

## 酸素充填水摂取は運動時の呼吸・循環応答に影響を及ぼすか？

Does oxygenated water have an influence on cardiorespiratory responses during exercise?

堀田 典生\*                      片山 敬章\*\*                      佐藤 耕平\*                      孫 志虎\*\*  
山本 親\*\*\*                      中塚 正博\*\*\*\*                      石田 浩司\*\*

Norio HOTTA\*                      Keisho KATAYAMA\*\*                      Kohei SATO\*                      Zhihu SUN\*\*  
Chikashi YAMAMOTO\*\*\*                      Masahiro NAKATSUKA\*\*\*\*                      Koji ISHIDA\*\*

The purpose of this study was to clarify whether the intake of oxygenated water before the start of exercise had an influence on cardiorespiratory responses during exercise. Ten male university long distance runners participated in the present study. We adopted a randomized, double blind, placebo controlled and crossover design for this experiment. The measurements of cardiorespiratory parameters such as oxygen uptake, carbon dioxide output, expired minute ventilation, arterial oxygen saturation, heart rate and exhaustion time during submaximal and maximal exercises were performed during a treadmill running test. Subjects consumed either the placebo, 350 ml of plain water, or 350 ml of water with an enriched oxygen content of 30 ppm within 15 minutes before the start of the test. As for maximal oxygen uptake and exhaustion time, significant differences were not detected in the measurements between subjects who drank oxygenated water and those who took the placebo [mean (SD) 68.8 (3.2) vs 69.0 (3.4) ml/kg/min, 566.7 (35.2) vs 570.4 (42.0) s]. The other variables also did not show any significant differences. These results suggest that the consumption of oxygen enriched water before exercise could not affect cardiorespiratory responses during exercise.

### 諸 言

酸素摂取量 (oxygen uptake:  $\dot{V}O_2$ ) は運動強度に伴い増加するが、ある強度を境にそれ以上は増加せずプラトーとなる。そして、この時の値は最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake:  $\dot{V}O_{2max}$ ) と呼ばれ、呼吸・循環機能及び持久的運動能力を反映する指標とされている<sup>1)</sup>。 $\dot{V}O_{2max}$  を規定する要因は、①呼吸運動による酸素の肺胞への取り込み、②肺胞から血液への拡散 (肺拡散能)、③血液による活動部位までの輸送、④毛細血管から組織への拡散、⑤細胞質からミトコンドリアへの輸送、⑥ミトコンドリアにおける酸素利用に分け

ることができ<sup>2)</sup>、①から⑤を酸素供給系、⑥を酸素利用系と考えることができる。前者の酸素供給系に着目し、運動中に大気よりも酸素濃度の高いガスを吸入させることにより  $\dot{V}O_{2max}$  や運動継続時間 (exhaustion time: EXtime) が増加することが知られている<sup>11)</sup>。しかし、運動前に高酸素ガスを吸引しても最大運動時における  $\dot{V}O_2$  や EXtime を増加させる効果はなく<sup>10)</sup>、また、実験室以外では基本的に適用できないため、実際の競技スポーツの場面では酸素の付加吸引により持久的運動能力を向上させることは不可能であると考えられる。

近年、酸素が充填された飲料水を飲むことでダイビング後の減圧症予防あるいは勉強や仕事の集中力増加

\* 名古屋大学大学院医学系研究科  
\*\* 名古屋大学総合保健体育科学センター  
\*\*\* 名古屋学院大学経済学部  
\*\*\*\* (株)日本食品開発研究所  
\* Graduate School of Medicine, Nagoya University  
\*\* Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University  
\*\*\* Nagoya Gakuin University  
\*\*\*\* Japan Food Research and Development Institute Co. Ltd

などを謳った酸素充填水が様々な企業から販売されている。さらに、酸素充填水由来の酸素は、水の吸収と共に血液循環に入るといふ考えの下、運動前の酸素充填水摂取による酸素の付加摂取が運動パフォーマンスを向上させるのではないかと期待されており、実際に酸素充填水摂取により EXtime が延長したという報告もみられる<sup>7)</sup>。一方、負荷漸増トレッドミル走の EXtime は、運動前の酸素充填水の摂取で改善されない<sup>12)</sup> という報告もされており、運動前の酸素充填水摂取によって持久的運動能力が改善されるか否かについては一致した研究結果が得られておらず、また、生理学的な証拠も未だ少ない。

