

博士論文

クロール泳における泳速度と
手部推進力および手部キネマティクスの関係

令和3年度

筑波大学大学院 人間総合科学研究科 体育科学専攻

次世代健康スポーツ科学学位プログラム

古賀 大樹

目次

I. 緒言	1
II. 文献研究.....	5
III. 研究の課題と仮説	27
1. 文献研究から抽出されたリサーチクエスチョン	27
2. 研究の課題.....	27
3. 研究の仮説.....	28
IV. データの取得と解析.....	29
1. データの取得.....	29
2. データ解析.....	34
V. 研究課題 1.....	38
V-1. 研究課題 1-1	38
1. 目的.....	38
2. 方法.....	38
3. 結果.....	42
4. 考察.....	48
5. まとめ.....	52
V-2. 研究課題 1-2.....	53
1. 目的.....	53

2. 方法.....	53
3. 結果.....	54
5. まとめ.....	65
VI. 研究課題 2.....	66
1. 目的.....	66
2. 方法.....	66
3. 結果.....	69
4. 考察.....	73
5. まとめ.....	78
VII. 総合討論.....	79
1. 泳速度と手部推進力の関係.....	79
2. 手部推進力と手部の圧力分布, 推進力比率, 手部キネマティクスの関係.....	81
3. 競技現場への提言.....	83
4. 本研究の限界と他の測定法との組み合わせ.....	87
5. 泳速度向上に向けた今後の課題.....	89
VIII. 結論.....	91
IX. 参考文献.....	92

表のタイトル一覧

Table 1 Physical characteristics, specialty and performance level of the swimmers.	39
Table 2 Mean values during one stroke cycle of each parameter.....	43
Table 3 Mean values of each parameter at three phases (glide, pull and push).....	45
Table 4 Physical characteristics, specialty and performance level of swimmers....	54
Table 5 Mean values during one stroke cycle of each parameter.....	56
Table 6 Physical characteristics, specialty and performance level of subjects.	67
Table 7 Correlation coefficient of each variable	70

図のタイトル一覧

Figure 1 Schematic diagram of the definition of the terms high / low and increase / decrease in pressure.....	vii
Figure 2 Schematic diagram of the stroke phase during front crawl swimming...	viii
Figure 3 Schematic diagram of hand propulsive force, hand resultant force, palm pressure, and dorsal pressure.	3
Figure 4 Image of a vortex in the wake at an impulsive start at a high angle of attack (Dickinson 1996).....	24
Figure 5 Experimental setting. Placement of motion capture cameras and measurement area.....	31
Figure 6 The location of the LED markers attached to the body and hands.	32
Figure 7(a) The location of the pressure sensors and the LED markers attached to the hands. (b) Definition of angle of attack. (c) Definition of hand plane, hand pressure force acting perpendicular to the hand plane, and hand propulsive force.....	33
Figure 8 Changes in the mean pressure values in the palm (A) and dorsal (B).....	44
Figure 9 Changes in angle of attack and pressure on the dorsum of the hand over time in swimmer A, B, C and D.....	46
Figure 10 Changes in angle of attack and pressure on the dorsum of the hand over time in swimmer E, F, G and H.....	47

Figure 11 Hand propulsive force, hand resultant force, and propulsion ratio in each phase at different trials. (*: $p < 0.05$).....	57
Figure 12 Palm pressure, dorsal pressure, hand speed, and angle of attack in each phase at different trials. (*: $p < 0.05$).....	58
Figure 13 Schematic diagram of the overlap of the propulsive forces exerted by the left and right hands in stroke of front crawl swimming.....	60
Figure 14 (a) Forces in the lateral and vertical directions in the pull phase. A positive value in the lateral direction means that the force is exerted outward to the body. A positive value in the vertical direction means that the force is exerted upward. (b) Image diagram of the hand movement for the hand to exit from water quickly at a high stroke frequency of T120%.....	61
Figure 15 Image diagram of moderate (left) and low (right) angle of attack.....	62
Figure 16 (a) Typical example of the change in angle of attack over time in swimmer D. (b) Comparison of the percentage of time with angle of attack of less than 20° to the phase time in the push phase in each swimmer (T100% vs T120%).	64
Figure 17 Comparison of the absolute value of the mean pressure between the palm and the dorsum of the hand. (*. $p < 0.05$).....	71
Figure 18 Variation over time of each variable (top, fluid force; middle, pressure; bottom, angle of attack & hand speed) in the right hand of the fastest swimmer A (left column) and the slowest swimmer X (right column).	72

用語の定義

(1) 流体力・推進力・手部の圧力分布

水中ではあらゆる方向から水からの力を受ける。ヒトが泳いでいる際に水から受ける全ての力を流体力と定義し、流体力のうち推進方向に働く力を推進力と定義した。

水中での泳動作時に、手部に働く圧力は、プラスの値を正圧、マイナスの値を負圧と表現する。正圧が 10 から 20 のように高くなることを「正圧が増加」、0 に近づくことを「正圧が低下」と表す。負圧は、-10 が-20 のように変化することを「負圧が増加」、0 に近づくことを「負圧が低下」と表す (Figure 1)。

加えて、正圧が比較対象の値よりも高いことを「正圧が高い」、比較対象の値よりも低いことを「正圧が低い」と表す。負圧は、比較対象の値が-10 の時に-20 は「負圧が高い」、比較対象の値が-10 の時に 0 は「負圧が低い」と表す (Figure 1)。

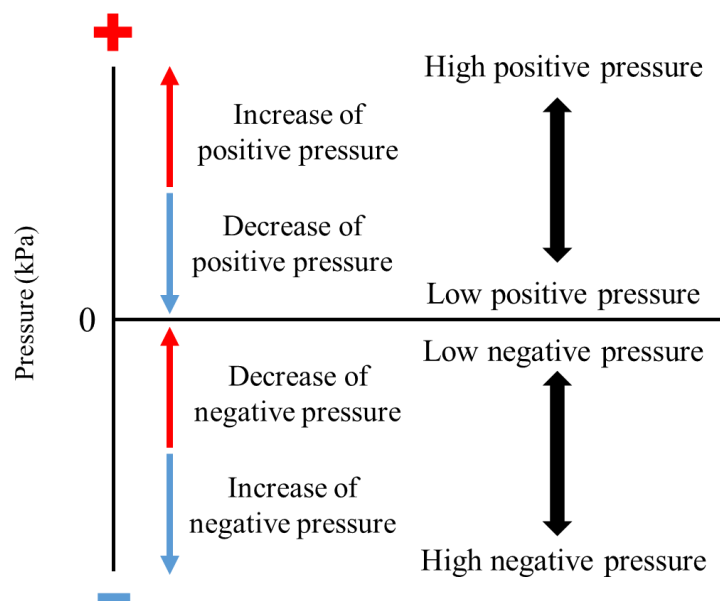


Figure 1 Schematic diagram of the definition of the terms high / low and increase / decrease in pressure.

(2) ストロークの局面

泳中の泳者を横から見た際のストロークの軌道において、Chollet et al. (2000) の定義に基づき、クロール泳におけるストローク動作を以下のように局面分けする (Figure 2).

Glide 局面 (Entry & Catch 局面) : 手部が入水してから手部が後方に移動するまでの区間

Pull 局面 : glide 局面の終わりから手部が肩の真下に到達するまでの区間

Push 局面 : Pull 局面の終わりから手部が出水するまでの区間

Recovery 局面 : Push 局面の終わりから手部が再度入水するまでの区間

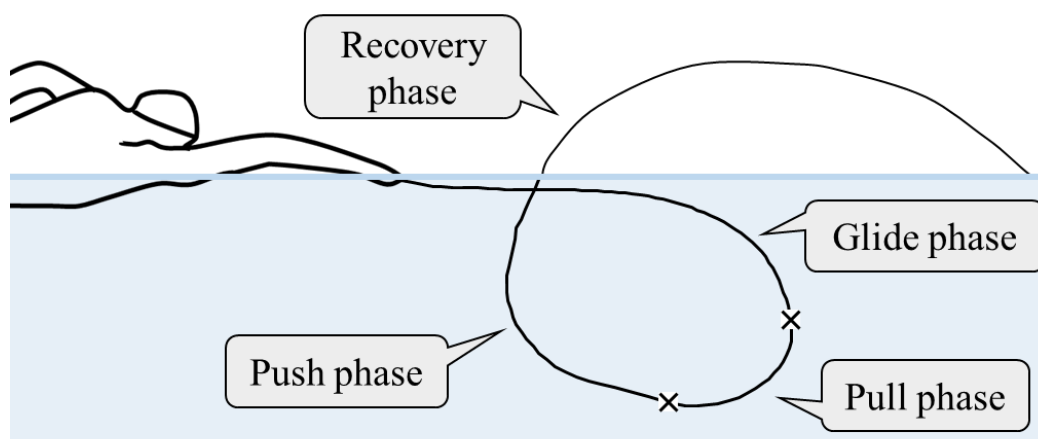


Figure 2 Schematic diagram of the stroke phase during front crawl swimming.

関連論文

本博士論文は、以下の原著論文をまとめたものである。

- (1) 古賀大樹, 角川隆明, 仙石泰雄, 本間三和子, 高木英樹. (2021) クロール泳におけるストローク頻度と手部推進力関係. 体育学研究, 66:207-218. doi:10.5432/jjpehss.20123

- (2) Koga D, Gonjo T, Kawai K, Tsunokawa T, Sakai S, Sengoku Y, Homma M, Takagi T
(2020) Effects of exceeding stroke frequency of maximal effort on hand kinematics and hand propulsive force in front crawl. Sports Biomech. doi:10.1080/14763141.2020.1814852

- (3) Koga, D., Tsunokawa, T., Sengoku, Y., Homoto, K., Nakazono, Y. and Takagi, T.
(2022) Relationship between hand kinematics, hand hydrodynamic pressure distribution and hand propulsive force in sprint front crawl swimming, Frontiers in Sports and Active Living. doi:10.3389/fspor.2022.786459

I. 緒言

1. 研究の背景

競泳競技のレースは、スタート局面、ストローク局面、ターン局面およびフィニッシュ局面に分けられる。競技会で実施されるレースにおいて、泳距離の最も短い 50 m から最も長い 1500 m に関わらず、ストローク局面の占める割合が最も多い(日本水泳連盟編 2014)。

ストローク局面は、泳動作を用いて推進する局面であり、レースの泳タイムを短縮するためには、このストローク局面において高い泳ぎの速度(泳速度)を獲得することおよび獲得した泳速度を維持することが重要であると述べられている(生田ほか, 2010)。

泳速度を決定する要因には、推進力と抵抗力がある。泳速度が一定の場合は推進力と抵抗力の大きさは同じであり、泳速度を上昇させるには推進力の増加もしくは抵抗力の低減が必要である(成田 2018)。抵抗力の最も低い姿勢は身体を流線形に近づけるストリームライン姿勢であるが(Narita et al. 2017)、四肢の泳動作を伴わないため推進力は発生しない。一方で、四肢を用いて泳動作を行うと、推進力が生成されるものの抵抗力も増加する(Narita et al. 2017)。このことから、四肢による泳動作は抵抗力の低減ではなく、推進力の生成を目的としていると言える。加えて、受動抵抗は泳速度の約 2 乗、自己推進時抵抗は泳速度の約 3 乗に比例して増加することから(Narita et al. 2017)、特に高い泳速度では、大きな抵抗力に打ち勝って泳ぐための大きな推進力発揮が求められる(成田 2018)。

クロール泳中の推進力の発揮は、上肢の方が下肢よりも大きく(Cohen et al. 2017)、手

部が上肢の中で推進力の発揮が最も大きい (Samson et al. 2017). それ故, クロール泳においては, 手部で発揮された推進力が泳速度に強く影響する.

個人内での手部推進力と泳速度との関係を検討した研究として, 泳速度を 1 回ずつ漸増させながら 16m のクロール泳を 10 回反復させ, その際のストローク頻度・長と手部推進力を調査したものがあ (角川ほか. 2019). その結果, 泳速度を上昇させると, ストローク頻度と手部スピードが上昇し, 手部推進力も上昇した. 一方で, 他の報告では, ストローク頻度が高くなるにつれて泳速度は高くなるが, 最大努力以上にストローク頻度を上昇させることで泳速度が低下することが示されている (Craig et al. 1979). 手部推進力の低下が泳速度の低下の要因であると推察されるが, 最大努力以上にストローク頻度を上昇させた際に手部推進力が低下する要因は明らかでない.

競技レベルが異なる個人間において推進力を調査した研究として, Kudo et al. (2016) は, Advanced と Intermediate の泳者を対象に, 25 m の全力クロール泳時の流体力と手部キネマティクスを比較した. その結果, Advanced の選手は, 手部推進力が大きく, 手部速度および加速度が高く, ストローク後半の手部の迎角 (手部の移動方向と手部平面のなす角) が大きい値を示した. このことから, 競技レベルの違いは, 手部速度および手部迎角といったキネマティクスが影響している可能性が示された. ただし, 競技レベルの高い選手において, 手部推進力および手部キネマティクスが高い値を示す要因は明らかでない.

手部推進力は、手部に働く全ての力である手部流体力のうち推進方向に作用した力を指す(角川ほか.2017). 近年, 手部推進力の算出の方法として, 手部表面(手掌・手背)の圧力分布を計測する方法が発展している(Takagi and Wilson, 1999; Tsunokawa et al. 2018b). 手部の圧力分布の計測によって算出される手部流体力は, 手掌と手背の圧力差に手部面積を乗じて求められる. 手部流体力の大きさに手掌と手背の圧力差が関係している理由は, 圧力抵抗は圧力の高い方から低い方に働くためである(Figure 3). クロール泳のストローク中における手部の圧力分布は, 手掌が正圧を, 手背で負圧を示し, その圧力差により流体力が生じる(Takagi et al. 2014a). 平泳ぎキック中の足部の圧力分布の報告では, 足部の足底(掌側)と足背(背側)における圧力の絶対値を比較すると, 足背の圧力が有意に高かったことが報告されている(角川ほか.2015a). つまり, 背側における負圧の高さが, 流体力に大きな影響を持つことが示されている. 背側(手背や足背)の負圧が流体力に対し影響が

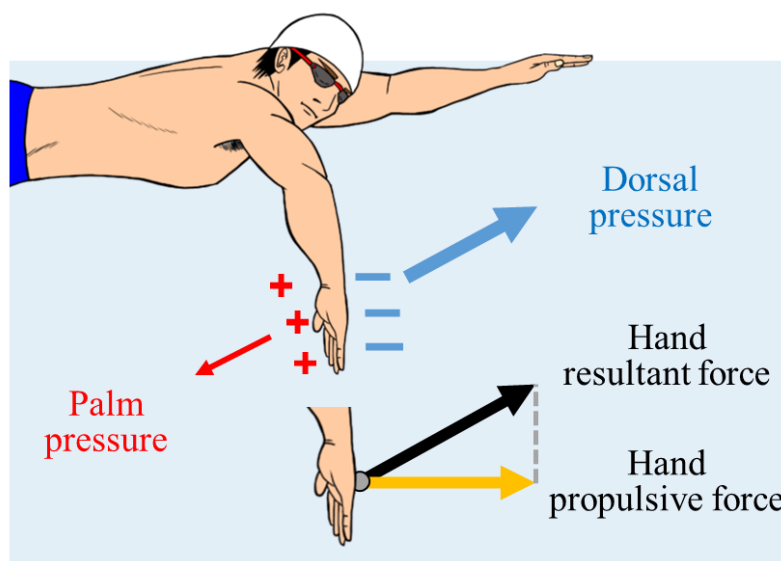


Figure 3 Schematic diagram of hand propulsive force, hand resultant force, palm pressure, and dorsal pressure.

大きいことは、平泳ぎのみならず水球の巻き足動作時の足部 (Kawai et al. 2018)、アーティスティックスイミングにおけるフラットスカル¹やサポートスカル² 時の手部 (Homma et al. 2016) など、さまざまな泳動作中に確認されている。ただし、クロール泳において、手部推進力の大きさに対する手部の圧力分布の影響は明らかでない。

2. 研究の目的

本研究は、クロール泳における泳速度と手部推進力および手部キネマティクスとの関係を、圧力分布測定と 3 次元動作解析を用いて個人内および個人間の比較から明らかにすること目的とした。

¹ フラットスカルとは、アーティスティックスイミングにおいて水平姿勢を保つ技術。

² サポートスカルとは、アーティスティックスイミングにおいて垂直姿勢を保つ技術。

II. 文献研究

1. 泳動作中に身体に働く力の特性

泳動作中に水から身体に対して働く力は、前進するための推進力とそれを妨げる抵抗力がある。泳速度が一定の場合は、推進力と抵抗力の大きさは同じであり (Van der Vaart et al. 1987), 推進力を増加, もしくは抵抗力を低減することで泳速度を高めることができる。推進力を生成するためには、四肢を動かすことで水から力を受け, その力を前方へ作用させることが必要である (角川ほか. 2017)。一方で、推進するために四肢を動かすことで水から受ける力は、その作用方向が推進方向と反対方向となることで抵抗力となる。この抵抗力は、自己推進時抵抗と呼ばれ、同じ姿勢を維持した泳者に働く抵抗力である受動抵抗とは区別して称されている (Chatard et al. 1990; Narita et al. 2017)。

Narita et al. (2017) は、四肢による推進動作を行うクロール泳時の自己推進時抵抗と、最も流線形に近づけた姿勢であるストリームライン姿勢時の受動抵抗を様々な泳速度 (実験用回流水槽における流速 1.0 から 1.5 m/s) で比較した。その結果、クロール泳は、ストリームライン姿勢と比較して大きい抵抗力を示した。加えて、ストリームライン姿勢時では泳速度の上昇に対して約 2 乗に比例して抵抗力が上昇したのに対して、クロール泳時では泳速度に対して約 3 乗に比例して上昇したことも報告している。つまり、四肢を用いた推進動作により泳速度を高めようとすればするほど抵抗力を増加させてしまう。

クロール泳における上肢動作は、泳速度への貢献度が高く推進力の生成が大きいことが

報告されている (Cohen et al. 2017). Cohen et al. (2017) は、数値流体力学を用いてクロール泳中の泳者に働く力をシミュレーションし、ストローク頻度を変化させた際の上肢と下肢の相対的な寄与を調査した。その結果、ストローク頻度が増加すると、下肢に対する上肢で生成された平均推進力の比は、1.1 から 2.5 に増加した。このことから、高い泳速度での推進力を最大化するためには、下肢動作の技術よりも上肢におけるストローク技術がより重要であることを示した。上肢の中でも前腕と手部で推進力の発揮が大きいことが推察されており (Takagi and Sanders 2002)、特に手部での推進力が大きいことが報告されている。Samson et al. (2017) は、シミュレーションによって、スプリントペースのクロール泳における、手部および前腕に働く圧力と摩擦力を算出した。シミュレーションは、実験により取得したキネマティクスデータに基づき、手部と前腕は、スキャナーを用いてスキャンされた泳者の手部と前腕のデジタル模型を用いている。その結果、ストローク中に 2 つの推進力のピークが確認され、手部は推進に最も貢献するセグメントであることが示された。さらに、手部では摩擦力よりも圧力の方が流体力への影響が大きかったことも報告されている。

クロール泳における下肢によるキック動作は抵抗力を低減する効果があることが示唆されている。Gourgoulis et al. (2014) は、25 m のクロール泳をキック動作ありとなしで全力泳を実施させ、その時の泳速度やストローク変数、身体の傾きを調査した。その結果、キック動作を用いたクロール泳では用いていない試技に対して有意に泳速度が高く、体の傾

きも 13%減少したことを報告した。加えて、上肢における推進力の大きさと方向、腕のストロークのフルード効率³は変化しなかったことから、体の傾きの減少が前面投影面積を減少させ抵抗力を低減することで、泳速度は上昇したと推察した。一方で、下肢動作は抵抗力を増加させるという報告もある。Narita et al. (2018) は、2つの泳速度（流速 1.1 と 1.3 m/s）で上肢のみ（下肢には浮力のあるプルブイ）のクロール泳と上肢下肢の両方を用いたクロール泳時の自己推進時抵抗を計測した。その結果、両泳速度で下肢動作の有無による自己推進時抵抗の有意な差は認められなかったものの、1.3 m/s では大きな効果量を示し、下肢動作ありの方が抵抗力は大きかった。この結果に対して Narita et al. (2018) は、抵抗力に対する下肢動作の影響は泳速度に依存すると推察している。この根拠として、Gatta et al. (2012) の研究がある。彼らは、上肢を頭上で組んだ状態でのフラッターキックを、牽引速度 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 m/s で行わせ、その際の抵抗力の計測を行った。その結果、泳速度が 1.27 m/s 以上では、キック動作で生成される推進力よりも、生成される抵抗力の方が大きいことが示された。

以上の泳動作中に働く力の特性をまとめると、クロール泳において高い泳速度で泳ぐとき、クロール泳動作は大きな抵抗力を生成するが、上肢の特に手部で大きな推進力を発揮し、生成された大きな抵抗力に対抗する。「高い泳速度では大きな抵抗力に打ち勝って泳ぐための推進力発揮が求められる」（成田 2018）と述べられているように、高い泳速度で泳ぐ際

³ フルード効率とは、水泳選手の筋が生成する外部への力のうち、推進に有効に働くよう変換される割合を示す泳効率の指標 (Zamparo et al. 2005)。

の泳動作の最大の目的は、抵抗力の低減ではなく推進力の最大化であると言える。

2. 泳動作中に身体に働く力の測定

2.1 準定常解析法による流体力の推定

準定常解析法 (quasi-static approach) は、空気力学の分野で発展し、対象に働く流体力を推定する方法である。Schleithauf (1979) は準定常解析法を泳動作中の手部の力の推定に応用した。この方法では、まず、手部周りの流れは定常に近い状態が連続するという仮定のもと、定常流時における手部模型に生じる流体力 (揚・抗力) を算出する。その得られた揚・抗力係数と、画像分析より得た手部スピード、迎角、流入角、手部面積、流体密度を流体力に関する一般式に代入することで手部の推進力を推定する。しかしながら、Pai and Hay (1988) は、準定常条件と非定常条件における円筒モデルに対する揚・抗力係数を算出した結果、準定常条件は低回転頻度・低加速度の動作のみで妥当であることが示された。一方で、競泳における泳動作の場合、高回転頻度・高加速度の動作であるため、流体力を正しく推定するには、渦や水の付加質量を考慮する必要性を示した。つまり、手部で発揮される流体力を準定常解析法で推定することは、水中 (流体中) における力の推定の方法としての妥当性が不十分である。

そこで、Gourgoulis et al. (2015) は、クロール泳において Sanders (1999) よって提唱された手部の加減速を加味した方法論を用いて手部流体力を推定した。これまでの準定常解析法において用いられてきた一般式に、手部加速度の係数、手部面積、流体密度、手部加

速度の積を加算することで手部流体力を推定している。流体力の推定の結果、手部加速度による付加質量が加味されることで、加速度を加味していない推定よりも流体力は大きいことが明らかとなった。また、Push 局面における抗力の平均値は加速度を考慮することでは変化せず、対応する効果量は中程度であったことから、加速度の変化とその影響はストローク局面によって異なることが示された。このような、加速度の影響を加味した流体力の推定によって、泳動作中における流体の非定常状態を加味した流体力の推定へと発展がなされた。ただし、依然として泳者の身体周りに発生する渦など、泳動作中の流体の非定常性の全てを考慮するには至っていない。

2.2 CFD を用いた身体に働く流体力の算出

数値流体力学 (CFD; Computational Fluid Dynamics) は、対象の周りの流れとその対象に加えられる外力を模擬的に計算できるため、近年では水泳運動中の流体力の解析にも適用されているツールである (Samson et al. 2017)。これは、流れを記述する流体力学方程式である Navier-Stokes 方程式を解くことで表される (Ferziger and Perić 2012)。数値流体力学を使用する主な利点は、実験研究でデザインされる実験設定よりも、反復可能かつ統制された設定でデータを収集できることである (Cohen et al. 2017)。一般的に、計算領域において身体周りの流体の速度、速度勾配、対象に作用する圧力の情報を取得することができる。さらに、CFD は視覚情報を提供するため、水泳動作の変化や技術の違いが泳者周

りで発生する流れに及ぼす影響を確認できる (Samson et al. 2018).

