

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25289195

研究課題名(和文) 皮膚・粘膜における水分蒸発モデルと乾燥感予測式の開発

研究課題名(英文) Modeling of moisture evaporation from skin and mucous membrane and prediction of dryness sensation

研究代表者

高田 暁 (Satoru, Takada)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20301244

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：室内の温熱環境条件から乾燥感を予測する体系を構築することを目標として、皮膚、眼球、気道での水分蒸発モデル、周辺組織における局所伝熱モデルを開発し、温湿度・風速条件に応じた皮膚、眼球、気道の生理反応、乾燥に関する心理反応を被験者実験により明らかにした。開発したモデルにより被験者実験で得られた皮膚・粘膜の蒸発面温度の挙動、水分状態を概ね再現可能であること、乾燥に関する心理反応は極度の低湿度条件に対しても弱いものであることが被験者実験より示された。以上より、当初想定していた乾燥感よりも、皮膚、粘膜の水分状態に関する生理量を用いた室内温熱環境の評価の枠組みを構築することが有効であることが示された。

研究成果の概要(英文)：In order to make a framework to predict dryness sensation from conditions of indoor thermal environments, models to predict heat and moisture transfer in and around skin, eye and airway were developed, and subject experiments were conducted to measure physiological and psychological responses of human to thermal environmental conditions inducing dryness of skin and mucous membranes. As the results, the surface temperature and moisture state of skin, eyes and airway calculated by the developed models agreed fairly well with the measured results obtained in the subject experiments. On the other hand, the psychological responses to an extremely low humidity conditions were not distinct. Therefore it was shown that the framework to evaluate the indoor thermal environments without dryness sensation should be based not on sensation of dryness, which was firstly assumed, but on the physiological variables of moisture state of skin and mucous membranes.

研究分野：建築環境工学

キーワード：乾燥 皮膚 粘膜 蒸発 水分 モデル 室内環境 被験者

1. 研究開始当初の背景

低湿度の環境では、皮膚や粘膜が乾燥してよくないという認識が漠然と存在しており、冬期の室内では加湿が行われるが、結露やエネルギー消費の観点からは、加湿量は必要最小限とするべきである。一方で、具体的にどの程度の湿度を保つべきかが明らかになっていない。湿度を直接的に感知する器官が人体には存在しないと言われており、「乾燥感」の生起メカニズムが不明であること、皮膚、眼球表面、鼻・喉の粘膜等の含水率低下は健康の観点からどのレベルまで許容されるのか明らかでないことがその原因である。保つべき湿度条件、形成するべき温熱環境条件を明らかにすることが、建築環境設計および制御の立場からは重要となる。

2. 研究の目的

我々は既に、皮膚・粘膜における水分蒸発量を予測するモデル(図1)を提案しているが、モデルに現れるパラメーター(例えば、皮膚の湿気伝導率・平衡含水率曲線、涙の油層湿気移動抵抗、気道内熱・湿気伝達面積および伝達率の分布)を適切に決定すること、また、蒸発面の温度予測を十分な精度で行うことが課題として残されている。被験者実験により、これらのモデル同定を行うことが必要である。また、被験者実験を通して、皮膚・眼球・咽頭での水分蒸発量と乾燥感の関係が数量的に明らかになれば、温熱環境条件から乾燥感を部位ごとに予測する体系が構築可能であろう(図2)。本研究では、その前段として、乾燥に関連した生理・心理反応特性を個体差を含めて明らかにし、乾燥感予測の実用的展開への道筋を明らかにすることを目的とする。

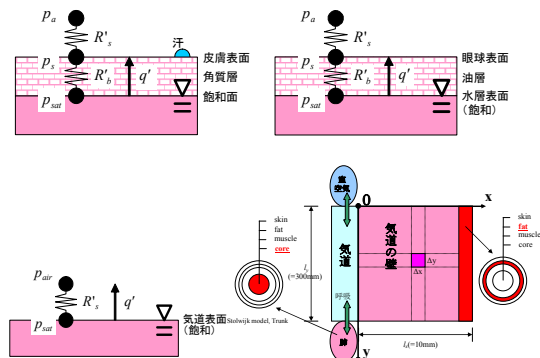


図1 皮膚・眼球・気道での水分蒸発モデルの概念図(上:皮膚と眼球、下:気道のモデル): 表面温度に応じる飽和水蒸気圧 (p_{sat}) を飽和面と与え、周辺の水蒸気圧 (p_a , p_{air}) や湿気抵抗 (R') を与えると、水分蒸発量 (q') が求まるというモデル。表面温度を的確に与えることで、蒸発量の計算精度が上がる。気道に関しては、吸入空気の時湿度と呼吸のリズムを与えて、気道内の湿度分布を解くモデルで、気道壁の熱容量を考慮し、気道壁の奥の温度や肺の温度は、人体熱モデル(図中では Stolwijk model) により与え、気道内の湿度分布を求める。

