

発汗の計測

—精神性発汗から多量発汗まで—

スキノス東御研究所 坂口 正雄 (消費科学解説記事掲載論文 2009. 2)

1. はじめに

発汗は、その発生要因から温熱性発汗と精神性発汗に大別できる。前者の暑い時や激しい運動時に発現する汗、後者の精神的緊張や興奮時に認められる汗など、発汗は我々が最も身近に接している生体现象の一つである。

従来、定量的な発汗量測定法として皮膚を覆うカプセルに乾燥ガスを流し、発汗に伴う気湿の変化分をパイプを通して電気的湿度計に誘導する換気カプセル法¹⁾やカプセルに湿度センサを内設して直接的に換気する直接法^{2, 3)}がある。両者の測定法とも皮膚を覆うカプセルに乾燥ガス(空気)を送風する必要があり、装置構成や取り扱いが簡便とはいえない。

その後、室内空気をカプセルに送風する差分方式換気カプセル型発汗計が開発され⁴⁾、高応答かつ多量発汗が測定できる装置へと改良が図られている⁵⁾。

本稿では、発汗の基礎的事項について触れた後、我々が開発に関わった発汗計の概要を述べ、精神性発汗から多量な温熱性発汗の測定例を紹介する。

2. 発汗の基礎的事項^{6, 7)}

発汗は一般に、暑熱負荷によって誘起される温熱性発汗と精神的緊張や情緒の変動によって発生する精神性発汗とに大別できる。温熱性発汗は、手掌、足底を除く体表面全体に認められ、視床下部の体温調節中枢によって発汗量が制御される。この汗は、暑さという刺激が加わっても体温がある閾値に達するまで発現しない。

一方、精神性発汗は常温において手掌、足底において認められる。感情と関係が深

表1 精神性発汗と温熱性発汗の差異

	精神性発汗	温熱性発汗
発汗部位	手掌、足底部の皮膚	左記以外の全身の皮膚
発汗刺激	精神性刺激	温熱性刺激
発汗量	微量	多量
発汗潜時	短い	長い

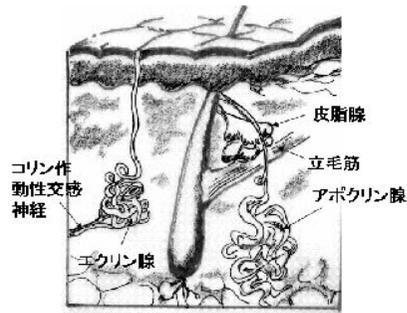


図1 エクリン腺、アポクリン腺の存在様式

い辺縁系や視床下部、大脳皮質の前運動野などが関与しているとされ、精神的緊張が動機となって、瞬時に微量で相動的に発現する。また、感覚的精神的刺激を何回も受けると「慣れ」が生じ、その刺激に応じて発現していた汗は減少する。なお、温熱性発汗が惹起される手掌、足底以外の体表面でも体温中枢が大脳皮質の活動の影響を受けて精神的な興奮によっても発汗が出現する。精神性発汗と温熱性発汗の差異を表1に示す。

汗腺は、エクリン腺とアポクリン腺とに分類される。前者は体毛の毛根部とは異なる部分に汗腺が開口し、皮膚のほぼ全面に分布している。後者は毛根部と開口部が一致し、腋窩、会陰部など体の一部に局限して存在する。

エクリン腺は腺細胞の形や大きさを変ることなく、塩分にとんだ液体を分泌する

(漏出分泌)。一方、アポクリン腺から分泌される汗は、汗腺細胞の細胞質の一部がちぎれて、その内容液がそのまま排出されたものであり(離出分泌)、たんぱく質が多く含まれている。

図1にエクリン腺、アポクリン腺の存在様式を示す。エクリン腺に分布している神経は交感神経で、アセチルコリンを化学伝達物質とするコリン作動性神経であり、汗腺活動を促すように働いている。

