

運 動 と 発 汗

小 川 徳 雄

EXERCISE AND SWEATING

TOKUO OGAWA

I. は じ め に

運動時には、その強度が増すほど多量の熱が産生されるので、それに適合した熱放散の促進が必要となるが、発汗は最も効率的な熱放散手段となる。しかし、運動時の体温調節機序については、諸家の見解が一致せず、発汗活動についても、安静時の発汗と比べ、その様相や多様な特徴が認められるが、その機序については明らかでない点も少なくない。また、体力ないし運動鍛錬と発汗機能との間にも密接な関連があり、多くの研究者の注目を集めている。以下、現時点におけるこれらの問題に関する知見について概説する。

II. 運動開始時の発汗活動

運動を始めると、きわめて短い潜時で発汗活動が増加する。これは深部体温や皮膚温の上昇に先行する。すなわち、深部体温（鼓膜温や食道温）の上昇はかなり遅れるし、むしろしばしば一過性に下降する。皮膚温も皮膚血管収縮のため、運動初期には通常下降する。それに対し、発汗は体温が上昇に転ずる前に出現し、また、その後の発汗増加も深部体温の上昇過程に先立つ。とくに運動開始前から発汗しているときは、運動開始後直ちに発汗量が増加し始める。ただし、深部温の初期低下が著しいときは、多少遅れたり一旦減少したりすることもある⁶⁴⁾ (図1)。運動負荷の急増、急減に際しても同様に迅速な発汗反応がみられる。また正弦波状に周期的に負荷を変えた運動でも発汗応答は体温、皮膚温変動に先行するし、負荷の

変動周期が短いと体温、皮膚温の変動なしに発汗応答が認められる⁸⁵⁾。

このような発汗反応は、活動肢の血行を阻止して深部体温の上昇を防いでも起こる⁷⁹⁾。しかも筋や静脈壁に温度受容器の存在は認められていないので、筋温自体の上昇に起因する可能性も少ない。したがって、運動初期の発汗活動になんらかの温熱以外の要因が関与していると推測される。

筋や関節の機械受容器の刺激に基づく反射的な発汗促進の可能性も古くから指摘されたが、受動運動では体温上昇に見合う程度の発汗量の増加しかみられないことから、この可能性も疑わしい⁶⁷⁾。

運動開始時の発汗活動増大は一過性であるともなし、運動開始に伴う運動中枢の興奮が体温調節のセットポイントに影響を与え、これが一過性に低下するとの仮説が提唱されたり⁸⁾、また交感神経系発射の増加が関与すると説明されたり⁷⁴⁾、さらには運動開始時の精神興奮に起因すると説明されたりする。

手掌や足底は精神性発汗部位として知られるが、運動初期にしばしば一過性の発汗増加を示す。一般体表面でも精神興奮時に一過性の反応（増加または減少）を示すことが多く、精神活動が体温調節中枢活動に影響するためと解される。運動開始時の発汗活動の増加も同様の機序による可能性も考えられる。

運動負荷急変時の一過性の発汗応答には個人差が大きく、手掌の精神性発汗に付随して他部の発汗や心拍数が動揺する者があり、その際手掌発汗

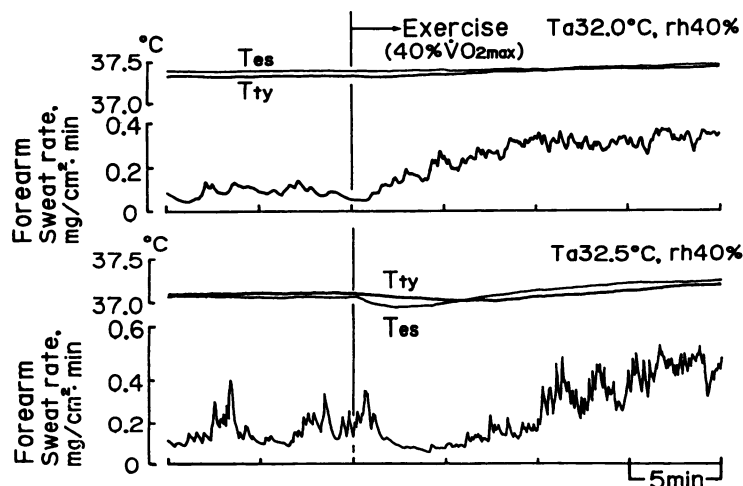


図1. 運動開始時の発汗応答(開始前から発汗があるとき). 通常, 発汗量の増加がみられる(上段の例)が, 深部体温の初期下降が著しいときは発汗量が一旦減少することもある(下段の例).

量や一般体表面の発汗量と心拍数とが並行し, 運動に伴う精神活動の影響が大きいとみられる. 他方, 手掌発汗も心拍数もほとんど応答しない者もあり, 運動鍛錬者に多い⁴⁴⁾が, 運動時の精神動揺が少ないためとも解される.

一方, 運動開始時や運動負荷急変時の迅速な呼吸促進, 心機能亢進などの反応には, 運動中枢活動(central command)が呼吸・循環調節系への拡

延が関与することが多くの研究者によって主張され, 数々の証拠が挙げられている. なかんづく, Goodwinら²⁸⁾は, 四肢の筋が一定負荷で等尺性収縮をしているときに緊張性振動反射を起こさせて, かつ同一強度を保たせると, 所要の運動中枢活動が増減し, それに応じて迅速な呼吸・循環活動の変化が起こることを観察し, また McClosky⁴⁰⁾は, 局所の筋麻痺を起こさせてその

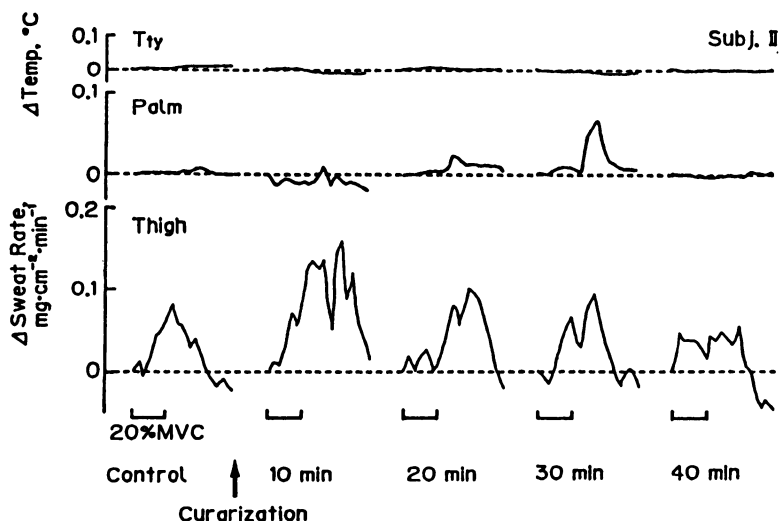


図2. クラレーにより麻痺された上肢の回復過程で等張性掌握運動をしたときの大腿部の発汗応答の推移、手掌の発汗応答は不定、鼓膜温の変動はみられない⁶³⁾.

