

バイオモニタリングによる大阪市道路沿道の元素濃度解析

Analyzing elements concentration of roadside air pollution in Osaka city with biomonitoring

○守口 要 (大阪大学)	村重 陽志 (大阪大学)
嶋寺 光 (大阪大学)	松尾 智仁 (大阪大学)
近藤 明 (大阪大学)	松井 敏彦 (中央復建コンサルタンツ)
重吉 実和 (中央復建コンサルタンツ)	原井 信明 (中央復建コンサルタンツ)
三原 幸恵 (中央復建コンサルタンツ)	世良 耕一郎 (岩手医科大学)

Kaname MORIGUCHI*¹ Haruyuki MURASHIGE*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Tomohito MATSUO*¹

Akira KONDO*¹ Toshihiko MATSUI*² Sanekazu SHIGEYOSHI*² Nobuaki HARAI*²

Yukie MIHARA*² Koichiro SERA*³

*¹ Osaka University *² CHUO FUKKEN CONSULTANTS CO.,LTD. *³ Iwate Medical University

This study aims to establish a method for estimating air pollution using biomonitoring and to measure roadside air pollution in Osaka city. The study uses ginkgo leaves as biomonitors because the ginkgo trees are widely used as a roadside tree in Osaka city. They were collected 3 times per year (May, July and October) in 12 sites along the roadside. Particles on the leaves were collected on filters. Then their chemical composition were analyzed by PIXE (Particle Induced X-ray Emission) analysis, and compared existing profile data. As a result, the chemical composition mostly corresponded to the profile data of road dust, brake dust and automobile exhaust gas.

はじめに

都市においては、自動車の排気ガスによって交通量の多い道路沿道で大気汚染物質濃度が高濃度になりやすい。日本では常時監視測定局や自動車排ガス測定局が大気汚染濃度を測定しているが、これらの測定局は全ての沿道を網羅しているわけではないため、沿道における局所的な高濃度汚染を把握できていない可能性がある。そこで、高濃度汚染地域のスクリーニング手法として、簡易に多点測定を行うことが可能なバイオモニタリングが注目されている¹⁾。バイオモニタリングとは、樹木の葉に付着している粒子の元素組成を分析し濃度評価を行う手法である。そこで本研究では、大阪市の主要道路である御堂筋、新なにわ筋の沿道に植樹されているイチョウの葉を対象とし、バイオモニタリングを用いて、葉に付着した粒子の元素濃度を解析し、その粒子の発生源について考察した。

1. 実験方法

1.1 バイオモニターの選択

本研究のバイオモニターには、イチョウを選択した。イチョウを選択した理由として、イチョウは大阪市沿道に比較的多く植樹されており、葉の採取がしやすかったこ

と、落葉樹であり1年間で全ての葉が入れ替わる²⁾ため、年度間の比較が行いやすいことなどが挙げられる。

1.2 採取地点の選択

本研究では大阪市沿道の12地点(御堂筋5地点、新なにわ筋7地点)と長居公園、大阪大学の合計14地点からイチョウの葉を採集した。Fig. 1に採取地点の地図を示す。Fig. 1のA1からA5が御堂筋で、B1からB7が新なにわ筋である。御堂筋、新なにわ筋ともに自動車の交通量が多く、その中でも新なにわ筋のB6、B7地点は大型車の交通量が多い³⁾。長居公園における採取地点は道路沿いではなく、最も近い道路から100m程度、大阪大学は200m程度離れており、自動車による大気汚染の影響が比較的少ないと考えられる地点である。

そして、上記の地点から虫や鳥の糞などの汚れが付着していない葉を各地点から1サンプルにつき10枚、2サンプルずつ採取した。



Fig.1 Locations of sampling sites of ginkgo leaves

1.3 葉の採取日

葉の採取を行った日を Table. 1 に示す。

Table.1 Date of collection of ginkgo leaves

	Spring	Summer	Fall
2015	5/14	7/31	10/6
2016	5/12	7/29	10/11

基本的にイチョウの葉に付着する粒子は経時的に蓄積していくものと考えられるが、季節によって葉に付着する粒子の量や元素組成にどのような違いが見られるのかを確認するために、Table. 1 に示すように春、夏、秋の季節ごとに葉の採取を行った。

1.4 粒子の捕集方法

葉の表面に付着した粒子の元素組成を分析するため、粒子を PTFE フィルター上に捕集する。試料作成する手順を示したものを Fig. 2 に示す。

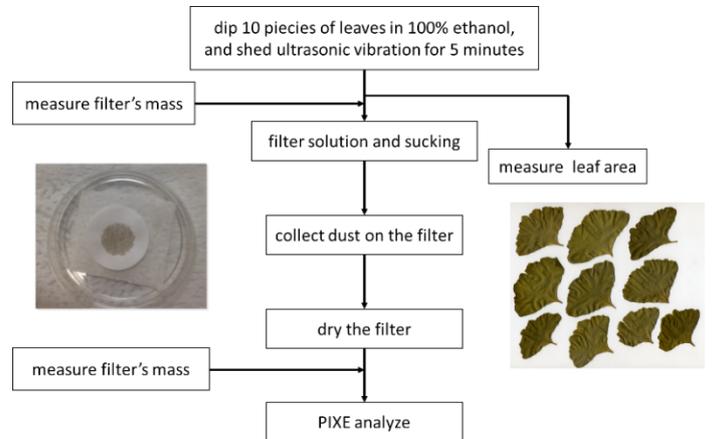


Fig.2 Procedure of sample preparation for PIXE analysis

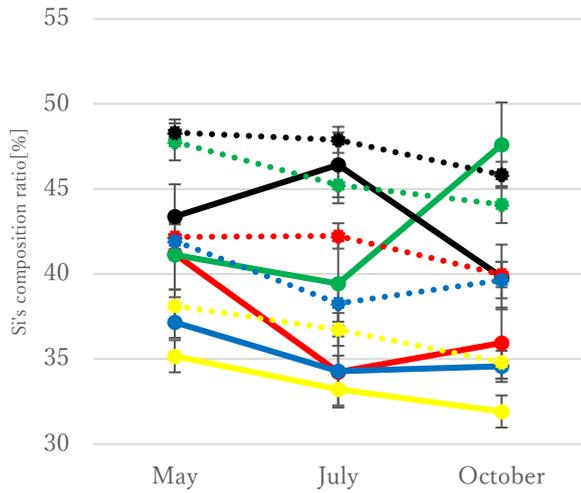
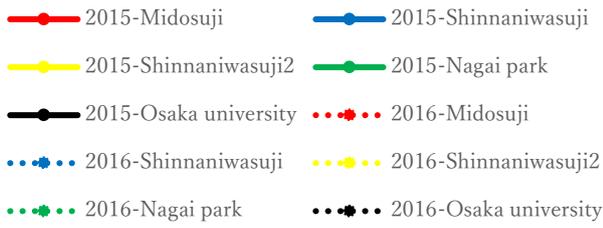
葉に付着している粒子を測定する手法として、先行研究には葉を乾燥させ、粉碎して分析する手法を用いているものも存在する。しかし、その手法では葉の内部の細胞等、周囲の環境に依存しない成分まで捕集粒子として分析される可能性がある。そこで、本研究では、Fig. 2 に示すように、葉 10 枚を 300ml のエタノールに浸し、超音波洗浄器（本多電子、W-103）を用いて、葉に付着した粒子を溶液中に脱離させる手法を用いた。歯の表面に付着した粒子の質量を求めめるため、粒子の捕集前後に PTFE フィルターの質量を測定した。測定には電子天秤を用いた。粒子を捕集後の質量測定では、自然乾燥によりエタノールを除去した後にフィルターの質量を測定した。捕集前後のフィルターの質量差を、葉の表面に付着した粒子の質量とみなした。

エタノールに浸した後の葉をスキャナーで読み取り、画像解析ソフト Cosmos32 を用いて葉の面積を測定した。葉の大きさによって粒子の捕集量が異なるため、葉の面積あたりの元素量によって結果を見た。

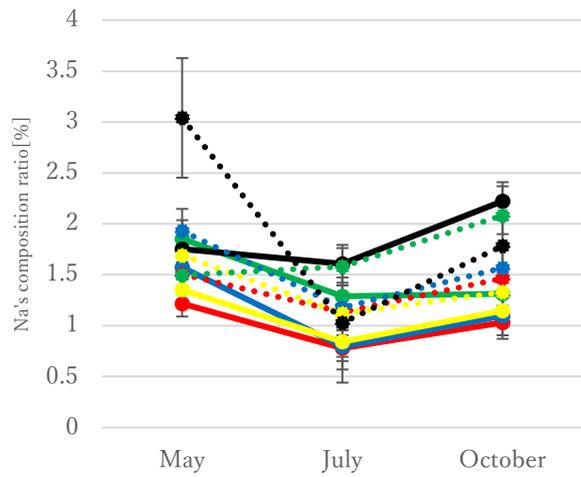
1.5 PIXE 分析

PIXE とは、Particle Induced X-ray Emission の略で、加速器で加速した高エネルギーのイオンビームを試料に照射し、試料とイオンビームとの衝突によって発生した特性 X 線のスペクトルを解析することによって、試料中に含まれる元素の組成を明らかにするものである。PIXE 分析では、Na から U までの元素を同時に分析でき、感度が高く、少量の元素量でも解析が可能であるなどの利点がある⁴⁾。

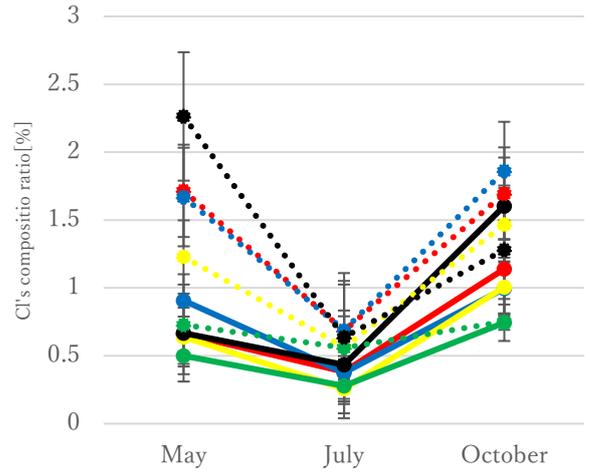
本研究では、NMCC(仁科記念サイクロトロンセンター)にて PIXE 分析を行い、粒子の元素組成を分析した。



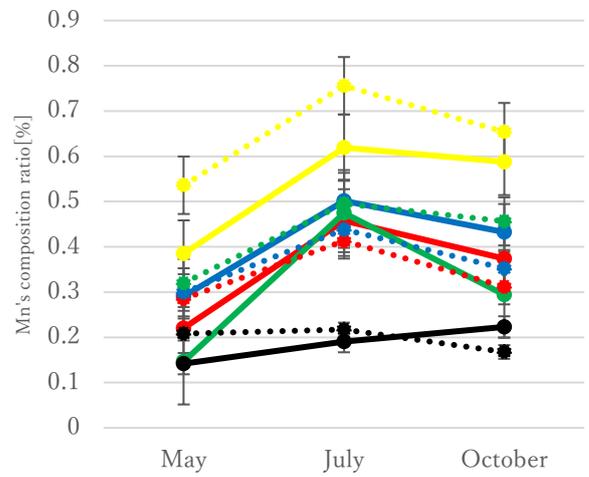
(a)



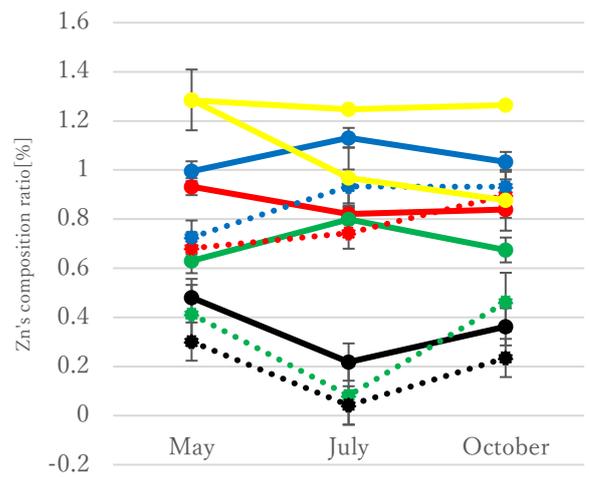
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig.3 Seasonal variation in composition ratio of Si (a), Na (b), Cl (c), Mn (d) and Zn (e)

2. 解析結果と考察

2.1 元素組成比

PIXE 分析の結果、Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Ga、Br、Rb、Sr、Zr、Pb が検出された。他に、As や Y など検出されるサンプルが存在したが、検出量が極めて少なく、検出下限値を下回るサンプルが多かったため、考察の対象からはずした。

Fig. 3 の(a)から(e)にそれぞれ Si、Na、Cl、Mn、Zn の元素量の季節変動を示す。Si は土壌、Na と Cl は海塩、Mn と Zn は自動車排気ガスの代表的な元素として採用した。ただし、図中の数値は、PIXE 分析により定量された対象元素の総質量に占める、対象元素の質量の割合で示した。また、図中の御堂筋とは Fig. 1 における A 地点の平均値であり、新たにわ筋と新たにわ筋 2 はそれぞれ、B1 から B5 の平均値、B6 と B7 の平均値である。平均値は、各地点について定量された総元素質量の総和で、各地点について定量された対象元素質量の総和を除すことで求めた。

Fig. 3(a)は Si の季節変動を示した図である。一部は異なった動きが見られるものの、概ね春から秋に向けて減少していく傾向が見られる。Si は土壌に多く含まれる元素で、地面から巻き上げられた粒子が付着しているものと考えられる。また、春に最も多く Si が検出される要因として、中国から運ばれる黄砂による影響を受けているものと考えられる⁵⁾。

Fig. 3(b, c)はそれぞれ Na と Cl で主に海塩の影響を強く受けると考えられる元素の季節変動を示した図である。これらの元素は共に、夏に大きく減少する結果となった。

Fig. 3(d)の Mn は交通量の多い地点と少ない地点(長居公園及び大阪大学)で傾向が分かれた。Mn は後述する発生源プロファイルデータにも採用され、交通量が多い地域ではその比率が高くなる傾向になると考えられる。

Fig. 3(e)の Zn についても Mn と同様に比較的交通量が多い地点で高くなる傾向にあった。

2.2 発生源解析

PIXE 分析により解析した元素の一部について発生源プロファイル⁶⁾を用いて発生源解析を行った。その結果を Fig. 4 に示す。発生源解析を行った元素は、Na、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Zn、Br である。元素組成と同様に、

$$\frac{\text{対象元素量}}{10 \text{ 種類の元素の総量}} \times 100$$

の式より求めた。

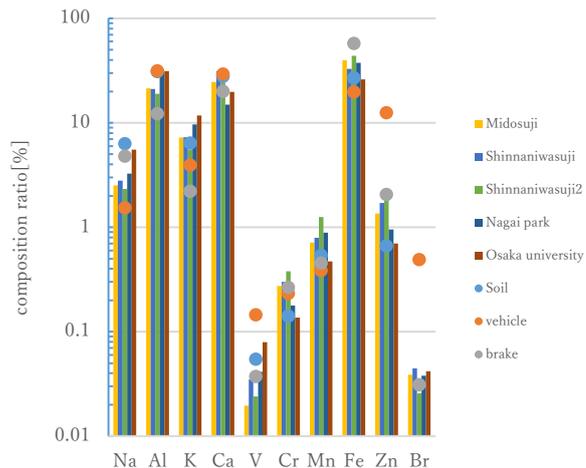


Fig.4 Source analysis profile

葉を採集した地点の大气汚染に影響すると考えられる発生源について Fig. 4 で図示した。これらの地点における元素質量比は、土壌由来の粒子、自動車の排気ガス由来の粒子、ブレーキ粉塵に由来する粒子のプロファイルと比較的によく一致した。

3. 結論

本研究では、バイオモニタリングを用いて沿道大气汚染濃度を把握することを目的とし、大阪市の主要道路の沿道などに植樹されるイチョウの葉を採取し、PIXE 分析を行うことで、葉の付着粒子の元素組成や季節変動を調べた。その結果、土壌由来と考えられる元素については春季に高くなり夏季及び秋季に低下し、海塩由来と考えられる元素については夏季に低下することが確認できた。Mn や Zn といった元素については交通量の多い地点での元素量が相対的に多くなった。

また、PIXE 分析にかけた元素の一部について発生源解析を行ったところ、土壌、自動車排気ガス、ブレーキ粉塵のプロファイルと比較的によく一致した。このため、これらが付着粒子の発生源として示唆された。

参考文献

- 1) 岡村秀雄：バイオモニタリングを活用した汚染された水環境の評価と管理
- 2) 清水庸、梅村周平、大政謙次：イチョウの開芽日・黄葉日の時系列変化と地理的傾向の解析
- 3) 大阪府、平成 22 年度 道路交通センサス
- 4) 宇田応之：粒子線励起 X 線分析法(PIXE)の現状と将来
- 5) 溝畑郎、伊藤憲男：黄砂粒子の化学成分の変質
- 6) 東京都微小粒子状物質検討委員会：レセプターモデルによる PM_{2.5} 発生源寄与割合の推定

水文/水質モデルを用いた阿武隈川流域における土壌粒子輸送に伴う
放射性セシウム動態解析

Analysis of the environmental fate of radiocesium adsorbed to soil particles in the Abukuma river basin using hydrological/water quality model

○池之上 翼 (大阪大学) 河野 葵 (大阪大学)
嶋 寺 光 (大阪大学) 松尾 智仁 (大阪大学)
高見 京平 (大阪大学) 近藤 明 (大阪大学)

Tsubasa IKENOUE*¹ Aoi KAWANO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Kyouhei TAKAMI*¹
Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

To evaluate the environmental fate of radiocesium, it is necessary to predict transport of soil particles in rainfall-runoff process. The behaviors of radiocesium adsorbed to eroded soil particles in the Abukuma river basin, located 30-100 km west of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, were analyzed by a hydrological/water quality model. Calculation of lateral inflow load was performed in two cases: one using L-Q equation and the other using Universal Soil Loss Equation (USLE). Results show that ¹³⁷Cs transported to the ocean in a period from August 10, 2011 to May 11, 2012 was 4070 GBq and 434 GBq in the cases with L-Q equation and USLE, respectively.

はじめに

2011年3月11日の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所 (FDNPP) の事故により、環境中に大量の放射性核種が放出された。大気中放射性核種は大気の流れにより輸送され、湿性・乾性沈着によって広範囲へと落下した。50年間積算実効線量について放射性セシウムの線量が顕著に大きいことが確認され¹⁾、今後の被ばく量評価の際には放射性セシウムに着目していく必要がある。放射性セシウムのモニタリング結果から、FDNPP から80 km 圏内を中心に多くの放射性セシウムが沈着したことが示された²⁾。また、土壌に沈着した¹³⁷Csは比表面積の大きな粘土やシルトなどの微細土壌粒子に偏在していることが明らかとなっている³⁾。そのため、FDNPP 事故後の放射性セシウムの環境動態プロセス全体を予測し、将来の健康影響の評価や除染対策をする上で水循環に伴う侵食土壌粒子の挙動を推定する必要がある。そこで、本研究では降雨流出過程に伴う土壌粒子流出量を推定することができる水質モデルを用いて、2012年12月までの阿武隈川流域における放射性セシウム動態の再現を試みた。

1. モデル概要

1.1 水質モデル概要

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、放射性セシウム初期沈着量等の入力データと基に、降雨流出過程に伴う水、粒度分布を考慮した侵食土壌粒子、土壌粒子に吸着した放射性セシウムの移動量が解析される。また、土壌粒子の河川への横流入負荷量の算出には LQ 式を用いる場合と USLE (Universal Soil Loss Equation)⁴⁾を用いる場合の2通りに分けて計算を行った。

1.2 横流入負荷算出式

1.2.1 LQ 式

LQ 式は斜面からの横流入量が流量に対して指数関数的に増加すると仮定し、河口における水流出量と SS 負荷量の関係が対象領域の SS 流出過程を代表するとして、LQ 式パラメータを決定する。

$$f_{ss} = \frac{\alpha_{ss} (q_r bl)^{\beta_{ss}}}{bl} \quad (2.1)$$

α_{ss} , β_{ss} : LQ 式パラメータ

1.2.2 USLE

USLE⁴⁾は畑地土壌の侵食を予測するために作られた

A-45

データベースに基づく統計モデルであり、単位面積あたりの流亡土壌を求めることができる。(2.2)式に示す係数の積によって、単位面積から単位時間に流出する平均的な流亡土量 A_{ss} が計算される。

$$A_{ss} = RKLSCP \quad (2.2)$$

A_{ss} : 土壌粒子流亡量[$10^6 \text{ g ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$], R : 降雨係数[$10^6 \text{ g m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-2}$], K : 土壌係数[h m^2], L : それぞれ斜面長, 斜面勾配を表す地形係数, C : 作物係数, P : 保全係数

2. 計算条件

計算領域は Fig. 1 に示す阿武隈川流域全域とし、流域全体を標準地域メッシュの3次メッシュに区分し計算格子を設定した。計算期間は2011, 2012年の2年間とする。なお、放射性セシウム輸送解析については第2次航空機モニタリングの最終測定日である平成2011年5月26日から行った。本研究では、粘土(0.45~3 μm), シルト(3~63 μm), 極細粒砂(63~125 μm), 細粒砂(125~250 μm)の4種類の無機物土壌粒子を対象として、粒径による流出特性の違いを考慮し水質モデルで解析を行った。計算領域の ^{137}Cs 初期沈着量データ²⁾を Fig. 2 に示す。

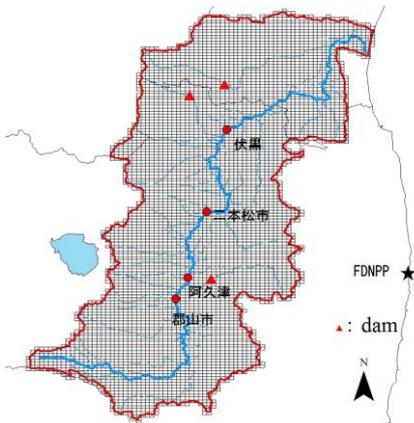


Fig. 1 Computational domain and locations of observation sites

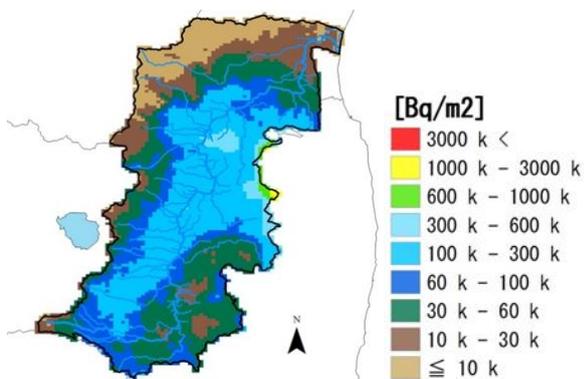


Fig. 2 Spatial distribution of initial radioactivity of deposited radiocesium²⁾

3. 計算結果

3.1 河川流量計算結果

伏黒, 阿久津における日平均流量の実測値と計算値の比較結果をそれぞれ Fig. 3, 4 に示す。両観測所における計算値は平水時だけでなく出水時の実測値の傾向を良好に捉えており、上流から下流への流量増加が再現された。

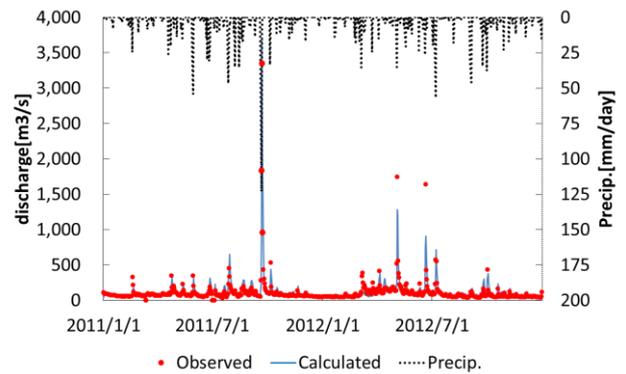


Fig. 3 Observed⁵⁾ and calculated daily river flow at Fushiguro observatory

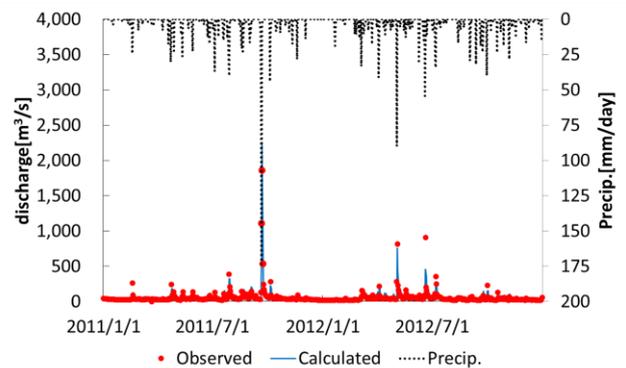


Fig. 4 Observed⁵⁾ and calculated daily river flow at Akutsu observatory

3.2 河川中浮遊粒子計算結果

河川流量と同地点の伏黒と阿久津において、SSの実測値と日平均計算値の比較結果をそれぞれ Fig. 5, 6 に示す。両観測所においての平水時の計算値と実測値のオーダーは一致した。両観測所においてUSLEを用いるとLQ式を用いるより濃度を小さく推定し、実測値に対しても過小評価となったがSS濃度ピークの時期は同様の結果となった。

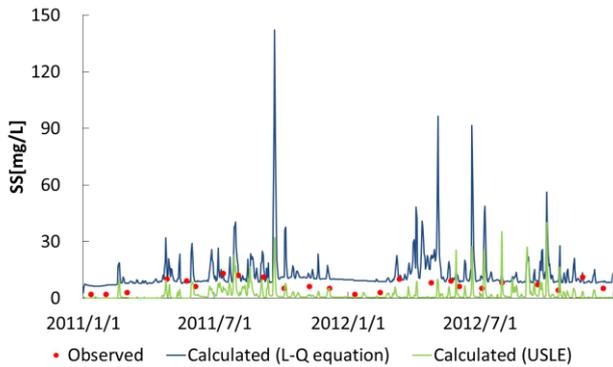


Fig. 5 Observed⁵⁾ and calculated daily concentration of suspended solids at Fushiguro observatory

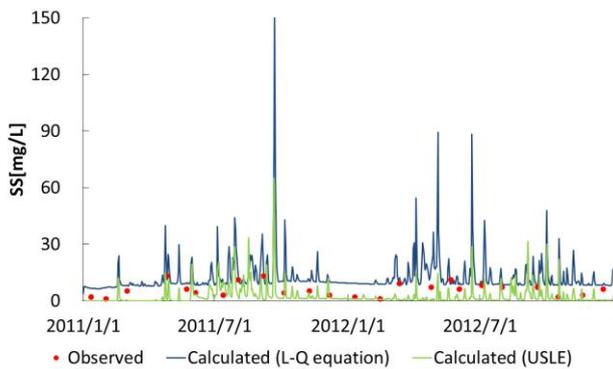


Fig. 6 Observed⁵⁾ and calculated daily concentration of suspended solids at Akutsu observatory

阿武隈川河口からの日平均河川水流出量と積算土壌流出量計算結果を Fig. 7 に示す。LQ 式を用いた場合、2011 年 8 月 10 日から 2012 年 5 月 11 日における土壌粒子流出量は 175 Gg であり、山敷ら⁶⁾の実測値 551 Gg に対してオーダーが一致した。一方、USLE を用いた場合の同期間における土壌粒子流出量は 22.9 Gg であり、山敷ら⁶⁾の実測値に対してオーダーが一桁小さな値となった。

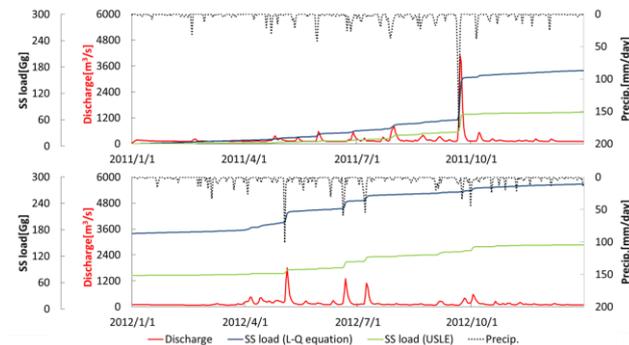


Fig. 7 Daily river flow and total suspended sediment outflow at the Abukuma River estuary

3.3 放射性セシウム動態計算結果

阿武隈川本川に位置する二本松市と郡山市における

SS 単位質量あたりの放射性セシウム濃度の実測値と日平均計算値比較結果をそれぞれ Fig. 8, 9 に示す。両観測所において計算値は実測値のオーダーを捉え、LQ 式を用いた計算結果と USLE を用いた計算結果は、同様な挙動を示した。

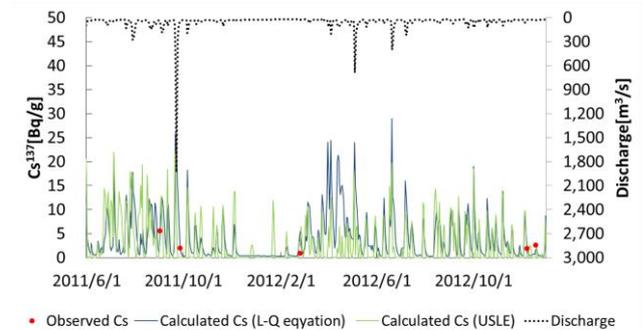


Fig. 8 Observed⁷⁾ and calculated daily concentration of radiocesium per unit mass of suspended solids at Nihonmatsushi observatory

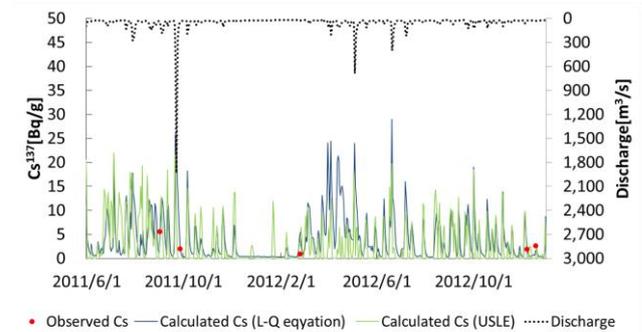


Fig. 9 Observed⁷⁾ and calculated daily concentration of radiocesium per unit mass of suspended solids at Koriyamashi observatory

阿武隈川河口からの日平均河川水流出量と SS に吸着した ¹³⁷Cs 積算流出量計算結果を、Fig. 10 に示す。LQ 式を用いた場合、2011 年 8 月 10 日から 2012 年 5 月 11 日における ¹³⁷Cs 流出量はそれぞれ 4070 GBq であると計算され、山敷ら¹⁾の実測値 5340 GBq に対してオーダーが一致した。一方、USLE を用いた場合の同期間における ¹³⁷Cs 流出量はそれぞれ 434 GBq であると計算され、山敷ら⁶⁾の実測値に対してオーダーが一桁小さい値となった。

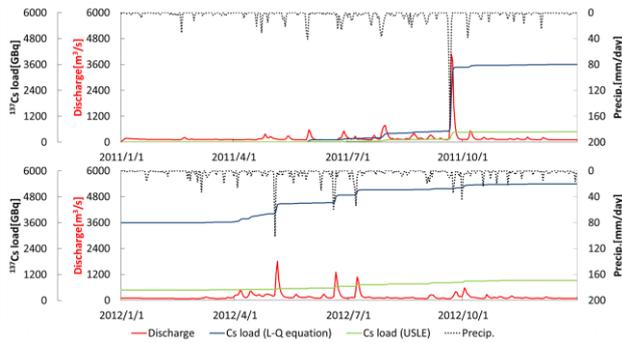


Fig. 10 Daily river flow and total ^{137}Cs outflow at the Abukuma River estuary

3.4 考察

河川流量について、実測値との比較から平水時だけでなく出水時における阿武隈川本川の河川流量を良好に再現できたことが確認された。河川中浮遊粒子について、LQ式を用いた場合河川中SS濃度は平水時において計算値は実測値のオーダーを捉えており、阿武隈川河口からの土壌流出量は既往研究⁶⁾と比較してオーダーが一致した。一方、USLEを用いた場合、河川中SS濃度は平水時において計算値は実測値のオーダーを捉えていたものの、阿武隈川河口からの土壌流出量は既往研究⁶⁾と比較して1桁小さな値となり、LQ式を用いた計算結果と比較しても平水時、出水時ともに土壌流出量は低い値となった。このことからUSLEを用いた水質モデルは、土壌粒子流出量を過小評価した可能性が示唆された。その原因として、USLEはLQ式と異なり、水田の水の貯留・流出機構の違いが反映されていないことや、表面土壌流出のみを対象とした式であることが考えられる。Williamsら⁸⁾によって開発されたMUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) を用い、表面土壌流出以外の土壌流出を考慮できる項を導入することで、実際の浸食土壌流出過程とそれに伴う放射性セシウム流出過程の再現性が向上する可能性がある。

4. 結論

2011年3月11日の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所(FDNPP)の事故により、環境中に大量の放射性核種が排出され、広範囲へと落下した。50年間積算実効線量について、放射性セシウムの線量が非常に大きいことが確認され、今後の被ばく量評価の際には、放射性セシウムに着目していく必要がある。土壌に沈着した ^{137}Cs は、比表面積の大きな粘土やシルトなどの微細土壌粒子に偏在していることが明らかとなったため、FDNPP事故後の放射性セシウムの環境動態プロセス全体を予測し、将来の健康影響を評価する上で、水循環に伴う侵食土壌粒子の挙動を推定する必要がある。そこで、本研究では降雨流出過程に伴う土壌粒子流出量を推定するこ

とができる水質モデルを用いて、2012年12月までの阿武隈川流域における放射性セシウム動態の再現を試みた。

結果として、河川流量は平水時、出水時ともに実測値をよく再現した。伏黒と阿久津において、SSの実測値と日平均計算値はUSLEを用いるとLQ式を用いるより濃度を小さく推定し、実測値に対しても過小評価となったが、SS濃度の挙動は同様の結果となった。LQ式を用いた場合、土壌粒子流出量、 ^{137}Cs 流出量は、山敷ら⁶⁾の実測値に対しオーダーが一致した。一方でUSLEを用いた場合、土壌粒子流出量、 ^{137}Cs 流出量は実測値⁶⁾に対しオーダーが1桁小さな値となった。

今後の課題 Williamsら⁸⁾によって開発されたMUSLEを用い、表面土壌流出以外の土壌流出を考慮できる項を導入すること、実際の侵食土壌流出過程とそれに伴う放射性セシウム流出過程の再現性が向上する可能性がある。また、将来における放射性セシウムの環境動態プロセス全体を予測し、将来の健康影響評価や除染対策をする上で、阿武隈川流域の過去における降水パターンから将来における降水シナリオを作成し、降雨流出過程に伴う放射性セシウム動態の現況再現から将来予測へと移行することを今後の課題とする。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構:航空機モニタリング[空間線量率]
<http://emdb.jaea.go.jp/emdb/portals/b136>
- 2) 文部科学省:放射線量等分布マップの作成等に関する報告書(第1編)
<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5235/view.html>
- 3) Sakaguchi A., Tanaka K., Iwatani H., Chiga H., Fan Q., Onda Y., Takahashi Y.:Size distribution studies of ^{137}Cs in river water in the Abukuma Riverine system following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident
- 4) Wischmeier, W. H., Smith, D.D. : Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. U.S.Department of Agriculture, Agriculture Handbook (1978)
- 5) 国土交通省:水文水質データベース
<http://www1.river.go.jp>
- 6) Yamashiki Y., Onda Y., Smith H., Blake W., Wakahara T., Igarashi Y., Matsuura Y., Yoshimura K. : Initial flux of sediment-associated radiocesium to the ocean from the largest river impacted by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Scientific Reports
- 7) 環境省:水質調査方法
<http://www.env.go.jp/hourei/05/000140.html>
- 8) Williams, J.R., Jones, C. A., and Dyke P. T.: A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity, Trans.ASAE, 27, pp.129-144, 1984.

阪神地域における大気質モデルのオゾンシミュレーション性能評価 Evaluation of air quality model performance for ozone simulation in the Hanshin region

○深水 健吾 (大阪大学) 嶋寺 光 (大阪大学)
服部 慎也 (大阪大学) 松尾 智仁 (大阪大学)
近藤 明 (大阪大学)

Kengo FUKAMI*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Shinya HATTORI*¹ Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

High-resolution modeling approach is increasingly being considered as a necessary step for improving the predictions of regional air quality. This study uses the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model coupled with the Weather Research and Forecasting (WRF) model for a comprehensive analysis to assess the suitability of such high-resolution modeling system in predicting ozone concentration in the Hanshin region, Japan. The weather and air-quality simulations was conducted with 64-km, 16-km, 4-km and 1-km grid resolutions over the Hanshin region. The simulated meteorological variables, ozone and nitrogen dioxide concentrations were evaluated using statistical metrics. The finer grid resolution improved the index of agreements of ozone and nitrogen dioxide which is a precursor of ozone, within the range of 64-km to 4-km. However, there was almost no difference in the statistical performance between the simulations with the grid resolution of 4-km and 1-km. These results suggest that the most appropriate grid resolution is 4-km for ozone simulation in the Hanshin area.

はじめに

光化学オキシダント (以下, O_x) が大気中で高濃度になると、目や粘膜を刺激するなどの健康被害のほか、植物の生育を阻害するなどの悪影響を生じさせるため、大気汚染問題の一つとしてこれまでに多くの国際的な関心を集めてきた。しかし、国内においては O_x についての環境基準値を達成している測定局は一般局で0%、自排局で3.6%と極めて低い水準である¹⁾。 O_x 濃度増加の要因や有効な削減対策の検討のために、環境省によって大気質モデルを用いた解析等が行われている²⁾。大気質モデルを大気環境改善対策の検討に用いる上で、モデルが実現象を良好に再現していることが前提となる。大気質モデルの再現性を向上させるための手段のひとつとして高解像度化がある。そこで本研究では、阪神地域を対象に、 O_x の主成分であるオゾン (以下, O_3) のシミュレーションを異なる水平格子解像度で実施し、高解像度化とモデル再現性の関係を示すことを目的とした。気象、 O_3 濃度および O_3 の前駆物質である二酸化窒素 (以下, NO_2) 濃度について、統計指標、時空間変動性の観点から包括的に再現性を評価した。その上で、計算負荷との兼ね合いを含めて、阪神地域の O_3 シミュレーションにおいて適切な格子解像度について検討した。

1. 計算方法

阪神地域を対象に、近年最も O_x 注意報の発令が多かった2010年の7月～8月における O_3 シミュレーションを、水平格子解像度64, 16, 4, 1 kmで実施した。数値モデルとして、気象モデルにWeather Research and Forecasting model (WRF) のバージョン3.7、大気質モデルにCommunity Multiscale Air Quality model (CMAQ) のバージョン5.1を用いた。

Fig.1 に示す通り、水平計算領域は、東アジアの広域を対象とする格子数 108×96 の64km格子領域(D1)、日本の本州地域を対象とする格子数 68×68 の16km格子領域(D2)、近畿圏を対象とする格子数 76×76 の4km格子領域(D3)、阪神地域を対象とする格子数 64×64 の1km格子領域(D4)の4領域とした。鉛直方向には、地表面から上空100hPaまでを30層に分割した。WRFおよびCMAQの再現性評価には、阪神地域における管区気象台(全2局)および大気汚染常時監視測定局(全100局)における観測値を用いた。**Fig.2**にD1～D4の阪神地域における標高を示す。高解像度化によって、地形がより明瞭に表現されていることがわかる。

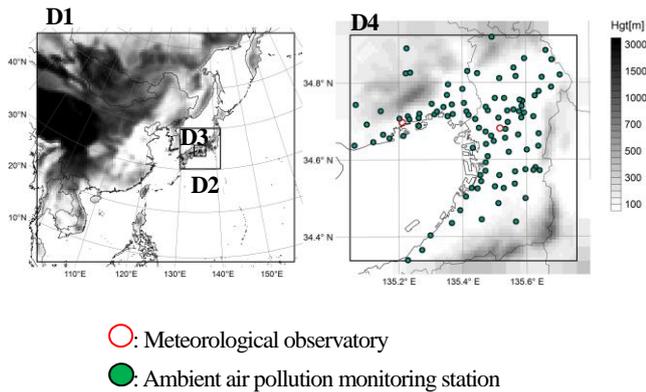


Fig.1 Modeling domains and locations of observation stations in the Hanshin region.

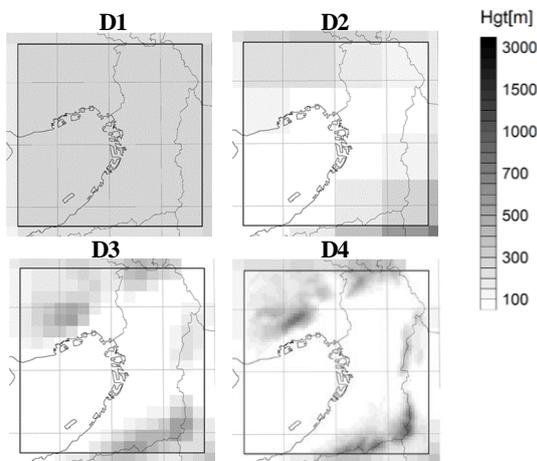


Fig.2 Geography of the Hanshin region represented in D1, D2, D3 and D4.

気象モデル WRF について、地形・土地利用データには、日本の土地利用を除き、アメリカ地質調査所 (USGS: U.S. Geological Survey) により整備された全球データセットを使用した。日本の土地利用には、土地利用細分メッシュデータを使用した。客観解析気象データには、NCEP (National Centers for Environmental Prediction) により全球を対象に作成された全球最終解析データ (NCEP FNL: NCEP FiNaL operational global analysis data) および高解像度版のリアルタイム全球海表面温度 (RTG-SST-HR: Real-Time, Global, Sea Surface Temperature High Resolution) と日本の気象庁により日本域を対象に作成された客観解析値 (MSM-GPV: MesoScale Model Grid Point Value) の 3 つのデータを使用した。FDPA については、D1 および D2 における気温、水蒸気混合比、風速の東西・南北成分に対して、D3 および D4 における気温、風速の東西成分・南北成分に対して解析値ナッジングを行った。雲微物理過程は WRF Single-Moment 6-class (WSM-6) スキーム、積雲過程には Kain-Fritsch スキーム、PBL 過程には Yonsei University (YSU) PBL スキーム、地表面過程は NCEP と NCAR によって共同開発された Noah

land-surface model (Noah LSM)、長波放射過程は Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) を用いた。

大気質モデル CMAQ について、D1 における大気汚染物質およびその前駆物質濃度の初期条件および側面境界条件には、NCAR による MOZART-4/GEOS-5 を用いた計算結果を使用した。D2, D3, D4 の側面境界条件は、それぞれ D1, D2, D3 における大気中ガス・粒子濃度の 1 時間間隔の計算結果から作成した。気相化学反応には従来の CB05 におけるトルエンの化学反応メカニズムが修正された CB05-TU (CB05-Toluene Update)、エアロゾル過程には Sixth-generation modal CMAQ aerosol model (AERO6) を用いた。大気汚染物質の排出量には、HTAP, JATOP 自動車, OPRF 船舶, EAGrid2010-Japan などと組み合わせて用いた。**Fig.3** に O_3 の前駆物質である NO_x の計算期間平均排出強度について、D1~D4 の阪神地域における空間分布を示す。高解像度化によって、都市域への排出源の集中がより明瞭に表現されていることがわかる。

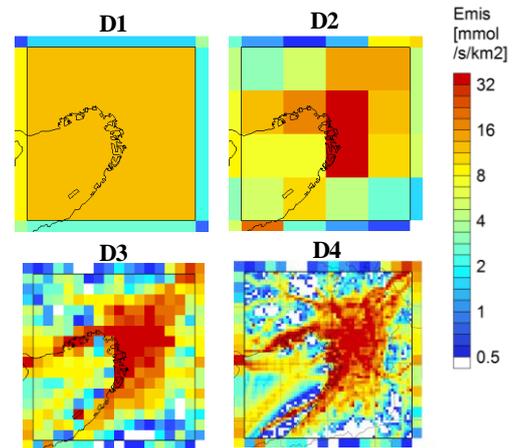


Fig.3 Spatial distribution of average emission intensity of NO_x in the Hanshin region.

2. 計算結果および考察

2.1 気象モデル再現性評価

Fig.4 に神戸および大阪管区気象台における観測値および計算値について、日平均気温および風速の 2010 年 7 月 1 日~8 月 31 日の時系列変化を示す。気温については、神戸では D1, D3, D4 で、大阪では D2, D3, D4 で観測値と計算値がよく一致しており、計算期間を通しての変動パターンをよく再現できている。また、7 月の 3 日, 9 日, 30 日など、気温が急激に低下するようなピークでは神戸および大阪の D1~D4 全てで観測値と計算値がよく一致している。風速については、神戸の D1~D4 において、高い風速が現れる日はよく再現しているが、計算期間を通して全体的に計算で風速が過小評価されている。全体的には、高解像度化に伴い再現性が向上する傾向はあるものの、気温、風速ともに D3 と D4 では変動がほぼ一致しているという結果となった。

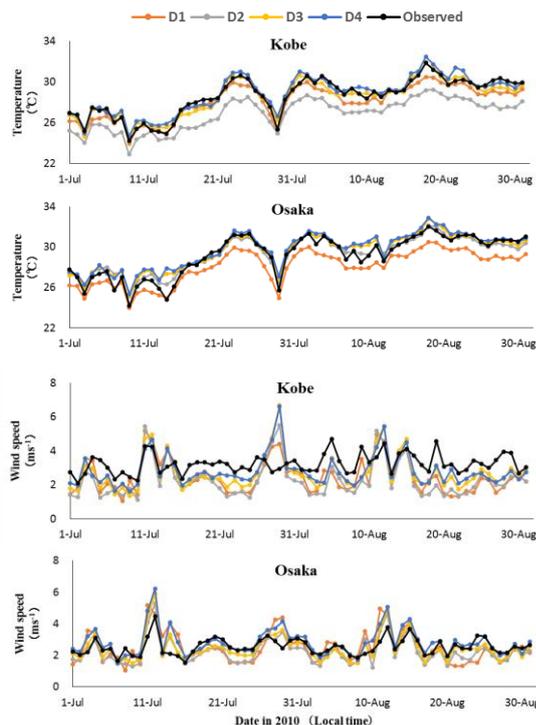


Fig.4 Daily time series of observed and WRF-simulated temperature and wind speed at Kobe and Osaka meteorological observatory from 1 July to 31 August 2010.

2.2 大気質モデル再現性評価

Fig.5 に D4 内の大気汚染常時監視局 100 局における平均の観測値および計算値について、NO₂ 濃度の日平均値および O₃ 濃度の日最高 8 時間値の 2010 年 7 月 1 日～8 月 31 日における時系列変化を示す。NO₂ 濃度の日平均値については、全体的に計算で過小評価されているが、D1 と比べると D2, D3, D4 は日々変動をよく再現できている。また、D2, D3, D4 間では日々変動にさほど差は見られないことがわかる。O₃ 濃度については、全体的に計算で過大評価されていることがわかる。特に、低 O₃ 濃度が観測された日では計算で過大評価の割合が大きくなっている。O₃ 濃度の日最高 8 時間値については、D1 と比べると D2, D3, D4 は日々変動をよく再現できている。D3 と D4 ではあまり差がなく、D2 と比べると、特に高 O₃ 濃度が観測された日で再現性がよくなっていることがわかる。

Fig.6 に D4 内の大気汚染常時監視局 100 局における NO₂ 濃度および O₃ 濃度の日最高 8 時間値についての、測定局ごとの観測値および CMAQ の計算値の計算期間平均値の比較を散布図で示す。NO₂ 濃度については、どの測定局においても観測値と計算値がよく一致し、計算で濃度の空間変動をよく再現できていると言える。O₃ 濃度の日最大 8 時間値については、どの測定局においても全体的に計算で過大評価となっている。特に、高濃度が観測された測定局では観測値と計算値がよく一致しているものの、低濃度が観測された測定局では計算値がより過

大となっている傾向が見られる。全体的には、NO₂ 濃度、O₃ 濃度ともに D1 および D2 と比べると、D3 および D4 の方が観測値と計算値が一致し、再現性が向上していることが分かる。

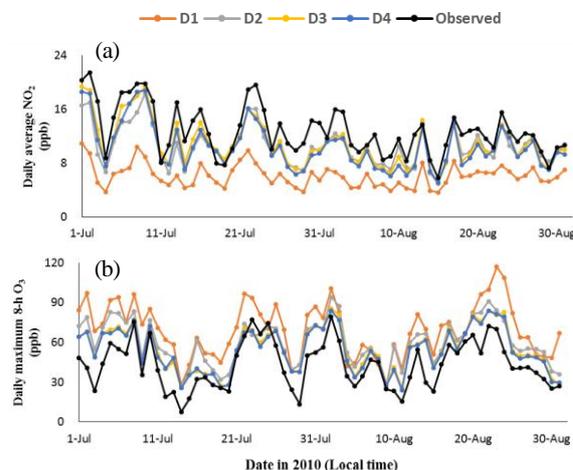


Fig.5 Daily time series of observed and CMAQ-simulated spatial mean daily average NO₂ (a) daily maximum 8-h O₃ (b) at ambient air pollution monitoring stations in the Hanshin region from 1 July to 31 August 2010.

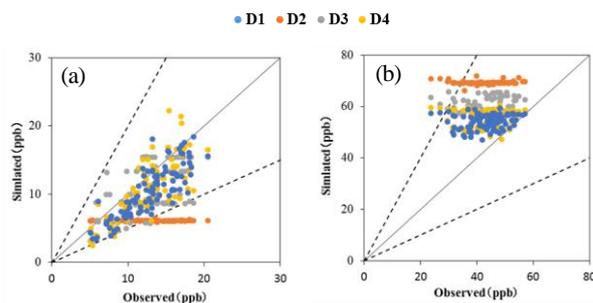


Fig.6 Scatter plots of temporal mean observed versus CMAQ-simulated daily average NO₂ (a) daily maximum 8-h O₃ (b) at ambient air pollution monitoring stations in the Hanshin region. 2:1, 1:2 and 1:1 reference lines are provided.

Table.1 に CMAQ の D1～D4 計算値に対する D4 内の大気汚染常時監視局 100 局における NO₂ 濃度および O₃ 濃度の日最高 8 時間値の日平均値の再現性に関する統計指標を計算領域別に示す。評価には統計指標として、相関係数 (R)、平均バイアス誤差 (MBE: Mean Bias Error)、二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) およびモデル一致性インデックス (IA: Index of Agreement) を用いた。IA 値については、0～1 の値をとり、1 に近いほど良い結果を示す指標である。NO₂ 濃度の日平均値については、R および RMSE の二項目で格子解像度を上げていくにつれ向上が見られることがわかる。MBE については D1～D3 間では 4.8 ppb ほど向上が見られるが、D4 は D2 よりも良くない結果となっている。また、IA については、D1～D3 間では向上が見ら

れるが、D3~D4では向上が見られないことがわかる。O₃濃度の日最大8時間値については、D1~D4においてMBE, RMSE, IAの三項目で向上が見られ、特にMBEについては、15.2 ppbも向上が見られることがわかる。また、IAについてはD3~D4では明確な向上は見られない。

Table.1 Observed and CMAQ-simulated concentrations at ambient air pollution monitoring stations in the Hanshin region and statistical measures for CMAQ-simulated of daily average NO₂ and daily maximum 8-h O₃.

		D1	D2	D3	D4
Daily average NO ₂	Sample number	5731	5731	5731	5731
	Mean_Obs (ppb)	12.8	12.8	12.8	12.8
	Mean_Sim (ppb)	6.1	10.5	10.9	10.4
	R	0.48	0.64	0.77	0.80
	MBE (ppb)	-6.7	-2.3	-1.9	-2.4
	RMSE (ppb)	8.5	5.2	4.5	4.4
	IA	0.49	0.77	0.85	0.85
Daily maximum 8-h O ₃	Sample number	5467	5467	5467	5467
	Mean_Obs (ppb)	43.2	43.2	43.2	43.2
	Mean_Sim (ppb)	69.3	60.0	55.0	54.1
	R	0.68	0.75	0.78	0.78
	MBE (ppb)	26.1	16.8	11.9	11.0
	RMSE (ppb)	30.8	21.9	17.7	17.0
	IA	0.62	0.74	0.80	0.82

Fig.7にD4内の大気汚染常時監視局別のCMAQのD1~D4計算値に対するNO₂濃度の日平均値およびO₃濃度の日最高8時間値についてのIAのうち、D4内全局についての値（以下、全局値）および各局についての値の中央値を示す。IAについては、NO₂濃度の日平均値において全局値が中央値よりも高くなっているのは、CMAQによる計算が、個別局における時間変動に比べて、複数局間の空間変動をより再現しているためであると考えられる。O₃濃度の日最高8時間値において全局値が中央値よりも低くなっているのは、CMAQによる計算が、複数局間の空間変動に比べて、個別局における時間変動をより再現しているためであると考えられる。

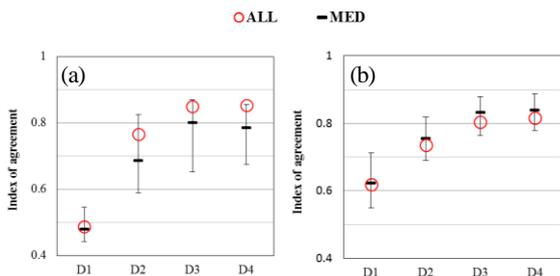


Fig.7 IA for CMAQ-simulated daily average NO₂ (a) and maximum 8-h O₃ (b) at ambient air pollution monitoring stations in the Hanshin region from 1 July to 31 August 2010.

Fig.8にD4内におけるCMAQによる2010年7月1日~8月31日の計算期間平均のNO₂濃度の日平均値およびO₃濃度の日最高8時間値のD1~D4計算値の空間分布を示す。NO₂濃度については、NO_x排出量分布を反映していると考えられる。O₃濃度については南西風である海風によりNO₂が輸送されて、風下においてO₃が生成されたためであると考えられる。

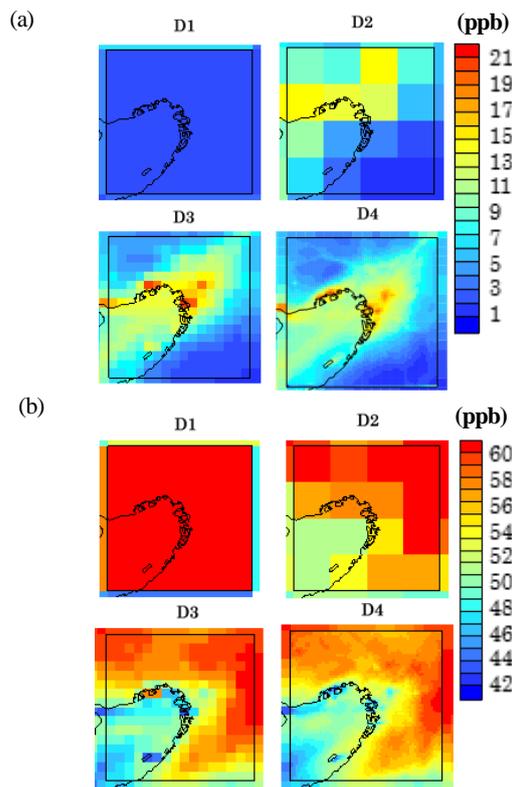


Fig.8 Spatial distribution of CMAQ-simulated daily average NO₂ (a) and maximum 8-h O₃ (b) in the Hanshin region.

3. 結論

本研究では、阪神地域を対象に、64, 16, 4, 1 kmの水平格子解像度でO₃シミュレーションを行った。格子解像度64kmから4kmまでは再現性の向上が確認できたが、4kmから1kmではほとんど再現性の向上が見られなかった。計算負荷との兼ね合いを考慮すると、本研究で考慮した格子解像度の中では、4kmが最も妥当であると言える。

参考文献

- 1) 環境省 (2014) 大気汚染状況について、http://www.env.go.jp/air/osen/jokyo_h26/rep03_h26.pdf.
- 2) 環境省 (2016) 平成27年光化学大気汚染の概要—意報等発令状況、被害届出状況—、<http://www.env.go.jp/press/files/jp/102421.pdf>.

ウランバートルにおける大気汚染を対象とした大気質モデル再現性評価
**Evaluation of air quality model performance for simulating air pollution in Ulaanbaatar,
 Mongolia**

○福原 峻汰 (大阪大学) 嶋 寺 光 (大阪大学)
 菅 澤 想 (大阪大学) 松 尾 智 仁 (大阪大学)
 近 藤 明 (大阪大学)

Ryota FUKUHARA*¹ Hikari SHIMADERA*¹ So SUGASAWA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

Ulaanbaatar faces severe air pollution caused by increasing coal combustions. This study applied the Community Multiscale Air Quality modeling system (CMAQ) to air quality simulation in Ulaanbaatar. The input meteorological and emission data were respectively produced from the Weather Research Forecasting model (WRF) and emission inventories including anthropogenic emissions for the Hemispheric Transport of Air Pollution (HTAP). CMAQ substantially underestimated air pollutant concentrations in Ulaanbaatar probably because of inaccurate spatial and temporal distributions in the HTAP emission inventory. By revising the emission data, CMAQ tended to better simulate air pollution in Ulaanbaatar. This result indicates that the improvement of emission data is the most important requirement to apply the model to Ulaanbaatar for understanding the air pollution situation.

