

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04064

研究課題名（和文）水泳水中運動における新たな流体力学的解析法の開発とメカニズムの解明

研究課題名（英文）Development of a new hydrodynamic analysis method for swimming underwater motion and elucidation of its mechanism

研究代表者

高木 英樹（TAKAGI, Hideki）

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：80226753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,000,000円

研究成果の概要（和文）：水泳水中運動は、陸上では得られない運動効果が期待できるわけだが、実はヒトが水中で運動を行った場合、水から受ける力がどのように、どれくらい生体に作用するのか？十分明らかになっていない。そこで本研究では、いくつかの最新流体力学的解析手法を組み合わせ、これまで困難とされてきた、水泳水中運動中の流体力の発生メカニズムを解明することを目的とした。その結果、これまでの準定常状態を前提とした発生機序とは異なり、渦の発生による非定常な流れが、手背部や足背部表面における急激な圧力低下（負圧）を惹起することにより、大きな流体力が発揮されることが初めて明らかにされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに独自に開発してきた水泳水中運動における先端的な計測技術を融合し、新たな方法論を確立することを目指した。学術的意義としては、ヒトの水泳水中運動について、流体力学、バイオメカニクス、計算科学などのさまざまな学問領域の知見を統合することより、新たな学際領域の創成へとつながることが期待される。また社会的意義としては、老若男女を問わず、競技、リハビリテーション、リハビリ等、幅広い目的で実施される水泳水中運動において、生体への負荷量を正確に定量できる方法論を確立することで、水中リハビリテーションにおける運動処方指針、あるいはトップスイマーの傷害予防などの指針となる知見を得ることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Swimming in water is expected to provide exercise benefits that cannot be achieved on land, but how and to what extent do the forces received from the water act on the organism when humans exercise in water? However, how and to what extent the forces received from the water act on the body when humans exercise in water is not fully understood. The aim of this study was to elucidate the mechanism of hydrodynamic force generation during swimming, which has been considered difficult, by combining several state-of-the-art hydrodynamic analysis methods. As a result, it was shown for the first time that, in contrast to the generation mechanism assuming a quasi-steady state, the unsteady flow due to vortex generation induces a sudden drop in pressure (negative pressure) on the back surfaces of the hands and feet, resulting in a large hydrodynamic force.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：水泳 流体力学 バイオメカニクス 流れの可視化 コンピュータシミュレーション 最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水泳水中運動の特徴として、陸上と同一の運動をしても生体への影響は大きく異なる。異なるが故に陸上では得られない運動効果が水中での運動には期待できるわけだが、実はヒトが水中で運動を行った場合、水から受ける力がどのように、どれくらい生体に作用するのか？十分明らかになっていない。そこで本研究プロジェクトでは、いくつかの最新流体力学的解析手法を組み合わせ、これまで困難とされてきた、水泳水中運動中の流体力の発生メカニズムを解明するとともに、生体への負荷量を正確に定量できる方法論を確立し、水中リハビリテーションにおける運動処方指針、あるいはトップスイマーの傷害予防などの指針となる知見を得ることを目指す。

2. 研究の目的

本研究プロジェクトの目的は、これまでに独自に開発をしてきた水泳水中運動における先端的な計測技術を融合・統合し分析対象を同時かつ多角的に解析して、水泳水中運動中の流体力の発生メカニズムを解明することである。本目的を達成するため、理論的には水泳水中運動するヒトの人体表面に作用する全圧力分布と全摩擦分布について動作を妨げることなく経時的に計測し、さらに人体周りの流れ場における流速ベクトルおよび渦度を三次元的に解析できれば良い。しかし実際にはそのような計測を実現することは不可能であるため、実現可能な方法論、具体的には1) 水泳人体シミュレーションモデル (SWUM)、2) 圧力分布計測法、3) 粒子画像流速測定法 (PIV) を組み合わせ、水泳水中運動中に発生する流体力を定量し、その発生メカニズムの解明を試みる。