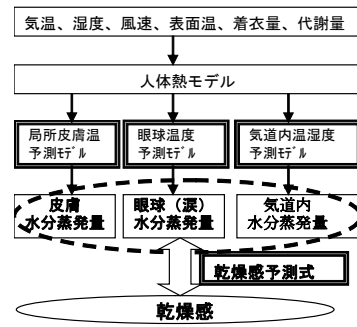


図2 本研究で扱うモデルの概念図

3. 研究の方法

被験者実験を行い、皮膚・眼球・気道周辺の温度や含水率を測定し、乾燥に関する心理反応を採取する。その一方で、皮膚・眼球・気道周辺の熱水分移動に関する数値計算を行い、実験結果との対応を検討する。

- (1) 水分蒸発モデルの検証(気道と眼)
- (2) 被験者実験(眼と皮膚の生理反応)
- (3) 被験者実験(気道での水分蒸発量計算値と乾燥に関する心理反応の関連)
- (4) フィールドでの皮膚含水率の長期測定
- (5) 被験者実験(低湿時の心理反応)

4. 研究成果

- (1) 水分蒸発モデルの検証(気道と眼)

①気道内の温度・湿度分布

気道内熱水分移動モデルによる呼吸時の気道内湿度分布の計算値を、Keck および Seeley らの被験者実験で得られた鼻腔内の湿度と比較し、提案しているモデル(図1:下)の修正を行った。鼻腔内の表面積拡大を考慮した場合、肺での加湿を想定しない場合に、計算値が実測値に近づくことを示した。

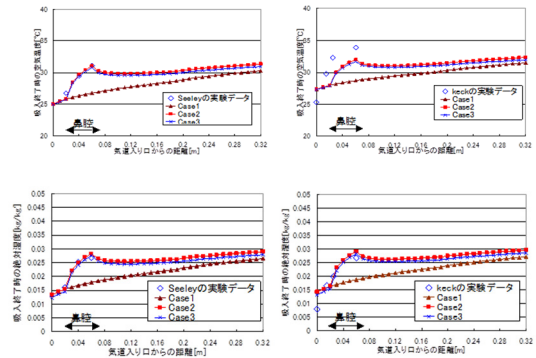


図3 吸入終了時の気道内の温度(上)・絶対湿度(下)分布(計算値)(左: Seeley による 22°C、36%RH 条件の実験値との比較、右: Keck による 25°C、35%RH 条件の実験値との比較)

②眼の表面温度の予測モデル

眼球的熱容量と涙液蒸発を考慮した眼球表面温度の計算モデル(図4)を開発し、6つの湿度条件下で眼球に気流を当てるという被験者実験の結果と比較した。気流発生時に眼球表面温度が低下し、温度回復する一連の過程を一部の条件について再現することができたが、全条件に対して統一的に実測値を再現

するには至らなかった (図 5)。眼球裏側の境界温度を Stolwijk モデルの頭部深部温度として与えた場合、眼球表面温度の計算値が低くなりすぎること、涙液油層の湿気抵抗が、眼球周辺の気流や涙液の状態に応じて変化する可能性を示した。

