

ヒトの発汗調節特性と部位差

近藤 徳彦* KONDO Narihiko*, 井上 芳光** INOUE Yoshimitsu**,
George HAVENITH***, Christiano A. MACHADO-MOREIRA****,
Nigel S. TAYLOR****

*神戸大学, **大阪国際大学, ***Loughborough University, ****University of Wollongong

1. はじめに

ヒトの発汗機能は他の動物と比較すると特異的に発達しており、これとヒトの進化が大きく関係することが人類学者により指摘されている。汗の蒸発は体から熱を奪うのには大変有効で、水1mlの蒸発により30℃付近では約0.58kcalの熱を奪い、100mlの水蒸発は体重70kgのヒトの体温を約1℃低下させることになる。特に、環境温が体温より高いときには、これによる熱放散が体温調節の唯一の手段となる。このような発汗は多くの情報により調節されており、また、体の部位によってもその反応が異なることが知られている。ここでは、ヒトの発汗調節の特性を紹介し、その上で、発汗反応の部位特性について説明したい。

2. 発汗調節特性

発汗調節を含むヒトの熱放散システムは図1に示すように、視床下部に存在する体温調節中枢がネガティブフィードバック機構を有している¹⁾。発汗反応を引き起こす要因として、体温や皮膚温などの温度に関係した温熱性要因 thermal factors とそれ以外の非温熱性要因 nonthermal factors が考えられ、特に、運動時の発汗反応は様々な非温熱性要因の影響を受ける。また、この非温熱性要因はフィードフォワードとして発汗反応に作用し、例えば、体温が大きく変化しなくても発汗を引き起こす。

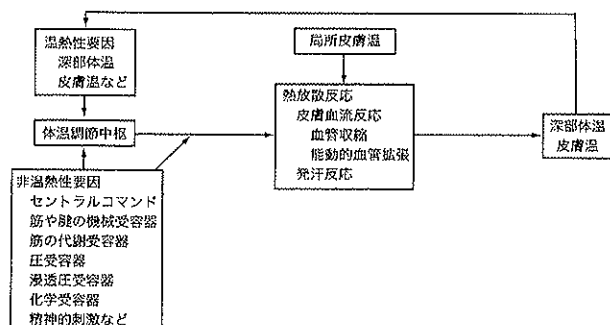


図1 発汗調節を含むヒトの熱放散システム¹⁾

(1) 温熱性要因

運動などによって体温が上昇するとそれに伴って発汗反応も大きく変化する。そのため、体温が上昇している条件下では、横軸に体温、縦軸に反応をとると両者の関係はほぼ直線になる。この関係は環境温（皮膚温）の影響を受け、その温度が上昇すると両者の関係は左方へ移動する。すなわち、環境温が上昇すると低体温で発汗反応が起きる。体温と発汗反応との間に得られる回帰直線が、横軸と交わる体温あるいは反応が引き起こされときの体温は、発汗反応の体温閾値を、また回帰直線の勾配は反応の感受性を示している。このように、発汗反応は体温や皮膚温に依存した反応を示すため、平均体温 mean body temperature（体温と平均皮膚温を重みづけして算出）に対する反応から発汗特性を検討する方法もある。

(2) 非温熱性要因

非温熱性要因として、セントラルコマンド（運動を意識的に行う際に高位中枢より発せられるもので、それが視床下部に影響する）、筋や腱の機械受容器および筋の代謝受容器、動脈圧・心肺圧受容器、浸透圧受容器、化学受容器、精神的刺激などが考えられる^{1,2)}。いずれの要因も熱放散反応に対して特異的に作用するのではなく、呼吸・循環反応などの他の調節機構にも影響するもので、運動時における各調節機構に関係する共通の要因である。非温熱性要因は発汗ばかりでなく、もう一つの熱放散機構である皮膚血流反応にも影響を及ぼす。例えば、運動にかかわる情報であるセントラルコマンドや、筋代謝受容器活動は皮膚血管拡張に対しては抑制的に、発汗活動には促進的に作用することが考えられ、熱放散量の増加という観点からこれらの入力は一反応に対して逆の効果を引き起こす。

