

**動静脈吻合の体力医学的意義**  
**—局所加温による温熱皮膚血管収縮反応—**

金 沢 大 学 永 坂 鉄 夫  
(共同研究者) 神 戸 女 子 大 学 平 田 耕 造  
同 田 中 香 利  
金 沢 学 院 大 学 平 井 敦 夫  
金 沢 経 済 大 学 平 下 政 美

**Significance for Physical Fitness and Sports Medicine**  
**of Cutaneous Arteriovenous Anastomoses**  
**— Decrease in finger blood flow induced by local leg heating —**

by

Tetsuo Nagasaka

*Department of Physiology, School of Medicine, Kanazawa University*

Kozo Hirata, Kaori Tanaka

*Kobe Women's University*

Atsuo Hirai

*Kanazawa-gakuin University*

Masami Hirashita

*Kanazawa college of Economics*

**ABSTRACT**

To examine the significance for physical fitness and sports medicine of cutaneous arteriovenous anastomoses (AVA) in human extremities from a viewpoint of thermal physiology, 15 healthy women were participated as a subject. The effects of local heating by the leg-immersion in water bath on finger skin blood flow (mainly AVA flow) was studied at

the ambient temperatures ( $T_a$ ) of 25 °C (warm environment) and 28 °C (hot environment). In the warm environment, the temperature of the water bath ( $T_w$ ) was steadily raised from 28 °C to 41 °C in 37 min, and then kept at constant  $T_w$  of 41 °C for 33min. In the hot environment,  $T_w$  was steadily raised from 35 °C to 41 °C in 17 min and then kept at constant  $T_w$  of 41 °C for 43min. Simultaneous blood flow (BF) recordings from the finger and the forearm skin were made continuously using laser-Doppler flowmeter.

As  $T_w$  was raised in the warm environment, finger BF decreased for approximately 15 min (leg skin temperature of 34.5 °C to 40.0 °C) and then increased until end of the experiment. However, there was no decrease of finger BF in the hot environment. Heat-induced vasoconstriction (HIVC) was not observed in the forearm skin in both environments.

These results suggest that HIVC in the finger caused by local leg heating in the warm environment is controlled via the reflexive control mechanism and may be limited to AVA vessels in the finger skin.

## 要 旨

人の四肢末端の皮膚に存在する動静脈吻合 (AVA) 血管の体力医学的意義について、温熱生理学的観点から検討するために15名の健康な成人女性を被験者として研究を行った。環境温 25 °C (Warm) と 28 °C (Hot) の2環境で、手指の皮膚血流量 (主にAVA血流量) に及ぼす下肢温浴による局所加温の効果を調べた。Warm環境では、水温を37分間で28 °Cから41 °Cに上昇させ、その後33分間水温を41 °C一定に保持させた。Hot環境では、17分間で水温を35 °Cから41 °Cに上昇させ、その後43分間水温を41 °C一定に維持した。指と前腕の皮膚血流量をレーザードップラー血流計によって同時に連続測定した。Warm環境で水温が上昇したとき、指皮膚血流量は15分間にわたって減少を示した。この現象は温熱皮膚血管収縮反応 (HIVC) と考えられる。そのときの下腿皮膚温は34.5 °Cから40.0 °Cであった。その後、指皮膚血流量は実験終了まで増加し続けた。しかし、Hot環境では指皮膚血流量の減少は観察されなかった。また、前腕皮膚血流量では両環境条件でHIVCは認められなかった。これらの結果から、

Warm環境で下肢温浴による局所加温によって、指に認められたHIVCは反射性の機序によって調節されており、指のAVA血管に限定して発現したことが示唆された。

## 緒 言

筋収縮にともない著しく増加する産生熱量を、からだの核心部から環境へ放散するために、皮膚血管は拡張する。人の皮膚血管でも、とくに四肢末梢部の無毛部皮膚 (手足) や唇、鼻、耳介など顔面の一部の皮膚にのみ存在する動静脈吻合 (AVA: Arteriovenous Anastomoses) は、人の体温恒常性維持に重要な働きをする血管である。

四肢末端部のAVA血流量の増加は、前腕や下腿の皮静脈血流を介して近接部の皮膚温を上昇させ、熱移動に著しい影響を及ぼしていることが知られている。四肢部のサーモグラフィによる観察から、前腕の皮膚からの熱放散量の約1/2は手のAVAから帰還する静脈血流に依存していることが報告されている<sup>6)</sup>。AVA血流量が四肢全体からの熱移動に重要な働きをしており、その生理的意義が認められてきている。

人でAVA血管の存在する皮膚 (例えば手や足)

を、温暖な環境下で局所的に加温するとき、皮膚温が体温を越え39~41℃に達すると皮膚血流量の減少することが報告されている。このような皮膚血管の収縮は、温熱皮膚血管収縮反応（HIVC：Heat-Induced Vasoconstriction）と呼ばれており、AVA血管に選択的に惹起されると考えられている<sup>5,8,9)</sup>。この反応は体温より高い温度で、皮膚血管が拡張しては外界から生体内へ熱の流入を促進することになり、HIVCはこれを抑制するための生体防御反応であると考えられている。動物でも同様な報告がなされており<sup>3,7,17)</sup>、いずれも局所的な加温刺激により発現すると報告されているが、遠隔部位の皮膚に対する温熱刺激がHIVCに関与するか否かは不明である。もし、全身のあらゆる皮膚部位に加えられた温熱刺激がHIVC反応に関係するならば、体温の恒常性維持に非常に重要であり、体力医学的意義はきわめて大きい。

本研究は、局所性の温熱刺激によって生じる温熱皮膚血管収縮反応（HIVC）が、遠隔部位の皮膚温熱刺激によっても反射性に引き起こされるか否か明らかにし、その体力医学的意義について考察する目的で行った。

