

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月27日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽

研究期間：2010～2012

課題番号：22656124

研究課題名（和文） 乾燥感の評価構造分析と室内湿度許容下限値の探求

研究課題名（英文） Study on Mechanism of Sensation of Dryness and Lower Limit of Indoor Humidity Accepted by Occupants

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

研究成果の概要（和文）：

冬季の室内など低湿度条件において、居住者が乾燥による不快を感じるものがない環境を合理的に創造することを目的として、乾燥感の発生するメカニズムやその発生条件を検討した。アンケート調査により乾燥感という問題の所在と乾燥を感じる体の部位とを明らかにするとともに、皮膚・眼球・気道での水分蒸発量を予測するモデルの提案を行い、温湿度、風速などの環境条件に応じた人体の乾燥を物理的に評価するための基礎を築いた。

研究成果の概要（英文）：

To properly create an indoor environment without sensation of dryness, the mechanism and physical condition of occurrence of dryness were studied. Based on the questionnaire surveys, the existence of the problem and the segments of the body where dryness is sensed were clarified. In addition, a model which predicts moisture evaporation rate from the skin, eye, and throat was developed, and the base of the estimation of dryness of human body according to the environmental conditions such as temperature, humidity, and air velocity was established.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	0	1,600,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,100,000	450,000	3,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築環境・設備

キーワード：湿気、人体

1. 研究開始当初の背景

オフィスや住宅など室内で「乾燥感」を訴える人が絶えない。ヒトが乾燥を感じる室内環境条件とは？単純な問いであるが、それに対する具体的な解答は得られていない。そもそも、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」と

は何か？という問いに対する解答さえ、満足に得られていないのが現状である。

乾燥感が生じるきっかけは、体の表層にあって周辺空気と接している部分、すなわち、皮膚、眼球、鼻、喉の表面含水率の低下であり、それが進むと、不快感や痛みや痒みを引き起こすと考えられる。痛みや痒みを起こす

段階まで行くと、「乾燥」の認識は明確であろう。その一方、それ以前の段階で、人が不快感を訴えているとすれば、その条件を明らかにしておくことが、建築環境設計および制御の立場からは重要となる。

冬季の室内乾燥を防ぐ方法として、加湿が考えられるが、住宅に関して我が国では局所暖房が主流であり、非暖房室での結露の危険性を考慮すべきである。一方、一般的なビルに関して、やみくもに加湿能力の高い装置を導入することは現実的でない。従って、乾燥への対処を加湿により行う場合、最小限に行うことが、結露被害防止及びコスト・エネルギーの観点から重要となる。室内居住者に必要な室内環境条件を定量的に把握した上で対策を考えることが重要であろう。

2. 研究の目的

居住者が乾燥感を訴えている実態を調査により明らかにするとともに、乾燥を感じる体の部位や温熱環境条件を調査し、乾燥感生起のメカニズムや室内湿度制御目標値の下限を明確にするための基礎を築く。また、人体熱モデルを用い、環境条件に応じた皮膚・眼球・気道の表面温度を考慮して、皮膚・粘膜での水分蒸発モデルを構築する。被験者実験により、提案するモデルで必要となる係数値の決定やモデルの妥当性検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 乾燥感の実態把握

