

総説

「スポーツドリンク」に要求される効能とは？

能勢 博

信州大学大学院 医学系研究科・スポーツ医科学分野

はじめに

スポーツドリンクと通常の飲料の違いは何か、と問われれば、「競技に勝つため」、「熱中症を防ぐため」の飲料と答える方が多いと思う。しかし、それらが開発されてきた科学的証拠となると正しく答えられる方は少ないのではないだろうか。本稿では、随分昔の話で恐縮だが、我々が「オリンピック競技で勝つため」に考えた戦略を軸に、スポーツドリンクの効能について概説する。

トップアスリートの運動時のエネルギー消費量

トップアスリートは、競技中にどれほどエネルギーを消費するのだろうか。1996年のアトランタオリンピックにマウンテンバイクで出場した女子選手（年齢25歳、身長159cm、体重49.3kg）を例に説明しよう。

図1は、オリンピック開催前に国内のマウンテンバイクコースを試走してもらった時の高度差と心拍数を示している。当時は高度を連続的に記録する装置が市販されていなかったことから、主な既知の高度のピークにスタッフを配置し、通過時間を測定した。図の下の折れ線が高度差を示すが、225m高度をスタートし、小さいコブを乗り越えて、高度310mのピークを昇り、少し下って、高度290mのピークを通過し、スタート地点に帰ってくるという15分のトライアルを2回やってもらった。上の折れ線は、走行中の心拍数を示す。図からわかるように、最高心拍数は182拍/分で、平均心拍数は173拍/分である。年齢から計算される最高心拍数（=220-年齢）が195拍/分で

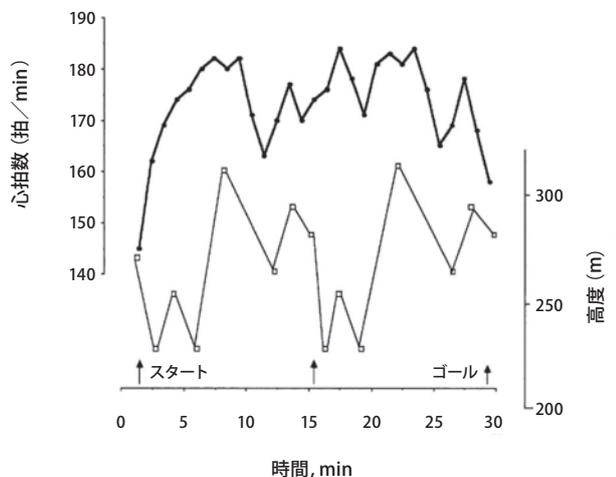


図1 マウンテンバイク走行中の高度変化(下図)と心拍数変化(上図)。走行時の心拍数が173拍/分とほぼ最大心拍数190拍/分に近い値であることを注意。

あることから、いかに高い心拍数で競技を行っているかがわかる。

競技中の心拍数がわかるとエネルギーの消費量を概算できる。図2で、同選手について実験室で負荷漸増法によって測定した心拍数と酸素消費量・二酸化炭素産生量の関係をそれぞれ示す。図から両者に直線関係があることがわかる。すなわち、競技中の平均心拍数が173拍/分とすれば、酸素消費量が2.7l/分であることになり、下記の要領で総エネルギー消費量が算出できる。

個人の単位時間あたりに最大どれほど酸素を消費する能力をもっているかを評価する指標を最大酸素摂取量と呼ぶが、同選手の場合、年齢から期待できる最高心拍数195拍/分から外挿して3l/分と推定できる。一方、ある運動中の酸素摂取量/最大酸素摂取量の比（酸素摂取量/最大酸素摂取量×100%）を相対運動強度(% of maximum oxygen uptake)と呼ぶが、実は、この相対運動強度と運動中に消費されるエネルギー基質との間に密接な関係がある。すなわち図3は相対運動強度と運動中

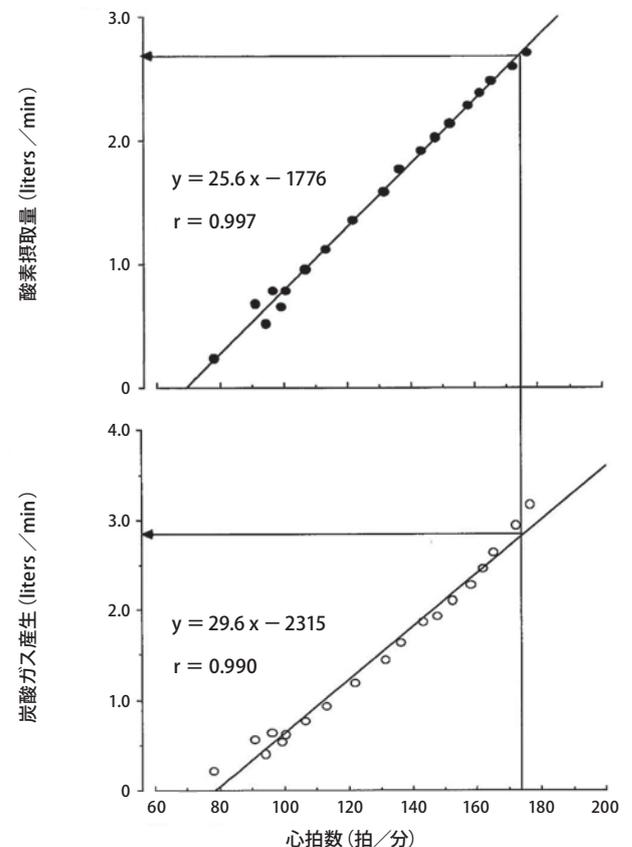


図2 負荷漸増法による体力測定中の酸素消費量および二酸化炭素産生量 vs. 心拍数。走行中の平均心拍数が173拍/分として、酸素消費量が2.7l/分であることがわかる。

に消費される糖質 (Carbohydrate) と脂質 (Fat) の比を表したものであるが、図から相対運動強度が70%を超えるとほとんどのエネルギー基質が糖質になって脂肪 (が燃焼しないことがわかる [1])。したがって、同選手の競技中の相対運動強度は90%だから、競技中に消費されるエネルギー基質は、ほぼ100%が糖質と考えてよい。

