

2025 年度修士学位論文

背泳ぎのプル・プッシュ・
クリアリング局面中の手部スピード、迎角と
泳速度の関係

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科

スポーツ健康科学専攻

博士課程前期課程 2 回生

学生証番号：6232240024-7

氏名：林 大成

背泳ぎのプル・プッシュ・クリアリング局面 中の手部スピード，迎角と泳速度の関係

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科 博士課程前期課程 2 回生

林大成

要旨

キーワード：動作解析，運動学，推進局面，運動制御

【緒言】

競泳の競技記録の向上には，レースの大部分を占めるストローク局面での泳速度を高めることが重要である．ストローク局面において手部は，身体で最も高い推進力を発揮する．泳者は，手部スピードと手部の迎角を大きくして推進力を獲得する．よって，背泳ぎのプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面における高い手部スピードと大きい迎角は，高い泳速度を発揮するために重要であると考えられる．しかしながら，手部が最大努力および最大努力下の背泳ぎの泳速度発揮に与える影響は，未だ明らかになっていない．

【目的】

本研究は，背泳ぎのストロークにおいて，手部が泳速度発揮に与える影響を運動学的分析の結果に基づいて明らかにすることとした．この目的の達成のために，1) 最大努力の背泳ぎにおけるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピード，迎角と泳速度の関係，2) 最大努力下の背泳ぎにおけるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピード，迎角と泳速度の関係，そして，3) 最大努力と最大努力下の背泳ぎの泳速度発揮に関わるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピードと手部の迎角の方略の解明を試みた．

【方法】

男子競泳選手 14 名を対象とし，最大努力および最大努力下の背泳ぎをビデオカメラで撮影した．泳者の進行方向を X 軸，プールの短軸かつ，泳者の進行方向に垂直な軸を Y

軸，そして，XY 軸に垂直な軸を Z 軸とした．手動デジタイズによって，映像データから，右の手部の 4 点，右肩峰，右大腿骨大転子の位置座標データを取得し，プル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の平均泳速度，手部スピード，手部迎角を算出し，相関関係を調べた．また，最大努力および最大努力下の背泳ぎにおけるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピード，迎角と泳速度の関係を検討した．また，最大努力および最大努力下のプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピードと迎角の差を対応のある t 検定を用いて調べ，最大努力および最大努力下の背泳ぎの泳速度発揮に関わるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピードと手部の迎角の方略を検討した．

【結果】

1) 最大努力の背泳ぎにおけるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピード，迎角と泳速度の関係

最大努力の背泳ぎでは，プッシュ局面の迎角，クリアリング局面の手部スピードと泳速度の間に有意な正の相関関係が認められた．一方で，プル局面の手部スピードと迎角，プッシュ局面の手部スピード，クリアリング局面の迎角と泳速度の間には有意な相関関係が認められなかった．プル局面では，手部は，X 軸負の方向，つまり，泳者の後方に加え，Y 軸正の方向，つまり，泳者の外側に動作していた．プッシュ局面では，手部は，X 軸負の方向，つまり，泳者の後方に加え，Y 軸負の方向，つまり，泳者の内側と Z 軸負の方向，つまり，鉛直下方向に動作していた．クリアリング局面では，X 軸負の方向，つまり，泳者の後方に加え，Z 軸正の方向，つまり，鉛直上方向に動作していた．

2) 最大努力下の背泳ぎにおけるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピード，迎角と泳速度の関係

最大努力下の背泳ぎでは，プッシュ局面の迎角と泳速度の間に有意な正の相関関係が認められた．一方で，プル局面の手部スピードと迎角，プッシュ局面の手部スピード，クリアリング局面の手部スピード，迎角と泳速度の間には有意な相関関係が認められなかった．プル局面では，手部は，X 軸負の方向，つまり，泳者の後方に加え，Y 軸正の方向，つまり，泳者の外側に動作していた．プッシュ局面では，手部は，X 軸負の方向，つまり，泳者の後方に加え，Y 軸負の方向，つまり，泳者の内側と Z 軸負の方向，つまり，鉛直下方

向に動作していた。クリアリング局面では、X 軸負の方向、つまり、泳者の後方に加え、Z 軸正の方向、つまり、鉛直上方向に動作していた。

3) 最大努力および最大努力下の背泳ぎの泳速度発揮に関わるプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピードと手部の迎角の方略

最大努力の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピードは、最大努力下よりも有意に高い値を示した。一方で、迎角は、最大努力と最大努力下の背泳ぎの全ての局面で有意差が認められなかった。

【考察】

最大努力および最大努力下の背泳ぎにおいて、プル局面では、肩関節が外転位となり、手部が外側へ動作するため、泳速度の発揮に大きく貢献していない可能性が示唆された。一方、プッシュ局面では、両条件ともに高い手部スピードが発揮され、高い泳速度を示す泳者ほど、大きな迎角を維持している可能性が示された。また、クリアリング局面における手部スピードは泳速度と関連しており、この局面での手部スピードの調整が最大努力と最大努力下の泳速度の違いに関与していることが示唆された。以上より、背泳ぎにおける泳速度の制御には、迎角を大きく変化させるのではなく、ストローク全体で迎角を比較的一定に保ちつつ、特にプッシュ局面およびクリアリング局面において手部スピードを調整することが重要であると考えられる。

【結論】

本研究では、手部が背泳ぎの泳速度に与える影響を運動学的分析の結果に基づいて明らかにすることを目的とした。その結果、以下の3点が明らかになった。

1. 最大努力の背泳ぎでは、高い泳速度の発揮にストローク後半の高い手部スピード発揮と大きい迎角の維持が必要であることが示唆された。
2. 最大努力下の背泳ぎでは、高い泳速度の発揮にプッシュ局面での大きい迎角の維持が必要であることが示唆された。
3. 泳者は、最大努力の背泳ぎでは、最大努力下の背泳ぎと同程度の迎角で高い手部スピードを発揮することで、高い泳速度を発揮していることが示唆された。

よって、背泳ぎのプッシュ局面、クリアリング局面における手部のスピードと迎角は、高い泳速度発揮に貢献しているため、ストローク後半の手部の動作改善は、競技記録の向上につながることを示唆された。

Relationships between hand speed and angle of attack and swimming velocity of pull, push, clearing phase in backstroke swimming

Graduate School of Sport and Health Science, Ritsumeikan University

Taisei Hayashi

Abstract

Keywords: motion analysis, kinematics, propulsive phase, motor control

[Introduction]

To improve competitive swimming performance, it is essential to increase swimming velocity during the stroke phase, which accounts for most of the race. During stroke phase, the hands generate the greatest propulsive force among body segments. Propulsive force is enhanced with increasing in hand speed and the angle of attack. Therefore, high hand speed and a large angle of attack during the pull, push, and clearing phases of backstroke are considered important for achieving high swimming velocity. However, the influence of hand kinematics on swimming velocity during maximal and submaximal effort backstroke has not yet been fully clarified.

[Objective]

The purpose of this study was to clarify the influence of hand speed and angle of attack on backstroke swimming velocity based on kinematic analysis. Specifically, this study aimed to:

1) examine the relationships between hand speed, angle of attack, and swimming velocity during the pull, push, and clearing phases of backstroke at maximal effort;

2) examine the relationships between hand speed, angle of attack, and swimming velocity during the pull, push, and clearing phases of backstroke at submaximal effort; and

3) identify strategies of hand speed and angle of attack during the pull, push, and clearing phases that contribute to swimming velocity production in maximal and submaximal effort backstroke.

[Method]

Fourteen male competitive swimmers performed backstroke swimming trials at maximal and submaximal effort. The travel direction of swimmers was the X-axis, the short axis of the pool and the axis perpendicular to the travel direction of swimmers was the Y-axis, and the axis perpendicular to the X and Y axes was the Z-axis. Each trial was recorded using video cameras, and the position coordinate data of four points on the right hand, the right acromion, and the greater trochanter of the right femur were obtained through manual digitization. Average swimming velocity, hand speed, and hand angle of attack were calculated for the pull, push, and clearing phases. Pearson's correlation coefficients were used to examine the relationships between hand kinematic variables and swimming velocity under maximal and submaximal effort conditions. Differences in hand speed and angle of attack between maximal and submaximal effort were analyzed using paired t-tests to identify kinematic strategies associated with swimming velocity production.

[Result]

1) At maximal effort, swimming velocity showed a significant positive correlation with the angle of attack during the push phase and with hand speed during the clearing phase. No significant correlations were observed between swimming velocity and hand speed or

angle of attack during the pull phase, hand speed during the push phase, or angle of attack during the clearing phase. During the pull phase, swimmers moved their hand in the negative direction of the X-axis as well as the positive direction of the Y-axis. During the push phase, swimmers moved their hand in the negative direction of the X-axis and Y-axis and Z-axis, while during the clearing phase, it moved in the negative direction of the X-axis and positive direction of the Z-axis.

2) At submaximal effort, a significant correlation between the angle of attack and swimming velocity during the push phase. No significant correlations were found between swimming velocity and hand speed during any phase or between angle of attack during the pull and clearing phases. Hand movement directions during each phase were similar to those observed at maximal effort.

3) Hand speed during the pull, push, and clearing phases was significantly higher at maximal effort than at submaximal effort. However, no significant differences in the angle of attack were observed between maximal and submaximal effort in any phase.

[Discussion]

During both maximal and submaximal effort backstroke, the shoulder joint was abducted during the pull phase, and the hand moved outward, suggesting that this phase contributes less to swimming velocity production. In contrast, during the push phase, swimmers exhibited high hand speeds under both effort conditions, and swimmers with higher swimming velocity appeared to maintain a larger angle of attack. Furthermore, hand speed during the clearing phase was associated with swimming velocity, suggesting that modulation of hand speed during this phase contributes to differences in swimming velocity between maximal and submaximal effort. These findings indicate that swimming velocity in backstroke is regulated primarily by adjustments in hand speed, particularly during the push and clearing phases, while maintaining a relatively constant angle of attack throughout the stroke.

[Conclusion]

This study clarified the influence of hand kinematics on backstroke swimming velocity using kinematic analysis. The results suggest that:

- 1) achieving high swimming velocity during maximal effort backstroke requires high hand speed in the latter half of the stroke and maintenance of a large angle of attack;
- 2) maintaining a large angle of attack during the push phase is particularly important for achieving high swimming velocity; and
- 3) swimmers achieve higher swimming velocities at maximal effort primarily by increasing hand speed while maintaining an angle of attack similar to that observed at submaximal effort.

These findings indicate that hand speed and angle of attack during the push and clearing phases play key roles in swimming velocity production, and that improving hand motion during the latter half of the stroke may contribute to enhanced competitive performance.

目次

第1章 緒言	1
1-1. 競泳競技とは.....	1
1-2. 競泳のバイオメカニクス研究	1
1-3. 背泳ぎとは	1
1-4. 手部の推進力と泳速度	2
1-5. 手部の動作速度と泳速度.....	2
1-6. 手部の迎角と泳速度.....	3
1-7. 最大努力と最大努力下の背泳ぎ	3
1-8. 目的および仮説.....	4
第2章 最大努力の背泳ぎにおけるプル局面，プッシュ局面，クリアリング 局面の手部スピード，迎角と泳速度の関係	6
2-1. 目的.....	6
2-2. 方法.....	6
2-2-1. 対象者	6
2-2-2. 実験環境.....	6
2-2-3. 運動データの解析.....	7
2-2-4. 統計解析.....	9
2-3. 結果.....	10
2-3-1. 各局面の変数の平均値と標準偏差	10
2-3-2. 最大努力の背泳ぎの矢状面の手部の軌跡，速度ベクトル.....	10
2-3-3. 最大努力の背泳ぎの水平面の手部の軌跡，速度ベクトル.....	11
2-3-4. 最大努力の背泳ぎの前額面の手部の軌跡，速度ベクトル.....	11
2-3-5. 最大努力の背泳ぎの泳速度の時系列データ	12

2-3-6. 最大努力の背泳ぎの手部スピードの時系列データ	13
2-3-7. 最大努力の背泳ぎの手部の迎角の時系列データ	13
2-3-8. プル局面の各変数と泳速度の相関関係	15
2-3-9. プッシュ局面の各変数と泳速度の相関関係	15
2-3-10. クリアリング局面の各変数と泳速度の相関関係	15
2-4. 考察	18
2-4-1. 本研究の主要な結果	18
2-4-2. プル局面の手部スピード, 迎角と泳速度の関係	18
2-4-3. プッシュ局面の手部スピード, 迎角と泳速度の関係	19
2-4-4. クリアリング局面の手部スピード, 迎角と泳速度の関係	19
2-5. 小括	20
第3章 最大努力下の背泳ぎにおけるプル局面, プッシュ局面, クリアリ ング局面の手部スピード, 迎角と泳速度の関係	22
3-1. 目的	22
3-2. 方法	22
3-3. 結果	22
3-3-1. 各局面の変数の平均値と標準偏差	22
3-3-2. 最大努力下の背泳ぎの矢状面の手部の軌跡, 速度ベクトル	23
3-3-3. 最大努力下の背泳ぎの水平面の手部の軌跡, 速度ベクトル	23
3-3-4. 最大努力下の背泳ぎの前額面の手部の軌跡, 速度ベクトル	24
3-3-3. 最大努力下の背泳ぎの泳速度の時系列データ	25
3-3-4. 最大努力下の背泳ぎの手部スピードの時系列データ	25
3-3-5. 最大努力下の背泳ぎの手部の迎角の時系列データ	25
3-3-6. 最大努力下のプル局面の各変数と泳速度の相関関係	27
3-3-7. 最大努力下のプッシュ局面の各変数と泳速度の相関関係	27
3-3-8. 最大努力下のクリアリング局面の各変数と泳速度の相関関係	27
3-4. 考察	30
3-4-1. 本研究の主要な結果	30

3-4-2. 最大努力下のプル局面の手部スピード，迎角と泳速度の関係	30
3-4-3. 最大努力下のプッシュ局面の手部スピード，迎角と泳速度の関係	31
3-4-4. 最大努力下のクリアリング局面の手部スピード，迎角と泳速度の関係	31
3-5. 小括	32
第4章 総合討論	33
4-1. 目的	33
4-2. 方法	33
4-3. 結果	33
4-3-1. 最大努力，最大努力下の背泳ぎの各局面の変数の平均値，標準偏差	33
4-3-2. 最大努力下の背泳ぎの各局面の手部の軌跡，速度ベクトル	34
4-3-3. 最大努力下の背泳ぎの泳速度の時系列データ	36
4-3-4. 最大努力下の背泳ぎの手部スピードの時系列データ	36
4-3-5. 最大努力下の背泳ぎの手部の迎角の時系列データ	37
4-3-6. 最大努力と最大努力下の背泳ぎの手部スピードの比較	39
4-3-7. 最大努力と最大努力下の背泳ぎの手部の迎角の比較	39
4-4. 考察	42
4-4-1. 本研究の主要な結果	42
4-4-2. 最大努力と最大努力下の背泳ぎの迎角，手部スピードの比較	42
4-5. 小括	43
4-6. 研究の限界	43
第5章 結論	45
参考文献一覧	45
謝辞	49

第 1 章 緒言

1-1. 競泳競技とは

競泳は、バタフライ、背泳ぎ、平泳ぎ、クロールの近代 4 泳法で一定の距離を泳ぐのにかかった時間を競うスポーツである。そして、競泳競技は、スタート、ターン後の水中局面と、レースの大部分を占めるストローク局面に分けられる。そのため、優れた競技記録を発揮するために、泳者は、レースの大部分を占めるストローク局面の泳速度を高める必要がある。