3. 研究の方法

本研究プロジェクトで用いた3つの分析方法について概説する。

- (1) 水泳人体シミュレーションモデル (SWUM) は、人体を21個の円錐台セグメントによってモデリングし、各セグメント間に相対運動(関節角)を与えて、流体力と身体の慣性力に関する運動方程式から、身体の絶対運動を求めるコンピュータシミュレーション手法である。本方法の利点として、複雑な流体方程式を解くことなく、身体に作用する流体力や関節間トルク・パワーを計算することが可能であること。さらに、目的関数を設定することで、泳動作の最適化シミュレーションを行うことができる点にある。
- (2) 圧力分布計測法は、泳者の身体部位、例えば手部、足部などに小型防水圧力センサー(PS-05KC, 協和電業)を複数貼付し、泳運動中の各部位の圧力分布を実測する。その圧力分布から代表値となる圧力を計算し、その値に各部位の代表面積を乗じることにより、流体力を推定する方法である。本分析方法の利点は、非定常な流れの影響を反映させ、リアルタイムで流体力を推定できる点にある。また三次元モーションキャプチャシステム (VENUS 3D, ノビテック) と同期させて分析することで、進行方向に作用する流体力、つまり推進力を定量することが可能となる。
- (3) 粒子画像流速測定法(PIV)は、ヒトが泳運動を行う流体中にマイクロバブルを放出し、そこにレーザーを照射して得られた粒子画像を解析することで、泳者周りの流れ場における速度ベクトルや渦度を計測する方法である。この方法を用いることで、通常目に見えない水流のふるまいが可視化され、流体力が発生する機序を解析することが可能となる。

4. 研究成果

本研究プロジェクトで実施された実験の結果を統合した研究成果の概要を示す。

- (1) 図1にSWUMにより6ビートキックを用いたクロール泳動作を最適化した場合のストローク頻度(SF)とストローク長(SL)、泳速度(v)、上肢推進力(Upper limb)、下肢推進力(Lower limb)、パワー(Power)、効率(Efficiency)との分析結果を示す。図1(a)より、SFの増加に伴って、SLは直線的に減少する一方 v は増加するが、SF=1.1Hz付近で v はピークに達し、さらにSFが増加すると v は増加せず、かえって減少した。このような関係性は、実際のスイマーを対象とした実験結果(Koga, et al., 2021, 2020)でも観察された。次に図1(b)より、上肢および下肢による推進力に関しては、全てのSF範囲において、上肢は推進力として作用しているが、逆に下肢はほぼ推進力として作用していないことが明らかとなった。また図1(c)より、発揮されるパワーはSFの増加に伴って直線的に増加するが、効率についてはSF=0.77Hz時に最高値23.9%を示したが、それ以上にSFが増加すると効率は低下することが初めて明らかにされた。
- (2) 図2に圧力分布計測法を用いて、ストローク頻度(SF)を6段階(全力泳時の70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 120%)で変化させた場合のストローク長(SL)、泳速度(v)、手部速度(V_{hand})、手部迎角(θ)、圧力値、流体力(F_{hand})、推進力($Thand$)の変化を示す。図2(a)より、 v はSF=100%でピークに達し、SFが110%、120%と増加するに

