

マイクロバブルを用いた炭酸冷水浴がアスリートの疲労からのリカバリーに有効か？

中村雅俊¹⁾、北條達也²⁾、福岡義之²⁾

1) 新潟医療福祉大学運動機能医科学研究所

2) 同志社大学スポーツ健康科学部

はじめに

競技スポーツではパフォーマンスの向上や勝利のために連日、激しいトレーニングが行われている。また、多くの競技では、一日に複数試合を行う場合や、連日試合を行う場合も存在する。その中で、トレーニングや試合によって生じたパフォーマンスや疲労状態からの効果的な回復法の確立は、トレーニングの効率化による競技力の向上や疲労から生じる障害発生を予防するために重要である。

近年、パフォーマンスや疲労回復法として着目されている方法として、「冷水浴」が挙げられる¹⁻³⁾。冷水浴は寒冷療法の中の一つで、冷水に身体の一部もしくは半身を浸水するものである。冷水浴における疲労回復効果を検討した報告では、冷水浴にパフォーマンス回復効果が認められないという報告^{4, 5)}がある一方、パフォーマンスが回復するという報告もある^{6, 7)}。また、高強度の運動後に冷水浴を行うことでパフォーマンス回復が促進されることが明らかとなっている⁸⁾。このように一定の見解は得られてはいない背景として、冷水浴の弊害としてある血流の減少が関与している可能性が考えられる。血中の乳酸の除去動態に着目した先行研究では、乳酸の除去には血流量が大きく関連していることが明らかになっている⁹⁾。冷水浴における冷却刺激によって血管の収縮が惹起され、その結果、血液量が減少するため、運動後の冷水浴では乳酸の除去が阻害されてしまう可能性が考えられる。前述のように、効果的なパフォーマンスや疲労状態からの効果的な回復法を確立するためには、冷水浴における血流減少のデメリットを克服する必要がある。

そこで我々は二酸化炭素が持つ血管拡張作用に着目した。二酸化炭素を溶解した炭酸水の効果として、経皮吸収された二酸化炭素が皮膚毛細血管を拡張させることが知られている¹⁰⁾。また本研究では、二酸化炭素を水に飽和させる方法として、二酸化炭素を非常に小さな大きさにする技術（マイクロバブル化）を併用することで、二酸化炭素の濃度が高い炭酸冷水を作成する事に成功している。そのため、このマイクロバブル化の技術を使用し、二酸化炭素を溶解した冷水炭酸浴を行うことで、血流減少を抑制した状態で、冷水浴が出来ると考えた。その結果、通常の冷水浴と比較して、効果的にパフォーマンスや疲労状態からの回復効果が望めると考えた。

そこで本研究では、冷水炭酸浴がパフォーマンスおよび疲労状態からの回復効果を有するかを明らかにするために、以下の2つの実験を行った。実験①：高強度間欠的運動

直後の炭酸冷水浴がパフォーマンスおよび血中乳酸濃度に及ぼす影響を検討すること。
実験②: 連日の高強度間欠的運動直後の炭酸冷水浴がパフォーマンスおよび血中乳酸濃度に及ぼす影響を検討することとした。

方法

実験①: 高強度間欠的運動直後の炭酸冷水浴がパフォーマンスおよび血中乳酸濃度に及ぼす影響

対象者

対象は日常から週 4 回以上運動習慣があり、また膝や股関節に過去に重度の受傷経験のない体育会男性アスリート 14 名 (年齢 19.1 ± 0.3 歳, 身長 171.0 ± 1.7 cm, 体重 67.3 ± 2.6 kg) を対象とした。すべての被験者に対して実験の目的, 内容および実験に際して起こりうる危険性について十分に説明し, 実験参加の同意を得た。なお, 本研究は倫理審査委員会の承認を得て実施した。

