

総説

動静脈吻合 (AVA) 血流と四肢からの熱放散調節

Blood Flow through Arteriovenous Anastomoses (AVA) and Regulation of Heat Losses from the Extremities in Human

平田 耕造

Kozo Hirata

神戸女子大学家政学部

Faculty of Home Economics, Kobe Women's University

(受付 2016年3月7日 / 受理 2016年3月17日)

本研究は熱負荷時に手から還流する皮静脈血流が、どの程度前腕からの蒸散性 (E) 及び非蒸散性 (R+C) 熱放散量に影響するか明らかにすることを目的とした。両腕は、一側ずつ手血流量と手からの還流静脈血を手首のカフ加圧 (250 mmHg) により 30 分間遮断する加圧側としない対照側とした。食道温が 0.82°C 上昇する間、手の血管拡張後、対照側の前腕皮膚温は 3.2°C 上昇したが、加圧側では上昇が認められなかった。これに伴って、対照側の前腕発汗量は 0.21 units まで増加したが、加圧側では 0.13 units に留まった。これらの結果から、手の血管拡張による AVA 血流量の増加は、前腕の発汗量増加と皮膚温の上昇による熱放散量亢進に著しく寄与することが判明した。

キーワード：動静脈吻合 (AVA)、手血管拡張、前腕熱放散量、表在性皮静脈血流、局所発汗量

The aim of this study was to investigate to what extent venous blood flow from the hand affects evaporative (E) and non-evaporative (R+C) heat losses from the forearm during heat load. Blood flow to and venous flow from the hand were occluded at the wrist for 30 min with cuff (5 cm width) at a pressure of 250 mmHg. Blood circulation in the control hand was not disturbed. After hand vasodilation, forearm skin temperature increased by 3.1°C on the control side but remained at rest value on the occluded side, with an increased esophageal temperature averaging 0.82°C. Forearm sweat rate at the end of heat load on the control sides was 0.21 units significantly higher than on the occluded side (0.13 units). These results clearly show contributes to the increase in forearm sweat rate and skin temperature after hand vasodilation (mainly through arteriovenous anastomoses: AVA) during heat load.

Key words: AVA, hand vasodilation, forearm heat loss, Superficial venous blood flow, Local sweat rate

1. はじめに

核心温 (体温) は恒常性を維持するために様々な変動が存在する。日内変動では、午後から夜に

かけて高く、夜から早朝にかけて低下し、再び午前中から午後にかけて上昇するという二相性の変化を示すことが知られており、その原因は、主に四肢部からの熱放散量の変化によるのである

(Aschoff and Heise, 1972). 図1に示されるように、夜間から早朝にかけて核心温(直腸温)の低下を引き起こすのは、四肢末梢部、特に指尖部、手掌部の皮膚温上昇、皮膚血管コンダクタンス(皮膚血管拡張の指標)の著増による熱放散量の亢進に起因することが分かる。これに対し、胸部など体幹部では、皮膚温、皮膚血管コンダクタンスの挙動は四肢部とは著しく異なり、むしろ核心温の変動と類似している。すなわち、核心温が高い時間帯には変化は小さいが皮膚温、皮膚血管コンダクタンスが高く、夜間から早朝にかけて低下するという、四肢部とは反対の動きを示している。

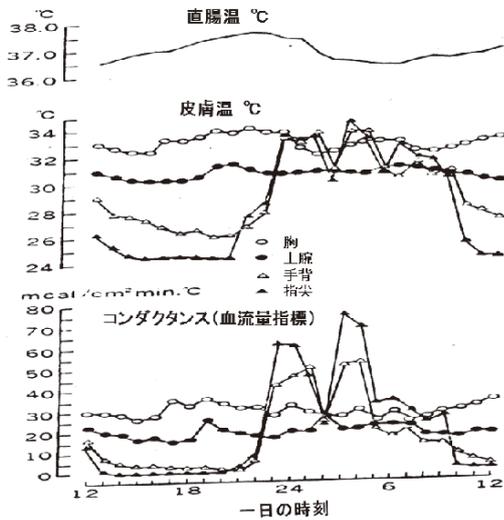


図1 直腸温、皮膚温、コンダクタンスの日内変動 (Aschoff and Heise, 1972 より引用)

すなわち核心温の日内変動に能動的に関与しているのは、皮膚温や皮膚血管コンダクタンス、皮膚血流量 (Smolander *et al.*, 1993) の変化に伴う皮膚からの熱放散反応であり、これに重要な皮膚部位は、体幹部よりむしろ四肢部であることが示されている。

2. 四肢部からの熱放散はどれほど有効か

四肢部からの熱放散反応を積極的に調節する結果として核心温の日内変動は生じているが、四肢部からの熱放散がどれほど有効なものであろうか。四肢部と体幹部の皮膚では、同じ面積であっても熱放散調節、すなわち体温調節への有効性に違いがあるのか否か明らかにする必要がある。そこで同一素材で被覆面積も同一であるが、被覆部位の異なる衣服を

作成して、上述の問いに対して実験的に明らかにすることを試みた(姫野, 1997; 田村ほか, 2005)。

図2に示すように、主に上肢部、フレンチ袖で肩から両腕・手を露出し、その他の皮膚を被覆した衣服Aと、四肢を完全に覆い、体幹部の背面及び上胸部を露出した衣服Bを用意した。衣服A・Bの被覆面積は体表面積の74%(露出部26%)である。この衣服A・Bを着用して7人の被験者に相対的に同一となる自転車運動負荷を1時間行った時の直腸温変化を図3に示した。60分目の直腸温は衣服A(上肢部露出)では平均で37.88°C、衣服B(体幹部露出)では38.14°Cまで上昇し、両者間には0.26°Cもの有意な差が認められた。また平均体温でも同様な傾向が示され、衣服A(上肢部露出)では37.43°C、衣服B(体幹部露出)では37.63°Cであり、上肢部露出の方が0.20°C有意に低値を示した。