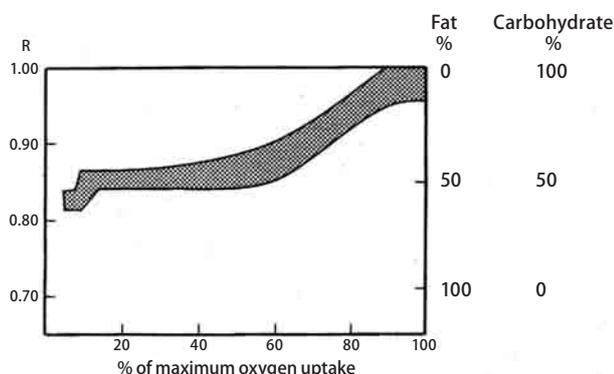


図3 相対運動強度 (% of maximum oxygen uptake) と糖質 (Carbohydrate) と脂質 (Fat) の燃焼比率を表す。相対運動強度が90%以上になると、エネルギー基質が100%糖質になることがわかる。文献 [1] より引用。

では、競技中にどれほどの糖質が必要か計算してみよう。体内のブドウ糖の燃焼式は、

$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O + 673 \text{ kcal}$  であり、また、図2で示すように、酸素消費量が2.7l/分 (=0.12mol/分) であるから、ブドウ糖の消費量は0.02mol/分 (=3.6g/分) と算出できる。すなわち、競技時間が150分と考えれば、540gのブドウ糖が必要であることがわかる。したがって、この量が供給できないと競技中に「ガス欠」になって、目標の強度で運動が継続できないことになる。通常、マラソンレースを観戦する際の見どころは30km付近といわれているが、ここでレースから脱落する選手は、最初から体内のブドウ糖 (グリコーゲン) の貯蓄量が少なかったか、あるいは、それまでのレース展開で乳酸を大量に産生するような高い強度の運動によって非効率にブドウ糖を消費してしまったことが原因と考えられる。ちなみに、このブドウ糖の80%は筋肉内に蓄えられ、肝臓、血液中のブドウ糖は20%程度にすぎない。

### トップアスリートの運動時の体温調節

上記の総エネルギー量がわかれば産熱量が計算できる。ここで消費されるブドウ糖内の化学エネルギーの100%が「走る」という機械エネルギーに使用されるわけではなく、精々20%にすぎない。これを仕事効率と呼ぶ。自動車におけるガソリンの化学エネルギーから走行エネルギーへの変換効率、原子力発電における核エネルギーから電気エネルギーへの変換効率も同程度とされる。すなわち、ヒトであれ、機械であれ、外に仕事をするためのエネルギーを取り出すということは、大量の熱の発生を伴うということである。

ヒトの体熱の放散メカニズムとして、大きく、対流性熱放散と蒸散性熱放散に分けられる。対流性熱放散は、ちょうど水が高い所から低い所へ静水圧差に従って流れ

るように、皮膚表面と大気の温度差に比例して行われる。皮膚表面の温度は皮膚血流量によって決定される。すなわち、運動中に筋肉で発生した熱は筋血流によって心臓へ戻され、心臓はその熱を皮膚血流によって皮膚へ運搬し、皮膚表面を温める。この皮膚血流量はスポーツ選手では、最大3l/分にまで増加し、安静時の心臓から駆出される血液量に匹敵する。一方、蒸散性熱放散は汗が皮膚表面から蒸発するときに奪う水の気化熱によって行われる。ちなみに、ヒトの汗腺はおおよそ300万個あり、1個の汗腺重量は40μgだから総重量120gになり片方の腎臓の重量に相当するほどの大きい臓器である。よく暑さに順化したスポーツ選手では、2l/時の発汗量が可能である。

図4は外気温と熱放散メカニズムとの関係を表している [2]。図からわかるように気温が30℃以下の場合には、皮膚表面と大気との温度差が十分保たれ対流性熱放散で十分対応できる。しかし、それ以上に外気温が上昇すると、蒸散性熱放散が唯一の熱放散メカニズムとなる。アトランタオリンピックの場合、外気温が約36℃であったことから、どれだけ汗をかけるかが勝敗を分けたと考えた。

では、このマウンテンバイクの選手の場合、どれくらい汗をかかなければならないか計算してみよう。上記の計算で示すように、ブドウ糖消費量が0.02mol/分だから総エネルギー消費量は673kcal/mol × 0.02 mol/分 = 13.5kcal/分となる。そのうち、熱エネルギーとして放散されるのは、仕事効率を20%と仮定して、13.5kcal/分 × 0.8 = 10.8kcal/分となる。したがって、競技時間が150分間と仮定すると、全部で1620kcalの熱が発生することになる。この熱量は、ヒトの体比熱が0.83cal/℃/g、同選手の体重が49.3kgだから、もし、体温の放散がなければ、平均体温が1620000/(0.83 × 49300) = 39.6℃上昇し、運動前の平均体温を36.0℃と仮定すると、平均体温が75.6℃にまで上昇することを意味する。あるいは、競技中の平均体温の上昇速度は39.6℃/150分 = 0.26℃/分となり、ヒトの運動継続可能な最高体温 (食道温) が40.2℃と報告されているので、運動継続可能時間は、(40.2 - 36.0)℃/0.26℃/分 = 16分となる。すなわち、運動開始後、わずかの時間で体がオーバーヒートして走れなくなることがわかる。

