A-25

都市型病院の室内環境・エネルギー性能の検証・評価
（第 7 報）竣工後 3 年間における熱源及び加湿システムの性能評価
Verification and Evaluation of Indoor Environment and Energy Performance in Urban Hospital
Part 7: Evaluation of Heat Source System and Humidification System Performance for 3 years after Starting Operation

○髙 橋　直 樹（日建設計総合研究所）　井 野　邦 子（関西電力）
松 岡　紗矢佳（関西電力）　田 尻　文 生（関電エネルギーソリューション）
丹 羽　英 治（日建設計総合研究所）　田 中　英 紀（名古屋大学）

Naoki TAKAHASHI*1　Kuniko INO*2　Sayaka MATSUOKA*2
Fumio TAJIRI*3　Hideharu NIWA*1　Hideki TANAKA*4
*1 NIKKEN SEKKEI Research Institute　*2 The Kansai Electric Power Co., Inc.
*3 Kanden Energy Solution Co., Inc.　*4 Nagoya University

This study aims at the energy conservation of K hospital in Osaka, which is planned to reduce environmental load and enrich the quality of cure environment. This paper shows the operative situation and performance evaluation of the heat source system and humidification system for 3 years after starting operation.

はじめに

K 病院は、「地球環境への“負荷”を低減し、治癒環境の“質”を向上させる都市型病院」をコンセプトに、旧病院から建替えが行われた。

本研究は、この K 病院を対象に、運用段階における省エネルギー化を推進することを目的とし、室内環境およびエネルギー性能の検証・評価を実施してきた[1)2)]。本報では、開院後 3 年間の熱源システム及び加湿システムの運用状況および性能評価結果について報告する。

1．熱源システムの性能評価

1.1　熱源システムの概要

K 病院では、高層部分となる病棟ゾーン（9～17F）は、外気処理も含めて空冷パッケージエアコンを利用した個別分散熱源方式とし、低層の診察ゾーン（B1～6F）は中央熱源方式を採用している。

Tab.1 および Fig.1 に、中央熱源方式の熱源機器リストおよび熱源系統図を示す。冷水・温水用熱源として、空冷ヒートポンプチラー（AHP）と地中熱ヒートポンプチラー（WHP）、冷水専用熱源としてインバータスクリューチラー（SR）で構成されている。地下ピットを利用した冷温水蓄熱槽（CH-T、1,100 m³）により、AHP および WHP の冷水あるいは温水を蓄熱する。

基本的な熱源稼働として、夏季冷房では、SR をベース機として運転しつつ、AHP が冷水蓄熱運転を行い、HEX により冷水放熱する。冬季暖房では、AHP が温水蓄熱運転を行い、HEX により温水放熱を行う。

Table.1 List of heat source equipment

No.		Cooling	Heating	Unit
AHP-601	Thermal storage Non-storage	420 kW 447 kW	308 kW 309 kW	1set
AHP-602	Thermal storage Non-storage	837 kW 893 kW	656 kW 659 kW	1set
SR-B101		520 kW	-	1
WHP-B101		39 kW	45 kW	1
HEX-B101		408 kW	338 kW	1
HEX-B102		816 kW	675 kW	1
HEX-B103		1,300 kW	1,300 kW	2
CH-T		1,100m³		1

AHP: Air source heat pump chiller
SR: Water source screw chiller
WHP: Ground source heat pump chiller
HEX: Heat exchanger
CH-T: Chilled and hot water tank

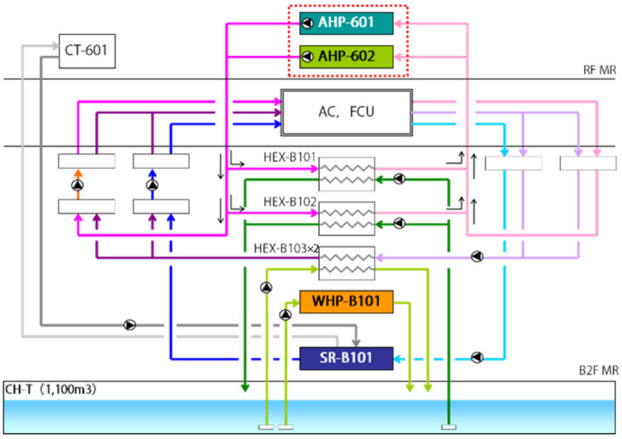


Figure.1　Heating and cooling system diagram

1.2　熱源システムの運転状況

Fig.2 に開院後 3 年間の月別生成熱量と平均外気温度の比較を示す。本病院は建て替えのため、2013 年 5 月にⅠ期部分が、2015 年 2 月にⅡ期が開院した。3 年間を比較すると、1 年目と比較して 2 年目以降の冷熱負荷が大きく減少していることがわかる。また、Ⅱ期開院後の 3 年目においても、負荷の大きな増加は見られなかった。

Fig.3 に開院後 3 年間の年間生成熱量の比較を示す。冷熱、温熱負荷とも 2 年目以降は減少している。運用開始後の省エネへの取り組みとして、室内設定温度の緩和や空調運転時間短縮の効果と考えられる。

1.3　熱源システムの運転実績

Fig.4 に開院後 3 年間の月別平均の熱源単体 COP の推移を示す。SR は、2 年目以降に中間期や冬季の COP が大幅に向上している。これは冷水供給温度の緩和や冷却水下限設定値の変更の効果である。AHP の夏季の冷房 COP および冬季の暖房 COP については、3 年間で大きな違いは見られなかった。

Fig.5 に年間移動平均熱源単体 COP の推移を示す。SR は運用条件の変更により、当初と比べて COP が 15%向上した。AHP は、開院後から直近まで同程度であった。

1.4　熱源システムの性能評価

AHP-602 の暖房運転について、LCEM モデルを用いて実データを評価した。Fig.6 に外気温度と熱源単体 COP の比較を示す。実データは 2016 年のほうが改善している。2014 年 11 月に実施した圧縮機と室外機ファンの制御変更の効果と考えられる。

1.5　運用改善効果の検証評価

LCEM モデルを用いて、冷却水下限設定値を変更した効果を検証評価した。ケース 1 を当初設定による基準とし、SR の冷却水下限温度設定を 25℃から 16℃に変更した場合をケース 2 とし、2015 年の毎時の実測値を与条件として冷熱のシミュレーションを行った。Fig.7 に熱源関連の年間電力量と熱源単体 COP の比較を示す。ケース 2 の年間電力量は、ケース 1 比にて全体で 3.4%減、SR 単体では 14%減となった。また熱源単体 COP は、ケース 1 比で 16%向上となり、Fig.5 で示した実運転状況が所定の改善効果を発揮していることを確認した。

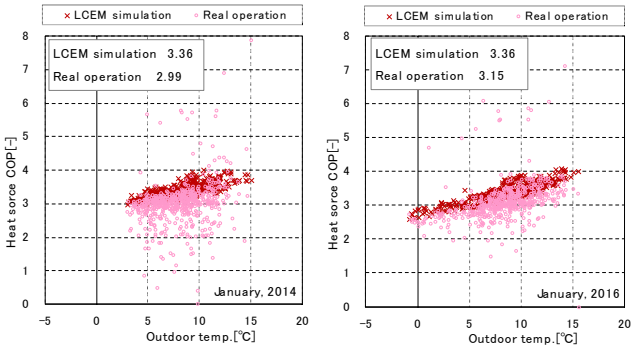


Figure.6　Comparison of outdoor temp. and heat source COP (AHP-602 Heating)

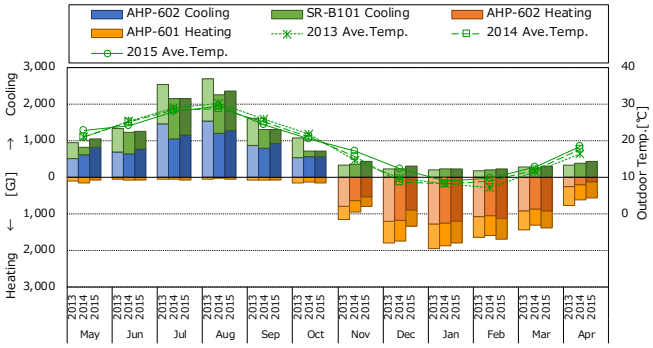


Figure.2　Comparison of product heat amount and outdoor temp.

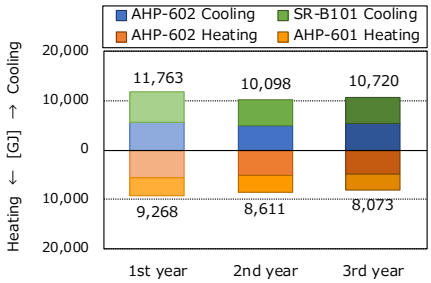


Figure.3　Comparison of annual product heat amount

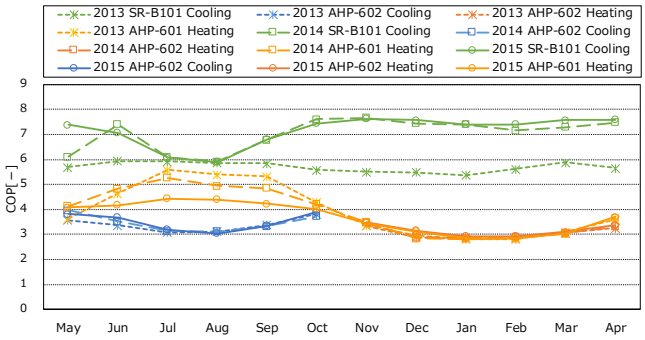


Figure.4　Comparison of heat source COP

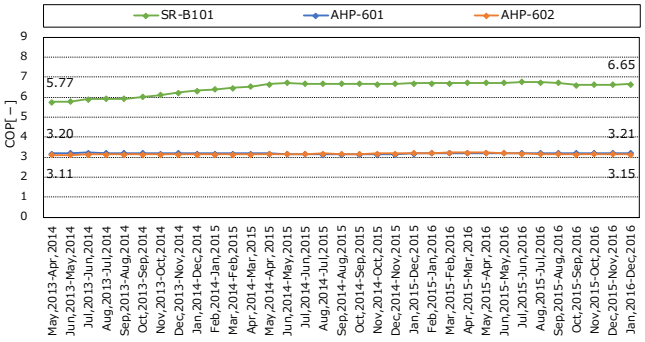


Figure.5　Annual moving heat source COP

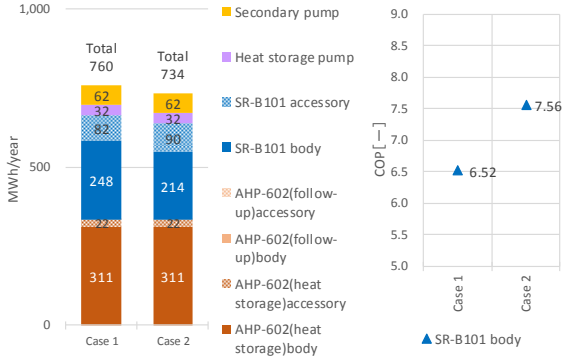


Figure.7　Comparison of annual electricity consumption and heat source COP (SR-B101)

2．加湿システムの性能評価

2.1　加湿システムの概要

一般的に病院施設における空調設備のエネルギー消費は他用途と比べて大きいが、その理由の一つに蒸気利用量が多いことがあげられる。これは蒸気生成時の機器効率の低さ、供給時の熱損失が大きいことが関係していると考えられる。

本病院では、この点に着目し、二次側空調システムでほぼ全面的（全体加湿量の96%）に気化式加湿器を採用し、建物内で蒸気を利用する用途をICU等に限定して蒸気配管の熱損失低減に配慮した計画とした。

2.2　評価対象の概要

Tab.2に評価対象とした外気処理空調機系統、Fig.8に空調機の模式図を示す。対象は、加湿方式の異なる次の3系統とした。

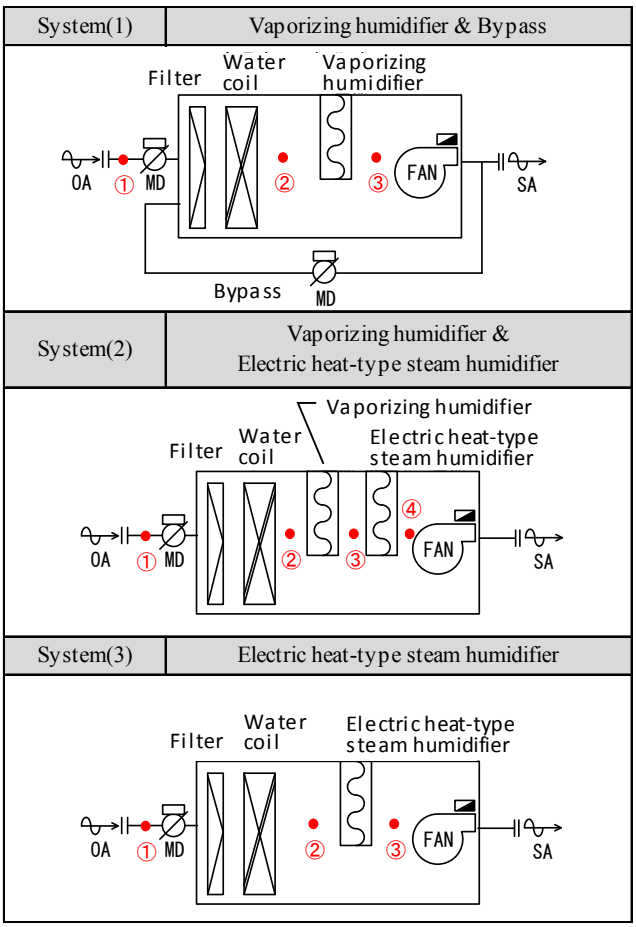
加湿方式(1)【System(1)】の気化式加湿器＋空調機バイパスは、空調機からの給気の一部を再度、空調機内を通過させて加湿を行う。加湿方式(2)【System(2)】の電熱式蒸気加湿器＋気化式加湿器併用は、気化式加湿器でベース運転を行い、不足分を電熱式蒸気加湿器で補う。加湿方式(3)【System(3)】は電熱式蒸気加湿器のみによって加湿を行う方式である。

2.3　外気処理エネルギー効率の定義

Tab.3に外気処理エネルギー効率の算出方法を示す。消費エネルギーは空調機コイルにて計測した積算熱量にシステム COP の逆数を乗じることによって熱源の温熱生成及び温水の搬送に係るエネルギーを評価した。電熱式蒸気加湿器を採用した加湿方式(2)、(3)については加湿器の消費電力量をコイルでの消費エネルギーに加算した。外気処理負荷は外気エンタルピーと空調機出口空気のエンタルピーの差に空調風量を乗じることで算出した。

Table.2 Subject of evaluation for outdoor air handling unit

	System	No.	Type of AHU	Air volume (m3/h)	Systematic name
(1)	Vaporizing humidifier & Bypass	AC-0103	Compact type AHU	4,500	Radiation room
(2)	Vaporizing humidifier & Electric heat-type steam humidifier	AC-0601	Compact type AHU	3,800	Operating room
(3)	Electric heat-type steam humidifier	AC-0602	Compact type AHU	3,000	ICU



※The numbers in this figure support with numbers in Table 3.

Figure.8　Schema of outdoor air handling unit

Table.3 Definition of outdoor air processing energy efficiency

	Sign	(1) Vaporizing humidifier & Bypass			(2) Vaporizing humidifier & Electric heat-type steam humidifier			(3) Electric heat-type steam humidifier		
1. State point in the air diagram	-	①Entrance of water coil ②Exit of water coil ③Exit of humidifier			①Entrance of water coil ②Exit of water coil ③Exit of Vaporizing humidifier ④Exit of steam humidifier			①Entrance of water coil ②Exit of water coil ③Exit of steam humidifier		
2. Energy consumed	C	①→②	$Q_c \times \frac{1}{COP}$	[MJ]	①→②	$Q_c \times \frac{1}{COP}$	[MJ]	①→②	$Q_c \times \frac{1}{COP}$	[MJ]
		②→③	0	[MJ]	②→③	0	[MJ]	②→③	$E_{hu} \times 3.6$	[MJ]
					③→④	$E_{hu} \times 3.6$	[MJ]			
		合計	$Q_c \times \frac{1}{COP}$	[MJ]	合計	$Q_c \times \frac{1}{COP} + E_{hu} \times 3.6$	[MJ]	合計	$Q_c \times \frac{1}{COP} + E_{hu} \times 3.6$	[MJ]
3. Outdoor air processing load	L	①→③	$\rho \times V \times (h_1 - h_2)$	[MJ]	①→④	$\rho \times V \times (h_1 - h_2)$	[MJ]	①→③	$\rho \times V \times (h_1 - h_2)$	[MJ]
4. Outdoor air processing energy efficiency	A		L/C	[-]		L/C	[-]		L/C	[-]

※COP:System COP[-], Qc:Load of water coil[MJ], Ehu:Power consumption of Electric heat-type steam humidifier[kWh], h1:Enthalpy of AHU exit[KJ/kg(DA)], h2:Enthalpy of AHU entrance[KJ/kg(DA)], V:air volume[m3], ρ:Air density[kg(DA)/m3]

2.4　加湿システムの性能評価

Fig.9 に開院後 1 シーズン目の 2014 年 1 月、Fig.10 に 3 シーズン目の 2016 年 1 月における外気処理エネルギー効率の分布を示す。外気処理エネルギー効率の期間平均値は、両期間とも加湿方式(1)が最大、加湿方式(3)が最小となった。本病院の場合、熱源システム COP（2014 年 1 月：2.82、2016 年 1 月：2.93）が比較的高いことから、電熱式蒸気加湿器よりも気化式加湿器のほうが外気処理エネルギー効率が高くなっているものと考えられる。

Fig.11 に加湿方式(1)、Fig.12 に加湿方式(3)に関する 2014 年と 2016 年の外気処理エネルギー効率分布の比較を示す。両年で空調機出入口エンタルピー差は大きく変わらないが、加湿方式(1)の外気処理エネルギー効率の向上が目立つ。これは熱源システム COP の差による影響が大きいものと考えられる。

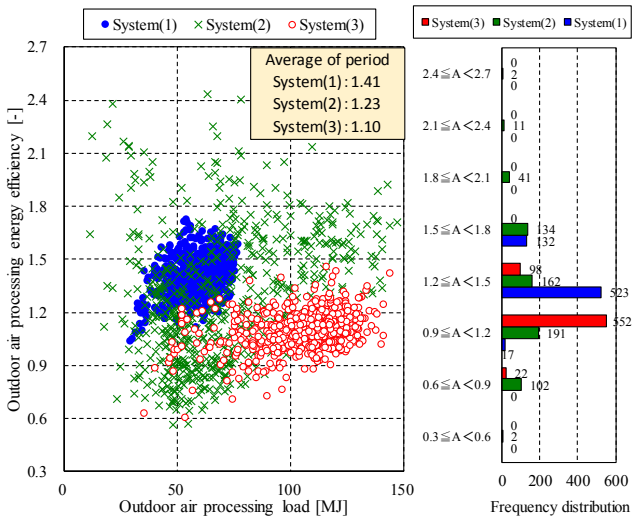


Figure.9　Distribution of outdoor air processing energy efficiency (January 2014)

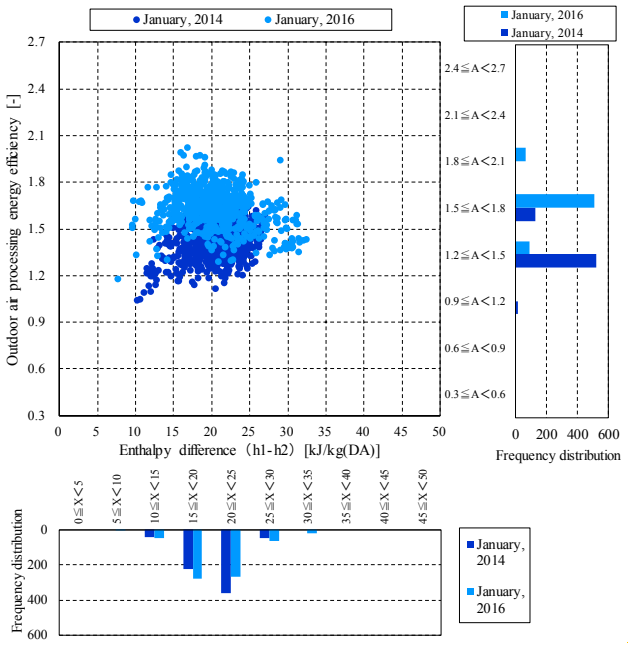


Figure.11　Comparison of distribution of outdoor air processing energy efficiency (System(1))

まとめ

熱源システムについては、運用条件の変更により SR の COP が向上するとともに、AHP の COP は当初の性能を維持していることを確認した。

加湿システムについては、本病院の場合、熱源システム COP が比較的高いことから、電熱式蒸気加湿器よりも気化式加湿器のほうが外気処理エネルギー効率が高いことを確認した。

参 考 文 献

1）熊田・高橋他：都市型病院の室内環境・エネルギー性能の検証・評価(第 1 報～第 6 報)，空気調和･衛生工学会近畿支部研究発表会論文集，2014. 3～2016. 3

2）熊田・進藤・高橋他：次世代都市型病院の室内環境・エネルギー性能の検証・評価研究（第 1 報～第 13 報），空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2013. 9～2016. 8

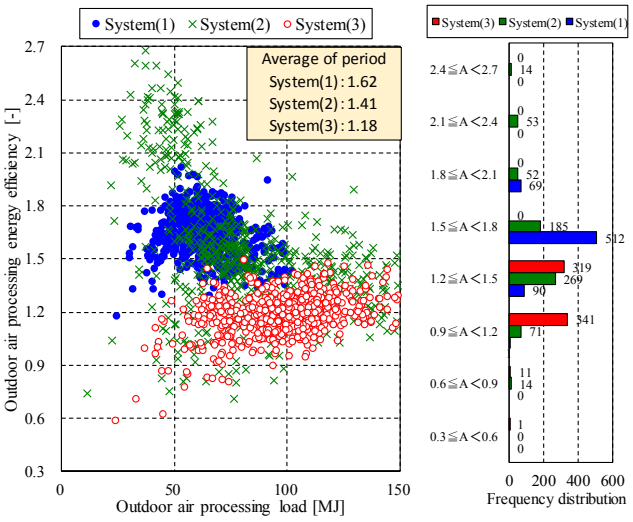


Figure.10　Distribution of outdoor air processing energy efficiency (January 2016)

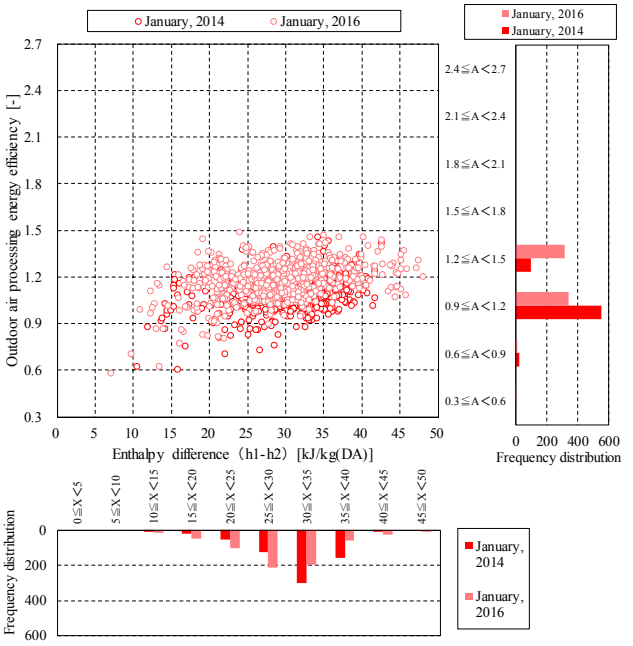


Figure.12　Comparison of distribution of outdoor air processing energy efficiency (System(3))

都市型病院の室内環境・エネルギー性能の検証・評価
（第 8 報）竣工後 3 シーズンにおける地中熱ヒートポンプチラーの長期的性能評価

Verification and Evaluation of Indoor Environment and Energy Performance in Urban Hospital
Part 8: Longtime Performance Evaluation of Ground Source Heat Pump System in Three Seasons after Completion

○金 子　亮 平（関西電力）　　井 野　邦 子（関西電力）
丹 羽　英 治（日建設計総合研究所）　　高 橋　直 樹（日建設計総合研究所）
尹　奎 英（名古屋市立大学）

Ryohei KANEKO*1　Kuniko INO *1　Hideharu NIWA *2
Naoki TAKAHASHI *2　Gyu-young YOON *3
*1 The Kansai Electric Power Co., Inc.　*2 NIKKEN SEKKEI Research Institute
*3 Nagoya City University

This study aims at the energy conservation of K hospital in Osaka, which is planned to reduce environmental load and enrich the quality of cure environment. This paper shows the longtime performance evaluation of ground source heat pump system in three seasons after the completion of the building, and also reports the comparison result of COP based on the operation time of ground source heat pump system.

はじめに

K 病院は、「地球環境への“負荷”を低減し、治癒環境の“質”を向上させる都市型病院」をコンセプトに、旧病院から建替えが行われた。

本研究は、この K 病院を対象に、運用段階における省エネルギー化を推進することを目的とし、室内環境およびエネルギー性能の検証・評価を実施してきた [1)2)]。本報では竣工後 3 シーズンにおける地中熱 HP チラー(WHP)の運転性能検証について報告する。また、WHP の運転時間の違いによる COP の比較を行ったのでその結果を報告する。

1．システム概要

K 病院では都市部での今後の地中熱活用を見据えた研究のためボアホール(BH)型、連壁（SMW）利用型および杭基礎(PF)利用型の 3 方式の熱交換器を併用した地中熱利用システムを導入している。二次側は水蓄熱槽に接続し、製造した冷温熱は建物の空調負荷の処理に利用している。Figure.1,2 にシステム系統図と各熱交換器断面図を Table.1,2 に機器および熱交換器の仕様を示す。

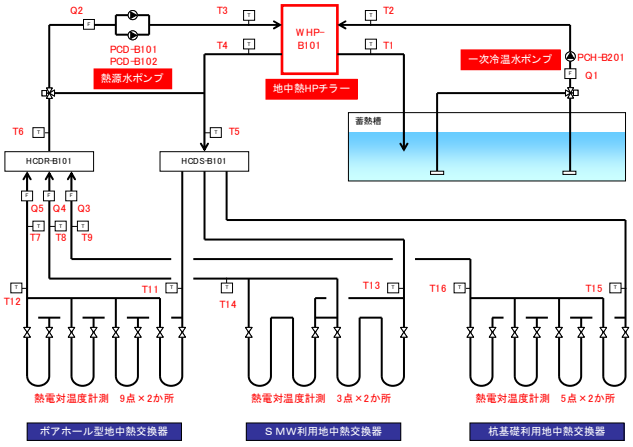


Figure.1 Heating and cooling system diagram

Table.1 Specification of machine

記号	機器名	仕様	定格 (kW)
WHP-B101	地中熱利用水冷ヒートポンプチラー	冷却能力 39kW　COP:3.8 冷水　14℃ → 6℃　71L/min 冷却水　30℃ → 35℃　142L/min 加熱能力 49kW　COP:3.9 温水　38℃ → 46℃　88L/min 熱源水　12℃ → 7℃　106L/min	10.21 12.56
PCH-B201	一次冷温水ﾎﾟﾝﾌﾟ	32φ × 94L/min × 15mmAq	0.75
PCD-B101,102	熱源水ﾎﾟﾝﾌﾟ	32φ × 150L/min × 25mmAq	2.2

Table.2 Specification of heat exchanger

熱交換器	仕様
ボアホール型	ボアホール直径 165Φ × 深さ 90 m × 4 箇所 （1 箇所当りUチューブ:2対）
連壁（SMW）利用型	SMW　深さ 21 m × 4 箇所 （1 箇所当りUチューブ:1対）
杭基礎利用型	杭径2,100mm × 杭長 45 m × 4 箇所 （1箇所当りのUチューブ:10対）

*Uチューブ径: 20 mm

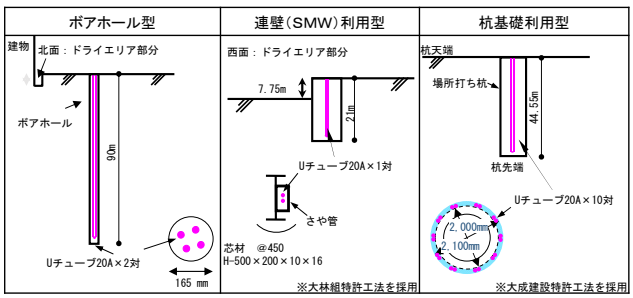


Figure.2 Sectional view of heat exchanger

２．冬季運転性能検証

2.1　運転条件

Table.3 に冬季の評価対象期間における運転条件を示す。いずれの年も運転期間は 12 月前半から 4 月後半の約 20 週、運転時間は平日の 9:00～19:00 とした。3 種類の地中熱交換器の熱源流量バランスは各期間中一定とした。流量の設定は、2013 年度は BH 系統の流量をやや多くし、2014 年度は 3 種類の流速をほぼ一定とした。2015 年度は 2014 年度と概ね同様の条件とした。なお、2014 年度は 3 月 17 日から 4 月 16 日の約 1 ヶ月は停電による機器の通信異常のため運転停止となっている。

2.2　実測結果

Figure.3～6 に熱源機運転時における熱源機及び各熱交換器の週平均の出入口温度の推移を示す。熱源機及び各熱交換器の出入口温度は週を追うごとに低下が見られたが、熱源機の入口温度はいずれの年も WHP の熱源水温度の定格値(12℃)を上回った。また、各熱交換器の入口温度はいずれの年も同程度であったのに対し、出口温度では差が見られた。これは、流速の変化に伴い、各熱交換器の熱交換性能が変化したことが要因と考えられる。

熱源機及び杭基礎系統の出入口温度差は週を追うごとに小さくなっているのに対し、SMW 系統の温度差はシーズンを通しての変化が小さく、BH 系統は週を追うごとに温度差が大きくなっていた。これは、各熱交換器周囲の地中温度の変化に差があったことが要因である。Figure.7 に 2015 年度の BH 系統と杭基礎系統の地中温度推移(SGL-20m 付近)を示す。BH 系統周囲の地中温度は運転期間中に約 2℃の低下していたのに対し、杭基礎周囲は約 6℃の低下となっていた。

Figure.8 に運転期間及びその前後の地中温度の鉛直方向の変化を示す。地中温度は代表として BH 付近のものを示している。地中温度は概ね 15℃以上で推移していた。また、いずれの年も運転期間中に約 2.0℃低下しており、年毎の比較としてはやや上昇傾向にある。

Figure.9 に WHP の期間生成熱量、期間電力量、期間運転時間、運転時間当たりの各熱交換器の採熱量を示す。1 日の運転時間はいずれの年も 10 時間であったが、2014

Table.3 Operation pattern in the winter

	2013年度				2014年度				2015年度			
運転期間	2013/12/9～2014/4/27				2014/12/8～2015/4/26				2015/12/7～2016/4/28			
運転時間	平日・9:00～19:00				平日・9:00～19:00				平日・9:00～19:00			
	BH	SMW	杭	合計	BH	SMW	杭	合計	BH	SMW	杭	合計
各系統流量 [L/min]	38.3	5.1	62.6	106.0	14.8	7.6	93.6	116.0	13.1	7.5	94.7	115.3
通水チューブ本数 [本]	6	2	35	43	4	2	30	36	4	2	30	36
1本当り流量 [L/min]	6.4	2.6	1.8	–	3.7	3.8	3.1	–	3.3	3.8	3.2	–
1本当り流速 [m/s]	0.31	0.12	0.09	–	0.18	0.18	0.15	–	0.16	0.18	0.15	–

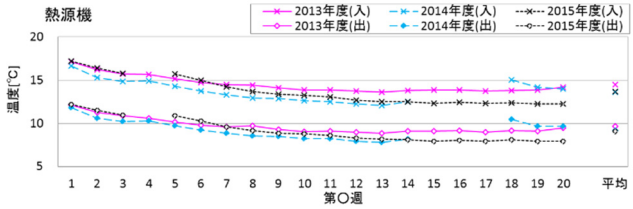


Figure.3 Temperature of heat source water (WHP)

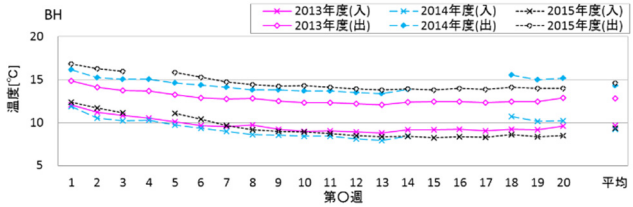


Figure.4 Temperature of heat source water (BH)

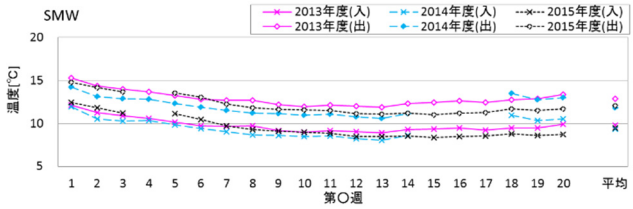


Figure.5 Temperature of heat source water (SMW)

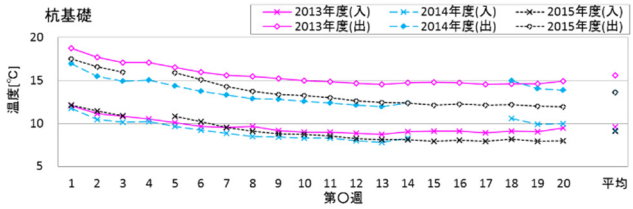


Figure.6 Temperature of heat source water (PF)

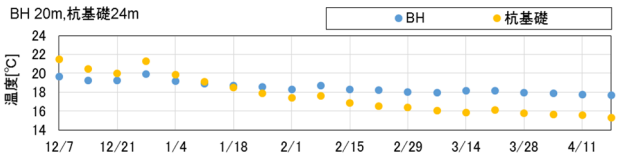


Figure.7 Comparison of underground temperature (2015)

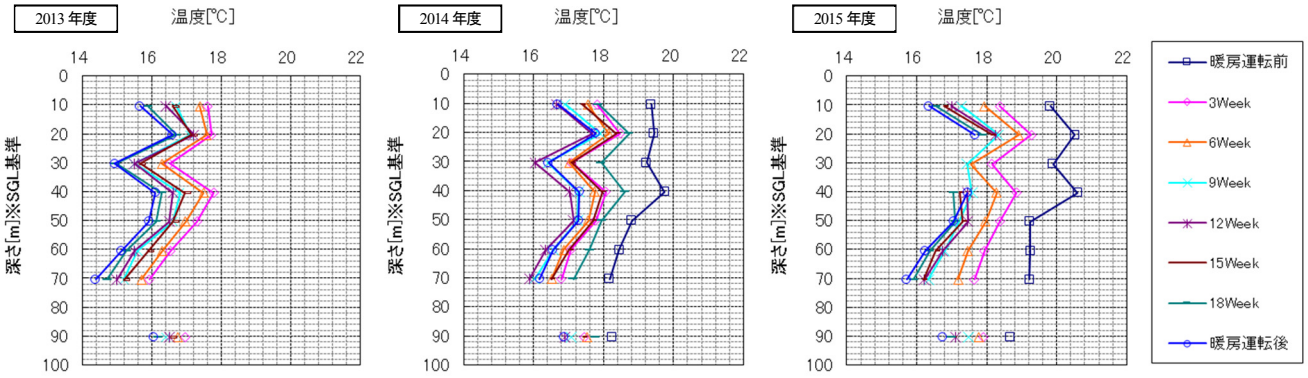


Figure.8 Change of underground temperature (BH)

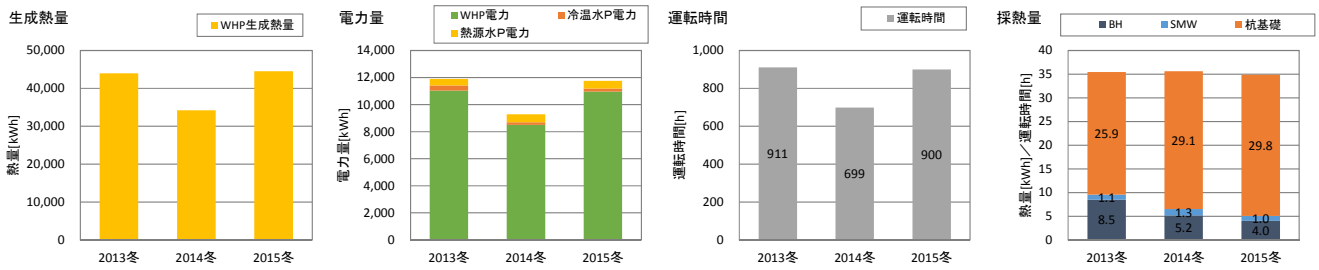


Figure.9 Various comparison

年度は停電による運転停止期間があったため、生成熱量、電力量及び運転時間が小さくなっている。また、運転時間当たりの採熱量は、流量の差により各熱交換器の差はあるが、合計値は同程度となった。

Figure.10 に熱源機運転時における週平均の熱源の単体 COP の推移を示す。熱源水温度の低下に伴い単体 COP は徐々に低下している。また、単体 COP はいずれの年も同程度で推移しており、運転開始直後は約 4.3 であったが、運転終了時は約 3.9 で推移し、約 10%の低下であった。

3. 夏季運転性能検証

3.1 運転条件

Table.4 に夏季の評価対象期間における運転条件を示す。運転期間は 6 月後半から 11 月前半までの 19 週、運転時間は、2014 年度は平日の 11:00～17:00、2015 年度と 2016 年度は平日の 10:00～18:00、流量設定の考え方はそれぞれ前年度の冬季と同じとした。なお、2015 年度の SMW 系統は 15 週目以降、不具合のため流量が 0 となっている。

3.2 夏季運転実績

Figure.11～14 に熱源機運転時における熱源機及び各熱交換器の週平均の出入口温度の推移を示す。熱源機及び各熱交換器の出入口温度は週を追うごとに上昇が見られ、熱源機の出入口温度はいずれの年も約 4.0℃の上昇を示した。各熱交換器の出口温度を比較すると、2015 年度は BH 系統を除き約 1~3℃の上昇を示しており、熱源機入口温度は第 6 週付近から WHP の熱源水温度の定格値(30℃)を上回った。熱源機及び各熱交換器の温度差は冬季と同様の傾向を示した。

Figure.15 に運転期間及びその前後の地中温度の鉛直方向の変化を示す。地中温度は運転期間中に約 2.0℃上昇していた。また、2015 年度は他の年と比較して、地中温度が約 0.5～1.0℃高かった。これは前述の各熱交換器の出口温度が高かったことの要因としても考えられる。

Figure.16 に WHP の期間生成熱量、期間電力量、期間運転時間、運転時間当たりの各熱交換器の放熱量を示す。運転時間は 2014 年度が 6 時間運転であったため、生成熱量、電力量及び運転時間が小さくなっている。運転時間当たりの放熱量では 2015 年度がやや低い傾向であった。

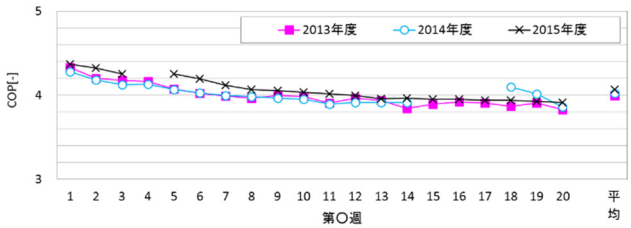


Figure.10 Change of COP

Table.4 Operation pattern in the summer

	2014年度				2015年度				2016年度			
運転期間	2014/6/23～11/3				2015/6/22～11/2				2016/6/20～10/28			
運転時間	平日・11:00～17:00				平日・10:00～18:00				平日・10:00～18:00			
	BH	SMW	杭	合計	BH	SMW	杭	合計	BH	SMW	杭	合計
各系統流量 [L/min]	41.1	7.1	92.6	140.8	28.1	7.3	107.9	143.3	28.7	7.4	109.2	145.3
通水チューブ本数 [本]	6	2	35	43	8	2	30	40	8	2	30	40
1本当り流量 [L/min]	6.9	3.5	2.6	–	3.5	3.7	3.6	–	3.6	3.7	3.6	–
1本当り流速 [m/s]	0.33	0.17	0.13	–	0.17	0.18	0.17	–	0.17	0.18	0.18	–

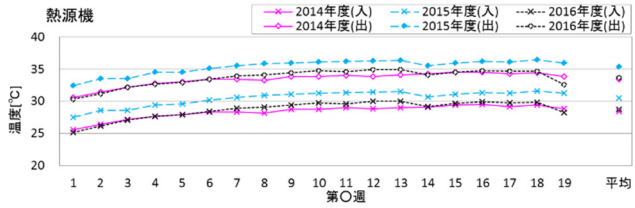


Figure.11 Temperature of heat source water (WHP)

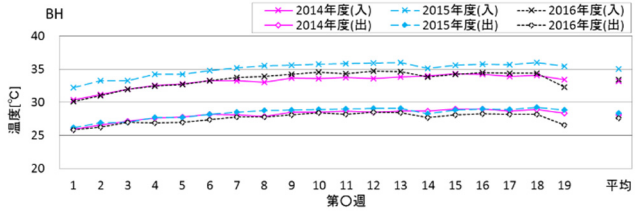


Figure.12 Temperature of heat source water (BH)

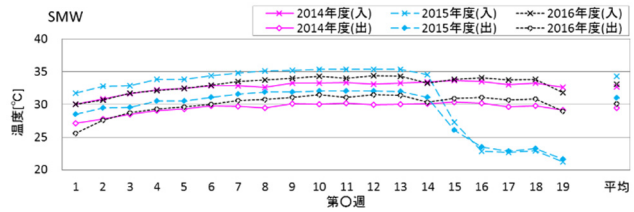


Figure.13 Temperature of heat source water (SMW)

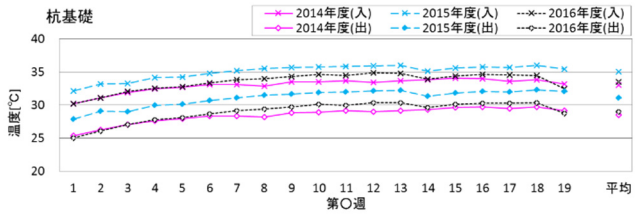


Figure.14 Temperature of heat source water (PF)

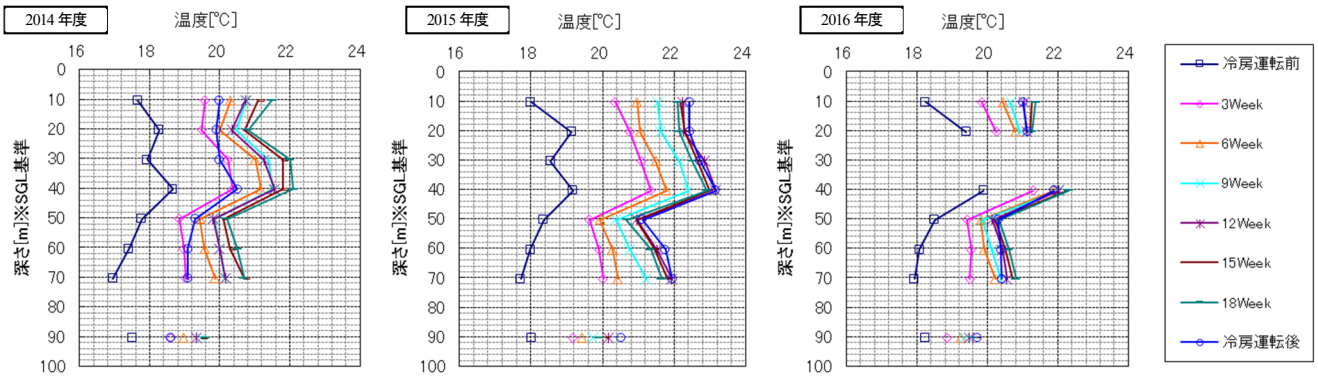


Figure.15 Change of underground temperature (BH)

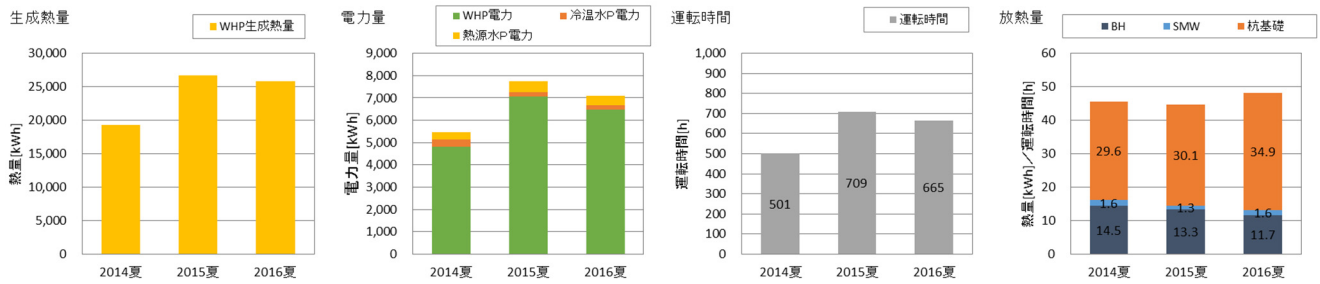


Figure.16 Various comparison

Figure.17 に熱源機運転時における週平均の熱源の単体 COP の推移を示す。熱源水温度の上昇に伴い単体 COP は徐々に低下しており、第 1 週と第 18 週を比較すると 2014 年度が 4.27→3.92 と約 8%の低下、2015 年度は 4.12→3.68 と約 11%の低下、2016 年度は 4.45→3.74 と約 16%の低下となり、2015 年度は他の年と比較して運転期間を通して低い値で推移していた。

2015 年度と 2016 年度は、各熱交換器の流量設定は概ね同等であったが、温度や COP の推移に差が見られた。これは前述の通り、2015 年度のみ地中温度が高く、その影響を受けたことが要因として考えられる。

3.3 WHP の運転時間による COP 比較

WHP の COP については、前述のように 2014 年度より 2015 年度は低下している、しかし、運転時間が異なる為、2015 年度の実測をベースとし、2 時間分を空冷ヒートポンプチラーで補うものとして COP の比較を行った。WHP のシステム COP は 6 時間運転が 3.53(2014 年度実績)、8 時間運転が 3.44(2015 年度実績)、空冷 HP チラーは 2.66(2013 年度実績)を用いた。

Figure.18 に結果を示す。トータルのシステム COP では 8 時間運転が最も高くなった。8 時間運転は 6 時間運転と比較して WHP のシステム COP は低下するものの、トータルで見た場合は 8 時間運転のほうが高効率であることを確認した。

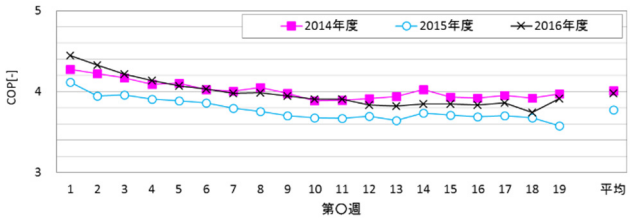


Figure.17 Change of COP

4. まとめ

本報では、2013 年度冬季から 2016 年度夏季までの 3 シーズンにおける WHP の運転性能の検証結果を報告した。今後も引き続き長期的な運転・評価を行いつつ、より詳細な運転性能の評価に取組む。

参 考 文 献

1) 熊田・高橋他：都市型病院の室内環境・エネルギー性能の検証・評価(第 1 報～第 6 報)，空気調和･衛生工学会近畿支部研究発表会論文集，2014. 3～2016. 3

2) 熊田・進藤・高橋他：次世代都市型病院の室内境・エネルギー性能の検証・評価研究（第 1 報～第 17 報），空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2013. 9～2016. 9

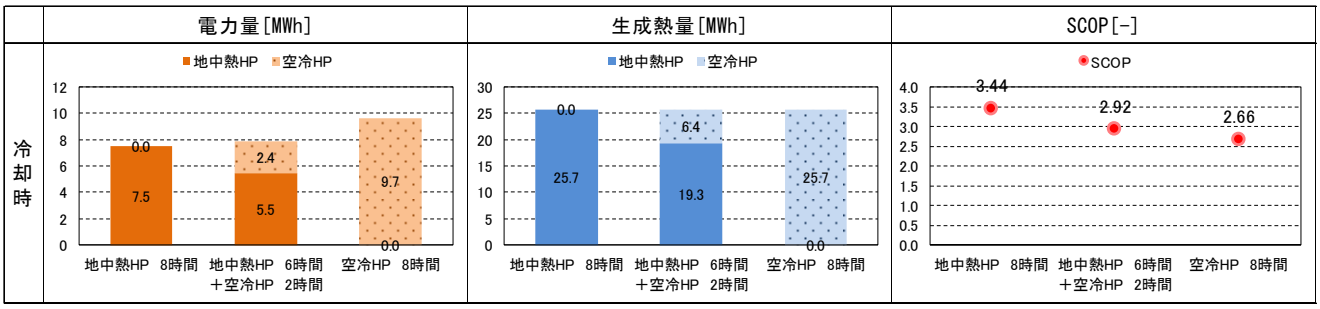


Figure.18 Study of COP based on operating hours

電力量計測データに基づく建築設備不具合の自動検知手法の開発
Development on the automatic fault detection method for the office building equipments

正 会 員　○山口　麻有（関西電力）　　正 会 員　　福地　浩美（関西電力）
正 会 員　　岸本　卓也（関西電力）　　正 会 員　　中村　和弘（ニュージェック）
正 会 員　　藤村　昌弘（アレフネット）

Mayu YAMAGUCHI*[1]　Hiromi FUKUCHI*[1]　Takuya KISHIMOTO*[1]　Kazuhiro NAKAMURA*[2]
Masahiro FUJIMURA*[3]

*[1] The Kansai Electric Power Co.,Inc.　*[2] NEWJEC Inc.　*[3] Aleph Networks Co.

We developed the automatic fault detection method for the office building equipments which is based on the electric power consumption data. This is one of the efficient technologies which are useful for energy saving of buildings. We installed this detection system to an office building and verified its effectiveness after adjusting the parameters.

はじめに

近年、施設の省エネルギーへの取り組みの必要性から、建物のエネルギー消費量計測が実施される事例が多く見られる。本研究は、これらの電力量計測データを活用し、建物における各種建築設備の故障や不具合、運用状況の監視を自動的に行うシステム（以下、不具合自動検知システムと称する）の開発を目的としている。既報[1)]では、検知対象とする不具合の分類と監視方法の整理の過程、および実稼働中の事務所建物における試験運用結果について報告した。本報では、既報以降の運用実績と基準値の見直し方針について報告する。

１．研究の背景と目的

対象建物ではエネルギーマネジメント活動と称し、用途別電力量の計測システムを構築し、電力量データを「見える化」して、建物管理者不在の施設に対して日常的なエネルギー管理や運用管理に活用している。本研究では、この計測システムに対して不具合自動検知システムを導入することで、建築設備機器の故障、不適切な運用の早期発見・早期改善による省エネルギー効果及び施設運用停止リスクの軽減を図ることを目的としている。不具合自動検知システムでは、多くの電力量計測ポイント等を監視対象とするが、日常的に使用するものであるためできる限り検知方法の複雑化は避け、よりシンプルにする必要がある。また、建物の実運用に即した合理的な運用法を検討する必要がある。

２．不具合監視方法の整理

2.1　不具合監視のフロー

既報[1)]に示すフローに従い、一時間電力量、および二次データとして得られる一日積算電力量、機器の各種設定値やエラー情報等の不具合監視の対象となる情報（以下、監視対象と称する）に対して不具合検知を実施した。

2.2　監視方法の整理

検知の対象となる不具合の特性に応じて、監視分類や監視期間、調整係数等の監視パラメータを設定する。本報では **Table.1** に示す 26 種類の監視方法を設定した。監視対象の監視に際しては、監視対象の特性に応じて、**Table.1** に示す監視方法から単数あるいは複数の監視方法を選択する。またここで選択された監視方法を、その監視対象における監視項目と称する。

Table.1　Monitoring methods

監視分類	記号	検知の対象となる不具合	監視対象の例	監視パラメータ			
				監視期間	監視曜日	監視時刻	調整係数
A	A1	蓄熱実施	蓄熱式熱源機器	夏期	営業日	7:00	0.5
	A2	蓄熱実施	蓄熱式熱源機器	冬期	営業日	7:00	0.5
	A3	蓄熱実施	電気温水器、エコキュート	全	毎日	7:00	0.5
B	B1	深夜停止	執務室空調器、照明	全	営業日	3:00	0.1
	B2	蓄熱不実施	蓄熱式熱源機器	夏期	土日	7:00	0.1
	B3	蓄熱不実施	蓄熱式熱源機器	冬期	土日	7:00	0.1
	B4	蓄熱終了	電気温水器、エコキュート	全	営業日	9:00	0.1
	B5	昼光利用	昼光利用対応照明器具	全	営業日	11:00	1.0
	B6	夜間停止	外調機、会議室・食堂照明	全	営業日	22:00	0.1
	B7	深夜停止（照明コン）	ベース負荷のある照明	全	営業日	3:00	0.5
	B8	深夜停止（ベース有）	ベース負荷のあるコンセント	全	営業日	3:00	0.3
	B9	中間期停止	外調機熱源	中間期	営業日	15:00	0.1
C	C1	ピーク電力(毎日)	機器類全般	全	毎日	毎時	1.1
	C2	ピーク電力(営業日)	機器類全般	全	営業日	毎時	1.1
	C3	デマンド電力	全電力	全	毎日	毎時	1.0
D	D1	一日最大電力量(毎日)	機器類全般	全	毎日	0:00	1.1
	D2	一日最大電力量(営業日)	機器類全般	全	営業日	0:00	1.1
E	E1	変動大	全電力、熱源機器	全	毎日	0:00	2
	E2	変動小	通信機器、定時運転ファン	全	毎日	0:00	4
F	F1	冷房設定温度	PAC設定温度	夏期	営業日	11:00	28
	F2	暖房設定温度	PAC設定温度	冬期	営業日	11:00	20
	F3	機器エラー	フィルタ目詰まりサイン	全	毎日	11:00	
G	G1	ベース停止時off	空調器と二次ポンプ	全	毎日	毎時	0.2
H	H1	短時間利用	会議室照明	全	営業日	毎時	6
	H2	定期運転	厨房機器	全	毎日	毎時	10
	H3	昼間運転	宿直室空調器	全	毎日	毎時	14

※F パラメータ監視、G 連動監視は検知がなかったため分析対象外とする。

３．某事務所建物における運用

3.1　対象建物の概要

不具合自動検知システムを実稼働中の事務所建物に導入し、システムの有効性を確認した。**Table.2** に対象建物の概要を示す。対象建物は平日の昼間に運用されており、

昼間以外の夜間および休日は宿直担当者が在館する。

Table.2　Building outline

敷地面積	13,163m2
延床面積	8,452m2
建物構造	RC造6階
建物用途	事務所
空調システム	ビル用マルチエアコン
省エネ配慮	高断熱、外気導入制御、PV、昼光利用、マネジメント活動等
電力量計測点数	145ポイント
建物運用開始	2012年10月

3.2　監視項目と基準値の設定

対象建物の各監視対象に対して **Table.3** に示す監視項目を設定した。通知分類については既報に従うが、本報では特に、日報または月報の区別に着目して分析した。

日報（●◎○）：設備故障や運用上の不具合を検知することにより速やかな修繕・改善対応につなげる

月報（□）：検知漏れの防止と省エネ提案に活用する

Table.3　Monitoring items

監視対象用途			監視分類													
			A 稼働監視	B 停止監視						C ピーク監視		D 一日電力監視		E 変動監視	F パラメタ監視	G 連動監視	H 連続運転監視
		監視記号	A1～3	B1,7,8	B6	B2,3	B4	B5	B9	C1,2	C3	D1	D2	E1,2	F1～3	G1	H1～3
		監視期間	夏期冬期	全	全	夏期冬期	全	全	中間	全	全	全	全	全	夏期冬期	全	全
		監視曜日	営業日	営業日	営業日	土日	営業日	営業日	営業日	営業日	毎日	毎日	営業日	毎日	営業日	毎日	毎日
		監視時刻	7:00	3:00	22:00	7:00	9:00	11:00	15:00	毎時	毎時	0:00	0:00	0:00	11:00	毎時	毎時
		監視する状態	蓄熱実施	深夜停止	夜間停止	蓄熱不実施	蓄熱終了	昼光利用	中間期停止	ピークkW	デマンド	電力量kWh	電力量kWh	変動大変動小	パラメタ設定状態	ベース停止時off	短時間Gh 定期1ch 昼間1ch
大項目	細目	監視対象 x	時間電力量[kWh]									一日積算電力[kWh/日]			パラメタ	時間電力[kW]	連続運転時間[h]
全電力		―								○	●	○	◎	○			
熱源	エコアイス	―	・			○				○			□	○			□
	執務室	―		□						○			□	○		○	□
	外気処理	―		□	○				○	○			□	○			□
	宿直	―								◎		◎		○			●
空調	室内機	負荷大		□						□		□		□	・		□
		負荷小		□						□		□		□	・		□
その他動力	ポンプ	―								○		○					
照明コンセント	執務室照明	―		●				○		◎		◎					
	会議室照明	―		●	◎					◎		◎					●
	コンセント	負荷大								◎		◎					
		負荷小								□		◎					
給湯		―	・				・			○		○		○			
厨房	給排気ファン	―		●	◎					◎		◎		◎			●
	機器	―		◎	◎					◎		◎		◎			◎
エレベータ		負荷大								◎		◎					
		負荷小								□		◎					
EV充電		負荷大								◎		◎					
		負荷小								□		◎					
別棟		負荷大								◎		◎					
		負荷小								□		◎					
通信機器		負荷大								◎		◎		◎			
		負荷小								□		◎		□			
機器用空調		負荷大								◎		◎		◎			
		負荷小								□		◎		□			

3.3　運用結果

2013 年 12 月に運用開始し、継続実施中である。運用開始から 2016 年 3 月 9 日までの検知状況を **Table.4** に示す。空調運転モード切り替え時に 5 件を超える場合もあるが、概ね 1～2 件程度で、検知頻度は分析対象期間中平均で 1.5 日に 1 回であった。監視項目数あたりの検知件数は、監視分類別では「B.停止監視」、「D.積算監視」、「E.変動監視」が多くなっており、監視対象用途別では「熱源」、「照明コンセント」が多かった。

Table.4 Number of detections

	A稼働	B停止	Cピーク	D積算	E変動	H連続	計
熱源	2	229	54	11	352	7	655
空調	0	0	0	0	0	0	0
その他動力	0	0	0	0	0	0	0
照明コンセント	0	141	15	175	0	25	356
給湯	27	0	0	1	24	0	52
厨房	0	5	48	28	34	62	177
エレベータ	0	0	0	66	0	0	66
電気自動車	0	0	0	0	0	0	0
別棟	0	0	35	64	0	0	99
通信	0	0	0	0	33	0	33
計	29	375	152	345	443	94	1,438

(1)　監視対象毎の積算検知件数

監視対象毎（室外機 ACP-1、5F 会議室照明など）の積算検知件数を **Fig.1 a - c** に示す。

a　熱源空調その他動力

外気処理系統での検知件数が多く、中間期停止期間における熱源稼働などが検知されている。また氷蓄熱機はスケジュール設定が反映できていなかったため、初期に検知が見られたが、判定時刻変更後の検知は少ない。

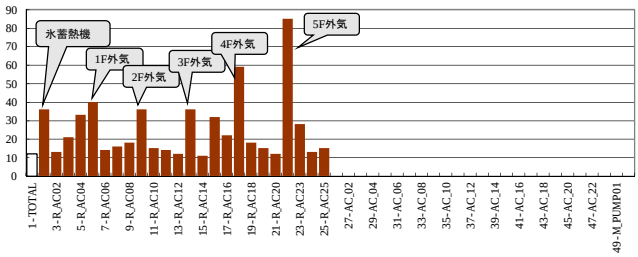


Fig.1-a Cumulative number of detections on EHP outdoor units, EHP indoor units, and power

b　照明コンセント

3F 執務室コンセント(No.85)は 2015 年 1～3 月付近で積算電力量の増加が発生していたが現時点では解消されている。また 2F 執務室照明(No.16～23)は夜間消灯監視が検知されていたが、施設運用上、日常的に夜間利用される部位であり、現時点では夜間消灯監視の監視対象外としている。

