

分子状水素水摂取が高強度運動負荷時の運動効率に及ぼす影響

村川 増代^{*1), 2)}, 金谷 和幸²⁾, 河端 隆志²⁾¹⁾明治国際医療大学基礎教養講座健康スポーツ学ユニット, ²⁾関西大学大学院人間健康研究科

要 旨 【目的】分子状水素水 (HRW) 摂取が, 運動時の疲労に伴う運動パフォーマンス低下を抑制するかどうかについて検討した。

【方法】研究対象者は健康な成人8名 (平均年齢: 21.5±0.2歳) であった。研究対象者は分子状HRW およびプラセボ (PW) の経口摂取を単盲検法によりランダムに7日間実施した。運動パフォーマンステスト (85% $\dot{V}O_{2peak}$, 20min) をそれぞれ摂取後実施し, 運動時の仕事量, 身体運動効率, 血中乳酸濃度の動態, 主観的疲労度を解析した。

【結果】分子状HRW 摂取およびPW 摂取後の運動パフォーマンステストを解析すると, 身体運動効率は分子状HRW (23.8±0.4%) がPW (22.1±0.4%) と比較して有意な高値を示した ($p<0.01$)。血中乳酸濃度の動態は, 運動終了時では分子状HRW (8.0±1.7mmol/L) がPW (14.4±1.9mmol/L) より有意な低値を示した ($p<0.05$)。

【考察】分子状HRW 摂取が運動パフォーマンステストの身体運動効率を増加させたことから, 分子状HRW 摂取が運動誘発性の酸化ストレスによる生体への負担を軽減することで, 摂取終了翌日の運動パフォーマンスの質を向上させる可能性があると考えられた。

Key words 分子状水素水 Molecular hydrogen-rich water, 運動効率 Exercise efficiency, 疲労 Fatigue, 高強度運動負荷 High-intensity exercise load, 運動パフォーマンス Exercise performance

1. はじめに

高強度の運動を実行すると活性酸素種 (Reactive Oxygen Species: ROS) が増加し, その結果, 酸化還元バランスが変化して酸化ストレスが増大することは先行研究からよく知られた事実である¹⁻²⁾。活性酸素の増加は, 細胞膜の損傷や細胞ミトコンドリアの機能不全を引き起こし³⁾, 最終的に, 疲労が増加した結果として運動パフォーマンスの低下につながっていく⁴⁻⁵⁾。

多くのアスリートは, 抗酸化反応を高め, 有酸素および無酸素代謝の運動パフォーマンスを向上させるために, 抗酸化サプリメントを摂取していることが多い。水素は, 生体組織や細胞に速やかに浸透・拡散することで, 効率的な抗酸化物質として作用することが知られている^{6,7)}。Ohsawa et al.⁷⁾は, 水素が活性酸素の中で生体に有害となるヒドロキシラジカルを選択的に除去することを報告している。ほとんどの抗酸化サプリメントは細胞内への分布が限られているが, 水素は生体膜を効果的に透過し, ミトコンドリアや核にまで浸透する能力を持っている⁸⁻⁹⁾。水素はさまざまな方法 (水素ガスの吸入や生理食塩水

*連絡先: 〒629-0392 京都府南丹市日吉町
明治国際医療大学 基礎教養講座 健康スポーツ学ユニット
E-mail: m_murakawa@meiji-u.ac.jp

の注射)によって投与できるが、最も簡単で安全な方法は、水に色の変化や風味を加えることなく、分子状水素水 (Hydrogen-Rich Water: HRW) を摂取することである¹⁰⁾。分子状水素水に関する最近の研究では、水素分子が抗酸化反応や抗炎症反応を引き起こし、代謝性アシドーシスを抑制することなど、身体に健康的な効果をもたらす可能性があるという成果を出している¹¹⁻¹³⁾。分子状 HRW の補給は、反復運動能力、筋疲労、および換気反応にプラスの効果をもたらすことが解明されている¹⁴⁻¹⁷⁾。同様に、4%の気体水素を男女に 1 週間吸入させると、ピーク走速度が向上したとの報告がある¹⁸⁾。

現在、分子状 HRW を生成するさまざまな装置が市場に出回っており、分子状 HRW と思われる袋やボトルもさまざまなサイズで販売されるようになってきた。水を濃縮するために使用される電気分解技術は、pH レベル、水素濃度、酸化還元電位 (ORP) を決定し、活性酸素を除去する能力という点で、これらの要因に決定的な影響を与えるようになった。細胞膜による水素の吸収を促進するもうひとつの決定要因は、水素バブルの大きさである。これと同様に、ナノバブル分子状 HRW (直径 $717 \pm 387 \text{nm}$ 以下) の抗酸化活性は、ナノバブルではないが同程度かそれ以下の溶存水素を含む通常の水素水よりも優れていることが示唆されている¹⁹⁾。

また、トレーニングを継続している人は、そうでない人よりも抗酸化能が高く、運動に対する免疫反応も優れているため、活性酸素の攻撃に対する抗酸化反応は、トレーニングをしていない人よりも効果的である¹⁷⁻²⁰⁾。このようなトレーニングによる適応は、

分子状 HRW 摂取のエルゴジェニック効果にも影響を及ぼす可能性がある。

本研究では身体運動効率に着目する。持久的運動能力を要求される場合、最高酸素摂取量、乳酸閾値、運動効率といった 3 要素が運動パフォーマンスにおいて主要な要素であると考えられる。運動効率は、エネルギー消費量に対する機械的仕事率の比率として定義され、一般的に 4 種類の式で表され、最も一般的なものは総効率である²¹⁾。

また、分子状 HRW 摂取が運動パフォーマンスにプラス効果をもたらすことが解明され改善したという報告はあるが¹⁴⁻¹⁷⁾、分子状 HRW 摂取の運動効率に関する影響についてはほとんど明らかにされていない。

そこで本研究は、健康な成人を研究対象者として分子状 HRW の経口摂取をさせて運動パフォーマンステストを課し、運動効率に着目し、運動時の疲労に伴う運動パフォーマンス低下を抑制するかどうかについて検討した。

