

令和 2 年 9 月 24 日現在

機関番号：34404

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K01713

研究課題名(和文) 肢体不自由者の水泳パフォーマンス向上のための水中バランス評価と有浮力水着の活用

研究課題名(英文) Evaluation of underwater balance and utilization of swimsuit and buoy with buoyancy to improve swimming performance of physically disabled persons

研究代表者

若吉 浩二 (Wakayoshi, Kohji)

大阪経済大学・人間科学部・教授

研究者番号：30191729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)： 肢体不自由者である水泳選手における縦軸方向と横軸方向における重心位置と浮心位置を調べたところ、健常者と同じく縦軸方向における浮心位置は重心位置よりも頭側に存在していた。また、下肢欠損者は上肢欠損者よりも重心浮心間距離が近かった。よって肢体不自由の欠損部位により、水中バランスのとり方に影響することが判明した。

水中バランスを改善するための有浮力水着と有浮力ブイでは、装着することで双方とも浮力が増し、浮心重心間距離が短縮することが認められた。しかしながら高速泳時では、有浮力水着のみにパフォーマンス向上に効果があることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

肢体不自由者においても、健康維持増進のためには日常生活に運動を取り入れることが重要である。水中運動は浮力の影響を受けることから、肢体不自由者において全身運動の実施が容易となる。

しかしながら、水中では、身体のバランスが取りづらいこと、呼吸の確保が困難であることの二つの問題がある。その解決に向けて、有浮力水着およびブイの開発に取り組んだところ、それらの装着によって水泳がより安全に優しく取り組める可能性が示された。特に有浮力ブイは肢体不自由者にとって装着が容易であり、左右の浮力も調整できることから、活用が期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to investigate the longitudinal and transverse axes position of center of-mass (LCM, TCM) and center-of-buoyancy (LCB, TCB) in physically impaired swimmers. In nine out of ten participants, LCB was located superior to LCM. However, the distance between LCB and LCM was closer in the lower limb amputee participants than in the upper limb amputee participants. Therefore, it was found that in physically impaired swimmers, the difference in the defect site of the upper or lower limbs affects the underwater balance determined by the positional relationship between CM and CB.

Another purpose of this study is to verify the effectiveness of a buoyant swimsuit (BS) and a buoyant buoy (BB). it was found that wearing BS and BB shortened the distance between CM and CB and improved the underwater balance. However, it was revealed that only BS were effective in improving performance when swimming at high speed.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：水泳 肢体不自由者 有浮力水着 有浮力ブイ パフォーマンス向上 浮力・浮心重心間距離 血中乳酸カーブテスト

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 研究 : 肢体不自由者の水泳選手における重心位置と浮心位置の測定

肢体不自由者においても、健康維持増進のためには日常生活に運動を取り入れることが重要である。水中運動は浮力の影響を受けることから、肢体不自由者において全身運動の実施が容易となる。しかしながら、水中では、身体のバランスが取りづらいこと、呼吸の確保が困難であることの二つの問題がある。

一般的に身体が水中に入った時、身体の質量中心である重心と水中に入った時の浮力の中心である浮心の位置は異なる。通常、浮心位置は頭側に、重心位置は尾側にそれぞれ位置するため、泳者が水中で水平姿勢を保持した場合は、下肢が沈降する (McLean & Hinrichs, 1998)。一般的に健常者において、頭部と足部を通る軸上では、重心は浮心よりも足に近い位置にある。そのため、重心と浮心の距離が大きいくほど脚を下向きに回転させる力が大きくなり、泳者が水中で水平な姿勢を維持しにくくなるのが先行研究で明らかにされている。しかしながら、四肢のいずれかの欠損がある、また麻痺を有し身体を自由に動かすことのできない肢体不自由者を対象とした水中バランスを評価した研究はみられない。

#### (2) 研究 : 有浮力水着および有浮力ブイ着用に伴う水中での浮力・浮心重心間距離と水泳パフォーマンスに及ぼす影響

泳者の水中での水平姿勢には、浮心位置は頭側に、重心位置は尾側にそれぞれ位置するため、浮心位置と重心位置の距離 (以下、浮心重心間距離と略す) は下肢沈降トルクと関連する。よって浮心重心間距離が大きいくほど下肢が下がることから結果的に前方投影面積も大きくなることから、抵抗が大きくなり泳パフォーマンスは低下する。逆に、泳者が浮力の高い水着 (有浮力水着) を着用すれば、もしくは浮力のあるブイ (有浮力ブイ) を腰部左右に装着すれば、浮心重心間距離が短縮されて姿勢がより水平へと近づき、その結果として泳パフォーマンスが向上するもしくは効果的に水泳を習得できるかもしれない。特に、肢体不自由者において、水着の着用は困難をきたす可能性が高いことから、着脱容易なブイにおいてそのような効果が期待できれば、水泳の普及に有効であると考えられる。

