

【カテゴリーII】

日本建築学会計画系論文集 第543号, 49-56, 2001年5月
J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ, No. 543, 49-56, May, 2001

気温と湿度の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応の季節差に及ぼす影響に関する試行実験

EXPERIMENTAL TRIAL ON THE SEASONAL DIFFERENCES OF THE COMBINED EFFECT OF AIR TEMPERATURE AND HUMIDITY ON THE HUMAN PHYSIOLOGICAL AND PSYCHOLOGICAL RESPONSES

石垣秀圭*, 松原辰樹**, 権田信***, 堀越哲美****
*Hidekado ISHIGAKI, Tatsuki MATSUBARA, Shin GONDA
 and Tetsumi HORIKOSHI*

The objective of this paper is to clarify the physiological and psychological response of the human body at various air temperature and humidity conditions in summer and winter. Experiment were conducted using 2 Japanese young males under 15 kinds of the following combined conditions: air temperature of 24°C, 28°C and 32°C, and relative humidity of 50%, 60%, 70%, 80% and 90% under still air in which the mean radiant temperature was nearly equal to air temperature. The following results were obtained: 1) Seasonal differences of the relationship between mean skin temperature and thermal sensation vote (TSV) were suggested. Neutral TSV is represented in MST of 33.8°C in summer and of 33.6°C in winter. 2) Seasonal differences of the relationship between humid operative temperature(HOT) and TSV were represented. Neutral TSV is represented in HOT of 24.9°C in summer and of 25.7°C in winter. 3) Seasonal differences of metabolism and evaporative heat loss were found.

Keyword Temperature, Humidity, Physiological responses, Psychological responses, Seasonal differences

気温, 湿度, 生理反応, 心理反応, 季節差

1. はじめに

気温と湿度の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究は国内外で多くなされてきた。Nevinsら¹⁾、Rohlesら²⁾、志村ら³⁾は数百人を越える被験者を気温と湿度を組み合わせた環境に暴露し、その心理申告から湿り空気線図上に快適線や快適域を求めた。これらの研究は、多人数実験のため生理反応にもとづいた裏付けに乏しい。渡辺ら⁴⁾、堀越ら⁵⁾、田辺ら⁶⁾は数人の日本人を対象にした被験者実験から平均皮膚温やぬれ面積率などの生理反応の測定を行い心理反応との対応を求めているが、組み合わせ条件が少ないため、さらなるデータの蓄積が必要と考えられる。

湿り作用温度⁸⁾は、人体の熱収支に基づき、湿度の影響を理論的に組み込んだ温熱指標として知られているが、湿り作用温度の導出過程で用いられる人体の対流熱伝達率やぬれ面積率を実測して湿り作用温度を求め、生理・心理反応との関係を求める研究は少ない。また、湿り作用温度と人体の経路別熱収支の関係を実験的に求めた研究例もない。代謝による産熱と放射、対流および蒸発による放熱の差である熱収支量は熱ストレス指標として重要な温熱指標と考えられ、垣鍔ら⁹⁾の人体の体組成を考慮して熱収支量を推定した研究もあるが、熱収支量について実験的に求めた研究は少ない。

日本人を対象とした至適温度条件の季節差について、小川ら¹⁰⁾、

深井ら¹¹⁾は生理反応と心理反応の関係において季節差はないとしているが、斎藤ら¹²⁾、志村ら¹³⁾の実験では季節差が認められる結果を報告している。これらは、実験条件がそれぞれ異なっているため単純に比較することはできないが、至適温度条件の季節差については議論の分かれるところである。

本研究では、夏季と冬季において、気温と湿度の組み合わせ条件下で被験者を用いた実験を行い、生理反応および心理反応の測定を行った。今回は主に高い湿度に着目し、湿度条件を多く設定して、平均皮膚温、ぬれ面積率および湿り作用温度と人体反応の関係についてまとめ、夏季と冬季の季節差の存在について検討すること目的とする。

2. 実験計画

2.1 実験室

実験は、1998年8月20日から9月4日（夏季実験）と1999年1月4日から1月18日（冬季実験）に名古屋工業大学ベンチャービジネスラボラトリの人工環境実験室にて行った。図1に実験室平面図を示す。実験室内には断熱パネルで組み立てられた幅3.15m×奥行3.51m×高さ2.6mの人工気候室（コイトロンPCM-4PG-2小糸工業）が設置しており、人工気候室の近傍に前室を設けた。表1に人工気候室仕様を示す。人工気候室及び前室は周囲壁面を無彩色のカーテンで覆った。

* 名古屋工業大学大学院社会開発工学専攻 大学院生・工修
(東邦ガス㈱)

** 名古屋工業大学大学院都市循環システム工学専攻
大学院生

*** 名古屋工業大学大学院都市循環システム工学専攻
大学院生・修士(工学)

**** 名古屋工業大学大学院都市循環システム工学専攻
教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Nagoya Institute of Technology, M. Eng.
(Toho Gas Co., Ltd.)

Graduate Student, Dept. of Environmental Technology and Urban Planning,
Graduate School of Eng., Nagoya Institute of Technology

Graduate Student, Dept. of Environmental Technology and Urban Planning,
Graduate School of Eng., Nagoya Institute of Technology, M. Eng.
Prof., Dept. of Environmental Technology and Urban Planning, Graduate School of
Eng., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

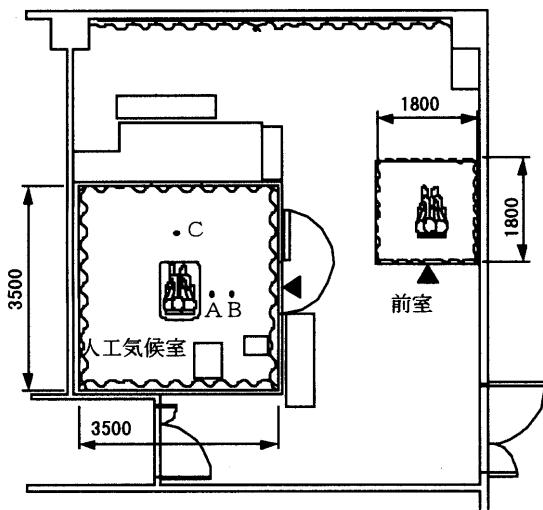


図1 実験室平面図

2.2 設定条件

温熱環境の設定条件を表2に示す。気温24°C、28°C、32°Cの3条件と湿度50%、60%、70%、80%、90%の5条件を組み合わせた計15条件を設定した。気流は静穏気流とし、実験室の周囲を布製カーテンで覆うことにより平均放射温度と気温をできるだけ等しくなるようにした。前室は気温28°C、相対湿度65%を目標に設定した。