II. 方法

1. 研究対象者

本研究には、健康な成人 8 名 (男性 7 名、女性 1 名) が研究対象者として参加した。尚、研究対象者には実験期間中本実験以外の運動・スポーツ活動の実施を控えるように指示した。また、女性の研究対象者は、月経周期の影響を受けないように聞き取りで月経日およびその周辺は行わないようにした。研究対象者には、本研究の目的および実験プロトコルを詳細に説明し、研究開始前に参加者より書面によるイ

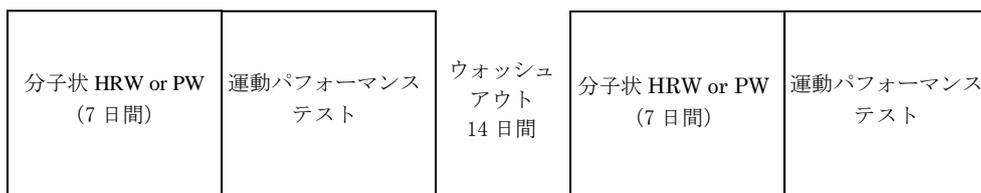


図 1 実験プロトコル

水素水摂取 (HRW) or プラセボ摂取 (PW) 10/日
運動パフォーマンステスト: 85% 運動強度 20 分
2 試行の間には、14 日間のウォッシュアウト期間を設けた。

ンフォームドコンセントを取得している。本研究は、関西大学人間健康学部・人間健康研究科研究倫理委員会の承認（2019-20）を得ており、ヘルシンキ宣言の要件を満たしたものである。

2. 実験プロトコル

研究対象者には、プレテストとして予め本実験における運動パフォーマンステストで設定する運動強度を算出するために、漸増負荷自転車運動による最高酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2peak}$) の測定を行った。7日間の分子状 HRW 摂取による高強度運動における持久的運動能への影響について評価するため、研究対象者に対して単盲検法により分子状 HRW と対照としてプラセボ (Placebo Water : PW) の 2 種類の摂取溶液をランダムに提供した。研究対象者は、最初の 7 日間にどちらか 1 種類の水溶液 (ランダムに分子状 HRW または PW) を摂取し、14 日間のウォッシュアウト期間を設けた後にもう 1 種類の水溶液を 7 日間摂取した。7 日間の摂取終了後に持久的運動能を評価する運動パフォーマンステストを 2 種類の場合について実施した (図 1)。測定は常に同一研究対象者に対して同一時間帯 (± 1 時間) に実施し、少なくとも 48 時間前以内は激しい運動を避けるように指示をした。測定は関西大学運動・環境生理学実験室人工気候室 (TBL-8H30A6PX 3014004749, ESPEC 社, 日本) にて実施し、測定環境はすべて室温: 27°C, 湿度: 50%とした。実験期間: 2021 年 4 月~2021 年 9 月であった。

3. 分子状 HRW の生成および摂取

分子状 HRW の生成には、分子状水素水生成装置 (Super Joy, Houjyu (株) 社製, 日本) を使用した。水素濃度は、市販されている軟水のミネラルウォーターに 15 分間で約 1.34mg/L 生成 (pH, 約 7.0) することができる機器であり、生成された分子状 HRW は携帯できる加水素液体真空保存容器 (H2-BAG1L, ハジ一技研 株式会社, 日本) に充填し、毎日 1000ml ごと研究対象者に提供した。本保存容器に充填された分子状 HRW は一定期間 (7 日間) 水素濃度の維持が可能であり、基本的に毎日飲水時に提供したが、提供

できない日は、最大 3 日分を事前に提供した。

7 日間の摂取期間、研究対象者に真空保存が可能である携帯用保存容器を 1 日あたり 1 容器 (1000ml) として 7 日間分の保存容器を計 7 本提供した。1 日あたりの摂取容量は 1000ml とし、凡そ 3 から 4 回程度で水溶液をすべて摂取するように指示した。PW には市販されているミネラルウォーター (pH 約 7.0, 成分: 100ml あたりナトリウム 0.8mg, カルシウム 0.1~2.4mg, マグネシウム 0.02~1.1mg, カリウム 0.04~0.7mg) を使用した。

4. 測定項目および測定内容

プレテスト

プレテストセッション開始前に研究対象者の身体組成を測定した。体重および体脂肪率については、生体電位インピーダンス法機器 (UC-411NFC, A&D 社製, 日本) により評価した。

本実験で設定する相対的運動強度 ($85\dot{V}O_{2peak}$) を決定するために研究対象者には最高酸素摂取量 (Peak Oxygen Consumption: $\dot{V}O_{2peak}$) の測定を課した。測定は、呼気ガス分析装置 (AEROMONITOR AE-310S, ミナト医科学社, 日本) を装着し、人工気候室 ($T_a: 27^\circ\text{C}$, $RH: 50\%$) にて、酸素摂取量 (Oxygen consumption: $\dot{V}O_2$) を自転車漕ぎ運動 (エアロバイク 75XLIII, コナミ社, 日本) の漸増負荷法 (仕事量: 20W/min, ペダル回転数: 60rpm) を用いて all-out に至るまでの最大運動を課した。

運動パフォーマンステスト

測定項目

測定項目は、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) および換気量 (VE), 心拍応答 (HR) を 1 分間ごとに連続測定した。また、安静時および運動時 (運動時 3 分, 5 分, 10 分, 15 分, 20 分) の血中乳酸値 (blood lactate level: Lac) および大腿部前面の疲労感 (Rating of Perceived Exertion: RPE) と主観的疲労度 (Visual Analogue Scale: VAS) を測定し仕事量の連続測定を行った。また身体運動効率率は、仕事量と $\dot{V}CO_2$ で算出した。

【VAS(Visual Analogue Scale)検査方法】

あなたが、今、感じている疲労感を直線の左右両端に示した感覚を参考に、直線上に×で示して下さい。(線や枠の外に×をつけることはできません)

