

発汗の動的特性による 衣服の着心地評価に関する研究

文化女子大学 佐藤 真理子

Clothing Comfortableness on the Dynamic Properties of Sweating

by

Mariko Sato

Bunka Women's University

ABSTRACT

By applying various heat stimuli to volunteer subjects, changes in the volume of sweating were subjected to a frequency analysis to ascertain the dynamic properties of sweating. The results revealed that, like other physiological phenomena such as brain waves and heart rates, thermal sweating is a phenomenon exhibiting fluctuations. Subjects were divided into heat acclimatized and heat non-acclimatized groups. Under a high heat environment, changes in sweating and thermal sensation were then compared between the two groups. Although no marked differences between the two groups were observed in the degree of fluctuations in sweating, differences were observed in frequency components of the specific frequency band in sweating power spectra. Changes in comfortableness differed according to acclimatization status, and the factors contributing to comfortableness for the acclimatized group were different to those for the non-acclimatized group. These findings suggest that when developing comfortable clothing for high heat environments, it is important to clarify the heat adaptability of test subjects. The results of the present study demonstrate that acclimatization to heat can be objectively assessed based on the dynamic properties of sweating, and this will prove useful for designing comfortable clothing for high heat environments.

要 旨

被験者に様々な温熱性刺激を与えた際の発汗量経時変化を周波数解析し、発汗の動的特性について検討を行った。温熱性発汗は、脳波や心拍数など他の生理学的現象と同様、ゆらぎを持つ現象であることが示された。被験者を暑熱馴化している馴化群と非馴化群とに分け、暑熱暴露下での発汗および感覚の時間的な変動の特徴を比較検討した。両群の発汗ゆらぎに差はなかったが、発汗パワースペクトルにおける特定周波数域の周波数成分の多寡が異なることが明らかとなった。快・不快感覚の経時変化は暑熱馴化により異なり、馴化群と非馴化群で快・不快の構成要素は異なっていた。暑熱環境を想定した快適な衣服の開発に際し、着用対象者の暑熱適応能を明らかにすることの重要性が示唆された。発汗の動的特性を用いて馴化・非馴化の評価を可能にする本研究の成果は、暑熱下での着心地の良い衣服設計を目指すにあたり有用である。

緒 言

快適な衣生活を目指すにあたり、衣服の着心地は重要である。着心地は、個人の感性的要素を含む複雑であまいなものであり、より良い衣服の開発、設計のためには、この主観的な表現を客観的に評価する方法が必要となる。近年、生体信号のスペクトル解析により人間の感覚を客観的に捉えようとする試みが広く行われている。しかしその対象は主に心拍や脳波であり、発汗に関するまとまった報告は未だない。発汗、特に温熱性発汗は衣内温湿度の変動に大きく影響し、着心地の快・不快を左右する。発汗量を連続的に観察すると不規則な波状の動揺がみられ、これには中枢性の機序が関わりと推測されている¹⁾。著者らはこれまで、発汗の時間的な変動の特性に着目し、日内変動や季節変動といった生体リズムの視点から、

発汗の動的特性における個人内差について明らかにしてきた^{2,3)}。本研究では、人それぞれに異なる温熱生理的特性が着心地感覚の個人差に反映されると考え、発汗の動的特性と被験者の温熱生理的特性、および温冷感、湿潤感等の感覚の関係を検討し、発汗の動的特性により衣服の着心地評価を行うための基礎研究を行った。

1. 方 法

1. 1 実験 I

実験 I では、単純な温熱性刺激を負荷した際の被験者の発汗変動を観察し、環境温度の違いが発汗の動的特性へ与える影響について検討した。

1. 1. 1 被験者

被験者は健康な 20 - 23 歳の女性 6 人であった(表 1)。被験者には、ポリエステル 100% の実験着(長袖、長ズボン)とショーツを着用させ、クロ値は合計 0.47clo であった。

表 1 被験者の身体的特性<実験 I >

n=6	体重 (kg)	身長 (cm)	BSA* (m ²)	年齢 (year)
平均値	50.4	158.2	1.49	21.5
標準偏差	3.0	2.0	0.04	1.0

* BSA (体表面積) は DuBois らの式による

1. 1. 2 環境条件

温度条件として、積極的な体温調節反応が行われないと考えられる中性温域に属する 24℃、血管調節による乾性放熱に加え、発汗による湿性放熱も増加し始めると考えられる 30℃、ほとんど湿性放熱のみによって熱放散が行われると考えられる 38℃の 3 条件に人工気候室を設定した⁴⁾。湿度は 50% RH 一定とした。各温度条件下で 1 人につき 4 回の測定を実施し、1 条件に対する延べ人数は 24 人であった。

1. 1. 3 測定項目および方法

局所発汗量を換気カプセル法により測定した。すでに報告した、応答性が高くかつ微量水分の検出可能な発汗カプセルを使用した⁵⁾。装着部位は

左前腕部屈側とした。カプセルに接続したシリコンチューブを通して乾燥窒素を流し、カプセル内に設置した温湿度センサの出力から局所発汗量を算出した。

1. 1. 4 実験手順

被験者の衣服内に発汗カプセルを装着し、人工気候室内で、環境に順応するため60分間椅座位安静を保たせた後、測定を開始した。4秒ごと、20分間のデータ収録を行った。発汗の動的特性を検討するにあたり、20分間の発汗量経時変化データから256個のデータポイントを抽出し、高速フーリエ変換(FFT)により周波数解析を行った。

1. 1. 5 統計処理

結果は平均値と標準偏差の形で表記した。相関解析にはPearsonの相関分析を用いた。有意水準は $p < 0.05$ とした。

1. 2 実験

実験Ⅱでは、温熱性刺激下における発汗量測定に加え、温冷感、湿潤感等の感覚を被験者に申告させ、発汗の動的特性と被験者の感覚との関係、個々の被験者の温熱生理的特性との相関について検討を行った。