1-2. 競泳のバイオメカニクス研究

泳者は、身体の動作によって、水中を推進する。よって、競泳の研究では、泳動作の動作解析といったキネマティクス研究が多く行われている(Ikeda et al., 2021; Koga et al., 2022; Tanaka et al., 2023)。これまでのキネマティクス研究では、矢状面での動作解析によって、1 秒間にストロークを行った回数を示すストローク頻度や 1 ストロークで進んだ距離を示すストローク長に注目されてきた(Didier et al., 2008; Seifert et al., 2004)。近年は、水中ドルフィンキックやクロールを対象とした 3 次元での動作解析によって、足部や手部などといった、より詳細な運動学因子が明らかになりつつある(Kudo et al., 2023; Matsuda et al., 2024)。背泳ぎや平泳ぎ、バタフライといった泳法でも、ストローク頻度やストローク長に注目した研究は複数ある一方で、これらの泳法を対象とした足部や手部の動作解析は、ほとんどみられない(Barbosa et al., 2008; Gonjo et al., 2025; Pinto et al., 2025)。よって、泳動作の詳細な動作解析は、まだ十分に行われていない状況である。

1-3. 背泳ぎとは

背泳ぎは、近代 4 泳法の中で唯一、仰臥位で推進する泳法である。また、背泳ぎは、クロールと同様に、上肢と下肢を交互に動作させて推進する泳法でもある一方で、クロールよりも泳速度が低い(*Swimming records*)。背泳ぎは、クロールよりもストローク頻度が低いいため、クロールと比較して泳速度が低い値を示す。(Gonjo et al., 2020)。背泳ぎの泳速

度は、クロールと同様に、ストローク頻度の向上に伴って増加するとされている(Didier et al., 2008; Seifert et al., 2004). 背泳ぎのストロークは、手部が入水してから後方に動き始めるまでのエントリー&キャッチ局面、エントリー&キャッチ局面終了後から手部の水平位置が肩峰の水平位置に達するまでのプル局面、プル局面終了後から手部が後方に動き終わるまでをプッシュ局面、プッシュ局面終了後から手部が退水するまでをクリアリング局面そして、クリアリング局面終了後から手部を前方に戻すリカバリー局面に分けられる(Didier et al., 2006). とりわけ、プル局面、プッシュ局面、クリアリング局面は、推進局面とされている(Didier et al., 2008; Maglischo, 2003). しかしながら、これらの先行研究は、1 ストロークに要した時間に対する各局面に要した時間の比率や、ストローク頻度、ストローク長による評価をしているため、背泳ぎのどの推進局面の運動学因子が高い泳速度発揮に貢献しているかは不明である.

1-4. 手部の推進力と泳速度

高い泳速度の発揮には、高い推進力を発揮することが求められる。推進力は、流体中の物体の速度、迎角、表面積、流体の密度によって増減するとされる。このうち、泳者がコントロール可能な変数は、速度と迎角である。よって、高い泳速度を発揮する泳者は、下肢や上肢の速度と迎角を大きくして推進力を増大させていると考えられる。クロールにおいて上肢は、下肢よりも大きい推進力を発揮し、手部は、上肢で最も高い推進力を発揮する(Samson et al., 2017; Takagi et al., 2021). つまり、手部は、身体で最も大きい推進力を発揮する。また、背泳ぎにおいても、手部は、上肢で最も大きい推進力を発揮する部位である(田中ら, 2025). よって、背泳ぎにおいて、高い泳速度を発揮する泳者は、手部で大きい推進力を発揮していると考えられる.

1-5. 手部の動作速度と泳速度

泳者が獲得する流体力は、速度の 2 乗に比例して増加する。クロールでは、ストローク頻度が高い泳者は、高い泳速度を發揮できる(Cohen et al., 2017; Koga et al., 2020; Seifert et al., 2004). ストローク頻度を増加させるためには、手部の速度を増加させる必要がある。そのため、手部の高い速度を發揮する選手は、高い泳速度を發揮する(Atkison et al., 2014; Koga et al., 2022). このように、身体の動作速度は、大きい推進力の發揮に貢献し

ていると考えられる。背泳ぎでも、高いストローク頻度を発揮する泳者は、高い泳速度を
発揮する(Didier et al., 2008)。また、背泳ぎの短距離選手と中距離選手を比較した先行研
究では、短距離選手は、中距離選手よりも高いストローク頻度と泳速度を発揮しているこ
とが明らかになっている(Cortesi et al., 2012)。背泳ぎにおける高いストローク頻度が高い
泳速度の発揮に関わっていること、背泳ぎでも手部が高い泳速度の発揮に重要と考えられ
ることから、背泳ぎのストローク中における手部の高い速度は、高い泳速度の発揮に貢献
していると考えられるが、いまだ明らかになっていない。

1-6. 手部の迎角と泳速度

迎角は、流体流れの向きに対する物体の傾きとして定義される。流体中の物体が受ける
力には、揚力と抗力が挙げられる。揚力は、流体中の物体が受ける流体力のうち、流れに
対して垂直な力であり、抗力は、流体力のうち、流れに平行な力である。揚力は、迎角
45°付近で最大となる一方で、抗力は、迎角 90°で最大となる(図 1-1)。クロール中の手
部の迎角について調べた先行研究によると、泳者は、手部の迎角 50°、90°付近で最も高い
揚力と抗力を獲得することが報告されている(Samson et al., 2018; Van Houwelingen et al.,
2017)。クロールにおいて、最大努力以上にストローク頻度が増加しても、泳速度は向上
しないことが示唆されている(Craig & Pendergast, 1979)。これは、最大努力以上のスト
ローク頻度では、最大努力と比較して手部の迎角が減少し、手部に作用する推進力が減少
するためであると報告されている(Koga et al., 2020)。よって、背泳ぎで高い泳速度を発揮
する泳者は、45°もしくは、90°に近い迎角を維持しながら手部の高い速度を発揮して高い
推進力を獲得していると考えられるが、背泳ぎにおける手部の迎角と泳速度の関係は不明
である。

1-7. 最大努力と最大努力下の背泳ぎ

競泳の背泳ぎは、50m、100m、200mの距離でレースが行われる。50m背泳ぎ競技の泳
速度が最も高く、200m背泳ぎ競技の泳速度が最も低い。そして、2025年に開催された競
泳の日本選手権の200m背泳ぎ競技の泳速度は、50m競技の約90%であった(日本水泳連
盟科学委員会)(表 1-1)。このように、泳者は、最大努力と最大努力下で泳速度を変化さ
せる際、推進力の調整のために手部の速度と迎角をコントロールしていると考えられる。

しかしながら、背泳ぎにおける最大努力および最大努力下の泳速度調整にどのような手部の速度と迎角の方略を用いているかは不明である。

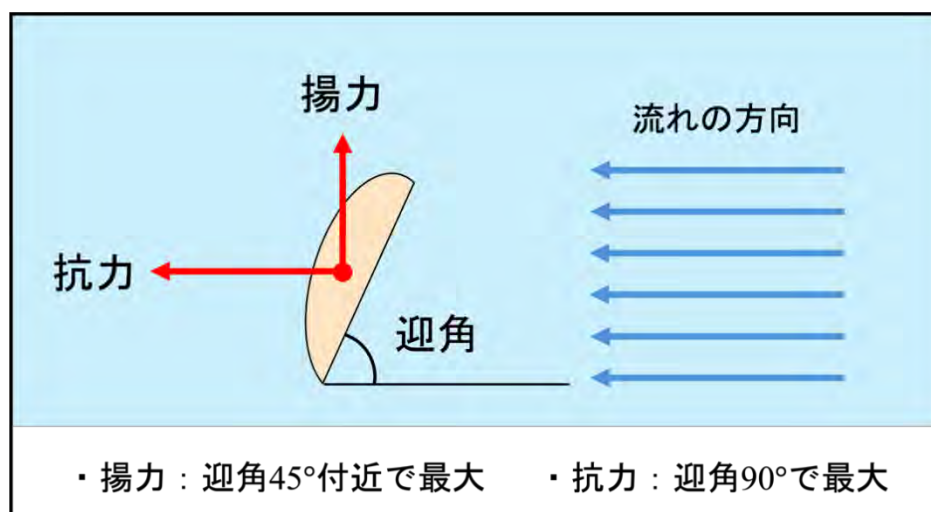


図 1-1：迎角と揚力，抗力

表 1-1：2025 年日本選手権水泳競技大会の 50m, 200m 背泳ぎの泳速度

	単位	50m背泳ぎ	200m背泳ぎ	速度比率(%)
泳速度	(m/s)	1.87 ± 0.03	1.71 ± 0.04	91.4

1-8. 目的および仮説

本修士論文は、背泳ぎのストロークにおいて、手部が泳速度発揮に与える影響を運動学的分析の結果に基づいて明らかにすることを目的とした。この目的を達成するためには、最大努力の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピード、手部の迎角と泳速度の関係の解明（研究課題 1）、最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピード、手部の迎角と泳速度の関係の解明（研究課題 2）、最大努力と最大努力下の背泳ぎの泳速度発揮に関わるプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピードと手部の迎角の方略の解明（研究課題 3）が必要である。本修士論文では、1)最大努力の背泳ぎにおいて、高い泳速度を発揮する泳者は、全ての局面で手部スピードが高く、迎角が大きい傾向がある（研究課題 1）、2)最大努力下に背泳ぎにおいて、高い泳速度を発揮する泳者は、全ての局面で手部スピードが高く、迎角が大きい傾向

がある（研究課題 2），3)最大努力の手部スピードと迎角は，全ての局面で最大努力下よりも高い値を示す（研究課題 3）という仮説を立てた．その仮説の検証を目的として，

1. 最大努力の背泳ぎの高い泳速度発揮に関わるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピードと迎角（第 2 章：研究課題 1）
2. 最大努力下の背泳ぎの高い泳速度発揮に関わるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピードと迎角（第 3 章：研究課題 2）

について検討した．そして，第 4 章で背泳ぎの最大努力，最大努力下におけるプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピードと手部の迎角（研究課題 3）について第 3 章までの知見に基づき総括的に議論し，第 5 章で結論を述べた．

第2章 最大努力の背泳ぎにおけるプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピード、迎角と泳速度の関係

2-1. 目的

本研究では、研究課題1に基づいて、最大努力の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面における手部スピード、迎角と泳速度の関係を明らかにすることを目的とした。推進力は速度の2乗に比例し、45°もしくは、90°に近い迎角で増加する。よって、プル局面、プッシュ局面、クリアリング局面において手部速度と迎角と泳速度の間に正の相関関係があるという仮説を立てた。

2-2. 方法

2-2-1. 対象者

本実験は、男子競泳選手14名（年齢：22.1±2.4歳，身長：173.8±5.9cm，体重：68.3±5.0kg，World Aquatics Score：670.7±91.7）を対象に行った。すべての対象者は、本実験に参加することで得られる利益や被る可能性がある不利益および危険についての説明を受けた。対象者は、対象者自身の自由意志による同意をもって本実験に参加した。なお、本研究は、「立命館大学における人を対象とする研究倫理指針（BKC-LSMH-2024-044）」に基づいて行われた。

2-2-2. 実験環境

背泳ぎ試技の撮影は、屋内プール（25m×7レーン，水深：1.35m，水温：30℃）で行った。10分間のウォーミングアップを実施した後、対象者の14点（右肩峰，右上腕前面，右上腕外側，右上腕後面，右上腕内側上顆，右上腕外側上顆，右前腕前面，右前腕外側，右前腕後面，右尺骨茎状突起，右橈骨茎状突起，右第2中手骨頭，右第5中手骨頭，右大腿骨大転子）に油性のボディペイント（YYT WORLD PRODUCTS社製）およびビニールテープ（ニチバン社製）を用いて印をつけた（図2-1）。最大努力の25m背泳ぎを1回行い、防水ケース（MPK-86 URX100A，SONY社製）に入れた4台のビデオカメラ（Cyber-shot，RX100III，SONY社製）で撮影した。ビデオカメラは、発光ダイオード（LED）を用いて同期した。スタートおよび水中動作の影響を排除するため、スタート

から 15m 地点を測定区間（縦：4.5m，横：1.0m，深さ：1.35m）の開始地点としてキャリブレーションフレームを設置し，キャリブレーションを行った（図 2-2）．また，対象者には，スタート後すぐに浮き上がるように指示した．

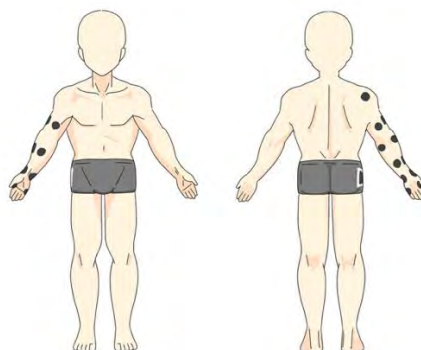


図 2-1：マーカーの貼付位置

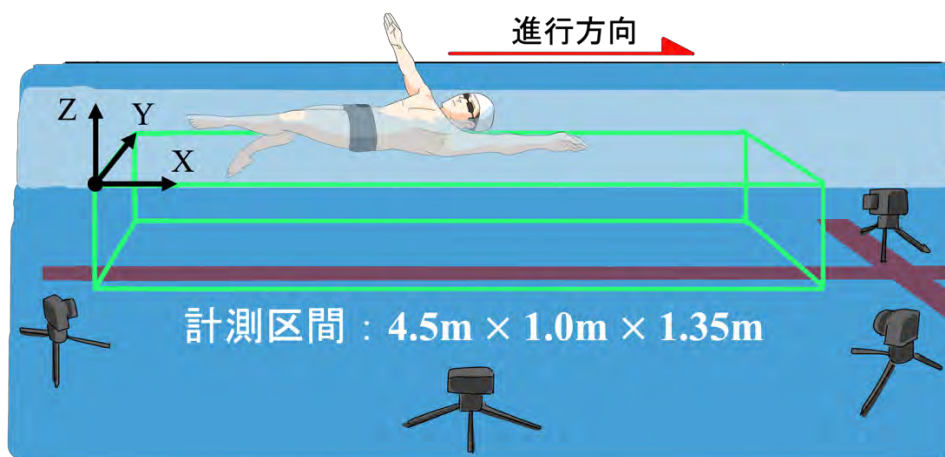


図 2-2：測定環境

2-2-3. 運動データの解析

背泳ぎ試技の撮影で取得した映像データは，手動デジタイズソフト（FRAME-DIAS Ver.5, DKH 社製）を用いてデジタイズし，位置座標データを取得した．キャリブレーション誤差は，X 軸で $0.0028 \pm 0.0004\text{m}$ ，Y 軸で $0.0058 \pm 0.0013\text{m}$ ，Z 軸で $0.0054 \pm 0.0007\text{m}$ であった．本研究では，泳者の進行方向かつ，プールの長軸を X 軸，泳者の進行

方向に垂直なプールの短軸を Y 軸，そして長軸と短軸に垂直な軸を Z 軸と定義した．なお，絶対座標系の原点は，スタートから 15m の地点とした．デジタイズによって得られた位置座標データは，4 次のバターワース型ローパスフィルタ（遮断周波数：6Hz）を用いて平滑化した(Ikeda et al., 2021)．解析対象は，右手が入水してから退水するまでのプル局面とプッシュ局面とした．プル局面は，右尺骨茎状突起，橈骨茎状突起，第 2 中手骨頭，第 5 中手骨頭の中心からなる手部の中心と大腿骨大転子の X 座標の差が最大値になった直後のフレームから手部の中心と肩峰の X 座標の差が負になったフレームまでとした．そして，プッシュ局面は，プル局面終了後から手部の中心の Z 座標が最小となる局面までとした．クリアリング局面は，プッシュ局面終了後から退水するまでとした（図 2-3）．プル局面，プッシュ局面，クリアリング局面中の平均泳速度，手部スピード，手部の迎角を算出した．平均泳速度は，大腿骨大転子の X 座標から算出した．手部スピードは，手部に貼付した 4 点のマーカの中心の速度ベクトルの絶対値から算出した．迎角は，手部のマーカから作成した面と手部の速度ベクトルがなす角として定義した（図 2-4）．ストローク全体の泳速度の平均値に加え，プル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の泳速度，手部スピード，手部の迎角の平均値を算出した．また，ストローク全体の泳速度，手部スピード，手部の迎角の時系列データを示した（図 2-8）．