直線の左端：これまで経験したことのないような、疲れを全く感じない最良の感覚

直線の右端：これまで経験したことのないような、何もできないほど疲れきった最悪の感覚

疲れを全く感じない最良の感覚

何もできないほど疲れきった最悪の感覚

図2 疲労度 (VAS)

疲労度の主観的評価として、運動パフォーマンステスト運動終了時に疲労度の度合を総合的に判断させVAS (Visual Analogue Scale) で評価した。

測定内容

研究対象者は、実験室到着後にまず約 200ml のミネラルウォーターを摂取し、安静後に排尿を行い測定前の体水分平衡を保った。その後、人工気候室 (Ta:27℃, RH:50%) にて 30 分間以上の椅座位安静を維持し、その間に測定機器等を装着した。なお、運動パフォーマンステストはすべて午前中(10-12 時)に行われた。運動パフォーマンステストは、7 日間の分子状 HRW 摂取および PW 摂取後の翌日にそれぞれ実施した。運動パフォーマンステストにおける個々に設定された負荷強度は、プレテストとして自転車漕ぎ運動による漸増負荷法での最高酸素摂取量の値より、最高酸素摂取量の 85%に相当する酸素摂取量の負荷強度(Watts)を算出して、PW 群および分子状 HRW 群で同じ負荷強度(Watts)を設定した。

仕事量の測定

仕事量の測定は、運動パフォーマンステストで使用した運動様式は、バイクの後輪部位にダイレクトドライブ式トレーナー (DORIVO XR-T, ELITE 社, イタリア) を装着した自転車漕ぎ運動であり、1 秒ごとの仕事量(Watts)を GPS サイクルコンピュータ (EDGE1030, GARMIN 社, 米国)により連続測定した。研究対象者はプレテストで計測した最高酸素摂取量の 85%に相当する運動強度で、ペダル回転数 85rpm の

条件でギアを設定し、20 分以上の自転車運動を行った。研究対象者にはペダル回転数 85rpm をできうる限り維持するように指示を行った。また疲労のため所定のケイデンスを維持できなくなるが、可能な限りケイデンスを維持できるように努力して 20 分以上走完させた。仕事量低下の評価は、ペダル回転数が設定値より 95%を下回った時点とし、仕事量を算出した。

ターゲット運動強度持続時間

運動パフォーマンステスト時のターゲット運動強度持続時間は、仕事量低下を示した時間を各研究対象者に示した。

Lac の測定

Lac の測定は、簡易ラクテート分析装置 (Lactate Pro2 LT-1730, ARKRAY, Inc. 社, 日本) を用いて、測定を行った。指尖から採血用穿刺針 (ARKRAY, Inc. 社製) を用い、自己採血した血液より、安静時および運動時 (運動時 3 分, 5 分, 10 分, 15 分, 20 分) の Lac を測定した。採血は、統一して右手第Ⅱ指・第Ⅲ指の指腹にて実施した。

主観的疲労の評価

運動時の大腿部前面の疲労感を評価するために、

表1 研究対象者の身体組成と $\dot{V}O_{2peak}$ 負荷強度

研究対象者	性別	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	体脂肪率 (%)	$\dot{V}O_{2peak}$ (mL/kg/min)
N1	M	21	164.0	62.4	19.8	43.9
N2	M	22	178.9	81.7	21.3	42.0
N3	M	22	186.6	68.6	11.1	44.9
N4	M	21	173.9	71.6	20.3	41.3
N5	M	21	172.5	65.1	22.1	42.9
N6	M	21	162.3	66.8	20.1	38.0
N7	M	22	170.5	63.9	17.7	42.9
N8	F	22	169.2	62.8	29.4	36.0
平均値±標準誤差		21.5±0.2	172.2±2.6	67.9±2.1	20.2±1.7	41.5±1.0

研究対象者の身体組成と $\dot{V}O_{2peak}$ を表したものである。研究対象者 8 名の年齢：21.5±0.2 歳，身長：172.2±2.6 cm，体重：67.9±2.1kg，体脂肪率：20.2±1.7%，体重あたりの酸素摂取量：41.5±1.0mL/kg/min であった。

RPE の計測を行った²²⁾。

加えて，運動パフォーマンステスト終了後の主観的疲労度の評価をするために VAS の計測を行った (図 2)。VAS は左端 (0 mm) には「疲れを全く感じない最良の感覚」，右端 (100 mm) には「何もできないほど疲れきった最悪の感覚」とした。

運動パフォーマンステスト時：身体運動効率の算出

仕事量と $\dot{V}O_2$ を 1 分間ごとに平均値を算出し，以下のように身体運動効率 (Gross efficiency) を算出した²³⁾。

仕事量 (Watts) ÷ 69.767 = 仕事量エネルギー (kcal) :
1kcal = 69.767W

酸素消費量 (ml/kg/min) × 0.005 = $\dot{V}O_2$ エネルギー
(kcal) : $\dot{V}O_2$: 1kcal = 0.005

仕事量エネルギー (kcal) ÷ $\dot{V}O_2$ エネルギー (kcal)
× 100 = 身体運動効率 (Gross efficiency, %)

$\dot{V}O_2$ は，運動開始から 2～3 分で定常状態に達する応答を示すので，4 分から示している²⁴⁾。

5. 統計処理

本研究の測定値は平均値±標準誤差 (mean ± SE) で示した。運動パフォーマンステストの 1 分ごとの身体運動効率・大腿部前面の疲労感・血中乳酸濃度における分子状 HRW 摂取と PW 摂取の 2 条件の差の

検定に二元配置分散分析 (群×時間) を用い，危険率 5% 未満を有意とした。なお，統計処理には統計処理ソフトウェア (Stat View) を使用した。Post-hoc テストは，Fisher の PLSD を用いた。また，運動パフォーマンステスト 20 分間全体での身体運動効率・主観的疲労度・ターゲット運動強度持続時間は，対応のある平均値の差の検定：t 検定を用いて比較を行い，危険率 5% 未満を有意とした。

