

ヒトの暑熱障害防止を目的とした 選択的脳冷却機構と個人差の解明

金沢経済大学 平下 政美

(共同研究者) 金沢大学 永坂 鉄夫

同 田辺 実

同 桜田 忽太郎

同 柴藤 治

金沢女子短期大学 平井 敦夫

Selective Brain Cooling in Hyperthermic Subjects and Its Inter-individual Difference

by

Masami Hirashita

Kanazawa College of Economics

Tetsuo Nagasaka, Minoru Tanabe,

Sohtaro Sakurada, Osamu Shido

Department of Physiology, School

of Medicine, Kanazawa University

Atsuo Hirai

Kanazawa Women's Junior College

ABSTRACT

During hyperthermia, venous blood from the face and scalp flows into the intracranium through the ophthalmic and emissary veins, which is supposed to be an important response providing selective brain cooling in humans. To understand a possible mechanism of this response, healthy male volunteers were subjected to either passive

body warming or exercise, in a climatic chamber whose air temperature and relative humidity were 28°C and 40%.

During either passive body warming or exercise, forehead sweat rate ($\dot{m}_{sw}$) and forehead skin blood flow ($\dot{Q}_{sk}$) started to increase shortly after the start of heat loading. A rather abrupt increase of venous flow through the ophthalmic veins into the intracranium occurred significantly later than the increases on $\dot{m}_{sw}$ and $\dot{Q}_{sk}$. Tympanic temperature at this abrupt increase in ophthalmic venous flow did not differ between the tests.

Mean skin temperature at this flow increase was, however, significantly higher during passive body warming than in exercise. The abrupt increase of inward venous flow through the ophthalmic veins was not observed in nearly 20% of subjects. The reason for this inter-individual difference of this response is discussed.

要 旨

ヒトが高体温になると、顔面・頭皮の静脈血が眼角-眼静脈、導出静脈経由で頭蓋内に流れるようになる。その機序と個人差を解明する目的でこの研究を行った。健康な男子を被験者とし、頭部以外の全身を加温箱により加温した時、あるいは自転車エルゴメータにより、種々の強度の負荷運動をした時の鼓膜温 (T_{ty})、食道温 (T_{oes})、全身皮膚温 ($\bar{T}_{sk}$)、前額の発汗量 ($\dot{m}_{sw}$) と皮膚血流量 ($\dot{Q}_{sk}$)、眼静脈の血流方向とその速度 ($\dot{Q}_{ov}$) を連続測定した。環境温度や体温上昇の手技如何にかかわらず、 $\dot{m}_{sw}$ と $\dot{Q}_{sk}$ は熱負荷開始後間もなく増加したが、 $\dot{Q}_{ov}$ の方向の変化 (顔面から頭蓋底へ) はそれとは著しく遅れておこった。

この変化のおきる時点の T_{ty} は、受動的体加温によっても運動によっても同じであった。平均皮膚温と平均体温は、運動時に比べて受動的体加温で高かった。これらの結果から、ヒトの選択的脳冷却に関わる眼静脈の血流方向の逆転は、末梢の温度受容器の刺激量ではなく、中枢の温度レベル

に依存しておきるものと推察した。

またこの血流方向の逆転の個人差について調べた。その結果、受動的体加温では25名中18名に、60% $\dot{V}_{O_{2max}}$ の運動では13名中10名に、負荷漸増運動では8名中6名に眼静脈血流の方向の変化が観察されたが、受動的体加温による高体温時になっても、 $\dot{Q}_{ov}$ の方向の逆転のおきない被験者は、25名中7名存在し、この機序の発現に個人差のあることが示唆された。

目 的

高温環境下での競技やマラソンなどの持久的運動で、ヒトの体温は著しく上昇する。これは、筋収縮によって体内で作られた熱と、高温の環境から体内に入ってくる熱負荷とが加算されて、著しい熱ストレスの状態になるからで、実際にマラソンで直腸温が42.0°Cに達したとの報告もある。脳は身体の他の組織に比べて熱に弱く、その限界温度は40.5°Cとも41.0°Cともいわれる。したがって、もし直腸温と脳温が同じなら、暑熱下でのマラソンは生体にとって危険である。しかしほとん

どの場合脳には何等の障害もなく、運動は完遂できる。これは、ヒトにも運動中、脳組織を過度の加熱から防ぐ、いわゆる選択的脳冷却機構が存在する可能性を示すものであろう。