インターネットを利用したアンケート調査により、「乾燥感」の存在を明らかにする。乾燥を感じている体の部位についての質問により、乾燥感生起のメカニズムを検討する。

(2) 乾燥を感じる温熱環境条件の調査

冬季に大学の研究室内でデスクワーク中の学生を対象として、乾燥感申告値とその時の温熱環境条件を記録し、その対応関係から、乾燥を感じる条件を明らかにする。

(3) 皮膚・粘膜での水分蒸発の定常モデル

皮膚・眼球・気道の表面における水分蒸発モデルを記述し、温湿度条件に応じた水分蒸発量の計算値(定常状態)を求める。以降において、モデルの課題(各論)を展開する。

(4) 皮膚における水分移動モデルの検討

皮膚の湿気容量の影響を検討するため、湿度のステップ変化に対する皮膚含水率の応答を被験者実験と数値解析(蒸気拡散支配の熱水分同時移動方程式)の両面から検討する。

(5) 眼球における水分蒸発モデルの検討

眼球温度の特性を被験者実験(赤外線カメラによる測定)から明らかにする。また、眼球表面の水分蒸発抵抗を求める。

(6) 気道における水分蒸発モデルの検討

鼻開口における温度測定値をもとに、気道での熱水分移動モデルの妥当性を検討する。

4. 研究成果

(1) 乾燥感の実態把握

オフィスワーカー1000名に1)空気乾燥による不快感の経験の有無、有の場合、不快感を感じる2)季節、3)体の部位を尋ねた。

オフィスの中で空気が乾燥しすぎて不快感に感じる人が[よくある]又は[たまにある]と答えた人は全体の約7割を占めた。また、その季節は[冬]との回答が9割を占めた。これらより、冬季に室内で乾燥を訴える人が多いことが確認できる。さらに乾燥を感じる体の部位としては、喉を挙げる人が最も多く、唇、眼、顔がそれに次いだ。

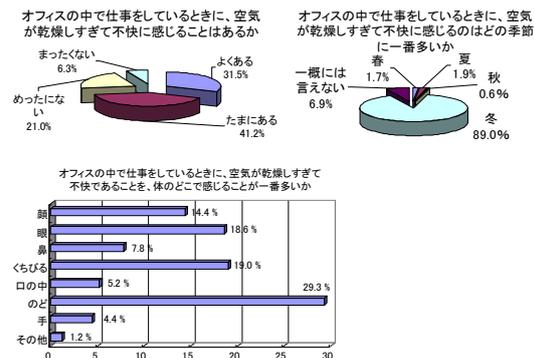


図1 乾燥による不快感の経験割合と乾燥を感じる体の部位

(2) 乾燥を感じる温熱環境条件の調査

20歳代の健康な学生6人に対し、1日に5回程度、図2のスケールに基づく乾湿感申告値と時刻とを記録させるとともに、回答時の室内空気温湿度を測定した。

図3は調査結果を空気線図上に表したものである。「とても乾いている」という評価は、気温22°C以上に集中しているが、絶対湿度で見ると3~6g/kg、相対湿度で見ると20~35%と比較的広い範囲に分布している。湿度だけでなく、温度が相当に寄与しているといえる。

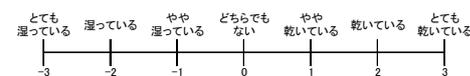


図2 乾湿感の評価スケール

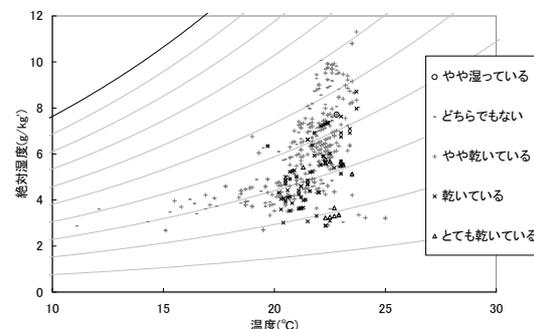


図3 温湿度と乾湿感評価の関係

同様の調査を20~30歳代の健康な学生7人を対象として行った。ここでは、体の部位別(眼、鼻腔、唇、口の中、喉、顔面、手、顔と手以外の肌)の乾湿感申告を採取し、温

湿度に加えて風速を測定した。

図4に、乾燥感の有無に応じた環境条件を示す。図2のスケールで0.5以上の申告値(乾燥側)の場合、0以下の申告値(湿潤側)の場合の2群にデータを分け、申告時の環境条件について、各群の平均値、標準偏差を示している。乾燥側の群では、気温が高く、相対湿度・絶対湿度が低く、風速が大きいという傾向が、乾燥側の申告比率が比較的高い部位(眼、鼻腔、唇、喉、顔面)で見られる。図5に乾燥感の申告値と室内温熱環境の物理量との相関係数を部位別に示す。全体として、気温・風速は、乾燥感の申告値に対して正の相関を、相対湿度は負の相関を示す部位が多い。絶対湿度との相関係数は非常に小さい。また、風速との相関係数が比較的高く、眼・唇・喉において顕著であった。部位別の特徴として、眼の乾燥感と物理量との相関係数の絶対値が比較的高いこと、眼・鼻腔・喉・顔面の傾向が似通っていることが挙げられる。

