



# 水分補給のサイエンス

## —これからの水分補給を考える—

昨今、メタボリック・シンドロームや加齢に伴う栄養摂取、食品の安全性などの課題を背景として食事・運動を軸とした一次予防の重要性が問われるなか、ILSI Japan (国際生命科学研究機構) では、世界各国と連携し、研究・調査・啓発活動などを進めております。

2010年6月17日(木)、ILSI JapanはILSI North Americaとの共催のもと、東京・白金台の八芳園にて、「水分補給のサイエンス」と題する講演会を実施いたしました。

本講演会では、海外において第一線で活躍する以下の先生をお招きし、世界における水分補給の最新研究結果や日本の現状と今後についての講演、およびパネルディスカッションを実施いたしました。講演2の内容をニュースレターとしてお届けいたします。

講演1: 「日常における水分補給」  
マキシム・ビュイクス博士  
(ザコカ・コーラ カンパニー/  
ILSI North America 水分補給委員会議長)

講演2: 「水分補給の生理学メカニズムと熱中症の予防」  
鷹股 亮博士 (奈良女子大学教授)

講演3: 「スポーツパフォーマンスにおける水分補給」  
ミンディ・ミラード=スタッフォード博士  
(ジョージア工科大学運動生理学研究所  
所長、元米国スポーツ医学会会長)

講演4: 「水分補給と健康: 将来への展望」  
ローレント・レベレゴ博士  
(ダノンカンパニー)

### 講演2

## 水分補給の生理学メカニズムと熱中症の予防

鷹股 亮博士

たかまた あきら

奈良女子大学 生活環境学部教授

連日、猛暑が続いた2010年の夏。テレビや新聞では熱中症を予防するために、水分補給の重要性が盛んに訴えられました。しかし、なぜ水分補給をすれば熱中症を予防できるのかと問われると、正しく答えられる人は、それほど多くはないでしょう。発汗による脱水や、水分補給に伴って起こる生理反応についても広く知られているわけではありません。そこで、奈良女子大学生生活環境学部の鷹股 亮教授に水分補給の生理メカニズムについてご説明いただきました。高温環境に置かれた際に起こる温熱脱水の仕組みに始まり、水分補給を怠った場合に起こる生理的な問題や、熱中症を予防するのに望まれる水分補給法の紹介など、盛りだくさんの内容となりました。

### 複雑なメカニズムで調節される体液

今回は脱水と水分補給、そして、それらが人間の生理にどのような影響を及ぼすかについて解説します。分かりやすくいうと、水を飲まなかったらどのような悪いことがあるのか、飲んだ場合はどのような良いことがあるかという話です。

まず、なぜ水分摂取が必要なのかを理解していただくために、その生理的背景となる温熱脱水について説明します。温熱脱水は汗をかいて脱水することを指すわけですが、これが起こると体液調節系にどのような影響が及ぶのか、そして何を飲めば適切に体液を調節できるのか、をご説明したいと思います。

体液調節系は浸透圧調節系と容量調節系の2つから成り立っています。浸透圧調節系は溶質を含まない水(自由水)の摂取と排泄の調節を行っています。細胞外液の浸透圧が変化すると、ナメクジに塩をかけると水が失われて縮み、真水の中に入れたら水が取り込まれて膨らむのと同じように、細胞も縮んだり、膨らんだりします。細胞内外の水の移動は浸透圧により駆動されるので、細胞の大きさ(細胞内液量)

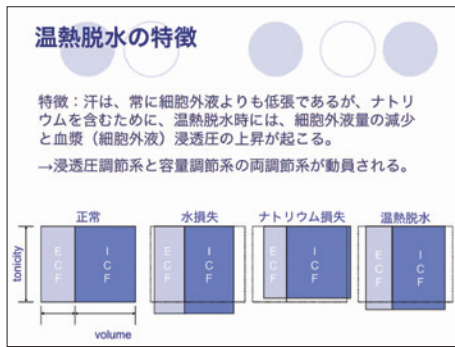


図1

を一定に保つためには細胞外液の浸透圧が一定である必要があります。つまり、浸透圧調節系は細胞の大きさ（細胞内液量）を調節しています。

この浸透圧調節系の主な受容器は脳の視床下部にあるといわれています。その調節の仕方ですが、まずバソプレッシンという抗利尿ホルモンが分泌されます。このホルモンは腎臓で、水の選択的な再吸収を増加させますが、溶質の再吸収を亢進させる機能は持っていないため、濃縮された少量の尿が排泄されるようになります。水の選択的な再吸収の亢進により細胞外液の浸透圧の上昇を抑えます。