1. 2. 1 被験者

被験者は健康な20-23歳の女性5人であった(表2)。被験者には、実験Ⅰと同じ実験着を着用させた。

表2 被験者の身体的特性<実験Ⅱ>

被験者 No.	1	2	3	4	5
体重(kg)	48.7	50.1	48.6	51.6	54.6
身長(cm)	158	160	154	158	158
BSA(m ²)	1.47	1.50	1.44	1.51	1.54
年齢(year)	20	23	22	20	20
備考	—	—	冷え性 を申告	スポーツ 経験者	亜熱帯域 出身者

*BSA(体表面積)はDuBoisらの式による

1. 2. 2 環境条件

環境温度の異なる隣接した2つの人工気候室間で被験者を移動させた。第1の気候室の環境温度

は24℃、第2の気候室の環境温度は38℃に設定した。第1、第2の気候室とも、湿度は50%RH一定とした。1人につき4回の測定を実施し、延べ人数は20人であった。

1. 2. 3 測定項目および方法

局所発汗量測定に加え、快適感覚、温度感覚、発汗感覚、むれ感覚、ぬれ感覚を被験者に申告させた。表3に示すカテゴリースケールを用い、小数点以下第1位までの数値により口答させた。

表3 感覚値カテゴリースケール

快適感覚	温度感覚	発汗感覚
3 非常に不快	3 非常に暑い	3 びっしょり
2 不快	2 暑い	2 かなり汗ばむ
1 少し不快	1 暖かい	1 少し汗ばむ
0 快適	0 ふつう	0 全くなし
	-1 涼しい	
	-2 寒い	
	-3 非常に寒い	
むれ感覚	ぬれ感覚	
3 非常にむれる	3 非常にぬれる	
2 むれる	2 ぬれる	
1 ややむれる	1 ややぬれる	
0 むれない	0 ぬれない	

1. 2. 4 実験手順

第1の気候室において60分間椅座位安静を保たせ熱的中立状態に達した後、被験者を第2の気候室へ移動させ、暑熱暴露下で測定を開始した。椅座位安静で4秒ごと、80分間のデータ収録を行った。感覚値申告は10分ごととした。80分間の測定のうち、環境順応後の後半20分間の発汗量経時変化データに関してFFT解析を行った。

1. 2. 5 統計処理

結果は平均値と標準偏差の形で表記した。感覚値の重回帰分析は、分散分析により重回帰式の有意性を検定した後、おのおのの説明変数の有効性を得た。周波数成分分布における各成分含有率の有意差については、分散分析後、Scheffe法による多重比較検定を行った。有意水準は $p < 0.05$ とした。

2. 結果

2.1 実験 I

各温度条件での局所発汗量全24実験平均値と標準偏差を表4に示す。环境温度24℃で観察された0.01—0.04 mg/cm²/min程度の水分蒸発は、既報の結果とほぼ同程度であり、皮膚からの不感蒸泄を表していた⁶⁾。

表4 各温度条件での発汗量平均値(mg/cm²/min)

环境温度	24℃	30℃	38℃
平均値	0.031	0.102	0.135
標準偏差	0.013	0.028	0.057

図1に各温度条件下での発汗量測定結果の一例を示す。环境温度24℃では、ごく小さい拍出が

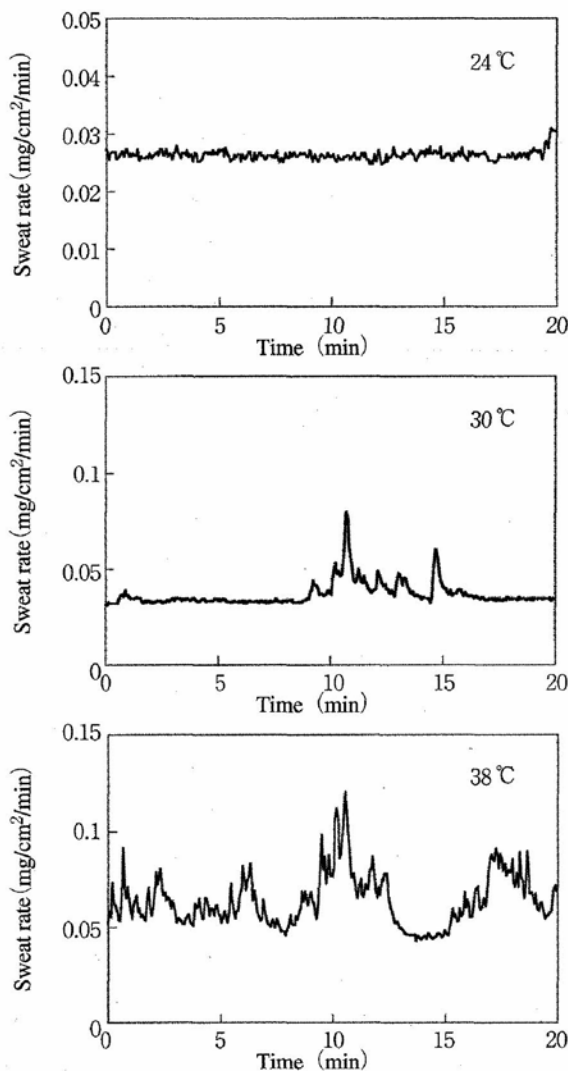


図1 発汗量測定結果例
(上から、温度条件24℃, 30℃, 38℃の順)

観察されるのみであったが、30℃, 38℃では、十数秒から数分の周期を持つ、様々な大きさの振幅の拍出が認められた。ここで観察された発汗量の波を解析すべく、得られた発汗量データに対して高速フーリエ変換 (FFT) による周波数解析を行った。

図2に発汗量経時変化データのFFT解析結果を示す。温度条件別に全24実験を平均し、周波数に対するパワースペクトルの両対数表示をとった。最小二乗法により回帰直線を求め、その傾きを周波数ゆらぎのひとつの指標として検討を行った。表5に、温度条件別のパワーの傾きの全24実験平均値および標準偏差を示す。発汗パワーの傾きは、24℃で-0.3から-0.8, 30℃で-0.6から-1.2,

