



THE LITTLE BOOK OF HYDROGEN AND EXERCISE

水素と運動

桐蔭横浜大学スポーツ科学部
桐蔭横浜大学大学院スポーツ科学研究科
桜井智野風

CONTENTS

0. はじめに
1. 水素とは何だろうか？
2. エネルギー生成への効果
 - (1) ATP生成向上
3. 持久力への効果
 - (1) 脂肪分解の促進
 - (2) 酸素摂取量増大
 - (3) 心拍数減少
4. パワー出力への効果
 - (1) 血中乳酸濃度増加
 - (2) パワー維持
5. 健康への効果
 - (1) 水素水足浴による血中酸素飽和度上昇
 - (2) 水素水および水素ガスの酸化ストレス除去効果
6. まとめ

0.はじめに

中学生の頃、「水素は空気の中でいちばん軽い物質で空気中の濃度が4%を超えると爆発の危険性がある」という話を聞きました。昔の飛行船は水素を充満させた機体で飛んでいたため、ひとたび引火して大変な事故につながったことも教わった記憶があります。

水素にちょっと危険なイメージを抱いていた私も大学生になり、授業内で「筋肉が活動するためのエネルギーは、筋細胞ミトコンドリア内で水素の関与により作られる」と教わることになります。「ん？水素ってあのあぶない水素か？」と困惑したことを今も忘れられません。また大学時代に陸上競技の選手であった私は、疲労に効果があるとされていた「アルカリイオン水・水素水」という商品を知ることになり、「水素」という物質への疑問「？」はますます大きくなっていきました。

歳月は流れ大学教員となった私は、「水素は我々の臓器や骨格筋をはじめとする各種器官において、様々な悪害をもたらす酸化ストレスを除去する抗炎症分子として寄与することや、私たちが筋肉を使って活動する際のエネルギーの産生は細胞内のミトコンドリアで水素分子および水素イオンの仲介により行われている」ということを教えることとなります。ある意味、昔感じた水素の疑問は昇華されていたのかもしれませんが。

最近は雑誌やテレビなどでも「水素社会」ということばを聞くことが多くなってきました。自動車など輸送の動力源として、あるいは発電のエネルギー源として、さまざまところで水素は利用されています。そんな中、私はある企業の会長と出会います。

「水素の研究をしてみませんか？」そんなお誘いに、私は昔のことを思い出しました。「我々が生活活動で利用するエネルギーも生命活動に必須なエネルギーも、そのすべてに水素が関与している」というもモヤモヤした奇異な感覚と、意味もなしに昇華させてしまった自分の意識を明快にするチャンスかもしれないと思い、私は「是非やらせてください！」と返事をしました。

こんなきっかけで私の水素研究はスタートしました。地球誕生の頃から存在し、最も軽い気体である水素は、酸素や水といった様々な形態の物質と関係することにより、我々の生活に恩恵をもたらしてくれることを、我々は認識（再認識？）し始めています。この知識をより強固なものとするために、私は身体に影響を及ぼす水素を継続して研究していきたいと思っています。

その一里塚とするためにまとめたのが本書です。何かのお役に立てれば幸いです。

2024年9月30日

桜井智野風

著者経歴

1966年、神奈川県川崎市生まれ。横浜国立大学卒業、同大学院修了。1991年、東京都立大学助手に就任。1999年、米国ウィスコンシン州立大学マディソン校にて客員研究員として勤務。その後、2006年に東京農業大学准教授に着任し、北海道網走市のご当地体操「あばしり健康カニチョッ筋体操」の開発にも携わる。2014年には桐蔭横浜大学教授に就任し、現在も同大学で教鞭を執る。

2011年より、公益財団法人日本陸上競技連盟の普及育成委員会副委員長を務め、2020年東京パラリンピックでは車いす陸上競技のコーチを担当。陸上競技指導者の養成プログラム開発やテレビ解説者としても活動し、『林修の今でしょ!講座』などのメディア出演も多数。スポーツ科学・トレーニング科学を専門とする研究者であり、教育学者・博士としての顔も持つ。

2020年8月11日、一般財団法人ミライ健康財団を設立し、理事長に就任。現在に至る。

1.水素とは何だろうか？

水素原子 (H) は宇宙で最初に誕生し、最も多く存在する元素であり、地球上では水や化石燃料など様々な化合物の中に含まれ、電気分解などによって水素分子 (H₂) として生成される。

水素原子 (H) は、地球上で最も軽く、最も多く存在する原子である。一般的に「水素」と呼ぶ場合、水素原子が2つ結合し安定した、ガス状の水素分子 (H₂) のことを指す。

水素原子の原子番号は「1」である。これは宇宙誕生直後に超高温の宇宙は急激に膨張しながら冷却され、そこに陽子 (水素原子核) が生まれ、その後30~40万年を経て陽子は電子を捕まえ、水素原子が誕生した。こうしてできた水素は、宇宙構成元素の約9割を占めている。宇宙に最初にでき、その割合も圧倒的に大きいため、水素原子の番号は「1」となっている。

元素記号の「H」はラテン語の「Hydrogenium (水を生むもの)」の略である。日本語もそれに準じたのか「水のもと (素)」となっている。

地球上で水素原子は様々な元素と結合しており、水や化石燃料といった化合物の状態が存在しているため、H₂は多様な資源から生成することが可能である。例えば、水 (H₂O) に電気を流して水素 (H₂) と酸素 (O₂) を生成する水の電気分解など様々な方法で水素が生成される。

水素には以下のような特徴がある。

- 我々が生活している大気中には約0.00005%の割合でしか存在しない。
- 宇宙では一番多い元素と言われている。地球は多量の水を蓄えている惑星であり、水を電気分解すれば水素が得られることを考えれば、水素も姿を変えて多量に存在する。
- 水素は地球上で一番軽い物質である。酸素が 1m^3 で $1,429\text{g}$ の重量であるのに対し、水素は 1m^3 で 90g である（ 0°C 、1気圧環境において）。
- 水素は非常に反応しやすい物質であり、特に酸素との反応で容易に化学反応を起こす。

水素原子
(H)

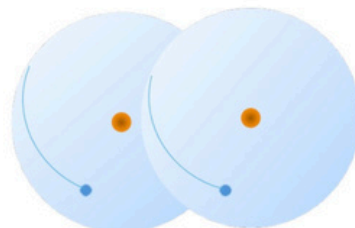


陽子1個と電子1個から構成されている。電子1個は不安定なので、自然界では単独で存在することは稀である。

水素イオン
(H^+)

「pH」=水素イオン濃度のことである。

水素分子
(H_2)



