熱的中立よりわずかに暑熱側の条件における高湿度が不快感に及ぼす影響

INFLUENCE OF HIGH HUMIDITY ON DISCOMFORT SENSATION UNDER CONDITIONS SLIGHTLY INCLINED TO HOT SIDE FROM THERMAL NEUTRALITY

川岸 佑衣果^{*1}, 高 田 暁^{*2}

Yuika KAWAGISHI and Satoru TAKADA

To clarify whether the discomfort caused under high humidity conditions is caused by the humidness/wetness sensations without strong heat/warm sensations, the subject experiments were conducted. As the results, around thermal neutrality on hot/warm side (0 to +0.5 in PMV scale), the discomfort sensation tended to become more intense as the air humidity became higher, and the humidness/wetness sensations might contribute to the discomfort sensation as well as heat/warm sensation. It was suggested that the discomfort sensation vote correlated with skin wettedness as well as PMV, SET* under the conditions in this study.

Keywords: High-humidity, Uncomfortable sensation, Thermal sensation, Humidity sensation, Subject experiment, Cooling

高湿度, 不快感, 温冷感, 湿度感, 被験者実験, 冷房

1. はじめに

夏期の室内において、居住者の快適性を旨として温熱環境を制御することは健康の維持や作業効率の向上を図る上で重要である。空調機による冷房において、温度のみが制御され、湿度の制御は成り行きとなっていることが多く、外気の湿度に応じて室内の湿度も変化することが考えられる。近年、省エネルギー化の流れとクールビズの普及、東日本大震災以後の節電への要請により、冷房の設定温度を高くする傾向がある^{1), 2)}。また、梅雨時期の冷房の使用が制限され、窓を開けることによって室内環境が高湿度な外気の影響を直接受けるケースも考えられる。さらに、エアコンのCOP向上を目的として冷媒温度を高くする傾向にあり、全体として冷房時の除湿量が低くなっている³⁾。このように、梅雨時期から夏期にかけて、室内湿度が高くなる要素が増えてきていると言える。室内が高湿となると室内環境への満足度が低下し、それにともなって作業効率が低下することが報告されている^{4), 5)}。強い暑さを感じていない場合でも、湿度が高くなることによって不快感が生じることがあれば、同様にして作業性や集中力の低下が生じる可能性が考えられる。

湿度の影響が考慮された温熱評価指標はこれまで数多く提案されている。Hatchらは、発汗が熱ストレスに対して適切な指標となり得ると考え、ぬれ面積率が高いほど値が大きくなる“Heat Stress Index”を提案している⁶⁾が、熱ストレスと不快感との関係については言及されていない。Fangerの予測平均温冷感申告(PMV)⁷⁾は、人体の熱収支式が基礎になっており、その中で湿度の影響は考慮されているが、熱収支と温冷感申告値の対応関係がモデル化されている

ため、湿度が不快感に直接的に及ぼす影響がモデル化されているわけではない。ASHRAEは、温冷感が中立的であることを不快でないための必要条件としている⁸⁾が、PMVは不快感そのものを対象とした指標ではない。Gaggeらの標準新有効温度(SET*)では、温冷感が等しくなるのが、皮膚温、皮膚表面熱流、ぬれ率が同一となる条件であるとして温熱評価指標を構成している⁹⁾。Hardyらにより、ET*と不快感との関連も示されている¹⁰⁾が、本来的に、ET*やSET*は温冷感を基礎とした評価指標であり、PMVと同様、人体の熱収支式において湿度の影響が考慮されているが、湿度と不快感の関係をモデル化したものは含まれていない。Gaggeらは、空気線図上で等しい温冷感を与える等ET*値を一定の平均皮膚温かつ一定のぬれ面積率の組合せで与えているが、持田らの実験¹¹⁾により、一定の平均皮膚温に対して、ぬれ面積率は一定の範囲で変化するという結果が得られており、平均皮膚温ごとに取り得るぬれ率の範囲を検討して得られたぬれ面積の特性曲線をもとに求められた等平均皮膚温線群から、高湿度環境では皮膚温に及ぼす湿度の影響が大きいことが示されている^{11), 12), 13)}。

暑熱条件下での不快感について、Hardy¹⁰⁾、深井ら¹⁴⁾は、暑熱時に不快感が温冷感の上昇とともに増加することを示している。これらの研究では、高温度(31℃～35℃)を含めて分析されているため、「暑さ」と不快感がよく対応した結果が示されていると考えられ、湿度が直接的に不快感に及ぼす影響が検討されているとは言えない。Nevinsらは、気温27℃の条件下で相対湿度を1時間ごとに40%、60%、80%と変化させ、そこに被験者を曝露する実験を行い、男性

^{*1} 北陸電力(株) (研究当時神戸大学工学部建築学科)

Hokuriku Electric Power Company (Former Undergrad. Student, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Kobe Univ.)

^{*2} 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士 (工学)

Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kobe Univ., Dr.Eng.

