

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11303

研究課題名（和文）高齢者の認知機能や呼吸機能に水中運動は陸上運動より有用か？

研究課題名（英文）Is aquatic exercise more beneficial for pulmonary and cognitive function in elderly persons than land exercise？

研究代表者

渡部 厚一（Watanabe, Koichi）

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：30447247

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：水中運動は関節痛を有する高齢者の有酸素能力を向上させるなど健康維持増進方法として近年注目されている一方、水中運動の呼吸器疾患患者への応用性や認知機能に及ぼす影響については明らかではない。そこで水中運動時の呼吸や脳血流動態の解析からその生理学的応答について解析した。その結果、水中運動は陸上運動と異なる換気動態や脳血流変化が認められ、陸上運動とは異なる運動負荷が得られる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

健康維持増進方法としての水中運動が近年注目されており、水中運動は関節痛を軽減しながら高齢者の有酸素能力を向上させることが報告されている、また、低酸素血症は認知機能に影響を与えることも報告されている。しかし、水中運動と認知機能改善との関連性や、呼吸器疾患の改善・予防のための呼吸器疾患患者への水中運動の応用性は未だ明らかにされていない。

本研究では、水中運動下における呼吸機能や認知機能の生理学的変化を観察することにより、高齢者や呼吸器疾患患者がより安全に水中運動を行うための、基礎的資料を提供している。

研究成果の概要（英文）：Water-based exercise has got popularity in recent years as one of methods for health, for example by improving aerobic capacity in elderly people with joint pain. However, the applicability of water-based exercise to patients with respiratory disease or its effects on cognitive function are not well known.

We studied its physiological response by analyzing respiratory function and cerebral hemodynamics during water-based exercise compared with land-based exercise.

As a result, water-based exercise induced different ventilatory dynamics and cerebral blood flow changes from land-based exercise and may be a different from land-based exercise.

研究分野：スポーツ医学

キーワード：水中運動 呼吸機能 認知機能

## 1. 研究開始当初の背景

近年、水中運動は健康維持・増進の方法として注目され、関節痛を軽減しながら高齢者の有酸素能力を向上させる (Wang et al., 2007, Suomi et al., 2007) ことや、浸水が肺活量および吸気筋力を低下させると報告しており (Andrade et al., 2013) 水圧に伴って吸気筋 (横隔膜) が頭部方向へ偏位して肺コンプライアンスが低下する生理学的反応がみられる。さらに水圧は血液循環を促進させるが、近年では陸上環境より脳の血液循環が促進されることが明らかとなり、水圧による呼吸変化が脳血管拡張に影響している可能性が示唆されている (Carter et al., 2014)。

加齢に伴い呼吸や脳機能は低下するが、呼吸器疾患では運動や呼吸機能悪化時に呼吸困難感や息切れといった症状が増悪し、運動耐用能低下や身体活動量減少の主要な要因となっている。同時に、呼吸調節機能の低下は脳血流調節機能にも影響を及ぼし、呼吸に伴う二酸化炭素の増減は脳血管拡張に影響を与えて脳血流増減をもたらし、更に脳への栄養供給の減少、認知機能の低下から脳機能の低下につながる事となる。

現在、呼吸器疾患の改善・予防や脳機能低下に対する運動療法が推奨され、呼吸器疾患では呼吸機能および吸気筋力の改善を介して運動耐用能を改善させること (Manuel et al., 2000, Janet et al., 1999) や吸気筋力向上には高強度トレーニングを必要とする (Suomi et al., 2003) こと、また低～中強度レベルの運動が脳血流を増加させ、継続的な運動が脳機能を高めることが明らかとなっている (Pugh et al., 2015)。

ところで、水中運動は陸上運動よりも効果的に吸気筋力を向上させる可能性に加え、呼吸機能の改善により脳血流を増加させて認知機能にも影響を与える可能性については、水中運動が呼吸機能を向上させる介入研究 (Ide et al., 2005, Rodrigues et al., 2018) をわずかに認めるのみで、水中運動が呼吸機能や認知機能にどのように影響を及ぼすかについてはいまだに明らかとはいえない。

