

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656336

研究課題名(和文) 嗅覚順応に基づく動的換気量制御による省エネルギー手法の開発

研究課題名(英文) Development of energy saving method using dynamic controlling of ventilation rate based on olfactory adaptation

研究代表者

山中 俊夫 (Yamanaka, Toshio)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80182575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、嗅覚順応を考慮して換気量を動的に変動させる省エネルギー手法確立のために、嗅覚の順応モデルの構築と臭気濃度の時間変化に対応する臭気強度の動的計算方法の開発を行った。官能試験の結果を基にして、においに対する順応過程においても、ウェーバー・フェヒナーの法則によって臭気強度が決まり、臭気の濃度の単位刺激に対する嗅覚閾値の増加量が応答関数で表現できるという仮説の上に嗅覚の順応モデルを開発した。さらに、この嗅覚順応モデルを用いて、臭気の濃度変動に対して臭気強度変動を計算によって求める手法を提示した。本研究により、人がにおいを感知しない最低限の換気量を制御することができる様になったものと言える。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to establish an energy saving method to control the ventilation rate dynamically based on the olfactory adaptation and to develop the calculation method of odor intensity variation under changing odor concentration. Using the sensation data obtained from olfactory test on odor intensity, two simple assumptions were introduced. The first assumption is that instantaneous odor intensity is determined by Weber-Fechner law even in transient process of olfactory adaptation, and the second one is that the increase of threshold is calculated by impulse response linearly. Based on these assumptions, olfactory adaptation model was developed. By means of this model, varying ventilation rate can be calculated. As a research results, it is made possible to control the ventilation rate at the minimum amount to prevent the occupants from feeling the odor inside the room.

研究分野：建築環境工学

キーワード：におい 臭気強度 嗅覚順応 モデル 嗅覚閾値 必要換気量 省エネルギー

1. 研究開始当初の背景

従来、建物室内の必要換気量は、人が発生する炭酸ガス濃度で規定されており、日本では建築基準法及び建築物衛生法においても、CO<sub>2</sub>濃度 1000ppm で決められている。この基準濃度は、CO<sub>2</sub>の毒性に基づくものではなく、人体から発生する生理的な汚染物質、即ち体臭の濃度を、外来者が微弱と感じる程度以下に保つための最低限の導入外気量の観点で決められている。ここで外来者としている理由は、室に長時間在室する在室者の場合には、すぐに嗅覚順応によってそのにおいを感じなくなってしまうからである。体臭の場合、においを感じなくなってしまうことで、室内空気質の悪化を検知できなくなるわけであり、在室者の知覚を頼りにしている限り、良好な室内空気質は維持できないため、この様に外来者の評価に基づくことは妥当であり、望ましいものと言える。

しかしもし仮に、順応時において、体臭とCO<sub>2</sub>濃度が在室者の健康や快適感に及ぼす影響が明らかになり、その健康影響が 1000ppm を越える状況下で定量的に明確にされている場合、一時的に CO<sub>2</sub>濃度が 1000ppm を越えたとしても、在室者が体臭を知覚しない状況であれば、問題はないものとも言える。ただし、室内にある重大な空気汚染質の発生源が人体以外に存在しないということが条件とはなるが、この様に在室者の嗅覚順応を考慮することで、必要換気量(外気導入量)は削減することが可能であり、場合によっては大幅な省エネルギーが可能となる。このことは、人体に健康影響のない様々なにおい、例えば天然木のにおいや様々な香料のにおいなどについても当てはめて考えることができ、在室者がにおいを過度に強く感じない程度に動的に制御することは、快適性と省エネルギーを両立させる意味でも非常に有効であると言える。

ところで、嗅覚順応を定量的に取り扱うための順応モデルは、種々提案されているが、換気・空調分野での研究として、国内では大迫らの研究が第一に挙げることができる。大迫らは、嗅上皮での嗅覚細胞と臭気物質との結合反応式に基づいて、嗅細胞の結合速度と嗅覚が対応するというモデルを提案している。しかしながら、その計算過程は複雑で、反応における様々な定数が未知であり、実用的なものとはなっていない。一方、国外の研究として代表的なものとして、Berglund の研究が挙げられる。この研究では、順応過程と回復過程に同様の実験を行い、その指数関数を同定している点で、本研究の先行研究と言える。ただ、単位応答という考え方には至っておらず、建築内空間での応用性に関しては、検討が不十分である。