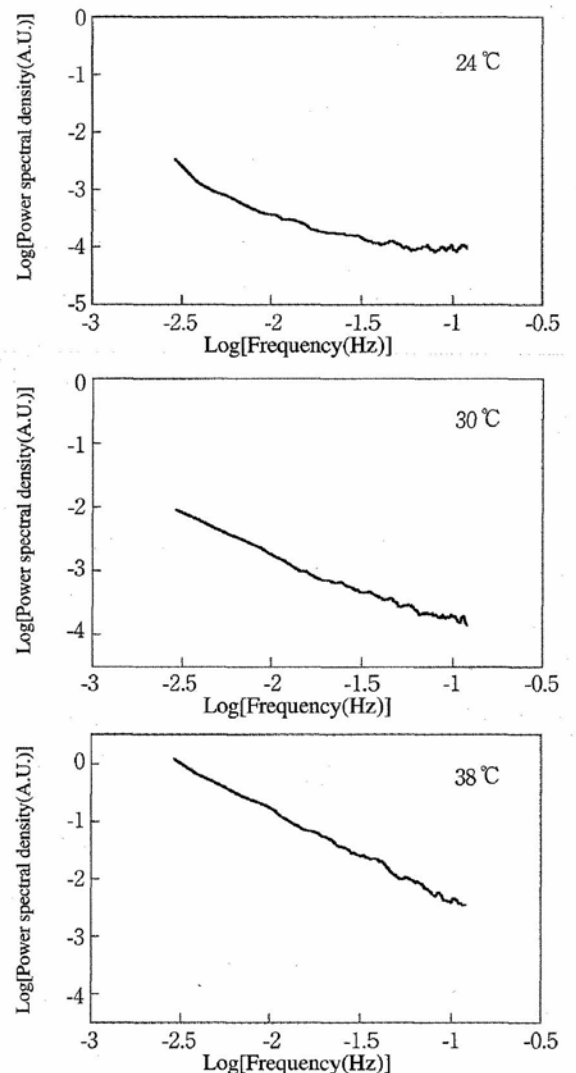


図2 発汗量経時変化データFFT解析結果
(温度条件別平均)

表5 各温度条件での発汗パワーの傾き平均値
および発汗量との相関

環境温度	24℃	30℃	38℃
平均値	-0.53	-1.01	-1.61
標準偏差	0.23	0.34	0.32
発汗量との相関	NS	NS	r=0.63

38℃で-1.4から-2.0となった。また、この発汗パワーの傾きと発汗量との相関を同じく表5に示した。発汗量は、FFT解析と同じ時間範囲の平均値を用いた。その結果、38℃で負の相関傾向を得たが、24℃、30℃で相関は得られなかった。

2.2 実験Ⅱ

図3に、暑熱暴露下でのおおのこの被験者における4回の発汗量測定結果を示す。被験者により汗のかきかたは様々であり、被験者1や3のように暑熱暴露開始より30-40分程は全く拍出が見られず、その後急激な発汗が起こる例、被験者2のように様々な周期を持つ大きさの異なる振幅の拍出が間欠的に起こる例、被験者4のように連続的な拍出が増加していくと共に、そのベースラインが徐々に上がっていく例、被験者5のように暑熱暴露開始からほぼ同程度の振幅の拍出が連続的に起こり続ける例などが観察された。暑熱暴露開始から発汗拍出出現までの時間、すなわち発汗潜時は、被験者3と1で長く30-40分、2もやや長く20分前後、4と5では観察できない程に短かった。

図4-8に、5つの感覚値項目の経時変化を被験者別に示す。1人4回の結果とその平均について、測定開始時との変化量を取り検討を行ったところ、どの項目に関しても被験者は大きく2つの群に分類された。1つの群では、被験者1, 2, 3のように、時間と共に、不快で、暑く、汗ばみ、むれ、ぬれた感覚が徐々に増加していった。特に被験者3では、暑熱暴露前半の立ち上がりは緩やかで、後半になると急激に値が増加するS字カーブを示した。もう1つの群では、被験者4, 5のよ

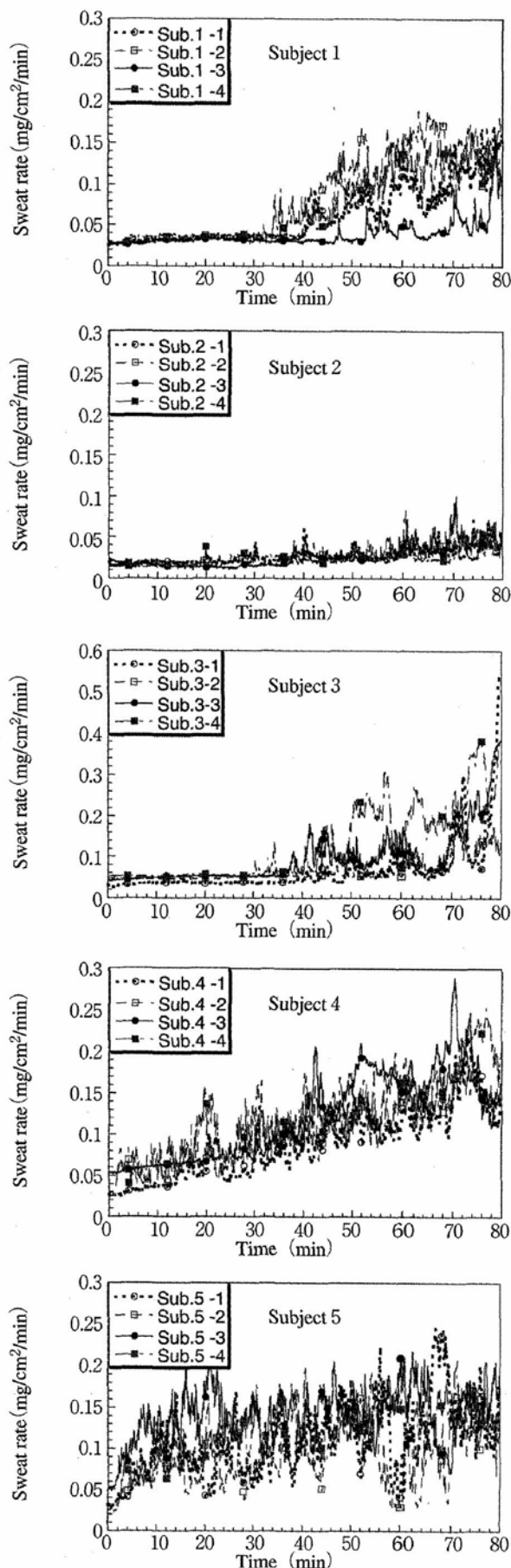


図3 発汗量測定結果例
(上から、被験者No.1, 2, 3, 4, 5の順)