こうした自律的な体液調節に加え、人間は行動によっても体液を調節しています。浸透圧性の行動調節というのは、喉の渇きを感じることで起こる飲水行動を指します。喉が渇くのは体液が減ったために起こると思われているかもしれませんが、実際は体液の浸透圧が上がったことで喉の渇きを感じ、飲水行動が起こります。脱水により浸透圧が上昇したときには、腎臓の機能だけでは体液量は決して元のレベルに戻ることができないので、行動性の調節は極めて重要です。

自律的な調節と、喉の渇きによって起こる飲水行動により細胞外液浸透圧が調節されています。

これに対して、容量調節系は細胞外液の量を調節しています。主な受容器は心臓の心房にあるといわれており、容量調節系は体内のナトリウム量を調節することにより機能します。浸透圧調節系が正常に機能している時は、体内のナトリウム量が細胞外液量を決定するため、ナトリウム量を一定にすれば、通常、細胞外液は一定に保たれます。また、心房に受容器があるために実際に体液が減っていなくても、心房の伸展の度合いが変化するとわれわれの体は体液が変化したと感知します。例えば臥位時は立位時に比べて心房の伸展度合いが大きくなり、体液量が増加したと感知され、血液量を減少させる調節が行われます。

ナトリウム量の調節にはレニン・アンギオテンシン・アルドステロン系と呼ばれる自律性の調節機能が関わっています。細胞外液量が減少すると腎臓の傍系球体装置からレニンが分泌され、アンギオテンシンIIが増加して副腎皮質からアルドステロンが分泌されます。アルドステロンは、腎臓でのナトリウムの再吸収を促進して、体外へのナトリウムの損失を防ぎ、細胞外液量の減少を小さくするために働きます。

喉の渇きにより浸透圧調節が働くと前述しましたが、大量の細胞外液を失ったときも喉の渇きを生じさせます。細胞外液量の10%程度が減少すると喉の渇きを感じると報告されています。ただし、通常の生活では、このように大量の細胞外液が失われることはないため、喉の渇きは浸透圧調節系により調節されていると考えていいでしょう。

では、温熱脱水ではどのような調節系が働いているのでしょうか。（図1）は細胞外液（ECF: extracellular fluid）と細胞内液（ICF: intercellular fluid）の量を模式的に示しており、横軸は体積を、縦軸は溶質の濃度を示しています。

まず、水だけを失うと浸透圧が上がります。溶質は失ってないので、体積が減っても濃度が高まるため、図中の面積、すなわち体内の溶質の量は変わりません。水だけを失った時は、細胞外液量の浸透圧が上昇し、水が細胞内から移動するために、細胞外液量の減少の割合と細胞内液量の減少の割合は同じになります。これに対して利尿剤を投与するなどしてナトリウムを損失し、それに伴い水が減少した場合、すなわち等張性に水分が損失する場合は、細胞外液が選択的に少なくなります。

温熱脱水で汗をかくと、汗にはナトリウムが含まれますが、汗のナトリウム濃度は細胞外液の濃度よりも低いため、水のみが損失する場合と、ナトリウムと水が等張性によって損失する場合の中間の状態になります。この際、細胞内液も減りますが、細胞外液が減る割合のほうが大きくなります。したがって、温熱脱水時には、浸透圧調節系と容量調節系の両方の調節系が働きます。