## 2. 研究の目的

水中運動が陸上運動より呼吸および認知機能に有用かどうかを検討することを目的とした。

この研究目的を達成するため、以下のように課題を設定した。

**課題** . 一過性の水中運動が健常若年者の換気動態、血行動態、脳活動に及ぼす影響の検討

**課題** . 一過性の水中運動が健常若年者の運動中肺気量分画に及ぼす影響の検討

**課題** . 一過性の水中運動が健常中高年者の呼吸機能および脳・認知機能に及ぼす影響の検討

-1: 水中歩行運動が脳血液量、実行機能に及ぼす影響

-2: 水中ステップ運動が呼吸数・脳酸素化に及ぼす影響

## 3. 研究の方法

**課題** . 一過性の水中運動が健常若年者の換気動態、血行動態、脳活動に及ぼす影響の検討

**a. 対象者**: 呼吸循環器疾患を有していない成人若年男性 12 名

**b. プロトコル**: 対象者は研究室に 3 度来室し、以下の測定を行った。TEST 1: 自転車エルゴメータを用いた最大酸素摂取量測定。TEST 2: 水中自転車運動。TEST 3: 陸上自転車運動。TEST 1 では、自転車エルゴメータを使用して対象者の  $VO_{2max}$  を測定した。TEST 2 では、対象者は実験室到着後、水着に着替え陸上での 5 分間安静後、生理学的不感温度の水中で 5 分間の安静を取り、15 分間の水中自転車運動の練習を行った。その後 30 分間陸上で安静とした後、15 分間の水中自転車運動 (超低強度、低強度、中等度強度を各 5 分間) を実施した。TEST 3 では TEST 2 と同様のタイムスケジュールで水中自転車運動を陸上自転車運動に置き換えて実施した。水中および陸上自転車運動中の酸素摂取量をモ

ニターし、両環境条件の運動強度を一致させた。両自転車運動中に換気動態、血行動態、脳活動を継続して、スパイロメトリーおよび呼吸筋力を練習前および2度目の自転車運動後に測定した。

#### **課題 . 一過性水中運動が健常若年者の運動中肺気量分画に及ぼす影響の検討**

a. **対象者**：呼吸循環器疾患を有していない成人若年男女 10 名

b. **プロトコル**：対象者は研究室に3度来室し、以下の測定を行った。TEST 1：自転車エルゴメータを用いた最大酸素摂取量測定。TEST 2：水中自転車運動。TEST 3：陸上自転車運動。TEST 1では、自転車エルゴメータを使用して対象者の $VO_{2max}$ を測定した。TEST 2では、対象者は実験室到着後、水着に着替え、陸上での5分間安静後、生理学的不感温度の水中で8分間の安静を取り、その後11分間の水中自転車運動を低強度と中等度強度でランダムに実施した。TEST 3ではTEST 2と同様のタイムスケジュールで水中自転車運動を陸上自転車運動に置き換えて実施した。水中および陸上自転車運動中の酸素摂取量をモニターし、両環境条件の運動強度を一致させた。測定項目は両自転車運動中に換気動態、血行動態を継続して測定し、各運動前後で最大呼吸を行うことで運動時の肺気量位を測定した。運動前浸水安静時および陸上安静時に努力肺活量の測定も行った。

#### **課題 . 一過性水中運動が健常中高年者の呼吸機能および脳・認知機能に及ぼす影響の検討**

##### **-1：水中歩行運動が脳血液量、実行機能に与える影響**

a. **対象者**：脳、呼吸器疾患を有していない中高年男女 7 名

b. **プロトコル**：対象者は運動施設に3度来訪し、以下の内容を行った。Day1：実験の説明と運動プロトコルの確認。Day2 および Day3 にて水中歩行または陸上歩行実験をランダムに実施した。まず運動施設に到着後、運動着または水着に着替え、ウェアラブル心拍計を装着し15分間座位にて安静を保った。その後、認知機能のうち実行機能を測定するストループ課題を実施した。課題後、10分間の低強度歩行運動(20%HRR)を実施し、運動後に再びストループ課題を行った。認知課題ならびに運動中に近赤外線分光法(fNIRS)による脳血液量測定を行い、それぞれの脳活動を評価した。