これまでの CFD 研究の変遷に関しては, Takagi et al. (2016) に詳しく記載されている. CFD においても以前は準定常条件で研究が行われ, 身体の一部 (手部や前腕) から (Bixler and Riewald 2002), 身体の全身のシミュレーションが実施されるようになった (Lyttle and Keys 2004). 近年では, メッシュフリーの平滑粒子流体力学法 (SPH; Smoothed Particle Hydrodynamics) を使用することで, 水面付近における泳動作を実施した泳者周りの水の流れや泳者に働く力のシミュレーションが行われている (Cleary et al. 2013; Cohen et al. 2015; Cohen et al. 2017). この方法は, 複雑で変形する物体の周りの流れと自由表面をモデル化するのに適しており, 自由液面の流れを精度よく計算できると言われている. 水泳は, 水面が不規則に変化し, 泳者の泳動作は急速かつ複雑に変化するため, SPH 法が有用である (Cleary et al. 2013).

数値的な研究は実験研究と一致する点も多く, また, 実験研究では得られない知見を得ることができる有効な手段である. しかしながら, CFD を適用するには, いくつかの課題が残っている. これまでの SPH 法を用いた水面付近を移動する泳者をシミュレーション研究では, 気泡の影響, 水の流れに応じた皮膚の変形, 皮膚や水着の表面特性の違いは含まれていない (Cohen et al. 2018). また, 泳動作をシミュレーションするにあたり, 泳者やシミュレーション対象となる各四肢における関節の自由度を適切に与えられるかも問題となる (Samson et al. 2017).

2.3 水泳人体シミュレーションモデル (SWUM) による身体に働く流体力の算出

水泳人体シミュレーションモデル (SWUM) は、水の非定常性を考慮して泳者の全身に働く流体力を求めるシミュレーションモデルである (Nakashima et al. 2007). この SWUM では、21 個の剛体セグメントにより泳者の身体を形成し、身体形状と関節運動 (位置、速度、加速度、方向、角速度、角加速度など) の情報を与えることにより身体に働く流体力の算出をする。流体力の算出は、CFD とは異なり身体周りの流れ場を解くことなく算出されるため、計算に要する時間が短いという特徴がある。流れ場を解かずに非定常流を考慮した流体力の算出が可能な理由として、ヒトの上肢と下肢を平均化して作成したモデルを水中で非定常的に運動をさせ、その時の流体力をモデルの付け根に取り付けられた歪みゲージにより測定し、付加質量力係数や法線、接線方向抵抗係数の同定を行っているためである。近年では、この SWUM で得られる流体力のデータと筋骨格モデルを組み合わせた筋骨格シミュレーションが行われている (Nakashima et al. 2012; Nakashima and Ono 2014; Nakashima et al. 2020). 陸上ではヒトが受ける力は床や地面からの反力で測定可能である。一方で、水中では全方向から水からの力を受けるため、ヒトが泳動作中に受ける全ての力を測定する手法がない。そのため、筋力をシミュレートすることが難しい。SWUM では全身に作用する流体力を推定できるため、筋骨格モデルを組み合わせることで、筋骨格シミュレーションが実施可能となっている (中島, 2016). さらに、筋骨格シミュレーションから、筋が最大に活動したときの最大関節トルクを算出することが可能となり、SWUM のシ

ミュレーションにおける関節トルクの算出結果が最大関節トルクの範囲内に収まっている
かにより、シミュレーション結果の妥当性が確認できるようになっている。

このように、多くの検証結果により、**SWUM**はそのシミュレーションの妥当性が確認さ
れており、困難とされていた全身の泳動作における身体に働く力や筋活動と関節運動の関
係性を理解することに有益なツールである。ただし、いくつかの筋では、実際の泳者の泳動
作中に測定された筋活動と **SWUM** および筋骨格シミュレーションで解析された筋活動が
明らかに異なる結果となったことも示されている (Nakashima et al. 2013)。そのため、シ
ミュレーションの結果の解釈には予備的な実測のデータの取得と比較が必要であるかもし
れない。また、**SWUM**に限らずシミュレーションの多くは対象を1人としてシミュレート
されることが多い (Cohen et al. 2015; 2018, Nakashima et al. 2019; 2020)。泳者は個々
に適したストローク戦略を取っていることが示されており (松田ほか. 2010)、泳者の個別
性に着目した研究が求められる。

2.4 圧力分布計測法による身体に働く流体力の算出

泳者が水面や水中で身体を動かす際には、流体力として身体表面に対して接線方向に働
く摩擦抵抗と、法線方向に働く圧力抵抗、造波抵抗が作用する (日本水泳連盟編 2014)。一
方で、水中での動作では、水面の波による影響はほぼないため、泳動作中の流体力を正確に
定量化するには摩擦抵抗と圧力抵抗の2つを計測すればよい (Barbosa et al. 2018; Vennell

et al. 2006). 実際には, Samson et al. (2017) は手部と前腕のクロール泳のストローク動作をシミュレーションし, 圧力抵抗が推進力獲得の主要因であることを報告した. Marinho et al. (2009) も, 泳者がグライド姿勢時において, 全抵抗に占める圧力抵抗の割合が高いことを報告している. そのため, 圧力抵抗に焦点をあて泳動作中の圧力分布を計測することで, クロール泳時の推進力の定量化が試みられている (Takagi and Willson 1999; Tsunokawa et al. 2015; Kudo et al. 2008). Takagi and Wilson (1999) は泳者の手掌 4 箇所と手背 4 箇所の計 8 箇所に圧力センサを貼付し, クロール泳中の圧力分布と手部面積の積から手部に働く流体力を推定し, クロール泳のストローク動作中に働く流体力を経時的に明らかにした. この方法では, 手部の平面積に手掌と手背の圧力差を乗じることで流体力を推定しているため, 画像分析によって圧力センサの水深を確認して静水圧の影響を除外する必要がなく, ほぼ即時的にデータを取得することが可能である (角川ほか, 2017). しかしながら, 圧力は手部に対して垂直に働く力のことであり, 圧力分布を計測しているこの方法では, 手部平面に対して垂直に働く流体力の大きさを算出することしかできない. つまり, 流体力の 3 次元的 (推進方向・鉛直方向・左右方向) な作用方向を明らかにすることはできず, 流体力が推進方向にどれだけ貢献するかを明らかにすることはできない.

そこで, 角川ほか (2015b) は水中モーションキャプチャシステムと圧力分布計測を同時に用いることで, 泳者の推進方向に働く力である推進力を推定している. 計測された流体力の方向と水中モーションキャプチャにより手部の座標から得た手部平面に対して垂直な法

線ベクトルが一致すると仮定し、手部平面の法線ベクトルを分解することで推進方向、鉛直方向、左右方向の力を推定している。この圧力分布計測とモーションキャプチャによる3次元動作解析を併用した DPPM 法 (Determination of Propulsion from Pressure measurement and Motion capture, 角川ほか, 2019) では、試技中にはモーションキャプチャ用のマーカーと圧力分布計測のための小型圧力センサの貼付を除き、泳動作を妨げる要因が少ない。そのため、実際の泳動作中にキネマティクスとキネティクス (推進力) データの収集を行うことができ、水の非定常性を含めた試技の評価を可能にする。一方で、現状 DPPM 法による推進力を計測可能な泳動作は限られている。DPPM 法による流体力・推進力が計測されている泳動作として、4 泳法での手部 (Tsunokawa et al. 2019)、スカーリング動作での手部 (競泳選手やアーティスティックスイミングで使用) (Takagi et al. 2014b; Homma et al. 2016)、平泳ぎでの足部 (Tsunokawa et al. 2015)、巻き足 (水球やアーティスティックスイミングで用いられる下腿を回旋させ、鉛直上向きの推力を得る技術) での足部 (Kawai et al. 2018) が報告されている。

2.5 身体周りの流れ場の計測による推力の算出

近年の生物流体力学や流体力学分野では、非定常な流れ場の速度分布を調べる手法として有効な粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry) を用い、昆虫の飛翔のメカニズムの解析などが行われてきた。水泳の研究においても、泳動作中の水の非定常性につ

いて詳細な調査を行うため、2次元および3次元的な流れ場⁴の解析が実施されている。PIVを用いた流れ場の計測では、泳者の泳ぐ水槽内にトレーサー粒子を懸濁し、レーザーシートを微小時間間隔で連続的に照射する。そして、時間の経過とともにシート内のトレーサー粒子の位置がどのように変化したかを捉える（速度ベクトルを算出）ことで、流れ場を可視化する（Matsuuchi et al. 2009; Takagi et al. 2014a; Takagi et al. 2014b; Shimojo et al. 2019）。このレーザーシートは2次元的な平面にのみ照射可能であるため、得られる流れ場の情報も2次元であり、取得可能なデータの範囲は限られたものになる。

近年では、Shimojo et al. (2019) は、固定されたレーザーシートの照射位置に対して、泳者が泳ぐ位置を移動することにより、水中ドルフィンキック中の3次元的な足部周りの流れ場の解析を可能とした。さらに、3次元的な流れ場の解析は、ドルフィンキック中の足部で発生する渦輪を3次元的に示すことを可能にした。Shimojo et al. (2021) は、渦輪⁵の解析による推力の推定と、従来から推力の推定方法（Fish et al. 2014）として用いられてきた足部における流れと動作による推力の推定を比較し、渦輪の解析を含む推力の推定の方がより妥当な結果が得られる可能性を示した。このように、PIVを用いた流れ場の解析は動作情報（キネマティクス）と流れ場の関係を明らかにするだけでなく、実際にどの程度の推力を生成したかを推定することが可能である。Shimojo et al. (2021) は、PIVによる推力の推定では精度に課題があると述べているが、これまでの手法では明らかとされてこな

⁴ 流れ場とは、解析対象となる流体の状態であり、流体の速度分布などが解析される。

⁵ 渦輪とは、端を持たない閉じられた渦管のことであり、円形の渦輪が一般的である。

かった新たな知見を得ることができると期待される。

しかしながら、いくつかの研究の制限も存在している。PIV による撮影範囲はとても狭く、クロール泳のような範囲の広い動作に対しては計測が不向きである。また、撮影範囲において意図した泳動作を確実に撮影することは困難であり、試技のやり直しにより試技数が増加する可能性がある。PIV を用いたデータ収集をより確実に行うため、泳者の動作範囲の制御を目的に実験用回流水槽など、特殊な実験環境で行う必要がある。ただし、通常のプールでの泳動作と異なり、コーディネーションの変化やストローク頻度の変化がなく、泳動作の柔軟性が制限される可能性が指摘されている (Guignard et al. 2020)。さらに、3次元的な流れ場の解析を行うためには、同一の動作を位置を変えて 20~40 ほどの試技を繰り返す必要があり (Shimojo et al. 2019; 2021)、その再現性にも注意が必要である。

3. 泳パフォーマンスとキネマティクスおよび泳動作中に身体に働く力の関係

3.1 泳パフォーマンスとストロークパラメータの関係

競泳競技は、定められた泳距離を泳ぐのに要した時間の短さを競う競技である。レースはスタート局面 (スタート地点から 15 m)、ターン局面 (ターン前 5 m)、フィニッシュ局 (ゴール前 5 m)、ストローク局面 (スタート、ターン、フィニッシュ局面以外の局面) に分けられ、総泳距離に対するストローク局面の割合が最も多く、上肢ストロークによって高い泳速度を獲得することが重要である (日本水泳連盟編 2014)。泳速度は、ストローク頻度

(Stroke Frequency) とストローク長 (Stroke Length) の積によって求めることができ、レースの分析により、一定の距離を泳ぐのに要した時間やストロークに要した時間等から泳速度と合わせることで算出することができる。ストローク長は、1 ストロークで進んだ距離を表す指標であり、ストローク頻度は、単位時間あたりに何回ストロークを行ったかを表す。泳速度向上を目的としてこれらのパラメータに関する研究が多くなされてきた。

個人内のストロークパラメータの関係性について着目すると、泳速度とストローク頻度には正の相関関係が存在し、泳速度とストローク長の間には負の相関関係が存在する。加えて、ストローク頻度が増加するとストローク長は低下する関係にある。Potdevin et al. (2006) は、メトロノームを用いて、35, 40, 45, 50, 55 の5つのストローク頻度 (stroke/min) でクロール泳を熟練者および非熟練者に行わせたところ、熟練者と非熟練者ともに設定された通りストローク頻度を上昇させ、泳速度を上昇させたことを報告した。一方で、ストローク長はストローク頻度の上昇に伴い有意に低下した。Seifert et al. (2004) は、25 m を8回泳がせ、それぞれの25 m 試技の各目標タイムは、3000 m, 1500 m, 800 m, 400 m, 200 m, 100 m, 50 m および全力時のレースタイムから算出した。その結果、泳速度とストローク頻度は正の相関関係、泳速度とストローク長は負の相関関係にあったことを報告している。Craig and Pendergast (1979) は、泳速度を低い泳速度から泳者が主観的に最も高いと感じる泳速度まで上昇させた。加えて、主観的に最も高いと感じる泳速度からストローク頻度を可能な限り高めさせ、客観的に最も高い泳速度の出現を観察した。その結果、

ストローク頻度が高くなるにつれてストローク長は低下するが泳速度は上昇した。ただし、あるストローク頻度を超えると泳速度が上昇しなくなることが示されているものの、その要因は明らかにされていない。もし、その要因を特定し改善することができれば、泳速度を向上させられる可能性がある。

個人間のストロークパラメータの関係性について着目すると、ストローク頻度は、泳者の競技力によって差は生じず、泳速度との関係性は低い。一方で、ストローク長は泳速度と正の相関関係にあり、泳者の競技力の高さを示す変数になり得ることが報告されている。先に示した Potdevin et al. (2006) の研究では、テンポトレーナーを用い、35, 40, 45, 50, 55 の 5 つのストローク頻度 (stroke/min) でクロール泳を熟練者 (100 m ベストタイム : 56.0±2.1 s) および非熟練者 (100 m ベストタイム : 75.6±8.2 s) に行わせたところ、ストローク長が熟練者において有意に高い値を示したと報告している。Seifert et al. (2007) は、男子の国内選手権決勝進出レベル以上と全国大会出場レベルの泳者に、25 m を 7 回泳がせた。試技の泳速度は、1500 m, 800 m, 400 m, 200 m, 100 m, 50 m および全力時のレース泳速度とした。その結果、ストローク頻度は 2 群において有意な差はなく、泳速度とストローク長は 2 群において有意な差が認められたことを報告している。このようにストローク長はストローク頻度よりも、泳速度の高さと直接的に関係するため、泳者の競技力の高さを示していると言える。

加えて、ストローク頻度とストローク長はそれぞれ以下のような特性を有している。スト

ローク頻度は、能動的に調節が可能な変数であり、その結果として泳速度の調節が可能であることが示されている。合屋ほか（2005, 2008）は男女競泳選手を対象に主観的努力度と客観的出力⁶の関係性を報告した。これらの研究では 20% から 100% までの 5 段階の主観的努力度を設定し、ランダムな順序で試技を行わせ、泳タイムを測定した。その時、各試技における泳タイムのフィードバックは試技ごとに行わずに、選手の養ってきた経験を頼りに泳がせた。その結果、泳ぎのタイムは主観的努力度の上昇に伴って短縮し、主観的努力度と客観的出力の間に高い相関関係が認められた。さらに、ストローク頻度と泳速度の間には相関関係が認められ、短距離クロール泳での泳速度調節は努力度の大小だけでなく、ストローク頻度の調節によっても行われることが推察された。大庭ほか（2009）や佐藤ほか（2010）は主観的努力度の強度を 70% から 100% までの 10% 刻みで 4 段階に設定し、客観的出力⁶との関係を検討した。その結果、70% から 100% という中・高強度領域においても泳速度調節が可能であり、ストローク頻度が主観的努力度の上昇に伴って増加することを報告した。古賀・八十島（2020）も、主観的努力度の強度を 70% から 100% までの 10% 刻みで 4 段階に設定し、客観的出力との関係を検討した。加えて、どのような身体感覚や注意の向け方によって客観的出力を調節しているかを質問紙によって調査した。その結果、泳者はストローク長よりも、ストローク頻度を上下させることによって泳速度を調節していることが示された。一方で、ストローク長は競技力によって差がみられていることから、トレ

⁶ 客観的出力とは、特定の立場に囚われない計測結果であり、ここでは泳タイムを指す。

ーニングによって向上するものであると報告されている。Wakayoshi et al. (1993) は 6 か月間の好気性（有酸素性）の水中トレーニングを課すことによって 400 m クロール泳における泳速度の向上や乳酸値の低下がみられ、これはストローク頻度よりもストローク長の向上に起因することを示した。それ故、即時的に同一泳速におけるストローク長を向上させることは困難であると言える。

Chollet et al. (2000) は、詳細なストローク動作の調査を行うため、クロール泳のストロークを局面分けし、ストロークにおける局面毎の相対的な割合、絶対時間の長さの分析を行った。その後の研究では、泳ぎの泳速度が変化する際に、1 ストローク中の各局面が占める相対的な割合が、個人内でどのように変化するかが調査されている。Seifert et al. (2004) は、ペースを上昇させることでストローク頻度が上昇し、Entry & Catch 局面の割合が有意に減少し、Pull, Push 局面の割合が有意に増加したことを報告している。絶対時間としては、推進局面は変化がなく、非推進局面を減少させることでストローク時間を短縮（ストローク頻度の上昇）させ、泳速度を上昇させていたと示されている。Schnitzler et al. (2008; 2010) および Seifert et al. (2010) も同様の結果を報告している。個人間においても、1 ストロークにおける各局面が占める相対的な割合がどのように異なるかが調査されている。

Seifert et al. (2010) は、national レベル（2007 年の世界記録の泳速度の $90.2 \pm 3.9\%$ ）と regional レベル（2007 年の世界記録の泳速度の $81.5 \pm 2.8\%$ ）の泳者間でストローク局面ごとの比較を行った。その結果、national レベルの泳者は regional レベルと比べ Entry &

Catch 局面の割合が有意に少なく、Push 局面の割合が有意に多かった。つまり、競技力の高い泳者は推進への貢献が低い局面の時間を短縮し、ストローク全体の所要時間に対する推進力面の相対的な割合を増加させていた。Schnitzler et al. (2010) も同様の結果を報告している。以上の個人内および個人間におけるストローク動作の調査結果から、1 ストローク中における Entry & Catch 局面（非推進局面）の割合が低いことは、ストローク頻度だけでなく推進局面の割合の高め、泳速度を高めることに貢献すると考えられる。

ただし、これらの局面分けに関しては、流体力学的に確かな根拠はない。Chollet et al. (2000) の局面分けの基準は、手部の前後方向の位置によるものである。その根拠は、上肢で水を押すことによる反作用によって推進力を獲得できることに基づいていると考えられ、実際に手部が後方に移動していない Entry & Catch 局面を非推進局面と定義している。ただし、ストロークは前後方向だけでなく左右方向へも実施されるため、前後方向の動きのみで推進力の大きさを推定することは不十分である。ストローク中に経時的に発揮される推進力を測定することで、流体力学的な推進力の大きさからストロークの局面の定義を再構成する必要がある。

3.2 泳パフォーマンスと推進力の関係

クロール泳では、上肢によるストローク動作が下肢によるキック動作よりも発揮される推進力が大きい (Cohen et al. 2017)。さらに、上肢の中でも手部で最も流体力の獲得が大きい (Samson et al. 2017)。平泳ぎにおいては、下肢動作が上肢動作よりも推進力の生成

が大きいとされ (Maglischo 2003), 下肢動作の中でも足部で最も流体力が獲得されている (角川 2012). これらの手部や足部で獲得される流体力・推進力の重要性から, 実験研究において手部や足部が発揮した推進力と泳パフォーマンスとの関係を分析した研究がなされている. Tsunokawa et al. (2017) は, 泳者に 16 m を 10 回段階的に泳速度を上昇させ, その際に DPPM 法を用いて推進力を計測し, 泳速度との関係を調査した. 手部推進力と泳速度の回帰式を作成することで, 手部推進力は泳速度の 2 乗から 3 乗に比例して上昇するという関係を見出した. Kudo et al. (2016) は Advanced と Intermediate のレベル選手が 25 m 全カスプリントクロール泳を実施した際の, ストローク動作中の InswEEP と Upsweep⁷局面の手部推進力を比較した. 推進力の計測は, 12 個の圧力センサを用いて手部流体力を算出し, モーションキャプチャにより取得した手部の座標値から手部推進力を算出している. その結果, Advanced の泳者はより大きい手部推進力を示したことを報告し, 競技力の高さと手部推進力の大きさが一致していた. 角川ほか (2012) は, 上肢動作の影響を排除した平泳ぎの下肢動作において, 足部で発揮された推進力を圧力分布計測と 3 次元 DLT 法を併用して計測した. その結果, 100 m 平泳ぎの自己最高記録の泳速度と足部推進力に, 有意な高い正の相関関係が認めれたことを報告している. このように, 個人内および個人間のどちらにおいても, 圧力分布計測と 3 次元動作分析により計測された推進力の大きさと泳パフォーマンスの高さには関連が認められている.

⁷ InswEEP 局面は, 手部が後方に移動し始めから手部が外側に移動し始めるまでの区間. Upsweep 局面は, 手部が外側に移動し始めから, 手部が水出すまでの区間.

3.3 推進力の大きさとキネマティクスの関係

クロール泳の上肢によるストローク動作は、前方から後方に手部を移動させて水を「押す」ことで、手部が水から受ける力（手部流体力）を獲得すると考えられてきた（Maglischo 2003）. 実際に、これまでの先行研究の知見では、クロール泳中、手掌が後方へと水を「押す」と、手掌へ働く動圧は高くなる（Takagi et al. 2014a; Tsunokawa et al. 2018b）. 一方で、手背の圧力は、負圧を示すことが報告されている（Takagi et al. 2014a; Tsunokawa et al. 2018b）. 流体力の推定は、手掌と手背の圧力差と手部平面積を掛け合わせることで算出できるため（Takagi and Wilson 1999）、圧力差を拡大するには手掌の圧力を高めるだけでなく手背の負圧を高める必要がある.

平泳ぎのキック動作や巻き足動作中の 1 周期の足部における流体力の研究では、流体力の大きさは、足底側の正圧よりも足背側の負圧の高さに左右されていたと報告されている（角川ほか. 2015a; Kawai et al. 2018）. Homma et al. (2016) は、アーティスティックスイミング選手のサポートスカルとフラットスカルの 1 周期中の圧力分布の変化を報告している. その報告では、手掌側の正圧よりも手背側の負圧が高いため、手背の負圧が手部流体力の大きさの要因であったと示している. それ故、手部と足部で動作は異なるものの、推進力の大きさを決定する要因の一つは、移動方向と正対する側面の正圧よりも背側の負圧の高さであると考えられる. しかし、背側の負圧の高さと泳速度との関係は調査されておらず、手背の圧力の高さの違いが、手部推進力の大きさ、泳速度の高さに影響を与えるかは明らか

でない。

手背の圧力が負を示す要因は、渦が手背面の流れの速度を高めるためだと示されている (Dickinson 1996; Matsuuchi et al. 2009; Samson et al. 2018; Shimojo et al. 2019)。その渦の発生は、手掌側に面した水が手部の側方を通り、手背側へ回り込む際に、その水の流れの一部が剥離することで生じる (Figure 4, Adapted from Dickinson 1996)。その渦の回転速度が流れの速度に影響を与える可能性があり、渦の回転速度の高さには、物体の運動スピードが影響を与えることが示されている (湊脇ほか. 2007)。ただし、渦はどのような条件においても生成されるわけではない。Samson et al. (2018) は、手部の迎角を 0 から 90° まで 10° 毎に変化させた際の手部周りの流れを非定常条件における CFD でシミュレーションした。その結果、迎角が 20° から 90° において手背面での前縁渦の発生がみられたことを示した。一方で 0° や 10° では手背の流れは渦の発生がなく安定し、手部に働く力も変化しな

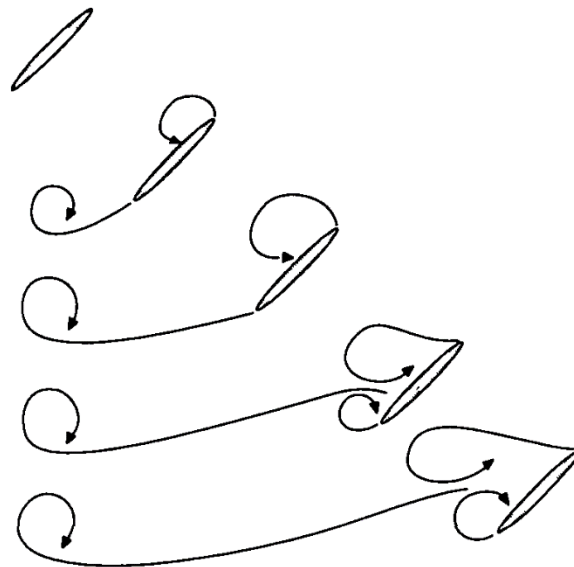


Figure 4 Image of a vortex in the wake at an impulsive start at a high angle of attack (Dickinson 1996).

