

第4回 人間—熱環境系シンポジウム報告集 (昭和55年12月)

講演 2

発汗の機序について

愛知医科大学

小川 徳雄

Mechanisms of Human Eccrine Sweating

Tokuo OGAWA

Aichi Medical University

The recent knowledge on mechanisms of human eccrine sweating is briefly reviewed. The crucial mechanism of production of precursor sweat is sodium secretion by basal cells of the secretory coil by means of Na-K exchange pump. Nearly isotonic precursor sweat becomes hypotonic by ductal reabsorption of NaCl exceeding that of water. Secretory energy is mainly supplied from ATP produced by aerobic oxidation of plasma glucose. The eccrine sweat gland receives cholinergic sympathetic nerve fibers. Despite of sufficient evidence for adrenergic mechanism, it appears to have little physiological significance in human eccrine sweating. Aldosterone facilitates sodium reabsorption, and lower salt concentration in sweat during heat acclimatization is attributed mainly to increase in its secretion. Vasopressin has no direct effect on sweat glands. Evidence shows interaction of central nervous activities for thermal sweating over the general body surface and mental sweating on palms and soles. Axillary sweating has lower thermal threshold and is less responsive to heat load than sweating on other general surface areas. Centrally-derived sudomotor neural activity is reflected on the frequency of sweat expulsions synchronized over the general body surface. Subthreshold sudomotor impulses persist in the absence of thermal sweating. Pressure over various skin areas causes dermatomal inhibition of sweating on the ipsilateral side. In newborns, development of central mechanisms for sweating is slower than activation of sweat glands. Less sweating activity in women than in men is accounted for by differences in mechanisms of body heat balance and in functional capacity of sweat glands. Sweat gland activity is affected by various local factors such as local temperature, blood flow and wetness of skin. Hidromeiosis, formerly called sweat gland fatigue, is closely related to skin wetness and appears to be caused by obstruction of the sweat duct due to swelling of its keratin ring. Increase in sweating capacity during short-term heat acclimatization is caused by adaptive changes in the central thermoregulatory activity as well as augmented secretory activity of sweat glands. Lessened sweat response to heat load in long-term heat acclimatization is attributed to weakened central activity due to habituation to heat.

汗腺にはエクリン腺とアポクリン腺があるが、ヒトでは後者は一部に局在するのみで分泌能もきわめて低く、生理的な意義も乏しい。ここではヒトの体温調節に関係の深いエクリン汗腺の発汗機序に限ってその比較的新しい知見を中心に述べる。

1. 汗の生成と再吸収：エクリン腺の分泌管には表層細胞、基底細胞、筋上皮細胞が存在するが、汗の原液はほとんど基底細胞によって分泌される。その主要機構はNa-K交換ポンプによるNa分泌である。汗の原液は血漿とほぼ等張であるが、導管近位部においてNa、Clが再吸収され、それにつれて水の再吸収が起こる。前者が後者をもと廻すため、皮膚面上に出た汗は血漿より低張となる。¹⁾ Naの再吸収速度には限度があるため、発汗量が多くなるほど再吸収を免れるNa量がふえ、汗中のNaCl量が増し、K濃度は逆に低下する。汗は通常酸性であるが、この酸性化には導管におけるHCO₃の再吸収またはNaH交換機構などの関与が考えられる。HCO₃濃度は発汗量と共に増大し、pHも発汗量の少いときほど下がるが、発汗量の増加とともに次第に中性に近づく。²⁾

分泌活動のエネルギー源は血中のブドウ糖を主要基質とし、その有気的な酸化により形成されるATPから得られると推定される。³⁾ 乳酸は汗中に高濃度に含まれ、汗腺内で解糖によって産生されたものとみなされるが、エネルギー産生の過程として無気的な解糖は重要ではないろう。ただし血行障害では汗の乳酸濃度が増す。

2. 汗腺の神経支配と液性調節：エクリン腺はコリン作動性の交感神経支配を受ける（顔面は二重支配を受けるといわれる）。アドレナリン作動性の神経支配については否定的な見解が有力であるが、最近蛍光組織化学的にカテコールアミン含有の神経網が認められて

第4回 人間-熱環境系シンポジウム報告集 (昭和55年12月)

いる。⁴⁾ アドレナリンの局所投与による少量の発汗のみられ、 α -アドレナリン遮断剤が阻止される。遊離したサルのエクリン腺では、 β 両受容機構の存在が示されている。⁵⁾ ヒトではアドレナリンの皮膚血管収縮作用が強く、その濃度閾値発汗作用のそれより低いので、アドレナリンによる発汗作用は弱く、その生理的意義は疑問視される。アドレナリンの系統投与時にとりとして認められる発汗増加は、その代謝増進作用による二次的なものと考えられ、 α -遮断剤の局所投与により阻止されない。⁶⁾ アルドステロンは汗腺の導管におけるNaの再吸収を促すと考えられるが、その効果の発現は異常におそい。⁷⁾ 暑熱順化時に汗中のNa濃度が低下するのは主としてアルドステロンの分泌増加に起因するとみられる。バゾプレッシンは大量の局所投与により発汗量の減少をもたらすが、これは皮膚血流の変化による二次的な作用と推測され、直接作用はないと考えられる。⁸⁾