高温下でマラソンなどの長時間運動が可能な動物は地球上ではヒトしかないことが指摘されており³⁾、これには発汗により運動時の体温上昇を抑えることは重要であるが、一方では、血圧を維持する必要も不可欠である。前述の非温熱性要因がその役割を担っているかもしれない。詳しくは参考文献1)を一読いただきたい¹⁾。

(3) 温熱性発汗と精神性発汗

温熱負荷に対して有効な熱放散である温熱性発汗は手掌と足底を除く全身の皮膚面に起こり、裸体安静時では約 30℃ 以上で体表面に現れ、最高発汗量は 1 時間に 2~3L になる。温熱性発汗は後述するように部位によって大きく異なる。一方、精神的緊張や情緒刺激によっても発汗が現れ、手掌や足底では常温下でも発汗がみられる。このようなことから、手掌や足底では温熱性発汗はみられないといわれていたが⁴⁾、このような部位でも温熱性発汗がみられることが近年報告されている。

3. 汗腺とその分布

汗腺は分泌様式によってエクリン腺とアポクリン腺に大別され、エクリン腺は毛包と独立して皮膚に開口部を有するが、アポクリン腺は汗がでる管が毛包に接続している(図2)⁴⁾。エクリン腺はヒトの体表のほとんど全面に分布しているが、ヒト以外のほとんどの哺乳類の一般体表面の汗腺はアポクリン腺である。ヒトのエクリン腺は体表面に広く分布し、速やかに汗を分泌する能力をもち、体温調節上重要な役割を果たす。一方、アポクリン腺は腋窩や会陰部などのごく一部に局在しており、その分泌速度も遅い。神経支配や分泌調節機序などから両者には明らかな相違がある。

ヒトのエクリン腺の総数は約 500 万個といわれており、その内、活動している汗腺(能動汗腺)の密度は手掌や足底が最も多く、ついで顔面の前額、頸部に多く、軀幹や四肢では少ない(図3)⁴⁾。また、汗腺の配置は部位によって異なり、手掌部(無毛部)では皺と皺の間に、それ以外の部位(一般体表面)では溝や溝と溝が交わったところに存在する(図4)⁵⁾。

4. 発汗の部位差

発汗特性に関して、久野の研究グループが多くの所見を残し、その中で発汗の部位差も指摘している。発汗は、前額、頸部、前胸部、背部、腰部、臀部、手背などで多く、上腕屈側、大腿内面、体幹側面などでは少ないことが報告されている⁴⁾。ここ数年、全身発汗量のマッピングに関する研究が実施され、発汗の部位差に関する所見が多く出されている⁵⁻¹¹⁾。図5はその一部を示しており⁶⁾、環境温 25℃、相対湿度 50% の環境試験室(気流 2 m/sec)で、心拍数が 125-135 と 150-160 拍/分になる 2 つの強度(最大酸素摂取量の 55% : 運動 I と 75% : 運動 II)のトレッドミル運動を実施したときの発汗量を、各部位に貼付した(5 分間)パットの重量変化で測定した結果である。それぞれの強度での体温は平均で運動 I が 37.7℃、運動 II が 38.1℃であった。また、被験者は日頃持久的な運動を実施している男性である。