実験プロトコル

被験者には実験当日の激しい運動を禁止した。また, 食事は水分摂取を除いて実験開始の 2 時間前までとし, 実験中はすべての飲食を禁止した。被験者は座位で 15 分間安静にした後に実験を開始した。実験プロトコルは, 無酸素性運動パフォーマンスを測定し, その後, 高強度間欠的運動を被験者が完全に疲労困憊の状態になるまで行った。高強度間欠的運動終了直後に, 20°C の人工炭酸泉浴 (炭酸水条件), 20°C の水道水浴 (冷水条件), および座位にて安静 (コントロール条件) の 3 条件の内, いずれかの条件を用いリカバリーを施行した。炭酸水条件および冷水条件では, リカバリー時間はすべての条件において 20 分間とし, リカバリー終了後, 被験者は水浴条件では十分に体の水分をタオルでふき取り, 着替えを行った。なお, 炭酸水条件および冷水条件では水着は実験前に着用し, 着替えの時間を考慮して, コントロール条件のリカバリー時間は 25 分間に設定した。リカバリー終了後, 無酸素性運動パフォーマンスの測定を行った。なお, 本実験はクロスオーバーデザインを採用しており, 7 日以上の間隔を設けて, 全ての条件を無作為な順番で実施した。また, 被験者は冷水浴に浸水する際に, 炭酸水条件もしくは冷水条件のどちらに浸水したかは知らせない状態で実施した。

高強度間欠的運動プロトコル

高強度間欠的運動は, Power MaxVII (KONAMI 社製) を用いて, $170\% \text{VO}_{2\text{max}}$ の負荷にて 20 秒間の自転車エルゴメータ運動を 10 秒間の休息をはさみ, 疲労困憊に至るまで繰り返した。なお, 疲労困憊まで最大努力を続けるため, 運動中は被験者に適宜, 声掛けを行った。

冷水浴について

炭酸水の生成には、マイクロバブル発生装置（大巧技研有限会社製）とガスキュレーター（日本炭酸瓦斬製 N24）を用いた。浴槽（アース株式会社製 FRP 水槽 210L）に貯めた 140L の水道水に炭酸ガスを注入することで生成した。マイクロバブルはガスキュレーターのバルブを手動で調整することで発生させ、ポータブル型 pH メーター（HORIBA 製 D-71）を用い、遊離炭酸水濃度を 1000ppm 以上にするため pH の基準を 4.9 とした。本研究で用いた炭酸水条件では、pH は 4.9 ± 0.06 であった。また、冷水条件では pH は 7.7 ± 0.03 であった。

測定項目

血中乳酸濃度

血中乳酸濃度の測定は Lactate Pro2（アークレイ社製）を用い、血液を被験者の指尖から採取した。血中乳酸濃度の測定は、安静時終了後、高強度間欠的運動終了後、リカバリー終了後の計 3 回実施した。

主観的運動強度

主観的運動強度の程度については、被験者に 6~20 の 15 段階で自己評価させた。主観的運動強度の測定は、安静時終了後、高強度間欠的運動終了後、リカバリー終了後の計 3 回実施した。

無酸素性運動パフォーマンス

Power MaxVII（KONAMI 社製）を用いて、体重の 7.5% に設定し、ウィングートテストを実施した。運動開始と同時に最大努力下でのペダリングを行ってもらうために、運動開始の 5 秒前から被験者に対してカウントダウンを行い、3 秒前から被験者はペダリングを開始した。最後まで最大努力を続けてもらうため、測定者は被験者に声掛けを行った。無酸素性運動パフォーマンスの評価項目は Average Power と Peak Power とした。

統計処理

条件間での冷水浴の効果を検討するため、全ての項目において反復測定 2 限配置分散分析を用いて検討した。事後検定として、各条件間の比較を Turkey 法における多重比較を行った。なお、有意水準は 5% 未満とし、全ての結果は平均 \pm 標準誤差で示した。

結果

血中乳酸濃度 (mmol/L)

血中乳酸濃度の結果を図 1 に示す。反復測定二限配置分散分析の結果、有意な交互作用が認められた ($P<0.01$, $F=5.93$, 偏 $\eta^2=0.35$)。事後検定の結果、介入前および高強度間欠的運動終了後には有意な差は認められなかった。しかし、リカバリー終了後の血中乳酸濃度は、炭酸水条件が 7.81 ± 0.44 mmol/L, 冷水条件が 8.74 ± 0.73 mmol/L, コントロール条件が 10.24 ± 1.12 mmol/L であり、事後検定の結果、炭酸水条件はコントロール条件および冷水条件と比較して有意に低値を示し、冷水条件はコントロール条件よりも有意に低値を示した。

主観的運動強度

主観的運動強度の経時的変化の結果を図 2 に示す。反復測定二限配置分散分析の結果、有意な交互作用が認められなかったが、リカバリー終了後において、炭酸水条件では 10.8 ± 0.59 , 冷水条件は 10.9 ± 0.86 , コントロール条件は 11.8 ± 0.92 であった。事後検定の結果、炭酸水条件と冷水条件は共にコントロールに対して有意に低値を示した。