回復過程で同一強度の運動をさせたとき、やはり迅速な呼吸・循環反応を認め、運動中枢活動の関与が大きいことを示している。大西⁶³⁾は、これらと同じ方法を用いて発汗活動にも同様の迅速な反応を観察し、運動中枢活動が体温調節機構にも及び、運動時の発汗活動にも関与することを示している(図2)。

運動開始から発汗発現までの体温上昇度は早朝と夕刻ではほぼ等しいといわれる²⁾が、このことも発汗発現が非温熱性要因、とくに運動に関わる中枢神経活動に左右されることを裏づけると解されよう。

また、断眠後の運動でも発汗量と体温との関係にはほとんど変化はないが、発汗発現の体温閾値が明らかに上昇する一方、皮膚血管拡張の体温閾値は低下することが観察されている^{15, 35, 72)}が、これらの反応も、断眠による影響が体温調節機構以外の中枢活動(例えば、注意集中、運動意欲など)に影響することによって起こるものと推察される。

手掌や足底にみられる精神性発汗と異なり、一般体表面の温熱性発汗は情動的に興奮するときは一過性の促進がみられるが、精神集中時などには

しばしば抑制される。運動競技などで集中していると、運動開始後発汗活動の迅速な増加反応がみられず、むしろ数十秒間発汗が抑制されることがある。1分間の運動を数分おきに繰り返すと、回を重ねるにつれ、情動によるとみられる手掌の発汗が慣れによって少なくなるにつれ、前腕発汗の一過性の抑制がはっきりしてくる⁵³⁾(図3)。相撲の取り組みで、力士が仕切り直しの反復後立ち上がったときによく経験することである。

Ⅲ. 運動中の発汗量

従来、運動時の発汗も安静時と同様、体深部(とくに中枢神経)の温度感受性ニューロンと皮膚温度受容器からの温度情報を入力として処理する体温調節中枢機構によって規制される体温調節反応の一つとみなされてきた。安静時の体温調節反応は、中枢機構にいわゆる設定温度 setpoint があり、深部体温と平均皮膚温を適当に重みづけして相加または相乗して求められる“平均体温”と設定温度との差によって決まると考えると、よく説明されるとされる。

ところが、運動時の体温調節反応を設定温度を

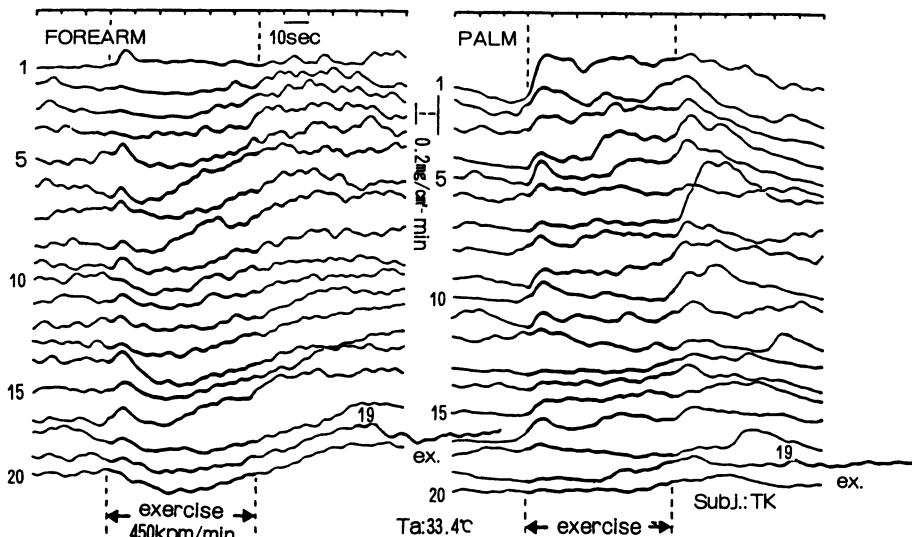


図3. 1分間の運動を数分おきに反復したときの前腕徒手症の発汗応答パターンの推移。回を重ねるにつれ、手掌発汗量の初期増加が減衰するとともに前腕発汗量の初期減少が明らかになる⁵³⁾。

基準として説明しようとする試みは多くの研究者によってなされているが、諸家の見解が一致していない。例えば、運動時の平衡体温が代謝量に応じて高くなることから、運動時には設定温度が上がるとする見解⁵⁰⁾や、運動中の発汗量と深部体温との関係が安静時と運動時とで等しく、運動時の体温調節機序が安静時と本質的に変わらないとする主張^{6,74)}があり、また、運動時の発汗発現の閾値体温が低下するという所見から、設定温度が下がるという考えがある^{38,77)}。さらに、発汗閾値の低下とともに調節系の感度も上昇しているという指摘もある⁷⁸⁾。発汗波の頻度を発汗中枢活動の指標として考察すると、運動時には安静時と比べ、同一体温における発汗中枢活動が明らかに増加している^{36,65)}。

いずれにしろ、運動時の高体温が、熱産生と熱放散の平衡が破れた結果ではなく、積極的に調節されて起こる現象であることは、多くの研究者の一致した見解であり、代謝量を主要な入力とした調節機構が働くようである。すなわち、運動時の体温調節反応は、運動遂行に関わる非温熱性要因 (work factor) によって左右されることを示唆する。

運動中の発汗量は運動負荷の強さと直線関係にあることは再三示されている^{14,51)}。また、坂上がりと坂下りの運動の比較から、発汗量が全熱産生量 (代謝量+仕事量) に比例するという報告もある⁴⁸⁾。いずれにしろ、運動遂行への努力と関係が深いことが窺われ、運動中枢活動が深く関わっていることが示唆される。

高温高湿環境で運動を続けると、脱水がそれほど進行していなくても、運動開始40~60分から発汗量が次第に減少し始めることが多い。つまり、発汗量が増しても滴り落ちる汗の量 (無効発汗量) が増すのみで熱放散量が増さないような状態では、発汗量が次第に減少する (発汗漸減)。発汗量が最高値に達したときの無効発汗量が多いほど、その後の発汗漸減の速度がはやくなる^{11,60)}。その際、無効発汗量のみが減少し、蒸発量 (有効発汗量) は変わらないため、発汗効率 (全発汗量に対する有効発汗量の割合) は次第に上昇し、1