そこで、本研究では、これらの過去の研究では実現できていない、工学的に活用可能な実用的な嗅覚順応モデルの構築を目指すこととした。

2. 研究の目的

本研究では、臭気源物質の濃度の変動による閾値変動に基づく実用的な嗅覚反応モデルの構築を目的とし、酢酸エチルを対象臭気として、嗅覚の順応過程における臭気強度の時間変化について検討するとともに、その実験結果を基にして、インパルス応答に基づく閾値上昇モデルの応答関数のパラメータを回帰分析により同定し、モデルの予測精度に関する考察を行った上で、酢酸エチルを連続曝露させた際の臭気強度変化を嗅覚反応モデルにより試算し、在室者が継続的に臭気に曝露された場合の臭気強度や、臭気の充満する室に出入りする場合、換気によってこもった臭気を希釈低減させる場合などの臭気強度変化などについて知見を得ることを目的とする。さらに、そのモデルを、体臭に対して適用して、その汎用性について検討を行うとともに、個人の順応特性の差異についても、考察を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

研究の方法としては、まず、酢酸エチルを複数のパネル(被験者)に嗅がせ、順応するとともににおいを感じなくなる過程における臭気強度減衰過程を明らかにした。実験方法としては、図1に示す様に、ガスボンベから酢酸エチルを発生させ、活性炭で濾過した新鮮空気と混合させることで、酢酸エチルの濃度 1.3ppm、4.0ppm、10.7ppm を作成し、ダクトを通してパネルの鼻と口の部分に当てることで、パネルに臭気を曝露した。三点比較式臭袋法での酢酸エチルの閾値は 0.3ppm とされることから、閾濃度に対する倍率で表現した臭気濃度は、4.3、13.3、35.7 となる。

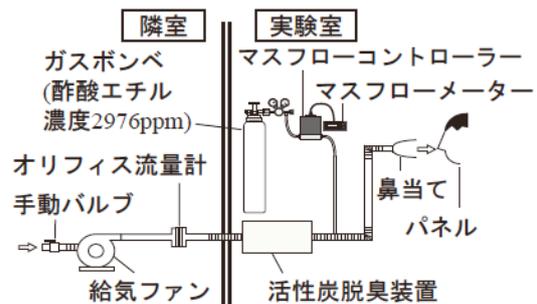


図1 臭気提示装置

この臭気を嗅いでいる間の臭気強度を図2に示す連続カテゴリー尺度で30秒ごとにパネルに申告させた。

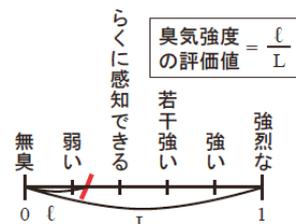


図2 臭気提示装置

パネルは 20~23 歳の本学学生 13 名(男子)

7名、女子6名)とした。実験のタイムスケジュールは図3の通りであり、曝露濃度はステップ状に変化させた。濃度の提示条件を表1に示す。

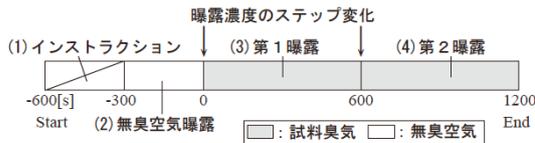


図3 実験のタイムスケジュール  
表1 濃度の提示条件

番号	第1曝露濃度	第2曝露濃度
No.1	1.5 ppm → 4.0 ppm	
No.2	1.5 ppm → 10.7 ppm	
No.3	4.0 ppm → 1.5 ppm	
No.4	4.0 ppm → 10.7 ppm	
No.5	10.7 ppm → 1.5 ppm	
No.6	10.7 ppm → 4.0 ppm	

なお、このような臭気提示条件での実験とは別に、体臭を対象とした実験などについても行った。詳しくは、学会発表の論文梗概をご覧ください。

このような実験によって得られた臭気強度の時間変化データを基に、指数関数を用いた応答関数のパラメータを最小二乗法によって同定し、応答関数を畳み込み積分することで臭気強度の変化を予測計算する手法を開発した。さらに、その予測精度について検討をした上で、臭気の濃度が変化した場合の臭気強度の変化の予測、及び、体臭などの他の臭気への適用性、パネルの個人差などについて、検討を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 順応過程における臭気強度の減衰過程