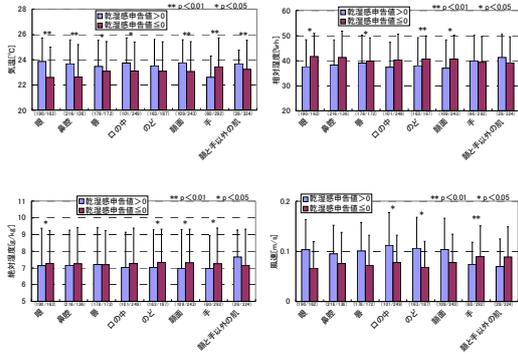


図4 温湿度と乾湿感評価の関係

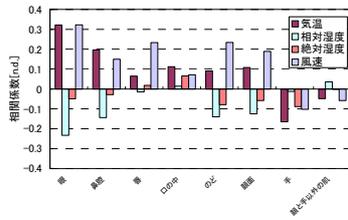


図5 乾燥感申告値と物理量との相関係数 (3)皮膚・粘膜での水分蒸発の定常モデル

皮膚: PMVの算出に用いられている皮膚角層の湿気移動抵抗値 R'_b (図6)を用い、Two-node modelにより求めた皮膚温を用いて皮膚角層下の飽和面からの蒸発量を求める。

眼球: 涙の3層構造のうち、表面の油層を、皮膚における角層と等価な扱いにし、その下の水層からの蒸発量を求める。

喉: 気道表面を飽和と仮定し、呼吸のリズムを考慮し、肺から鼻開口までの気道内熱水分移動モデル(図7)を用いて、気道内喉部位における蒸発量を求める。気道内壁の奥温度をStolwijk modelの胴脂肪温で与える。

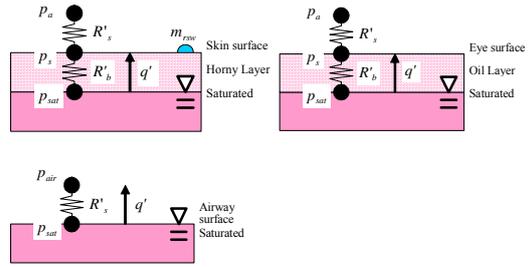


図6 水分蒸発モデル概念図(皮膚・眼球・喉)

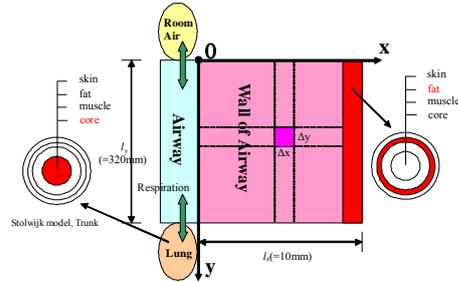
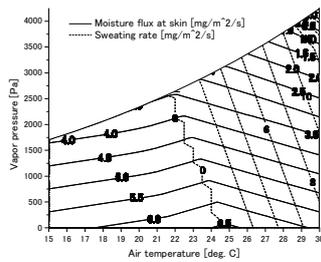
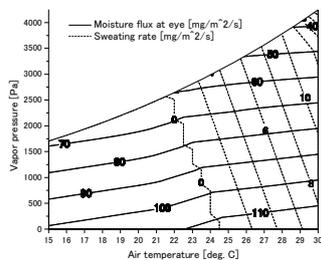


図7 気道内熱水分移動モデルの概念図

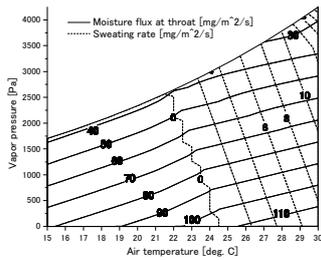
計算結果を図8に示す。皮膚・眼球・喉のいずれに関しても、水分蒸発量は、温湿度の両方に依存しており、温度が高いと絶対湿度が同じでも蒸発量が多い。皮膚に関して、調節発汗が生じると角層からの蒸発量はむしろ抑制される。眼球に関して蒸発量の値が大きいのは、油層の湿気抵抗値(未知)を仮に0としていることによる(5)で詳細を検討する)。気道に関しては6秒周期、6liter/minの呼吸のリズムを考慮した周期的定常解である。蒸発量の空気線図上での勾配(温度の影響)が皮膚、眼球より大きいことが分かる。