### 1. 実験方法

実験は身体に対する温熱負荷強度を変えるために、異なる二種類の環境条件と下肢温浴条件の組み合わせを用いて行った（実験1：Hot環境、および実験2：Warm環境）。実験条件の概要は表1に示した。

（実験1：Hot環境）

実験は、室温 $28 \pm 0.5$ ℃、相対湿度 $50 \pm 3$ %、気流 $0.2\text{m/sec}$ に調節された本学家政学部生活環境シミュレーター主室にて行なった。被験者は、20~24歳の健康な成人女性7名であり、身体的特性は身長で $160.6 \pm 5.7\text{cm}$ 、体重では $55.4 \pm 5.5\text{kg}$ 、体脂肪率は $23.5 \pm 3.6$ %であった。着用衣服は、

下着の上に、綿またはポリエステル100%の平織布より製作した、半袖ノーカラーブラウスとショートパンツの組み合わせとした。

実験手順：被験者は実験2時間前までに一定の軽食（おにぎり2個、茶200cc）を摂取し、実験室に来室した。実験前の食事、飲水状況や体調に関するアンケートを記入後、実験用衣服に更衣し、生活環境シミュレーターに入室した。座位安静状態で、各種測定装置を取りつけた。その後、測定開始15分前には2個穴を開けた水槽の蓋を通して、両下肢を水温35℃の水槽（ $292 \times 390 \times 415$  mm）内に浸漬し、各測定値の安定を確認したうえで計測を開始した。安静座位姿勢で、水温35℃を10分間保持した後、17分間で水温を41℃に上昇させた。その後同一水温を43分間保持して実験を終了した。計測時間は合計70分間であった。実験は7人の被験者が各3回ずつ実施し、計21回であった。

測定項目：測定項目は、皮膚温、直腸温、平均皮膚温、平均体温、心拍数、皮膚血流量および総発汗量とした。皮膚温（ $T_{sk}$ ）は、胸部、上腕部、大腿部、下腿部の計4部位とし、皮膚温用サーミス

表1 Hot環境とWarm環境における実験条件の概要

|              | 実験1：Hot         | 実験2：Warm        |
|--------------|-----------------|-----------------|
| 環境条件         |                 |                 |
| 温度 (°C)      | $28.0 \pm 0.5$  | $25.0 \pm 0.5$  |
| 相対湿度 (%)     | $50 \pm 3$      | $50 \pm 3$      |
| 風速 (m/秒)     | 0.2             | 0.2             |
| 下肢温浴条件       |                 |                 |
| 初期水温 (°C)    | 35              | 28              |
| 上昇水温 (°C)    | 41              | 41              |
| 初期水温浸漬時間 (分) | 10              | 10              |
| 水温上昇時間 (分)   | 17              | 37              |
| 水温保持時間 (分)   | 43              | 33              |
| 合計実験時間 (分)   | 70              | 80              |
| 被験者          |                 |                 |
| 人数 (人)       | 7               | 8               |
| 年齢 (才)       | 20-24           | 20-25           |
| 身長 (cm)      | $160.6 \pm 5.7$ | $160.6 \pm 4.3$ |
| 体重 (kg)      | $55.4 \pm 5.5$  | $51.1 \pm 4.5$  |
| 体脂肪率 (%)     | $23.5 \pm 3.6$  | $19.8 \pm 1.8$  |
| 着衣条件         |                 |                 |
| 上衣           | 半袖ブラウス          | 長袖ポロシャツ         |
| 下衣           | ショートパンツ         | ハーフパンツ          |

ター (SXX67, TECHNOLSEVEN, 横浜) を用い、サージカルテープで皮膚に固定して計測した。測定値はパーソナルコンピューター (PC9801DS, NEC, 東京) を介して30秒毎に連続測定し、記録した。その後、キャリブレーションによって算出した校正式に代入し、1分毎に解析処理した。4点の皮膚温より平均皮膚温 ( $\bar{T}_{sk}$ ) を以下の式<sup>14)</sup>にて算出した。

$$\bar{T}_{sk} = 0.3 \times (T_{CHEST} + T_{ARM}) + 0.2 \times (T_{THIGH} + T_{LEG})$$

深部体温の指標として直腸温 ( $T_{re}$ ) の測定を行なった。測定にはプレジジョンサーミスタプローブ (401J, 日機装 YSI, 東京) を用い、先端から10cmの位置にシリコンボールを装着し、直腸内に挿入した。解析処理は皮膚温と同様に行った。平均皮膚温と直腸温から以下の式<sup>4)</sup>を用いて平均体温 ( $\bar{T}_b$ ) を算出した。

$$\bar{T}_b = 0.2 \times \bar{T}_{sk} + 0.8 \times T_{re}$$

心拍数の測定には、パルスウオッチ (MRC-1200, 日本光電, 東京) を用いた。送信部ベルトは胸部、受信部は左手首に装着し、1分毎に記録した。その後、測定値はパーソナルコンピューター (PC9870DS, NEC, 東京) を介して30秒毎に連続測定し、解析処理した。

皮膚血流量の測定は、レーザードップラー血流計 (ALF-21, アドバンス, 東京) を使用し、左手示指末節掌側および左前腕部外側に血流プローブを両面接着テープにて貼付した。血流計からの出力はバイオバックシステム (MP100WS, 株式会社モンテシステム, 東京) を介し、パーソナルコンピュータ (Power Book 190 CS, Macintosh) により1秒毎に記録し、1分毎の平均皮膚血流量を求めた。

総発汗量は、実験前後に精密体重計 (KCC150 S, メトラー, 横浜) によって求めた体重減少量から算出した。無効発汗量は、実験前後の衣服重量差より求め、有効発汗量は総発汗量より無効発