3. 発汗の種類とその中枢機構：手掌・足底を除く一般体表面にみられる温熱性発汗は、視床下部に統合される体温調節中枢機構の統制を受ける。しかし手掌・足底の発汗も温熱の影響を多少受ける。一方精神性発汗は手掌・足底に常温下でもみられ、精神的緊張や情緒興奮によって相動的に増加する。精神活動・情緒に關係する大脳皮質・辺縁系・視床下部などが関与すると考えられるが、一般体表面の発汗も精神刺激に応じて相動的に増減する。高度精神作用に関わるストレスはしばしば一般体表面の発汗抑制をもたらす。大脳皮質に発汗抑制機構の存在を推測させる。⁹⁾ 大脳皮質の損傷でしばしば多汗症がみられることや、睡眠中発汗量が増加することなども大脳皮質からの発汗抑制の除去によると説明される。睡眠中は脳波上の睡眠深度に平行して発汗量が増減することが多いが、夜間睡眠ではこの関係が乱れることがあり、皮質下脳部の活動水準の変化を示唆する。¹⁰⁾ 手掌・足底の発汗は睡眠期間を通じて停止する。中枢神経に傷害のあるとき、それより下位部を反射中枢として発汗の起こることがある。腋窩のエクリン腺は他の一般体表面部位よりやや低い温度条件で発汗がみられ、温熱負荷の増大に対する発汗反応が鈍い。

運動時には温熱性・精神性発汗がともに著しく増加する。運動開始後発汗促進までの潜伏時間が極めて短く、その機序については諸説があるが、いずれも証拠に乏しい。運動中の発汗量は仕事の強度や深部温と平行関係にあり、皮膚温には影響されにくい。しかし環境温が32℃以下では発汗量は皮膚温が低いほど小さくなる。¹¹⁾

一側皮膚部位の圧迫によるいわゆる半側発汗は、圧迫部位の高さにより同側の発汗抑制範囲が移動することから、脊髓分節を介しての反射によるものと解される。¹²⁾ 局所に限局した反射性発汗は正常ではあまりみられないが、味覚性発汗はこの一つである。実験的には軸索反射性発汗も認められるが、その生理的意義は不明である。

高位中枢に由来する発汗神経活動は一般体表面の全域で同期する汗の拍出の頻度に対応される。これは定常状態において室温・発汗量と直線関係にある。¹³⁾ 皮膚圧による発汗抑制には影響されない。全域同期性の汗の拍出は温熱性発汗発現温度閾下でも、薬物による局所発汗に認められ、閾下でも中枢性発汗活動があることを示す。汗の拍出の実体については、分泌管節上皮の収縮によるよりも分泌細胞の拍動性興奮による可能性が大きい。

4. 年令・性による差違：汗腺の能動化は胎生中28週に始まり生後2年半までに完了する

第4回 人間—熱環境系シンポジウム報告集(昭和55年12月)

が、その総数はその間の温度環境に依存するといわれる。発汗能は出生直後は弱く、生後急速に増強する。温熱性発汗は生後2~18日に、また精神性発汗は生後1~3ヶ月して発現するが、これは発汗中枢機構の発達に遅れに帰せられる。幼小児は発汗能に季節変動が少なく、性差もほとんど認められない。思春期以後は、女子は男子より発汗発現の温度条件が高く、発汗量も少ない。性差の原因は性ホルモンの差に基づく体熱出納機序の相違や汗腺自体の機能の相違によると考えられる。¹²⁾高齢者では男子では暑熱に対する反応速度がのろくなり、発汗閾値が高くなるが、女子ではとくに変化が認められず、性差が少なくなるという。汗の食塩濃度は年齢とともに増加する。

5. 発汗に影響する局所要因：局所温が高いほど汗腺活動は増大し、そのQ₁₀は3~5といわれる。局所温が神経-腺接合部で遊離される伝達物質の量および伝達物質に対する分泌細胞の感受性に影響すると推定される。¹³⁾

局所の血行は汗腺への水分・酸素等の供給上重要である。汗腺活動時にはその近傍でブラウデンキニンが産生され、汗腺周囲の血管網を拡張するという。血行不良時の発汗減少には、神経-腺接合部の疲労と分泌機構自体の変化が関与すると考えられる。¹⁴⁾