はじめに

モンゴルは国土面積 156 万 km² に対して人口約 300 万人と国全体では人口密度は非常に小さいが、首都のウランバートルには全人口の半数近くが集中している。ウランバートルでは、急激な経済成長に伴って増加するエネルギー需要や、寒冷期の暖房需要を満たすために、大量の石炭が消費されている。主にこの石炭燃焼が原因となって、深刻な大気汚染が顕在化している¹⁾。大気汚染の実態把握や発生源寄与解析のためには、大気質モデルによるシミュレーションを活用する必要があるが、これまでに大気質モデルのウランバートルへの適用事例はない。そこで本研究では、ウランバートルを対象に大気質モデルを用いた大気汚染シミュレーションを行い、その再現性評価を行うことで、今後の大気汚染の状況把握へのモデル活用の可能性を示すことを目的とした。

1. 計算条件

ウランバートルにおける大気汚染シミュレーションには、気象モデルに Weather Research Forecasting model (WRF)²⁾ のバージョン 3.7、大気質モデルに Community Multiscale Air Quality modeling system (CMAQ)³⁾ のバージョン 5.1 を使用した。計算期間は、2014 年の 1 年間とし、計算領域は、Fig.1 に示す通り、東アジアを対象とした 45km 格子領域 (D1)、中国北東部からモンゴル東部を対象とした 15km 格子領域 (D2)、ウランバートル周

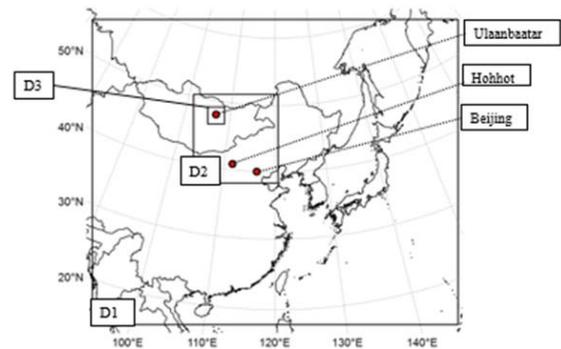


Fig.1 Modeling domains and locations of observation sites

辺を対象とする 5km 格子領域 (D3) の 3 領域とした。モデルの再現性評価には、モンゴルのウランバートル、中国の北京および呼和浩特における観測データを使用した。排出量データについては、Hemispheric Transport of Air Pollution (HTAP) 作業部会による人為起源排出インベントリのバージョン 2.2⁴⁾ をはじめとする、複数のデータセットを組み合わせて作成した。HTAP インベントリは、人為起源の二酸化硫黄 (SO₂)、窒素酸化物 (NO_x)、一酸化炭素 (CO)、非メタン揮発性有機化合物、10μm および 2.5μm 以下の粒子状物質 (PM₁₀ および PM_{2.5})、黒色炭素粒子、有機炭素粒子の排出量について、全球を対象に解像度 0.1° × 0.1° で整備されている。本研究の計算期間における平均 SO₂、NO_x、PM₁₀ 排出強度の空間分布を Fig. 2 に示す。

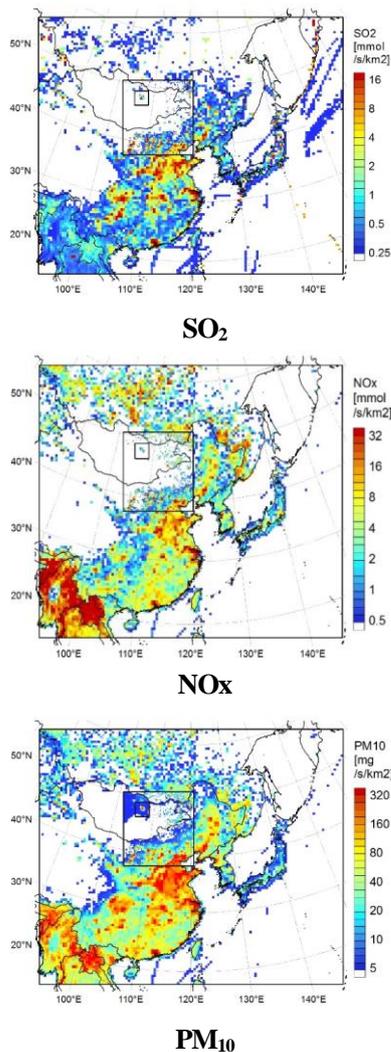


Fig.2 Spatial distributions of mean SO₂, NO_x and PM₁₀ emissions

2. 計算結果と考察

2.1 再現性評価

(1) 気象の再現性

気象モデル WRF の再現性評価のため、ウランバートルにおける気温と風速を対象に計算値と観測値の比較を行った。モデルの再現性評価には、統計指標として、相関係数 R、Mean Bias Error (MBE)、Mean Absolute Error (MAE)、Root Mean Square Error (RMSE)、Index of Agreement (IA) を用いた。IA は 0~1 の値をとり、1 に近いほどよく一致していることを示す指標である。気象の再現性評価には、Emery ら⁵⁾ が気象モデルの計算精度評価のために設定したベンチマークを用いた。ベンチマークは、気温に対して MBE ≤ ±0.5°C、MAE ≤ 2°C、IA ≥ 0.8、風速に対して MBE ≤ ±0.5 m/s、RMSE ≤ 2 m/s、IA ≥ 0.6 が定められている。

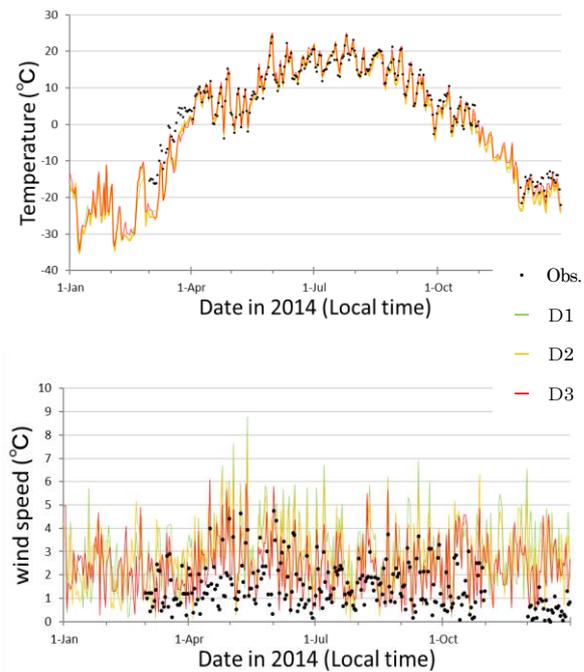


Fig.3 Time series comparisons of observed and simulated temperature and wind speed in Ulaanbaatar

Table.1 Statistical evaluation of WRF performance in Ulaanbaatar

種類	統計指標	D1	D2	D3
Temperature	観測平均 (°C)	6.3	6.3	6.3
	計算平均 (°C)	4.6	4.8	5.7
	R	0.99	0.99	0.99
	MBE (°C)	-1.7	-1.5	-0.6
	MAE (°C)	2.0	2.0	1.6
	RMSE (°C)	2.9	2.9	2.7
	IA	0.99	0.99	0.99
wind speed	観測平均 (m/s)	1.5	1.5	1.5
	計算平均 (m/s)	3.0	2.9	2.3
	R	0.66	0.61	0.52
	MBE (m/s)	1.6	1.4	0.9
	MAE (m/s)	1.6	1.5	1.1
	RMSE (m/s)	1.9	1.8	1.4
	IA	0.59	0.60	0.65

Fig.3 に、ウランバートルにおける気温および風速の計算値と観測値の日平均値の時系列変化を示す。気温については、計算期間を通して WRF の再現性が良好であることがわかる。風速については、WRF はやや過大評価をしているものの、日々変動を概ね良好に再現していることがわかる。

Table.2 に、D1~D3 の各領域のウランバートルにおける統計指標による計算値と観測値の比較を示す。D1 から D3 へと格子解像度が高くなるにつれて、気温と風速の再現性が向上していることがわかる。D3 において、気温については、計算値が観測値に比べて冬季に低い傾向があったことで MBE のベンチマークを満たさなかったが、MAE、IA のベンチマークを満たした。風速については、

A-47

全体として計算値が観測値に比べて大きい傾向があったことで MBE のベンチマークを満たさなかったものの、RMSE, IA のベンチマークを満たした。

以上の結果より、気象モデル WRF はウランバートルにおける気象場を概ね良好に再現したと考えられたため、WRF の計算結果を大気質モデル CMAQ に入力した。

(2) 大気汚染の再現性

大気質モデル CAMQ の再現性評価のため、ウランバートル, 呼和浩特, 北京における SO₂, 二酸化窒素 (NO₂), CO, オゾン (O₃), PM₁₀ および PM_{2.5} を対象に計算値と観測値の比較を行った。ウランバートルについては D3 の計算値, 呼和浩特および北京については D2 の計算値を観測値と比較した。Table.3 に、ウランバートル, 呼和浩特, 北京における統計指標による計算値と観測値の比較を示す。また、Fig.4 に、北京における時系列変化を Fig.6 の「Original」にウランバートルにおける時系列変化を示す。PM_{2.5} については、観測値が得られなかったため、計算値のみを示した。

Table. 3 Statistical evaluation of CMAQ performance in Ulaanbaatar,

		Hohhot and Beijing		
汚染物質	統計指標	ウランバートル	呼和浩特	北京
SO ₂ (ppb)	観測平均	7.4	16.2	7.2
	計算平均	6.2	45.5	31.5
	R	0.61	0.78	0.72
	MBE	-1.2	29.3	24.3
	MAE	3.8	29.3	24.3
	RMSE	5.4	38.6	29.0
	IA	0.71	0.49	0.44
NO ₂ (ppb)	観測平均	23.6	21.7	26.6
	計算平均	6.2	25.9	42.4
	R	0.52	0.72	0.49
	MBE	-17.4	4.2	15.8
	MAE	17.4	6.2	16.4
	RMSE	18.8	8.1	19.7
	IA	0.42	0.80	0.54
CO (ppb)	観測平均	932	1519	1016
	計算平均	160	640	1178
	R	-0.07	0.66	0.78
	MBE	-772	-879	162
	MAE	806	900	338
	RMSE	3164	1149	465
	IA	0.11	0.56	0.86
O ₃ (ppb)	観測平均	13.9	36.3	52.1
	計算平均	40.6	49.2	48.8
	R	0.50	0.72	0.84
	MBE	26.7	12.9	-3.3
	MAE	26.8	17.2	14.4
	RMSE	28.3	22.9	20.8
	IA	0.30	0.77	0.91
PM ₁₀ (μg/m ³)	観測平均	192.7	116.0	116.4
	計算平均	21.1	58.0	109.5
	R	0.34	0.43	0.72
	MBE	-171.6	-57.9	-6.8
	MAE	171.6	62.1	39.9
	RMSE	206.8	79.4	53.3
	IA	0.40	0.54	0.84
PM _{2.5} (μg/m ³)	観測平均		43.9	84.5
	計算平均	13.7	47.5	92.9
	R		0.68	0.83
	MBE		3.6	8.4
	MAE		15.9	29.2
	RMSE		24.3	39.8
	IA		0.82	0.90

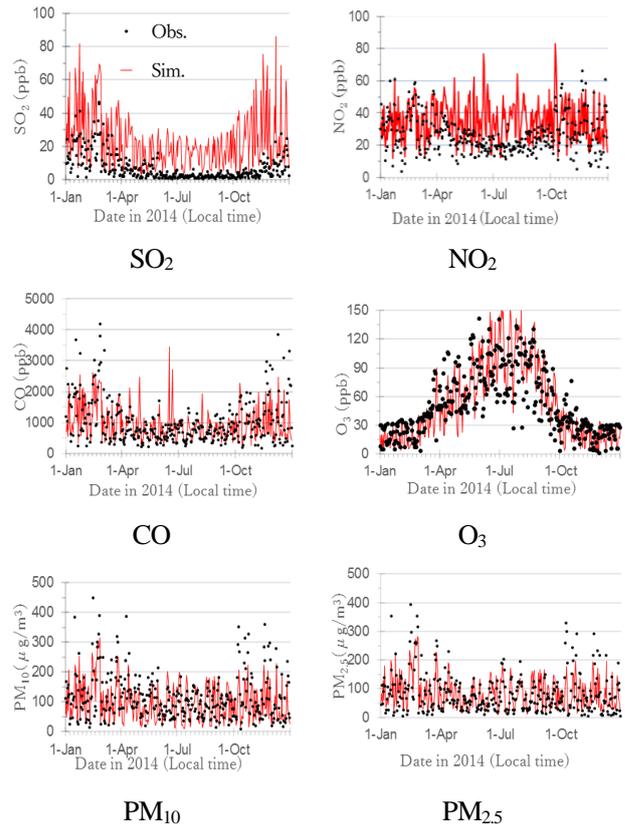


Fig. 4 Time series comparisons of observed and simulated concentrations in Beijing

ウランバートルにおいて、SO₂については濃度レベル、時間変動ともに概ね良好に再現された。しかし、NO₂, CO, PM₁₀については大幅に過小評価、O₃については過大評価となった。ウランバートルにおける大気汚染の再現性は高いといえるものではなく、大幅な改善が必要である。

呼和浩特, 北京においては、CMAQ は SO₂ については過大評価したものの、NO₂, CO, O₃, PM₁₀ についてはウランバートルに比べて明らかに良い再現性を示した。PM_{2.5} についても、両地点で濃度レベル、時間変動ともに良好に再現された。

ウランバートルで大気汚染の再現性が著しく悪い原因として、呼和浩特, 北京で大気汚染が概ね良好に再現されたことから、CMAQ 本体の物理・化学過程に起因する誤差は考えにくい。また、ウランバートルにおける気象の再現性に大きな問題はなかった。したがって、HTAP インベントリを基にしたウランバートルにおける排出量データが第一の原因として考えられた。そこで、排出量データを変更し、大気汚染の再現性が向上するかを確認した。

2.2 排出量データの変更と再現性の変化

本研究で使用した HTAP インベントリはウランバートルにおける排出強度を過小評価していると考えられる。

そこで、以下の3点のようにしてD3における排出量データの変更を行った。

- ① エネルギー・産業・家庭・交通部門排出を計算格子の都市域割合に応じて空間配分
- ② 家庭部門排出で内モンゴル自治区を基に季節変動を考慮
- ③ 産業部門排出の大半が低煙突からのものであることを想定し地表付近の鉛直層に排出量を集中

空間分布の変化の例として、Fig.5にD3における変更前後のPM₁₀排出強度を示す。

CMAQによる大気汚染物質濃度の排出量データ変更前後での比較をFig.6に示す。排出量がウランバートル都市域に集中したことで、SO₂、NO₂、CO、PM₁₀濃度は

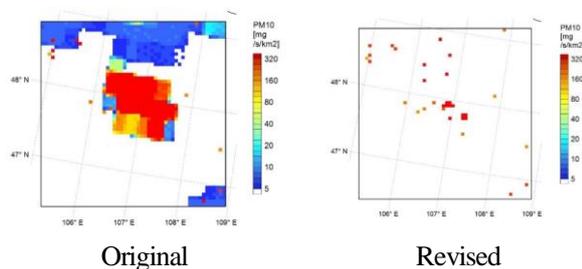


Fig. 5 Spatial distributions of mean PM₁₀ emissions before and after revision in D3

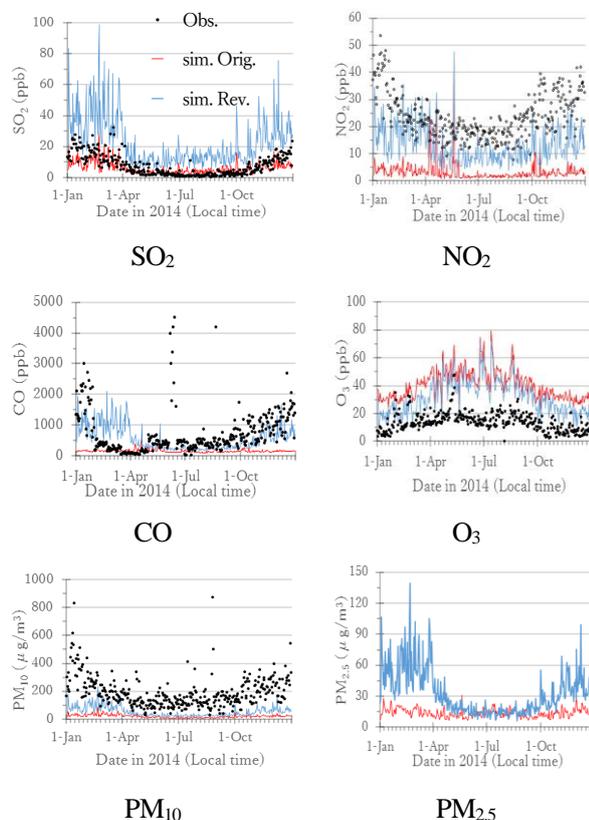


Fig. 6 Time series comparisons of concentrations simulated with original and revised emissions in Ulaanbaatar

上昇し、O₃濃度は低下した。元々再現性が良好であったSO₂については排出量変更によって過大評価となったが、その他の物質については濃度レベルが観測値に近づいた。以上の結果から、排出量の改善によって、大気質モデルによるウランバートルにおける大気汚染の再現性が向上する可能性が示された。

3. 結論

大気質モデル CMAQ を大気汚染が深刻化するウランバートルに適用したところ、その再現性は高いといえるものではなく、大幅な改善が必要であることがわかった。排出量データの改善が再現性向上に寄与することが示されたことから、今後、大気質モデルを大気汚染の実態把握に活用できるよう、ウランバートルの実態を反映した排出量推計を進めていく。

参考文献

- 1) D. Amarsaikhan, V. Battengel, B. Nergui, M. Ganzorig, G. Bolor : A Study on Air Pollution in Ulaanbaatar City, Mongolia Journal of Geoscience and Environment Protection, 2014, 2, p123-128
- 2)Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Baker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J.G.: A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR., 2009.
- 3)Byun D, Ching J: Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, EPA/600/R-99/030, 1999.
- 4)Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Dentener, F., Muntean, M., Pouliot, G., ... & Denier van der Gon, H. (2015). HTAP_v2. 2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(19), 11411-11432.
- 5)Emery C., Tai E. and Yarwood G.: Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Prepared for The Texas Natural Resource Conservation Commission 12118 Park 35 Circle Austin, Texas 78753. 2001.

気象・水文モデルを用いた淀川流域の水文特性に対する気候変動影響の解析
**Analysis of the climate change impacts on hydrological characteristics of Yodo river basin
 using meteorological and hydrological model**

○合田 昌弘 (大阪大学) 嶋寺 光 (大阪大学)
 松尾 智仁 (大阪大学) 小西 遼 (大阪大学)
 近藤 明 (大阪大学)

Masahiro GODA*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Ryo KONISHI*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

Climate change likely influences hydrological characteristics, and therefore, may endanger flood risk control and water resource management. In this study, hydrological model was driven by climate fields with or without dynamical downscaling of general circulation model output in Yodo river basin. The dynamical downscaling using meteorological model was shown to greatly influence hydrological simulation in the basin. Future hydrological characteristics were assessed by a comparison between reference period (1981-2000) and future period (2081-2100). The comparison indicated increases in flood risk in some areas and increases in drought risk in almost all areas in the basin in the future.

はじめに

近年、気候システムの温暖化に伴う影響が懸念されている。水文環境への影響として、蒸発散量の増加、極端な気象現象の増加、融雪時期の早期化や融雪水の減少などが引き起こされる可能性がある。このような影響は将来の洪水、渇水リスクに悪影響を及ぼすため、気候変動に対する適応策の必要性が高まっている。

そこで本研究では、近畿圏の重要な水源である淀川流域を対象とし、将来の水文特性に対する気候変動影響の解析を行うことを目的とした。数値解析には、気候変動を表現する全球気候モデル出力データ、地域気象を再現するために力学的ダウンスケーリングを行う気象モデル、河川流出解析を行う水文モデルを用いた。

1. モデル

1.1 全球気候モデル

全球気候モデル出力データとして、Earth System Grid (www.earthsystemgrid.org) より入手できる The Community Climate System Model version 4 (CCSM4) ¹⁾ の出力データセットを用いた。将来シナリオは、中程度の気候変動を想定した Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5 シナリオを採用した。計算期間は、現況再現として 1981 - 2000 年の 20 年間、将来予測として 2081 - 2100 年の 20 年間とした。

1.2 地域気象モデル

全球気候モデル出力に基づいて地域気象を再現するため、地域気象モデル Weather Research and Forecasting

model (WRF) ²⁾ の Advanced Research WRF (WRF-ARW) のバージョン 3.5.1 を使用した。WRF の計算領域は、80km 格子領域 (D1)、20km 格子領域 (D2)、5km 格子領域 (D3) の 3 領域とした。この計算領域を Fig.1 に示す。Fig.1 中の経緯線は CCSM4 の格子を、D3 内の黒線で囲んだ領域は淀川流域を示す。

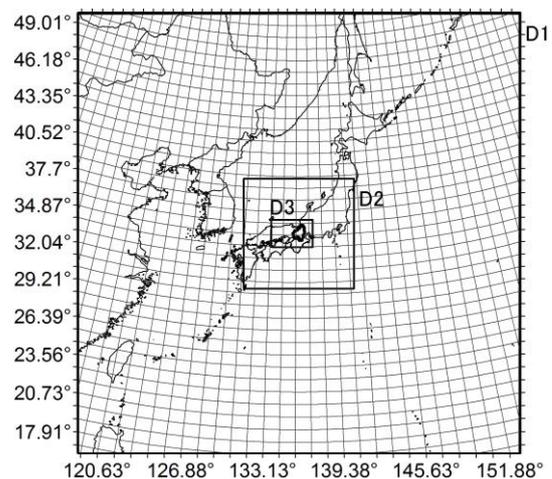


Fig.1 Computational domains for WRF

1.3 水文モデル

水文モデルは、熱収支モデルと流れ解析モデルから構成される。解像度は 1km×1km とし、入力データの気温と降水量には標高補正を適用した。水文モデルで用いた標高データと土地利用データを Fig.2 に示す。

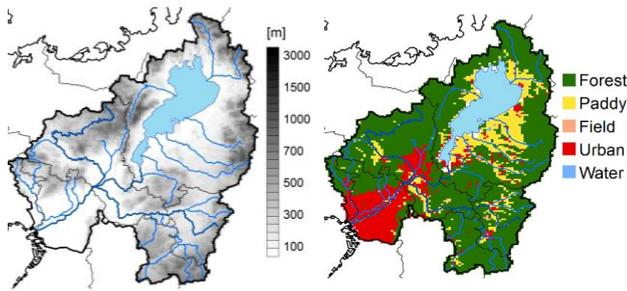


Fig.2 Elevation and land use in Yodo river basin

2. 解析手法

2.1 力学的ダウンスケーリングの効果の評価

気象モデルによる力学的ダウンスケーリングを行った場合の計算をケース A、行わなかった場合の計算をケース B とした。ケース A、B の水文モデル計算結果の比較によって、力学的ダウンスケーリングの効果の評価した。

2.2 洪水・渇水の解析

20 年間の計算結果から、50 年に 1 度、100 年に 1 度起こるような洪水や渇水の流量を推定するため、極値理論に基づく水文統計解析³⁾を行った。解析にはケース B の計算結果を用い、現在と将来の 20 年間の年最大（最小）流量を極値分布に当てはめ、洪水（渇水）の流量を推定した。このような推定には誤差が伴うため、リサンプリング法によって推定流量の標準偏差を推定した。

3. 結果

3.1 水文諸量への気候変動影響

Fig.3 に、それぞれケース A、B の 20 年平均気温の現在、将来、将来と現在の差分の空間分布を示す。ケース A の現在、将来の図で詳細な分布が見られるが、これは標高補正の効果であり、将来と現在の差分の分布では CCSM4 の格子解像度を反映した分布になっている。ケース B では南西部の気温が上昇しているが、これは土地利用（市街地）が考慮されたためであると考えられる。また、気温の変化としてはケース A、B ともに上昇した。

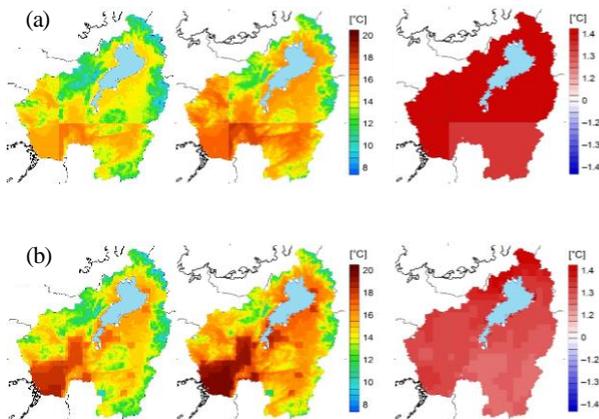


Fig.3 Mean temperature in case A (a) and B (b)

(left: current, center: future, right: future - current)

Fig.4 に、それぞれケース A、B の 20 年平均年降水量の現在、将来、将来と現在の差分の空間分布を示す。ケース A では Fig.3(a)と同様の標高補正の効果が表れている。この標高補正の効果としてケース A でも地形性の降水が見られるが、ケース B では、力学的ダウンスケーリングによって地形性の降水がより明確に再現されている。また将来、ケース A では北部で降水量が減少するが、ケース B では流域のほぼ全体において降水量が増加するという結果となった。特にケース B では北西部で降水量の増加が顕著であるが、これは地形性の降水の再現と、将来の気温上昇に伴って水蒸気量が増加し、降水の強度が増したことが原因である。

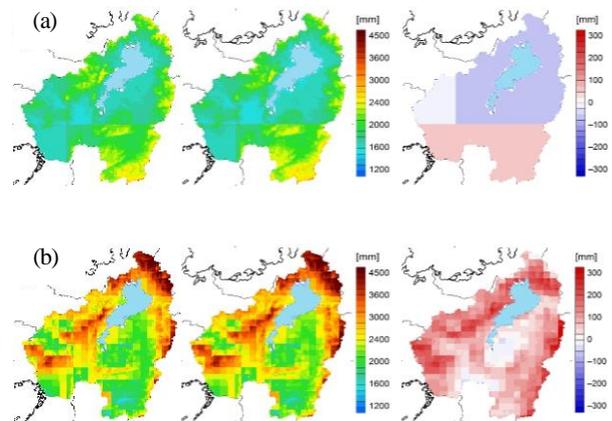


Fig.4 Mean annual precipitation in case A (a) and B (b)

(left: current, center: future, right: future - current)

Fig.5 に、それぞれケース A、B の 20 年平均年蒸発散量の現在、将来、将来と現在の差分の空間分布を示す。将来への変化について、ケース A、B ともに流域の多くの地域で蒸発散量が増加したが、ケース A では B よりも増加が大きい。これは、ケース A では将来の気温の上昇がより大きく評価されているためである。

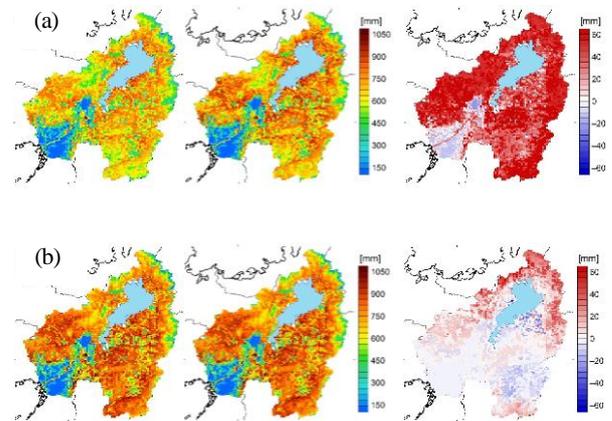


Fig.5 Mean annual evapotranspiration in case A (a) and B (b)

(left: current, center: future, right: future - current)

Fig.6 に、それぞれケース A, B の 20 年平均積雪深の現在, 将来, 将来と現在の差分の空間分布を示す。A では積雪がほぼ見られないが, B では流域北部で積雪が見られる。これは降水量の増加に伴う降雪量の増加が原因である。また B では、現在, 将来における積雪深の増加に伴って、現在から将来への積雪深の減少が A より大きくなっている。積雪の多い地域は特別豪雪地帯の南限(柳ヶ瀬) 付近の地域であり、気温が上昇した際には降雪の減少の影響が強く表れる。このように、力学的ダウンスケーリングによって積雪の減少という気候変動影響が考慮されるようになった。

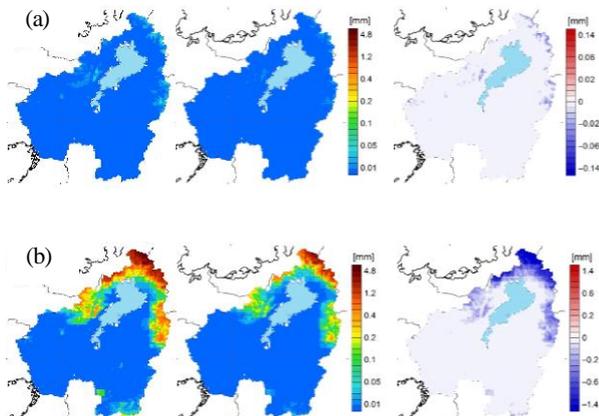


Fig.6 Mean snow depth in case A (a) and B (b)
(left: current, center: future, right: future - current)

Fig.7 に、それぞれケース A, B の 20 年平均流量の現在, 将来, 将来と現在の差分の空間分布を示す。A では将来多くの地域で流量が減少するが, B では流域全体で流量が増加するという結果となった。A では流域北部での降水量の減少, 流域全体での蒸発散量の増加が予測されており、これらが流量減少の原因である。また, B で将来流量が増加した原因としては、Fig.4(b)に示した降水量の増加が支配的な要因である。

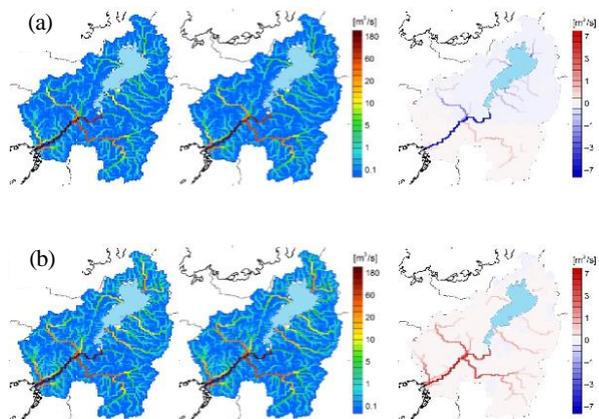


Fig.73 Mean discharge in case A (a) and B (b)
(left: current, center: future, right: future - current)

以上の分析によって、気象モデルは地形や土地利用に基づいて全球気候モデルの出力を合理的にダウンスケーリングするため、その効果が水文諸量に大きく影響したことが示された。また、ダウンスケーリングした入力データを用いた水文モデル計算により、将来の淀川流域への気候変動影響として、降水量の増加, 積雪の減少, 流量の増加といった影響が予測された。これらの予測結果は全球気候モデル出力を直接水文モデルへ入力した場合の予測結果とは異なっており、気候変動影響の評価において、入力データの対象流域スケールへのダウンスケーリングが重要な効果を持つことが示唆された。

3.2 洪水・渇水への気候変動影響

Fig.8 に、洪水, 渇水について解析を行った 5 地点 (加茂, 桂, 宇治, 枚方, 小戸) を示す。

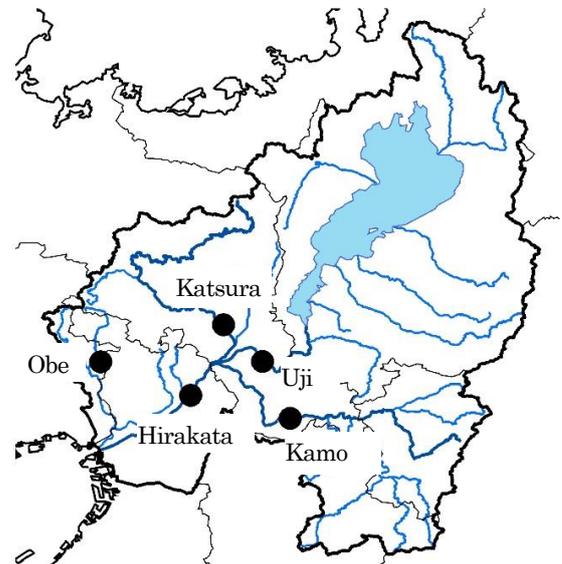


Fig.8 Locations of sites for extreme flood and drought analyses

Fig.9 に、それぞれの地点における、20 年, 50 年, 100 年に 1 度の洪水の推定された流量を示す。図中のエラーバーは推定流量の標準偏差を示す。加茂, 宇治, 枚方では将来の洪水の流量が減少している一方、桂, 小戸では洪水の流量は増加しており、変化に地域差が見られた。加茂, 宇治, 枚方における洪水流量の減少の原因としては、積雪量の減少に伴って融雪時期の流量が減少したことが考えられる。また、桂, 小戸における洪水流量の増加は、Fig.4(b)に示した流域北西部での降水量の顕著な増加によるものである。将来の洪水リスクの評価として、流域西部の地域における洪水リスクの増加が示唆された。

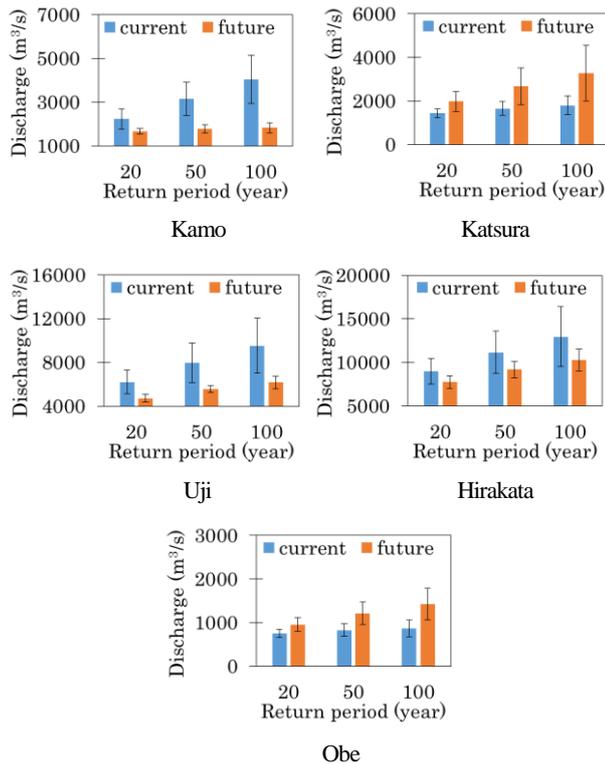


Fig.9 Estimated extreme flood discharge

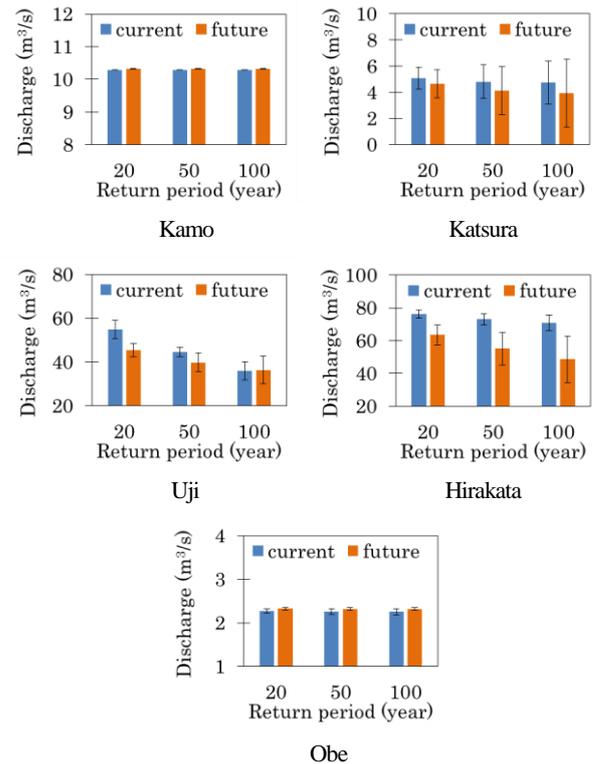


Fig.10 Estimated extreme drought discharge

Fig.10に、それぞれの地点における、20年、50年、100年に1度の渇水の推定された流量を示す。加茂、小戸では渇水の流量にはほぼ変化がなく、桂、宇治、枚方では渇水の流量が減少するという結果となった。特に、枚方においては減少が顕著であった。地域差が生じたという点は洪水の解析結果と同様であるが、渇水については流量が増加する地点は見られず、全体として減少傾向が見られた。このような渇水の流量の減少は、山林からの流出に対して将来の蒸発散量の増加が影響したことが原因である。Fig.2に示したように淀川流域の大部分の土地利用は山林となっているため、渇水時の流量に関しては山林からの流出が重要となる。山林からの流出は、河川流出に比較して緩慢であるため、蒸発散の影響が大きい。淀川流域が以上のような特性を持つ一方、Fig.5(b)に示したように蒸発散量は将来多くの地域で増加しており、この蒸発散量の増加が影響したために渇水の流量が減少した。将来の渇水リスク評価として、流域の多くの地域における渇水リスクの増加が示唆された。

本研究では20年間の計算結果を外挿して50年に1度、100年に1度起こるような洪水や渇水を推定したが、このような稀に起こる現象をより正確に推定するためには多くの標本が必要である。そのため、計算期間をさらに長くすることが今後の課題である。

4. 結論

本研究では、気象モデルと水文モデルを用いて将来の淀川流域の水文特性に対する気候変動影響の解析を行った。その結果、気象モデルを用いた全球気候モデル出力の力学的ダウンスケーリングが降水量や河川流量といった水文諸量の解析に大きく影響することや、将来の淀川流域では平均的には降水量の増加や流量の増加が生じることが示された。洪水については、将来への変化には地域差があり、一部の地域では洪水リスクが増加することが示唆された。渇水については、多くの地域で流量の減少が予測され、蒸発散量の増加に伴う渇水リスクの増加が示された。今後の課題としては、極端現象をより正確に推定するために計算期間を長くすることが挙げられる。

参考文献

- 1) Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B., Rasch, P. J., Vertenstein, M., Worley, P. H., Yang, Z. L., Zhang, M. : The Community Climate System Model Version 4, Journal of Climate, Vol.24, pp.4973-4991, 2011
- 2) Skamarock, W. C., Klemp, J. B. : A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, Journal of Computational Physics, Vol.227, Issue 7, pp.3465-3485, 2008
- 3) 星清: 水文統計解析, 開発土木研究所月報, No.540, pp.31-63, 1998

分布型マルチメディアモデルを用いた琵琶湖・淀川流域における水銀の環境動態解析
Analysis of fate and transport of mercury in Lake Biwa-Yodo River basin using multimedia model

○福間 晴亮 (大阪大学) 日岡 佑介 (大阪大学)
 嶋寺 光 (大阪大学) 松尾 智仁 (大阪大学)
 近藤 明 (大阪大学)

Haruaki FUKUMA*¹ Yusuke HIOKA*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

In this study, we developed one box-type and distributed-type multimedia models to evaluate environmental fate and transport of mercury. We applied the models to Lake Biwa and Yodo River basin with estimated mercury emissions for a period from 1946 to 2009 in order to estimate the mercury concentration in four environmental media: atmosphere, soil, water, and sediment. The concentrations calculated by the two models were compared to the measured concentrations. The comparison showed that the one box-type model approximately captured the current concentration level in the four media and the distributed-type model better simulated the concentration in the atmosphere and sediment.

はじめに

産業革命以後、我々人間の産業活動に伴い、様々な有害化学物質が環境中に排出されてきた。このような化学物質が人の健康や生態系へ及ぼすリスクを評価し、適正な監視と管理を行うためには、その環境濃度を推定することが必要である。そして基本的な濃度推定の方法であるサンプリングなどによる有害物質の現状把握だけではなく、有害物質の環境挙動を表現する運命予測モデルでの活用が有効である。その中で有機化合物の環境中挙動に対するマルチメディアシミュレーションは数多く実施されているが、有害金属に対してはほとんど適応されていない。1956年に水俣病が魚を媒体とした人為的環境汚染による中毒であることが明らかになり、水銀の有害性は国際的にも注目され、日本のみならず各国において医学的、科学的、生物的研究が盛んとなった。そして2013年に熊本で「水銀に関する水俣条約」が採択・署名され、水銀の一次採掘から貿易、水銀添加製品や製造工程での水銀利用、大気への排出や水・土壌への放出、水銀廃棄物に至るまで、水銀が人の健康や環境に与えるリスクを低減するための包括的な規制が定められた。しかし、日本、中国、アメリカが批准する中、東南アジア諸国の批准が遅れており、条約は未だ発行条件の締約国数に達しておらず発行していない。人為起源の排出量は産業革命以来増加傾向にあり、その中でも54%(2000年)がアジア地域からの排出とされている¹⁾。人間活動によって排出される水銀はガス状の金属水銀であるため気団に乗って移動し、排出源から遠く離れた場所にも影響を与える²⁾。そこで、

国内外の水銀の排出を考慮したうえで、環境中の大気、土壌、水域等の各媒体に存在する水銀の濃度計算モデルを構築し、人へのリスク評価を行うことが必要となってくる。また、水銀の一部は水域で生物濃縮することから、閉鎖性水域において水銀濃度をモニタリングすることは重要である。閉鎖性淡水域の代表である琵琶湖は日本最大の湖であり、多様な固有生物を有する古代湖である。琵琶湖水の滞留時間は約19年³⁾と長く、水生生物に水銀の高濃度蓄積が発現する可能性がある。また、これらの理由から琵琶湖を水銀の研究対象にしている先行研究が多く存在する^{4,5,6)}。以上を踏まえて、本研究では、現在一般環境中に存在する水銀の有害性を評価するため、琵琶湖・淀川流域で水銀のOne Box型と分布型の二種類のマルチメディアモデルを構築し、濃度計算を行った。また、計算値を実測値と比較し、その妥当性を評価した。

1. モデルの概要

水銀などの残留性の強い化学物質挙動解析を行う場合、単一媒体のみを対象としたシミュレーションでは不十分であり、メディア間の移動を考慮できるマルチメディアモデルが有用である。

Fig. 1にマルチメディアモデルの概要図を示す。本研究では対象領域を1つの箱と仮定し、箱内の4つ媒体における濃度は均一と仮定するOne Box型と、対象領域を約1 km×約1 kmに分割し、各メッシュを4つの媒体から構成することで計算する分布型の2種類のモデルを作成した。モデル構築に関して以下の仮定をおいた。

- ① 実環境は大気、水域、土壌、底質の4つの主要なメディアで構成されており、また、水域は液相、浮遊粒子相(SS)、交換性イオンから成り、土壌、底質は液相、交換性イオン、粒子相から成る。
- ② 大気においては風の移流による対象領域外からの化学物質の流入、又は対象領域外への流出がある。
- ③ 水銀は推定した排出先に基づいて、各媒体に排出される。(2章参照)
- ④ 水銀はガス状水銀、二価水銀、有機水銀の形状で存在する。
- ⑤ 大気中で水銀はガス状水銀または二価水銀の形で存在していて、ガス状水銀は土壌と水域に沈着する際に二価水銀に形を変える。
- ⑥ 大気ガス状水銀および二価水銀は重力および降雨の影響により水域と土壌へ沈降する。
- ⑦ 土壌、水域で二価水銀の一部は有機化される。
- ⑧ 土壌、水域、底質に関しては、粒子相から液相への金属化学物質の溶出と粒子相 - 液相間の陽イオン交換平衡がある。
- ⑨ 河川水から底質水への拡散輸送がある。
- ⑩ 土壌・底質厚さは一定とする。

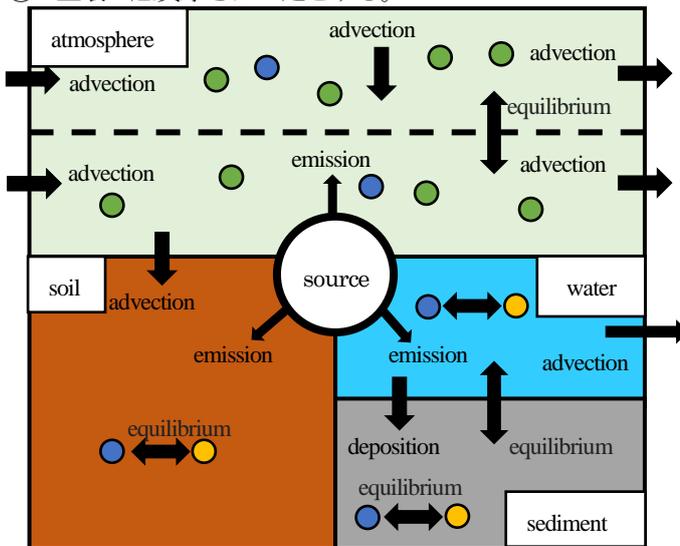


Fig.1 Schematic of multimedia model

2. 水銀の排出量推計

2.1 PRTRについて

PRTR 制度とは、人の健康や生態系に有害な恐れのある化学物質が、事業所から大気、水、土壌などの環境へ排出される量及び廃棄物に含まれて事業所外へ移動する量を、事業者が自ら把握し国に届け出をし、国は届出データや推計に基づき、排出量・移動量を集計・公表する制度である。

2.2 PRTR 届出内排出量

届出内排出量による対象領域内の排出量の推定は、

PRTR データに含まれる各事業所の排出量と住所を使用した。

2.3 PRTR 届出外排出量

届出外排出量推計方法は、PRTR データに掲載されているものを参考にした。県別の推定結果が掲載されているため、各府県の事業所数に対する流域内の事業所数の比を掛けることで流域内の PRTR 届出外排出量とした。

2.4 その他の排出源からの水銀排出量推定

貴田⁷⁾が推定した多量に使われていた用途の水銀の使用量から、過去の水銀排出量を推定した。まず、使用量が多かった用途の水銀消費量を流域内の消費量に換算した。その際、使用量を日本の事業所数に対する流域内事業所数に比例させ流域内使用量に換算した。クロロアルカリ工業、触媒からの水銀の排出量については、消費量の50%が環境負荷を与える形で廃棄されたとした。農薬からの排出量については、当時の水銀輸出割合、農作物への付着割合を考慮し、排出量を推定した。それ以外の用途からの水銀の排出量については、水銀が使われた製品の廃棄時に半分は埋め立て処理、残りは焼却処理されて環境中へ排出されるとして推定した。

2.5 流域外の影響について

東アジア地域における急速な産業発展に伴って排出された大気汚染物質の越境輸送が指摘されているため外から流入してくる水銀も考慮する必要がある。よって流域外からの影響を流入大気濃度で考慮した。中国からの影響が大きいため、過去の流入大気中水銀濃度を中国の GDP⁷⁾ 成長率に比例させた。

2.5 1956年以前の排出量

データが不足していた1956年以前の水銀排出量は、大気、水域に関しては1957年から1946年まで単調減少すると仮定し、土壌は水銀農薬の使用が開始された1952年を排出量0とし、1952年まで単調減少すると仮定した。以上の方法で推定した排出量を Fig. 2 に示す。

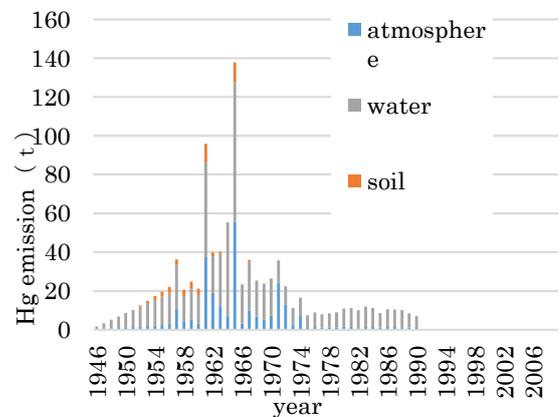


Fig.2 Estimated results of leads emissions to the air and soil, water in Lake Biwa - Yodo River (1946-2009)

3. 水銀濃度推計結果

3.1 One Box 型マルチメディアモデルの推計結果

One Box 型マルチメディアモデルを用いて 1946 年から 2009 年までの各媒体の水銀濃度を出力した。各媒体の 2009 年における One Box 型マルチメディアモデルの計算結果と実測値の比較を Fig. 3 に示す。底質では計算結果が比較的高い値を示しているが、すべてのメディアにおいてオーダーレベルで計算結果が実測値と同じ値を示した。

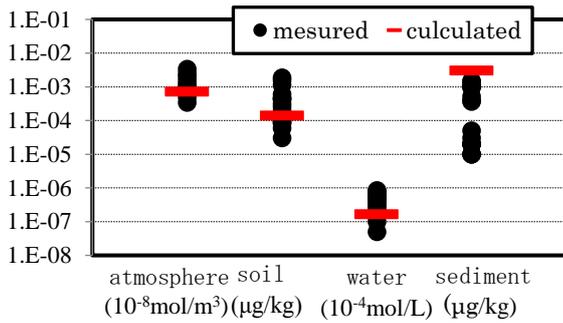


Fig.3 Comparison between measured values and estimated values in four media in 2009

3.2 分布型マルチメディアモデルの推計結果

分布型マルチメディアモデルの計算妥当性を評価するため、大気と底質において実測値との比較を行った。これを Fig. 8 に示す。大気、底質の 2 つのメディアにおいて実測値との誤差は一桁以内に収まっており、モデルの計算値は妥当であるという事が分かった。大気においては過小評価の傾向がみられるが、概ね実測値を再現しているという事が分かった。底質においては One Box 型マルチメディアモデルで過大評価の結果が出たが、分布型マルチメディアモデルでは過大評価を修正できた。水域、土壌は実測データがなく今回は省いた。

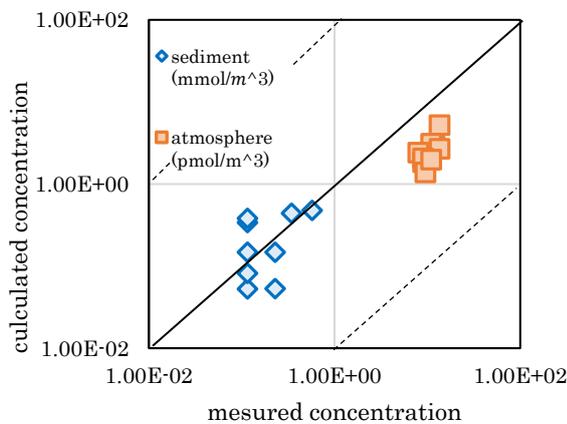


Fig.4 Comparison between measured values and calculated values (atmosphere and sediment)

大気、土壌、水域、底質の濃度分布を示す。

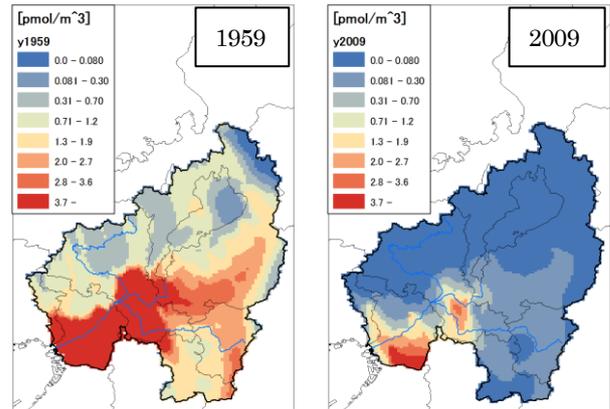


Fig.5 Concentration distribution of mercury in Lake Biwa - Yodo River basin (atmosphere)

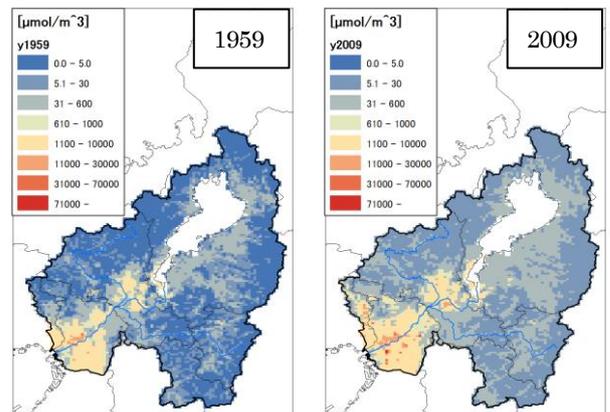


Fig.6 Concentration distribution of mercury in Lake Biwa - Yodo River basin (soil)

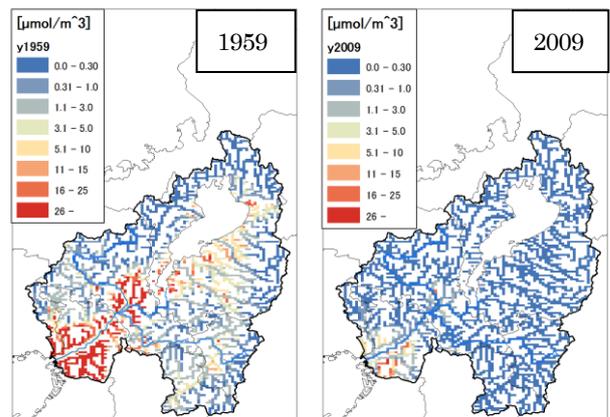


Fig.7 Concentration distribution of mercury in Lake Biwa - Yodo River basin (water)

次に Fig. 5-8 に対象領域の 1959 年, 2009 年における

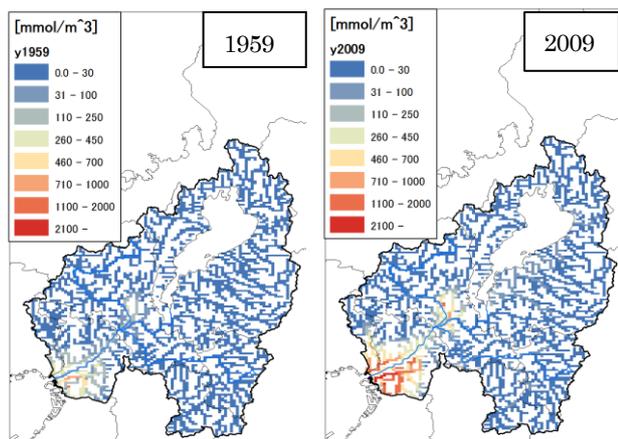


Fig.8 Concentration distribution of mercury in Lake Biwa - Yodo River basin (sediment)

いずれのメディアも淀川下流域において水銀濃度が高くなっていることが分かる。また、大気メディアでは1959年当時の濃度が2009年に比べて非常に高く、さらに京都府南部にも水銀濃度が高い地域が観測されている。対して琵琶湖上空では大気中の水銀濃度が低いという事が分かる。土壌メディアでは1959年より2009年に広範囲で濃度が上昇していることが分かる。これは残留性の高い性質を持つ水銀が土壌に蓄積されている事が原因と考えられる。また濃度上昇は琵琶湖西部より東部でより顕著であることが観測された。土壌の濃度分布が大気と比べて細かく分かれているのは人間活動による土地利用に起因していると考えられる。水域メディアでは他のメディアと同様に淀川下流域で高い濃度が観測されている。また、マルチメディアモデルの概要で述べたように水域は土壌から流入する水銀の影響を受けるので、土壌メディアと同様に琵琶湖の西部より東部の濃度が高い傾向にある。加えて、水域内での移流の影響を受けて、上流より下流のほうが濃度が高い傾向にある。1959年の図をみると土壌メディアの濃度が低い奈良県北東部で水域メディアの濃度が高くなっていることが分かる。これは上流から流されてきた水銀が下流で観測されるためだと考えられる。底質では水域からの影響が大きく水域で高濃度を示していた領域では同様に高濃度を示した。

4. 結論

One Box 型、分布型の両方で水銀の挙動を再現できた。One Box 型ではどのメディアに関してもオーダーレベルで再現できた。しかしその中で底質が過大評価傾向にあったが、これは底質粒子径を一定と設定した事が原因だと考えられる。分布型モデルでは大気と底質で実測値と

比較したが、どちらもオーダーレベルで水銀挙動が再現できた。また、水銀濃度の分布をみると、大気メディアでは偏西風の影響によると見られる北東に向かって濃度が広がる分布がみられ、土壌メディアでは人間の産業活動に起因する細かい空間変動がみられた。また水域メディアでは下流のほうが濃度が高いという傾向が。底質メディアでは水域メディアからの影響を反映した濃度分布がそれぞれ見られた。分布型では上記のようなそれぞれのメディアの濃度分布特徴が観察できた。この濃度分布と経年変化傾向を利用すれば将来予測と共に人的被害への対策も可能である。また、今回構築したモデルは異なる地域や対象物質に対して適用することも可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Pacyna, E. G., Pacyna, J. M., Steenhuisen, F. and Wilson, S: Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000, *Atmos. Env.*, 40, 4048-4063. 2006
- 2) 清水香奈, 山本浩平, 東野達: 東アジア地域における運命予測モデルを用いた水銀の影響評価 ; 土木学会論文集 G Vol.66, No.3, 136-148, 2010.9
- 3) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター, 琵琶湖の概要, <http://www.lberi.jp/root/jp/13biwakogaiyo/bkjindex.htm> (2013年7月時点).
- 4) 菱田尚子, 永淵修: 琵琶湖集水域における水銀沈着量の空間分布; 水環境学会誌, *Journal of Japan Society on Water Environment* Vol.37, No.4, pp.155-161 (2014)
- 5) 鈴木由紀子, 大手信人, 谷田幸治, 三条英章, 勝山正則, 伊藤雅之 (2008) 森林集水域における水銀動態に関する研究, 日本生態学会全国大会一般講演ポスター発表要旨, 2-277.
- 6) 橋本尚己, 永淵修, 中澤暦, 國松孝男 (2010) 琵琶湖集水域における大気降下物負荷量の時間的・空間的な差異の評価, *環境工学研究論文集*, 47, 545-551.
- 7) 世界の経済・統計・情報サイト http://ecodb.net/country/CN/imf_gdp.html#index01
- 8) 貴田晶子: 我が国及び世界の水銀の使用・排出状況 ; 水銀条約に関する公開セミナー 2012.1

「平成 26 年 8 月豪雨」を対象とした気象モデルによる
降水の再現と海面水温に対する感度評価

Simulation of “the heavy rainfall episode in August 2014 over Japan”
and analysis of its sensitivity to SST using a regional meteorological model

○南 口 侑 希 (大阪大学) 嶋 寺 光 (大阪大学)
松 尾 智 仁 (大阪大学) 近 藤 明 (大阪大学)

Yuki MINAMIGUCHI*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

There is a concern over the increase of precipitation associated with the increase of sea surface temperature (SST) due to global warming. In this study, the Weather Research and Forecasting (WRF) model was used to simulate “the heavy rainfall episode in August 2014 over Japan”. The WRF simulations for 7 different conditions were performed to determine the optimal condition for sensitivity analyses of the episode to SST. In the sensitivity analyses, SSTs around Japan were changed by +2 K, +1 K, -1 K and -2 K homogeneously from the original SST data. The analyses showed that precipitation increased with increasing SST excluding the +2 K simulation, in which precipitation was less than that of the +1 K simulation because the air temperature rise increased the amount of saturated water vapor.

はじめに

近年進行する地球温暖化により、気候変動が起きていると考えられている。IPCC 第 5 次評価報告書によると、気候変動の一つとして、降水量の増加が挙げられている¹⁾。特に、強い降水現象の回数および降水量が増加すると考えられており、この理由として、地球温暖化によって気温が上昇することにより飽和水蒸気量が増えること、海面水温の上昇によって海面からの蒸発により大気へ供給される水蒸気量が増加することが挙げられる。本研究では、地球温暖化による海面水温上昇が大雨のような降水に与える影響を評価するため、「平成 26 年 8 月豪雨」を対象として(1)集中豪雨事象の再現をすること、(2)海面水温に対する降水の感度を評価することの 2 つを目的としてシミュレーションを行った。なお、本研究で対象とした「平成 26 年 8 月豪雨」は、2014 年 7 月 30 日～8 月 26 日に発生した災害である。台風第 12 号、第 11 号が相次いで日本に接近・上陸し、前線が日本付近に長く停滞したことで、日本全国で記録的な大雨が観測された。

1. 計算条件

1.1 共通の計算条件

本研究では気象モデル WRF-ARW (Advanced Research Weather Research Forecasting model)²⁾ のバージョン 3.7 を使用した。Fig. 1 に計算領域および計算結果の比較対象地点である気象官署の位置を示す。評価対象とする期間は 2014 年 8 月 1 日～2014 年 8 月 31 日とした。計算領域

としてほぼ日本全国を含む領域を設定し、鉛直層は地表面から上空 100 hPa までを 40 層に分割した。本研究で使用した気象モデルの設定を Table. 1 に示す。

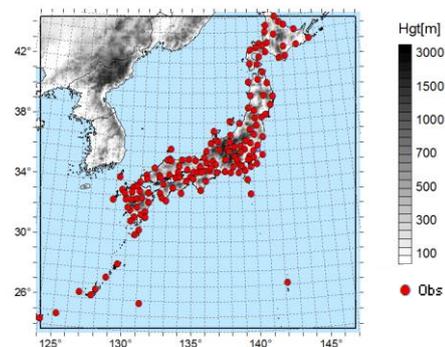


Fig. 1 Modeling domain and locations of meteorological observatories.

