

寒さと運動・作業

平田 耕造¹⁾

1) 神戸女子大学家政学部

I. 寒さと運動・作業時の体温調節反応

寒冷地域の冬に屋外労働をする人々にとって、寒さによる影響はきわめて重大である。労働のパフォーマンスが低下し、不快感が増し、それに加えて凍傷の危険性もある。日常的に問題となることは、手や指の温度が低下するため複雑な手仕事が難しくなったり、道具がうまく使えなくなったりするために、作業中の安全性が損なわれることであろう。

最近スノーモービル使用者に寒冷障害が頻発していることが報告されている¹⁾。寒冷下での作業にはエネルギー消費量、着衣量のような個人的因子や、気温・風速のような気候因子などが影響することが知られている^{2,3)}。通常、深部体温は寒さの中での作業中でも上昇し、環境温には関係なく主にエネルギー消費量に比例して上昇する。また、寒冷時に必要な着衣量には、運動の強度も大きく影響することをHolmér⁴⁾は報告している。

寒冷条件で最もパフォーマンスに影響するのは、四肢の温度低下によることが報告されている^{5,6)}。低下した四肢の皮膚温は、運動を継続すると上昇に転ずる。この現象は手では容易に観察されるが⁷⁾、足では手よりもっと強い運動が必要であるといわれている⁸⁾。すなわち冷えきった手足を暖めるには、筋運動によって生じた熱産生が重要なのである⁹⁾。一般に寒冷作業中に余分の寒さから身を守るために、適切な衣服着用²⁾、寒冷暴露時間の制限¹⁰⁾、適当な暖房装置¹¹⁾などの方法が用いられている。その他に作業中に寒さから身を守るには、運動による熱産生の増加もまた大切な要因である。ここでは、作業中に寒さから身を守

るために、どの程度の運動が最も適しているか調査したVirokannas¹²⁾の研究を紹介する。

被験者は年齢、体格、体脂肪、最大酸素摂取量がほぼ同一のひと19人とし、3群に分けた。(1)重作業の国境警備スキーパトロール7人、(2)中程度の作業である道路工事に従事するひと6人、(3)軽作業の測量調査員6人について、冬の気候条件(気温+3℃~-27℃、風速0.2~4.3m/秒)での作業時の体温調節反応の観察実験を行った。

その結果、体温上昇はスキーパトロールで37.8℃、道路工事労働者で37.5℃、そして測量調査員では37.4℃であり、作業強度に比例して上昇したが環境条件には無関係であった。非常に厳しい寒さであるにもかかわらず、深部体温はいずれの条件でも低下することはなかった。測定日のうちマイナス15℃以下の非常に寒い日に、3種類の仕事に手足の局所温冷感が「cool」または「cold」と申告した割合を表1で比較した。スキーパトロールでは、手で4%、足では0%であった。道路工事の従事者において、手では29%であったのに対し足では35%であった。さらに測量調査員の手では58%、足では25%であった。すなわち、軽い労働ほど手足の冷え感を訴える割合は多いが、労働強度が高くなるにしたがって少なくなった。同時に測定した手足の皮膚温は局所温冷感とほぼ一致しており、労働の強さによって著しく異った(表1)。例えば、スキーパトロールでは手と指の皮膚温は26.4℃、27.8℃であったのに対し、測量調査員では極端に低くそれぞれ19.4℃と15.4℃であった。また足指でも同様であり、スキーパトロールでは25.7℃であったが、測量調査員では17.8℃

別刷請求宛先：平田 耕造

〒654 神戸市須磨区東須磨青山2-1 神戸女子大学家政学部 被服・運動生理学研究室

Reprint Requests to Kozo Hirata, Clothing and Exercise Physiology Laboratory, Faculty of Home Economics, Kobe Women's University, 2-1 Aoyama, Higashi-uma, Suma-ku, Kobe 654 Japan

表1 マイナス15℃以下の非常に寒い日において3種類の作業中の手足局所温冷感が「寒い」を申告した割合(%)と手足の皮膚温度(℃)