### 2. 研究の目的

#### (1) 研究

けのび姿勢は水泳中において最も一般的な姿勢である。けのび姿勢を水平方向に維持することは、形状抵抗を減らし効率よく泳ぐために重要なことである。けのび姿勢で水平姿勢を維持するためには縦軸方向における重心浮心間距離を短くすることが重要である。しかし、これまでの研究は健常者を対象としており身体は左右対称であることを前提として行われている。肢体不自由者 (四肢欠損・麻痺) のように左右が非対称である者にとっては、重心浮心間距離は縦軸方向だけではなく横軸方向にも発生する可能性がある。そのため身体障害者の重心浮心間距離を考える場合は、縦軸方向だけではなく横軸方向についても考えなければならない。そこで、本研究の目的は、肢体不自由者の水泳選手における縦軸方向と横軸方向における重心位置 (LCM, TCM) と浮心位置 (LCB, TCB) を調べることであった。この研究で得られた知見は、体のバランスを評価する指標になるとともに、泳能力向上のための有益な情報になると考える。

#### (2) 研究

水の密度は空気の約 800 倍であることから、水中での抵抗は空気中での抵抗よりもはるかに大きい。物体が水中を移動する際に速度と抵抗には指数関数的な関係がみられ、ヒトが泳ぐ際の抵抗は泳速の 2 乗 (Toussaint et al., 1988) もしくは 3 乗 (Narita, et al., 2017) に比例するといわれている。それゆえ、水泳における抵抗は、泳者のパフォーマンス向上にも影響する重要な要因といえる。

本研究では、膝上までの大腿部を覆う形状で浮力を持つ水着の着用 (有浮力水着) および高い浮力を有するブイ (有浮力ブイ) が、水中水平姿勢の浮心および重心位置と泳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。

### 3. 研究の方法

#### (1) 研究

研究参加者は、過去に日本パラ水泳選手権に参加したことのある 10 人のエリートパラ水泳選手が本研究に参加した。測定は、参加者が 3 つのセンサがついたプラットフォーム (フォーアシスト社製) 上にストリームライン姿勢を取り、うつ伏せで寝た状態で行った (図 1)。陸上で重心測定を行った後、被験者とプラットフォームを完全水没させて浮心測定を行った。参加者は重心測定と浮心測定中、同じ姿勢を維持するように指示された。浮心の測定中、被験者はシュノーケルを用いて通常呼吸を行った。



図 1 測定装置

呼吸によって重心位置や浮心位置は変動するので、三呼吸分の値を平均し分析した。重心と浮心の計算はセンサから算出された値を用いて計算した。

LCMとTCMはそれぞれ、縦軸方向および横軸方向におけるテンションセンサ1からの重心までの距離を示している。LCBとTCBはそれぞれ、縦軸方向および横軸方向におけるテンションセンサ1からの浮心までの距離を示している。重心もしくは浮心がテンションセンサ1に左側に存在している時、値はプラスと表現されている。

## (2)研究

一般練習用と有浮力水着との実験では、被検者は大学男子競泳選手8名とした。また、一般練習用と有浮力ブイとの実験では、被検者は大学男子競泳選手13名とした。泳パフォーマンスへの影響を検討するために、けのび姿勢における重心位置、浮力および浮心位置と、クロールによる漸増速度泳(カーブテスト)の血中乳酸値および泳速度がそれぞれ測定された。

身体重心位置の測定は、リアクションボード法(Hay, 1993)を用いて、陸上における仰臥位上肢挙上姿勢にて行った。浮力および浮心位置の測定は、すでに複数の研究(若吉ら, 2012; Watanabe et al., 2014)で用いられている専用測定システムを用いた。このシステムを用いて、被検者は全身を浸水させて、手は水面上に設置されたフレームより吊り下げられたバーを握り、足部も同様のフレームより吊り下げられた板に足首を90度に背屈した状態で固定された。また、換気量を測定するために、被検者は先端にフローセンサが設置されたシュノーケルを介して呼息と吸息を5秒ずつ行うようにコントロールされた呼吸を6周期分を行った。水平姿勢より得られた指標のうち、換気量、浮力および浮心重心間距離は呼吸3周期分の値の平均値を算出した。また、浮力は、換気量の影響を受ける。そこで、先行研究と同様に、換気量、浮心重心間距離は、換気量に伴う浮力の変化を正規化し、浮力が0となる時点での値(中性浮力)を用いて算出した(Watanabe et al., 2017)。