長期間の暑熱暴露時、発汗量が次第に減少する現象は、かつて汗腺の疲労によるとみられてきたが、近年この見解は疑問視され、発汗漸減hidromeiosisと呼ばれるようになった。発汗漸減は皮膚の湿潤と密着に関係し、高温環境、温水浴、多量発汗がよくみられ、汗腺導管終末部がそのケラチン環の膨潤によって閉塞されることによるとする解釈が有力であるが、反論も多い。¹⁴⁾発汗漸減時、汗の食塩濃度が漸増するが、皮膚を急冷すると直ちにその濃度が低下することから汗腺疲労とは考えにくく、分泌管でNaの分泌に伴うべき水の滲出が導管内の静水圧の上昇のために妨げられ、食塩濃度が上昇すると推測される。発汗漸減は、汗の蒸発が妨げられ、無効発汗があるときにみられ、発汗量の増加が熱放散の増加につながらないときに体内水分保留のために起こる適応性現象とも考えられるが、それなら発汗漸減に伴う食塩濃度の上昇が理解できず、また暑熱順化による発汗漸減傾向が減弱することも説明しえない。

6. 暑熱順化と汗腺活動：短期暑熱順化に伴い、発汗能が増大し、同一体温でも発汗量が多く、体温の上昇に伴う発汗量の増加も著しい。体温調節中枢機構の適応性変化も無視できないが、汗腺自体の汗分泌活動の亢進により重要な機序と考えられる。暑熱順化に伴う発汗量の増加度は部位により異なり、とくに四肢に著しいが¹⁵⁾これは外気の影響を受けやすい部位ほど順化・脱順化の度合いが大きいのであろう。暑熱順化時の発汗量の増大は高温環境で著しく、発汗漸減の発現は遅延し、その程度が軽くなる。とくに高温条件下で順化させるときに著しい。暑熱順化時汗のNa濃度が低下することは、アルドステロンの分泌促進によるほか、局所的に訓練された汗腺でも起こることから、汗腺自体のNa輸送機序の変化も考えられる。長期暑熱順化者では暑熱に対する発汗反応はむしろ弱い。これは暑熱に対する慣れによる中枢活動の鈍化によると考えられ、汗腺自体の分泌能は高く¹⁶⁾また汗中の食塩濃度も低く、耐暑能は高い。¹⁷⁾

第4回 人間-熱環境系シンポジウム報告集 (昭和55年12月)

文献

- 1) Sato, K.: Sweat induction from an isolated eccrine sweat gland. *Am. J. Physiol.* 225. 1147/1151 (1973)
- 2) Kaiser, D., Songo-Williams, S. & Drack, E.: Hydrogen ion and electrolyte excretion of the single human sweat gland. *Pflügers Arch.* 349. 63/72 (1974)
- 3) Sato, K.: The physiology, pharmacology, and biochemistry of the eccrine sweat gland. *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.* 79. 51/113 (1977)
- 4) Uno, H.: Sympathetic innervation of the sweat glands and piloerector muscles of macaques and human beings. *J. Invest. Dermatol.* 69. 112/120 (1977)
- 5) Ogawa, T.: Effects of subcutaneously administered adrenaline on human eccrine sweating, with special reference to the physiological significance of the adrenergic sweating mechanism. *Jpn. J. Physiol.* 26. 517/528 (1976)
- 6) Morimoto, T.: Endocrine function and sweating. In: *The Physiology and Pathophysiology of the Skin*. Vol.5. 1635/1643. Academic Press, London (1978)
- 7) Ogawa, T.: Thermal influence on palmar sweating and mental influence on generalized sweating in man. *Jpn. J. Physiol.* 25. 525/536 (1975)
- 8) Ogawa, T., Satoh, T. & Takagi, K.: Sweating during night sleep. *Jpn. J. Physiol.* 17. 135/148 (1967)
- 9) Nielsen, B.: On the regulation of sweat secretion in exercise. *Acta Physiol. Scand.* 64. 314/322 (1965)
- 10) Ogawa, T., Asayama, M., Ito, M. & Yoshida, K.: Significance of skin pressure in body heat balance. *Jpn. J. Physiol.* 29. 805/816 (1979)
- 11) Ogawa, T. & Bullard, R. W.: Characteristics of subthreshold sudomotor neural impulses. *J. Appl. Physiol.* 33. 300/305 (1972)
- 12) Morimoto, T.: Variations of sweating activity due to sex, age and race. In: *The Physiology and Pathophysiology of the Skin*. Vol.5. 1655/1666 Academic Press, London (1978)
- 13) Ogawa, T.: Local determinants of sweat gland activity. In: *Advances in Climatic Physiology*. 93/108 Igaku Shoin, Tokyo (1972)
- 14) Sargent, F., II: Depression of sweating in man: so-called "sweat gland fatigue." In: *Advances in Biology of Skin*. 163/212 Pergamon Press, Oxford (1962)
- 15) Ogawa, T. & Asayama, M.: Frequency of sweat expulsions, as indicator of sudomotor neural activity, In: *New Trends in Thermal Physiology*. 105/107 Masson, Paris (1978)
- 16) Ohara, K.: Salt concentration in sweat and heat adaptability. In: *Advances in Climatic Physiology*. 122/133 Igaku Shoin, Tokyo (1972)