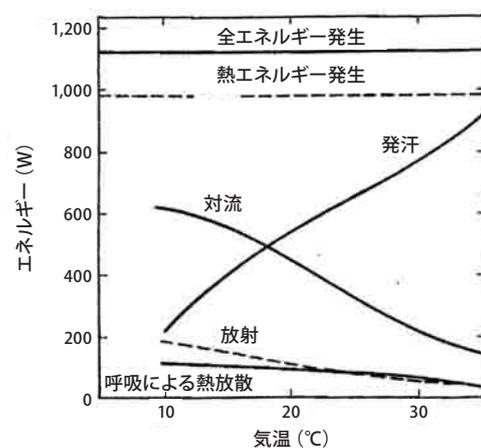


図4 熱放散メカニズムと気温の関係。気温が30℃以上になると汗が主な熱放散メカニズムになる。文献 [2] より引用。

一方、汗(水)の気化熱は、0.58kcal/gなので、150分間の競技中体温を上昇させないための総発汗量は1620kcal/0.58kcal/g=2793gと計算される。しかし、汗のすべてが皮膚表面から気化し、有効に熱放散に参与するわけではない。これを無効発汗と呼ぶ。たとえば、相対湿度が100%であれば、汗のすべては無効発汗となる。アトランタの相対湿度は約60%とされていたので、総発汗量の50%が汗滴となって地上に落下し、無効発汗になると予想した。したがって、必要発汗量は、2793g/0.5=5586gとなり、2.2ℓ/時の発汗量が必要となる。

## 「勝つ」ためにスポーツドリンクに求められる効能

今回、例に挙げた暑熱環境下でのマウンテンバイクのような持久性競技の場合、体内貯蓄量の最大限のグリコーゲン貯蓄量を必要とし、さらに、発汗量もその最大値まで要求されることが明らかとなった。これらの条件が満たされなければ、期待どおりの運動強度(走行速度)でレースが展開できないか、あるいは、「ガス欠」または「オーバーヒート」で途中棄権ということになる。これらをできるだけ防ぐために、スポーツドリンクは開発された。

### 1) 炭水化物補給が重要 [1]

骨格筋内に貯蓄されているグリコーゲン量は500g、肝臓に蓄えられているグリコーゲン量は100g程度とされる。筋肉内のブドウ糖が消費されるにつれ、血液中から筋肉内へのブドウ糖の取り込みが行われるようになる。それを補充するために肝臓のグリコーゲンが分解され、競技中の初期レベルには血液中のブドウ糖濃度(血糖値)は100mg/dl前後に維持される。しかし、筋肉内への取り込みが肝臓からの補充を上回る場合、徐々に血糖値が低下して、70mg/dl以下になると脳へのブドウ糖供給が阻害され、運動の継続が困難になる。ところで、肝臓に蓄えられるグリコーゲン量には限界があることから、筋肉内

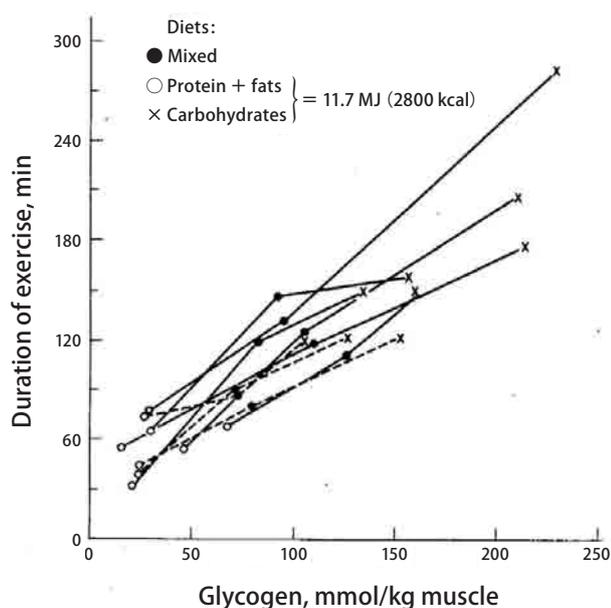


図5 骨格筋内のグリコーゲン(Glycogen)量と運動継続時間(Duration of exercise)を表す。骨格筋内のグリコーゲン量と運動継続時間が強く比例することに注目。文献[1]より引用。

に蓄えられるグリコーゲン量が持久性運動継続のカギとなる。図5は中等度の運動の継続時間と生検で求めた単位筋組織あたりのグリコーゲン含有量(Glycogen)を表す。図から筋肉内のグリコーゲン含有量が高いほど運動の継続時間(Duration of endurance)が長いことがわかる。以上の理由から、スポーツドリンク内のブドウ糖含有量は高ければ高いほど競技に勝てる可能性が高くなる。しかし、以下に示す別の要素を考慮しなければならない。

### 2) 胃内容排泄速度が速い [3]

口から入った飲料は、胃に一旦貯まり、順次小腸の方へ排泄される。しかし、その速度には限界がある。そのため、一度に大量のスポーツドリンクを摂取すると「胃にもたれる」か「吐き出して」しまう。胃内容排泄速度は600mlまでは摂取した溶液の体積に比例して増加し、25ml/分程度であるが、それ以上ではむしろ低下する。その理由は、600mlまでは胃の伸展度に応じて胃のぜん動運動が促進するためとされる。一方、胃内容排泄速度は摂取した溶液の浸透圧濃度によっても影響される。たとえば、水よりも等張性食塩水の方が速く、それ以上の浸透圧では排出速度は浸透圧に比例して低下する。さらに、胃内容排出速度は摂取したエネルギー量が増加すれば低下する。たとえば、図6で示すように、水と糖質溶液を一定量摂取させ、溶媒である水の胃排泄速度(Fluid delivery)を比較した場合、糖質濃度(Carbohydrate concentration)が8g/dl以下では水と変わらないが、10g/dl以上からその濃度に応じて低下する。しかし、溶質である糖質の胃排泄速度(CHO delivery)は一定濃度まではその濃度に応じて上昇することから、ふたつの曲線が交差する点である10g/dlが最適な摂取溶液の糖質濃度と考えられている。

その後、摂取エネルギー量と溶液の浸透圧のどちらが胃内容排泄速度に影響するのか、を検証する目的で、ブドウ糖ポリマー溶液とブドウ糖溶液を比較する実験が行われた。その結果、等濃度の溶液では両群間で差を認めず、溶液濃度に比例して胃内容排泄速度が低下した。この結果は、摂取溶液の胃排泄速度は浸透圧よりもエネルギー量に依存していることを示唆する。