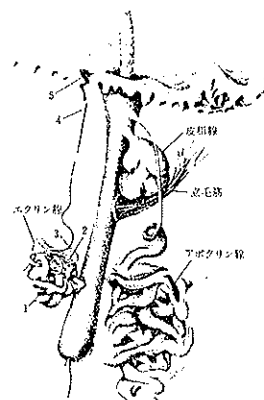


図2 汗腺とその他の皮膚にある器官の模式図⁴⁾

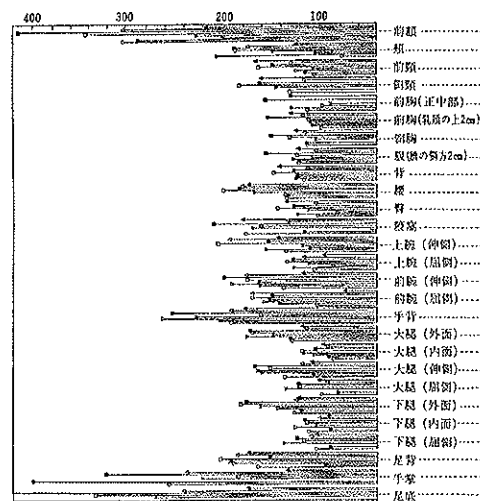


図3 単一面積(1 cm²)当たりの能動汗腺数⁴⁾

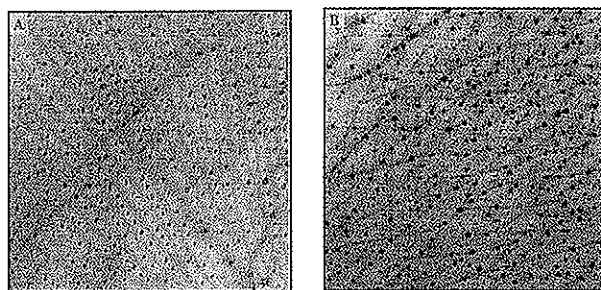


図4 無毛部(A)と有毛部(B)での汗腺の配置⁵⁾

運動 I での発汗量は大きな部位でみると体幹部背面 > 体幹部前面 > 頭部 > 脚前面 > 腕 > 脚後面、というような順となり、この順番は運動強度が強い運動 II においては、体幹部背面 > 頭部 > 体幹部前面 > 腕 > 脚前面の順になる。それぞれの部位内での変化では、頭部 + 頸部での発汗量は運動強度に関係なく、前額部 > 側頭部 > 頭部 > 頭頂部の順となり、運動 II になると前額部発汗量は多いが、それ以外での部位でのそれは運動 I の方の差が小さい。体幹部においてはいずれの運動強度も体幹中心部の発汗量が多く、特に、背面の脊柱付近、肩甲骨部および腰部でのそのが多い。上肢では全体的に前腕部の発汗量