Table. 1 WRF configurations

Parameter	Setting
Initial and boundary	NCEP FNL, REG-SST-HR, MSM-GPV
Topography	USGS Global 30 Arc-Second Elevation
Land use	USGS 24-category data, MLIT Land Use Fragmented Mesh
Explicit moisture	WSM6 scheme
Cumulus	Kain-Fritsch scheme
PBL	YSU scheme
Surface	Noah land-surface model
Radiation	RRTM (longwave), Dudhia (shortwave)
FDDA	$G_{t,uv} = 1.0 \times 10^{-4}$, $G_q = 1.0 \times 10^{-5} [s^{-1}]$

1.2 比較のための計算条件

本研究では、降水の再現計算と、海面水温変化に対する感度評価の2つの実験を行った。それぞれ複数の条件を設定して計算を行い、その結果を比較した。

(1) 再現計算

海面水温変化実験のための最適条件を決定するにあたり、Table 2 に示す7条件で再現計算を実施した。

Table 2 Condition settings of simulations to determine the optimal condition for SST sensitivity study

Conditions	FDDA	Resolution	Cumulus	Period
TQW_5km	Temperature, Humidity, Wind speed	5 km	No	Usual
no_5km	None	5 km	No	Usual
no_5km_2day	None	5 km	No	2 days
W_5km	Wind speed	5 km	No	Usual
W_2.5km	Wind speed	2.5 km	No	Usual
W_10km	Wind speed	10 km	No	Usual
W_10km_cu	Wind speed	10 km	Yes	Usual

1) FDDA (データ同化) の有無についての検討

海面水温変化の影響が FDDA によって抑制されるので、降水の海面水温変化に対する感度実験においては FDDA を適用は最小限にすることが望ましい。本研究では①気温・湿度・風速に適用する、②適用しない、③風速のみに適用するという3条件の計算を行い、②又は③で、①と同程度の再現性を得られることを期待した。

2) 水平格子解像度についての検討

格子解像度を1/2倍すると格子数が4倍、時間積分回数が2倍となるので、計算の所要時間は約8倍となる。すなわち、格子解像度2.5kmの場合10kmに比べて所要時間が約64倍である。そこでできるだけ大きい格子解像度で良く再現されるものを選ぶ。

3) 積雲対流スキームの有無についての検討

積雲対流スキームを適用すべきとされる格子解像度は定められていない。5km格子でも検討すべきであると考えられるが、本研究では計算所要時間の短い10km格子で検討した。

4) 計算期間についての検討

既に述べた通り、本研究の評価対象期間は2014年8月1日～8月31日である。全7計算条件中6条件において、計算期間を2014年7月1日～8月31日とし、前半の1ヶ月を助走計算期間とした。一方、条件no_5km_2dayでは2日間ずつ計算を行い、1日目を助走計算、2日目を評価対象として31回計算を行い、計算時間を短くすることでFDDAを適用せずとも実際の気象場との乖離が抑制されることを期待した。

(2) 海面水温変化

海面水温の変化により降水がどのように変化するかを調べるため、再現計算実験の結果から選んだ計算条件をORGとし、海面水温を+2K, +1K, -1K, -2Kと変化させて、条件SST+2, SST+1, SST-1, SST-2とした。感度実験において、海面水温は、NCEP RTG-SST-HRのデータを一様に変化させて用いた。

2. 計算結果と考察

2.1 再現性評価

本研究で使用した気象モデルの再現性を評価するため、Fig. 1 に示す149地点において観測値と計算値の比較を行った。評価には統計指標として、相関係数R, MBE (Mean Bias Error), MAE (Mean Absolute Error), RMSE (Root Mean Square Error), IA (Index of Agreement) を用いた。気象計算結果は、Emeryら³⁾が気象モデルによる計算精度評価のために設定したベンチマークを基に比較した。ベンチマークは、気温に対して $MBE \leq \pm 0.5^\circ\text{C}$, $MAE \leq 2^\circ\text{C}$, $IA \geq 0.8$, 比湿に対して $MBE \leq \pm 1 \text{ g/kg}$, $MAE \leq 2 \text{ g/kg}$, $IA \geq 0.6$, 風速に対して $MBE \leq \pm 0.5 \text{ m/s}$, $RMSE \leq 2 \text{ m/s}$, $IA \geq 0.6$ が定められている。Table 3 に、計算期間における全地点の気温、比湿、風速、降水量の観測値と計算値の統計指標を示す。また、降水量の観測値及び各条件の計算値について、Fig. 2 に全観測地点での平均値と、観測地点毎の値の中央値を示し、Fig. 3 に全観測地点でのIAと、地点毎のIAの中央値を示す。

Table 3 Statistical evaluation of WRF performance for simulating daily meteorological variables

	Sample num.	Mean	R	MBE	MAE	RMSE	IA
Temperature							
		($^\circ\text{C}$)		($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	
Obs.		25.1					
TQW_5km	4617	25.3	0.94	0.16	0.86	1.09	0.97
no_5km	4617	25.3	0.90	0.16	1.08	1.39	0.95
no_5km_2day	4617	24.7	0.93	-0.38	0.96	1.21	0.96
W_5km	4617	25.2	0.92	0.07	0.99	1.27	0.96
W_2.5km	4617	25.6	0.93	0.47	0.95	1.24	0.96
W_10km	4555	24.8	0.89	-0.39	1.19	1.51	0.94
W_10km_cu	4555	24.9	0.88	-0.33	1.26	1.57	0.93
Humidity							
		(g/kg)		(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	
Obs.		16.9					
TQW_5km	4614	16.2	0.95	-0.66	0.93	1.14	0.96
no_5km	4614	16.0	0.92	-0.86	1.14	1.43	0.93
no_5km_2day	4614	16.1	0.94	-0.78	1.03	1.27	0.95
W_5km	4614	16.4	0.94	-0.52	0.90	1.12	0.96
W_2.5km	4614	16.2	0.94	-0.66	0.95	1.18	0.96
W_10km	4552	16.7	0.93	-0.31	0.86	1.08	0.96
W_10km_cu	4552	16.5	0.93	-0.42	0.89	1.11	0.96
Wind Speed							
		(m/s)		(m/s)	(m/s)	(m/s)	
Obs.		2.97					
TQW_5km	4617	3.57	0.82	0.60	0.95	1.40	0.87
no_5km	4617	3.87	0.78	0.90	1.18	1.67	0.83
no_5km_2day	4617	3.74	0.79	0.77	1.08	1.57	0.84
W_5km	4617	3.58	0.82	0.61	0.96	1.40	0.87
W_2.5km	4617	3.50	0.83	0.53	0.88	1.27	0.89
W_10km	4555	3.70	0.78	0.72	1.10	1.61	0.84
W_10km_cu	4555	3.69	0.78	0.71	1.11	1.62	0.84
Precipitation							
		(mm/d)		(mm/d)	(mm/d)	(mm/d)	
Obs.		10.00					
TQW_5km	4593	9.09	0.61	-0.91	8.31	20.0	0.75
no_5km	4593	7.74	0.46	-2.26	9.85	23.3	0.64
no_5km_2day	4593	8.83	0.50	-1.18	9.60	23.0	0.67
W_5km	4593	9.28	0.63	-0.72	8.48	19.9	0.78
W_2.5km	4593	9.37	0.63	-0.63	8.35	19.8	0.77
W_10km	4531	9.15	0.56	-0.85	9.12	21.9	0.73
W_10km_cu	4531	13.04	0.53	3.04	11.68	22.7	0.71

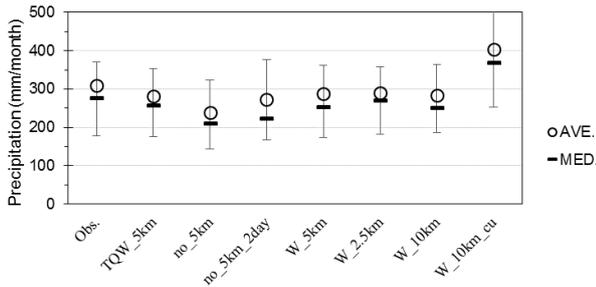


Fig. 2 Mean and median of monthly precipitation in observation and the 7 simulations

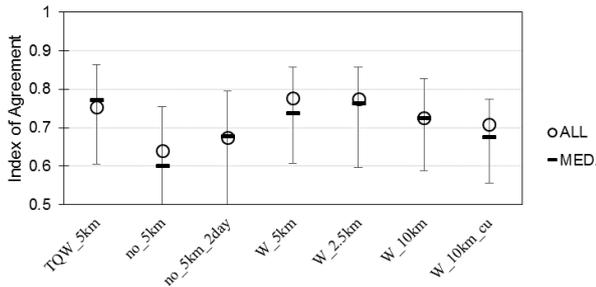


Fig. 3 IA for daily precipitation in the 7 simulations

気温、比湿、風速について、いずれも観測値と概ね良好な一致が見られた。統計指標は、気温及び比湿で全条件について、MBE、MAE、IAのいずれもEmeryらのベンチマークを満たしている。気温は条件W_10kmと条件W_10km_cuで相関係数Rが0.9にわずかに満たなかったが、それ以外の条件では相関係数は0.9以上と高い値となった。比湿は条件no_5km、条件no_5km_2dayを筆頭に全条件で過小評価であったものの、いずれも相関係数は0.9以上と高く、良好に再現した。風速はいずれの条件でも過大評価したが、RMSE、IAのベンチマークを満たした。降水量は相関係数が0.46~0.63と高くなく他の気象要素と比較すると再現性はかなり劣るが、降水現象のメカニズムは複雑であり、この相関係数の程度は許容範囲内である。

データ同化に関する比較として、条件no_5kmは降水量のIAが他の条件に比べて低だけでなく、いずれの気象要素においても相関係数、IAともに最も低い値で、誤差も大きかった。それに比べて条件TQW_5kmと条件W_5kmは、比湿、風速の統計指標では同程度の値が得られた。海面水温変化実験ではデータ同化の適用を最小限にすることが望ましいので、風のみデータ同化を行うこととした。

格子解像度の比較においては、比湿のみ格子解像度10kmの再現性は2.5km及び5kmと同程度の再現性であった。気温、風速、降水量については格子解像度2.5kmで最も良く再現されていたが、5kmと10kmの差に比べて2.5kmと5kmの差は小さく、ほとんど同程度の再現性が得られた。従って計算負荷のより小さい水平格子解像

度5kmを採用した。

条件W_10km_cuでは積雲対流スキームを適用することで考慮された小さな対流雲の発生によって降水量を過大評価したため、再現性が劣った。また、計算期間を2日間に分割して行った条件no_5km_2dayでは、気温、混合比、風速については、他の条件と同程度の再現性が得られたが、降水量を良く再現できなかった。従って積雲対流スキームの適用及び計算期間を2日間にすることは不採用とした。

これらの結果より、通常の計算期間で、格子解像度5km、風のみデータ同化を実施し、積雲対流スキームを適用しない条件で海面水温変化実験を行うこととした。これは、条件W_5kmと同じ内容である。この条件での再現性を空間分布として比較するために、(a) 解析雨量、(b) 条件W_5kmそれぞれの2014年8月の月間降水量の空間分布をFig. 4に示す。四国南部で過小評価、福島県付近で過大評価したものの、これらを除く陸域では良く再現された。

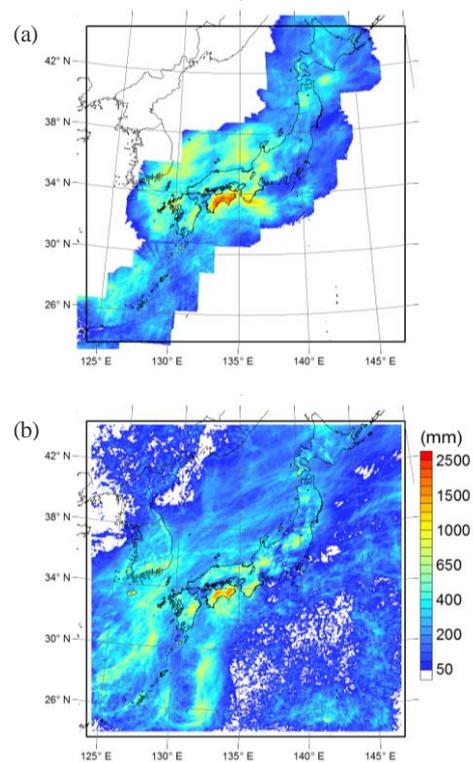


Fig. 4 Spatial distributions of monthly precipitation obtained from (a) Radar/Raingauge-Analyzed precipitation data and (b) W_5km case

2.2 海面水温に対する感度評価

海面水温変化実験の結果として、水フラックスに関する値(降水量、蒸発散量)、及び熱フラックスに関する値(上向き潜熱フラックス、上向き顕熱フラックス)について領域内の平均値をTable. 4に示す。各条件における全観測地点での降水量の平均値と、観測地点毎に求めた平均の中央値をFig. 5に示す。また、(a) 条件SST+2、(b) 条

件 SST+1, (c) 条件 SST-1, (d) 条件 SST-2 それぞれの降水量から条件 ORG を差し引いた差分の空間分布を Fig. 6 に示す。

Table. 4 及び Fig. 5 より, 条件 SST+1, SST-1, SST-2 では海面水温を上昇させると降水量が増加, 低下させると降水量が減少するという相関関係が見られた。これは海面水温の上昇により蒸発量が増加し, 雲の発達促進されたためである。

しかし, 条件 SST+2 では条件 SST+1 よりも降水量が減少する結果となった。Fig. 6 より条件 SST+2 では, 条件 SST+2 において, 太平洋の近畿付近から南西諸島にかけては条件 SST+1 より降水量が増加するが, 東北地方及び中国地方といった陸域や, 日本海北部から大韓民国, 黄海にかけての海域で, 条件 ORG より降水量が減少する結果となり, 降水量が増加した箇所と減少した箇所の分布が明瞭になった。増加が明瞭となったのは, 海面からの蒸発量増加により海域での雲の発達促進され, 陸域に到達する前に降水となったためであると考えられる。減少が明瞭になった原因としては, 降水量が増加した領域の風下側であったことや, 気温上昇に伴って飽和水蒸気量が増加し, 水蒸気のまま計算領域外に運ばれたこと等が考えられる。

熱フラックスについては Table. 4 より, 降水量が増加すると陸域の上向き顕熱フラックスが減少した。これは地表面が降水により冷却されたためであるほか, 雲の増加により日射量が減少したためであると考えられる。

Table. 4 Mean water and heat flux in different SST conditions

	SST+2	SST+1	ORG	SST-1	SST-2
Precipitation (mm/month)					
land	219.6	250.1	222.4	201.0	192.8
sea	263.9	266.3	188.0	154.2	132.5
total	255.8	263.3	194.3	162.8	143.6
Evaporation (mm/month)					
land	96.3	95.8	94.4	95.4	95.4
sea	198.6	142.0	107.1	82.1	51.6
total	179.8	133.5	104.7	84.5	59.7
Precipitation/Evaporation					
land	2.28	2.61	2.36	2.11	2.02
sea	1.33	1.88	1.76	1.88	2.57
total	1.42	1.97	1.86	1.93	2.41
Upward latent heat flux (W/m ²)					
land	89.9	89.4	88.1	89.1	89.1
sea	185.4	132.6	99.9	76.6	48.2
total	167.8	124.6	97.8	78.9	55.7
Upward sensible heat flux (W/m ²)					
land	44.34	41.48	42.34	44.92	45.28
sea	19.01	10.16	6.46	-0.89	-4.59
total	23.67	15.92	13.06	7.52	4.58

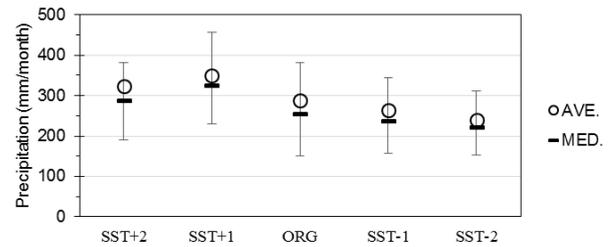


Fig. 5 Mean and median of monthly precipitation in different SST conditions

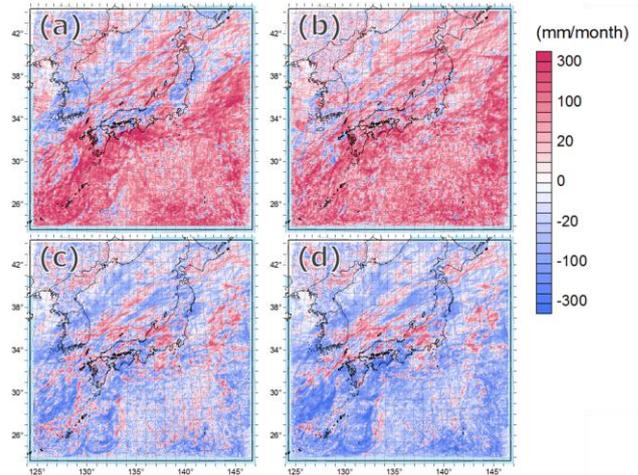


Fig. 6 Monthly precipitation difference from the ORG condition in (a) SST+2, (b) SST+1, (c) SST-1 and (d) SST-2 conditions

3. 結論

「平成 26 年 8 月豪雨」について再現計算を行い, さらに海面水温を変化させた実験を行うことで, 地球温暖化による海面水温上昇によって降水量が増加する可能性が高いことがわかった。しかし同時に, 海面水温上昇と降水量増加に相関があると一概には言えなかったため, 今後地球温暖化による降水現象への影響の理解を深めるためには, 他の大雨事例についても検討を行うことが必要である。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change: CLIMATE CHANGE 2014 Synthesis Report, 2014
- 2) Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Baker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers J.G.: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note. NCAR/TN-475+STR. DOI: 10.5065/D68S4MVH. 2008
- 3) Emery C., Tai E. and Yarwood G: Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Prepared for The Texas Natural Resource Conservation Commission 12118 Park 35 Circle Austin, Texas 78753. 2001.

東アジアにおける大気中窒素・硫黄化合物の収支の数値解析

Numerical analysis of atmospheric mass balance of nitrogen and sulfur compounds in East Asia

○大橋 尚生 (大阪大学) 嶋 寺 光 (大阪大学) 齋 木 脩 平 (大阪大学)
松尾 智仁 (大阪大学) 近 藤 明 (大阪大学)

Naoki OHASHI*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Shuhei SAIKI*¹ Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

The East Asian region is currently facing severe air pollution by fine particulate matter (PM_{2.5}) which consists of various chemical components including nitrogen and sulfur compounds. In this research, the Community Multiscale Air Quality modeling system (CMAQ) was utilized to simulate atmospheric behavior of nitrogen and sulfur compounds over East Asia in 2010. Comparisons with observed ground-level concentration and wet deposition indicated that the model underestimated both ground-level and upper air concentrations of sulfate in winter and underestimated wet removal of air pollutants from the atmosphere. According to analysis of atmospheric mass balance, the model performance for nitric acid and coarse mode nitrate need to be verified because they substantially influence atmospheric behavior of PM_{2.5} nitrate.

はじめに

東アジア地域は、著しい経済成長に伴う大気汚染物質排出量の増大により、微小粒子状物質 (PM_{2.5}) の高濃度汚染をはじめとする深刻な大気汚染問題に直面している。日本においては、1970年代以降の対策によって大気汚染が改善されてきた。しかし、PM_{2.5}基準達成率は低い状況であり、さらなる改善のためには効率的な対策が求められる。大気汚染の実態把握や発生源寄与解析には大気質モデルが有用だが、PM_{2.5}の再現性については改善の必要がある。モデルによる大気汚染の再現性の評価は、多くの場合、特定地域における地上濃度観測値との比較のみによるものに留まる。しかし、地上濃度は、発生源からの排出、大気中の3次元的な輸送とその過程での反応、乾性・湿性沈着による大気からの除去に至るまでの大気汚染物質の動態の一部を反映しているに過ぎない。また、PM_{2.5}には様々な化合物が含まれているが、主要成分である硫酸塩、硝酸塩、アンモニウム塩は地上で観測されるPM_{2.5}質量濃度の半分近くを占めており、PM_{2.5}濃度を再現する上で、大気中の窒素・硫黄化合物の動態を再現することは極めて重要である。

本研究では、大気質モデルによるPM_{2.5}再現性向上のための課題を明らかにすることを目的に、東アジアにおける大気中の窒素・硫黄化合物について、大気質モデルによる再現性を、地上濃度に加えて、鉛直方向の大気の状態を反映する湿性沈着を含めてより包括的な評価を行った。さらに、大気質モデル内でPM_{2.5}の動態に大きく影響しており、今後の観測結果との比較によってその妥当性を評価すべき過程を明らかにすることを目的に、窒

素・硫黄化合物の排出と沈着の収支解析を行った。

1. 計算条件

本研究では、気象モデルに Weather Research and Forecasting model (WRF)¹⁾ のバージョン3.7、大気質モデルに Community Multiscale Air Quality modeling system (CMAQ)²⁾ のバージョン5.0.2を使用し、東アジアにおける2010年度の1年間を対象に、大気質シミュレーションを行った。Fig. 1に計算領域およびモデル再現性の評価に用いた観測点を示す。計算領域として、東アジアの広域を対象とする、水平方向は45 km×45 km格子、格子数130×110、鉛直方向は地表面から上空100 hPaまでの30層からなる領域を設定した。モデルの再現性評価には、2010年度にPM_{2.5}成分測定が実施された12地点とその最寄りの気象官署および一般環境大気測定局 (一般局)、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク測定局 (EANET 局) における観測データを用いた。本研究で使用した気象モデル WRF の設定を Table. 1 に、大気質モデル CMAQ の設定を Table. 2 に示す。CMAQ については、Table. 2 に示した条件に加え、側面境界での流入出を推計するため、境界から流入する窒素・硫黄化合物濃度をゼロとした条件でも計算を行った。

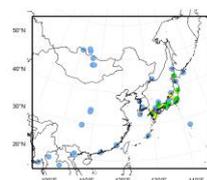


Fig. 1 Modeling domain and locations of monitoring stations

Table.1 WRF configurations

Parameter	Setting
Topography	USGS global 30-sec elevation data
Land use	USGS global 30-sec 24-category data MLIT Land Use Fragmented Mesh
Initial and boundary	NCEP FNL、 RTG-SST-HR、 MSM-GPV
Explicit moisture	Morrison 2-moment scheme
Cumulus	Kain-Fritsch scheme
Surface	Noah land-surface model
PBL	YSU PBL
Radiation	RRTMG shortwave and longwave schemes

Table.2 CMAQ configurations

Parameter	Setting
Initial and boundary	MOZART-4/GEOS5
Emission	Asia: HTAP v2.2、 Japan: EAGrid2010 & JEI-DB (Vehicle) & OPRF (Ship)、 Biogenic: MEGANv2.04、 Biomass burning: FINN v1.5、 Volcano: Aerocom
Horizontal advection	Yamartino scheme
Vertical advection	WRF-based scheme
Horizontal diffusion	Multiscale
Vertical diffusion	ACM2
Photolysis rate	CCTM in-line calculation
Gas phase chemistry	CB05
Aerosol process	AERO6

2. 計算結果と考察

2.1 WRFの再現性評価

WRFの再現性を評価するため、Fig. 1に示したPM_{2.5}成分測定地点の最寄りの気象官署12地点で観測値と計算値の比較を行った。統計指標として、相関係数R、Mean Bias Error (MBE)、Mean Absolute Error (MAE)、Root Mean Square Error (RMSE)、Index of Agreement (IA)を用い、Emeryら³⁾によるベンチマークを基に評価した。ベンチマークは、気温に対してMBE ≤ ±0.5°C、MAE ≤ 2°C、IA ≥ 0.8、比湿に対してMBE ≤ ±1 g/kg、MAE ≤ 2 g/kg、IA ≥ 0.6、風速に対してMBE ≤ ±0.5 m/s、RMSE ≤ 2 m/s、IA ≥ 0.6が定められている。Table. 3に、計算期間における気象官署12地点についての平均の気温、比湿、風速、降水量の統計指標による観測値と計算値の比較を示す。気象の計算結果は、気温に関してMBEが-1.4で過小評価しているもののRとIA値はベンチマークを満たして過小評価気味ではあるが良好に再現できているといえる。また、比湿、風速にはすべてのベンチマークを満たしており、良好に再現できているといえる。降水量は、過小

評価気味であるが、統計指標の値は良く良好に再現できている。

Table. 3 Statistical evaluation of WRF performance for simulating daily meteorological variables

	samples	Obs_Ave	Sim_Ave	R	MBE	MAE	RMSE	IA
Temperature		(°C)	(°C)		(°C)	(°C)	(°C)	
Average	4374	15.4	14.0	0.982	-1.4	1.9	2.3	0.9851
Humidity		(g/kg)	(g/kg)		(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	
Average	4371	8.7	8.4	0.992	-0.3	0.5	0.8	0.9948
Wind Speed		(m/s)	(m/s)		(m/s)	(m/s)	(m/s)	
Average	4373	3.0	3.2	0.6283	0.2027	0.9	1.4	0.7608
Precipitation		(mm/day)	(mm/day)		(mm/day)	(mm/day)	(mm/day)	
Average	4374	4.1	2.8	0.7877	-1.3	2.6	7.4	0.8256

2.2 大気濃度の再現性評価

常時監視測定局の観測値と結果について季節別の結果をFig.2にTable. 4に計算結果についての統計指標を示す。Springは3~5月平均、Summerは6~8月、Autumnは9~11月、Winterは12~2月を示す。成分調査局に関する季節別の結果をFig.3に、Table. 5に計算結果についての統計指標を示す。日本におけるEANETの季節別の観測値と計算値の結果をFig.4に示す。

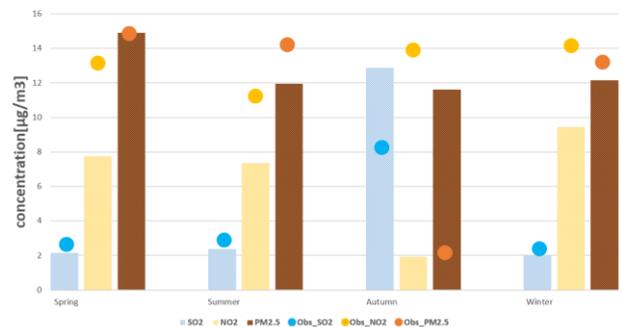


Fig.2 Observed and simulated seasonal mean PM_{2.5}, SO₂ and NO₂ concentrations at ambient air pollution monitoring stations

Table. 4 Statistical evaluation of measured and modeled pollutant concentrations at ambient air pollution monitoring stations

	samples	Obs_Ave	Sim_Ave	R	MBE	MAE	RMSE	IA
SO ₂		[ppb]	[ppb]		[ppb]	[ppb]	[ppb]	
Average	3220	2.5	2.3	0.37	-0.2	1.7	2.3	0.6
NO ₂		[ppb]	[ppb]		[ppb]	[ppb]	[ppb]	
Average	4293	13.8	8.2	0.71	-5.6	6.4	8.2	0.74
PM _{2.5}		[µg/m ³]	[µg/m ³]		[µg/m ³]	[µg/m ³]	[µg/m ³]	
Average	3079	14.1	13	0.67	-1.1	5.6	8.5	0.8

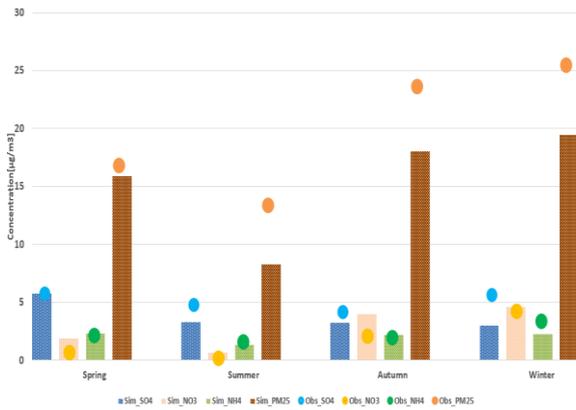


Fig.3 Observed and simulated seasonal mean SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations at $\text{PM}_{2.5}$ component analysis stations

Table. 5 Statistical evaluation of measured and modeled pollutant concentrations at $\text{PM}_{2.5}$ component analysis stations

	samples	Obs. Ave	Sim. Ave	R	MBE	MAE	RMSE	IA
SO_4^{2-}		[ppb]	[ppb]		[ppb]	[ppb]	[ppb]	
Average	674	5.1	3.6	0.81	-1.4	2.0	3.1	0.85
NO_3^-		[ppb]	[ppb]		[ppb]	[ppb]	[ppb]	
Average	601	2.0	3.0	0.71	1.0	1.7	2.8	0.81
NH_4^+		[ppb]	[ppb]		[ppb]	[ppb]	[ppb]	
Average	671	2.3	2.0	0.81	-0.3	0.9	1.3	0.89
$\text{PM}_{2.5}$		[µg/m³]	[µg/m³]		[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	
Average	674	19.9	14.5	0.84	-5.4	6.8	9.8	0.87

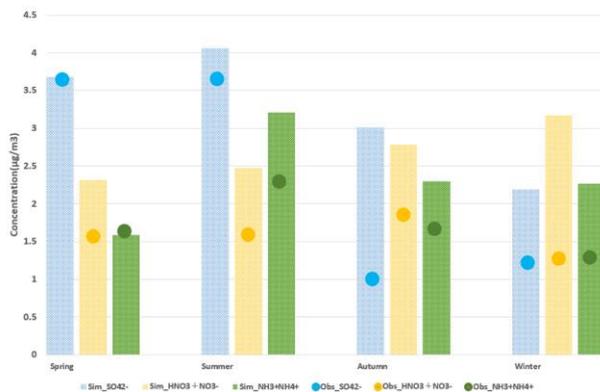


Fig.4 Observed and simulated seasonal mean total sulfate、nitrate and ammonium concentrations at EANET sites in Japan

$\text{PM}_{2.5}$ の観測値と計算値について、Table. 4、Table. 5より、IA値はそれぞれ0.80、0.87であり概ね良好に表現できているといえる。 SO_2 の計算値はFig. 2、Table. 4に示すように夏季に過小評価が見られ、相関係数、IA値も悪くなっている。 NO_2 はFig. 2、Table. 4より計算値はMBE = -5.6となり、一年を通して過小評価している。 SO_4^{2-} の計算値はFig. 3、Fig. 4、Table. 5に示すように、やや過小評価する傾向にあるものの、相関係数 $R = 0.85$ で一年を通じて濃度の日々の変動はよく再現できていた。季節別では、冬季においては他の季節よりも過小に評価されている。 NO_3^- の計算値はFig. 3、Table. 5に示すように、冬季は良好に観測値を再現しているが、その他の季節では著しく過大評価している。IA=0.81であり、冬季に関し

ては非常に良好な一致が見られた。また、気体状硝酸と粒子状硝酸の合計値($\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-$)はFig. 4より一年を通して過大評価しており、 NO_3^- の過大評価の影響が大きく出ているが、冬場も過大評価しているため硝酸の生成を過大評価していると考えられる。 NH_4^+ の計算値はFig. 3、Table. 5に示すように、 $R=0.81$ 、 $IA=0.89$ であり、一年を通じて良好な一致が見られた。また粒子状アンモニウムと気体アンモニアの合計値($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$)は、Fig. 4より夏場過小評価しているが一年を通して概ね再現できている。これらのことから $\text{PM}_{2.5}$ の合計値の再現性は認められるが詳細に物質を見ると計算値に誤差があるのがわかる。

2.3 湿性沈着量の再現性評価

2.2で $\text{PM}_{2.5}$ の合計値はあっているが各物質の計算に誤差があることがわかった。このことから、さらにモデルを包括的に評価するために、湿性沈着結果をFig. 5に示す。 SO_4^{2-} について、Fig. 5より、特に冬季に過小評価の傾向が見られる。Fig. 2より SO_2 は年間を通して過小評価気味であり、Fig. 3、Fig. 4より粒子状 SO_4^{2-} は冬季に過小評価気味である。したがって、モデル全体として硫酸化合物を過小評価しており、冬季は顕著であることが分かる。湿性沈着する NO_3^- についてFig. 5より年間を通して過小評価傾向である。Fig. 2より NO_2 は年間を通して過小評価気味であり、Fig. 3、Fig. 4より粒子状 NO_3^- は、冬季以外過大評価していた。このことより $\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$ の反応を過大評価していることと粒子が雨滴中に溶け込む反応を過小評価していることがわかる。Fig. 5より湿性沈着する NH_4^+ は一年を通して一定の偏りを見せない。これはFig. 3、Fig. 4より気体状 NH_3 と粒子状 NH_4^+ が一年を通して、季節の偏りの少ないシミュレーションをするためであると考えられる。

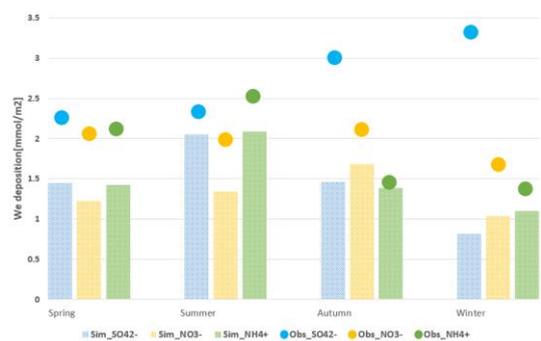


Fig.5 Observed and simulated seasonal mean SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ wet depositions at EANET sites in Japan

2.4 窒素・硫黄成分の動態解析

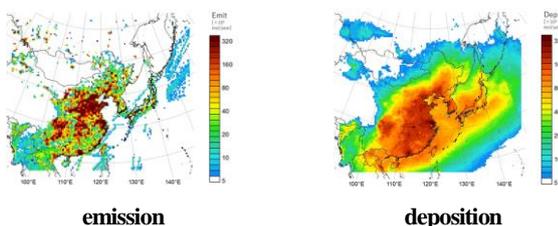
排出量と沈着量を示すことによって、モデル内の窒素硫黄成分の動態を解析する。硫酸化合物、窒素化合物、

アンモニア状窒素それぞれの排出量と沈着量について **Fig.7(a)S (b)NO_x-N (c)NH₃-N** に示す。 **Fig.7(a)S** より硫酸酸化物は排出点の比較的近くに沈着していることが分かる。 **(b)NO_x-N** より境界外への流出が多いのは東南アジアのバイオマス燃焼分が極東風に乗ってエリア外に流出した可能性がある。 **(c)NH₃-N** を見ると硫酸酸化物と同様に排出地点の近くに沈着していることが分かるが、海上であまり沈着していないことが分かる。また、 **Fig.8(a)S (b)NO_x-N (c)NH₃-N** にエリア内での合計の沈着量と排出量について原因物質別に示す。沈着量の合計値の内、乾性沈着の割合は(a)(b)(c)それぞれ 53%、69%、51%となっており湿性沈着よりも乾性沈着の量が多くなっている。また境界外の寄与の割合は同様にそれぞれ 10%、12%、14%となっておりすべて 10%程度である。 **Fig.8 (b)NO_x-N** より先程示したのと同じことだが、棒グラフの排出量と沈着量の差が大きくエリア外に輸送される量が三物質の中で一番多い。また現在モニタリングが十分とはいえない気体状硝酸と硝酸由来の粗大物質の沈着が多く、モデルの再現性を上げるために観測が必要である。

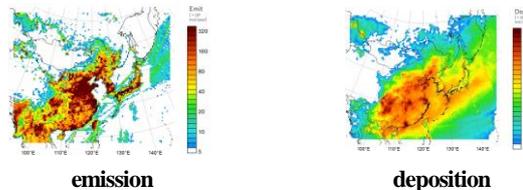
3. 結論

大気質モデル CMAQ を用いて 2010 年度の東アジアにおける大気中窒素・硫黄化合物の動態を解析した。CMAQ は日本における PM_{2.5} 質量の地上濃度を良好に再現したが、主要成分である硫酸塩は特に冬季に過小評価、硝酸塩は過大評価の傾向を示した。湿性沈着については、硫酸塩で地上大気濃度と同様に冬季に過小評価となる傾向が強く、硝酸塩は地上大気濃度と異なりやや過小評価となった。そのため、冬季の硫酸塩の大気中濃度は地上だけでなく全体的に過小評価となっていること、降水洗浄による大気中からの除去がやや過小評価されていることが考えられる。また、大気中窒素・硫黄化合物の収支解析の結果、大気質モデル内で、硫黄と NH₃-N については、排出のほとんどを占める SO₂ と NH₃ が、乾性沈着で大気中から除去される割合が比較的高いことがわかった。それに対し、NO_x-N については、排出でほとんどを占める NO は、沈着にはほとんど寄与しておらず、反応を経て別の形態、特に、硝酸ガスと粗大硝酸塩粒子として大気中から除去される割合が高いことがわかった。硝酸ガスと粗大硝酸塩粒子については、今後の妥当性評価が重要である。

(a) S



(b) NO_x-N



(c) NH₃-N

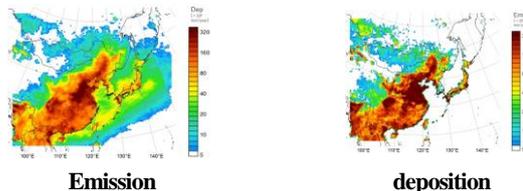


Fig.7 Spatial distributions of annual emissions and depositions of nitrogen and sulfur compounds

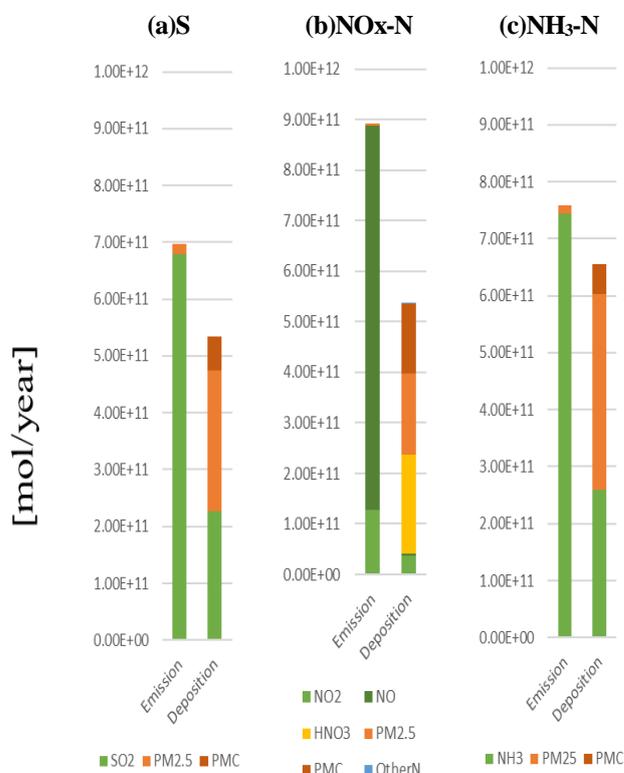


Fig.8 Annual emissions and depositions of nitrogen and sulfur compounds in the entire domain

参考文献

1)Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Baker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W. and Powers J.G: A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR., 2009.
 2)Byun D., Ching J.: Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, EPA/600/R-99/030, 1999.
 3)Emery C., Tai E. and Yarwood G: Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Prepared for The Texas Natural Resource Conservation Commission 12118 Park 35 Circle Austin, Texas 78753. 2001.

大阪平野における夏季夜間の陸風による冷却作用の評価

Evaluation of Land Breeze Cooling in Summer Nights in Osaka Plain

○小川 貴史 (大阪府立大学) 安田 龍介 (大阪府立大学) 吉田 篤正 (大阪府立大学)

Takashi OGAWA*¹ Ryusuke YASUDA*¹ Atsumasa YOSHIDA*¹*¹ Osaka Prefecture University

We analyzed the relationship between the land-sea breeze condition and nocturnal temperature from observation data. We evaluated the impacts of changes in land use and SST on nocturnal land breeze and temperature in summer nights in Osaka Plain. The result showed that the impact of land use change was dominant. We also evaluated the cooling effect of nocturnal wind. The result showed that the cooling effect of land breezes reduces from inland to coastal areas but remains even around the coasts. Therefore, it is concluded that land breeze cooling is effective in the mitigation of nocturnal UHI over the entire area of the Osaka Plain.

1. はじめに

大阪平野における夏季日中のヒートアイランド対策として、海風の活用が効果的であると考えられている¹⁾。ヒートアイランドは一般に夜間に顕著であるが、陸風がヒートアイランドに及ぼす影響に着目した研究は不足している。陸風が夜間のヒートアイランド対策として活用できるか否かを検討するためには、夜間の陸風と気温の関係を把握し、陸風の冷却作用を評価する必要がある。そこで本研究では、まず観測データに基づいて大阪平野の夏季夜間における風系パターンと気温の関係を解析した。次に、陸風を経年的に変化させると考えられる要因として土地利用および海面水温 (SST) の変化を取り上げ、それらが陸風に及ぼす影響を解析した。最後に、陸風による冷却作用を定量的に評価した。

2. 観測データに基づく夜間気温と風系パターンの解析

海陸風の進入と気温に対応関係があるか否かを確認するため、観測データに基づいて大阪平野の夏季夜間における風系パターンと気温の関係を解析した。クラスター分析によって夜間の風系および気温パターンの分類を行い、二つの分類結果の対応関係を調べた。観測データには大阪府のアメダス観測所7地点における風向風速および気温の毎時データを用いた。解析対象期間は2006～2009年の7、8月とし、一般風や台風の影響をなるべく除外するため、夜間 (午前1～6時) の大阪管区气象台における平均地衡風風速が15m/s以上または降水量が1mmを超えた日は除外した。地衡風風速は大阪周辺の27地点における海面更正気圧観測値から2次曲面を作成して求めた。

ある対象日と他の対象日との類似度 (以下、「距離」と呼ぶ) を定義した。風系についての対象日 a , b 間の距離

D_{ab}^W を(1)式に、気温についての距離 D_{ab}^T を(2)式に示す。

$$D_{ab}^W = \frac{1}{t \cdot n} \sum_{i=1}^t \sum_{k=1}^n \sqrt{(U_{aik} - U_{bik})^2 + (V_{aik} - V_{bik})^2} \quad (1)$$

$$D_{ab}^T = \frac{1}{t \cdot n} \sum_{i=1}^t \sum_{k=1}^n \sqrt{(T_{aik} - T_{bik})^2} \quad (2)$$

ただし U_{aik} , V_{aik} および T_{aik} は対象日 a 時刻 i における観測点 k での風速の東西、南北成分および気温、 n は観測点の数、夜間 (以下、午前1～6時を指す) について平均するため $t = 6$ とした。ウォード法により、風系と気温分布について解析対象日をそれぞれ3つのパターンに分類した。風系パターンをそれぞれ $W1 \sim 3$ 、気温パターンをそれぞれ $T1 \sim 3$ とした。

風系パターンの内、 $W1$ には海風、 $W3$ には陸風の進入が見られた日が属し、 $W2$ にはどちらともつかない日が属していた。 $W3$ における各観測点の夜間平均気温は $W1$ と比べて 2°C 程度低くなっていた。

気温パターンの内、 $T1$ には大阪平野の気温が全体的に高い日、 $T3$ には低い日が属し、 $T2$ がそれらの中間となっていた。

二つの分類結果の対応関係を図1に示す。 $W1$ においては $T3$ より $T1$ の割合が高く、 $W3$ においては $T3$ の割合が高い。すなわち、海風が進入する場合には大阪平野の夜間気温が高くなっており、一方で陸風が進入する場合には大阪平野の夜間気温が低くなっていた。したがって、大阪平野の夏季夜間における海陸風の進入と気温には対応関係があることが確認された。

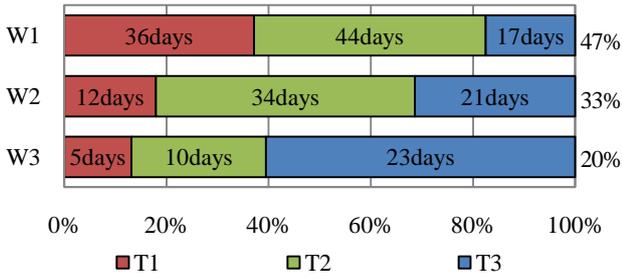


Fig.1 Correspondence relationship between two classifications

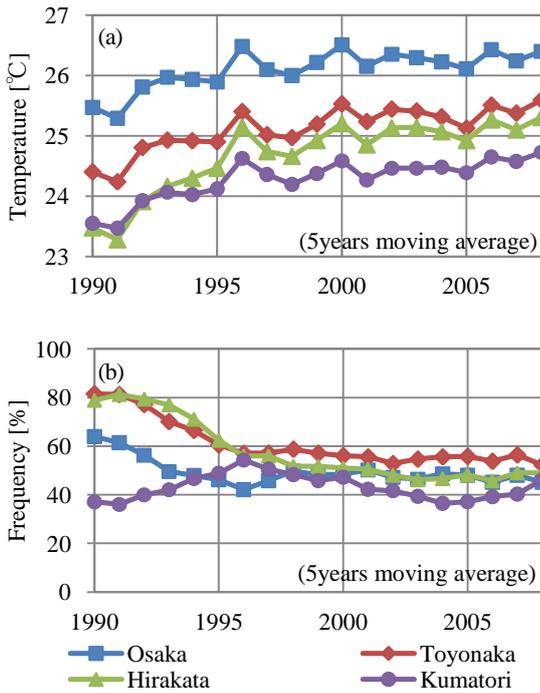


Fig.2 Long-term trends of (a) temperature and (b) frequency of land breeze occurrence at night

次に、夜間気温と陸風の経年的な変化を解析した。解析対象期間は1988～2010年の7、8月とし、夜間の大阪管区气象台における平均地衡風風速が15m/s以上または降水量が1mmを超えた日は除外した。夜間の風配図と地形から陸風の判別基準を観測点ごとに定め、夜間の平均風向（平均風ベクトルの風向）が基準を満たす日を陸風日とした。

図2に府内のアメダス4地点における夜間気温および陸風の発生頻度の経年変化を示す。夜間気温はいずれの地点でも経年的に上昇している。一方、アメダス大阪、豊中および枚方では陸風の発生頻度が経年的に低下しており、夜間気温と陸風の発生頻度に強い逆相関が見られた。これは図1に見られた対応関係と整合している。また、アメダス大阪では陸風の平均風速が低下し、陸風の開始時刻が遅くなっており、陸風が経年的に弱体化していた。

3. 土地利用および海面水温の変化が陸風に及ぼす影響

都市化によって土地利用が変化すると、人工被覆面からの放熱が増加して陸域の気圧が低下することで陸域から大阪湾へ向かう気圧傾度力が小さくなり、陸風が弱体化すると考えられる。また、海面水温が上昇すると陸域から海域にかけての気圧傾度力が変化し、大阪平野における陸風の発達を阻害する可能性がある。そこで、陸風に経年変化をもたらす要因として土地利用および海面水温の変化を取り上げ、これらが陸風に及ぼす影響を解析した。

1976年から2009年にかけての大阪中央部、北部、南部、京都盆地および奈良盆地における土地利用構成比の推移を図3に示す。土地利用構成比は国土数値情報から算出しているが、土地利用カテゴリは4種類にまとめている。いずれの地域でも都市域は増加して植生域は減少しており、大阪南部、京都盆地および奈良盆地で変化が比較的大きかった。

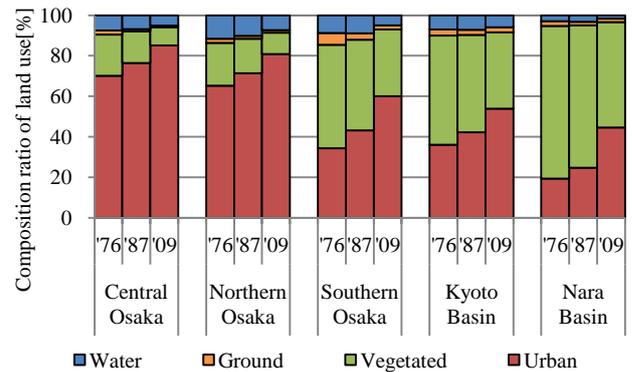


Fig.3 Composition ratio of land use

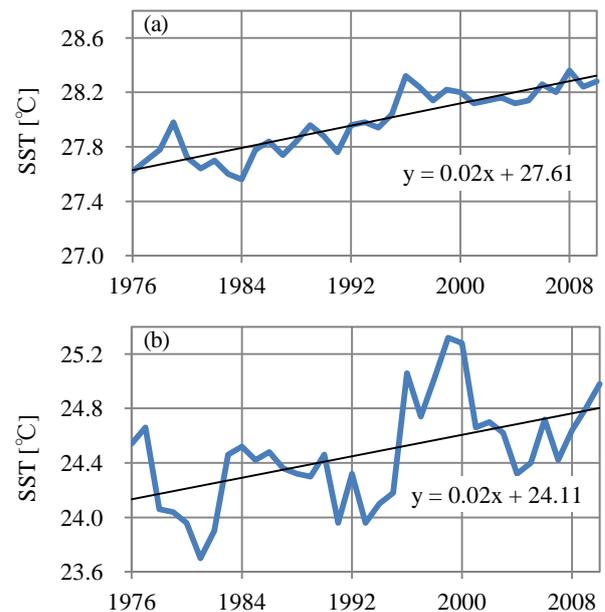


Fig.4 Long-term trend of SST in (a) Shikoku/Tokai-oki and (b) Japan Sea in summer²⁾

1976年から2009年にかけての夏季（7～9月）における四国・東海沖北部および日本海南部の平均海面水温の経年変化を図4に示す。いずれの海域でも海面水温の変化率は+0.02°C/年程度であった。

以上の経年変化を踏まえ、土地利用および海面水温を以下のように変化させ、W3から選んだ代表日（以下、陸風日と呼ぶ）について数値シミュレーションを行った。

Case1: ベースケース。2009年の土地利用データを用いた。

Case2: 1976年の土地利用データを用いたケース。

Case3: 海面水温を0.5°C下げたケース。

数値気象モデルにはWRF v.3.7.1を用いた。計算対象日は2006年8月26日で計算開始から39時間は予備計算とした。

土地利用が1976年から2009年のものに変化した場合（Case1-Case2）と海面水温が0.5°C上昇した場合（Case1-Case3）における夜間平均気温および風ベクトルの変化を図5に示す。また、気温上昇および風速低下の夜間（午前1～6時）における地域別平均値を表2、3に示す。1976年から2009年にかけて大阪平野南部、京都盆地および奈良盆地で土地利用が大きく変化することで、淀川沿い、大和川沿いおよび奈良盆地で夜間の平均気温は上昇し、陸風の風速は低下した。陸風が弱化した原因としては、大阪平野南部、京都盆地および奈良盆地の都市化によって夜間の平均気温が上昇して低圧になり、大阪湾からそれらの地域に向かう気圧傾度力によって陸風の発達が悪化されたためと考えられる。

一方、海面水温の変化が陸風日夜間の気温および風速に及ぼす影響は土地利用のそれより小さかった。したがって、土地利用の変化が夜間の陸風と気温に支配的な影響を及ぼし、都市化によって陸風が経年的に弱まったと考えられる。

Table 2 Mean temperature increment in each region [°C]

	Central Osaka	Northern Osaka	Southern Osaka	Kyoto Basin	Nara Basin
Case1 -Case2	0.41	0.33	0.60	0.30	0.85
Case1 -Case3	0.02	0.03	0.07	0.02	0.02

Table 3 Mean wind speed reduction in each region [m/s]

	Central Osaka	Northern Osaka	Southern Osaka	Kyoto Basin	Nara Basin
Case1 -Case2	0.24	0.25	0.28	0.18	0.43
Case1 -Case3	0.15	0.13	0.22	0.07	0.16

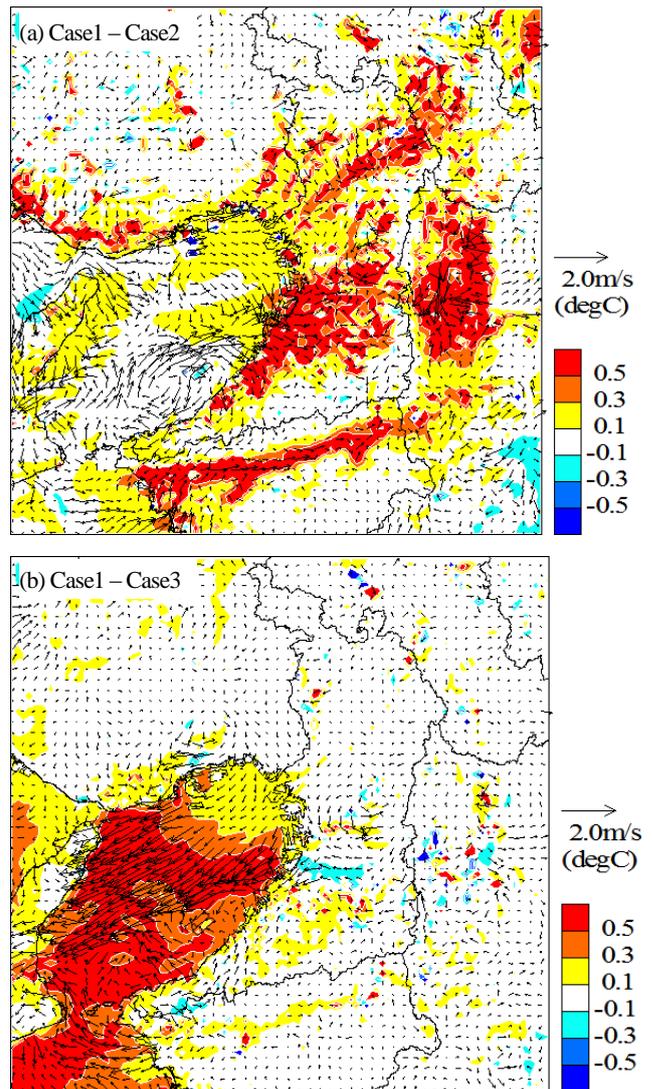


Fig.5 Difference of mean temperature and wind vectors (0100-0600LST)

4. 陸風による冷却作用の評価

夜間の風が気温に及ぼす影響を評価するため、W1から選んだ代表日（以下、海風日と呼ぶ）とW3から選んだ陸風日について数値シミュレーションを行った。計算対象日は海風日が2006年8月11、12、22日、陸風日が2006年8月23、24、26日である。顕熱輸送による冷却作用を局所温位変化率によって評価した。数値気象モデルの出力から以下に示す温位保存式中の各項による局所温位変化率を算出した。

$$\text{移流: } \left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{adv} = -\frac{\partial(U_j \theta)}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\text{拡散: } \left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{diff} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_{j\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

$$\text{放射: } \left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{rad} = \frac{\theta}{T} \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial F}{\partial z} \quad (5)$$

ここで、 U_j は風速成分、 θ は温位、 T は気温、 ρ は密度、 c_p は定圧比熱、 $D_{j\theta}$ は乱流拡散係数（水平方向はSmagorinskyモデル、鉛直方向はMYNNモデルのLevel2.5）、 F は長短波放射フラックスを表す。地表面からの顕熱フラックスは拡散項で評価している。また、凝縮・蒸発に伴う熱の出入りは考慮していない。

海風日夜間では大阪平野に海風が進入して京都盆地まで到達しており、淀川沿いに高温域が見られた。一方、陸風日では北摂山系と京都盆地からの風が合流して大阪平野を経由して大阪湾へと流れており、海風日と比較して北摂山系から大阪平野にかけて気温が低くなっていた。

海風日および陸風日の大阪における温位変化率の経時変化をそれぞれ図6に示す。ただし、図は海風日および陸風日3ケースずつをそれぞれ平均したものである。海風日では移流による温位変化率は18時頃から小さくなり、23時以降は0~0.5K/h程度で推移していた。一方、陸風日では移流による温位変化率は海陸風の交替(20時頃)後に少し大きくなり、その後は-1.0K/h程度で推移していた。

海風日および陸風日の夜間における移流による平均温位変化率の水平分布を図7に示す。海風日では夜間の平均温位変化率は平野部全体で-0.2K/h前後となっていた。一方、陸風日では夜間の平均温位変化率は平野北部、南部および風上側の地域で-0.8K/h程度、海岸部でも-0.6K/h程度となっていた。このことから、陸風の冷却作用は風下側に行くにつれて弱くなるが、海岸部にも移流による冷却作用が及んでいると考えられる。

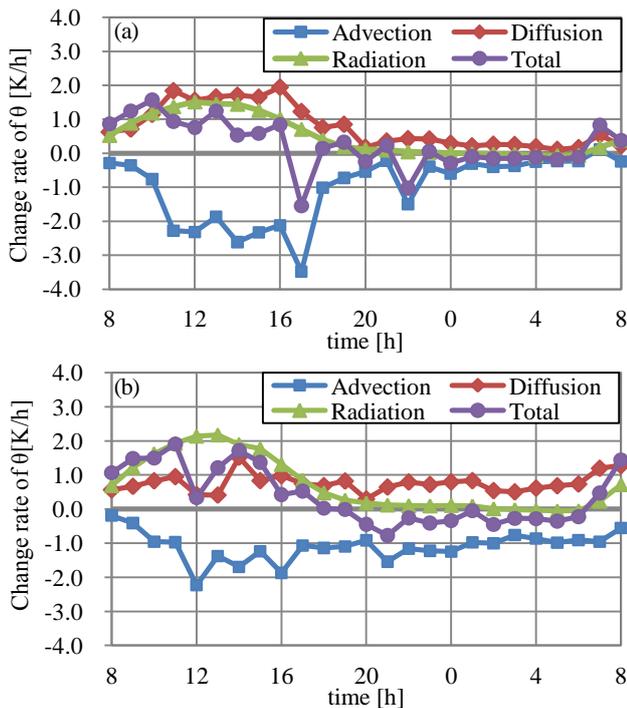


Fig.6 Time series of change rate of potential temperature in Osaka in (a) sea breeze condition and (b) land breeze condition (3cases average)

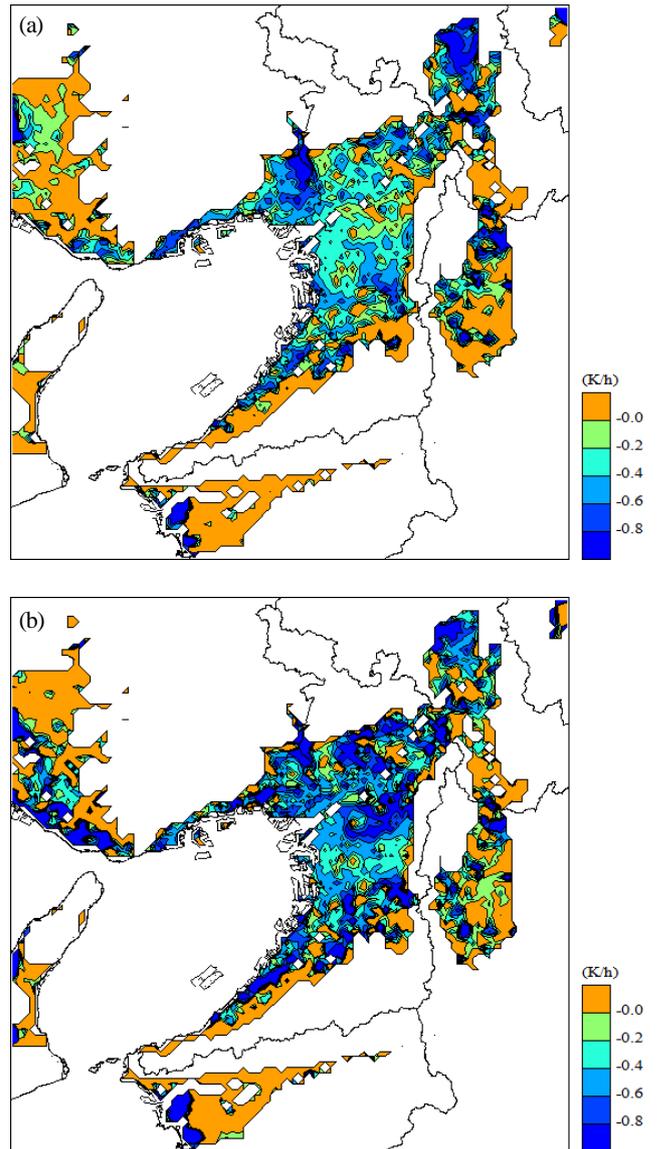


Fig.7 Mean change rate of potential temperature in (a) sea breeze condition and (b) land breeze condition (0100-0600LST, 3cases average)

5. まとめ

大阪平野における夏季夜間の風系パターンと気温の関係を解析し、陸風による冷却作用を評価した。その結果から、陸風の活用は大阪平野における夏季夜間のヒートアイランドの緩和に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 石井義裕, 玉井昌宏, 村岡浩爾, 大阪平野におけるヒートアイランドと海陸風の相互作用, ながれ, Vol.19 (2000), pp.139-142
- 2) 気象庁, 海面水温の長期変化傾向(日本近海)のデータ [2017年2月9日確認]
http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm_data.html

都市の規模及び沿岸部土地利用と気温上昇の関係分析

Relationship between city size, coastal land use and air temperature rise with distance from coast

○金川 一平 (神戸大学)

竹林 英樹 (神戸大学)

Ippei KANAGAWA*¹Hideki TAKEBAYASHI*¹

In this study, the relationship between city size, coastal land use and air temperature rise with distance from coast is analyzed by using meso scale Weather Research & Forecasting (WRF) model, in five cities with different sizes; Tokyo, Osaka, Nagoya, Hiroshima, Sendai. There is no relationship between city size and air temperature rise. Coastal land use has a large influence on air temperature rise.