選択的脳冷却は、顔面・頭皮（動物では上気道）で冷やされた血液が、眼静脈（OV）や導出静脈を経由して頭蓋内に入ることによる。たとえばイヌ、ヒツジでは運動時の高温の動脈血は、脳底の頸動脈網を通過する間に、海綿静脈洞の冷たい静脈血との間で熱交換され、冷えた動脈血が脳まで送られる。トナカイやラクダでは、顔面静脈の一部が温度依存的に収縮し、一種の括約筋として働く。運動によってその部分の温度が上昇すると局所の血管抵抗が上がり、顔面静脈を流れていた静脈血が、すべて眼角静脈経路で頭蓋内の静脈洞へ流入するようになるといわれる。しかし、ヒトで高体温時にはほかの核心部体温とは独立して、脳温だけを低く保つ機構があるか否かについては未だに論議がある。

Nagasaka ら（1990）によれば、温浴による受動的な体加温時に、顔面静脈を機械的に閉塞し、眼静脈血流量を増大させると、脳温の指標としての T_{ty} の上昇率が減少し、逆に眼静脈血流を機械的に遮断すると、 T_{ty} の上昇率が増加する。Hirashita ら（1992）は、ヒトが運動で高体温になると、眼静脈血流の方向が（頭蓋底から顔面）から（顔面から頭蓋底）へと変化することを観察した。

これらは、ヒトでも運動時に選択的に脳が冷却されることを示唆する。

本研究の目的は、このような眼静脈血流の流れの方向の変化が、1) どのような機序でおこるか、2) すべてのヒトに観察されるかどうか、の二点に的を絞って追求することである。

1. 方 法

実験1 ヒトの高体温時における眼静脈血流の頭蓋内還流の機序の解明のための実験

5人の健康な成人男子（別の研究で高体温時に眼静脈血流の方向の逆転が明らかであった人）を被験者とした。被験者の身体的特徴は表1に示す。

1.1 測定項目

食道温 (T_{oes}) は鼻腔から42 cm 食道内に挿入（心房の高さ）、鼓膜温 (T_{ty}) は最も高い温度を示す鼓膜の部位に接触させたサーミスタ素子（Tecnol Seven, Yokohama）でそれぞれ測定した。 T_{ty} が T_{oes} より高いことを確認した後、外耳道に脱脂綿をつめ、プローブが動かないようにテープで固定した。耳介には脱脂綿をかぶせ、全体を合成樹脂製の耳覆いでおおった。皮膚温 ($\bar{T}_{sk}$) は $\bar{T}_{sk}$ 用サーミスターをテープで皮膚に貼り、全身7箇所測定した。すべての温度データはADコンバータ、データロガー（D1 K 923, Technol Seven）を通してパーソナルコンピュータ（PC

表1 被験者の身体的特徴

Subjects	Age (years)	Height (cm)	Body mass (kg)	$\dot{V}_{O_{2max}}$ ($ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$)
S. S.	26	171	54.8	45.2
T. N.	19	177	56.2	50.9
H. A.	21	172	56.2	66.1
T. M.	21	169	56.2	58.2
S. I.	19	168	55.8	52.0
Mean	21.2	171.4	55.84	54.48
SE	1.28	1.57	0.27	3.56

9801 VX, NEC, Tokyo) に 30 秒ごとに入力した. 平均皮膚温 ($\bar{T}_{sk}$) と平均体温 ($\bar{T}_b$) を以下の式により同時に計算した.

$$\bar{T}_{sk} = 0.07 T_1 + 0.35 T_2 + 0.14 T_3 + 0.05 T_4 \\ + 0.19 T_5 + 0.13 T_6 + 0.07 T_7$$

$$\bar{T}_b = 0.7 T_{oes} + 0.3 \bar{T}_{sk}$$

ただし, T_1 : 前額, T_2 : 胸, T_3 : 前腕, T_4 : 手, T_5 : 大腿, T_6 : 下腿, T_7 : 足

眼静脈 (OV) を流れる血液の方向と流速 ($\dot{Q}_{ov}$) は, 超音波ドップラー血流計 (Model 909, Parks, Oregon) を用いて測定した. プロープは 8 MHz の静脈血流用のダイレクトモードに合わせ, OV 上の皮膚にはほぼ垂直になるように固定した. 固定には, 内側をスポンジで囲んだ金属製のヘッドバンド (幅 3 cm) につけた, 軸が自由に調整できる金属製ホルダーを用いた (図 1).

ヘッドバンドは頭部に固定し, 運動中, 頭部を動かしても OV とプロープの位置関係が変わらないようにした. さらにバンド装着の際, 頭皮の静

脈血流を障害せず, 前額からの発汗が通常通り効率よく行われるように注意した. 前額の皮膚血流量 ($\dot{Q}_{sk}$) は, レーザードップラー血流計 (ALF-2100, Advance, Tokyo) で測定した. 局所発汗量 ($\dot{m}_{sw}$) は前額の中心で, 静電湿度計を用いた換気法で測定した. 超音波およびレーザードップラー血流計と温度計の出力は, 記録計 (SP-H6P, Riken, Tokyo と SR-6312, Watanabe Sokki, Tokyo) で連続記録した. 最大酸素摂取量 ($\dot{V}_{O_{2max}}$) は複合負荷法にて酸素分析装置を用いて算出した.

