

原著論文

アーティスティックスイミング日本代表選手を対象とした
低酸素スプリントトレーニングの効果

A case study of hypoxic sprint training for artistic swimmers in Japan national team

鈴木康弘^{1),2)}, 石田優子¹⁾, 鈴木栄子¹⁾, 山下大地¹⁾
Yasuhiro Suzuki^{1),2)}, Yuko Ishida¹⁾, Eiko Suzuki¹⁾, Daichi Yamashita¹⁾

Abstract : The purpose of this study was to examine the effects of hypoxic sprint interval training using cycle ergometer on energy supply and artistic swimming performance. Two Japan national team artistic swimmers who participate in Tokyo 2020 Olympic performed sprint interval training for 24 sessions under the normobaric hypoxia ($FiO_2 = 14.4-15.5\%$). The training consisted of 10-s and 60-s maximal sprinting, and sprint interval training (9×60-s pedaling, 60-s rest or 9×30-s pedaling, 30-s rest×2sets). At the end of training, a questionnaire was administered regarding changes in performance as perceived during competition and practice. The duration of exposure to hypoxia per session was approximately 90-110 minutes. The highest average power during training for the 60-s maximal pedaling test used to assess anaerobic capacity increased by 18 % and 13 %, respectively, for each subject compared to the first training session. In addition, the results of the questionnaire to the athletes indicated that they were able to swim to the end of the performance and that they felt less fatigued, indicating an improvement in subjective energy supply and delayed fatigue. These findings suggest that the sprint interval training under the normobaric hypoxia improved both anaerobic and aerobic capacities and may be an effective training program for artistic swimmers.

Key words : Artistic swimming, Hypoxic training, Sprint interval training, Anaerobic capacity, Aerobic capacity

キーワード : アーティスティックスイミング, 低酸素トレーニング, スプリントインターバルトレーニング, 無酸素性能力, 有酸素性能力

¹⁾国立スポーツ科学センター, ²⁾東京経済大学

¹⁾ Japan Institute of Sports Sciences, ²⁾ Tokyo Keizai University

E-mail : yasuzuki@tku.ac.jp

受付日 : 2022 年 6 月 20 日

受理日 : 2022 年 10 月 28 日

I. 緒言

アーティスティックスイミングは、音楽や他の泳者に合わせて演技を行い、技の完遂度、同時性、演技構成や芸術性、表現力、そして技の難易度を競い合う採点競技であり^{24),26)}、日本では2018年3月までシンクロナイズドスイミングという名称で親しまれてきた夏季オリンピック競技である。オリンピックでは、1984年ロサンゼルス大会から正式競技に採用され、1988年ソウル大会までは1人で競技を行う「ソロ」、2人で競技を行う「デュエット」の2種目であったが、1992年バルセロナ大会に「ソロ」が廃止と同時に4-8名で競技する「チーム」が採用され、現在では「デュエット」と「チーム」の2種目がオリンピックで実施されている。

また、アーティスティックスイミングでは各種目において「テクニカルルーティン」と「フリールーティン」の2つの競技プログラムがある。テクニカルルーティンの競技時間はデュエットが2分30秒、チームが2分50秒、フリールーティンの競技時間は、デュエットが3分、チームが4分である⁹⁾。このような競技時間は、競泳では200mもしくは400m種目に相当し、陸上競技では800m走もしくは1500m走に相当するが、いずれの競技においてもエネルギー供給機構としては、主に有酸素性エネルギー代謝に依存することが知られている^{28),32)}。一方、アーティスティックスイミングは、止息状態での運動が断続的に行われる競技であり、競技時間の50-65%を水中に潜っている動作によって占められていることが明らかにされている^{1),5),13)}。また、止息運動では潜水反応による徐脈が生じ³¹⁾、動脈血酸素飽和度(SpO₂)が低下すること²⁵⁾から、アーティスティックスイミング競技中は、組織が低酸素状態になっており、同じ運動時間の陸上運動と比較して、総エネルギー需要に対する無酸素性エネルギー代謝の貢献度が高いと考えられる。したがって、アーティスティックスイミング選手の競技パフォーマンス向上のためには、有酸素性持久力と無酸素性持久力の両方の向上が必要になると考えられ

る^{31),34)}。

有酸素性持久力と無酸素性持久力の両方を効率的に高める手段として、近年では高強度インターバルトレーニングが注目されている。高強度インターバルトレーニングは、いわゆるTabataプロトコル³³⁾やスプリントインターバルトレーニング¹⁰⁾がよく知られているが、近年では、低酸素環境においてスプリントインターバルトレーニングを用いることで、これらの先行研究^{10),33)}よりもさらに短期間で有酸素性持久力と無酸素性持久力の両方を向上させることができると報告されている^{29),30),35)}。さらに、Repeated-Sprint training in Hypoxia (RSH)と呼ばれる低酸素環境での反復スプリントトレーニングも近年注目されており、常圧低酸素環境を用いた主要な低酸素トレーニング方法となりつつある^{3),6),7),12),23)}。これらのことから、低酸素環境を用いた高強度インターバルトレーニングは、アーティスティックスイミング選手に対するエネルギー系体力の向上として有効な手段の一つであると考えられる。

そこで本研究では、アーティスティックスイミング日本代表選手を対象として、フリールーティンの演技後半における疲労を遅延し、最後まで完成度の高い動きができるようにするために実施した、低酸素環境での自転車エルゴメーターを用いたトレーニングの事例を紹介し、このトレーニングプロトコルがエネルギー系体力の向上に有効であるのか否かについて検討すること、さらに、このトレーニングにより選手およびコーチの主観的な競技パフォーマンスにどのような効果をもたらしたのかについて検討することを目的とした。

II. 方法

1. 対象

対象者は、アーティスティックスイミング日本代表選手であり、2021年に開催された東京オリンピックに出場した2名であった。両選手とも低酸素トレーニングおよび自転車トレーニングの実施経験はなかった。

本研究は、国立スポーツ科学センター倫理審査

委員会の承認（2021-064）を得て実施し、得られたデータの研究利用について、選手に研究の目的や公表の内容、起こりうるリスクについて説明をし、書面にて同意を得た。

2. 低酸素トレーニング導入の経緯

アーティスティックスイミング代表コーチから著者らにトレーニングに関する相談があった。「現在取り組んでいるフリールーティンは、演技中の足技、特に足関節を背屈させるような動きを多く取り入れた演技構成にしている。しかし、今まで行ったことのない足の動きを多く取り入れたため、選手達は演技後半では脚全体に『乳酸が溜まる』ような感覚になり、最後まで泳ぎきれない状態になる。そのため、いわゆる耐乳酸系のトレーニングを取り入れることにより、この状況を打破したいが、どのようなトレーニングが適切だろうか」という内容であった。

そこで、まずフリールーティン演技中の映像を見せてもらい、演技中の動きを確認しながら、選手達から演技中および演技後の疲労感についての感想を聞いた。選手達の感想としては、演技中に「乳酸が溜まる」感覚とともに、演技終盤では「エネルギーがなくなってしまう」感覚があり、演技終了後には立ってられないほどの強い疲労感があるということであった。

