

暑熱環境下における運動時の熱中症防止や 競技パフォーマンス向上に果たす血液量の生理学的意義

上條義一郎¹⁾

1) 和歌山県立医科大学・リハビリテーション医学講座

キーワード：インスリン・糖質タンパク質サプリメント・暑熱馴化

はじめに

ヒトは他の四足動物に比べ、運動時の活動筋で生じた熱を皮膚血流と発汗により皮膚表面から放散させる能力に非常に長けている。しかし、近年のアメニティの充実ヒトが持つ環境適応能力を劣化させ、一方で地球温暖化を加速させている。わが国の消防庁の報道資料によると、2010年には熱中症による死亡者数が1700名を超え、過去最悪であったが、その80%が65歳以上の高齢者であった。このように、熱中症は深刻な社会問題になっている。

ヒトの体温は熱産生と熱放散が等しいと一定に保たれる。運動時には運動した分だけ余計に熱が発生し、それにより体温が上昇する。その理由は、運動時における筋肉の収縮のためのエネルギー効率が約20%と低く、残りの80%は熱に変換されるためである。例えば、体重60kgで安静時体温が37°Cのヒトがジョギング程度の運動をすると、たった30分間で体温が40°Cを超えるほどの熱が発生することになり、本来なら運動継続が困難となる。しかし実際は、体温が上昇すると皮膚の血管が開きここに血液を集めて外界へ熱を逃がし、また汗をかいて、その蒸発によっても熱を逃がし、そのおかげで体温は高々38°C程度までしか上昇しない。このようにヒトは実にうまく体温調節を行っている。

しかし、皮膚血管への血液貯留や大量の発汗による脱水は心臓へ還る血流量(静脈還流量)を減少させる。そのまま皮膚血管拡張が続き、何の代償作用も働かなければ、本来活動筋へ送られるべき血流が皮膚の方へ横取りされ、血圧は低下し、すぐに脳血流が維持できなくなり失神を起こす。これは「熱失神」と言われ熱中症の病態の一つである。これを防ぐためにヒトの体は、心臓への静脈還流量が減少すると、心房が脱伸展し、その情報が心血管中枢に伝えられ、交感神経を介して過剰な皮膚血管拡張を抑制し、体温調節を犠牲にしても血圧を維持しようと働く。その結果、体温上昇はさらに加速する。ヒトが暑い日に運動するとき、涼しい日に比べてより疲れたと感じるのはこのためである。

それでは、このいわゆる“バテ”を防ぐためにはどうした

らよいだろうか？ そのカギとなるのが“血液量”である。暑い日に水分摂取を行わずに運動するとすぐに疲れてしまう。反対に、もともと体力があり血液量が多い者は活動筋ばかりでなく皮膚にも十分な血流を分配できるため、暑い日に同じ強度の運動をしても体温上昇は抑えられ楽に運動することができる。運動時の熱中症防止や競技パフォーマンス向上を促すためには“いかに血液量を維持または増加させるか”が重要である。しかし、現時点でこの“血液量”にフォーカスした考えが一般に浸透しているとは言い難い。

そこで、我々が過去に行ってきた研究成果を中心に、i)脱水状態から速やかに体液の回復を図るためには食塩とブドウ糖を含む糖電解質飲料の摂取が有効であること(水分補給)、ii)若年者のみならず血圧が高い高齢者において一定期間の持久性トレーニング+糖質・タンパク質摂取による血液量の増加が運動時の皮膚血管拡張や発汗反応を亢進させること(暑熱馴化)、iii)このような血液量増加による暑熱馴化のメカニズム(皮膚交感神経活動の関与)について述べ、暑熱馴化における血液量増加の意義について考察する。更にiv)交感神経活動が障害された頸髄損傷者においては、どんなに体温が上昇しようともこのような圧反射性皮膚血流調節は生じないが、局所の温・冷刺激による皮膚血管反応は残存していることを紹介し、同競技者らの暑さ対策について考察する。

効率の良い脱水の改善 (水分補給)