III. 結果

本研究において研究対象者全員が測定を完了し，分子状 HRW 摂取に関連すると思われる副作用および運動パフォーマンステスト後に体調を崩したという報告はなかった。

1. 研究対象者の身体組成と $\dot{V}O_{2peak}$

表 1 は，研究対象者の身体組成と $\dot{V}O_{2peak}$ を表したものである。研究対象者 8 名 (男子 7 名，女子 1 名) の年齢：21.5±0.2 歳，身長：172.2±2.6 cm，体重：67.9±2.1kg，体脂肪率：20.2±1.7%， $\dot{V}O_{2peak}$ ：41.5±1.0 mL/kg/min であった。

2. 運動パフォーマンステスト時の仕事量 8 名の平均時系列

7 日間の分子状 HRW あるいは PW 摂取後に施行した

運動パフォーマンステストについて解析を行った。図3は研究対象者8名の1分間の平均仕事量を表したものであり、20分間の平均仕事量は、分子状HRW摂取は 173.9 ± 0.9 W/min, PW摂取は 168.7 ± 0.8 W/minであった。運動開始から20分間において、分子状HRW摂取とPW摂取との間には有意な差は認められなかった。

3. 運動パフォーマンステスト時のターゲット運動強度持続時間

表2は20分間の高強度運動負荷時の持久的運動能を評価するために、1秒ごとに連続測定した仕事量の動態からターゲット運動強度を持続できた時間(秒)を表したものである。また仕事量の低下を評価するのは既定のペダリング数85rpmの95%を下回

ったときとして算出した。研究対象者が、個々に設定された負荷強度に対してケイデンスを維持できた運動パフォーマンスタイムは、分子状HRW摂取で 1182.4 ± 7.7 秒に対してPWでは 993.6 ± 59.8 秒と、分子状HRW摂取時の運動パフォーマンスタイムが有意に長かった ($p < 0.05$)。

4. 運動パフォーマンステスト時の身体運動効率

表3は、20分間の運動パフォーマンステスト時の身体運動効率を研究対象者ごとに算出(Gross efficiency)した。分子状HRW摂取後の運動パフォーマンステストにおける身体運動効率は、1例を除きPW摂取後の数値と比較して高値を示し、分子状HRW摂取： $23.8 \pm 0.4\%$ はPW摂取： $22.1 \pm 0.4\%$ と比較して有意な高値を示した ($p < 0.01$)。

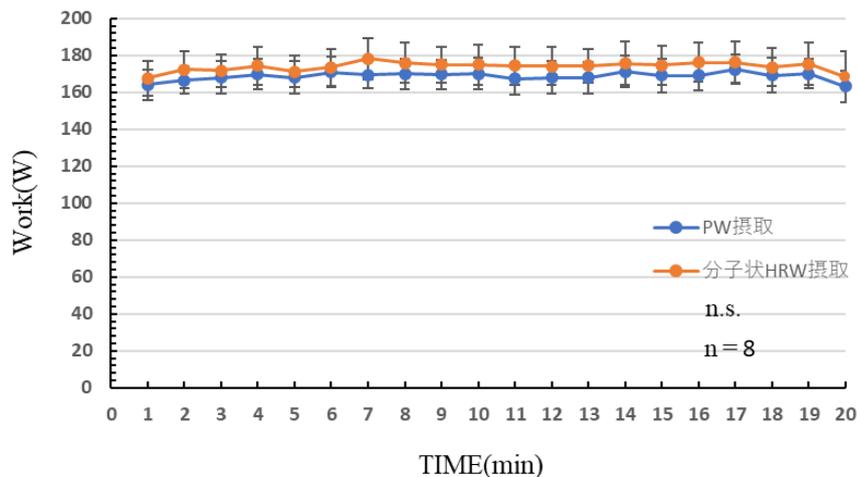


図3 仕事量 (W) 8名の平均時系列

研究対象者8名の平均仕事量を表したものであり、平均仕事量の分子状HRW摂取は 173.9 ± 0.9 W/min, PW摂取は 168.7 ± 0.8 W/minであった。運動開始から20分間において、分子状HRW摂取とPW摂取との間には有意な差は認められなかった。

表2 運動パフォーマンステスト時のターゲット運動強度持続時間

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	平均
	(秒)								
分子状HRW摂取	1200	1156	1176	1200	1200	1187	1200	1140	1182.4 ± 7.7 *
PW摂取	1065	1018	660	1080	780	1176	1150	1020	993.6 ± 59.8

* $p < 0.05$ n=8

仕事量の動態からターゲット運動強度を持続できた時間を表したものである。研究対象者が、個々に設定された負荷強度に対してケイデンスを維持できた運動パフォーマンスタイムは、分子状HRW摂取で 1182.4 ± 7.7 秒に対してPWでは 993.6 ± 59.8 秒と、分子状HRW摂取時の運動パフォーマンスタイムが有意に長かった ($p < 0.05$)。

図4は、運動パフォーマンステスト時の1分間ごとの $\dot{V}O_2$ および仕事量から算出された身体運動効率 (Gross efficiency, %) を分子状HRW摂取およびPW摂取について示したものである。 $\dot{V}O_2$ は、運動開始から2~3分で定常状態に達する応答を示すことが知られているので、4分から示している²⁴⁾。

運動開始から分子状HRW摂取時の身体運動効率の値はPW摂取と比較して高値を示す傾向にあり、7分、8分、9分、11分、13分、16分、17分、19分で有意な高値を示した (p<0.05)。

5. 運動パフォーマンステスト時の大腿部前面の疲労感

図5は運動パフォーマンステスト時の大腿部前面の疲労感について示したものである。運動開始より分子状HRW摂取時の大腿部前面の疲労感がPW摂取

時と比較して低値を示す傾向にあり、15分目の運動時では分子状HRW (12.8±1.1)、PW (16.3±0.6) と分子状HRW摂取時の大腿部前面の疲労感の有意な抑制を示した (p<0.05)。さらに20分目の運動終了時では分子状HRW (13.5±1.2)、PW (18.0±0.7) と分子状HRW摂取時の大腿部前面の疲労感の有意な抑制を示した (p<0.01)。