い。また、揚力係数と抗力係数がそれぞれ 40°から 60°と 80°から 90°の迎角で最大であると示した。Dickinson (1996) のレビューでは、流体が定常な状態において、迎角が 15°未満では圧力抵抗は非常に小さく、15°を超えると、迎角の増加に伴い圧力抵抗が急速に増加することを示唆している。van Houwelingen et al. (2017) は、3つの数値研究と5つの実験研究で、定常状態での抗力係数、揚力係数、迎角の関係をレビューした。レビューによると、ほとんどの研究では結果に目立った違いは見られず、迎角が 90°付近で最も高い抗力係数、50°付近で最も高い揚力係数であったことを報告している。Homma et al. (2019) は、エリートアーティスティックスイミング選手において、サポートスカルとフラットスカルの迎角が約 20°から 60°の間に保たれていたことを報告している。川合 (2018) は、水球の巻き足において、15 kg の重りの支重タイムと鉛直上向きの流体力のそれぞれで順位をつけ、足し合わせたランキングを作成し、ランキングの最もよい選手と悪い選手の迎角を比較した。その結果、推進力のピークが観察されたタイミングにおいて、最も成績のよい選手は迎角が右足 32.9°と左足 25.5°であったのに対して、最も成績の悪かった選手は右足 8.8°と左足 10.3°であった。このように、迎角の大きさは手背における渦生成と関連し、泳パフォーマンスに差を生じさせる可能性がある。ただし、クロール泳中における手背の圧力と迎角の関係を明らかにした調査は行われていない。

加えて、手部推進力は流体力の推進方向成分であるため、流体力を推進力として作用させるには、その作用方向が重要である。Tsunokawa et al. (2018a) は、手部流体力と推進力

を算出し、1 ストロークにおける流体力が推進方向に働く比率（推進力比率）を求めた。その結果、泳速度の上昇に伴い推進力比率は上昇傾向にあったことを報告している。ただし、1 ストロークを通じた推進力比率では、どの動作局面で推進力比率が上昇したか詳細は明らかにされていない。1 ストローク中に手部の動きは時々刻々と変化し (Samson et al. 2015)、手部流体力の作用方向やその推進方向に働く比率も動作局面によって変化する。つまり、手部推進力の大きさの要因を詳細に検討するには、動作局面に応じた推進力比率の調査が求められる。

Ⅲ. 研究の課題と仮説

1. 文献研究から抽出されたリサーチクエスチョン

クロール泳における泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの関係について、前章の文献研究により以下のリサーチクエスチョンが設定された。

- 1) 泳速度を段階的に上昇させることで手部推進力が増加するが、手部推進力の増加の要因は何なのか？
- 2) ストローク頻度を超最大（最大努力時のストローク頻度よりも高いストローク頻度）へ上昇させても、泳速度が上昇しないことが示されているが、その要因は何なのか？
- 3) 泳速度の高い選手は手部推進力が大きいですが、その手部推進力の大きさの要因は何なのか？

2. 研究の課題

上述のリサーチクエスチョンを解決するために、本博士論文では以下の 3 つの研究課題を設定した。

- 研究課題 1 ストローク頻度を変化させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにする。

研究課題 1-1 **最大下で**ストローク頻度を増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにする。

研究課題 1-2 ストローク頻度を**超最大**へ増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにする。

研究課題 2 全力泳時の泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの関係を明らかにする。

3. 研究の仮説

各研究課題において、それぞれ以下のように仮説を立てた。

研究課題 1-1 ストローク頻度を上昇させた際に泳速度も上昇し、手部では手部スピードの上昇と共に手背の負圧が増加することで、手部推進力が上昇する。

研究課題 1-2 超最大のストローク頻度では泳速度および手部推進力は低下し、その要因は、迎角の小ささによる手掌の正圧の低下と手背の負圧の低下である。

研究課題 2 泳速度の高い泳者は手部推進力が大きく、その要因は手背の負圧の高さである。加えて、泳速度の高い選手は、ストローク頻度と手部スピードが高く、手部の迎角が大きい。

IV. データの取得と解析

本研究では、研究の目的を達成するため異なる課題を設定しているが、いずれの研究課題においても用いられるデータの取得と解析の方法はほぼ同一である。そのため、以下に示すそれぞれの研究課題で内容の重複を避けるため、本章においてデータの取得と解析の方法を示す。ただし、課題によって異なる部分があるためその点も示す。

1. データの取得

手部の三次元座標値の取得のため、三次元リアルタイムモーション計測システム VENUS 3D (Nobby Tech) を用いて三次元動作分析を実施した。分析範囲はプールの壁から 17 m と 22 m の間の 5 m とし、カメラ 15 台を用い、分析範囲を取り囲むように水中に配置した (Figure 5)。観測対象領域のキャリブレーションは、モーション計測システム VENUS 3D に付属するダイナミックキャリブレーションシステムを用い、各カメラの画角内でワンドを振り、1500 以上のサンプルを取得した。なお、キャリブレーション時の水中モーションキャプチャの標準誤差は 0.3 mm 以下であった。加えて、キャリブレーション後に画角内の複数位置でサイズの決まったワンドの長さを計測することで、その計測誤差を算出した。画面内の 9 箇所 (左前, 左中, 左奥, 中前, 中, 中奥, 右前, 右中, 右奥) それぞれでワンドの長さを 100 サンプル計測し、その計測誤差は最大で 0.58 mm であった。対象者には、研究課題 1-1 と 1-2 では、左右の大転子、右の肩峰、右の第 2・第 5 中手指節関節 (第 2・

第 5 MP 関節), 右の橈骨茎状突起, 右の尺骨茎状突起の計 7 点に自発光 LED マーカーを貼付した (Figure 6). 研究課題 2 では, 両上肢が交互にストロークされるというクロール泳の特徴をよりデータに反映させるため, 左右の大転子, 左右の肩峰, 左右の第 2・第 5MP 関節, 左右の橈骨茎状突起, 左右の尺骨茎状突起の計 12 点に自発光 LED マーカーを貼付した (Figure 6). 試技はサンプリング周波数 100 Hz で撮影した. 本研究では, 泳者の推進方向を Y 軸とし, その左右方向を X 軸, 鉛直方向を Z 軸とした右手固定座標系を用いた (Figure 5).

試技中の手部表面の圧力分布計測をするため, 防水処理を施した小型圧力センサ (PS-05KC, 共和電業) を, 角川ほか (2019) の方法を参考に対象者の手部に貼付した. 研究課題 1-1 と 1-2 では, 右手部のみにそれぞれ手掌 3 ヶ所と手背 3 ヶ所の計 6 ヶ所に貼付した (Figure 7a). 研究課題 2 では, マーカーの貼付と同様の理由で左右の手部にそれぞれ手掌 3 ヶ所と手背 3 ヶ所の計 12 ヶ所にセンサを貼付した. 手部平面は, 第 2, 第 4 指間腔によって 3 区分 (Segment 1: 第 1 指周辺, Segment 2: 第 2, 3 指周辺, Segment 3: 第 5 指周辺) に分割した (Figure 7a). 圧力センサの貼付位置は, 各区分内に手掌と手背のほぼ同位置に当たる第 2, 第 3, 第 5 の中手指節関節付近とした. 圧力センサから出力された信号は, ユニバーサルレコーダ (EDX-100A, 共和電業) を経由し, データ収録用ソフトウェア (DCS-100A, 共和電業) によってサンプリング周波数 100 Hz で PC に記録した. また, モーションキャプチャシステムと圧力センサからのすべての信号が同期さ

れ、計測用 PC に保存された。圧力センサは有線であったため、コードは釣竿に沿わせて泳ぎを妨げないように管理し、機材一式をのせた台車を泳者と共に移動した (Figure 5)。分析は、観測対象領域内で行われた上肢ストロークの 1 ストロークサイクル分のデータを切り出して分析した。モーションキャプチャシステムは水中のみに設置されたため、水中における上肢によるストローク動作のみを分析対象とした。

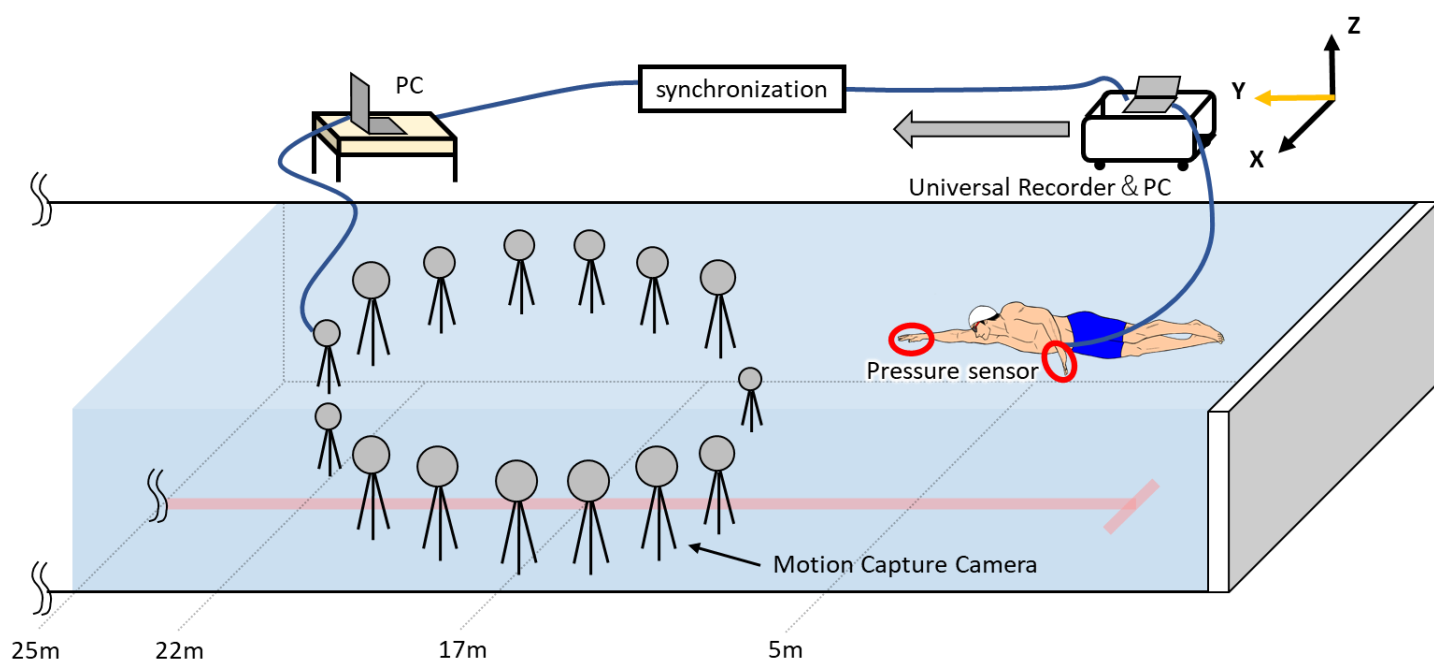


Figure 5 Experimental setting. Placement of motion capture cameras and measurement area.

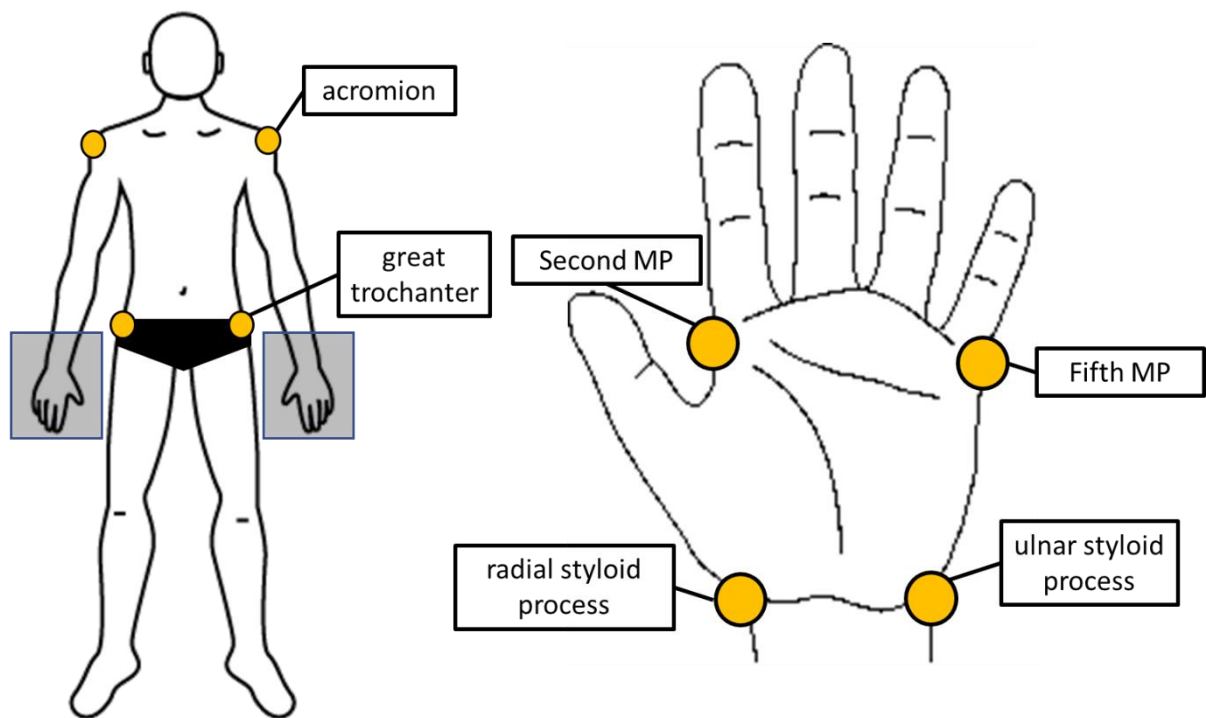


Figure 6 The location of the LED markers attached to the body and hands.

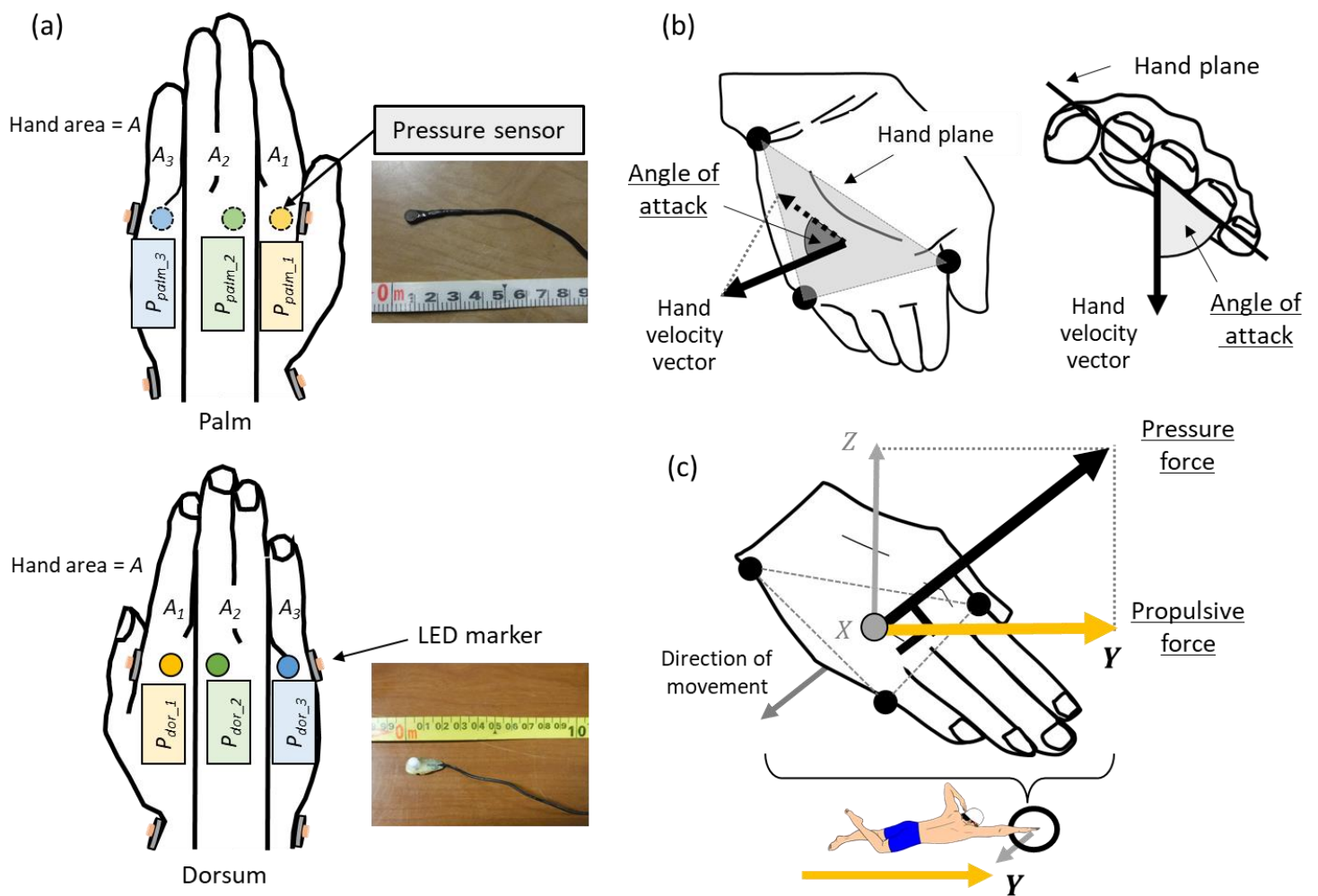


Figure 7 (a) The location of the pressure sensors and the LED markers attached to the hands. (b) Definition of angle of attack. (c) Definition of hand plane, hand pressure force acting perpendicular to the hand plane, and hand propulsive force.

2. データ解析

2.1 キネマティクス変数

1 ストロークサイクル中の平均泳速度は, Matsuda et al. (2018) の報告を参照し, モーションキャプチャシステムに付随する専用解析ソフト VENUS3D 4.3 (Nobby Tech. Ltd) を用いて, 左右大転子の中点における 1 ストロークサイクルの Y 軸方向への変位をその所要時間で微分することによって算出した. ストローク頻度は上肢ストロークの 1 ストロークサイクルの所要時間の逆数を算出し, ストローク長は平均泳速度をストローク頻度で除することによって算出した. 手部スピードは, 手部各座標 (第 2・第 5MP 関節, 尺骨茎状突起) の中点の 3 次元的なスピードとし, 研究課題 2 では, 手部スピードと手部の水中のストローク時間の積で水中手部移動距離を算出した. 手部迎角は, 尺骨茎状突起から第 5MP 関節と第 2MP 関節を指す 2 つのベクトルで構成される手部平面と, 手部速度ベクトルの間の角度として計算された (Figure 7b). これらの変数は, それぞれモーションキャプチャの設置された水中ストロークの区間のみの平均値とした.

2.2 手掌と手背に働く流体力学的圧力

センサで測定された圧力値 ($P_{measured}$) は, 流体力学的圧力である P_{effect} と $P_{potential}$ の合計である (Eq.1). P_{effect} は, センサの表面に垂直に作用する圧力で, 泳動作による流体のエネルギー変化を反映したものである. $P_{potential}$ は, ポテンシャル, すなわち水深の変化による圧力である (Eq.2).

$$P_{measured} = P_{effect} + P_{potential} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$P_{potential} = \rho g z \quad (\text{Eq. 2})$$

ここで、 ρ は水の密度 (997 kg/m³), g は重力加速度 (9.80665 m/s²), z は水面では0とし、深くなるにつれて正の値として増加するとした。手部に取り付けた各圧力センサの位置は、それぞれの対となるセンサがほぼ同じ水深にあると仮定し、第2、第5中手指節関節の座標と両関節の midpoint から算出した。

圧力分布測定では、圧力は大気圧を0と設定した。各手部のセグメントにおける取得した圧力データは、角川ほか (2019) の方法を参考に Low-pass Butterworth digital filter を用いて平滑化した。手部流体力の大きさは、手掌と手背の圧力差に手の面積を乗じたものであるため、手掌と手背のそれぞれの P_{effect} を示すことが重要である。手掌と手背の P_{effect} を求める際には、 $P_{measured}$ を平均するのではなく、3つのセグメントのそれぞれの面積 (Figure 7a, A₁-A₃) と水深による圧力 ($P_{potential}$) を考慮した (Eq. 3, 4)。

$$Palm\ pressure = \frac{\sum_{i=1}^3 (p_{palm_i} - P_{potential_i}) \times A_i}{A} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$Dorsal\ pressure = \frac{\sum_{i=1}^3 (p_{dor_i} - P_{potential_i}) \times A_i}{A} \quad (\text{Eq. 4})$$

ここで、 A_i は i 番目のセグメントの手部面積 ($i=1-3$), p_{palm_i} と p_{dor_i} はそれぞれ手掌と手背の i 番目のセグメントに働く $P_{measured}$, $P_{potential_i}$ は i 番目のセグメントの水深による圧力を示す。A は手部全体の面積を示す。手掌と手背の圧力の平均値は、手部が水中にある区間を対象として算出した。

2.3 手部流体力と手部推進力

手部の各セグメントで算出した手掌と手背の圧力差に各セグメントの手部平面積を乗じることによって手部流体力を算出した。手掌と手背の圧力差の計算では、手掌と手背のセンサの深さや圧力が作用する手部面積が同一であるため、2.2における流体力学的圧力の算出とは異なり、深さや手部面積を考慮する必要がない。したがって、単純に、手掌と手背の圧力センサで計測された値の差を圧力差とした。本研究で使用された圧力センサでは、手部平面に対して垂直に作用する圧力が計測される。そのため、手部流体力が作用するベクトルの方向は、手部平面に対して垂直な法線ベクトルの方向と一致すると仮定し、手部流体力の作用するベクトルを決定した (Figure 7c)。加えて、手部流体力は手部に働いた合力であるため、泳者の推進方向に働いた成分を求める必要がある。法線ベクトルの各方向成分の単位ベクトルを求め、流体力を各方向成分 (X, Y, Z) に分解し、泳者の推進方向である Y 軸方向に働く流体力を手部推進力と定義した (角川ほか, 2019) (Figure 7c)。研究課題 1-1, 1-2 では、LED マーカーと圧力センサが右手部にのみ貼付されたため、右手部で計測された流体力と推進力の 1 ストロークサイクルの平均値を求めた。研究課題 2 では、左右の手部で流体力と推進力を計測したため、それぞれの時間において左右の手部で計測された値の合計値を算出し、その 1 ストロークサイクルの平均値を求めた。加えて、手部流体力をどれだけ有効に手部推進力として作用させたかを示す推進力比率を

算出した。推進力比率は、手部推進力を手部流体力で除すことで算出した (Tsunokawa et al. 2018a)。

V. 研究課題 1

V-1. 研究課題 1-1

最大下でストローク頻度を増加させた時の、
泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化

1. 目的

泳者内でストローク頻度を上昇させることで、泳速度の上昇と共に手部推進力が上昇することは明らかになっているが、どのような要因によって手部推進力が上昇するかは明らかでない。そこで、研究課題 1-1 では、最大下でストローク頻度を増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 対象者

対象者は自由形、平泳ぎ、個人メドレーを専門とする男子競泳選手 8 名とした。対象者の競技レベルは、全国大会出場から全国大会決勝レベルであった。全ての対象者の年齢、身長、体重、専門種目、50 m 自由形のベストタイム、50 m 自由形の FINA Point を Table 1 に示した。FINA Point は、種目や男女の違いを超えて泳記録を比較するために国際水泳連

盟が定めた指標であり，世界記録を基準として算出される (Eq. 5) . なお，式中の B は基準記録であり，最新の世界記録をもとに国際水泳連盟が決定しており，T は算出対象である泳記録である．また，対象者には，研究の趣旨と内容，危険性について説明し，書面にて参加の同意を得た．なお，本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認（課題番号：第体 019-115 号）を得て行った．

$$\text{FINA Point} = 1000 \times (\text{B} / \text{T})^3 \quad (\text{Eq. 5})$$

Table 1 Physical characteristics, specialty and performance level of the swimmers.