2.3 被験者

被験者は健康な青年男子2名を用いた。着衣はトランクスのみの裸体とし、椅子で安静を保った。表3に被験者身体データを示す。なお、被験者には適正な報酬が支払われた。

2.4 実験方法

図2に実験スケジュールを示す。実験は午前10時～午後7時の間で1日に最大3条件を行った。被験者は実験室に到着後脱衣し、前室で熱電対および熱流計を装着した。前室で30分間の椅子安静を保った後、人工気候室に移動し、デジタル台秤の上に置いた椅子に着座した。着座後、総合代謝量測定システム（エアロモニタAE-280S ミナト医学）を装着し、環境に60分間曝露した。椅子は、全身からの蒸発が阻害されないよう、座面と背もたれ部分がビニル製のネットでできたものを使用した。

被験者は1日に1条件または2条件に暴露され、2条件に暴露される場合は1回目終了後から4時間以上の間隔をおき、1回目の実験の影響が残らないよう配慮した。また、食後1.5時間以上の間隔をおいた。サーカディアンリズムの影響¹⁵⁾は顕著な差異が確認できなかつたため検討から除外した。

2.5 測定項目および方法

2.5.1 温熱環境条件

測定項目および測定機器を表4に示す。気温・湿球温度は図1のA点（床上100cm）でアスマン通風乾湿球温度計で10分毎に目視にて少数1桁まで読取った。グローブ温度は図1のB点（床上100cm）でグローブ温度計で30秒毎に連続測定した。周囲カーテンの表面温度（床上150cm）と床は0.2mmT型熱電対で30秒毎の連続測定をした。風速は図1のC点（床上110cm）三次元超音波風速計で10分毎に測定した。

2.5.2 人体の生理反応および心理反応

表5に皮膚温・頭熱量の測定点と重み係数を示す。人体の皮膚温は、Hardy-DuBoisの7点法¹⁶⁾における人体各部位をベースに分割した13点で、0.2mmT型熱電対を透湿性テープで皮膚に貼り付けて測定した。舌下温は0.2mmT型熱電対を直接口腔舌下に留めて測定し

表1 人工気候室仕様

構造	組み立て式断熱パネル、気密構造				
室内寸法	3150 ^W ×3510 ^D ×2600 ^H mm				
材質	内表面 ステンレス鋼板 (SUS304 0.5mm) 外表面 カーボン鋼板 (7色ペイント)				
断熱材	硬質ウレタンフォーム	40mm			
温度制御範囲	+5~45°C	調節精度	±0.3°C		
湿度制御範囲	30~90%RH	調節精度	±3.0%		
温湿度分布	温度±1.0°C	湿度±5.0%			
室内気流	0.3m/s以下				

表2 設定条件

気温	湿度				
	50%	60%	70%	80%	90%
24°C	①②	①②	①②	①②	①②
28°C	①②	①②	①②	①②	①②
32°C	①②	①②	①②	①②	①②

気流：静穏気流

平均放射温度：= 気温

夏季実験①：1998年8月20日～9月4日

冬季実験②：1999年1月4日～1月18日

表3 被験者身体データ

年齢	身長 Hcm	体重 Wkg	体表面積 Adm ²
Y. E.	23	174	1.68
T. K.	26	172	1.76

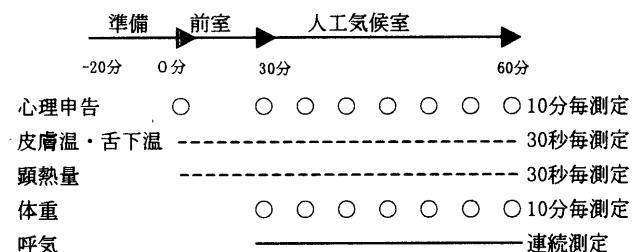
体表面積は藏澄ら¹⁴⁾の式より算定 $Ad = 100.315W^{0.383}H^{0.693}$ 

図2 実験スケジュール

表4 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器
乾球・湿球温度	アスマン通風乾湿球温度計
壁面温度	T型熱電対 0.2mmφ
気流	3次元超音波風速計
放射温度	グローブ温度計 15cmφ
皮膚温・舌下温	T型熱電対 0.2mmφ
体重減少量	デジタル台秤 感度1g
頭熱放熱量	熱流計

