

居住者の乾燥意識に配慮した室内温湿度の形成に関する研究 —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

高田 暁, 谷口 桂悟, 開原 典子
神戸大学大学院工学研究科

Study on Indoor Air Temperature and Humidity Control Considering Occupants' Sensation of Dryness Numerical Analysis of Moisture Evaporation at Skin Surface under Low Humidity Conditions

Satoru TAKADA, Keigo TANIGUCHI and Noriko KAIHARA
Graduate School of Engineering, Kobe University

Abstract: In winter, occupants complain of dryness more often than in the other seasons. In order to realize a rational control of the indoor thermal environment, it is necessary to clarify the mechanism of the sensation of dryness and to enable to predict it. From this viewpoint, as the first attempt, the moisture flux at the skin surface was analyzed based on the human thermal model. The results were expressed on the psychrometric chart, so as to seek the limitation of human tolerance to dryness.

Key Words: Low Humidity, Human Body, Moisture Flux, Sensation of Dryness, Thermal Model of Human Body

要旨： 冬季に室内で乾燥を訴える人が多いが、訴えの発生に至るメカニズムは明らかでない。「乾燥感」の評価構造を明らかにし、予測が可能となれば、冬季の室内空気の調整方法に寄与すると思われる。乾燥の訴えが発生する原因として、人体からの水分蒸発量がある一定以上となっていることが考えられる。この観点より、本研究では、冬季の暖房時を想定し、皮膚角層下での水分蒸発量を人体熱モデルにより計算し、湿り空気線図上で表現した。

キーワード： 低湿度, 人体, 水分流, 乾燥感, 人体熱モデル

1. はじめに

わが国において冬季に室内で乾燥を訴える人が多い (Appendix 1 を参照)。冬季の外気絶対湿度が他の季節と比べて低いことが根本の原因と考えられるが、乾燥の訴えの詳細を系統的に整理した資料は見当たらず、乾燥の訴えが発生するメカニズムも十分に明らかにはなっていない。湿度の受容器が現在のところ見つかっていない (本間ら 2007) が、人が空気の乾燥を何らかの情報を基に認識していることも事実と思われる (田辺ら 2008)。「乾燥感」の評価構造を明らかにし、その予測が可能となれば、冬季の室内空気の調整方法の改善に寄与するものと思われる。また、現在、冬季の室内において乾燥を防ぐことを目的とした加湿が行われ

ることが多いが、加湿は結露の可能性を高くするほか、エネルギー消費量の増大につながる。乾燥感の評価構造が定量的に明らかとなれば、最適な環境調整が可能となるであろう。

三浦 (1978) は、低湿度が快適感や健康、労働機能への影響について述べている。建築物環境衛生管理基準では、相対湿度は 40% 以上 70% 以下と定められているが、冬季にオフィス内の相対湿度が 40% 未満であるとの実測例がある (Yoshizawa 1996, 猪股ら 2005, 谷口ら 2010, Appendix 1 を参照)。さらに室内湿度がどこまで低下したら不快か、または支障をきたすのか、基礎的な検討は、被験者実験を中心として、なされてきている (深井ら 1993, 唐木ら 2004, 青木ら 2006,

田辺ら 2008) が、明確な線引きは明らかでない。被験者実験だけでなく、解析モデルによるアプローチも必要と思われる。

乾燥の訴えが発生する原因として、人体からの水分蒸発量がある一定以上となっていることが考えられる。この観点より、本研究では、特に皮膚からの水分蒸発量を、温湿度条件に応じて定量的に記述し、乾燥感の評価構造を把握するための基礎的検討を行うことを目的とする。具体的には、人体熱モデルを用いて、冬季の暖房時を想定し、皮膚からの水分蒸発量の定式化を行う。

