

発汗の動的特性

一局所発汗量測定装置の開発と発汗ゆらぎの周波数解析—

Dynamic properties of sweating activity

-Detection and spectral analysis for the fluctuation in the sweat rate-

佐藤真理子

Mariko Sato

1. はじめに

お茶の水女子大学大学院人間文化研究科人間環境学専攻へ入学して以来、中島利誠教授ならびに生活工学講座の先生方のお教を賜わり、研究活動を行なってきた。1999年3月に、博士論文「発汗の動的特性一局所発汗量測定装置の開発と発汗ゆらぎの周波数解析—」により学位を取得した。以下に博士論文の内容をご紹介したい。

2. 本研究の目的

衣内における温湿度の変動は衣服の着心地に大きな影響を与えるが、これを左右するものの一つに発汗活動が挙げられる。発汗量を連続的に観察すると、周期の異なるいくつもの波が複合したような経時変化が見られる。この不規則な波状の動揺には中枢性の機序が関わりと推測されているが[1]、その動的特性に関する知見は未だ十分でなく、解明が望まれている。体温調節のために発汗を起こすのはヒトおよびごく一部の哺乳動物に限られるため、発汗に関する研究において解剖学的手法はとられていない。従って、その動的特性解明には、入出力の関係を手がかりとして、その間に介在する black box での情報処理を考察していく現象論的手段をとることになる。これまでに、周波数解析を用いて発汗活動の動的特性を解明しようと試みた報告もあるが[2]、負荷する刺激の種類や人間のバイオリズムによる影響などを含めた発汗の動的特性について総合的に検討した研究例はない。

そこで本研究では、様々な刺激下、そして人間の持つ生体リズムの異なる位相下での発汗活動の動的特性を詳細に考察し、生理的指標や着衣の快・不快を表わす感覚的指標として、発汗の動的特性を用いることが可能かどうか検討するための基礎的知見を得ることを目的とした。

3. 換気カプセル法を用いた局所発汗量測定装置(発汗カプセル)の開発

発汗の動的特性を評価し、着衣の快、不快との関わりを調べるためには、微量かつ速い発汗変動を精度高く捉える必要がある。そこで、急激な温湿度変化に対応することのできる発汗量測定装置の開発を行なった。本装置は、温湿度センサを設置した小型カプセルならびにセンサ駆動・検出電気回路からなり、カプセルには乾燥窒素を一定流量で供給した。カプセル本体は、パイレックスガラスで作製し、衣服内での装着安定性が高く皮膚面への圧迫負担が少ない形状を工夫した。カプセル内の温湿度変化の測定には、温湿度センサを2組使い、気流の方向に対して測定口の上流と下流に配置した(図1)。本装置は2組のセンサの指示値の差をとることによって、乾燥窒素に含まれるわずかな水分の影響を取り除き、微量な局所発汗量の絶対値の測定を可能にした。従来の換気カプセル法における欠点、例えば、乾燥窒素の流し始めに多量の水分が検出され、基線レベルが安定するまでの数分間は測定ができない点[3]や、窒素ガス乾燥用の内蔵シリカゲルの性能低下により正確な測定ができなく

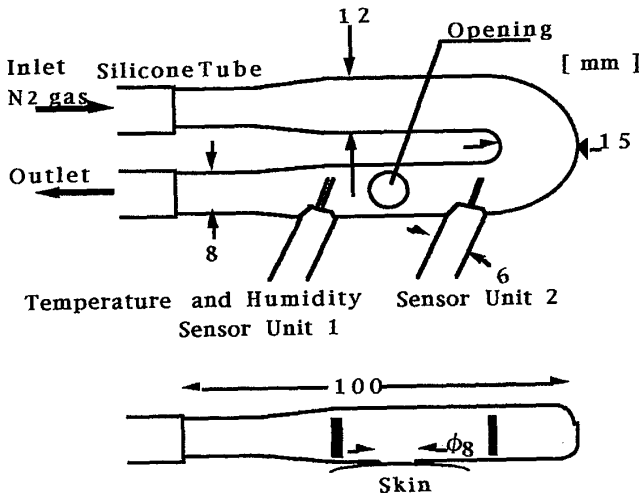


図1 発汗カプセル模式図

なる点[4]なども改善された。本装置によりカプセル装着直後の測定開始が可能であり、取り扱いが簡易でかつ正確に発汗量の連続測定を行うことができるようになった。

装置の応答性を、温湿度センサ時定数、カプセル内でのセンサのみかけの時定数、汗が蒸発してからセンサが応答を始めるまでのむだ時間の3つの要因で考え、これらについて実験的に検討を行った。その結果、本装置が発汗の速い変動に追従できる十分高い応答速度を持つことを確認した。