Subject	Age (years)	Height (m)	Weight (kg)	Specialty	Best Record of 50 m front crawl (s")	FINA Point
A	24	1.84	81.0	Front crawl	22.96	755.3
B	32	1.76	78.0	Breast stroke	24.54	618.6
C	22	1.68	64.0	Individual Medley	24.20	645.1
D	23	1.84	81.0	Front crawl	22.74	777.5
E	23	1.86	84.0	Front crawl	23.80	678.2
F	20	1.77	80.0	Front crawl	23.35	718.1
G	20	1.87	80.0	Front crawl	23.37	716.3
H	20	1.75	76.0	Individual Medley	24.31	636.4
mean	23.0	1.80	78.0		23.66	693.2
SD	3.7	0.06	5.7		0.61	54.1

2.2 実験設定

対象者は、任意のウォーミングアップの後、壁から 5 m と 25 m の間の 20 m のクロール泳を無呼吸で 5 試技実施した。1 回目の試技は全力泳とし、解析対象であるその後の 4 試技におけるストローク頻度を決定するために実施した。全力泳のストローク頻度を基準 (100%) とした上で、その後の 4 回の試技を 70, 80, 90, 100% のストローク頻度 (以下 T70%, T80%, T90%, T100%) で実施した。T70% から T100% では、電子音メトロノーム (TEMPO TRAINER PRO, FINIS, Inc.) に従って泳ぐことにより調節をした。それぞれの試技でストローク頻度は異なるが、指定されたストローク頻度で最速で泳ぐことを目指すように指示した。電子音メトロノームは、スイミングキャップと頭部の間に入れ固定した。T70% から T100% の各試技のストローク頻度は、上方から撮影した映像により 3 ストロークサイクル分の平均値とし、そのストローク頻度が指示したストローク頻度の $\pm 2.5\%$ 以内であれば適正とし、2.5% より外れた場合は再度同じ試技を実施した。この適正の基準は、先行研究での基準 (± 2 cycle/min, Potdevin et al. 2006) よりも厳しいものである。なお、本研究でのクロール泳における 1 ストロークサイクルは、泳者の片方の手部が入水してから再度同側の手部が入水するまでとした。試技順序は、T70 % から T100 % を昇順で行った。その理由として、予備実験にてランダムな試技順にて実施した際、昇順で実施した場合に比べ、数名の選手で指示された試技のストローク頻度を達成できず失敗試技が増えたためである。そこで失敗試技を最小限にし、疲労を少なくするため昇順で試技を実施することとし

た。対象者には電子音メトロノームに慣れてもらうために、電子メトロノームから発せられる音に合わせて泳ぐ練習を、少なくとも週2回3週間程度行わせた。

2.3 統計解析

本研究の統計処理は、SPSS Statistics 25.0 を用いて行った。サンプルの正規性は、Shapiro-Wilk の正規性の検定を用いて検証した。その結果、すべてのデータで正規性は棄却されなかった。それ故、分析項目の試技間における変数の平均値の差の検定には、対応のある t 検定及び対応のある一元配置分散分析を行った。主効果が認められた場合には、Bonferroni 法を用いて多重比較を行った。統計的有意水準は、 $P < 0.05$ に設定した。また、ストローク頻度の効果量として η^2 を算出し、効果量の大小の基準値は以下のようにみなされた。 $0 < \eta^2 \leq 0.04$ の場合は効果なし、 $0.04 < \eta^2 \leq 0.25$ の場合は小さい効果、 $0.25 < \eta^2 \leq 0.64$ の場合は中程度の効果、 $\eta^2 > 0.64$ の場合は強い効果、とした (Ferguson, 2009)。

3. 結果

Table 2 に 1 ストローク中の泳速度、ストローク頻度、ストローク長および水中ストローク中の各変数の平均値を示した。Figure 8 には各泳者の各ストローク頻度における手掌と手背の圧力値の変化を示した。ストローク頻度の上昇に伴い泳速度は有意に上昇 ($F [3,21] = 84.20, p < 0.001$)、ストローク長は有意に低下した ($F [3,21] = 43.61, p < 0.001$)。手部推進力 ($F [3,21] = 19.67, p < 0.001$)、手部流体力 ($F [3,21] = 18.61, p < 0.001$) は、ストローク頻度の上昇に伴い有意に増加した。推進力比率は、ストローク頻度の違いによる主効果が認められたものの ($F [3,21] = 5.96, p = 0.004$)、試技間の有意差は認められなかった。ただし、推進力比率におけるストローク頻度の効果量は中程度であった ($\eta^2 = 0.46$)。手掌の圧力はストローク頻度の違いによる主効果が認められなかった。一方で、手背は負圧を示し、ストローク頻度の上昇に伴い有意に増加した ($F [3,21] = 29.87, p < 0.001$) (Figure 8)。手部スピードは有意に上昇し ($F [3,21] = 81.57, p < 0.001$)、迎角は T90%まで有意に上昇した ($F [3,21] = 17.05, p < 0.001$)。

Table 3 に glide, pull および push 局面における各変数の平均値を示した。局面ごとの手部推進力は、ストローク頻度の上昇に伴い glide 局面 ($F [3,21] = 16.52, p < 0.001$) と push 局面 ($F [3,21] = 4.71, p = 0.012$) で有意に増加した。手部流体力は glide 局面 ($F [3,21] = 10.02, p = 0.016$) と push 局面 ($F [3,21] = 9.11, p = 0.019$) でストローク頻度の違いによる主効果は認められたが、試技間に有意な差は認められなかった。ただし、流体力における

ストローク頻度の効果量は glide 局面で 0.59, push 局面で 0.42 であり中程度であった。推進力比率は glide 局面のみで、ストローク頻度の上昇に伴い有意に上昇した ($F [3,21] = 5.64$, $p = 0.005$)。手掌の圧力は、全ての局面においてストローク頻度の違いによる主効果は認められなかった。手背の圧力は全ての局面で負圧を示し、ストローク頻度の上昇に伴い glide 局面 ($F [3,21] = 13.42$, $p < 0.001$) と push 局面 ($F [3,21] = 13.33$, $p < 0.001$) で有意に増加した。手部スピードは、glide 局面 ($F [3,21] = 86.87$, $p < 0.001$) と push 局面 ($F [3,21] = 16.83$, $p < 0.001$) でストローク頻度の上昇に伴い有意に上昇した。迎角は、glide 局面 ($F [3,21] = 8.9$, $p = 0.001$) でストローク頻度の上昇に伴い有意に上昇した。

Table 2 Mean values during one stroke cycle of each parameter.

	T70%	T80%	T90%	T100%	η^2
<i>Swimming velocity</i> (m/s)	1.45 ± 0.06	1.57 ± 0.07	a 1.67 ± 0.06	ab 1.73 ± 0.06	abc 0.92
<i>Stroke frequency</i> (stroke/s)	0.65 ± 0.03	0.75 ± 0.04	a 0.85 ± 0.05	ab 0.94 ± 0.06	abc 0.96
<i>Stroke length</i> (m/stroke)	2.24 ± 0.14	2.10 ± 0.09	a 1.98 ± 0.11	ab 1.86 ± 0.11	abc 0.86
<i>Hand propulsive force</i> (N)	23.19 ± 2.49	26.97 ± 3.45	a 32.93 ± 7.61	a 35.53 ± 8.50	abc 0.78
<i>Hand resultant force</i> (N)	32.11 ± 1.83	35.39 ± 2.34	a 40.97 ± 3.84	a 45.49 ± 3.83	abc 0.76
<i>Propulsion ratio</i>	0.70 ± 0.07	0.73 ± 0.04	0.76 ± 0.06	0.76 ± 0.04	0.46
<i>Palm pressure value</i> (kPa)	3.07 ± 1.58	2.74 ± 2.03	3.73 ± 2.30	3.69 ± 3.08	-
<i>Dorsal pressure value</i> (kPa)	-5.38 ± 1.05	-6.76 ± 0.57	-8.24 ± 1.37	ab -9.28 ± 1.21	abc 0.81
<i>Hand speed</i> (m/s)	2.09 ± 0.12	2.22 ± 0.12	a 2.38 ± 0.18	ab 2.50 ± 0.17	abc 0.92
<i>Angle of attack</i> (°)	29.7 ± 2.3	32.8 ± 3.5	36.8 ± 3.4	ab 36.5 ± 4.1	a 0.71

a: Significant difference when compared to T70%, b: Significant difference when compared to T80%,

c: Significant difference when compared to T90%.

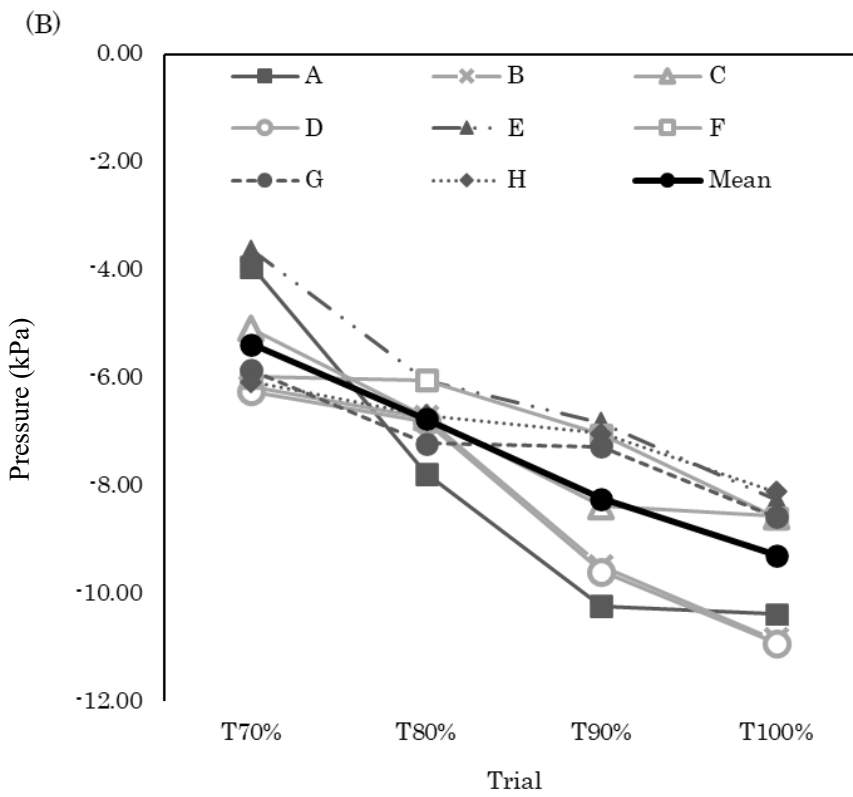
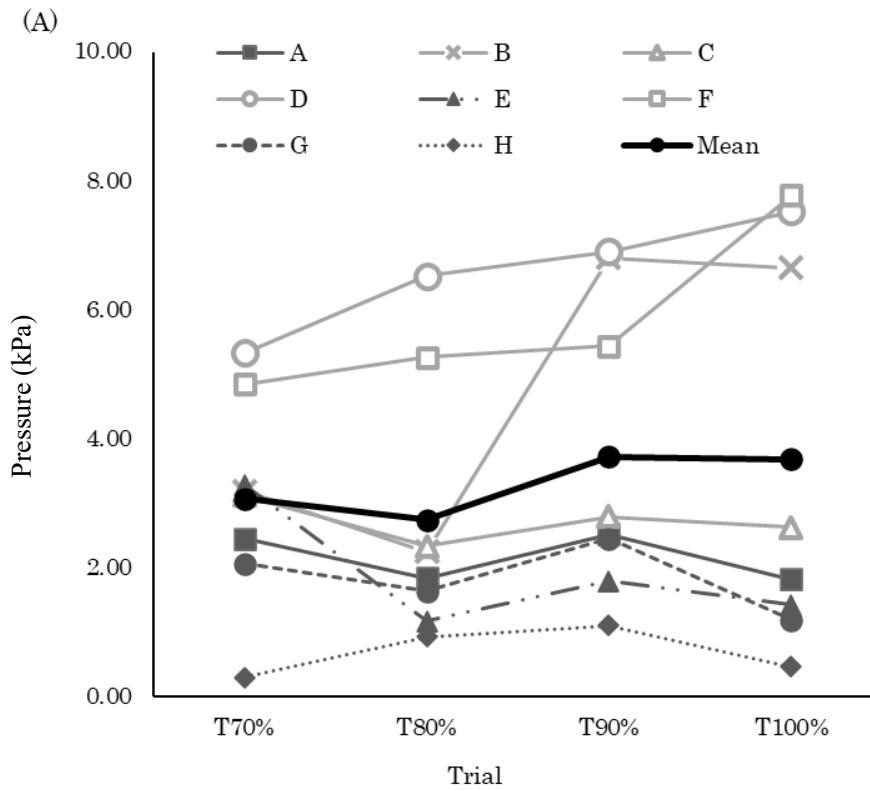


Figure 8 Changes in the mean pressure values in the palm (A) and dorsal (B) of each swimmer for each trial.

Table 3 Mean values of each parameter at three phases (glide, pull and push).

Phase	T70%	T80%	T90%	T100%	η^2			
Glide								
<i>Hand propulsive force</i> (N)	8.2 ± 5.8	10.5 ± 5.2	16.8 ± 9.0	a	23.8 ± 11.8	abc	0.7	
<i>Hand resultant force</i> (N)	22.1 ± 6.9	26.4 ± 10.3	35.2 ± 16.9		42.1 ± 20.8		0.59	
<i>Rate of propulsion</i>	0.39 ± 0.22	0.47 ± 0.25	0.51 ± 0.17		0.56 ± 0.13	a	0.45	
<i>Palm pressure value</i> (kPa)	1.70 ± 1.33	1.62 ± 1.93	2.40 ± 2.13		2.71 ± 2.96		-	
<i>Dorsal pressure value</i> (kPa)	-1.97 ± 1.31	-2.79 ± 0.70	-3.32 ± 1.18		-4.55 ± 1.43	abc	0.66	
<i>Hand speed</i> (m/s)	1.79 ± 0.10	1.99 ± 0.09	a	2.17 ± 0.19	ab	2.39 ± 0.17	abc	0.93
<i>Angle of attack</i> (°)	11.1 ± 6.8	15.1 ± 9.3		15.8 ± 9.1	a	18.5 ± 7.6	a	0.56
Pull								
<i>Hand propulsive force</i> (N)	71.9 ± 9.9	71.1 ± 8.6	78.5 ± 16.6		78.1 ± 17.1		-	
<i>Hand resultant force</i> (N)	84.0 ± 9.1	83.1 ± 9.1	93.8 ± 15.7		93.3 ± 15.9		-	
<i>Rate of propulsion</i>	0.85 ± 0.07	0.86 ± 0.05	0.84 ± 0.07		0.83 ± 0.06		-	
<i>Palm pressure value</i> (kPa)	5.27 ± 2.78	4.84 ± 2.52	6.05 ± 2.34		5.97 ± 2.97		-	
<i>Dorsal pressure value</i> (kPa)	-8.62 ± 1.83	-9.04 ± 2.17	-9.33 ± 1.85		-9.77 ± 1.22		-	
<i>Hand speed</i> (m/s)	2.09 ± 0.16	2.14 ± 0.17	2.22 ± 0.21		2.25 ± 0.20		-	
<i>Angle of attack</i> (°)	55.8 ± 8.9	54.3 ± 4.4	59.5 ± 7.7		60.2 ± 4.7		-	
Push								
<i>Hand propulsive force</i> (N)	65.4 ± 10.0	69.3 ± 14.8	78.9 ± 14.6	a	78.4 ± 17.6	a	0.4	
<i>Hand resultant force</i> (N)	86.1 ± 13.9	84.9 ± 17.1	97.6 ± 23.2		98.8 ± 24.0		0.42	
<i>Rate of propulsion</i>	0.76 ± 0.08	0.82 ± 0.06	0.82 ± 0.08		0.81 ± 0.10		-	
<i>Palm pressure value</i> (kPa)	3.79 ± 2.30	2.96 ± 3.03	3.59 ± 2.98		3.30 ± 3.77		-	
<i>Dorsal pressure value</i> (kPa)	-11.19 ± 1.00	-11.39 ± 2.02	-13.21 ± 1.78	a	-14.29 ± 1.70	abc	0.66	
<i>Hand speed</i> (m/s)	2.65 ± 0.15	2.64 ± 0.20	2.75 ± 0.19		2.88 ± 0.18	abc	0.71	
<i>Angle of attack</i> (°)	44.2 ± 8.5	44.8 ± 8.2	45.4 ± 8.4		42.6 ± 8.5		-	

a: Significant difference when compared to T70%, b: Significant difference when compared to T80%,

c: Significant difference when compared to T90%.

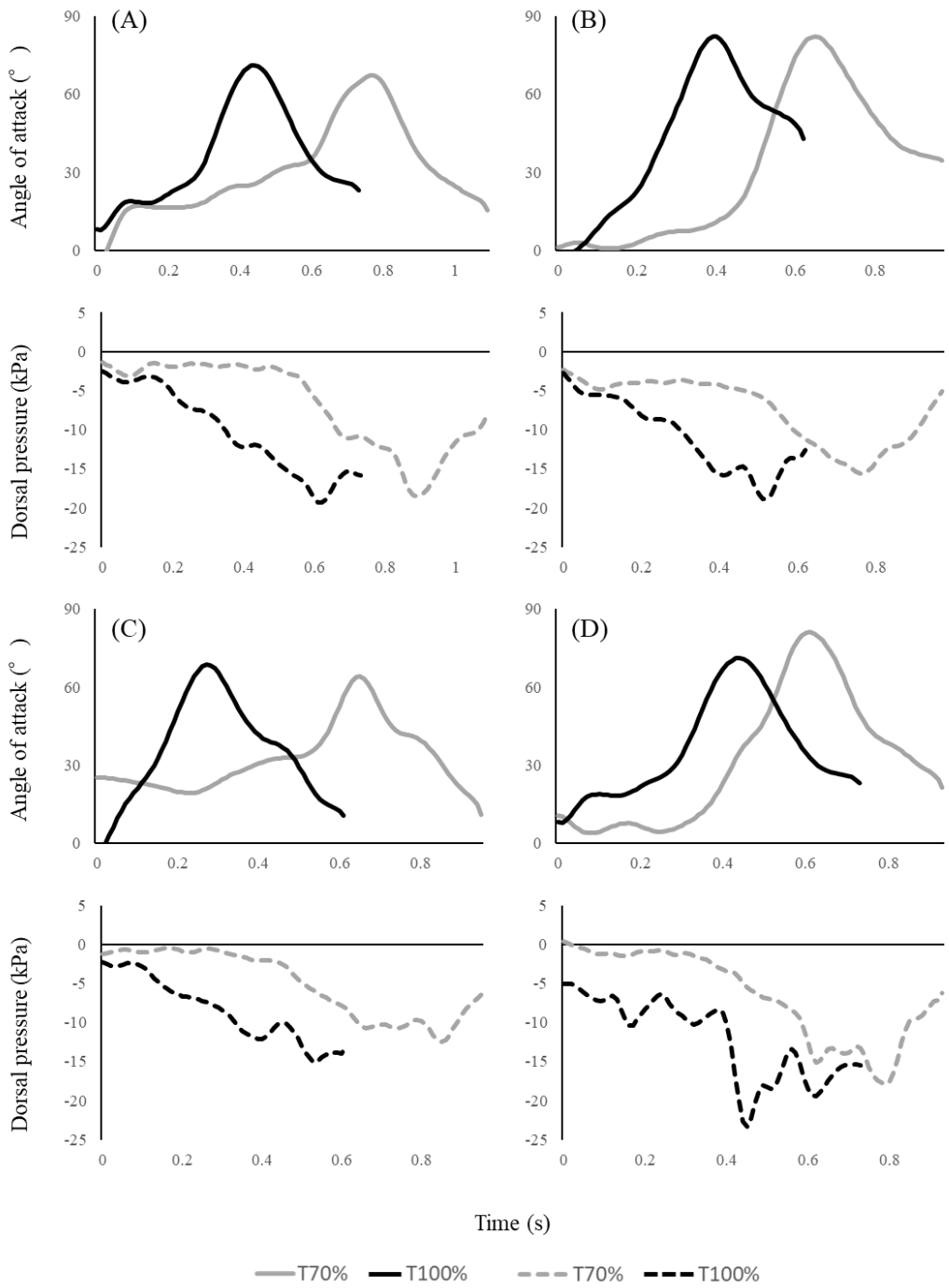


Figure 9 Changes in angle of attack and pressure on the dorsum of the hand over time in swimmer A, B, C and D.

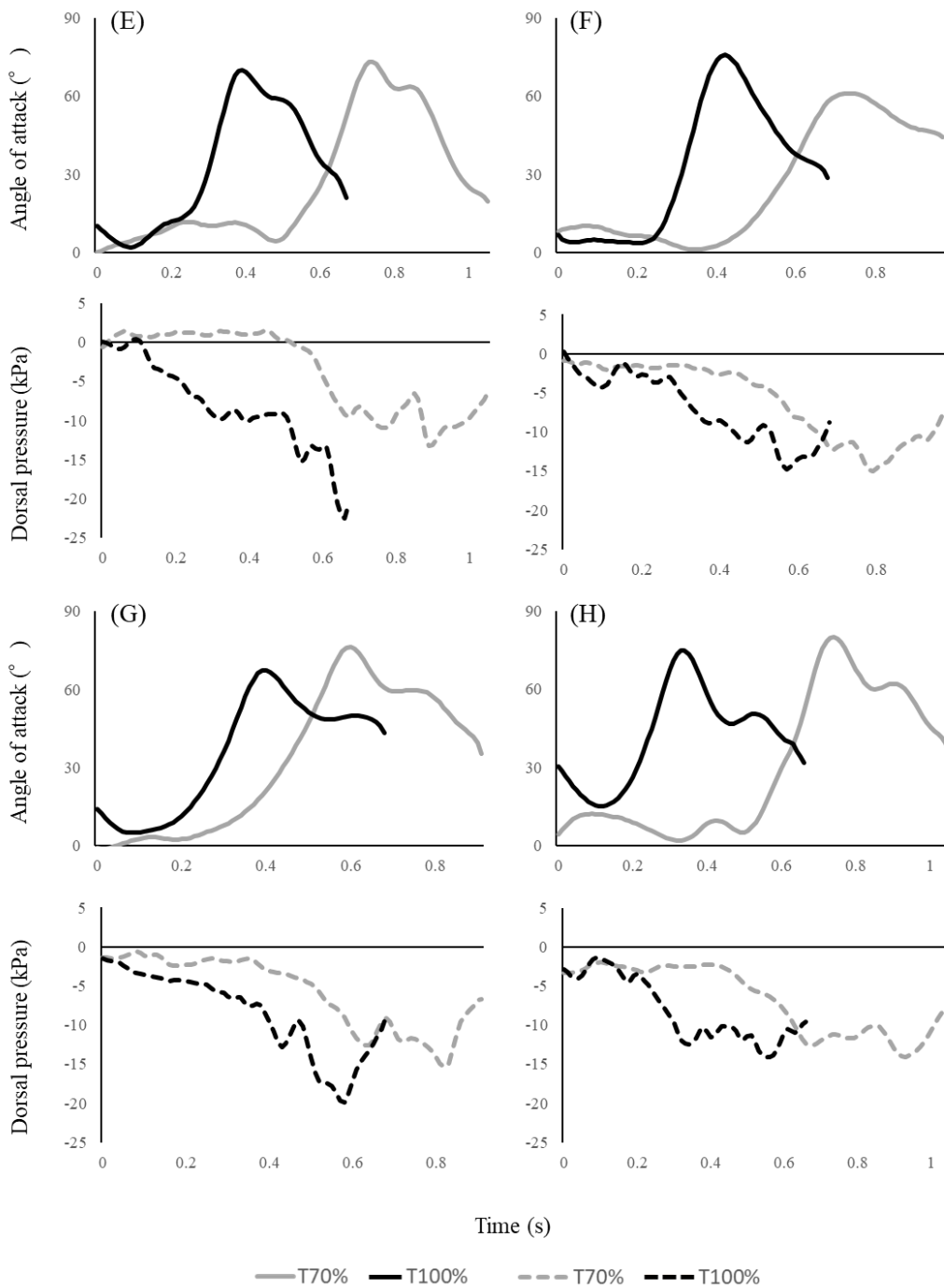


Figure 10 Changes in angle of attack and pressure on the dorsum of the hand over time in swimmer E, F, G and H.