水素原子2個が結合した分子である。「水素」とはこの水素分子を示すことが多い。無味無臭で色もない。燃焼しても二酸化炭素を発生しない。

このような水素であるが、我々の身体の中においても様々な役割を担っており、生物として活動する我々にとっても欠くことのできない物質である。

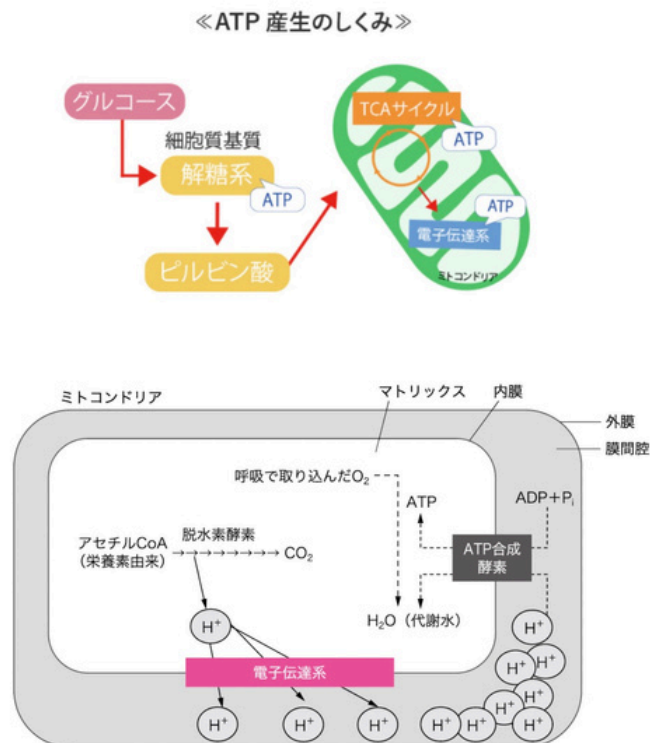
後章では、水素が我々の身体が活動する際にどのような役割を持つのか。またどのように影響を及ぼすのかを見ていきたい。

2.エネルギー生成への効果

私たちの体内では、水素イオン (H^+) が電子伝達系を通じてATPを合成し、その過程で酸素と結びついて代謝水を生成することで、エネルギー供給と体温維持が行われる。

我々は筋肉や心臓の活動、神経、肝、腎機能等の維持のために、ATP（アデノシン三リン酸：Adenosine Tri-Phosphate）という「化学エネルギー」と37度の体温を維持する「熱エネルギー」を産生しなければならない。解糖系やミトコンドリアのTCAサイクルは糖や脂肪を二酸化炭素 (CO_2) と水 (H_2O) に分解するが、その過程で生じた $NADH_2$ 、あるいは $FADH_2$ 等の水素は電子を失って水素イオン (H^+) となる。その電子は「電子伝達系」を経て酸素に渡され、水 (H_2O) となる。この水素イオン、電子の濃度勾配を利用してATPが産生される。最終的に電子を受容するのは酸素であり、酸素がないと電子伝達系を介するATP合成も止まり死に至る。しかしATP合成に流れる電子エネルギーは40%で、残りは脱共役 (Uncoupling) 回路で直接熱になる。一方、ATPは筋肉や心筋の収縮、神経細胞の興奮、蛋白質の合成等に必須である。ATP消費と熱産生は表裏一体で、ATP分解時のエネルギーの75%は熱となり、残りが分子流動や他の物体の移動等の力学的エネルギーとなるが、最後は分子相互や地面、空気との摩擦熱となって放散する。結局、摂取したエネルギーの40%はATPを経て、60%は脱共役回路で、最終的には全て熱になり、これがATPとしての「生命活動」と「体温の維持」という2つの活動ができる理由である。

電子伝達系では、酸化リン酸化によるATPの合成が行われる。酸化リン酸化とは、栄養素の酸化によって得た水素（クエン酸回路で生成したNADH+H⁺とFADH₂の水素）を利用して行う化学反応であり、ミトコンドリアの電子伝達系で行われる。水素イオン（H⁺）は電子伝達系を介してミトコンドリア膜間腔に運ばれ、その結果、水素イオン濃度（PH）が上昇することから濃度勾配が形成される。ATP合成酵素は、ミトコンドリア内膜に存在しており、ミトコンドリアマトリックスに流れ込もうとする水素イオンの経路となって、分子の一部を回転させ、そのエネルギーでADPと無機リン酸（Pi）からATPを合成する。一方、水素イオンは最終的に酸素（O₂）と結合して代謝水が生成する。



このように水素がエネルギーや熱の生成に関与していることは既知の事実である。だとするならば、水素分子を体内に取り込むことにより、このエネルギー生成の効率が変化するのではないか。

(1) ATP生成向上

水素を吸入することで運動時のエネルギーである ATP の生成が増加する。

前述した通り、我々の筋肉の活動エネルギーとなるATP というエネルギーを生成するために水素を利用している。それは、分子という形かイオンという形かはその経路により異なり、詳細なことはいまだわかっていない。

そこで、水素環境に一定時間暴露した場合、筋肉内のATP 生成量は変化するのかを調査した。研究には実験動物のラットを用い、次の2群に分けた。

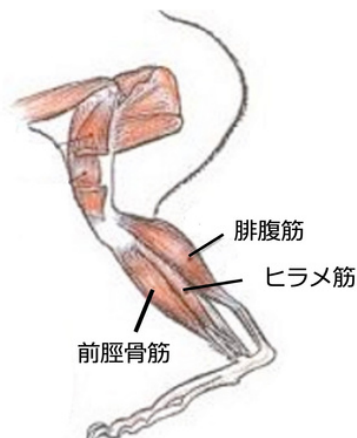


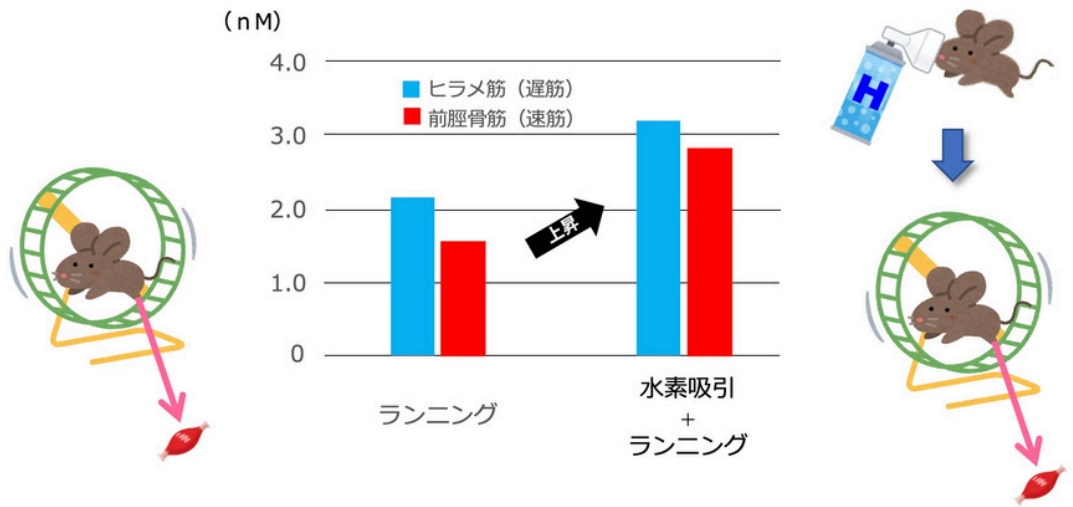
ランニング群
(疲労困憊までランニング)