また、発汗カプセルを人体に装着した際の、発汗量測定値に対する乾燥窒素ガス流量の影響を調べた。発汗カプセル内に挿入したセンサの出力値とその変動幅は、カプセル内に流す窒素流量に大きく依存し、汗の蒸発量が同じであれば、流量が小さくなるほど出力値は大きくなり、流量があまり大きくなりすぎるとカプセル内の湿度変化を充分捉えることができない。被験者を用いた検討の結果、多量発汗時にもカプセル内のセンサが結露せず、かつ微量な発汗量変化の検知に適し、より鋭敏に発汗変動を捉えることができる乾燥窒素ガス流量を決定した。

従来の発汗カプセルでは、乾燥窒素ガスのみを流している場合にも指示値の経時変化に微細な変動があり、発汗量自体の変動に対する解析を行う際大きな障害となっ

ていた。本装置では、発汗以外の原因による変動が消去されており、発汗の動的特性評価にきわめて適したものであるといえる。

4. 温熱性および精神性刺激下での発汗の動的特性

作製した発汗カプセルを実際に人体へ装着し、温熱性刺激、精神性刺激を与える被験者実験を行った。測定により得られる発汗変動を観察し、発汗量の経時変化を周波数解析することで、様々な刺激下での発汗の動的特性について検討した。

4.1 温熱性刺激下での発汗

はじめに、温熱性刺激を与えた際の被験者において、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。

発汗カプセルを使用して得られる局所発汗量データは、複数の汗腺からの汗の拍出の和である。その重なった汗の拍出を周期毎に分離するため、高速フーリエ変換 (FFT) により発汗量経時変化の周波数解析を行なった。温熱性刺激下での発汗パワースペクトルにおいて、どの周波数の波が温熱性発汗に関与しているかを検討したところ、温度条件が高くなるにつれて、高周波数の波は変わらないが、低周波数の波は増加する傾向にあることがわかった。発汗パワースペクトルの型は温度条件により異なり (図2)、特定の温度条件下において、温熱性発汗スペクトルは $1/f$ 型や $1/f^2$ 型になることが明らかになった。発汗は、脳波や心拍数などと同様、ゆらぎを持つ現象であることが示された。汗の拍出は全身で同期し、その頻度は発汗量と直線関係にあることから[5]、このゆらぎは拍出周期のゆらぎであると思われる。発汗パワースペクトルと発汗量、体温の関係を調べたところ、強い温熱性刺激の際、発汗パワーは発汗量に依存し、多量発汗時により $1/f^2$ 型に近くなる傾向が示された。また、弱い温熱性刺激の際、発汗パワーと皮膚温変化量との間に高い正の相関を得た。さらに、温度感覚、快適感覚等の感覚申告値と発汗パワーの関係を検討したところ、精