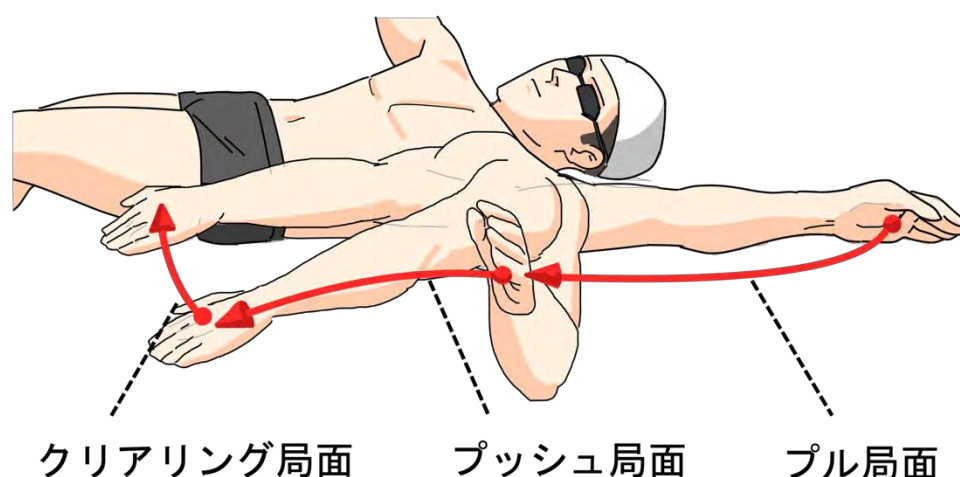


図 2-3 : 背泳ぎの各局面

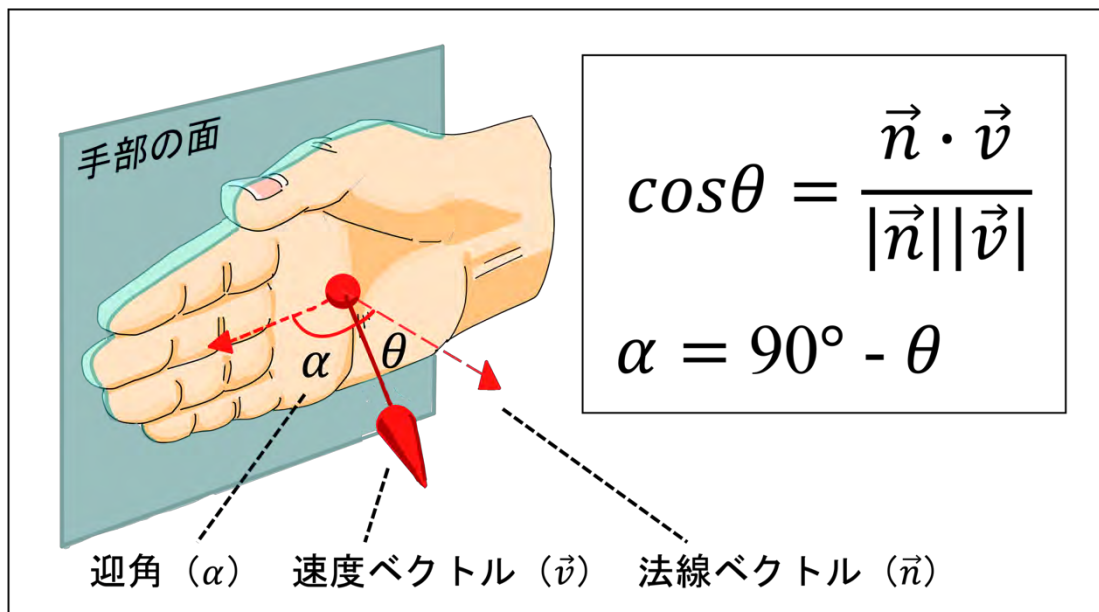


図 2-4 : 迎角の算出方法

2-2-4. 統計解析

取得したデータは、Shapiro-Wilk 検定によって正規性を確認した。正規性が認められた変数間の相関関係は、ピアソンの積率相関係数を用いて相関関係を検討した。そして、少なくとも一方の正規性が認められなかった変数間の相関関係は、スピアマンの順位相関係数を用いて相関関係を検討した。Shapiro-Wilk 検定の結果、プッシュ局面の手部スピード以外の変数に正規性が認められた。本研究では、相関係数 r が 0.00-0.10 を相関関係なし、0.10-0.39 を弱い相関関係、0.40-0.69 を中程度の相関関係、0.70-0.89 を強い相関関係、0.90-1.00 を非常に強い相関関係とした(Schober et al., 2018)。また、検定の多重性を避けるために BH 法を用いて p 値を調整した(Benjamini & Hochberg, 1995)。なお、False Discovery Rate は、0.05 とし、 q 値がこの値を下回った検定の帰無仮説を棄却した。有意水準は、5%とした。

2-3. 結果

2-3-1. 各局面の変数の平均値と標準偏差

本実験対象者の最大努力の背泳ぎのストローク全体，プル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の平均泳速度と，プル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の手部スピード，迎角の平均値と標準偏差を表に示した（表 2-1）。

表 2-1：最大努力のプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の
各変数の平均値と標準偏差

		平均値	±	標準偏差
ストローク全体				
平均泳速度	(m/s)	1.52	±	0.09
プル局面				
平均泳速度	(m/s)	1.54	±	0.09
手部スピード	(m/s)	2.69	±	0.25
迎角	(deg)	58.30	±	7.34
プッシュ局面				
平均泳速度	(m/s)	1.61	±	0.10
手部スピード	(m/s)	3.10	±	0.26
迎角	(deg)	63.83	±	8.36
クリアリング局面				
平均泳速度	(m/s)	1.30	±	0.17
手部スピード	(m/s)	2.26	±	0.41
迎角	(deg)	22.23	±	9.25

2-3-2. 最大努力の背泳ぎの矢状面の手部の軌跡，速度ベクトル

本実験対象者 1 名の背泳ぎの矢状上の手部の軌跡と速度ベクトルを図に示した（図 2-5）。手부는，ストローク全体を通して X 軸負の方向に動作していた。プル局面前半では，Z 軸方向負の方向に動作し，プル局面後半では，Z 軸正の方向に動作した。プッシュ局面では，Z 軸負の方向に動作し，クリアリング局面では，Z 軸正の方向に動作した。

2-3-3. 最大努力の背泳ぎの水平面上の手部の軌跡, 速度ベクトル

本実験対象者 1 名の背泳ぎの水平面上の手部の軌跡と速度ベクトルを図に示した (図 2-6) 手部は, ストローク全体を通して X 軸負の方向に動作していた. 手部は, プル局面中盤にかけて Y 軸正の方向に動作した. その後, プッシュ局面後半で, Y 軸負の方向に動作した. 手部は, クリアリング局面で内側に動作していた.

2-3-4. 最大努力の背泳ぎの前額面上の手部の軌跡, 速度ベクトル

本実験対象者 1 名の背泳ぎの前額面上の手部の軌跡と速度ベクトルを図に示した (図 2-7) 手部は, プル局面前半で Z 軸負の方向に動作し, Y 軸正の方向に動作した. そして, プル局面の後半では, Z 軸正の方向に動作した. その後, 手部は, プッシュ局面で Z 軸負の方向に加え, Y 軸負の方向に動作した. クリアリング局面では, 手部は, Z 軸正の方向に動作した.

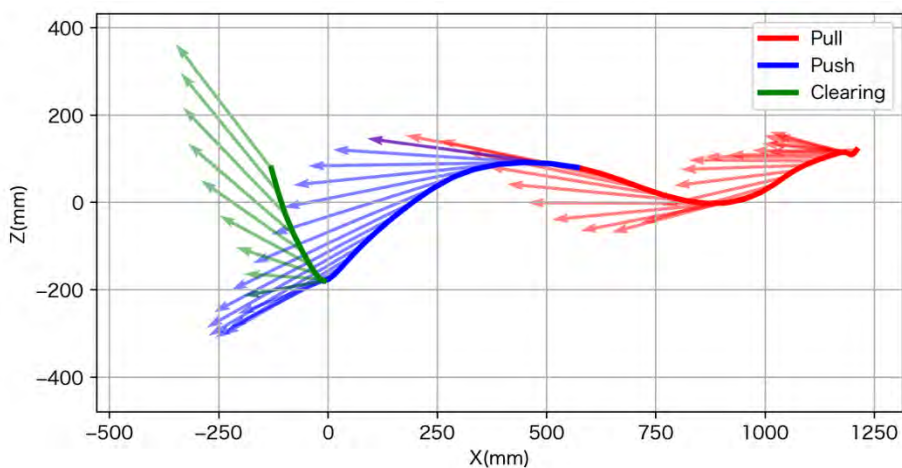


図 2-5 : 矢状面から見た最大努力の背泳ぎの手部の軌跡と速度ベクトル

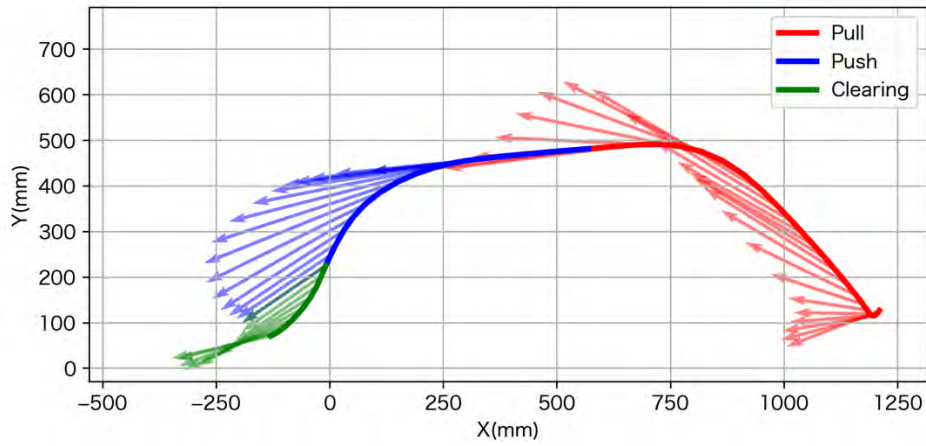


図 2-6 : 上から見た最大努力の背泳ぎの手部の軌跡と速度ベクトル

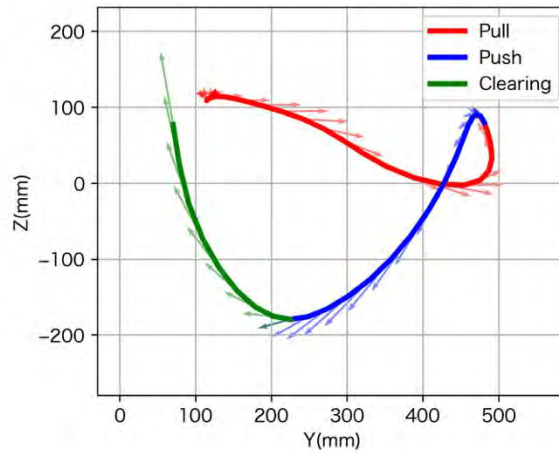


図 2-7 : 進行方向から見た最大努力の背泳ぎの手部の軌跡と速度ベクトル

2-3-5. 最大努力の背泳ぎの泳速度の時系列データ

最大努力の背泳ぎの泳速度の時系列データを図に示した (図 2-8). 右手が入水してからプル局面開始までは, 手部が後方に動作していない局面のため, 研究の対象外とした. 最大努力の背泳ぎの泳速度は, プル局面開始直後からプル局面中盤にかけて, やや減少した後, プル局面の終盤からプッシュ局面の中盤にかけて, やや増加した. その後, 泳速度は, クリアリング局面にかけて減少し, クリアリング局面終盤にかけて増加した.

2-3-6. 最大努力の背泳ぎの手部スピードの時系列データ

最大努力の背泳ぎの手部スピードの時系列データを図に示した (図 2-8)。最大努力の背泳ぎの手部スピードは、プル局面開始直後からプル局面終盤にかけて増加し、プッシュ局面終盤にかけて減少した。その後、手部スピードは、クリアリング局面開始直後からクリアリング局面終盤にかけて増加した。

2-3-7. 最大努力の背泳ぎの手部の迎角の時系列データ

最大努力の背泳ぎの迎角の時系列データを図に示した (図 2-8)。最大努力の背泳ぎの迎角は、プル局面の中盤にかけて大きくなり、プッシュ局面前にかけて小さくなった。その後、迎角は、プッシュ局面の中盤にかけて大きくなり、クリアリング局面終盤にかけて小さくなった。

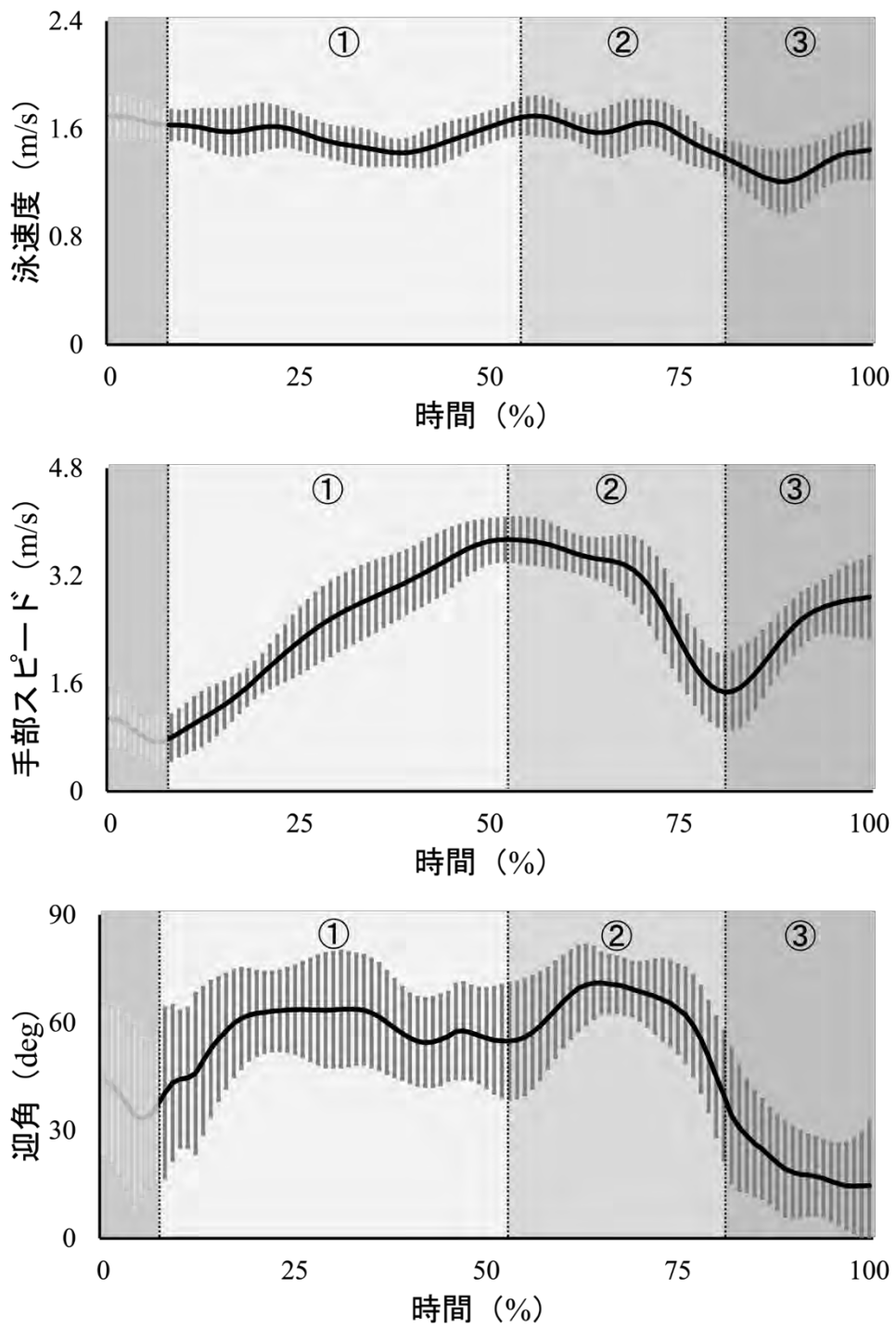


図 2-8 : 泳速度, 手部スピード, 迎角の時系列データ

① : プル局面, ② : プッシュ局面, ③ : クリアリング局面

2-3-8. プル局面の各変数と泳速度の相関関係

プル局面の手部スピード，迎角の平均値と平均泳速度の相関関係を表に示した（図 2-9,2-10）．プル局面の手部スピード，迎角と平均泳速度の間に有意な相関関係は認められなかった（図 2-9,2-10）．