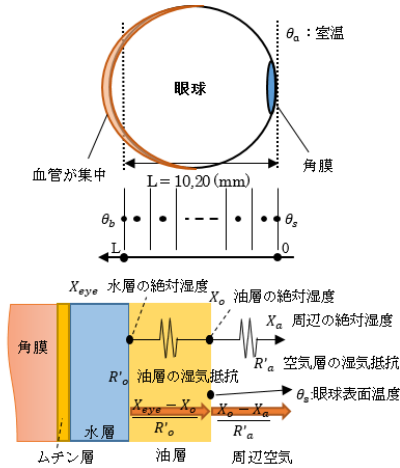


図 4 眼球温度モデルと涙液の蒸発モデル

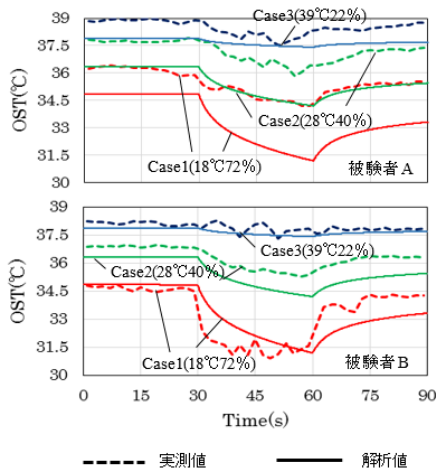


図 5 眼球表面温度 (OST) の実測値と解析値 (30~60 秒: 風速大)

(2) 被験者実験 (眼と皮膚の生理反応)

①瞬きに応じた眼の表面温度変化

2 名の被験者に対して、眼の表面温度を放射温度計により連続測定し、同時にビデオ画像で瞬きの様子を記録するという実験を行った (22.4~22.9°C、37~40%rh、風速約 0.15m/s)。自然な状態、瞬きを行う時間間隔を指定する場合、眼を閉じた場合について実験を行い、開眼中に眼球表面温度が低下すること、瞬きをする時間間隔を自然な状態より長くするように指定した場合、その温度低下は 0.5~1.0°C に達し、上瞼外側表面温度が眼球表面温度より高いこと、したがって、瞬きにより、上瞼と眼球との間で熱交換がなされ、眼球が加温されていることを明らかにした (図 6)。また、自然な状態と比べて長い時間、眼を開ける場合、瞬きの際に眼を閉じる時間を長くなることを見出した。眼の状態の指標として瞬

き回数がよく用いられるが、瞬き時の閉眼時間という別の指標があり得ることを示唆した。

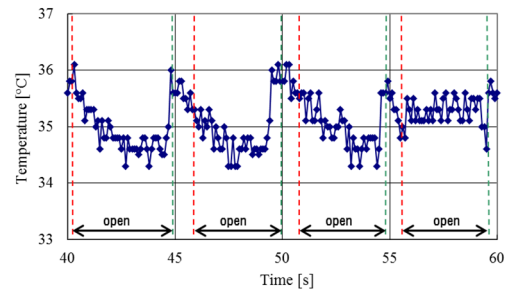


図 6 眼の表面温度 (被験者 A、瞬きを 5 秒ごとと指定した場合、「open」は眼が完全に開いている時間帯: 測定値=眼球表面温度、その他の測定値には瞼の表面温度の影響を含む)

②温湿度、気流速度変化に対する眼球の反応

放射温度計を用いて、2 名の被験者の眼球温度と瞬き回数を 130 分間 (29°C40%rh:20 分→24°C 50%:40 分→28°C 40%:30 分→35°C 20%:40 分) 連続的に測定した (日を変えて 3 回繰り返す)。その結果、図 7 に示すように、同一被験者でも日によって異なる値が得られたが、瞬き回数と眼球表面温度との間には負の相関関係が見られた。また、30 秒間、眼球に 0.5m/s の風を吹きつける実験を同様に 3 回繰り返した。風の吹き付けにより眼球表面温度は一時的に低下する (図 8)。その低下幅は、眼球表面温度が高く瞬き回数が少ない日に小さい傾向にあった。瞬き回数が少ないのは、瞬きを増やさずとも蒸発量が抑えられており、眼の状態が良いことを反映していると考え、この傾向は説明できると思われる。

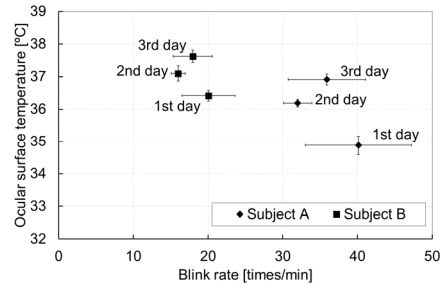


図 7 瞬き回数と眼球表面温度の関係 (24~30°C、90 分間曝露、実験日を変えて 3 回繰り返した結果、被験者 A と B)