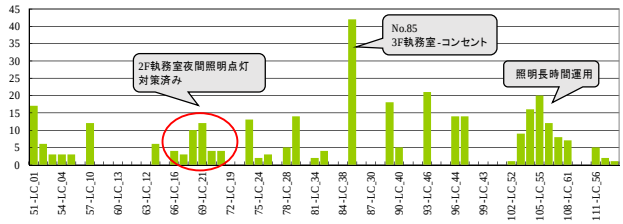


Fig.1-b Cumulative number of detections on lightings and outlets

c　その他の積算検知件数

厨房機器(No.118)は、2015 年 8 月の運用変更以降の積算電力増加が検知されており、現時点では監視対象の基準値の見直しを実施している。ELV1(No.125)は、2014 年 12 月から翌 3 月付近での電力量増加によるものであり、現在では解消されている。別棟での検知は正常な運用範囲の増加であり、現時点では基準値を見直している。

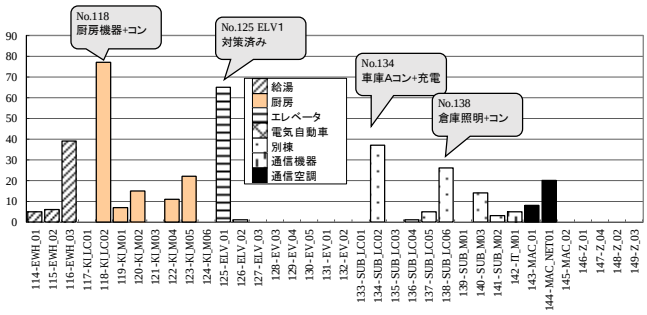


Fig.1-c Cumulative number of detections on others

(2)　監視分類毎の一日検知件数

監視分類毎（A 稼働監視、B 停止監視など）の一日検知件数を時系列的に **Fig.2 a - f** に示す。

a　稼働監視の一日検知件数

検知件数は比較的少ないが、2016 年 2 月付近で給湯循環ポンプの停止による不具合を適切に検知することにより、速やかに修繕を行なうことができた。

b　停止監視の一日検知件数

中間期における外気処理機系統の熱源稼働に対する検知が多い。

c　ピーク監視の一日検知件数

一時的な利用量増加に伴う検知が散発的に発生した。厨房や別棟における特定負荷で検知が多かった。ピーク監視は、特定負荷の運用がある監視対象ではなく、時間変化の少ない通信機器等の不具合検知に有効であると考えられる。

d　一日電力監視の一日検知件数

主として照明器具の長時間運用に伴う電力増加が検知された。特定負荷の運用変更による電力量増加に対しては、基準値見直しを実施した。

e　変動監視の一日検知件数

主として空調運転モードの切り替えや負荷増加に伴う電力量の変動が大きい期間などに検知数が多くなった。また、時間変化の少ない通信機器等の監視対象では、一部誤検知が見られた。

f　連続運転監視の一日検知件数

照明等の切り忘れ及び深夜業務対応による連続運転に伴う検知が散発的に発生していた。

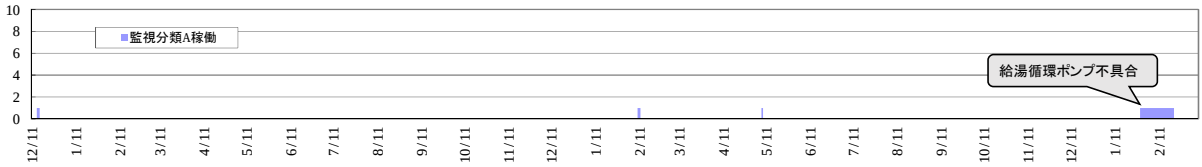


Fig.2-a Number of operation fault detections per day

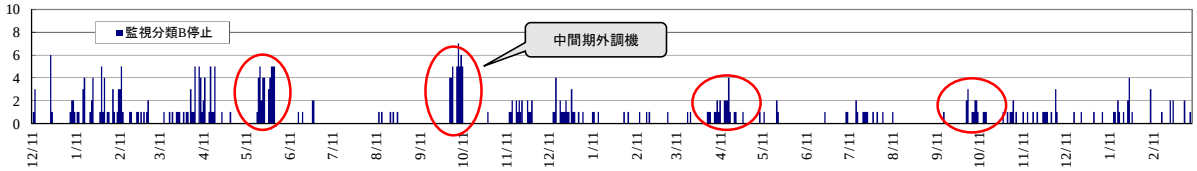


Fig.2-b Number of stop fault detections per day

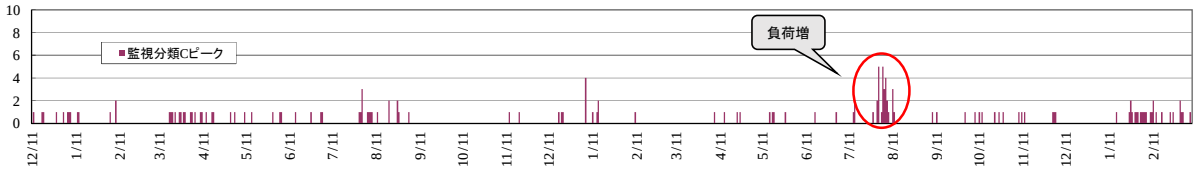


Fig.2-c Number of peak energy consumption fault detections per day

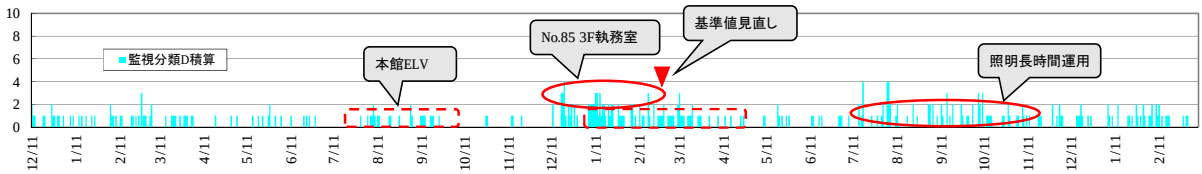


Fig.2-d Number of daily energy consumption fault detections per day

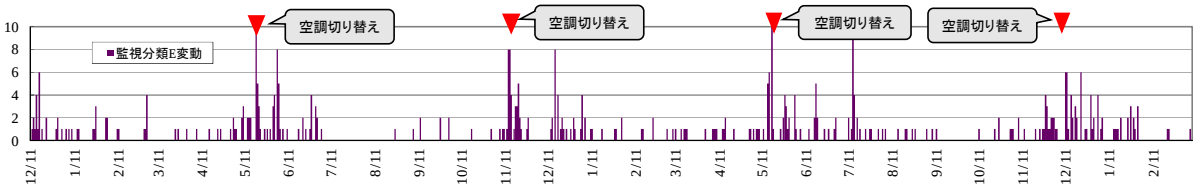


Fig.2-e Number of energy variation fault detections per day by monitoring

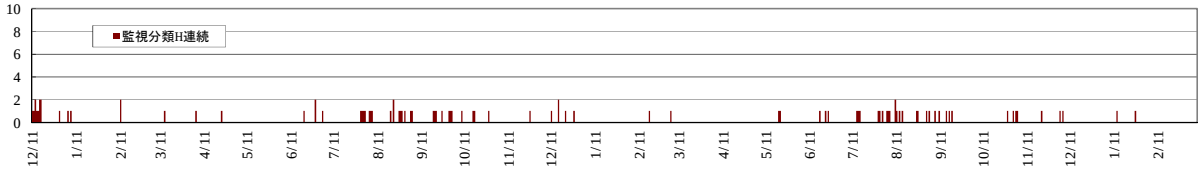


Fig.2-f Number of continuous operation time fault detections per day

(3)　監視対象の分類毎と監視分類毎のクロス集計

監視対象の分類毎（熱源、照明コンセントなど）に、監視分類毎（A 稼働監視、B 停止監視など）の積算検知件数をクロス集計したもののうち、熱源、照明コンセント、給湯の結果を **Fig.3 a - c** に示す。

a　熱源のクロス集計

空調機運転モード切り替え後の E 変動監視や中間期における外調機の B 停止監視の検知が多かった。また E 変動監視については、夜間運転に伴う不具合が検知された。

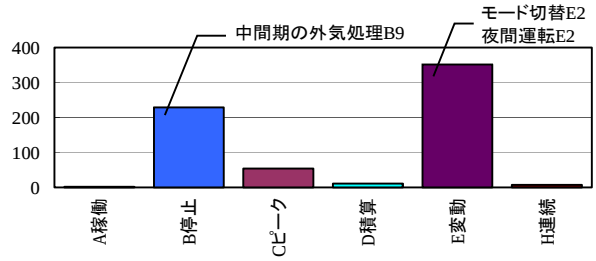


Fig.3-a Cross tabulation of EHP outdoor units

b　照明コンセントのクロス集計

切り忘れや長時間運用に伴う B 停止監視および D 積算電力監視が多かった。

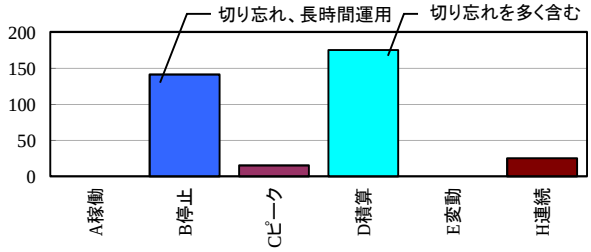


Fig.3-b Cross tabulation of lightings, and outlets

c　給湯のクロス集計

A 稼働監視は 2016 年 2 月付近の循環ポンプ停止に伴う検知が多く含まれる。また、正常範囲のエコキュート運転量の僅かな変化を E 変動監視により検知した。

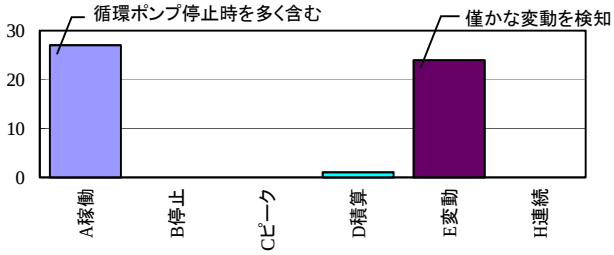


Fig.3-c Cross tabulation of hot water supply

(4)　月報による検知結果

日報での検知漏れを確認するため、月報データのうち通知分類が月報のみとなっている検知件数をピックアップした。ここでは、空調に関するものの集計結果を **Fig.4** に示す。空調設備はスケジュール運用となっているが、休日夜間はマニュアル運転が実施されるため、B 停止監視、D 積算電力監視、E 変動監視、H 連続監視で検知された。また月別検知件数では夏期冷房運転時の夜間休日稼働が多いことがわかった。

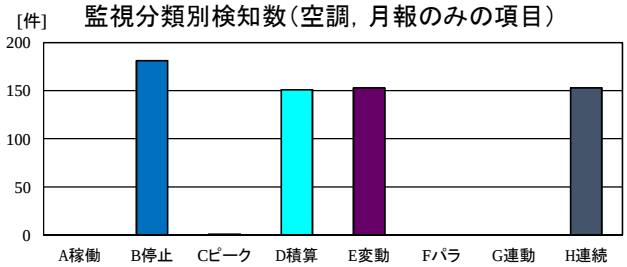


Fig.4 Cumulative number of detections on EHP indoor units by each monitoring group

3.4　検知事例の評価と見直し方針の整理

(1)　熱源の検知状況評価

切り忘れを含む深夜時間帯の運用は適切に検知された。中間期における外気処理機停止監視は、中間期設定期間（月単位）と、運転モード切り替えの実作業のタイミングとのずれにより検知される他、運転モード切り替え後の電力量変動等の検知が不適切な検知となったが、これらは季節切り替えの確認として活用できる。

(2)　空調の検知状況評価

空調はスケジュール運転が実施されており、切り忘れ等による不適切な運用は発生しないことから、即時通知および日報通知の対象外とした。しかし、月報で運転状況評価を分析した結果、スケジュール設定ミスによる土日運転の発生を検知できていないことがわかったため、土日監視停止を日報に追加することが望ましいと言える。

(3)　照明コンセントの検知状況評価

切り忘れや長時間運用は適切に検知された。運用変更に伴う基準値の変化が頻繁な監視対象であるため、現地運用の変更に対応した基準値の見直しが望まれる。

(4)　給湯の検知状況評価

循環ポンプの停止は適切に検知された。水温変化等に伴うエコキュートの電力量変化が変動監視にて検知されたが、検知数は少なく運転状況の監視として活用できる。

5．まとめと今後の展開

本報では主として電力量計測データを利用した不具合自動検知システムを、実稼働中の事務所建物で運用した結果、循環ポンプの停止や切り忘れの検知等のシステムの有効性を確認できた。一方で、基準値は不具合検知システム構築時点での運用状況を基に定数として与えられる数値であるが、運用変更などにより見直しが必要であることもわかった。基準値の自動更新は技術的には可能であるが、エラーデータの排除や意図的な利用増加の有無判断を自動的に行うことには課題があるため、今後の検討課題である。

参 考 文 献

1）中村和弘,石田直哉,山口弘雅,岩井良真,藤村昌弘:電力量計測データに基づく建築設備不具合の自動検知手法の開発,空気調和･衛生工学会学術講演会講演論文集,pp.157-160,2014.9

B-1

商業施設におけるベストミックス個別空調の計画と実施

Planning and Implementation of Best Mix Air Conditioning System in the Commercial Facility

○松 倉　想 馬（竹中工務店）　篠 島　隆 司（竹中工務店）　大 原　宗 明（竹中工務店）

Soma MATSUKURA*[1]　Takashi SHINOJIMA*[1]　Muneaki OHARA*[1]

*[1] Takenaka Corporation

Hirakata T-SITE opened in May 2016 is a commercial facility that proposes lifestyle through books, planned in front of Hirakata City Station located at the midpoint between Osaka and Kyoto. In this building, we aimed for an air conditioning system with energy savings, cost savings, and high environmental friendliness, by the best mix of ＧＨＰ and ＥＨＰ as air conditioning system. We report on these plans and implementation based on actual energy consumption values after the start of operation.

１．はじめに

2016 年 5 月にオープンした枚方 T-SITE は、大阪と京都の中間点に位置する枚方市駅前に計画された。Fig.1 に枚方 T-SITE の外観を示す。枚方市駅前の新たな風景となるようデザインされた外観は、駅前広場にさし出された居心地のよい「街のリビング」と、本を通したライフスタイル提案が街にダイレクトに伝わる「透明なファサード」、街を眺める「屋上テラス」が融合し、街への共感を生み出すきっかけとなっている。約 40 年前の高度成長期に建設された駅前再開発ビルを建て替える「再々開発」プロジェクトでもある枚方 T-SITE は、人口減少期における駅前再生の可能性を示すものである。

本建物では、空調方式として個別分散空調方式を採用し、ガス式ヒートポンプ・パッケージエアコン（以降ＧＨＰ）と電気式ヒートポンプ・パッケージエアコン（以降ＥＨＰ）のベストミックスにより、省エネ・省コスト・環境性の高い空調システムを目指した。本稿では、これらをベストミックス個別空調と呼び、その計画と実施について、運用開始後のエネルギー消費実績値を元に報告する。

Fig.1 Building facade

２．建物概要

2.1　建築概要

建物名称　：枚方 T-SITE
所在地　　：大阪府枚方市岡東町 12 番 2 号
建物用途　：物販店舗、飲食店舗、金融機関店舗、駐車場
建築面積　：2,494.07 ㎡
延床面積　：17,553.44 ㎡
階数　　：地上 9 階、地下 1 階
構造　　：S 造、一部 SRC 造

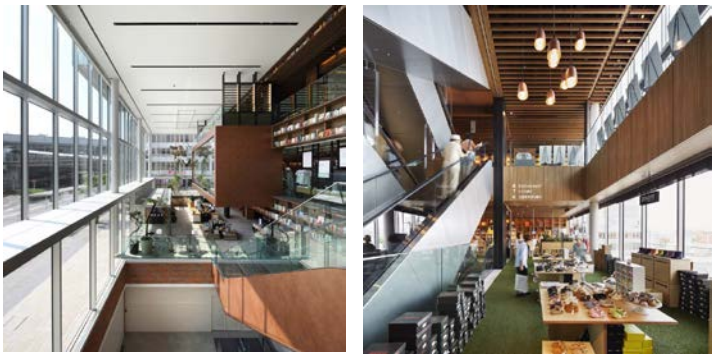


Fig.2 Interior view of atrium

建物の外装は全周に渡りガラスカーテンウォールが採用され、南面は日射負荷の軽減を考慮し Low-e ガラスを採用した。また、内部は、吹抜けを少しずつずらして配置した断面計画により、Ｂ１階から最上階まで繋がりのある空間となっている。外部とは、１階と３階で接続され、１階は周囲６か所の出入口を有し、３階は枚方駅から続くデッキで接続され西側から出入可能となっている。また北側の建物とは、地下１階の地下道と３階道路上の空中通路にて接続されている。

なお空調設備、受電設備については、エネルギーサービス会社が設置し、初期投資をすることなく、機器設置費やメンテナンス費を含んだエネルギーサービス料金を支払い、費用負担を平準化するスキームを採用した。

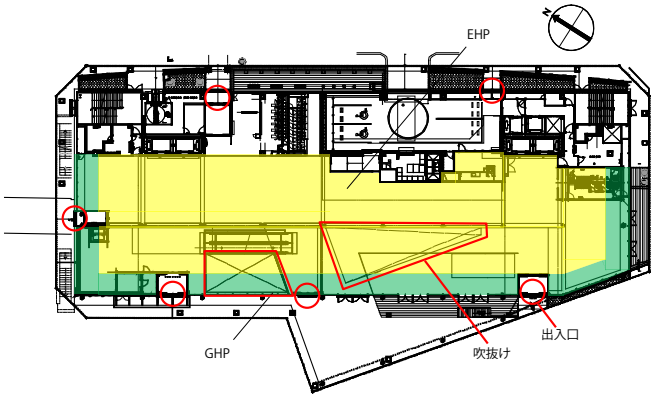


Fig.3 1st floor plan

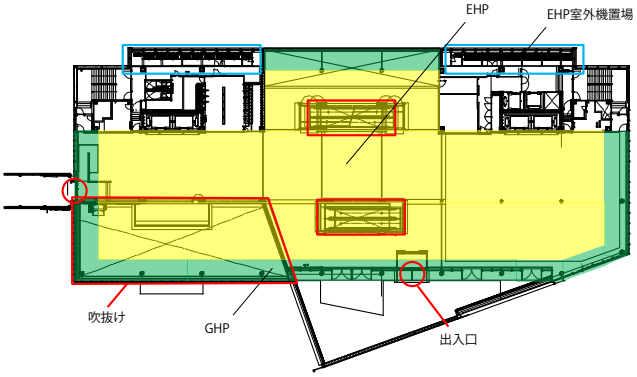


Fig.4 3rd floor plan

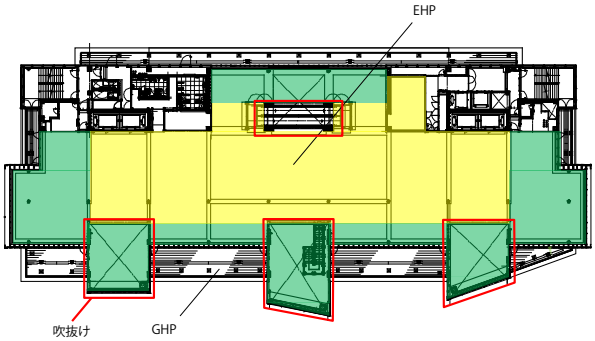


Fig.5 5th floor plan

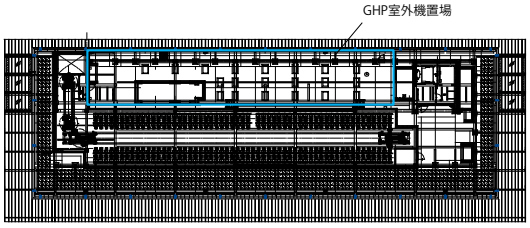


Fig.6 9th floor plan

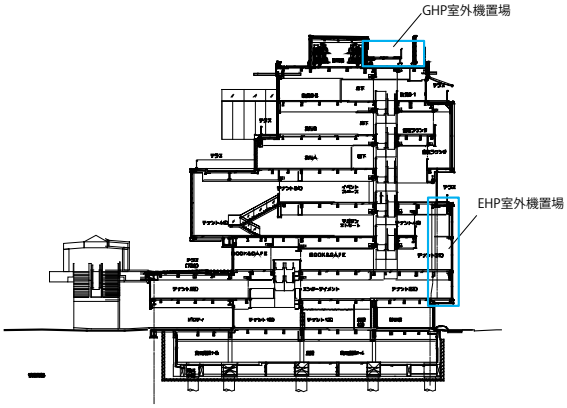


Fig.7 Sectional view

３．空調設備計画

3.1　空調方式

一般的に商業施設の空調方式はセントラル空調方式が多い。中でも主要な方式は、中央熱源から冷温水配管をテナント店舗に供給し、増移設が容易な空調機やファンコイルユニット（ＦＣＵ）を２次側空調とする空調方式である。本計画では、ゾーン毎のきめ細かい温度設定が可能な個別分散空調方式を採用し、操作性の良さに配慮した。室内機は、30～50 ㎡の小ゾーンに１台配置し、そのゾーンでの温度コントロールが可能となる。

特筆すべき点として、セントラル空調方式では一般的な、電気・ガスのベストミックス方式を、個別分散空調方式に適用したことである。ベストミックス方式は、エネルギー自由化の流れの中で、状況に応じ、電気・ガスの最適なエネルギーを選択できるメリットもある。

本計画では、ビル全体の空調負荷や使い勝手を考慮し、ＧＨＰ方式とＥＨＰ方式のベストミックス個別空調を構築した。高負荷で年間の負荷変動が大きいペリメーター部や飲食テナントの空調に対し、電力デマンド抑制に効果的なＧＨＰを配置した。また、テナント要望による変更の可能性の高いインテリア部は、室外機がコンパクトで、かつ電力のみのエネルギー供給で良く、設置のフレキシビリティの高い、ＥＨＰを配置した。Fig.3~5 にＥＨＰとＧＨＰのゾーニング図を示す。これにより、大幅な電力デマンド削減と受変電容量の低減を図った。また、室外機は、３～４系統／フロアで、600～700 ㎡程度ごとに１台配置し、その系統ごとに冷暖房の選択も可能である。

室外機設置スペースは、Fig4,.6,7 のように東側外壁面と屋上に配置した。屋上機器置場は、テナント店舗からの距離が離れているため、変更の可能性の少ないＧＨＰを中心に配置し、東側外壁面はテナント店舗から近いため、配管延長も短くなり変更や増設が容易であると考え、ＥＨＰを配置した。ただし、室外機が上下階に配置されているため、ショートサーキットが起こりにくいよう、

また、敷地境界に近いため騒音規制に配慮し、Fig.8 のように消音器付のフードを設ける工夫をした。

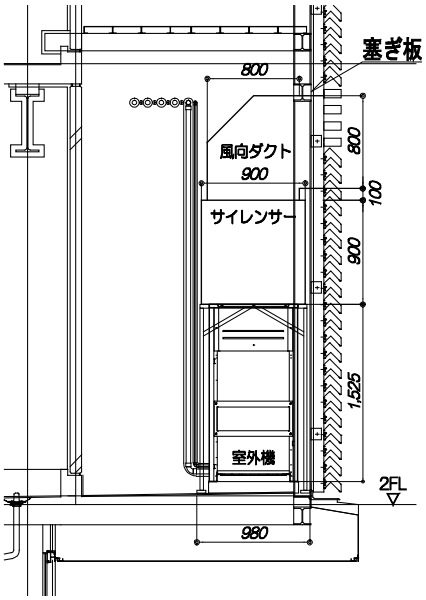


Fig.8 Section of compressor unit space

3.2　空調電力の予測

本計画における全館での、ＧＨＰの機器容量は 1,900kW、ＥＨＰは 2,400kW である。計画段階での、全館ＥＨＰとした場合の、ピーク時の空調電力デマンドを、1,000kW 程度と予測し、ＧＨＰ採用による電力低減が 450kW 程度と予測しており、ベストミックス個別空調の空調電力デマンドは、550kW 程度と予測した。また、インテリア部ＥＨＰの年間負荷変動は大きくないと予測し、換気方式を省エネルギーに配慮し、全熱交換器としていたため、外気導入の負荷の変動程度と考えていた。

なお、ＧＨＰ採用による受変電容量の削減効果は、変圧器 1000kW となった。

４．エネルギー消費量実測結果

4.1　電力およびガス消費量

ビル運用開始後の月別空調電力デマンドおよび空調電力消費量について実績値を Fig9,10 に示す。なお、本稿での実績値として、対象月はＢ1 階がオープンし全館運用開始となった 2016 年 8 月以降とした。実績値との比較として、全館ＥＨＰとした場合の換算値を記載したが、ＧＨＰのガス消費量から、仮に全てのＧＨＰをＥＨＰに置き換えた場合の電力デマンド、空調電力消費量として想定した。

ＧＨＰガス消費量からＥＨＰ電気消費量への換算方法については、全空調ガス消費量を、仮に 20HP の能力とした場合のＧＨＰガス消費量により除することで、全負荷相当運転時間を算出し、同能力（20HP）のＥＨＰの電力消費量に換算した場合の値として算出した。

電力デマンドの換算値については、実績値 1,066kW に対し、空調デマンドが最も少ない 11 月における空調電力量 33,971kWh と、空調以外の用途に使用される電力量 302,840kWh の割合により、空調以外の電力デマンドを 663kW と仮定し、毎月の固定値とした。

Fig.9 より、全てＥＨＰにした場合、空調電力デマンド換算値は 900kW となり、実績値 403kW に比べて 123%上昇（換算値⇒実績値の場合、55%削減）する結果となった。また 8 月～1 月の期間中の空調電気消費量は実績値 421,281kWh から換算値 819,755kWh となり、94.5%上昇（換算値⇒実績値の場合、49%削減）する結果となった。

また、ＥＨＰとＧＨＰのベストミックス個別空調により、当初の計画では、電力デマンドを 450kW 低減と予想していたが、実績値はこれを上回る 497kW の結果となった。また、空調電力デマンドの月別変動実績は、8 月と 11 月の比較で約 80%（8 月 403kW、11 月 74kW）と、比較的大きい結果となった。この要因としては、出入口の多い建物形状により、来館者の多い時間帯では絶えず外気が流入していることで、インテリア部分の負荷変動が想定以上に大きくなっているためと考えられる。

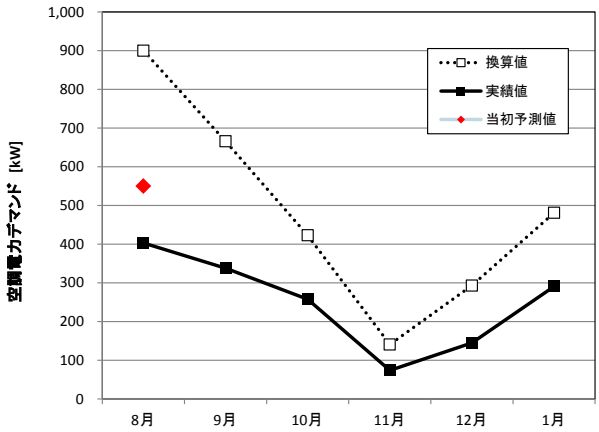


Fig.9 Amount of monthly electric power

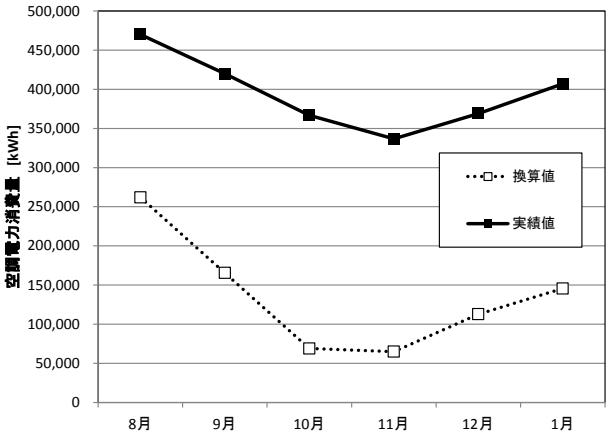


Fig.10 Amount of monthly electric energy

Table1 Amount of monthly electric power

	8月	9月	10月	11月	12月	1月
	kW					
実績値	1,066	1,001	921	737	808	954
換算値	1,563	1,329	1,086	804	956	1,144
実績値（空調のみ）	403	338	258	74	145	291
換算値（空調のみ）	900	666	423	141	293	481

Table2 Amount of monthly electric energy

		8月	9月	10月	11月	12月	1月
		kWh					
実績値	①EHP	112,203	79,745	39,539	32,473	53,945	86,227
	②GHP	5,161	4,197	2,558	1,498	1,853	1,882
	①＋②	**117,364**	**83,942**	**42,097**	**33,971**	**55,798**	**88,109**
換算値	③EHP(GHP)	149,853	85,734	29,403	32,473	58,769	59,391
	①＋③	**262,056**	**165,479**	**68,942**	**64,946**	**112,714**	**145,618**

4.2　ランニングコスト試算

前項のエネルギー消費量実測結果に基づき、電気、ガス使用によるランニングコストの試算を行った。電気、ガスの料金体系については、電気は関西電力の高圧電力AL、ガスは大阪ガスの小型空調契約を、それぞれ想定した。

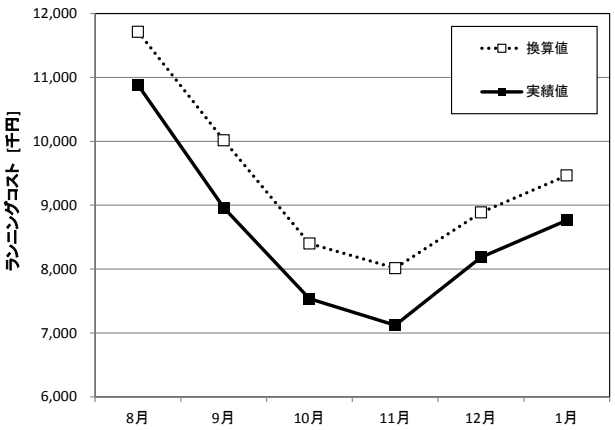


Fig.11 Monthly running cost

Fig.11 より、8 月～1 月の期間合計で、全てＥＨＰ方式とした場合に比べて、ベストミックス個別空調により 5,049 千円（月平均 841 千円）のランニングコスト削減となった。また、削減率は 7.4%であった。これは、全てＥＨＰと仮定した場合の、電力デマンドおよび電力消費量の増加による、電気基本料金および従量料金の増額コストがＧＨＰ使用によるガス従量料金よりも上回っているためである。

５．まとめ

商業施設における空調方式について、枚方 T-SITE を実例として、ＧＨＰとＥＨＰのベストミックス個別空調方式を計画、実施した。結果として、全てＥＨＰとした場合と比べて、以下の知見が得られた。

・電力デマンドが 55%削減された。
・電力消費量が 49%削減された。
・ランニングコストが 7.4%削減された。
・外気流入の多い建物形状では、インテリア部の電力変動（負荷変動）も比較的大きい。

これにより電気熱源とガス熱源によるベストミックス個別空調が、省エネ・省コスト・環境性の向上に効果的であることが実証された。今回は、8 月～1 月までのデータのみであったが、今後は、継続して 2 月～7 月の運用実績を計測し、一年間通した空調エネルギー消費に関して分析を行っていく予定である。

６．おわりに

最後に、本建物の設計・建設・運用にあたり、建築主をはじめとする多くの方々にご指導、ご支援をいただき、紙面をお借りし厚くお礼申し上げます。

B-2

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターESCO 事業における計画と性能検証 (第 2 報)2 年目検証と改善内容

Planning and Commissioning on ESCO Project by Institute of Laser Engineering ,Osaka University (Part2) Commissioning and Improvements at the Second Year ESCO Service

正 会 員 ○千原 崇（三機工業） 正 会 員 平岡 秀明（三機工業）
正 会 員 横田 和久（三機工業）

Takashi Chihara*1 Hideaki Hiraoka*1 Kazuhisa Yokota*1

*1 Sanki Engineering Co Ltd.

Energy consumption has decreased in the second year of ESCO service period by 11 % in comparison with the previous year to attain a reduction of 51 % from the value before the improvements owing to removal of the failures detected in the first year of ESCO Project as well as due to the tuning for further energy saving by Institute of Laser Engineering, Osaka University.

1. はじめに

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターESCO 事業において、前報では提案の概要と ESCO サービス期間 1 年目の 2014 年度に 45.8%（装置電力除く）の削減ができたことについて、各省エネルギー項目ごとの削減状況を報告した。

ESCO サービス期間 2 年目の 2015 年度は除湿制御の温水不具合や空調機インバータ導入の小風量運転が計画通りに実行できなかった事などの改善、熱源・空冷パッケージエアコン・機械室換気ファンについて更なる省エネルギーの為のチューニングを実施した。それらの取り組みにより 2014 年度から 11%エネルギー削減量が向上し、2015 年度は 51.0%の省エネルギーができた。

本報告では、上述の改善内容や省エネルギーチューニング内容と省エネルギー効果について報告する。

2. 1 年目からの改善

2.1 除湿時の温水不具合改善

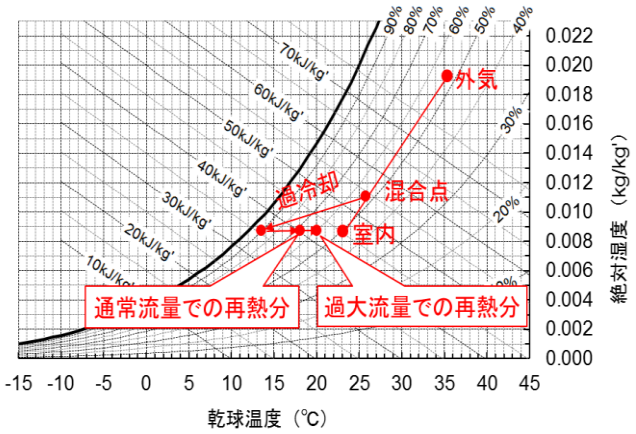
(1) 温水不具合の状況（2014 年度）

除湿制御を行っている空調機のうち、除湿時に過冷却-再熱を行う際の温水コイルの能力に再熱の為の必要能力がなく、能力不足を補う為に約 2 倍流量の温水を流しているものがあった。

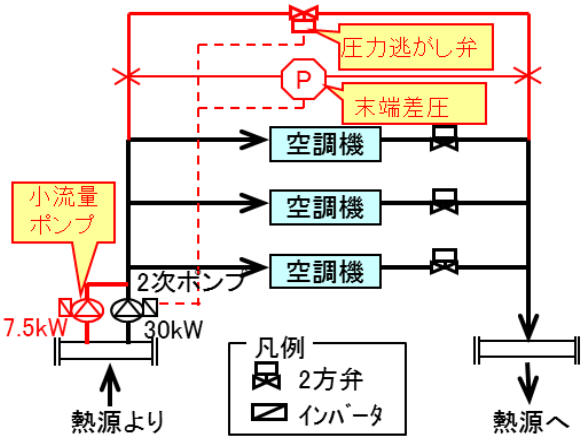
図-1 に空気線図を示す。通常流量では温水コイル出口空気温度は 18℃にしかならない。実際の吹出温度は 19℃～21℃であり、不足分は温水過大流量で補っていた。.

一方、温水 2 次ポンプは図-2 に示すように末端差圧によるインバータ制御と夜間・休日は小流量ポンプに切替わる省エネ設備を導入していた。

末端差圧は 100kPa に設定する計画であったが、前述の温水不具合の為に 200kPa とする必要があり、通常時の温水ポンプは計画よりも高い周波数での運転となり、また、小流量ポンプへも切替ができなかった。



図－1 空気線図による再熱流量不足の説明図



図－2 温水 2 次ポンプ省エネルギー提案概念図

温水の設定温度については熱回収チラーの効率向上のために夏期は冬期の 42℃よりも設定温度を下げて 38℃にする計画であったが、温水不具合の為に 42℃で運転した。

(2)　不具合改善

空調対象室内は湿度発生源は無く、外気のみを除湿すれば室内湿度を設定値以下に保つことができる。

そこで、図-3 に示すように、外気ダクトに除湿用冷却コイルを設置し、室内露点以下まで冷却した外気を空調機に供給するように改造した。

これにより除湿（潜熱処理）は除湿用冷却コイル、室内顕熱処理は空調機と機能を分離する事ができ、空調機での過冷却-再熱は無くなった。

改善前は空調機の全風量を過冷却していたが、改善により必要風量のみの過冷却となり、冷水負荷と温水負荷の削減ができた。

(3) 改善効果

図-4 に温水負荷の 2 ヵ年の比較を示す。除湿の必要な 5 月～10 月の温水負荷が 39.7%削減できた。

温水ポンプの末端差圧は 100kPa に設定し、熱源温水温度を 38℃に設定した。

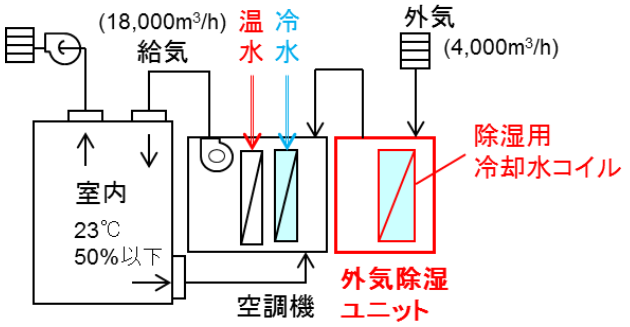
図-1 に温水 2 次ポンプの搬送効率(WTF)を示す。

WTF(Water Transportation Factor)は以下に定義する。

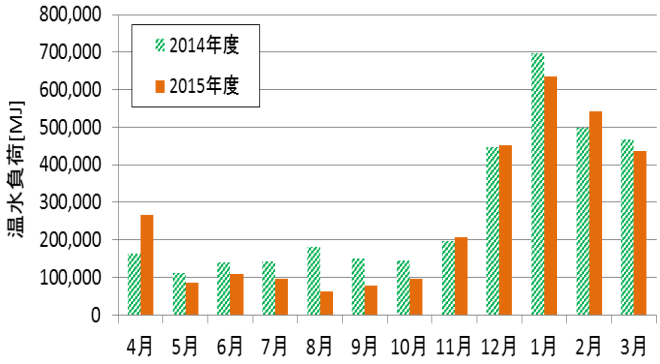
$$\mathrm{WTF} = \frac{\text{温水熱量[MJ]}}{\text{ポンプ電力量[kWh]}\times 3.6\,[\mathrm{MJ/kWh}]}$$

5 月～10 月の除湿シーズンの平均 WTF は 24.7 から 48.2 に向上した。

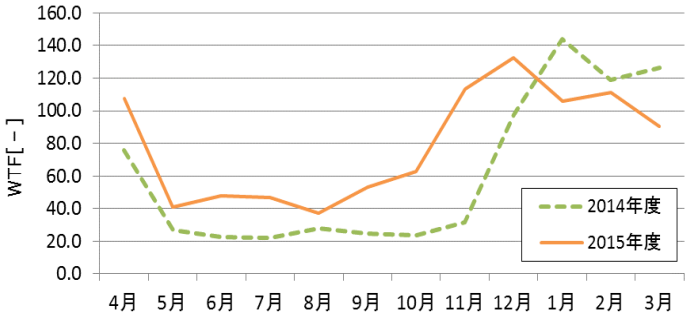
図-6 に熱回収チラーの 8 月の電力と処理熱量の関係を示す。温水設定温度を 42℃から 38℃に下げることにより効率が良くなり、8 月の平均 COP(冷水ﾍﾞｰｽ)は 3.8 から 5.0 に向上した。



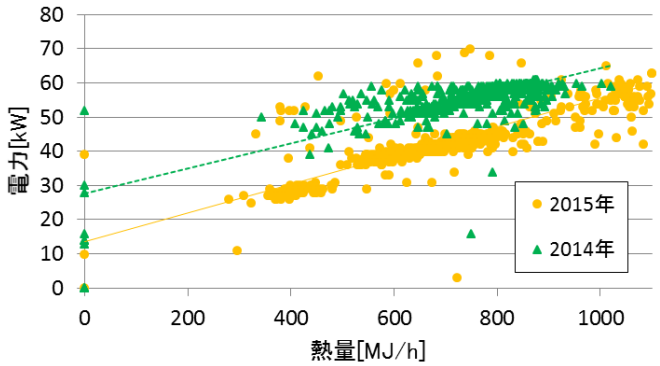
図－3　除湿用冷却コイル設置



図－4　温水負荷



図－5　ポンプ搬送効率(WTF)の 2 ヵ年比較

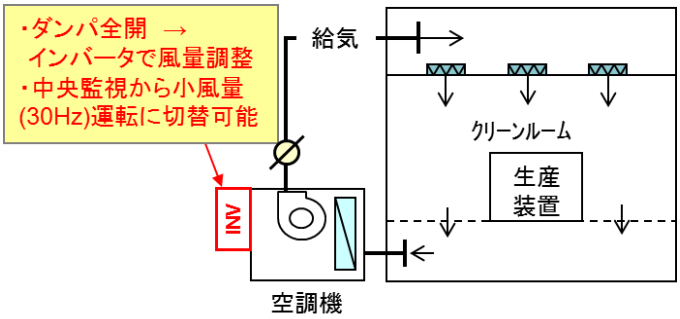


図－6　8 月の熱回収チラーの電力と処置熱量の関係

2.2　空調機小風量運転時間の拡大

(1)　2014 年度小風量運転の導入状況

ESCO では空調機 8 台を対象にインバータを設置し、図-7 に示すようにダンパを全開にしてインバータで風量調整をした。その際、夜間や休日などの負荷が少ない時間帯には小風量運転（インバータ周波数 30Hz）に切替可能なシステムを導入した。しかし、使用者側から小風量運転時の温度変動やクリーンルームの清浄度への影響の懸念の声があがり、2014 年度は表-2 に示すように中間期の夜間のみの導入であった。



図－7　空調機インバータ設置の説明図

表－1　2015 年度の小風量設定

4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
中間期		夏期				中間期		冬期			
夜間	夜間					夜間	夜間				

(2)　小風量運転の運転時間拡大

2015 年度は使用者側でも更に省エネルギーをしたいと

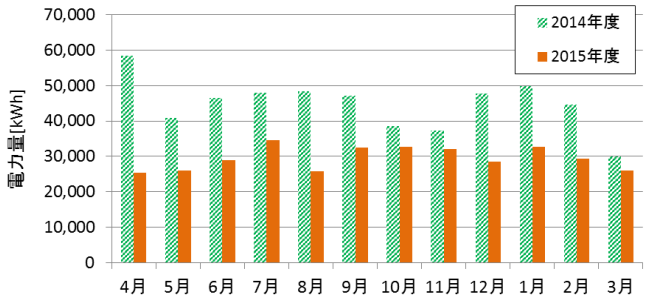
いう機運が高まり、小風量の運転時間の拡大をすることになった。

その際に試験的に 1 週間程度連続して小風量運転を実施し、清浄度や温度変動、更に実験に不具合が無いかを確認し、小風量運転の導入時間を表-2 に示すように大幅に延長した。

図-8 に対象空調機の 2 ヵ年のファン電力量の比較を示す。2014 年度に比較し 34%の削減ができた

表－2　2015 年度の小風量設定

4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
中間期		夏期				中間期		冬期			
24h	24h	夜間・休日	夜間・休日	夜間・休日	夜間・休日	24h	24h	24h	24h	24h	24h



図－8　空調機ファン電力量

3.　更なる省エネルギーチューニング

3.1　熱源の省エネルギーチューニング

(1)　熱源の構成と運転の考え方

改修前の熱源はすべてガス焚吸収式冷温水発生機(以下ガス吸収式とする)であったが、改修後は図-9 に示すように熱回収チラー、空冷モジュールヒートポンプチラー(以下モジュールチラーとする)とガス吸収式のベストミックス熱源とした。

運転パターンについては、表-3 に示す各冷水熱源機の熱量あたりのコストにより検討し、熱回収チラーは常時運転とし、負荷に応じてモジュールチラー、ガス吸収式を運転した。

(2)　熱源運用の改善

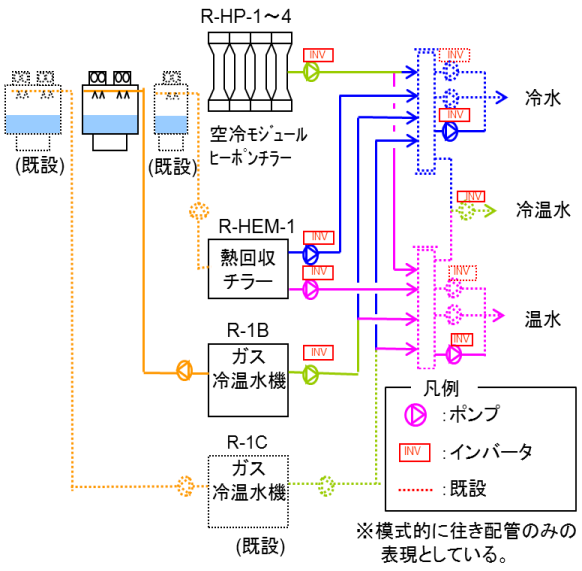
2014 年 7 月の冷水ピーク負荷に対して運転していた熱源の合計冷却能力の比は 80%であった。複数の熱源を運転した場合には流量に比例した熱量を各冷凍機が処理する。そこで熱回収チラーとモジュールチラーの処理熱量を上げてガス吸収式の処理熱量を下げる為に、ガス吸収式のポンプ流量を定格の 60%に設定した。

また、冷水設定温度についてもガス吸収式はモジュールチラーよりも 1℃高く設定した。

(3)　熱源の総合熱量単価

熱源の総合熱量単価を以下に定義し、2 ヵ年の比較を図-10 に示す。

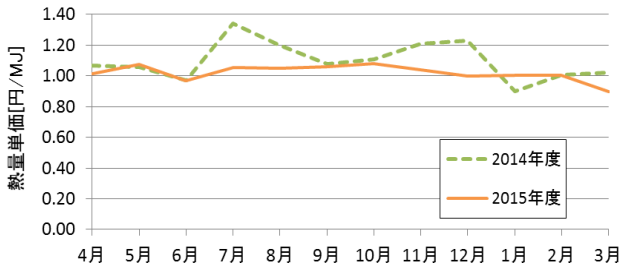
$$\text{総合熱量単価[円/MJ]} = \frac{\text{熱源全体エネルギーコスト[円]}}{(\text{冷水熱量}+\text{温水熱量})\text{[MJ]}}$$



図－9　改修後熱源フロー図

表－3 各冷水熱源機の熱量あたりのコスト

機器	冷却能力[MJ]	エネルギ消費量				1MJあたりｺｽﾄ[円/MJ]
			本体	ポンプ冷却塔	合計	
ｶﾞｽ焚吸収式冷温水機	3,038	電力[kWh]	7.4	103.4	110.8	2.10
		ガス[m3]	50.1	–	50.1	
		上水[m3]	–	1.3	1.3	
空冷ﾓｼﾞｭｰﾙﾋｰﾄﾎﾟﾝﾌﾟﾁﾗｰ	1,426	電力[kWh]	101	7.5	108.5	1.03
		ガス[m3]	–	–	0	



図－10　熱源総合の熱量単価

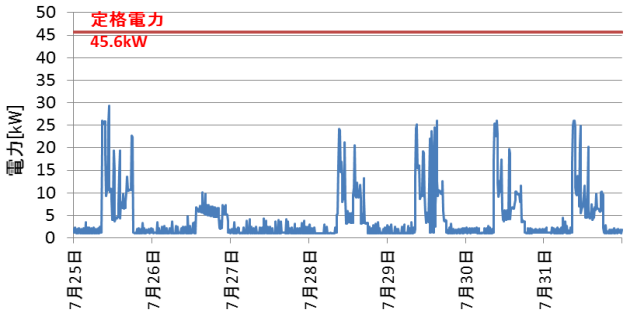
前述の運用改善と温水不具合改善の効果向上等により、2105 年は冷房シーズンの熱量単価を下げることができた

3.2　エアコンの省エネルギーチューニング

図-11 に 2014 年 7 月 25 日から 7 月 31 日の ESCO で導入したエアコンの 10 分ごとの電力変動を示す。ピーク時でも負荷率は約 60%であり、能力にかなりの余裕があることが分かる。また、平日昼間以外はほとんど負荷がない。

そこで冷房運転時の膨張弁における冷媒蒸発温度の設定を標準値より上げた。これにより、室内機吹出し温度が上がり最大能力は低下するが、効率は上がる。また、夜間・休日はできるだけ停止した。

2015 年度はエアコン室外機電力は前年比 71.7%であった。



図－11　7/25～7/31 のエアコンの電力変動

3.3　機械室ファンの運転時間の変更

機械室の換気ファンは 2014 年度は 24 時間運転を 1 日 4 時間の運転に、2 年目は夏期以外は 1 日 1 時間の運転に変更し、 運転時間を短縮した。

表－4　ファンの発停スケジュール(2015 年度)

○夏期(6月～9月)　時

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
EF-18							■				■				■				■					
EF-19								■				■				■				■				
EF-20									■				■				■				■			

○夏期以外(10月～5月)　時

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
EF-18															■									
EF-19																■								
EF-20																	■							

■ 運転

4.　建物全体の評価(一次エネルギー)

4.1　ベースラインの補正について

ESCO ベースラインの 2012 年～2014 年の 3 ヵ年の平均値に対して、以下の補正を行った。

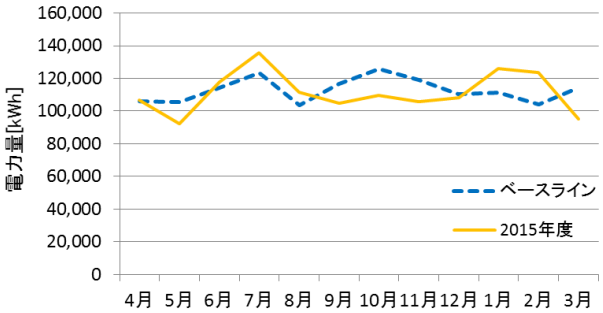
(1) 外気エンタルピ差による外気負荷の増減を処理する熱源電力の補正

外気のデータは大阪管区気象台の値を採用した。2015 年度はベースラインよりも夏は涼しく冬は暖かかった為補正は 174.1[GJ/年]減少であった。

(2) 実験装置の発熱（電力量）の差による冷却負荷の増減を処理する熱源電力の補正

実験装置の電力量を図-12 に示す。2015 年度はベースラインと比較して減少し補正は 52.9[GJ/年]減少であった。

外気分と実験装置分の合計でベースラインから 227[GJ/年]下げた値と 2015 年度実績値とを比較して削減量を求めた。

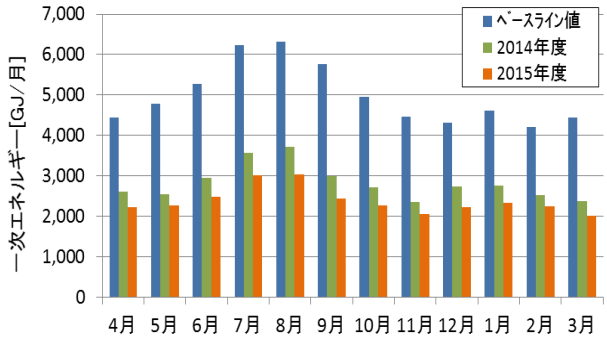


図－12 実験装置電力量

4.2　一次エネルギー削減量

(1)　全体

2014 年はベースライン（補正後）から 45.8%の省エネができたが、2015 年度は前年比で 11%削減量が向上し、51.0%の削減ができた。



図－13　一次エネルギー消費量

(2)　各項目ごとの削減量

表-5 に各項目ごとの一次エネルギー削減量の 2 ヵ年比較を示す。全ての項目で前年より削減量が向上した。

特に空調機の小風量運転への切替時間を延長した効果は前年より 125%と大きく向上し、前年比からの削減向上の 3,021[GJ/年]うち 58%を占めている。

表－5　省エネシステム概要

項目	省エネ 内容	エネルギー削減量（GJ/年） 保証値	2014年度	2015年度	前年比
熱源	熱源の高効率化（熱回収チラー、空冷モジュールチラーの導入）	9,272	14,255	15,136	106%
空調	空調機のインバータ化と低負荷時小風量運転	5,693	7,030	8,777	125%
空調	水冷エアコンの空冷化と過冷却-再熱の中止	2,174	2,653	2,788	105%
搬送	空調搬送ﾎﾟﾝﾌﾟの制御改善と小流量ﾎﾟﾝﾌﾟの設置	1,897	2,219	2,312	104%
その他	全熱交換器のバイパス制御、機械室ファンの間欠運転導入など	1,071	1,478	1,643	111%
合計		20,107	27,635	30,656	111%

5.　まとめ

ESCO の 2 年目効果検証期間にあたる 2015 年度は 2014 年度に計画通りにならなかった点の改善、省エネルギーチューニングにより前年比でエネルギー削減量が 11%向上し、改修前と比較して 51.0%の削減ができた。

謝辞

本 ESCO 事業にあたり国立大学法人　大阪大学様、株式会社 大阪ガスファシリティーズ様の多大なご支援を頂き、ここに深くお礼を申しあげます。

A-29

配管接続改修による空調用冷水カスケード利用の基礎的検討
-カスケード利用の導入可能条件-
Cascade Energy Use of Chilled Water for Air-Conditioning by Pipeline Renovation
Possible Introduction Conditions of Cascade Energy Use

○清 水　美 希（大阪市立大学）　　西 岡　真 稔（大阪市立大学）
鍋 島　美 奈 子（大阪市立大学）　　中 尾　正 喜（大阪市立大学）
小 田　久 人（新晃工業）

Yoshiki SHIMIZU[*1]　Masatoshi NISHIOKA[*1]　Minako NABESHIMA[*1]
Masaki NAKAO[*1]　Hisato ODA [*2]
[*1] Osaka City University　[*2] Sinko Industries Ltd.

In cascade energy use, we use chilled water for air-conditioning more than once. It is expected to reduce air-conditioning energy. In this paper, we consider the operation system and introduction effect of cascade energy use. Through some simulations, we suggest two operation systems of selecting the number of the coil rows and distributing chilled water to the first and second coils. It is shown that room temperature is properly maintained in the both operation systems, but sometimes room temperature rises and falls in the former operation system. It is also shown that the both operation systems can conserve energy compared to discrete heat source system.