無酸素性運動パフォーマンス

無酸素性運動パフォーマンスの結果を表 1 に示す。二元配置分散分析の結果、全ての項目において有意な交互作用は認められなかった (Average Power : $p=0.993$, $F=0.003$, 偏 $\eta^2=0.000$, Peak Power : $p=0.856$, $F=0.156$, 偏 $\eta^2=0.013$)。全ての項目において、条件間に有意な差は認められなかった。

実験②: 連日の高強度間欠的運動直後の炭酸冷水浴がパフォーマンスおよび血中乳酸濃度に及ぼす影響

対象者

実験①と同様に、対象は日常から週 4 回以上運動習慣があり、また膝や股関節に過去に重度の受傷経験のない体育会男性アスリート 8 名 (年齢 19.3 ± 0.4 歳, 身長 171.0 ± 7.5 cm, 体重 66.2 ± 11.2 kg) を対象とした。すべての被験者に対して実験の目的、内容および実験に際して起こりうる危険性について十分に説明し、実験参加の同意を得た。なお、本研究は倫理審査委員会の承認を得て実施した。

実験プロトコル

実験①と同様に、被験者には実験当日の激しい運動を禁止した。また、食事は水分摂取を除いて実験開始の 2 時間前までとし、実験中はすべての飲食を禁止した。被験者は座位で 15 分間安静にした後に実験を開始した。対象者を無作為に 20°C の冷水炭酸浴に浸水する炭酸水条件に 2 名, 20°C の水道水浴 (冷水条件) に 3 名, および座位にて安静 (コントロール条件) に 3 名に群別けを行った。

実験②は、図 3 に示す通り、4 日連続で実験を実施した。全ての条件において高強度間欠的運動を実施し、炭酸水条件および冷水条件では高強度間欠的運動終了後に 20 分間、20°Cの冷水浴を実施した。また、コントロール条件は座位にて安静を 20 分間、実施した。なお、冷水浴の作成は課題①と同様の条件で作成した。

高強度間欠的運動プロトコル

高強度間欠的運動は、Power MaxVII (KONAMI 社製) を用いて、120%VO_{2max} の負荷にて 20 秒間の自転車エルゴメータ運動を 10 秒間の休息をはさみ、8 セット実施した。

無酸素性運動パフォーマンス

高強度間欠的運動プロトコル実施中の平均のパワーおよび回転数を無酸素性運動パフォーマンスの指標として採用した。

血中乳酸濃度

血中乳酸濃度の測定は Lactate Pro2 (アークレイ社製) を用い、血液を被験者の指先から採取した。血中乳酸濃度測定は、高強度間欠的運動プロトコル介入前後およびリカバリー終了後に測定を実施した。

主観的運動強度

課題①と同様に、主観的運動強度の程度については、被験者に 6~20 の 15 段階で自己評価させた。主観的運動強度の測定は、血中 La 測定と同じ安静時終了後、高強度間欠的運動終了後、リカバリー終了後に実施した。

結果

無酸素性運動パフォーマンス

無酸素性運動パフォーマンスに関しては、パワーおよび回転数に関しては全ての条件において大きな変化の差は認められなかった。

血中乳酸濃度 (mmol/L)

血中乳酸濃度の結果を図 4 に示す。全ての条件において高強度間欠的運動後に血中乳酸濃度が増加し、リカバリー後に減少し、翌日には元に戻る傾向を示した。また実験 3 日目においては、コントロール条件と比較して、炭酸水条件および冷水条件では介入前に血中乳酸濃度が小さくなる傾向が認められた。

主観的運動強度

主観的運動強度の経時的変化の結果を図 5 に示す。全ての条件において、高強度間欠

的運動後に主観的運動強度が増加し、リカバリー後に減少し、翌日には元に戻った。またコントロール条件と比較して、炭酸水条件および冷水条件ではリカバリー後に主観的運動強度尾が低い傾向を示した。