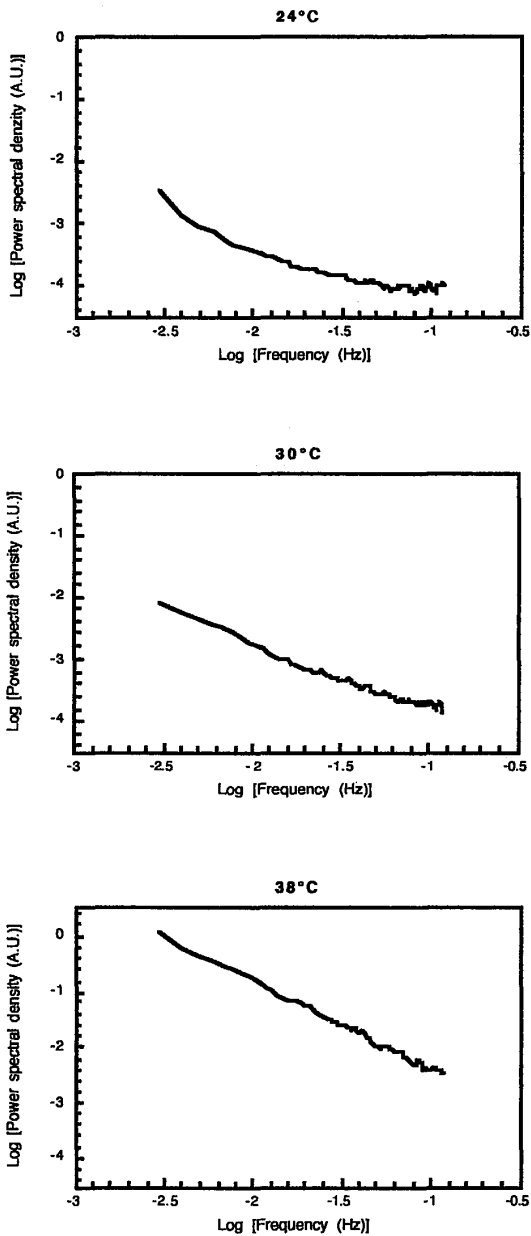


図2 発汗量経時変化FFT解析結果
(温度条件別平均, 両対数表示)

神的影響などによる修飾は大きいと思われるものの、快、不快といった人間の感覚と発汗の動的特性との関連が示唆された。

4.2 精神性刺激下での発汗

精神性刺激は、手掌や足底などいわゆる精神性発汗部位に発汗を起こすのみでなく、一般体表面の発汗にも何らかの影響を及ぼす。温熱性発汗のない常温下でも、発

汗剤による発汗に精神性刺激に対する反応が観察されるとの報告がある[6]。そこで、温熱性発汗の動的特性はどのように精神性刺激の影響を受けているかについて調べる必要があると考えた。実験としては、一定温熱環境下で被験者に音楽を聴かせたり本を読ませたりし、各精神性刺激下での発汗変動を観察した。音楽は、音響振動数の変動スペクトルの違いから[7]、ロック音楽と1/f音楽を選択した。測定により得られる発汗量経時変化を周波数解析し、発汗パワースペクトルについて考察を行った。

その結果、本を読む、音楽を聴くなどの精神性刺激により、発汗量や発汗感覚は大きな影響を受けるにも関わらず(図3, 4)、発汗パワースペクトルに差はなく、これらの精神性刺激は温熱性発汗の周波数ゆらぎに影響しないことが示された。

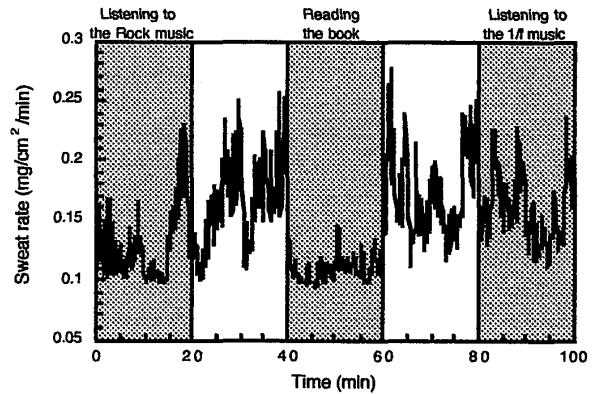


図3 精神性刺激下発汗量経時変化例

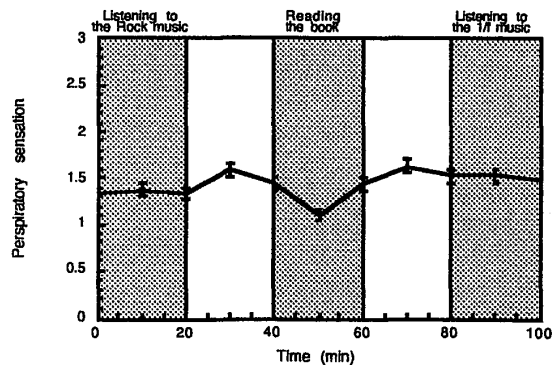


図4 精神性刺激下「発汗感覚」経時変化
(全被験者平均)

また、被験者各個人内で発汗スペクトルを比較すると、本を読んでいる場合に最もばらつきが少なく、発汗の動的特性評価を行うにあたり、個々のスペクトルの詳細な検討には、読書時の測定がよいことがわかった。

温熱性刺激実験、精神性刺激実験を通して、外界からの様々な刺激に対する発汗反応の分類の可能性が示されたが、各被験者、あるいは同一被験者においても1日のうちの時間帯により、または日によって、発汗状態は異なっており観察されることが多かった。そこで、日内変動、季節変動などの被験者の生体リズムによる発汗の動的特性への影響を調べておくことが必要であろうと考え、次の実験を行なった。

