

暑熱環境における湿度感に関する基礎的実験 EXPERIMENTAL STUDY ON AIR HUMIDITY SENSATION IN HOT ENVIRONMENTS

松尾朋浩*, 窪田英樹**, 鎌田紀彦***, 若松伸司****
Tomohiro MATSUO, Hideki KUBOTA, Norihiko KAMATA
and Shinji WAKAMATSU

In order to examine the relationship between Air Humidity Sensation (AHS) and skin relative humidity, a series of experiments of three different conditions on Air Humidity Sensation was conducted with subjects of both sedentary and ergometer activity conditions in hot environment. Skin relative humidity was identified by applying measured mean skin temperature and sweat rate. For the experiment in which only AHS was asked, predicted mean skin temperature and sweat rate were applied. After analysis, it has been confirmed that the Air Humidity Sensation has a good correlation with the relative humidity of the air at the skin surface.

Keyword: humidity sensation, skin relative humidity, sweating, mean skin temperature, thermal environment, hot environment

湿度感、皮膚相対湿度、発汗、平均皮膚表面温度、温熱環境、暑熱環境

1 はじめに

温熱環境に関する研究は過去長い間、空調、生理学など様々な視点により研究されてきた^{1,2)}。日本においてもこの研究は行われており、欧米で作られた指標を取り入れる方法がその主流となっている。一方で、日本の夏には『蒸し暑さ』のように湿度ぬきには語れない問題も存在する。しかし、湿度の低い欧米で始まったこの分野の研究は、当然のことながら研究の焦点が温冷感や快適感に当てられる場合がほとんどであり、湿度感³⁾について明確に述べた研究は少ない^{3~14)}。

Berglundは湿度感(perceived ambient humidity by sedentary subjects)が空気の露点温度(絶対湿度)の関数であるとし、空気の露点温度が同じであればそのときの湿度感もほぼ一定の値を示すことを椅座時の被験者実験の結果を用いて示している³⁾。しかし一方で、酒井らは「乾湿感」が水蒸気圧、相対湿度とはほとんど相関は見られず、むしろ室温との関連が強いと述べている⁷⁾。また、小関・田辺ら¹⁴⁾も、同じ絶対湿度でも室温によって「乾湿感」が異なる結果を得ている。

これらの実験は、結果的に「湿度感」が『やや湿っている』を超える程度の実験条件で行われており、絶対湿度が比較的狭い範囲での実験結果であることが「湿度感」が明確にされていない理由の1つとも思われる。筆者らの研究でも、本論文で示すように水蒸気圧(絶対湿度)が湿度感に強く関わる量の1つであることを示唆する結果が得られる。しかし、着衣の影響、運動時に発汗量が増えた場合を考慮す

ると、湿度感が絶対湿度などの単一の環境要素のみで評価できるかどうかは、疑問が残る。

一方、湿度感に類似した感覚に発汗による濡れ感がある。Berglundはperceived skin moisture(濡れ感)と実測によって得られた濡れ率(measured skin wetness)とが高い相関を示すと述べている³⁾。これは、筆者らの研究において『発汗感』(汗をかいている程度を答えたもの)が濡れ率と高い相関を示すことと対応する。しかし、これは身体の状態を評価したもので、空気の湿度という環境を「主観的」に評価する『湿度感』とは、関係が深いものの別の感覚と考えられる¹⁵⁾。

本研究では、湿度感と皮膚表面の相対湿度 RH_{sk} (以下、皮膚相対湿度)との関係を分析した結果について述べる。実験は、次の条件“代謝量=1 & 2.8 met, 気流=0.1~1.8 m/s, 相対湿度=50 & 80%, 着衣=0 & 0.3 clo”で、主に「湿っている側の感覚」¹⁶⁾が表れる中立温度より高い室温において実施した。

2 実験方法・概要

本論文で扱う実験は次に示す3種類である(表1)。

実験1: 着衣0.3clo、椅座の実験

実験条件a(1994年10~11月): 室温28、30、32、34℃、相対湿度80%、気流0.1、0.3、0.6、1.2、1.8 m/sの組合わせで、異なる18条件について実験を行った。

* 室蘭工業大学大学院建設工学専攻 大学院生・工修

** 室蘭工業大学建設システム工学科 教授・工博

*** 室蘭工業大学建設システム工学科 助教授・工博

**** 国立環境研究所地域環境研究グループ大気保全研究チーム 総合研究官・工博

Graduate Student, Division of Civil and Environmental Eng., Muroran Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Leader, Urban Air Quality Research Team, Regional Environmental Division, National Institute for Environmental Studies, Dr. Eng.

実験条件b (1995、1996年10～11月): 室温28、30、31、32、34、36℃、相対湿度50%、気流0.1、0.3、0.6、1.2、1.8 m/sの組合わせで、異なる16条件について実験を行った。

条件a、bともに被験者は男子学生6名、着衣は半袖Tシャツ・ショートパンツの約0.3 cloである。被験者は中立温度(27℃、50%)の準備室に椅座で30分間過ごし、その後実験室へ移動し30分間予め設定された気流を椅座で前方から全身に受ける。気流発生装置は吹出し開口部150×50cm、吹出し口から被験者の頭部までは約145cmであり、気流速度は無入時の椅座被験者位置における平均値を用いた。室温測定/主観申告は準備室滞在30分後、実験開始0、3、10、20、30分である。ただし、被験者の皮膚表面温度などの生理量の測定は行っていない。環境測定にはアースマン乾湿計、グローブ温度計、超音波流速計を使用した。