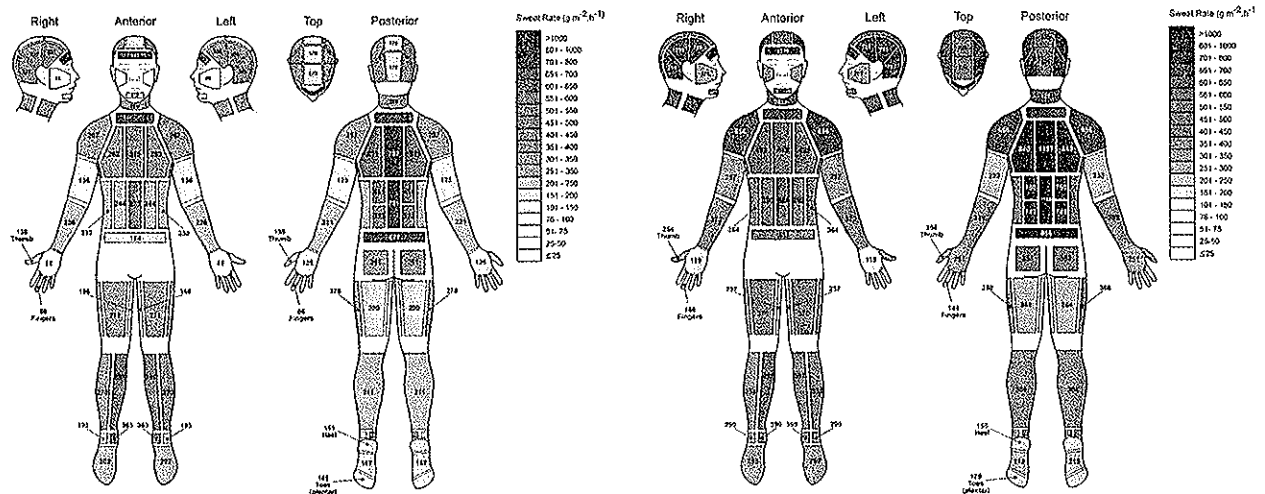


図5 2つの運動強度（左：運動Ⅰ，右：運動Ⅱ）に対する男性ランナーの発汗の部位差⁶⁾

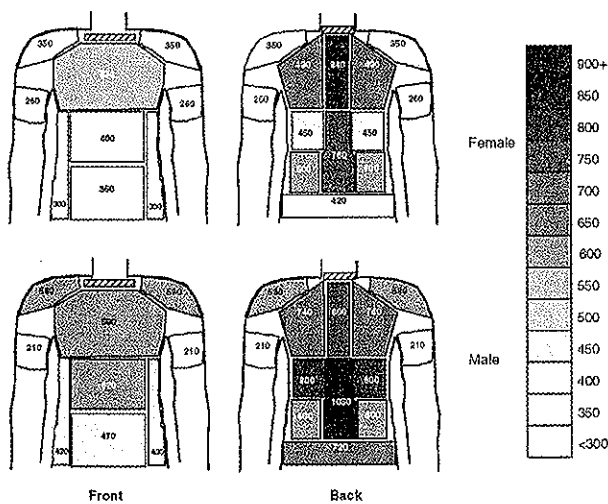


図6 男性と女性の運動時における上体発汗の部位差¹⁰⁾

が多く、運動Ⅱになると手甲部でのそれも多くなる。下肢では大腿・下腿とも前面での、側面では大腿外側での発汗が多く、運動Ⅱになると下腿背面の発汗量も増える。運動強度が強く、発汗量が多い場合の部位別発汗量を概観すると、前額と躯幹部背面の脊柱部での発汗量が際立って多い。これらの部位は高温下や運動時において脳温の過度の上昇を抑えるために有効な部位なのかも知れない。

図6は同じような体力（最大酸素摂取量が等しい）の男性と女性が心拍数150-160拍/分のトレッドミル運動を60分間行ったときの上体発汗の部位差を示したものである¹⁰⁾。この場合、体温は1.2-1.3℃増加した。体の前面では男性の発汗量は腹部・肩で、背部では中心部や側部で女性より多い。また、肩甲骨中央部は女性の発汗量が多い。女性の発汗量は男性より低いことが報告されており、その違いは図6のように部位によっても大きく異なる。

5. 精神的刺激に対する温熱性発汗部位と精神性発汗部位

前述のように発汗には温熱性発汗と精神性発汗があり、みられる部位がそれぞれ異なる。しかし、体温上昇が大きく、また、発汗量が多い場合には精神的刺激によって、全身での発汗増加が一様に起こることも報告された⁵⁾。図7は環境温36℃（相対湿度60%）の条件下でお湯が循環するスーツの着用により発汗を引き起こした場合の値（□）と、その状態で精神的刺激（暗算、痛みなど）を負荷した場合の値（■）を各部位で示している⁵⁾。精神的刺激が加わると測定された部位で発汗が増加し、そのうち70%の部位において有意な増加となった。これらのことは精神的刺激により一般体表面での発汗も影響を受けることを示唆している。また、温熱性発汗ばかりではなく、精神性発汗においても各部位内（例えば、頭部や手といった区分）の発汗量に違いがみられる。

6. 年齢に伴う発汗の部位差

子供は思春期を境に発汗量が多くなる。図8は思春期前の少年（11歳）と若年成人に28℃の環境下で最大酸素摂取量の35%、50%および65%の自転車運動を30分間負荷した場合の発汗量を示している¹²⁾。最大酸素摂取量の35%運動ではすべての部位で年齢差がみられないが、50%運動では全額・胸・大腿で、65%運動では前額・胸・大腿で、子どもの発汗量が若年者より少なかった。この差は能動汗腺数（活動汗腺数）より汗腺1個あたりの汗出力が子どもでは小さいことに起因している。これらの結果から、運動強度の増加に伴う発汗量の増加の部位差は、子どもと成人では異なることがわかる。