考察

本研究では、冷水炭酸浴が高強度間欠的運動によるパフォーマンスおよび疲労状態からの回復効果を有するか否かを明らかにするために、以下の2つの実験を行った。実験①では、高強度間欠的運動直後の炭酸冷水浴の効果を検討した結果、炭酸冷水浴および通常の水道水での冷水浴に浸水することで、血中乳酸濃度や自覚的運動強度は安静条件と比較して有意に低値を示した。また、血中乳酸値は、通常の水浴と比較して炭酸冷水浴の方が有意に低い値を示した。加えて、実験②では、連続した高強度間欠的運動における炭酸冷水浴の効果を検討した結果、実験①と同様に炭酸冷水浴および通常の水道水での冷水浴に浸水することで、血中乳酸濃度や自覚的運動強度は安静条件と比較して有意に低値を示す傾向であった。しかしすべての条件において、次の日には全ての項目において開始前の値に戻っていた。これらの結果より、冷水浴は血中乳酸濃度や自覚的運動強度を即時的に減少することが出来、さらに炭酸冷水浴を用いることで、より効果的に血中乳酸濃度を減少することが可能であることが明らかになった。

血中乳酸濃度および主観的運動強度について、リカバリー終了後に炭酸水条件および冷水条件では安静座位を行ったコントロール条件と比較して有意に低値を示した。この結果は、二酸化炭素の有無に関係なく、浸漬することによる静水圧作用が働いたためだと考えられる。静水圧作用には血流を促進させる効果があることが知られている。静水圧は10mの水深に対して76mmHgかかることが知られている¹¹⁾。今回の実験では水位は被験者の剣状突起あたりを目安とした。そのため浸漬の深さは約0.5m、水圧では約38mmHgの陽圧が血管および細胞に負荷されたことになる。この静水圧によって血管内圧の上昇が抑制された結果、血管抵抗が減少する。そのため血流が促進され、結果として乳酸の除去動態がコントロール条件と比較して改善したと推察できる。この血中乳酸濃度の減少が主観的運動強度の有意な減少に繋がったと考えられる。

また興味深いことに、リカバリー終了時においては冷水条件よりも炭酸水条件の方が有意に血中乳酸濃度は低い値を示した。この結果には二酸化炭素による血管拡張作用が影響したと考えられる。二酸化炭素を溶解した炭酸水の効果として、経皮吸収された二酸化炭素が皮膚毛細血管を拡張させることが知られている¹¹⁾。そのため、炭酸水条件では静水圧作用に加えて、この血管拡張作用によって血流が増加していると考えられる。その結果、静水圧作用のみであった冷水条件と比較して、静水圧作用と血管拡張作用を持つ炭酸水条件の方が血中乳酸の除去を促進したと考えられる。そのため、高強度の運動を行った直後に冷水に浸漬することは、疲労回復へのリカバリー戦略として有益であることが明らかとなり、また、通常の水よりも二酸化炭素を溶解した炭酸水を使用する

方が血中乳酸濃度を減少させ、さらに有益なリカバリー戦略であることが明らかとなった。

連日の高強度間欠的運動後の冷水浴の効果に関して、実験①の結果と同様に、リカバリー直後には主観的運動強度は冷水条件および炭酸水条件で、コントロール条件と比較して低い傾向を示したが、翌日には全ての条件において元の値に戻っていた。実験①と実験②の結果を統合して考えると、炭酸浴は高強度間欠的運動による主観的な疲労感および血中乳酸濃度の減少に有益であり、一日に複数試合を行う場合のリカバリー戦略として有益であるが、連日の試合を想定した場合は、炭酸水および冷水における疲労回復効果は少ない可能性が示唆された。しかし、実験②はサンプルが少ないため、今後はサンプルを増やした検討および高強度間欠的運動ではなく、筋力トレーニングにおけるリカバリー戦略としての炭酸水の有用性を検討する必要がある。

前述のように、血中乳酸濃度は炭酸水条件および冷水条件でコントロール条件よりも有意に低値を示したため、無酸素性運動パフォーマンスの回復効果も大きくなることが期待された。しかし、実験①および実験②において、全ての条件で無酸素性運動パフォーマンスはリカバリー終了後に有意な差は認められなかった。先行研究において、局所冷却後の瞬発運動のパフォーマンスが低下したことを報告されており¹²⁾、この体温および筋温の減少が冷水条件および炭酸水条件の無酸素性運動パフォーマンスの回復効果を阻害した可能性が考えられる。また、コントロール条件においても無酸素性運動パフォーマンスが有意な差が認められなかったため、冷水条件および炭酸水条件との差を明らかにすることが出来なかった可能性がある。そのため、より大きな無酸素性運動パフォーマンスの低下を引き起こす運動課題を行った直後のリカバリー戦略としての炭酸水の効果を検討していく必要がある。また無酸素性運動パフォーマンスの変化を検討したため、有酸素性運動パフォーマンスでは差が生じていた可能性があるため、今後は有酸素運動パフォーマンスに対する影響を検討していく必要もある。