4. 考察

研究課題 1-1 では、最大下でストローク頻度を増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにすることを目的とした。その結果、手部推進力および手部流体力は有意に上昇し、手背の負圧も有意に増加したが、手掌の圧力は試技間で変化しなかった。迎角は T90%まで有意に上昇し、手部スピードも全試技を通して有意に上昇した。推進力比率は上昇傾向を示し、1 ストロークを動作局面で分けた際、glide 局面でのみ推進力比率の有意な上昇が認められた。

手部流体力は手掌と手背の圧力差と手部平面積の積によって求められる。手部平面積は泳者個々で変化しないため、圧力差の変化が流体力の大きさを変化させることになる。先行研究では、1 周期中のクロール泳やスカーリング動作において、手掌面では正圧が計測され、手背面では負圧が計測された (Tsunokawa et al. 2018b; Koga et al. 2020; Takagi et al. 2014a)。角川ほか (2015a) や Kawai et al. (2018) も、1 周期中の平泳ぎのキック動作や巻き足動作の足部における流体力の増加は、足部の移動方向に正対する足底側の圧力ではなく、足背の負圧の増加に起因すると報告した。本研究では、1 周期中の圧力分布の変化だけでなく、試技のストローク頻度を増加させた際の圧力分布の変化を調査した。その結果、試技間の手部流体力の増加は、手掌の正圧の増加ではなく、手背の負圧の増加に起因することが新たに明らかとなった。局面ごとにおける試技間の比較では、glide 局面と push 局面において手背の負圧が有意に増加した。一方で、手掌の圧力は、いずれの局面でもストロー

ク頻度の違いによる試技間の差は認められなかった。それ故、泳者内のストローク頻度の上昇により流体力が増加する要因は、手背の負圧が増加することであると言える。

この手背の負圧が増加する要因は、水の流れが手掌側から手背側に向かう際、手部から流れが剥離することで、手背面の後流中に渦が発生し、手背表面の水の流れの速度が高まるためであると考えられる。手背面の後流中における剥離した水による渦の発生は、粒子画像流速測定法やコンピュータシミュレーションによるクロール泳動作中の手部周りの水の流れの可視化によって確認されている (Matsuuchi et al. 2009; Takagi et al. 2014b)。渦の発生の有無は迎角の大きさに関連している可能性がある。Samson et al. (2018) は、手部の迎角を 10°毎に 0°から 90°に変化させた際の手部周りの流れを CFD でシミュレーションした。その結果、迎角が 20°から 90°において手背面での前縁渦の発生がみられたことを示した。一方で、0°や 10°では手背の流れは安定し、手部に働く力も変化しなかった。Dickinson (1996) は、定常状態において、15°未満の迎角では圧力抵抗は非常に小さく、15°を超えると、迎角の増加に伴い圧力抵抗が急速に増加することを示唆している。このことから、20°以下の迎角では渦が生じにくく、手背の負圧が増加しにくいと考えられる。

本研究では、迎角は T90%まで有意に上昇し、特に glide 局面において有意に上昇した。経時的な迎角と手背の圧力の変化をしてみると、glide 局面において迎角が 20°以下である時間が減少し、手背の負圧が低い時間も減少していた (Figure 9, 10)。一方で、迎角の最大値に大きな違いは認められなかった (Figure 9, 10)。つまり、ストローク頻度の上昇に伴う迎

角の上昇は、ストロークを通して迎角が全体的に増加するというよりも、迎角の小さい時間（20°以下の迎角）が減少したことによる結果であると推察される。

ストローク頻度の上昇に伴う glide 局面の 20°以下の迎角の時間の減少は、ストローク頻度を上昇させるという課題のために、glide 局面のストローク時間を短縮した結果であったと考えられる。Seifert et al. (2004) は、ペースを上昇させることでストローク頻度が上昇、glide 局面の相対的な割合が有意に減少、Pull および Push 局面の割合が有意に上昇したことを報告している。絶対時間は、Pull および Push 局面の時間に変化がなく、glide 局面の時間が減少したことでストローク頻度が上昇したと示されている。Schnitzler et al. (2008; 2010) および Seifert et al. (2010) も同様の結果を報告している。つまり、泳者は Pull や Push ではなく、glide 局面の時間を変化させることでストローク頻度をコントロールしていると言える。この glide 局面の時間の短縮は、他の局面に比べて推進力の小さい glide 局面の割合の減少および、推進力の大きい Pull および Push 局面の割合の増加により、1 ストローク全体での平均手部推進力が増加すること影響していた (Table 2, 3)。

手背における負の圧力は、先に述べたように、手背での渦の発生が要因であると推察されている。加えて、その渦の強さはその物体の運動スピードによって変化し、手背の負圧の高さに影響を及ぼす可能性がある。渦は、渦度によって流れの回転運動成分の度合いが表される。湍脇ほか (2007) は、翼のヒービング運動⁸中の後流の渦構造を異なる運動速度において

⁸ ヒービング運動とは、並進運動である。

て調査し、より高い運動速度で過度が高かったことを報告した。本研究でも、平均迎角の増減がない push 局面において、手部スピードの増加に伴い手背の負圧が増加した。この結果は、澁脇ほか (2007) の一部をサポートするものであり、手部スピードの高さは手背の負圧の高さに影響すると推察された。

5. まとめ

研究課題 1-1 では、最大下でストローク頻度を増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにすることを目的とし、以下の知見が得られた。

- (1) ストローク頻度を上昇させた際、泳速度と共に手部推進力は有意に増加した。
- (2) 手部推進力の増加は、手部流体力の増加および推進力比率の上昇が影響した。
- (3) ストローク頻度の上昇による手部流体力の増加には、手掌の正圧よりも手背の負圧の増加が大きく影響した。
- (4) 手背の負圧の増加は、 20° 以下の迎角の時間が減少したことと、手部スピード上昇したことが影響したと推察された。

V-2. 研究課題 1-2

ストローク頻度を超最大へ増加させた時の、

泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化

1. 目的

泳者の主観的な最大努力以上（超最大）にストローク頻度を上昇させた際に、泳速度は上昇しないことが示されているが、その要因は明らかでない。そこで、研究課題 1-2 では、ストローク頻度を超最大へ増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 対象者

対象者は自由形、個人メドレーを専門とする男子競泳選手 8 名とした。全ての対象者の年齢、身長、体重、専門種目、50 m 自由形のベストタイム、50 m 自由形の FINA Point を Table 4 に示した。対象者には、研究の趣旨と内容、危険性について説明し、書面にて参加の同意を得た。なお、本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認（課題番号：第体 019-115 号）を得て行った。

Table 4 Physical characteristics, specialty and performance level of swimmers.

Swimmer	Age (years)	Height (m)	Weight (kg)	Specialty	Best Record of 50 m front crawl (s)	FINA Point
A	23	1.84	81.0	Front crawl	22.74	777.5
B	24	1.84	81.0	Front crawl	22.96	755.3
C	23	1.78	82.5	Front crawl	23.19	733.1
D	20	1.77	80.0	Front crawl	23.35	718.1
E	20	1.87	80.0	Front crawl	23.37	716.3
F	23	1.86	84.0	Front crawl	23.80	678.2
G	20	1.83	77.0	Front crawl	24.26	640.3
H	20	1.75	76.0	Individual Medley	24.31	636.4
mean	21.6	1.82	80.2		23.50	706.9
SD	1.7	0.04	2.5		0.54	48.0

2.2 実験設定と統計分析

実験設定は概ね研究課題 1-1 と同様である。異なる部分は、試技のストローク頻度の設定である。全力泳のストローク頻度を基準（100%）とした上で、その後の 3 回の試技を 100, 110, 120%のストローク頻度（以下 T100%, T110%, T120%）で実施した。

3. 結果

Table 5 は、1 ストロークサイクルと水中ストローク区間における各パラメータの平均値を示した。ストローク頻度は、指示どおりに有意に上昇した ($F [2,14] = 209.4, p < 0.001$)。手部スピードも有意に上昇した ($F [2,14] = 209.4, p < 0.001$)。泳速度に有意な変化は見ら

れなかった。ストローク頻度の上昇に伴い、各試技間でストローク長が有意に低下した ($F [2,14] = 130.6, p = 0.001$)。手部推進力 ($F [2,14] = 8.9, p = 0.003$)、手掌の圧力 ($F [2,14] = 8.7, p = 0.004$) も有意に低下した。推進力比率、手背の圧力は、ストローク頻度の違いによる主効果が認められたものの (それぞれ $F [2,14] = 5.0, p = 0.023, F [2,14] = 3.9, p = 0.045$)、試技間では有意な差が認められなかった。ただし、ストローク頻度の違いによる中程度の効果量 ($\eta^2 = 0.42, 0.36$) を示した。各試技間で手部流体力、迎角に有意差は認められなかった。

Figure 11 と Figure 12 は、3つの局面 (glide, pull, push) における各パラメータの平均値を示している。手部推進力は、pull 局面 ($F [2,14] = 11.0, p = 0.001$) および push 局面 ($F [2,14] = 17.8, p < 0.001$) で有意に低下した。手部流体力は push 局面で有意に低下し ($F [2,14] = 11.7, p = 0.001$)、推進力比率は pull 局面で有意に低下した ($F [2,14] = 11.7, p = 0.001$)。手掌の圧力は、push 局面で有意に低下し ($F [2,14] = 26.2, p < 0.001$)、手背の負圧は glide 局面で有意に増加した ($F [2,14] = 5.9, p = 0.014$)。手部スピードは、glide 局面 ($F [2,14] = 11.1, p = 0.001$) と push 局面 ($F [2,14] = 19.8, p < 0.001$) で有意に上昇した。迎角は push 局面で有意に低下した ($F [2,14] = 8.9, p = 0.003$)。

Table 5 Mean values during one stroke cycle of each parameter.

	T100%	T110%	T120%		
<i>Swimming velocity (m/s)</i>	1.75 ± 0.06	1.76 ± 0.07	1.74 ± 0.07		
<i>Stroke frequency (stroke/s)</i>	0.93 ± 0.05	1.01 ± 0.05	1.11 ± 0.06	a	ab
<i>Stroke length (m/stroke)</i>	1.89 ± 0.08	1.73 ± 0.07	1.57 ± 0.08	a	ab
<i>Hand propulsive force (N)</i>	34.1 ± 5.8	33.9 ± 6.2	29.7 ± 7.4		ab
<i>Hand resultant force (N)</i>	46.0 ± 8.9	45.6 ± 10.3	43.3 ± 10.3		
<i>Propulsion ratio</i>	0.75 ± 0.06	0.77 ± 0.08	0.69 ± 0.08		
<i>Palm pressure value (kPa)</i>	2.88 ± 2.22	2.78 ± 2.17	2.05 ± 2.45		ab
<i>Dorsal pressure value (kPa)</i>	-8.90 ± 1.31	-9.39 ± 1.64	-9.10 ± 1.59		
<i>Hand speed (m/s)</i>	2.49 ± 0.16	2.58 ± 0.15	2.69 ± 0.19		ab
<i>Angle of attack (°)</i>	34.8 ± 4.1	34.0 ± 3.6	33.3 ± 5.0		

a: Significant difference when compared to T100%, b: Significant difference when compared to T110%.

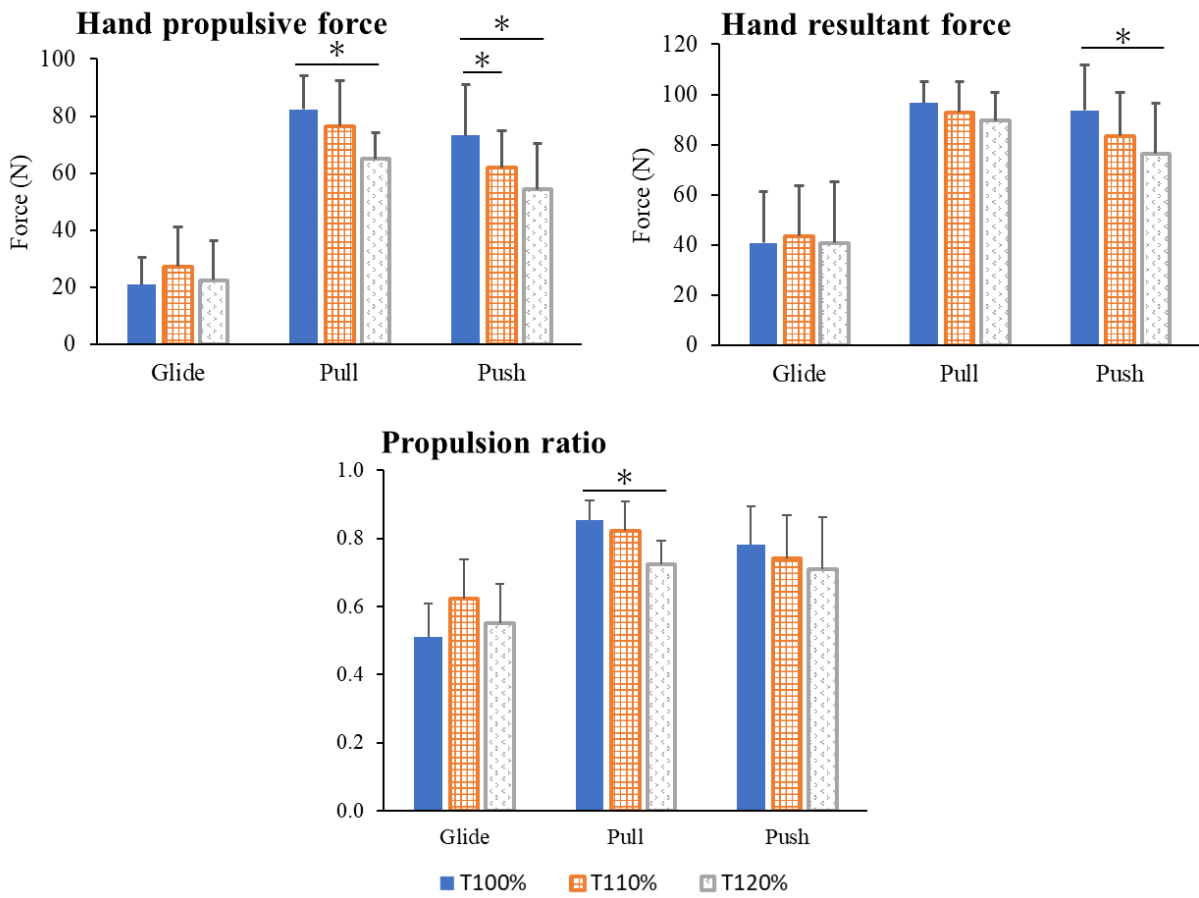


Figure 11 Hand propulsive force, hand resultant force, and propulsion ratio in each phase at different trials. (*: $p < 0.05$)

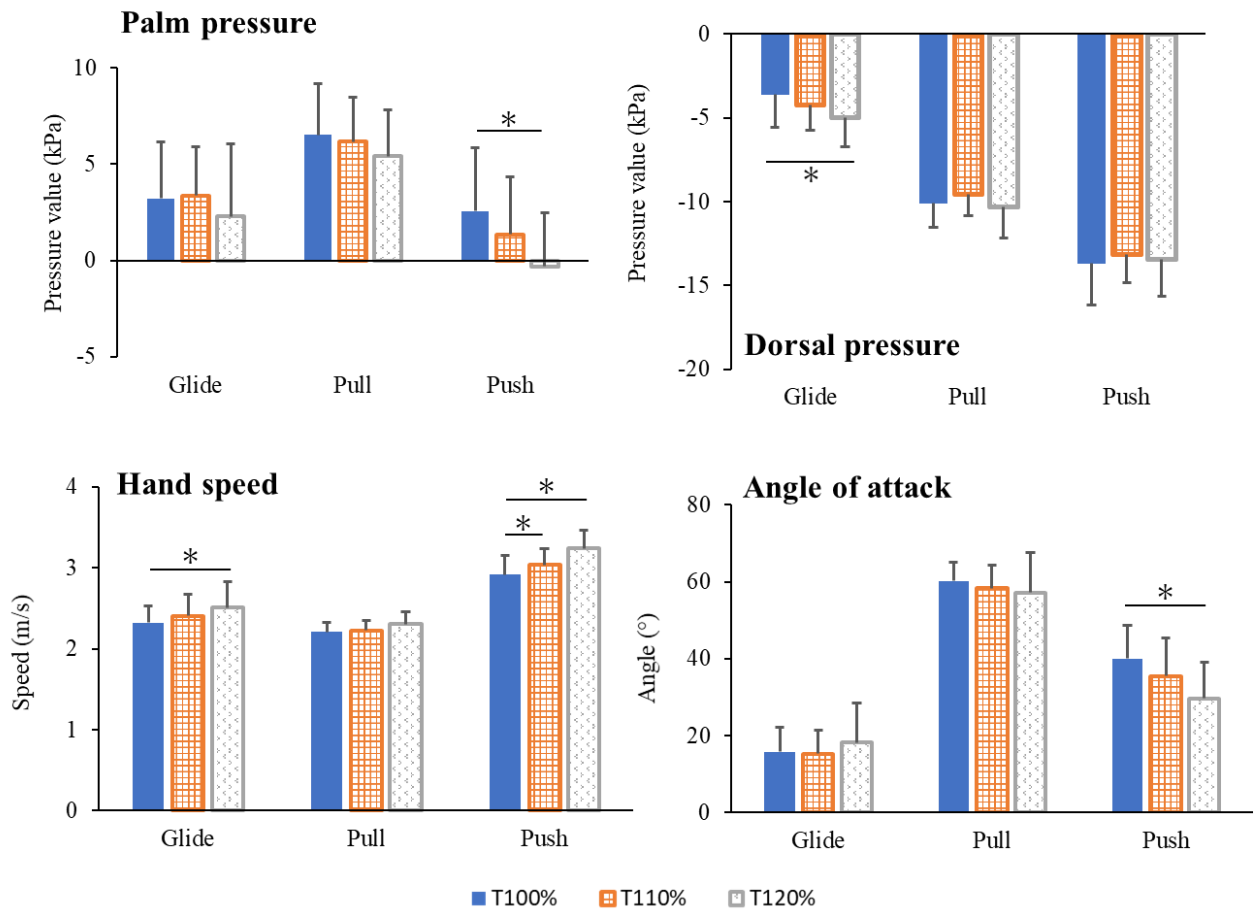


Figure 12 Palm pressure, dorsal pressure, hand speed, and angle of attack in each phase at different trials. (*: $p < 0.05$)

4. 考察

研究課題 1-2 の目的は、ストローク頻度を超最大へ増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにすることであった。先行研究では、超最大にストローク頻度を上昇させた際に、泳速度は上昇しないことが示されている (Craig and Pendergast 1979; Nakashima and Ono 2014)。しかし、その理由は不明であった。本研究の結果、超最大のストローク頻度へ上昇させることで、1 ストロークの手部推進力が有意に低下したことで泳速度が上昇しなかったと考えられた。手部推進力が低下した要因は、pull および push 局面における手部推進力の低下であった。

手部推進力が低下したにもかかわらず、泳速度は T100%と T120%で同程度であった。これはストローク頻度の上昇と関係している。クロール泳では、ストローク頻度の増加によって、ストローク全体の所要時間に対する非推進局面の時間の短縮や、左右のストロークにおける推進局面 (Pull と Push 局面) の重なりが大きくなることで、持続的な推進力発揮がなされる (Chollet et al. 2000; Seifert et al. 2004) (Figure 13)。つまり、T120%では、片手の手部推進力の低さをストローク頻度の高さにより、1 ストロークサイクルとしての推進力の低下を補った可能性がある。しかし、本研究では左右の上肢のコーディネーションを分析していないため、今後の研究で検討する必要がある。

T120%における手部推進力の低下は、ストロークの局面によって異なっていた。T120%における Pull 局面では、手部流体力は有意な変化がなかったものの、推進力比率が低下したことで手部推進力が低下した。手部流体力が変化しなかったことは、手部の移動方向に対

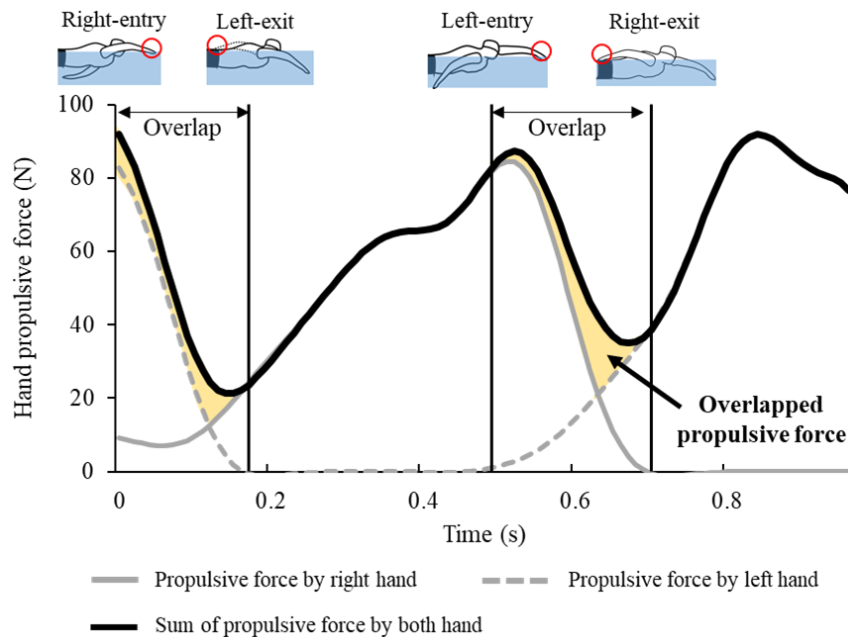


Figure 13 Schematic diagram of the overlap of the propulsive forces exerted by the left and right hands in stroke of front crawl swimming.