の被験者グループが相対湿度の上昇に応じてより不快側の申告を行ったことを示している¹⁵⁾。Tanabe らは、11 の温湿度条件に被験者を曝露する被験者実験を行い、高湿度条件では不快感の申告率が高くなること、不快感の申告率とぬれ率には密接な関係があることを示している¹⁶⁾。しかし、不快感の申告の程度については言及されておらず、湿度が不快感の程度に与える影響については明らかにされていない。田辺らは、気温 25℃、28℃、30℃のそれぞれについて相対湿度を 30%、50%、70%と変えた場合に、30℃の場合のみ湿度条件間での不快感に差が見られたことを述べている¹⁷⁾。また、SET*を 28℃に固定して相対湿度を変えた場合には、不快感の申告値に差が見られないことを示している¹⁸⁾。

これらの既往研究では、不快感の申告値を採取する際に、熱的不快感、あるいは thermal discomfort であることを被験者に教示し、暑さに結び付いた不快感について答えるよう教示しているもの^{10, 17, 18)}と、そうでないもの^{14, 15)}が混在している。いずれの場合も、ある程度高温の条件下では、高湿度が不快感の発生に影響を与えることが示されており、それらは暑さと密接に関連した不快感であることが示唆されるが、熱的中立よりわずかに暑熱側の条件下での高湿度が、不快感を生じさせているか否かは明確でない。本研究では、熱的中立に比較的近い高温側の条件を選び、高湿度を含む複数の条件に被験者を曝露し、曝露中の温冷感、快不快感に加えて乾湿感、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感について申告させ、高湿度条件下での申告値の関係について検討し、熱的中立よりわずかに暑熱側の条件下での高湿度で生じる不快感が暑さ以外の湿りに関する要因によっても生じるかどうかを明らかにすることを目的とする。

Fig. 1 Temperature and humidity conditions of subject experiment (The temperature value shown at each plot is SET* value associated with the temperature and humidity conditions.)

2. 被験者実験の方法

被験者実験は、2020 年 11 月～12 月に、神戸大学内の人工気候室で行われた。図 1 に示す 7 通りの室温・相対湿度（平均放射温度が気温に等しくほぼ均一、静穏気流）の条件に対する 120 分の曝露を 4 人の被験者に対して行った。気温は 27～29℃の範囲で設定し、温冷感が中立付近になると考えられる気温 27℃条件では、相対湿度を 40%～90%の範囲で 4 条件設定した。いずれの条件においても、クールビズを想定し、着衣量は 0.5clo 相当とした（下着以外の衣服は実験者が用意したものを着用させた^{注 1)}）。実験中、被験者は椅座安静を保ち、PC 作業を行った（1.0met 程度を想定）。図 2 に実験スケジュール^{注 2)}を示す。人工気候室内で被験者が過ごす最初の 30 分間は

条件への順応のためのものであり、着替えやセンサーの取り付けもこの時間に人工気候室内で行った。人工気候室への入室から 30 分経過した後、図 3 に示す 6 つの感覚について、5 分ごとに 90 分間申告させた。表 1 に測定項目を示す。環境要素の測定はすべて 10 秒間隔で行った。実験に参加した被験者の情報を表 2 に示す。それぞれの被験者は図 2 に示す条件 (i)～(vii) すべてに参加した。実験は午前に 1 回、午後に 1 回、1 日最大 2 回実施し、同一被験者が参加する実験は 1 日最大 1 回とした。被験者には、室温・相対湿度の設定条件を伝えず、また、室内での測定器の表示値が見えないように配慮した。

Fig. 2 Protocol of an experiment

Table 1 Measurement item

Measured item	Measuring method and equipment	Interval
Temperature and relative humidity	Thermos-hygrometer with logger (Espec, RS-14)	10sec
Globe temperature	Globe ball, Thermos-hygrometer with logger (Espec, RT-14)	10sec
Air velocity	Hot-wire anemometer (KANOMAX, MODEL6543)	10sec
Carbon dioxide concentration	Carbon dioxide concentration meter with logger (Espec, THCO2)	10sec
Skin temperature	Temperature logger (Gram, LT-8A), 4-point measurement (Ramanathan's method)	10sec
Sweat rate	Sweat rate meter (SKINOS, SKW-1000)	10sec
Skin moisture content	Skin moisture meter (SCALAR, Moisture checker)	5min
Body weight	Weight scale (METTLER TOLEDO)	—
Vote	Thermal, comfort and dryness sensation (Bipolar scale, 13 steps in 0.5 increments) Clamminess, stuffiness and stickiness sensations (Unipolar scale, 7 steps in 0.5 increments)	5min

The items with the interval of 10 seconds were recorded automatically by using data loggers.

Table 2 Anthropometric data of subjects

Subject	Gender	Age	Height (cm)	Weight (kg)	Body surface area (m ²)
A	Male	22	175	69.9	1.828
B	Male	22	178	59.0	1.744
C	Female	24	166	53.4	1.600
D	Female	22	155	49.1	1.477

Fig. 3 Voting scales of thermal, comfort, dryness, clamminess, stuffiness, and stickiness sensations (Voting was conducted in Japanese.)

生理量は皮膚温、発汗量^{注3)}を10秒間隔、皮膚含水率^{注4)}を主観申告と同時に5分間隔で測定した。申告スケールは、日本建築学会の規準¹⁹⁾を参考に、温冷感、快不快感、乾湿感に加え、高湿時に生じると考えられる感覚を表す擬態語として、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感を選択し、スケール化した^{注5)}。快不快感に関しては、暑さ・寒さ、湿り感のほかに、におい、音、光など多様な要素が関係する可能性があるが、本研究では特定の要素に起因する快不快感(例えば、暑さ・寒さに起因する快不快感)に絞るような指示は与えず、「現在の室内の状態がどの程度快適あるいは不快であると感じますか」という指示のもとで被験者に申告をさせた。

3. 実験結果

(1) 温熱環境条件

表3にそれぞれの実験の $t=30\sim90(\text{min})$ の気温、相対湿度、平均放射温度の平均値を示す。気温・相対湿度ともに概ね目標通りの値となった。平均放射温度は概ね気温に近い値となった。風速は概ね静穏気流条件に保たれた^{注6)}。