##### **-2：水中ステップ運動が呼吸数・脳酸素化に与える影響**

a. **対象者**：脳、呼吸器疾患を有していない中高年男女 12 名

b. **プロトコル**：対象者は運動施設に3度来訪し、以下の内容を行った。Day1：実験の説明と運動プロトコルの確認。Day2 および Day3 に水中ステップまたは陸上ステップ運動をランダムに実施した。運動施設に到着後、運動着または水着に着替え、呼吸数を計測できるウェアラブル心拍計を装着し15分間の安静座位を保った。その後、課題 -1 同様、実行機能を測定するストループ課題を実施した。課題後、10分間の低強度ステップ運動(30%HRR)を実施し、運動後に再びストループ課題を行った。認知課題ならびに運動中に脳酸素化動態を計測できる近赤外線分光法(fNIRS)による脳酸素化測定を行い、それぞれの脳活動を評価した。

## 4 . 研究成果

#### **課題 . 一過性水中運動が健常若年者の換気動態、血行動態、脳活動に及ぼす影響の検討**

すべての運動強度で、水中および陸上運動の $VO_2$ は同様であった。しかし、中等度水中運動において、呼吸数、吸気フローは陸上運動より有意に高く、吸気時間は有意に低かった(全て $P < 0.05$ )。また、水中運動では、安静時の終末呼気二酸化炭素( $PETCO_2$ )は陸上よりも高く、中等度運動での $PETCO_2$ は逆に低かった。水中運動後にのみ有意に努力肺活量が減少したが、呼吸筋力は変化しなかった。また、脳活動指標である前頭前野の酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)は左背外側前頭前野の領域を除き、ほとんどの領域で差を認めなかった。なお、換気動態においては二元配置分散分析(環境：陸上 vs 水中, 運動強度：超低強度 vs 低強度 vs 中等度強度)、スパイロメトリー値および呼吸筋力にも二元配置分散分析(環境：陸上 vs 水中, 時間：運動前 vs 運動後)を用いた。

これらの結果から、水中運動は同等の運動強度の陸上運動よりも呼吸数や吸気フローを増加させ、

浸水に伴う肺への生理学的負荷（肺コンプライアンスの低下や横隔膜の偏位）と運動強度増加に伴う換気需要の高まりによって換気量が増加した可能性がある。こうした水中運動時の換気動態は、運動後の努力肺活量の減少に關与したと示唆された。また左背外側前頭前野の脳活動に差がみられたことから肺機能よりも運動実行性の差が影響した可能性がある。

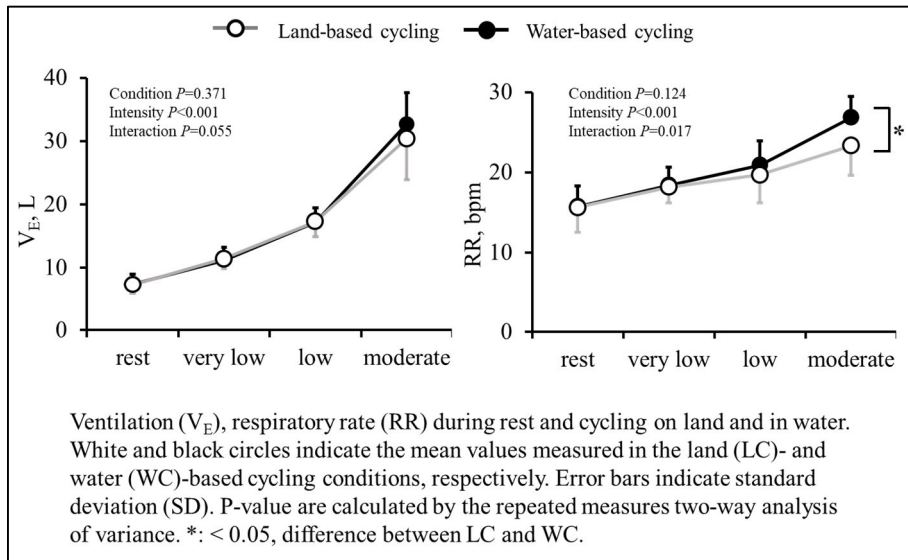


図 1：超低強度、低強度、中等度強度での水中および陸上自転車運動時の換気量と呼吸数

課題 . 一過性の水中運動が健常若年者の運動中肺気量分画に及ぼす影響の検討

測定システムの原因により女性 1 名のデータを取得できなかった。換気動態および肺気量分画指標において 3 要因の線形混合モデル(環境：陸上 vs 水中，運動強度：低強度 vs 中等度 強度，時間：安静 vs 運動) を用いて統計解析したところ、すべての運動強度で、水中および陸上自転車運動の  $VO_2$  は同様であった。しかし、中等度水中運動における分時換気量および呼吸数は陸上運動中よりも有意に高く、一呼吸時間は有意に低かった(全て  $P < 0.05$ )。また、肺気量分画指標では、水中運動中の予備吸気量は陸上運動よりも高く(安静時、低強度、中等度強度全てで  $P < 0.05$ )、予備呼気量は低かった(環境の主効果： $P < 0.05$ )。