運動パフォーマンステスト終了後の主観的疲労度 (表4) は、分子状HRW摂取 (66.9±4.6 mm) によりPW摂取 (80.4±4.1 mm) 時と比較して有意な低値を示した (p<0.01)。

6. 運動パフォーマンステスト時の血中乳酸濃度

図6は運動パフォーマンステスト時の血中乳酸濃度の動態について示したものである。運動開始時よ

表3 運動パフォーマンステスト時の身体運動効率

	N1 (%)	N2 (%)	N3 (%)	N4 (%)	N5 (%)	N6 (%)	N7 (%)	N8 (%)	平均 (%)
分子状HRW摂取	25.1	23.2	24.2	25.3	21.5	24.3	22.5	23.9	23.8±0.4 **
PW摂取	23.6	25.1	22.8	22.4	20.6	21.4	20.9	20.4	22.1±0.4

** p<0.01 n=8

運動パフォーマンステスト時の身体運動効率を研究対象者ごとに算出 (Gross efficiency) したものである。分子状HRW摂取後の運動パフォーマンステストにおける身体運動効率は、分子状HRW摂取:23.8±0.4%とPW摂取:22.1±0.4%と比較して有意な高値を示した (p<0.01)。

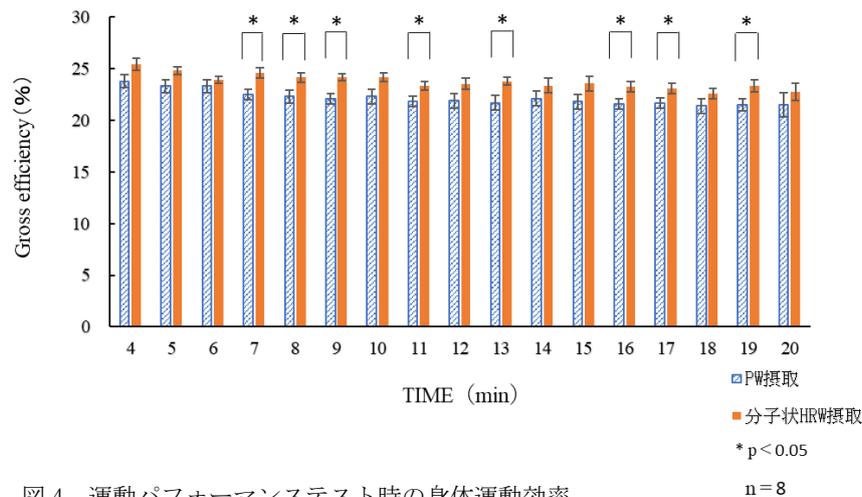


図4 運動パフォーマンステスト時の身体運動効率

運動パフォーマンステスト時の身体運動効率 (Gross efficiency, %) を分子状HRW摂取およびPW摂取について示したものである。運動開始から分子状HRW摂取時の身体運動効率の値はPW摂取と比較して高値を示す傾向にあり、有意な高値を示した (p<0.05)。

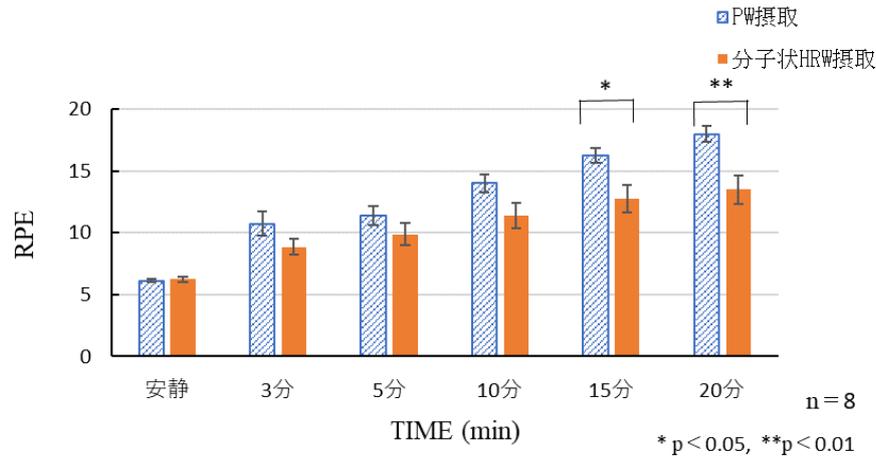


図5 運動パフォーマンステスト時の大腿部前面の疲労感

運動パフォーマンステスト時の運動時の大腿部前面の疲労感を RPE で示したものである。運動開始より 15 分目の運動時では分子状 HRW (12.8±1.1), PW (16.3±0.6) と分子状 HRW 摂取時の大腿部前面の疲労感の有意な抑制を示した (p<0.05)。また 20 分目の運動終了時では分子状 HRW (13.5±1.2), PW (18.0±0.7) と分子状 HRW 摂取時の大腿部前面の疲労感の有意な抑制を示した (p<0.01)。

表4 運動パフォーマンステスト後の主観的疲労度

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	平均
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
分子状HRW摂取	60	68	80	80	52	43	72	80	66.9±4.6 **
PW摂取	80	78	85	90	80	58	72	100	80.4±4.1

* **p<0.01 n=8

運動パフォーマンステスト終了後の主観的疲労度を示したものである。分子状 HRW 摂取：66.9±4.6mm により PW 摂取：80.4±4.1mm 時と比較して有意な低値を示した (p<0.01)。

り血中乳酸濃度は安静値より増加を示すも、分子状 HRW 摂取時の動態をみると PW 摂取時より増加が抑制されている傾向を示し、20 分目の運動終了時では分子状 HRW (8.0±1.7mmol/L) が PW (14.4±1.9mmol/L) より有意な低値を示した (p<0.05)。