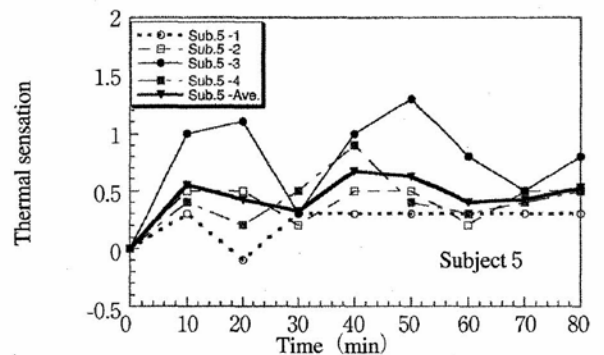
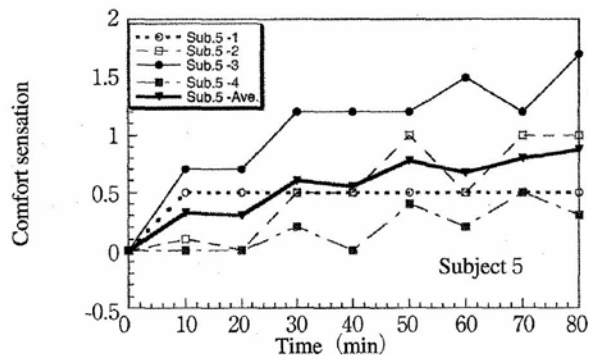
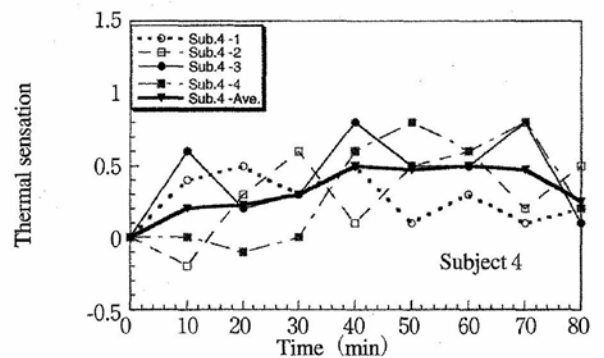
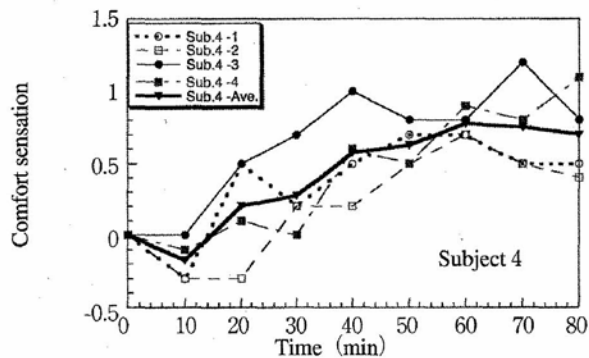
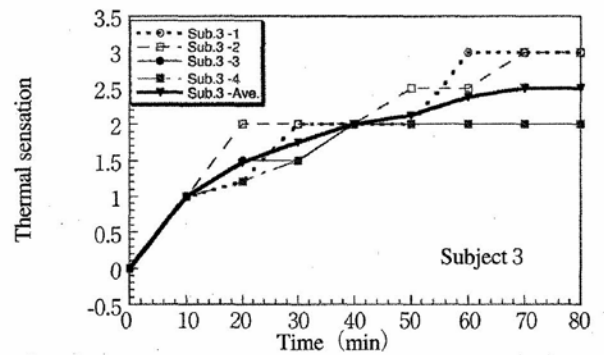
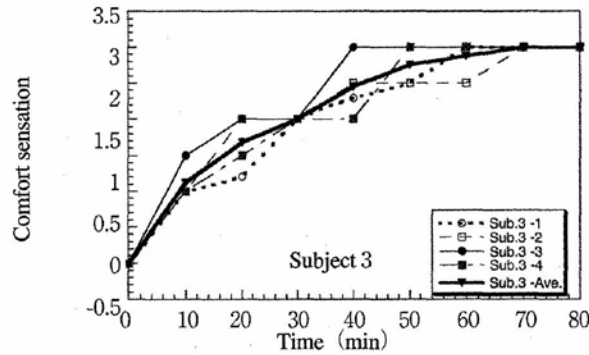
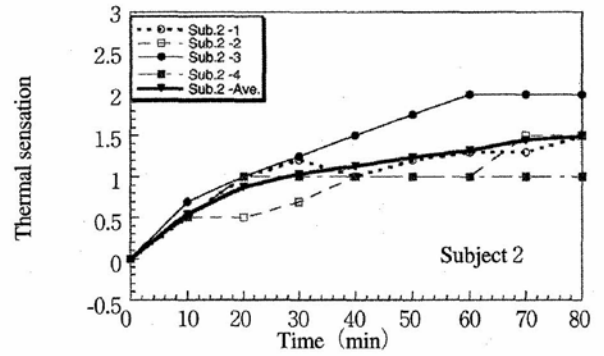
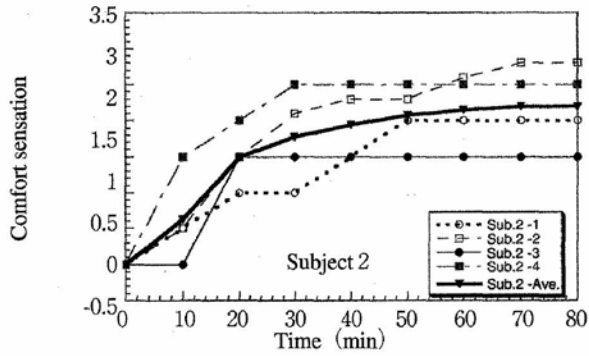
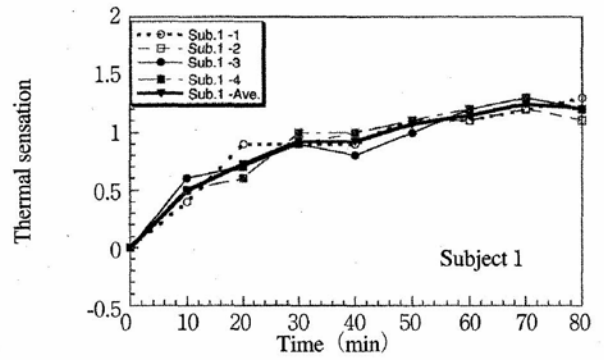
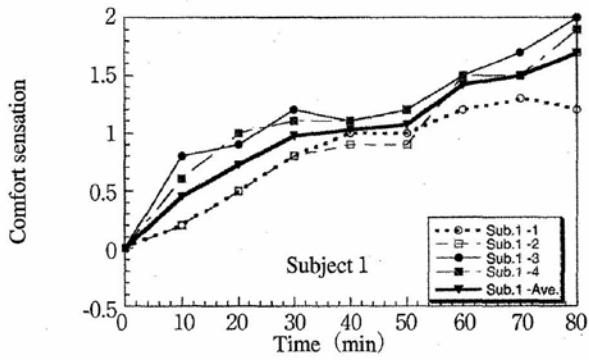