体重の2%以上の脱水が生じると体温調節能ばかりでなく持久力も低下する。従って、熱中症予防や競技パフォーマンス低下防止のためには体重減少が2%以内に収まるような水分補給が望まれる。しかし、ヒトは自身のどのの渴きに任せて水分摂取を行っても、脱水により失った水分を完全に回復させることはできない。これを自発性脱水と呼ぶ。運動時の水分補給では、自発性脱水を最小限に食い止めることがポイントとなる。暑い環境で長時間運動するとき、0.1 - 0.2%の食塩(ナトリウム濃度換算で17 - 34 meq/l)と4 - 8%の糖質を含む「糖電解質飲料」(含スポーツドリンク)の摂取が推奨され

ている¹⁾。これは汗で失われたナトリウム(Na⁺)やエネルギー源を補給するためばかりでなく、食塩の摂取は血液の浸透圧を維持するため、また糖質(ブドウ糖)の摂取は腎臓でのNa⁺イオンの取り込みを増やすために尿排泄を抑える働きがあるためである。

なぜ食塩が自発性脱水を軽減するか? Noseら²⁾は2.3%の脱水後に180分間の回復期を設け、水または0.45%食塩水を自由に摂取させた。すると、水摂取条件では失った体液の68%が回復し、血漿量は78%しか回復しなかったが、0.45%食塩水摂取条件では、失った体液の82%が回復し、血漿量は脱水前のレベルを超えて174%も回復した。水摂取条件で体液の回復が悪かった理由は、血漿浸透圧低下による口渴感減少が飲水量を低下させたことや自由水クリアランスが増加したためであると考察された。

一方、以前からヒトにインスリン輸液を行うと尿中Na⁺排泄量が減少すること³⁾、*in vitro*において腎尿細管・集合管にはインスリン受容体が存在することが知られていた⁴⁾。そこで我々は、「脱水後のブドウ糖摂取によるインスリン分泌増加が腎Na⁺再吸収を促進させ血漿量回復を早める」という仮説を証明するために実験を行った。被験者は2.3%の脱水後に発汗量と同量の糖質濃度を変えた3種類の電解質飲料(21 meq/l [Na⁺], 5 meq/l [K⁺], 16.5 meq/l [C], 10 meq/l [Citrate⁻³])を30分以内に飲み、飲水開始から180分間安静にした。3種類の飲料の糖質濃度はいずれも溶液100 ml当たりで、高炭水化物摂取条件(HG; ブドウ糖:果糖 = 3.4g : 3.1g)、低炭水化物摂取条件(LG; 1.7g : 1.6g)、コントロール(C; 0.0g : 0.0g)とした。その結果、血漿バゾプレッシン・アルドステロン濃度が条件間に有意差を認めなかったにもかかわらず、血漿量の回復率はHGで最も早く、そのレベルは最終60分間維持された。同時に、尿蓄積量が最終90分間で最少であり、腎Na⁺再吸収率が最初の120分間で最も高く、さらに最初の45-105分で血清インスリン濃度が最高値を示していたことから、この血漿量回復の亢進はブドウ糖摂取によるインスリン上昇が腎Na⁺再吸収を亢進させた結果と考えられた⁵⁾。

以上より、暑熱環境において長時間運動するとき、「糖質電解質飲料」の摂取が推奨される。

予め血液量を増やしておく (暑熱馴化)

前述のようにもともと人間には優れた体温調節機能があり、体が暑さに慣れること(暑熱馴化)によりさらに外界へ熱を逃がしやすくする。つまり、暑熱馴化後に同じ強度の運動をしても体温上昇は抑えられ、楽に感じる。我々の研究から、この暑熱馴化による体温調節反応の亢進には血液量の増加が関与していること、効率よく暑熱馴化させ、血液量を増やすためには「ややきつい運動直後の糖質+タンパク質摂取が有効