IV. 考察

スポーツ・シーンなどでより良い運動パフォーマンスを維持していくためには、身体的負担のみならず精神的負担に対する適応能が大切であり、こうした身体的・精神的ストレスとうまく付き合えるからだの調整力が重要となる。近年、運動前の分子状 HRW

摂取が運動パフォーマンス、特に持久力、筋力、反復運動能力において、血中乳酸濃度、換気能、知覚反応（主観的疲労度）を改善¹⁶⁾し、さらに抗疲労効果があることが報告されている¹⁴⁾。こうした報告では、主に運動前の分子状 HRW 摂取期間が 7 日間以上によるものであり、運動前に単体として分子状 HRW 摂取した報告では効果がないというものもある。また、運動パフォーマンス向上（抗疲労）効果は運動能力レベルに依存するという報告もある²⁵⁾。

今回、われわれは 7 日間の分子状 HRW 摂取が高強度運動の運動パフォーマンスに及ぼす影響を検討するため、20 分間の高強度運動時のターゲット運動強度持続時間、エネルギー消費量、仕事量、身体的運

動効率、主観的疲労および血中乳酸濃度の動態より抗疲労の影響について解析を行った。

運動パフォーマンステストにおける高強度運動に対する維持能力についてみると、分子状 HRW 摂取時の規定したケイデンスで維持できた運動パフォーマンスタイムが PW 摂取と比較して有意に延長したことから、外的仕事量として運動パフォーマンスの向上がみられた。こうした運動レベルの維持能力は、運動ストレスに対する生体負担度に改善がみられ、運動パフォーマンスが向上している事が分かる。先行研究において分子状 HRW 摂取は効率的な抗酸化物質として作用することが知られており⁶⁻⁷⁾、生理学的抗疲労の影響が生体内で起きていると考えられる。

運動効率に着目すると、この運動効率において運動継続の阻害因子となる主観的因子として疲労および疲労感があるが、先行研究では分子状 HRW 摂取において、換気反応にプラスの影響があると報告している¹⁴⁻¹⁷⁾。本研究において、一定負荷運動に対するエネルギー消費量と外的仕事量との関係から身体的運動効率 (Gross efficiency) を求めてみると、分子状 HRW 摂取後の値は PW 摂取と比較して高値を示す傾向にあり 7 分目以降有意な差が示され、分子状 HRW 摂取により身体運動効率向上の影響が考えられる。大腿部前面の疲労感についてみると、先行研究では分子状 HRW 摂取において、筋疲労にプラスの影響

がある¹⁴⁻¹⁷⁾と報告している。本研究においても、活動筋である大腿部前面の疲労感では、運動時間に伴い大腿部前面の疲労感の動態は増加するも分子状 HRW 摂取の値は PW 摂取を下回る傾向にあり運動後半では有意に低値を示した。研究対象者の大腿部前面にかかる疲労感の減少が認められ、分子状 HRW 摂取が大腿部前面の疲労感の抑制に影響していると考えられる。

さらに、運動終了時の主観的疲労度については、分子状 HRW 摂取 (66.9 ± 4.6 mm) により PW 摂取 (80.4 ± 4.1 mm) 時と比較して有意な低値を示した。このように、主観的疲労度については、分子状 HRW 摂取により運動時の疲労負担度の抑制に影響していると考えられる。

つぎに、運動時の生体負担の抑制について着目する。Ostojic et al.²⁶⁾は、分子状 HRW 摂取は、代謝性アシドーシスによる体組織および血液の低 pH、さまざまな神経筋および心肺反応への障害を抑制する可能性があるとして報告し、Aoki et al.¹⁴⁾は分子状 HRW 摂取による運動時の乳酸濃度の増加抑制および筋疲労の抑制があると報告している。本研究においても、運動開始時より血中乳酸濃度は安静値より増加を示すも、分子状 HRW 摂取時の動態は PW 摂取時より増加が抑制されている傾向を示し、20 分目では有意な低値を示した。

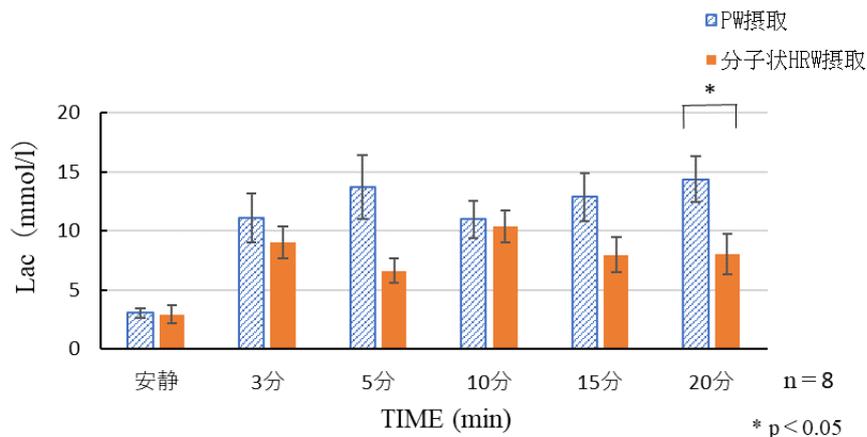


図6 運動パフォーマンステスト時の血中乳酸濃度の動態

運動パフォーマンステスト時の血中乳酸濃度の動態について示す。運動開始より 20 分目の運動終了時では分子状 HRW (8.0 ± 1.7 mmol/L) が PW (14.4 ± 1.9 mmol/L) より有意な低値を示した ($p < 0.05$)。

また、分子状 HRW 摂取は身体的運動効率の向上、主観的疲労度の抑制、運動誘発性アシドーシスの抑制などから運動時の運動パフォーマンスを向上・改善させることが示唆され、先行研究の結果とも近似している²⁷⁻³⁰⁾。