する傾き（迎角）と手部スピードに変化がなかったため，手部に働く力（手掌と手背の圧力）にも変化がなかったと推察できる．推進力比率の低下は，手部平面が推進方向以外に向く割合が増加し，手部流体力が左右方向や鉛直方向に発揮される割合が増加することで生じる．そこで，左右方向と鉛直方向に働いた流体力の解析を行った．その結果，泳者 H を除き T100%よりも T120%で身体に対して外側への力の発揮が顕著に増加した（Figure 14a, left panel）．鉛直方向の力の発揮は，泳者 F, G 除き変化が小さかった（Figure 14a, right panel）．身体に対する外側への大きな流体力の発揮という特徴は，Push 局面や Upsweep 局面といった局面に見られる出水へ移行する際の特徴と類似している（Maglisch 2003）．ただし，Push 局面や Upsweep 局面はストローク終盤の局面であるのに対し，Pull 局面はストローク中盤の局面である．したがって，T120%の Pull 局面では，高いストローク頻度を達成するため，早期に出水につながる動作へと移行していたと考えられる（Figure 14b）．

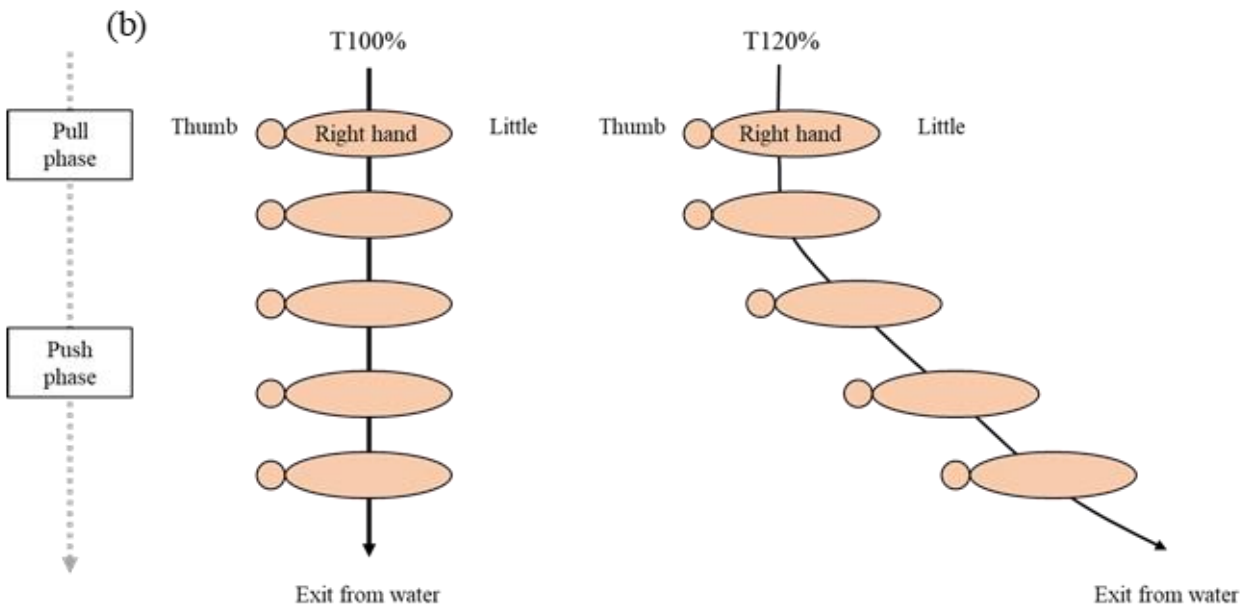
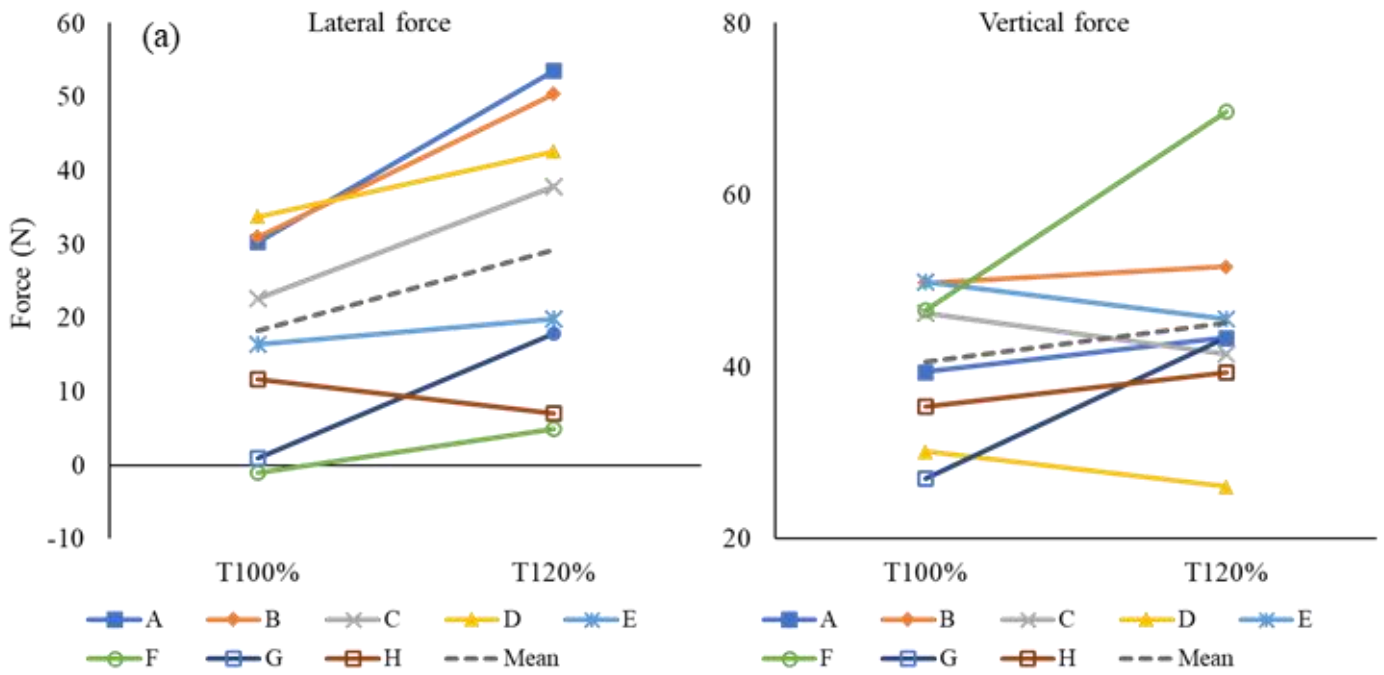


Figure 14 (a) Forces in the lateral and vertical directions in the pull phase. A positive value in the lateral direction means that the force is exerted outward to the body. A positive value in the vertical direction means that the force is exerted upward. (b) Image diagram of the hand movement for the hand to exit from water quickly at a high stroke frequency of T120%.

T120%における Push 局面での手部推進力低下は、迎角の低下が要因である可能性がある。手部流体力は手掌と手背の圧力差であるため、手掌の正圧が低下するか、手背の負圧が低下すると、手掌と手背の圧力差が縮小する。手掌の圧力は、迎角の影響を受けると考えられる。迎角が大きい場合、手掌に対する主流ベクトルの角度は手部平面に垂直に近くなり、手部に垂直に働く圧力値は増加する (Figure 15, left panel)。一方で、迎角が小さい場合、手部平面は主流ベクトルに対してほぼ平行に移動するため (Figure 15, right panel)、手部に垂直に働く圧力が減少する。T120%の push 局面では迎角の減少により、手部平面に垂直な主流ベクトルの圧力成分が減少したために、手掌に働く正圧が低下したと考えられる。

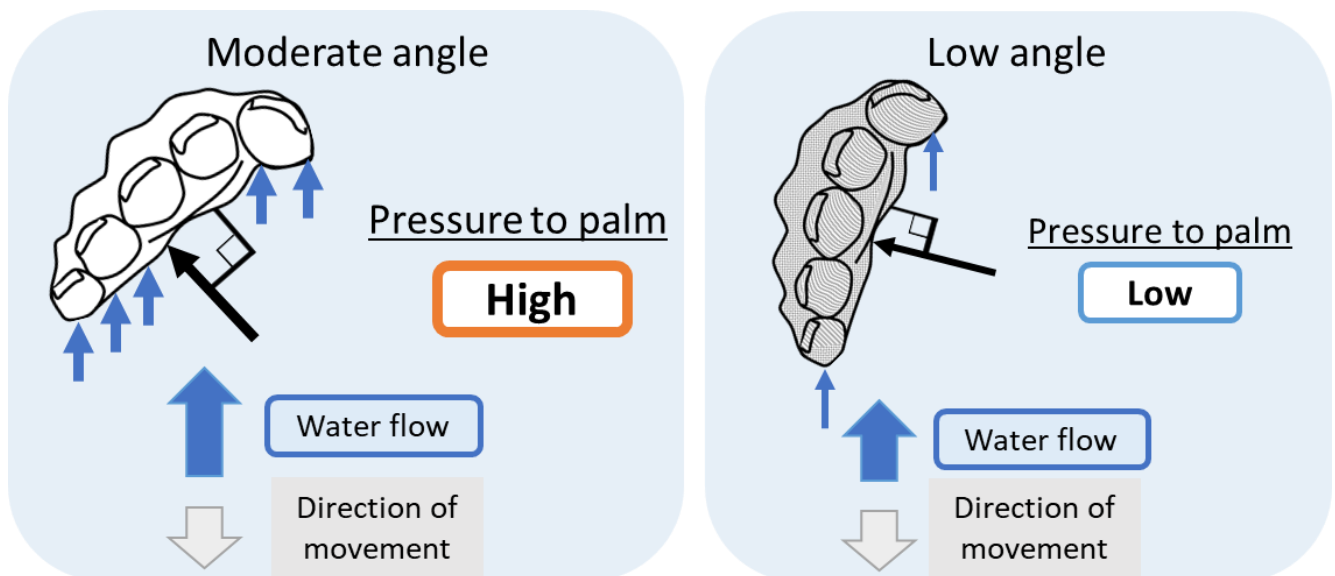


Figure 15 Image diagram of moderate (left) and low (right) angle of attack.

手背の負圧は、最大下ではストローク頻度、迎角および手部スピードの上昇によって増加したものの（研究課題 1-1）、超最大では変化はなく、有意に増加しなかった。手背の圧力は、手背の後流における流れの速度と関連し、流れの速度には渦生成と渦度の強さが影響すると考えられる（Dickinson 1996; Samson et al. 2018; 淵脇ほか. 2007）。20°以下の迎角では、手背の後流において渦が発生しづらく、流れの速度が高まらず、負圧の増加を妨げる可能性がある。そこで、T100%と T120%の push 局面において、push 局面時間に対して迎角が 20°以下である時間の割合を比較すると、泳者 H を除き T100%よりも T120%で増加していた（Figure 16b）。それ故、T120%の push 局面において迎角が 20°以下である割合が増加したことにより、手背の後流において渦が発生しづらく、手背の負圧が増加しなかった可能性がある。一方で、T120%では、手部スピードが上昇しているため、迎角は小さいが手部周りの流れの速度は高く、手背の負圧が低下するにも至らなかったと推察される。これらを説明にするには、PIV などによる流れ場の調査などの更なる裏付けが必要である。

研究課題 1-2 で課した高ストローク頻度では、push 局面では迎角の低下が手部推進力の低下の主要因であると考えられるため、泳速度の向上にはストローク頻度を上昇させた際に、迎角を維持することが重要である。ただし、手背に渦が発生するような迎角（おおよそ 20°以上）では、前面投影面積および圧力抵抗が大きいことで、手部の移動を妨げる大きな抵抗力が発生すると考えられる。さらに抵抗力は、移動速度の 2 乗以上に比例して増加する（日本水泳連盟編 2014）。つまり、20°以上の迎角では、手部に大きな抵抗力が働

くことで手部の移動速度を高めにくく、ストローク頻度も高めにくい。特に、push 局面の手部スピードは、水中ストローク局面の中で最も高いスピードである。そのため、T100%に対して T120%で迎角が小さく、手部流体力が小さかったという結果は、泳者が課された高ストローク頻度を達成するための適応であったと考えられる。したがって、ストローク頻度を高めて泳者の最高泳速度を向上させるには、最大努力時と同じ迎角を維持できるような技術もしくは体力的要素のトレーニングが必要になると考えられる。

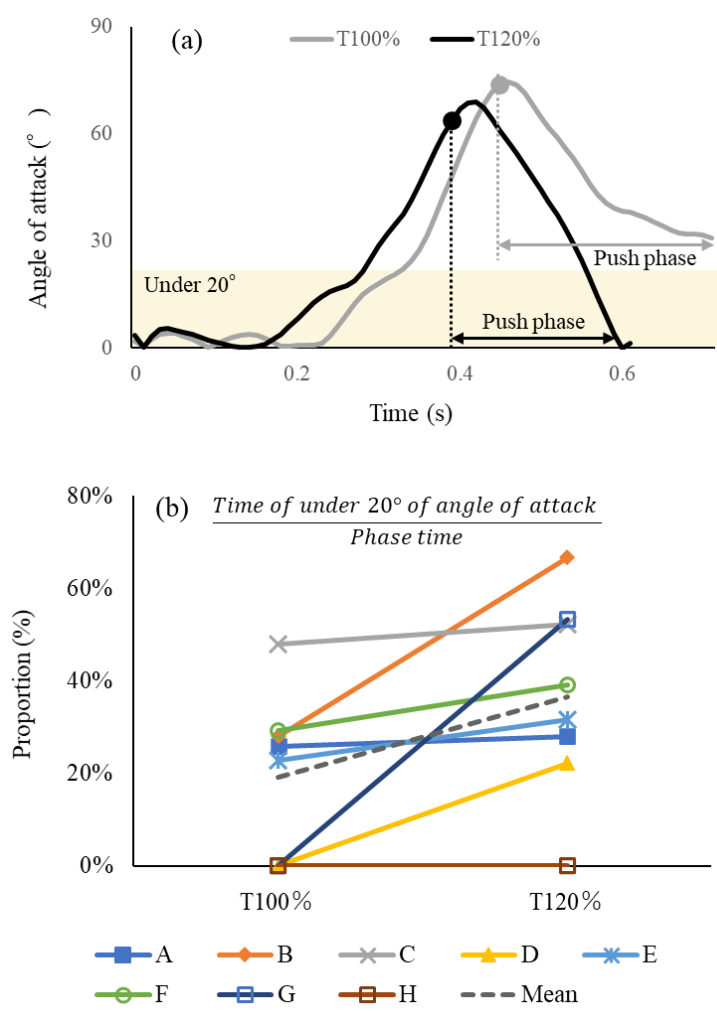


Figure 16 (a) Typical example of the change in angle of attack over time in swimmer D. (b) Comparison of the percentage of time with angle of attack of less than 20° to the phase time in the push phase in each swimmer (T100% vs T120%).

5. まとめ

研究課題 1-2 では、ストローク頻度を超最大へ増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにすることを目的とし、以下の知見が得られた。

- (1) 超最大へストローク頻度を上昇させた際、泳速度が上昇しなくなる要因として、手部推進力の有意な低下が挙げられた。
- (2) 手部推進力の低下の要因は、動作局面によって異なっていた。Pull 局面では、手部流体力は有意に変化しなかったものの、推進方向へ作用させる有効性が低下し手部推進力が低下した。Push 局面では、手部流体力の低下に伴い手部推進力が低下した。
- (3) Push 局面での手部流体力の低下の要因は、迎角の低下に伴う手掌の圧力低下、手背の負圧が変化しなかったことにより、手掌と手背の圧力差が縮小したためであると推察された。

VI. 研究課題 2

全力泳時の泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの関係

1. 目的

泳速度の高さは手部推進力の大きさと関連があるが、泳速度が高い選手における手部推進力が大きい要因は明らかでない。そこで、研究課題 2 では、全力泳時の泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの関係を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 対象者

対象者は男子競泳選手 24 名とした。競技力は、地域大会出場から選手権決勝レベルであった。全ての対象者の年齢、身長、体重、専門種目、50 m 自由形のベストタイム、50 m 自由形の FINA Point を Table 6 に示した。対象者には、研究の趣旨と内容、危険性について説明し、書面にて参加の同意を得た。

Table 6 Physical characteristics, specialty and performance level of subjects.

Swimmer	Age (years)	Height (m)	Weight (kg)	Specialty	Best Record of 50 m front crawl (s")	FINA Point
A	19	176.0	72.0	Front crawl	22.61	791.0
B	26	174.0	72.0	Front crawl	22.79	772.4
C	26	184.0	81.0	Front crawl	22.96	755.3
D	25	181.0	76.0	Front crawl	22.98	753.4
E	22	177.0	80.0	Front crawl	23.22	730.3
F	22	187.0	80.0	Front crawl	23.27	725.6
G	24	186.0	78.0	Front crawl	23.50	704.5
H	21	169.0	69.0	Front crawl	23.52	702.7
I	21	175.0	70.0	Back stroke	23.86	673.1
J	22	174.6	79.0	Front crawl	23.93	667.2
K	20	181.0	71.5	Front crawl	24.06	656.4
L	19	175.5	70.0	Breast stroke	24.20	645.1
M	21	183.0	77.0	Front crawl	24.26	640.3
N	21	175.0	75.0	Individual medley	24.31	636.4
O	22	169.0	63.0	Back stroke	24.87	594.3
P	23	176.0	72.5	Breast stroke	24.89	592.9
Q	21	179.0	70.0	Front crawl	24.91	591.5
R	20	168.0	62.0	Butterfly	24.99	585.8
S	20	172.5	68.0	Back stroke	25.00	585.1
T	20	175.0	69.0	Front crawl	25.18	572.7
U	20	175.0	74.0	Individual medley	25.28	565.9
V	19	176.0	78.0	Back stroke	25.42	556.6
W	20	171.0	68.0	Breast stroke	25.55	548.1
X	20	164.0	66.0	Front crawl	26.24	506.0
mean	21.4	176.0	72.5		24.24	648.0
SD	2.0	5.6	5.2		0.97	78.2

2.2 実験設定

対象者は、任意のウォーミングアップの後、壁から 5 m と 25 m の間の 20 m のクロール泳を無呼吸および全力で 3 試技実施した。3 試技実施した理由として、実施した 3 試技の中で解析対象として最も適切と考えられる試技を選定するためであった。本研究で用いたモーションキャプチャシステムにおける計測範囲では、泳者が計測範囲に進入するタイミングによっては 1 ストロークサイクルを取得できない場合がある。3 試技の中で、計測範囲内で 1 ストロークサイクルを完了した試技を解析対象として適切な試技とした。なお、本研究でのクロール泳における 1 ストロークサイクルは、泳者の片方の手部が入水してから再度同側の手部が入水するまでとした。

2.3 統計解析

本研究の統計処理は、SPSS Statistics 25.0 を用いて行った。サンプルの正規性は、Shapiro-Wilk の正規性の検定を用いて検証した。その結果、すべてのデータで正規性は棄却されなかった。各変数の関係性の検定には Pearson 相関係数を算出し、平均値の比較には独立したサンプルの t 検定を行った。t 検定の統計量について、Cohen's d を用いて効果量を算出した。Cohen の d の絶対値が 0.2 未満であれば効果の大きさは小さい、0.2 以上 0.5 未満であれば中程度、0.5 以上であれば大きいとした。統計的有意水準は、 $P < 0.05$ に設定した。

3. 結果

Table 7 に各変数間の相関係数を示した。危険率が 5%未満であったものをグレーで強調して示した。Figure 17 には、手掌と手背の平均圧力の絶対値の比較の結果を示した。手背が手掌よりも有意に高い値を示し、高い効果量を示した（手掌: 1.17 ± 0.50 kPa, 手背: 2.83 ± 0.39 kPa, $p < 0.00$, 効果量: 3.71; Figure 17)。

Figure 18 に、典型的な結果の例として、最も速い泳者 A と最も遅い泳者 X の右手の変数の経時変化を示した。泳者 X に比べ、泳者 A は手部推進力と平均手流体力が大きく、手背の負圧が高く、手部スピードも高かった。

Table 7 Correlation coefficient of each variable

	Mean swimming velocity	Stroke frequency	Stroke length	Mean hand resultant force	Mean hand propulsive force	Propulsion ratio	Mean hand speed	Mean angle of attack	Mean palm pressure	Mean dorsal pressure	Stroke time under water	Travel distance under water
Mean swimming velocity		0.135	.509*	.687**	.751**	0.15	.881**	0.142	0.269	-.676**	-0.328	0.282
Stroke frequency			-.780**	0.054	0.182	0.292	0.395	0.03	0.137	-.416*	-.857**	-.737**
Stroke length				0.371	0.294	-0.168	0.213	0.059	0.047	-0.053	.522**	.800**
Mean hand resultant force					.873**	-0.228	.676**	0.355	.736**	-.566**	-0.22	0.269
Mean hand propulsive force						0.269	.696**	.444*	.512*	-.656**	-0.287	0.202
Propulsion ratio							0.08	0.216	-0.395	-0.179	-0.199	-0.184
Mean hand speed								0.19	0.324	-.720**	-.569**	0.097
Mean angle of attack									.471*	0.149	-0.044	0.098
Mean palm pressure										-0.129	-0.311	-0.118
Mean dorsal pressure											.486*	0.023
Stroke time under water												.760**
Travel distance under water												

*. p < 0.05, **. p < 0.01

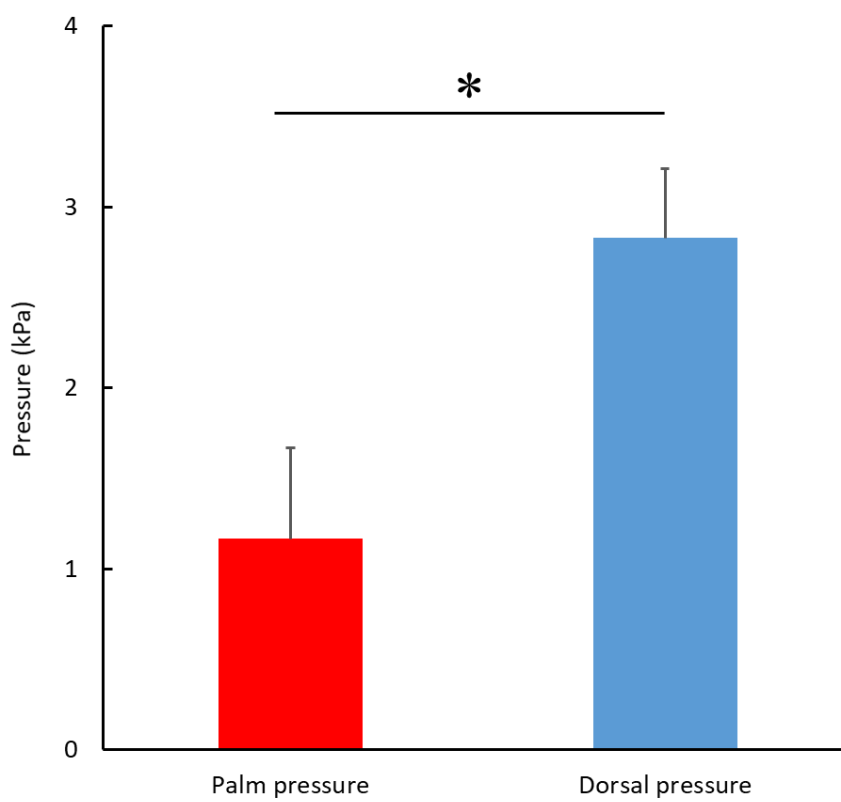


Figure 17 Comparison of the absolute value of the mean pressure between the palm and the dorsum of the hand. (*. $p < 0.05$)

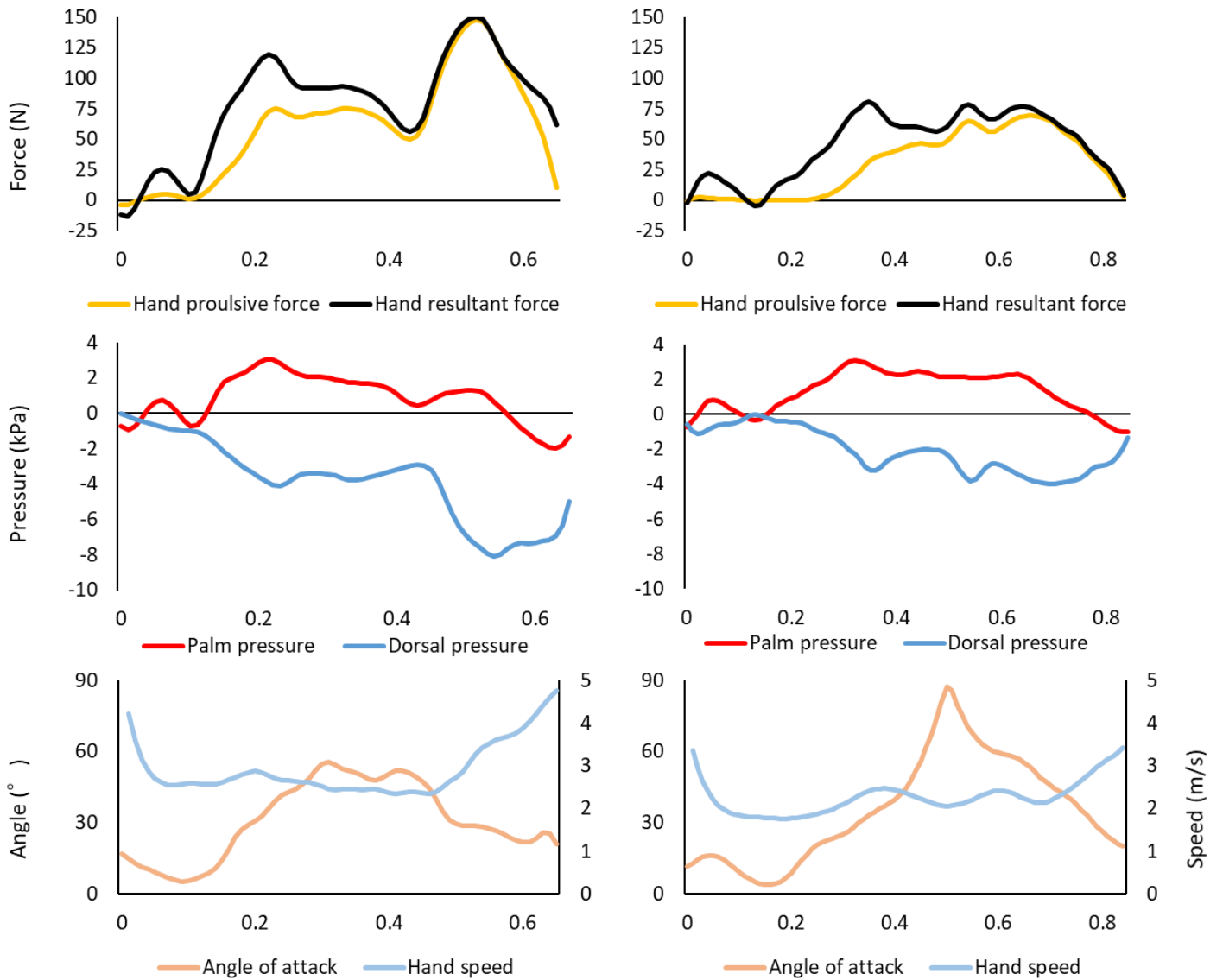


Figure 18 Variation over time of each variable (top, fluid force; middle, pressure; bottom, angle of attack & hand speed) in the right hand of the fastest swimmer A (left column) and the slowest swimmer X (right column).