汗腺の総数は個人差や環境温度で変化するが、発汗機能を示す能動汗腺数は、日本人で平均230万個といわれている。能動汗腺数の分布密度は、多い順に前額、足底、手掌、手甲、足甲の各部であり、少ないベスト5は、前胸部、背部、腹部、臀部、大腿部であるといわれるが個人差が著しい。

3. 発汗量の測定法

(1) 定性法

発汗の有無およびその多少を見分ける定性法には、ヨードデンプン法(ミノール法)がよく知られている。ヨードの無水アルコール溶液とヒマシ油の混合液を皮膚に一樣に塗布し、乾燥後デンプンを均等に散布する。発汗が起こると暗紫色に着色し、その濃淡で発汗量を検知する。この方法は、発汗部位やその時点を把握するのに都合がよい。図3にヨードデンプン法による手掌部発汗の観察例を示す。

(2) 定量法

皮膚表面からの水分蒸発量を定量的に測定する水分蒸発量計は、カプセルに内设の2つの湿度センサを用いて分圧勾配を測定し、蒸発量を決定している⁸⁾。

従来から発汗量の定量的測定法として汎用されている換気カプセル法は、皮膚の一部を覆うカプセルに乾燥空気を流し、その部分の発汗に伴う気湿の変化分を電氣的湿度計にパイプで誘導し、相対湿度を指標に測定している。



図2 ヨードデンプン法による発汗量の観察(小学5年生男子)

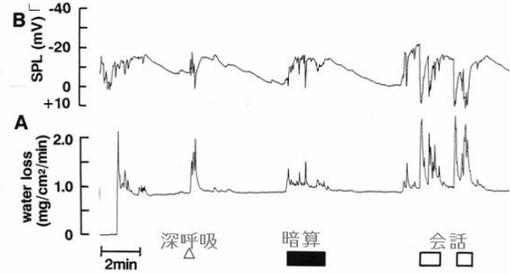


図3 生理学的負荷時における手掌部発汗(A)、皮膚電位(B)の測定例

(3) 皮膚電気活動による測定法

生理学および精神医学領域で、緊張や興奮、情動変化の指標として皮膚電気活動が利用されている⁹⁾。皮膚に微弱電流を流したときの見かけ上の抵抗変化を記録する通電法は、心理学研究に用いられている。汗腺活動の少ない前腕部と精神性発汗の多い手掌部間の電位(皮膚電位)を測定する電位法は、測定の簡便さから意識、覚醒水準、入眠の計測手段として活用されている。

図3に深呼吸、暗算、会話の負荷時における手掌部発汗量(換気カプセル法)、皮膚電位の測定例を示す。負レベルの皮膚電位水準(skin potential level)は刺激に応じて出現する発汗に相動して変化している。

(4) 発汗計の応用分野

発汗計の主な応用分野を次に示す。

- ①医学：自律神経機能検査、多汗症・無汗症診断、皮膚科、麻酔科、精神科領域等
- ②心理学：心理(心)、気分(感性)、情動(感情)等
- ③被服学：保湿、着心地等
- ④健康・運動領域
- ⑤化粧品領域(皮膚蒸散・発汗モニター)
- ⑥睡眠領域：寝心地、睡眠評価等

4. 発汗計とその応用例

(1) 換気カプセル型発汗計

換気カプセル法を原理とする連続発汗測定装置¹⁰⁾ (フォーシオン ハイδροグラフ AMU-3)の原理的ブロック図を図4に示す. 同図に示すように皮膚から蒸散する汗を乾燥ガス(N₂ガス)で換気し, ガスの湿度を電気湿度計で測定する. 湿分が皆無なN₂ガスを用いた換気カプセル法は皮膚深層の間質液が蒸発する極めて微量な不感蒸泄の測定領域で採用されている.

我々は, 皮膚を覆うカプセルに湿度センサを内設して換気する局所発汗量連続装置(直説法)を開発し, 1991年医療用具の承認を受けた(スズケン Kenz Perspiro OSS-100). この装置はシリカゲルを用いて乾燥空気を作製し, 乾燥ガス(N₂ガス)を必要としない. しかしながら, 近年の電磁環境適合性(EMC)の面からカプセルに内設の電子回路の電磁波改善が医療用具継続のために要求されている.