水素吸引+ランニング群
(2時間の水素吸引後に疲労困憊までランニング)

疲労困憊ランニング直後に、麻酔下で前脛骨筋（速筋線維を多く含む）、ヒラメ筋（遅筋線維を多く含む）を採取した。





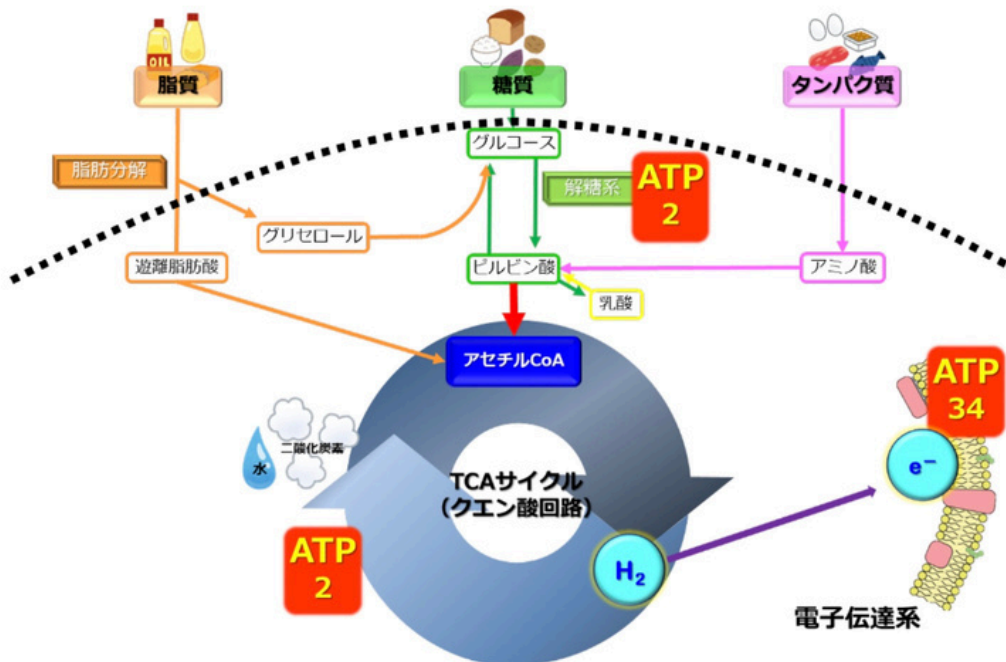
(T Sakurai et al, 2024)

運動すると筋育内のATP量は上昇するが、水素ガス吸入により筋肉内ATP量はさらに上昇した。水素吸引は運動中の骨格筋のエネルギー代謝に影響を与えられられる。特に速筋線維における上昇が顕著であり、速い動きパワフルな動きを必要とする際の水素吸入が効果的であると思われる。

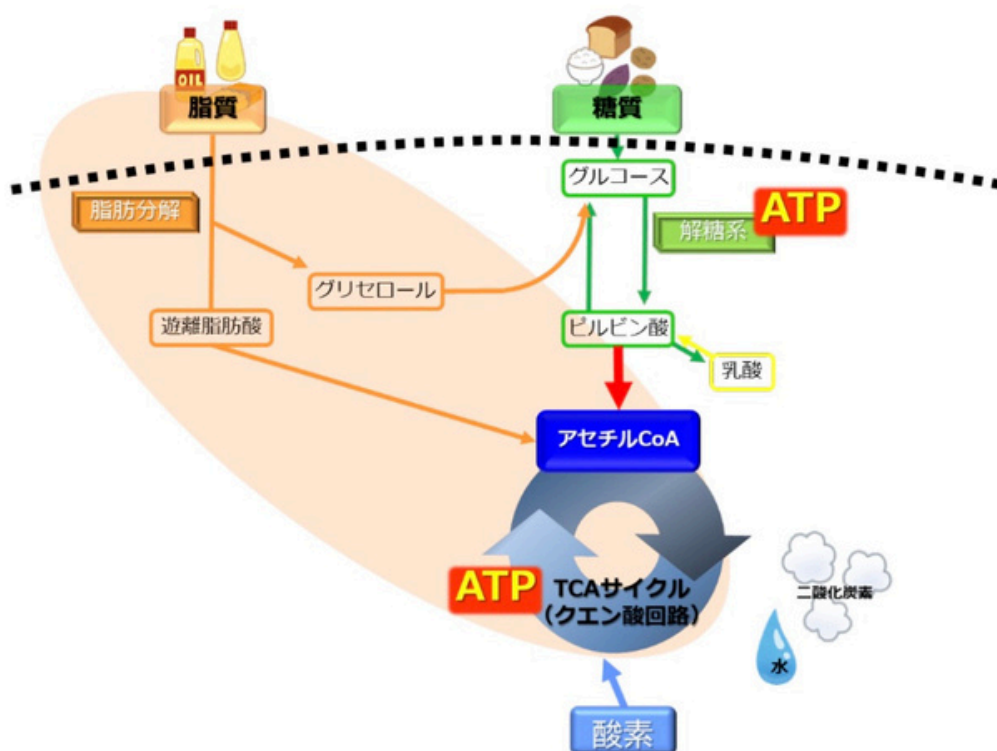
3.持久力への効果

持久運動では脂肪の分解から得られる遊離脂肪酸と酸素が重要なエネルギー源となり、水素が体内で遊離脂肪酸の濃度に変化を与えることで持久力に影響を与える可能性がある。

多くのエネルギーを必要とする運動では、食事から摂る糖質や脂質が主なエネルギー源として使われる。カラダの中に蓄えている糖質のエネルギー量は、脂質と比べると30分の1以下と、とても少ない。しかし、息が上がるくらいのきつめの運動では、糖質が主に使われてなくなってしまい、疲労（運動中止）の原因となる。糖質や脂質をATPに作り替える筋肉中のミトコンドリアが増えると、カラダの中の脂質を利用しやすくする。脂質をエネルギー源として使えるようになると、糖質を温存できるようになり、運動をより長く続けられるようになる。



その中でも、長い時間の運動（持久運動）に必要なエネルギーの供給は、脂肪の分解から得られる。これには脂肪を分解して生み出される遊離脂肪酸と酸素が必要となる。もっと一般的な言葉に言い換えれば、持久力は遊離脂肪酸と酸素によって生み出されるエネルギーが重要であるということである。水素を体内に取り入れることで、遊離脂肪酸濃度が変化するとすれば、水素は持久力に影響を与えることになる。