(a)



(b)



(c)

図 8 水分蒸発量と空気温湿度の関係 (計算値、a:皮膚、b:眼球、c:喉、点線は発汗量)

(4) 皮膚における水分移動モデルの検討

1) 被験者実験による検討

湿度のステップ変化に対する前腕角層含水率変化を測定した(スカラ社製, MY-808S)。被験者は20~30歳代の5名である。低湿曝露は、窒素ガスを循環させた箱に前腕を挿入して実現した。低湿曝露中の含水率測定は箱内で行った。一方、乾燥・湿潤直後の角層内含水率分布を共焦点ラマン分光装置(River Diagnostics BV社製, Model 3510)により測定した。乾燥はドライヤーの2分間吹き付け、湿潤は湿った布の5分間押し当ての直後に測定した。被験者は30歳代の女性1名である。乾燥→湿潤の順に続けて実験を行った。

皮膚含水率は、絶対湿度に追従して変化する(図9)。過渡的变化は5分間程度と短い。低湿曝露後の皮膚含水率が曝露前と比べて高いのは、皮膚温の低下によると考えられる。乾燥・湿潤後の角層内皮膚含水率分布を見ると、表面から10 μ m程度まで影響が及んでいる(図10)。別途行った30分間の高湿(80%rh)、低湿(10%rh)空気曝露実験では、16 μ m深さ程度まで含水率の変動が見られた(図11)。

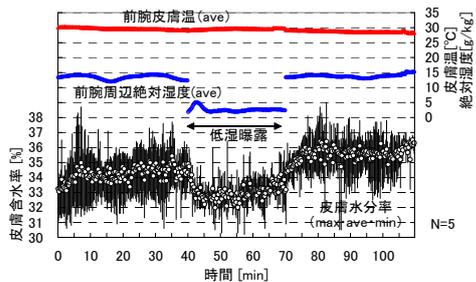


図 9 湿度に対する皮膚含水率変化(測定値)

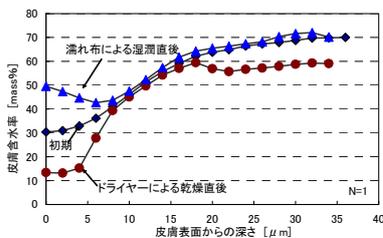
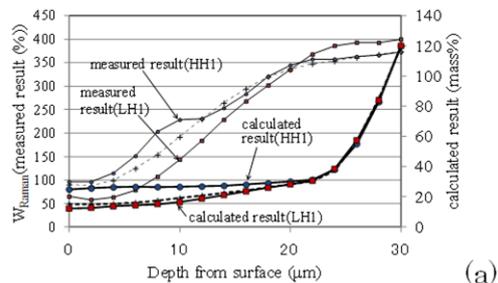


図 10 皮膚角層内含水率分布(乾燥と湿潤に対する応答、測定値)

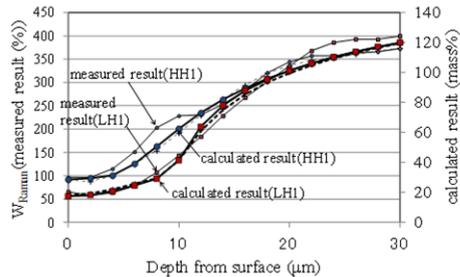
2) 数値解析による検討

皮膚角層について、均質な多孔質材料に対する熱水分同時移動方程式を適用しモデル化し、皮膚表面から30 μ mの位置で境界条件(飽和)を与えて、30分間の高湿(80%rh)、低湿(10%rh)曝露直後の、角層内含水率分布を解析する。共焦点ラマン分光装置による測定結果と比較し、モデルおよび物性値の妥当性を検討する。皮膚の熱・湿気物性値については文献値に基づいて決定した。

図11に示すように、湿気伝導率 λ' を一定値として扱った場合(a)、実験値で得られた分布形を再現できないが、高含水率時に湿気伝導率が大きくなるように与えた場合(b)、実験結果に近い計算結果が得られた。角層内の含水率分布の過渡応答をこのモデルにより説明する可能性を示唆する結果と言える。