4. 考察

研究課題 2 では、全力泳時の泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの関係を明らかにすることを目的とした。

平均泳速度は、平均手部推進力および平均手部流体力と高および中程度の正の相関関係を有していた（それぞれ $r=0.751, 0.678$ ）。角川ほか（2015a）は、平泳ぎキック泳の試技における足部流体力と泳速度（50 m 平泳ぎキック泳の平均泳速度）に高い正の相関関係（ $r=0.87$ ）があったことを報告している。Kudo et al.（2016）は、異なる競技力の Advanced と Intermediate のレベル選手が 25 m 全カスプリントクロール泳を実施した際の、InswEEP と Upsweep 局面の手部推進力を比較した。その結果、Advanced の泳者はより高い手部推進力を示したことを報告し、競技レベルの高さと手部推進力の大きさが一致していた。つまり、本研究結果は、これまでの先行研究と同様な結果を示した。

手部推進力は手部流体力の推進方向成分であり、流体力の大きさと、流体力をいかに有効に推進方向へ作用させたかが影響する。平均手部推進力と平均手部流体力および推進力比率では、平均手部流体力のみ有意に高い正の相関関係が認められた（それぞれ $r = 0.873, 0.269$ ）。つまり、手部推進力の高い選手は必ずしも推進力比率が高いわけではない。手部で発揮された推進方向以外に働く力は、鉛直や左右方向に作用する。クロール泳において鉛直上方向に力が作用することは、身体を水面付近もしくはそれ以上に持ち上げる作用を意味し（Nakashima 2007）、水から抵抗力を受ける面積を低減する効果を持つ。左右方向に働

く力は、身体の安定性を高めること、大きな流体力を獲得することに貢献する可能性がある。

Downsweep 局面⁹では、手部が身体の外側へ移動する動きがみられ、外側への手部の動きは、もう一方の上肢のリカバリー動作により身体が沈むのを防ぐ (Maglischo 2003)。

Downsweep 局面から Insweep 局面へと局面が変わる際には、手部が身体の外側から内側へと移動方向が転換し、大きな流体力が発揮される (Takagi et al. 2014)。本研究における最も速い泳者 A と最も遅い泳者 X の両泳者において、Downsweep 局面から Insweep 局面に相当する Glide 局面から Pull 局面にかけ、手部流体力に対して手部推進力が小さく、特にこの局面で推進方向以外に力を作用させていることが推察される (Figure 18)。以上のように、手部流体力を推進方向に働かせるだけでなく、他の方向に作用させることによっても大きな流体力および高い泳速度の獲得への利点がある。そのため、手部推進力の高い選手は必ずしも推進力比率が高いわけではないと考えられる。

手部流体力は、手掌と手背の圧力差に手部面積を乗じたものである。研究課題 2 では、手掌と手背のそれぞれで計測された圧力を、手部の 3 つのセグメントの面積により重み付けを行い、手掌と手背の平均圧力を算出した。その手掌と手背の平均圧力は、平均手部流体力とそれぞれ高いおよび中程度の正の相関関係を有していた (手掌: $r = 0.736$, 手背: $r = -0.566$)。ただし、手掌と手背の平均圧力の絶対値を比較した結果、手背の平均圧力が有意に高い値を示し効果量も大きかった (Figure 17)。泳者 A と泳者 X の経時的な変化を比較し

⁹ Downsweep 局面は、反対側の手部の出水から手部が最も外側に達するまでの区間。

でも、手掌側では正圧に大きな差は見られず、手背側では特にストローク後半において負圧の差が顕著であった (Figure 18). このことから、手掌と手背の圧力のどちらも手部推進力の高さに影響するが、手背の負圧の高さがより大きな影響を有すると言える. この結果と、研究課題 1-1, 1-2 およびこれまでの研究結果をまとめると、ストロークの 1 周期中の手部流体力の変動に対しても、個人内での平均手部流体力の増加に対しても、さらには、個人間で異なる競技力の選手における平均手部流体力の高さに対しても、手背の負圧の高さが大きな影響力を有していた. それ故、手部推進力を増加させるためには、手部流体力の増加のため、手背の負圧を高める方策を思案することが効果的であると考えられる.

手背の圧力には、研究課題 1-1 と 1-2 において、手部スピードおよび迎角が関連していることが推察された. 手背の平均圧力と平均手部スピードおよび平均迎角は、平均手部スピードのみで有意に高い相関関係が認められた (それぞれ $r = -0.720, 0.149$). 迎角は、研究課題 1-1 と 1-2 と同様に、大きな値を示すことが重要なのではなく、 20° を下回らないようにすることが重要であると考えられる. これを支持するように、最も速い泳者 A の迎角は、ストロークの最初 (約 0.2 秒以前) を除き、約 20 から 60° といった大きすぎず小さすぎない角度の範囲で推移した (Figure 18). それ故、本研究では平均迎角は手背の平均圧力との関連性が示されず、迎角の大きさごとに手背の圧力値と関係性を調査することで、迎角と手背の負圧の関連性を詳細に示すことができると考えられる.

一方で、平均手部スピードが高い選手は手背の負圧が高いことが明らかとなった. 手部ス

スピードと手部推進力の関係性に関しては、個人内の泳速度を上昇させた際に、ストローク頻度と手部スピードが上昇し、手部推進力が上昇したという報告や（角川ほか. 2019）、競技力の高い選手が後方への手部速度が高かったという報告（Kudo et al. 2016）のみに留まっていた。そのため、手部スピードと手背の圧力の関係性の高さを示した研究はなかった。研究課題 1-1 では、手部スピードの上昇が手背の負圧の増加と関連している可能性が推察され、研究課題 2 においても、手部スピードが高い選手は、負圧が高いという関係性を示した。このような関係性が示された要因として、物体の運動スピードと渦度の強さが関連していることが考えられる（淵脇ほか. 2007）。渦度は渦の回転速度を示し、その回転速度が高いことで身体表面の流れの速度を高め、高い負圧を生じさせる可能性がある。ただし、ヒトにおいて、その渦度の強さと、身体表面の圧力との関係性を報告している調査は見当たらない。それ故、動作解析により手部スピードを、流れ場の解析によって渦度を、圧力分布計測によって身体表面の圧力を、同時に収集することで、手部スピードと手背の負圧の関係性を明らかにすることが求められる。

手部スピードは、研究課題 1-1 と 1-2 や先に示した先行研究のように、個人内においてストローク頻度の上昇と共に上昇し、ストローク頻度と関連性の高い変数であると考えられる。しかしながら、平均手部スピードとストローク頻度は有意な相関関係が認められなかった ($r=0.395$)。ストローク頻度はストローク時間の逆数であり、ストローク時間が短ければストローク頻度は高くなる。一方で、手部スピードは、単位時間あたりの移動距離であり、

移動距離の要素が含まれる。それぞれの関係性を見てみると、ストローク頻度と水中ストローク時間および水中手部移動距離は、それぞれ有意に高い相関関係が認められた（それぞれ $r = -0.857, -0.737$ ）。手部スピードは、水中ストローク時間のみと有意な中程度の相関関係が認められた（ $r = -0.569$ 、水中手部移動距離とは $r = 0.097$ ）。このことから、ストローク頻度の高い選手は所要時間だけでなく手部の移動距離を短縮してしまったために、手部スピードの上昇につながらなかったと考えられる。そのため、ストローク頻度と平均手部スピードの相関関係が高くなかったと考えられる。

5. まとめ

研究課題 2 では、全力泳時の泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの関係を明らかにすることを目的とし、以下の知見が得られた。

- (1) 泳速度の高い選手は手部推進力が大きく、手部推進力の大きさは手部流体力の大きさと強く関係していた。
- (2) 手部流体力の大きさには、手背の負圧が大きく影響し、手背の負圧には手部スピードが影響していた。
- (3) 手部スピードはストローク頻度と関係性は有意でなく、ストローク頻度が高く手部スピードが高くない選手の特徴として、水中における手部の移動時間が短いだけでなく、手部の移動距離も短いことが推察された。

VII. 総合討論

1. 泳速度と手部推進力の関係

泳動作中に水から身体に働く力は、前進するための推進力とそれを妨げる抵抗力があり、「高い泳速度では大きな抵抗力に打ち勝って泳ぐための推進力発揮が求められる」と述べられている（成田. 2018）. 推進力を生成するためには、四肢を動かすことで水から力を受け、その力を前方へ作用させることが必要である（角川ほか. 2017）. クロール泳においては、上肢動作が下肢動作よりも推進力の生成が高く泳速度への貢献が大きい（Cohen et al. 2017）. その上肢の中でも、前腕と手部で推進力の発揮が大きいことが示されており（Takagi and Sanders 2002）、特に手部での推進力が大きい（Samson et al. 2017）.

これまで、個人内で泳速度と手部推進力の関係性を調査した研究はいくつかあり、いずれも個人内で泳速度が上昇したときに、平均の手部推進力が上昇したという報告であった（角川ほか. 2015b; 2017; 2019, Tsunokawa et al. 2019）. 個人間においては、クロール泳において、競技力が異なることで、手部推進力の大きさに違いが認められたと報告されている（Kudo et al. 2016）. 平泳ぎの下肢キックにおいても、100 m 平泳ぎの自己最高記録の泳速度と、足部流体力および推進力の平均値、力積、ピーク値との間に有意に高い正の相関関係が認められていた（角川ほか. 2012）. このことから、クロール泳において、手部で発揮される推進力の大きさが泳速度の高さと関連すると推察された.

本研究結果では、個人内では先行研究と同様に、泳速度の上昇に伴い手部推進力が増加し、泳速度が上昇できなかった試技条件では手部推進力も増加しなかった。個人間では、最大努力泳において泳速度が高い選手は手部推進力が大きいという関係性が認められた。それ故、先行研究と同様に、クロール泳において、泳速度の高さは手部推進力の大きさと強く関連していると言える。

ただし、「全ての泳者において、最大努力試技における手部推進力の高さが高ければよい」という点については議論の余地がある。角川ほか（2017）は、対象者 2 名の事例的な比較を示しており、全力泳試技での平均手部推進力の差は小さかったものの（51.8 N vs 53.1 N）、泳速度は 1.67 m/s と 1.56 m/s で差があったと報告している。このことから、対象者によって、発揮した手部推進力の大きさに対して獲得可能な泳速度が異なると考えられる。その要因として、泳動作による推進に対する抵抗力の大きさを考える必要がある。総抵抗の大きさは、抵抗係数、水の密度、基準面積および泳速度によって決定される。基準面積は、移動方向から泳者を見た投射断面積と、水中に浸っている表面積のいずれかが用いられている（Gonjo et al. 2020）。投射断面積に影響を及ぼす要因として、一つは身体の形状とサイズといった泳者間の体格の違いである。もう一つは、身体の傾斜である。身体の傾斜は、上肢ストロークによる頭を持ち上げる力の発揮と（Nakashima. 2007）、キック動作による足を持ち上げる力の発揮（Yanai, 2001）の釣り合いによって決まる。水中の表面積の違いは、上肢ストロークやキック動作により、身体を高いポジションに位置させる技術の違いによ

るものであると考えられる (Gonjo et al. 2020).

本研究の研究課題Ⅱにおいて、泳者 A と泳者 I は、泳速度には違いがみられた一方で手部推進力は同程度であった (手部推進力: 76.1N vs 74.4N, 泳速度: 1.90 m/s vs 1.81 m/s).

泳者 A と I の身長および体重は、同程度であった (それぞれ 176.0 cm・72.0 kg, 175.0 cm・70 kg). それ故、体格の差は小さく、身体を水平に保つ技術や高いポジションに保つ泳技術の差によって、抵抗力の大きさが異なり、泳速度に差が生じたと推察される. このような泳者の体格や泳技術の差によって抵抗力の大きさが異なることで、同一泳速度でも求められる手部推進力の大きさに違いが生じると考えられる.

2. 手部推進力と手部の圧力分布, 推進力比率, 手部キネマティクスの関係

手部推進力は、手部流体力の推進方向成分であるため、流体力を推進方向へ作用させる有効性 (推進力比率) と、手部流体力を構成する手掌と手背の圧力差によって決定される (角川ほか. 2017). ただし、これまでの研究では、クロール泳においてこれらの変数それぞれがどの程度手部推進力の大きさに影響を与えているかは明らかでなかった. 加えて、手部スピードや迎角といった手部キネマティクスが手部や足部で発揮された流体力や推進力の大きさと関連していると考えられたが (角川ほか. 2019; Samson et al. 2018), 手部の圧力分布との関係性は明らかではなかった.

研究課題 1-1, 1-2, 2 から、推進力比率は手部推進力との関係性は低く、手部流体力を構

成する手掌と手背の圧力を比較すると、手背の負圧の方が手部流体力の大きさに影響していた。手背の圧力の変化は、手背表面の流れの速度から影響を受け、その流れの速度には手背の後流における渦の発生の有無および渦の回転速度（渦度）の高さが関連している（Dickinson 1996）。Dickinson（1996）は、渦の生成による圧力抵抗の増加は迎角が 15° 以上から、Samson et al.（2018）は、シミュレーションにおいて、迎角が 20° では手背面での渦生成が確認されたのに対して、 10° 以下では手部周りの流れが安定し、手部に作用する力も安定して変化が見られなかったと報告している。そのため、渦の発生の有無に関する迎角、渦度の高さに関与する手部スピードは、手背の圧力に影響を与える変数であると考えられた。その迎角においては、その大きさを増加させるのではなく、 20° 以下となる時間の短縮（ 20° 以上の迎角の保持）が、平均の手背の負圧の高さに影響すると推察された。これは、研究課題 1-1、1-2 において、迎角が 20° 以下である時間の長さの変動と共に、手背の圧力が変化したことに基づいている。手背の負圧に対する手部スピードの上昇の影響は、迎角が保持、もしくは上昇した際に認められた（研究課題 1-1 : glide, push 局面, 研究課題 1-2 : glide 局面）。一方で、迎角が低下した研究課題 1-2 の push 局面では、手部スピードが上昇しても手背の負圧は増加しなかった。以上のことから、手背の負圧は、迎角が 20° 以上に保持され手部スピードが高いと増加するという関係が見いだされる。

手掌の圧力は手背の圧力よりも影響は小さいが、手部流体力の大きさに影響を与えた。手掌の圧力の高さは、圧力が面に対して垂直に働く力であるため、手掌面と主流方向のなす角

(迎角) が大きいことで手掌面に垂直に働く圧力が高まると考えられる。研究課題 1-1 では、ストローク頻度の上昇に伴い 2 名の泳者で 4 試技を通して手掌の圧力値が増加し、4 名の泳者では T90%まで手掌の圧力値が増加した (Figure 8)。研究課題 1-2 では、迎角の低下に伴い手掌の正圧が低下し、研究課題 2 では迎角と中程度の有意な相関関係を示し ($r = 0.471$)、迎角と手掌の正圧の間に一定の関係性が認められた。このことから、手掌の正圧は、手部推進力へ影響を与える一要因であるため、少しでも大きな推進力の発揮のため、手掌の正圧を高める方策を詳細に検討していく必要がある。

研究課題 1, 2 の結果をまとめると、迎角を 20° 以上に保って手部スピードを高め、手掌の正圧と手背の負圧を高めることで手部推進力を大きくすることができると考えられる。

3. 競技現場への提言

研究課題 1, 2 の結果から、手部における流体力の発揮原理に関して、これまでの理論を再考する必要性が推察される。これまで、流体力の発揮するためには、水を「押す」と表現されてきた。なぜなら、流体力が生じる原理として、ニュートンの第 3 の運動法則における物体に力を加えることで得られる反作用に依拠すると考えられてきたからである (Maglichio 2003)。本研究結果においても、手部の移動方向に正対する手掌は、作用させた力の反作用を直接受ける側面であり、圧力は正の値であったため、水を押していたとする表現は間違いではない。研究課題 2 において、手掌の正圧は、手部流体力の高さとは有意に高

い正の相関関係が認められた。このことから、手掌の圧力は圧力差の拡大に影響していると言える。しかし、ストローク頻度の上昇に伴う手掌の圧力値の有意な上昇は認められなかった（研究課題 1-1）。加えて、手掌と手背の圧力を絶対値で比較したとき、手背の絶対値の方が高かった（研究課題 1-1, 2）。つまり、手背の負圧の高さが圧力差の拡大に強く関与していると言える。これらのことから、泳者は手部で水を「押した」反力で手掌面の圧力を高めて、流体力を増加させていたというより、手背の負圧を高めて流体力を増加させていたと考えられる。Soh and Sanders (2021) も、手部の動きにより手掌で水から力を受けるというより手背側の水を加速させて推進力を獲得することを示しており、手部で水を「押す」のではなく、手部の背側の水を「引っ張る / 引く」と表現している。

以上のことから、競技現場においてはストロークによって推進力を獲得し推進するために、水を「押す」ことのみで囚われないように注意する必要がある。一般的に、「押す」と表現することは、作用反作用のように物体に対して作用させた力と受ける力が直線的な関係を持ち、進行方向と反対方向に直線的に動かすことになる。クロール泳のストローク動作において、身体に対する直線的な前後方向の動作に注意を向けることで、ストロークは直線的な「I 字」の軌道に近くなる (Nakashima and Ono 2014)。Takagi et al. (2014) のロボットアームの研究結果では、I 字ストロークにおいて手部は大きな迎角で直線的に動き、手掌の圧力が高く、手背の負圧は高くはなかったと述べている。一方で、左右方向の手部の移動に動かすことで「S 字」の軌道を描くストロークになる (Nakashima and Ono 2014)。

S字ストロークでは、手部が身体の中心へ移動する局面から身体の外側へ移動する局面に切り替わるタイミングで、手背の負圧が増加すると述べている (Takagi et al. 2014). それ故、水を「押す」ことよりも手背の負圧を増加させる指導を行う 1 つの方法として、手部の左右方向への移動と、移動方向の切り替わりで大きな流体力が生成されることに着目することが挙げられる.

手背の負圧を増加させる他の指導の視点として、本研究では手部スピードの高さが挙げられる. 手部スピードが重要である理由は以下のことが考えられる. 例えば、泳速度 2.0 m/s で泳いでいる時、泳者から見て水は推進方向とは反対方向に 2.0 m/s の速度で動いていることになる. ここで、手部が水の速度よりも高い 2.5 m/s で動いている場合、手掌は速度の差分である 0.5 m/s で水を押し、手背には手部から剥離した流れが渦となり、手背表面に負圧を生じさせると考えられる. 一方で、泳速度 2.5 m/s の時、進行方向とは身体と反対方向に 2.5 m/s で動き、手部の速度と同じになる. この状態では、手部と水と一緒に動くため、手掌で水を押すことや、手背で渦は生じにくくなると考えられる. そうした状況が生じる 1 つの例として、高速で牽引されることが挙げられる. レース時のような高い泳速度の達成は大きな疲労を伴うため、競泳の練習では、高い泳速度で良い技術で泳ぐ練習として、ゴムチューブなどで泳者を前方から高速で牽引することがある. ただし、自力で到達可能以上の泳速度では、手部スピードとの速度差が小さくなるため、手部推進力が小さくなる (角川ほか, 2021). 従って、高い泳速度で良い技術を養う練習としての効果を最大限に引き出すため、

どの程度の牽引速度であれば技術練習になり得るかには注意が必要である。一方で、ゴムチューブやパラシュートを用いて後方から荷重し、高いパワー発揮を狙う練習がある。この時、荷重しない場合より泳速度は遅くなり、手部スピードとの速度差が大きいため手部推進力が大きくなる（角川ほか. 2021）。従って、荷重による速度低下は、パワー発揮だけでなく大きな手部推進力の獲得の技術練習にもなり得る。ただし、手部スピードを高値まで高めずとも大きな手部推進力を獲得できてしまうため、手部スピードが通常よりも過度に低値を示していないかは注意すべき点として挙げられる。以上のことから、泳速度と手部スピードの差を調整するという考え方を持つことで、本研究の知見をトレーニングに落とし込むことができると考えらる。

ただし、手部スピードを高めることと、ただ手を速く回す（高いストローク頻度＝短いストローク時間）ということは異なると考えられる。手部スピードの上昇は、個人内ではストローク頻度の上昇と共に生じ（研究課題 1-1, 1-2）、角川ほか（2019）においても同様な結果が報告されている。ただし、個人間ではストローク頻度の高さや手部スピードの高さの関係性は有意でなかった（研究課題 2）。Barbosa et al. (2021) は、50 m 自由形を世界レベル（21 秒）、国際レベル（22 秒）、国内レベル（23 秒）で泳ぐ選手のレースパフォーマンスを調査し、22 秒と 23 秒の泳者のレースにおけるストローク頻度の比較の差は中程度と小さく、泳速度の差はストローク長の差であると示している。Barbosa et al. (2019) は、50 m 自由形のベストタイムが 22 秒の選手が 21 秒に到達するまでの経過を縦断的に調査し、

泳速度の向上に伴うストローク頻度の変化は小さかったことを示している。このように、高いストローク頻度（＝短いストローク時間）は、高い泳速度の主要因とは言えないようである。

ストローク頻度が高くても手部スピードが高くない選手には、研究課題 2 の結果から以下のような特徴があると推察される。ストローク頻度が高い選手は、水中のストローク所要時間が短いだけでなく（ $r = -0.857$ ）、手部の移動距離も短い（ $r = -0.737$ ）。そのために、移動距離と所要時間の商である手部スピードが高くなかった可能性がある。つまり、ストロークの所要時間の短縮に注意を向けすぎて、手部の移動距離の長さを疎かにすると、手部スピードの高さではなくストローク頻度のみが高まってしまうと考えられる。それ故、手部スピードの高さの増加に対しては、動作時間の短縮という要因と、手部の移動距離や動作の大きさという要因の 2 つに注意を向けて指導を行うことが好ましいと考えられる。

4. 本研究の限界と他の測定法との組み合わせ

本研究にはいくつかの制限がある。上肢において、総推進力の大部分を発揮するセグメントは手部であるという仮定の下、手部推進力と手部キネティクス（圧力）および手部キネマティクス（スピード・角度）との関係性を調査した。圧力分布計測で使用した圧力センサは、手部平面に垂直な方向に作用する圧力のみ測定することが可能である。水中ストロークの後半では、肩から手部への軸流の発生による摩擦力の影響によって、負圧の増加が示唆され

ている (Toussaint et al. 2002). したがって、推進力を正確に測定するためには、摩擦成分を測定する必要がある。ただし、手部で発揮される推進力の主要因が手部に垂直な圧力成分であることを考えると (Samson et al. 2017)、手部の圧力分布計測からの推進力の推定は合理的であると考えられる。また、上肢での推進力は、前腕と上腕によっても生成される。ただし、推進力に対する影響は、手部よりも前腕が小さい (Samson et al. 2017)。したがって、本研究結果は測定法および手部以外のセグメントにおける力の発揮に多少の影響を受けている可能性があるが、その程度は小さく、妥当な範囲に収まっていたと考えられる。

一方で、圧力分布計測の結果だけでは流体力の大きさの要因を全て説明することは難しい。各研究課題の考察で示したように、流体力の大きさは、これまでの運動の3法則のみでは説明できず、手背の負圧の高さが大きく関連していた。手背の負圧の高さには、手背表面の流速が影響していると考えられ、流速の高さには渦の発生と渦の回転速度が関わっていると考えられる。これら流速および渦に対する知見は、流体の流れの可視化の実験結果に基づいている。流れの可視化の技術と圧力分布計測を組み合わせることで、流れの速度や渦生成の有無、渦の強さから、流体力の大きさの要因を説明できると考えられる。ただし、測定技術制限から流れの可視化が可能な範囲は狭く、クロール泳のようなヒトの頭上から大腿まで移動する手部周りの水の変化をとらえ続けることは極めて困難である。先行研究においても、クロール泳を対象に実施されていたが、その範囲は限られた一部であった (Matsuuchi et al. 2009)。また、可視化の測定は2次元平面での測定であり、矢状面や前

額面および水平面を切り替えることはできるが全ての面を同時に測定する方法は確立されていなかった。近年、同一平面内において泳者が泳ぐ位置を少しずつ移動させ、様々な身体位置の流れの情報を取得し、その流れの情報を組み合わせることで 3 次元的な流れ場の解析が可能となった (Shimojo et al. 2019)。ただし、1 条件の計測に数十の試技の実施が必要であり、本研究で対象にしたスプリント泳では疲労の影響など研究の制限が多く発生すると考えられる。

