

●招請講演

頭部で起こる対向流熱交換 —ヒトの選択的脳冷却機構についての考察—

永坂鉄夫*

動物には高体温時に体温とは独立して脳を冷却する機構がある。この選択的脳冷却（SBC）はヒトにも存在し、鳥類、哺乳類に普遍的な機構である。ヒトは多くの動物にみられるような頸動脈網をもたず、頭蓋内で強力な対向流熱交換が期待できないとする意見もあるが、ヒトでは導出（眼角—眼）静脈の血流の増加と分時換気量の増加で頭頸部での動静脈血間の対向流熱交換が促進され、このSBCに大きく貢献する。ヒトでSBC機構が有効に作動するためには、導出静脈や眼角静脈を経て頭蓋内に還流する静脈血が、頭部の汗の蒸発と上気道粘膜での水の蒸発により十分冷却される必要がある。このような事実を十分理解し応用することにより、極端な高温環境下での作業、スポーツ、あるいは温熱療法時のヒトの健康と快適性、パフォーマンスの向上を図りうるが、その具体策につき提言した。

キーワード：選択的脳冷却，頭頸部，対向流熱交換，高体温

Counter-Current Heat Exchange in the Head
— A Mechanism of Human Selective Brain Cooling —

Tetsuo Nagasaka
Professor Emeritus, Kanazawa University

A vascular mechanism with which the brain is selectively cooled during hyperthermia is a well-accepted fact in animals. This selective brain cooling (SBC) can also occur in hyperthermic humans despite the fact that humans have no carotid rete, a vascular structure that facilitates counter-current heat exchange and that is located at the base of the skull in some mammals. In humans, an increase in emissary and angular-ocular venous flows enhances counter-current heat exchange within the head and neck which contributes to SBC, whose efficiency is increased by evaporation of sweat on the head and by increased ventilation through the nose. Good knowledge of human SBC, facilitating heat loss from the head, avoiding headgear, increasing ventilation by dilating the athlete's nostrils etc., is likely to improve the health and comfort of subjects to extreme hot environments for their work, sport events, or for therapeutic reasons.

Keywords : _____
selective brain cooling
head and neck
counter-current heat exchange
hyperthermia

はじめに

脳は代謝の高い臓器で、およそ20Wの熱を産生する。その熱は脳に流入するおよそ $5\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ の動脈血により処理され、その結果、脳から帰還する静脈血の温度は流入する動脈血の温度より 0.5°C ほど高い。脳が動脈血で冷やされることは、一側の頸動脈を圧迫しその血流を止めるとその側の鼓膜温 (T_{ty}) が高くなる¹⁾ ことから明白である。このように、流入する動脈血の温度が脳温より低ければ、特別な機構がなくても脳は冷却されその機能を維持しうる。また、脳は高温にはきわめて弱い臓器で、脳温が 40.5°C を越すとその機能になんらかの障害が現れる²⁾。激しい運動や暑熱暴露で体温がこの限界温を越すレベルにまで上

* 金沢大学名誉教授

昇した場合は、脳の機能維持のためにこの限界温以下に脳温を下げておく必要があり、そのために発達した特別な機構が選択的脳冷却 (selective brain cooling: SBC) である³⁾。

動物のSBC

イヌやネコでは、激しい運動で体温が大きく上昇しても脳温はそれより1~2℃低く抑えられる。それは、パンティング (panting) による上気道を通する気流量の増加、唾液腺や鼻腔粘膜の腺からの水分分泌の増加、舌の血管拡張などで上気道からの水の蒸発が促進し、そこで冷やされた大量の血液が眼角静脈を経て頭蓋内の海綿静脈洞などに注ぎ、直接あるいは間接に脳を冷却するためである。