これらの結果から、被覆(露出)面積が同一であってもA・B両衣服着用により核心温に差が生じたのは、上肢部を露出する方が体幹部を露出するより熱放散量が高く亢進することに起因することが示された。

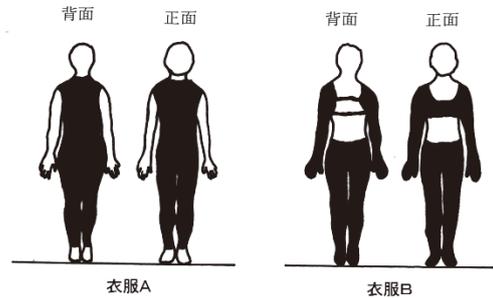


図2 被覆部位の異なる実験用衣服

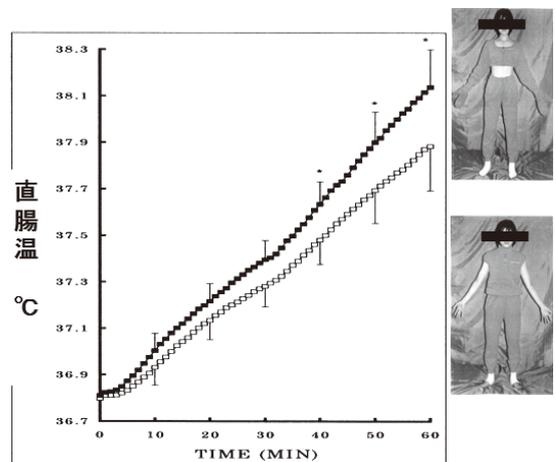


図3 衣服別自転車運動負荷時の直腸温変化 (姫野, 1997 より抜粋)

3. 四肢部の皮膚 AVA 血流動態の観察

四肢部の皮膚が体幹部に比べて熱放散に適しているのはどのような理由からであろうか。第一に形態の違いが考えられ、容積に対する表面積比が大きい場合、熱放散には有効となる。人の体幹部の表面積:容積比を 1 とした場合、腕は 5 倍、手は 10 倍、手指は 22 倍、足趾では 69 倍も大きいことが知られている (Carlson and Hsieh, 1970)。このように体幹部より四肢部で、特に末梢部ほど容積に対する表面積比が著しく大きいため、熱放散に有用である。

第二に皮膚血管であり、四肢末端部の皮膚に存在するが体幹部皮膚にはないものとして動静脈吻合 (Arteriovenous Anastomoses: AVA) 血管がある (Clara, 1956; Hales, 1984; Sherman, 1963)。これは顔面の一部の皮膚にも存在するが、形態や調節反応等が一般の皮膚血管とは著しく異なることが知られている (Hales *et al.*, 1984)。

ヒトの皮膚では、手や足などの四肢末梢部や耳、唇など特定の皮膚部位に AVA 血管が多数存在し、解剖学的な構造が毛細血管とは異なっている。例えば、一般の皮膚では表皮の厚さが約 0.2~0.4 mm あり、その下にある真皮の乳頭下血管網から乳頭毛細血管が出て、乳頭内で毛細血管係蹄を作っている。AVA 血管は細動脈と細静脈の間に、極めて厚い 40~60 μm の平滑筋壁をもち、コイル状に巻いて存在する。AVA の数は指爪床部では 1 cm^2 当たり 600、手掌・足底や小指球では 100 も存在するといわれている (Popoff, 1934)。AVA のサイズは、内径では 10~150 μm 、血管の長さは 200~500 μm であり、深さはやや深く、ほぼ汗腺と同様、皮膚表面から約 1 mm の深さに位置するといわれている (Nelms, 1963)。AVA 血管には多数の血管収縮性交感神経末端の存在が報告されており (Donadio *et al.*, 2006)、血流量が増加する場合には上述の交感神経活動の抑制による受動的血管拡張に依存することが知られており、一般の皮膚血管のように汗腺活動と連動した能動的血管拡張 (Fox and Hilton, 1980; 平田, 1995) は関与しない。

AVA 血管は毛細血管に比べて拡張時の内径が著しく大きいため、核心部の熱を皮膚表面へ運び出し環境へ放散するために極めて重要な働きを

していることが、指摘されている (Molyneux, 1977)。ポアズイユの法則として知られているように、圧力差が一定の場合、単位時間に流れる液体の量は管の半径の 4 乗に比例し、長さおよび粘性に反比例する。すなわち、口径が 2 倍の管は 16 倍も多く液体を流すことができるし、口径が半分になれば流量は 1/16 に激減することを示している。

この法則を AVA 血管と毛細血管に当てはめて考え、拡張した AVA 血管の平均径 100 μm は、毛細血管の平均径 10 μm に比べて 10 倍大きいため、ポアズイユの法則により単位長さ当たりの血流量は AVA 血管が 10,000 倍も大きいことになる (Molyneux and Bryden, 1981)。このため、AVA の存在する部位の皮膚血流量は他の部位に比べ著しく大きい。指血流量を静脈閉塞プレチスモグラフィ (Whitney, 1953) で測定した例では、暑熱時に拡張している状態での血流量は 100 $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot 100 \text{ml}^{-1}$ 以上にも増加するが、AVA の存在しない皮膚の血流量は指血流量の約 1/10 程度と少ないことから、いかに AVA 血管を流れる血流量が多いのかが分かる (永坂, 1993)。Coffman と Cohen (1971) の報告によると、手全体の血流量のうち、AVA 血流量は約 80% にも達し、残りが毛細血管血流であることが知られている。