図4は、提示条件 No.2 (0→1.5ppm→10.7ppm) での13名全員の臭気強度の変化とその平均値(◇プロット)を示したものである。曝露開始とともに、臭気強度が指数的に減衰することがわかるが、パネルのばらつきは比較的大きいと言える。10分後に濃度が変化すると、再度臭気強度が上昇し、その後また減衰することがわかる。この様に、順応の過程はパネルによる個人差が大きいものではあるが、本研究では、工学的な実用性を重視し、各パネルの算術平均値を計算によって精度良く求めるための順応モデルの開発を目指すことにした。

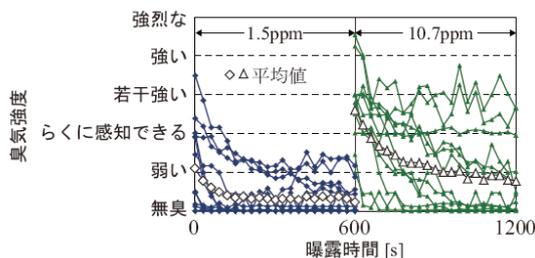


図4 提示条件 No.2における各パネルの臭気強度変化

図5は、臭気を曝露してから10分間の第一曝露時の全パネルの臭気強度を算術平均し、その減衰を示したものである。プロットは、表の6種類である。この図より、濃度が高いほど、初期(t=0)での臭気強度が高いが、いずれの濃度でも時間経過とともに減衰し、10分後にはかなり臭気強度が小さくなることわかる。

番号	第一曝露	第二曝露
1	◆ 1.5 ppm	4.0 ppm
2	◇ 1.5 ppm	10.7 ppm
3	□ 4.0 ppm	1.5 ppm
4	■ 4.0 ppm	10.7 ppm
5	▲ 10.7 ppm	1.5 ppm
6	△ 10.7 ppm	4.0 ppm

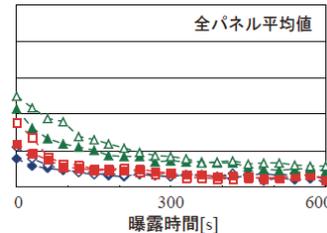


図5 第1曝露時間における各パネルの臭気強度

##### (2) 嗅覚順応モデルの誘導

本モデルは、二つの仮定に基づく。まず一つ目は、以下の通り、Weber-Fechner 則を仮定し、順応過程での臭気強度は、そのときの順応濃度と曝露されている濃度との比の対数で表すものとする。つまり、順応過程において、非順応状態での嗅覚閾値が  $C_{th0}$ 、閾値上昇量が  $\Delta C_{th(t)}$  であるとき、時刻  $t$  における臭気強度  $I_{(t)}$  は、次式のように書ける。

$$I_{(t)} = k_c \log_{10} \frac{C_{(t)}}{C_{th0} + \Delta C_{th(t)}} \dots (1)$$

( $k_c$ : 比例定数、 $C_{(t)}$ : 時刻  $t$  での曝露濃度)

(1)式を用いて、本研究で得られた臭気強度データから、(1)式中の係数、 $k_c$  と  $C_{th}$  を同定すると、 $k_c=0.321$ 、 $C_{th}=0.411$  [ppm] を得ることができた。

ここで、図5に示す単位インパルスに対する閾値濃度の上昇量  $\Delta C_{th(t)}$  の時間変化を指数関数で近似し、最小二乗法によってその定数の同定を行った。この単位インパルス関数を用いると、任意の時刻の  $\Delta C_{th(t)}$  は(2)式で求めることができる。

$$\Delta C_{th(t)} = \int_0^{\infty} C_{(t-\tau)} C_{th}^* d\tau \dots (2)$$

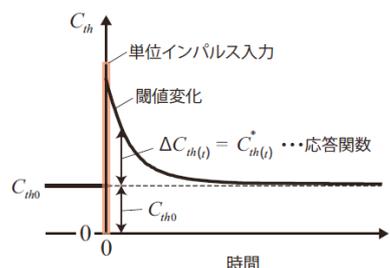


図5 単位インパルスに対する嗅覚閾値変化モデル

ここで、応答関数は次式の様な指数関数を仮定した。

$$C_{m(t)}^* = \alpha \cdot e^{-\beta t} \dots (3)$$

ここで  $\alpha$  と  $\beta$  は定数である。

(2)式と(3)式から、任意の時刻の臭気強度は(4)式で求めることができる。

$$I_{(t)} = k_c \log_{10} \frac{C_{(t)}}{C_{m0} + \int_0^{\infty} C_{(t-\tau)} \cdot \alpha \cdot e^{-\beta \tau} d\tau} \dots (4)$$