その後, N₂ガスや乾燥空気を必要としない室内の自然空気をカプセルに供給する差分方式換気カプセル型発汗計(スキノス SKA-2000, SKD-2000)を開発した. 装置のブロック図を図5に示す. 本装置は, エアーポンプにより定流量(200ml/min)で送風される室内空気を絶対湿度センサが内設されるハウジング1に供給し, パイプを通して皮膚を覆うカプセルを経て絶対湿度センサが内設されたハウジング2から排出する. 空気湿分を検出した絶対湿度センサ出力と皮膚蒸散水分を混合した空気湿分を検出した絶対湿度センサ出力の両者を差動増幅器に供給して差分をとることにより, 皮膚蒸散水分(汗)に対応した出力電圧が得られる. SKA, SKD シリーズ発汗計は0.1mg/cm²・minの出力感度を有し, アナログ出力(1V)は発汗量(1mg/cm²・min)に対応している. 装置出力を専用のA/D変換器(12bit/10Hz)とシリアルインターフェースを介してパーソナルコンピュータに供給す

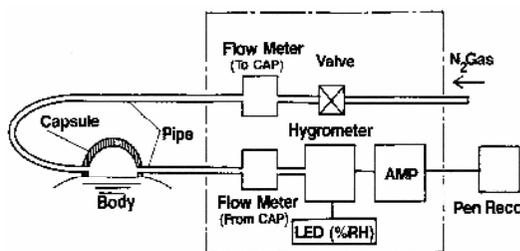


図4 連続発汗測定装置(ハイδροグラフ AMU-3)のブロック図

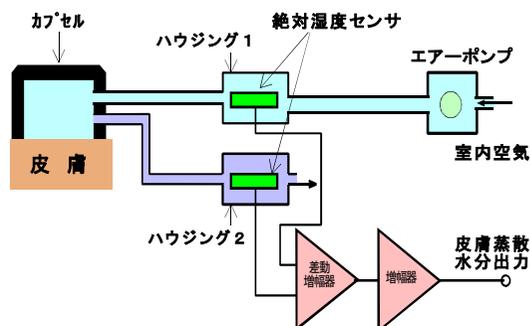


図5 差分方式換気カプセル型発汗計のブロック

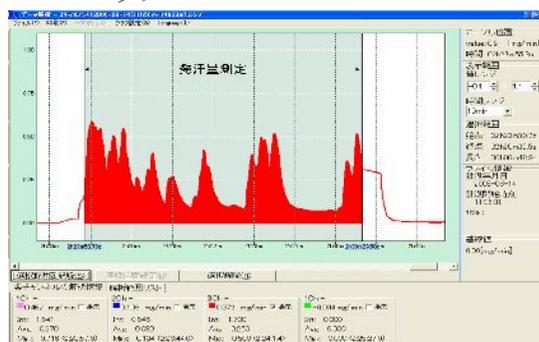


図6 手掌部発汗量の記録・解析例
3歳女兒左手掌部

れば発汗データのリアルタイム観察ならびに保存, 解析が容易に可能となる(解析ソフト スキノス(MOD-002)). 主な解析項目は, カーソル指定した発汗量(発汗時間積分値とその時間), 変化量, 最大値, 平均値等であり, パーソナルコンピュータ画面に表示される発汗波形と対話的にそれぞれ実行可能である.

図6にSKA-2000による3歳女兒左手掌部

発汗の記録・解析例を示す。カーソル指定した発汗量の測定時間は約6分50秒、発汗量は $1.7\text{mg}/\text{cm}^2$ (塗りつぶし部分の面積)、最大値は $0.588\text{mg}/\text{cm}^2$ 、平均値は $0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ である。

(2) 空気流量補償方式換気カプセル型発汗計

従来の湿度センサを用いた換気カプセル型発汗計は、多量の発汗(たとえば $2\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ 以上)を測定しようとする時、湿度センサが湿分飽和し、測定不能に陥る。そこで、換気カプセル型発汗計のカプセルに供給する空気流量を皮膚蒸散水分量(発汗量)に応じて変化させる空気流量補償型の発汗計を開発した。