1. はじめに

Oke¹⁾は、ヒートアイランド強度は人口の対数に比例することを明らかにした。都市化の程度を総合的に示す指標として人口が用いられたが、実効性の高いヒートアイランド対策の検討には、より具体的な指標が必要である。人口の増加は、都市の規模(面積)の拡大と土地利用の変化を伴う。土地利用と気温の関係については、気温は建物高さより建蔽率の影響を強く受け、建蔽率が小さいほど、建物高さが低いほど低くなることが報告されている²⁾。本研究では、ヒートアイランド現象の実態把握を目的として、規模及び沿岸部土地利用の異なる都市(東京地域、大阪地域、名古屋地域、広島地域、仙台地域)を対象として、都市の規模及び沿岸部土地利用と気温分布の関係を分析した。

2. メソ気象モデル WRF の概要と計算条件

2.1 メソ気象モデル WRF の概要

メソスケールの気象モデル WRF (Weather Research & Forecasting) は、米国大気研究センター (NCAR) などの研究機関により開発された完全圧縮の非静力学モデルで、支配方程式は、運動方程式、連続の式、ジオポテンシャル式、温位保存式、スカラー保存式などで構成され、乾燥大気の静水圧地形準拠座標 (η 座標) 系によって記述される。地表面付近の現象は、地表面過程と大気境界層過程によって解かれ、下端境界条件が設定される。都市域には、(1) 都市形状を表現するストリートキャニオンのパラメタリゼーション、(2) 建物による影と建物間の相互放射、(3) キャノピー層内の指数ウインドプロファイル、(4) 屋根面、壁面、道路面からの多層伝熱方程式を特徴とする都市キャノピーモデル (UCM) を組み込むことで、建物によって形成される地表面の凹凸の影響を考慮する。

2.2 計算条件

本研究では、WRF version3.0.1.1-ARW を用いた。計算条件を表1に示す。計算期間は2010年の8月1ヶ月間とした。計算対象領域を図1に示す。ネスティング手法を用い Domain1, 2 を設定した。考察対象領域は Domain2 である。

都市キャノピーモデル (UCM) では、都市を3分類まで設定することができる。そこで、国土数値情報において都市と分類されたメッシュについて、ランドサット ETM データ (2001年10月5日撮影) より算出した正規化植生指標 (NVI) に基づき、都市化の程度に応じて都市 A, B, C と分類した。現状の土地利用設定を図2に示す。また、土地利用分類別の物性値を表2に都市カテゴリーの設定値を表3に示す。

Table.1 Calculation condition

Calculation period	1-31 August, 2010
Vertical grid	28 layer (surface-100hPa)
Horizontal grid	Domain1: 3km (120×120grids) Domain2: 1km (103×103grids)
Meteorological data	JMA-Meso-scale Analysis (3 hourly, 10km grid, 20 layer) NCEP-final analysis (6 hourly, 1 degree grid, 17 layer)
Geographical data	Terrain height
	Land use
Microphysics process	Digital Map (50×50 resolution) Purdue Lin et al. scheme
Radiation processes	Long wave
	Short wave
Planetary boundary layer process	RRTM Longwave scheme Dudhia Shortwave scheme
Surface processes	Mellor-Yamada-Janjić PBL scheme
Cumulus parameterization	Urban area
	Non urban area
Four-dimensional data assimilation	UCM (Urban Canopy Model) Noah LSM
	None
	None

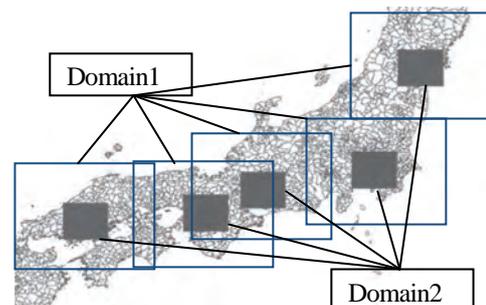


Fig.1 Calculation area

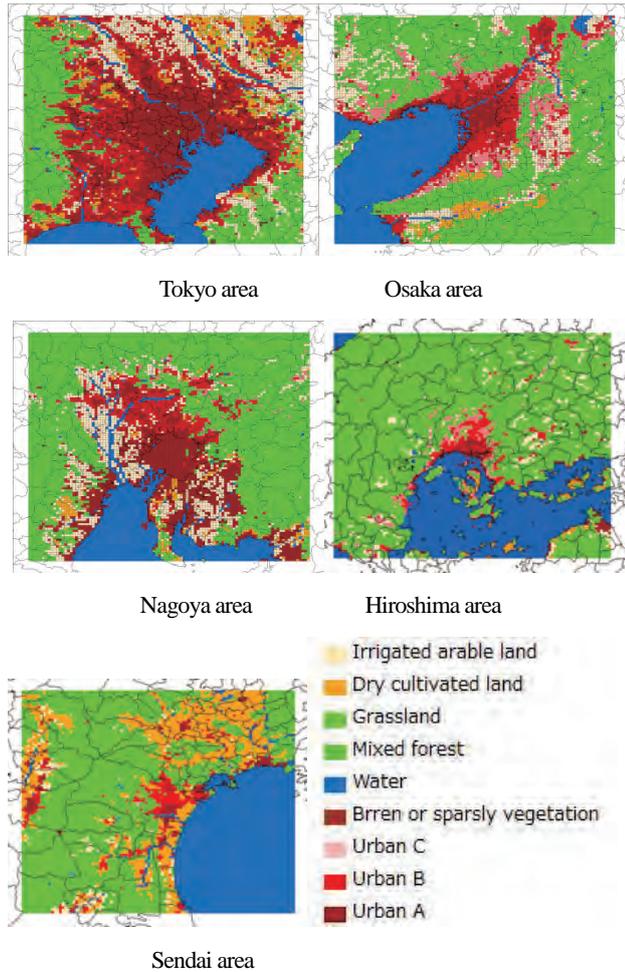


Fig.2 Land use condition

Table.2 Physical property on each land use

USGS	Albedo	Evaporation efficiency	Emissivity	Roughness length	Thermal inertia	
Land use code	Land use	[%]	[%]	[%]	[m]	[kJ/m ² ·K·s ^{0.5}]
1	Urban	15	10	88	0.8	1.26
2	Dry cultivated land	17	30	98.5	0.15	1.68
3	Irrigated cultivated land	18	50	98.5	0.15	1.68
7	Grassland	19	15	96	0.12	1.26
8	Shrubland	22	10	93	0.05	1.26
9	Mixing 7 and 8	20	15	95	0.06	1.26
11	Deciduous broad-leaved forest	16	30	93	0.5	1.67
13	Evergreen broad-leaved forest	12	50	95	0.5	2.09
14	Evergreen coniferous forest	12	30	95	0.5	1.67
15	Mixed forest	13	30	97	0.5	1.68
16	Water	8	100	98	0.0001	2.52
18	Woodland swampy land	14	35	95	0.4	2.09
19	Barren or sparse vegetation	25	2	90	0.01	0.84

Table.3 Setting for urban canopy model

Urban category	Dimensionless building height[-]	Building resistance coefficient[-]	Building volume parameters [m-1]	Roof surface evaporation efficiency[%]	Wall evaporation efficiency[%]	Ground surface evaporation efficiency[%]	Anthropogenic heat [W/m ²]
A	0.5	0.1	0.4	0	0	0	90
B	0.4	0.1	0.3	0	0	0	50
C	0.3	0.1	0.2	0	0	0	20

Urban category	Building height [m]	Roughness length of momentum on canyon[m]	Heat roughness length on the canyon[m]	0 surface displacement height[m]	Sky factor (initial value)[%]	Building coverage[%]
A	10	1	1	2	48	50
B	7.5	0.75	0.75	1.5	56	50
C	5	0.5	0.5	1	62	50

3. 計算値と観測値の比較

数値計算に用いるメソ気象モデル WRF の計算結果を検証した。検証に用いた観測データは、気象庁の気象台や地域気象観測システム (アメダス) のデータである。

3.1 晴天日・海風日の抽出

晴天日、海風日を定義し、観測値に基づき抽出した。晴天日、海風日の定義を表4に示す。

3.2 精度検証

2010年8月の晴天海風日に、東京、大阪、名古屋、広島、仙台地域のDomain2 (1km×1kmメッシュ) 内にあるアメダスの観測値と計算値の比較を行った。表5に各観測点の風速と気温のBias, RMSE, Correlationを示す。いずれの地域においても、比較的良好な精度で計算結果が得られた。しかし、夜間 (21時~8時) の気温は観測値との差が大きい。日中 (9時~14時) の計算結果を解析対象とした。

Table.4 Definition of sunny day and sea breeze day

Sunny day	weather	Mostly Sunny or sunny	Sea breeze day	wind speed	2.0[m/s] or more
	Sunshine hours	7.0 hours or more		wind direction	Each region's main 2 wind direction
Total amount of solar radiation	19[M/m ²] or more	hour	The time that satisfies the above two conditions is 6 hours or more per day after 12 o'clock		
Precipitation	0.5[mm] or more				

Table.5 Bias, RMSE, Correlation of air temperature and wind speed

	Temperature	Bias[°C]	RMSE[°C]	Correlation	Wind speed	Bias[m/s]	RMSE[m/s]	Correlation
Tokyo area	Tokyo	0.50	0.72	0.92	Tokyo	-0.38	0.54	0.78
	Nerima	0.72	0.79	0.92	Nerima	1.74	1.85	0.63
	Futyu	1.80	2.14	0.90	Futyu	0.01	0.72	0.70
	Saitama	1.13	1.19	0.91	Saitama	0.41	0.72	0.69
	Tukuba	0.82	0.88	0.94	Tukuba	0.73	0.95	0.74
	Chiba	-0.24	0.28	0.90	Chiba	-0.97	1.03	0.78
Osaka area	Osaka	0.20	0.31	0.92	Osaka	-0.13	0.43	0.67
	Kobe	0.30	0.45	0.89	Kobe	-1.14	1.19	0.59
	Sakai	0.40	1.15	0.91	Sakai	0.28	0.71	0.58
	Toyonaka	0.43	0.54	0.91	Toyonaka	-0.18	0.52	0.62
	Yao	0.92	0.98	0.92	Yao	-0.71	0.92	0.56
	Hirakata	0.42	0.63	0.87	Hirakata	0.86	0.94	0.47
Nagoyarea	Nagoya	0.71	0.80	0.90	Nagoya	-0.46	0.56	0.64
	Toukai	0.24	0.48	0.89	Toukai	0.97	1.02	0.53
	Aisai	-0.18	0.32	0.93	Aisai	1.37	1.52	0.62
	Toyota	0.59	0.75	0.93	Toyota	0.42	0.58	0.33
	Gifu	0.97	1.01	0.90	Gifu	-0.29	0.40	0.64
	Tajimi	0.47	0.84	0.93	Tajimi	0.46	0.59	0.53
Hiroshima area	Hiroshima	0.01	0.02	0.91	Hiroshima	-0.56	0.77	0.56
	Kure	-0.05	0.06	0.93	Kure	0.04	0.55	0.59
	Otake	0.05	0.05	0.86	Otake	-0.70	0.74	0.41
	Higashiroshma	-0.08	0.08	0.94	Higashiroshma	-0.50	0.77	0.30
	miri	0.03	0.03	0.89	miri	-1.38	1.68	0.01
	Sendai	-0.03	0.04	0.90	Sendai	-0.19	0.44	0.46
Sendai area	Watari	-0.06	0.06	0.81	Watari	-0.36	0.62	0.31
	Shiogama	0.47	1.08	0.91	Shiogama	1.38	1.45	0.32
	Zaou	-0.02	0.04	0.83	Zaou	-0.82	0.90	0.12
	Ishimaki	-0.05	0.06	0.83	Ishimaki	-0.74	0.82	0.57

4. 気温分布の分析

東京地域、大阪地域、名古屋地域、広島地域、仙台地域の都市の規模及び沿岸部土地利用と気温分布の関係を分析した。分析には2010年8月の晴天、海風日の日中(9時~14時)の計算結果を用いた。

4.1 都市の規模と気温分布

広島地域の海岸からの距離と気温の関係を図3に、広島地域及び各地域の晴天海風日平均における海岸からの距離と気温上昇の関係を図4に、海岸からの距離1km毎の都市の土地利用の頻度を図5に、広島地域の気温分布を図6に示す。

5地域ともに海岸からの距離が大きくなるにつれて気温が上昇する傾向が確認されたが、日によって気温上昇の傾きは異なっていた。気温上昇の傾きが異なる要因は、夜間の雲量と日中の海面温度であると考察された。各地域の都市の規模と気温上昇の傾きとの間に関係は確認されなかった。

広島地域は東京地域、大阪地域と同様に沿岸部に都市が広がっているが、高温になる都市のメッシュが2地域と比較して少ないため傾きが小さくなっていると考察された。

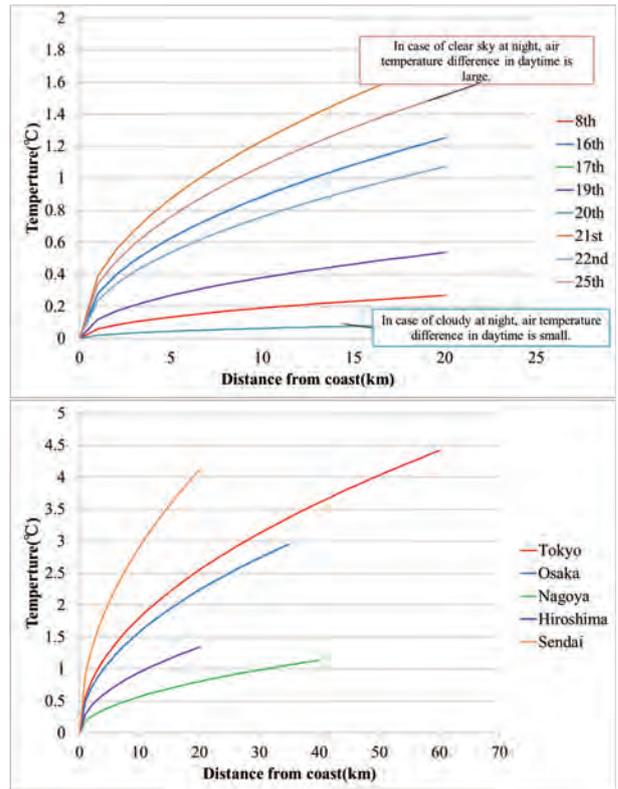


Fig.4 Relationship between distance from coast and air temperature rise (Upper: Hiroshima area, Lower: Average for each area)

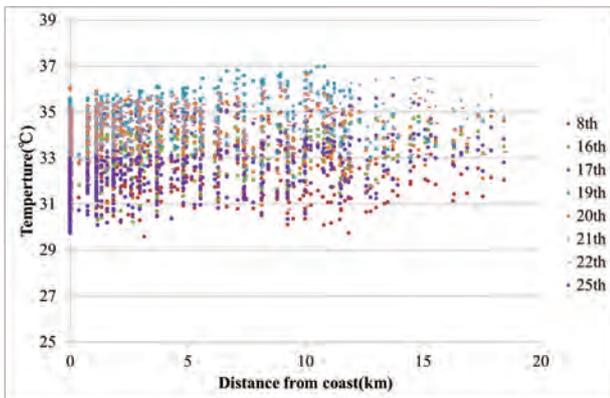


Fig.3 Relationship between distance from the coast and air temperature in Hiroshima area

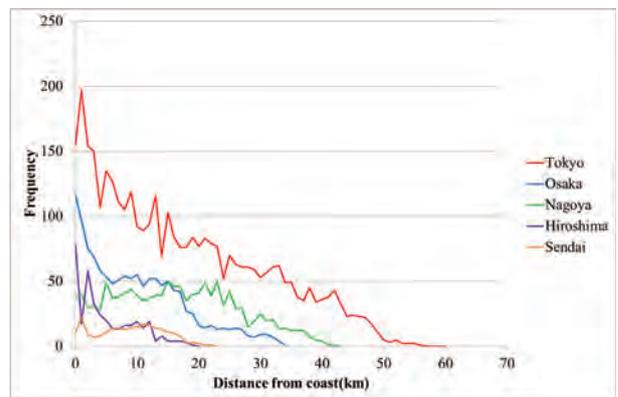


Fig.5 Frequency of urban land use every 1 km away from coast

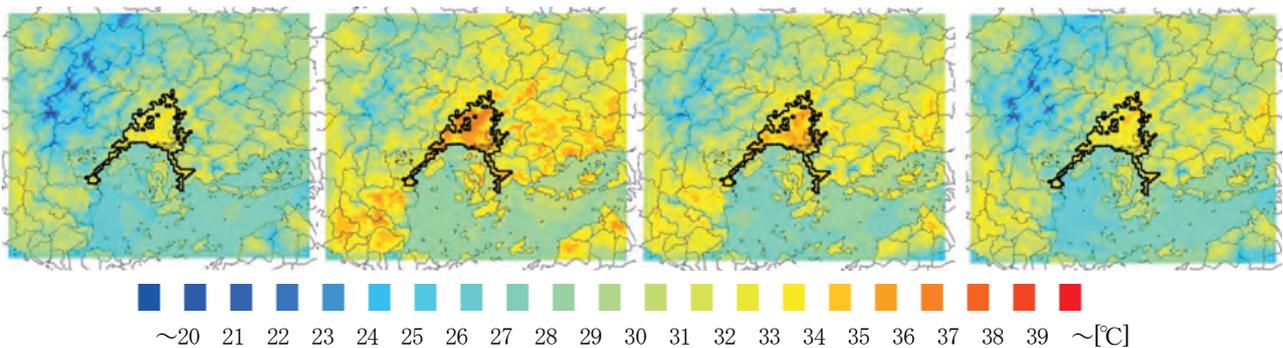


Fig.6 Air temperature distribution in Hiroshima area at 14:00 (from the left: on Aug. 08, Aug. 19, Aug. 20, Aug. 25)

4.2 沿岸部土地利用と気温上昇の関係

東京地域、大阪地域、名古屋地域、広島地域の4地域で共通して晴天海風日であった8月25日14時の気温の頻度分布、海岸からの距離と気温上昇の関係を図7、8に、東京地域、名古屋地域、仙台地域の3地域で共通して晴天海風日であった8月7日の気温の頻度分布、気温分布を図9、10に示す。

名古屋地域、仙台地域では沿岸地域に都市の土地利用が少ない。名古屋地域では気温の低い沿岸部の都市が他地域と比べて少ない。その影響で内陸部との気温差が小さく、気温上昇の傾きが小さい。沿岸部の都市以外の土地利用を含めると、気温上昇の傾きは東京地域、大阪地域と同様になる。仙台地域では都市部の気温は他地域と同様であるが、緯度の影響で海面温度が約1℃低い。その影響で沿岸部の都市以外の土地利用の気温が約1-2℃低く、隣接する都市の気温も低いため、内陸部との気温差が大きく、気温上昇の傾きが大きい。以上より、沿岸部の土地利用が気温上昇の傾きに及ぼす影響が大きいことが分析された。

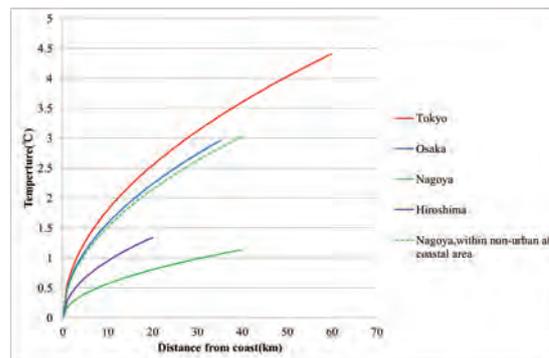


Fig.8 Relationship between distance from the coast and air temperature rise

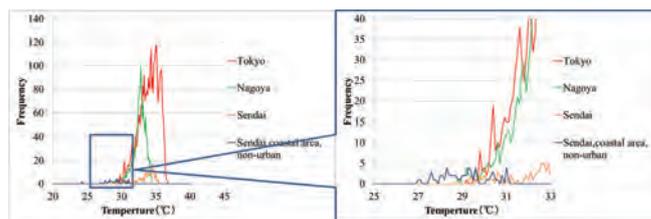


Fig.9 Frequency of air temperature at 14:00 on August 7

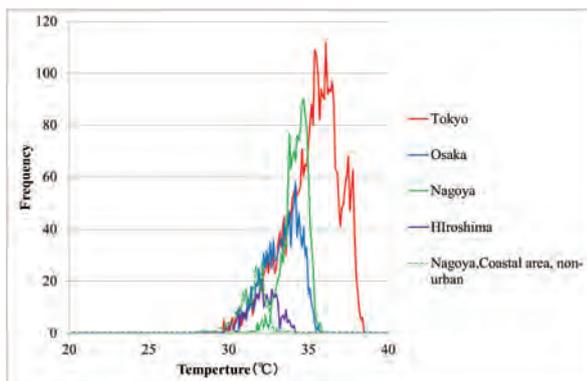


Fig.7 Frequency of air temperature at 14:00 on August 25

5. 結論

本研究では、東京地域、大阪地域、名古屋地域、広島地域、仙台地域を対象として、都市の規模及び沿岸部土地利用と気温上昇の関係を分析した。

各地域の都市の規模と気温上昇の傾きとの間には関係は確認されなかった。沿岸部土地利用が気温上昇に及ぼす影響が大きいと分析された。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 16H04464 の助成を受けた。
参考文献

- 1) Oke, T.R. : City size and the urban heat island, Atmos, Environ., 7, pp. 769~779, 1973
- 2) 乾友紀子: 地域の気候特性に基づく土地利用計画による熱環境緩和効果に関する研究, 神戸大学大学院修士論文, 2013

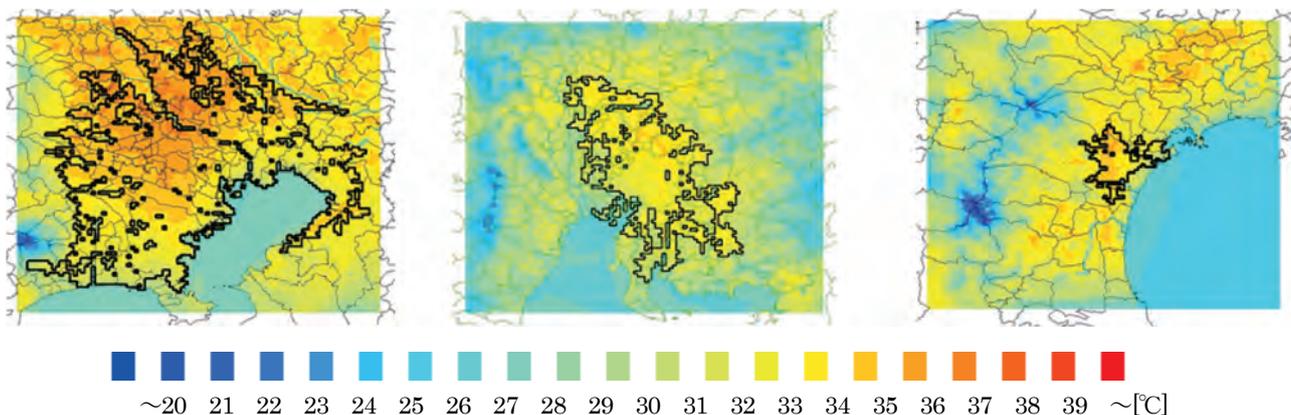


Fig.10 Air Temperature distribution at 14:00 on August 7 (left: Tokyo, center: Nagoya, right: Sendai)

ヒートアイランド対策の優先的導入の観点に基づく 街区特性と街路空間の風環境の関係分析

Analysis of the relation between urban block characteristics and wind environment in street canyon based on the countermeasure priority for urban heat island

○山本 直生 (神戸大学) 竹林 英樹 (神戸大学)

Naoki KIYAMA*¹ Hideki TAKEBAYASHI*¹

*¹Kobe University

In this study, the relation between urban block characteristics and wind environment in street canyon is analyzed based on the countermeasure priority for urban heat island. Weak wind risk is prescribed based on the wind environment evaluation scale proposed by Murakami et al. When the ratio of non-suitable wind due to weak wind is more than 70%, it is supposed as high weak wind risk. It is possible to more appropriately specify the countermeasure priority road by adding the building height to the street width as indicators for weak wind risk.

1. はじめに

街路空間内の風通し環境が悪化し都市内で発生した熱が滞留することはヒートアイランド現象の原因の一つである。その対策には、劣悪な風環境となる箇所の把握が必要である。増田ら¹⁾は、街路空間を上空風向との関係に基づいて分類し、街路形態及び面的な建物群の特性が街路空間の風通し環境に及ぼす影響を考察した。

本研究では、都市の街路形態（道路方向、道路幅、建物高さ）と風環境の関係に関する既往研究の成果に基づき、風環境の観点からヒートアイランド対策を優先的に導入すべき箇所を特定する方法を検討する。

2. 弱風リスクの定義

ヒートアイランド対策を優先的に導入する箇所を把握するために村上ら²⁾が提案した風環境評価尺度を用いた。風環境評価尺度の「弱風による非適風」となる範囲（風速比が0.175以下）をヒートアイランド対策を優先的に導入する箇所と規定した。大阪市における道路幅と風速比の関係を図1に示す。各道路幅において「弱風による非適風」に当てはまる割合を「弱風リスク」と定義する。弱風リスクが70%以上の場合を「高リスク」、40%~70%の場合を「中リスク」、40%以下の場合を「低リスク」と分類し、表1に示す。

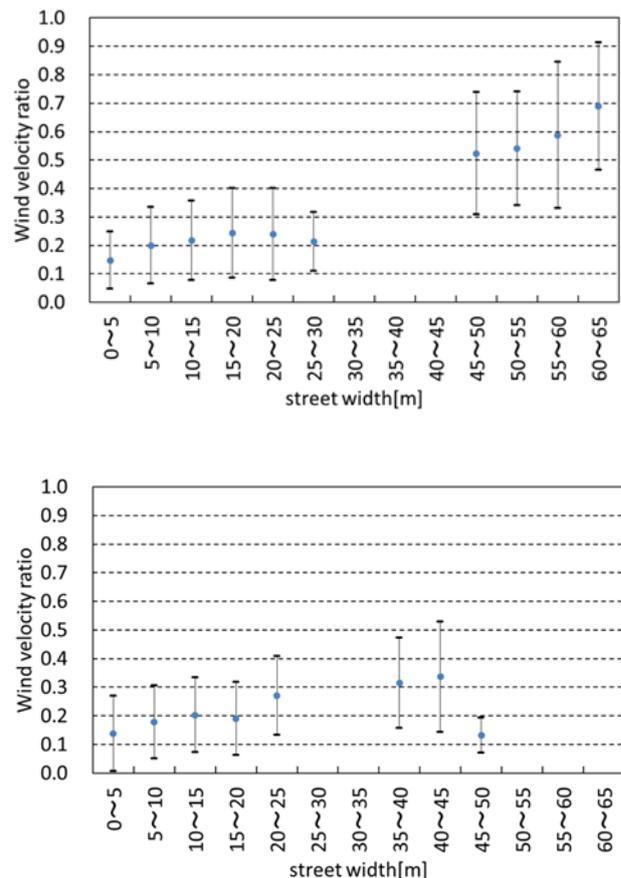


Fig.1 Relationship between street width and wind velocity ratio

Above: The street parallel to upper wind

Below: The street perpendicular to upper wind

3. 風環境分析

3.1 概要

指標に基づく弱風リスク選定の妥当性を、実街区モデルを対象とした風環境分布の計算結果と比較して検討する。

3.2 計算領域と格子間隔

大阪の中心市街地を対象に CFD による数値計算を行った。図 2 に計算対象地域を示す。中央大通などに存在する高速道路の高架や、街路樹などの樹木は表現しておらず、建物のみを想定した。対象とした 1 つの領域を例に、計算領域の平面図を図 3 に示す。Field1 が計算領域、Field2 が計算対象領域、Field3 が解析領域である。解析領域内の流れが計算領域の設定の影響を受けないように、解析領域よりも十分広い計算領域を設定した。水平方向の格子間隔は、解析対象領域内は 1m、解析対象領域外で徐々に広がる不等間隔とし、鉛直方向は、最高建物高さまでを 1m、それ以上は徐々に広がる不等間隔とした。

3.3 計算方法

RANS モデル系の $k-\epsilon$ 型 2 方程式乱流モデルを用いた。流入境界は基準高さ 47m の風速を 3.2m/s として 1/4 べき乗則で与えた。計算領域の主風向は西である。流出境界は自由流入出条件、上空境界・側面境界は free-slip 条件、地面・壁面境界は一般化対数則条件とした。

3.4 計算結果と考察

3.4.1 解析方法

建物、道路データと計算結果を重ね合わせ、道路ごとに弱風リスクを評価した。上空風速は、流入風速とし、解析には高さ 2m の計算結果を上空風速で除した風速比を用いた。

3.4.2 弱風リスクの検討

指標に基づく弱風リスク分布図と CFD 解析結果に基づく弱風リスク分布図の例を図 4 に示す。道路幅の大きな平行道路では概ね一致するが、道路幅の大きな直交道路や道路幅が中程度の道路では両者に差が確認された。

指標に基づく弱風リスクに対する CFD 解析結果に基づく弱風リスクの割合を道路幅ごとに図 5 に示す。平行道路では、弱風リスク中に分類された道路幅 5~30m の道路で、特に 5~15m の道路幅の場合に CFD 解析結果

Table 1 Weak wind risk based on street width

	The street parallel to upper wind	The street perpendicular to upper wind
0-5m	74%	78%
5-10m	59%	67%
10-15m	52%	57%
15-20m	47%	68%
20-25m	48%	35%
25-30m	51%	
30-35m		(45%)
35-40m	(0%)	26%
40-45m		27%
45-50m	7%	84%
50-55m	6%	
55-60m	10%	
60-65m	3%	
65-70m	9%	

high

middle

low



Fig.2 Calculation target area

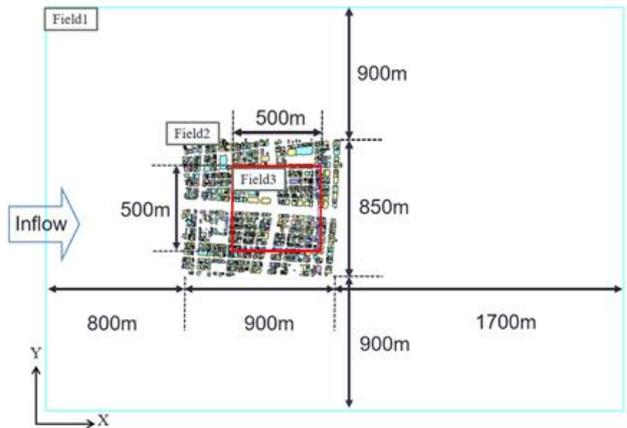


Fig.3 Example of calculation area



Fig.4 Weak wind risk distribution based on street width (left) and CFD analysis result (right)

は弱風リスク大に分類される場合が多い。直交道路でも同様に、弱風リスク中に分類された道路幅5~20mの道路で、特に5~15mの道幅の場合にCFD解析結果は弱風リスク大に分類される場合が多い。これらの道路幅の道路においては、建物高さなどの影響で弱風リスクが大きくなっていると考えられる。

以上より、指標に基づく弱風リスクの評価は、弱風リスク中と評価した街路空間、特に道路幅の小さい街路空間では周辺の建物高さなどの街区特性の影響で対策優先度が高くなる場合を適切に評価出来ないことがある。

3.4.3 建物高さの影響の検討

CFD解析結果より作成した周辺建物高さと言風速比の関係を道路方向別に図6に示す。平行道路、直交道路の両方で周辺建物高さが低いと弱風による非適風の割合が大きい。弱風リスク中の街路空間において道路幅別に検討したところ、平行道路の道路幅5~15mと直交道路の道路幅5~15mにおいて、周辺建物高さが低いと平均風速比が小さい傾向が確認された。

周辺建物高さが30~40mの時の弱風リスクは、平行道路の道路幅5~10mで47.8%、道路幅10~15mで42.8%、直交道路の道路幅5~10mで53.3%、道路幅10~15mで77.7%であり、周辺建物高さが20~30mの時の弱風リスクは、平行道路の道路幅5~10mで70.2%、道路幅10~15mで68.8%、直交道路の道路幅5~10mで92.1%、道路幅10~15mで74%であった。周辺建物高さが30m以下の道路で、弱風リスクがほぼ70%以上になるため、平行道路の道路幅5~15mと直交道路の道路幅5~10mの道路の周辺建物高さ30m以下の場合と直交道路の道路幅10~15mの道路の周辺建物高さ40m以下の場合を弱風リスク大に再定義した。道路幅と建物高さを指標とした弱風リスクを表2に示す。

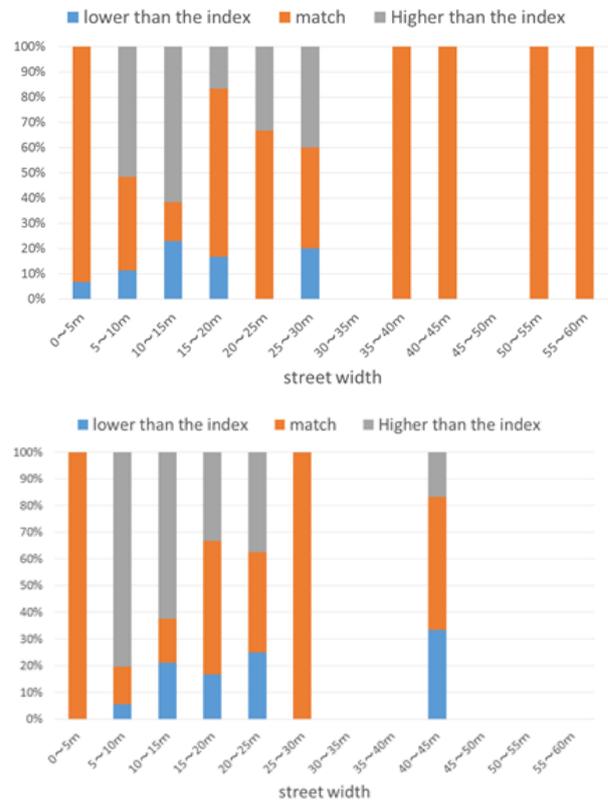


Fig. 5 Weak wind risk ratio based on CFD for that on street width

Above: The street parallel to upper wind

Below: The street perpendicular to upper wind

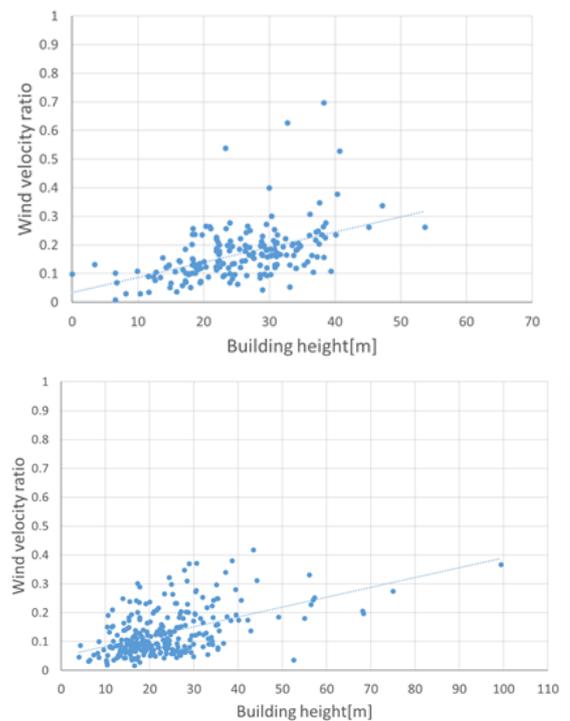


Fig. 6 Relationship between building height and wind velocity ratio

Above: The street parallel to upper wind

Below: The street perpendicular to upper wind

道路幅と建物高さを指標とした弱風リスクに対するCFD解析結果に基づく弱風リスクの割合を図7に示す。高さを指標に加えることで、整合率は48%から64%に改善した。なお、CFD解析結果に基づくリスクが低くなる割合も含めると89%であり、ヒートアイランド対策を優先的に導入すべき箇所の特定には有効であるといえる。

4. 結論

本研究は、ヒートアイランド対策を効果的に導入するために、対策優先箇所を特定する方法を風環境の観点から検討した。道路幅を指標とした弱風リスクの評価では、弱風リスク中と評価した平行道路の道路幅5~15m、直交道路の道路幅5~10mの道路で、周辺建物高さ30m以下の時に弱風による非適風になる割合が高く、直交道路における道路幅10~15mの道路で、周辺建物高さ40m以下の時にも弱風による非適風になる割合が高いと分析された。建物高さを指標に加えることで、ヒートアイランド対策を優先的に導入すべき箇所の特定が可能となる。

謝辞 本研究はJSPS科研費16H04464の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 増田恭大, 街路形態が街路空間の風通し環境に及ぼす影響に関する研究, 神戸大学大学院自然科学研究科修士論文, 2009.2
- 2) 村上周三, 森川泰成, 気温の影響を考慮した風環境評価尺度に関する研究 一日平均風速と日平均気温に基づく適風, 非適風環境の設定一, 日本建築学会計画系論文報告集 (358), 9-17, 1985-12-30

Table 2 Weak wind risk based on street width and building height

	The street parallel to upper wind	The street perpendicular to upper wind
0-5m	74%	78%
5-10m	59%	67%
10-15m	52%	57%
15-20m	47%	68%
20-25m	48%	35%
25-30m	51%	
30-35m		(45%)
35-40m	(0%)	26%
40-45m		27%
45-50m	7%	84%
50-55m	6%	
55-60m	10%	
60-65m	3%	
65-70m	9%	

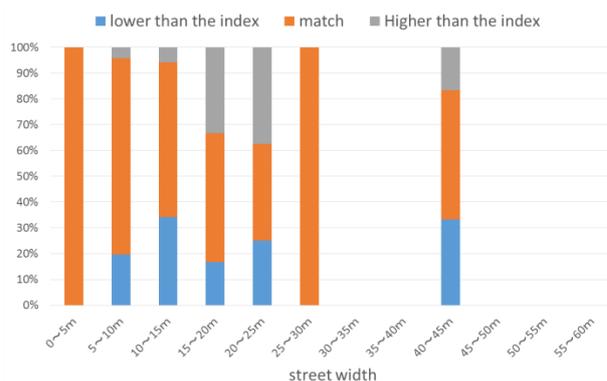
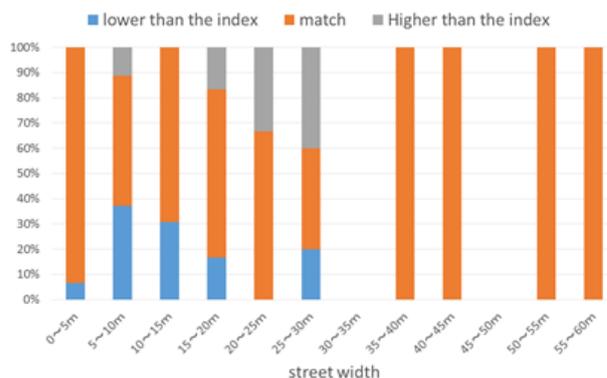
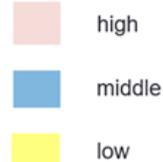


Fig. 7 Weak wind risk ratio based on CFD for that on street width and building height

Above: The street parallel to upper wind

Below: The street perpendicular to upper wind

風洞実験による建物の遮風昇温効果に関する研究

Study on the temperature rise effect caused by the buildings obstructing the wind using wind tunnel.

○福井 彩奈 (摂南大学)

三浦 美之 (摂南大学)

森山 正和 (摂南大学)

河野 仁 (兵庫県立大学名誉教授)

Ayana FUKUI*¹ Toshiyuki MIURA*¹ Masakazu MORIYAMA*¹ Hitoshi KONO*²*¹ Setsunan University *² Professor emeritus at University of Hyogo

It seems that the temperature rise of the spaces between buildings is caused by releasing the heat from cars and solar energy under obstructing the wind flow. Therefore, wind tunnel experiments with measurements area 300*300 mm, are carried out using the building models of 60*60 mm with heat generation from floor surface. The wind pattern was almost no difference by the existence of heat generation. The air temperature was highest at windward near the floor in case of the existence of heat generation.

1. はじめに

近年、日本の都市化に伴い、ヒートアイランド現象が進行しており気温が上昇している。これにより、人の健康状況やその他動植物にも様々な害がでており、近年では熱中症や熱さでの睡眠障害などが起り問題視されている。その結果電力などの使用エネルギーが増加していて、これもまた問題視されている。ヒートアイランド現象の主な要因は人工排熱の増加・都市形態の高密度化・地表面被覆の人工化が大きくあげられる。

上記のように、都市部でのヒートアイランド現象が深刻になってきている。その要因の一つとして建物により風が遮られ、風の流れが悪化していることも考えられる。

ここでは「遮風昇温効果」とは、風が建物に遮られて風速が弱くなって空気が淀み、日射熱や自動車の排熱などにより局所的に気温が上昇する現象を意味している。また、「陽だまり効果」と表現する場合もある。

本研究では、風洞実験による建物の遮風昇温効果について測定し、その原理と特徴を知り、その結果からヒートアイランド現象に対する影響を考察することを目的とする。

2. 測定方法

エッフェル型風洞と呼ばれる、吸い込み口と吹き出し口が大気に直接開放されているタイプの風洞を使用した。風洞の測定部サイズは、風下方向を X、スパン方向を Y、高さを Z と定義すると、 $(X \times Y \times Z) = (3000\text{mm} \times 300\text{mm} \times 300\text{mm})$ である。模型の上流に粗度ブロックとブレードを配置し、都市の乱流を再現した¹⁾。この風洞に模型

(60mm×60mm)と面発熱体を入れ(Fig. 1)、発熱のある場合とない場合の2つの条件で測定を行う。

2.1 測定条件

(1) 測定日時

測定は、2016年12月5日と2017年2月3日の2回行ったが、ほとんど同じ結果が得られたので、ここでは2回目の結果を示す。

(2) 測定機器(測定項目)

記録は各点1秒間隔で300回。

測定時の風洞実験装置内の風速：3.0 m/s

クリモマスター(風速)・熱電対(温度)・赤外線熱電対(エドックス/IRT/C. 3X-K-80F/27C)(表面温度)

(3) 測定点(Fig2)

reference：建物の影響を受けていない上空

A~L点：面発熱体が置いてある建物模型と建物模型の間の空間の中で、X軸方向とZ軸方向に測定位置を(X軸方向3)×(Z軸方向4)の合計12点。風上側の下からA点。



Fig.1 Arrangement of model and surface heating element (in the wind tunnel)

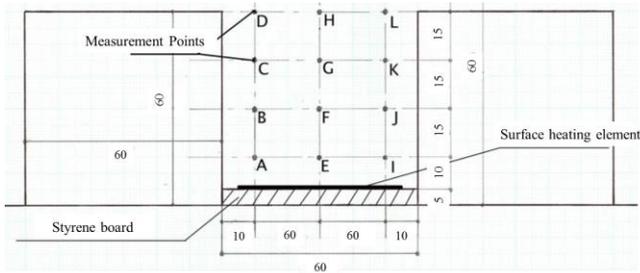


Fig.2 Measurement points



Fig.3 Arrangement of measurement instruments

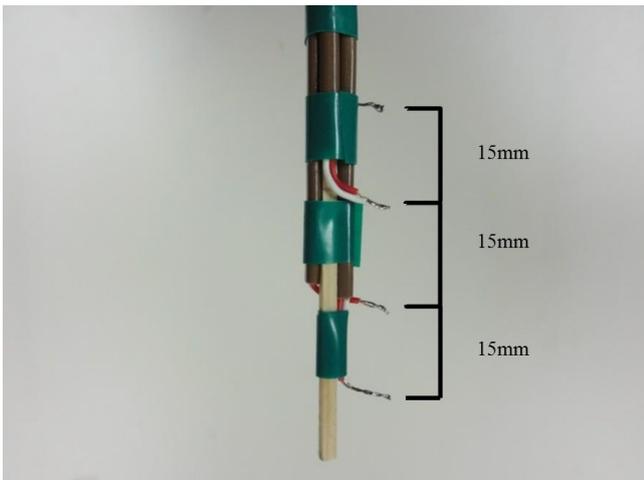


Fig.4 Thermocouple for the measurement of vertical air temperature profile

2.2 面発熱体について

フィルムヒーターである。ステンレス箔を電気抵抗体として、両面に絶縁フィルムをラミネートした、薄いシート状の発熱体 (X×Y) = (50mm×80mm)。電源はDC4.5Vとした。今回の測定では、2つ使用した。

2.3 相似則について

基準風速は3.0 m/s、模型高さ0.06mであるため、建物レイノルズ数を求めると $Re=12000$ であるので、乱流条件での実験である²⁾。

3. 測定結果及び考察

3.1 発熱がない場合の風速の測定結果及び考察

Fig. 5 に発熱がない場合の風速の結果を示す。

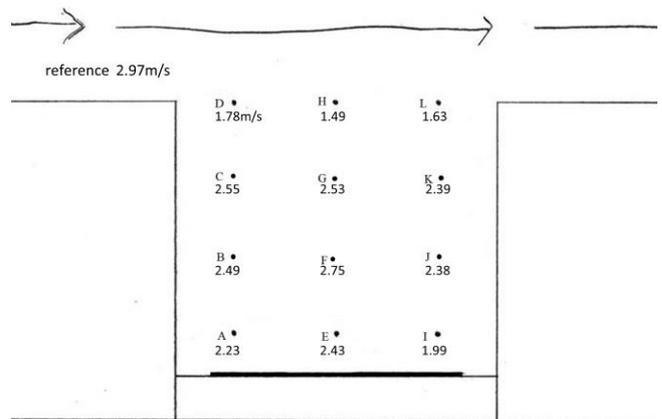


Fig.5 Measured wind velocity (no heat generation)
(minus symbol is omitted)

上記の reference (X, Y, Z) = (1250mm, 150mm, 240mm) と各点の風速の差を Fig. 6, 7 のコンターに示した。

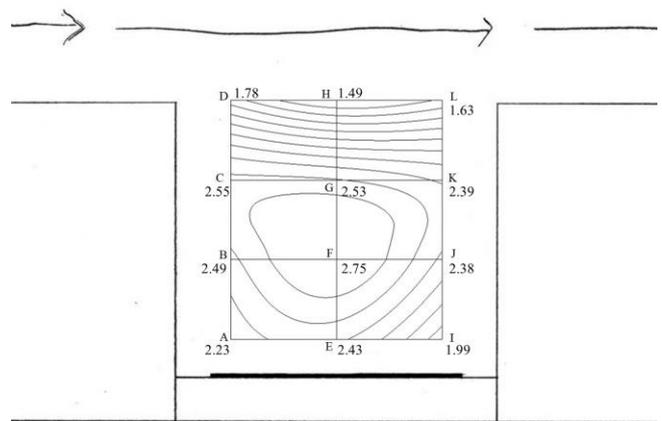


Fig.6 The contour of wind velocity difference between reference and measured values (no heat generation) (minus symbol is omitted)

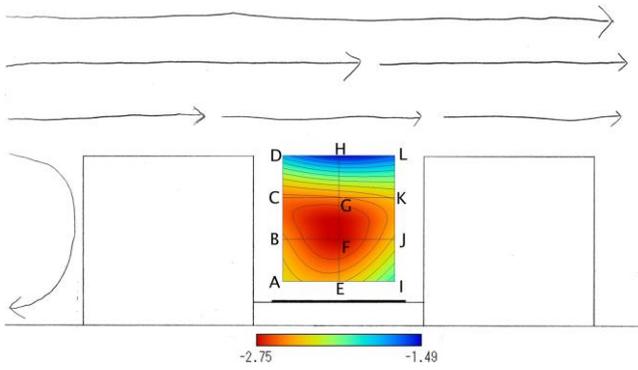


Fig.7 The color contour of wind velocity difference between reference and measured values (no heat generation)

発熱がない場合の各点の風速はF点の風速が一番弱く、K→J→I→E→A→B→Cの順の測定点で風速が弱くなっている。
 この結果ではF点の風速が一番弱く、原因としてK→J→I→E→A→B→Cの順に風の流れができ、中心部まで風が届かなかったためだと考えられる。

3.2 発熱がある場合の風速の測定結果及び考察

Fig. 8 に発熱がない場合の風速の結果を示す。

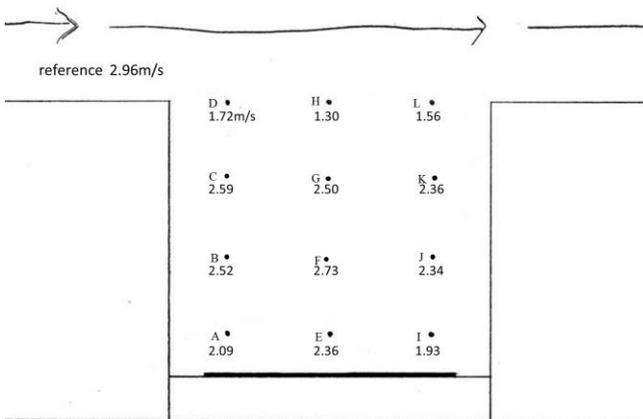


Fig.8 The measurement result of wind velocity (heat generation) (minus symbol is omitted)

上記の reference (X, Y, Z) = (1250mm, 150mm, 240mm) と各点の風速の差を Fig. 9, 10 のコンターに示した。

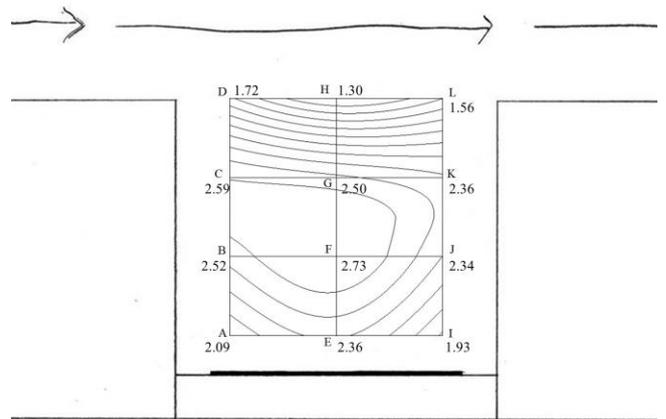


Fig.9 The contour of wind velocity difference between reference and measured values (heat generation) (minus symbol is omitted)

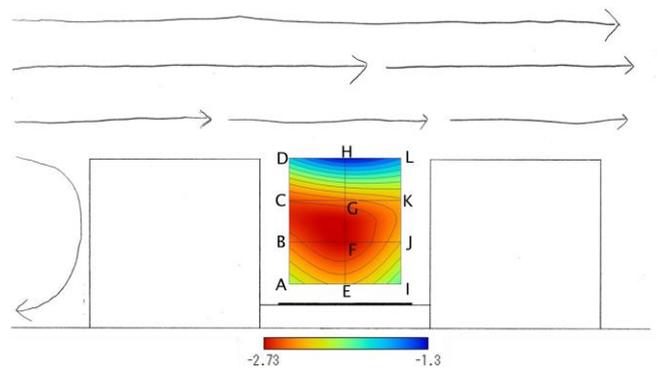


Fig.10 The color contour of wind velocity difference between reference and measured values (heat generation)

発熱がある場合の各点の風速は、発熱がない場合の風速と同じくF点の風速が一番弱かった。原因として、3.2と同様にK→J→I→E→A→B→Cの順に風の流れができ、中心部まで風が届かなかったためだと考えられる。

3.3 温度の測定結果及び考察

Fig. 11 に発熱したときの温度の結果を示す。

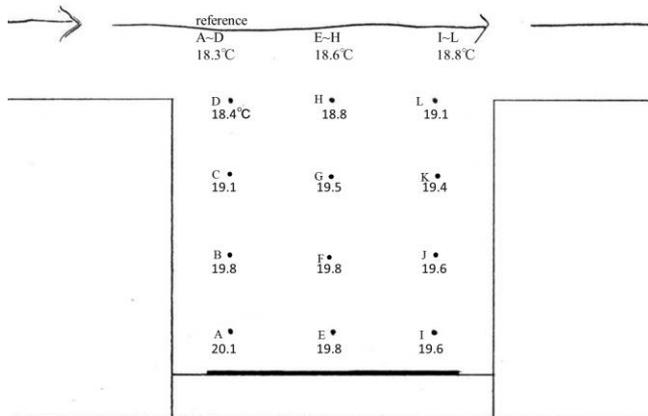


Fig.11 The measurement result of temperature

上記の reference (X, Y, Z) = (1250mm, 75mm, 240mm) と各点の温度差を Fig. 12, 13 のコンターに示した。

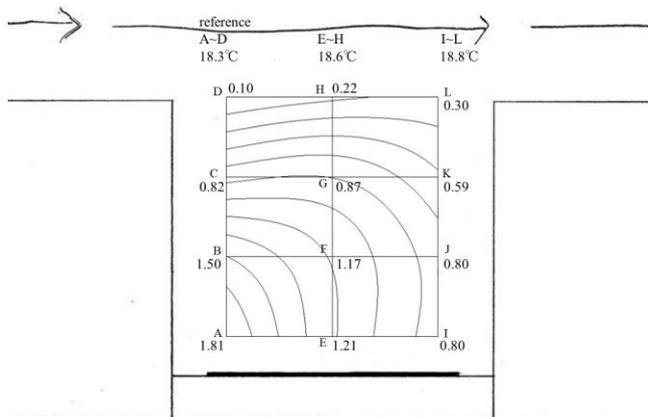


Fig.12 The contour of wind velocity difference

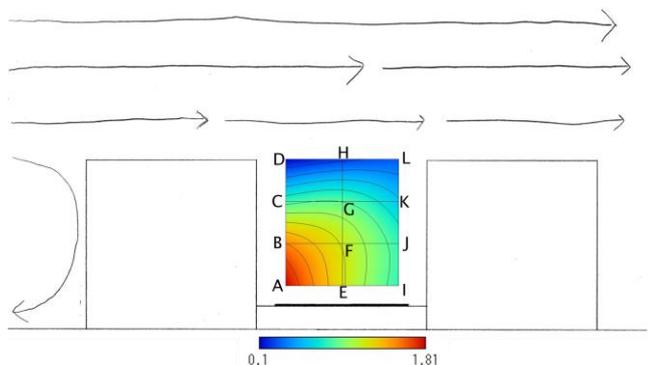


Fig.13 The color contour of temperature difference

建物の遮風による温度変化の結果は、左下周辺の測定点 ABCE 点の温度が高くなった。ABCE 点には面発熱体によって暖められた空気が風に乗って運ばれ、温度が上がったと考えられる。この結果は、A 点周辺の温度が高くなった。F 点の温度が高かったのは、3.2 の結果から風があまり流れていないことがわかり、それにより温度が上がったと考えられる。上部の DHL 点は reference とほとんど差は無かった。これは、風が良く通っているので遮風昇温効果の影響がないと考えられる。

なお、AEI 点は面発熱体に距離的に近く、測定値に輻射熱の影響を受けていることが考えられる。今後、その影響は検討する予定である。

4. 結論

建物による遮風昇温効果は建物間の弱風化が、温度上昇につながることを示している。これによりヒートアイランド現象の要因となることが確認できた。

本研究の測定では、最高で 1.8°Cほどの温度上昇であったが、都市単位で考えると温度上昇が大きくなると予想される。この建物の遮風昇温効果の対策として、風の通り道を作ることが挙げられる。それにより、都市部の温度上昇が抑制され、ヒートアイランド現象の対策につながると思われる。

参考文献

- 1) 3D stream and vortexes in the urban canopy layer and transport of motor vehicle exhaust gas, H. Kono and K. Kusunoki, International Journal of Environment and Pollution, Vol. 25, N01/2/3/4, 177-190, 2005
- 2) 日本風工学会編集, 風工学ハンドブック, 朝倉書店, 2007 年

夏季の寝室における冷房や通風利用パターンによる睡眠の質の違い
 -大阪の集合住宅を対象とした分析-

Relation between thermal control use and sleep quality 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) 小林知広 (大阪市立大学)
 別所洋奈 (大阪市立大学) 中山裕介 (大阪市立大学)

Yoshiki TACHIBANA* Noriko UMEMIYA* Tomohiro KOBAYASHI*

Hirona BESSHO* Yusuke NAKAYAMA*

*Osaka City University

This survey compared sleep quality when using three thermal control patterns based on 75 respondents on a total of 343 days for three years in collective housing in Osaka. The thermal environment is expressed by the mean during sleep. It is defined as the total insulation values of bedding systems. Results show that sleep quality has nothing to do with the indoor thermal environment in the case of "full time air conditioner." Moreover, it is worse as the thermal environment becomes hotter in the case of "full time window opening." Good sleep quality is obtained by "using an air conditioner timer" when the outdoor temperature exceeds 27.9°C.