	温冷感 (%)		皮膚温 (℃)		
	手部	足部	手部	手指部	足指部
スキーパトロール (重作業)	4	0	26.4	27.8	25.7
道路工事作業 (中作業)	29	35	22.3	18.2	16.6
測量調査 (軽作業)	58	25	19.4	15.4	17.8

であった。一方、スキーパトロールの胸部皮膚温は31.7℃、測量調査員のそれは33.0℃であり、両者のあいだに差異は認められなかった。四肢末端部の皮膚温は労働強度によって大きく異なったにもかかわらず、体幹部の皮膚温にはそのような変化は観察されなかった。軽作業時には四肢末端で皮膚温が低く、温冷感でも「cool」、または「cold」を申告する割合が多かった。手足を冷却から保護するのに手足部を被って保温するだけでは不十分であるとKaufman¹³⁾が報告しており、極端な寒さから身を守るためには、ある程度強い運動・作業によって熱産生を増大させ、手足の皮膚血管拡張を引き起こし高い皮膚温に保つことが必要である。次に、運動・作業時における四肢部の皮膚血流調節とその影響因子について述べる。

II. 運動・作業時の皮膚血流量

1. 皮膚血管

熱放散量を調節する皮膚の血管系は大きく2つに分けられる。第1は細動脈—毛細血管—細静脈網であり、いわゆる「普通」の皮膚血管である。真皮にはきわめて多数の血管が存在し、互いに吻合して3~4層の血管床を形成し、最も浅い終末細動脈から係蹄状の毛細血管(直径約10 μ m)が乳頭下に入り込んでおり、ここから熱放散が行われる。

第2は動静脈吻合(AVA:arteriovenous anastomoses)である。手足や口唇、耳、鼻などの無毛部の皮膚にしか存在せず、反応様式も毛細血管と異なる点がある。汗腺や毛包のレベルよりやや浅いところで、細動脈—AVA—細静脈と直接短絡している。直径は開大時には約25~150 μ mにもなり、厚い筋層を伴っており多数の交感神

経終末がみられる。AVAは乳頭下毛細血管係蹄から供給される熱だけでは不十分なとき開大し、大量の暖かい血液を静脈叢に送り、そこから皮膚表面に熱を供給し放散している。

AVA血管は毛細血管に比べ開大時の直径が大きい。例えば、直径10 μ mの毛細血管と直径100 μ mのAVAでは、ポアズイユ(Poiseuille)の法則により同一血管長当たりの血流量は血管径の4乗に比例し、AVAの方が約10,000倍も大きいのである。CoffmanとCohen¹⁴⁾によると、手のAVA血流量は手全体の血流量のうち約80%にも達すると報告している。一方、手の毛細血管血流量は約20%にとどまるのである。

2. AVA血流による熱放散量増加

上肢末端にあるAVAが開大すると、上肢全体からの熱放散が亢進する。図1に示したように、手のAVA血流量の増加は手からの熱放散量を亢進する。さらに、AVAを通過した静脈血流は心臓に戻るとき表在の皮静脈を通り、前腕の皮膚温を上昇させることにより熱放散を亢進させる。前腕部の皮膚温上昇は、前腕における発汗量をも増加させるため、上肢全体からの熱放散の亢進に対してAVA血流量が寄与している。運動時のAVA血流量が前腕からの熱放散に寄与する割合を、室温20℃、湿度30%の環境で手首阻血実験にて測定した¹⁵⁾。その結果、前腕からの非蒸散性の熱放散量は96%増加し、汗による蒸散性熱放散量は64%の増加であった。また、両者を合わせた前腕からの全熱放散量では75%も増加させるのに貢献し、AVA血流量の熱放散亢進に及ぼす重要性が確認された。