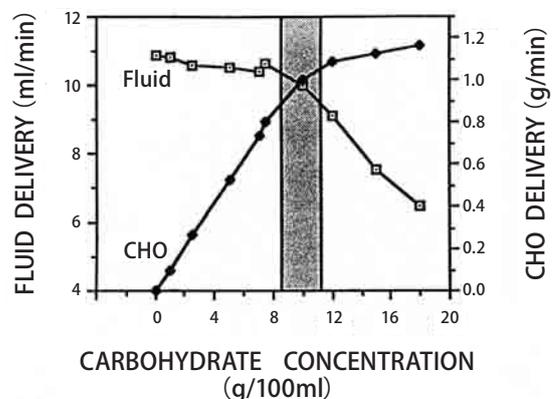


図6 スポーツドリンクの糖質濃度(Carbohydrate concentration)と、胃から小腸への溶液(Fluid delivery)および糖質の移動速度(CHO delivery)の関係。溶液の糖質濃度が10g/dl以上になると溶液の胃内容排泄速度が減少し、そのため糖質の移動量が頭打ちになる。文献[3]より引用。

### 3) 小腸での吸収が早い [4]

次に、スポーツドリンクの小腸での吸収速度が問題になる。これが遅いと下痢をしてしまい競技どころではなくなる。腸管からの水分吸収は基本的には、腸間膜上皮を介する管腔側と血液側の浸透圧勾配に従って行われる。表1は、蒸留水、リンガー液（細胞外液成分に近似した輸液剤）、ブドウ糖リンガー液の3種類の液体を10ml/分でヒトの十二指腸から空腸上部の45cmの間を灌流した場合の水分吸収速度を調べた結果である。その結果、等張性のリンガー液では吸収速度は蒸留水の10%にすぎない。しかし、リンガー液の1%にブドウ糖を添加するとほぼ蒸留水と同程度の吸収速度が得られる。

このメカニズムについて、等張性のリンガー液が腸の管腔内に入っても、血液側との間に浸透圧勾配が発生しないために水の移動がおこらない。では、何故、食塩水を飲んでも結果的に水が吸収されるのか。それは、腸管細胞にNaポンプがあり、まず、そのポンプがNaイオンを血液側にくみ出し、その結果、血液側が高く、管腔側が低い浸透圧勾配が発生するが、その勾配にしたがって水が移動するからである。問題は、そのポンプの活性度である。Naポンプはブドウ糖と共輸送体であるものが多く、ブドウ糖を添加すると、より多くのポンプがNaイオンを管腔側から血液側に移動することになり水分吸収が促進する。さらに、ブドウ糖だけでなく、果糖を添加することによって、腸管内

表1 摂取溶液と上部消化管における水、電解質の吸収速度

|           | H <sub>2</sub> O | ブドウ糖 | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Cl <sup>-</sup> |
|-----------|------------------|------|-----------------|----------------|-----------------|
| 蒸留水       | 15.30            |      | -2.00           | -0.09          | -2.00           |
| リンガー液     | 1.80             |      | 0.41            | 0.01           | 0.64            |
| ブドウ糖リンガー液 | 15.30            | 2.23 | 2.07            | 0.02           | 2.02            |

単位：H<sub>2</sub>O(ml/時/cm)、ブドウ糖(mmol/時/cm)、Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>(meq/時/cm) 文献 [4] より引用

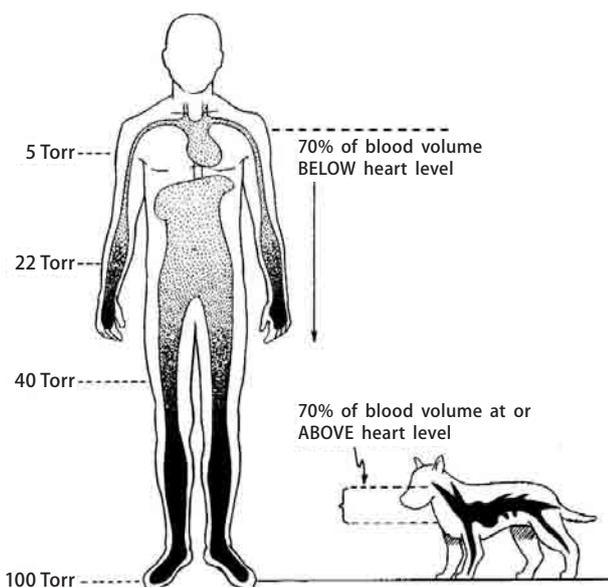


図7 ヒトとイヌにおける血液量の分布の差。イヌでは全血液量の70%が心臓より上にあるが、ヒトでは下にあることに注目。文献 [5] より引用。

のより多くの糖輸送体を関与させることになり、水の吸収速度がより上昇するという結果も報告されている。

### 4) 血液量の回復が速い

ヒトは立位で運動することで他の四足動物に比べユニークであるが、そのためには十分な血液量が心臓に還ってこなくてはならない。図7はヒトとイヌで血液の分布の違いを示したものである [5]。イヌでは全血液量の70%以上が心臓より上にあることから、運動時に血液が静水圧に従って無理なく心臓に還ってくるが、一方、ヒトでは全血液量の70%が心臓より下にあり、筋肉ポンプ、静脈弁などをはじめとする心臓に血液を戻すためのメカニズムが他の四足動物より発達している。それでも、発汗による脱水など、わずかな血液量の減少でも心臓に還ってくる血液量が減少し、心臓が駆出できる血液量が減少し、そのため、たとえば皮膚血流量の維持、発汗量の維持が困難になって、体温が上昇する。以下にその実験例を示す。