これらの状況を踏まえ、著者らは、無酸素性エネルギー供給機構と有酸素性エネルギー供給機構を同時に刺激することにより、総エネルギー供給量を向上させること、また足関節の背屈運動を繰り返すことにより局所の疲労を遅延することがトレーニング目標であると判断した。そして、国立スポーツ科学センターの医・科学サポートとして、自転車エルゴメーターを用いた低酸素環境でのスプリントインターバルトレーニングを実施すること、足関節の背屈運動を取り入れた陸上での補強トレーニングは、普段のトレーニングにおいて実施してもらうことを提案し、コーチからトレーニング実施の了承を得た。

3. 低酸素トレーニング

1) トレーニング期間

低酸素環境でのトレーニングは、通常的水中トレーニングおよび陸上トレーニングに追加する形で、3期間に分けて合計24回実施した。第1期は2020年12月9日から2021年1月30日までに計16回、第2期は2021年2月8日から3月17日までに計6回、第3期は2021年6月3日および6月9日の計2回であった。なお、各トレーニング期間は、アーティスティックスイミング日本代表チームがJISSにおいて強化合宿を行っていた期間であり、トレーニング頻度は概ね週に2回であった。

2) トレーニング内容

全てのトレーニングは、常圧低酸素環境のトレーニング室（Espec社製）内で実施した。この低酸素トレーニング室は、床面積が8.7 m × 6.9 m、天井高は3.3 mであり、酸素濃度の制御範囲は18.6-11.2%（標高1,000-5,000 m相当）であった。トレーニング室内の酸素濃度は、最初の4週間（8回）は標高2,500 m相当（吸気酸素濃度：15.4%）に設定し、その後はトレーニング終了まで標高3,000 m相当（吸気酸素濃度：14.4%）に設定した。なお、トレーニング中の室内温度は、おおよそ20-22℃になるようにエアコンを設定した。

トレーニングには、電磁ブレーキ式自転車エルゴメーター（風神雷神：OC Labo社製）を用いて実施した。初回実施日に設定したサドルおよびハンドルの位置を記録し、全てのトレーニングにおいて同条件で行った。なお、低酸素トレーニング室入室から退室まで心拍計（Polar H10：Polar社製）を用いて心拍数（HR）を5秒毎に測定し、パルスオキシメーター（WristOx2 Model 3150：Nonin Medical社製）を用いて動脈血酸素飽和濃度（SpO₂）を1秒毎に測定した。HRは各運動における運動前および各セットの最高値を記録し、SpO₂は各運動における運動前および各セットの最低値を記録した。

図1に、低酸素トレーニングの全体図を示し

た。選手は低酸素トレーニング室に入室 10 分後にウォーミングアップを開始し、その後 10 秒間全力ペダリングテスト、60 秒間全力ペダリングテスト、スプリントインターバルトレーニングの順で実施した。その後、約 10 分間のクーリングダウンを任意の負荷で実施し、少なくともトレーニング終了後 20 分以上は低酸素室内に留まった後、退室するように指示した。1 回のトレーニングにおける低酸素トレーニング室滞在時間はおよそ 90-110 分であった。

3) ウォーミングアップ

対象者は、低酸素トレーニング室に入室後、各自でハンドルやサドル等の高さをセットし、入室 10 分後を目安にウォーミングアップを開始した。ウォーミングアップは、1kp の負荷で 80 rpm の運動を 5 分間とし、運動開始 2 分および 4 分後の時点で約 5 秒間の全力ペダリング運動を行わせた^{30),35)}。

4) 10秒間全力ペダリングテストおよび60秒間全力ペダリングテスト

ウォーミングアップ終了後、1kp の負荷での 10 秒間全力ペダリングテストを約 2 分間の休息を挟んで 2 回実施し、記録が良い方の最高回転数を代

表値として採用した。

10 秒間全力ペダリングテスト終了後、約 3 分の休息を挟んで、無酸素性パワー、無酸素性持久力および有酸素性持久力の評価とトレーニングを兼ねた、60 秒間の全力ペダリングテストを体重×0.05kp の負荷で実施し、最高パワーおよび平均パワーを記録した。

いずれのテストもペース配分することなく、運動開始時から全力で漕ぐことを指示し、運動中は検者による口頭での励ましを行った。

5) スプリントインターバルトレーニング

60 秒間全力ペダリングテスト終了 5-8 分後に、メインのトレーニングであるスプリントインターバルトレーニングを実施した。すべてのスプリントインターバルトレーニングの運動休息比は 1:1 とし、各トレーニング期間によって運動時間および負荷を変化させた。また回転数はすべてのセットにおいて可能な限り高く維持するように指示した。

第 1 期では、回転数 110-145 rpm を維持する 60 秒間の運動を 60 秒間の休息を挟んで 9 回繰り返す運動を 1 セット実施し、負荷は体重×0.025 kp (1.5-1.7 kp) に設定した。すなわち、A 選手は

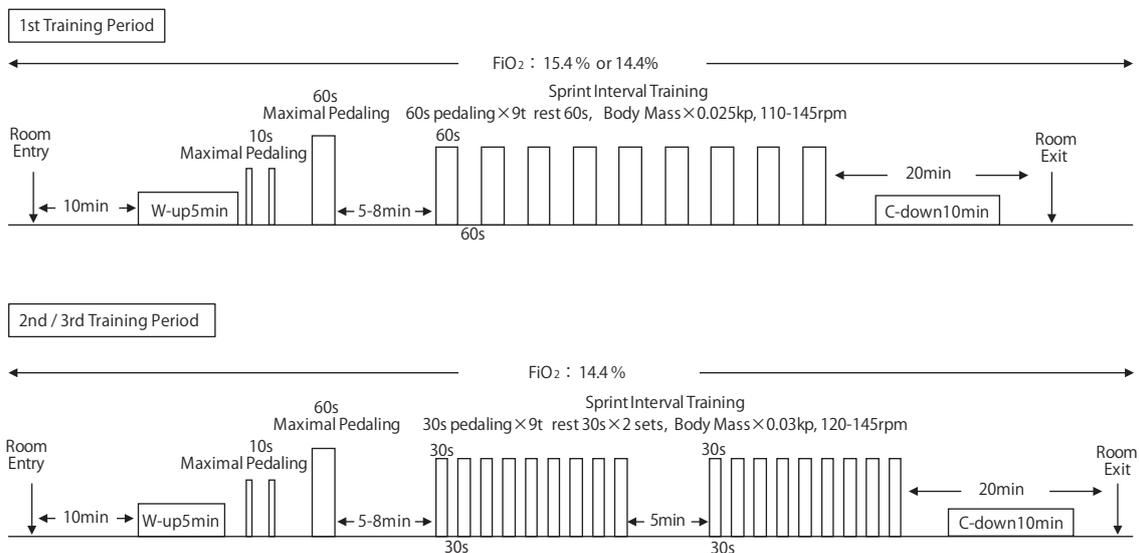


Figure 1. Schematic illustration of hypoxic training protocols.