カーブテストは、200mクロール泳を4回行った。泳速度の設定は、200m自己ベスト記録の平均泳速度(泳記録を泳距離で除して算出)を基準として、1回目は80%、2回目は85%、3回目は90%とし、一定の泳速度に維持させた。4回目は、ペース配分を気にすることなく、泳者自身の最大努力とした。血中乳酸濃度を測定するための採血は専用計測器(ラクテートプロ2、アークレイ社製)を用いて1から3回目は試技1分後、4回目は1分後から2分おきに最大値が確認されるまで行った。そのため4回目の分析対象とした乳酸値は最大値とした。また、カーブテストの結果から、 $4\text{mmol/l}$ をまたぐ2つの泳速度と血中乳酸濃度より $4\text{mmol/l}$ に相当する泳速度( $V@OBLA$ )を算出した。

## 4. 研究成果

### (1)研究

上肢欠損者における長軸方向および横軸方向の平均の重心浮心間距離はそれぞれ $13.0 \pm 4.0\text{mm}$ と $1.9 \pm 0.4\text{mm}$ であった。下肢欠損者における長軸方向および横軸方向の平均の重心浮心間距離はそれぞれ $2.6 \pm 1.8\text{mm}$ と $1.1 \pm 0.8\text{mm}$ であった。身体麻痺者における長軸方向および横軸方向の平均の重心浮心間距離はそれぞれ、 $9.2 \pm 10.2\text{mm}$ と $0.8 \pm 1.2\text{mm}$ であった。

本研究では、身体障害者水泳選手における長軸方向と横軸方向における重心及び浮心の測定を行った。体肢欠損参加者のLCBはLCMより頭側に存在していた。Nara et al., (2015)は、健常者におけるLCBとLCMの計測を行い、全被験者においてLCBはLCMよりも頭側に存在していたことを報告した。また、縦軸方向における重心浮心間距離の幅は $5\text{-}16.9\text{mm}$ であったとしている。本研究において、上肢欠損者の縦軸方向における重心浮心間距離の平均は $13.0 \pm 4.0\text{mm}$ であり、健常者の値と大きな違いはなかった。一方で、下肢欠損者の縦軸方向における重心浮心間距離の平均は $2.6 \pm 1.8\text{mm}$ であり、健常者よりも短かった。これらの結果から、体肢欠損者においても、けのび姿勢中に下肢を沈めるトルクが発生すると考えられる。その中で、下肢欠損者は上肢欠損者や健常者よりも、重心浮心間距離が短かく下肢を沈めるトルクが小さくなるため、けのび姿勢を取りやすいと考えられる。さらに、両下肢欠損者は片下肢欠損者よりも重心浮心間距離が短かった。Ae et al. (1992)は男女の体の部位の重さを報告しており、下肢は男女それぞれ17.2%と18.7%を占めるとしている。このことを考慮すると3名の参加者において、それぞれ体重の18.7%、17.2%、37.4%を失っていると予測される。我々の結果は、下肢の欠損部位が大きくなれば大きくなるほど、縦軸方向における重心浮心間距離は短くなることを示している。麻痺参加者についてはばらつきが大きく、縦軸方向における重心浮心間距離は一定の関係性を示さなかった。5人中4人の参加者は縦軸方向における浮心位置が重心よりも頭側に存在していたが、1人の参加者は縦軸方向における重心位置が浮心位置よりも頭側に存在していた。この参加者は麻痺だけでなく体幹機能障害も有していたため、体幹及び下肢の筋肉が萎縮してしまっており、結果として重心位置が頭側に寄ってしまっていた可能性がある。