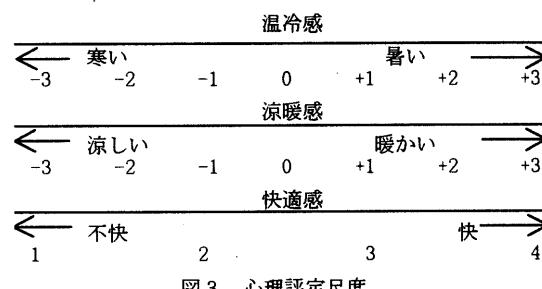


図3 心理評定尺度

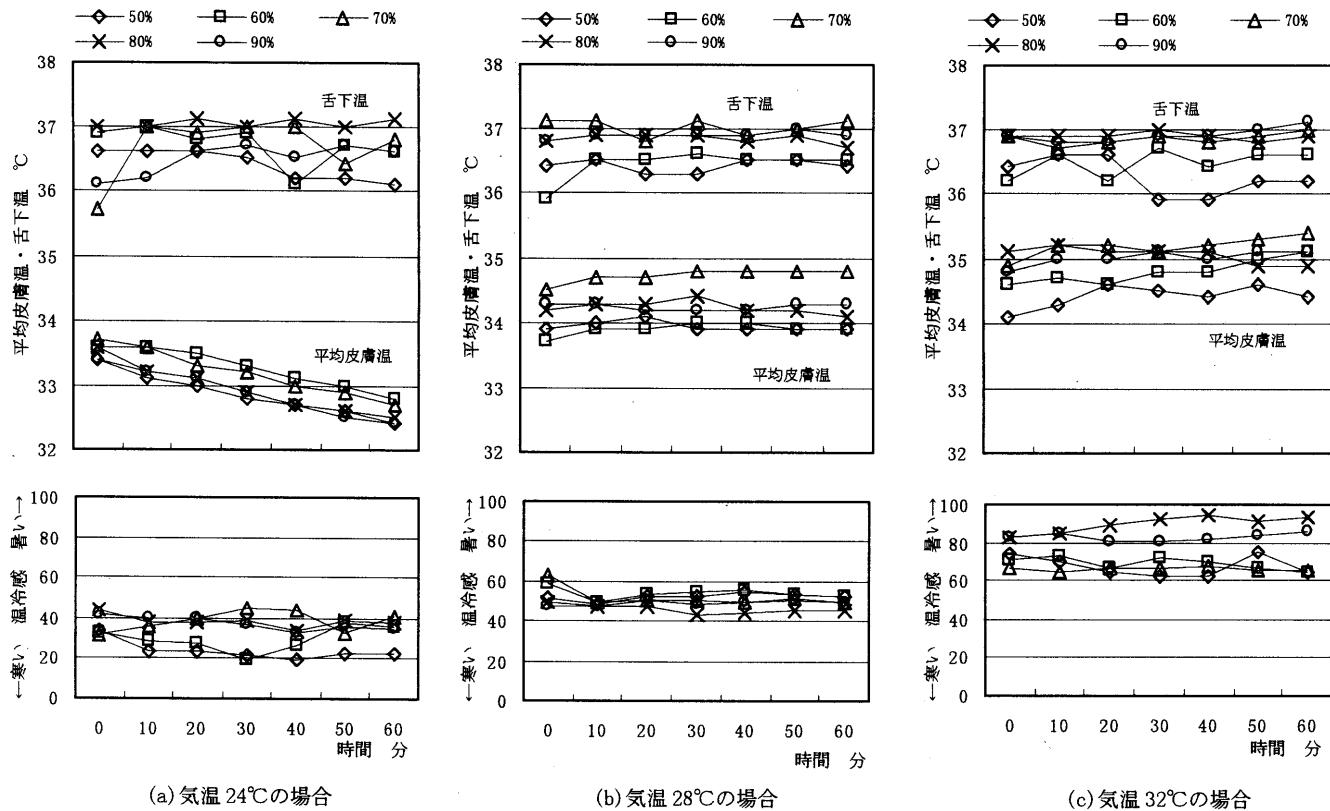


図4 夏季における平均皮膚温、舌下温、温冷感の経時変動（被験者 T. K.）

た。人体の顎熱放热量は、皮膚温を測定する13点のうち手背に代えて上腕を測定部位とし、熱流計（EM1京都電子工業）を透湿性テープで密着させて測定した。皮膚温、舌下温、顎熱放热量は30秒毎に連続測定した。体重減少量はデジタル台秤で10分毎に測定した。被験者の心理反応は、図3に示す直線評定尺度及び数値評定尺度を用いて10分毎に測定した。直線評定尺度で得られた申告は全長を100として数値換算した。参考として、乾湿感、気流感、放射感および部位温冷感（顔、腹、背、手、足）を測定した。解析には実験終了前10分のデータを用いた。

3. 実験結果

3.1 溫熱環境条件実測結果

表6に各設定条件における人工気候室の気温、湿度、平均放射温度、風速の暴露終了前10分の環境測定結果を示す。表中で、2人の被験者について夏季実験と冬季実験の計4回の平均値を上段に、標準偏差を下段に示してある。各条件とも気温は設定値を満足できたと考えられるが、相対湿度は設定値より平均で4.7%高く

表5 皮膚温・顎熱放热量の測定点と重み係数

Hardy-DuBois		本研究	
		皮膚温	顎熱放热量
前額	0.07	前額	0.07
胸乳	0.35	胸乳	0.175
上腕	-	肩胛蔵	0.175
前腕	0.14	上腕右	-
手背	0.05	上腕左	-
大腿	0.19	前腕右	0.0475
下腿	0.13	前腕左	0.0475
足背	0.07	手背右	0.025
		手背左	-
		大腿右	0.095
		大腿左	0.095
		下腿右	0.065
		下腿左	0.065
		足背右	0.035
		足背左	0.035

表6 環境測定結果

湿度条件	24°C						28°C						32°C					
	気温	湿度	MRT	風速	気温	湿度	MRT	風速	気温	湿度	MRT	風速						
	°C	%	°C	m/s		%	°C	m/s		%	°C	m/s						
50%	24.3	56	26.2	0.10	28.1	55	29.8	0.11	32.0	55	33.3	0.13						
	0.2	4.6	0.2	0.04	0.1	5.7	0.3	0.04	0.1	5.2	0.4	0.02						
60%	24.4	65	26.5	0.10	28.2	72	30.0	0.12	32.0	65	33.3	0.12						
	0.0	4.1	0.2	0.02	0.0	10	0.2	0.03	0.1	2.1	0.2	0.04						
70%	24.1	76	26.3	0.11	28.2	74	30.0	0.09	31.8	75	33.4	0.15						
	0.2	5.8	0.4	0.04	0.1	3.0	0.2	0.03	0.1	3.7	0.2	0.05						
80%	24.3	84	26.3	0.11	28.2	83	29.8	0.10	31.9	85	33.2	0.10						
	0.1	5.4	0.3	0.03	0.1	6.3	0.3	0.03	0.3	4.4	0.3	0.04						
90%	24.2	92	26.5	0.15	28.0	93	29.6	0.11	32.1	91	33.0	0.09						
	0.4	5.5	0.7	0.04	0.3	5.5	0.2	0.04	0.2	4.4	0.4	0.03						

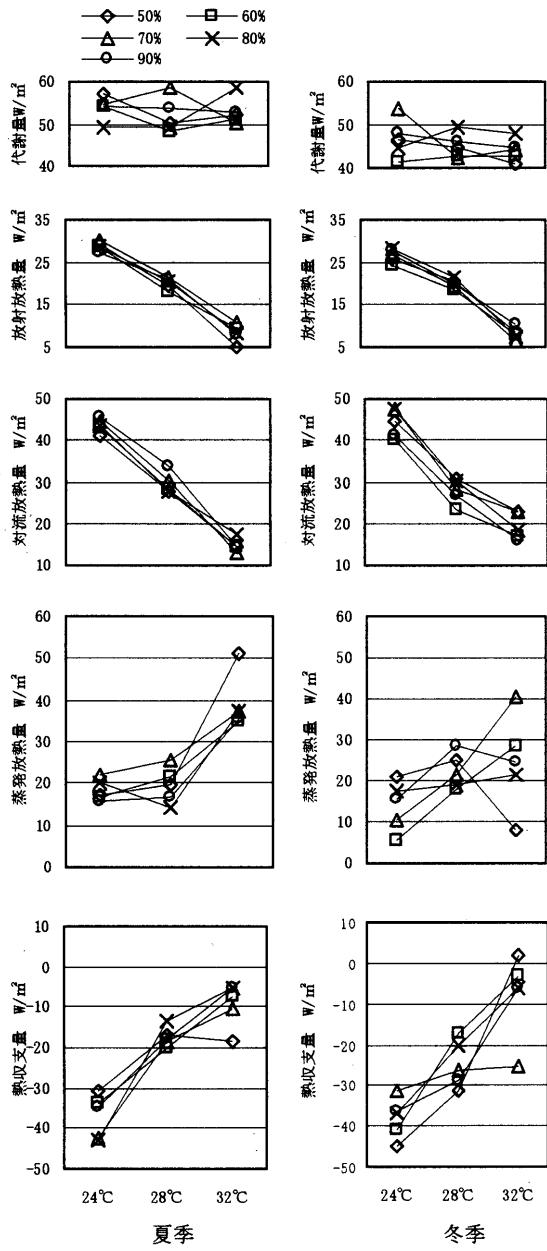


図5 経路別放熱量実測値（被験者T.K.）

なった。平均放射温度は気温より平均で 1.7°C 高くなかった。風速は 0.1m/s 付近で静穏気流を実現できた。本研究ではバリエーションのある気温と湿度の組み合わせ条件で実験を行うことを目的としているため、結果的に実測値が設定値と外れても実測値そのものを分析に用いるので、問題は生じないと考えられる。