1-5 回目のトレーニングが 1.5 kp、6-13 回目が 1.6 kp、14-16 回目が 1.7 kp であり、B 選手は 1-2 回目のトレーニングが 1.5 kp、3-13 回目が 1.6 kp、14-16 回目が 1.7 kp であった。

第 2・3 期では、回転数 120-145 rpm を維持する 30 秒間の運動を 30 秒間の休息を挟んで 9 回繰り返す運動を 2 セット実施し、セット間の休息時間は 5 分とした。負荷は体重 \times 0.03 kp に設定したが、17-18 回目のトレーニングは両選手とも 1.7 kp に設定し、19-24 回目のトレーニングでは、A 選手は 1.8 kp、B 選手は 1.9 kp に設定した。

4. アンケート調査

第 3 期のトレーニング終了後に、一連のトレーニングに関するアンケート調査を行った。質問内容は、「低酸素トレーニングを開始する前の競技中・練習中の課題」、「低酸素トレーニングの第 1 期終了後、競技中・練習中に感じた変化」、「第 2 期終了後、競技中・練習中に感じた変化」についてそれぞれ自由記述してもらった。

Ⅲ. 結果

1. 10 秒間全力ペダリングテストおよび 60 秒間全力ペダリングテスト

図 2 に、10 秒間全力ペダリングテスト時の最高回転数の変化を示した。1 回目のトレーニングでは A 選手が 191 rpm、B 選手が 159 rpm であったが、トレーニング経過に伴って徐々に増加し、トレーニング全体を通しての最高値は A 選手が 212 rpm (17 回目)、B 選手が 216 rpm (22 回目) であった。第 3 期における最高回転数は、やや低下する傾向を示した。

図 3 に、60 秒間全力ペダリングテストにおける最高パワーおよび平均パワーの変化を示した。A 選手は最高パワー、平均パワーともにトレーニング経過に伴い順調に増加する傾向だったが、平均パワーは 14 回目のトレーニングで最高値 (325 W、パワー増加率: 18%) を記録した後、17 回目および 20 回目のトレーニング時にも最高値と同値を記録し、パワーの増加がやや頭打ちになっていた。一方、B 選手は 10 回目のトレーニングまで、最高パワー、平均パワーともに上下動が激

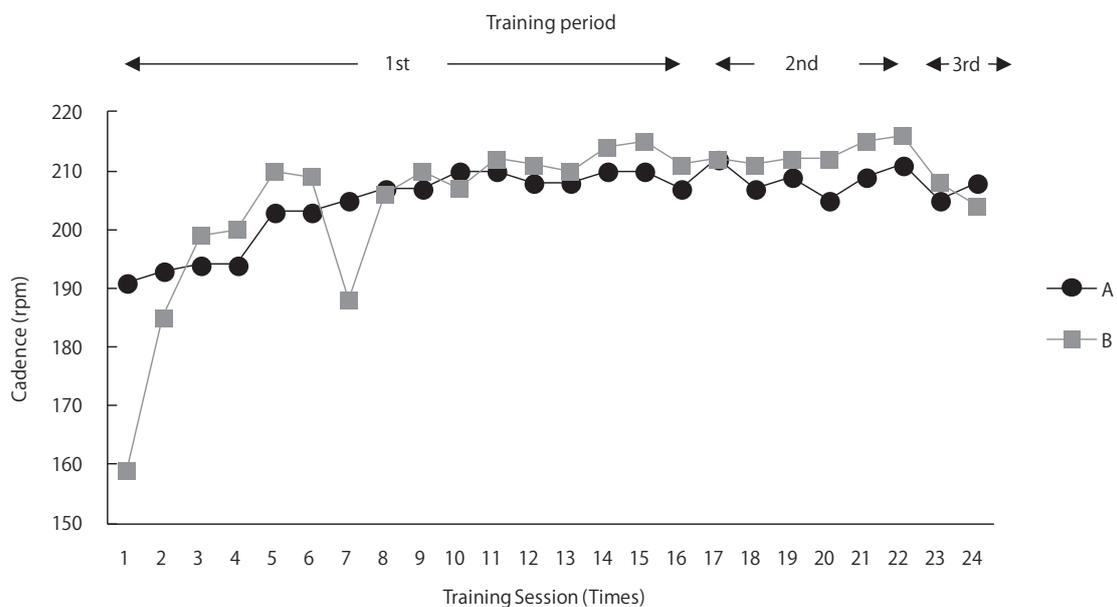


Figure 2. Changes in maximal cadence during 10-s maximal cycle sprint.

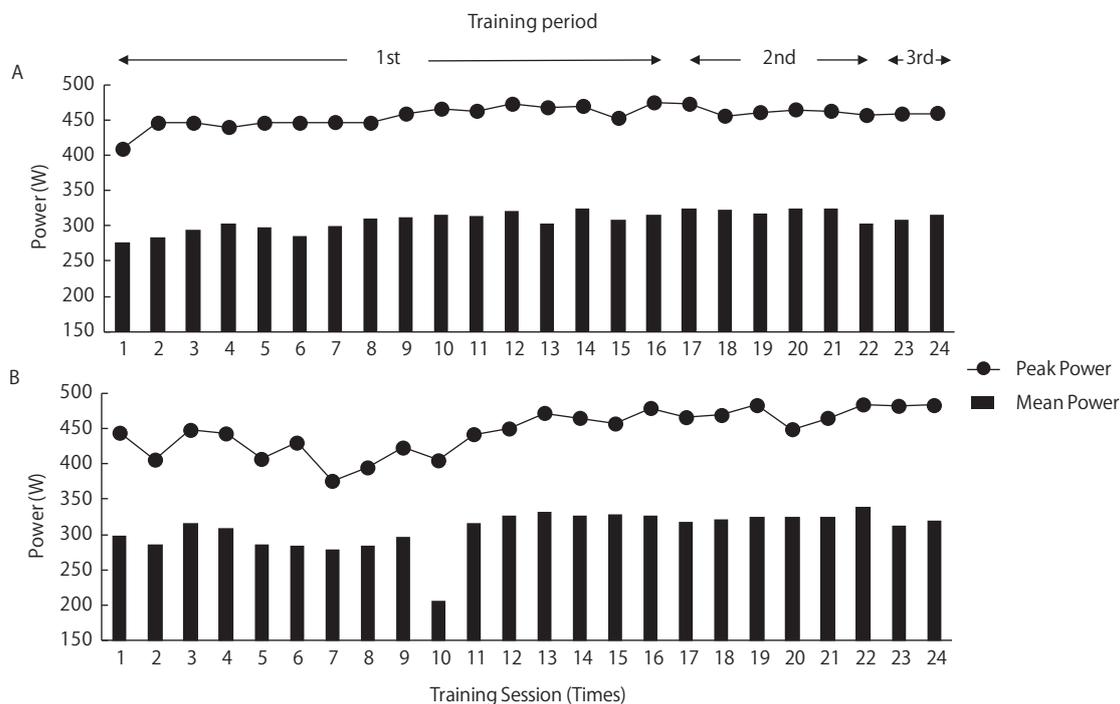


Figure 3. Changes in peak power and mean power during 60-s maximal cycle sprint.

