

冷房使用日と冷房非使用日の寝室の温熱環境温熱感覚及び睡眠の質の比較

－大阪の賃貸集合住宅居住者を対象とした分析－

Relation between thermal environment and sleep quality in bedrooms with and without air-conditioning during summer

- Survey of apartments in Osaka-

○橘良樹（大阪市立大学）梅宮典子（大阪市立大学）新井潤一郎（ダイキン工業）

小林知広（大阪市立大学）中山裕介（大阪市立大学）

Yoshiki TACHIBANA* Noriko UMEMIYA* Tomohiro KOBAYASHI* Jun-ichiro ARAI**

Tomohiro KOBAYASHI*Yusuke NAKAYAMA*

*Osaka City University**Daikin Industries, Ltd

This survey assessed the relation between thermal environment and sleep quality in bedrooms with or without air-conditioning (AC). Respondents were 55 residents of collective housing in Osaka. 1) Results show a significant relation between sleep quality and thermal sensation on days they used AC. 2) The higher the outdoor temperature becomes during sleep, the higher U(AC Use) becomes. The higher indoor temperature becomes during sleep, the lower U becomes. 3) The relation between SET* and sleep quality is stronger than that between indoor temperature and sleep quality. The OSA sleep inventory score becomes highest when indoor SET* during sleep is 23°C with AC. The OSA score becomes lowest when indoor SET* during sleep is 23°C with no AC.

1. 背景と目的

温暖化と都市高温化により夏季の熱帯夜数が増加している。筆者らは夏季睡眠時の適切な冷房使用について検討するにあたって大阪の大学生のべ179日の寝室の気温実測と申告調査から、外気温と室温、睡眠時の温熱感覚、睡眠の質を冷房使用日と非使用日のあいだで比較し、睡眠の質は冷房使用日に冷房使用によって温熱感覚とは関係があるが、室温との関係は弱いことを明らかにした。^{文1)}そこで本報は、大阪の賃貸住宅居住者を対象に寝室の気温実測と申告調査から、冷房使用日と非使用日のあいだで、1) 温冷感と睡眠の質の関係、2) 睡眠時の室温や外気温と冷房使用との関係を分析し、3) 室温と睡眠の質の関係について比較をおこなう。

2. 方法

表1に測定概要を示す。測定調査は大阪市内および堺市内の公団・公社賃貸集合住宅において、2014年8月19日～9月27日に44人、2015年8月1日～9月10日に44人の居住者を対象に実施した。各居住者は連続した1週間のあいだ温湿度を記録し、毎朝、前夜の睡眠時の温熱感覚や睡眠の質について評価する。睡眠の質はOSA睡眠調査票MA版^{文2)}を用いて、「非常によい」、「ややよい」、「やや悪い」、「非常に悪い」の4段階15項目で評価する。また、冷房使用、窓開放および扇風機使用、寝室の在・不在、睡眠について、30分単位で日誌に記入する。住戸属性や自宅の住環境の主観評価にも回答する。本報では寝室気温を代表する場所にセンサーが設置できていると判断で

きる2015年34人、2014年21人のデータを使用した。

Table1 Measurement items

測定項目	測定精度	測定位置	測定間隔
気温	0.5K	就寝時の頭部周辺	2014年30分 2015年10分
湿度	1%RH	就寝時の頭部周辺	就寝前 起床後

3. 調査期間の外気温

外気温には気象台の10分間隔データを使用する。図1に両年の夏における日平均外気温の推移を示す。2014年は冷夏とされ、また調査期間が異なるため、2014年は30.4°Cから20.5°C（平均24.4°C）、2015年は31.9°Cから22.3°C（平均27.2°C）を推移している。

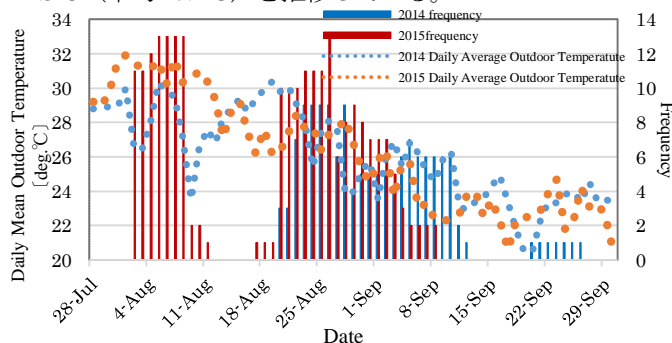


Fig.1 Daily mean outdoor temperature and frequency

4. 調査結果

4.1 睡眠時の室温と湿度

図2に睡眠時における室温と外気温の平均値を示す。

2015年は10分間隔、2014年は30分間隔のデータを使用し、1日毎の居住者ごとに異なる睡眠時間帯で平均した値を年別に平均した。睡眠時の外気温の平均は2014年24.3℃、2015年26.4℃で2015年が高いが、室温平均は2014年27.5℃、2015年27.8℃でほぼ同じである。図3に相対湿度の室内と外気の平均を示す。平均は個人別の就寝前と就寝後の2回の平均を年別に平均した。湿度は外気も室内も両年でほぼ同じである。

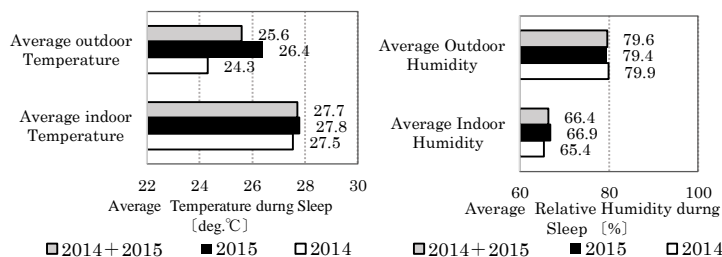


Fig.2 Average indoor and outdoor temperature during sleep

Fig.3 Average indoor and outdoor humidity during sleep

4.2 睡眠時の温熱環境調節行為

図4に、30分ごとの申告に基づいて各被験者で1日ごとに求めた睡眠時間に対する冷房を使用した時間率、窓を開放した時間率の平均を示す。睡眠時の冷房使用率は2014年19.1%、2015年36.0%、窓開放率は2014年58.2%、2015年46.2%であり、2015年は2014年より冷房を使い窓を閉めている。

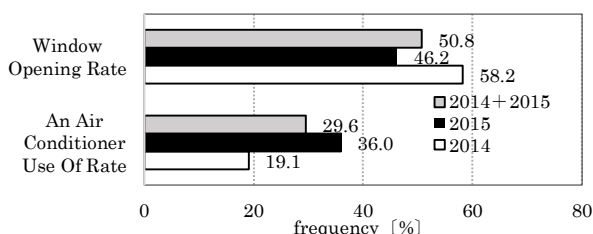


Fig.4 Time ratio of thermal control use in each year

4.3 OSA 得点

図5に、日誌に基づいて睡眠時に冷房を30分以上使用した「冷房使用日」と、全く使用しなかった「冷房非使用日」別のOSA得点を示す。使用日49.1点、非使用日47.9点で、有意ではないが使用日の方が非使用日より高い。(P=0.15)

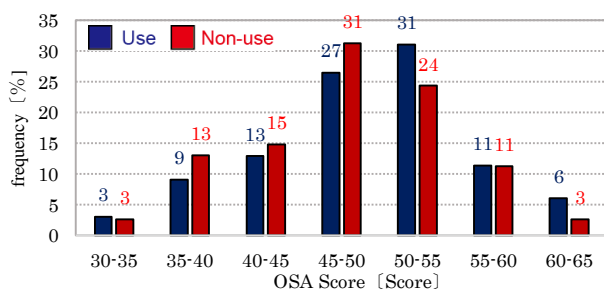


Fig.5 OSA Score

4.4 室温および温冷感

睡眠時室温は、使用日27.4℃、非使用日28.2℃である。図6に起床時に回答した睡眠時の温冷感を冷房使用別に示す。使用日は「暑くも寒くもない」が28.9%、非使用日は「暑くも寒くもない」、「やや暑い」の割合が32.2%で最多であり、使用日のほうが有意に暑い(P=0.003)。

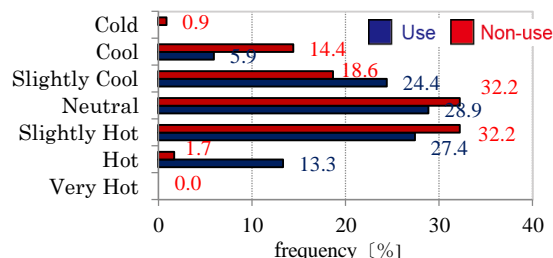


Fig.6 frequency distribution of Thermal Sensation vote

また、図7に冷房使用によつての温冷感の変化について示す。2015年のべ85日のデータを用いている。温冷感が「涼しい」ほど冷房使用によって「涼しくなった」の割合が多くなっている。また、温冷感が「やや暑い」であっても67%が「涼しくなった」と回答しており、冷房使用によつて温冷感は改善されているといえる。

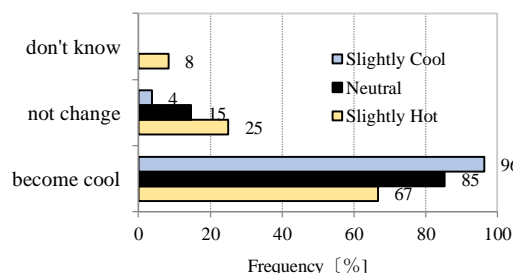


Fig.7 frequency Thermal Sensation vote by cooling

5. 温冷感と睡眠の質の関係

図8に冷房使用別の温冷感とOSA得点の関係を示す。冷房使用日では温冷感が「涼しい」ほどOSAが有意に高い(P=0.002)。一方、冷房非使用日は温冷感とOSA得点に関係がない(P=0.86)。大阪の大学生の調査でも同様の結果が得られている。

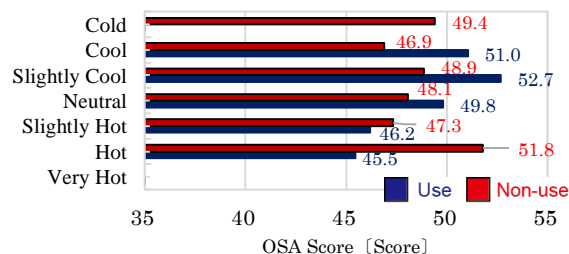


Fig.8 Average OSA Score in each TS category

温冷感申告とPMVの関係を図9に示す。PMVの室温と湿度は実測データを使用し、MRTは室温+1℃と仮定した。気流速度はアンケートにより扇風機を使用しない場合やりズム風、その他の場合0.2 m/sとし、使用する場合は別途おこなった測定をもとに「強」2.5m/s、「中」

1.2m/s、「微」0.3m/sとした。クロ値はアンケートの寝間着の種類により表2のように仮定した。代謝量は0.9Metとした。冷房非使用日では申告のほう勾配が緩やかであるが温冷感中立時にPMVがほぼ0で両者は一致している。使用日では温冷感中立時にPMVがほぼ-1で温冷感中立がPMVでは「涼しい」側にずれている。

Table 2 clothing and clo value

Clothing	clo value
半袖半ズボン	0.23
半袖長ズボン	0.26
長袖半ズボン	0.28
長袖長ズボン	0.31
ワンピース	0.35
浴衣	0.31
ほぼ裸	0.05
ノースリーブ短パン	0.16
甚平	0.31
上下下着	0.1
半袖のみ	0.12

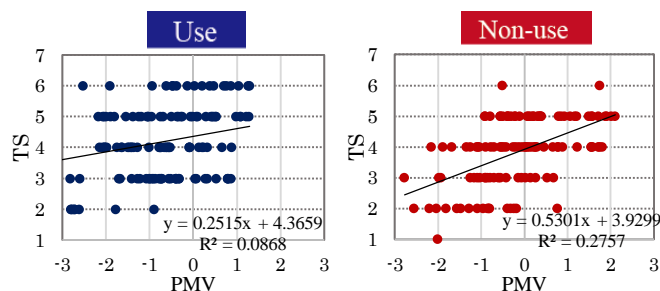


Fig.9 Relation between PMV and TS

図10にPMVとOSA得点の関係を示す。PMVと睡眠の質の関係は冷房使用日、非使用日ともに関係は見られない。

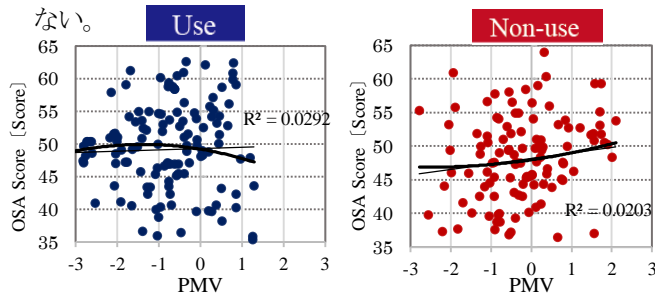


Fig.10 Relation between PMV and OSA Score

以上より温冷感は冷房使用日では温冷感が「涼しい」ほど睡眠の質が有意に高く、冷房使用日の方が室温が低いが実測結果から算出した温熱環境と睡眠の質との間に関係は見られない。

6. 睡眠時室温・外気温と冷房使用の関係

6.1 睡眠時外気温と冷房使用の関係

図11に睡眠時の1℃刻みの外気温のビンにおける冷房使用と非使用の度数分布と相対度数分布を示す。外気温は30分刻みでの瞬時値を使用し、度数は30分ごとに数えた。外気温は23℃～25℃台と28℃台が多い。冷房使用の割合は外気温29℃で50%とピークに達し、30℃、31℃にかけて下がる。30℃以上は度数が小さいので無視すると、外気温が高くなるにつれて冷房使用率が上がるといえる。27℃台、28℃台では40～50%が冷房を使用している。

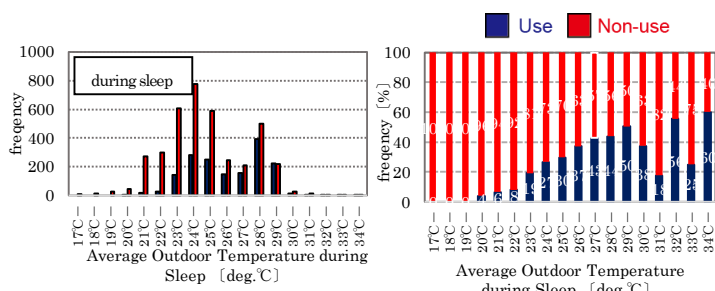


Fig.11 AC use and non-use for outdoor temperature

6.2 睡眠時室温と冷房使用の関係

図12に図11と同様室温について示す。冷房使用時非使用時ともに28℃台が多い。室温が高くなるにつれて冷房使用の割合が低く、冷房を使用しているとき室温は低いといえる。

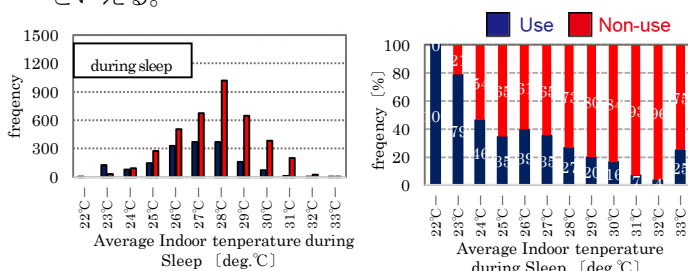


Fig.12 AC use and non-use for bedroom temperature

7. 温熱環境と睡眠の質の評価方法の検討

7.1 睡眠時における外気ET*と室温との関係

図13に冷房使用別の日ごとの睡眠時外気ET*と睡眠時平均室温との関係を示す。外気平均放射温度はグローブ温度と外気温および風速から求めた。グローブ温度は以下の式から推定した^{文3)}。clo値は0.5、Metは一律0.9とした。de Dearは外気ET*と室内作用温度の関係を総括し^{文4)}、空調空間ではComfort tem=22.6+0.04×外気ET*、非空調空間ではComfort tem=18.9+0.255×外気ET*としている。図13にはその80%快適範囲も重ねて示す。冷房使用日では空調時の80%許容室温範囲にほとんど入っておらず、冷房非使用日では非空調時の80%許容温度に半数ほど入っているが外気ET*が高いときはほとんど入っていない。非使用日の回帰式の勾配は快適方程式よりも急である。

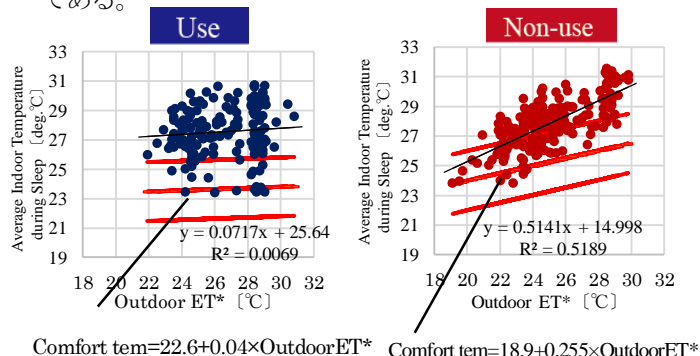


Fig.13 Relation between Outdoor ET* and Average Indoor Temperature during Sleep

また、温冷感の熱的中立(「やや暑い」、「暑くも寒くもない」、「やや涼しい」)を抽出した図14を図13同様に冷房使用別に示す。温冷感が中立であっても80%許容室温範囲にほとんど入っておらず、冷房非使用日では非空調時の80%許容温度に半数ほど入っているが外気ET*が高いときはほとんど入っていない。

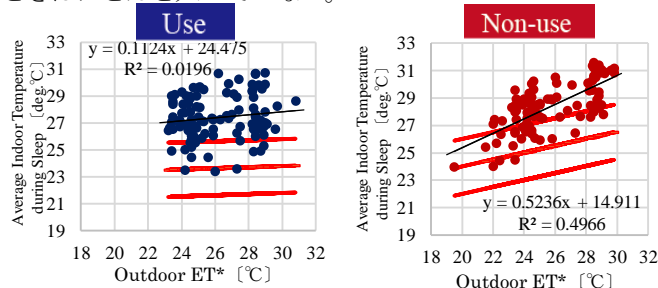


Fig.14 Relation between Outdoor ET* and Average Indoor Temperature during Sleep ($3 \leq TS \leq 5$)

次に、PMVの熱的中立($-1 \leq PMV \leq 1$)を抽出した図15を図13同様に冷房使用別に示す。PMVが熱的中立であるとき冷房使用日、非使用日ともに勾配は快適式に近くなるが、80%許容室温範囲にほとんど入っておらず、快適式よりも高い温度であり、快適式より室温が高くても熱的中立は保てる。

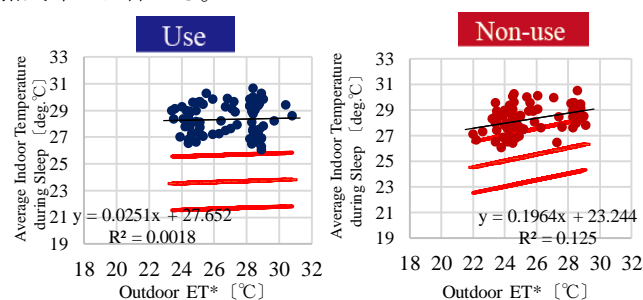


Fig.15 Relation between Outdoor ET* and Average Indoor Temperature during Sleep ($-1 \leq PMV \leq 1$)

7.2 睡眠時外気ET*と睡眠時平均室内SET*との関係

図16に冷房使用別の睡眠時外気ET*と睡眠時平均室内SET*との関係を示す。図16では快適式の室作用温度を室内SET*に置き換えて快適範囲を示す。睡眠時平均室内SET*は冷房使用日非使用日ともに80%許容温度にほとんど入っている。また、非使用日について、外気ET*と室内SET*の回帰式の勾配は0.27であり快適式の勾配に近い。

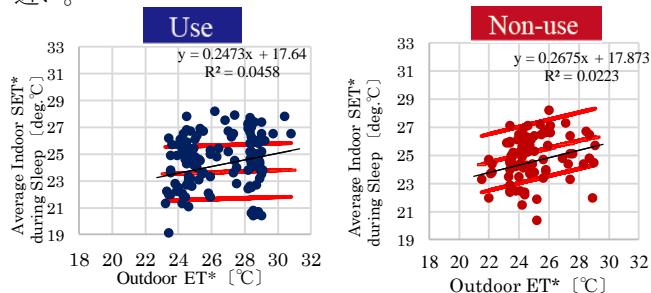


Fig.16 Relation between Outdoor ET* and Average Indoor SET* during Sleep

7.3 睡眠時睡眠時平均室内SET*と睡眠の質の関係

図17に睡眠時平均室内SET*とOSA得点との関係を冷房使用別に示す。室温で評価するよりも関係が強く、睡眠時平均室内SET*が冷房使用日では23℃で最も睡眠の質が良く、非使用日では23℃で最も睡眠の質が悪い。

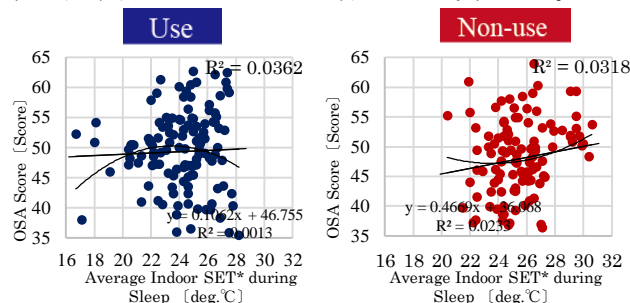


Fig.17 Relation between Average Indoor SET* during Sleep and OSA

以上より外気温と室温と冷房使用の実態では冷房使用の割合は外気温が高くなるにつれて多くなり、室温は低いほど多くなる。また、睡眠時平均室内SET*は外気に対してのAdaptive Modelの80%許容範囲に冷房使用日で60%、非使用日で73%が入っており、室温よりSET*で評価するほうが寝室の温熱環境を評価するには適しており、快適に室内環境が調整されているが、睡眠時平均室内SET*と睡眠の質との関係は見られない。

8. まとめ

大阪の集合住宅居住者55名のべ383日を対象に、30分ごとの行動申告にもとづき冷房を30分以上使用した「冷房使用日」と全く使用しない「非使用日」について睡眠時の室温実測値、温冷感申告、およびOSA睡眠評価得点を比較した。1)室温は使用日27.4℃、非使用日28.2℃、温冷感使用日が有意に暑く、OSA得点は使用日49.1点、非使用日47.9点で有意差はない、2)OSA得点は、使用日は「涼しい」ほど高いが非使用日は温冷感申告と関係がない、3)PMVゼロのとき使用日は「暑い」側、非使用日は「中立」に申告、4)30分刻みの気温に対し冷房を使用した割合は、外気温が高いと高く27℃台と28℃台で約40%、室温が高いと低い、5)非使用日には睡眠時平均室内SET*の73%がAdaptive Model自然通風時の80%快適範囲に入る、6)室温とOSA得点とは使用日非使用日とも関係がないが、SET*23℃のときOSA得点の使用日では最高、非使用日では最低となる。

参考文献

- 橋ら：冷房使用日と冷房非使用日の寝室の温熱環境、温熱感覚及び睡眠の質の比較 大阪の大学生を対象とした分析 2015年度 日本建築学会学術講演梗概集 (P343-344), 2015
- 山本ら：中高年・高齢者を対象としたOSA睡眠感調査票(MA版)の開発と標準化。脳と精神の医学 10: 401-409, 1999
- 登内 道彦, 村上 貢司, 2008, 日本生気象学会雑誌, 45(3), 62.
- de Dear et al. : Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference ASHRAE transactions 104, 145

性別・年齢・職業および体質と夏の温熱環境調節行為との関係
—冷房使用・扇風機使用と通風利用

The relationship between sex, age, occupation, constitution and thermal control use during summer—Use of air conditioning, fan and ventilation

○張 冰（大阪市立大学） 梅 宮 典 子（大阪市立大学）
小 林 知 広（大阪市立大学） 中 山 裕 介（大阪市立大学）

Hyou CHOU* Noriko UMEMIYA* Tomohiro KOBAYASHI* Yusuke NAKAYAMA*
* Osaka City University

1-1) Men reporting a strong constitution do not use AC, set the highest temperatures, and open windows the most. 1-2) Women reporting a weak constitution do not use fans. 1-3) Employed young women who are tolerant to heat use AC and fans the most. 1-4) Employed young men who are intolerant of heat use AC, close windows the most, and set the lowest temperatures. 1-5) Employed young women with bad circulation do not use AC much, but set the temperature high. 2) Women who are intolerant of heat report the highest costs for AC, whereas women who report a weak constitution also report the lowest costs. 3) Frequency of AC usage is related to heat tolerance and age. Young groups use AC frequently. People with high tolerance to cold show no features of thermal control.

1. 背景と目的

近年、大阪などの都市部では、地球温暖化と都市高温化によって夏季に冷房なしで暑さをしのぐことがむずかしく、1世帯が複数のエアコンを所有して、エアコン使用がパーソナル化している。既往研究は「暑がり」「寒がり」は冷暖房依存度が高い¹⁾²⁾、「暑がり」は低温を好み「寒がり」は高温を好む³⁾、「冷え性」は冷房設定温度が高く冷房費が安い^{文4)}、などを示している。個人を尊重した上で、エネルギー使用の削減を行うことが重要である。

そこで本研究は、2004年から2014年にかけて大阪の集合住宅居住者を対象に実施された5件の調査のメタ解析により、1)年齢、性別、職業、体質に基づき類型化し、2)冷房使用頻度や冷房設定温度、3)窓開放頻度、4)扇風機使用頻度、5)冷房費に関する類型別特性について明らかにする。

2. 使用するデータ

表1の家族向き集合住宅に対する5つの調査^{文5)～文9)}のうち、健康状態「悪い」347名を除く、1269名を対象とする。

Table.1 Data used in this research

Name	Recovery	Year	The Main Universes
A ^{文5)}	290	2004	Mid-to-high-rise collective housing in Southern Osaka
B ^{文6)}	297	2006	The super-high-rise collective housing resident around Osaka
C ^{文7)}	314	2011	The collective housing resident of southern Osaka
D ^{文8)}	363	2012	The collective housing resident of southern Osaka
E ^{文9)}	352	2014	Public rental collective housing in Osaka and Sakai
Total	1616		

Table.2 Survey Items

Classification	Question items () :the number of category
Respondents attribute	age, sex, birthplace, occupation, (3), tolerance to heat, cold(3)and ease of sweating, the degree of sensitivity to cold (3), physical condition, sleep condition (3), health (4)
Lifestyle, Environmental awareness	lifetime, regularity of meal time, type of life, intake of breakfast,(3), , habit of movement and drinking,(3),smoking (2) bathing method, home time, cooling exposure outside, environmental awareness {10 items} energy-saving consciousness {12 items} heat measures {11 items} (4)
Living environment subjective evaluation	ventilation (4), sunshine, the view from the veranda, sight from the outside, outside air, security, noise, draft, moisture and smell, insects such as flies, mold and condensation of windows and walls, solar heat, sunshine , summer heat, effectiveness of the air conditioning (3), the degree of satisfaction of a dwelling unit (5)
Dwelling unit attribute	floor plans, number of stories in the building and the number of dwelling unit, residence date, building age, the structure of the building, window orientation, awning way, dwelling unit area, ownership, collection form
Thermal environment regulation act	air conditioner use frequency, air conditioning preset temperature (a maximum, a minimum), performance satisfaction and thinking of air conditioning, air conditioning electric bill consciousness, fan use frequency, windows open frequency (day, night), electricity charges (May, August)

調査項目（表2）は基本属性、生活スタイル、環境意識、住環境主観評価、住戸属性と温熱環境調節行為である。冷房設定温度は上限と下限の平均値、冷房費は8月と5月の電気料金の差である。

3. 調査対象の構成

個人属性として図1に、年齢、体質、全職業、冷房設定温度、冷房費、および環境意識の分布を示す。これらの項目には調査間で分布に差がほとんどなかった。

性別は全調査合計で約40%が男性で、約60%が女性、年齢は約40%が10～40代、約40%が50～60代、約20%が70代以上、職業は約65%が有職、約15%が主婦、約20%が無職である。

体温調節能力に関する体質として暑さへの耐性、寒さへの耐性、風邪のひきやすさと冷え性を扱う。暑さへの耐性は約20%が「強い」、60%が「普通」、20%が「弱い」、寒さへの耐性は約20%が「強い」、50%が「普通」、30%が「弱い」、風邪のひきやすさは約10%が「よく引く」、40%が「普通」、50%が「あまり引かない」。冷え性は約30%が「ある」、30%が「普通」、40%が「ない」である。

全調査合計の冷房設定温度は、下限の平均が26.4℃、上限の平均が27.6℃で、最頻値は上限と下限とも28℃である。全調査合計の冷房費の平均は1847円である。

冷房使用については、約70%が「なるべく使いたくない」、15%が「できるだけ使いたい」、15%が「どちらで

もない」と答えている。節電意識は約24%が「かなりある」、38%が「ある」、31%が「少しある」、7%が「ない」。

住戸属性として住戸面積は70～80㎡、間取りは2DK～3DKが最多である。63%が「風通しがよい」、73%が「日当たりがよい」と評価している（図略）。

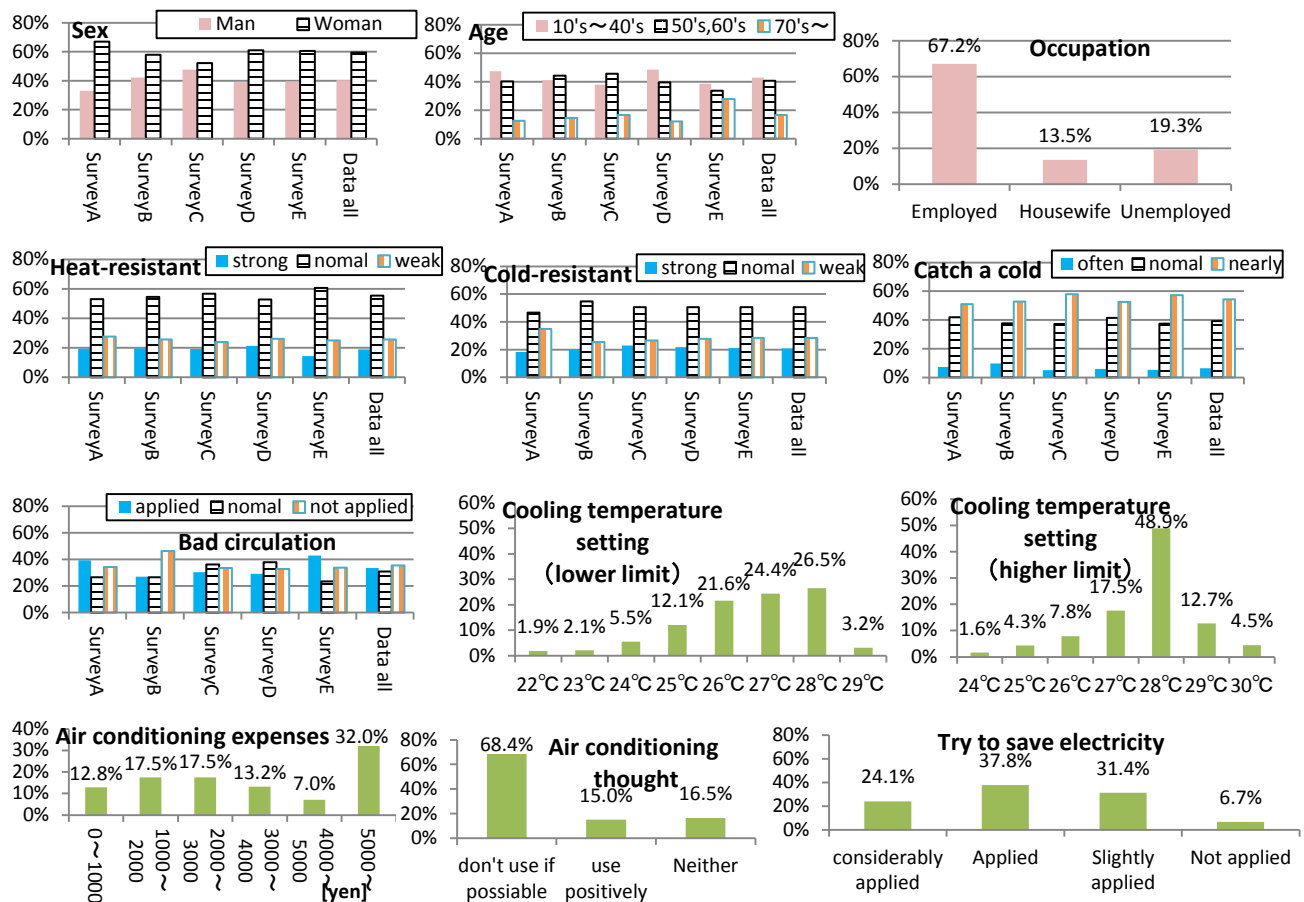


Figure1 attribute of respondents

4. 回答者の類型化

手順として、まず、既往研究から温熱環境調節行為と関係がありそうな項目として、基本属性の年齢、性別、職業の3項目、健康状態と体質の4項目、計8項目を選定した。次に、1269の標本数を対象に、8項目を使って

クラスター分析によって類型化し、最適な類型数を検討する。最後に、各類型の特徴をまとめる。

4.1 類型化に使用する項目とカテゴリー分類

クラスター分類するにあたって年齢は10歳刻みに訊いた調査もあるため10歳刻みの度数分布を検討した結

果、10代～40代、50代～60代、70代以上の3カテゴリーとした。職業は有職、専業主婦、無職の3カテゴリーに再分類した、健康は「不良」は削除して「良好」と「普通」のみとした。暑さ耐性と寒さ耐性は「強い」、「普通」、「弱い」、風邪は「よくひく」、「普通」、「あまりひかない」、冷え性傾向は「傾向がある」、「普通」、「傾向がない」のいずれもアンケートのカテゴリー数にあわせて3分類とした。

4.2 類型数の検討

類型数(CL)4～8の場合の類型化を検討した。類型数が4, 5, 6, 8の場合は類型の特徴が似ていたり、特徴が出なかったりしたが、類型①～⑦はそれぞれ違う体質に分けられたため、7分類が最適と判断した。

4.3 各類型の特徴

表3は類型数7の7類型における各項目の分布を示す。健康状態は各類型に偏りなく分布したため、表には載せていない。類型①～⑦の基本属性と体質の特徴を表3に示す。①(*n*=186)は男性が91%で体質が全体に強い。②(*n*=116)は89%が女性で体質が全体に弱い。③(*n*=182)は87%が女性で「暑さ耐性」以外は強い。④(*n*=191)は風邪「ひきにくい」が「冷え性」、「寒がり」、「暑がり」である。⑤(*n*=182)は85%が男性、年齢95%が10代～60代、98%が有職で、「暑さ耐性」だけが弱い。⑥(*n*=300)は98%が女性で、年齢98%が10代～60代、「冷え性」。⑦(*n*=131)は79%が女性、年齢98%が10代～60代、有職82%で、「暑さ耐性」だけが強い。健康状態は各類型に偏りなく分布する。高齢を特徴とする類型を抽出されない、性別や職業を特徴とする類型が多い。単独の体質を特徴とする類型は少ない。

5.1 調節行為の頻度 (図2)

5.1.1 冷房使用頻度

類型①は体質が全体に強い男性は、冷房を最も使わない、最も使うのは類型⑤の有職で暑さだけに弱い若い男性と、類型⑦の有職で暑さだけに強い若い女性である。就寝中も類型①が冷房を最も使わず、最も使うのは類型⑤である。

5.1.2 窓開放頻度

起床中最も窓を開けておくのは類型①、最も閉めておくのは類型⑤である。就寝中最も窓を開けておくのは類型①、最も閉めるのは類型③の暑さに弱い女性である。

5.1.3 扇風機使用頻度

最も使わないのが類型②の体質が全体に弱い女性で、最も使うのが類型⑦である。

5.2 冷房設定温度 (図3)

設定温度の下限値が高いのは類型①の体質が全体に強い男性と類型⑥の冷え性の女性である、最も低いのは類型③と類型⑤である。設定温度の上限値が最も高いのは類型⑦、最も低いのが類型③である。設定温度の平均値から見ると、一番高いのは類型②の体質が全体に弱い「冷え性」の女性と、類型⑥の冷え性だがあとは強い若い女性である。冷房設定温度が最も低いのは、類型③④⑤の「暑がり」である。

5.3 冷房費 (図4)

冷房費が高いのは類型③の暑さだけに弱い女性で、設定温度が低いからだと考えられる。冷房費が最も低いのは、類型②の体質が全体に弱い女性である。類型②の設定温度が最も高いことと関係していると考えられる。

5.4 冷房設定温度と冷房費の関係 (図5)

全般に、設定温度25℃から28℃にかけて冷房費は下がる傾向があるが、そうでない類型もある。類型②は25℃に設定した人数が5人しかいないため高いが、無視する。同じ温度に設定したとき、類型③の方冷房費が

CL	Age	Sex	Occupation	Heat-resistant	Cold-resistant	Catch a cold	Bad circulation
①	70's~ 27.5 50~60's 50.6 10~40's 22.0	Woman 9.0 Man 91.0	Unemployed 31.5 Housewife 4.0 Employed 64.5	weak 0.6 normal 53.0 strong 46.4	weak 10.4 normal 55.8 strong 33.7	nearly 87.2 normal 12.8 often 0	Not applied 76.9 normal 20.9 applied 2.2
②	70's~ 30.0 50~60's 39.5 10~40's 30.7	Woman 89.5 Man 10.5	Unemployed 31.5 Housewife 48.0 Employed 20.6	weak 45.2 normal 53.9 strong 0.9	weak 46.5 normal 51.5 strong 2.0	nearly 2.6 normal 68.4 often 29.0	Not applied 5.3 normal 29.8 applied 64.9
③	70's~ 36.1 50~60's 40 10~40's 23.9	Woman 87.0 Man 13.0	Unemployed 54.8 Housewife 25.5 Employed 20.8	weak 57.5 normal 42.0 strong 0.6	weak 6.0 normal 46.4 strong 47.6	nearly 86.2 normal 13.8 often 0	Not applied 57.5 normal 35.4 applied 7.2
④	70's~ 21.8 50~60's 48.9 10~40's 29.3	Woman 36.0 Man 64.0	Unemployed 24.0 Housewife 9.1 Employed 66.9	weak 45.5 normal 51.9 strong 2.7	weak 53.1 normal 46.4 strong 0.6	nearly 60.3 normal 38.7 often 0	Not applied 7.3 normal 42.4 applied 50.3
⑤	70's~ 5.0 50~60's 37.6 10~40's 57.3	Woman 15.5 Man 84.5	Unemployed 0 Housewife 1.8 Employed 98.2	weak 34.4 normal 60 strong 5.6	weak 6.4 normal 56.7 strong 36.8	nearly 20.7 normal 71.0 often 8.4	Not applied 74.3 normal 25.7 applied 0
⑥	70's~ 1.7 50~60's 38.2 10~40's 60.1	Woman 98.0 Man 2.0	Unemployed 1.1 Housewife 9.2 Employed 89.7	weak 4.7 normal 67.2 strong 28.1	weak 18.2 normal 65.1 strong 16.7	nearly 74.7 normal 25.3 often 0	Not applied 8.7 normal 31.7 applied 59.6
⑦	70's~ 1.6 50~60's 22.5 10~40's 76.0	Woman 78.8 Man 21.3	Unemployed 1.4 Housewife 16.7 Employed 81.9	weak 3.1 normal 51.2 strong 45.7	weak 92.6 normal 6.6 strong 0.8	nearly 0.8 normal 72.9 often 26.4	Not applied 16.2 normal 25.4 applied 58.5

Table.3 characteristics of each type's classification when max-classification is 7

ほかより高い、これは50代からの無職の女性で、在宅時間が長い。暑さに弱い、冷房をあまり使わないと回答しているが、在宅時間が長いいためほかの類型より冷房費が高くなっていると考えられる。

6. 結論

基本属性や体質と夏季の温熱環境調節の関係を大阪の1269名を対象に調べ、以下を明らかにした。

- 1-1) 体質が全体に強い男性①は、冷房を最も使わず、設定温度が最も高い、窓を最も開ける。1-2) 体質が全体に弱い女性②は、扇風機を最も使わない。1-3) 有職で暑さだけに強い若い女性⑦は、冷房も扇風機も最も使う。1-4) 有職で暑さだけに弱い若い男性⑤は最も冷房を使い、最も窓を閉め、設定温度が最も低い。1-5) 有職で冷え性の若い女性⑥は、冷房をあまり使わず、設定温度が高い。
- 2) 冷房費は暑さだけに弱い女性③が最も高く、体質が全体に弱い女性②が最も低い。
- 3) 冷房使用頻度は暑さ耐性と年齢に関係する。年齢が若い類型がよく使う。風邪ひきに強い類型は調節行為に特徴がない。

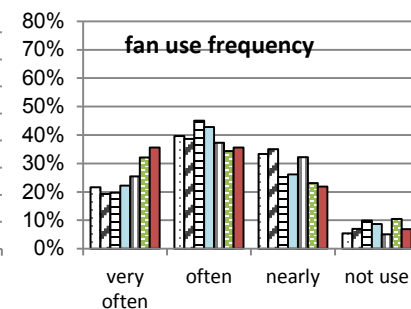
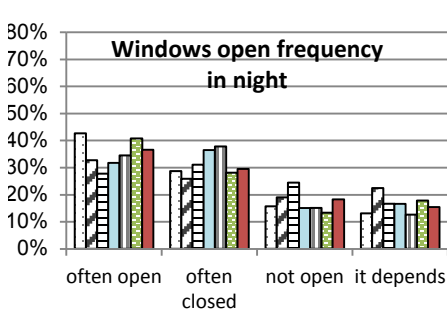
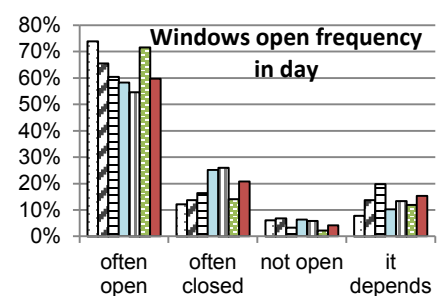
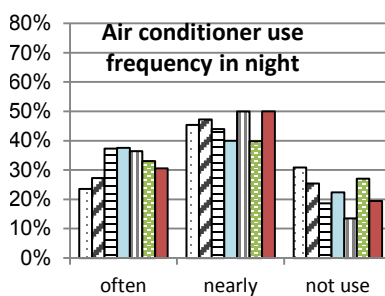
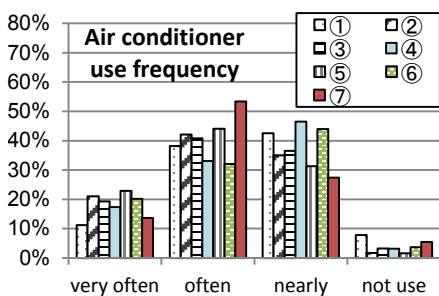


Figure2 Thermal environment regulation act frequency

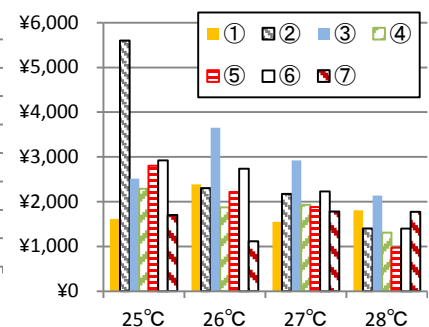


Figure5 air conditioning preset temperature and electricity charges

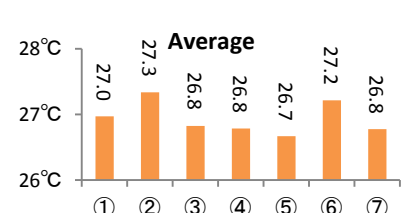
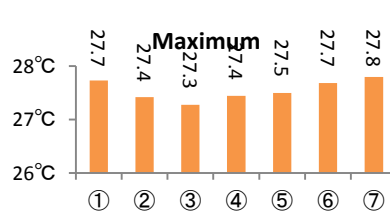
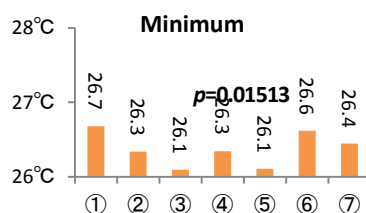


Figure3 air conditioning preset temperature

参考文献

- 文献：1)垣鏑:人間-生活環境系シンポジウム 23, pp. 192-195, 1999 2)大中:人間と生活環境 20(1), pp. 1-6, 2013 3)佐々ら:建・大・梗概集, pp. 343-344, 2009 4)岩崎:空衛・近・論文集, pp. 217-220, 2013 5)林ら:建・近・報告集, pp. 81-84, 2005 6)野村:空衛・近・論文集, pp. 1-4, 2007 7)坂根:空衛・近・論文集, pp. 263-266, 2012 8)坂根:空衛・近・論文集, pp. 173-176, 2013 9)橘:空衛・近・論文集, pp. 196-199, 2015

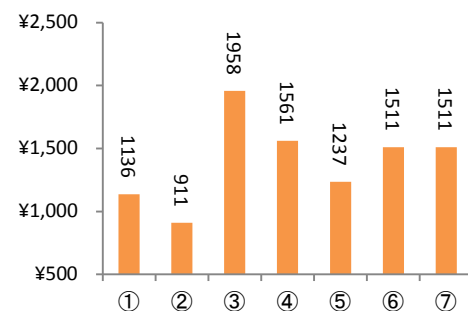


Figure4 electricity charge

○安本 千晶 (ダイキン工業) 樋江井 武彦 (ダイキン工業)

加藤 隆史 (大阪大学) 松澤 重行 (大阪大学) 谷池 雅子 (大阪大学)

Chiaki YASUMOTO*¹ Takehiko HIEI*¹Takafumi KATO*² Shigeyuki MATSUZAWA*² Masako TANIIKE*²*¹ Daikin Industries, Ltd. *² Osaka University

To assess the effects of ambient temperature on thermal sensation, body temperature and sleep quality in summer, overnight video-polysomnographic recordings were done under ambient temperature between 25-32°C in five young male subjects in summer. Skin and eardrum temperatures were lower throughout the night when subjects reported cool than warm sensation. At cool ambient temperature, the percentage of Stage N1 increased in the last-third of sleep while that of Stage N3 decreased in the first-third of sleep at warm temperature. Cool and warm ambient temperature in summer can differently influence the interactions among thermal sensation, body temperature and sleep processes.

1. はじめに

近年、気温の上昇により、夏期の睡眠環境が悪化している。快適な睡眠を得るために一晩中エアコンを利用する人が増加しているが、就床前に設定した室温が合わずに、夜間に設定温度の調整を繰り返す例も少なくない。このような問題が生じる理由として、睡眠中の室温に対する温冷感が変化することが考えられる。

ヒトには深部体温を一定の範囲に保持する機能が備わっていると同時に、深部体温が概日リズムに従って最適な値になるように、制御目標値（セットポイント）を変動させていると考えられている¹⁾。深部体温に関する情報は視床下部に集められ、制御目標値と照合し、発汗やふるえの他に皮膚血管の拡張や収縮などによる環境との熱交換を行うことにより制御目標値になるように調節される。一般に深部体温を上昇させるような体温調節が作用する際には寒く、逆に下降させる際には暑く感じる²⁾。

睡眠時には日中に比較し制御目標値は下がり、代謝による産熱量も低下する³⁾。従って睡眠時の温冷感は睡眠経過とともに変化する制御目標値と、同じく変化する代謝の影響を受ける深部体温との大小関係により複雑に変化することが予想される。また深部体温変化と睡眠構造とは密接な関係があることから温冷感によっても睡眠構造は変化する。

過去の研究では、温度環境と、睡眠経過に伴った生理量や客観的な睡眠の質との関係についての報告⁴⁾があるが、このように温冷感に着目して分析した報告は極めて少ない。

そこで本研究では、被験者を複数の温度環境で就寝さ

せることによって、温度環境と起床時の温冷感の関係、起床時の温冷感と睡眠経過に伴う被験者の体温や客観的な睡眠指標、主観的な睡眠の質との関係を調べた。

2. 方法

実験概要を Table 1 に示す。実験は、大阪大学大学院歯学研究科睡眠検査室にて、2015 年 7 月～9 月の間に、健康な男子大学生 5 人 (23.0±0.6 歳) に対して、ビデオ睡眠ポリソムノグラフィー (PSG: video-polysomnography) 検査を合計 20 夜 (1 人当たり 4 夜、N=5) 実施した。本実験は、大阪大学大学院歯学研究科・歯学部および歯学部付属病院倫理審査委員会の承認を得た。PSG 検査は American Academy of Sleep Medicine (AASM) の方法に準拠した。また、皮膚温 8 点 (Hardy-DuBois の 7 点+背)、鼓膜温を一分毎に測定した。被験者には、就寝時間を 22:45～23:15、起床時刻を 6:00～7:00 の約 7～8 時間、着衣量は 0.3clo、ベッド上で寝具を使用しないで睡眠させた。

就寝中の設定温度は、被験者が夏期睡眠時に通常設定するエアコン温度を参考に、温冷感が異なるよう被験者ごとに 25°C～32°C の間で設定した (Table 2)。また、睡眠中の室温を、ベッドサイドに設置した温度センサーを用いて 0.1m、0.6m (ベッドと同じ高さ)、1.1m、1.6m の各高さで 1 分毎に測定した。

温冷感 (7 段階、-3: 寒い、-2: 涼しい、-1: やや涼しい、0: 中立、+1: やや暖かい、+2: 暖かい、+3: 暑い)、快適感 (7 段階、-3: 非常に不快、-2: 不快、-1: やや不快、0: 中立、+1: やや快適、+2: 快適、+3: 非常に

Table1 Experimental schedule, number of subjects, clothing conditions and measurements

Period	2015/7～2015/9 (20days)		
Study facility	Sleep laboratory in Graduate School of Dentistry in Osaka University		
Subject	5		
Clothes	0.3clo (T-shirt, short pants, underwear) ※no blanket		
Measurements	Overnight	【Beside pillow】 Temperature (0.1m,0.6m,1.1m,1.6m) Humidity (0.6m) Wind velocity (0.6m) 【On bed (nearby back)】 Temperature (-0.3m, -0.1m, +0.1m, +0.3m) Humidity (-0.3m, -0.1m, +0.1m, +0.3m) 【Others】 PSG, Eardrum temperature, Skin temperature (8points)	
	Before and after sleep	Thermal sensation, Thermal comfort, Sweat sensation, Trail-Marking-Test	
	After sleep	OSA-MA, VAS	

快適)、発汗度 (5 段階、0 : 汗をかいていない、+1 : やや汗をかいている、+2 : 汗をかいている、+3 : かなり汗をかいている、+4 : ぬれるほど汗をかいている) を就床時および起床時に測定した。起床時の睡眠感を OSA-MA⁵⁾ と、Visual Analog Scale による自作の質問表を用いて評価した。

設定温度、皮膚温、深部体温、睡眠深度および OSA-MA と温冷感との関係を解析する主観指標として、起床時温冷感を用いた。起床時温冷感を、「-3 : 寒い、-2 : 涼しい、-1 : やや涼しい」を『冷涼』、「0」を『中立』、「+1 : やや暖かい、+2 : 暖かい、+3 : 暑い」を『暑熱』として3つのカテゴリーに分けて前述の5つの指標との関係を分析した。

客観的な睡眠の質の解析として、AASM の判定基準に基づいて睡眠段階 (W、StageN1、StageN2、StageN3、StageREM) を判定した。一夜全体での各睡眠段階の占有率と、一夜の睡眠を前期、中期、後期に分け、それぞれの期間における占有率も算出した。体温は、皮膚温は測定した7点の平均値 (以下7点皮膚温) を用い、鼓膜温を深部体温と同等とみなした。室温は、0.6mの高さで取得した値を用いた。体温および室温は、睡眠前期、中期、後期それぞれの平均値を算出した。

3. 結果および考察

3.1 温度と温冷感の関係

Table 2 に被験者別の設定温度と起床時の温冷感の関係を示し、Fig. 1 に起床時温冷感と設定温度の関係を示す。『冷涼』の温度域は25℃～28℃、『中立』の温度域は26℃～30℃、『暑熱』の温度域は28℃～32℃と幅があり、温冷感には個人差があることを確認した。『冷涼』の平均温度は26.9℃、『中立』の平均温度は28.4℃、『暑熱』の平均温度は29.4℃であり、各申告の温度差は1～2℃程度であった。

Table 2 Reported thermal sensation and ambient temperature in five subjects

Subject	25℃	26℃	28℃	30℃	32℃
A		-1	+1	+2	
B	-3	0	+2	+2	
C			-1	0	+2
D		-1	0	+1	
E		-1	-1	0	

(-3: cold, -2: cool, -1: slightly cool, 0: neutral, +1: slightly warm, +2: warm, +3: hot)

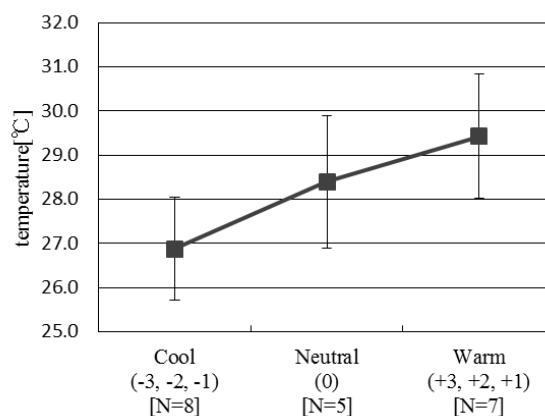


Fig. 1 Mean ambient temperature and the three grades of thermal sensation

3.2 温冷感と皮膚温、深部体温の関係

睡眠前期、睡眠中期、睡眠後期における7点皮膚温、鼓膜温と7点皮膚温の差を3段階の温冷感ごとにFig. 2、3、4に示す。起床時の温冷感が『冷涼』、『中立』、『暑熱』の順に高くなるに従って、7点皮膚温、鼓膜温は高くなった (Fig. 2、Fig. 3)。また、いずれの温度環境においても睡眠後期に向かって7点皮膚温、鼓膜温が低下する傾向があった (Fig. 2、Fig. 3)。逆に、『暑熱』から『冷涼』となるにしたがって、核心温である鼓膜温と表面温である7点皮膚温の差が大きくなる傾向があっ

た (Fig. 4)。『冷涼』では、鼓膜温と7点皮膚温の差は睡眠前期から睡眠後期にかけて増加する傾向があった。これは、ヒトの体温調節機構において皮膚血管からの放熱を抑制するように作用していることを示し、冷涼側の温冷感申告と一致する。

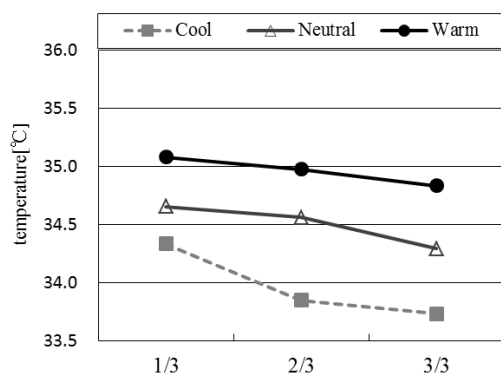


Fig. 2 Mean skin temperature across the night under three thermal conditions

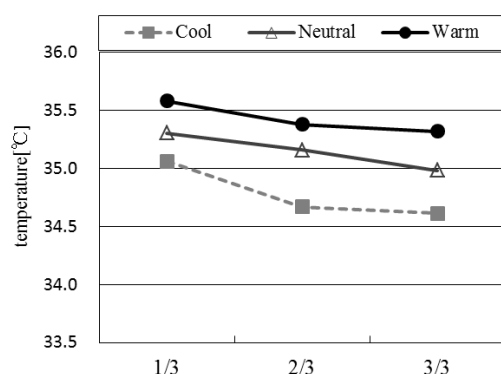


Fig. 3 Mean eardrum temperature across the night under three thermal conditions

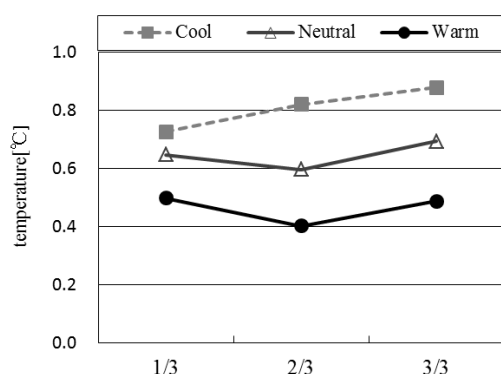


Fig. 4 Difference between eardrum and skin temperature under three thermal conditions

3.3 温冷感と睡眠深度の関係

Table 3 に温冷感と睡眠深度（睡眠全期間）の関係を示す。温冷感と一晩の睡眠深度の割合の関係を観察すると、『暑熱』では、WASO が他よりも7~8%程度高く、浅睡眠の指標である StageN1 はいずれの環境においても10%

前後であり、深睡眠の指標である StageN3 の割合は『冷涼』で最も高かった。

Fig. 5、6 に、睡眠経過に伴う StageN1 と StageN3 の占有率を温冷感ごとに示す。StageN1 の占有率は、睡眠前期、睡眠中期には『暑熱』で最も高いのに対し、睡眠後期には『冷涼』で最も高い傾向が見られた (Fig. 5)。StageN3 の割合は、睡眠前期、睡眠中期には『冷涼』で最も高いのに対し、睡眠後期においては『暑熱』で最も高い傾向が見られた (Fig. 6)。このように、睡眠の経過に伴う StageN1 と StageN3 の占有率の変化に温冷感による差を認めた。『暑熱』では睡眠前期に十分取得できなかった深睡眠を、睡眠中期、後期で確保しようとし、『冷涼』においては睡眠前期、中期で深睡眠を確保できたが、鼓膜温と皮膚温の差が睡眠後期に向かって増加することが、浅睡眠の発生に関わっている可能性が考えられた。

Table 3 Sleep macrostructure under three thermal conditions

Sleep parameter	Cool	Neutral	Warm
WASO (%)	6.6	5.4	13.8
Stage N1 (%)	10.6	9.9	11.6
Stage N2 (%)	41.3	44.9	40.0
Stage N3 (%)	24.5	20.2	18.0
StageREM (%)	17.0	19.6	16.7

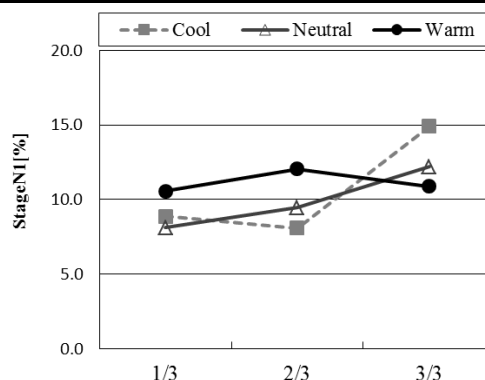


Fig. 5 Changes of StageN1(%) across the night under three thermal conditions

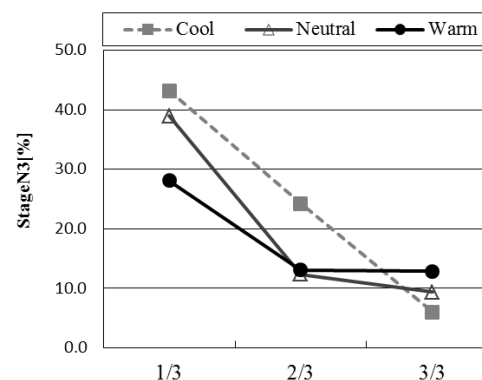


Fig. 6 Changes of StageN3(%) across the night under three thermal conditions

3.4 温冷感と OSA-MA の関係

Fig. 7 に温冷感と OSA-MA の関係を示す。『暑熱』、『冷涼』ではいずれの因子も『中立』より得点が低かった。したがって、『暑熱』で睡眠前期、中期に深睡眠が少ないことや、『冷涼』で睡眠後期に浅睡眠が多かったことが、主観的な睡眠維持の評価が低くなると考えられる。

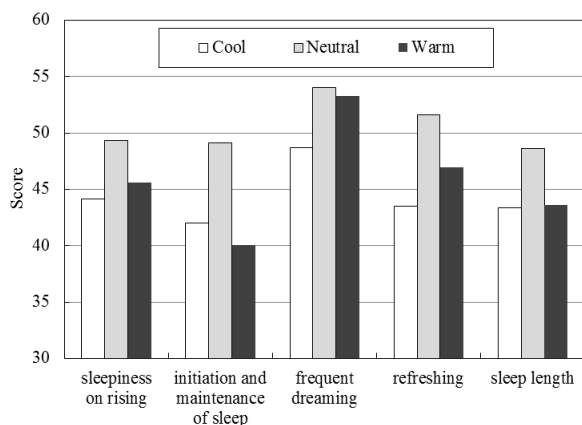


Fig. 7 OSA-MA score and three thermal conditions

4. まとめ

本研究では、夏期を想定した温度環境 (25℃～32℃) で終夜睡眠検査を行い、起床時の温冷感と、睡眠経過に伴う被験者の体温や客観的な睡眠の質、主観的な睡眠の質との関係を調べた。就寝中の室温の差は起床時の温冷感に反映され、温冷感の高低は睡眠中の皮膚温や鼓膜温の高低と一致した。また、いずれの温度環境でも睡眠の経過に伴って皮膚温・鼓膜温共に低下する傾向を示した。睡眠深度については、冷涼環境と暑熱環境では、睡眠の経過に伴う StageN1 と StageN3 の占有率の変化に差を認めた。また、温冷感が中立な温度環境に比べて、暑熱・冷涼環境では、主観的な睡眠の評価は低くなったが、客観的な睡眠の質への影響については両者で異なることが示された。

謝辞：本研究にご協力いただいた被験者の皆様ならびに、大阪大学医学部附属病院睡眠医療センター 野々上茂様、大阪大学大学院歯学研究科 矢谷博文教授、原木真吾様、辻阪亮子様、手島佑衣様、大阪大学連合小児発達学研究科 上村真代様、中村美咲様、山野里恵様、藤原彩加様、前川友裕様に深謝を表す。

参 考 文 献

- 1) 彼末一之：脳と体温、共立出版、p150-170 (2000)
- 2) 彼末一之：からだと温度の事典、朝倉書店、p355 (2010)

- 3) 片寄泰子：睡眠中のエネルギー代謝を測る、睡眠医療 2: p192-198 (2008)
- 4) 後藤和貴子他：体温サーカディアンリズムを考慮した室温変化が夏期終夜睡眠に及ぼす影響、第 30 回人間生活環境系シンポジウム報告集、p93-96 (2006)
- 5) 山本由華吏他：中高年・高齢者を対象とした OSA 睡眠感調査票 (MA 版) の開発と標準化、脳と精神の医学 10: p401-409 (1999)

寝室の冷房設定温度と睡眠の質の関係

-大阪の集合住宅を対象とした調査-

Relation of Preset Temperature and Sleep Quality in Bedroom

-Survey of Public Rent Apartment in Osaka-

○中山 裕介（大阪市立大学）

梅宮 典子（大阪市立大学）

新井 潤一郎（ダイキン工業）

小林 知広（大阪市立大学）

橘 良樹（大阪市立大学）

Yusuke NAKAYAMA^{*1}

Noriko UMEMIYA^{*1}

Jun-ichiro ARAI^{*2}

Tomohiro KOBAYASHI^{*1}

Yoshiki TACHIBANA^{*1}

^{*1} Osaka City University

^{*2} Daikin Industries, Ltd

Based on the responses of 168 unemployed persons living in public rent apartments in Osaka, we analyzed the relation between preset air-conditioner (AC) temperatures and sleep quality. Results were the following. 1-1) No relation was found between preset temperatures and sleep quality for 'high-frequency AC users'. 1-2) Sleep quality of 'low-frequency AC users' is high when the preset temperature is high. 2-1) Most frequent AC users feel comfortable whatever the preset temperature. 2-2) As the frequency of AC-use decreases, the comfortable preset temperature becomes higher.

1 はじめに

近年都市部の熱帯夜日数が増加し、熱中症のリスクが高まっている。一方、COOL BIZ キャンペーンや東日本大震災以降の節電など、冷房の節約が推奨されている。睡眠時の適切な冷房使用に関しては、久保ら（2002）^{文1)}や石丸ら（2009）^{文2)}が、冷房使用による熱的快適性の低下の可能性を報告している。

筆者ら^{文3)}は、睡眠時の冷房使用の実態を明らかにするために、大阪の分譲共同住宅居住者を対象としたアンケートデータ^{文4)}から、1)住戸における日射熱の煩わしさが入眠及び睡眠維持に、2)住戸の暖冷房の効きやすさが疲労回復に影響を及ぼすことを明らかにした。

本研究では、賃貸共同住宅居住者へのアンケート調査に加え寝室室温測定を実施し、1)寝室の冷房設定温度と睡眠の質の関係、2)寝室の冷房設定温度と熱的快適感の関係、3)寝室室温と設定温度および睡眠の質の関係を分析したので報告する。

2 方法

2.1 アンケート調査

公団・公社賃貸共同住宅に、2014年7月28日～8月1日、9月8日～11日、2015年7月31日～8月2日、8月27日～29日にアンケート票を配布し、2014年は352通、2015年は293通を回収した。Table1に調査項目を示す。睡眠時の冷房使用は、「ここ1～2週間」について尋ねた。睡眠調査は、平日の起床後に前夜の睡眠を OSA

Table1 Questionnaire survey items

Classification	item
Personal attribute	Age, sex, working days, working hours, occupation time health, stress, residence years, etc...
AC-use (these days)	Frequency of use, use of timer, preset temperature (upper & lower)
Sleep survey (day of the weekday)	OSAn sleep inventory, thermal comfort, etc...

Table2 Measurement survey items

Classification	item
Record of life action	Occupancy of bedroom, AC-use sleep, opening of window
Sleep survey	OSA sleep inventory, thermal comfort, etc...

睡眠調査票^{文5)}などで評価させた。OSA は、4段階5因子計15尺度で睡眠感を評価し、偏差値で表し、高得点であるほど睡眠の質が高い。本報は、起床時眠気因子（以下「起床」）、入眠および睡眠維持因子（以下「維持」）、疲労回復因子（以下「疲労」）、および OSA 総合得点（以下「OSA 総合」）を分析する。

2.2 寝室室温測定調査

室温測定は、2014年8月19日～9月26日と2015年8

月1日～9月10日に、アンケート回答者の中から各年44名寝室で各7日間測定してもらった。室温は、枕もとに設置したボタン電池型ロガーで10分間隔で記録し、冷房使用や寝室在室、睡眠を30分刻みで、OSA睡眠調査は毎日起床後に記入してもらった (table2)。

2.3 分析対象の特性

分析対象は、アンケートでは、1)週の勤務が5日以上や40時間以上、2)平日在宅時間が12時間未満、3)健康状態5段階中の「不良」と「やや不良」、4)ストレス4段階中の「非常にある」、5)居住年数1年未満を除外した167名とした。室温測定の対象も同条件で抽出した44名とした。

アンケート分析対象者167名は、平均年齢60.4歳、女性66.4%である。Fig.1に『ここ1～2週間の睡眠時冷房使用頻度 (以下「冷房頻度」)』を示す。以降、冷房頻度は「高頻度側」(「非常によく使用」と「よく使用」)と「低頻度側」(「時々使用」、「ほとんど不使用」)に二分する。Fig.2に『ここ1～2週間の寝室の冷房設定温度』の上限と下限、およびその平均値の分布を示す。本報では、この平均値を『睡眠時の寝室の冷房設定温度 (以下『設定温度』)』とする。測定対象者44名は、平均年齢59.2歳、女性61.2%であり、アンケート分析対象と有意な差はない。

3 アンケート分析結果と考察

3.1 冷房使用

(1)冷房設定温度 Fig.3に冷房頻度と設定温度の関係を示す。冷房頻度間の設定温度の有意差はない

($p=.785$)。冷房頻度と設定温度は関係がない、といえる。

(2)タイマー使用 Fig.4に冷房頻度とタイマー使用の関係を示す。「高頻度側」は一晩中冷房を使用し、「低頻度側」はタイマーを設定し冷房を使用する傾向がある。

3.2 冷房設定温度と睡眠の質

Fig.5に設定温度と睡眠の質の関係を示す。設定温度は、OSA、起床、維持と相関がない

($R=.027, .008, .009$)。一方、疲労は設定温度が高いほど得点が高い ($R=.219$)。

Fig.6に、冷房頻度別の、設定温度と睡眠の質の関係を示す。「高頻度側」は、設定温度とOSA、起床、維持、疲労の相関がない ($R=-.122, -.069, -.032, -.021$)。「低頻度側」は、設定温度とOSA、起床、維持、疲労に正の相関があり ($R=.228, .080, .164, .395$)、OSAと疲労が特に強い。冷房頻度が低い場合、設定温度が高温側であるほどOSAと疲労の得点が高い、といえる。

3.2 設定温度と熱的快適感

Fig.7に、各設定温度における熱的快適感の分布を、

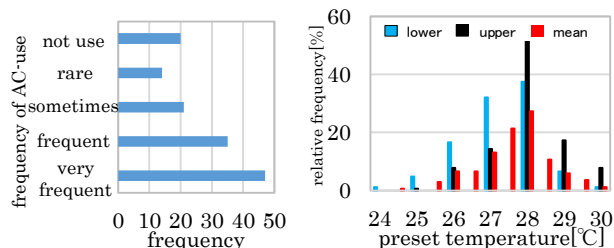


Fig.1 Frequency of AC-use

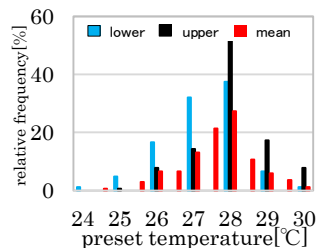


Fig.2 Preset temperature

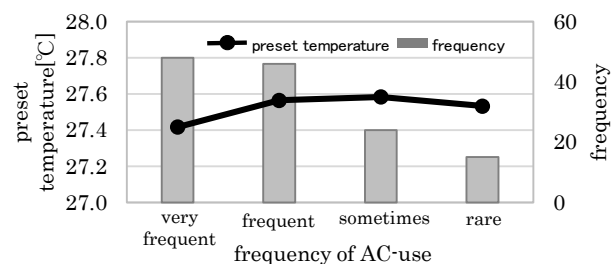


Fig.3 Preset temperature by frequency of AC-use

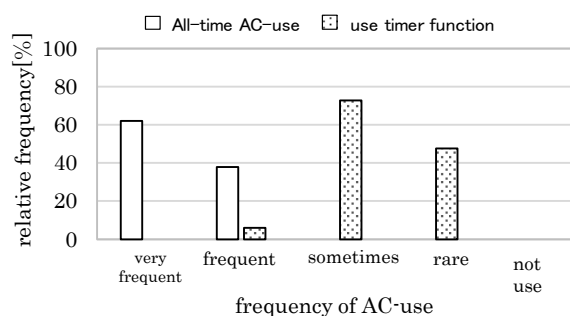


Fig.4 Timer use by frequency of AC-use

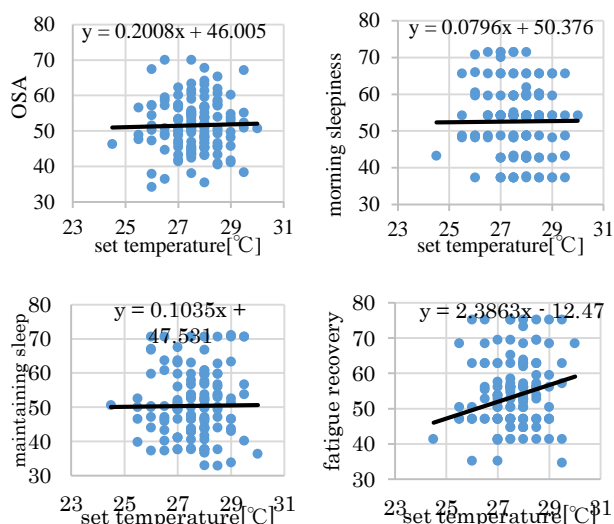


Fig.5 Relation between preset temperature and sleep quality

冷房頻度別に示す。「高頻度側」は、26°C、27°Cと低温側で「快適」の割合が有意に高い ($p=.085$)。「低頻度側」は、28°C、29°Cと高温側で「快適」の割合が有意に

高い ($p=.074$)。Fig.8 に、冷房頻度「非常によく」、「よく」、「時々」、「ほとんど」別の各設定温度台における熱的快適感の分布を示す。最も頻度の高い「非常によく」では、全設定温度において「快適」の割合が高い。一方、「よく」では27℃台、「時々」では28℃台、「ほとんど」では28℃台と、冷房頻度が下がるほど「快適」の割合が高い設定温度は、高温側へ移行する。

3.3 設定温度と睡眠の質および熱的快適感

睡眠時冷房使用頻度「高頻度側」は、睡眠中全時間冷房を使用する傾向があり、特に最も頻度が高い場合には設定温度に関わらず「快適」である。一方、「低頻度側」はタイマーを設定する傾向があり、タイマーによる冷房の運転停止後に室温の上昇が予想される。また、室温上昇は、設定温度が低温側ほど大きいと考えられる。

「低頻度側」のみ、設定温度の低温側で睡眠の質が低い要因として、設定温度が低温側であるほど室温上昇が大きく、熱的快適感が損なわれていることが考えられる。

4 寝室室温と設定温度および睡眠の質

4.1 被験者の冷房使用時間率

Fig.10 に被験者の一日の睡眠時間に対する冷房使用時間の割合（以下「冷房使用時間率」）を示す。本研究では、睡眠中全時間冷房を使用した時間率100%を「全時間使用」、冷房が睡眠中に停止した0%を除く100%未満を「一部使用」、冷房を使用していない0%を「不使用」とする。

4.2 時間帯別室温

Fig.11 に冷房使用時間率別の、睡眠時間帯と室温の関係を示す。ここで睡眠時間帯は、入眠後3時間（以下「入眠後」）、起床前3時間（以下「起床前」）の2段階とした。「全時間使用」と「不使用」は、入眠後と起床前で室温差がない ($p=.889, .334$)。一方「一部使用」は、入眠後と比較し起床前の室温が有意に高い

($p=.070$)。「一部使用」は、冷房の運転が停止することによって室温が上昇していると考えられる。

4.3 冷房設定温度と室温上昇

Fig.12 に、冷房使用時間率別に、設定温度ごとの入眠後から起床前にかけての室温上昇の平均を示す。「全時間使用」は、設定温度による室温上昇の差がない

($p=.233$)。「一部使用」は、設定温度が低温側ほど、室温上昇が大きい ($p=.090$)。冷房が睡眠中に停止する場合、設定温度が低いほど入眠後から起床前にかけて室温上昇が大きくなる、といえる。

4.3 熱的快適感と室温上昇

Fig.13 に熱的快適感と入眠後から起床前にかけての室温上昇の関係を示す。室温上昇の平均は、「快適」で0.05℃と最も小さく、不快となるほど大きい傾向がある。室温上昇が小さいほど熱的快適感は「快適」であ

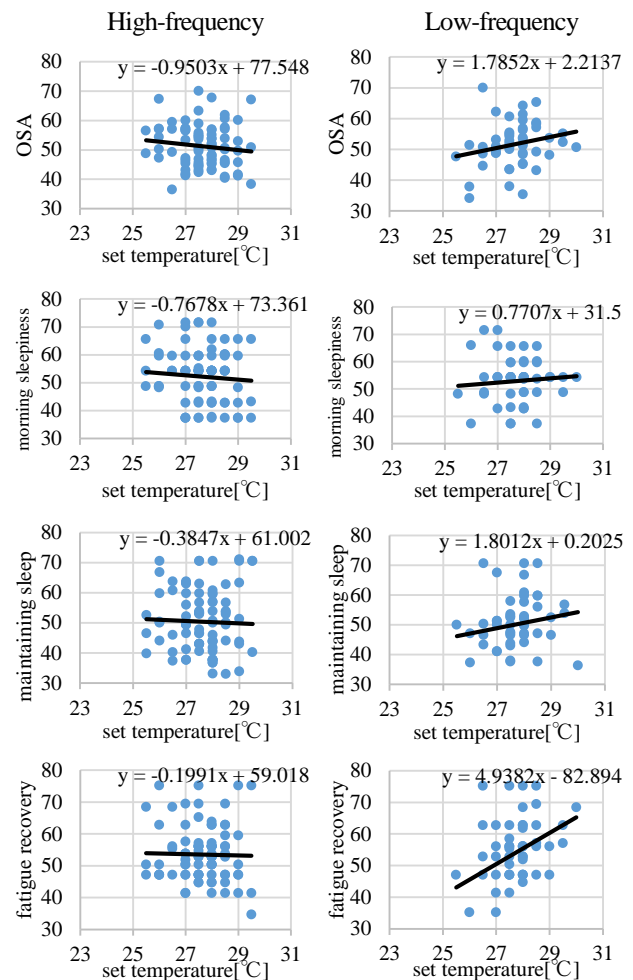


Fig.6 Relation between preset temperature and sleep quality

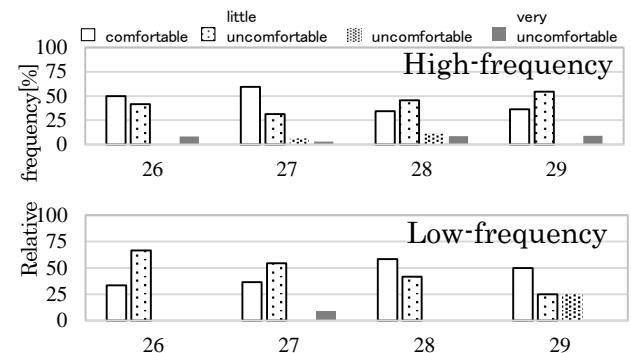


Fig.7 Thermal comfort by preset temperature

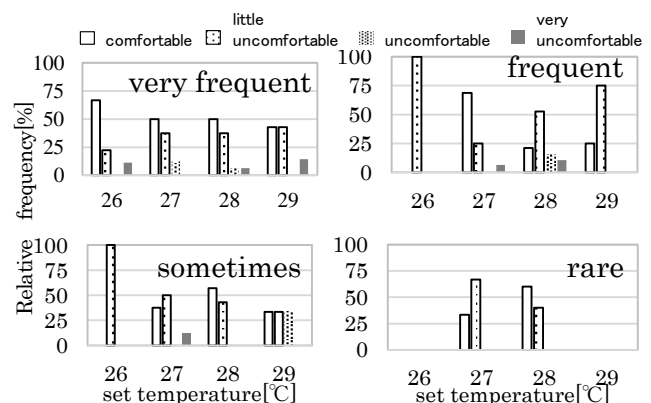


Fig.8 Thermal comfort by preset temperature

る、といえる。

4.3 室温上昇と睡眠の質

Fig.14 に「全時間使用」、「一部使用」別の、室温上昇と OSA、疲労の関係を示す。「全時間使用」は、室温上昇の分布が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の範囲に収まっており、室温上昇と OSA、疲労の相関がない ($R=-.001, .024$)。「一部使用」は、 1°C 以上の室温上昇の分布がみられ、入眠後から起床前の室温上昇が 1°C を超えると、得点が急激に下がる傾向がある。

5 結論

2014 年と 2015 年に、大阪の公団・公社賃貸共同住宅を対象にアンケート調査と寝室室温測定を実施し、以下を明らかにした。

アンケート調査より、1-1) 冷房使用頻度が高い場合、設定温度と OSA の得点は関係がない。1-2) 頻度が低い場合、設定温度が高いほど疲労回復因子得点と OSA 総合得点が高い。2-1) 冷房使用頻度が「非常によく使用」の場合、設定温度に限らず「快適」の割合が高い。2-2) 頻度が低いと、「快適」である設定温度は高温側に移行する。

寝室室温測定より、3-1) 睡眠時の冷房が一時的な使用の場合、入眠後と比較し起床前の室温が高い。3-2) 一時的な使用の場合、設定温度が低いほど、入眠後から起床前の室温上昇が大きい。3-3) OSA 総合得点および疲労回復因子得点は、入眠後から起床前の室温上昇が 1°C を超えると急激に下がる。

参考文献

※1 久保ら：夏期と冬期における高齢者の睡眠と寝室・寝床環境に関するアンケート調査，人間・生活環境系シンポジウム報告集 26，pp.105-108，2002 年 12 月，※2 石丸ら：夏季の都市部での睡眠・寝床環境に関する 実態調査，日本生気象学会誌，46(3)，S41，2009 年，※3 中山ら：冷房使用が住宅熱的性能と睡眠の質に及ぼす影響と及ぼす影響，空衛学会近畿支部学術研究発表会論文集，pp.181-184，2015 年 3 月，※4 坂根ら：夏季における睡眠の質に影響する居住環境因子，空・衛近畿論文集，43，pp.261-264，2014 年，※5 山本ら：中高年・高齢者を対象とした OSA 睡眠調査票（MA 版）の開発と標準化，脳と精神の医学 10，pp.401-409，1999 年

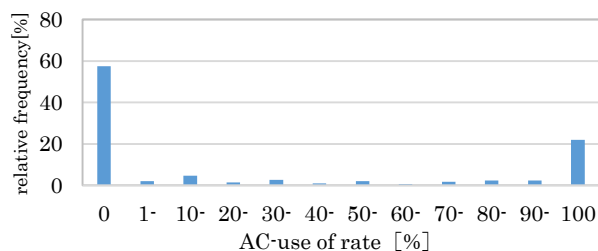


Fig.10 Percentage of AC-use time to sleep time

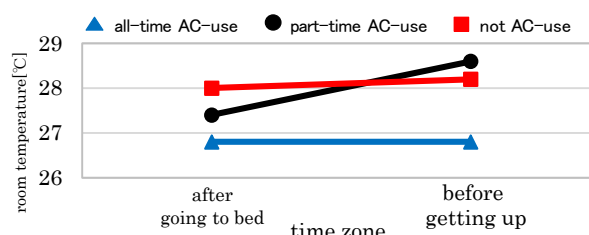


Fig.11 Room temperature according to time

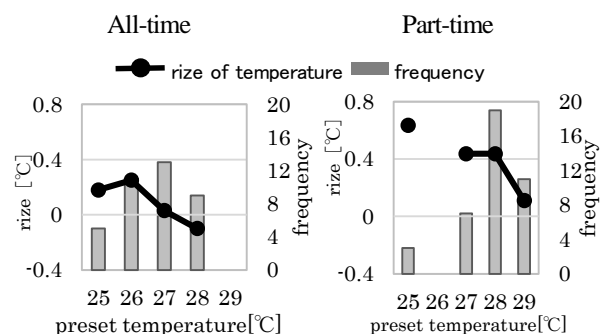


Fig.12 Rize of room temperature by preset temperature

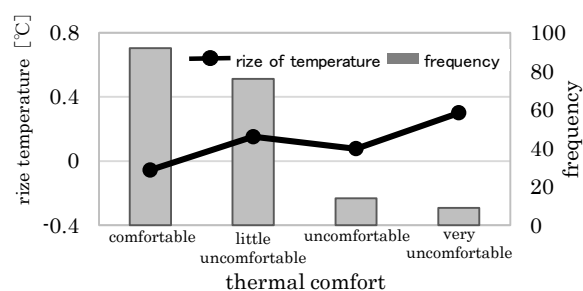


Fig.13 Rize of room temperature by thermal comfort

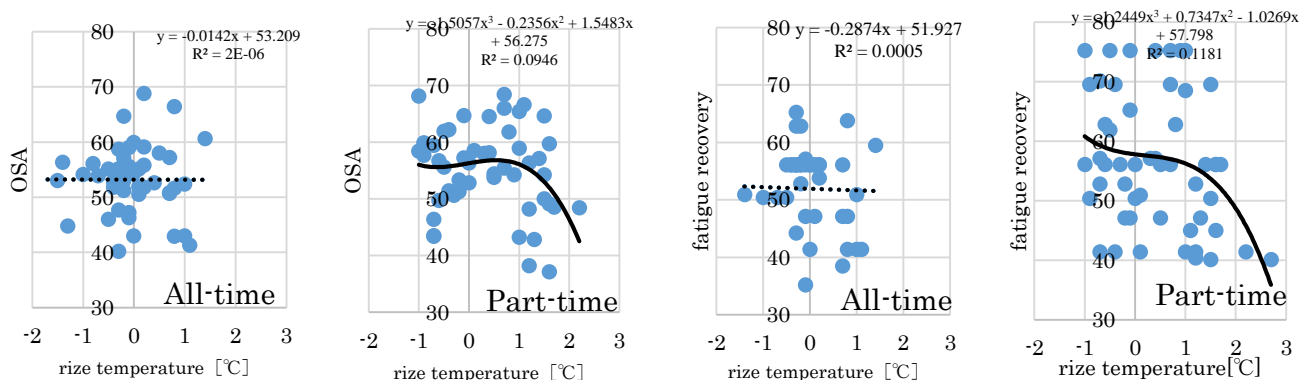


Fig.14 Relation between rize of room temperature and sleep quality

室温のハンチング変動が人間の生理・心理に及ぼす影響の検討 Effect of Controlling Temperature Fluctuation on Thermal Comfort

○亀山 大介 (立命館大学) 近本 智行 (立命館大学) 李 明香 (立命館大学)

Daisuke KAMEYAMA*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Myonghyang LEE*¹

*¹ Ritsumeikan University

Air-conditioning controls room temperature by thermo-on/off through sensing and predicting change of room temperature. It causes temperature-fluctuation. In addition, Zero Energy Band Control and Passive Rhythming Air-Conditioning are aiming energy-saving and cost-saving by permitting temperature-fluctuation. Therefore, considering temperature-fluctuation is important in considering thermal comfort. This study aims connect to the improvement of thermal comfort by controlling temperature-fluctuation, and investigates effect of temperature-fluctuation on thermal comfort.