下半身陰圧法 (Lower body suction or LBNP, Lower body negative pressure) は、人為的に心臓への血液の環流量を段階的に減少させることができ、重力による血液の下半身への貯留が皮膚血流量に与える影響を検証するために用いられてきた実験手技である [5]。図8で示すように、ヒトに仰臥位姿勢をとらせ腰より下を密閉した容器に入れる。そして、容器の別の口をバキュームにつなぎ、容器内の圧力を陰圧にすると、下肢の静脈内に血液が貯まり、心臓への血液の環流量が減少する。図9にその結果を示す。この場合は、容器の中に自転車エルゴメータを置き、運動を负荷している。図からわかるように運動開始後、食道温 (Esophageal temperature) が上昇し、前腕の皮膚血流 (FBF) も上昇するが、運動開始後15分目に下半身を-20, -10, -40mmHg(Torr)の順に陰圧(LBNP)に暴露すると、その程度に比例して、皮膚血流量が低下し、さらに、それに比例して食道温が上昇する [6]。

#### SIMULATION OF ORTHOSTASIS BY LOWER BODY SUCTION

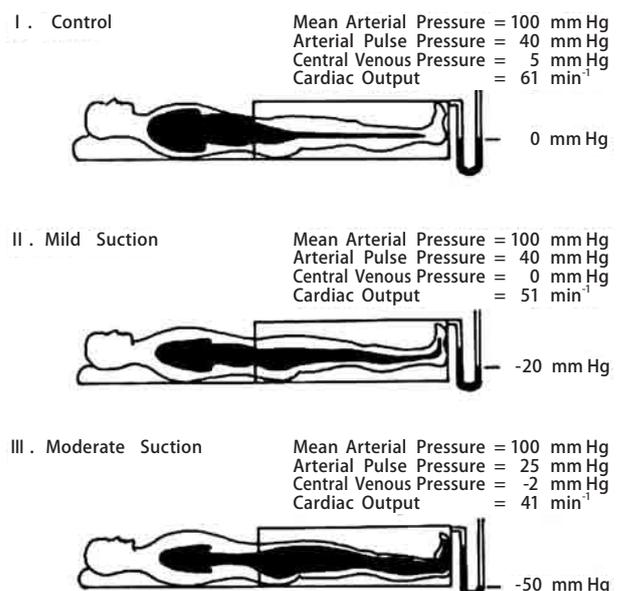


図8 下半身陰圧法 (Lower body suction)。下半身を密閉した容器に入れ、その容器の圧力を陰圧にすると下半身に血液が貯まり、心臓へ還流する血液量が低下する。文献 [5] より引用。

逆に陰圧呼吸法 (CNPB, continuous negative pressure breathing) は人為的に心臓への血液の環流量を増加させることができる。図 10 で示すように、通常呼気ガス採取用マスクに蛇管を用いて箱につなぎ、容器の別の口をバキュームにつなぐ。そして、容器の中が  $-15\text{cmH}_2\text{O}$  の陰圧になるようにする。被験者はこの陰圧に負けずに胸腔 (Pleural cavity) 内の圧力 (Ppl) を通常より高い陰圧にして呼吸をするため、心臓 (Heart) への血液の環流量が増加する。図 11 にあるように、この装置を用い運動時に陰圧呼吸法 (CNPB) を適用すると (N-trial)、対照群 (C-trial) に比べ、皮膚血流 (FBF) と皮膚血管拡張度 (FVC) が増加した<sup>7)</sup>。

下半身陰圧法、陰圧呼吸法による心臓への環流量の増減は精々  $100\text{--}300\text{ml}$  程度であることから、運動時には、脱水によるわずかな血液量の減少でも体温調節能に大きく低下させることがわかる。したがって、我々は血液量を素早く回復させることのできる飲料の成分の研究を行ってきた。

図 12 は、あらかじめ体重の 2.3% ( $1.2\text{l}$ ) に相当する脱水 (発汗) を負荷した被験者に水道水 ( $\text{H}_2\text{O-R}$ )、または 0.45%

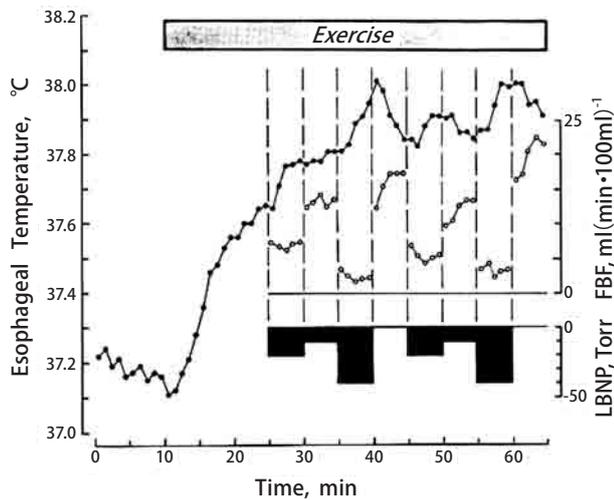


図 9 自転車エルゴメータ運動時に下半身陰圧 (LBNP, Lower body negative pressure) を負荷した場合の、容器内圧力、食道温 (Esophageal temperature)、前腕皮膚血流 (FBF) を表す。容器内の陰圧に比例して皮膚血流が低下し、その結果、食道温が上昇することに注意。文献 [6] より引用。

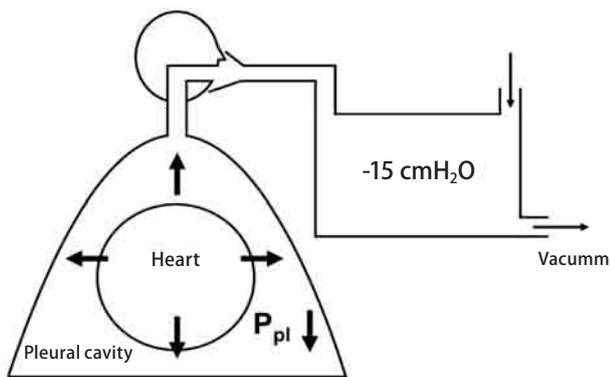


図 10 陰圧呼吸法 (CNPB, Continuous negative pressure breathing)。陰圧にした容器から呼吸すると胸腔 (Pleural cavity) 内の圧力 (PPL) がより陰圧になり、心臓への血液の環流量が増加する。