に近づく⁶⁰⁾。この現象は、表皮がふやけ、汗腺の導管が表皮の角質層を貫く汗孔部の狭窄ないし閉塞が生ずるため、局所要因によるものといえる。したがって、部分的にも起こり、その部の皮膚を乾かせば直ちに発汗量が回復する³³⁾。

Ⅳ. 運動後の発汗

運動開始時の迅速な発汗反応と同様、運動終了時の反応もすばやく、体温の低下に先行して発汗量が減り始める。これは運動開始時と逆方向の反応とみなされる。しかし、発汗量が運動開始前のレベルに戻るのには体温のそれより遅れ気味になり、とくに激しい運動で疲労した後には発汗減少過程が長引く⁶⁸⁾。乳酸の蓄積など、運動に伴う体液性の変化の関与が窺われる。

高温高湿の運動で熱負債が大きいつきは、当然発汗の熱放散効率が低いので、運動後の発汗減退経過が長引く。また、長時間にわたる持続運動の後には軽度の高体温が10時間以上も持続することがあり、その間、発汗発現の体温閾値が上昇する。これは運動によって生じた微細な組織損傷が内因性発熱物質の放出をもたらし、軽い発熱を起こすためと考えられる³⁰⁾。

Ⅴ. 運動時の発汗活動の部位差

a. 活動肢の発汗量

加温された部位では汗腺活動が増す。これは温度の上昇により、発汗神経末端で遊離される伝達物質の量と、伝達物質に対する汗分泌細胞の感受性が増すことによると考えられ、汗産生量に対する局所温の効果は Q_{10} で平均約2.5となる⁵⁶⁾。したがって、活動筋を覆う皮膚部位では皮膚温が上昇し、発汗量が多くなる⁸²⁾。上肢の運動では上肢で、下肢の運動では下肢で発汗量の増加が著しい。

局所の反復温浴などによりその部の汗腺は訓練され、発汗活動が増す。この現象は、後述する暑熱順化による発汗活動の亢進の一要因と考えられる。

b. 利き腕と発汗能

左右の腕の発汗量は必ずしも等しくなく、右利

きの者では、一般に利き腕の発汗量が対側に比べて多く、とくに単一汗腺当りの発汗量で比較すると明らかである。反面、頭部や体幹部では左右差はない^{42,43)} (図4)。これは長期間の使用偏重に起因すると考えられる。すなわち、利き腕の活動筋の温度が上がる事が多く、それを覆う皮膚温も高くなる事が多いので、長期にわたってこれが反復されると局所の汗腺が訓練され、発汗能が増進することより、使用偏重された腕の発汗能が対側のそれより高くなったものと推論される。左利きの者では、多少とも右腕使用に矯正されるので、左右差が出にくい。

上半身を多く用いる運動競技の選手は下半身の運動が主体となる運動競技の選手と比べ、上半身の発汗量が多い傾向がみられるのも同様の機序に

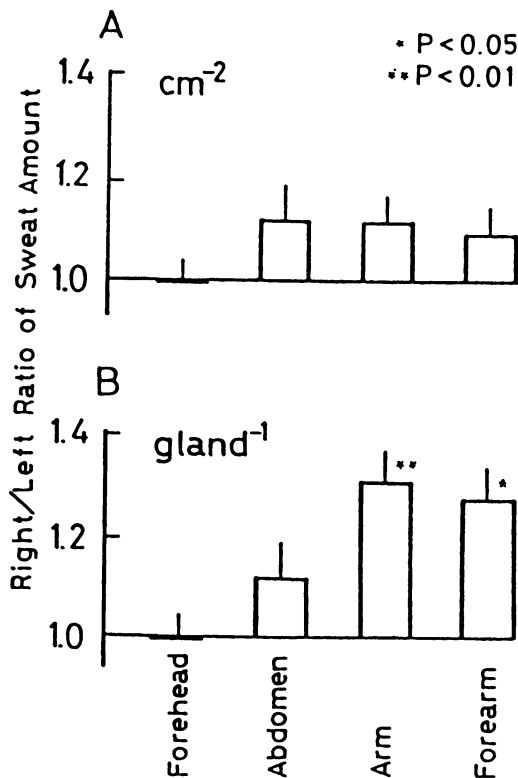


図4. 右利き被験者の前額、腹部、上腕、前腕の発汗量の左右差(左の値に対する右の割合で示す)。単位面積当たりの発汗量(上段)には有意差はないが、単一汗腺当たりでみると(下段)四肢の発汗量に著差がみられる⁴²⁾。

よるものと考えられる⁴²⁾。しかし、運動選手では、利き腕による発汗能の左右差があまりはっきりない。これは左右ほぼ平等な鍛錬を心がけるためと推定される⁴²⁾。

c. 部位差の日周変動

早朝と夕刻では運動時の発汗量が皮膚部位によって異なり、前額では夕刻より早朝に多く、背部では夕刻より早朝に多くなる。また、前腕の発汗量と比較して早朝には前額の発汗量が、夕刻には背部の発汗量が有意に多くなると報告されている²⁾。発汗活動に日周変動があり、それが部位によって異なることが示唆される。

d. 運動時の半側発汗

発汗は通常全身一様に増減するが、片側にもたれたり横向きに寝たりすると、下になった側からの発汗量が減少し、対側の発汗量は一般に増加することが半側発汗として知られる。半側発汗は皮膚部位の圧迫に基づく発汗抑制反射によるものであることが高木らによって明らかにされている⁷⁶⁾。側胸部、肩甲部の圧迫による上半身の半側発汗が最も効果的である。側胸部の圧迫部位を下方へ移動するにしたがって発汗抑制区域も尾側へ移ることから、この反射は脊髓分節を介するものと解される⁵⁸⁾。

多量発汗時、とくに体温の上昇や運動が激しいほど半側発汗は現れにくくなる⁴⁴⁾。これは、高位中枢からの発汗神経衝撃が強いときは、より下位の発汗抑制機序が隠蔽されるためと解される。

VI. 運動時の発汗に影響する体液性要因

種々の体液性変化が安静時、運動時に関わらず発汗活動に影響するが、本稿ではとくに運動と関係の深いものを取り上げる。

運動中の多量発汗によって脱水が進むと、体温上昇に伴うべき発汗量の増加が鈍る。これには血漿浸透圧の上昇と血漿量の減少が関与するが、項を改めて述べる(Ⅷ項)。

高炭酸血症では発汗が促進され、低炭酸血症では発汗が抑制される。実験的に4～6%のCO₂吸入により発汗促進と体温低下がみられ、中枢性と局所性の作用が認められる⁷⁵⁾ (図5 A)。逆に、