1. 研究背景・目的

業務ビルにおけるエネルギー消費のうち、4 割以上が空調設備に係る消費エネルギーで占められており、例えば中間期に典型的となる熱源機の負荷率低下が空調設備の課題の一つである。この課題の改善策として熱源機の台数制御が挙げられ、建物内や建物間で複数負荷を少ない熱源機でまとめて処理すれば運転効率が向上する。このような仕組みを取り入れたシステムの構築が空調設備の省エネルギー化に求められる。

本研究では別々に空調される複数の空調機間で冷水配管を直列に接続し、冷水を複数段階利用する冷水カスケード利用を提案する。空調機を個別に運転する場合に比べ、一つの冷水で複数負荷をまとめて処理することで、冷水流量低減による搬送動力低減効果や、熱源機負荷率の上昇による運転効率向上効果が期待できる。

これまでに著者[1)]らは発生する熱損失や、実建物間へ導入時の省エネルギー効果について研究を進めてきた。また三浦[2)]はコイル仕様に着目し、冷水設計温度差がコイル出口状態や処理熱量に影響することを明らかにしている。

しかし、導入に有利な条件についての知見は依然として不十分であり、負荷状況に応じた運用手法や室内環境への影響は検討されていない。

そこで、本研究では負荷状況の変動に応じて冷水カスケード利用を成立させるための運用手法について検討し、その導入効果を把握することを目的とする。

2. 冷水カスケード利用システムモデル概要

Modelica 言語による空調シミュレーションツールの Buldings Library（以下ライブラリ）を用いて、冷水カスケード利用システムモデル(Figure 1)を構築した。このモデルは冷水カスケード利用の一段目・二段目となる二つの空調系統から構成し、それぞれをバイパス管で直列接続している。制御方法は、一般には冷水流量と風量の同時制御である場合が多いが、ここでは風量は定格値で一定とし、冷水流量の制御によって室温を一定としている。

機器構成として、冷却コイルはライブラリのモデルで濡れ面係数法による S 社の機器特性を表現し、熱源機も同様に国土交通省の LCEM ツール内の熱源特性を表現しており、部屋は壁体を想定した熱容量・熱コンダクタンス、室内発熱を加えた一質点の伝熱モデルである。

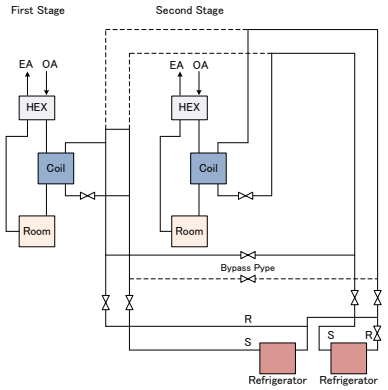


Figure 1　Cascade Energy Use System Model

3. 冷水カスケード利用の運用手法と導入効果の検討

3.1. はじめに

負荷に応じて冷水流量が制御されると、冷水経路が直列となる冷水カスケード利用では、二段目の入力条件は一段目の条件に制限を受けて負荷処理できない場合がある。そこで構築したモデルにより、負荷変動に応じた冷水カスケード利用の運用手法と導入効果について検討する。

3.2. 検討する運用手法

(1)列数可変コイルによる冷水カスケード利用(Type1)

コイル列数は負荷処理能力に影響を与えるため、同負荷に対しても列数が少ないほど必要となる冷水流量が大きく、冷水出入口温度差が小さくなる。この特性を生かし、負荷変動に対応する運用手法の一つとして、列数が可変であるコイルを用い、負荷変動に応じて一段目コイル列数を変更することで、二段目で熱量が不足しないよう冷水流量を調整するという運用手法について検討する。一段目コイル列数の選択肢は 8 列、4 列、0 列とし、また二段目コイル列数は 3 つの中で処理能力が高い 8 列とする。

各列数における一段目・二段目の処理可能な負荷比率をモデルにより検討したところ下記のようになった。

一段目に対する二段目の処理可能な負荷比率
（一段目室負荷 20kW）
・（一段目，二段目）＝（8 列, 8 列）： 約 6/10
・（一段目，二段目）＝（4 列, 8 列）： 約 8/10

これを踏まえ、二段目室負荷が異なる 3 つの負荷帯(Table 2)を設定し、2 時間ごとに低負荷帯、中負荷帯、高負荷帯と移行する計 6 時間の負荷を与える。ただし高負荷帯では①一段目だけ負荷処理、②二段目だけ負荷処理を切り替える運転を行い、切替間隔は 30 分とする。

Table 1　Coil Rated Value

	4 Row Coil	8 Row Coil
$q_{T,0}$	85.20 kW	146.88 kW
$q_{s,0}$	54.97 kW	77.64 kW
$q_{l,0}$	30.27 kW	69.23 kW
$V_{a,0}$	3 m³/s	3 m³/s
$V_{w,0}$	280.8 L/min	561.6 L/min
$t_{a,in,0}$	34°C	34°C
$t_{w,in,0}$	7°C	7°C
$DP_{a,0}$	22.09°C	22.09°C

$q_{T,0}$: Nominal Total Heat [kW]
$q_{s,0}$: Nominal Sensible Heat [kW]
$q_{l,0}$: Nominal Latent Heat [kW]
$V_{a,0}$: Nominal Air Flow [m³/s]
$V_{w,0}$: Nominal Water Flow Rates [L/min]
$t_{a,in,0}$: Nominal Return Air Temperature [°C]
$t_{w,in,0}$: Nominal Water Inlet Temperature [°C]
$DP_{a,0}$: Nominal Dew Point Temperature [°C]

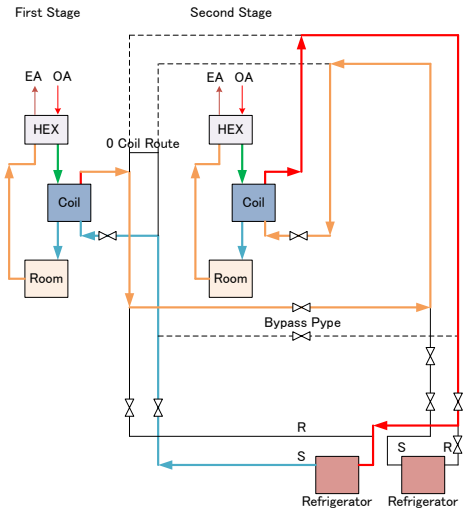


Figure 2　Cascade(Type1) Low Load : First[8 Row], Second[8 Row]

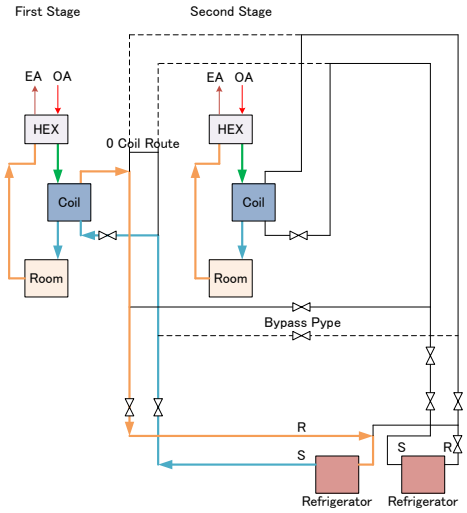


Figure 3　Cascade(Type1) High Load①　: First[8 Row], Second[off]

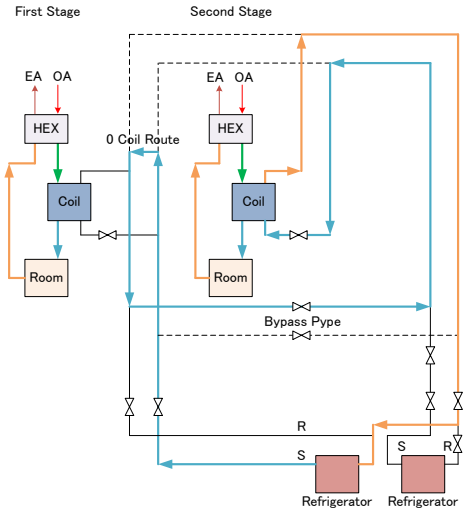


Figure 4　Cascade(Type1) High Load②　: First[off], Second[8 Row]

Table 2　Thermal Load and Number of Coil Rows (Cascade(Type1))

		Room Load		Number of Rows	
		First	Second	First	Second
Low Load		20kW	12kW	8 Row	8 Row
Medium Load		20kW	16kW	4 Row	8 Row
High Load	①	20kW	20kW	8 Row	0 Row
	②			0 Row	8 Row

(2)二段目へ冷水分流による冷水カスケード利用(Type2)

コイル列数を可変とする代わりに、一段目に供給する冷水の一部を二段目に分流し、二段目に一段目から流れる二次冷水に加えて二段目に一次冷水を送り混合することで二段目の不足熱量を補うという運用手法について検討する。この運用手法は直列経路で冷水を複数段階利用しながらも一部並列に冷水を供給する手法で、熱源機の余力をより活用することが可能となる。ただし分流経路となる配管の増設が必要であり、Type1 に比べて配管増設コストが大きくなる。

与える負荷変動は Type1 と同じ 3 つの負荷帯とし、二段目の不足熱量に応じて分流する冷水流量を制御する。なおコイル列数は全ての負荷帯で 8 列とする。

Table 3　Input Condition

	First	Second
Water Inlet Temperature	7°C	-
OA Temperature and Humidity	30°C・50 %	30°C・50 %
Setting Room Temperature	25°C	25°C
Room Volume	2000 m^3	500 m^3
Air Flow	3.0 m^3/s	3.0 m^3/s

3.3. 検討結果

(1)列数可変コイルによる冷水カスケード利用(Type1)

もし冷水カスケード利用が成立しなければ、室温が維持できずに上昇する傾向が見られるが、本検討における室温(Figure 6）は、一段目・二段目ともに負荷変動に対して設定値の 25°Cにおおよそ維持されており、冷水カスケード利用が成立していると言える。

この要因としては冷水流量(Figure 7)がコイル列数に応じて変化しているためであり、一段目が 8 列の低負荷帯では約 80L/min、一段目が 4 列の中負荷帯では約 115L/min とコイル列数が少ないほど冷水流量が増加するという特性が表れている。

ただし高負荷帯では負荷処理停止時に室温上昇が見られ、一段目、二段目とも 30 分間で約 1~2°C上昇し、負荷処理再開後に蓄積された負荷を処理して再び室温を 25°C まで低下させている。このように負荷処理停止を伴う運転では温度ムラが生じ、室内環境の質が低下する。

(2)二段目へ冷水分流による冷水カスケード利用(Type2)

室温(Figure 8)は、一段目・二段目ともに負荷変動に対して設定どおり 25°Cに維持されており、冷水カスケード利用が成立していると言える。

この要因としては負荷の増加に応じて二段目へ分流する冷水流量(Figure 9)が増加しているためであり、一段目は全負荷帯で約 60L/min であるのに対し、二段目は低負荷帯では約 70L/min、中負荷帯では約 130L/min、高負荷帯では約 170L/min と順に増加している。

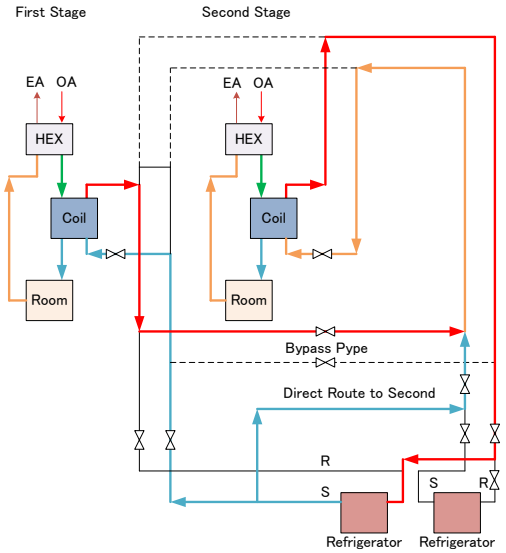


Figure 5　Cascade(Type2)

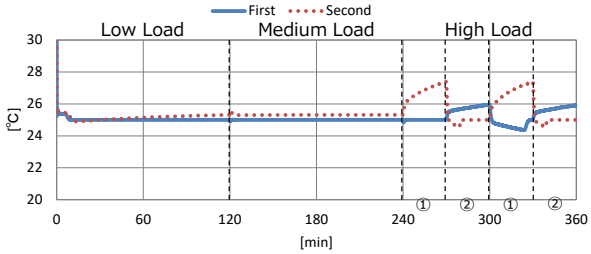


Figure 6　Room Temperature (Cascade(Type1))

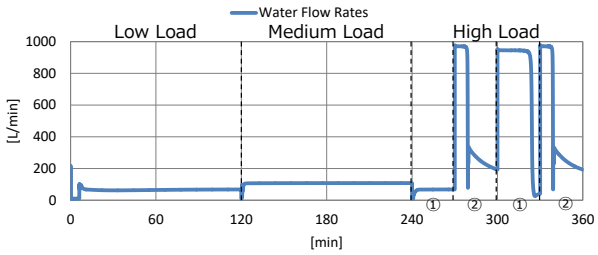


Figure 7　Water Flow Rates (Cascade(Type1))

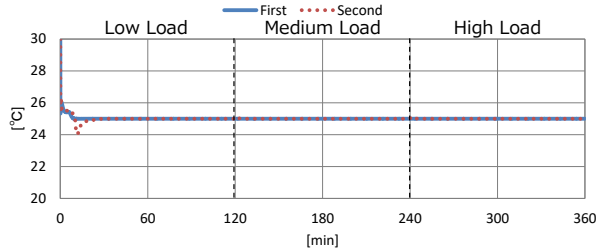


Figure 8　Room Temperature (Cascade(Type2))

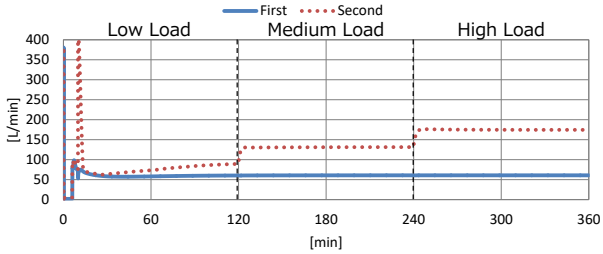


Figure 9　Water Flow Rates (Cascade(Type2))

3.4. 省エネルギー効果

検討した二つの運転手法と同条件における個別運転のエネルギー消費量を比較すると、各運転のエネルギー消費量(Figure 10)は、個別運転で 580MJ、列数可変コイルによるカスケード運転で 367MJ、二段目へ冷水分流によるカスケード運転で 360MJ であり、個別運転に比べてそれぞれ 37%、38%の省エネルギー効果が得られる結果となった。

要因としては、熱源機運転台数削減効果が大きく、個別運転では二台の熱源機を運転し、エネルギー消費量の合計は 568MJ であるのに対し、二つのカスケード運転では一台の熱源機のみ運転し、エネルギー消費量はそれぞれ 367MJ、360MJ となっている。

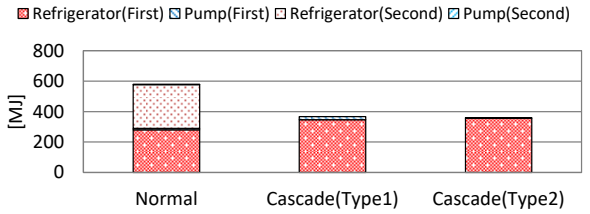


Figure 10　Energy Consumption

3.5. 実負荷の想定

3.5.1. 概要

設定した負荷条件において、二つの運用手法により冷水カスケードが成立することを示したが、ここでは実在する業務ビルの実負荷(Figure 11)を負荷条件として与え、同様に二つの冷水カスケード利用が成立するか検討する。

(1)列数可変コイルによる冷水カスケード利用(Type1)

負荷条件より一段目の負荷は約 10kW と、熱源機の容量350kW に対して低負荷であるため各コイル列数選択時の負荷比率は前節より小さく、モデルにより検討したところ下記のようになった。

一段目に対する二段目の処理可能な負荷比率
（一段目室負荷 10kW）
・（一段目，二段目）＝（8 列, 8 列）： 約 3/10
・（一段目，二段目）＝（4 列, 8 列）： 約 4.5/10

これと負荷条件より、運転パターン(Table 4)を設定する。

(2)二段目へ冷水分流による冷水カスケード利用(Type2)

コイル列数は一段目、二段目ともに 8 列とし、負荷条件に応じて二段目に分流する冷水流量を制御する。

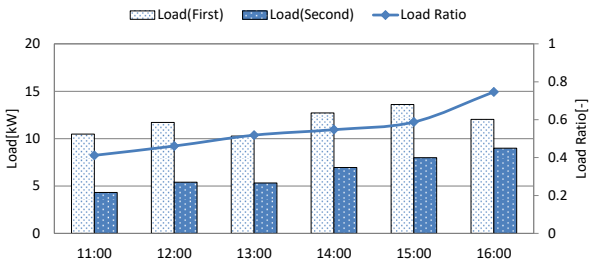


Figure 11　Input Actual Load

Table 4　Operation Pattern (Cascade(Type1))

	Number of Rows	
	First	Second
11:00~11:30	4 Row	8 Row
11:30~16:00	8 Row	0 Row
	0 Row	8 Row

3.5.2. 検討結果

(1)列数可変コイルによる冷水カスケード利用(Type1)

実負荷においても負荷変動に対応して室温が設定値の 25℃に維持されており、冷水カスケード利用が成立することが確認できた。ただし、与えた実負荷では一時的な負荷処理停止を伴う運転切替が必要な場合が多く、結果として室温の温度ムラが生じて室内環境の質が低下する場合が多いことを把握した。

(2)二段目へ冷水分流による冷水カスケード利用(Type2)

実負荷においても負荷状況の変動に応じて二段目へ分流する冷水流量を変更することで室温を設定値の 25℃に保ち、冷水カスケード利用が成立することが確認できた。

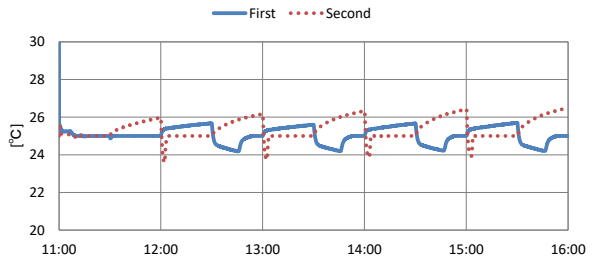


Figure 12　Room Temperature (Cascade(Type1))

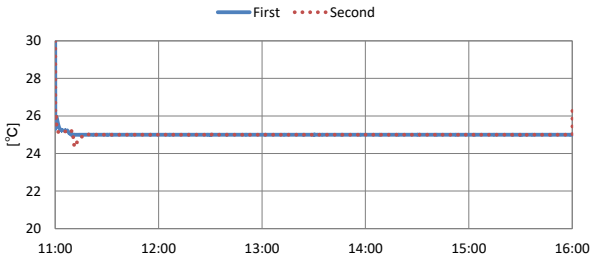


Figure 13　Room Temperature (Cascade(Type2))

4. まとめ

(1)列数可変コイルによる冷水カスケード利用、二段目へ冷水分流による冷水カスケード利用という二つの運用手法を提案してそれぞれ負荷変動に対応して成立することを確認した。

(2)提案した二つの冷水カスケード利用の運用手法ではそれぞれ省エネルギー効果が得られることを示した。

＜参考文献＞

1) 浅田雄樹ほか：二建物間における冷温水の建物間カスケード利用システムの省エネルギー効果に関する研究,平成 27 年度空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会,2016 年 3 月

2) 三浦克弘：空調設備における冷温水多段利用に関する研究,平成 22 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 p.1413-1414, 2010 年 9 月

A-30

温泉源泉からの熱回収に関する研究

ー熱交換器の性能劣化特性と形状の把握ー

Study on heat recovery from hot spring
-Evaluation of degradation character of heat exchangers and discussion about potential for improvement in their shape-

○柊本　一成（大阪市立大学）　三毛　正仁（総合設備コンサルタント）
澤部　孝一（総合設備コンサルタント）　澤田　紗奈（総合設備コンサルタント）
鍋島　美奈子（大阪市立大学）　西岡　真稔（大阪市立大学）
中尾　正喜（大阪市立大学）

Kazunari HIRAGIMOTO*[1]　Masahito MIKE*[2]
Koichi SAWABE*[2]　Minako NABESHIMA*[1]　Masatoshi NISHIOKA*[1]　Nakao NAKAO*[1]
*[1] Osaka city University　*[2] Sogo Setsubi Consulting Co. ,Ltd

In order to use the hot spring heat, we have considered heat recovery from hot spring at the community. A series of experiment for evaluating the degradation character of heat exchangers (HEX) by scale in hot spring is conducted. As a result, flat plate HEX has not been degraded its performance by scale in alum spring for a week. On the other hand, falling-film HEX has been degraded its performance for 3 month. The degradation character is analyzed from the point of view of outside temperature and scale. Consequently falling-film HEX has been affected by not only scale but also decrease in outside temperature. We have also discussed about improvement of the experiments and shape of HEX by referring the formula for estimation of the heat transfer coefficient from previous researches. As a result, a few improvements in both type of HEX are indicated.

はじめに

東日本大震災以降、我が国のエネルギー施策の見直しが求められている。近年未利用のエネルギー有効利用として自然界に存在する再生可能エネルギーが注目され、その活用が期待されている。康ら [1)]は温泉施設においての施設の規模の大きさによらず給湯需要量が大きいことを示した。また温泉地域全体で熱を融通するシステムも検討されており [2)]、本研究では温泉熱を有効利用する熱回収システムの検討を行う。回収した熱は給湯用上水の予熱、ヒートポンプの熱源である熱源水の予熱に利用することを想定している。温泉から熱を回収するための熱交換器は、スケール付着により徐々に性能が劣化することが予想されるため、本研究では実際の温泉を用いて熱交換器の性能を把握するための実験を行う。また実験で用いた熱交換器の配管径や配管間隔などの形状や設置方法が熱交換器の性能を示す熱通過率(W/(m^2・K))にどのような影響を及ぼすのか考察し、熱交換性能向上に向けた。改良の方向性を明らかにする。

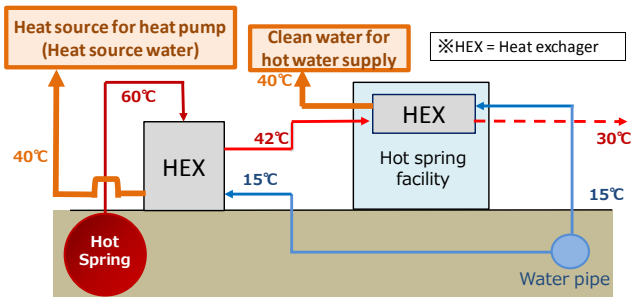


Figure 1 Image of heat utilization from hot spring

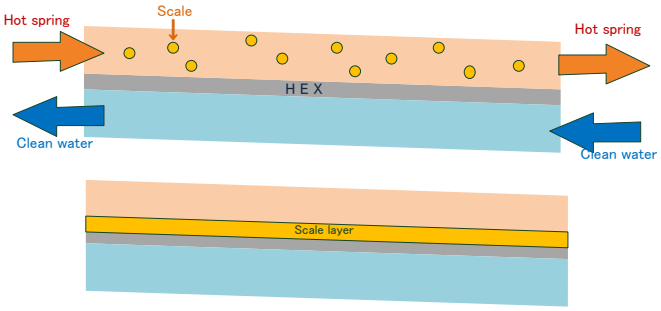


Figure 2 Image of the performance degradation of HEX

1 性能把握試験の概要

本研究で用いる熱交換器は浴室排水の熱を回収する平板型熱交換器と源泉の熱を回収する流下液膜式熱交換器の 2 種類である。熱交換器の高温側熱源は源泉、低温側はボイラー給水または熱源水である。各流体の出入口温度を計測し熱交換器の熱通過率を算出することで経時変化と性能劣化の関係を明らかにし、評価する。熱通過率算出式を(1)~(3)に示す。

2 平板型熱交換器の性能把握試験

2.1 試験概要

試験は源泉の豊富な鹿児島県霧島市で行い、試験期間は 2016 年 8/26~9/2 の 1 週間、1 日の試験時間は 10 時から 14 時とした。使用する源泉は明礬泉で源泉は熱交換器に 1/50 の傾斜を付けて 24(L/min)流し、上水は 12(L/min)で熱交換器の配管に流した。試験をした平板型熱交換器は平板型パイプ式熱交換器と平板型プレートコイルの 2 つである。平板型パイプ式熱交換器は給湯用上水の予熱、平板型プレートコイルは熱源水に予熱する役割が見込まれている。各熱交換器の形状と熱通過率の理論値を Table 1 示す。

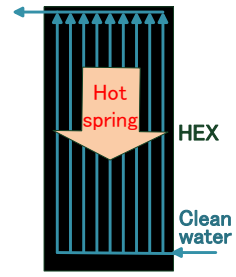
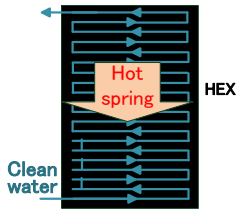
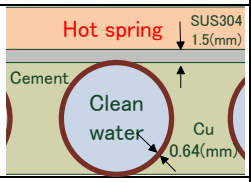
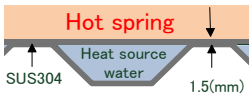
2.2 試験結果

試験結果を Figure 3 と Figure 4 に示す。1 日の試験の熱通過率は 10:00~14:00 の間で得られた計測温度と源泉、上水の流量のデータから算出し、そこで得られた熱通過率の経時変化から時間によって大きな変化がない安定した時間の熱通過率を取り出し、その平均値をその日得られた熱通過率とする。試験結果から 1 週間熱通過率に大きな変化は見られず、1 週間では明礬泉内のスケールは熱交換器の性能に影響を及ぼさないことが確認された。試験中の源泉を流していた熱交換器の平板を試験が始まる前に毎日確認したが、スケールの付着やスケールによる変色も見られなかった。また、試験中に熱交換器の平板にテストピースを数枚貼り、1 日ごとに取り外した後、顕微鏡で変化を調べたがスケールによる変化を観察することはできなかった。そのため 1 週間では熱交換器に明礬泉のスケールが付着しないことが分かった。一方試験中に源泉を流していた塩ビ管は 1 週間で赤く変色しており、実際に試験した源泉にはスケールが含まれていたことと、明礬泉のスケールの付着のしやすさはその源泉に触れている材質によって異なることが確認された。

- $Q = \rho C V (T_{co} - T_{ci})$ (1)
- $\Delta T_m = (\Delta T_A - \Delta T_B) / \log (\Delta T_A / \Delta T_B)$ (2)
- $K = Q \Delta T_m / A$ (3)

Q :Exchange amount of heat(W)
ρ :Density(kg/m^3)
C :Volumetric specific heat(J/(kg・K))
V :Clean source flow rate(m^3/s)
T_{wi} :HEX inlet temperature of hot spring(℃)
T_{wo} :HEX outlet temperature of hot spring(℃)
T_{ci} :HEX inlet temperature of clean water(℃)
T_{co} :HEX outlet temperature of clean water(℃)
ΔT_m :Logarithmic mean temperature difference(K)
ΔT_A : $T_{wi} - T_{co}$(K) A :Heat-transfer area(m^2)
ΔT_B : $T_{wo} - T_{ci}$(K) K :Heat transfer coefficient(W/(m^2・K))

Table 1 Specification of each HEX

	Flat plate HEX (Pipe type)	Flat plate HEX (Plate coil)
Clean water route		
Cross-section structure		
Heat transfer coefficient	477(W/(m^2・K))	1448(W/(m^2・K))

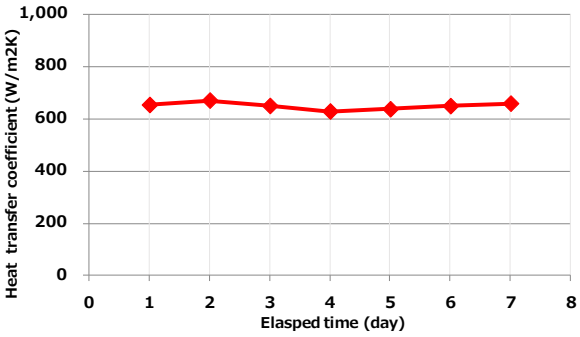


Figure 3 Aging of heat transfer coefficient of Flat plate HEX(Pipe type)

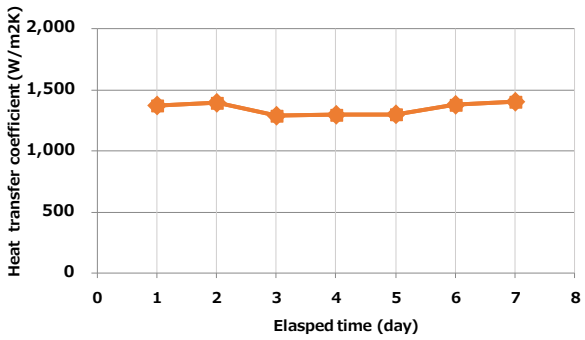


Figure 4 Aging of heat transfer coefficient of Flat plate HEX(Pipe type)

3 流下液膜式熱交換器の性能把握試験

3.1 試験概要

試験は平板型熱交換器の試験同様、鹿児島県霧島市で行い、源泉と熱源水ともに 15(L/min)流した。5/27~8/17 に硫黄泉、8/18~11/18 に明礬泉を用いて試験を行った。Figure 5 に熱交換器の構造を示す。

3.2 試験結果

硫黄泉を用いた場合熱交換器の性能が低下していないことがわかった。一方 Figure 6 より明礬を用いた場合、熱交換器の性能が低下していることが確認された。明礬泉を用いて試験した期間の気温のデータから外気温の低下も確認された。またこの期間で最も計測温度の低下が著しかったのは熱源水出口温度と判明した(Figure 7)。ここの試験結果のみでは外気温かスケールの影響か判断できないため、外気温の低下による熱源水出口の低下温度を求めるために 1~2 日単位の外気温と熱源水出口温度の散布図(Figure 8)から回帰式を作成し、基準温度を 20℃とする場合の補正温度差を求める。基準外気温度を 20℃とし、式 4 を用いて熱源水出口温度を補正し、再度熱通過率を算出した。補正後と補正前の熱通過率の経時変化を Figure 9 に示す。Figure 9 より補正後の熱通過率も徐々に低下していることが分かった。9 月 17 日以降、源泉をくみ上げるポンプの不調で、源泉の流下停止-再開を繰り返しており、その際に熱通過率が不連続に変化することが確認された。源泉の流下停止時にスケールの状態が変化したと考えられる。試験開始時、熱通過率は 650 [W/(m^2・K)]程度であったが、1 か月経過後から徐々に低下し、3 か月後には 300[W/(m^2・K)]程度になった。

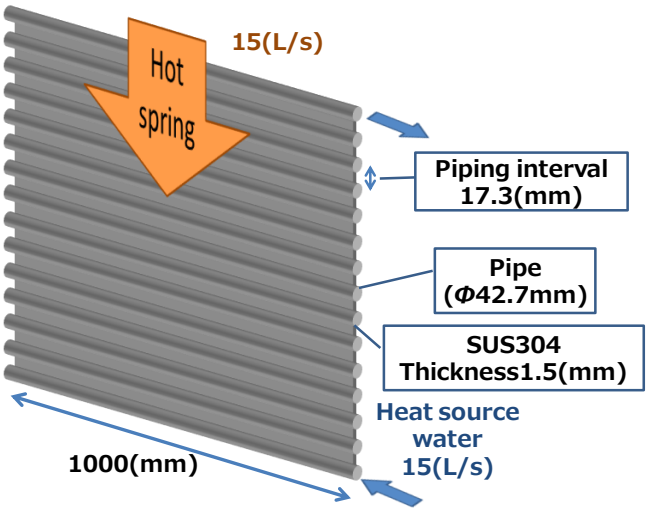


Figure 5 Specification of falling-film HEX

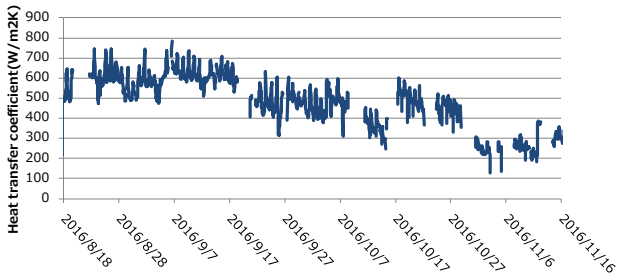


Figure 6 Aging of heat transfer coefficient(alum spring)

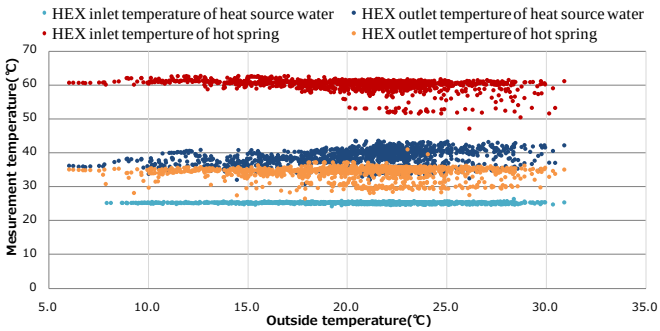


Figure 7 Relation of measurement temperature and outside temperature

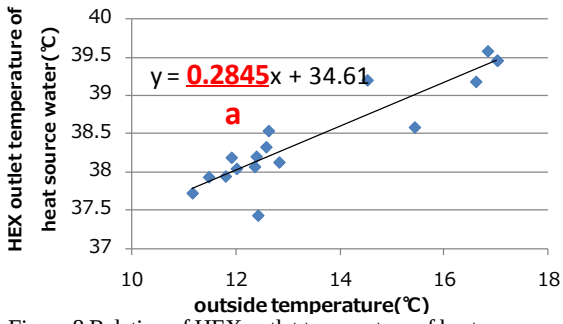


Figure 8 Relation of HEX outlet temperature of heat source water and outside temperature in a day (11/16)

$$T'_{\infty} = a\,(T'_a - T_a) + T_{\infty} \qquad (4)$$

T'_{∞} :Corrected HEX outlet temperature of heat source water (℃)
a :Slope of regression formula
T_a :Outside temperature(℃)
T'_a :Standard outside temperature (20℃)
T_{∞} :HEX outlet temperature of heat source water (℃)

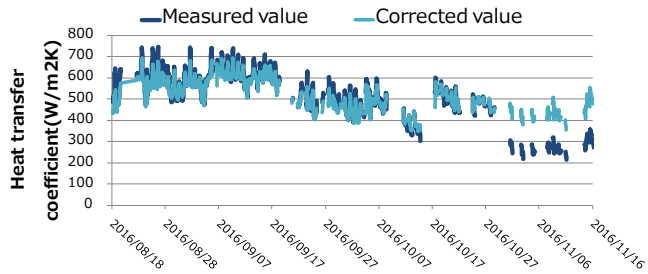


Figure 9 Aging of heat transfer coefficient and corrected it

4 熱交換器の形状の検討

4.1 検討の概要

各熱交換器の熱通過率の理論値から性能把握試験の改善点や熱交換器の配管、管間隔などの形状と性能の関係を計算によって把握する。流下液膜式熱交換器は Jacobi の式 [2)]を用いて検討を行った。流下液膜式熱交換器の高温側ヌセルト数は式(5)~(8)に示す Jacobi らの実験式 [2)]を用いて算出し、理想的な条件下で得られる熱通過率を推定した。

4.2 流下液膜式熱交換器の形状

熱交換器の管間隔と熱通過率の関係を Figure 10、管外形と熱通過率の関係を Figure 11、明礬泉を用いた性能把握試験から得られた熱通過率と同じ流量条件で Jacobi の式から算出した熱通過率の推定値の経時変化を Figure 12 に示す。Figure 10 より液膜の配管の間隔に伴って熱通過率が大きくなることが分かった。しかし管間隔が極端に大きくなると寸法が大きくなる。また Figure 11 より配管径に伴って熱通過率は小さくなる。しかし配管径を極端に小さくすると配管にかかる負荷が大きくなるため、長期間の使用は見込めない。また流下液膜式熱交換器の性能把握試験中の熱交換器の様子から、熱通過率推定値と試験結果の差(Figure 12)は流下する源泉の膜厚の分布や熱交換コイルから飛沫した源泉によって生じたと確認された。今後源泉の膜厚が偏らず熱交換器から源泉の飛沫が生じないような熱交換コイルの形状に改善の必要があると分かった。コイル上部の源泉放出口を増やすなどの工夫により、コイル全体に源泉が均一に流下しやすくなり、コイルから源泉の飛沫については配管の形状変更により緩和されると考えている。

5 まとめ

2 種類の熱交換器の性能把握試験の結果と熱通過率推定値の比較により、熱交換器の形状と性能の関係や本研究の性能把握試験の改善すべき点が確認された。

Droplet Mode	$Nu = 0.113\mathrm{Re}^{0.85}\mathrm{Pr}^{0.85}\left(\frac{\rho_h^2 g D_o^3}{\mu_h^2}\right)^{-0.27}\left(\frac{s}{D_o}\right)^{0.04}$	(5)
Jet Mode	$Nu = 1.378\mathrm{Re}^{0.42}\mathrm{Pr}^{0.26}\left(\frac{\rho_h^2 g D_o^3}{\mu_h^2}\right)^{-0.23}\left(\frac{s}{D_o}\right)^{0.08}$	(6)
Sheet Mode	$Nu = 1.378\mathrm{Re}^{0.28}\mathrm{Pr}^{0.14}\left(\frac{\rho_h^2 g D_o^3}{\mu_h^2}\right)^{-0.20}\left(\frac{s}{D_o}\right)^{0.07}$	(7)
	$h_f = Nuk_h / \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3}$	(8)

Nu :Nusselt number(-) Re :Reynolds number(-)
Pr :Prandtl number(-) ρ_h :Density of the falling-film (kg/m^3)
g :Gravity acceleration (m/h^2) s : Interval of pipes(m)
D_0 : Outside diameter of heat transfer pipe[m],
μ_h : Viscosity of the falling-film(kg/(m・s)

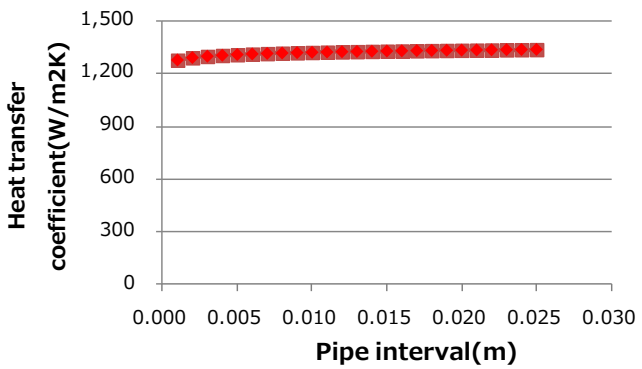


Figure 10 Relation of heat transfer coefficient and pipe interval

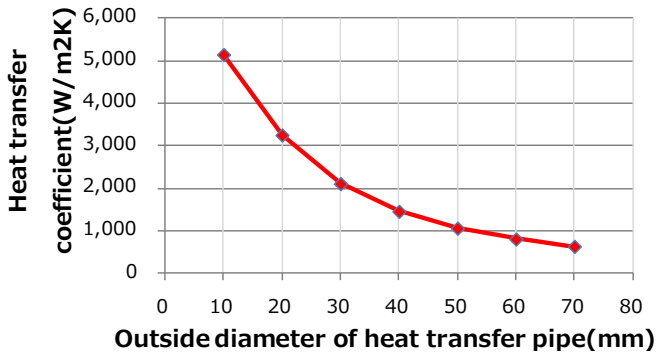


Figure 11 Relation of heat transfer coefficient and outside diameter of heat transfer pipe

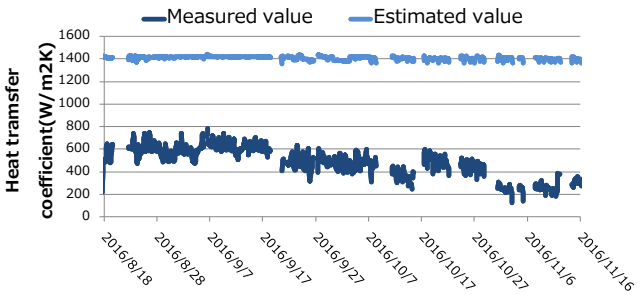


Figure 12 Aging of Measured value and estimated value(alum spring)

参考文献

1) 康尚義他：「温泉地域における熱源水ネットワークシステム導入に関する研究 - 規模の異なる 2 軒の宿泊施設における温泉・給湯需要および排湯温度に関する実測調査 - 」空気調和・衛生工学会学術講演文集 2016 年 3 月

2) 温泉と排湯を利用した熱源水ネットワークシステムの構築 （第 3 報）システム導入による地域全体のエネルギー消費量削減効果の検討

3) X.Hu and M.Jacobi：The Intertube Falling-Film Modes: Transition ,Hysteresis,and Effects on Heat Transfer,

[あとがき]

この成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果、得られたものです。

A-31

京町家の井戸水を利用した暖房が井戸水温度に与える影響の検討

Investigation of Influence of the geothermal heat-pump air conditioning system using well water of Kyo-machiya dwellings to well water temperature

○高野駿（京都大学）　伊庭千恵美（京都大学）　鉾井修一（京都大学）

萩原可奈（西日本旅客鉄道株式会社）　難波真衣（京都大学）

Shun TAKANO[*1]　Chiemi IBA[*1]　Shuichi HOKOI[*1]

Kana HAGIHARA[*2]　Mai NAMBA[*1]

[*1]Kyoto University　[*2]West Japan Railway Company

Today, using ground-source heat attracts a great deal of public attention. Traditional wooden dwellings unique to Kyoto called Kyo-machiya require relatively large energy to heat during winter, but most of them have a well as a water source, which can potentially be a great source of geothermal heating. In this study, the influence of the geothermal heat-pump system operation to well water temperature was analyzed by both measurement and computational fluid dynamics analysis. It was found that a certain amount of warm underground water flow in and out the bottom part of the well and as a result heat was supplied constantly.

１．はじめに

地中熱は天候や季節に左右されない安定したエネルギー源として注目が集まっているが、掘削費用などの初期費用が大きく日本の住宅では普及が進んでいないのが現状である[1)]。一方京町家は京都の伝統的な木造住宅建築であるが、気密性・断熱性が不十分なものが多く、冬季の暖房エネルギー消費が特に大きくなっている。京町家には使用されていない井戸が多く存在しており[2)]、その井戸水を熱源とした地中熱ヒートポンプ暖房システムは、初期費用を抑えつつ省エネルギーを実現できる可能性がある。

先行研究として、萩原ら[3)4)]は三次元の熱移動モデルによって井戸水の温度変化を再現することで熱源としての性能評価と最適使用方法の検討を行い、熱源としての有用性を示すとともに暖房の継続的な使用のためには井戸水の温度回復時間を設ける必要があることを示したが、それらの研究では井戸内部の水の動きや井戸への地下水流入、採熱管の配置等については、井戸水温度が実測値に合うように仮定し計算を行っている。そこで本研究ではこれらの井戸内部の状況についての仮定の妥当性を実測と流体解析を用いて明らかにしたうえで、より効率よく採熱するための採熱管配置について検討することを目的とする。

２．実測調査

２－１．実測対象

実測対象とする井戸は、地中熱ヒートポンプ暖房を実際に運転している京町家の井戸である。この地中熱ヒートポンプ暖房と井戸の概要を **Fig. 1** に示す。

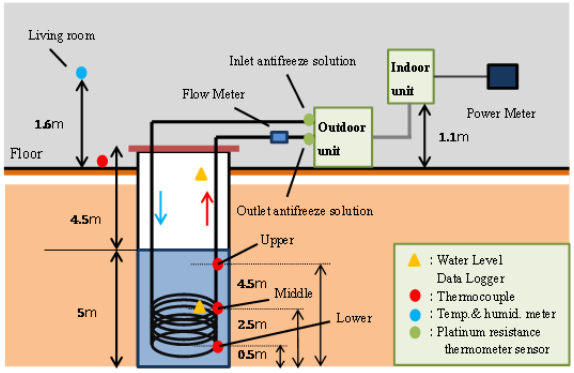


Fig. 1 Outline of geothermal heat-pump system set up in Kyo-machiya well

本研究で扱う地中熱ヒートポンプ暖房は、外気と熱交換を行う通常の空調機とは異なり、室内にある室外機と井戸をつなぐ採熱管に不凍液を循環させることで井戸水と熱交換を行い、得られた熱量を暖房エネルギーとして使用する。測定対象として高さの異なる３点での井戸の水温、井戸の水位、不凍液の往き還り温度、不凍液の還り流量、室の温湿度、暖房の消費電力を計測した。

２－２．実測調査結果

2015 年 11 月 12 日～2016 年 4 月 30 日の水温と室温の実測結果を **Fig. 2**　に示す。冬季のヒートポンプ暖房運転期間には上部・中部・下部のいずれも水温が大きく低下する。運転期間外は室温と比べて水温は非常に安定した値を示しているため、これらの温度低下は地中熱ヒートポンプ暖房運転によるものと考えられる。

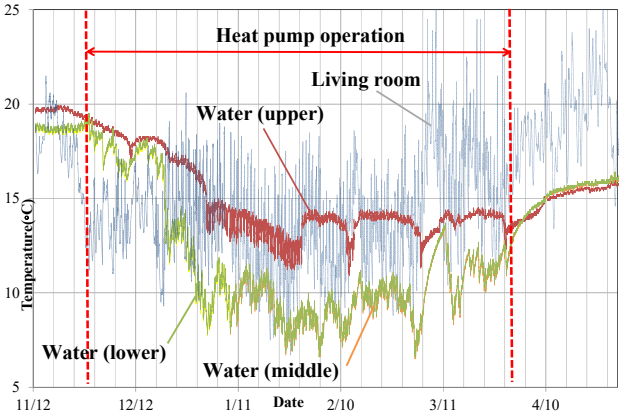


Fig. 2 Temperature of well water during winter

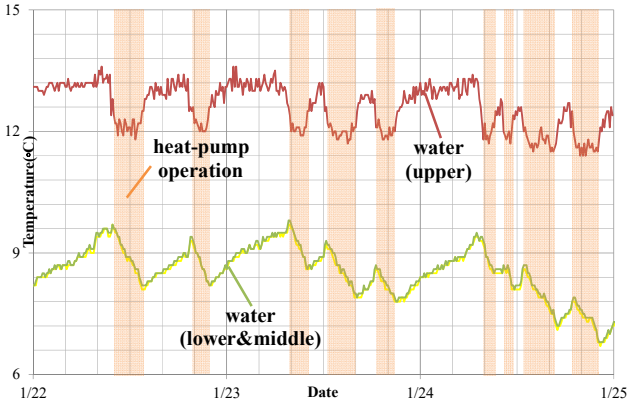


Fig. 3 Temperature of well water during three days when heating system was running at frequent intervals

暖房使用時の短時間での温度変化を調べるため、暖房が継続的に使用されている期間中の 2016 年 1 月 22 日 ~2016 年 1 月 25 日の水温の実測結果を **Fig. 3** に示す。この期間では暖房使用とともに井戸のいずれの測定点においてもの温度が低下し、停止後は上部の水温はすぐに回復するが中部・下部が回復するにはかなりの時間を要することが分かる。また、約２ヶ月間断続的に暖房を運転した場合、井戸上部と中部・下部で約４℃の温度差が発生することがわかる。

３．数値流体解析による井戸内水温度分布の再現

３－１．解析概要

本章では数値流体解析ソフトを使用して井戸の採熱管配置の現状を模したモデルを作成し、第２章で示したヒートポンプを使用した際の井戸水の温度分布の特徴を再現した。このとき、ヒートポンプ運転後の井戸水の温度上昇速度等に注目して地下水の井戸への流入や地盤からの熱流入といった境界条件を算出した

井戸の内部を模した基本モデルの断面図、立面図をそれぞれ **Fig. 4** に、基本モデルに使用した物性値を **Table. 1** に示す。本来の井戸、採熱管は円筒形であるが、簡易化のため立方体に近似し、それぞれ体積、表面積を実際の井戸、採熱管と等しくすることで表現した。実際の井戸の観察結果と設置時の様子を観察し、採熱管は井戸底面

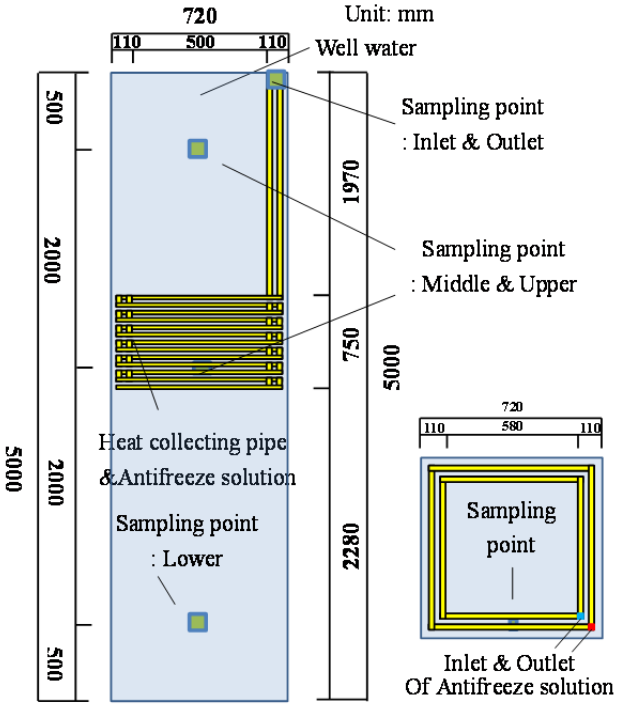


Fig. 4 Section of the basic calculation model

Table. 1 Material property used in calculation

Object	Property	Value
Well water	Density	997.5 [kg/m^3]
	Thermal conductivity	0.604 [W/(mK)]
	Specific heat	4179 [J/(kgK)]
Antifreeze solution	density	1020 [kg/m^3]
	Thermal conductivity	0.5 [W/(mK)]
	Specific heat	4100 [J/(kgK)]
Well wall	Density	2110 [kg/m^3]
	Thermal conductivity	1.395 [W/(mK)]
	Specific heat	1130 [J/(kgK)]

から約 3mの高さに集中して配置されていると仮定した。また、不凍液と井戸水間の熱貫流率は不凍液還り温度が実測値と合うように 60 [W/m^{2}K]に設定した。計算には流体解析ソフト Flow Designer を使用した。

解析期間は①暖房が継続的に使用される前の冬季序盤と②暖房が継続的に使用されている冬季中盤の２パターンとし、それぞれ流量と不凍液の往き温度をその時期の任意の暖房運転時の実測値から与え、水温、地盤温度を初期条件をそれぞれのケースに対して **Table. 2**, **Table. 3** で与える。

３－２．パターン①：冬季序盤の解析結果（温度）

冬季の序盤においては、地下を流れている水と井戸内部の水にほとんど温度差が見られないため、地下水の流入による熱移動を考慮せず、井戸壁と井戸水の温度差による熱伝導のみを考慮する。パターン①の解析モデル概

観を **Fig. 5** に示す。井戸水の周囲はモルタルの周壁で覆われていると仮定し、周壁の外側は周辺地盤からの熱流入により温度一定と仮定した。メッシュ数は 47*47*264 で計算した。

計算期間は 2015 年 12 月 2 日 7 時 30 分～16 時 00 分とし、実測結果と比較した。解析の計算条件を **Table. 2** に示す。水温は中部の水温の実測値から 18.5℃で全体を統一して設定し、周壁もそれに合わせて同じく 18.5℃として設定した。また、冬季の序盤は井戸水の温度低下があまり進んでいないため、不凍液の往き温度は約 10~11[℃]、流量は約 8 [L/min]で推移していた。

実測結果と解析結果の温度の比較を **Fig. 6** に示す。不凍液の出口温度、水温の分布ともに大略一致していることが分かる。このことから、冬季の序盤においては井戸内の温度分布は地下水流による熱移動の影響を受けなくても、地盤からの熱伝導の影響により水温が回復することがわかった。

３－３．パターン②：冬季中盤の解析結果（温度）

冬季の中盤においては継続的な暖房使用により井戸壁および周辺地盤の温度が著しく低下しているため、地盤から井戸水への熱伝導は無視できるほど小さいと仮定し、地下水流による熱交換のみを考慮した。パターン②の解析モデル概観を **Fig. 7** に示す。井戸水の周囲は断熱であると仮定し、井戸の底部から約 800mm の範囲で水流が発生しているとしてモデルを作成した。メッシュ数は 39*39*264 で計算した。

計算期間は 2016 年 1 月 22 日 9 時 30 分～16 時 00 分とし結果を実測値と比較する。冬季中盤には井戸水の上下に温度差がついているため、実測値より初期条件として上部の水温を 13.5℃、下部の水温を 9.5℃と設定し温度差を与えた。また、地下水流の温度はヒートポンプ設置井戸の周辺の井戸の温度実測値[5]から、流量はヒートポンプ運転停止時の温度変化から算出した。解析の計算条件を **Table. 3** に示す。冬季の中盤は井戸水の温度低下が著しく、採熱のため不凍液の往き温度は約 1～3 [℃]、流量は約 25 [L/min]で推移していた。

実測結果と解析結果の比較を **Fig. 8** に示す。パターン①と同じく大略一致していることが分かる。

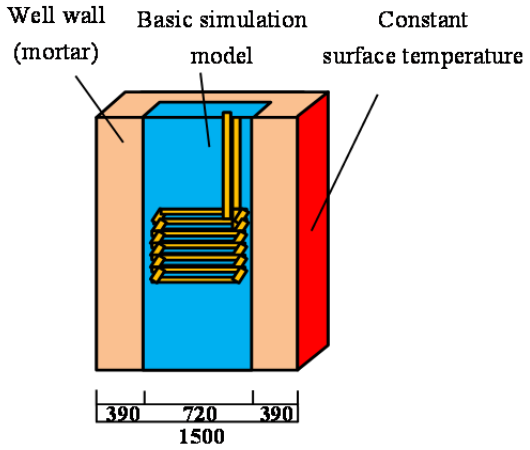


Fig. 5 Schematic of calculation model in pattern 1

Table. 2 Calculation condition in the pattern 1

Object	Property	Value
Well wall outer surface	Temperature	18.5 [℃]

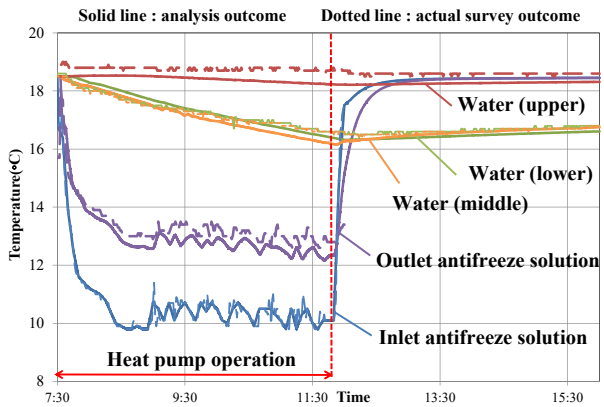


Fig. 6 Measured and calculated temperature profiles in pattern 1

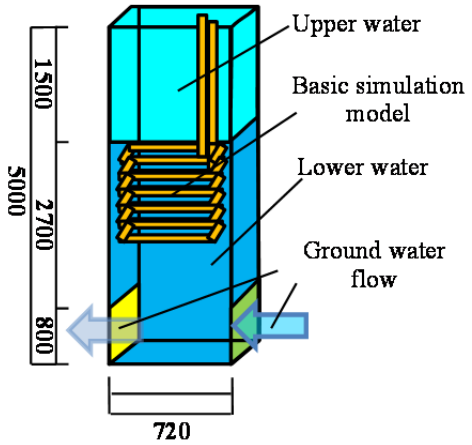


Fig. 7 Schematic of calculation model in pattern 2

Table. 3 Calculation condition of pattern 2

Object	Property	Value
Ground water flow	Temperature	17 [℃]
	Fluid	3.5×10^{-6} [m^3/min]

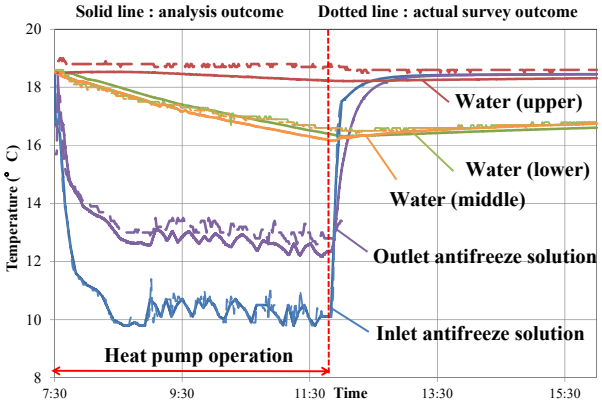


Fig. 8 Measured and calculated temperature profiles in pattern 2

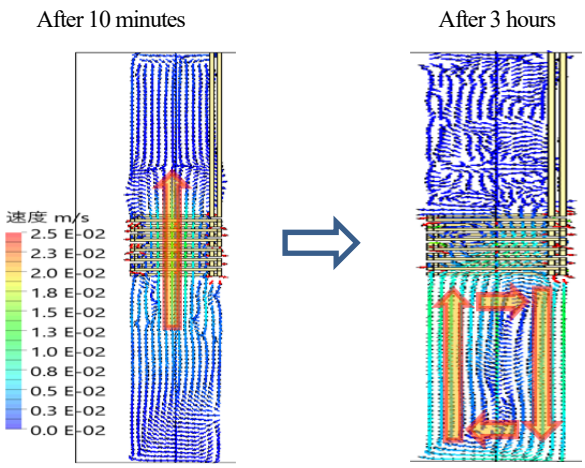


Fig. 9 Water flow in well during heat pump operation in pattern 1

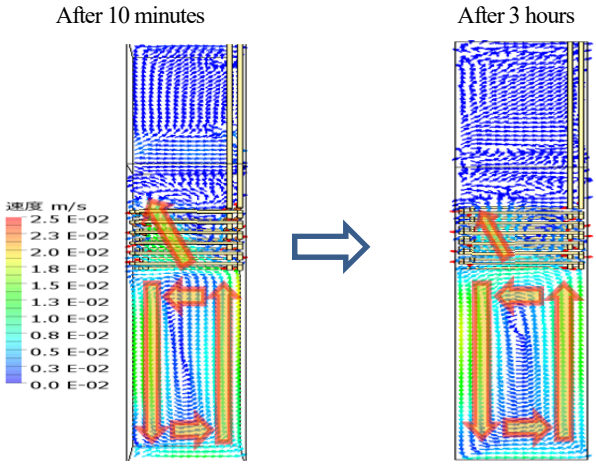


Fig. 10 Water flow in well during heat pump operation in pattern 2

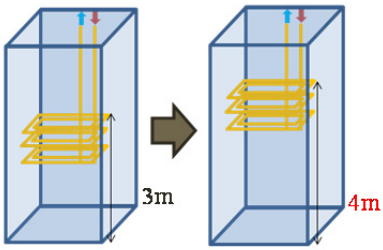


Fig. 11 Model in which heat collecting pipe was shifted upper

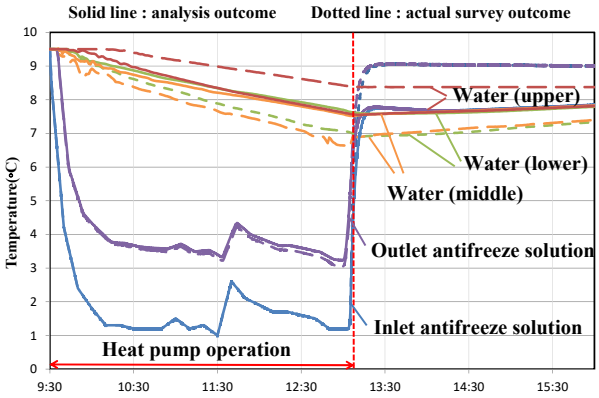


Fig. 12 Measured and calculated temperature profiles in case of heat collecting pipe shifted

３－４．パターン①②の解析結果（水流）

パターン①②それぞれにおける暖房開始後の水流の時間経過を **Fig. 9**、**Fig. 10** に示す。パターン①では開始直後に井戸の中部に水流が発生し、時間経過とともに下部に移動するのに対し、パターン②では開始直後から下部での水流が大きく、中部の水流はやや弱化するもののほぼ変化はない。時期によって水流が変化する原因として、パターン②では初期条件ですでに温度差が発生していたためと考えられる。パターン①でも時間経過により水流が下部のみで発生していることから、水流の発生と上下の温度分布は非常に強い関係があると言える。

３－５．　採熱管の位置による温度分布変化の検討

基本モデルの採熱管の位置を上に 1m ずらしたモデルを作成し、基本モデルと比較を行った。初期条件として上部の水温を下部と等しく 9.5℃で設定し、それ以外はパターン②と同様の条件で解析を行った。モデル概観、初期条件、結果をそれぞれ **Fig. 11**、**Fig. 12** に示す。不凍液の出口温度はほとんど変化がないものの、パターン②の特徴であった上下の温度差が発生しにくいことが読み取れる。これにより基本モデルと比べ採熱管付近の水温の低下が抑えられ、長期的な採熱効率の向上が見込まれると考えられる。

４．まとめ

本研究ではヒートポンプを使用した井戸水温度の実測と数値流体解析により以下の知見を得た。

1）ヒートポンプ運転時の井戸水内水流は水温の分布により変化する。

2）井戸内部の水流は主に採熱管の下部で発生している。

3）井戸への地下水流入は下部から約 3.5×10^{-6} [m^3/min] の流量で流入していると考えられる。

4）冬季は採熱管を上部に移動すると上下の温度差が解消される見込みがある。

参考文献

1) 内藤春雄：地中熱利用ヒートポンプの基本がわかる本, オーム社, 2012

2) 沖野茂, 和泉正顕, 福原真介：京都市の井戸及び井水の衛生学的調査, 水道, 8(9), pp. 417-430, 1933

3) Kana Hagiwara “Effective use of a ground-source heat-pump system in traditional Japanese “Kyo-machiya” residences during winter”, Energy and Buildings, No. 128, pp. 262-269, 2016

4) 萩原・伊庭・鉾井・松岡,「京町家における地中熱ヒートポンプによる暖房（その２）３次元解析モデルによる井戸水温度と採熱量の解析」, 日本建築学会学術講演梗概集 D-Ⅱ, pp.1335-1336, 2016

5) 難波・鉾井・伊庭,「京町家の井戸水を利用した暖房が地盤温度に及ぼす影響」, 日本建築学会学術講演梗概集 D-Ⅱ, pp .1333-1334, 2016

A-32

鉛直流出入ディフューザーを持つ温度成層型蓄熱槽の蓄熱性能予測

Prediction of Thermal Storage Performance on Temperature-stratified Water Thermal Energy Storage Tank with Vertical Inlet/Outlet Diffusers

○山澤　春菜（大阪大学）　相良　和伸（大阪大学）
山中　俊夫（大阪大学）　甲谷　寿史（大阪大学）
桃井　良尚（大阪大学）　岩田　　剛（三重大学）

Haruna YAMASAWA[*1]　Kazunobu SAGARA[*1]　Toshio YAMANAKA[*1]
Hisashi KOTANI[*1]　Yoshihisa MOMOI[*1]　Takeshi IWATA[*2]
[*1] Osaka University　[*2] Mie University

Water Thermal Energy Storage (TES) system is used to cut down heating and cooling cost in the daytime. When disigning a TES tank, it is common to design in accordance with experience and past case, and there is no good tool for it. Using CFD is one method to design a TES tank, but because of the effort and time it takes for simulating all the conditons, a more simple and quickly usable tool is needed for spreading usefulness and effectiveness of TES system. This study aimes to evaluate the performance of temperature-stratified water TES tank by using a simple and quick tool.