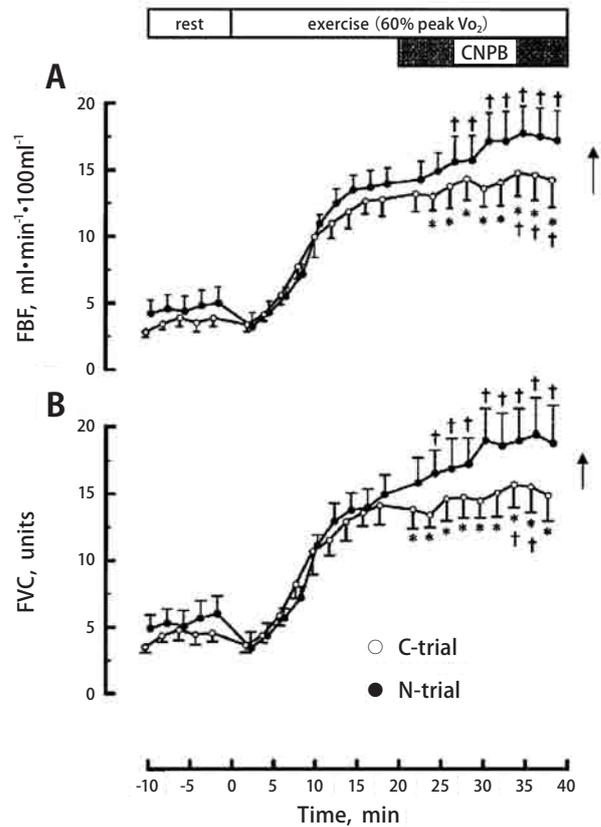


図 11 自転車エルゴメータ運動時に陰圧呼吸 (CNPB, Continuous negative pressure breathing) を負荷した場合の、前腕皮膚血流 (FBF, forearm skin blood flow) と前腕皮膚血管コンダクタンス (FVC, forearm vascular conductance, 皮膚血管拡張度)。陰圧呼吸によって、皮膚血管が拡張することに注意。文献 [7] より引用。

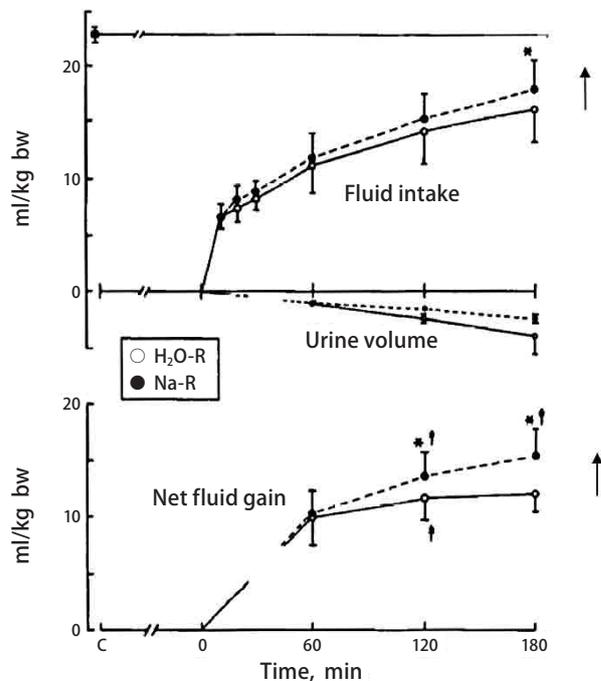


図 12 体重の 2.3%脱水負荷をかけ、その後自由に水道水 ( $\text{H}_2\text{O-R}$ ) または 0.45%食塩水 ( $\text{Na-R}$ ) を摂取させた時の、水分摂取量と尿量の積算値 (上図) と体内貯留量 (下図) を表す。食塩水の方が水道水に比べ、摂取量が多く、尿量が少なく、したがって体内貯留量が多いことに注目。文献 [8] より引用。

食塩水 (Na-R) を自由に摂取させた際の、上に飲水量と尿量のそれぞれ積算値、その下に水の体内貯留量を示す。その際、味覚の影響を排除するために、水道水条件では砂糖を、食塩水条件では食塩を、それぞれタブレットの中にいれ、被験者にそれらの条件が判別できないように工夫した。その結果、まず、食塩水条件では水道水条件に比べ飲水量が多く、尿量が少なく、したがって正味の水分の体内貯留量が高かった。

このメカニズムを明らかにする目的で、脱水とその回復時の水分塩分バランスを求めた。その結果を図 13 に示す。横軸に水分 (Fluid balance)、縦軸に陽イオン ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  イオン, Cation balance) のそれぞれバランスについて脱水前を原点として表す。また、等張性ライン (isotonic line) を示すが、これは、もし、下痢や嘔吐のように等張性に体液が失われれば、このライン上を水分・塩分バランス値が移動することを意味する。しかし、汗は、個人差はあるが、ほぼ半等張液なので脱水直後には図で示すように等張ラインよりも上の領域に位置する。さて、食塩水条件では水と一緒に食塩を摂取するので右方向だけでなく上方向に移動し、最終的には原点に回復するようにみえる。一方、水道水条件は、水しか摂取せず、むしろ脱水回復中に電解質を尿中に排泄するために右方向だけでなく下方向に移動する。しかし、大切なことは、いずれの条件群でも等張性ライン上で飲水がほぼ停止するという点である。すなわち、脱水回復は血漿浸透圧を元に戻すことが優先され、血漿量の回復は後回しにされる。

図 14 は脱水回復中の血漿量の変化量 ( $\Delta PV$ ) を表している。食塩摂取条件 (Na-R) では水道水条件 ( $\text{H}_2\text{O-R}$ ) に比べ、血漿量の増加速度が速く、また脱水回復 3 時間後に水に比べ 2ml/kg 余分に血漿量の回復を示した。被験者の体重が 65kg なので、130ml も多く血漿量が回復したことになる。これは、上記の下半身陰圧法や陰圧呼吸で得られた結果から考えて、有意に皮膚血流量 (そして発汗量) を改善する血漿量である。