実験条件c (1996年11月): 相対湿度50%、気流1.2 m/sにおいて室温33、36℃の2条件について実験を行った。被験者は男子学生3名、着衣は半袖Tシャツ・ショートパンツの約0.3 cloである。被験者は中立温度(27℃、50%)の準備室に椅座で40分間過ごし、その後実験室へ移動し180分間予め設定された気流を椅座で前方から全身に受ける(条件a、b参照)。この間、準備室・実験室を通して5分間隔で皮膚表面温度の測定、実験室入室後は15分間隔で体重、気温、湿度、グローブ温度を記録する。被験者の主観申告は、実験室60、120、180分である。皮膚表面温度・気温・グローブ温度の測定にはサーミスタ温度計(タカラK722/センサー直径1mm)、体重測定は精密体重計(A&D AD-6205/最小表示20g)、湿度の測定はアースマン乾湿計を使用した。なお、皮膚表面温度の測定、平均皮膚表面温度(以下、平均皮温)の算出にはHardy-DuBoisの7点法(7部位で各1点測定)^{22,23)}を用いた。

実験II: 着衣0 clo、椅座180分の実験

実験条件(1998年10～11月): 室温30、33、36℃、相対湿度50、70%(室温30℃のみ80%)、気流0.1 m/s 合計6条件である。

被験者は男子学生6名、着衣はトランクスのみ約0 cloである。被験者は、中立温度(27.5℃、55%)の準備室に1時間滞在し、その後実験室へ移動して180分間椅座で過ごす。この間、準備室・実験室を通して5分間隔で皮膚表面温度の測定、実験室入室後は15分間隔で体重、気温、湿度、グローブ温度、被験者の主観申告を記録する。皮膚表面温度・気温・グローブ温度の測定にはサーミスタ温度計(タカラK722/センサー直径1mm)、体重測定は電子天秤(A&D HP-100/最小表示1g)、湿度の測定はアースマン乾湿計を使用した。なお、皮膚表面温度の測定、平均皮温の算出にはHardy-DuBoisの7点法を用いた。

実験III: 着衣0 clo、エルゴメータ120分の実験

実験条件(1998年11月): 室温16、19、22、28、34℃、相対湿度50%、気流0.1 m/s 合計5条件である。

被験者は男子学生4名、着衣はトランクスのみ約0 cloである。被験者は中立条件(27.5℃、55%)の準備室に30分間滞在し、その後実験室へ移動して『1分間の立位: 体重測定』と『9分間のエルゴメータ運動』を1サイクルとする10分周期の作業(平均代謝量2.8 met、外部機械仕事率0.16)を120分間続ける。自転車エルゴメータ運動時の代謝量を3 metに設定し、この代謝を維持するようにエルゴメータの負荷を28.5 W/m²に調整した。この間、準備室・実験室を通して5分間

隔で皮膚表面温度の測定、実験室入室後は10分間隔で体重、気温、湿度、グローブ温度、被験者の主観申告を記録する。エルゴメータはキャットアイ製(EC-1600)を使用。その他の機器は実験IIと同様で、皮膚表面温度・気温・グローブ温度の測定にはサーミスタ温度計(タカラK722/センサー直径1mm)、体重測定は電子天秤(A&D HP-100/最小表示1g)、湿度の測定はアースマン乾湿計を使用した。皮膚表面温度の測定、平均皮温の算出にはHardy-DuBoisの7点法を用いた。

なお、湿度感(Air Humidity Sensation = AHS)の申告には、次の尺度を用いた。+3 = 非常に湿っている、+2 = 湿っている、+1 = やや湿っている、0 = どちらでもない、-1 = やや乾燥している、-2 = 乾燥している、-3 = 非常に乾燥している

表1 実験条件

流速[m/s]	気温[℃]										
	16	19	22	28	30	31	32	33	34	36	
0.1	■	■	■	○	●	△	○	△	●	○	●
0.3				△	○	△	○	△	○	△	○
0.6				△	○	△	○	△	○	△	○
1.2					○	△	○	△	○	△	○
1.8					△	△	△	△	△	△	△

●: RH50% 0clo, △: RH70% 0clo(気温30℃のみRH80%)
 ○: RH50% 0.3clo, △: RH80% 0.3clo
 ■: RH50% 0clo、相対風速0.18m/s (自転車エルゴメータ)
 ◇: RH50% 0.3clo 1.2m/s

表2 被験者(男性)

実験名(人数)	年齢[才]	身長[m]	体重[kg]	体表面積[m ²]
実験I a (6)	22.3 (±0.4)	1.71 (±0.04)	63.5 (±5.0)	1.74 (±0.06)
実験I b (6)	23.2 (±0.9)	1.70 (不明)	62.0 (不明)	1.71 (不明)
実験I c (3)	21.8 (±0.6)	1.75 (±0.05)	65.7 (±6.0)	1.79 (±0.09)
実験II (6)	21.8 (±0.4)	1.74 (±0.03)	62.1 (±2.9)	1.74 (±0.05)
実験III (4)	22.7 (±0.9)	1.66 (±0.04)	60.0 (±2.7)	1.66 (±0.06)

体表面積(DuBois面積) = 0.202(体重)^{0.425} × (身長)^{0.725} [m²]
 体重 [kg]、身長 [m]

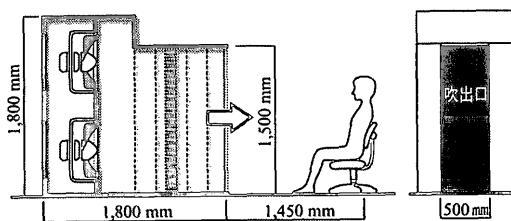


図1 気流発生装置

3 実験結果と考察

3.1 経時変化

図2に平均皮温と湿度感の経時変化を示す(図中の数値は℃-%)。今回の実験条件のような暑熱環境においては、30分から1時間程度でほぼ定常とみなすことのできる状態に落ち着くことがわかる。特に湿度感、実験開始後ほとんど一定の値を示していることがわかる。このことから実験I a,bに関しては、30分経過した実験終了時の「湿度感」の値を定常値とみなしても大差ないと考えられる。実験I c、II、IIIに関しては、実験開始後60分以降の平均値を定常値として使用する。