横軸方向における重心浮心間距離は全参加者の幅が $-0.9\text{-}2.2\text{mm}$ であり、欠損や麻痺の程度によって、あまり一定の関係性を示さなかった。さらに横軸方向の重心浮心間距離は縦軸の重心浮心間距離よりも小さかった。これは、重心から腕や足までの距離が横軸方向よりも縦軸方向のほうが長いからであると考えられる。そのため、左右非対称の体をしている身体障害者でも、横軸方向より縦軸方向のほうが重心浮心間距離は大きくなると考えられる。これらのことから、身体障害者がけのび姿勢をとった時、体を回転させるトルクは横方向よりも縦方向の方が大きく発生すると示唆される。

本研究の結果から、下肢欠損者の縦軸方向における重心浮心間距離は上肢欠損者や健常者よりも短いことが明らかとなった。さらに下肢の欠損具合が大きくなれば、縦軸方向の重心浮心間距離は短くなることが示された。これらのことから、下肢欠損者は上肢欠損者や健常者よりもけのび姿勢を取りやすいと示唆される。一方で、横軸方向における重心浮心間距離は縦軸方向のその半分以下であり、体を回転させるトルクは縦軸方向の方が横軸方向よりも大きく発生することが示唆される。

## (2) 研究

図2は、ある被検者の練習用水着着用時と有浮力水着着用時の浮力測定における呼吸6周期の換気量に伴う手部および足部における鉛直方向の荷重の変化を示したものである。本研究においても先行研究(Watanabe et al., 2017)と同様に、すべての被検者において換気量と荷重は同調して変化することが明らかとなった。また、手、足および手+足にかかる荷重と肺換気量の回帰式の切片はいずれも有浮力水着の方が低値を示した。有浮力水着着用時の浮心重心間距離は、呼吸3周期分の平均値でみて中性浮力でも、いずれも練習用水着着用時よりも2mm程度有意に短かった。

図3は、練習用水着と有浮力ブイ着用時の中性浮力時における浮心重心間距離の変化である。有浮力ブイは5N、10Nおよび15Nの3つの異なる浮力で測定を行った。その結果、浮力の増加に伴い、浮心重心間距離が有意に短縮することが判明した。

それゆえ、本研究で使用した有浮力水着および有浮力ブイを着用することで、下肢が沈みづらくなって泳姿勢がより水平に保持しやすくなり、前方投影面積と密接な関係にある圧力抵抗を軽減させ泳効率を高めることの可能性が示唆された。

図4は、練習用水着と有浮力水着着用時の泳速度と血中乳酸値の変化を比較したものである。有浮力水着着用時には、練習用水着と比べ、泳速度に対して全体的に低値を示した。また、OBLA時および最大努力泳時において、有浮力水着は有意な高値を示した。

図5は、練習用水着と有浮力ブイ(10N)着用時の泳速度と血中乳酸値の変化を比較したものである。有浮力水着とは異なり、有浮力ブイは、練習水着着用時よりも泳速度に対して高い血中乳酸値を示した。また、最大努力時の泳速度も、有浮力ブイ着用時には有意な低値を示した。

ラバー製のウェットスーツの効果を検証した研究では、素材自体の浮力に加えて皮膚と水着内にとどまっている空気による浮力の増大が、最大下運動強度のパフォーマンスを有意に向上させることが報告されている(Tomikawa et al., 2008; Toussaint et al., 1989)。本研究で用いたラバー製の有浮力水着では、先行研究と同様に水着内にとどまっている空気による浮力の増大がみられたかどうかは明らかにできないが、OBLA速度が有意に向上している結果から、最大下運動強度でのパフォーマンス改善に資する点は先行研究と合致した。本研究で用いた有浮力水着は下肢沈降トルクを有意に減少させ、OBLA泳速度も有意な向上が確認された。それゆえ、有浮力水着の着用により、泳者は通常の練習水着着用時と比較して水泳時の姿勢が水平になり、その結果として前方投影面積および自己推進時抵抗が減少することで、ある一定の最大下泳速度におけるエネルギー消費量の減少を招来することが示唆された。

一方、有浮力ブイは、有浮力水着に比べ、泳速度と血中乳酸値の関係は正反対となった。この原因として、フィット性に劣り前方投影面積が増大することで、抵抗が大きくなったこと、さらには選手の感想からストローク中に手がブイに当たり泳ぎづらくなることといった理由が考えられる。