これまでの分子状 HRW 摂取の抗疲労に関する研究報告は、抗酸化特性による抗疲労についてのものであり、スポーツにおける分子状 HRW 使用の根拠も、そのほとんどが抗酸化特性によるものと言える。運動は、生体内で活性酸素の過剰生成とフリーラジカルを介した組織への損傷をもたらす³¹⁾、分子状 HRW のような強力な抗酸化物質の使用は、酸化ストレスと活性酸素関連の障害（例：疲労、微細損傷、炎症、オーバートレーニング）を減少させる可能性があるとする報告が多くみられる^{30,32,33)}。Ostojic et al.¹³⁾ は、運動による代謝性アシドーシスに対して分子状 HRW を摂取した場合、PW 群に対して有意に動脈血 pH が上昇し、血中 pH をアルカリ化する効果を報告している。また、和田ら³⁴⁾ は活性酸素種がミオシンの構造的な変化に関与していることを示唆し、Lowe et al.³⁵⁾ は、前述のように、ROS はアクチンと強く結合するミオシン頭部の数を減少させると報告した。これらのことから、分子状 HRW 摂取において Lac の抑制による代謝性アシドーシスの抑制²⁷⁾により主観的疲労度および大腿部前面の疲労感が抑制されたと考えられる。

今回の研究では、7 日間の分子状 HRW 摂取により、高強度運動時の運動効率に及ぼす影響について、運動強度持続時間、身体的運動効率、主観的疲労度および血中乳酸濃度の動態から検討を加えた。その結果、分子状 HRW 摂取による高強度運動後の主観的疲労度および大腿部前面の疲労感は PW 摂取時よりも抑制されていることが研究対象者全員に認められた。本研究では、分子状 HRW およびプラセボを用いて、主観的評価や身体的運動効率を比較検討した、これらの手法は他に見当たらないわれわれの新しい視点である。また本研究においては、分子状 HRW 摂取が運動パフォーマンステストの身体運動効率を増加させたことから、分子状 HRW 摂取が運動誘発性の酸化ス

トレスによる生体への負担を軽減することで、摂取終了翌日の運動パフォーマンスの質を向上させる可能性があると考えられた。

V. 結語

本研究は、健康な成人を研究対象者に、7 日間の分子状 HRW 摂取により、高強度運動時 (85% $\dot{V}O_{2peak}$) の運動パフォーマンスに及ぼす影響について、ターゲット運動強度持続時間、身体的運動効率、主観的疲労度および血中乳酸濃度の動態から以下の結果が得られた。

(1) 身体的運動効率は分子状 HRW 摂取で有意な高値を示した。

(2) ターゲット運動強度持続時間は分子状 HRW 摂取で有意な延長が認められた。

(3) 主観的運動負担度は分子状 HRW 摂取で大腿部前面の疲労感および主観的疲労度 (VAS) に有意な抑制が認められた。

(4) 血中乳酸濃度の動態は分子状 HRW 摂取で 20 分目の運動終了時では有意な低値を示した。

以上の結果より、7 日間の分子状 HRW 摂取が、高強度運動負荷時の疲労感への抑制が認められ、運動パフォーマンステストの運動効率を増加させたことから、分子状 HRW 摂取が運動誘発性の酸化ストレスによる生体への負担を軽減することで、摂取終了翌日の運動パフォーマンスの質を向上させる可能性があると考えられた。

文献

1. Tanskanen M, Atalay M, Uusitalo A: Altered oxidative stress in overtrained athletes. *J Sports Sci*, 28(3):309-317, 2010.
2. Magherini F, Fiaschi T, Marzocchini R, et al.: Oxidative stress in exercise training: the involvement of inflammation and peripheral signals. *Free Radic Res*, 53(11-12):1155-1165, 2019.

3. Carri MT, Valle C, Bozzo F, et al.: Oxidative stress and mitochondrial damage: importance in non-SOD1 ALS. *Front Cell Neurosci*, 9(41):1-6, 2015.
4. Finaud J, Lac G, Filaire E: Oxidative stress - Relationship with exercise and training. *Sports Med*, 36(4):327-358, 2006.
5. Powers SK, Jackson MJ: Exercise-induced oxidative stress: cellular mechanisms and impact on muscle force production. *Physiol Rev*, 88(4):1243-1276, 2008.
6. Ishibashi T: Molecular hydrogen: new antioxidant and anti-inflammatory therapy for rheumatoid arthritis and related diseases. *Curr Pharm Des*, 19(35):6375-6381, 2013.
7. Ohsawa I, Ishikawa M, Takahashi K, et al.: Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. *Nat Med*, 13(6):688-694, 2007.
8. Ohta S: Molecular hydrogen as a novel antioxidant: overview of the advantages of hydrogen for medical applications. *Methods Enzymol*, 555:289-317, 2015.
9. Nicolson G, De Mattos G, Settineri R, et al.: Clinical effects of hydrogen administration: from animal and human diseases to exercise medicine. *Int J Clin Med*, 7(1):32-76, 2016.
10. Ohta S: Recent Progress Toward Hydrogen Medicine: Potential of Molecular Hydrogen for Preventive and Therapeutic Applications. *Curr Pharm Des*, 17(22):2241-2252, 2011.
11. Ishibashi T, Sato B, Rikitake M, et al.: Consumption of water containing a high concentration of molecular hydrogen reduces oxidative stress and disease activity in patients with rheumatoid arthritis: an open-label pilot study. *Med Gas Res*, 2(1):27, 1-8, 2012.
12. LeBaron T, Singh R, Fatima G, et al.: The Effects of 24-Week, High-Concentration Hydrogen-Rich Water on Body Composition, Blood Lipid Profiles and Inflammation Biomarkers in Men and Women with Metabolic Syndrome: A Randomized Controlled Trial. *Diabetes Metab Syndr Obes*, 13:889-896, 2020.
13. Ostojic S, Stojanovic M: Hydrogen-Rich Water Affected Blood Alkalinity in Physically Active Men. *Res Sports Med*, 22(1):49-60, 2014.
14. Aoki K, Nakao A, Adachi T, et al.: Pilot study: Effects of drinking hydrogen-rich water on muscle fatigue caused by acute exercise in elite athletes. *Med Gas Res*, 2:12, 1-6, 2012.
15. Da Ponte A, Giovanelli N, Nigris D, et al.: Effects of hydrogen rich water on prolonged intermittent exercise. *J Sport Med Phys Fit*, 58(5):612-621, 2018.
16. Botek M, Krejci J, McKune A, et al.: Hydrogen Rich Water Improved Ventilatory, Perceptual and Lactate Responses to Exercise. *Int J Sports Med*, 40(14):879-885, 2019.
17. Botek M, Krejčí J, McKune AJ, et al.: Hydrogen-Rich Water Supplementation and Uphill Running Performance: Effect of Athlete Performance Level. *Int J Sports Physiol Perform*, 15(8):1193-1196, 2020.
18. Javorac D, Stajer V, Ratgeber L, et al.: Short-term H₂ inhalation improves running performance and torso strength in healthy adults. *Biol Sport*, 36(4):333-339, 2019.
19. Kato S, Matsuoka D, Miwa N: Antioxidant activities of nano-bubble hydrogen-dissolved water assessed by ESR and 2,2'-bipyridyl methods. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 53:7-10, 2015.