ネコでは、外頸動脈 (ネコの場合脳に血液を送る主動脈) はこの海綿静脈洞にとり囲まれる格好で細かく枝分れしていわゆる頸動脈網を作り、そこから離れる時再び1本に合して脳に達する。このような構造は動静脈血間で対向流熱交換を有効に行うのに適する⁴⁾。イヌの頸動脈網は発達が弱い、それでもその部で動脈と静脈の接触面積が増え、対向流熱交換が助長される。高体温時にみられるこのようなSBCは、イヌ、ネコなど食肉類だけに限られるものではなく、ウサギ類、偶蹄類、奇蹄類など近縁関係の離れた目でも確認され、哺乳類に普遍的な機構である。

ヒトのSBC

Cabanac and Caputa⁵⁾によれば、温浴で高体温になった被験者の食道温 (T_{es}) と鼓膜温 (T_{ty}) の関係は、温浴前は $T_{ty} > T_{es}$ であるが、温浴で体温が上昇した後は $T_{ty} < T_{es}$ となり、さらに温浴中に頭部に風を当てるとその関係がさらに増強され、 T_{es} と T_{ty} の差が約0.6℃と大きくなった。その後に行われた多くの研究でもほとんどそれと同様の結果が得られている。

しかし、ヒトは高体温になってもパンティングをせず、また頭蓋底に頸動脈網をもたない。頸動脈網はSBCに不可欠の構造であり⁶⁾、それなしに1本づつの動静脈で対向流熱交換により処理できる熱は、例えばその血液温度差が1℃であったときには僅かに5Wに過ぎず⁷⁾、大きく見積もって

も0.02℃/℃である⁸⁾ など、ヒトの頭蓋底での対向流熱交換機能を否定する研究者がいる。しかし、ウマは頸動脈網をもたずパンティングもしないが、運動による高体温で鼻の周囲や顔面からも大量の発汗をし明らかなSBCが記録されており⁹⁾、彼らの主張には正当性がない。ヒトの眼角静脈も眼静脈と通じ、顔面や鼻粘膜から来た静脈血を頭蓋内に送る。その他頭皮には導出静脈と呼ぶ特殊な静脈があり、頭蓋骨に開いた導出孔を通じて頭皮側と頭蓋内側を交通する。超音波ドップラー血流測定素子をそれらの静脈上に置きその血流の方向と速度を測定すると、高体温時には、それら静脈を経由し頭蓋内に流入する血流が増え、それに応じて $T_{ty} < T_{es}$ の関係が増強する^{10, 11)}。

眼角 (導出) 静脈血流により T_{ty} の上昇が抑えられていることを証明する目的で両側の眼角静脈を皮膚上から圧迫しその血流を遮断すると、 T_{ty} が上昇し $T_{ty} < T_{es}$ の関係が弱くなり、圧迫解除により徐々に血流遮断以前の関係に回復した (図1)¹²⁾。顔面静脈を鼻翼の横で閉塞し眼角静脈経路で頭蓋内に流入する血流を増加させると、 T_{ty} が低くなり、 $T_{ty} < T_{es}$ の関係が強くなった。眼角静脈領域に血管障害を持つ「しゅさ (rosacea)」の患者では眼角静脈経路で頭蓋内に流入する血流が阻害されており、高体温時でも T_{es} と比べて T_{ty} が低くない¹³⁾。このことも、眼角静脈や導出静脈の血流がヒトのSBCに大きく関わることを示唆する。内頸動脈は、頭蓋内に入ると直ちに静脈網に囲まれ、動脈血と静脈血の接触する面積は3倍に増える。高体温時に顔面に送風しながら測定した眼角部の静脈血温が17~18℃であったという報告もあり、それから計算すると、海綿静脈洞の中だけで頸動脈血は0.5~0.6℃冷やされることになる。さらに動静脈血間での熱交換は海綿静脈洞以外の場所、例えば内頸静脈と総頸動脈の間でも起き¹⁴⁾、それらの結果ウイリス環内の温度が脳温より低くなる¹⁵⁾。一側だけ頭の皮膚を冷やしたときその側の頸動脈血温が下がることも頭頸部で対向流熱交換が有効に起きていることを示唆する。