1. 背景と目的

地球温暖化と都市高温化の進展によって熱帯夜数が増加し、都市部において夏季に睡眠の質を確保することは年々難しくなっている。熱中症の予防のため積極的な冷房使用が呼びかけられているが、睡眠時の冷房使用による熱的快適性の低下や中途覚醒リスクの増大を指摘した研究もある^{文3) 4)}。本研究は、大阪の集合住宅居住者 75 名の 3 年間 343 日を対象に、寝室の温湿度実測と申告調査から、1)出現頻度が高い温熱環境調節のパターンを明らかにし、2) 室内・外における温熱環境、3)温熱感覚、4)睡眠の質、5)温熱環境と睡眠の質の関係のこれらパターンのあいだの違いを明らかにする。睡眠の質に強く関係する要因を除いた分析もおこなう。温熱環境は睡眠時の平均値で表し、断熱量は寝具まで考慮した「総合断熱量」を用いる。

2. 方法

測定対象は大阪市および堺市の公団公社賃貸集合住宅 43 団地 77 棟 306 住戸を対象に募集し、2014 年 44 戸、2015 年 44 戸、2016 年 37 戸の協力を得た^{注1)}。調査期間を fig.1 に示す。間取りは 3DK と 2LDK の合計が半数を超え、平均居住階数は 5.7 階、対象者は女 53.5%、50 才代 23.8%、有職 72.0%、専業主婦 10.8%で、寝具は布団 77.3%である。

測定日の外気温は、2014 年 30.4~20.5°C (平均 24.4°C)、2015 年は盛夏期に多く測定したため 31.9~22.3°C (平均 27.5°C)、2016 年は 31.6°C~24.5°C (平均 29.4°C) を推移している。居住者は 1 週間のあいだ寝室の頭部周辺に温

湿度計を設置して測定し^{注2)}、30 分単位で冷房や扇風機の使用・不使用、窓の開・閉、寝室の在・不在、起床・就寝を記録するほか、毎朝前夜の睡眠時の温熱感覚や睡眠の質 (OSA) を評価する。自宅や寝室の住戸属性、寝室の住環境・雰囲気評価、体質・習慣や健康状態、測定期間中の気分 (POMS) も回答する。睡眠時の温冷感に『昨夜の睡眠時にあなたが寝る部屋で感じた暑さ寒さ』として尋ねた。睡眠の質は OSA 睡眠調査票^{文5)}の 5 因子 15 項目により 4 段階評価する。得られたのべ 606 日のうち、1)ストレスが「非常にあった」、2)健康状態が「不良」、3)睡眠が悪い側で、悪い理由が温熱以外、4)2 歳以下の子と就寝の場合を除き、50 戸のべ 75 人 343 日を以降の分析対象とする。

3. 睡眠時平均室内 SET* (総合) の定義

温熱環境を SET*で評価するに際し、風速は『扇風機の強さ』の申告から「強」2.5m/s、「中」1.2m/s、「微風」0.3m/s、

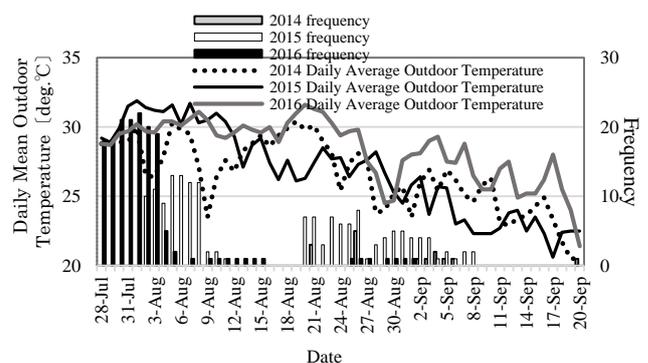


fig.1 Daily mean outdoor temperature and measured periods

「リズム風」、「その他」、「不使用」0.2m/sとし、冷房使用時や窓開放時は0.2m/sとする。放射温度は室温と同じ、代謝量は0.7metとする^{注3)}。着衣断熱量は寝衣の断熱量のみ考慮した「寝衣断熱量」と、寝具まで考慮した「総合断熱量」の2種類を検討する。『寝衣の種類』の申告を用いて、ISO9920基準^{文6)}にもとづいてTable.1のように与える。基準にない「長袖半ズボン」、「浴衣、甚平」などは、ISO基準の個別の着衣のクロ値を加算する。

Linら(2008)^{文7)}はサーマルマネキンを用い、ベッドや掛布団、寝衣の種類に対する寝具カバー率を考慮して寝具まで含めた睡眠時の総合的な断熱量を測定した。Linらの寝具や寝具カバー率との対応をTable.2~4に示す。

Linらは半袖半ズボンと長袖長ズボンのみ測定した。本研究では半袖半ズボンが47.8%等他の寝衣も多い。そこで、Linらの半袖半ズボンと長袖長ズボンのクロ値と「総合断熱量」との関係をもとに、他の寝衣の「総合断熱量」を線形補間により、ベッド、掛布団、寝具カバー率の組み合わせごとに求める。fig.2は通常のマットレス、ブランケット、寝具カバー率23.3%の例である。半袖半ズボンと長袖長ズボンの「寝衣断熱量」xと「総合断熱量」yの2点を結んだ式 $y = 0.5588x + 1.2515$ にTable.1の「寝衣断熱量」を与え、「総合断熱量」を推定している。

4. 温熱環境調節行為パターンの出現頻度

冷房使用、窓開放、扇風機使用の3行為に対し、睡眠時間に対する行為時間率1~99%のとき「一時使用」(△)とする。全時間使用(○)や不使用(×)と合わせ、3×3×3=27組合せのうち、出現頻度が上位のパターンをTable 5に示す。①冷房全時間使用が69日21.4%、②窓開放全時間が60日18.6%、③冷房一時使用が36日11.2%と多い。

Table.1 Clothing and clo value

Clothing	clo value
short sleeve, short gown	0.23clo
short sleeve, long gown	0.42clo
long sleeve, short gown	0.37clo
long sleeve, long gown	0.57clo
dress	0.21clo
summer kimono, summertime casual wear	0.41clo
close on bareness	0.04clo
no sleeve	0.18clo
underwear	0.10clo
only short sleeve	0.12clo

Table.2 the kind of the bed

Study of Lin et (2008)	This study
A conventional mattress	bed
Zongbang bed	futon

Table.3 Percentage coverage of body surface area

Study of Lin et (2008)	This study
23.3%	uncovered when I noticed
	covered in temporarily or in mid-flow
	no comforter
48.0%	only foot
59.1%	only lower body
67.0%	covered at all times

Table.4 the kind of Comforter

Study of Lin et (2008)	This study
Blanket (B)	cotton blanket
	wool blanket
	cotton thermal
	large towel
Summer Quilt 2 (Q2)	summer cotton comforter
	summer feather comforter
Summer Quilt 1 (Q1)	heavy cotton comforter
	heavy feather comforter

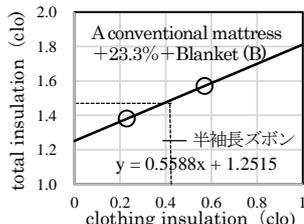


fig.2 estimated total insulation values from clothing insulation values (example)

Table.5 higher pattern of the thermal control use frequency

	Air conditioner	Window	fan	frequency
① full time air conditioner	○	×	×	21.4%
② full time window opening	×	○	×	18.6%
③ using an air conditioner timer	△	×	×	11.2%
④ do nothing	×	×	×	7.5%
⑤ full time Air conditioner and fan	○	×	○	6.5%

5. 行為パターン①②③の比較

上記①~③のあいだで、温熱環境、温熱感覚、気分、OSAの平均をfig.3に比較する。p: * (<5%)、** (<1%)。

外気温は①27.1℃、②26.4℃、③27.6℃で、②<③、②<① (p<1, 5%) であり、外気温の低い夜に開けている。

室温は①26.4℃、②28.3℃、③27.4℃、室内SET* (寝衣) は①22.7℃、②25.5℃、③24.6℃、室内総合SET*は①28.7℃、②31.3℃、③29.7℃で、いずれも③<①<② (p<1%)。

温冷感は①4.4、②4.1、③4.4で①②③に有意差はない。

OSAは、①48.9点、②51.9点、③51.3点で、②が①より睡眠の質が高い (p<1%)。

POMS得点 (以降POMS) は①6.2点、②1.6点、③4.5点で、②>①、②>③で (p<1%、5%)、②が他より良い。

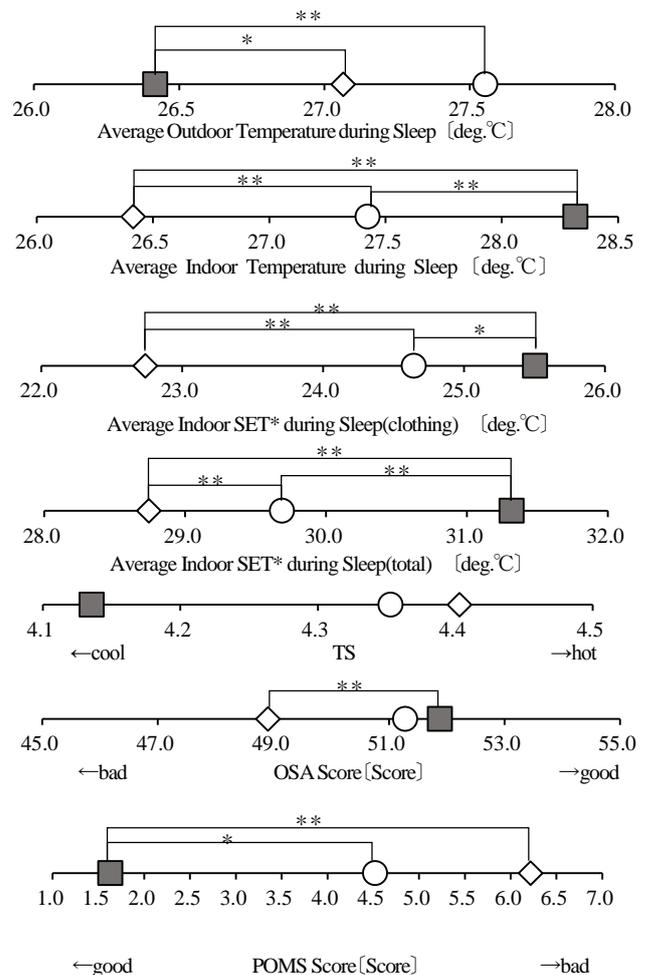
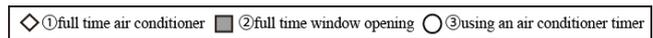


fig.3 Comparison of thermal control use ①②③

すなわち、室内温熱環境は②>③>①の順に高いが温冷感は①②③に差はない、睡眠の質は①が②より悪い、期間中の気分(POMS)は②が良い等、調節行為のパターン、特に冷房を使う日①③と窓のみの日②のあいだで、有意な差がある。

6. 睡眠の質との関係

①②③別の温熱環境やPOMSとOSAとの回帰分析のR値とP値をTable.6に示す。

寝衣断熱量や総合断熱量と OSA の関係を fig.4~fig.5 に示す。①では寝衣断熱量、総合断熱量ともにOSAと関係がないが、②③では断熱量が小さいほどOSAが良い。すなわち着衣や寝具の断熱量は、睡眠時に全時間冷房使用しない日では小さいほうが睡眠が良い一方で、全時間冷房を使う日では睡眠の質と関係がない。

fig.6.にPOMSとOSAとの関係を示す。①③では関係がないが、②では正の相関がある。

fig.7~ fig.8に外気温や室温とOSAとの関係を示す。①②では相関がないが、③では正の相関がある。一方Table.6が示すように、室内のSET*とOSAは関係がない。一時的に冷房を使う日のみで室内気温や外気温が高いほど睡眠が良い、しかし室内SET*で表した温熱環境は、①②③ともに睡眠の質とは関係がない、といえる。

ただし、温熱環境やPOMSの範囲は①②③のあいだで異なる。したがって次節では、温熱環境やPOMSが平均±標準偏差の範囲で①②③を比較する。

7. 温熱環境の範囲を限定した睡眠の質との関係

7.1 外気温の範囲を限定した場合

外気温の平均±標準偏差の範囲は 25.4°Cから 28.6°Cである。fig.9は外気温 26°C台から 29°C台までを示す。参考に棒グラフで出現頻度を示す。図の左が①②③の合計で、図の右は①②③合計のうち POMS の平均±標準偏差のデータに限定している。

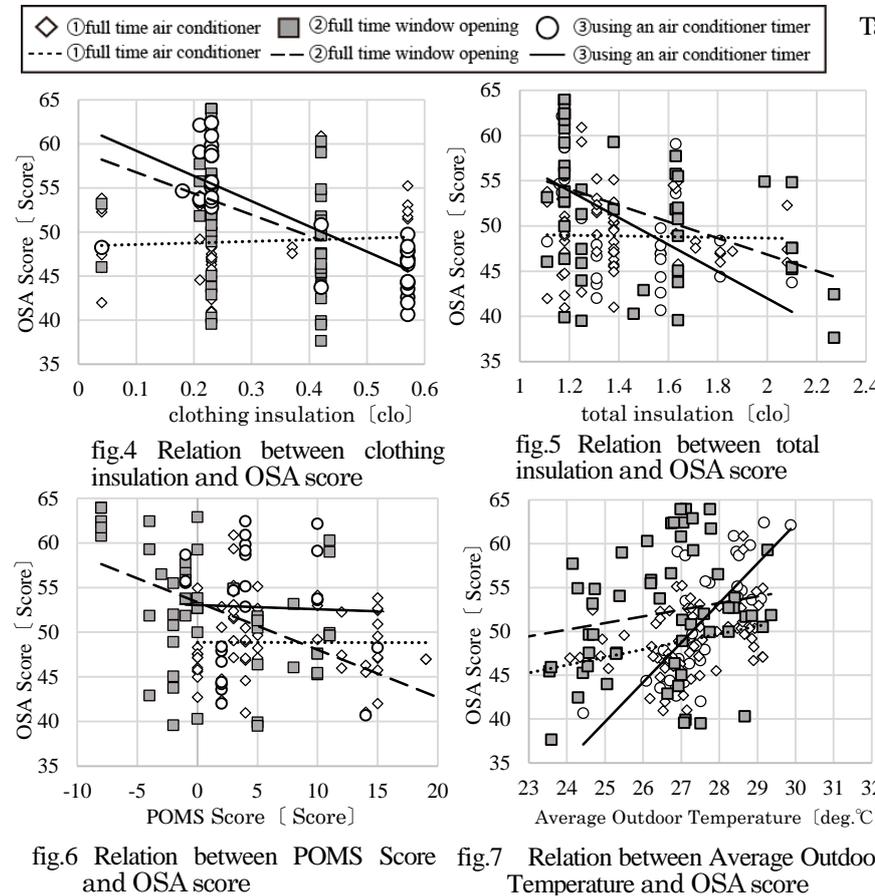
左右とも、①②③合計では外気温が高いとき OSA が高い。①②③を較べると、左右とも OSA は外気温 26~27°Cでは②が①③より良いが、28~29°Cでは①③の方が良い。③では外気温が高いほど OSA が良い。

fig.10は②と③について、極端な外気温を除くために外気温 25.4°C~28.6°Cに限定して、外気温と OSA の関係を示す。②はR²値は小さいが、回帰線は 27.9°Cで交わる。睡眠時の平均外気温が 27.9°Cを超える日は調査対象データの 28%を占めるが、これらの日では一時的に冷房を使った場合のほうが睡眠の質が良い、といえる。

7.2 室温の範囲を限定した場合

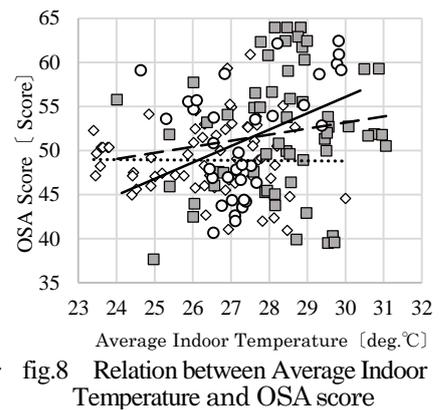
室温の平均±標準偏差の範囲は 25.6°Cから 29.0°Cである。fig.11は室温 26°C台から 29°C台までを示す。図の見方は fig.9 と同じである。

左右とも、①②③を合わせた場合は室温に関係なく OSA が 50 点前後である。しかし①②③別にみると、室温が同じでも OSA が異なっている。左右とも、室温が 28°Cを超えると③が最も OSA が良い。特に右の図でこの差は



Tables.6 Relation between OSA and thermal environment, insulation and POMS

	①full time air conditioner	②full time window opening	③using an air conditioner timer
Average Indoor Temperature	R=-0.01 P=0.93	R=0.15 P=0.26	R=0.38 P=0.02
Average Outdoor Temperature	R=0.30 P=0.01	R=0.19 P=0.15	R=0.75 P=<.0001
clothing insulation	R=-0.06 P=0.62	R=-0.36 P=0.006	R=-0.80 P=<.0001
Average Indoor SET* during Sleep(clothing)	R=0.006 P=0.96	R=0.02 P=0.87	R=-0.20 P=0.24
total insulation	R=-0.02 P=0.85	R=-0.42 P=0.002	R=-0.57 P=0.0004
Average Indoor SET* during Sleep(total)	R=-0.04 P=0.75	R=-0.22 P=0.13	R=-0.08 P=0.64
POMS Score	R=-0.003 P=0.98	R=-0.47 P=0.0005	R=-0.03 P=0.88



大きい。冷房を一時的に使う日③の睡眠の質は、睡眠時平均室温が27℃台のときは①②③のうち最も悪いが、28～29℃台のときは①②③のうち最も良い。さらにこの傾向は、極端な POMS の居住者を除くに明瞭になる、といえる。また、右の図では27℃台で①②③のうち①が最も良い。すなわち、極端な POMS の居住者を除くと、睡眠の質は、睡眠時平均室温が27℃台のときは①②③のうち全時間冷房を使う日①が最も良い。

7.3 室内 SET* (総合) と OSA 得点との関係

室内 SET* (総合) の平均±標準偏差の範囲は 27.9℃から 31.7℃である。fig.12 は 28℃台から 31℃台まで示す。

左右とも、室温と同様に①②③を合わせると OSA が 50 点前後である。しかし①②③別にみると OSA は、①では室内 SET* (総合) と関係がない。28℃台のときは①②③に差はない。②の OSA は、29～30℃台のときは①③より特に良いが、29～31℃にかけて SET*が高くなるほど悪くなり、31℃では③に逆転される。右図で極端な POMS のデータを除くと、③の OSA は 30～31℃台で①②より良い。すなわち、寝具まで考慮した SET*で表すと、睡眠の質は、冷房を全時間使う日①では室内温熱環境と関係がない、29～30℃では窓のみの日②が特に良いが、31℃では冷房を一時的に使う日③が最も良い。

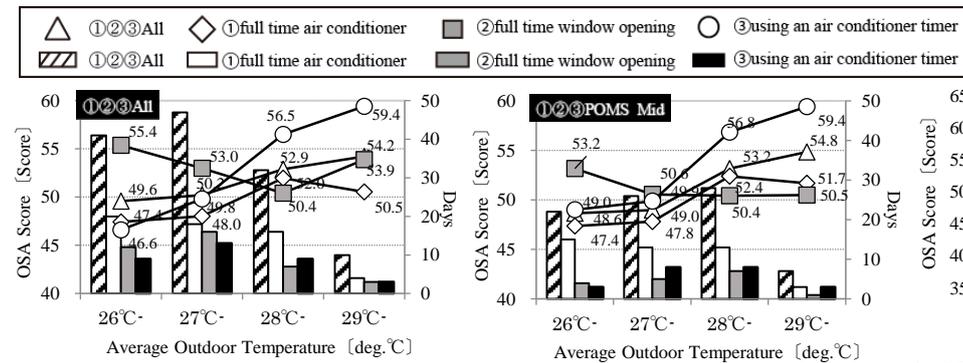


fig.9 Relation between Average Outdoor Temperature and OSA score

fig.10 Relation between outdoor temp. (25.4-28.6℃) and OSA score

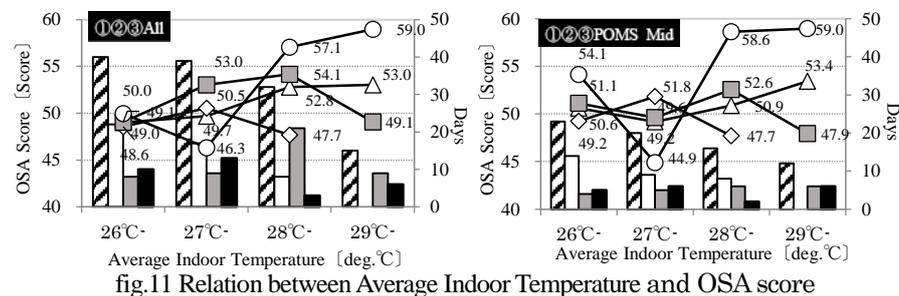


fig.11 Relation between Average Indoor Temperature and OSA score

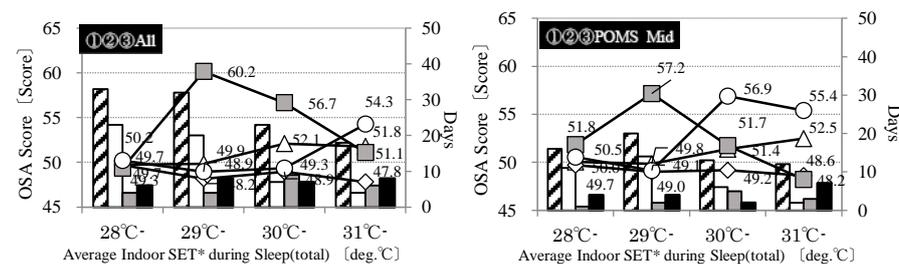


fig.12. Relation between Average Indoor SET*(total) and OSA score

8. まとめ

大阪の集合住宅居住者 75 名の 3 年間 343 日を対象に、夏季の寝室の測定と申告調査を実施し、睡眠時の温熱環境調節行為のうちよく出現する 3 パターン、全時間冷房使用 (出現頻度 21.4%) (①)、全時間窓開放 (同 18.6%) (②)、冷房一時使用 (同 11.2%) (③) のあいだで睡眠の質 (OSA) を比較した。温熱環境を睡眠時の平均値で評価する場合、以下のことがいえる。

- 1) 室内温熱環境は②>③>①であるが温冷感には①②③で差がなく、OSA は②>①、POMS は②が最も良い。
- 2) 睡眠時に全時間冷房を使わない場合②③では、寝衣断熱量や総合断熱量が小さいほど OSA が良い。
- 3) POMS は OSA に強く関係し、②が①③より睡眠の質が良い。
- 4) OSA は、睡眠時に全時間冷房を使う①では室内 SET* と関係がない。窓のみを使う②では高温ほど悪い。
- 5) POMS が極端なデータを除くと、一時的に冷房を使う③では室内 SET*が高いときに睡眠の質が良い。
- 6) OSA は窓のみを使う②で最も良いが、外気温が 27.9℃を超える日 (出現頻度 28%) には、OSA は一時的に冷房を使う③が最も良い。

参考文献
 文1) 気象庁 <http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html> 平成28年10月18日閲覧
 文2) 環境省: 気温の上昇が睡眠に及ぼす影響、ヒートアイランド対策の環境影響等に関する調査業務報告書, pp.1-50, 2009年2月,
 文3) 久保ら: 夏季と冬季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,
 文4) 石丸ら: 夏季の都市部での睡眠温熱環境に関する実態調査, 日本生気象学会雑誌 46(3), S41, 2009年,
 文5) 山本ら: 中年・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
 文6) ISO9920:1995
 文7) Zhongping Lin, Shiming Deng; „Building and Environment 43 (2008) 905-916,

注1) 27戸は2年、14戸は3年協力したため、実質70戸。
 注2) 2014年は30分、2015～16年は10分間隔で測定。
 注3) 別途実施した扇風機の風速測定と3住戸でのグローブ温度測定にもとづく

謝辞 ダイキン工業 新井潤一郎氏に謝意を表す。

夏季の寝室における冷房使用と
 温冷感・熱的快適感・熱的受容度の申告に基づく快適範囲
 —大阪の大学生を対象とした実態—

**Thermally Comfort Zones in Bedrooms during Summer based on Thermal Sensation
 -Survey of University Students in Osaka-**

○別所 洋奈 (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)
 橘 良樹 (大阪市立大学) 中山 裕介 (大阪市立大学)
 Hirona BESSHO* Noriko UMEMIYA* Tomohiro KOBAYASHI*
 Yoshiki TACHIBANA* Yusuke NAKAYAMA*

*Osaka City University

Based on the responses of 24 university students and graduate students in Osaka, we analyzed the thermal comfort zones in bedrooms during summer in relation to thermal sensations and sleep quality. Results showed the following. 1) The thermal comfort zones in bedrooms based on thermal sensations are SET* 19.3–22.7°C, with thermal acceptability is SET* 17.7–28°C, and feelings of good sleep at 20.1–23.7°C. 2) The thermal environment zone, for which the AC-users' comfortable response rate is higher than the not AC-users' is SET* 24–25.7 based on thermal sensations and feelings of good sleep.

1. 背景と目的

近年都市部の熱帯夜数が増加し^{文1)}、夏季に冷房なしで良質な睡眠をとることは難しくなっていると思われる。大阪の集合住宅では夏に 41.2%が窓を開け冷房なしで就寝しているという調査結果もある^{文2)}。

そこで本研究は、夏季の就寝中の温熱感覚や睡眠の質の実態を把握し、就寝中にどのように寝室の温熱環境を調節すれば睡眠の質が保てるのかを明らかにするために、温熱環境の実測と申告調査を、3年間のべ 581 日の大学生 24 名の盛夏期における睡眠の実態を分析する。「熱的快適」は各種の申告尺度に対して定義し、1)睡眠時の就寝時に「熱的快適」と評価される寝室の温熱環境の範囲、2)睡眠の質(OSA)との関係、3)冷房使用日と非使用日の「熱的快適」範囲のちがいを明らかにする。

2. 方法

5月～10月の中間期、梅雨期、盛夏期、残暑期の期に各期約 10 名、3年でのべ 83 名を対象に、1期に 7 日連続でのべ 581 日に、1)10 分間隔で寝室の気温・湿度、2)30 分間隔の生活行動記録と寝室温熱環境調節状況の記録、毎朝起床時の前夜睡眠時の 3)温熱感覚と睡眠感(OSA)の申告を採取した。4)寝衣と寝具などの睡眠状況も尋ねた。『昨夜の睡眠時にあなたが寝る部屋に感じた』感覚として、温冷感、熱的快適感、熱的受容度、睡眠感「非常によかった」～「非常に悪かった」の 4 段階を尋ねた。

温湿度計は被験者自身が頭部近傍に設置する。SET*には、風速は冷房時と通風時は 0.2m/s、扇風機運転時は風量

Table.1 clo value and velocity

Clothing	clo value	fan air volume	velocity
半袖半ズボン	0.23clo	強風	2.5
半袖長ズボン	0.42clo	中	1.2
長袖長半ズボン	0.37clo	微風	0.3
長袖長ズボン	0.57clo	リズム風	0.2
ほぼ裸	0.04clo	その他	0.2
		非使用	0

設定による 0.2～2.5m/s、寝衣は申告に基づき Table.1^{文3)}で、代謝量は 0.9met、グローブ温は室温と仮定した。

3. 調査対象の構成

Fig.1 に被験者属性と住戸属性を示す。自宅通学生 63%、下宿生 37%、『冷え性』は「少し」が最多で 36.2%、次いで「人並」32.8%である。『暑さ耐性』は「弱い」が最多で 44.8%、次いで「人並」39.7%である。『睡眠』の習慣は「やや不規則」が最多で 63.8%である。住戸形態は 2 階建ての戸建て 44.4%で最も多く、下宿生は全員が集合住宅である。『寝室の暑さ』は、「通風だけでも暑さをしのげる」が最多で 54.1%、「暑いときだけ冷房を利用すれば足りる」31.1%、「冷房なしでは暑さをしのげない」14.8%である。Fig.2 に測定当日の寝具と寝衣、温熱感覚および睡眠感の分布を示す。『寝衣』は「半袖半ズボン」68.9%、「半袖長ズボン」10.0%、『掛け布団』は「大判タオル」および「タオルケット」が最多で 18.4%、次いで「綿毛布」17.8%である。温冷感「暑くも寒くもない」34.8%、熱的快適感「快適」62.6%、熱的受容感「我慢できた」85.8%、

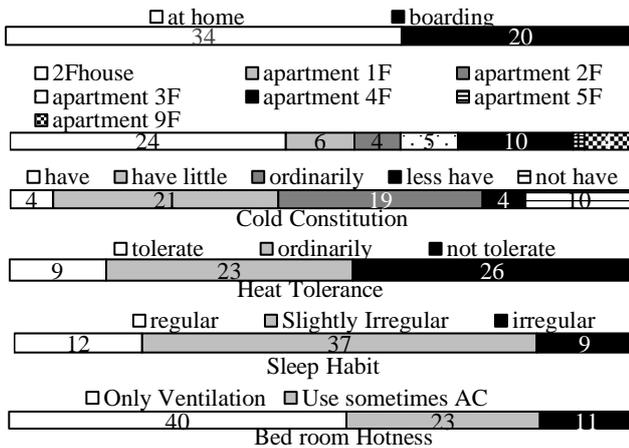


Fig.1 Frequency of Subject Basic Attribute

睡眠感は「ややよかった」61.3%が最も多い。次いでそれぞれ、「やや暑い」26%、「やや不快」30.8%、「我慢できないときがあった」12.9%、「やや悪かった」22.4%が多い。

4. 測定結果

本研究では温熱環境は睡眠中の平均値で表す。盛夏期における一晩の睡眠時平均 SET*、WBGT^{文4)}について、1°C刻みで表した分布を Fig.3 に示す。睡眠時平均 SET*は 19~31°Cで、26°C台が最多、平均値は 25.7°Cである。WBGT は 19~30°Cで、27°Cが最多である。WBGT は 25°C~28°C(警戒)が 34.7%、28°C~31°C(嚴重警戒)が 8.2%、31°C以上は 0%である。WBGT が 28°Cを超えると、すべての生活活動中に熱中症の危険があるとされており、温熱環境を睡眠時平均値で評価した場合でも、28°Cを超える日があることは注目される。

OSA 総合得点の分布は Fig.4 のようになる。50 点が最多で、平均は 48.3 点、標準偏差 2.92 点である。

5. 温熱感覚及び睡眠感に基づく睡眠時熱的快適範囲

Fig.5 に睡眠時平均 SET*と快適申告率の関係を示す。ここに快適申告率とは、5 種類の申告尺度に対してそれぞれ、1)7 段階温冷感において「中立」、2) 温冷感において中央 3 カテゴリーの範囲、3)4 段階の熱的快適感において「快適」、4)3 段階の熱的受容度において「我慢できた」、5)4 段階の睡眠感において「非常によい」と「ややよい」に申告される割合と定義する。温冷感中立と熱的快適感でみた快適申告率は、SET*21°Cまでは SET*が高くなるほど高くなるが、21°Cを超えると著低下している。他の申告でみた快適率も、21°Cを超えると低下または横ばいになっている。

ASHRAE 基準 55^{文5)} は、在室者の 80%が受容できる温熱環境の範囲を快適と定義している。そこで Fig.6 に、快適申告率 80%に相当する SET*の範囲を示す。温冷感中央 3 カテゴリー、熱的受容度、及び睡眠感に対する快適域はそれぞれ 19.3~22.7°C、17.7~28°C、20.1~23.7°Cである。温冷感中立と快適感「快適」の申告率は

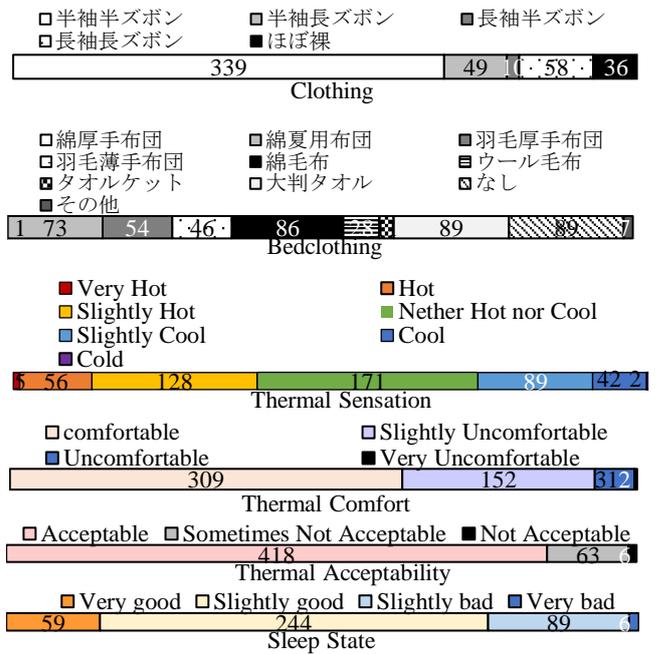


Fig.2 Frequency of Thermal Sensation and Sleep State

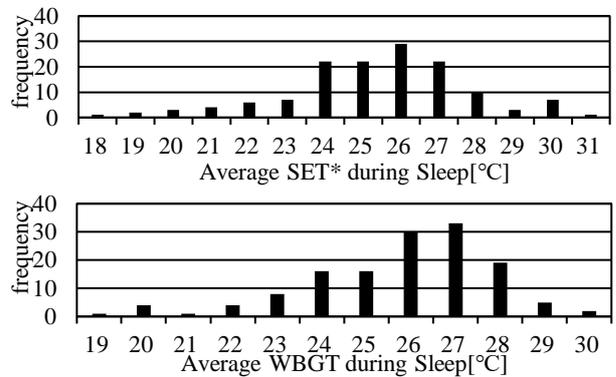


Fig.3 Average SET* and WBGT during Sleep in Midsummer

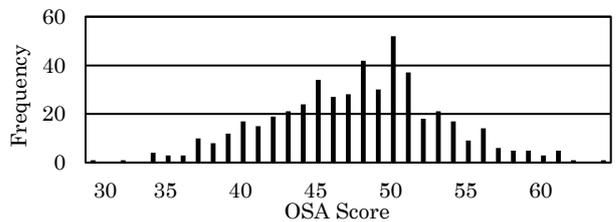


Fig.4 Frequency of OSA Score

帰すると 80%を上回る範囲は存在しなかったが、快適感「快適」では 18°C、19°Cおよび 22°Cにおいて申告率が 80%を上回っている。

次に ASHRAE 基準の快適範囲(活動時)との比較を行う。Fig.7 に、温冷感、熱的快適感、熱低受容度、睡眠感の申告においてそれぞれ、中央 3 カテゴリー、「快適」、「我慢できた」、上位 2 カテゴリーに申告された日の温熱環境を空気線図上にプロットして示す。これらの快適な日は ASHRAE 基準 0.5clo 快適域 24~28°Cにくらべて広く分布している。

温冷感中央 3 カテゴリーによる快適域は室温 23.3~

28.4℃、睡眠感による室温の快適範囲は 22~24.9℃であり、ASHRAE 基準の快適域に較べて低温側に分布している。熱的受容度による室温の快適範囲は 22.1~31℃であり、ASHRAE 快適域の低温側と高温側の両方に分布している。これらの快適範囲いずれも半数以上が ASHRAE の科的域の外にある。こうしたずれの原因として、睡眠時にそもそも感覚がないことや、それにも関わらず睡眠時の起床時に前夜の睡眠時の感覚について評価させていることが考えられる。他にも、寝室というプライベートな空間に対する評価であることや、期待感の違い、暑さへの回答者の生理的な順応なども考えられる。

6. OSA 得点に基づく睡眠の快適範囲

Fig.8 に SET* の 1℃刻みの各ビンに対して各種と OSA 得点 (睡眠の質) の快適範囲を示す。図の縦棒は度数を示す。ここに快適範囲とは、OSA 得点上位 25%以上の範囲と定義する。OSA 総合では 51.2 点、OSA 起床時眠気因子では 50 点、OSA 入眠・睡眠維持因子では 52.2 点、OSA 疲労回復因子では 51.1 点に相当する。回帰曲線で見ると快適率は、OSA 総合得点では、SET*が低いときは SET*とあまり関係がないが、22~23℃を過ぎると仇やカニ低下、起床時眠気因子と疲労回復因子では、21~22℃までは SET*に関わらず高いが、21~22℃をピークとして低下し、26℃以降では再び上昇する。この傾向は疲労回復因子が得に強い。入眠・睡眠維持因子では、SET*が高くなると快適率がやや上昇する。睡眠の質は 4 種類とも、SET*が高いとき快適率が下がる傾向があるが、SET*が高いとき OSA 評価でした快適率が低いとは限らない。上位 25%であるにもかかわらず、占める割合が高くなっている理由としては上位 25%の値近くに分布が集中しているためだと考えられる。

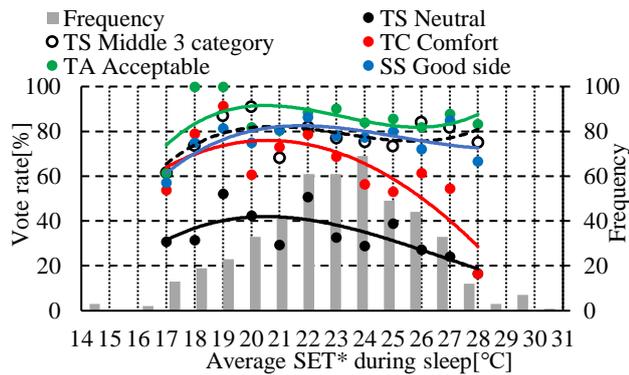


Fig.5 Comfort Thermal Sensation Vote Rate by Average SET* during Sleep

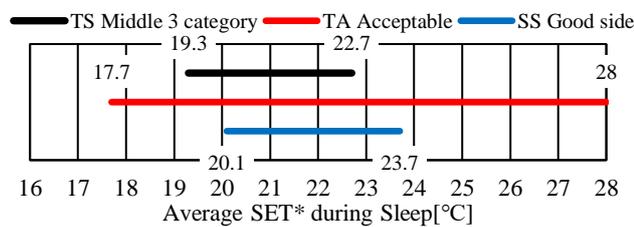


Fig.6 Thermally Comfort Zone Based on each Scale

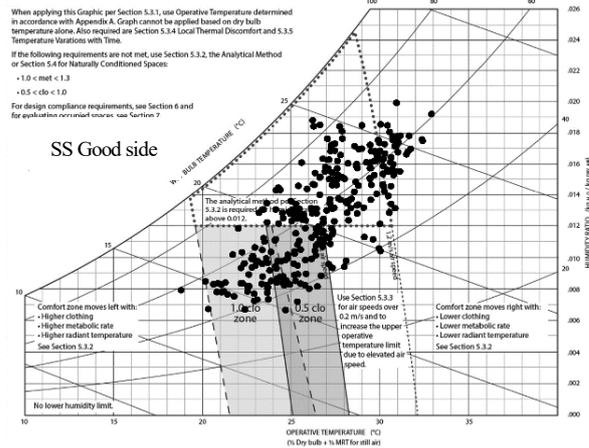
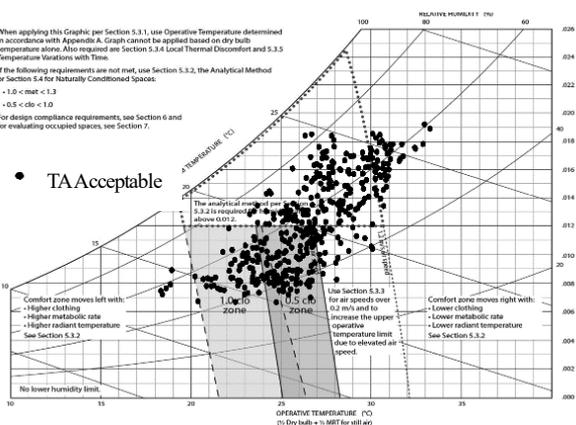
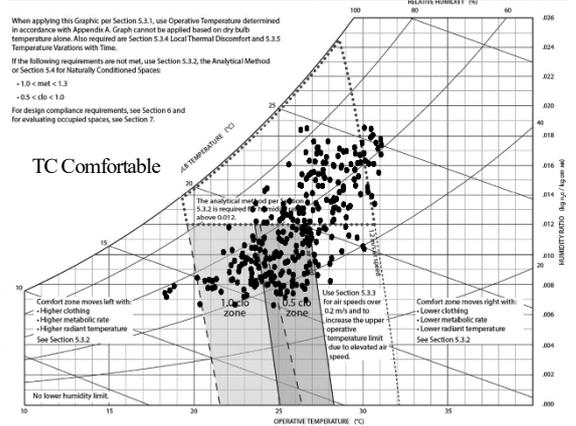
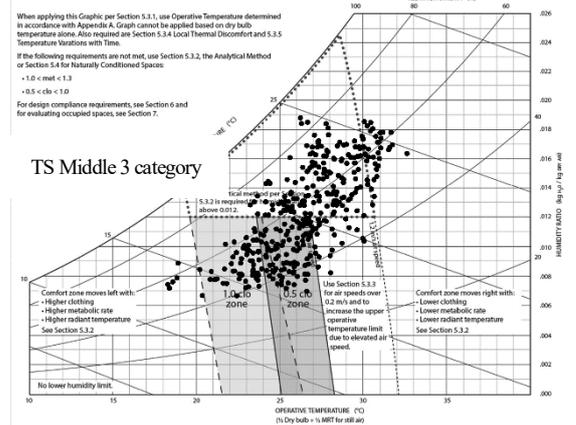


Fig.7 Operative Temperature and Humidity Ratio of each "comfort" vote and ASHRAE Comfort Zone

7. 冷房使用日と非使用日の快適申告率の比較

Fig.9に冷房使用日と非使用日別に、温熱感覚やOSA得点にもとづく「快適」申告率を示す。図の縦棒は度数を示す、温熱感中立、温熱感中央3カテゴリ、熱的快適感による「快適」申告率は、SET*23~26°Cでは同じSET*に対し冷房使用日が非使用日より高い。熱的受容度による「快適率」もSET*24°C~27°Cでは同様に使用日の方が高いが、22°Cでは使用の方が著しく低い。

睡眠感による「快適」申告率では冷房使用日と非使用日で同程度である。OSA得点による「快適」申告率はどの因子も、非使用日はSET*が高くなるほど低下しているが、使用日は25°Cがピークとなっている。つまりOSAは冷房非使用日はSET*が低いほど得点が良いが、使用日は25°Cのとき最も良い。

8. 結論

盛夏期において、睡眠の翌朝に評価した前夜の温熱感覚や睡眠感に基づいて「快適」率を定義し、睡眠時平均値で表した温熱環境との関係について実態を明らかにした。寝衣は半袖半ズボン 68.9%、掛け布団は大判タオルおよびタオルケット 18.4%。平均SET*は25.7°C。温熱感「中立」、熱的快適感「快適」が最多であるが、WBGT28°C以上は8.2%である。2-1)温熱感中央3カテゴリ、熱的受容度「我慢できる」、睡眠感よい側を「快適」と見なすと、「快適」率80%のSET*はそれぞれ、19.3~22.7°C、17.7~28°C、20.1~23.7°C。2-2)ASHRAE基準と較べると、睡眠時の「快適」範囲は下側に1~2°C、上側に3°C広い。2-3)OSAに基づく「快適」率は、SET*が高くなると低くなる傾向があるが、SET*が高いときに低いとは限らない。

3-1)温熱感や熱的快適感や受容度に基づく「快適」率はいずれも、SET*23~26°Cでは冷房使用日が非使用日より高い。受容度に基づく22°Cでは使用日の方が低い。3-2)OSAに基づく「快適」率は冷房使用日は25°Cで最も高く、非使用日はSET*低いほど高い。

謝辞 新井潤一郎博士(ダイキン工業)に謝意を表す

参考文献

- 1) 気象庁 <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 2) 坂根ら:有職者の夏季における睡眠の質に関連する居住環境因子、空衛・近・論文集 263-266、2012
- 3) ISO, Ergonomics of the thermal environment-Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble
- 4) 日本生気象学会編著:日常生活における熱中症予防指針 Ver.3、日本生気象学会、2013年5月
- 5) ANSI/ASHRAE Standard.55-2013

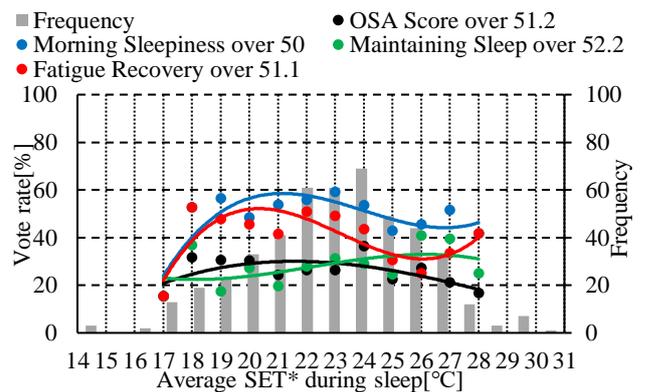


Fig.8 'Comfort' Rate of OSA Score for SET* during Sleep

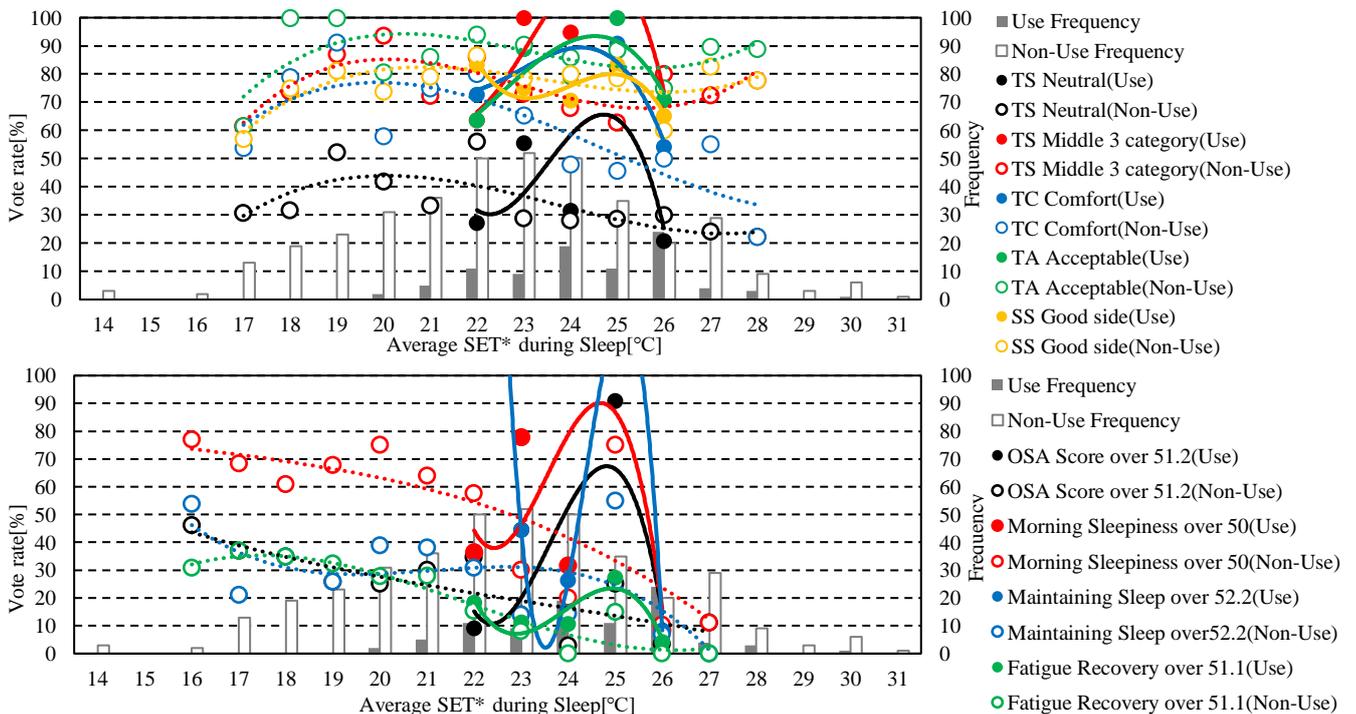


Fig.9 'Comfort' Rate of Thermal Sensation and OSA Score for SET* during AC use and not use nights

大学生の生活時間と睡眠実態-室内温度について-
The field survey of college students daily sleeping habits
-Temperatures in living room and bedroom-

○廣田 優 (奈良女子大学) 久保 博子 (奈良女子大学)

Yu HIROTA*¹ Hiroko KUBO*¹

*¹ Nara women's University

The college students tend to spend irregular time because they have less temporal restriction relatively as before. The purpose of this study is to survey college students daily sleeping habits and to study factors in relation to subjective sleeping assessment. We conducted the field survey in winter to 10 male and 10 female college students for 1 week and measured temperature in their room and physical responses, their activities, subjective sleeping assessment. Subjective sleeping assessment's score is in relation to environment in bedroom and daytime activities, core temperature rhythm.