(1) 脂肪分解の促進

水素を吸入することで脂肪分解を向上させる。

研究には実験動物のラットを用い、次の3群に分けた。



コントロール群

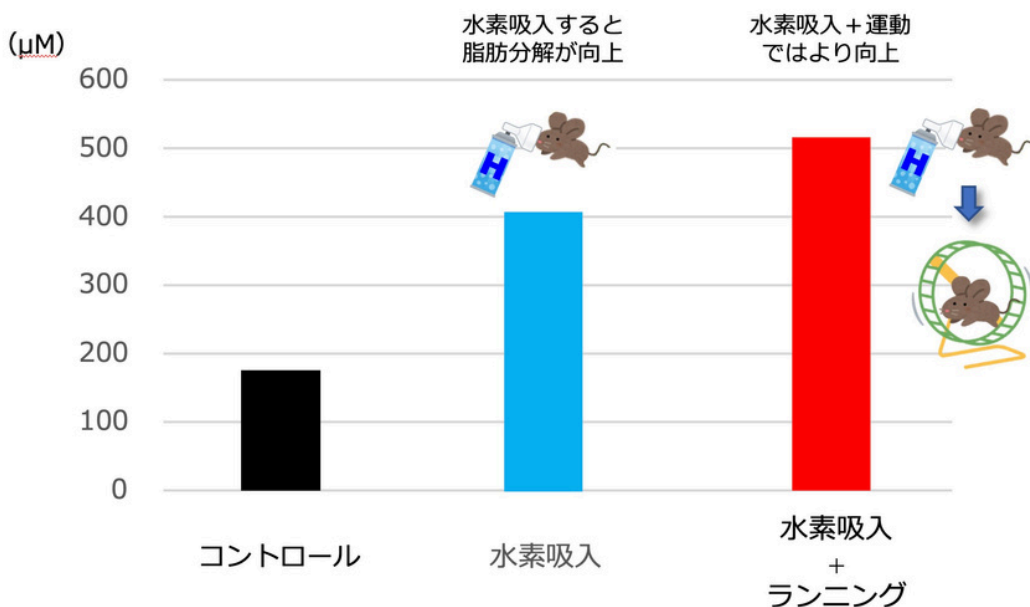


ランニング群
(疲労困憊までランニング)



水素吸引+ランニング群
(2時間の水素吸引後に疲労困憊までランニング)

疲労困憊ランニング直後に採血し、脂肪分解によって生成される遊離脂肪酸濃度を測定した。遊離脂肪酸濃度を測定することにより、脂肪が分解される状況も把握できる。



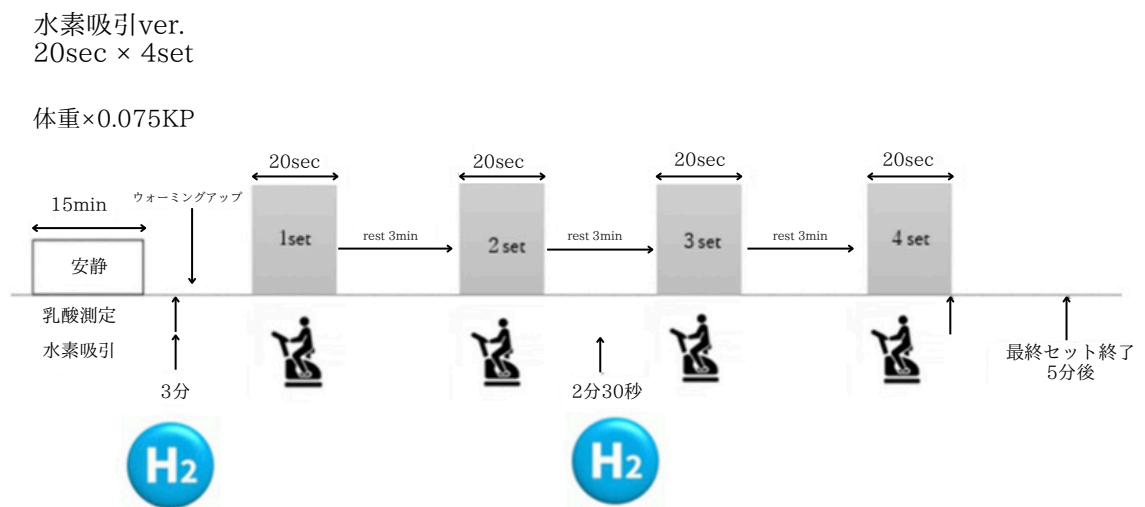
何もしていない状況（コントロール群）に比べ、水素吸引したグループは脂肪分解が向上した。さらにランニング運動を加えることでさらに増加することが分かった。この結果が示すことは、遊離脂肪酸濃度の向上から運動時の持久力の向上はもとより、脂肪分解の亢進が増加することでシェイプアップ効果への期待も考えられる。

(2) 酸素摂取量向上

水素を吸入することで運動時の酸素摂取量は増加する。

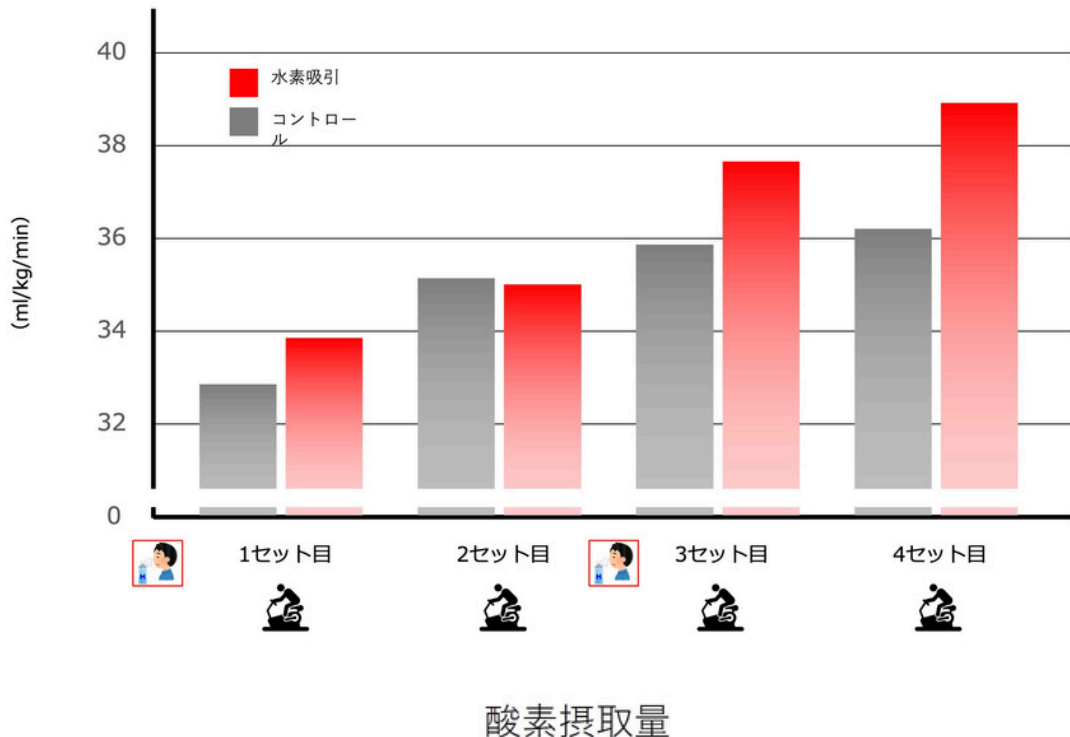
持久力の指標は「酸素摂取量 (VO₂)」であり、中でもその最高値を示す「最大酸素摂取量 (VO₂max)」は、全身持久力を示す値として広く知られている。水素によって、エネルギー生成能力が向上することで、持久的な運動能力の向上が期待できるとすれば、酸素摂取量にも影響を及ぼすことが考えられる。そこで、運動前、運動中における水素吸入が酸素摂取量変化に及ぼす影響を調査した。