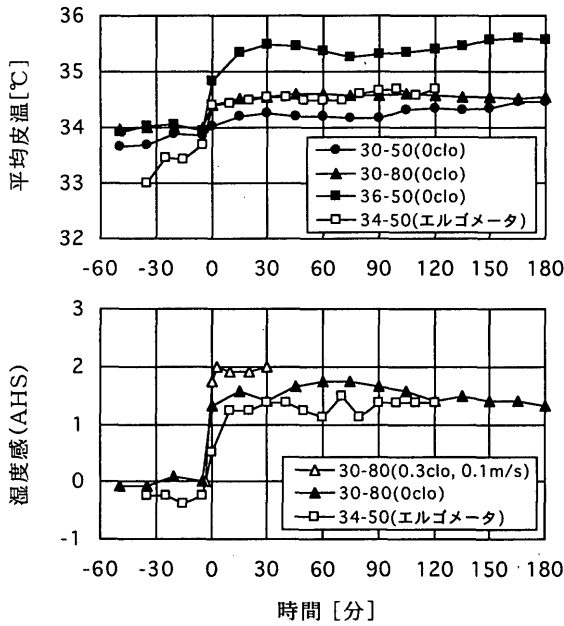


図2 平均皮温と湿度感の経時変化

3.2 皮膚相対湿度

皮膚相対湿度 RH_{sk} は皮膚に接する空気の水蒸気圧 p_{sksf} と平均皮温における飽和水蒸気圧 p_{sk} の関係によって次式で定義される^{15, 16)}。

$$RH_{sk} = p_{sksf} / p_{sk} \quad \text{ND (1)}$$

上式から、次に示す既存の皮膚相対湿度の関係式¹⁵⁾が導かれる。詳細はAPPENDIX IIを参照。

$$RH_{sk} = w + (1 - w)p_n / p_{sk} \quad \text{ND (2)}$$

ここで、濡れ率 w は皮膚表面からの蒸発密度(拡散蒸散と発汗) q_{wsk} と最大蒸発密度 q_{wmax} の関係として次式で定義する。

$$w = q_{wsk} / q_{wmax} \quad \text{ND (3)}$$

$$= q_{wsk} / \{k_{max} (p_{sk} - p_n) / k_L\} \quad \text{ND (4)}$$

a) 皮膚表面からの蒸発密度 q_{wsk} の算出方法

実験結果を用いて q_{wsk} を算出する方法を示す。体重減少には、呼吸と体表からの水分流出(蒸発と滴下)、呼吸のガス交換による体重減少、体表と着衣への水分蓄積、が関与するが、本論文では呼吸のガス交換による体重減少、体表と着衣への水分蓄積の影響は無視した。つまり、皮膚表面からの蒸発密度(拡散蒸散と発汗) q_{wsk} は体重減少密度 q_{wb} から呼吸による蒸発密度 q_{wres} を差引くことで次式で推定する。

$$q_{wsk} = q_{wb} - q_{wres} \quad \text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2) \quad (5)$$

ここで、呼吸による体重減少には次の関係式を適用した¹⁾。

$$q_{wres} = k_{Lres} (p_{ex} - p_n) / k_L = 0.0173 q_M (5.87 - p_n) / k_L \quad \text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2) \quad (6)$$

b) 平均皮温と皮膚相対湿度の理論的予測値の検証(実験結果との比較)

実験 I a, b では平均皮温などの生理量は測定していない。このときの皮膚相対湿度 RH_{sk} は、APPENDIX I に示す予測式^{17-19, 21)}(式(A4)、(A6))を用いて算定した。図3, 4 は、この予測式の適合性を実験 I c, II, III の実測値と比較することにより検証したものである。同図は、予測値が実測値を十分反映することを示している。

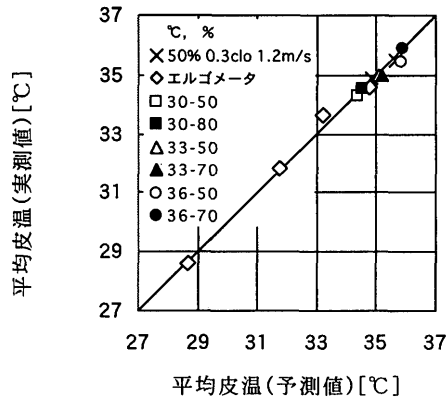


図3 平均皮温 t_{sk} : 予測値と実測値の比較

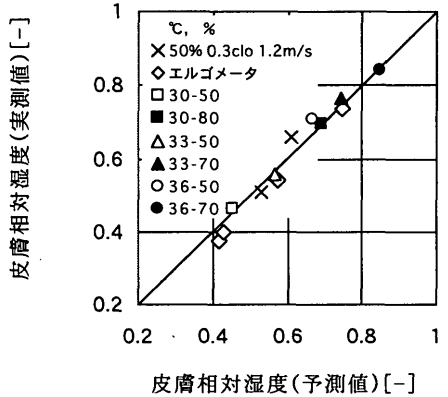


図4 皮膚相対湿度 RH_{sk} : 予測値と実測値の比較

3.3 湿度感と皮膚相対湿度 RH_{sk}

図5 は、湿度感と皮膚相対湿度 RH_{sk} の関係を示したものである。実験 I c, II, III については、実測した平均皮温 t_{sk} と蒸発量を適用した濡れ率 w を用い、実験 I a, b の平均皮温 t_{sk} と濡れ率 w は、上記のように予測値を用いた(APPENDIX I、式(A4)、式(A6)参照)。