ヒトの頭部の皮膚にある汗腺の数は他の体部の皮膚より単位面積あたりで2倍ほど多く、汗に基づく水分蒸発量も頭部で多い¹⁶⁾。しかもこの頭部の発汗は脱水による影響を受けない¹⁷⁾。このよう

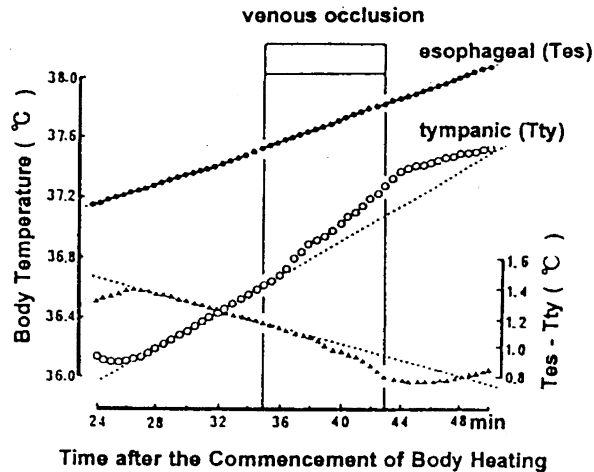


図1 体加温中に眼角一眼静脈血流を閉塞 (venous occlusion) して起きる体温の変化 (1例)¹²⁾

T_{es} : (食道温), T_{ty} : (鼓膜温)。体加温中は顔面に送風した。静脈血流閉塞により T_{es} と T_{ty} の差が減少した。この被験者は体加温直後から頭部に強い発汗があり、そのため T_{ty} の著しい下降が起き、測定中の T_{ty} は T_{es} より大きく低くなった。

な特徴は、熱放散を必要とする脳に対し頭部の皮膚が最短の位置にあることを含め、SBCの機序として考えると理解しやすい。

SBCが効率よく行われるためには、頭部で十分な発汗があり、かつその汗が有効に蒸発する必要がある。例えば、自転車漕ぎ運動をしている被験者の顔に送風し続けると、運動による T_{es} の上昇は大きくても T_{ty} の上昇は軽微で、より強い運動を継続することができる。しかし、頭部にフードを被せ風が当たらなくなると、 T_{ty} が上昇し、かなり低い T_{es} レベルでもごく軽い運動しか遂行できなくなる¹⁸⁾。高温時に送風などで頭部を冷やすと、同じ躯幹部温であっても「温熱的な心地好さ (thermal comfort)」が増し、最大仕事量が増え、仕事にともない生じる種々のストレスの徴候が減る。Brinnel et al¹⁹⁾によれば、温浴で T_{es} が 38.5°C に上がり「温熱的な不快感」のある被験者の頭部に送風すると、 T_{ty} が 0.6°C 下降し、 T_{es} は同じであってもこの「不快感」が著しく減り、全身加温に耐えられる時間が、送風のない場合の30分から50分に延長した。

Germain et al.²⁰⁾は、運動選手をトレッドミル上で、走行スピードに応じた風速の風を頭部に当

てつつ、平均の T_{es} がほぼ 40°C になるまで走らせ、1回は運動停止後もそのまま頭部に同じ風速の風を送り続け、別の回では運動停止後は全く送風をせず、両者の運動停止後の T_{ty} の変化を観察したが、運動停止後も顔面送風を続けた場合は、 T_{ty} は運動停止後わずかに 0.1°C 上昇した後で急速に下降し、 T_{es} より有意に低い値に回復した。しかし、顔面送風のない場合には、運動を停止しても T_{ty} はさらに上昇し続け、4.5分後には 0.5°C 近くまで上昇し、その後徐々に T_{es} に近い値に下降した(図2)。このような報告は、暑熱環境下での運動では、脳の保護のために運動を停止した後も頭部を冷却し続ける必要があることを示唆する。