である」ということが明らかになってきた。

若い男性被験者(20-24歳)18名を対象に、室温30°Cの部屋で最大体力の70%の強度で自転車運動を30分間行い、その直後10分以内に糖質(70g)と乳タンパク質(20g)を含むサプリメント(サプリメント群; 9名)かプラセボ[偽薬](プラセボ群; 9名)を摂取し、5日間続けてもらった⁶⁾。すると、プラセボ群では血漿量、血漿アルブミン量がともに4%しか増加しなかったのに対し、サプリメント群ではそれぞれ8%、10%も増加した。アルブミンとは、血液中に多いタンパク質の1つで血管中の血液量を調節する働きがあり、アルブミン1gで18mlの水を引き寄せる効果がある。従って、サプリメント群では血漿アルブミン量がより増えたため血漿量の増加が大きかった。その結果、プラセボ群では体温上昇に対する皮膚血管の開きやすさ、汗のかきやすさは暑熱馴化後にそれぞれ20%、10%増加したが、サプリメント群では馴化前に比べて馴化後にはそれぞれ50%、40%も増加した。すなわち、サプリメント群の方がプラセボ群に比べて約3倍も熱を逃がしやすくなった。

Okazakiら⁷⁾は、高齢者において持久性トレーニング期間中の運動直後の糖質・蛋白質サプリメント摂取が血漿量増加と体温調節能に与える効果を検証した。健康な高齢者に、室温19°Cの環境下において、週3回、60分間の60-75%VO_{2peak}の強度で自転車運動を8週間行なわせ、運動直後に糖質・蛋白質サプリメント(サプリメント群)、もしくはプラセボ(コントロール群)を摂取させた。そして、トレーニング期間前後に血漿量を測定し、さらに温暖な環境下でトレーニング開始前の60%VO_{2peak}の強度で20分間の自転車運動を行った際の食道温、食道温上昇に対する胸部発汗速度(ASR/ΔT_{es})と前腕皮膚血管コンダクタンスの上昇の感受性(ΔFVC/ΔT_{es})を測定した。その結果、サプリメント群ではトレーニングにより、血漿量が6%増加したが、コントロール群では増加しなかった。また、サプリメント群では、ΔFVC/ΔT_{es}が80%、ASR/ΔT_{es}が18%増加したが、コントロール群では増加しなかった。これらの結果は、サプリメント摂取が血漿量を増加させ、体温調節を改善することを示唆する。

さらに最近Kataokaら⁸⁾は、血圧が高めの高齢男性(平均年齢69歳、平均収縮/拡張期血圧=160/90mmHg)を対象としてOkazakiらと同様のトレーニングを行い、毎回の運動直後15分以内に糖質15g+蛋白質10gを摂取させた群では血漿量は7%増加し体温調節反応も改善したが、糖質25gのみを摂取した群ではこのような改善を認めなかった。そして、この血漿量増加にもかかわらず安静・運動時の血圧はむしろ低下した。即ち、年齢にかかわらず70%VO_{2peak}程度の運動直後に糖質+蛋白質を摂取することは暑熱馴化獲得に有効であり、この際の血漿量増加は高齢者において血圧を悪化させないことが

明らかとなった。

以上より、若年者のみならず血圧が高い高齢者において、一定期間の持久性トレーニング+糖質・タンパク質摂取による血液量の増加が運動時の皮膚血管拡張や発汗反応を亢進させること、高齢者において、このようなトレーニングにより血漿量が増加しても血圧を悪化させることはない。

血液量増加による暑熱馴化のメカニズム(皮膚交感神経活動の関与)

従来、暑熱負荷時や運動時の高体温時におけるヒトの皮膚血管を能動的に拡張させる神経が存在し、この皮膚血管拡張は心肺圧受容器からの入力によって調節される。すなわち、暑熱馴化による皮膚血管拡張反応の改善は、血液量の増加による心房伸展が関わると考えられてきたが、その遠心路である皮膚血管拡張神経活動は同定されていなかった⁹⁾。