図2

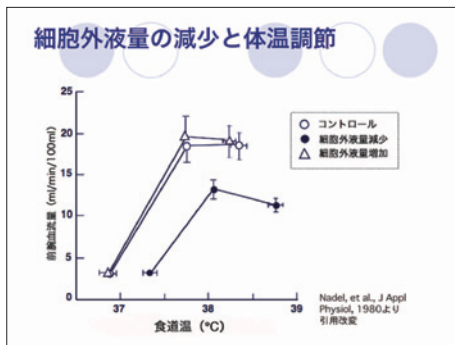


図3



容量調節系の受容器は心臓にあると前述しましたが、高温環境で容量調節系がどのように影響されるかについても触れておきます。高温の環境にいると体温を逃がすために皮膚の血流が増加します。皮膚血流量が増加するだけでなく皮膚の静脈への血液貯留が起きます。特に立位時には下肢への血液貯留に加えて皮膚への血液の貯留により、全身から心臓に戻ってくる血液の量が減少します。皮膚血流が増えて皮膚への血液の貯留が起ると全身の体液量に変化はなくても、体液量が減ったと感知され、容量調節系が動員されます。また、発汗による体液量の減少も容量調節系を動員します(図2)。

### 喉の渇きが止まるメカニズム

浸透圧上昇時に喉の渇きにより飲水行動が起こり、体液が調節されるわけですが、浸透圧が下がるまで水を飲むと、水を飲みすぎて水中毒になる危険性があります。なぜなら、飲んだ水はいったん消化管に溜まってから吸収されるためです。そのため、人間には口腔咽頭反射と呼ばれる、飲水を停止する機能も備わっています。

喉が渇いて水を一口飲むと、それまでの喉の渇きがすぐに感じなくなるという経験をした人もいますかと思いますが、しかし、水を一口飲むだけでは、すぐに浸透圧を下げられるわけではありません。もし飲水を続ければ、消化管の中に水がたまり、浸透圧が下がる頃には、飲み過ぎ、つまり水中毒になってしまいます。そこで、水を一口飲んだだけでも口腔咽頭反射が働いて喉の渇きを止めてくれるのです。

口腔咽頭反射に関する実験を紹介します。体液が失われると血漿の浸透圧が上がり、喉の渇きを感じるようになり、バソプレッシンの血中濃度も上がります。ここで水を200ミリリットル飲むと、すぐには浸透圧が下がらないのに、喉の渇きとバソプレッシン濃度は共に下がります。これで水の飲み過ぎによる水中毒を防げるわけです。

この実験では口腔咽頭反射が起らないよう、胃に直接チューブで水を押し込んでいますが、浸透圧が下がらなければ、喉の渇きとバソプレッシン濃度も低下することはありませんでした。すなわち、水が喉を通過しないことには喉の渇きは止まらないのです。

### 脱水が進むと体温を調節しにくくなる理由

温熱脱水時の生理反応の説明に戻ります。前述したように温熱脱水時は、細胞外液が減少し、浸透圧が上がります。細胞外液が減った時の体温調節への影響を調べるため、被験者に利尿剤を投与し、体温(食道温)と皮膚の血流(前腕血流)を調べました(図3)。通常、体温が上がると皮膚血流は増え、汗をかいて体温上昇を防ぐわけですが、利尿剤により細胞外液が減ると、同様に体温が上昇しても、皮膚血流の増加は低く抑えられます。つまり、細胞外液量が減ると体温調節反応は抑制されてしまいます。すなわち、脱水が進むと体温調節が障害されます。

次に体温調節に対する浸透圧の影響を解説します。濃い食塩水を点滴して、浸透圧を上げた時の体温調節反応を調べました。被験者に、42°Cのお湯に足をつけてもらい、体温を上昇させると、浸透圧の変化のない生理食塩水を点滴した場合、体温上昇は0.2~0.3°Cにとどまります。ところが、浸透圧が10ミリオスモル(ミリオスモルは溶液1リットルに1ミリモルの溶質を含有した場合の浸透圧)程度まで上がると、体温上昇が非常に大きくなります。10ミリオスモルといえば、通常の浸透圧から3%程度上がっただけなのですが、体温上昇に大きく影響することが見て取れます。

その理由は、体温調節反応が抑制されているためだろうと推測されます。この実験では、発汗も調べました。浸透圧に変化がない時は、体温が上がり始めると血管が拡張して、すぐに発汗が起こりました。一方、浸透圧が上がっていると、皮膚血管