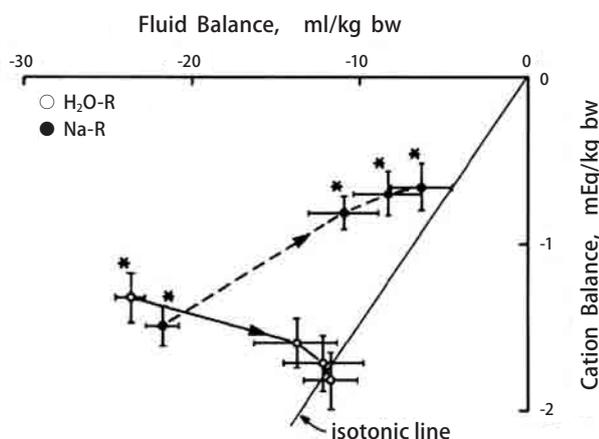


図 13 脱水回復時の水分 (Fluid balance) と陽イオンバランス (Cation balance)。食塩水条件 (Na-R) では、脱水前の値 (原点) に向かって回復傾向を見せるが、水道水条件 ( $\text{H}_2\text{O-R}$ ) では脱水量の 50% しか回復しない。しかし、どちらも等張性ライン (isotonic line) に達すると、飲水を停止することに注目。文献 [8] より引用。

以上の結果から、次のことが明らかになった。

- 1) 真水では脱水を 50% までしか回復できないが、食塩水では 80% まで回復できる。
- 2) その理由は、発汗によって食塩を汗の中に失っているため、水道水のみを補給すると血漿浸透圧が低下し、口渴感を減弱し、利尿を引き起こすからである。
- 3) 食塩の添加は、体内の水分貯留量 (特に細胞外スペースでの水分貯留量) を引き上げ、その結果、血漿量の回復を促進する。

実際、脱水後に血漿量を回復するだけで、体温調節能は回復するのだろうか。図 15 は脱水によって、血液量を 10% 低下させた条件、さらに食塩水摂取によって、血漿量を脱水前まで回復させた条件について、運動時の心拍数、食道温を比較したものである。脱水条件では対照条件に比べ運動中の心拍数と食道温の上昇が顕著で、運動開始後 20 分で運動を中止している。一方、食塩水摂取によって血漿量を回復させた条件では、皮膚血流量、発汗量も回復し (図に示されていないが) 心拍数、食道温も回復していることがわかる。

以上の結果から、血漿量の維持、回復が運動時の体温調節能維持に必須であること、そのためには食塩摂取が有効であることが明らかとなった。

## 現場応用

これらの結果から、スポーツドリンクは、汗に近い食塩濃度 (0.45%) の溶液に最大 10% のブドウ糖を加えたものが良いと考えられる。しかし、汗の食塩濃度は 0.1–0.7% と個人差があり、味覚も考慮して、現在では 0.2% が主流となっている。これらの溶液を、胃内容排泄速度が最大 25ml/分であることから、余裕をもって 150–200ml/10 分のペースで、摂取させることが基本方針となっている。さらに、図 14 で示すように、飲水してから実際に血漿量が増加するまで 10–15 分程度を要することから、口渴感を自覚しなくても、早めに摂取することが大切だ。

ところで、スポーツドリンクで競技中に摂取できるエネルギー量、水分量はそれらの全消費量のどれくらいに匹敵するのだろうか。我々が関与したマウンテンバイク選手の場合、本人とも相談し、(2g NaCl + 60g ブドウ糖) / l の溶液を 50ml/10 分で飲ませることにした。すなわち、150 分間

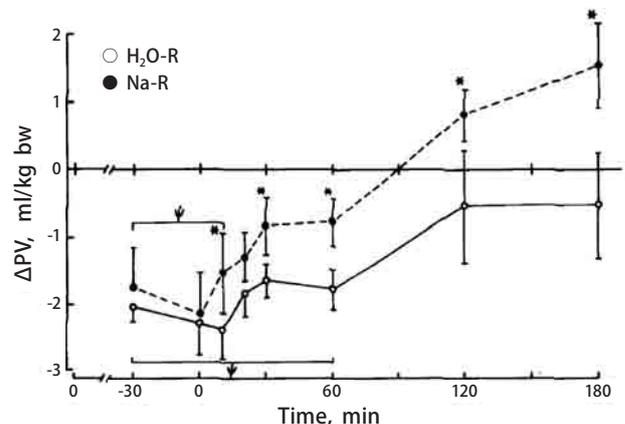


図 14 脱水回復時の血漿量の変化 ( $\Delta PV$ )。食塩水条件 (Na-R) では、水道水条件 ( $\text{H}_2\text{O-R}$ ) に比べ回復が早く、回復量も高いことに注目。文献 [8] より引用。