最近 Kami jo ら¹⁰⁾は、若年男性を正常血液量群と低血液量群(開始前に利尿剤を投与)に分け、45分間の暑熱負荷を行い、その際、腓骨神経より皮膚交感神経活動、同側の足背部の皮膚血流量、上腕動脈の動脈血圧を同時連続測定した。我々は、皮膚血流が圧反射性に調節されているという点を考慮し、皮膚交感神経活動の原波形より心電図の各 R 波を起点とした 5 秒間のデータを取り出し、スパイク頻度を 0.05 秒のビン毎にカウントし、得られた頻度分布カーブを 1 分毎に加算平均した。その結果、スパイクには R 波から 1.1 - 1.3 秒の潜伏を持つ心周期に同期した成分と同期しない成分があることが明らかになった。さらに、暑熱負荷により食道温が約 0.6°C 上昇すると、この心周期同期成分は食道温上昇と共に増加し、その上昇は低血液量により皮膚血管コンダクタンス(=皮膚血流量/平均血圧)上昇が抑制されると共に抑制された¹⁰⁾。一方、心周期に同期しない成分は暑熱負荷時に増加したが、両群で有意差を認めず、発汗速度と同様な反応を示した。

次に Ogawa ら¹¹⁾は、暑熱負荷により食道温を約 0.7°C 上昇させた時、30°ヘッドアップ・ティルトにより右心房容積が低下する時、皮膚交感神経活動・心周期同期成分と皮膚血管拡張反応も減少することを明らかにした。

以上より、皮膚交感神経活動・心周期同期成分が圧反射性皮膚血流調節の遠心路であり、暑熱馴化後には血液量増加による心房伸展がこの成分を亢進させている可能性がある。また、心周期非同期成分が発汗神経活動であることも示唆された。従って、発汗反応の亢進は、この皮膚血流量増加による 2 次的なものであると推測される。

頸髄損傷者の高体温時における体温調節反応

脊髄にある交感神経の下位中枢は Th1 - L2 に存在する。これより高位で障害を受けている頸髄損傷者は全身の交感神経

活動が機能しない。その結果、循環、体液、体温調節において重大な障害が生じうる。例えば、坐位の姿勢で健常者や胸腰髄損傷者に比べて血圧低下を生じやすく、体液調節に関しては、腎臓における Na⁺再吸収機能が障害されているため、運動により尿への Na⁺排泄が高まり、低 Na⁺血症のリスクが高くなる可能性が示された(Kami jo ら未発表データ)。さらには、体温調節反応が障害されているため、運動時のパフォーマンスは外気温の影響を受けやすいことが予想された。

そこで、今年で 36 回を数える大分国際車いすマラソン大会の過去 10 年間のレース危険率とレース・スタート時の大分市の気温の関係を調べた。すると、ハーフ、フル・マラソンともに、約 22°C を境にして、気温が低くても高くても危険率が上昇し、その傾向は頸髄損傷選手で顕著であった(Kami jo ら未発表データ)。

さらに、頸髄損傷者、胸腰髄損傷者、健常者に水循環スーツ(上着・パンツ)を着用して安静臥位をとり、始め 33°C の水を循環させ 10 分間の測定のうち、上着には 36°C、パンツには 47°C の水を循環させて、食道温が 1°C 上昇した時点で測定を終了とした。この時、同時に平均・胸・腹・大腿部皮膚温、平均血圧、胸・腹部発汗速度(SR_{chest}・SR_{abdo}; カプセル換気法)を測定し、さらに胸・腹・大腿部皮膚血流量(レーザー・ドップラー法)も測定し、それぞれ平均血圧で除し各部位の皮膚血管コンダクタンス(CVC_{chest}・CVC_{abdo}・CVC_{thigh})とした。その結果、平均皮膚温は 3 群において暑熱負荷により 35°C から約 3°C 上昇し、胸・腹部皮膚温は ~1.4°C 上昇、大腿部皮膚温も全群で約 32~34°C から約 6°C 上昇した。CVC_{chest} は健常者で暑熱負荷により約 4 倍に上昇したが、胸腰髄損傷者では 3 倍にしか上昇せず頸髄損傷者では全く上昇しなかった。CVC_{abdo} も同様の傾向を認めた。一方、CVC_{thigh} は全ての群で約 4 倍上昇した。SR_{chest}, SR_{abdo} もそれぞれ同部位の CVC と同様の傾向を認めた。