下図に実験のプロトコルを示す。対象は健康な成人男子とし、運動は自転車エルゴメーターを使用したインターバル運動とした。



各被験者の体重の7.5%に当たる負荷（KP）で20秒間の全力ペダリングを3分の休憩をはさんで4セット行った。何も吸入せずに行ったテストをコントロールとした。運動3分前および全力ペダリング2セット目終了時に各々水素40ccを吸引した。エルゴメーターペダリング各セット後の酸素摂取量を測定した。

20秒間の全力ペダリングはかなり強度の高い運動である。今回の測定では、セットを経過するごと酸素の需要量が増し、酸素摂取量も増加した。セット前、休息時に40ccの水素を吸入すると、酸素摂取量はさらに増加した。その増加割合は、セットを経過するごとに大きくなることが分かった。酸素摂取量はエネルギーの生産量を表す。したがって水素の吸入は、より多くのエネルギーを生み出しパフォーマンスを向上させることが出来る作用を持つことが考えられる。



(T Sakurai et al, 2023)

(3) 心拍数減少

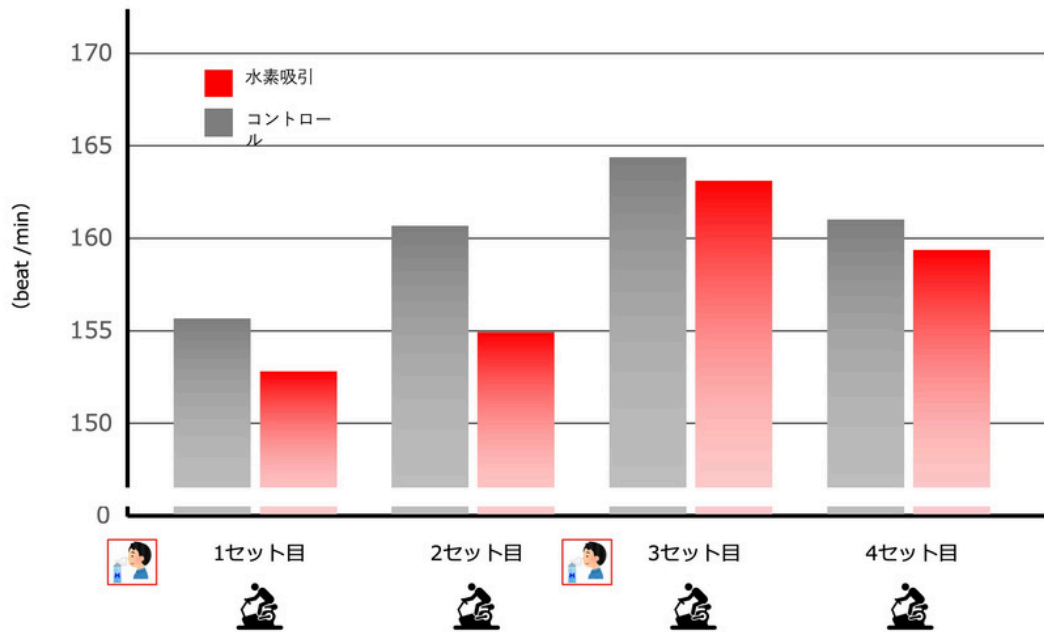
水素を吸入することで運動時の心拍数は低下する。

心拍数とは、一定の時間内に心臓が血液を送り出すために拍動した回数の中で、通常は1分間の回数(bpm: beat per minutes)で表現される。同じ年齢であれば心拍数と運動の強度との関係はほぼ一定なので、運動の強度を計る目安として用いられる。すなわち、運動中の心拍数の増加は身体への負担増大を、低下は身体への負担が低下していることを示す。

実験のプロトコールは前出の20秒フルペダリングと同様である。エルゴメーターペダリング各セット中の20秒間の平均値を心拍数として示した。



▲ペダリングテストの様子▲



ペダリング20秒間の平均心拍数

(T Sakurai et al, 2023)

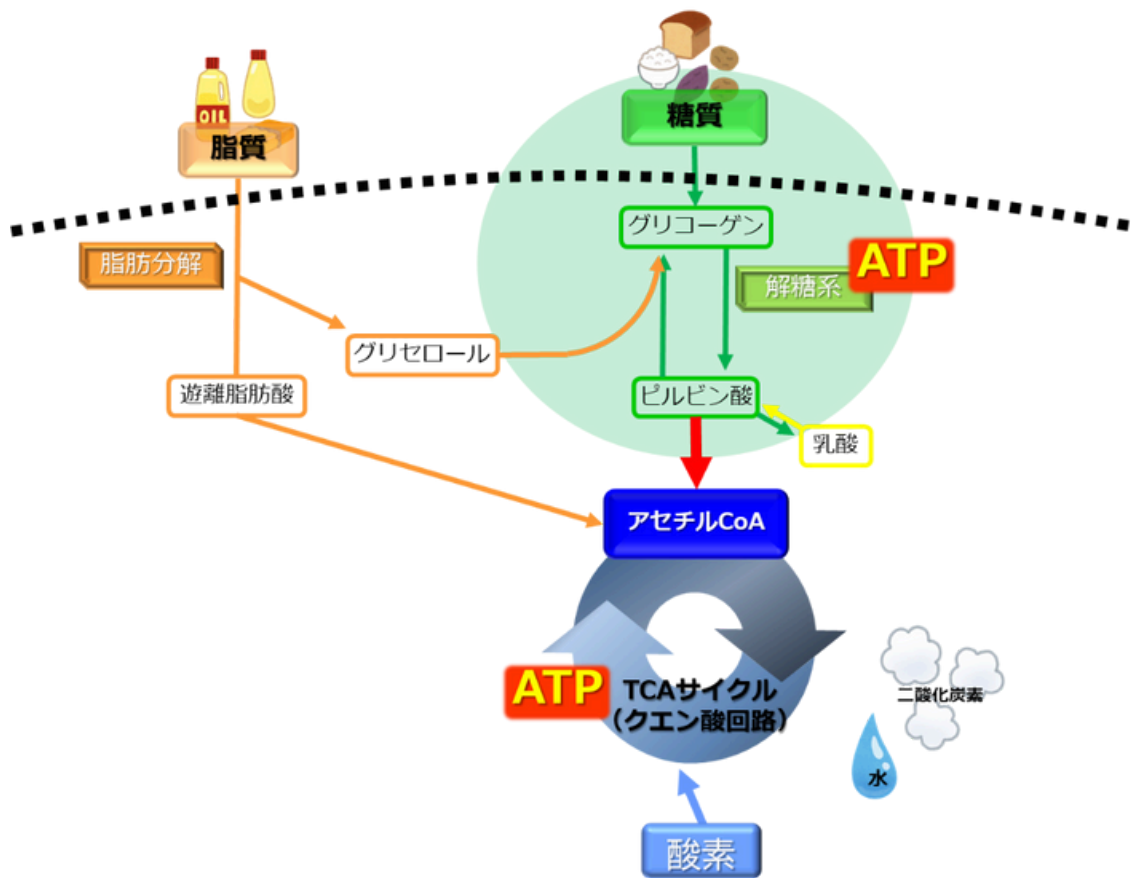
今回の測定では、3セット目まではセットを経過するごと心拍数は上昇した。4セット目の心拍数が低下したのは、かなりの強度のペダリングのため、4セット目の20秒間後半にペダリング回数が低下したためである。セット前、休息時に40ccの水素を吸入すると、心拍数は明確に低下した。ペダリング中の心拍数の低下は身体への負担が低下していることを示している。