2. 計算方法

2.1 皮膚からの水分蒸発の解析モデル

皮膚表面から外に向かう水分流 q'_{so} [kg/m²/s] は、

$$q'_{so} = (X_s - X_a) / R'_a \quad (1)$$

と表される。ここで、 X_s 、 X_a はそれぞれ皮膚表面、室空気の絶対湿度 [kg/kg]、 R'_a は皮膚表面の湿気伝達抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/kg}) / \text{kg}$] (着衣に覆われている場合、着衣の湿気抵抗を加算する必要がある) である。

一方、皮膚角層下に存在する飽和層表面で蒸発した水分が皮膚角層を通して外部へ放出され则认为と (Fanger 1970)、飽和層表面から皮膚表面に向かう水分流 q'_{si} [kg/m²/s] は、皮膚の湿気容量を無視すると、

$$q'_{si} = (X_{s,sat} - X_s) / R'_s \quad (2)$$

ここで、 $X_{s,sat}$ は皮膚角層下部の飽和層表面の絶対湿度 [kg/kg]、 R'_s は皮膚角層 (飽和層表面と皮膚表面間) の湿気抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/kg}) / \text{kg}$] である。

これらより、定常状態における皮膚表面での水分収支式は、皮膚表面での調節発汗を考慮して (皮膚表面で液相水分が発生すると考えて)、

$$q'_{si} + m_{rsw} = q'_{so} \quad (3)$$

となる。ここで、 m_{rsw} は調節発汗量 [kg/m²/s] である。

角層の厚さは 20 μm 程度 (田上 1999) であり、熱的には皮膚角層が非常に薄いと考え、飽和層表面温度は皮膚表面温度と等しいとおける。その場合、 $X_{s,sat}$ が皮膚温に應ずる飽和絶対湿度として決定される。すなわち、皮膚温および調節発汗量が与えられると、水分収支式における未知数は、皮膚表面の絶対湿度のみとなり、以下のように解ける。

$$X_s = (R'_a X_{s,sat} + R'_s X_a + R'_a R'_s m_{rsw}) / (R'_a + R'_s) \quad (4)$$

これは、多くの人体熱モデルにおいて、皮膚表面での水分蒸発を記述する際に用いられている考え方である。

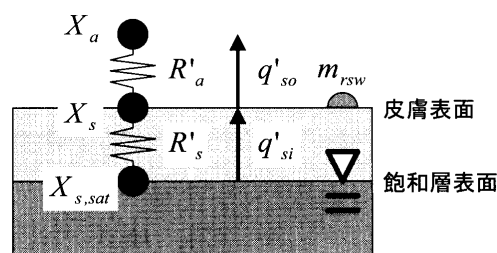


図1 皮膚角層の概念図

2.2 定常状態における皮膚温の算出方法

冬季のオフィスにおいて想定される温湿度条件を網羅するように条件を設定し、各条件に対する皮膚角層下での蒸発水分流 (着衣に覆われていない部分) を人体熱モデル (Two-node model) (Gagge et al. 1986) により求める。室の温湿度については、15~30℃を 0.5K 刻み、相対湿度 0~100% を 5% 刻みに分割し、全組み合わせについて計算した。冬季のオフィスワークを想定し、着衣量は 1.0clo、代謝量は 58.2 W/m² とした。また、対流熱伝達率は静穏気流を想定し 3.1 W/(m²·K)、放射熱伝達率は 4.65 W/(m²·K)、平均放射温度は気温に等しいと仮定し、定常解を求めた。皮膚表面の水分流を求める際に用いる皮膚表面湿気伝達抵抗は、対流熱伝達率の値からルイス関係を用いて決定した。また、皮膚角層 (飽和層表面と皮膚表面間) の湿気抵抗は文献値 (Fanger 1970) (一定値) を与えた。

表1 計算に用いる諸数値

着衣量	1 [clo]
代謝量	58.2 [W/m ²]
対流熱伝達率	3.1 [W/(m ² ·K)]
放射熱伝達率	4.65 [W/(m ² ·K)]
湿気伝達抵抗 R'_a	3.23×10^2 [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/kg}) / \text{kg}$]
皮膚角層湿気抵抗 R'_s	4.82×10^3 [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/kg}) / \text{kg}$]