このように AVA 血管の拡張時には皮膚血流量が著しく増加するため、図 1 に示した日内変動において核心温の低下開始時には、四肢末端の手・指皮膚温は約 10°C もの急激な上昇が示され、熱放散の著増を惹起している。

4. AVA 血管からの還流皮静脈血による熱放散

上肢末端の手指部に存在する AVA 血管を通過した血液は、手指部からの熱放散を著しく増加させたあと、腋窩静脈をとおり心臓へ戻る。Aulick and Robinson (1981) は 1 時間のトレッドミル走行運動中の腋窩静脈血液温と指皮膚温変化の関係を報告している (図 4)。AVA 血流量の増加に伴い指尖部皮膚温の上昇が始まると、腋窩静脈血液温は著しく低下することから、AVA 血管の拡張に伴い、上肢部からの熱放散量が著増し腋窩静脈血液温が低下した結果であることが示された。腋窩静脈血液温と指尖皮膚温は鏡像を描き、指尖

皮膚温の上昇時には腋窩静脈血液温は低下するが、指尖皮膚温の低下時には反対に上昇している。

しかし、これらの変化は AVA 血管の拡張に伴い、手指部からの熱放散量促進のみで説明するには、腋窩静脈血液温の低下が大きすぎるようである。すなわち、両温度の関係が示唆することは、手指部からの熱放散ばかりではなく、AVA 血管を通過したあと腕部において表在性皮静脈を通過するあいだに、上肢全体から熱放散が促進して強力な体温調節作用が作動していることである (Grant and Pearson, 1938 ; 平田, 1990)。

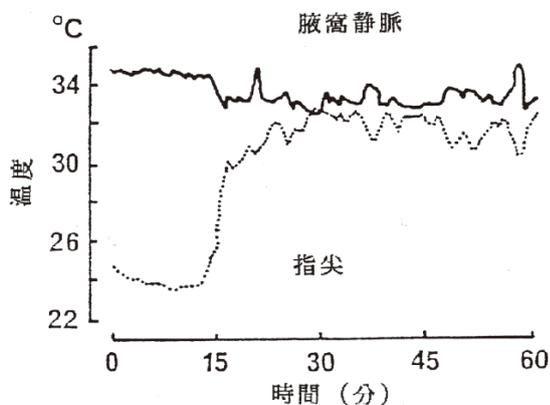


図4 走行運動中の腋窩静脈血液温と指尖皮膚温変化 (Aulick and Robinson, 1981 より抜粋)

このメカニズムを明確に示すことを目的に、我々は心拍数 120 bpm 程度の下肢運動中に、静脈閉塞プレチスモグラフィで測定した手指血流量と、超音波ドップラー血流計で測定した前腕の皮静脈血流量の指標としての血流速度を測定する実験を行った (Hirata et al., 1989b) (図 5)。運動中に体温が上昇し、手指血流量の増加に伴い、前腕の皮静脈血流も増加を示した。途中、25 分～30 分の 5 分間と 40 分目から 10 分間、手首のカフ加圧 (OCCL) により手指への血流を遮断すると、前腕の皮静脈血流はほとんどなくなり、カフ加圧を開放すると再び皮静脈血流量は増加した。このように前腕部の皮静脈血流速度と手指血流量の間には正比例の関係が存在する。以上の結果から、前腕の皮静脈を流れる血流量は大部分が手指部から還流する血流、すなわち主に AVA を通

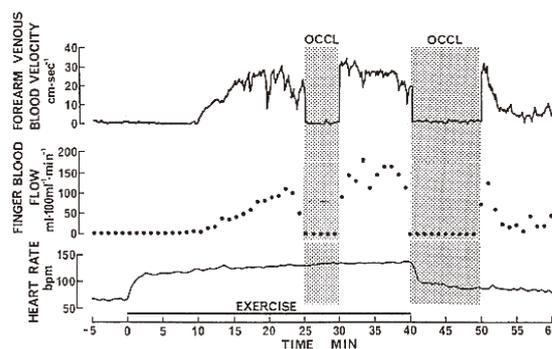


図5 手指血流量と前腕血流速度の関係 (Hirata et al., 1989b より抜粋)

過した血流量 (Coffman and Cohen, 1971) の変化と同期していることがわかる。

5. 前腕皮膚温と AVA 血流

運動時の前腕皮膚温が、手指 AVA 血流量の影響を受けていることを明確にするため、手指への血流を遮断したときと、しないときの両条件で、前腕皮膚温を比較する実験を行った (Hirata et al., 2013)。環境温 23°C 下で半仰臥位にて 30 分間の自転車運動により体温上昇を起こしたとき、手と前腕の皮膚温変化を図 6 に示した。一方は手首の血流遮断をしない対照側 (CONTROL : 左)、他方は手首のカフ加圧により手への血流を 30 分間遮断した側 (OCCLUSION : 右) とした。対照側では体温上昇に伴って AVA を含む手の皮膚温が上昇し、前腕皮膚温のレベルを超えた後、前腕皮膚温の上昇が観察されたが、カフ加圧側では手の皮膚温上昇が生じないため、前腕の皮膚温上昇も生じなかった。両条件下の前腕皮膚温を図 7 に示した。対照側の前腕皮膚温 (白丸) は、手指の皮膚温が急激に上昇するのに伴って、運動 15 分目より 26.0°C から運動終了時 29.2°C まで 3.2°C も上昇した。運動終了後の 5 分間にはさらに上昇し、29.9°C にも達した。一方、血流を遮断して手からの還流静脈血がない場合、手首カフ加圧側の前腕皮膚温 (黒丸) は約 26°C を維持しつづけ上昇することはなかった。運動終了後に血流を開放すると、手の皮膚温は約 22°C から 28°C まで急激に上昇し、それにもない前腕皮膚温の上昇が観察された。カフ加圧時であっても前腕への皮膚血流量は確保されているが、前腕皮膚温の上昇には寄与