高齢者では発汗能力も低下する。図9は35℃環境下で60分間下肢温浴を行ったときの高齢者（70歳）と若

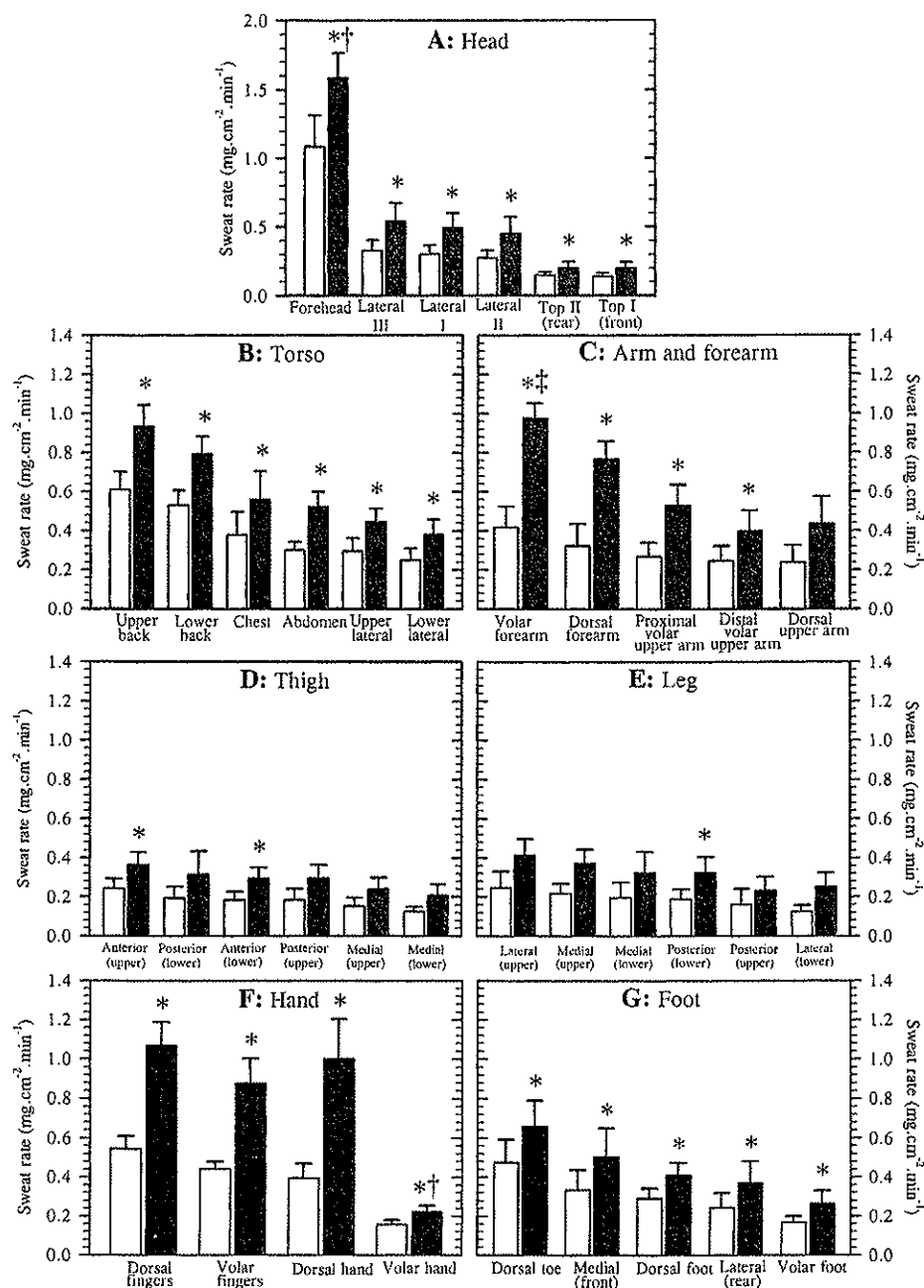


図7 精神的刺激に対する温熱性発汗と精神性発汗の部位別反応⁵⁾

* : 同部位での有意差 ($p < 0.05$), † : 他部位との有意差 ($p < 0.05$),

‡ : dorsal and distal volar upper arm との有意差 ($p < 0.05$)