2-3-9. プッシュ局面の各変数と泳速度の相関関係

プッシュ局面の手部スピード，迎角の平均値と平均泳速度の相関関係を図に示した（図 2-9,2-10）．プッシュ局面の手部スピードと平均泳速度の間に有意な相関関係は認められなかった（図 2-9）．一方で，プッシュ局面の迎角と平均泳速度の間に有意な中程度の正の相関関係が認められた（図 2-10）．

2-3-10. クリアリング局面の各変数と泳速度の相関関係

クリアリング局面の手部スピード，迎角の平均値と平均泳速度の相関関係を図に示した（図 2-9,2-10）．クリアリング局面の手部スピードと平均泳速度の間に有意な強い正の相関関係が認められた（図 2-9）．一方で，クリアリング局面の迎角と平均泳速度の間に有意な相関関係は認められなかった（図 2-10）．

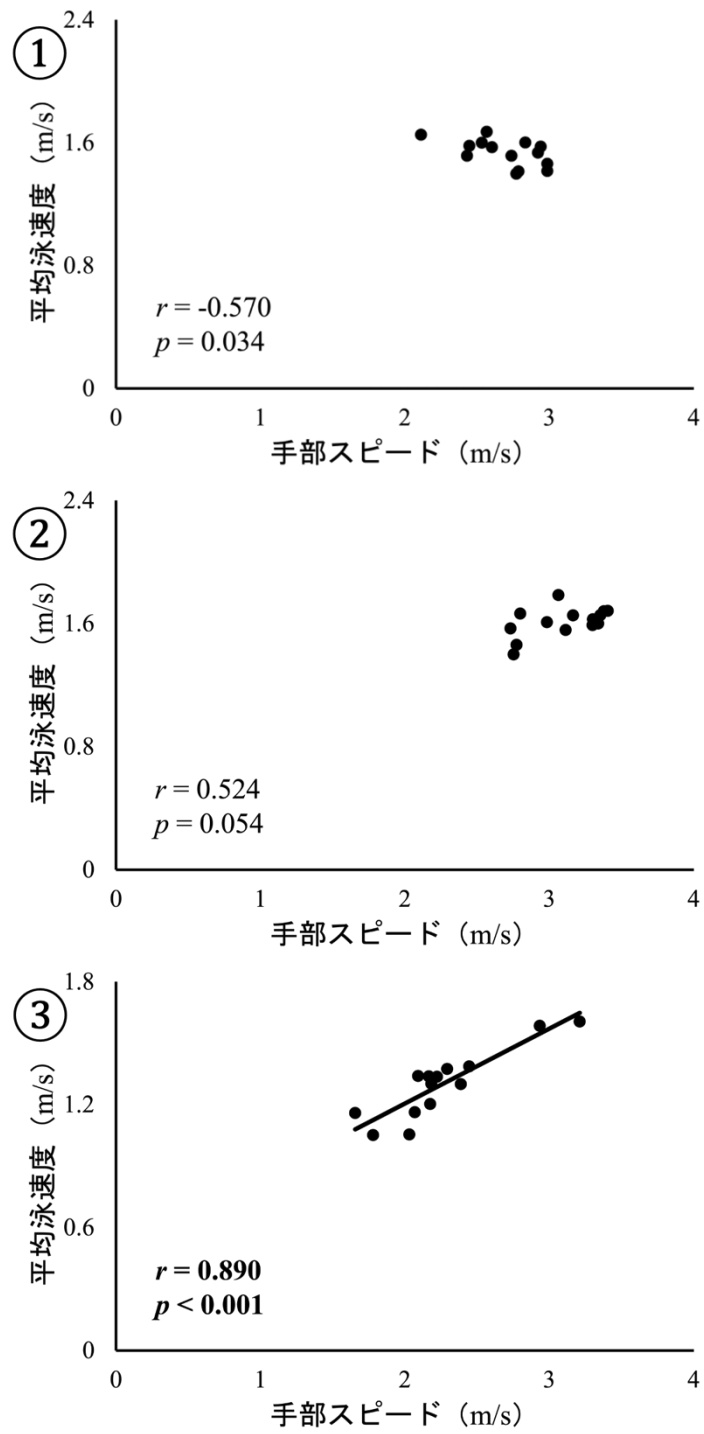


図 2-9 : 最大努力のプル局面, プッシュ局面, クリアリング局面の
手部スピードと平均泳速度の散布図

① : プル局面, ② : プッシュ局面, ③ : クリアリング局面

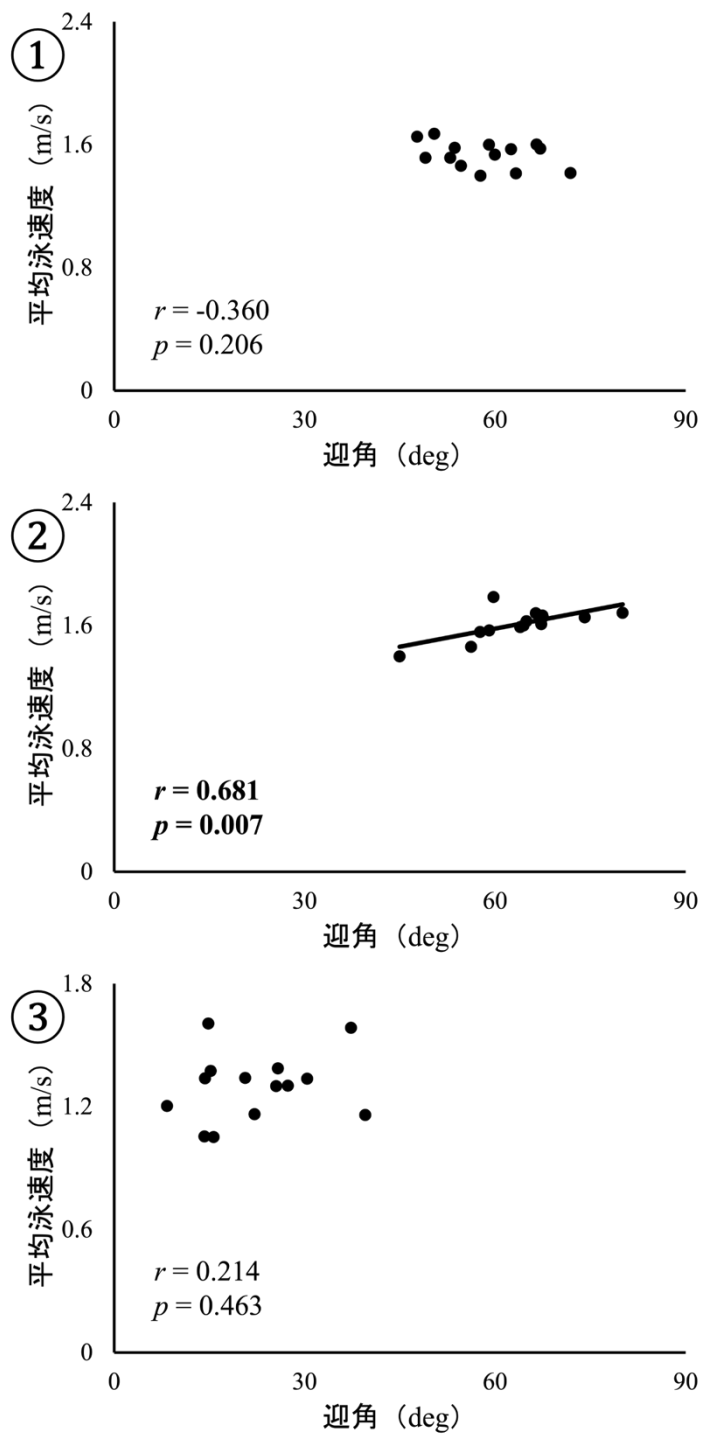


図 2-10：最大努力のプル局面，プッシュ局面，クリアリング局面の
迎角と平均泳速度の散布図

①：プル局面，②：プッシュ局面，③：クリアリング局面

2-4. 考察

2-4-1. 本研究の主要な結果

本研究の目的は、背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面における手部のスピード、迎角と泳速度の関係を明らかにすることであった。実験の結果、背泳ぎのプッシュ局面の迎角とクリアリング局面の手部スピードの間に有意な正の相関関係が認められた。よって、最大努力の背泳ぎにおいて、高い泳速度を発揮する泳者は、手部スピードが高く、迎角が大きい傾向があるという仮説は、一部支持された。背泳ぎのストロークにおける手部スピードと迎角は、高い泳速度発揮に有利に作用することが明らかになった。

2-4-2. プル局面の手部スピード、迎角と泳速度の関係

本研究では、最大努力の背泳ぎのプル局面において、手部スピードおよび迎角と泳速度の間に有意な相関関係は認められなかった(図 2-9,2-10)。一般に、手部スピードや迎角の増大は推進力の増加に寄与すると考えられるため、両変数と泳速度との間に正の関係が認められることが想定された。しかし、本研究の結果は、高い泳速度を発揮する泳者ほど手部スピードが高く、迎角が大きいという仮説を支持しなかった。図 2-8 の時系列データでは、プル局面前半で手部スピードが比較的小さく、迎角が増大している一方で、泳速度は、やや減少していた。これは、プル局面前半において、手部による推進力の獲得が十分でない可能性を示唆する。プル局面終盤にかけて手部スピードは増加し、迎角は小さくなったが、泳速度はやや増加した。よって、プル局面は、後半で推進力を獲得した一方で、全体を通して推進力の獲得に直結していなかったと考えられる。推進力は、手部の相対速度の 2 乗に比例して増加する。しかし、泳者が獲得した力の方向が泳者の進行方向と一致していなければ、泳速度の増加には寄与しにくい。実際に、本研究におけるプル局面中盤の手部の速度ベクトルは、X 軸負の方向、つまり、泳者の後方に加えて Y 軸正の方向、つまり、泳者の外側にも向いていた(図 2-6)。泳者は、背泳ぎのプル局面で 180°外転位からおよそ 90°外転位まで肩関節を内転する。このとき、手部は、泳者の外側に円弧状に動作する。よって、プル局面で発揮された力の一部は、推進方向以外に向いていた可能性がある。背泳ぎでは、一方の手部がプル局面であるとき、他方の手部は常にクリアリング局面にあり、泳者がプル局面で受ける水の抵抗は、他の局面に比べて大きかったと考えられる(Didier et al., 2008; Psycharakis & Coleman, 2024)。そのため、プル局面における手部

スピードや迎角の増減が、泳速度の変化として表れなかった可能性がある。以上のことから、最大努力の背泳ぎのプル局面では、手部スピードおよび迎角の推進力への影響が、水の抵抗や力の方向によって打ち消された結果、泳速度との間に有意な相関関係が認められなかったと考えられる。

2-4-3. プッシュ局面の手部スピード、迎角と泳速度の関係

本研究では、最大努力の背泳ぎのプッシュ局面において、手部スピードと泳速度の間には有意な相関関係は認められなかった一方で、迎角と泳速度の間には有意な中程度の正の相関関係が認められた（図 2-9,2-10）。図 2-8 および表 2-1 から、プッシュ局面は手部スピード、迎角、泳速度の全てが高い値を示す局面である。最大努力の背泳ぎのプッシュ局面は、多くの泳者が高い手部スピードを発揮していたため、手部スピードの個人差が相対的に小さくなった可能性がある。その結果、プッシュ局面の手部スピードと泳速度との間に有意な相関関係が認められなかったと考えられる。一方で、プッシュ局面の迎角と泳速度の間に有意な正の相関関係が認められたことは、高い泳速度を発揮する泳者ほど、プッシュ局面において 90°に近い迎角を維持していることを示唆する。推進力は、手部スピードおよび迎角によって増減するが、手部スピードが高い水準であるプッシュ局面では、迎角の違いが推進力の差として表れたと考えられる。クロールを対象とした先行研究では、最大努力を超えてストローク頻度を増加させると、手部スピードを維持するために迎角が減少することが報告されている(Koga et al., 2020)。よって、高い手部スピードの発揮と大きな迎角の維持は、両立が困難な場合があると考えられる。本研究においても、高い泳速度を発揮する泳者は、プッシュ局面で 90°に近い迎角を保持しながら高い手部スピードを発揮できていた一方で、泳速度の低い泳者では、これらを同時に満たすことが困難であった可能性がある。以上のことから、最大努力の背泳ぎのプッシュ局面では、迎角の調整が推進力の大きさを左右する要因であり、迎角の個人差が泳速度の違いとして表れた結果、迎角と泳速度との間に有意な相関関係が認められたと考えられる。

2-4-4. クリアリング局面の手部スピード、迎角と泳速度の関係

本研究では、最大努力の背泳ぎのクリアリング局面において、手部スピードと泳速度の間に有意な強い正の相関関係が認められた一方で、迎角と泳速度の間には有意な相関関係

は認められなかった (図 2-9,2-10). この結果は, クリアリング局面においては, 迎角よりも手部スピードが泳速度発揮に強く関与していることを示唆する. 図 2-8 に示した時系列データより, クリアリング局面の手部スピード泳速度は, 局面開始直後から終盤にかけて増加していた. このことから, クリアリング局面で高い泳速度を発揮する泳者ほど, 高い手部スピードを増加させていたと考えられる. 背泳ぎにおいて高い泳速度を発揮する泳者は, クリアリング局面で大きな推進力を獲得する”three-peak stroke pattern”が認められることが報告されている(Maglischo, 2003). 本研究では, この三つ目の推進力のピークが, 主にクリアリング局面の高い手部スピードの発揮によって生じた可能性がある. 迎角は, クリアリング局面を通して小さくなり続けた. 背泳ぎのクリアリング局面では, 手掌を内側あるいは鉛直下向きに向けた状態での Z 軸正の方向, つまり, 鉛直上方向への動作が確認される. 抗力が 90°付近で最大となり, 揚力が 45°付近で最大となることを踏まえると, 迎角の平均値が 22.23°, 標準偏差が 9.25°であるクリアリング局面は, 抗力および揚力依存の推進力が小さく, 泳速度との相関関係が認められなかった可能性がある (表 2-1).