しなかった。これは、手から還流する皮静脈血流がカフ加圧により遮断されたため、前腕皮膚温が上昇しなかったことを示しているのである。換言すれば、下肢運動中の前腕皮膚温の上昇は、まず体温の上昇により手指皮膚血流量が著しく増加し、手指の皮膚温が上昇する。次いで手指を通過した静脈血が、前腕にある表在の皮静脈を通過する際に前腕皮膚温の上昇を引き起こすのである。前腕皮膚温の上昇が、主に前腕皮膚血流量の増加によるものと考え (Veghte *et al.*, 1979) は、少なくとも本実験条件下では誤りであるといえる。さらに、前腕筋肉から直上の皮膚への熱移動による皮膚温上昇についても可能性は考えられるが、Johnson and Rowell (1975) によれば、下肢運動中の前腕筋血流量は安静レベルより低く保持されると報告されているためこの考えは否定される。

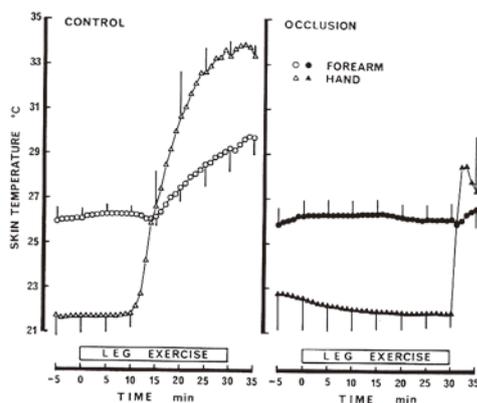


図 6 手首阻血による前腕、手指の皮膚温変化 (Hirata *et al.*, 2013 より抜粋)

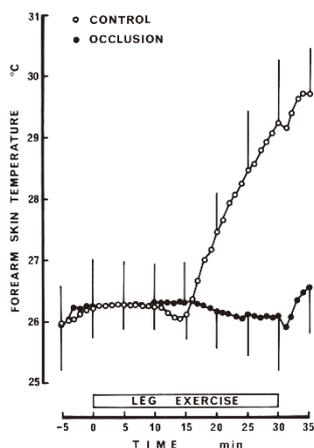


図 7 手首阻血による前腕の皮膚温変化 (Hirata *et al.*, 1989b; 平田, 1990 より抜粋)

図 8 には、同様の方法によって下肢運動中の上肢について、手と前腕の皮膚温を観察する実験 (左図: 環境温 20°C) と、上肢運動中の下肢について足と下腿の皮膚温を観察する実験 (右図: 環境温 30°C) を行い、サーモグラムの結果を示した。左図中では D・E の「cuff」と示したところで左手首にカフ加圧による阻血を実施した。また右図中では C・D の「cuff」で右足首にカフ加圧による阻血を実施した。前腕、下腿いずれの皮膚温においても、四肢末端の AVA 血管から還流する静脈血によって、前腕および下腿の皮膚温上昇が観察され、さらに表在性皮静脈から周辺部へ継時的に熱が移動する様子も併せて観察された。

このように四肢近接部の皮膚からの熱放散は、末端に存在する AVA を通過する多量の血液が近接部の表在性皮静脈を還流する際に熱を放散するという、極めて効率のよい熱放散メカニズムによって調節されていることが判明した。

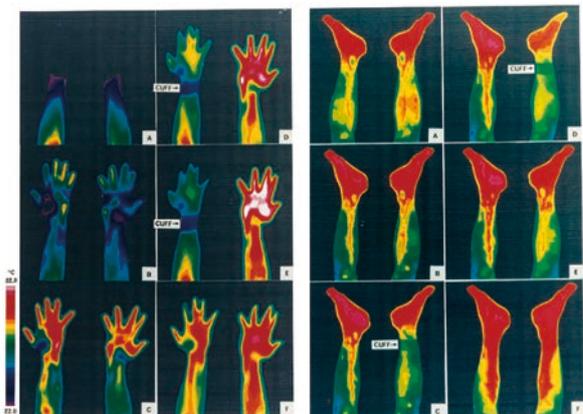


図 8 カフ加圧による手首、足首阻血時の皮膚表面のサーモグラム (下肢運動中の上肢皮膚 (左)、上肢運動中の下肢皮膚 (右))

6. 前腕発汗量と AVA からの還流皮静脈血流

手指 AVA 血流が前腕皮膚温の上昇を引き起こすことは、前腕の発汗量にも影響して熱放散反応に寄与するものと考えられる。図 6 で既に述べた運動実験において、左右の前腕局所発汗量に及ぼす手からの還流静脈血の影響を観察した (Hirata *et al.*, 1989a)。

図 9 左側に示すように、図左 (A) は対照実験として手首のカフ加圧を全く行わないで、被験者 5 人の左右両腕における発汗反応には差がない

ことを確かめた。発汗開始はほぼ同時であり、発汗増加量も同程度であった。一側の手首をカフ加圧した条件での経時変化を図9右(B)に示した。図6で示したように、手指AVAからの還流静脈血の有無による前腕皮膚温の差が3.2°Cにも上り、前腕部における局所皮膚温の差異は前腕発汗量にも表れ、運動終了時点でカフ加圧側では $0.13 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ であったが、対照側では $0.21 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ と有意に高値まで増加した。