四肢の一部に麻痺や欠損などのある肢体不自由者を対象に、本実験で用いた有浮力水着や有浮力

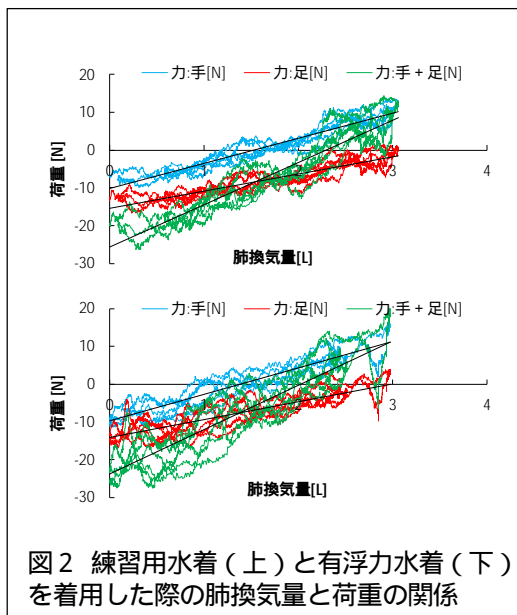


図2 練習用水着(上)と有浮力水着(下)を着用した際の肺換気量と荷重の関係

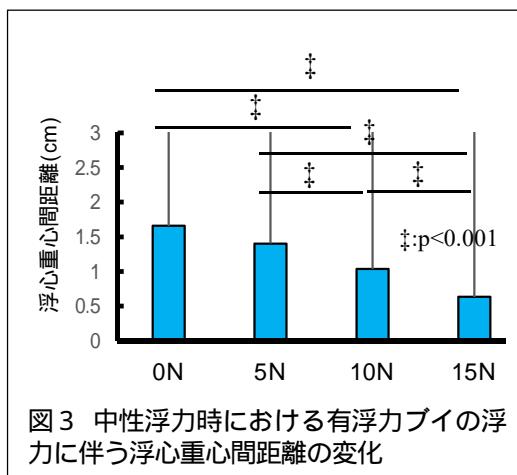


図3 中性浮力時における有浮力ブイの浮力に伴う浮心重心間距離の変化

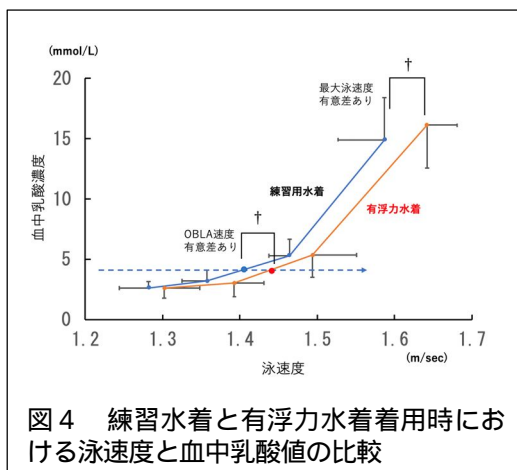


図4 練習水着と有浮力水着着用時における泳速度と血中乳酸値の比較

ブイの活用方法を検討したところ、以下のようにまとめられる。

1. 有浮力水着および有浮力ブイとも着用することで、浮力が得られ、かつ浮心重心間距離が短縮するので、安全に水平姿勢を取ることができる。
2. 有浮力水着は、より競技思考の高い障がい者水泳選手が低抵抗姿勢を身に付けるためのトレーニングギアとして活用できる。
3. 有浮力ブイは、装着も容易であることから、初心者もしくは愛好者の水中での安全確保と水泳習得の効果的な活用に有効である。

