

国土館大学審査学位論文

「水中運動の生体工学における力学的要因の総合的
解析：競泳パフォーマンスと推進技術に関する研究」

兵頭 洋樹

氏名 兵頭 洋樹
学位の種類 博士(工学)
報告番号 甲第70号
学位授与年月日 令和6年3月20日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目 水中運動の生体工学における力学的要因の総合的解析：
競泳パフォーマンスと推進技術に関する研究
論文審査委員 (主任審査員) 教授 和田 匡史
(審査員) 教授 二川 佳央
(審査員) 教授 大浦 邦彦
(学外審査員) 教授 下山 好充(新潟医療福祉大学)

博士論文

題目 水中運動の生体工学における力学的要因の総合的解析：
競泳パフォーマンスと推進技術に関する研究

氏名 兵頭 洋樹

令和5年度 博士論文

水中運動の生体工学における力学的要因の総合的解析：

競泳パフォーマンスと推進技術に関する研究

国土舘大学大学院工学研究科

応用システム工学専攻 博士課程

学籍番号 21-DE001

兵頭 洋樹

指導教員：和田 匡史 教授

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景	
1.1.1 生体工学・スポーツ科学の貢献	1
1.1.2 水中身体運動の科学	2
1.2 本研究の意義と目的	5
1.3 本論文の構成	5

第2章 競泳競技におけるスタート動作の3次元動作解析

2.1 緒言	7
2.2 計測システム	
2.2.1 対象者	8
2.2.2 環境設定	10
2.2.3 実験プロトコル	15
2.2.4 身体マーカ貼付位置	17
2.2.5 身体座標値の解析	19
2.3 解析結果	21
2.3.1 離台時飛び出し速度	23
2.3.2 離台時飛び出し角度	23
2.4 結言	24

第3章 クロール泳における肩・腰・体幹ローテーション動作の解明

3.1 緒言	25
3.2 計測システム	
3.2.1 対象者	26
3.2.2 実験プロトコル	29
3.2.3 環境設定	29
3.2.4 身体マーカ貼付位置	32
3.2.5 身体座標値の解析	35
3.3 解析結果	39
3.3.1 肩のローテーション動作	42
3.3.2 腰のローテーション動作	42
3.3.3 肩と腰のローテーション動作のタイミング	42
3.3.4 泳速度の変化による個人内変化率の比較	48

3.4 結言	
3.4.1 現場への示唆.....	50
3.4.2 結論	51
第4章 クロール泳における体幹筋活動量の解明	
4.1 緒言	52
4.2 方法論	
4.2.1 対象者.....	52
4.2.2 実験プロトコル	55
4.2.3 環境設定	55
4.2.4 身体マーカ・表面筋電図電極貼付位置	57
4.2.5 筋活動量の解析	63
4.3 解析結果.....	63
4.3.1 泳速度と筋活動の関係	67
4.3.2 筋活動と泳動作のタイミング	67
4.4 結言	68
第5章 結論.....	69
参考文献	72
研究業績	79
謝辞.....	82
要旨.....	83

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 生体工学・スポーツ科学の貢献

近年の科学技術の進展は驚異的であり、多くの分野で画期的な進歩を遂げている。特に、ウェアラブルデバイスの急速な発展は、個人の健康管理を革命的に支援している。これらのデバイスにより、心拍数、血圧、歩数、睡眠の質などの健康指標をリアルタイムで計測・モニタリングすることが可能となり、自身の健康状態を把握し、適切なアクションを取ることで、予防医療の推進に寄与している。非侵襲的な光学センシングや超音波を活用した診断技術は、患者の負担を軽減しながら、より正確な計測を実現している(Jones et al., 2023^[1]; Bashkirtsev et al., 2023^[2]; Minocha et al., 2018^[3]; Troiani et al., 2022^[4])。また、バイオセンサー技術は、微生物や DNA などの生体内分子を高感度で検出し、疾患の早期診断や新薬の開発に貢献している。この技術は医療分野における治療法の改善に向けた研究に影響している(Horvath, 2013^[5]; Buenrostro et al., 2013^[6])。脳科学の分野でも、脳の活動や機能の計測・解析技術が進化し、脳の神経ネットワークや認知機能の理解が深まっている(Biswal et al., 1995^[7]; Mazoyer et al., 2002^[8]; Desikan et al., 2006^[9])。これらの技術の進化は、スポーツにおける競技パフォーマンスの向上はもちろん、医療診断や治療、健康管理、研究分野において生体計測の精度向上と効率化をもたらし、人々の健康と生活の質の向上に大きく貢献している。

特に、生体計測の分野での進展は目覚ましく、生体情報の計測・解析技術が革命的に発展している。この領域では、生体の多様なスケール、すなわち個体から細胞レベルまでの構造や動作を包括的に研究している。骨や腱の材料力学、鳥や昆虫の飛行メカニズム、魚の遊泳動作、心臓や血管の流体力学的特性などが主要な研究対象となっている