そこで本研究では、運動前の酸素充填水摂取が、運動時の呼吸・循環応答と持久的パフォーマンスに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 方 法

### 1. 被検者

本学陸上競技部中・長距離ブロック所属の健康な男子大学生10名を被検者とした。被検者の身体的特性は、年齢  $20.4 \pm 0.8$  歳 (平均値  $\pm$  標準偏差)、身長  $170.0 \pm 5.1$  cm、体重  $56.7 \pm 1.9$  kg であった。全ての被検者に本研究の目的、方法を十分に説明した後、研究に参加することの同意を得た。本研究は、名古屋大学総合保健体育科学センター倫理委員会の下で行われた。

### 2. 酸素充填水の摂取方法及び実験手順

実験に先立ち、被検者を運動テストに慣れさせた。本研究では、ダブルブラインド法及びクロスオーバー法を採用した。1回目測定の7日後の同時刻に2回目の測定を行った。被検者をランダムオーダーにて  $5 - 9^\circ\text{C}$  に冷却された溶存酸素 30ppm の酸素充填水、あるいはミネラルを酸素充填水と同じにコントロールした溶存酸素 8ppm 以下のプラセボ水を摂取させた。摂取方法は、10から15分程度のウォーミングアップの後、最大運動テスト15分前より、3分以内に 350ml を摂取完了するように指示した。測定1、2回目間において、摂取に要した時間に有意差は認められなかった。

### 3. 最大運動テスト及び測定項目

運動テストにはトレッドミルを使用し、Rice<sup>9)</sup> のプロトコルを用いた。すなわち、傾斜 0%、250m/min の速度で4分間運動を継続した後、疲労困憊に至るまで毎分 2% ずつ角度を増加させた。呼気ガスは最大下運動中においては3分30秒から4分までの30秒間と、最大運動時においては30秒毎の連続採気によりダ

グラスバックに採集した。呼気ガス量 (expired minute ventilation:  $\dot{V}_E$ , BTPS) は湿式ガスメータ (WE、品川製作所) により、呼気ガスの酸素及び炭酸ガス濃度は質量ガス分析器 (ARCO-1000、アルコシステム) により測定し、 $\dot{V}O_2$  及び二酸化炭素排出量 (carbon dioxide output:  $\dot{V}CO_2$ ) を求めた。心拍数 (heart rate: HR) は双極誘導心電計 (OEC-6401、日本光電) により測定し3分30秒から4分までの30秒間の平均値と運動中の最高値 (HRmax) を採用した。動脈血酸素飽和度 (arterial oxygen saturation:  $SaO_2$ ) は、左耳葉においてパルスオキシメーター (Biox3740、omedea) にて計測した。 $SaO_2$  の値は3分30秒から4分までの30秒間と運動終了直前の30秒間の平均値を採用した。 $\dot{V}O_{2\text{max}}$  の決定は、1) 負荷の増加に対する  $\dot{V}O_2$  の 150ml 以上の増加が観察されないこと、2) 最高心拍数 ( $220 - \text{年齢}$ ) に達していること、3) 呼吸交換比 (respiratory exchange rate: RER) が 1.1 以上であること、の3項目の内2項目を満たした場合とした。運動中の  $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}CO_2$  の最高値を  $\dot{V}_{E\text{max}}$ 、 $\dot{V}CO_{2\text{max}}$  とした。また、EXtime を記録し持久的運動パフォーマンスの指標とした。

### 4. 統計処理

全ての数値は平均値  $\pm$  標準偏差で示した。酸素充填水とプラセボ水の差の検定は、F検定にて両群の分散が等しいことを確認した後、対応ある t 検定を用いた。危険率 5% 未満をもって有意とした。分析には Stat View 5.0 を用いた。