参加したボランティアには、コントロール時にもプラセボの吸入器により通常の空気を吸わせているため、水素を吸入しているかどうかはわからない。測定後に意見を求めると、水素を吸入した時の方が辛さは少なかったという意見も聞かれた。

4.パワー出力への効果

**筋内のグリコーゲンがピルビン酸に分解され、
急激なエネルギー需要時には乳酸へと変化し、
その過程でATPが生成されることで、
最大限の筋収縮が可能となる。**

筋内に貯蔵されている糖質（グリコーゲン）はピルビン酸に分解される。ピルビン酸はアセチルCoAと変化しミトコンドリアで代謝されるが、急激にグリコーゲンが分解される場合、すなわちエネルギー需要が急激に高まった状態では、ピルビン酸は一時、乳酸へと変化する。グリコーゲンがピルビン酸へと分解され、そして乳酸へと還元される一連の反応経路を解糖系と呼び、この時に発生するエネルギーがATPの産生に用いられる。急激なエネルギーの利用が必要となるのは、我々が大きなパワーを発揮するときであり、このATP生成経路により最大限の筋収縮が可能となる。



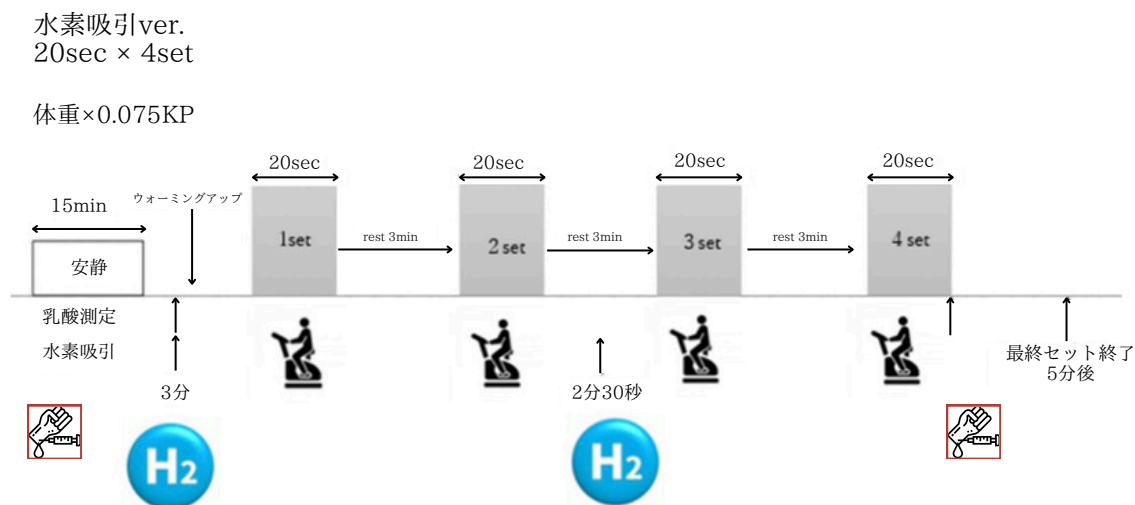
(1) 血中乳酸濃度増加

水素を吸入することで運動後の血中乳酸濃度は上昇する。

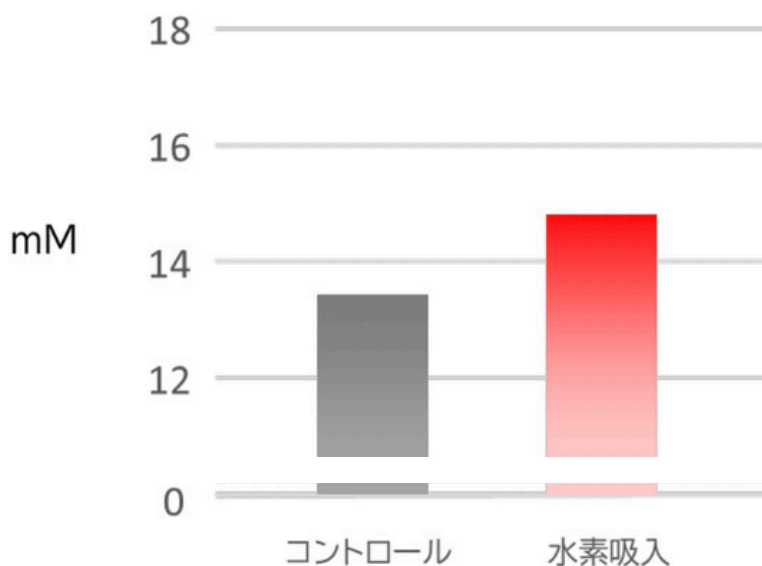
「乳酸は疲労物質」という考えがスポーツ科学の分野でもいまだに話されている。乳酸は体内が無酸素状態になることでできる老廃物とされてきた。疲労は乳酸が多くできて体内が酸性になることで起きるとされ、そこで乳酸さえ対処すれば、疲労は回復するように考えられていた。ところがこれらのことは正しくない。

高強度運動中、速さやパワーを必要とする速筋線維において糖をエネルギーとしてATPを生成する際に乳酸が生成される。すなわち、糖をたくさん利用するような強度の高い運動では乳酸が多く生成され、乳酸ができるということは高強度な運動の為に糖を使っていることである。言い換えれば、たくさんの乳酸が生成されているということは、より高い強度で筋肉が運動しており、より多くの速筋線維が活動していることを示している。

実験のプロトコールは前出の20秒フルペダリングテストの開始前および4セット終了後に採血し血中乳酸濃度を測定した。



参加したボランティアには、コントロール時にもプラセボの吸入器により通常の空気を吸わせているため、水素を吸入しているかどうかはわからない。フルペダリング終了後の血中乳酸濃度は、水素吸入を行った時の方が高値を示した。その上昇値の差は約2mMと明らかであった。この結果は、水素吸入時のペダリング時により多くの速筋線維を使用していることを示唆している。