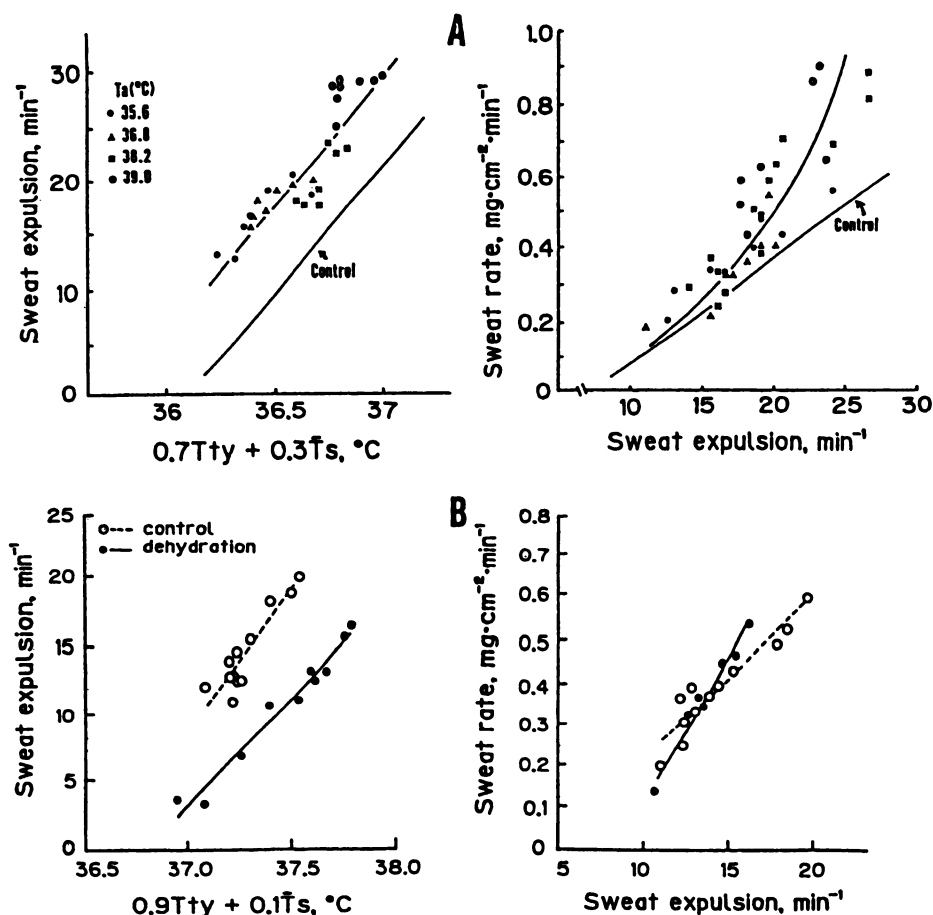


図5. 6% CO_2 吸入時(A)および脱水時(B)の発汗波特性の変化. 左欄は中枢性の発汗活動(平均体温と発汗波頻度の関係), 右欄は汗腺の反応性(発汗波頻度と前腕部発汗量との関係)を示す⁶²⁾.

換気過剰により発汗抑制と体温上昇が起こる. 同様の現象は酸性液, アルカリ液の輸液によってもみられ, pHの低下, 上昇がそれぞれ発汗促進, 抑制をもたらすと推定される⁵⁷⁾. 強度の運動中には乳酸の蓄積などによる予備アルカリの減少のためpHの低下が起こるが, 同時に呼吸促進により血液中の CO_2 分圧が著しく減少するので, 発汗活動に対する効果が相殺されることになるが, アシドーシスが進行すれば発汗抑制をもたらす可能性がある.

ヒトのエクリン腺は元来アドレナリン(AD)受容性であった原始汗腺(アポクリン腺)から進化したものと考えられ, 局所に投与したADに弱

く応答するが, 後者の血管収縮作用が強く, その生理的な意味は乏しいと推定される. ただし, α , β レセプターをもち, β 作動薬は低濃度のメタコリン(MCH)による発汗作用を部分相加的に増強する. すなわち, ムスカリン性レセプターと β レセプターとの間には相互作用が認められる⁷⁰⁾. また, 運動時には, 副腎髄質からのAD分泌が増すので, これが発汗促進機構に関与しうる可能性が残る^{39, 54)}.

運動時には, 上記ADのほか種々のホルモンの分泌活動に変化が起こる. アルドステロン(AS)^{26, 34)}, プロラクチン(PRL)^{9, 18, 41)}, バゾプレッシン(ADH)も運動時, ことに暑熱環境で分

泌が促され、これらは発汗活動と関連が深い。とくに多量発汗によって脱水が進むと、これらの分泌が増加する。AS や ADH の血漿濃度は運動強度が増すにつれて増加する²⁷⁾。

AS は汗腺導管における Na^+ の再吸収を促すが、その作用経過はきわめて遅く、数時間以降に効果が現れ始める⁷¹⁾ ので、運動中にその効果が現れるには至らない。PRL も汗の食塩濃度を低下させる作用があり、汗腺活動に影響するとも示唆されている^{32,66)}。ADH は生理的な変動範囲では発汗に対する効果はみられないが、その大量の全身投与により発汗の増加が認められており¹⁾、ADH が脳内で遊離される内因性解熱物質として体温上昇抑制作用をもつことと符合する。

VII. 運動時の汗の組成

汗の主要成分は、希薄な食塩水である。分泌管で生成された前駆汗は、血漿とはほぼ等張であるが、導管で Na^+ などの再吸収が起こり、皮膚面に排出される汗は低張となる。発汗量が多いほど汗の食塩濃度は上昇するが、これは導管内の流量が多いため、再吸収を免れる Na^+ 量が増すからである⁶⁹⁾。運動時は通常発汗量が多いので、汗の食塩濃度が比較的高く、これが長時間にわたると水分とともに塩分の喪失も多くなる。

暑熱順化や運動鍛錬で発汗能が増大するとともに導管の塩分再吸収能も増し、汗の塩分濃度が低下する(IX項)。しかし、汗の塩分濃度には発汗能や鍛錬度では説明できないような個人差が認められる⁸⁰⁾。

暑熱負荷時の汗と運動時の汗との間には、 $[\text{Na}^+]$ 、 $[\text{K}^+]$ 、 $[\text{Cl}^-]$ にほとんど差は認められないが、 $[\text{Mg}^{2+}]$ や $[\text{Ca}^{2+}]$ は運動時の汗の方が低値を示す⁸⁰⁾。 Ca^{2+} が筋収縮に必須であり、 Mg^{2+} が種々のリン酸化反応や酸化還元反応に重要なものであることを勘案すると、これらの損失を防ぐなんらかの機構が働いているかも知れない。