20. Koltai E, Bori Z, Osvath P, et al.: Master athletes have higher miR-7, SIRT3 and SOD2 expression in skeletal muscle than age-matched sedentary controls. *Redox Biol*, 19: 46-51, 2018.
21. Ettema G, and H W Loras: Efficiency in cycling: a review. *Eur. J Appl Physiol*, 106:1-14, 2009.
22. 内山靖, 小林武, 潮見泰藏: 臨床評価指標入門 適用と解釈のポイント. 第5刷, 協同医書出版社, 東京, pp 81-86, 2010.
23. Gaesser G A, and G A Brooks: Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J Appl Physiol*, 38:1132-1139, 1975.
24. Zoladz J A, Szkutnik Z, Majerczak J, et al.: Detection of the change point in oxygen uptake during an incremental exercise test using recursive residuals: relationship to the plasma lactate accumulation and blood acid base balance. *Eur J Appl Physiol*, 78:369-377, 1998.
25. Rafael T, Guillermo O, Adrian G C, et al.: Effects of 7-day intake of hydrogen-rich water on physical performance of trained and untrained subjects. *Biology of Sport*, 38(2):269-275, 2021.
26. Ostojic S M, Stojanovic M D, Calleja-Gonzalez J, et al.: Drink with alkaline NORP improve exercise performance in physically active men and women. *Serb J Sports Sci*, 5(3):83-89, 2011.
27. Ostojic S M: Serum alkalinization and hydrogen-rich water in healthy men. *Mayo Clin Proc*, 87(5):501-502, 2012.
28. Gharib B, Hanna S, Abdallahi O M, et al.: Anti-inflammatory properties of molecular hydrogen: investigation on parasite-induced liver inflammation. *C R Acad Sci*, III 324:719-724, 2001.
29. Hirohisa Ono, Yoji Nishijima, Shigeo Ohta, et al.: Hydrogen Gas Inhalation Treatment in Acute Cerebral Infarction. A Randomized Controlled Clinical Study on Safety and Neuroprotection. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 26(11):2587-2594, 2017.
30. Ostojic S M: Molecular hydrogen in sports medicine: new therapeutic perspectives. *Int J Sports Med*, 36(4):273-279, 2015.
31. Powers S K, Jackson M J: Exercise-induced oxidative stress: cellular mechanisms and impact on muscle force production. *Physiol Rev*, 88:1243-1276, 2008.
32. Nagata K, Nakashima-Kamimura N, Mikami T, et al.: Consumption of molecular hydrogen prevents the stress-induced impairments in hippocampus-dependent learning tasks during chronic physical restraint in mice. *Neuropsychopharmacology*, 34:501-508, 2009.
33. Nishimaki K, Asada T, Ohsawa I, et al.: Effects of Molecular Hydrogen Assessed by an Animal Model and a Randomized Clinical Study on Mild Cognitive Impairment. *Curr Alzheimer Res*, 15(5):482-492, 2018.
34. 和田正信, 坂本誠, 杉山美奈子ら: 高強度運動における筋疲労の要因: 無機リン酸, グリコーゲンおよび活性酸素種の影響. *体育学研究*, 51(4):399-408, 2006.
35. Lowe D, Tsurek J, Thomas D, et al.: Electron paramagnetic response reveals age-related myosin structural changes in rat skeletal muscle. *Am J Physiol*, 280: C540-C547, 2001.

Effects of molecular hydrogen-rich water intake on exercise efficiency under high-intensity exercise load

Masuyo Murakawa^{1), 2)}, Kazuyuki Kanatani²⁾, Takashi Kawabata²⁾

¹⁾ *Department of Basic Liberal Arts, Meiji University of Integrative Medicine*

²⁾ *Kansai University Graduate School of Health and Well-being*

Abstract

Purpose: This study seeks to examine the suppression of the effects of molecular hydrogen-rich water (HRW) intake on exercise performance decline associated with fatigue during exercise.

Methods: The subjects were eight healthy adults (mean age: 21.5 ± 0.2 years) who were randomly assigned in a single-blind manner to consume either molecular HRW or placebo water (PW) for seven days. An exercise performance test ($85\% \dot{V}O_{2peak}$, 20 min) was conducted after molecular HRW or PW intake to analyze workload, physical exercise efficiency, kinetics of blood lactate concentration, and the degree of fatigue during exercise.

Results: Analysis of the exercise performance test after molecular HRW or PW intake revealed a significantly higher physical exercise efficiency with molecular HRW ($23.8 \pm 0.4\%$) than with PW ($22.1 \pm 0.4\%$) ($p < 0.01$). The kinetics of blood lactate concentration was significantly lower with molecular HRW (8.0 ± 1.7 mmol/L) than with PW (14.4 ± 1.9 mmol/L) at the end of exercise ($p < 0.05$).

Discussion: Molecular HRW intake increased exercise efficiency in the exercise performance test, thus raising the possibility that it improves the quality of exercise performance the next day by reducing the physical burden.