(a)



(b)

図 11 皮膚角層内含水率分布(低湿・高湿曝露後、実験・計算値、a: λ' 一定、b: λ' 変化)

(5) 眼球における水分移動モデルの検討

1) 眼球表面温度予測のための基礎検討

眼球表面での水分蒸発量を把握するためには、表面温度を十分に把握する必要がある。赤外線カメラを用いて、眼球表面および顔表面温度(髪に覆われていない領域の平均値)を測定した。室空気温湿度21.6°C, 49%rh(S.D. 0.39 K, 7.9%rh)条件で大学生100人を対象にした測定と、4段階に気温を変えた測定(9人の学生が参加)とを行った。

前者の測定より、眼球とその周辺の温度が、額と並び特に高いこと、黒目の温度が白目と比べて低いこと(図12)、眼球表面温度は顔表面温度と比べて0.6K程度高いこと、裸眼の者と比べ、コンタクトレンズを装着している者の眼球温にばらつきが大きく、温度が低く、瞬き回数が多いこと(表1)が示された。後者の測定より、眼球と顔面の温度差は低温条件ほど大きいことが示された(図13)。

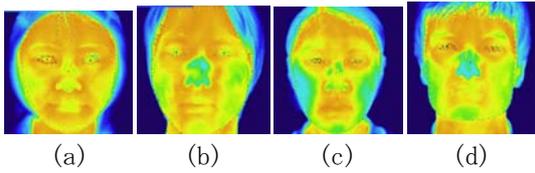


図 12 顔の赤外線画像: (a) (b)コンタクトレンズ有、(c) (d)無、(a) (c)女性、(b) (d)男性

表 1 眼球温、顔面温、瞬き回数 (測定値)

	全被験者		裸眼	コンタクトレンズ装着
	眼球表面温度 [°C]	平均値	33.7	34.0
	S.D.	0.7	0.5	0.7
	最大値	35.3	35.3	34.8
	最小値	31.9	32.9	31.9
顔表面温度 [°C]	平均値	33.1	33.2	33.0
	S.D.	0.7	0.6	0.8
	最大値	34.7	34.3	34.7
	最小値	31.2	31.3	31.2
瞬き回数 [回/min]	平均値	18.6	15.3	21.3
	S.D.	12.9	10.7	14.0
	最大値	64	45	64
	最小値	1	1	1
データ数		100	46	54

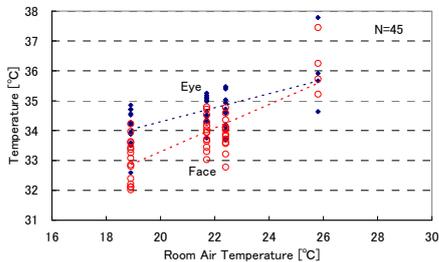


図 13 顔面温と眼球温 (室温を変えた場合)

2) 油層の湿気抵抗の同定

涙の蒸発抵抗が一定と仮定すると、多様な条件下での蒸発量予測が可能となる。提案している水分蒸発モデルにおいて必要な湿気抵抗値を被験者実験により同定する。眼球周りに密閉空間を作り (図 14)、空間内の絶対湿度変化を 900 秒間測定する。開始直前に赤外線カメラを用いて、眼球の表面温度を測定する。一方、提案している水分蒸発モデルを用いて、密閉空間内の湿度を計算する。実験値を再現する抵抗値を探索する。

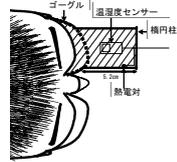


図 14 油層湿気抵抗推定の為の実験 (概念図)

水層の相対湿度 ϕ を 100% とすると、実験値を再現する抵抗値 R' を決定できない (図 15 左)。60%rh とすると、絶対湿度の上昇勾配が実験値とほぼ一致した (図 15 右)。900 秒間の絶対湿度の実験値と計算値の誤差 (RMS) が最小となる抵抗値と相対湿度の組み合わせを探索すると、 $1100 [m^2 \cdot s \cdot (kg/kg') / kg]$ 、53%rh となった。以上は被験者 A についての結果であるが、他の被験者について同様の解析を行うと、いずれの実験についても、実験結果を再現する R' と ϕ を決定可能であった (表 2)。 R' は $650 \sim 1350 [m^2 \cdot s \cdot (kg/kg') / kg]$ 、 ϕ は 43~68 [%] となった。