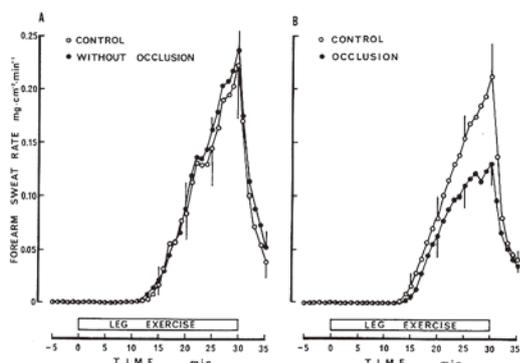


図9 手首阻血による前腕発汗量の変化 (Hirata et al., 2013 より抜粋)

これらの変化を前腕皮膚温に対する前腕発汗量の関係として図10に示した。手首のカフ加圧側(黒丸)では皮膚温の上昇がないため、主に中枢温と平均皮膚温の変化が刺激となり運動終了時に $0.13 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ まで増加した。一方、対照側(白丸)では同一の中枢性の発汗神経衝撃に加えて、前腕の局所皮膚温上昇の効果が加わったため発汗量が亢進し、運動終了時には $0.21 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ と有意に高値まで増加した。

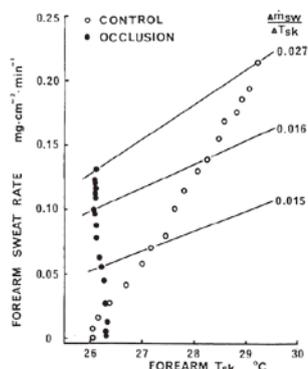


図10 手首阻血による前腕皮膚温と発汗量の関係 (Hirata et al., 2013 より抜粋)

これは中枢性の発汗神経衝撃に対して、神経-腺接合部での伝達物質の分泌が、温度上昇により亢進することに起因するのであろう (Bullard et al., 1967)。図中の実線は同一の中枢性の発汗刺激に対し、皮膚温上昇に対する発汗量増加の感度を示している。皮膚温が高くなるほど直線の傾きが大きくなり、発汗量増加の感度が高くなることを示している。その効果は指数関数的で、 Q_{10} は3またはそれ以上であるといわれている (MacIntyre et al., 1968; Nadel et al., 1971)。皮膚温の上昇がない場合には、ある場合に比べて前腕発汗量の開始が若干遅延し、増加量は有意に抑制された。前腕皮膚温の上昇が、前腕発汗量の増加亢進に大きく寄与することが示された。

7. 前腕からの熱放散に及ぼす手指AVAからの還流皮静脈血流

既に図6、図8で示した結果を用いて、前腕皮膚からの蒸散性、非蒸散性および全熱放散量を推定し、手指AVA血流を通過して還流する静脈血流の役割について定量的に述べる (Hirata et al., 1989a)。表1に示したとおり、腕からの蒸散性熱放散量(E)は、対照側では $87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ であったのに対し、カフ加圧側で $53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ であるため、皮膚温上昇による熱放散量の亢進が $34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (39%) にも達している。さらに非蒸散性熱放散量(R+C)は対照側で $53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、カフ加圧側では $27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ であり、手から還流する皮静脈血流によるものは $26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (46%) にも達している。腕全体からの熱放散量は、対照側の $140 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ に対してカフ加圧側では $80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ であった。AVA血流量が増加し、手から還流する皮静脈血による熱放散の亢進は、 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (43%) にも達し、その貢献度が確認さ

表1 手首阻血による前腕皮膚からの蒸散性・非蒸散性及び全熱放散量 (Hirata et al., 1989a)

	蒸散性 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (%)	非蒸散性 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (%)	全熱放散量 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (%)
対照側	87 (100)	53 (100)	140 (100)
カフ加圧側	53 (61)	27 (51)	80 (57)
差	34 (39)	26 (49)	60 (43)

(対照側-手首阻血側)

れた。手指 AVA から帰還する表在性静脈血が前腕皮膚からの熱放散調節に占める役割は、極めて大きいものと結論できる。

8. AVA 血流と核心温・血圧変化

四肢における AVA 血流量の増加が、熱放散量の亢進に重要な役割を果たすならば、核心温にも影響するはずである。これを検証するために、7名の健康な男性を被験者とし、室温 20°C、湿度 30%の人工気象室で、30 分間の安静ののち心拍数 120~130 拍/分強度の自転車運動を 25 分間行わせた。その後 20 分間の回復期とした。カフ加压実験では、運動開始 15 分目より実験終了までの 30 分間、両手首のカフ加压により血流を遮断した。対照実験は一切の加压なしの条件で行った。

その結果、対照実験では指皮膚温は 20.5°C から 34°C まで上昇し、これに伴って前腕の皮膚温は 25.4°C から 27.7°C まで 2.7°C も上昇した。一方、カフ加压実験では指と前腕の皮膚温は加压前値から全く変化しなかった。体幹部の皮膚を代表して、胸部について換気カプセル法による局所発汗量とレーザードップラー血流計による皮膚血流量を測定したところ、皮膚血流量と発汗量ともにカフ加压開始後に亢進し、対照実験よりカフ加压実験では有意に高い値を示した (図 11)。これらはカフ加压による上肢からの熱放散の抑制を補償するための代償反応であると推察される。上肢からの熱放散抑制による代償反応は、前額、胸、大腿と足の 4 部位で測定した皮膚温が、対照実験より有意に高く上昇した。これらはいずれも皮膚血管の拡張によるものと解された。