1．はじめに

蓄熱槽は、夜間電力を利用して日中の冷暖房負荷のピークを緩和し、特に夏場の電力負荷を平準化することができる。更に、災害時の水資源としての利用も可能であることからその有用性が見直されている。特に温度成層型蓄熱槽は、槽上部に温水・槽下部に冷水を極力混合させずに蓄えることで、より高効率の運転が可能である。

本研究では、鉛直流出入ディフューザーを持つ温度成層型蓄熱槽について、槽内の温度分布を簡易なモデルで算出、蓄熱性能を予測することを目的としている。実験で、温度による体膨張率変化を考慮した CFD 解析の精度を検証し、ディフューザーの設置水深や流量を変えて CFD 解析を行った。モデル計算結果を CFD 解析結果と比較して精度を検証した。比較の指標として、槽内鉛直温度分布、流出入温度に加え蓄熱槽効率を用いる。

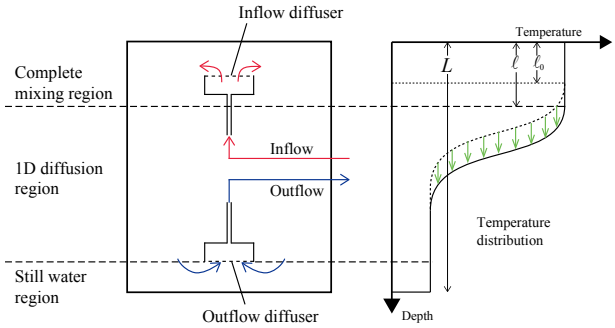


Fig. 1 Mixing Model

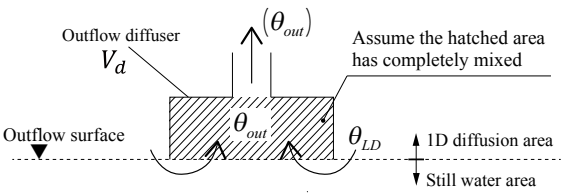


Fig. 2 Outlet submodel

2．槽内混合モデルの概要

Fig. 1 に示すように、槽内に流入した水が槽内水と完全に混合して一様な温度になると仮定している完全混合域と、流入した水が槽内水を押し出していく一次元拡散域、流出口より先の死水域とに槽内を 3 分割するのが本研究における槽内混合モデル [1] であり、高精度差分法 [2] を用いて Excel VBA により計算できるようにしている。

各領域の支配方程式は以下の通りである。

完全混合域

$$\rho C_p V R \frac{d\theta}{dt} = \rho C_p F\left(\theta_{in} - \theta\right) \tag{1}$$

一次元拡散域・死水域

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - U\frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{2}$$

なお、死水域においては、流速 $U = 0$ とする。

3．流出口サブモデルの検討

実際の蓄熱槽では、熱源機器や空調機への送水温度が重要である。後述の蓄放熱を繰り返す運転時には、送水温度が送水限界温度に達すると運転が切り替わるとしており、槽内混合モデルにおいても流出口のモデル化の検討を行った。Fig. 2 に示す一次元拡散域と死水域の境界面に達した水はその水深で瞬時にディフューザーに全量吸い込まれるものとし、そのディフューザー吸込面から、それに面する底面もしくは水面の範囲（死水域）での流速 U は 0 とする。そして、ディフューザー内に吸い込まれた水は Fig. 2 斜線部の容積 V_d のディフューザー内で瞬時に完全混合し一様な温度になると仮定し、送水温度 (流出温度) は次式で表されるとした。

$$\theta_{out}\big|_{t+\Delta t} = \left(\theta_{LD} - \theta_{out}\big|_{t}\right)\exp\left(-\frac{F}{V_d}\Delta t\right) \tag{3}$$

4. ＣＦＤ解析条件の検討

4.1 解析条件

CFD 解析では、精度の高い解析を行おうとすると計算時間が長くなってしまうため、十分な精度を確保しつつ計算時間を抑えられるような解析条件の検討が必要となる。今回、Fig. 3 に示す 1m×1m×1m(水深) の温度成層型蓄熱槽について CFD 解析を行った。その際対称性を考慮して、Fig. 4 のように槽全体の 1/4 を解析空間とした。また、送水温度 (流出温度) は Fig. 4 の流出面 (下部 Inlet/Outlet) の平均温度とした。ディフューザー形状・サイズについては相良らの検討結果 [3] を参考にして、換水時間 1 時間を目安に 150mm×450mm× 高さ 50mm と設定し、接続竪管は φ75mm とした。

今回検討したのはメッシュサイズと計算時間間隔についてである。メッシュは、流速の大きくなる吹出面・吸込面付近と衝突の発生する槽壁近傍においては十分に細かくしなければならないが、流入出が進み温度成層がしっかり形成されると変化に乏しくなり、槽上下部と比べるとメッシュの細かさが比較的要求されなくなる。また、流量が大きいと計算時間間隔を小さくしなければ変化の速さに対応することができない。

今回、ディフューザーの設計を 1 時間換水を基準に行っているので、余裕を持たせて二倍にした 2 時間換水のケースと流量の極めて大きい 0.25 時間 (15 分) 換水のケースについて検討した。解析は Table 1 のような条件で Table 2 のケースについて行った。

Table 1 CFD analysis condition

CFD code		STREAM V13(RC2)
Turbulence model		RNG k-ε
Finite difference scheme		QUICK
Volume expansion coefficient		Function of water temperature
Initial water temperature		7℃
Inflow water temperature		15℃
Boundary condition	Inlet	Defined flow rate
	Outlet	Defined flow rate
	Tank wall	Adiabatic, Wall: Generalized log-low
	Water surface	Adiabatic, Free slip
	Symmetry	Adiabatic, Free slip
Punchig metal		Pressure loss with Rectification

Table 2 CFD analysis case

Mesh		293,150 , 480,850
Water exchange time		0.25h (15min.) , 2h
Time step [s]	0.25h	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2
	2h	0.25, 0.5, 1, 2
Diffuser depth		50mm
Tank size		$1m^3$=1m×1m×1m(Depth)
Diffuser size		$1m^3$=150mm×450mm×50mm(Height)

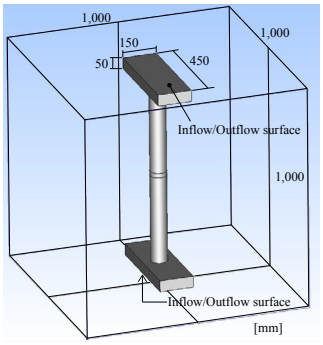


Fig. 3 CFD tank condition

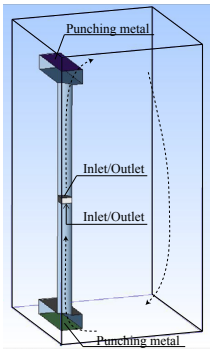


Fig. 4 Analytical space

4.2 結果と考察

Fig. 5、Fig. 6 に送水温度の過渡応答の比較の例を示す。2 時間換水では全て概ねあっているが、0.25 時間 (15 分) 換水の場合では、時間間隔・メッシュサイズの変化に伴って若干のずれが生じ、流量が小さい場合よりも精度の確保が難しいことがわかる。しかし、0.25 時間換水の 480,850 メッシュ・計算時間間隔 0.0625s と同メッシュ・計算時間間隔 0.125s を比較すると (Fig. 7-8) 概ね重なっており、精度が安定していることがわかる。余裕を持って精度のよい 480,850 メッシュ・計算時間間隔 0.0625s の条件をその後の解析に用いた。換水時間が変わるときは、その条件での 1 回換水あたりの計算回数が 0.25 時間換水計算間隔 0.0625s の場合と同じ 14,400 回となるように設定した。

4.3 実験によるＣＦＤの検証

三重大学において、Fig. 9 のような温度成層型蓄熱槽

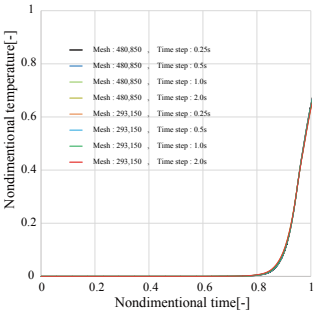


Fig. 5 Outflow temperature (Water exchange time: 2h)

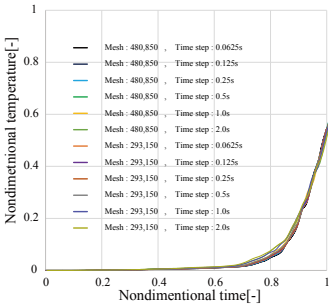


Fig. 6 Outflow temperature (Water exchange time: 0.25h)

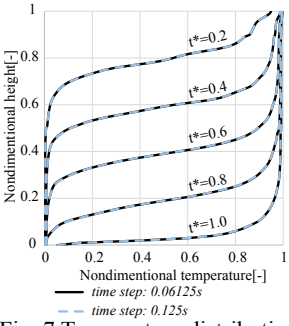


Fig. 7 Temperature distribution (Water exchange time: 0.25h)

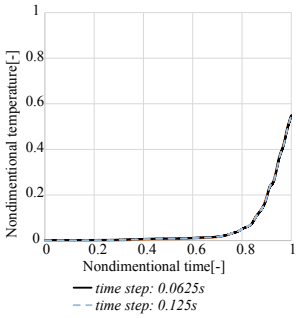


Fig. 8 Outflow temperature (Water exchange time: 0.25h)

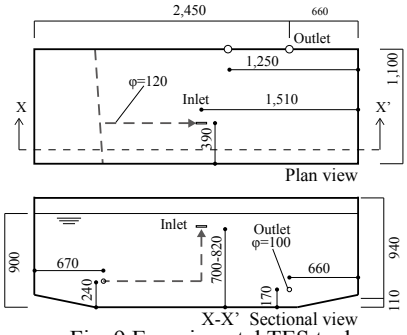


Fig. 9 Experimental TES tank

を用いて実験[4]が行われた。温度による体膨張率変化を考慮したCFD解析を実行し、その結果を実験結果と比較し、精度を検証した。槽内温度分布の比較の例をFig. 10に示す。実験結果とCFD解析結果はよく一致しており、槽内混合モデルの検証にCFD解析を十分に用いることができるとわかる。槽上部が流入温度を超えているが、これは、水面以上の空気と熱交換が行われた結果であると推測される。

5. CFDによる槽内混合モデルの検証

モデルの妥当性の確認及び6章のモデル計算で用いる初期完全混合域深さR_0を同定するために初期温度7℃一様の槽に15℃の一定温度・一定流量がある放熱のみの条件についてCFD解析で検証した。CFD解析条件・モデル計算条件はそれぞれをTable 1・Table 3と同様である。比較した条件はTable4のとおりであり、同表に無次元槽内蓄熱量とR_0を、換水回数1(t^*=1)の槽内蓄熱量のCFD解析結果とモデル計算結果の比較をFig. 11に示す。槽全体が流入温度の水で満たされたときの槽内蓄熱量を基準蓄熱量として、1回換水時の蓄熱量をその基準蓄熱量で除したものを無次元槽内蓄熱量 Q_s^* と定義すると、以下の式となる。

$$Q_s^* = \frac{\int^V \rho C_p(\theta - \theta_0)dV}{\int^V \rho C_p(\theta_{in} - \theta_0)dV} \tag{4}$$

この式から、換水回数1回時点での無次元槽内蓄熱量は、1回換水時の無次元槽内平均温度と等しいということから簡単に求めることができる。

$$Q_s^* = \frac{\int^V \theta^* dV}{V} = \overline{\theta^*} \tag{5}$$

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_{in} - \theta_0} \tag{6}$$

モデルの計算結果はCFD解析結果より性能を低く評価しているが、設計の立場からは安全側の評価ができているといえる。

Table 4 R_0 and Storage of heat

Diffuser depth [mm]	Water exchange time [h]	Case	R_0	Storage of heat [-] CFD	Storage of heat [-] Model
10 ○	0.25	Case1	0. 412	0. 808	0. 805
	0.5	Case2	0. 171	0. 92	0. 916
	1	Case3	0. 080	0. 96	0. 967
	2	Case4	0. 049	0. 973	0. 968
	4	Case5	0. 036	0. 971	0. 968
	8	Case6	0. 051	0. 961	0. 958
25 □	0.25	Case7	0. 154	0. 927	0. 911
	0.5	Case8	0. 083	0. 96	0. 944
	1	Case9	0. 054	0. 974	0. 957
	2	Case10	0. 035	0. 975	0. 963
	4	Case11	0. 037	0. 971	0. 96
	8	Case12	0. 048	0. 961	0. 954
50 △	0.25	Case13	0. 088	0. 949	0. 921
	0.5	Case14	0. 062	0. 966	0. 933
	1	Case15	0. 060	0. 968	0. 935
	2	Case16	0. 054	0. 963	0. 938
	4	Case17	0. 061	0. 956	0. 937
	8	Case18	0. 072	0. 949	0. 933

6. 蓄放熱サイクルの蓄熱性能評価

実際の運転時では、放熱のみならず蓄熱と放熱とを繰り返して運転される。本章では送水温度が送水限界温度に達すると蓄熱と放熱が切り替わり、流入側と流出側が反転する。蓄放熱サイクルでの性能評価の為に、蓄放熱を繰り返した時に正味の蓄えられる熱量を表す蓄熱槽効率 η_v を定義する。

$$\eta_v = \frac{\text{放熱終了時槽内蓄熱量} - \text{蓄熱終了時槽内蓄熱量}}{\text{基準蓄熱量}}$$

蓄放熱サイクルは、まず、槽内の初期温度分布を形成するために7℃一様の槽内に15℃の温水が槽上部から流入し放熱するPhase1、蓄放熱が切り替わり7℃の冷水が槽下部から流入し蓄熱するPhase2、蓄放熱が切り替わり放熱するPhase3、最後に蓄放熱が切り替わり蓄熱するPhase4の、計4工程とした。

送水温度が指定の限界温度に達すると蓄放熱が切り替わるよう、CFD解析ではユーザー関数を用いて、モデルではプログラムで設定した。CFD解析とモデル計算をそれぞれTable 1・Table 3の条件で行った。送水限界温度は、

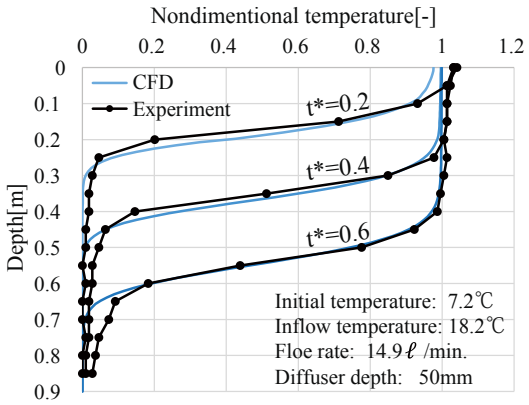


Fig. 10 Comparison of temperature distribution

Table 3 Model calculation condition

Programing language		VBA
Execution program		Excel
Finite difference scheme		MAB[2]
Thermal diffusivity		0.0005 ㎡/h
Boundary condition	Water surface	Adiabatic
	Tank wall	Adiabatic

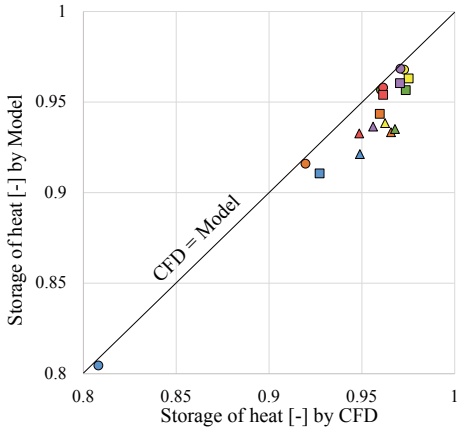


Fig. 11 Storage of heat at t*=1

上部Inlet/Outletで12℃、下部Inlet/Outletで10℃とした。

解析・計算の結果 (Table 5) から CaseD を例にとり、Fig. 12 に槽内鉛直温度分布の推移、Fig. 13 に流出入温度の過渡応答を示した。完全混合域の存在を仮定しているために槽上部と下部でずれが生じているが、特に温度成層部についてはよく一致しており、蓄熱槽効率を求める際に重要な蓄放熱運転の切り替わりもよく表現できている。ほとんどの Case で、Phase を重ねるごとに CFD 解析結果とモデル計算結果が近づいた。　蓄熱槽効率の CFD 解析結果とモデル計算結果の比較を Table 5, Fig. 14 に示している。最大誤差は 3.9% であり、よく一致しているため適切にモデル化できていると言える。ディフューザー設置水深が小さいほどモデル計算結果が CFD 解析結果に近づくのは、直線的な挙動をする死水域が小さくなるからだと考えられる。

- 記号 -

a : 熱拡散率[㎡/s]　C_p : 比熱容量[J/kg・℃]　F : 流量[㎥/s]
L : 水面から槽底面までの水深[m]　ℓ : 完全混合域深さ[m]
ℓ_0 : 初期完全混合域深さ[m]　t : 時間[s]　t^* : 無次元時間[−]
Q_s^* : 無次元槽内蓄熱量[−]　R : 無次元完全混合域深さ[−]
U : 流速[m/s]　V : 槽容量[㎥]　V_d : ディフューザー容積[㎥]
R_0 : 無次元初期完全混合域深さ[−]　z : 水深[m]　ρ : 密度[kg/㎥]
θ : 温度[℃]　θ^* : 無次元温度[−]　θ_{in} : 流入温度[℃]
θ_{LD} : ディフューザー吸込面位置での温度[℃]　θ_{out} : 送水温度[℃]

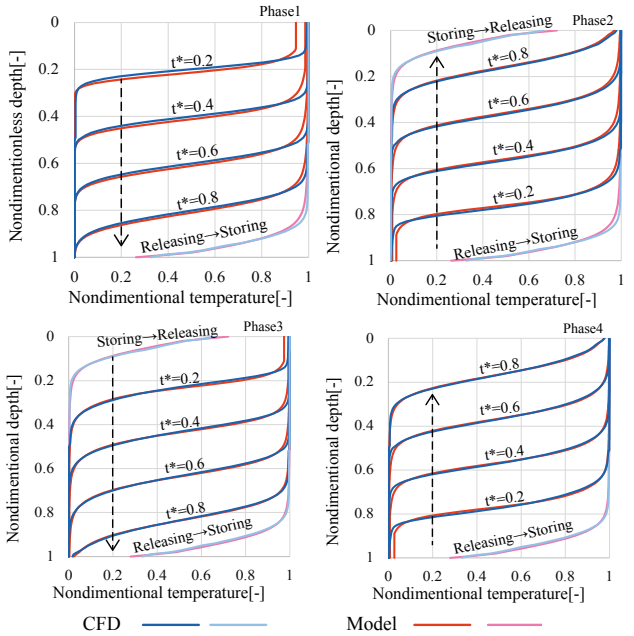


Fig. 12 Temperature distribution - CaseD

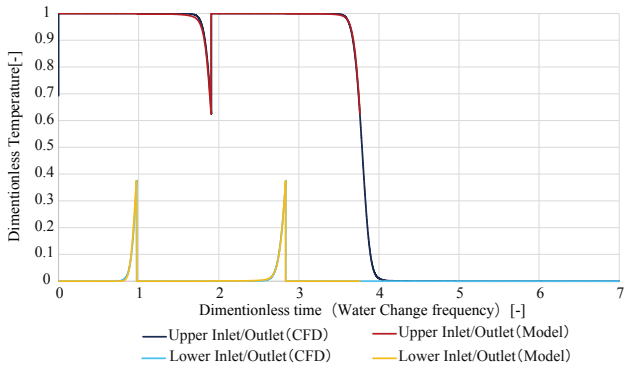


Fig. 13 Inflow/Outflow temperature - CaseD

7. おわりに

本報では、鉛直流出入ディフューザーを持つ温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデルを、実験で精度検証を行った CFD 解析により検証した。その結果、槽内混合モデルは低流量の場合において適切に性能を評価できることがわかった。しかし、本報では送水限界温度は上部・下部ディフューザーでそれぞれ 12℃・10℃、槽容量は 1m^3 の場合を検討し、ディフューザー設置位置は上下で対称とした。そのため、送水限界温度、槽容量を変化させ、更にディフューザー設置水深を上下で非対称にした場合についての検討を行うことが今後の課題である。

参考文献

1) 相良・前田・浅野・中原：蓄熱槽に関する研究 第 4 報、空気調和・衛生工学会論文集、No.30, pp.9-19, 1986
2) 斉藤武雄：数値伝熱学、株式会社養賢堂、pp.65-70
3) 相良・岩田他、温度成層型蓄熱槽における鉛直流入型ディフューザーの CFD 解析による性能評価（その 2）吐出面均等流入流速の場合のモデルパラメータ同定 , 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1447-1448, 2014.9
4) 岩田・相良他、温度成層型蓄熱槽における CFD 解析のモデル化方法の妥当性検証 , 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp105-108, 2014.9

Table 5 Tank efficiency

Diffuser depth [mm]	Water exchange time [-]	Case	TES tank efficiency[-]	
			CFD	Model
10 ○	0. 5	CaseA	0. 786	0. 781
	1	CaseB	0. 889	0. 884
	2	CaseC	0. 911	0. 908
	4	CaseD	0. 898	0. 900
	8	CaseE	0. 865	0. 862
25 □	0. 5	CaseF	0. 889	0. 866
	1	CaseG	0. 917	0. 892
	2	CaseH	0. 916	0. 895
	4	CaseI	0. 897	0. 879
	8	CaseJ	0. 863	0. 851
50 △	0. 5	CaseK	0. 897	0. 864
	1	CaseL	0. 895	0. 856
	2	CaseM	0. 874	0. 848
	4	CaseN	0. 850	0. 828
	8	CaseO	0. 824	0. 802

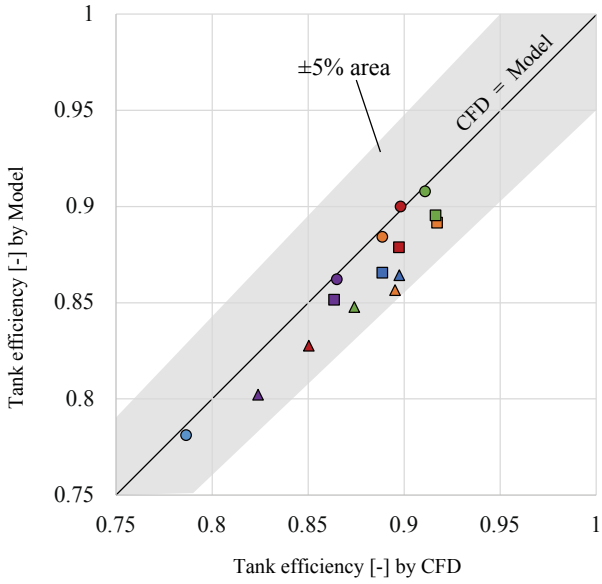


Fig. 14 Tank efficiency

B-3

デマンドレスポンス対応氷蓄熱システムの設計と実施
Design and implementation of demand response ice thermal storage system

○安心院　智（竹中工務店）　　篠島　隆司（竹中工務店）　　山形　光生（竹中工務店）
Satoshi　Ajimi*[1]　　Takashi Shinojima*[1]　　Mitsuo Yamagata*[1]
*[1] Takenaka Corporation

Recently, the reestablishment of supply-and-demand structural balance on electric power is the subject of interest. This will regulate the amount of electricity by the amount generated, instead of generating electricity to exceed consumer demands of electric usage in the daytime by power plants. One of the major methods is “peak shift” and “peak cut”. This paper will introduce the ice storage for “peak shift”. It will also explain the new ice storage system to “peak cut” when its demand-supply situation is tight in the daytime. This paper will also describe the use of new system to accommodate thermal energy of sewage water regenerated in the sewage plant by utilizing unused thermal energy in urban areas.

1.はじめに

近年，電力需給構造の見直しが注目されている．これは，従来の電力需要家に合わせた電力供給を見直し，発電量に合わせて電力需要家が電力使用量を調整する構造である．電力需要家が電力使用量を調整する方法の一つとして，デマンドレスポンスがある．デマンドレスポンスは，日中の電力需給逼迫時に節電をおこなう手段で，ピークカットとピークシフト等がある.本論では，ピークシフトのために，氷蓄熱システムを採用した.さらにピーク負荷を大幅に低減せるために，電力逼迫時は他の熱源機器を停止して氷蓄熱システムから大放熱をおこなうことで，よりピーク時の消費電力を削減するデマンドレスポンス対応氷蓄熱システムについて報告する．

なお，氷蓄熱システムは，地域に潜在する未利用エネルギーの活用として，下水処理場で高度処理された下水再生水の熱エネルギーを利用したため，下水再生水の高度複合利用についても合わせて報告する．

1.1　施設概要

本システムは，南海本線七道駅の北西，大和川の左岸と堺市西部を南北に走る国道 26 号東側に位置するイオンモール堺鉄砲町にて実施した．

所在地　：大阪府堺市堺区鉄砲町１番１
建物用途：物販，飲食を主とする複合大型商業施設
建築主　：イオンモール株式会社
設計施工：株式会社　竹中工務店
延床面積：134,886 ㎡　　構造規模：S 造・地上 4 階

1.2　セントラル熱源設備概要

給湯用水冷 HP チラー（下水熱利用）	15HP×2 台
水冷スクリューチラー（ブライン）	70RT×5 台
水冷スクリューチラー	150RT×2 台
氷蓄熱槽	3,250RT
下水熱プレート式熱交換器（チタン）	1,100ｋｗ

Fig.1 Main entrance

Fig.2 Ice storage tank

Water-cooled chiller

2.下水再生水高度複合利用の概要

2.1　下水再生水について

下水再生水は，敷地北西 2.3ｋｍに位置する三宝下水処理場で高度処理した後，本敷地内で熱利用と水源利用され，七道駅南東に位置する堺市中心部の環濠内「内川緑地せせらぎ水路」に放流することで，水路の水源及び水質改善に貢献している.下水再生水の未利用熱は年間を通して安定している為,冬期は外気処理空調機の予熱,年間をとおして給湯熱源として利用後，空調熱源として段階利用する.未利用熱の段階利用の後，一部を取水し，

膜処理設備で水処理を行い，施設内のトイレ洗浄水や敷地内せせらぎの補給水として利用する計画とした.**Fig.3** に下水再生水高度複合利用の概念図を示す.

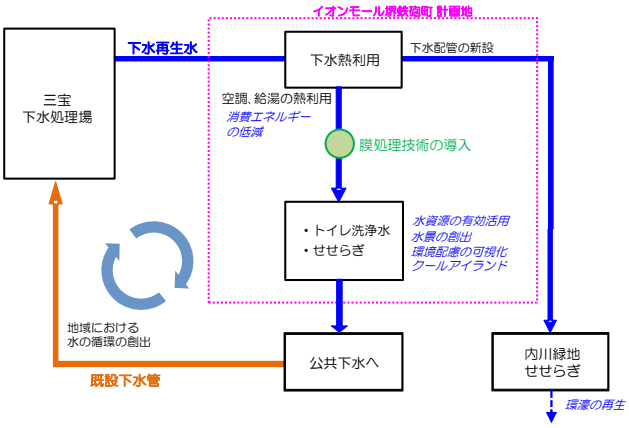


Fig.3 Conceptual diagram of using regenerated sewage water

2.2 下水再生水高度複合利用のシステム概要

（1）下水再生水水温・水質の特徴

平成 26 年度の三宝下水処理場の下水再生水の水温と外気温(日平均)との関係を **Fig.4** に示す.

図 3 より，下水再生水の水温は外気温と比較して温度幅の変動が少なく，冬季は外気温よりも高く，夏季は外気温よりも低いという特徴がわかる.

なお，2015 年 8 月の日最高平均気温は，32.9℃

2015 年 1 月の日最低平均気温は 2.2℃である.

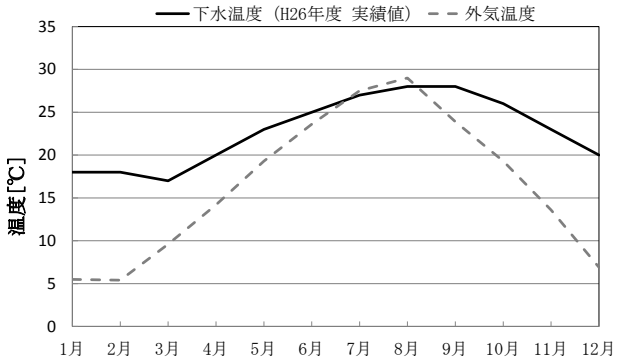


Fig.4 Temperature of regenerated sewage water and outside temperature of annual transition

次に，平成 26 年度の三宝下水処理場高度処理再生水の水質試験結果を **Table.1** に示す.一般的な水質評価基準である BOD は，平均 1.0mg/L，最大でも 2.4mg/L と，排水基準である日間平均 20mg/L を大幅に下回っている.また，赤潮等の発生原因となる窒素及びりん含有量も基準値を大幅に下回っており，処理水質は良好である.

Table.1 Quality-test results of regenerated sewage water

項目	単位	排水基準※1	平均値※2	最大値
BOD	mg/L	(20)	1.0	2.4
COD	mg/L	160（120）	7.7	9.8
SS	mg/L	(70)	1.0	1.0
窒素含有量	mg/L	120（60）	3.8	4.9
りん含有量	mg/L	16（8）	0.14	0.55
大腸菌群数	個/cm³	(3000)	100	340

※1:水質汚濁防止法及び大阪府条例で定める上乗せ基準

※2: () 内の数値は日間平均値

（2）下水再生水の熱利用システム

下水再生水熱利用システム全体図を **Fig.5** に示す.

本システムでは，下水再生水との水温と外気温との差を利用し，冬季は外調機の外気予熱として利用する.通年では給湯用ヒートポンプの熱源として利用し，冷房期間中は空調用冷凍機の冷却水として利用することで下水再生水熱のカスケード利用を行うシステム構成としている.なお，三宝下水処理場から圧送する下水再生水量は，日量 1,500t（1,033L/min）である.

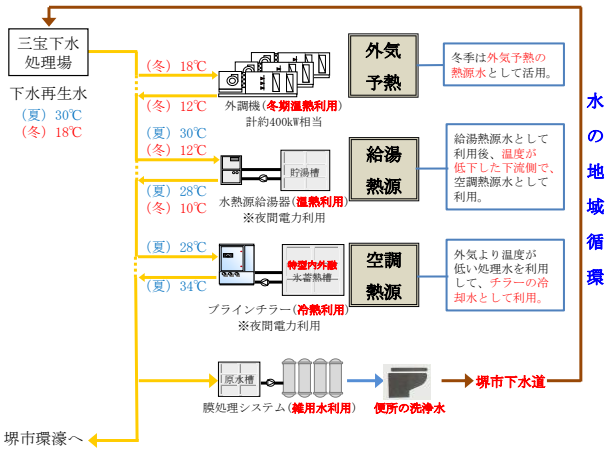


Fig.5 A new system for accommodating thermal energy by using sewage water regenerated in sewage plant

各熱源機器における熱利用の考え方を記載する.

a) 外気予熱用温熱源

冬季，外気に比べて温度が高い下水再生水を直膨式外調機の温水予熱用熱源として利用することで空冷ヒートポンプが処理する暖房負荷を削減する.

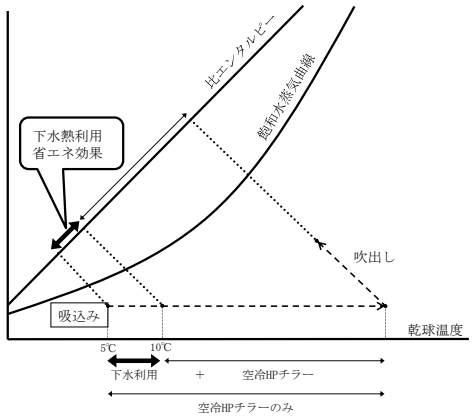


Fig.6 Energy saving effect when thermal energy of sewage is used in external conditioner

Fig.6 の例は，外気温 5℃，下水再生水温度 18℃と仮定した場合，外調機吸込み温度を 5℃上昇させることが可能なため，そのエンタルピー差のエネルギーを削減できる．

b) 給湯用温熱源

下水再生水を給湯ヒートポンプの排熱回収用（冷熱回収）の水熱源として利用する．空気熱源式給湯ヒートポンプは，外気温が低下すると効率も低下する特徴があるため，冬季においては外気に比べ温度が高い下水再生水を熱源利用することで，効率の良い運転が可能となる．

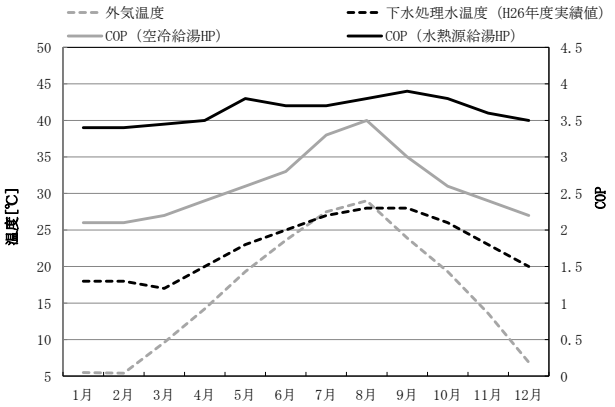


Fig.7 COP comparison to hot water heat pump

c)空調用冷熱源

水冷チラー（ブライン仕様）にて，夜間の製氷と，日中の負荷増大時に追掛け運転をおこなうことで，冷水を施設内 FCU 系統に供給するが，夏季，外気温度より温度が低い下水再生水を冷却水として利用することで水冷チラーの効率が向上し，消費電力が抑制できる．

また，a)～c)の熱交換器を直列接続し，給湯ヒートポンプと水冷チラー（ブライン仕様）を夜間同時稼動させることで，給湯熱源水として利用した後，温度低下した下水再生水を下流に接続した水冷チラーの冷却水としてカスケード利用することでシステムの効率向上を図っている．

d) 膜処理を利用した下水再生水ろ過利用システム

下水再生水の更なる有効利用のため，熱源利用した後の下水再生水を一部取水し，水資源としてカスケード利用するシステムを導入することとした **Fig.8**.

本システムは，取水した下水再生水をＵＦ膜ろ過処理し，敷地内のせせらぎ用水の補給水及び建物内の平日の便所洗浄水の全量を賄うものとした．便所洗浄水の水使用量は，平日の日最大使用量を 180 t と想定し，膜ろ過能力は最大 180 t /日とした．

本システムにより，下水処理場と本施設の間に，水の地域循環が構成できる．これにより，地域で上水を精製するエネルギーの削減に貢献できる．

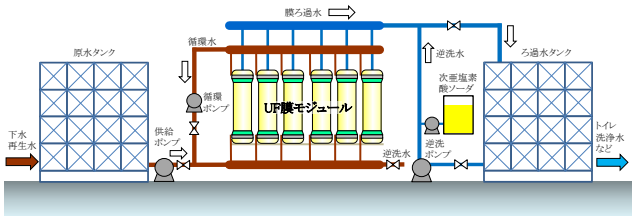


Fig.8 Sewage filteration system

3.下水再生水利用の熱源システムとデマンドレスポンス

前述した下水再生水利用の高度複合利用システムに，デマンドレスポンスシステムを取り入れるため，デマンドレスポンス対応氷蓄熱システムを開発した．具体的には，通常，日中のピーク負荷時，氷蓄熱で補えない熱負荷は追掛け用水冷チラーで熱負荷処理していたが，デマンドレスポンス時は，氷蓄熱槽で大放熱することで，追掛け用水冷チラーの運転を停止し，セントラル熱源の電力を削減することでデマンドレスポンスを実現する．

しかし，従来の氷蓄熱システムは，深夜電力を活用したピークシフトが主な役割であり，日中のピーク負荷を全て処理することが目的ではなかったため，単純にピーク負荷で氷蓄熱槽を選定すると，通年単位では過剰な氷蓄熱容量となりイニシャルコストが大幅に増加する．そこで，氷蓄熱容量を抑えながら，大放熱を可能とすることで，デマンドレスポンス対応とすることとした．さらに，氷蓄熱は放熱ロスと熱交換ロスによる効率の低下が課題であったことから，代表的な蓄熱システムである内融式氷蓄熱，外融式氷蓄熱，水蓄熱の利点を組み合わせ，高効率化を目指した．

3.1 デマンドレスポンス対応大放熱蓄熱

まず，デマンドレスポンス時に大放熱するために，従来の代表的な氷蓄熱システムである，内融式と外融式氷蓄熱を組み合わせ内外融併用氷蓄熱槽とした．

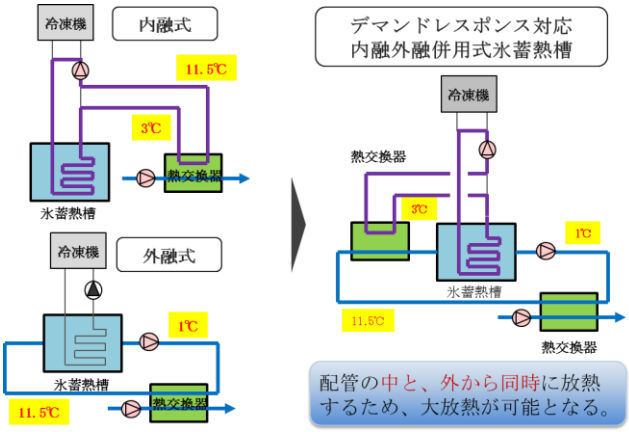


Fig.7 Internal and external ice storage tank

3.2 氷蓄熱の小型化と高効率化

通常運転時は，冷水取出し温度が内融式（3℃）に比べ，低温取出しが可能な外融式（1℃）の方が放熱特性がよいため，大温度差による効率がよい外融式をベースとした．ただし，外融式は氷蓄熱槽内のコイルの離隔が大きくなり，氷蓄熱槽の容量が大幅に増大するため，氷蓄熱槽の小型化を検討した．従来氷蓄熱槽は冷水取出し温度 3℃程度で放熱完了であった為, 水槽内の温度が 3℃で放熱完了していた．そこで，水蓄熱槽の考えを取り入れ，氷蓄熱槽内に堰を入れることで，槽内に温度成層をつくり，槽内温度を平均 11℃程度まで使用することで，未使用であった顕熱利用域を有効蓄熱容量とし，氷蓄熱槽の容量を小型化することとした **Fig.10**.

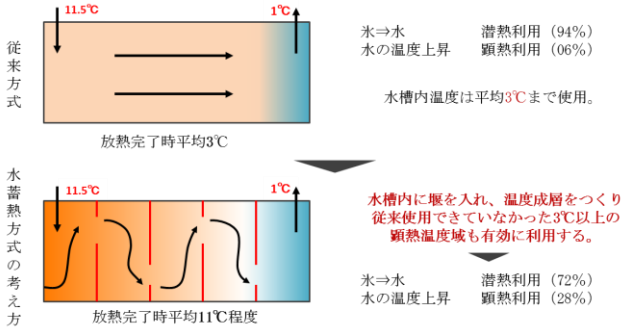


Fig.10 Deference between water storage and ice strage

3.3 冷凍機の高効率化

顕熱利用域を大きくとり, 水槽内平均温度が 11℃程度になることで，冷凍機の効率が上昇する．これは蓄熱運転時，冷凍機の入口温度が高い方が，冷凍機効率が上昇するためである．また，同時に氷蓄熱槽内のコイルの氷厚を薄く（34mmから 23mm）することで，冷凍機のブライン出口温度を高く（-8℃から-3℃）し，さらなる高効率化を図った **Fig.11**.

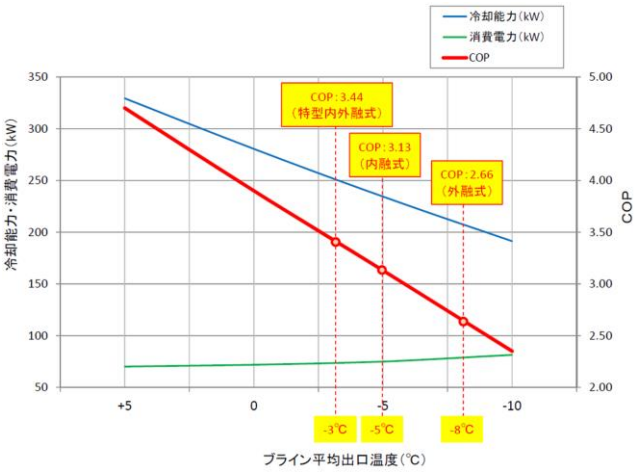


Fig.11 Efficiency of refrigerator

3.4 デマンドレスポンス対応内外融併用式氷蓄熱のシステムのまとめ

デマンドレスポンス対応内外融特型氷蓄熱システム図と従来式の内融式，外融式氷蓄熱との性能比較を **Fig.12** に示す.

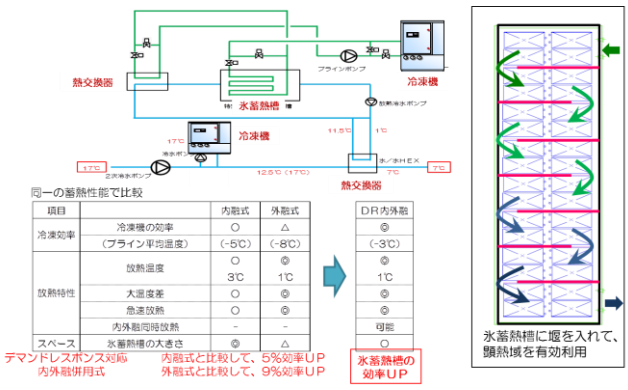


Fig.12 Diagram and performance between Comparison of internal and external type ice thermal storage system and previous one

4. 検証

2017 年 4 月で 1 年が経過するため，データを検証する予定であるが，現時点で取得できているデータを報告する.

まず，氷蓄熱槽内に堰を設けて，水蓄熱槽の要素を取り入れたデータは，**Fig.13 となっている**.

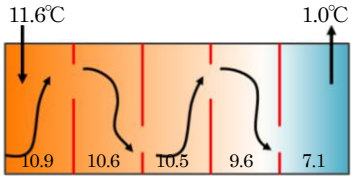


Fig.13 Measurement data in the ice thermal storage tank

実測値では氷蓄熱槽の最下流の水槽温度が 7.1℃となっているが，1.0℃の冷水取出しができている．これは，測定ポイントが水槽上端にあるため，冷水の取出口には氷が残っており，冷水の取り出しが可能な状態であることが分かる．また，冷水取出し温度を 3.0℃までに設定すると最下流の水槽内温度は 10.5℃となった．これらの実測データにより，従来の氷蓄熱の水槽内温度 3℃に対して，10.5℃程度まで顕熱域を利用したことで，500ＲＴ程度の容量が増加した.

次に，デマンドレスポンス対応内外融同時放熱については, ＢＥＭＳにてデマンドレスポンスモードを設定し, 日中の 13 時～15 時に追掛け用ブラインチラーを全て停止し，内融外融同時放熱のみで全負荷を処理するシステムとして, 夏期に実測して, 全負荷氷蓄熱の放熱のみで, 熱負荷を処理できていることを確認した.

5. おわりに

今後，１年の実績データが 4 月に揃うため，改めて詳細を報告する予定である.

A-33

PCM 循環システムの利用可能性に関する研究
A Study on the Possibility of Using PCM Circulation System

○小寺　雄也（立命館大学）　近本　智行（立命館大学）
Yuuya KOTERA*[1]　Tomoyuki CHIKAMOTO*[1]
*[1] Ritsumeikan University

Phase change material (PCM) is effective for peak shift of the power demand because PCM can store heat in the night and suply heat of constant temperature at the daytime. But this method has problems because a lot of PCM is necessary. This study proposes the new system using a small amount of PCM that can convey heat value effectively by circulating PCM naturally. The purpose of this study is verifying the possibility of realization of this system.

はじめに

潜熱蓄熱材（PCM）は、顕熱よりも熱量の大きな潜熱を利用でき、一定の温度で熱量を取り出せるのが特徴である。時間をシフトして熱量供給ができることから、安価な夜間電力を用いて蓄熱し日中に放熱することで電力需要をピークカットするという利用方法が一般的であり、一定の効果も確認されている[文1)]。

しかし、この利用方法には課題があると考える。まず、PCM が蓄熱するには蓄熱分の熱量を PCM に供給しなければならず、多くのエネルギーが必要となる。また、室内環境を改善し維持するためには多量の PCM が必要だということも課題として挙げられる。そのため、上記の課題を解決した PCM 利用方法の確立が必要であると考えた。

そこで提案するのが、本論で示す PCM 循環システムである。PCM の持つ潜熱を利用し、地中熱を用いて少量の PCM を自然循環させることで、熱量搬送・蓄熱にエネルギーを必要とせず、効率的に熱量を供給できると考えた。本論では、本システムの概要と、利用可能性を検証することを目的に、本システムで搬送可能な熱量を既存のシステムと比較し有用性の検討を行ったので結果を報告する。

１．システム概要

1.1 PCM の密度の変化について

システムを考えるにあたり注目したのが、PCM の密度が状態変化に伴い変化するという点である。例えば Table1 に示すように、パラフィンの密度は固相時は 920kg/m^3、液相時は 780kg/m^3 であり、固相時よりも液相時に密度が小さくなる。それに対しチオ硫酸ナトリウム水和物は、Table2 に示すように固相時は 1500kg/m^3、液相時は 1600kg/m^3 であり、液相時よりも固相時に密度が小さくなる。このことから、PCM を状態変化させることで密度を変化させ、固相・液相の中間の密度の液体の中に入れると浮上・沈降させることが可能であると考えた。

Table1 Heat Storage Capacity and Density of Paraffin

	潜熱量	密度
固体時	193[kg/kJ]	920[kg/m³]
液体時		780[kg/m³]

Table2 Heat Storage Capacity and Density of Sodium Thiosulfate Pentahydrate

	潜熱量	密度
固体時	190[kg/kJ]	1500[kg/m³]
液体時		1600[kg/m³]

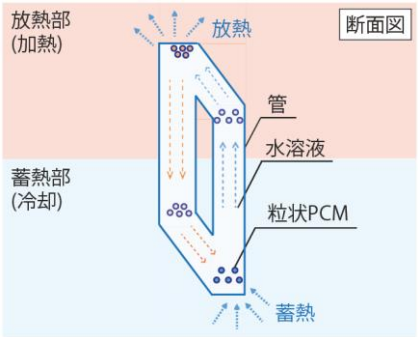


Fig.1 The Outline of PCM Circulation System

1.2 システムの仕組み

例えば Fig.1 のように、ループ状の管にチオ硫酸ナトリウム水和物（以下 PCM）を入れ、管内を PCM の固相・液相の中間の密度の水溶液で満たす。この管の上部を常時加熱し、下部を常時冷却した状態を考える。まず、下部で冷却された液相の PCM は凝固して密度が小さくなり管内を浮上する。浮上した PCM は管の上部で放熱し、放熱し終えた PCM は融解して密度が大きくなって沈降する。沈降した PCM は、下部で再び冷熱を蓄えて凝固し浮上する。このように上部と下部に温度差があるとき、PCM の密度の変化を利用することで PCM が蓄熱・放熱サイクルを伴って管内を自然に循環し、繰り返し熱量供給が可能であると考えた。

ここで、上記について蓄熱に地中熱を用いた場合を考えてみる。Fig.2 に示すように、蓄熱部を地中、放熱部を

地上としたシステムを考える。地中熱は年間を通して17℃付近に保たれている。例えば夏期での利用を考えて外気温を 30℃と仮定し、PCM の融点を 20℃付近とすると、管内の粒状 PCM は地中熱を蓄熱することで冷却し固体となる。固体となった粒状 PCM は、密度が小さくなり地上に浮上し、地上で冷熱を放熱する。これにより、外気温の高い状況下でも 20℃付近の冷熱を供給できる。放熱し終え、外気温にさらされて融解した粒状 PCM は液体となり、密度が大きくなって地中に沈降する。そして再び地中熱を蓄熱し、地上に浮上することで繰り返し熱量を供給できる。

以下本論では、蓄熱に地中熱を利用した場合について具体的に検討した結果を説明する。

２．研究概要

2.1 研究の流れ

本システムにおける研究課題を次に示す。

1) 熱の伝わる速度の導出
蓄熱時・放熱時における PCM の伝熱速度を求める。

2) PCM の浮上・沈降速度の導出
PCM が固相時に浮上、液相時に沈降する際の速度を求める。

3) 単位時間当たりに供給可能な熱量の導出
1)、2)から、PCM が循環し単位時間当たりにどの程度熱量を供給できるのかを算出する。

4) 既存のシステムとの優位性の検証
3)により求めた供給可能な熱量を、既存システムと比較し、本システムの有用性を検証する。

本論では上記について検討した結果を報告する。

2.2PCM の循環に要する時間の検討

まず、PCM の蓄熱・放熱時、浮上・沈降時の伝熱速度を踏まえ、PCM が管内を 1 サイクルする際に要する時間 t を検討した。t は Fig.3 より次のように表せる。

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 \quad \cdots①$$

以下、式①について具体的に計算した結果を述べる。

2.3 簡易モデルでの検討

Table3 に計算条件を示す。またその数値は Table3 のように仮定する。地中での PCM の膜表面温度（蓄熱時）について、Fig.3 の赤枠部分に示すように、地中部分の水溶液は地中熱（=17℃と仮定）により十分冷却されていると仮定して 17℃とし、その水溶液によって PCM の膜表面も十分冷却されていると考えて同様に 17℃と仮定する。地上での PCM の膜表面温度（放熱時）についても同様に、地上部分の水溶液は夏期の外気温（=30℃と仮定）に十分に加熱されていると仮定して 30℃とし、その水溶液によって PCM の膜表面も十分加熱されていると考えて 30℃と仮定する。また、PCM の膜表面から PCM への伝熱速度を計算する際には、Fig.4 のように PCM を 10 層に分割して考えた。以下、式①各項についての計算結果を示す。

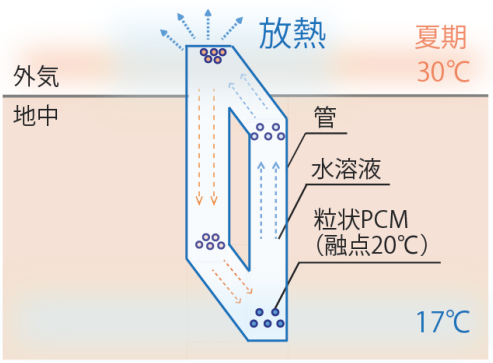


Fig.2 PCM Circulation System using underground heat

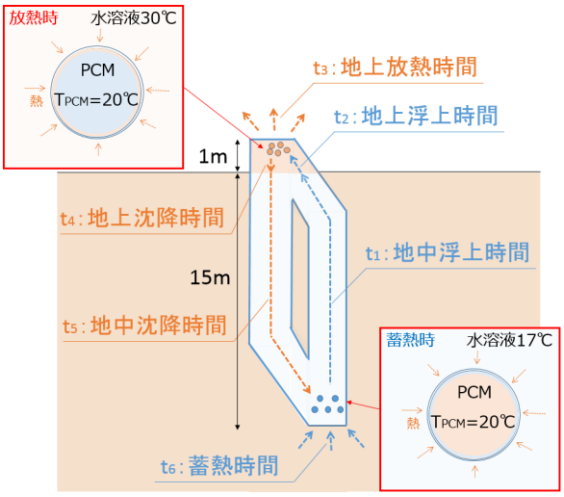


Fig.3 The parts of PCM Cycle

Table3 The List of Items to Calculate heat transfer speed of PCM

項目		文字	数値
地中熱		―	17[℃]
外気温（夏期）		―	30[℃]
PCMの膜表面温度（蓄熱時）		$T_{膜(蓄熱)}$	17[℃]
PCMの膜表面温度（放熱時）		$T_{膜(放熱)}$	30[℃]
PCMの融点		T_{PCM}	20[℃]
PCMの粒径の半径		r	0.5×10^{-2}[m]
PCMの熱伝導率		λ_{PCM}	0.20[W/m・K]
PCMの潜熱量		―	200[J]
PCMの密度	液相	$\rho_{液相}$	950[kg/m³]
	固相	$\rho_{固相}$	1050[kg/m³]
PCMの膜（ポリエチレン）	厚さ	$\delta_{PCM膜}$	0.5×10^{-3}[m]
	熱伝導率	$\lambda_{PCM膜}$	0.33[W/m・K]
水溶液の密度		$\rho_{水溶液}$	1000[kg/m³]

(1) 地中浮上時間（t_1）の検討

PCM が地中熱を蓄熱し完全に凝固したのち浮上すると考える。Fig.5 のように PCM の浮力を F_1、PCM の重力を F_2、抵抗力を D とすると、次の式が成り立つ。

$$F_1 = F_2 + D$$

$$\Leftrightarrow \quad (\rho_{水溶液} - \rho_{固相})\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right) g = D \quad \cdots②$$

ここで PCM の浮上速度を $v_{浮上}$とすると、抵抗力 D は、抵抗係数 C_D を用いて

$$D = C_D \pi r^2 \left(\frac{\rho_{固相} \cdot v_{浮上}^2}{2}\right) \quad \cdots③$$

抵抗係数 C_D は水の動粘性係数 $\nu=1.0\times10^{-6}$[m²/s]を用いて

$$C_D=\frac{24}{R_e}=\frac{24}{v_{浮上}\cdot 2r/\nu}=\frac{12\nu}{v_{浮上}r}\quad\cdots④$$

と表される。式②、③、④より以下の式が成り立つ。

$$(\rho_{水溶液}-\rho_{固相})\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)g=\frac{12\nu}{v_{浮上}r}\pi r^2\left(\frac{\rho_{固相}\cdot v_{浮上}^2}{2}\right)$$

上式を解いて $v_{浮上}=2.722\times10^{-1}$[m/s]となる。Fig.3 より、管の埋設深さを 15m とし、PCM が一定速度で浮上すると考えると地中から地表面までの浮上時間は $t_1=55.1$[s]となる。

(2) 地上浮上時間（t_2）の検討

PCM は管内の地上部分を浮上する間、徐々に放熱し外側から液相となる。前述のように PCM が地上部分を浮上する際の PCM の膜表面温度を $T_{膜(放熱)}=30$℃とし、単位面積を A（=1[m²]）とおくと、熱伝導抵抗 R[m²・K/W]は以下のように表せる。

$$R=\frac{1}{A}\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}=\frac{1}{1}\left(\frac{0.5\times10^{-3}}{0.33}+\frac{0.5\times10^{-3}}{0.20}\times10\right)\quad\cdots⑤$$

$$=2.65\times10^{-2}[m^2\cdot K/W]$$

このとき膜表面から PCM に伝わる単位面積当たりの熱量 $q_{放熱}$[W/m²] は以下のように表せる。

$$q_{放熱}=\frac{T_{膜(放熱)}-T_{PCM}}{R}=\frac{30-20}{2.65\times10^{-2}}=377[W/m^2]$$

よって膜表面から PCM に伝わる単位時間当たりの熱量 $Q_{放熱}$[J/s]は以下のようになる。

$$Q_{放熱}=q_{放熱}\times4\pi r^2=377\times4\pi r^2=1.18\times10^{-1}[J/s]$$

ここでは簡易化のため、PCM 内の液体による対流の影響は考慮せず計算を行った。完全固相時の粒状 PCM の重さは 4.97×10^{-1} [g] 注1)、単位重さ当たりの潜熱量は 200[J/g]より、粒状 PCM の潜熱量は 99.4[J]となる。ゆえに、単位時間当たりに PCM が液相となる割合は 1.19×10^{-1} [%] 注2)となる。単位時間後の密度は 950.12[g/m²] 注3) となるので、単位時間後の PCM の浮上速度は 2.716×10^{-1} [m/s] 注4)となる。よって、PCM が地上部分を浮上するとき、浮上速度は単位時間当たりに 6.46×10^{-4}[m/s]減少する。PCM が地上部分を浮上する際の速度を $v'_{浮上}$とすると $v'_{浮上}$は以下のように表せる。

$$v'_{浮上}=v_{浮上}-(6.46\times10^{-4})t_2$$

Fig.3 より地上部分の管の頂部を地上高さ 1m とすると、PCM が地表面から管の頂部に浮上するまでの時間 t_2 は

$$\int_0^{t_2}v_{浮上}'dt_2=\int_0^{t_2}\left\{v_{浮上}-(6.46\times10^{-4})t_2\right\}dt_2=1$$

上式より $t_2=3.68$[s]となる。

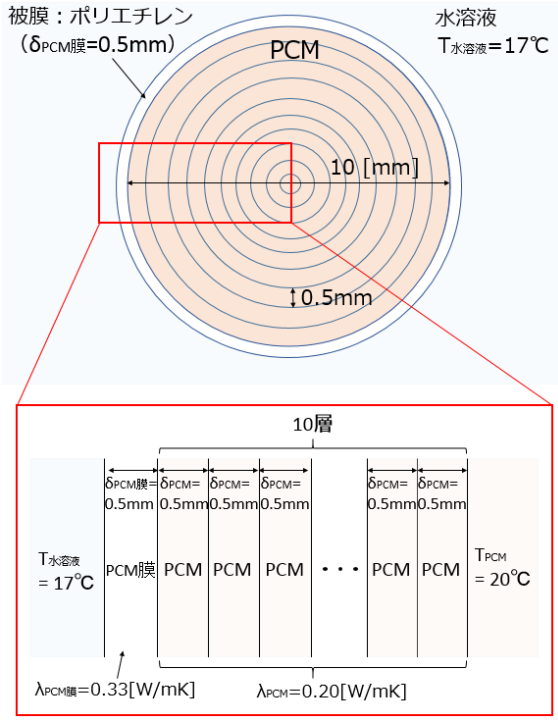


Fig.4 The Model Diagram that divides PCM in 10 layers

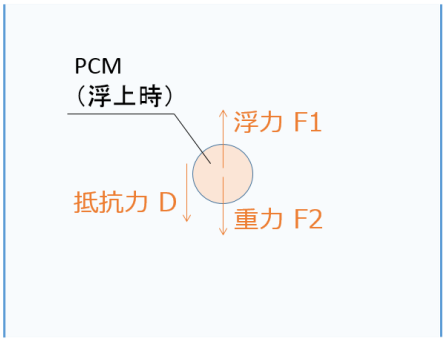


Fig.5 The Balance of the power of PCM

(3) 放熱時間（t_3）の検討

(2)より、放熱時 PCM は単位時間当たりに 1.19×10^{-1} [%]が液相となるので、完全固相の PCM が完全液相になるまでに要する時間は 843[s]である。PCM は(2)ですでに $t_2=3.68$[s]の時間放熱しているので、t_3 は 839[s]となる。

(4) 地上沈降時間（t_4）の検討

PCM が地中熱を放熱し、完全に融解したのち沈降すると考える。PCM の沈降速度を $v_{沈降}$とすると、(1)と同様に式②、③、④より

$$(\rho_{液相}-\rho_{水溶液})\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)g=\frac{12\nu}{v_{沈降}r}\pi r^2\left(\frac{\rho_{液相}\cdot v_{沈降}^2}{2}\right)$$

上式より $v_{沈降}=2.722\times10^{-1}$[m/s]となる。地上部分の管の頂部は地上高さ 1m より PCM が一定速度で沈降すると考えると、地中から地表面まで沈降する時間 $t_4=3.67$[s]となる。

(5) 地中沈降時間（t_5）の検討

PCM は管内の地中部分を沈降する間、徐々に蓄熱し外側から固相となる。前述のように、PCM が地中部分を沈

降し蓄熱する際の PCM の膜表面温度を $T_{膜(蓄熱)}$ =17℃とすると、PCM に伝わる単位面積当たりの熱量 $q_{蓄熱}$[W/m^2]は、⑤を用いて以下のように表せる。

$$q_{蓄熱} = \frac{T_{PCM} - T_{膜(蓄熱)}}{R} = \frac{20 - 17}{2.65 \times 10^{-2}} = 113[W/m^2]$$

よって粒状PCMに単位時間当たりに伝わる熱量$Q_{蓄熱}$[J/s]は以下のようになる。

$$Q_{蓄熱} = q_{蓄熱} \times 4\pi r^2 = 113 \times 4\pi r^2 = 3.55 \times 10^{-2}[J/s]$$

以下（2）と同様の計算により、完全液相時の粒状 PCM の重さは 5.50×10^{-1} [g]、単位重さ当たりの潜熱量は 200[J/g]より粒状 PCM の潜熱量は 110[J]となる。ゆえに、単位時間当たりに PCM が液相となる割合は 3.23×10^{-2} [%]となる。単位時間後の密度は 1049.97[g/m^2]より、単位時間後の PCM の沈降速度は 2.720×10^{-1}[m/s]となる。よって、PCM が地中部分を沈降するとき、浮上速度は単位時間当たりに 1.76×10^{-4} [m/s]減少する。PCM が地中部分を沈降する際の速度を $v'_{沈降}$とすると $v'_{沈降}$は以下のように表せる。

$$v'_{沈降} = v_{沈降} - (1.76 \times 10^{-4})t_5$$

Fig.3 より地中部分の管の埋設深さを 15m とすると、PCM が地表面から管の底部に沈降するまでの時間 t_5 は

$$\int_0^{t_5} v_{沈降}' dt_5 = \int_0^{t_5} \left\{ v_{沈降} - (1.76 \times 10^{-4})t_5 \right\} dt_5 = 15$$

上式より t_5=56.1[s]となる。

(6) 蓄熱時間（t_6）の検討

(5)より、蓄熱時に PCM は単位時間当たりに 3.23×10^{-2} [%]が固相となるので、完全液相の PCM が完全固相になるまでに要する時間は 3096[s]である。PCM は(5)ですでに t_5=56.1[s]放熱しているので、t_6は 3040[s]となる。

(1)～(6)より PCM が管内をサイクルするのに要する時間 t は 4000[s]となる。よって 1h で 1 個の PCM が供給可能な熱量は 1.80×10^{-1}[kJ]となる。

2.4 既往の利用方法との比較

提案システムの実用可能性を検討するため、上記によって得られた単位時間あたりの供給熱量を既往の利用方法と比較した。Table4 に既往の利用方法（床下空調[文1)]・建材（床材[文2)]、壁材[文3)]）・直置き[文3)]）の使用重量・潜熱量・放熱時間・1h での供給可能熱量（理論値）を示す。これらは既往論文より実際に施工されている事例を引用した。提案システムでの 1 個当たりの 1h 単位での供給熱量は 1.80×10^{-1} [kJ]であるため、既存システムと比較すると、PCM を 1890～6170 個（945～3085g）循環させることで理論上は既往の利用方法と同等のオーダーでの熱量供給が可能であると考えられる。

今後この数値をベースに詳細な検討を行うとともに、シミュレーションを用いた検討などを行い、本システムの利用可能性についての検証を行っていく。

Table4 The Heat Quantity that PCM can Supply per hour

既存の利用方法	使用重量	潜熱量	放熱時間	1hでの供給可能熱量(理論値)
床下空調	106[kg]	17,800[kJ]	16[h]	1110[kJ]
建材（床材）	75[kg]	4,800[kJ]	14[h]	340[kJ]
建材（壁材）	28[kg]	4200[kJ]	6.2[h]	670[kJ]
直置き	50[kg]	302.4[kJ]	0.7[h]	430[kJ]

３．まとめ

本論では PCM の新たな利用方法として、PCM を自然循環させ、蓄熱に地中熱を用いることで、効率的に熱量搬送ができるシステムを提案した。また、実現可能性に向けた検証として 1h 当たりでの供給可能な熱量の算出を行い、既存の利用方法との比較を行った。その結果、机上検討においては粒径 1.0×10^{-2}[m]の PCM を 1890～6170 個循環させると既存システムと同等の熱量供給が可能となり、既存システムより少ない PCM 量でも効率的に利用できる可能性を示した。この理論値を一つの目安とし、今後さらに詳細な検証を行い、結果を報告していく。

注釈

注1) PCM の重さは固相時の密度（$\rho_{固相}$=950[kg/m^3]）に粒状 PCM（半径 r=0.5×10^{-2}[m]）の体積を乗じて以下の式から求めた。

$$950 \times 10^3 \times \frac{4}{3}\pi r^3 = 4.97 \times 10^{-1}[g]$$

注2) 粒状 PCM に単位時間当たりに伝わる熱量は $Q_{放熱}$=1.18×10^{-1} [J]、粒状 PCM の保持熱量は 99.4[J]より

$$\frac{1.18 \times 10^{-1}}{99.4} \times 100 = 1.19 \times 10^{-1}[\%]$$

注3) PCM の固相時の密度 $\rho_{固相}$=950[kg/m^3]、PCM の液相時の密度 $\rho_{液相}$=1050[kg/m^3]より、単位時間後に PCM は 1.19×10^{-1}［%］が液相となるので単位時間後の PCM の密度 $\rho'_{固相}$は

$$950 \times \frac{99.9}{100} + 1050 \times \frac{0.119}{100} = 950.12[kg/m^3]$$

注4) $(\rho_{水溶液} - \rho'_{固相})\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right) g = \frac{12\nu}{v_{浮上} r}\pi r^2 \left(\frac{\rho_{固相} \cdot v_{浮上}^2}{2}\right)$

$$\therefore v_{浮上} = 2.716 \times 10^{-1}[m/s]$$

謝辞

本論文を作成するにあたり、立命館大学研究員である小畑光央様から、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

文1）荒木、高村、山羽：住宅における床下に設置する潜熱蓄熱材の利用に関する研究 その3 潜熱蓄熱材の設置による日中のエアコン運転時間削減効果、日本建築学会大会学術講演梗概集、2015年9月、pp915-916

文2）中村、尾崎、佐藤、林、石黒：潜熱蓄熱建材の効果に関する研究 その6 屋外実験棟における効率的利用方法の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、2012 年 9 月、pp149-150

文3）草間、石戸谷：潜熱蓄熱材を利用した躯体蓄熱空調の負荷削減効果に関する研究 その 2 潜熱蓄熱建材を適用したパッシブ住宅における性能評価手法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014 年 9 月、pp539-540

文4）佐々木、八嶋、長澤、小山内、中島：潜熱蓄熱材の室内パッシブ利用に関する調査研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014 年 9 月、pp1031-1032

A-34

異なる色の小空間内における嗅覚閾値と心理評価に関する検討

Basic Study on Olfactory Threshold and Sensory Evaluation Measured in Colored Small Spaces

○ 竹村　明久　（摂南大学）　甲谷　圭亮　（摂南大学）

Akihisa TAKEMURA*1 Keisuke KOTANI*1
***1 Setsunan University**

It is not sufficient, although the effect of color on odor evaluation has studied. In this study, Twenty participants sniffed acetone and alpha pinene in the evaluation boxes, those innner walls were colored white, blue and red. Olfactory thresholds and sensory evaluations were compared among three colors. There was no significant difference among thresholds in three color boxes. Intensity and hedonics of odor were also not effected by color, except for impression of "warmth". However, evaluation of "warmth" might be include not only impression of odor but also color or total impression of small space, which only meant that these tendency were according to Hue-heat Hypothesis. Totally, there might not be little relationship in the threshold and the psychological evaluation of odor.