(2) 心理量の測定結果

図4に $t=0\sim90(\text{min})$ の被験者の温冷感・快不快感申告値を示す。申告開始前に30分間の慣らし時間をとっていたが、申告開始後も申告値や皮膚温に変動が見られたことから、分析には申告時間のうち最終の30分間の申告値を用いることとする。

① 温冷感

被験者Aの申告値は、レンジが狭く、すべての条件でほぼ0～+1の間に収まった。被験者Bの申告値は、すべての条件で概ね0～+1の間に収まったが、時間の経過とともに細かく変動する傾向であった。被験者Cの申告値は、気温27℃、相対湿度40～75%の条件下で、時間経過にともなう変動をほとんど示さなかった。被験者Dの

申告値は、気温27、28℃の条件下ではほとんど寒い側であった。また、27℃条件では相対湿度が高くなるにつれて寒さの程度が強くなっている。実験の条件はすべてPMVが0以上となることから、被験者の温冷感の中立温度が高かったことや、冬期の実験であったため、体が冷えていたことなどが原因として考えられる。気温が29℃の条件下では、暑い側の申告となり、相対湿度が高い方が暑さの程度も強くなっている。

② 快不快感

被験者Aの申告値は、気温27、28℃の条件でほぼ中立で、時間経過にともなう変動もほとんどない。気温29℃の条件下では不快側の申告があったが、時間経過にともなって中立に近くなる傾向がみられる。申告値は他の被験者に比べて全体的にレンジが狭く、条件間の差もあまりみられなかった。被験者Bの申告値は、気温27、28℃の条件と、気温29℃、相対湿度60%の条件ではほとんど快適側であった。他の被験者は、温冷感が中立であるときに不快側となる傾向があるのに対し、被験者Bは快適側の申告をすることが多かった。また、気温29℃の条件では相対湿度が60%のときに快適側の申告であるのに対して、90%のときは不快側の申告となり、差が大きかった。被験者Cの申告値は、気温27℃の条件では相対湿度40%のときに快適側、相対湿度60%のときに中立、その他の条件では不快側となっている。気温が等しい条件で比較すると、相対湿度が高い条件でより不快側となっている。被験者Dの申告値は、すべての条件で不快側である。気温27、28℃の条件では、寒い側の申告が多く、寒さによって生じる不快感が支配的であったと考えられる。

③ 乾湿感・ジメジメ感・ムシムシ感・ベタベタ感

被験者Aの申告値は、申告開始直後は変動することが多かったが、 $t=60\sim90(\text{min})$ では気温29℃、相対湿度90%の条件を除き、ほぼ一定となった。被験者Bの乾湿感、ジメジメ感の申告値は、0.5刻みで細かく変動し、 $t=60\sim90(\text{min})$ でも一定とならない傾向があった。一方、ムシムシ感、ベタベタ感の申告値は、ほとんど変動がなく、気温29℃、相対湿度90%の条件を除いてほぼ0となった。被験者Cの乾湿感、ジメジメ感の申告値は、 $t=60\sim90(\text{min})$ でほぼ一定となったが、相対湿度が高い条件では相対湿度が低い条件に比べて変動する傾向があった。ムシムシ感の申告値は、気温27℃の条件では一定となったが、気温28℃以上の条件では変動し、 $t=60\sim90(\text{min})$ でも落ち着かなかった。ベタベタ感の申告値は、相対湿度が60%以下の条件ではほぼ一定となったが、相対湿度が高い条件では0.5刻みで変動した。被験者Dの申告値は、申告開始後から変動したが、 $t=60\sim90(\text{min})$ で一定の値に落ち着く傾向があった。

図5にそれぞれの被験者の乾湿感、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感の申告について温湿度条件別の平均値を示す。被験者によって申告の傾向が異なっており、特にジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感他は他の申告項目よりも被験者の感覚の違いによって申告に差が生じたと考えられる。被験者Aの申告は乾湿感、ジメジメ感、ベタベタ感が同じ傾向で、気温27℃条件では、相対湿度が高くなるとともに申告値も大きくなったが、相対湿度90%のときに申告値が小さくなった。気温28℃以上の条件では、気温、相対湿度が高いほど申告値も大きくなった。被験者Bの申告は乾湿感とジメジメ感の申告の傾向が同じで、気温27℃、相対湿度40、60%の条件では0.5

Fig.4 Time change of thermal, comfort, dryness, clamminess, stuffiness, stickiness sensation vote

Table 3 Average values of thermal environmental conditions (The standard deviations are shown in parentheses.)

Condition	i :27°C,40%	ii :27°C,60%	iii :27°C,75%	iv :27°C,90%	v :28°C,60%	vi :29°C,60%	vii :29°C,90%
Temperature(°C)	27.7 (0.14)	27.1 (0.26)	27.3 (0.07)	27.0 (0.10)	28.2 (0.11)	29.2 (0.10)	28.9 (0.09)
Relative humidity(%)	36 (0.6)	60 (2.7)	76 (1.6)	93 (1.5)	61 (0.8)	61 (0.6)	93 (1.4)
MRT(°C)	27.6 (0.14)	27.0 (0.13)	27.1 (0.07)	26.8 (0.11)	28.1 (0.10)	29.2 (0.17)	28.8 (0.08)
Air velocity(m/s)	0.19 (0.03)						