乳酸は汗の主成分の一つで、その濃度は血漿中の濃度よりはるかに高い⁶⁹⁾。腺細胞で嫌気的な解糖によって産生され、汗腺の嫌気性代謝を反映

する。運動中はその強度が増すほど血漿中の乳酸濃度は増すが、汗中の乳酸濃度は変わらず²⁰⁾、発汗量とはむしろ逆相関の関係にある¹⁹⁾ことから、運動で増量した乳酸の排泄には発汗が貢献するとは考えにくい。しかし最近、汗中の D-, L-乳酸じめ解糖に関わる methylglyoxal, ピルビン酸の濃度が運動、とくに嫌気性運動の後に高くなることが示されている³⁷⁾。

アンモニアも血漿中の濃度よりはるかに高い濃度で汗中に排出される。これは肝臓で解毒されたアンモニアが腎尿細管と同様、汗腺でもグルタミンナーゼによって再遊離され、アンモニウムイオンとなって汗中に排出されたものとみられる。一方、強度の運動時にはアンモニアの産生が活動筋において増加する。これがどのように処理されるかは明らかでないが、運動強度が増し、血漿中のアンモニア濃度が増すにつれてその汗中への排出量も増加することが観察されている¹³⁾。

VIII. 脱水と飲料補給

長時間の運動時、とくに高温下で多量の発汗により脱水が進行すると、循環機能に支障を来すとともに、発汗量が減少して体温の上昇を加速し、運動能力が低下する。脱水時の発汗抑制には、体液量の減少と浸透圧の上昇が関与するが、殊に血漿浸透圧の上昇の効果が大きい^{23,29,49)}。しかし、血液量の減少も発汗量の減少をもたらすことが認められている²²⁾。脱水は体温調節中枢機構に強く作用するが、汗腺機能への直接の影響は少ない⁶²⁾(図5B)。

汗は低張液であるが、汗中の塩分濃度は発汗量が増すとともに増加するので、暑熱下の持続運動で長時間多量発汗を続けると、水分とともに塩分も喪失し、さらにさまざまな障害を来すことになる。

発汗による体液の喪失を水のみで補い、血漿中の Na^+ 濃度がある基準以下になると、熱痙攣が起り、痛みをともなった痙攣が疲労している四肢や腹部の活動筋に発生する。

暑熱下の運動で、脱水に皮膚血管の拡張が加わると、循環血液量が減り、また血液の粘性が増加

するので、心臓への負担が増す。また、脱水による発汗量の減少が体温上昇を加速することになり、いわゆる熱ばて(熱疲労)となる。熱ばては健康な若年者が長時間肉体的努力をしたときによくみられ、治療を怠ると熱中症に陥り、死に至ることもある。

熱負債が著しく、うつ熱のため高体温になると、体温調節中枢機構の機能失調を来し、発汗が停止して体温の上昇がさらに加速して熱中症となる。深部体温は通常 42°C を超え、皮膚が乾燥して熱くなり、意識障害や痙攣もしばしばみられる。迅速な診断と精力的な治療がなされないと致命的となりやすい。

熱中症など高温障害の予防には、環境温度に応じて仕事量を定めるべきで、暑さが激しいときは運動や肉体労働は避けるか、少なくとも必要最小限に抑えるべきであり、多量発汗時には、水分や塩分の補給が必要である。

飲料摂取は体液量、血漿浸透圧を改善し、また冷たい飲料は直接体温の低下に資する^{73,83)}。運動前に飲料をとると、脱水を防ぎ、発汗を促して体温の上昇を抑えるとともに、心臓の負担を軽減し、発汗を促して体温の上昇を抑え、作業能力の向上に有利に働く⁴⁶⁾。

しかし、多量の発汗により脱水状態になっても、それがかなり高度にならない限り乾き感が強くなり、一般にその補給は遅れ(自発性脱水)、体液の回復は遅延してしまう。多量発汗のときには電解質も補給しなければならないが、補給液としてグルコースと電解質(Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , K^+ など)を適当に含んだ液(スポーツドリンクなど)を用いると、水の場合より多く飲むことができ、体液性状の回復も早い⁴⁵⁾。

IX. 暑熱順化と運動鍛錬効果

夏になると、発汗量が増し、汗中の塩分濃度が低下する。体温調節中枢の温度上昇に対する感受性が増すとともに、汗腺の汗分泌能も増す。連日反復して暑さに曝したり、運動鍛錬を続けても、同様な効果が得られ、両者を組み合わせると順化が促進される。

順化による発汗能の増大は、体幹に比し四肢に著しく起こる³¹⁾。また順化過程で皮膚局所を毎日冷水に浸すと、その部の発汗量は増さないし、前述のように皮膚局所を毎日温浴させるだけでも、その部の汗腺が訓練され、汗分泌能が増す^{25,59)}。さらに、ピロカルピン局所投与による局所発汗量は、運動鍛錬者では非鍛錬者よりはるかに多い¹⁰⁾。これらのことから、暑熱順化や運動鍛錬における発汗活動の増加には汗腺自体の分泌能の増大も関与することがわかる。長期の運動鍛錬者では、最大酸素摂取量の一定割合の運動を負荷したとき、非鍛錬者より胸部発汗量が多いが、前腕部の発汗量には差がなく、その効果が末梢性の機序によると解される⁸⁴⁾。

運動鍛錬者では、血液量が増加し、最大酸素摂取量($\dot{V}\text{O}_2\text{max}$)の増加や発汗能の増大に寄与するとされる^{5,12)}。しかし、同じ強度の運動をした場合には、 $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ の大きい者ほど発汗量はむしろ少ない⁸⁶⁾。熟練者では運動効率が上がり熱産生量が少なく済むこと、長期にわたる運動習慣により皮下脂肪厚が減少し、また皮膚血管が拡張して皮膚温上昇による乾性熱放散量が増し、汗の蒸発も促進されること、などが考えられる。つまり、熱帯住民と似た、長期暑熱順化効果が現れ、暑熱負荷時にも発汗量が少なくなると推測される。

暑熱順化時にはまた、汗の食塩濃度が低下する。これは従来、アルドステロン(AS)の分泌増加に帰せられたが、血中のレニン活性やAS濃度は増加せず、暑熱環境における運動時のAS分泌の増加度は順化後むしろ低下する^{21,26)}。この観察から、導管細胞のASに対する感受性が増強すると推論されている³⁴⁾。局所の温浴による汗腺訓練によっても汗の塩分濃度がいくらか低下し、汗腺の分泌能の亢進とともに塩分の再吸収能も高まることが示唆される⁵⁹⁾が、これもASに対する感受性の増加による可能性がある。

暑熱順化や運動鍛錬で汗の塩分濃度が低くなることは、多量発汗時の血漿浸透圧の上昇を促すことになり、これが細胞内液の細胞外への移動を促して細胞外液量の減少を抑え、運動時の血圧の維持に資することになる⁵²⁾。