2.2 実験手順

実験は室温 $28 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 相対湿度 $40 \pm 3\%$ の人工気象室内で行った. 被験者は前夜から絶食後, 午前中ほぼ同一時刻に実験室に来て, ショーツのみ着用し, 温度センサー, 超音波およびレーザードップラープロープ, 発汗カプセルを装着した後, 少なくとも 30 分間自転車エルゴメータ上あるいは椅子に腰掛けて安静を保ち, 体熱平衡が得られた後, 受動的体加熱, あるいは異なる強度の運動により被験者の体温を上昇させた.

受動的体加熱は, 一人用の箱型の加熱装置にて行った (図 1). 被験者を内部温を 50°C にセットした加温装置に注意深く移動し, 頭部のみは装置外に出るようにして箱内に設置された椅子に座らせ, 10 分の安静の後, さらに箱内温を上げて体加温し, OV の血流方向が完全に変るか, または, 被験者が暑さに耐えられないと申告するまで実験を続けた. 運動は自転車エルゴメータを用い, 以下の三種とした (図 1). すなわち, $60\% \dot{V}_{O_{2max}}$ と $30\% \dot{V}_{O_{2max}}$ の運動 30 分間, あるいは受動的体加温での体温上昇度にみあった割合で T_{oes} が上昇するように, 運動強度を $30\% \dot{V}_{O_{2max}}$ から $70\% \dot{V}_{O_{2max}}$ まで段階的に上昇させた.