2.3 乾燥感の評価構造に関する仮定

人がどのような状況で乾燥による不快感を訴えるのか現時点で明らかでないが、ここでは「皮膚が乾燥するという訴えは、皮膚角層からの水分蒸発量が多いほど出現しやすい」と仮定する。調節発汗は、液相の水分が、汗腺から分泌されるものである。汗腺は真皮中層から皮下組織にかけて位置しており (溝口ら 2008)、角層より相当に深い部分にある。したがって、調節発汗による水分損失は、角層の乾燥には直接関与しないと考え、 q'_{so} (皮膚表面から外に向かう水分流) ではなく、 q'_{si} (飽和層表面から皮膚表面に向かう水分流) を乾燥の訴えに直結する量と仮定する。

3. 結果

図2は、湿り空気線図上に、皮膚角層下での蒸発水分流 q'_{si} の等高線を描いたものである。調節発汗量も点線で併記している。皮膚角層下での蒸発水分流の等高線は、調節発汗を生じない条件で、右肩上がりとなった。室空气の絶対湿度が低い場合だけでなく気温が高い場合にも（皮膚温が上がり、皮膚角層下の飽和絶対湿度が高くなるため）蒸発量が増え乾燥が進むことを量的に示している。調節発汗を生じる領域で、等高線はゆるやかな右肩下がりとなる。発汗により角層下での蒸発が抑えられるためと考えられる。

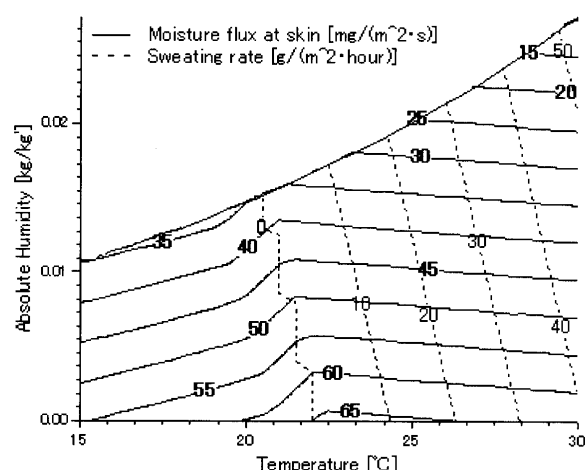


図2 皮膚角層下での蒸発水分流と発汗量の等高線図（湿り空気線図上での表現、着衣に覆われていない部位、定常状態、1clo、1Met、静穏気流条件、MRT=気温を想定した計算結果）

4. 考察

「皮膚角層下での蒸発量が多いほど皮膚乾燥の訴えが出現しやすい」との仮定に基づくとなると、等高線のいずれかが訴え出現の限界を示すことになり、このような図が環境調整に利用可能になると思われる。仮定の妥当性を検討するとともに、訴え出現の限界について、実験を通して明らかにしていく必要がある。

今回用いている皮膚角層での水分移動モデルにおいて、皮膚角層下部の飽和層上面の位置（水位）は一定としている。これは、蒸発により角層下部で水分損失が起こっても、損失量に応じて水分が補給されるというモデル化である。この妥当性について、検討の余地がある。また、角層の湿気容量および液移動の影響は無視しているが、その妥当性についても検討する必要があると考えている。そのためには、皮膚の含水率分布を考慮した実験や解析が不可欠であろう（開原ら2009）。さらに、本論の解析では、角層の湿気抵抗 $R'_{s'}$ を全身で一様かつ一定としているが、これについても検討の余地がある。

本論では、Two-node model を用いて皮膚温を求めており、これを皮膚角層の飽和層上面の温度として用いている。この際、着衣の熱抵抗を考慮しているが、皮膚温は全身の平均値である。一方、皮膚表面の水分流を求める際には、着衣の湿気抵抗を無視している。本来は、皮膚を着衣により被覆されている部分と露出部分に分けて皮膚温を計算し、露出部皮膚温に基づき、角層下の飽和層の上面温度を決定すべきである。