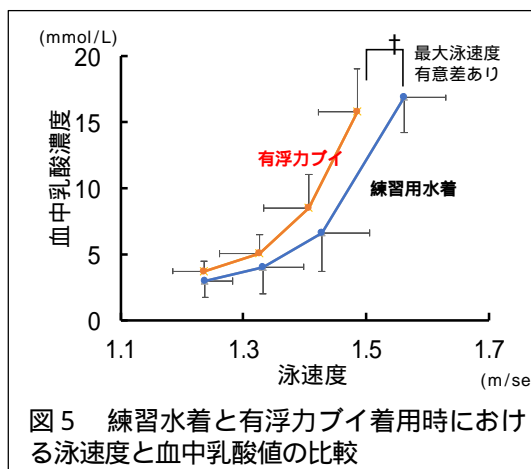


図5 練習水着と有浮力ブイ着用時における泳速度と血中乳酸値の比較

## 文献

- Ae, M., Tang, H., Yokoi, T. (1992) Estimation of inertia properties of the body segments in Japanese athletes. *Society of biomechanisms Japan*, 23-33.
- Hay, J.G. (1993) *The biomechanics of sports technics*. 4th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- McLean, S. P. & Hinrichs, R.N. (1998) Sex differences in the centre of buoyancy location of competitive swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 16(4), 373-83. <https://doi.org/10.1080/02640419808559365>
- Nara, R., Ichikawa, H., Nagano, Y., Ikeda, Y., Sato, D., Baba, Y., Shimoyama, Y. (2015) Effects of distance between center of mass and center of buoyancy on gliding performance and passive drag. *The Japan journal of coaching studies* 29, 51-58.
- Narita, K., Nakashima, M., & Takagi, H. (2017) Developing a methodology for estimating the drag in front-crawl swimming at various velocities, *Journal of Biomechanics*, 21(54), 123-128. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.01.037>
- Tomikawa, M., Shimoyama, Y. & Nomura, T. (2008) Factors related to the advantageous effects of wearing a wetsuit during swimming at different submaximal velocity in triathletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11, 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.02.005>
- Toussaint, H. M., Bruinink, L., Coster, R., de Looze, M., van Rossem, B., Van Veenen, R. & de Groot, G. (1989) Effect of a triathlon wet suit on drag during swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 21(3), 325-328.
- Toussaint, H. M., Groot, G. de, Savelberg H. H. C. M., Vervoorn, K., Hollander, A. P. & Ingen Schenau, G. J. van. (1988) Active drag related to velocity in male and female swimmers. *Journal of Biomechanics*, 21(5), 435-8, [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(88\)90149-2](https://doi.org/10.1016/0021-9290(88)90149-2)
- 若吉浩二、渡邊泰典 (2012) 水泳選手における腹式呼吸トレーニングは浮心位置を変えることができるか? *体力科学*, 61(6), 673.
- Watanabe, T., Wakayoshi, K., Nomura, T., Tachi, M. (2014) The effect of breathing on the distance between center of buoyancy and center of mass in competitive swimmers *CRNOGORSKA SPORTSKA AKADEMIJA, "SPORT MONT"*, XII (40-41-42), 98-104.
- Watanabe, Y., Wakayoshi, K., Nomura, T. (2017) New evaluation index for the retainability of a swimmer's horizontal posture *PLOS ONE* 12 (5) e0177368.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Horai T., Tachi M., Ohnuma H., and Wakayoshi K.	4. 巻 23th
2. 論文標題 Center of mass and center of buoyancy in physically impaired swimmers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 XIII th International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming Proceedings	6. 最初と最後の頁 332-336
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 若吉浩二、森山進一郎、渡邊泰典
2. 発表標題 有浮力水着着用が水中バランスおよび血中乳酸カーブテストに及ぼす効果
3. 学会等名 日本コーチング学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宝来毅，立正伸，若吉浩二
2. 発表標題 肢体不自由者の泳能力向上のための水中バランス評価法の確立
3. 学会等名 第72回日本体力医学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮本知弥，宝来毅，立正伸，若吉浩二
2. 発表標題 肢体不自由者の泳姿勢における重心・浮心位置の二軸方向測定システムのシミュレーション実験
3. 学会等名 2017年日本水泳水中運動学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊泰典, 若吉浩二
2. 発表標題 浮力・浮心重心間距離が水中牽引時抵抗に及ぼす影響
3. 学会等名 日本コーチング学会第28回大会兼第10回日本体育学会体育方法専門領域研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊泰典, 森翼, 若吉浩二
2. 発表標題 大学女子水球選手の移動手段別にみた牽引泳によるパワー評価法の検討
3. 学会等名 2016年度日本水泳・水中運動学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 特許権	発明者 若吉浩二	権利者 住友ゴム工業株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-25986	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究協力者	立 正伸  (Tachi Masanobu)  (20392699)	奈良教育大学・保健体育講座・准教授   (14601)	
研究協力者	渡邊 泰典  (Watanabe Yasunori)  (50638418)	仙台大学・体育学部・講師   (31301)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	森山 進一郎 (Moriyama Shinichiro) (60386307)	東京学芸大学・教育学部・准教授  (12604)	
研究協力者	宝来 毅 (Horai Takeshi) (90775777)	鈴鹿工業高等専門学校・教養教育科・講師  (54101)	
研究協力者	大沼 勇人 (Ohnuma Hayato) (10762239)	関西福祉大学・教育学部・講師  (34525)	