Lossius *et al.* (1993) によれば、AVA 血流量の変動は平均血圧の変動との間に非常に高い負の相関が認められると報告していることから、本実験結果では、カフ加压の代償反応として、胸部ばかりでなく前額、大腿や足など全身の皮膚において血管拡張が生じているものと推察され、末梢血管抵抗が低下した結果、平均血圧では 5 mmHg の有意な低下が生じたものと考えられる (図 12)。さらには、両手首のカフ加压により全身皮膚に生じた代償性反応により熱バランスの変化が起きているにも関わらず、食道温はカフ加压により 0.20°C も高値を示した (図 13)。

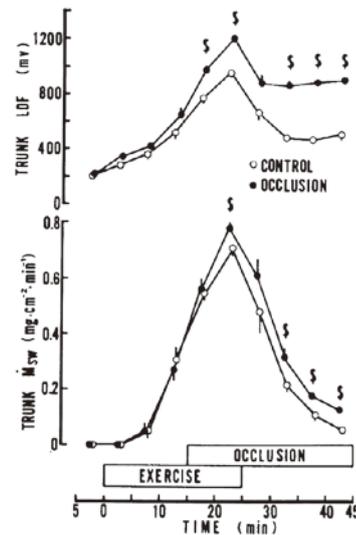


図 11 手首阻血による胸部血流量と発汗量の変化 (Hirata *et al.*, 1993 より抜粋)

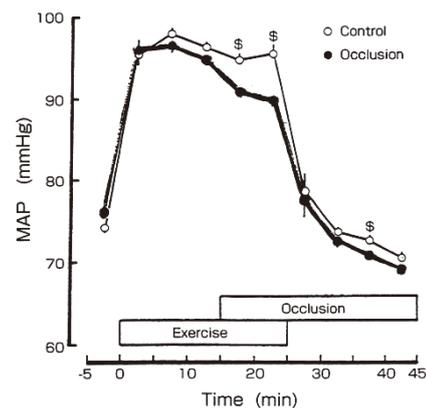


図 12 自転車エルゴメータ運動による熱付加中の両手首阻血が、平均血圧 (MAP) に及ぼす効果 (永坂ほか, 1997 より抜粋)

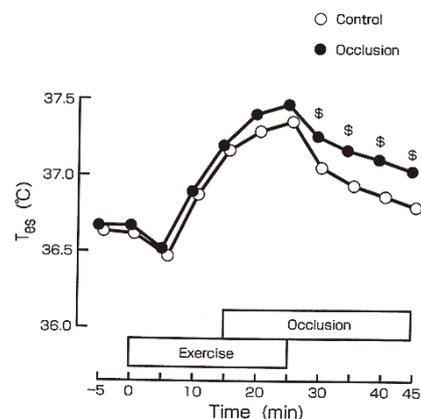


図 13 自転車エルゴメータ運動による熱負荷中の両手首阻血が食道温 (Tes) に及ぼす効果 (永坂ほか, 1997 より抜粋)

以上の結果から、実験的に AVA 血流を遮断すると上肢からの熱放散量が著しく減少するため、全身の皮膚における余分な血管拡張と発汗量の余分な増加が生じる。しかし熱バランス的には十分な補償ができなかったため、食道温は 0.20°C も高値となった。さらに AVA 血流遮断により代償性に拡張した血管床が大きすぎるため、血压維持の観点からは末梢血管抵抗が低下し、平均血压の低下を招来したものと推察された。換言すると図 14 に示す通り、AVA 血流量が十分に確保されれば、四肢末梢部（手・腕や足・下腿）からの蒸散性および非蒸散性の熱放散量が十分に高く維持され、全身における他部位の皮膚からの発汗量、皮膚血流量の増加を抑制できる上に、体温を低く保つことができる。さらに、同時に AVA 血流量は血压維持機能 (Walloe, 2015) にも貢献することが確認できた。

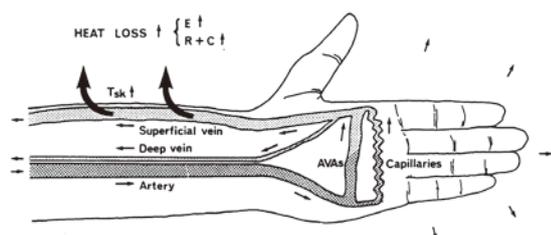


図 14 AVA 血流量増加が上肢全体からの熱放散量充進に寄与するメカニズム

(Hirata *et al.*, 1989a ; Hirata *et al.*, 1990 より抜粋)

9. おわりに

本稿では、AVA 血流による熱放散調節に焦点を絞って述べてきた。用いた実験結果は、主に上肢における手と前腕の関係について行ったものであるが、下肢においても同様のメカニズムにより、下腿部分からの熱放散量充進に足部 AVA 血流が関与している (Hirata *et al.*, 1989b)。このため、四肢末端に存在する AVA 血流の増減によって、四肢全体からの熱放散量、ひいては体温の調節が行われていることを明らかにした。この機序は、人のからだの形態と機能を十分に活かして調節されている。細胞を栄養する毛細血管とは別に、主に体温調節性に機能する AVA 血管が四肢末端部に配置されており、AVA 血管拡張により末端部からの熱放散量ばかり

でなく、四肢近接部を通過して帰還する表在性皮静脈から周辺部の皮膚へ熱が伝導し、局所皮膚温の上昇は非蒸散性熱放散と発汗量の増加充進に伴う蒸散性熱放散をも促進することで体温調節に寄与している。本文中で述べたように、AVA 血流と四肢部を利用する熱放散の機序は、体幹部への皮膚血流量と発汗量の充進を抑制でき、その結果、血压維持の調節にも大いに貢献していることを示してきた。