しかったが、11回目のトレーニング以降は大きな低下は少なくなり、徐々に増加する傾向をみせ、平均パワーは第2期の最後となる22回目のトレーニングで最高値（339 W、パワー増加率：13%）を記録した。

図4に、60秒間全力ペダリングテストを5秒ずつ12区間に分け、各区間における平均パワーの推移を、1回目のテスト、60秒間の平均パワーが最高値を記録した第1期および第2・3期それぞれのテストに分けて示した。各区間の平均パワーは、いずれのトレーニング時にも、第2区間（6-10秒）で最も高くなり、その後徐々に低下していく傾向にあったが、A選手の第2・3期では、第3区間（11-15秒）で最も高くなっていった。また、第1期および第2・3期で最高値を記録したそれぞれのテスト時は、1回目のテスト時と比較して、全ての区間において高いパワーを発揮していた。さらに、B選手においては、第2・3期で最高値を記録したテスト時は、第1期の最高値を

記録したテスト時と比較して、後半4区間（41-60秒）において高値を示す傾向にあった。

2. スプリントインターバルトレーニングにおける平均パワー

図5に、第1期および第2・3期におけるスプリントインターバルトレーニングにおける60秒間ペダリングおよび30秒間ペダリングの各セットで記録した平均パワーの全体平均値の変化を示した。A選手は第1期において6回目のトレーニングまではパワーが増加する傾向にあったが、そこから負荷が高くなったにも関わらずパワーは頭打ちの傾向になり、14回目を除いた12-16回目のトレーニングでは高い値を示した。B選手は7回目のトレーニングを除いて順調にパワーの増加が認められた。一方、第2・3期では運動時間を第1期の半分の30秒にして、休憩時間をはさみ2セット行わせたことから、両選手ともに第1期と比較して高いパワーを示したが、第1期ほどの

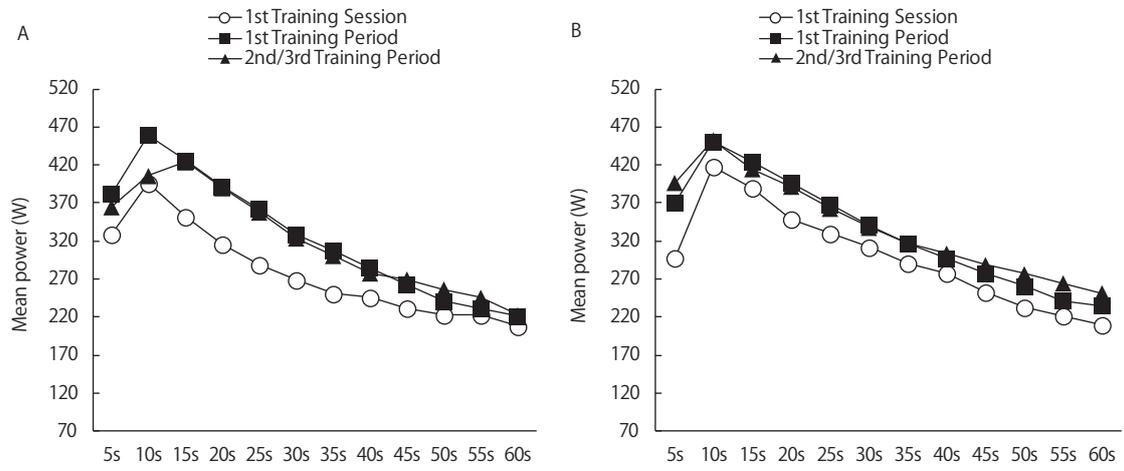


Figure 4. Changes in power output profile of each 5-s phase of the 60-s maximal cycle ergometer sprinting.○:1st training session, ■: the best value of mean power during 1st training period, ▲: the best value of mean power during 2nd/3rd training period.

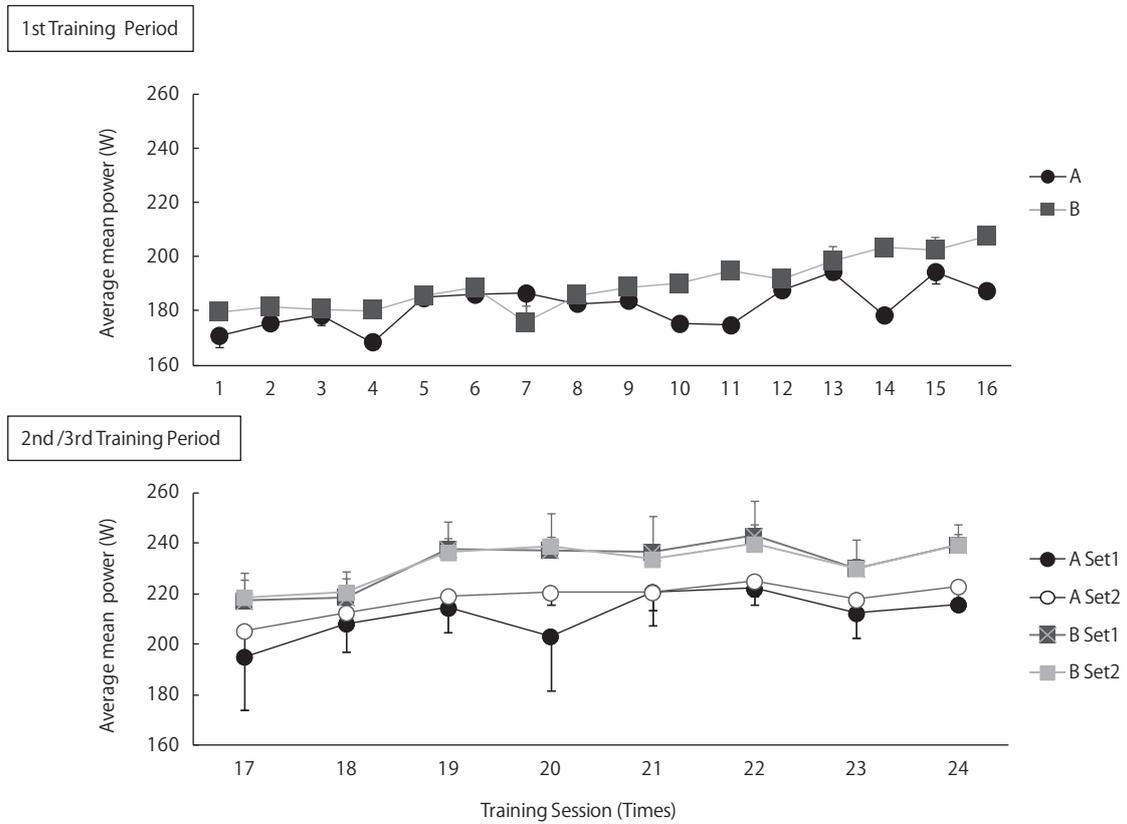


Figure 5. Changes in average mean power during sprint interval training.