## 結 果

ステップ負荷運動4分間の最後の30秒間の呼吸・循環応答を表1Aに示した。この最大下運動中の酸素充填水及びプラセボ水摂取時の  $\dot{V}O_2$  はそれぞれ、 $49.2 \pm 3.3$ 、 $49.2 \pm 3.5$  ml/kg/min であり、有意差は認められなかった。また、その他の値も統計学的に有意な変化は観察されなかった。表1Bに最大下運動後継続して実施された漸増負荷運動中における  $\dot{V}O_{2\text{max}}$ 、 $\dot{V}CO_{2\text{max}}$ 、 $\dot{V}_{E\text{max}}$ 、HRmax と RER を示した。また、EXtime 並びに、EXtime の前30秒間の  $SaO_2$  を示した。酸素充填水及びプラセボ水摂取時の  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  は、 $68.8 \pm 3.2$ 、 $69.0 \pm 3.4$  l/kg/min であり有意な変化は示さなかった。また、EXtime も  $566.7 \pm 35.2$ 、 $570.4 \pm 42.0$  s であり、他の全ての項目と同様に酸素充填水摂取時とプラセボ水摂取時に、有意差は認められなかった。最大運動時における  $\dot{V}O_{2\text{max}}$ 、 $\dot{V}CO_{2\text{max}}$ 、RER、EXtime に関しては各被検者の値並びに平均値を図示した (図1)。

酸素充填水摂取は運動時の呼吸・循環応答に影響を及ぼすか？

表 1 最大下及び最大運動時における呼吸・循環応答

A: 最大下運動時							
	$\dot{V}O_2$	$\dot{V}O_2/BW$	$\dot{V}CO_2$	$\dot{V}E$	RER	HR	SaO <sub>2</sub>
	l/min	ml/kg/min	l/min	l/min		beats/min	%
酸素充填水	2.79±0.23	49.2±3.3	2.51±0.27	76.0±11.1	0.90±0.04	156.4±12.2	93.3±1.8
プラセボ水	2.79±0.23	49.2±3.5	2.56±0.23	77.3±10.2	0.92±0.05	157.3±11.6	93.5±1.9

B: 最大運動時								
	$\dot{V}O_{2max}$	$\dot{V}O_{2max}/BW$	$\dot{V}CO_{2max}$	$\dot{V}E_{max}$	RER	HRmax	SaO <sub>2</sub>	EXtime
	l/min	ml/kg/min	l/min	l/min		beats/min	%	s
酸素充填水	3.90±0.08	68.8±3.2	4.65±0.24	143.8±16.9	1.19±0.05	188.1±6.6	90.1±2.2	566.7±35.2
プラセボ水	3.92±0.25	69.0±3.4	4.75±0.38	150.1±18.5	1.21±0.04	188.3±7.0	89.9±2.6	570.4±42.0

数値は平均±標準偏差。  $\dot{V}O_2$ : 酸素摂取量,  $\dot{V}O_2/BW$ : 体重あたりの酸素摂取量,  $\dot{V}CO_2$ : 二酸化炭素排出量,  $\dot{V}E$ : 換気量, RER: 呼吸交換比, HR: 心拍数, SaO<sub>2</sub>: 動脈血酸素飽和度,  $\dot{V}O_{2max}$ : 最大酸素摂取量,  $\dot{V}O_{2max}/BW$ : 体重あたりの最大酸素摂取量,  $\dot{V}CO_{2max}$ : 最大二酸化炭素排出量,  $\dot{V}E_{max}$ : 最大換気量, HRmax: 最高心拍数, EXtime: 運動継続時間