5. 発汗の動的特性に対する生体リズムの影響

同じ温熱性刺激に対する体温調節反応でも、被験者の生体リズムの位相の違いによりその様相は異なることが知られている[8,9]。発汗などの体温調節活動の研究において、生体リズムに対する考慮は不可欠である。そこで、生体リズムの異なる位相にある被験者に対して同じ温熱性刺激を与え、発汗周波数成分に現れる季節変動や日内変動の影響を明らかにした。同時に発汗量測定部位近傍の皮膚血流量を測定し、皮膚血流の動的特性との関係を調べることで、発汗の動的特性の詳細について解明を試みた。

5.1 発汗周期に対する季節変動の影響

はじめに、同一温熱性刺激に対する発汗反応の違いが顕著であると考えられる季節変動に注目し、発汗パワースペクトルでの季節による差異を検討した。FFT結果の両対数表示プロットにおいて、夏季と冬季に、相似した形状と対応する屈曲点が観察された(図5)。対応する屈曲点は夏季と冬季で同一の周波数には現われず、夏季の屈曲点は冬季に比べて高周波側へ移行していた。移行の程度は、周期にして0.6-0.9倍であった。発汗中枢機構は体温調節機構に包括されその統制下で作動するため、発汗パワーには、体温調節に関与する交感神経系、

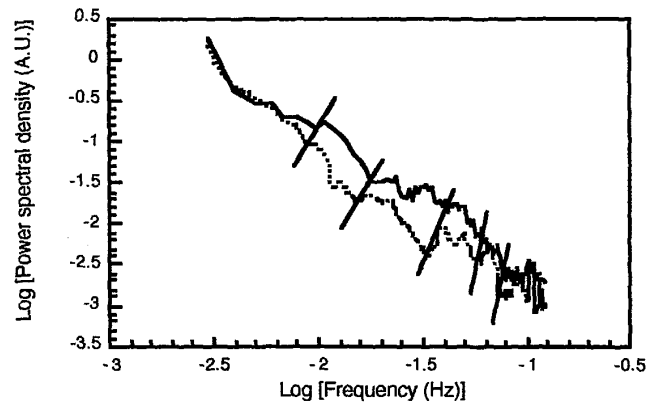


図5 温熱性刺激下発汗量経時変化FFT解析結果例
(両対数表示)

<夏(実線)と冬(破線)に対応する屈曲点の位置を示す>

副交感神経系両方の活動の影響が表れていると考えられる。本研究の測定範囲において発汗パワーに表れた体温調節機構のリズムは、夏季にその周期が短くなる傾向にあり、この体温調節リズムの短周期化は、発汗潜時の短縮や発汗感受性の高まりなどに代表される、暑熱適応による体温調節機構の反応性の亢進[10,11]を示していると推測される。

周波数解析後の出力データを同数ずつに区切り、周波数成分分布として表すことでさらなる検討を行ったところ、0.02Hz前後の周波数成分において、夏季の値が冬季よりも有意に大きかった。ここで、0.02Hz前後の周波数成分とは、一般に皮膚温由来と推測されているいわゆる“速波”成分[12]にあたる。皮膚温決定要因として皮膚血流量が主要な役割を果たしていることから、この発汗周波数成分と、パワースペクトル解析に用いた測定時間範囲の血流量平均値との相関を検討した。同様に発汗周波数成分と発汗量平均値との相関も調べた。その結果、発汗周波数成分と血流量との関係では、夏季と冬季のどちらにも、0.02Hz周波数成分で弱い正の相関が見られたが、発汗量との関係では特に相関は見られなかった。

温熱性刺激下での発汗と血流の関係としては、汗腺活動の開始と一致して起きる血流量の増加が知られており、これは発汗神経末端からアセチルコリンと共に血管作用性ペプチドが遊離され汗腺周囲の血管に作用したためとも[13]、汗腺の周囲で形成される血管拡張物質の作用によとも[14]いわれている。これに対して、暑熱暴露開始初期に見られる汗腺活動前の血流量の増加は、血管運動神経の作用によると考えられている[15]。発汗パワー値0.02Hz周波数成分と血流量の相関について考える際、この周波数成分の発汗が、発汗に伴う二次的な血流量の増減に起因するのか、あるいはその逆かを検討する必要がある。そこで、全測定時間100min間(中性温域下での20min間の後、温熱性刺激下での80min間)の血流量経時変化と、温熱性刺激下後半20min間の発汗パワー値0.02Hz周波数成分との相関を調べた。血流量測定時間に対する相関係数の経時変化を観察したところ(図6)、パワースペクトル解析直前の血流量と発汗パワー値0.02Hz周波数成分とが正の相関を示した。経時的に先行する皮膚血流量と正の相関を持つことから、この周波数成分は、発汗に先行して起こった血管運動神経の作用による血流量の増加に関わることが示唆された。