数値流体力学の技術を用いたシミュレーションによっても流れの可視化が行われている。CFD では、PIV を用いた流れ場の可視化と比較して、3 次元的な解析の難しさや測定範囲の制限といった問題はない。しかし、あくまでシミュレーションの結果であり、実測との違いが生じる可能性を否定できない。ただし、PIV と CFD のどちらも流れ場の理解を深めることに対するツールとしては非常に有用である。そのため、測定法の限界を踏まえ、それぞれの利点を生かした計測・解析を行っていくことで、大きな流体力を獲得する方策を明らかにしていくことができると考えられる。

5. 泳速度向上に向けた今後の課題

本研究では、手部推進力の大きさの要因を手部圧力分布、手部キネマティクスから明らかにすることを試みた。その結果、手部推進力の大きさに大きな影響を与える変数の一つとして、手部のスピードが示された。手部の前後方向の速度は、体幹（肩・胸部からなる）の回

旋速度、さらに、ヨー・ピッチ・ロールにといた三次元的な回旋動作と関連していることが示されている (Kudo et al. 2021). 肩のロールの角速度と手部推進力の関係を調査した研究では、手部推進力における揚力成分の高さと肩のロールの角速度が有意な相関関係にあることが報告されている (Kudo et al. 2017). また、Push 局面の手部の前後速度に対しては、肘関節の伸展も大きな影響を与えていると報告されている。それ故、手部スピードを高めるには、体幹の回旋動作や上肢関節の角運動にも着目していく必要がある。

加えて、体幹部の動きは、下肢動作の影響を受けていることが示されている。Andersen et al. (2018) は、クロール泳中の上肢、下肢、全身の角運動量をフーリエ変換により高調波に分解することで、体幹の回旋運動に対する下肢動作の影響を調査した。その結果、下肢キックは、泳動作において「安定化」という役割を担っていることが示された。加えて、下肢キックは、副次的に上肢および全身の角運動量に影響を与えていたことを報告している。つまり、上肢と下肢は影響しあって泳動作が実施されており、四肢間のコーディネーションが重要である。Mezêncio et al. (2020) による研究では、アマチュアレベルとエキスパートレベルの泳者における上肢と下肢の動作間の同期性を調査している。解析の結果、エキスパートの 65%が同調した上下肢の動作を用いたのに対し、アマチュアの 95%で上下肢の動作が同調していなかったこと示し、上肢と下肢の協調性の重要性が明らかにされている。

以上のことから、これまでは手部という局所に焦点を当ててきたが、次のステップとして、泳動作を体幹部・下肢動作を含めて巨視的に見ることで、手部スピードを高め、大きい手部

推進力を獲得するメカニズムを明らかにできる可能性がある。

VIII. 結論

本博士論文では、クロールにおける泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの関係を明らかにすることを目的とした。そして、この目的を達成するために、【研究課題 1-1】最大下でストローク頻度を増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにする、【研究課題 1-2】ストローク頻度を超最大へ増加させた時の、泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの変化を明らかにする、【研究課題 2】全力泳時の泳速度と手部推進力および手部キネマティクスの関係を明らかにする、という 3 つの研究課題を設定した。これらの研究課題から得られた新たな知見は、以下の通りである。

- 1) クロール泳の泳速度と手部推進力は高い関係性にあり、手部推進力の大きさの主要因は、手背の負圧の高さである。
- 2) 手背の負圧の高さは、迎角および手部スピードと関連する。手背の負圧を増加させるには、迎角を 20°以上に保ち、手部スピードを高めることが必要であると推察される。
- 3) 全力時および全力以上のクロール泳において、手部推進力とストローク頻度の関係性は高くない。

IX. 参考文献

Andersen J, Sinclair P, McCabe CB, Sanders R (2018) The Application of fourier analysis to demonstrate the impact of the flutter kick on longitudinal rotation in front crawl.

ISBS Proceedings Archive 36(1): 923-926

Barbosa AC, Barroso R, Gonjo T, Rossi MM, Paolucci LA, Olstad BH, Andrade AG (2021) 50

m freestyle in 21, 22 and 23 s: What differentiates the speed curve of world-class and elite male swimmers?. *Int J Perform Anal Sport* 1-11.

doi:10.1080/24748668.2021.1971509

Barbosa AC, Valadao PF, Wilke CF, Martins FDS, Silva DCP, Volkers SA, Lima COV,

Ribeiro JRC, Bittencourt NF, Barroso R (2019) The road to 21 seconds: A case report of a 2016 Olympic swimming sprinter. *Int J Sports Sci Coach* 14(3): 393-405.

doi:10.1177/1747954119828885

Barbosa TM, Ramos R, Silva AJ, Marinho DA (2018) Assessment of passive drag in

swimming by numerical simulation and analytical procedure. *J Sports Sci* 36

(5):492-498. doi:10.1080/02640414.2017.1321774

Bixler B, Riewald S (2002) Analysis of a swimmer's hand and arm in steady flow conditions

using computational fluid dynamics. *J Biomech* 35(5):713-717.

Chatard JC, Bourgoïn B, Lacour JR (1990) Passive Drag Is Still a Good Evaluator of

- Swimming Aptitude. *J Appl Physiol* 59 (6):399-404. doi:10.1007/Bf02388619
- Chollet D, Chabies S, Chatard JC (2000) A new index of coordination for the crawl: description and usefulness. *Int J Sports Med* 21 (1):54-59. doi:10.1055/s-2000-8855
- Cleary PW, Feng YT, Cohen RCZ, Harrison SM, Sinnott MD, Prakash M, Mead S (2013) Prediction of industrial, biophysical and extreme geophysical flows using particle methods. *Engineering Computations* 30 (2):157-196. doi:10.1108/02644401311304845
- Cohen RC, Cleary PW, Mason BR, Pease DL (2015) The Role of the Hand During Freestyle Swimming. *J Biomech Eng* 137 (11):111007. doi:10.1115/1.4031586
- Cohen RCZ, Cleary PW, Mason BR, Pease DL (2017) Forces during front crawl swimming at different stroke rates. *Sports Engineering* 21 (1):63-73. doi:10.1007/s12283-017-0246-x
- Craig AB, Jr., Pendergast DR (1979) Relationships of stroke rate, distance perstroke, and velocity in competitive swimming. *Medicine and science in sports* 11 (3):278-283
- Dickinson MH (1996) Unsteady mechanisms of force generation in aquatic and aerial locomotion. *Am Zool* 36 (6):537-554
- Ferguson CJ (2009) An effect size primer: a guide for clinicians and researchers. *Prof. Psychol.: Res. Pract*, 40:532-538. doi:10.1037/14805-020

Ferziger JH, Perić M (2012) Computational methods for fluid dynamics. Berlin: Springer.

Fish FE, Legac P, Williams TM, Wei T (2014) Measurement of hydrodynamic force generation by swimming dolphins using bubble DPIV. *J Exp Biol* 217 (Pt 2):252-260. doi:10.1242/jeb.087924

瀧脇正樹, 田中和博, 永山勝也. (2007). 非定常運動翼後流の渦流れと非定常推進力. 日本機械学会論文集 B 編, 73(728): 922-929.

Gatta G, Cortesi M, Di Michele R (2012) Power production of the lower limbs in flutter-kick swimming. *Sports Biomech* 11 (4):480-491. doi:10.1080/14763141.2012.670663

Gonjo T, Narita K, McCabe C, Fernandes RJ, Vilas-Boas JP, Takagi H, Sanders R (2020) Front crawl is more efficient and has smaller active drag than backstroke swimming: Kinematic and kinetic comparison between the two techniques at the same swimming speeds. *Front Bioeng Biotechnol* 8. doi:10.3389/fbioe.2020.570657

Gourgoulis V, Boli A, Aggeloussis N, Antoniou P, Toubekis A, Mavromatis G (2015) The influence of the hand's acceleration and the relative contribution of drag and lift forces in front crawl swimming. *J Sports Sci* 33 (7):696-712. doi:10.1080/02640414.2014.962571

Gourgoulis V, Boli A, Aggeloussis N, Toubekis A, Antoniou P, Kasimatis P, Vezos N, Michalopoulou M, Kambas A, Mavromatis G (2014) The effect of leg kick on sprint

front crawl swimming. *J Sports Sci* 32 (3):278-289.

doi:10.1080/02640414.2013.823224

Guignard B, Rouard A, Chollet D, Bonifazi M, Dalla Vedova D, Hart J, Seifert L (2020)

Coordination dynamics of upper limbs in swimming: effects of speed and fluid flow manipulation. *Research quarterly for exercise and sport*, 91(3), 433-444.

doi:10.1080/02701367.2019.1680787

合屋十四秋, 野村照夫, 杉浦加枝子. (2005) 女子水泳選手におけるクロール泳の速度出力調節と動作との関係. *スポーツ方法学研究*. 18: 75-83.

合屋十四秋, 野村照夫, 松井敦典. (2008) 男子水泳選手におけるクロール泳の速度出力調節と動作との関係. *トレーニング科学*, 20: 33-42.

Homma M, Kawai Y, Takagi H (2016) Estimating Hydrodynamic Forces Acting on the Hand during Sculling in Synchronized Swimming. *ISBS Proceedings Archive* 34:656-659

Homma M, Okamoto Y, Takagi H (2019) How do elite artistic swimmers generate fluid forces by hand during sculling motions? *Sports Biomech*

doi:10.1080/14763141.2019.1671485

生田泰志, 松田有司, 山田陽介, 来田宣幸, 小田伸午. (2010). クロール泳における泳速度, ストローク頻度およびストローク長の変化と筋活動の関係. *体力科学*, 59(4), 427-438.

川合英介. (2018) 水球競技選手における巻き足動作時の足部流体力に関する研究. 筑波大学大

学院博士論文.

Kawai E, Tsunokawa T, Takagi H (2018) Estimating the hydrodynamic forces during eggbeater kicking by pressure distribution analysis. *Heliyon* 4 (12):e01095.

doi:10.1016/j.heliyon.2018.e01095

Koga D, Homoto K, Tsunokawa T, Takagi H (2020) Hydrodynamic re-examination of underwater non-propulsive phase in front crawl. *ISBS Proceedings Archive* 38 (1):1-

4

古賀大樹, 八十島崇. (2020) 中・高強度領域のクロール泳における泳速度調節時の競泳選手の身体感覚の検討. *スポーツパフォーマンス研究*, 12: 737-752.

Kudo S, Mastuda Y, Sakurai Y, Ichikawa H, Ikuta Y (2016) Differences in stroke technique to exert hand propulsion between advanced and intermediate swimmers. *ISBS*

Proceedings Archive 34:707-710

Kudo S, Mastuda Y, Yanai T, Sakurai Y (2021) Forwards-backwards hand velocity induced by the upper trunk rotation in front crawl strokes and its association with the stroke frequency. *J Sports Sci*:1-8. doi:10.1080/02640414.2021.1892266

Kudo S, Sakurai Y, Miwa T, Matsuda Y (2017) Relationship between shoulder roll and hand propulsion in the front crawl stroke. *J Sports Sci* 35 (10):945-952.

doi:10.1080/02640414.2016.1206208

- Kudo S, Vennell R, Wilson B (2013) The effect of unsteady flow due to acceleration on hydrodynamic forces acting on the hand in swimming. *J Biomech* 46 (10):1697-1704.
doi:10.1016/j.jbiomech.2013.04.002
- Kudo S, Yanai T, Wilson B, Takagi H, Vennell R (2008) Prediction of fluid forces acting on a hand model in unsteady flow conditions. *J Biomech* 41 (5):1131-1136.
doi:10.1016/j.jbiomech.2007.12.007
- Lyttle A, Keys M (2004) The use of computational fluids dynamics to optimise underwater kicking performance. In *ISBS Conference Proceedings Archive* 22:438-441.
- Maglischo, E. W. (2003) *Swimming fastest*. Human kinetics.
- Marinho DA, Reis VM, Alves FB, Vilas-Boas JP, Machado L, Silva AJ, Rouboa AI (2009) Hydrodynamic drag during gliding in swimming. *J Appl Biomech* 25 (3):253-257.
doi:10.1123/jab.25.3.253
- Matsuda Y, Sakurai Y, Akashi K, Kubo Y (2018) A practical estimation method for center of mass velocity in swimming direction during front crawl swimming. *J Appl Biomech* 34(4):342-347. doi:10.1123/jab.2017-0188
- 松田有司, 山田陽介, 赤井聡文, 生田泰志, 野村照夫, 小田伸午. (2010) 100 m 自由形におけるストローク頻度とストローク長からみた泳タイプ分類. *体力科学*, 59: 465-474.
- Matsuuchi K, Miwa T, Nomura T, Sakakibara J, Shintani H, Ungerechts BE (2009)

- Unsteady flow field around a human hand and propulsive force in swimming. *J Biomech* 42 (1):42-47. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.10.009
- Mezêncio B, Pinho JP, Huebner R, Vilas-Boas JP, Amadio AC, Serrão JC (2020) Overall indexes of coordination in front crawl swimming. *J Sports Sci* 38(8):910-917. doi:10.1080/02640414.2020.1737349
- Nakashima M (2007) Mechanical Study of Standard Six Beat Front Crawl Swimming by Using Swimming Human Simulation Model. *Journal of Fluid Science and Technology* 2 (1):290-301. doi:10.1299/jfst.2.290
- 中島求. (2016) 水泳の筋骨格シミュレーション. *体育の科学*, 66 (2): 92-99.
- Nakashima M, Hasegawa T, Kamiya S, Takagi H (2013) Musculoskeletal Simulation of the Breaststroke. *Journal of Biomechanical Science and Engineering* 8 (2):152-163. doi:10.1299/jbse.8.152
- Nakashima M, Maeda S, Miwa T, Ichikawa H (2012) Optimizing Simulation of the Arm Stroke in Crawl Swimming Considering Muscle Strength Characteristics of Athlete Swimmers. *Journal of Biomechanical Science and Engineering* 7 (2):102-117. doi:10.1299/jbse.7.102
- Nakashima M, Ono A (2014) Maximum joint torque dependency of the crawl swimming with optimized arm stroke. *Journal of Biomechanical Science and Engineering* 9

(1):JBSE0001-JBSE0001. doi:10.1299/jbse.2014jbse0001

Nakashima M, Satou K, Miura Y (2007) Development of Swimming Human Simulation Model Considering Rigid Body Dynamics and Unsteady Fluid Force for Whole Body. Journal of Fluid Science and Technology 2 (1):56-67. doi:10.1299/jfst.2.56

Nakashima M, Takahashi R, Kishimoto T (2020) Optimizing simulation of deficient limb's strokes in freestyle for swimmers with unilateral transradial deficiency. J Biomech Sci Eng 15 (1):19-00467-00419-00467. doi:10.1299/jbse.19-00467

成田健造. (2018) 余剰推進力計測を用いた水泳中に働く自己推進時抵抗評価法の開発. 筑波大学大学院博士論文.

Narita K, Nakashima M, Takagi H (2017) Developing a methodology for estimating the drag in front-crawl swimming at various velocities. J Biomech 54:123-128. doi:10.1016/j.jbiomech.2017.01.037

Narita K, Nakashima M, Takagi H (2018) Effect of leg kick on active drag in front-crawl swimming: Comparison of whole stroke and arms-only stroke during front-crawl and the streamlined position. J Biomech 76:197-203. doi:10.1016/j.jbiomech.2018.05.027

日本水泳連盟. (2014) 水泳コーチ教本 (第3版). 東京: 大修館書店.

大庭昌昭, 佐藤慎哉, 下山好充, 佐藤大輔. (2009) 主観的努力度の変化が泳速度に及ぼす影響—

クロールと平泳ぎの比較— 日本体育学会体育方法学専門分科会会報. 36: 113-116.

Pai YC., Hay JG (1988) A hydrodynamic study of the oscillation motion in swimming. J

Appl Biomech, 4(1):21-37. doi:10.1123/ijbs.4.1.21

Potdevin F, Bril B, Sidney M, Pelayo P (2006) Stroke frequency and arm coordination in

front crawl swimming. Int J Sports Med 27 (3):193-198. doi:10.1055/s-2005-837545

Ribeiro J, Figueiredo P, Morais S, Alves F, Toussaint H, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ (2017)

Biomechanics, energetics and coordination during extreme swimming intensity:

effect of performance level. J Sports Sci 35 (16):1614-1621.

doi:10.1080/02640414.2016.1227079

Samson M, Bernard A, Monnet T, Lacouture P, David L (2017) Unsteady computational

fluid dynamics in front crawl swimming. Comput Methods Biomech Biomed Engin

20 (7):783-793. doi:10.1080/10255842.2017.1302434

Samson M, Monnet T, Bernard A, Lacouture P, David L (2015) Kinematic hand parameters

in front crawl at different paces of swimming. J Biomech 48 (14):3743-3750.

doi:10.1016/j.jbiomech.2015.07.034

Samson M, Monnet T, Bernard A, Lacouture P, David L (2018) Analysis of a swimmer's

hand and forearm in impulsive start from rest using computational fluid dynamics

in unsteady flow conditions. J Biomech 67:157-165.

doi:10.1016/j.jbiomech.2017.12.003

Sanders RH (1999) Hydrodynamic characteristics of a swimmer's hand. *Journal of Applied Biomechanics* 15 (1):3-26. doi:DOI 10.1123/jab.15.1.3

Sanders RH, Psycharakis SG (2009) Rolling rhythms in front crawl swimming with six-beat kick. *J Biomech* 42 (3):273-279. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.10.037

佐藤慎哉, 五十嵐久人, 大庭昌昭. (2010) 主観的努力度の変化が背泳ぎの泳速度調節に与える影響. *日本体育学会大会予稿集*, 61: 216

Schleihauf RE. (1979) A hydrodynamic analysis of swimming propulsion. In: Terauds, J., Bedingfield, E.W. (Eds.), *Swimming III International Series on Sport Sciences*, 8. University Park Press, Baltimore, MD, 70–109.

Schnitzler C, Seifert L, Alberty M, Chollet D (2010) Hip velocity and arm coordination in front crawl swimming. *Int J Sports Med* 31 (12):875-881. doi:10.1055/s-0030-1265149

Schnitzler C, Seifert L, Ernwein V, Chollet D (2008) Arm coordination adaptations assessment in swimming. *Int J Sports Med* 29 (6):480-486. doi:10.1055/s-2007-989235

Seifert L, Chollet D, Bardy BG (2004) Effect of swimming velocity on arm coordination in the front crawl: a dynamic analysis. *J Sports Sci* 22 (7):651-660.

doi:10.1080/02640410310001655787

Seifert L, Chollet D, Chatard JC (2007) Kinematic changes during a 100-m front crawl: effects of performance level and gender. *Med Sci Sports Exerc* 39 (10):1784-1793.

doi:10.1249/mss.0b013e3180f62f38

Seifert L, Toussaint HM, Alberty M, Schnitzler C, Chollet D (2010) Arm coordination, power, and swim efficiency in national and regional front crawl swimmers. *Hum Mov Sci* 29 (3):426-439. doi:10.1016/j.humov.2009.11.003

Shimojo H, Gonjo T, Sakakibara J, Sengoku Y, Sanders R, Takagi H (2019) A quasi three-dimensional visualization of unsteady wake flow in human undulatory swimming. *J Biomech* 93:60-69. doi:10.1016/j.jbiomech.2019.06.013

Shimojo H, Koga D, Nakazono Y, Sengoku Y, Takagi H (2021) Estimation of thrust force from wake vortices in human kick swimming. *ARIHHP Human High Performance International Forum2021*. Tsukuba, Japan. 15 March 2021.

Soh J, Sanders R (2021) The clues are in the flow: how swim propulsion should be interpreted. *Sports Biomech* 20(7): 798-814. doi:10.1080/14763141.2019.1602162

Takagi H, Nakashima M, Ozaki T, Matsuuchi K (2014a) Unsteady hydrodynamic forces acting on a robotic arm and its flow field: application to the crawl stroke. *J Biomech* 47 (6):1401-1408. doi:10.1016/j.jbiomech.2014.01.046

- Takagi H, Nakashima M, Sato Y, Matsuuchi K, Sanders RH (2016) Numerical and experimental investigations of human swimming motions. *J Sports Sci* 34 (16):1564-1580. doi:10.1080/02640414.2015.1123284
- Takagi H, Sanders R (2002) Measurement of propulsion by the hand during competitive swimming. In: Ujihashi S, Haake SJ, editor *The engineering of sport 4* Oxford: Blackwell Publishing:631-637
- Takagi H, Shimada S, Miwa T, Kudo S, Sanders R, Matsuuchi K (2014b) Unsteady hydrodynamic forces acting on a hand and its flow field during sculling motion. *Hum Mov Sci* 38:133-142. doi:10.1016/j.humov.2014.09.003
- Takagi H, Willson B (1999) Calculating hydrodynamic force by using pressure differences in swimming.
- Toussaint HM, Van den Berg C, Beek WJ (2002) "Pumped-up propulsion" during front crawl swimming. *Med Sci Sports Exerc* 34 (2):314-319. doi:10.1097/00005768-200202000-00020
- 角川隆明, 古賀大樹, 萬久博敏. (2021) 競泳競技のスプリントトレーニングにおける手部推進力と機械的パワーに関する研究. *スポーツパフォーマンス研究*, 13, 181-194.
- 角川隆明, 萬久博敏, 荻田太. (2017) 水中モーションキャプチャと圧力分布計測を用いたクロール泳中に発揮される推進力の分析. *鹿屋体育大学学術研究紀要*, 55: 113-121.

角川隆明, 萬久博敏, 荻田太. (2019). クロールにおける泳速度の変化とストロークパラメータ
との関係: 圧力分布計測と水中モーションキャプチャを用いた分析. 体育学研究,
18053.

Tsunokawa T, Nakashima M, Takagi H (2015) Use of pressure distribution analysis to
estimate fluid forces around a foot during breaststroke kicking. *Sports Engineering*
18 (3):149-156. doi:10.1007/s12283-015-0174-6

Tsunokawa T, Narita K, Mankyu H, Ogita F, Takagi H (2018a) Estimation of propulsive
forces acting on a hand using pressure measurement and underwater motion
capture during front crawl swimming. XIII th INTERNATIONAL SYMPOSIUM on
BIOMECHANICS and MEDICINE in SWIMMING PROCEEDINGS:166-172

角川隆明, 仙石泰雄, 椿本昇三, 高木英樹. (2015a) 平泳ぎキック動作中に働く非定常流体力と
足部表面の圧力分布の関係. 体育学研究, 60(1): 165-175.

角川隆明, 高木英樹, 仙石泰雄, 椿本昇三. (2012) 平泳ぎ泳パフォーマンスと圧力分布から推定
した足部流体力との関係. 体育学研究, 12003.

Tsunokawa T, Tsuno T, Mankyu H, Takagi H, Ogita F (2018b) The effect of paddles on
pressure and force generation at the hand during front crawl. *Hum Mov Sci* 57:409-
416. doi:10.1016/j.humov.2017.10.002

角川隆明, 津野天兵, 成田健造, 萬久博敏, 荻田太, 仙石泰雄, 椿本昇三, 高木英樹. (2015b) 水

中モーションキャプチャシステムと圧力分布計測を用いたクロールの上肢動作の分析.

水泳水中運動科学, 18: 34-39.

Van der Vaart AJM, Savelberg HHCM, De Groot G, Hollander AP, Toussaint HM, van Ingen

Schenau GJ (1987) An estimation of drag in front crawl swimming. *Journal of*

biomechanics, 20(5):543-546. doi:10.1016/0021-9290(87)90254-5

van Houwelingen J, Schreven S, Smeets JB, Clercx HJ, Beek PJ (2017) Effective Propulsion

in Swimming: Grasping the Hydrodynamics of Hand and Arm Movements. *J Appl*

Biomech 33 (1):87-100. doi:10.1123/jab.2016-0064

Vennell R, Pease D, Wilson B (2006) Wave drag on human swimmers. *J Biomech* 39 (4):664-

671. doi:10.1016/j.jbiomech.2005.01.023

Wakayoshi K, Yoshida T, Ikuta Y, Mutoh Y, Miyashita M (1993) Adaptations to Six Months

of Aerobic Swim Training. *Int J Sports Med* 14(7):368-372. doi:10.1055/s-2007-

1021194

Yanai T (2001) What causes the body to roll in front-crawl swimming?. *J Appl Biomech*

17(1):28-42. doi:10.1123/jab.17.1.28

Zamparo P, Pendergast DR, Mollendorf J, Termin A, Minetti AE (2005) An energy

balance of front crawl. *Eur J Appl Physiol* 94(1):134-144.