以下と小さく、気温 27℃、相対湿度 75%から気温 29℃、相対湿度 60%の条件では 0.5 程度となり、ほとんど変化がなかった。ムシムシ感、ベタベタ感の申告は、すべての条件でほぼ 0 であった。被験者 C、D の申告は、それぞれの被験者のジメジメ感とベタベタ感が同じ傾向で、被験者 C の申告は相対湿度 60%以下の条件ではほぼ 0 であったのに対し、高湿度条件では湿度が高いほど申告値も大きくなった。被験者 D の申告は、SET*が高くなるほど大きくなった。また、すべての被験者に共通して、ムシムシ感は温冷感の申告値が大きく

なったときに強くなる傾向があり、「蒸し暑さ」を感じたときに申告値が大きくなったと考えられる。被験者の申告の傾向に違いはみられたが、すべての申告について、すべての被験者の申告値が気温 29℃、相対湿度 90%の条件で最も大きくなった。

(3) 生理量の測定結果

表 4 に被験者の皮膚温、肌水分計の指示値、発汗量、t=0～90 (min) のうち最終の 30 分間の平均値と、実験前後の体重減少量 (1 時間あたり、体表面積あたりに換算) を示す。体表面積は、表 1 に示した

Table 4 Average values of physiological variables (The standard deviations are shown in parentheses.)

Measurement item	Subject	Conditions						
		i :27℃,40%	ii :27℃,60%	iii :27℃,75%	iv :27℃,90%	v :28℃,60%	vi :29℃,60%	vii :29℃,90%
Average skin temperature (°C)	A	34.0 (0.13)	33.7 (0.15)	34.1 (0.16)	—	33.8 (0.14)	34.6 (0.13)	34.3 (0.14)
	B	—	33.7 (0.11)	33.6 (0.04)	33.8 (0.15)	34.1 (0.09)	34.2 (0.06)	—
	C	32.9 (0.10)	33.5 (0.08)	34.0 (0.22)	33.3 (0.09)	34.3 (0.09)	34.5 (0.14)	34.6 (0.10)
	D	32.7 (0.05)	33.2 (0.15)	33.2 (0.07)	33.7 (0.15)	33.2 (0.11)	34.3 (0.13)	33.6 (0.19)
Skin moisture content (%)	A	33.7 (0.54)	36.4 (0.69)	36.7 (0.79)	40.3 (0.57)	35.7 (1.08)	35.9 (0.67)	41.0 (1.08)
	B	31.8 (0.34)	28.6 (1.01)	32.9 (1.17)	33.2 (0.89)	32.2 (1.39)	28.7 (0.56)	32.6 (1.41)
	C	33.0 (0.18)	35.5 (0.80)	36.7 (0.63)	37.4 (0.39)	34.8 (0.51)	35.7 (0.76)	39.7 (0.27)
	D	37.1 (0.90)	39.8 (1.75)	40.7 (2.33)	40.3 (0.90)	40.8 (1.04)	41.3 (1.51)	42.6 (1.94)
Sweat rate (g/m ² h)	A	12.8	16.3	16.1	—	—	44.8	21.5
	B	9.2	5.7	13.9	19.3	18.0	10.4	—
	C	5.7	4.1	13.9	14.5	13.4	10.6	—
	D	9.1	7.3	15.9	8.2	15.6	8.2	17.9
Weight loss (g/m ² h)	A	33.7	25.1	26.3	20.4	34.9	36.9	43.1
	B	35.4	30.0	29.2	22.6	14.1	20.0	17.7
	C	16.1	11.4	15.7	20.1	19.8	18.2	7.5
	D	21.4	21.1	17.7	25.6	19.2	23.4	13.3

The symbol "—" in the table means data missing.

Fig.5 Average value of dryness sensation, clamminess sensation, stuffiness sensation and stickiness sensation for each experimental condition

値を用いた。平均皮膚温について、被験者 A は気温 27、28℃の条件では差が小さく、気温 27℃、相対湿度 40%の条件では他の被験者に比べて高くなった。被験者 B は気温 27℃の条件では 33.6～33.8℃と差が小さく、気温 28℃以上の条件で高くなった。被験者 C、D は概ね SET*が高くなるにつれて皮膚温も高くなっているが、被験者 C は気温 27℃、相対湿度 90%のときに、被験者 D は気温が 29℃のときに皮膚温が上がらなかった。このとき、肌水分計の指示値や発汗量の値が高くなっており、汗の蒸発によって皮膚温が低くなったと考えられる。被験者 A、C、D の皮膚含水率は相対湿度条件が高くなるにしたがって高くなる傾向がみられた。被験者 B の肌水分計の指示値は他の被験者に比べて差が生じなかった。また、体重減少量はどの被験者も 45g/m²h 以下であり、肌水分計の計測値^{注 4)}から判断すると発汗はあったと言えるものの、いずれの条件、いずれの被験者に関しても決して多くはなかったと言える。

4. 考察

(1) 心理量の申告値間の相関関係

被験者実験で採取した、快不快感、温冷感、乾湿感、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感の申告値相互の相関を検討した。分析には、それぞれの実験について、90 分の申告時間のうち最終の 30 分間の申告を用いた。

全被験者のデータを用いて相関係数を算出した結果を表 5(a)に示す。全被験者をまとめて見ると、快不快感の申告値に対しては、温冷感の申告値よりも、乾湿感、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感の申告値との相関係数の絶対値が大きい。ただし、温冷感、乾湿感、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感の各申告値相互の相関係数も比較的高い。同様の分析を、温冷感申告値が 0～+0.5 のデータに限って行った結果を表 5(b)に示す。温冷感申告値による限定をしない場合とほとんど同じ傾向であった。

Table 5 Correlation coefficients between sensations (for all subjects and all the conditions) (In (b), the data which satisfy $0 \leq \text{thermal sensation vote} \leq +0.5$ are used for analysis.)