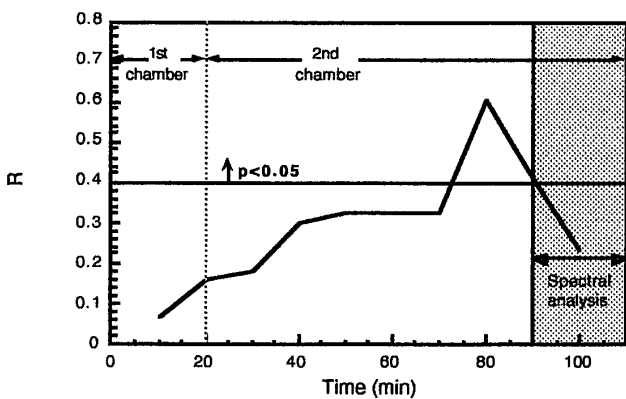


図6 温熱性刺激下後半20min間における発汗パワー値0.02Hz周波数成分と、全測定時間100min間の血流量経時変化との相関係数(R)

5.2 発汗周期に対する日内変動の影響

次に、日内変動に着目し、午前、午後1(昼)、午後2(夜)の被験者における発汗量経時変化を周波数解析し、発汗パワースペクトルを比較した。周波数ゆらぎの指標である発汗パワーの傾きで、日内変動による差異は特に観察されなかった。両対数表示プロットにおいて、0.04Hz付近にピークが見出され、この付近の周波数成分は午前より午後に大きかったが(図7)、午後1と午後2でどちらのピークが大きいかは、被験者により異なっていた。

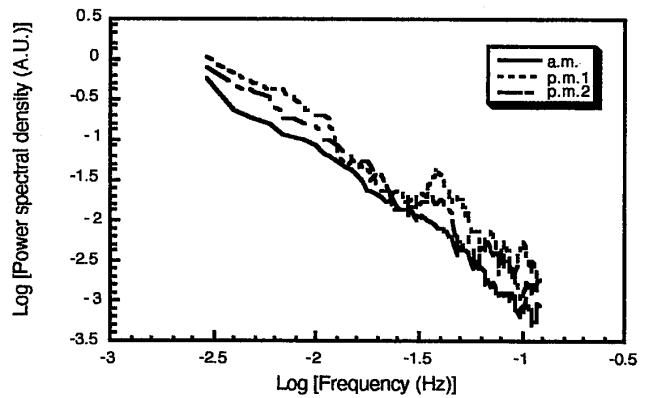


図7 温熱性刺激下発汗量経時変化FFT解析結果例(両対数表示)

<午前(実線), 午後1,2(破線1,2)の比較>

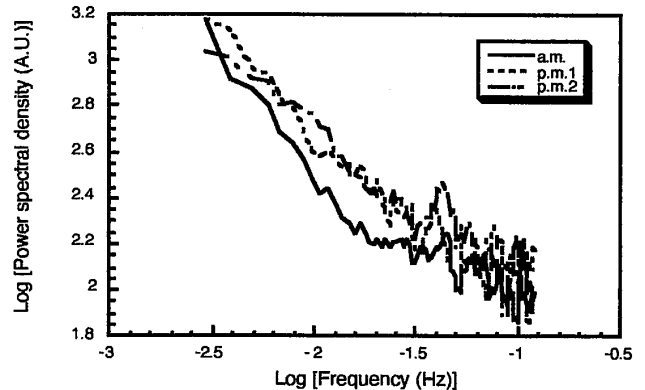


図8 温熱性刺激下血流量経時変化FFT解析結果例(両対数表示)

<午前(実線), 午後1,2(破線1,2)の比較>

血流についても同様に周波数解析を行い、午前、午後1、午後2を比較した。発汗と同じく0.04Hz付近に、午前より午後に大きいピークを見出した(図8)。この付近の周波数成分が、午後1と午後2でどちらが多いかはやはり被験者により異なっていた。周波数成分分布による検討においても、ピークの見出された付近の周波数成分は、発汗、血流共、午前より午後に有意に大きい値を示した。