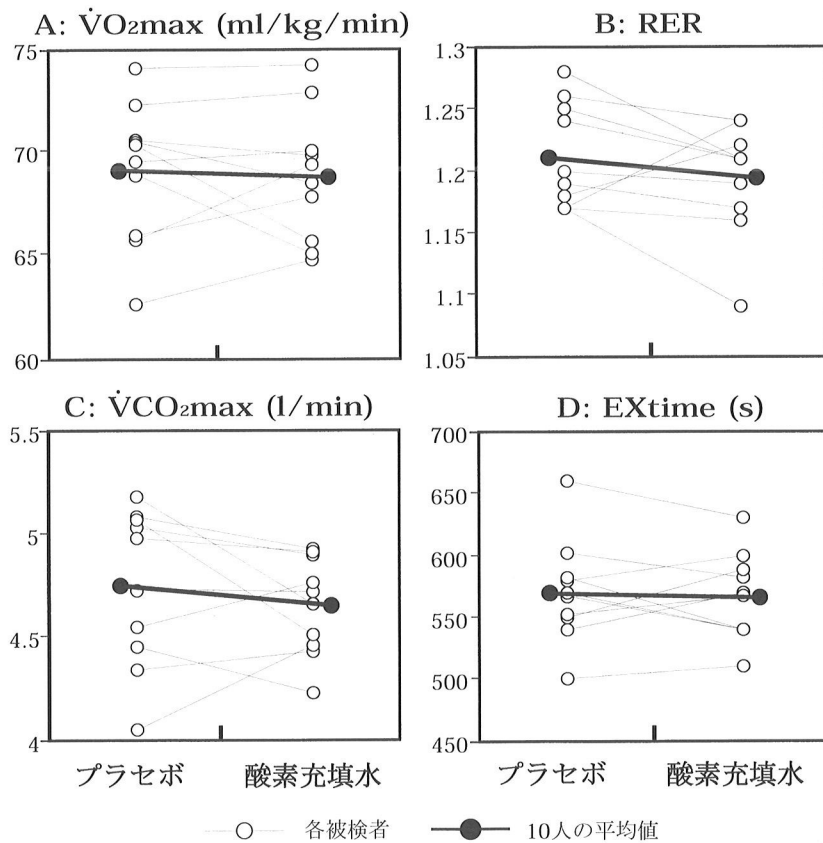


図 1 最大運動時における  $\dot{V}O_{2max}$ 、RER、 $\dot{V}CO_{2max}$ 、EXtime  
 最大運動時における  $\dot{V}O_{2max}$ (A)、RER(B)、 $\dot{V}CO_{2max}$ (C)、EXtime(D)においてプラセボ、酸素充填水摂取間に有意差は認められなかった。

## 考 察

本実験では、運動前の酸素充填水摂取が、運動時の呼吸・循環応答や持久的運動パフォーマンスに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。10名の被検者を対象にトレッドミルによる連続的多段階漸増負荷法を用いて実験を行った結果、運動時における呼吸・循環応答並びに持久的運動パフォーマンスにおいて、15分前の溶存酸素 30ppm の充填水 350ml 摂取とプラセボ摂取間に有意差は認められなかった。

### 1. 最大下運動時の呼吸・循環応答

ステップ負荷運動開始後の肺における  $\dot{V}O_2$  は遅れて立ち上がる過渡応答を示すが、活動筋への酸素供給系と活動筋の酸素利用系のどちらがその規定因子となり得るかの論議はこれまで続けられてきた。微小循環レベルにおける酸素供給と需要のつり合いの破綻、酸化系酵素活動の遅れ、または筋線維の動因パターンの違いなど<sup>5)</sup>を理由に、規定因子としては酸素供給系が酸素供給系を凌駕しているという結論に収束されつつある<sup>8)</sup>。すなわち、運動開始後から観察される  $\dot{V}O_2$  の過渡応答期においては、例え通常より多くの酸素を血液中に取り入れたとしても、筋における  $\dot{V}O_2$  (muscle  $\dot{V}O_2$ ;  $m\dot{V}O_2$ ) が変化することはないと考えられる。本実験における最大下運動時の測定は、負荷漸増前、すなわちステップ負荷中における運動開始後 3分30秒から4分の30秒間に行われた。本研究ではプレスバイプレスによる  $\dot{V}O_2$  動態の観察を行っていないため、この期間が  $\dot{V}O_2$  の過渡応答期に当たるのか、定常状態に該当するのかは判断できない。しかし、過渡期であった場合は補足的に酸素を取り込んでも  $m\dot{V}O_2$  を変化させないことより、酸素充填水による酸素補償は  $\dot{V}O_2$  の応答を早めるなどの影響は及ぼさないことが考えられ、また、定常状態の場合は通常  $m\dot{V}O_2$  が変化することは考え難い。これらのことから、もし酸素充填水由来の酸素が肺を介さずに血液循環に入り筋において利用されたとすると、その分だけ肺における  $\dot{V}O_2$  は減少することが推測される。しかし、本実験においては、Willmert ら<sup>12)</sup> の先行研究と同様に、最大下運動時の呼吸・循環応答に変化は見られなかった。このことから、酸素充填水由来の酸素が血液循環に入っていない可能性が考えられた。