ヒトは運動などで高温になってもパンティングはしないが、分時換気量 (V_E) が著しく増加する。もちろん、この V_E の増加は必要な代謝量を維持する目的の反応であるが、SBCも促進する。例えば、開放システムにつないだマスクを通して呼吸しながら自転車エルゴメータ運動をしている被験者のマスク内に水蒸気で飽和した空気を送り高湿度にした空気を一定時間呼吸させると、それ以前には $T_{ty} < T_{es}$ であった関係が、 T_{ty} の上昇によりほぼ $T_{ty} = T_{es}$ となる³⁾。温浴により核心部温を上

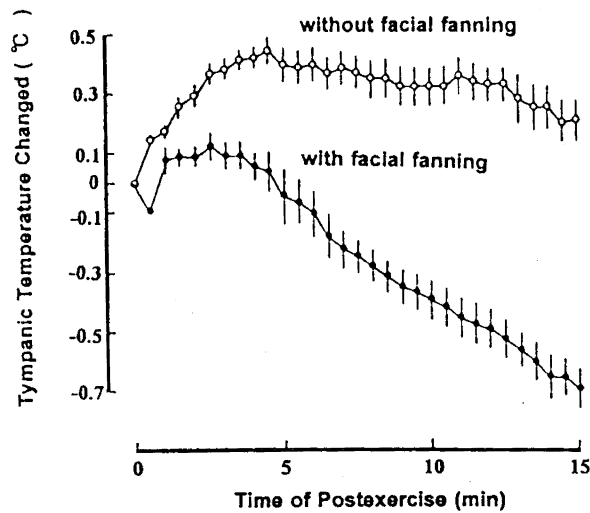


図2 筋運動終了後の鼓膜温に及ぼす顔面送風の影響 (n=8)²⁰⁾
送風量: 3.75m/s。鼓膜温は、運動終了時のものを基準としてそれからの変動で表した。両群とも運動中は顔面に送風した。

昇させた場合も V_E が増加するが、酸素消費量はそれほど増加しないので、その機序と効果は動物でのパンティングの場合と同じと考えてよい。Mel-lergaard²¹⁾によれば、昏睡患者の鼻腔に加湿した冷気 (5~10 l·min⁻¹) を送るだけで、直腸温は変わらずに脳室内温度が0.2°C下降した。

上気道粘膜を有効に冷却するには、換気量の増加だけでなく、粘膜面からの蒸発に必要な水分が十分に供給されねばならない。White and Cabanac²²⁾によれば、温浴時の被験者の鼻粘膜血流量は温浴前と比べ3倍に増加した。鼻粘膜からの蒸発に必要な水分は鼻漏によっても供給される。鼻漏はヒトが運動している最中にも起き、イヌで知られる機構と類似する。もちろん高体温時の鼻粘膜血流量の増加は体温上昇に依存した調節的反応であり²²⁾、それは鼻粘膜に動静脈吻合 (AVA) が多数存在することからも推測できる。高体温時に、上気道で冷やされた静脈血が頭蓋内に流れ込むのは、顔面皮膚から静脈血が頭蓋内に流れ込むのと同じ原理による。鼻・咽頭静脈と頭蓋内の静脈網の間にはおびただしい吻合的な静脈があり、例えば、翼状静脈叢は海綿静脈洞と連絡し、篩板を通過する導出静脈がある。加えて、鼻腔との間

の距離が短く、熱放散の起きる鼻粘膜と脳の前頭葉などの距離はわずかに数mmしか離れておらず、脳と鼻腔の間できわめて急な温度勾配が存在する。したがって、静脈血のみでなく、鼻腔からの伝導で脳が直接冷される可能性も強い。

SBCの応用

夏の高温多湿の環境でスポーツあるいは労働に従事すると、脳温が上がり熱中症の発生が予想される。自由に水が摂取できず全身を冷却することもできない野外あるいは労働の場で熱疲労や熱中症に罹患した人に対しては、頭部を水で濡らす、顔面に霧を吹き掛け送風するなどして、ともかく頭部を冷却すべきである。