X. 年齢, 性別による差異

幼小児期の発汗量は成人と比べて多いとも, 大差ないとも, また少ないとも報告され, 汗腺の成熟度, 汗腺密度, 暑熱負荷や運動負荷の方法やその強度の違い, 厳密な条件設定 (衣服や姿勢など) の困難さなどのため, 実験結果が多様になると推察される。幼小児期は個々の汗腺の分泌能は低く, 年齢とともに発汗能が増大する半面, 体表面積が小さいので汗腺密度が高く, 長ずるとともに低下する。したがって, 体表面積当りの発汗量は両者のバランス如何によって異なってくる。体熱出納の面から, 発汗量の過不足を考察する必要がある。

運動時の発汗量については, 小児の発汗量が少なく, 体温が上昇しやすいとの報告が多い^{3,4,19,81)}, 少なくとも小児期の最大発汗量は成人より劣る。

汗の塩分濃度は, 幼小児期は低く, 長ずるにしたがって高くなる¹⁶⁾。その過程には性ホルモンや身体発育が関与すると思われるが, その機序は明らかでない。PRL は暑熱下の運動時に著増し, その度合いは思春期のうちに増加する¹⁸⁾が, これはむしろ汗の塩分濃度を下げる効果を有する。

思春期以後の女子は, 安静時においても, 男子より発汗発現の体温閾値が高く, 発汗量が少ないことが知られているが, 運動時にも同様の所見が得られている^{7,17)}。この差異の主因は, 体熱出納機序の性差にあるといわれるが, 汗腺の分泌能も低く, 汗の食塩濃度も高い。また黄体期には卵胞期より発汗発現の閾値体温が平均0.5℃上がる。

高齢者では, 温熱負荷や運動に際し発汗発現が遅れ, その体温閾値が上がるため耐暑性に劣るとする見解が多いが, 個人差が大きく, 若年者との間に有意差が生じにくい⁵⁵⁾。とくに, 肉体労働・運動の習慣や有酸素的作業能 (最大酸素摂取量) などの差が年齢差以上に影響すると考えられる。定常状態の発汗量は若年者と変わらないともいわれる⁵⁵⁾。しかし, きわめて高齢 (男70歳, 女80歳以上) になると明らかな汗腺の変性と汗腺機能 (暑熱負荷, MCH に対する反応性) の低下が認められ, 最大発汗量も低下し, ことに四肢で著しいといわ

れる²⁴⁾。汗の塩分濃度には加齢による増加傾向が認められている¹⁶⁾。

高齢者ではまた, 暑熱順化による汗腺の汗分泌能の増大が起こりにくくなる⁶¹⁾。反復温浴による汗腺訓練の効果には, 加齢による低下が認められ, とくに男性で著しい。夏と冬を比べても, 同様に老年者, とくに男子では夏における発汗能の増大が著しくない。

ま と め

運動時には, 熱産生量の増加, 運動中枢の活動, 体液性状の変化, 呼吸・循環機能の変化, 皮膚性状の変化など, 安静時とは明らかに異なる要因のため, 発汗活動にも特徴的な変化が認められる。しかもその様相が年齢, 性別, 運動習慣, 鍛錬などによって大きく影響される。

文 献

- 1) Allen, J. A. and Roddie, I. C. The effect of anti-diuretic hormone on human sweating. *J. Physiol.* (1974), **236**, 403-412.
- 2) Aoki, K., Shiojiri, T., Shibasaki, M., Takano, S., Kondo, N. and Iwata, A. The effect of diurnal variation on the regional differences in sweating and skin blood flow during exercise. *Eur. J. Physiol.* (1995), **71**, 276-280.
- 3) Araki, T., Toda, Y., Matsushita, K. and Tsujino, A. Age difference in sweating during muscular exercise. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.* (1979), **28**, 239-248.
- 4) Bar-Or, O. Climate and the exercising child—a review. *Int. J. Sports Med.* (1980), **1**, 53-65.
- 5) Bass, D. E., Bushkirk, E. R., Iampietro, P. F. and Mager, M. Comparison of blood volume during physical conditioning, heat acclimatization, and sedentary living. *J. Appl. Physiol.* (1958), **12**, 186-188.
- 6) Benzinger, T. H. Heat regulation: homeostasis of central temperatures in man. *Physiol. Rev.* (1969), **49**, 671-759.
- 7) Bittel, J. and Henane, R. Comparison of thermal exchanges in men and women under neutral and hot conditions. *J. Physiol.* (1975), **250**, 475-489.
- 8) Bligh, J. Temperature Regulation in Mammals and Other Vertebrates, North-Holland, Amsterdam. (1973).
- 9) Brisson, G. R., Audet, A., Ledoux, M., Matton, P., Pellerin-Massicotte, J. and Perronet, F. Exercise-induced blood prolactin variations in trained adult