(a)	Comfort	Thermal	Dryness	Clamminess	Stiffness	Stickiness
Comfort	1.00					
Thermal	-0.10	1.00				
Dryness	-0.50	0.51	1.00			
Clamminess	-0.41	0.49	0.77	1.00		
Stiffness	-0.68	0.49	0.73	0.65	1.00	
Stickiness	-0.55	0.44	0.77	0.80	0.77	1.00

(b)	Comfort	Thermal	Dryness	Clamminess	Stiffness	Stickiness
Comfort	1.00					
Thermal	-0.16	1.00				
Dryness	-0.45	0.35	1.00			
Clamminess	-0.36	0.43	0.76	1.00		
Stiffness	-0.68	0.31	0.56	0.52	1.00	
Stickiness	-0.59	0.26	0.56	0.57	0.73	1.00

Table 6 Correlation coefficients between comfort sensation and the other sensations (for each subject and all the conditions) (In (b), the data which satisfy $0 \leq \text{thermal sensation vote} \leq +0.5$ are used for analysis.)

(a)	Subject A	Subject B	Subject C	Subject D
Thermal	-0.65	-0.80	-0.72	0.54
Dryness	-0.73	-0.75	-0.72	-0.18
Clamminess	-0.71	-0.79	-0.60	-0.07
Stiffness	-0.76	-0.65	-0.85	-0.17
Stickiness	-0.76	-0.57	-0.62	-0.18

(b)	Subject A	Subject B	Subject C	Subject D
Thermal	-0.45	-0.49	-0.24	-0.22
Dryness	-0.42	-0.59	-0.86	-0.90
Clamminess	-0.38	-0.59	-0.69	-0.87
Stiffness	-0.63	-0.08	-0.92	-0.61
Stickiness	-0.76	-0.57	-0.62	-0.18

次に、快不快感の申告値に限定して、その他の申告値との相関係数を各被験者について算出した結果を表 6(a) に示す。被験者 D のみ寒い側の温冷感で不快というデータが含まれるため、相関係数の正負が逆転しているところがあるが、その他の被験者に関して、快不快感申告値と乾湿感・ジメジメ感・ムシムシ感・ベタベタ感それぞれの申告値との相関係数の絶対値は、概ね温冷感申告値と同等程度に大きい。温冷感申告値が $0 \sim +0.5$ のデータに限定して同じ分析を行った場合 (表 6(b))、乾湿感・ジメジメ感・ムシムシ感・ベタベタ感それぞれの申告値との相関係数の絶対値が温冷感申告値のそれよりも卓越している場合がより多かった。温冷感申告値が 0 (「どちらでもない」) $\sim +0.5$ (「どちらでもない」と「やや暑い」の間) という熱的中立よりわずかに暑熱側の条件において、湿り感、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感が不快感に影響する度合いは小さくないと言える。

(2) 温冷感の中立時の心理量

図 6 に温冷感申告値と快不快感の申告値の相関を示す (バブルの大きさがデータ数に比例するように表示している)。温冷感申告値が 0 以上となる範囲では、すべての被験者に共通して温冷感申告値が暑い側になるにつれて快不快感の申告値が不快側になる傾向がある。ただし、温冷感申告値に対して快不快感の申告値が一意的に対応しているとは言えず、ある温冷感申告値に対して、快不快感申告値の幅が広い。特に、被験者 B と被験者 C に関してそれが顕著である。図 7~11 に被験者の温冷感申告値が $0 \sim +0.5$ (ほぼ中立で、なおかつ暑熱側) のときの快不快感・乾湿感・ジメジメ感・ムシムシ感・ベタ

ベタ感申告値と実験時の相対湿度との関係を示す。個人差はあるが、温冷感が中立付近となるときに、相対湿度が高いほど不快感の程度は強くなる傾向があると言える。また、乾湿感・ジメジメ感・ムシムシ感等は相対湿度が高いときほど最大の申告値が大きくなる傾向がみられた。特に被験者 C、被験者 D について相関係数が高い。より多くの被験者に対して確認する必要があるものの、このことから、暑さを感じていないときであっても不快感が、乾湿感・ジメジメ感・ムシムシ感等の感覚によって生じている可能性が高いと考えられる。

Fig.6 Relationship between thermal sensation vote and comfort sensation vote (The size of the bubble is proportional to the number of data. The same is true for Figs. 7-11.)

Fig.7 Relationship between relative humidity and comfort sensation vote when thermal sensation vote is within range of 0 to +0.5

Fig.8 Relationship between relative humidity and dryness sensation vote when thermal sensation vote value is within range of 0 to +0.5

Fig.9 Relationship between relative humidity and clamminess sensation vote when thermal sensation vote is within range of 0 to +0.5

Fig.10 Relationship between relative humidity and stuffiness sensation vote when thermal sensation vote is within range of 0 to +0.5

Fig.11 Relationship between relative humidity and stickiness sensation vote when thermal sensation vote is within range of 0 to +0.5