この応答関数が嗅覚の順応過程、同回復過程において一意に定まるためには、濃度刺激と閾値上昇との間に線形関係が成り立たなければならないことは言うまでもない。複雑な嗅覚反応において、生理学的アプローチから両者の線形性が保証されている訳ではないが、嗅覚の生理的メカニズムと心理反応の構造を一体としてブラックボックス的に扱う上で、この線形性の仮定はこれまでの実験データから導かれる最も単純かつ有効なものと考えられた。故に、本研究では、工学的有用性を重視し、この仮定を行うことにした。

測定データを用いた最小二乗法により(3)式のパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  の同定を行った。同定の結果、 $\alpha = 2.03 \times 10^{-3}$  [1/s]、 $\beta = 5.38 \times 10^{-3}$  [1/s] を得た。この値を用いた場合の決定係数は0.885であり、臭気強度の測定値と予測値の相関は図6の通りである。この手法による予測精度はかなり良いと言える。

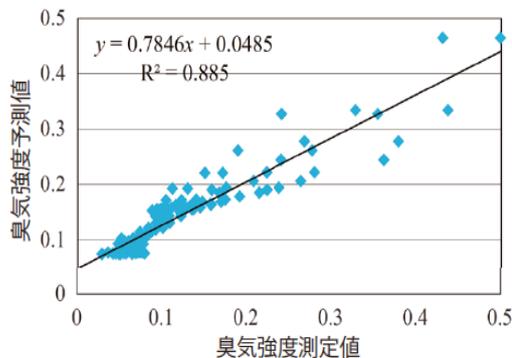


図6 第1曝露での臭気強度測定値と予測値との相関

実際の臭気強度の測定値と、酢酸エチル濃度から計算した臭気強度との比較例を図7に示す。図より、モデル計算値は、特に第1曝露の評価値と精度よく一致していることがわかる。これは、 $\alpha$ 、 $\beta$  の回帰係数が第1曝露での実験データを用いて同定された値であるためと考えられる。第2曝露では、10.7ppmの2条件において評価値よりもモデル値が小さく算出された。この理由は明らかではないが、本嗅覚順応モデルにより、臭気強度変化は概ね再現できると考え、様々な曝露濃度変化時における嗅覚反応においても、本モデルは適用し得ると考えられる。

次項ではこの順応モデルを用いて、酢酸エチル濃度が様々な変化をする場合の臭気強度の時間変化を予測計算を行うこととする。

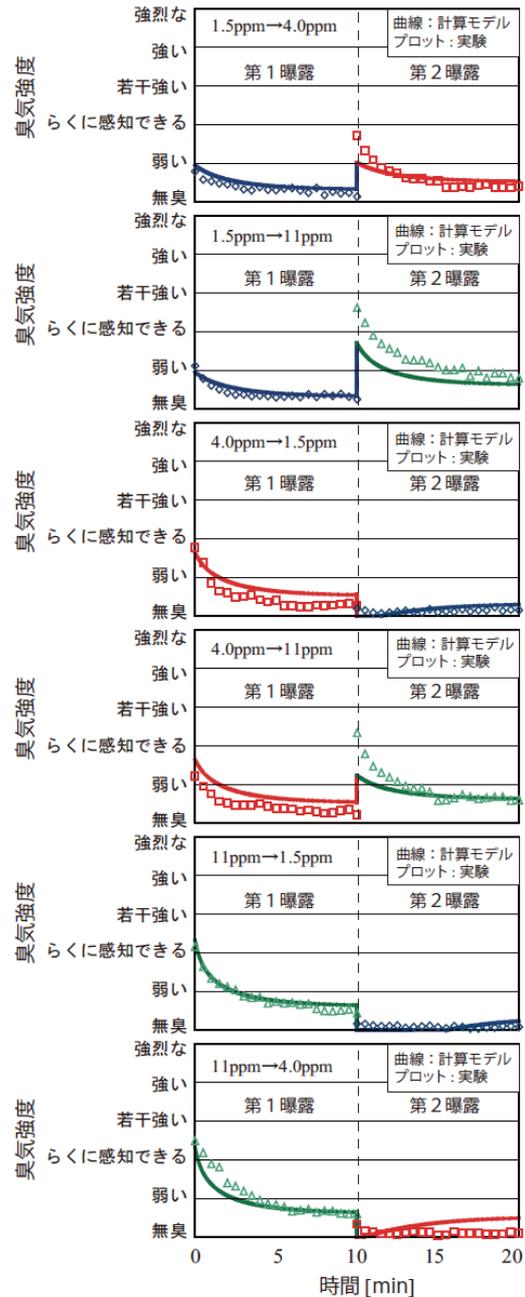


図7 ステップ濃度変化時の臭気強度の時間変化 (測定値と計算モデルによる予測値の比較)