3.2 平均皮膚温、舌下温および温冷感の測定結果

図4に測定結果の一例として、夏期における被験者T.K.の平均皮膚温、舌下温および温冷感の人工気候室入室後の経時変動を示す。気温 24°C の場合、舌下温は $35.7 \sim 37.1^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、ほぼ一定の値を示している。平均皮膚温は入室後 33.5°C 付近から低下傾向にあり、60分後には約 1°C 低下し、非定常な状態にある。温冷感申告はほぼ一定で申告値 $20 \sim 40$ の「寒い」側にある。気温 28°C の場合、舌下温は $35.9 \sim 37.1^{\circ}\text{C}$ 、平均皮膚温は $33.7 \sim 34.8^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、共に実験室入室後から一定の値を示している。温冷感申告はほぼ一定で熱的中性を示す申告値50付近にある。気温 32°C の場合、舌下温は $35.9 \sim 37.1^{\circ}\text{C}$ ではほぼ一定の値を示している。平均皮膚温は $34.1 \sim 35.4^{\circ}\text{C}$ の範囲で、入室後上昇傾向があるが、60分後にはほぼ一定の

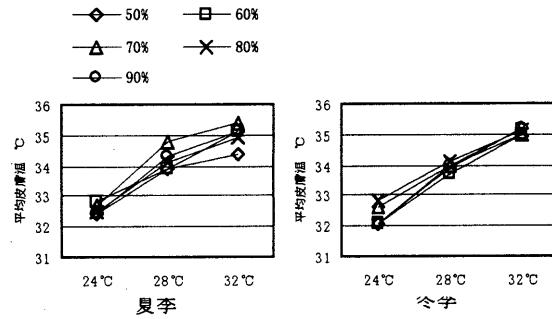


図6 平均皮膚温測定結果（被験者T.K.）

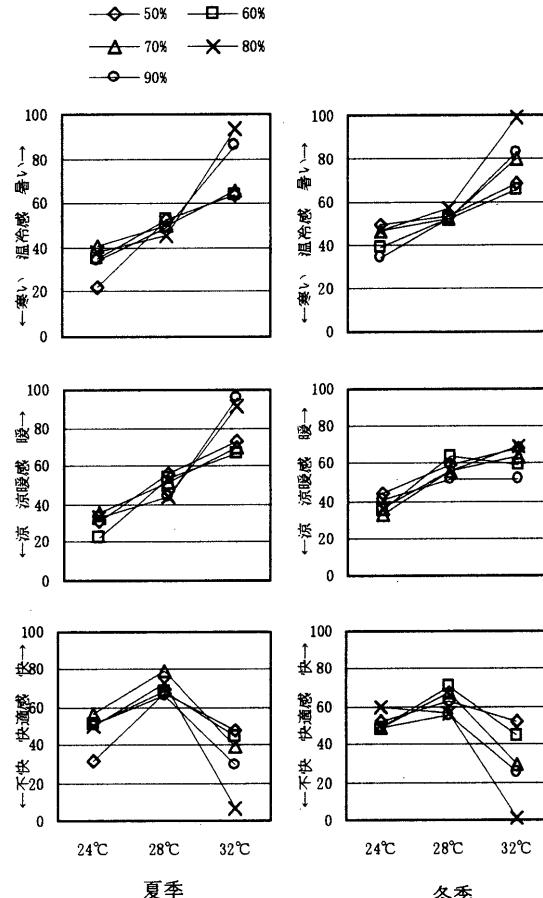


図7 心理反応測定結果（被験者T.K.）

値となった。温冷感申告は湿度により差があるが、変動は小さく申告値 $60 \sim 100$ の「暑い」側にある。被験者T.K.の冬期実験、被験者Y.E.の夏期および冬期実験についても同様の傾向を示した。

3.3 人体の経路別放熱量

図5に実験結果の一例として被験者T.K.の場合の代謝量、放射放熱量、対流放熱量、蒸発放熱量、および熱収支量を気温条件別にまとめて示す。^{注1)}代謝量は気温によらずほぼ一定で夏季は $48.4 \sim 58.5\text{W/m}^2$ 、冬季は $41.0 \sim 53.7\text{W/m}^2$ の値を示している。放射放熱量は、夏季は 24°C 条件で $27.1 \sim 30.4\text{W/m}^2$ 、 28°C 条件で $18.2 \sim 21.4\text{W/m}^2$ 、 32°C 条件で $5.2 \sim 10.9\text{W/m}^2$ 、冬季は 24°C 条件で $24.4 \sim 28.1\text{W/m}^2$ 、 28°C 条件で $18.4 \sim 21.5\text{W/m}^2$ 、 32°C 条件で $6.3 \sim 10.4\text{W/m}^2$ の値を示している。対流放熱量は、夏季は 24°C 条件で $41.3 \sim 45.7\text{W/m}^2$ 、 28°C 条件で $27.6 \sim 33.5\text{W/m}^2$ 、 32°C 条件で $12.7 \sim 17.6\text{W/m}^2$ 、冬季は 24°C 条件で $41.1 \sim 47.6\text{W/m}^2$ 、 28°C 条件で $23.1 \sim 30.7\text{W/m}^2$ 、 32°C 条件で $16.9 \sim 22.9\text{W/m}^2$ の値を示している。放射放熱量と対流放熱量は顕熱による放熱（乾性放熱）のため湿度の違いによる差はみられない。蒸発放熱量は、夏季は 24°C 条件で $15.7 \sim$