7. おわりに

年者の発汗量を示している¹²⁾。高齢者の発汗量は背と大腿で若年者のそれより低く、特に、大腿での低い発汗量は65歳においてすでに認められているものである。図にあるように70歳時に若年者と同様であった胸・前腕の発汗量は75歳時には低下しており、その低下は胸のほうが大きかった。これらの結果から、井上は発汗機能の低下は、下肢→躯幹後面→躯幹前面→上肢→頭部、の順に起こることを指摘している¹²⁾。

今回は、発汗の部位差を中心にしながら、ヒトの発汗特性を紹介させていただいた。日本の発汗研究は久野の功績もあることから、世界でも注目されている。毎年、夏になると熱中症の問題が取り上げられてきたが、今年はそれ以外に、東北での大震災により電力消費の問題が大きな課題となっており、その解決が急務であると思われる。ヒトは優れた発汗機能により高温下でも体温を一定に保つことが可能となっており、この機能を促進できるような衣服の開発、あるいは、この機能をさらに高められるようなものの開発が進むことが期待される。さら

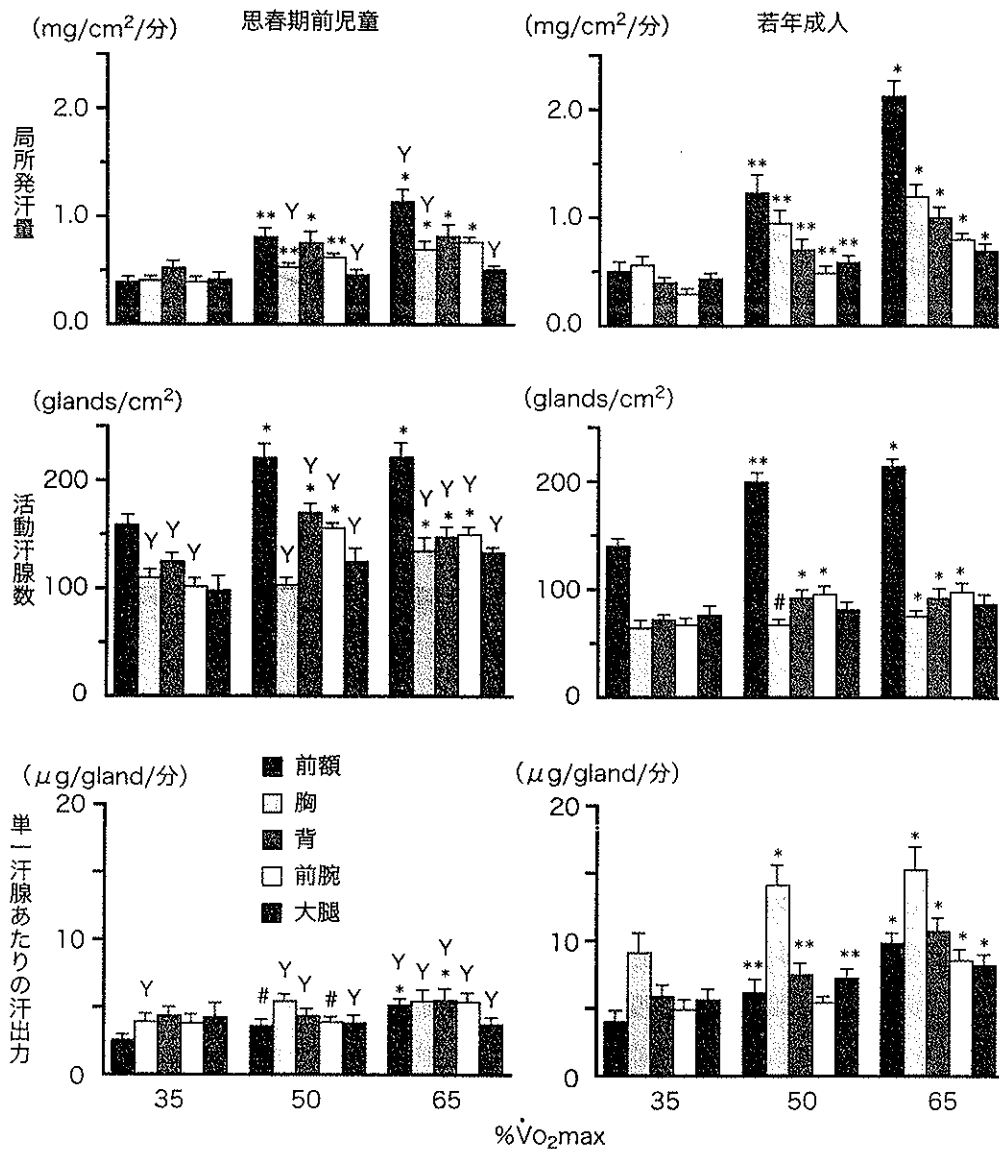


図8 運動時における思春期前の子どもと若年成人の発汗量の部位差¹²⁾
 *は35% VO₂ max 運動から, **は35%および65% VO₂ max 運動から,
 #は65% VO₂ max 運動から, Yは若年成人からの有意差 (p < 0.05)

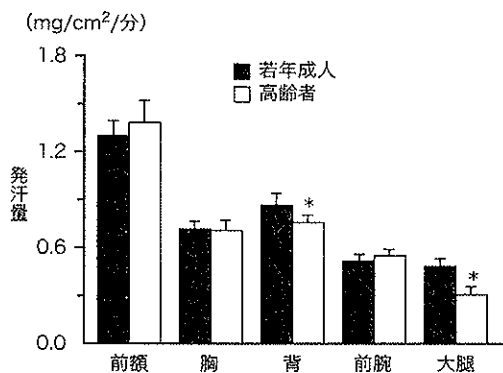


図9 高齢者と若年者の発汗量とその部位差¹²⁾
 * : 有意差 (p < 0.05)

参考文献

- 1) 近藤徳彦, 運動に関わる要因と熱放散システム, 体温Ⅱ-体温調節システムとその適応 (井上芳光, 近藤徳彦編), NAP, 2010, pp. 72-97
- 2) Kondo N, et al: Non-thermal modification of heat-loss responses during exercise in humans. *Eur J Appl Physiol*, 110, 2010, pp. 447-458
- 3) Bramble, D.M, et al, Endurance running and the evolution of Homo. *Nature*, 432, 2004, pp. 345-352
- 4) 小川徳雄, 3-2 蒸散性熱放散, 温熱生理学 (中山昭雄編), 1981, pp. 135-166
- 5) Machado-Moreira, C.A., The regional distribution of human sudomotor function and its neuropharmacological control. Doctoral thesis in University of Wollongong, 2011