### (3) 臭気強度の非定常変動の試算例

本研究では、最終的には、臭気の濃度に応じて、換気量を時間的に変動させる手法を開発することを目指している。故に、少なくとも、臭気の濃度変化に応じた臭気強度の変化が計算できなければならない。本研究では、様々なケースを対象として、臭気強度の試算を行ったが、図8は、酢酸エチルの濃度がステップ状にON-OFFを繰り返す場合の臭気強度の変化を試算した例である。

完全に順応する前に、濃度が0となるために、嗅覚の回復現象が生じ、閾値が周期的に変動し、それに伴い、臭気強度が大きく変化している様子がわかる。

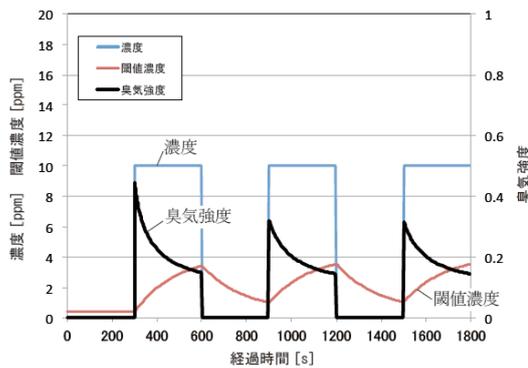


図8 濃度変化時の酢酸エチル濃度・閾値濃度・臭気強度の時間変化

臭気を感じない様に、換気量をコントロールし、閾濃度を曝露濃度以上に保つことができれば、においを感じない理想的な換気量制御が可能となる。本研究で、確立した順応モデルを用いれば、室の濃度と換気量との関係より、換気量を制御することは可能であると考えられ、本研究は、その様な省エネルギー性に優れた換気方式の確立に道を開いたものと考えている。

(4) 曝露濃度と完全順応時臭気強度との関係  
本研究で構築した順応モデルを用いれば、十分な時間が経過し、嗅覚が完全に順応したときの臭気強度を求めることができる。

(4)式において、 $t \rightarrow \infty$ とすると、(5)式が得られ、これをグラフにすると図9の様になる。この図より、高濃度になると完全順応時の臭気強度はある一定の値に漸近する様子がわかる。

$$I_{(\infty)} = k_c \log_{10} \frac{C_{(\infty)}}{C_{th0} + \frac{\alpha}{\beta} C_{(\infty)}} \dots (5)$$

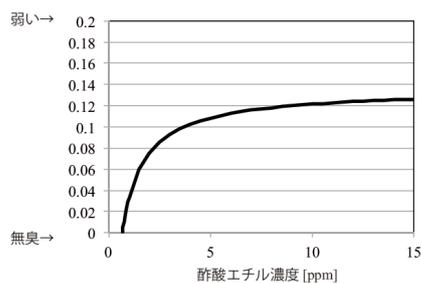


図9 完全順応状態における酢酸エチル濃度と臭気強度との関係

今後は、様々な臭気を対象として、パラメータ同定の必要があると言える。

(5)その他

本研究では、上記の他にも体臭を曝露した場合の順応過程や、パネルの個人差についても検討を行っている。紙面の都合で、内容は割愛させて頂くが、学会発表の梗概などをご参照頂ければ幸いです。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 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、査読有、Vo1. 79、No. 702、2014、pp. 655-662

[学会発表] (計23件)