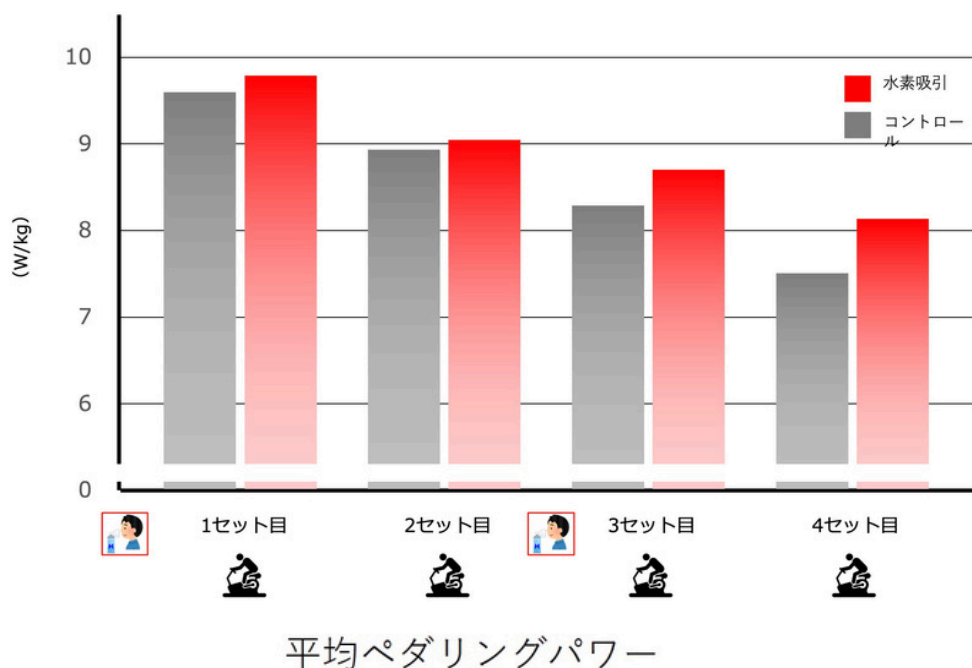


(T Sakurai et al, 2020)

(2) パワー維持

水素を吸入することで運動時の発揮パワーは上昇し、
反復時の出力は維持される。

20秒間の全力ペダリングはかなり強度の高い運動であり、セットを経過するごとに出力パワーは低下していく。しかし、セット前、休息時に40ccの水素を吸入すると、パワーの低下量は減少した。すなわち、水素吸入により低下率が少なくなりパワーを維持する能力が上昇したといえる。前述の血中乳酸濃度の上昇と合わせて考えると、速筋線維の利用が増加も影響を及ぼしていることが考えられる。



(T Sakurai et al, 2023)

5.健康への効果

**2007年の研究で水素が活性酸素を除去することが確認され、
抗酸化や炎症抑制効果が注目され、
吸入や飲用、入浴などでの摂取が研究されている。**

元来、水素は体に効果も害も与えないものと思われていた。しかし、2007年に、動物モデルを使った実験で水素が活性酸素を除去したという論文が発表されたことを皮切りに、研究が盛んになった。活性酸素による酸化ストレスは、老化やがん、心血管疾患、脳卒中、生活習慣病など、さまざまな病態と関連することが知られており、その対策として、幅広い領域で水素の抗酸化作用を活用できるようになることが期待されている。また、水素には炎症やアレルギーを抑制する作用があることも分かっている。

水素は、体の中では、腸内細菌によって産生されるが、治療への活用を検討する場合は、体の外から摂取することになる。水素を体内に取り込む方法としては、吸入、飲用、入浴（経皮吸収）などさまざまな摂取経路が考えられるが、肺から水素を吸入する方法ではヒトにおける効果が検討されている。また、細胞毒性がないことも、水素の特徴の一つである。水素分子が入浴や水素暴露により経皮的に吸収されることも報告されている。

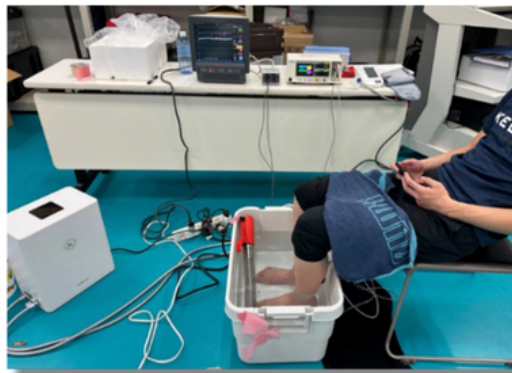
水素は可燃性ガスであり、酸素と反応することで爆発する性質がある。しかし、爆発のリスクが高まる水素濃度は4%以上とされており、これまでの研究では、2%以下の低い水素濃度でも健康に対する効果が得られている。

(1) 水素水足浴による血中酸素飽和度上昇

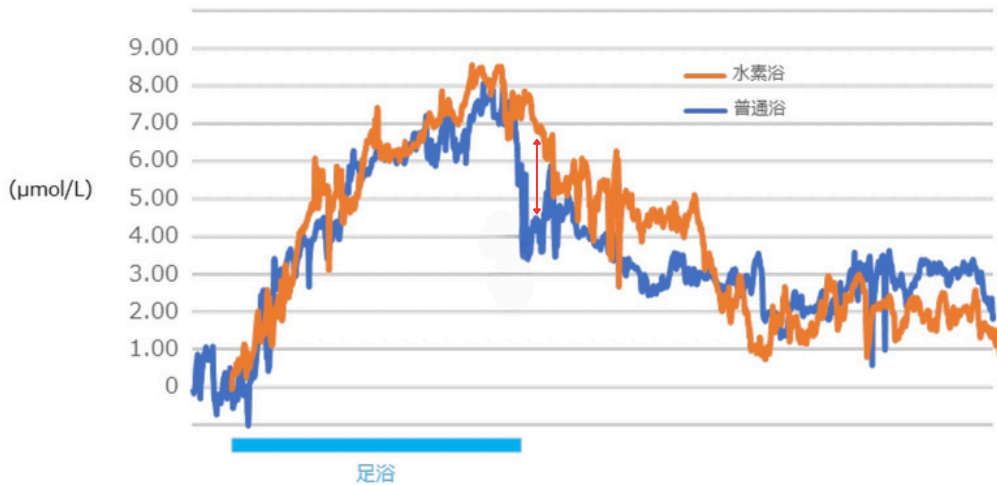
水素浴は体内酸素動態に影響を及ぼし、
浴後の保温効果をもたらす。

酸素飽和度とは血液中のヘモグロビンのうちどれだけが酸素と結びついているかを示すもので、酸素と結合したヘモグロビン（酸化ヘモグロビン： HbO_2 ）、酸素と結合していないヘモグロビン（還元ヘモグロビン： Hb ）との割合で示される。酸素飽和度値は%で表し、血液中の酸素の濃度が満たされていると100%であり、正常値は99~96%と言われている。