これらの結果から、水中運動中の肺気量分画は陸上運動中に比べて呼気側へ偏位し(つまり水中運動中は予備吸気量の増加と予備呼気量の低下が生じる)呼吸数および分時換気量の増加と関連することが示唆された。このことは水中運動中の高い換気量の潜在的なメカニズムを示す可能性がある。

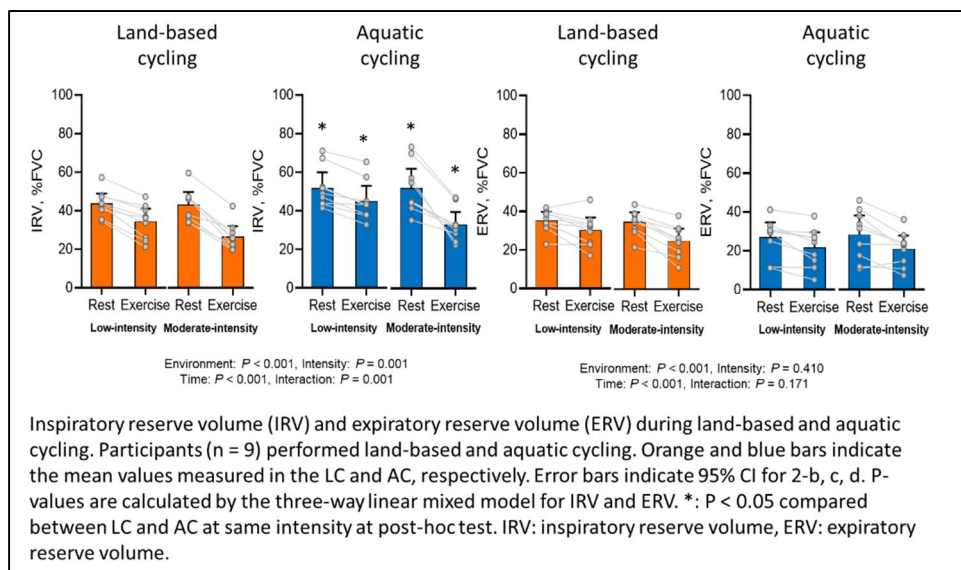
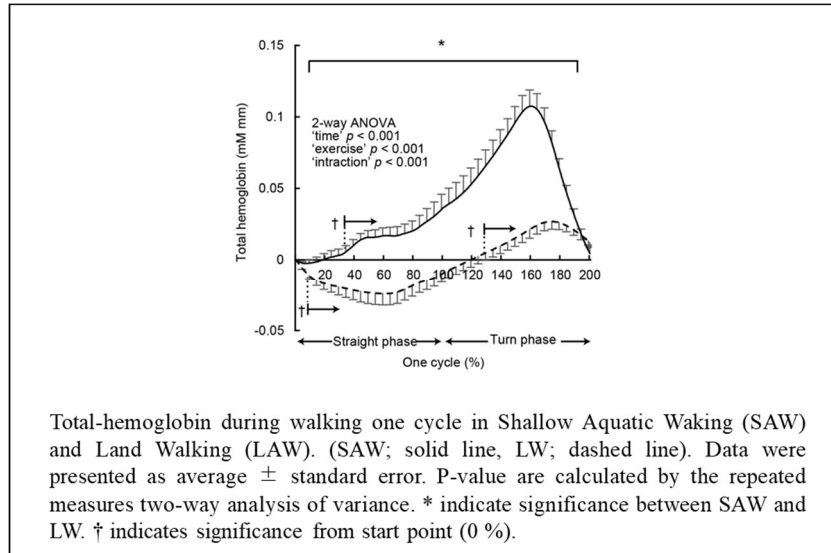