はじめに

PMV や SET*のような快適指標は定常状態を想定して評価を行っている。しかし、人々の生活に必要な空調設備は、室温の変化をセンシングや予測して制御し、サーモ on/off を繰り返しているため室温変動が起きる。また、人間の許容できる温湿度範囲では空調運転を行わないゼロ エナジーバンド制御^{文1)}や、空調機を周期的に運転・停止させるパッシブリズム空調^{文2)}が存在し、省エネルギー・省コストを実現しようとしており、これらは室温の変動を許容している。そういった空調運転のリズムが 1/f ゆらぎのように生体に対し快適感を与える可能性もある。したがって空調空間の温熱環境を考える上で、温度変動を考慮することは重要であると考えられる。

本研究では、非定常な空調空間に着目し、敢えて室温変動を与える制御を行うことで、快適性の向上につなげることを目指す。そこで、室温を意図的に変動させる制御をした被験者実験を行い、環境測定、皮膚温度測定及びアンケート申告させることで、温度変動が人間の知覚・心理・生理に及ぼす影響を検証する。

1. 実験概要

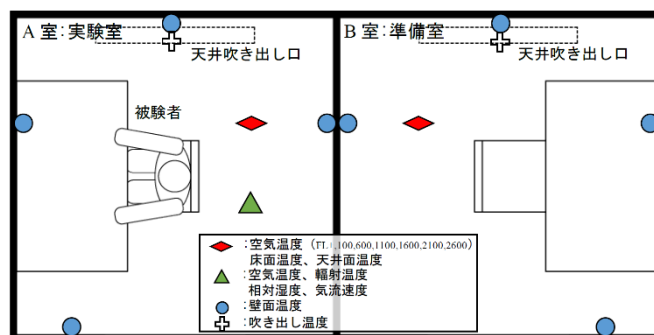
1.1 実験条件

本実験は9月下旬～10月上旬に、立命館大学びわこくさつキャンパスにある恒温恒湿室にて行った。実験室概要及び測定点を Fig.1 に示す。被験者は健康な男子大学生4名であり、着衣量 0.6clo (クールビズ、長袖シャツ)、代謝量 1.2met (事務作業)とした。実験は一人ずつ行い、前日の睡眠時間を十分確保させ、飲酒は禁止とした。実験前に、被験者に室温を変動させることがあることを伝えたが、変動のタイミングは伝えていない。

1.2 実験方法

各 case の目標室温変動値を Table1 に、case1-1 を例にし

た実験手順を Fig.2 に示す。case1-1 を基準として温度幅、周期、基準温度を変更し、他の変動 case とした。case1-0 及び case2-0 は室温一定とした。被験者は実験開始前に 28℃に設定された B 室で 30 分間安静にする。その後 A 室へ移動し実験開始とする。すぐに皮膚温度測定用の熱電対を装着させ、室温は実験開始 20 分後から変動させる。室温変動は、実験室外の制御盤で設定温度を変更することで行い、上昇時、下降時共にアクティブ制御である。



1.3 アンケート申告

アンケートは主に 2 種類行い、申告のタイミングは毎回実験室扉をノックして知らせた。

① 温冷感及び快適感申告

その瞬間の温冷感・快適感、数分前温冷感・快適感比較を申告させた。後者は 2~3 分前に比べ、現在の温熱環境がどうなったかを申告させたものであり、相対的な申告である。Fig.2 に示す通り、実験開始 15 分後と各 case の基準温度時（上昇時、下降時）、最高温度時（山部）、最低温度時（谷部）に申告させた。ただし室温一定の case は実験開始 15 分後から 10 分毎に申告させた。

② 温度マッピングテスト

室温変動に対する被験者の経時的な知覚の仕方を検証することを目的として、各 case の最後の 30 分（実験開始後 120~150 分）に 1 分毎の温冷感申告及び体感による室温推移を予想させた。

1.4 皮膚温度測定

皮膚温度は Hardy-DuBois の 7 点法より頭、上腕、手、足、下腿、大腿、胴と抹消部皮膚温として耳たぶ、指先の計 9 点を計測した。

2. 実験結果及び考察

Fig.3 に被験者 1 人分の室温変動の実測値を示す。

2.1 人間の室温変動に対する知覚

Fig.4 に温度マッピングテストの結果の一部を示す。室温の変動方向が変化する付近（山部、谷部）でマッピングの推移と室温変動に時間差が見られる。マッピングの推移の方が早いことも遅いこともあり、(1)のようにマッピングの推移が明らかに室温変動より先行していることがあった。これは、室温変動の勾配が緩やかになることによって逆方向に知覚してしまうと考える。時間差はあるが室温変動のある全ての case において室温上昇時、下降時共に知覚していると考えられる。

Fig.5 に各 case の 28℃時（上昇時、下降時）の数分前温冷感比較の結果を示す。室温一定の時と比較すると、上昇時において暑くなった側の申告の割合が増加し、下降時は寒くなった側の申告の割合が増加していることが分かる。また、温度幅、室温変化勾配が大きい case1-2 が最も顕著にその傾向が表れている。case1-1 と case1-3 を比較すると、上昇時では大きな差が見られないが、case1-1 の方が下降時の涼しくなった割合が多い。したがって、室温変動は知覚されており、室温変化勾配や温度幅が知覚の大きさに関係していると考えられる。

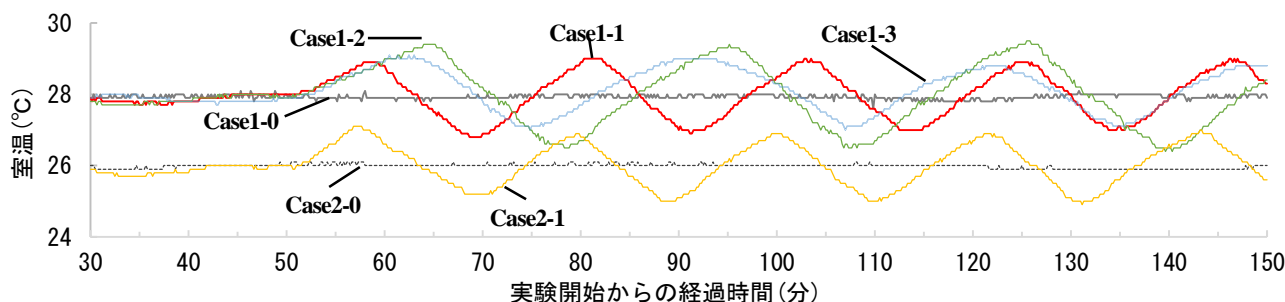


Fig.3 Measured date of temperature-fluctuation

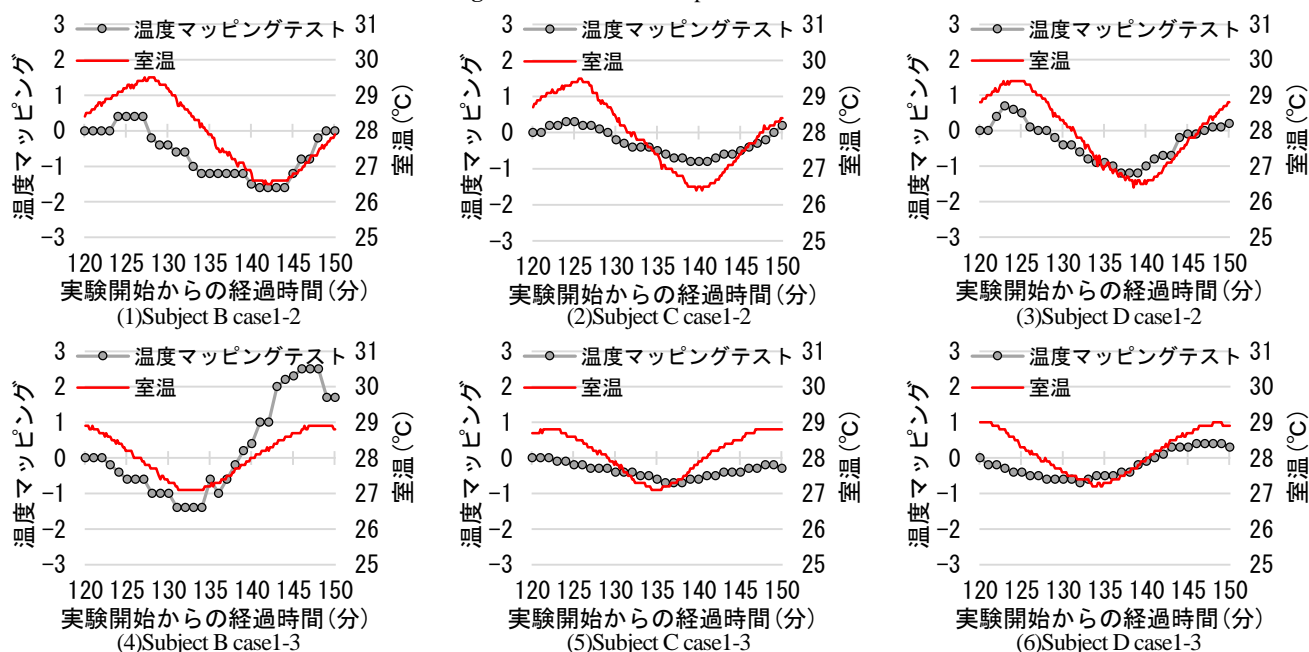


Fig.4 Result of temperature mapping test

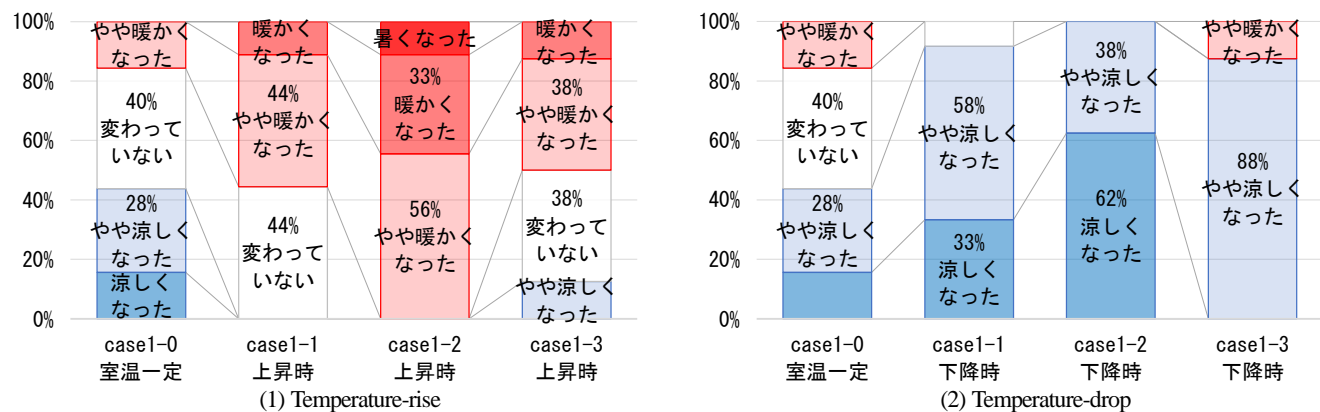


Fig.5 Result of thermal sensation comparison with several minutes ago (when it is 28°C)

2.2 室温変動が温冷感・快適感に与える影響

Fig.6 に室温と温冷感の推移の一部を、Fig.7 に室温と快適感の推移の一部を示す。ただし、被験者実験は一人ずつ行い、同 case であっても室温変動が一致しないので、case 毎に室温変動を平均化し、温冷感と快適感は丁度基準温度時、山部、谷部で申告したとする。室温変動と温冷感の推移が似ていることが分かる。個人差が見られるが、室温上昇時や山部では暖かい、不快側へ、室温下降時や谷部では涼しい、快適側へ推移する傾向がある。また、山部や谷部より、その直前の上昇時や下降時において、温冷感でより暑い側や寒い側の申告を得られることもあった。これは山部及び谷部で、室温変化勾配が緩やかになっていること、室温変動方向が変化している場合があることが影響していると考えられる。

Fig.8 に各 case の 28°C 時の温冷感を上昇時、下降時分けて示す。室温変動 case の 28°C 時において温冷感の違いは顕著に表れなかった。室温一定の時と比較すると、上昇

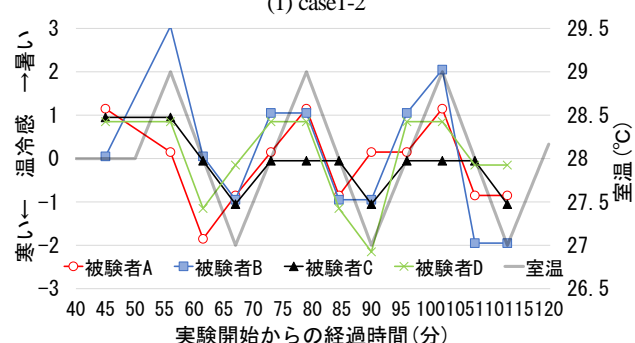
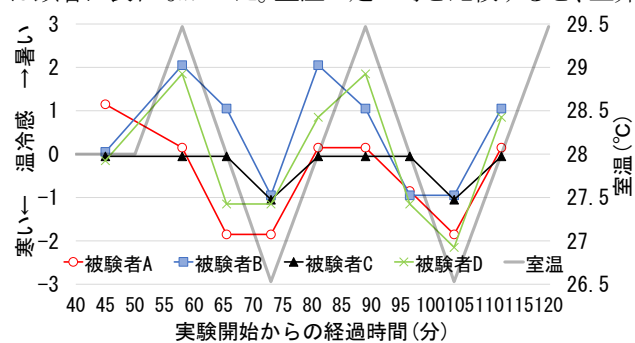


Fig.6 Transition of thermal sensation

時は暑い側、下降時は寒い側の申告が増加していることが分かる。したがって、室温変動の方向は温冷感に影響していると考えられ、温冷感は室温変動の方向を予測し先行している可能性がある。

Fig.9 に各 case の快適感及び温冷感申告の割合を示す。室温変動がある case は室温一定の case と比較して快適感で顕著に申告のばらつきがあることが分かる。また、case1-1 より温度幅が大きい case1-2 ではばらつきが多く、室温変化勾配が最も緩やかな case1-3 ではばらつきが少なくなっている。しかし、case2-1 は case2-0 より快適感が損なわれている。これは基準温度一定時における快適感の差によるものと考えられる。case2-0 では快適・やや快適が大半を占めているが、case1-0 ではやや快適・どちらでもないが大半を占めている。快適でない室温の時は、室温変動をさせることによって快適感や不快感を得るが、元々が快適であった場合は室温変動によって不快感のみを得ると考えられる。

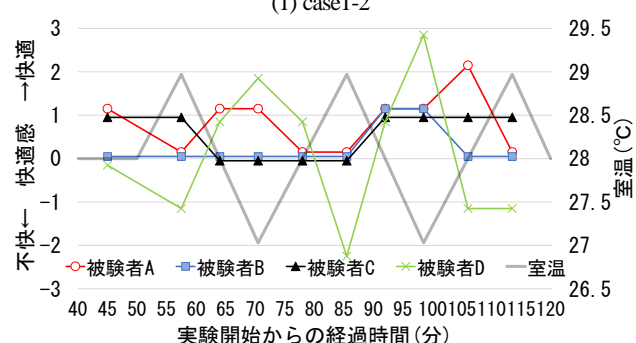
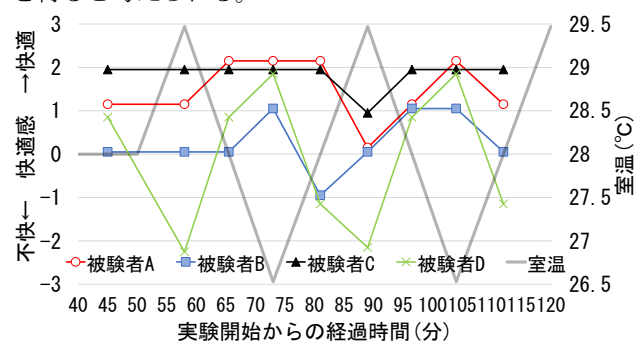


Fig.7 Transition of thermal comfort

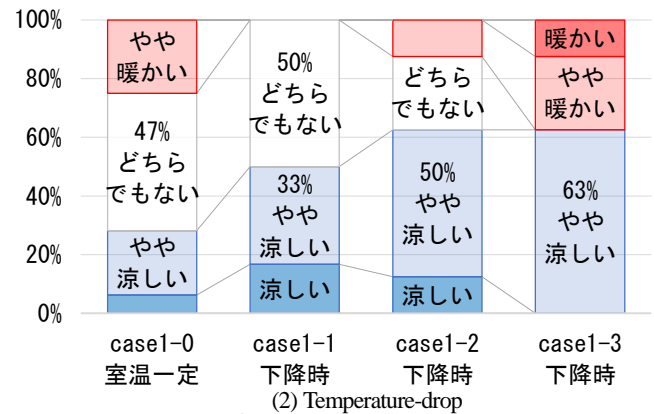
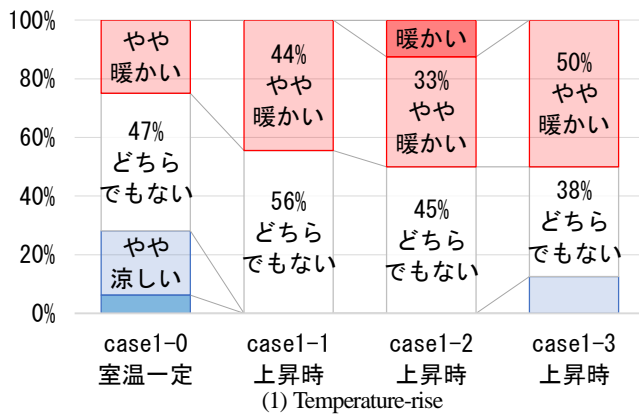


Fig.8 Result of thermal sensation (when it is 28°C)

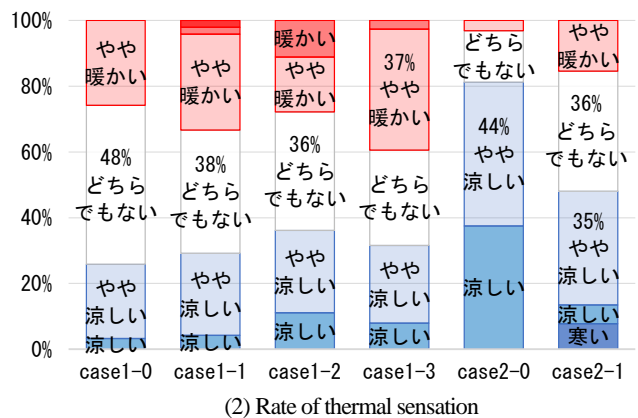
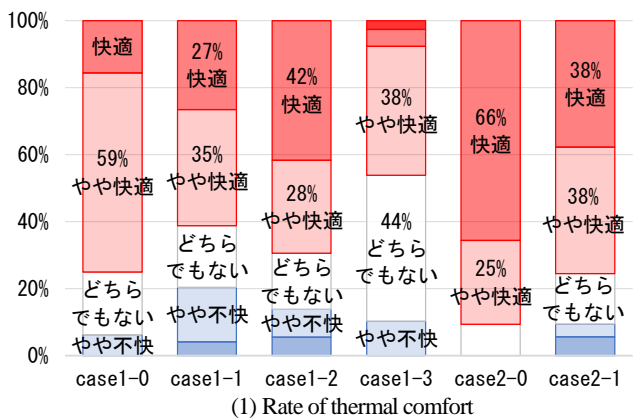


Fig.9 Result of thermal comfort and sensation

2.3 室温変動が皮膚温に与える影響

Fig.10 に皮膚温の結果の一部を示す。平均皮膚温度は室温に依存し、室温変動に伴い変動していることが分かる。また、部位毎に見ると頭部と胴の温度が高く、変動が少ない。温度の低い耳たぶは大きく変動しており、他の皮膚温はその間で変動している。

3. まとめ

本研究では、意図的な室温を変動させる制御を行うことによる快適性の向上を目指し、室温変動が人間の知覚・心理・生理に及ぼす影響の検証をするために被験者実験を行った。今回行った実験では、1)室温変動、特に変動方向は知覚されており、温度幅や室温変化勾配が知覚の大きさに関係があると考えられる。2)室温変動は温冷感、快適感に影響を与えると考えられ、特に快適感の差が顕著にあった。3)皮膚温度は室温変動に伴い変動した。

室温を変動させることで快適側と不快側の両方に申告がばらついたが、case によってはばらつきを抑えられた。よって、室温の上昇、下降を制御することで、快適にすることができると考える。本実験の結果からは室温下降時を case1-1 に、室温上昇時を case1-3 にすることで不快感が増えずに快適感の割合が増えるのではないかと考える。

今後の課題として、本実験は被験者が通常より室温変動に意識的であったので意識的でない中での実験や、その中で被験者が知覚や温冷感、快適感に対して影響しない範囲、許容できる範囲の検討をする必要がある。

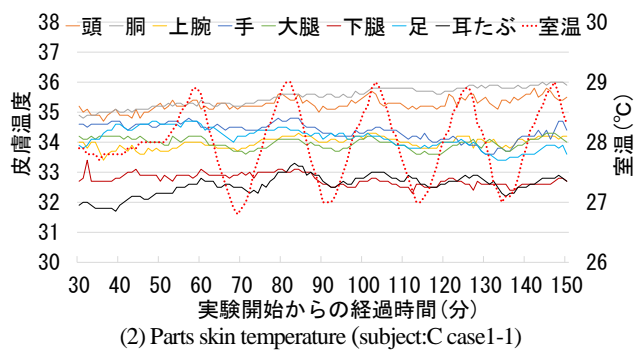
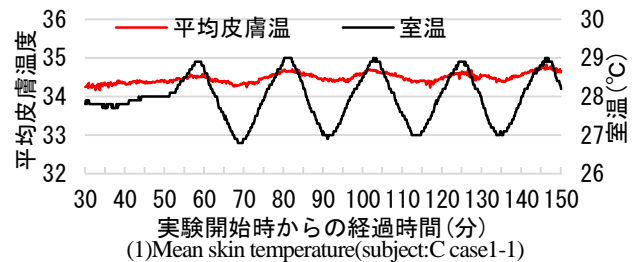


Fig.10 Result of skin temperature

参考文献

- 文1) 佐藤孝輔ほか: ゼロカーボン建築の実現可能性に関する研究 : (第3報) ゼロエネルギーバンドの設定と冷暖房負荷及び空調用エネルギー削減可能量の試算、学術講演会論文集、平成22年(1)、pp689-692、2010-8
- 文2) 坊垣和明ほか: パッシブブリズミング空調における快適性と省エネルギーに関する研究: 第1報-パッシブブリズミング空調が快適性に及ぼす影響に関する実験: 夏季実測結果について、空気調和・衛生工学会論文集(64)、pp61-71、1997-1

洗顔時の温度設定と温冷感に関する基礎的研究 Research on the Relationship between Thermal Sensation and Water Temperature for Face Washing

○ 上田 奈々 (大阪市立大学) ファーナム・クレイグ (大阪市立大学)
鍋島 美奈子 (大阪市立大学)

Nana UEDA^{*1}, Craig FARNHAM^{*1} and Minako NABESHIMA^{*1}

^{*1} Osaka City University

With the goal of designing home bath water heat recovery systems to reduce the water heating load for other uses, such as face-washing, experiments on hot-cold sensation and comfort for water temperatures of 14°C-45°C were performed on 30 test subjects. Subjects could accurately detect a temperature difference of 1°C. Hot-cold sensation on a 7-level vote scale strongly correlated with water temperature and skin temperature. At 28°C and above, there were no “cold” votes. A heat recovery system that stores warm water to save energy could also improve quality of life if the set temperature is 28°C.

はじめに

家庭における燃料別エネルギー消費量は、電力の普及、家電製品の多様化と大型化、生活様式の変化などが増加要因となり、増加を続けている。また、家庭の消費エネルギーのうち、冷房・暖房・給湯といった熱需要は全体の半分以上を占めており、給湯エネルギーは、住宅におけるエネルギー消費全体の約3割を占める。

現在 EU ではすでにシャワーブース用の熱回収機が一般家庭用に販売されている。これは、シャワーブースの床下空間に平板状の熱交換器を設置し、上水配管を通る水の温度を上昇させるという熱回収装置である。日本ではシャワーブースではなく浴槽のある浴室が一般的であり、浴室の容積も大きいので、日本のライフスタイルに合った熱回収装置について研究がなされている。阿部らは浴室排水熱回収による上水予熱システムに関する基礎的研究により、1~15°C程度の温度上昇が見込まれると報告している⁽¹⁾。

排水熱回収で予熱された上水を給湯器に供給すれば直接的に燃料消費量の削減が期待できるが、給湯器を介さずそのまま水として使用しても、湯の使用量を削減できる可能性がある。また、日本人のライフスタイルや給湯設備を考えると、比較的低温の湯を必要とする場面が無駄に給湯器が稼働していることもある。たとえば、洗顔という行為は時間も短く、水温も比較的低温でも対応が可能な生活行為だと言える。排水熱交換により予熱した上水を洗顔に使用すれば、給湯器を使わずに、水が冷たすぎて不快な状況も避けることができる考え、本報では洗顔時に求められる水温と温冷感、快適感に関して調査することにした。

2つのタンク（いずれも200）と2つの水栓とがっ

合水栓のハンドルをひねることで、水量と水温が調整できるようになっている実験装置（Fig. 1）を使用して2つの予備実験を行った。

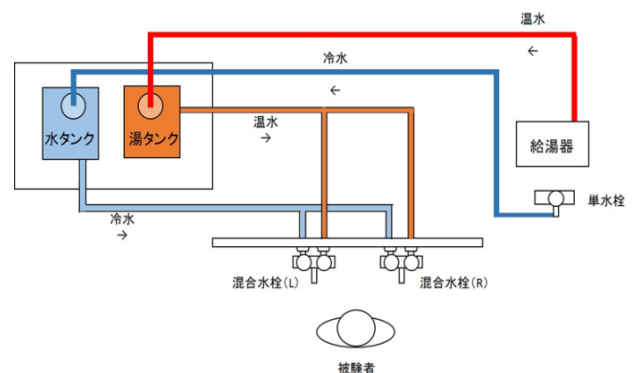


Fig.1 Diagram of experiment on judging temperature difference

1. 予備実験

1.1 洗顔を前提とした人の温冷感に関する調査

実験者が左右の混合水栓のハンドルを無作為に調整し、被験者に設置された混合栓の前に立ってもらい、片手ずつ触ってもらった。そして、その温冷感について左右の水栓から出る水の温度のうちどちらの水温が高いのか、または同じか、というヒアリング調査を行った。その結果を Fig. 2 に示す。これにより、温度差が 1°C 程度あると、正答率が上がることが分かった。

1.2 洗顔を前提とした快適水温の調査

被験者が洗顔に適していると思う温度を調整すると、どのくらいの温度幅があるかを調査した。

予備実験 1, 2 より本実験での温度ピッチは 1°C に設定すること、体温や皮膚温度を測ること、日常生

活の洗顔時データーを基礎情報としてヒアリングすること、を決定した。また、水温を確認する際、確認は指先で行われていたため、センサーを付けるのは指先とした。

Table.1 Chosen comfortable temperature for face washing

	A	B	C	D	E	F	G	H	平均
高温から	37.4	37.2	39.2	32.5	36.2	35.7	27.8	33	34.9
低温から	30.3	33.2	31.6	26.3	34.6	31.3	23.2	35.2	30.7
温度差	7.1	4	7.6	6.2	1.6	4.4	4.6	-2.2	4.2

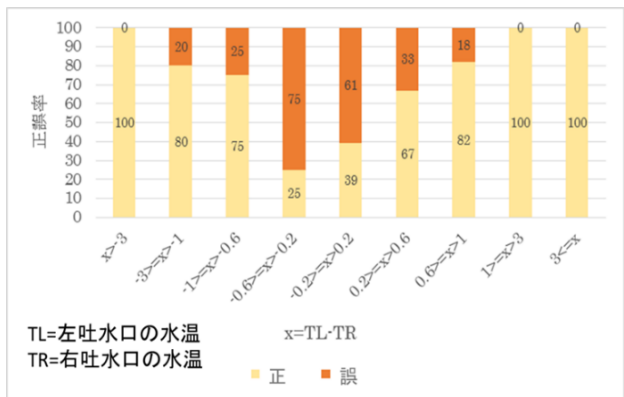


Fig.2 Percent correct in judging temperature differences

2. 本実験

2.1 温冷感評価実験

洗顔の所要時間や指の皮膚温度、温冷感を調べ、洗顔時の水温に関わる快適さというものがあるのかの考察を行う。実験装置として、熱交換器を介してつくられる冷水と、給湯器（37℃～75℃まで設定可能）からの温水がつながっており、被験者の立つ前に取り付けられた混合水栓のハンドルをひねることで、水量と水温が調整できるようになっている実験装置(Fig. 3)を使用した。本実験で使用する装置は 16℃～45℃の水温に調節が可能であり、予備実験時の装置と比較すると、低い水温の湯もつくれるようになった。

被験者は 21～27 歳の健康な男女 22 名であった。
実験方法：

温度ロガーLT200SA につながれた LT-2N-12 を被験者の両手の人差し指の手の平側の第 2、第 3 関節の間に医療用テープで貼り付け皮膚表面温度を計測し、実験者が混合栓を調整して作った水温の評価を行った。このとき、水温はシース型熱電対で計測した。順序効果を考慮し、水温は実験車がランダムに設定することとし、被験者に設定した水温の流水に触ってもらい、その温冷感を①水に触った瞬間、②被験者の洗顔時間、③60 秒後の 3 回ヒアリングした。そのとき、評価には SD 法を用い、7 段階の温冷感指標（熱い・暖かい・やや暖かい・どちらでもない・やや冷たい・冷たい・非常に冷たい）と、その状態の快適感（快・不快）の 2 点についてのヒアリングを行った。なお被験者に水に触る際には、回復時間の

問題上、人差し指だけが水に触れるように指示した。60 秒後のヒアリングの後、左右どちらかの手の皮膚表面温度が初期状態になるまで待ち、皮膚表面温度が回復した側の手で水温を変更し、同様に行った。皮膚表面温度の回復には、使い捨てカイロを使用しても良いこととした。なお、水量は 0.2ℓ/s とする。

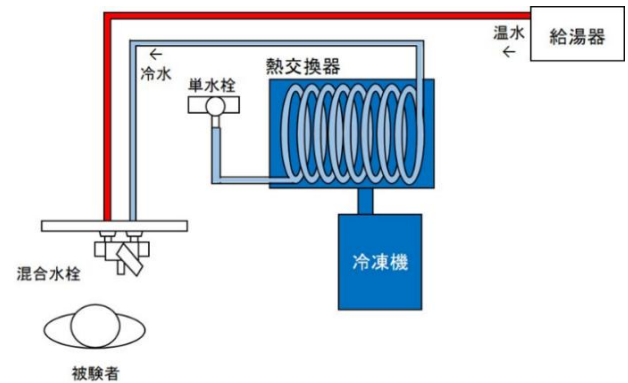


Fig.3 Diagram of experiment setup to control water temperature

2.2 アンケート調査

冬の間の通常洗顔時についてや、給湯器の設定温度、家で湯が出るまでにかかる時間、洗顔時間など 14 項目についてのアンケートを行った。

2.3 結果

実験中のヒアリングで得られた結果は全部で 1067 件であった。この結果から、水温と温冷感の比較、温冷感と不快感の比較などを行った。結果を表記する際の温冷感と対応数字は Table 2 に示す。

Table.2 7-level water temperature hot-cold vote scale

非常に冷たい	-3
冷たい	-2
やや冷たい	-1
どちらでもない	0
やや暖かい	1
暖かい	2
熱い	3

水温と温冷感の比較をおこなった。全データでのすべての時間帯での瞬間水温と温冷感との関係を Fig. 4 に示した。これより、温冷感申告値と瞬間水温とは強い正の相関がみられた。

Fig. 5 に示した各被験者の瞬間皮膚温と初期皮膚温（実験を始める前の皮膚表面温度）の差と、温冷感申告値の関係を比較したところ、皮膚温と温冷感の関係を調べた時よりも関係が強いことが分かった。

Table 2 の温冷感申告値と不快率の関係を Fig. 6 に示した。

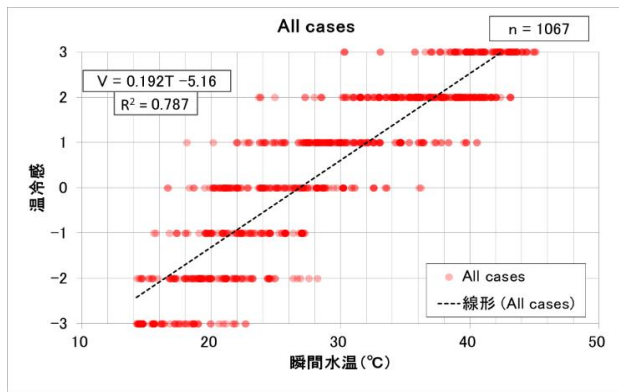


Fig.4 Water temperature vs. hot-cold vote

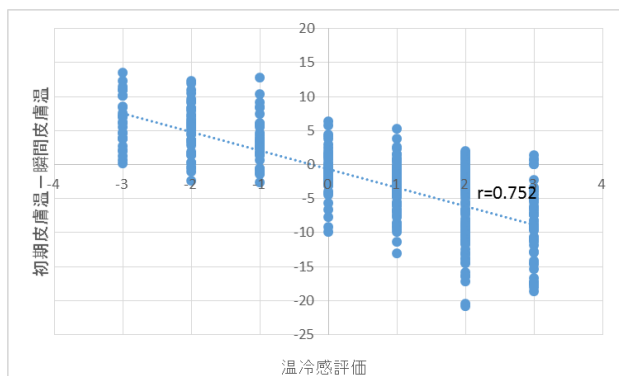


Fig.5 Change in skin temperature from initial vs hot-cold vote

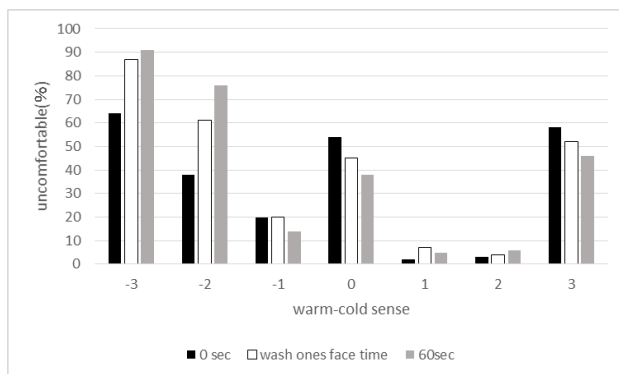


Fig.6 Percentage uncomfortable for each hot-cold vote

これより、時間がたつにつれ、「冷たい」の不快感率は 38%→61%→76%と、「非常に冷たい」の不快感率は 64%→87%→91%と移行し、不快だと感じる人が増加したことが分かった。また、反対に「熱い」の不快感率は 58%→52%→46%と減少した。また、「どちらでもない」を不快とする割合が予想していたよりも多かった。

全結果の中から実際の洗顔時の温度を考慮し、実験で使用する水温を 18～30℃の範囲出の結果をみた。1℃ピッチで設定し水温別に洗顔所要時間での温冷感の評価や、各被験者ごとの洗顔所要時間での快適な水温と通常洗顔温度との比較を行った。

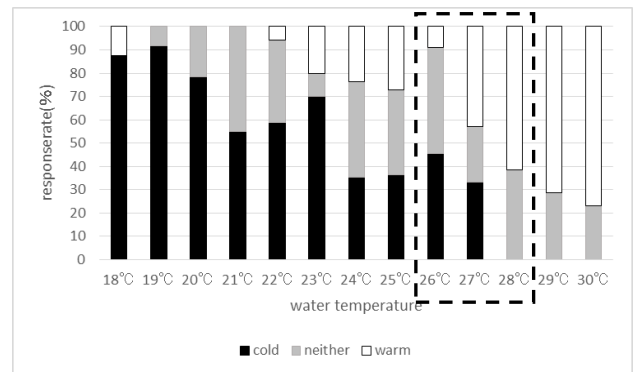


Fig.7 Percentage cold, warm, neither vs. water temperature

温冷感申告値-3～-1 までも「冷たい」、0 を「どちらでもない」、1～3 を「暖かい」として 18～30℃までの温冷感の割合を Fig. 7 に示す。これより、27℃が「冷たい」と評価される最高温度だということが分かった。また、26～28℃の快/不快の割合を Fig. 8 に示す通り、26℃、27℃では「冷たい」と評価されたなかでも快適と評価された割合が比較的高いことがわかった。これより洗顔に快適な温度は 26℃以上であると考えられる。

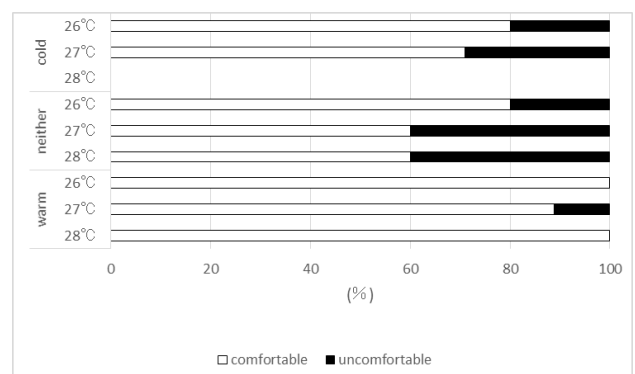


Fig.8 Percent uncomfortable vs. temperature and hot-cold vote

被験者ごとに洗顔所要時間での快適な水温と通常洗顔温度との比較を行った際に通常洗顔温度が快適温度よりも低かった被験者を Fig. 9 に表わし、被験者それぞれの洗顔状況を Table. 3 に示す。これらより、の 6 名の被験者の通常洗顔温度は、水道水の温度または十分に暖くなる前の温度で洗顔している傾向があると考えられた。

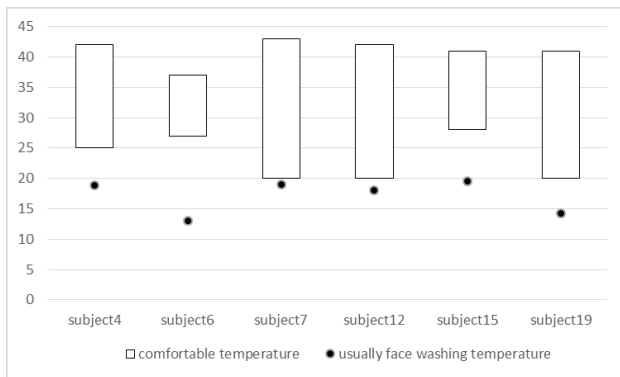


Fig.9 Usual face-washing temperature vs. comfortable range

Table.3 Examples of water use patterns of test subjects

被験者	洗顔時	湯が出るまで	洗顔時間(秒)
被験者4	水	-	12
被験者6	湯	待たない	6
被験者7	湯	待たない	15
被験者12	水	-	15
被験者15	湯	待たない	8
被験者19	水	-	5

3. 温冷感を指標としたシステムの構築

エネルギーの移動が、①給湯器→浴槽、②浴槽排水→熱交換機、③熱交換機→蓄熱タンクとなる日本の浴槽を使う生活スタイルを考慮した浴槽排水を利用したシステム (Fig. 10) において洗顔時にかかるコストを算出する。

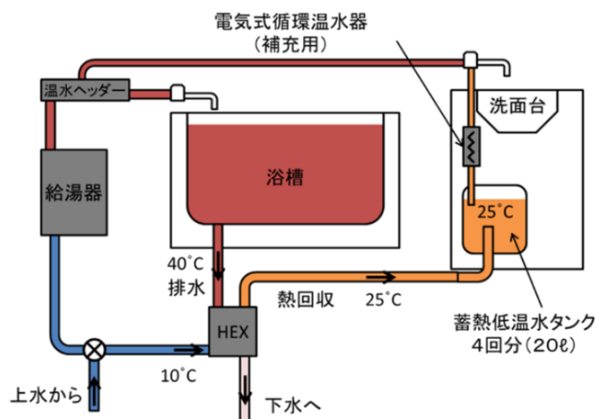


Fig.10 A heat recovery thermal storage system for face-washing

算出には、冬の水道水の温度： $T_c=10^{\circ}\text{C}$ 、給湯器の設定温度 $=42^{\circ}\text{C}$ 、水栓の吐水口からの水量 $=0.2\text{ℓ/秒}$ 、水の料金 $=168\text{ 円/}\text{m}^3$ ⁽²⁾、ガスの料金 $=139\text{ 円/}\text{m}^3$ ⁽³⁾、給湯器効率： $\eta=90\%$ 、電気料金 $22.83\text{ 円/}\text{kWh}$ ⁽⁴⁾を使用する。また、実験結果より、湯が出るまでの時間を25秒、洗顔時間を22秒とする。この条件において、従来通りの給湯システムの洗顔コストを算出すると1回あたり5.91円かかると算出され、浴槽排水熱を利用した上水予熱システムにおいて実験で明らかになった洗顔水温 28°C の水で22秒の洗顔を行うとすると1回あたり1.12円かかると算出された。

これらの結果より、1回あたり4円の差がでるとして、4人家族で1日1回、3か月間使用したとすると1440円のコスト差が生じる。また、洗顔以外のことも考慮するとさらにコスト差が生じると考えられるため、このシステムは有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 阿部敏也, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 西岡真稔, 三毛正仁, 澤部孝一: 浴槽排水熱を利用した上水予熱システムの開発 (その1) 実験装置の製作と熱交換試験, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会, pp.241-244, 2013
- 2) 大阪市水道局 HP 水道料金 < <http://www.city.osaka.lg.jp/suido/page/0000321765.html> > (参照日 2016.1)
- 3) 大阪ガス HP 一般料金 料金表 < https://www.e5.osakagas.co.jp/custserv/ryokinhyo1001.html?_ga=1.55620712.2119441795.1452313928 > (参照日 2016.1)
- 4) 関西電力 HP 主な電気料金単価表 < <https://kepc.co.jp/ryokin/unitprice/> > (参照日 2016.1)

片廊下型と階段室型の公的住宅の温熱環境・住まい方のアンケート調査 Study on Thermal Environment and Life Action in Public Subsidized Housing Built with the Single-load Corridor Type and Stair-case Type

○松嶋 洸樹 (立命館大学)

近本 智行 (立命館大学)

田邊 陽一 (大阪府庁)

原田 和幸 (立命館大学)

Kouki MATSUSHIMA*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Yoichi TANABE*² Kazuyuki HARADA*¹*¹ Ritsumeikan University *² Osaka Prefectural Government

The study focused on thermal environment in public subsidized housing in recent years and existing old staircase type apartment house. In this paper, first of all, research life action in summer and winter by using questionnaire, and after that, research thermal environment and life action unknown by only questionnaire.

はじめに

日本全国には多くの共同住宅があり、高度成長期大量に供給された階段室型集合住宅は老朽化や居住者の高齢化に伴い修繕や片廊下型への建て替えが進められている^{文1, 2)}。建築計画学では片廊下型よりも階段室型の方が採光は多く存在する^{文3, 4)}。しかし、実居住住戸における温熱環境と生活行動との関係を示した研究は多くない。

そこで本研究では、近年建設された片廊下型の公的住宅においてアンケートによる生活実態調査を行い、実居住住戸における温熱環境からの評価をし、温熱環境が居住者の生活行動や住まい方、住宅内における人体へ与える影響を考察する。また、階段室型と片廊下型における温熱環境や換気上の比較・整理を行い、実居住住戸において通風を目的とする窓・間仕切りの開閉状況を検証することで住まい方の改善点や今後の計画に活かすことを目的とする。

1. 研究概要

本研究では大阪府住宅供給公社所有する一般賃貸住宅の中で、築浅で断熱性能、床暖房、浴室暖房乾燥機、24時間換気を標準装備した片廊下型集合住宅を対象として、①温熱環境と住まい方に関するアンケート調査、②実居住住戸を対象とした生活行動調査、③実居住住戸における温熱環境実測調査を行った。①温熱環境と住まい方に関するアンケート調査では2団地4棟の全住戸を対象に行った。居住者属性は単純集計により傾向を調べ、夏期と冬期では、単純集計やクロス集計、条件別集計による片廊下型と階段室型の傾向の比較をすることによって、温熱環境が住まい方に与える影響を調査する。②実居住者を対象とした生活行動調査では対象とする片廊下型集合住宅において、実際の室の使われ方を確認するため、温熱環境が室の使い方に与える影響を確認するため行っ

た。③実居住住戸における温熱環境実測調査では実際の住戸における温熱環境を把握するため行った。熱中症などの人体への影響やカビや結露の発生といった建物への影響を確認するため温熱環境と共に湿度環境を確認した。比較・整理には2014年度までに調査済み^{文5, 6)}の階段室型集合住宅を対象とする。実測期間は夏期：2015/9/7～2015/9/18に行った。夏期ではあるが、外気温が上がりず中間期に近いものであった。

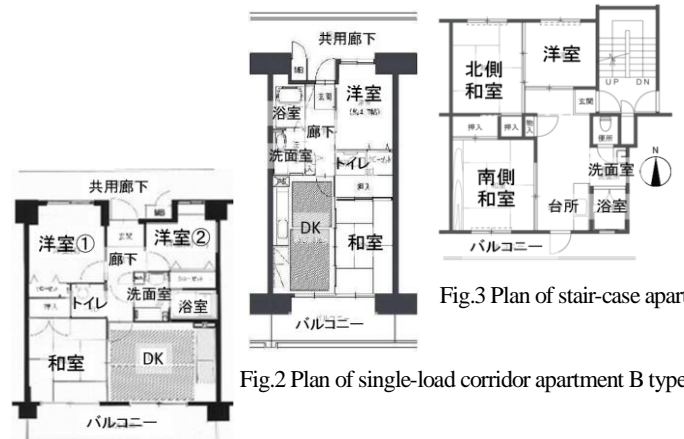


Fig.1 Plan of single-load corridor apartment D type



Fig.2 Plan of single-load corridor apartment B type

Fig.3 Plan of stair-case apartment

Table.1 Outline of the apartment building

	片廊下型集合住宅		階段室型集合住宅
	N	S	
築年数	8年	8年	39年
対象	大阪府T市	大阪府S市	大阪府N市
管理	住宅供給公社		住宅供給公社
専有面積	40.98～67.00㎡	40.86～67.52㎡	49.23～51.19㎡
住戸数	246戸	204戸	380戸
構造	鉄筋12階 他	鉄筋12階建 他	鉄筋5階建
住戸タイプ (室形式)	14タイプ (1DK, 2DK, 3K, 2LDK, 3LDK)	14タイプ (1DK, 2DK, 3K, 3DK, 2LDK, 3LDK)	5タイプ (3DK, LDK)
断熱性能	あり(平成11年省エネ基準)		なし
設備	床暖房(LD)あり 浴室暖房乾燥機あり 24時間換気(第3種機械換気)		床暖房(LD)なし 浴室暖房乾燥機なし 台所のみ換気扇

Table.2 Outline of questions

	総数(片廊下型)	N(T市)	S(S市)	階段室型
配布数	437	204	233	380
回収数	114	51	63	141
有効数	107	48	59	138
回収率	24%	24%	25%	36%
実施期間	2015/7/28~8/12		2013/11/5~11/19	

Table.3 Question list

属性	冬期
同居人数	各部屋の使用状況
年齢・性別・在室時間	使用する理由
夏期	暖房機器の設置
各部屋の使用状況	利用している暖房機器
使用する理由	使用している暖房機器
エアコンの設置箇所	①-床暖房について
各室における温冷感	②-浴室暖乾燥機について
窓・間仕切の開閉状況	各室における温冷感
夏期の問題点	窓・間仕切の開閉状況
問題点への対策	冬期の問題点
梅雨時期の住まいの問題点	問題点への対策
梅雨時期の問題点の解消法	脱衣時での寒さへの対策
熱中症予防対策(冷房・通風)	入浴時での寒さへの対策
電気・ガス使用金額	電気・ガス使用金額

2. アンケート調査結果

2.1 アンケート対象者属性

片廊下型では、同居人数 (Fig.5) は1、2人世帯が約8割になっており、年齢分布 (Fig.4) は60代以上の割合が約2割増えており、階段室型よりも高齢の方が夫婦で住まわれている傾向が強いことが分かった。これは、片廊下型になりエレベーターが導入され、高齢者にとって住まいやすくなったためである。一方で、床面積の狭い住戸には若い夫婦の世帯も見られた。階段室型では、家賃が安いと、若い子育て世代や若年単身世帯が多かった。

2.2 夏期

(1) 夏期の問題点とその対策

夏期の問題点 (Fig.6) に関して、片廊下型は、階段室型よりも問題視している割合が全体的減っており、特に、“調理中の暑さ”という項目は3割減っている。また、夏期の問題点の対策 (Fig.7) に関して、“隙間風”に関する項目の割合が5%程度に減っており、住戸全体の気密性の向上が分かった。

(3) 夏期の熱中症への対策

夏期の熱中症の対策 (Fig.8) に関して、エアコンをつける居住者は片廊下型でも階段室型でも多いが、片廊下型では、窓を開けて風通しを良くする、階段室型では扇風機などを利用するという回答が多くなっている。これは、階段室型では自然換気がしやすいため、扇風機などの利用で大きな効果が得られるためだと考えられる。

2.3 冬期

(1) 冬期の使用暖房機器

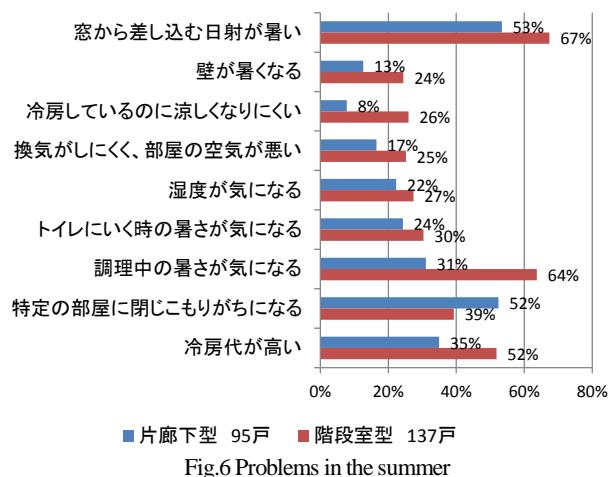
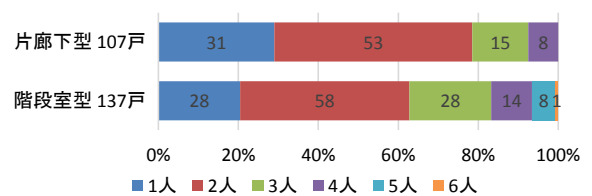
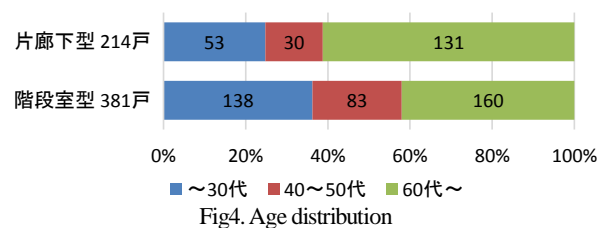
冬期における使用暖房機器 (Fig.9) に関して、片廊下型では、新しく導入されている床暖房と浴室暖房乾燥機の使用割合がそれぞれ71%、54%と非常に高くなって

いる。階段室型では、電気カーペットと電気こたつがそれぞれ53%、46%と高くなっている。片廊下型では、全体的な暖房、階段室型では、局所的な暖房が多くなっているのは、住宅の気密性能の差であると考えられる。

(2) 冬期の問題点とその対策

冬期の問題点 (Fig.10) に関して、片廊下型は、階段室型よりも問題視している項目の割合が平均で3割程度減っている。“隙間風”に関する項目は約6割から1割前後になり、“浴室や洗面室の寒さ”、“トイレに行くときの寒さ”の項目と合わせて、気密性の向上が分かる。一方で、“換気がしにくい”という項目は1%の回答に留まっている。自然換気があまりできないことと、気密性が向上していることに反して、24時間換気の効果が出ている。

階段室型では、“結露”に関する回答が多く、特に、“窓のサッシに結露が発生する”という項目に約9割の回答が得られた。しかし、片廊下型では、結露の問題が改善されていることが分かる。冬期の問題点の対策 (Fig.11) に関して、片廊下型では、解決策の割合が減っており、“特に必要はない”という項目で29%と多くなっている。前述の問題点に対応した対策が求められていることがわかる。また、トイレの寒さは依然として問題であることが分かる。



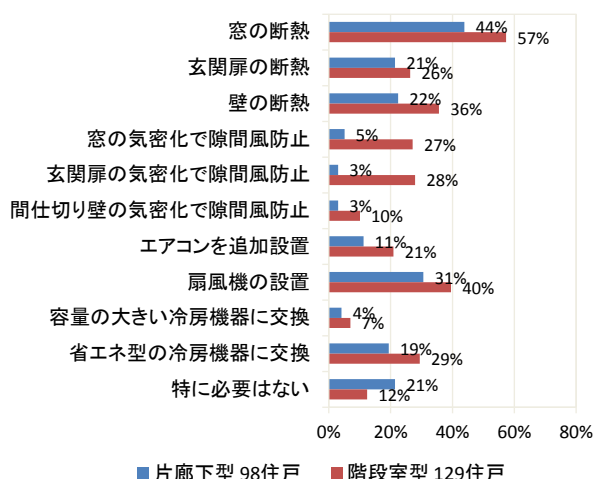


Fig.7 Countermeasure of the problems in the summer

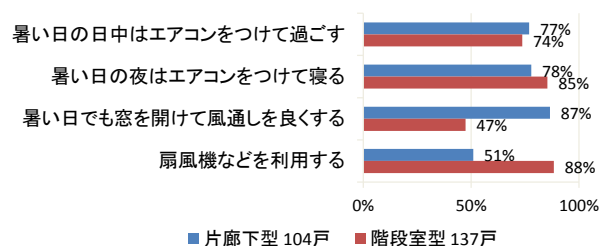


Fig.8 Precaution of Heat stroke

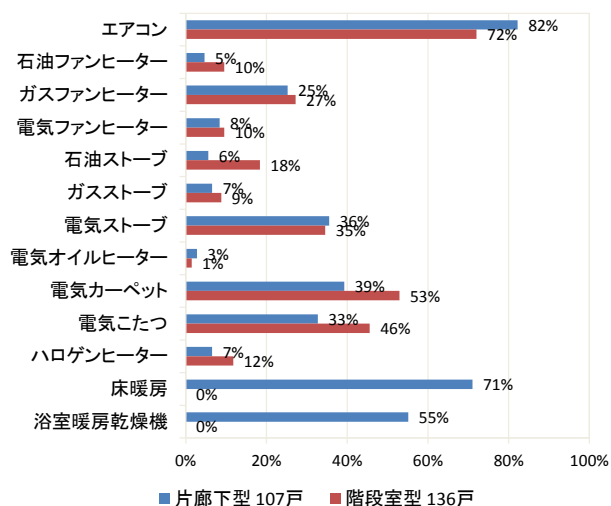


Fig.9 Heating equipment

Table.4 Outline of subjects

		住戸形式	居住階	年齢	性別	居住者	測定日	天気	外気温(℃)	
									最高	最低
I	S	D(3DK)	7F (中層階)	65	男性	2名	9/10	雨のち晴	25.7	21.4
				64	女性		9/11	晴	26.6	18.0
							9/12	晴のち曇	29.0	18.2
II	S	B(2DK)	2F (低層階)	29 29	男性 女性	2名	9/14	晴のち曇	27.8	18.3
							9/15	晴のち曇	29.3	18.3
							9/16	曇時々雨	24.5	22.0
							9/17	雨のち曇	23.9	19.1
							9/18	晴のち曇	27.0	18.7
III	N	D1(3DK)	2F (低層階)	68 59	男性 女性	4名 子供1名	9/8	曇のち雨	23.6	21.7
							9/9	雨のち曇	25.7	20.2
							9/10	雨のち晴	25.7	21.4
IV	N	D'(3DK)	12F (高層階)	64 60	男性 女性	2名	9/7	曇のち雨	26.0	21.6
							9/8	曇のち雨	23.6	21.7
							9/9	雨のち曇	25.7	20.2
							9/10	雨のち晴	25.7	21.4
							9/11	晴	26.6	18.0

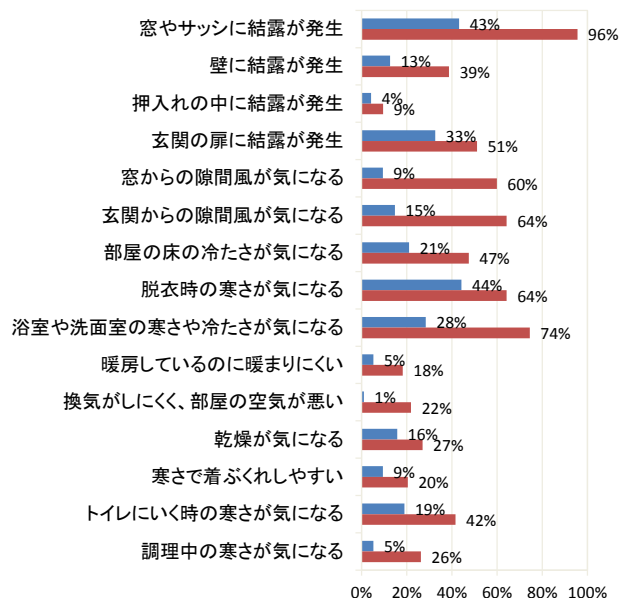


Fig.10 Problems in the winter

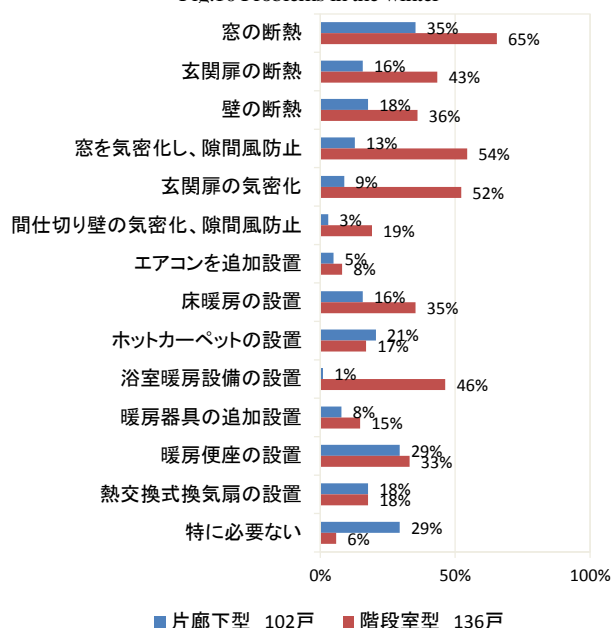


Fig.11 Countermeasure of the problems in the winter

3. 夏期生活行動調査

3.1 タイムダイアリ

本調査は実居住者を対象として行った (Table.4)。最高気温 25.6°C の中間期に近い日のタイムダイアリを Fig.13~15 に示す。低層・中層階の住戸では窓は開けていることが多く、扇風機を使用していた。一方で高層階の住戸では玄関扉と南側居室の窓を開け住戸内で通風を確保していた。階段室型では最高気温 33.4°C の暑熱環境下でも住戸内通風を確保している (Fig.16) ことがみられ階段室型が通風に強い平面計画であることが分かる。

3.2 皮膚温度結果

皮膚温度 (胸、腕、大腿の3点) を計測した。暑熱環境下でなかったため皮膚温度の大きな変動はみられなかった。

4. 夏期温熱環境実測調査

4.1 居室温湿度結果

実住戸において温熱環境実測調査を行った (Fig.12)。起床時の居住者による玄関の扉を開ける行為により共用廊下からバルコニーへ通風経路が確保され、その経路にある玄関・和室・DKの室温が低下している (Fig.17)。また高層階において通風の影響か中層階よりも室温が低く、低層階と同程度となっている (Fig.18)。

4.2 天井面・壁面温度

実居住住戸において天井面、壁面の表面温度の計測を行った。外気温があがらなかったため躯体への蓄熱は不明である。

5. まとめ

アンケート調査では近年建設された片廊下型の公的住宅が戦後建設された既存階段室型の住宅と比べ居住環境が大幅に改善されていることが示された。断熱性能や住戸の気密化がその改善に大きく寄与していると考えられる。そして、気密性の違いにより、夏期における熱中症対策、冬期における使用暖房機器に差が出た。また、冬期において、脱衣時の行為では高齢者は若年世代よりも寒さ対策をしており、新たな暖房機器により対策を取っていることが分かった。一方で、通風・換気の問題に関しては階段室型に比べ設備機器に依存している傾向がみられた。片廊下型においても通風経路の確保によって温熱環境が改善されることから、今後の計画において通風経路を考慮した平面計画が望ましいと考えられる。

謝辞

本誌の作成にあたりご協力いただいた同研究室の辻俊徳君に感謝申し上げます。

参考文献

- 国土交通省, 「持続可能社会における既存共同住宅ストックの再生に向けた勉強会」資料, 2012
- 国土交通省住宅局, 公的賃貸住宅をめぐる現状と課題について, 2006
- 佐野ら, 階段室型公団賃貸住宅における夏場の開口部の開放状況と通風環境に対する居住者の評価, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 2004
- 菅原ら, 夏季の自然通風時における住居平面と住まい方の室内気候への影響に関する調査研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 1995. 2
- 荻野ら, 既存階段室型住宅における温熱環境調査(その4) 冬期の温熱環境に関する改修による効果検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, pp. 73-76, 2014
- 近本ら, 既存階段室型住宅における温熱環境調査(その5) 夏期の実居住世帯調査及び改修による効果検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 205-208, 2014

目的	測定項目	測定方法
室内環境の把握	居室温度	おんどとり
	居室湿度	おんどとり
	カビ	ヒアリング調査
各室の使用状況	天井面・壁面表面温度	サーモクロン
	行動パターンと居場所	タイムダイアリ
生理量調査	心拍数	時計型心拍計
	皮膚温度	サーモクロン
凡例	機器名称	設置高さ(mm)
●	おんどとり	1000
■	サーモクロン壁面貼り付け	1000
▲	サーモクロン天井面貼り付け	天井面

Fig.12 Measuring Instrument

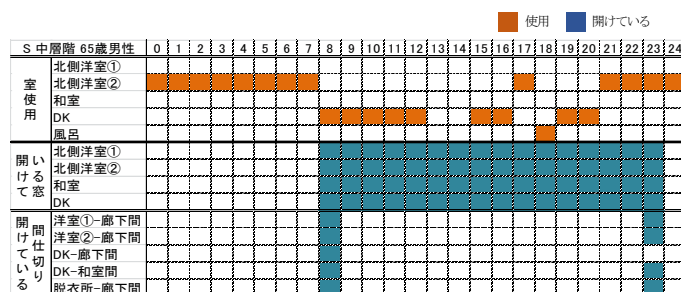
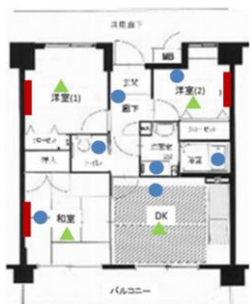


Fig.13 Time diary (subject I Middle floor 9/10)

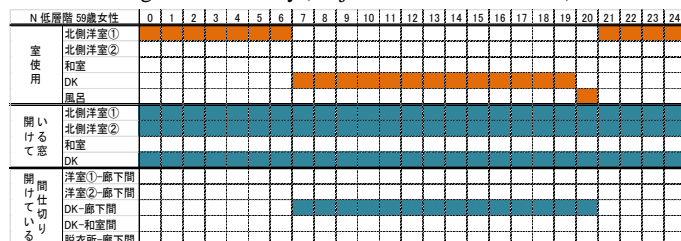


Fig.14 Time diary (subject III Lower floor 9/10)

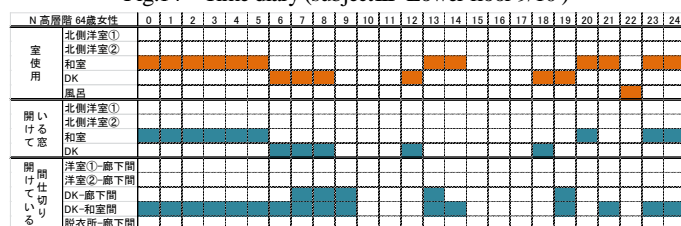


Fig.15 Time diary (subject IV High floor 9/10)

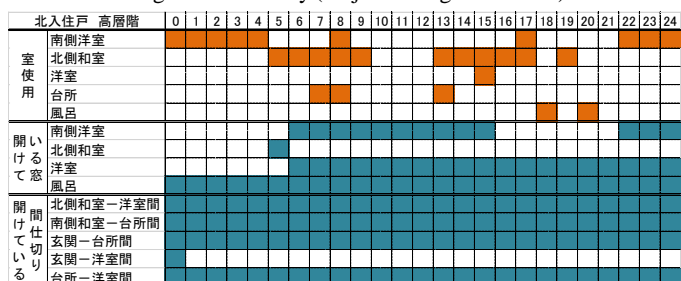


Fig.16 Time diary (Stair-case High floor 2014/8/18)

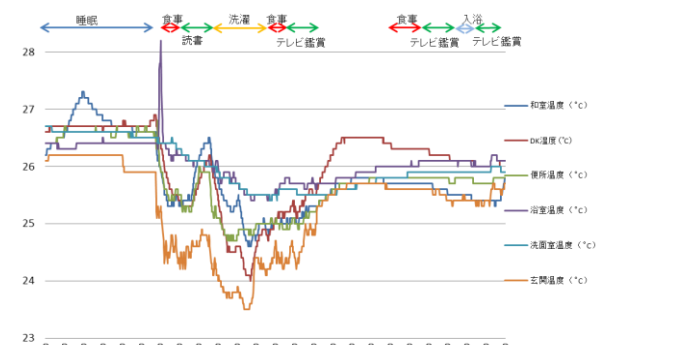


Fig.17 Temperature (subject IV High floor 9/10)

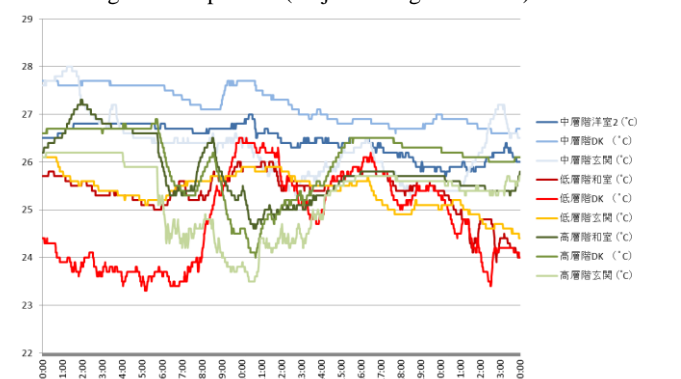


Fig.18 Temperature (Lower, Middle, Higher floors 9/10)

トラクタの車室環境改善に向けた実大実験及び人体モデルによる検証 Analysis of the Human Physiological Condition and Thermal Environment in the Tractor Cabin and Effective Cooling Method toward Comfort and Energy Saving

○織田浩平（立命館大学） 近本智行（立命館大学） 李明香（立命館大学）

Kohei ODA*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Myonghyang LEE*¹

*¹ Ritsumeikan University

The target of this study is the internal of environment temperature at the Tractor. Temperature inside a cabin is very high, because it is surrounded by many windows and receive solar heat directly. Thus, a cooling device in the Tractor is introduced to make a comfortable cabin environment for the operator. Therefore, the goal of this study is to propose an energy saving cooling method for a comfortable cabin environment. Towards it, this study verified how thermal environment in the cabin effects on a human.

はじめに

近年、自動車や電車の車室内の温熱環境は様々な研究によって明らかにされてきた^{文1) 文2)}が、トラクタの車室内に關しての研究はほとんどない。Fig.1に車室の暑熱環境要因を示す。トラクタの車室は4面と足元が農作業の作業性と安全性のためにガラスで覆われているので、日射の影響を受けやすい。また、低速で走行し、風速の影響をほとんど受けなため、躯体に蓄積される日射熱が除去されにくい特徴がある。そしてさらに、人体側の暑熱要因も考えられる。農作業の安全性のため長袖長ズボンの作業服を着用する場合は着衣量が上がる。また、運転操作が複雑で、凹凸の多い農地を走り振動が多いため、代謝量が高くなる傾向がある。したがって、運転手が快適に作業でき、かつ熱中症などの事故を起こさないようにするために、車室密閉型のトラクタでは、省エネルギー性を無視して冷房を行っている。

そこで本研究では、省エネかつ快適な冷却、遮熱手法の提案を前提に、トラクタの車室内で人体が受ける熱的影響を明らかにすることを目的とする。

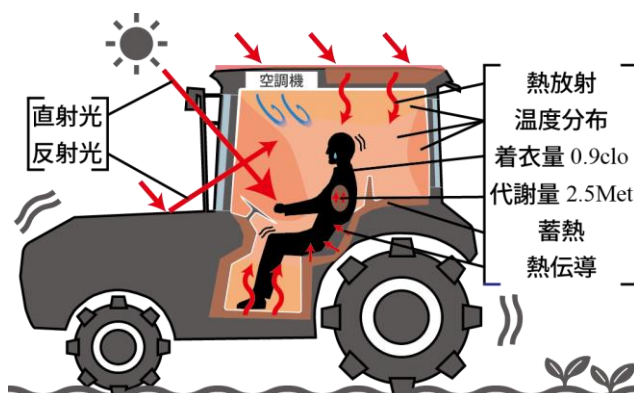


Fig.1 High Temperature Factor

1. 夏期実測及び車室環境と人体生理量

1.1 研究概要

Fig.2に研究概要を示す。本研究は車室環境とその環境に曝露された人体の生理量を解析対象とする。解析には、熱環境・熱負荷解析ソフト (THERB for HAM) ^{文3)}と人体熱モデル (COM) ^{文4)}を使用した。

まず、夏期車室環境の現状把握を行うために実測を行う。そして、実測では行えなかった外皮性能を変更した場合の車室環境を検証するために、車室モデルを作成し、車室環境解析を行った。次に、暑熱環境に曝露された人体の状態を検証するために、人体熱モデルを使用する。境界条件に車室環境解析で求めた空気温度、放射温度、日射の等価温度^{注1)}などの計算値を設定する。そして、部位別の気流や座席からの直接冷却などの局部冷却や代謝量が人体に及ぼす影響を解析する。

研究概要

1. 実測による暑熱環境把握と車室モデルによる環境解析
2. 人体モデルによる車室環境が人体に及ぼす影響の解析
3. 局部冷却時の人体生理量解析

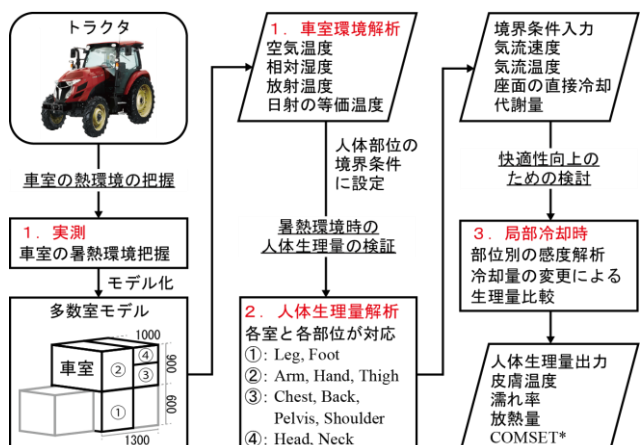


Fig.2 Research Outline

1.2 実測及び解析対象

実測は滋賀県米原市に位置する Y 社敷地内の温室で行われた。空調機と人工照明により夏期暑熱環境を再現 (Fig.3) することができる。Fig.4 に 2015 年 9 月 15 日の実測結果を示す。外気温が約 40℃であるのに対して、車室空気温度は 60℃近くまで上昇している。



Fig.3 Survey Picture

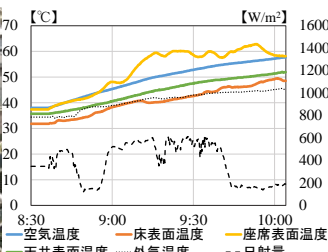


Fig.4 Survey Result

1.3 車室モデルの概要

車室環境改善に向けた外皮性能検討のため車室モデルを作成した。本モデルは多数室モデル (Fig.2, 6 参照) であるため、室ごとに空気温度、相対湿度、放射温度、透過日射量、SET*などを算出することができる。車室の温度分布を再現できるため、人体モデルへの境界条件を詳細に算出できる。境界条件には外気温度、湿度、風向・風速、日射量を入力する。

1.4 車室モデルの精度検証

Table1 Cabin Structure Material

要素	材料	厚み mm	要素	材料	厚み mm
外壁	硬質不織布材	2	座面	ポリウレタンスポンジ	50
	空気層	10		SPCC 冷間圧延鋼板	2
	SPCC 冷間圧延鋼板	2	屋根	硬質不織布材	2
内壁	SPCC 冷間圧延鋼板	20		空気層	20
	スポンジシート	20		硬質ウレタン	100
床	EPDMゴム	5		SPCC 冷間圧延鋼板	2
	SPCC 冷間圧延鋼板	2	窓	遮熱フィルム	-
				単板ガラス	3

本モデルの精度を確認するために、2016 年 1 月 9 日の温室内実測の気象データを入力条件とし、自然状態の車室温度を計算した。Fig.5 に精度検証の結果を示す。室番号の③を中央、④を上部と表記する。Table1 に車室の躯体構成を示す。実測データと比較し、車室空気温度の温度誤差が 0.6℃以内で、温度変化の傾向も概ね一致していたため、本モデルの精度が確認された。

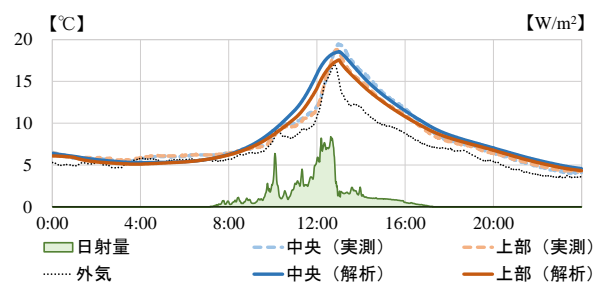


Fig.5 Air Temperature, Accuracy Verification (winter)

1.5 人体熱モデルの概要

人体熱数値計算モデル COM を使用して人体生理量を算出した。COM は詳細な四肢血流モデルを含み、人体を Core 層と Skin 層からなる 17 の部位に分割しモデル化している^{文4)}。Fig.6 に車室と人体モデルの関係を示す。室番号と部位が対応しているため、室ごとで得られる環境データを部位別に境界条件に設定できる。

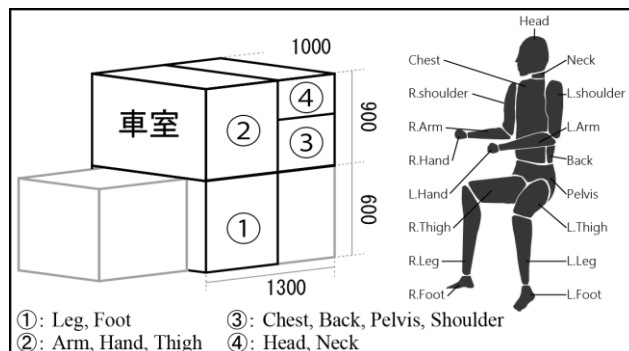


Fig.6 Relation of Cabin and Human Model

1.6 車室と人体熱モデルの連成解析

Table2 に外皮性能の検討の解析ケースを示す。CaseA を基準ケースとし、窓は単板ガラスで屋根断熱無し、外装には赤色塗装を想定した。通常の単板ガラスの日射吸収率、反射率は垂直入射の場合 0.06, 0.08 と設定している^{文5)}。CaseA から窓と屋根の仕様を変更した場合の車室環境について比較する。同じ空気温度の条件で日射の影響を検証するため、空調は日中 28℃設定にし、放射温度、透過日射量、顕熱負荷を比較した。Fig.7-9 に車室環境解析結果を示す。窓の日射吸収率と反射率を高くした CaseB, C は、透過日射量は減少するが、窓に吸熱されるため放射温度が上昇する。屋根面に硬質ウレタンフォーム断熱材を 40mm 挿入した CaseD は日射熱が断熱材によって抑えられ、放射温度が緩和される。また、空調時の顕熱負荷も削減される。塗装や外皮仕様の変更を想定し、外表面の日射吸収率と長波長放射率を低くした CaseE は、日射熱が躯体に蓄熱しにくくなるので放射温度が緩和される。

Table2 Compare to Exterior Material

Case	窓の成分		屋根		
	日射吸収率	日射反射率	断熱材	遮熱(外表面)	
			ウレタン mm	日射吸収率	長波長放射率
A	-	-	-	-	-
B	0.23	0.07	-	0.7	0.9
C	0.21	0.25	-	-	-
D	-	-	40	-	-
E	-	-	-	0.4	0.5

次に車室環境解析で得られた空気温度、放射温度、相対湿度、日射の等価温度の環境データを境界条件に人体生理量を算出する。Fig.10-12 に人体生理量解析結果を示す。皮膚温度は放射温度と透過日射量の影響を大きく受ける。Fig.7, 8 より、CaseB, C は他のケースに比べ、放射温度が大きい透過日射量が低い。ぬれ率は透過日射量が低いと低下する傾向がみられる。

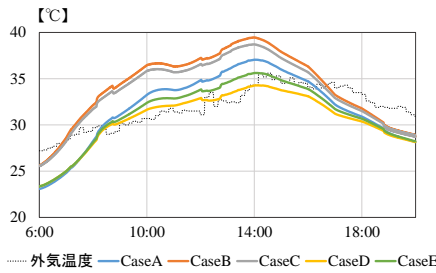


Fig.7 Radiation Temperature

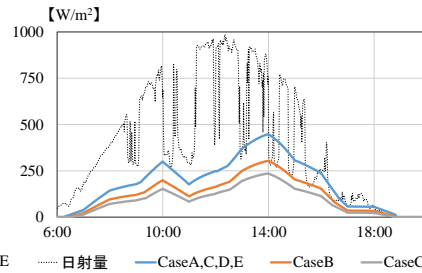


Fig.8 Permeation Solar

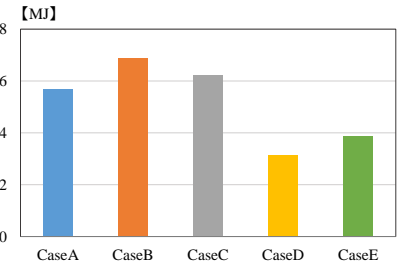


Fig.9 Sensible Heat load

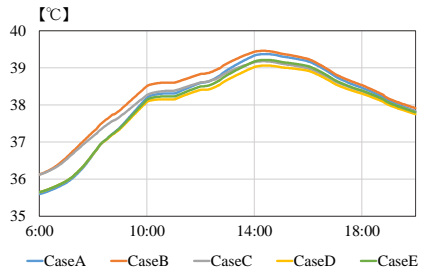


Fig.10 Skin Average Temperature

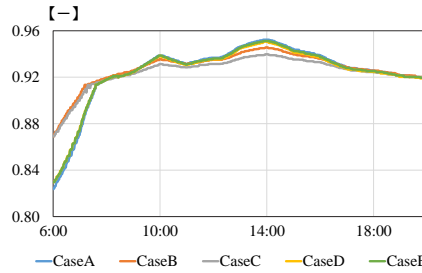


Fig.11 Sweat Percentage

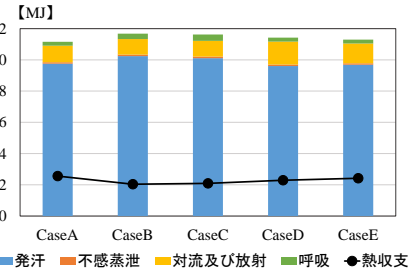


Fig.12 Radiation of Heat

2. 局部冷却による人体生理量解析

2.1 解析条件

車室の外皮性能を変更しただけでは、人体の生理量の変化は小さい。そのため、人体を局部冷却した場合について検討する。Table3 に解析ケースを示す。自然状態を想定した初期条件から空調を想定しステップ変化 (Case0) させ、さらに局部冷却 (気流速度・温度、座席冷却) (Case1, 2, 4) と代謝量の変更 (Case3) を行った場合の解析を行う。初期条件は実測データから基準値を設定した。Case1, 2, 4 は Case0 の実験条件に気流と座席の影響を追加したケー

スである。Case3 は Case0 の代謝量を初期条件から変更したケースである。

2.2 解析結果と考察

(1) 皮膚温度

Fig.13, Fig.14 に、各 Case の平均皮膚温の変動を示す。グラフの凡例の意味は、例えば、1_Head とは Case1 で Head に気流を当てたケースである。平均皮膚温度は局部に気流を与えた場合 (Case1) より、座面から直接人体を冷却した場合 (Case2) の方が低下している。また、Case2 より -10W 冷却量を増加させた場合 (Case4) では、Case3 の場合より皮膚温度が低下し、人体の冷却面積の影響も大きい。Fig.15, Fig.16 に冷却部位の皮膚温度を示す。特に Hand の皮膚温低下が著しいが、これは Hand には着衣がなく熱容量^{注2)} が小さいためであると考えられる。

(2) めれ率および発汗熱損失

Fig.17-19 に全身の平均めれ率、Fig.20-22 に発汗による熱損失量を示す。めれ率が小さくなるに伴い発汗による熱損失量も少なくなる。めれ率と放熱量は、座席冷却の場合 (Case2, Case4) に低くなり、気流による冷却の場合 (Case1) に上昇している。これは、対流による潜熱損失は増えるが、座席冷却による皮膚温度低下がめれ率や放熱量に影響したためだと考えられる。

(3) 顕熱・潜熱放熱量

Fig.23, Fig.24 に人体全体からの顕熱・潜熱放熱量を示す。ほとんどが発汗による放熱量であり、車室内が暑いことがわかる。着衣のない部位に気流を当てた場合で放熱量が減少している。これは、平均皮膚温度が低下しているため、熱放散の駆動力が小さくなったためであると考えられる。全身の熱収支 (産熱量-放熱量) は、座席冷却した場合 (Case2, Case4) と着衣がない部位への気流を当てた場合 (Case1_Hand) に少なくなり、人体を冷却している。

Table3 Cooling a Part of Human, Analysis Cases

Case	境界条件		単位	初期条件	実験条件
0	曝露時間		min	10	30
	平均放射温度		℃	45.0	34.5
	日射の等価温度		℃	2.7 *1	
	空気温度		℃	40.0	28.0
	相対湿度		%	35.0	
	気流	風速	m/s	0.5	2.0
	の影響	部位	-	全身	
	人体	着衣量	clo	0.9	
1	の影響	代謝量	Met	2.5 *2	
	気流 の影響	吹出し温度	℃	-	16.0
		風速	m/s		3.0
部位		-	各部位*3		
2	座席面	座席面除去熱量	W	-	-30.0
	の影響	部位	-		各部位*4
3	人体 の影響	代謝量	Met	2.0 *5	
				1.5 *6	
4	気流 温度 の影響	吹出し温度	℃	-	14.0
		風速	m/s		3.0
		部位	-		Chest Hand
	座席面 冷却 の影響	座席面除去熱量	W	-	-40.0
		部位	-		Back Thigh

*1 日射量: 170[W/m²] 衣服の日射吸収率: 0.36で計算

*2 農作業機・建設作業機の運転を想定

*3 Back, Pelvis, Thighは除く

*4 Back, Pelvis, Thighのみ

*5 軽いベンチワークを想定

*6 自動車の運転を想定

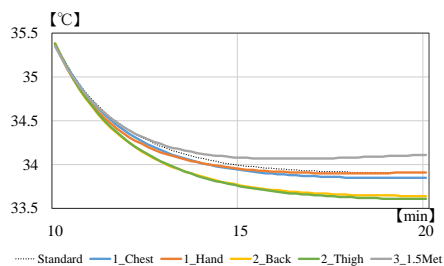


Fig.13 Skin Average Temperature (Case0-3)

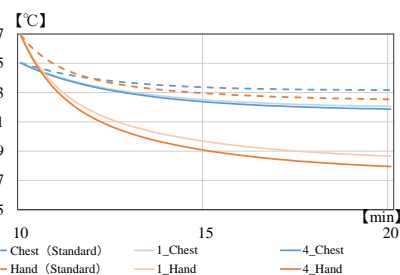


Fig.15 Skin Temperature Hand, Chest (Case0, 1, 4)

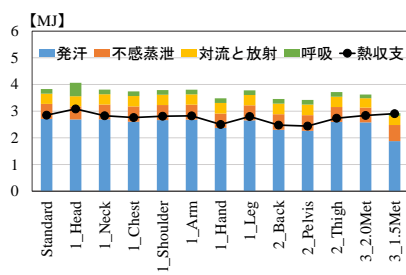


Fig.23 Radiation of Heat (Case0-3)

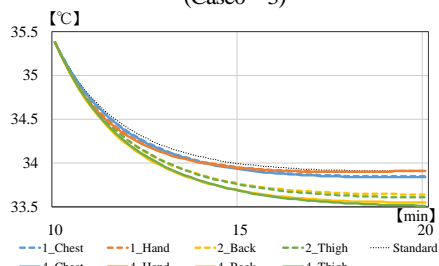


Fig.14 Skin Average Temperature (Case1, 2, 4)

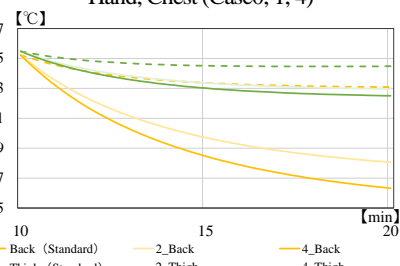


Fig.16 Skin Temperature Back, Thigh (Case0, 2, 4)

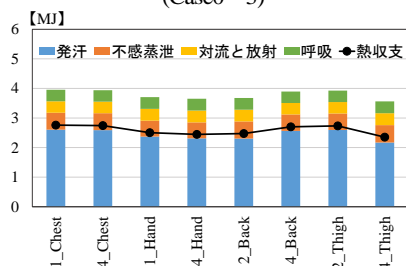


Fig.24 Radiation of Heat (Case1, 2, 4)

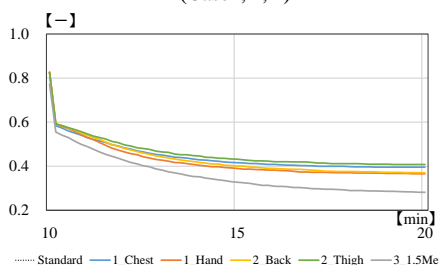


Fig.17 Sweat Percentage (Case0-3)

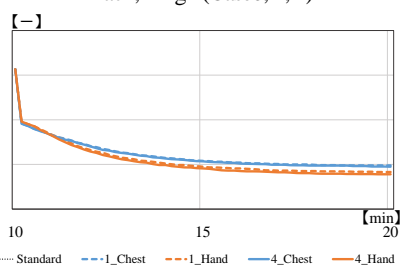


Fig.18 Sweat Percentage (Case0, 1, 4)

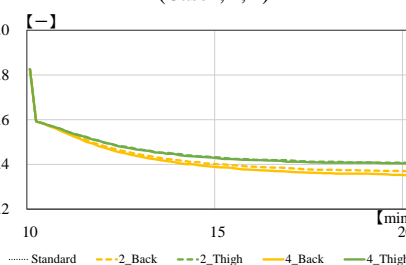


Fig.19 Sweat Percentage (Case0, 2, 4)

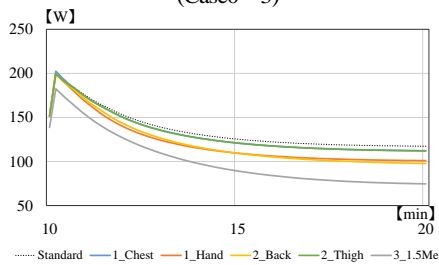


Fig.20 Radiation of Heat by Sweat (Case0-3)

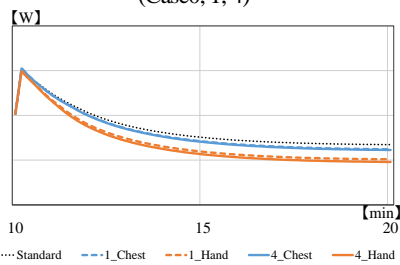


Fig.21 Radiation of Heat by Sweat (Case0, 1, 4)

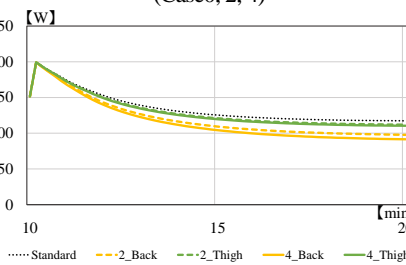


Fig.22 Radiation of Heat by Sweat (Case0, 2, 4)

4. まとめ

- 1) トラクタ車室の実測及び環境解析, 運転者の生理状態と局部冷却による人体生理量の変化を求めた。
- 2) 日射の影響を強く受けるので躯体の日射吸収率, 長波長放射率を下げることや, 屋根に断熱材を使用すると放射温度は緩和される。
- 3) 人体の冷却方法に関しては, 気流による冷却よりも座面からの直接冷却の方が皮膚温度を下げるのに効果的であった。
- 4) 今後の課題として, 冷却方法については気流を当てる角度, 強さ, 温度などを詳細に検討していく必要がある。また, 本研究は生理量解析で, 計算にすぎないため, 人体の快適性については明確ではない。そのため, 被験者実験で官能評価を行う必要がある。

注釈

- 注1) 日射のあたる方位[East, West, South]を考慮する
Head [E, W, S] Neck [E, W, S] Chest [E, S] Back [W] Pelvis [-]
L. Shoulder [E, W] R. Shoulder [E, W, S] L. R. Arm[E, S] L. R. Hand [E, S] L. R. Thigh [E, S] L. Leg [E] R. Leg [E, S] L. Foot [E] R. Foot [E, S]
- 注2) Skin 層の熱容量[kJ/K]: Hand 0.356, Chest 1.588, Back 1.462, Pelvis 2.002

参考文献

- 文1) 田辺新一ほか: 人間—熱環境シミュレータ (その 53) 夏季冷房条件の車室内における熱的快適性, 日本建築学会学術梗概集 (近畿), 2014 年 9 月
- 文2) 坂脇理絵ほか: 夏期における電車内の温熱環境とその制御法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 2000 年 9 月
- 文3) 尾崎明仁ほか: Simulation Software to Describe the Hygrothermal Environment of Whole Buildings Based on detailed Physical Simulation in Buildings, P03 (24 Pages), 2006
- 文4) 田辺新一ほか: 温熱環境評価のための人体熱数値計算モデル COM の開発, 日本建築学会環境系論文集 第 599 号, 31-38, 2006 年 1 月
- 文5) 田中俊六ほか: 最新建築環境工学 (改訂 4 版), p106

高床式砂栽培農法のビニルハウスにおける効率的な温度調節手法の研究

—夏期におけるミスト冷却効果に関する実験的検討—

Research on efficient temperature moderation method for the farming of high-floored sand bed in plastic greenhouse - An experimental study on the mist cooling in summer -

○木村 駿介（大阪市立大学）

鍋島 美奈子（大阪市立大学）

西岡 真稔（大阪市立大学）

笠島 佳明（大阪市立大学）

岡本 治（株式会社茂広組）

大橋 良之（東レ建設株式会社）

Shunsuke KIMURA^{*1} Minako NABESHIMA^{*1} Masatoshi NISHIOKA^{*1}

Yoshiaki KASASHIMA^{*1} Osamu OKAMOTO Yoshiyuki Oohashi^{*2}

^{*1} Osaka city University ^{*2} TORAY Construction Co., Ltd. ^{*3} SHIGEHIOGUMI Co.Ltd

This mist cooling experiment has been conducted at the plastic house in Sijounawate City Osaka where the farming of high-floored sand bed is used in order to improve the growing and working environment in summer. The mist is sprayed above the solar shielding net installed in the greenhouse and cools air in green house by the evaporation heat. Changes in temperature and humidity are measured and the water balance are confirmed.