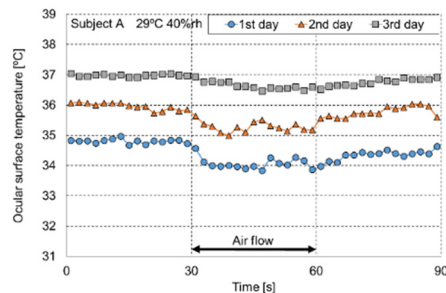


図 8 眼球表面温度 (30 秒間の 0.5m/s の気流吹き付けに対する反応、実験日を変えて 3 回繰り返した結果、被験者 A)

③皮膚（角層内）含水率分布の測定

8人を対象として皮膚含水率分布（前腕、角層内）を測定し（図9）、湿度の変動が分布に与える影響を検討した。70分程度の高・低湿度曝露により、皮膚表面から深さ10 μm の範囲では、湿度の高低に応じて含水率が上下することが確認された（図10：上）。また、湿度変化に応じて角層が膨張・収縮する可能性、その特性に個人差が存在する可能性が示唆された。実験を行った室の湿度は2月（7.8g/kg'）より9月（10.9g/kg'）の方が高かったが、どの被験者も40 μm 以深の皮膚含水率は、ほぼ同じであった。また、表面近傍では9月の方が高い。一方、10 μm 以深では、6人中3人（被験者A, C, E）について、2月の中湿曝露時の皮膚含水率が9月を上回った。絶対湿度の年間変動に応じた皮膚含水率分布の特徴を反映した結果と考えられる（図10：下）。

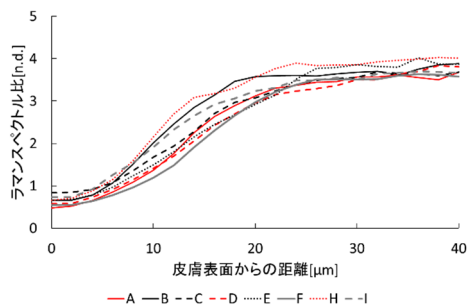
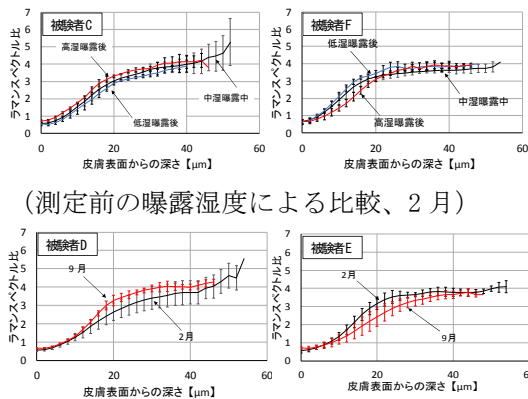


図9 皮膚含水率分布（ラマン分光装置によるスペクトル比、21°C50%rhの室内で実施）



（測定前の曝露湿度による比較、2月）
図10 皮膚含水率分布（ラマン分光装置によるスペクトル比）

（3）被験者実験（気道での水分蒸発量計算値と乾燥に関する心理反応との関連）

気道内での熱水分移動解析モデルの肺と鼻の部分について修正（肺内部表面での加温加湿を考慮しない、鼻腔に相当する部分でのみ気道表面積を仮想的に拡大）を行うことで、被験者実験から得た開口部空気温の実験値（温湿度5条件、被験者4人）に計算値が一致することを示した（図11）。また、気道内での水分蒸発量の計算値と乾燥感申告値（図12のスケールを使用）との間に相関関係が認められることを示した（図13）。