播種性の悪性腫瘍の治療のために全身の高体温療法が行われる²³⁾。このときSBCを助長する方法で脳温の上昇を抑えておけば、投与する熱のドーズをより多くし、治療の効果を上げることができ。患者の顔を冷水に浸けて核心部温を44°Cで30分間維持することができたという報告もある³⁾。

SBCにより運動中の脳温が下げられ心臓の負担が減り、同時に開放ループ型の調節が働き、筋温が上昇し、運動により好都合な状態となる³⁾。し

たがって、競技者は運動中にSBCを阻害しないよう留意すべきである。多くの運動競技では、汗とりの目的で種々のヘッドギヤーが用いられるが、高度の運動能力の維持が要求されるスポーツ競技の場でヘッドギヤーの使用は好ましくない。Rasch and Cabanac²⁴⁾によれば、ヘッドギヤーの着用はSBCの効率を低下させ、運動能力を減退させる。

ウマは運動で高体温になってもパンティングをしないが、大量の発汗をする。頭蓋底には頸動脈網がなく、その点でウマの頭部の熱放散の機構はヒトのものと類似するようにみえる。しかし、気管に呼吸弁を挿入し鼻を通さずに直接外気を呼吸するようにして運動させたウマでは、鼻を通して呼吸させた場合と比べ、 V_E の増加は同じであっても脳温が大きく上昇した^{9,25)}。SBCに関しウマではヒトのような頭部の発汗の役割は比較的少ない。逆に、ヒトでも口を通じて呼吸した方が鼻から呼吸をした時より T_{ty} の上がり大きい。これらはすべて呼吸がヒトのSBCにも役割を持つことを示唆する。運動時の呼吸性熱放散量が100W近くになるという報告²⁶⁾があるが、その量は脳で産生される熱の処理に十分な量である。

呼吸がヒトのSBCにとっても重要な役割を持つことはWhite and Cabanac²⁷⁾の研究からも明らかである。運動中に特殊な装置で鼻孔を開大して呼吸させた被験者では、ふつうの被験者と比べて T_{ty} の上昇度が減少した。すなわち、鼻腔が高体温の人でSBCが働くための熱交換器として働いており、鼻孔の機械的な開大の結果増加した気流がこの機構の働きを促進したと考えられる。長距離ランナーやクロスカントリーのスキー選手、あるいはもっと一般的に長時間強い筋運動をする人々すべてに対し、適切な呼吸法を採択することを勧める。運動選手たちがすでに自発的に採用している、鼻から息を吸い口から吐く呼吸法は、水の損失という代償は払うものの、鼻腔粘膜からの熱放散を促進し、呼気から熱が再び体内に戻るのを制限するので奨励できる。