図4 快適感覚変化量経時変化例
(上から, 被験者No.1, 2, 3, 4, 5の順)

図5 温度感覚変化量経時変化例
(上から, 被験者No.1, 2, 3, 4, 5の順)

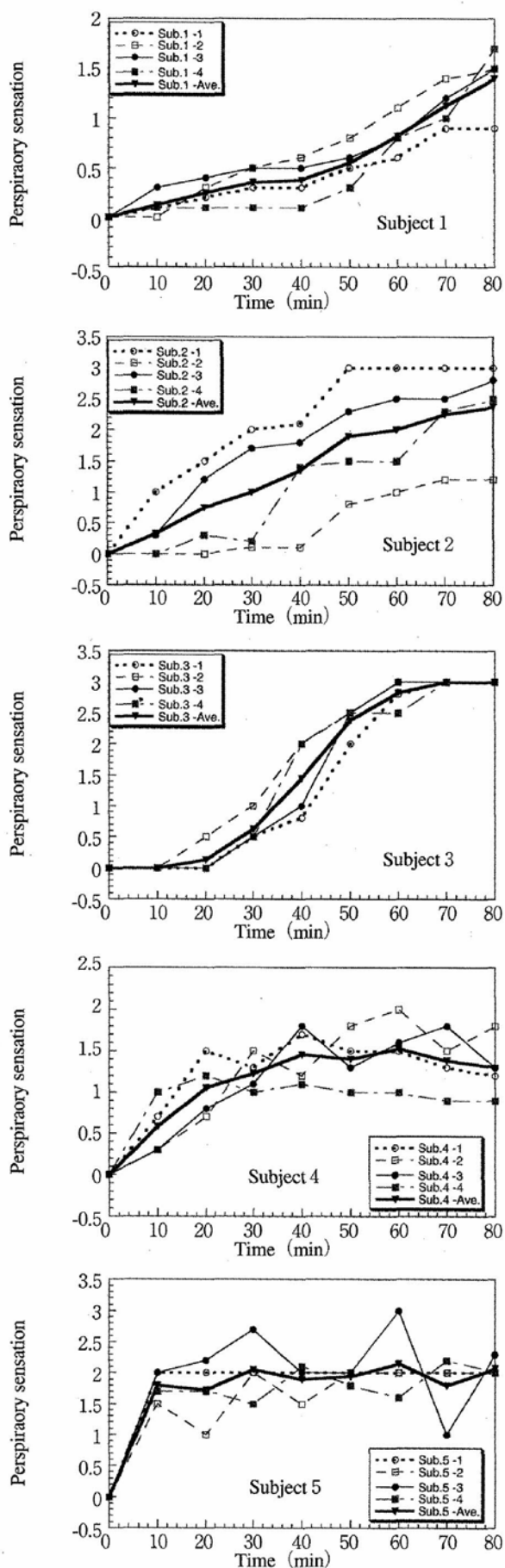


図6 発汗感覚変化量経時変化例
(上から, 被験者No.1, 2, 3, 4, 5の順)