- 6) Smith, C. J., Havenith, G., Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise-induced hyperthermia. *Eur J Appl Physiol*, 111, 2011, pp. 1391-1404
- 7) Machado-Moreira, C.A. et al, Local differences in sweat secretion during rest and exercise in the heat. *Eur J Appl*

に、今回の大震災は、環境のエコとともに、我々のからだの適応を利用したヒューマンエコも考える必要があるので、との問いを発信しているように思えてならない。

- Physiol*, 104, 2008, pp. 257-264
- 8) Machado-Moreira, C.A. et al., Sweat secretion from the torso during passively-induced and exercise-related hyperthermia. *Eur J Appl Physiol*, 104, 2008, pp. 265-270
 - 9) Machado-Moreira, C.A. et al., Sweat Secretion from Palmar and Dorsal Surfaces of the Hands During Passive and Active Heating. *Aviat Space Environ Med*, 79, 2008, pp. 1034-1040
 - 10) Havenith, G. et al., Male and female upper body sweat distribution during running measured with technical absorbents. *Eur J Appl Physiol*, 104, 2008, pp. 245-255
 - 11) Taylor, S.N. et al., The sweating foot: local differences in sweat secretion during exercise-induced hyperthermia. *Aviat Space Environ Med*, 77, 2006, pp. 1020-1027
 - 12) 井上芳光. 6-I 発育と老化. 体温Ⅱ-体温調節システムとその適応 (井上芳光, 近藤徳彦編). NAP, 2010, pp. 220-237