しかしながら, クリアリング局面の手部スピード, 迎角と泳速度の関係の解釈は, 慎重になる必要がある. クリアリング局面の手部スピードと迎角は, プル局面やプッシュ局面よりも低い値を示した (表 2-1). よって, 泳者がクリアリング局面で獲得している推進力は, 小さいと考えられる. また, 手部の速度ベクトルは, X 軸負の方向, つまり, 泳者の後方に加え, Z 軸正の方向, つまり, 鉛直上方向に向いている (図 2-7). よって, 手部スピードが高い泳者ほど, クリアリング局面で大きな推進力を発揮した可能性がある一方で, 発揮した推進力自体は小さい可能性がある. 以上のことから, 最大努力の背泳ぎのクリアリング局面においては, 迎角の大きさよりも, 高い手部スピードの発揮が大きな推進力獲得および高い泳速度発揮において重要な役割を果たしている可能性がある.

2-5. 小括

本研究は, 研究課題 1 に基づいて背泳ぎのプル, プッシュ, クリアリング局面の手部スピード, 迎角と泳速度の関係を明らかにすることを目的として行った. その結果, プッシュ局面の迎角とクリアリング局面の手部スピードが高い泳速度発揮に関連している可能性

が示唆された。よって、最大努力の背泳ぎのストローク後半の手部スピードと迎角は、高い泳速度の発揮に貢献すると考えられる。

第3章 最大努力下の背泳ぎにおけるプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピード、迎角と泳速度の関係

3-1. 目的

本研究では、研究課題 2 に基づいて最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面における手部スピード、迎角と泳速度の関係を明らかにすることを目的とした。最大努力下の背泳ぎにおいても、最大努力の背泳ぎと同様に、プル局面、プッシュ局面、クリアリング局面において手部速度と迎角と泳速度の間に正の相関関係があるという仮説を立てた。

3-2. 方法

2 章の測定と同一の対象者で最大努力下の背泳ぎの測定を行った。最大努力下の背泳ぎは、最大努力の背泳ぎを行った後、最大努力の背泳ぎの 90%のタイムを算出し、算出したタイムの $\pm 5\%$ 以内で泳ぐよう指示した。そして、算出したタイムの $\pm 5\%$ 以内で泳げた試技を成功試技とした。最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピード、迎角、平均泳速度は、2 章と同様の方法で取得した。また、統計解析も 2 章と同じ手法を用いた。

3-3. 結果

3-3-1. 各局面の変数の平均値と標準偏差

本実験対象者の最大努力下の背泳ぎのストローク全体、プル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の平均泳速度と、プル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピード、迎角の平均値と標準偏差を表に示した（表 3-1）。

表 3-1：最大努力下のプル局面，プッシュ局面，クリアリング
局面の各変数の平均値と標準偏差

		平均値	±	標準偏差
ストローク全体				
平均泳速度	(m/s)	1.38	±	0.11
プル局面				
平均泳速度	(m/s)	1.38	±	0.13
手部スピード	(m/s)	2.18	±	0.39
迎角	(deg)	55.60	±	8.29
プッシュ局面				
平均泳速度	(m/s)	1.43	±	0.11
手部スピード	(m/s)	2.71	±	0.30
迎角	(deg)	61.60	±	7.69
クリアリング局面				
平均泳速度	(m/s)	1.16	±	0.16
手部スピード	(m/s)	1.61	±	0.45
迎角	(deg)	24.99	±	12.31

3-3-2. 最大努力下の背泳ぎの矢状面の手部の軌跡，速度ベクトル

本実験対象者 1 名の背泳ぎの矢状面上の手部の軌跡と速度ベクトルを図に示した（図 3-1）。手部は，ストローク全体を通して X 軸負の方向に動作していた。プル局面前半では，Z 軸方向負の方向に動作し，プル局面後半では，Z 軸正の方向に動作した。プッシュ局面では，Z 軸負の方向に動作し，クリアリング局面では，Z 軸正の方向に動作した。

3-3-3. 最大努力下の背泳ぎの水平面の手部の軌跡，速度ベクトル

本実験対象者 1 名の背泳ぎの水平面上の手部の軌跡と速度ベクトルを図に示した（図 3-2）。手部は，ストローク全体を通して X 軸負の方向に動作していた。手部は，プル局面中盤にかけて Y 軸正の方向に動作した。その後，プッシュ局面後半で，Y 軸負の方向に動作した。手部は，クリアリング局面で内側に動作していた。

3-3-4. 最大努力下の背泳ぎの前額面の手部の軌跡, 速度ベクトル

本実験対象者 1 名の背泳ぎの前額面上の手部の軌跡と速度ベクトルを図に示した (図 3-3) 手部は, プル局面前半で Z 軸負の方向に動作し, Y 軸正の方向に動作した. そして, プル局面の後半では, Z 軸正の方向に動作した. その後, 手部は, プッシュ局面で Z 軸負の方向に加え, Y 軸負の方向に動作した. クリアリング局面では, 手部は, Z 軸正の方向に動作した.

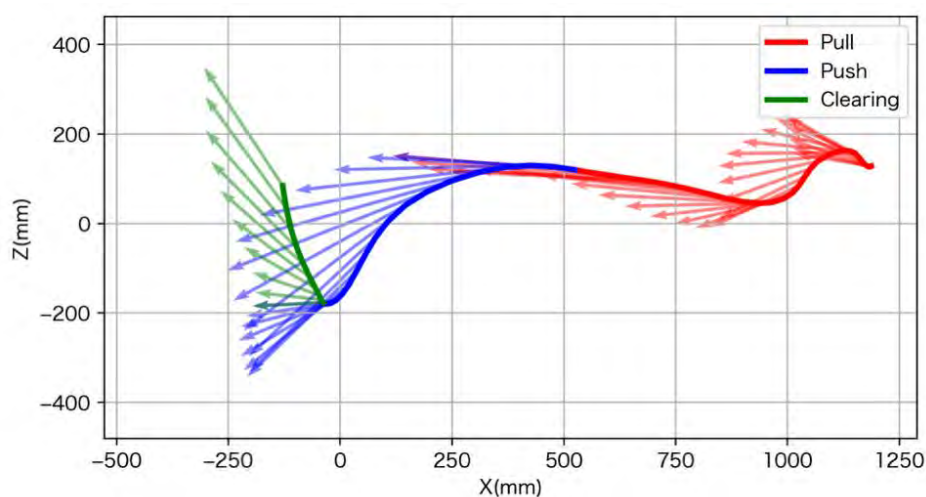


図 3-1 : 矢状面から見た最大努力下の背泳ぎの手部の軌跡と速度ベクトル

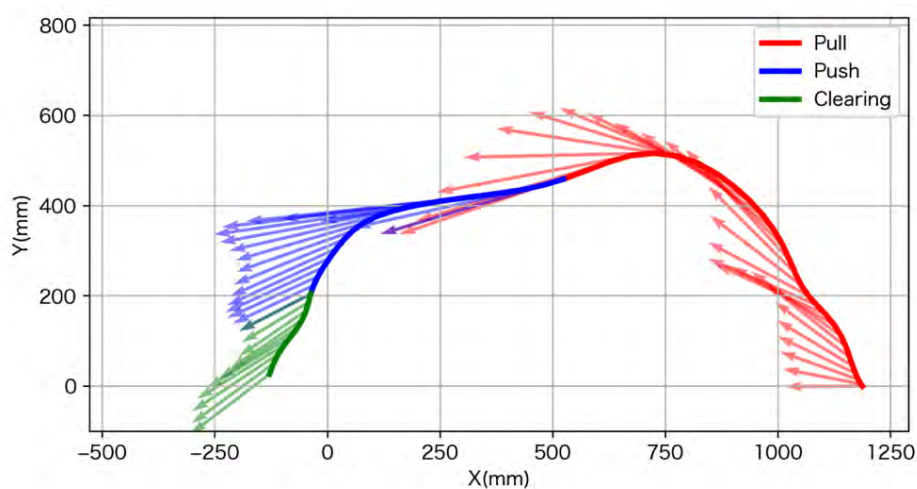


図 3-2 : 上から見た最大努力下の背泳ぎの手部の軌跡と速度ベクトル

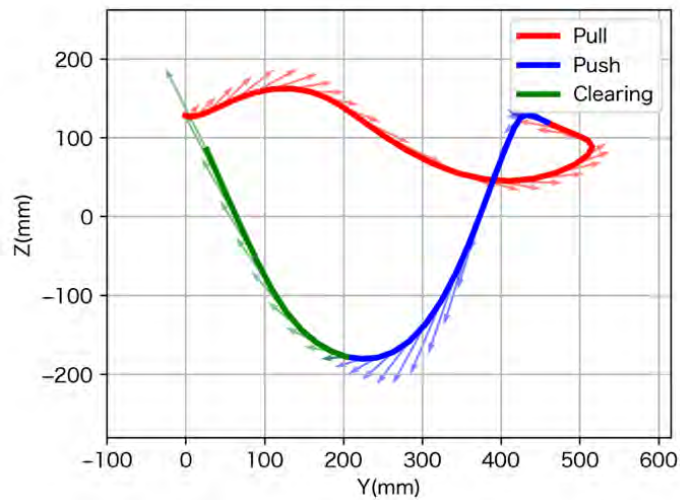


図 3-3 : 進行方向から見た最大努力下の背泳ぎの手部の軌跡と速度ベクトル

3-3-3. 最大努力下の背泳ぎの泳速度の時系列データ

最大努力下の背泳ぎの泳速度の時系列データを図に示した (図 3-4). 右手が入水してからプル局面開始までは, 手部が後方に動作していない局面のため, 研究の対象外とした. 最大努力下の背泳ぎの泳速度は, プル局面開始直後からプル局面中盤にかけて, やや減少した後, プル局面の終盤からプッシュ局面の中盤にかけて, やや増加した. その後, 泳速度は, クリアリング局面にかけて減少した.

3-3-4. 最大努力下の背泳ぎの手部スピードの時系列データ

最大努力下の背泳ぎの手部スピードの時系列データを図に示した (図 3-4). 最大努力下の背泳ぎの手部スピードは, プル局面開始直後からプル局面終盤にかけて増加し, プッシュ局面終盤にかけて減少した. その後, 手部スピードは, クリアリング局面開始直後からクリアリング局面終盤にかけて増加した.

3-3-5. 最大努力下の背泳ぎの手部の迎角の時系列データ

最大努力下の背泳ぎの迎角の時系列データを図に示した (図 3-4). 最大努力下の背泳ぎの迎角は, プル局面の中盤にかけて大きくなり, プッシュ局面前にかけて小さくなった.

その後、迎角は、プッシュ局面の中盤にかけて大きくなり、クリアリング局面終盤にかけて小さくなった。

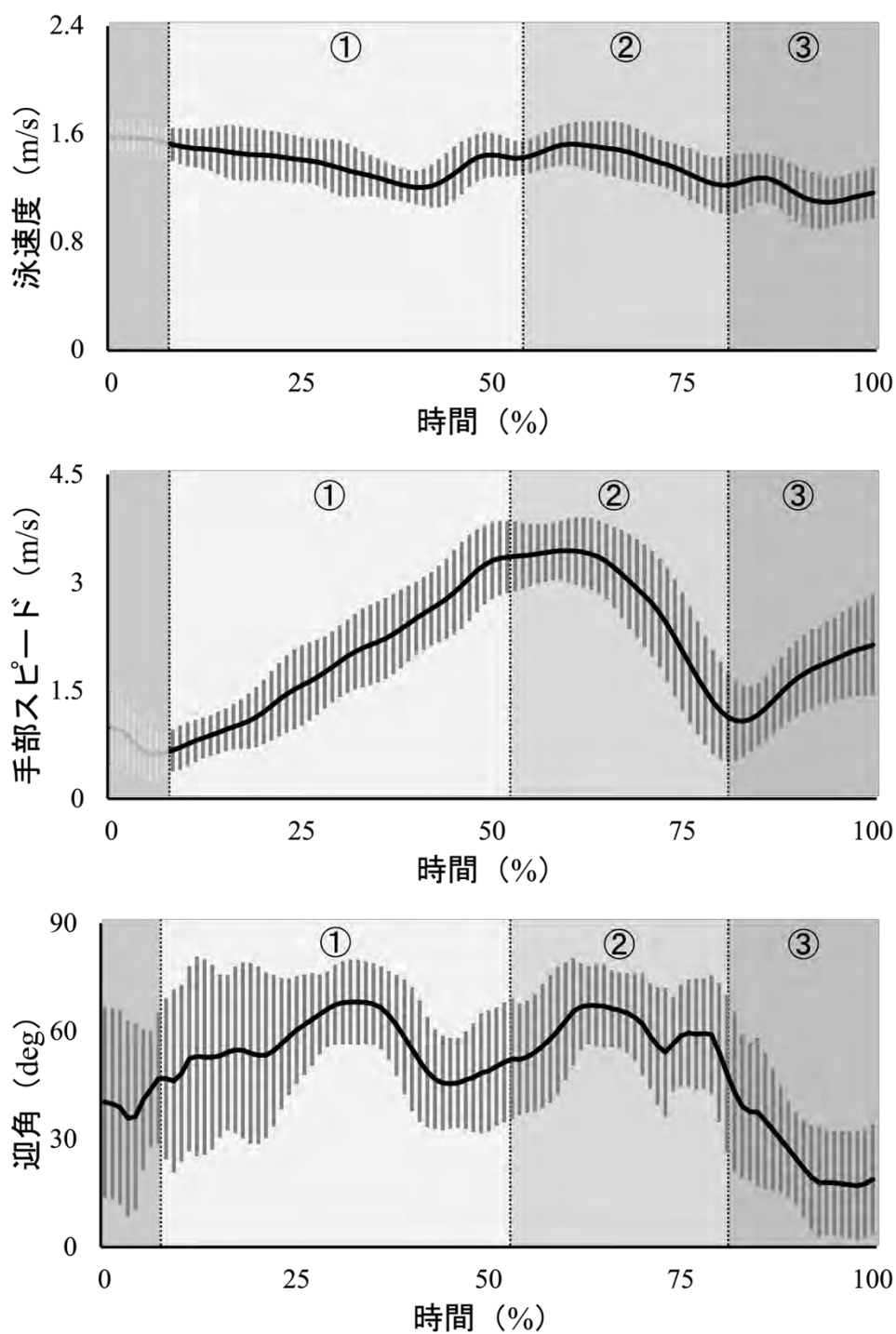


図 3-4 : 泳速度, 手部スピード, 迎角の時系列データ

① : プル局面, ② : プッシュ局面, ③ : クリアリング局面

3-3-6. 最大努力下のプル局面の各変数と泳速度の相関関係

最大努力下のプル局面の手部スピード，迎角の平均値と平均泳速度の相関関係を図に示した（図 3-5,3-6）．プル局面の手部スピード，迎角と平均泳速度の間に有意な相関関係は認められなかった（図 3-5,3-6）．

3-3-7. 最大努力下のプッシュ局面の各変数と泳速度の相関関係

最大努力下のプッシュ局面の手部スピード，迎角の平均値と平均泳速度の相関関係を図に示した（図 3-5,3-6）．プッシュ局面の手部スピードと平均泳速度の間に有意な相関関係は認められなかった（図 3-5）．一方で，迎角と平均泳速度の間に有意な強い正の相関関係が認められた（図 3-6）．

3-3-8. 最大努力下のクリアリング局面の各変数と泳速度の相関関係

最大努力下のクリアリング局面の手部スピード，迎角の平均値と平均泳速度の相関関係を図に示した（図 3-5,3-6）．クリアリング局面の手部スピード，迎角と平均泳速度の間に有意な相関関係は認められなかった（図 3-5,3-6）．