- males: a thermic stress more than an osmotic stress. *Horm. Res.* (1986), **23**, 200-206.
- 10) Buono, M. J. and Sjöholm, N. T. Effect of physical training on peripheral sweat production. *J. Appl. Physiol.* (1988), **65**, 811-814.
 - 11) Candas, V., Libert, J. P. Effect of hydromineral balance on sweat droplet production during acclimation to humid heat. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1980), **44**, 123-133.
 - 12) Convertino, V. A. Heart rate and sweat rate responses associated with exercise-induced hypervolemia. *Med. Sci. Sports Exerc.* (1983), **15**, 77-82.
 - 13) Czarnowski, D. and Gorski, J. Sweat ammonia excretion during submaximal cycling exercise. *J. Appl. Physiol.* (1991), **70**, 371-374.
 - 14) Davies, C. T. M. Thermoregulation during exercise in relation to sex and age. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1979), **42**, 71-79.
 - 15) Dewasmes, G., Bothorel, B., Hoeft, A. and Candas, V. Regulation of local sweating in sleep-deprived exercising humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1993), **66**, 542-546.
 - 16) Dill, D. B., Hall, F. G. and van Beaumont, W. Sweat chloride concentration, sweat rate, metabolic rate, skin temperature, and age. *J. Appl. Physiol.* (1966), **21**, 99-106.
 - 17) Dill, D. B., Yousef, M. K. and Nelson, J. D. Responses of men and women to two-hour walks in desert heat. *J. Appl. Physiol.* (1973), **35**, 231-235.
 - 18) Falk, B., Bar-Or, O. and MacDougall, J. D. Aldosterone and prolactin response to exercise in the heat in circumpubertal boys. *J. Appl. Physiol.* (1991), **71**, 1741-1745.
 - 19) Falk, B., Bar-Or, O., MacDougall, J. D., McGillis, L., Calvert, R. and Meyer, F. Sweat lactate in exercising children and adolescents of varying physical maturity. *J. Appl. Physiol.* (1991a), **71**, 1735-1740.
 - 20) Fellmann, N., Grizard, G. and Coudert, J. Human frontal sweat rate and lactate concentration during heat exposure and exercise. *J. Appl. Physiol.* (1983), **54**, 355-360.
 - 21) Finberg, J. P. M. and Berlyn, G. M. Modification of renin and aldosterone response to heat by acclimatization in man. *J. Appl. Physiol.* (1977), **42**, 554-558.
 - 22) Fortney, S. M., Nadel, E. R., Wenger, C. B. and Bove, J. R. Effect of blood volume on sweating rate and body fluids in exercising humans. *J. Appl. Physiol.* (1981), **51**, 1594-1600.
 - 23) Fortney, S. M., Wenger, C. B., Bove, J. R. and Nadel, E. R. Effect of hyperosmolality on control of blood flow and sweating. *J. Appl. Physiol.* (1984), **57**, 1688-1695.
 - 24) Foster, K. G., Ellis, F. P., Dore, C., Exton-Smith, A. N. and Weiner, J. S. Sweat responses in the aged. *Age Ageing* (1976), **5**, 91-101.
 - 25) Fox, R. H., Goldsmith, R., Hampton, I. F. G. and Lewis, H. E. The nature of the increase in sweating capacity produced by heat acclimatization. *J. Physiol.* (1964), **171**, 368-376.
 - 26) Francesconi, R. P., Sawka, M. N. and Pandolf, K. B. Hypohydration and heat acclimation: plasma renin and aldosterone during exercise. *J. Appl. Physiol.* (1983), **55**, 1790-1794.
 - 27) Freund, B. J., Shizuru, E. M., Hashiro, G. M. and Claybaugh, J. R. Hormonal, electrolyte, and renal responses to exercise are intensity dependent. *J. Appl. Physiol.* (1991), **70**, 900-906.
 - 28) Goodwin, G. M., McClosky, D. I. and Mitchell, J. H. Cardiovascular and respiratory responses to changes in central command during isometric exercise at constant muscle tension. *J. Physiol.* (1972), **226**, 173-190.
 - 29) Greenleaf, J. E. and Castle, B. L. Exercise temperature regulation during hypohydration and hyperhydration. *J. Appl. Physiol.* (1971), **30**, 847-853.
 - 30) Haight, J. S. J. and Keatinge, W. R. Elevation in set point for body temperature regulation after prolonged exercise. *J. Physiol.* (1973), **43**, 822-828.
 - 31) Höfler, W. Changes in regional distribution of sweating during acclimatization to heat. *J. Appl. Physiol.* (1968), **25**, 503-506.
 - 32) Kaufman, F. L., Mills, D. E., Hughson, R. L. and Peake, G. T. Effects of bromocriptine on sweat gland function during heat acclimatization. *Horm. Res.* (1988), **29**, 31-38.
 - 33) Kerslake, D. Mc. K. *The Stress of Hot Environments*. Cambridge University Press, London. (1972).
 - 34) Kirby, C. R. and Convertino, V. A. Plasma aldosterone and sweat sodium concentrations after exercise and heat acclimation. *J. Appl. Physiol.* (1986), **61**, 967-970.
 - 35) Kolka, M. A., and Stephenson, L. A. Exercise thermoregulation after prolonged wakefulness. *J. Appl. Physiol.* (1988), **64**, 1575-1579.
 - 36) 近藤徳彦, 西安岳, 鍋倉賢治, 池上晴夫. 汗の拍出頻度よりみた安静時と運動時の発汗調節の比較—非定常状態の場合について. *日本生気象学会雑誌*, (1987), **24**, 135-144.
 - 37) Kondoh, Y., Kawase, M. and Ohmori, S. D-Lactate concentrations in blood, urine and sweat before and after exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1992), **65**, 88-93.
 - 38) Lopez, M., Sessler, D. L., Walter, K., Emerik, T. and Ayyalapu, A. Reduced sweating threshold during exercise-induced hyperthermia. *Pflugers Arch. Eur. J. Physiol.* (1995), **430**, 606-611.
 - 39) Mack, G. W., Shannon, L. M. and Nadel, E. R. Influence of β -adrenergic blockade on the control of sweating in humans. *J. Appl. Physiol.* (1986), **61**, 1701-1705.
 - 40) McClosky, D. I. Centrally-generated commands and cardiovascular control in man. *Clin. Exp. Hypertens.* (1981), **3**, 369-378.