図2に示すように、冬季のオフィス等で想定される条件でも調節発汗が生じている可能性がある。調節発汗の有無が乾燥感に及ぼす影響について、実験により評価することも重要と思われる。

本論では皮膚について検討したが、眼球を飽和面が露出した皮膚と捉えれば、 $R'_{s'}=0$ と置き、眼球表面温度を適切に考慮すれば、皮膚と同様の展開が可能と思われる。鼻腔や咽頭についても同様に可能と思われるが、呼吸を考慮することが必要である。

5. まとめ

冬季の室内において居住者が乾燥を訴えるメカニズムを定量的に検討し、なおかつ乾燥感を予測する体系を構築するための基礎として、人体熱モデルを用いて、皮膚角層下での蒸発水分流を冬季の室内を想定した条件について計算し、湿り空気線図上に表現した。この水分流と乾燥感との関係を検討するとともに、ここで用いたさまざまな近似の妥当性について検討することが必要である。

APPENDIX 1 オフィスワーカーに対するアンケート調査

インターネットを利用してオフィスワーカー1000名に乾燥感に関する質問を行った。アンケート回答者の属性を表-A1に表す。調査期間は2010年1月15日～18日である。アンケートは全8問で、オフィス、住宅それぞれに滞在している際の状況を回答するよう依頼した。図-A1、A2はアンケートの結果である。オフィスの中で空気が乾燥しすぎて不快に感じるものが[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。一方、住宅については5割と若干低かった。また、空気が乾燥しすぎて不快に感じる季節は[冬]との回答がオフィス・住宅とも9割を占めた。さらに乾燥を感じる体の部位としては、のどを挙げる人がオフィス・住宅とも最も多く、唇、眼、顔がそれに次いで多かった。住宅での乾燥による不快さを感じるのは、個室滞在時や睡眠時との回答が多かった。

表-A1 アンケート回答者の属性

性別	男性:66.0%		女性:34.0%	
年齢	20歳代:18.1%	30歳代:33.4%	40歳代:28.2%	50歳代:20.3%
勤め先	関東圏:50.0%		関西圏:50.0%	

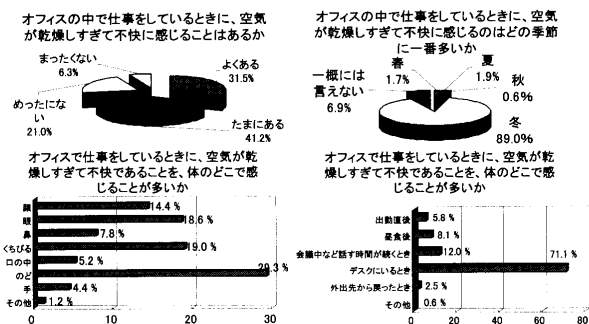


図-A1 オフィスワーク時の乾燥感・アンケート結果

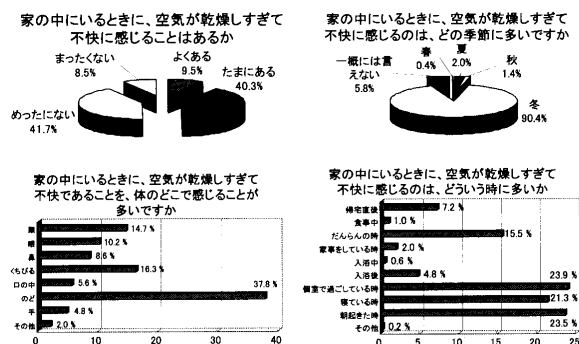


図-A2 住宅内での乾燥感・アンケート結果

APPENDIX 2 ある居室でのアンケート調査

調査は、2009年12月9日～2010年1月13日に神戸市内の大学の研究室内（床面積 32m²、天井高 3.6m）で、20歳代の健康な男性5人、女性1人を対象に行った。回答者に室内の湿度について7段階のスケール（とても乾いている～どちらでもない～とても湿っている）を示して、日中に随時、数値で回答させた（申告時の時刻を併せて記録させた）。回答の頻度は、適当な間隔をあけて1日に5回程度を目安とするよう依頼した。室内には、対流式エアコンと家庭用の加湿器1台が設置されており、制御方法は、居住者が自由に調節した。温湿度に関しては、ロガー付き小型温湿度計により、室の中央付近において10分間隔で記録した。