はじめに

農業従事者の高齢化による人数の減少等が原因で日本の食糧自給率は減少傾向にある。それらを解決する為に生産性や作業性に優れた高床式砂栽培農業が注目されている。課題として作物を育てる砂ベッドの厚さが薄く、砂層の熱容量が小さい為、ビニルハウス(以下、ハウスと省略)内の気温の影響を受けやすいという点がある。その為、一般的な暖房方式である温風暖房を想定した冬の寒冷地対策としてハウスの天井高を低くして、体積を小さくする方法がある。

しかし、夏期にはハウス内の空気温度は 40℃を超え、作物の生育限界を超えている。また、農業従事者の労働環境としても危険な環境にある。さらに天井に近いほど温度が高くなるため、ハウスの天井を下げるとより高い温度の空気が作物や農業従事者に接近し、環境が悪化する。そのためハウスの体積を減少させるには夏期の暑熱対策を行う必要がある。夏期の暑熱対策にはヒートポンプを用いた冷風冷房やファンやパッドを用いた方式があるが導入コストなどの問題があり採用しにくい。

そこで本研究では作業性や経済性を考慮し、ミスト噴霧による気化熱を用いた冷却方法を採用する。冷却方式として日射遮蔽ネットに向けてミストを噴霧し、そこから気化する熱量でハウス内の空気を冷却する。水道圧ミストとポンプ式ミストの2種類のミストを用いてミスト噴霧時からのハウス内空気、砂ベッド、日射遮蔽ネットの温度、湿度などの測定を行い、冷却効果を把握、比較する。さらにそれぞれの水収支を計算し冷却効果の確認も行う。

1. ビニルハウスの熱収支の把握

1.1 実測概要

大阪府四条畷市下田原農場のハウス空気の冷却効果を把握する為ハウス内の砂ベッド、日射遮蔽ネットに測器を設置した。なお日射遮蔽ネットの一部には上から保水シートを設置した。測器の設置位置を Figure 1、Figure 2 に示す。ミストは水道圧で噴霧するミストの粒径の大きい(100 μm)のタイプとポンプにより水压を高め、粒径を小さくして噴霧する(28 μm)タイプの2種類を用いて実験を行った。ミストの噴霧装置はハウス内の一部に Figure 2 のように水道圧ミストを噴霧する区画とベッドとポンプ式ミストを噴霧する区画を設けたが、それぞれの区画に物理的な仕切りはない。

空気温度センサーはミストが直接かからないようにした。水道圧式ミストは 30 秒、ポンプ式ミストは 120 秒ミストを噴霧してから一時間半後までの実測を行った。測定項目を Table 1 に示す。また実験条件を Figure 3 に示す。実験は片側ずつ行い一方の実験を行っている間はもう一方のベッド及びその上部の空気、日射遮蔽ネットの熱環境はミストを噴霧しない時の熱環境と考え対照実験として扱う。測定値からミストを噴霧した側と噴霧していない側での温度差を算出し、またミストを噴霧した時刻の温度差を 0℃として温度差の推移について調べた。この時再び温度差が 0℃になるまでの時間をミストの冷却効果の持続時間とした。ミストの冷却効果の持続時間内の最大温度差の絶対値を最大冷却温度とした。これらを用いてそれぞれのミストの冷約効果について検討、比較した。

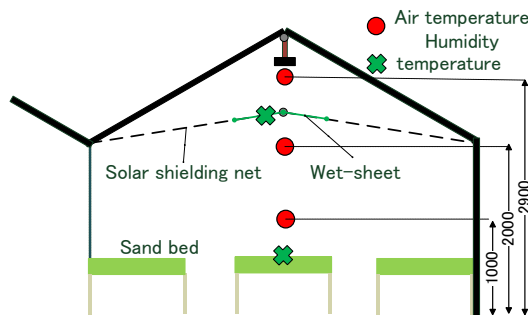


Figure 1 Installation position of the measuring instrument
(Longitudinal section)(mm)

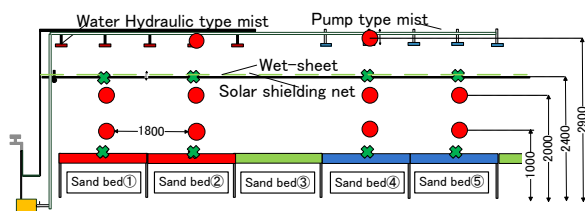


Figure 2 Installation position of the measuring instrument(Cross-section) (mm)

Table 1 Measurement item

In greenhouse	Sand bed	Solar shielding net
Air temperature	Soil temperature	Solar shielding net temperature
Humidity		
Solar Radiation		

Mist type	Water Hydraulic type mist				pump type mist		
Name	S I	SIII	SIV	SVI	P I	P II	P III
Day	10/15	10/21	10/22	10/27	10/8		
Weather	Sunny	Sunny	Cloudy	Sunny	Sunny		
Spray start time	14:04:30	12:59:00	10:44:30	12:55:30	11:23:00	13:42:00	14:25:00
temperature (air on Solar shielding net)(°C)	44.1	45.1	34.0	42.0	39.0	48.0	29.9
Humidity (air on Solar shielding net) (%)	0.2	16.0	53.0	25.0	0.4	0.2	0.5
Dry-wet-bulb temperature difference (air on Solar shielding temperature (air under Solar shielding	21.3	21.3	8.1	17.0	11.9	22.5	7.8
Humidity (air under Solar shielding net)	29.3	28.9	22.2	29.6	27.1	32.9	26.0
Dry-wet-bulb temperature difference (air under Solar	42	37	69	48	50	30	70
	9.4	10.3	3.9	8.3	6.9	9.4	4.6

Figure 3 Experimental condition

1.2 結果と考察

水道式ミストの噴霧実験についてミスト噴霧開始時刻の対照区画との温度差を 0℃とした温度差の推移を Figure 4 に示す。なお今回は代表実験として SIII を挙げた。SIII の実験では噴霧開始時刻(12 時 59 分 00 秒)後に再び温度差が 0℃になったのが日射遮蔽ネット上部空気では 13 時 54 分 00 秒、日射遮蔽ネット下部空気では 13 時 10 分 00 秒だった。よってミストの冷却効果の持続時間はそれぞれ 55 分、13 分とした。また、冷却効果の持続時間内の温度差の最小は日射遮蔽ネットより上部空気では -5.1℃(13 時 01 分 50 秒)、日射遮蔽ネットより下部空気では -0.7℃(13 時 04 分 50 秒) だった。よって最大冷却温度をそれぞれ 5.1℃、0.7℃とした。日射遮蔽ネット上部の空気と下部の空気について比較すると日射遮蔽ネット上部空気の方が冷却温度が大きいことが分かる。また冷却効果の持続時

間も上部空気の方が長いことも分かる。

ポンプ式ミストの噴霧実験のミスト噴霧時刻の温度差を 0℃とした温度差の推移を Figure 5 に示す。なお今回は代表実験として P I を挙げた P I の実験では噴霧開始時刻(11 時 23 分 00 秒)後に再び温度差が 0℃になったのが日射遮蔽ネットより上部空気では 11 時 27 分 30 秒、日射遮蔽ネットより下部空気では 11 時 39 分 50 秒であった。よって冷却効果の持続時間はそれぞれ 4 分 30 秒、13 分 50 秒とした。また、冷却効果の持続時間内の温度差の最小は日射遮蔽ネットより上部空気では -0.4℃(11 時 31 分 20 秒)、日射遮蔽ネットより下部の空気では -0.4℃(11 時 24 分 30 秒) だった。よって最大冷却温度はどちらも 0.4℃とした。日射遮蔽ネット上部の空気と下部の空気について比較すると最大冷却温度にほとんど違いは無いが冷却効果の持続時間は下部空気の方が長かった。

各ミストの噴霧量辺りの冷却効果の持続時間の関係と噴霧量辺りの最大冷却温度の関係を Figure 7 に示す。Figure 6 を見ると、地面から日射ネットより上部の空気ではポンプ式ミストより水道圧式ミストの方が冷却効果の持続時間が長かった。また Figure 7 よりそれぞれの日射ネットより上部の空気の噴霧量あたりの最大冷却温度を比べるとポンプ式ミストより水道圧式ミストの方が最大冷却温度が高かった。これは水道圧式ミストの方がミストの粒径が大きいため、日射遮蔽ネットに付着する量が多くなりその結果ポンプ式ミストの場合より日射遮蔽ネットより上部の空気が冷却されるためと考えられる。またどちらにおいても乾湿球温度差が高いほど持続時間は長くなった。

逆に日射ネットより下部の空気の噴霧時間当たりの冷却効果の持続時間を比べると水道圧式ミストよりポンプ式ミストの方が冷却効果の持続時間が長かった。さらに、日射ネットより下部の空気の噴霧時間当たりの最大冷却温度を比べると水道圧式ミストよりもポンプ式ミストの方が最大冷却温度が高かった。これはポンプ式ミストの方がミストの粒径が小さい為、日射遮蔽ネットを透過する量が多く水道圧式ミストの場合より日射遮蔽ネット下部の空気を冷却される為と考えた。またどちらにおいても乾湿球温度差が高いほど最大冷却温度は高くなった。

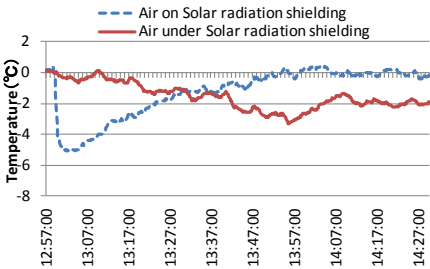


Figure 4 Temperature difference(Water Hydraulic type mist)

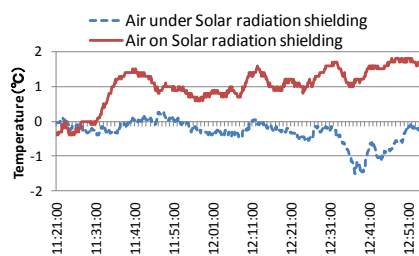


Figure 5 Temperature difference

(Pump type mist)

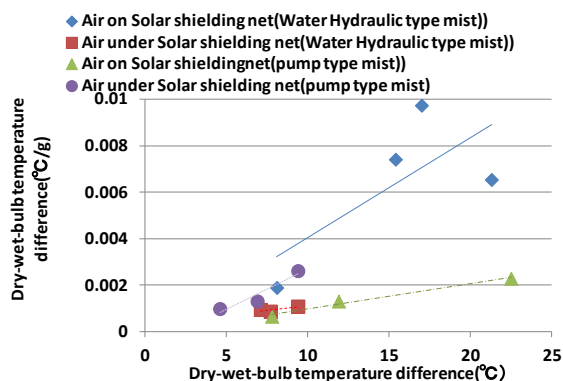


Figure 6 Relationship of duration cooling effect of per dry wet-bulb temperature difference and the amount sprayed

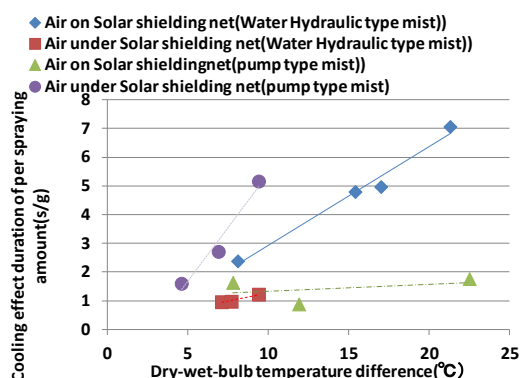


Figure 7 Maximum relationship of cooling temperature per dry wet-bulb temperature difference and the amount sprayed

2 ビニルハウスの水収支

噴霧したミストの気化熱の用途を検討する為にハウスの水収支を考える。本研究では簡易モデルとして考える為、ミスト噴霧を行った空間のみで水収支を考える事とする。水収支を考える空間を Figure 8、Figure 9 に示す。

噴霧ミストの水収支を Formula 1 に空間内空気の水収支を Formula 2 で、日射遮蔽ネットの水収支を Formula 3 として表現する。Formula 1 では $W_{L,out}$ を未知数として算出した。またミストが空間内の空気中で気化する量を Formula 4 に示す。さらに日射ネットから気化する水の量を拡散速度の式を用いて Formula 9 で表した。なお、Formula 9 の拡散係数については実測で求めた値を用いた。Figure 11、Figure 12 より噴霧ミストの内訳を比べると両方とも半分以上のミストが日射遮蔽カーテンに付着

($W_{n,keep}$) している。これにより、日射遮蔽ネットに付着したミストが気化することによって日射遮蔽ネット上部の空気の方が冷却されることが考えられる。日射遮蔽ネットを透過した水の量 ($W_{n,th}$) の量を二つのミスト方式で比較するとポンプ式ミストの方が多いことが分かる。これはポンプ式ミストの方がミストの粒径が小さいことが起因していると考えられる。また、同様の理由でミストが日射遮蔽ネット上部の空気中で気化した量 ($W_{air,in}$) もポンプ式の方が多い事も分かる。

以上のことから本実験の日射遮蔽ネットとミストの設置位置でミストを噴霧すると日射遮蔽ネットの上部の空気を冷却することに対しては有用であるが日射遮蔽ネットの下部の空気を冷却することに対してはほとんど効果が無かった。よって作物の高さの空気を冷却するにはミストノズルと日射遮蔽ネットの間隔をできるだけ離して空気中で蒸発する量を増やすか、日射遮蔽ネットをミストノズルの上部に設置するのが望ましい。もし、現状の状態でミストを噴霧するのであれば空気を循環させるなどして日射遮蔽ネットに付着した水を迅速に気化させる工夫が必要である。

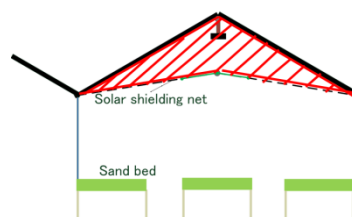


Figure 8 Calculation area (Longitudinal section)

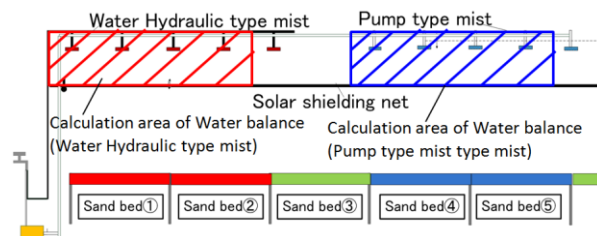


Figure 9 Calculation area (Cross-section)

3 まとめ

研究の成果

- ミスト噴霧実験より乾湿球温度差が高いほど冷却効果も上昇することが分かった。また水道圧式ミストとポンプ式ミストの冷却効果を比較することで日射遮蔽ネットより上部の空気を冷却するには水道圧式ミストの方が、日射遮蔽ネットより下部の空気を冷却するにはポンプ式ミストの方が有用であることが分かった。
- ミストの水収支より噴霧された水の用途を明らかにし、日射遮蔽ネットに保水される水の量が最も多いことを明らかにした。このことからミストを噴霧する場合の日射遮蔽ネットとミストノズルの位置関係について考察した。

研究の課題

- ・→噴霧時間を変えたミストの冷却実験を行い適切なミストの噴霧時間を模索することが必要である。
- ・→ミストの噴霧実験をビニルハウス内の一区画で行った為に水収支、熱収支の計算領域が半閉鎖的空間となり計算に支障が生じた。特に噴霧されたミストが計算領域の外で気化した量については不明であり正確な気化熱は算出できていない状態である。さらに正確な水収支、熱収支を考えるためにはハウス全体でミスト噴霧実験を行い計算領域を閉鎖的空間にする必要がある。

$$W_{m_out} = W_{n_keep} + W_{air_in} - W_{i_out} + W_{n_th} \quad \text{Formula 1}$$

$$\Delta W_{air} = W_{air_in} + W_{n_out} + W_{o_in} - W_{o_out} \quad \text{Formula 2}$$

$$\Delta W_n = W_{n_keep} - W_{n_out} \quad \text{Formula 3}$$

$$W_{air_in} = 3.95 \times 10^{-5} \frac{\Delta T_{WB}^{0.5} \times z^{0.7}}{d^{0.8} \times W_{m_out}} \quad \text{Formula 4}^{1)}$$

$$W_{o_in} = Q_1 \times \gamma \times W_o + Q_2 \times \gamma \times W_{i1_s} \quad \text{Formula 5}$$

$$W_{o_out} = (Q_1 + Q_2) \times \gamma \times W_{i1} \quad \text{Formula 6}$$

$$Q_1 = \frac{H}{\gamma \times C_p \times (t_{i1} - t_o)} \quad \text{Formula 7}$$

$$H = h_v(t_{i1} - t_o) \quad \text{Formula 8}$$

$$W_{n_out} = N_A \times M_w \times A_w \quad \text{Formula 9}$$

$$N_A = D_{AB} \times \frac{(C_s - C_\infty)}{\delta} \quad \text{Formula 10}$$

$$\Delta W_{air} = (W_{air_e} - W_{air_s}) \times \gamma \times V \quad \text{Formula 11}$$

$$\Delta W_n = W_{n_e} - W_{n_s} \quad \text{Formula 12}$$

W_{m_out} Amount of mist spray(g)

W_{n_keep} Amount which was water retention in the solar shielding net(g)

W_{air_in} Amount of vaporize(g)

W_{i_out} amount that flows out of the calculation region(g)

W_{n_th} amount that has passed through the solar radiation shielding net(g)

ΔW_{air} amount of change in the moisture in the air(g)

W_{n_out} amount of water that has evaporated from the net(g)

W_{o_in} amount from the outside air(g)

W_{o_out} amount that flows out to the outside air(g)

ΔW_n Change the amount of water in the solar shielding net(g)

ΔT_{WB} Dry-wet-bulb temperature difference(°C)

z Distance(m)

d Particle size(m)

Q_1 amount of ventilation from the outside air(m³)

Q_2 amount of ventilation from the outside air(m³)

γ Density of air(kg/m³)

W_{i1_s} Absolute humidity of the air above the solar r shielding nets in the House at the start of spray(g)

W_{i1} Absolute humidity of the air above the solar r shielding nets(g)

C_p Specific heat of air(1.0kJ/kg・K)

t_{i1} Temperature of the upper than the solar radiation shielding nets in the House(°C)

t_o temperature of the outside air(°C)

H Heat transfer by ventilation of the gap(kJ/h)

h_v Heat transfer coefficient due to ventilation

N_A Diffusion speed(mol/m²・s)

M_w The molecular weight of the water

A_w Attached area of the mist (m²)

D_{AB} Diffusion coefficient(8.6×10⁻⁶ m²/s)

C_s Saturated water vapor molar concentration in the temperature of the solar radiation shielding net(mol/m³)

C_∞ The molar concentration of the air above the solar radiation shielding nets in the House(mol/m³)

δ Boundary film(0.0001m)

W_{air_e} Absolute humidity of the spray at the start in the House(g)

W_{air_s} Absolute humidity of the calculation interval in the last of the House(g)

W_{n_e} water content of the calculation interval last of the net(g)

W_{n_s} Water content of the net for at the time of the start of spray(g)

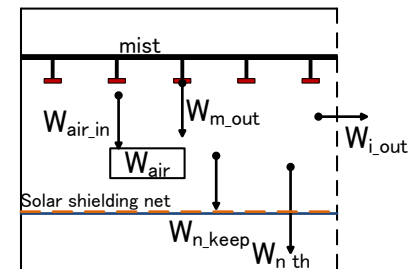


Figure 10 Water balance in the greenhouses

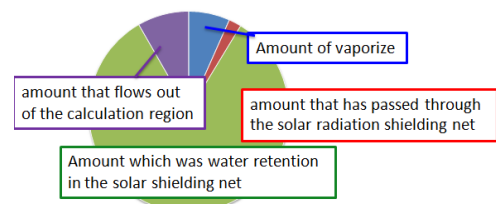


Figure 11 Use of the spray mist(Water Hydraulic type mist)

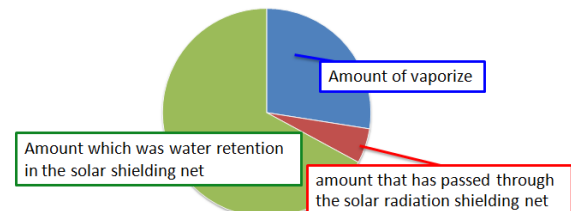


Figure 12 Use of the spray mist(pump type mist)

<参考文献>

- 1) Farnham Craig Edward(2011)「Evaporative Mist Cooling and its Application」p129
- 2) 上田正文(2000)「温度と蒸発—基礎から計測技術まで—」,初版,コロナ社,P83-88

冬期における農業用ビニルハウスの効率的な暖房方式に関する研究

(第2報) 高床式砂ベッドの加温と保温による葉菜類生育促進効果の実証と

寒冷地への適用可能性の検討

Research on efficient heating system for a plastic greenhouse in winter

(Part2) Verification of growth promoting effects of leaf vegetables by the heating and insulating high-floored sand bed and evaluation on their effects by application to cold regions

○笠島 佳明 (大阪市立大学)

西岡 真稔 (大阪市立大学)

岡本 治 (株式会社茂広組)

鍋島 美奈子 (大阪市立大学)

大橋 良之 (東レ建設株式会社)

前田 一隆 (グリーンファーム株式会社)

Yoshiaki KASASHIMA*¹ Minako NABESHIMA*¹ Masatoshi NISHIOKA*¹

Yoshiyuki Oohashi*² Osamu OKAMOTO*³ Kazutaka MAEDA*⁴

*¹ Osaka City University *² TORAY Construction Co., Ltd.

*³ Sigehirogumi Co., Ltd. *⁴ Green Farm Co., Ltd.

Recently it is known that high floored sand culture that can cultivate in easy work and high productivity. In this study, examination of heating system for the high-floored sand bed has been conducted by using covering materials and heating cable. A Simple of plastic greenhouse is prepared in order to assess the effects of 2 kinds of heating system, the hot-air heating system and the sand bed heating system, by a CFD simulation tool. As a result, it is shown that the sand bed heating system can raise the average temperature of sand bed about 8.54K in Sendai

はじめに

施設園芸は地球温暖化の進行により大きな影響を受けている農業分野において、重要な役割を担っている。しかし我が国の施設園芸では、暖房のエネルギー源のほとんどを石油に依存しており、石油暖房の削減が必要である。また、野菜の価格高騰や農業従事者の高齢化により農業存続が課題である中、それらを解決する高床式砂栽培農業が注目されている。高床式砂栽培農業は、生産性が高く、軽作業で栽培可能であるなどの特徴を持つ。前報¹⁾では下田原農場での砂層に着目した暖房手法の実験的検証を行い、冬期の作物の収穫日数と消費電力量により評価した。しかし、前報での暖房手法では砂層の上面部分からの放熱対策が施されていない点や、実験地とは異なる地域に適用した場合の暖房効果が明らかになっていない点等の課題がある。

そこで本報では、高床式砂ベッド上面からの放熱を防ぐ対策として、被覆資材を用いて更なる暖房手法として実験を行い収穫時重量及び積算温度、消費電力量により、暖房熱源と被覆資材、断熱材を組み合わせた際の暖房効果について検証する。また、ビニルハウス全体の簡易なシミュレーションモデルを作成し、3次元熱流体解析により寒冷地域に適用した場合の暖房手法の効果を明らかにする事を目的とする。

1. 高床式砂ベッドにおける暖房手法の実験的検証

1.1 実測概要

大阪府四條畷市下田原農場のビニルハウスにおいて、屋外とハウス内と砂ベッドに測器を設置し、冬期(3月～4月)の1ヶ月間実測を行った。測定項目を Table 1、測器設置位置を Figure 1～Figure 3 に示す。

Table 1 Measurement item

Outdoors	In plastic greenhouse	Sand bed
Air Temp Humidity Wind direction Wind speed Short wave radiation Long wave radiation	Air Temp Humidity Wind speed Wall temperature Short wave radiation Long wave radiation	Sand Temp of depth Sand heat flux

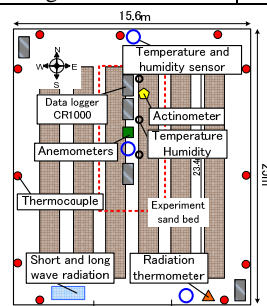


Figure 1 In plastic greenhouse

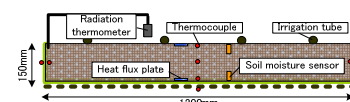


Figure 2 Sand bed

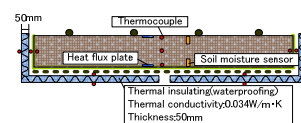


Figure 3 Sand bed(insulating)

1.2 加温方式の概要

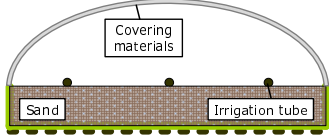
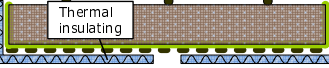
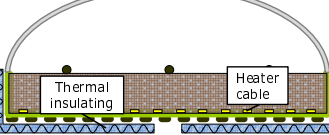
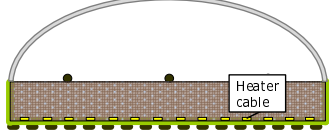
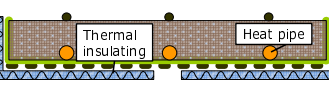
作物(ワサビ菜)の冬期の収穫日数を Table 2 に示す 5 つのケースで比較した。Case1 は上側に被覆資材を設置した砂ベッド、Case2 は断熱材を設置した砂ベッド、Case3 は断熱材と被覆資材、温床線を設置した砂ベッド、Case4 は被覆資材と温床線を設置した砂ベッド、Case5 は断熱材とヒートパイプを設置した砂ベッドである。温床線とヒートパイプの制御方法は、作物の根付近に温度制御熱電対を設置し、制御温度を 15℃に設定した。比較方法として、各 Case 同時に定植したワサビ菜の収穫重量の違いと、加温用熱源がある Case では消費電力量(エネルギーコスト)の違いを比較する。ここで、温床線とヒートパイプの主な特徴は、温床線は設置が容易で安価であるということ、ヒートパイプは断面積が大きく砂ベッドを均一に加温できるということが挙げられる。

1.3 結果と考察

各 Case の 1 スパンから収穫した作物の平均重量と標準偏差を Figure 4 に示す。Figure 4 より加温した Case3、4、5 は平均重量が断熱のみの Case1、2 に比べて重くなったことから、よって暖房熱源と断熱材や被覆資材を組み合わせることで作物を大きく育てることができた。また収穫日までのハウス温度と各 Case の土壌温度の積算温度(℃・日)を Figure 5 に示す。一般的にワサビ菜はハウス空気の 1 日の平均温度の積算温度が 500(℃・日)程度となる頃が収穫の目安とされている。Figure 5 より、被覆資材を設置していない Case2・5 の積算空気温度は 504(℃・日)に対し、被覆資材のみ設置した Case1 は 514(℃・日)、被覆資材と暖房熱源を設置した Case3、4 は約 560(℃・日)となり、また加温した場合の土壌温度の積算温度は約 600~700(℃・日)となった。以上より被覆資材と暖房熱源を組み合わせることで周辺空気の積算温度で 56(℃・日)の差が表れることがわかった。土壌温度の積算温度は 220~340(℃・日)の差が生じた。なお Case4 については土壌温度の制御温度が 17℃程度に制御されていた期間が 17 日程度あったため、Case3 に比べて土壌積算温度が高くなったが、重量から見た生育状態に差はほとんど見られなかった。

次に、Figure 6 は Case3・Case4・Case5 の 1 日の砂ベッド 1.2m×5.4m あたりの積算消費電力量(kWh)を示したグラフである。ただし、この値は 13 日間の積算消費電力量を平均したものである。Figure 6 より、Case3 が 2.2kWh/日、Case4 が 11.8kWh/日、Case5 が 4.5kWh/日となり、Case4 が最も消費電力量が大きく、Case5、Case3 の順になった。また収穫までの 37 日間の積算消費電力量を推定すると、Case3 が 84.3kWh、Case4 が 446.9kWh、Case5 が 169.4kWh となり、断熱材の有無では 362.6kWh の差が表れ、電気料金に変換すると、現在 1kWh=11.11 円²⁾より断熱材の有無による差は 4028 円となった。

Table 2 Detail of cases(Sectioned drawing of sand bed)

Case1 covering materials	
Case2 Thermal insulating	
Case3 Heater cable Thermal insulating Covering materials	
Case4 Heater cable Covering materials	
Case5 Heat pipe Thermal insulating	

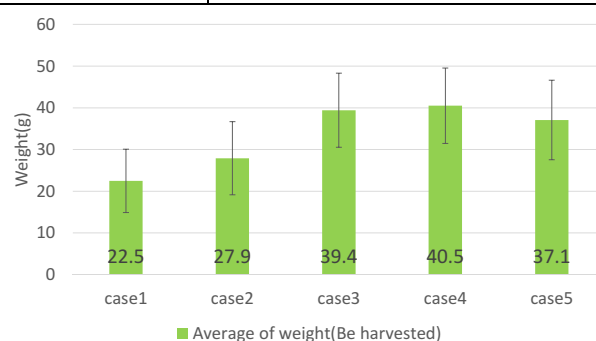


Figure 4 each case of average weight and standard deviation

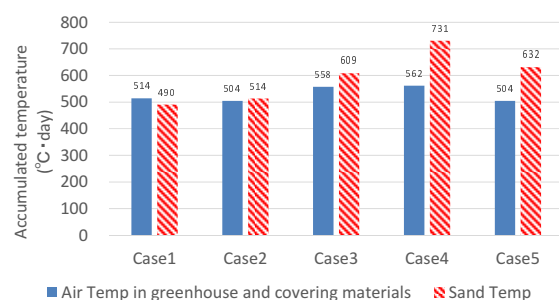


Figure 5 The accumulated Temp until a harvest day

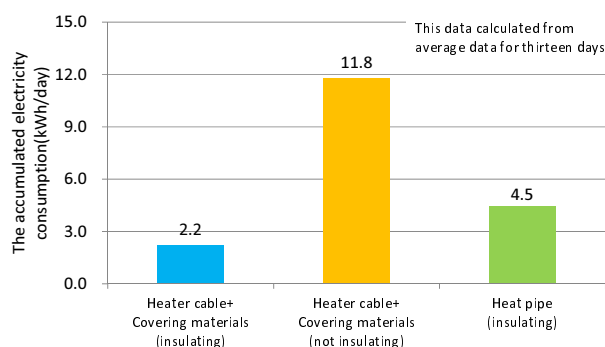


Figure 6 The accumulated electricity consumption

2 ビニルハウスの簡易モデルによる暖房方式の効果

2.1 シミュレーション方針

高床式砂栽培農法を採用したビニルハウスでの効果的な暖房方式を検討するため、植栽やハウスの骨組みなどを省略した簡易なモデルを作成する。数値計算に必要な物性値は、実際にビニルハウスで用いられている素材の文献値やカタログ値を用い、気象条件は晴れた冬の日を想定し、気象庁で 2015/1/24 に観測された大阪と仙台の気温(1 時間値)、雲量(3 時間値)を引用する。日射量に関しては雲量データを用いて ASHRAE で提案された算出式にて計算する。

2.2 シミュレーション概要

熱流体シミュレーションソフト(STREAM®Ver.11)を用いて簡易モデルを作成し、暖房方式の効果を検討する。実施する暖房方式の Case の概要を Table 3 に、計算・解析条件を Table 4 に、各モデルの物性値を Table 5、境界条件を Table 6 に示す。乱流モデルは一般的な標準 $k-\epsilon$ モデルを採用し、輻射に関しては形態係数に基づく計算で行う。各素材の物性値は基本的に一般的な物性値を用いているが、遮光ネットの日射吸収率に関しては上部空間の加熱源になっていると想定し、0.5 と設定した。砂ベッドはビニルハウス内に 3 スパン分(1 スパン ; $1.2 \times 1.8\text{m}$)を 2 列配置した。境界条件となる土壌温度は 0.5m に設定した。ビニルハウス外側からの西風を想定し、西壁面及び東壁面の一部に圧力差を与えた(圧力値は文献を参考にした)。またビニルハウス外側及び内側表面では、対流熱伝達率として建築推奨値を用いて屋根面及び壁面に与えた。また内側表面はビニルハウス内では長波は透過しない特性を表現するため、輻射率は 0.9 に設定し、長波拡散反射率を 0.1 に設定した。

また温床線及び温風暖房のモデル概要を示したものを Table 7 に示す。稼働時間については稲葉らの検討での、1 月の時期での温床線の稼働時間を参考に設定した。また温風暖房機は規模に応じたハウス栽培用ヒートポンプ(以下、HP)を選定し、熱量は暖房時の定格能力を用い、稼働時間を温床線と同じとする。

3 本モデルを用いた場合の暖房方式の効果

Case A の 24:00 におけるビニルハウス内の風速分布($x=1775\text{mm}$)を Figure 7 に、同様に Case C の 24:00 のビニルハウス内の風速分布を Figure 8 に示す。Figure 7 より、ビニルハウス内での風速は壁面を伝って流れている空気が確認できる。またその後屋根面にて冷やされ加工している様子が確認でき、自然対流が起きていることが分かる。また Figure 8 より、吹出口より空気が流れており、北壁面に向けて流れていき、その後壁面に沿って上部に上昇し吸込口に向かって流れている様子が分かる。よって本モデルの温風暖房によりビニルハウス内に温風が行き届いていることが分かった。Case A のビニルハウス内

Table 3 Brief of each case

	Heater cable	Hot-air heating
Case A	—	—
Case B	○	—
Case C	—	○

Table 4 Calculation and analysis condition

Turbulence model	Standard $k-\epsilon$ model
Algorithm	Nonstationary solution by finite volume method
Insolation calculation	ASHRAE model
Radiation calculation	View factor model

Table 5 Physical properties of each model

Greenhouse ($4500 \times 6400 \times 3400\text{mm}$)	Material ; Flexible PVC Open area ratio;0.01 St;0.85 Sa;0.05
Shading net ($4500 \times 6400 \times 10\text{mm}$)	Material ; PE Open area ratio;0.4 Solar transmittance;0.5 Solar absorptance;0.5 (by Catalog)
Sand bed ($1200 \times 5400 \times 150\text{mm}$)	Material ; Sand Solar absorptance;0.65 (by document ³⁾)
Soil ($4500 \times 6400 \times 500$)	Material ; Organic soil Solar absorptance;0.9 (by document ³⁾)

Table 6 Boundary condition

External surface in greenhouse	Positive pressure in west side Negative pressure in east side Specified coefficient of heat transfer(roof;35,wall;23)
Internal surface in greenhouse	Specified coefficient of heat transfer(roof;11.6,wall;8.92) Radiation factor;0.9 Diffuse reflection factor;0.1
Soil surface	Heat insulating Constant Temp(soil bottom)
Solar condition	24.Jan in Osaka(ASHRAE)
Outer air Temp	24.Jan in Osaka(extract by JMA)

Table 7 Brief of Heating system

	Heater cable	HP for Greenhouse (COP;5.30)
Operating time	17~7o'clock (14h)	17~7o'clock (14h)
Thermal capability(kW)	982.4(Rated)	3400(Rated)

の各点における経時変化を表したものを Figure 9 に、温床線の有無による砂層温度の比較を表したものを Figure 10 に、温床線と温風暖房による砂層温度の比較を表したものを Figure 11 に示す。Figure 9 よりすべての点において 13 時ごろに最高温度を示しており、砂ベッド下部空氣の最高温度が約 21.4℃に、砂ベッド中心部の最高温度が約 22.9℃に、ビニルハウス中心部空氣の最高温度が約 21.9℃に、ビニルハウス天井付近空氣の最高温度が約 22.2℃になり、天井付近空氣と砂ベッド下部空氣を最高温度で比較すると 0.8K の差が生じている。このことから本モデルにおいて昼間に鉛直温度分布が形成されていることが分かる。次に Figure 10 より、温床線のモデルでは連続的に ON になる設定をしたため、砂層温度の差は特に夜間で大きくなり、最大で約 11.4K になり平均でも約 7.61K になった。最後に Figure 11 より、温床線と温風暖房との砂層温度の差は最大で約 8.61K、平均で約 5.88K となり、また消費電力量の差は 1 日積算で約 34kWh となり、砂層を効率よく加温できるのは温床線であることがわかった。

4 寒冷地での暖房効果の推定

寒冷地域の代表地として宮城県仙台市を選定した。また気象条件は仙台市の冬の晴れた日の代表日として 1 月 27 日を選定した。なお、寒冷地での暖房効果については Case A 及び Case B について示す。仙台市における Case A のビニルハウス内の各点における経時変化を表したものを Figure 12 に、温床線の有無による砂層温度の比較を表したものを Figure 13 に示す。Figure 12 より、大阪の Case A と比較すると最高温度の差が約 3.8K と差が大きくなった。これは 12 時におけるビニルハウス天井面に入射する日射量で大阪と仙台を比較すると、大阪は約 450W/m² の日射量であるのに対し、仙台では 350W/m² の日射量になっているためである。また Figure 13 より、仙台では大阪と同じ熱量の温床線により砂層温度の差は最大で約 12.7K になり平均で約 8.54K になった。大阪での温床線を設置した場合と比較すると、効果は大きくなった。これは Case A での砂層温度が気温の影響を受け、大阪での Case A より低くなったことによって差が大きくなったと考えられる。

5 まとめと今後の課題

- ・大阪府四条畷市の下田原農場にて、砂層に着目した暖房手法を用いた実験を行い、積算温度と消費電力によりその暖房効果について定量的に示した。
- ・熱流体解析シミュレーションソフトを用いて簡易ビニルハウスモデルを作成し、大阪での暖房熱源の効果と仙台での暖房熱源の効果を定量的に示した。
- ・今後の課題として、湿度及び植物を考慮したモデルを作成することで、より実際のビニルハウスに近づけていくことが挙げられる。

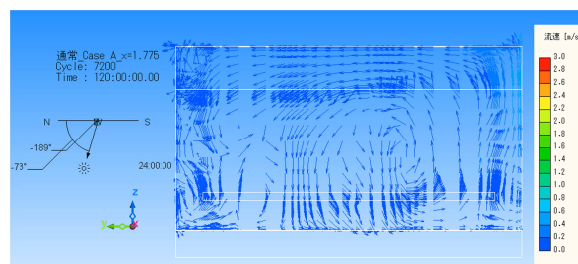


Figure 7 Flow velocity distribution(Case A_Osaka)

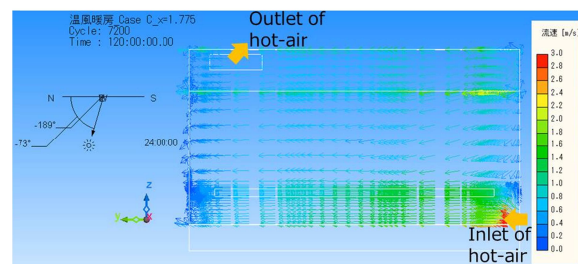


Figure 8 Flow velocity distribution (Case C_Osaka)

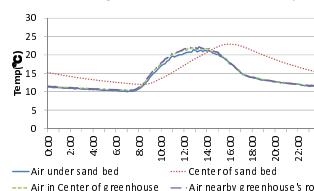


Figure 9 Temporal change in each point(Case A_Osaka)

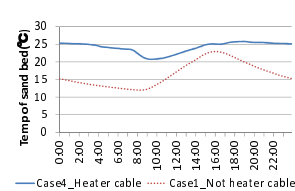


Figure 10 Comparing of Temp of sand bed(Heater cable)

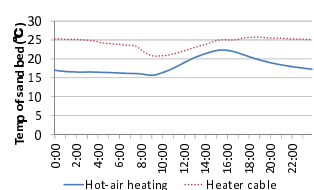


Figure 11 Comparing of heater cable and hot-air heating

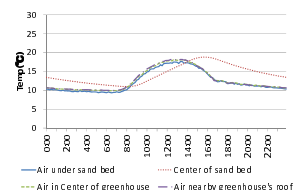


Figure 12 Temporal change in each point(Case A_Sendai)

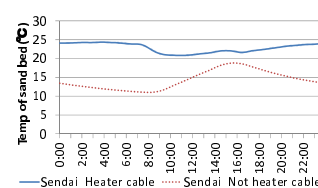


Figure 13 Comparing of Temp of sand bed in Sendai(Heater cable)

参考文献

- 1) 稲葉直美ら 「冬期における農業用ビニルハウスの効率的な暖房方式に関する研究 (第 1 報)高床式砂ベッドの加温と保温効果の実験的検証」 空気調和・衛生工学会近畿支部学術講演論文集 2015 年 3 月
 - 2) 関西電力株式会社HP(2014/12/19 閲覧)
URL:http://www.kepco.co.jp/home/ryoukin/menu/dento_a.html
 - 3) ゲイロン・サンフォード・キャンベルら(2003)「生物環境物理学の基礎第 2 版」 森北出版
 - 4) 浦野良美 中村洋(1996) 「建築環境工学」 森北出版 p.155
- 【謝辞】
東レペフ加工品株式会社、ならびに山里産業株式会社に実験用材料を提供頂いた。記して謝意を表します。

屋外ワークスペースの快適性とグループ作業による知的生産性

(その1) 被験者実験概要と作業空間の環境特性

Group work productivity and comfort in outdoor work space

(Part1) Experimental Outline and Environmental Characteristics of Target Workplace

○藤原 邦彦 (竹中工務店)

山中 俊夫 (大阪大学)

甲谷 寿史 (大阪大学)

花田 潤 (大阪大学)

黒木 友裕 (竹中工務店)

野崎 尚子 (竹中工務店)

Kunihiko FUJIWARA^{*1} Toshio YAMANAKA^{*2} Hisashi KOTANI^{*2}

Jun HANADA^{*2} Tomohiro KUROKI^{*1} Naoko NOZAKI^{*1}

^{*1} Takenaka Corporation ^{*2} Osaka University

To evaluate the productivity of the group work in outdoor spaces, we conducted subject experiments comparing the group task performance in an outdoor work space with an indoor work space. In this paper, the overview of the experiments and discussion of environmental measurements were shown. The result of PMV, illuminance and noise level indicated that it was relatively cold, glaring, and noisy in the outdoor work space.

1. はじめに

ICTの発展は職場の自席に縛られない柔軟なワークスタイルを可能とした。仕事の種類に応じて適した場所を選択することは、生産性の向上に寄与するものと考えられる。特に「知識創造」(価値創造、イノベーション)¹⁾に関する活動については、他の活動よりも自席以外の場所を選択することが多い傾向が報告されている²⁾。今後より重要性が増すことが予想される「知識創造」の生産性を最大限に引き出すためには、自席以外の選択肢となるような多様な場所を整備することが重要と考えられる。

筆者らは自席以外の場所として屋外空間に着目し、既存オフィスビル内に設置した「屋外ワークスペース」(以降、屋外と表記)の知的生産性に関する性能を検証してきた³⁾⁴⁾。なかでも既報⁴⁾においては、個人作業による知的生産性を評価し、屋外の多様な刺激が知識創造に関するパフォーマンスを向上させる可能性を示唆した。

本報では、コミュニケーションを伴うグループ作業に着目し、変化の幅が大きい自然の環境下におけるグループ作業の知的生産性や満足度を評価する。

本研究では個人タスクおよびグループタスクにおける知的生産性を図-1のようにモデル化した。本モデルでは、グループを構成する個人のパフォーマンス、その個人同士のコミュニケーションにより得られるグループのパフォーマンスの2段階を設定している。どちらのパフォーマンスについても内的要因と外的要因により変化すると考えられるが、ワークスペース (WS) の仕様は外的要因として執務者の心理的变化を促し、それが集中力やモチベーションに影響を与える因子となる。そこで、外的

要因を起点とした一連の流れを可能な限り定量評価するため、本研究では環境測定、加速度計による活動量の評価、アンケートによる心理評価、個人タスク・グループタスクによる知的生産性評価を行なった。

本報は被験者実験の概要と作業空間の環境特性を、(その2)は作業環境に関する主観評価、(その3)は作業空間での知的生産性について示す。

2. 実験概要

既存のオフィスビル20階の会議室である「屋内ワークスペース (以降、屋内と表記)」と、公開空地に整備した「屋外」において被験者に個人タスク・グループタスクおよびアンケートを課し、2つのWSを比較した。

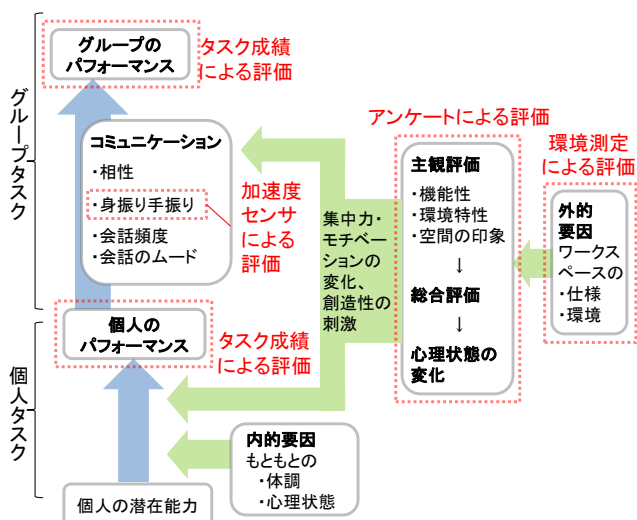


図-1. グループ作業の知的生産性への影響要因概念図

2. 1 被験者概要

屋外でのデスクワーク・グループワークがある旨を明記して大学学部生・院生 32 名（{男性 4 名+女性 4 名}×4 日）を募集した。被験者の年齢は 20 歳～25 歳で、グループは男女別の 4 名ずつ（A、B グループ）とし、友人同士が同一グループにならない、グループ内で大学での専攻分野がばらけるよう配慮した。また、一人の被験者は 1 日のみの参加に限定した。

実験当日はタスクの練習時間を設け、その後に実験に移行した。また全日程終了後にタスク回答を各被験者（各々の被験者自身の回答は除く）に送付し、採点をさせた。採点結果受領の後、被験者全員に実験当日と採点の所要時間に見合う報酬を支払った。また、実験中は長袖・長ズボン・靴下・靴の着用を指定し、上着の着脱と休憩時間中の水分補給（水またはお茶）は自由とした。

2. 2 実験場所

実験場所は大阪市内の地上 37 階建ての既存オフィスビルである。概略図を図-2 に示す。本報では、表-1 のような特徴を持つ 2 箇所の WS で実験を実施し、両者の違いを比較した。屋内は一般的な作業空間を想定し、屋外は公共性が高くオープンで物理環境の変動の大きい作業空間を想定している。図-3 に各 WS の外観写真と見取り図を示す。図-3 のように、屋外には可動式の天井ルーバー（赤着色部）、壁ルーバー（紫着色部）、ロール式で開閉可能なフラクタル日除け（青着色部）が配置されている。壁ルーバーは実験者が水平に固定、フラクタル日除けは閉状態で固定し、被験者の調整は不可とした。（強風時のみ例外的に壁ルーバーの角度を 45° とした。）

2. 3 測定項目

（1）環境・音声測定

測定項目と機器、測定位置、測定時間各を表-2 に示す（測定器の位置は図-3 も参照）。屋外、屋外ともにグループタスク用の座席近くに 1 点、屋外では WS から距離 10m 程度の場所にも外部基準点として 1 点設置している。なお、各点において温湿度・照度計、グローブ球、熱式風速計、CO₂ 濃度計、騒音計は三脚へ一括固定して設置し、ボイスレコーダーはグループタスク用机の上に設置した（屋外外部基準点には CO₂ 濃度計、騒音計、ボイスレコーダーはなし）。表面温度のトラバース測定は、図-4 に示すスケジュールの各回、各タスク、各 WS において測定した。

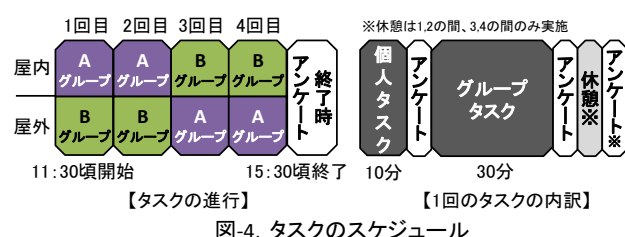
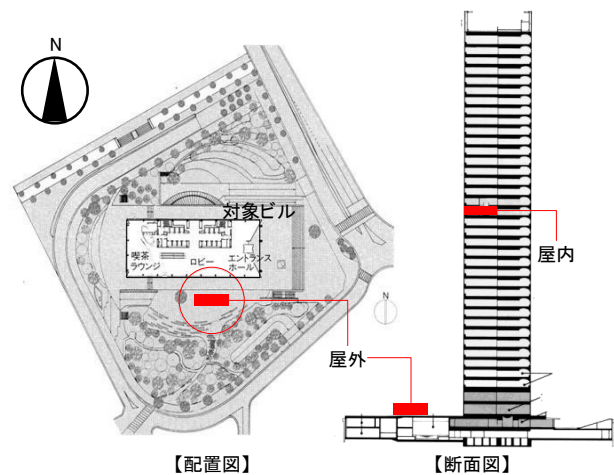


図-4. タスクのスケジュール



【配置図】 【断面図】
図-2. 実験場所の概略図

表-1. 各WSの特徴

	各WSの特徴	空調	照明	その他
屋内	・設置什器は個人タスク用の机×4、イス×4、グループタスク用の机×1、イス×4（配置は図-3参照） ・個人タスクでは毎回同じ座席に同じ被験者が着席。 グループタスクではイスのみ被験者の自由選択。	25℃設定	通常照明	・通常時は貸会議室・ブラインド常時全閉
屋外	・設置什器は机×9、イス×30（配置は図-3参照） ・個人タスクでは被験者が座席を自由選択。グループタスクでは机は固定でイスのみ自由選択。	なし	なし	・通常時もWSとして利用

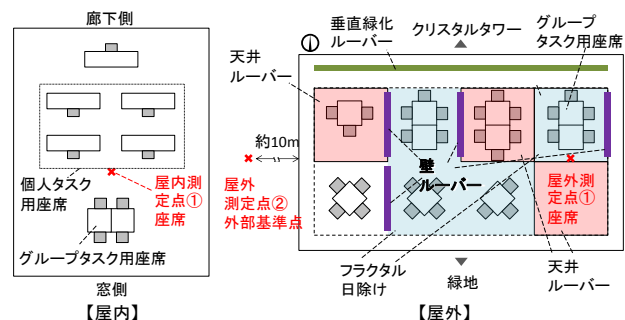


図-3. 各WSの外観写真と見取り図

表-2. 測定項目・方法概要

項目	機器	型番（メーカー名）	位置[mm]	測定間隔
気温	照度	RTR-574-H (T&D)	屋内座席	1分
湿度	・温湿度計		屋外座席	
照度			・外部基準点	
グローブ温度	グローブ球温度計	RTR-52A (T&D)		
風速	熱線風速計 データロガー	AM-09T (リオン) 2300A (江藤電機)	FL+1100	1分
CO ₂ 濃度	CO ₂ 濃度計	TR-76Ui (T&D)	屋内座席	
暗騒音	騒音計	NR-52(リオン)	・外部基準点	
音声	ボイスレコーダー	V-822(OLYMPUS)	グループタスク用の机上	
水平面全天日射量	日射計	MS-402(英弘精機)	屋外	1分
表面温度	データロガー	LR-5041 (HIOKI)	外部基準点	
加速度計	サーモカメラ	— (NEC三栄)		トラバース
	ライフレコーダー	UW-301BT(日立)	各被験者の非利き腕	

(2) アンケート

知的生産性に影響を与える要因を「機能性」「環境特性」「印象」の3つに分類し、これらの重要性・満足度、タスクへの影響、総合評価を把握した。アンケートは全て紙面上で実施し、図4のスケジュールに沿って各WSの個人・グループの各タスク終了後、1回目と2回目、3回目と4回目の間の休憩後、さらに全スケジュールの終了時に回答を課した。詳細は(その2)にて報告する。

(3) タスク

「新しい〇〇を考えてください」という問いに対し、新しい機能・効果等のアイデアを自由に回答させる「生産力テスト」を個人・グループタスクそれぞれで課した。詳細は(その3)にて報告する。

2. 4 実験スケジュール

被験者実験候補日を6日間設け、降雨がなく外気条件が比較的穏やかな2015/10/24、10/25、10/31、11/1の4日間を実施日とした。

3. 実験結果

3. 1 各ワークスペースの環境特性

(1) 気温

屋内と屋外の代表点と、屋外の外部基準点における、平均気温の推移を図-5^{注1)}に示す。屋内では空調設定温度の25℃より約1℃高い26℃前後を推移している。屋外は、10/24は屋内とほぼ同等であるが、他の3日間は18～20℃を推移している。

(2) 水平面照度

平均水平面照度の推移を図-6に示す。屋内は750lx前後を推移していた。屋外代表点では天井ルーバー、壁ルーバー、フラクタル日除けが配置されているため外部基準点よりは値が小さくなっているが、多くの時間帯で10000lx近くを推移しており、タスク作業への眩しさの影響を把握する必要がある。

(3) 風速

平均風速の推移を図-7^{注2)}に示す。屋内は0.1m/s前後を推移している。屋外代表点では時間帯で0.5～2.0m/sの範囲を推移している。10/31には屋外の外部基準点の風速が3.0m/s近くまで大きくなっているが、座席付近の代表点では1.0m/sまで小さくなっており、壁ルーバー等により風速が低減されていると推測される。

(4) 表面温度

屋外における実験中の平均気温が最高の10/24と最低の11/1の2回目のグループタスク時(13時頃)に測定した各WSにおける表面温度分布を図-8に示す。屋内では両日でほぼ同様の表面温度分布となっている。屋外では11/1の表面温度が全体的に低く、被験者の皮膚表面温度も比較的低い。

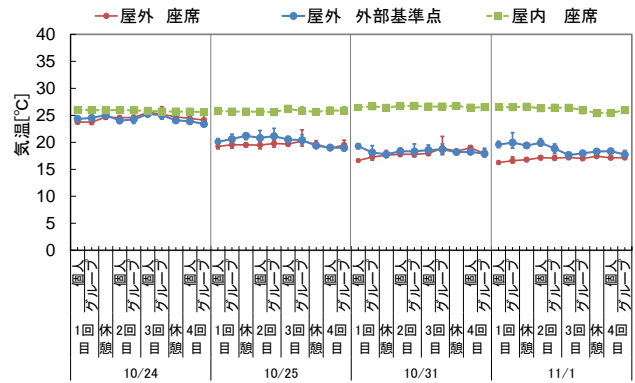


図-5. 平均気温の推移

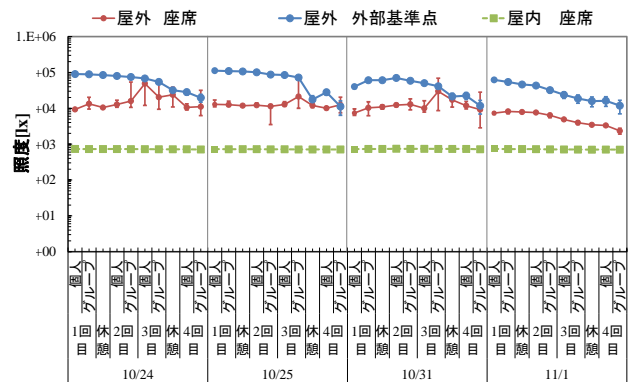


図-6. 平均照度の推移

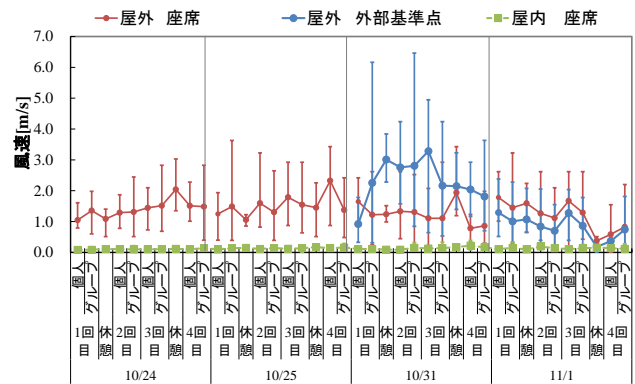


図-7. 平均風速の推移

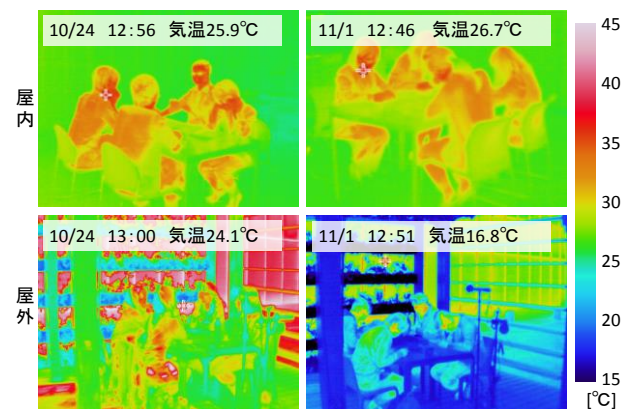


図-8. 表面温度分布の測定例

(5) 等価騒音レベル

平均等価騒音レベルの推移を図-9に示す。グループタスクもしくは休憩中は被験者の発声の影響があるため、個人タスク中の測定値により音環境を比較する。屋内は一般事務室の許容騒音値(50dB)を下回っているが、屋外の騒音値はそれを上回る50~60dBで推移しており、騒音による作業性への影響があった可能性がある。

3. 3 分散型WSとしての作業環境の考察

各実験日の各回のタスク時間における平均PMV(予想平均温冷感申告)^{注3)}と平均照度(対数表示)の関係を図-10に示す。屋内はISOのPMV推奨範囲である±0.5から暑い側に超過した約0.6~0.8を推移している。屋外は、10/24の3回/全4回と10/25の1回/全4回で推奨範囲内となっているが、その他はほぼ全ての回で寒い側に超過している。光環境では全ての回が屋内よりも明るい。

3. 4 被験者の活動量

全被験者で測定された加速度の3軸合成値を屋内⇄屋外、個人タスク⇄グループタスク、個人タスクの屋内⇄個人タスクの屋外、グループタスクの屋内⇄グループタスクの屋外、においてそれぞれ平均化して比較した(図-11)。どの比較においても明確な差はみられず、ワークスペースの種類やタスクの種類による被験者の活動量への影響は捉えることはできなかった。

4. まとめ

オフィスビルの屋内外に設けられた「分散型WS」において被験者実験を実施し、(その1)では実験概要と各作業空間の環境特性を述べた。以下に報告内容をまとめる。

- 1) 屋内は、気温、照度、風速がほぼ均一となっていたが、PMVは暑い側に推奨範囲を超過していた。
- 2) 屋外は、温熱環境は暑い側から寒い側まで幅広い分布を示したが、推奨範囲を寒い側に超過している回が半数以上であった。
- 3) 屋外においては光・音環境がそれぞれ推奨範囲を逸脱しており、作業への影響の把握が必要である。
- 4) ワークスペースの種類、タスクの種類による被験者の活動量への影響は捉えられなかった。

【謝辞】本研究は環境省「平成27年度CO2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の委託事業(技術開発課題名「省エネルギーに繋がる居住者の移動を促すための空間設計と誘導システム構築」)の一環として実施した。

【注釈】

注1) 各測定点における各イベント(個人タスク・グループタスク・休憩)での平均値(等価騒音レベルの場合はパワー平均)、最大値、最小値をプロットしている。(以後、同様のグラフでは同じ仕様とする)。

注2) 屋外の外部基準点における10/24、25のデータは欠測。

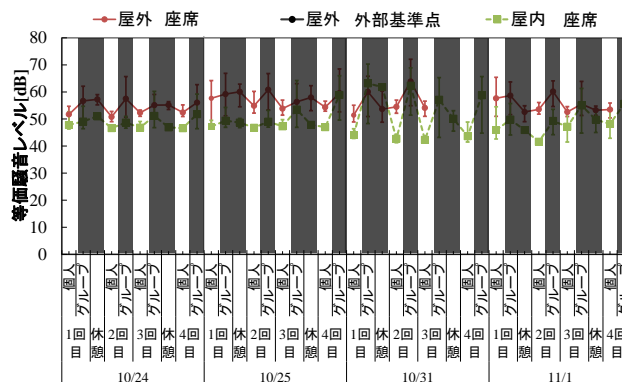


図-9. 等価騒音レベルの推移

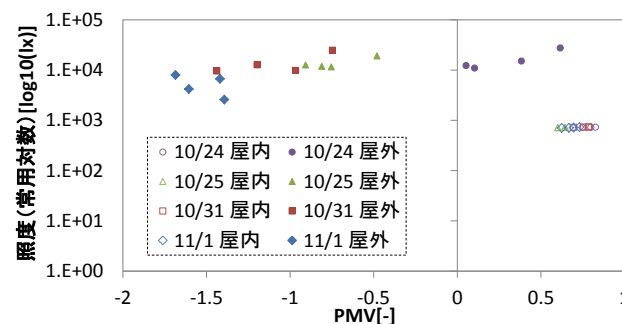


図-10. PMVと照度(対数)の関係

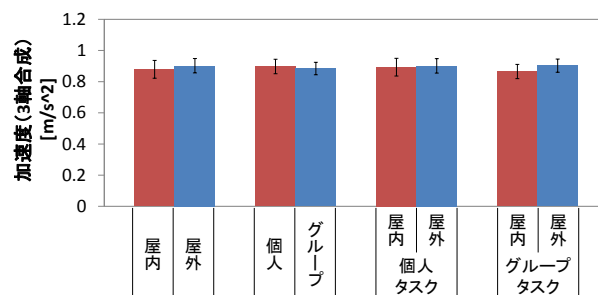


図-11. 各タスク・各WSにおける活動量
(エラーバーは標準偏差を示す)

注3) 屋外環境の快適性指標は一般的に標準新有効温度(SET*)を用いるが、作業環境としての快適性を比較するためPMVを採用した。なお、代謝量は1.2metとし、着衣量は暑い日と寒い日の両方の実験日があったため0.9cloまたは1.1cloのうち快適な方の値を選択した。10/25の屋外代表点風速データの欠測は、座席1~6の風速平均値を代入しMRT(平均放射温度)およびPMVを算出した。MRTの算出には下式を用いた。

$$MRT = T_g + 2.37\sqrt{V}(T_g - T_a) \quad [T_g: \text{グローブ温度}, T_a: \text{気温}, V: \text{風速}]$$

【参考文献】

- 1) 財団法人建築環境・省エネルギー機構 編著, 知的創造とワークプレイス, 武田ランダムハウスジャパン, 2010
- 2) 須藤, 久木, 水谷他: 知識創造空間における空間・環境要素に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 Vol. 79 (2014) No. 705 p. 2367-2374
- 3) 安藤, 樋口, 黒木他: 分散型ワークスペースの知的生産性および快適性に関する研究(その1)~(その3), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(秋田), pp.45-56, 2014.09
- 4) 野崎, 山中, 黒木他: 分散型ワークスペースの知的生産性および快適性に関する研究(その4)~(その5), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(大阪), pp.69-76, 2015.09

屋外ワークスペースの快適性とグループ作業による知的生産性 (その2) 作業環境としての快適性に関する主観評価 Group work productivity and comfort in outdoor work space (Part 2) Subjective Evaluation on Comfort

○花田 潤 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学)
甲谷 寿史 (大阪大学) 桃井 良尚 (大阪大学)
相良 和伸 (大阪大学) 黒木 友裕 (竹中工務店)
野崎 尚子 (竹中工務店) 藤原 邦彦 (竹中工務店)

Jun HANADA*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Hisashi KOTANI*¹ Yoshihisa MOMOI*¹
Kazunobu SAGARA*¹ Tomohiro KUROKI*² Naoko NOZAKI*² Kunihiko FUJIWARA*²
*¹ Osaka University *² Takenaka Corporation

The productivity at work is affected by the effect surrounding environment, such as thermal environment, image of the space, the distance between persons and a facility. The purpose of this project is to create an outdoor office as a new type of workplace, and the experiments by using subjects was conducted to confirm degree of the relation of each element on the productivity. This paper focusses on the questionnaire survey.

1. はじめに

環境省のCO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業の一環で、屋内オフィスの環境負荷低減とワークスタイルの改革を目標に、執務空間として屋外オフィスを提案している。ワーカーの知的生産性は、作業空間の使いやすさ、環境特性(温熱・光・視・音・空気質・風)、空間の印象等の影響を受けており、作業の内容や媒体により最適な作業環境は異なると考えられる。第一段階として、2013年¹⁾秋に、環境特性が知的生産性に与える影響に絞って被験者調査を行い、設置時期や設置場所の工夫により、屋外ワークスペース(以下WS)の利用価値はあるという知見を得た。そこで2014年度は屋外ワークスペースに焦点を当て、被験者に複数のタスクを課し、周辺環境が各作業の知的生産性に与える影響を調査した結果²⁾、媒体よりも拡散、収束思考により、作業に適する周辺環境は異なり、特に創造的思考においては屋外の方が適する可能性がある知見を得た。そこで、2015年度は再び屋外WSに焦点を当て、被験者に個人及びグループによるタスクを課し、周辺環境が知的生産性に与える影響を調査した。本報(その2)では、被験者によるアンケート調査について述べる。

2. 調査手法

2.1 実験概要

大阪市内の既存オフィスビルの屋外WS(公開空地にルーバー等の環境調節機能のある屋外ブース施工)と屋内WS(通常執務空間と見立て環境を一定とした対照的な空間)の2か所で被験者に個人及びグループによるタスクの筆記試験・アンケート調査を実施し、同時に各場所で環境実測を行い、周辺環境が試験成績に及ぼす影響を検討した。被験者は1日4人×2グループ(A,B)×4日

間の計32名の大学生男女であり、参加は一人1日のみとし各日異なる被験者とし、紙面による「拡散的思考」タスクを個人及びグループにより行った。「拡散思考」とは、「新しい○○を考えよ」という生産力テストを1つのテストとする。室内でタスク練習後、実施場所の順序による差を相殺するためA・Bの2グループに分け、それぞれのグループに各作業を屋内と屋外で交互に実施した(Table 1, Table 2)。調査、実験の詳細は、前報(その1)³⁾を参照されたい。

2.2 アンケート概要

アンケートはタスク後のみにを行い、個人タスク終了後、グループタスク終了後、休憩後、全日程終了後の計4種

Table 1 schedule on a day

Time		Group A		Group B	
	practice				
11:00 ⌋ 12:00	Task1	Indoor	Individual Group	Outdoor	Individual Group
	break				
12:10 ⌋ 13:10	Task2	Indoor	Individual Group	Outdoor	Individual Group
	Move	to Outdoor		to Indoor	
13:20 ⌋ 14:20	Task3	Outdoor	Individual Group	Indoor	Individual Group
	break				
14:30 ⌋ 15:30	Task4	Outdoor	Individual Group	Indoor	Individual Group

類用意した。タスク後の「作業環境評価シート」と称するアンケート内容に関して、知的生産性に影響を与える要素を大きく、「機特性」「環境特性」「印象

Table 2 task schedule

task by oneself	10
working environment questionnaire	7
task by group	30
working environment questionnaire	4

の3要素に分類できるとした。それら3要素が全体的な作業のしやすさや総合満足度にどのように影響するのか

Table 3 Items of the working environment questionnaire

classification		question	evaluation axis
function	importance/ satisfaction	layout of furniture	7
		facility of furniture	7
		the area on the desk	7
		the area of personal space	7
		the distance between persons	7
		other's eyes	7
	satisfaction	function satisfaction	7
environment	importance	brightness of the space	7
		brightness on the desk	7
		visibility of paper	7
		natural light	7
		total light environment	7
		air moisture	7
		air freshness	7
		smell	7
		total air environment	7
		wind environment	7
		sunshine	7
		thermal environment	7
		acoustic environment	7
	sense	brightness of the space	7
		brightness on the desk	7
		visibility of paper	7
		thermal environment	7
		air moisture	7
		air freshness	7
	sensitivity	wind/sunshine/smell/sound	4
		environmental comfort	7
		light/thermal/air/acoustic/wind	7
		environmental satisfaction	7
impression	impression	activity	7
		esthetics	7
		openness	7
		familiarity	7
		ease to stay	7
	satisfaction	impression satisfaction	7
total	satisfaction	workability	7
		acceptance of work	4
		function/environment/impression	7
		total satisfaction	7

を把握することを目標にアンケート項目を決定した。また2か所で同タスク後に、どちらの空間が好ましいかについて選択肢で回答させ、その理由について自由に記述させた。作業環境評価シートの概念図を Fig. 1 に、具体的な作業環境評価シート項目と評価軸を Table 3 に示す。

3. 作業環境評価シートの結果と考察

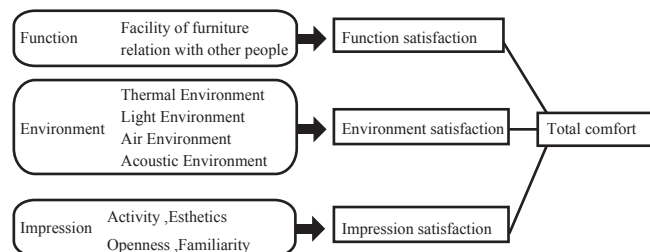


Fig. 1 The concept of the working environment questionnaire

屋内・屋外における個人タスク後アンケート結果を Fig.2 に、グループタスク後アンケート結果を Fig. 3 に示す。横軸を各回答の割合、縦軸を満足度になっている。

3.1 個人タスク後 (Fig. 2)

実験日毎で比較すると、屋内評価において結果に差が最も大きいものは「Impression」であった。屋外評価においては、「Total」、「Environment」で差が大きい。また、屋内屋外で比較すると、「Total」「Environment」に関しては、屋外で不満評価が多くなるのに対し、「Impression」「function」では不満評価が減少することが多い。

3.2 グループタスク後 (Fig.3)

実験日毎で比較すると、屋内評価においては「Impression」、屋外評価においては「Total」、「Environment」で差が大きく出ている。また、屋内屋外で比較すると、「Total」「Impression」「Environment」で差が大きく出ている。

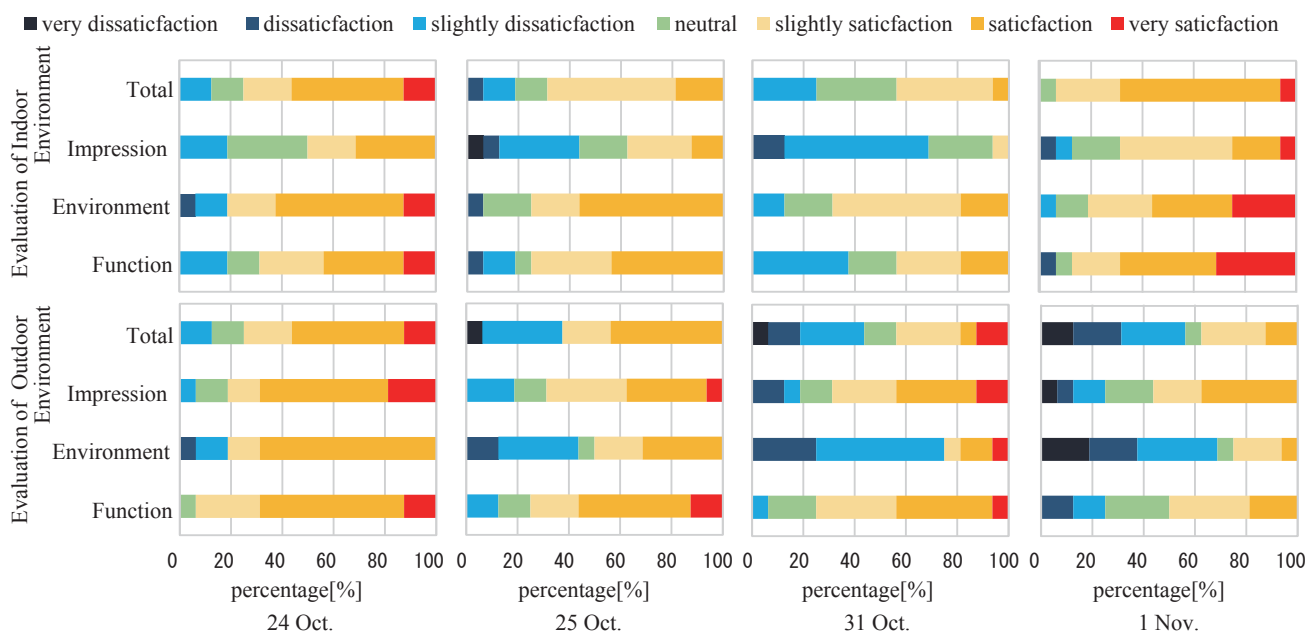


Fig.2 Comparison of each satisfaction after task by individual

3.3 屋内評価 個人とグループとの比較 (Fig.2, Fig.3)

屋内におけるタスクに関して、個人とグループとの間に大きく差は出なかった。

3.4 屋外評価 個人とグループとの比較 (Fig.2, Fig.3)

屋外におけるタスクに関して、「Total」及び「Function」の不満側の割合が個人よりもグループの方が低くなる傾向が見られる。

4. 総合満足度と各要素との関係 (Fig.4)

「総合満足度」と各要素との関係を示す。縦軸が個人タスク後及びグループタスク後における総合満足度、横軸に「作業空間」「環境特性」「空間の快適性」「空間の印象」を表す。

4.1 個人タスク後 (Fig.4)

屋内において、「Function」及び「Comfort」の相関係数が高く、「Function」及び「Comfort」が高いと、「総

合満足度」も高くなる傾向にあった。屋外においては、「Environment」及び「Comfort」の相関係数が高く、屋内に比べ強い相関関係があった。

4.2 グループタスク後 (Fig.4)

屋内、屋外において、「Environment」及び「Comfort」の相関が高く、屋外の方がより強い相関関係にあった。また、屋内においては「Environment」及び「Comfort」に対し不満の評価はほとんどないが、屋外においては満足、不満の双方補評価が見られた。また屋外における「Function」との相関関係は他と比べて弱かった。

5. 環境特性及び快適性と各環境要素との関係

Fig.5, Fig.6 に「環境特性」及び「快適性」と各環境要素に対する満足度との関係を示す。これまでの考察において、「総合満足度」には「環境特性」及び「快適性」が影響しやすい可能性を示した。本節では、「環境特性」

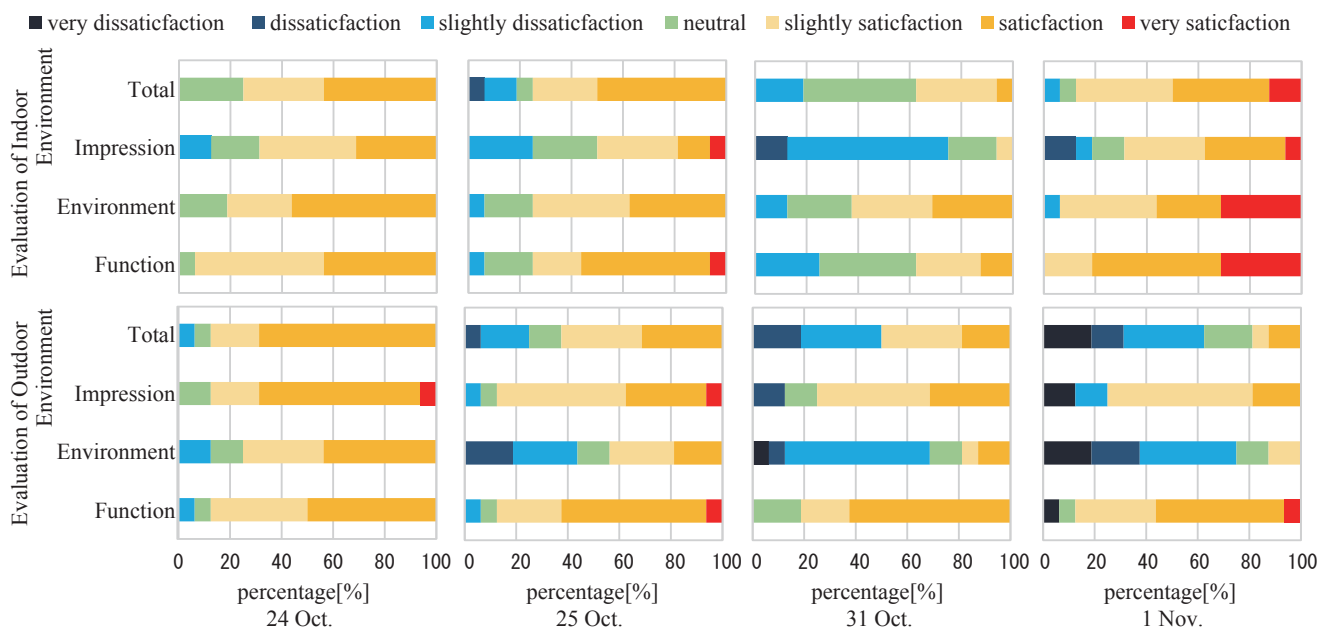


Fig.3 Comparison of each satisfaction after task by group

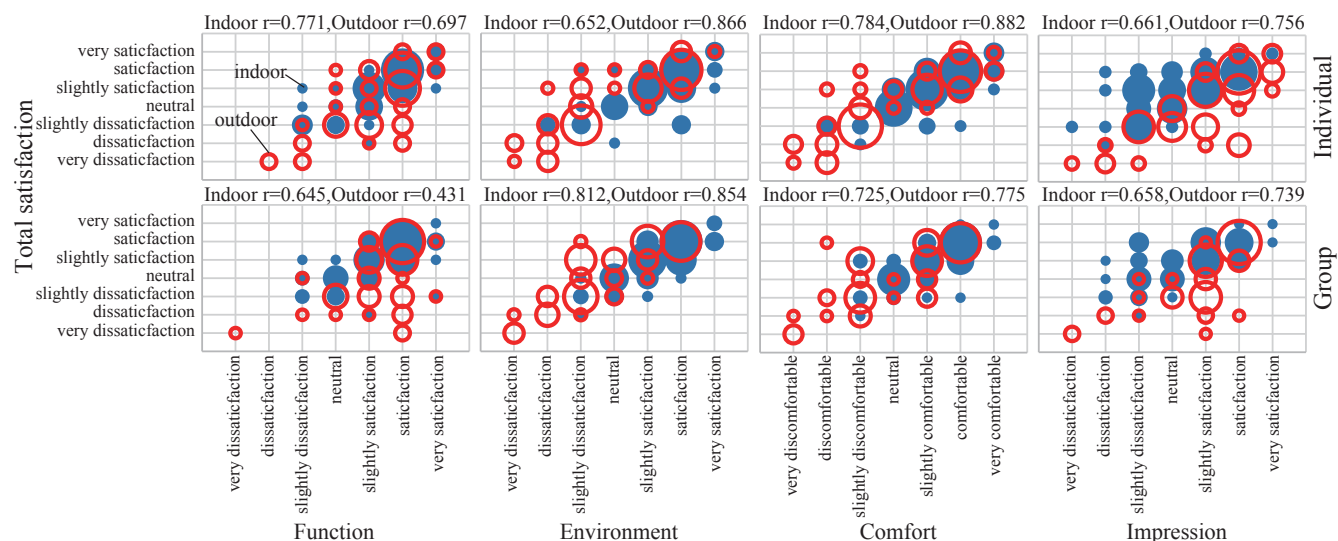


Fig.4 Relation between total satisfaction and each satisfaction

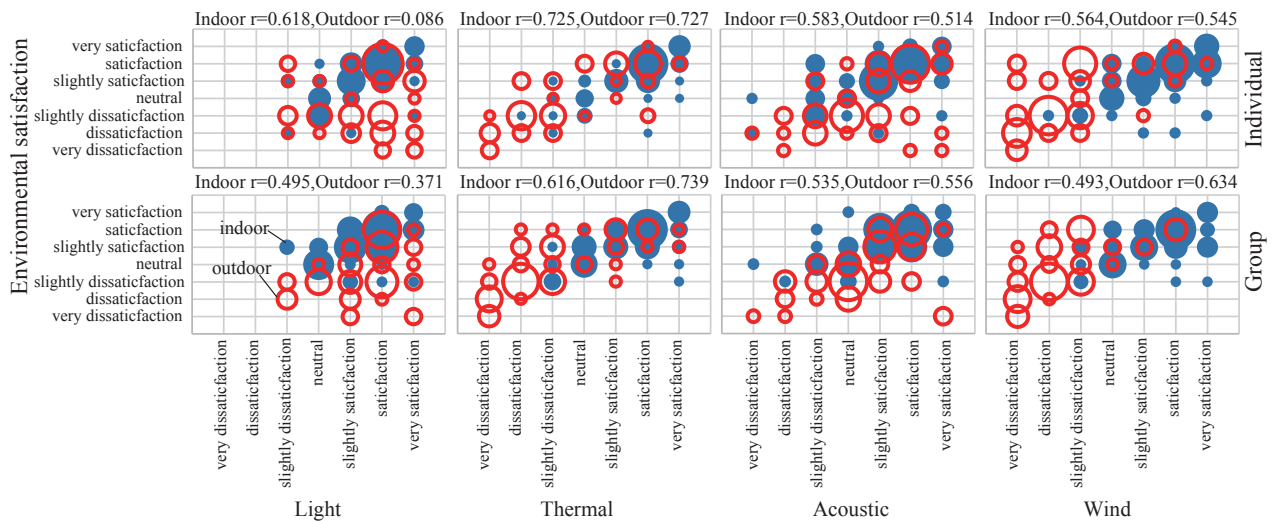


Fig.5 Relation between total environmental satisfaction and each satisfaction

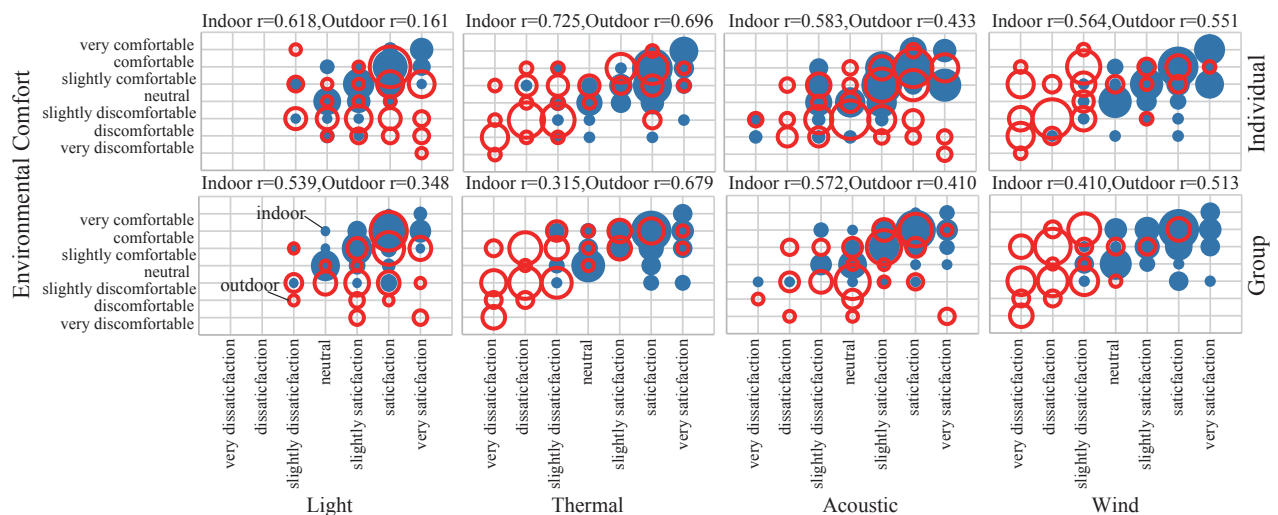


Fig.6 Relation between total environmental comfort and each satisfaction

及び「快適性」に影響を与える要素を考える。

5.1 環境特性満足度の影響因子 (Fig.5)

「Individual」では、「Thermal」の相関関係が屋内、屋外において、最も高かった。また屋外における「Light」の相関係数が $r=0.086$ とかなり相関が低い結果となり、「Light」の満足評価が「Environmental satisfaction」の繋がっていないことがわかる。「Group」では、「Individual」と同様に「Thermal」の相関係数が屋内、屋外において高く、屋外の方がより高かった。また屋外の特徴として、環境要素に対し不満評価の場合、「Environmental satisfaction」も不満評価となる傾向があった。

5.2 快適性に対する影響因子 (Fig.6)

「Individual」では、屋内、屋外ともに「Thermal」との相関関係が高い結果となり、屋内の方がより強かった。「Group」では、屋内において「Light」及び「Acoustic」の相関関係が同程度に高く、屋外においては「Thermal」との相関関係が強い結果となった。また屋外において、「Thermal」の満足度が低いと、「Environment Confort」の快適度も低くなることが分かった。

6 まとめ・今後の予定

今回の被験者実験では屋外におけるグループワークに焦点を当てて実験を行ったが、快適性主観評価においては個人とグループの間に大きな差は見られなかった。今後はタスク結果も加味して検討をしていく予定である。

〔謝辞〕 本研究は環境省「平成 25 年度 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の委託事業（技術開発課題名「省エネルギーに繋がる居住者の移動を促すための空間設計と誘導システム構築」の一環として実施した。

〔参考文献〕 1) 樋口彩子, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸, 黒木友裕, 安藤邦明: 「分散型ワークスペースの知的生産性及び快適性に関する研究 (その 2) 執務空間の快適性に関する主観評価」, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 pp. 137-140, 2014. 3

2) 樋口彩子, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸, 黒木友裕, 野崎尚子, 藤原邦彦: 「屋外ワークスペースの知的生産性及び快適性に関する研究 (その 2) 場所選択と作業環境についての主観評価」, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. 204-207, 2015. 3

3) 藤原邦彦, 山中俊夫, 甲谷寿史, 花田潤, 黒木友裕, 野崎尚子: 「屋外ワークスペースの快適性とグループワークによる知的生産性 (その 1) 被験者実験概要と作業空間の環境特性」, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2016. 3 掲載予定

屋外ワークスペースの快適性とグループ作業による知的生産性 その3 グループ作業による知的生産性

Group work productivity and comfort in outdoor work space Part 3 Group work productivity

○ 黒木 友裕 (竹中工務店) 山中 俊夫 (大阪大学)
甲谷 寿史 (大阪大学) 花田 潤 (大阪大学)
野崎 尚子 (竹中工務店) 藤原 邦彦 (竹中工務店)

Tomohiro KUROKI^{*1} Toshio YAMANAKA^{*2} Hisashi KOTANI^{*2}

Jun HANADA^{*2} Naoko NOZAKI^{*1} Kunihiro FUJIWARA^{*1}

^{*1} Takenaka Corporation ^{*2} Osaka University

A subject experiment in the “divergent community space” to evaluates workplace productivity was conducted. Correlation with productivity including by group task and environment and impression in each spaces was investigated. We found that outdoor environment increase the creativity performance by group as well as by person even if it is thermally uncomfortable.