汗量を減じて求めた。

#### (実験2: Warm環境)

実験は室温  $25.0 \pm 0.5$  °C, 相対湿度  $50 \pm 3$  %, 気流  $0.2$  m/sec に調節された本学家政学部生活環境シミュレーター主室にて行なった (表1)。被験者は、20~25歳の健康な成人女性8名であり、身体的特性は身長  $160.6 \pm 4.3$  cm, 体重  $51.1 \pm 4.5$  kg, 体脂肪率  $19.8 \pm 1.8$  % であった。着用衣服は、下着の上に長袖ポロシャツとハーフパンツの組み合わせで一定とした。

実験手順: 実験1とほぼ同様に実施した。被験者は実験2時間前までに一定の軽食 (おにぎり2個, 茶200cc) を摂取し、実験室に来室した。実験前のアンケート記入後、実験服に更衣し、生活環境シミュレーターに入室した。座位安静状態で、各種測定装置を取りつけた。その後、測定開始15分前に両下肢を水温  $28$  °C の水槽内に浸漬し、各測定値の安定を確認したうえで計測を開始した。安静座位で、水温  $28$  °C を10分間保持した後、37分間で水温を  $41$  °C に上昇させた。その後同一水温を33分間保持して実験を終了した。計測時間は合計80分間であった。実験は8人の被験者が各3回ずつ実施し、計24回であった。

測定項目: 測定項目は、皮膚温, 直腸温, 平均皮膚温, 平均体温, 心拍数, 皮膚血流量および総発汗量とした。皮膚温は、皮膚温用サーミスターを用い胸部, 上腕部, 大腿部, 下腿部, 左手示指掌面の計5部位とした。左手示指掌面を除く4点の皮膚温より、Ramanathan<sup>14)</sup> の式を用いて平均皮膚温を算出した。また、深部体温の指標として直腸温の測定を行なった。平均皮膚温と直腸温から、Hardy and DuBois<sup>4)</sup> の式を用いて平均体温を算出した。心拍数は、パルスウオッチを用いて毎分記録した。

皮膚血流量は、レーザードップラー血流計 (ALF-21, アドバンス, 東京) を使用前腕部と示指末節掌側の2部位に血流プローブを装着して

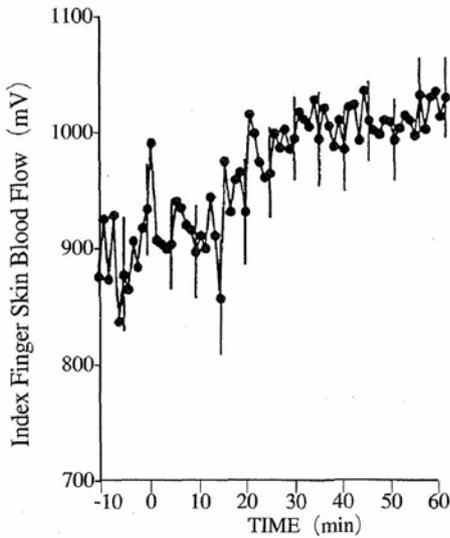


図1 Hot環境(28℃, 50%rh)における下肢温浴(35-41℃)時の示指皮膚血流量の変化. 平均値±標準誤差

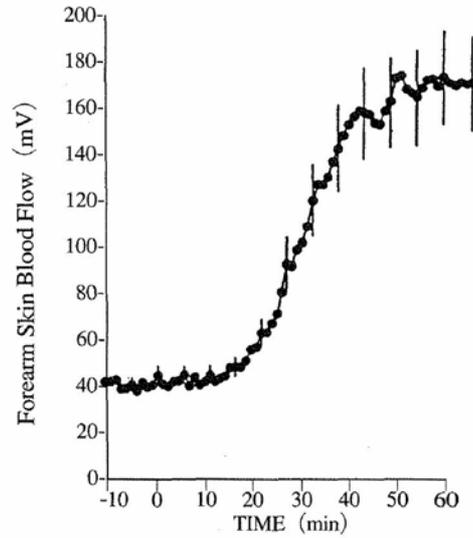


図2 Hot環境(28℃, 50%rh)における下肢温浴(35-41℃)時の前腕皮膚血流量の変化. 平均値±標準誤差

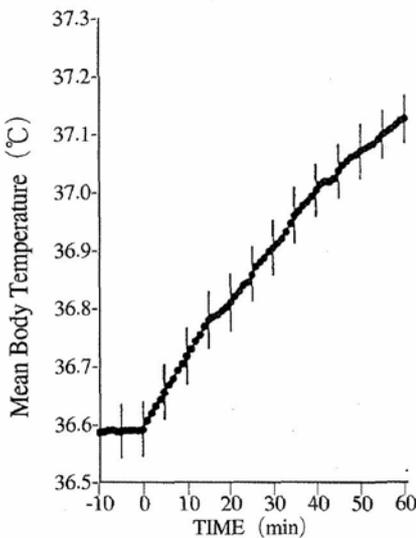


図3 Hot環境(28℃, 50%rh)における下肢温浴(35-41℃)時の平均体温(左)と平均皮膚温(右)の変化. 平均値±標準誤差

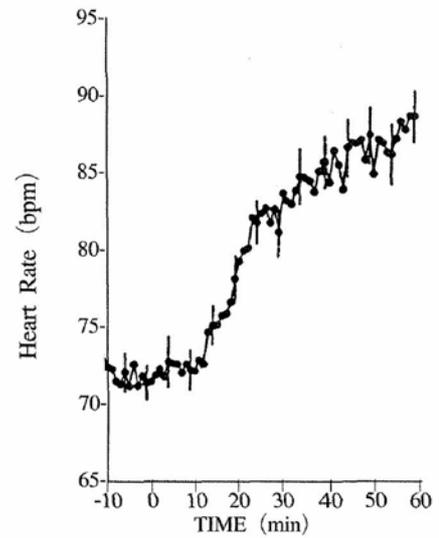
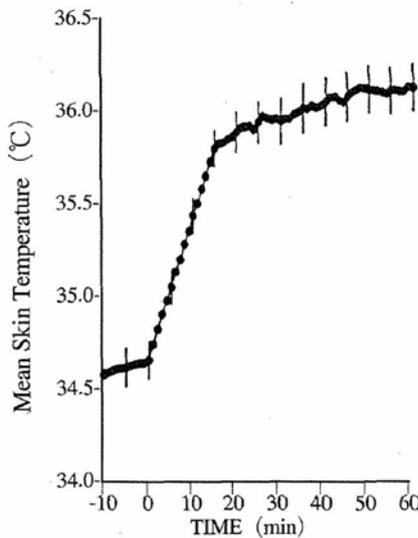