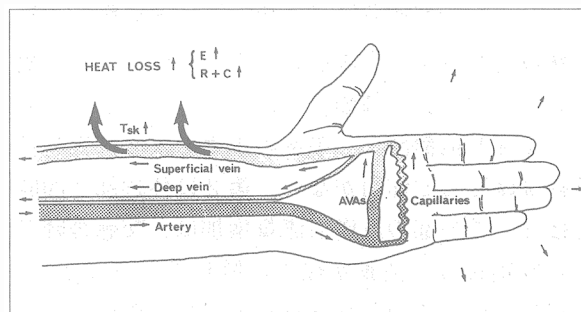


図1 AVA血流量増加が上肢全体からの熱放散量亢進に寄与するメカニズム

(Hirataたち、1989)

3. 皮膚血流量の調節

皮膚血流量の調節には、温熱因子と非温熱因子が関与する。温熱因子は核心温（深部体温）や皮膚温の変化として測定され、視床下部の体温調節中枢に入力される。特に核心温の効果は平均皮膚温の効果に比べ、およそ20倍も大きいことが知られている。したがって、皮膚血流量と温熱因子（核心温と平均皮膚温）の関係は図2のようになる。核心温が上昇すると、それに比例して皮膚血流量は増加する。それは環境温度が高いときや、衣服着用により平均皮膚温が高くなるほど、より低い閾値核心温から皮膚血流量の増加が起こることを示している。

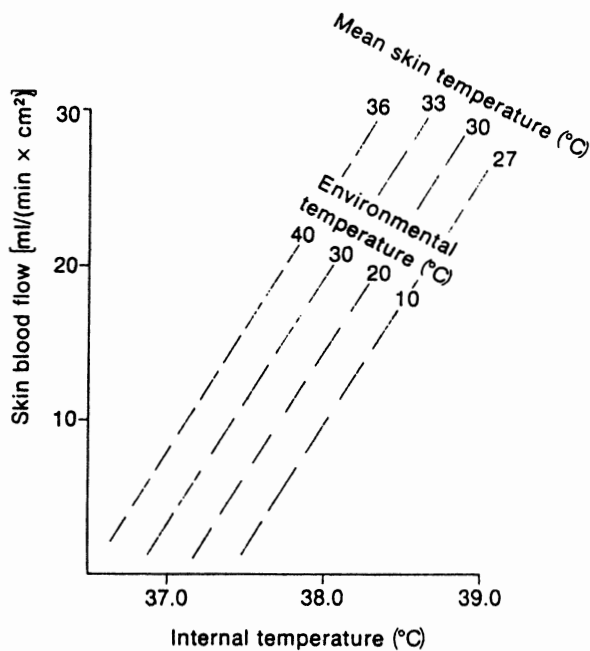


図2 核心温と皮膚血流量の関係におよぼす平均皮膚温（環境温）の影響
(Wengerたち、1975をNadel改変、1979)

熱負荷に対する皮膚血管反応は部位によって異なるが、大きく3種類に分けることができる。第1に頭部と前額部：この部の皮膚では血管作動性神経はほとんど作用がない。第2に体幹部と四肢近接部：この部の皮膚血流量増加は、交感神経の血管収縮神経の活動が徐々に解除されることと、汗腺を支配している交感神経末端から放出される伝達物質のVIP (Vasoactive Intestinal Peptide) などによる能動性拡張の2つの機序によるものと考

えられている。第3に四肢末梢部：手、足および耳、鼻、唇などの血管（主にAVA血管）はほとんどアドレナリン作動性交感神経により支配されている。この神経活動の増加は血管収縮を、減少は血管拡張をひき起こす。このように皮膚血流量は温熱因子による調節が主である。

4. 非温熱因子による影響

運動を開始すると、安静時とは異なり運動に関連する温熱以外の体内変化の生じることが知られている。運動を含む温熱以外の刺激で皮膚血流量に影響する因子は、総称して非温熱因子 (Non-thermal factor) と呼ばれている。

皮膚血流量の変化には、非温熱因子による抑制的な関与が報告されている（図3）。安静時と運動時の核心温に対する皮膚血流量の変化は異なる。皮膚血管の拡張し始める体温（皮膚血管拡張閾値体温）は運動時の方が高くなり、しかも皮膚血流量の増加はやや抑制される¹⁶⁾。この変化は温熱因子による皮膚血流量の増加が、非温熱因子によって抑制されていると考えられている。