空気流量補償方式換気カプセル型発汗計のブロック図を図7に示す。本装置は、カプセルに供給する空気湿分と皮膚蒸散水分を吸収したカプセルを経由した空気湿分との差が一定になるようにカプセルに供給する空気流量を制御している。すなわち、カプセルに定常的に流量約 $170\text{ml}/\text{min}$ の空気を送風するための励振電圧に2つの絶対湿度センサ出力の差分(差動増幅器の出力)を加算してエアポンプ駆動用電力増幅器に供給し、差動増幅器出力が一定になるようにポンプ供給電力を制御する。差動増幅器出力信号は基線レベル調整回路内蔵の増幅器を経て皮膚蒸散水分(汗)出力として取り出すことができる。

サーボ系を構成した本装置は、高応答化されている。空気流量補償前後のステップ応答を比較すると、本装置の立ち上がり時間は1sで約 $1/5$ に改善された。定常値から70%低下するまでの下降時間は補償後、約 $1/3$ に短縮された。高応答化を図ることにより、今までと異なった発汗現象の詳細が計測可能である。

(3) 睡眠時の発汗量測定¹⁾

発汗計の応用例として、秋季(2007年9月27日~10月5日)の夜間睡眠中におけるヒ

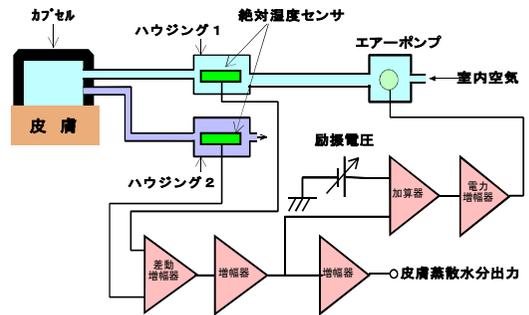


図7 空気流量補償方式換気カプセル型発汗計ブロック図

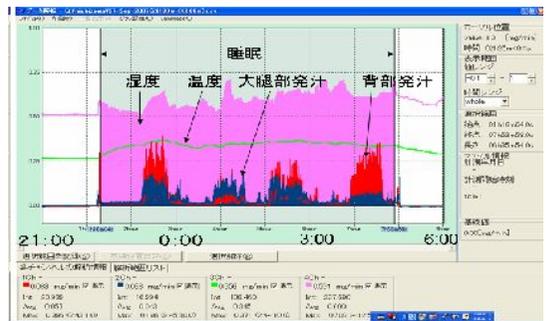


図8 睡眠中における背部、大腿部発汗量 (2007年9月27-28日)

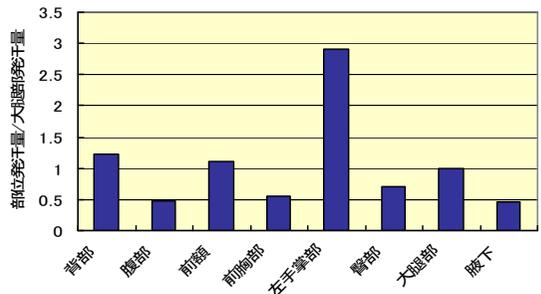


図9 大腿部を基準にした各部位の睡眠時発汗量

ト各部位の発汗量の相異について述べる。

布団の温・湿度を温・湿度計(バイサラ HMI32)を敷布の下(大腿部付近)に設置して測定し、発汗量は流量補償方式換気カプセル型発汗計(スキノス SKT-2006)を用いて測定した。毎夜、発汗計のチャンネル1のカプセルを大腿部(内側)に、チャンネル2のカプセルは夜ごとに背部、腹部、前額、前胸部、左手掌部、臀部、腋下と部位を順次選