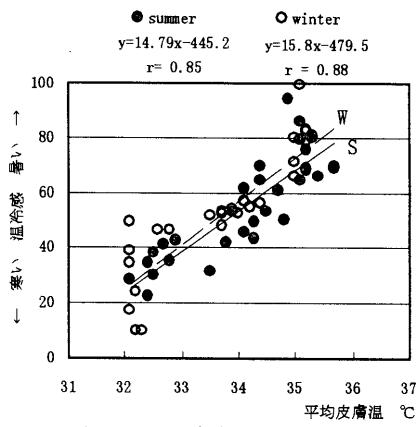


図 8 平均皮膚温と温冷感の関係

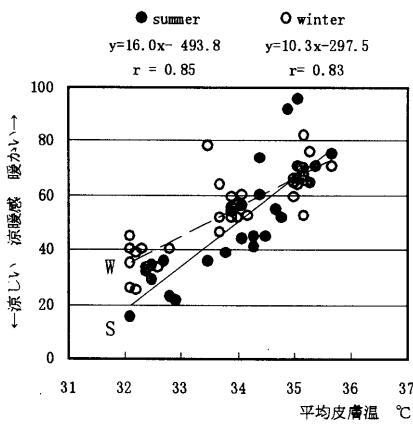


図 9 平均皮膚温と涼暖感の関係

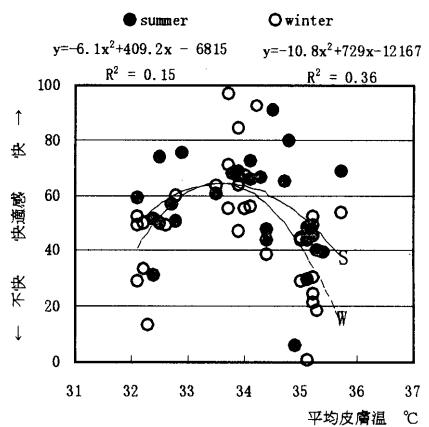


図 10 平均皮膚温と快適感の関係

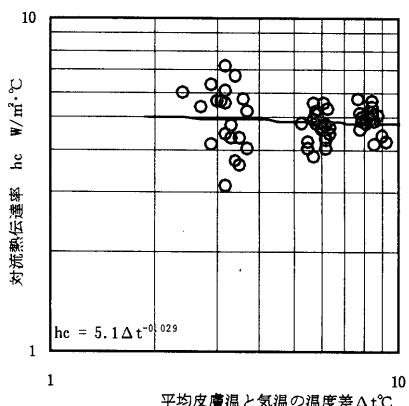


図 11 対流熱伝達率と温度差の関係

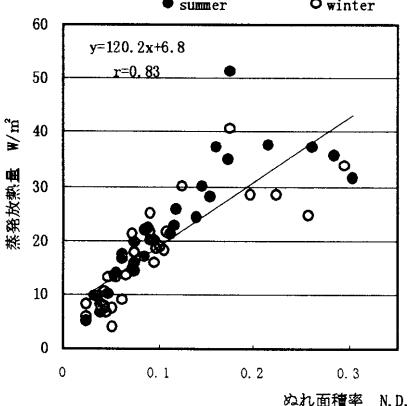


図 12 ぬれ面積率と蒸発放熱量の関係

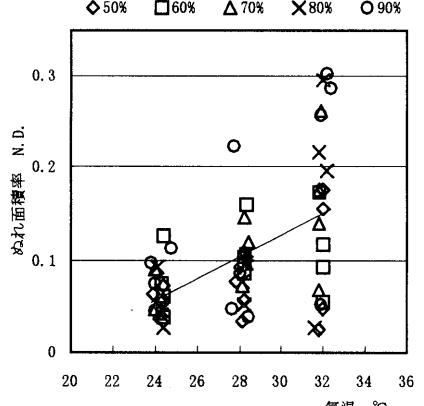


図 13 気温とぬれ面積率の関係

22.2W/m²、28°C条件で14.2～25.7W/m²、32°C条件で34.9～51.4W/m²、冬季は24°C条件で5.8～21.1W/m²、28°C条件で18.8～28.4W/m²、32°C条件で8.1～40.6W/m²の値を示している。蒸発放熱量は湿度の違いによる差が見られる。熱収支量は、夏季は24°C条件で-42.9～-30.5W/m²、28°C条件で-20.0～-13.2W/m²、32°C条件で-18.5～-5.1W/m²、冬季は24°C条件で-45.0～-31.2W/m²、28°C条件で-31.2～-17.3W/m²、32°C条件で-25.5～-1.8W/m²の値を示しており、全体的に人体は熱収支上冷却側にある。

3.4 平均皮膚温の算定結果

図6に被験者T.K.の場合の平均皮膚温測定結果を示す。各条件別の平均皮膚温の平均値は、夏季は24°C条件で32.6°C、28°C条件で34.2°C、32°C条件で35.0°Cの値となり、冬季は24°C条件で32.3°C、28°C条件で33.9°C、32°C条件で35.1°Cの値となった。夏季は28°C条件と32°C条件では湿度条件によって平均皮膚温が最大1°Cの開きがみられるが、冬季は湿度条件による差はほとんどない。

3.5 人体の心理的反応

図7に被験者T.K.の場合の心理反応測定結果を示す。温冷感は気温が高くなるほど「暑い」側の申告となる。夏季の32°C条件では湿度による差が見られ、湿度80%、90%で特に「暑い」側の申告になっている。冬季は各気温条件とも湿度による差は小さい。涼暖感は気温が高くなるほど「暖かい」側の申告となる。夏季の32°C条件では湿度による差がある。快適感は夏季冬季とも28°C条件で「快適」側にあるが、24°C、32°C条件では「不快」側を示している。32°C条件では湿度80%、90%で「不快」側の申告となっている。

被験者Y.E.の経路別放熱量、平均皮膚温および心理反応の実験結果についても、被験者T.K.と同様の傾向を示した。

4. 考察

本研究は被験者が2名であるため、夏季と冬季のそれぞれの実験結果について気温条件別に被験者間のデータの同質性を検討したところ、明らかな差が確認できなかったため、以降の分析において2名のデータをまとめて扱った。

4.1 平均皮膚温と心理反応の関係

人体皮膚表面と環境との熱交換の結果形成される平均皮膚温は皮膚からの温度感觉刺激の指標として重要である。図8に平均皮膚温と温冷感の関係を示す。夏季と冬季の回帰直線に差があるかを調べるために共分散分析により水準間の差の検定を行ったところ、有意差($\alpha=0.01$)があったので夏季と冬季でデータを分けた。熱的中性申告50を示す平均皮膚温を一次の回帰直線から算出すると、夏期33.8°C、冬期33.6°Cとなった。小川ら⁹⁾は、平均皮膚温と温冷感の関係で季節による差はないとしているが、本研究で得られた平均皮膚温32°C～35.5°Cの範囲では、同一温冷感を得る平均皮膚温は冬季において夏季より0.2°C低い結果となり、季節による差が示唆される。図9に平均皮膚温と涼暖感の関係を示す。涼暖感50を示す平均皮膚温は、夏季34.0°C、冬季33.5°Cとなり、冬季のほうが0.5°C低い。平均皮膚温が35°C付近では冬季と夏季に差はみられず、「暖かい」という感じ方に季節差はないが、平均皮膚温が32°C～33°Cの範囲では、冬季と夏季の差が顕著に表れ、「涼しい」という感じ方に季節差があることを示唆している。斎藤ら¹¹⁾の研究では、夏季に「涼感」を得られやすいと報告しており、本研究の結果とも一致する。図10に平均皮膚温と快適感の関係を示す。平均皮膚温と快適感の関係に2次の曲線をあてはめたところ、夏季、冬季とも平均皮膚温33.6°Cで快適感の極大値を得た。快適感を示す平均皮膚温は、冬季における温冷感50(33.6°C)、涼暖感