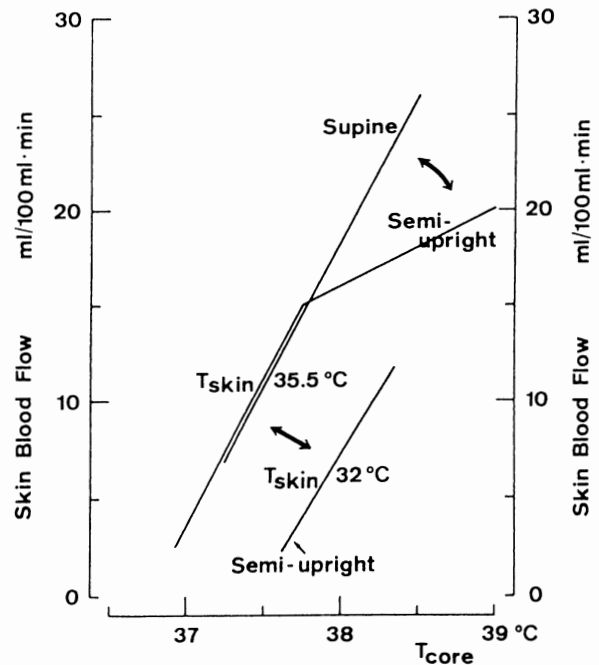


図3 核心温と皮膚血流量の関係におよぼす運動（非温熱因子）の影響

(Johnsonたち、1974)

運動時の皮膚血流量増加に対して、運動強度が影響するかどうか重要な問題である。前腕血流量についてSmolanderたち¹⁷⁾は、25℃の室温で15分間の自転車運動中に、50%~90% $\dot{V}O_2\max$ の範囲で実験し報告している。運動強度が高くなるほど、皮膚血管拡張閾値体温はより高温側に移行した。さらに、体温上昇に対する前腕血流量増加を示す直線の傾き(皮膚血流量増加の感度)は、運動強度の増加により低下傾向を示し80% $\dot{V}O_2\max$ 以上では明らかに低下した。

これに対し、我々の実験¹⁸⁾ではAVA血流量を含む指血流量は、運動強度が高くなると20~45% $\dot{V}O_2\max$ の範囲で皮膚血流量増加の感度は低下を示し、45% $\dot{V}O_2\max$ 以上では感度の更なる低下は認められなかった(図4)。また、血管拡張閾値体温には運動強度による影響は認められなかった。両実験から、前腕と指の血流量では運動強度による影響が異なることが判明した。一般の皮膚血流量に比べるとAVA血流量の方が、運動強度の増加に対してより低い運動強度から敏感に反応するようである。これはAVAの存在する皮膚の方が血管収縮性交感神経活動の反応性が高いことに起因すると考えられる。

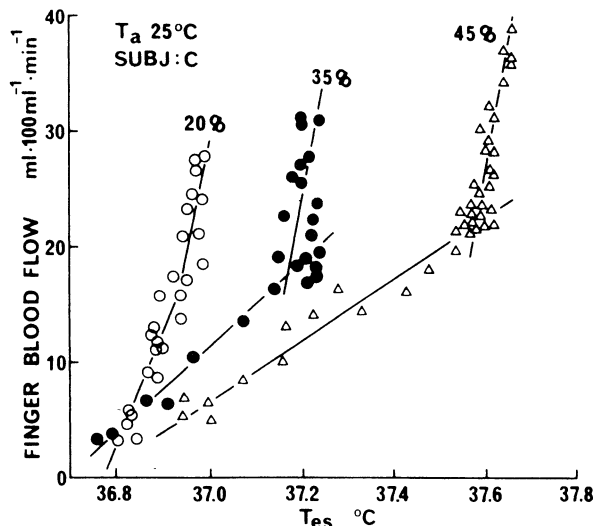


図4 AVA血流量を含む指血流量増加におよぼす運動強度の影響

(Hirataたち、1983)