1. はじめに

前報に引き続き、本報では通常のオフィス空間を模したワークスペース(20階に設置。以下「屋内」と記す)と屋外に設置したワークスペース(以下「屋外」と記す)にて被験者に課した個人タスクおよびグループタスクの成績を報告し、それぞれでの環境や被験者の主観評価との関係から知的生産性について考察する。

2. 知的生産性の評価

2.1 概要

知的生産活動は「情報処理」「収束的思考」「拡散的思考」「リラックス」「リフレッシュ」「フォーマルコミュニケーション」「インフォーマルコミュニケーション」の7つのbehaviorに分類される¹⁾。昨年までの研究²⁾では前3者に関して、個人用のタスクを作成し、屋外を含めた異なる環境下で被験者実験を実施して、環境との関連を確認した。一方、オフィスでの知的生産活動においてはコミュニケーションも重視されており、その満足度が知的生産性に影響している¹⁾。そこで、今回はコミュニケーションが結果に影響を与えるようなグループ用のタスクを新たに考案し、屋内・屋外の2か所のワークスペースを使って被験者実験を行った。

タスクの実施スケジュールを表-1, 2に示す。大学生の被験者男子4名と女子4名の2グループを構成し、4日間に分けて実験を行った。被験者は日ごとに全て入れ替えた。

8名の被験者はインストラクションとタスクの練習後A・B2つのグループに分かれて別々のワークスペースに移動する。タスクの1セットは、個人タスク、グループタスク、アンケートから構成されている。これを2セット行った後、場所を入れ替えてさらに2セット行う。



屋内での個人タスク



屋外での個人タスク



屋内でのグループタスク



屋外でのグループタスク

図-1 実験風景

表-1 実験の全日程と被験者グループの性別

	実施日	被験者性別	
		Aグループ	Bグループ
1日目	10/24(土)	男性	女性
2日目	10/25(日)	女性	男性
3日目	10/31(土)	男性	女性
4日目	11/1(日)	女性	男性

表-2 タスクのスケジュール

	実施場所		タスク		実施時間※
	Aグループ	Bグループ	題材	個人/グループ	
1回目	屋内	屋外	かばん	個人 グループ	11:30～11:40 11:50～12:20
2回目	屋内	屋外	自転車	個人 グループ	12:30～12:40 12:45～13:15
3回目	屋外	屋内	めがね	個人 グループ	13:30～13:40 13:45～14:15
4回目	屋外	屋内	枕	個人 グループ	14:30～14:40 14:45～15:15

※記載以外の時間はアンケート、休憩、移動

2.2 タスクの実施方法

タスクとしては「生産力テスト」³⁾を使用した。「新しい○○を考えてください」という問いに対し、新しい機能・効果等のアイデアを自由に回答させるものである。出題例(個人用)を図-2に示す。生産力テストのテーマ(上記の「○○」)に使用した題材(4セット)を表2中に示す。

被験者にはまず一人ずつ分かれて着座させこれに10分で回答させる。回答の数に制限はないが、終了前に被験者自身に自分で書いた回答からベスト5を選ばせる(①)。

次に、グループ4人を同じテーブルに着座させ、各自が①で作成した回答を持ち寄り、互いに参考にしながら自由に議論しアイデアをブラッシュアップさせる。時間は30分であるが、①と同様に最後にはグループでベスト5のアイデアとしてまとめさせる(②)。グループタスクではA3サイズの白紙と付箋を配布し、議論の過程で適宜使用させた。また、最終案は付箋に記入の上用紙に貼付して提出するよう指示した。

本報では①を個人タスク、②をグループタスクと呼ぶ。

なお、回答の質は次節に示すように「新奇性」と「適切性」で評価するが、このことは実験前に被験者に教示し、ベスト5もその基準で選ぶよう指示した。

2.3 タスクの評価方法

生産力テストでは、得られた回答を「新奇性」と「適切性」をそれぞれ0(全くない)～4(非常にある)の5段階で採点され、2者の和がその回答の「創造性」を示すものとされている³⁾。採点は被験者実験の全日程終了後、被験者に評価用のシートを送付して行った。評価シートは1つの回答が16人の被験者(回答した本人を含まない)によって評価され、かつ順序効果が出ないよう回答をシャッフルして作成した。本報で示すのは16名の採点の平均値である。

3. タスクの成績

個人タスクもグループタスクも環境からの影響を受けると予想される。特に、グループタスクに関しては個人タスクに比べて回答の質が高まるはずであり、その度合いにはコミュニケーションの良否が影響していると考えられることができる。

全8グループのタスクの得点の推移を図-3に示す。「個人」は4人の出したベスト5、つまり20個の回答の平均点、「グループ」はグループで出したベスト5の平均点である。各グループとも4つの出題を個人⇒グループの順に実施しているが、初回はグループタスクの成績が必ずしも個人タスクよりも良くならない。2回目以降はグループタスクのほうが成績が良い。また、回を追うごとに成績が上昇するとともに、グループ間の差が縮まる傾向がある。初回はグループでの議論の要領もつかめず、さほど成績が伸びないこと、2回目以降は要領がつかめてきて、得点が増えるようになるとともに、慣れてくると議論がどのグループも

問い 「新しいカバン」を考えてください

回答欄	ベスト5にチェック□
1	<input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>
5	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/>
7	<input type="checkbox"/>

図-2 個人タスクの用紙例

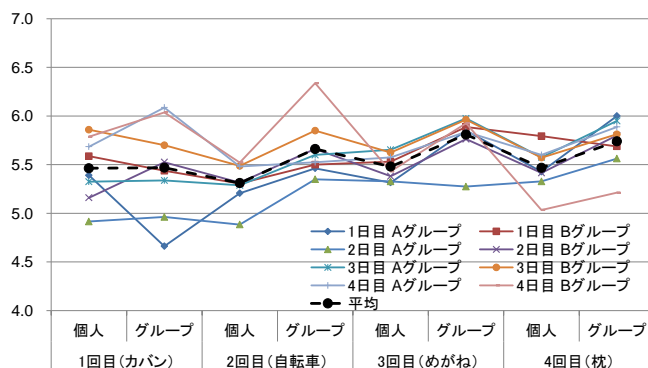


図-3 グループ別 得点の推移

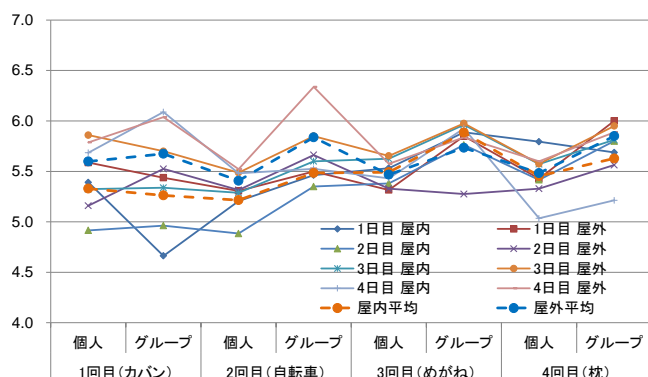


図-4 場所別 得点の推移

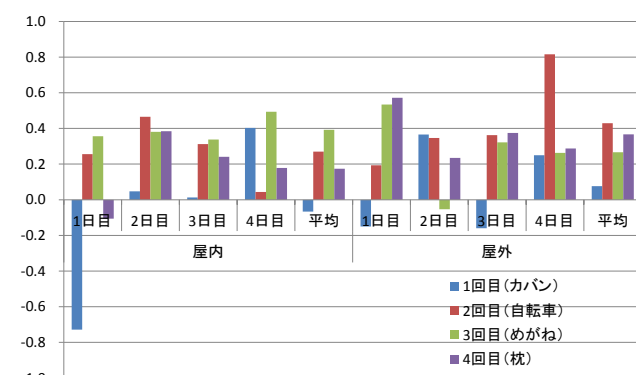


図-5 グループタスクでの得点上昇

似たような感じになって、グループ間の差が縮まる、といった推測は可能である。ただし、出題内容が4回とも異なることに注意が必要である。

場所別の得点の推移を図-4に示す。破線で屋内および屋外で実施した場合の平均を示す。前々報で示した通り、2～4日目の屋外では大半の時間帯でPMVが-1を下回っており、寒いと感じていた被験者が多かったが、タスクの成績はむしろ屋外のほうが概ね成績がよく、特に1,2回目でその差が大きい。

次に、グループタスクと個人タスクの成績の差、すなわちグループでの議論を経て向上した得点を図-5に示す。この数値の多寡はグループタスクでのコミュニケーションの良否と強く関連していると考えられる。

一部の例外を除き、グループタスクのほうが得点が高い。また、その上昇分を屋内と屋外とで比較すると、屋外のほうが大きくなっていることがわかる。前述のとおり、2～4日目は屋外の温熱環境は良くなかったが、屋内と比べて大差ない得点上昇が確認された。

4. タスクの成績と環境測定値との相関

4.1 照度とタスク成績との相関

個人タスク(図-6)とグループタスク(図-7)について、屋内と屋外を色分けして示す。

いずれも照度との特筆すべき関係は見られない。なお、屋外は屋内の10倍程度の照度であったが、10,000lx程度と適度な遮光の効果が表れており、「自然光のまぶしさ」を訴える被験者は述べ128回のアンケートで6名に過ぎなかった。

4.2 温冷感とタスク成績との相関

温冷感(PMV)とタスク成績との関係について、図-8(個人)、図-9(グループ)に示す。

前々報で示した通り、屋外の温冷感は屋内よりも広く分布している。タスクの成績はPMVとほぼ無関係であった。PMVは0付近が最も不満足者が少ないとされているが、今回の実験では0付近で成績が上がるといった傾向は見られなかった。

4.3 騒音値とタスク成績との相関

同様に、個人タスク(図-10)とグループタスク(図-11)について示す。個人タスク、グループタスクともに屋外のほうが騒音値が大きくなっているが、これは主に暗騒音の差によるものと思われる。また、図-10と図-11を比較すると、屋内・屋外ともに騒音が大きくなっているが、これはグループで議論する際の音声が反映されているものと思われる。

グループタスクでは等価騒音レベルが大きいほど得点が高くなる弱い傾向が見られる。そこで、話声の等価騒音レベル(グループタスクと個人タスクの音圧から算定)とグループタスクによる成績の向上分との関係を図-12に示

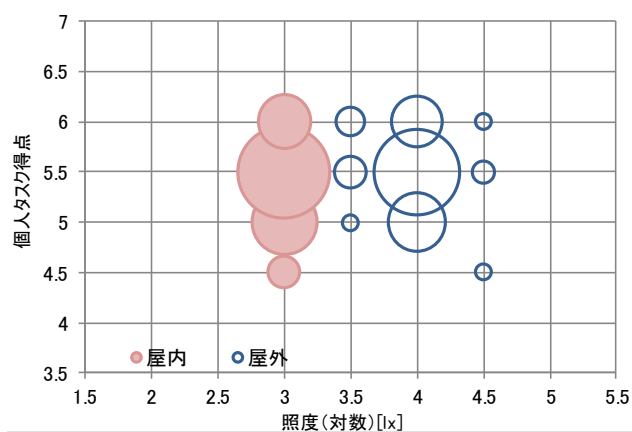


図-6 照度と個人タスクとの関係

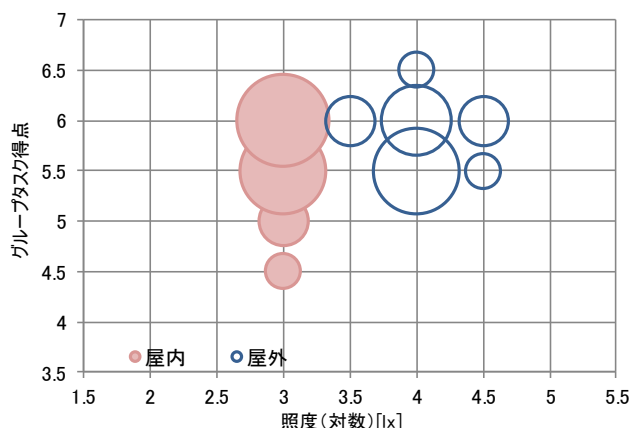


図-7 照度とグループタスクとの関係

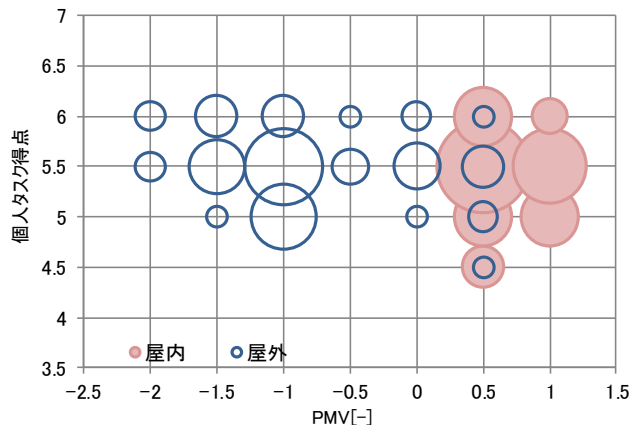


図-8 PMVと個人タスクとの関係

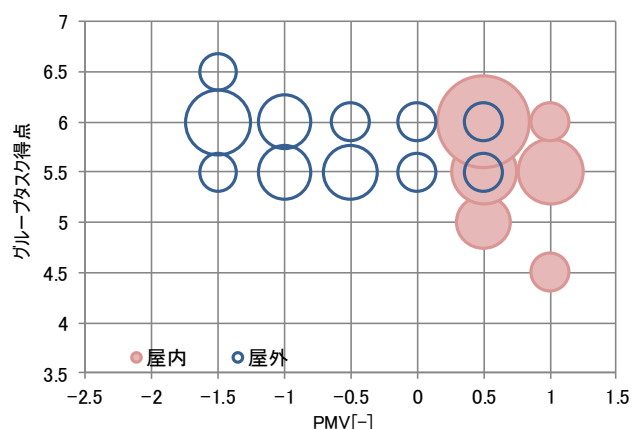


図-9 PMVとグループタスクとの関係

す。会話が活発に行われることでグループタスクの成績が向上すると予想したが、今回の実験では確認できなかった。サンプル数が不十分であること、屋外の暗騒音が不安定であること、騒音計と被験者との距離が一定にできていないことなど、要因は考えられる。

5. 主観評価とタスク成績との相関

種々の主観評価とタスクの成績との関連についても確認した。ここでは「環境」「機能」「印象」の満足度をさらにまとめた総合満足度を例として、タスクとの相関を確認する(図-13, 14)。

満足度が高いほど成績が良い、といった傾向は個人タスク、グループタスクともに見られなかった。ただし、図-13

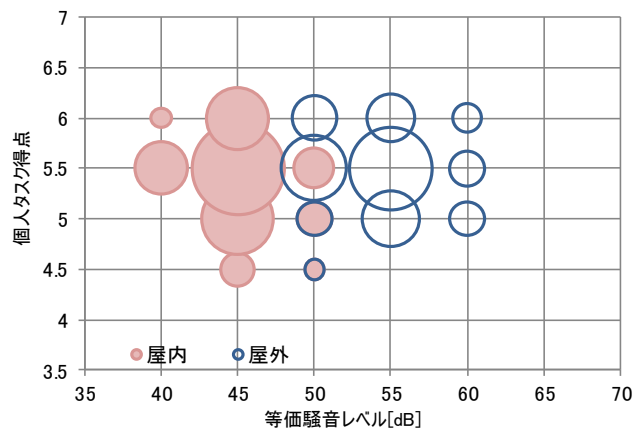


図-10 等価騒音レベルと個人タスクとの関係

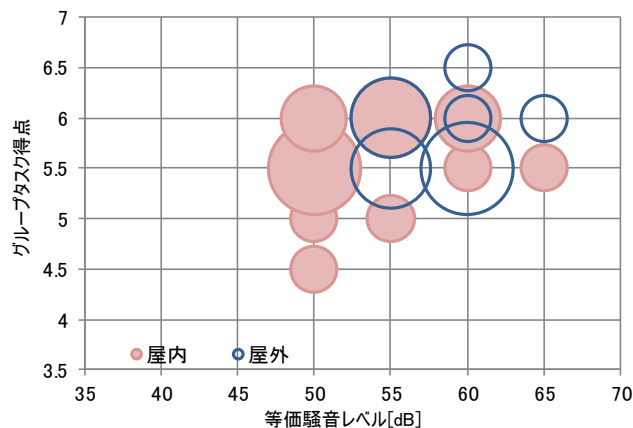


図-11 等価騒音レベルとグループタスクとの関係

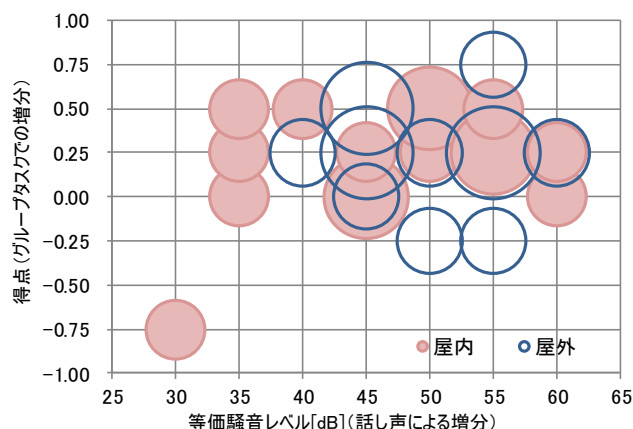


図-12 話声による等価騒音レベル増分と得点増分との関係

と図-14を比較すると分布に違いがあり、グループタスクでは満足度が低いほど成績が良くなる弱い傾向がある。つまり、グループタスクは個人タスクに比べ満足度の低さがタスク成績に「より影響しにくい」傾向があると言える。

6. まとめ

屋内・屋外のワークスペースにて、特にグループによる知的生産性を比較する実験を行い、下記の知見を得た。

- ・屋外は温冷感的には多くの場合不快側(寒い)であったが、タスクの成績は個人・グループともに屋内を上回る傾向があった。
- ・タスクの成績と環境測定値との間には相関がほとんどなかった。
- ・グループタスクは個人タスクに比べ満足度の低さがタスク成績に「より影響しにくい」傾向があった。

【参考文献】

- 1) 国土交通省,「知的生産性研究委員会報告書」, pp.12~17, 2013.3
- 2) 安藤邦明他,「分散型ワークスペースの知的生産性および快適性に関する研究」その1~3, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 45~56, 2014.9, 同その4,5, 同, pp. 69~76, 2015.9
- 3) 樋口祥明他,「物理環境が創造的思考に与える影響」その1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 環境工学Ⅱ, pp. 1263-1266, 2010.9, その3~4, 同, D-1, 環境工学Ⅰ, pp. 137-140, 2011.9, その5, 同, D-1, 環境工学Ⅰ, pp. 109-110.

【謝辞】

本研究は環境省「平成27年度CO2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の委託事業(技術開発課題名「省エネルギーに繋がる居住者の移動を促すための空間設計と誘導システム構築」)の一環として実施した。

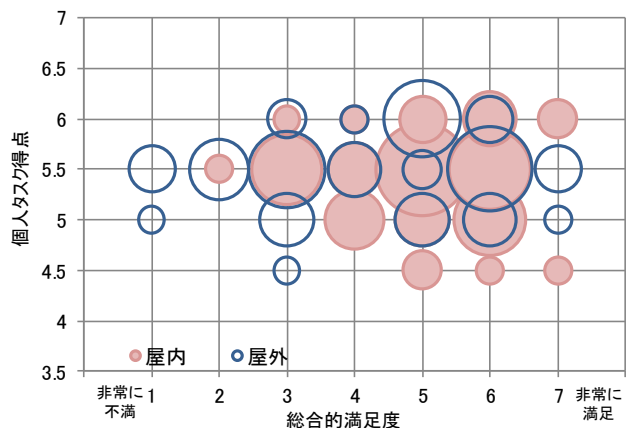


図-13 総合満足度と個人タスクとの関係

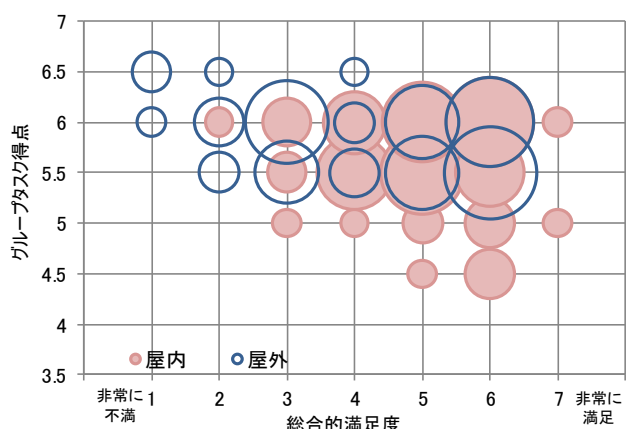


図-14 総合満足度とグループタスクとの関係

学校建築におけるコミュニケーションスペースの設計手法に関する研究
(その3) 中高一貫校における中庭及び隣接屋内空間の利用実態に関する年間調査
Design Methods of Community Space in School Building
(Part3)Field Survey on Actual Usage of Courtyard and Adjoining Indoor Space
in Junior and Senior High School

○坂 口 武 司 (竹中工務店) 山 中 俊 夫 (大阪大学)
甲 谷 寿 史 (大阪大学) 桃 井 良 尚 (大阪大学)
相 良 和 伸 (大阪大学) 花 田 潤 (大阪大学)
Takeshi SAKAGUCHI*¹ Toshio YAMANAKA*² Hisashi KOTANI*²
Yoshinao MOMOI*² Kazunobu SAGARA*² Jun HANADA*²
*¹ Takenaka Corporation *² Osaka University

In this study, design method of community space in school is proposed. Recently, the community space in school have been important factor when students choose new school. Environmental elements such as temperature, globe temperature, relative humidity, wind velocity, illuminance, and solar radiation, questionnaire, and visual survey in court and indoor space to comprehend feature of the place were conducted. In this paper, the result of the annual research is presented.

1. はじめに

生徒や保護者にとって学校選択の重要な要素として、キャンパス空間の魅力が挙げられる。本研究では改修後の学校建築におけるコミュニティスペースに着目する。コミュニティスペースといってもその環境や利用方法は多様であり、利用目的や滞在時間によって変化する。本研究は、対象とする中庭および隣接する屋外空間が生徒達によってどのように使われているのかを、環境特性調査、目視定点観測、及びアンケートによって包括的に調査し、総合的な視点から学校建築における中庭および隣接屋内空間の設計手法の検討を行う。前報¹⁾では、6、9、11月の環境特性調査と目視定点観測の結果を示した。本報では、これに冬期調査を追加し、6、9、11月及び2月の年間を通したアンケートの分析結果を報告する。



Fig.1 Hall

Fig.2 Courtyard

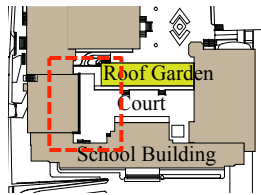


Fig.3 Site Plan

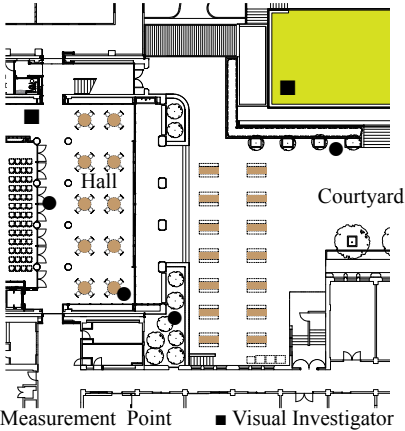


Fig.4 Plan of the Hall and Courtyard

2. 調査概要

2.1 調査対象空間 (Fig.1-4)

神戸市内の女子中高一貫校校舎の中庭および隣接屋内空間を調査対象とした。それぞれにテーブルと椅子を配置し、昼休みや放課後に生徒が自由に利用できるよう計画した。

2.2 環境特性調査 (Fig.4)

●印の位置に、計測機器を配置した。また、本報で示す教室気温は中庭の南に位置する校舎の2, 3, 4階各1教室における計測値の平均値である。調査期間をTable1、測定機器をTable2に示す。

2.3 目視定点観測 (Fig.4)

■印の位置に、調査員計2名を調査時間中配置した。記録間隔は10分、記録内容は、場所、人数、行動、日陰位置である。調査期間はTable1に示す通り。

	Spring 2014	Summer 2014	Autumn 2014	Winter 2015	Autumn 2015
Field Survey	16, 17 Jun.	8, 9 Sept.	11, 12 Nov.	23, 24 Feb.	27, 28 Oct.
Questionnaire	16~20 Jun.	7~11 Sept.	9~13 Nov.	22~26 Feb.	-
	Once a week	Once a week	Once a week	Once a week	-

Table1 Investigation Out Frame

Measurement Equipment		Height of Point(mm)
Temperature	T&D RTR53	500
Relative Humidity		500
Wind Verocity	Field Pro 200-WS01B-5	1070
Globe Temperature	Climatex C-BB-75mm	800
Solar Radiation	Field Pro SP-110B-L3	650
Illuminance	T&D TR-74Ui	650

Table2 Measurement Equipment

2.3 アンケート調査

中学1年生から高校3年生を対象に、ホール及び中庭の利用と環境評価に関するアンケート調査を行った。実施期間をTable1、アンケート項目をTable3、回答者数をTable4に、それぞれ示す。

	Question items	Answer format
Individual attribute	Scool year, Sensitive to heat or cold	Select answer
Usage of hall or courtyard	Frequency of usage in hall or courtyard	Select answer
	Reason why you don't stay in hall or courtyard	Free answer
	Place where you stay frequently other than hall and courtyard	Select and free answer
Usage and impression about hall or courtyard in which you stay more frequent	Staying time, the number of your group	Select answer
	Reason why you chose hall or courtyard, Action what you do there	Select and free answer
	Thermal sensation, Thermal sensation of seat,	5 stage evaluation
	Brightness, Noise, Cleanliness of air	5 stage evaluation
	Wind, Sunshine, Smell	4 stage evaluation
	Activeness, Sophistication, Spaciousness, Familiarity	5 stage evaluation
	General comfortability, Ease of use	5 stage evaluation
	Comfortable phenomenon	Select and free answer

Table3 Items of Questionnaire

	Spring 2014	Summer 2014	Autumn 2014	Winter 2015	Total
1st J.H.	38	35	36	34	143
2nd J.H.	35	37	33	34	139
3rd J.H.	35	37	37	32	141
1st S.H.	50	42	48	48	188
2nd S.H.	47	50	51	50	198
3rd S.H.	49	46	42	-	137
Total	254	247	247	198	946

Table4 Number of Respondents

3. 環境特性調査と目視定点観測の結果と考察

3.1 調査期間中の気候条件 (Table5)

アンケートが月～金曜全般の利用や印象を金曜終業時に回答してもらったことを踏まえ、当該5日間の気温変化を示す。数値はアメダス神戸が現地実測値とほぼ同じであるため前者を用いた。昼休みや放課後の気温は概ね春期(6月)は22～28℃、夏期(9月)は25～30℃、秋期(11月)は12～20℃、冬期(2月)は9～15℃程度である。なお、10月調査はアンケート実施しなかったため、環境調査と目視観測を行った月・火曜分のみ示す。

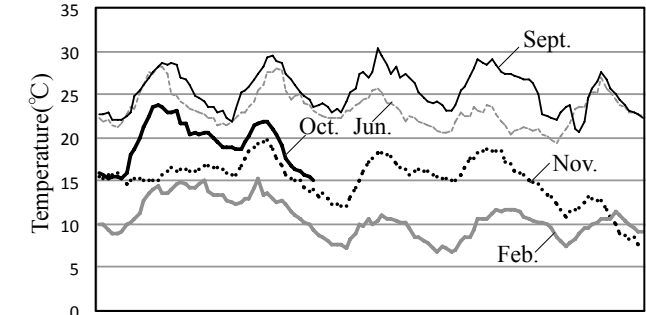


Table5 Temperature in 5days of Survey

3.2 滞在者数と温度の関係 (Table6-9)

Table6と7から、ホールと中庭に四季を通じて顕著な温度差がないことがわかる。これは、ホールの冷暖房があまり使用されておらず、かつ中庭側の外部出入口（掃出し窓）が開放されていることが多い運用実態によると推測される。Table6と8から、ホールは25℃を超え、また教室よりも暑くなってくると滞在者が減る一方、冬期に10℃近くまで下がり、教室よりも10℃近く低くなっても利用者が減らず、むしろ増える傾向が読み取れる。

Table7と9は、中庭は28℃程度で最も滞在者数が多い一方、10℃近くまで下がり、教室との温度差も10℃近くになるに従い、滞在者数が減っていることを示す。

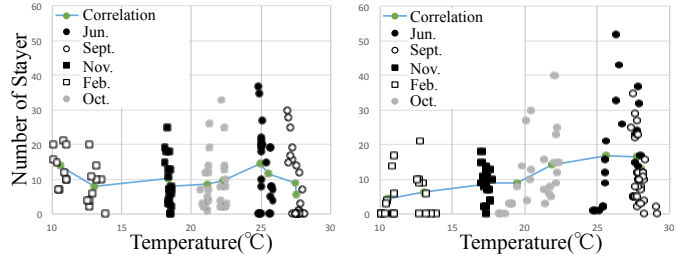


Table6 Correlation between Number of Stayer and Temperature in Hall

Table7 Correlation between Number of Stayer and Temperature in Court

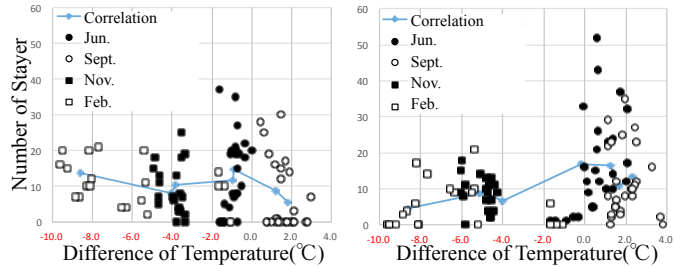


Table8 Correlation between Number of Stayer and Difference of Temperature(Hall-Classroom)

Table9 Correlation between Number of Stayer and Difference of Temperature(Court-Classroom)

3.3 中庭を選択した割合と温度の関係 (Table10,11)

ホールと中庭は隣接しており、どちらに滞在するか自由に選べる。夏期、中庭の気温が28℃程度になっても中庭を敬遠する傾向は見られない。一方、冬期、14℃を下回り、教室との温度差が6℃を下回ると、中庭よりもホールを選ぶ割合が半数以上となることが分かる。これは3.3の結果と一致する。ただし、3.3に示す通り、冬期もホールと中庭の温度はほぼ一致しているため、中庭からホールへ生徒が流れているのは、気温以外の要因があると推測される。

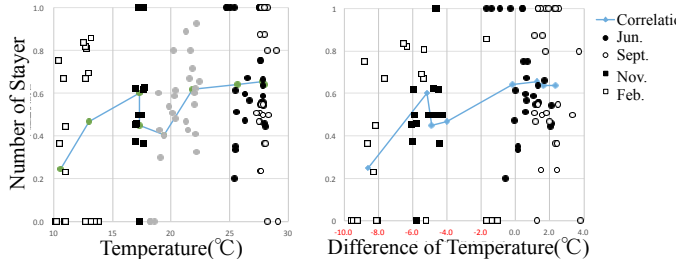


Table10 Correlation between Selected Ratio of Court and Temperature

Table11 Correlation between Selected Ratio of Court and Difference of Temperature(Court-Classroom)

4. アンケート調査の結果と考察

4.1 温冷感(Table12,13)

ホールは、春、夏、秋期は温熱環境的に中庸を示す「どちらでもない」が60%を超えるが、冬期は20%程度に減少し、「やや寒い」「寒い」が75%を占める。中庭も、春、夏、秋期は「どちらでもない」が60%以上だが、冬期でも40%以上が「どちらでもない」と回答しており、「やや寒い」「寒い」は55%程度と、ホールよりも快適側の回答になっている。これは、3.3に示す通りホールが期待したほど暖かくない一方、中庭は、寒さを承知の上で中庭を選択していることや、子どもたちの寒冷馴化能力²⁾によるものと推測される。

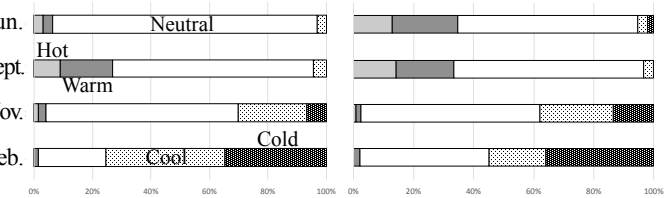


Table12 Thermal Sensation(Hall) Table13 Thermal Sensation(Court)

4.2 滞在時間(Table14,15)

ホールは、15～30分が春期60%から冬期17%へと減少する一方、15分未満が12%から72%へ増加している。中庭は、ホールより滞在時間が短く、15分未満が年間を通じて72～88%である。目視観測で、ホールでは学習や読書などの一定の継続時間を要する行為が見られる一方、中庭は待合せなど短時間行為が主で、行為と滞在時間によってホールと中庭を使い分けている様子がうかがえる。

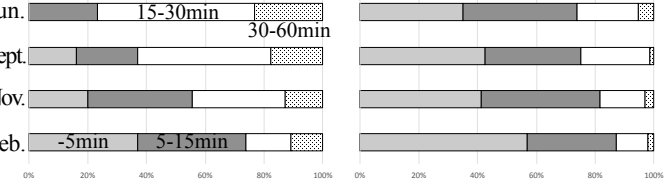


Table14 Staying Time(Hall) Table15 Staying Time(Court)

4.3 温冷感と滞在時間の関係(Table16-19)

夏期と冬期について、温冷感と滞在時間の相関を示す。3.2章で示した通り、冬期はホールと中庭の温度に大差がない。にもかかわらず、Table18と19を比較すると、中庭に比べてホールの温冷感が寒い側によっていることが分かる。子どもたちは、同じ温度であっても、ホールの方をより寒いと感じており、夏期よりも滞在時間が短くなっているといえる。中庭についても同様の傾向が見られるが、ホールほど顕著ではない。冬期のホールの利用を促進するために、暖房の運用やサッシの閉鎖など、温熱環境向上のための運用が必要である。

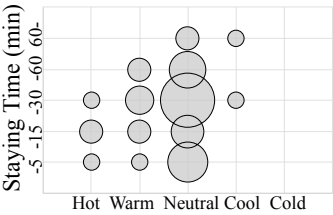


Table16 Thermal Sensation and Staying Time (Sept. Hall)

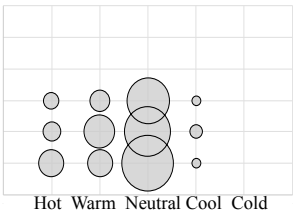


Table17 Thermal Sensation and Staying Time (Sept. Court)

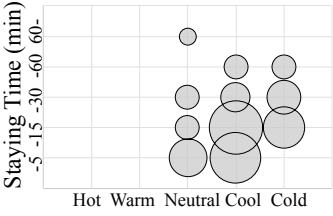


Table18 Thermal Sensation and Staying Time (Feb. Hall)

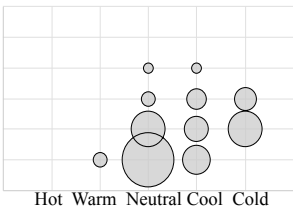


Table19 Thermal Sensation and Staying Time (Feb. Court)

4.4 選んだ理由(Table20-23)

ホールを選んだ理由として、年間を通じて「ベンチや椅子」「机」「雨をしのげる」「風をしのげる」が多い。また、6、9月には「涼しい」が挙げられている。

一方、中庭を選んだ理由としても、年間を通じて「ベンチや椅子」が最も多く挙げられているが、次いで、「自動販売機」が挙げられているのが特徴である。利用を促進するためには、ベンチ、椅子、自動販売機など、機能性を確保した上で、涼しさ、雨風をしのげる等の環境性を整えることが望ましいことを示している。

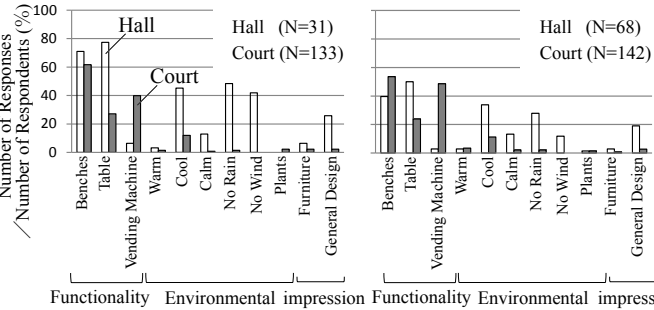


Table20 Reason for Chosen (Jun.) Table21 Reason for Chosen (Sept.)

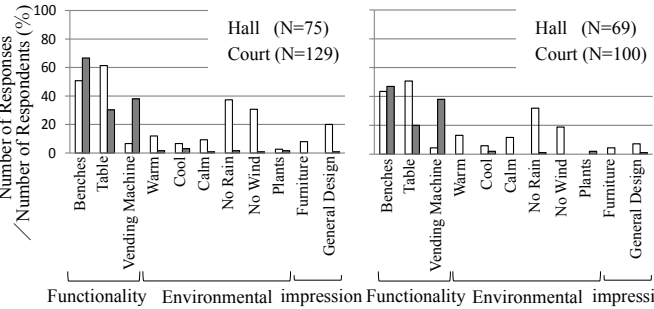


Table22 Reason for Chosen (Nov.) Table23 Reason for Chosen (Feb.)

4.6 「気持ち良い」「心地よい」要因 (Table24-27)

年間を通じて、ホール、中庭とも「開放的」「座れる」「のんびりできる」が上位3要素を占める。ホールでは年間を通じ「落ち着く」、6、9月の「涼しさ」が20%超の回答を得ている。中庭では、6、9月の「風」、9月の「日陰・木陰」、2月の「日ざし・木漏れ日」「空」など、四季や自然を対象とした要因が20%を超えて選ばれている。快適で落ち着くホール、自然を感じる中庭という計画意図が一定の支持を得ているといえる。

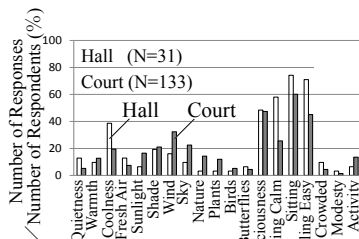


Table24 Comfortable Phenomenon (Jun.)

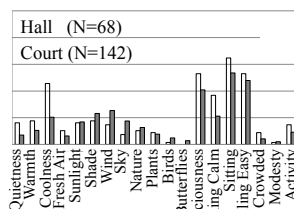


Table25 Comfortable Phenomenon (Sept.)

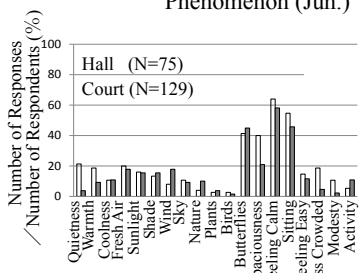


Table26 Comfortable Phenomenon (Nov.)

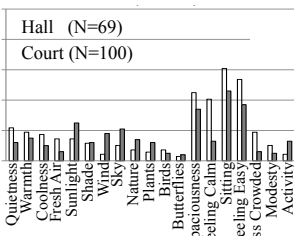


Table27 Comfortable Phenomenon (Feb.)

4.4 総合的快適感 (Table28-29)

年間を通じ、ホール、中庭とも、「不快」「やや不快」は10%未満で、両空間ともまずは一定の快適性を獲得しているといえる。中庭において温熱環境的に快適とはいえない難い夏期や冬期も50%以上が「快適」「やや快適」と回答している一方、冬期は、ホール、中庭とも「快適」「やや快適」の回答率が最も低くなっている。

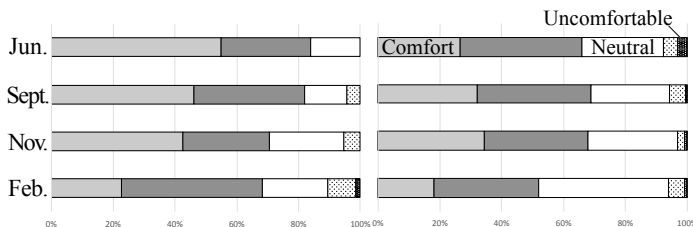


Table28 Evaluation of Comfort (Hall)

Table29 Evaluation of Comfort (Court)

4.3 「減多に利用しない」理由 (Table30)

9月は、涼しいホールを利用したいが「混んでいる・席がない」ので利用せず、中庭は暑くて利用しない、という実態が浮かび上がる。一方、2月は、中庭は寒いが、ホールも寒くて利用しないと推測できる。

ホールについては6月に「距離が遠い」という回答が30%近く見られる。ホールは校舎の西端1階にあり、教室からの距離や階段の有無等と利用頻度に関係があると推測されるが、その相関については今後の課題としたい。

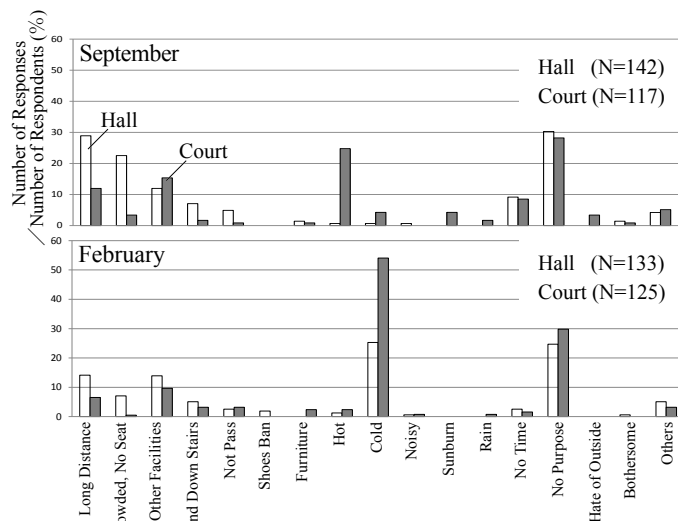


Table30 Reason for non-chosen (Sept. and Feb.)

5. まとめ

学校建築の中庭及び隣接屋内空間における温熱環境、利用実態および環境評価について把握した。

- 1) 気温が28℃でも中庭を敬遠する傾向は見られなかったが、気温が14℃を下回り、教室との温度差が6℃を下回ると、ホールを選ぶ割合が半数以上となった。
- 2) 冬期の中庭の温冷感ホールより快適側になった。寒さを承知の上で中庭を選択していること、子どもの寒冷馴化能力が高いためと推測される。
- 3) 年間を通じて、中庭はホールより滞在時間が短い。ホールは学習や読書、中庭は待合せ等、行為と滞在時間によって使い分けていることがわかった。
- 4) 中庭を選んだ理由として、「ベンチや椅子」が最も多く、次いで「自動販売機」が挙げられている。
- 5) 中庭の「気持ち良い」「心地よい」要因は、ホールと異なり「風」「日陰木陰」「日ざし・木漏れ日」「空」など自然に関する要因が選ばれている。
- 6) 中庭では温熱環境的に快適とはいえない難い夏期や冬期も50%以上が「快適」「やや快適」と回答した。
- 9) 「ホールを減多に利用しない」理由として「距離が遠い」という回答が30%近くあった。教室からの距離階段と利用頻度との関係等、今後の課題とする。

謝辞

現地調査にご協力頂いた本校の関係各位に深く感謝いたします。環境調査においては竹中工務店技術研究所にご協力いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

本論文に関連した既発表論文等

- (1) 花田潤, 坂口武司, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸: 学校建築におけるコミュニティスペースの設計手法に関する研究 (その2) 中高一貫校における中庭及び隣接屋内空間の利用実態に関する夏期・秋期調査, 空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集, 2015年9月
- (2) 坂口武司, 鍋谷めぐみ: 神戸海星女子学院中学校・高等学校, 日本建築学会建築デザイン発表会梗概集, 2015年9月

新校舎への移転前後の夏期・中間期における教室内の学習環境と学習効率の測定 Measurement about Learning Environment of School and Learning Efficiency Transferred Before and After in Summer and Autumn in a New School Building

○深瀬 貢佑 (立命館大学)

近本 智行 (立命館大学)

三村 凌央 (立命館大学)

川崎 克己 (鹿島建設)

宮崎 裕輔 (鹿島建設)

Kosuke FUKASE*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Ryouto MIMURA*¹Katumi KAWASAKI*² Yusuke MIYAZAKI*²*¹ Ritumeikan University *² Kazima Co. Ltd.

In 2013, R junior and senior high school was investigated classroom environment transferred before to compare transferred before and after. Then it was moved in 2014. In this research, we surveyed about learning environment of school and canvassed by using a questionnaire and a diagram test in R junior and senior high school. To measurement about the relation between classroom environment and learning efficiency transferred before and after in a school.

はじめに

近年、学校施設においても環境負荷低減のための取り組みが求められている。学校施設では、子どもたちにとっての学習の場、一日の大半を過ごす場であることから、適切な室内環境を確保した上で、省エネ対策を進めていく必要がある。2013年度にR 中学高等学校では、キャンパス移転前後の比較を行うため、移転前の教室内の学習環境を調査した。そして、2014年度に新キャンパスへと移転し学習環境が一新された。

本研究では、移転後のR 中学高等学校を対象に、教室内の学習環境の調査、生徒を対象にアンケート調査、図形テストを実施し、キャンパス移転前後の室内環境の比較及び学習効率と室内環境の関係性を検証していくことを目的とする。

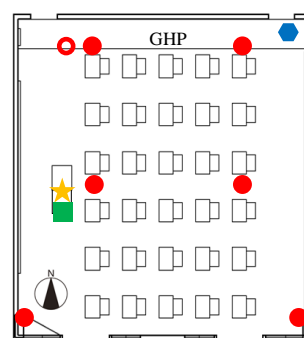
1. 学習環境調査概要

1.1 室内環境調査概要

教室環境に関しては、温湿度、放射温度、CO₂濃度、机上面照度、教室内の風速分布、電力消費量についての実測を行った。教室における測定機器設置場所をFig.1に示す。また、各授業時間の教室の使用状況（各開口部の開閉、照明の点灯、空調機の運転）を目視で調査した。本論文では、学習環境に大きな影響を与えると考えられる、温度、CO₂濃度、机上面照度の結果について報告する。

1.2 調査対象概要

N市に位置するR 中学高等学校の中学2クラス(J3-6、J3-7)、高校2クラス(H1-6、H2-4)を対象としている。実測期間は、夏期と中間期の2回行い、それぞれ2015年9月3日～9月16日、2015年10月24日～11月6日とした。



Tabale.1 Survey components

	測定項目	測定高さ(床)
●	放射温度を測定	2.1m
●	ボタン型温度計を設置して測定	2.8m/1.2m/0.2m
★	照度計により照度を測定	机上面 0.7m
■	CO ₂ 濃度と温度、湿度を測定	机上面 0.7m
●	ボタン型温度計を設置して、吹き出し温度、吸い込み温度を測定	空調吹き出し口、吸い込み口付近内
▲	教室内風速分布(土日実測)	1.2m

※教室平面図は南開口横吹きノズル式教室(H1-6)を使用

Fig.1 Floor plan of classroom and location of measuring equipment

1.3 代表クラス

移転後のキャンパスでは、ノズル式空調が主な空調方式であるためH1-6を選定し、移転前では、人数、移動教室を考慮し代表となるクラスを選定した。

1.4 比較対象

学習環境の調査をするにあたり、3パターンの比較を行った。Fig.2にその比較対象を示す。本論文では、移転前後の比較について報告する。

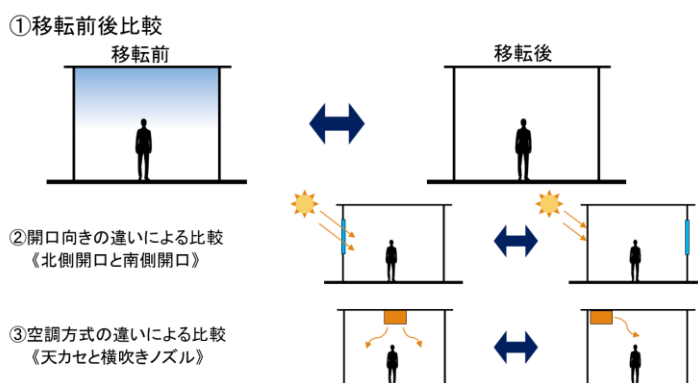


Fig.2 Comparison of classroom

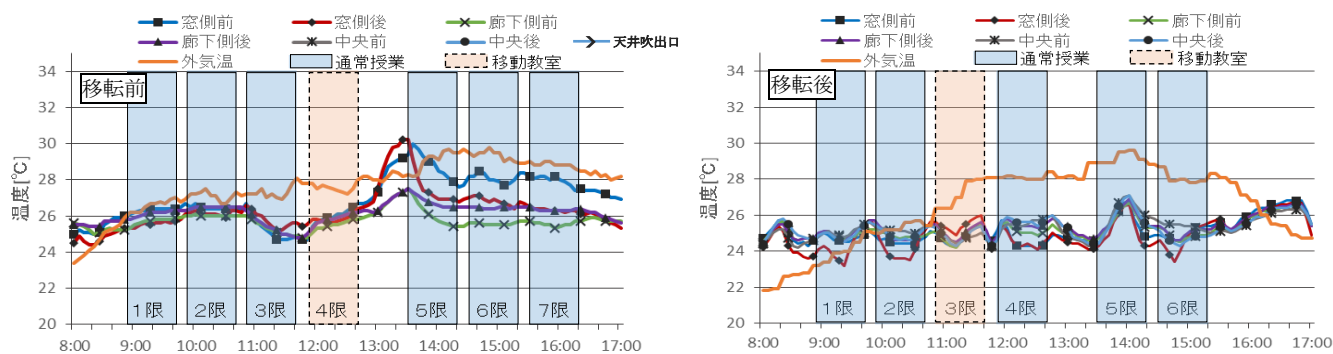


Fig.3 Temperature transition of classroom transferred before and after in summer

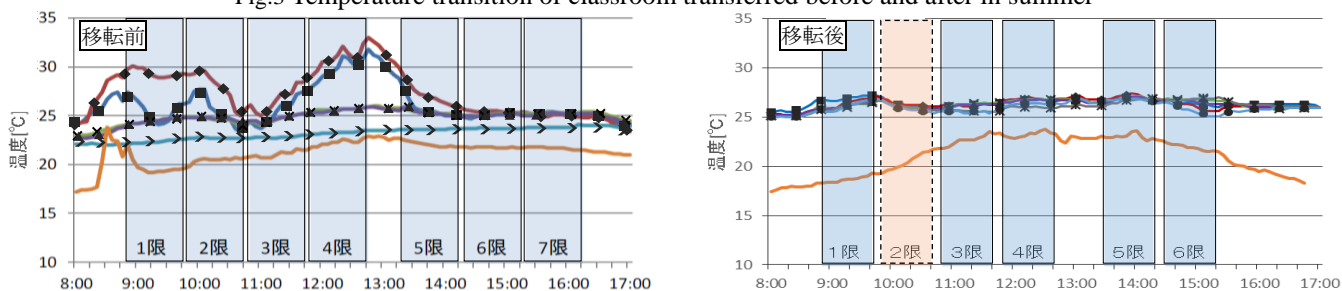


Fig.4 Temperature transition of classroom transferred before and after in autumn

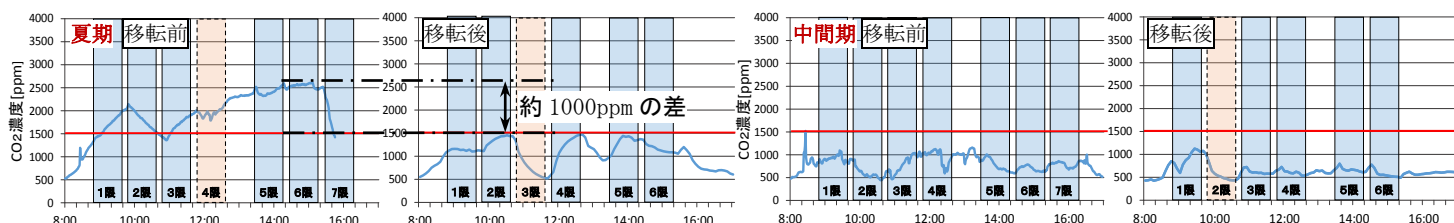
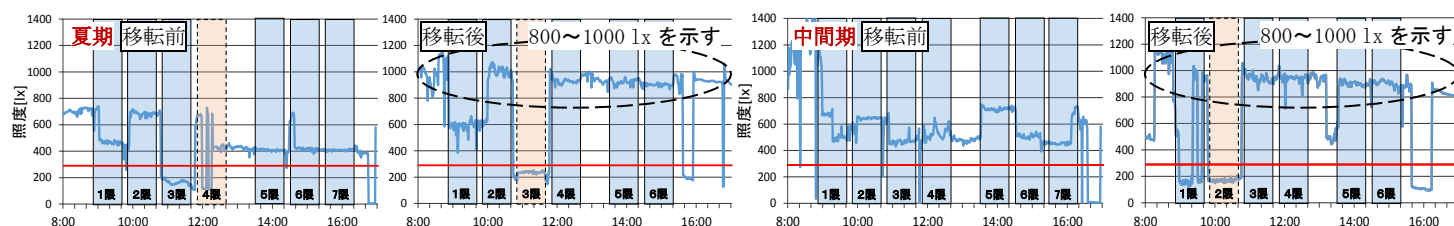
Fig.5 CO₂ concentration of classroom transition transferred before and after / summer and autumn

Fig.6 Illuminance on a desk surface transition of classroom transferred before and after / summer and autumn

2. 温熱環境調査結果

移転前後の比較をするにあたり、晴天日で外部環境が類似している日をそれぞれ選定した。Fig.3.4に夏期・中間期の移転前後における教室内温度の推移を示す。夏期の移転前では、廊下側と窓側で最大約2℃の温度差があり、窓側の方が高い温度を示した。しかし、移転後の教室温度では、室の位置による温度の差がほとんど見られなかった。これは、移転前では、外部負荷の影響が受けやすかったことが考えられる。中間期においても、移転前に見られた窓側と廊下側での温度差が、移転後では、夏期同様ほとんど温度分布に変化が見られなかった。

3. 空気質環境調査結果

Fig.5は夏期と中間期の移転前後における教室のCO₂濃度の推移である。移転前では、基準となる

1500ppmを超えることが一度もなかった。移転後で、CO₂濃度が著しく下がった原因として、移転後に各教室に設置された換気設備が考えられる。中間期は夏期に比べ、開口部の開閉がよく行われていたため、移転前後ともに基準値を下回っている。

4. 光環境調査結果

Fig.6は夏期・中間期における机上面照度の推移である。移転前後ともに基準値は超えているが、移転後では、800～1000 lx とかなり高い数値を指している。これは、移転後の照明には自動調光センサーが設定値600 lxで設置されているが、センサーの認識照度が必ずしも机上面照度と一致しないことを示している。今後、照明の目標照度値の設定値を低く定めることにより、照明の省エネルギー化が期待できると考えられる。

5. 室内環境と学習効率に関する調査

5.1 調査概要

実測期間中に週2回アンケートを、週1回テストを行い、そのアンケート及びテスト結果と実施した時の教室環境を比較し、学習効率と教室環境の関係性を確認する。

5.2 調査対象・期間

先に示した中学2クラス(3-6、3-7)53名、高校2クラス(1-6、2-4)72名を対象とした。実測期間は夏期2015年9月3日～9月16日、中間期2015年10月24日～11月6日とした。

5.3 テスト及びアンケート調査

実測期間中の移動教室の少ない日を選んでアンケートと図形テスト(Fig.7)を行った。Table.2に実施期間と実施回数の詳細とTable.3にアンケートの調査項目の詳細を示す。また、Table.4にそれぞれの実施日及び時間、内容について示す。

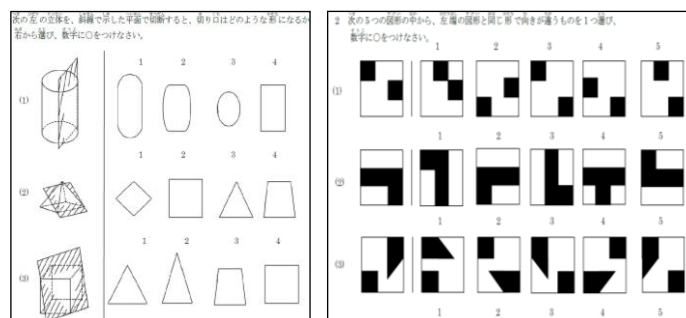


Fig.7 Diagram test

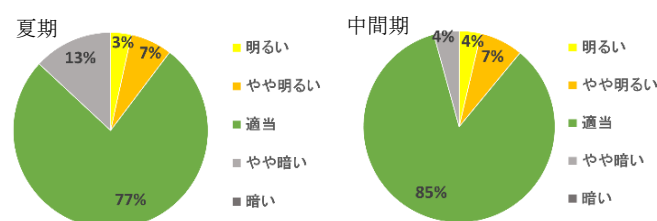


Fig.8 Questionnaire survey for illuminance on a desk surface

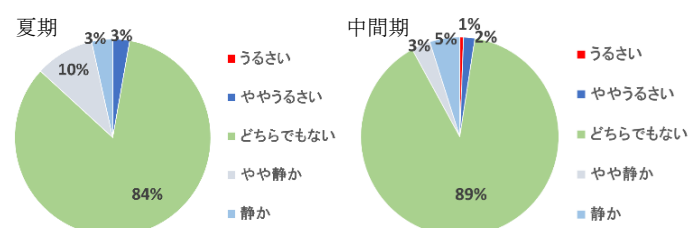


Fig.9 Questionnaire survey for sound environment

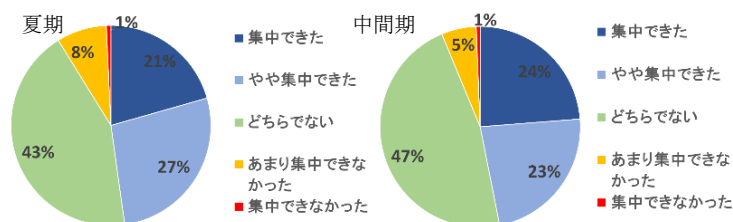


Fig.10 Questionnaire survey for degree of concentration

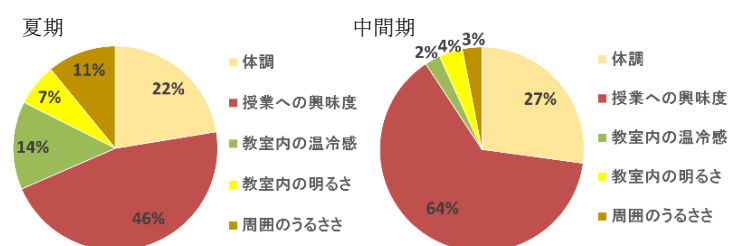


Fig.11 Main causes of concentration

6. 調査結果

6.1 調査概要

Fig.8、Fig.9には生徒の机上面の明るさに関するアンケート結果と教室内の音環境に関するアンケート結果を示す。また、Fig.10、Fig.11にはその時の集中度に関する結果と主な原因に関するアンケート結果を示す。

6.2 アンケート比較

光環境と音環境について夏期・中間期とも不快申告はわずかであり、その環境下で集中できなかったと答える申告者も1割未満と少ない。また、原因に関しては中間期よりも夏期の方が環境要因の影響を受けやすい。

6.3 温冷感比較

アンケートIの温冷感申告と各座席エリア平均温度を比較し、生徒が快適と感じる温度を調べた。評価項目(縦軸)ごとに測定値を平均し重心を求め、結果を求めた。Fig.12、Fig.13はそれぞれの評価項目ごとの

Table.1 Implementation summary

	夏期 2015/9/3～2015/9/16	中間期 2015/10/24～2015/11/6
アンケート	1週目(2回)+2週目(2回)	1週目(2回)+2週目(2回)
図形テスト	1週目(1回)+2週目(1回)	1週目(1回)+2週目(1回)

Table.2 Items of questionnaire survey

	調査項目
アンケートI	一限毎の座席エリア/机上面明るさ/体感温度/集中度等
アンケートII	一日を通しての室内の明るさ/温冷感/音環境/学習意欲等

Table.3 Details of date

	主な実施日	実施時間	内容
アンケートI	水曜日、金曜日	各授業終了後	教室環境と授業への集中度を問う内容
アンケートII		最終授業終了後	教室環境が授業の理解度にどのように影響したのか問う内容
テスト	水曜日	最終授業終了後5分間	適正検査で行われている簡単な図形テスト

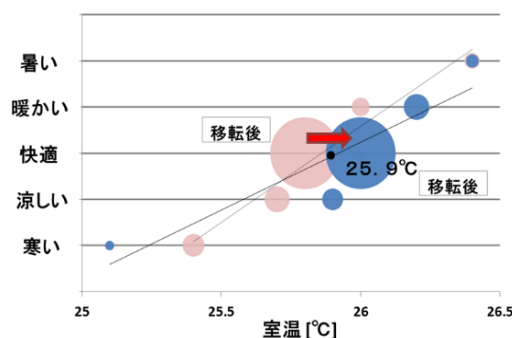


Fig.12 Warm-cold questionnaire in summer

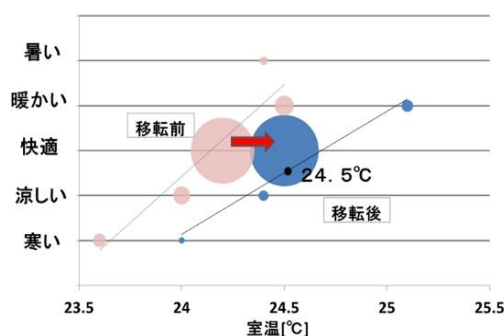


Fig.13 Warm-cold questionnaire in autumn

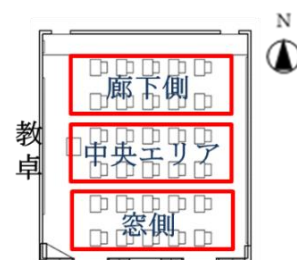


Fig.14 Area division in classroom

重心のみを示し、平均したプロットの数をもとに円の大きさとしてバブル図で示している。移転後の中間期の温冷感のばらつきがほぼなくなり、夏期・中間期ともに快適と感じる温度が少し上昇した。

6.4 エリア別比較

Fig.14 にエリア区分と Fig.15 に移転前後のエリア別温冷感アンケートの結果を示す。教室内の温度差の改善により、生徒の身体への負担が軽減され、学習中の窓や扉などの換気動作や空調操作が減り、講義への集中力の持続になりうる。

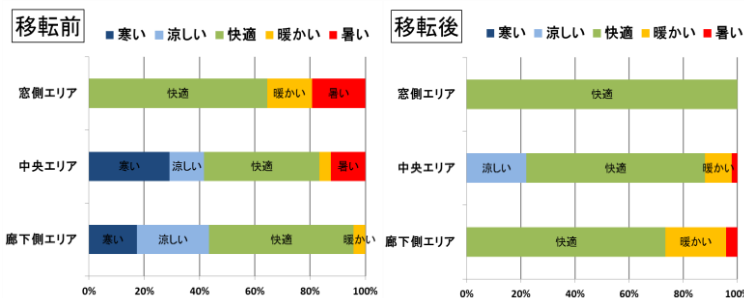


Fig.15 Warm-cold feeling comparison in classroom

transferred before /after in summer

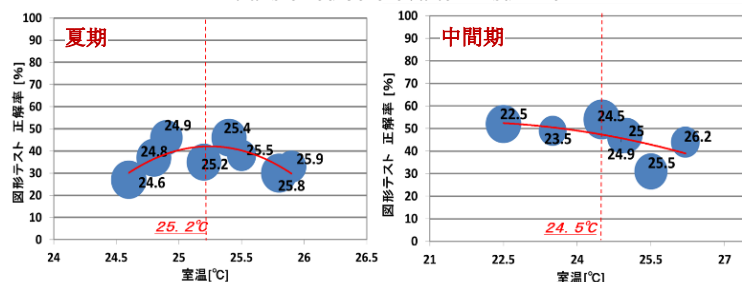


Fig.16 Test results and temperature /summer and autumn

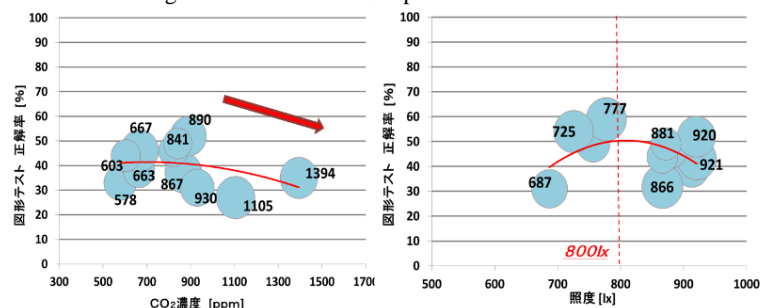


Fig.17 Test results and CO2

Fig.18 Test results and concentration /summer and autumn

illuminance /summer and autumn

参考文献

- 1) 野口ら：教室の学習環境と学習効率に関する研究（第1報）移転前施設の夏期・中間期における学習環境と学習効率の測定、空衛学会大会、第8巻、pp289-292、2014年9月
- 2) 宮崎ら：新建築・新設備立命館中学校・高等学校長岡京キャンパス、BE建築設備、764、8-18、2014年9月

謝辞

本研究を進めるにあたって鹿島建設（株）の方々には多大なご協力を頂きました。記して感謝の意を表します。

7. 図形テスト結果

テスト結果は各教室の正解率の平均とその時の測定値をバブル図にして関係性を示した。

7.1 図形テストと温度比較

テスト結果とその教室内の温度の比較を、夏期と中間期を分けて Fig.16 に示す。夏期は 25.2°C 付近、中間期は 24.5°C 付近で最も正解率が高くなっている。

7.2 図形テストと CO2 濃度・照度比較

Fig.17.18 にテスト結果とその時の CO2 濃度、照度を比較したものを示す。Fig.17 では近似線が右下がりになっており、CO2 濃度が高くなるにつれて正解率が下がっている。CO2 濃度を常に 1000ppm 未満に抑えることが学習環境としては良いと考えられる。移転後は 800 lx 付近が最も正解率が高くなった。

8. まとめ

本研究により得られた主な成果を以下に述べる。

- 1) 移転後では、夏期・中間期ともに移転前にみられた教室内の温度分布に差がほとんどなくなった。
- 2) 夏期における CO2 濃度は、移転前では、基準を大きく超えていたが、換気設備の設置により、移転後では、CO2 濃度の値が著しく低下した。
- 3) 移転後では、各環境要素に対して不快申告が少なくなり、学習環境としての快適性が向上した。
- 4) CO2 濃度を低い水準で保ち、適度な照度と静かな環境を維持することで高い学習効率の持続が見込める。

高分解能衛星による植生指標を用いた都市緑被率推定に関する研究 Study on city green coverage ratio estimate using the vegetation index by the high-resolution satellite

○湊 智大（関西大学） 宮崎ひろ志（関西大学） 橘高 康介（神戸大学）

Tomohiro MINATO^{*1}, Hiroshi MIYAZAKI^{*1}, Kosuke KITTA^{*2}

^{*1}Kansai University ^{*2}Kobe University

Recently, high spec sensors on satellites have been launched such as IKONOS, GeoEye, and so on. With these high resolution sensors, however, new type errors on land surface classification, the shadow effects, which caused by high rised buildings were reported. This study aims to investigate the accuracy of classification of green coverage with recent high resolution sensors. We used data from GeoEye (launched in 2008, resolution was 1.64 meters). As the groundtruth data, we used aerial photographs. The resolution of these normal color photos were about 30 centimeters at the ground. In this study, we used GIS to compare these data. As the result, a weak correlation between Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), which was calculated with GeoEye, and the ground truth, which was accounted from the aerial photograph, was recognized. The reason why there was only weak relationship was estimated that the offnadir angle in aerial photograph, and some error in geo-reference of the aerial photograph.

1. はじめに

都市環境分野では、従来都市環境情報の取得のため、次のような利用技術開発及び利用応用に関する研究が多く見られた。

- ・広域緑被率分布推定
- ・広域土地被覆分布推定
- ・都市内緑被率分布推定
- ・都市の土地被覆分類
- ・表面温度分布推定 (Land Surface Temp.)
- ・熱慣性分布推定

こうしたなか、近年、高性能衛星の打上げが相次いでいる。衛星の高性能化に見られる主なトレンドには次のようなものがある。

- ・観測帯域の多バンド化 (例: ASTER terra、Hyperion など)
- ・特殊目的のためのセンサ搭載 (例: TRMM 熱帯降雨観測、など)
- ・空間分解能の高度化 (例: IKONOS、Quick Bird など)
- ・データ分解能の高度化 (例: Quick Bird、LANDSAT 8 など)
- ・可変ナディアアングル化による回帰日数短縮 (例: IKONOS など)

例えば従来最も多く利用されてきた LANDSAT 5 号 (1984 年打上げ) から、空間分解能はそのままであるが、新しい LANDSAT 8 号 (2012 年打上げ) に移行した場合、データ分解能の高度化により、同じピクセルで、8bit (256 階調) であったデータが、16bit (65536 階調) と階調が 256 倍に豊かになる。こうした衛星の高性能化は、例えば都市緑被率推定というテーマで考えると、従来衛星から得られた情

報が 100 倍程度豊かになることが期待される。

一方、高木らは、衛星の高性能化、特に 1 メートル前後にまで高度化された空間分解能は、自動車などの単一物の色彩が、従来の土地被覆分類法で誤分類をもたらす可能性があることを指摘している。また宮崎は、可変ナディアアングル化は、従来の直下視と異なり、高層化した都市部で斜め撮りにより壁面の倒れこみ効果があることを指摘した。これらの報告などより、高性能化した衛星を従来の方法で新たに利用する場合、慎重な検証が必要であると考えられる。しかし、都市環境分野ではこうした検証事例は少ないのが実態である。本研究は、今後都市環境調査で主流となると思われる LANDSAT 8 号による都市緑被率推定を想定し、検証を行うことを目的とするものである。ここでは LANDSAT 5 号時代の代表的な植生指標を、LANDSAT 8 号データで作成、比較を行う。またグラントゥールスとの比較検証も試みる。

2. 各種植生指標の LANDSAT 8 号データへの適用

2-1. 緑被率推定方法

衛星をプラットフォームとしたリモートセンシング技術のなかで、緑被率推定は、土地被覆分類の中でも比較的精度が高いとされている。その基盤技術は、植生の他地表面と異なるユニークな波長別反射特性に拠るものである。すなわち植生は可視光を強く吸収、近赤外域を強く反射する。代表的な植生指標は正規化植生指標 (Normalized Differential Vegetation Index、以下 NDVI) である。ま

た、LANDSAT 5号の利用を前提としてNDVIを改良した指標の提案も数多い。主なものに広ダイナミックレンジ植生指標 (Wide Dynamic Range Vegetation Index、以下 WDRVI) や、強化型植生指標 (Enhanced Vegetation Index、以下 EVI) などがある。下記にそれぞれの計算式を示す。

$$NDVI = \frac{NIR - VIS_{RED}}{NIR + VIS_{RED}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$WDRVI = \frac{\alpha NIR - VIS_{RED}}{\alpha NIR + VIS_{RED}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$EVI = \frac{2.5 \cdot (NIR - VIS_{RED})}{(NIR + 6 \cdot VIS_{RED} - 7.5 \cdot VIS_{BLUE} + 1)} \quad (\text{Eq. 3})$$

2-2. 検討に用いたデータ

World View 2は、DigitalGlobe社（米）が2009年に打上げた高性能商用地球観測衛星で、8バンド（Blue、Green、Red、NIR1、Coastal、Yellow、Red Edge、NIR2）、空間分解能1.84メートル（マルチスペクトル）、データ分解能（深度）は11bitである。本研究で用いたバンド帯は、LANDSAT 5号に倣い、上記のうち、赤（630-690nm、可視VISred）、近赤外（895-1770nm、NIR）の2バンドデータを用いた。データの撮影日は2012年7月27日、撮影エリアは、京都市中心部20平方km、雲量は0、オフナディア角は5°と、ほぼ直下視である。



Figure 3 NDVI

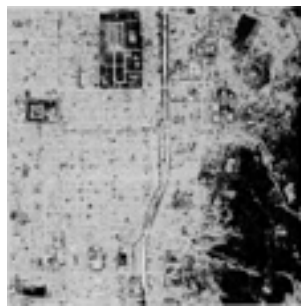


Figure 5 EVI



Figure 4 WDRVI

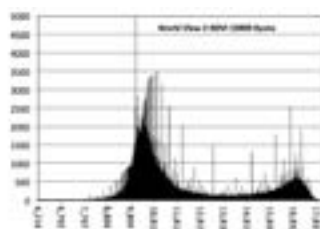


Figure 6 NDVI

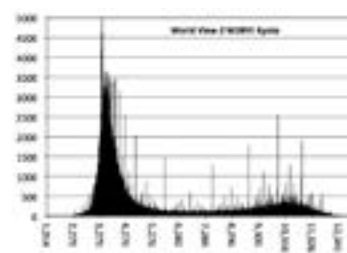


Figure 7 WDRVI

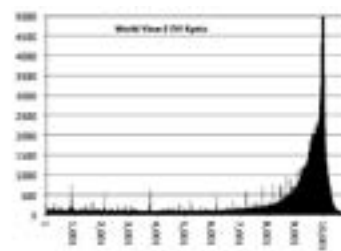


Figure 8 EVI

2-3. データ深度

Figure 1に衛星オリジナルデータのバンド間演算に用いた可視（赤）、近赤外のDN値のヒストグラムを示す。11bits、最大2048階調のうち、有効レンジ幅は、可視（赤）が500、近赤外で約1080と、25～50%程度しか有効に利用できていなかった。なお、これまで最新のLANDSAT 7号の場合、例えば上海、夏季2000年9月2日、雲量0の可視（赤）は88階調、近赤外データは118階調であった。World view 2は、LANDSAT 従来機との比較で、可視（赤）は5.6倍、近赤外バンドは9.1倍のデータ深度を持つことが分かった。

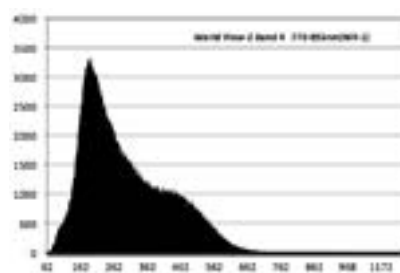
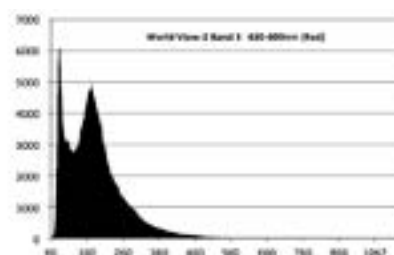


Figure 1 Histogram band3(0) band(U)

2-4. 植生指標比較

対象エリアは京都市中心部で、ほとんどが密集市街地であるが、京都御所、二条城などの大規模緑地のほか、東山などの自然地も含まれる。NDVI, WDRVI, EVI 各植生指標を作成した。結果をFigure2～4に、またヒストグラムをFigure5～7に示す。NDVI, WDRVI のヒストグラムには2つの山が確認できる。ふたつの正規分布が重なったものと推定され、市街地、緑地がともにある分散をもった正規分布となっているものと思われる。EVI は市街地側のみひとつの山が見られる。画像を見ると、植生は黒色一色でグラデーションは一見乏しい。EVI は市街地側の分類が豊かとなる。

3. グラントゥールスを用いた精度検証

3-1. 概要

本来グラントゥールスの取得には、観測日に合わせて実施踏査などが必要とされるが、ここでは同年同季節に観測・記録された空中写真の読み取り値をグラントゥールスとした。また本節での高性能衛星は、GeoEye、World View-2 クラスの現時点における最新衛星のものとした。空中写真に衛星画素よりも小さくなる格子メッシュを被せ、撮影航空機進路直下付近より、緑被率読み取りエリア（各10～20メートル四方）を10ヶ所ほど選定した。空中写真（デジタル画像）は通常のカラー画像であることから、本研究では緑被率の読み取りは目視で行い、このメッシュ単位で緑被率を推定した。こうしてグラントゥールス格子メッシュ（グラントゥールスに相当する緑被率推定値を属性値として持つ）と、衛星画像メッシュ（各種植生指標を属性値として持つ）との比較より、精度の検証を試みた。



Figure 9 After making polygon NDVI (L)
Aerial photography (R)

3-2. 検証に用いたデータ

国土地理院の空中写真アーカイブと、GeoEye-2 などの新世代衛星画像で、同年同季節に雲量0のデータが取得できていたのは全国で神奈川県横須賀市周辺の一角のみであったため、本節の検証対象エリアは同地とした。

空中写真は国土地理院空中写真カラー画像データで、撮影日は2014年9月29日、撮影高度2332メートル、ネガ原版から1200 [dpi] でスキャンしたデジタル画像で、地

上空間分解能約0.3mである。

衛星データは GeoEye -1 で、撮影日は2014年8月5日、雲量0、オフナディア角は12度と、対象地における夏至の最高太陽高度と同程度と、ほぼ真上からの撮影である。GeoEye センサ仕様などを Table 1 に示す。

Table 1 Summary of the GeoEye-1

Launch day	Sep 6 2008
Orbit height	681km
Wave Length of Pan data	450-800nm
Resolution of Pan data	0.41-0.50m
Wave Length of multi-spectral data	B 450-510nm
	G 510-580nm
	R 655-690nm
	NIR 780-920nm
Res of Multi Spec data	1.64m
Wedth of view	15.2km
Data Depth	11bits

3-3. メッシュデータの作成

緑被率とは特定の地域において、森林や草地や農地などの緑地で覆われている部分の面積割合のことである。まずはじめに空中写真をグラントゥールスとし緑被率を目視により求めた。GeoEye データの pixel サイズと合わせるため GIS 上で空中写真と GeoEye データの画像あわせを行った。この際実際に正しく合成できているかどうかを GIS の街区データにより確認した。その後 GeoEye 画像の pixel サイズに合わせてメッシュデータの作成を行った。

3-3. 緑被率算出範囲選択

空中写真一枚でもかなりの量のメッシュが作られる。そのため範囲を指定して緑被率の算定を行った。

①撮影位置

飛行機から撮影したものであり、縦横25km程の範囲を撮影しているため場所によっては非常に角度のついたところから撮られている。角度があると建物の陰に隠れた部分が見えないため正確な値が得られない。よって比較的直上から撮影された中心部分から選択した。

②日向であること

建物位置や太陽高度によって日陰になる範囲がある。日陰が日向かによって NDVI の値が同じ場所でも変わる可能性があるため、条件を同じにするように日向であるところを選択した。

③木の量

芝生のような厚みのない草地は草のある場所とない場所の判断がしづらい。そのため緑被率と NDVI の関係に誤差を生じやすい。そのため明らかに木の固まりであると分かる場所を選択した。

精度向上のため以上3つの条件に絞って12点緑被率を算定する場所を選択した。

3-4. 緑被率算定

目視により緑被率の算定を行った。3.1.2 で決定した範囲を一地点ずつ目視により確認した。明らかに0%、100%であると判断出来る pixel を先に判定し、少し緑

のある pixel についてその pixel サイズから考えた割合を記入していった。この作業は液晶画面上で行わず印刷して紙面上で行った。紙面上で作成後、GIS 上の属性テーブルに新規フィールドを作成しそこに緑被率を入力した。

3-5. GeoEye 画像による植生指標の算出

NDVI の算出には Multispec を用いた。近赤外画像と可視光画像を重ねあわせ、Reformat より式を代入し NDVI 画像を作成した。これは、700nm で生じる植生の急激な反射率の増加に基いており、この波長域では、他のほとんどの自然表面は比較的緩やかな変化しか示さないために起こる緑色植生の特徴を利用したものである。よって、植生が大部分を占める表面ではこの差が大きくなって白色に表され、反対に裸地土壌の表面では小さくなるため黒色で表される。また、そのデータを GIS に追加しプロパティから変換すると以下の画像になった。

4. データ処理

4-1. 中心点算出

植生指標の画像と緑被率を重ねあわせるために植生指標の画像のポリゴン一つ一つの中心点を緯度経度で算出した。まず、GIS 上に衛星画像を追加した。属性テーブルを開き新規フィールドを2つ追加した。このとき緯度経度を入力するため、タイプを Double にし、整数を12桁、小数点以下を3桁にしておく。そして、ジオメトリ演算を単位を度(10進)に設定して行った。

4-2. ポイント作成

ArcGIS のファイルメニューの XY データの追加により中心点のデータを追加した。X フィールドに X 座標値、Y フィールドに Y 座標値、Z フィールドには元から入力されている植生指標値を選択した。マップにポイントが追加されたらコンテンツウィンドウからデータのエクスポートを行った。

5. 結果と考察

Figure 10 に結果を示す。横軸は GeoEye の可視(赤)、近赤外から求めた NDVI の DN 値、縦軸は衛星ピクセルに含まれる植生ピクセル数(空中写真画素)である。概形より弱い正の相関が伺えるが、その相関は低い結果となった。今回の検討では空中写真をグランドトゥールースとして用いた。本対象エリアには傾斜地が多く、標高差がある場所では空中写真に複雑な歪みが見られた。このことによるジオリファレンス精度が低くなったことが結果に影響した可能性が考えられる。またグランドトゥールースは直下視部分だけではなく、斜め撮影部分からも作成した。斜め撮影による植生位置のズ

レも、結果に影響した可能性がある。今回、GIS を用いて空中写真から多量のグランドトゥールースを取得する手法を開発した。今後、直下視赤外線カメラによる空中写真を用いるなど、より精度の高いグランドトゥールース作成が必要と思われる。

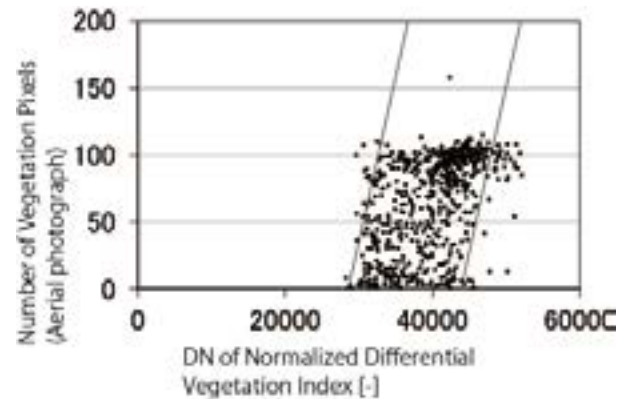


Figure 10 Data of NDVI

参考文献

- [1] 出口聡, 斉藤郁雄, 石原修: 高分解能人工衛星(Quick Bird) データの都市環境解析への適用に関する研究, 日本環境管理学会, 環境の管理, 59, 77-80, 2006
- [2] 高木直樹, 岩井一博, 山下恭弘: 都市計画支援としての熱収支分布図作成への地表面情報の算出: IKONOS 衛星を用いた市街地アルベドの解析(2002 年度大会(北陸) 学術講演梗概集), 日本建築学会, 学術講演梗概集 2002, 591-594, 2002.
- [3] 宮崎ひろ志: 衛星リモートセンシングによる都市部観測精度評価: 都心部緑地分布グランドトゥールースを用いた建物倒れ込み効果の検討 日本建築学会, 学術講演梗概集. 921-922, 2014
- [4] 梅干野 晃, 小松 義典: "リモートセンシングデータの空間分解能と住宅地の土地被覆分類結果との関係: ミクセルの観点からの考察", 日本建築学会計画系論文報告集, vol. 394, pp. 1-9, 1988
- [5] 弥田 健太郎, 高木 直樹: "リモートセンシングデータを利用した土地被覆分類における使用するバンドの適切な数とその選択指標", 日本建築学会計画系論文集, vol. 498, pp. 73-79, 1997

校庭の部分的芝生化による暑熱緩和効果に関する研究

Heat Mitigation Effects of Schoolyard Partial Turf Planting

○岸本 健志（大阪市立大学） 梅宮 典子（大阪市立大学） 小林 知広（大阪市立大学）

Takeshi KISHIMOTO*¹ Noriko UMEMIYA*¹ Tomohiro KOBAYASHI *¹*¹ OSAKA CITY UNIVERSITY

This paper evaluates heat mitigation effects of partial turf and studies effective/less effective place of partial turf by Computer Fluid Dynamics (CFD) analysis. This paper confirmed by questionnaire and aerial photograph survey that 1) partial turf planting is major manner in an Osaka city elementary school. According to our CFD analysis, 2) the maximum temperature decrease is 0.79 K. Heat mitigation effects of turf are 3) more effective at windless locations or 4) only on turf, and 5) less effective if the partial turf is downwind to sandy ground. 6) The maximum Wet Bulb Globe Temperature decrease is 0.98 K, but no analysis case shows that Wet Bulb Globe Temperature decreases from over 31°C to less than 31°C.