1. 背景・目的

大学生は、比較的時間の制約が弱く、自由な生活を送ることができる。そのため、不規則な生活リズムで過ごす大学生は多い¹⁾。しかし、これまでの大学生の睡眠に関する調査はアンケート調査のデータのみであることが多く、日常睡眠の実測値のデータは少ない。

そこで、大学生の日常睡眠の実態を把握し、主観的睡眠評価に影響する要因の検討を目的に1週間の実測調査を実施した。

2. 実験方法

Table 1 に実測調査概要を示す。2015年11月10日～12月15日の期間に、それぞれ1週間の実測調査を行った。

Table 2 に測定項目を示す。居間温度・寝室温度はサーミスタ温度計を用いて測定した。直腸温の測定にはサーミスタ温度計 LT8 (グラム株式会社製) を使用し、心拍数の測定にはベッドに敷くシート型の機器、眠りモニタ (アイシン精機株式会社製) を用いた。また、脳波の測定には簡易脳波計 (プロアシスト社製) を用い、活動量及び歩数・照度は3軸加速度センサーと照度センサーが内蔵されているアクチグラフを腕に装着することで測定した。また、起床時には、OSA 睡眠調査票 MA 版による主観的睡眠評価を測定した。Table 3 に被験者概要を示す。被験者は、男子大学生10名 (平均年齢 24.7±3.5 歳) と女子大学生10名 (平均年齢 21.6±1.1 歳) の計20名を採用した。

実験1日目は、2日目以降の実測調査の予備実験とし、奈良女子大学人工気候室で実施した。予備実験の手順は、被験者に機器装着後、22°C50%に調整された人工気候室で、20時以降自由に入眠してもらい、翌朝7時に起床してもらった。

Table 1 Outline of the field survey

Period	For a week from 10 Novemver to 15 December 2015
Place	In their house
Subject	10 male and 10 female college students

Table 2 Measurements

		daytime	sleeping	rising
Environment	livingroom temperature	○	●	
	bedroom temperature	○	●	
	illumination by actigraph	○	●	
Physical responses	core temperature		●	
	heart rate		●	
	the stage of sleeping depth		●	
	wake/sleep judgement	○	●	
Psychological responses	OSA sleep assessment			◎
Activity	body movement	○	●	
	the number of steps	○	●	

Table 3 Characteristics of subjects

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Sex	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Hight	165	172	172	180	178	162	177	170	170	178
Weight	60.9	63.6	68.7	83.1	68.3	56.1	66.2	65.9	62.8	61.9
BMI	22.4	21.5	23.1	25.7	21.7	21.3	21.2	22.8	21.7	19.5
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Sex	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Hight	151	156	145	152	159	153	159	154	146	161
Weight	45	50.3	39.4	42	51.1	47.7	57.4	47.4	45.7	57.7
BMI	19.7	20.7	18.7	18.1	20.2	20.4	22.7	20.1	21.5	22.2

実験2～7日目は、各被験者自宅で実施し、被験者には通常通りの生活をとってもらった。

3. 結果

3-1. OSA 睡眠調査票 MA 版²⁾による主観的睡眠評価

起床時に実施した OSA 睡眠調査票は、16 個の質問項目を 5 つの因子に分け、標準化・得点化したものであり、得点が高いほど主観的睡眠評価が良好であることを示す。Figure 1 に、各被験者の OSA の 5 因子全ての平均値を示す。全被験者の OSA の 5 因子全ての平均値は 45.5 点だったので、平均点以上の睡眠評価が高い群 (n=8) と、平均点未満の睡眠評価が低い群 (n=12) とに分類し、以下解析する。

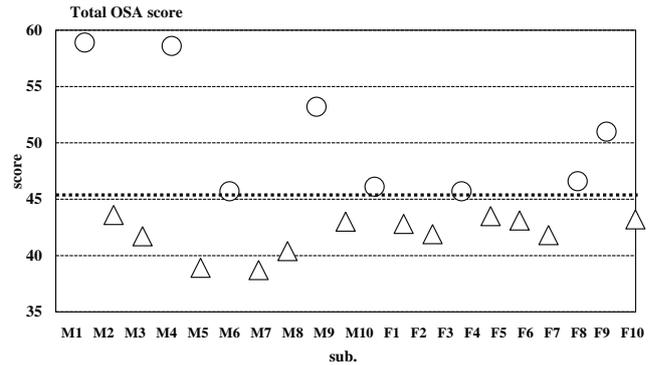
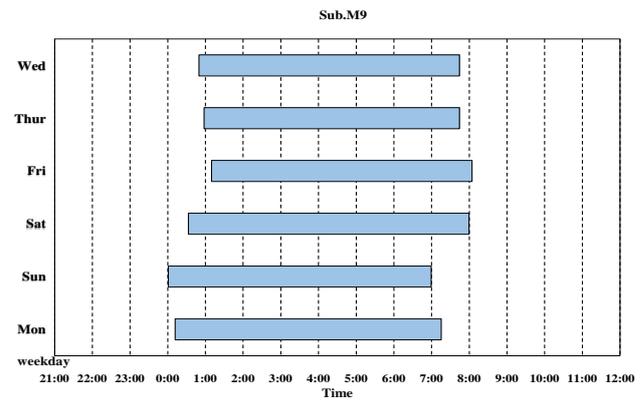


Figure 1 Total OSA MA score

3-2. 睡眠時刻

Figure 2 に、被験者 M9 (睡眠評価が高い群) と F6 (睡眠評価が低い群) を例として、就床時刻と起床時刻のグラフを示す。

M9 は、6 日間を通して、就床時刻と起床時刻はほぼ一定であるが、F6 は、不規則なリズムで睡眠をとっていることが分かる。睡眠評価が高い群の平均値は、就床時刻が 0 時 44 分、起床時刻が 7 時 18 分、睡眠時間が 5 時間 36 分だった。睡眠評価が低い群の平均値は、就床時刻が 1 時 45 分、起床時刻が 7 時 49 分、睡眠時間は 5 時間 30 分だった。睡眠評価が低い群の方が、就床時刻・起床時刻が共に遅く、睡眠時間は短い、個人差が大きく両群間に有意差は見られなかった(就床時刻: $p=0.100$,起床時刻: $p=0.150$,睡眠時間: $p=0.542$)。



(1) Sleep times of High score group's subject

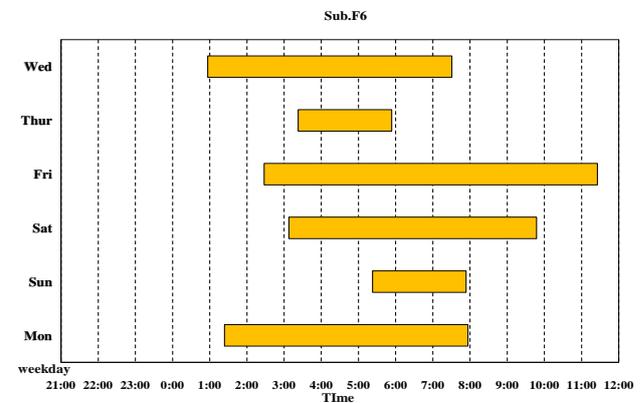
3-3. 活動量

被験者の腕に装着したアクチグラフにより体動を計測し、被験者の状態が wake か sleep か判定した。その結果を Figure 3 に示す。

日中 wake 割合を見ると、水曜と日曜では、両群は同程度の割合である。しかし、それ以外の曜日においては、睡眠評価が高い群の方が、日中 wake 割合が高く、日中によく活動していることが分かる。6 日間平均の日中 wake 割合において、両群間で有意差が見られた ($p=0.035$)。

また、睡眠評価が高い群においては、日中 sleep 割合は、月～金の平日の平均値は 18%、土日の休日の平均値は 30%と判定され、有意に休日が多かった($p=0.001$)。これにより、休日は日中にあまり活動せず、短い昼寝をとるなど、活動していない時間が長いと考えられる。

睡眠評価が低い群においては、平日と休日間に有意差が見られたのは、日中 wake 割合のみであった($p=0.046$)。睡眠評価が低い群も、同様に休日は日中にあまり活動をしていなかった。



(2) Sleep times of Low score group's subject

Figure 2 In Bed time & Out Bed time

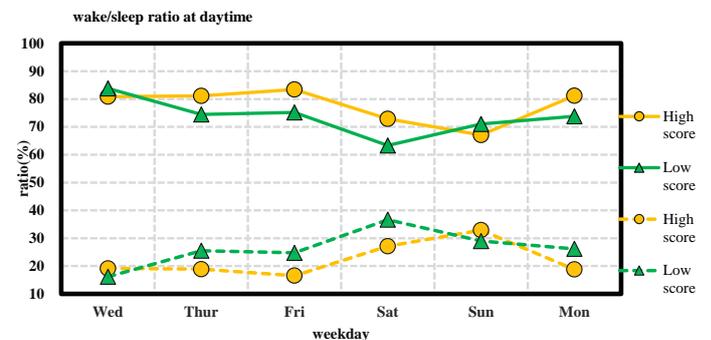


Figure 3 Wake/sleep ratio at daytime

Full line: wake% Dotted line: sleep%

3-4. 直腸温

Figure 4 に睡眠中直腸温変化を示す。

睡眠評価が高い群の方が、入眠時直腸温度が高く、下降に要する時間が長く、上昇温度偏差が小さい結果となった。入眠時直腸温度(p=0.043)、下降に要する時間(p=0.008)、上昇度偏差(p=0.002)において、両群間で有意差が見られた。睡眠評価が高い群のほうが、入眠時直腸温度が高いのは、日中によく活動していることが影響していると思われる。

3-5. 睡眠段階

簡易脳波計により計測した脳波の睡眠段階の割合の結果を Figure 5 に示す。

両群間において、どの睡眠段階もほとんど差が見られなかった。また、割合比較ではなく、時間換算で比較もしたが、有意差が見られた睡眠段階はなかった。どちらの群も、睡眠段階の内容は同程度であることが示唆された。

また、ベッドに入ってから入眠に至るまでの入眠潜時、入眠してから stage3 (深睡眠) に至るまでの深眠潜時、睡眠効率も有意差が見られなかった。しかし、中途覚醒時間には有意差が見られ(p=0.041)、睡眠評価が高い群のほうが、中途覚醒時間が、約 13 分長い結果となった。

3-6. 気温

Figure 6 の上のグラフは、日中と睡眠中の居間温度を示し、下のグラフは、日中と睡眠中の寝室温度を示す。

まず、居間温度について検討する。睡眠評価が高い群は低い群よりも、日中・睡眠中どちらも居間温度が高くなっている。睡眠評価が高い群は、日中と睡眠中の温度差がほとんどないのに対して、睡眠評価が低い群は、日中よりも睡眠中に居間温度が低かった。平均日中居間温度は、睡眠評価が高い群で 19.8℃、睡眠評価が低い群で 18.8℃であり、有意差が見られた (p=0.018)。また、平均睡眠中居間温度においても、有意差が見られ(p=0.001)、睡眠評価が高い群は 19.7℃、睡眠評価が低い群は 18.2℃であった。

次に、寝室温度について検討する。居間温度と同様に、睡眠評価が高い群は、日中と睡眠中の温度差がほとんどないが、睡眠評価が低い群は、日中よりも睡眠中に寝室温度が低かった。また、日中・睡眠中どちらにおいても、睡眠評価が高い群のほうが、寝室気温が高かった。平均日中寝室温度は、睡眠評価が高い群で 20.0℃、睡眠評価が低い群で 18.8℃と有意差があった(p=0.003)。平均睡眠中寝室気温においても、有意差が見られ(p=0.000)、睡眠評価が高い群が 19.8℃、睡眠評価が低い群が 18.2℃であった。

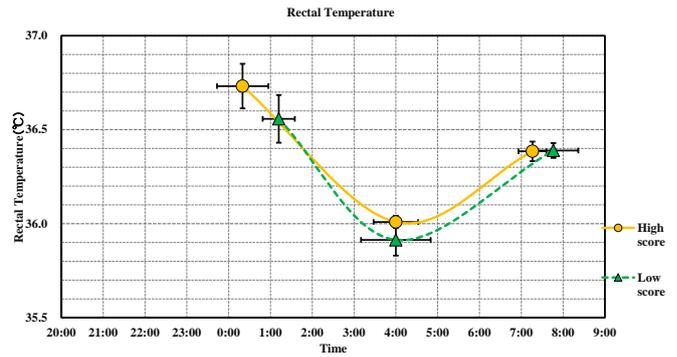


Figure 4 Rectal temperature

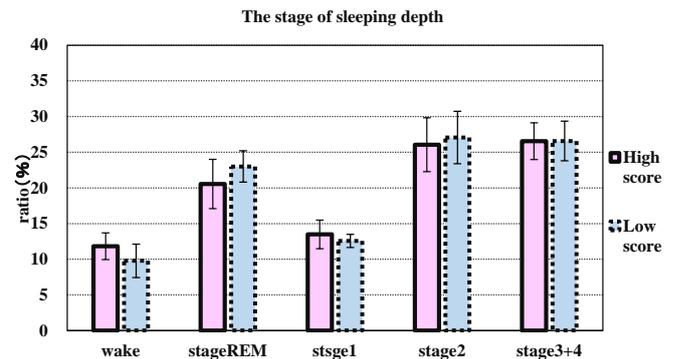


Figure 5 The stage of sleeping depth

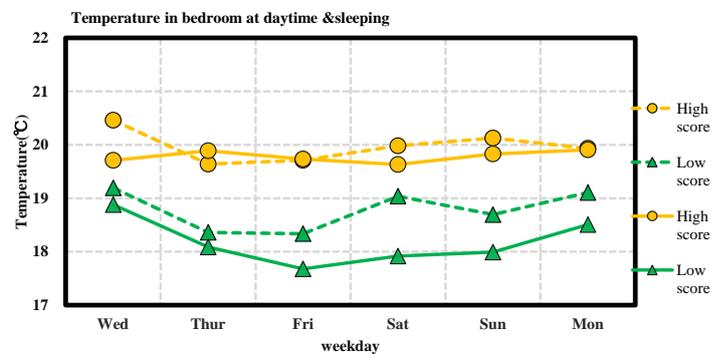
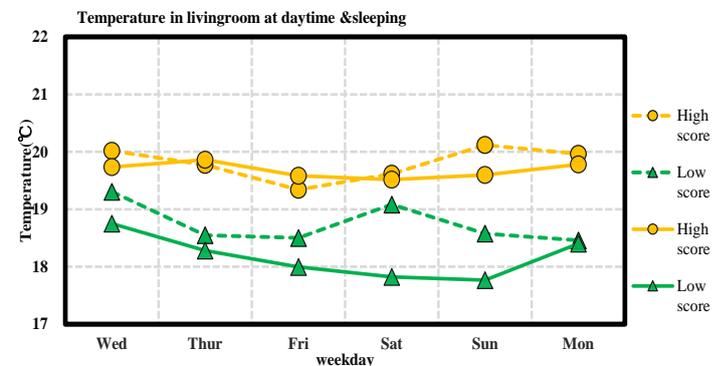


Figure 6 Temperature at daytime & sleeping

Upper :in living room Lower :in bedroom

Full line: at sleeping Dotted line: at daytime

3-7. 照度

アクチグラフにより計測された照度の結果を Figure 7 に示す。アクチグラフを装着する際には、照度計が袖に隠れないように、袖をベルト状のもので留めた。

Figure 7 の上のグラフは、日中と睡眠中の平均照度を示し、下のグラフは、日中と睡眠中の照度 0 の割合を示す。

6 日間の日中平均照度は、睡眠評価が高い群で 145lux、低い群で 110lux となり、有意差は見られなかった(p=0.268)。また、両群共に金曜と土曜で、平均照度は小さくなっているが、平均照度の曜日による有意差はなかった。6 日間の睡眠中平均照度は、睡眠評価が高い群で 0.0lux、低い群で 1.3lux となり、有意差はなかったものの(p=0.307)、低い群は真っ暗の状態ではないことが示唆される。

6 日間の平均日中照度 0 割合は、睡眠評価が高い群で 73%、低い群で 75%と、どちらも高い割合となり、有意差はなかった。割合が高かった理由として、アクチグラフが袖に隠れてしまった可能性がある。平均睡眠中照度 0 割合は、睡眠評価が高い群で 100%だったが、低い群は 99.5%であり、有意差が見られた(p=0.042)。

4. まとめ

OSA 得点により、睡眠評価が高い群と低い群に分けた。どちらの群も就床時刻は 0 時を過ぎており、睡眠時間は 5 時間 30 分程度と、20 代平均睡眠時間³⁾を下回った。大学生の夜型化と短時間睡眠が明らかとなった。

Table 4 には、両群間で有意差が見られた因子を、有意差が大きい順に示している。睡眠中寝室温度が最も有意差が大きく、次いで睡眠中居間温度、直腸温上昇度偏差、日中寝室温度、直腸温度下降に要する時間という順である。就床時刻・睡眠時間・睡眠段階には有意差は見られなかった。

Table 4 Significant different factors between the group of High score and the group of Low score

Factor	The group of High score	The group of Low score	Significant difference
Temperature in bedroom at sleeping (°C)	19.8	18.2	0.000
Temperature in living room at sleeping (°C)	19.7	18.2	0.001
The SD of rectal temperature rising (°C)	0.076	0.136	0.002
Temperature in bedroom at daytime (°C)	20	18.8	0.003
The time of rectal temperature lowering (min)	222.3	162	0.008
Temperature in living room at daytime (°C)	19.8	18.8	0.018
The max lasting time of rest at daytime(min)	54.2	82.8	0.028
Wake ratio at daytime (%)	77.8	71.6	0.035
0 lux ratio at sleeping (%)	100.0	99.5	0.042
Total awakening time at sleeping (min)	21.4	8.9	0.041
Rectal temperature at onset sleeping (°C)	36.7	36.6	0.043

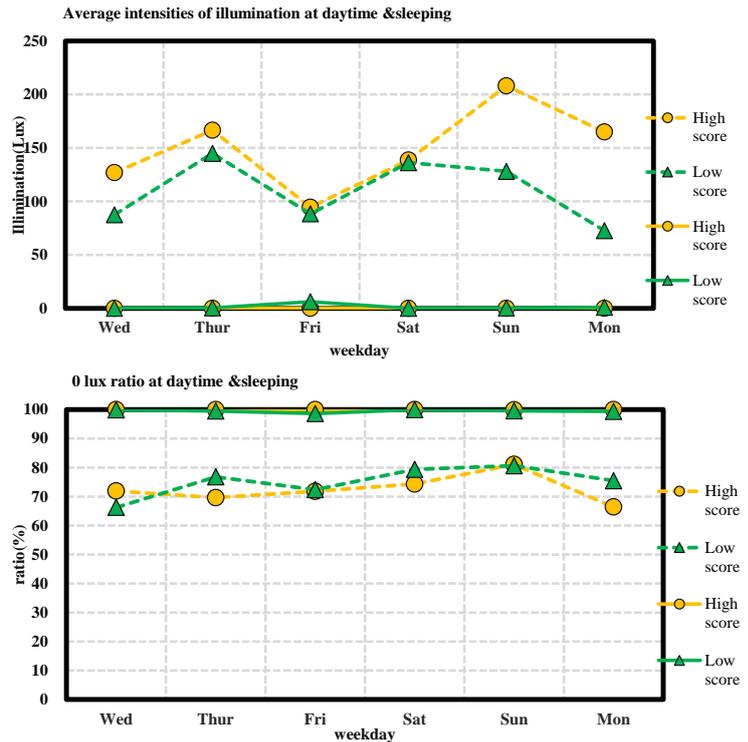


Figure 7 About illumination at daytime & sleeping

Upper : Average intensities of illumination

Lower : 0 lux ratio

Full line: at sleeping Dotted line: at daytime

これらのことから、今回の実測調査では、主観的睡眠評価には、室温等の環境や、日中活動や直腸温度上昇偏差等の睡眠リズムの規則性に関する項目の影響が大きいと示唆された。

<参考文献>

- 1) 桂樹 良子：夜間睡眠と日中の眠気に関する研究 人間工学会 vol.49(2013) p.S214-215
- 2) 一般社団法人 日本睡眠改善協議会
- 3) NHK による国民生活時間調査

夏期における上下温度差が温熱快適性に及ぼす影響について Effects of Vertical Air Temperature Gradients on Thermal comfort in summer

○山口 涼 嘉 (奈良女子大学)

仲本 晶 絵 (奈良女子大学)

久保 博 子 (奈良女子大学)

杉崎 智 子 (東芝キャリア)

Suzuka YAMAGUCHI*¹ Masae NAKAMOTO*¹ Hiroko KUBO*¹ Satoko SUGISAKI*²

*¹ Nara Women's University *² Toshiba Career Industry Co. Ltd.

The purpose of this study is finding the relation on vertical air temperature gradients and thermal comfort in summer. Subjects were healthy 8 female college students because females are said cold sensitive. In summer, we conducted the experiment in vertical air temperature gradients environment, all subjects participated 6 conditions of vertical air temperature gradients environment. Environment temperature affected Skin temperature, skin temperature affected thermal sensation and comfort vote. Especially foot cold affected whole body thermal sensation and comfort vote.

1. はじめに

日常生活空間には様々な上下温度差環境が存在しており、ISO やASHRAE が推奨する快適な温熱環境条件は、足元の温度が頭部の温度より 3℃以上低くならない環境としている。しかし現実環境では推奨範囲を超えた上下温度差が見られることも多い。以前には人工気候室内に作成した気候ボックスの中に足元部分(下腿以下)を入れ、その部分だけが気候室と異なる環境条件になるよう設定した研究¹⁾もあるが、今回はより実際に近い空間を想定した実験を行うため簡易的な机を気候室内に設置した。そこで、室内の上下温度差が人体へ及ぼす影響を検討することを目的に、上下温度差環境での生理心理量測定を行った。

2. 方法

2.1 実験概要

Table 1 に実験概要を示す。実験は 2016 年 9 月 9 日～10 月 2 日の間に、奈良女子大学 E 棟 2 階の人工気候室で行った。被験者は寒さに敏感といわれる女性を対象とし、健康な青年女性 8 名とした (Table 2 に被験者概要を示す)。実験条件は、Table 1 に示した通り、室温と足元温度を変化させるため、足元暖房条件①、⑤、⑥、足元冷房条件②、③、④の 6 条件とした。足元の暖房冷房条件は、それぞれ環境温から 2-3℃ずつ足元温度が上昇、または下降するように条件を設定した。着衣量は全条件で半袖・半ズボンの 0.3clo とした。

2.2 実験方法

Table 3 に実験手順 (冷暖房条件の詳細) を示す。Fig.1 に人工気候室平面図を示す。測定項目は Table 1 に示している通りで、被験者は、機器装着終了後、上下温度差のない前室で 40 分間、実験室では 40 分経過後に条件を変化

Table 1 Experimental conditions

Period	a day from 9 September to 2 October 2016	
Place	Artificial climate chamber in Nara Women's University	
Subjects	8 female college students	
Conditions	Thermal Environment	1. 24℃→27℃→30℃, RH50%, Warm (Foot 26℃→29℃→32℃) 2. 30℃→27℃→24℃, RH50%, Cool (Foot 28℃→25℃→22℃) 3. 27℃, RH50%, Cool (Foot 25℃→23℃→21℃) 4. 30℃, RH50%, Cool (Foot 28℃→26℃→24℃) 5. 24℃, RH50%, Warm (Foot 26℃→28℃→30℃) 6. 27℃, RH50%, Warm (Foot 29℃→31℃→33℃)
	Clothes	Short sleeved T-shirt and Short pants (0.3clo)
Measurement	Environment	Room temperature(0.1m,0.6m,1.1m,1.6m on the floor), Globe temperature(0.6m on the floor), Relative humidity(0.6m on the floor), Near the subject (1cm,15cm,30cm,32cm,52cm,72cm,Inside 15cm,Inside 52cm,90cm,120cm on the floor), Thermo camera, PM V
	Physiological responses	Skin temperature(12points)+upper arm+toe, Rectal, Heart rate, Weight decrease amount, Blood pressure, Oral
	Psychological responses	Thermal sensation vote, Thermal confort vote, etc.
	Other	Questionnaire on thermal lifestyle habit, Survey sheet on health condition

Table 2 Subjects characteristic

subject	Age	Height (cm)	Weight (kg)	Body surface area(m ²)	BMI(kg/m ²)	Fat rate(%)
Average	22	157.5	49.1	1.48	19.8	26.8
min	21	153.0	44.2	1.40	18.3	20.3
max	23	162.0	56.1	1.59	22.2	30.7
SD	0.76	3.30	4.26	0.06	1.41	3.25

Table 3 Schedule of the experiment

Time(min.)	Measurement START																
	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Environment	0-isothermal																
														Cool 1:-2~+3℃ from 0			Cool 2:-2~+3℃ from 1
Skin temperature (12points+upper arm+toe)	1 minute measurement																
														Warm 1:+2~+3℃ from 0			Warm 2:+2~+3℃ from 1
Rectal	1 minute measurement																
Heart rate																	
Environment temperature	1 minute measurement																
Declaration														0	0	0	0
Clothes	0.3clo																

させ3条件の環境を設定した。測定項目は、環境温、生理量として皮膚温、直腸温、心拍数などを1分間隔で測定し、心理量として温冷感・快適感申告などを10分間隔で実施した。

3. 結果

3.1 環境温

Fig.2に条件③の被験者近傍環境温の平均値経時変動を示す。条件③は室温が27°C一定で青枠で囲んでいる実験室に移動後は約40分経過毎に足元温度が室温から2~3°Cずつ下降していく条件である。室温27°Cに対して、40~80分は足元温度が約25°C、80~120分は約23°C、120~160分は約21°C前後となっていた。また、Fig.4左に条件③、右に⑥の各環境40分目平均の被験者近傍環境温グラフを示す。条件③では経時変動でも述べたように、足元温度が室温27°Cからおおよそ2°Cずつ低下していったことが分かり、最終的には室温と足元温度に約6°Cの差がついた。条件⑥では高さによっては冷房条件よりも足元温度を制御しきれていない部分もあるが、最終的には上下でおおよそ6~7°Cの差がついた。

3.2 皮膚温

Fig.3に前に示した条件③の皮膚温の平均値経時変動を示す。上半身に大きな変化は見られなかったが、時間経過と共に、足元環境温の低下と足元皮膚温の低下が連動していた。特に下腿以下の部位で皮膚温低下が顕著であり、図中点線の足背と足親指の大きな低下が分かる。また、Fig.5左に条件③、右に⑥の各環境40分目平均の皮膚温グラフを示す。条件③では、手背を除いた上半身の皮膚温に大きな変化は見られず、下腿以下になるほど環境温の影響による皮膚温の低下が見られた。条件⑥では、上半身にも下半身にも大きな変化は見られず、下腿後面における僅かな低下のみ認められた。

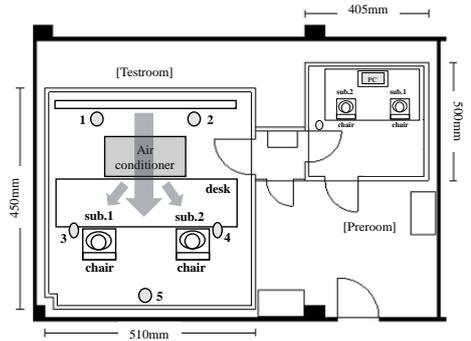


Fig.1 Plane figure of the artificial climate chamber

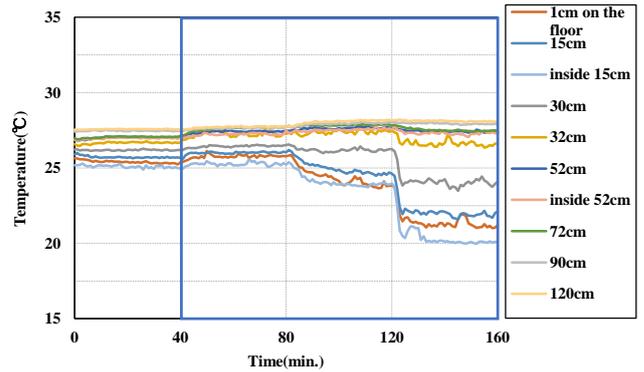


Fig.2 Change of the air temperatures (condition 3)

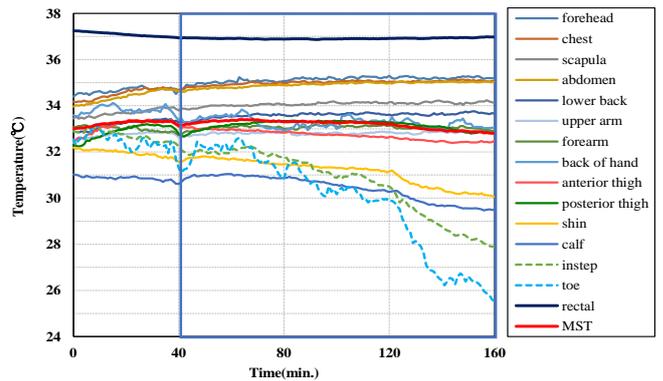


Fig.3 Change of the skin temperatures (condition 3)

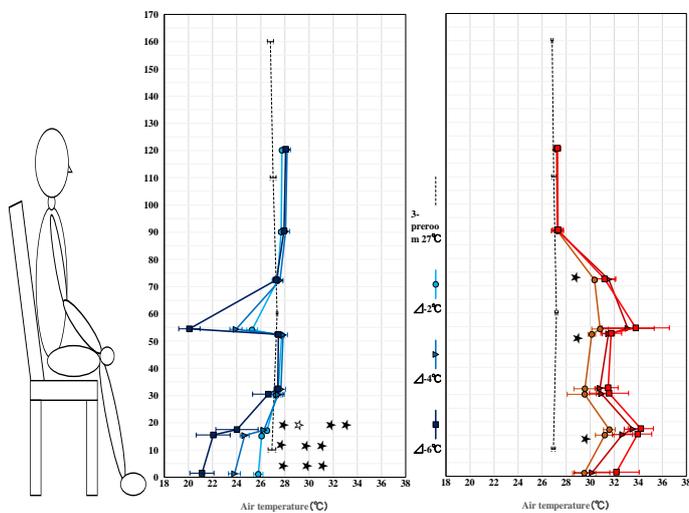


Fig.4 Vertical air temperature by conditions (L: con.3 R: con.6)

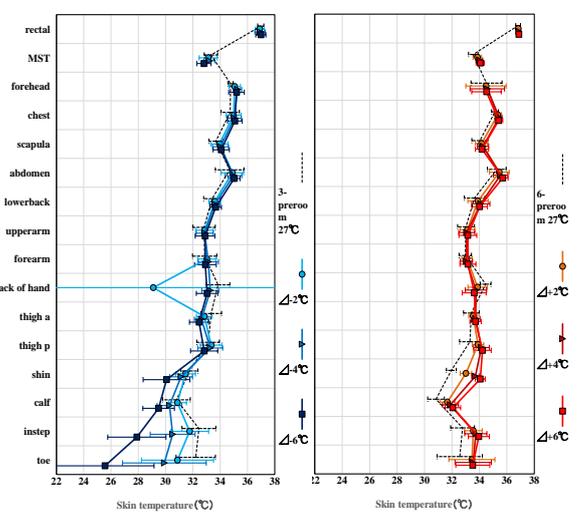


Fig.5 Rectal and skin temperature by conditions (L: con.3 R: con.6)

3.3 心理量

心理量の経時変動はここには示さないが、Fig. 6.7に各条件内各環境40分目平均の温冷感（本頁）、快適感（次頁）グラフを示す。どちらもグラフ左上から条件③②④、右上から条件⑥①⑤となっている。

(1) 温冷感

条件③は、冷房1～3段階目までで上半身は「どちらでもない」～「やや涼しい」、下半身は「やや涼しい」～「寒い」となった。一方、条件⑥は暖房段階に関係なく上半身下半身共に終始「やや暖かい」であった。また、全身温冷感については、条件③では「やや涼しい」～「涼しい」、条件⑥では「やや暖かい」となった。続いて条件①と②について、条件①（暖房）では室温と足元温度が同時に上昇していくことで上半身下半身皮膚温に上昇が見られ、条件②（冷房）については逆の変化である低下が見られた。条件①は暖房段階が進むほど「やや涼しい」～「やや暖かい」となっており、全身温冷感では「暖かい」という申告もあった。条件②は、①と逆の変化で冷房段階が進むほど「やや暖かい」～「やや涼しい」、足元では「涼しい」という申告もあり、全身温冷感は「やや暖かい」～「やや涼しい」となっていた。また、条件④と⑤について、条件④は室温30℃、⑤は室温24℃である。条件④と⑤の環境温の変化は、温度帯がずれるだけで条件③、⑥と類似しており、皮膚温変化はやはり上半身に変化は無く、足元皮膚温に注目すると、条件④では③ほどの低下は見られず、条件⑤では⑥よりも低下していた。条件④、⑤は、どちらも終始上半身に大きな変化は見られないが、それぞれ室温に影響されていることはよく分かり、上半身の温冷感は条件④では「暖かい」～「やや暖かい」、⑤では「どちらでもない」～「やや涼しい」となった。下半身については④は「やや暖かい」～「涼しい」、⑤は「やや涼しい」～「どちらでもない」となった。全身温冷感については、④は冷房が強まるほど「暖かい」～「やや暖かい」、⑤は暖房が強まるも大きな変化は無く、「やや涼しい」となった。

(2) 快適感

条件③は、上半身の「どちらでもない」という温冷感に対して、快適感では冷房が強まると「やや快適」～「どちらでもない」に変化していた。下半身では、温冷感の「やや涼しい」～「寒い」という申告に対して、快適感では「やや快適」～「やや不快（不快）」まで変化していた。一方、条件⑥は温冷感と同様上半身でも下半身でも大きな変化はなく、温冷感で「やや暖かい」という申告が快適感では終始「やや快適」という申告になっていた。また、全身快適感については、条件③では「やや快適」～「やや不快」、条件⑥では「やや快適」となった。条件①は、室温と暖房段階が進むにつれ、上

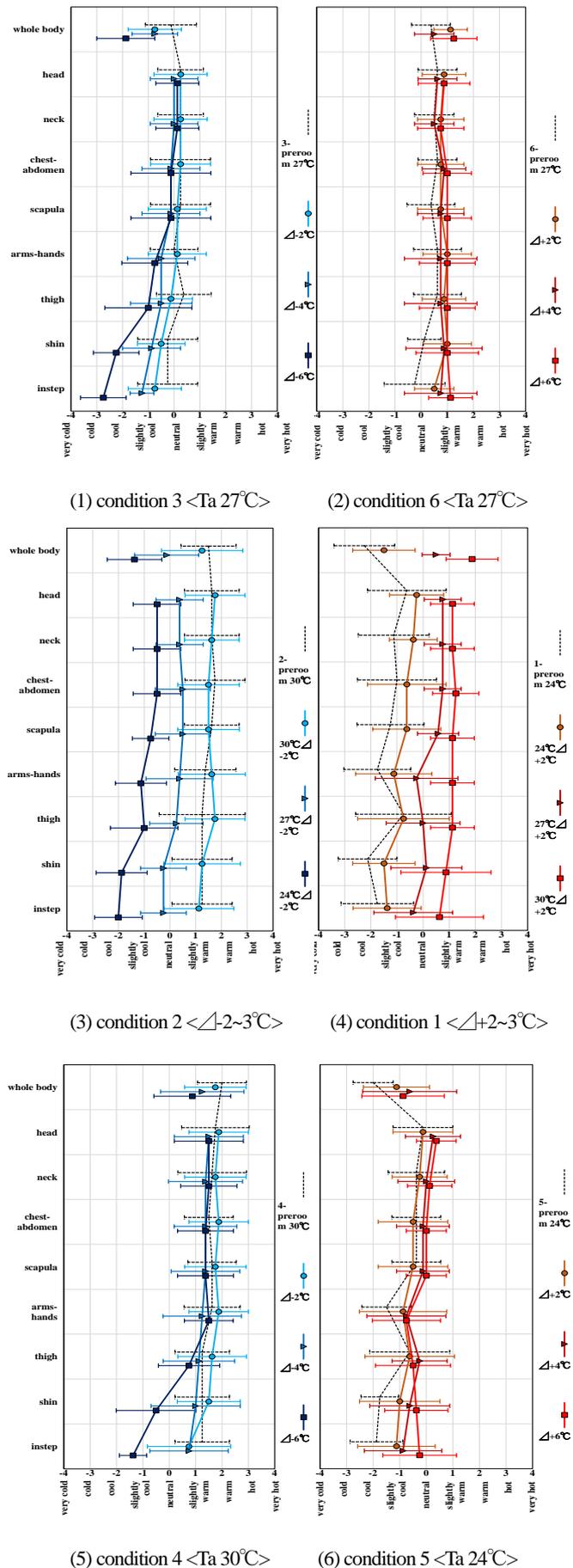


Fig.6 Wholebody and local thermal sensation vote by conditions

半身「どちらでもない」～「やや快適」、下半身「やや不快」～「どちらでもない」となり、条件②は、室温と冷房段階が進んでも、上半身は「どちらでもない」付近の申告で大きな変化は無く、下半身では最後の冷房段階で「やや不快」となった。全身快適感については、①で「やや不快」～「やや快適」、②で「どちらでもない」～「やや不快」となった。

条件④は、全身の各部位において変化が少なく、ほぼ全ての部位で「どちらでもない」という申告であり、冷房最終段階で「やや快適」に近付いていた。条件⑤も各部位における変化が少なく、下半身部位において暖房段階が進むほど「やや不快」～「やや快適」となった。全身快適感、条件④と⑤どちらも終始「どちらでもない」、という申告であったが、冷房及び暖房段階が進むほど僅かながら快適側へと変化していた。

4. まとめ

1) 足元が冷たい場合

室温が24℃の時、足元が室温より約2℃冷やされるだけで「やや不快」を感じる傾向が見られた。また、室温27℃の時、上下2℃差で既に下半身が気温変化を感じ、部位別・全身温冷感に影響を与えていたが、上下6℃差で不快側の申告となった。一方、室温が30℃の場合は、足元が24℃で室温より6℃低くても「やや涼しい」と感じ、「やや快適」であった。

2) 足元が暖かい場合

室温が24℃の時は、足元が暖められると申告が快適側に変化していき、足元が30℃になると快適側の申告となった。室温27℃で足元を暖めた場合は、上下6℃差になっても温冷感快適感に大きな影響を与えないことが示唆され、「やや暖かい」と感じ、「やや快適」であった。

以上のことから、足元は冷えに敏感であることが示唆された。室温により影響が異なるが、室温が低い時には足元を暖め、冷えを緩和することで快適性を向上させることが出来ると考えられる。

参考文献

- 1) 西村美砂：夏期における若齢女性の足元の冷えに関する研究 平成27年度奈良女子大学卒業論文
- 2) Hashiguchi N, Kumamoto T, Chisyaki A, Tochihara Y(2011) Effects of Vertical Air Temperature Gradients on Physiological and Psychological Responses in the Elderly. Journal of the Human-Environment System Vol.14;No 1;9-17

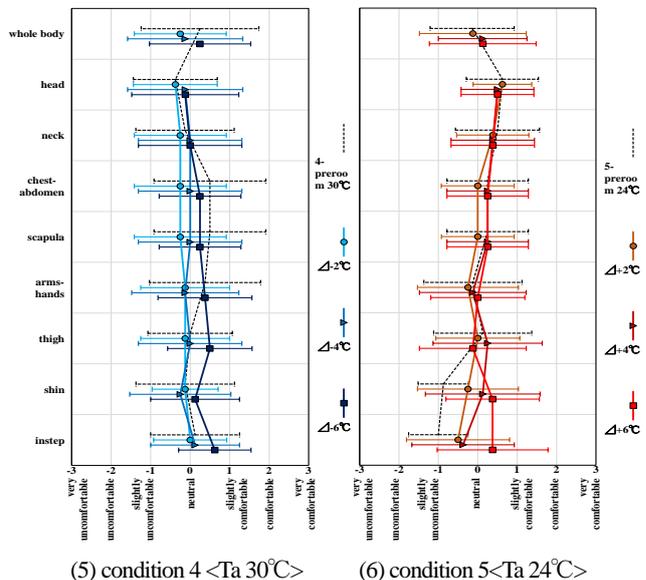
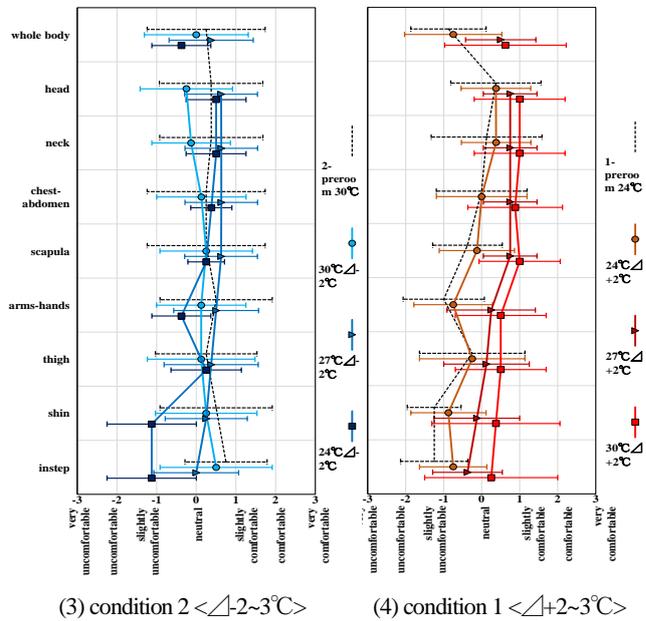
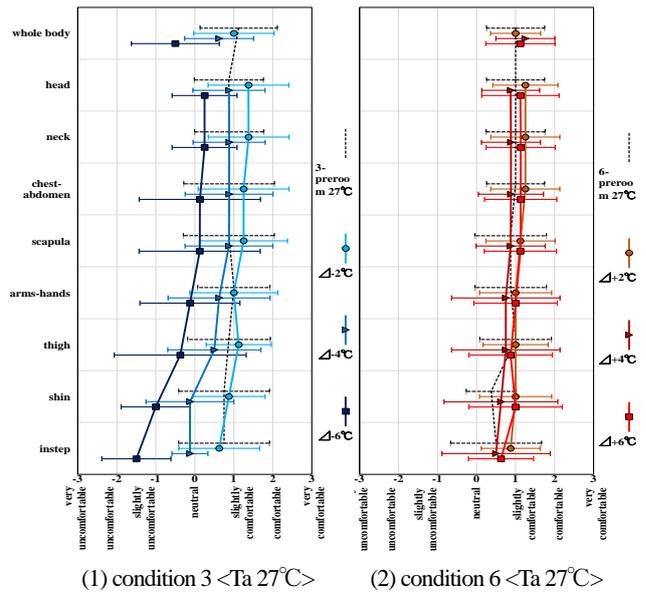


Fig.7 Wholebody and local thermal comfort vote by conditions

冬期・夏期における片廊下型公的住宅の温熱環境と住まい方調査

Thermal Environment and Lifestyle in Single Corridor Type Apartment Houses in Winter and Summer

○松嶋 洸樹 (立命館大学) 近本 智行 (立命館大学)
土井 脩史 (立命館大学) 田邊 陽一 (大阪府庁)

Koki MATSUSHIMA*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Shushi DOI*¹ Yoichi TANABE*²

*¹ Ritsumeikan University *² Osaka Prefectural Government

In this paper, we focused on thermal environment and lifestyle in single corridor type apartment houses and stair-case type apartment houses. First, we research lifestyle of residents in winter and summer by using questionnaires. Next, we research thermal environments and open / close status of window and partition, living behavior, usage status of air conditioning. We compare the thermal environment of the single corridor type to that of stair-case type and residents' lifestyle of those.

はじめに

近年、マスハウジング期に供給された住宅における老朽化や居住者の高齢化等の問題があり、居住者の住み替えや住宅の建て替え等が行われている^{文1)~5)}。既報では階段室型公的集合住宅(以下、階段室型)の温熱環境や住まい方の問題点を明らかにし、低コストで効果の得られる改修等の方策を検討した^{文6)}。一方で、建て替え等により近年建設された片廊下型公的集合住宅(以下、片廊下型)と階段室型における温熱環境や住まい方の比較はされていない。

本研究では、より幅広い公的住宅の実態を確認するために、近年建設された片廊下型を新たな検討対象とする。特に、実居住住戸における温熱環境からの評価を行い、温熱環境が居住者の住まい方、人体へ与える影響を考察する。片廊下型は、階段室型と異なりEV設置に伴い中高層化されると共に、断熱性能の強化、バリアフリー化が図られている。過年度調査済みの断熱性能のない階段室型の調査結果と片廊下型における温熱環境や換気上の実態と窓・間仕切りの開閉状況を比較することで、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2007年に建設された大阪府住宅供給公社が管理する片廊下型 (Table.1、Fig.1~2) を対象とする。対象住宅では断熱性能、床暖房、浴室暖房乾燥機、24時間換気を標準装備している。①実居住住戸における冬期・夏期の温熱環境の把握 (Table.3、 Fig.4) を行い、さらに②実居住住戸における住まい方を把握し (Table.2)、温熱環境が住まい方に与える影響を考察した。①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。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考察した。比較・整理には2014年度までに調査済みの階段室型 (Fig.3) を対象とする^{注1)}。実測期間は冬期：2016/1/13~1/27、夏期：2016/8/5~8/16に行った。

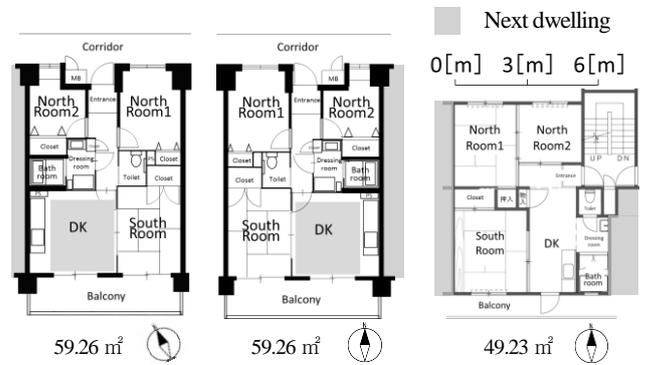


Fig.1 Plan of single corridor apartment N (Top floor)

Fig.2 Plan of single corridor apartment S (Middle floor)

Fig.3 Plan of stair-case apartment (Top floor)

Table.1 Outline of the apartment building

	Single corridor type apartment house N	Single corridor type apartment house S	Stair-case type apartment house
Completion	3/2007		3/1976
Location	T city in Osaka pref.	S city in Osaka pref.	N city in Osaka pref.
Management	Osaka prefectural Housing Corporation		
Area	40.98~67.00m ²	40.86~67.52m ²	49.23~51.19m ²
Number of dwellings	246	206	380
Construction	Reinforced concrete structure		
House type	12 types		5 types
	1DK, 2DK, 3K, 3DK, 2LDK, 3LDK		3DK, LDK
Insulation	(Energy saving standard at 1993)		None
Facility	Floor heating (Living and Dining)		None
	Bathroom heating dryer		None
	24 hour ventilation system		Ventilator in kitchen

Table.2 Outline of subjects

Resident	Dwelling type	Place	Age	Sex
A	Stair-case	Top floor	67	Female
B		Middle floor	65	Male
C	Single corridor	Middle floor	65	Female
D		Top floor	65	Male
E		Top floor	60	Female

Table.3 Measurement item

Purpose	Measurement item	Measurement method
Indoor environment	Temperature / Humidity	Temperature / humidity logger
	Wall / Ceiling surface temperature	Temperature logger
Physiological quantity	Heart rate	Clock type heart rate monitor
	Skin temperature	Temperature logger
Lifestyle	Patterns of behavior	Hearing

2. 冬期実測結果

2.1 冬期生活行動調査

冬期生活行動調査では、主に高齢世帯を対象^{注2)}に1時間毎のタイムダイアリ^{注3)}を作成してもらった。対象住戸では、南側居室を主な滞在空間として使用しており、北側居室は主として寝室として夜間に利用していた。間仕切りの開閉状況は、片廊下型では南側居室(南西)-DK間を開放している傾向が見られる。階段室型でも、同様に、南側居室(南西)-台所間の間仕切りを開放している。片廊下型、階段室型共に主な生活空間となる南側居室とあまり使用しない北側居室の間仕切りは閉じており、空調空間と非空調空間を分けて生活していると考えられる(Fig.5~6)。

2.2 冬期温熱環境実測調査

片廊下型の代表日を在室時間の長い2016年1月16日、階段室型の代表日を片廊下型の代表日と外気温度の条件が類似している2014年2月24日とし、各室の温度分布を示す(Fig.7~8)。居室温度では、南側に位置する和室、DKが非空調時においても北側居室よりやや室温が高くなる傾向が見られた。片廊下型、階段室型共に暖房機器の使用に応じ室温が上昇している。片廊下型では使用している空間を25℃程度まで暖めて居住している。一方、階段室型では日中は片廊下型より5℃程度低い温熱環境で居住していることが分かる。片廊下型の浴室温度は、早朝の時間帯では外気温度より約15deg.程高く、階段室型の浴室温度より高い温度が保たれていることが分かる。これは、気密性・断熱性が上がると共に24時間換気により各居室からの暖気の流入の影響が考えられる。片廊下型の居住者に対するヒアリング調査では、入浴前に浴室暖房乾燥機を用いて浴室を予め温めておくという回答があり、Fig.7で浴室と代表的な居室との温度差が見られないことから、ヒートショックなどの人体への影響を緩和できていると考えられる。

※左から片廊下型D'タイプ、片廊下型Dタイプ、階段室型北入住戸

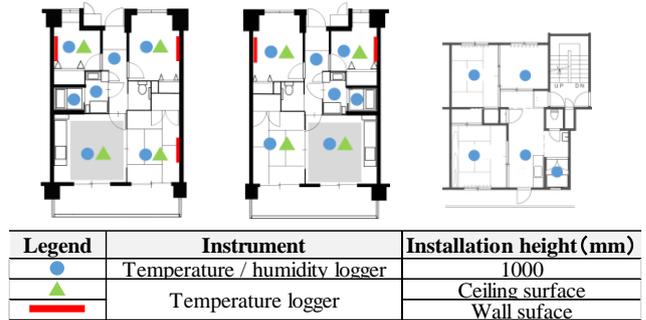


Fig.4 Measurement item



Fig.5 Opening and closing status of the partition door



Fig.6 Opening and closing status of the partition door

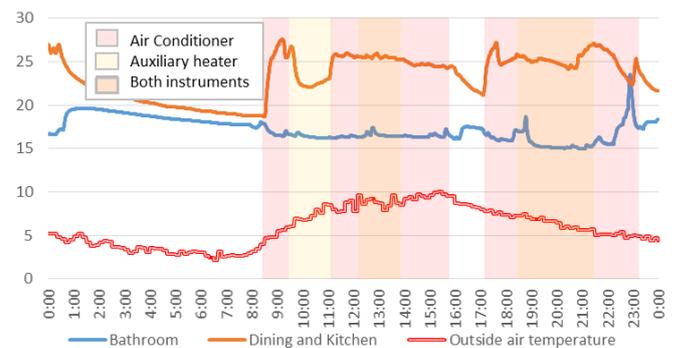


Fig.7 Temperature transition (Single corridor type / Middle floor / 2016/1/16)

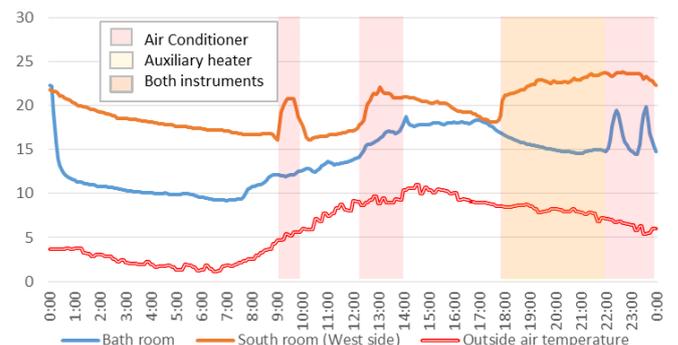


Fig.8 Temperature transition (Stair-case type / Middle floor / 2014/2/24)

3. 夏期実測結果

3.1 夏期生活行動調査

夏期生活行動調査では中層階、最上階の高齢世帯 2 住戸を対象として行った。Fig.10~11 に片廊下型最上階住戸と階段室型の窓・間仕切りの開閉状況を示す。最上階住戸では玄関扉や南側居室の窓を開放し 1 日を通して住戸内の通風を促進していた。空調機は夕方以降のみ使用しており、日中は住戸内が暑熱環境となっている。階段室型でも同様に住戸内の通風促進が見られた。空調機の使用は片廊下型とは異なり北側居室で使用していたが、冬期と同様に間仕切りを用いて空調空間を限定していた。

3.2 夏期温熱環境実測調査

実居住住戸において温熱環境実測調査を行った。外気最高温度が 34.8℃の真夏日における階段室型の室内温度

分布を Fig.12 に示す。階段室型では外気温度が上昇を始める 6 時頃より早い 4 時頃から住戸内の温度が上昇を始めている。また、空調機を使用している時間帯を除いて室内温度は外気温度よりも高い温度を示している。Fig.13~14 には片廊下型の中層階・最上階における室内温度分布を示す。中層階住戸では空調機を使用している和室、洋室 2 が他室よりも温度が低い。非空調空間においても一日を通して 31℃前後で推移しており、外気温の上昇が大きく影響している様子は見られない。中層階住戸で夜間に浴室の温度が上昇しているのは浴室の乾燥を目的に浴室暖房乾燥機を用いているからである。最上階住戸では夕食時以外の時間帯では空調機の使用が見られない。住戸内温度は一日を通して高く、日中は外部環境の影響を大きく受けて暑熱環境を形成している。

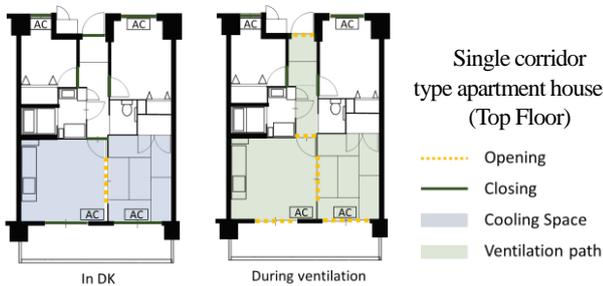


Fig.10 Opening and closing status of the partition door 注5)

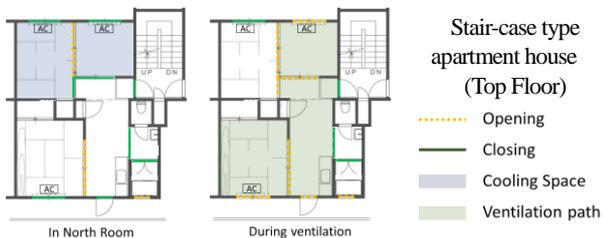


Fig.11 Opening and closing status of the partition door

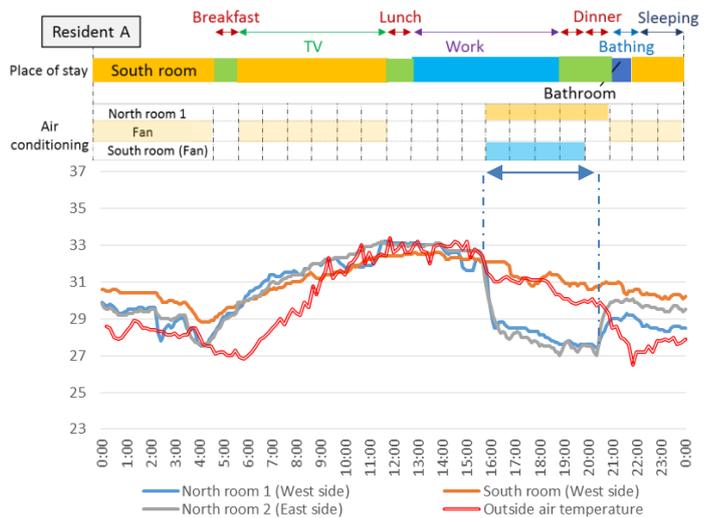


Fig.12 Temperature transition (Stair-case type / Top floor / 2014/8/18)

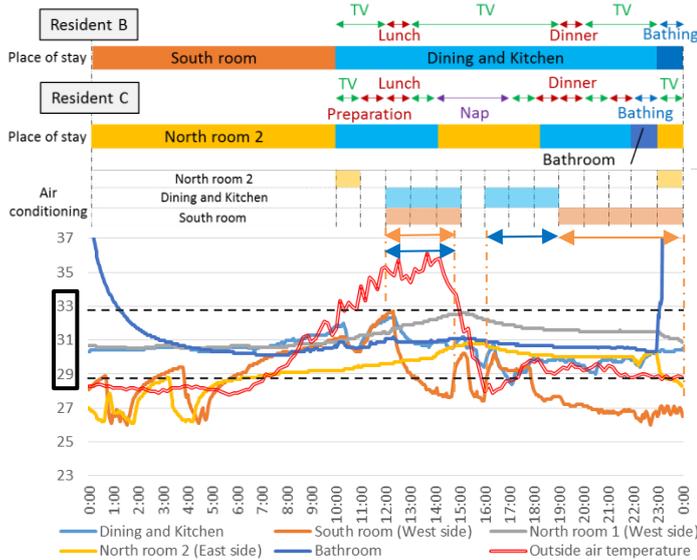


Fig.13 Temperature transition (Single corridor type / Middle floor / 2016/8/6)

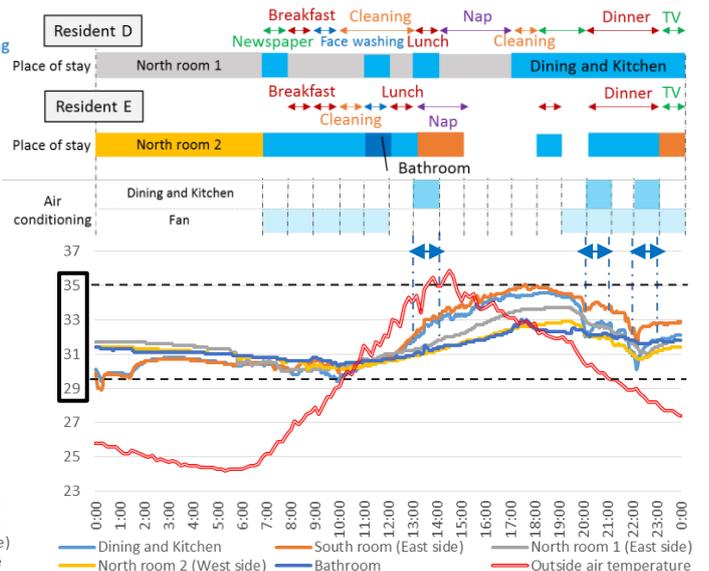


Fig.14 Temperature transition (Single corridor type / Top floor / 2016/8/11)

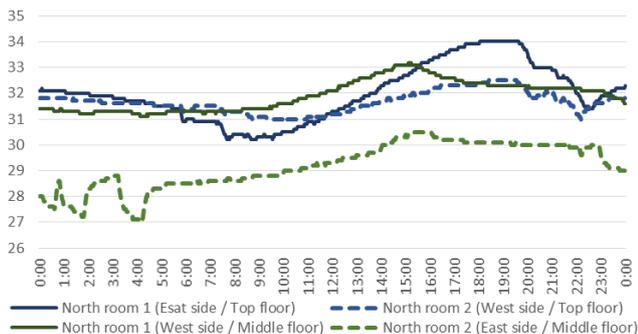


Fig.15 Wall surface temperature transition

(Single corridor type / Top floor and Middle floor / 2016/8/11)

Fig.12、14 では階段室型は無断熱のため、外気温と室温が連動し、夜間の室内温度が下がるのも早い。一方で、片廊下型は断熱が高いため、早朝は室温上昇が外気温の上昇に遅れて始まり、夜間も温度低下が遅く熱中症のリスクが高くなっている。熱中症予防として適正な冷房の利用がのぞまれる。室内の温熱環境と住まい方に関して、中層階住戸では一日を通して南側居室の空調空間で生活している。最上階住戸では長時間連続して空調を用いることが少なく、暑熱環境下で自然通風を促進して生活している。

3.4 壁面・天井面表面温度分布結果

Fig.15、16 に中層階と最上階の壁面表面温度及び天井面表面温度を示す。壁面表面温度は各室の東面または西面を計測した。天井面表面温度は各室天井面において計測した^{注6)}。

(a) 壁面表面温度分布

各室の壁面表面温度は日中大きな差が見られる。最上階住戸、中層階住戸ともに日中は壁面が外壁に面している北側居室1の壁面表面温度が高く推移している。特に夕方頃に大きな差が表れており、最上階では1.5°C程度、中層階では2°C程度の差がある。(Fig.15)。

(b) 天井面表面温度分布

Fig.16 に中層階・最上階住戸の天井面表面温度を示す。天井面表面温度についても日中に大きな差が見られる。中層階住戸では約30°Cから33°Cの間で推移している。一方で、最上階住戸では1日を通して温度が高く推移しており18時頃には北側居室1の天井面表面温度は35°Cにまで達している。

4. まとめ

片廊下型公的集合住宅における温熱環境の把握と温熱環境が住まい方に与える影響の確認を行った。

(1) 片廊下型公的住宅では住戸の気密化・断熱強化の効果が表れており、冬期の住戸内の温度が階段室型よりも高く維持されていた。居室での空調の温度設定によっては浴室温度との差が階段室型並みになることもあり、浴室暖房の適正な利用によりヒートショックを緩和することができる。

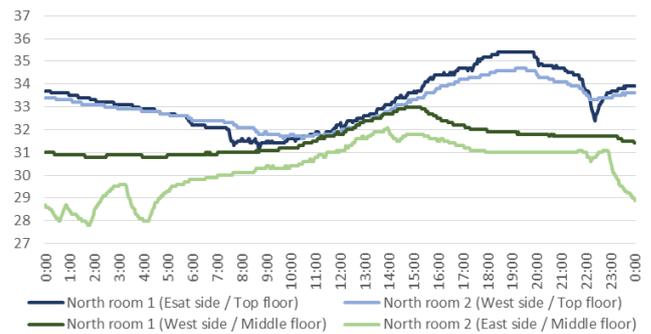


Fig.16 Ceiling surface temperature transition

(Single corridor type / Top floor and Middle floor / 2016/8/11)

- (2) 片廊下型中層階における夏期実測では階段室型からの温熱環境の改善が見られたが、最上階住戸では依然として暑熱環境が見られた。特に冬には有利に働く断熱性ゆえに、夜間に居室温度が下がりにくいため熱中症予防として適正な冷房の利用がのぞまれる。
- (3) 日射による躯体への蓄熱の影響で外壁に面する壁面や最上階の天井面の表面温度が高く、室温への影響が見られた。

片廊下型は、マスハウジング期供給された階段室型と比べて断熱強化されている。一方で、空調機の使用等の熱中症対策を行っていない住戸では暑熱環境になることもあり、住まい方の改善が求められる。

注釈

- 注1) 階段室型における実測期間は冬期:2014/2/22~3/11、夏期:2014/8/13~8/21に行行った。
- 注2) 冬期実測では、住戸位置による温熱環境に差があると考え、床暖房、浴室暖房乾燥機の使用がみられる低層階1住戸、中層3住戸、最上階1住戸の計5住戸を対象とし、4住戸を高齡世帯で、1住戸(中層階)を若年世帯で行った。
- 注3) 1時間毎に被験者の在室状況、行動、窓や間仕切りの開閉状況、使用している空調機器を記入したシート。
- 注4) 夏期実測では、中層、最上階の高齡世帯2住戸で行った。
- 注5) 片廊下型最上階住戸では住戸内通風を促進するために玄関扉の内側にルーバー付きサッシを取り付けていた。
- 注6) 中層階では北側居室1において0時から4時頃の間に、最上階では北側居室1において22時頃に冷房の使用があった。

参考文献

- 文1) 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
- 文2) 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
- 文3) 国土交通省住宅局、公営住宅長寿化計画策定方針(改訂)、2016.8
- 文4) 国土交通省住宅局、平成25年住生活総合調査結果、2013
- 文5) 国土交通省住宅局、第4回公民連携セミナー資料「公民連携による公的住宅整備の取組み」、2015.5
- 文6) 近本智行ほか、既存階段室型住宅における温熱環境調査(その4-5)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 D-2, pp.73-76, pp.205-208, 2014
- 文7) 松嶋洗樹ほか、片廊下型と階段室型の公的住宅における温熱環境と住まい方調査(その1-2)夏期・冬期における温熱環境と住まい方のアンケート調査、日本建築学会大会(九州)、2016.8

トラクタの実大実験による車室環境及び局部冷却が人体生理・心理に及ぼす影響の検証 Verification of Human Physiological and Psychological Conditions in the Cabin on a Tractor

○織田浩平（立命館大学） 近本智行（立命館大学） 李明香（九州大学）

福留二郎（ヤンマー） 池上聡一郎（ヤンマー）

Kohei ODA*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Myonghyang LEE*² Jiro FUKUDOME*³ Soichiro IKEGAMI*³

*¹ Ritsumeikan University *² Kyushu University *³ Yanmar Co, Ltd.

The purpose of this research is the development of cooling methods to provide comfortable environment for an operator and reducing air-conditioning energy consumption in the cabin on a tractor. Necessity of local cooling was found by results on the analysis of human physiological conditions, but psychological conditions have not been found. Therefore, this paper is being reported about the outline and results of the subjective experiment. Relations of human physiological and psychological conditions when cooled a part of human body in the tractor cabin were verified.