- ① 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14)クロスモダリティ・マッチングを用いた臭気強度評価手法の検討、平成26年度(第44回)空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、2015、pp. 81-84
- ② 山田響子、山中俊夫、竹村明久、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、池田馨、在室者から発生する汚染質の評価手法に関する研究(その1)入室法による臭気の主観評価と在室者評価、平成26年度(第44回)空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、2015、pp. 85-88
- ③ 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(第44回)空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、2015、pp. 89-92
- ④ 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、2014、pp. 29-32
- ⑤ 高橋亮太、山中俊夫、竹村明久、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、山田響子、嗅覚の非定常応答に関する基礎的研究(その13)個人の順応特性に対する嗅覚反応モデルの適用、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、2014、pp. 33-36
- ⑥ 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、主観評価を用いた嗅覚の順応過程に関する基礎的研究(その15)体臭の臭気成分と各パネルの評価特性、日本建築学会2014年度大会学術講演梗概集、2014、pp. 977-978
- ⑦ 高橋亮太、山中俊夫、竹村明久、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、山田響子、主観評価を用いた嗅覚の順応過程に関する基礎的研究(その16)回復・再順応過程における嗅覚反応モデルの適用性の検討、日本建築学会2014年度大会学術講演梗概集、2014、pp. 979-980
- ⑧ 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、主観評価を用いた嗅覚の順応過程に関する基礎的研究

(その13) 評価の個人差に関する検討、日本建築学会近畿支部研究報告集、第54号、環境系、2014、pp.301-304

⑨高橋亮太、山中俊夫、竹村明久、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、山田響子、嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究(その14) 嗅覚の回復及び再順応特性、日本建築学会近畿支部研究報告集、第54号、環境系、2014、pp.305-308

⑩山田響子、山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、永井雄喜、高橋亮太、嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究(その9) 各パネルの評価特性に関する検討、平成25年度(第43回)空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、2014、pp.217-220

⑪高橋亮太、山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、永井雄喜、山田響子、嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究(その10) 回復・再順応過程における臭気強度の時間変化特性、平成25年度(第43回)空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、2014、pp.221-224

⑫永井雄喜、山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、高橋亮太、山田響子、嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究(その11) 回復・再順応過程への嗅覚反応モデルの適用性、平成25年度(第43回)空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、2014、pp.225-228

⑬永井雄喜、山中俊夫、竹村明久、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、山田響子、嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究(その7) 嗅覚反応モデルを用いた臭気強度予測に関する検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、第7巻、2013、pp.97-100

⑭山田響子、山中俊夫、竹村明久、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、永井雄喜、嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究(その8) 体臭連続曝露時における嗅覚の順応特性、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、第7巻、2013、pp.101-104

⑮山田響子、山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、永井雄喜、主観評価を用いた嗅覚の順応過程に関する基礎的研究(その12) 体臭強度の時間変化特性に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013、pp.793-794

⑯永井雄喜、山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、山田響子、主観評価を用いた嗅覚の順応過程に関する基礎的研究(その11) 順応過程における臭気強度の時間変化特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013、pp.795-796

⑰山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、永井雄喜、山田響子、応答係数に基づく嗅覚反応モデルを用いた換気量制御手法、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013、pp.821-824

⑱永井雄喜、山中俊夫、竹村明久、甲谷寿史、

桃井良尚、相良和伸、山田響子、嗅覚の順応特性に関する基礎的研究(その1) 酢酸エチル濃度のステップ変化時における臭気強度変化、におい・かおり環境学会講演要旨集、Vol.26、2013、pp.56-59

⑲山中俊夫、竹村明久、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、永井雄喜、山田響子、嗅覚の順応特性に関する基礎的研究(その2) インパルス応答関数を用いた嗅覚閾値と臭気強度変化の予測手法、におい・かおり環境学会講演要旨集、Vol.26、2013、pp.60-63

⑳山田響子、山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、永井雄喜、主観評価を用いた嗅覚の順応過程に関する基礎的研究(その9) 体臭曝露時における臭気強度の経時変化、日本建築学会近畿支部研究報告集、第53号、環境系、2013、pp.333-336

㉑永井雄喜、山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、山田響子、主観評価を用いた嗅覚の順応過程に関する基礎的研究(その10) 嗅覚反応モデルの提案とその適用性に関する検討、日本建築学会近畿支部研究報告集、第53号、環境系、2013、pp.337-340

㉒山田響子、山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、永井雄喜、嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究(その5) 連続カテゴリ一尺度を用いた主観評価に基づく体臭強度の経時変化、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、2013、pp.205-208

㉓永井雄喜、山中俊夫、竹村明久、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、山田響子、嗅覚の非正常応答に関する基礎的研究(その6) 体臭強度変化に対する嗅覚反応モデルの適用性、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、2013、pp.209-212

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山中 俊夫 (YAMANAKA, Toshio)

研究者番号：80182575

### (2) 研究分担者

竹村 明久 (TAKEMURA, Akihisa)

研究者番号：70584689

### (3) 連携研究者

桃井 良尚 (MOMOI, Yoshihisa)

研究者番号：40506870