パワーの順調な増加は認められなかった。

3. スプリントインターバルトレーニング中の SpO₂ および HR

図 6 に、スプリントインターバルトレーニングにおける各セットで記録した SpO₂ の最低値の全体平均値の変化を示した。第 1 期では、1 回目から 8 回目までが酸素濃度 15.4 % (標高 2,500 m 相当) に設定し、9 回目から 24 回目までが酸素濃度 14.4 % (標高 3,000 m 相当) に設定した。スプリントインターバルトレーニング中の最低 SpO₂ は、第 1 期が A 選手: 78.6 ± 2.0 % (range: 76-85 %)、B 選手: 76.8 ± 2.6 % (range: 73-80 %) であり、第 2・3 期がそれぞれ 75.8 ± 2.0 % (range: 73-79 %)、76.2 ± 1.3 % (range: 75-78 %) であった。また、酸素濃度 15.4 % および 14.4 % における最低 SpO₂ は、A 選手がそれぞれ 81.0 ± 2.7 % (range: 79-85 %)、76.7 ± 1.7 % (range: 73-79 %) であり、B 選手がそれぞれ 79.6 ± 0.9 % (range: 78-81 %)、

75.7 ± 1.8 % (range: 73-79 %) であった。なお、第 3 期の 23, 24 回目のトレーニングおよび B 選手の 21 回目のトレーニング時の SpO₂ は機械トラブルにより記録ができなかった。

一方、スプリントインターバルトレーニング中の最高心拍数は、第 1 期が A 選手: 180 ± 5 bpm (range: 171-183 bpm)、B 選手: 177 ± 4 bpm (range: 171-182 bpm) であり、第 2・3 期がそれぞれ A 選手: 181 ± 2 bpm (range: 178-183 bpm)、B 選手: 176 ± 2 bpm (range: 174-178 bpm) であった。

4. 低酸素トレーニング期間終了前後のアンケート結果

1) 低酸素トレーニングを開始する前の競技中・練習中の課題

A 選手は、「11 月の試合前に水中で持久力トレーニングをして試合に臨んだが、デュエットのフリーレーティンでは、どうしても中盤から足が動かなくなった。足をフレックスにして動かす動作

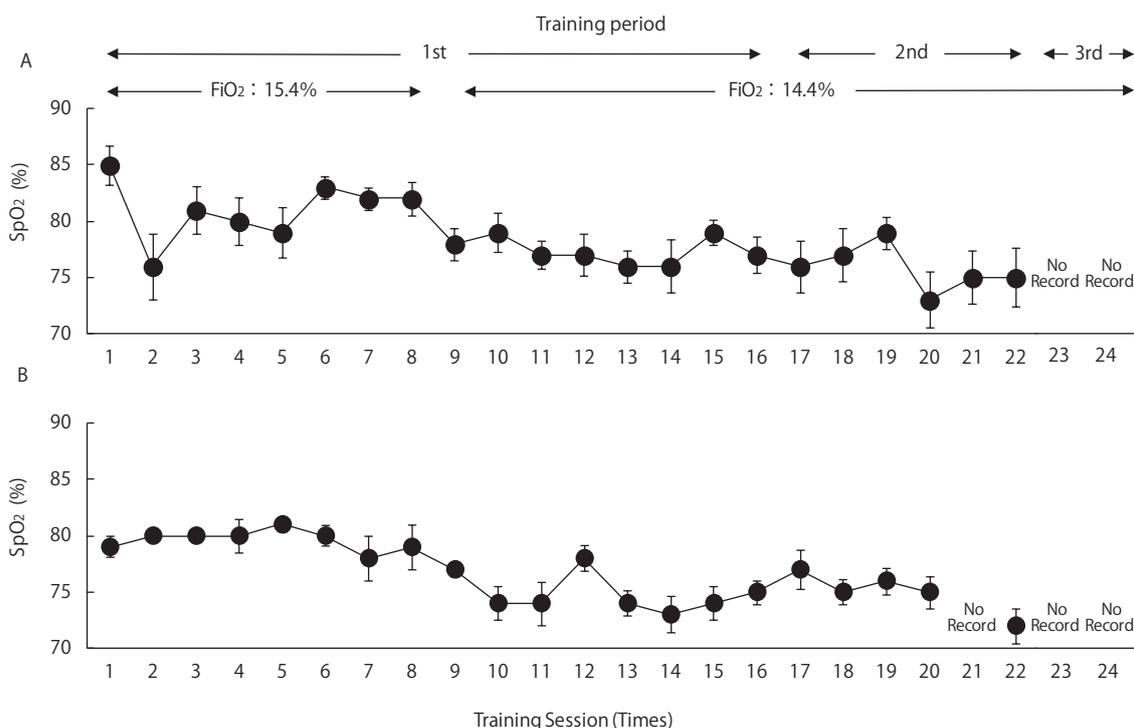


Figure 6. Change in average minimal SpO₂ during sprint interval training.

が多く対応できていなかった」と回答した。また B 選手は、「フリールーティンを最後まで泳ぎきれなかったのも、最後までもつ（維持できる）パワーが必要だった。泳ぎ切ることが課題だったので、演技の内容まで頭が回っていなかった」と回答した。

2) 低酸素トレーニングの第 1 期終了後、競技中・練習中に感じた変化

A 選手は「練習中の通し練習で 11 月に動かなくなっていたところでも動き続けられるようになった」と回答した。また、B 選手は「最後まで泳ぎきれようになり、気持ちとして怖くなくなった」と回答した。さらに B 選手は、「以前は演技内容まで頭が回っていなかったが、(体力的な) 余裕ができたことで演技内容を追求できるようになり、演技構成もどんどんレベルアップさせていけるようになった」と回答した。加えて B 選手は、「練習中の身体の回復力が早くなった」「足に乳酸が出たように感じてからひと山越えられるようになった」「根性がついた」と回答した。

3) 低酸素トレーニングの第 2 期終了後、競技中・練習中に感じた変化

A 選手は「11 月の大会と同じ条件で (5 月の) 日本選手権を泳いで、後半も粘って泳げるようになった (それまでは後半は明らかに落ちていたが後半まで足を動かせるようになった)」、「特に立ち泳ぎの動作の時に低酸素トレーニングの効果を感じた」「1 曲泳ぎ終わった後は足が棒のようになっていたが、少し減った」と回答した。また、B 選手は「本番で最初から全力で力を出せるようになった」「体力のことを考えずに演技に集中できるようになった」、「競技間隔が短くてもリカバーできた」と回答した。

IV. 考察

1. ウォーミングアップおよび 10 秒間・60 秒間全力ペダリングテスト

本研究では、低酸素室への入室 10 分後にウォーミングアップを開始しているが、これは体内を低酸素状態にするため、すなわち、 SpO_2 を一定

まで低下させるためであり、先行研究^{19),20)}では、15 分間の低酸素吸引で SpO_2 が十分に低下することが示されている。本研究では 10 秒間全力ペダリングテスト開始前に 5 分間のウォーミングアップ時間を設けたため、低酸素入室 10 分後にウォーミングアップを開始することにした。