(3) PMV・SET*・ぬれ率と申告値の関係

図 12 に、PMV・SET*・ぬれ率と、被験者の $t=60\sim90$ (min) の温冷感・快不快感申告の平均値との関係を示す。ぬれ率は、表 7 の条件下で Two-node model を用いて算出した。温冷感・快不快感の申告値はそれぞれ各指標 (PMV・SET*・ぬれ率) と相関関係がみられる。既に述べたように、PMV や SET* において湿度の影響が考慮されているが、PMV や SET* は基本的に温冷感に関する指標である。比較的狭い温度範囲に限定して高湿側の湿度条件をカバーした本研究の実験条件のデータに対して、不快感の申告が PMV や SET* と (高いとは言えないものの) あるレベルの相関を示したことは特筆するべきであろう。一方、既往研究¹⁶⁾では、不快側の申告の割合について、ぬれ率との相関係数が高いことが示されていたが、本研究では、不快側の申告値 (不快の程度) についても相関が見られることが示された。ぬれ率は、発汗量と皮膚表面での水分蒸発量に密接な関係を持つ生理的物物理的変数であり、不快感が湿度を原因として生じているとすれば、その説明変数としての合理性を有する。なお、図 12 は全被験者のデータをまとめて分析しているが、個々の被験者について同様の検討を行った場合も、ほぼ同様の傾向が見られた。

Fig.12 Relationship between PMV/ SET*/ skin wettedness and thermal/ comfort sensation vote

5. まとめ

冷房の設定温度が高めの場合や梅雨時期に室内で発生すると考えられる「熱的中立よりわずかに暑熱側の条件」において、高湿度条件下で生じる不快感が「暑さ」以外の湿りに関する要素によって生じるか否かを調べることを目的として、4名の被験者を、気温27～29℃、相対湿度40～90%の範囲内の7条件に曝露するという実験を行い、次の結論を得た。

1) 温冷感の申告が暑い側のときに不快感が強くなる傾向は認められるが、快不快感申告の幅が大きく、温冷感申告値と快不快感申告値の関係が一意であるとは言い難い。すなわち、不快感は温熱感以外の要素の影響を受けて決まっている可能性が高いと言える。温冷感の申告が中立付近(0～+0.5)のデータのみに限定すると、湿度が高い条件で不快感の程度が強くなる傾向があったことから、高湿度が不快感の直接的な要因となっている可能性が高い。

2) 快不快感、温冷感、乾湿感、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感の申告値相互の相関係数を検討した結果、温冷感申告値が0(「どちらでもない」)～+0.5(「どちらでもない」と「やや暑い」の間)というわずかに暑熱側の条件において、不快感、湿り感、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感が不快感に影響する度合いは小さくないことが示された。また、わずかに暑熱側の条件における不快感、湿り感、ジメジメ感、ムシムシ感、ベタベタ感が湿度が高くなるにつれて大きくなる傾向が、複数の被験者について確認された。これらのことから、熱的中立に比較的近い高温側の条件で生じる不快感が、暑さ以外の湿りに関する要因によっても生じていることが示唆される。

3) 本研究の実験条件で得られた快不快感申告値は、温熱環境評価指標(PMV, SET*, ぬれ率)のそれぞれとある程度相関することが確認された。その中でもぬれ率との相関が比較的高いことが示された。

注

- 注1) 男性はYシャツ、スラックス、半袖シャツ、靴下を、女性は、ブラウス、スラックス、キャミソール、靴下を実験者側で用意し、その他の下着は被験者のものとした。
- 注2) 被験者には実験室入室の1時間前までに食事を済ませ、以降は室内で安静にしているように要請した。
- 注3) 発汗量計は換気カプセル法に基づいている。用いたシステムでは、不感蒸泄分をキャンセルするための校正機能がない。そこで、実験室入室後に発汗量計を取り付けてから5分間の計測値の平均値を不感蒸泄時のものと仮定して、その値を計測値から一律に減じたものを発汗量とした。今回の実験は冬期に行われており、実験室入室前1時間は保たれた室内で安静を保つように教示していたこと、その室は20～23℃程度に保たれていたことから、実験室入室時に発汗が生じる可能性は低いと考えられるため、妥当な調整と思われる。
- 注4) 使用した肌水分計は静電容量法を採用しており、皮膚表面にセンサーを押し当てて測定を行うもので、本来、皮膚の角質層内の水分量に応じて静電容量が変化する性質を利用して、皮膚含水率を調べる目的に用いられる。発汗による液相水分が皮膚表面に存在する時、肌水分計の表示値はその水分に反応して変化すると考えられる。これは、本来の測定目的とは異なるが、皮膚表面上の液相水分に対して、明確な反応を示すことが期待される。今回は、わずかに暑熱側の条件を想定していることから、発汗があったとしても比較的少量となることが予想されたため、肌水分計による測定を併用することで、わずかな発汗を感度よく検知することを期待した。なお、使用した肌水分計の表示値(%)は、実際の皮膚含水率に校正されたものではなく、相対値としての評価に用いられるものである。
- 注5) ジメジメ、ムシムシ、ベタベタは、暑さや不快さと無関係と言えない言葉であるが、基本的には空気や皮膚の湿り感に関連した言葉であり、暑さとは別の要因で不快感が生じるかどうかを調べるという本研究の目的に合

致していると考えられたため、スケールとして選択した。この3つの言葉が高湿度に関連する擬態語を完全に網羅しているとは言えないが、できるだけ多様な擬態語を選ぶようにしたものである。学会規準¹⁹⁾の記述を参考にすると、ジメジメは空気の湿り感として、ムシムシは空気が新鮮である感じの対極的な感覚の一つとして、ベタベタは発汗などによる皮膚の湿り感として用いられると考えられる。