今回は述べていないが、AVA 血流に関する話題として体脂肪率による影響 (西村ほか, 1993)、皮膚毛細血管と AVA 血流の分離測定を試み (平田と永坂, 1990 ; Hirata *et al.*, 1988)、体温調節の個人差と AVA 血流の関係 (Hirata *et al.*, 1996)、衣服の快適性ととの関係 (Hirata, 1988; 1991) などがある。AVA 血管における温熱性皮膚血管収縮反応 (Heat-induced vasoconstriction : HIVC) (Nagasaka *et al.*, 1986; Nagasaka *et al.*, 1987; Nagasaka *et al.*, 1987) については、異なる皮膚部位への刺激においても HIVC が惹起される等、非常に興味深く新しい展開がある。さらに、AVA 血流を組み込んだ人体熱モデルの開発 (竹森ほか, 1994 ; 竹森, 1995) 等も有用な研究である。しかし、今回は紙面の関係で余裕がないため別の機会に譲りたい。

引用・参考文献

- ASCHOFF, J. and HEISE, A. (1972): Thermal conductance in man: its dependence on time of day and on ambient temperature. In: ITOH, S., OGATA, K. and YOSHIMURA, H. (eds.), *Advances in Climatic Physiology*, Igaku Shoin, Tokyo, pp. 334-348.
- AULICK, L.H. and ROBINSON, S. (1981): Arm and leg intravascular temperatures of men during submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.*, **51**: 1092-1097.
- BULLARD, R.W., BANARJEE, M.R. and MACINTYRE, B.A. (1967): The role of the skin in negative feedback regulation of eccrine sweating. *Int. J. Biometeorol.*, **11**: 93-104.
- CARLSON, L.D. and HSIEH, A.C.L. (1970): *Control of energy exchange*. MacMillan, New York, pp. 18.
- CLARA, M. (1956): *Die arterio-venosen Anastomosen*. (2 Aufl.), Springer, Wien, pp. 12-23.
- COFFMAN, J.D. and COHEN, A.S. (1971): Total and capillary fingertip blood flows in Raynaud's phenomenon. *N. Eng. J. Med.*, **285**: 259-263.
- DONADIO, V., NOLANO, M., PROVITERA, V., STANCANELLI, A., LULLO, F., LIGUORI, R. and SANTORO, L. (2006):

- Skin sympathetic adrenergic innervation: An immunofluorescence confocal study. *Ann. Neurol.*, **59**: 376–381.
- FOX, R.H. and HILLTON, S.H. (1980): Bradikinin formation in human skin as a factor in heat vasodilation. *J. Physiol. (London)*, **284**: 515–521.
- GRANT, R.T. and PEARSON, R.S.B. (1938): The blood circulation in the human limb; observations on the difference between the proximal and distal parts and remarks on the regulation of body temperature. *Clin. Sci.*, **3**: 119–139.
- HALES, J.R.S. (1984): Skin arteriovenous anastomoses, their control and role in thermo-regulation. In: KROGSGAARD-LARSEN, P., CHRISTENSEN, S.B. and KOFOD, H. (eds.), Cardiovascular Shunts, Alfred Benzon Symposium 21, Munksgaard, Copenhagen, pp.1–16.
- HALES, J.R.S., JESSEN, C., FAWCETT, A.A. and KING, R.B. (1984): Skin AVA and capillary dilatation and constriction induced by local skin heating. *Pflugers Arch.*, **404**: 203–207.
- 姫野朋子 (1997) : 四肢と体幹の部位差が人の体温調節反応に及ぼす影響. 神戸女子大学大学院家政学研究科, 修士論文, p. 31.
- HIRATA, K. (1988): Skin circulation and clothing comfort – How thermal features of the extremities vary by changing type of clothing. In: TOKURA, H. (ed.), Proceedings of International Symposium on Clothing Comfort Studies in Mt. Fuji, Fuji Institute of Education and Training, The Japan Research Association for Textile End-Uses, Japan, Aug. pp. 29–31.
- HIRATA, K., NAGASAKA, T. and NODA, Y. (1988): Partitional measurement of capillary and arteriovenous anastomotic blood flow in the human finger by laser-Doppler-flowmeter. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **57**: 616–621.
- HIRATA, K., NAGASAKA, T., HIRASHITA, M. and TAKAHATA, T. (1989a): Increase in evaporative and non-evaporative heat loss from the forearm depends on venous return from the hand during exercise. In: MERCER, J.B. (ed.), Thermal Physiology 1989, Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam, pp. 155–159.
- HIRATA, K., NAGASAKA, T. and NODA, Y. (1989b): Venous return from distal regions affects heat loss from arms and legs during exercise-induced thermal loads. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **58**: 865–872.
- 平田耕造, 永坂鉄夫 (1990) : レーザードップラー血流計を用いたヒトの皮膚毛細血管および動静脈吻合血流量の分離測定法の確立. 興和生命科学振興財団研究報告, **2**: 57–64.
- 平田耕造 (1990) : 運動時の四肢発汗量を促進する動静脈吻合 (AVA) 血流量. 体育の科学, **40**: 889–894.
- HIRATA, K. (1990): Skin blood flow in an acral region of the extremities and thermoregulation during heat load in clothed subjects. *Bulletin of Kobe Women's University*, **24H**: 83–106.
- HIRATA, K. (1991): Clothing comfort and physiological responses during exercise: mechanisms for promoting heat loss from the extremities. In: TOKURA, H. (ed.), Proceedings of 2nd International Symposium on Clothing Comfort Studies in Mt. Fuji ~ Physiological aspects of clothing and their significance for human health~, Fuji Institute of Education and Training, The Japan Research Association for Textile End-Uses, Japan, Nov. 30–Dec. 2.
- HIRATA, K., YUTANI, M. and NAGASAKA, T. (1993): Increased hand blood flow limits other skin vasodilation. *J. Therm. Biol.*, **18**: 325–327.
- 平田耕造 (1995) : 皮膚血流量の温熱生理学. 繊維製品消費科学, **36**: 12–17.
- HIRATA, K., KONDO, N. and SUYAMA, T. (1996): Individual difference in thermoregulatory responses of arteriovenous anastomoses (AVA) blood flow and interrelation of skin blood flow – sweat rate during heat load. *Bulletin of ONO Sports Science Foundation*, **4**: 124–138.
- HIRATA, K., NAGASAKA, T. and SHIDO, O. (2013): Venous blood returning from the hand enhance forearm sweat rate during thermal load. *Bulletin of Faculty of Home Economics, Kobe Women's University*, **46**: 21–29.
- JOHNSON, J.M. and ROWELL, L.B. (1975): Forearm skin and muscle vascular responses to prolonged leg exercise in man. *J. Appl. Physiol.*, **39**: 920–924.
- LOSSIUS, K., ERIKSEN, M. and WALLOE, L. (1993): Fluctuations in blood flow to acral skin in humans: connection with heart rate and blood pressure variability. *J. Physiol.*, **460**: 641–655.
- MACINTYRE, B.A., BULLARD, R.W., BANERJEE, M. and ELIZONDO, R. (1968): Mechanism of enhancement of eccrine sweating by localized heating. *J. Appl. Physiol.*, **25**: 255–260.
- MOLYNEUX, G.S. (1977): The role of arteriovenous anastomoses in the peripheral circulation. *Proc. Roy. Soc. Qld.*, **88**: v-xiv, pls. 1–9.
- MOLYNEUX, G.S. and BRYDEN, M.M. (1981): Comparative aspects of arteriovenous anastomoses. In: HARRISON, R.J. and HOLMES, R.L. (eds.), Progress in Anatomy, Cambridge University Press, pp. 207–227.
- NADEL, E.R., BULLARD, R.W. and STOLWIJK, J.A.J. (1971): Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *J. Appl. Physiol.*, **31**: 80–87.
- NAGASAKA, T., CABANAC, M., HIRATA, K. and NUNOMURA, T. (1986): Heat-induced vasoconstriction in the fingers: a mechanism for reducing heat gain through the hand heated locally. *Pflugers Arch.*, **407**: 71–75.