結論

本研究では、冷水炭酸浴がパフォーマンスおよび疲労状態からの回復効果を有するかを明らかにするために、以下の2つの実験を行った。実験①：高強度間欠的運動直後の炭酸冷水浴がパフォーマンスおよび血中乳酸濃度に及ぼす影響の検討。実験②：連日の高強度間欠的運動直後の炭酸冷水浴がパフォーマンスおよび血中乳酸濃度に及ぼす影響の検討。本研究の結果、高強度間欠的運動後に炭酸水に浸漬することで主観的な疲労感および血中乳酸濃度の減少することが明らかとなり、高強度間欠的運動におけるリカバリー戦略として冷水炭酸浴が有用であることが明らかとなった。

謝辞

本研究を遂行するにあたって、公益財団法人ミズノスポーツ振興財団の皆様には多大

なご支援を頂きました。ここに感謝申し上げます。

1. Versey NG, Halson SL, et al. Water immersion recovery for athletes: effect on exercise performance and practical recommendations. *Sports Med.* 2013; 43(11):1101-1130.
2. Broatch JR, Petersen A, et al. The Influence of Post-Exercise Cold-Water Immersion on Adaptive Responses to Exercise: A Review of the Literature. *Sports Med.* 2018.
3. Marino FE. Methods, advantages, and limitations of body cooling for exercise performance. *Br J Sports Med.* 2002; 36(2):89-94.
4. Peiffer JJ, Abbiss CR, et al. Effect of cold-water immersion duration on body temperature and muscle function. *J Sports Sci.* 2009; 27(10):987-993.
5. Eston R, Peters D. Effects of cold water immersion on the symptoms of exercise-induced muscle damage. *J Sports Sci.* 1999; 17(3):231-238.
6. Yeargin SW, Casa DJ, et al. Body cooling between two bouts of exercise in the heat enhances subsequent performance. *J Strength Cond Res.* 2006; 20(2):383-389.
7. Montgomery PG, Pyne DB, et al. The effect of recovery strategies on physical performance and cumulative fatigue in competitive basketball. *J Sports Sci.* 2008; 26(11):1135-1145.
8. Vaile J, Halson S, et al. Effect of hydrotherapy on recovery from fatigue. *Int J Sports Med.* 2008; 29(7):539-544.
9. 稲沢見矢子, 西保岳, 近藤徳彦, 勝田茂, 池上晴夫. 乳酸消失からみたクーリングダウンの効果に関する研究 : 間欠的回復期運動の場合. *体育学研究* 1988;33(2):145-153.
10. Schmid KL. 炭酸浴(炭酸泉). *人工炭酸泉研究会雑誌* 1998;1(1):5-9.
11. 飯島 裕一. 【高齢者のための現代版湯治のすすめ】 温泉の効用と活用法 温泉水の体への作用と活用法 物理作用(浮力、粘性、摩擦抵抗、静水圧)とは何か 物理作用を利用した水中運動で骨粗しょう症や肥満などを予防 楽しみながら生活習慣病の対策も. *GPnet* 2007 .02;53(12):38-40.
12. Fischer J, Van Lunen BL, Branch JD, Pirone JL. Functional performance following an ice bag application to the hamstrings. *J Strength Cond Re* 2009;23(1):44-50.