湿度感と皮膚相対湿度 RH_{sk} の相関が高いことがわかる。特に、裸体時の実験 II, III (図中の■、●、▲) はほぼ一直線上に並んでいる。

このとき、湿度感 (AHS: Air Humidity Sensation) は皮膚相対湿度

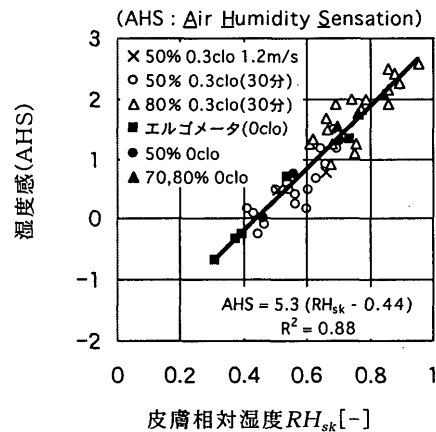


図5 皮膚相対湿度 RH_{sk} と湿度感の関係

RH_{sk} の関数として次式で表わされる。

$$AHS = 5.3 (RH_{sk} - 0.44) \quad ND \quad (7)$$

上の関係式より、湿度感が中立の「(0)どちらでもない」のときの皮膚相対湿度 RH_{sk} は44%、「(+3)非常に湿っている」は皮膚相対湿度がほぼ100%の飽和状態に対応することがわかる。

図6は皮膚相対湿度と湿度感の関係について、本研究の実験結果と既存の研究結果^{13,14,24)}を比較したものである。既存の研究については、皮膚相対湿度を実験条件を基に平均皮温予測式(式(A4))、皮膚表面の濡れ率(式(A6))を用いて推測した。また、既存の研究の「乾湿感」は湿度感と同じ意味とみなして本研究の尺度に変換して統一した。概ね良い関係を示しており、湿度感の評価に皮膚相対湿度が有効であるといえる。なお、これらの実験は、伊藤¹³⁾は8~9月、小関・田辺¹⁴⁾は9~10月に行われた実験である。

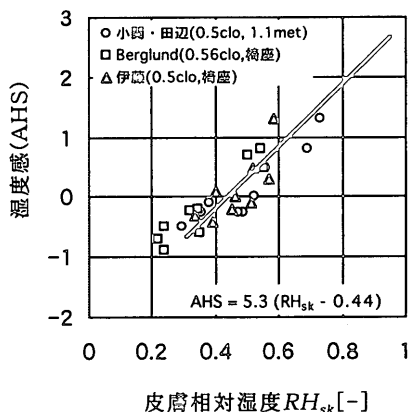


図6 皮膚相対湿度 RH_{sk} と湿度感の関係^{13,14,24)}
(既存の結果との比較)

3.4 湿度感と空気の水蒸気圧

図7に湿度感と空気の水蒸気圧 p_a の関係を示す。同図から、湿度感が空気の水蒸気圧と高い相関を有していることがわかる。これは、既存⁹⁾の「湿度感が空気の水蒸気圧(絶対湿度)の影響を受ける」結果と矛盾しない。しかし、図5との大きな違いは、運動時(エルゴメータ)と椅座時(いずれも裸体)の結果が異なった傾向を示しており、同一直線上にないことである。運動時の方が、同じ水蒸気圧でも湿度感が高くなっている。これは運動時の発汗量が椅座時より多いことが原因と

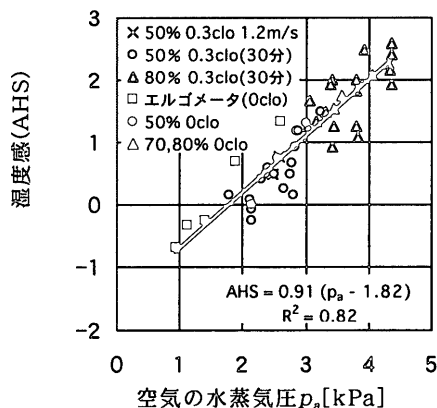


図7 空気の水蒸気圧と湿度感の関係

考えられる。この考えが正しいとすると、発汗量は全身温感と密接に係わっているのが既存の研究^{7,14)}の「湿度感が気温の影響を受ける」ことになり、また、気流・着衣が環境への水蒸気拡散に影響することから、同じ水蒸気圧の環境の下でも湿度感が異なることが予想される。

着衣の影響については、今回の実験では明確には表れていないが、これは着衣量0.3 cloと0 cloと、その差が小さいためと考えられる。

3.5 湿度感と気流速度

気流速度の影響を調べたのが図8、9である。これらは、着衣時0.3 cloの実験結果を流速ごとに表したものである。図中の直線は、流速別の回帰直線の傾きに有意差が認められなかったため(有意水準5%)、傾きが同じとした場合の流速別の直線である。

まず、図8は湿度感を RH_{sk} に対して示したものである。流速の一番大きい1.8 m/sが一番下、次いで1.2 m/sが辛うじて下から2番目とはなるが、それ以外は明確ではない。図8についての共分散分析の結果、湿度感と RH_{sk} の関係においては、各流速間に有意な差は認められなかった(有意水準5%)。つまり、皮膚相対湿度が湿度感を良く表現していると言える。

一方、湿度感を周囲空気の水蒸気圧 p_a に対して示した図9では、直線は上から順に0.1、0.3、0.6、1.2、1.8 m/sと流速が大きいくほど湿度感が小さくなる傾向が明確に読み取れる。共分散分析の結果、湿度感と周囲空気の水蒸気圧の関係では流速間に有意な差が認められた(有意水準0.01%)。すなわち、空気の水蒸気圧の単一尺度のみでは気流の影響を含めた湿度感を評価できないことがわかる。