はじめに

従来型のトラクタは、作業者が雨や風などの外部環境に大きく影響を受ける開放型となっていたが、近年、快適な作業環境を形成するために密閉型キャビン（以後車室と称する）が普及し始めた。しかし、外部環境から守られた車室は、自動車等と異なる特有の要因により暑熱環境になりやすい。Fig.1 に車室の暑熱環境要因を示す。車室は4面と足元が農作業の作業性のためガラスで覆われているため、日射の影響を大きく受ける。また、低速で走行し、対流熱損失が少ないため、躯体に蓄積される日射熱が除去されにくい特徴がある。さらに、人体側の暑熱要因として着衣量の大きさや操作などによる高い代謝量が考えられる。このような熱負荷が大きい環境の中で、運転者の快適性を向上させるためには多大なエネルギーを消費する。車室内での温熱環境解析は自動車や電車で先行して行われてきた^{文1), 文2)}。トラクタでも、車室の熱負荷の数値解析が行われているが^{文3)}、車室環境下での人体生理量と心理量に関して詳細は明らかになっていない。

既報^{文4)}では、人が乗車していない状態の夏期車室環境の実測を行った。また、車室の窓や屋根、天井材などの外皮仕様が、車室環境と人体生理に及ぼす影響を車室モデルと人体モデルを用いたシミュレーションにより解析した。この解析から、外皮仕様の変更と共に空調負荷も増減するが、人体生理に及ぼす影響は少ないことが分かったため、局部冷却を人体に行った時の生理量変化を解析した。冷却手法を最適化するためには車室環境と人体生理量・心理量のデータを収集し、車室環境下での人体の解析モデルを作成する必要がある。

そこで本報では、トラクタの車室内で人体に局部冷却を与えた時の人体の生理・心理的反応の検証を目的に行った被験者実験の概要と結果について報告する。

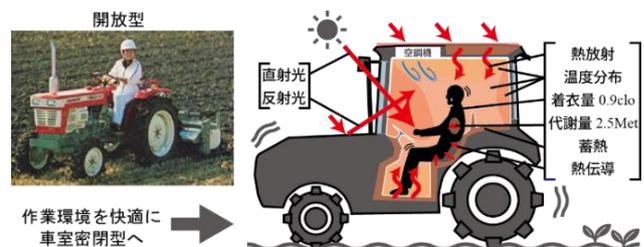


Fig.1 Heat Source in the Cabin Environment

1. 被験者実験概要

1.1 実験施設

Fig.2 に実験室の平面図と断面図を示す。実験は、立命館大学びわこくさつキャンパス内にある、2台のルームエアコンによって温度調節ができる実験室（幅 3,600mm、奥行き 2,080mm、天井高 2,800mm）内に、実際の車室（幅 1,350mm、奥行き 1,150mm、高さ 1,530mm）を設置して行った。車室内全体の冷房は、実験室のルームエアコンを用いて行い、人体の局部冷却は、ペルチェ素子を用いた空調機（約 60W、以後ペルチェ空調と称する）を用いた。ペルチェ空調の吹出し口は樹脂ダクトを用いているため、フレキシブルに吹出し位置を調節できる。

Fig.3 に実験室の写真を示す。屋外環境を想定し、実験室壁体からの放射熱の影響を減らすために、壁面と天井面にアルミシートを貼り付けた。また、日射環境を再現するために、面状発熱体を窓前面と屋根面、床下面に張り付けて表面温度を上昇させ、車室内の放射温度を空気温度よりも高温にした。しかし、人体に照射する直射日光の再現は実験室の都合上困難であったため、車室内の人体に日射が当たらない南中時を想定した。また、冷却椅子の仕様（Fig.4）は、座面と背面を熱伝導性の良いスチールのパンチング材とした。ペルチェ空調を椅子に接続することで熱伝導により冷熱を人体に与えることができる。

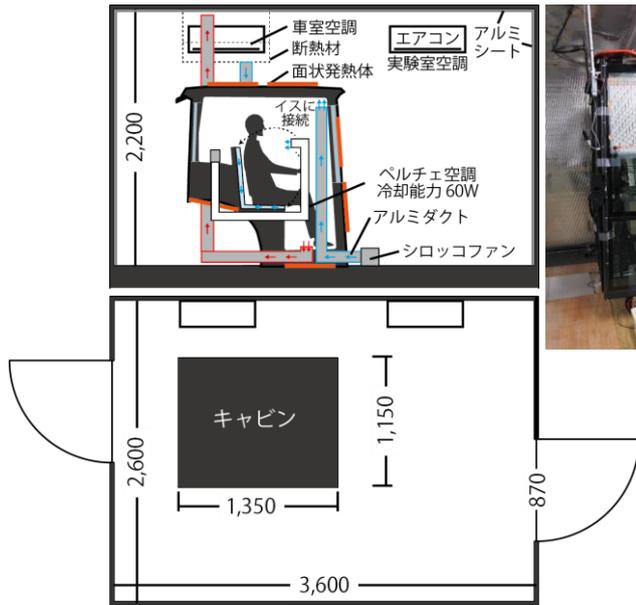


Fig.2 Cross Section Plan and Floor Plan of the Laboratory

1.2 温熱環境と人体生理・心理量の測定概要

Fig.5 に実験室環境温度の測定箇所の一部, Fig.6 に人体皮膚温度の測定箇所を示す。空気温度を車室内外で計 41 点, 車室表面温度を計 26 点, 皮膚温度を計 12 点, グローブ温度を車室中央前面に 1 点, T 型熱電対 (環境用 0.2mm, 人体用 0.1mm) とグローブ球を用いて測定した。また, 腕時計型光学式脈拍モニターを用いて脈拍数を測定した。Fig.7 に生理量を測定するためのアンケート申告の内容と申告の意図を示す。アンケートは, 温冷感, 温度に対する快適感, 局部冷却の気流に対する快適感, 発汗の不快感, 発汗について, 発汗箇所を申告させた。また, 温冷感申告と快適感申告は, ASHRAE の 7 段階スケールを用いた。発汗箇所は額, 首筋, 胸, 腹部, 背中, 腰, 尻, 両脇, 両腕, 両手, 両太腿下側, 両太腿上側, 両ひざ裏, 両ふくらはぎ, 両足の甲の 15 か所について申告させた。

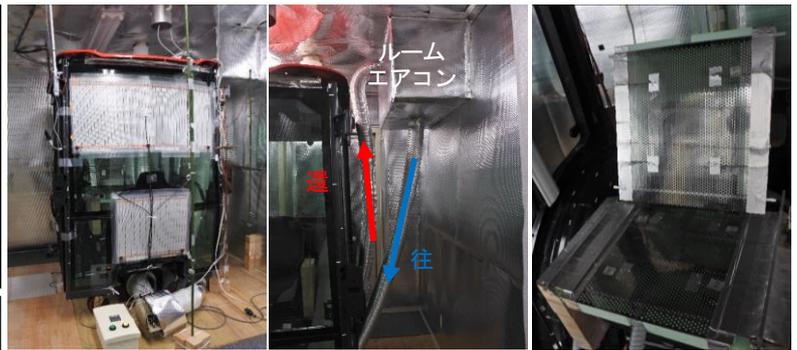


Fig.3 Inside Views of the Laboratory

1.3 実験方法

被験者は BMI 指数が似通った (20 前後) 健康な男子大学生 3 名とし, 実験は 10 月中旬に行った。Fig.8 に実験方法を示す。乗車前の農作業と乗車後のトラクタの運転を想定して, 乗車前と乗車後それぞれ代謝量を上昇させながら実験を行った。まず, I. 実験室に入り測定を開始する準備を行う。熱電対を身体各部に貼り付け, 腕時計型光学式脈拍モニターの設定を行った。次に, 被験者の時間的な熱の履歴をリセットするために II. 身体を温熱環境に慣らすために, 椅子に座って 10 分間安静にする。そして, III. 外部での農作業を想定し, 踏台装置による足踏み運動を 100BPM の間隔で行う。この運動は被験者に少し汗をかかせる程度の運動とした。その後, IV. 空調された車室内に移動し, 椅子に座り実験 Case ごとの局部冷却を開始する。この時もトラクタの運転を想定して代謝量を上昇させるために, 着座状態で足踏み運動 (足が床から離れる程度) を 50BPM の間隔で行わせた。また, アンケート申告はタブレット端末に入力する形式とし, 1 分間隔で行った。

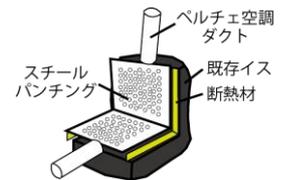


Fig.4 Specifications of the Cooling Chair

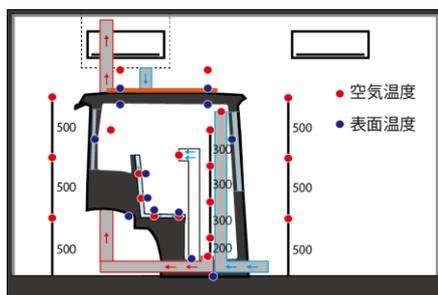


Fig.5 Points of the Environmental Temperature Measuring



Fig.6 Points of the Skin Temperature

<p>● 皮膚温度測定点</p> <p>1 首 2 胸 3 腰</p> <p>4 左肩 5 左腕 6 左手</p> <p>7 右腕 8 左太腿下 9 左脚</p> <p>10 左足 11 右太腿下 12 左脇</p> <p>● 水分率測定点</p> <p>額 胸 左腕</p>	<p>温冷感</p> <p>現在の室温をどのように感じているか</p> <p>温度に対する快適感</p> <p>現在の室温や局部冷却の温度がどうか</p> <p>局部冷却の気流に対する快適感</p> <p>現在の局部冷却の気流がどうか</p> <p>発汗の不快感</p> <p>現在の発汗が不快かどうか</p> <p>発汗について</p> <p>全身の発汗の有無はどうか</p> <p>発汗箇所</p> <p>現在発汗しているのはどの部位か</p>
--	--

Fig.7 Questionnaire

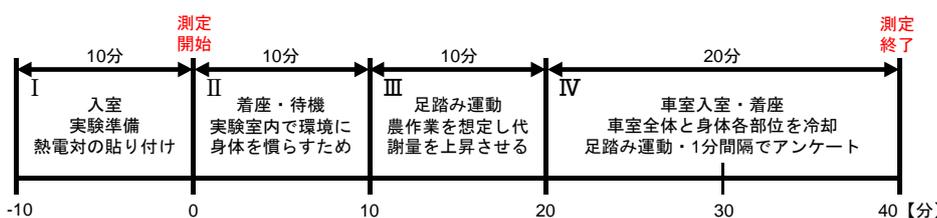
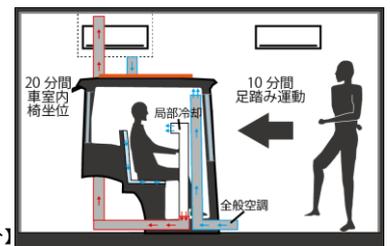


Fig.8 The Method of the Experiment



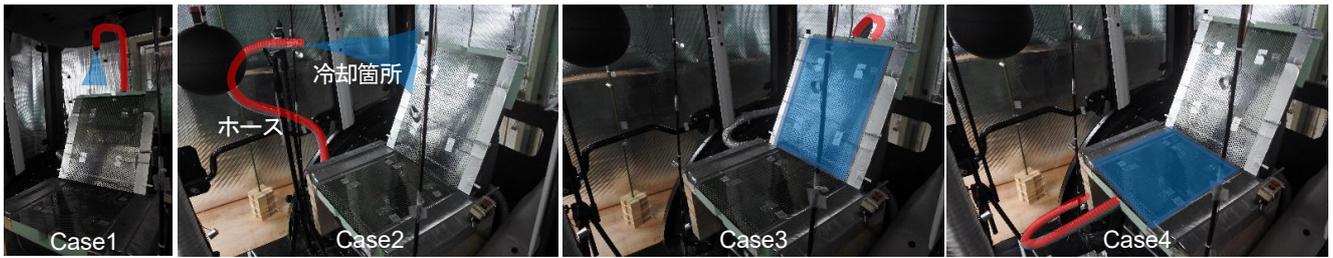


Fig.9 Imagine of the Experimental Case

Table1 Experimental Cases

	条件	場所・備考	パラメータ	単位	
全Case 共通条件	空気温度	車室外	32	°C	
		車室内	27		
	表面温度	屋根	55		
		天井	30		
		床	33		
		前窓	40		
	グローブ温度	中央前	28		
	吹出し温度	全般空調	23		
	風速	全般空調	7		m/s
		ペルチェ空調	7		
	相対湿度	中央前	37		%
	着衣量	半袖シャツ, 長袖, 長ズボン 作業服, 靴 下, 靴			0.8
代謝量	足踏み (立位)		2.5	Met	
					足踏み (座位)
吹出し温度	ペルチェ空調	25	°C		

実験Case				冷却部位	25~26 (吹出し温度)	°C
Case0 (基準)		無し				
Case1		首				
Case2		胸				
Case3		腰				
Case4		尻, 太腿				

※着衣量と代謝量以外は実測値(代謝量と着衣量は推測値)

1.4 実験条件

Table1 に境界条件, Fig.9 に実験 Case ごとの冷却部分のイメージ図を示す。境界条件は, 実験室の性能に合わせるため, 事前実験の結果から設定した。夏期の外気温度を想定し, 日射の影響として屋根外表面温度と床表面温度と窓表面温度の上昇を考慮した。実験 Case は, Case0 を局部冷却無しの条件 (基準 Case) とし, Case1-4 を局部冷却有り (首, 胸, 腰, 尻・太腿) の条件とした。

2. 被験者実験結果

①車室と冷却椅子の環境温度

Fig.10 に全 Case の平均的車室環境温度を示す。車室外空気温度 32°C に対して車室内空気温度を 27°C に冷房できている。グローブ温度は空気温度よりも 1°C 程度高い条件, 局部冷却の吹出し温度は空気温度よりも 2°C 程度低い条件で実験を行った。

Fig.11 に各実験 Case の平均の冷却椅子の背面と座面の表面温度を示す。{※凡例の意味: 0_基準は Case0 (基準ケース), 1_首は Case1 (首局部冷却) 以下同様を意味する}冷却椅子の背面の温度は Case3 の時に最も低くなり, 座面の温度は, 被験者が座席に着席した 20 分以降では Case4 の時に最も低くなった。しかし, 被験者が乗車していない 20 分以内に Case3 の座面温度が低いのは背面に向けた冷気が座面付近まで下降しているためだと考えられる。背面と座面ともに冷却を行った場合とそうでない場合に約 1°C の差ができ, 冷却椅子の性能が確認できた。

②部位ごとの皮膚温度 (局部冷却箇所)

Fig.12 に各実験 Case の平均の首, 胸, 腰, 太腿下腿の皮膚温度を示す。首と胸を気流冷却した Case1, 2 では, 冷却部位の温度低下が見られた。しかし背面と座面を冷却した Case3, 4 では冷却部位の目立った温度低下は見られなかった。これは, 冷却椅子の座席表面温度が他の Case よりも低い (Fig.11) が, ペルチェ空調の冷却量が少なく, 座席面との接触部の着衣の影響が大きかったため, 局部冷却の影響は皮膚温度に表れにくかったと考えられる。

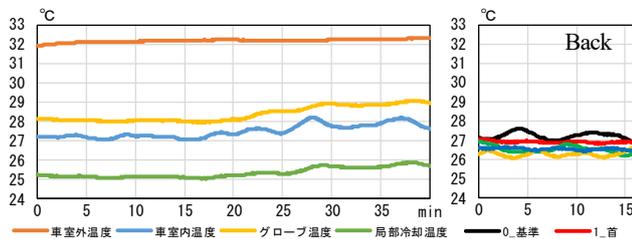


Fig.10 Cabin Environment Temperature

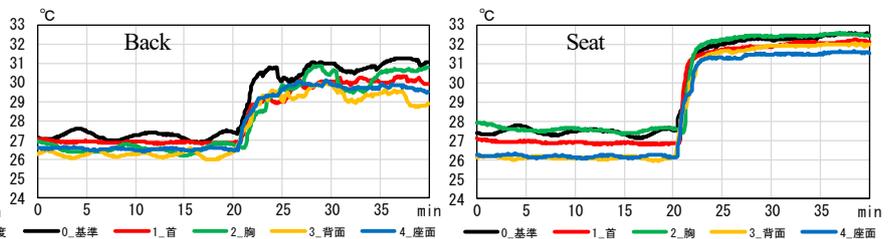


Fig.11 Surface Temperature of the Cooling Chair (Back, Seat)

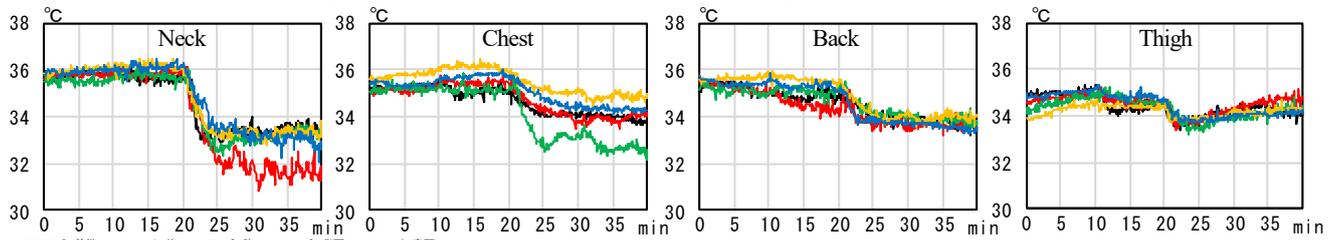


Fig.12 Skin Temperature (Neck, Chest, Back, Thigh)

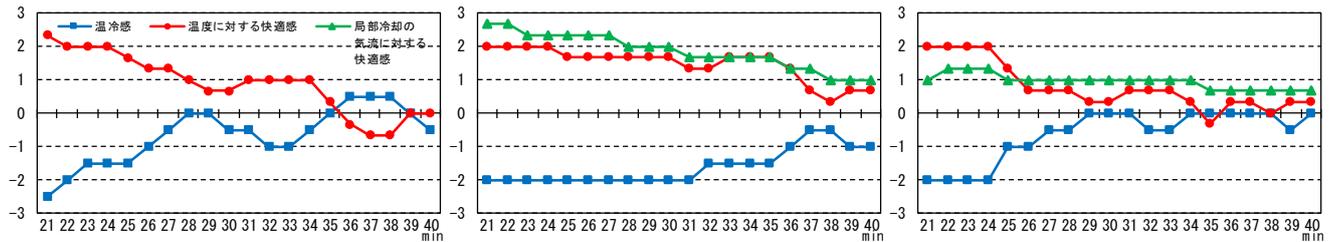


Fig.13 Thermal Sensation, Thermal Comfort and Airflow Comfort (Case0, Case1, Case4)

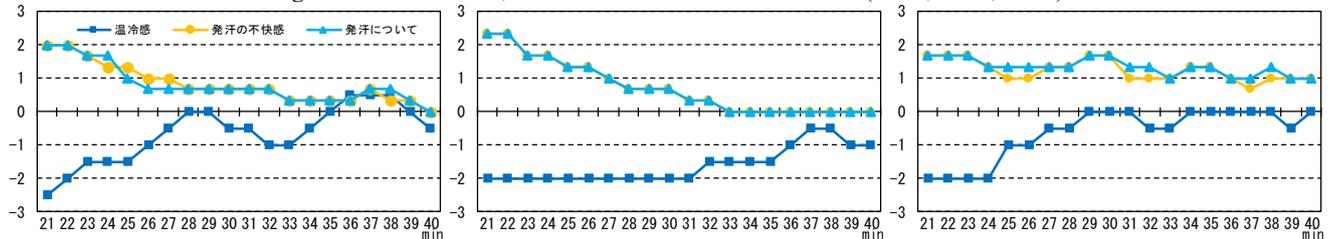


Fig.14 Thermal Sensation, Sweating Uncomfortable and Sweating Sensation (Case0, Case1, Case4)

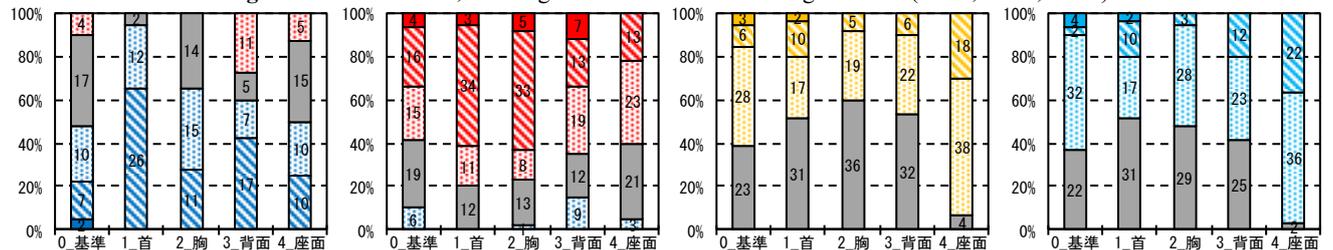


Fig.15 Total Thermal Sensation, Thermal Comfort, Sweating Uncomfortable and Sweating Sensation

	温冷感	快適感	不快感	発汗感
3	暑い	非常に快適	非常に不快	非常に汗ばむ
2	暖かい	快適	不快	汗ばむ
1	やや暖かい	やや快適	やや不快	やや汗ばむ
0	中立	中立	中立	発汗なし
-1	やや涼しい	やや不快		
-2	涼しい	不快		
-3	寒い	非常に不快		

③アンケート申告

Fig.13,14 に 1 分間隔の温冷感, 温度に対する快適感, 局部冷却の気流に対する快適感, 発汗の不快感, 発汗感を示す。気流冷却と座席冷却を比較するために Case1 と Case4 を掲載した。今回の実験では, 暑い空間で代謝量を上昇させた後に冷房空間に入ったため, 申告 1 分時には全ての Case で「涼しくて快適」という申告が見られた。しかし, 時間経過と共に温冷感と快適感が中立側に移行している。これは身体が現在の温熱環境に慣れ, 生理状態が時間経過と共に安定するからだと考えられる。気流を首に直接当てて冷却を行った Case1 は, 首に当たる冷気の温度が空気温度よりも低い状態を維持できたために冷涼感と快適感が持続している。一方, 座面冷却を行った Case4 は, 座面表面温度が人体の接触と同時に皮膚温度に近づくため, 冷涼感と快適感が持続しなかった。発汗についても Case1 は申告 13 分時点で発汗の申告がなくなったが, Case0, 4 では実験終了時まで発汗感が継続している。

Fig.15 に車室入室後 20 分間の申告数の割合を示す。Fig.13, 14 の結果と同様 Case1 の時に, 冷涼感と快適感の割合が最も多く, 発汗の申告割合も最も少ない。Case0 と Case4 を比較すると Case4 の方が発汗を申告している割合が高いにもかかわらず Case0 と温冷感・快適感申告の

割合が同等である。これは Case4 では, 冷却部位の皮膚温度に冷却効果は表れていないが (Fig.12, Thigh), 発汗量が多いため, 座面からの局部冷却の影響を意識して, 発汗の蒸散による冷涼感を感じたと考えられる。

3. まとめ

- ①車室環境については, グローブ温度が車室内空気温度よりも約 1℃高く, ペルチェ空調温度が約 2℃低い。また, 座席面を冷却した時, 冷却効果が表れていた。
- ②皮膚温度については, 気流で直接身体部位を冷却すると冷却部位の皮膚温度が低下する。しかし, 座席冷却の場合ペルチェ空調の冷却量が少なく, 衣服の熱抵抗により, 局部冷却の影響は皮膚温度に表れにくかった。
- ③心理量については, 発汗を伴う暑熱環境から冷房空間に入った時, 冷涼感と快適感を感じるが, 時間経過とともに環境温度に身体が慣れ, 次第に生理状態が安定し温冷感と快適感は中立側に移行した。

今回の実験では, 車室冷却手法の最適化モデルの開発に向けて気流冷却の有効性を確認した。今後, 実験結果を境界条件に人体モデルによる生理量解析を行う。また, 冷却椅子の性能に課題があったため, 冷却椅子の仕様を変更して再度被験者実験を行う必要がある。

参考文献

文1) 田辺新一ほか: クールダウン時の車室乗客の温冷感・快不快感予測に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2011.9.14-16
 文2) 林伸明ほか: シミュレーションによる車内温熱環境の再現と評価, JR EAST Technical Review-No.53, 13-18
 文3) Ružić, D. & Časnji, F. (2011). Agricultural Tractor Cab Characteristics Relevant for Microclimatic Conditions. Journal of Applied Engineering Science Vol.2, No.9, (June 2011), pp. 323-330, ISSN 1451-4117
 文4) 織田浩平ほか: 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 (その3) 車室環境及び局部冷却が人体に及ぼす影響の解析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 1-46, 2016年9月

不均一温熱環境下の温冷感・快不快感の評価に関する研究

Human thermal sensation and comfort in inhomogeneous thermal environments

○東 真史 (福井大学) 吉田 伸治 (奈良女子大学)

Masafumi AZUMA*¹ Shinji YOSHIDA*²*¹ University of Fukui *² Nara Women's University

The purpose of this paper is to investigate a method of evaluating physiological and psychological responses from human being under inhomogeneous thermal conditions. The experiment for investigating effects of local irradiation to body parts on thermal comfort for subjects were carried out using a constant temperature and humidity chamber. The evaluation model for inhomogeneous thermal comfort proposed by Zhang et al. (2003) was also validated in the present experiment. Through the investigation, it has been found that the increase in inhomogeneity of local thermal comfort intensifies the increase in the entire thermal discomfort for the human being.

1. はじめに

アトリウム空間、半屋外空間、車内空間など人間は日射を含む不均一な温熱空間に曝露されることが多い。また室間の移動、外部空間への移動など非定常状態もよく経験する。これまで比較的均一で定常に近い空間の温熱快適性評価は、予測平均申告 PMV (Predicted Mean Vote) ^{文1)文2)} や新標準有効温度 SET* (Standard new Effective Temperature) ^{文3)文4)} を用いて行われてきた。しかし、不均一性や非定常な温熱環境は、これらの快適指標のみで評価することは難しい。また、近年では省エネルギーの観点から上記の空間における、人体に有効な空調制御、空間計画を行うための定量評価の要望から、非定常・不均一な温熱環境の評価手法の開発 ^{文5)} が試みられている。不均一環境下の温冷感評価の試みとして Zhang らの研究 ^{文6)} がある。Zhang らは、不均一環境下の全身及び部位別の温冷感評価のみならず、快適感まで評価する手法を提案している。しかしながら、日射の影響に対する温冷感の感度に対する検討がなされていない。上記に示す不均一な温熱環境での人の熱的快適性には大きなばらつきが生じると考えられる。特に日射については同じ強度の日射であっても、日射を受ける部位によって熱的快適性には違いが生じる。本研究では、不均一温熱環境を想定した恒温恒湿室で被験者実験を行い、局所的な日射が温冷感・快不快感に及ぼす影響を分析する。また、Zhang モデルを用いた予測値と実験から得られた被験者申告値との比較検討することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 測定対象・期間

実験は人工太陽照明灯 (SOLAX XC-500) を設置した

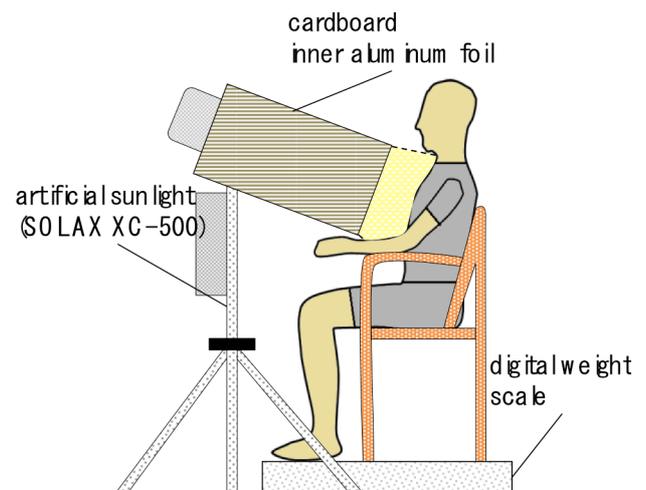


Fig.1 Chest irradiation

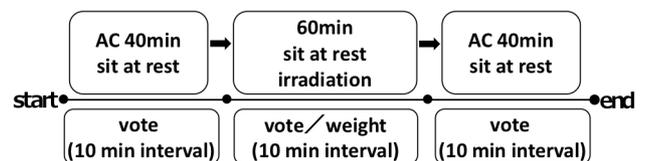


Fig.2 Flow of experiment

奈良女子大学生環系 E 棟 5 階の恒温恒湿室内を対象とした。測定期間は 2016 年 9 月 4 日から 9 月 30 日 (延べ 12 日) であった。

2.2 実験方法

Fig.1 に実験イメージを示す。被験者 4 名の特徴を Table.1 に示す。被験者は健康な青年男性 2 名、女性 2 名

の計4名とし、心理量申告及び生理量測定を行った。Fig.2に実験手順を示す。前室に40分間滞在後、実験室に60分間滞在した後、前室に戻り40分間滞在するものとした。実験中、被験者は椅子座安静を保つものとした。前室の温熱環境は空気温度25°Cとした。実験室の温熱環境は、空気温度30°C、相対湿度50%、気流速度0.1m/sとした。局部には、300[W/m²]の照射を行い、照射条件は照射無を含む、頭照射、胸照射、背照射、左足照射、左腕照射の合計6条件に対する被験者実験を行った。環境条件として、被験者周りの空気温度、平均放射温度、相対湿度、気流速度を測定した。また人体の生理量として、人体部位(頭、頸、胸、背、腰、左右上腕、左右前腕、左右手、左右大腿、左右下腿、左右足)の皮膚温及び、胸部の発汗量を測定した。心理量として人体17部位及び全身の温冷感、熱的快不快感を7段階スケール(温冷感申告尺度:-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、快不快感申告尺度:-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非常に快適)で、申告させた。心理量申告は全体を通して10分間隔の、計14回行った。実験着は、上下灰色のTシャツ、短パン(着衣量0.3clo相当)を使用した。

3. 実験結果

3.1 皮膚温

Fig.3に各照射条件での、全被験者の値を平均した頭部、胸部、背部、左下腿部の皮膚温度を示す。実験室滞在時の各照射条件における皮膚温を比較すると、体幹部である背部では照射の有無による皮膚温差が最も大きく3.5°C程度となり、照射に対して敏感に反応していることが分かる。一方同じ体幹部である頭部、胸部では、照射の有無による温度差は各々1°C程度となった。また四肢部位である左下腿部の皮膚温差は1.5°C程度となった。胸に比べ背は、内臓や血液より比熱の小さい骨の割合が大きいため、他の部位に比べ、皮膚温の増加が大きくなったと考えられる。

3.2 温冷感・快不快感

Fig.4に全被験者の全照射条件での全身に対する温冷感・快不快感の被験者申告値(横軸、以下V_s、V_c)と、各部位に対する温冷感・快不快感の被験者申告値に皮膚表面積による重みづけ平均を行うことにより得られる全身温冷感・快不快感(縦軸、以下A_s、A_c)の関係を示す。Table.2に重みづけ計算の際に用いた各部位の表面積の値を示す。A_s、A_cを(1)、(2)式に示す。

$$A_s = \sum A_{Du}(i) \cdot v_s(i) / \sum A_{Du}(i) \quad (1)$$

$$A_c = \sum A_{Du}(i) \cdot v_c(i) / \sum A_{Du}(i) \quad (2)$$

記号 A_{Du}(i) : 部位 i の表面積、v_s(i) : 部位 i の温冷感申告値、v_c(i) : 部位 i の快不快感申告値

Fig.4を見ると、温冷感、快不快感ともに計算値(A_s、A_c)が

Table.1 Subject information

ID	Gender	Age	Height (cm)	Weight (kg)
1	Female	21	1.55	44.0
2	Male	22	1.76	57.6
3	Female	21	1.52	46.6
4	Male	24	1.73	64.2

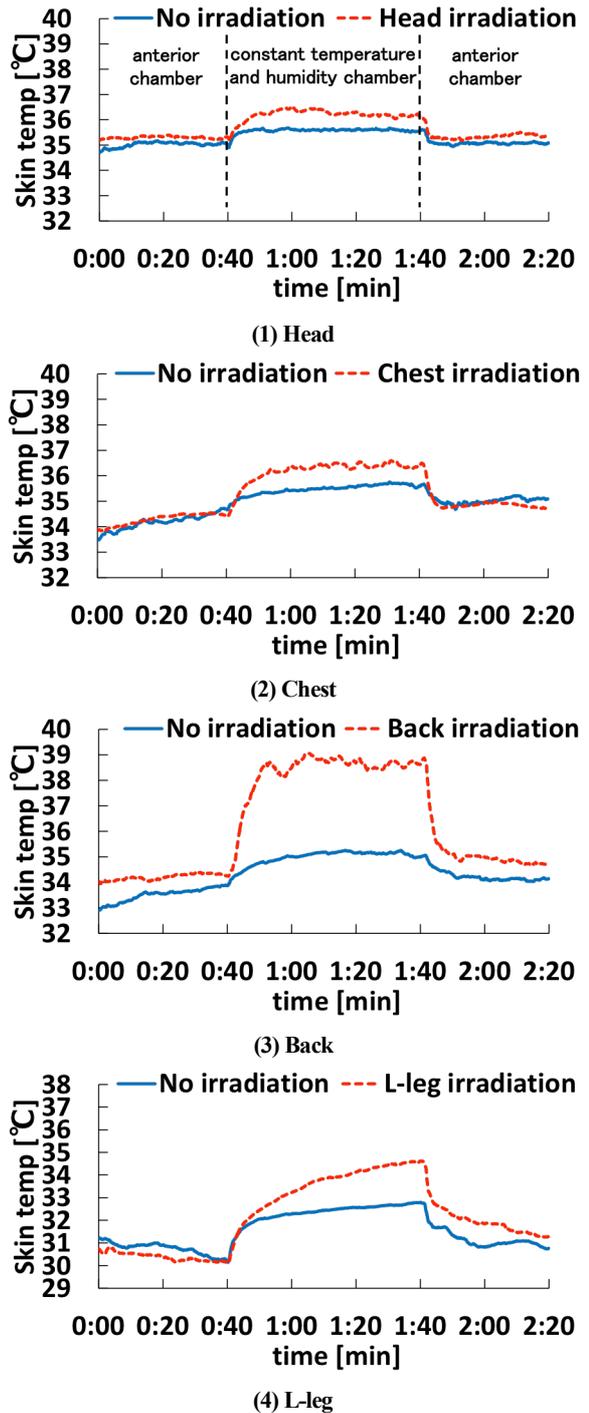


Fig.3 Local skin temperature change depending on irradiation

実際の被験者申告値 (V_s 、 V_c) を過小評価する傾向がみられた。部位分割を考慮しない場合、全身で平均的な評価が得られるものと期待される。従って、本来、全身に対する値と各部位の値を外界との熱交換を行う部位表面積に基づき平均して得られる全身平均値は同等なものと考えられる。Fig.4の結果は、この皮膚表面に基づく平均的な条件以外の要因も全身の申告に作用することを示唆するものと考えられる。

Fig.5に部位毎の温冷感・快不快感の不均一度(横軸、以下 σ_s 、 σ_c)と、Fig.4に示した全身申告(V_s 、 V_c)と部位毎の申告の皮膚表面に基づく平均(A_s 、 A_c)の差、すなわち $V_s - A_s$ 、 $V_c - A_c$ の関係を示す。 σ_s 、 σ_c の定義を(3)、(4)式に示す。Nは部位の数であり、今回の検討部位数は17である。

$$\sigma_s = \sqrt{\sum(v_s(i) - A_s)^2 / N} \quad (3)$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sum(v_c(i) - A_c)^2 / N} \quad (4)$$

Fig.5より温冷感では、 σ_s の値の増加に伴い、 $V_s - A_s$ も増加する傾向が、また快不快感では σ_c の値の増加に伴い、 $V_c - A_c$ はより大きな負値をとる傾向がみられる。これにより、各部位での温冷感・快不快感の不均一度の増加は全身の申告と部位毎の申告の平均との差を大きくすること、すなわち、不均一度の増加は全身の温冷感・快不快感の絶対値の増加に寄与することが明らかとなった。

4. Zhang モデル予測値の精度検証

4.1 Zhang モデルの全身・部位別温冷感予測

Zhang モデルでは人体を19部位に分割し、各部位の皮膚温、セットポイント温度から定常状態、非定常状態における全身及び部位別の温冷感を予測する。さらに、これを基に部位別快不快感、最終的に全身の快不快感を予測している。この予測モデルを構築するため、Zhangらは、カリフォルニアバークレー校の環境実験室にて109名を対象とした被験者実験を行っている。この実験では、環境温度を22.1℃から31.8℃まで5段階変化させ、評価したい部位のみ局所的に環境温度を変更した時の皮膚温分布と温冷感の関係を求めている。定常状態における部位別及び全身温冷感の予測式(5)を示す。Table 5に部位別温冷感算出の際に用いる係数C1、K1の値の一部を示す。

Local Sensation

$$= 4(2/(1 + e^{-C1 \cdot \Delta T1 - K1 \Delta T2}) - 1) \quad (5)$$

$$\Delta T1 = T_{skin,local} - T_{skin,local,set}$$

$$\Delta T2$$

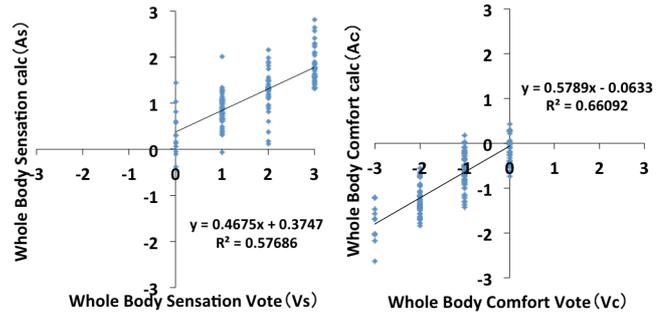


Fig.4 Whole body sensation and comfort votes vs. calculation values

Thermal Sensation scales : -3 cold, -2 cool, -1 slightly cool, 0 neutral
1 slightly warm, 2 warm, 3 hot

Thermal Comfort scales : -3 very uncomfortable, -2, uncomfortable
-1 slightly uncomfortable, 0 neutral
1 slightly comfortable, 2 comfortable, 3 very comfortable

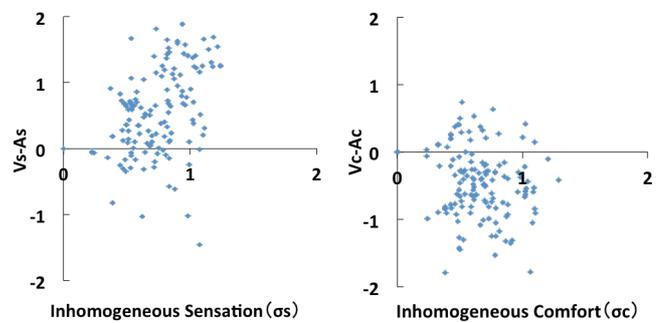


Fig.5 Sensation and Comfort Non-uniformity vs. difference between votes and calculation values

Table.2 JOS-2 Body surface area 文7)

i	Segment	$A_{Du}(i)_{st}$ [m ²]
1	Head	0.110
2	Neck	0.029
3	Chest	0.175
4	Back	0.161
5	Pelvis	0.221
6	Left shoulder	0.096
7	Left arm	0.063
8	Left hand	0.050
9	Right shoulder	0.096
10	Right arm	0.063
11	Right hand	0.050
12	Left thigh	0.209
13	Left leg	0.112
14	Left foot	0.056
15	Right thigh	0.209
16	Right leg	0.112
17	Right foot	0.056
	Total	1.870

Table.3 Coefficients K1, C1 文6)

Body Part	$T_{skin,i} - T_{skin,i,set} < 0$ (local body part cool)		$T_{skin,i} - T_{skin,i,set} \geq 0$ (local body part warm)	
	C1	K1	C1	K1
Head	0.38	0.18	1.32	0.18
Neck	0.4	0.15	1.25	0.15
Chest	0.35	0.1	0.6	0.1
Back	0.3	0.1	0.7	0.1
Pelvis	0.2	0.15	0.4	0.15
Upper arm	0.29	0.1	0.4	0.1
Lower arm	0.3	0.1	0.7	0.1

記号 $C1, K1$: 部位温冷感算出のための部位別に設定された係数、 $S_{local,i}$: 部位 i の温冷感、 $T_{skin,local}$: 各部位の皮膚温、 \bar{T}_{skin} : 平均皮膚温、 $T_{skin,local,set}$: 各部位のセットポイント温度、 $\bar{T}_{skin,set}$: 平均セットポイント温度、

部位別温冷感を予測する(5)式には、被験者実験で得られた主な2つの結果、すなわち、①皮膚温に対する感度は、暖かい側が寒い側より高い、②部位の皮膚温が同じでも、他の部位が暖かいと冷たく、他の部位が寒いと暖かく感じる、が反映されている。

4.2 局部温冷感予測式の検討

各照射条件下で被験者毎に得られた、部位毎の温冷感申告値と(5)式より算出した温冷感予測値の関係を図9に示す。頭照射時の頭の温冷感、胸照射時の胸の温冷感被験者申告値が1(やや暖かい)、2(暖かい)の場合は、Zhangモデル予測値と概ね合う傾向を示す一方、申告値が3(暑い)の場合は、頭、胸ともに予測値が申告値を過小評価する結果となった。背では、申告値が1(暖かい)、2(暑い)の場合に対して計算値がやや過大評価する傾向となった。左下腿では全体的に予測値が申告値を過小評価する結果となった。以上から、頭、胸、下腿部では皮膚温のわずかな上昇が、申告値に大きく作用すること、それに対し背部では上記の部位に比べ皮膚温度の上昇による温冷感への影響が小さいことがわかった。これらの差が生じた要因としては、①Zhangモデルは皮膚温度のみの関数なので、発汗や、個人の体格差等の他の要因が影響したこと②今回の環境条件下では係数 $C1, K1$ の値が適切ではなかったこと③Zhangモデルで使用されているセットポイント温度が今回の被験者のそれと差があったことが考えられる。

5. まとめ

- 1) 日射の影響を受ける不均一温熱環境を想定した恒温恒湿室での被験者実験を行い、人体の温熱生理量、心理量への影響を評価した。
- 2) 被験者実験では、各照射条件における各部位の皮膚温、温冷感、快不快感を評価した。照射による皮膚温上昇は背面が最も高いことが分かった。また、部位毎の温冷感・快不快感の不均一度の増加は全身の温冷感・快不快感の絶対値の増加に寄与することが明らかとなった。
- 3) 被験者実験をもとにZhangモデルを用いて各部位の温冷感を算出し、被験者申告値との比較を行った。Zhangモデルによる予測値が暑熱環境下で申告値を過小評価する傾向がみられた。実験の継続による被験者数の確保と、得られた結果を考慮したZhangモデルの改良方法の検討が今後の課題である。

謝辞 本研究の遂行に当たり、久保博子氏(奈良女子大学研究院生活環境科学系教授)には多大な助言、並びに助力を得た。ここに深甚なる謝意を表します。

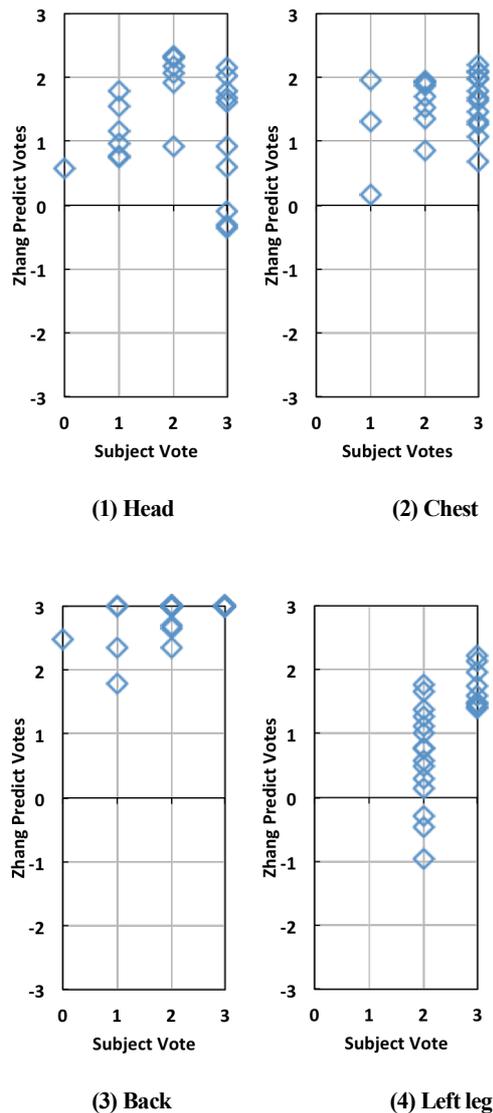


Fig.6 Local sensation votes vs. Zhang predict votes

参考文献

- [1] ISO7730 : 1994
- [2] P.O.Fanger : Thermal Comfort – Analysis and Applications in Environmental Engineering, McGraw-Hill Book Company, 1972
- [3] A.P.Gagge, J.A.J.Stolwijk and Y.Nishi : An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Transactions, 77, 247-262, 1971
- [4] A.P.Gagge, J.A.J.Stolwijk and Y.Nishi : A Standard Predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions, 92(1), 709-731, 1986
- [5] 小林裕他 : 人間—熱環境系快適性数値シミュレータ (その43) 部位別冷却時の車内乗員の快適予測手法に関する研究 その1
- [6] H. Zhang : Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments, PhD, 2003
- [7] Yutaka Kobayashi, Shin-ichi Tanabe : Development of JOS-2 human thermoregulation model with detailed vascular system

建物近傍における屋外空間の温熱環境ならびに人体温冷感予測 Thermal Environment in Outdoor Space Near the Building and Numerical Analysis of Human Thermal Sensation

○桑木 雅史 (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)

Masashi KUWAKI Shinichi KINOSHITA Atsumasa YOSHIDA

Osaka Prefecture University

Thermal sensation under outdoor environment is effected by solar radiation. Trees can reduce direct solar radiation. To understand the effect of trees, two cases were simulated. One is the environment with five trees and the other is no tree environment. The solar radiation and other meteorological data were obtained by simulation. Using these data and two-node model, human thermal load were calculated. Human thermal load were reduced under the trees.

1. はじめに

近年、地球温暖化や都市域でのヒートアイランド現象など様々な気象問題が発生している。人々が活動する環境での温熱快適性の改善は以前にも増して重要な問題となっており、快適性の指標づくりの一環として人体の生理反応を予測するモデルの確立が急がれている。都市の温熱環境の現状把握、熱環境を設計するために体感に基づいて屋外空間の温熱環境を評価することが必要である。

本研究では建物で囲まれた空間を対象にした。建物で囲まれた空間は風通しが悪く、4方向からの日射反射があるため、人にとって暑いと感じる空間になりやすい。長時間滞在できる空間づくりのため、樹木を植えることによる環境改善効果の解析を行うことを目的とした。本研究では夏季の熱環境をソフトを用いてシミュレーションを行った。シミュレーションにより得られた気象データを2node modelのプログラムに入力条件として代入した。出力により得られる人体の皮膚温と深部温度、発汗による蒸発熱損失から人体熱負荷量を算出した。被検者実験により得られた人体熱負荷量と人体温冷感の相関式を用いて人体温冷感の予測を行った。建物近傍において人体温冷感に与える日射の影響を知るため、モデルに樹木がある場合とない場合の2条件で計算を行った。

2. 人体熱収支に基づく温冷感指標

人体の温熱環境を評価するには周囲の環境要因のみではなく人体の生理要因を考慮する必要がある。人体の熱の収支の因子としては代謝量、機械的仕事量、ふく射量、顕熱損失量、潜熱損失量の5つに大きく分けられる。人体の熱収支は式(1)で表すことができる。

$$M - W = -R_{\text{net}} + E + C \quad (1)$$

ここで、 M は代謝量 $[W/m^2]$ 、 W は機械的仕事量 $[W/m^2]$ 、 R_{net} は正味ふく射熱量 $[W/m^2]$ 、 C は顕熱損失量 $[W/m^2]$ 、 E は潜熱損失量 $[W/m^2]$ である。人体の熱収支が非平衡状態にあるときの熱収支は人体に加わる熱負荷となり、これを人体熱負荷量と定義する。人体熱負荷量 $F_{\text{load}}[W/m^2]$ の定義は式(2)で表される。

$$F_{\text{load}} = M - W + R_{\text{net}} - E - C \quad (2)$$

人体熱負荷量は島崎ら⁵⁾によって屋外環境での温冷感との相関が示されており、その有効性が認められている。本研究では人は立位安静状態であり、 $M = 80[W/m^2]$ 、 $W = 0[W/m^2]$ で一定とした。正味ふく射量は(3)式に示すように、皮膚温と平均放射温度 MRT から求めた。 $h_r(W/m^2\text{ }^\circ\text{C})$ はふく射熱伝達率、 $T_{\text{sk}}(^\circ\text{C})$ は皮膚温、 $T_{\text{mrt}}(^\circ\text{C})$ は平均放射温度、 F_{cl} は着衣伝熱効率である。

$$R = h_r(T_{\text{sk}} - T_{\text{mrt}})F_{\text{cl}} \quad (3)$$

人体からの顕熱損失量は皮膚からの顕熱損失と呼気からの顕熱損失の和とした。潜熱損失量は2 node model から算出される発汗による蒸発熱、不感蒸発熱、呼気蒸発熱の和とした。

3. 熱環境シミュレーション

3.1 計算モデル

屋外空間の熱環境を微気象シミュレーションソフト ENVI-met を用いてシミュレーションを行った。大気乱流モデルはk-εモデルである。植物は気孔抵抗、光合成速度から蒸発散をもとめている。水分は地面から吸収しており、土壌は含水率を一定に保つように水分は常に供給される。図1にモデル図を示す。モデルは大阪市に位置し、

大阪府立大学 B4 棟を模擬して作成した。紙面左上方向が北である。計算領域は $120\text{m}\times 120\text{m}\times 40\text{m}$ であり、1 辺が $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}\times 1.25\text{m}$ のグリッドで区切った。建物はコンクリート、樹木は街路樹などに用いられるプラタナスを 5 本配置し、建物周辺の土壌はアスファルト、中庭中央部は壤土、その周辺はウッドデッキで覆った。2016 年 8 月 31 日 0 時から 24 時間分計算を行った。表 1 に初期条件を示す。初期条件の気温、湿度、二酸化炭素濃度はモデル内で一様である。境界条件は全ての物体表面で滑りなし条件が使われており、流入境界面ではノイマン条件、下流側と側面の境界面では勾配 0 のノイマン条件であり、最上面では垂直方向の動きはない。

風は東から西に 3.0m/s の風が吹いており、雲量は 0 である。最初、気温は 21°C で相対湿度は高さ 2m で 50%、土壌の含水量は 60%、温度は 293K で CO_2 濃度は 350ppm とした。

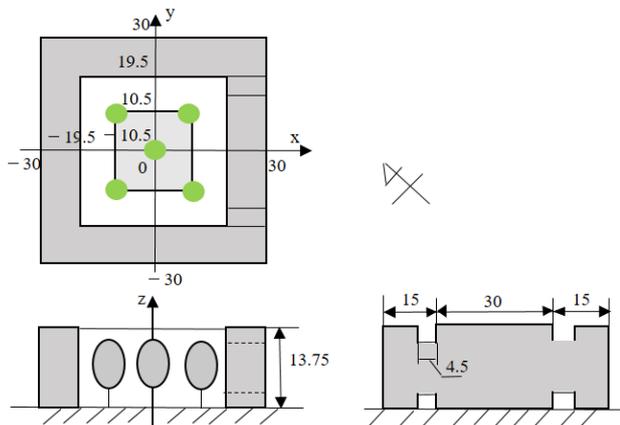


Fig.1 Numerical model of building

3.2 シミュレーション結果

図 2 に高さ 1.1m での水平断面での気温と風速の分布、 $y=0$ の鉛直断面での気温と風速の分布を示す。図 3 は高さ 1.1m での水平断面と $y=0$ の鉛直断面での MRT 分布である。モデルを半分に分ける図 1 の $y=0\text{m}$ で断面について、2016 年 8 月 31 日 12 時の高さ 1.1m での MRT、風速、直達光について樹木がある場合とない場合で比較し、図 4-6 に示した。各データの -30m , 30m 付近に値がないのは建物の影響である。

$x=-20\sim 20\text{m}$ の中庭空間について着目する。風速は最大で樹木がある方が 0.4m/s 大きくなった。樹木がある方が MRT で 15°C 低く、比湿は 0.1g/kg 、相対湿度は 1.2% 大きく、直達日射は 860W/m^2 小さかった。樹木を植えることにより、湿度が大きくなるが MRT が低くなり日射を大幅に小さくできることが確認できた。

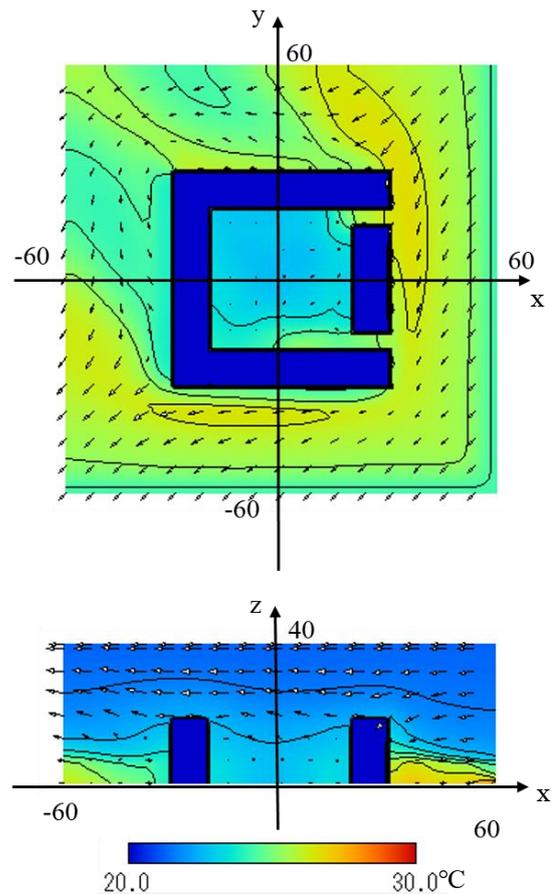


Fig.2 Distribution of Temperature and Wind velocity

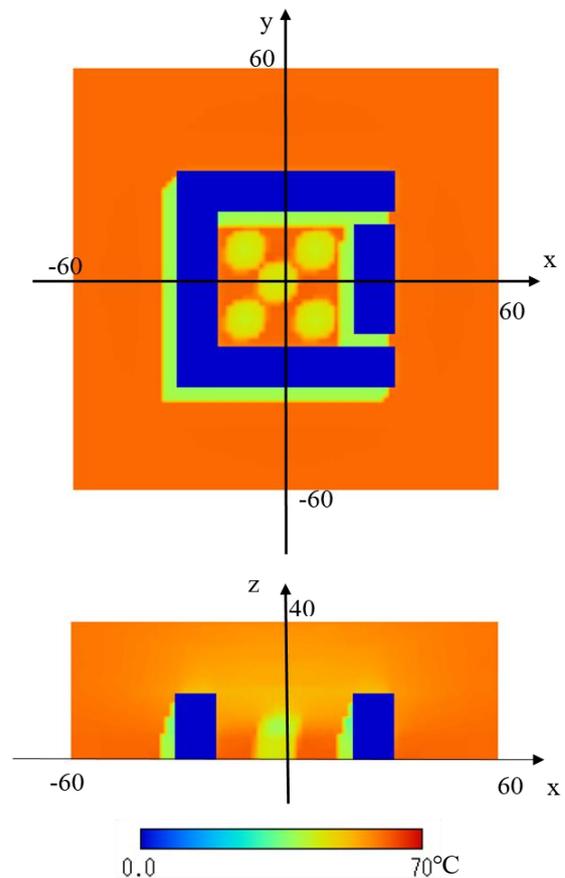


Fig.3 Distribution of MRT

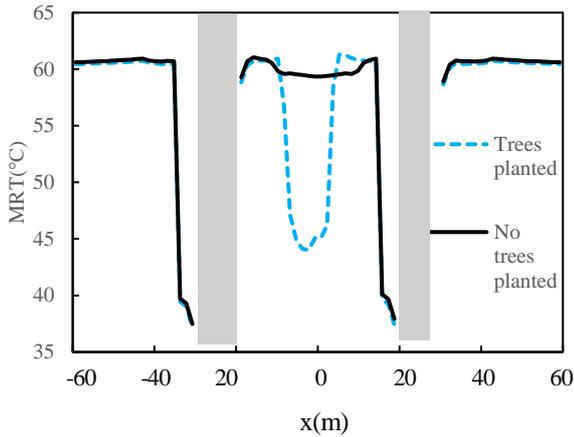


Fig.5 Distribution of MRT

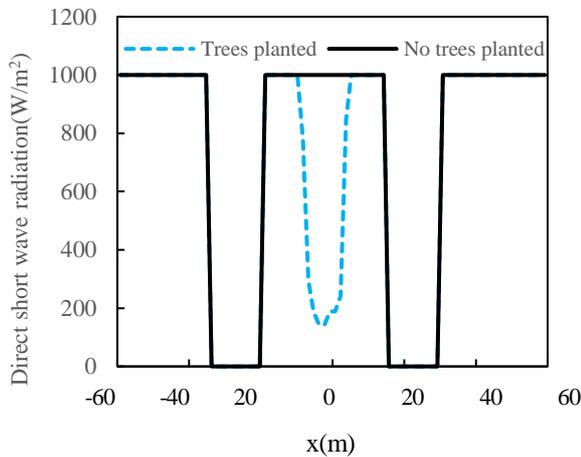


Fig.5 Distribution of Direct short wave radiation

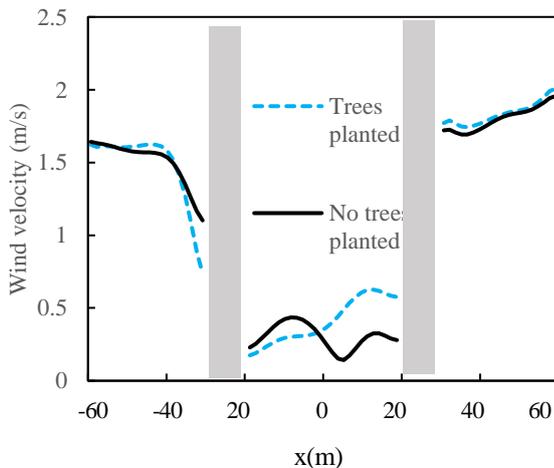


Fig.5 Distribution of Wind velocity

4. 人体モデルプログラム

4.1 2 node model

人体の生理量を求めるため、人体モデルのなかでも簡単なモデルのひとつである Gagge の 2 node model⁶⁾ のプログラムを作成した。2 node model は人体を皮膚層とコア層の 2 層でできた円柱としたもので、入力項目は気温、相対湿度、対流熱伝達率、衣服の clo 値、代謝量、仕事量、身長、体重で、出力は平均皮膚温、深部温、発汗による熱損失、皮膚ぬれ面積率である。

皮膚血管反応は皮膚信号(skin signal)により、発汗反応は皮膚信号とコア信号(core signal)により制御される。皮膚温が 34.1°C 以下になると皮膚血管の収縮の信号が送られ、それ以上では血管拡張の信号が出される。発汗反応は、深部温が 36.6°C 以上、皮膚温が 34.1°C 以上で信号が送られる。発汗量 m_{sw} は式(4)で表される。

$$m_{sw} = 250(T_{cr} - 36.6) + 100(T_{cr} - 36.6)(T_{sk} - 34.1) \quad (4)$$

皮膚温 T_{sk} は初期値が 34.1°C であり、式(5)~(7)のように求められる。 S_{sk} (W/m²) は皮膚層の蓄熱量、 K_{min} (W/m²) は肌の熱伝達率の最小値、 c_{bl} (W/kg°C) は血液の比熱、 V_{bl} (L/h · m²) は皮膚の血流である。皮膚層の熱容量は体の比熱 0.97 (Wh/kg°C) と皮膚層の質量 3.4kg の積で表され、 A は身長と体重から導き出される DuBois 体表面積である。 T'_{sk} は微小時間経った時の皮膚温変化を表す。

$$S_{sk} = K_{min}(T_{cr} - T_{sk}) + c_{bl}V_{bl}(T_{cr} - T_{sk}) - E_{sk} - (R + C) \quad (5)$$

$$T_{sk} = S_{sk}A / (0.97 \cdot 3.4) \quad (6)$$

$$T_{sk} = 34.1 + \int_0^t T'_{sk} dt \quad (7)$$

4.2 人体熱負荷量の算出

2 node model を用いて皮膚温と皮膚からの蒸発熱を算出するプログラムを作成し、人体熱負荷量を求めた。図 2~4 と同じ断面での人体熱負荷量の分布を図 8 に示す。

距離が -20m~20m の中庭空間では最大 56.5W/m² 小さくなった。樹木を配置した 0m 付近では日射が遮られるため、人体熱負荷量は樹木がない場合に比べて小さくなっている。風上側にあたる 30m~60m 付近では差は見られないが、風下にあたる -60m~-30m 付近では樹木がある場合の方が少し小さくなった。

樹下及びその周辺で人体熱負荷量が下がった主要因として、日射が減少したことにより MRT が下がり、正味ふく射が小さくなったことが考えられる。顕熱損失量や潜熱損失量も小さくなったが、それらに比べて正味ふく射の減少量が多かったことが考えられる。

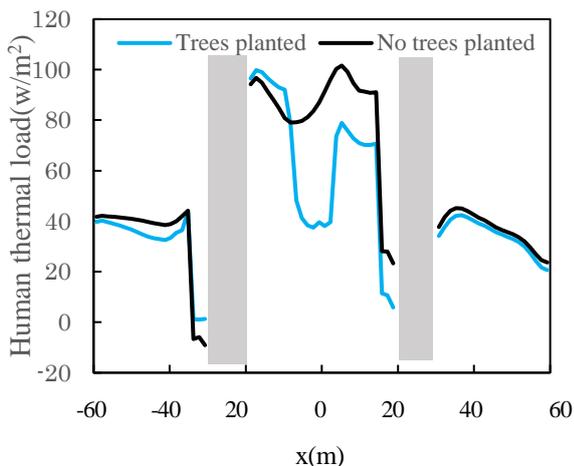


Fig.7 Distribution of Human thermal load

人体熱負荷量から式(8)を用いて 7)人体温冷感の予測を行った。式(8)は夏季に行った被験者実験により得られた相関式で、T.S は温冷感、T.L は人体熱負荷量である。予測した温冷感を図9に示す。人体温冷感は-3~+3の数字で表され、-3が「寒い」、+3が「暑い」を表す。

$$T.S=0.0183T.L+0.128 \quad (8)$$

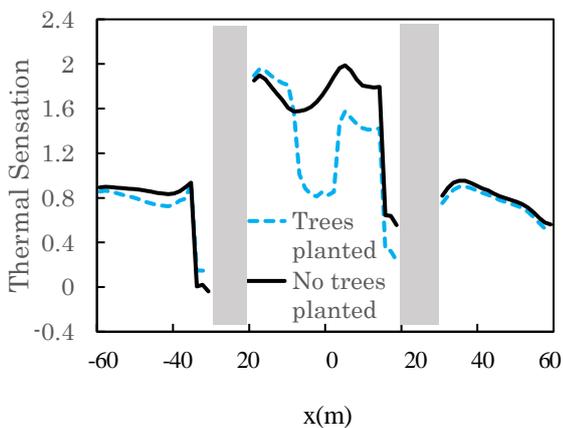


Fig9. Prediction of Thermal Sensation

5. まとめ

建物に囲まれた空間及びその周辺において、樹木を植えることが人体温冷感に与える影響を調べた。夏季における建物近傍において、樹木がある場合とない場合の2つの場合で熱環境シミュレーションを行い、MRTなどの気象条件の分布を調べて比較した。さらに得られた気象データと2ノードモデルから人体熱負荷量を算出し、人体温冷感の予測を行った。樹下では風速や湿度が高くなるが、日射量が小さくなるため正味ふく射が小さくなり、

涼しく感じられることが確認できた。また、樹下だけではなくその周辺環境においても樹木を植えることによって人体の温冷感は下がり、快適性が中立に近づくことが分かった。

参考文献

- 1) A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk, Y. Nishi ; “An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response”, ASHRAE Transactions, **77**,[1](1971) 247-262.
- 2) P.O.Fanger; ”Thermal Comfort”, Danish Technical Press, Copenhagen (1970).
- 3) J. A. J. Stolwijk , J. D. Hardy; “A Mathematical model of physiological temperature regulation in man”,NASA-Langley (1971).
- 4) 田辺新一, 中野淳太, 小林弘造 ; 「温熱環境評価のための65分割モデルに関する研究」日本建築学会計画系論文報告集, **541**(2001)9-16.
- 5) 島崎康弘, 吉田篤正, 鈴木良太, 木下進一 ; 「人体熱負荷量に基づく温熱快適性指標の提案」日本冷凍空調学会論文集, **26**,[1](2009)113-120.
- 6) A. P. Gagge, A. P. Fobelets, L. G.. Berglund; “A standard predictive index of human response to the thermal environment”, ASHRAE Transactions, **92**[2](1986)709-731.
- 7) 島崎康弘 ; 「人体熱収支に基づく人体温冷感を用いた屋外温熱環境評価」大阪府立大学博士論文(2010).