10 秒間全力ペダリングテストおよび 60 秒間全力ペダリングテストは、無酸素性パワー、無酸素性持久力および有酸素性持久力の評価とトレーニングを兼ねて毎回実施した。アーティスティックスイミング選手を対象に、自転車エルゴメーターを用いて無酸素性パワーや無酸素性持久力などの無酸素性能力を評価した研究は、我々の知る限り見当たらないため、本研究がアーティスティックスイミング選手を対象に無酸素性能力を評価した初めての研究だと考えられる。対象者はトレーニング開始当初のペダリング技術が低く、特に軽い負荷で高回転のペダリングが必要な 10 秒間全力ペダリングテストは苦手だという感想を述べていた。しかし、5 回目のトレーニング時に両選手とも 10 秒間全力ペダリングの最高回転数が大きく増加し、その後も徐々に最高回転数の記録を更新していったことから、5 回目のトレーニング以降はペダリング技術が安定し、無酸素性パワーは向上していたと考えられる (図 2)。また、無酸素性パワー、無酸素性持久力および有酸素性持久力の指標として実施した 60 秒間全力ペダリングテストにおける最高パワーおよび平均パワーは、トレーニング経過に伴って徐々に増加していた。さらに、5 秒毎の平均パワーの変化は、1 回目のテスト時と比較して、全ての区間において高いパワーを発揮しており、特に B 選手においては、第 2・3 期において後半 4 区間 (41-60 秒) で 1 回目のトレーニングと比較して高値を示す傾向にあった (図 3) ことから、本研究のトレーニングにより無酸素性パワー、無酸素性持久力および有酸素性持久力のすべてが向上していた可能性が高いと考えられる。

2. スプリントインターバルトレーニングの負荷設定

近年、Repeated-Sprint training in Hypoxia (RSH) の推奨プロトコルがメタ解析の結果から提案されている（頻度：週 2-3 回、期間：2-5 週間、総運動時間：60 分以内、運動：4-15 秒のスプリントを 4-7 本× 3-4 セット、スプリント間休息：30 秒以内、強度：最大、超最大または all-out³⁾。本研究で用いたスプリントインターバルトレーニングの頻度、期間および総運動時間は、推奨プロトコルと同様であったが、運動、休息时间、強度は異なるものであった。これは、スプリントインターバルトレーニングにより脚の筋肥大を起ささないようにし、かつ、有酸素性能力と無酸素性能力の両方を向上させることが可能なプロトコルにしたためである。本研究におけるスプリントインターバルトレーニングの負荷は 1.5-1.8kp であり、一番重い負荷設定であった 60 秒間全力ペダリングテストにおける負荷でも 3kp（体重× 0.05 kp）に設定しており、RSH で多く用いられる負荷^{6), 7), 15), 29), 30), 35)} と比較して軽い負荷に設定した。これは、コーチとのトレーニング目的および内容の打ち合わせの際に、「芸術性の種目は選手の『見た目』も大事な要素であり、『きれいな脚』を作り上げてきたので、自転車トレーニングにより選手の脚の形が変わってしまうことは避けたい」という要望があったことを反映したためである。重い負荷を用いて長期間自転車トレーニングをすることにより、大腿部の筋肥大を引き起こす可能性があることは、自転車競技日本代表の大腿部筋横断面積のデータから認められる。すなわち、自転車競技の短距離選手と長距離選手の大腿部筋横断面積を比較すると、より重い負荷でトレーニングを繰り返している短距離選手の方が大きいことがデータで示されている²⁷⁾。このことから、大腿部の筋肥大を生じさせないためには、ペダリングの負荷を軽く設定する方がよいと考えられる。その一方で、男子大学生陸上競技短距離選手を対象に、常圧低酸素環境において体重× 0.075kp の負荷を用いた自転車スプリントトレーニングを週 2 回、

8 週間行っても、大腿部の筋横断面積に有意な変化は認められない¹⁴⁾ ことから、専門競技のトレーニングではなく、補助的トレーニング手段としての自転車トレーニングでは、筋肥大は生じないと考えられる。本研究ではトレーニング前後の大腿部筋横断面積や周径囲は測定していないが、トレーニング期間中に何度も「見た目」の変化が生じていないかどうかをコーチに確認し、慎重にトレーニングを進めていったため、大腿部および臀部の大きな形態的变化は生じなかった可能性が高いと考えられる。

3. スプリントインターバルトレーニングのプロトコル

本研究における第 1 期のトレーニング期間は、先行研究^{21), 22)} を参考にして 60 秒の運動を 60 秒の休息をはさみながら 9 本行わせるプロコルを採用した。McKay et al²²⁾ は、最大運動強度の 120% の負荷 (120%WRmax) で 60 秒の自転車ペダリング運動を 60 秒の休息をはさみながら 8-12 本行わせるトレーニングを 8 回行かせたところ、体重あたりの $\dot{V}O_2\max$ および乳酸性作業閾値 (LT) が有意に増加すること、さらにこのトレーニング群は、同じトレーニング期間であるが、総運動時間が 10 倍の持久性トレーニング群と同程度の持久性能力の変化が認められたことを報告している。また、Little et al²¹⁾ は、30 秒間全力ペダリングを 4-7 本行わせるスプリントインターバルトレーニング^{4), 11)} は身体ストレスが大きく、高いモチベーションが必要なことから、一般人には適していない可能性があるため、より幅広い対象者に対して実践できる、やや負荷を軽くした 1 分間のペダリング運動を用いたスプリントインターバルトレーニングの効果を検証している。彼らは、100%WRmax の負荷で 60 秒の自転車ペダリング運動を 75 秒の休息をはさみながら 8-12 本行わせるトレーニングを合計 6 回行かせたところ、約 2 分および約 60 分で終了するタイムトライアルテストの両方において有意にタイムが短縮したことを報告している²¹⁾。したがって、第 1 期で採用

した 60 秒の運動を繰り返すトレーニングプロトコルは、先行研究^{21),22)}と比較してさらに軽い負荷ではあったが、総運動時間は同程度であり、全力に近いペダリング運動を繰り返していることから、有酸素性持久力と無酸素性持久力の両方を向上させることができるプロトコルであったと考えられる。

一方、第 2・3 期では、主運動時間と休息時間をいずれも 60 秒から 30 秒に変更し、本数は同じ 9 本であるが、セット数を 2 セットに変更した (図 1)。これは主運動時間を短くすることにより、より無酸素性持久力を向上させることをねらいとしたものであり、また運動休息比を 1:1 に保ちながら総運動時間も第 1 期と同じにすることで、各期での発揮パワーを比較することができる考えたためである。近年多く報告されている Repeated-Sprint training in Hypoxia (RSH) のプロトコルは、30 秒以内の全力スプリントを比較的短時間の休息をはさみながら繰り返すことで速筋線維の大幅な動員を促すものであり³⁾、対照群と比較して筋グリコーゲンの低下が大きく¹⁶⁾、トレーニング後に筋グリコーゲンを大幅に増加させること¹⁵⁾、そして無酸素性の運動パフォーマンス (反復回数・パワー) を大きく向上させることが複数の研究で報告されている^{6),7),15),29),30),35)}。したがって、主運動時間を 60 秒から 30 秒に変更した第 2・3 期のトレーニングプロトコルは、第 1 期と比較してより無酸素性エネルギー代謝に負荷をかけることができたと予想される。

本研究では、無酸素性持久力の指標である最大酸素消費量や有酸素性持久力の指標である $\dot{V}O_{2max}$ や LT などの生理学的なエネルギー指標を測定していないため、無酸素性エネルギー供給能力および有酸素性エネルギー供給能力がそれぞれどの程度向上したのか、正確には明らかでない。しかし、無酸素性パワー、無酸素性持久力および有酸素性持久力の指標として実施した 60 秒間全力ペダリングテストにおける最高パワーおよび平均パワーは、トレーニング経過に伴って徐々に増加したこと、また、トレーニング後のアンケートには「動