1. 研究の背景と目的

芝生化には怪我の防止や児童の外遊びを促進する効果^{文1)}、²⁾や暑熱緩和効果^{文1)}、³⁾が期待され、国や自治体、企業、スポーツ団体等により推進されている。大阪市内では公立小学校の校庭芝生化推進事業が2004年から行われ2015年度までに292校中57校が芝生化されている(Fig.1)。しかし実施や維持管理の費用や労力、芝生の養生管理等の理由から校庭の部分的な芝生化が多い。本研究は校庭の部分的な芝生化の暑熱緩和効果について、大阪市内の小学校を対象に1)アンケート調査及び航空写真の分析により、芝生の位置・形状パターンや面積など部分的芝生化の実態を明らかにし、次いでこの実態調査と実測値^{文2)}に基づいたCFD解析による気温分布のシミュレーションを行い、2)気温低下効果の大きさ、3)気温低下効果が大きい芝生の場所、4)気温低下効果の及ぶ範囲、5)気温低下効果が小さい芝生の場所を検討し、6)暑熱緩和効果をWBGTで評価する。

2. 校庭芝生の実態調査

2.1 小学校を対象としたアンケート調査

航空写真をもとに芝生があると判断した^{注1)}66の大阪市内立小学校の施設整備担当者に平成27年7月に調査票を郵送付し、28校から回答を得た。うち16校が芝生化を実施していた。アンケートでは、芝生化の実施と位置、位置決定の理由、効果、問題点、維持管理の実態等について尋ねた。Fig.1に芝生の位置を示す。「全面」と「中心」が少なく「遊具周り」「周縁」「中庭」等が多い。Fig.3に芝生位置の決定理由を示す。維持管理や芝生利用の都合が多く、暑熱緩和効果を理由とした校はない。

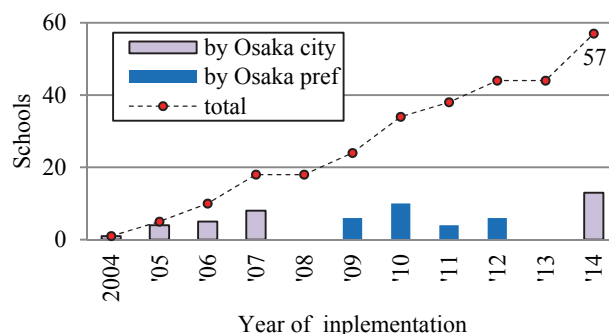


Figure1 Planted turf elementary schools in Osaka city

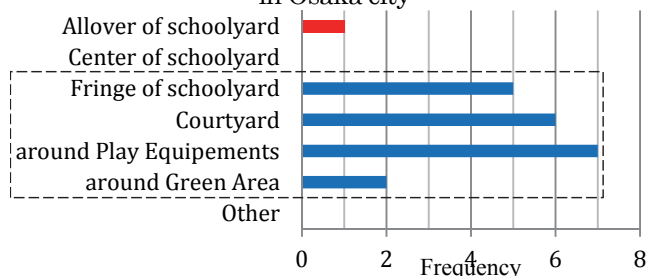


Figure2 Sites of turf (by questionnaire survey)

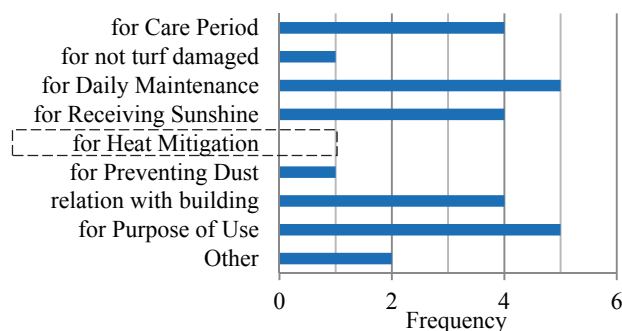


Figure3 Reasons of sites of turf planting (by questionnaire survey)

2.2 航空写真による分析

(1) 芝生部分の面積

前節のアンケート、航空写真、現地目視、および大阪府や大阪市の情報を合わせて 49 校の芝生部分の面積を得た。100m²刻みの度数分布を Fig.4 に示す。1,000m²以下は 36 校あり、内 901-1,000m²が 10 校と最多である。

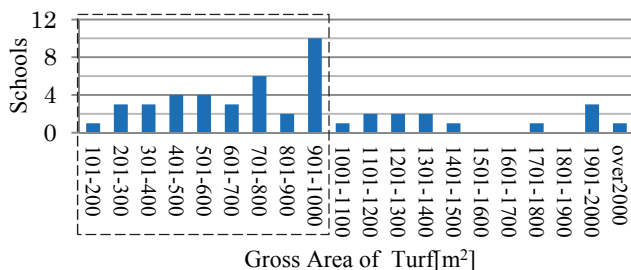


Figure4 Gross area of turf

(2) 芝生の位置と形状

具体的な芝生の位置形状が分かった 49 校について、芝生の位置形状を「全面(AI)」「四角(Sq)」「オビ状(Ln)」「凸部(Cv)」「中庭(CY)」「第二グラウンド(SY)」の 6 つに分類し集計した。Fig.5 に各分類の代表例を示す。Fig.6 に分類ごとの出現頻度を示す。芝生面積 1,000m²以下ではオビ状と凸部が多く、1,000m²を超えると全面が多い。

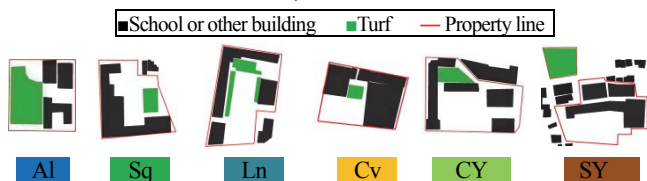


Figure5 Classification of Site/Shape of Turf

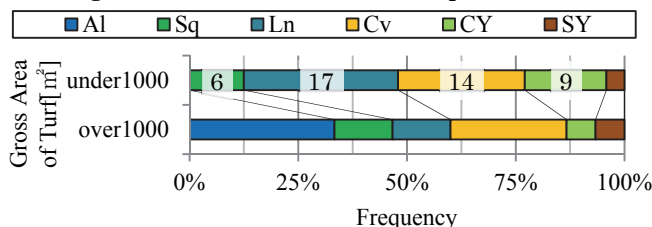


Figure6 Frequency of Classified Site/Shape of Turf

3. CFD 解析によるシミュレーション

3.1 解析対象校の選定

航空写真より大阪市内のすべての公立小学校 291 校を対象に、小学校を中心とする周辺 400m 角範囲（以下、「街区」）について、航空写真から求めた「緑」の投影面積率の度数分布を Fig.7 に示す。芝生化していない 235 校の下位約 25%（64 校）から、方位ごとの建物有無、敷地の面積、プールと体育館の大きさを考慮し最も多い学校建物配置のパターンを検討した。北と西に校舎がありプールと体育館が低層の別棟、敷地面積は 6795~13128m²（平均値±標準偏差）、が最も多いパターンであることがわかった。これら全てを満たすものは 8 校あった。さらに街区の西側に建つ校舎より高い建物の数から高層化と建物密集度の状況を検討し、中高層建物が疎らに建つ MODEL_K と、低層建物が密集する

MODEL_H の 2 校を解析対象モデルの小学校として選定した (Fig8)。

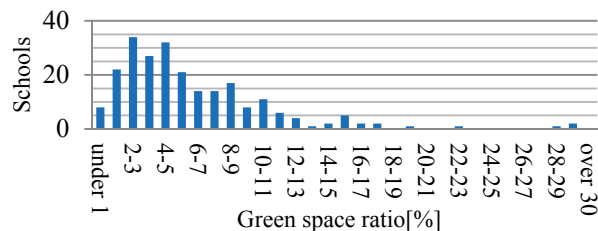
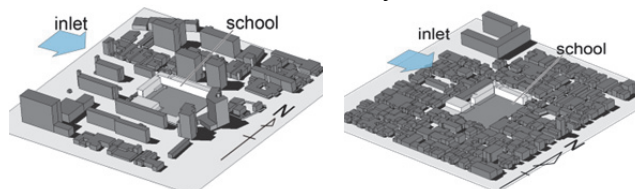


Figure7 Green space ratio around elementary schools in Osaka city



MODEL_K
School's lot Area: 11,550 m²
Schoolyard Area: 6,520 m²

MODEL_H
School's lot Area: 11,865 m²
Schoolyard Area: 6,510 m²

Figure8 Selected 2 analysis MODELS

3.2 解析の概要

解析モデルを中心とする 400m 角範囲の街区を再現し、大阪市の盛夏期日中を想定したシミュレーションを行う。解析領域とメッシュ分割を Fig.9 に、計算概要を Table1 に示す。前述の実態調査より芝生面積 1,000m²以下でオビ状と校庭凸部の芝生が多いことを考慮し Fig.10 の 13 ケースを解析する。モデルの表面に実測²⁾より得た表面温度 (Table2) を与え、風向は最多風向の西とした。各ケースで変更した条件は芝生の位置のみである。

Table1. CFD Analysis Condition

Analysis Domain	1500m×600m×450m
Analysis Model	400m×400m(highest building 45m)
Turbulence model	Standard <i>k-ε</i> model
Discretization Scheme	first - order upwind differencing scheme
Boundary Condition	Inlet(West) 1/5 power law 3.13 m/s(Z=20m) 31.60°C(MODEL_K) / 31.10°C(MODEL_H) from West to East
	Outlet(East) Gauge pressure: 0 pa
	other Ground/Walls: no-slip Sky/Northern/Southern Domain: free-slip
	Thermal Boundary Condition Coefficient of Heat-Transfer 23W/m ² (fixed)
Number of Mesh	6,001,328(MODEL_K) / 5,889,372(MODEL_H)

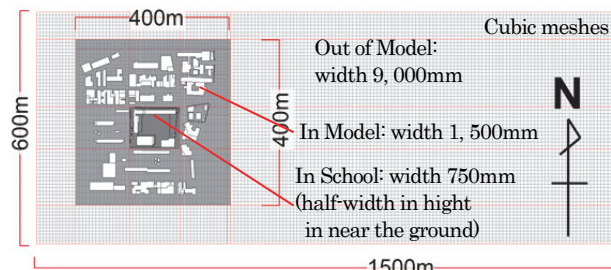


Figure9 Analysis domain and mesh layout

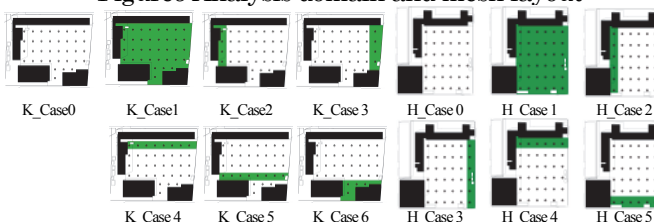
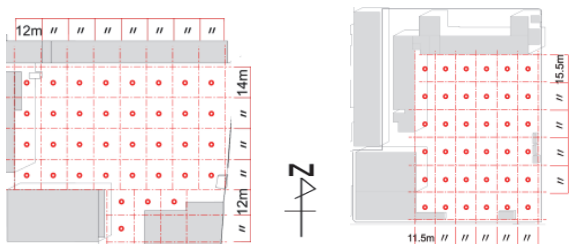


Figure10 Analysis cases

Table2 Surface temperature [°C]

Building Surface					Ground of City	
Northern	Southern	Western	Eastern	Roof	GND(light)	GND(shade)
35.84	35.79	39.95	38.48	51.80	51.80	37.60
Ground of Schoolyard						
Sand(light)		Sand(shade)		Turf(light)	Turf(shade)	
51.20		37.94		46.73	34.64	



MODEL_K

MODEL_H

Figure.11 Study points of 2 analysis MODELS

両モデルについて、校庭を 36 分割し児童の胸の高さとして地上 1m に 36 点の検討点を設定した(Fig.11)。以下で気温、気温差、風速、WBGT は地上 1m の値を扱う。

3.3 解析結果

(1) MODEL_K

校庭の全面が土のケース (K_Case0、以下全面土) と全面芝のケース (K_Case1、以下全面芝) の気温コンター図を Fig.12 に示す。検討点での気温は全面土で 33.47~36.16°C、全面芝で 33.25~35.44°C とおおむね実測^{※2)} の範囲内にある。全面土と比べると全面芝では校庭の全体で気温が低く、検討点での両者の気温の差は 0.08~0.92K である。芝生のある各ケース (Case1~) について、全面土との気温の差を気温低下と定義する。気温低下のコンターを Fig.13 に、検討点の気温低下の最大と平均を Table3 に示す。全面芝では校庭全域で気温低下があり、体育館 (南西の建物) の後方や校舎の入隅部で気温低下が大きい。部分芝生 (K_Case2~6) の気温低下は芝生の上でのみある。部分芝生で気温低下が最も大きいのは K_Case6 で、芝生上検討点の平均で 0.56K 低下した。西側と南側の部分芝生 (K_Case2,5,6) は芝生上において全面芝と同程度の気温低下があるが、Fig.14 左の流線図において風下にあたる北側と東側 (K_Case3,4) では芝生上の効果が全面芝よりも小さく芝生上検討点で 0.10~0.38K 気温低下が劣る。北側と東側が風下にあたる。芝生が土に対して風下にあるとき土上を通過した暑い空気が芝生上に流れ込むため、気温低下が劣ると考えられる。

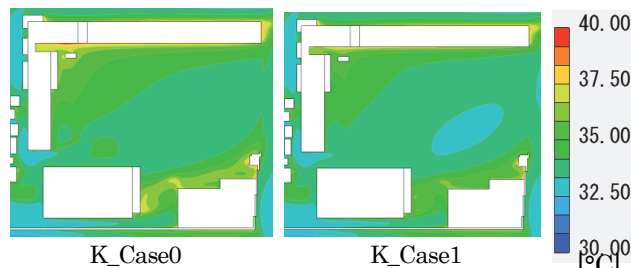


Figure12 Temperature in schoolyard (MODEL_K)

(2) MODEL_H

全面土 (H_Case0) と全面芝 (H_Case1) 検討点での気温はおおむね実測^{※2)} の範囲内にある。気温低下のコンターを Fig.15 示す。全面芝では体育館 (南西の建物) の後方と校舎入隅部で気温低下が大きい。部分芝生では H_Case5 が最も気温低下し芝生上検討点の平均で 0.27K 低下した。部分芝生が土に対して風下するとき気温低下が劣る傾向は MODEL_H でも見られた。風下にあたる北側と東側 (H_Case3,4) は全面芝と比べて芝生上検討点で 0.20~0.41K 気温低下が小さい。

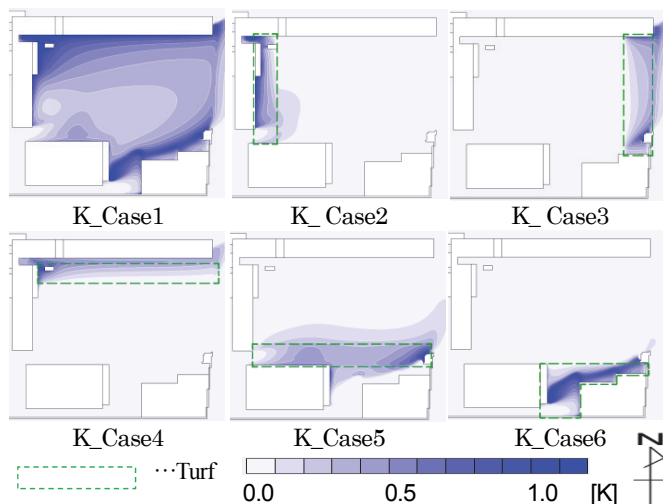
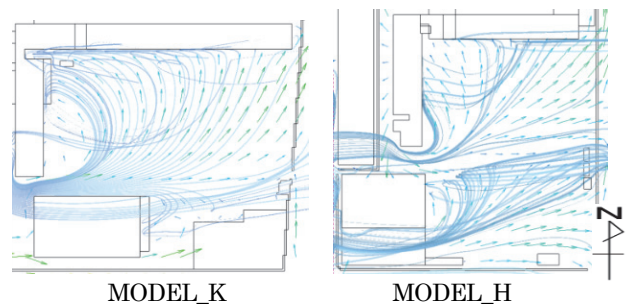


Figure13 Temperature decrease (MODEL_K)



MODEL_K

MODEL_H

Figure14 Air flow vectors and flow lines

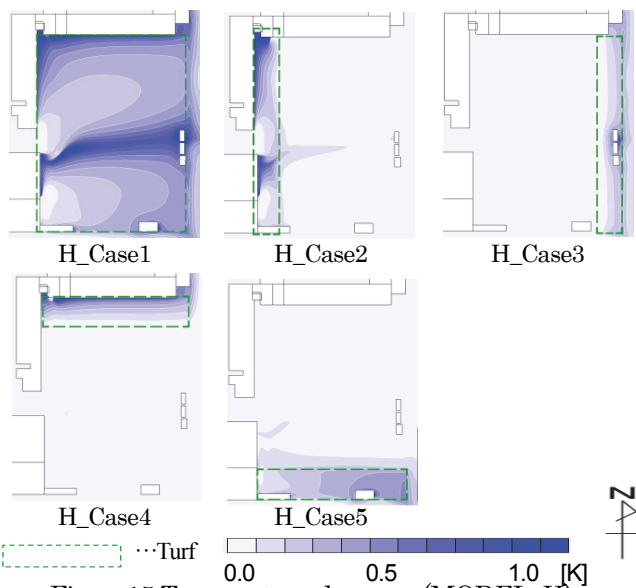


Figure15 Temperature decrease (MODEL_H)

(3) 気温低下と風速の関係

K_Case1 と H_Case1 の検討点での気温低下と、同検討点での風速の関係を Fig.16 に示す。風速が小さいほど気温低下が大きい。また風速が小さい点は芝生化していない Case0 で気温が高い。地上 1m の気温に及ぼす地表温度の影響が、風速が大きいときに小さく、風速が小さいときに大きい^{文4)}ためと推測できる。

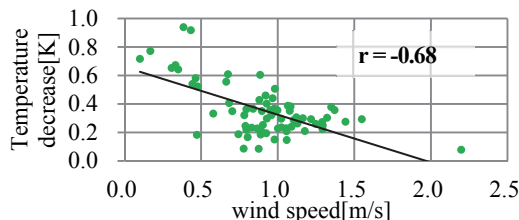


Figure16 Temperature decrease with wind speed at study points

4. WBGT による暑熱緩和効果の評価

各面の立体角放射率と全天日射量より(1)(2)式で長波長放射を考慮した $OUT_{MRT,L}$ ^{文5)}を求める。グローブ温度は(3)式で求め、湿球温度は実測した湿度から(4)(5)式で求める。算出した WBGT を、ケースごとの平均値で Table4 に示す。全面土と部分芝生の WBGT の差(「WBGT 低下」)は、各ケース平均で 0.33~0.79K であり、最大は 0.98K である。検討点の気温低下と WBGT 低下の関係を Fig.17 に示す。気温低下が大きい位置では WBGT 低下も大きく、同じ位置で WBGT 低下は気温低下より 0.2K 程度大きい。部分芝生上の WBGT の値は 29.22~34.77°C であり日影の検討点を含む Case2 を除いた全てのケースで日本体育協会が示す原則運動中止の基準ならびに日本生気象学会が提唱する危険基準である 31°C を超えている。本シミュレーションでは校舎近くに芝生があるケースを解析したが、建物近くでは長波長放射の影響により WBGT が高いと考えられる。

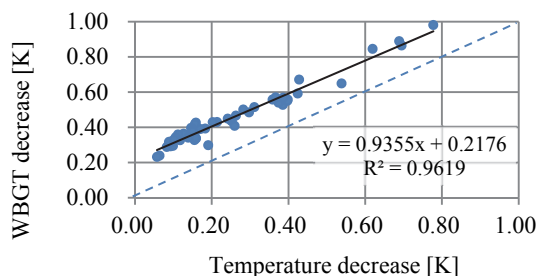


Figure17 WBGT decrease on partial turf with temperature decrease

Table3 Temperature decrease at study points on partial turf

	K Case2	K Case3	K Case4	K Case5	K Case6	H Case2	H Case3	H Case4	H Case5
Maximum[K]	0.40	0.43	0.54	0.70	0.78	0.42	0.20	0.16	0.40
Average[K]	0.24	0.18	0.18	0.32	0.56	0.21	0.11	0.15	0.27

Table4 Average of WBGT at study points on partial turf

	K Case2	K Case3	K Case4	K Case5	K Case6	H Case2	H Case3	H Case4	H Case5
Before Turf [°C]	29.68	32.07	32.14	32.12	35.55	29.56	31.92	31.72	31.99
After Turf [°C]	29.22	31.62	31.74	31.60	34.77	29.18	31.59	31.34	31.53
Decrease [K]	0.47	0.45	0.39	0.52	0.79	0.38	0.33	0.38	0.46

5. まとめ

大阪市の小学校を対象に校庭の部分的芝生化の実態を調査し、代表的な校舎配置の2校について校庭の部分的な芝生化の暑熱緩和効果を CFD により検討した結果、部分的な芝生では暑熱緩和効果を得られにくい芝生の位置があることがわかった。1)芝生は1,000m²以下が多く、形状や位置はオビ状と校庭凸部が多い。2)盛夏期の実測値をもとにしたシミュレーションでは、全面土と部分芝生の気温の差(「気温低下」)は検討点の最大で 0.79K、ケースごとの平均値は 0.11~0.56K である。3)芝生の気温低下効果は、風速が小さい地点で大きい。4)部分芝生の気温低下効果は芝生の上のみにとどまる。5)土の部分に対して芝生の部分が風下側にあるような芝の配置の場合、気温低下効果は小さい。6)全面土と部分芝生の WBGT の差(「WBGT 低下」)は各ケース平均で 0.33~0.79K であり、最大は 0.98K である。芝生上の WBGT 低下は気温低下と相関が強く、気温低下より約 0.2K 大きい。芝生化により WBGT が 31°C 以上から 31°C 未満に低下したケースはない。

$$T_{MRT,L} = \sum F_{bi} \times T_{prt,i} = \sum F_{bi} \times (\sum F_{j,i} \times \varepsilon_j T_{s,j}) \quad (1)$$

$$T_{MRT} = \left[\frac{F_p(1-\alpha_{cl})S_1}{F_{eff}\sigma} + \frac{(1-\alpha_{cl})(D_1+S_1)\alpha_{GND}}{\sigma} + T_{MRT,L}^4 \right]^{0.25} \quad (2)$$

$$T_{MRT} = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 V_a^{0.6}}{\varepsilon_b D^{0.4}} (t_g - t_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (3)$$

$$h' = h + (x' - x)hc' \equiv h + (x' - x)t_w \quad (4)$$

$$h = 0.240t + (0.431t + 597.3)x \quad (5)$$

$F_{b,i}$:人体 i 面の投影面積率[-] $F_{j,i}$:面 j の立体角放射率[-] ε_j :面 j の放射率
[-] $T_{s,j}$:面 j の表面温度 [°C] α_{cl} :衣服のアルベド [-] α_{GND} :地表面アルベド
[-] S_1 :直達日射量[w/m²] D_1 :拡散日射量[w/m²] F_{eff} :有効放射面率
[-] J_a :直達日射に対する人体の投影面積率[-] σ :ステファン・ボルツマン定数[W/m²K⁴] t_a :乾球温度[°C] t_g :グローブ温度[°C] t_w :湿球温度
[°C] V_a :風速[m/s] ε_b :グローブの放射率[-] D :グローブの直径[m] h :
乾球周り空気の水蒸気圧[Pa] h' :湿球周り空気の水蒸気圧[Pa] x :乾球周りの絶対湿度[g/kgDA] x' :湿球周りの絶対湿度

謝辞

アンケート調査にご協力頂いた小学校ならびに担当者様のご厚意に深く感謝申し上げます。

注

注 1) 行政の補助以外で校庭芝生化を行った校もあると思われるので、大阪府市が公開している校に加え航空写真目視より芝生化していると思われる校に送付した。

参考文献

1) 森山正和編：ヒートアイランドの対策と技術，学芸出版社，69-76，2004 年 8 月 田邊祐介：校庭の芝生が児童の校庭の利用に及ぼす影響に関する研究，日本造園学会全国大会論文集，943-946，2005 年 3 月 3) 原田恭幸他：都市部の小学校における校庭芝生化の効果に及ぼす校舎配置の影響，空衛・近畿・論文集（平成 23 年），235-238，2012 年 3 月 4) 八木里英子他：地表面温度と風速が地表付近の気温形成に与える影響に関する研究，建・近畿・報告集，環境系（53），317-320，2013 年 5 月 5) 真嶋一博他：都市内街区における路地の熱的快適性評価，建・環境系論文集 第 622 号，41-48，2007 年 7 月

夏季のオフィス街におけるクールロードの創出に関する研究 Study on the creation of the cool road in the business district in summer

○福井 彩奈(摂南大学) 森山 正和(摂南大学)

Ayana FUKUI*¹ Masakazu MORIYAMA*¹

*¹ Setsunan University

For the comfortable walking spaces for the people, shades and winds influence them. In this study, it is aimed that the creation methods of the cool road in the business district in summer are suggested. Therefore, the present conditions of the business district were observed. The shades are effective for the creation of the cool road. However, in the shade, because it is thought that the wind also has an influence to the comfort walking spaces.

1. はじめに

近年、日本の都市部においてヒートアイランド現象が進行しており、夏季における外部空間の気温が上昇し快適な街路空間が減ってきている。これにより、オフィス街で働く人々が街の中で過ごしにくくなり、その周りの建物、バスや電車などの交通機関への歩行による移動が不快になっていると考えられる。建物や樹木の配置や大きさを考慮することにより、不快な歩行空間を改善することが出来ると思われる。

人が快適な歩行空間だと感じるためには、日影や風が影響すると考えられる。そのため、本研究ではオフィス街で働く人々のための快適なクールロードの創出方法の提案を目的とし、実際のオフィス街の現状を把握、それを元に熱環境や風の流れをどう改善すればクールロードを創り出すことができるかを考える。ここでは、クールロードを人が快適だと感じる歩行空間とする。

2. 測定方法

a 測定日時：2015年8月10, 11日の2日間

10:00~18:00

両日とも晴れ、10日は一時小雨

b 測定機器(測定項目)：

記録は10分間隔、測定高さはおよそ150cm

A地点—PMV指数計

(風速・気温・湿度・黒球温度)

B地点—PMV指数計

(風速・黒球温度)

C地点—ウェザーバケット

(風向・風速・気温・湿度・日射量)

c 対象地域：京阪北浜駅周辺(Fig1)

この場所は、大阪の中心部であり格子状の街路をしており、大阪の典型的なオフィス街と言える。

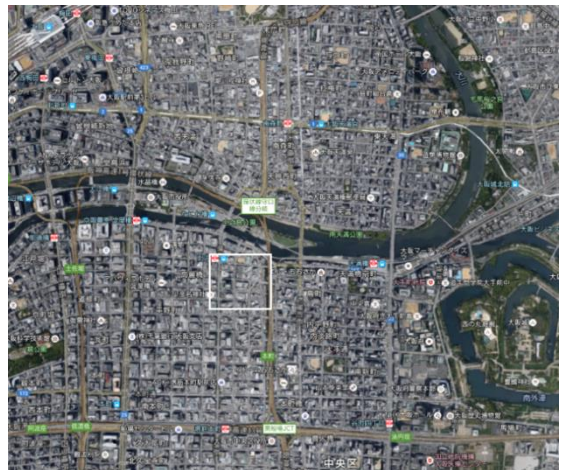


Fig1. Subject area

d 測定地点：Fig2

A地点が高層ビルの北東側の交差点。B地点は高層ビルの南西側の交差点よりも少しビルの後ろ側。C地点は、中層ビルの南東側の交差点で、ほかの地点よりも開けていて近くに障害物がなかったため、対象地域の代表点とする。A, B地点では、高層ビルの角と背後の違いを、A, C地点では、同じ交差点付近で直達日射の有無での違いを比較するために、この場所を選んだ。



Fig2. Measurement points



Fig3.Point A



Fig4.Point B



Fig5.Point C

e 日影図(Fig6-8)

A 地点は 13 時頃から日影になっている.B 地点は朝に少し日影で,14 時前からまた日影になっている.C 地点は,日中ほぼずっと日があたっている.

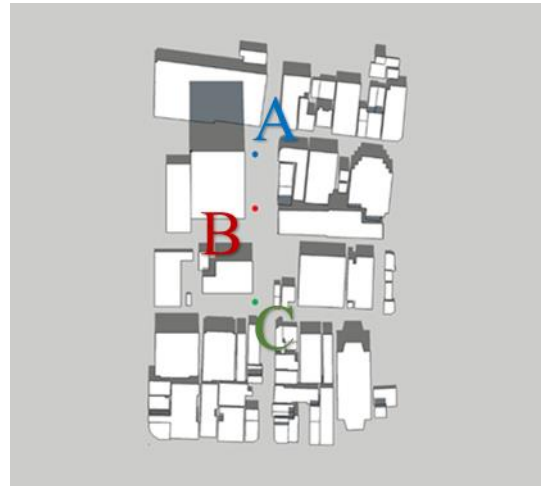


Fig6.Figure of shade (12 hour)



Fig7.Figure of shade (14 hour)



Fig8.Figure of shade (16 hour)

3. 測定結果及び考察

a 気温 (Fig9)

すべて同じような変化をしているが、A, C 地点の方が気象台よりも全体的に高い気温を示している。午前中は A, C 地点とも同じように上がっているが、13 時を境に C 地点の方が高い値になっている。これは、A 地点が 13 時前から日陰になり気温が下がったのだと考えられる。A 地点の気温・湿度の観測機には、輻射除けを考慮していなかったため、以降の気温・湿度については C 地点の値を使用している。

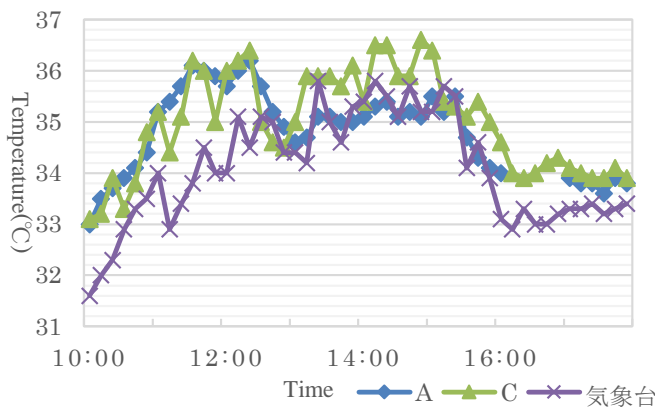


Fig9. Temperature (August 10, 2015)

b 風速 (Fig10)

A 地点では午後の方が風が強い傾向があり、B 地点は時間によってばらつきがあった。これは、A 地点、B 地点両方とも高層ビル周辺での測定だが、A 地点は交差点で、B 地点は交差点からは離れた場所での測定であったため、違いが出ているのだと考えられる。C 地点も交差点に近い場所で測定していたが、同じ交差点付近である A 地点と C 地点を比べると、C 地点の方が強い風が吹いていることが多く見られる。

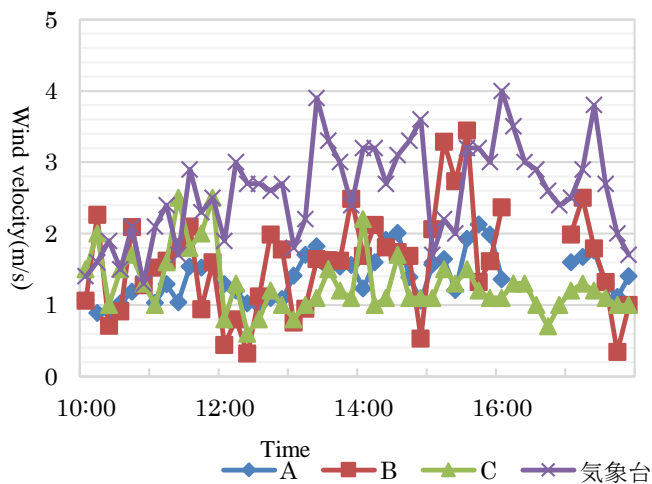


Fig10. Wind velocity (August 10, 2015)

c 風向 (Fig11)

12 時半を境に風向が逆になっている。大阪の都市部では、一般的に午後には海風の影響で西風になるが、この日は台風の影響で西風にはならなかったと考えられる。

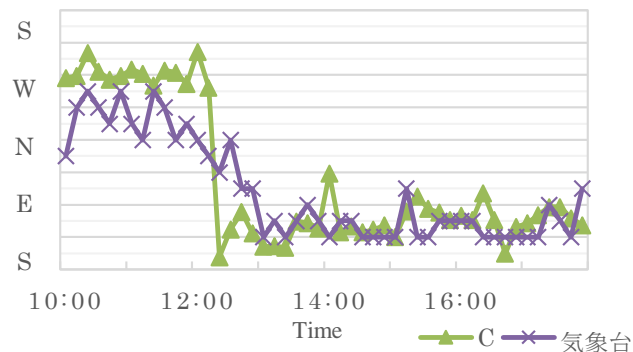


Fig11. The direction of the wind
(August 10, 2015)

d 黒球温度 (Fig12)

A 地点は、午前中日が当たっており温度が上昇しているが、13 時前から日影になってからは安定した値になっている。B 地点は、日中ずっと日が当たっていたが、10 分毎の記録に大きな変化が見られるのは、測定器の横に自動車が停まっていた時間があつたのでそれが原因であると思われる。15 時以降の急激な変化は、空に雲がかかり日射が減ったためである。小雨が降った 16 時以降は A, B 地点ともに同じぐらいの値になっている。

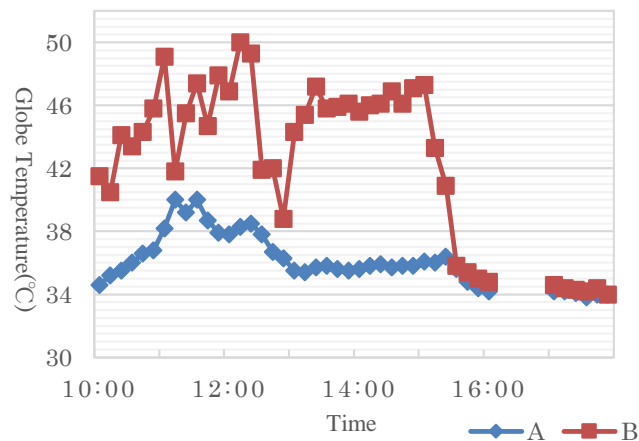


Fig12. Globe Temperature (August 10, 2015)

e WBGT (Fig13)

A 地点と B 地点の両方とも 27.0 以上 30.0℃以下になっている。湿球温度は 2 つの地点で同じ値を使って計算したため、似たような変化をしているが、黒球温度(図 6) の高い B 地点のほうが WBGT も少し高い結果となっている。

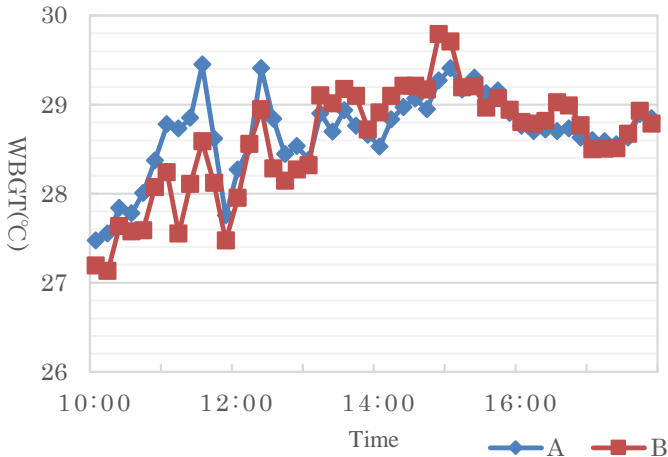


Fig13.WBGT (August 10,2015)

f SET* (Fig14)

A 地点では 29℃～35℃だが、B 地点では 30℃～40℃と変化が大きく、A 地点と比べて温度がだいぶ高くなっている。この原因は、13:00～16:00 の間 A 地点は日影であるが、B 地点は日が当たっていて黒球温度が高いからであると考えられる。この測定では、快適性の指標 SET*と比較して熱中症の指標 WBGT は、輻射熱の影響を小さく見積もっていることが考えられた。

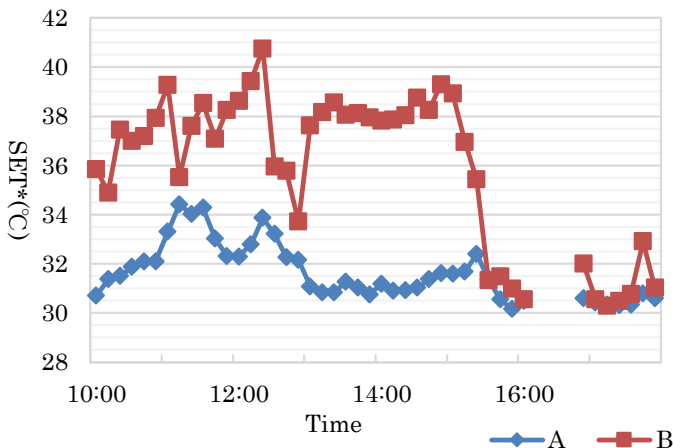


Fig14.SET* (August 10,2015)

g 風速別 SET*(Fig15)

これらの測定結果から、昼間の気象状況を測定結果より仮定(気温 36℃, 相対湿度 40%)し、風速を 0.5m/s と 2.0m/s の場合での SET*を黒球温度(Tg)が 36℃から 55℃までで算出した(Fig8)。風速が弱いほうが SET*が高く、Tg が上がるにつれて SET*の差が減っている。Tg が 55℃の時には、SET*は同じになる。これより、Tg の高い場所では風速を増やすよりも日射量を減らし Tg を下げる方が SET*を下げるのに効果的であると考えられる。

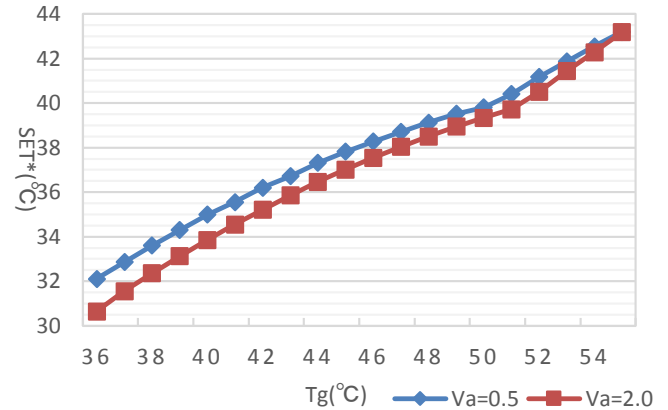


Fig15.SET* according to the wind velocity
(August 10,2015)

4. 結論

測定を行った結果、次のようなことがわかった。気温、湿度は、3 点の測定地点ともに気象台の気温よりも高く、黒球温度は、A 地点と B 地点では、日影の時間が長かったため、A 地点の方が低い。風速は、B 地点では変動が大きく、A 地点と C 地点では C 地点の方が強く吹いていた。

測定結果より算出した WBGT は、黒球温度の高かった B 地点の方が WBGT も高かった。SET*も WBGT 同様、黒球温度の高かった B 地点の方が高かった。風の変動が大きいと、SET*も左右される。

これらより、日影を創る方が熱環境を快適にできるため、クールロードの創出に効果が出ると考えられる。しかし、日影が快適性を向上させる大前提であるが、日影での風の存在は快適性を向上させるのに効果があると考えられるため、今後検討する。

引用・参考文献

- 1) 大阪管区気象台: <http://www.jma-net.go.jp/osaka/>
- 2) 環境省ホームページ: <http://www.wbgt.env.go.jp/wbgt.php>
- 3) 赤川宏幸, 竹林英樹, 森山正和: 湿潤舗装と遮熱舗装上の温熱環境改善効果に関する実験的研究 日本建築学会環境系論文集 第 73 巻 p.85-91
- 4) 彰国社『図説テキスト建築環境工学 第二版』(2010 年)

大型複合施設における外部空間のヒートアイランド対策技術の性能評価に関する研究 (その 7) 建物、樹木の配置及び被覆材料特性を指標とした温熱快適性評価

Study on performance evaluation of the outdoor Heat Island measures technology in large composite facilities

(Part7) Thermal sensation evaluation by buildings and trees arrangement and covering material properties

○青 山 健太郎 (神戸大学) 竹 林 英 樹 (神戸大学)
笠 原 万起子 (日建設計) 田 辺 慎 吾 (日建設計) 高 山 眞 (日建設計)

Kentaro AOYAMA*¹ Hideki TAKEBAYASHI*¹
Makiko KASAHARA*² Shingo TANABE*² Makoto KOUYAMA*²
*¹ Kobe University *² Nikken Sekkei Ltd.

Several heat island countermeasures technologies are applied to the objective building. In this study, the outdoor thermal sensation is evaluated focusing on the effects by buildings and trees arrangement and covering material properties. Thermal sensation index SET* is primarily affected by solar radiation. Trees arrangement is important to the places where are not shaded by buildings. Cover materials improvement is important to the places where are not shaded by buildings and trees. Both of solar radiation shade and cover materials improvement are needed for outdoor thermal comfort in the daytime, and solar radiation shading is needed in the evening, in the typical summer.

1. はじめに

近年、ヒートアイランド対策に配慮した設計事例が増えつつあり、その効果の研究も行われている。福味ら¹⁾は、屋上緑化空間における検討結果より、日射遮蔽と風通しの改善が温熱環境改善に有効であるとの知見を得た。赤川ら²⁾は建築物周辺の外部空間において、人工物の影、緑の影、半開放空間の3地点でSET*を比較した。これらの研究において、温熱環境の改善には、日射遮蔽、表面温度低減、風通しの改善が有効であるとの知見が得られている。既報³⁾では、日射遮蔽及び被覆材料の改善が放射環境に与える影響を評価した。また、風通し改善を目的として樹木及び障害物が風環境に与える影響を評価した。しかし、放射環境と風環境を統合した温熱環境と建物や樹木の配置、被覆材料などの設計パラメータとの関係についての議論は行われていない。本研究では、幾つかのヒートアイランド対策技術が導入された大型複合施設の外部空間において温熱環境を評価し、比較分析する。建物、樹木、被覆材料の適切な選択や配置方法に注目して外部空間の環境設計手法を検討する。

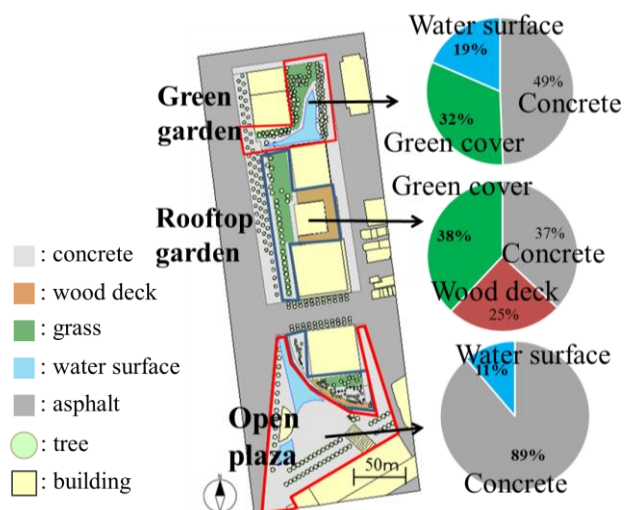


Figure1. Building shape, trees and covering materials arrangement and area ratio of each ground covering materials

Table1. Area ratio of trees in entire area and three areas

Entire area	10%
Open plaza	6%
Rooftop garden	5%
Green garden	20%

2. 温熱環境の計算結果と考察

MRT と風速の計算結果を統合して SET* を算出し、建物や樹木の配置、被覆材料の特性などの設計パラメータと温熱環境の関係を分析した。日射遮蔽、表面温度低減、風通しの改善と温熱環境緩和効果の関係を考察した。

2.1 計算対象領域の概要

計算対象領域の建物形状、植栽、被覆材料の配置と対象領域別の被覆の割合を図1、樹冠面積率を表1に示す。水盤が特徴的で開放的な広場、地上 45m に位置し緑化された屋上庭園、高層建物に囲まれ植栽が多い緑化空間の3エリアを分析対象とする。計算対象領域を 2m のメッシュで分割し、日射量、表面温度、MRT を計算した。被覆材料は、コンクリート、ウッドデッキ、芝生、水盤、アスファルトの5種類とした。広場ではコンクリートの割合が多く、水盤の割合は10%である。屋上庭園ではコンクリート、緑被、ウッドデッキが同程度の割合である。緑化空間では樹冠面積率が20%と他のエリアより大きい。風速は大型複合施設を中心とする1.2km 四方の市街地モデルを計算領域とし、格子間隔は計算対象領域内を2m、それ以外を徐々に広がる不等間隔とした。地表面粗度区分IVを適用し、流入風に上空 50.9m で大阪管区気象台の風向と風速の観測結果を流入境界に設定した。解析には、RANS モデル系の $k-\varepsilon$ 型2方程式乱流モデルを用いた。

2.2 温熱環境の考察

夏期代表日（2013年8月11日）の13時の表面温度、MRT、SET*を計算した。MRT 算出の際の人体の日射吸収率は0.5とした。SET*算出の際の着衣量は0.6clo、代謝量は1.0metとした。気温・湿度は大阪管区気象台の測定データを用いた。天空率・日射量はGISにより算出した。木の透過率を0.06として植栽の影響を考慮した。流入風には上空 50.9m で西南西 2.96m/s（大阪管区気象台の測定データ）を与えた。

表面温度分布を図2に示す。被覆対策による表面温度低減が確認される。日陰や緑被、水盤で低く、アスファルトとウッドデッキで高い。

MRT 分布を図3に示す。日陰で低く、アスファルトとウッドデッキで高い。

風速分布を図4に示す。対象建物や障害物、植栽による弱風域が確認される。

SET*分布を図5に示す。屋上庭園で風速は強いが、SET*への影響はMRTが支配的である。表面被覆を改善することで効果的に温熱環境を改善できる。

2.3 MRT、風速とSET*の関係の考察

夏期代表日（2013年8月11日）の13時、17時、夏至（2013年6月21日）の13時におけるSET*の変化（感度解析）の上に、広場、屋上庭園、緑化空間の風速、MRTの平均値及び標準偏差を日向、日陰別に図6～図8に示

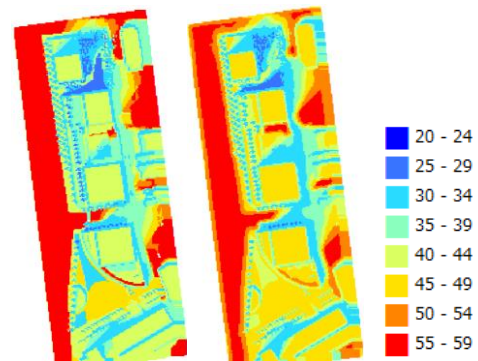


Figure 2.3. Distribution map of surface temperature (left), distribution map of MRT (right) at 13:00 on typical summer day

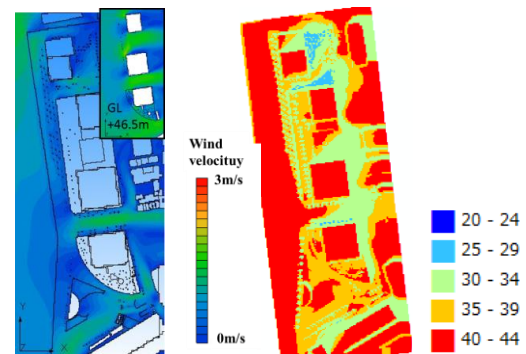


Figure 4.5. Distribution map of wind velocity (left), distribution map of SET* (right) at 13:00 on typical summer day

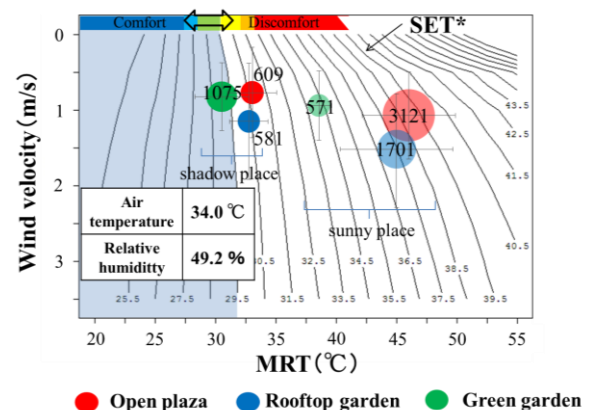


Figure 6. Effect of MRT and wind velocity on SET* at 13:00 on typical summer day

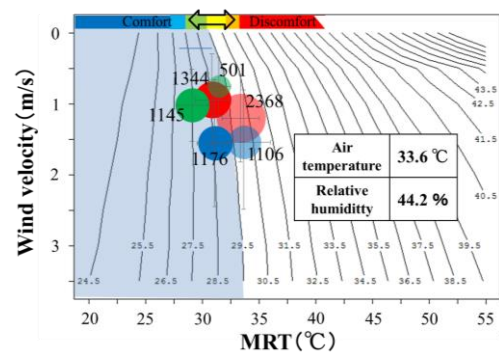


Figure 7. Effect of MRT and wind velocity on SET* at 17:00 on typical summer day

す。バブルの中心が平均値で、大きさが対象点数を表す。半透明が日向、不透明が日陰、I は標準偏差である。対象点数は広場、屋上庭園、緑化空間でそれぞれ 3730 点、2282 点、1646 点である。石井ら⁴⁾による SET*と快適感の関係に関する研究に基づき、29.5℃以下の SET*を目標とする。

夏期代表日の 13 時、17 時は、SET*に対し、風速より MRT の影響が大きく、MRT が極めて高くなると風速の影響が大きい。気温が高いため快適範囲が狭い。夏至の 13 時になると気温が低いため快適範囲は広い。

夏期代表日 13 時は日向、日陰による MRT の差は約 8～12℃と大きく、SET*は約 5～8℃の差に相当する。広場、屋上庭園は日影率が小さく、緑化空間は日陰率が高い。緑化空間の日陰では快適感は「どちらでもない」となる。風速は最大で 1m/s の差があり、日陰では影響が確認されないが、日向では風速の大きい屋上庭園で SET*が 1℃程度緩和される。

夏期代表日 17 時の SET*は 26.5℃～31.5℃とばらつきが小さく、日陰では「どちらでもない」となる。夏期の夕方には日射遮蔽が有効であると言える。

夏至 13 時の SET*は日向日陰による差は大きいですが、多くの地点が快適域に入る。夏至の日中は日射の有無に関わらず、快適な温熱環境になる。

2.4 地表面被覆材料別の考察

夏期代表日 13 時を対象に、表面被覆材別に SET*を考察する。

広場における表面被覆材料別の風速、MRT の平均値及び標準偏差を日向、日陰に分けて図 9 に示す。コンクリート、水盤のいずれにおいても、日射が遮蔽されると SET*は約 8℃低下する。水盤の SET*はコンクリートより 1～2℃低い。ただし、快適感が「どちらでもない」となる水盤の日陰は少ない。

屋上庭園における表面被覆材料別の風速、MRT の平均値及び標準偏差を日向、日陰に分けて図 10 に示す。ウッドデッキの日向は MRT が非常に高いため SET*が高い。ウッドデッキ、コンクリート、緑被において日射が遮蔽されると SET*はそれぞれ約 9℃、6℃、7.5℃低下する。緑被の SET*は日陰でコンクリートより約 1.5℃低く、快適感は「どちらでもない」となる。日向では緑被とコンクリートの SET*に差はなく、これはコンクリートと緑被が混在し、お互いに影響を受け合い MRT に差がないためと考えられる。

緑化空間における表面被覆材料別の風速、MRT の平均値及び標準偏差を日向、日陰に分けて図 11 に示す。コンクリート、水盤、緑被において日射が遮蔽されると SET*はそれぞれ約 6℃、5℃、4.5℃低下する。コンクリートを水盤、緑被にすることで、SET*は日向で約 2.5℃、

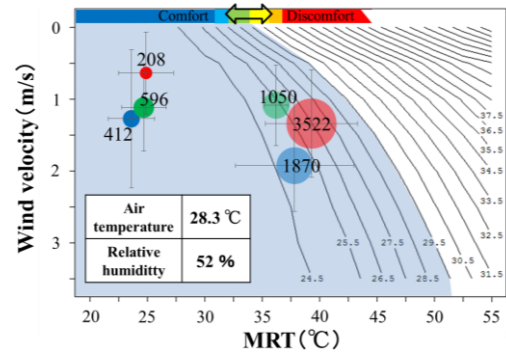


Figure8. Effect of MRT and wind velocity on SET* at 13:00 on early summer day

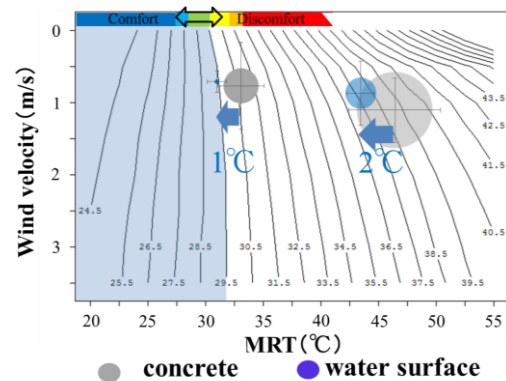


Figure9. Effect of MRT and wind velocity on SET* in open plaza at 13:00 on typical summer day

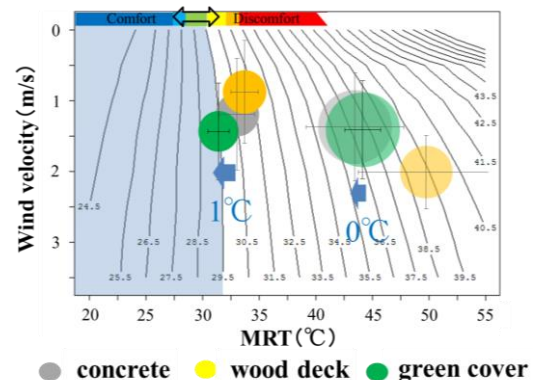


Figure10. Effect of MRT and wind velocity on SET* in rooftop garden at 13:00 on typical summer day

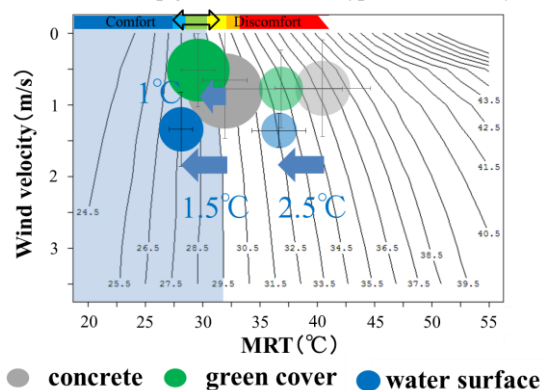


Figure11. Effect of MRT and wind velocity on SET* in green garden at 13:00 on typical summer day

日陰で約 1.0～1.5℃低下する。緑化空間の日陰では、水盤、緑被において快適感は「どちらでもない」となる。

夏期代表日 13 時の日射遮蔽、被覆の改善、風通し改善による SET*低下量を表 2 に示す。温熱環境の改善には、日射遮蔽、被覆の改善、風通し改善の順に有効である。日射遮蔽と被覆の改善の両方の対策で快適感「どちらでもない」となるため、夏期の日中には日射遮蔽と被覆の改善の両方が必要である。

3. 樹木、被覆材料の配置位置の考察

夏期代表日 13 時を対象に、広場、屋上庭園、緑化空間で樹木、表面被覆材の配置位置を考察する。

夏期代表日 13 時の広場、屋上庭園、緑化空間の建物、樹木による日陰、日向の割合と水盤、緑被の割合を図 12 に示す。外円部が建物による日陰、日向の割合、中円部が樹木による日陰、日向の割合、内円部が水盤、緑被の割合を示している。建物による日陰の割合は広場で 7%、屋上庭園で 15%と小さく、緑化空間で 44%と大きい。

建物により日射が遮蔽されない箇所には、樹木による遮蔽が必要である。広場では、樹木率 6%のほとんどが日向に配置され、樹木による日陰の割合が 9%となる。屋上庭園においても、樹木率 5%のほとんどが日向に配置され樹木による日陰の割合が 11%となる。緑化空間では、樹木が建物の影になる割合が 13%と大きく、樹木による日射遮蔽効果が最大限に発揮されていない。

建物や樹木により日射が遮蔽されない箇所には、水盤や緑被等の被覆の改善が必要である。広場は、水盤が日向に効果的に配置されている。屋上庭園は、緑被が日向に効果的に配置されている。緑化空間は、水盤、緑被が日陰にも多く位置し、あまり効果的な配置ではない。

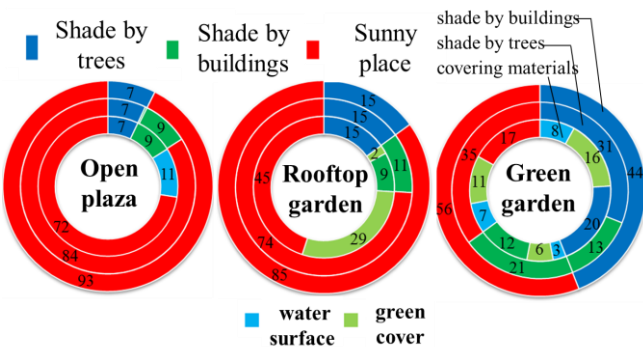


Figure12. Area ratio of shade by buildings and trees and covering materials in three areas at 13:00 on typical summer day

Table2. SET* reduction effect in three areas at 13:00 on typical summer day

SET * reduction effect	Open plaza	Rooftop garden	Green garden
Solar radiation shielding effect (Relative to concrete in sunny place)	8.0℃	6.0℃	6.0℃
Covering materials improvement effect (Relative to concrete)	Watersurface	green cover	green cover
			2.5℃ (sunny place) 1.0℃ (shadow place)
			Watersurface
	2.0℃ (sunny place) 1.0℃ (shadow place)	0℃ (sunny place) 1.5℃ (shadow place)	2.5℃ (sunny place) 1.5℃ (shadow place)
Ventilation effect (Relative to green garden)	0.3℃	0.5~1.5℃	0℃

4. 結論

本研究では大型複合施設の外部空間を対象として、実測調査及び数値計算に基づき、屋外での温熱環境の緩和に、日射遮蔽、表面温度低減、風通し改善のいずれが効果的で、優先的に導入されるべきかについて、建物や樹木の配置、被覆材料の特性などの設計パラメータと風速、MRT、SET*の関係に注目して分析した。

温熱環境の改善には、日射遮蔽、被覆の改善、風通し改善の順に有効である。夏期の日中には日射遮蔽と被覆の改善の両方が必要であり、夕方には日射遮蔽が有効である。夏至の日中は気温が低いため、日射の有無に関わらず、快適な温熱環境となる。建物により日射が遮蔽されない箇所に樹木を配置することで、効果的に温熱環境が改善される。更に、建物、樹木により日射が遮蔽されない箇所に水盤や緑被を配置することで、効果的に温熱環境が改善される。また、風通しの良い屋上庭園では SET*が 1℃程度低下し、温熱環境が改善される。

参考文献

1) 福味克幸ら：大規模商業施設屋上庭園における温熱環境評価 その 4 形態係数による影響の考察と快適温度時間数による評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1, pp. 619-620, 2006

2) 赤川宏幸、杉本英夫：都市キャニオンの大規模人工緑地における環境評価：その 2 街区の温熱環境調査、学術講演梗概集、2006

3) 京極沙絵ら：大型複合施設における外部空間のヒートアイランド対策技術の性能評価に関する研究（その 4）被覆材料改善及び日射遮蔽が放射環境に与える影響、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、2015

4) 石井昭夫ら：屋外気候環境における快適感に関する実験、人間-熱環境系シンポジウム報告集 11, pp. 134-137, 1987

河川水利用地域熱供給システムの性能検証・評価に関する研究
(第 16 報) 河川水利用によるヒートアイランド負荷の低減評価と 11 年間のプラント性能
評価

Study on Performance Verification and Evaluation of District Heating and Cooling System
Using Thermal Energy of River Water

Report 16: Evaluation of Exhaust Heat Load Reduction causing Heat Island using Thermal Energy of River
Water and Efforts of 11 years after Starting Operation

○ 金子 亮平 (関西電力) 林 英人 (関西電力)
丹羽 英治 (日建設計総合研究所) 高橋 直樹 (日建設計総合研究所)
小池 万里 (日建設計総合研究所) 三島 憲明 (関電エネルギーソリューション)
下田 吉之 (大阪大学)

Ryohei KANEKO*¹ Hideto HAYASHI*¹ Hideharu NIWA*² Naoki TAKAHASHI*²
Kazusa KOIKE*² Noriaki MISHIMA*³ Yoshiyuki SHIMODA*⁴
*¹ The Kansai Electric Power Co.,Inc *² NIKKEN SEKKEI Research Institute
*³ Kanden Energy Solution, CO.,Inc *⁴ Osaka University

The DHC system in the block 3 in Nakanoshima district uses heat pumps and river water to achieve the efficient use of the heat source and mitigate the heat island effect. This report outlines the analysis of the operating conditions of the heat source system and plant performance records for the consecutive 11 years since the operation was launched, and also reports the evaluation of exhaust heat load reduction causing heat island using thermal energy of river water.

はじめに

大阪中之島に位置する「中之島三丁目地区地域熱供給施設」においては、熱源システムの効率向上とヒートアイランド現象の緩和を目的として、全面的に河川水利用ヒートポンプシステムを採用し、継続的に適正運転・維持管理を実践している。本報では、運用開始後 11 年間の熱源プラントの運転実績やプラント COP の経年推移を分析した。また、河川水利用によるヒートアイランド負荷としての排熱量低減の効果について、最新の運用状況により評価を行ったので、以下に報告する。

1. システム概要

本施設の熱供給エリアは、2005 年の運用開始から、Ⅱ期工事(2009 年)を経て、2013 年 3 月にⅢ期工事が完了している。Ⅲ期工事では、新たに事務所ビル 1 棟(延床面積約 48,000m²)及びホテル 1 棟(延床面積約 13,000m²)へ供給を開始している。

Fig.1 に熱供給プラントの熱源システム系統図、Table.1 に主要熱源機器と蓄熱槽の仕様をそれぞれ示す。

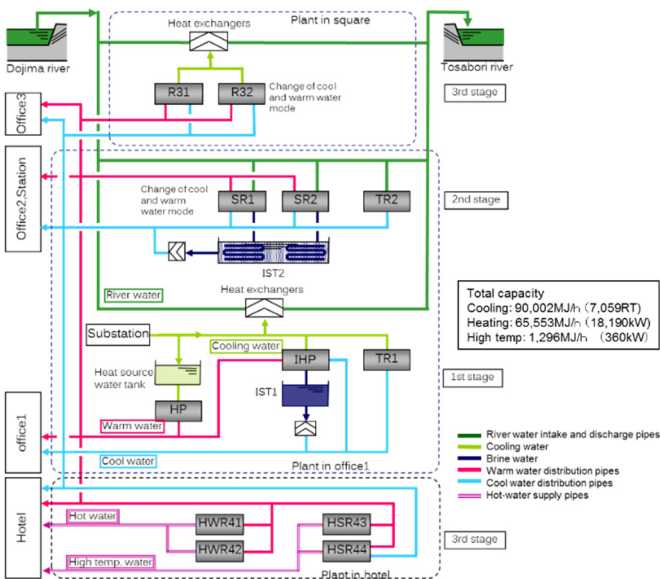


Figure.1 DHC system diagram

Table.1 List of heat source equipment

[1st Stage]			
	Cooling	Heating	Number
HP	-	838MJ/h	1
IHP	Cool water : 3,080MJ/h Ice Storage : 1,936MJ/h	Cool water heat recovery : 3,606MJ/h Ice storage heat recovery : 2,448MJ/h	8Unit (16)
TR1	5,063MJ/h	-	1
Storage capacity			Number
IST1	Dynamic type	139,440MJ 870m3	8
[2nd Stage]			
	Cooling	Heating	Number
SR1	Cool water : 5,062MJ/h Ice Storage : 4,404MJ/h	4,187MJ/h	1
SR2	Cool water : 8,640MJ/h Ice Storage : 8,478MJ/h	13,860MJ/h	1
TR2	7,595MJ/h	-	1
Storage capacity			Number
IST2	Static type	78,230MJ 545m3	8Unit
[3rd Stage]			
	Cooling	Heating	Number
R31・R32	8,561MJ/h	8,910MJ/h	2
Cooling			Number
HWR41・HWR42	-	464MJ/h	2
HSR43	-	184MJ/h	1
HSR44	113MJ/h	184MJ/h	1

TR : Water Cooling Turbo Chiller
IHP : Water Source Screw Heat Pump (Ice storage and heat recovery)
IST : Ice storage tank
SR : Water Source Screw Heat Pump (Ice storage and change of cool and warm water mode)
HP : Water Source Screw Heat Pump (Heating)
R : Water Source Screw Heat Pump (change of cool and warm water mode)
HWR : Scroll Heat Pump (high temp.)
HSR : Scroll Heat Pump (High temp. or high temp. and heat recovery)

2. 熱源プラントの運転実績

2.1 販売熱量の経年推移 (2005～2015 年)

Fig.2 に運用開始以降の需要家別販売熱量^{注1}の経年推移を示す。冷熱販売熱量は猛暑であった2010年がピークとなっており、Ⅲ期以降も2010年には達しておらず、需要家による負荷低減の対応が伺える。温熱販売熱量は、Ⅱ期竣工以降も少しずつ増加している。これは、需要家による節電が、内部負荷の減少として影響していると考えられる。また、2013年春のⅢ期竣工と2014年1月のホテル開業に伴い、2014年の温熱販売量は前年と比較し6,913GJ増加している。しかし、2015年は暖冬の影響により、2014年と比較して2,969GJ減少している。

2.2 電力消費量の経年推移 (2005～2015 年)

Fig.3 に運用開始以降の昼夜の電力消費量と夜間電力比率^{注2}の経年推移を示す。夏季及び中間期の夜間電力比率は、2013年までは60～70%あったが、Ⅲ期竣工後の熱

需要の増加に伴い、それ以降は40～60%となっている。また、冬季の夜間電力比率は、2013年までは20%前後で推移していたが、ホテル開業に伴い夜間の温熱需要が増加したため、2014年以降は30%前後で推移している。

2.3 生産熱量 (2005～2015 年)

Fig.4 に運用開始以降の冷温熱生産熱量^{注3}の経年推移について、熱源機器の運転モード別に内訳を示す。冷熱生成量のモード別分担をみると、2015年もⅢ期竣工後と同様の傾向を示しており、高効率機器の運転を優先し、節電に配慮している。また、製氷熱回収運転については近年増加傾向にある。

温熱生成量のモード別分担をみると、Ⅱ期以降は、高効率な熱回収運転を優先しつつ、追掛け熱源機器を併用しているが、2015年の温熱需要の減少に対しては追掛け熱源機器の運転を減少させて対応していることがわかる。

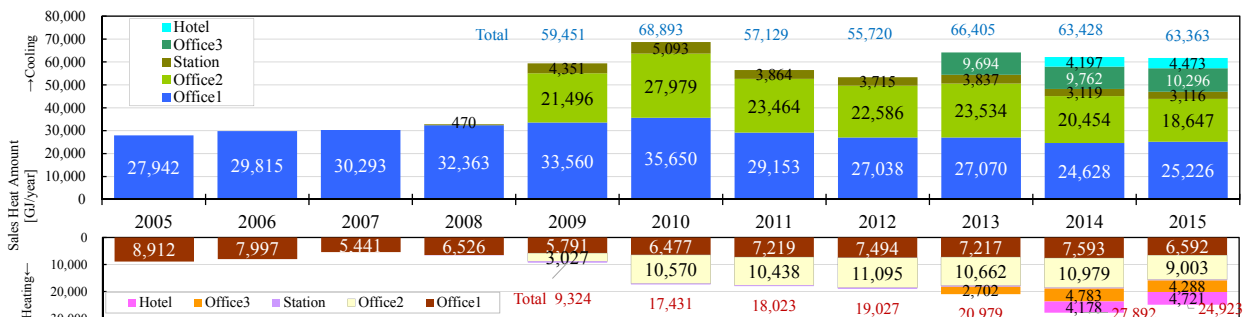


Figure.2 Amount of heat sold by the plant(per consumer)

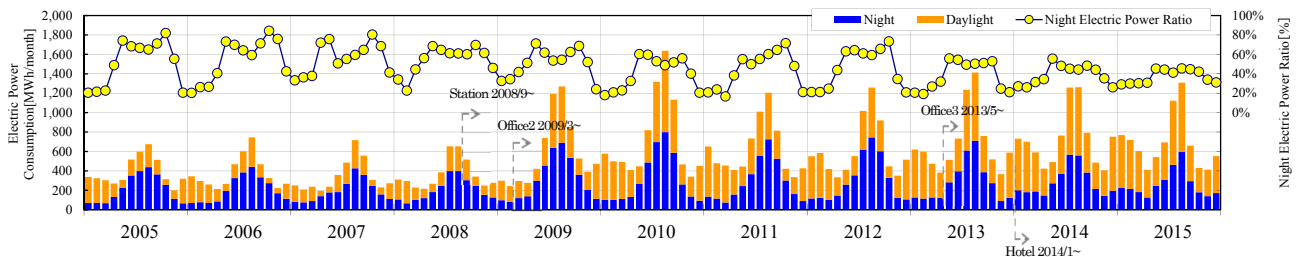


Figure.3 Amount of power consumption by the plant (daytime and nighttime)

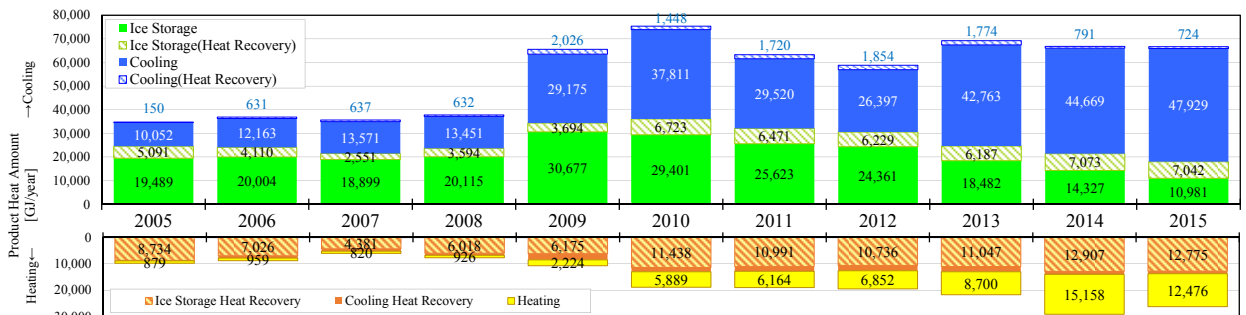


Figure.4 Amount of heat produced by the plant (per operation mode)

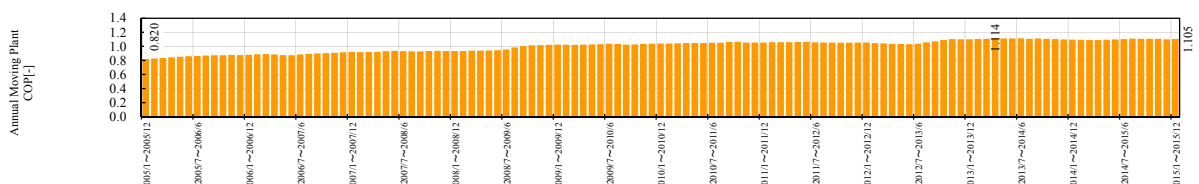


Figure.5 Annual moving plant COP

2.4 プラント効率の推移（販売熱量基準）

Fig.5 に販売熱量基準の 1 年間の移動平均熱源プラント COP^{注4}（一次エネルギー換算）の推移を示す。プラント COP は I 期竣工から順調に向上を続けている。2015 年は 1.105 であり、2005 年（0.820）と比較して 35% の向上を示した。また、プラント COP は最高で 1.114 であり、直近でも同水準を維持している。

3. 河川水利用によるヒートアイランド負荷の低減評価

3.1 ヒートアイランド負荷抑制効果の検証・評価方法

I 期の事務所ビルについて仮想の閉空間を想定し、投入されるエネルギーと河川へ排出されるエネルギーの残差から大気への排出エネルギーを算出する²⁾。ヒートアイランド負荷としての大気排熱量 Q_{LHI} は、(1)式のように定義し、仮想閉空間のエネルギー収支と実測データを用いて Q_{LHI} 算定する。

$$Q_{LHI} = Q_o - Q_i \quad \dots (1)$$

Q_{LHI} ・・・大気排熱量、 Q_o ・・・大気への排熱量、 Q_i ・・・大気からの吸熱量

仮想閉空間のエネルギー収支式は、(2)式で表すことができる。

$$Eb + Ed + Qi + Qm = Qo + Qd + Qw + (Qr - Qs) \quad \dots (2)$$

Eb ・・・ビル電力消費量、 Ed ・・・DHC 電力消費量、 Qm ・・・人体発熱量

Qd ・・・河川へ放熱される熱量、 Qw ・・・給湯放熱量

Qr ・・・放熱量、 Qs ・・・蓄熱量

したがって、ヒートアイランド負荷としての大気排熱量 Q_{LHI} は、(3)式で算定できる。

$$Q_{LHI} = (Eb + Ed + Qm) - (Qd + Qw) - (Qr - Qs) \quad \dots (3)$$

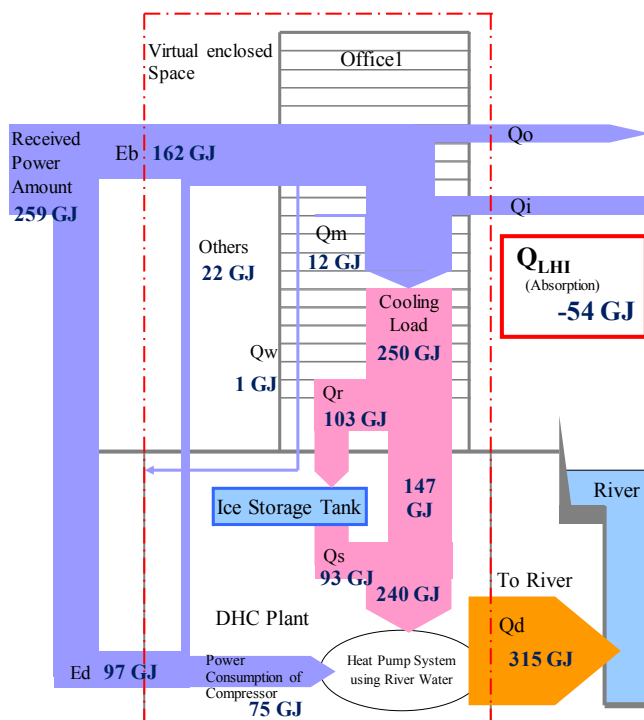


Figure.6 Energy flow(2005)

3.2 試算結果

I 期竣工当初の 2005 年の夏季ピーク日である 7 月 19 日における試算結果を Fig.6 に、III 期竣工後の 2014 年の夏季ピーク日である 8 月 19 日における試算結果を Fig.7 に示す。 Q_{LHI} は 2005 年が -54 GJ であったのに対し、2014 年は -83 GJ と、両日とも大気から熱を吸収しているという結果となったが、2014 年の方がより大気から熱を吸収しているという結果になった。

2005 年と 2014 年各々の夏季ピーク日の投入エネルギー（電力消費量と人体発熱量）を Fig.8,9、排出エネルギー（河川放熱量と給湯放熱量）を Fig.10,11、蓄熱槽の蓄熱量と放熱量を Fig.12,13、 Q_{LHI} の一日の推移を Fig.14,15 に示す。夜間は熱源が蓄熱運転を行っていることもあり、大気への排熱側となっているが、その他の時間はほぼ吸熱側となっていることがわかる。また、2005 年は夜間がほぼ排熱側であったのに対して、2014 年のほうが早い時間から吸熱側となっていることがわかる。

2005 年の Q_{LHI} の 7 月と 8 月における日積算値の推移を Fig.16,17 に、2014 年の推移を Fig.18,19 に示す。共に 7 月前半と一般空調が停止している土日以外は概ね吸熱側となる。2014 年の方が 7 月の早い時期より大気から吸熱していることがわかる。2014 年 7 月は 1 日当たり平均で 19.4 GJ、8 月は 28.8 GJ の吸熱となった。

2005 年と比較して 2014 年の大気からの吸熱が増加した要因として、プラント効率の向上による圧縮機電力消費量の減少や省エネルギー運用によるビル電力消費量の減少が考えられ、その結果、ヒートアイランドの低減効果についても有効性が高まったと評価できる。

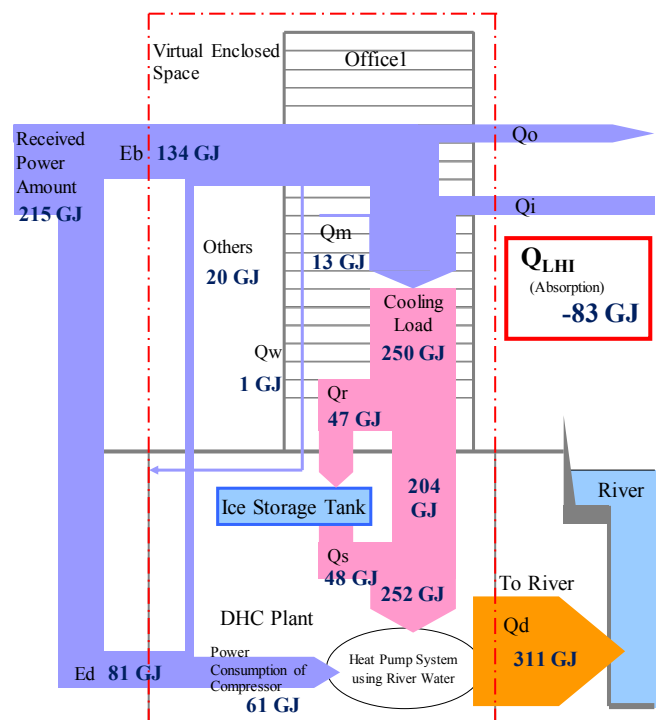


Figure.7 Energy flow(2014)

4. まとめ

本報では、運用開始後 11 年間の取り組み内容として、11 年間の販売熱量についての分析や夜間電力消費量の分析、熱源機器の運転状況の分析、プラント COP の推移を分析した。

また、2014 年のヒートアイランド負荷としての排熱量低減評価を行い、2005 年時との比較を行った。

本施設は、運用開始以降、様々な状況に配慮しつつ、適切な熱源運用を行い、継続的なプラント性能の向上を実現してきた。また、ヒートアイランド負荷削減にも一定の効果を果たしてきたと試算することができた。

参考文献

- 1) 吉成・中澤・丹羽他：河川水利用地域熱供給システムの性能検証・評価に関する研究(第 1 報～第 15 報)，空調調和・衛生工学会近畿支部研究発表会論文集，2006.3～2015.3
 - 2) 三浦・下田・丹羽他：未利用エネルギー(河川水)を活用した地域熱供給システムの性能検証・評価に関する研究(第 4 報)，空調調和・衛生工学会学術講演論文集，2006.9
- 注 1) 販売熱量：各需要家の熱量計にて計測された熱量
 注 2) 夜間電力比率＝夜間電力消費量 ÷ 全電力消費量
 注 3) 生産熱量：各熱源機にて計測された熱量
 注 4) プラント COP＝販売熱量(変電所利用熱量含む) ÷ 消費エネルギー量

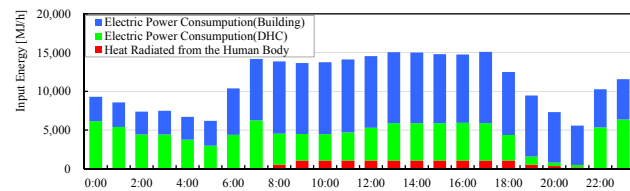


Figure.8 Input energy (2005/7/19)

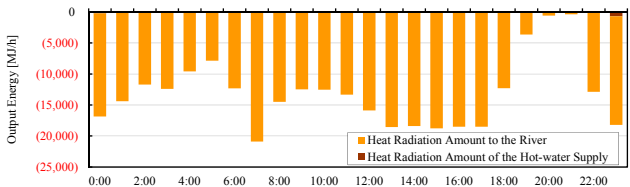


Figure.10 Output energy (2005/7/19)

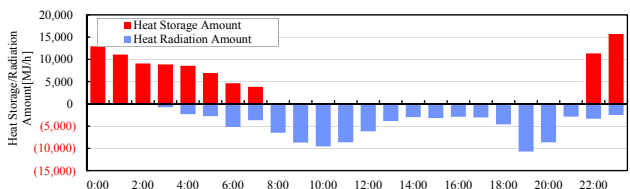


Figure.12 Heat storage/radiation amount (2005/7/19)

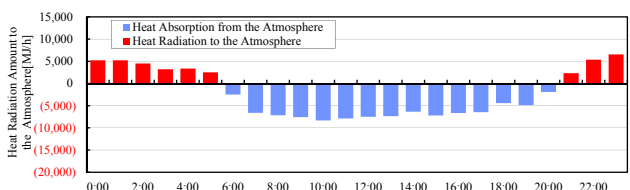


Figure.14 Q_{LHI} (2005/7/19)

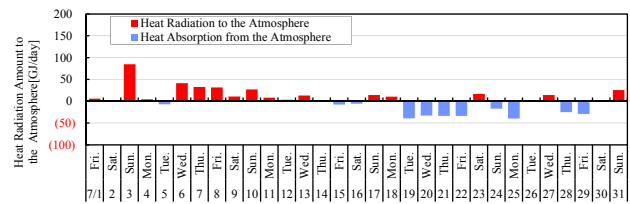


Figure.16 Q_{LHI} (2005/7)

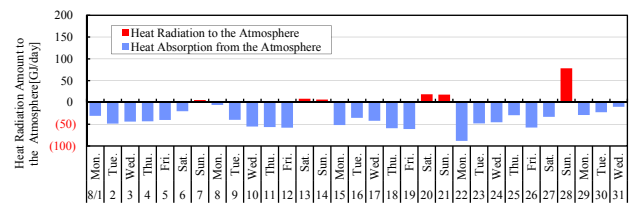


Figure.17 Q_{LHI} (2005/8)

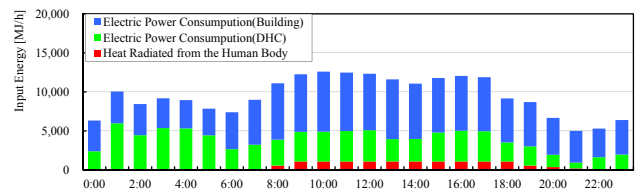


Figure.9 Input energy (2014/8/19)

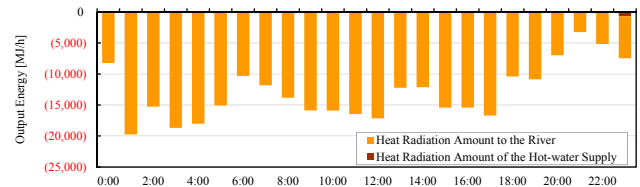


Figure.11 Output energy (2014/8/19)

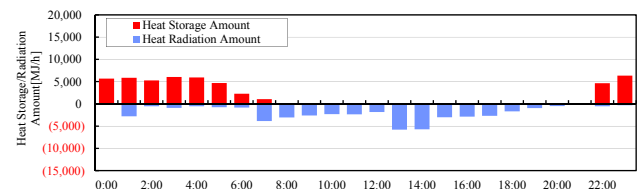


Figure.13 Heat storage/radiation amount (2014/8/19)

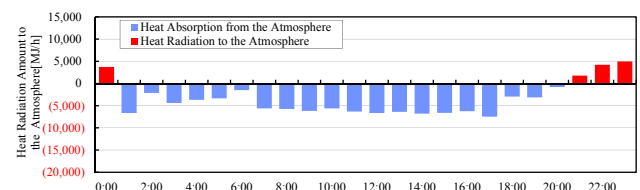


Figure.15 Q_{LHI} (2014/8/19)

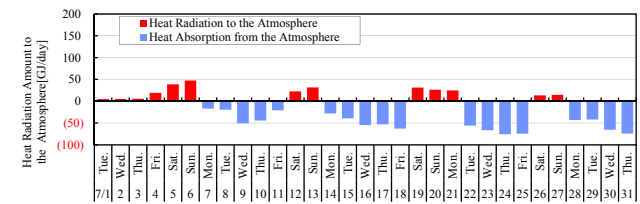


Figure.18 Q_{LHI} (2014/7)

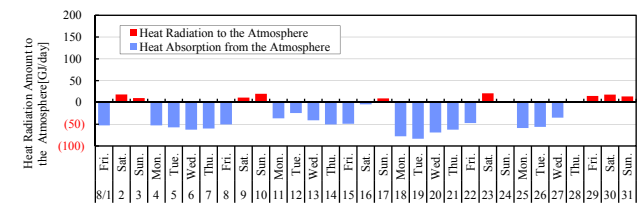


Figure.19 Q_{LHI} (2014/8)

降雨後の保水性舗装の水分吸収特性の推定 Moisture absorption properties of water retentive pavement

○倉橋 知里（大阪大学） 嶋寺 光（大阪大学）

Aiza Cortes（大阪大学） 近藤 明（大阪大学）

Chisato KURAHASHI^{*1} Hikari SHIMADERA^{*1} Aiza CORTES^{*1} Akira KONDO^{*1}

^{*1} Osaka University

Objective of this study is to investigate the moisture absorption characteristics of water retentive pavement (WRP) during rainfall events and to estimate the effect of WRP on mitigation of increase in the surface temperature after the rainfall events. Evaporation flux was measured under 4 experimental cases. Evaporation occurred efficiently with lower volumetric water content in the rainfall cases compared to the saturation case, indicating that rain water absorbed by WRP dominantly distributed near the surface. A one-dimensional heat and moisture transport model for WRP generally captured temporal variations of the evaporation flux and the surface temperature in the experimental cases.

はじめに

都市化の進展に伴い、ヒートアイランド現象は顕著になり、熱中症等の健康被害や都市型集中豪雨との関連も指摘され¹⁾、早急な対応が求められている。地球温暖化に伴い、世界の平均気温は過去 100 年で約 0.71℃の割合で上昇しているとされ、日本においても長期的に 100 年あたり約 1.16℃の割合で上昇している²⁾と報告されている。大阪では、100 年あたりの上昇率は 2.7℃であり³⁾、日本の全国平均を上回る速さで温暖化が進行している。これは、地球温暖化による気温上昇にヒートアイランド現象が加わった結果であると考えられる。

ヒートアイランド現象の要因には大きく三つある。一つ目が建物の空調機器や自動車、工場や清掃工場、火力発電所などの人工排熱の増加である。空冷式の空調機器や燃料の燃焼に伴って発生する熱の大部分を占める顕熱は大気を暖め、気温上昇の原因の一つとなる。二つ目は宅地化とそれに伴う道路等の都市基盤整備による地表面被覆の人工化である。アスファルトやコンクリート等の舗装面は、夏季の日中に日射を受けると表面温度が 50～60℃程度にまで達し、大気を加熱するようになる。アスファルトやコンクリートは熱容量が大きいため日中に熱を蓄え、夜間の気温低下を妨げる原因となっている。三つ目が都市形態の高密度化である。中高層の建物の増加による高密度化は、地

表付近の風通しが悪化し、熱の拡散や換気性能の低下を引き起こす可能性がある。また、高密度化した都市では、天空率が小さくなり、夜間の放射冷却が阻害され、熱が溜まりやすくなる。

原因の一つである地表面被覆の変化を改善する対策として保水性舗装がある。保水性舗装は空隙の多い舗装に保水材を充填させた構造で、降雨や散水により保水された水分が蒸発時に気化潜熱を奪うことで路面温度の上昇を抑制するという機能を有する舗装である。

既往の研究⁴⁾では、保水性舗装の飽和含水状態からの舗装体内部の水分・熱移動メカニズムについて考えられてきた。本研究では、保水性舗装の降雨後の水分吸収特性を明らかにすること、それによってより現実に即した条件で地表面熱収支モデルによるヒートアイランド緩和効果の評価を可能とすることを目的とした。

1. 地表面熱収支モデル

保水性舗装材内の熱・水分輸送を考える際、Kondo and Saigusa⁵⁾を基にした 1 次元多層モデルを使用した。多層モデルに組み込む蒸発効率は、保水性舗装と水面からの蒸発効率測定実験結果から式(1)を用いて算出した。

$$E = \rho C_E u \beta (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (1)$$

E : 蒸発フラックス [$\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

ρ : 空気の密度 [g/m^3]

C_E : バルク輸送係数

u : 風速 [m/s]

q_{sat} : T_s における飽和比湿 [kg/kg]

T_s : 表面温度 [$^{\circ}\text{C}$]

q_a : 大気の比湿 [kg/kg]

β : 蒸発効率 [-]

蒸発効率とは水面蒸発量に対する舗装材からの蒸発量の比である。発効率が1に近い値であれば、試料の表面では、水面と同程度の蒸発が起こっていることを示す。一方、蒸発効率が0に近い値であれば、試料の表面では、蒸発がほとんど起こっていないことを意味する。

また、保水性舗装の表面の熱収支式は式(2)で表される。

$$Rn = L \uparrow + H + G + LE \quad (2)$$

Rn : 正味の入力放射量 [W/m^2]

$L \uparrow$: 上向き長波放射 [W/m^2]

H : 顕熱フラックス [W/m^2]

G : 地中伝導熱流速 [W/m^2]

LE : 潜熱フラックス [W/m^2]

また、上向き長波放射、顕熱フラックス、地中伝導熱流速、潜熱フラックスは式(3)~(6)で表される。

$$L \uparrow = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

$$H = \rho c_h C_p u (T_s - T_a) \quad (4)$$

$$G = -\lambda \left(-\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$LE = \rho C_E u \beta (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (6)$$

ε : 射出率 [-]

σ : ステファンボルツマン定数 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$]

c_h : バルク輸送係数 [-]

C_p : 熱容量 [$\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$]

λ : 熱伝導率 [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]

z : 高さ [m]

2. 降雨強度に応じた蒸発効率の測定

2.1 実験方法

0.5 mm/h, 1 mm/h, 2 mm/h の降雨強度での1時間の降雨後を想定した条件および飽和含水条件で蒸発効率

の測定を行った。実験は気温 30 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 50 %に設定した暗室のグロースチャンバー内で行った。実験の試料としてフライアッシュ製保水性舗装を用いた。サイズは、縦横 15 cm、高さ 5 cm であり、飽和含水率は 0.09 である。降雨を再現するために、各降雨強度にて1時間降雨総量の4分の1を15分毎に舗装材の上部から1時間かけて滴下した。また、24時間水に浸した保水性舗装を、水で湿らせた布で包み、更に24時間放置し、飽和含水状態をつくった。1時間の降雨の後、重量計(AND-GX8K)を用いて保水性舗装の重量、熱電対を用いて表面温度を、24時間測定した(Fig.1)。



Fig. 1 Appearance of experiment

2.2 重量と表面温度の測定結果

実験より得られた降雨強度別の表面温度と蒸発フラックスの時間変化をそれぞれ Fig.2 と Fig.3 に示す。0.5 mm/h の降雨を想定した場合は吸水した量のほとんどが蒸発したので実験を18時間で終了した。降雨強度にかかわらず、蒸発による表面温度の低下は見られた。表面温度の最低温度はどの場合でもおよそ 26.5 $^{\circ}\text{C}$ となっている。しかし降雨強度により、保水性舗装からの水分蒸発による温度上昇抑制効果の持続時間には違いがあった。本実験では、29 $^{\circ}\text{C}$ を初めて超えるまでにかかった時間を見ると、2 mm/h は10時間後、1 mm/h は9時間後、0.5 mm/h は6時間後と降雨強度が強くなると舗装の含水率も大きくなるので保水性舗装の温度上昇抑制効果の持続時間は長くなった。

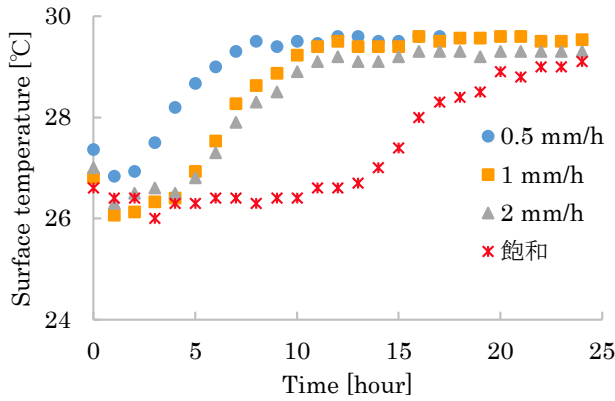


Fig. 2 Measured surface temperature

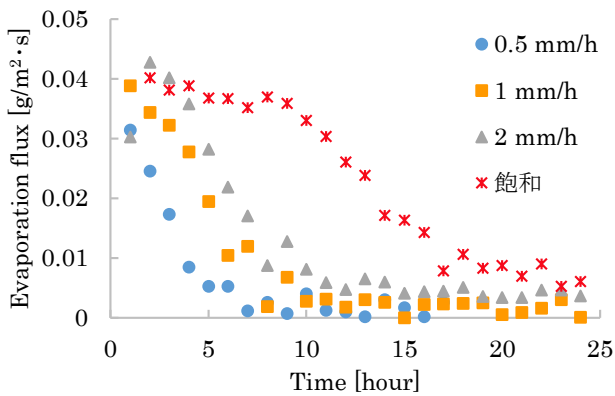


Fig. 3 Measured evaporation flux

2.3 降雨強度別の蒸発効率

各降雨強度における蒸発効率 β を求めた。蒸発効率 β は式(1)から求める。飽和含水状態での実験開始から数時間は含水率が高く、毛細管現象で試料の表面に水分が出てきて蒸発がおこる。この状態の蒸発効率を1として蒸発効率を求めた。ただし、未知のパラメータ $C_E u$ は $\beta=1$ のときの平均を求めた結果、 $C_E u = 0.005$ であった。

Fig.4 に蒸発効率 β と体積含水率 θ の関係について、各条件での蒸発実験結果とロジスティック曲線による近似を示す。降水強度が弱いほど、保水性舗装の含水率が低い、蒸発実験開始直後の蒸発フラックスは、どの降水強度の場合も飽和含水状態から始めた場合と同程度の値を示している。飽和含水状態から測定した場合には、含水率0.04程度でほとんど蒸発が起こらなくなるのに対し、降雨を想定した条件では全体の含水率が0.02や0.01と低くても蒸発効率は大きい。この結果は、降雨を想定した条件では、表層付近に水分が偏在していることを示唆している。

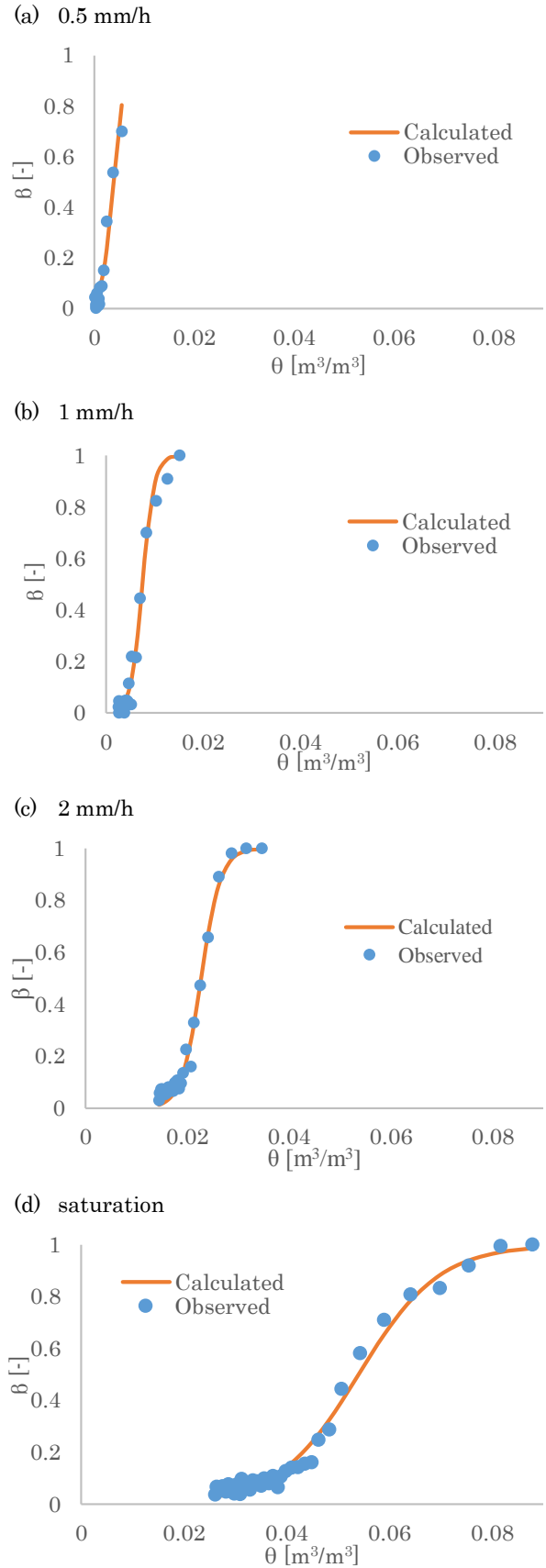


Fig. 4 Relationship of evaporation efficiency β and volumetric water content θ : (a) 0.5 mm/h (b) 1 mm/h (c) 2mm/h (d) saturation

3. 計算結果

多層モデルは各層の熱・水分輸送を個別に考えているので蒸発効率 β は3節で示した飽和含水状態から測定した場合に得られた近似曲線を用いて、多層モデルを用いた地表面熱収支モデルの計算を行った。蒸発実験の結果は、降雨後の保水性舗装内部の水分は表層付近に偏在していることを示唆していた。そこで、本計算では、各降雨強度での蒸発実験開始時の含水量を基に、第1層から順に飽和しているものとして、初期条件を設定した。

降雨を想定した実験と1次元多層モデルの計算結果の比較を行った。表面温度の時間変化をFig.5に、蒸発フラックスの時間変化をFig.6に降雨強度別に示す。

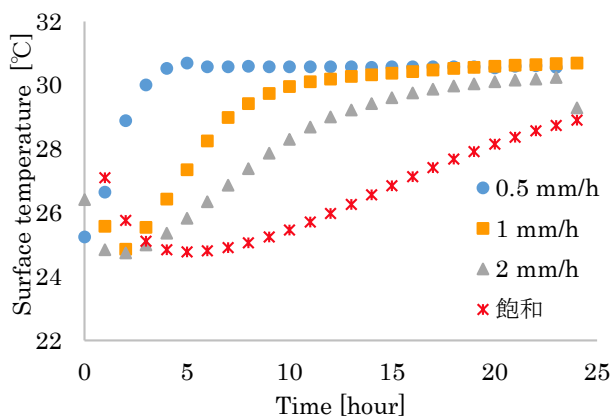


Fig. 5 Simulated surface temperature

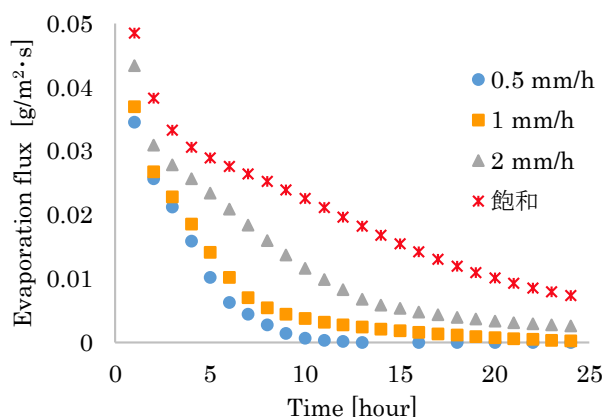


Fig. 6 Simulated evaporation flux

水分の蒸発による温度の低下は、Fig.3と比較すると、実測値の最低温度が26°Cであるのに対し、計算値は24.5°Cと低くなり、計算値のほうが減少幅は大きくな

った。また、蒸発フラックスはFig.4の実測値よりも全体を通して少なかった。しかしながら、表面温度および蒸発フラックスの時間変化について、ばらつきはあるものの多層モデルによって傾向を再現できていると言える。これらより、降雨や散水時において、吸収された水は、表層から舗装材を飽和させていくことがわかった。

4. 結論

降雨を想定した蒸発実験により、保水性舗装の降雨時の吸水過程において水分は表層に偏在していることが分かった。また、降雨量が多くなり、保水性舗装に吸水される量が多くなると、温度上昇抑制効果の持続時間は長くなった。今後、この結果を踏まえ、地表面熱収支モデルを3次元都市街区モデルに組み込むことにより、より現実に即した条件で都市ヒートアイランド緩和策を評価することができると考えられる。

参考文献

- 1) 三上岳彦, 安藤晴夫, 横山仁, 山口隆子, 市野美夏, 石井康一郎, 大和広明: 東京都内における夏期の局地的大雨に関する研究, 東京都市環境科学研究所年報, 33-42., 2005
- 2) 気象庁. 日本の気温と降水量の長期変化傾向 2015 年 http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html.
- 3) 気象庁 ヒートアイランド監視報告 2014. 2015 年 <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr/h27/chapter1.pdf>.
- 4) Cortes A., Kondo A., Shimadera H., Hongu S.: Numerical Evaluation of the Transport of Heat and Moisture in Water Retentive Pavement. 大気環境学会誌 第 51 巻 第 2 号 2016
- 5) Kondo J, N Saigusa: Modeling the Evaporation from Bare Soil with a Formula for Vaporization in the Soil Pores, *J. of the Meteorological Society of Japan*, Vol.72, No.3, pp.413-421, June 1994

粒状多孔質充填層の水分蒸発過程の実験的評価

Experimental evaluation about water evaporation process of granular packed bed

○辻本 大介（大阪府立大学） 木下 進一（大阪府立大学） 吉田 篤正（大阪府立大学）

Daisuke TSUJIMOTO Shinichi KINOSHITA Atsumasa YOSHIDA

Osaka Prefecture University

The waterretentivepavement by porous materials is proposed as one of the mitigation measures for urban heat island. For the deterioration of evaporation performance of the materials in the drying process, performance improvement by means of granular porous media is considered. The effect of internal pore structure and particle size related to the inter-particle void structure on the evaporation performance of granular water retentive material are experimentally evaluated by drying tests with thermostat and wind channel.