結果を図-A3に示す。延べ569時刻における申告が得られた。「とても乾いている」という評価は、気温22℃以上に集中しているが、絶対湿度で3～6g/kg¹、相対湿度で20～35%と比較的広い範囲に分布している。湿度が相当に寄与している可能性が示唆される。

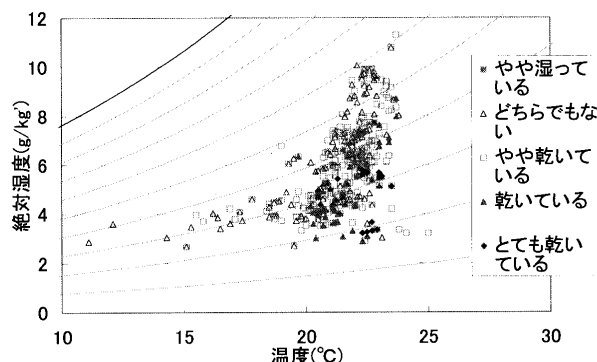


図-A3 居室内湿度に関するアンケート結果

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費 挑

戦的萌芽研究(課題番号 22656124, 研究代表者：高田 暁)の助成を受けた。アンケート調査にご協力いただいた皆様方にお礼申し上げます。

文献

本間研一，彼末一之編，2007：環境生理学，北海道大学出版会，301/301

田辺新一，堤仁美，鈴木孝佳，2008：オフィス空間における湿度が熱的快適性に与える影響に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集 137, 1/7

三浦豊彦，1978：湿度と人間，労働科学 54(4), 165/177
猪股悦子，後藤伴延ら，2005：オフィスにおける温熱適応性に関する長期実測調査，日本建築学会東北支部研究報告集，107/110

Yoshizawa S., 1996：International Study on Indoor Air Quality and Climate in Office Buildings, Japan Building Maintenance Association, 1/64

谷口桂悟，高田暁ら，2010：冬季における室内湿度および居住者の室内湿度に対する評価の実態，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, 189/190

唐木千岳，松橋秀明，枅原裕，鮮于裕珍，2004：低湿度が人間に与える影響，空気調和・衛生工学会学術講演論文集，625/628

青木哲，須藤千春，水谷章夫，大澤徹夫，2006：室内温湿度から見た冷房の効果に関する研究，日本建築学会環境系論文集 605, 55/62

深井一夫，伊藤宏，佐々木真希，1993：温熱的中立付近の環境における湿度の快適限界に関する実験的検討その1 冬季被験者実験による低湿側の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 D, 1347/1348

Fanger P. O., 1970：Thermal comfort, Danish Technical Press, 27/27

田上八朗，1999：皮膚の医学，中公新書，4/4

Gagge A. P., et al., 1986：A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions 92, 709/731

溝口昌子ら，2008：皮膚の事典，朝倉書店，14/14

開原典子，高田暁，2009：居住者の乾燥意識に配慮した室内温湿度の形成に関する研究(その1) 暖房時を想定した皮膚水分率の測定，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, 227/228

長谷川兼一，吉野博，1998：高断熱高気密住宅における居住者の乾燥感に関する冬季調査，日本建築学会計画系論文集 509, 91/96

<連絡先>

著者名：高田 暁
住 所：神戸市灘区六甲台町 1-1
所 属：神戸大学大学院工学研究科建築学専攻
E-mail アドレス：satoruta@kobe-u.ac.jp