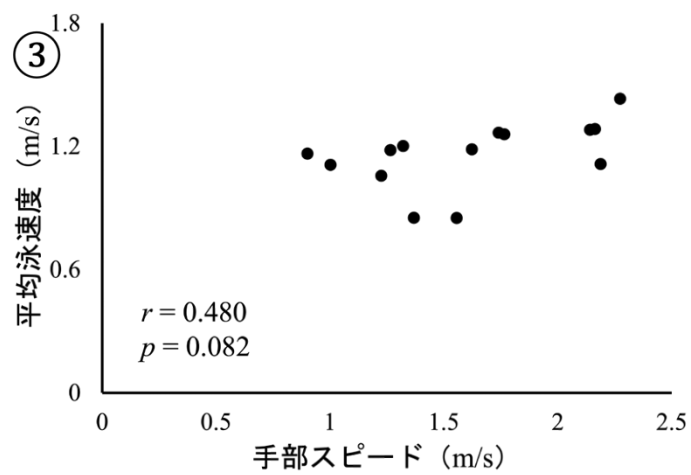
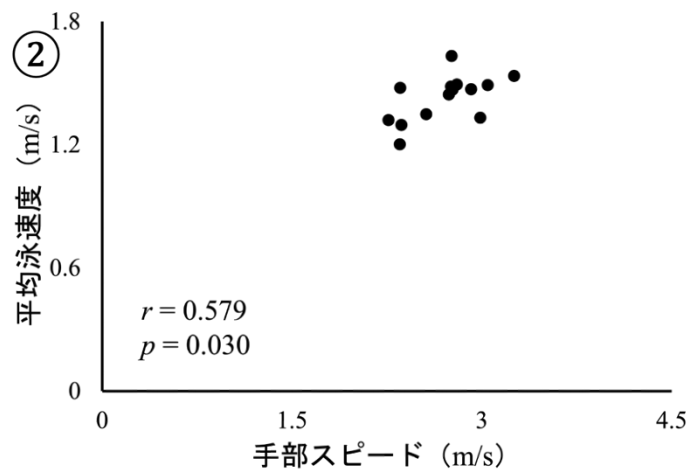
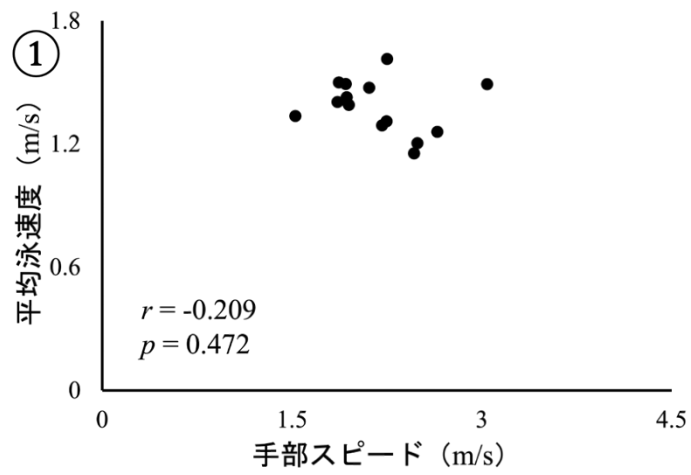


図 3-5 : 最大努力下のプル局面, プッシュ局面, クリアリング局面の
手部スピードと平均泳速度の散布図

① : プル局面, ② : プッシュ局面, ③ : クリアリング局面

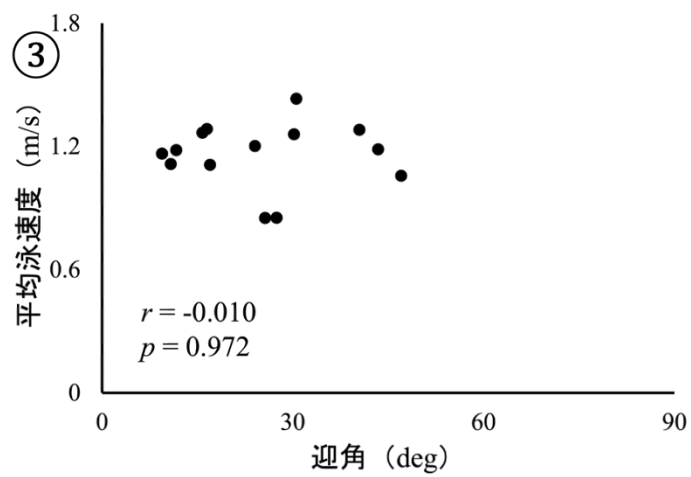
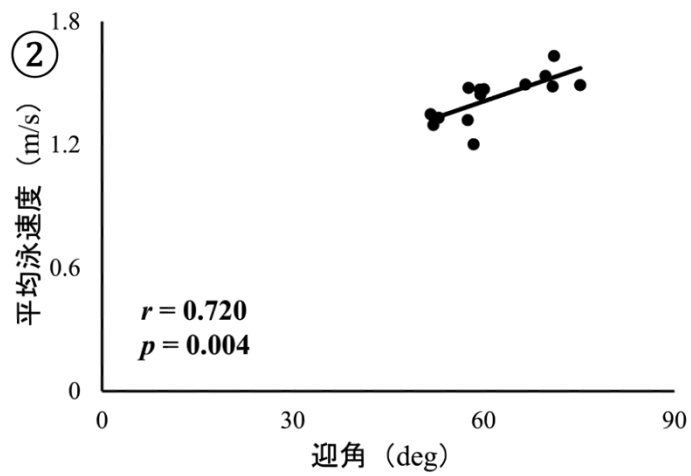
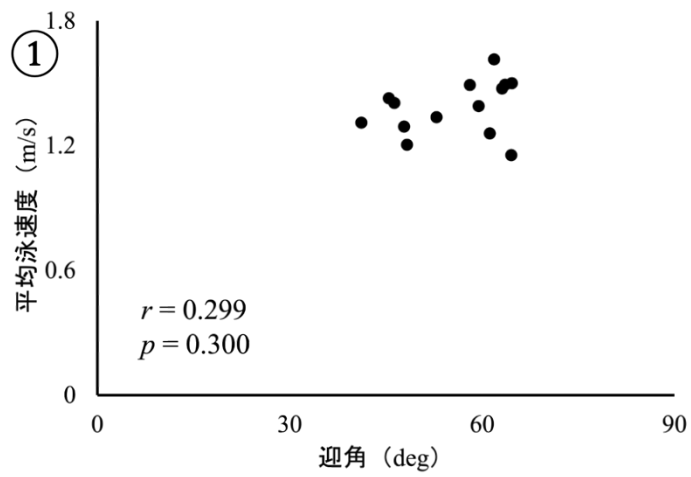


図 3-6 : 最大努力下のプル局面, プッシュ局面, クリアリング局面の
迎角と平均泳速度の散布図

① : プル局面, ② : プッシュ局面, ③ : クリアリング局面

3-4. 考察

3-4-1. 本研究の主要な結果

本研究の目的は、最大努力下における背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面中の手部のスピード、迎角と泳速度の関係を明らかにすることであった。実験の結果、背泳ぎのプッシュ局面の迎角と平均泳速度の間に有意な正の相関関係が認められた。よって、最大努力下の背泳ぎにおいて、高い泳速度を発揮する泳者は、手部スピードが高く、迎角が大きい傾向があるという仮説は、一部支持された。最大努力下における背泳ぎのプッシュ局面の迎角は、高い泳速度発揮に有利に作用することが明らかになった。

3-4-2. 最大努力下のプル局面の手部スピード、迎角と泳速度の関係

本研究では、最大努力下の背泳ぎのプル局面において、手部スピードおよび迎角と泳速度との間に有意な相関関係は認められなかった。この結果は、最大努力の背泳ぎと同様に、最大努力下においてもプル局面の手部スピードや迎角が高い泳速度発揮に直接的には関与していない可能性を示唆する。背泳ぎは、泳速度の増加に伴ってストローク長が減少し、ストローク頻度が増加する一方で、一方の手部がプル局面であるとき、他方の手部がリカバリー局面という推進パターンから変化しないことが報告されている(Didier et al., 2008)。そのため、最大努力下においても、泳者は、プル局面で大きな水の抵抗を受けている可能性がある(Psycharakis & Coleman, 2024)。時系列データより、最大努力下の背泳ぎのプル局面における手部スピードは、最大努力条件と同様に、局面開始直後から終盤にかけて増加していた。しかし、プル局面中盤における手部の速度ベクトルは、X軸負の方向、つまり、泳者の後方だけでなくY軸正の方向、つまり、泳者の外側にも向いていた(図3-2)、よって、推進方向への力は、小さいと考えられる。このような手部の運動の特徴は、最大努力下においても、プル局面で獲得できる推進力が限定的であることを示している。以上のことから、最大努力下の背泳ぎにおいても、プル局面は高い泳速度を直接的に生み出す局面というよりも、次に続くプッシュ局面に向けた準備をする局面である可能性がある。最大努力と最大努力下で、同様の結果が得られたことは、背泳ぎのプル局面の機能が規定されていることを示唆する。

3-4-3. 最大努力下のプッシュ局面の手部スピード、迎角と泳速度の関係

本研究では、最大努力下の背泳ぎのプッシュ局面において、迎角と泳速度の間に有意な強い正の相関関係が認められた一方で、手部スピードと泳速度の間には有意な相関関係は認められなかった（図 3-5,3-6）。この結果は、最大努力下においても、プッシュ局面における迎角の調整が高い泳速度発揮に関与していることを示唆する。図 3-4 の時系列データより、最大努力下の背泳ぎにおいても、泳速度、手部スピード、迎角はいずれもプッシュ局面でピークを示していた。よって、最大努力下においても、泳者はプッシュ局面で大きな推進力を獲得することで泳速度を高めていると考えられる。一方で、プッシュ局面の手部スピードと泳速度の間に相関関係が認められなかったことは、最大努力下でも最大努力と同様に、手部スピードが一定の高い水準に収束し、個人差が小さくなっていた可能性を示している。その結果、手部スピードの違いが泳速度の差として表れなかったと考えられる。一方で、迎角と泳速度の間に強い正の相関関係が認められたことは、高い泳速度を発揮する泳者ほど、プッシュ局面において 90°に近い迎角を維持していたことを示唆する。迎角が 90°付近で抗力が最大となる。そのため、迎角の違いが推進力の差として表れた可能性がある。以上のことから、最大努力下のプッシュ局面では、迎角の大きさが推進力の大きさを左右し、結果として泳速度の違いを生み出していると考えられる。この傾向は、最大努力の背泳ぎと共通しているため、背泳ぎのプッシュ局面における迎角制御は、高い泳速度発揮における重要な方略である可能性がある。

3-4-4. 最大努力下のクリアリング局面の手部スピード、迎角と泳速度の関係

本研究では、最大努力下における背泳ぎのクリアリング局面の手部スピードおよび迎角と平均泳速度との間に、有意な相関関係は認められなかった（図 3-5,3-6）。この結果は、最大努力下の背泳ぎにおいて、クリアリング局面における手部スピードおよび迎角が、泳速度の個人差を決定する主要な要因とはなっていない可能性を示唆する。表 3-1 のとおり、最大努力下の背泳ぎのクリアリング局面における手部スピードは、プル局面およびプッシュ局面と比較して低い値を示した。推進力は速度の 2 乗に比例して増加する。よって、クリアリング局面で発揮される推進力は、プル局面およびプッシュ局面と比較して小さい可能性がある。一般に、背泳ぎはプル局面およびプッシュ局面で主に推進力を獲得する“two-peak stroke pattern”を示す泳法であるが、高い泳速度を発揮する泳者では、これら

に加えてクリアリング局面においても推進力を獲得する“three-peak stroke pattern”が認められるとされている(Maglischo, 2003). しかし, 本研究の結果では, 最大努力下の背泳ぎにおいて, クリアリング局面の手部スピードおよび迎角と泳速度との間に関連は認められなかった. よって, 最大努力下の背泳ぎでは, 主に“two-peak stroke pattern”で推進していた可能性が考えられる. 迎角の時系列変化に着目すると, 最大努力下のクリアリング局面における迎角は, クリアリング局面開始直後から終盤にかけて一貫して減少していた(図 3-4). 本研究において, 迎角は, 手部の法線ベクトルと手部の速度ベクトルのなす角と定義している. そのため, この結果は, クリアリング局面において手部の面が速度ベクトルに対して並行に近い状態で動作していたことを示唆する. 以上のことから, 最大努力下の背泳ぎのクリアリング局面では, 小さい迎角および低い手部スピードで手部が動作しているため, 推進力の獲得という観点からは, 泳速度発揮への寄与は小さい可能性がある.

3-5. 小括

本研究は, 研究課題 2 に基づいて最大努力下の背泳ぎのプル, プッシュ, クリアリング局面の手部スピード, 迎角と泳速度の関係を明らかにすることを目的として行った. 実験の結果, プッシュ局面の迎角が高い泳速度発揮に関連している可能性が示唆された. よって, 最大努力下ではプッシュ局面で大きな迎角を維持してストロークを行うことで高い泳速度を発揮している可能性がある.

第4章 総合討論

4-1. 目的

表 4-1：最大努力と最大努力下の背泳ぎの泳速度

	単位	最大努力	最大努力下	速度比率(%)
泳速度	(m/s)	1.52 ± 0.09	1.38 ± 0.11	90.8

本研究の最大努力下の背泳ぎの泳速度は、最大努力の背泳ぎの約 90%の泳速度であった(表 4-1)。200m 背泳ぎ競技の泳速度は、50m 競技の約 90%である(日本水泳連盟科学委員会)。よって、本研究の結果は、50m と 200m の背泳ぎ競技の動作の違いを比較することとなる。本研究では、研究課題 3 に基づいて最大努力と最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の泳速度発揮に関わる手部スピードと迎角を調整するための方略を明らかにすることを目的とした。2 章、3 章の結果から、泳者は、プッシュ局面で迎角と手部スピードを、クリアリング局面で手部スピードを調整することで泳速度を増減させるという仮説を立てた。

4-2. 方法

2 章、3 章で得られた最大努力、最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピードと迎角を対応のある t 検定を用いて比較した。BH 法を用いて p 値を調整した(Benjamini & Hochberg, 1995)。なお、False Discovery Rate は、0.05 とし、q 値がこの値を下回った検定の帰無仮説を棄却した。有意水準は、5%とした。

4-3. 結果

4-3-1. 最大努力、最大努力下の背泳ぎの各局面の変数の平均値、標準偏差

最大努力と最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の平均泳速度、手部スピード、迎角の平均値と標準偏差を表に示した(表 4-2)。

表 4-2 : 最大努力・最大努力下の各変数の平均値と標準偏差

	最大努力		最大努力下		p値
	平均値	± 標準偏差	平均値	± 標準偏差	
ストローク全体					
平均泳速度	(m/s)	1.52 ± 0.09	1.38 ± 0.11		<0.001
プル局面					
平均泳速度	(m/s)	1.54 ± 0.09	1.38 ± 0.13		0.001
手部スピード	(m/s)	2.69 ± 0.25	2.18 ± 0.39		<0.001
迎角	(deg)	58.30 ± 7.34	55.60 ± 8.29		0.358
プッシュ局面					
平均泳速度	(m/s)	1.61 ± 0.10	1.43 ± 0.11		<0.001
手部スピード	(m/s)	3.10 ± 0.26	2.71 ± 0.30		0.001
迎角	(deg)	63.83 ± 8.36	61.60 ± 7.69		0.283
クリアリング局面					
平均泳速度	(m/s)	1.30 ± 0.17	1.16 ± 0.16		0.005
手部スピード	(m/s)	2.26 ± 0.41	1.61 ± 0.45		<0.001
迎角	(deg)	22.23 ± 9.25	24.99 ± 12.31		0.493

4-3-2. 最大努力下の背泳ぎの各局面の手部の軌跡，速度ベクトル

本実験対象者 1 名の最大努力および最大努力下の背泳ぎの矢状面，水平面，前額面からみた手部の軌跡と速度ベクトルを，最大努力を実線，最大努力下を破線として図に示した（図 4-1,4-2,4-3）. 最大努力と最大努力下で手部の軌跡や速度ベクトルの向きは大きく変化しなかった.