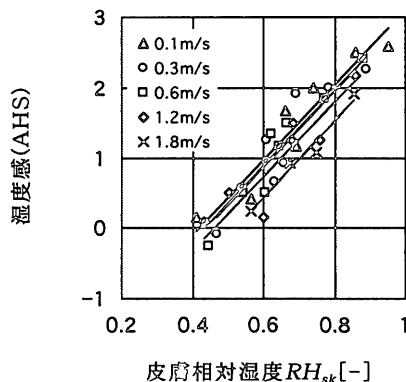


図8 皮膚相対湿度 RH_{sk} と湿度感の関係

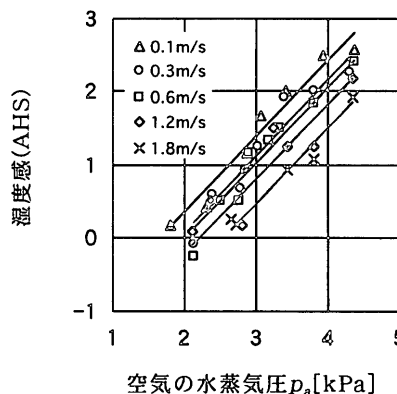


図9 空気の水蒸気圧 p_a と湿度感の関係

3.6 湿度感に関する考察

以上のことから、「湿っている側」の湿度感に関しては、代謝と気温・湿度・気流などの影響を総合的に反映した皮膚相対湿度がその良い指標であることが、ほぼ確認されたと言うことができよう。

これは、湿度感が皮膚表面の角質層の含水率と関わることを示唆している。すなわち、一般に、木材・紙などの材質の含湿率は、それに接する空気の相対湿度の関数であることが知られているが、角質層も同様に皮膚表面の空気の相対湿度の影響を強く受けると考えることができる。つまり、日常生活で感じる湿度感は、「室内環境の空気の湿度」そのものに対してではなく、「皮膚表面に接する空気の湿度」に対する感覚であることを示している。

一方、呼吸に係わる粘膜からの蒸発には周囲空気(吸気)の水蒸気圧が関係しているが、外部環境の人体に対する風速とは無関係である。仮に、呼吸器系の粘膜が湿度感に卓越した影響を有するとすれば、呼吸器を通過する気流の影響は受けても、人体周囲の風速の影響は受けないことになる。しかし図9に示されている周囲空気の水蒸気圧(=吸気の水蒸気圧)との関係では、湿度感は明らかに環境側の風速の影響を受けており、従って、鼻腔・咽頭・気管等の粘膜は「湿っている側の感覚」には大きな影響を有するとは考え難い。

4 結論

湿度感(AHS)が、皮膚相対湿度 RH_{sk} の関数で表現できることを、3種類の実験結果(実験条件:代謝量 = 1 & 2.8 met, 気流 = 0.1 ~ 1.8 m/s, 相対湿度 = 50 & 80%, 着衣 = 0 & 0.3 clo) を基にして示した。その結果、湿度感(AHS)を皮膚相対湿度 RH_{sk} の関数として表わす次式を得た。

$$AHS = 5.3 (RH_{sk} - 0.44) \quad ND$$

ここで、AHS: 湿度感 (+3 = 非常に湿っている, +2 = 湿っている, +1 = やや湿っている, 0 = どちらでもない, -1 = やや乾燥している, -2 = 乾燥している, -3 = 非常に乾燥している)

ただし、上式の適用範囲は $0.4 < RH_{sk} \leq 1$ 、全身温感が中立より暑い側とする。この結果は、人間が感じる湿度感が「皮膚表面に接している空気の湿度」に対する感覚であり、全身温感と発汗の増加の影響を受け、同時に着衣と気流の影響も受けることを示している。湿度感が中立時の皮膚相対湿度 RH_{sk} は44%、「非常に湿っている」ではほぼ100%の飽和状態であった。

謝辞 データの分析や実験に協力いただいた後藤友邦、竹内崇、遠藤裕輔、岩本昌也、浜田博之、秋山竜也、伊藤亜希彦、穂苅高志、宮下雅之、森原崇、赤上ゆきの、山村由香、三井雪恵、小笠原美詠、94、95、96年暑熱実験に被験者として参加していただいた諸氏に感謝します。なお、この研究は、国立環境研究所を中心とする地球環境研究プロジェクトの一貫として進められた「家庭等における二酸化炭素排出抑制システムに関する研究(平成3-5年)」「地球温暖化防止対策技術の総合評価に関する研究(平成6-8年)」の研究の過程で発想されたものであり関係各位に感謝いたします。

注1) 本研究では、湿度感を「(+湿っている側~(-)乾燥している側」で表現する。類似する用語に乾湿度「(+乾燥している側~(-)湿っている側」^{6~10)}がある。両者は尺度が逆転している以外は、同じ意味と著者らは考えている。

本論文の内容の一部は下記の機会に報告した。

- a) 松尾朋浩、窪田英樹、竹内崇、堀井崇司、鎌田紀彦: 夏期室内環境の評価(2)空気の湿度感に関する一考察、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東D2)、No.41179、373-374、1997.9.
- b) 松尾朋浩、窪田英樹、朝比奈亮、浜田博之、山越健弘: 椅座時の温熱性発汗と人体平均皮膚表面温度に関する基礎実験、空気調和・衛生工学北海道支部、77-80、1999.3.
- c) 松尾朋浩、窪田英樹、朝比奈亮、浜田博之、山越健弘: 椅座時の温熱性発汗・人体平均皮温・湿度感に関する基礎実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国D)、No.41164、327-328、1999.9.