図4 Hot環境(28℃, 50%rh)における下肢温浴(35-41℃)時の心拍数の変化. 平均値±標準誤差

測定した。総発汗量は実験前後に精密体重計(KCC 150 S, メトラー, 横浜)によって求めた体重減少量から算出した。無効発汗量は、実験前後の衣服重量差より求め、有効発汗量は総発汗量より無効発汗量を減じて求めた。

## 2. 実験結果

### (実験1: Hot環境)

図1にはAVAを含む示指皮膚血流量の変化を平均値±標準誤差で示した。両下肢を35℃の水槽に浸漬中は900mV前後でほぼ一定を示したが、

水温上昇に伴い徐々に増加し、30分以降は1,000mVでほぼ一定値を示した。一方、AVAを含まない一般皮膚の代表として、前腕皮膚血流量の変化を示した(図2)。両下肢を35℃の水槽に浸漬中は約40mVでほぼ一定を示し、水温上昇に伴い15分目以降は急激に増加し、50分以降は約170mVで定常状態を示した。下肢温浴のあいだ、HIVCは指でも前腕でも観察されなかった。

図3左には全身の温熱的負荷を示す平均体温、図3右には平均皮膚温の変化を示した。平均体温は、両下肢を35℃の水槽に浸漬中36.59℃でほぼ

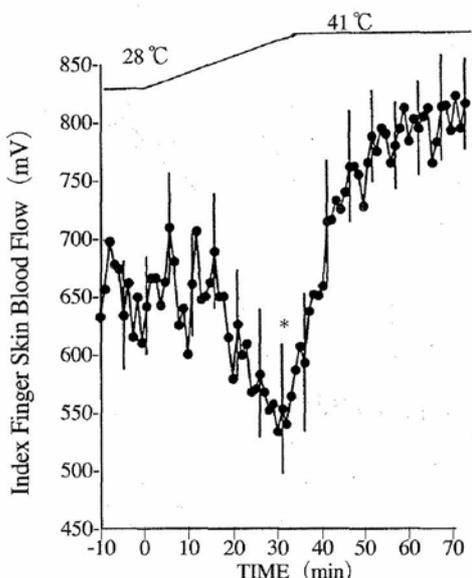


図5 Warm環境(25℃, 50%rh)における下肢温浴(28-41℃)時の示指皮膚血流量の変化. 平均値±標準誤差

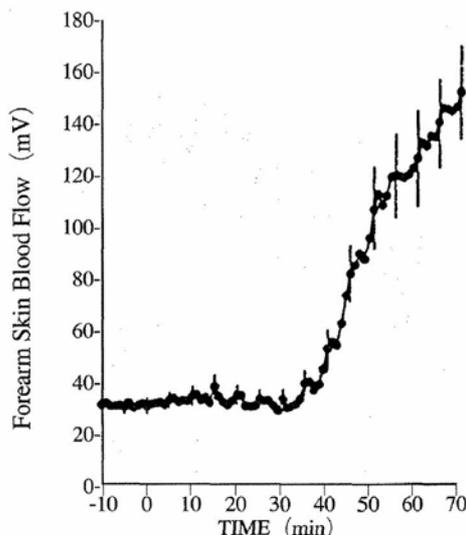


図6 Warm環境(25℃, 50%rh)における下肢温浴(28-41℃)時の前腕皮膚血流量の変化. 平均値±標準誤差

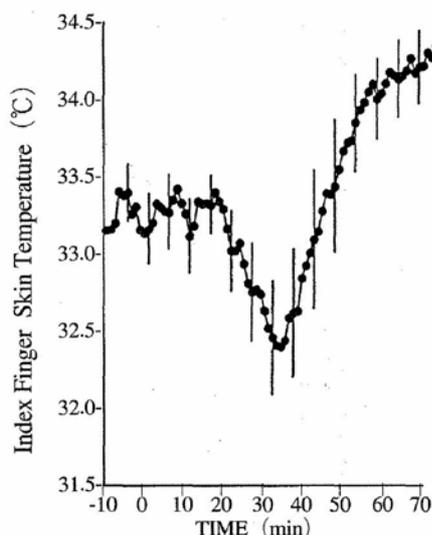


図7 Warm環境(25℃, 50%rh)における下肢温浴(28-41℃)時の示指皮膚温の変化. 平均値±標準誤差

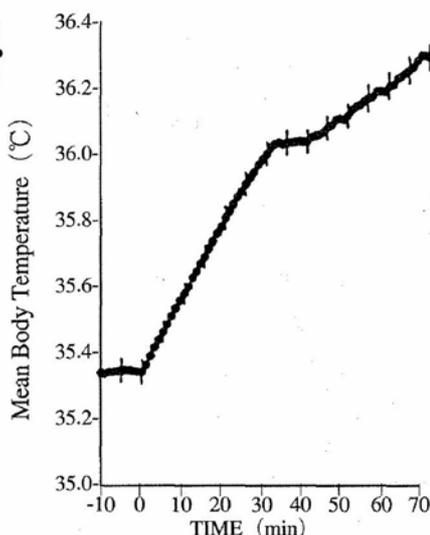
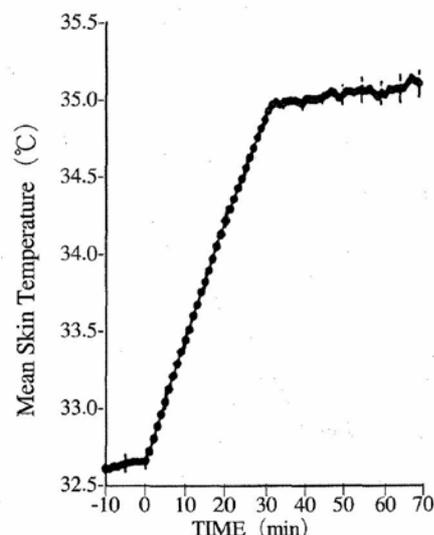


図8 Warm環境(25℃, 50%rh)における下肢温浴(28-41℃)時の平均体温(左)と平均皮膚温(右)の変化. 平均値±標準誤差



一定であったが、水温上昇に伴って経時的に上昇し、加温開始60分には37.21℃に達した。また、平均皮膚温は両下肢を35℃の水槽に浸漬中は、34.51~2℃でほぼ一定を示したが、水温上昇に伴い急激に上昇した。15分目には35.58℃に達し、その後は実験終了まで緩やかな上昇を示した。60分目には36.02℃でほぼ一定であった。直腸温は初期値37.09℃から、60分目には37.49℃まで上昇した。この間に0.40℃の上昇が観察された。

心拍数の変化を図4に示した。初期値は約70拍/分ではほぼ一定であったが、水温上昇に伴い14

分目より増加に転じ、終了まで増加し続けた。60分目には89拍/分に到達し、下肢温浴により19拍/分の増加を示した。