1. はじめに

人は、常時複数の感覚器官を同時に働かせて生活しているため、室内環境を考える上では単一感覚のみでは実情に沿わない場合があると予想される。室内空気環境では心理的不快要因としてにおい問題が取上げられるが、においと温熱感覚の複合評価などの研究は行われてきた。一方で、視覚との複合評価についての研究は少なく、例えば川上ら[1)]が、色とにおい提示時の VDT 作業効率や人体影響について報告しているが、色がにおいの感覚に及ぼす影響に関する知見はほとんどない。悪臭の不快感の緩和や芳香の活用に向けた色彩と嗅覚の関係の基礎資料整備は、今後の室内環境創造の上で不可欠と言えることから、本研究では、異なる色の小空間内におけるにおい感覚やにおいの心理評価を把握することを目的とする。

2. 異なる色の小空間における閾値測定概要

2016 年 11 月 8 日から 12 月 8 日に、T&T オルファクトメータと石原式色覚検査の双方に合格した 20 名のパネル（平均 21.3 歳、男性 10 名、女性 10 名）に三点比較式臭袋法に準じて、アセトン（溶剤臭）とα－ピネン（木材臭）を用いた閾値測定を実施した。パネルは、図 1 に示す評価ブース内で 3L におい袋(PET 製、近江オドエアーサービス社製）を実験者から受取って検臭する手法とした。ブース内には調光可能な D65 光源を設置し、暗幕で覆った。ブースは 3 種用意し、各内壁には、白色（N9.5)、青色（5PB 4/8)、赤色（2.5R 4/12）の画用紙をパネルから見て左右のブース内壁面と奥の面、及び机上面の 4 面に貼り付けた。各ブースは、机上面照度が 400[lx] となるよう調整した。3 色のブースの経験順は、ラテン方格に準じて順不同とした。また、検臭時にはブース内正面を注視して、なるべく目を閉じないよう教示した。

三点比較式臭袋法は、パネルに提示した 3 個のにおい袋のうちの 1 袋を有臭､残りの 2 袋は無臭として、有臭袋を回答させ、正解であればさらに 3 倍系列で希釈した臭気について判定を繰返し、不正解となった希釈倍数と直前の希釈倍数の間に嗅覚閾値が存在すると考える手法である。本検討では、まずアセトンについて同法で閾値測定をした後にα－ピネンの測定を行った。

なお、本検討は、本学研究倫理審査委員会の承認済であり、パネルには、適切な謝礼を支払った。

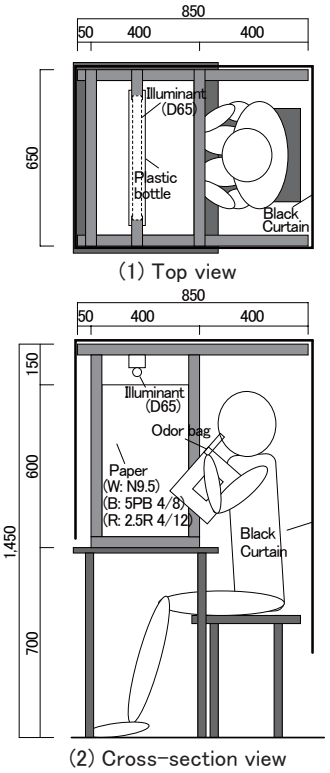


Figure 1 Colored small space

3. 閾値測定結果

表 1 から表 6 に、各色の小空間内で測定した 20 名の三点比較式臭袋法結果を示す。アセトンの閾

Table 1 Thresholds of acetone in white space

Partici-pants' No.	Logarism of dilution ratio from concentration of original odor Log10D											Log10Dn	Concentration of original odor C [ppm]	Indivisual threshold Ct=C/Dn [ppm]
	1	1.48	2	2.48	3	3.48	4	4.48	5	5.48	6			
1	○	○	×									1.74	5000	91
2	○	○	×									1.74	4250	77
3	○	○	○	○	×							2.74	4250	7.7
4	○	○	○	×								2.24	5000	29
5	○	○	○	○	○	×						3.24	5000	2.9
6	○	○	×									1.74	4800	87
7	○	○	○	×								2.24	5000	29
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	5.74	4800	0.0087
9	○	○	○	○	×							2.74	4250	7.7
10	○	○	○	○	×							2.74	4250	7.7
11	○	○	×									1.74	4250	77
12	○	○	×									1.74	4250	77
13	○	○	×									1.74	4750	86
14	○	○	○	×								2.24	4250	24
15	○	○	○	×								2.24	4250	24
16	○	○	○	×								2.24	4250	24
17	○	○	×									1.74	4250	77
18	○	○	○	○	×							2.74	5000	9.1
19	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	5000	0.29
20	○	○	×									1.74	5000	91
													Mean	16

Table 2 Thresholds of acetone in blue space

Partici-pants' No.	Logarism of dilution ratio from concentration of original odor Log10D											Log10Dn	Concentration of original odor C [ppm]	Indivisual threshold Ct=C/Dn [ppm]
	1	1.48	2	2.48	3	3.48	4	4.48	5	5.48	6			
1	○	○	×									1.74	5000	91
2	○	○	○	○	×							2.74	4250	7.7
3	○	○	○	×								2.24	4250	24
4	○	○	×									1.74	5000	91
5	○	○	○	×								2.24	5000	29
6	○	○	○	○	×							2.74	4800	8.7
7	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	5000	0.29
8	○	○	○	○	×							2.74	4800	8.7
9	○	○	○	×								2.24	4250	24
10	○	○	○	○	○	×						3.24	4250	2.4
11	○	○	○	×								2.24	4250	24
12	○	×										1.24	4250	245
13	○	○	○	×								2.24	4750	27
14	○	○	○	×								2.24	4250	24
15	○	○	○	×								2.24	4250	24
16	○	○	○	×								2.24	4250	24
17	○	○	×									1.74	4250	77
18	○	○	○	○	×							2.74	5000	9.1
19	○	○	○	○	○	○	○	○	×			4.74	5000	0.091
20	○	○	○	○	×							2.74	5000	9.1
													Mean	14

Table 3 Thresholds of acetone in red space

Partici-pants' No.	Logarism of dilution ratio from concentration of original odor Log10D											Log10Dn	Concentration of original odor C [ppm]	Indivisual threshold Ct=C/Dn [ppm]
	1	1.48	2	2.48	3	3.48	4	4.48	5	5.48	6			
1	○	○	○	×								2.24	5000	29
2	○	○	×									1.74	4250	77
3	○	○	○	○	○	×						3.24	4250	2.4
4	○	○	○	×								2.24	5000	29
5	○	○	○	○	×							2.74	5000	9.1
6	○	○	×									1.74	4800	87
7	○	○	○	×								2.24	5000	29
8	○	○	○	○	×							2.74	4800	8.7
9	○	○	○	×								2.24	4250	24
10	○	○	○	○	○	×						3.24	4250	2.4
11	○	○	○	×								1.74	4250	77
12	○	○	○	○	○	×						3.24	4250	2.4
13	○	○	○	○	×							2.74	4750	8.6
14	○	○	○	×								2.24	4250	24
15	○	○	○	×								2.24	4250	24
16	○	○	○	○	×							2.74	4250	7.7
17	○	○	×									1.74	4250	77
18	○	○	×									1.74	5000	91
19	○	○	○	○	×							2.74	5000	9.1
20	○	○	×									1.74	5000	91
													Mean	20

Table 4 Thresholds of alpha-pinene in white space

Partici-pants' No.	Logarism of dilution ratio from concentration of original odor Log10D											Log10Dn	Concentration of original odor C [ppm]	Indivisual threshold Ct=C/Dn [ppm]
	1	1.48	2	2.48	3	3.48	4	4.48	5	5.48	6			
1	○	○	○	○	×							2.74	200	0.36
2	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	220	0.013
3	○	○	○	×								2.24	220	1.3
4	○	○	○	○	○	○	○	○	×			4.74	280	0.0051
5	○	○	○	○	○	○	×					3.74	280	0.051
6	○	○	×									1.74	230	4.2
7	○	○	×									1.74	200	3.6
8	○	○	○	○	×							2.74	230	0.42
9	○	○	○	○	○	×						3.24	230	0.13
10	○	○	○	×								2.24	250	1.4
11	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	5.74	250	0.00045
12	○	○	○	○	○	○	○	○	×			4.74	300	0.0055
13	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	280	0.016
14	○	○	○	○	○	○	×					3.74	290	0.053
15	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	300	0.017
16	○	○	○	×								2.24	300	1.7
17	○	○	○	○	×							2.74	290	0.53
18	○	○	○	○	×							2.74	300	0.55
19	○	○	○	○	○	×						3.24	200	0.12
20	○	×										1.24	200	12
													Mean	0.15

Table 5 Thresholds of alpha-pinene in blue space

Partici-pants' No.	Logarism of dilution ratio from concentration of original odor Log10D											Log10Dn	Concentration of original odor C [ppm]	Indivisual threshold Ct=C/Dn [ppm]
	1	1.48	2	2.48	3	3.48	4	4.48	5	5.48	6			
1	○	○	×									1.74	200	3.6
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	5.74	220	0.00040
3	○	○	○	○	×							2.74	220	0.40
4	○	○	○	○	○	○	○	○	×			4.74	280	0.0051
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×		5.24	280	0.0016
6	○	○	×									1.74	230	4.2
7	○	○	×									1.74	200	3.6
8	○	○	○	○	○	×						3.24	230	0.13
9	○	○	○	○	×							2.74	230	0.42
10	○	○	○	○	○	×						3.24	250	0.14
11	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×		5.24	250	0.0014
12	○	○	○	○	○	○	×					3.74	300	0.055
13	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	280	0.016
14	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	290	0.017
15	○	○	○	○	○	○	○	○	×			4.74	300	0.005
16	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	300	0.017
17	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	290	0.017
18	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	300	0.017
19	○	○	○	×								2.24	200	1.2
20	○	×										1.24	200	12
													Mean	0.07

Table 6 Thresholds of alpha-pinene in red space

Partici-pants' No.	Logarism of dilution ratio from concentration of original odor Log10D											Log10Dn	Concentration of original odor C [ppm]	Indivisual threshold Ct=C/Dn [ppm]
	1	1.48	2	2.48	3	3.48	4	4.48	5	5.48	6			
1	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	200	0.012
2	○	○	○	×								2.24	220	1.3
3	○	○	○	×								2.24	220	1.3
4	○	○	○	○	○	○	○	○	×			4.74	280	0.0051
5	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	280	0.016
6	○	○	○	×								2.24	230	1.3
7	○	○	×									1.74	200	3.6
8	○	○	○	○	×							2.74	230	0.42
9	○	○	○	×								2.24	230	1.3
10	○	○	○	×								2.24	250	1.4
11	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×		5.24	250	0.0014
12	○	○	○	○	○	○	×					3.74	300	0.055
13	○	○	○	○	○	○	○	×				4.24	280	0.016
14	○	○	○	○	○	×						3.24	290	0.17
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	5.74	300	0.00055
16	○	○	○	×								2.24	300	1.7
17	○	○	○	×								2.24	290	1.7
18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×		5.24	300	0.0017
19	○	○	○	○	○	×						3.24	200	0.12
20	○	×										1.24	200	12
													Mean	0.14

値に関してみると、表１の白色条件と表２の青色条件では、２名ずつ高い希釈倍数まで嗅ぐことができたパネルが存在したが、表３の赤色条件ではパネル間のばらつきが非常に小さかった。バートレット検定では、３色の閾値のばらつき間に $p<.05$ の有意差が検出された。一方、α－ピネンに関しては、３色とも個人閾値の差は同程度だった。

図２に、表１から表６で算出した20名の嗅覚閾値の対数平均値と濃度の対数の標準偏差を示す。アセトン、α－ピネン共、平均閾値に大きな差異は見られず、分散分析による有意差も検出されなかった。アセトンの赤色条件における個人間ばらつきの低下は見出されたものの、概ね検臭空間の色が嗅覚閾値に及ぼす影響は大きくないと推測された。また、永田ら[2)]が公開した測定閾値であるアセトン42[ppm]、α－ピネン0.018[ppm]と比較して、アセトンでは本検討の方がやや閾値濃度が低く、α－ピネンではやや高い傾

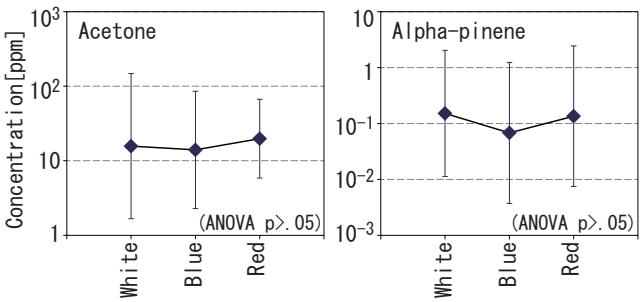


Figure 2 Comparison of thresholds among color spaces

向にあったが、3 色の条件間の測定を繰返し測定精度として捉えた場合には、非常に精度が高い測定だったと言える。

4. 異なる色の小空間における心理評価実験概要

2 章で閾値測定を行った臭気について、2016 年 11 月 12 日から 12 月 14 日の間に、図 1 の 3 色の色条件空間内でにおいの心理評価実験を実施した。提示臭気は、アセトン（126, 420, 1260[ppm]）と α－ピネン（0. 1, 1, 10[ppm]）の計 6 濃度条件を 10L 試料採取袋（PET 製、近江オドエアーサービス社製）にそれぞれ封入して作製した。実験は、インストラクションに基づき、まず色空間のみの印象評価の後に、色空間 3 条件とにおい濃度 6 条件の計 18 条件について、ラテン方格に基づき順不同で 2 章と同一の 20 名のパネルに提示した。

評価項目は、色空間評価では印象として「親しみ」、「新鮮さ」、「複雑さ」、「温かさ」の 4 因子[3)] を色空間を対象として評価させ、色とにおいの複合評価ではにおいの強さと快･不快､及びにおいの印象として「親しみ」、「新鮮さ」、「複雑さ」、「温かさ」の 4 因子の計 6 項目とした（図 3）。

本検討も、本学研究倫理審査委員会の承認を得ており、パネルには、適切な謝礼金を支払った。

5. 濃度とにおいの強さとの関係

図 4 に、におい濃度と臭気強度の関係を示す。横軸はにおいの濃度（対数軸）、縦軸はにおいの強さを示す臭気強度尺度とした。2 臭気とも、濃度が高いほど臭気強度も高い傾向にあった。色条件間では、アセトンはわずかに色条件ごとに「濃度－強度関係」の傾きが異なり、白条件が最小で青条件が最大だった。ただし、色条件間の平均値の有意差は、分散分析では検出されなかった。α－ピネンでは色条件間でほぼ傾向が一致した。全体として色条件間で差異があったとは言えない。

6. 濃度とにおいの快・不快の関係

図 5 に、におい濃度と快・不快度の関係を示す。横軸はにおいの濃度（対数軸）、縦軸はにおいの快・不快を示す快・不快度尺度とした。アセトンでは、濃度が高いほど快・不快度が低下する傾向だったが、α－ピネンでは濃度に依らず一定の評価だった。色条件間での評価の差異は見られず、分散分析でも有意差は検出されなかった。全体として色条件間で差異があったとは言えない。

7. 濃度とにおいの印象の関係

濃度とにおいの印象の関係については、紙面の都合上アセトンのみについて述べる。図 6 に、におい濃度と「親しみ」の関係を示す。横軸はにおいの濃度（対数軸）、縦軸はにおいの「親しみ」尺度とした。円の面積は回答者の度数を示し、図中の横線分は、色空間のみの評価であり、評価尺度は同一だが、厳密には評価対象が色空間かにおいかで異なる。「親しみ」評価では、いずれの色条件でも、濃度が高いほど「親しみ」が低下する傾向にあった。色条件間では、白条件が青及び赤条件よりもわずかに高めの傾向を示したが、分散分析による有意差は検出されなかった。色空間のみの評価と比較すると、白及び青条件では低濃度で色空間のみの評価に近いのに対し、赤条件では高濃度で色空間のみの評価に近かった。

図 7 に、におい濃度と「新鮮さ」の関係を示す。図の見方は図 6 と同様である。「新鮮さ」評価では、白条件では濃度に依らず一定の評価を、青条件では濃度が高いほどわずかに評価が低下し、赤条件では濃度が高いほどわずかに評価が上昇する傾向にあった。色条件間の評価を比較すると、ほとんど差異は見られず、分散分析でも有意

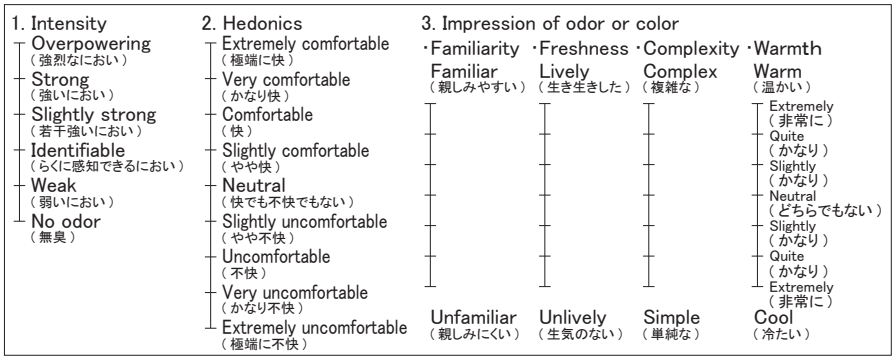


Figure 3 Scale

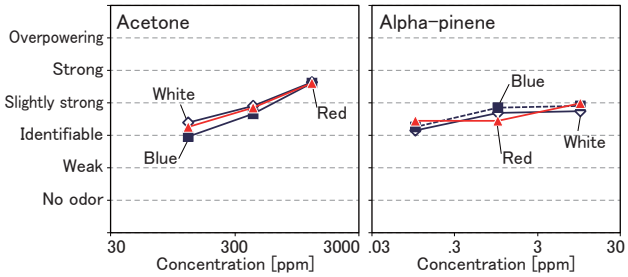


Figure 4 Relationship between odor concentration and intensity

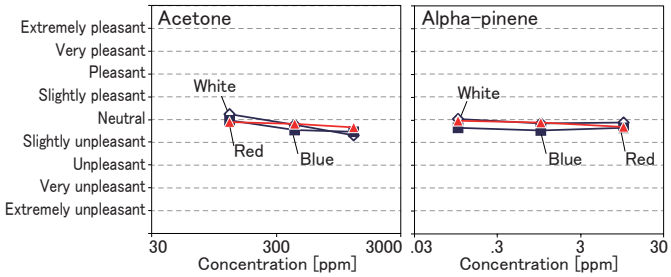


Figure 5 Relationship between odor concentration and hedonics

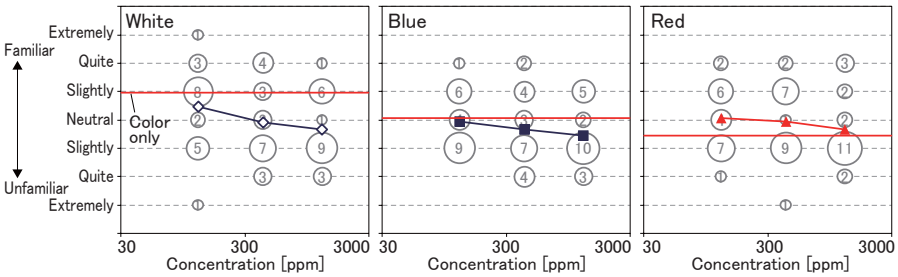


Figure 6 Relationship between odor concentration and familiarity (acetone)

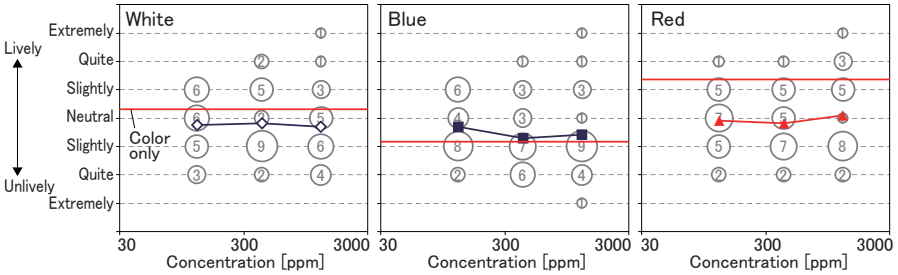


Figure 7 Relationship between odor concentration and freshness (acetone)

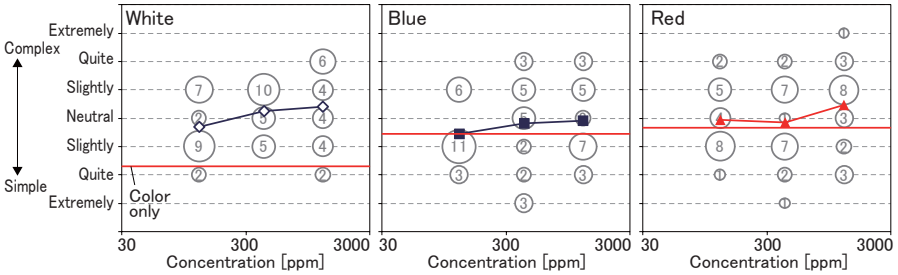


Figure 8 Relationship between odor concentration and complexity (acetone)

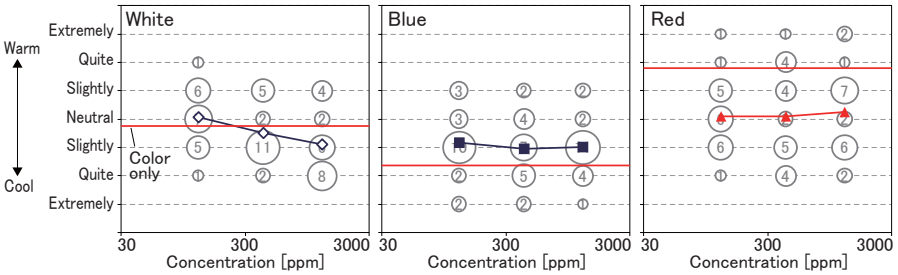


Figure 9 Relationship between odor concentration and warmth (acetone)

Table 7 Significant differences in multiple comparison
(comparison of warmth among color conditions)

(1) 126 [ppm]

	Wh	Bl	Re
White		*	*
Blue			
Red			

(2) 420 [ppm]

	Wh	Bl	Re
White			
Blue			*
Red			

(3) 1260 [ppm]

	Wh	Bl	Re
White			*
Blue			**
Red			

(**:p<.01, *:p<.05)

差は検出されなかったが、赤条件はわずかに青条件より高い傾向にあった。色空間のみの評価との比較では、青条件はにおい評価よりも色空間のみの評価の方が低く、赤条件では反対ににおい評価よりも色空間のみの評価の方が高かった。有意差は検出されなかったが、前述の色条件間のわずかな評価傾向の差異が、色空間のみの評価の影響を受けた可能性が考えられた。

図 8 ににおい濃度と「複雑さ」の関係を示す。図の見方は図 6 に準じる。「複雑さ」評価では、全色条件で濃度が高いほど評価も高い傾向にあった。色条件間比較では、赤条件の 126[ppm] がわずかに他の条件より高かったが、分散分析による有意差は検出されなかった。色空間のみの評価との比較では、白条件はにおい評価が色空間のみ評価よりかなり高く、青及び赤条件ではにおい評価は色空間のみ評価とほぼ同等だった。

図 9 ににおい濃度と「温かさ」の関係を示す。図の見方は図 6 と同様である。「温かさ」評価では、白条件のみで濃度が高いほど評価が顕著に低下する傾向が見られた。青条件では「やや冷たい」程度で濃度に依らず一定、赤条件では「どちらでもない」程度で濃度に依らず一定の傾向を示した。色条件間比較では、表 7 に示したように、複数の条件で多重比較による有意差が検出された。色空間のみの評価との比較では、青条件での低いにおい評価と赤条件での高いにおい評価が色空間のみの評価の影響を受けたと推測される。これが、におい評価への影響だったのか、インストラクションや評価用紙の設問での指示に反して、小空間の総合的な印象評価だったのかは明確にできなかった。

8. おわりに

本報では、小空間の色がにおいの閾値と心理評価に及ぼす影響について検討した。嗅覚閾値への影響はほとんどないと考えられた。においの強さ及び快・不快への影響も見られなかったが、においの印象評価への影響は一部項目で確認された。

本研究の一部は、鴻池奨学財団平成 28 年度研究助成による。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 川上満幸，松本修一，大槻繁雄：色彩と香りが VDT 作業に及ぼす影響，照明学会誌 第 84 巻 第 2 号，pp. 92-99，2000
2) 永田好男，竹内教文：三点比較式臭袋法による臭気物質の閾値測定結果，日環セ所報 No. 17，pp. 77-89，1990
3) 竹村明久，山中俊夫，甲谷寿史：建築材料から発生するにおいの主観評価に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第 630 号，pp. 999-1004，2008. 8

A-35

におい嗜好が嗅覚閾値と主観評価に及ぼす影響

Effect of Odor Preference on Olfactory Threshold and Sensory Evaluation

○ 青木　悦徳　（摂南大学）　竹村　明久　（摂南大学）
Yoshinori AOKI[*1] Akihisa TAKEMURA[*1]
***1 Setsunan University**

There is little knowledge about the effect of odor preference on odor evaluation. It is useful to obtain the effect on odor evaluation and threshold quantitatively. Each ten participants, those like, dislike and were indifferent about the odors of osmanthus and gasoline, measured their thresholds. There were no difference among attributes of preference. Next, at least fifteen participants, those like, dislike and were indifferent about the above two odors, evaluated about intensity, acceptance and impressions. There were no difference in odor intensity evaluation. On the other hand, acceptability and some items of impressions were effected by preference of odor.

1. はじめに

嗅覚を利用したにおい評価を行う場合に、評価者のにおいへの嗜好が評価に及ぼす影響については、指摘されてきた。坂井ら[1)]はアネトール検臭時にポジティブとネガティブの情報を与えて快不快評価の差を得たが、教示を用いずに潜在的な評価者のにおい嗜好によって評価傾向を比較した例は非常に少ない。室内空間のにおい評価を嗅覚に頼る場合に、評価者の嗜好が環境判断に大きな影響を有する可能性については明らかにすべきである。そこで、本研究では、対象臭気への嗜好ごとに評価者群を設けて、濃度をパラメータとしたにおい評価実験を行い、評価傾向の嗜好群間比較から評価者の嗜好がにおい評価傾向に及ぼす影響を把握することを目的とする。

2. 臭気の選定

においに対して幅広い嗜好群を均等人数準備することを念頭に、評価者として採用が想定される本学学生のにおい嗜好傾向を把握する必要があると考えた。そこで、2016 年 5 月から 6 月に、本学科学生を対象に、におい嗜好の調査を実施した。調査項目は、においへの興味の有無、印象に残っているにおいの自由記述、好むにおいと嫌うにおいをそれぞれ食べ物とその他について自由記述、そして、これまでに他者とにおい嗜好について意見が異なった経験の有無とその内容の自由記述で構成した。回答者は 257 名（1 年：75 名、2 年：58 名、3 年：55 名、4 年 49 名、男 153 名、女 84 名）だった。

調査の結果から、「意見の異なったにおい」の最上位にガソリン臭が挙げられた。また、「好むにおい」、「嫌うにおい」および「意見の異なったにおい」の項目全てに挙がったキンモクセイ臭も有効な対象臭気と考えて、計 2 種を選定した。

3. 閾値のにおい嗜好間比較

2016 年 11 月 4 日から 12 月 2 日に本学実験室で、三点比較式臭袋法により閾値測定を実施した。原臭は、ガソリンは試料採取袋（近江オドエアーサービス社製、PET 製、容量 10L）に ENEOS レギュラーガソリン（JX エネルギー社）を封入、キンモクセイは同種の袋にサワデーキンモクセイ（小林製薬社）を封入し、袋内に充満させた臭気をそれぞれ異なる袋に移して作成した。実験時の温湿度は、18 ～ 25[℃]、30 ～ 70[%RH] だった。パネルは、嗅覚検査合格者の中から 2 種の試料臭気に対して「好き」、「どちらでもない」、「嫌い」の 3 群を設け、事前の自己申告に基づいて各 10 名となるように集めて延べ 30 名とした。本検討は、本学医療研究倫理審査委員会で承認を得ており、被験者には、適切な謝礼金を支払った。

表 1 に測定結果を示す。数値は、パネルの閾値に相当する原臭からの希釈倍数の対数である。また、悪臭防止法では、上下 1 トリム平均値を代表値とするが、ここでは統計処理のために全データの平均値を併記した。ガソリンは、全嗜好群でほぼ閾値は一致した。個人間の閾値のばらつきが大きいとされることを鑑みても、嗜好群の差異は無かったと言えよう。分散分析による有意差も検出されなかった。キンモクセイについてもわずかに「どちらでもない」群が低い値、すなわち閾値の濃度が高い、嗅覚が鈍い傾向にあったが、分散分析における有意差の検出はなく、差異はな

かったと考えられる。以上から、2 臭気のみの検討ではあるが、におい嗜好が嗅覚閾値に及ぼす影響はほぼないと考えられた。そこで、嗜好群をまたいだ計 30 名の平均値の原臭からの希釈倍数の対数値である、ガソリンは 4.41（臭気濃度 25500）、キンモクセイは 6.39（臭気濃度 2450000）を代表原臭濃度とみなした。ここで、臭気濃度とは、閾希釈倍数のことである。

4. におい評価の嗜好群間比較

4.1 実験概要

実験は、2016 年 11 月 4 日から 12 月 8 日に、本学実験室にて実施した。試料臭気は、予備実験にて臭気強度がおよそ等間隔になる原臭からの希釈倍数として、ガソリンは臭気濃度 25, 85, 255, 850 に無臭を加えた 5 段階、キンモクセイは臭気濃度 245, 2460, 8180, 81800 に無臭を加えた 5 段階とし、計 10 条件を臭気種ごとに順不同に提示した。パネルは 3 章の参加者を含めた嗅覚検査に合格した者とし、事前の自己申告に基づき、ガソリンは「好き」群 18 名、「どちらでもない」群 16 名、「嫌い」群 16 名、キンモクセイは、「好き」群 20 名、「どちらでもない」群 15 名、「嫌い」群 15 名とした。延評価者数は 50 名で、評価者は全員が 2 臭気ともを評価した。評価項目は図 1 に示す 4 種で、においの強さ、許容の可否（強制二者択一方式 (a)、ISO の線分方式 (b)）、においの印象として「嗜好」、「安全」、「複雑さ」、「機嫌」、「疲労」、「嗅ぎたさ」、「自然感」とした。実験時の温湿度は、18.3 ～ 24.6[℃]、26 ～ 63[%RH] だった。本検討も、本学医療研究倫理審査委員会で承認を得ており、被験者には、適切な謝礼金を支払った。また、パネルには提示臭気情報は与えなかった。

Table 1 Logarithmic value of dilution factor from original odor corresponding to threshold

(a) Gasoline

Like	Neutral	Dislike
3.74	3.74	3.24
3.74	3.74	4.24
3.74	3.74	4.24
3.74	4.24	4.24
4.24	4.24	4.24
4.24	4.24	4.24
4.24	4.74	4.74
4.74	4.74	4.74
5.24	4.74	4.74
6.24	5.74	5.74
Mean 4.39	Mean 4.39	Mean 4.44

(b) Osmanthus

Like	Neutral	Dislike
5.24	5.24	5.74
5.74	5.24	5.74
5.74	5.74	5.74
5.74	5.74	6.24
6.24	5.74	6.24
6.24	6.24	6.24
6.24	6.24	6.74
7.24	6.24	7.74
8.24	6.74	7.74
8.24	7.24	8.24
Mean 6.49	Mean 6.04	Mean 6.64

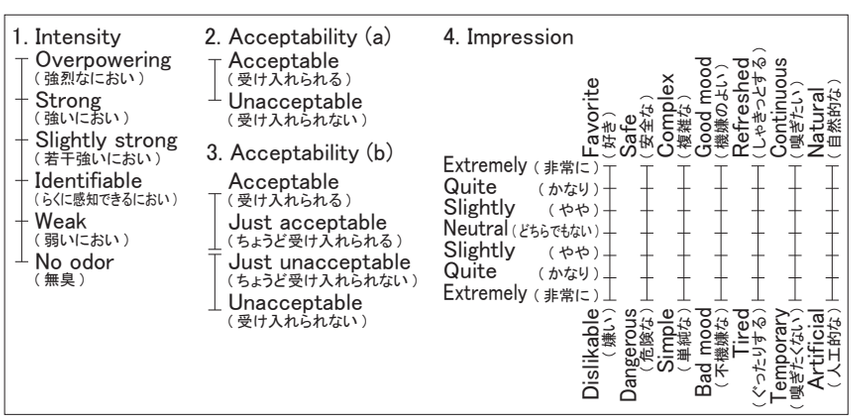


Figure 1 Rating scale

4.2 臭気濃度と臭気強度の関係

図 2 に臭気濃度と臭気強度の関係の嗜好群間比較を示す。横軸を臭気濃度の対数軸としたため、無臭条件（図中 Ctr）の評価は分けて記載した。縦軸は臭気強度で、円の面積で度数、プロットで平均値を示す。図中には嗜好群名とパネル数を併記した。

まず、全嗜好条件の Ctr 評価を見ると、全てが「無臭」ではなく、最大で「若干強い」までの評価が見られた。無臭空気は、活性炭槽を通した室空気を用いて作成したが、パネルには必ずしも無臭とは評価されなかった。この傾向は、既往研究[2] と同様だった。

有臭袋評価のガソリンを見ると、全体として嗜好群間に大きな差異は見られなかったが、低臭気濃度では「どちらでもない」群と「嫌い」群で「好き」群より高い傾向にあった。キンモクセイでは、全体的に「臭気濃度－臭気強度関係」の傾きがガソリンより緩やかな傾向にあり、アロマオイルの同関係を求めた既往研究[3] と類似し

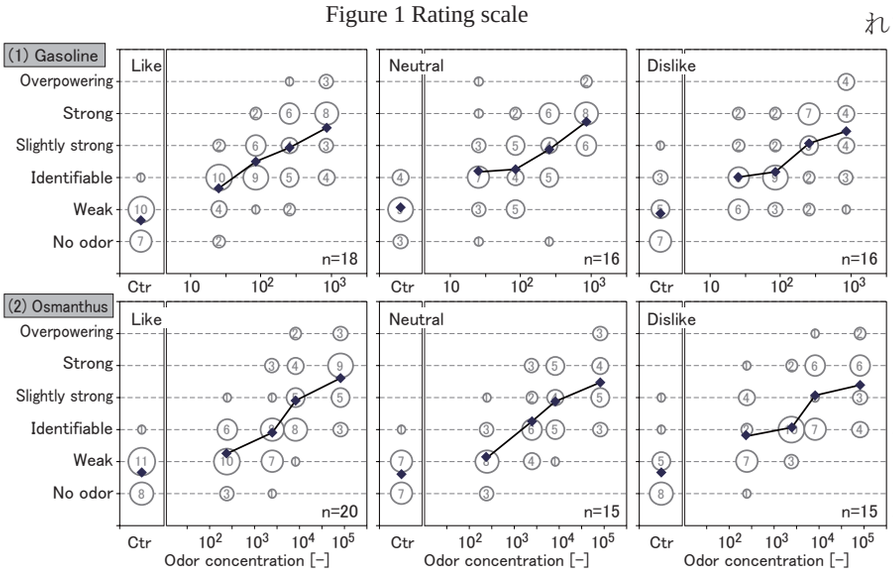


Figure 2 Comparison of relationship between odor concentration and intensity among odor preference

た傾向だった。また、低濃度では「嫌い」群の評価が他群よりやや高く、建材臭での嗜好群間の臭気強度評価傾向の差異[4]と類似していた。一方で、高濃度ではガソリンもキンモクセイも嗜好群間の差異は見られなかった。3 章の閾値測定結果に嗜好群間の差はなかったことを鑑みると、低濃度臭気の認知が「嫌い」群で臭気強度を上昇させる可能性が示唆された。

4.3 臭気濃度と非容認率の関係

許容の可否評価（二者択一）で、「受け入れられない」と回答した数を全パネル数で除した値を非容認率として、図 3 に臭気濃度と非容認率の関係を示した。横軸が臭気濃度、縦軸はプロットに対しては非容認率、円については許容の可否評価を示し、円の面積で度数とした。

ガソリンでは、「好き」群は非容認率が低く、「どちらでもない」群は低臭気濃度でも「嫌い」群より高い非容認率だったが、特に「嫌い」群で臭気濃度が高いほど非容認率が大きく上昇する傾向が目立った。キンモクセイでは、「好き」群は全臭気濃度でほぼ非容認率は 0[%] だったが、「どちらでもない」群と「嫌い」群では、高い臭気濃度域で 20[%] 程度ではあるが非容認率が上昇する傾向にあった。4.2 節で臭気強度の嗜好群間の傾向差がなかったことと比較すると、同強度感覚であっても、許容の可否にはパネルのにおいに対する嗜好が大きく影響することを支持している。

4.4 臭気濃度と印象（嗜好）の関係

印象評価のうち、嗜好群間差の表出が予想された「嗜好」評価について図 4 に示す。横軸は臭気濃度、縦軸は「嗜好」評価を示し、円の面積で度数を、プロットで平均値を示した。

ガソリンでは、「好き」群は全臭気濃度にわたって好き側の平均評価だったのに対して、他の 2 群は嫌い側の平均評価だった。また、臭気濃度が高いほど「好き」群は評価が上昇し、他の 2 群では下降した。「どちらでもない」群と「嫌い」群の評価傾向は、悪臭を対象とした濃度－嗜好評価関係に見られる傾向だったのに対して、「好き」群の傾向は、芳香の同関係の傾向に近い。キンモクセイでは、低い臭気濃度では嗜好群間の評価差は見られなかったが、高い臭気濃度域で「どちらでもない」群と「嫌い」群では評価が嫌い側に推移するのに対し、「好き」群では高い臭気濃度でも好き側評価が多く見られた。なお、これらの傾向から、事前の自己申告で分類した嗜好群との相関が見られ、分類が妥当であったことも読み取れた。

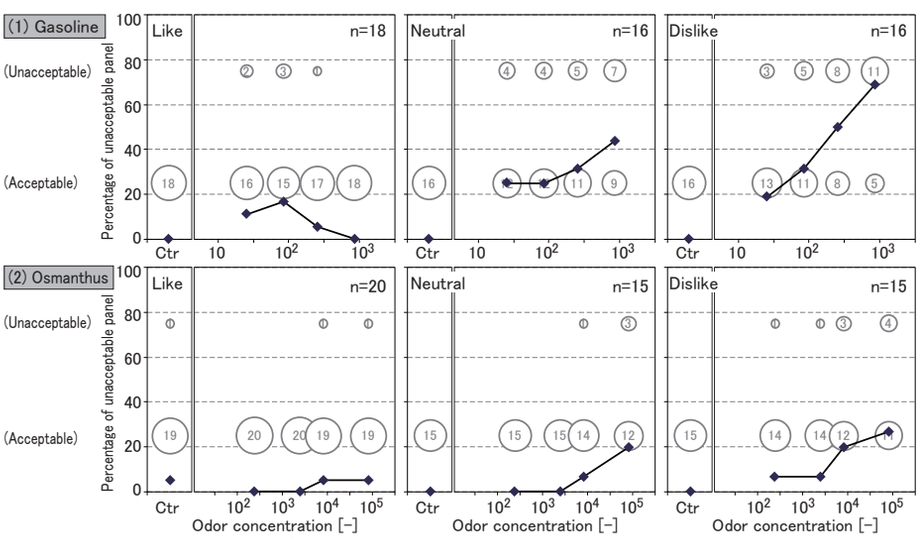


Figure 3 Comparison of relationship between odor concentration and acceptability among odor preference

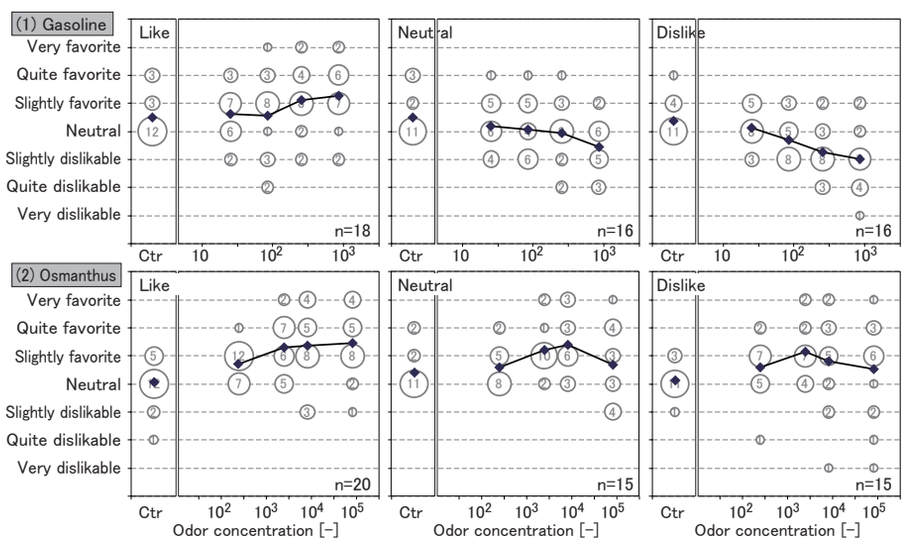


Figure 4 Comparison of relationship between odor concentration and impression of preference among odor preference

4.5 臭気濃度と印象（嗜好以外）の関係

図 5 に、印象評価の「嗜好」以外の 6 項目の臭気濃度と評価の関係について示した。

[1]「安全」では、ガソリンは「好き」群でも危険側評価であり他群と同様に高い臭気濃度ほど危険側評価の傾向だった。キンモクセイでは、「好き」群では臭気濃度 81800 でも危険側評価が皆無だった。

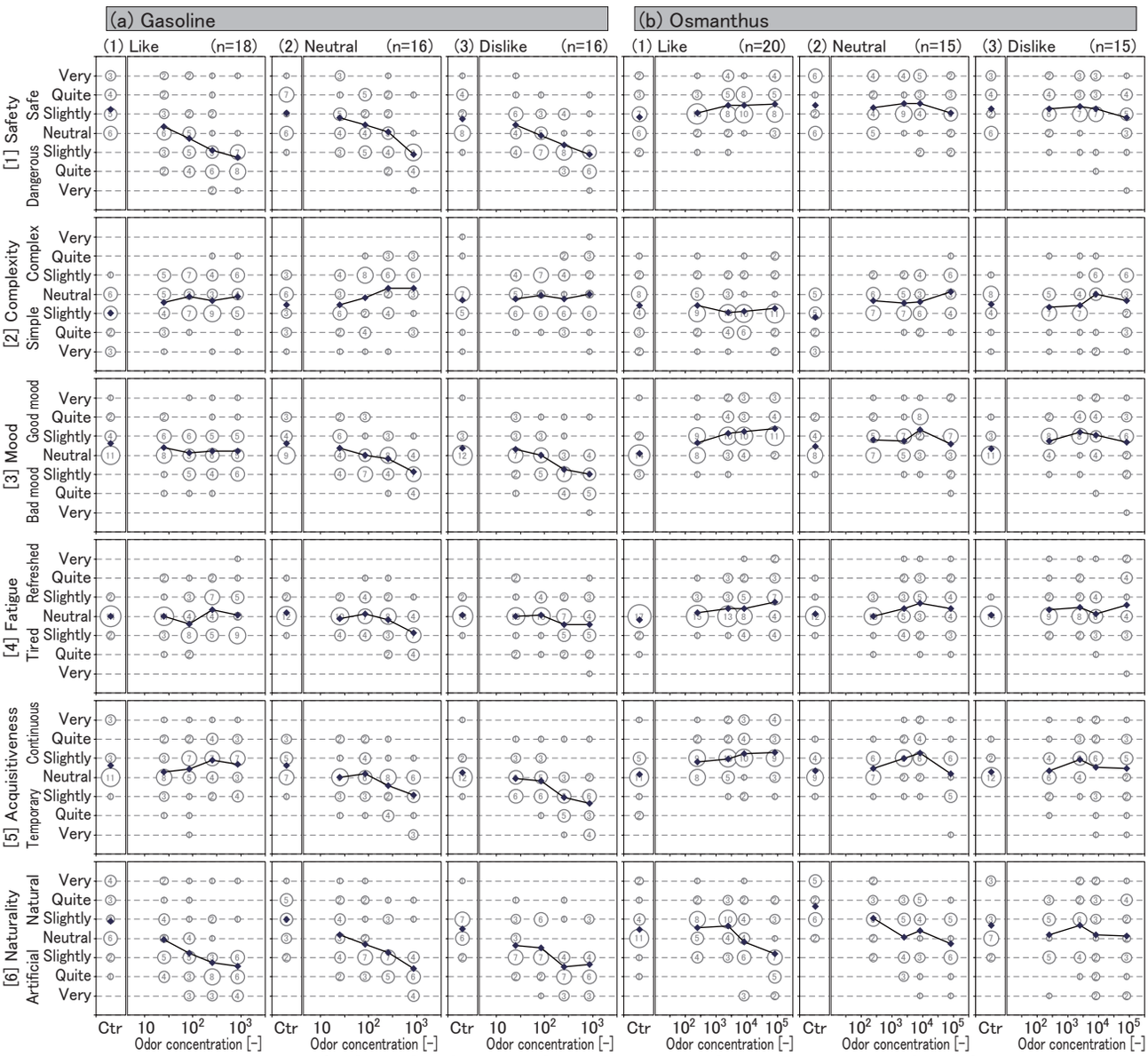


Figure 5 Comparison of relationships between odor concentration and impressions among odor preference

[2]「複雑さ」、[4]「疲労」、[6]「自然感」では、嗜好群間差は小さかった。[3]「機嫌」では、2 臭気とも「どちらでもない」群と「嫌い」群は右下がりの傾向だったのに対して「好き」群は異なる傾向だった。[5]「嗅ぎたさ」では、高い臭気濃度域で「好き」群と他の 2 群との傾向差が鮮明だった。

なお、[1]「安全」では、無臭条件である Ctr の平均評価が嗜好群に依らず「やや安全な」程度であった。低濃度臭気や無臭空気の印象として、中庸評価と安全側評価に分散して評価されたと考えられる。[6]「自然感」では、Ctr の平均評価は「やや自然的な」から「かなり自然的な」の範囲だった。低濃度臭気や無臭空気の印象を中庸評価よりも自然的と評価したことがわかる。

5. おわりに

本報では、ガソリンとキンモクセイの 2 種のにおいに対して分類した 3 嗜好群のパネルを用いて、閾値と主観評価の嗜好群間差について検討した。閾値と臭気強度評価には差が見られず、非容認率と印象の数項目では顕著な差が見られた。今後、これらをより定量的に評価する必要があると考える。

本研究の一部は、鴻池奨学財団平成 28 年度研究助成による。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 坂井信之，小早川達，斉藤幸子：認知的要因がにおいの知覚と順応過程に及ぼす影響，におい・かおり環境学会誌 Vol.35 No.1，pp.22-25，2004
2) 竹村明久：臭気強度評価訓練における訓練影響の定量化に関する研究，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.17-20，2015
3) 竹村明久：濃度をパラメータとしたアロマ精油のかおり評価特性（その２）閾値測定と回帰モデルに基づく心理評価傾向の把握，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.93-96，2016
4) 竹村明久，相良和伸，山中俊夫，甲谷寿史：においの主観評価に関する基礎的研究（その 2）パネルの建材臭に対する嗜好が評価に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1，pp.93-94，2007

A-36

木質精油の香りが知的作業成績とストレス・精神疲労の関係に及ぼす影響

Effect of Essential Oils of Woods on Relationship among Mental Work Performance, Stress and Mental Fatigue

○ 地畠　博　（摂南大学）　竹村　明久　（摂南大学）

Hiroshi JIBATAKE[*1] Akihisa TAKEMURA[*1]

***1 Setsunan University**

In the previous research on mental work performance, the effect of aroma had large deviations among participants. It is neccesary to reveal indivisual tendencies of the effect. Ten participants were made the mental work in the room filled with aroma, those were emitted from essential oils: cypress in Kiso, cypress in Aomori, eucalyptus, pine, orange and control(water). Flicker fusion frequency, saliva amylase and evaluation of moods, those were measured before and after mental work, were compared among aroma conditions. Consequently, it was found that work efficiency was improved and work stress was suppressed in aroma conditons of woods except for eucalyptus. Indivisual patterns of aroma effects were approximately classified.