以上四種の熱負荷実験は, 任意に別々の日に行った. 超音波とレーザードップラーの出力,

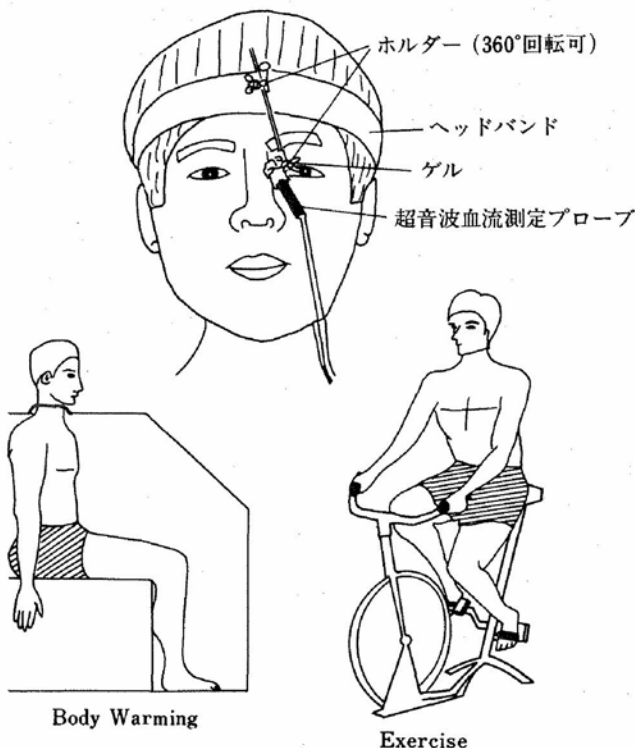


図 1 受動的体加温と運動による熱負荷
および超音波ドップラー血流計の装着

$\dot{m}_{sw}$ はパーソナルコンピュータ (PC-9801 Vm, NEC) につないだデジタイザーで 30 秒ごとに集

録した. 測定値は各被験者ごとに 1 分ごとの平均値としてあらわした. $\dot{Q}_{ov}$ は, 体温が上昇する前で

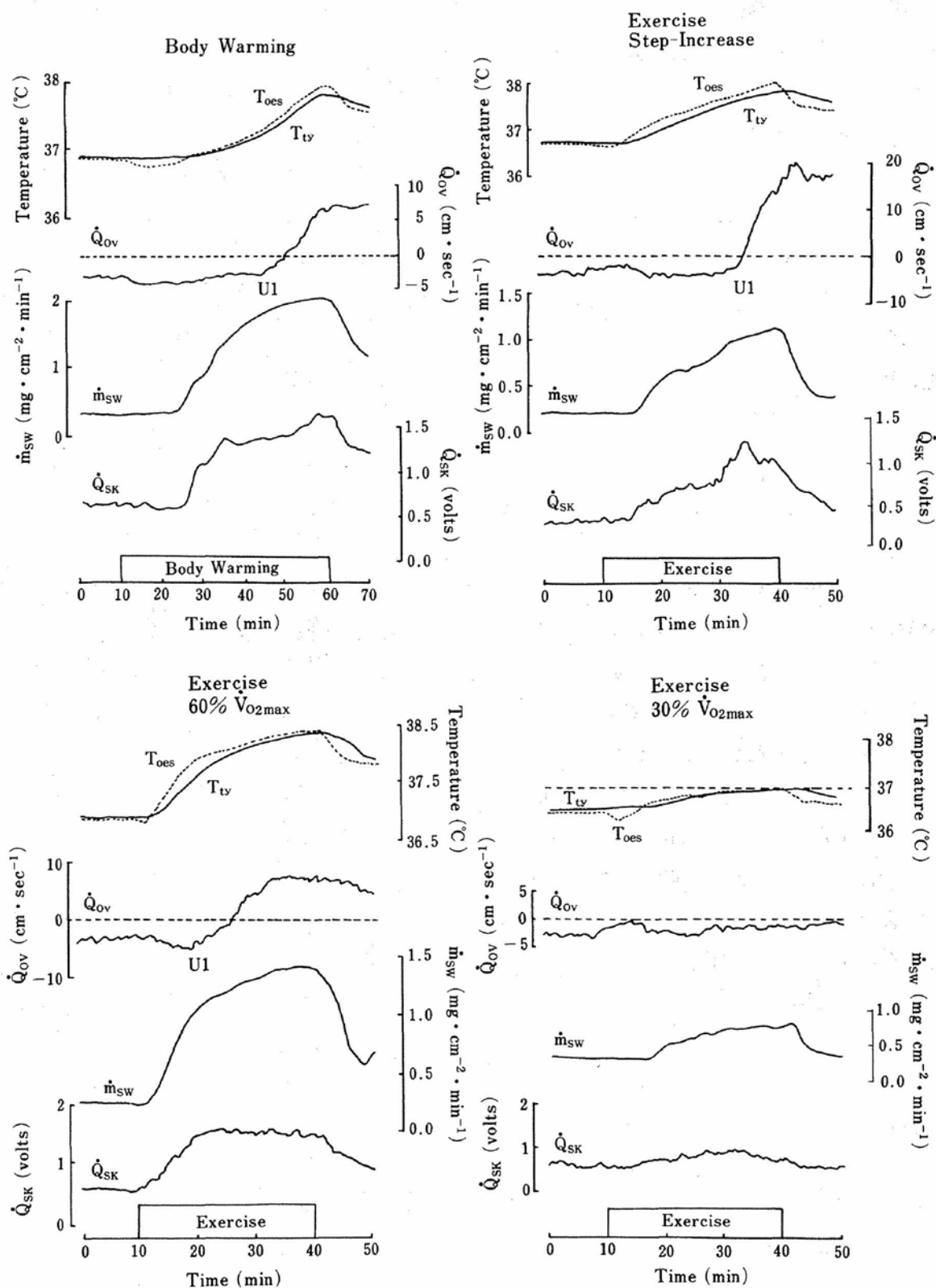


図2 食道温 (T_{oes}), 鼓膜温 (T_{ty}), 発汗量 ($\dot{m}_{sw}$), 眼静脈血流の方向と流速 ($\dot{Q}_{ov}$) の経時的変化
U1: 眼静脈血流の流速 (方向) が急に遅くなり (換り) 始める点

は、わずかではあるが頭蓋内から顔面へ方向（外向き）であった。熱負荷開始後しばらくして、外向きの $\dot{Q}_{ov}$ の速度が突然遅くなり、やがてその流れの方向が完全に逆転した。 $\dot{Q}_{ov}$ の速度が突然遅くなり始める点（U1）を血流方向の変換点と定義した（図2）。

実験2 選択的脳冷却の個人差の解明のための実験

実験1の被験者のほかに、20名の健康成人男子を被験者として $\dot{Q}_{ov}$ の動態を調べた。U1の有無を受動的体加温時(25名)と運動時(60% $\dot{V}_{O_{2max}}$: 13名, 漸増負荷: 8名)の両方について調査した。測定項目および実験手順は実験1の場合と同様であった。

2. 結 果

実験1

図2に、同一の被験者(H. A.)でえられた四種の温熱負荷中と、それぞれ前後の T_{ty} , T_{oes} , $\dot{Q}_{ov}$ (方向と速度), $\dot{m}_{sw}$, $\dot{Q}_{sk}$ の変化を示す。