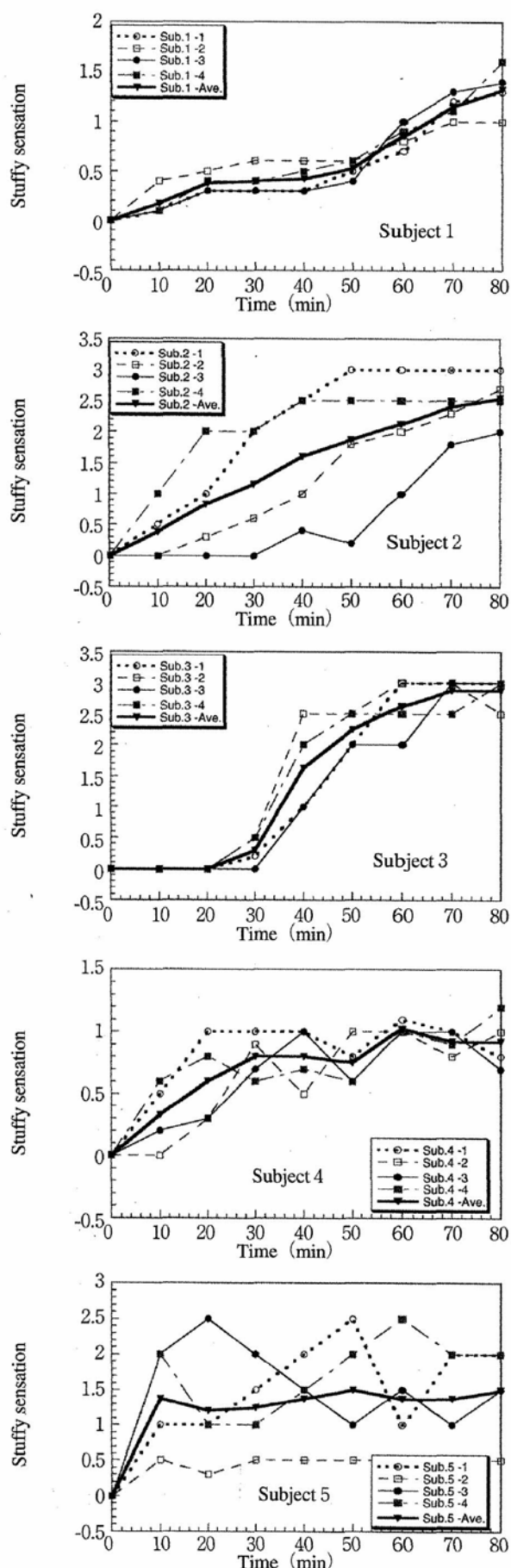


図7 むれ感覚変化量経時変化例
(上から, 被験者No.1, 2, 3, 4, 5の順)

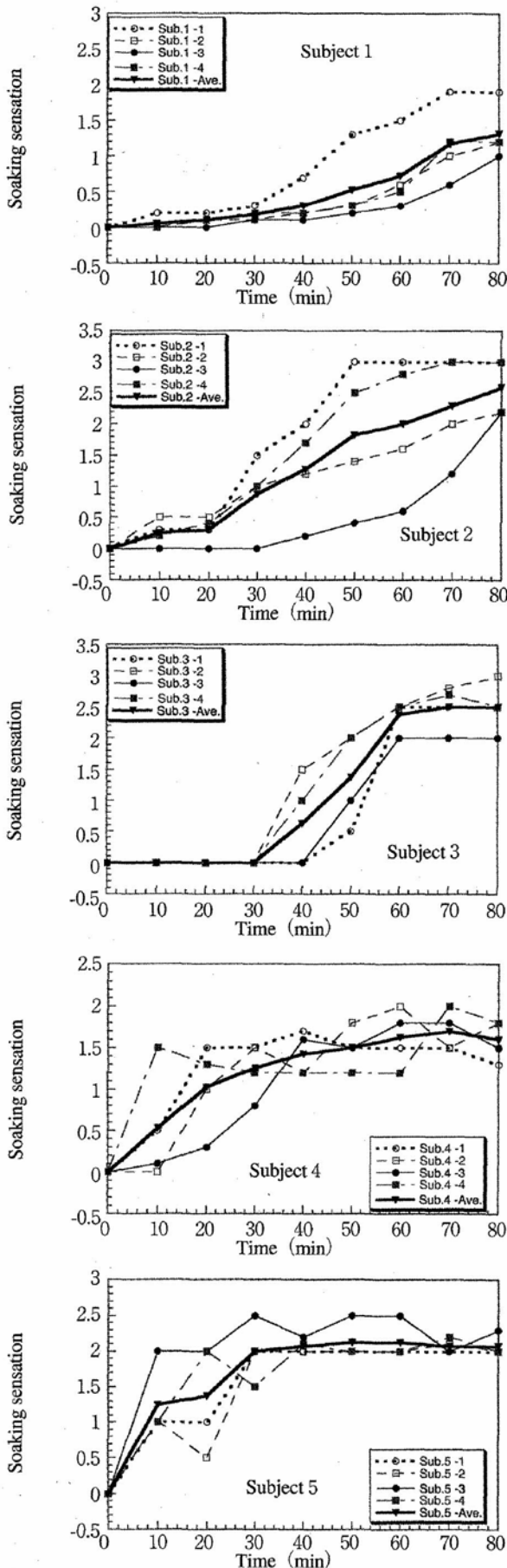


図8 ぬれ感覚変化量経時変化例
(上から、被験者No.1, 2, 3, 4, 5の順)

うに、暑熱暴露前半と後半とでさほど大きな値の差はなく、感覚値を申告させた10分ごとに値の増減が見られた。この2群の違いを検討する上で、被験者おのこの快・不快がどういった要素からできているか、特に暑熱暴露前半と後半とで快・不快を決定する要因に差異はないかを知るため、重回帰分析を行った。結果を表6に示す。重回帰

表6 各被験者の感覚値重回帰分析結果における切片および係数の値 (暑熱暴露前半と後半)
式 $y=A+Bx_1+Cx_2+Dx_3+Ex_4$ において、
 y : 快適感覚, x_1 : 温度感覚, x_2 : 発汗感覚, x_3 : むれ感覚, x_4 : ぬれ感覚 を表す

	A	B	C	D	E
Sub.1					
暴露前半	-0.05	1.37**	0.91	-0.59	-0.19
暴露後半	1.03	-0.30	0.34*	0.55	-0.14
Sub.2					
暴露前半	0.06	1.50**	-0.58**	0.38	0.24
暴露後半	1.80	0.13	-0.48**	0.15	0.34
Sub.3					
暴露前半	0.59	0.66*	0.35	0.13	-0.30
暴露後半	2.02	-0.05	0.54*	-0.24	0.05
Sub.4					
暴露前半	-0.46	0.49	0.97**	-0.07	-0.41
暴露後半	0.48	1.10*	-0.49	0.81*	-0.15
Sub.5					
暴露前半	-1.18	0.40	0.92**	-0.18	-0.03
暴露後半	-3.37	-0.29	-0.19	-0.24	2.37*

** : $p < 0.05$, * : $p < 0.01$ (□は有効な説明変数の係数)

式は全て $p < 0.01$ で有意であった。暑熱暴露前半と後半を区別して上記2群を比較すると、被験者1, 2, 3では、前半に温度感覚、後半に発汗感覚の寄与が大きいと示され、被験者4, 5では、前半に発汗感覚、後半にむれ感覚やぬれ感覚の寄与が大きかった。次に、この快・不快構成要素の異なる2群を比較するにあたり、発汗の動的特性による検討を行った。