図 2：低強度、中強度水中および陸上自転車運動時の予備吸・呼気量 (IRV, ERV) の変化

**課題 . 一過性の水中運動が健常中高年者の呼吸機能および脳・認知機能に及ぼす影響の検討**

-1 では、二元配置分散分析の結果、水中歩行中の脳血液量は陸上歩行よりも増加した。また水中歩行後におけるストループ干渉の成績は陸上歩行より向上した ( $P < 0.05$ )。

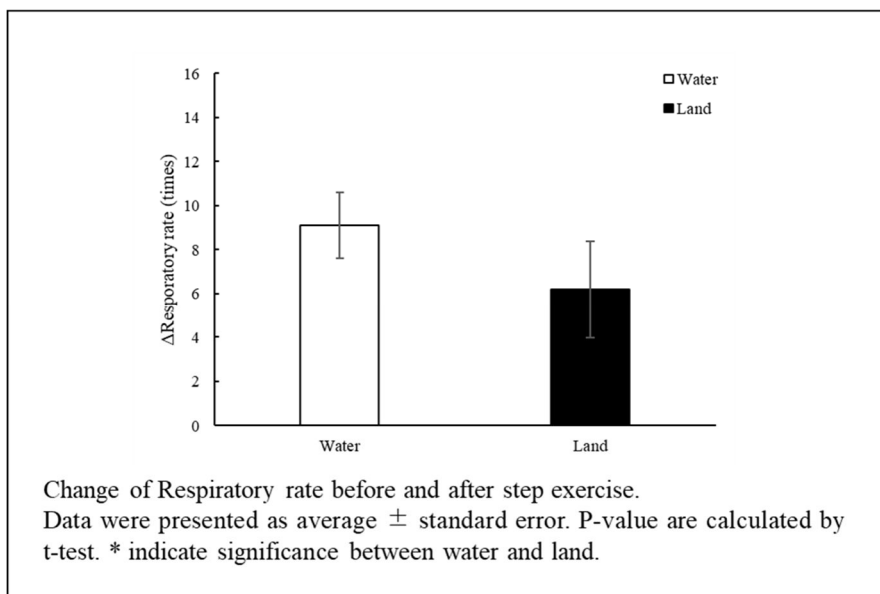
プール水位と運動中心拍数の調整により、環境差による循環器系の変動を最小限にしたため、水中歩行は主に水圧や抵抗の影響を受けて実行する必要があるとあり、陸上歩行よりも難しいと考えられる。運動を遂行するために前頭前野がより一時的に活性化した結果、ストループ課題の成績にも影響を与えた可能性が示唆された。



**図 3 : 水中歩行および陸上歩行時の酸素化ヘモグロビンの変動**

-2 では、対応のある t 検定の結果、安静時から運動終了直後の呼吸数の変化量において水中と陸上運動間に有意差が認められたが、運動中脳酸素化動態の変動は両運動間に差は認められないもの異なる傾向を示した。加えてストループ課題における反応速度の変化に有意差は認められなかった。

中高年者では低強度の運動強度でも水圧によって呼吸数に差が生じることが明らかとなったが、脳酸素化動態やストループ課題の成績に差を認めなかったことから、低強度運動における脳酸素化動態の変動は、呼吸数の影響以外の要因による可能性が示唆された。