受動的体加温では、 T_{ty} は加温開始からおよそ8分間ほぼ不変であったが、その後は連続的に上昇した。 $\dot{Q}_{ov}$ の方向は、加温前と加温開始から30分の間外向きであった。 T_{ty} が加温前に比べほぼ0.5℃高い37.4℃になると、 $\dot{Q}_{ov}$ の外向きの速度は明らかに減少し始め、その後数分でその方向が完全に内向きに転じた。この内向きの $\dot{Q}_{ov}$ は体加温終了後も2, 3分続いた。

前額の $\dot{m}_{sw}$ と $\dot{Q}_{sk}$ は明らかに上昇した。この上昇の開始はU1より明らかに早かった。漸増的負荷および60% $\dot{V}_{O_{2max}}$ 運動ともにU1が認められ、この時の T_{ty} は受動的体加温時と同様37.4℃付近であった。 $\dot{m}_{sw}$ と $\dot{Q}_{sk}$ の上昇開始も受動的体加温時と同様、U1のおきる時点より早かった。

このような変化は全被験者に見られた。しかし、30% $\dot{V}_{O_{2max}}$ の運動では、5名中1名についてのみU1が観察された。U1が観察されなかった

被験者すべてで $\dot{m}_{sw}$ や $\dot{Q}_{sk}$ の増加は見られたものの、 T_{ty} の上昇は小さく37.0℃に達しなかった。受動的体加温時、運動時ともにU1の認められた被験者では、温熱負荷終了時の T_{oes} は T_{ty} より高かった。

図3は、 $\dot{m}_{sw}$, $\dot{Q}_{sk}$ の増加し始めとU1の時間を各熱負荷ごとにまとめたものである。受動的体加温、運動負荷ともに前額部の発汗と皮膚血管の拡張がおこり、U1は全被験者で観察された。U1は受動的体加温、運動にかかわらず $\dot{m}_{sw}$ と $\dot{Q}_{sk}$ の増加より有意に遅れておこり、 $\dot{m}_{sw}$ と $\dot{Q}_{sk}$ の増加を比較すると、 $\dot{Q}_{sk}$ の増加の方が早い傾向にあったが、両者に有意差はなかった。なお30% $\dot{V}_{O_{2max}}$ の図は1名の結果のみなので省いた。

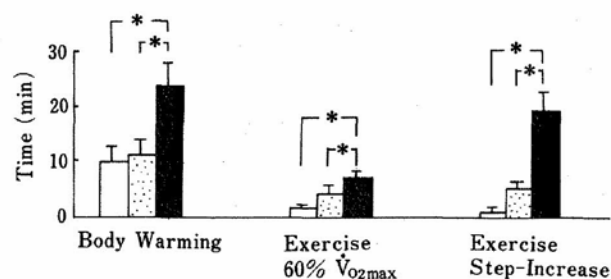


図3 前額部の皮膚血流量と発汗量が増加し始める時間および眼静脈血流の流速が遅くなり始める時間（U1），□：皮膚血流量（ $\dot{Q}_{sk}$ ），▨：発汗量（ $\dot{m}_{sw}$ ），■：U1，*：P<0.05（n=5）

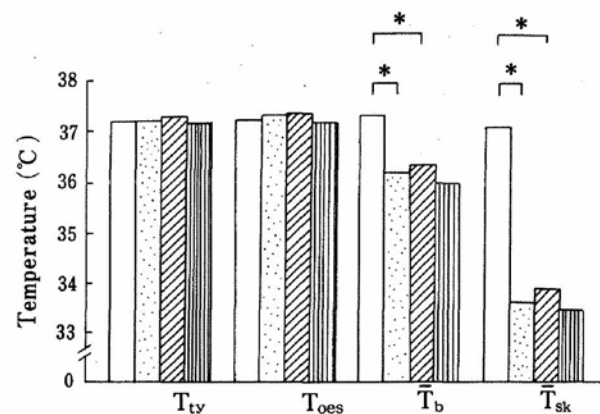


図4 U1時の鼓膜温（ T_{ty} ），食道温（ T_{oes} ），平均体温（ T_b ），平均皮膚温（ T_{sk} ）
□：受動的体加温（n=5），▨：漸増的負荷運動（n=5），▩：60% $\dot{V}_{O_{2max}}$ （n=5），▤：30% $\dot{V}_{O_{2max}}$ （n=1），*：P<0.05

図4は、U1時点の T_{ty} , T_{es} , $\bar{T}_b$, $\bar{T}_{sk}$ を熱負荷ごとにまとめたものである。温熱負荷の手技の如何にかかわらず、U1時点の T_{ty} (または T_{oes})は同じであった。しかし、受動的体加温でU1のおきる時点の $\bar{T}_b$ や $\bar{T}_{sk}$ は、運動時より有意に高かった。