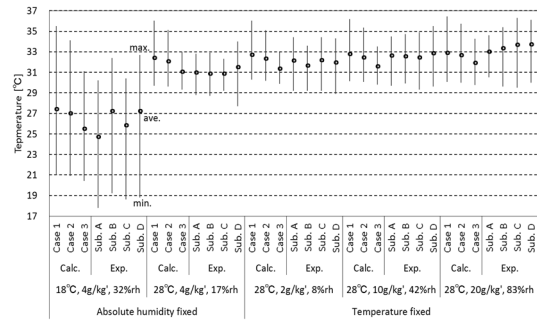


図11 鼻の開口における気温（実験値と計算値の比較、温湿度5条件、被験者4名）

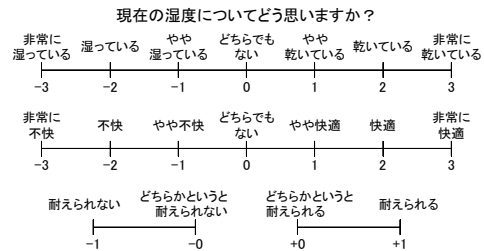


図12 乾湿感・快適感・受容度の申告スケール

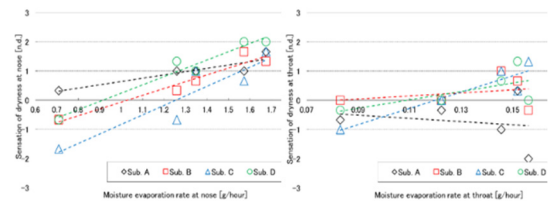


図13 気道表面での蒸発量（計算値）と乾燥感申告値の相関（左：鼻腔での蒸発量と鼻での乾燥感、右：喉での蒸発量と喉での乾燥感）

上記の実験（実験1と呼ぶ）では、鼻呼吸時と口呼吸時とを区別しており、鼻呼吸時は口の開口を閉じる、口呼吸時は鼻の開口を閉じるという制約を加えていた。そのような制約の無い実験2を行ったところ、湿度に応じた乾燥感の差異が実験1ほど明確には見られないことが示された（図14）。

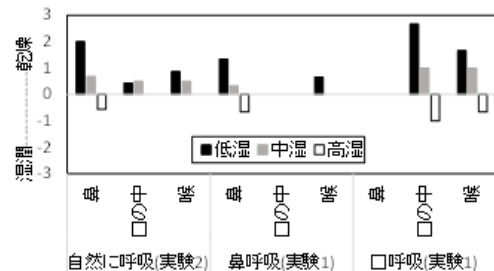


図14 鼻・口・喉の乾燥感申告値（自然に呼吸する場合と鼻呼吸・口呼吸を指定する場合の比較、同一被験者、湿度3条件）

（4）フィールドでの皮膚含水率の長期測定
1人の被験者について、秋から冬にかけての3か月間、日常生活時の皮膚含水率を測定した（肌水分計：スカラ社製、MY-808S、静電容量法）。日内の皮膚含水率と室内の温湿度の上下変動の形から、約8割のデータについて、

測定時の室内の絶対湿度の変化に対して同じタイミングで上下に変化していることが示された(図15)。また、残りの約2割のデータについて、測定時点での室内温湿度以外の要因(測定上の突発的不具合、実生活上の生活行為、天気や天候あるいは気候などの影響)によりその挙動を説明される可能性が示された。

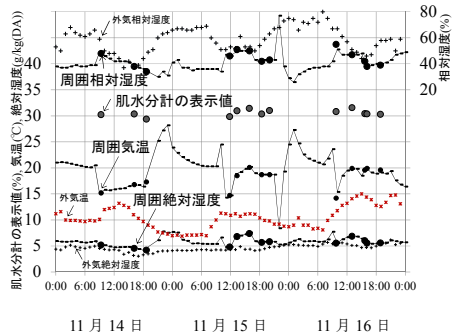


図15 室内外の温湿度と皮膚含水率(肌水分計の表示値)

一方、複数の被験者に対し、日常のデスクワーク中に、手首付近の皮膚含水率を通年で測定(肌水分計を使用)し、その変動特性と温湿度の関係を検討した。皮膚含水率は、気温・相対湿度・絶対湿度との間に、それぞれ正の相関が認められた(図16)。冬期に限定すると、気温よりも相対湿度・絶対湿度との相関係数がやや高い(図17)。また、皮膚含水率の測定時に図12のスケールを用いて得られた皮膚についての乾燥感申告値に関して、乾燥側の申告(申告値>0)が少なかったが、皮膚含水率が低い場合に乾燥側の申告がなされる傾向が見られた(図18)。一方、皮膚含水率の値の高低には個体差が認められ、その説明要因として、皮膚の油分、弾力、皮膚温を検討し、皮膚温と弱い負の相関が見られた(図19)。

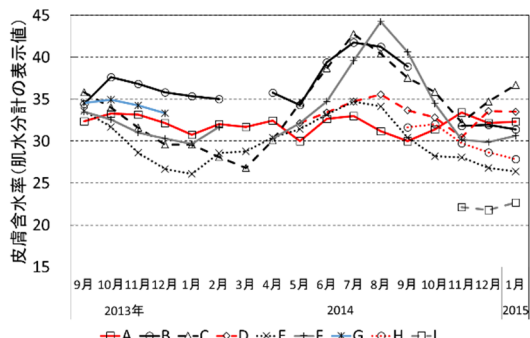


図16 皮膚含水率の通年での変動(月平均値)