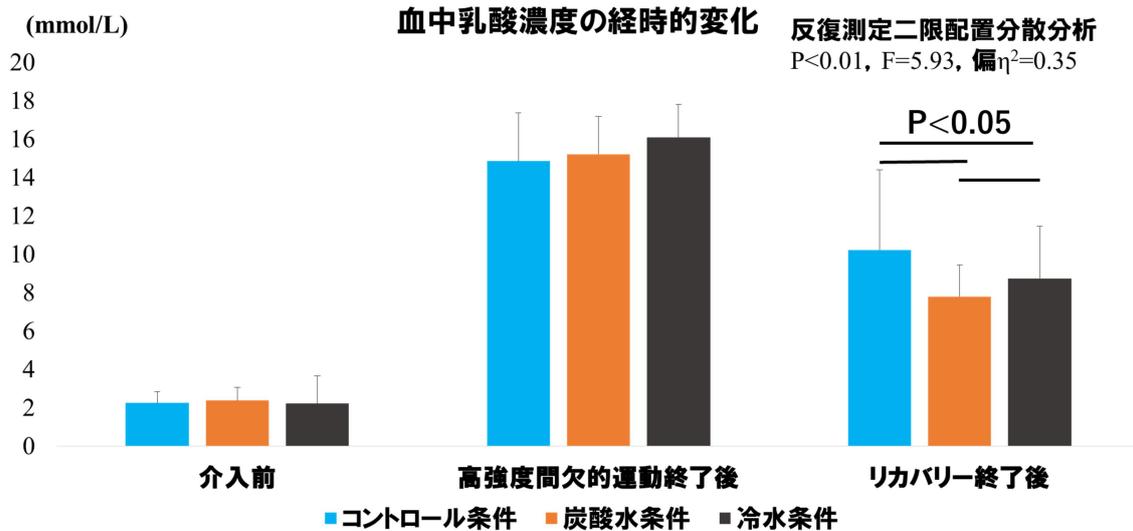


図 1. 血中乳酸濃度の経時的変化

二限配置分散分析の結果，有意な交互作用を認め ($P < 0.01$, $F = 5.93$, 偏 $\eta^2 = 0.35$)，事後検定の結果，リカバリー終了後において炭酸水条件はコントロール条件および冷水条件と比較して有意に低値を示し，冷水条件はコントロール条件よりも有意に低値

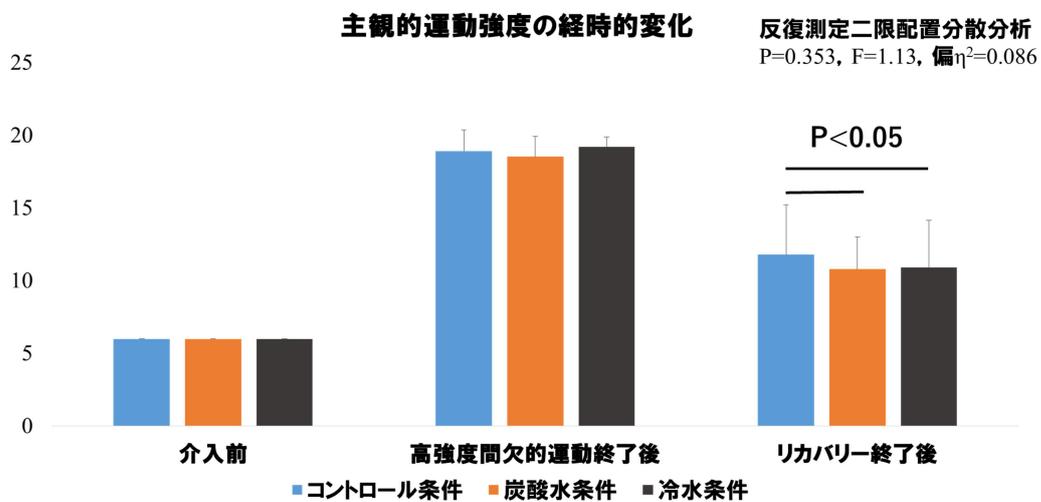


図 2. 主観的運動強度の経時的変化

反復測定二限配置分散分析の結果，有意な交互作用が認められなかったが，事後検定の結果，リカバリー終了後において，炭酸水条件と冷水条件は共にコントロールに対して有意に低値を示した。