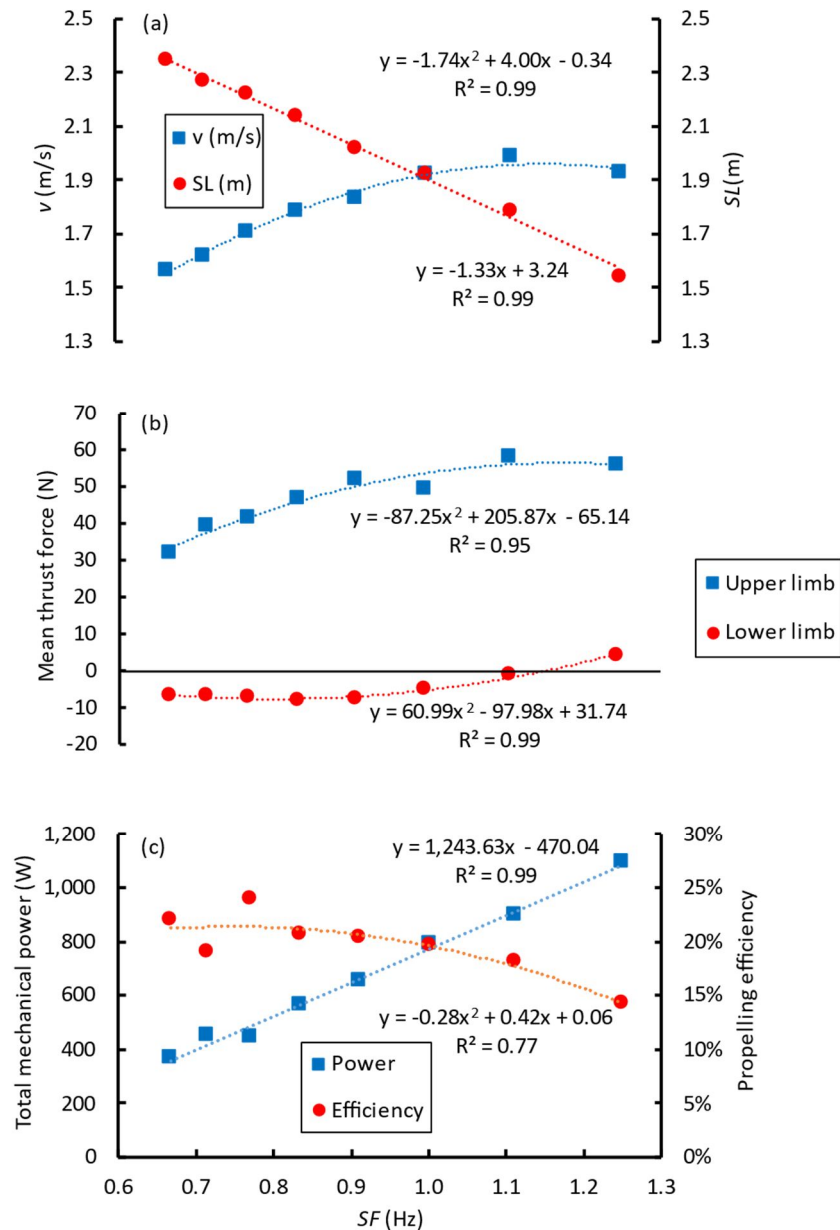


図 1 SWUM により 6 ビートキックを用いたクロール泳動作を最適化した場合のストローク長(SL), 泳速度(v), 上肢推進力(Upper limb), 下肢推進力(Lower limb), パワー(Power), 効率(Efficiency)とストローク頻度(SF)の関係(Takagi, et al., 2021)

つれてプラトーもしくはわずかに減少していた。一方、SLはSFの増加とともに直線的に減少した。これらの結果は、図1に示したSWUMシミュレーション結果とよく一致している。次に図2(b)より、ストローク局面を3つに区分した場合、プッシュ局面において、手部速度はSF=70%~80%ではあまり変化せず、90%以上で直線的に増加した。また図2(c)に示す手部迎角は、SF=100%までは3局面いずれも明確な増減傾向を示さなかったが、プッシュ局においては100%を超えると減少する傾向にあった。図2(d)は、手掌(Palm side)と手背(Back side)の圧力値の絶対値を示している。手掌の圧力は、SF=70%~100%SFにかけてわずかに増加しているが、手掌よりも手背の圧力の低下が顕著である。図2(e)では、流体力とその推進方向成分である推進力の両方がSF=70%~90%まで増加し、100%でピークに達した後、110%~120%まで減少した。以上の結果から、泳者は泳速度を増加させるためにSFを増加させる必要があるが、あるSFを超えると適切な手部迎角を維持できなくなり、手掌の圧力が低下してしまい、結果として圧力差と流体力も低下するため、泳速度が停滞すると考えられる。

- (3) 粒子画像流速測定法(PIV)を用いた流れの可視化結果および上記の実験結果より、流体力の発揮メカニズムをまとめると、一般的には「水をつかむ」とか「水を押し進む」という表現が用いられるが、実際には手部の適切な迎角を保って、移動速度を増加させると、手背側に渦が発生し、それが圧力低下を引き起こし、手掌と手背の圧力差が増大することで、手部に作用する流体力が発生すると解釈される。