実験2

表2に全被験者のU1の有無を載せた。U1が観察されたのは、受動的体加温では25名中19名、ほかの6名では $\dot{Q}_{ov}$ のドップラー信号出力が上下を繰り返す、明確な判定ができなかった。60% $\dot{V}_{O_{2max}}$ 運動では13名中10名に見られ、3名には観察されなかった。漸増的負荷運動では8名中6名に確認され、2名については判定できなかった。

被験者を運動鍛練者と非運動鍛練者に分け、それぞれでU1の有無を比較したが、U1は受動的体加温では運動鍛練者16名中11名に、非運動鍛練者8名中6名に観察され、とくに鍛練による影響は観察されなかった。

3. 考 察

運動によって深部体温が上昇する。直射日光下や湿度の高い条件では、直腸温は往々にして42.0℃にも達するとの報告があるが、この温度は脳にとってはきわめて危険である。したがって、

運動中は脳組織をこのような過度の加熱から防ぐ何等かの機構が存在するはずである。多くの動物で、運動中の脳温が体幹部で測定した核心温より約0.15℃は低く保たれると報告されている。これは鼻粘膜で冷やされた静脈血が、OVを通して海綿静脈叢へ流入することによる。

今まで運動中のヒトの導出静脈の流れについて報告がなかった。Nagasakaら(1990)によれば、体温を受動的に上昇させたヒトで $\dot{Q}_{ov}$ を機械的に遮断すると、 T_{oes} の上昇率は影響を受けずに T_{ty} の上昇率のみ増加した。また、鼻翼の高さで両側顔面静脈を圧迫し $\dot{Q}_{ov}$ の頭蓋内への流入を促進すると、 T_{oes} の上昇率は影響を受けずに T_{ty} の上昇率のみが減少した。これらの結果は、頭蓋内へ流入する $\dot{Q}_{ov}$ が高体温にあるヒトの脳温の上昇を防ぐのに重要であることを示唆する。

本研究は、正常体温では $\dot{Q}_{ov}$ の方向が頭蓋内から顔面(外向き)の血流、高体温では顔面から頭蓋内(内向き)の血流となることを明確にした。さらに、中性温度環境下で異なる種類の運動によって核心温を上昇させた時にも $\dot{Q}_{ov}$ の方向の明確な逆転が見られた。これは、運動による高体温時でも選択的な脳冷却がおきることを示唆するものである。しかも、 $\dot{Q}_{ov}$ が内向きの流れになり始める時点U1の T_{ty} , T_{oes} は熱負荷の方法に無関係に常にほぼ同じであった。(図4)。

表2 被験者の年齢、運動状況、受動的体加温および運動時のU1の有無

Subject	S.S.	M.H.	M.T.	Y.I.	M.F.	R.H.	A.H.	S.Y.	T.T.	H.F.	K.Y.	S.T.	M.T.	N.Y.	O.T.	T.N.	H.M.	Y.K.	H.A.	H.T.	Y.A.	T.M.	S.I.	H.S.	A.M.
Age (year)	24	37	19	30	21	36	39	21	33	21	21	20	21	19	19	19	19	20	21	20	19	21	19	21	29
TC	U	U	U	U	T	U	U	T	U	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	U	T	T	U
PBW	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+
60	+	+	/	/	-	/	/	+	/	/	+	-	+	/	/	+	/	+	+	/	-	+	+	+	+
Step	+	/	/	/	/	/	/	-	/	/	+	/	/	/	/	+	/	+	+	/	-	+	+	/	/
30	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	/	/	-	/	-	+	-	/	/

TC: Training condition, U: Untrained, T: Trained, PBW: Passive body warming, 60: 60% $\dot{V}_{O_{2max}}$, 30: 30% $\dot{V}_{O_{2max}}$, Step: Step-increase exercise, +: $\dot{Q}_{ov}$ (change), -: $\dot{Q}_{ov}$ (no change), /: no experiment

30% $\dot{V}_{O_{2\max}}$ の運動では T_{ty} , T_{oes} が 37.0°C に達しない場合は $\dot{Q}_{ov}$ の頭蓋内への還流はなかった (図2). これらを考え合わせると, $\dot{Q}_{ov}$ の頭蓋内への還流は, ある程度体温が上昇してから皮膚血流量や発汗量の増加によって, 十分に冷却された血液が頭蓋内に送られる準備が整った後に発動する調節された機構と考えられる.