- 41) Melin, B., Cure, M., Pequignot, J. M. and Bittel, J. Body temperature and plasma prolactin and nor-epinephrine relationships during exercise in a warm environment: effect of dehydration. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1988), **58**, 146-151.
- 42) 宮側敏明. 発汗能の左右差とその要因について. 愛知医科大学医学会雑誌, (1988), **16**, 135-145.
- 43) 宮側敏明, 小川徳雄, 朝山正巳. 利き腕の発汗能について. 愛知医科大学医学会雑誌, (1981), **9**, 243-248.
- 44) 宮側敏明, 小川徳雄, 朝山正巳. 皮膚圧迫による発汗抑制効果に対する高度温度負荷の影響. 日本生気象学会雑誌, (1985), **21**, 21-28.
- 45) 森本武利, 三木健寿, 能勢博, 山田誠二, 平川和文, 松原周信. 発汗時の水分塩分摂取と体液組成の変化. 日本生気象学会雑誌, (1981), **18**, 31-39.
- 46) Moroff, S. V. and Bass, D. E. Effects of overhydration on man's physiological responses to work in the heat. *J. Appl. Physiol.* (1965), **20**, 267-270.
- 47) Nadel, E. R., Bullard, R. W. and Stolwijk, J. A. J. Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *J. Appl. Physiol.* (1971), **31**, 80-87.
- 48) Nielsen, B. Regulation of body temperature and heat dissipation at different levels of energy and heat production in man. *Acta Physiol. Scand.* (1966), **68**, 215-227.
- 49) Nielsen, B. Effects of changes in plasma volume and osmolality on thermoregulation during exercise. *Acta Physiol. Scand.* (1974), **90**, 725-730.
- 50) Nielsen, B. and Nielsen, M. Body temperature during work at different environmental temperatures. *Acta Physiol. Scand.* (1962), **56**, 120-129.
- 51) Nielsen, B. and Nielsen, M. On the regulation of sweat secretion in exercise. *Acta Physiol. Scand.* (1965), **64**, 314-322.
- 52) Nose, H., Mack, G. W., Shi, X. and Nadel, E. R. Role of osmolality and plasma volume during rehydration in humans. *J. Appl. Physiol.* (1988), **65**, 318-324.
- 53) Ogawa, T. Thermal influence on palmar sweating and mental influence on generalized sweating in man. *Jpn. J. Physiol.* (1975), **25**, 525-536.
- 54) 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.* (1976), **26**, 517-528.
- 55) Ogawa, T. Influence of aging on sweating activity. In: *Cutaneous Aging* (Kligman, A.M. and Takase, Y., eds.), Univ. of Tokyo Press, Tokyo, (1988), pp. 111-125.
- 56) Ogawa, T. and Asayama, M. Quantitative analysis of the local effect of skin temperature on sweating. *Jpn. J. Physiol.* (1986), **36**, 417-422.
- 57) Ogawa, T. and Asayama, M. Thermal and nonthermal control of sweating during rest and exercise. In: *Man in Stressful Environment: Thermal and Work Physiology* (Shiraki, K. and Yousef, M. K., eds.), Thomas, Springfield, (1987), pp. 225-236.
- 58) 小川徳雄, 朝山正巳, 伊藤嘉紀. 皮膚圧及びハリによる区域的発汗抑制. 自律神経, (1981), **18**, 246-253.
- 59) Ogawa, T., Asayama, M. and Miyagawa, T. Effects of sweat gland training by repeated local heating. *Jpn. J. Physiol.* (1982), **32**, 971-981.
- 60) Ogawa, T., Asayama, M., Sugeno, J., Fujimatsu, H., Miyagawa, T. and Terai, Y. Temperature regulation in hot-humid environments, with special reference to the significance of hydromeiosis. *J. Therm. Biol.* (1984), **9**, 121-125.
- 61) Ogawa, T. and Ohnishi, N. Trainability of sweat glands in the aged. In: *Milestones in Environmental Physiology* (Yousef, M. K., ed.), SPB Academic Publishing, the Hague, (1989), pp. 63-71.
- 62) Ogawa, T. and Sugeno, J. Pulsatile sweating and sympathetic sudomotor activity. *Jpn. J. Physiol.* (1993), **43**, 275-289.
- 63) 大西範和. 運動時の発汗活動に対する運動中枢活動の関与について. 愛知医科大学医学会雑誌, (1991), **19**, 593-603.
- 64) 大西範和, 小川徳雄. 運動開始時の深部体温の低下について. 体力科学, (1990), **39**, 626.
- 65) 大西範和, 小川徳雄, 朝山正巳, 加藤健一. 汗の拍出頻度よりみた運動時の発汗調節の検討. 体力科学, (1986), **35**, 354.
- 66) Robertson, M. T., Boyajian, M. J., Patterson, K. and Robertson, W. V. B. Modulation of the chloride concentration of human sweat by prolactin. *Endocrinology* (1986), **119**, 2439-2444.
- 67) Robinson, S. The regulation of sweating in exercise. In: *Advance of Biology of Skin*, Pergamon, New York, (1962), Vol. 3, pp. 152-162.
- 68) Saltin, B. et al. Body temperatures and sweating during exhaustive exercise. *J. Appl. Physiol.* (1972), **32**, 635-643.
- 69) Sato, K. The physiology, pharmacology, and biochemistry of the eccrine sweat gland. *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.* (1977), **79**, 51-131.
- 70) Sato, K. The physiology and pharmacology of the eccrine sweat gland. In: *Biochemistry and Physiology of the Skin* (Goldsmith, L. A., ed.), Oxford University Press, New York, (1983), pp. 596-641.
- 71) Sato, K. and Dobson, R. L. The effect of intracutaneous d-aldosterone and hydrocortisone on the human eccrine sweat gland function. *J. Invest. Dermat.* (1970), **56**, 337-339.
- 72) Sawka, M. N., Gonzalez, R. R., O'Donovan, B. H. and Nadel, E. R. Effects of sleep deprivation on thermoregulation during exercise. *Am. J. Physiol.* (1984), **252**, R462-R473.
- 73) Snellen, J. W. and Mitchell, D. Calorimetric analysis of the effect of drinking saline solution on whole-body sweating. Response to different volumes, salinities and temperatures. *Pflügers Arch.* **331**, 134-144.

- 74) Stolwijk, J. A. and Nadal, E. R. Thermoregulation during positive and negative exercise. *Fed. Proc.* (1973), **32**, 1607-1613.
- 75) Sugeno, J., Ogawa, T., Asayama, M. and Miyagawa, T. Characteristics of central sudomotor mechanism estimated by frequency of sweat expulsions. *Jpn. J. Physiol.* (1985), **35**, 783-794.
- 76) Takagi, K. and Sakurai, T. A sweat reflex due to pressure on the body surface. *Jpn. J. Physiol.* (1950), **1**, 22-28.
- 77) Tam, H.-S., Darling, R. C., Cheh, H.-Y. and Downey, J. A. Sweating response: a means of evaluating the set-point theory during exercise. *J. Appl. Physiol.* (1978), **45**, 451-458.
- 78) Timbal, J. M., Loncle, M., Boutellier, C., Marotte, H. and Colin, J. Comparison of mean body temperature during sweating at rest and during exercise. In: *New Trends in Thermal Physiology*, Masson, Paris, (1978), pp. 161-163.
- 79) Van Beaumont, W. and Bullard, R. W. Sweating: exercise stimulation during circulatory arrest. *Science* (1966), **152**, 1521-1523.
- 80) Verde, T., Shephard, R. J., Corey, P. and Moore, R. Sweat composition in exercise and in heat. *J. Appl. Physiol.* (1982), **53**, 1540-1545.
- 81) Wagner, J. A., Robinson, S., Tzankoff, S. P. and Marino, R. P. Heat tolerance and acclimatization to work in the heat in relation to age. *J. Appl. Physiol.* (1972), **33**, 616-622.
- 82) Wells, C. L. and Buskirk, E. R. Limb sweating rates overlying active and nonactive muscle tissue. *J. Appl. Physiol.* (1971), **31**, 858-863.
- 83) 山田誠二, 松原周信, 能勢博, 三木健寿, 伊藤俊之, 瀬尾芳輝, 平川和文, 森本武利. 発汗時補給水分の体温冷却効果. *日本生気象学会雑誌*, (1982), **19**, 45-51.
- 84) Yamazaki, F., Fujii, N., Sone, R. and Ikegami, H. Mechanism of potentiation in sweating induced by long-term physical training. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1994), **69**, 228-232.
- 85) Yamazaki, F., Sone, R. and Ikegami, H. Responses of sweating and body temperature to sinusoidal exercise. *J. Appl. Physiol.* (1994), **76**, 2541-2545.
- 86) Yoshida, T., Nakai, S., Yorimoto, A., Kawabata, T. and Morimoto, T. Effect of aerobic capacity on sweat rate and fluid intake during outdoor exercise in the heat. *Eur. J. Appl. Physiol.* (1995), **71**, 235-239.