注6) 人工気候室の気積が小さく、機械換気量にも限界があるため、実験室内の空気質を保つことを目的として、実験中、実験者は隣室に控えており、カメラとマイク、スピーカーを用いて、オンラインで被験者と対話するようにした。実験中、人工気候室内には被験者のみが居る状態であること、用いた熱線風速計のプローブ(高温となる部分)が露出しているタイプであることから、被験者の近傍に熱線風速計を設置するのは危険と判断し、被験者から少し離れた部屋の端に風速計を設置して参考値を得る目的で測定を行った。その結果、測定された風速の値は0.33±0.06m/s(全実験)と比較的大きなものとなった。別途、被験者実験と同じ配置を再現し、被験者近傍の顔の高さ付近(90 cm)において、風速を30分間測定したところ、平均値は0.19±0.03m/sとなった。その値を表3に示している。実験に用いた人工気候室は定風量制御であること、部屋の端での測定値が全実験を通して比較的狭い範囲に収まっていることから、毎回の実験において、静穏気流条件が実現されていたと判断している。

Table 7 Calculation conditions of PMV/ SET*/ skin wettedness

Temperature (°C)	Measured value
Relative humidity (%)	Measured value
Globe temperature (°C)	Measured value
MRT (°C)	Calculated from measured value of globe temperature
Air velocity (m/s)	0.2
Convective heat transfer coefficient (W/m ² · K)	3.49
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² · K)	4.65
Clothing level (clo)	0.5
Metabolism (W/m ²)	58.2 (1.0 met)

参考文献

1) Doi, K.: COOL BIZ, Journal of the Society of Heating Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol.80, No.7, pp.5-7, 2006.7 (in Japanese)
土居健太郎: COOL BIZ, 空気調和・衛生工学, 第80巻, 第7号, pp.5-7, 2006.7

2) Lin, X., Umemiya, N.: Actual State and Consciousness of Households' Air-conditioner Use during 2011 Post-disaster Electricity Shortages, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.727, pp.785-794, 2016.9 (in Japanese)
林小勇, 梅宮典子: 震災後の節電下における家庭の冷房使用の意識と実態, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻, 第727号, pp.785-794, 2016.9

3) Miura, H., Tatsumi, Y., Ogino, T., Ogura, D.: Study on Characteristics of Cooling and Dehumidifying Performance of Room Air Conditioner, Technical papers of annual meeting, the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary engineers of Japan, Vol.3, pp.213-216, 2014.9 (in Japanese)
三浦尚志, 巽佑介, 荻野登司, 小椋大輔: ルームエアコンディショナーの冷房除湿特性の検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第3巻, pp.213-216, 2014.9

4) Haneda, M., Nishihara, N., Nakamura, S., Uchida, S., Tanabe, S.: A Field Measurement of Thermal Environment in Cool Biz Office and the Evaluation on Productivity by a Questionnaire Survey, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.74, No.637, pp.389-396, 2009.3 (in Japanese)
羽田正冲, 西原直枝, 中村駿介, 内田智志, 田辺新一: 夏季室温緩和設定オフィスにおける温熱環境実測および執務者アンケート調査による知的生産性に関する評価, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第637号, pp.389-396, 2009.3

5) Tawada, T., Ikaga, T., Murakami, S., Uchida, S., Ueda, H.: The Total Effect on Performance and Energy Consumption Caused by Office's Thermal Environment, Journal of Environmental Engineering

- (Transactions of AIJ), Vol.75, No.648, pp.213-219, 2010.2 (in Japanese)
 多和田友美, 伊香賀俊治, 村上周三, 内田匠子, 上田悠: オフィスの温熱環境が作業効率及び電力消費量に与える総合的な影響, 日本建築学会環境系論文集, 第75巻, 第648号, pp.213-219, 2010.2
- 6)Belding, H.S., Hatch, T.F.: Index for Evaluating Heat Stress in Terms of Resulting Physiological Strains, Heating, piping, & air conditioning, pp.129-136, 1955.8
- 7)ISO7730: Ergonomics of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.11
- 8)ASHRAE: ASHRAE Standard 55-2010, 2010
- 9)Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Nishi, Y.: An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Transactions, Vol.77, pp.247-262, 1971
- 10)Hardy, J.D.: Thermal Comfort and Health, ASHRAE Journal, 2, pp.43-51, 1971.2
- 11)Mochida, T., Horikoshi, T., Ochifuji, K., Shimakura, K.: The Characteristics of Expressions on Evaporative Heat Loss from Skin Surface and an Equi-skin Temperature Line with Various Value of Wettedness on it, Transactions of the Society of Heating Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No.48, pp.39-47, 1992.2 (in Japanese)
 持田徹, 堀越哲美, 落藤澄, 嶋倉一實: 蒸汗放熱表示式の特徴とぬれ面積率の変化特性を考慮した等平均皮膚温線, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 48, pp. 39-47, 1992.2
- 12)Mochida, T., Shimakura, K., Katada, K., Sakoi, T., Nagano, K.: Fundamental Study concerning the Relationship between Average Skin Temperature and Wettedness When Man Feels an Equal Thermal Sensation, Transactions of the Society of Heating Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No.72, pp.107-116, 1999.1 (in Japanese)
 持田徹, 嶋倉一實, 堅田兼史, 佐古井智紀, 長野克則: 等しい温熱感を報告した時の平均皮膚温とぬれ面積率の関係に関する基礎的研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 72, pp. 107-116, 1999.1
- 13)SET* Committee: Report of SET* Committee, J.Human and Living Environment, 12, pp.75-99, 2005 (in Japanese)
 SET*委員会: SET*委員会報告書, 人間と生活環境, 12, pp.75-99, 2005
- 14)Fukai, K., Gotoh, S., Saito, J., Ito, H., Akui, S.: Experimental Study on Correlation between Standard New Effective Temperature (SET*) and Japanese Thermal Sensation Part2, Transactions of the Society of Heating Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No.51, pp.139-147, 1993.2 (in Japanese)
 深井一夫, 後藤滋, 斎藤純司, 伊藤宏, 阿久井哲: 標準新有効温度(SET*)と日本人の温熱感覚に関する実験的研究(第2報), 空気調和・衛生工学会論文集, No. 51, pp. 139-147, 1993.2
- 15)Nevins, R.G., Gonzalez, R.R., Nishi, Y., Gagge, A.P.: Effect of Changes in Ambient Temperature and Level of Humidity on Comfort and Thermal Sensations, ASHRAE Transactions, Vol.81, pp.169-182, 1975
- 16)Tanabe, S., Kimura, K., Hara, T.: Thermal Comfort Requirements During the Summer Season in Japan, ASHRAE Transactions, Vol.93, pp.564-577, 1987
- 17)Tanabe S., Tsutsumi H., Suzuki T, Effects of Humidity on Thermal Comfort in Office Space: Part 1 - Subjective Thermal Sensation at the Different Combinations of Air Temperature and Humidity, Transactions of the Society of Heating Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No.109, pp.1-9, 2006.4 (in Japanese)
 田辺新一, 堤仁美, 鈴木孝佳, 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: 第1報-空気温度・相対湿度の組合せによる温冷感の違い, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 109, pp. 1-9, 2006.4
- 18)Tanabe S., Tsutsumi H., Suzuki T, Effects of Humidity on Thermal Comfort in Office Space: Part 2 - Subjective Experiment under the Constant SET* Conditions, Transactions of the Society of Heating Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No.137, pp.1-8, 2008.8 (in Japanese)
 田辺新一, 堤仁美, 鈴木孝佳, 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: 第2報-空気温度・相対湿度を変数とした等SET*条件での被験者実験, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 137, pp. 1-8, 2008.8
- 19)Architectural Institute of Japan: Standards for Measurement of Psychological and Physiological Responses to Thermal environments, pp.4-16, 2014.3 (in Japanese)
 日本建築学会: 温熱心理・生理測定法規準・同解説, pp.4-16, 2014.3