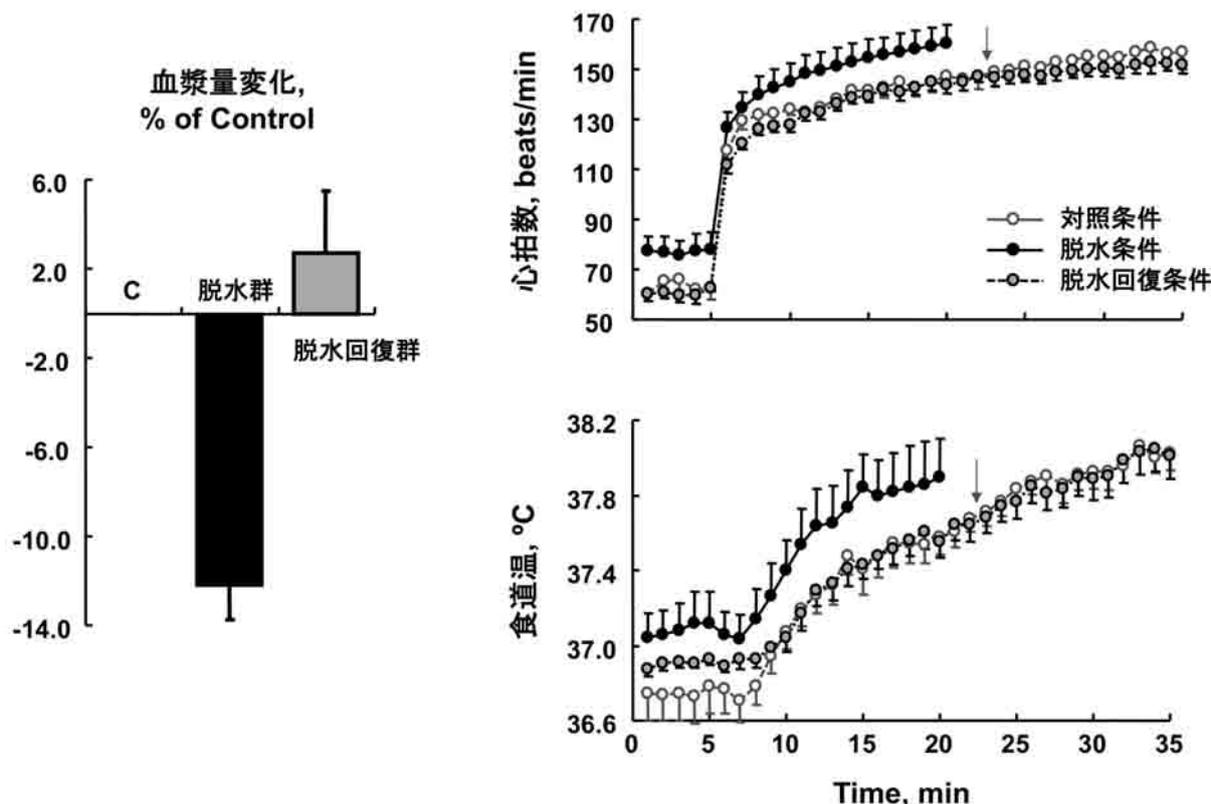


図 15 脱水による低血漿量の運動時の心拍数、食道温への影響。10%低血液量(約 300ml)状態では、同じ強度の運動時の心拍数が 20 拍 / 分程度高く、食道温も 0.4°C 高い。しかし、食塩水摂取によって血漿量が回復すると、心拍数、食道温も回復することに注意。(上條ら、未発表データ)

の競技中に水分 750ml、ブドウ糖 45g となり、それぞれの総消費量の 13%、8%であった。これが非常に少ないと思うかもしれないが、メダル争いのわずかな力の差を考えれば、意味をもつと考える。

### 補足説明

上で述べたように、競技中に摂取できるスポーツドリンクの量は限られており、競技前からカーボハイドレート・ローディングの手法により、競技前に筋肉内のグリコーゲン量を増加させておくことが有効である [1]。さらに、血漿量を増加させるには、1 週間程度の期間、暑熱環境下で運動による脱水負荷をかけると、レニン・アンジオテンシン・アルドステロンなどの水分・塩分貯留ホルモンが活性化して、血漿量が増加する [9]。さらに、最近、我々は運動直後に糖質・たんぱく質サプリメントを摂取させることで、トレーニングによる血漿量増加が亢進して、体温調節能がより向上することを明らかにしたが [10,11,12]、これらの結果の紹介については稿を改めることにする。

### おわりに

上記から明らかなように、本来、スポーツドリンクは、競技中のエネルギー補給、体温調節能を維持し、「競技に勝つため」、そして「熱中症などの事故防止のため」に開発された。最近、さまざまなメーカーがスポーツドリンクと銘打って商品化しているが、あえてここでスポーツドリンクを定義すれば「少なくとも適切な濃度の糖質と食塩 (NaCl) を含んでおり、運動パフォーマンス向上の効果が科学的に実証されているもの」といえるだろう。

### <参考文献>

- [1] Per-Olf Astrand and Kaare Rodahl: Nutrition and Physical performance, In: Textbook of Work Physiology, McGraw-Hill, NY, pp523-582, 1986.
- [2] 中山昭雄: 運動時の体温調節, In: 温熱生理学, 理工学社, 東京, pp425-437, 1981.
- [3] Costill DL: gastric emptying of fluids during exercise. In: Gisolfi and Lamb DR (eds), Fluid homeostasis during exercise. Benchmark, Chelsea, Michigan, pp 97-121, 1990.
- [4] Gisolfi CV, Summer RW, and Schedl HP: Intestinal absorption of fluids during rest and exercise. In: Gisolfi and Lamb DR (eds), Fluid homeostasis during exercise. Benchmark, Chelsea, Michigan, pp129-175, 1990.
- [5] Rowell, LB: Adjustments of upright posture and blood loss, In: Human Circulation Regulation during Physical Stress, pp137-173, 1986.
- [6] Mack GW, Nose H, and Nadel E: Role of cardiopulmonary baroreflexes during dynamic exercise. J. Appl. Physiol. 65: 1827-1832, 1988.
- [7] Nagashima K, Nose H, Takamata A, and Morimoto T: Effect of continuous negative-pressure breathing on skin blood flow during exercise in a hot environment. J. Appl. Physiol. 84: 1845-1851, 1998.
- [8] Nose H, Mack GW, Shi X, and Nadel E: Role of osmolality and plasma volume during rehydration in humans. J. Appl. Physiol. 65: 325-331, 1988.
- [9] Nose H, Mack GW, Shi X, and Nadel E: Involvement of sodium retention hormones during rehydration in humans. J. Appl. Physiol. 65: 332-336, 1988.
- [10] Okazaki K, Hayase H, Ichinose T, Mitono H, Doi T, and Nose H. Protein and carbohydrate supplementation after exercise increases plasma volume and albumin content in older and young men. J Appl Physiol 107: 770-9, 2009.
- [11] Okazaki K, Ichinose T, Mitono H, Chen M, Masuki S, Endoh H, Hayase H, Tatsuya Doi T, and Nose H. Impact of protein and carbohydrate supplementation on plasma volume expansion and thermoregulatory adaptation by aerobic training in older men. J Appl Physiol 107: 725-33, 2009.