この0.04Hz周波数成分に関して、被験者各自により異なる午後1と午後2の比較検討を行うため、発汗と血流の日内動態を調べた(図9)。図9では、x軸が1日のうちの時間、y軸が周波数成分で、1から6の被験者各自の平均値と、全被験者平均値を示している。発汗(上図)と血流(下図)を比較すると、被験者それぞれにおいて非常に類似した日内動態を示していた。0.04Hz以外の

周波数成分についても調べたが、発汗と血流で同一の動態傾向は見出せず、0.04Hz周波数成分に関してのみ、発汗と血流の間に正の相関を得た(図10)。0.04Hz周波数成分が、発汗と血流で非常に類似した日内動態を示し相関を持つことについて、以下に解釈を示す。

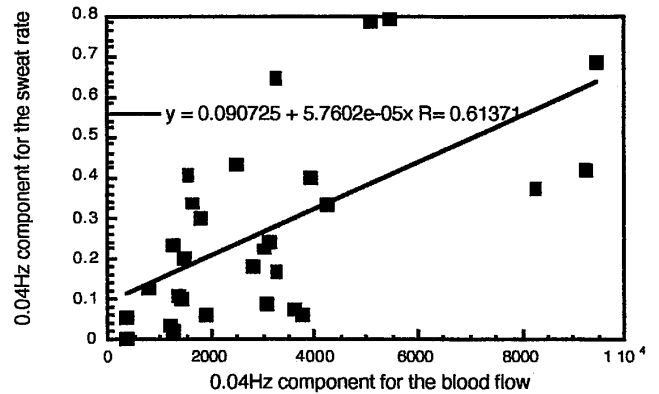


図10 0.04Hz周波数成分における発汗と血流の相関

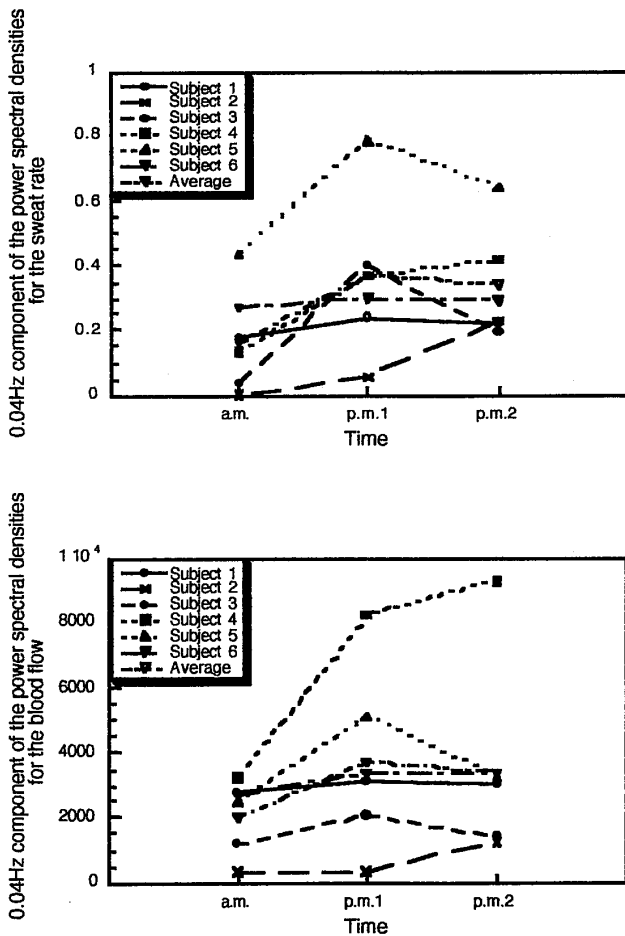


図9 発汗(上図)と血流(下図)における0.04Hz周波数成分の日内動態
 <被験者1~6および全被験者平均値>

Smithらの報告によれば[16],血管状態のサーカディアンリズムは、 α -アドレナリンレセプターでのノルエピネフリン放出のサーカディアンリズムにより起こるとされている。ノルエピネフリン放出に反映すると考えられる[17],血漿ノルエピネフリン濃度のサーカディアンリズムの存在も知られている[18,19]。一方、汗腺は α -、 β -アドレナリンレセプター、及びコリンレセプターを持ち、ノルエピネフリン濃度のサーカディアンリズムの影響を受けると考えられる。したがって、血流と発汗で、同じ日内変動パターンを示すのは、ノルエピネフリン放出の日内変動の影響による可能性が考えられる。ノルエピネフリンやアセチルコリン等、神経伝達物質の分泌には、ゆらぎを持つ特徴があると報告されている[20]。しかしながら、ノルエピネフリン分泌ゆらぎが0.04Hzという特定の周波数域にあるかどうかは明らかでない。