### 2. 最大運動時の呼吸・循環応答

前述したように、 $\dot{V}O_{2max}$  を制限するステージの中でも酸素供給系は、①呼吸運動による酸素の肺胞への取り込み、②肺胞から血液への拡散(肺拡散能)、③血液

による活動部位までの輸送、④毛細血管から組織への拡散、⑤細胞質からミトコンドリアへの輸送の五つに分けることができる<sup>2)</sup>。Dempsey ら<sup>3)</sup> は、一流競技者の中には最大運動時に  $SaO_2$  が低下する者がいるが(運動誘発性動脈血酸素不飽和)、彼らに高濃度酸素ガスを吸わせることで肺と動脈の酸素較差が減少し、動脈血酸素分圧の低下が抑制されることから、 $m\dot{V}O_{2max}$  は②の肺拡散能に制限を受けていることを明らかにしている。酸素充填水の場合、もし経口摂取により肺を介さずに血液循環に入るとすると血中の酸素分圧が上昇するため、運動中に  $SaO_2$  が低下しても、速やかに酸素充填水由来の酸素がヘモグロビンと結合する、あるいはヘモグロビンに結合しなくともそのまま組織で利用されることが考えられる。すなわち、②肺拡散能の制限を受けないため酸素充填水摂取により  $m\dot{V}O_{2max}$  は増加し、EXtime など持久的運動パフォーマンスを改善することが考えられる。実際に、Jenkins ら<sup>7)</sup> は、酸素充填水摂取により自転車運動中の  $SaO_2$  が有意に高まり最大運動における EXtime が延長することを報告している。

しかし、これらの結果と反して、酸素充填水を摂取しても最大運動時の呼吸・循環応答に影響を及ぼさないことが報告されており<sup>6,12)</sup>、これらは本研究の結果と一致する。低酸素ガスを吸引した場合、 $SaO_2$  は低下することが知られているが、酸素充填水を摂取してもそれは改善されないこと、また動脈血化させた指先毛細血管からの採血による動脈血酸素分圧の低下も抑制されないことが Wing ら<sup>13)</sup> によって報告されている。また、本研究においても動脈血酸素不飽和が観察されるような最大運動時における  $SaO_2$  は酸素充填水を摂取しても改善されなかった。これらのことより酸素充填水摂取を摂取しても動脈血の酸素分圧が高まらなかったことが考えられた。

$\dot{V}O_2$  のみに焦点を当てた場合、酸素充填水摂取により酸素を補足的に取り込んだとしても  $\dot{V}O_{2max}$  の増加に反映されない理由が、最大下運動時と同様に、測定方法に見出すことができる。もし、酸素充填水により動脈血酸素分圧が高まり、酸素充填水由来の酸素が直接的に酸素の需要が高まっている筋で利用された場合は、肺胞における酸素の移動がないため、見かけ上  $\dot{V}O_2$  は変化し得ない。また、酸素がヘモグロビンに結合せずに血漿中に溶解して運ばれた場合は  $SaO_2$  にも反映されない。本実験において、 $\dot{V}O_2$  と  $SaO_2$  に反映されずに、酸素充填水由来の酸素が末梢においてそのまま補足的に利用されたとしたら、すなわち  $m\dot{V}O_{2max}$  が高まっていたとしたら、酸化的リン酸化が亢進されるため EXtime の延長や RER、 $\dot{V}CO_{2max}$  の増大が期待される。しかし、それらの変化は観察されなかった(図 1 B, C,

D)。このことから、酸素充填水による酸素補償によって呼吸・循環応答が変化しなかった理由として、酸素充填水摂取後に動脈血の酸素分圧が高まらなかったことが推察された。