かなくなっていたところでも動き続けられるようになった」「練習中の身体の回復力が早くなった」「足に乳酸が出たように感じてから、ひと山越えられるようになった」という回答があったことから推測すると、無酸素性エネルギー供給能力および有酸素性エネルギー供給能力の両方が向上していた可能性が高いと考えられる。

4. スプリントインターバルトレーニングの生理学的負荷

本研究におけるスプリントインターバルトレーニング中の最高心拍数は 171-183 bpm の範囲であり、トレーニング強度として十分に高いことが認められた。Rodriguez-Zamora et al³¹⁾ は、スペインのジュニアおよびシニアエリートアーティスティックスイミング選手を対象に競技会におけるルーティン中の心拍数を測定しており、その最高心拍数は 191.7 ± 8.7 bpm、平均心拍数は 159.6 ± 14.4 bpm であったことを報告している。したがって、本研究におけるスプリントインターバルトレーニングは、有酸素性持久力を向上させるために十分な生理的負荷をかけられており、なおかつ競技会における最高心拍数近くまで達することができる負荷をかけられていたことから、生理学的負荷としては十分であったことが示唆される。

一方、本研究におけるスプリントインターバルトレーニング中の SpO₂ は、両選手とも第 1 期よりも第 2・3 期の方が低値を示し、また酸素濃度 15.4 % よりも 14.4 % の方が低値を示した (図 6)。その値は、本研究と同じく標高 3,000 m 相当の酸素濃度 (14.4 %) においてスプリントトレーニングを実施した陸上競技女子 400 m 走選手を対象とした研究³⁵⁾ の値 (71-80 %) と同程度の値 (73-79 %) を示した。低酸素トレーニングは SpO₂ の低下を利用し、有酸素性エネルギー代謝と無酸素性エネルギー代謝の両方に刺激を与えるトレーニング¹²⁾ であるが、本研究では対照条件を設けていないため、トレーニング効果に対する低酸素の影響がどの程度あったのかを明示することができない。一方、アーティスティックスイミング選手は、

競技会や普段のトレーニングにおいて頻繁に水中に潜り、止息状態で運動を繰り返すことにより、低酸素に対する感受性を表す指標である低酸素換気応答 (Hypoxic Ventilatory Response: HVR) が低いことが明らかにされている^{2),34)}。すなわち、アーティスティックスイミング選手は低酸素環境への曝露により SpO₂ が低下したとしても換気の亢進が少なく、苦しさを感じにくい特徴を持っているといえる。また Feiner et al⁸⁾ は、HVR と SpO₂ の最低値との間に有意な正の相関関係があること、止息時間に影響するのは HVR であると述べており、アーティスティックスイミング選手にとって HVR は低い状態を維持しておくことが良い状態であると考えられる。しかしながら、一般的に高地/低酸素環境への長期間曝露やトレーニングにより HVR は増加することが知られていることから^{17),18)}、HVR を増加させる方向に向かわせる低酸素トレーニングは、アーティスティックスイミング選手に対してマイナスの影響がある可能性がある。このことについては、今後明らかにする必要がありと考えられるが、アンケート結果や選手およびコーチへのヒアリング時に、止息時間が短くなった、息苦しくなった等のコメントがなかったことを考慮すると、低酸素トレーニングによる明らかなマイナス効果はなかったと思われる。

5. フリールーティンの演技への影響

東京オリンピックにおけるアーティスティックスイミング日本代表チームの結果は、デュエット、チームともに4位であり、目標としていたメダル獲得はできなかった。フリールーティンの最終スコアは、30%がすべての動作、40%が芸術的な印象、30%がルーティンの動きの難易度によって評価される⁹⁾ ことから、低酸素トレーニングによる無酸素性および有酸素性エネルギー供給能力の向上、すなわちエネルギー系体力の向上が必ずしも最終スコアに結びつくとは限らない。さらに、低酸素トレーニングが終了してから、オリンピック本番まで2ヶ月近い期間があったため、低酸素トレーニングの効果としてのエネルギー系体力の

向上が、オリンピックにおけるフリールーティンのスコアにどの程度貢献したのかは明らかではない。しかしながら、選手へのアンケート結果から、低酸素トレーニング開始前は、デュエットフリールーティンでは「どうしても中盤から足が動かなくなった」「最後まで泳ぎきれなかった」が、低酸素トレーニング終了した時点で、「通し練習で動かなくなっていたところでも動き続けられるようになった」「最後まで泳ぎきれなくなった」という、パフォーマンス向上につながる前向きなコメントが得られたことから、低酸素トレーニングによるエネルギー系体力の向上により、少なくとも低酸素トレーニング期間終了直後までは、フリールーティンの演技に良い影響を与えた可能性は高いと考えられる。特に B 選手は「(体力的な)余裕ができたことで演技内容を追求できるようになり、演技構成もどんどんレベルアップさせていけるようになった」と回答しており、エネルギー系体力の向上が演技内容の向上につながったと考えられる。さらに、低酸素トレーニング期間終了後に代表コーチからも、「低酸素トレーニングは演技に対するプラス効果はあった」というコメントをもらっており、少なくとも低酸素トレーニング期間終了直前までの練習中におけるフリールーティン演技への影響は少なくなかったと考えられる。実際、自転車エルゴメーターを用いて測定した $\dot{V}O_{2max}$ とアーティスティックスイミングのソロルーティンをシミュレートしたパフォーマンステストのスコアとの間には有意な正の相関関係が認められたことが、最近の研究³⁵⁾ で報告されていることから、普段の水中トレーニングに加えて自転車エルゴメーターを用いたトレーニングを行うことにより、エネルギー系体力を向上させることは、アーティスティックスイミングの競技力を高めることにつながる可能性が高いと考えられる。

V. まとめ

本研究では、アーティスティックスイミング日本代表選手2名を対象として、フリールーティン

の演技後半における疲労を遅延し、最後まで完成度の高い動きができるようにすることを目的として、低酸素環境において自転車エルゴメーターを用いたスプリントインターバルトレーニングを実施した。無酸素性持久力および有酸素性持久力の評価として用いた60秒間全力パダリングテストの平均パワーは、それぞれの対象者で18%および13%増加したことから、無酸素性エネルギー供給能力および有酸素性エネルギー供給能力の向上が認められた。また、トレーニング終了後に「演技の最後まで泳ぎきれようになった」「疲労が軽減した」という選手からの感想が得られたことから、主観的なエネルギー系体力の向上と疲労の遅延効果も認められた。これらのことから、本研究で実施した低酸素トレーニングは、アーティスティックスイミング選手の無酸素性エネルギー供給能力および有酸素性エネルギー供給能力の両方を向上させ、競技パフォーマンスにつながる効果的なトレーニングプログラムであったことが示唆された。