以上より、頸髄損傷者では暑熱負荷時において、食道温上昇に対する体温調節反応が欠如し、胸腰髄損傷者では非障害領域において健常者軍に比べ反応が減弱し、障害領域においては完全には抑制されなかった。しかし局所の皮膚温が約 6°C 上昇した大腿部においては、局所反射による皮膚血管拡張反応が全群で認められた。

このような頸髄損傷者では健常者と同様の暑熱馴化を期待することはできない。それでは、心肺機能には改善の余地はないだろうか? 先行研究では、頸髄損傷受傷後 9-10 年程度のパラリンピアン(3年以上のホイール・チェア・ラグビー経験者)と年齢と身長が合う健常者と心肺機能を比較すると、頸髄損傷アスリートは健常者に比べて体重が約 10% 低く、肺容量は 20% 低く(横隔膜の機能低下による)、心臓容量も約 20% 低い(ため 1 回心拍出量も約 20% 低いという報告がある¹²⁾。一方、我々は頸髄損傷アスリートでありながら心臓の容量を

健常人レベルにまで改善し、維持している選手の測定に携わる機会を得たことがある。心臓容量と血液量は密接にかかわることから、腎機能は障害されていても、前述の糖質タンパク質サプリメントを日常のトレーニング直後に摂取することで、血液量を増加させることができる可能性がある。この増加は心臓容量を増加させ、心機能を改善することが期待できないだろうか。

謝 辞

今回、このような発表の機会を与えてくださった大会長の上西啓裕先生並びに運営事務局の先生方、本文のデータに関わった信州大学大学院医学系研究科・スポーツ医科学講座(能勢 博教授)及び和歌山県立医科大学医学部・リハビリテーション医学講座(田島文博教授)、同附属病院リハビリテーション部の療法士の先生方に深謝いたします。

文 献

- 1) 川原 貴・他：スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック。公益財団法人日本体育協会：pp20 - 22, 2001
- 2) Nose H, et al.: Role of osmolality and plasma volume during rehydration in humans. *J Appl Physiol* 65: 325-331, 1988
- 3) DeFronzo, RA, et al.: The effect of insulin on renal handling of sodium, potassium, calcium, and phosphate in man. *J Clin Invest* 55: 845-855, 1975
- 4) Nakamura, R, et al.: Insulin binding sites in various segments of the rabbit nephron. *J Clin Invest* 72: 388-392, 1983
- 5) Kamiyo, Y et al.: Enhanced renal Na⁺ reabsorption by carbohydrate in beverages during restitution from thermal and exercise-induced dehydration in men. *Am J Physiol* 303: R824-833, 2012
- 6) Goto, M, et al.: Protein and carbohydrate supplementation during 5-day aerobic training enhanced plasma volume expansion and thermoregulatory adaptation in young men. *J Appl Physiol* 109: 1247-1255, 2010
- 7) Okazaki K, et al.: Impact of protein and carbohydrate supplementation on plasma volume expansion and thermoregulatory adaptation by aerobic training in older men. *J Appl Physiol* 107: 725-733, 2009
- 8) Kataoka Y, et al.: Effects of hypervolemia by protein and glucose supplementation during aerobic training on thermal and arterial pressure regulations in hypertensive older men. *J Appl Physiol* 121: 1021-1031, 2016
- 9) Macefield VG, et al.: Firing properties of single postganglionic sympathetic neurones recorded in awake human subjects. *Auton Neurosci* 95: 146-159, 2002

10) Kamiyo, Y et al.: Skin sympathetic nerve activity component synchronizing with cardiac cycle is involved in hypovolaemic suppression of cutaneous vasodilatation in hyperthermia. *J Physiol (Lond.)* 589: 6231-6242, 2011

11) Ogawa Y, et al.: Effects of postural change from supine to head-up tilt on skin sympathetic nerve activity component synchronised with cardiac cycle in warmed men. *J Physiol (Lond.)* (In press).

12) West, CR, et al.: Resting Cardiopulmonary Function in Paralympic Athletes with Cervical Spinal Cord Injury. *Med. Sci. Sports Exerc* 44: 323-329, 2012