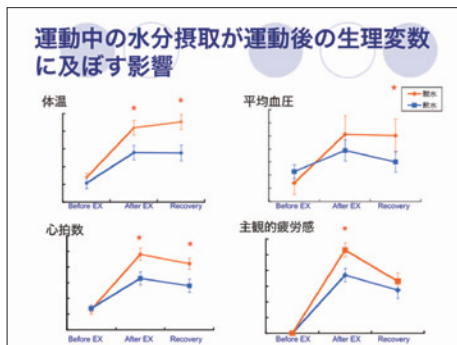


図4

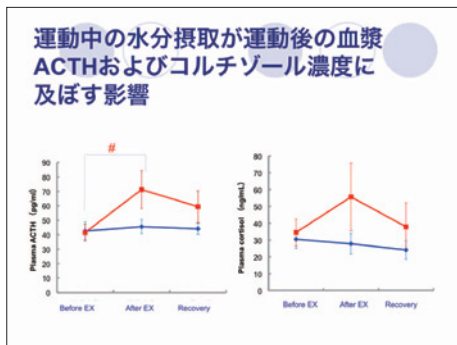


図5

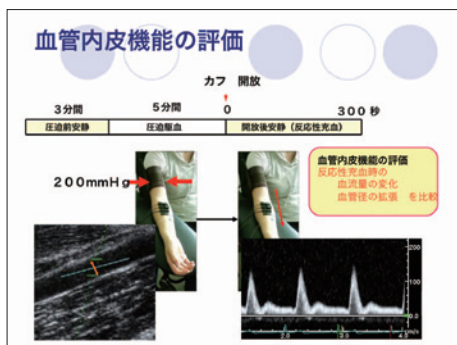


図6

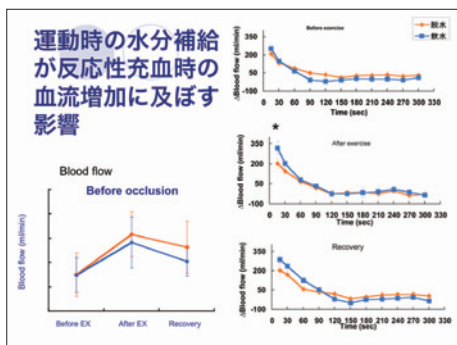


図7

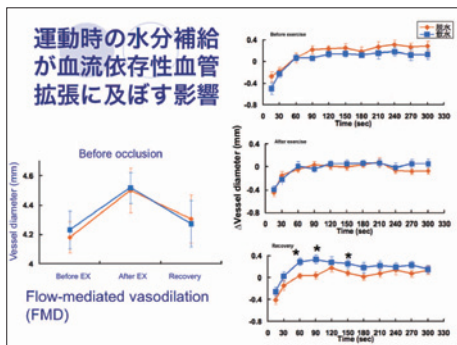


図8

はゆっくりと拡張し、発汗の開始が遅れます。結果的に体温調節が開始される前に体温が上昇してしまい、体温上昇が大きくなるわけです。

このように、脱水時に起こる浸透圧上昇および細胞外液の減少は、共に体温調節を抑制していることがわかります。水を飲まないで熱中症になってしまうのも、このメカニズムで説明できます。言い換えると、細胞外液量と細胞外液の浸透圧を一定に保てば、体温調節反応を維持できる、つまり熱中症になりにくくなります。では、そのためにはどうすればいいのか？当然、水分補給が必要であるということです。

#### 水分補給でストレス負荷も減少する

運動中の水分補給についても解説します。被験者に2時間運動してもらい、その間に失われた水分を補給した場合と補給しなかった場合の、運動前、運動後、30分の回復時点での体温(鼓膜温)・血圧・心拍数を測定し、主観的な疲労感を尋ねました。その結果、水分を補給しない場合、運動後に体温・心拍数・平均血圧・主観的疲労のいずれもが水分補給をした時に比べて増大しました。これにより、水分補給を怠れば、体に対する負荷が大きくなるといえます(図4)。

生体に対する負荷が大きくなっているため、ストレスに関連したホルモンも変化するのではないかと考え、副腎皮質刺激ホルモン(ACTH)とコルチゾールを測定しました。すると、いずれのホルモンも水分を補給しないと、運動後に非常に高くなりました。つまり、水分を補給しないで運動して脱水状態に陥ると、生体に対するストレスは大きくなります(図5)。別のストレスホルモンである副腎髄質ホルモンのアドレナリン、ノルアドレナリンも水分を補給しないと補給したときに比べて上昇が大きくなりました。