1. 緒言

近年、日本各地の都市部において建物や道路への蓄熱や人工排熱の増加によってヒートアイランド現象が顕著になっている。この緩和策の1つとして、多孔質の保水性材料で街路等を舗装することが考えられる。この対策技術は、日射エネルギーを保水性材料内部の水分の蒸発潜熱により吸収し、気温上昇に関わる大気への顕熱輸送を抑えることが狙いである。舗装材として利用される保水性材料はブロック形状であるが、蒸発が進むにつれその速度が低下する問題がある。この蒸発性能を改善するために、材料を粒状化し、直接外気に触れる面積を増加させ、水分利用効率を向上させることが考えられている。粒状多孔質の蒸発性能を高めていくためには、粒状多孔質の水分蒸発特性に影響する因子を詳細に評価する必要がある。

本研究では粒径や粒子内の空隙構造の異なる粒状多孔質を対象として、熱・水分移動特性を実験的に評価する。風速、温度、湿度が制御できる小型風洞を用いて異なる粒径ならびに粒子内微細構造を有する粒状多孔質充填層の水分蒸発特性を評価した。

2. 試料および熱・水分移動特性評価

多孔質試料を次のとおり作成した。白信楽粘土に粉末活性炭を混練し、任意の形状に成形・乾燥させた材料を、電気炉で800℃にて素焼・焼結する。その際、粉末活性炭は焼き飛ばされると考えられるが、混練した活性炭の粒径を変えることにより、異なる気孔構造を有する多孔質試料の作成を試みる。粉末活性炭については、平均粒径100μmと6μmの2種類を用意する。混練時の粘土・活性炭重量比は10:1で固定する。粒状試料の形状は直径15mmの球形粒子と直径3mm・高さ3mmの円柱粒子の2種類とする。

作成した試料の条件を表1に示す。また、同じ方法でブロック状や円盤状の試料も作成し、それらの熱および水分移動に関する物性値を測定する実験に使用する。測定する項目は透水係数、湿気伝導率、熱伝導率、比熱、平衡含水率の5つであり、透水係数は変水位透水試験1)、湿気伝導率はカップ法2)、熱伝導率は非定常熱線法3)、比熱は混合法により測定し、平衡含水率はチャンバー法を用いて測定を行う4)。

測定の結果を表2に示す。また、熱伝導率の各試料における含水率依存性の結果を図1に示す。平衡含水率の測定結果を図2に示す。湿気伝導率、透水係数においては粒径100μm活性炭を配合した試料の方が小さい値を示した。理由としては、細孔径分布が小さくなるほど、毛管凝縮相の移動が大きくなるため、水分伝導率が大きくなったためと考えられる。

また、比熱、熱伝導率は粒径100μm活性炭を配合した試料の方が大きい値を示した。その理由としては、粒径100μm活性炭を配合した試料の方が空隙率が2%ほど大きくなっているためだと考えられる。

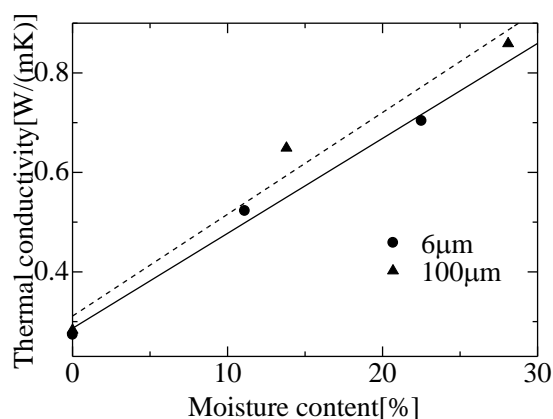
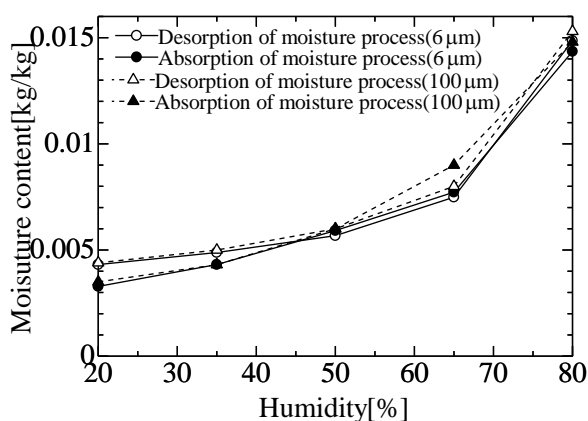
平衡含水率については、大きな差異については認められなかった。

Table1 Measurement samples properties

Particle size[mm]	Carbon Particle size[μm]	Combination ratio	Porosity [m^3/m^3]
15	100	10 : 1	0.44
3	100	10 : 1	0.44
15	6	10 : 1	0.42
15	なし	10 : 1	0.32

Table2 Physical properties media sample

Carbon particle size [μm]	Specific Heat [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	Moisture conductivity [$\times 10^{-10}\text{m/s}$]	Permeability [$\times 10^{-9}\text{m/s}$]
6	1.57	6.81	2.86
100	1.84	6.73	2.56

**Fig.1** Moisture dependence of thermal conductivity**Fig.2** Equilibrium moisture content

3. 風洞を用いた乾燥実験

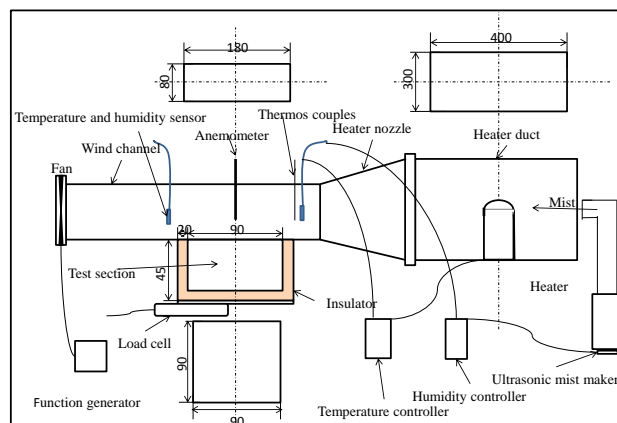
風速が一定の条件で乾燥実験を行い、粒径および空隙の違いによる蒸発性能への影響を評価する。蒸発性能は乾燥速度、含水量、表面温度および内部温度の時間変化を測定することにより評価した。

3.1 測定方法

測定装置の概略を図3に示す。風洞装置は誘引式を採用し、上流側から、ヒーターダクト、ノズル、テストセクション、DCファンで構成されている。主流部の流路断面は180×80mmの長方形で、DCファンの個数ならびに回転数を変えることにより風速を1.0～8.0 [m/s]の範囲で調節することができる。乾燥室の出入口の相対湿度を測定し、試料の温度変化をK型熱電対、重量変化はロードセルを用いた天秤で測定をし、乾燥速度を求める。深さ方向の温度を測定するために、K型熱電対を表面から45mmまで7.5mm間隔に5ヶ所設置した。また、充填層底部において流出・流入する熱流束を熱流板にて測定する。断熱のために試料底面に厚さ30mm、試料側面部に20mmの発泡スチロールを貼り付けた。測定試料は図4に示す。

測定試料は直径15mmの球状試料と、直径・高さ3mmの円柱状試料を作成し、球状試料については、100 μm 活性炭配合、6 μm 活性炭配合、活性炭配合なしの3種類作成した。円柱状試料は100 μm 活性炭配合の1種類作成した。それぞれ試料a, b, d, cとする。

測定条件は次節で記述する。初期において試料充填層内部の温度が均一になるまで、容器上部をラップで覆い、テストセクション入口が所定の温度湿度になるようにヒータ電圧、ミスト発生量を調整し定常になるまで放置した。温度が定常になった時点でラップを除去した。各データはデータロガーで測定を行い、測定間隔は10秒とした。

**Fig.3** Direct picture of wind channel duct

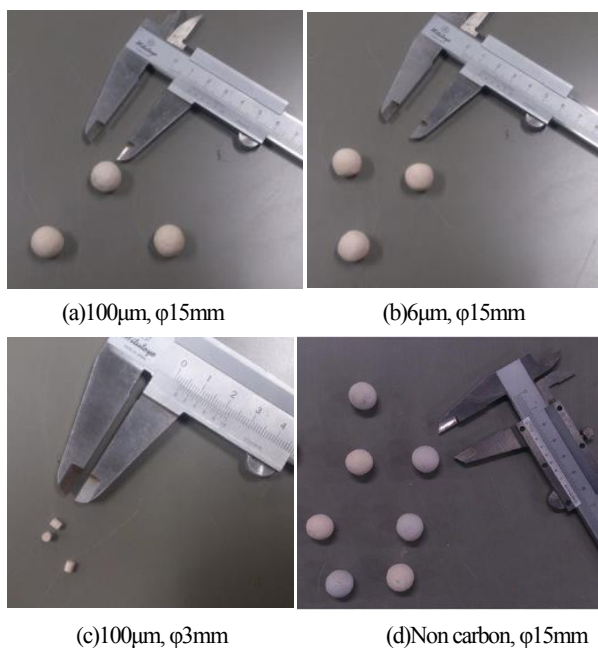


Fig.4 The measurement items

3.2 測定結果

試料 a から d の充填層内部温度の推移をそれぞれ図 5～図 8 に示す。含水率の推移を図 9 に示す。温度が定常となり、断熱を終了としたところを 0 点とする。

活性炭粒径配合の異なる試料 a, b を比較すると、試料 b の方が初期で温度変動の小さい定率乾燥期間が長く、乾燥終了までに長い時間を要しているのが分かる。これは、水分伝導率が細孔径分布が小さい方が水分伝導率が大きくなるためと考えられる。試料粒径の異なる試料 a, c を比較すると、試料 c の方が定率乾燥が長い。これらのことから、試料内部の空隙構造や試料と試料の隙間にできる空隙構造がより細かいほど、定率乾燥や乾燥が完了するまで長くなることが分かる。これは 100μm 活性炭配合粒径 15mm の試料 a と活性炭なし粒径 15mm 試料 d の比較からも同じことが言える。また、含水量のグラフの傾き、つまり乾燥速度は三種類の試料全て粒径が同じ場合等しい。しかし 6μm 活性炭配合試料の方が長く乾燥し、含水量も 100μm 活性炭配合より低い値になるまで乾燥している。この結果から、空隙構造は乾燥速度に影響を及ぼさないが、最終的な含水率には及ぼし、その値は空隙構造がより微細であるほど小さくなる。また、粒径が小さい場合、定率乾燥期間の乾燥速度は低くなる。

次に測定条件で湿度を 50% から 80% まで上昇させた場合の結果について、100μm 活性炭配合粒径 15mm 試料 a の内部温度推移を図 10 に示す。また、風速を 1.5m/s から 5.0m/s に増加させた場合の 100μm 活性炭配合粒径 15mm 試料 a の内部温度推移を図 11 に示す。この時の含水率推移を図 12 に示す。定率乾燥期間の時間は変わらないが、境界層厚さが薄くなるため温度上昇速度が風速を変化させた場合の方が早い乾燥にかかる時間が短くなって

いる。また、湿度に関しては乾燥にあまり影響を与えないことがわかった。

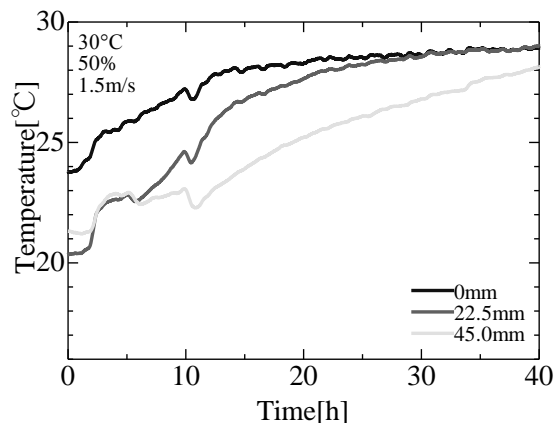


Fig.5 Temperature transition(a) (Basic case)

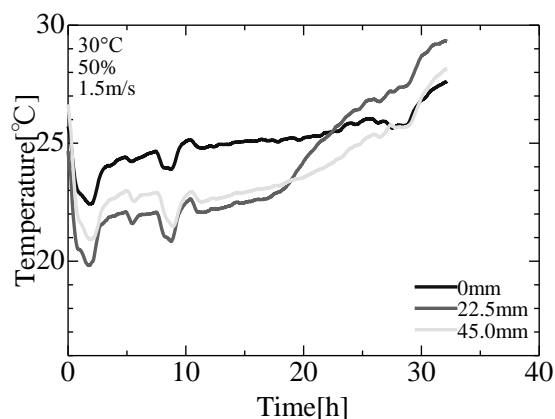


Fig.6 Temperature transition(b) (Basic case)

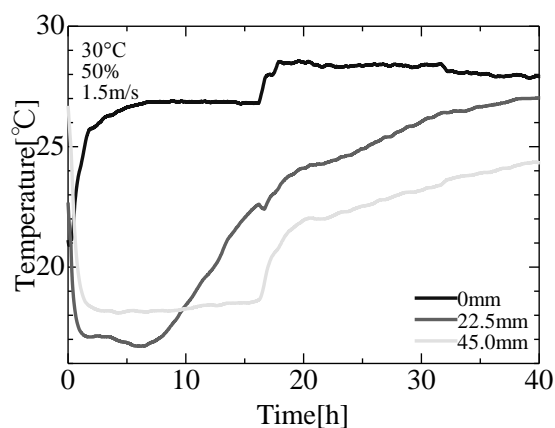


Fig.7 Temperature transition(c) (Basic case)

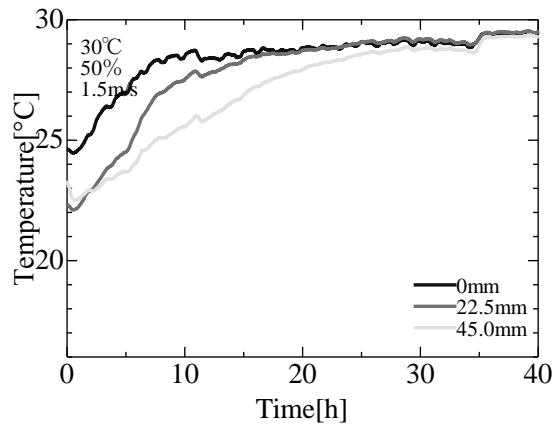


Fig.8 Temperature transition (d) (Basic case)

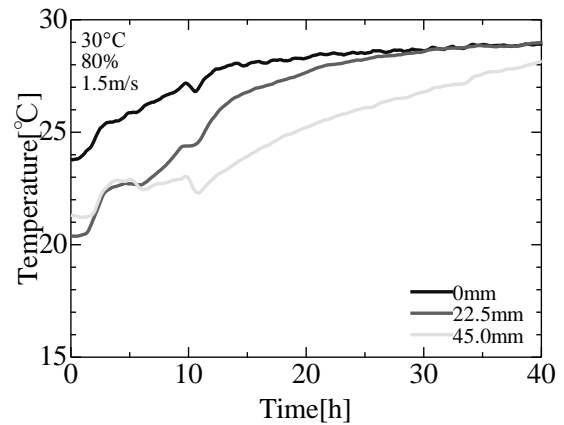


Fig.11 temperature transition(a) (Humidity change case)

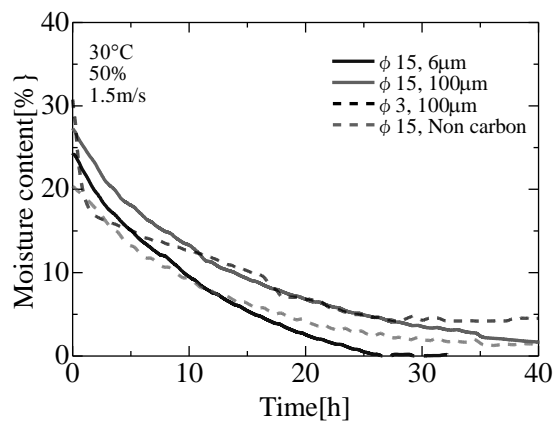


Fig.9 Moisture content transition (Basic case)

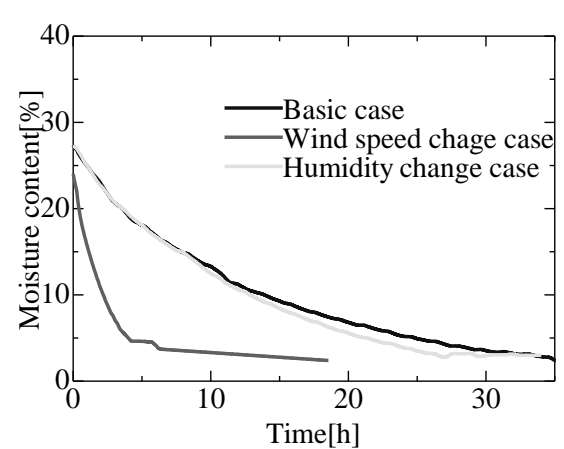


Fig.12 Moisture content transition (Case change)

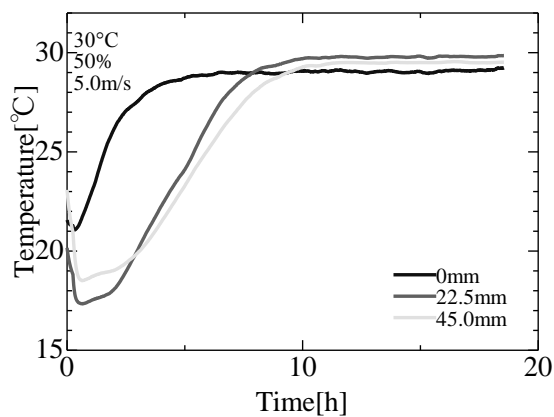


Fig.10 Temperature transition (a) (Wind speed change case)

4 結言

一定の風速が流れている条件で、内部空隙構造がより細かいほど定率乾燥期間が長くなるが乾燥速度があまり変わらないためより低い含水率まで達することができ、内部の水分を十分活用することができる。

粒径が細かい場合定率乾燥期間は長くなるが、乾燥速度が低くなり、結果として粒径が大きい方が含水率まで達することができる。

風速は乾燥に対して、大きく影響を与える。これは風速が熱伝導に対して直接影響を与えるためであると考えられる。また湿度は、乾燥に対して大きな影響を与えない。

参考文献

- 1) JIS A 1218;2009 土の透水試験方法
- 2) JIS A 1324;1995 建築材料の透湿性測定方法
- 3) JIS R 2616;2001 耐火断熱れんがの熱伝導率の試験方法
- 4) JIS A 1375;2004 建築材料の平衡含水率測定方法

2 地点浅層地中温度観測値を用いた深さ別地中温度推定式に関する研究

地域係数推定手法の検討

Study of the soil temperature estimation method in each depth using the observed soil temperatures in the shallow strata of two points

Consideration of the local coefficient estimation method

技術フェロー ○川北 晋栄（関西大学） 正会員 宮崎 ひろ志（関西大学）

Akihide KAWAKITA*¹ Hiroshi MIYAZAKI*¹

*¹ Kansai University

In this study, I propose a method to estimate the soil temperature profile with three actual measurement data. One is a grand surface temperature. Other two are soil temperature at two different depth. As an overview of the estimated equation, I use the properties of the dimensionless annual range of soil temperature and two kinds of thermal diffusivities. As a result of the comparison between predicted values and measured values, I verified that the accuracy of the predicted values are high and this method is practical for an architectural planning.

1.はじめに

近年、低炭素社会への転換が求められている中、未利用エネルギーである地中熱利用が注目されている。しかし、その利用状況は芳しくない。その理由として、高い設備コストが挙げられる。また、全国規模の地中温度測定網が整っていないこともその理由として挙げられる。地中温度恒温性は場所を選ばず使用できる性質であるが、実設計において期待される地温を予測することは難しい。また、地中温度予測における事前調査コストは現実的なものとは言いにくく、実際に実施されることが少ない。

気象庁では、全国の気象台等で地中温度の測定を 1970 年に中止している。そのため、地中温度推定において、現状の観測値および統計値が使用できない。それ故、1970 年以降では、土壌の物性による土壌内部の熱移動を考慮した解析による推定手法と地表面における熱収支を考慮した解析による推定手法の二つの数値解析方法が採択されている。しかし、その推定手法において必要パラメータの多くが実測値を必要とし実測から求めることが困難な場合が多い。そのため、地中温度推定は難航している。

渡辺(1958)は地表面の地中温度データを用いた暖房設計用地中温度推定式を提案した。また、宮崎(2012)は農林水産省・気象庁(1982)の「地中温度に関する資料」より地中温度に関するデータアーカイブの解析を行い、深さ別地中温度年較差は、ある深さの地中温度年較差で無次元化すると単純な曲線で近似できることと、各深さ別年平均地中温度は、いずれも各地の年平均気温より 2℃前後高くなることを見つけた。渡辺(1958)の推定式と宮崎

(2012)の研究内容を考慮した地中温度推定式を田中(2015)が開発した。しかし、田中の提案した推定式において推定誤差が大きい地点が存在した。その原因の一つとして、田中が定義した地域係数があげられる。

以上の研究を踏まえ本報では、田中(2015)における地域係数を宮崎(2012)の研究内容と熱拡散率を使用することで、精度向上を目指した。

2. 方法

2.1 解析方法

本報で用いた地中温度データベースは、農林水産省・気象庁(1982)「地中温度に関する資料」であり、全国的に統一され、地表面から地中 5m までの多様な深さで地中温度観測が行われた 1932-1948 年(17 年間)を対象とした。また、本報では、熱拡散率を十分に表現できる地点として Table1 の 22 地点のデータを用いる。

Table1 Outline of used Data-archive

Target point					
Sendai	Fukushima	Kofu	Nagano	Kanazawa	Nagoya
Hikone	Osaka	Kobe	Fukuoka	Tokushima	Nagasaki
Tyoshi	Oita	Isigakizima	Morioka	Matuyama	Akita
Kumamoto	Miyazaki	Kasihara	Shimonoseki		
Target depth(m)					
0	0.1	0.2	0.3	0.5	1
2	3	5			
Target period					
1932-1948(for 17 years)					

2.2 地域係数

深さ別地中温度年較差において、ある深さの地中温度

年較差を基準(以下、基準点と記述)とし、無次元化すると単純な曲線で表すことができる。(Eq.1)

$$y = \beta e^{-\alpha h} \quad (\text{Eq.1})$$

ここにおける α および β を地域係数と定義する。田中は、この曲線を一次元において一定と定義している。本報では、各深さにおいて曲線が変化するものとし、定義している。また、 α は、曲線の線形形状を決める要因であり、 β は、地表面における無次元化年較差であることがわかる。

2.3 熱拡散率

温度伝播率とよばれ、温度の伝わりやすさを表すものである。本報では、熱伝導方程式の解を用い、その振幅により求められた熱拡散率を使用する。

$$a = \frac{(h_n - h_m)^2}{(\log(R_n) - \log(R_m))^2} * \frac{\pi}{T} \quad (\text{Eq.2})$$

〈添え字一覧(1)〉

y	無次元化年較差[-]	$h_{n,m}$	深さn,m[m]
h	深さ[m]	$R_{n,m}$	深さn, mにおける年較差[°C]
α, β	地域係数[-]	π	円周率[-]
a	熱拡散率[m ² /h]	T	周期(1年間とする)[h]

3. 地域係数の推定手法

3.1 地域係数の推定手法概要

本報では、宮崎(2012)の研究内容と熱拡散率を用い新たに地域係数を算出し、地域係数の精度を向上することを目的とした。方法として、無次元化年較差の性質と、地表面から基準点における熱拡散率および、基準点から任意点における熱拡散率の二種類の熱拡散率を用いて地域係数を算出した。

3.2 地域係数の推定手法過程

(1) β について

a. $h_s \neq h_0$

地表面における無次元化年較差は

$$\beta = \frac{R_0}{R_s}$$

また、上式を両辺対数化すると

$$\log(\beta) = \log(R_0) - \log(R_s)$$

ここで、地表面から基準点における熱拡散率は(Eq.2)より

$$a' = \frac{(h_0 - h_s)^2}{(\log(R_0) - \log(R_s))^2} * \frac{\pi}{T}$$

以上のことより

$$a' = \frac{(0 - h_s)^2}{(\log(\beta))^2} * \frac{\pi}{T}$$

$$\log(\beta) = \pm(0 - h_s) * \sqrt{\frac{\pi}{a'T}}$$

故に、 β は以下の式で表される。

但し、 β は1以上の大きさ故に、符号は以下の様に帰着される。

$$\beta = \exp \left\{ -(0 - h_s) * \sqrt{\frac{\pi}{a'T}} \right\} \quad (\text{Eq.3})$$

b. $h_s = h_0$

$$\beta = 1$$

(Eq.4)

(2) α について

a. $h_s \neq h_i$

任意点 y_i は(Eq.1)より

$$y_i = \beta * e^{-\alpha h_i}$$

また、 y_i は無次元化年較差より

$$y_i = \frac{R_i}{R_s}$$

故に

$$\frac{R_i}{R_s} = \beta * e^{-\alpha h_i}$$

上式の両辺を対数化すると

$$\log \left(\frac{R_i}{R_s} \right) = \log(\beta) - \alpha h_i$$

(Eq.3)より、 β は

$$\beta = \exp \left\{ -(0 - h_s) * \sqrt{\frac{\pi}{a'T}} \right\}$$

なので、

$$\log \left(\frac{R_i}{R_s} \right) = -(0 - h_s) * \sqrt{\frac{\pi}{a'T}} - \alpha h_i$$

また、任意深さ h_i における熱拡散率は

$$a = \frac{(h_i - h_s)^2}{(\log(R_i) - \log(R_s))^2} * \frac{\pi}{T}$$

$$\log \left(\frac{R_i}{R_s} \right) = \pm(h_i - h_s) * \sqrt{\frac{\pi}{aT}}$$

ここで、無次元化年較差は深さが深くなるにつれて、小さくなることがわかっている

以上より上式の符号は以下の様に帰着される。

$$\log \left(\frac{R_i}{R_s} \right) = -(h_i - h_s) * \sqrt{\frac{\pi}{aT}}$$

以上より α は以下の様になる。

$$-(h_i - h_s) * \sqrt{\frac{\pi}{aT}} = -(h_0 - h_s) * \sqrt{\frac{\pi}{a'T}} - \alpha h_i$$

$$\alpha = \frac{h_s}{h_i} \sqrt{\frac{\pi}{T}} * \left| -\left(\frac{h_0}{h_s} - 1 \right) * \sqrt{\frac{1}{a'}} + \left(\frac{h_i}{h_s} - 1 \right) * \sqrt{\frac{1}{a}} \right|$$

(Eq.5)

b. $h_s = h_i$

基準点では無次元化年較差が1になるので、(Eq.1)より

$$1 = \beta * e^{-\alpha h_s}$$

両辺を対数化する。

$$0 = \log(\beta) - \alpha h_s$$

$$\alpha = -\left(\frac{h_0}{h_s} - 1\right) * \sqrt{\frac{\pi}{a'T}}$$

(Eq.6)

3.3 実測値と予測値の比較検証

全 22 地点の地域係数の結果を Table2 に記載する。また、地域係数算出時の基準深さは 0.1m、0.2m、0.3m、0.5m、1.0m の 5 つの深さにおいて行った。しかし、各基準深さにおいて地域係数の値は同じであったため、以降の記載では基準深さ 0.1m のものを採用する。

無次元化年較差の算出方法として、求めた地域係数を (Eq.1) に代入し、深さ別曲線を求める。その曲線に深さの値を代入し無次元化年較差を求めた。

Table2 Result of Local coefficient

Sendai					Nagasaki				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.05070	1.05070	1.00000	0	0	1.07166	1.07166	1.00000
0.1	0.48459	1.05070	1.00000	1.00000	0.1	0.69208	1.07166	1.00000	1.00000
0.2	0.50997	1.05070	0.89693	0.89693	0.2	0.60519	1.07166	0.89693	0.89693
0.3	0.52746	1.05070	0.89693	0.89693	0.3	0.63400	1.07166	0.89693	0.89693
0.5	0.55702	1.05070	0.79529	0.79529	0.5	0.70204	1.07166	0.79442	0.79442
1	0.52161	1.05070	0.62366	0.62366	1	0.61954	1.07166	0.62366	0.62366
2	0.63403	1.05070	0.29564	0.29564	2	0.52639	1.07166	0.27397	0.27397
3	0.28450	1.05070	0.44751	0.44751	3	0.48808	1.07166	0.44751	0.44751
5	0.38311	1.05070	0.15473	0.15473	5	0.49144	1.07166	0.09181	0.09181
Fukushima					Toyoshi				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.07040	1.07040	1.00000	0	0	1.05875	1.05875	1.00000
0.1	0.68035	1.07040	1.00000	1.00000	0.1	0.57090	1.05875	1.00000	1.00000
0.2	0.61359	1.07040	0.94679	0.94679	0.2	0.57771	1.05875	0.94322	0.94322
0.3	0.57398	1.07040	0.89466	0.89466	0.3	0.57811	1.05875	0.89466	0.89466
0.5	0.45279	1.07040	0.85354	0.85354	0.5	0.47163	1.05875	0.83634	0.83634
1	0.63172	1.07040	0.61111	0.61111	1	0.41190	1.05875	0.61111	0.61111
2	0.63058	1.07040	0.30327	0.30327	2	0.38900	1.05875	0.48729	0.48729
3	0.54297	1.07040	0.20932	0.20932	3	0.38730	1.05875	0.31228	0.31228
5	0.46933	1.07040	0.10243	0.10243	5	0.39404	1.05875	0.14762	0.14762
Kofu					Oita				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.07844	1.07844	1.00000	0	0	1.09519	1.09519	1.00000
0.1	0.75520	1.07844	1.00000	1.00000	0.1	0.50927	1.09519	1.00000	1.00000
0.2	0.86690	1.07844	0.90678	0.90678	0.2	0.56976	1.09519	0.97724	0.97724
0.3	0.78305	1.07844	0.85266	0.85266	0.3	0.54606	1.09519	0.90222	0.90222
0.5	0.70439	1.07844	0.75830	0.75830	0.5	0.58642	1.09519	0.81686	0.81686
1	0.56157	1.07844	0.61505	0.61505	1	0.54665	1.09519	0.62399	0.62399
2	0.55982	1.07844	0.35198	0.35198	2	0.52454	1.09519	0.38360	0.38360
3	0.54488	1.07844	0.21032	0.21032	3	0.50848	1.09519	0.23823	0.23823
5	0.39874	1.07844	0.07367	0.07367	5	0.47039	1.09519	0.10424	0.10424
Nagano					Ishigakizima				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.09996	1.09996	1.00000	0	0	1.14929	1.14929	1.00000
0.1	0.95269	1.09996	1.00000	1.00000	0.1	0.59143	1.14929	1.00000	1.00000
0.2	0.64539	1.09996	0.96676	0.96676	0.2	0.69485	1.14929	0.96096	0.96096
0.3	0.54129	1.09996	0.93509	0.93509	0.3	0.70507	1.14929	0.93018	0.93018
0.5	0.50724	1.09996	0.85355	0.85355	0.5	0.57057	1.14929	0.84603	0.84603
1	0.48204	1.09996	0.78255	0.78255	1	0.45336	1.14929	0.73036	0.73036
2	0.44028	1.09996	0.45087	0.45087	2	0.39259	1.14929	0.52412	0.52412
3	0.44830	1.09996	0.28661	0.28661	3	0.38259	1.14929	0.36472	0.36472
5	0.43191	1.09996	0.12681	0.12681	5	0.39339	1.14929	0.16077	0.16077
Kanazawa					Morioka				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.0698	1.0698	1.00000	0	0	1.06157	1.06157	1.00000
0.1	0.6749	1.0698	1.00000	1.00000	0.1	0.59752	1.06157	1.00000	1.00000
0.2	0.5400	1.0698	0.96030	0.96030	0.2	0.51905	1.06157	0.96999	0.96999
0.3	0.53356	1.0698	0.91102	0.91102	0.3	0.50216	1.06157	0.91311	0.91311
0.5	0.4535	1.0698	0.84046	0.84046	0.5	0.45336	1.06157	0.71710	0.71710
1	0.4631	1.0698	0.67328	0.67328	1	0.54395	1.06157	0.61619	0.61619
2	0.4463	1.0698	0.37455	0.37455	2	0.55623	1.06157	0.35129	0.35129
3	0.4089	1.0698	0.31371	0.31371	3	0.54508	1.06157	0.21003	0.21003
5	0.3658	1.0698	0.17180	0.17180	5	0.41482	1.06157	0.13341	0.13341
Nagoya					Matsuyama				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.08558	1.08558	1.00000	0	0	1.04415	1.04415	1.00000
0.1	0.82112	1.08558	1.00000	1.00000	0.1	0.43203	1.04415	1.00000	1.00000
0.2	0.53288	1.08558	0.96166	0.96166	0.2	0.45145	1.04415	0.94442	0.94442
0.3	0.53965	1.08558	0.92332	0.92332	0.3	0.37241	1.04415	0.93377	0.93377
0.5	0.29539	1.08558	0.85354	0.85354	0.5	0.32405	1.04415	0.80389	0.80389
1	0.34011	1.08558	0.77260	0.77260	1	0.35765	1.04415	0.73019	0.73019
2	0.33888	1.08558	0.55120	0.55120	2	0.36805	1.04415	0.50012	0.50012
3	0.33200	1.08558	0.40066	0.40066	3	0.34197	1.04415	0.31429	0.31429
5	0.34640	1.08558	0.19207	0.19207	5	0.33210	1.04415	0.19843	0.19843
Hikone					Akita				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.15172	1.15172	1.00000	0	0	1.04448	1.04448	1.00000
0.1	1.41259	1.15172	1.00000	1.00000	0.1	0.43515	1.04448	1.00000	1.00000
0.2	0.79574	1.15172	0.98227	0.98227	0.2	0.42671	1.04448	0.95904	0.95904
0.3	0.64771	1.15172	0.94633	0.94633	0.3	0.35436	1.04448	0.93914	0.93914
0.5	0.44772	1.15172	0.82072	0.82072	0.5	0.37291	1.04448	0.86681	0.86681
1	0.40294	1.15172	0.76976	0.76976	1	0.36637	1.04448	0.72191	0.72191
2	0.35310	1.15172	0.56839	0.56839	2	0.32594	1.04448	0.54424	0.54424
3	0.41253	1.15172	0.33409	0.33409	3	0.34533	1.04448	0.37289	0.37289
5	0.47687	1.15172	0.10613	0.10613	5	0.37508	1.04448	0.16011	0.16011
Osaka					Kumamoto				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.10722	1.10722	1.00000	0	0	1.09771	1.09771	1.00000
0.1	1.021248	1.10722	1.00000	1.00000	0.1	0.93231	1.09771	1.00000	1.00000
0.2	0.65863	1.10722	0.97179	0.97179	0.2	0.80156	1.09771	0.93512	0.93512
0.3	0.53075	1.10722	0.94311	0.94311	0.3	0.90841	1.09771	0.86183	0.86183
0.5	0.47875	1.10722	0.87175	0.87175	0.5	0.61679	1.09771	0.80641	0.80641
1	0.434171	1.10722	0.74515	0.74515	1	0.55205	1.09771	0.69536	0.69536
2	0.416302	1.10722	0.48168	0.48168	2	0.53655	1.09771	0.37536	0.37536
3	0.414950	1.10722	0.31885	0.31885	3	0.50304	1.09771	0.24271	0.24271
5	0.40002	1.10722	0.18092	0.18092	5	0.52200	1.09771	0.09064	0.09064
Kobe					Miyazaki				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.09110	1.09110	1.00000	0	0	1.04931	1.04931	1.00000
0.1	0.97190	1.09110	1.00000	1.00000	0.1	0.49130	1.04931	1.00000	1.00000
0.2	0.60160	1.09110	0.96741	0.96741	0.2	0.53429	1.04931	0.94296	0.94296
0.3	0.54963	1.09110	0.93221	0.93221	0.3	0.48509	1.04931	0.86596	0.86596
0.5	0.47738	1.09110	0.85442	0.85442	0.5	0.49331	1.04931	0.82969	0.82969
1	0.46509	1.09110	0.68530	0.68530	1	0.47601	1.04931	0.65059	0.65059
2	0.42795	1.09110	0.46361	0.46361	2	0.48326	1.04931	0.39128	0.39128
3	0.40919	1.09110	0.31970	0.31970	3	0.51059	1.04931	0.22681	0.22681
5	0.39091	1.09110	0.16032	0.16032	5	0.51197	1.04931	0.09129	0.09129
Fukuoka					Kashihara				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.08830	1.08830	1.00000	0	0	1.07619	1.07619	1.00000
0.1	0.84615	1.08830	1.00000	1.00000	0.1	0.73427	1.07619	1.00000	1.00000
0.2	0.62802	1.08830	0.95854	0.95854	0.2	0.61237	1.07619	0.95214	0.95214
0.3	0.57467	1.08830	0.91596	0.91596	0.3	0.61092	1.07619	0.89597	0.89597
0.5	0.48053	1.08830	0.83272	0.83272	0.5	0.50845	1.07619	0.83419	0.83419
1	0.49261	1.08830	0.70851	0.70851	1	0.51926	1.07619	0.64029	0.64029
2	0.47644	1.08830	0.54422	0.54422	2	0.52886	1.07619	0.42860	0.42860
3	0.45821	1.08830	0.37257	0.37257	3	0.48845	1.07619	0.28620	0.28620
5	0.43538	1.08830	0.21260	0.21260	5	0.46336	1.07619	0.10598	0.10598
Tokushima					Shimonoseki				
Depth[m]	α	β	y	y'/y	Depth[m]	α	β	y	y'/y
0	0	1.06631	1.06631	1.00000	0	0	1.07650	1.07650	1.00000
0.1	0.64200	1.06631	1.00000	1.00000	0.1	0.73719	1.07650	1.00000	1.00000
0.2	0.48091	1.06631	0.96202	0.96202	0.2	0.64429	1.07650	0.96202	0.96202
0.3	0.46301	1.06631	0.92802	0.92802	0.3	0.55782	1.07650	0.91602	0.91602
0.5	0.42008	1.06631	0.85354	0.85354	0.5	0.48885	1.07650	0.85354	0.85354
1	0.40160	1.06631	0.71362	0.71362	1	0.48784	1.07650	0.66105	0.66105
2	0.40137	1.06631	0.57179	0.57179	2	0.48761	1.07650	0.42471	0.42471
3	0.38452	1.06631	0.33643	0.33643	3	0.44390	1.07650	0.28423	0.28423

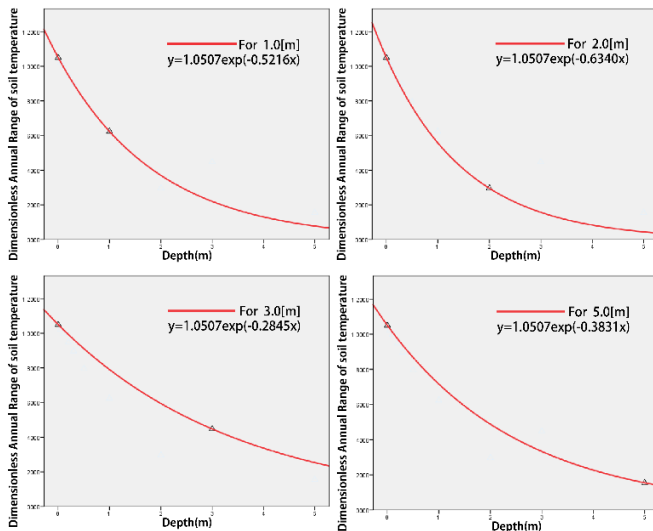


Fig.2 (b) Local coefficient by This Study(For 1.0m-5.0m)

4.3 考察

田中による方法では、近似曲線を使用し、地域係数を算出している。故に、決定係数が低い場合、その精度は下がる。本報では、深さごとに地域係数を算出することにより、精度を向上できた。しかし、近似曲線と違い、本報の方法では観測値が存在する地点でのみ地域係数を算出可能という欠点がある。また、本予測式では、地表面から基準点の熱拡散率が必要であり、その熱拡散率を実測により求めることが難しいと思われる。

5. まとめ

本研究は、無次元化年較差の性質と熱拡散率を使用することで田中による地域係数を再定義し、算出した。その結果を以下に記す。

- ・ 観測値と予測値の比較において、全ての地点において観測値および予測値の比率が 1 を示すことを確認した。
- ・ 田中による方法では、近似曲線により地域係数を算出する。それ故、決定係数が低い場合精度が下がる。本報による方法では、各深さにおける地域係数を算出するので精度を高く算出できる。しかし、観測値が存在する深さのみでしか算出できないという欠点が存在する。
- ・ 地表面から基準点の熱拡散率が必要であり、実測から求めることが難しいと思われる。

以上のことから、今後は地中の熱拡散率のみで予測できる予測式を提案することを目標とする。

〈添え字一覧(2)〉

h_i	任意の深さ[m]	R_i	任意点の地中温度年較差[°C]
h_0	地表面深さ[m]	R_0	地表面の地表面温度年較差[°C]
h_s	基準点の深さ[m]	R_s	基準点の地中温度年較差[°C]
π	円周率[-]	y_i	任意の深さにおける無次元化年較差[-]
T	周期(1年間とする)[h]		
a	任意深さから基準点深さまでの熱拡散率[m ² /h]		
a'	地表面から基準点深さまでの熱拡散率[m ² /h]		

参考文献

- 1) 松尾陽, 金成完: 標準気象データを用いた地中温度の推定法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 昭和 61 年 8 月
- 2) 下田吉之, 水野稔, 内藤和夫: 都市化による地中温度上昇に関する研究 地中温度の推定手法についての検討, 空調・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 1987 年 3 月
- 3) 松岡大介, 土屋喬雄, 北沢芳彦: 東京近郊における住宅地下室の温湿度環境に関する研究 その 2 半無限地中温度予測式の適応範囲について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 1997 年 9 月
- 4) 松本真一, 吉野博: 拡張 AMeDAS 版時刻別気象データに基づく地中温度の推定 その 1 計算プログラムの試作と計算例, 日本建築学会東北支部研究報告会, 平成 10 年 6 月
- 5) 洪田玲, 高偉俊, 李海峰, 尾島俊雄: 地中温度及び地表面温度の算定に関する研究: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999 年 9 月
- 6) 渡辺要: 暖房設計用地中温度と地下室の暖房負荷, 日本建築学会論文報告集第 60 号, 昭和 33 年 10 月
- 7) 宮崎ひろ志, 小座野貴弘, 芝一行: 地熱利用計画支援のための地中温度データベースの構築 その 1 地中温度データアーカイブの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp215-216, 2012 年 9 月
- 8) 田中健人: 地中熱利用計画支援のための地域別地中温度推定方法の提案, 関西大学大学院修士論文, 2015 年度
- 9) 八幡敏雄: 土壌の物理, 東京大学出版会, 1975 年
- 10) 三浦昌夫, 尾島俊雄: 95 地点の実測による都心と郊外の地中温度差について 東京における地中温度分布に関する実測調査研究 その 2, 日本建築学会計画系論文報告集第 454 号, 1993 年 12 月

琵琶湖流動場モデルによる温度成層の再現性評価

Evaluation of reproducibility for thermal stratification in Lake Biwa

using a hydrodynamic model

○公江 仁一 (大阪大学) 近藤 明 (大阪大学)

嶋寺 光 (大阪大学) 武川 さゆみ (大阪大学)

劉 彦妮 (大阪大学)

Jinichi KOUE*¹ Akira KONDO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Sayumi TAKEGAWA*¹ Liu Yanni*¹

*¹ Osaka University

Since the 1960's, the decrease in dissolved oxygen has been observed at the bottom of the northern part of Lake Biwa. The water temperature varies depending on the depth, which results in stratification. The thermocline disrupts the supply of oxygen from the water surface under the thermocline, where oxygen is only consumed through the decomposition of organic matter by bacteria. The strength of stratification plays an important role in the varying amounts of dissolved oxygen in Lake Biwa. In our present study, we developed a hydrodynamic model, and reproduced the seasonal and inter-annual change of vertical water distribution.

はじめに

琵琶湖の北湖では、夏季の表層水温は約27℃まで上昇するが、北湖の底層の水温は約7℃であり鉛直方向に水温差があるために、水温躍層が形成される¹⁾。夏季は、この水温躍層によって湖面からの酸素供給が遮られ、深層ではプランクトンの死骸などの分解により酸素が消費される一方になる。しかし、秋季から冬季にかけて、湖面が冷却されて成層が弱まり、消滅していく。その後、水温が上層と下層で同じ温度になるように、鉛直混合が全層で行われる(通常1月～2月)。酸素が多く含んだ水塊が底層まで供給されるため、湖底近傍での溶存酸素濃度は飽和状態にまで回復する。

近年、琵琶湖の底層の溶存酸素濃度が低下していることが問題となっている。この底層の溶存酸素濃度の低下傾向の原因として考えられるのが過去20年間の降水量の減少(約100mm)、気温の上昇(約1～2℃)、風速の減少(約5%)などの気候変動である²⁾。特に、気温の上昇や風速の減少は湖水の鉛直混合を弱め、底層の溶存酸素濃度が低下する原因となる可能性がある。水温の成層構造の季節変化を詳細にモデルで再現できれば、物質循環の変動も明らかにできる。

本研究では、将来的に温暖化に伴う成層構造の変化がどの程度、貧酸素化に影響があるのかを明らかにしていくために、観測された水温鉛直分布を再現できるモデルを構築することで、湖内の水温成層構造の季節経年変化が再現できることを示している。鉛直1次元モデルを構築することで、長期解析を行うことを容易にし、3次元モデルを構築することで、流動場、物質循環の挙動を時

空間的に詳細に解析することができる。

1. 琵琶湖流動場モデル

1.1 計算領域

Fig.1 に琵琶湖流動場モデルの計算領域と水深を示す。

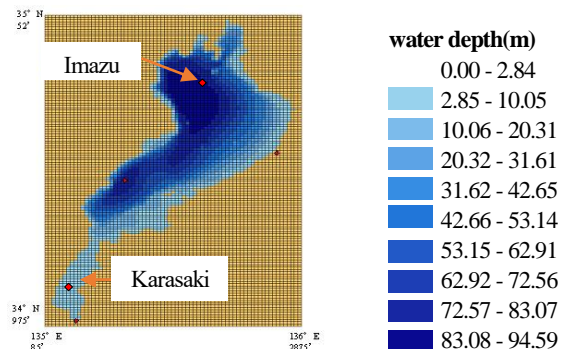


Fig.1 Lake Biwa model mesh

鉛直1次元モデルは、Fig.1の今津沖中央と唐崎沖中央の地点で、計算を行う。

3次元流動場モデルの水平計算領域は琵琶湖全体を含む36km×65.5km、水平格子は500m×500m、格子数は72×131である。鉛直方向の格子幅は、水面から水深20mまでを0.5m間隔、20m以深は0.1m間隔に格子幅を大きくし、最大2.5mに設定している。これは夏場の温度躍層を詳細に表現するためであり、格子数は86である。座標は、水平面上の領域の南西端を原点とするx,y軸をとり、湖底より鉛直上方を上向きとしてz軸をとる。

(1) 支配方程式

鉛直1次元モデル、3次元流動場モデルの基礎方程式はともに、ブシネスク近似、鉛直方向に静水圧近似を仮定

している。鉛直 1 次元モデルは、拡散方程式、温度の拡散方程式で構成されている。3 次元流動場モデルは、流体の運動方程式、連続の式、温度の保存式で構成されている。以下に基礎方程式を示す。

a-1. 1 次元モデルの拡散方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \nu_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

a-2. 3 次元モデルの運動方程式(x, y 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu_h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \nu_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + fu = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu_h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \nu_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \end{aligned} \quad (4)$$

b. 静水圧近似

$$0 = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho}{\rho_0} g \quad (5)$$

c. 連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

d-1. 1 次元モデルの温度の拡散方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

d-2. 3 次元モデルの温度の保存式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa_h \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \kappa_h \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \kappa_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (8)$$

ここで、 u, v, w : x, y, z 方向の流速(ms^{-1})、 T : 水温(K)、 p : 圧力(Nm^{-2})、 ρ : 湖水密度(kgm^{-3})、 ρ_0 : 基準湖水密度($=10^3 \text{kgm}^{-3}$)、 g : 重力加速度($=9.8 \text{ms}^{-2}$)、 f : コリオリ・パラメータ($=8.34 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)、 ν_h : 水平方向の渦粘性係数($=1.0 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 κ_h : 鉛直方向の渦粘性係数($=1.0 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 ν_z : 水平方向の渦拡散係数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 κ_z : 鉛直方向の渦拡散係数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

水平方向の渦粘性係数と渦拡散係数は、上に記述した値が、琵琶湖の環流の形状に対して決定的な役割を果たすことが秋友ら³⁾によって示されている。

鉛直方向の渦粘性係数と渦拡散係数に対しては以下のように定める。

$$Ri = - \frac{g}{\rho_0} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (9)$$

$$\nu_z = \frac{0.0001}{(1.0 + 5.2 Ri)} \quad \kappa_z = \frac{0.0001}{\left(1.0 + \frac{10}{3} \times Ri \right)^2} \quad (10)$$

u : 水平方向の流速(ms^{-1})

夏季の琵琶湖には水深 10m から 20m に水温躍層が形成される。そこで密度が層状に変化している流れの不安定性を表す無次元数であるリチャードソン数 Ri を用いて、 ν_z および κ_z を求める⁴⁾。

(2) 計算条件

初期値について、流速は各成分(x, y, z)のいずれも 0m/s とした。また、初期水温は、滋賀県琵琶湖環境科学研究センターによって、今津沖中央で、月 2 回、水深 0.5、5、10、15、20、30、40、60、80、90m の 10 点で測定しているデータのうち、2006 年 6 月 19 日と 7 月 3 日のデータから線形補間し、7 月 1 日の初期値を設定した。計算期間は、1 次元モデルでは、2006 年 7 月からの半年間を助走期間とし、2007 年 1 月から 2014 年 12 月まで計算した。3 次元モデルでは、2006 年 7 月からの半年間を助走期間とし、2007 年の 1 月から 12 月までの 1 年間を対象として結果を評価した。

3 次元モデルでは、淀川流域水系モデル⁵⁾による河川流量・水温を境界条件として、琵琶湖流動場モデルは流向・流速・水温を計算した。

(1) 気象条件

入力データとして風速、気温は気象庁メソ数値予報モデル解析値を内挿して与え、日射量は彦根地方気象台の観測値を水平一様に与えた。1 時間毎に更新しているため、湖面での熱収支・流れの再現が可能となる。

(2) 河川条件

56 の河川について、淀川流域圏水系モデルの河川水温・流量計算結果を入力データとして取り入れている。

2. 琵琶湖流動場モデルの計算結果

2.1 1 次元モデルの計算結果

(1) 北湖の水温鉛直分布の経年変化

北湖の今津中央沖定点の水温鉛直分布の季節変動の観測結果と計算結果を比較する。2006 年 7 月から 12 月までを助走期間とし、2007 年 1 月から 2011 年 12 月までの 4 年間の経年変化を Fig.2 に示す。毎年、夏季には表層と底層で約 20°C 以上の水温差がある水温躍層が形成される。観測結果の方が、計算結果に比べて表層水温が高く、成層が若干強いが、水温躍層の深さもよく再現されている。また、Fig.2(b)に示すように、2009 年の夏季は、冷夏であったために成層が他の年よりも弱い現象もシミュレーションで再現されている。冬季になると、鉛直循環によって、水温が鉛直方向に一樣となる様子も観測にみられる結果と一致している。

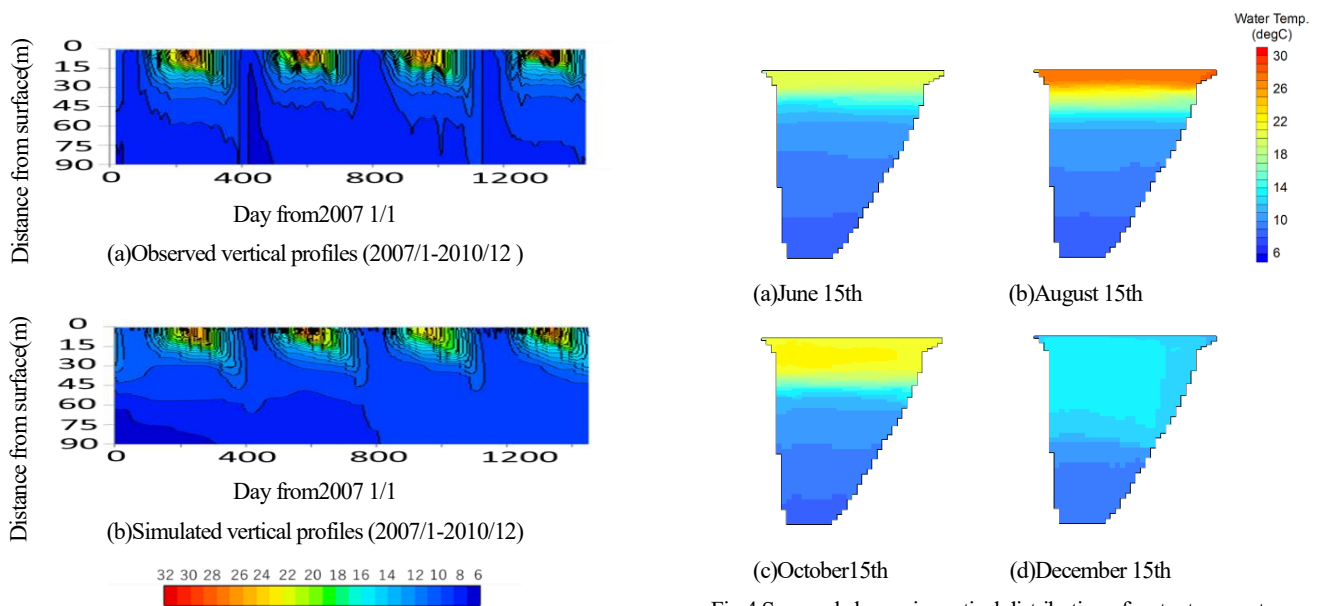


Fig.2 Inter-annual change of vertical water distribution at the monitoring station off Imazu(The horizontal axis: Day, The vertical axis: Distance from surface(m) Colour contour: Water temperature($^{\circ}\text{C}$))

2.2 3次元モデルの計算結果

(1) 北湖の成層構造の季節変動

北湖今津沖中央の0.5、20、90mの水温の3次元モデルの計算結果、1次元モデルの計算結果と観測値との比較をFig.3に示す。表層(0.5m)水温では、夏季に計算値が観測値より低い。水温躍層、底層ともに1年を通して、概ね3次元モデルの計算結果では観測値より高く、1次元モデルの計算結果は観測値より低い結果となった。

次に、北湖の今津沖中央付近を通り、琵琶湖流動場モデルのメッシュのy軸に平行な鉛直断面で切り取った2007年6、8、10、12月の午前12時の水温鉛直分布をFig.4に示す。観測で見られるように、夏にかけて表層の水温が上昇し、8月には水温躍層が形成された後、気温低下とともに表層が冷却され、12月には表層と底層に若干水温差はあるものの、一様に低い水温となっていることが確認された。2007年は暖冬でもあったため、12月でも少なからず、水温差はある。モデルによって、成層構造の季節変動をよく再現できている。

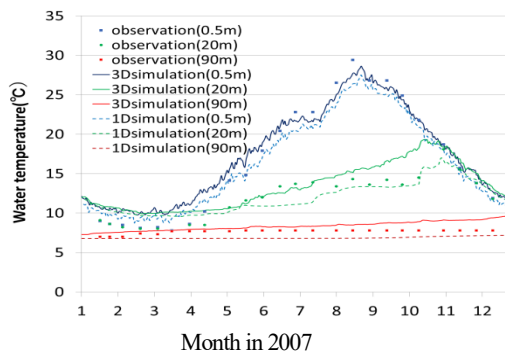


Fig.3 Seasonal change of vertical water distribution at the monitoring station off Imazu

Fig.4 Seasonal change in vertical distribution of water temperature
Colour contour: Water temperature($^{\circ}\text{C}$)

(2) 冬季の鉛直混合

毎年、鉛直方向の循環が生じている2月において、水温の鉛直断面図を3時間毎に描画し、鉛直混合の再現ができているか確認した。Fig.5に、2月18日の0時の水温鉛直分布を左に、右に鉛直方向の流速を示す。

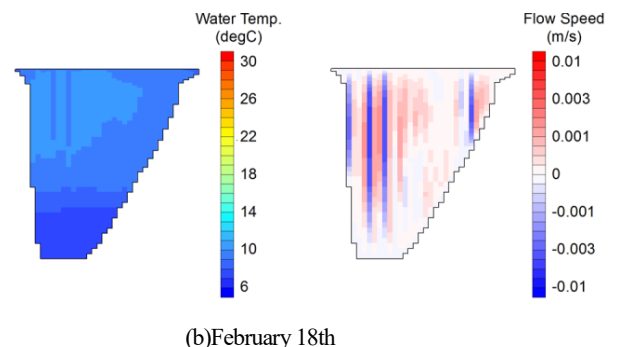


Fig.5 Vertical distribution of water temperature and vertical flow speed

中央部では、底層まで冷たい水塊が到達している現象が確認できる。秋友ら⁹⁾によると鉛直方向の循環をより促進させる原因の一つとして、岸に沿って表層で冷やされた水が湖底へと潜り込んでいく現象を挙げている。また、細田ら⁷⁾は、鉛直循環は、平面的な水温分布の変化により、周りより冷たい水塊が落下するような形態で生じ、落下水塊の周辺では逆に、上昇流が生じていると述べているように、本研究でも対流現象が確認できている。様々な現象が重なり合って鉛直混合が起こっているため、今後も詳細な実測データの解析とともにモデルによって検証を行う必要がある。

(3) 表層流

琵琶湖の流動場に見られる顕著な特徴は、夏季の北湖表層に形成される複数の環流系である。1920年代には北から第1環流(反時計回り)、第2環流(時計回り)、第3環流(反時計回り)と大きく3つあると考えられていたが、

1980年代以降の係留流速測定や船底での流速観測はさらに精密な流動場の特徴を明らかにしており、夏季の流動場は第3環流がなく、2環流システムである可能性も指摘されていた(Endoh and Okumura, 1993)⁸⁾。

環流は水温躍層以浅で生じており、5月頃から11月頃までの成層期に第1環流が現れる。その流速は10cm/s~30cm/s程度で、夏季には最大となる。本研究では、3時間毎に計算結果を出力し、表層付近の水平断面図を描画した。Fig.6(a)に5月20日、(b)に7月17日の表層の流れのシミュレーション結果を示す。Fig.6(a)では、5月から、北湖中心部を円の中心とし、環流が生じている。Fig.6(b)では、北湖の北部で反時計回りの第1環流、南部で時計回りの第2環流が生じているのが確認できる。

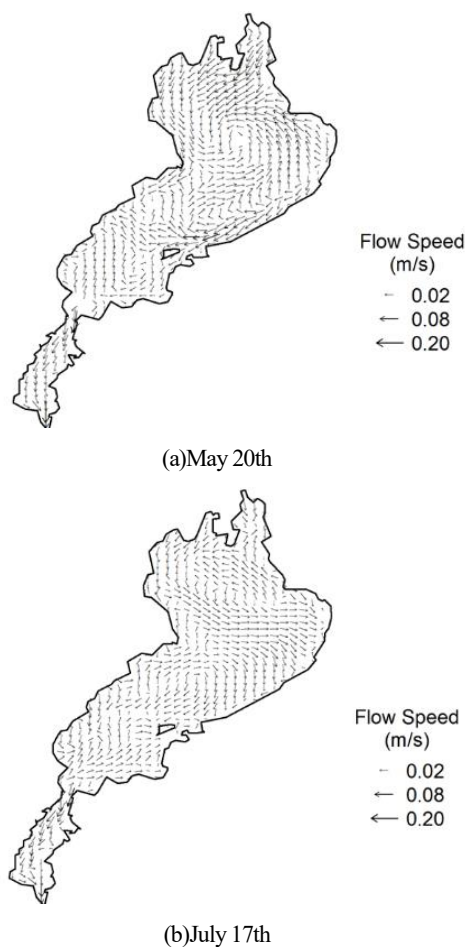


Fig.6 Horizontal current in the surface layer

3. 結論

本研究では1次元流動場モデルで長期の水温成層構造の季節経年変化を再現し、3次元モデルを用い、琵琶湖成層構造の季節変動の再現性の評価を行った。その結果、観測にみられるような成層構造を再現することができている。1次元モデルでは、長期的な変動を見るのに適しており、今後、熱収支における長波放射の量を調整することによって、表層水温が観測値より低いことは改善できる。

3次元モデルでも、成層構造の季節変動、冬季の鉛直混

合が再現でき、表層における環流についても再現できた。特に、成層構造の詳細な変動を知ること、は、深水層への物質循環が供給されるか否かの評価をするのに重要である。平面的な水温分布の違い、水深による熱量の配分の違いによって移流拡散の量も異なるので、3次元で琵琶湖内の流動を詳細に再現することも必要である。さらに、実際に、琵琶湖での成層構造は熱循環と風成循環、河川流入など様々な現象が重なり合って変化する。強風による鉛直混合なども再現するには、鉛直方向の渦拡散係数を中立状態でも成層状態でも風応力を考慮した勾配型リチャードソン数の関係から算定する方法を用いることも今後、検討の必要がある。

最後に、3次元モデルで、計算の水温初期値として、本研究で用いた夏季の水温を用いるより、全層で鉛直混合が終わった時期の水温データを与えることが望ましいと考えられる。北湖と南湖での平面的な水温鉛直分布の偏差が少ないからである。現状では3次元の計算期間が短い場合は、初期値の影響が残ってしまうこともあるので、琵琶湖の水の滞留時間(5年)を考慮に入れて、計算時間を長くすること、そのためにモデルの計算速度を向上させることも今後の課題である。

参考文献

- 1) 宗宮功：琵琶湖 その環境と水質形成，技報堂出版，258pp，2000
- 2) 北澤大輔，石川俊之，熊谷道夫：過去50年間の気候変動の琵琶湖生態系への影響に関する数値解析，生産研究，Vol.62，No.1，pp.45-49，2010
- 3) 秋友和典，黒木聖夫，大久保賢治，熊谷道夫：3次元数値モデルで再現された琵琶湖の熱循環，琵琶湖研究所所報21号，28-42，2002
- 4) 石塚瞳，北澤大輔，金野祥久(2005)：琵琶湖物理環境の数値計算における乱流モデルの比較検討 第19回数値流体力学シンポジウム講演論文集，C2-4
- 5) Kundan Lal Shrestha：Water Resource Assessment of Yodo River Basin Using Coupled Hydrometeorological Modeling, Approach, Doctoral Thesis, 2010
- 6) Akitomo, K., K. Tanaka and M. Kumagai：Annual cycle of circulations in Lake Biwa, part 2：Mechanisms.. Limnology, 10, 119-129, 2009
- 7) 細田尚，磯野太俊：琵琶湖北湖の冷却期を想定した熱対流の数値実験と確率モデルによる考察，土木学会応用力学論文集 Vol.11, pp.825-834, 2008
- 8) Endoh and Okumura：Gyre system in Lake Biwa derived from recent current measurements. J. Limnol. 54, 191-197, 1993

淀川流域を対象とした水質モデルによる窒素動態解析

Analysis of the environmental fate of nitrogen in Yodo River Basin using water quality model

○清水 智紀 (大阪大学) 高見 京平 (大阪大学)

嶋寺 光 (大阪大学) 近藤 明 (大阪大学)

^{*1}Tomoki SHIMIZU ^{*1}Kyouhei TAKAMKI ^{*1}Hikari SHIMADERA ^{*1}Akira KONDO

^{*1}Osaka University

In Osaka Bay, changes in nutrient cycles in the river basins have led to changes of ecosystem in the coastal water, which may seriously affect the fishing industry. This study analyzed hydrological transport of the total nitrogen in Yodo River Basin, which has the largest nitrogen load into the Osaka Bay among the surrounding basins. In addition, source apportionment was conducted for the main sources of nitrogen, including sediment discharge, sewage and fertilizer. The result showed that the contribution rates of sediment discharge, sewage and fertilizer to nitrogen load into Osaka Bay were 74.3%, 24.1% and 1.5%, respectively.

はじめに

大阪湾では、高度成長期は汚濁負荷の急増によって富栄養化状態になり、赤潮が多く発生していた。その後、総量規制や下水道施設の設備等の施策により水質は改善されてきた。しかし近年、淡路島沖や播磨灘ではノリの色落ちやイワシ類・アサリ等の漁獲量の低下など、水産業では深刻な問題が起こっている¹⁾。その原因の1つとして貧栄養化があげられる。藻類の増殖には、栄養塩が必須の物質であるが、栄養塩濃度が年々低下している。

このような大阪湾の栄養塩循環の変化の要因として、流域からの栄養塩負荷の変化が考えられる。大阪湾へ流入するおもな河川には、淀川、寝屋川、神崎川、大和川、泉州諸河川がある。大阪湾への窒素流入負荷は、淀川流域(淀川、寝屋川、神崎川)が9割近くを占めている¹⁾。したがって、大阪湾の栄養塩変動の原因究明には、淀川流域における窒素の動態解析が急務である。

本研究では、栄養塩のうち総窒素(TN)を対象に、水質モデルを用いて淀川流域における動態解析を行った。また窒素負荷の主な発生源としては、土砂流出、下水、肥料を考え、発生源寄与を求めた。

1. 解析方法

1.1 水質モデルの概要

水質モデルでは、流域界・水路網データ、土地利用データ、気象データの3種類の入力データと、窒素負荷発生源を基に、流域水循環とそれに伴う窒素輸送が解析される。

1.2 計算条件

Fig.1に計算領域を示す。淀川流域全体を標準地域メッシュの第3次メッシュごとに区分し、計7557の計算格子を設定した。計算期間は2009年の1年間とした。

窒素の発生源は、土砂流出、下水流出、肥料施肥の3種類を考え、土砂流出は土地利用ごとの面源汚濁負荷原単位から、下水流出は

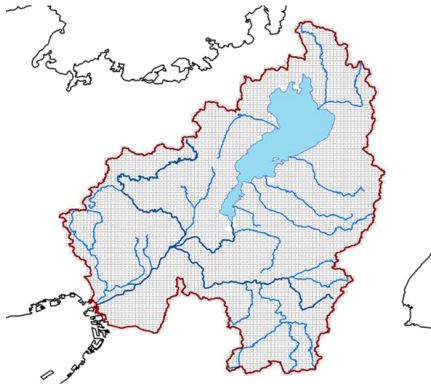


Fig.1 Computational domain

下水放流濃度と流量から、施肥は施肥量と肥料からの流出率から算定した。

Table 1 に土地利用ごとの面源負荷源データと施肥量のデータを示す^{2) 3)}。土砂流出については、Fig.2 に示す土地利用の中で、山林、水田、耕作地からの窒素負荷を考慮した。施肥については、Fig3 に示す耕作地からの肥料からの溶脱を考慮した。

下水流出として、Fig.4 に示す 29 地点の下水場の流出として考慮した。Table 2 に流量の多い 8 地点の年平均流量と年平均 TN 濃度を示す。

Table 1 Data of plane source data for each land use and fertilization amount

Sediment discharge[g/m ² /m]			Fertilizer
Forest	Paddy	Cropland	[g/m ² /m]
0.044	0.412	2.38	0.145

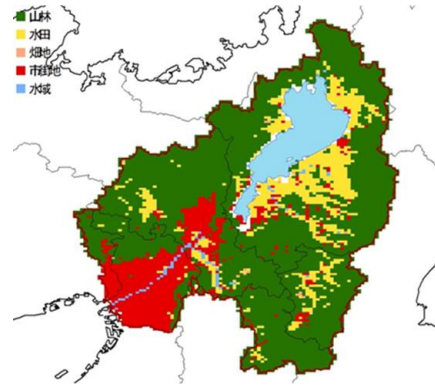


Fig.2 The main land use

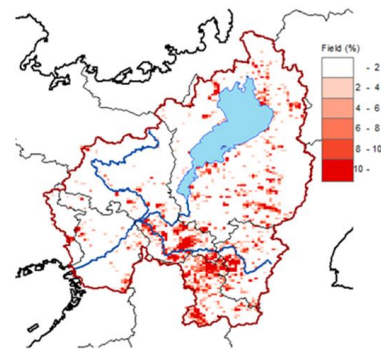


Fig.3 Fraction of cropland area

Table 2 Sewage data

Sewage point	Flow rate [m ³ /s]	TN concentration [mg/L]
Toba Water Environment Preservation Center	9.32	9.1
Rakusai Purification Center	4.42	7.5
Ohno sewage treatment plant	2.78	9.1
Konoike water future center	3.83	5.8
Kawamata water future center	4.13	13
Central treatment plant	3.51	7.8
Harada water future center	6.32	12
Hunan Central Purification Center	5.64	4.8

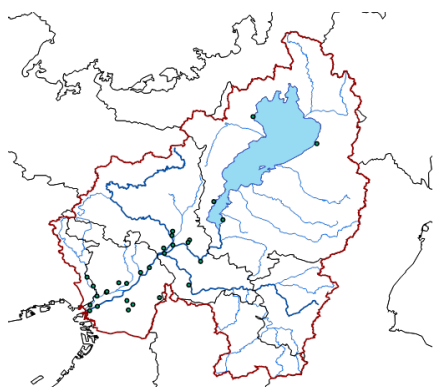


Fig.4 Location of sewage plant

2. 計算結果

Fig.5 に水質モデル計算結果の評価に用いた TN 濃度の観測点を示す。実測は、月 1 回平水時に実施されている。



Fig.5 TN observation point

Fig.6 に柴島、隠元橋、伝法大橋における TN 濃度の日平均計算結果と実測データの比較、および日平均流量の計算結果を示す。実測が行われている平水時は、計算において比較的低濃度であり、実測と概ね一致した。一方、降雨流出に伴って河川流量が増加しているときには、窒素流出負荷量も増加しており、それに伴って、TN 濃度が平水時に比べて、大幅に増加している。

2009 年の観測所 6 地点における計算値の年平均値の 6 地点の観測所における散布図を

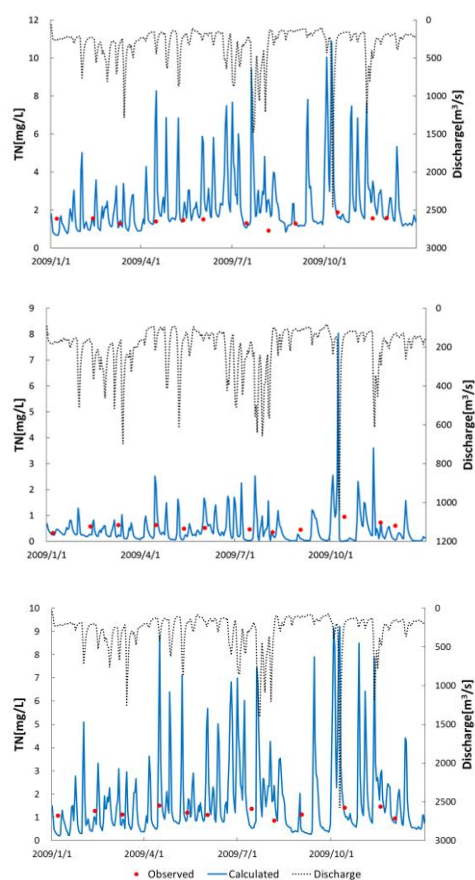


Fig.6 Comparison of observed and calculated TN concentration at Kunizima, Ingenbasi Denpouoohasi

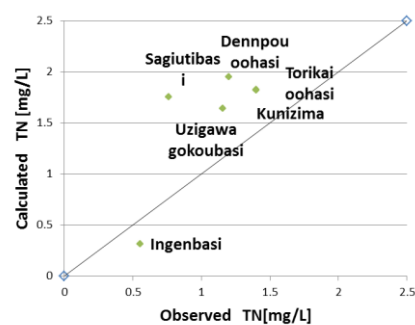


Fig.7 Scatter plot of observed and calculated annual average TN concentration

Fig.7 に示す。鷺内橋、伝法大橋では過大評価となった。

Fig.8 に河口における総窒素の流出量の発生源寄与割合を示す。発生源寄与の割合は、

土砂流出が多く、肥料施肥が少ない結果となった。淀川流域では畑面積が少ないため、肥料施肥からの影響が少ないと考えられる。土壌流出に占める寄与は、山林、水田、耕作地のいずれの土地利用も同程度に大きかった。

Fig.9 に河口における流出量と流域区分割合を示す。流域区分の割合では、淀川、寝屋川、神崎川の順に多くなった。また実測値の日平均窒素流出量 80t/日⁴⁾ に対して、計算の流出量 109t/日は過大評価となった。

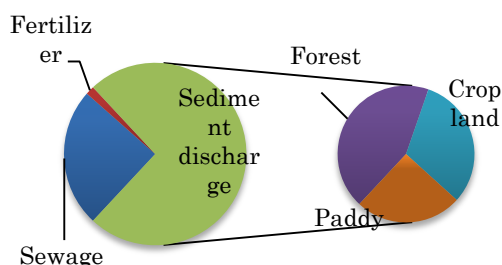


Fig.8 Source contribution of TN runoff in Yodo River

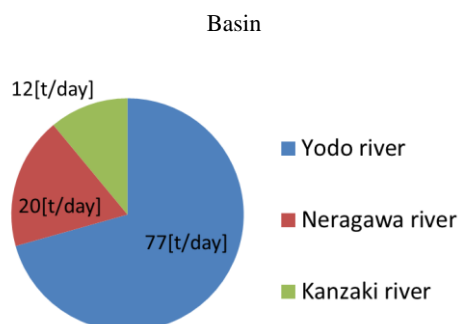


Fig.9 Fraction of TN outflow into Osaka Bay from each river in Yodogawa River Basin

3. 結論

総窒素濃度は、鷺打橋、伝法大橋では過大評価となった。過大評価の要因は、面源汚濁負荷原単位を過大評価していることが考えられる。雨天時のデータのみと、晴天時データもおりまぜて算出した原単位の負荷量とでは約3倍もの違いが報告されている⁵⁾。この計

算で負荷量を過大評価したのは晴天時や降雨のイベント、節別に汚濁負荷原単位を設定していないため、汚濁負荷原単位を過大評価していることが考えられる。

発生源寄与解析の結果は、土砂流出が非常に大きく、肥料が小さい結果となった。日平均窒素流出量の割合では淀川、寝屋川、神崎川の順に多くなり、河口の日平均総窒素流量は 109t/日であった。

今後の課題として、①TN 濃度の解析精度をあげること、②大阪湾の栄養変動が起こる前の窒素動態解析を行い、現在のデータと比較し、感度解析をおこなうこと③対象物質を総窒素ではなく、窒素形態別の算出していくことである。

参考文献

- 1) 石垣衛、山中亮一：大阪湾の埋立による栄養塩バランスの変遷と適正化に向けた方策の検証
https://www.it-hiroshima.ac.jp/institution/library/pdf/research46_001-005.pdf
- 2) 藤生和也、古田敏章、田中典秀：GIS を活用した流域汚濁負荷量情報データベース構築に関する調査
www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0323pdf/ks0323007.pdf
- 3) 武田育郎：水と水環境の基礎知識,オーム社, p119
- 4) 西田修三：大阪湾の水環境再生策のあり方
<http://www.cifer-core.jp/data/150529/1>.
- 5) 村田智史：水田からの汚濁負荷流出原単位に関する研究
<http://kaihatsu2.sse.tottori-u.ac.jp/dev/main/study/summary/.../murata03.pdf>

嗅覚の非定常応答に関する研究
 (その 16) 言語評定尺度・線分長尺度・ME 法による臭気強度評価
 Basic Study on Unsteady Olfactory Response
 (Part 16) Odor Intensity Evaluation by Language Rating Scale, Line Length Scale
 and Magnitude Estimation(ME) Method

○竹内 慎 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学)
 竹村 明久 (摂南大学) 甲谷 寿史 (大阪大学)
 桃井 良尚 (大阪大学) 相良 和伸 (大阪大学)
 高橋 亮太 (大阪大学)

Shin TAKEUCHI*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Akihisa TAKEMURA*² Hisashi KOUTANI*¹
 Yoshihisa MOMOI*¹ Kazunobu SAGARA*¹ Ryouta TAKAHASHI*¹

*¹ Osaka University *² Setsunan University

The decreasing sense of odor due to the continuous exposure of the odor is called olfactory adaptation. The quantification of change in the sense of the smell in the olfactory adaptation process have been studied. However, there are considerable differences of evaluation value of the odor intensity between subjects. Thus, it is necessary to find new odor intensity evaluation methods which reduce individual differences. In this study, the panel were exposed to ethyl acetate and evaluated the odor intensity by means of the language rating scale, the line length scale and the magnitude estimation method. The characteristics of the odor evaluation methods in the olfactory adaptation process were compared. Consequently, it is found that there were individual differences among these evaluation value in different evaluation methods.