70分の実験中、総発汗量は155gであった。このうち、有効発汗量は118g、無効発汗量は37gであった。これらを時間当たりで求めると、総発汗量：2.21g/分、有効発汗量：1.69g/分、無効発汗量：0.53g/分となる。総発汗量のうち有効に蒸発した汗の割合を表わす発汗蒸発効率は、76%であった。

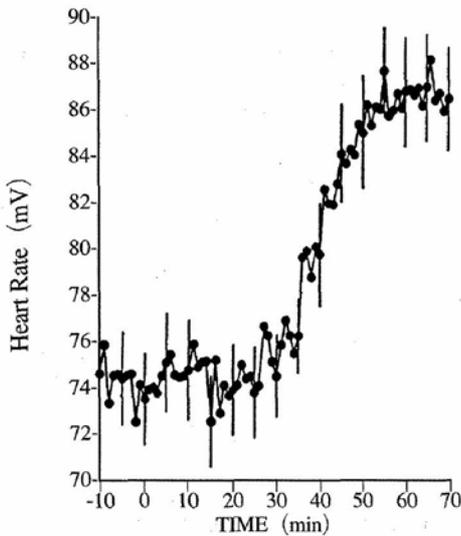


図9 Warm環境 (25℃, 50% rh)における下肢温浴 (28-41℃)時の心拍数の変化.平均値±標準誤差

(実験2: Warm環境)

図5にはAVAを含む示指皮膚血流量の変化を示した。両下肢を28℃の水槽に浸漬中は650mV前後ではほぼ一定を示したが、水温上昇に伴い15分目より30分まで減少し続け、HIVCが観察された。30分値は約550mVであり、0分値に比較し有意な低下であった ( $p<0.05$ )。その後、皮膚血流量は増加に転じ60分以降は実験終了までほぼ800mVで一定を示した。

一方、前腕皮膚血流量の変化を図6に示した。両下肢を28℃の水槽に浸漬中は約30mVではほぼ一定を示し、水温上昇に伴い35分目以降は増加に転じ、70分まで定常状態を示すことはなかった。最終値は155mVに達した。下肢温浴のあいだ、HIVCは観察されなかった。

図7には示指皮膚温の経時変化を示した。初期値は33.2~33.4℃ではほぼ定常であったが、下肢温浴の開始後18分目より32分目 (32.4℃)まで皮膚温は有意な低下を示した。その後、上昇に転じ70分目には34.3℃に達した。この皮膚温の変化は図5に示した皮膚血流量にきわめて類似していた。

図8左には平均体温、右には平均皮膚温の変化を示した。平均体温は、両下肢を28℃の水槽に

浸漬中、35.33℃ではほぼ一定であったが、水温上昇に伴って上昇し、加温開始70分には36.30℃に達した。また、平均皮膚温は両下肢を28℃の水槽に浸漬中、32.6℃ではほぼ一定を示したが、水温上昇に伴い急激に上昇した。35分目には35.0℃に達し、その後は実験終了までほぼ一定値を示し、70分目には35.1℃ではほぼ一定であった。直腸温は初期値36.74℃から、70分目には36.91℃まで上昇した。この間に0.17℃の上昇が観察された。

心拍数の変化を図9に示した。初期値は約74拍/分ではほぼ一定であったが、水温上昇に伴い35分目より増加に転じ、50分以降、終了までほぼ定常状態を示した。70分目には87拍/分に到達し、下肢温浴により13拍/分の増加を示した。

80分の実験期間中、総発汗量は112gであった。このうち、有効発汗量は99g、無効発汗量は13gであった。これらを時間当たりで求めると、総発汗量: 1.40g/分、有効発汗量: 1.24g/分、無効発汗量: 0.16g/分となる。有効発汗量/総発汗量から求めた発汗蒸発効率、88%であった。