また、運動中は酸素消費が増えるため、酸化ストレスも増大します。そこで、酸化ストレスのマーカーであるカルボニル化タンパク質を指標に、酸化ストレスへの影響を調べました。水分補給を怠ると、カルボニル化タンパク質が増加します。しかし、スポーツドリンクを補給すると増加しないことが確認されました。

酸化ストレスが増大すると、血管内皮の機能が悪化します。この機能悪化は動脈硬化と関連しているといわれているため、血管内皮機能への水分補給の影響についても検討しました。血管内皮機能の評価は反応性充血と呼ばれる方法で調べることができます。200mmHgの圧力で腕を5分間圧迫し、解放すると血流が一気に増加するのですが、その際、血流の増加や血管の拡張を測定することで血管内皮機能の評価ができます。圧迫を解いた時に血流が大きく増加すると、血管内皮機能が良いと判断されます(図6)。

運動中にスポーツドリンクを飲んだ場合と飲まなかった場合での血管内皮機能を比較したところ、飲んでいない場合は、飲んでいない場合に比べ、血管内皮機能が良いことが確認されました(図7)。

血流の回復は、比較的細い血管の内皮機能を反映しているといわれています。これに対して、圧迫を解いた時の上腕動脈の拡張の測定は、比較的太い血管の内皮機能を反映しているといわれています。(図8)の結果が示すように、スポーツドリンクを補給した時のほうが、回復期に血管がより拡張していることがわかります。

すなわち、運動時に水分を摂取すると心拍数・体温・血圧・主観的疲労感を低く抑えられ、体に対する負担が少なくなります。その証拠に、水分を摂取することでストレス関連ホルモンの上昇を抑えられます。酸化ストレスも抑制できるため、血管内皮機能の改善も示唆されます。運動により血管内皮機能が良くなることが報告されていますが、脱水を伴った運動では、運動による内皮機能の改善効果が悪くなる可能性も示されています。したがって、水分摂取は運動の動脈硬化予防効果を高めるといえるかもしれません。