1. はじめに

あるにおいを連続的に感じ続けるとそのにおいを感じにくくなる嗅覚の順応が起こる。本研究では、そのような特性を持つ人間のにおいの感じ方に対応した換気量制御を行うために、嗅覚順応過程における嗅感覚の変化を定量的に把握することを目的とする。先行研究¹⁾では、様々な臭気曝露パターンについて、嗅覚順応過程における被験者の主観的な臭気強度を言語評定尺度を用いて評価させた。しかし、言語評定尺度を用いた臭気強度評価について個人間の評価値の差異が大きくみられ、そのような個人差を抑える評価手法を開発する必要がある。先行研究²⁾において、クロスモダリティマッチング（以下、CMM と表記）という異なる感覚間で主観的に感覚量を一致させる評価方法に着目し、臭気強度を言語評定尺度、線分長尺度、音の大きさを用いた CMM で評価する臭気曝露実験を行い、モデルの適応性について検討した。本報では臭気強度評価を言語評定尺度、線分長尺度、数の大きさを用いて評価する ME 法を用いて行った臭気曝露実験の結果より嗅覚順応過程における評価手法の特性について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

実験は 2015 年 10 月 27 日～2015 年 11 月 25 日にかけて、Fig.1 に示す臭気提示装置を用いて実施した。被験者は、T&T オルファクトメーター試験を行い、正常な嗅覚を有すると認められた 19～25 歳の本学学生 9 名（男子 4 名、女子 5 名）を採用した。試料臭気は酢酸エチルを用いた。評価方法は Fig.2 に示す言語評定尺度（連続カテゴリー尺

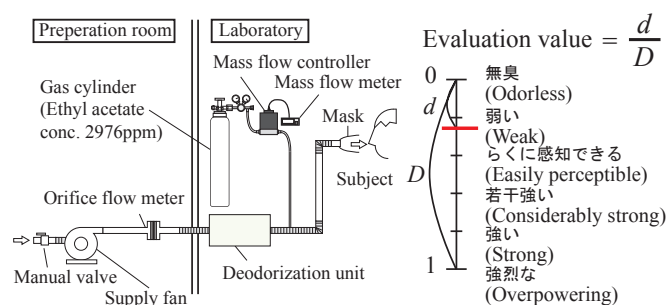


Fig.1 Sniffing apparatus

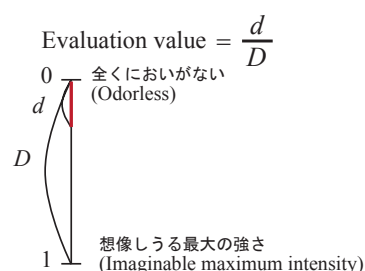


Fig.3 Line length scale

Fig.2 Continuous rating scale with semantic descriptions

Fig.4 Evaluation form of ME method

度)、Fig.3 に示す線分長尺度、Fig.4 に示す ME 法の評価用紙を用いて、被験者が感じる臭気強度を主観的に記入させた。Fig.5 にタイムスケジュールを示す。インストラクションでは検臭、評価方法、注意事項、試料空気的安全性について説明し、10L のサンプリングバックを用いてパネルに 7.5ppm の酢酸エチルを嗅がせて臭気質を教示した。ME 法では予備実験より定めたモジュラス (7.5ppm を 10 とした) を提示し、それを臭気強度の評価の基準にさせた。次に非順応状態における曝露濃度と臭気強度の関係を把握するため、3 分間の無臭空気曝露ののち、マスフ

ローコントローラーで流量を制御した酢酸エチルを5秒間曝露し、臭気強度を評価させた。これを3回繰り返した。曝露する酢酸エチルの濃度は1.1, 3.0, 7.5ppmであり、順序効果と系列位置効果を相殺するために、3つの濃度について曝露する順序をパネルごとにランダムに変えた。その後、無臭空気を5分間曝露ののち、7.5ppmの酢酸エチルを15分間連続曝露し、30秒おきに評価させた。

3. 結果と考察

3.1 言語評定尺度を用いた臭気強度評価

嗅覚非順応状態における曝露濃度と言語評定尺度を用いた臭気強度評価値の関係をFig.6、臭気連続曝露時の言語評定尺度を用いた臭気強度評価値の経時変化をFig.7に示す。Fig.6を見ると、曝露濃度が高いほど、臭気強度が

高い傾向にあることが分かる。Fig.7を見ると、ほとんどのパネルについて概ね時間とともに評価値が下がっていることから順応が確認できる。しかし、パネル4,5,6,8は評価値が下がってはいるが、上下変動している。また、順応過程の初期値についてパネル間に差異が見られ、これは、パネル間の言語の解釈の差異の影響だと思われる。

3.2 線分長尺度を用いた臭気強度評価

嗅覚非順応状態における曝露濃度と線分長尺度を用いた臭気強度評価値の関係をFig.8、臭気連続曝露時の線分長尺度を用いた臭気強度評価値の経時変化をFig.9に示す。Fig.8を見ると曝露濃度が高いほど、臭気強度が高い傾向にある。しかし、パネルに間に評価値の差異があり、線分長尺度を用いた場合でも個人差があることが確認でき

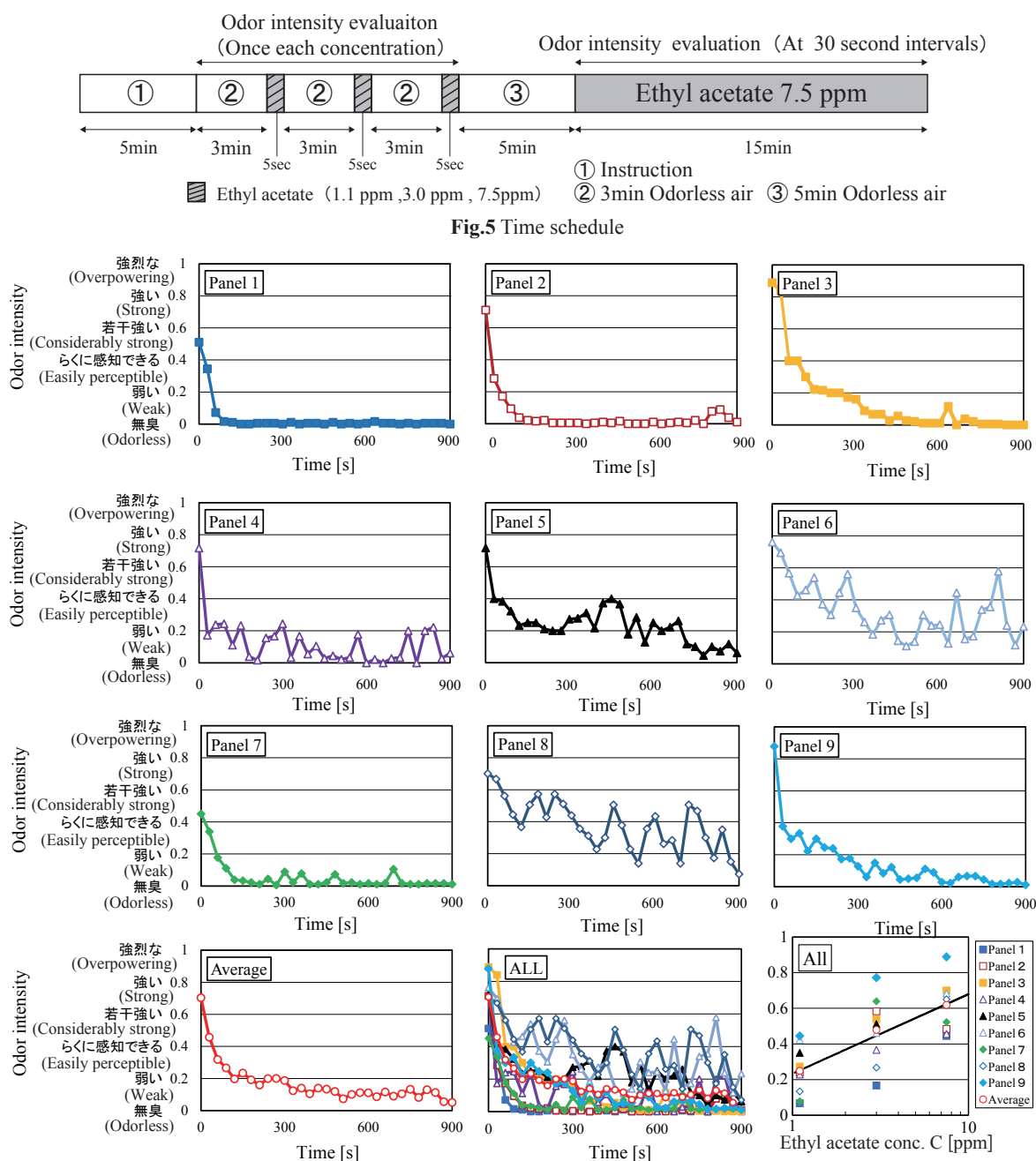


Fig.7 Intensity change of ethyl acetate exposure in language rating scale

Fig.6 Relation between odor intensity and ethyl acetate conc. in language rating scale

る。**Fig.9**を見るとほとんどのパネルについて順応が確認できるが、言語評定尺度と同様、パネル4,5,6,8は評価値の上下変動が見られる。このことから、パネル4,5,6,8は評価手法が異なっても、評価の傾向が変わらないということが分かる。一方で、パネル2は言語評定尺度では、評価値が指数的に下がっていたが、線分長尺度を用いた場合には評価値に若干の上下変動が見られ、評価値が直線に近い形で下がっており、評価の傾向に変化が見られた。よって、評価手法が異なると評価の傾向が変化するパネルがいることも確認できる。パネル平均値の挙動を見ると、言語評定尺度のものと類似していることが読み取れる。これは、評価尺度が類似している影響が大きく、また、言語評定尺度を用いた実験から1週間以内に線分長尺度を用いた実験を行ったためにパネルが評価の傾向を記憶しており、類似した結果となったと推測される。しかし、評価値の初期値について、言語評定尺度のものと比較するとパネル間の差異は小さい。このことから、言語評定尺度使用時におけるパネルの言語解釈の差異の影響が線分長尺度を用いた場合、小さくなったことが分かる。

3.3 ME法を用いた臭気強度評価

嗅覚非順応状態における曝露濃度とME法を用いた臭

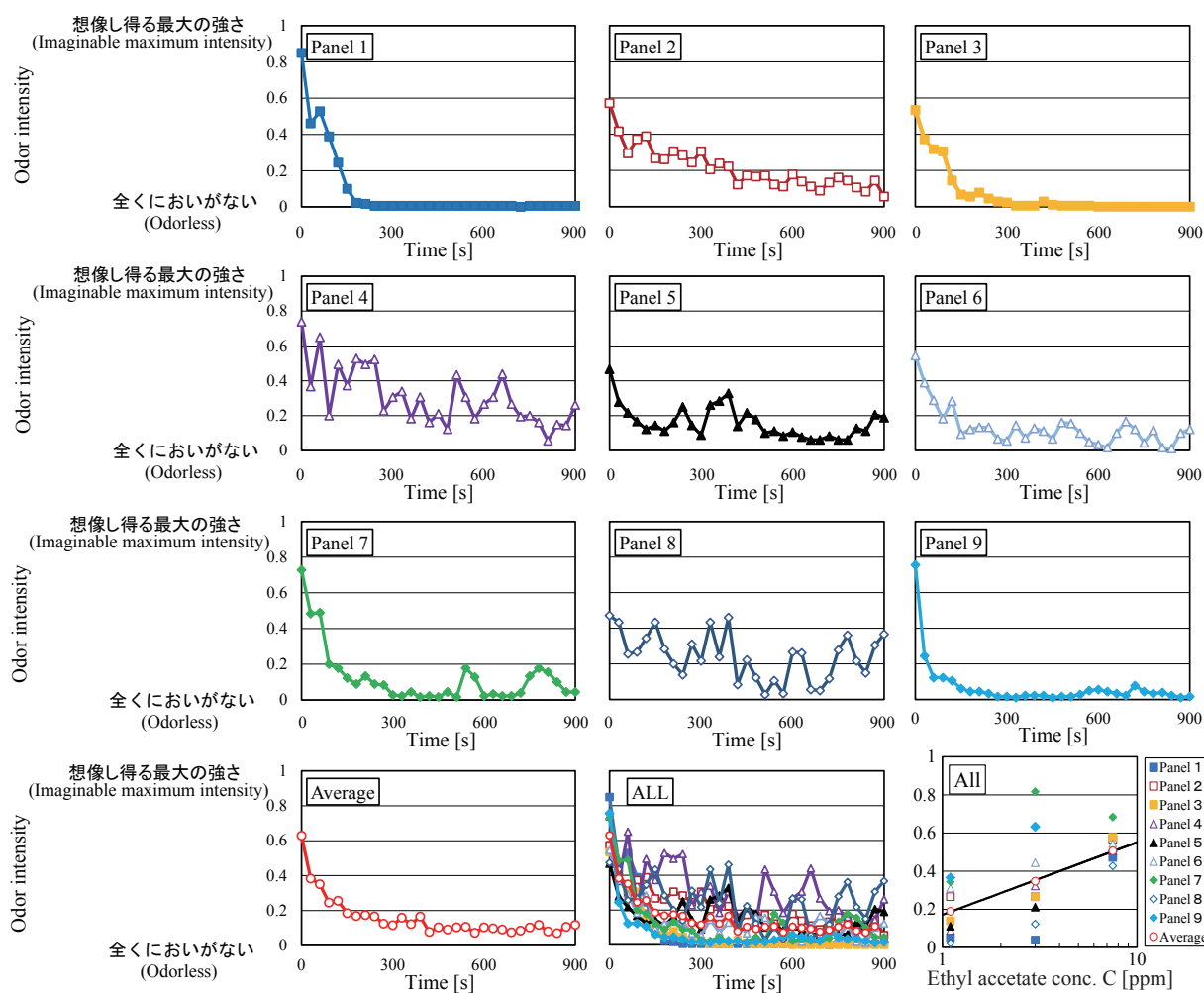


Fig.9 Intensity change of ethyl acetate exposure in line length scale

気強度評価値の関係を **Fig.10** に、臭気連続曝露時の ME 法を用いた臭気強度評価値の経時変化を **Fig.11** に示す。ME 法を用いた場合、評価値はスティーブンスの法則に従うため、縦軸を普通軸で表現する場合、言語評定尺度、線分長尺度のものと同等に比較することはできない。**Fig.10** を見ると、曝露濃度が高いほど、臭気強度が高い傾向にあることが分かる。実験の最初にモジュラスとして、7.5ppm に対して『10』という数字をパネルに提示したが、非順応状態における 7.5ppm に対しての臭気強度評価が『10』から大きく異なるパネルが存在する。これは、無臭空気曝露をはさみながら臭気強度を何分も記憶し続けることは難しいためであると推測される。しかし、パネル平均値はモジュラスで与えた値にかなり近い値を示しているため、全体的に見れば正確に評価できていると言える。**Fig.11** を見ると、パネル8以外について順応が確認できる。パネル8は言語評定尺度と線分長尺度においても評価値が上下変動しているため、評価の傾向は類似している。パネル6も同様である。先の2つの評価手法において、評価値が上下変動していたパネル4,5はME法においてはそのような傾向はほぼ見られない。また、パネルを総じて見ると先の2つの評価手法のものに比べ、評価値が上下変動す

Fig.8 Relation between odor intensity and ethyl acetate conc. in line length scale

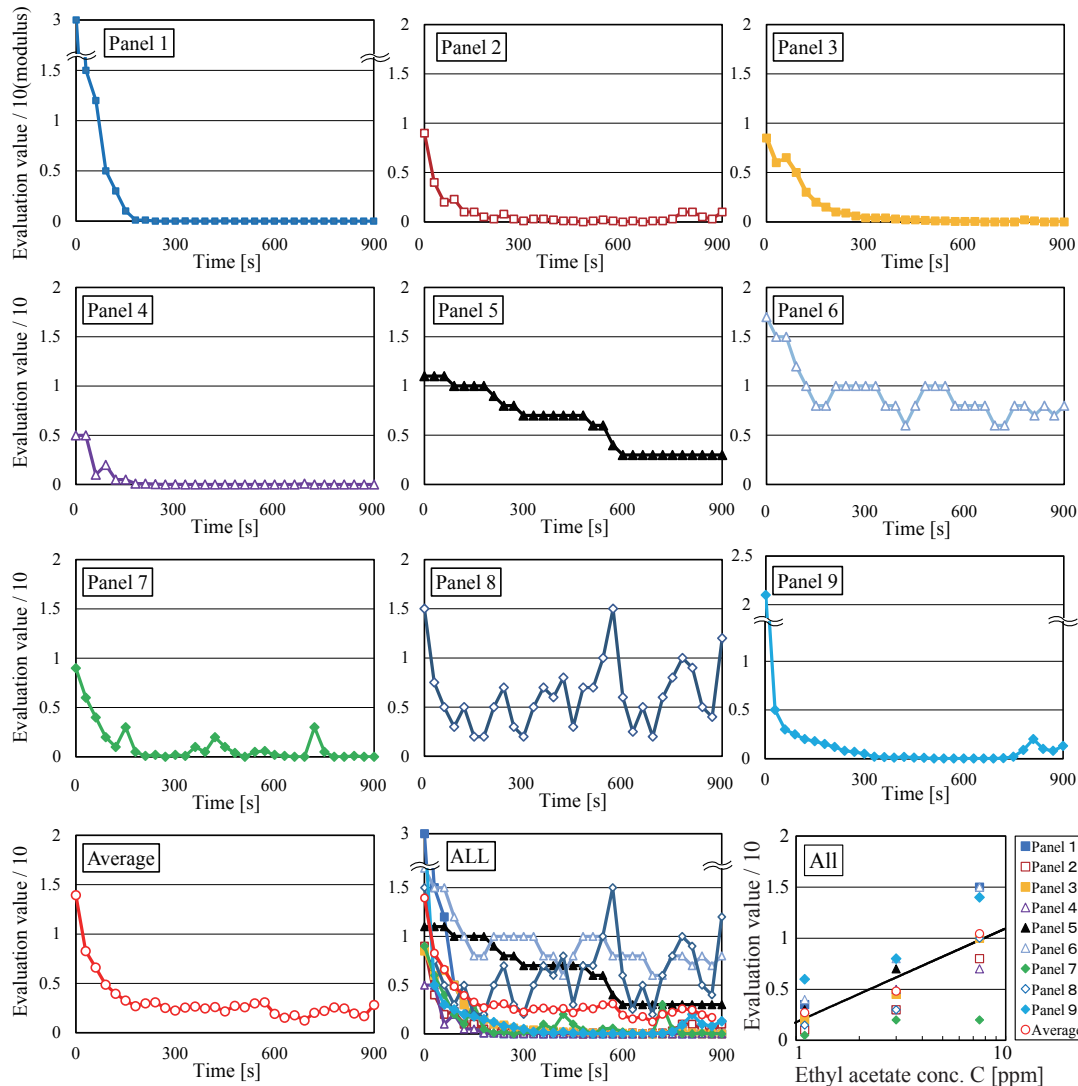


Fig.11 Intensity change of ethyl acetate exposure in ME method

るパネルが少なく、早い段階で順応が完了し、0に近い値で評価し続けているパネルが多いことが分かる。これは、実験への慣れが影響していることも考えられるが、ME法を用いた臭気強度評価の傾向の一つとも言える。また、パネル5,6の評価値の推移を見ると、評価値がステップ的に変化していることが分かる。これは、パネル5,6は評価値に整数を多用する傾向があり、小数や分数を使うことが少なかったために評価値が指数的に下がらずステップ的に下がったと推測される。また数値による評価手法では直前の記憶が評価に大きく影響したことも推測される。連続曝露時の最初の評価値を見ると、非順応状態と同様、モジュラスと大きな差異が確認でき、パネルが時間の経過によりモジュラスの刺激量を忘れてしまったと考えられる。よって、モジュラスを用いる場合にはパネルが記憶でき、評価の基準に使えるようなタイムスケジュールの検討が必要である。

4. おわりに

本報では、言語評定尺度、線分長尺度、ME法を用いた

Fig.10 Relation between odor intensity and ethyl acetate conc. in ME method

嗅覚順応過程における臭気強度評価手法の特性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 言語評定尺度を用いた場合、言語の解釈の差異により、評価値に個人差が生まれる。
- (2) 線分長尺度を用いた場合、言語解釈の差異の影響を小さくすることができる。
- (3) ME法を用いた場合、数への嗜好性が評価に影響する。今後は、他の評価手法を用いた実験よりデータを蓄積していく所存である。

謝辞

本研究の一部は平成27年度科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金、挑戦的萌芽研究、「クロスモダリティ・マッチングを用いた嗅覚応答過程の評価手法に関する研究」、課題番号:15K14076、研究代表:山中俊夫）による。

参考文献

- 1) 高橋, 山中, 竹村, 甲谷, 桃井, 相良, 山田: 嗅覚の非定常応答に関する基礎的研究 (その14) 回復・再順応過程への嗅覚反応モデルの適用性, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第54号, 環境系, pp.305-308, 2014.6
- 2) 高橋, 山中, 竹村, 甲谷, 桃井, 相良: 主観評価を用いた嗅覚の順応過程に関する基礎的研究 (その15) クロスモダリティマッチングを用いた臭気強度評価の検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第55号, 環境系, pp.137-140, 2015.6

嗅覚の非定常応答に関する基礎的研究 (その 17) 音を用いたクロスモダリティマッチングによる臭気強度評価

Basic Study on Unsteady Olfactory Response

(Part 17) Evaluation Method of Odor Intensity by Cross Modality Matching with Sensation of Sound

○高橋 亮太 (大阪大学)
竹村 明久 (摂南大学)
桃井 良尚 (大阪大学)
竹内 慎 (大阪大学)

山中 俊夫 (大阪大学)
甲谷 寿史 (大阪大学)
相良 和伸 (大阪大学)

Ryota TAKAHASHI^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Akihisa TAKEMURA^{*2}
Hisashi KOTANI^{*1} Yoshihisa MOMOI^{*1} Kazunobu SAGARA^{*1} Shin TAKEUCHI^{*1}

^{*1} Osaka University ^{*2} Setsunan University

It is necessary to investigate into olfactory response in order to realize suitable environment. However, it is essential that evaluation method of odor intensity because there are no method to evaluated adequately variation in olfactory response affected by adaptation. In this study, the subjects were exposed to ethyl acetate and they evaluate odor intensity with cross modality matching. They matched odor intensity to sound pitch and volume. It is important to study on subject's difference of sense of sound volume and pitch and the possibility to evaluate odor intensity by cross modality matching with sense of sound.

1. はじめに

嗅覚は順応しやすい感覚であることを考えると、においの除去を目的とした換気量制御などの室内環境設計を行うためには、嗅覚応答の変化を把握することが不可欠である。嗅覚応答の把握は、パネルを用いた官能試験により行われるが、その際にパネルの感覚を十分に表現できる尺度が必要となる。感覚量を評価する尺度の多くには、示性語が用いられるが、パネルによって解釈や言語間の距離などは異なる。そこで本報では、言語を用いない手法としてクロスモダリティマッチング（以下、CMM）という異なるモダリティを合致させる評価手法に着目した。先行研究¹⁾では、順応過程の臭気強度評価手法として臭気強度と音の大きさを合致させる実験を行い評価手法について検討を行ったが、本報では、比較的、5感の中では順応の影響が小さいと考えられる聴覚に着目し、音の大きさととのマッチングに加え、臭気強度を音の高さと合致させる CMM を評価手法とした臭気連続曝露実験を行い、音に対する感覚との CMM 及び前報²⁾で用いられた尺度による評価結果との比較を行い、評価手法の特性について検討した結果を報告する。

2. 音の高さととのマッチングを用いた臭気の連続曝露実験

実験は 2015 年 12 月 7 日～2016 年 1 月 14 日にかけて大阪大学内の実験室にて実施した。パネルは、前報²⁾と同じ 19～25 歳の学生 9 名（男子 4 名、女子 5 名）を採用した。また、酢酸エチルの連続曝露の方法も同様である。臭気強度評価に用いた装置を Fig. 1 に示す。オーディオ発信器（オンソク製 OG-438AL）を操作し、臭気強度に相当する音の高さの純音をヘッドフォン（Sennheiser 製）で出力することで評価させた。なお、本

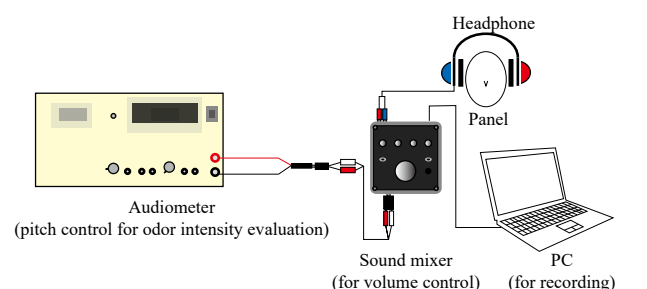


Fig. 1 Evaluation device (CMM of Sound pitch)

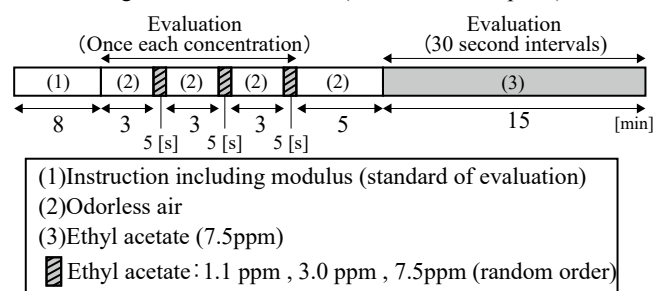


Fig. 2 Time schedule

実験では、7.5ppm の臭気強度に相当する音の高さとして 1000Hz の純音をモジュラスとして与え、パネルに提示した。また、音量はミキサー（TASCAM 製 US-366）を操作することで自由に調整させた。出力された音声を PC で録音し、周波数解析を行うことで評価周波数を得た。実験は、Fig. 2 に示すタイムスケジュールにしたがって行った。最初にインストラクションを行い、検臭・評価方法、注意事項、試料臭気の安全性について説明した。また、臭気質を教示するため 10 L のサンプリングバッグを用いて、7.5 ppm の酢酸エチルを嗅がせた。説明後にパネルの可聴周波数を調べるために高低両側の可聴限界周波数をオーディオ発信器の操作により出力し、録音した。その後、無臭空気を 3 分間曝露させた後、モジュ

ラスを提示した。次に、無臭空気を3分間連続曝露させた後、酢酸エチルを5秒間曝露させた。これを3回繰り返して行った。なお、曝露濃度は1.1 ppm、3.0 ppm、7.5 ppmのいずれかをパネルごとに順不同で1回ずつ行うことで、非順応状態における評価値を得た。次に嗅覚を回復させるため無臭空気を5分間曝露した。その後、呼吸を止めさせ、酢酸エチル濃度を7.5 ppmに制御を行い、順応過程の評価値を得るためパネル呼吸再開と同時に30秒おきに評価させ、出力される音を録音した。なお、毎回録音が終わるとオーディオ発信器のつまみを最低周波数(9 Hz)に戻した。

3. 音の大きさととのマッチングを用いた臭気の連続曝露実験

実験は2016年1月18日～2016年1月27日にかけて行った。なお、パネル、臭気の提示方法、試料臭気は前報²⁾と同じである。先行研究¹⁾においても音の大きさととのCMMを用いた実験を行っており、パネルがミキサーを操作することで臭気強度に相当するスピーカーから出力される音の大きさとで評価したが、記録は出力音の騒音計による測定値であったため、暗騒音の影響を排除できない問題があった。本報では、先行研究¹⁾で用いた装置を改良し、音の大きさととのCMMを用いた

臭気強度評価手法で実験を行った。評価に用いた装置をFig. 3で示す。評価装置はオーディオ発信器を用いて440 Hzの純音を発生させ、ミキサー(1)をパネルが操作することでヘッドホンからの音量を調整し、臭気強度と音の大きさをマッチングさせた。評価値は、パネルが評価し終わったWaveファイル形式の記録データをCSVファイルに書き出した。なお、CSVファイルに書き出した値は16 bit、つまり $\pm 2^{15}$ で波形の音圧変動の振幅を量子化させたものである。音の大きさは波形の振幅が大きければ大きく、波形の振幅のRMSと出力される音の大きさととは相対的な関係がある。そこで、臭気強度と音の大きさととのマッチングでは、評価した音の波形の1秒間

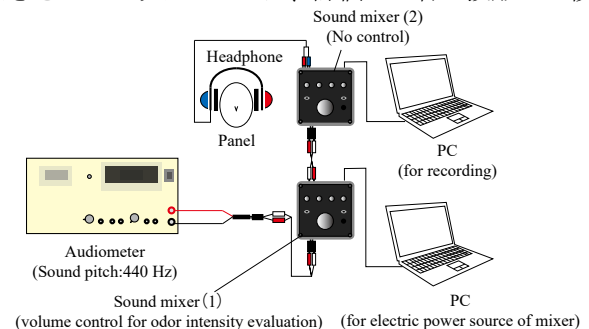


Fig. 3 Evaluation device (CMM of Sound Volume)

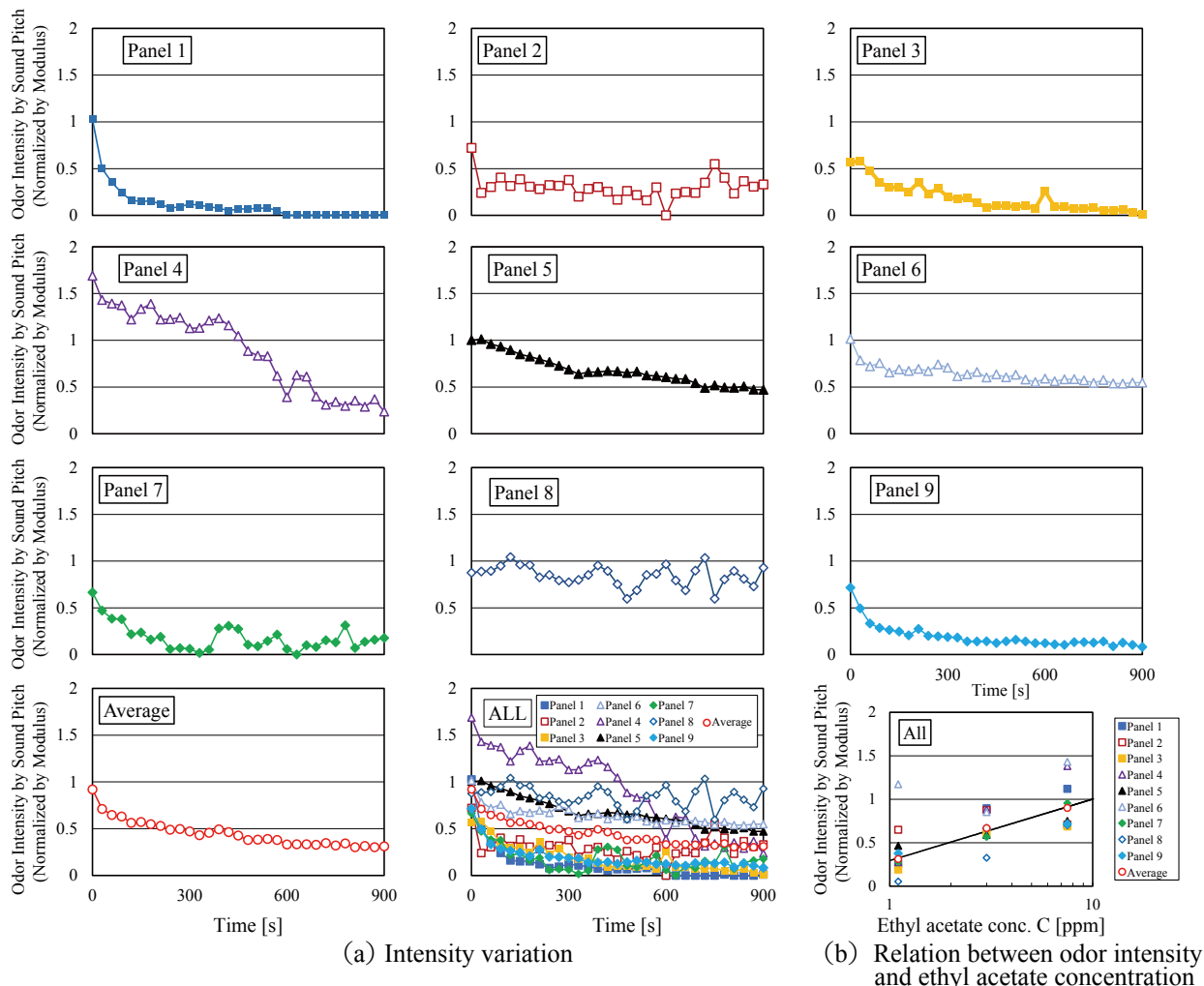


Fig. 4 Intensity variation and relation between odor intensity and ethyl acetate concentration(CMM of Sound pitch)

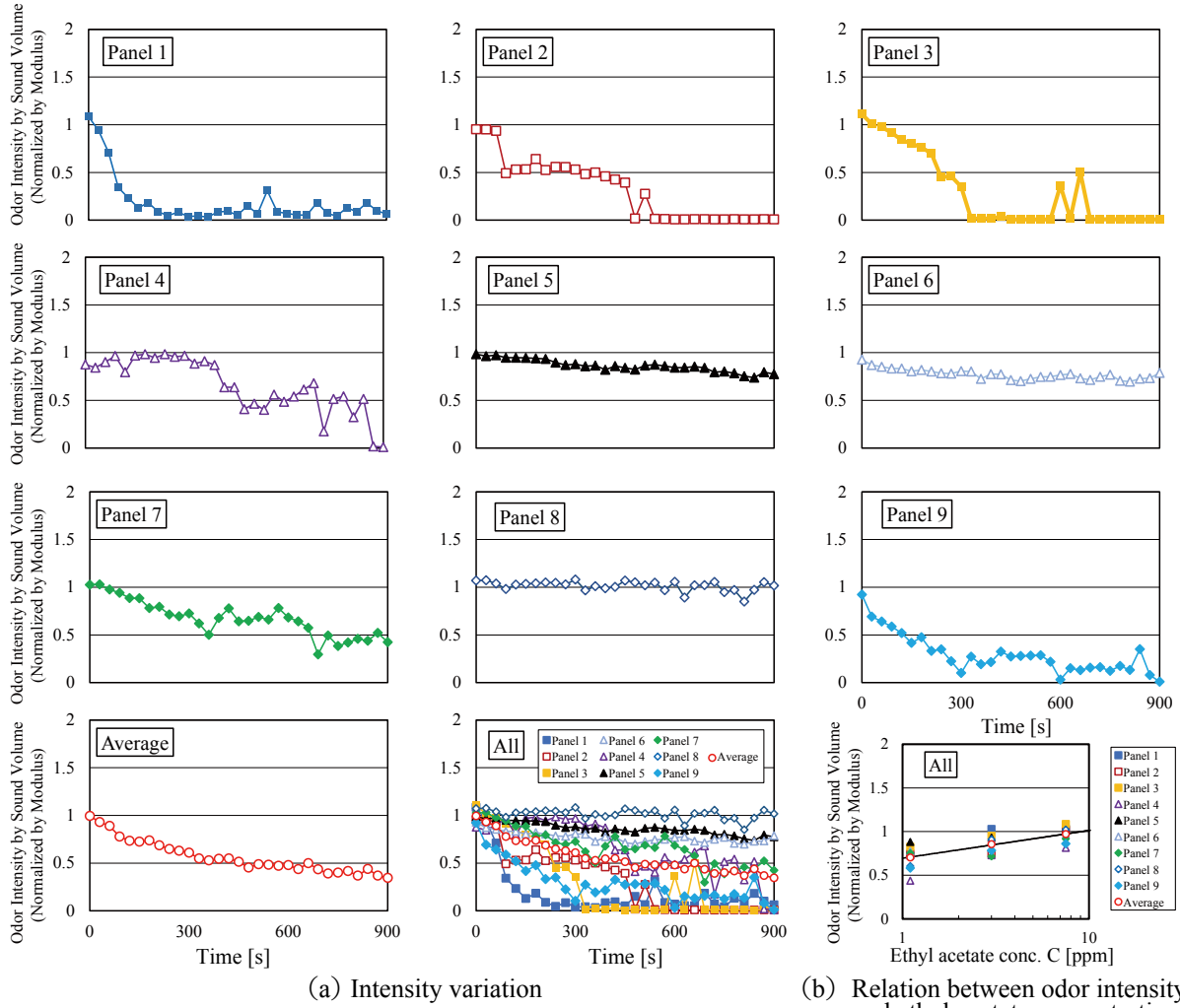


Fig. 5 Intensity variation and relation between odor intensity and ethyl acetate concentration (CMM of Sound volume) の RMS 値を評価値とした。また、7.5ppm の臭気強度に相当する音の大きさとして RMS 値 2000 の音量をモジュラスとして与え、パネルに提示した。なお、本実験で録音した評価値の Wave ファイルは録音用の PC と接続されたミキサー (2) の入力されたものを録音しているため、実際に出力されている音圧変動とは異なるが、本実験では相対的な評価値を得ることを目的としているためミキサー (2) のつまみは固定し制限を設けることで再現性を保った。実験は 2 章の実験と同じ実験スケジュールで行った。なお、録音が終わるとミキサーの出力が最小になるようにつまみを戻した。

4. 結果と考察

4.1 音の高さとの CMM による臭気強度評価

Fig. 4 に非順応状態における曝露濃度と音の高さをを用いた臭気強度評価値との関係及び、評価値の経時変化を示す。なお、評価された周波数はパネルの可聴域に依存することから、(Eq.1) のように各パネルの可聴域で規準化した値で示した。

$$E_{(t)} = \frac{\log_{10} f_{(t)} - \log_{10} f_l}{\log_{10} f_m - \log_{10} f_l} \quad (\text{Eq.1})$$

$E_{(t)}$ は時刻 t の規準化した評価値、 $f_{(t)}$ は時刻 t の評価周

波数 [Hz]、 f_m はモジュラスの周波数 (1000Hz) [Hz]、 f_l はパネルの最小可聴周波数 [Hz] である。非順応状態の濃度と強度の関係において濃度が高くなると評価値が高くなる傾向があることが分かる。しかしながら個人差も大きく見られる。順応過程の評価変動を見ると時間経過とともに減衰していることから順応が確認できる。初期評価値では、パネル 1, 5, 6, 7 はモジュラスで与えた値を意味する評価値 1 に近い値であることが分かる。しかし、パネル 2 のように初期評価値が大きいパネルやパネル 3, 7 のように小さいパネルも存在する。前報²⁾の ME 法のように、モジュラス提示から時間経過により、モジュラスの記憶が薄れたという問題である可能性も考えられるが、本実験では、モジュラスの提示の際に臭気強度とともに音の高さも記憶する必要があったことや、音の高さを正確に把握できなかった可能性も考えられる。音の高さを評価手法として用いた際にも、パネル毎に評価傾向が存在していることが分かる。パネル 1, 3 のように時間が経過とともに無臭を意味する評価値 0 まで減衰していくパネルもいれば、パネル 4, 5, 6 のように評価値の減衰が見られ順応は確認できるが

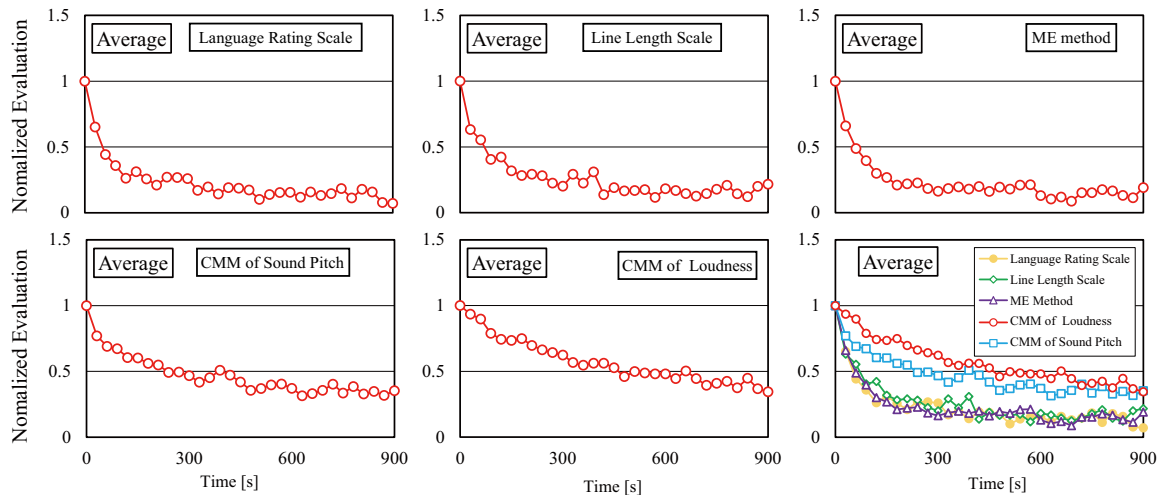


Fig. 6 Normalized evaluation variation each method of odor intensity evaluation

完全に無臭の評価はせず、一定の強さまでしか減衰しないパネルも見られる。また、前報²⁾と同様にパネル8は評価値が上昇下降を繰り返している傾向も確認できる。パネル平均を見ると、評価値が減衰していることから順応も確認でき、音の高さを用いたクロスモダリティマッチングにおいても臭気強度を表現できていると考えられる。

4.2 音の大きさとCMMによる臭気強度評価

Fig. 5 に非順応状態における曝露濃度と音の大きさを用いた臭気強度評価値との関係及び、評価値の経時変化を示す。なお、出力を最小にしてもRMS値は0にならなかったため、評価値は音の高さの評価値と同様に (Eq. 2) で規準化した値を示している。

$$E_{(t)} = \frac{\log_{10} RMS_{(t)} - \log_{10} RMS_l}{\log_{10} RMS_m - \log_{10} RMS_l} \quad (\text{Eq. 2})$$

$E_{(t)}$ は時刻 t における規準化した評価値 [-], $RMS_{(t)}$ は時刻 t の評価 RMS 値 [-], RMS_m はモジュラスの RMS 値 (2000) [-], RMS_l は出力できる最小 RMS 値 [-] である。濃度-強度関係を見ると濃度が高くなるにつれて評価値が高くなっている傾向にある。順応過程の評価変動を見ると時間経過とともに減衰していることから順応が確認できる。しかしながら、パネル8はほとんど変動しておらず順応が確認できない。また、パネル5, 6 は初期評価値から徐々に下がっているが減衰が小さい。初期の評価値を見ると、概ねいずれのパネルもモジュラスで与えた値を意味する評価値1に近い値をとっていることが分かる。これは、音の高さよりも大きさの方がモジュラスとして記憶に残りやすいためと考えられる。順応過程における音の高さを用いたCMMにおいても臭気強度を表現できていると考えられるが、依然としてパネルの評価傾向が現れており個人差が存在することが分かる。

4.3 順応過程における評価手法ごとの特性の検討

前報²⁾と本報で用いた5種類の尺度による臭気強

度評価結果の比較を行う。順応過程の初期評価の感覚量は、いずれも等しいと仮定し、各評価手法のパネル平均値の初期評価値が1となるような倍率を各評価手法で算出し、その倍率をパネル平均値の全評価値にかけることで各手法の評価値を比較できるように規準化した。Fig. 6に初期値を1とした際の規準化した評価値の経時変化を示す。Fig. 6を見ると、音の高さ及び大きさを用いたCMMでは、前報²⁾の評価手法に比べ、減衰が小さいことが分かる。特に音の大きさを用いたCMMでは、その傾向が大きいことが分かる。これは嗅感覚が大きく変動しても音の感覚ではそれほど大きな変動としては現れないということが考えられる。また、前報²⁾の言語評定尺度、線分長尺度、ME法を用いた評価値は概ね一致しており、同様な傾向が見られることが分かる。規準化の手法が適切でない可能性もあるが、音のCMMを用いた評価手法では、減衰が小さい傾向にあり、言語評定尺度、線分長尺度、ME法は概ね同様な評価傾向になると考えられる。

5. おわりに

本報では音のCMMを用いた臭気強度評価結果の特性及び、言語評定尺度、線分長尺度、ME法を用いた臭気強度評価結果との比較を行った。今後は、音以外の他のモダリティにも着目し、CMMによる臭気強度データを蓄積していく所存である。

【謝辞】

本研究の一部は日本学術振興会平成27年度科学研究費助成事業 (学術研究助成基金助成金, 挑戦的萌芽研究, 「クロスモダリティ・マッチングを用いた嗅覚応答過程の評価手法に関する研究」, 課題番号: 15K14076, 研究代表: 山中俊夫) によった。

【参考文献】

- 1) 高橋, 山中, 竹村, 甲谷, 桃井, 相良: 嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究 (その14) クロスモダリティ・マッチングを用いた臭気強度評価手法の検討, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会, pp.81-84, 2015. 3
- 2) 竹内, 山中, 竹村, 甲谷, 桃井, 相良: 嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究 (その16) 言語評定尺度・線分長尺度・ME法による臭気強度評価, 平成27年度 (第45回) 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2016. 3 (掲載予定)

在室者から発生する汚染質の評価手法に関する研究
 (その4) 三点比較式臭袋法を用いた体臭の弁別閾における CO₂ 濃度の同定
Evaluation Method for Perceived Air Pollution Caused by Human Bioeffluents
(Part 4) Identification of CO₂ Concentration in Body Odor Olfactory Threshold
Using Triangle Odor Bag Method

○池田 馨 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学)
 竹村 明久 (摂南大学) 甲谷 寿史 (大阪大学)
 桃井 良尚 (大阪大学) 相良 和伸 (大阪大学)

Kaoru IKEDA^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Akihisa TAKEMURA^{*2}
 Hisashi KOTANI^{*1} Yoshihisa MOMOI^{*1} Kazunobu SAGARA^{*1}

^{*1} Osaka University ^{*2} Setsunan University

It is specified in Japanese legislation that CO₂ concentration in non-residential buildings shall not be more than 1000 ppm. CO₂ concentration standard is an index to determine ventilation requirements for visitors not to feel uncomfortable to the body odor when they enter a room. It is the purpose of our study to clarify olfactory threshold of body odor. Accordingly, this paper shows results of measurements of olfactory threshold of body odor using “the triangle odor bag method”. The odor index is very small value. The present results provide a further reason to design for low-polluting buildings. The thresholds were different with each person and each day.

はじめに

現在、日本の建築物の室内環境は CO₂ 濃度を 1000 ppm に保つことで維持されている。人間の呼気由来の CO₂ は体臭強度の指標とされ、CO₂ 濃度基準は外来者が入室した際に体臭を不快に感じない程度の換気量を要求するものである。しかし、建物用途によって求められる知覚空気質は異なるため、知覚空気質の評価手法の確立が重要である。その室内空気評価手法のひとつとして体臭に対する人間の嗅覚閾値を求めることが我々の研究目的である。

本研究では三点比較式臭袋法を用いて在室者を汚染源とする室内空気の臭気濃度を測定した。また実験によって得られた体臭についての嗅覚閾値から CO₂ 濃度と体臭の臭気濃度の関係を求めた。体臭コントロール有り無しとの2条件で測定を行い、両条件の比較および男女比較を行った。また試料の定性分析を行い、空気中に含まれる成分を同定した。本報では体臭閾値測定と定性分析の結果、その考察について報告する。

1. 体臭閾値測定

1.1 実験概要

実験は2016年1月18日から2月10日にかけて実施した。実験を行う前に、T&T オルファクトメーター試験を行い、正常な嗅覚を有すると認められた20～24歳の本学学生18名（男子9名女子9名、非喫煙者）を各日男性3名女性3名、計6名ずつパネルとして採用した。それ以外に体臭発生源として21～23歳の本学学生6名（男子3名女子3名、非喫煙者）を在室者とした。なお、被

験者には適切な報酬を支払った。純粋な人体由来の体臭とシャンプーや化粧品など後から付加された臭気を含む体臭の閾値を比較するため、体臭コントロール有りの条件（1月19、26日、2月10日）とコントロール無しの条件（1月18、29日、2月5日）の2条件で測定を行った。体臭コントロール有りの条件で実験を行った日は、在室者に実験の前日から強い食事をとらない、支給したシャンプー・ボディウォッシュを用いて入浴する、実験当日に化粧品や整髪料を使用しない等、様々な制限を設けた。また、実験時には麻が主材の衣服・部屋履きを着用させた。

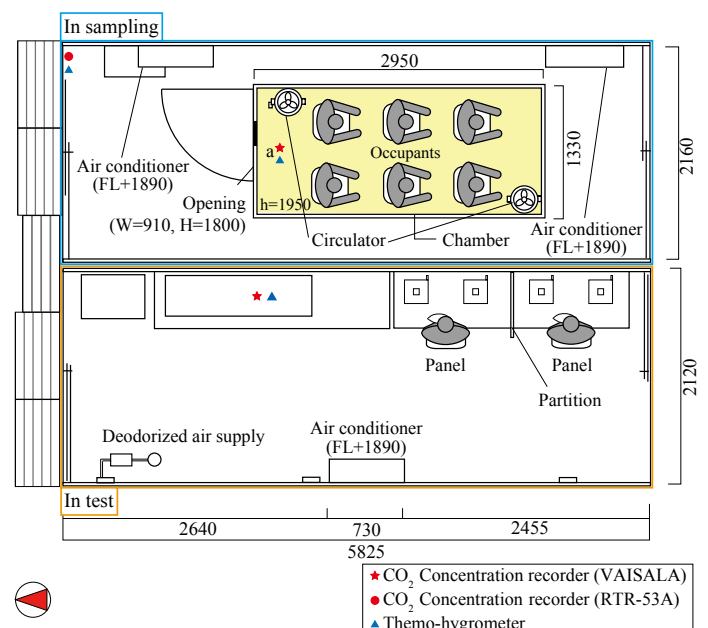


Fig. 1 Laboratory plan

回答用紙 3 個の袋のうち、 においのあるのは 何番ですか？ <div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 50px; margin: 10px auto;"></div>	氏名： 回数： 回目 あなたの選んだ袋のにおいの強さは どの程度ですか？ 下の番号に○印をしてください。 1：弱い 2：らくに感知できる 3：若干強い 4：強い 5：強烈な
---	---

Fig. 2 Evaluation sheet

実験場所は Fig. 1 に示す本学学内の隣接する 2 つの実験室である。一方の実験室内にある容積 7.65 m³ の臭気作成室に、体臭発生源として在室者 6 名を入室させた。空気汚染質のレベルを表す指標として CO₂ 濃度を用いる。CO₂ 濃度が均一になるようにサーキュレーターを配置し、設定濃度 5000 ppm 時の臭気作成室内空気を試料としてサンプリングバッグに捕集した。温湿度及び CO₂ 濃度は、小型温湿度計 (T&D 社製 RTR-53A)、小型 CO₂ 濃度計 (室内：VAISALA 社製 GM70、外気：T&D 社製 TR-76Ui) を用いて連続測定を行った。在室者が発汗しないよう室温は 17～27℃とした。

三点比較式臭袋法による閾値測定は、原臭を採取した実験室の隣にある無臭室で行った。試験中、実験室は常に窓を開けて換気を行っていたが、実験室における体臭の嗅覚順応の影響を考慮して待機中は外来者には無臭マスク (ミドリ安全社製使い捨て粉じんマスク SH7022kv ケスモン DS2) を着用させた。におい袋のにおいを嗅ぐ直前には引き戸から外に顔を出させ、外気で約 30 秒間深呼吸させた。また検臭の間隔は少なくとも 1 分間はあけるようにした¹⁾。測定は希釈倍数 10 倍から始め、下降法により 30, 100, 300 倍と段階的に希釈した。また、Fig. 2 に示す回答用紙を用いて付臭におい袋の番号を回答させるとともに、その臭気強度についても評価させた。

1.2 結果と考察

(1) 臭気作成室における CO₂ 濃度と温度

Fig. 1 の測定点 a における CO₂ 濃度と温度変化の一例として、1 月 18 日の測定結果を Fig. 3 に示す。在室者が入室を完了した時点から時間の経過とともに CO₂ 濃度が上昇していることが分かる。

(2) 体臭閾値測定結果

各パネルの評価と判定結果の一例として、1 月 18 日の測定結果を Table 1 に示す。1 回目の測定 (希釈倍数 10 倍) で不正解となったパネルについては個人閾値を算出することができなかったため臭気濃度は - と表記した。また各実験日における閾値測定結果を Table 2 に示す。実験結果より CO₂ 濃度換算した体臭閾値 [ppm] も以下の算出式により算出した。

$$\Delta C_{CO_2} = C_i - C_o$$

ΔC_{CO_2} : 人間の呼気による CO₂ 増加量 [ppm]
 C_i : 体臭採取時の室内 CO₂ 濃度 [ppm]
 C_o : 外気 CO₂ 濃度 [ppm]

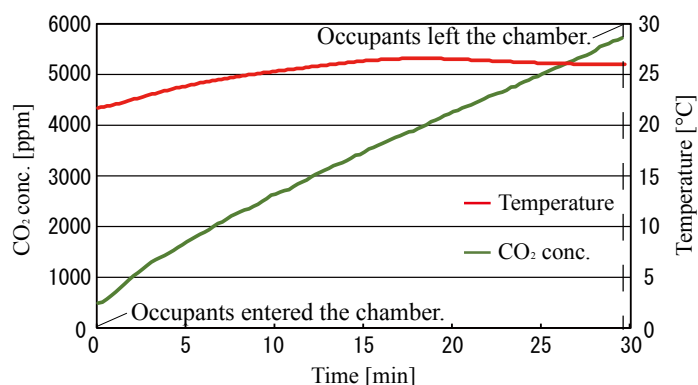


Fig. 3 Example of CO₂ conc. and temperature change time variation

Table 1 Example of judgement result

Dilution rate		10	30	100	300	1000	Individual odor concentration
Panel A	Odor intensity	1					(-)
	Judgement	×					
Panel B	Odor intensity	1	1				17
	Judgement	○	×				
Panel C	Odor intensity	4	3	2			55
	Judgement	○	○	×			
Panel J	Odor intensity	1	2	1	1		174
	Judgement	○	○	○	×		
Panel K	Odor intensity	2	2	1	4	1	(550)
	Judgement	○	○	○	○	×	
Panel L	Odor intensity	2	2	1	1		174
	Judgement	○	○	○	×		

Table 2 Equivalent CO₂ concentration to odor threshold

Controlled				
19 Jan. 2016	Odor concentration	73	ΔC_{CO_2} [ppm]	4539
	Odor index	19	Olfactory threshold [ppm]	62
26 Jan. 2016	Odor concentration	55	ΔC_{CO_2} [ppm]	4636
	Odor index	17	Olfactory threshold [ppm]	84
10 Feb. 2016	Odor concentration	73	ΔC_{CO_2} [ppm]	4509
	Odor index	19	Olfactory threshold [ppm]	62
Uncontrolled				
18 Jan. 2016	Odor concentration	73	ΔC_{CO_2} [ppm]	4911
	Odor index	19	Olfactory threshold [ppm]	67
29 Jan. 2016	Odor concentration	98	ΔC_{CO_2} [ppm]	4579
	Odor index	20	Olfactory threshold [ppm]	47
5 Feb. 2016	Odor concentration	174	ΔC_{CO_2} [ppm]	4589
	Odor index	22	Olfactory threshold [ppm]	26

$$C_{th} = \frac{\Delta C_{CO_2}}{Y}$$

C_{th} : 体臭閾値 [ppm]
 Y : 臭気濃度 (閾希釈倍数)

Table 2 の通り、体臭の閾値濃度は非常に低い値となった。昨年度行った実験²⁾でも同様の値を得たことから三点比較式臭袋法の無臭袋と付臭におい袋の差を判断して回答するという手順の過程で、体臭を知覚するときにおいだけでなく刺激感等他の感覚要素も関係している可能性がある。

続いて臭気濃度の男女差について Fig. 4 に示す。各日男性 3 名女性 3 名ずつの測定しか行っていないため、それぞれの実験日での男女の臭気濃度はその 3 名の平均と

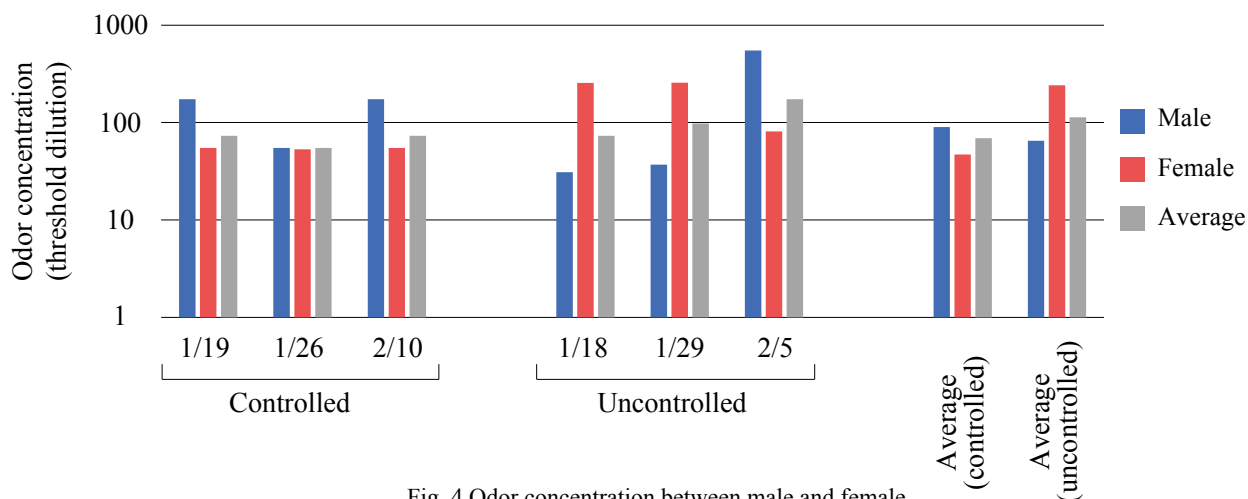


Fig. 4 Odor concentration between male and female

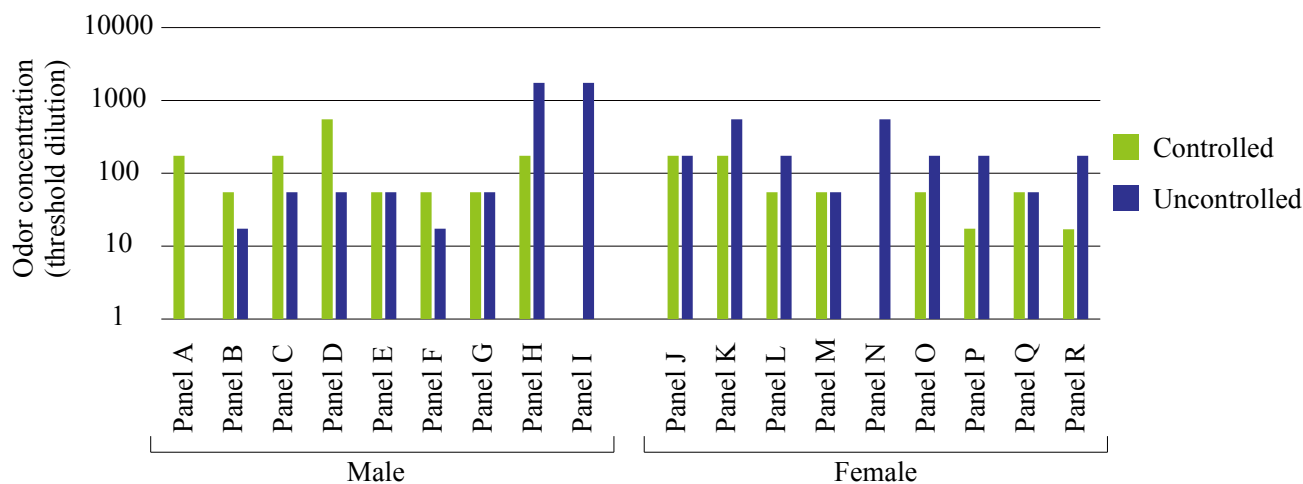


Fig. 5 Odor concentration between each panel

して算出した。また1回目の測定で不正解となったパネルは個人閾値を算出することができなかったため、そのようなパネルが存在した実験日の男女の臭気濃度はその他2名の平均値をとった。同実験日でのパネル6名の平均や各条件下での平均を算出する場合はパネルの個人閾値の最大値と最小値1名ずつをカットした。

Fig. 4を見ると、体臭コントロール無しの臭気作成室内空気を原臭とした閾値測定で臭気濃度が大きくなっていることがわかった。体臭コントロール無しの実験日には、入浴や洗濯、化粧品の使用などは被験者に任せ、在室者には普段どおりの格好でくるようにと指示をした。そのため、臭気作成室内には人体から発散される純粋な体臭以外に化粧品や整髪料等から揮発した化学物質が存在したと考えられる。このような化学物質に対してパネルが敏感に知覚しているであろうということが実験結果から明らかになった。

各パネルごとの臭気濃度の結果をFig. 5に示す。それぞれコントロール有りの場合と無しの場合とで分けて示した。1回目の測定で不正解となり個人閾

値を算出できなかったパネルに関しては臭気濃度1として示した。

各パネルの結果をみると、パネルによって大きく臭気濃度が異なることが分かる。例えば、Panel H, Iの臭気濃度は1738と非常に大きい値となった。一方でPanel A, N, Iのように閾値算出ができなかったパネルも存在した。特にPanel Iは体臭コントロール有りの条件では1回目の測定で不正解となったにもかかわらず、体臭コントロール無しの条件では希釈倍数1000倍まで正解し、臭気濃度は1738となっている。このことからこのパネルは特定の臭気質について非常に敏感に知覚するのではないかと考えられる。

ただし、臭気濃度の体臭のコントロールの有無による差や男女差についての詳細な分析は今後行っていく予定であるため、有意差等についての考察は次報で報告する。

2. 臭気に含まれる成分の定性分析

2.1 分析方法

分析サンプルとして2016年1月18日に体臭コン

Table 3 Qualitative analysis result

Qualitative analysis result	
Controlled	Uncontrolled
Acetone	Toluene
2-Methyl-1,3-butadiene	Xylene
Toluene	1,3-Butanediol
2-(1,1-Dimethylethoxy)ethanol	3-Methoxy-3-methylbutanol
Xylene	6-Methyl-5-hepten-2-one
1,3-Butanediol	Octanal
3-Methoxy-3-methylbutanol	Undecane
1-Butoxy-2-propanol	3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol
6-Methyl-5-hepten-2-one	Nonanal
1-Phenyl-1-methylethanol	Levomenthol
Nonanal	Decanal
Decanal	Tridecane

トロール無しの条件での試料を、2016年1月19日に体臭コントロール有りの条件での試料をそれぞれ採取した。分析サンプルはCO₂濃度5000ppm時に、在室者背後のCO₂濃度の測定点付近で捕集した。体臭発生源は1章と同一の6名であり、1章で行った体臭閾値測定を試料を採取すると同時に分析用のサンプリングを行った。捕集方法はサンプリングポンプ（近江オドエアーサービス（株））を用いて各サンプルを10ℓのフレックサンプラー（近江オドエアーサービス（株））に2袋ずつ採取した。臭気成分の定性については、株式会社カネカテクノロジーに分析を依頼した。分析は、吸着管（TENAX TA）に20ℓの空気を吸引させてVOCを捕集し、加熱脱着GC/MS法により定性分析を行った。

2.2 結果と考察

臭気作成室内空気の定性分析結果をTable 3に、各条件におけるアバダンスをFig. 6に示す。分析の結果、岩下³⁾の研究で体臭が発生している空間においてVOCから体臭成分として同定されたNonanal, Decanalが本実験でも両条件で検出された。またその他に既報⁴⁾の実験と本実験の両条件で検出された成分としては、Tolueneと6-Methyl-5-hepten-2-oneが存在した。Tolueneは建材の溶剤として用いられ、シックハウス症候群の原因物質であるといわれる成分であるので、体臭成分ではなく実験室の建材から揮発した可能性が高い。体臭コントロール有りの条件のみで検出された成分として、代謝プロセスの結果として人体で自然に生成される成分であるAcetoneがあげられる。また体臭コントロール無しの条件では、Octanalや3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol, Levomentholのような香料に含まれる成分が検出された。両条件において異なる成分が存在すると確認できたことから、1章の閾値測定実験において化粧品などから揮発した特定の化学物質に対して敏感に反応するパネルが存在することが示唆された。上記の成分についての定量化は現在分析中である。

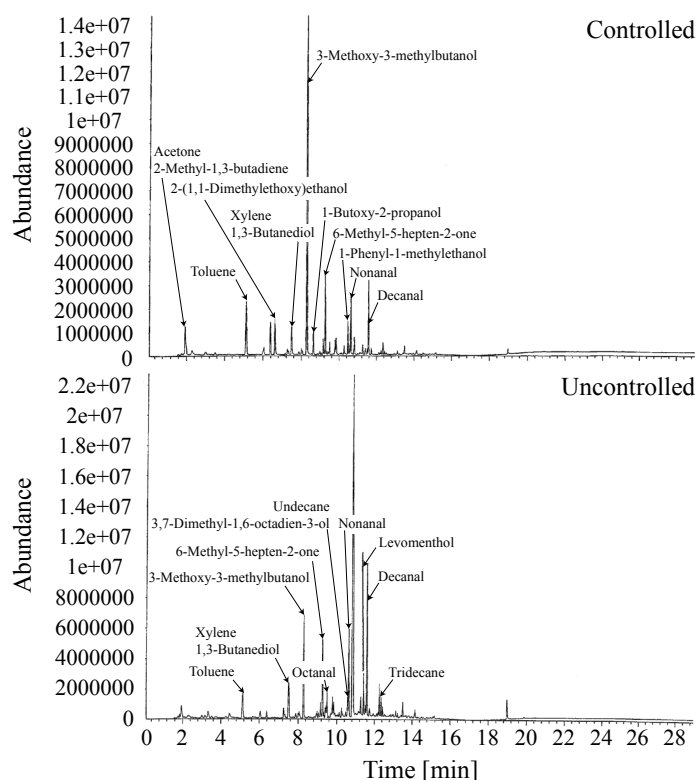


Fig. 6 Abundance of qualitative analysis result

おわりに

本報では体臭閾値測定、定性分析の結果とその考察について報告した。体臭閾値については以前の測定と同様に非常に小さい値となり、パネル別に見ると個人差が非常に大きかった。定性分析の結果は体臭コントロール有りと無しの場合で成分が異なり、有りの場合は純粋な体臭成分が、無しの場合は香料に含まれる成分が検出された。今後は引き続き統計的考察と定量分析を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は平成27年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）基盤研究（A）（一般）「噴霧脱臭・除菌と置換喚起の複合による快適・安全な病室換気システムの開発研究」（課題番号：

参 考 文 献

- 1) P. X.Etievant, G. Callement, D. Langlois, S. Issanchou, N. Coquibus : Odor Intensity Evaluation in Gas Chromatography-Olfactometry by Finger Span Method, J. Agric. Food Chem., Vol. 4, pp. 1673-1680, 1999
- 2) 山田響子, 山中俊夫, 竹村明久, 相良和伸, 甲谷寿史, 桃井良尚, 池田馨: 在室者から発生する汚染質の評価手法に関する研究（その1）入室法による臭気の主観評価と在室者評価, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.85-88, 2015. 3
- 3) 岩下剛, 日比野貴生: VOC濃度による体臭臭気強度の評価 体臭による知覚空気汚染に関する研究（その2）, 日本建築学会環境系論文集, 第76巻 第644号, pp.539-545, 2011.6
- 4) 山田響子, 山中俊夫, 竹村明久, 相良和伸, 甲谷寿史, 桃井良尚, 高橋亮太: 嗅覚の非定常応答に関する基礎的研究（その12）臭気曝露実験におけるパネルの評価特性, 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集, 第7巻, pp.29-32, 2014.9

三点比較式臭袋法における吸入濃度に基づく最適吸引法に関する研究
(その1) 吸引濃度予測のための簡易予測手法に関する検討
**Proposal for Optimum Sniffing Method Based on Odor Concentration
in Triangle Odor Bag Method
(Part1) Simple Model for Prediction of Sniffing Concentration**

○ 山川 和希 (摂南大学) 堀江 昌朗 (摂南大学) 竹村 明久 (摂南大学) 増井 公貴 (摂南大学)

Kazuki YAMAKAWA^{*1} Masaaki HORIE^{*1} Akihisa TAKEMURA^{*1} Koki MASUI^{*1}

^{*1} Setsunan University

The triangle odor bag method is sensory measurement method of odor concentration by the Offensive Odor Control Act. This method has some problems in terms of accuracy. It is guessed that decrease of odor concentration is one of them because of leakage from clearance between mask and face of subject. Therefore, it was compared suction flow rate among three width of clearance by using CFD. Consequently, it was revealed that odor concentration suctioned from odor bag was more decreased as the size of breath and width of clearance between mask and face of subject.

1. はじめに

悪臭防止法の公定法である三点比較式臭袋法は、嗅覚に基づき臭気の濃度を算出するための手法である。臭気は、PET製の容量3Lの袋にガラス管が付帯する使い捨て器具で提示され、PET製の漏斗状の鼻あてを、鼻と口が収まるように顔に隙間なく押し当てて、自己吸引によって袋に圧力をかけずに袋内臭気を吸い出すこととされている(図1)¹⁾。しかし、鼻あて内を吸引による負圧にすることで、隙間などからの外部空気の流入が懸念され、検臭臭気の濃度が設定濃度よりも大幅に低下する可能性が高い。一方で、鼻あてを用いない場合よりも、手法の改良次第では規定濃度をより精確に被験者に提示できる余地がある。本研究では、三点比較式臭袋法の精度向上のために、様々な吸引ケースを想定、検討し、最適な吸引手法を提案することを目指し、簡易な濃度予測手法の提案を目的とする。本報では、鼻あて装着時における鼻あてと顔の隙間が吸引時の臭気の濃度に及ぼす影響に関する検討について報告する。

2. 数値解析方法

本研究では数値解析を行い内部流れおよび鼻孔に吸引される気体の濃度の予測を行う。Fig.1は数値解析モデルを示しており、計算モデルは鼻孔部、鼻あて部、におい袋から鼻あてに接続されるパイプ部によって構成されている。ここで鼻孔部は簡易モデルとして直径12mmの二つの円筒孔が直径12mmの円筒に合流した形状をしており、鼻孔入口から出口までの距離は約60mmとした。パイプ部は近江オドエアーサービス

社製におい袋(3ℓ)に取り付けられている部分と同じ形状をしており、パイプの内径は10mmで鼻の先端から約10mm離れた位置に設置した。また、鼻あては近江オドエアーサービス社製製品とほぼ同じ形状で顔に接触する部分は鼻の形状を模擬している。なお、パイプ部の容量は約4.7ml、鼻あて部は190ml、鼻孔部は10mlとした。また、鼻あてを顔表面に密着させた場合と比較するために、鼻あての顔表面側の内周に2種類の隙間(0.5、1.0mm)のモデルを作成した。なお、本解析モデルの要素数は約22万である。境界条件は、入口はパイプ部のにおい袋側端面として自然吸引を想定していることから大気圧に設定した。また、鼻孔側の端面を出口として実験から得られた鼻孔での吸引流量を設定する。さらに、吸引された気体の体積濃度を評価するために、入口から流入する気体をGas-A、初期の状態からパイプ部、鼻あて部、鼻孔部にある気体をGas-B、鼻あてと顔表面の間に隙間を設けた際に鼻あて外部から流入する気体をGas-Cとした。なお、臭い成分を含む気体はGas-Aであり、全ての気体は空気と同じ物性値としている。

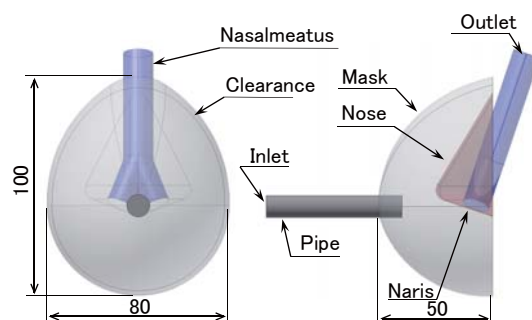


Figure 1 Outline of calculation model

数値解析ソフトウェアは汎用熱流体解析ソフトウェア ANSYS CFX16.1 を用いた。なお、解析において気体は非圧縮性とし、乱流モデルは SST (Shear Stress Transport) モデルを採用し、非定常解析を行った。

3. 鼻孔の吸引流量の測定

数値解析における出口境界条件として鼻孔からの吸気量を設定するために、9 人の被験者を対象に吸気流量の測定実験を行った。Fig. 2 に実験装置の概略を示す。気体用流量センサ (KEYENCE 社製 FD-A10) が取り付けられた鼻あてを外気が流入しないように顔表面に密着させて吸気流量を測定した。被験者は 20 代の男女 9 人で、実験前に鼻あてを顔表面に押し当て、0.5 秒間で鼻から吸引するよう指示し、それぞれ 5 回計測を行った。Fig. 3 に吸気流量の測定結果の一例を示す。縦軸は吸気流量 Q_s [ℓ/s]、横軸は時間 t [s] とし、同一被験者の 5 回分の測定結果を示している。吸引パターンには個人差はあるが、5 回実験を行ってもほとんど同じパターンとなり、また、吸引パターンは 3 種に大別できることが明らかとなった。そこで、数値解析における鼻孔出口の境界条件として 3 種類の代表的な吸引パターンを S-A、S-B、S-C とし、Fig. 4 に示す。S-A の吸引パターンは総吸引時間 T_s が約 0.5s、瞬間最大吸引流量 Q_{smax} は約 135 $\text{m}\ell/s$ 、総吸引量 V_s

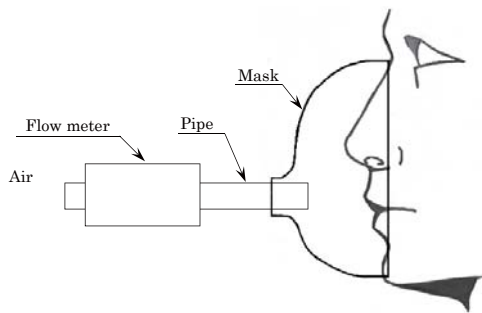


Figure 2 Outline of experimental equipment

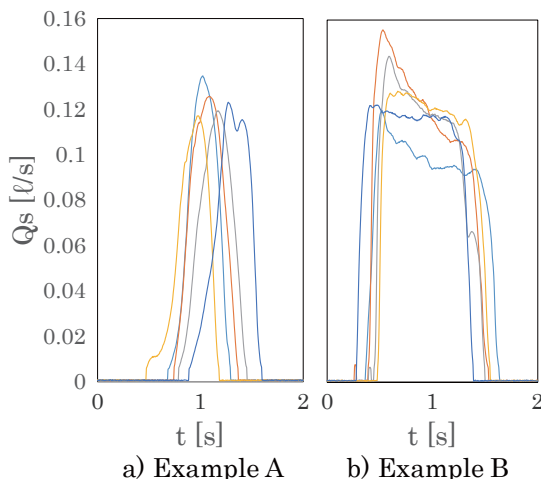


Figure 3 Example of suction flow rate in nasal

は約 45 $\text{m}\ell$ である。S-B は T_s が約 1.4s と長く、 Q_{smax} は約 120 $\text{m}\ell/s$ 、 V_s は約 114 $\text{m}\ell$ である。S-C は T_s が S-A とほぼ同じ約 0.5s であるが、 Q_{smax} は約 71 $\text{m}\ell/s$ 、 V_s は約 24 $\text{m}\ell$ である。

4. 鼻あて内部の流動状態

Fig. 5 a ~ c に隙間の有無による鼻あて内部の各気体の濃度分布の数値解析結果を示す。なお、鼻孔における吸引パターンを S-A とし、吸引開始直後から吸引終了直前の $t=0.2, 0.35, 0.5s$ の結果を示している。図中の濃淡は、におい袋からの気体 Gas-A と鼻あて外部から流入する気体 Gas-C の濃度を示している。a) の鼻あてを顔表面に密着させて隙間 δ が 0mm の場合、最初に Gas-B (鼻孔内部、パイプ部、鼻あて内部の気体の一部) を吸引するときに顔表面や口に接触した気体が渦を形成してにおい成分が含まれている Gas-A と混合され、その一部が鼻孔内部に吸引される。 $t=0.5s$ では吸引流量が少なくなり、鼻の下部に形成される渦によって Gas-A の濃度が比較的高い領域が広がる。隙間がある場合、吸引により鼻あて内部が負圧となるためにおい袋側から Gas-A が流入するだけでなく、吸引開始と同時に隙間からも外気が鼻あて内部に流入する。 δ が大きくなるにつれて、Gas-A が鼻孔に向かい流れている濃度の色が薄くなることから Gas-A の吸引量が減少していると考えられる。

Fig. 6 a ~ c に吸引パターンが S-B の場合の隙間の有無による鼻あて内部の各気体の濃度分布の数値解析結果を示す。なお、 $t=0.8s$ の結果を示しており、この時間は吸引流量の時間変化がほとんど無い状態である。ここでは割愛するが、S-B は初期の吸引パターンは S-A とほぼ同様に急激に内部流れの変化が生じる。 $t=0.8s$ の吸引流量の変化が少ない時間帯では流動パターンはほとんど変化せず定常的な流れとな

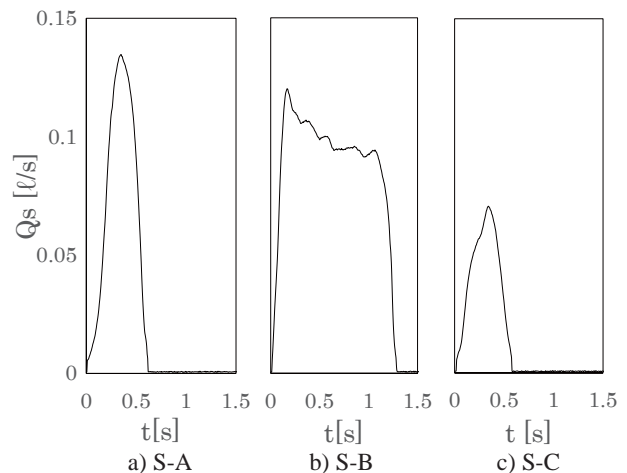


Figure 4 Characteristic suction flow rate in nasal

る。 δ が 0.5mm の場合、隙間から流入する Gas-C は鼻の上部において $\delta = 1.0\text{mm}$ に比べて広い領域で濃度が濃くなっているこれは。これは 0.5mm の方がの隙間の面積が狭いことから流速が増すことにより、より広い範囲に Gas-C が流入しているためであると考えられる。いずれにしても、隙間が存在することにより、鼻孔から吸引されている Gas-A の濃度は低くなると考えられる。

Fig. 7 a ~ c に鼻孔出口における各気体の体積濃度率 ϕ の時間履歴の数値解析結果を示している。なお、横軸は無次元時間 t/T_s 、 ϕ の添え字は気体の種類を示している。i) の S-A の場合、 $\delta = 0.0\text{mm}$ のとき t/T_s が約 0.2 から Gas-A が鼻孔出口で検出され、 t/T_s が約 0.3 で Gas-A の体積濃度率 ϕ_A は約 0.5 であった。しかし、吸引終了時の ϕ_A は約 0.55 であり、濃度率

はほとんど変化することはない、Gas-A の総吸引量 V_{sA} は約 14ml であった。これは時間の経過に伴い吸引量は減少するものの、Gas-B に対する A の混合割合が一定になるためであり、また、パイプと鼻の位置にも関係しているものと考えられる。 δ が 0.5mm の場合、Gas-A を吸引し始める時間は遅くなるが、鼻あて外からの気体 Gas-C の鼻孔への流入はほとんど無く、Gas-B の吸引量が増加する。この場合の吸引終了時の ϕ_A は約 0.3、Gas-A の総吸引量 V_{sA} は約 2ml であった。隙間 δ が 1.0mm になると、Gas-B の吸引のみとなり、Gas-A はほぼ零となる結果を得た。これは隙間の面積が大きくなるために Gas-C の鼻あて内部の流入が増加するものの、S-A の吸引量と吸引時間の関係から Gas-B を吸引することだけになってしまうことによるものと考えられる。このことは自然吸引において鼻

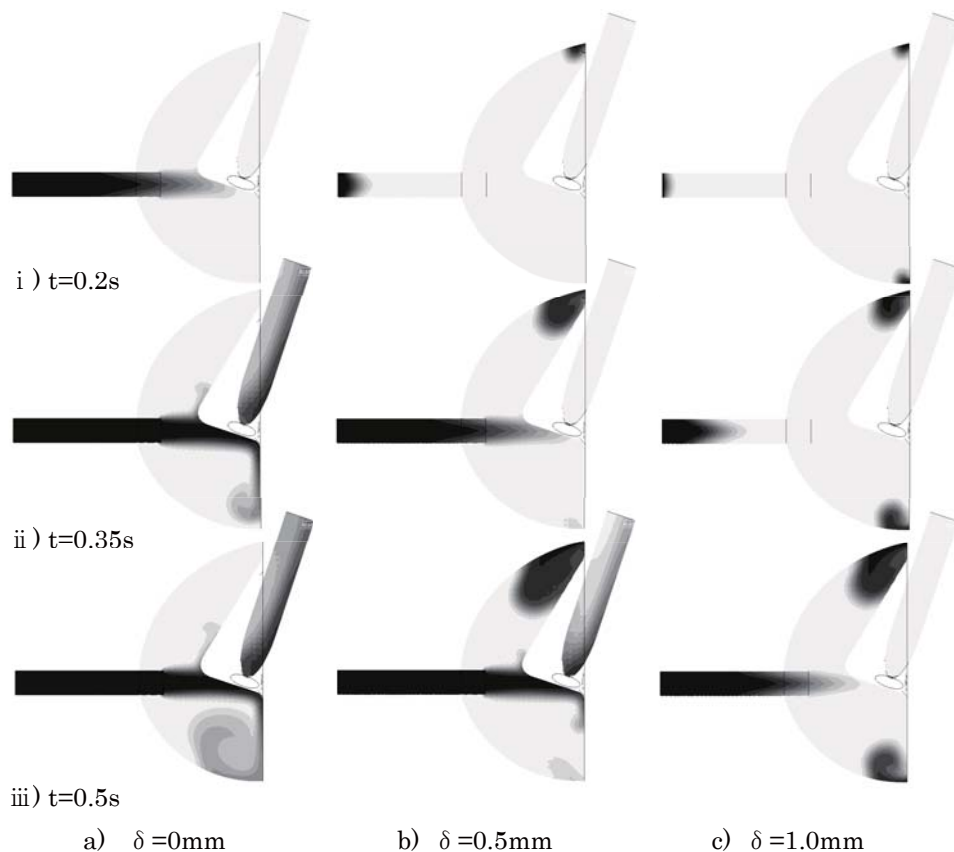


Figure 5 Volumetric density of Gas-A and C in mask by S-A

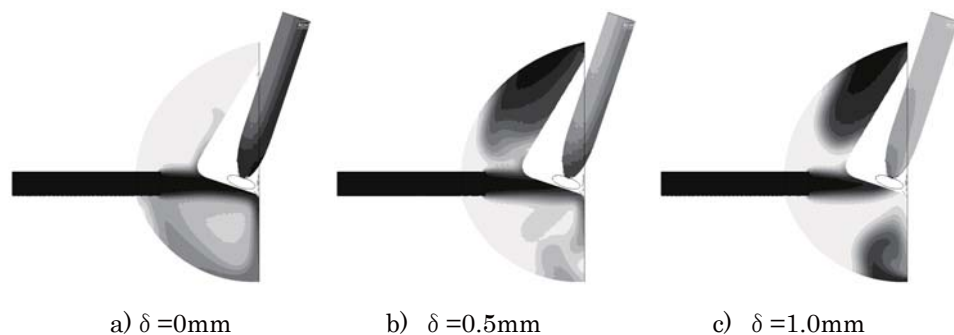


Figure 6 Volumetric density of Gas-A and C in mask by S-B (t=0.8s)

あてと顔の表面の隙間が大きい場合、S-Aのような吸引パターンでは、全くにおい袋の気体を吸引することができないことを意味している。

ii) のS-Bで隙間 δ が0.0mmの場合、 $t/T_s=0.1$ からGas-Aの吸引が始まり、吸引終了時の ϕ_A は約0.65、Gas-Aの総吸引量 V_{sA} は約57mlでS-Aよりも多い結果を得た。また、 $\delta=0.5\text{mm}$ の場合、Gas-B以外の吸引が始まるのは $t/T_s=0.2$ 以降で、 $t/T_s=0.5$ から鼻あて外部からの気体Gas-Cが吸引され始める。S-Aと同様に、隙間があることによってGas-Bの吸引量が増え、吸引終了時の ϕ_A は約0.35、 V_{sA} は約26mlに減少し、Gas-Cの吸引量 V_{sC} は約3mlであった。さらに $\delta=1.0$ では $t/T_s=0.4$ からGas-AとCが同時に吸引され、 ϕ_C が約0.35、 ϕ_A は約0.15となり、 V_{sA} は約7mlに減少し、 V_{sC} は約10mlに増加する。ここでは詳細は割愛するが、S-Cの吸引流量が少なく δ が0mmの場合、 V_{sA} は3mlと最も少なかったが、 ϕ_A は約0.5とS-Aの場合とほとんど同じであった。また、実際におい測定において、鼻あてを顔の表面に密着させてから吸引するまでの間に、鼻あて内部のGas-Bは顔の表面の温度によって自然対流し、顔表面のにおい成分が含まれることが予想される。このことから、鼻あてを密着させて吸引を行う場合、なるべく早く吸引することが望ましいと考えられる。

以上のことから、自然吸引による吸引方法の場合、鼻あてを顔表面に密着させた吸引が適切であるといえる。しかし、実際に三点比較式臭袋法を行う場合、鼻あてを完全に顔に密着させて吸引することは困難で、鼻あて内部が吸引により負圧となるため鼻あてが

変形し、鼻あて上部の鼻の付け根のところから外気が流入してしまう。また、自然吸引では吸引初期の段階においてパイプ内部、鼻あて、鼻孔内部の気体を吸引するため、におい成分の含まれている気体を吸引するまでの時間がかかる。この問題を克服するためには、自然吸引するのではなく、鼻あてと顔表面に僅かな隙間を設け、におい袋を押さえつけてパイプ部とにおい袋内部の気体を隙間から排出させた後に吸引することが適切であると考えられる。

5. 結論

三点比較式臭袋法を想定した吸引方法の差異が、鼻孔におけるにおい成分を含む気体の吸引濃度に及ぼす影響について検討を行い、以下の結論を得た。

- ・被験者により吸引方法には個人差があるが、3種類の吸引パターンに大別できる。
- ・鼻あてを密着させて吸引した場合、鼻あて内部の気体とにおい成分を含む気体の混合気を吸引し、時間が経過しても気体の濃度率はほとんど同じである。
- ・鼻あてと顔表面の間に隙間がある場合、隙間から外気が流入するため、におい成分を含む気体の吸引量は減少する。また、呼吸量が多い場合、隙間が大きいほど鼻あて外の気体の吸引量が増加する。
- ・におい成分を含む気体を高い濃度で長い時間吸引するためには、隙間を設けて強制的ににおい袋から気体を排出させた後に、吸引を開始することが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 岩崎好陽：新訂臭気の嗅覚測定法 三点比較式臭袋法測定マニュアル、においかおり環境協会、2005

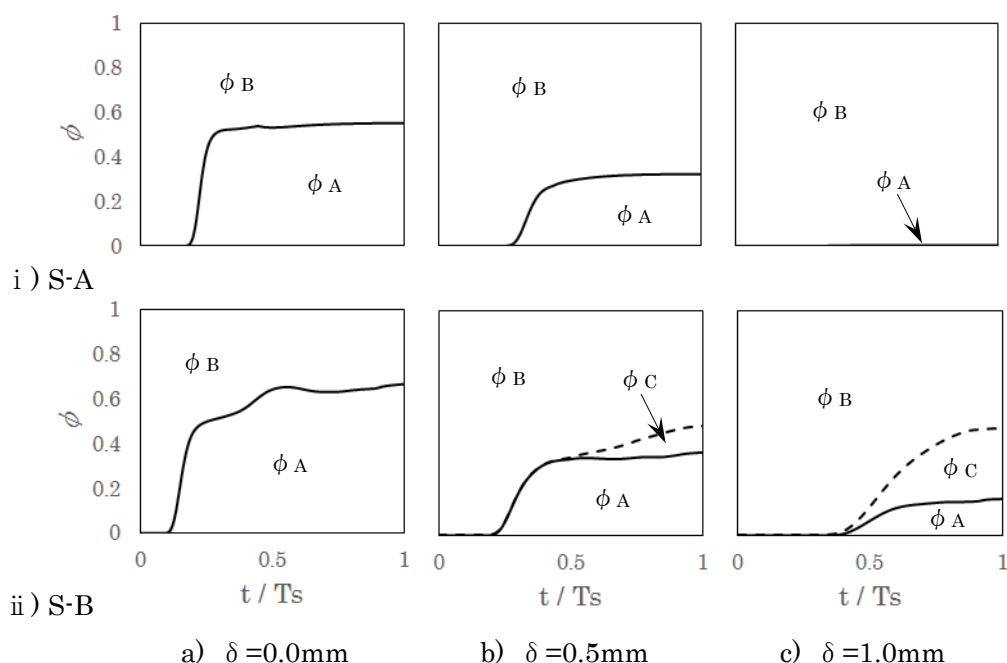


Figure 7 Volumetric density in nasal output

濃度をパラメータとしたアロマ精油のかおり評価特性
(その1) 三点比較式臭袋法による閾値測定と濃度－評価関係に関する検討
Relationship between Concentration and Sensory Characteristics of Essential Oils
(Part1) Measurement of Olfactory Threshold and Study on Concentration Properties

○ 竹村 明久 (摂南大学) 中村 昂貴 (摂南大学)

Akihisa TAKEMURA^{*1} Kouki NAKAMURA^{*1}

^{*1} Setsunan University

In spite of good aroma, it might be very uncomfortable on being exposed to large concentration. "Harm from aroma" has been popular in recent years. Therefore, firstly three essential oils; "lavender", "orange sweet" and "frankincense" were selected, and measured olfactory thresholds. Secondly, three oils were evaluated intensity, hedonics and acceptability by sixty subjects in five concentration conditions. "Orange sweet" oil was high hedonics even though large concentration. "Lavender" and "frankincense" were almost same tendency. Consequently, it was supposed that evaluation of essential oils were larger effected by subjects' preferences than that of concrete odor.