1. はじめに

香り空調をはじめとした木質精油を用いたオフィス等での環境向上の取組みは以前よりあった一方で、検証研究では明確な効果を示した例[1)]は多くない。オフィスを想定した香り環境での作業に関する既往研究[2)]では、個人ごとに影響が異なる可能性が示唆された。そこで、本研究では、オフィスでの木質香の活用を目標にしながら、香り空間での作業実験を実施し、実験参加者平均値の傾向を示すと共に、空間の香りが作業効率や作業によってかかるストレス、精神疲労に及ぼす個人ごとの影響の傾向を把握することを目的とする。

2. 木質香料の選定

オフィス空間での香りの利用を想定し、精油での検討が望ましいと考えた。多数ある木質精油のうち、香り試料に適切と考えられる精油を選定するため、木質香料の香り評価実験を実施した。12 名の実験参加者（男 7 名、女 5 名：21-22 歳）に試料採取袋（近江オドエアーサービス社製、PET 製、容量 10L）に封入した香り試料を提示して評価させた。評価項目は、臭気強度、快・不快度、嗜好度、印象 5 項目（「自然感」、「親しみ」、「新鮮さ」、「複雑さ」、「温かさ」）および集中度とした。香り試料には、木曽ヒノキ（KH)、吉野ヒノキ（YH)、青森ヒバ（AH)、カンファー（CP)、ローズマリー（RM)、ユーカリ（EU)、ユーカリラディアータ（UR)、ユーカリシトリオドラ（UC)、シダーウッド（CW)、ティートリー（TT)、パイン（PI)、ホーリーフ（HL）の 12 種を用いた。

香りの印象を基に選定することにしたため、印象評価の結果を図 1 に示す。横軸は香り試料種を、縦軸は印象評価軸を示し、上側が「自然的な」、「親しみやすい」、「生き生きした」、「複雑な」、「温かい」を、下側が「人工的な」、「親しみにくい」、「生気のない」、「単純な」、「冷たい」を示す。円の面積で度数を、プロットは平均値を示す。

(1) の「自然感」では、KH が最高評価で、EU が最低だった。(2) の「親しみ」では、KH の評価が最高で、AH, CP, TT で低評価だった。(3) の「新鮮さ」では、KH の評価が最高で、AH, TT で低評価だった。(4) の「複雑さ」では、EU が最高値で、KH, ER が低評価だった。(5) の「温かさ」では、香り試料間の差異が小さく全て「冷たい」側評価だった。全項目を通して見ると、

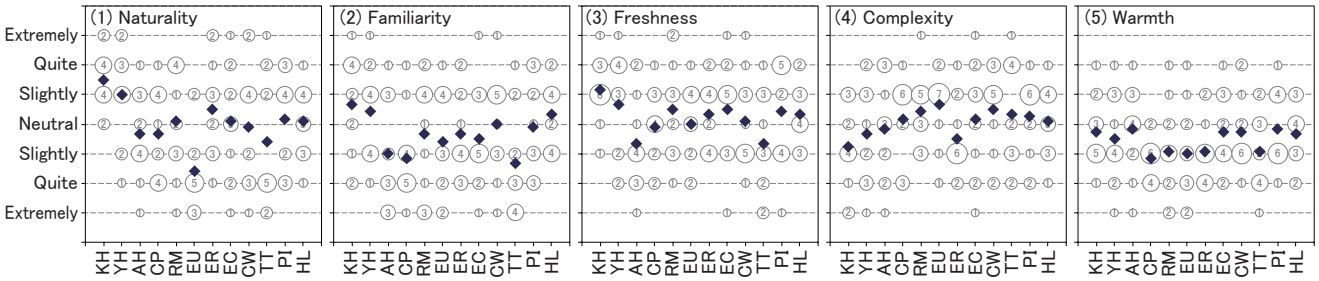


Figure 1 Impression evaluation of wood oils

PI は中庸の評価が非常に少なく、実験参加者の評価が二分されやすい傾向にあった。以上から、「自然感」で特徴的な傾向の KH,EU、「自然感」の平均値が中庸程度の香り試料のうち、分布傾向に特徴があった PI、ヒノキ科の KH との比較のため、同じヒノキ科で印象の評価傾向が KH と異なる AH の計 4 種を採用した。

3. 香り環境下での作業実験概要

2016 年 10 月 21 日から 11 月 28 日に、図 2 に示す本学実験室で作業実験を実施した。実験参加者は嗅覚検査に合格した 10 名（男女 5 名ずつ、平均 21.3 歳）とし、図 2 の 2 箇所のアロマディフューザから香り試料を室内に噴霧し、ファンで室内空気を撹拌した。香り条件は、コントロール（Con）として水道水のみを噴霧した条件（CO）のほか、有香条件（Odo）として非木材香からオレンジスイート精油（OR）を採用し、その他 2 章で選定した 4 種の木質精油（KH,AH,EU,PI）を加えた計 6 条件とした。実験参加者は、ラテン方格に基づき順不同に全条件を経験させた。

作業内容として図 3 のような平仮名 10 字から 2 字以上の有意な単語を 10 分間で作成させる手法とした。これは、竹村[2] の手法のうち、問題間の難易度差を小さくするために、提示した 10 字を、子音を 6 字、母音を 3 字、小文字利用可能字を 1 字で構成した手法である。作成される字数が大きい方が作業が高次であるとみなし、実験参加者には、字数が多い方が評点が高いことを伝えて動機付けした。作業前後には、作業でかかるストレスと精神疲労の把握のために、唾液アミラーゼ測定は唾液アミラーゼモニタ（ニプロ製）で 1 回、フリッカー値測定はフリッカー測定器Ⅱ型（竹井機器製）で連続 5 回の測定を実施した。実験室には、実験 30 分前から香り試料を噴霧して充満させたため、作業前測定は実験室とは異なる別室で実施した。また、作業前後の心理状態の把握のため、POMS を基に作成した 6 尺度（「不安」、「憂鬱」、「疲労」、「機嫌」、「混乱」、「覚醒」）について 7 段階尺度で評価させた。

実験時の環境は、17.4 ～ 26.1[℃]、27 ～ 66[%RH] だった。本実験は、本学研究倫理審査委員会の承認済であり、実験参加者には適切な謝礼を支払った。

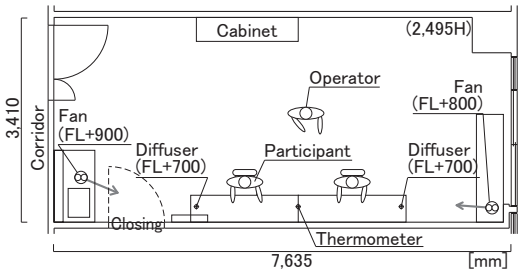
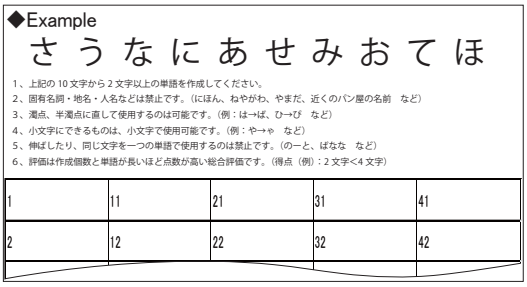


Figure 2 Laboratory


◆Example

さ う な に あ せ み お て ほ

1、上記の 10 文字から 2 文字以上の単語を作成してください。
2、固有名詞・地名・人名などは禁止です。（にほん、ねやがわ、やまだ、近くのパン屋の名前　など）
3、濁点、半濁点に直して使用するのは可能です。（例：は→ば、ひ→び　など）
4、小文字にできるものは、小文字で使用可能です。（例：や→ゃ　など）
5、伸ばしたり、同じ文字を一つの単語で使用するのは禁止です。（のーと、ばなな　など）
6、評価は作成個数と単語が長いほど点数が高い総合評価です。（得点（例）：2 文字<4 文字）

1	11	21	31	41
2	12	22	32	42

Figure 3 Example of mental worksheet

4. 平均作業量の香り条件間比較

図 4 に、作業量の条件間比較を示す。横軸は香り条件を、縦軸は回答のうち有意な 2 文字以上の単語数の 10 名の平均値を示す。ここでは、作成文字数に関わらず計数した。縦線分は、標準偏差を示す。図中の＊印は、多重比較結果を示す。

図より、EU が最も低く他条件との有意差も見られたことがわかる。既報[3] で得られたユーカリブルーガム精油香の傾向とは反対の傾向だったが、これは実験参加者が異なることが一因である可能性が考えられた。他の香り条件では、有意差は見られなかったが CO より高い傾向にあった。これは、有香条件ではコントロールよりも成績が向上する傾向にあった既報[2] と類似の傾向である。

5. 唾液アミラーゼ平均値の香り条件間比較

図 5 に唾液アミラーゼ測定値の作業前後比の香り条件間比較を示す。横軸は香り条件を、縦軸は、作業後の唾液アミラーゼ値を作業前の値で除した前後比の対数値を実験参加者間平均値で示した。縦軸の正は、作業後には作業前よりストレスが高かったこ

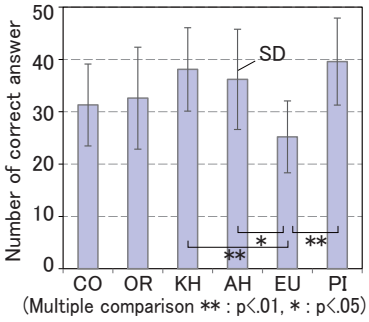


Figure 4 Comparison of mental workload among aroma conditions

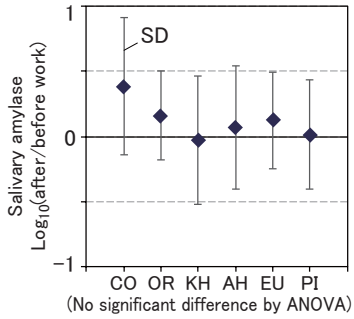


Figure 5 Comparison of salivary amylase among aroma conditions

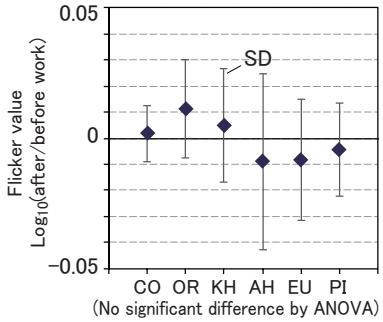


Figure 6 Comparison of flicker value among aroma conditions

とを表す。縦線分は標準偏差を示し、香り条件間の分散分析では有意差は検出されなかった。

図から、いずれの条件でもばらつきが大きかったことがわかる。有意差は見られなかったが、CO に比べて全香り条件で値が低く、有香条件でストレス軽減ができる可能性が示された。また、KH は本実験中、唯一実験前より実験後にストレス値が低下した条件だった。ただし、この傾向は、ヒノキ精油での既報[2)]の傾向とは反対である。

6. フリッカー平均値の香り条件間比較

図 6 にフリッカー測定値の作業前後比の香り条件間比較を示す。横軸は香り条件を、縦軸はフリッカー測定値の連続 5 回平均値を作業後から作業前の値で除して、対数値を求めて 10 名平均した値で示した。縦軸の正は、作業後には作業前より精神疲労が軽減したことを表す。なお、縦線分は標準偏差を示し、香り条件間の分散分析では有意差は検出されなかった。

図より、CO は作業前後でほぼ同値だったことがわかる。一方で、有意差は検出されなかったものの、OR, KH は正で作業後に精神疲労が軽減したことが示された。AH, EU, PI は負の数だった。

7. 個人ごとの作業量の香り条件間比較

既報[2)]では、有香条件の影響が実験参加者ごとに異なる傾向にある可能性を指摘した。本研究結果も同様と考えられたため、各指標の個人値から香り条件ごとの傾向を把握することにした。

図 7 に、作業で回答した有意な単語数の実験参加者間の比較を示す。横軸は実験参加者番号を、縦軸は回答された有意な単語数について、「2 字」、「3 字」、「4 字以上」の数を有香条件から CO を差し引いて基準化した値を示す。縦軸が正であれば、CO より回答数が多いことを表す。

(1) OR では、No. 6 の「2 字」が非常に高い値だったが、その他は小さな増減だった。正負それぞれへの分布は同程度だった。No. 2 はいずれの字数でも負の値、No. 9, 10 は正の値だった。(2) KH では、No. 3, 4 以外の 8 名が「2 字」で高い値だった。No. 1, 9, 10 はいずれの字数でも正の値だった。(3) AH では、No. 3, 7, 8 が「2 字」で比較的大きな負の値だった。一方で、No. 9, 10 は正の値だった。(4) EU では、No. 2, 9, 10 以外の 7 名が「2 字」で負の値だった。「3 字」でも、No. 9, 10 のみが正の値だった。(5) PI では、「2 字」は正負が同程度だったが、「3 字」はほぼ全員が正の値だった。「4 字」についても同様だった。

全体的に、No. 9, 10 のようにほぼ全ての条件、字数で正の値を示した実験参加者がいた一方で、No. 2 は「3・4 字」がほぼ全ての香り条件で負の値だった。一方で、No. 1, 3, 4 はほぼ全ての香り条件で「3・4 字」が正の値だった。

8. 個人ごとのストレス値の香り条件間比較

図 8 に、唾液アミラーゼ値の実験参加者間の比較を示す。横軸は実験参加者番号を、縦軸は唾液アミラーゼ値の作業前後比の対数値について有香条件から CO を引いて基準化した値を示す。縦軸が正であれば、作業によるストレスが CO より大きいことを示す。

(1) OR は、負の値の実験参加者がやや多かった。(2) KH は、ほとんどが負の値だった。(3) AH は、No. 4 が比較的大きな正の値だが、No. 5 などで大きな負の値が見られた。(4) EU は、全体的に OR に近い傾向だったが、No. 1, 2, 5, 6 は特に OR に近い傾向だった。(5) PI は、小さな正の値は散見されたが、負の値の実験参加者が多かった。

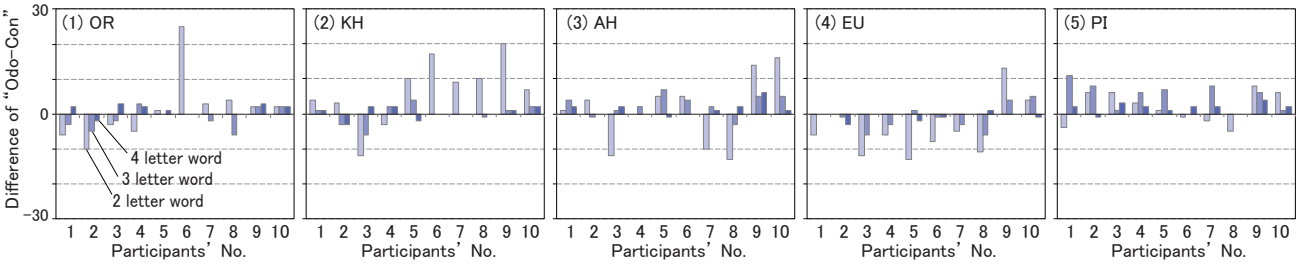


Figure 7 Comparison of mental workload standardized in "Con" among participants

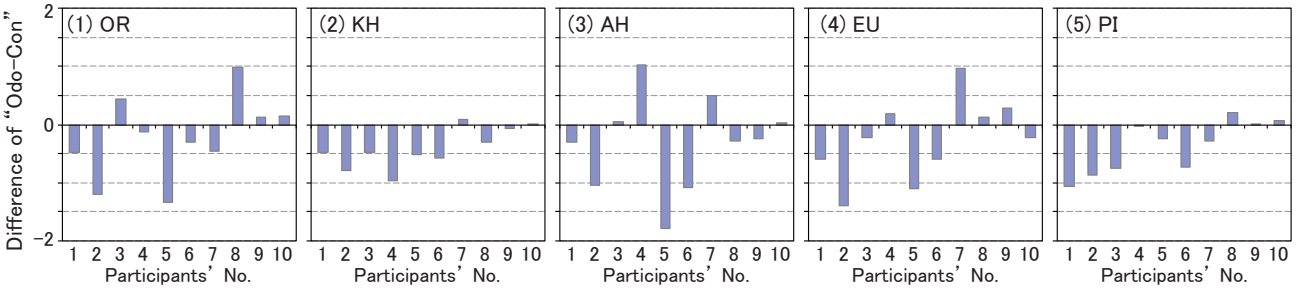


Figure 8 Comparison of salivary amylase standardized in "Con" among participants

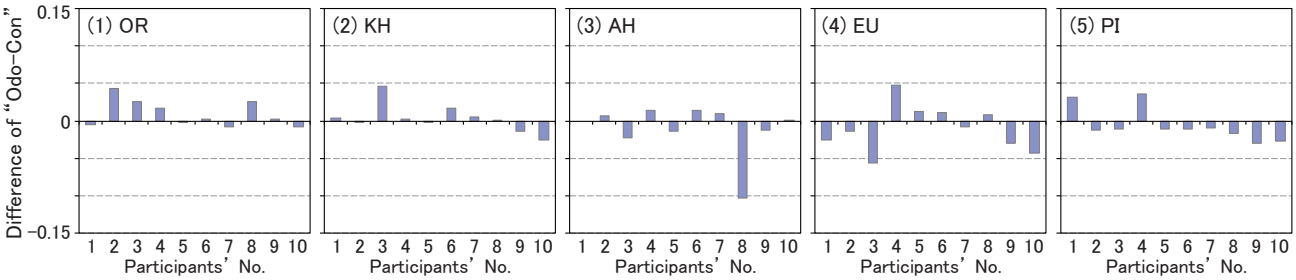


Figure 9 Comparison of flicker value standardized in "Con" among participants

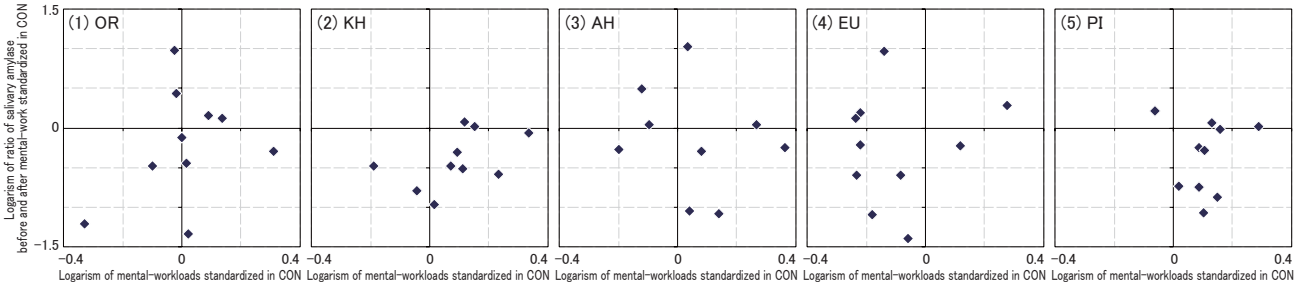


Figure 10 Relationship between mental-workloads and salivary amylase standardized in "Con"

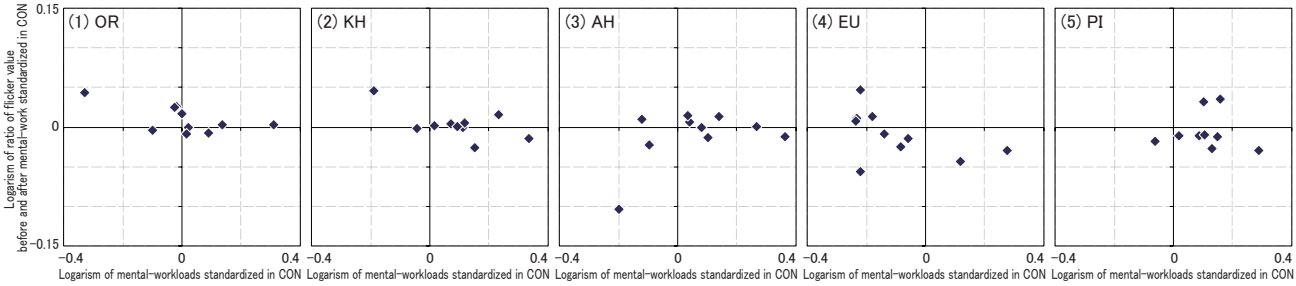


Figure 11 Relationship between mental-workloads and flicker value standardized in "Con"

9. 個人ごとの精神疲労指標の香り条件間比較

図9に、フリッカー値の実験参加者間の比較を示す。横軸は実験参加者番号を、縦軸はフリッカー5回平均値の作業前後比の対数値について有香条件からCOを引いて基準化した値を示す。縦軸が正であれば、作業による精神疲労がCOより小さいことを示す。

(1)ORは、No.2,3,4で正の値だったが、他はほぼ0だった。(2)KHは、No.3,6が正、No.9,10が負の値だった。(3)AHは、No.8が大きな負の値だが、他もやや大きな正負の値が見られた。(4)EUも、AHに近い傾向だった。(5)PIは、No.1,4で正の値だったほかは負の値だった。No.3,4,9は、AH,EU,PIで類似の傾向だった。また、No.9は木材香の4条件全てで負の値だった。

10. 作業量と各指標の散布図の香り条件間比較

図10に、作業量と唾液アミラーゼ値の関係を示す。横軸は図7の縦軸、縦軸は図8の縦軸と同一である。10名の同関係の散布図で示した。

(1)ORで全象限にプロットがあるのに対して、(2)KHと(5)PIでは第4象限のプロットが多い。(4)EUは第3象限に半数のプロットがあり、(3)AHはORに近い。KHやPIは、作業効率を高めてストレスを減ずる作業者が多い可能性がある。

図11に、作業量とフリッカー値の関係を示す。横軸は図7の縦軸、縦軸は図9の縦軸と同一である。10名の同関係の散布図で示した。

(1)ORでは第3象限以外が多く、(4)EUは第3象限にプロットが多い。(2)KHは第1象限が多く、(3)AHは第1,4象限に多い。(5)PIでは第4象限のプロットが多い。KHとAHは、一部で作業効率を落としたり精神疲労がかかるが、比較的多くが作業効率を高め、かつ精神疲労を減少できる可能性がある。

11. おわりに

本報では、香り空間での作業実験の結果を、実験参加者ごとの作業効率とストレス量や精神疲労度指標の関係の散布図として検討し、香り条件ごとの傾向差を明らかにした。今後、さらにデータを蓄積することで、目的に応じた香り試料を知るための基礎資料整備が可能と考える。

参考文献

1) 例えば、稲垣敬子，馬郡文平，安田大樹，飯沼朋也，古口正以，千葉正貴：オフィス空間への香りの導入と効果に関する基礎的研究，日本建築学会学術講演梗概集 D-2 ，pp. 597-598，2011
2) 竹村明久：室内の香りが知的作業成績とストレスの関係に及ぼす影響，平成28年室内環境学会学術大会講演要旨集，pp. 308-309，2016
3) 竹村明久：作業負荷時の心理・生理状態におけるかおりの嗜好の影響－被験者のユーカリ精油に対する嗜好ごとの比較，平成26年室内環境学会学術大会講演要旨集，pp. 272-273，2014

A-37

作業負荷時のかおりの嗜好が心理・生理状態に及ぼす影響
（その２）作業成績とストレス値および心理評価の嗜好群間比較
Effect of Preference of Fragrance in Mental Workloads on Psycho-Physiological State (Part2) Comparison of Peformance, Stress and Moods among Preference Groups

○ 南田　高希　（摂南大学）　竹村　明久　（摂南大学）　川谷　祐士　（摂南大学）
Koki MINAMIDA[*1] Akihisa TAKEMURA[*1] Yuji KAWATANI[*1]
***1 Setsunan University**

In the previous study, it was suggested the possiblity that the preference for fragrance might affect work peformance and stress. Thus, the experiment was conducted used more participants, more advanced method of workloads and other odors in the indoor environment. Participants those were classified in their preference of odors, garlic and liquid poultice, conducted mental works in the room filled with each odor. In the condition of odor exposure, participants, those liked each odor, increased their mental work performance and also their stresses. However, this tendency was different from that of the previous study. It was neccessary to supplement more data.

1. はじめに

オフィス等で採用された香り空調は、その後使用されなくなるなどの経緯を辿る場合があり、理由としてコストやメンテナンスの煩雑さなどのほかに全在室者が香りを好まないことが考えられる。竹村[1)]は、香りの嗜好が作業量に影響する可能性を挙げているが、被験者数が不十分であるなどの課題があった。本報では、実験参加者を増加し、複数の臭気に対して嗜好間比較を行い、嗜好が作業効率や作業によってかかるストレスに及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2016 年 10 月 19 日から 12 月 2 日に、図 1 の本学実験室にて 39 名の本学学生（男性 17 名、女性 22 名：平均 20.6 歳）に実施した。試料臭気は、予備アンケートを基に好き側と嫌い側の実験参加者を両方確保できる可能性があったにんにく（S&B 製生にんにく（チューブ））と液体湿布（久光製薬製サロンパスローション）とした。

実験は、知的作業および作業前後の心理・生理量の測定で構成した。実験参加者は入室後に実験者からインストラクションを受け、作業前測定を終えた後、5 分間の知的作業を実施した。また、作業開始と同時に試料臭気の発生を開始した。知的作業終了後、作業後測定を行って実験終了とした。

知的作業には、オフィスでの思考作業を想定した竹村[2)]の手法を改善した図 2 の手法を用いた。具体的には、提示された平仮名 10 字から、制限時間とした 5 分間、2 字以上の名詞をできるだけ多く作成する作業である。作業前後の心理状態は、POMS[3)]の 6 項目を基に作成した、「不安」、「憂鬱」、「疲労」、「機嫌」、「混乱」、「活気」の項目を SD 法の 7 段階尺度となるよう対義語を設定して両側尺度として提示した。また、実験後のみ、試料臭気の嗜好と強さを評価させた。生理量は、ストレスとの相関が高いとされる[4)]唾液アミラーゼ値を唾液アミラーゼモニタ（ニプロ製）を用いて測定した。

実験参加候補者には、予め上記の試料を検臭させて嗜好を確認し、2 臭気それぞれについて「好き群」と「嫌い群」各 15 名（臭気ごとに重複する実験参加

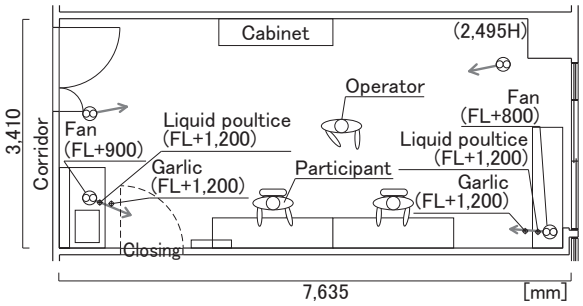
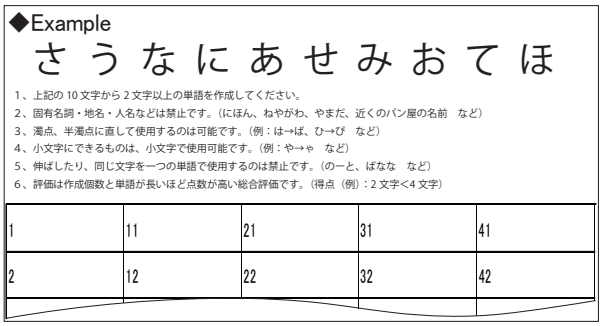


Figure 1 Laboratory


◆Example

さ う な に あ せ み お て ほ

1、上記の 10 文字から 2 文字以上の単語を作成してください。
2、固有名詞・地名・人名などは禁止です。（にほん、ねやがわ、やまだ、近くのパン屋の名前　など）
3、濁点、半濁点に直して使用するのは可能です。（例：は→ば、ひ→び　など）
4、小文字にできるものは、小文字で使用可能です。（例：や→ゃ　など）
5、伸ばしたり、同じ文字を一つの単語で使用するのは禁止です。（のーと、ばなな　など）
6、評価は作成個数と単語が長いほど点数が高い総合評価です。（得点（例）：2 文字<4 文字）

1	11	21	31	41
2	12	22	32	42

Figure 2 Example of mental worksheet

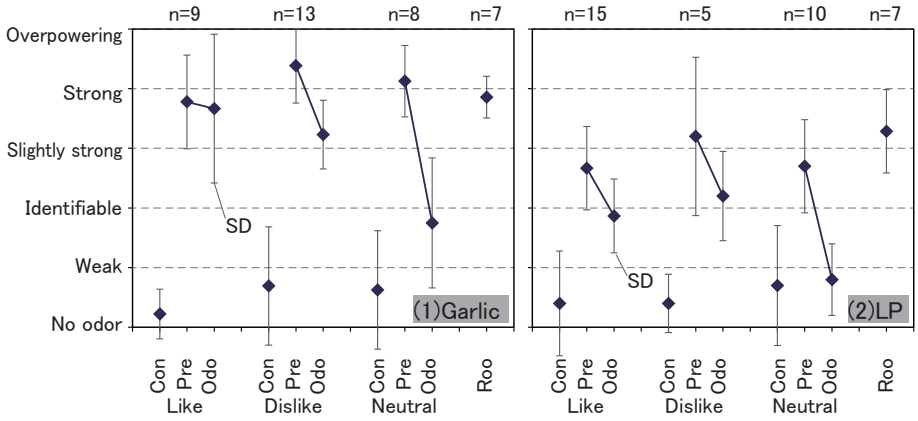


Figure 3 Comparison intensity of odor among preliminary experiment, experiment and entering room method

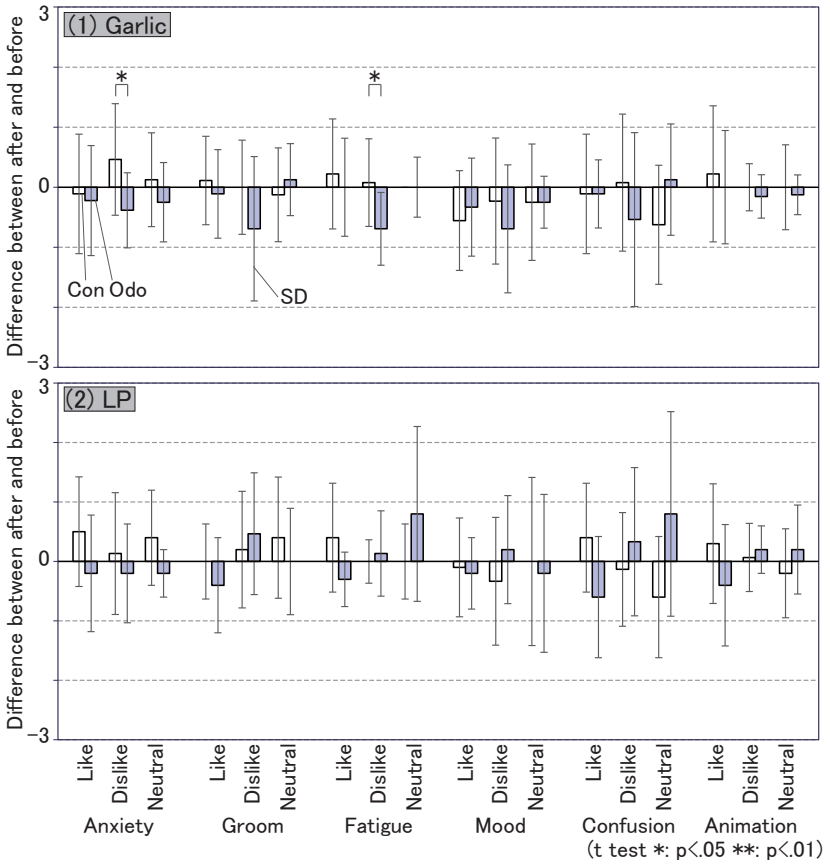


Figure 4 Comparison psychological evaluations between "Con" and "Odo"

者を含む）の実験参加者を選定した。

試料臭気の発生方法は、にんにく条件（図中"Garic"と表記）は図1内の2箇所にポールに吊った茶漉し内にラップ上に載せた約5[g]のにんにくを設置してファンの風を当てた。液体湿布条件（図中"LP"と表記）は、図1内の2箇所に小皿に載せた半分に切った台所用スポンジを設置し、約10[mL]の液体湿布をかけてファンの風を当てた。また、対照条件（以下図中では"Con"と表記）として上記の臭気発生を伴わない条件を用意して、実験参加者は順不同に対照条件と有臭条件（にんにく、液体湿布の両条件とも図中では"Odo"と表記）を経験させた。

本研究は、本学研究倫理審査委員会の承認済であり、実験参加者には適切な謝礼を支払った。

3. 結果と考察

3.1 嗜好群の再構成

実験時の臭気への嗜好評価は、事前の予備検討における嗜好評価と異なった。このため、予備検討で設定した嗜好群間の比較は不適切と判断した。そこで、実験時の嗜好評価に沿って、各臭気条件で30名ずつ実施した実験参加者を、にんにく条件では、「好き」群9名、「中庸」群13名、「嫌い」群8名に再構成した。液体湿布条件では、「好き」群15名、「中庸」群5名、「嫌い」群10名とした。これは、予備検討の提示臭気強度と実験時の臭気強度との乖離が一因として考えられたため、図3に示すように各嗜好群の実験時の対照条件評価（図中"Con"）、予備検討時の臭気評価（図中"Pre"）、実験時の臭気評価（図中"Odo"）、別途実施した実験参加者とは異なる嗅覚検査合格者7名による入室法を用いた臭気強度評価（図中"Roo"）を比較した。図中には各嗜好群および入室法の実験参加者数をnで示した。対照条件は、嗜好群間に大きな差異は見られなかったが、実験時評価（Odo）は、予備検討時評価（Pre）よりも総じて低い評価だった。特に、両臭気条件の「中庸」群では差異が大きかった。この点は、定性的ではあるが、「中庸」群の実験参加者が積極的に実験時に臭気に意識を向けなかったために生じた傾向ではないかと推察した。

実験時評価（Odo）は臭気曝露中ではなく、5分程度の臭気曝露後である作業後に作業中の臭気強度を思い出させて評価させる手法だったため、臭気への順応後の評価だった可能性があった。そこで、実験参加者は異なるが、嗅覚順応していない評価者による入室法（Roo）評価と比較すると、にんにく条件では予備検討と同等の評価であり、液体湿布条件でも予備検討より少し高い程度だった。このことから、予備検討時と実験時の嗜好度の差異は、臭気強度の両時の差異が原因ではなく、例えば順応後の臭気強度を回

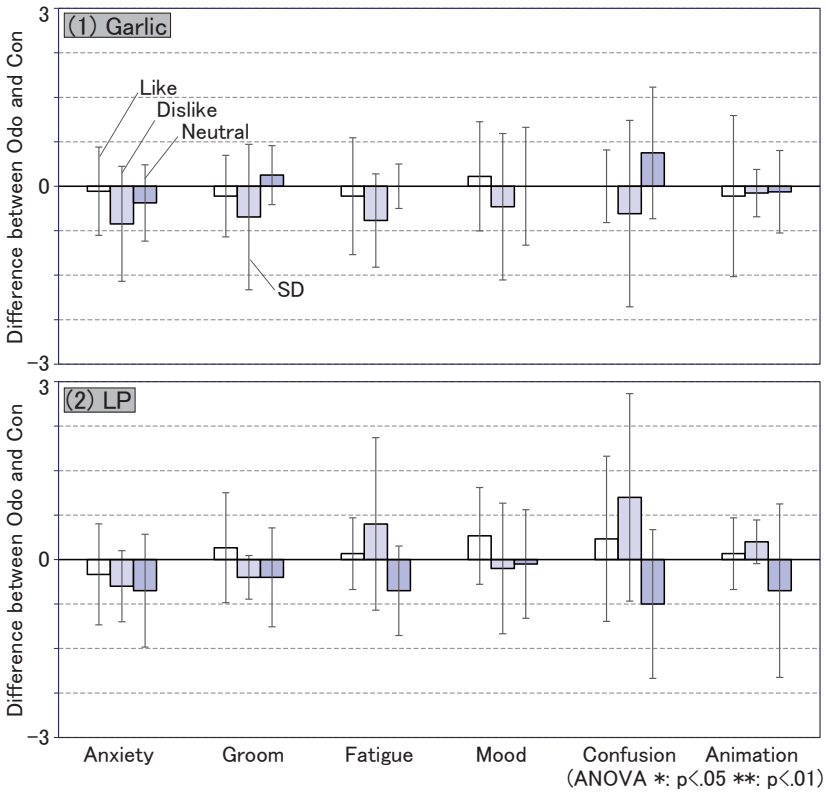


Figure 5 Comparison psychological evaluations among preferences

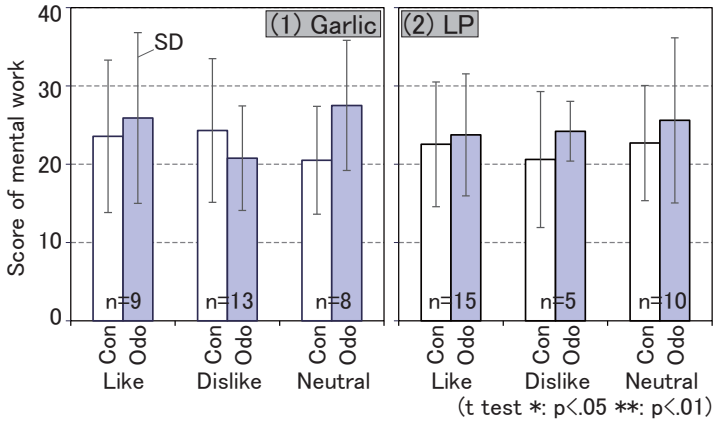


Figure 6 Comparison score of mental work between "Con" and "Odo"

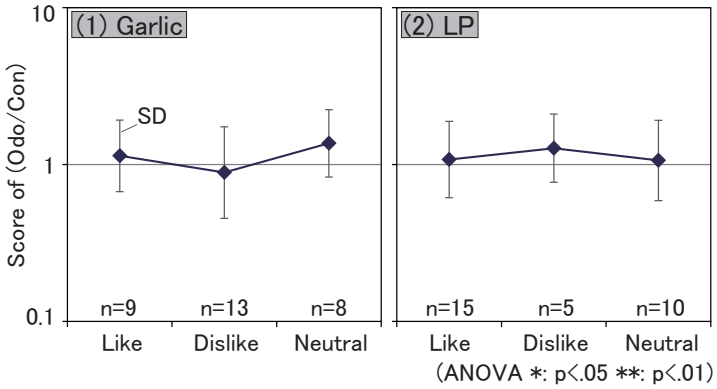


Figure 7 Comparison score of mental work among preferences

想して嗜好度も回答したために、低強度臭気への嗜好度が評価されて、予備検討時の嗜好度評価と異なったなどの可能性がある。以上を踏まえた上で、以降は再構成後の嗜好群を基に比較することにした。

3.2　心理状態

図４に対照条件と有臭条件の心理状態評価平均値の比較を示す。縦軸は作業前後の心理状態評価の差を示し、正であれば、ポジティブ評価側に変化したことを示す。「不安」評価では、２臭気とも対照条件より有臭条件の方がネガティブ側の評価に変化する傾向が見られた。その他では、明確な傾向は見られなかったが、対照条件と有臭条件とのｔ検定では、にんにく条件における「不安」評価の「嫌い」群と、「疲労」評価の「嫌い」群で有意差が検出された。

図５に、図４の有臭条件と対照条件の差をとって基準化した嗜好群間比較を示す。２臭気とも「混乱」評価で「嫌い」群と「中庸」群とが差が大きい傾向にあったが、嗜好群間で実施した分散分析では有意差は検出されなかった。

3.3 作業成績

知的作業に関しては、作成した名詞について２字を１点、３字を２点、４字以上を３点と重み付けして作業得点として集計した。図６に対照条件と有臭条件の作業得点平均値の比較を示す。縦軸は、上述の重み付け得点を示し、図中にｎで各嗜好群の人数を示した。にんにく条件の「嫌い」群のみ、対照条件より有臭条件で作業得点が低下し、その他の条件では対照条件より有臭条件の作業得点が高かった。ただし、各条件で標準偏差が大きく見られ、対照条件と有臭条件間のｔ検定では有意差は検出されなかった。有意差は見られなかったが、この傾向は、既往研究[2)]と類似する。

図７に、有臭条件の作業得点を対照条件の得点で除した基準化得点の嗜好群間比較を示す。にんにく条件では、「中庸」群が最高で、「好き」群、「嫌い」群と続いた。液体湿布条件では、「嫌い」群が最高で、「好き」群と「中庸」群がほぼ同値だった。ただし、いずれも嗜好群間の分散分析で有意差は見られなかった。有意差は見られなかったが、両臭気とも「好き」群はわずかに１を超えており、「好き」群では臭気の曝露が作業得点を向上させる影響が存在する可能性はあると考えられる。

3.4 唾液アミラーゼ値

図８は、唾液アミラーゼ値の平均値の対照条

件と有臭条件の比較を示す。縦軸は、唾液アミラーゼ値の作業後を作業前の値で除した比の対数値で示した。にんにく条件では、有臭条件の方が対照条件より唾液アミラーゼ値が高い傾向にあった。液体湿布条件では、「好き」群で同様の傾向にあったが、「嫌い」群と「中庸」群では反対の傾向にあった。ただし、対照条件と有臭条件間のｔ検定では、有意差は検出されなかった。

図９に、唾液アミラーゼ値の作業前後比の嗜好群間比較を示す。縦軸は、唾液アミラーゼ値の作業後と作業前の比の対数について、有臭条件を対照条件で除して基準化した値とした。にんにく条件では、いずれも１以上で対照条件より有臭条件の方が唾液アミラーゼ値が高い傾向にあるが、嗜好群間での大きな差異は見られなかった。液体湿布条件では、「好き」群では有臭条件の方が対照条件より唾液アミラーゼ値が高かったが、「嫌い」群では有臭条件の方が値が低く、「中庸」群では両条件が同等程度だった。ただ、いずれも嗜好群間での分散分析で有意差は見られなかった。

3.5 作業成績と唾液アミラーゼ値との関係

図 10 は、図７および図９を基に作成した、有臭条件の作業得点を対照条件で基準化した値の対数値と、有臭条件の唾液アミラーゼ値の作業前後比を対照条件で基準化した値との関係における嗜好群間での比較を示す。図の原点が対照条件における作業効率と作業で生じるストレスを表すとみなし、例えば第１象限にプロットがあれば、臭気曝露下での作業を行うことで、作業効率は上昇するが、ストレス値も上昇することを示すと考えた。図７および図９で分散分析での有意差は検出されなかったが、図 10 に示す通り、わずかに対照条件と異なる傾向が見られた。

にんにく条件では、「好き」群と「中庸」群が第１象限にあり、作業効率は向上するがストレス値も高くなる傾向にあった。「嫌い」群は第２象限にあり、作業効率の低下とストレス値の増大の傾向が見て取れた。液体湿布条件では、「好き」群は第１象限にあり、作業効率は向上するがストレス値も高くなる傾向にあった。「中庸」群はほぼ横軸上にあり、対照条件よりもわずかに作業効率は向上し、わずかにストレス値が低下する傾向と言えた。「嫌い」群は第４象限にあり、臭気曝露下での作業によって作業効率が向上し、ストレス値も低下する傾向にあった。既報[1)]では、「好き」群には作業効率向上とストレス低下の可能性が示唆されたが、本検討では同様の傾向は見られなかった。

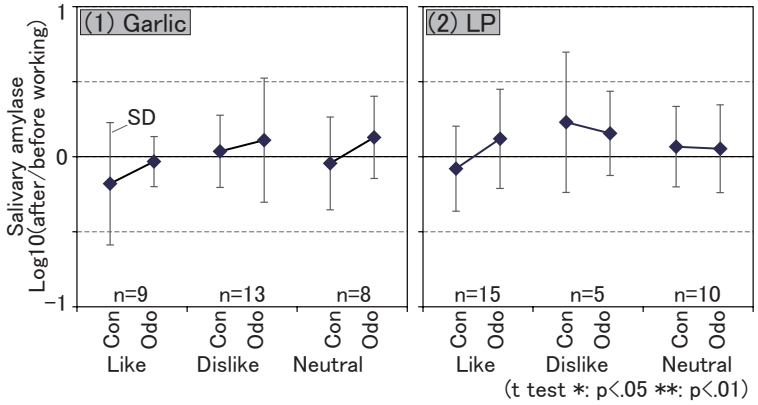


Figure 8 Comparison salivary amylase between "Con" and "Odo"

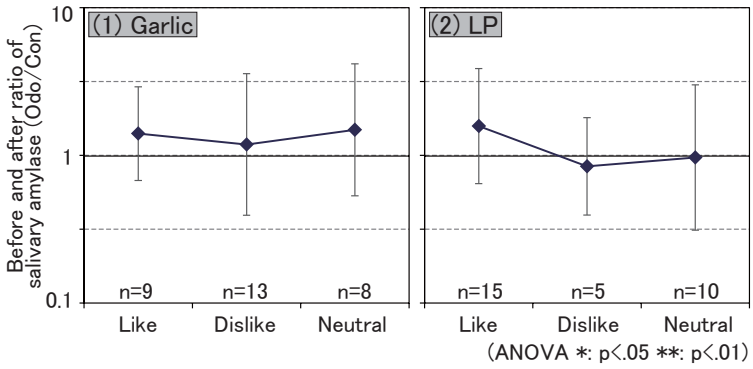


Figure 9 Comparison salivary amylase among preferences

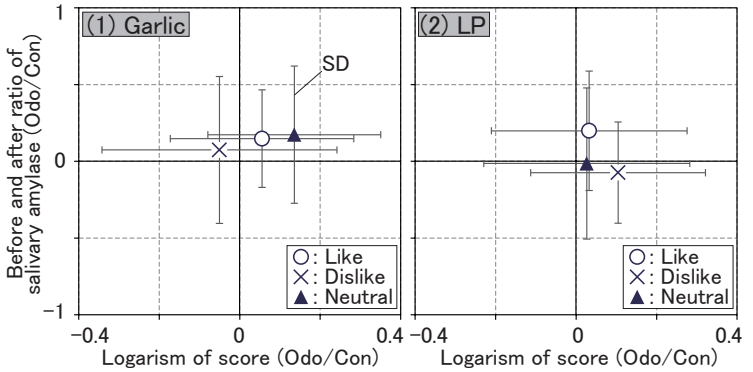


Figure 10 Relationship between score of mental work and salivary amylase

4. おわりに

本報では、心理状態評価と作業効率、およびストレス値の嗜好群間比較を行った。既往研究との傾向の相違を含めて、さらに基礎データを充実させる必要がある。

参考文献

1) 竹村明久：作業負荷時の心理・生理状態におけるかおりの嗜好の影響－被験者のユーカリ精油に対する嗜好ごとの比較，平成 26 年室内環境学会学術大会講演要旨集，pp. 272-273，2014
2) 竹村明久：室内の香りが知的作業成績とストレスの関係に及ぼす影響，平成 28 年室内環境学会学術大会講演要旨集，pp. 308-309，2016
3) 横山和仁，荒記俊一：日本版 POMS 手引，金子書房，p. 10，1994
4) 中野敦行，山口昌樹：唾液アミラーゼによるストレスの評価，バイオフィードバック研究 38(1)，pp. 3-9，2011

A-38

三点比較式臭袋法における吸入濃度に基づく最適吸引法に関する研究
（その３）CFD 解析による鼻あてと顔との間隔に関する吸引濃度予測
Proposal for Optimum Sniffing Method Based on Odor Concentration in Triangle Odor Bag Method
(Part3) Prediction of Sniffing Concentration on Gap between Mask and Face by CFD Analysis

○ 藤本 侑佑 （摂南大学） 堀江 昌朗 （摂南大学） 竹村 明久 （摂南大学）
Yusuke FUJIMOTO*1 Masaaki HORIE*1 Akihisa TAKEMURA*1
***1 Setsunan University**

The triangle odor bag method is the most popular sensory measurement method of odor concentration. The method is also adopted by the Offensive Odor Control Act. However, it was revealed that this method which was called "self-suction method" had the problem in the point of decrease of the suction odor concentration in the previous study by using CFD. Therefore, we suggested "discharge and suction method" as an alternative to "self-suction method". In this study, the case of "discharge and suction method" was investigated by using CFD. It was cleared the concentration of suction odor by "discharge and suction method"was higher than that by "self-suction method".

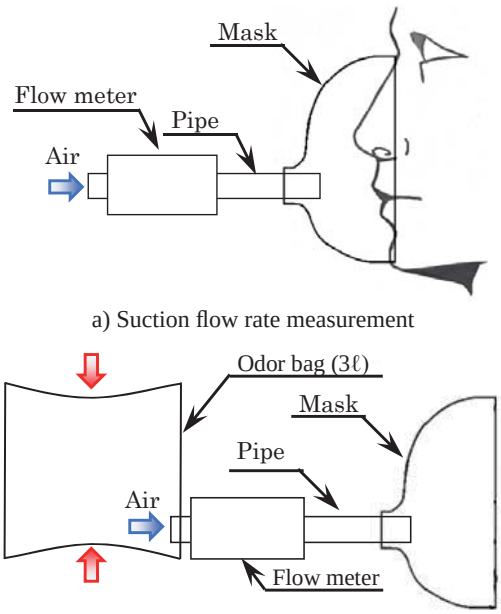
1. はじめに

三点比較式臭袋法は、臭気の濃度を測定するために機器ではなく嗅覚を用いる悪臭防止法の公定法である。この手法では、パネル（被験者）は、ポリエチレンテレフタレート製で容量 3L の袋にガラス管が付帯する使い捨て袋 3 個を提示される。3 個のうち 1 個には臭気が、残りの 2 個には無臭空気が封入されており、パネルはポリエチレンテレフタレート製の漏斗状の鼻あてを、鼻と口が収まるように顔に隙間なく押し当てて、袋に手で押すなどの圧力をかけずに自己吸引によって袋内臭気を吸い出して、有臭と感じた臭気袋番号を回答することとされている[1)]。悪臭防止法における臭気指数規制が実施されるようになって以降、多く利用されてきた同手法であったが、一方で、同手法では、鼻あて内が負圧になることで隙間などからの鼻あて外部の空気の流入が懸念され、検臭臭気の濃度が設定濃度よりも大幅に低下する可能性が高いと考えられた。そこで、既報[2)]では鼻あてを用いた自己吸引手法を数値解析で簡易に評価可能かを検討した。この検討では、鼻あてへの外部空気の流入の影響の他にも、吸引時点で鼻あて内に存在する空気の吸引の影響が小さくないことや、臭気と鼻あて内空気の混合による鼻腔への吸引臭気の濃度低下が懸念されることが明らかになった。

本報では、既報の検討結果から、吸引濃度がより高くできると考えられたにおい袋に手で外部から圧力を加えて袋内臭気を押し出して検臭する手法について、数値解析に基づき検討した結果について報告する。

2. 吸引量および検臭空気排出量の測定

数値解析において、鼻孔からの吸引量を出口境界条件、におい袋を押さえつけたときに排出される流量を入口境界条件として設定するため、鼻あてとにおい袋を用いてそれぞれの流量測定実験を行った。Fig. 1 は実験装置の概略を示している。a) の吸引流量の測定では、鼻あての上流側に気体用流量センサ（KEYENCE 社製 FDA10）を取り付け、また、b) のにおい袋からの排出量の測定では、におい袋に取り付けられているガラス管先端に流量センサ（KEYENCE 社製 FDA35）を取り付けた。吸引量の測定は、2015 年 10 月 20 日に摂南大学で実施し、被験者は 20 代の学生 9 名（男

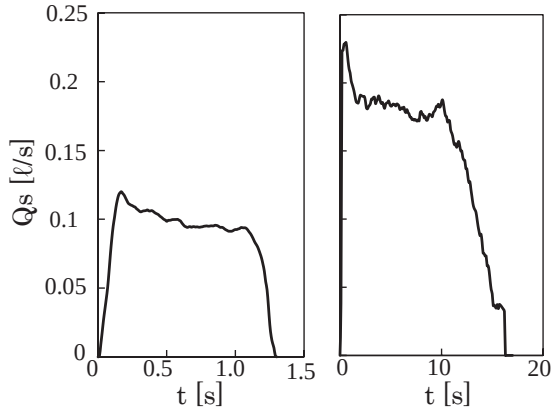


a) Suction flow rate measurement

b) Discharge flow rate measurement

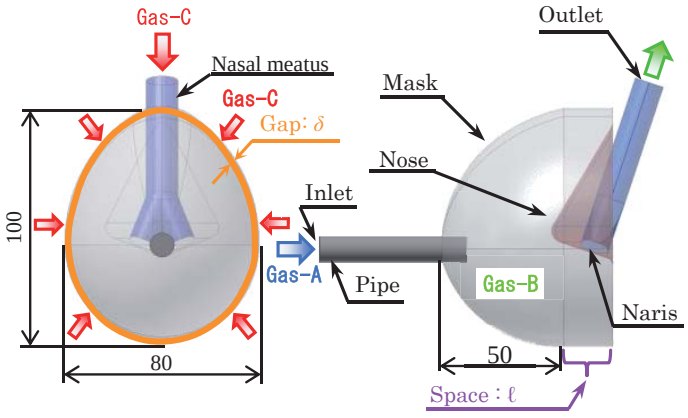
Figure1 Outline of experimental apparatus

8 名、女 1 名）とし、鼻あてを可能な限り外気が流入しないように顔表面に押し当て、0.5 秒間で鼻から吸引するよう指示し､それぞれ 5 回計測を行った。また、におい袋からの排出量の測定は、2016 年 6 月 9 日、8 月 29 日に 2 回に分けて摂南大学で実施し、被験者は 20 代の学生 9 名（男 7 名、女 2 名）とした。あらかじめ 3 ℓのポリエチレンテレフタレート製のにおい袋内にポンプで検臭気体を想定した空気を充満させておき、20 秒間で気体を排出するように指示し、それぞれ 3 回計測を行った。ここでは詳細は割愛するが、実測の吸引時間は全員が 0.5 秒以上、におい袋からの排出時間は 15 秒以上であった。各自の 5 回の吸引および 3 回の排出パターンはほとんど同じであったが、個人毎の吸引パターンは 3 種類程度に大別できる[2)]。また、排出パターンは異なるものの、瞬時の吸引流量に比べて排出流量ははるかに多い結果を得た。そこで本報では、Fig. 2 に示す吸引流量と排出流量を代表として解析を行った。a) の吸引流量は吸引時間が約 1.3 秒、瞬間の最大吸引流量は 0.12 ℓ /s、総吸引量は 114m ℓである。それに対して、b) の排出流量は排出時間が 16.2 秒、瞬間の最大排出流量は 0.23ℓ/s、総排出量は約 2500m ℓである。この吸引流量と排出流量を数値解析における出口と入口の境界条件として設定した。



(a) Suction flow　　(b) Discharge flow

Figure 2 Characteristic suction and discharge flow



(a) Front view　　(b) Side view

Figure 3 Outline of calculation model

3. 数値解析方法

Fig. 3 に数値解析モデルを示す。計算モデルは鼻腔部、鼻あて部、におい袋から鼻あてに接続されるガラス管部によって構成されている。ここで鼻腔部は簡易モデルとして直径 12mm の二つの円筒が 1 つの円筒に合流した形状をしており、鼻孔入口から出口までの距離を約 60mm とした。ガラス管部は近江オドエアーサービス社製におい袋（3 ℓ）に取り付けられているものとほとんど同じ形状で、ガラス管の内径を 10mm、長さを 60mm とし、鼻の先端から約 15mm 離した位置にガラス管出口を設置した。また、鼻あては近江オドエアーサービス社製製品とほぼ同じ形状とし、顔に接触する部分は簡易的に鼻の形状のみを模擬している。数値解析において、入口境界はパイプ部のにおい袋側端面、出口境界を鼻腔部端面とし、それぞれにおい袋を押さえたときの排出流量と鼻孔における吸引流量を設定した。

本研究では、鼻あてを顔表面に密着させたときに生じる隙間を想定したモデルと、鼻あてを顔表面から離した場合を想定した解析モデルを使用した。なお、前者は鼻あての顔表面の内周側に隙間（δ =0.5、1mm）を設け、また、後者は顔表面から鼻あてを離し（L=5、10、20mm）、それぞれ外部からの気体が流入出できるように設定した。入口から流入する気体を Gas-A、初期の状態からガラス管部、鼻あて部、鼻腔部に存在している気体を Gas-B、外部から鼻あて内部へ流入する気体を Gas-C とした。ここで、におい成分を含む気体は Gas-A のみであり、全ての気体は 25℃の非圧縮性の空気とした。数値解析においては汎用熱流体解析ソフトウェア ANSYS CFX16.1 を用い、乱流モデルは SST（Sheer Stress Transport）モデルを採用し、非定常解析を行った。なお、本研究ではにおい袋から GAS-A を排出し始めて 1 秒後に吸引を開始するように設定した。

4. 検臭空気の吸引濃度予測

まず始めに、出口境界において気体を吸引することなく、におい袋から鼻当て内部に気体を排出させたときの濃度分布について検討を行った。Fig. 4 に鼻あてと顔表面の隙間 δ が 1.0mm の場合の Gas-A の濃度分布の時間変化を示す。ここで、濃度分布は全容積に対する Gas-A の体積割合を示している。時間の経過に伴い、鼻あてに流入する Gas-A は鼻あて内部の Gas-B を隙間から外部へ押出し､鼻あて内部の Gas-A の濃度は高くなる。また、

約 0.8 秒後には鼻腔内部の中央部までの Gas-A の濃度が概ね 80% 以上となり、以降の濃度は徐々に高くなるものの、Gas-A の濃度分布の傾向はほぼ同じであった。この鼻腔内部の Gas-A の濃度分布の傾向は鼻あてを顔から離した場合もほぼ同様であった。このことから、におい袋を押さえて鼻あて内部の気体を排出した後に時間を遅らせて吸引を開始する方法は、吸引のみによる吸引方法に比べて、はじめから鼻腔内部にまで Gas-A が流入しているために Gas-A を多く吸引することができると考えられる。

Fig.5 に隙間 δ を設け、におい袋から気体を排出させた後に吸引した場合の鼻あて内部の濃度分布と流線を示す。なお、これらの図はにおい袋から Gas-A を排出し始めて 1 秒後に吸引を開始し、さらに 0.8 秒後にあたる 1.8 秒における解析結果を示している。鼻あてと顔表面の間の隙間を想定した δ =0.5mm の場合、におい袋から鼻あて内部に流入する Gas-A は鼻孔に向かって流れ、鼻腔内部においても高い濃度になっている。また、吸引時の流量に対してにおい袋から排出される流量が 2 倍近くも大きいために、鼻孔に流入しきれなかった Gas-A は鼻あて内部に最初から存在していた Gas-B を隙間から排出すると共に、Gas-B と混合して鼻あて内部に充満する。そのため、鼻あて外部から流入する Gas-C はほとんど無い。δ =1.0mm の場合、δ =0.5mm の場合に比べて Gas-A の鼻あて内部の濃度はわずかに低くなるものの、濃度分布の傾向はほとんど同じであった。

Fig.6 に鼻あてを顔表面から離した場合の鼻あて内部の Gas-A、C の濃度分布と流線を示す。各気体の濃度や時刻については Fig.5 と同様である。Gas-A は鼻孔に向かって流入し、顔からの距離 L に関わらず鼻あておよび鼻腔内部の Gas-A の濃度分布はほぼ同

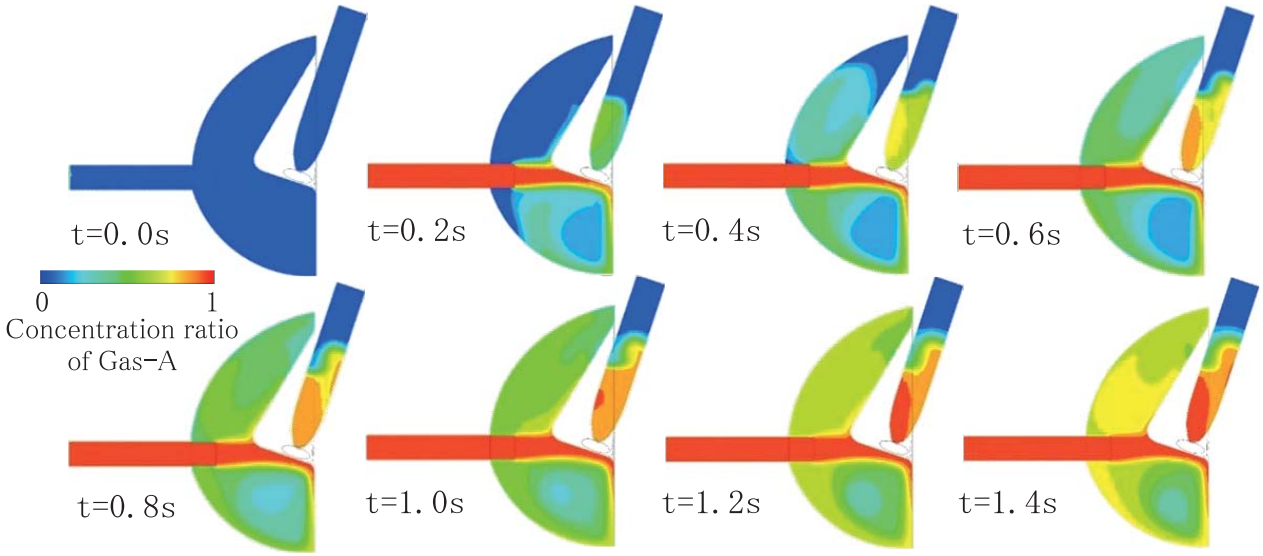


Figure 4 Concentration of Gas-A in mask with narrow gap by only discharge flow

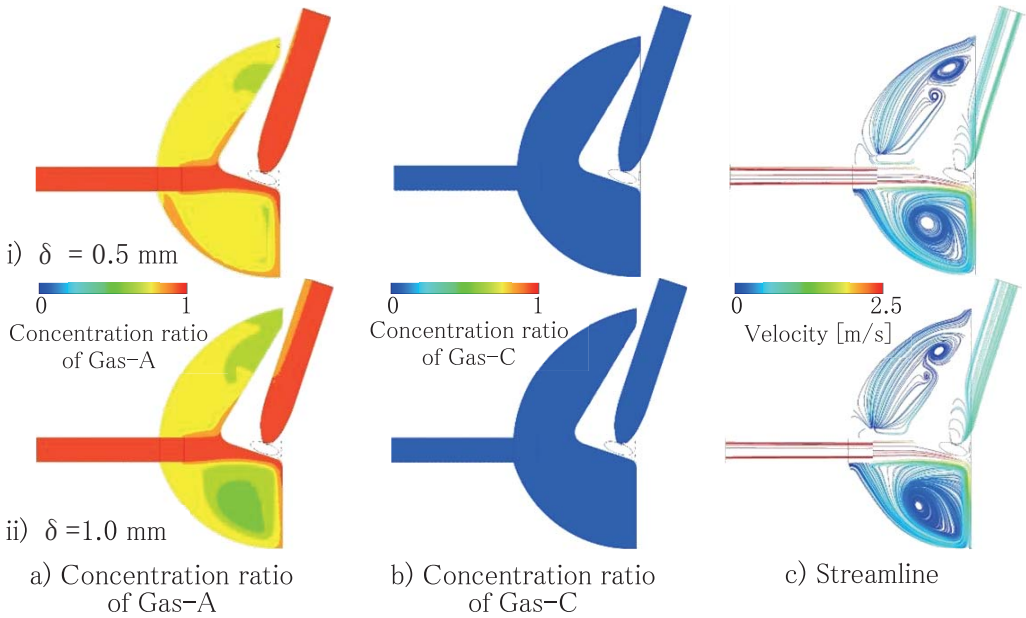


Figure 5 Flow pattern in mask with narrow gap (t=1.8s)

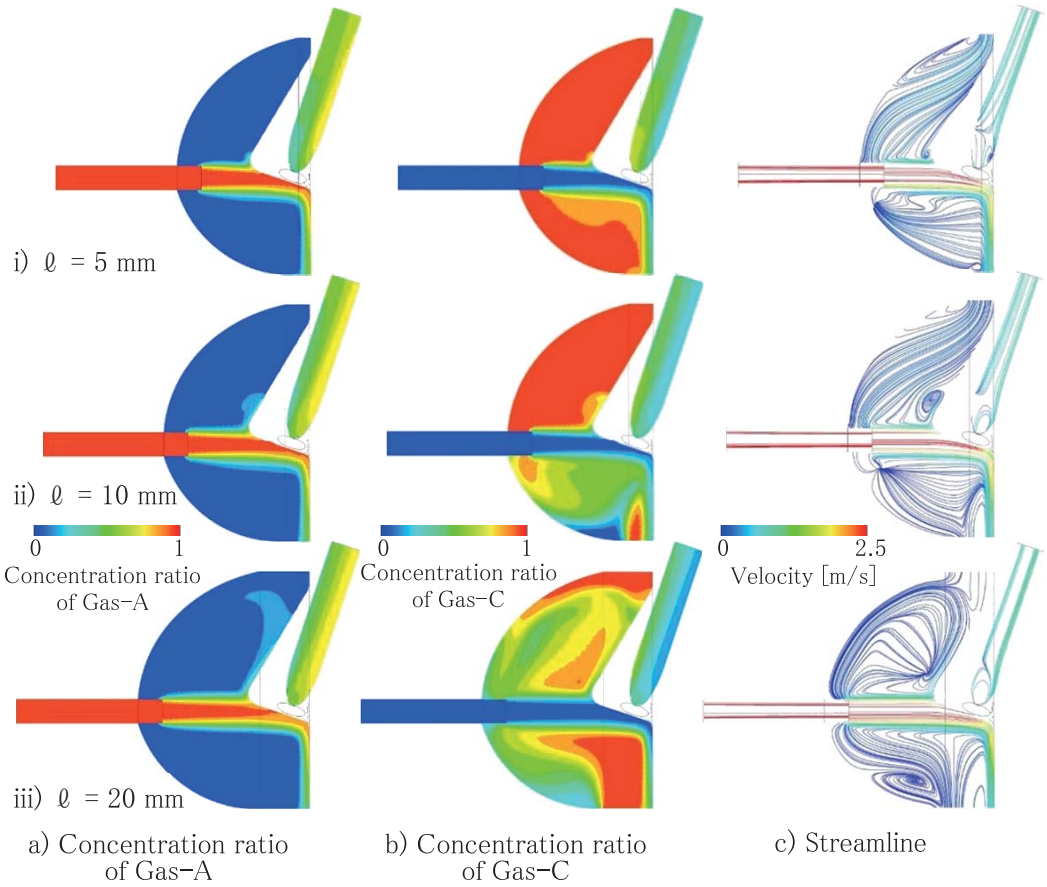


Figure 6 Flow pattern in mask with space (t=1.8s)

様であった。また、鼻孔に流入しきれなかった Gas-A は主に鼻の横または下方から Gas-B を巻き込みながら鼻あての外部へ流出する。このとき、Gas-C は鼻あて内部に吸い込まれるように鼻あての上部から流入する。しかし、鼻あてと顔の距離が大きくなるほど Gas-C の鼻あて内部への流入量は減少し、鼻腔内部に流入する Gas-C の濃度は低くなる傾向を示した。

Table 1 に吸引方法が異なる場合の 1 回の吸引における各気体の濃度を示す。ここでは参考のために吸引のみの結果[2)] も示している。吸引のみの場合、僅かな隙間でさえ Gas-A の吸引量は減少してしまうことから、実際の検臭には適していないといえる。それに対して、におい袋内の気体を強制的に排出させ 1 秒後に吸引を始めると、鼻あてを顔に密着させたときに隙間があったとしても 80% 以上、鼻あてを顔から 20mm 離した場合であっても 60% もの Gas-A を吸引するという結果を得た。しかし、Gas-C の吸引量は鼻あてを顔に近付けた方が多くなる結果となった。これは鼻あてを顔に近付けた場合、Gas-A は Gas-B を多く巻き込んで鼻の横や下の隙間から流出し、多くの Gas-C が鼻の上部から流入する。これに対して、鼻あてが顔から離れた場合は、Gas-A の流出に伴う Gas-B の巻き込み量が減少し、混合気体の Gas-B の占める割合が高くなるためである。

Table 1 Concentration ratio respective gases

	δ or ℓ [mm]	Concentration ratio [%] Gas-A	Gas-B	Gas-C
Suction (with narrow gap : δ)	0	50	50	0
	0.5	23	74	3
	1	6	85	9
Suction + Discharge (with narrow gap : δ)	0.5	89	11	0
	1	88	12	0
Suction + Discharge (with large space : ℓ)	5	63	4	33
	10	63	9	28
	20	62	15	23

5. まとめ

検臭空気の吸引量を多くするためには、鼻あてを顔に接近させるものの隙間を設け、におい袋から強制的に検臭空気を押出し、鼻あて内部と鼻腔部の気体を隙間から排出させた後に吸引する方法が良いと考えられる。しかし、顔から鼻あてを離した状態であっても 60% もの気体を吸引できることから、今後、におい袋のガラス管の位置や鼻あての有無による吸引量について調査を行う必要があると考えている。

参考文献

1) 岩崎好陽：新訂臭気の嗅覚測定法　三点比較式臭袋法測定マニュアル，においかおり環境協会，2005
2) 藤本侑佑，堀江昌朗，竹村明久：三点比較式臭袋法における吸入濃度に基づく最適吸引法に関する研究（その２）簡易 CFD 解析に基づく吸引濃度予測，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp. 105-108，2016

A-39

三点比較式臭袋法における吸入濃度に基づく最適吸引法に関する研究
（その４）吸引方法が閾値に及ぼす影響の実験的検証

Proposal for Optimum Sniffing Method Based on Odor Concentration in Triangle Odor Bag Method (Part4) Experimental Study of Effect of Suction Method on Olfactory Threshold

○ 山瀬　優樹　（摂南大学）　竹村　明久　（摂南大学）
堀江　昌朗　（摂南大学）　藤本　侑佑　（摂南大学）
Yuki YAMASE[*1] Akihisa TAKEMURA[*1] Masaaki HORIE[*1] Yusuke FUJIMOTO[*1]
***1 Setsunan University**

In the triangle odor bag method, there are some original methods for the purpose of improving accuracy, for example, measuring without mask and so on. In this study, olfactory thresholds of acetone were measured with or without plastic mask, which was specified to be worn by the Offensive Odor Control Act. In the condition without the mask had the lowest threshold concentlation. The second lowest threshold concentlation was obtained in the condition of self suction with the mask, which was official method. Moreover, it was supposed that the suction odor velocity might effect on the threshold based on comparison between the above threshold measurement and the measurement of suction volume.