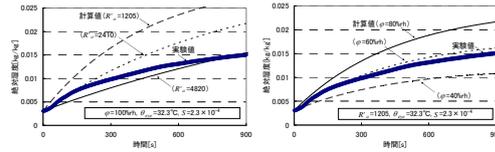


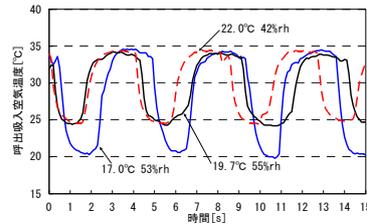
図 15 眼球周辺密閉空間湿度 (実験・計算値)

表 2 涙の油層の湿気抵抗値推定結果

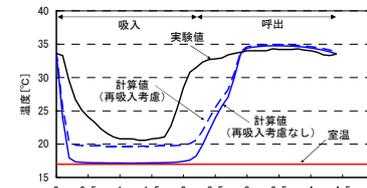
被験者 (性別、年齢、コンタクトレンズ装着の有無)	眼球温	最適値		絶対湿度誤差
		油層湿気抵抗	水層相対湿度	
A 男 22 コンタクトレンズ	32.3	1100	0.53	0.0002
B 男 23 裸眼	34.9	850	0.49	0.0005
C 男 22 裸眼	35.0	700	0.54	0.0003
D 女 23 裸眼	34.1	650	0.56	0.0002
E 男 24 コンタクトレンズ	34.2	1350	0.56	0.0001
F 男 24 裸眼	34.2	900	0.43	0.0003
G 男 24 コンタクトレンズ	34.3	750	0.52	0.0004
H 女 24 裸眼	34.3	950	0.53	0.0003
I 男 24 コンタクトレンズ	34.8	950	0.54	0.0003
J 男 24 裸眼	35.0	1100	0.59	0.0002
K 女 38 コンタクトレンズ	31.6	750	0.68	0.0002
L 女 38 裸眼	34.5	650	0.55	0.0003

(6) 気道における水分移動モデルの検討

気道の鼻開口での空気温測定 (T 型熱電対) を行い、(3) のモデルによる計算値と比較する。被験者には、呼吸を鼻でのみで行うよう指示した。被験者は学生 1 名である。



a



b

図 16 鼻開口部温度の変化 (a: 実験値 (温度条件 3 種)、b: 実験・計算値 (17°C 条件))

室空気の温湿度条件 3 種 (17.0, 19.7, 22.0°C) の実験結果 (図 16(a)) について、呼吸周期はそれぞれ 4.4、4.8、4.0 秒 (平均値) であった。全般に呼出の時間帯が吸入より長い。呼吸 1 サイクルでの最低値は室温より 3°C~4°C 高い。鼻腔表面からの熱伝達及び呼気再吸入の影響と考えられる。最高値は 34°C~35°C 程度であった。次に、気温 17°C の場合について周期的定常解と比較する (図 16(b))。1 サイクルの最低値は気温とほぼ同じ値であり実験値より低い。呼気の再吸入 (呼出空気の 17% と仮定) を考慮すると実験値に近づく。最高値に関しては実験値と概ね一致している。吸入開始直後は実験値と比べて応答が早い。呼出時間が吸入時間より長いことを考慮していない為の差もある。この解析結果は気道径を一樣としたものであるが、鼻腔内で表面積が大きいことを考慮すると、実験値に近

づくことを別途確認した(図略)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

①Satoru Takada, Takayuki Matsushita, Modeling of moisture evaporation from the skin, eyes and airway to evaluate sensations of dryness in low-humidity environments, Journal of Building Physics, 査読有, Vol. 36, No. 4, 2013, pp. 422-437

②Noriko Kaihara, Satoru Takada and Takayuki Matsushita, Transient response of skin surface moisture content to change in indoor humidity, Measurement and modeling of moisture transfer in skin surface, Proc. the 5th international Building Physics Conference (IBPC), Kyoto, Japan, 査読有, 2012, pp.939-944