- NAGASAKA, T., CABANAC, M., HIRATA, K. and NUNOMURA, T. (1987): Control of local heat gain by vasomotor response of the hand. *J. Appl. Physiol.*, **63**: 1335–1338.
- NAGASAKA, T., HIRATA, K. and NUNOMURA, T. (1987): Contribution of arteriovenous anastomoses to vasoconstriction induced by local heating of the human finger. *J.J.P.*, **37**: 425–433.
- 永坂鉄夫 (1990): 動静脈吻合による皮膚での熱移動の調節. *日本生理誌*, **52**: 197–205.
- 永坂鉄夫 (1993): 暑熱と人間—環境生理学の立場から. *日本体質学雑誌*, **57**: 8–10.
- 永坂鉄夫, 平田耕造, 平井敦夫, 平下政美 (1997): 動静脈吻合の体力医学的意義. *デサントスポーツ科学*, **18**: 3–13.
- 西村和久, 平田耕造, 白水智子, 竹森利和 (1993): 体脂肪率の違いは末梢部皮膚温に影響するか? *日生氣誌*, **30**: 187–196.
- NELMS, J.D. (1963): Functional anatomy of skin related to temperature regulation. *Fed. Proc.*, **22**: 933–936.
- POPOFF, N.W. (1934): The digital vascular system- With reference to the state Glomus in inflammation Arteriosclerotic gangrene, diabetic gangrene thrombo-angiitis obliterans and supernumerary digits in man. *Arch. Pathol.*, **18**: 295–330.
- SMOLANDER, J., HARMA, M., LINDQVIST, A. KOLARI, P. and LAITINEN, L.A. (1993): Circadian variation in peripheral blood flow in relation to core temperature at rest. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **67**: 192–196.
- SHERMAN, J.L. (1963): Normal arteriovenous anastomoses. *Medicine (Baltimore)*, **42**: 247–267.
- 田村照子, 小柴朋子, 平田耕造 (2005): 衣環境の科学, 建帛社 (東京), pp. 28–29.
- 竹森利和 (1995): 熱環境の快適性評価のための人体熱モデル開発. 神戸大学大学院自然科学研究科, 博士論文, pp. 1–113.
- 竹森利和, 庄司祐子, 平田耕造, 中島 健 (1994): 動静脈吻合血管反応を考慮した人体熱モデルによる皮膚温予測結果. *人間—生活環境系会議誌*, **1**: 58–63.
- VEGTE, J.H. ADAMS, W.C. and BERNAUER, E.M. (1979): Temperature changes during exercise measured by thermography. *Aviat. Space Environ. Med.*, **50**: 708–713.
- WALLOE, M.D. (2015): Arterio-venous anastomoses in the human skin and their role in temperature control. *Temperature*, 1–12.
- WHITNEY, R.J. (1953): The measurement of volume changes in human limbs. *J. Physiol.*, **121**: 1–27.

Corresponding Author Address: Kozo HIRATA,
Faculty of Home Economics, Kobe Women's University,
2-1 Aoyama Higashisuma, Suma-ku, Kobe, 654-8585, Japan.
E-mail: k-hirata@suma.kobe-wu.ac.jp

〒654-8585 神戸市須磨区東須磨青山 2-1
神戸女子大学家政学部
平田耕造