参考文献

- 1) Fanger, P. O.,: Thermal Comfort, McGraw-Hill, New York, 1972.
- 2) Gagge, A. P., Stolwijk, J. A., Nishi, Y.,: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Trans., 77(1), 247-262, 1971.
- 3) Berglund, L. G.,: Comfort and Humidity, AHRAE Journal, August, 35-41, 1998.
- 4) Gagge, A. P., Fobelets, A. P., Berglund, L. G.,: A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Trans., 92(2B), 709-731, 1986.
- 5) Gonzalez, R. R., Berglund, L. G., Gagge, A. P.: Indices of thermoregulatory strain for moderate exercise in the heat, Journal of Applied Physiology: Respiration Environment Exercise Physiology, 44(6), 889-899, 1978.
- 6) 岩本静男、石井昭夫、片山忠久、堤純一郎、酒井英二、籠田真一郎: 温熱環境における低湿冷房の影響に関する研究(その1)被験者による申告実験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸D)、4504、1007-1008、1992.
- 7) 酒井英二、石井昭夫、片山忠久、堤純一郎、岩本静男、籠田真一郎: 温熱環境における低湿冷房の影響に関する研究(その2)被験者による申告実験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸D)、4505、1009-1010、1992.
- 8) 酒井英二、石井昭夫、岩本静男、片山忠久、堤純一郎: 冷房環境における温熱感覚申告(その1)湿度の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東D)、No.4672、1343-1344、1993.
- 9) 石井昭夫、岩本静男、酒井英二、片山忠久、堤純一郎: 冷房環境における温熱感覚申告(その2)温熱指標による評価、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東D)、No.4673、1345-1346、1993.
- 10) 姚鳳軍、石井昭夫、岩本静男、山下盛久、酒井英二: 温熱感覚に及ぼす湿度の影響に関する研究(その1)通常エアコンと湿度制御型エアコンの比較実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北D)、No.4355、709-710、1991.
- 11) 酒井英二、石井昭夫、岩本静男、片山忠久、塩月義隆、堤純一郎、山下盛久、姚鳳軍: 温熱感覚に及ぼす湿度の影響に関する研究(その2)人工気候室における被験者実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北D)、No.4356、711-712、1991.
- 12) 深井一夫、伊藤宏、佐々木真希: 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 冬期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(関東D)、4674、1347-1348、1993.

- 13) 伊藤宏、深井一夫、佐々木真希：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2 夏季被験者実験による高温側の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東D)、4675、1349-1350、1993。
- 14) 小関敬子、田辺新一、今村寿子、鈴木孝佳：オフィスにおける湿度が熱的快適性に与える影響 その1 オフィス環境試験室における被験者実験結果、空気調和・衛生工学会学術講演論文集(熊本)、G-5、433-436、1994.10。
- 15) Berglund, L. G., Cunningham, and D. J.: Parameters of Human Discomfort in Warm Environments, ASHRAE Trans., Vol.92, part 2B, 732-746, 1986.
- 16) Mole, R. H.: The relative humidity of the skin, Journal of Physiology, 107, 399-411, and 1948.
- 17) 窪田英樹、松尾朋浩、伊地知健、鎌田紀彦、若松伸司：温熱性発汗特性を考慮した椅座時の平均皮膚表面温度の予測、日本建築学会計画系論文集、No.532、2000.6。
- 18) Kubota, H., Ijichi, T., Kamata, N.: Mean skin temperature as an index of human response to the thermal environment, Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1996.7, Nagoya, JAPAN, 221-226.
- 19) 真木学、窪田英樹、山崎大史、松尾朋浩、竹内崇：運動時の発汗特性と平均皮膚温予測モデル、空気調和・衛生工学会北海道支部、195-198、1998.3。
- 20) ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS, 1997.
- 21) 松尾朋浩、窪田英樹、真木学、伊地知健、鎌田紀彦、若松伸司：運動時の温熱性発汗と平均皮膚表面温度の予測、日本建築学会計画系論文集、No.526、107-113、1999.12。
- 22) Hardy, J. D., DuBois, E. F.: The technic of measuring radiation and convection, Journal of Nutrition, Vol.15, No.5, 461-475, 1938.
- 23) Mitchell, D., Wyndham, C. H.: Comparison of weighting formulas for calculating mean skin temperature, Journal of Applied Physiology, Vol.26, No.5, 616-622, 1969.5.
- 24) Berglund, L. G., Cain, W. S.: Perceived air quality and the thermal environment, The Human Equation: Health and Comfort, Proceedings of ASHRAE/SOEH Conferece IAQ '89 Atlanta: ASHRAE, 93-99, 1989.
- 25) McClough, E. A., Jones, B. W., Tamura, T., A data base for determining the evaporative resistance of clothing, AHRAE Trans., Vol. 95(2), pp.316-328, 1989.
- 26) Winslow, C. -E., Gagge, A. p., Herrington, B. P., The influence of air movement upon heat loss from the clothed human body, Journal of Physiology, 127, pp.505-518, 1939.
- 27) Nishi, Y., Gagge, A. P., Moisture permeation of clothing - a factor governing thermal equilibrium and comfort, AHRAE Trans., Vol.76, Part1, pp.137-145, 1970.
- 28) Oohori, T., Berglund, L. G., Gagge, A. P., Comparison of current two-parameters indices of vapor permeation of clothing - as factors governing thermal equilibrium and human comfort, AHRAE Trans., Vol.91, Part2A, pp.85-101, 1984.
- 29) Winslow, C. -E. A., Herrington, L. P., Gagge, A. P., Physiological reaction of the human body to varying environmental temperature, The American Journal of Physiology, Vol.120, No.1, pp.1-22, 1937.