### 3. 考 察

本実験で最も重要な知見は、実験2で実施した下肢温浴によりAVAを含む指血流量が、約15分間にわたり減少する変化が観察されたことである(図5)。この結果は手指における温熱皮膚血管収縮反応(HIVC)が下肢温浴によって引き起こされることを示したものであり、中枢を介する反射性の反応であることを示唆している。常識的な皮膚血管の性質と役割からみると、このHIVCは不思議な現象である。もしも、局所温の上昇に比例して皮膚血流量が増加するのみでは、温熱性発汗のない皮膚部位では外界から熱が生体内に流入して、高体温を促進しヒトの体温の恒常性維持にとって不利になる。HIVCはこのような条件の下で、外界から体内への熱移動を抑える末梢血管レベルでの補償機構と考えられ、体力医学的意義はきわ

表2 Hot環境とWarm環境における実験結果の概要

|         |           | Hot   | Warm  | △差    |
|---------|-----------|-------|-------|-------|
| 示指皮膚血流量 | HIVC反応    | NO    | YES   |       |
|         | 初期値 (mV)  | 900   | 650   | 250   |
|         | 最終値 (mV)  | 1000  | 800   | 200   |
|         | 変化分 (mV)  | 100   | 150   | -50   |
| 前腕皮膚血流量 | HIVC反応    | NO    | NO    |       |
|         | 初期値 (mV)  | 40    | 30    | 10    |
|         | 最終値 (mV)  | 170   | 155   | 15    |
|         | 変化分 (mV)  | 130   | 115   | 15    |
| 直腸温     | 初期値 (°C)  | 37.09 | 36.74 | 0.35  |
|         | 最終値 (°C)  | 37.49 | 36.91 | 0.58  |
|         | 変化分 (°C)  | 0.4   | 0.17  | 0.23  |
| 平均体温    | 初期値 (°C)  | 36.59 | 35.33 | 1.26  |
|         | 最終値 (°C)  | 37.21 | 36.3  | 0.91  |
|         | 変化分 (°C)  | 0.62  | 0.97  | -0.35 |
| 平均皮膚温   | 初期値 (°C)  | 34.51 | 32.6  | 1.91  |
|         | 最終値 (°C)  | 36.02 | 35.1  | 0.92  |
|         | 変化分 (°C)  | 1.51  | 2.5   | -0.99 |
| 心拍数     | 初期値 (bpm) | 70    | 74    | -4    |
|         | 最終値 (bpm) | 89    | 87    | 2     |
|         | 変化分 (bpm) | 19    | 13    | 6     |
| 総発汗量    | g/分       | 2.21  | 1.40  | 0.81  |
| 有効発汗量   | g/分       | 1.69  | 1.24  | 0.45  |
| 無効発汗量   | g/分       | 0.53  | 0.16  | 0.37  |
| 発汗蒸発効率  | %         | 76    | 88    | -12   |

めて大きい。HIVC反応は、これまでAVAの存在する皮膚部位の加温に限って生ずることが報告されていたが、下肢温浴のように遠隔部位の皮膚を加温したときにも反射性に手指にHIVCの発現することが確認され、全身のあらゆる温熱負荷時に起こる可能性が考えられるようになった意義は大きい。

手指にあるAVA血流量は、手全体の血流量の約80%にも達することが報告されており<sup>2)</sup>、深部と末梢の熱移動には最も重要な血管である。AVA血管の変化は、手からの熱の授受に関係するばかりでなく、表在性の皮静脈を流れて前腕など上肢全体からの熱の授受に関与するとの報告がある<sup>6)</sup>。それゆえ、HIVC反応は末端の皮膚に生ずるが、全身の体温恒常性に影響を与えるという体力医学的な基礎を確立した意義は大きいと考えられる。

我々は、これまでに人の皮膚を局所的に体温より高い温度にさらすと、AVAの存在する部位に限って皮膚血流量が減少することを報告してきた。

例えば、温熱環境(35°C-40%)下で被験者を椅座させ体熱平衡を得た後、手指、足趾等AVAの存在する皮膚を温水に浸漬し、35°Cから0.45°C/分の温度上昇率で2°C上昇させ、10分間保持する方法で2°C毎に43°Cまで上昇させたとき、水温が深部体温を越えて39°C~41°Cに達すると皮膚血流量が減少し、43°Cでは再び増加することを示してきた。この時、血圧は不変なので皮膚血流量の減少は、血管の収縮に起因するものである。それゆえ、この現象を温熱皮膚血管収縮反応(HIVC: Heat-induced vasoconstriction)と呼んでいる。しかし、このHIVCは低環境温時(20°C-40%)や、逆に高温高湿時(35°C-80%)では認められない。すなわち、HIVC発現には至適条件が存在するのである。前述の低環境温では、平均皮膚温が低いため皮膚血管に対する収縮作用が大きく、局所加温によるHIVCは発現しない。また、前述の高温高湿環境では、温熱負荷が大きいため皮膚血管に対する拡張作用が大きく、局所加温によるHIVCは観察されなかったものと考えられている。

本研究でも、下肢温浴による反射性のHIVCは、いずれの条件でも発現するわけではなかった。図1に示したように、環境温28°C、初期水温35°Cから41°Cに上昇させる下肢温浴では、示指皮膚血管にHIVCは観察しなかった。しかし、図5で観察されたように、環境温25°C、初期水温28°Cから41°Cに上昇させる温暖な刺激時には、HIVCが観察された。少なくとも後者の条件は、HIVC発現の至適条件であったと考える。両条件によって温熱生理的な項目にいかなる差異が生じたのか、結果の概要を表2に示した。皮膚血流量では指、前腕ともにHot環境では高値を示した。発汗量では有効発汗量、無効発汗量ともにHot環境で大きく、その結果合計した総発汗量でも大きかった。体温でも直腸温、平均体温、平均皮膚温いずれもHot環境で高値を示した。心拍数はHot環境では