図9に、暑熱暴露下後半20分間の発汗量経時変化データFFT解析結果を示す。被験者別に、それぞれ4回の結果とその平均を両対数表示で表した。実験Iと同様、パワーの傾きを周波数ゆらぎのひとつの指標として検討を行ったが、2群間および被験者間に有意な差は見られなかった(表7)。

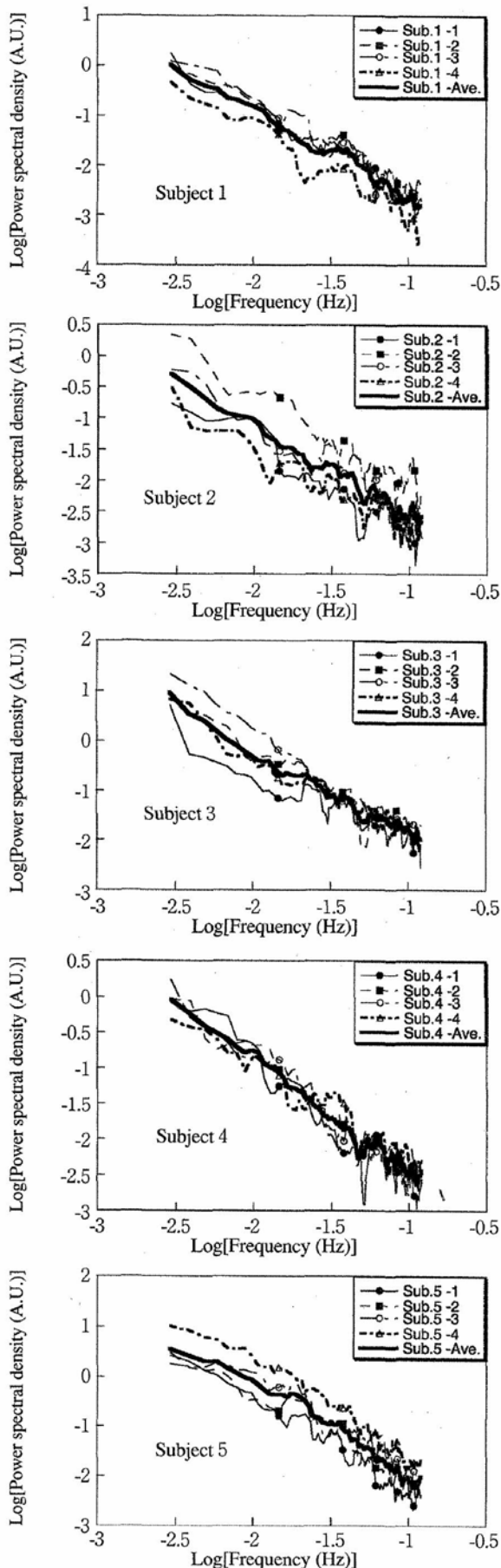


図9 発汗量経時変化データFFT解析結果 (上から、被験者No.1, 2, 3, 4, 5の順)

表7 各被験者の発汗パワーの傾き平均値

被験者No.	1	2	3	4	5
平均値	-1.76	-1.44	-1.55	-1.60	-2.14
標準偏差	0.08	0.15	0.26	0.14	0.11

表8 発汗パワースペクトルにおける0.01Hzごと周波数成分分布 (%)

被験者No.	1	2	3	4	5
< 0.01[Hz]	80.87 (2.75)	76.53 (4.90)	88.10 (3.74)	67.47 (8.55)	65.61 (5.98)
0.01[Hz]	9.60 (2.91)	9.48 (4.86)	5.26 (2.30)	17.04 (4.71)	17.63 (6.21)
0.02[Hz]	3.04 (1.45)	3.03 (0.59)	2.00 (0.49)	5.14 (0.52)	7.87 (1.63)
0.03[Hz]	2.12 (0.74)	2.85 (1.07)	1.31 (0.68)	3.49 (2.92)	3.43 (0.61)
0.04[Hz]	1.36 (0.78)	2.28 (0.87)	0.97 (0.35)	1.61 (0.99)	1.88 (0.68)
0.05[Hz]	0.90 (0.19)	1.17 (0.23)	0.46 (0.21)	0.88 (0.47)	1.02 (0.37)
0.06[Hz]	0.47 (0.03)	1.20 (0.44)	0.45 (0.17)	1.05 (0.32)	0.88 (0.50)
0.07[Hz]	0.44 (0.11)	1.03 (0.38)	0.30 (0.12)	0.75 (0.40)	0.43 (0.18)
0.08[Hz]	0.34 (0.09)	0.59 (0.14)	0.39 (0.15)	0.66 (0.29)	0.39 (0.14)
0.09[Hz]	0.26 (0.07)	0.48 (0.13)	0.28 (0.09)	0.69 (0.42)	0.27 (0.06)
≥ 0.1[Hz]	0.60 (0.19)	1.35 (0.39)	0.50 (0.19)	1.22 (0.65)	0.59 (0.18)

各被験者4回の平均値、()内は標準偏差

さらに、周波数特性の詳細を捉えるため、0.01Hzごとに周波数域を区切り、周波数成分分布による検討を行った。表8に、周波数成分分布の各被験者平均値を示す。表中に示した周波数は区切った範囲の中央の数値である。上記で分類された2群を比較したところ、0.01Hz、0.02Hzの範囲の周波数成分が、被験者1, 2, 3の群では小さく、被験者4, 5の群では大きかった。特に0.02Hz周波数成分に関しては、被験者1-5間、2-5間、3-5間、3-4間で有意差が認められた(図10)。