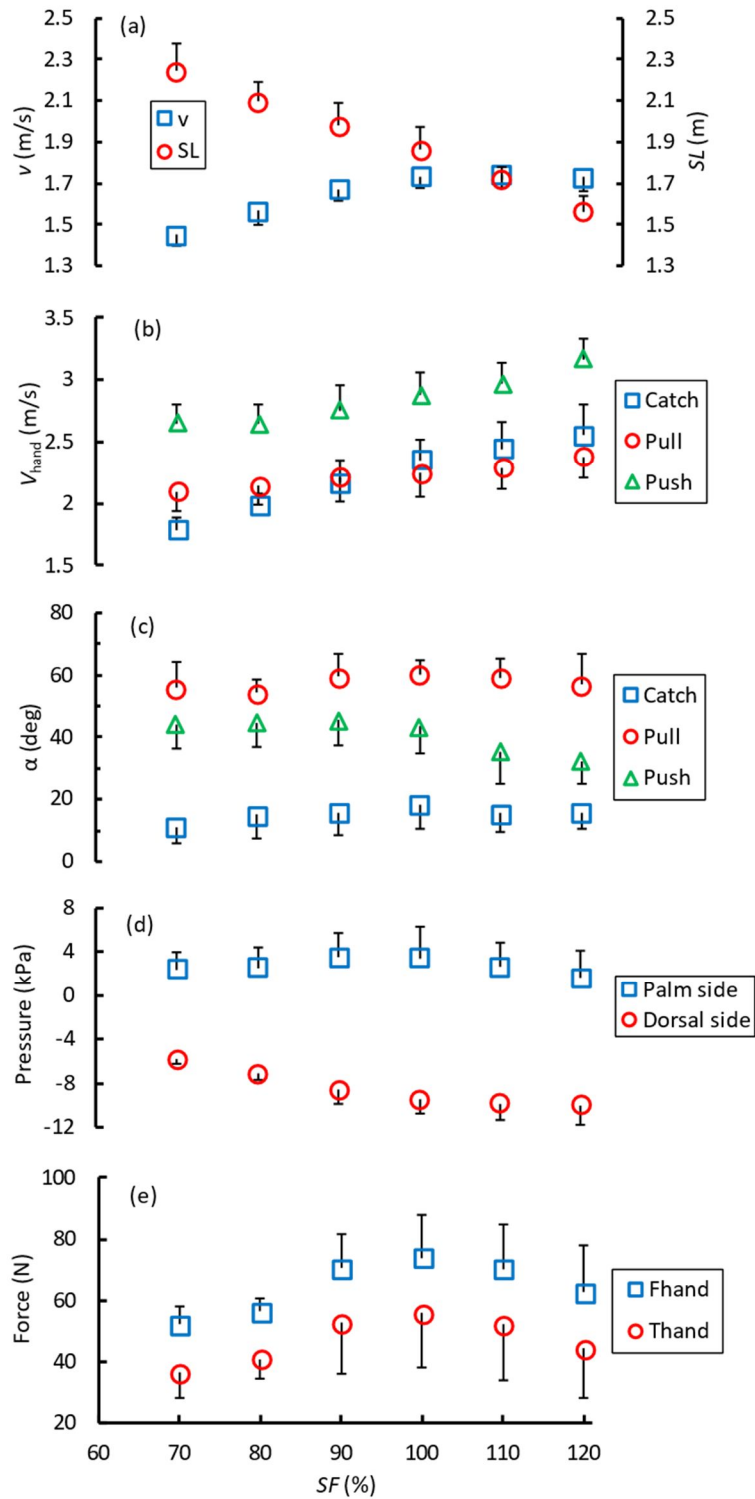


図 2 圧力分布計測法を用いて、ストローク頻度(SF)を6段階(全力時の70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 120%)で変化させた場合のストローク長(SL), 泳速度(v), 手部速度(V_{hand}), 手部迎角(α), 圧力値, 流体力(Fhand), 推進力(Thand)の変化(Takagi, et al., 2021)

5. 関連業績

- (1) Shimojo, H., Yamashiro, S., Ichikawa, H., Shimoyama, Y., Tsunokawa, T., Sengoku, Y., Takagi, H.: Wake flow visualization around swimmer's foot and thrust force estimation at an indoor swimming pool. *XIVth International*

Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming Proceedings, 501-504, 2023.