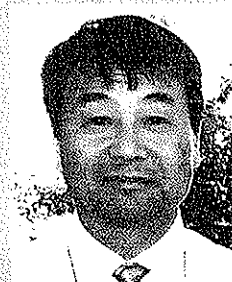
近藤 徳彦 (こんどう なりひこ)

筑波大学博士課程体育科学研究科修了後、神戸大学教育学部助手、発達科学部助教授を経て、現在、人間発達環境学研究科教授。専門は環境生理学・運動生理学で、ヒトの発汗調節にかかわる研究に携わっている。教育学博士



井上 芳光 (いのうえ よしみつ)

大阪教育大学修士課程修了後、神戸大学医学部衛生学教室へ。現在、大阪国際大学人間科学部教授。専門は環境生理学、応用人類学で、ヒトの体温調節の中でも、年齢、性差および性周期差の研究に携わっている。医学博士



George HAVENITH

アメリカの University of Pennsylvania で PD を行い、その後、イギリスの Loughborough University の人間工学系で教育・研究に携わる。現在、同大学 Design School の Environmental Ergonomics Research Centre の所長 (教授)。主な研究分野は人間工学・環境工学。PhD.



Christiano A. MACHADO-MOREIRA

ブラジルの Federal University of Minas Gerais で修士を取得後、オーストラリアの University of Wollongong の博士課程へ進学し、本年、PhD の学位を修得。全身の発汗量の部位差を含め、多くのストレスに対する発汗反応を検討している。



Nigel S. TAYLOR

カナダの Simon Fraser University で学位を取得後、様々な研究所で PD を行い、オーストラリアの University of Wollongong へ、現在、Centre for Human and Applied Physiology のコーディネータをしている（准教授）。Eur J Appl Physiol や Int J Biometeorology の編集委員などに携わり、発汗調節を中心に幅広い研究を行っている。PhD.



海外資料研究会入会ご案内

世界各国の繊維技術情報を

より早く、より広く、より正確に把握するために

海外資料研究会へご入会下さい

本学会海外資料研究会におきましては、海外各国から、我が国にもたらされる、繊維に関する数多くの情報を逐一検討し、それらを工程別、分野別に分類、整理の上、速やかに訳出し、「海外繊維技術文献集」を通じて定期的におとどけしています。

世界各国における研究状況、技術開発および市場動向等、いち早くその関連業界の流れを的確に把握するため、本研究会へのご入会をおすすめします。

事業内容

1. 海外文献、資料の蒐集整備

海外各国より毎月多数の文献、資料、所報、社報、カタログ等を入手しており、これらの整備充実をはかり、その内容を訳出して会員に紹介しています。

2. 海外繊維技術文献集（隔月刊）の刊行

毎月入手する多数の文献や資料等をそれぞれの分野の専門の委員によって、工程別に分類、整理の上、速やかに訳出して紹介する海外繊維文献抄録と、繊維並びに繊維機械に関する基礎的研究論文、実際研究および新製品や新しい技術の紹介等、比較的重要と思われるものについては全訳して紹介する海外繊維技術文献集を合冊して、機関誌として定期的におとどけます。編集、訳出、査読等は全国各大学、研究所並びに会社所属の専門の方々に依頼し、その正確流暢を期しています。

3. 海外文献紹介講演会、座談会の開催

海外文献に掲載されたもののうち注目すべきもの、あるいは海外で行われた講演会、シンポジウム並びに見本市等につき、随時紹介講演会、座談会を開催します。

4. 海外文献、資料の複写頒布

会員に限り、本会所有の文献、資料の複写頒布を行っています。

5. 申込方法

申込書をご請求下さい。見本誌を進呈しますので、ご希望の方はお申し出下さい。

部会費（割引購読料）年間 12,600円（消費税込み）

〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-8-4（大阪科学技術センタービル）

日本繊維機械学会 海外資料研究委員会 TEL. 06-6443-4691, FAX. 06-6443-4694