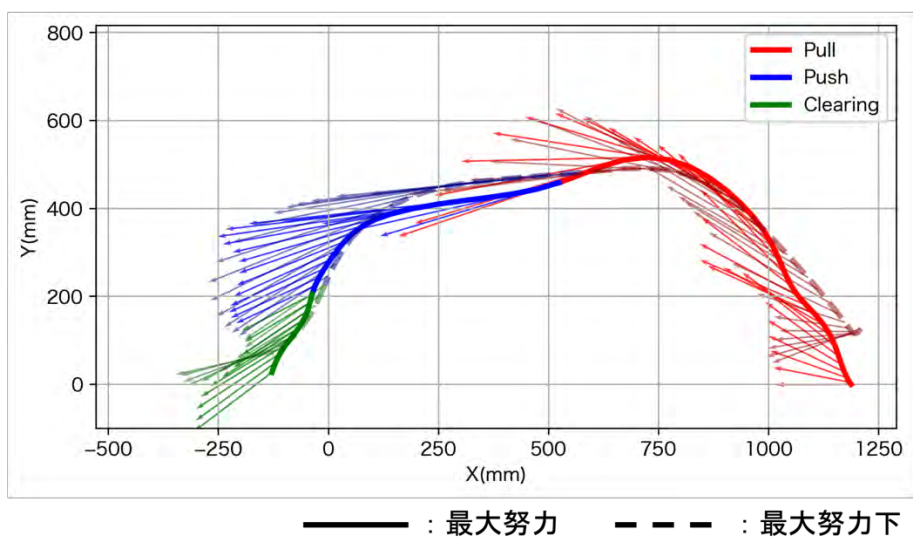


図 4-1 : 矢状面から見た最大努力・最大努力下の手部の軌跡と速度ベクトル

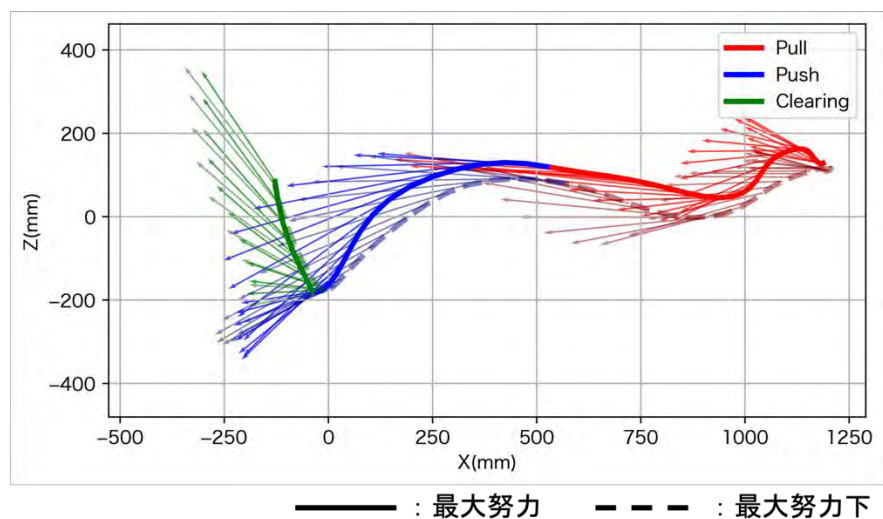


図 4-2 : 上から見た最大努力・最大努力下の手部の軌跡と速度ベクトル

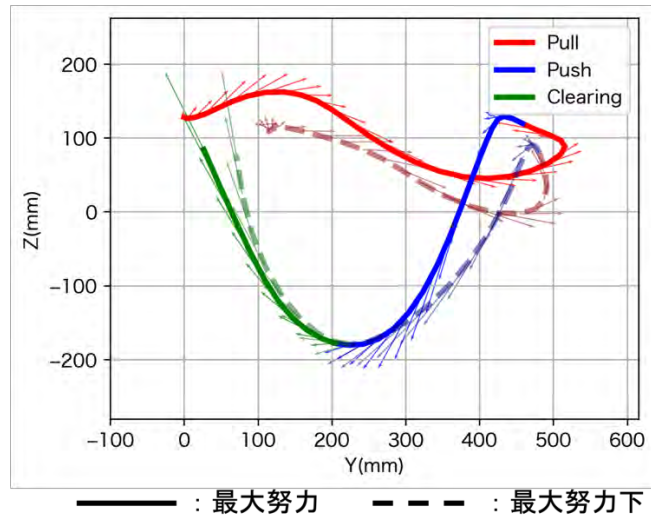


図 4-3：進行方向から見た最大努力・最大努力下の手部の軌跡と速度ベクトル

4-3-3. 最大努力下の背泳ぎの泳速度の時系列データ

最大努力と最大努力下の背泳ぎの泳速度の時系列データを図に示した（図 4-4）．右手が入水してからプル局面開始までは，手手が後方に動作していない局面のため，研究の対象外とした．最大努力と最大努力下の背泳ぎの泳速度は，どちらもプル局面開始直後からプル局面中盤にかけて，やや減少した後，プル局面の終盤からプッシュ局面の中盤にかけて，やや増加した．その後，最大努力の背泳ぎの泳速度は，クリアリング局面中盤にかけて減少し，クリアリング局面終盤にかけて増加した．一方で，最大努力下の背泳ぎの泳速度は，クリアリング局面で減少した．ほぼ全ての時間で最大努力が最大努力下の泳速度を上回った．

4-3-4. 最大努力下の背泳ぎの手部スピードの時系列データ

最大努力と最大努力下の背泳ぎの手部スピードの時系列データを図に示した（図 4-4）．最大努力と最大努力下の背泳ぎの手部スピードは，プル局面開始直後からプル局面終盤にかけて増加し，プッシュ局面終盤にかけて減少した．その後，手部スピードは，クリアリング局面開始直後からクリアリング局面終盤にかけて増加した．全ての時間で最大努力が最大努力下の手部スピードを上回った．

4-3-5. 最大努力下の背泳ぎの手部の迎角の時系列データ

最大努力と最大努力下の背泳ぎの迎角の時系列データを図に示した（図 4-4）．最大努力と最大努力下の背泳ぎの迎角は，プル局面の中盤にかけて大きくなり，プッシュ局面前にかけて小さくなった．その後，迎角は，プッシュ局面の中盤にかけて大きくなり，クリアリング局面終盤にかけて小さくなった．

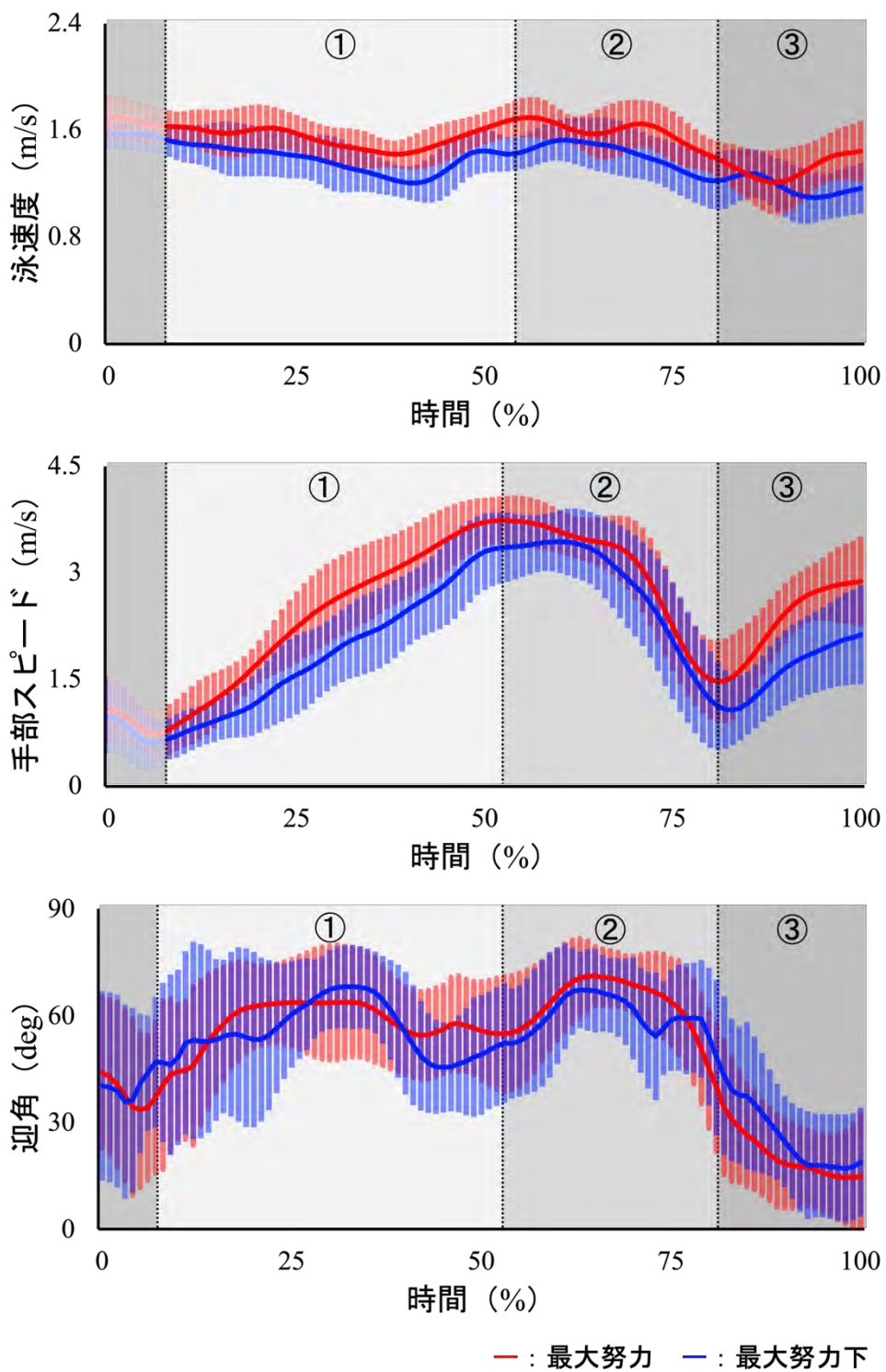


図 4-4 : 最大努力, 最大努力下の背泳ぎの泳速度, 手部スピード, 迎角の時系列データ

① : プル局面, ②プッシュ局面, ③ : クリアリング局面

4-3-6. 最大努力と最大努力下の背泳ぎの手部スピードの比較

最大努力と最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の手部スピードを比較したグラフを示した（図 4-5）。最大努力の背泳ぎの手部スピードは、全ての局面で最大努力下よりも有意に高い値を示した（図 4-5）。

4-3-7. 最大努力と最大努力下の背泳ぎの手部の迎角の比較

最大努力と最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の迎角を比較したグラフを示した（図 4-6）。最大努力の背泳ぎの迎角は、全ての局面で最大努力下と有意差が認められなかった（図 4-6）。

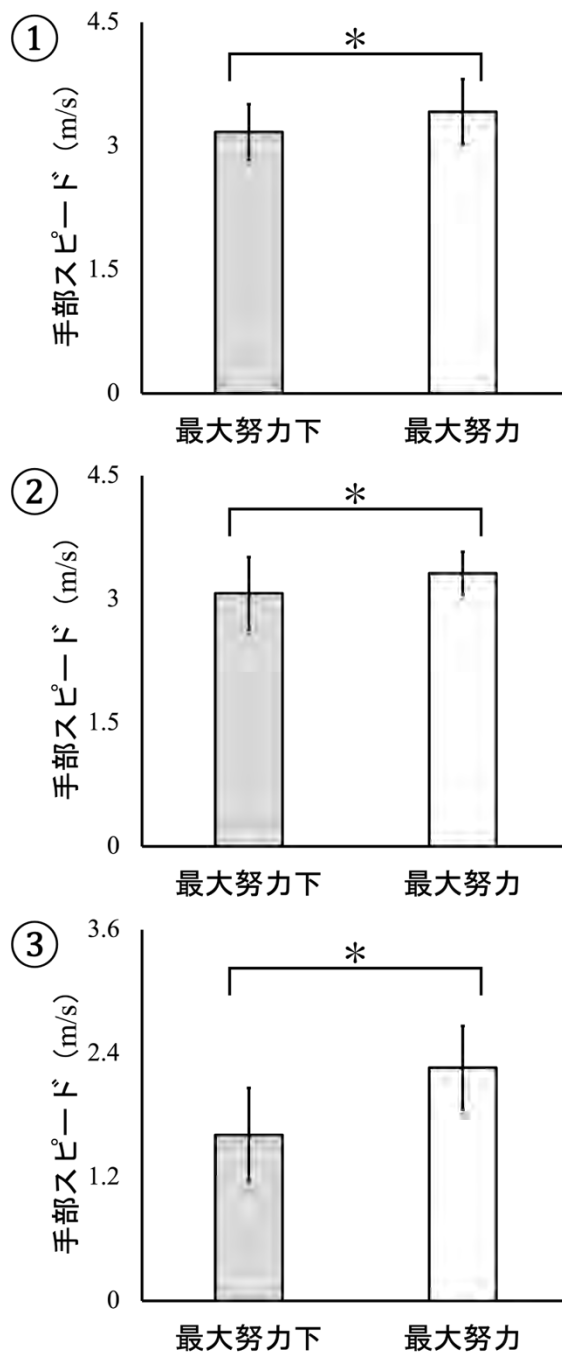


図 4-5 : 最大努力・最大努力下の背泳ぎのプル局面, プッシュ局面, クリアリング局面の手部スピードの比較

① : プル局面, ② : プッシュ局面, ③ : クリアリング局面

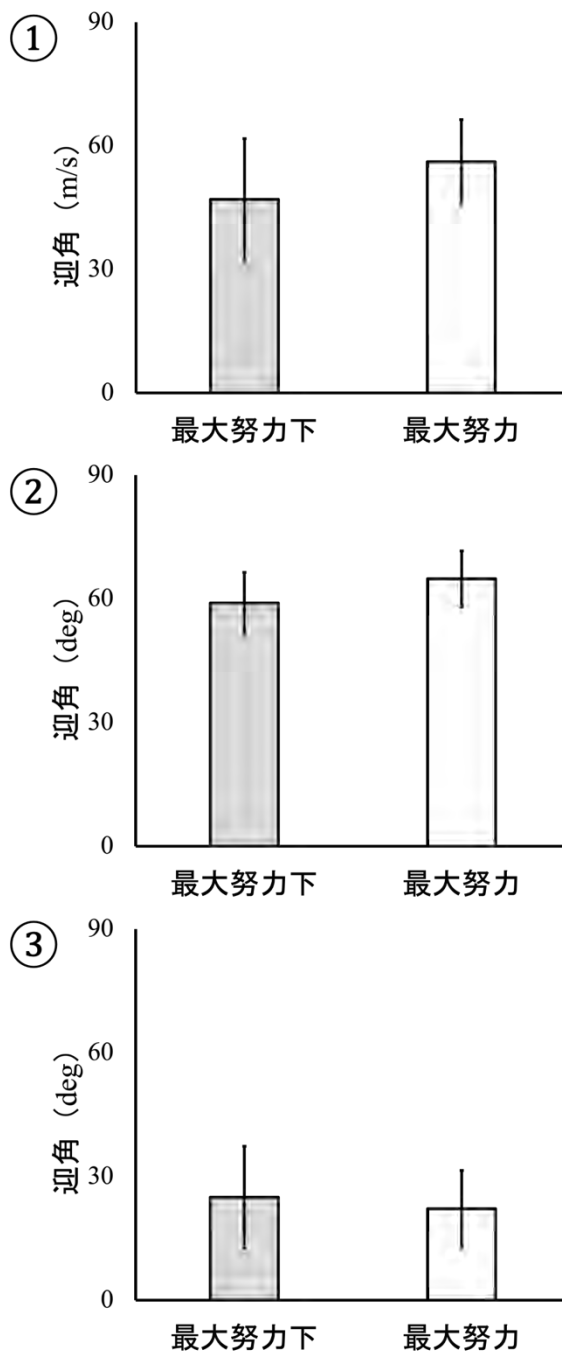


図 4-6 : 最大努力・最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、
クリアリング局面の迎角の比較