- (2) Nakazono, Y. , Shimojo, H. , **Takagi, H.** , Sengoku, Y. , Tsunokawa, T. : Underwater undulatory swimming propulsion mechanism of left lower limb deficient swimmer using piv method. *XIVth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming Proceedings*, 353-358, 2023.
- (3) Nakashima, M. , Tsuchiya, S. , Toyoda, R. , Kuramoto, A. , Koga, D. , **Takagi, H.**: Athlete-specific optimizing simulation of armstroke in crawl swimming considering individual shoulder joint torque characteristics, *XIVth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming Proceedings*, 349-352, 2023.
- (4) Yamakawa, K. K. , Homoto, K. , Nakazono, Y. , Tsunokawa, T. , **Takagi, H.** , Sengoku, Y.: Relationship between fluid force acting on a foot and muscle activity of lower limb in breaststroke kicking. *XIVth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming Proceedings*, 5, 2023.
- (5) Yamakawa, K.K., Shimojo, H., **Takagi, H.**, Sengoku, Y.: Changes in kinematics and muscle activity with increasing velocity during underwater undulatory swimming. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.829618>, 2022.
- (6) Koga, D., Tsunokawa, T., Sengoku, Y., Homoto, K., Nakazono, Y., **Takagi, H.**: Relationship between hand kinematics, hand hydrodynamic pressure distribution and hand propulsive force in sprint front crawl swimming. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, DOI: 10.3389/fspor.2022.786459, 2022.
- (7) Sanders, R., **Takagi, H.**, Vilas-Boas., J.P.: How technique modifications in elite 100m swimmers might improve front crawl performances to podium levels: Swimming 'chariots of fire' . *Sports Biomechanics*, 1-20, DOI: 10.1080/14763141.2021.1998590, 2021.
- (8) **Takagi, H.**, Nakashima, M., Sengoku, Y., Tsunokawa, T., Koga, D., Narita, K., Kudo, S., Sanders, R., Gonjo, T.: How do swimmers control their front crawl swimming velocity? Current knowledge and gaps from hydrodynamic perspectives. *Sports Biomechanics*, DOI: 10.1080/14763141.2021.1959946, 2021.
- (9) Koga, D., Tsunokawa, T., Sengoku, Y., Homma, M., & Takagi, H.: Relationship between stroke frequency and hand propulsive force in front crawl. *Jpn J. Phys. Educ. Health Sport Sci.*, doi:10.5432/jjpehss.20123, 2021.
- (10) Koga, D., Gonjo, T., Kawai, E., Tsunokawa, T., Sakai, S., Sengoku, Y., **Takagi, H.**: Effects of exceeding stroke frequency of maximal effort on hand kinematics and hand propulsive force in front crawl. *Sports Biomechanics*, 1-13. doi:10.1080/14763141.2020.1814852, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Yamakawa Keisuke Kobayashi, Shimojo Hirofumi, Takagi Hideki, Sengoku Yasuo	4. 巻 4
2. 論文標題 Changes in Kinematics and Muscle Activity With Increasing Velocity During Underwater Undulatory Swimming	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Sports and Active Living	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fspor.2022.829618	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 Koga Daiki, Tsunokawa Takaaki, Sengoku Yasuo, Homoto Kenta, Nakazono Yusaku, Takagi Hideki	4. 巻 4
2. 論文標題 Relationship Between Hand Kinematics, Hand Hydrodynamic Pressure Distribution and Hand Propulsive Force in Sprint Front Crawl Swimming	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Sports and Active Living	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fspor.2022.786459	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 Sanders Ross Howard, Takagi Hideki, Vilas-Boas J. Paulo	4. 巻 -
2. 論文標題 How Technique Modifications in Elite 100m Swimmers Might Improve Front Crawl Performances to Podium Levels: Swimming 'Chariots of Fire'	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sports Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1~20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14763141.2021.1998590	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 該当する
1. 著者名 Kawai Eisuke, Gonjo Tomohiro, Takagi Hideki	4. 巻 -
2. 論文標題 Kinematic and kinetic parameters to identify water polo players' eggbeater kick techniques	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sports Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14763141.2021.1995477	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 該当する

1. 著者名 Sakai Shin, Koike Sekiya, Takeda Tsuyoshi, Sengoku Yasuo, Homma Miwako, Takagi Hideki	4. 巻 -
2. 論文標題 Kinetics of four limb joints during kick-start motion in competitive swimming	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sports Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1~19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14763141.2021.1963465	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 -