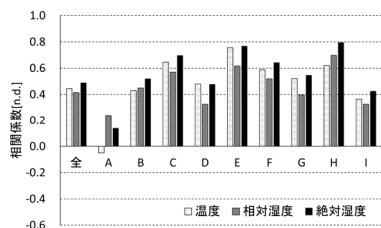


図17 皮膚含水率と温湿度の相関係数(「全」は全被験者の平均)

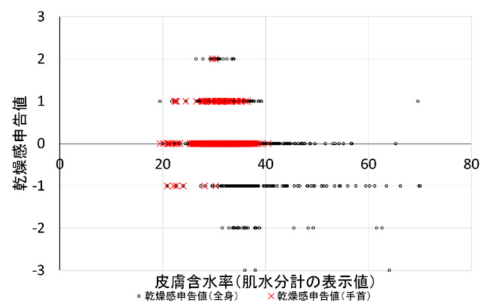


図18 皮膚含水率と乾燥感の相関(通年)

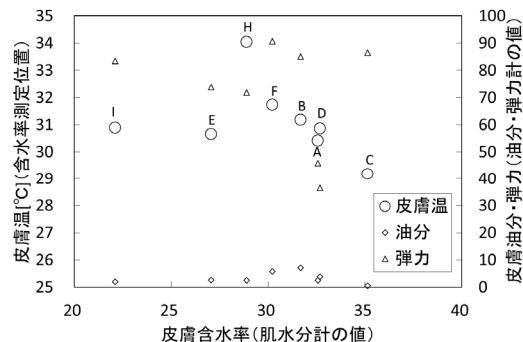


図19 皮膚含水率と皮膚温・皮膚油分・皮膚弾力の相関(アルファベットは被験者記号)

(5) 被験者実験(低湿時の心理反応)

低湿度(相対湿度10%)への曝露実験を5名の被験者(若年男性)に対して行い、乾湿感、湿度に対する不快感、許容度の申告値(図12)を採取し、被験者を5時間曝露しても、全身および各部位についての乾湿感申告値は定常状態に至らないこと(図20)、低湿への曝露開始から30~90分遅れて乾燥感がピークをとるという被験者および部位が、半数以上を占めることが示された。乾湿感申告値は、「やや乾いている」、「どちらでもない」が大半を占め、眼、鼻腔、喉、唇の乾湿感がその他の部位と比べて高いこと、不快側、耐えられない側の申告値は、それぞれ17%、6%であることが示された。一方、25名(男性13、女性12)に対して、同様の実験(低湿度への曝露時間は2時間40分)を行い、ほぼ符合する結果が得られた。申告特性において、顕著な男女差は見られなかった(図21~23)。

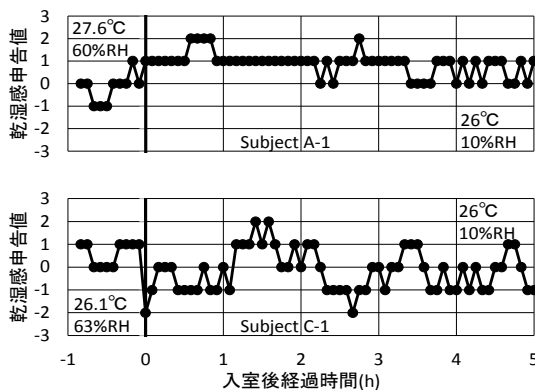


図20 全身乾湿感申告値(若年男性2例)

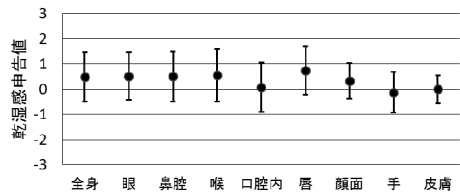


図 21 乾湿感申告値 (25 名の平均±SD)