1. はじめに

生活環境における悪臭の研究が進み、日本建築学会の室内臭気の規準¹⁾が作成されるなど、悪臭対策が進んできた反面、アロマセラピーや芳香剤など、芳香に関する詳細な香り評価特性に関する検討のうち、香りの種類と心理的作用や生理的作用を把握する例は数多くあったものの、濃度について系統立てて整理して心理評価特性を明らかにすることは、これまで十分にされてこなかった。一方で、近年、柔軟剤の香りに対する他者の評価として“香害”という語が造られて一般的用語となりつつあるように、生活空間における芳香の利用が、利用者以外への不快感をもたらす事例が多く世間で報じられるようになり、芳香の適切な濃度での活用が強く求められる現状にあると言える。

そこで、本研究では、濃度によって芳香にも悪臭にもなる可能性がある例として、アロマセラピーでよく利用される精油(以下、アロマ精油)を取り上げ、濃度をパラメータとした香りの心理評価特性の把握を基に、快適性から見た適切な濃度の提案を目標とする。本報では、アロマ精油の閾値測定実験と心理評価実験の結果について報告する。

2. アロマ精油の閾値測定

香りは多種多様な化学物質の混合物を含む空気であり、代表物質の体積濃度で濃度表現する場合もあるが、嗅感覚との対応を考える場合には、化学物質ごとに閾値濃度が異なることから、香りの濃度表現方法として使いやすさとはいえない。悪臭防止法で挙げられている指標である臭気濃度は、閾希釈倍数

のことであるが、異なる化学物質間での感覚を基にした濃度比較のしやすさや、換気を用いた希釈による臭気対策をする場合のわかりやすさの点で便利である。そこで、本研究では、公定法の三点比較式臭袋法に準じて、次章で使用する原臭の臭気濃度測定、すなわち各アロマ精油試料の閾値測定を行った。

測定は、2015年9月29日と30日に図1に示す本学実験室で、嗅覚検査(T&T オルファクトメータ)に合格した6名の本学学生パネル(22歳、男性4名、女性2名)に対して実施した。試料の香りには、アロマ環境協会の嗜好アンケートで男女の上位に挙げられたアロマ精油を候補のうち、質が明確に異なると考えられたラベンダー(LV)、オレンジスイート(OR)、フランキンセンス(FR)の3種を選定した。原臭は、10Lの試料採取袋(PET製、近江オドエアーサービス)に活性炭槽を通した無臭空気を充填して、上記のアロマ精油を0.14[mL]注入したのち、十分に揮発させて作成した。原臭の臭気を希釈して、3個1組の3Lのにおい袋(PET製、近江オドエアーサービス)のうちの1個に封入し、残りの2個に無臭空気を充填してパ

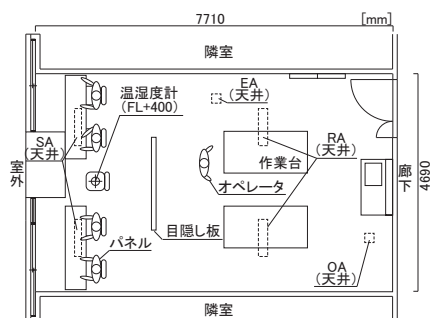


Figure 1 Laboratory

ネルに提示し、有臭袋を回答させた。回答が不正解になるまで、3 倍ずつ有臭袋の希釈倍数を大きくして提示を繰返し、不正解となった時点で測定終了とした。実験時の温度は 23 ～ 30℃、相対湿度は 40 ～ 70% 程度の範囲だった。

測定結果は表 1 の通りである。表 1 の数値は、それぞれ 6 名の 3 種の香りに対する閾値にあたる原臭からの希釈倍数の対数値を表す。閾値算出に対する考え方としては、公定法の算出法に従い、正解した最大の希釈倍数の対数値と不正解となった希釈倍数の対数値の間に閾値が存在するとみなし、両値の平均値とした。6 名の閾値の代表値の選定には、各試料における最大と最小の希釈倍数となったパネル 1 名ずつの閾値をカットし、残りの 4 名の閾値の平均値として、表 1 の最下行に示した。表 1 中の網掛け部は、カットされた 2 名の閾値を示し、OR 条件のパネル 4 は、実験順序上、それ以上の希釈倍数が正解しても平均時にカットされることから実験を打ち切ったことを示す。

LV 条件では、パネル 1 のみ閾値が高い、すなわち希釈倍数が小さい時点で不正解となったが、他のパネル間のばらつきは非常に小さかった。OR 条件では、前述のパネル 4 がやや閾値が低い傾向にあったが、個人間のばらつきはやや小さい傾向にあった。FR 条件では、閾値の最も低いパネル 3 と最も高いパネル 1 とが約 4.5 の差であり、臭気濃度換算で約 30000 倍の差があった。LV、OR 条件と比較しても個人間のばらつきは大きい傾向にあった。なお、パネル 1 は全条件で閾値が 6 名のうち最も高かった。

以上の検討から、原臭の臭気濃度は表 2 に示す値であることが算出された。LV と OR 条件の原臭は同程度の臭気濃度だったが、FR 条件はわずかに低い臭気濃度だった。

3. 心理評価実験概要

2 章で濃度測定を行った LV、OR、FR の 3 条件の香り試料の原臭を基に、表 3 に示す 5 段階の濃度になるよう、10L 試料採取袋に無臭空気適宜希釈して、計 15 条件の提示試料を作成した。最大濃度を原臭（希釈倍数 1）に設定し、10 倍または 100 倍系列の希釈を行って、最低の濃度が臭気濃度約 10 として、においを認知できる程度になるようにした。実験は、2015 年 10 月 6 日から 27 日に本学実験室で、60 名の本学学生パネル（平均 21.2 歳、男性 46 名、女性 14 名）に対して実施した。嗅覚疲労を防ぐため、15 条件の試料を 1.5 分程度の間隔をあけてラテン方格に基づき作成した提示順で評価させた。評価項目は、図 2 に示す 3 項目として、香りの強さ評価には環境省の 6

段階尺度、快・不快評価には環境省の 9 段階尺度、許容の可否の評価は強制二者択一方式とした。本検討は、本学医療研究倫理審査委員会で承認を得ており、被験者には、適切な謝礼金を支払った。

4. 臭気濃度と香りの強さとの関係

図 3 に臭気濃度と香りの強さ評価との関係を示す。横軸は臭気濃度、縦軸は香りの強さを示し、円の面積で回答数を、プロットで濃度ごとの香りの強さ評価の平均値を示す。比較のために、点線分でコンクリートの臭気濃度と臭気強度との関係²⁾について併記した。ただし、コンクリートの検討事例では、用いた強さの尺度が本研究とは異なり、「やっと感知できる」が「弱い」、「何のにおいであるかわかる弱い」が「らくに感知できる」、「楽に感知できる」が「若干強い」であった。

図より、3 条件の香り試料とも、臭気濃度が高いほど香りの強さ評価も高い傾向にある。臭気濃度の対数に対して、香りの強さ評価はほぼ線形関係にあるとも言え、芳香を対象とした場合にも Weber-Fechner 則が成立していることが見て取れる。3 種の香り条件

Table 1 Logarithmic value of dilution factor of essential oil

	LV	OR	FR
panel 1	2.74	4.74	3.74
panel 2	6.24	6.24	4.74
panel 3	6.24	5.74	8.24
panel 4	6.24	>7.0	5.24
panel 5	6.24	6.74	7.74
panel 6	5.74	6.24	5.74
Trimmed Mean	6.12	6.24	5.87

*Shaded data means trimmed data.

Table 2 Threshold value of essential oil

	LV	OR	FR
Odor concentration	1.3×10^6	1.7×10^6	7.3×10^5

Table 3 Concentration of sample

	Dilution ratio from original smell				
	10^5	10^4	10^3	10^2	1
LV	1.3×10	1.3×10^2	1.3×10^3	1.3×10^4	1.3×10^6
OR	1.7×10	1.7×10^2	1.7×10^3	1.7×10^4	1.7×10^6
FR	7.3	7.3×10	7.3×10^2	7.3×10^3	7.3×10^5

1. Intensity	2. Hedonics
Overpowering (強烈なおい)	Extremely comfortable (極端に快)
Strong (強いにおい)	Very comfortable (非常に快)
Distinct (楽に感知できるにおい)	Comfortable (快)
Identifiable (何のにおいであるかわかる弱いにおい)	Slightly comfortable (やや快)
Threshold (やっと感知できるにおい)	Neutral (快でも不快でもない)
No odor (無臭)	Slightly uncomfortable (やや不快)
3. Acceptability	Uncomfortable (不快)
Acceptable (受け入れられる)	Very uncomfortable (非常に不快)
Unacceptable (受け入れられない)	Extremely uncomfortable (極端に不快)

Figure 2 Rating scale

の勾配を比較すると、LV、FR 条件が同程度で、OR 条件が小さい。LV、FR 条件は、併記したコンクリートの勾配に近い。LV 条件には多分に、FR 条件には幾分か刺激臭が含まれることが、この傾向の差の要因ではないかと推測される。また、OR 条件では臭気濃度 10 で約半数の 29 名が、LV、FR 条件では約 2/3 の約 40 名が「無臭」と回答しており、およそ半数のパネルがにおいを感じられなくなる濃度が閾値とされていることを鑑みると、臭気濃度表記上では閾値の 10 倍の濃度であってもほぼ嗅覚閾値程度の低い強さ感覚であったことがわかる。コンクリートの場合には、閾値から臭気濃度 10 までの範囲でも臭気強度の増分は大きい、芳香評価の場合には、低濃度域の香りの強さ評価は非常に感覚が鈍い、すなわち図中の線分の傾きが小さい可能性がある。

図 4 に、臭気濃度と快・不快評価との関係を示す。横軸は臭気濃度、縦軸は快・不快度を示し、円の面積で回答数を、プロットで濃度ごとの快・不快度の平均値を示す。また、点線分と三角のプロットで、コンクリートの臭気濃度と快・不快度との関係²⁾について併記した。ただし、コンクリートの検討事例では、「非常に快/不快」を「かなり快/不快」として評価させた点が異なる。

図より、OR 条件は 3 条件中最も高い評価で推移しており、いずれの臭気濃度でも平均値が「快でも不快でもない」を下回ることがなかった。LV、FR 条件は同程度の快・不快度の範囲であった。臭気濃度との関係では、いずれも高濃度では不快側に評価が寄る傾向が見られたが、LV 条件では低濃度域から臭気濃度 1000 までは「快でも不快でもない」の辺りでほぼ横ばいであり、臭気濃度 1000 以上で不快側に寄るのに対して、OR 条件は大きく、FR 条件ではわずかに、低濃度域から臭気濃度が高くなるほど快側に評価が一度上昇したのちに不快側に寄る「へ」の字型の傾向を示した。OR 条件では、臭気濃度 1.7×10^6 で「やや快」や「快」の評価と「やや不快」の評価

度数が多く、「快でも不快でもない」が少ない 2 つのピークを持つ分布となっており、パネルの嗜好が影響したと推測される。同様の傾向は、LV 条件の臭気濃度 1.3×10^4 でも見られるが、平均値が同程度の FR 条件の臭気濃度 7.3×10^3 では見られない。高濃度では、LV、FR 条件の評価度数分布は不快側に大きく偏っており、高濃度の OR 条件や中濃度の FR 条件における評価の二極化は、芳香評価の特性の 1 つであると考えられる。また、OR 条件がさらに高濃度曝露された場合には、LV 条件と同様に不快側に度数分布が偏る可能性も考えられる。ここより推測されることは、パネルごとの快と感じる濃度範囲の差異が極大化する濃度以上の場合には、芳香であっても悪臭と同様の不快側への評価の偏りと平均値の低下が見込まれるということである。

コンクリートの評価例と比較すると、不快側に大きく寄る臭気濃度閾がコンクリートで臭気濃度 3 程度であるのに対して、LV 条件で臭気濃度 1000、OR 条件で 10000、FR 条件で 100 程度と非常に高かった。また、臭気濃度上昇に対して低下する快・不快度の割合は、コンクリートよりも緩やかであった。

図 5 に臭気濃度と、許容の可否評価で否と回答した人数を全パネル数で除した非容認率との関係を示

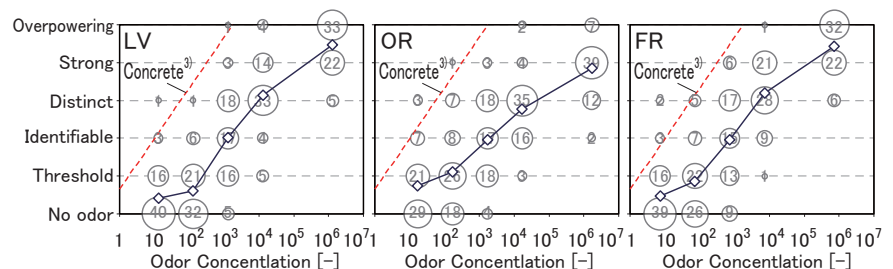


Figure 3 Relationship between odor concentration and intensity

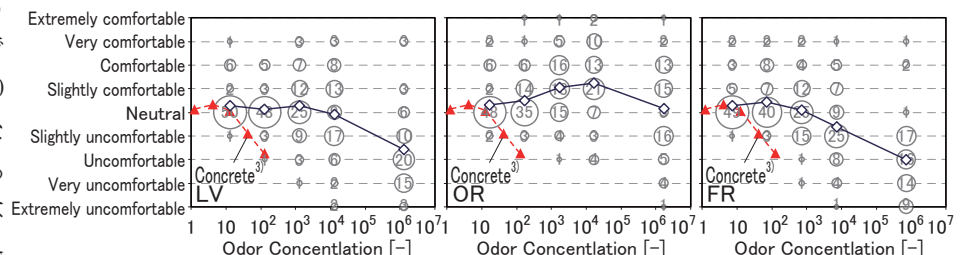


Figure 4 Relationship between odor concentration and hedonics

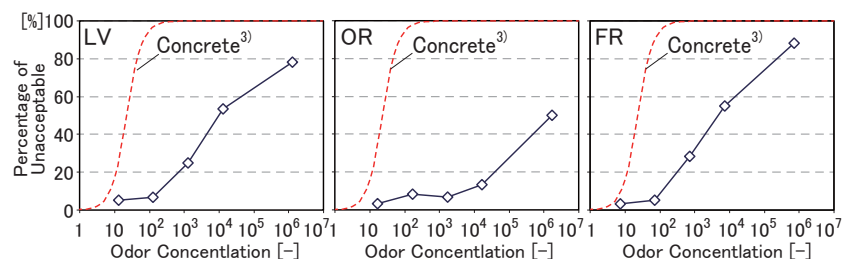


Figure 5 Relationship between odor concentration and acceptability

す。横軸が臭気濃度、縦軸が非容認率、点線でコンクリートの臭気濃度と非容認率との関係²⁾について併記した。

図より、臭気濃度が高いほど非容認率も高い傾向にあることがわかるが、OR 条件は臭気濃度

1.7×10^6 でも非容認率 50% 程度と非常に許容される傾向が見られた。OR 条件に対するパネルの嗜好の高さが一因と考えられる。コンクリートの評価例と比較すると、コンクリートでは臭気濃度 10 から 100 で非容認率が大幅に上昇する傾向にあり、コンクリートのおいが許容できなくなる濃度帯が非常に狭い範囲で存在することを予想させる

が、それに対して 3 条件では、臭気濃度に対して比較的緩やかに非容認率が上昇する傾向にあり、濃度が高いほど許容できないパネルは一定割合で徐々に増える傾向にあった。この傾向も、臭気濃度と快・不快評価との関係で述べた個人の嗜好の差異、すなわち許容できなくなる濃度帯のばらつきが影響していると推測される。

また、非容認率 20% は、日本建築学会の臭気規準¹⁾が定める空間の臭気の許容限界であるが、コンクリートの許容限界の臭気濃度 10 に対して、LV 条件で臭気濃度約 1000、OR 条件で約 30000、FR 条件で約 300 と非常に高い。

5. 評価項目間の関係

図 6 に香りの強さ評価と快・不快評価との関係を示す。横軸は香りの強さ、縦軸は快・不快度で、60 名による濃度 5 条件に対する評価の和の 300 データを用いて示した。円の面積で評価度数を示し、図中の r は相関係数である。

図より、LV、FR 条件は強さが高いほど不快と評価されることがわかる。相関係数も負のやや大きな値であった。OR 条件は、「無臭」から「楽に感知できる」の範囲では正の相関で、「強い」では快側と不快側に評価が二分される傾向にあった。LV 条件でも、「楽に感知できる」と「強い」の評価間で快・不快度の分布が大きく不快側に偏る傾向が見られ、この 2 条件では「楽に感知できる」程度以下の空間での使用が、快・不快度評価の面から見ると望ましいと考えられる。FR 条件は、「何のにおいであるかがわかる弱い」より強

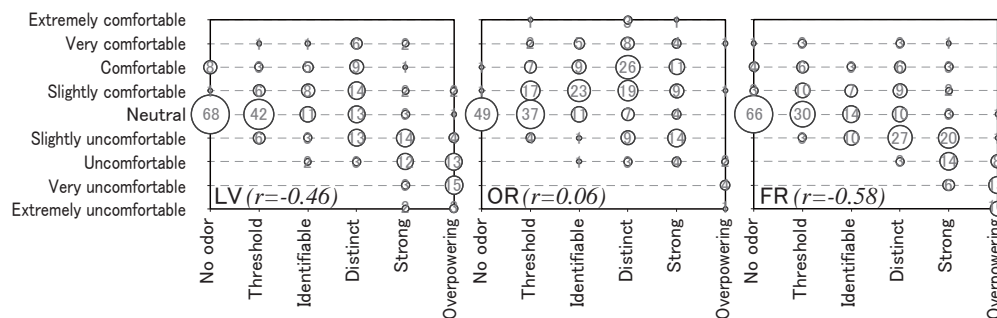


Figure 6 Relationship between intensity and hedonics

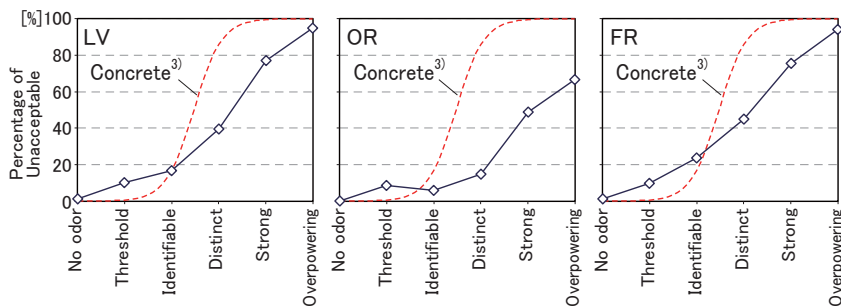


Figure 7 Relationship between intensity and acceptability

いと不快側評価が多くなるため、使用する場合の目安の強さはこの程度に留めるとよいと考えられる。

図 7 に、香りの強さと非容認率との関係を示す。横軸は香りの強さ、縦軸は非容認率を示す。点線でコンクリートの臭気濃度と非容認率との関係²⁾について併記した。

図より、3 条件とも右上がりの傾向にあり、LV、FR 条件は比較的近い傾向にあることがわかる。コンクリートとも比較的近い傾向にあるが、コンクリートよりも非容認率の上昇はやや緩やかである。この理由も、前述の嗜好の個人差に因ると推測される。OR 条件は、他の 2 条件よりも上昇の傾きは緩やかであり、「楽に感知できる」でも非容認率は 20% 以下であった。非容認率 20% の許容限界は、LV、FR 条件はコンクリートと同程度の強さ評価であるが、OR 条件は「楽に感知できる」程度で大幅に高い傾向にあった。

6. おわりに

本報では、アロマ精油試料の濃度をパラメータとした心理評価傾向、および評価項目間の関係について明らかにした。今後は、他の試料に対する検討や、近似モデルを用いた評価傾向の予測、芳香試料ならではの傾向の把握を進めていきたい。

本研究の一部は、日本学術振興会平成 27 年度科学研究費（若手研究 (B) 26820250）による。

参考文献

- 1) 室内の臭気に関する対策・維持管理規準・同解説, 日本建築学会環境基準 A1JES-A003-2005, 2005
- 2) 竹村明久, 山中俊夫, 甲谷寿史: 建築材料から発生するにおいの主観評価に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 630 号, pp. 999-1004, 2008. 8

空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
 オフィス打ち合わせスペースへの香りの導入による影響について
 Effects on Fragrance Inducing for Meeting Space in Office Building

○世 利 公 一（竹中工務店） 中 川 浩 明（竹中工務店）
 正 木 保 弘（竹中工務店） 廣 江 誠 人（竹中工務店）
 村 井 絢 香（竹中工務店） 天 野 健 太 郎（竹中工務店）

Kouichi SERI *¹ Hiroaki NAKAGAWA*¹ Yasuhiro MASAKI*¹

Masato HIROE*¹ Ayaka MURAI*¹ Kentarou AMANO*¹

*¹ TAKENAKA Corporation

Normally, the researches on fragrance in office buildings are concentrated on the work place to study its effects on individual intellectual work. However, the purpose of this research is to evaluate the odor-inducing effects in meeting space, based on questionnaire surveys which were carried out on workers in real meeting conditions without prior notice. Also, a measurement was taken to see the relationship between the odor intensity and its impact on human intellectual productivity.

はじめに

近年、オフィスにおける快適性、知的生産性、創造性向上を目指した室内環境制御方法に関する様々な研究が行われている。香りは、人間の自律神経系への働きかけを行い、リラックス、リフレッシュ、覚醒効果などの心理面、生理面に影響するといわれ、1980年代から香り空調が導入された事例もあり、その効果について報告されている。¹⁾ これまでの研究では、香りと作業効率（計算など）の関係を対象とした研究²⁾ などが多く、実際のオフィス空間での打合せ等のコミュニケーション行動を対象とした研究は少ない。本研究では、オフィス内のコミュニケーション活動が行われる打合せスペースを対象に、香りを導入した場合のアンケート調査、香りの強度が人の心理面に与える影響について基礎的な調査及び分析を行ったので報告を行う。

1. 実験概要

1.1 実験場所

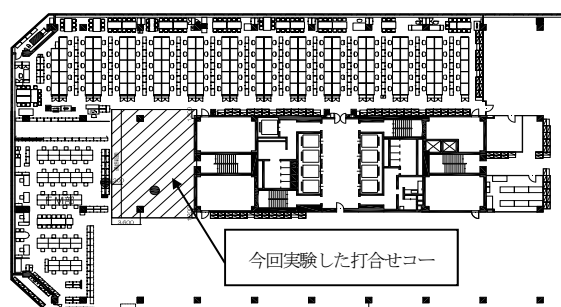


Fig.1 Plan in the target building



Fig.2 Image of the meeting space

Table. 1 Abstract for the space

面 積	約 163.2 m ² (香り放出範囲)
天井高さ	2,500mm
換気量	1066 m ³ /h

アンケート調査はMビル6階打合せコーナーにて実施した。打合せコーナーは執務ゾーンとの間仕切りは無く、執務スペース間とのバッファスペースとなっており、日々、コミュニケーション、会議が行われる場となっている。(Fig.1, Fig.2, Table.1)

1.2 実験方法

香り発生装置は、業務用アロマディフューザーを使用し、6種類の香りを打合せ中に放出した。6種類の香りは9月中旬～10月末にかけて、1週間毎に精油の入れ替えを行い、打合せ参加者に対しアンケートを実施した。香りの種類は、リフレッシュ効果が謳われている柑橘系のグレープフルーツ、リラックス効果が謳われているラベンダー、木質系のヒノキ、およびハーブ系のローズマリー、ティーツリー、覚醒効果が謳われているミントを選定した。香り放出時は、卓上小型扇風機により、香りが打ち合わせスペース全体に拡散するよう配慮した。実験

条件を Table.2、実験に使用したアロマディフューザー配置、打合せスペースの空調吹き出しを Fig.3 に示す。

Table. 2 Abstract on questionnaire survey

実測期間	2015 年 9 月 9 日～10 月 30 日
実験使用機器	業務用アロマディフューザー
被験者概要	<ul style="list-style-type: none"> ・総数 147 名 ・男性／女性の比率 104／43 ・年齢構成 20 代：42 名、30 代：31 名 40 代：50 名、50 代：24 名
香り（アロマ）の種類	グレープフルーツ、ローズマリー、ティーツリー、ヒノキ、ラベンダー、ペパーミントの 6 種類の精油
香りの強度	業務用ディフューザー 10 秒噴霧+20 秒停止
攪拌装置	卓上小型扇風機を使用

2. アンケート結果と考察

2.1 嗜好性

香りの嗜好性に対するアンケート結果を Fig.4 に示す。ヒノキ、ラベンダー、ミントで 60%を超える人が「とても好きな香り」「好きな香り」という回答が得られた。ティーツリーに関しては今回、嗜好性が低い結果となった。Fig.5, Fig.6 は、各香りの種類に対して、“とても好きな香り”を 4 に、“好きな香り”を 3 に、“何も思わない”を 2 に、“嫌いな香り”を 1 に、“とても嫌いな香り”を 0 としして採点を行い、その結果を人数平均にした男女別の嗜好性示すチャートグラフである。女性でヒノキが 0 となっているが、これはヒノキの香り放出時の打合せ時に女性の出席者が居なかったためである。女性の方がリフレッシュ効果のあるグレープフルーツ、リラックス効果のあるローズマリー、ラベンダーが好まれる傾向が若干見られるものの、今回の実験では顕著な違いは見られなかった。

2.2 香りに対する身体的感覚

打合せ中に嗅いだ香りに対する身体的感覚をまとめたグラフを Fig.7 に示す。人によって受け取り方が異なることも考えられるが、アンケート結果からは無臭時と比べて、全ての香りで「リラックスする」「リフレッシュする」という回答結果が得られた。特にローズマリー、ラベンダーについては半数近くの人がリラックスした、ミント、グレープフルーツについては、リフレッシュしたという結果が得られた。

Fig.8 に男女別、Fig.9 に年齢別での香りに対する身体的感覚のアンケート結果を示す。男女別では今回顕著な違いは見られなかった。年齢別では 50 歳代で「特に何も思わない」という意見が多く、20 歳代で「リラックス、リフレッシュする」「不快な気分になる」など、様々な回答結果となった。

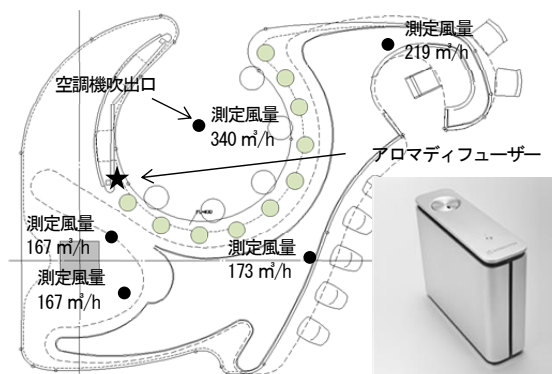


Fig.3 Detailed plan of the meeting space

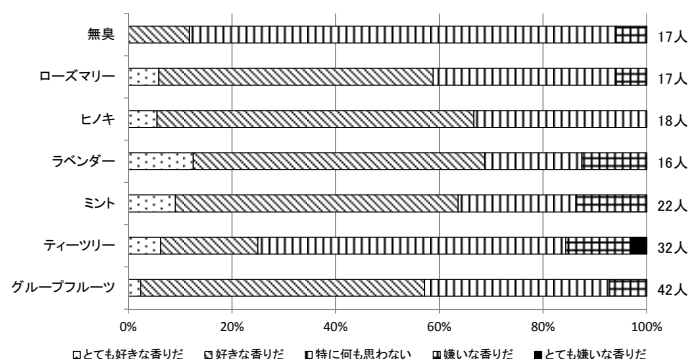


Fig.4 Impression on emitted fragrance

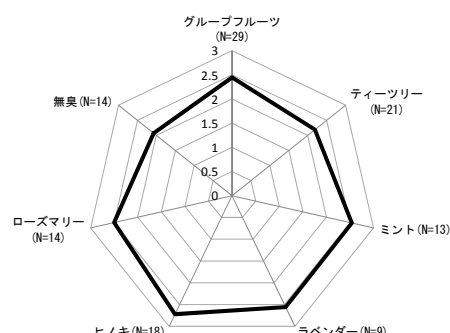


Fig.5 Impression on particular emitted fragrance (for male)

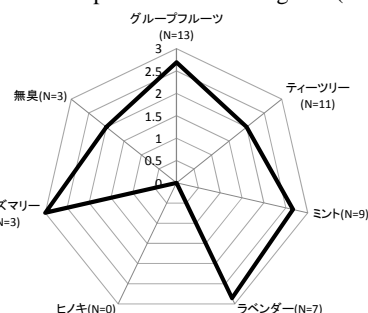


Fig.6 Impression on particular emitted fragrance (for female)

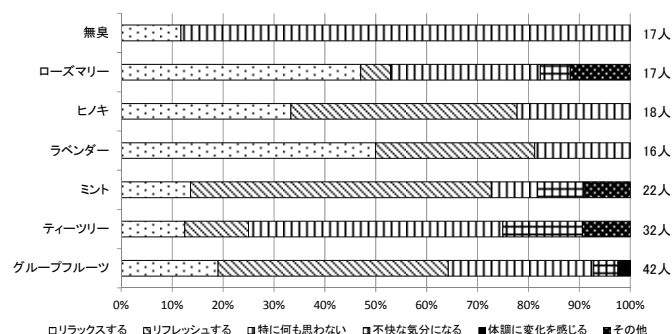


Fig.7 Effects on the emitted fragrance

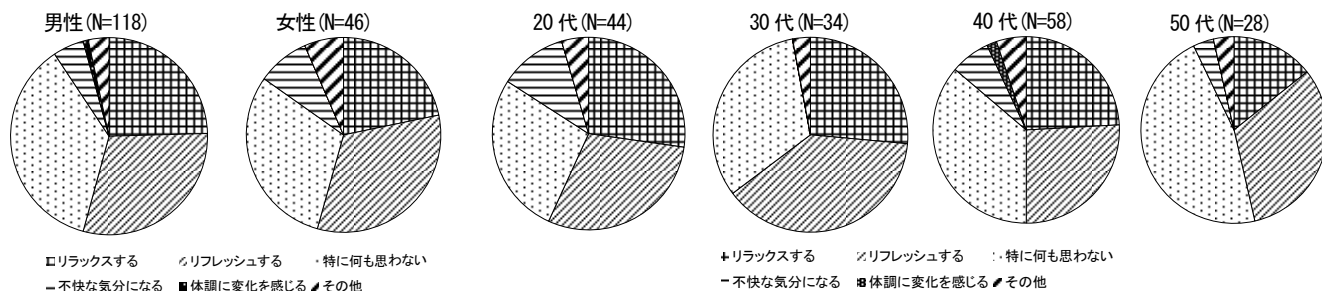


Fig. 8 Effects of the emitted fragrance (gender)

2.3 会議全体に対する印象

香りを放出した会議全体に対する印象を Fig.10 に示す。アンケート解答者全員を対象に、香りごとに、「会議に対する印象」に関する6問に対して、ポジティブな回答が得られたかどうかの関係性を示すグラフとなっている。縦軸はポジティブ回答を1点、ネガティブ回答を0点として、平均をとった数値である。今回の実験では、無臭時と香り放出時で顕著な差は見られなかったが、香りを使用することにより、会議全体に対する印象は良いことが分かった。香りの種類によって回答は様々であることが読みとれ、男女別、年齢別の嗜好性によるものと思われる。ラベンダーに関しては全項目で高得点が出ている傾向が読み取れた。

Fig.9 Effects of the emitted fragrance (age)

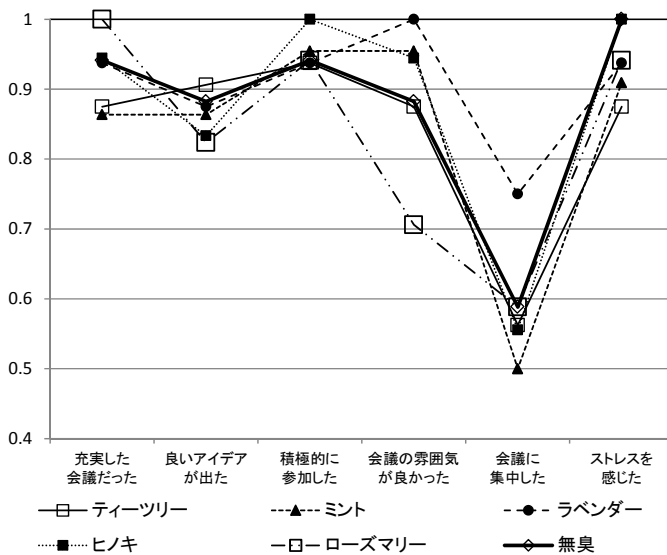


Fig.10 Impression on the meetings (fragrance)

3. 香りの強さの影響について

3.1 実測と臭気強度申告による香り強度分布解析

打合せスペースの平面図を Fig.11 に示す。星点は香り発生点、黒点は香りの測定点を示している。打合せスペースを A～G 区域に分け、ニオイセンサー (Fig.12) による測定と人による臭気強度申告から、今回の空間における香りの強さの分布解析を行った。ニオイセンサーは座席毎に計測を行った。測定した臭気レベル値を Fig.13 に示す。一方、臭気強度申告は座席毎に6人で0～5 (Table.3 参照) の評価を行った。

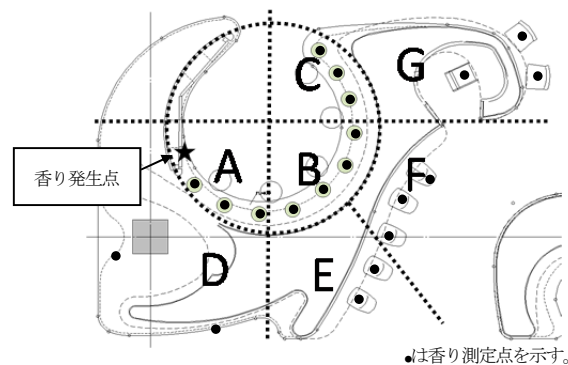


Fig.11 Plan of the measurement condition

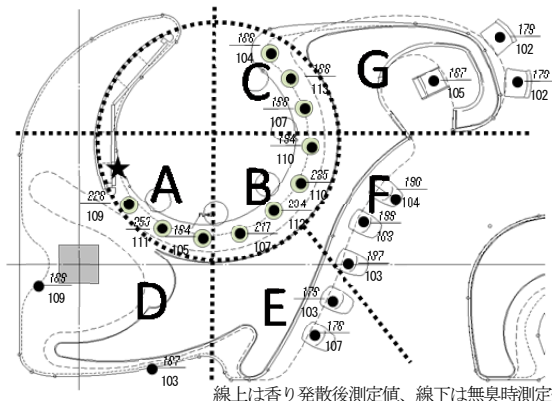


Fig.13 Measurement result of the odor concentration

3.2 打合せコーナーの香り強度分布

A～G 区域の測定結果の平均値と臭気強度申告値の平均値により、各区域の香り強度を定量化した。各区域の平均値をまとめた表を Table.4 に示す。



Fig.12 Detail of the odor concentration meter

項目	内容
メーター	COSMOS
型式	XP-329 III

Table. 3 Questionnaire used in odor concentration measurement

臭気強度	
0	無臭
1	やっと感知できるにおい (検知閾値)
2	何のにおいか分かる弱いにおい (認知閾値)
3	楽に感知できるにおい
4	強いにおい
5	強烈なにおい

Table. 4 Result of the odor concentration measurement

発生した香り：ラベンダー		A区域	B区域	C区域	D区域	E区域	F区域	G区域
測定結果	臭気レベル値(発生後)	225.0	220.0	191.3	188.0	178.5	192.0	181.7
	臭気レベル値(無臭)	108.3	109.8	108.0	106.0	105.0	103.3	103.0
臭気申告結果	臭気強度(平均値)	2.8	3.0	2.3	0.7	0.7	1.0	1.4

A、B 区域は楽に感知できるにおいて、C 区域は何のにおいかわかる弱いにおいて、D～G 区域はやっと感知できるにおいて分類できることがわかった。D～G 区域については、アンケート回答数が少ないこともあり、A～C 区域について、香りの強さが嗜好性、身体的感覚、会議全体に対する印象に与える影響について検証を行う。

3.3 香りの強さの影響についての考察

Fig.14 に A～C 区域の「香りに対する印象」のアンケート結果を示す。C 区域(何のにおいかわかる弱いにおいて)が、嗜好性が良いといえる。臭気レベル値が最も強く、楽ににおいを感知できる A 区域では、嫌いな香りであると回答する人の割合が多くなる傾向がみられた。また、臭気レベル、臭気強度が高い A 区域と B 区域において「特に何も思わない」という被験者の比率も高い。香りの順応効果により、感知能力の低下も考えられる。Fig.15 に、A～C 区域の嗅いだ香りに対する身体的感覚を示したアンケート結果を示す。嗜好性と同様に C 区域でリラックスする、リフレッシュすると回答した比率が大きいことが分かった。A 区域では不快と感じる被験者や B 区域では体調の不良を訴える回答もあった。Fig.16 は A,B,C 区域ごとに、「会議に対する印象」に関する 6 問 (Fig.10) に対して、ポジティブな回答を 1 点、ネガティブな回答を 0 点として採点を行い、その結果を人数平均にしたグラフである。弱いにおいの C 区域で評価が最もよく、臭気強度申告値の高かった B 区域では被験者の会議に対する評価は最も低くなる傾向がみられた。

まとめ

本研究では、オフィス内のコミュニケーション活動が行われる打合せスペースを対象に、香りを導入した場合のアンケート調査、香りの強度が人の心理面に与える影響について基礎的な調査及び分析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 打合せ時に香りを放出した結果、無臭時と比べリラックス、リフレッシュするといった回答比率が多く、会議中の印象も良いことが分かった。
- 2) 香りの種類によって、性別、年齢別で受け取り方が様々であり、嗜好性、会議全体の印象には顕著な差はみられなかった。
- 3) 打合せ時の香りの強さが嗜好性、身体的感覚、会議全体の印象に与える影響について関連性があり、香

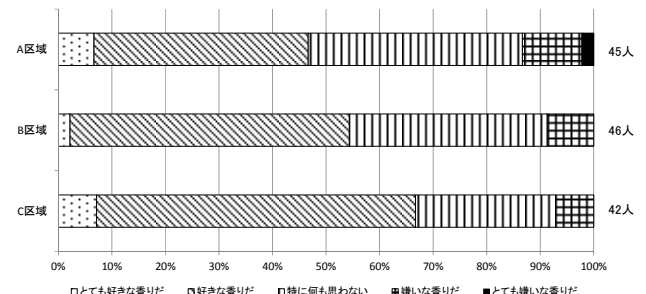


Fig.14 Impression on the fragrance (district)

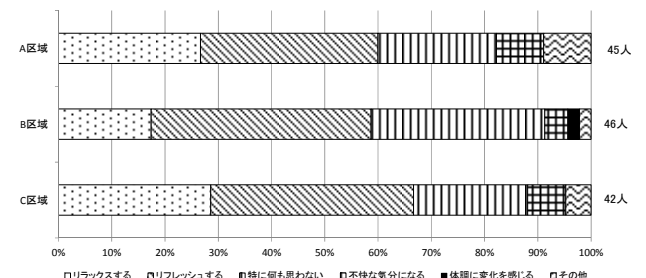


Fig.15 Physical effects of the fragrance (district)

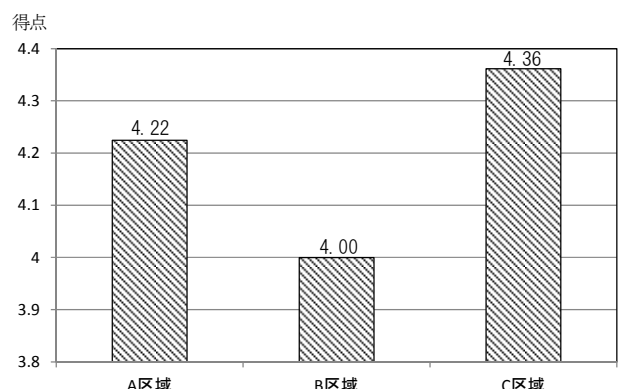


Fig.16 Impression on the meeting (district)

り強度が大きいと逆効果であることがアンケート結果から読み取れた。

今後は、今回実施した実験結果をベースに、オフィスの執務空間やバッファ空間での香り発生と知的生産性との関連性について、検討を行う。

参考文献

- 1) 長谷川俊雄他：KI ビルの居住環境（その1）建築概要とアトリウムの温熱環境、香り環境、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 1991 年 10 月～11 月
- 2) 天野健太郎他：人にやさしい空間 室内空気室が心理・整理に与える影響に関する研究(その1 においが知的作業時および安静時の人に与える影響) 日本建築学会大会学術講演梗概集 2010 年 9 月

消・脱臭剤のノズル噴霧による臭気除去効果に関する基礎的研究
(その 12) 一流体ノズルによる下向き噴霧流における水ミストの粒径分布

Deodorizing Effect of Deodorant Mist Sprayed with a Misting Nozzle
(Part 12) Distribution of Mist Particle in case of One-fluid Nozzle Spraying Downwards

○西田 敏宏 (大阪大学)

山中 俊夫 (大阪大学)

甲谷 寿史 (大阪大学)

桃井 良尚 (大阪大学)

相良 和伸 (大阪大学)

鈴木 克治 (大阪大学)

Toshihiro NISHIDA*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Hisashi KOTANI*¹

Yoshihisa MOMOI*¹ Kazunobu SAGARA*¹ Katsuharu SUZUKI*¹

*¹ Osaka University

This study focuses on prediction of the deodorizing effect for mist sprayed with a nozzle in hospital or elderly nursing homes, where odor is a big issue to keep the indoor air quality good. In the previous study, the analytical model to simulate the behavior of stream sprayed from one-fluid nozzle has already been derived. However, the model is simulated for spraying only one diameter of mist particle. Then, in this paper, it is reported that the distribution of the mist particles with the one-fluid nozzle spraying downwards is measured by the phase doppler anemometer.

1. はじめに

病院などの臭気が発生しやすい施設では、臭気の低減を換気に依存することが多いため、空調負荷が増大する。本研究では、省エネルギーで安価な消・脱臭剤の噴霧による臭気除去法に着目し、効果的な設計手法を確立することを目的とする。既報¹⁾では、現在広く用いられている空円錐型一流体ノズルについて、ミスト流量分布などの測定結果から噴霧流性状の数値解析モデルを構築した。しかしながら、粒径分布の把握が十分になされておらず、単一粒径のみを噴霧するモデルとなっている。そこで本報では、噴霧流中の詳細な粒径分布の測定を行った結果を報告する。

2. 水ミストの粒径分布及び速度分布の測定

2.1 測定概要

ミスト粒子の表面積は、消・脱臭効果や冷却効果に大きく作用するので、物体間の熱移動や物質移動を予測するためには重要なパラメータとなる。そこで、位相ドップラー法 (PDA:Phase Doppler Anemometer) を用いて、Table 1 に示すノズルの詳細な水ミストの粒径・速度分布を測定した。

位相ドップラー法は、既報²⁾でミストの速度分布の測定を行ったレーザードップラー法の原理を応用したものである。PDA ではレーザービームの可干渉性を利用し

て、2本のレーザービームを交差させ、干渉縞 (フリンジ) を形成し、その1点を通る噴霧粒径と1次元方向の流速を同時計測することができる。本実験では、PDA (DANTEC DYNAMICS, FiberPDA System) を用い、送光系には焦点距離 310mm の Flow Explorer 出力装置、受光系には焦点距離 400mm のディテクターを用いた。

また、実験は大阪大学構内の人工気候室で行い、噴霧時における室内相対湿度の極端な上昇を防ぐため、換気回数が約 1.4 ~ 1.5 回/h となる排気量で全外気運転を行った。室内温度を 20℃と設定し、相対湿度は約 20 ~ 30%、室内平均風速はおおよそ 0.03 m/s であった。測定点を Fig. 1、測定機器の配置図を Fig. 2 に示す。各点におけるミストサンプリング数を 1 万個と設定し、Effective Rate は 80%以上を確保する。ただし、噴霧流の端といった、Data Rate が著しく低い設定個数を確保することが困難な点では、サンプリング数を半分にするなどの調整を行った。

Table 1 One-fluid nozzle specification

Manufacture	H.Ikeuchi&Co.,Ltd
Model number	1/4M KB 80063N S303-RW
Spray pattern	Hollow cone
Nozzle hole diameter[mm]	0.22
Fluid pressure[MPa]	0.70
Spray angle[°]	80
Initial mass flow rate of mist[L/hr]	2.00

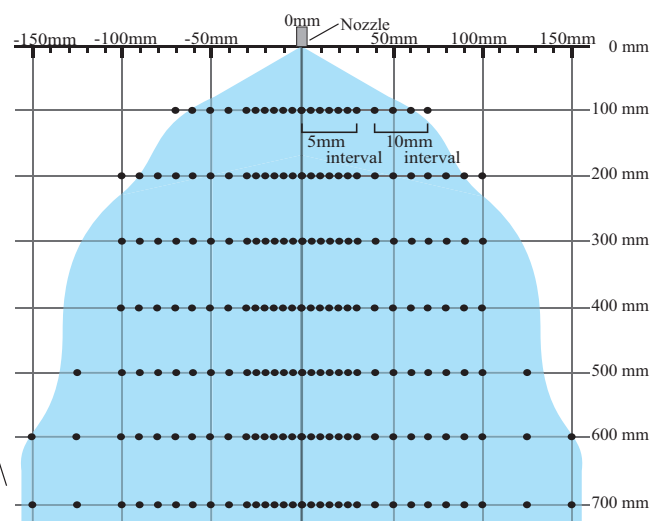
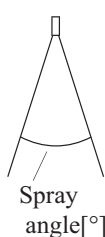


Fig. 1 Measuring point by PDA

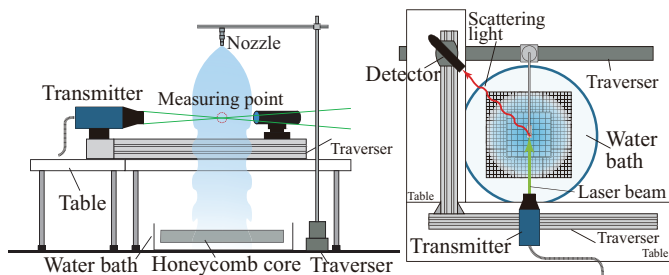


Fig. 2 Layout of instruments for PDA

2.2 下方噴霧時の水ミストの粒径分布

ノズル下 100mm ~ 700mm における水ミストのザウター平均径及び個数平均径の分布を Fig. 3 に示す。ここで、ザウター平均径とは、表面積重みづけ平均した粒子径のことであり、定義式を Fig. 3 中の式 (1) に示す。ノズル下 100mm では 2 種の粒径はほぼ一致しているが、ノズルからの鉛直距離が大きくなるにつれて差が広がり、ザウター平均径の方が大きくなる。これは微細な粒子に比べて粗大な粒子ほど蒸発しにくく、より遠くまで飛散するため、ノズルから遠ざかるにつれて粗大な粒子の割合が大きくなったためであると考えられる。また、ノズル近傍では噴霧流中心部に細かな粒子、外縁部に大きな

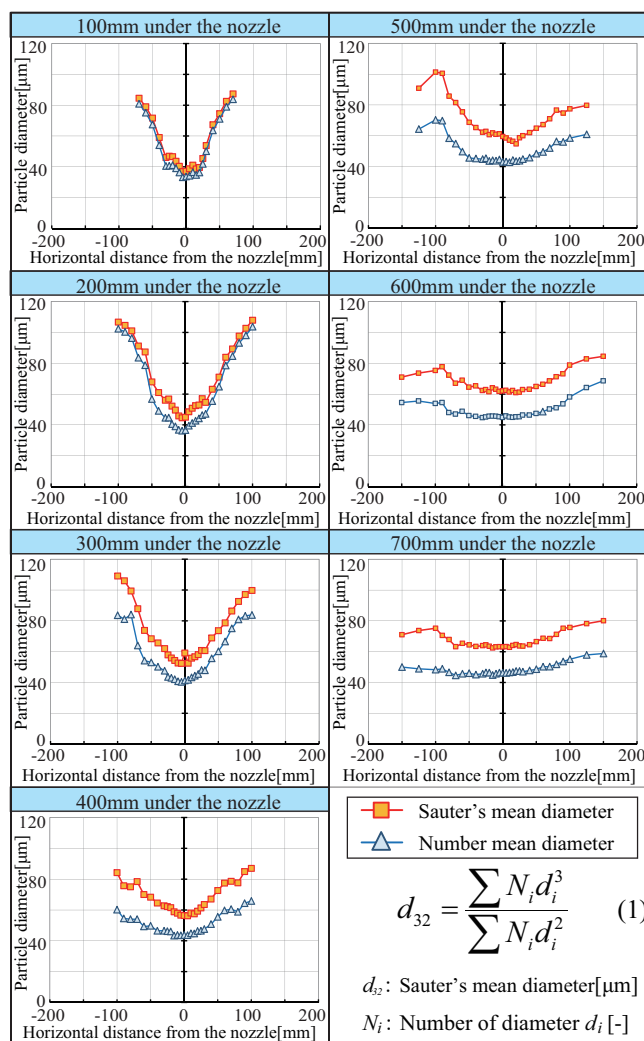


Fig. 3 Distribution of mist particle at each height from the nozzle

粒子が分布しており、質量の大きい粗大な粒子ほどノズルから噴射された直後の速度を保持しつつ、より遠くまで飛散するためであると考えられる。さらに、ノズルから離れるほど中心部と外縁部の粒径の差が小さくなっている。ノズル中心軸上の粒径がノズルから離れるほど大きくなっていることから、粒子が水平方向への広がりを見せ、分布が徐々に均一化されていることが分かる。

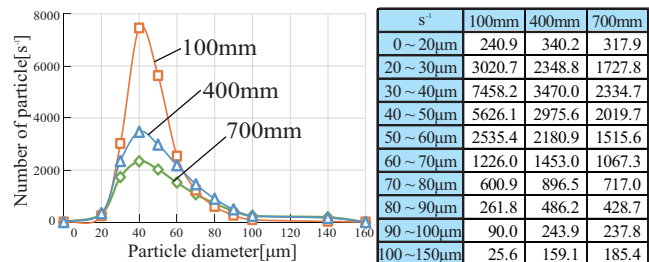


Fig. 4 Particle distribution per second at 100mm, 400mm and 700mm under the nozzle

次に、ノズルからの距離 100mm、400mm、700mm における単位時間当たりの粒子個数の分布を Fig. 4 に示す。いずれの高さでも対数正規分布型の分布を形成し、ノズルから離れるにつれて粒径 30 ~ 50μm の粒子の個数が大幅に減少していることが分かる。原因としては、ミスト総数そのものが減っているため、微細な粒子の蒸発が考えられる。一方で粒径 80μm 以上の粒子に着目すると、ノズルから離れるとともに個数がわずかに増加する傾向が見られる。これは、ミスト粒子同士の衝突などにより粒子が結合している可能性がある。このように、微細な粒子が減り、大きな粒子が増えるために、ザウター平均径の方が個数平均径より大きくなっていくことが分かる。

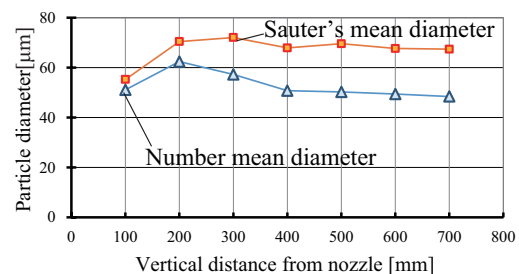


Fig. 5 Average particle diameter at each height

各高さ断面上に存在する全粒子のザウター平均及び個数平均の鉛直変化を Fig. 5 に示す。2 種の平均径は、ノズル下 200mm 以降では単調に減少し、その差が大きくなっていくことが分かる。

2.3 下方噴霧時の水ミストの速度分布

PDA を用いて測定したミスト速度と、既報²⁾で LDV を用いて測定したミスト速度の比較を Fig. 6 に示す。PDA のミスト速度は、ノズル下 100mm では噴霧流の中心部と外縁部で速いが、ノズルから遠ざかるほど徐々に滑らかな曲線へと変化している。空円錐型のノズルであっても、ノズル下 200mm 以降では正規分布に近い分布で速度が広がることが分かる。PDA と LDV のミスト

速度を比較すると、いずれの高さにおいても PDA の方が噴霧流中心付近では速度が速く、外縁部では遅い結果となった。LDV を用いた実験室では、本実験の人工気候室内の平均風速よりも 10 倍近い気流が生じていたため、LDV の測定ではミストが流され、値が平均化されてしまった可能性がある。また、室温に 10℃ほどの差があるなど、室内環境が大きく異なるため、今後は PDA 測定と同環境下で気相速度を測定することにより、噴霧流速の詳細な把握が必要である。

2.4 下方噴霧時の水ミストの流量分布

測定された粒子が完全球体であると仮定し、粒径や測定に要した時間から、測定点を通過したミストの単位時間あたりの流量を求める。各高さにおける流量分布を Fig. 7 に示す。ノズル下 100mm では、中心軸上よりもその近傍の流量が大きく、空円錐型ノズル特有の流量分布が見られる。ノズル下 200mm 以降では速度分布と似たような分布をしており、ノズルから離れるほど最大流量が減少している。

2.5 粒径分布と速度分布の関係

流量分布と速度分布の関係を調べることで、より詳細な噴霧流特性の把握を行う。Fig. 8 に、ノズルからの各高さの噴霧流中心軸上における粒子の持つ粒径及び速度

の頻度分布を、等値線を用いて表した図を示している。等値線は 200 個毎に描いており、各グラフの粒子総数は 1 万個である。ノズルから遠ざかるほど、速度が遅くなり、粒径分布が広がることから分かる。さらに、等値線の間隔に注目すると、ノズル下 100mm では正規分布に近い分布を形成し、ノズル下 200mm 以降では対数正規分布に近い分布が見られる。例として Fig. 8 中に、ノズル下 100mm 及び 500mm におけるコンター図の断面図を示す。また、いずれの高さにおいても速度分布の幅がほとんど変化しないため、一様に速度が減衰していると考えられる。

次に水平方向の粒径と速度の関係を調べる。ノズル下 100mm における水平方向の粒径及び速度の等値線頻度分布を Fig. 9 に、ノズル下 700mm における同様の図を Fig. 10 に示す。ノズル下 100mm では、ノズルからの水平距離 0 ～ 40mm あたりでは、速度が遅くなりつつ粒径が大

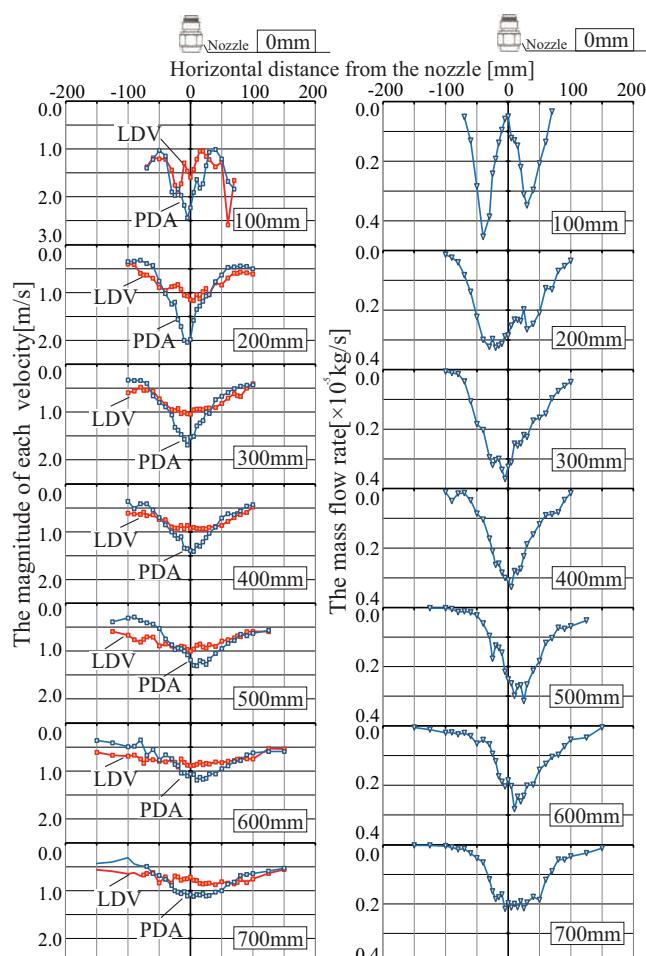


Fig. 6 Velocity distribution of mist by PDA and LDV

Fig. 7 Distribution of mist Flow rate by PDA

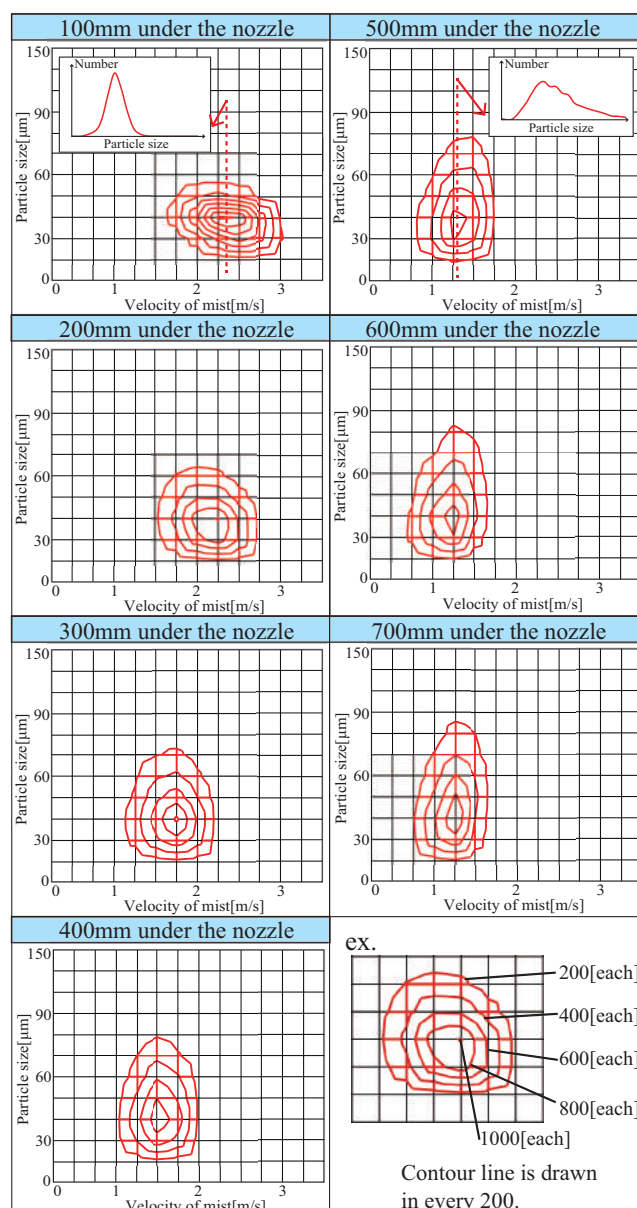


Fig. 8 Distribution of mist velocity - particle on center line in spray stream at each height

きくなる傾向が見られる。50mm で速度分布の幅が広がり、60～70mm では2 点にピークを持つ二峰分布型となる傾向が見られた。ノズル下 700mm では、速度は徐々に全体として遅くなりながら分布が狭くなり、粒径分布が大きく縦に伸びていくことが分かる。ノズルからの鉛直距離が近い外縁部では、粒径が大きく様々な速度を持った粒子が支配的で、鉛直距離が遠い外縁部では、速度が遅く広い粒径分布を持つ粒子が多いことが分かる。

3. まとめ

本報では、PDA を用いて空円錐型一流体ノズルの詳細な粒径・速度分布の測定を行った。その結果、粒径・速度・流量分布いずれにおいても空円錐型ノズル特有と考えられる分布が測定できた。また、速度と粒径の関係から、粒子分布の鉛直・水平方向変化の傾向に関する知見を得られた。今後は、これらの実験結果から既往のモデルに粒径分布を組み込み、数値解析を行う予定である。

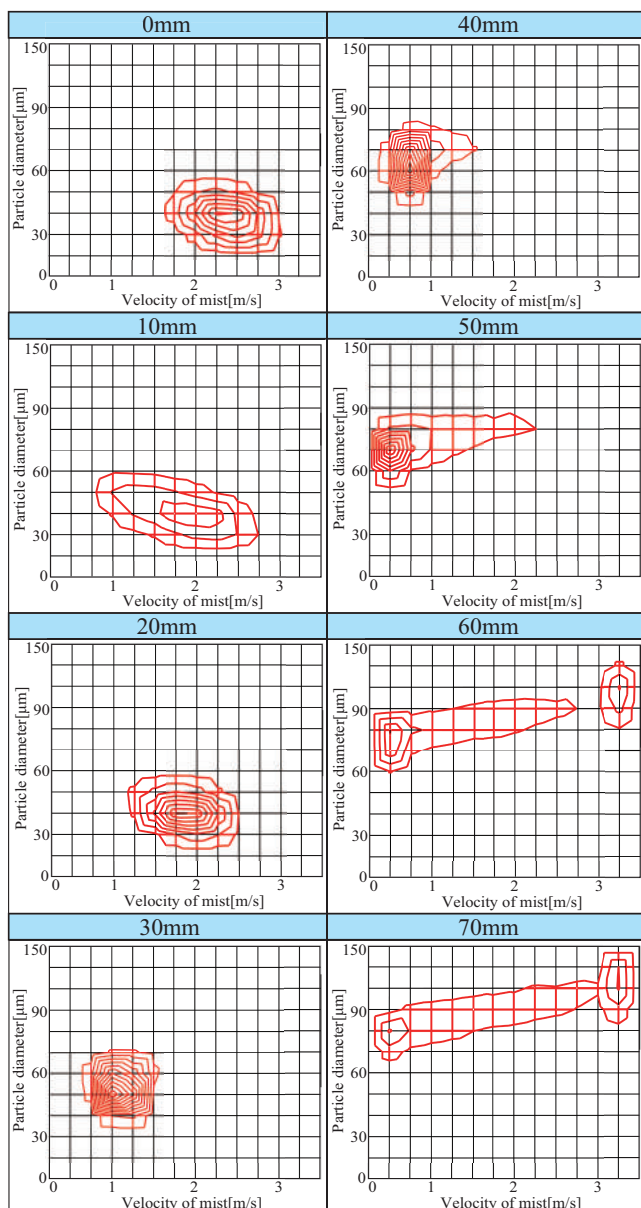


Fig. 9 Distribution of mist velocity - particle on horizontal direction below 100mm from the nozzle

謝辞

本研究の一部は、平成 27 年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）基盤研究（A）（一般）（「噴霧脱臭・除菌と置換換気の複合による快適・安全な病室換気システムの開発研究」、課題番号:15H02279, 研究代表者:山中俊夫）によった。

参考文献

- 1) 栗村祐太, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸, 西田敏宏: 消・脱臭剤のノズル噴霧による臭気除去効果に関する基礎的研究 (その 10) 一流体ノズルによる下向き噴霧流測定に基づくミスト挙動の数値解析, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.77-80, 2015.3
- 2) 西田敏宏, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸, 栗村祐太: 上記同題 (その 11) 一流体ノズルからの水ミストの下向き噴霧流性状, 空気調和・衛生工学会学術研究発表会論文集第 7 巻, pp.13-16, 2015.9
- 3) 日本機械学会: 技術資料流体計測法, 丸善株式会社, 1985.8
- 4) S・K・Friedlander, 早川一也, 芳住邦雄: エアロゾルの科学, 産業図書, 1983.10

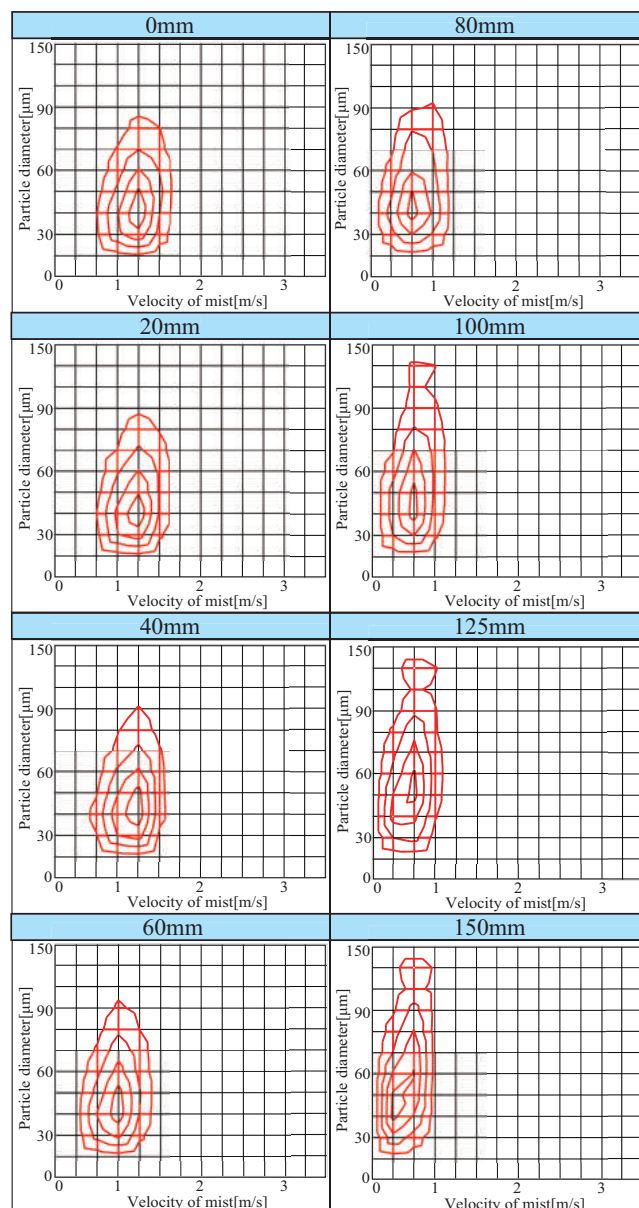


Fig. 10 Distribution of mist velocity - particle on horizontal direction below 700mm from the nozzle

消・脱臭剤のノズル噴霧による臭気除去効果に関する基礎的研究
(その 13) 過酸化水素水のミスト噴霧による消臭効果

Deodorizing Effect of Deodorant Mist Sprayed with a Misting Nozzle
(Part 13) Deodrant Effect of Spraying Hydrogen Peroxide Solution Mist

○鈴木 克治 (大阪大学)

山中 俊夫 (大阪大学)

甲谷 寿史 (大阪大学)

桃井 良尚 (大阪大学)

相良 和伸 (大阪大学)

西田 敏宏 (大阪大学)

Katsuharu SUZUKI*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Hisashi KOTANI*¹

Yoshihisa MOMOI*¹ Kazunobu SAGARA*¹ Toshihiro NISHIDA*¹

*¹ Osaka University

This study focuses on predicting the deodorant effect in spraying mist from a nozzle. Spraying mist improves to eliminate odor materials effectively and eco-friendly, however the way to design quantitative assesment has not been established yet. In this paper, the result that by using one-fluid sparay nozzle and hydrogen peroxide solution as a deodorant material, the attenuation of odor materials is measured is reported. Finally the odor material's concentration is predicted in saome cases of variable situation. This paper will show spraying mist can reduce the flow rate and create ecological space.

1. はじめに

既報¹⁾では安井らによって臭気除去効果予測モデルが提案された。本報では、このモデルで適用されている粒子内瞬時反応の仮定の妥当性を調べるため、消・脱臭薬剤として 3% 過酸化水素水 (オキシドール) を用いた場合の消・脱臭効果を実験によって測定した。また、オキシドールの消・脱臭剤としての能力を水道水噴霧や換気の場合と比較して検証した。

2. 臭気物質・噴霧薬剤の選定

本研究では居室内の排泄物臭・体臭除去の定量的手法の確立を主目的としている。そのため、臭気物質には排泄物臭や口臭の主な要因と言われているメチルメルカプタン (CH_3SH , 分子量 48.11) を用いた。これはたまねぎの腐ったようなにおいのする気体である。実験では無色透明なメチルメルカプタンナトリウム 15% 水溶液を気化させてメチルメルカプタンを発生させた。

噴霧薬剤としては 3% 過酸化水素水 (オキシドール) を用いた。オキシドールは、①酸化力をもつ、②漂白、殺菌能力が高い、③安価で入手が容易、④人体に無害、といった特徴を持つ。

3. 測定対象ノズル

本報で報告す実験は大きく予備実験と本実験にわかれ、予備実験に市販の手動噴霧器を、本実験に消臭ノズルとして空円錐型一流体ノズルを用いた。測定対象とした一流体ノズルの仕様を Table 1 に示す。また、

Table 1 One-fluid nozzle specification

Manufacture	H.Ikeuchi&Co.,Ltd
Model number	1/4M KB 80063N S303-RW
Spray pattern	Hollow Cone
Nozzle hole diameter[mm]	0.22
Fluid pressure[MPa]	0.70
Spray angle[°]	80
Initial mist mass flow rate[L/hr]	2.00

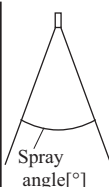


Fig. 1 に手動噴霧器と一流体ノズルを示す。



Fig. 1 Hand spray / one fluid nozzle

4. 予備実験

予備実験ではオキシドールの大きな消臭効果を実験で示し、得られた知見を本実験に活用することを目的とする。

実験概要のイメージを Fig. 2 に示す。実験は容器内に 0.05ml はかり取ったメチルメルカプタンナトリウム 15% 水溶液をガラスシャーレに入れ、30 分間ファンを稼働させて気化させた後、無噴霧/水道水噴霧/オキシドール噴霧の 3 パターンに分けてメチルメルカプタン濃度の時間変化を測定する。濃度は医療用口臭測定器を濃度分析器 (ABILIT 社製) として用いた。本機は医療用であるため高濃度になると誤作動を起こす可能性があるため、低濃度で使用した。まず容器にデシケーターを用い、無噴霧で、各時間 3 回サンプリングした場合のメチルメルカプタン濃度の時間変化を Fig. 3 に示す。

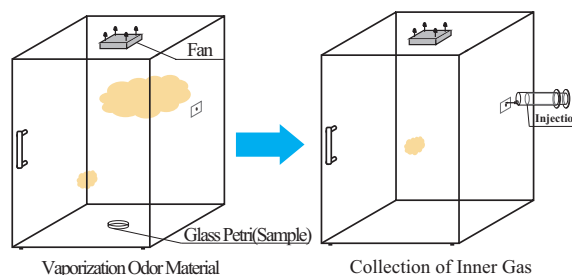


Fig. 2 Experimental set up

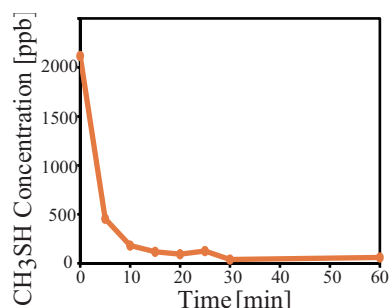


Fig. 3 Odor attenuation of methyl mercaptan without spraying

無噴霧にも関わらず、大幅な濃度の減衰が見られる。要因として、①デシケーターからの漏れ、②シリンジで容器内臭気を吸い出す際、容器に外部空気を取り込むことによる容器内空気の希釈、③濃度分析器が安定化するまでの待ち時間の間にシリンジからの漏れ、④臭気物質の空中分解、壁面吸着度、などが考えられる。①、②については容器を体積可変なゴミ袋を用いることで、③については測定待ちのシリンジに紙粘土やゴムキャップなどで密閉をすることで対策した。また、噴霧ミストが直接臭気物質にかからないよう臭気物質を高い位置に置く。改良容器を Fig. 4 に示す。実験手順は、容器中に先の実験と同量の水溶液が入ったシャーレを置き、ファン付手動噴霧器とともにゴミ袋の中に入れて 30 分間気化させる。その後、0,2,4,6,8,10 分後に 2 回ずつ容器内試料を採取し、濃度を測定する。ミストを噴霧する際は 1,3,5,7,9 分後にそれぞれ 1 回 (約 1.1cc) ずつ噴霧する。実験条件を Table 2 に、測定結果を Fig.

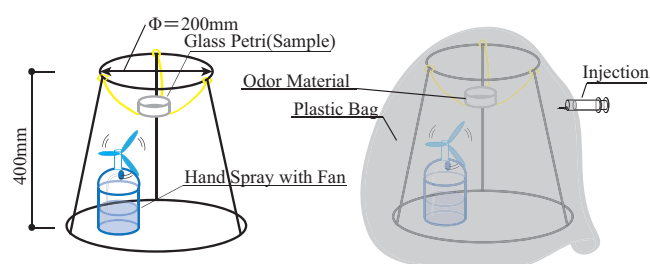


Fig. 4 Improved container

Table 2 Experiment case

case No.	Way to Seal Up	Kinds of Mist
case 1	Paper Clay	No Mist
case 2		Water
case 3		Hydrogen Peroxide
case 4	Rubber Cap	No Mist
case 5		Water
case 6		Hydrogen Peroxide

5-7 に示す。Fig. 5 はメチルメルカプタン濃度の最大値、最小値、平均値を表す。Fig. 6 に、濃度分析器が同時に測定する硫化水素 (H_2S , 分子量 34.08)、ジメチルサルファイド ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$, 分子量 62.13) とメチルメルカプタンの各平均濃度の比較を、Fig. 7 にシリンジの密閉方法ごとの噴霧方法によるメチルメルカプタン濃度減衰の比較を示す。無噴霧でも依然として減衰が見られる。これより袋内の物質の安定性実験を行うこととした。また、Fig. 6 より、その他の臭気物質もわずかに発生していることがわかるが、メチルメルカプタンと比較するとわずかである。これらが発生させていないにもかかわらず検出されたのかはわからなかった。

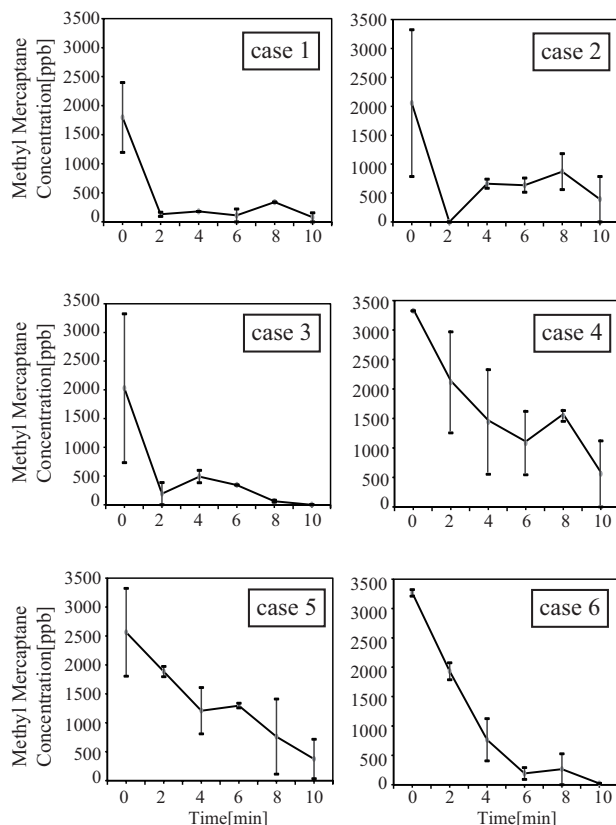


Fig. 5 Methyl Mercaptane concentration

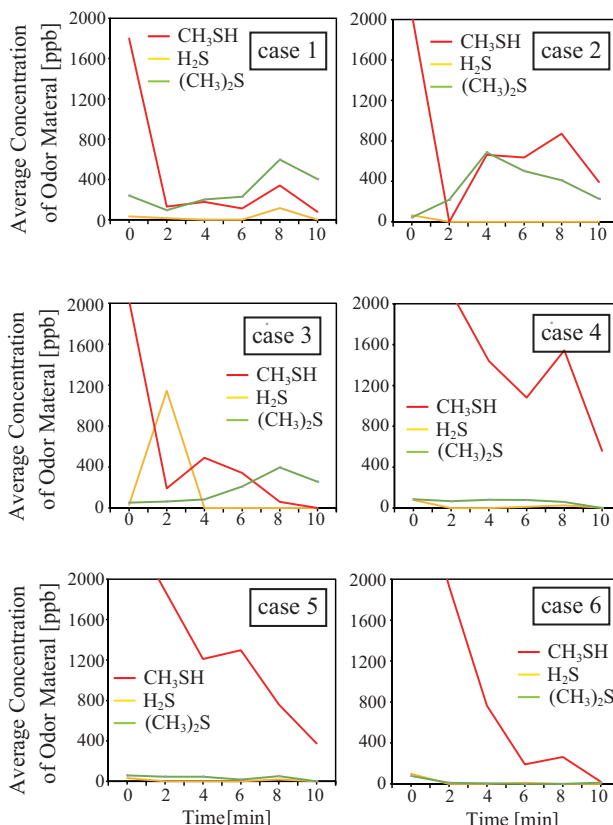


Fig. 6 Averaged concentration of CH_3SH , H_2S , $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ for odor materials

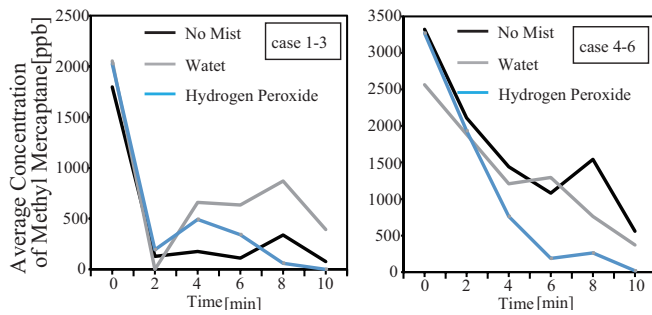


Fig. 7 Comparison of CH₃SH among kinds of mist
Fig. 7 右図はオキシドールが他の噴霧方法よりもわずかに消臭効果が高いことを示唆するが、まだ信頼性の高いデータとはいえない。これらの結果を考慮したうえで本実験へ移った。

5. 臭気物質除去効果予測

本節では既報¹⁾で安井らが提案した解析モデルを用いてメチルメルカプタン濃度減衰予測を行った。解析空間は実験と同じく人工気候室を想定する。モデルの概念図を Fig. 8 に、使用する式を Table 3 に示す。

5.1 解析条件

時間刻みは工学的に十分精度を持つといわれる解析解と数値解との相対誤差が 10^{-6} 以下²⁾となる解が支配的となる $t_{\text{step}}=0.01$ とした。また、解析に用いるメチルメルカプタンの拡散係数には、文献³⁾により分子量の近いプロパンの値を用いた。解析条件を Table 4 に示す。

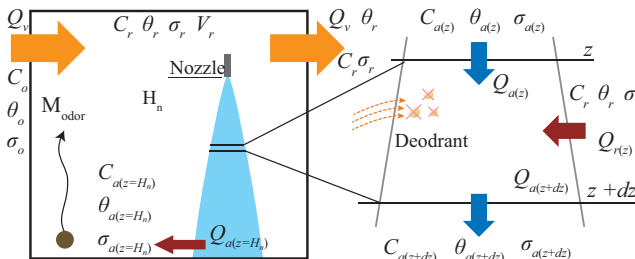


Fig. 8 Modeling scheme of deodorant in a room and spray flow

Analysis Initial Condition	Value
Nozzle Hole Diameter [mm]	0.22
Room Temperature [°C]	20
Room Humidity [%]	50
Mist Temperature [°C]	50
Spray Direction	Downward

5.2 解析結果

初期メチルメルカプタン室内濃度は 1000ppb、発生量は 0[kg/s] として、Fig. 9(a) に無噴霧の際の濃度変化を、(b) にミスト噴霧時の濃度変化を、(c) に初期流量を $10.0, 5.6, 3.0 \times 10^{-4}$ kg/s と変化させた場合の濃度変化を示す。(b) より、ミスト噴霧によって換気の場合よりも消臭効果が優れており、高換気量の場合に匹敵するほどの消臭効果を持つことがわかる。(c) より、初期流量をあまり大きくしなくても十分な消臭効果が得られることがわかる。

Table 4 Predicting model of deodorant

■ Reacting Material of Odor Material ■ Mass Transfer Coefficient

$$M_{\text{dev}} = S \times k_c \times C \quad (1) \quad k_c = \frac{ShD_c}{d_{32}} = \frac{2D_c}{d_{32}} = \frac{2a_c}{d_{32}} \quad (2)$$

■ Mass Balance Equation of Odor Material in Mist

$$\frac{d(CQ_o)}{dz} = C_E \frac{dQ_o}{dz} - \frac{S_{\text{total}} k_c C}{v_m (1 - \eta_b^2)} \quad (3)$$

■ Mass Balance Equation of a Room Space

$$V_r \frac{dC_r}{dT} = - \sum_{z=0}^{H_n} M_{\text{deod}(z)} + Q(C_o - C_r) + M_{\text{odor}} \quad (4)$$

■ Heat Balance Equation

$$c_p \rho_r V_r \frac{d\theta_r}{dT} = c_p \rho_r Q_{a(z=H_n)} (\theta_{a(z=H_n)} - \theta_r) + c_p \rho_r Q (\theta_o - \theta_r) \quad (5)$$

■ Vapor Balance Equation

$$V_r \frac{d\sigma_r}{dT} = Q_{a(z=H_n)} (\sigma_{a(z=H_n)} - \sigma_r) + Q (\sigma_o - \sigma_r) \quad (6)$$

■ Nomenclature

M_{deod} : Reacting Weight of Odor Material [kg/s]	t : Time [s]
S : Surface Area of Mist [m^2]	H_n : Nozzle Height [m]
k_c : Mass Transfer Coefficient [m/s]	Q : Amount of Ventilation [m^3/s]
C, C_a : Odor Concentration around Mist [kg/m^3]	C_o : Outdoor Concentration of Odor [kg/m^3]
D_c : Diffusion Factor of Odor [m^2/s]	M_{odor} : Odor Generation [kg/s]
d_{32} : Sauter's Mean Diameter [m]	c_p : Air Specific heat [J/(kgK)]
Sh : Sherwood Number [-]	ρ_r : Air Density [kg/m^3]
a_c : Thermal Diffusion Coefficient [m^2/s]	θ_r : Temperature [°C]
Q_a : Flow Rate of Gas Phase [m^3/s]	$Q_{a(z=H_n)}$: Amount of Ventilation from Bottom Mist [m^3/s]
C_E : Odor Concentration in Analytical Space [kg/s]	$Q_{a(z=H_n)}$: Flow Temperature from Bottom Mist [°C]
S_{total} : Total Surface Area of Mist [m^2]	θ_o : Outdoor Temperature [°C]
v_m : On Centerline of Misting Velocity [m/s]	σ_r : Vapor Concentration in Space [kg/m^3]
η_b : Characteristic Length of Velocity Distribution of Gas Phase to That of Flow Rate Distribution of Mist Ratio [-]	$\sigma_{a(z=H_n)}$: Vapor Concentration in Flow from Bottom Mist [kg/m^3]
V_r : Analytical Space Volume [m^3]	σ_o : Outdoor Vapor Concentration [kg/m^3]

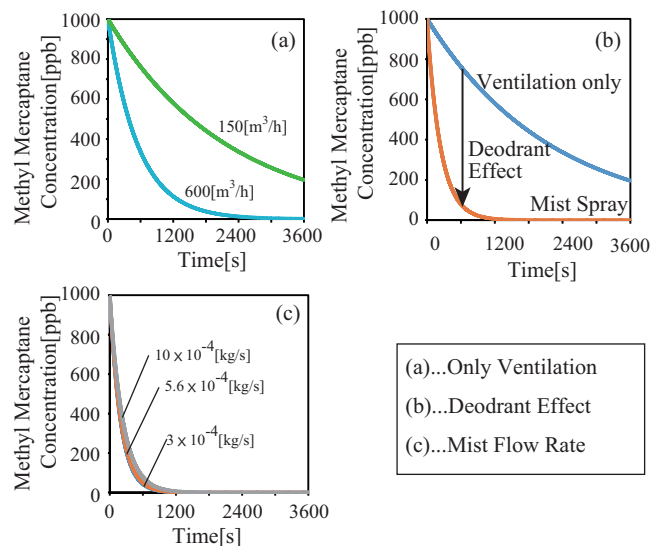


Fig. 9 Analytical result

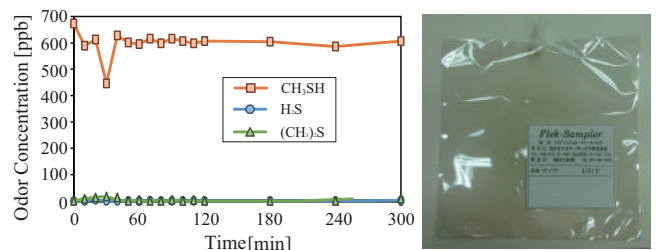


Fig. 10 Plastic bag and its measurement stability



Fig. 11 Climatoron chamber

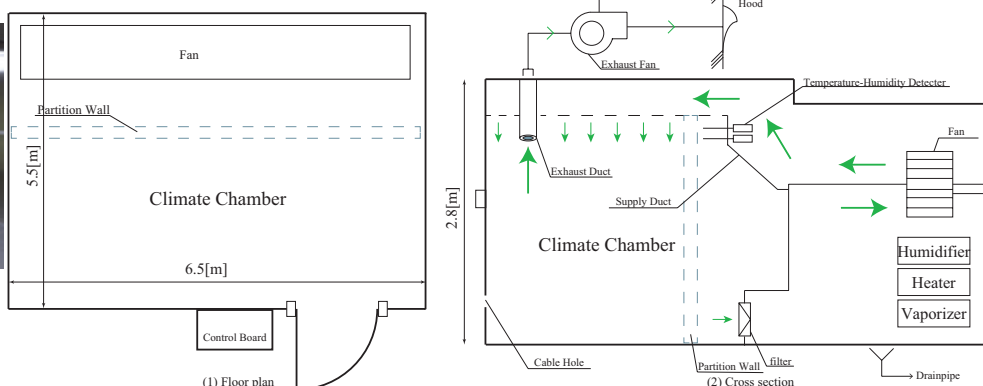


Fig. 12 Flow plan / cross section plan of climate chamber

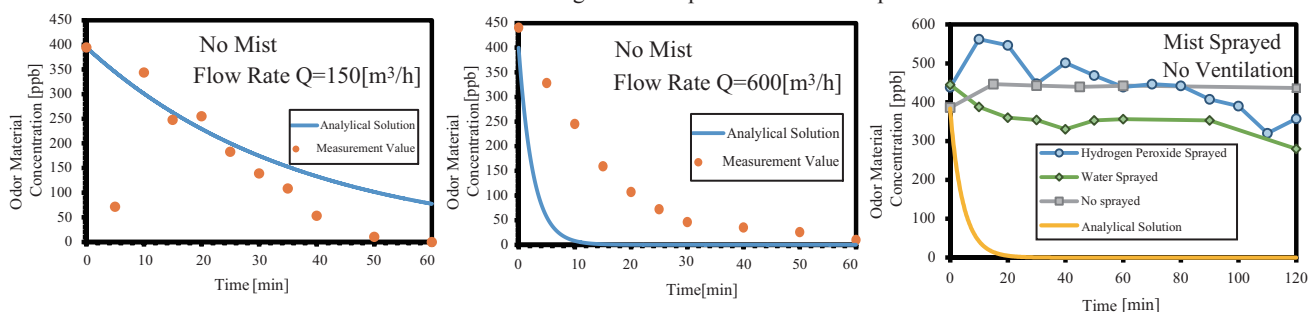


Fig. 13 Result of experiment conducting no mist (left/center) 案 d mist sprayed (right)

6. 本実験

6.1 臭気捕集袋内の臭気物質の安定性

予備実験で測定待機中の臭気が減衰することがわかったため、本実験で用いる臭気袋内の臭気物質の安定性を検証することにした。袋内に臭気を捕集して密閉し、およそ5時間後までの濃度変化を測定した。メチルメルカプタン濃度を測定した。測定結果と臭気捕集袋を Fig. 10 に示す。濃度はほぼ一定であり、測定待機時間中の袋の内壁への吸着や空中分解の影響はあまりなく、臭気物質の安定性は高いといえる。

6.2 人工気候室

人工気候室の外観を Fig. 11 に、平断面図を Fig. 12 に示す。温度は 20℃、湿度は無制御とした。運転方法は全外気運転とした。これは、還気に臭気物質や噴霧の水分を取り込まないためである。

6.3 実験概要

本実験は 2016 年 2 月 11 日～2 月 12 日に大阪大学の人工気候室で行った。人工気候室の天井（高さ 2.8m）に 3 章で述べた空円錐型一流体ノズルを設置する。初期濃度約 400ppb のメチルメルカプタンを発生させた後、換気のみ (150m³/h・600m³/h) と換気なしかつ噴霧なし・水道水噴霧・オキシドール噴霧で実験を行った。ノズルは実験開始後から実験終了まで常に一定流量の 1.7 L/hr で噴霧し続けた。なお一度使用した臭気袋は無臭空気（新鮮外気）を用いて 3 回洗浄した後、再度用いた。

6.4 実験結果

Fig. 13 に実験結果を示す。換気量 150m³/h の場合でも 1 時間後には臭気はほぼなくなっており、換気量

600m³/h の場合も、解析解と値は大きく異なるが指数関数的に減衰している。ところが換気を行わず、水道水・オキシドールを噴霧しても臭気物質濃度はあまり減衰せず、無噴霧の場合とさほど濃度変化は無かった。加えて安井らの提案した粒子内瞬時反応の仮定を前提とした解析解とは大幅に挙動が異なっていることがわかる。また、実験後の室内は湿度が高く、床面が水に濡れていることも目視で確認した。したがって、本実験では水道水・オキシドールのミスト噴霧では消・脱臭効果を示すことができなかったものの、水道水やオキシドールを噴霧する際は、粒子内瞬時反応の仮定が過大な評価であることを確認した。

7. まとめ

本報ではオキシドールを用いた消・脱臭効果を測定し、換気や水道水噴霧と比較した。その結果、二種類の実験を行ってもオキシドールは優れた消・脱臭効果をもつという根拠を示すことはできなかったが、一般的な液体の噴霧では粒子内瞬時反応は過大な仮定であることが実験よりわかった。今後は、様々な噴霧薬剤、臭気物質を用いて実験を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、平成 27 年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）基盤研究（A）（一般）、「噴霧脱臭・除菌と置換換気の複合による快適・安全な病室換気システムの開発研究」、課題番号：15H02279、研究代表者：山中俊夫 によった。

参考文献

- 1) 安井さおり, 山中俊夫, 相良和伸, 甲谷寿史, 桃井良尚: 消・脱臭剤のノズル噴霧による臭気除去効果に関する基礎的研究 (その 2) 粒子内瞬時反応を仮定した消・脱臭性能予測, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.69-72, 2014.9
- 2) 趙華安: Excel による数値計算法, pp.11, 12, 101-107, 共立出版, 200.2
- 3) 甲藤好郎: 伝熱概論, p222, 養賢堂, 1964.12