文献

- 1) Alentejano T, Marshall D, Bell G. A time-motion analysis of elite solo synchronized swimming. *Int J Sports Physiol Perform*, 3(1): 31-40, 2008.
- 2) Bjurström RL, Schoene RB. Control of ventilation in elite synchronized swimmers. *J Appl Physiol* (1985), 63(3): 1019-1024, 1987.
- 3) Brocherie F, Girard O, Faiss R, Millet GP. Effects of repeated-sprint training in hypoxia on sea-level performance: A meta-analysis. *Sports Med*, 47(8): 1651-1660, 2017.
- 4) Burgomaster KA, Hughes SC, Heigenhauser GJ, Bradwell SN, Gibala MJ. Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans. *J Appl Physiol*, 98(6): 1985-1990, 2005.
- 5) Davies BN, Donaldson GC, Joels N. Do the competition rules of synchronized swimming encourage undesirable levels of hypoxia? *Br J Sports Med*, 29(1): 16-19, 1995.
- 6) Faiss R, Girard O, Millet GP. Advancing hypoxic training in team sports: from intermittent hypoxic training to repeated sprint training in hypoxia. *Br J Sports Med*, 47 (Suppl 1): i45-50, 2013.
- 7) Faiss R, Léger B, Vesin JM, Fournier PE, Eggel Y, Dériaz O, Millet GP. Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One*, 8(2): e56522, 2013.
- 8) Feiner JR, Bickler PE, Severinghaus JW. Hypoxic ventilatory response predicts the extent of maximal breath-holds in man. *Respir Physiol*, 100(3): 213-222, 1995.
- 9) FINA. FINA Artistic Swimming Rules - Valid from 12.09.2017 (Revised). <https://www.fina.org/artistic-swimming/rules> (2022 Mar 10)
- 10) Gibala MJ, Little JP, Macdonald MJ, Hawley JA. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J Physiol*, 590(5): 1077-1084, 2012.
- 11) Gibala MJ, Little JP, van Essen M, Wilkin GP, Burgomaster KA, Safdar A, Raha S, Tarnopolsky MA. Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *J Physiol*, 575(Pt 3): 901-911, 2006.
- 12) Girard O, Brocherie F, Millet GP. Effects of altitude/hypoxia on single- and multiple-sprint performance: a comprehensive review. *Sports Med*, 47(10): 1931-1949, 2017.
- 13) Homma M. The components and the time of 'face in' of the routines in synchronized swimming. In: Miyashita M et al. (Eds.) *Medicine and Science in Aquatic Sports*. Karger, pp.149-154, 1994.
- 14) 伊藤稜, 鈴木康弘, 山崎一彦, 高松薫. 低酸素トレーニングによる緩衝能の改善が高強度運動パフォーマンスに及ぼす影響. *デサントスポーツ科学*, 22: 117-116, 2001.
- 15) Kasai N, Kojima C, Sumi D, Takahashi H, Goto

- K, Suzuki Y. Impact of 5 days of sprint training in hypoxia on performance and muscle energy substances. *Int J Sports Med*, 38(13): 983-991, 2017.
- 16) Kasai N, Tanji F, Ishibashi A, Ohnuma H, Takahashi H, Goto K, Suzuki Y. Augmented muscle glycogen utilization following a single session of sprint training in hypoxia. *Eur J Appl Physiol*, 121(11): 2981-2991, 2021.
- 17) Katayama K, Ishida K, Iwasaki K, Miyamura M. Effect of two durations of short-term intermittent hypoxia on ventilatory chemosensitivity in humans. *Eur J Appl Physiol*, 105(5): 815-821, 2009.
- 18) Katayama K, Sato Y, Morotome Y, Shima N, Ishida K, Mori S, Miyamura M. Intermittent hypoxia increases ventilation and SaO₂ during hypoxic exercise and hypoxic chemosensitivity. *J Appl Physiol*, 90(4): 1431-1440, 2001.
- 19) Kon M, Ikeda T, Homma T, Akimoto T, Suzuki Y, Kawahara T. Effects of acute hypoxia on metabolic and hormonal responses to resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 42(7): 1279-1285, 2010.
- 20) Kon M, Ikeda T, Homma T, Suzuki Y. Effects of low-intensity resistance exercise under acute systemic hypoxia on hormonal responses. *J Strength Cond Res*, 26(3): 611-617, 2012.
- 21) Little JP, Safdar A, Wilkin GP, Tarnopolsky MA, Gibala MJ. A practical model of low-volume high-intensity interval training induces mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle: potential mechanisms. *J Physiol*, 588(Pt 6): 1011-1022, 2010.
- 22) McKay BR, Paterson DH, Kowalchuk JM. Effect of short-term high-intensity interval training vs. continuous training on O₂ uptake kinetics, muscle deoxygenation, and exercise performance. *J Appl Physiol*, 107(1): 128-138, 2009.
- 23) Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X, Richalet JP. Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med*, 40(1): 1-25, 2010.
- 24) Mountjoy M. The basics of synchronized swimming and its injuries. *Clin Sports Med*, 18(2): 321-336, 1999.
- 25) Mulder E, Schagatay E, Sieber A. Using underwater pulse oximetry in freediving to extreme depths to study risk of hypoxic blackout and diving response phases. *Front Physiol*, 12: 651128, 2021.
- 26) 日本水泳連盟 . アーティスティックスイミング . <https://swim.or.jp/as/>. (2022 2022/4/1)
- 27) 日本スポーツ振興センターハイパフォーマンススポーツセンター国立スポーツ科学センター . 日本人トップアスリートのフィットネスチェックデータ . 松林武生編 , フィットネスチェックハンドブック—体力測定に基づいたアスリートへの科学的支援 . 大修館書店 , pp.196-197, 2020.
- 28) 萩田太 . 水泳中の無酸素性エネルギー動態 . 水泳水中運動科学 , 2: 47-56, 1999.
- 29) Oriishi M, Hagiwara M, Yamanaka R, Ohya T, Ohnuma H, Kawahara T, Suzuki Y Short-term hypoxic training improves maximal anaerobic power after a week of recovery. *Gazz Med Ital*, 180(1-2): 1-6, 2021.
- 30) Oriishi M, Matsubayashi T, Kawahara T, Suzuki Y. Short-Term Hypoxic Exposure and Training Improve Maximal Anaerobic Running Test Performance. *J Strength Cond Res*, 32(1): 181-188, 2018.
- 31) Rodriguez-Zamora L, Iglesias X, Barrero A, Chaverri D, Erola P, Rodriguez FA. Physiological responses in relation to performance during competition in elite synchronized swimmers. *PLoS One*, 7(11): e49098, 2012.
- 32) Spencer MR, Gastin PB. Energy system contribution during 200- to 1500-m running in

- highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 33(1): 157-162, 2001.
- 33) Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, Miyachi M. Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc*, 29(3): 390-395, 1997.
- 34) Viana E, Bentley DJ, Logan-Sprenger HM. A Physiological overview of the demands, characteristics, and adaptations of highly trained artistic swimmers: a literature review. *Sports Med Open*, 5(1): 16, 2019.
- 35) 山中亮, 丹治史弥, 大沼勇人, 安藤良介, 前村公彦, 鈴木康弘. 5日間の低酸素トレーニングが日本トップレベル女子400m走者の無酸素性及び有酸素性能力に及ぼす影響. *Journal of High Performance Sport*, 8: 19-34, 2021.