INFLUENCE OF HIGH HUMIDITY ON DISCOMFORT SENSATION UNDER CONDITIONS SLIGHTLY INCLINED TO HOT SIDE FROM THERMAL NEUTRALITY

Yuika KAWAGISHI^{*1} and *Satoru TAKADA*^{*2}

^{*1} Hokuriku Electric Power Company(Former Undergrad. Student, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Kobe Univ.)

^{*2} Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kobe Univ., Dr.Eng.

It is important to control the thermal environment for the comfort of the occupants indoors in the summer in order to maintain health and improve work efficiency. In most cooling systems, the temperature is mainly controlled, and the humidity is often left without control, and the indoor humidity tends to change according to the outdoor humidity. On the other hand, the set point of the indoor temperature during cooling has become higher due to the trend of saving energy, the spread of "Cool Biz" movement, and the request for conservation of electricity after the Great East Japan Earthquake. In this way, there have been more and more factors that increase the indoor humidity from the rainy season to summer. In such situations, high humidity might cause discomfort sensation without feeling strong heat/warm sensations, which could bring reduction in workability and concentration of the occupants. Previous studies have suggested that high humidity influences on the occurrence of discomfort. However few studies have studied the cause of discomfort sensation in relation with thermal sensation. For the purpose of clarifying whether the discomfort caused under high humidity conditions is caused by the humidness/wetness sensations without strong heat/warm sensations, the experiments involving subjects were conducted by using an artificial climate chamber, with 4 subjects exposed for 120 minutes to 7 conditions within the temperature range between 27 to 29 °C and the relative humidity range between 40 to 90 %, and with the sensations of thermal, comfort, dry-wet, clamminess, stuffiness and stickiness recorded from the declaration of the subjects during the exposure. As the result, the following conclusions were obtained.

1) The sensation of discomfort tended to become stronger when the hot/warm sensation was declared. However, the range of comfort sensation became rather wider at a level of thermal sensation, and thus the thermal sensation vote did not show unique correspondence with the discomfort sensation vote. This means that the discomfort might be determined by the factors other than hot/warm sensations. When limited to the data close to thermal neutrality on hot/warm side (0 to +0.5 in PMV scale), the discomfort sensations tended to become more intense in the higher humidity conditions, and thus high humidity might be a direct cause of discomfort.

2) As a result of examining the correlation coefficients between the sensation votes, it was found that under the condition close to thermal neutrality on hot/warm side (0 to +0.5 in PMV scale) the degree to which the sensations of wetness, clamminess, stuffiness, and stickiness affected the discomfort sensation was significant. In addition, when the thermal sensation is close to neutral on hot/warm side (0 to +0.5 in PMV scale), the discomfort sensation tended to become stronger for higher humidity, and the sensations of wetness, clamminess, stuffiness, and stickiness showed increase along with humidity in the same way. From these facts, it was suggested that the discomfort sensation caused around thermal neutrality on hot/warm side of the neutrality was caused by the factors related to humidness/wetness sensations as well as the hot/warm sensation.

3) The comfort sensation votes obtained under the experimental conditions of this study correlated with each of the thermal environmental indexes (PMV, SET* and skin wettedness) to some extent. The discomfort tended to have a relatively high correlation coefficient with the skin wettedness.

(2021 年 3 月 10 日原稿受理, 2021 年 9 月 17 日採用決定)