$\dot{Q}_{ov}$ の流れの方向は, 如何に調節されているかは興味のあるところである. 動物では眼角静脈と顔面静脈は交感神経により調節されており (Elk-hawad ら (1990), Johnsen ら (1988), 寒冷によって交感神経の緊張が亢進する時は眼角静脈は α -アドレナリン作動性で収縮し, 顔面静脈は β -アドレナリン作動性で拡張する. 暑熱高温で交感神経の活動が低下した時, この関係は逆転し, 眼角静脈は拡張, 顔面静脈は収縮して, 静脈血流の方向は鼻粘膜から頭蓋内へと変換する. これは, 推測ではあるが, ヒトの顔面の静脈についても同様であろうと考えられる.

図2のごとく, $\dot{Q}_{ov}$ の方向の変化はきわめて急激である. したがって本研究の結果は, 温熱負荷時に交感神経を介する血管運動神経活動に変化がおきて顔面静脈は収縮, 眼角静脈は拡張し, その結果 OV を経由して頭蓋内へ入る静脈血流が増加したためと説明できる.

$\dot{Q}_{ov}$ が逆転する時の T_{ty} (同じく T_{oes}) は, 温熱負荷の方法の違いには無関係に同じであった. しかし, $\bar{T}_{sk}$ (それゆえ $\bar{T}_b$) は, 受動的体加温時の方が運動時より高かった. 一般的に, 体温調節反応は中枢と末梢の両方の温度入力により発現する.

たとえば, 非蒸発性熱放散量の急増する時の視床下部温は, 皮膚温を上昇させた時の方が, 核心部の体温を上昇させた時より低い (Shido and Nagasaka (1990). 運動時と比べて受動的体加温時には, T_{ty} は同じであっても $\bar{T}_{sk}$ が有意に高く, 全体として生体への温度入力はきわめて大きい.

もし $\dot{Q}_{ov}$ の逆転がありきたりの体温調節反応であれば, 血流の方向が逆転する時の T_{ty} は, 運動中より体加温時に低いはずであるが, そのような事実は認められなかった.

以上の事実をまとめ, われわれはヒトの選択的脳冷却の機序について以下のように推察した (図5). すなわち, 運動などにより体温が上昇すると, はじめ顔面静脈を通して直接大静脈に流れていた血液が, 動物での場合と同じく, 眼角静脈經由で頭蓋内に流れ込むようになる. これは, 高体温になると眼角静脈等の平滑筋を支配する交感神経活動が低下し, 受動的にその部の血流量が増すことと合せて, ラクダの顔面静脈⁴⁾で報告されているごとく, 顔面静脈の組織温度が上昇し, その部の平滑筋の収縮 (血管抵抗の増加) がおきることによって考えられる. 顔面静脈の組織温度が上がって, その部の血管抵抗が増すためであろう. さらに頭皮からの静脈血が, ほかの導出静脈經由で頭蓋内の硬膜静脈洞に流入し, 直接伝導で, また頸部で並行する動脈の血液との間で熱交換をすることがその機序であろう.

高体温時にこのような機構が働くことは, ヒトがより高い運動パフォーマンスを得るためにはきわめて重要である. すでに Hirata ら (1987) は, 高体温時の持久的運動で顔面送風により積極的に顔を冷却すると, 送風しない場合より, T_{oes} の上

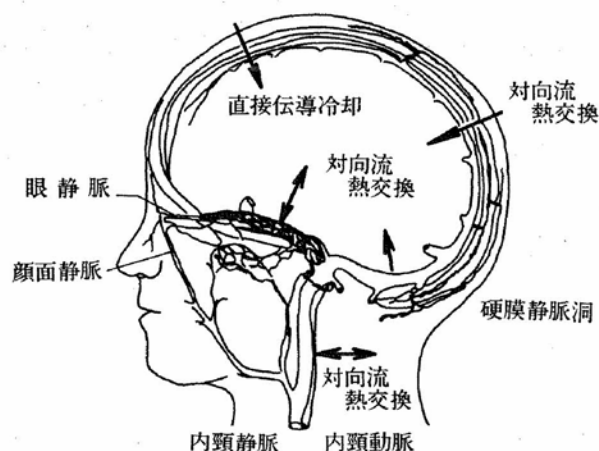


図5 ヒトの選択的脳冷却機構のメカニズム

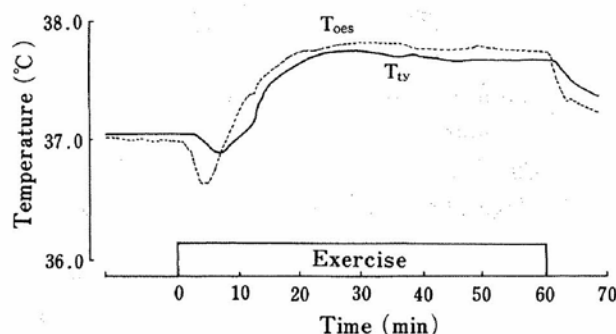


図6 運動時の食道温、鼓膜温の経時的変化
(負荷強度: $50\% \dot{V}_{O_{2max}}$)