1. はじめに

三点比較式臭袋法[1)]は、悪臭防止法の臭気指数規制のための閾希釈倍数（臭気濃度として定義されている）測定手法である。手法の開発以来、多くの悪臭公害対策のために用いられてきた手法であるが、原則とされる手法のみならず、各所で独自の改良手法による測定が行われていると見られる。その原因には、例えば鼻あてを用いた吸引手法における、呼気やパネル（評価者）の口周辺由来の臭気の混入の虞があることや、自己吸引法と呼ばれる袋内臭気をパネルが吸い出す手法で、鼻あて内が負圧になることで、鼻あてとパネルの顔との隙間から外気が流入して吸引する臭気の濃度が低下する虞があることなどが考えられる。既報[2～4)]では、CFD を用いて自己吸引をはじめとした吸引手法間の臭気の鼻腔への吸引濃度予測を試みた。本報では、三点比較式臭袋法による実験的検証を行うほか、吸引流量測定も行って、各吸引手法の特徴の把握を試みた結果を報告する。

2. 三点比較式臭袋法による手法間の測定値の比較

2.1 実験概要

2016 年 11 月 21 日から 12 月 7 日に、本学実験室にて実施し、温湿度は 19～24[℃]、25～40[%RH] だった。対象臭気は、安全性と ISO16000-30[5)] 等で訓練臭気として用いられている点から一般性が高いと考えて acetone を採用し、原臭は 4200[ppm] 程度に統一した。

Table 1 Experimental conditions

	Method	Mask	Push	Suction
S_s0.5	Self suction	with	−	0.5[s]
S_s3	Self suction	with	−	3[s]
M_p3_s3	Push & suction	with	3[s]	3[s]
M_p5_s3	Push & suction	with	5[s]	3[s]
N_p5_s0.5	Push & suction	without	5[s]	0.5[s]
N_p5_s3	Push & suction	without	5[s]	3[s]

パネルは、T&T オルファクトメータ合格者 7 名（男性 4 名、女性 3 名：平均 20.5 歳）で、全員が三点比較式臭袋法経験者とした。

比較のために設定した吸引手法は表 1 に示す通りで、三点比較式臭袋法における原則的手法である自己吸引法（S 条件）のほか、袋内臭気を手で押出して臭気を吸引する押出し吸引法も設定し、鼻あてを用いる場合（M 条件）と鼻あてなしの場合（N 条件）とした。それぞれ、自己吸引法は吸引時間のみ、押出し吸引法は押出し時間も含めて長短の条件を設定して、測定値の比較を行った。

三点比較式臭袋法は、原臭を 3 倍系列で希釈して 3 個用意したにおい袋（近江オドエアーサービス社製、容量 3[L]、PET 製）の 1 個に封入し、残りの 2 個の無臭空気充填袋と合わせた 3 個の中から有臭袋をパネルに回答させる手法で、正解すればさらに希釈倍数を高くして評価を繰返し、不正解になった時点の希釈倍数と直前の希釈倍数の対数値の中間にパネルの閾値が存在すると考える手法である。

本検討は、本学研究倫理審査委員会で承認を得ており、被験者には、適切な謝礼を支払った。

2.2 測定値の比較

表 2 に三点比較式臭袋法結果を示す。表中の「×」

印は、各パネルが不正解となった希釈倍数を示す。表中の「LogDn」は、不正解だった希釈倍数と、直前の希釈倍数の対数平均値として算出した個人ごとの閾値に相当する原臭からの希釈倍数（閾希釈倍数）の対数値である。なお､各パネルの閾希釈倍数の対数値は、値が大きいほど低濃度まで判別できたことを示す。

Table 2 Results of triangle odor bag method

(1) S_s0.5

	Logarism of dilution ratio										
panel	1.00	1.47	2.00	2.47	3.00	3.47	4.00	4.47	5.00	5.47	LogDn
1	○	○	×								1.74
2	○	○	×								1.74
3	○	○	×								1.74
4	○	○	○	○	○	○	×				3.74
5	○	○	○	○	○	×					3.24
6	○	○	○	×							2.24
7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	5.24

(2) S_s3

	Logarism of dilution ratio										
panel	1.00	1.47	2.00	2.47	3.00	3.47	4.00	4.47	5.00	5.47	LogDn
1	○	○	○	○	×						2.74
2	○	○	○	○	×						2.74
3	○	×									1.24
4	○	○	○	○	×						2.74
5	○	○	×								1.74
6	○	○	○	×							2.24
7	○	○	×								1.74

(3) M_p3_s3

	Logarism of dilution ratio										
panel	1.00	1.47	2.00	2.47	3.00	3.47	4.00	4.47	5.00	5.47	LogDn
1	○	×									1.24
2	○	○	×								1.74
3	○	×									1.24
4	○	×									1.24
5	○	○	○	×							2.24
6	○	○	×								1.74
7	○	○	○	○	○	×					3.24

(4) M_p5_s3

	Logarism of dilution ratio										
panel	1.00	1.47	2.00	2.47	3.00	3.47	4.00	4.47	5.00	5.47	LogDn
1	○	○	○	×							2.24
2	○	○	○	×							2.24
3	○	×									1.24
4	○	○	○	○	×						2.74
5	○	○	×								1.74
6	○	○	×								1.74
7	○	×									1.24

(5) N_p5_s0.5

	Logarism of dilution ratio										
panel	1.00	1.47	2.00	2.47	3.00	3.47	4.00	4.47	5.00	5.47	LogDn
1	○	○	○	×							2.24
2	○	○	○	○	×						2.74
3	○	○	○	×							2.24
4	○	○	○	○	×						2.74
5	○	○	×								1.74
6	○	○	○	×							2.24
7	○	○	○	○	×						2.74

(6) N_p5_s3

	Logarism of dilution ratio										
panel	1.00	1.47	2.00	2.47	3.00	3.47	4.00	4.47	5.00	5.47	LogDn
1	○	○	○	○	○	○	×				3.74
2	○	○	×								1.74
3	○	×									1.24
4	○	○	○	○	×						2.74
5	○	○	○	○	×						2.74
6	○	○	○	×							2.24
7	○	○	○	○	○	○	×				3.74

「S_s0.5」条件では、パネル7が非常に高い希釈倍数まで嗅ぎ分けることができ、全条件、全パネル中最も高い値だった。「M_p3_s3」と「M_p5_s3」条件では、比較的低い値のパネルが多く見られた。「S_s3」や「N_p5_s0.5」条件では、7名のパネル間の差異が比較的小さい傾向にあった。

表3に、表2の結果を基に算出した吸引手法ごとの閾希釈倍数（D）の対数値の平均値を示す。表中（1）には7名の平均値を、（2）には悪臭防止法における測定手法に準じた上下1名ずつカットした平均値を示した。（1）の平均値は、分散分析による各条件間の測定値の比較のために用意した。また、原臭濃度を4200[ppm]とした場合の平均閾値濃度（C）も併記した。なお、参考値として永田ら[6)]が測定したacetoneの閾値濃度は42[ppm]を示しておく。

（1）の吸引手法間での閾希釈倍数対数値のばらつきに関するバートレット検定、平均値に関する分散分析による有意差はともに検出されなかった。有意差は見られなかったが、最高値の「S_s0.5」条件で最も低濃度まで臭気を検知できたことがわかるほか、原則として示されている自己吸引法の「N」条件も同程度の精度を有することがわかる。半面、鼻あてを用いた押出し吸引法の「M」条件では値が低く、比較的高濃度で検知できなかったことがわかった。公定法の算出法に準じた（2）でもほぼ同様の傾向が見られたことから、自己吸引法における測定精度の高さと、押出し吸引を行う場合には鼻あてなしの方が高精度となる可能性が示唆された。ただし、既報[2)]のシミュレーションでは鼻あて内空気の吸引や隙間からの外気流入による吸引臭気の濃度低下のおそれが懸念されており、本実験では上記の傾向が示されたものの、測定精度は手法に対するパネルの熟練度に依存する可能性も高いと考えられる。

3. 吸引流量測定値の手法間比較

3.1 実験概要

2016年11月24日と12月8日に、本学機械工学科実験室にて実施した。測定には、図1に示す気体流量計（KEYENCE製、FD-A10）を用いて、鼻あてを用い

Table 3 Mean dilution ratio of threshold

(1) Mean			(2) Trimmed mean		
	LogD	C[ppm]		LogD	C[ppm]
S_s0.5	2.81	6.6	S_s0.5	2.54	12
S_s3	2.16	29	S_s3	2.24	24
N_p5_s0.5	2.38	18	N_p5_s0.5	2.44	15
N_p5_s3	2.59	11	N_p5_s3	2.64	10
M_p3_s3	1.81	66	M_p3_s3	1.64	97
M_p5_s3	1.88	56	M_p5_s3	1.84	61

た吸引流量測定には、図中 (1) のようにして臭気ではなく室内空気を自己吸引法と同等の手法で吸引させた。(2) は押出し流量測定時の測定手法であり、吸引は伴わずに押出し作業のみを指示した。吸引については、実験参加者に 0.5,3[s] での吸引を指示した条件と、鼻あての顔に接触する部分にクッションテープ（ニトムズ社製、EPDM 製）で補助を行って顔との隙間の減少を企図して作製した「改良鼻あて」で上記の 2 条件を実施した条件、測定直前に高低 2 濃度の acetone 臭気を検臭させた後に、同臭気を検臭すると想定させた上での吸引流量測定条件を実施した。押出し量測定条件（3,5[s] 指示）の 2 条件と合わせて計 8 条件を実施した。本報では、0.5,3[s] での吸引を指示した条件と「改良鼻あて」条件のみ報告する。

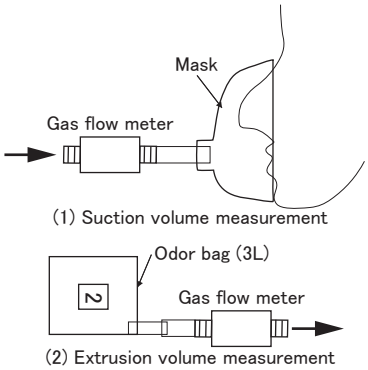


Figure 1 Measurement method

実験参加者は、2 章の三点比較式臭袋法パネル 7 名と、同法未経験の実験参加者 7 名とした。パネル 7 名には、再現性の確認のため、0.5,3[s] 指示条件の吸引を 2 回実施した。

3.2 測定値の手法間比較

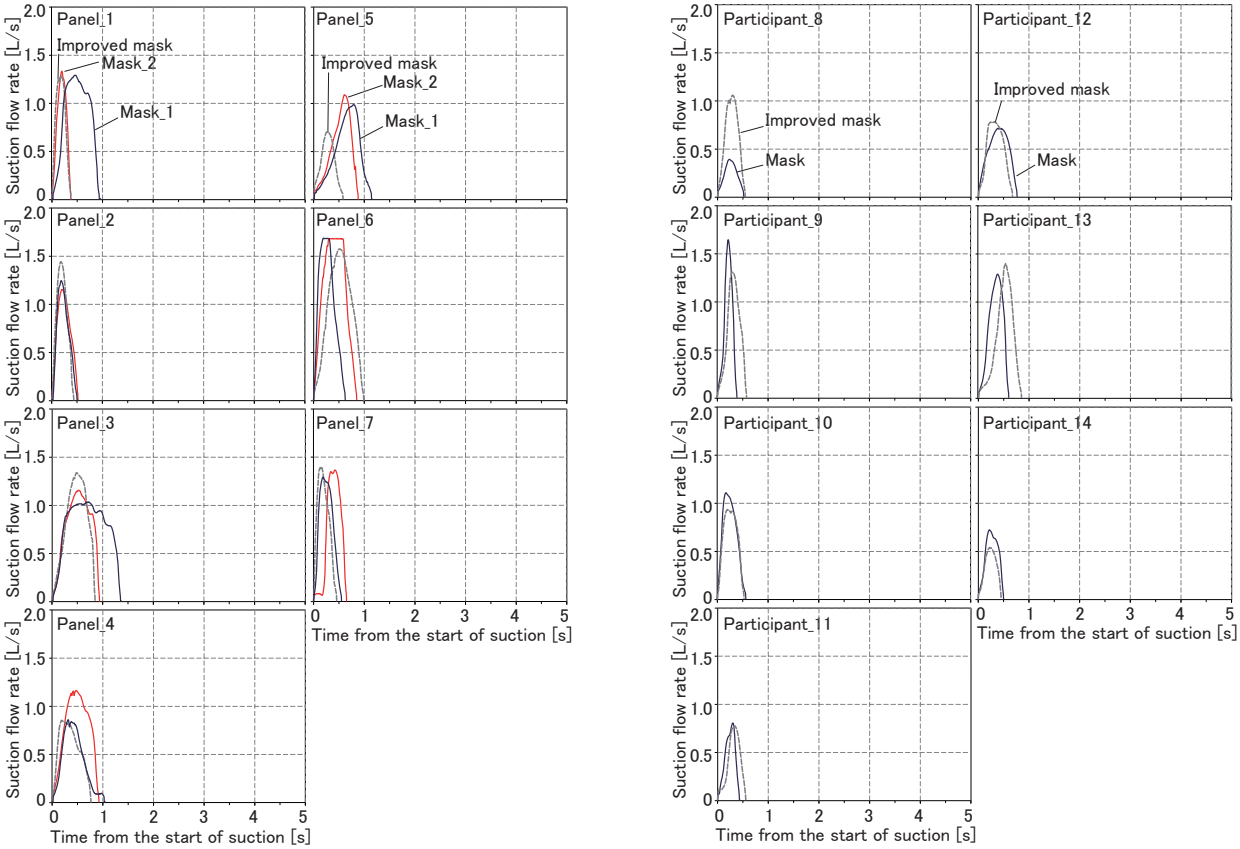
図 2 に、0.5[s] での吸引を指示した場合の実験参加者ごとの吸引流量の時間変化を示す。図中の実線の「Mask_n」が n 回目の試行を示す。「改良鼻あて」は破線で示した。全体を通して吸引時間は 0.5 ～ 1.0[s] 程度だった。パネル 1,3 はやや 1 回目の吸引時間が長く、パネル 4 は最大吸引流量が 2 回目で高いが、傾向は類似しており、概ね再現性は高いと言える。

「改良鼻あて」との比較では、パネルによってわずかに通常鼻あてと差異は見られたが、実験参加者 8 を除けば大きな差異は見られなかった。実用上、必ずしも現状の鼻あての顔との隙間が吸引に関して大きな障害となっていない可能性がある。

(1) 経験者群と (2) 未経験者群の比較では、未経験者群の方が全般的に最大吸引流量が低く、臭気の吸引が十分に想定できていない可能性が考えられた。

図 3 に、図 2 と同様の表記で、3[s] での吸引を指示した場合の吸引流量の時間変化を示す。全体を通して吸引時間は 2.0 ～ 4.0[s] 程度で、指定時間が長いためか指定時間に対して実吸引時間のばらつきが大きかった。

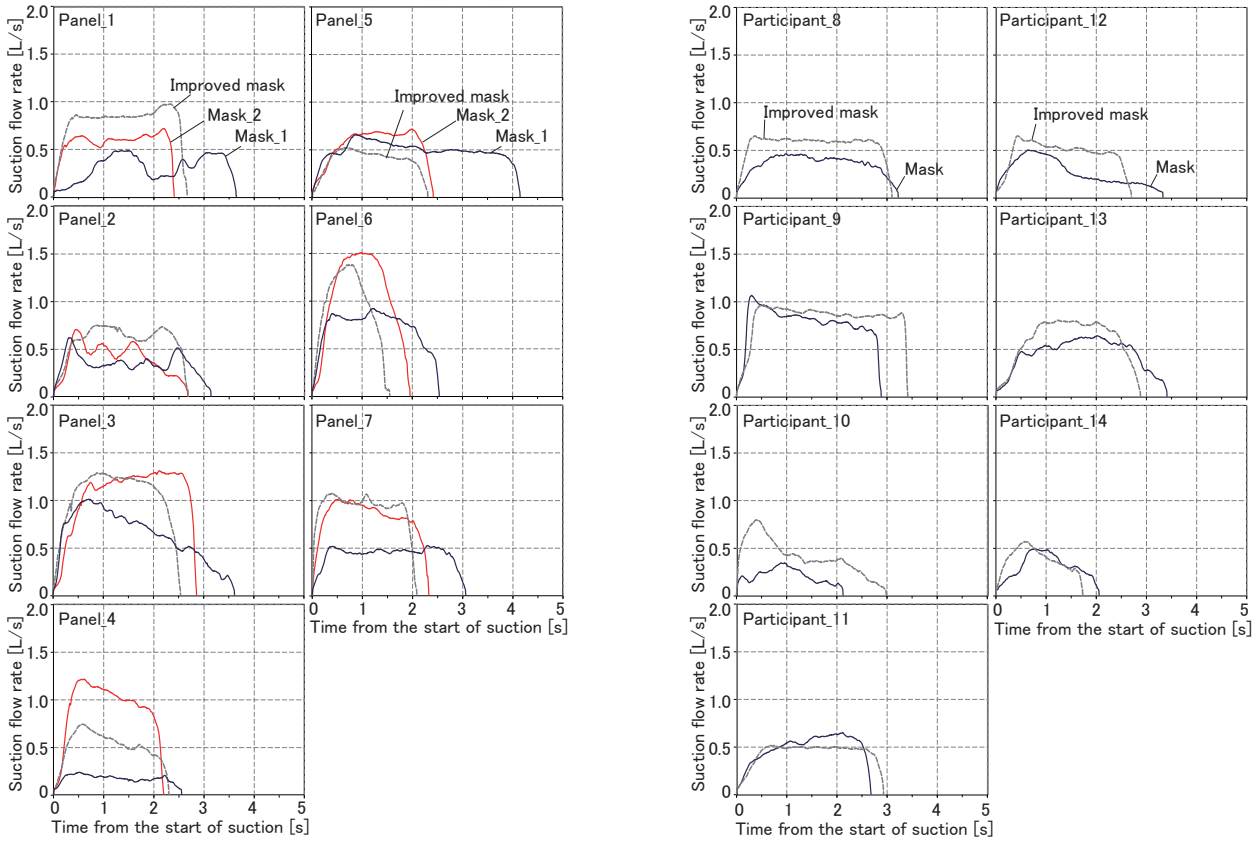
表 4 に、図 2,3 から算出した実験参加者ごとの吸引量と平均値および標準偏差を示す。(1) 経験者群で 2 回の繰返し測定を実施したが、0.5,3[s] 指示条件



(1) Panel with experience

(2) Inexperienced participants

Figure 2 Temporal change of indivisual suction flow rate (suction in 0.5[s])



(1) Panel with experience　　(2) Inexperienced participants

Figure 3 Temporal change of indivisual suction flow rate (suction in 3[s])

いずれでも t 検定の有意差は検出されず、再現性は得られたと判断した。

経験者群と未経験者群の比較では、0.5[s] 指示条件で (1) 経験者群では約 60[mL] の平均吸引量だったのに対して、(2) 未経験者群では30[mL] 程度と少量で、t 検定による有意差（p<.01）も検出された。3[s] 条件でも (1) 経験者群の方が多量だったが、t 検定の有意差は検出されなかった。

鼻あての改良版との比較では、平均値では (1) 経験者群では「改良鼻あて」の方が少ない吸引量だった。(2) では「改良鼻あて」の方が多量であり、3[s] 指示条件では、t 検定による有意差（p<.05）が検出された。経験者にとっては既存の鼻あてでの吸引手法でも十分であるが、未経験者では既存鼻あてでは鼻あてと顔の隙間からの外気流入があったため、「改良鼻あて」で吸引量が増加した可能性がある。

4. おわりに

本報では、閾値測定と吸引量測定実験を基に、各吸引手法の特徴を把握した。押出し吸引法では、鼻あてを用いないほうが低濃度の嗅ぎ分けがしやすい傾向にあった。経験者と未経験者では、吸引量や吸引流量の時間変動に傾向差が見られた。

本研究の一部は、鴻池奨学財団平成 28 年度研究助成による。ここに記して謝意を表します。

Table 4 Suction volume [mL]

(1) Panel with experience

Panel	Suction in 0.5[s] Mask_1	Mask_2	Imp.Mask	Suction in 3[s] Mask_1	Mask_2	Imp.Mask
1	81.3	30.2	30.8	112.3	138.6	210.5
2	34.4	37.6	37.6	108.4	107.0	158.7
3	105.0	73.1	70.8	228.3	301.5	265.2
4	42.7	70.9	43.5	44.3	199.9	117.7
5	56.3	47.4	23.2	202.1	133.1	90.2
6	64.5	96.9	91.8	181.5	205.0	145.4
7	43.5	45.6	39.3	131.6	189.1	190.4
Mean	61.1	57.4	48.1	144.1	182.0	168.3
SD	23.1	21.9	22.5	58.9	59.9	54.7

(2) Inexperienced participants

Parti-cipants	Suction in 0.5[s] Mask	Imp.Mask	Suction in 3[s] Mask	Imp.Mask
8	12.3	34.5	114.9	174.3
9	30.7	39.8	222.4	280.2
10	38.0	33.7	44.9	122.1
11	19.2	22.6	132.2	128.0
12	37.3	33.3	88.3	125.5
13	44.1	51.6	153.4	172.0
14	23.0	15.7	63.4	65.8
Mean	29.2	33.0	117.1	152.5
SD	10.6	10.7	55.5	62.0

参考文献

1) 岩崎好陽：臭気の嗅覚測定法　三点比較式臭袋法マニュアル，におい・かおり環境協会，2015
2) 山川ら：三点比較式臭袋法における吸入濃度に基づく最適吸引法に関する研究（その１）吸引濃度予測のための簡易予測手法に関する検討，空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集（pdf），2016
3) 藤本ら：三点比較式臭袋法における吸入濃度に基づく最適吸引法に関する研究（その２）簡易 CFD 解析に基づく吸引濃度予測，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp. 105-108，2016
4) 藤本ら：三点比較式臭袋法における吸入濃度に基づく最適吸引法に関する研究（その３）CFD 解析による鼻あてと顔との間隔に関する吸引濃度予測，空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集（pdf），2017
5) ISO16000-30，Sensory testing of indoor air，2014
6) 永田ら：三点比較式臭袋法による臭気物質の閾値測定結果，日環セ所報 No. 17，pp. 77-89，1990

A-40

においのマスキング効果に関する基礎的研究
（その１）木材香を用いた体臭想定物質のマスキング効果の検討
Basic Study on Odor Masking Effect
(Part1) Masking Effect of Wood Aroma Oil on Evaluation of Contained Materials in Body Odor

○ 川田　莉穂　（摂南大学）　竹村　明久　（摂南大学）
Riho KAWADA[*1] Akihisa TAKEMURA[*1]
***1 Setsunan University**

It is not necessary to increase ventilation volume for decreasing indoor chemical materials not harmful to human health. However, we need to improve sensuously uncomfortable indoor odor environment. The sensory deodorization using the masking effect may be able to reduce odor intensity or discomfort, without excessive increase in ventilation volume. Therefore, it was conducted sensory evaluation of the combination of body odor and wood odor. Moreover, we measured one of the combination odor concentration by triangle odor bag method. It was revealed that some combinations reduced body odor. On the other hand, odor concentration of one combination was higher than the sum of both components.

1. はじめに

芳香剤は、居室や便所等で多く使用され、店舗に並ぶ商品数も非常に多い人気商品となった。そのメカニズムは、悪臭に他の香りを付加して感覚的に悪臭を感じにくくするマスキング効果（感覚的消臭）である。室内空気中の人体に有害な汚染物質に対しては、マスキングは有害汚染源を除去しないために有効と考えにくいが、有害性が相当低く不快感のみを有する臭気を対象にすれば、マスキングの活用は、臭気低減のための過大な換気量の適切な制御など省エネルギー面からも有意義と考えられる。

芳香消臭脱臭剤協議会は、効力試験法[1)]として、感覚的消臭に関しては、臭気強度もしくは快・不快度を１段階以上低下させる製品としている。大迫ら[2)]は、濃度をパラメータに多種臭気の組合せについて詳細な検討を実施し、悪臭成分によってマスキングされやすい傾向が異なることを明らかにした。一方で、検討された成分は、悪臭防止法指定物質を中心に構成されており、その他の臭気･香気の検討例は著しく少ない。

本研究では、会議室や乗り物の多人数が長時間在室する空間に対して、木材臭を用いたマスキングによる臭気対策用の換気量の削減を目標として、体臭として検出された成分と木材臭の各単一臭と混合臭の臭気評価傾向を把握することを目的とする。

2. 体臭想定臭と木材臭の選定

体臭の成分物質には個人差が大きいと考えられるが、着衣や洗髪料をコントロールされた山田ら[3)]と池田ら[4)]の体臭分析結果、および岩下ら[5)]の分析結果を基に、人体有害性が著しく高くない成分として、Methylheptenone、n-Butanol、Nonanal の 3 種とした。木材臭には、間伐剤利用を想定してヒノキ系から吉野ヒノキ、青森ヒバ、そしてにおい質の特徴が異なるシダーウッドの 3 種の精油とした。

提示する濃度は表 1 の通りとした。表中の C は臭気濃度を示し、臭気濃度とは閾希釈倍数のことで 1 が閾値濃度に相当する。各臭気濃度は、予備実験で実施した三点比較式臭袋法、および臭気強度評価実験によって把握した原臭臭気濃度と、臭気強度 3（若干強いにおい）程度に相当する原臭の希釈倍数探索実験を基に決定した。臭気強度 3 とした経緯は、まず上記の三点比較式臭袋法実施時に併せて評価させた臭気強度評価から作成した、「臭気濃度（原臭からの希釈倍数）－臭気強度」関係に対して、池田ら[4)]の測定した洗髪料や食事の制限を行わない在室者群の体臭閾値が臭気濃度 73 から 174 の範囲であったことから、それらの臭気濃度に対応する臭気強度を上記の関係から算出すると、概ね臭気強度 3 だったことによる。なお、芳香消臭脱臭剤協議会の効力試験法[1)]では、同じく臭気強度 3 を悪臭側の臭気強度設定値としているが、同法で使用した臭気強度尺度は構成される語が本報とは異なり、「楽に感知できるにおい」に相当する。

以上の検討を踏まえて、提示臭気として、体臭想定臭と木材臭のほか、双方の混合臭を表 1 のように作

Table 1 Combination of body odor and wood odor

			Wood odor for masking			
			Kiso cypress1	Kiso cypress2	Yoshino cypress	Cedar wood
			K1	K2	Y	C
Odor assumed body odor		C	149	45	452	52
Methylheptenone1	m1	118	K1_m1	K2_m1	Y_m1	C_m1
Methylheptenone2	m2	35	K1_m2	K2_m2	Y_m2	C_m2
n-Butanol	nb	112	K1_nb	K2_nb	Y_nb	C_nb
Nonanal	no	37	K1_no	K2_no	Y_no	C_no

成した。なお、Methylheptenone と木曽ヒノキの 2 種については、低濃度時の組合せの一例として、それぞれ 3 倍希釈の濃度設定も実施することにしたため、全体としては表 1 の網掛け部の 24 条件（体臭想定臭 4 条件、木材臭 4 条件、混合臭 16 条件）を用意した。以降は、表 1 中の条件名で表記する。

3. 心理評価実験概要

2016 年 11 月 24 日から 12 月 2 日に、本学実験室にて 2 章の臭気について心理評価実験を実施した。実験時の温湿度は、17.4 ～ 23.1[℃]、27 ～ 44[%RH] で、嗅覚検査に合格した 20 名のパネル（男女 10 名ずつ、平均 21.3 歳）がラテン方格で順不同に提示された 10L 試料採取袋(近江オドエアーサービス社製､PET 製) から、表 1 の 24 条件について検臭し、評価した。評価項目は、図 1 の臭気強度、快・不快度、印象 6 項目とした。本報では、紙面の都合上、このうち臭気強度と快・不快度の検討についてのみ述べる。

なお、パネルは提示される臭気の内容についての情報は事前に受けておらず、パネルには適切な謝金を支払った。また、本研究内容は本学研究倫理審査委員会の承認済である。

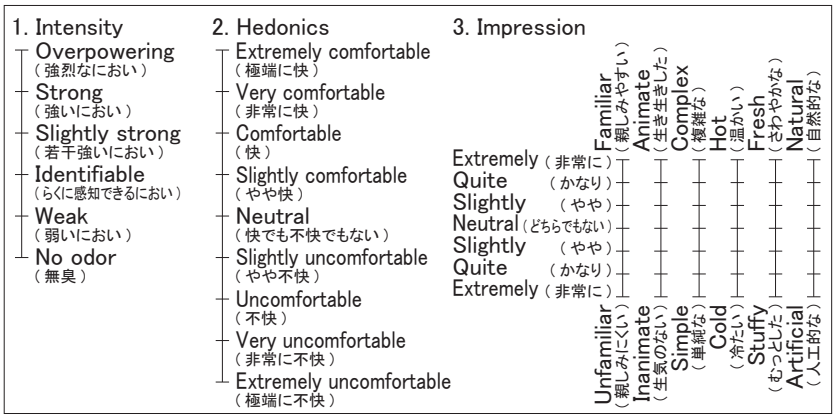


Figure 1 Rating scale

4. 各臭気と混合臭のにおいの強さ評価の比較

図2に全条件の臭気強度評価を示す。各図の横軸は左から体臭想定臭、木材臭、双方の混合臭を示し、縦軸は臭気強度を示す。行列で、体臭想定臭 4 条件と木材臭 4 条件の組合せを表記した。図中プロットは平均値で、縦線分は標準偏差を示す。＊印で、多重比較で有意差の検出された条件の組合せを示す。

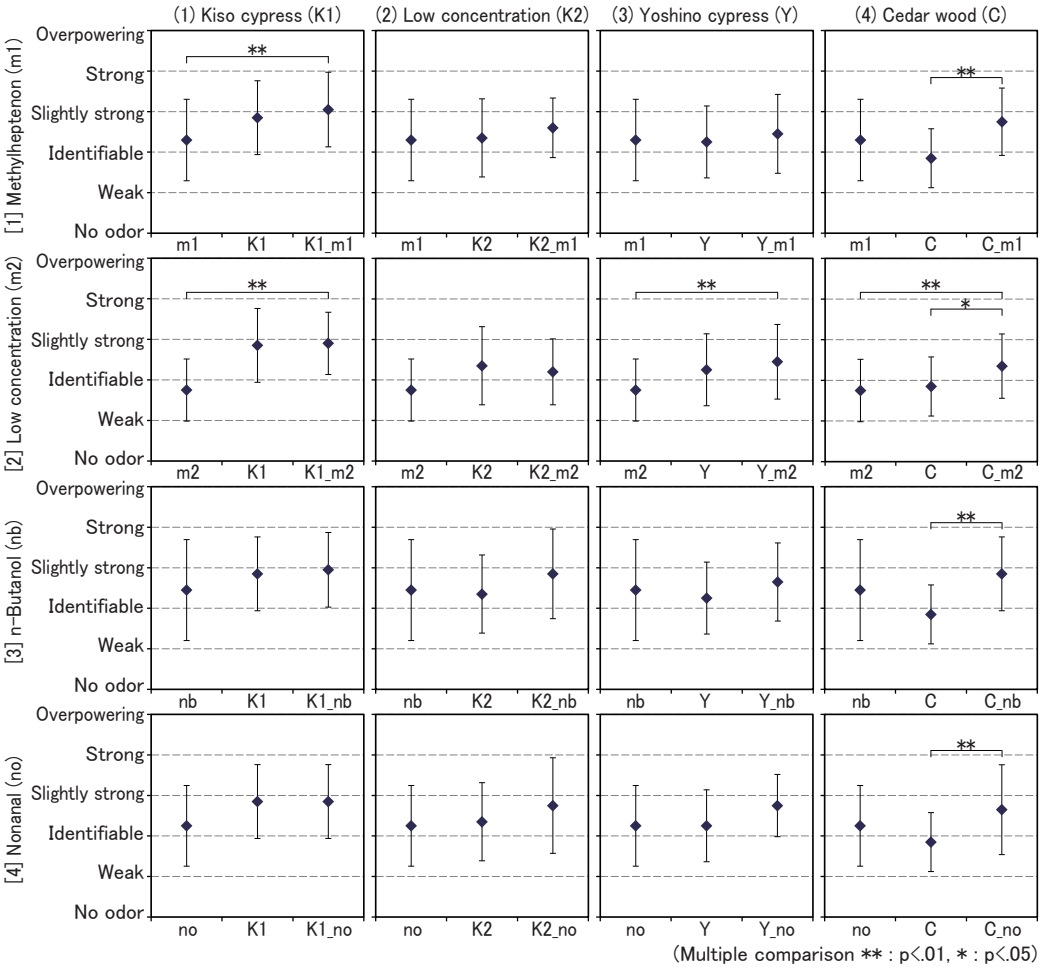


Figure 2 Comparison of intensity among body odor, wood odor and mixed odor

体臭想定臭ごと（行）に見ると、[1]m1 では、K1 との組合せで K1_m1 との間に有意差が見られた。これは、K1_m1 が K1 と近い強さだったと見ることができ、マスキングとしては有効だったと考えられる。C と C_m1 の組合せでも有意差が見られたが、ここでは体臭想定臭と木材臭双方より混合臭の臭気強度が高い傾向にあった。低濃度の [2]m2 では、K2_m2 以外で有意差が見られ、K1_m2、Y_m2、C_m2 とも体臭想定臭と混合臭間に差異があったことから、マスキング効果があったと判断できる。C_m2 では、C とも有意差が見られ、混合臭の臭気強度が各単体よりも有意に高く評価されたことがわかる。[3]nb では、C_nb のみ C と C_nb 間の有意差が見られた。これも、各単体臭より混合臭の臭気強度が高い傾向にあったと考えられる。[4]no では、nb と同様に C_no と C 間の有意差のみ見られた。

木材臭ごと（列）に見ると、(1)K1 では総じて混合臭と K1 の臭気強度評価が近い傾向にあった。木曽ヒノキ臭が多種の被マスキング臭について、臭気強度評価の面で卓越しやすい傾向にある可能性がある。(2)K2 では、総じて体臭想定臭より混合臭の方が臭気強度は高かった。K2_m1、K2_nb、K2_no では、各単体臭より混合臭の臭気強度が高かった。各混合臭の評価は、(1)K1 の各混合臭より低い評価であり、木材臭の臭気強度が低いことが混合臭の臭気強度評価にも影響したと推定される。(3)Y では、Y_m2 で m2 と混合臭との間に有意差が見られ、混合臭評価が Y の評価に近い傾向にあったと考えられるが、他の組合せでは両単体臭より混合臭の臭気強度が高い傾向にあった。(4)C では、総じて混合臭と C との有意差が見られたことから、4 条件の体臭想定臭に対していずれも体臭想定臭の影響が強かったり、混合時に増強された臭気強度評価となったことがわかる。シダーウッドは、他臭気との混合によって、混合前よりも臭気強度評価を大きく上昇させる可能性があり、臭気強度のマスキングとしては望ましくないと予想される。

全体を通して、体臭想定臭より混合臭の臭気強度は高かったことから、マスキングによって臭気強度を体臭想定臭より低減する組合せは本実験では存在しなかったと言える。また、混合臭と各単体臭の評価傾向の関係には、図中の列方向、すなわち木材臭が一貫した傾向を示す条件が多く見られた。

5. 各臭気と混合臭の快・不快評価の比較

図 3 に全条件の快・不快度評価を示す。各図の横軸は左から体臭想定臭、木材臭、双方の混合臭を示し、縦軸は快・不快度を示す。行列で、体臭想定臭 4 条件と木材臭 4 条件の組合せを表記した。図中プロットは平均値で、縦線分は標準偏差を示す。＊印で、多重比較で有意差の検出された条件の組合せを示す。

体臭想定臭ごと（行）に見ると、[1]m1 では、混合臭の評価が各単体臭より概ね低い傾向にあった。m1 は単体でも平均値が快側にあったことが一因と考えられる。[2]m2 でも同様の傾向だったが、K1_m2 と Y_m2 は有意差はなかったものの各単体臭よりわずかに高い評価だった。快・不快度から見たマスキング効果の可能性が見られるが、これは m2 が低強度だったためと考えられ、m1 の傾向と比較しても、被マスキング臭気の強度が低いことが、マスキング効果を得るために必要であることが示唆される。[3]nb では、K2_nb で K2 との間に有意差が見られたほか、全般的に木材臭より nb に近い混合臭の評価だった。一方で、有意差は見られないものの、いずれの組合せでも nb より混合臭の評価が高く、nb はマスキングされやすい臭気だと推定できる。[4]no では、全条件で木材臭と混合臭との間に有意差が見られた。有意差は見られなかったが、全条件で nb より混合臭の評価が低い傾向にあることから、no は、木材臭による快・不快度評価のマスキングが起こりにくい臭気と推定されるほか、他臭気との混合によってより不快感を強くするおそれがあることがわかった。

木材臭ごと（列）に見ると、いずれの体臭想定臭に対しても、木材臭の混合によって快・不快度が一貫して上昇した木材臭はなかった。大迫ら[2)]は、臭気強度低下および快・不快度向上を目的とする場合、混合する 2 臭気の質の調和性が高いほどマスキング効果が起きやすいとしている。これより、全ての被マスキング臭の快・不快度評価に効果のあるマスキング臭を期待することは困難と考えられるが、ここでもいずれの木材臭も、一貫して 3 種 4 条件の体臭想定臭にマスキング効果を持つとは言えなかった。

全体としては、混合臭と各単体臭の評価傾向の関係には、図中の行方向、すなわち体臭想定臭が一貫した傾向を示す条件が多く見られた。

6. 混合臭の閾値測定

2016 年 12 月 14 ～ 16 日に、同実験室で混合臭 K1_m1 の閾値測定を実施した。パネルは 3 章のパネルから 10 名（男女 5 名、平均 21.2 歳）とし、三点比較式臭袋法で測定した。実験時温湿度は、18.3 ～ 21.6[℃]、21 ～ 34[%RH] だった。

測定結果は、表 2 の通りだった。悪臭防止法の算定法に準じて、最大と最小値 1 名ずつのカット平均値を求めて、算出した混合臭 K1_m1 の臭気濃度は 1500

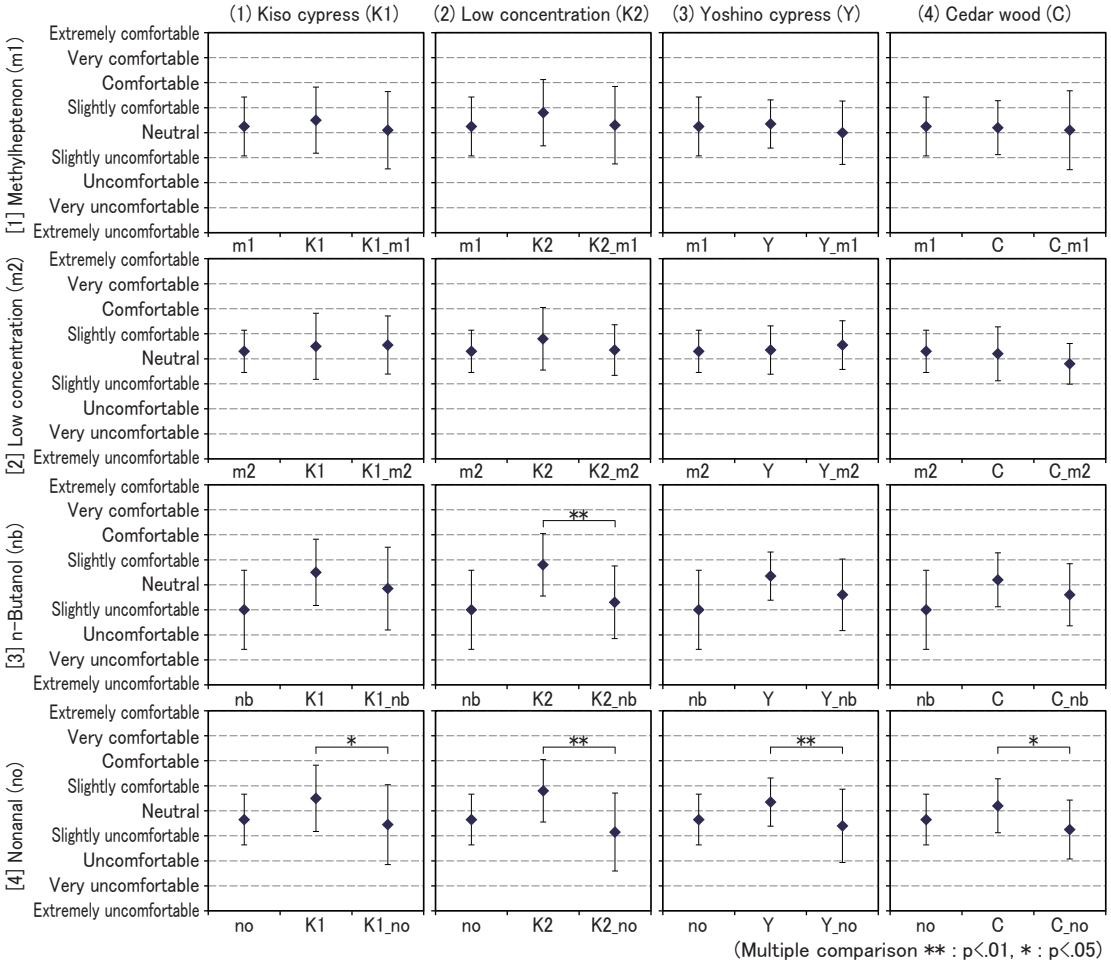


Figure 3 Comparison of hedonics among body odor, wood odor and mixed odor

だった。表 1 に示した通り、K1 は臭気濃度 149、m1 は 118 だったことから、両者の混合臭 K1_m1 の臭気濃度は各単体臭の 10 倍程度の臭気濃度として知覚されたことがわかった。ただし、図 2 の K1_m1 の臭気強度評価は、m1 とは 1 段階程度の差異があって臭気濃度の 10 倍比と比較的相関があると考えられたが、K1_m1 と K1 とはほぼ差異が見られなかったことから、混合臭 K1_m1 の「臭気濃度－臭気強度」関係が、m1 の同関係に近い可能性が考えられた。これは、K1 側から見れば、K1 の「臭気濃度－臭気強度」関係が混合臭と異なることを意味しており、これらの傾向の把握には、今後条件をより多くしてデータを蓄積することが望ましい。

6. おわりに

本報では、マスキングの計画的で適切な活用を目標として、体臭想定臭と木材臭の混合臭に関して臭気強度と快・不快度評価を中心とした検討を行った。また、1 条件のみ混合臭の臭気濃度測定を実施した。臭気強度に対しては、木材臭が混合臭の評価傾向に及ぼす影響が比較的系統的に表れたが、快・不快度に関しては、体臭想定臭が混合臭の評価傾向に及ぼす影響の方がやや卓越する傾向にあることがわかった。

Table 2 Result of triangle odor bag method

Panel No.	Logarism of dilution ratio ($Log_{10}D$)							$Log_{10}Dn$
	1.48	2.00	2.48	3.00	3.48	4.00	4.48	
1	○	○	○	×				2.74
2	○	○	○	○	×			3.24
3	○	×						1.74
4	○	○	○	×				2.74
6	○	○	○	○	○	○	×	4.24
8	○	○	○	○	○	×		3.74
9	○	○	○	×				2.74
10	○	○	×					2.24
16	○	○	○	○	○	×		3.74
17	○	○	○	○	○	○	×	4.24

参考文献

1) 田中廣通：芳香消臭脱臭剤協議会の新効力試験法について，におい・かおり環境学会誌 Vol.37 No.5，pp.339-354，2006
2) 大迫政浩，西田耕之助：芳香系消臭剤の感覚的消臭機構に関する研究―芳香成分の中和・相殺効果およびマスキング効果―，人間工学 Vol.26 No.5，pp.271-282，1990
3) 山田響子，山中俊夫，竹村明久，甲谷寿史，桃井良尚，相良和伸，高橋亮太：嗅覚の非定常応答に関する基礎的研究（その 12）臭気曝露実験におけるパネルの評価特性，平成 26 年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 第 7 巻，pp.29-32，2014
4) 池田馨，山中俊夫，竹村明久，相良和伸，甲谷寿史，桃井良尚：在室者による空気汚染質の評価手法に関する研究（その３）三点比較式臭袋法を用いた体臭閾値測定と成分定量分析，日本建築学会近畿支部研究報告集 第 56 号 環境系，pp.269-272，2016
5) 岩下剛，日比野貴生：VOC 濃度による体臭臭気強度の評価－体臭による知覚空気汚染に関する研究（その 2），日本建築学会環境系論文集 Vol.76 No.664，pp.539-545，2011

A-41

在室者から発生する汚染質の評価手法に関する研究
（その６）在室者の体臭制御がにおいの主観評価に及ぼす影響
Evaluation Method for Perceived Air Pollution Caused by Human Bioeffluents
(Part 6) Influence of Body Odor Control of Occupants on Subjective Evaluation of Odor

○池田　馨（大阪大学）　山中　俊夫（大阪大学）　竹村　明久（摂南大学）　甲谷　寿史（大阪大学）
桃井　良尚（大阪大学）　相良　和伸（大阪大学）　田中　大輔（三菱重工業株式会社）
杉山　茂広（三菱重工業株式会社）　井上　正志（三菱航空機株式会社）　吉本　梨紗（大阪大学）

Kaoru IKEDA[*1] Toshio YAMANAKA[*1] Akihisa TAKEMURA[*2] Hisashi KOTANI[*1]
Yoshihisa MOMOI[*1] Kazunobu SAGARA[*1] Daisuke TANAKA[*3]
Shigehiro SUGIYAMA[*3] Masashi INOUE[*4] Lisa YOSHIMOTO[*1]
[*1] Osaka University [*2] Setsunan University [*3] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. [*4] Mitsubishi Aircraft Corporation

It is specified in Japanese code that CO_2 concentration in non-residential buildings should not be more than 1000 ppm. CO_2 concentration standard is an index to determine ventilation requirements for visitors not to feel uncomfortable due to the body odor when they enter a room. It is the purpose of our study to clarify olfactory evaluation of body odor. Accordingly, this paper shows results of occupants' and visitors' evaluation of body odor in cases of body odor control and uncontrol. And we also conducted an experiment even under the condition that occupants sweated. The present results provide the difference between occupants and visitors and experimental conditions.

はじめに

現在、日本の建築物の室内環境は CO_2 濃度を 1000 ppm 以下に保つことで維持されている。呼気由来の CO_2 は体臭強度の指標とされ、CO_2 濃度基準は外来者が入室した際に不快に感じない程度の換気量を要求するものである。しかし、CO_2 と体臭の発生量の比は、入浴後の経過時間、着衣の汚れの程度、化粧品などの香料の種類、発汗状態、年齢など多くの要因に依存しており、いかなる状態でも CO_2 濃度 1000 ppm が同じ体臭強度となるわけではないと考えられる。

既報[1)]では嗅ぎ窓式無臭室法と入室法により主観評価実験を行い、評価手法について検討した。その結果、両手法において在室者と外来者間に評価の差違を確認したが、評価手法と在室者の体臭制御の双方が異なったため手法間の比較が難しかった。

そこで今回は嗅ぎ窓式無臭室法で在室者の体臭を制御した「ミニマム条件」、衣服や入浴に制限を設けない「無制御条件」、夏季想定空間で運動させた「発汗条件」の 3 条件で実験を行った。既報[2)]では、体臭コントロールの有無による体臭成分の差異を確認した。本報では、在室者から発生する空気汚染質の曝露実験を行い、体臭制御による評価の違い、在室者・外来者の評価の相違に関する考察を行った。

１．実験概要

実験は 2016 年 10 月 13 日～11 月 22 日に実施した。T&T オルファクトメータ試験で正常な嗅覚を有すると認められた 18 ～ 25 歳の本学学生 16 名（男子 8 名女子 8 名、非喫煙者）を各日 6 名ずつ外来者パネルとし、それ以外に 22 ～ 25 歳の本学学生 6 名（男子 3 名女子 3 名、非喫煙者）を体臭発生源となる在室者として採用した。純粋な人体由来の体臭とシャンプーや化粧品など後から付加された臭気を含む体臭、発汗を伴った体臭を比較するため、「ミニマム条件」（10 月 13, 27 日、11 月 22 日）と「無制御条件」（10 月 20 日）、「発汗条件」（10 月 22 日）の 3 条件で測定を行った。「ミニマム条件」では、在室者に実験の前日からにおいの強い食事をとらない、支給した無香料のシャンプー・コンディショナー・ボディウォッシュを用いて入浴する、実験当日に化粧品や整髪料を使用しない等の制限を設けた。また、実験時には麻が主材の衣服を着用させた。「無制御条件」では普段どおりの格好で実験に参加させ、「発汗条件」ではミニマム条件の制御に加えチャンバー入室前に夏季を想定した 35℃ 70％の空間に 10 分間滞在させ、そのうち 5 分間踏み台昇降運動させた。

実験は Fig. 1 に示す本学学内の隣接する 2 つの実験室で行った。一方の実験室内にある容積 7.65 m^3 のチャンバー

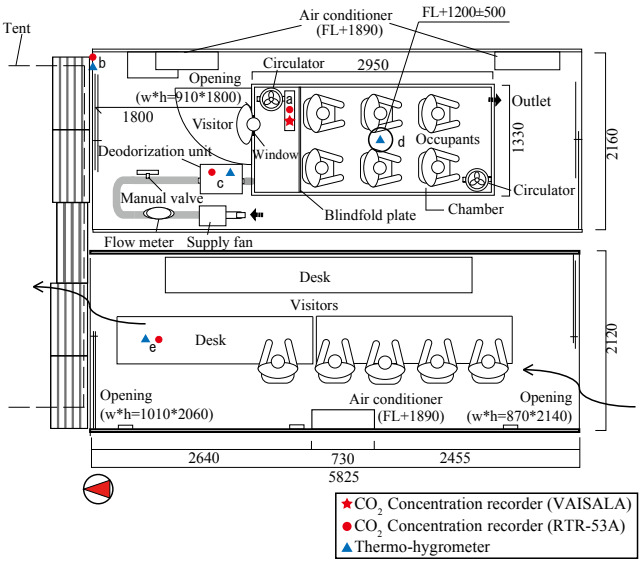


Fig. 1 Laboratory plan

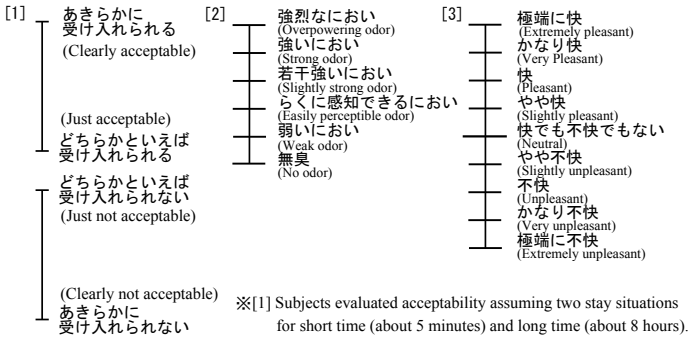


Fig. 2 Evaluation sheet

に体臭発生源として在室者 6 名を入室させた。空気汚染質のレベルを表す指標として CO_2 濃度を用いる。温湿度及び CO_2 濃度は、小型温湿度計（T&D 社製 RTR-53A）、小型 CO_2 濃度計（VAISALA 社製 GM70, T&D 社製 TR-76Ui）を用いて連続測定を行った。

外来者がチャンバー内空気について評価する CO_2 濃度は、換気ファンをまわして定常状態とした 1500, 2650, 5000 ppm の 3 通りとした。在室者には上記 3 濃度に加え CO_2 濃度上昇の過程で 1080, 1270, 1800, 2170, 3260, 4030 ppm においても評価させた。外来者には 1 人ずつチャンバーのある隣室に移動させて、嗅ぎ窓から臭気作成室内に顔を入れて検臭を行わせた後に評価させた。実験中は控室内の CO_2 濃度が上昇しないように、常時窓を開放して換気を行った。評価は Fig. 2 に示す評価尺度に記入させた。なお、受容度については 5 分程度の短時間と 8 時間程度の長時間の 2 通りの滞在を想定して評価させた。

■実験手順

(1) 臭気の作成

在室者入室後、Fig. 1 の測定点 a における CO_2 濃度が所定の濃度に達すると換気ファンを動作させ手動バルブの調整によって臭気作成室内の CO_2 濃度を定常化させた。

(2) インストラクション

外来者には嗅ぎ窓からチャンバー内に顔を入れ自然な呼吸を 2 回する等、検臭方法に関して指示を与えた。また、臭気は数名が滞在する室の空気のにおいであることも告知した。これは実験の途中で人のにおいだと気づかれることにより、評価に影響が出るのを防ぐためである。在室者・外来者ともに評価の仕方・タイミング等に関する指示も行った。

(3) CO_2 濃度上昇過程における在室者による空気質評価

在室者には CO_2 濃度上昇の過程でチャンバー内の空気質について評価させた。

(4) CO_2 濃度定常状態での空気質評価

換気ファンを動作させ所定の濃度で CO_2 濃度を定常化したチャンバー内の空気質について在室者・外来者に評価させた。外来者には、待機中のコンテナから在室者側コンテナへの移動途中に外気中で数回深呼吸させた。その後 Fig. 3 に示すように嗅ぎ窓からチャンバー内に顔を十分に入れて検臭を行わせた後、すぐに評価させた。ま

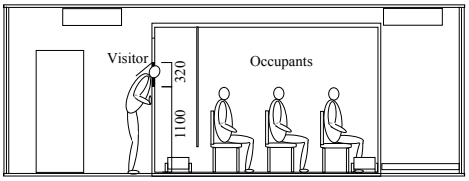


Fig. 3 Method of exposing to odor

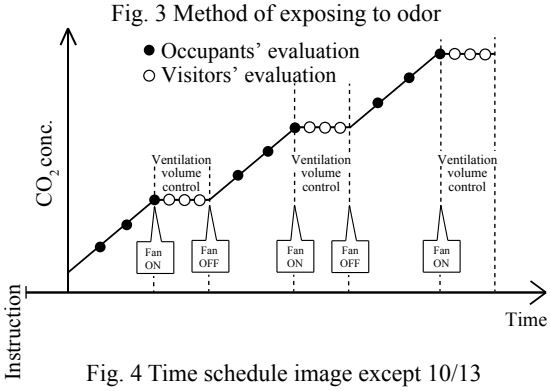


Fig. 4 Time schedule image except 10/13

た外来者には各濃度で 10 月 13 日は 1 人につき 1 回ずつ（のべ 6 回）、10 月 13 日以外の実験日は 1 人につき 3 回ずつ（のべ 18 回）評価させた。

(5) 外来者による空気質についての自由記述

外来者に検臭後、控室に戻りチャンバー内の空気質について自由に記述させた。

タイムスケジュールイメージを Fig. 4 に示す。

２．実験結果

2.1 CO_2 濃度制御

Fig. 1 の測定点 a における CO_2 濃度変化の一例として、10 月 13 日の CO_2 濃度測定結果を Fig. 5 に示す。在室者が入室を完了した時点から CO_2 濃度は上昇し、ファンの発停によって所定濃度に維持できている。

2.2「ミニマム条件」における実験の再現性

実験の再現性を確認するため、「ミニマム条件」で 3 回試験を実施した。CO_2 濃度と臭気強度、快・不快度、受容度の 3 日間の平均値の関係を Fig. 6 に示す。横軸は CO_2 濃度 [ppm], 縦軸は評価値、縦線分は 95% 信頼区間を示す。ただし、95% 信頼区間は在室者は 6 名 3 日間の 18 データ、外来者評価は 6 名 1 回（10 月 13 日）の 6 データと 6 名 3 回 2 日間（10 月 27 日、11 月 22 日）の 36 データをあわせた 42 データをそれぞれ 18 名 1 回、42 名 1 回のデータとして算出した。どの評価尺度においても信頼区間が 1 尺度未満に収まっており、再現性が確保できたといえる。また各実験日における給気の CO_2 濃度は、10

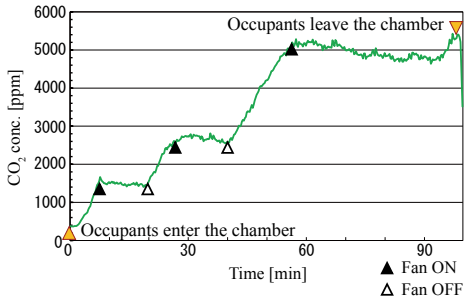


Fig. 5 Example of CO_2 conc. change

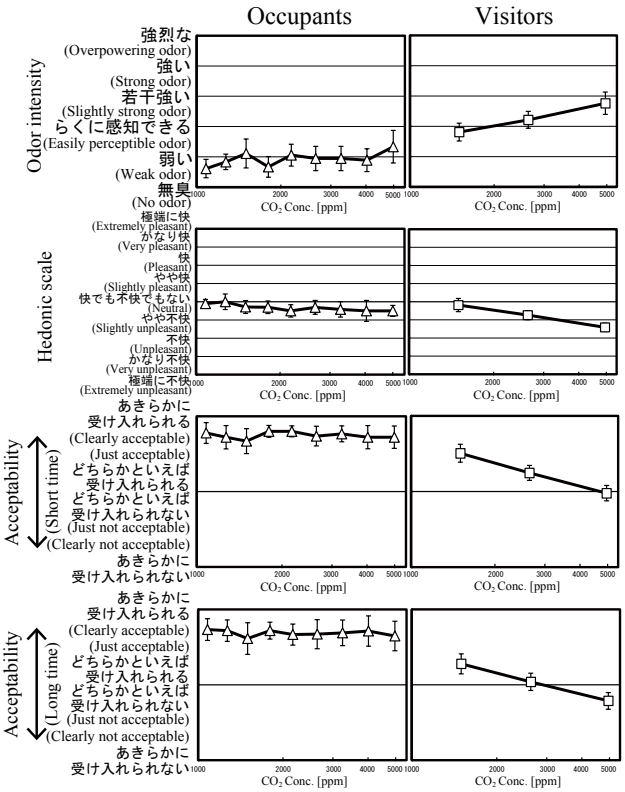


Fig. 6 Mean evaluation of three days and statistical reliability

月 13 日 432 ppm, 10 月 27 日 434 ppm, 11 月 22 日 518 ppm, 10 月 20 日 479 ppm, 10 月 22 日 489 ppm である。