① : プル局面, ②プッシュ局面, ③ : クリアリング局面

4-4. 考察

4-4-1. 本研究の主要な結果

本研究は、最大努力と最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の泳速度発揮に関わる手部スピードと迎角を調整するための方略を明らかにすることを目的とした。実験の結果、最大努力の背泳ぎの手部スピードは、全ての局面で最大努力下の背泳ぎよりも有意に高い値を示した。一方で、最大努力と最大努力下の背泳ぎの迎角には、全ての局面で有意な差が認められなかった。よって、最大努力の背泳ぎの手部スピードと迎角は、最大努力よりも高い値を示すという仮説は、一部支持された。泳者は、最大努力下と同程度の迎角で高い手部スピードを発揮することで、高い泳速度を発揮していると可能性がある。

4-4-2. 最大努力と最大努力下の背泳ぎの迎角，手部スピードの比較

最大努力と最大努力下の背泳ぎを比較した結果、手部スピードは、プル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の全てにおいて、最大努力の背泳ぎが最大努力下よりも有意に高い値であった（図 4-5）。一方で、迎角は、いずれの局面においても、有意な差は認められなかった（図 4-6）。

最大努力の背泳ぎのプル局面では、最大努力下よりも有意に高い手部スピードが発揮されていた。しかし、2 章および 3 章の結果において、最大努力および最大努力下のいずれにおいても、プル局面の手部スピードと泳速度との間に有意な相関関係は認められていなかった。このことから、プル局面における手部スピードの増加は、泳速度の個人差を直接的に規定する要因ではない可能性が示唆される。一方で、泳速度は、ストローク頻度の増加によって向上することが報告されている(Didier et al., 2008)。そして、ストローク頻度の増加は、手部スピードの増加を伴って達成される。そのため、最大努力と最大努力下におけるプル局面の手部スピードの差は、泳速度調整というよりも、ストローク頻度の違いを反映していた可能性がある。

プッシュ局面およびクリアリング局面においても、最大努力の背泳ぎは最大努力下よりも有意に高い手部スピードを示した（図 4-5）。2 章および 3 章の結果から、これらの局面の高い手部スピードの発揮は、泳速度の増加に関与している可能性がある。推進力は、速度の 2 乗に比例して増加する。よって、高い手部スピードの発揮は、大きな推進力の獲得に

つながると考えられる。クロールを対象とした先行研究においても、高い手部スピードの発揮によって大きな推進力が獲得されることが報告されている(Koga et al., 2022)。最大努力の背泳ぎでは、クリアリング局面の手部スピードが最大努力下よりも高く、平均値の差は約 1.0 m/s であった (図 4-5)。この差は、速度の 2 乗に比例する推進力の観点から、クリアリング局面における推進力の大きな違いを生じさせる可能性がある。実際に、最大努力の背泳ぎでは、クリアリング局面終盤において泳速度が再び増加する傾向がみられたのに対し、最大努力下では、クリアリング局面での泳速度の増加がほとんどみられなかった (図 4-4)。これらの結果から、最大努力の背泳ぎでは、プッシュ局面およびクリアリング局面において高い手部スピードを発揮することで、大きな推進力を獲得し、高い泳速度を発揮している可能性が示唆される。

一方で、迎角は、最大努力と最大努力下の背泳ぎのいずれの局面においても有意な差は認められなかった。この結果は、泳者が発揮する泳速度の大きさにかかわらず、手部の迎角を一定の範囲に維持したままストロークを行っている可能性を示唆する。つまり、最大努力の背泳ぎでは、迎角を大きく変化させるのではなく、最大努力下と同程度の迎角を維持した状態で手部スピードを高めることによって、高い泳速度を発揮していると考えられる。

4-5. 小括

本研究は、研究課題 3 に基づいて最大努力と最大努力下の背泳ぎのプル局面、プッシュ局面、クリアリング局面の泳速度発揮に関わる手部スピードと迎角を調整するための方略を明らかにすることを目的として行った。実験の結果、最大努力と最大努力下の背泳ぎでは、手部スピードに差があった一方で、迎角には差が認められなかった。よって、泳者は、最大努力の背泳ぎで、最大努力下の背泳ぎと同程度の迎角を維持して高い手部スピードを発揮することで、高い泳速度を発揮していることが示唆された。

4-6. 研究の限界

本研究は、男子競泳選手を対象に実験を行った。研究対象者の World Aquatics Score は、 670.7 ± 91.7 であった。これは、地区大会から全国大会出場レベルの競技力である(Ruiz-Navarro et al., 2023)。そのため、本研究の結果は、他の性別や年齢、競技レベルの競泳選

手には当てはまらない可能性がある。また、本研究では、キック動作の影響を排除していない。そのため、背泳ぎにおける手部の速度や迎角と泳速度の関係を過小評価している可能性が考えられる。しかしながら、手部は、身体で最も高い推進力を発揮すると報告されている(Samson et al., 2017; Takagi et al., 2021)。また、キック動作を伴うストロークとキック動作を伴わないストロークの泳速度の差は、10-20%程度であるとされている(Bucher et al., 1975; Deschodt et al., 1999)。よって、キック動作が本研究の結果に及ぼした影響は小さいと考えられる。加えて、本研究で取得した変数は、1 ストロークのみであったため、本研究の知見は、異なるストロークに適応できない可能性がある。しかし、クロールを対象とした先行研究でも、本研究と同様に 1 ストロークを測定対象としている(Koga et al., 2020; Koga et al., 2022)。よって、本研究で得られた知見は、異なるストロークにおいても適用できると考えられる。

第5章 結論

本研究では、手部が背泳ぎの泳速度に与える影響を運動学的分析の結果に基づいて明らかにすることを目的とした。その結果、次の3点が明らかになった。

1. 最大努力の背泳ぎでは、高い泳速度の発揮にストローク後半の高い手部スピード発揮と大きい迎角の維持が必要であることが示唆された。
2. 最大努力下の背泳ぎでは、高い泳速度の発揮にプッシュ局面での大きい迎角の維持が必要であることが示唆された。
3. 泳者は、最大努力の背泳ぎでは、最大努力下の背泳ぎと同程度の迎角で高い手部スピードを発揮することで、高い泳速度を発揮していることが示唆された。

以上の結果から、背泳ぎのプッシュ局面、クリアリング局面における手部のスピードと迎角は、高い泳速度発揮に貢献しているため、ストローク後半の手部の動作改善は、競技記録の向上につながることを示唆された。

参考文献一覧

- Atkison, R. R., Dickey, J. P., Dragunas, A., & Nolte, V. (2014). Importance of sagittal kick symmetry for underwater dolphin kick performance. *Hum Mov Sci*, *33*, 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.08.013>
- Barbosa, T. M., Fernandes, R. J., Keskinen, K. L., & Vilas-Boas, J. P. (2008). The influence of stroke mechanics into energy cost of elite swimmers. *Eur J Appl Physiol*, *103*(2), 139-149. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0676-z>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling The False Discovery Rate - A Practical And Powerful Approach To Multiple Testing. *J. Royal Statist. Soc., Series B*, *57*, 289-300. <https://doi.org/10.2307/2346101>
- Bucher, W., Lewillie, L., & Clarys, J. P. (1975). *The influence of the leg kick and the arm stroke on the total speed during the crawl stroke*. Univ. Park Press.
- Cohen, R., Cleary, P., Mason, B., & Pease, D. (2017). Forces during front crawl swimming at different stroke rates. *Sports Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s12283-017-0246-x>

- Cortesi, M., Fantozzi, S., & Gatta, G. (2012). Effects of distance specialization on the backstroke swimming kinematics. *J Sports Sci Med*, *11*(3), 526-532.
- Craig, A. B., Jr., & Pendergast, D. R. (1979). Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming. *Med Sci Sports*, *11*(3), 278-283.
- Deschodt, V. J., Arsac, L. M., & Rouard, A. H. (1999). Relative contribution of arms and legs in humans to propulsion in 25-m sprint front-crawl swimming. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *80*(3), 192-199. <https://doi.org/10.1007/s004210050581>
- Didier, C., Carter, M., & Seifert, L. (2006). Effect of technical mistakes on arm coordination in backstroke. *Portuguese Journal of Sport Sciences*, *6*, 30-32.
- Didier, C., Seifert, L., & Carter, M. (2008). Arm coordination in elite backstroke swimmers. *Journal of Sports Sciences*, *26*, 675-682. <https://doi.org/10.1080/02640410701787791>
- Gonjo, T., Fernandes, R. J., Vilas-Boas, J. P., & Sanders, R. (2020). Upper body kinematic differences between maximum front crawl and backstroke swimming. *J Biomech*, *98*, 109452. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109452>
- Gonjo, T., Veiga, S., Hermosilla-Perona, F., & Olstad, B. H. (2025). Variabilities in the stroking parameters during short course 50 m time trials in all four competitive swimming strokes. *Sci Rep*, *15*(1), 23640. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08519-9>
- Ikeda, Y., Ichikawa, H., Shimojo, H., Nara, R., Baba, Y., & Shimoyama, Y. (2021). Relationship between dolphin kick movement in humans and velocity during undulatory underwater swimming. *J Sports Sci*, *39*(13), 1497-1503. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1881313>
- 公益財団法人日本水泳連盟科学委員会. 競泳レース分析プロジェクト. 公益財団法人日本水泳連盟科学委員会. Retrieved 12月29日 from <https://kizahashi.co.jp/JASF/PDF/index.php?EventNo=7024701>
- Koga, D., Gonjo, T., Kawai, E., Tsunokawa, T., Sakai, S., Sengoku, Y., Homma, M., & Takagi, H. (2020). Effects of exceeding stroke frequency of maximal effort on hand kinematics and hand propulsive force in front crawl. *Sports Biomech*, *23*(1), 15-27. <https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1814852>

- Koga, D., Tsunokawa, T., Sengoku, Y., Homoto, K., Nakazono, Y., & Takagi, H. (2022). Relationship Between Hand Kinematics, Hand Hydrodynamic Pressure Distribution and Hand Propulsive Force in Sprint Front Crawl Swimming. *Front Sports Act Living*, 4, 786459. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.786459>
- Kudo, S., Matsuda, Y., Sakurai, Y., & Ikuta, Y. (2023). Rapid Change in the Direction of Hand Movement to Increase Hand Propulsion During Front Crawl Swimming. *J Appl Biomech*, 39(2), 90-98. <https://doi.org/10.1123/jab.2022-0106>
- Maglischo, E. (2003). Swimming fastest. The essential reference on technique, training, and program design. *Hum. Kinet.*, 593-688.
- Matsuda, Y., Kaneko, M., Sakurai, Y., Akashi, K., & Yasuo, S. (2024). Three-dimensional lower-limb kinematics during undulatory underwater swimming. *Sports Biomech*, 23(11), 2093-2107. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1995475>
- Pinto, M. P., Neiva, H. P., Sampaio, T., Oliveira, J. P., Marinho, D. A., Barbosa, T. M., & Morais, J. E. (2025). The Associations Between the Swimming Speed, Anthropometrics, Kinematics, and Kinetics in the Butterfly Stroke. *Bioengineering (Basel)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/bioengineering12080797>
- Psycharakis, S. G., & Coleman, S. G. S. (2024). Which Phases of the Stroke Cycle Are Propulsive in Front Crawl Swimming? *Res Q Exerc Sport*, 95(2), 325-333. <https://doi.org/10.1080/02701367.2023.2203724>
- Ruiz-Navarro, J. J., López-Belmonte, Ó., Gay, A., Cuenca-Fernández, F., & Arellano, R. (2023). A new model of performance classification to standardize the research results in swimming. *Eur J Sport Sci*, 23(4), 478-488. <https://doi.org/10.1080/17461391.2022.2046174>
- 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. <https://doi.org/10.1080/10255842.2017.1302434>
- 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. *Journal of Biomechanics*, 67, 157-165. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.12.003>

- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesth Analg*, *126*(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000002864>
- Seifert, L., Chollet, D., & Bardy, B. G. (2004). Effect of swimming velocity on arm coordination in the front crawl: a dynamic analysis. *Journal of Sports Sciences*, *22*(7), 651-660. <https://doi.org/10.1080/02640410310001655787>
- Swimming records*. World Aquatics. Retrieved 29 December from <https://www.worldaquatics.com/swimming/records?recordCode=WR&eventTypeId=®ion=&countryId=&gender=M&pool=LCM>
- Takagi, H., Nakashima, M., Sengoku, Y., Tsunokawa, T., Koga, D., Narita, K., Kudo, S., Sanders, R., & Gonjo, T. (2021). How do swimmers control their front crawl swimming velocity? Current knowledge and gaps from hydrodynamic perspectives. *Sports Biomech*, *22*(12), 1552-1571. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1959946>
- 田中貴大, 林大成, & 伊坂忠夫. (2025, 10月24日, 25日, 26日). 渦と流体力の分析から背泳ぎ選手の特長を解く Revealing the characteristics of backstroke swimmer: analyzing the vortex and fluid forces. 日本水泳・水中運動学会, 中京大学.
- Tanaka, T., Hashizume, S., Kurihara, T., & Isaka, T. (2023). Vortex structure and fluid force changed by altering whole-body kinematic parameters during underwater undulatory swimming. *Sports Biomech*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/14763141.2023.2233466>
- Van Houwelingen, J., Schreven, S., Smeets, J. B. J., Clercx, H. J. H., & Beek, P. J. (2017). Effective Propulsion in Swimming: Grasping the Hydrodynamics of Hand and Arm Movements. *Journal of Applied Biomechanics*, *33*(1), 87-100. <https://doi.org/10.1123/jab.2016-0064>

謝辞

本研究の研究計画書作成から、実験の実施、そして、本修士学位論文の執筆に際して、非常に手厚いご指導やコメントをいただいた伊坂忠夫教授に、心から御礼申し上げます。また、本修士学位論文の副査をお引き受けいただき、多くのご意見をいただきました長野明紀教授、そして、山平芳美准教授に厚く御礼申し上げます。

研究計画の作成や実験の実施、データ分析や学会発表にあたっての資料作成、そして、本修士学位論文の執筆など多くの場面で非常に丁寧にご指導いただきました田中貴大助教に深く感謝申し上げます。また、研究計画の立案や研究の実施、データ分析にあたって、伊坂研究室の皆様には、多くのご指導・ご意見をいただきました。この場を借りて感謝申し上げます。加えて、倫理申請書の提出などの事務手続きに際して、多くお世話いただいた秘書の奥村悦子氏に御礼申し上げます。

本研究の実験の実施にあたり、被験者としてご協力を賜りました立命館大学水泳部競泳部門の皆様、そして、大学院生の皆様に感謝申し上げます。

皆様のお力添えによって非常に充実した博士課程前期課程を送ることができました。ご多忙にもかかわらず、研究の遂行にご協力いただいた皆様に重ねて深く御礼申し上げます。