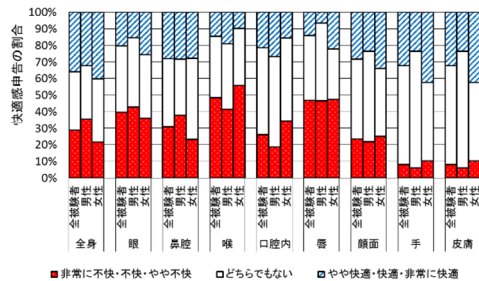
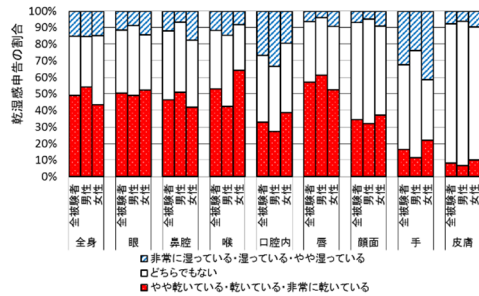


図 22 乾湿感・快適感申告の割合 (25 名)

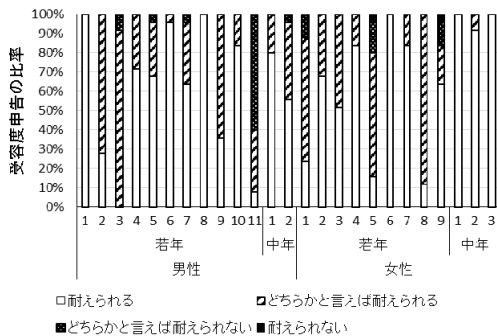


図 23 全身受容度の被験者別の申告割合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

開原典子, 高田暁, 室内滞在時の皮膚含水率と温湿度の関係についての実態調査, 日本建築学会環境系論文集、査読有、第 82 巻 第 734 号, pp. 337-345, 2017.

Satoru Takada, Yoshitaka Ito, Measurement of ocular surface temperature for determination of moisture evaporation rate at eyes and prevention of sensation of dryness, Proceedings of the 5th International Conference on Human-Environment System, 査読有, 20154, pp.1-9, Nagoya Univ., Nagoya, Japan, 2016.

Satoru Takada, Evaluation of sensation of dryness in airway under low humidity environment by heat and moisture transfer

model of respiration, Energy Procedia, 査読有, Vol. 78, pp. 2772-2777, 2015.

開原典子, 高田暁, 室内湿度変化に対する皮膚含水率の非定常応答のモデル化, 日本建築学会環境系論文集、査読有、第 79 巻 第 697 号, pp. 233-239, 2014.

開原典子, 高田暁, 周辺空気の絶対湿度変化に対する皮膚含水率の経時変化の測定, 人間と生活環境、査読有、第 21 巻 第 2 号, pp. 67-74, 2014.

高田暁, 乾燥感と室内温熱環境条件に関する基礎的研究, 日本建築学会環境系論文集、査読有、第 78 巻 第 693 号, pp. 835-840, 2013.

〔学会発表〕(計 18 件)

高田暁, 室内湿度の下限値に関する研究 被験者実験による低湿度に対する心理反応の検討, 空気調和・衛生工学会平成 30 年度学術講演会講演論文集, 2018.

高田暁, 低湿度条件下での目の乾燥感に関する研究 目の状態と温熱環境条件の関係, 空気調和・衛生工学会平成 29 年度学術講演会講演論文集第 6 巻, pp. 25-28, 2017.

石川藍子, 高田暁, 低湿度環境下での乾燥感に関する研究 (その 13) 湿度を変えた場合の皮膚含水率分布の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 485-486, 2016.

高田暁, 皮膚含水率の変動特性と個体差に関する検討, 第 39 回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp. 175-178, 2015.

伊藤好崇, 高田暁, 目の乾燥感に与える温熱環境の影響に関する研究 眼球表面温度の測定と予測モデルの検討, 空気調和・衛生工学会平成 27 年度学術講演会講演論文集第 6 巻, pp. 129-132, 2015.

鶴見隆太, 高田暁, 低湿度環境下での乾燥感に関する研究 (その 11) 口腔水分量を用いた量的評価および乾燥感の気道内部位別特性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 297-298, 2015.

高田暁, 瞬き時における目の表面温度の測定, 第 37 回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp. 125-128, 2013.

山田直毅, 高田暁, 松下敬幸, 低湿度環境下での乾燥感に関する研究 (その 6) 気道内温湿度の実測値に基づくモデルの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 273-274, 2013.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.arch.kobe-u.ac.jp/~en4/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 暁 (TAKADA SATORU)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20301244

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し