択して両面テープとサージカルテープを用いて固定した。データを A/D 変換器を介してパーソナルコンピュータに供給して前述の発汗解析ソフトを用いて保存・解析した。

図 8 は 2007 年 9 月 27-28 日における背部、大腿部の発汗量変化の記録である。睡眠時間は 6.6 時間、平均室温は 23.1℃、湿度は 59%RH であった。着床とともに体温により布団温度は上昇し、平均温度は 34.5℃、湿度は発汗に相動して変動している(平均値、60%RH)。睡眠中、4 回に及ぶバースト的発汗が背部、大腿部に認められ、発汗量は背部、20.9mg/cm²、大腿部は 17mg/cm² であった。

図 9 に大腿部を基準にして各部位の睡眠時の発汗量(単位時間)をグラフで示した。手掌部は睡眠中にバースト的発汗は認められず、一定レベルの基礎発汗が持続的に存在し、その量が極めて多いことがわかる。また、睡眠中の背部、前額発汗は多量で腹部、前胸部、臀部、腋下の発汗量は少ない。

(4) 空気流量補償方式換気カプセル型デジタル発汗計とその応用

2008 年 6 月、空気流量補償方式換気カプセル型デジタル発汗計(西澤電機計器製作所 SKN-2000)を実用化した(図 10)¹²⁾。

新型発汗計の特徴を要約すると、①応答性に優れ(立ち上がり時間 1 s 以内で従来装置の約 1/5)、②ダイナミックレンジの拡大(従来装置の約 2 倍)、③利便性が向上：パーソナルコンピュータへのデジタルデータ出力機能(外部 A/D 変換器不要)、自動ゼロアジャスト機能付加等である。新型発汗計による多量発汗の測定例を以下に記述する。

[炎天下運動中の前額・前胸部発汗の測定]

炎天下ステップ運動中の前額、前胸部の発汗量の測定を行った。発汗計を冷却水入りペットボトルとともに発泡スチロール箱内に収納して炎天下に置き、その傍らでステップマシンによる運動を行った。



図 10 空気流量補償方式デジタル発汗計 (SKN-2000) の外観写真

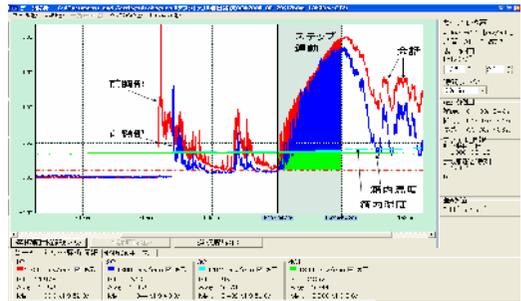


図 11 ステップ運動における前胸部、前額部発汗

直射日光下で 10 分間のステップ運動を负荷した際の前額、前胸部発汗量変化の記録を図 11 に示す。40℃を超える温度下では前胸部、前額部にすでに発汗が認められ、ステップ運動を開始するとまもなく顕著な発汗が惹起され、10 分後には最大値約 2mg/cm²・min の発汗が認められた(前胸部)。運動を中止すると各部の発汗が止まり、汗が減少していく中で会話により発汗が惹起された。運動中の前胸部、前額部発汗量はそれぞれ 11.7 mg/cm²、9.8mg/cm² であった。発泡スチロール箱内の温度はほぼ 35℃、湿度は 41% で一定であった。発汗計を発泡スチロール箱内に収納することは高温環境下において有効である。

[入浴中の前額・前胸部発汗の測定]

図 12(a) に示すように発汗計を発泡スチロール箱内に入れて浴室の洗い場に設置した。カプセルを前額、前胸部に両面テープを用いて貼付・固定した後に浴室に入り、半身の入浴を行った。b 図は浴室内の湿度ならびに温度変化である。入浴により湯気が立ち込め、湿度は約 100%RH になった。

20 分間の半身浴の後、浴室ドアを開けて外気を入れると室内湿度は低下した。室内湿度はほとんど変化せず 23~25℃であった。このような浴室内環境の下で行った半身浴の発汗量変化の記録を図 13 に示す。湯温約 41℃の風呂に入浴するとまもなく前胸部、前額部発汗が出現し、洗い場に出ると、浴室湿度の低下に相動して各部の発汗は減少して行く。入浴中の前胸部、前額部発汗量はそれぞれ 35.1mg/cm²、35.4 mg/cm²であった。発泡スチロール箱内の温・湿度はほぼ 26℃、58%RH であった。