昇率に比べ T_{ty} の上昇率が低く保たれ、結果的にパフォーマンスが延長することを示唆している(図6)。これは個々の発汗能を含めた選択的脳冷却機序能の優劣が、持久的運動のパフォーマンスを左右する要因になりうることを示唆するものである。

ヒトには高温環境下で運動した場合、同じ環境条件、運動条件にもかかわらず、熱疲労や熱中症をおこす者がいる。あるいは季節の変動を含めた環境条件の違いにより、極端にパフォーマンスに差の出る者もいる。この原因として、選択的脳冷却機構の発現と効率に個人差のあることも考えられる。

U1にも明らかに個人差が観察され、眼静脈血流の頭蓋内方向への還流が判定できなかった被験者(ほぼ10%~20%)の中には、運動鍛練者が半数以上占めていた(表2)。U1の発現しやすさは、運動などによる暑熱訓練によって、容易に獲得できる性質のものではないことを示唆するが、詳細については今後の検討が必要であろう。しかし、このような超音波ドップラー法で、簡単にヒトの耐暑性や高温下の運動適性の判定が可能となるならば、暑熱下での運動や労働時の安全性はもちろんのこと、ヒトのパフォーマンスの向上にも寄与することになる。そのためにはこの方面のさらなる研究が望まれる。

4. 結 論

ヒトの選択的脳冷却に関わる運動時や、受動的体加温時における眼静脈血流の方向の変化の機序と、その個人差についてつぎのようなことが明らかとなった。

眼静脈血流の頭蓋内への還流は、顔面の皮膚血流量や、発汗量が増加する時点よりかなり遅れておきた。この還流開始時の核心部体温は、熱負荷の手技如何にかかわらず常にほぼ同じであったが、皮膚温は熱負荷の種類により大きく異なった。

またこの反応は、皮膚血流量や発汗量の増加に追従するような漸増的な反応ではなく、on-off 的性質をもった急激におきる反応であった。被験者の20%程度にはこの反応がみられず、この反応に個人差のあることが判明した。この反応の発現は、暑い環境で運動を行うには有利なはずで、その有無によりヒトのパフォーマンスにどのような差ができるか興味のあるところである。暑熱障害防止の観点からもこの方面の研究の成果が待たれる。

謝 辞

御援助いただきました石本記念デサントスポーツ科学振興財団、本実験の被験者諸氏に深謝致します。

文 献

- 1) Baker, M. A.; Brain cooling in endotherms in heat and exercise, *Ann. Rev. Physiol.*, **44**, 85-96 (1982)
- 2) Cabanac, M., Brinnet, H.; Blood flow in the emissary veins of the human head during hyperthermia, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **54**, 172-176 (1985)
- 3) Caputa, M., Kadziela, W., Narebski, J.; Cerebral temperature regulation in resting and running guinea-pigs (*Cavia porcellus*), *J. Therm. Biol.*, **8**, 265-272 (1983)

- 4) Elkhawad, A. O., Al-Zaid, N. S. Bou-Resli, M. N. ; Facial vessels of desert camel (*Camelus dromedarius*) : role in brain cooling, *Am. J. Physiol.*, **258**, R 602-R 607 (1990)
- 5) Hirashita, M., Shido, O., Tanabe, M. ; Blood flow through the ophthalmic veins during exercise in humans, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **64**, 92-97 (1992)
- 6) Hirata, K., Nagasaka, T., Nunomura, T., Hirai, A., Hirashita, M. ; Effects of facial fanning on local exercise performance and thermoregulatory responses during hyperthermia, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **56**, 43-48 (1987)
- 7) Johnsen, H. K. Folkow, L. P. ; Vascular control of brain cooling in reindeer, *Am. J. Physiol.*, **254**, R 730-R 739 (1988)
- 8) Maron, M. B., Wagner, J. A., Horvath, S. M. ; Thermoregulatory responses during competitive marathon running, *J. Appl. Physiol.*, **42**, 909-914 (1977)
- 9) Nagasaka, T., Hirashita, M., Tanabe, M., Sakurada, S., Brinnel, H. ; Role of the veins of the face brain cooling during body warming in human subjects, *Jpn. J. Biometeorol.*, **27**, 113-120 (1990)
- 10) Shido, O., Nagasaka, T. ; Thermal balance during intraperitoneal electric heating at various ambient temperature in rats, *Jpn. J. Aerosp. Environ Med.*, **23**, 27-32 (1986)