一方、近年盛んに行われている心拍数の時系列解析で、0.04Hz付近の心拍数の動揺が、体温調節に関連する末梢血管の収縮・拡張による変動であるとの報告がある

[21]. この付近の周波数域を含むいわゆる低周波数領域 (LF) の心拍変動は午前より午後に亢進することが明らかとなっている。また、一日周期で身体の諸機能を変動させる「体内時計」のメカニズムは、各身体器官で独立したものではなく、脳の特定の場所 (視交叉上核) で全ての周期的な活動を制御しているとの説が有力であることから [22], 心拍, 血流, 発汗での体温調節に関わると思われるゆらぎが, 同じ周波数域に現われ, かつ同様の日内変動を示す可能性は十分にあると考えられる。血流及び発汗で, 特定周波数域のパワースペクトルが同じ日内変動パターンを示すのは, 同じサーカディアン振動系の影響を受けているためとも考えることができる。

生体リズムの異なる位相にある被験者の発汗パワースペクトルについて検討したことにより, 特定周波数域にある発汗周波数成分の“性格”を知ることができた。今後, 発汗の動的特性を, 生理的指標あるいは快, 不快等の感覚的指標として用いることを考えた場合, 限られた被験者群や実験条件下においても, 被験者の持つ生体リズムを考慮することにより, その可能性は高まるものと期待される。

6. まとめ

従来, 発汗反応を取り扱う場合には, 発汗潜時や平均発汗量, そしてそれらと体温の関係などが主に検討され, 発汗の時間的な変動の特徴である「動的特性」が取り上げられることは少なかった。しかし, 本研究により, 発汗の特性を周波数解析によって分類, 分析できる可能性が示された。また, 発汗をその動的特性から捉える際, 外的な環境要因に関しては周波数ゆらぎを, 内的な生理学的要因に関しては特定周波数域の周波数成分を, それぞれ重視して検討すべきであることが明らかとなった。本稿では字数の関係上省いたが, 発汗周波数ゆらぎと感覚申告値の関係にも一定の傾向が認められ, 感覚の他覚的な評価における発汗の動的特性の重要性が示されたものと考えられる。

本研究の成果をふまえ, 発汗の動的特性に関する研究をより展開させるにあたり, 今後の課題として以下のような問題が挙げられよう。本研究における新型発汗カプセルによる発汗量測定は, 応答速度が高く発汗の動的特性を捉えるのに適したものであるが, 汗が蒸発してから水蒸気となった以降の現象のみを扱っており, 皮膚上での汗の蒸発機構については触れていない。このレベルにおける測定が必要であるかは目的によるが, ぬれ感やむれ感と発汗の動的特性の関係について研究を進める場合には, 皮膚上での汗の蒸発速度などについても検討が必要であり, その際は装置のさらなる改良や, カプセル法以外の水分移動特性の測定法を併用する必要があると思われる。本研究では解析法としてFFTを使用した, 負荷する刺激の種類や被験者の身体的状況により, または, 発汗の様相や解析期間, 特に刺激負荷開始直後の非定常的な発汗反応時などでは, FFT以外の解析法を探索する必要がある。しかし, 全体像が明らかでない未知の現象を解析する第一段階として, FFT解析により得られる情報は不可欠であり, 今後の研究においてもその重要性は変わらないと考えられる。

発汗現象は, 様々なファクターと関係する多くの情報を含んだ複雑な出力信号であり, ヒトでは解剖学的手段が適わない以上, 入出力の関係を手がかりとして現象論的方法によりその特性解明を目指すしかない。本研究は, 単純な温熱性および精神性刺激に対する発汗反応や, それらの反応の生体リズムによる修飾を, 発汗ゆらぎという動的な側面から理解しようと試みたものであり, その結果, 発汗の特性について重要ないくつかの基礎的知見を得ることに成功した。発汗の動的特性が, 発汗ひいては体温調節機構の解明に有効であると同時に, 生理的指標あるいは感覚的指標となり得ることが明らかになった。今後, 衣服の着心地などの感覚評価に関する研究において, 本研究の成果がひとつの指針となることを期待する。