Ⅲ. 結語

寒い環境でいろいろな強度の運動・作業を行う場合、手足では「寒さ」という温熱因子と「運動」という非温熱因子の両作用により、皮膚血管に収縮が起こりやすい状態である。運動が軽すぎると体温上昇が小さく、AVA血管を十分に拡張できないため手足の温度が低くなってしまう。これを防止するためには、血管拡張を促す程度の運動・作業による体温上昇が必要である。実際の生活の中では、運動と衣服や気候などの条件を組み合わせる考えなければならない。

文献

- 1) Virokannas H, Anttonen H : Risk of frostbite in vibration-induced white finger cases. *Arctic Med Res* 52 : 69-72, 1993
- 2) Lotens WA : Comparison of thermal predictive models for clothed humans. *ASHRAE Trans* 90 : 1321-1340, 1988
- 3) Holmér I : Assessment of cold stress. *Arctic Med Res* 50 [Suppl 6] : 83-88, 1991
- 4) Holmér I : Required clothing insulation (IREQ) as an analytical index of cold stress. *ASHRAE Trans* 90 : 1116-1128, 1984
- 5) Clark RE, Cohen A : Manual performance as a function of rate of change in hand skin temperature. *J Appl Physiol* 15 : 496-498, 1960
- 6) Bergh U : Human power at subnormal body temperatures. *Acta Physiol Scand* 478 [Suppl] : 1-39, 1980
- 7) Virokannas H, Anttonen H : Body heat balance reflected by skin temperature on the hand in light and heavy work in cold condition. *Arch Complex Environ Studies* 5 : 91-95, 1994
- 8) Hellstrom B, Berg K, et al : Human peripheral rewarming during exercise in the cold. *J Appl Physiol* 29 : 191-199, 1970
- 9) Rintamaki H, Hassi J, et al : Rewarming of feet by lower and upper body exercise. *Eur J Appl Physiol* 65 : 427-432, 1992
- 10) Forsthoft A : Arbeit in 28°C. *Arbeitsphysiologische Untersuchungen zur klimatischen Belastung bei Körperarbeit tiefen Umgebungstemperaturen unter*

besonderer Berücksichtigung der Kuhlansarbeit.
Dokumentation Arbeitswissenschaft. Ein Leser-Service der
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Ascheberg, Westfalen,
1982

- 11) Anttonen H, Niskanen J, et al : Prevention of adverse effects of cold on food processing workers by infrared heaters. In : Nielsen R, Jorgensen K (eds) Advances in industrial ergonomics and safety, Taylor and Francis, London, pp 369-376, 1993
- 12) Virokannas H : Thermal responses to light, moderate and heavy daily outdoor work in cold weather. Eur J Appl Physiol 72 : 483-489, 1996
- 13) Kaufman WC : The hand and foot in the cold. Phys Sportmed 11 : 156-158, 1983
- 14) Coffman J D, Cohen A S : Total and capillary finger tip blood flows in Raynaud's phenomenon. N Eng J Med 285 : 259-263, 1971
- 15) Hirata K, Nagasaka T, et al : Increase in evaporative and non-evaporative heat loss from the forearm depends on venous return from the hand during exercise. In : Thermal Physiology 1989(ed.J.B.Mercer),Elsevier Science Publishers B V (Biomedical Division), pp. 155-159, 1989
- 16) Johnson I M, Rowell L B, et al : Modification of the skin blood flow-body temperature relationship by upright exercise. J Appl Physiol 37 : 880-886, 1974
- 17) Smolander J, Saalo J, et al : Effect of work load on cutaneous vascular response to exercise. J Appl Physiol 71 : 1614-1619, 1991
- 18) Hirata K, Nagasaka T, et al:Cutaneous vascular tone during heat load modified by exercise intensity. J Therm Biol 9 : 117-120, 1984