屋外のふく射環境が異なる場所での人体の温冷感

Effect of Radiative Environment on Human Thermal Sensation in Outdoor

○林 大輝 (大阪府立大学) 吉田 篤正 (大阪府立大学) 木下 進一 (大阪府立大学)

Daiki HAYASHI*¹ Atsumasa YOSHIDA*¹ Shinichi KINOSHITA*¹

*¹ Osaka Prefecture University

The simultaneous measurements of the thermal environment and the thermal sensation of subjects were performed to examine the effect of ground surface materials with various solar reflectance and urban greenery with various factors, namely tree canopy, wall greenery and hedge. The present study employs human thermal load as a thermal comfort index. Human thermal load refers to the thermal load on the human body and is obtained from the energy balance of the whole body. Human thermal load and thermal comfort are sufficiently correlated for several types of ground surface materials and greenery under the steady state.

1. 緒言

近年、都市への人口、経済活動の集中が著しくその熱環境は変化している。緑地面積の減少や人工排熱の増加などにより気温の上昇が認められ、ヒートアイランド現象が社会問題となっている。このため、人が活動する場での温熱快適性がより重要視され、様々な環境下での体感指標が必要とされている。温熱環境に対して屋外では屋内に比べてふく射輸送が支配的になる。ヒートアイランド対策として、建物外皮の高日射反射率化や壁面緑化など様々な取り組みが行われている。そこで、本研究ではふく射環境の異なる場所での人体へかかる熱負荷さらに、人体の温冷感への影響について考察することを目的として、被験者実験を実施した。

2. 被験者実験の方法と評価

環境要素の測定項目は上下と東西南北の6方位の日射量、赤外放射量、気温、相対湿度、風速、黒球温度を測定し、人体の生理量の測定項目として皮膚温(7点)、耳内温度(深部温度)、心拍数をそれぞれ測定した。測定間隔は、環境要素は20秒毎に、風速のみ0.1秒毎に測定し、生理量は20秒毎に測定した。被験者は22~24歳の健康な成人男性を測定対象とした。被験者の衣服として、夏季は白の半袖、半ズボン(clo値:0.30)、冬季はグレーのスウェット(clo値:0.99)を着用させた。皮膚温の代表値としてHardy-Duboisの7点法による平均皮膚温を人体表面の平均皮膚温度として用いた。実験は南向きを前面として立位安静状態を維持し、5分おきに温冷感の申告をさせた。温冷感はASHRAEの温冷感指標の日本語訳に基づき「非常に寒い(-3)」～「中立(±0)」～「非常に暑い(+3)」を線形尺度で記入した。以下に使用した温冷感の申告表をFig.1に示す。全ての被験者実験は同一のプロトコルで行った。被験者は実験開始1時間前に待機

室で待機し、10分前に環境順応と測器取付のため実験場所に移動し、30分間立位安静状態で実験を行った。

被験者実験申告表	実験日	被験者名
経過時間	実験条件	体重 前 _____ g
温冷感	開始時刻	後 _____ g
非常に寒い		非常に暑い
	どちらでもない	

Fig.1 Thermal sensation vote

人体の温熱環境を評価するには、環境要素と人体の生理量等について評価しなければならない。本研究では人体と人体周りの環境との間での熱収支が温冷感につながると考え、人体温冷感指標を構築している。人体の熱収支の因子としては代謝量 M 、機械的仕事量 W 、正味ふく射量 R_{net} 、顕熱損失量 E 、潜熱損失量 C の5つからなる熱的平衡状態においては以下の式が成り立つとしている。

$$M - W = -R_{net} + E + C \quad (1)$$

代謝量は、心拍数と相関があるとされている。そこで本実験では、心拍数を測定し、被験者毎に代謝量を算出した。熱的に非平衡状態のときは、この5つの熱収支の残差が熱負荷として与えられ、環境から人体へ熱が流入する場合を正として人体熱負荷量として定義する。

$$F_{load} = M - W + R_{net} - C - E \quad (2)$$

人体熱負荷量は島崎らによって屋外環境での温冷感との相関が示されており、その有効性が認められている^[1]。従って、被験者実験の評価指標として人体熱負荷量を本研究では用いる。夏季の日射が安定している晴天日、気温 32℃、相対湿度 43%、風速 1.3m/s の時の人体熱負荷の内訳の例を Fig.2 に示す。Fig.2 からふく射輸送が人体熱負荷に与える影響は大きいと言える。

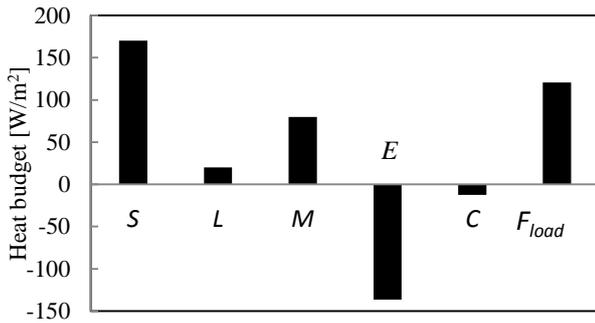


Fig.2 Heat budget of human body
(S: solar radiation, L: infrared radiation)

3. 実験場所

(a) 地表面の日射反射率が異なる場所(屋外)

地表面の日射反射率が異なる場で被験者実験を行った。夏季は地表面がウッドデッキ(日射反射率 $R=0.20$)とタイル面($R=0.31$)の2つの異なる場所で行った。冬季は地表面が防水シート($R=0.10$)の場所とその場所に縦 2.8m, 横 3.6m の白色のシート($R=0.76$)を地表面に敷いた場所で行った。被験者から見たシートの形態係数 $f=0.73$ であった。夏季は 2016/07/28-29, 冬季は 2016/11/30 と 12/02 に被験者実験を行った。被験者は 6 名, 時間帯は 11:00-14:00 で行った。

(b) 地表面の日射反射率が異なる場所(人工気候室)

人工気候室の地表面を白色, 黒色, コンクリートの 3 つの異なる条件で被験者実験を行った。シートの大さは白色, 黒色ともに縦 2.8m, 横 3.6m である。被験者は 4 名である。人工気候室での環境要素として気温 30°C , 相対湿度 50%RH, 風速 0.3m/s, ふく射は人工照明で与えており, 日射束 $880\text{W}/\text{m}^2$, 赤外放射束 $587\text{W}/\text{m}^2$ であった。

(c) 上空の日射を遮蔽した場所(屋外)

日射が直接当たるオープンスペースと樹下で上空からの日射遮った場所で実験を行った。実験を行った日時は, 2013/08/02-03, 08/10-11, 08/13-14, 08/20-21, 08/27-28 で 5 ヶ所行った。時間帯は 11:00~14:00 で被験者は 6 名行った。実験場所の 1 ヶ所を Fig.3 に示す。



Fig.3 Measurement site
(left: sunshine, right: tree cover)

(d) 壁面, 地表面からの赤外放射の異なる場所(屋外)

壁面緑化あるいは低木植栽した場所で被験者実験を行

った。実験場所を Fig.4 に示す。実験の日時 2014/08/04-05, 08/06-07 で行った。時間帯は 11:00~14:00 で被験者は 6 名行った。

Site	Greening	Reference
Wall Greening		
Hedge		

Fig.4 Measurement site

4. 実験結果および考察

(a) 地表面の日射反射率が異なる場所(屋外)

Fig.5 に示すように温冷感と人体熱負荷量で相関が見られる(相関係数 $R^2=0.718$)。次に夏季, 冬季ともに各地表面間での人体熱負荷量の差を Fig.6 に示す。夏季の実験では, ウッドデッキ($R=0.195$)とタイル($R=0.31$)の間には人体熱負荷量の差が平均で $29\text{W}/\text{m}^2$ みられ, 冬季の実験では, 防水シート($R=0.10$)と白色のシート($R=0.76$)の間には $57\text{W}/\text{m}^2$ 差が確認できた。これらより日射反射率の差が大きいと人体熱負荷量の差も大きくなる。また, 高日射反射率の地表面では, 温冷感の申告値が高いことを Fig.7 は示している。

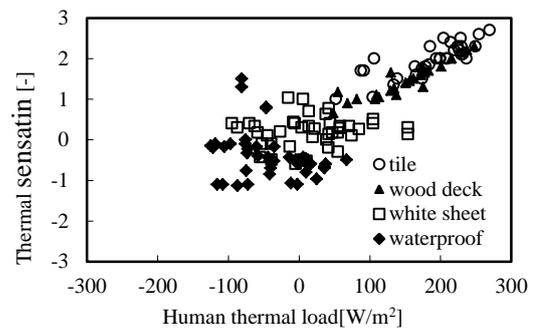


Fig.5 Relation between human thermal load and thermal sensation

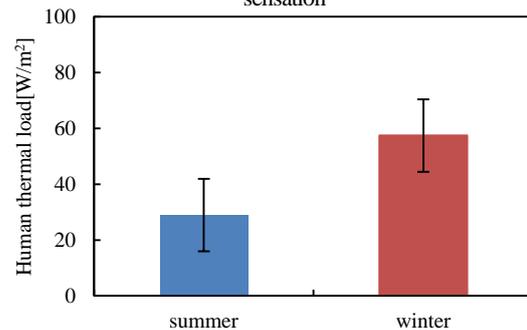


Fig.6 Difference in human thermal load

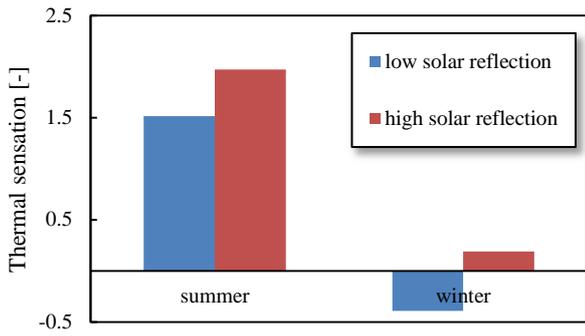


Fig.7 Difference in thermal sensation

(b) 地表面の日射反射率が異なる場所(人工気候室)

各地表面での人体熱負荷量の平均は、Fig.8のように日射反射率の大きい順に人体熱負荷量も大きくなった。また各地表面での人体熱負荷量の平均について t 検定 ($p<0.01$) を行い有意な差が確認された。被験者の主観申告で得られる温冷感の結果を Fig.9 に示す。それぞれの地表面での温冷感の申告値の平均について t 検定を行ったところ、白シートと他の2つの地表面間では有意な差が得られた。しかし、コンクリート面と黒シート間では温冷感の申告値に平均値に差は見られたが有意な差は得られなかった。日射反射率が異なる地表面で日射反射率が大きくなると人体が得る熱量が増加し、それに伴い人体熱負荷量も増加し、その結果人体の温冷感に影響することが確かめられた。Fig.10 は各地表面での日射、赤外放射、正味ふく射の結果を示す。反射日射に大きな差

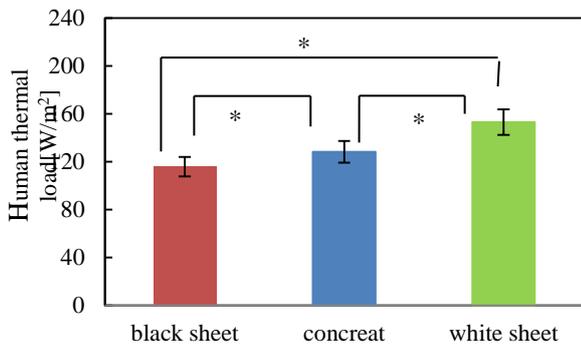


Fig.8 Human thermal load (*:p<0.01)

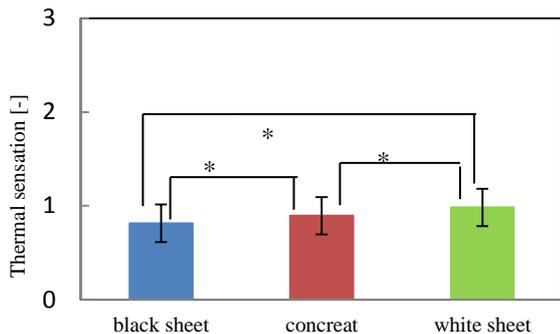


Fig.9 Thermal sensation (*:p<0.01)

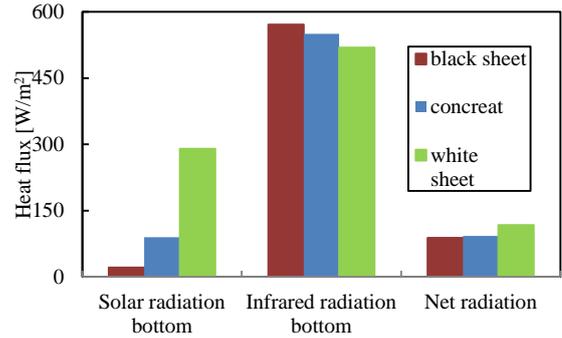


Fig.10 Radiation flux

が出ているのがわかる。地表面からの赤外放射は日射反射率が低いほど、表面温度が上昇し、その値は大きくなる。反射日射の影響が大きく、日射反射率が高いほど正味のふく射が大きくなる。

(c) 上空の日射を遮蔽した場所(屋外)

日射下と樹下での日射量、赤外放射量の比較を Fig.11 に示す。樹下で上からの日射量を低減するとともに、樹林で赤外放射量も低減させていることがわかる。地表面温度の低下の影響である。Fig.12 から温冷感の申告値の平均にも差が出ており、有意な差が得られた。人体熱負荷量と温冷感の相関を Fig.13 に示す(相関係数 $R^2=0.354$)。日射下にいる時、人体熱負荷が大きくなり温冷感の申告値も高くなっている。同じ時刻のときは樹下にいる時の方が、人体にかかる熱負荷は小さい。

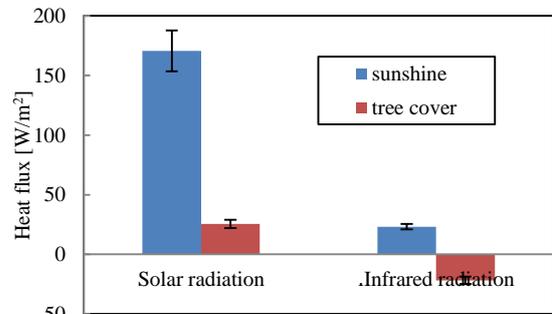


Fig.11 Difference in radiation flux

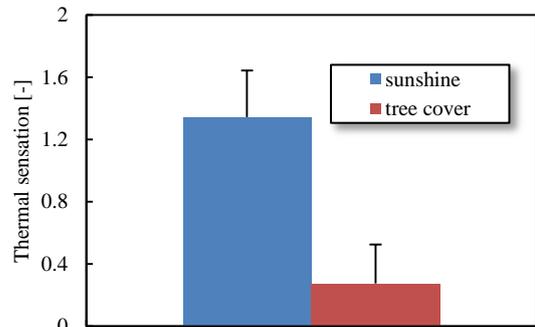


Fig.12 Difference in thermal sensation

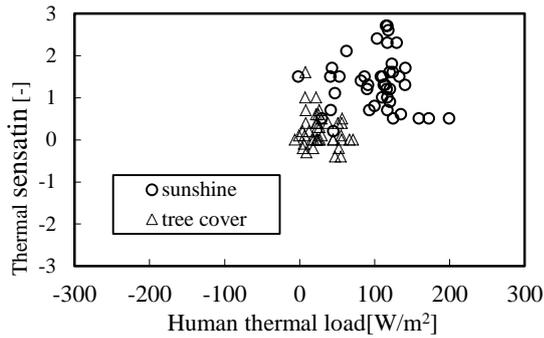


Fig.13 Relation between human thermal load and thermal sensation

(d) 壁面, 地表面からの赤外放射の異なる場所(屋外)
 壁面緑化が施されている場所と施されていない場所での日射量, 赤外放射量を Fig.14 に示す. (c)の実験時に比べ日射量の低減率は小さいが, 赤外放射の低減は確認された. Fig.15 は壁面緑化の場所と壁面緑化を施していない場所, また低木がある場所とない場所での人体熱負荷量の同時刻での差を示している. 緑化の影響によるその差は壁面緑化の場合 19.2W/m^2 , 低木緑化条件は 40.2W/m^2 の差がみられた. 人体熱負荷量と温冷感の相関を Fig.16 に示す($R^2=0.457$).

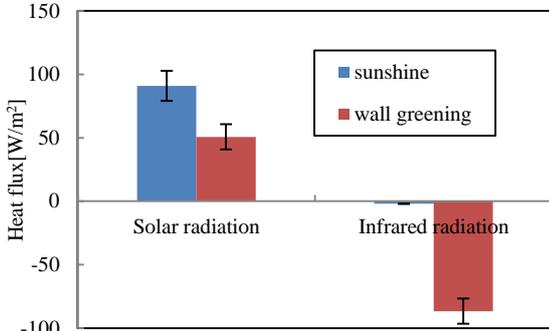


Fig.14 Difference in radiation flux

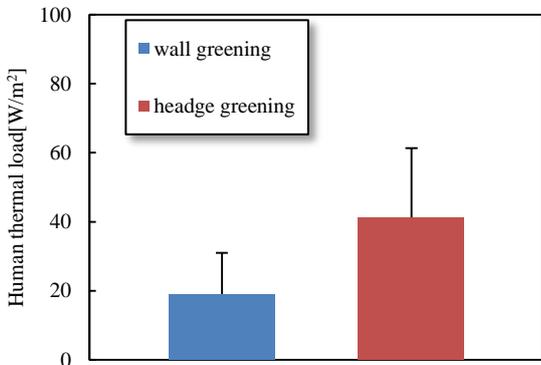


Fig.15 Difference in Human thermal load

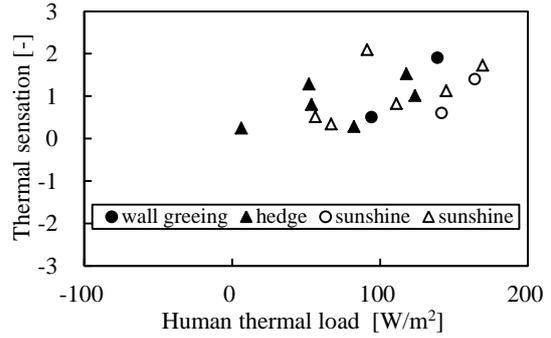


Fig.16 Relation between human thermal load and thermal Sensation

Fig.17 に本研究で得られた全ての人体熱負荷量と温冷感の相関を示す. 相関関係($R^2=0.618$)が得られた. ふく射環境の条件から, 人体熱負荷量, さらに温冷感の予測が可能であることが示された.

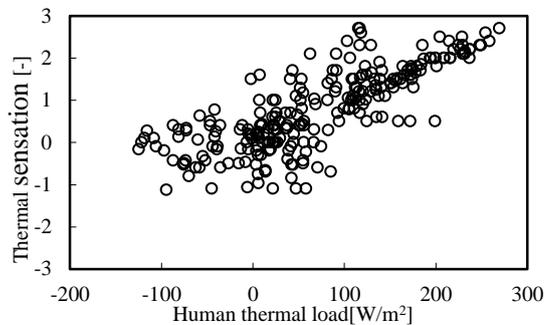


Fig.17 Relation between human thermal load and thermal sensation

5. 結言

本研究では屋外の異なるふく射環境下での人体の温冷感の評価を目的に, 被験者実験を実施した.

- 地表面の日射反射率が高くなると, 人体熱負荷量が増加し, 温冷感にも差が出る事を示した. しかし, 日射反射率の差が小さい時は温冷感の差に優位な差は確認されなかった.
- 樹下にある場所と, ない場所での比較の結果, 日射量が大きく低減され正味のふく射量が小さくなることで, 人体熱負荷も小さくなり, 温冷感の申告値が低くなることを示した. さらに, 樹下にいる時, 赤外放射の低減も確認された.
- 壁面緑化と低木緑化の実験から両条件ともに赤外放射の低減が見られた. それにより人体熱負荷量が小さくなることが示された.

参考文献

1) 島崎康弘ら;「人体熱負荷量に基づく温熱快適性指標の提案」, 日本冷凍空調学会論文集, 26[1], pp.113-120,2009.

粒状多孔質充填層の水分蒸発過程に及ぼす空隙構造の影響

Influence of Void Structure on Moisture Evaporation Process of Granular Porous Packed Bed

○ 森下侑亮(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)

Yusuke MORISHITA*¹ Shinichi KINOSHITA*¹ Atsumasa YOSHIDA*¹

*¹Osaka Prefecture University

In recent year, pavement of a road with water-retentive porous material can be cited as a mitigation measure for the remarkable heat island phenomenon. In order to improve the evaporation performance of the water retentive porous material, it is necessary to establish a method of measuring physical properties and evaluating performance concerning heat and moisture transport. In this study, the heat and moisture transfer characteristics was evaluated and evaluated the evaporation property for the granular porous packed bed of particle size and void structure.

1 緒言

近年, 日本各地の都市化に伴いヒートアイランド現象が顕著となっている。そこで都市域では種々のヒートアイランド対策が進められている。具体的には建物屋上の緑化, 建物屋根面・道路の高反射率化, 道路表面の保水性材料による舗装があげられる。保水性材料の舗装により, 日射エネ材料内部の水分蒸発で吸収させ, 表面温度の上昇を抑制し, 気温の上昇に寄与する顕熱流速を減少させることが期待されている。多孔質材料は保水性に優れているため, タイルや舗道ブロックとしても利用されている。しかしタイルやブロック形状の保水性材料は材料内部の水分が残っているにも関わらず, 乾燥の進行が終了していることが課題である。この課題を解決するために, 粒状の保水性材料が提案されている。

保水性材料に水分を供給するにはコストがかかるため, 材料内部に存在する水分を有効利用する必要がある。そこで粒状にすることで表面積を増やし蒸発性能の向上が見込まれる。

本研究では, 粒径や空隙構造の異なる保水性多孔質材料を対象として, その蒸発性能に対する粒径や空隙構造の影響を, 風速・温度・湿度を制御できる小型風洞を用いて, 乾燥速度・含水率・温度の変化から蒸発性能を評価する。また内部構造の差が熱・物質伝

達特性に与える影響から蒸発特性を評価するため, 透水係数・湿気伝導率・平衡含水率・熱伝導率・比熱の物性値を測定する。同じ試料を対象とした辻本ら²⁾の研究から測定されている透水係数・湿気伝導率・熱伝導率・比熱を参照する。本研究で平衡含水率の評価実験を行った。

2 測定対象の粒状多孔質充填層

本研究において, 球状の表1にある試料の粒径と空隙の最大粒径が異なる粒状多孔質を利用した。これは白信楽粘土を最大粒径の異なる活性炭を重量比10:1で混練したものを異なる粒径の球状または柱状にし, 電気炉で焼成温度を800°Cに設定し試料を焼き, 活性炭を揮発させて作成した。

Table 1: Measurement samples properties

	(a)	(b)	(c)	(d)
Diameter[mm]	15	15	15	3
Pore size[μm]	100	6		100

3 試料の熱・水分移動特性の評価

3.1 平衡含水率測定

平衡含水率とは, 雰囲気の水蒸気を吸放湿し平衡に達したときの蒸発可能な水分の質量, 又は体積と材料の基準乾燥時の質量又は体積との比である。以下の式から算出

される。

$$\varphi_e = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで φ_e :平衡含水率[%], m :絶乾状態の試料の質量[g], m_0 :恒量に達したときの試料の質量[g]である。JIS A 1475 建築材料の平衡含水率測定¹⁾に従い測定を行う。測定には恒温恒湿槽 (ISUZU HPAV-48-20), 電子天秤 (SHIMADZU UW620H)を用いた。また, 試料の乾燥には定温乾燥器 (ASONE DOV-450)を用いた。一般的に同じ相対湿度の雰囲気中でも, 吸湿する場合と放湿する場合とは異なるため, その過程について両方を測定する。表1の試料(a), (b), (c), (d)をそれぞれ恒温恒湿槽に入れた。

【放湿過程】

飽和状態→95%→90%→80%→65%→50%→35%→30%

【吸湿過程】

絶乾状態→30%→35%→50%→65%→80%→90%→95%

この時, 電子天秤は湿度80%以下の環境にのみ対応していたので, 恒温恒湿槽の外に設置し重量測定の度に試料を恒温恒湿槽から取り出し測定を行った。

3.2 結果

それぞれの試料の放湿過程と吸湿過程には放湿過程が上, 吸湿過程が下の経路を通るヒステリシスが見られた。球形15mm, 100 μ m活性炭配合試料の平衡含水率の測定結果を図1および図2に示す。粒径と内部構造の違いで異なる変化は見られず, 平衡含水率に影響しないことが分かった。

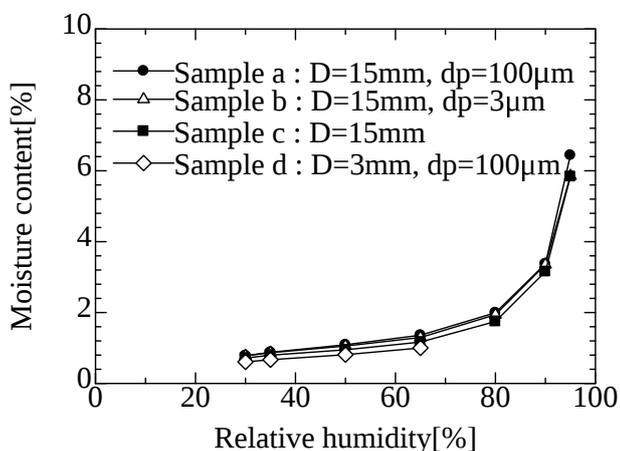


Fig. 1: Moisture release process of samples

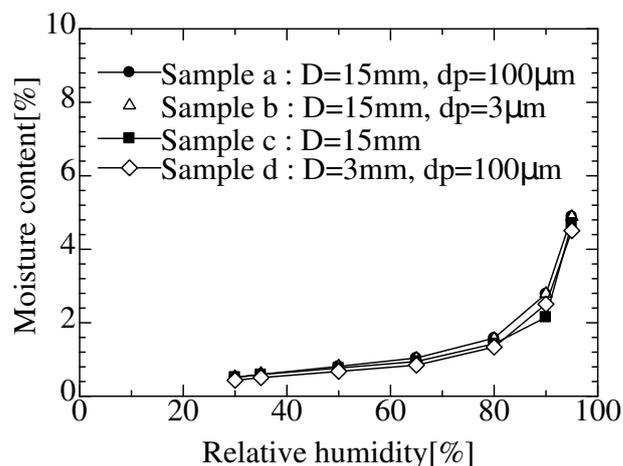


Fig. 2: Moisture absorption process of samples

3.3 その他の熱・水分移動特性

対象試料の辻本ら²⁾の研究で測定された熱・水分移動特性に関する物性値を表2に示す。

Table 2: The measurement conditions

	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Permeability [$\times 10^{-9}$ m/s]	Moisture conductivity [$\times 10^{-10}$ kg/(m·s·Pa)]	Specific heat [J/(kg·K)]
a	$0.021\phi + 0.311$	2.86	6.73	1.84
b	$0.019\phi + 0.287$	2.56	6.8	1.57
c		2.82		
d	$0.021\phi + 0.311$	2.86	6.73	1.84

4 風洞を用いた水分蒸発特性の実験的評価

4.1 実験

4.1.1 実験概要

測定装置の概略を図3, テストセクションの詳細図を図4に示す。右側からヒーターダクト, ノズル, テストセクション, 吸い込みファンである。風洞は下流側に設置された誘引式である。主流部の流路断面は180 \times 80mmの長方形で, 3つの吸い込みファンの出力をファンクションジェネレーターにより制御する。ヒータ部では抵抗が60 Ω の抵抗線を用いて熱源を作成している。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。風速は1.0-7.0[m/s]の範囲で調節することができる。空気温度はヒーターで温度を変化させ試料セクターの表面部の温度をフィードバックすることで調節する。空気の相対湿度は超音波霧化ユニットによって発生させたミストをダクト入口へ吹き込み, 試料セクターの表

面部の湿度をフィードバックすることで調節する。

測定方法は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。初期において試料充填層内部の深さ方向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、ミスト発生量を設定し定常になるまで放置した。試料槽内の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1分とした。

4.1.2 測定条件

測定条件は表3に示す。測定条件は温度30°C、相対湿度50%、風速1.5m/sの条件を基本とし、湿度または風速を増した状態でもそれぞれ測定を行う。測定試料は表1と同じものを使用した。

Table 3: The measurement conditions

Case	Wind speed [m/s]	Temperature [°C]	Humidity[%]
A	2.0	30	50
B	5.0	30	50
C	2.0	40	50

4.2 結果

基本条件でそれぞれの試料での充填層内の温度変化を図5~図7に、含水率変化の遷移を図8に示す。活性炭粒径配合の異なる試料(a)と(b)では定率乾燥期間の違いが見られ、これは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)と(d)でも定率乾燥期間の差異が見られ、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、定率乾燥期間と全体の乾燥が完了するまでの時間が長くかかることがわかる。

風速変化条件での試料(a)の充填層内の温度変化を図9に示す。

基本条件の試料(a)と比較して、全体の乾燥

期間が短いことがわかる。

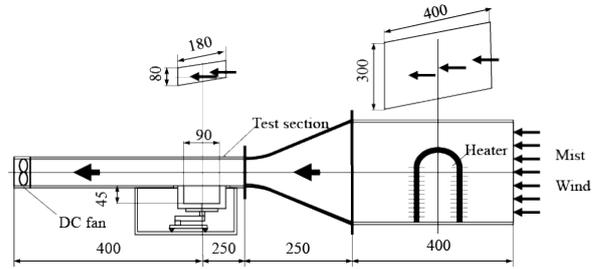


Fig. 3: Schematic of wind channel duct

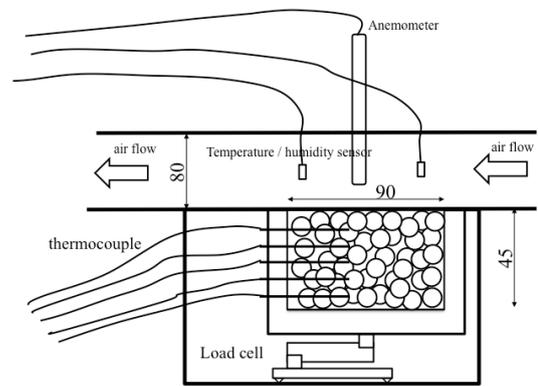


Fig. 4: Test section

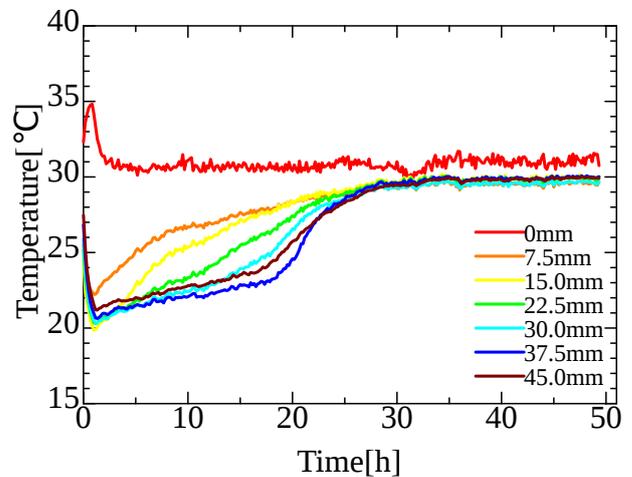


Fig. 5: 100µm carbon mixed sample a temperature transition in basic condition(30°C, 50%, 2.0m/s)

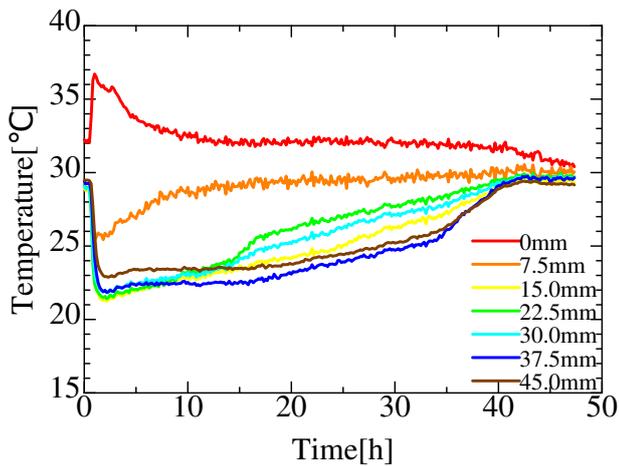


Fig. 6: 6 μm carbon mixed sample b temperature transition in basic condition(30°C, 50%, 2.0m/s)

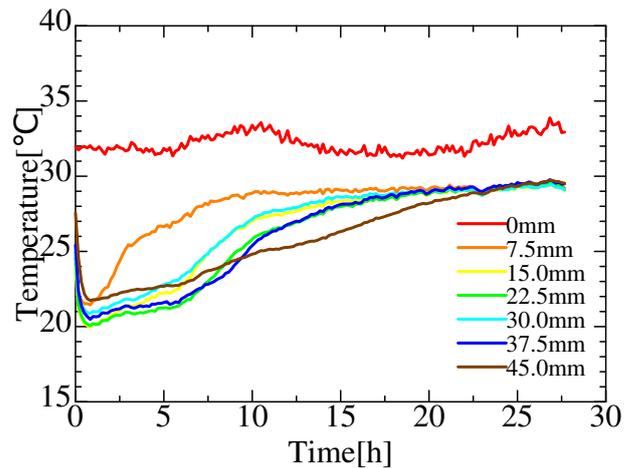


Fig. 9: Moisture content transition in wind change condition(30°C, 50%, 5.0m/s)

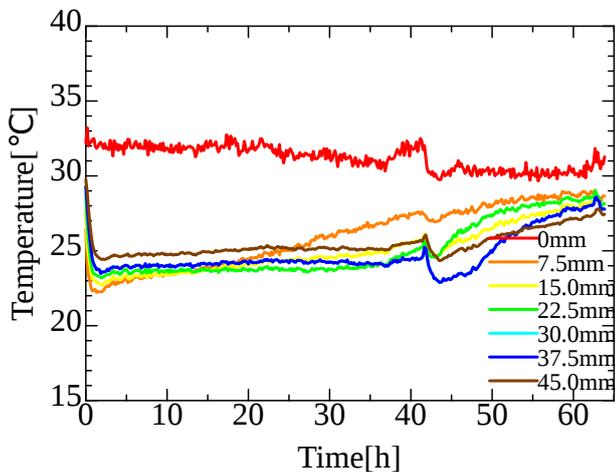


Fig. 7: 100 μm carbon mixed sample d temperature transition in basic condition(30°C, 50%, 2.0m/s)

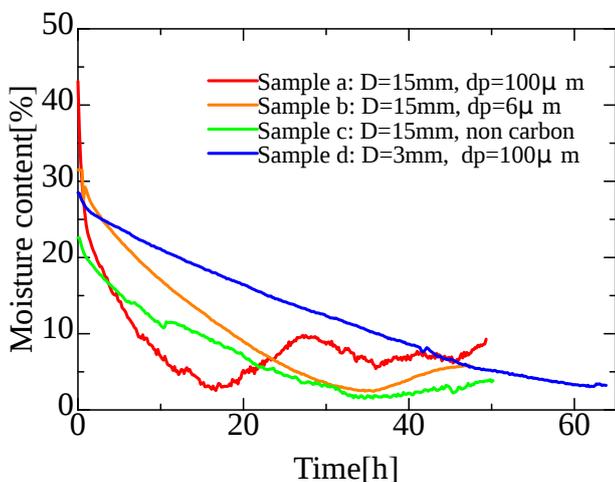


Fig. 8: Moisture content transition in basic condition(30°C, 50%, 2.0m/s)

5 結言

内部構造の違いが保水性粒状多孔質の物性値および蒸発特性に及ぼす影響を評価するため測定と実験を行い、以下の結果を得た。

- ・粒径や内部構造が試料の平衡含水率に影響していない。

一定の風速の条件下においての蒸発性能を評価するために風洞を用いた乾燥実験を粒状多孔質充填層に対して行い以下の結果を得た。

- ・試料の粒径や内部構造の細かさに関わらず、残留含水量が平衡含水率と比べて高い値つてとどまっていることがわかった。

風洞内に一定の温度・湿度で一定の風速が流れている条件で、細孔平均直径の異なる試料を比較した場合、内部構造がより細かい方が定率乾燥期間や乾燥終了までの時間が長くなることがわかった。さらに粒径が異なる場合でも同じ傾向が見られた。

- ・風速を増加させた場合、定率乾燥期間および減率乾燥期間ともに短くなり、全体の乾燥時間が短くなった。風速が熱伝達に対して影響し、境界層厚さがさがり温度勾配が大きくなり乾燥速度が大きくなるためだと考えられる。

参考文献

- 1) JIS A 1476 建築材料の含水率測定方法。
- 2) 辻本, 木下, 吉田粒状多孔質充填層の水分蒸発過程の実験的評価, 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 A86, 2015

ヒートアイランド対策の優先的導入の観点に基づく 街区特性と街路空間の放射熱環境の関係分析

Analysis of the relation between urban block characteristics and radiant environment in street canyon based on the countermeasure priority for urban heat island

○木山 裕貴 (神戸大学) 竹林 英樹 (神戸大学)

Yuki KIYAMA*¹ Hideki TAKEBAYASHI*¹

*¹Kobe University

In this study, in order to effectively introduce heat island countermeasure technology for ground surface covering, the countermeasure priority is examined based on the radiant environment in street canyon. The boundary of countermeasure priority is set on 80% of the amount of maximum daily integrated solar radiation gain on summer sunny day. If the building height is H , the boundary of countermeasure priority is located on about $H/3$ from the southern building wall, $2H/3$ from the eastern and western wall with a gradient of about $H/4$ from the south end.

1. はじめに

ヒートアイランド対策に関する様々な研究が行われている。屋上緑化、緑地の整備、保水性建材、高反射率塗料などの普及が期待されるが、それらを効果的に導入するには、優先的に導入すべき箇所を特定する必要がある。村田ら¹⁾は、対象道路と周辺建物の特性（道路方向、道路幅、建物高さ）に着目して、街路空間の放射熱環境の特徴を評価した。

本研究は、地表面被覆に関するヒートアイランド対策技術を効果的に導入するために、放射熱環境の観点から対策優先箇所を特定する方法を明らかにすることを目的とする。ヒートアイランド対策技術導入の観点からは、日向となる時間が長く正味日射受熱量の大きい地点が優先的に導入すべき箇所となる。本研究では、夏季晴天日の最大日積算日射受熱量の80%以上の日射量を受ける地表面を優先的に対策技術を導入すべき箇所として考察した。

2. 対策優先箇所特定のための放射熱環境の分析

2.1 概要

単純形状モデルを用いて太陽の情報（太陽方位、太陽高度）から建物周辺の日積算日射受熱量分布を計算した。建物高さを H 、南北に向いた壁面の幅を X 、東西に向いた壁面の幅を Y としてモデルを作成した(図1)。屋外の高温化による悪影響が懸念される夏期晴天日を対象とし、2007年8月5日を選定した。場所は大阪市の中心部を想定した。

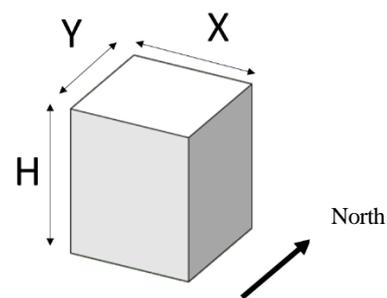


Figure1. Simple building model

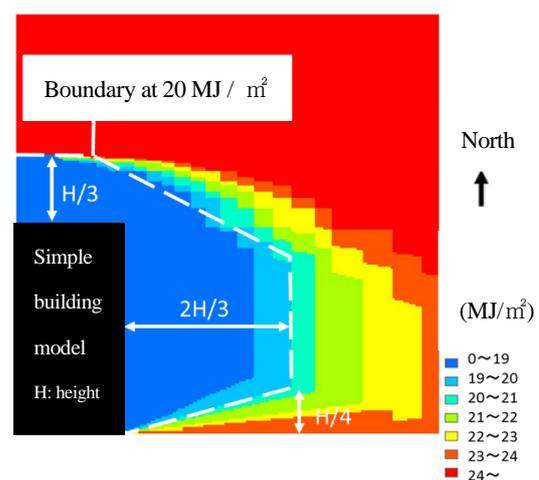


Figure2. Distribution of daily integrated solar radiation gain around simple building model

2.2 計算結果と考察

単純形状モデル周辺の日積算日射受熱量分布を図 2 に示す. 図の左右(東西)が対称となったため西側半分は割愛した. 全天日射量に占める直達日射量の割合が大きいため, 建物による直達日射の遮蔽の影響が支配的である. 15 分毎の離散値を積算したため階段状になっている部分がある. 建物近傍で日射遮蔽の時間が長く, 日積算日射受熱量が小さい. 20MJ/m²の境界線は, 建物壁面から北側約 H/3, 東側約 2H/3 に位置し, 東側では建物南端から約 H/4 の箇所に向けて引かれる.

3. 方位別の日積算日射受熱量分布の考察

3.1 東西道路

太陽方位と太陽高度より, 時刻別の南側建物壁面からの日陰距離 y [m] は式(1)で表される.

$$y = H \cdot \sin A \cdot \cot \beta \quad (1)$$

ここで, H は建物高さ [m], A は南側建物壁面と太陽の角度 [°], β は太陽高度 [°] であり, A は太陽方位 α [°] を用いて式(2)で表される.

$$A = \alpha - 90 \quad (90 < \alpha \leq 180), \quad 270 - \alpha \quad (180 < \alpha < 270) \quad (2)$$

東西道路の南側建物壁面からの日陰距離を図 3 に示す. 11 時から 13 時の間に日陰距離が約 H/3 となる. この間の日射受熱量は日積算値の約 20% に相当し, 東西道路では 11 時から 13 時に日射を受けない南側建物壁面から H/3 の範囲の対策優先度が低い.

実際には南側建物の間から道路面に日射が入射するためその影響を考察する. 11 時及び 13 時の太陽方位角は約 45° であり, 図 4 に示す通り, 南側建物の端から内側に H/3 入った地点で建物から H/3 の地点に日射が到達する. 逆に, 建物の幅 X が 2H/3 ($H/3 + H/3$) より小さいと日陰は壁面から H/3 の地点にまで到達しない.

3.2 南北道路

太陽方位と太陽高度より, 時刻別の東側, 西側建物壁面からの日陰距離 x [m] は式(3)で表される.

$$x = H \cdot \cos B \cdot \cot \beta \quad (3)$$

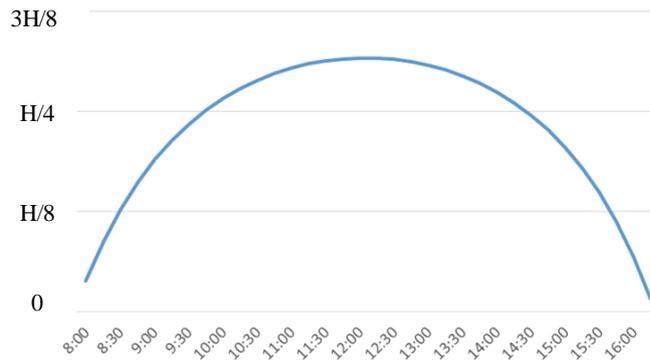


Figure3. Shaded distance from the southern building wall on east-west road

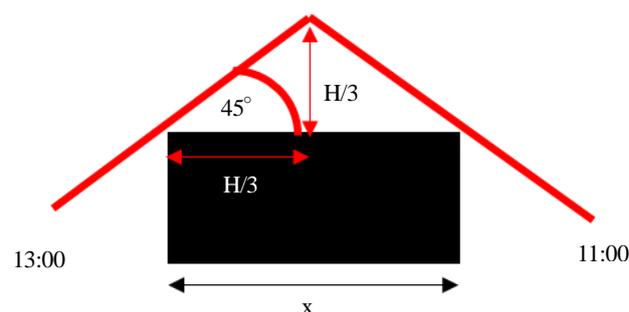


Figure4. Solar azimuth at 11:00 and 13:00 on east-west road

ここで, B は太陽方位 α を用いて式(4)で表される.

$$B = \alpha \quad (\alpha < 90), \quad \alpha - 90 \quad (90 \leq \alpha < 180), \quad 270 - \alpha \quad (180 < \alpha < 270), \quad 360 - \alpha \quad (270 \leq \alpha) \quad (4)$$

南北道路の東側, 西側建物壁面からの日陰距離を図 5 に示す. 西側建物による日陰の距離は 14 時 15~30 分に約 2H/3 となる. 14 時 15~30 分以降の日射受熱量は日積算値の約 20% に相当し, 式(1)の A を B に置き換えると 14 時 15~30 分における建物南端からの日陰距離は約 H/4 となる. 従って, 14 時 15~30 分以降に日射を受けない建物壁面から 2H/3 の範囲で建物南端から H/4 以上離れた領域の対策優先度が低い. 12 時を境にほぼ対称のため東側建物による日陰についても同様に壁面から 2H/3 の範囲で建物南端から H/4 以上離れた領域の対策優先度が低い.

南北道路においても建物の間から道路面に日射の影響を考察する. 太陽方位角は 16 時 30 分頃に約 270° (西) になり, 日没時刻の 19 時頃には約 290° になる. 図 6 に示す通り, 建物北端から内側に

約 $H/4$ 入った地点で、壁面から $2H/3$ の地点に日射が到達する。逆に、建物の幅 Y が $H/2$ ($H/4+H/4$) より小さいと日陰は壁面から $2H/3$ の地点にまで到達しない。

3.3 斜め道路

単純形状モデル ($X=Y=H$) を 45° 回転させた計算結果を図7に示す。建物の北側には対策優先度の低い領域は生じない。建物の東側、西側では任意の壁面から $2H/3$ で北側に $H/4$ 以上進んだ地点までの対策優先度が低い。 45° 回転させた場合には建物の北側には対策優先度の低い領域が存在しないが、傾きが小さくなるほど東西道路の場合の $H/3$ に近づく。

以上より、道路の方位によらず壁面の任意の点から東西方向に $2H/3$ 、北方向に $H/4$ 進んだ地点に対策優先度の境界線が位置する。その傾きは約 23° であり、道路の方位が 23° より小さい場合は東西道路と同様に扱うことが出来る。傾きが大きくなるほど北側の対策優先度の低い領域は小さくなり、 45° になると生じない。

4. 実在街路での検討

4.1 対象領域と計算条件

建物高さにばらつきがあり、道路幅が極端に狭くない東西道路、南北道路、斜め道路を大阪市内より選定した。いずれも道路幅は約 $30m$ である。メッシュ間隔は水平方向 $1m$ 、鉛直方向 $3.5m$ とした。凡例を図8に示す。日射量解析で優先度が高く、指標に基づく場合に低い場合を赤（危険な判定間違い）、その逆の場合を青（安全な判定間違い）で表現した。

4.2 東西道路

指標と日射量解析に基づく対策優先度の分布の差を図9に示す。一部差が生じているものの全体的にはよく一致している。

4.3 南北道路

指標と日射量解析に基づく対策優先度の分布の差を図10に示す。特に建物同士が接する地点付近に差が生じている。指標に基づく場合に建物の角の部分の影響を適切に表現できないことが原因であると考えられる。メッシュサイズによる影響も確認される。以上の点に留意すれば指標に基づく簡易な方法でも対策優先度の把握は可能である。

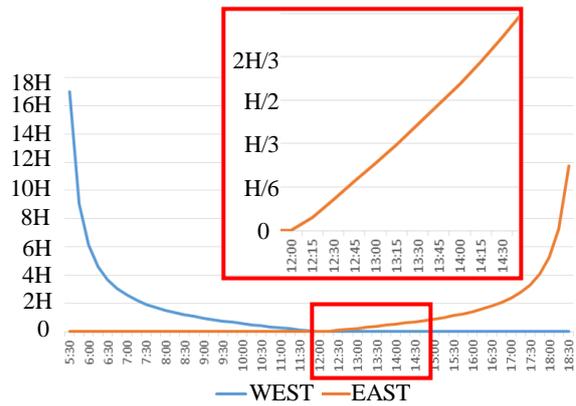


Figure5. Shaded distance from the eastern and western building wall on north-south road

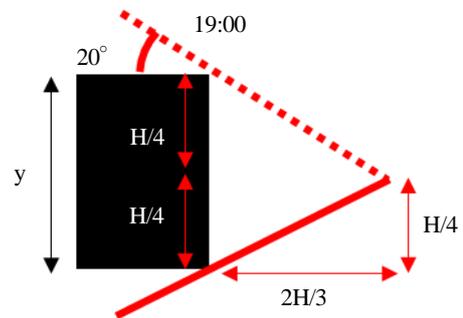


Figure6. Solar azimuth at 19:00 on north-south road

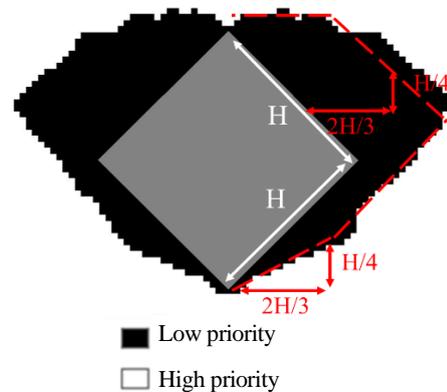


Figure7. Countermeasure priority around simple building model ($\theta = 45^\circ$)

Consistency of countermeasure priority		Rank
□	Match(High)	1~2
■	Miss(Safe)	3~4
■	Miss(Dangerous)	5~7
■	Match(Low)	8~11

Figure8. Legend of Figures 9 to 11

4.4 斜め道路

指標と日射量解析に基づく対策優先度の分布の差を図 11 に示す。道路西側で 1~2 メッシュずつ差が生じている。平行道路に比べて差が生じている部分が多い理由は、幾つかの建物による日射遮蔽の影響を複合的に受けるためである。

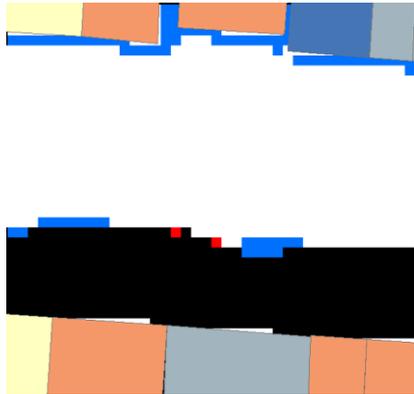


Figure9. Consistency of countermeasure priority on east-west road

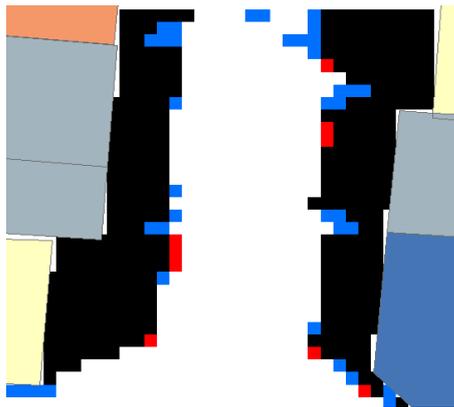


Figure10. Consistency of countermeasure priority on north-south road

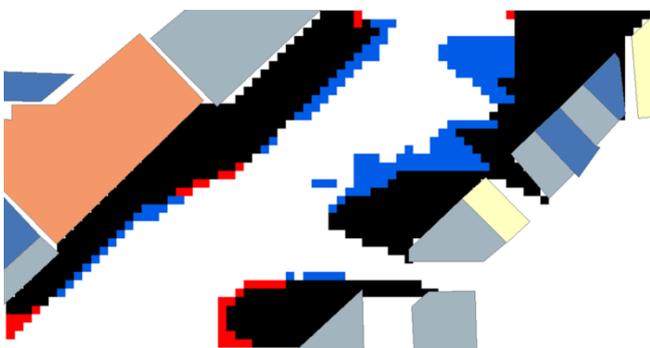


Figure11. Consistency of countermeasure priority on oblique road

5. 結論

建物高さを H とすると、東西南北面に正対する建物の場合に、対策優先度の低い範囲は、北側壁面から $H/3$ 、東西壁面から $2H/3$ 、南端から $H/4$ で表される (図 12)。この範囲は、建物の幅が東西方向に $2H/3$ 以下、南北方向に $H/2$ 以下の建物では狭くなる。東西南北面に正対しない建物の場合は、図 13 に示される通り、北側に対策優先度の低い範囲は生じず、東側、西側では任意の壁面から $2H/3$ で北側に $H/4$ 以上進んだ地点までの対策優先度が低い。

実在街路においても建物の隅付近で若干の誤差が生じるが、この指標による簡易な判定が適応できる。特に、斜め方向の道路では、幾つかの建物による日射遮蔽の影響を複合的に受けることが原因で誤差の生じる箇所があった。

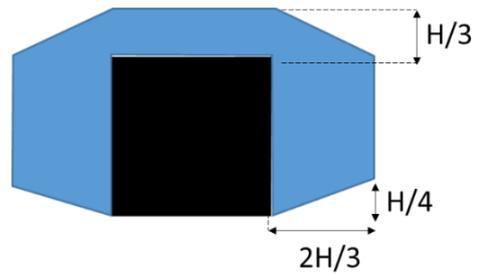


Figure12. Low countermeasure priority around single building model in case the building faces east, west, north and south

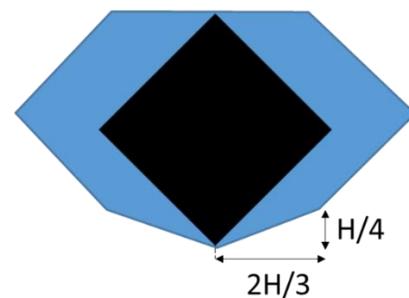


Figure13. Low countermeasure priority around single building model in case the building does not face east, west, north and south

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H04464 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 村田知之, ヒートアイランド対策の適所導入を目指した屋外空間の放射熱環境の解析, 神戸大学修士論文, (2011)