5. まとめ

本稿では、発汗のメカニズム等の基礎的事項ならびに発汗の計測について解説を行い、次いで、我々が開発してきた湿度センサを用いた発汗計、最近開発・実用化した流量補償方式換気カプセル型発汗計の概要を述べた。さらに、日常生活下や睡眠中、炎天下、入浴中など様々な環境下におけるヒト各部位の発汗量変化の測定例(被験者 65 歳, 男性)を示した。

精神性発汗のような微量発汗から運動や入浴時のような多量発汗が簡便に測定できる発汗計が衣服などの繊維領域、健康・運動領域、さらに多汗症治療などの医学領域で普及し、活用されることを期待している。

参考文献

- 1) 中山昭雄編：温熱生理学，理工学社，東京(1980)
- 2) 坂口正雄，森建治他：精神性局所発汗量連続記録装置の開発. 医用電子と生体工学, 26(4), 213 - 217 (1988)
- 3) 坂口正雄，小野伸幸他：湿度センサを用いた精神性発汗連続記録装置－温度補償とその特性－. 医用電子と生体工学, 28, 137 - 142 (1990)
- 4) 坂口正雄，大橋俊夫他：差分方式皮膚蒸散量計の開発. 発汗学, Vol. 6, No. 1, 2 - 6 (1999)
- 5) 坂口正雄，中島隆行他：空気流量補償型発汗計の開発. Proceedings of The 2008 JSME Conference on Robotics

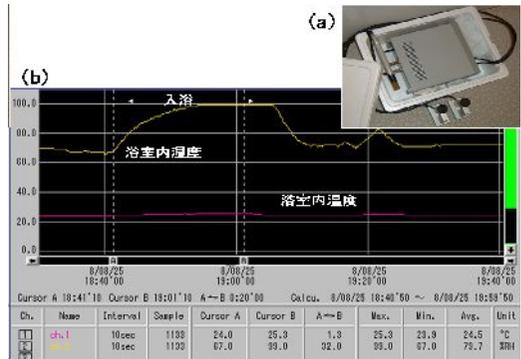


図 12 発泡スチロール箱に収納した発汗計 (a) と浴室内温度・湿度の変化(b)

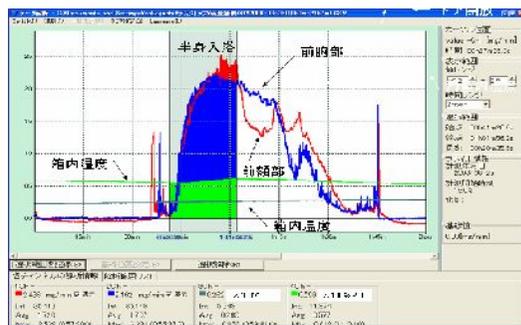


図 13 半身浴中における前胸部、前額部発汗

- and Mechtoronics, Nagano, Japan, 1A1-I02(1) - (2) (2008)
- 6) 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－. ライフメディコ. 名古屋 (1993)
- 7) 小川徳雄：新汗のはなし 汗と熱さの生理学. アドア出版，東京 (1994)
- 8) G. E. Nilsson: Measurement of water exchange through skin. Med. Biol. Engn. Comput., 15, 209-218 (1977)
- 9) 新美良純，鈴木二郎(編)：皮膚電気活動，星和書店 (1986)
- 10) (株)フォーシオン：取り扱い説明書，連続発汗測定装置ハイドログラフ AMU-3 (1991)
- 11) 坂口正雄，大橋俊夫：夜間睡眠中のヒト各部位の発汗量計測. 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2007 講演論文集, 111-112 (2007)
- 12) 百瀬英哉，坂口正雄他：流量補償方式換気カプセル型デジタル発汗計の開発. 電子情報通信学会技術研究報告, MBE2008-39,69-72 (2008)