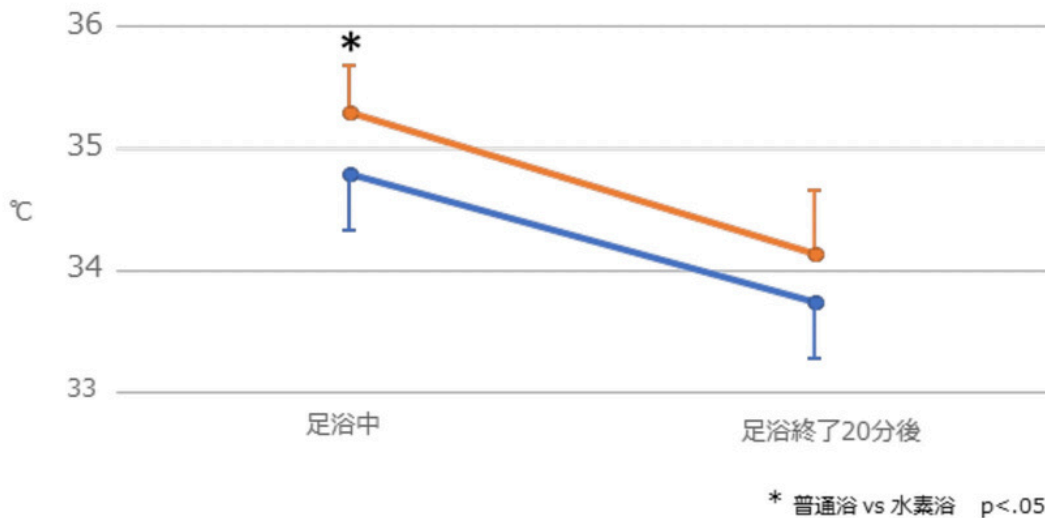
本測定では、体内の酸素動態の指標として酸化ヘモグロビン濃度を測定した。水素発生装置を装着したウォーターバス（深さ20cm、温度40℃）を利用した。測定対象は健康な成人男子とし、10分間の足浴中と終了後20分まで測定を行った。測定項目は、下腿三頭筋の酸化ヘモグロビン濃度（血中酸素濃度の指標）と筋温とした。なお、ボランティアは空気中の水素を吸引しないように呼吸装置を着用した。



▲水素水足浴の様子▲



酸素化ヘモグロビン濃度変化 (ΔO_2Hb)



筋温の変化

水道水の足浴よりも水素水の足浴による酸化ヘモグロビン上昇が確認できた。そして、水素浴は筋温も高値を示すことから、水素水は保温効果をもたらすことが示唆される。

(2) 水素水および水素ガスの酸化ストレス除去効果

水素を摂取および吸入することで
運動により誘発される酸化ストレスは減少する。

水素を体内に取り込む方法としては、吸入、飲用、入浴・ミストサウナ（経皮吸収）などさまざまな摂取経路が考えられる。様々な研究報告において異なる摂取方法を用いているが、効率的な成果を得られるのはどの方法かという解答はまだ出ていない。本測定では水素の摂取方法の違いが、ランニング運動により骨格筋内に発生する酸化ストレスへの影響を検討した。測定には実験動物のラットを用い、次の4群に分けた。



コントロール群



ランニング群
(疲労困憊までランニング)



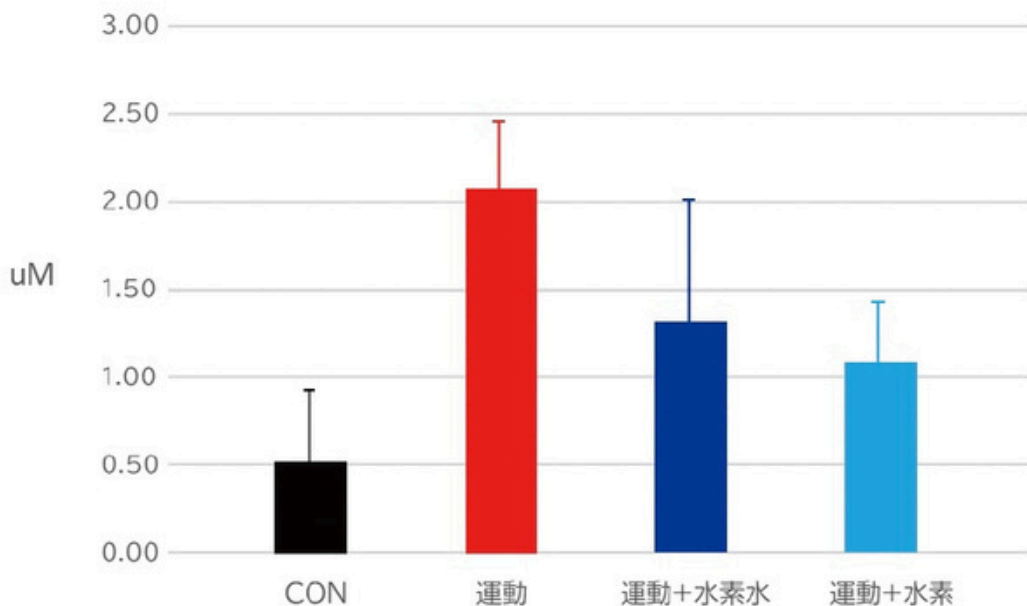
水素水+ランニング群
(5日間水素水を摂取後に疲労困憊までランニング)



水素吸引+ランニング群
(5日間高水素環境(150ppm)で飼育後に疲労困憊までランニング)

テスト終了後に麻酔下で前脛骨筋を採取し、筋肉内の過酸化脂質(TBARS)を測定した。

運動によりTBARSは大きく増加した。筋肉における酸化ストレスの増加が伺える。水素水摂取、高濃度水素環境飼育の両群ともに酸化ストレスは減少した。高濃度水素環境飼育の方が減少度は高い傾向を見せたが、水素水摂取と明確な差は見られなかった。筋肉内の酸化ストレス減少に水素が関与していることは明らかであるが、その摂取方法の差異は不明である。




運動後の前脛骨筋内の TBARS 値

6.まとめ

- 運動時のエネルギーであるATP産生が増加するため、運動のパフォーマンス向上効果が期待される。
- 脂肪分解を向上させることより、持久力向上およびシェイプアップ効果が期待される。
- 筋の発揮出力維持や血中乳酸濃度の変化より、パワー向上効果も期待される。
- 骨格筋内における活性酸素の生成を抑制することより、運動後の筋の炎症等にも有効であることが考えられる。
- 水素浴は終了後の保温性に優れると思われる。
- 水素水および水素吸引は運動による酸化ストレスを軽減できる可能性がある。

参考文献

- Effect of hydrogen gas inhalation on energy metabolism during exercise in skeletal muscle (アメリカスポーツ医学会 ASCM コロラド 2023.)
- 水素ガス吸引が運動時の骨格筋エネルギー代謝に及ぼす影響 (第78回日本体力医学会 佐賀 2024)

実験資材協力：  H&S
Group