〔参 考 文 献〕

- 1) OGAWA, T., SUGENOYA, J., OHNISHI, N. et al : Bilateral differences in tympanic temperatures reflect
- that in brain temperature. MILTON, A.S. (ed.), Temperature Regulation, Recent Physiological and Pharmacological Advances, Basel, Birkhauser Verlag, 1994, pp. 127-131
- 2) CAPUTA, M. : Selective brain cooling : an important component of thermal physiology. Szelenyi Z. and Szekely, M. (eds.), Contributions to Thermal Physiology. Oxford, Pergamon Press, 1981, pp. 183-192
- 3) CABANAC, M. : Human Selective Brain Cooling. Austin (USA), R. G. Landes Company, 1995, pp. 1-114.
- 4) BAKER, M.A. AND HAYWARD, J.N. : Carotid rete and brain temperature of cat. Nature 216 : 139-141, 1967
- 5) CABANAC, M. and CAPUTA, M. : Natural selective cooling of the human brain : evidence of its occurrence and magnitude. J. Physiol. (Lond.), 286 : 255-264, 1979
- 6) BRENGELMANN, G.L. : Brain cooling via emissary veins : fact or fancy? Behav. Brain Sci. 13 : 349-350, 1990
- 7) WENGER, C.B. : More comments on "Keeping a cool head". NIPS, 2 : 150, 1987
- 8) NIELSEN, B. : Natural cooling of the brain during outdoor bicycling. Pflügers Arch. 411 : 456-461, 1988
- 9) MCCONAGHY, F.F., HALES, J.R.S., ROSE, R. J. et al. : Selective brain cooling in the horse during exercise. J. Appl. Physiol. 74 : 1849-1854, 1995
- 10) CABANAC, M. and BRINNEL, H. : Blood-flow in the emissary veins of the human head during hyperthermia. Eur. J. appl. Physiol. 54 : 172-176, 1985
- 11) HIRASHITA, M., SHIDO, O. AND TANABE, M. : Blood flow through the ophthalmic veins during exercise in humans. Eur. J. appl. Physiol. 64 : 92-97, 1992
- 12) NAGASAKA, T., HIRASHITA, M., TANABE, M. et al. : Role of the veins of the face in brain cooling during body warming in human subjects. Jpn. J. Biometeor. 27 : 113-129, 1990
- 13) BRINNEL, H., FRIEDEL, J., CAPUTA, M. et al., Rosacea : disturbed defense against brain overheating. Arch. dermatol. Res. 282 : 66-72, 1989
- 14) MCCAFFREY, T.V., MCCOOK, R.D. and WUSTER, R.D. : Effect of head skin temperature on tympanic and oral temperature in man. J. appl. Physiol. 39 : 114-118, 1975
- 15) MARIK, Z., BONDYRA, Z. and PIELARSKA, M. : The temperature within the circle of Willis vs. tympanic temperature in humans. Eur. J. appl.

- Physiol. 66 : 518-520, 1993
- 16) OGAWA, T. : Regional differences in sweating activity. HALES, J.R.S. (ed.), Thermal Physiology. New York, Raven Press, 1984, pp. 229-234
 - 17) CAPUTA, M. and CABANAC, M. : Precedence of head homeothermia over trunk in dehydrated men. Eur. J. appl. Physiol. 57 : 611-615, 1988
 - 18) CABANAC, M. and CAPUTA, M. : Open loop increase in trunk temperature produced by face cooling in working humans. J. Physiol. (Lond.), 289 : 163-174, 1979
 - 19) BRINNEL, H., NAGASAKA, T. and CABANAC, M. : Enhanced brain protection during passive hyperthermia in humans. Eur. J. appl. Physiol. 56 : 540-545, 1987
 - 20) GERMAIN, M., JOBIN, M. and CABANAC, M. : The effect of face fanning during recovery from exercise hyperthermia. Can. J. Physiol. Pharmacol. 65 : 87-91, 1987
 - 21) MELLERGAARD, P. : Changes in human intracerebral temperature in response to different methods of brain cooling. Neurosurgery 31 : 671-677, 1992
 - 22) WHITE, M.D. and CABANAC, M. : Nasal mucosal vasodilatation in response to passive hyperthermia in humans. Eur. J. appl. Physiol. 70 : 207-212, 1995
 - 23) BULL, J.M.C. : A review of systemic hyperthermia. Frontiers Rad. Ther. Oncol. 18 : 171-176, 1984
 - 24) RASCH, W. and CABANAC, M., : Selective brain cooling is affected by wearing headgear during exercise. J. appl. Physiol. 74 : 1229-1233, 1993
 - 25) NAGASAKA, T., BRINNEL, H., HALES, J.R.S. et al. : Selective brain cooling in hyperthermia : the mechanisms and medical implications. Medical Hypotheses 50 : 203-211, 1998
 - 26) RASCH, W., SAMSON, P., COTE, J. et al. : Heat loss from the human head during exercise. J. appl. Physiol. 71 : 590-595, 1991
 - 27) WHITE, M.D. and CABANAC, M. : Physical dilatation of the nostrils lowers the thermal strain of exercising humans. Eur. J. appl. Physiol. 70 : 200-206, 1995