**図 4 : 水中および陸上ステップ運動時の呼吸数変化**

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Hoshi Daisuke, Fukuie Marina, Hashitomi Tatsuya, Tarumi Takashi, Sugawara Jun, Watanabe Koichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Respiratory function and breathing response to water and land based cycling at the matched oxygen uptake	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physiological Reports	6. 最初と最後の頁 1~14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14814/phy2.15475	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hashitomi Tatsuya, Hoshi Daisuke, Tarumi Takashi, Sugawara Jun, Watanabe Koichi	4. 巻 12
2. 論文標題 Effect of aquatic walking on prefrontal activity and executive function in healthy middle- and old-aged adults: a pilot study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 59~67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7600/jpfsm.12.59	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hashitomi Tatsuya, Hoshi Daisuke, Fukuie Marina, Tarumi Takashi, Sugawara Jun, Watanabe Koichi	4. 巻 241
2. 論文標題 Differences in the prefrontal cortex responses of healthy young men performing either water-based or land-based exercise at light to moderate intensity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experimental Brain Research	6. 最初と最後の頁 991~1000
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00221-023-06583-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hoshi Daisuke, Fukuie Marina, Tamai Shinsuke, Momma Reiko, Tarumi Takashi, Sugawara Jun, Watanabe Koichi	4. 巻 295
2. 論文標題 Influence of water immersion on the airway impedance measured by forced oscillation technique	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Respiratory Physiology & Neurobiology	6. 最初と最後の頁 103779~103779
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.resp.2021.103779	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 星大輔, 福家真理那, 樽味孝, 菅原順, 渡部厚一
2. 発表標題 水中運動中における換気応答の変化
3. 学会等名 第21回SATテクノロジー・ショーケース
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daisuke Hoshi, Marina Fukuie, Tatsuya Hashitomi, Takashi Tarumi, Jun Sugawara, Koichi Watanabe.
2. 発表標題 The Pressure Of End-Tidal Carbon Dioxide Response To Incremental Underwater Cycling
3. 学会等名 American College of Sports and Medicine, San Diego and Online (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋富達也, 樽味孝, 菅原順, 渡部厚一
2. 発表標題 健常中高年者における水中歩行運動が実行機能に与える影響
3. 学会等名 日本体力医学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daisuke Hoshi, Marina Fukuie, Tatsuya Hashitomi, Takashi Tarumi, Jun Sugawara, Koichi Watanabe.
2. 発表標題 Respiratory Response To Underwater And Land-based Cycling At The Matched Oxygen Uptake.
3. 学会等名 Experimental Biology, Online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Hoshi, Marina Fukuie, Tatsuya Hashitomi, Takashi Tarumi, Jun Sugawara, Koichi Watanabe.
2. 発表標題 Influence of Different Exercise Intensities on the Respiratory Function and Breathing Pattern during Underwater Cycling.
3. 学会等名 American College of Sports and Medicine, Online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuya Hashitomi, Daisuke Hoshi, Marina Fukuie, Tarumi Takashi, Jun Sugawara, Koichi Watanabe.
2. 発表標題 Effect of A Low- to-Moderate Intensity Water Exercise on The Prefrontal Cortical Activity.
3. 学会等名 American College of Sports and Medicine, Online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Hoshi, Marina Fukuie, Tatsuya Hashitomi, Takashi Tarumi, Jun Sugawara, Koichi Watanabe.
2. 発表標題 The Pressure Of End-Tidal Carbon Dioxide Response To Incremental Underwater Cycling.
3. 学会等名 American College of Sports and Medicine, San Diego (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 星大輔, 福家真理那, 樽味孝, 菅原順, 渡部厚一
2. 発表標題 水中運動中における換気応答の変化.
3. 学会等名 SATテクノロジーショーケース, つくば
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Daisuke Hoshi, Marina Fukuie, Tatsuya Hashitomi, Takashi Tarumi, Jun Sugawara, Koichi Watanabe.
2. 発表標題 Respiratory Response To Underwater And Land-based Cycling At The Matched Oxygen Uptake.
3. 学会等名 Experimental Biology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Hoshi, Marina Fukuie, Tatsuya Hashitomi, Takashi Tarumi, Jun Sugawara, Koichi Watanabe.
2. 発表標題 Influence of Different Exercise Intensities on the Respiratory Function and Breathing Pattern during Underwater Cycling.
3. 学会等名 American College of Sports and Medicine (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuya Hashitomi, Daisuke Hoshi, Marina Fukuie, Tarumi Takashi, Jun Sugawara, Koichi Watanabe.
2. 発表標題 Effect of A Low- to-Moderate Intensity Water Exercise on The Prefrontal Cortical Activity.
3. 学会等名 American College of Sports and Medicine (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 星 大輔, 福家 真理那, 東本 翼, 樽味 孝, Wenxing Qin, 菅原 順, 渡部 厚一
2. 発表標題 水中運動における肺気量分画の変化
3. 学会等名 2024 SATテクノロジー・ショーケース
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Daisuke Hoshi, Marina Fukuie, Tsubasa Tomoto, Takashi Tarumi, Jun Sugawara, Koichi Watanabe
2. 発表標題 Operating lung volume shifts downward during underwater exercise in young healthy adults
3. 学会等名 The American College of Sports Medicine 2023 Annual Meeting, Denver (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関