APPENDIX I :

温熱性発汗環境における平均皮膚表面温度の理論的予測^{17-19,21)}

人体と環境との間の熱平衡式は、汗が全て体の表面で蒸発する場合、次式のように表される。

$$q_M(1 - \eta) = q_{Sres} + q_{Lres} + q_{dif} + q_{swe} + q_{swt} + q_r + q_c \quad \text{W/m}^2 \quad (\text{A1})$$

この熱平衡式において、平均皮温を含むのは q_{dif} 、 q_{swt} 、 q_r 、 q_c の4項である。温熱性発汗 q_{swt} に対しては次式を適用し、

$$q_{swt} = k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad \text{W/m}^2 \quad (\text{A2})^{21)}$$

飽和水蒸気圧 P_{sk} を平均皮温 t_{sk} の一次式で近似する。すなわち、

$$P_{sk} \approx a_{sk} t_{sk} + b_{sk} \quad \text{kPa} \quad (\text{A3})$$

これらの式(A2)、(A3)を適用すると、上記の4項 q_{dif} 、 q_{swt} 、 q_r 、 q_c は全て平均皮温 t_{sk} の一次式で表されることになり、平均皮温が上記の熱平衡式(A1)から次のように得られる。

$$t_{sk} = [q_M(1 - \eta) - \{q_{Sres} + q_{Lres} + k_{dif}(b_{sk} - P_a) + q_{swe}(1 - k_{dif}/k_{max}) - k_{swt}(1 - k_{dif}/k_{max})t_{sksw} - k_{rc}t_o\}] / [a_{sk}k_{dif} + k_{swt}(1 - k_{dif}/k_{max}) + k_{rc}] \quad (t_{sksw} \leq t_{sk} \leq 36) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{A4})$$

この結果を利用して、発汗による濡れ率は次式のように表される。

$$w_{sw} = q_{sw} / q_{max} = \{k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) + q_{swe}\} / \{k_{max}(P_{sk} - P_a)\} \quad \text{ND} \quad (\text{A5})$$

一方、皮膚表面の濡れ率 w は次式のように表わされる。

$$w = w_{dif} + w_{sw} = (q_{dif} + q_{sw}) / q_{max} = (1 - w_{sw})k_{dif} / k_{max} + w_{sw} \quad \text{ND} \quad (\text{A6})$$

$$k_{max} = 1 / (R_{cl} + R_{se}) = 1 / \{0.155I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl})\} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa}) \quad (\text{A7})^{27,28)}$$

式(A4)、(A5)の計算には、下記の特性を適用した¹⁾、

$$q_{Sres} = k_{sres}(t_{ex} - t_a) = 0.0014 q_M(34.0 - t_a) \quad \text{W/m}^2 \quad (\text{A8})^{11)}$$

$$q_{Lres} = k_{Lres}(P_{ex} - P_a) = 0.0173 q_M(5.87 - P_a) \quad \text{W/m}^2 \quad (\text{A9})^{11)}$$

$$k_{dif} = 1 / (R_{dif} + R_{cle} + R_{se}) = 1 / \{0.328 + 0.155I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl})\} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa}) \quad (\text{A10})^{1,27,28)}$$

$$i_{cl} = 0.34 \quad \text{ND} \quad (\text{A11})^{20,25)}$$

$$h_c = 12.1v^{0.5} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (\text{A12})^{20)}$$

$$a_{sk} = 0.270 \text{ kPa/K}, \quad b_{sk} = -3.834 \text{ kPa} \quad (\text{A13})$$

$$q_{swe} = 0.42 \{q_M(1 - \eta) - 58.14\} \quad \text{W/m}^2 \quad (\text{A14})^{11)}$$

$$k_{swt} = 28 \quad (t_{sk} \geq t_{sksw}), \quad k_{swt} = 0 \quad (t_{sk} < t_{sksw}) \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (\text{A15})^{21)}$$

$$k_{dif} / k_{max} = \{0.155I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl})\} / \{0.328 + 0.155I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl})\} \quad \text{ND} \quad (\text{A16})$$

$$q_{rc} = k_{rc}(t_{sk} - t_{op}) \quad \text{W/m}^2 \quad (\text{A17})$$

$$k_{rc} = 1 / \{0.155I_{cl} + 1 / (h \cdot f_{cl})\} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (\text{A18})$$

$$t_{sksw} = \begin{cases} 33.8 & (\text{実験 I, II 椅座時, 1 met}) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{A19})^{17)} \\ 31.8 & (\text{実験 III エルゴメータ, 2.8 met}) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{A20})^{21)} \end{cases}$$

$$t_{op} = (h_c t_a + h_{rop} t_{rop}) / (h_c + h_{rop}) \quad \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{A21})^{29)}$$

$$h_{rop} = 4 \varepsilon \sigma \{273.2 + (t_a + t_{rop}) / 2\}^3 \cdot f_{eff} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (\text{A22})$$

APPENDIX II :

皮膚相対湿度 RH_{sk} ^{15, 16, 24)}

皮膚相対湿度 RH_{sk} は皮膚に接する空気の水蒸気圧 P_{sksf} と平均皮温における飽和水蒸気圧 P_{sk} の関係によって次式で定義される。

$$RH_{sk} = P_{sksf} / P_{sk} \quad \text{ND} \quad (\text{A23})$$

一方、拡散蒸散と発汗によって人体皮膚表面からの蒸発密度 q_{wsk} は

次のように示される。

$$q_{wsk} = (p_{sksf} - p_a) / (R_{wcle} + R_{wse}) \quad \text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2) \quad (\text{A24})$$

また、皮膚が完全に水で濡れた場合の皮膚表面からの最大蒸発密度 q_{wmax} は次式で示される。

$$q_{wmax} = (p_{sk} - p_a) / (R_{wcle} + R_{wse}) \quad \text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2) \quad (\text{A25})$$