経口摂取された酸素充填水がいかなる経路をたどり動脈血の酸素分圧を高めるのかという研究はほとんどなされていない。Forth ら<sup>4)</sup> はウサギを用いた実験で、酸素充填水を経胃投与した結果、肝臓を経由して静脈へ注がれる門脈において酸素分圧が高まることを報告しているが、このことは、酸素充填水は動脈血の酸素分圧を直接的には上昇させないことを示唆している。

酸素充填水摂取の方法に運動時の呼吸・循環応答を改善させなかった原因がある可能性も考えられるが、酸素充填水摂取によって改善された報告では、詳細な摂取方法の記載がない。酸素充填水が動脈血の酸素分圧を上昇させるか否かを確認することと同様に摂取タイミングや濃度、摂取量なども今後の検討課題であると考えられた。

## 結 論

30ppm の酸素充填水 350ml を漸増負荷運動15分前に摂取した結果、最大下並びに最大運動時における  $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、RER、 $\dot{V}_E$ 、HR、 $SaO_2$  と EXtime にプラセボ水摂取時との差は認められなかった。以上の結果より、酸素充填水摂取は運動時の呼吸・循環応答及び持久的パフォーマンスに影響しないことが示唆された。

## 参考文献

- 1) 宮地元彦：酸素を体内に取り入れるしくみ－運動と呼吸－。春日規克・竹倉宏明編、「運動生理学の基礎と発展」。フリースペース, pp 67-86, 2002.
- 2) 安田好文：運動と酸素摂取量, 宮村実晴編, 「最新運動生理学－身体パフォーマンスの科学的基礎－」, 真興交易医書出版部, pp 204-212, 1997.
- 3) Dempsey J.A., P.G. Hanson and K.S. Henderson: Exercise-induced arterial hypoxaemia in healthy human subjects at sea level. *J Physiol (Lond)*. **355**: 161-175, 1984.
- 4) Forth W. and O. Adam: Uptake of oxygen from the intestine-experiments with rabbits. *Eur J Med Res*. **6**: 488-492, 2001.
- 5) Grassi B.: Oxygen uptake kinetics: old and recent lessons from experiments on isolated muscle in situ. *Eur J Appl Physiol*. **90**: 242-249, 2003.
- 6) Hampson N.B., N.W. Pollock and C.A. Piantadosi: Oxygenated water and athletic performance. *JAMA*. **290**: 2408-2409, 2003.
- 7) Jenkins A., M. Moreland, T.B. Waddell and B.F. Fernhall: Effect of oxygenized water on percent oxygen saturation and performance during exercise. *Med Sci Sports Exerc*. **33**: S167, 2001.
- 8) 古賀俊策, 塩尻智之, 遠藤雅子: 運動開始時の酸素摂取。宮村実晴編, 「運動と呼吸」, 真興交易医書出版部, pp 24-32, 2004.
- 9) Rice A.J., G.C. Scroop, A.T. Thornton, N.S. McNaughton, K.J. Rogers, M.J. Chapman, H.W. Greville, R. Scicchitano and C.J. Gore: Arterial hypoxaemia in endurance athletes is greater during running than cycling. *Respir Physiol*. **123**: 235-246, 2000.
- 10) Robbins M.K., K. Gleeson and C.W. Zwillich: Effect of oxygen breathing following submaximal and maximal exercise on recovery and performance. *Med Sci Sports Exerc*. **24**: 720-725, 1992.
- 11) Welch H.G.: Hyperoxia and human performance: a brief review. *Med Sci Sports Exerc*. **14**: 253-262, 1982.
- 12) Willmert N., J.P. Porcari, C. Foster, S. Doberstein and G. Brice: The effect of oxygenated water on exercise physiology during incremental exercise and recovery. *Journal of Exercise Physiol*. **5**: 16-21, 2002.
- 13) Wing S.L., E.W. Askew, M.J. Luetkemeier, D.T. Ryujiin, G.H. Kamimori and C.K. Grissom: Lack of effect of Rhodiola or oxygenated water supplementation on hypoxemia and oxidative stress. *Wilderness Environ Med*. **14**: 9-16, 2003.

(2004年11月17日受付)