最終値でやや高い傾向が見られたが、著明な差は認められなかった。いずれの項目でも実験1のHot環境では、実験2のWarm環境に比べ生体への温熱負荷が大きいいため血管拡張作用が強く、下肢からの温熱刺激が適当な温度まで上昇しても、血管収縮作用がマスクされてしまいHIVCが観察されないものと考えられる。とくに、図3と図8に示すように平均体温で比較すると、Warm環境でHIVCが観察されたときの平均体温は、35.7℃~36.0℃の間であった。しかし、Hot環境では平均体温は初期値から36.6℃もあり、HIVC発現の至適条件を越えていたものと推察される。本研究によってHIVCが中枢を介する反射性反応であることが明らかとなったので、今後はHIVC発現の至適条件を詳細に検討する必要がある。

Warm環境でHIVCが観察されたとき、下腿皮膚温は34.5℃であり、HIVCが終了し血管拡張に転じるのは下腿皮膚温が40.0℃に到達したときからであった。これまで報告してきた手足の局所加温では、局所皮膚温が深部体温を越えたときにHIVCが引き起こされたが、今回は下腿皮膚温が深部体温より2℃以上低い温度で発現した。なぜ深部体温より低い皮膚温でHIVCが発現したのだろうか。この理由として、まず温熱刺激を加えた皮膚面積の大きさが上げられる。本実験では両側の足部と下腿部を完全に浸漬する方法を採用しているため、体表面積の約20%に相当する皮膚の加温であった。これは既に報告した一側の手指を加温する実験に比べ、10倍以上大きい面積の皮膚を加温したことになる。

さらに、本実験では水温を毎分0.36℃の上昇率で下肢温浴しているため、下肢の温度感覚は水温上昇時にダイナミック反応が生じているものと推察される。その場合、実際的水温刺激より高い温度に相当する温度感覚として知覚されており、HIVC発現時の下腿皮膚温が深部体温より低かったことが説明される。手指を段階的に局所加温し

た既報の実験において、温水浸漬時の手指の温度感覚はいわゆるダイナミック反応を示し、水温を新しい高い温度に切り替えた直後から急激に熱さの申告レベルが上昇し、4~5分後水温が安定してからは、温度切り替え前よりは高いものの比較的低いレベルに落ち着いた。暗算中などにはこの温度感覚のダイナミック反応と血流量の減少の起こらない場合があった。このことは、HIVCが局所皮膚温度感覚の絶対レベルでなく、その上昇の速さにより強く関連して起こり、中枢の関与する反応であることを示すものである。以上のことから、本実験で下肢の皮膚温が深部体温より2℃以上も低い時点からHIVCが発現したのは、1) 10倍以上広い面積の皮膚に温熱刺激を加えていること、2) 水温上昇による温度感覚のダイナミック反応が重要な因子として作用したものと思われる。

最近、指の血流速度(AVA活動の指標)に対する局所加温の影響を観察した結果が報告されている<sup>1)</sup>。彼等は手の浸漬レベル以外はわれわれとほぼ同様な実験条件で手指の局所加温を行ったが、HIVCを再現することはできなかったと述べている。この結果は彼等の被験者(ノルウェー人)にとって、環境温35℃で片手を35℃の水槽に浸漬する条件は、気候順化の観点からHIVC発現の至適条件よりやや暑かったのではないかと推察される。しかし、菅原<sup>16)</sup>はドイツ人およびドイツ在住の日本人については、我々と同様の方法でHIVCが観察されることを報告している。人の気候順化あるいは温度適応とHIVCの関係については、今後の研究課題である。

HIVCの発現はAVAの存在する皮膚に限定されており、前腕のようにAVAの存在しない皮膚ではHIVCは観察されず、局所温の上昇に比例して皮膚血流量は増加し続ける。本研究でも図2と図6に示したように、前腕の皮膚血管にHIVC発現は認められなかった。この結果は、HIVCはAVA血管に限定されることを確認するものである。

著者らは毛細血管とAVAの血流変化を別々に測定するために、表層毛細血管の血流を計測するレーザードップラー血流計と、深部のAVAと毛細血管の血流量を総合して計測する静脈閉塞プレチスモグラフ法の二通りの測定法を併用して、同様の実験を行った結果を報告している<sup>5,9)</sup>。指を水槽に浸漬させて局所加温した結果、指の毛細血管血流量は前腕皮膚と同様に局所温上昇に比例して増加し、39~41℃でも減少することはなかった。しかし、静脈閉塞プレチスモグラフ法で測定したAVA血流を含む指の全血流量は、局所温39~41℃では有意な減少を示した。すなわち、皮膚温が体温を越える温度に加温されるとAVA血管が収縮し、血流量の減少を引き起こすことが判明した。本実験では半導体レーザーを使用したレーザードップラー血流計を用いており、しかもファイバー間距離の関係から既に報告した手指の実験に使用したレーザードップラー血流計(He-Ne)とは異なり、皮膚での測定深度が深くなるため(私信)、AVAの存在する皮膚に使用すると、毛細血管ばかりでなく一部はAVAの反応をも含むと考えられている。それゆえ、本研究における皮膚血流量減少は、前腕では観察されず指においてのみ認められることから、既報<sup>5,9)</sup>の結果と同様にAVAにおいて発現したものと推察される。

局所温の上昇による皮膚血流量の減少は、野性動物の四肢、尾、耳介等の血管においても観察されている。砂漠動物であるjack rabbitの耳介血管は、直射日光にさらされて耳介皮膚温が上昇するようになると収縮し、皮膚温が下降する日陰では逆に拡張する<sup>17)</sup>。実験的に体温より高い局所温に曝されたラットの尾<sup>13)</sup>やヒツジの後肢<sup>3)</sup>、カンガルーの尾や後肢<sup>11)</sup>でも、局所加温によりAVA血管が収縮する。さらに、皮膚ではないが体温調節に重要な働きをする、イヌの舌の血流も同様の変化を示す。舌の表面温度が30~40℃の間では、局所温度が上昇するにつれて舌の血流量が減少す