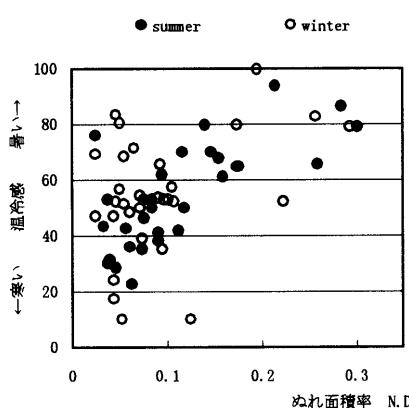


図14ぬれ面積率と温冷感の関係

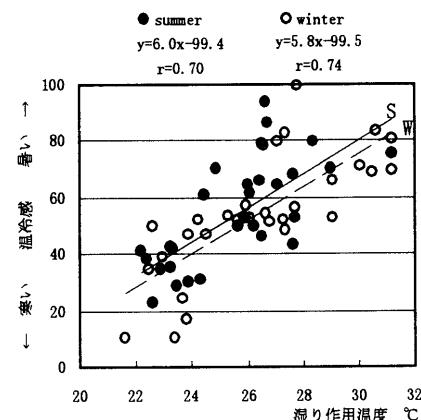


図15 湿り作用温度と温冷感の関係

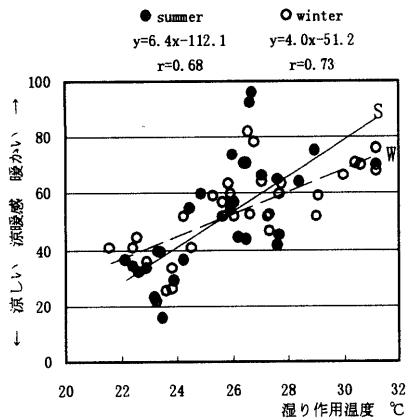


図16 湿り作用温度と涼暖感の関係

50 (33.5°C) とほぼ一致し、夏季における温冷感 50 (33.8°C)、涼暖感 50 (34.0°C) より低い値となった。夏季においては温冷感が「寒い」側、涼暖感が「涼しい」側で快適性が得られている。

4.2 ぬれ面積率と生理・心理反応の関係

本研究では、ぬれ面積率を最大蒸発放熱量に対する実際の蒸発放熱量の比率からぬれ面積率を算定した。実際の蒸発放熱量は体重減少量から算定できるが、最大蒸発放熱量は皮膚表面の水蒸気分圧と環境の水蒸気分圧の差に蒸発に伴う熱伝達率を乗じて算定する。すなわちルイスの関係と対流熱伝達率を用いるが、ここで注意すべきことは、人体の対流熱伝達率としてどの数値を用いるかである。本研究では実測した対流放熱量から求めた対流熱伝達率を用いることが可能である。図11に本研究での対流熱伝達率の実験値を示す。自然対流熱伝達率は伝熱理論¹⁷⁾により平均皮膚温と気温の温度差の指數関数として表現される。回帰直線から判断すると、本研究では温度差による影響は少なく対流熱伝達率は 5.1W/m²·°C 前後の値となった。人体の部位対流熱伝達率の分布を考慮して求めた石井ら¹⁸⁾の値 5.2~5.5W/m²·°C とほぼ等しい値となった。図12にぬれ面積率と蒸発放熱量の関係を示す。ぬれ面積率と蒸発放熱量の関係において夏季と冬季に差 ($\alpha = 0.01$) はなかった。ぬれ面積率と蒸発放熱量の間には正の相関があり、Gagge¹⁹⁾が不感蒸泄時の最低ぬれ面積率としている 0.06 を下回る値もある。ぬれ面積率 0.2~0.3 の範囲では蒸発放熱量は 24.5~37.5W/m² となっており、40~46W/m² の結果を示した持田ら²⁰⁾の研究と比較して本研究では小さな値となった。持田らは高温高湿の条件であったため、および対流熱伝達率の値として、Mitchell²¹⁾の 3.1W/m²·°C を用いているため、採用した対流熱伝達率の違いが表されたことも考えられる。図13に気温とぬれ面積率の関係を示す。気温とぬれ面積率の関係において、夏季と冬季には有意差 ($\alpha = 0.01$) はなかった。気温 24°C 条件ではぬれ面積率が 0.02~0.13、気温 28°C 条件では 0.02~0.22、気温 32°C 条件では 0.03~0.30 の範囲にある。ぬれ面積率は気温が高いほど値のばらつきが大きくなる。堀越ら²²⁾の実験結果でも、気温が 31°C 以上でぬれ面積率が急増しており、気温 30°C を越える環境では発汗の影響で蒸発放熱量が大きくなり、ぬれ面積率の値が大きくなると考えられる。図14にぬれ面積率と温冷感の関係を示す。ぬれ面積率が大きくなるほど「暑い」側の申告が多くなる。ぬれ面積率 0.1 以下では「寒い」から「暑い」まで広く分布し、ぬれ面積率は温冷感とは相關しないが、発汗域に入ると温冷感との対応が表れる。

4.3 湿り作用温度と心理反応の関係

人体の熱収支にもとづく温熱指標としての湿り作用温度は、作用温度に蒸発の影響を組み込んだもので、環境の水蒸気分圧つまり湿度の影響を表現できると考えられる。そこで気温と湿度の組み合わ

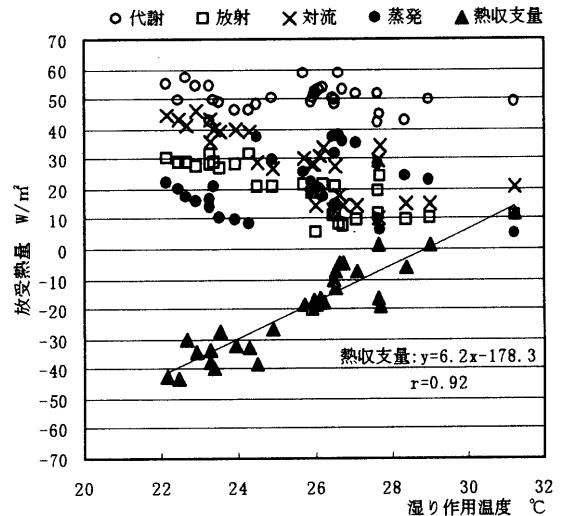


図17 湿り作用温度と経路別熱収支の関係(夏季)

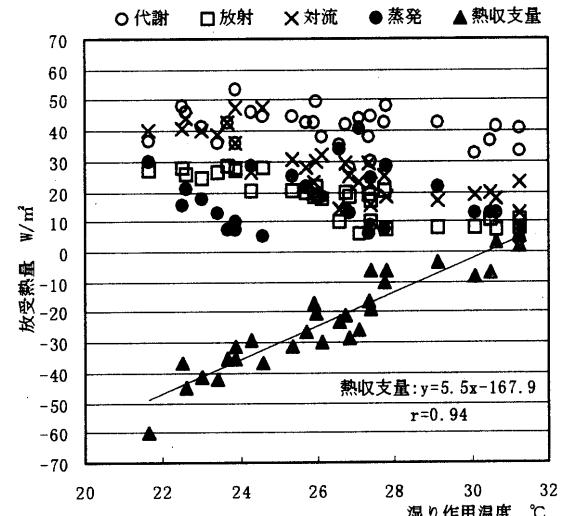


図18 湿り作用温度と経路別熱収支の関係(冬季)