このとき、皮膚表面の濡れ率 w は次のように示される。

$$w = q_{wsk} / q_{wmax} \quad \text{ND} \quad (\text{A26})$$

$$= (p_{sksf} - p_a) / (p_{sk} - p_a)$$

つまり、皮膚表面の水蒸気圧 p_{sksf} は皮膚表面の濡れ率 w との関係により次式で示される。

$$p_{sksf} = w p_{sk} + (1 - w) p_a \quad \text{kPa} \quad (\text{A27})$$

よって、次に示す既存の皮膚相対湿度の関係式¹⁵⁾が導かれる。

$$RH_{sk} = w + (1 - w) p_a / p_{sk} \quad \text{ND} \quad (\text{A28})$$

記号の説明

a_{sk} : 平均皮温 t_{sk} における飽和水蒸気圧 P_{sk} に関わる係数 kPa/K

$$P_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk} \quad (a_{sk} = 0.270, 27 < t_{sk} < 37 \text{ } ^\circ\text{C})$$

b_{sk} : 平均皮温 t_{sk} における飽和水蒸気圧 P_{sk} に関わる係数 kPa

$$P_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk} \quad (b_{sk} = -3.83, 27 < t_{sk} < 37 \text{ } ^\circ\text{C})$$

f_{cl} : 人体表面積増加率 (= 着衣表面積 / DuBois 面積) ND

f_{eff} : 人体有効放射面積率 ND

h : 総合熱伝達率 (= $h_c + h_{rop}$) $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

h_c : 対流熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

h_r : 放射熱伝達率 (= $4 \epsilon \sigma \{273.2 + (t_a + t_{rop})/2\}^3$) $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

h_{rop} : 作用放射熱伝達率 (= $f_{eff} \cdot h_r$) $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

i_{cl} : 着衣の透湿効率 ND

k_{dif} : 拡散による蒸散熱透過率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$

k_L : 潜熱変換係数 $\text{g}/\text{h} \rightarrow \text{W}$ (= $H_L/3600=0.674$) $\text{W}/(\text{g}/\text{h})$

k_{Lres} : 呼吸による潜熱流率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$

k_{max} : 濡れた皮膚表面からの蒸散熱透過率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$

k_{rc} : 放射と対流による熱透過率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

k_{Sres} : 呼吸による顕熱流率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

k_{swt} : 温熱性発汗による蒸散熱流率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

k_{swe} : 中立温感時の運動性発汗による蒸散熱流率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

H_L : 水の蒸発潜熱 (= 2.43×10^3) J/g

LR : ルイス数 (=16.5) K/kPa

p_a : 周囲空気の水蒸気圧 kPa

p_{ex} : 呼気の水蒸気圧 kPa

p_{sk} : 平均皮膚表面温度における飽和水蒸気圧 kPa

p_{sksf} : 皮膚表面に接する空気の水蒸気圧 kPa

q_c : 対流による熱流密度 W/m^2

q_{dif} : 拡散蒸散による熱流密度 W/m^2

q_{exw} : 外部仕事率密度 W/m^2

q_{Lres} : 呼吸による蒸発熱流密度 W/m^2

q_{max} : 濡れた人体表面からの最大蒸発熱流密度 W/m^2

q_M : 代謝熱流密度 W/m^2

q_r : 放射による熱流密度 W/m^2

q_{Sres} : 呼吸による顕熱流密度 W/m^2

q_{Lsk} : 人体表面からの蒸散熱流密度 (= $q_{dif} + q_{sw}$) W/m^2

q_{sw} : 発汗による蒸散熱流密度 (= $q_{swe} + q_{swt}$) W/m^2

q_{swe} : 中立温感時の運動性発汗による蒸散熱流密度 W/m^2

q_{swt} : 温熱性発汗による蒸散熱流密度 W/m^2

q_{wb} : 人体からの水分流出による体重減少密度 $\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$

q_{wdif} : 拡散蒸散による蒸発密度 $\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$

q_{wmax} : 濡れた人体表面からの最大蒸発密度 $\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$

q_{wres} : 呼吸による蒸発密度 $\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$

q_{wsk} : 人体表面からの蒸発密度 (= $q_{wdif} + q_{wsw}$) $\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$

R_{cl} : 着衣熱抵抗 (= $0.155 I_{cl}$) $(\text{K} \cdot \text{m}^2)/\text{W}$

R_{cle} : 着衣の湿気抵抗 $(\text{kPa} \cdot \text{m}^2)/\text{W}$

R_s : 人体の表面熱伝達抵抗 $(\text{K} \cdot \text{m}^2)/\text{W}$

R_{se} : 人体の表面湿気伝達抵抗 $(\text{kPa} \cdot \text{m}^2)/\text{W}$

R_{wcle} : 着衣の湿気抵抗 $(\text{kPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h})/\text{g}$

R_{wse} : 人体の表面湿気伝達抵抗 $(\text{kPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h})/\text{g}$

RH : 周囲空気の相対湿度 ND

RH_{sk} : 皮膚表面に接する空気の相対湿度 ND

t_a : 室温 $^\circ\text{C}$

t_{ex} : 呼気温度 $^\circ\text{C}$

t_{op} : 作用温度 (= $(h_{rop} t_{rop} + h_c t_a) / (h_{rop} + h_c)$) $^\circ\text{C}$

t_{rop} : 作用放射温度 $^\circ\text{C}$

t_{sk} : 平均皮膚表面温度 $^\circ\text{C}$

t_{sksw} : 温熱性発汗が始まる臨界平均皮膚表面温度 $^\circ\text{C}$

v : 相対風速 m/s

w : 皮膚表面の濡れ率 (= $w_{dif} + w_{sw}$) ND

w_{dif} : 拡散蒸散による濡れ率 (= q_{dif} / q_{max}) ND

w_{sw} : 発汗による濡れ率 (= q_{sw} / q_{max}) ND

η : 外部機械仕事率 (= q_{exw} / q_M) ND

(1999年7月10日原稿受理, 2000年1月28日採用決定)