(現在の所属 日本女子大学家政学部)

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) 朝山正巳, 小川徳雄, 宮側敏明, 伊藤路子, パワースペクトル分析による発汗の動的特性, 愛知医大誌, 7, 234-243 (1979)
- 3) 中原寿喜太, 近赤外線吸収形発汗量測定装置, 計測自動制御学会論文集, 18(11), 1099-1103 (1982)
- 4) 大橋俊夫, 宇尾野公義 編著, 精神性発汗現象-測定法と臨床的応用-, (株)スズケン医療機器事業部, p.11, 1993
- 5) 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)
- 6) Ogawa, T. and Bullard, R.W., Characteristics of subthreshold sudomotor neural impulses, *J. Appl. Physiol.*, 33, 300-305 (1972)
- 7) 武者利光, 沢田康次, ゆらぎ・カオス・フラクタル, 日本評論社, p.76-77, 1991
- 8) Frascarolo, Ph., Schutz, Y. and Jéquier, E., Influence of the menstrual cycle on the sweating response measured by direct calorimetry in women exposed to warm environmental conditions, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 64, 449-454 (1992)
- 9) 堀清記, 田中信雄, 運動による暑熱馴化と気候による暑熱馴化に関する研究, 日本生気誌, 22(1), 17-21 (1985)
- 10) Hori, S., Ihzuka, H. and Nakamura, M., Studies on physiological responses of residents in Okinawa to a hot environment, *Jpn. J. Physiol.*, 26, 235-244 (1976)
- 11) Henane, R., Flandrois, R. and Charbonnier, J.P., Increase in sweating sensitivity by endurance conditioning in man, *J. appl. Physiol.*, 43, 822-828 (1977)
- 12) 小川徳雄, 朝山正巳, 伊藤路子, 吉田勝志, 下肢温浴による暑熱負荷量の急変に対する発汗反応, 愛知医大誌, 5, 327-333 (1977)
- 13) Lindh, B., Haegerstrand, A., Lundberg, J.M., Hökfelt, T., Fahrenkrug, J., Cuello, A.G., Graffi, J. and Massoulié, J., Substance P-, VIP- and CGRP- like immunoreactivities coexist in a population of cholinergic postganglionic sympathetic nerves innervating sweat glands in the cat, *Acta Physiol. Scand.*, 134, 569-570 (1988)
- 14) Fox, R.H. and Hilton, S.M., Bradykinin formation in human skin as a factor in heat vasodilation, *J. Physiol.*, 142, 219-232 (1958)
- 15) Hertzman, A.B., Vasomotor regulation of cutaneous circulation, *Physiol. Rev.*, 39, 280-306 (1959)
- 16) Smith, R.E., Circadian variations in human thermoregulatory responses, *J. Appl. Physiol.*, 26, 554-560 (1969)
- 17) Christensen, N.J., Plasma noradrenaline and adrenaline measured by isotope-derivative assay, *Dan. Med. Bull.*, 26, 17-56 (1979)
- 18) Stene, M., Panagiotis, N., Tuck, M.L., Sowers, J.R., Mayes, D. and Berg, G., Plasma norepinephrine levels are influenced by sodium intake, glucocorticoid administration, and circadian changes in normal man, *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 51, 1340-1345 (1980)
- 19) Touitou, Y., Sulon, J., Bogdan, A., Touitou, C., Reimberg, A., Beck, H., Sodoyez, J.-C., Demy-Ponsart, E. and Cauwenberge, H.V., Adrenal circadian system in young and elderly human subjects: a comparative study, *J. Endocrinol.*, 93, 201-210 (1982)
- 20) 小野功一, 生体制御系の動作原理とゆらぎ, ゆらぎの科学7 (武者利光編), p.103-142, 森北出版, 1997
- 21) Baumert, J.-H., Frey, A.W. and Adt, M., Analyse der Herzfrequenzvariabilität, *Anaesthesist*, 44, 677-686 (1995)
- 22) 石田直理雄, 坂本克彦, ラット時計遺伝子ホモログPERファミリーの発現と生物機能, 第71回日本生化学会大会抄録, 3L-S60-04 (1998)