3. 考察

3.1 実験I

単純な温熱性刺激を与える被験者実験を行い、発汗パワースペクトルについて検討したところ(図2)、環境温度30℃では、パワーが周波数に

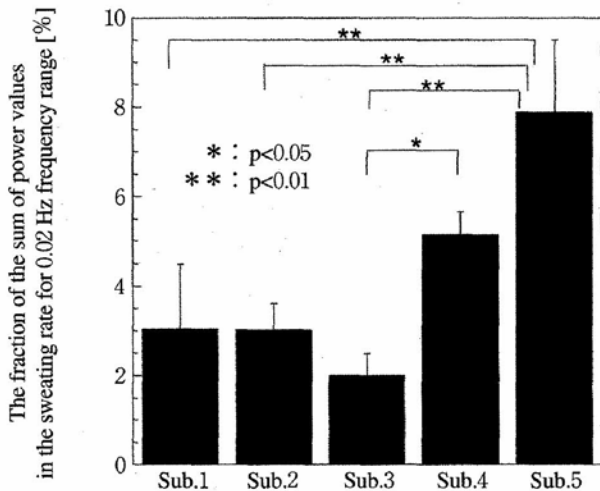


図10 発汗パワースペクトルにおける0.02Hz周波数成分含有率(各被験者4回の平均値)

逆比例するタイプのスペクトルである、 $1/f$ スペクトルが得られた(表5)。38℃でのパワーの傾きの絶対値は、30℃と比べて有意に大きく、 $1/f^2$ スペクトルに近づく傾向があった。24℃での不感蒸泄のパワーの傾きは、30℃、38℃での発汗と比較してかなり小さく、いわゆる白色雑音($1/f^0$ スペクトル)に近づいた。発汗パワースペクトルの型は温度条件により異なり、 $1/f$ 型や $1/f^2$ 型に近づくなどの傾向が示された。温熱性発汗は、脳波や心拍数など他の生理学的現象と同様、ゆらぎのある現象であることが明らかとなった。ここで、汗の拍出は全身で同期し、その拍出頻度は発汗量と直線関係にあることから、このゆらぎは、一回の拍出量によるのではなく拍出周期によるものと考えられる。

さらに、ゆらぎのひとつの指標である発汗パワーの傾きと発汗量との関係を調べた結果(表5)、38℃のような強い温熱性刺激の際、パワーの傾きの絶対値は発汗量に依存し、多量発汗時にはより $1/f^2$ 型に近くなることが示された。しかし24℃と30℃で相関は得られず、発汗ゆらぎは、温度条件によって変わるが、発汗量へ完全に依存するものでもないことがわかった。

3.2 実験

発汗量経時変化を視覚的に捉えた場合、その変動は多様ではあるものの、個人内での再現性が認められた(図3)。発汗開始時や不感蒸泄量、発汗拍出の振幅の大きさや最大発汗量等に被験者それぞれの傾向が見出された。冷え性を自己申告している被験者3の場合(表2)、発汗潜時が長い上、測定開始時の不感蒸泄レベルと測定終了時の発汗レベルとの差が顕著であり、暑熱環境にあまり馴化していないと考えられる。被験者3に類似する発汗パターンの被験者として被験者1が挙げられ、被験者2がそれに準じていた。一方、生下時より青年期に達するまで亜熱帯環境に生活していた被験者5や、10代から運動を続けている被験者4の場合(表2)、暑熱暴露開始直後からのコンスタントな発汗拍出の様子に暑熱馴化した温熱生理的特性が窺えた。暑熱馴化は一般に、頻回の暑熱暴露もしくは運動により形成され、被験者4、5とも適合する。感覚申告値においても、上記の発汗パターンで分類される2群が明らかに異なる経時変化傾向を示し(図4-8)、被験者4、5を馴化群、被験者1、2、3を非馴化群と位置付けて良いと考えられる。さらに、快・不快感覚構成要素の重回帰分析結果から、この馴化群、非馴化群において、暑熱暴露前半と後半とで快・不快へ有意に寄与する感覚の異なることが明らかとなった(表6)。

次に、FFT解析により発汗の動的特性について検討を行ったところ(図9)、周波数ゆらぎで馴化群と非馴化群に差は見られなかったものの(表7)、周波数成分分布では、0.01Hz、0.02Hz前後の周波数成分が馴化群において大きかった(表8)。特に0.02Hz周波数成分に関しては、被験者間の有意差が認められた(図10)。ここで、0.02Hz前後の周波数成分は冬季より夏季に大きく得られることが既に明らかであり、その季節差は馴化による暑熱暴露下の皮膚血流量増加の促進⁸⁾に関わる

と推測されている²⁾。本研究における馴化群と非馴化群の周波数成分差は、この季節差の結果と矛盾せず、0.02Hz前後の発汗周波数成分の多寡が被験者の馴化・非馴化の判断に有効であることが示された。発汗の動的特性の検討は、ヒトの暑熱適応能評価、ひいては暑熱下での快・不快感覚評価の可能性を有すると考えられる。

結 語

温熱性発汗は、脳波や心拍数と同様、ゆらぎを持つ現象であることが示された。温熱性発汗の動的特性と被験者の温熱生理的特性、および温冷感、湿潤感等の感覚の関係を検討した結果、快・不快感覚構成要素の異なる暑熱馴化群と非馴化群で、発汗パワースペクトルにおける特定周波数域の周波数成分の多寡が異なることが明らかとなった。

謝 辞

研究助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 菅屋潤壹；発汗の中樞機構 (Ⅱ)，臨床脳波，32 (3)，189-194 (1990)
- 2) 佐藤真理子，仲西 正，中島利誠，他；季節変動からみた発汗の動的特性，繊維学会誌，54 (6)，201-206 (1998)
- 3) Sato, M., Nakanishi, T., Nakajima, T. et al.; Circadian variations of the dynamic properties in sweating activity, *J. Human-Environmental System*, 14 (1), 33-39 (2000)
- 4) Kuno, Y., *Human Perspiration*, C.C. Thomas, Springfield (1956)
- 5) 佐藤真理子，仲西 正，中島利誠，他；高性能局所発汗量測定装置の開発，繊維学会誌，54 (5)，701-703 (1998)
- 6) Ohara, K., Kondo, M., Ogino, I.; Fluctuations in insensible perspiration, *Jpn. J. Physiol.*, 13, 441-453 (1963)
- 7) 小川徳雄；発汗活動に影響する中枢性および末梢性要因，日本生理誌，48，1-13 (1986)
- 8) Bass, D.E. and Henschel, A.; Responses of body fluid compartments to heat and cold, *Physiol. Rev.*, 36, 128-144 (1956)