2.3 CO_2 濃度と臭気強度との関係

CO_2 濃度と各条件の臭気強度の関係を Fig. 7 に示す。横軸は CO_2 濃度 [ppm], 縦軸は臭気強度である。在室者と外来者の評価について平均値の差の検定（t 検定）を行った。ただし、10 月 27 日、11 月 22 日における外来者評価は 6 名 3 回の 18 データを 18 名 1 回として算出した。

全条件を通して、在室者と外来者の評価は「らくに感知できる」を境に差が見られた。在室者外来者間では「発汗条件」の 2650 ppm 以外の濃度で有意差を得た。外来者評価を見ると、CO_2 濃度の上昇に伴い臭気強度が上がり、最終的に約一段階臭気強度は上昇した。それに対し在室者の評価は実験を通してほぼ横ばいである。すべての評価値は外来者の臭気強度が在室者を上回っており、在室者には順応の影響が見られた。

在室者は「発汗条件」で初期臭気強度をやや高めに評価したことから汗のにおいに関しては強めに知覚することがわかる。外来者は「ミニマム条件」で若干低く評価しており化粧品や衣服、汗のにおいが付加されると臭気強度を強く知覚することがわかった。

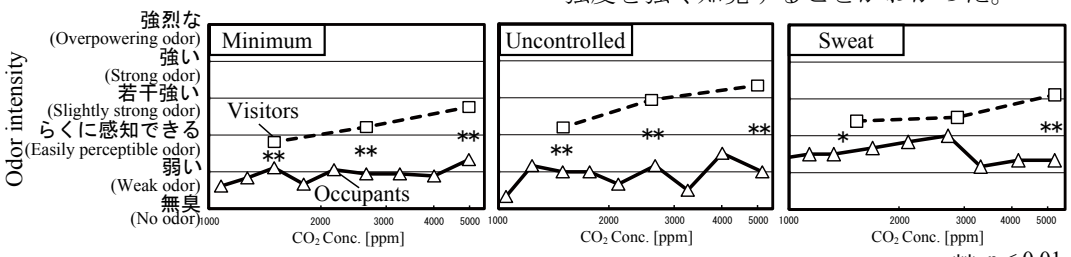


Fig. 7 Comparison between conditions of evaluation of odor intensity

** p < 0.01
* p < 0.05

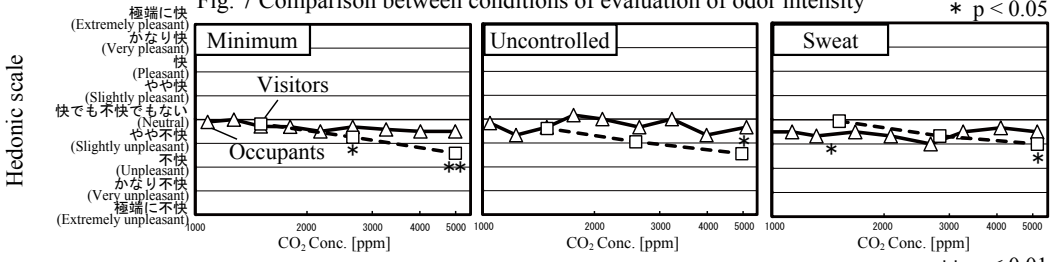


Fig. 8 Comparison between conditions of evaluation of hedonic scale

** p < 0.01
* p < 0.05

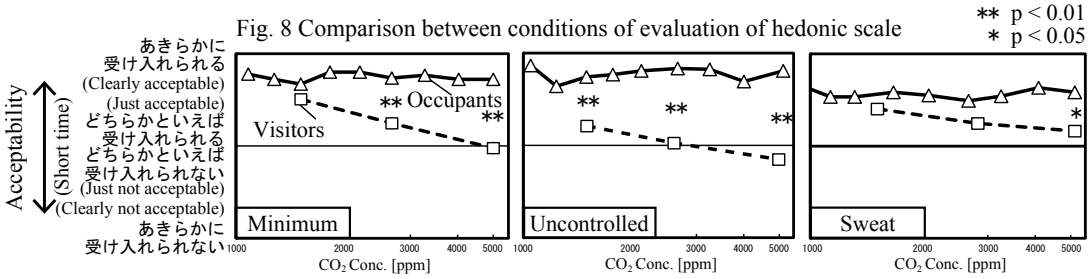


Fig. 9 Comparison between conditions of acceptability for short time

** p < 0.01
* p < 0.05

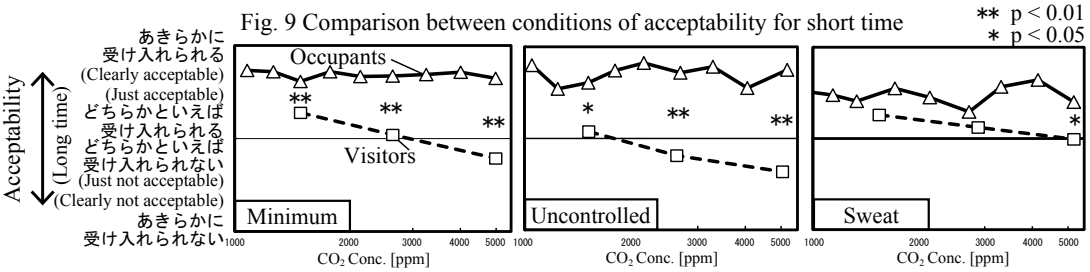


Fig. 10 Comparison between conditions of acceptability for long time

** p < 0.01
* p < 0.05

Table 1 Quantitative analysis of chamber indoor air (μg/m³)

Detection ingredient	Blank (No ventilation)	Blank (With ventilation)	Minimum 2016/10/13	Minimum 2016/10/27	Minimum 2016/11/22	Uncontrolled 2016/10/20	Sweat 2016/10/22
Folmaldehyde	4.6	2.6	7.7	7.4	9.9	17	12
Acetaldehyde	1.6	1.5	3.2	2	26	5.7	4.1
Toluene	4.0	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<0.9)	5.1	0.93	ND(<0.9)
Xylene	0.92	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<0.9)	1.9	0.85	ND(<0.9)
Ethylbenzene	0.82	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<0.9)	2.5	ND(<0.8)	ND(<0.9)
Styrene	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<0.9)	2.7	0.95	ND(<0.9)
p-Dichlorobenzene	ND(<0.8)	ND(<0.8)	0.89	1.4	1.5	2.5	ND(<0.9)
Nonanal	3.9	4.5	12	14	10	20	6.8
n-Tetradecane	1.5	1.7	3.0	1.5	1.1	2.7	1.2
DBP	0.86	0.92	ND(<0.8)	ND(<0.9)	ND(<0.8)	1.3	ND(<0.9)
DEHP	ND(<1.4)	2.4	1.5	3.6	ND(<1.4)	2.8	1.8
TVOC	18	31	100*	220*	220*	170*	150*
Butanol	1.7	ND(<1.0)	ND(<1.0)	ND(<1.1)	ND(<1.0)	ND(<1.0)	ND(<1.1)
Hexanal	ND(<1.0)	ND(<1.0)	1.4	ND(<1.1)	1.2	3.2	ND(<1.1)
α-Pinene	ND(<1.0)	ND(<1.0)	ND(<1.0)	ND(<1.1)	ND(<1.0)	ND(<1.0)	ND(<1.1)
Octanal	ND(<1.9)	ND(<1.9)	2.2	ND(<1.1)	ND(<1.0)	5.7	ND(<2.1)
Limonene	ND(<1.0)	ND(<1.0)	1.3	16	ND(<1.0)	2.1	12
Decanal	3.2	4.1	7.6	12	9.3	22	5.7
Levomenthol	ND(<1.0)	ND(<1.0)	1.1	4.2	1.3	3.6	6.6
Nonenal	ND(<1.0)	ND(<1.0)	1.1	5.4	3.2	2.0	2.8
Isovaleric acid	ND(<1.9)	ND(<1.9)	ND(<1.9)	3.7	2.5	ND(<1.9)	1.9
n-Butyric acid	ND(<1.9)	ND(<1.9)	ND(<1.9)	ND(<2.1)	3.6	ND(<1.9)	ND(<2.1)
6-Methyl-5-Hepten-2-one	ND(<1.0)	1.6	3.7	2.1	4.6	7.3	ND(<2.1)
3-Methyl-2-Hexenoic acid	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<1.1)	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<1.1)

※ Analysis by Kaneka Techno Research Corporation

2.4 CO_2 濃度と快・不快度との関係

CO_2 濃度と各条件の快・不快度の関係を Fig. 8 に示す。横軸は CO_2 濃度 [ppm], 縦軸は快・不快度である。臭気強度と同様、快・不快度も t 検定を行った。

全条件を通して、在室者外来者ともに「快でも不快でもない」近辺に評価した。有意差があらわれた濃度もあったが、臭気強度ほど在室者と外来者の評価に差は見られなかった。外来者評価を見ると、CO_2 濃度の上昇に伴い若干不快側に移行する傾向が見られ、在室者の評価は実験を通してほぼ横ばいであった。

2.5 CO_2 濃度と受容度との関係

CO_2 濃度と各条件の受容度の関係を Fig. 9, 10 に示す。横軸は CO_2 濃度 [ppm], 縦軸は受容度である。臭気強度、快・不快度と同様の t 検定を受容度についても行った。

全条件で外来者は在室者よりも受け入れられない側に評価した。特に「無制御条件」では外来者在室者間の差が顕著であった。在室者評価はどの条件においても受け入れられる側でほぼ横ばいであるが、「発汗条件」では他条件に比べて若干受け入れられない側に評価しており、臭気強度との相関が見られた。外来者評価は CO_2 濃度の上昇に伴い受け入れられない側に移行する傾向が見られた。5 分間と 8 時間の滞在を想定させた受容度を比較すると、在室者の評価はそれほど変わらないのに対して、外来者は長時間の受容度でやや受け入れられない評価となった。

2.6 チャンバー内空気の定量分析

体臭に含まれる成分の定量化を行うため、各条件 5000 ppm 時のチャンバー内空気の分析を行った。また換気無し、有りの両条件で在室者不在時の Blank も定量分析した。定量分析の結果を Table 1 に示す。表中の ND は定量下限を、“*” は検量線範囲を超えたため、検量線を外挿して定量値を算出したことを示している。分析の結果、岩下ら[3] の研究で体臭成分として同定された Nonanal, Decanal が本実験でも両条件で検出された。Blank 換気無しの場合は、換気有りと比較して Toluene, Xylene, Ethylbenzene, Butanol を検出した。実験室由来の VOC 成分であり、換気ありの場合は希釈効果で検出下限値以下になったと考えられる。人由来成分として Nonenal が検出された。Nonenal は、加齢臭の一成分とされていると同時にストレス臭成分であるため、25 歳以下の在室者からも検出されたと考えられる。「ミニマム条件」と「発汗条件」を比較すると Folmaldehyde が発汗の場合に増加していた。

おわりに

本報では嗅ぎ窓式無臭室法によって在室者から発生する汚染質についての主観評価実験を行った。臭気強度や受容度で外来者と在室者の評価値の差を確認した。定量分析結果からは実験日によってチャンバー内に存在した成分や量について違いを確認し、この違いが各条件の主観評価の違いに影響したと考えられる。

参 考 文 献

1) 池田馨 , 山中俊夫 , 竹村明久 , 甲谷寿史 , 桃井良尚 , 相良和伸 , 山田響子：在室者から発生する汚染質の評価手法に関する研究（その２）嗅ぎ穴を用いた無臭室法による評価 , 平成 26 年度空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 , pp. 89 - 92, 2015. 3

2) 池田馨 , 山中俊夫 , 竹村明久 , 甲谷寿史 , 桃井良尚 , 相良和伸 : 在室者から発生する汚染質の評価手法に関する研究（その５）三点比較式臭袋法を用いた体臭閾値測定と各希釈倍数における臭気強度評価 , 平成 28 年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集 , 第 7 巻 , pp. 101 - 104, 2016. 9

3) 岩下剛 , 日比野貴生 :VOC 濃度による体臭臭気強度の評価 体臭による知覚空気汚染に関する研究（その２）, 日本建築

在室者から発生する汚染質の評価に関する研究
（その７）在室者特性がにおいの主観評価に及ぼす影響
Evaluation for Perceived Air Pollution Caused by Human Bioeffluents
(Part 7)Influence of Characteristics of Occupants on Subjective Evaluation of Odor

○吉本　梨紗（大阪大学）　山中　俊夫（大阪大学）　竹村　明久（摂南大学）　甲谷　寿史（大阪大学）
桃井　良尚（大阪大学）　相良　和伸（大阪大学）　田中　大輔（三菱重工業株式会社）
杉山　茂広（三菱重工業株式会社）　井上　正志（三菱航空機株式会社）　池田　馨（大阪大学）

Lisa YOSHIMOTO[*1]　Toshio YAMANAKA[*1]　Akihisa TAKEMURA[*2]
Hisashi KOTANI[*1]　Yoshihisa MOMOI [*1]　Kazunobu SAGARA[*1]
Daisuke TANAKA[*3]　Shigehiro SUGIYAMA[*3]　Masashi Inoue[*4]　Kaoru IKEDA[*1]
[*1] Osaka University [*2] Setsunan University [*3] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. [*4] Mitsubishi Aircraft Corporation

CO_2 concentration is an index of perceived air pollution caused by human bioeffluents. However, occupants' predicable (such as sex, age and nationality) has enough possibilities to affect room odor environment. It is very meaningful for making indoor condition better to approach problems related to body odor. This paper shows the results of the exposure experiment of human bioeffluents and we consider how occupants' predicable affect room odor and the difference of the evaluation between occupants and visitors.

はじめに

日本の建物の室内環境は、建築物における衛生的環境の確保に関する法律（通称：建築物衛生法）に基づいて CO_2 濃度を 1000 ppm に保つことで維持されているが、岡田[1)]が建築用途別の不快な臭気についてまとめているように、建物用途や使用する人々によって求められる知覚空気質は異なり、在室者の状態が異なれば室内のにおい環境が変化するであろうことは容易に想像でき、室内環境向上の為には十分に調査する必要がある。

前報[2)]では在室者を 25 歳以下日本人とし、衣服や入浴に特に制限を設けない「無制御条件」、体臭を制御した「体臭ミニマム条件」、発汗を目的として夏季を想定した空間で運動させた後入室させた「発汗条件」の 3 条件で実験を行った。しかし在室者の制御条件だけでなく、その属性（例えば男女の性差や年齢、国籍など）も室内のにおい環境に影響を及ぼす可能性があると考えられる。

本研究では、在室者から発生する空気汚染質の曝露実験を行い、室内の空気汚染質の主観評価の差について検討を行うことを目的としている。既報[3)]では、体臭コントロールに関して有りと無しの 2 条件について室内空気の定量分析を行い、空気中に含まれる成分に違いを確認した。本報では本研究で行った曝露実験の中より、衣服や入浴に制限を設けず、在室者が 25 歳以下日本人である条件、35 歳以上日本人である条件、外国籍を有する者である条件、という在室者の年齢や国籍に差を設けた 3 条件に着目し、在室者の属性が臭気評価に及ぼす影響や在室者と外来者の評価の差についての考察を行った。

1. 実験概要

実験は 2016 年 10 月 20, 24 日、2017 年 1 月 14 日の 3 日間実施した。実験を行う前に T&T オルファクトメーター試験を行い、正確な嗅覚を有すると認められた 18 ～ 25 歳の本学日本人学生 14 名（男性 7 名、女性 7 名）を各日 6 名ずつ、入室直後の室内空気質を評価する外来者パネルとして、22 ～ 25 歳の本学日本人学生 6 名（男女 3 名ずつ）および 39 ～ 65 歳の日本一般人（男性 5 名、女性 1 名）、22 ～ 27 歳の本学外国人学生（ミャンマー 2 名、マレーシア、インドネシア、インド、ロシア各 1 名）の計 6 名（男女 3 名ずつ）を生体発散物質の発生源である在室者として採用した。なおパネル及び在室者は全員非喫煙者であり、それぞれ適切な報酬を支払った。

実験方法は前報[2)]の通りである。なお外来者パネルには各濃度の初めの評価で、控室に戻った後 Fig. 1 で示す自由記述にて室内の臭気質に関しても回答させた。

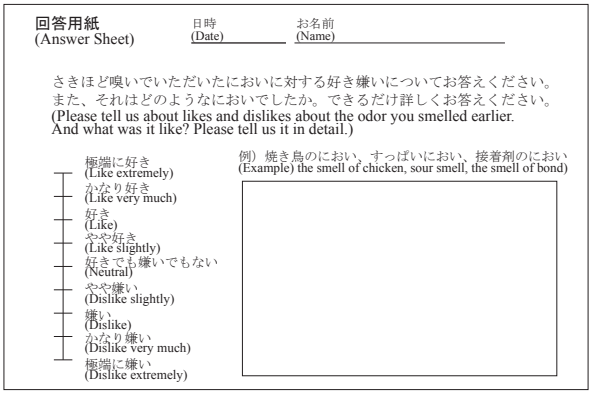

回答用紙
(Answer Sheet)
日時 (Date)
お名前 (Name)
さきほど嗅いでいただいたにおいに対する好き嫌いについてお答えください。
また、それはどのようなにおいでしたか。できるだけ詳しくお答えください。
(Please tell us about likes and dislikes about the odor you smelled earlier.
And what was it like? Please tell us it in detail.)
極端に好き (Like extremely)
かなり好き (Like very much)
好き (Like)
やや好き (Like slightly)
好きでも嫌いでもない (Neutral)
やや嫌い (Dislike slightly)
嫌い (Dislike)
かなり嫌い (Dislike very much)
極端に嫌い (Dislike extremely)
例）焼き鳥のにおい、すっぱいにおい、接着剤のにおい
(Example) the smell of chicken, sour smell, the smell of bond)

Fig. 1 Answer sheet of odor quality

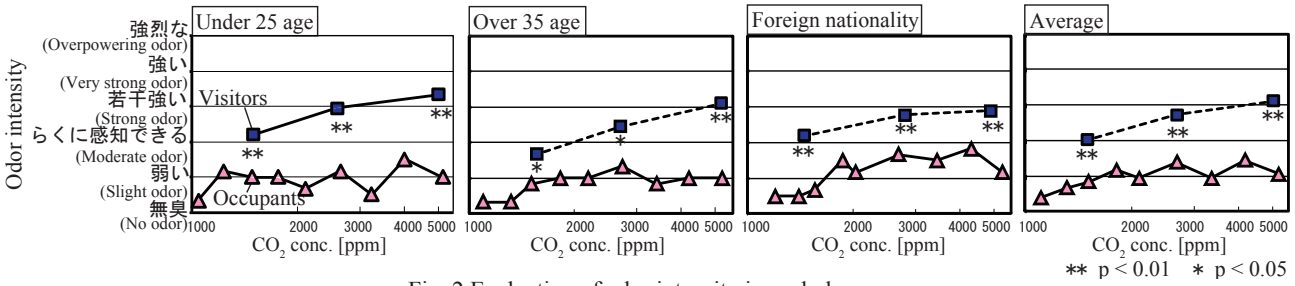


Fig. 2 Evaluation of odor intensity in each day

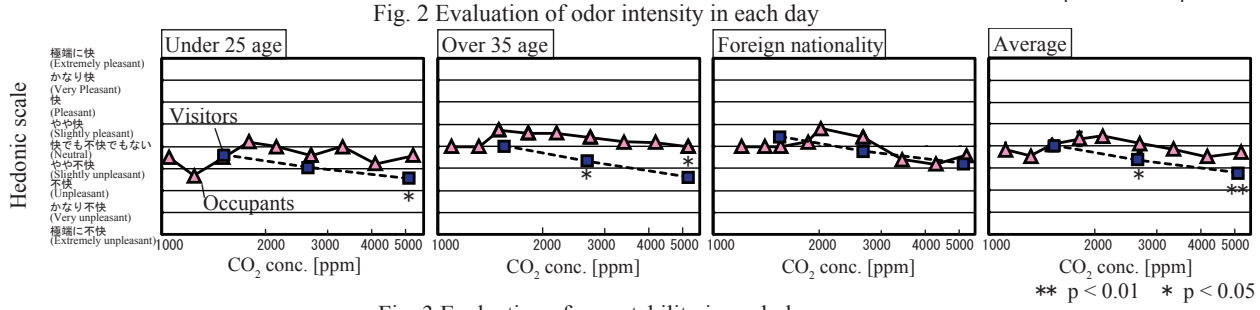


Fig. 3 Evaluation of acceptability in each day

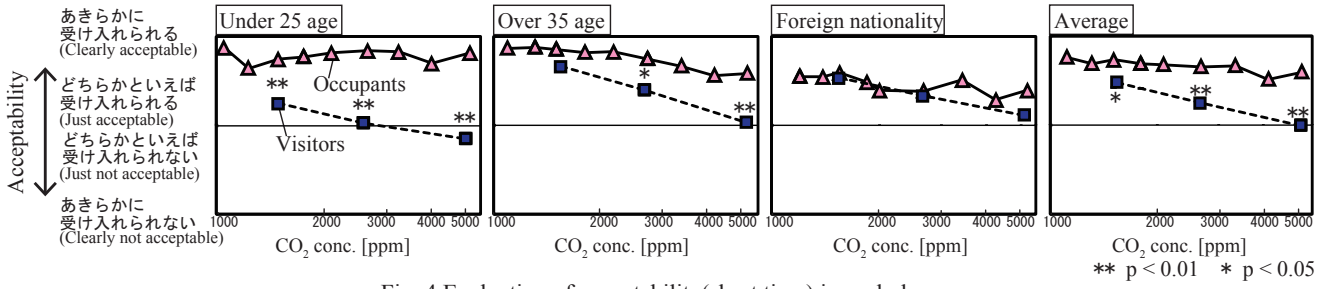


Fig. 4 Evaluation of acceptability(short time) in each day

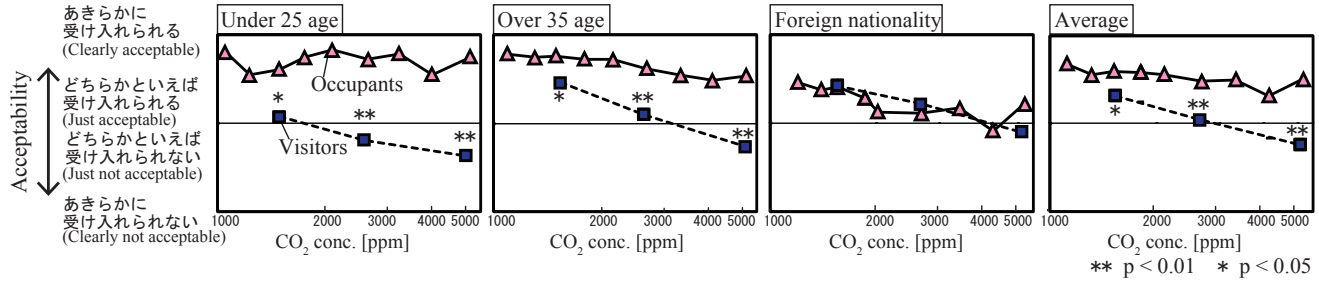


Fig. 5 Evaluation of acceptability(long time) in each day

2. 結果と考察

各実験日における給気の平均 CO_2 濃度は 2016 年 10 月 20 日は 527 ppm、2016 年 10 月 24 日は 473 ppm、2017 年 1 月 14 日は 441 ppm であった。

2.1 CO_2 濃度と臭気強度との関係

CO_2 濃度と各実験日の臭気強度と、各実験日の平均値との関係を Fig. 2 に示す。横軸は CO_2 濃度 [ppm]、縦軸は臭気強度を示している。3 日間の平均値グラフでは全条件を通して「らくに感知できる」を境に在室者と外来者の評価の間に差が見られた。全ての評価値において外来者の臭気強度が在室者の臭気強度を上回っており、在室者の評価値は実験を通してほぼ横ばいであり、順応の影響が見られた。どの実験日においても CO_2 濃度と外来者の臭気強度の間に正の相関が見られた。また、各条件間で在室者の臭気強度は 1800 ppm 以降、外国人条件が他の条件を上回っていたのに対し、外来者の臭気強度は 25 歳以下条件が他の条件を上回っている。

2.2 CO_2 濃度と快・不快度との関係

CO_2 濃度と各実験日の快・不快度と、各実験日の平均値との関係を Fig. 3 に示す。横軸は CO_2 濃度 [ppm]、縦軸は快・不快度を示している。全条件を通して、在室者と外来者の評価の間に大きく差が見られた臭気強度と比較すると、在室者と外来者の評価値の差が小さかった。また、CO_2 濃度と外来者の評価の間には負の相関が見られたが、在室者評価は実験を通してほぼ横ばいであった。各条件を比較すると、在室者の快・不快度は 25 歳以下条件では全体的に「快でも不快でもない」より不快側であるのに対し、35 歳以上条件では快側である傾向が見られた。外来者の快・不快度は 25 歳以下、35 歳以上、外国人の順に快側へと若干移行している。

Table. 1 Quantitative analysis of chamber indoor air

(μg/m³)

			Under 25 age	Over 35 age	Foreign nationality
Detection ingredient	Blank (No ventilation)	Blank (With ventilation)	2016/10/20	2016/10/24	2017/1/14
Folmaldehyde	4.6	2.6	17	15	14
Acetaldehyde	1.6	1.5	5.7	4.9	3.5
Toluene	4.0	ND(<0.8)	0.93	ND(<0.9)	0.95
Xylene	0.92	ND(<0.8)	0.85	ND(<0.9)	ND(<0.5)
Ethylbenzene	0.82	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<0.9)	0.56
Styrene	ND(<0.8)	ND(<0.8)	0.95	ND(<0.9)	0.66
p-Dichlorobenzene	ND(<0.8)	ND(<0.8)	2.5	33	4
Nonanal	3.9	4.5	20	12	16
n-Tetradecane	1.5	1.7	2.7	ND(<0.9)	4.8
DBP	0.86	0.92	1.3	ND(<0.9)	0.6
DEHP	ND(<1.4)	2.4	2.8	1.8	1.3
TVOC	18	31	170*	140*	460*
Butanol	1.7	ND(<1.0)	ND(<1.0)	ND(<1.1)	ND(<0.6)
Hexanal	ND(<1.0)	ND(<1.0)	3.2	1.6	5.3
α-Pinene	ND(<1.0)	ND(<1.0)	ND(<1.0)	ND(<1.1)	ND(<0.6)
Octanal	ND(<1.9)	ND(<1.9)	5.7	3	9.3
Limonene	ND(<1.0)	ND(<1.0)	2.1	ND(<1.1)	ND(<0.6)
Decanal	3.2	4.1	22	15	47*
Levomenthol	ND(<1.0)	ND(<1.0)	3.6	ND(<1.1)	2.0
Nonenal	ND(<1.0)	ND(<1.0)	2.0	2.0	5.3
Isovaleric acid	ND(<1.9)	ND(<1.9)	ND(<1.9)	ND(<2.1)	ND(<1.2)
n-Butyric acid	ND(<1.9)	ND(<1.9)	ND(<1.9)	ND(<2.1)	1.9
6-Methyl-5-Hepten-2-one	ND(<1.0)	1.6	7.3	5	19
3-Methyl-2-Hexenoic acid	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<0.8)	ND(<1.1)	ND(<0.5)

※ Analysis by Kaneka Techno Research Corporation

2.3 CO_2 濃度と受容度との関係

CO_2 濃度と各実験日の受容度と、各実験日の平均値との関係を、5 分程度の滞在を想定させた短時間想定に関しては Fig. 4、8 時間程度の滞在を想定させた長時間想定に関しては Fig. 5 に示す。横軸は CO_2 濃度 [ppm]、縦軸は受容度を示している。全条件を通して短時間想定より長時間想定の方が在室者も外来者も受け入れられない側の評価をしている。受容度は滞在時間の長さの影響を受けると考えられる。各条件を比較すると、在室者評価は外国人条件では他の条件より受け入れられない側の評価であった。これは在室者全員が外国籍を有する者ではあるが、その国籍は揃えられなかった為に在室者同士の体臭が異なり、双方が違和感を持った可能性が考えられる。外来者評価は 25 歳以下条件において他の条件より受け入れられない側の評価であった。3 日間の平均値グラフから、在室者は外来者より受け入れられる側に評価する傾向が読み取れるが、上記に挙げた理由から外国人条件では外来者評価が在室者評価と重なる、もしくは上回る箇所が見られた。

2.4 チャンバー内空気の定量分析結果

前報[1] で報告したチャンバー内空気の定量分析を本実験に対しても行った。その結果を Table. 1 に示す。表中の ND は定量下限を、“＊”は検量線範囲を超えた為、検量線を外挿して定量値を算出したことを表す。

35 歳以上の在室者からは p-Dichlorobenzene が他条件に比べて多く検出された。これは p-Dichlorobenzene が主に防虫剤等に使用されており、実験当日 35 歳以上の在室者の 6 人中 5 人がスーツを着用していたことから、衣服による持ち込みと考えられる。Nonenal は加齢臭成分であるが、35 歳以上の在室者から特に多く検出されたわけではなかった。35 歳以上の在室者の年齢構成としては 46 歳 2 名、39 歳、45 歳、47 歳、65 歳各 1 名である。これは Nonenal が加齢臭成分であると同時にストレス臭成分であるためと考えられる。外国人の在室者からは Hexanal, Octanal, Decanal, 6-Methyl-5-Hepten-2-one といった香料として使用される成分が他条件に比べて多く検出された。特に果実臭として知られ、香料・香辛料に含有されているとされる Decanal は検量範囲を超えている。今回在室者となった外国人は日本人に比べ、強い香料のものを用いる傾向にあったと考えられる。

2.5 臭気質に関するアンケート結果

外来者パネルに対して行った臭気質に関するアンケート結果を Table. 2 に示す。図中の「–」は無回答であったことを示す。全条件を通して 1500 ppm 時では「甘いにおい」「シャンプーのようなにおい」という記述が多く見られた。当日普段通

Table. 2 Results of questionnaire about odor quality

Under 25 age	1500ppm	2650ppm	5000ppm
Visitor 1	普通に部屋にいる時のにおい	ファストフード店にいる時みたいなにおい	つんとくる、すっぱいにおい
Visitor 2	シャンプーのような香り	花のようなにおい	数時間閉めきった教室のにおい
Visitor 3	ややすっぱい系のにおい 汗のにおい	すっぱいにおい 生乾きのにおい	ややすっぱいにおい 食べ物のにおい
Visitor 4	換気していない部屋のにおい	大勢の人がいる部屋のにおい	大勢の人がいる部屋のにおい
Visitor 5	若干、シャンプーのようなにおい	女性のにおい？	ランニング後の汗のにおい
Visitor 6	すっぱい	前評価時よりは弱い酸味のあるにおい	最初に評価した時と同じ酸味のあるにおい 高校の昼休みの男子の多いクラスの教室のにおい
Over 35 age	**1500ppm**	**2650ppm**	**5000ppm**
Vistior 2	花のようなにおい	かすかにシャンプーのにおい それより室内のこもったにおいの方が強い	人の体臭がまざったようなにおい
Vistior 3	ほぼ無臭 空気や部屋(教室や家など)に入った瞬間のにおい	すっぱい(黒酢のような)におい おじさんの整髪料のにおい	すっぱいにおい(前評価時よりは弱い)
Vistior 7	無臭	少し甘いにおい？	洋服のにおい
Vistior 8	人の体臭(衣服にしみついたにおい)	換気をしていない寝室のにおい 布にしみついた体臭など	強い体臭 換気されていない部屋にたくさんの男性がいるようなにおい
Vistior 9	柔軟剤	もわっとした少しすっぱいにおい 脇汗、ファンデーション、湿気のにおい	こもったにおい、すっぱいにおい 汗、タオルの生乾きのにおい
Vistior 10	洗剤と何かが混ざったにおい 男性的でなく女性的	前評価時よりは薄い匂い	少し汗っぽいにおい
Foreign nationality	**1500ppm**	**2650ppm**	**5000ppm**
Visitor 1	服のにおい	ほこりっぽいにおい 甘いにおいが混ざったようなにおい	汗っぽいにおい すっぱくてつんとするにおい
Visitor 3	甘いにおい 花のにおい	甘いにおい	灯油のにおい
Visitor 11	甘いにおい 香水系	ホームセンターの日用品っぽいにおい	甘いにおい 花っぽいにおい
Visitor 12	石鹸のようなにおい	少し汗っぽいにおい	満員電車の人のにおい
Visitor 13	石鹸のようなにおい	少しむわっとするにおい	汗臭いにおい こもったにおい
Visitor 14	化粧品ぽいにおい	–	混んでいる電車の中でにおう 化粧品のような感じ

りの格好を想定して衣服や化粧品、整髪料に関して特に制限を設けていなかった為に、チャンバー内にはそれらから揮発した化学物質が存在していた可能性がある。これに対して 5000 ppm 時では「汗のにおい」「体臭」といった記述や「満員電車の人のにおい」などの体臭を強く感知していると思われる記述が見られた。CO_2 濃度が体臭による空気汚染の指標であることが改めて確認できた。多くのパネルが CO_2 濃度によって異なる臭気質を回答したという結果は既報[4]と同様の傾向であった。また、「汗」に関する記述が特に 5000 ppm 時に複数見られた。チャンバー内の温度は在室者が発汗しないよう制御しており、実験後に行った発汗に関するアンケートでも在室者が汗をかいているとの回答は得られなかった。体臭と汗のにおいを結びつけて認識している可能性がある。条件別に比較すると、25 歳以下条件と 35 歳以上条件では特に差は見られず、外国人条件では 1500 ppm において 6 名中 5 名が「甘いにおい」や「石鹸のようなにおい」など化学物質由来と考えられる臭気質を回答しており、2650 ppm 時、5000 ppm 時においても似たような回答が見られた。パネル別に比較すると外来者 3、外来者 6、外来者 10 は CO_2 濃度が上昇した後の評価において「前評価時より弱い」と回答しているが、各々の臭気強度評価に着目すると前評価時より低い回答をしているパネルはいなかった。これは臭気強度評価は検臭の直後に行わせたのに対し、臭気質評価は控室に戻ってから行わせたため、その時間経過が評価に影響を及ぼしたと考えられる。

おわりに

本報では嗅ぎ窓式無臭室法によって在室者を汚染源とした空気汚染質についての曝露実験を行い、在室者の属性が主観評価に及ぼす影響についての検討を行った。特に快不快度や受容度においてその影響が見られ、在室者と外来者の間においても受容度に加えて臭気強度での評価値の間に差を確認した。今後は本報で報告した以外の条件での結果にも着目し、引き続き統計的考察を行っていく予定である。

なお、本研究は大阪大学工学研究科倫理委員会の承諾を得て、実施した。

【参考文献】

1) 岡田：居住環境の快適性と臭気，環境技術，21(8), pp. 27-31, 1992
2) 池田，山中，竹村，甲谷，桃井，相良，田中，杉山，井上，吉本：在室者から発生する汚染質の評価手法に関する研究（その 6）在室者の体臭制御がにおいの主観評価に及ぼす影響，空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集，2017.3（掲載予定）
3) 池田，山中，竹村，甲谷，桃井，相良：在室者から発生する汚染質の評価手法に関する研究（その 4）三点比較式臭袋法を用いた体臭閾値測定と各希釈倍数における臭気強度評価，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，第 7 巻，pp.101-104, 2016.9
4) 池田，山中，竹村，甲谷，桃井，相良，山田：在室者から発生する汚染質の評価手法に関する研究（その 2）嗅ぎ穴を用いた無臭室法による評価，空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集，pp.89-92, 2015.3

A-43

嗅覚の非定常応答に関する基礎的研究
（その 18）言語・線分・音の高さを用いた臭気強度の時間変化の評価
Basic Study on Unsteady Olfactory Response
(Part 18) Evaluation of Time Changing Odor Intensity by Language Rating Scale, Line Length Scale and Sensation of Sound Pitch

○佐岡　美咲　（大阪大学）　　山中　俊夫　（大阪大学）
竹村　明久　（摂南大学）　　相良　和伸　（大阪大学）
甲谷　寿史　（大阪大学）　　桃井　良尚　（大阪大学）

Misaki SAOKA[*1] Toshio YAMANAKA[*1] Akihisa TAKEMURA[*2]
Kazunobu SAGARA[*1] Hisashi KOTANI[*1] Yoshihisa MOMOI[*1]
[*1] Osaka University [*2] Setsunan University

It is important to understand olfactory response to design comfortable indoor environment. However, the method to evaluate odor intensity have to be considered because there are large individual differences among panels. In this study, two experiments in evaluation on odor intensity were conducted. One was to compare three evaluation methods (the language rating scale, the line length scale and sound pitch), and the other was to know the characteristics of olfactory adaptation and recovery. The result of the experiments is adapted the olfactory response model.

はじめに

人は常に様々なにおいにさらされ、嗅覚の順応と回復を繰り返しながら生活している。におい除去を目的とした換気量制御などの室内環境設計を行うためには、そのような嗅感覚の変化の把握が必要である。嗅感覚の把握のために、パネルを用いた臭気強度の主観評価実験が数多く行われてきた。評価に用いられる尺度には、言語を用いたものが多くあるが、人によって言語解釈や言語間の距離などは異なる。そこで、言語を用いない手法としてクロスモダリティマッチング（以下、CMM）という異なるモダリティを合致させる評価手法に着目した。既報[1)2)]では、5 つの評価手法を用いて順応過程の臭気強度を評価させた。また、Berglund[3)]は、臭気の連続曝露の後に無臭空気を曝露しながら間欠的に臭気を瞬間曝露する実験から､順応･回復特性について検討した。本報では、言語評定尺度、線分長尺度、音の高さによる CMM の 3 つの評価手法を用いて既報[1)2)]と同様の連続曝露実験を行い、結果の再現性を確認するとともに、Berglund[3)]と同様にして臭気の連続曝露と間欠的な瞬間曝露を行う実験を行い、嗅覚応答特性について検討をした結果を報告する。また、両実験に対して山中ら[4)]が提案した嗅覚応答モデルの有効性を検討した結果についても報告する。

1. インパルス応答関数を適用した嗅覚応答モデル[4)]

山中ら[4)]は、嗅感覚変化は閾値の変化によるものと考え、臭気強度と臭気濃度の間に Weber-Fehner 則を適用し、時刻 t の曝露濃度 $C_{(t)}$、時刻 t の閾値上昇量 $\Delta C_{th(t)}$、非順応状態での閾値濃度 C_{th0}、定数 k_c を用いて時刻 t の臭気強度 $I_{(t)}$ を、(Eq.1) のように表した。

$$I_{(t)} = k_c \log_{10} \frac{C_{(t)}}{C_{th0} + \Delta C_{th(t)}} \qquad \text{(Eq.1)}$$

ここで、閾値上昇量 $\Delta C_{th(t)}$ は **Fig. 1** のようなインパルス応答の積み重ねであると考え、(Eq.2) に示す応答関数 $C^*_{th(t)}$ を用いて (Eq.3) のように表せる。

$$C^*_{th(t)} = \alpha \cdot e^{-\beta t} \qquad \text{(Eq.2)}$$

$$\Delta C_{th(t)} = \int_0^\infty C_{(t-\tau)} C^*_{th(\tau)} d\tau \qquad \text{(Eq.3)}$$

α, β は定数、τ [s] は時刻 t から遡る時間である。

2. 3 つの評価手法を用いた臭気強度評価実験

2.1 実験概要

実験は 2017 年 1 月 10 日～ 2017 年 1 月 19 日にかけて **Fig. 2** に示す臭気提示装置を用い、酢酸エチルを試料臭気として実施した。同時に 3 名まで曝露することができ、ファン流量はパネルが不快に感じないよう一人当たり 8m^3/h 程度に調整した。パネルは嗅覚試験を行い、正常な嗅覚を有すると認められた 19 ～ 21 歳の本学学生

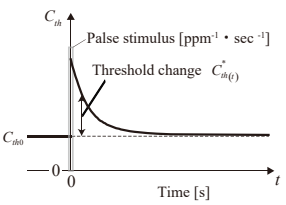


Fig. 1 Concept of threshold change after pulse of stimulus

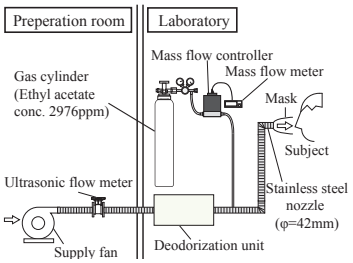


Fig. 2 Sniffing Apparatus

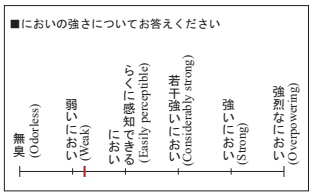


Fig. 3 Evaluation sheet (Language rating scale)

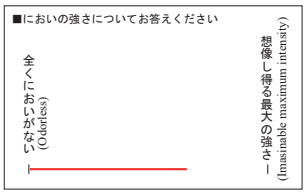


Fig. 4 Evaluation sheet (Line length scale)

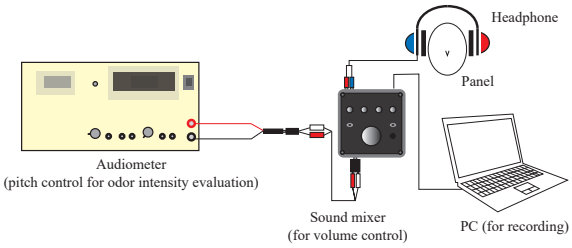


Fig. 5 Evaluation device (CMM of Sound pitch)

6 名（男子 3 名、女子 3 名）であり、既報 [1)2)] のパネルとは重複していない。言語評定尺度（連続カテゴリー尺度）と 線分長尺度はそれぞれ既報 [1)] と同じ **Fig. 3**, **Fig. 4** に示す評価用紙を、音の高さ CMM では前報 [2)] と同様の **Fig. 5** に示す装置を用いて評価させた。音の高さ CMM では、7.5ppm の臭気強度に相当する音の高さとして 1000Hz の純音をモジュラスとしてパネルに提示した。実験のタイムスケジュールを **Fig. 6** に示す。最初にインストラクションを行い、検臭・評価方法、注意事項、試料臭気の安全性についての説明と、臭気質の教示、モジュラスの提示を行った。次に、無臭空気を 3 分間曝露した後に酢酸エチルを 10 秒間曝露させることを 3 回繰り返し行った。曝露濃度は 1.1 ppm、3.0 ppm、7.5 ppm のいずれかであり、パネルごとに順不同で 1 回ずつ曝露し、臭気強度を評価させることで非順応状態における評価値を得た。その後、嗅覚を回復させるために無臭空気を 5 分間曝露し、7.5 ppm の酢酸エチルを 15 分間連続曝露し、1 分毎に評価させ順応過程での評価値を得た。

2. 2 結果と考察

(1) 言語評定尺度を用いた臭気強度評価

Fig. 7 に言語評定尺度による非順応状態での曝露濃度

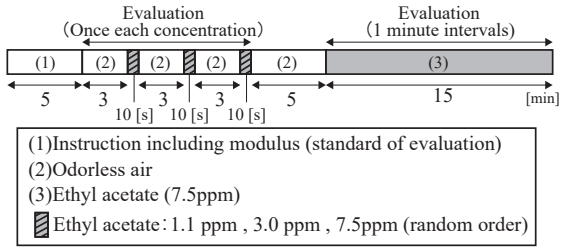


Fig. 6 Time schedule (Experiment on adaptation by CMM)

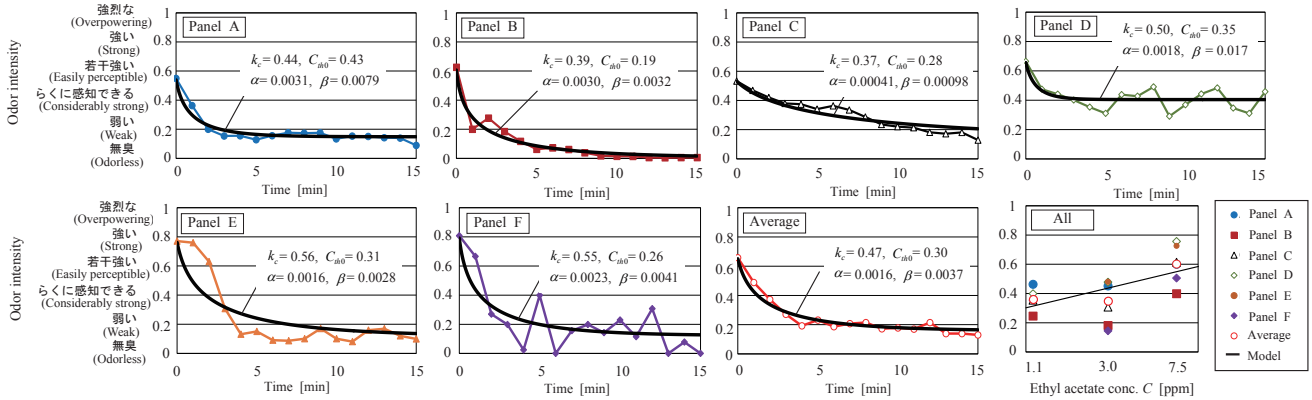
と評価値の関係、及び連続曝露時の評価値の経時変化とモデルの適用結果を示す。モデルのパラメータは、各パネルの非順応状態の評価値の回帰式により決定した C_{th0} を用いて連続曝露時の初期評価値から k_c を算出し、α, β を最小二乗法によって決定した。全パネルで時間に伴う臭気強度の低下が見られ、順応が確認できる。パネル D, F は曝露開始 5 分後から評価値が大きく変動している。これは、パネルが濃度変化を予想して評価したためと推測される。また、パネル E は曝露開始直後の変化が小さくモデルで再現できていないが、他のパネルは指数的に減少した後一定になり、モデル値とよく一致している。

(2) 線分長尺度を用いた臭気強度評価

Fig. 8 に線分長尺度による非順応状態での曝露濃度と評価値の関係、及び連続曝露時の評価値の経時変化とモデルの適用結果を示す。パネル D を除く全パネルで概ね指数的に評価値が減少し、順応が確認できる。線分長尺度の場合でも、経時変化がなだらかなものと上下変動するものが見られるが、**Fig. 7** と比較すると異なる手法でも個人の評価傾向は概ね変わらないことがわかる。パネル D は曝露開始 5 分以降に大きく評価値が上昇した。

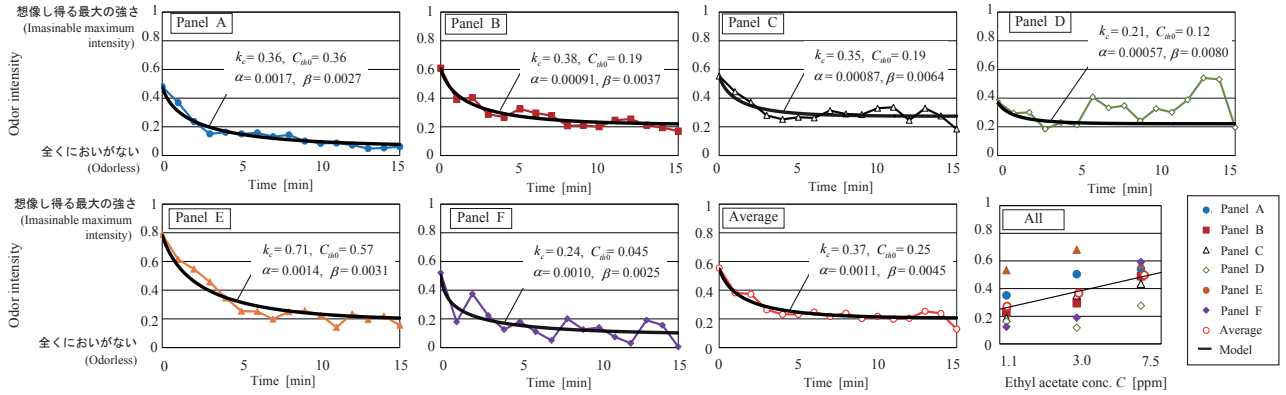
(3) 音の高さ CMM を用いた臭気強度評価

Fig. 9 に音の高さ CMM による非順応状態での曝露濃度と評価値の関係、及び連続曝露時の評価値の経時変化とモデルの適用結果を示す。なお、前報 [2)] と同様に、パネルの評価した周波数 $f_{(t)}$ [Hz] をモジュラス周波数 f_m [Hz] とパネルの最小可聴周波数 f_l [Hz] で規準化した値を評価値 $E_{(t)}$ とした。規準化に用いた式を (Eq.4) に示す。



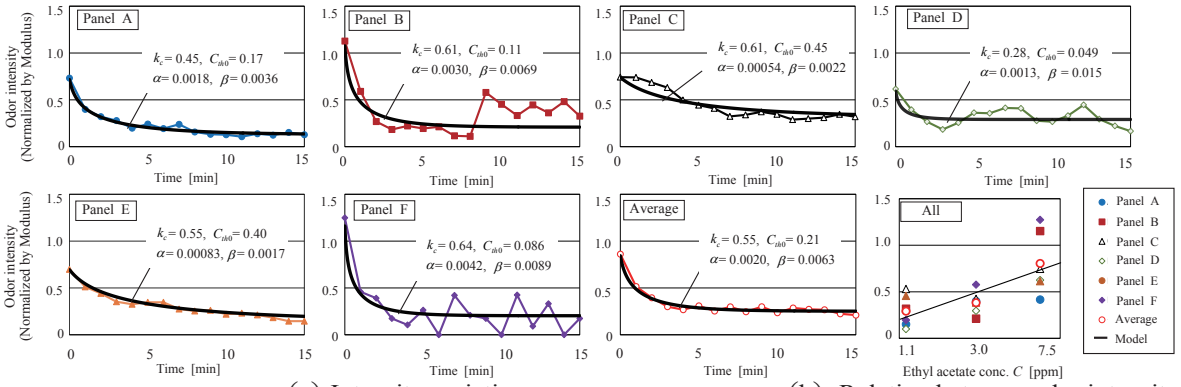
(a) Intensity variation　　(b) Relation between odor intensity and ethyl acetate concentration

Fig. 7 Intensity variation and relation between odor intensity and ethyl acetate concentration (Language rating scale)



(a) Intensity variation　　(b) Relation between odor intensity and ethyl acetate concentration

Fig. 8 Intensity variation and relation between odor intensity and ethyl acetate concentration(Line length scale)



(a) Intensity variation　　(b) Relation between odor intensity and ethyl acetate concentration

Fig. 9 Intensity variation and relation between odor intensity and ethyl acetate concentration(CMM of Sound pitch)

$$E_{(t)} = \frac{\log_{10} f_{(t)} - \log_{10} f_l}{\log_{10} f_m - \log_{10} f_l} \qquad \text{(Eq.4)}$$

他の手法と同じく経時変化がなだらかなものと上下変動するものとが存在するが、全パネルで指数的に評価値が減少しており、順応が確認できる。しかし、パネル B は曝露開始 8 分後から急激に評価値が上昇している。これはモジュラスを記憶し続けることが難しく、パネル内で評価基準が変化したためと推測する。初期評価値が 1 から離れるパネルが多いことからも、モジュラスの記憶に問題があると考えられる。

(4) 各評価手法の特性の検討

Fig. 7 ～ **Fig. 9** に示す実験結果から、各手法の評価特性について検討する。どの手法でも順応が表現されているが、推移のなだらかなパネルと上下変動するパネルが存在し、その傾向はパネル内で概ね不変である。このような評価傾向の個人差は、既報 [1)2)] でも確認されている。また、パネル B は言語評定尺度、線分長尺度ではなだらかであるのに対し音の高さ CMM では曝露途中で大きく変動する。またパネル D はどの手法でも変動が大きいが、線分長尺度では特に大きく評価値が著しく上昇しており、思い込みなど心理的要因が影響している可能性がある。

手法間を比較すると、言語評定尺度と線分長尺度は評価法が類似している。しかし、非順応状態や連続曝露の初期評価値は評価の目安となる言語ラベルがないために線分長尺度の方がパネル間の差が大きいのに対し、連続曝露時の評価値の変化量を見ると、パネル D を除いて線分長尺度の方がパネル間のばらつきが小さく、既報 [1)] と同様の結果が見て取れる。線分長尺度では初期評価値を各人の基準として言語ラベルに左右されずに臭気強度の変化を表現できることが分かる。音の高さ CMM では、前報 [2)] と同じくモジュラスを正しく記憶することが困難であるという特徴が見られ、評価値のばらつきを抑えることが難しい。しかし、パネル平均値の挙動を比較すると、いずれの手法も類似してなだらかに指数的に減少しており、嗅覚応答モデルとよく一致している。

3. 連続曝露と間欠曝露による順応・回復実験

3.1 実験概要

実験は 2017 年 1 月 27 日～2017 年 1 月 31 日にかけて大阪大学内の実験室にて実施した。パネルは前述の 6 名のうちの 5 名(男子 2 名、女子 3 名) であり、試料臭気、臭気の提示方法は 2 節の実験と同じである。評価方法は言語評定尺度とし、**Fig. 3** に示す評価用紙を用いた。

実験のタイムスケジュールを **Fig. 10** に示す。インストラクションの後、2 節の実験と同様にして非順応状態における評価を行った。次に嗅覚を回復させるため無臭空気を 5 分間曝露した後、7.5 ppm の酢酸エチルを 12 分間連続曝露し、1 分毎に評価を行った。その後無臭空気を曝露しながら 1 分毎に 7.5ppm の酢酸エチルを 10 秒間曝露し、その臭気強度を評価させた。

3. 2 結果と考察

Fig. 11 に非順応状態における曝露濃度と評価値の関係、及び連続曝露における評価値の経時変化とモデルの適用結果を示す。パネル D を除く全パネルで臭気曝露による順応と無臭空気曝露による回復が見られた。いずれも順応には 8 分程度要するのに対して、回復過程では 1 分程度で急激に臭気強度が上昇している。また、嗅覚が完全に回復すれば評価値は初期値と同程度になるはずであるが、そのようなパネルは見られない。これは、回復過程にも瞬間的に繰り返し臭気に曝露されており、その度にわずかに順応を繰り返しているためと考えられる。明らかな順応が見られないパネル D も、無臭空気曝露開始後に評価値の上昇が見られ、評価値に大きくは現れなかったものの順応しており、回復過程で臭気強度が強くなって初めて評価値に影響したと思われる。実験値とモデル値を比較すると、順応過程では概ね一致するが、回復過程では急速に上昇する実験値とモデル値が全く一致しない。従って、この嗅覚応答モデルは順応過程では有効だが、回復過程では実際の嗅覚応答を再現できないことがわかる。また、順応に比べて非常に短時間で回復することから、回復過程では応答係数が順応過程と異なる可能性がある。

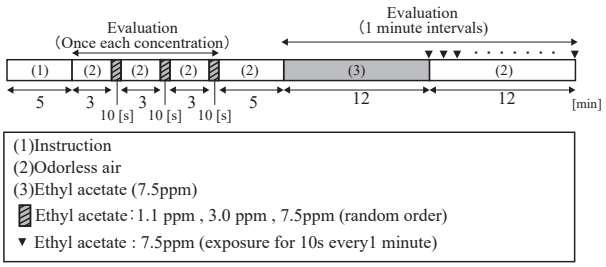


Fig. 10 Time schedule (Experiment on adaptation and recovery)

おわりに

本報では、3 つの手法を用いた臭気強度評価における手法間比較を行うとともに、順応・回復実験から嗅覚応答特性とモデルの有効性について検討した。今後は CMM を用いた実験を回復過程にも実施し、回復現象の解明とモデルの改良を目指していく所存である。なお、本研究は大阪大学工学研究科倫理委員会の承認を得ている。また、本研究は JSPS 科研費 JP15K14076 の助成を受けたものである。

備考

実験後に各濃度に調整した臭気を分析した結果、実際の濃度は設定値の約半分であった。分析結果を **Table.1** に示す。この原因は現在検討中である。また、本報の実験で使用した臭気提示装置は既報 [1)2)] で使用したものを新調し、ステンレス製で吹出口が 3 つになったため装置の固有臭が増加した可能性があるが、7.5ppm(3.6ppm) の臭気に対しては微弱であり、評価へはほとんど影響しないと考える。

Setting conc.[ppm]	1.1	3.0	7.5
Measured conc.[ppm]	0.36	1.4	3.6

※ Analysis by Kaneka Techno Research Corporation

Table. 1 Result of concentration analysis of ethyl acetate

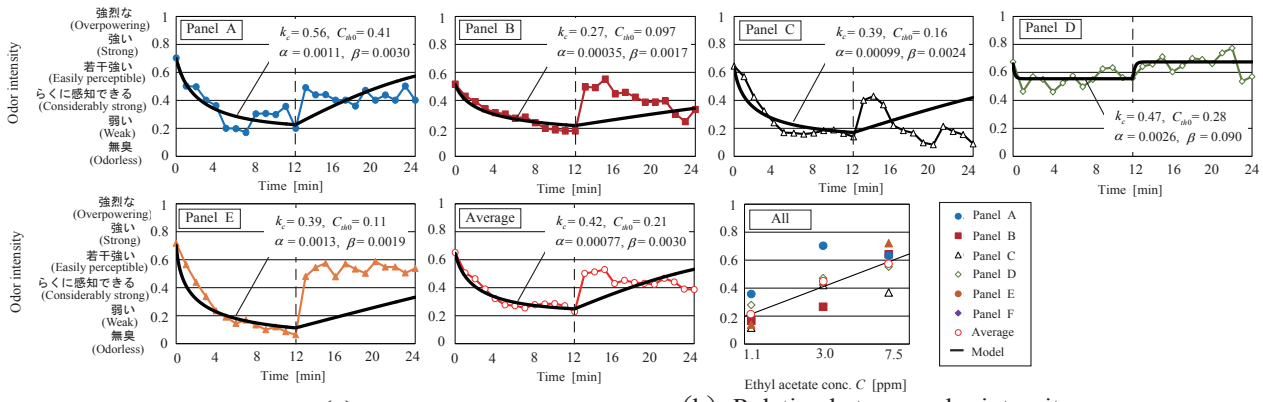
参 考 文 献

1) 竹内慎 , 山中俊夫 , 竹村明久 , 甲谷寿史 , 桃井良尚 , 相良和伸 : 嗅覚の非定常応答に関する基礎的研究 (その 16) 言語評定尺度・線分長尺度・ME 法による臭気強度評価 , 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 , A-90, 2016. 3

2) 高橋亮太 , 山中俊夫 , 竹村明久 , 甲谷寿史 , 桃井良尚 , 相良和伸 : 嗅覚の非定常応答に関する基礎的研究 (その 17) 音を用いたクロスモダリティマッチングによる臭気強度評価 , 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 ,A-91, 2016. 3

3)Ulf Berglund: Dynamic Properties Of The Olfactory System, Annals of the New York Academy of Sciences,Volume 237, pp.17-27, 1974.9

4) 山中俊夫 , 竹村明久 , 甲谷寿史 , 桃井良尚 , 相良和伸 , 永井雄喜 : 嗅覚閾値の非定常応答に基づく嗅覚順応モデル , 日本建築学会環境系論文集 , 第 79 巻 , 第 702 号 ,pp.655-662, 2014. 8



(a) Intensity variation

(b) Relation between odor intensity and ethyl acetate concentration

Fig. 11 Intensity variation and relation between odor intensity and ethyl acetate concentration(Language rating scale)