[学会発表] (計18件)

①山田直毅, 高田暁, 気道内熱水分移動モデルに基づく低湿時の室内温熱環境調整法に関する研究, 第36回人間-生活環境系シンポジウム(名古屋), 2012.12.1-2 pp.153-156

②高田暁, 眼球からの水分蒸発のモデル化, 第33回日本熱物性シンポジウム(大阪), 2012.10.3-5, pp.239-241

③高田暁, 松下敬幸, 眼球および気道からの水分蒸発モデルに関する検討, 日本建築学会大会(名古屋)学術講演梗概集D-2, 2012.9.12-14, pp.289-290

④開原典子, 高田暁, 他1名, 室内の湿度変化に対する皮膚含水率の非定常応答, 日本建築学会大会(名古屋)学術講演梗概集D-2, 2012.9.12-14, pp.291-292

⑤Satoru Takada, and Takayuki Matsushita, Modeling of moisture evaporation from skin, eye and airway for evaluating sensation of dryness under low humidity environment, Proc. the 5th international Building Physics Conference (IBPC), Kyoto, Japan, 2012.5.28-31, pp.953-958

⑥高田暁, 開原典子, 室内の湿度変化に対する皮膚含水率分布の応答 ラマン分光装置による測定と熱水分同時移動方程式による解析, 第32回日本熱物性シンポジウム(横浜), 2011, pp.539-541

⑦高田暁, 開原典子, 室内の湿度変化に対する皮膚含水率の応答, 日本生気象学会(京都)雑誌, 48, 3, 2011.11.21-23, p.S66

⑧Satoru Takada, Takayuki Matsushita, Prediction of evaporation rate from the skin, eyes and airway to evaluate sensation of dryness in a low humidity environment, Proc. the Fourth International Conference on Human-Environment System, Sapporo, Japan, 2011.10.3-6, pp.271-276

⑨Satoru Takada, Noriko Kaihara, Takayuki Matsushita, Response of skin surface moisture to change in indoor temperature and humidity, Proc. the Fourth International Conference on Human-Environment System, Sapporo, Japan, 2011.10.3-6, pp.277-282

⑩高田暁, 乾燥感の部位別特性と室内温熱環境条件との関係, 空気調和・衛生工学会平成23年度学術講演会(名古屋)講演論文集III, 2011.9.13-15, pp.1865-1868

⑪高田暁, 松下敬幸, 皮膚および眼球表面からの蒸発量予測のための基礎的検討, 日本建築学会大会(東京)学術講演梗概集D-2, 2011.8.23-25, pp.191-192

⑫木村裕太郎, 高田暁, 他1名, 気道における熱水分移動解析モデルの提案, 日本建築学会大会(東京)学術講演梗概集D-2, 2011.8.23-25, pp.193-194

⑬開原典子, 高田暁, 他1名, 室内の温湿度変化に対する皮膚表層水分の応答, 日本建築学会大会(東京)学術講演梗概集D-2, 2011.8.23-25, pp.195-196

⑭高田暁, 谷口桂悟, 他1名, 低湿度条件下における皮膚表面での水分蒸発に関する数値計算, 第34回人間-生活環境系シンポジウム(新潟), 2010.11.27-28, pp.17-20

⑮開原典子, 高田暁, 湿度変化に対する皮膚表層水分率の応答, 第34回人間-生活環境系シンポジウム(新潟), 2010, pp.13-16

⑯高田暁, 乾燥感の評価構造に関する研究 人体熱モデルを用いた解析とアンケート調査, 日本生気象学会(東京)雑誌第47巻, 第3号, 2010.11.5-6, p.S64

⑰高田暁, 低湿度環境下における人体表面での水分移動と乾燥感, 日本建築学会第40回熱シンポジウム(大阪), 2010.10.22-23, pp.19-24

⑱高田暁, 谷口桂悟, 他2名, 乾燥感の評価構造に関する研究 人体熱モデルを用いた解析とアンケート調査, 空気調和・衛生工学会平成22年度学術講演会(山口)講演論文集II, 2010.9.1-3, pp.1507-1510

[その他]

ホームページ

<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

なし

(3) 連携研究者

なし