図17, 18 の符号は、代謝は産熱で+、放射・対流・蒸発は放熱を+として表示している。熱収支量は蓄熱で+、冷却で-となる。

せ条件の評価指標として湿り作用温度を採用し、心理反応との関係を調べた。夏季実験と冬季実験で水準間の差の検定を行ったところ有意差 ($\alpha = 0.01$) があった。図15に湿り作用温度と温冷感の関係を示す。相関係数で比較すると、図8に示した平均皮膚温と温冷感の関係（夏季 $r = 0.85$ 、冬季 $r = 0.88$ ）のほうが強い相関がある。温冷感50を示す湿り作用温度は、夏季24.9°C、冬季25.7°Cとなり、本研究の湿り作用温度21.6°C～31.2°Cの範囲では同一温冷感を得る湿り作用温度は冬季より夏季のほうが0.8°C低くなつた。志村¹³⁾は温冷感が熱的に中立となるSET*は、夏季では男女とも25.5°C、冬季では男性25.1°C女性26.7°Cと季節による差を認めている。一方、深井ら¹¹⁾は全身温冷感とSET*の関係において季節差はないとしている。深井らの研究はSET*の算出には2層モデル¹⁸⁾を用いているため、季節によらず同じ熱環境に暴露された被験者は同じSET*の値となり、SET*算出に必要な生理反応に季節による影響が組み込まれず、心理反応のみに影響がでる。本研究では実測した平均皮膚温やぬれ面積率を用いて実際の人体反応にもとづいたデータを用いているため、生理・心理反応の両面に季節差の影響を組み込むことができたと考えられる。このことは実測した平均皮膚温と温冷感の関係において季節差が示唆されたことからも推察される。図16に湿り作用温度と涼暖感の関係を示す。涼暖感50を示す湿り作用温度は、夏季、冬季とも25.4°Cとなるが、25.4°C以下では夏季のほうが冬季より「涼しい」側の申告となり、25.4°C以上では夏季のほうが冬季より「暖かい」側の申告となる。

4.4 湿り作用温度と人体熱収支の関係

図17に夏季実験の湿り作用温度と経路別放熱量の関係を示す。図18に冬季実験の湿り作用温度と経路別放熱量の関係を示す。湿り作用温度と放射放熱量の関係および湿り作用温度と対流放熱量の関係では夏季と冬季の間に有意差 ($\alpha = 0.01$) がなかった。放射放熱量は湿り作用温度が大きくなるほど皮膚温と平均放射温度の温度差が小さくなるため値が小さくなる。対流放熱量は湿り作用温度が大きくなるほど皮膚温と気温の温度差が小さくなるため値が小さくなる。本研究の湿り作用温度の範囲では、湿り作用温度と代謝量の関係において回帰の有意性 ($\alpha = 0.01$) がなかったので平均値の差の検定を行ったところ、夏季と冬季に有意差 ($\alpha = 0.01$) があった。夏季の代謝量は $49.7 \pm 4.9 \text{ W/m}^2$ 、冬季は $41.0 \pm 6.0 \text{ W/m}^2$ となり、夏季のほうが大きい結果となった。^{注2)} これは、冬季の方が夏季より代謝量が大きいという1975年の小川ら¹⁰⁾の研究と逆の結果となつたが、欧米では基礎代謝の季節変動を認めないとする説²²⁾が主流であり、代謝量は食質と摂取カロリーにも影響されることや、近年の本州の住宅における冬季の採暖から暖房への変化や夏季の冷房の普及など生活習慣が影響していることも考えられる。湿り作用温度と蒸発放熱量の関係についても回帰の有意性 ($\alpha = 0.01$) がなかったが、平均値の差では、夏季と冬季に有意差 ($\alpha = 0.05$) があった。蒸発放熱量は夏季 $22.3 \pm 11.0 \text{ W/m}^2$ 、冬季 $16.9 \pm 9.1 \text{ W/m}^2$ となり、夏季のほうが冬季より大きい結果となつた。Horiら²³⁾は、発汗反応の季節変動について、汗量は夏季のほうが冬季より多いと報告しており、本研究の結果とも一致する。熱収支量と湿り作用温度との関係において夏季と冬季に有意差 ($\alpha = 0.01$) があった。湿り作用温度が大きくなるにつれて熱収支量は0に近づき、夏季28.9°C、冬季30.4°Cで熱収支量が0となり、受熱と放熱がバランスする。図15で求めた温冷感50の湿り作用温度（夏季24.9°C、冬季25.7°C）の場合、熱収支量は夏季-24.6W/m²、冬季-26.2W/m²となり、いずれも人体の冷却側で熱的中性申告を得る。都築ら²⁴⁾は、自転車エルゴメーターへの着座安静状態での熱収支量と温冷感の関係を求め、熱収支量が-20W/m²の冷却側で熱

的中性申告を得ている。Fanger²⁵⁾は、人体熱負荷と温冷感を関連づけ、熱負荷が0の時に快適としている。本研究では、熱収支量が0でない状態で熱的中性申告が得られており、これについては経路別熱収支測定の精密化が必要であり、測定時の定常性の検討と非定常時の人体熱収支と温冷感との関係について、更に検討の余地があるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、夏季と冬季において気温24°C、28°C、32°Cの3条件と湿度50%、60%、70%、80%、90%の5条件を組み合わせた合計15条件下で、青年男子被験者2名を用いた生理的実験により、次の結果^{注3)}を得た。

1. 平均皮膚温と温冷感の関係では夏季と冬季の差が示唆され、熱的中性申告を示す平均皮膚温は、夏季33.8°C、冬季33.6°Cとなつた。平均皮膚温と涼暖感の関係でも夏季と冬季の差が示唆された。
2. 热流計を用いて測定した対流放熱量から自然対流時の対流熱伝達率を求めたところ、本実験条件の下で平均皮膚温と気温の温度差によらず、 $5.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ の値となつた。
3. ぬれ面積率と蒸発放熱量の関係および気温とぬれ面積率の関係では夏季と冬季の差がなかった。ぬれ面積率と温冷感の関係では、ぬれ面積率が0.1以下では温冷感は広く分布し、気温が温冷申告に与える影響が大きくなる。
4. 湿り作用温度と温冷感の関係では夏季と冬季に差があり、熱的中性申告を示す湿り作用温度は、夏季24.9°C、冬季25.7°Cとなつた。湿り作用温度と涼暖感の関係でも夏季と冬季の差があつた。
5. 湿り作用温度と放射放熱量の関係および湿り作用温度と対流放熱量の関係では夏季と冬季の差がなかった。代謝量は夏季と冬季の差があり、夏季のほうが冬季より大きい結果となつた。蒸発放熱量は夏季と冬季に差があり、夏季が冬季より大きい値となつた。熱収支量は、夏季28.9°C、冬季30.4°Cで受熱と放熱がバランスし、熱的中性申告は非定常時に表れた。

本研究は、議論の分かれている日本人の至適温度条件の季節差について生理、心理反応の両面から実験的にその存在についての検討を試みたものであり、本研究の結果を日本人全体に適用することは難しいが、男女差、年齢差の影響なども含めて今後のデータの蓄積が必要と考える。