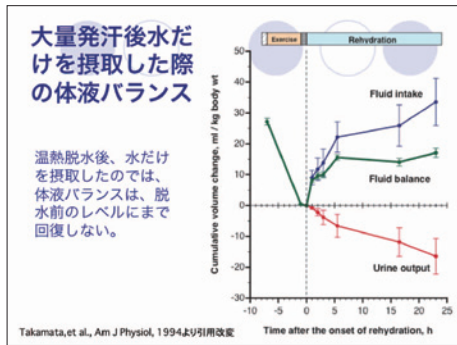


図9

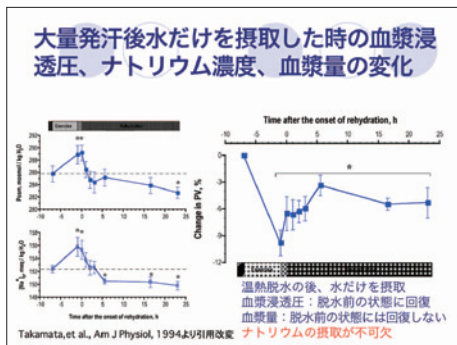


図10

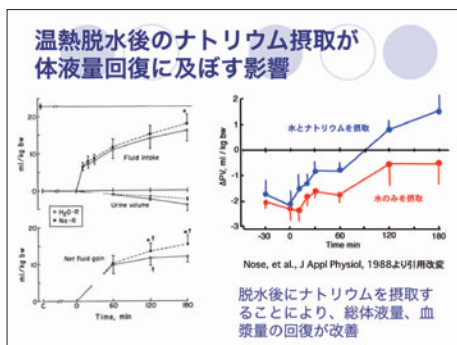


図11

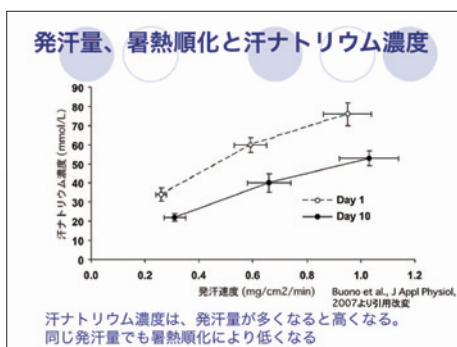


図12

## 水だけの補給はリスクをもたらす

では、どのような飲料が水分補給に適しているかを考えます。今回、紹介する実験は、温熱脱水で3%程度の体液が失われた被験者に水だけを飲ませたもので(図9)、水分摂取で取り込まれる量、尿による排出される量、そして体液のバランスを示しています。

最初の3~6時間は、水を飲めば体液バランスは回復しますが、それ以降は水を飲んでもその分、尿量が増えて、体液のバランスは元の状態よりも少ない状態のままです。脱水後、水だけを飲むと、摂取量を多くしても一定レベルを超えると飲んだ水は尿として排出されるため、体液バランスを保てなくなります。

この時の血漿の浸透圧やナトリウム量の状態を調べて、(図10)に示しています。尿とともにナトリウムが排出されると、ナトリウムを補給しない限り、浸透圧調節系が優先するため、摂取した水は尿として出ていくだけです。血漿量を元に戻すことにはつながりません。ナトリウムを摂取した場合、水だけを摂取した場合と、水に加えナトリウムも摂取した場合を比較した結果を(図11)に示しています。水とナトリウムを摂取した場合、血漿量が速やかに回復しているのがわかります。

理想のナトリウム濃度について考える場合、汗に含まれるナトリウムについても考慮する必要があります。なぜなら、発汗が多いほど、汗に含まれるナトリウムが増えるからです。そのことを示したのが(図12)です。横軸は発汗量、縦軸はナトリウム濃度が示されています。発汗量が多くなると、汗ナトリウム濃度が高くなります。汗が汗腺から分泌される際、ナトリウムが選択的に再吸収され、発汗が多くなると、再吸収が間に合わなくなり、汗とともに排出されるナトリウムが増加してしまいます。

ただし、発汗量が同じであっても、ナトリウム濃度が異なることがあります。(図12)は10日間運動をしてもらい、1日目と10日目のナトリウム濃度を比較した結果ですが、毎日運動をして暑さに慣れてくると(暑熱順化)、汗ナトリウム濃度は低くなります。したがって、日頃から運動をしている人はナトリウムをあまり摂らなくても、体液量を元に戻す能力が高く、運動習慣のない人が汗をたくさんかいた時は、意図的にナトリウムを摂取しなければ、体液量を元に戻すことは難しくなります。

このように温熱脱水後は、水を飲むだけではなく、ナトリウムの摂取が不可欠です。ただし、摂取するナトリウムの至適濃度は発汗速度に影響され、発汗速度は運動強度に影響されるため、より激しい運動をしている時はたくさんのナトリウムを摂取しなければなりません。また、暑熱順化の程度や、運動の習慣があるかどうかによっても、至適濃度は変化します。日常生活では大量に発汗することは少なく、発汗により失われるナトリウムも少ないので、そこまでナトリウムを摂取する必要はありません。

また、無理に大量の水を摂取しないということにも留意してください。前述の通り、人間には口腔咽頭反射により水の飲み過ぎを防ぐメカニズムが備わっています。このため、ナトリウムを摂取せずに大量の水を飲むと、低ナトリウム血症になる可能性があります。特に、大量に発汗する運動時は意識してナトリウムを摂取してください。水しかない場合、喉の渇きを頼りに水の摂取量を決めるのが安全です。

体液のバランスを良好に保つため、水分に加え、ナトリウムの摂取が重要だということをぜひ覚えていただきたいと思います。



**発行元:**

ILSI Japan

(特定非営利活動法人 国際生命科学研究機構)

〒102-0083

東京都千代田区麹町2-6-7 麹町R・Kビル1階

TEL:03-5215-3535/FAX:03-5215-3537

**監修:**

ILSI Japan 理事長 木村 修一

**本ニュースレターの問い合わせ先:**

03-3544-5641

(健康日本21推進フォーラム事務局)