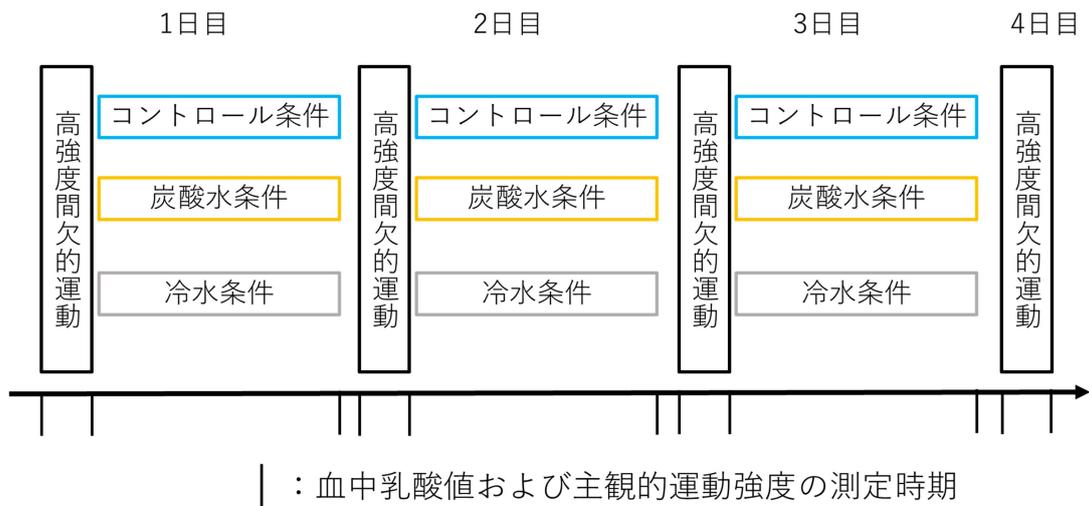


図3. 実験②の実験プロトコル

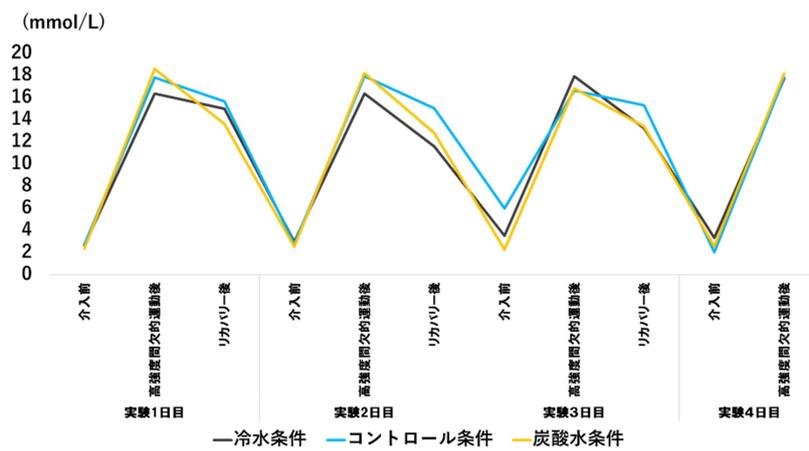


図4. 血中乳酸濃度の経時的変化について

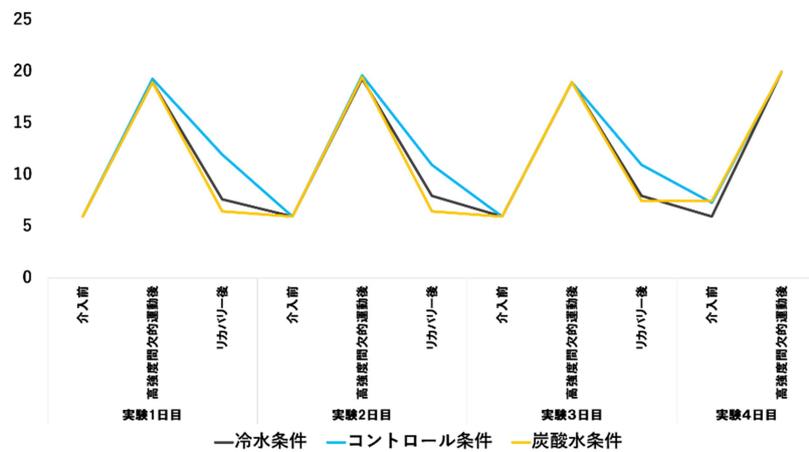


図5. 主観的運動強度の経時的変化

表 1. 無酸素性運動パフォーマンスの結果

	コントロール条件		炭酸水条件		冷水条件	
	介入前	リカバリー 終了後	介入前	リカバリー 終了後	介入前	リカバリー 終了後
Average Power (W)	600.0±78.3	586.2±76.8	604.9±106.9	586.3±88.9	606.5±85.3	591.8±84.8
Peak Power (W)	747.9±118.8	722.2±130.2	746.1±152.8	724.2±120.3	745.9±127.4	733.1±111.5