注1) 経路別放熱量は以下の各式により、有効数字3桁で算出した。

放射放熱量 R (W/m²) は次式による。

$$R = \sigma \epsilon_s \epsilon_w [(t_s + 273.15)^4 - (t_r + 273.15)^4] F_{eff}$$

$$t_r = t_g + 2.73 \sqrt{\nu} (t_g - t_s)$$

σ : Stefan Boltzmann の定数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

ϵ_s : 人体の放射率 0.98 ϵ_w : 周壁面の放射率 1.0

t_s : 平均皮膚温 °C

t_r : 平均放射温度 °C

t_g : グローブ温度 °C

ν : 風速 m/s

F_{eff} : 人体の有効放射面積率 0.74

対流放熱量 C (W/m²) は次式による。

$$C = H - R$$

H : 热流計により測定される顯熱放散量 W/m²

蒸発放熱量 E (W/m²) は次式による。

$$E = 60 \times m \times \lambda / A_d$$

m : 体重減少量 g/min λ : 水の蒸発潜熱 0.67 W/g

A_d : 体表面積 m²

熱収支量 S (W/m²) は次式による。

$$S = M - R - C - E$$

- 注2) 冬期の代謝量について一部に小さすぎると考えられる値が測定されたが、Grubbs-Smimov の棄却検定の結果 ($\alpha=0.1$)、実験データとして採用した。
- 注3) 図17、図18に示した熱収支量の算定結果から、以下の結論は、実際は必ずしも定常状態ではなく非定常状態であったことも考えられる。そのデータを用いた検討結果である。

謝辞

本研究を行うにあたり、実験の準備等にご協力していただいた名古屋工業大学堀越研究室の学生の方々ならびに被験者各位に感謝の意を表します。また、研究費の一部として、科学研究費補助金基盤研究（C）NO.1165060 を用いた。

引用文献

- 1)Nevins,R.G.,Rohles,F.H.,Springer,W.,Feyerherm,A.M.: Temperature-Humidity Chart for Thermal Comfort of Seated Persons, ASHRAE Trans., Vol. 72, part 1, pp.283-291, 1966
- 2)F.H.Rohles, R.G.Nevins: The Nature of Thermal Comfort for Sedentary Man, ASHRAE Trans., Vol. 77, pp.239-247, 1971
- 3)志村欣一ほか2名:日本人を対象とした室内温湿度条件の至適域に関する実験的研究,日本建築学会計画系論文集, No.480,pp.15-24,1996.2
- 4)渡辺明彦ほか7名:中等度環境気温における湿度の人体に及ぼす影響(第1報),労働科学,52巻11号,pp.635-650,1976
- 5)渡辺明彦ほか6名:中等度環境気温における湿度の人体に及ぼす影響(第2報),労働科学,53巻3号,pp.199-219,1977
- 6)堀越哲美ほか3名:修正湿り作用温度・温熱風速場・有効放射場および減効湿度場による温熱環境条件の人体影響表現方法の検討,日本建築学会計画系論文集, No.380,pp.12-23,1987.10
- 7)田辺新一,木村建一:夏季の成人の温冷感と快不快感に関する試行実験,日本建築学会計画系論文集, No.368,pp.31-41,1986.10
- 8) Nishi, Y. & Gagge, A.P. : Humid Operative Temperature-A Biophysical Index of Thermal Sensation and Discomfort, J.Physiol., Paris 63, pp.365-368, 1971
- 9)垣鍛直ほか3名:体組成を考慮した蓄熱量の算定と皮膚面からの放熱特性に関する実験的研究,日本建築学会計画系論文集, No.493,pp.85-91,1997.3
- 10)小川庄吉ほか3名:至適温度条件の季節差について,公衆衛生院研究報告,24巻4号,pp.221-231,1975
- 11)深井一夫ほか4名: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,空気調和・衛生工学会論文集, No.51,pp.139-147,1993
- 12)斎藤輝幸ほか4名:室温が不快条件から中立条件へ変化するときの生理・心理反応の季節差,日本建築学会計画系論文集, No.441,pp.33-42,1992.11
- 13)志村欣一:空気調和設計における室内温湿度条件の快適域に関する研究,名古屋工業大学学位論文,1997
- 14)蕨澄美仁ほか3名:日本人の体表面積に関する研究,日本生気象学会雑誌, 第31巻, 第1号, pp.5-29, 1994
- 15)権田信ほか2名:代謝量の日変動に及ぼす季節差の影響について, 第23回人間-生活景境系シンポジウム, pp.108-111, 1999
- 16)Hardy, J.D. & DuBois, E.F. : The Technic of Measuring Radiation and Convection, J.Nutrition, Vol.5, pp.461-475, 1938
- 17)甲藤好郎:伝熱概論,養賢堂,1989
- 18)石井仁ほか4名:自然対流時における人体および部位の対流熱伝達率の推定,日本建築学会計画系論文集, No.530,pp.31-37,2000.4
- 19)Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Nishi, Y. : An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Trans., 77, pp.247-262, 1971
- 20)持田徹ほか4名: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
- 21)Mitchell, D. : Convective Heat Transfer in Man and Other Animals, Butterworth Publishing Inc., London, p.59, 1974
- 22)日本生気象学会編:生気象学の辞典,朝倉書店,1992
- 23)Hori, S., Iizuka, H. & Nakamura, M. : Studies on Physiological Responses of Residents in OKINAWA to a Hot Environment, Jap. J. Physiol., 26, pp.235-244, 1976
- 24)都篠和代ほか2名:夏期における気温と湿度が運動時の人体に及ぼす影響に関する研究,日本建築学会計画系論文集, No.405,pp.47-54,1989.11
- 25)Fanger, P.O. : Thermal Comfort, Danish Technical Press, 1970

本論に関する既発表論文

- 1)松原辰樹ほか4名:気温と湿度の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応に及ぼす影響に関する実験的研究(その1), 夏期実験の方法と結果, 日本建築学会東海支部研究報告集, 37号, pp. 529-532, 1999
- 2)石垣秀圭ほか4名:気温と湿度の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応に及ぼす影響に関する実験的研究(その2) 経路別熱収支・ぬれ面積率・湿り作用温度について, 日本建築学会東海支部研究報告集, 37号, pp. 533-536, 1999
- 3)松原辰樹ほか3名:気温と湿度の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応に及ぼす影響に関する実験的研究(その3) 冬期実験の方法と結果, 日本建築学会学術講演梗概集, D-2, pp. 335-336, 1999
- 4)石垣秀圭ほか3名:気温と湿度の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応に及ぼす影響に関する実験的研究(その4) 人体熱収支・ぬれ面積率・湿り作用温度の冬期実験結果について, 日本建築学会学術講演梗概集, D-2, pp. 337-338, 1999
- 5)権田 信ほか3名:気温湿度が人体の熱収支と心理反応に及ぼす影響について(その1), 日本生気象学会雑誌, 第36巻第3号, p.44, 1999
- 6)松原辰樹ほか3名:気温湿度が人体の熱収支と心理反応に及ぼす影響について(その2), 日本生気象学会雑誌, 第36巻第3号, p.45, 1999
- 7)石垣秀圭ほか3名:気温湿度が人体の熱収支と心理反応に及ぼす影響について(その3), 日本生気象学会雑誌, 第36巻第3号, p.46, 1999

(2000年6月10日原稿受理, 2000年12月13日採用決定)