る。この反応に関与する血管もAVAである<sup>12)</sup>。

ラットでは外科的、あるいは薬物的に中枢からの交感神経活動を遮断しても、局所加温によるAVA血管収縮は残存するので、中枢作用はなく局所の温度作用のみで生じる反応であると考えられている<sup>15)</sup>。しかし、人では手指を39~41℃に局所加温したとき、手指の血流量は減少するが、このとき、実際に正中神経から記録した皮膚交感神経活動は明らかに増加した<sup>10)</sup>。人と動物の種の違いによるHIVC発現のメカニズムには差異が認めらる。さらに、本実験の結果が示すように、手から遠く離れた下肢部の皮膚を局所加温したときに、手指の皮膚血流量減少が認められたことは、人のHIVCは中枢で統合され、指のAVA血管を支配する皮膚交感神経により調節された体温調節性の反応であることが判明した。もしも、局所温の上昇に比例して皮膚血流量が増加するのみでは、体温より高温の物体から熱が生体内に流入して、高体温を促進することになる。人と動物で機序は異なっても、HIVC反応は体温より高い温度の外界から、熱を生体内に入れないための防御反応としてAVA血管を収縮させているものと考えられる。HIVC反応は生体の恒常性を維持するための重要な反応の1つである。HIVCと温度感覚との関連性も含め、運動鍛錬や温度適応による修飾作用の解明は今後の研究課題であろう。

#### 4. まとめ

体温より高い温度刺激から生体を防御するために、皮膚AVA血管に生ずる温熱皮膚血管収縮反応(HIVC)が、遠隔部位の皮膚に加えた温熱刺激によって反射的に引き起こされる反応であることを検証した。しかも、HIVC反応の発現には至適条件が存在することを確認した。皮膚のAVA血管で生ずるHIVC反応の体力医学的意義について考察した。

謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究に対し助成いただいた(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に感謝の意を表します。

文 献

- 1) Bergersen, T. K., Eriksen, M., and Walløe, L.; Effect of local warming on hand and finger artery blood velocities, *Am. J. Physiol.*, **269**, R325-R330 (1995)
- 2) Coffman, J. D. and Cohen, A. S.; Total and capillary finger tip blood flow in Raynaud's phenomenon, *N. Eng. J. Med.*, **285**, 259-263 (1971)
- 3) Hales, J. R. S., Jessen, C., Fawcett, A. A. and King, R. B.; Skin AVA and capillary dilatation and constriction induced by local skin heating, *Pflügers Arch.*, **404**, 203-207 (1985)
- 4) Hardy, J. D. and DuBois, E. F.; Regulation of heat loss from the human body, *Proc. Nat. Acad. Sci. (Wash)*, **23**, 624-631 (1937)
- 5) Hirata, K., Nagasaka, T., Nunomura, T., and Cabanac, M.; Local thermal sensation and finger vasoconstriction in the locally heated hand, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **58**, 92-96 (1988)
- 6) Hirata, K., Nagasaka, T. and Noda, Y.; Venous return from distal regions affects heat loss from the arms and legs during exercise-induced thermal loads, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **58**, 865-872 (1989)
- 7) Kronert, H., Wurster, R. D., Pierau, F. R. -K., and Pleschka, K.; Vasodilatory response of arteriovenous anastomoses to local cold stimuli in the dog's tongue, *Pflügers Arch.*, **388**, 17-19 (1980)
- 8) Nagasaka, T., Cabanac, M., Hirata, K. and Nunomura, T.; Heat-induced vasoconstriction in the fingers: a mechanism for reducing heat gain through

the hand heated locally, *Pflügers Arch.*, **407**, 71-75 (1986)

- 9) Nagasaka, T., Hirata, K., and Nunomura, T.; Contribution of arteriovenous anastomoses to vasoconstriction induced by local heating of the human finger, *Jpn. J. Physiol.*, **37**, 425-433 (1987)
- 10) Nagasaka, T., Hirata, K., Mano, T., Iwase, S. and Rossetti, Y.; Heat-induced finger vasoconstriction controlled by skin sympathetic nerve activity, *J. Appl. Physiol.*, **68**, 71-75 (1990)
- 11) Needham, A. D. and Dawson, T. J.; Influence of environmental temperature on the blood flow distribution in the red kangaroo *Macropus rufus*. In: *Thermal Physiology* (ed. by Hales, J. R. S.), Raven Press, New York, pp. 275-278 (1984)
- 12) Pleschka, K.; Control of tongue blood flow in regulation of heat loss in mammals, *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.*, **100**, 75-120 (1984)
- 13) Raman, E. C., Roberts, M. F. and Vanhuyse, V. J.; Body temperature control of rat tail blood flow, *Am. J. Physiol.*, **245**, R426-R432 (1983)
- 14) Ramanathan, N. L.; A new weighing system for mean surface temperature of the human body, *J. Appl. Physiol.*, **19**, 531-533 (1964)
- 15) Sakurada, S., Shido, O. and Nagasaka, T.; Mechanism of vasoconstriction in the rat's tail when warmed locally, *J. Appl. Physiol.*, **71**, 1758-1763 (1991)
- 16) 菅原正志; ドイツ人とドイツ滞在日本人の手指における寒冷血管拡張反応と温熱血管収縮反応, *体力科学*, **46**, 221-228 (1997)
- 17) Schmidt-Nielsen, K., Dawson, T. J., Hammel, H. T., Hinds, D. and Jackson, D. C.; The Jack Rabbit - a study in its desert survival, *Hyalradets Skrifter*, **48**, 125-142 (1965)