1. 著者名 Takagi Hideki, Nakashima Motomu, Sengoku Yasuo, Tsunokawa Takaaki, Koga Daiki, Narita Kenzo, Kudo Shigetada, Sanders Ross, Gonjo Tomohiro	4. 巻 -
2. 論文標題 How do swimmers control their front crawl swimming velocity? Current knowledge and gaps from hydrodynamic perspectives	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sports Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1~20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14763141.2021.1959946	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 該当する

1. 著者名 古賀 大樹, 角川 隆明, 仙石 泰雄, 本間 三和子, 高木 英樹	4. 巻 66
2. 論文標題 クロール泳におけるストローク頻度と手部推進力の関係	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 体育学研究	6. 最初と最後の頁 早期公開中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5432/jjpehss.20123	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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Shimojo, H. , Yamashiro, S. , Ichikawa, H. , Shimoyama, Y. , Tsunokawa, T. , Sengoku, Y. , Takagi, H.
2. 発表標題 Wake flow visualization around swimmer's foot and thrust force estimation at an indoor swimming pool
3. 学会等名 XIVth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakazono, Y. , Shimojo, H. , Takagi, H. , Sengoku, Y. , Tsunokawa, T.
2. 発表標題 Underwater undulatory swimming propulsion mechanism of left lower limb deficient swimmer using piv method
3. 学会等名 XIVth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakashima, M. , Tsuchiya, S. , Toyoda, R. , Kuramoto, A. , Koga, D. , Takagi, H.
2. 発表標題 Athlete-specific optimizing simulation of armstroke in crawl swimming considering individual shoulder joint torque characteristics
3. 学会等名 XIVth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamakawa, K.K., Shimojo, H., Takagi, H., Sengoku, Y.
2. 発表標題 Changes in kinematics and muscle activity with increasing velocity during underwater undulatory swimming
3. 学会等名 XIVth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田健造, 加地智哉, 高木英樹
2. 発表標題 クロール泳中の身体セグメントの姿勢・動作速度から抵抗力を考える～圧力抵抗の観点から～
3. 学会等名 日本水泳・水中運動学会2022年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中園優作, 下門洋文, 角川隆明, 仙石泰雄, 高木英樹
2. 発表標題 PIV法を用いた水中ドルフィンキックの泳速度を向上させる要因の検討
3. 学会等名 日本水泳・水中運動学会2022年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古賀大樹, 中園優作, 角川隆明, 仙石泰雄, 高木英樹
2. 発表標題 水中ドルフィンキックにおける泳速度が高い泳者の足部の流体力学的特徴
3. 学会等名 日本水泳・水中運動学会2022年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浪尾大二郎, 角川隆明, 酒井紳, 仙石泰雄, 本間三和子, 高木英樹
2. 発表標題 競泳キックスタートにおける下肢の筋活動解析&一台上動作に着目してー
3. 学会等名 日本水泳・水中運動学会2021年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中園優作, 下門洋文, 角川隆明, 仙石泰雄, 高木英樹
2. 発表標題 PIV法を用いた水中ドルフィンキックの泳速度を向上させる要因の検討
3. 学会等名 日本水泳・水中運動学会2021年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川合英介, 高木英樹
2. 発表標題 優れた巻き足技術を有する水球選手はどのように推進力を生成しているのか?
3. 学会等名 日本水泳・水中運動学会2021年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daiki Koga, Kenta Homoto, Takaaki Tsunokawa, Hideki Takagi
2. 発表標題 Hydrodynamic re-examination of underwater non-propulsive phase in front crawl
3. 学会等名 38th International Conference on Biomechanics in Sports (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	角川 隆明 (Tsunokawa Takaaki) (00740078)	筑波大学・体育系・助教 (12102)	
研究分担者	中島 求 (Nakashima Motomu) (20272669)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	
研究分担者	仙石 泰雄 (Sengoku Yasuo) (30375365)	筑波大学・体育系・准教授 (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	下門 洋文 (Shimojo Hirofumi) (50757911)	新潟医療福祉大学・健康科学部・講師 (33111)	

	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	成田 健造 (Narita Kenzo) (70836999)	鹿屋体育大学・スポーツ・武道実践科学系・講師 (17702)	
研究協力者	古賀 大樹 (Koga Daiki) (80963602)	東京工業大学・工学院・JSPS特別研究員 (12608)	

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			
ノルウェー	Norwegian School of Sport Sciences			
オーストラリア	The University of Sydney			
ポルトガル	University of Porto			