(Maklad, 2019^[10]; Thiyagarajah et al., 2022^[11])。生物からのヒントを基にした新しい機械や技術の開発、バイオミメティクス(生体模倣設計)は、この領域の研究から生まれた新しい技術分野として注目されている(Yousaf et al., 2020^[12]; Luo et al., 2022^[13])。そのため、生体工学は、生物の構造や動作の深い理解を基に、新しい技術や応用の可能性を追求する学問領域として、その重要性が増しており、これらの進展により、生体工学計測技術は医療現場での疾患診断、治療法の最適化、健康管理、研究分野など幅広い領域で活用され、人々の健康増進や医療の向上に大きく貢献している。

スポーツ分野における生体工学計測技術の貢献は顕著である。選手のパフォーマンス最適化のために、生体工学計測技術を用いることで、選手の生体情報をリアルタイムで取得し、トレーニングや戦術の調整が行える(梶山ほか, 2006^[14]; 小山ほか, 2017^[15]; Cardinale et al., 2017^[16])。運動生理学的データの詳細な分析により、選手の体力や疲労度を評価し、効

果的なトレーニングプログラムを設計することができる (澤田ほか, 2022^[17]; Umam et al., 2023^[18]). 怪我の予防やリスク管理の点からも, 生体工学計測技術の重要性は高い. 選手の身体状態を継続的にモニタリングすることで, 怪我のリスクを予測・評価し, 予防策を導入することが促進される. さらに, 選手の動作やフォームの評価, 心理的側面のサポートにもこの技術が役立つ (山本ほか, 2017^[19]; 相原ほか, 2018^[20]). ストレスや心理状態をモニタリングし, 適切なサポートを提供することで, 選手の心理的健康やパフォーマンスの向上が期待できる. 全体として, 生体工学計測技術はスポーツ分野での選手のパフォーマンス向上, 安全管理, 戦術の最適化に不可欠な技術と言える.

本研究では, 生体工学計測技術の中でも「スポーツバイオメカニクス」を特に焦点として取り上げる. スポーツバイオメカニクスは, スポーツ活動における動作及び技術の力学・科学的分析を目的とした学際的な研究領域である. 「バイオメカニクス」という用語は, 生体 (バイオ) と力学 (メカニクス) の統合から派生したもので, 生体の動的及び機能的特性を力学的視点から解析する学問を指す. 本領域の主要な関心事は, 人間の運動に関連する力学的属性や原理の詳細な研究であり, これによりスポーツのパフォーマンスや技術の最適化が期待される. 近年, モーションキャプチャーシステム, フォースプレート, 筋電計といった先進的計測機器がスポーツバイオメカニクスの研究に導入されている (湯浅ほか, 1999^[21]; 稲尾ほか, 2016^[22]; 原藤ほか, 2019^[23]; Jankaew et al., 2023^[24]; Liu et al., 2023^[25]). これらの機器の利用により, 選手の動作や筋肉活動を高い精度で計測することが可能となり, 精緻な動作分析やフィードバックの提供が可能となっている. スポーツバイオメカニクスの研究成果は, トップアスリートのパフォーマンスの最適化に資するとともに, 多様なスポーツ競技における動作分析を基盤とした指導法の提案や怪我の予防策の策定にも寄与していると考えられる.

1.1.2 水中身体運動の科学

水中での身体の動きは, 陸上とは異なる特有の物理的要因によって影響を受ける. 例えば, アルキメデスの原理による浮力は身体の浮遊性を調整する要因として存在し, また, 物体が水を排除する際の力も考慮が必要である. 水の密度は空気よりも約 800 倍高く, この高い密度が動きの抵抗を増加させる主要な原因となる. 競泳における抵抗は, 主に造波抵抗, 摩擦抵抗, 形状抵抗の三つの要素に分類される. 造波抵抗は, 泳者の動作に伴って発生する水面の波動から生じる抵抗であり, 摩擦抵抗は, 泳者の皮膚や水着の表面が水と接触することによる摩擦から発生し, 形状抵抗は, 泳者の後方に形成されるカルマン渦に起因し, これらの抵抗要素の中で最も影響が大きいとされている (Fig. 1). 特に, 泳者の体が水中で占める推進方向への投影面積が大きくなると, 形状抵抗は顕著に増加する. この抵抗は速度が増加すると, 2 乗から 3 乗の割合で増大することが知られている (成田ほか, 2018^[26]). さらに, 水深が増すと圧力も増加し, 特に深海潜水時にはこの圧力の増加が

重要な要因となる。また、水の熱伝導率は体温の急激な低下を引き起こす可能性があるため、適切な保護が必要である。生理的には、水中での呼吸制約があるため、特別な配慮が求められる。これらの要因を考慮することで、水中での身体の動きや反応を深く理解することができる。

競泳は、船や他の乗り物を使用せずに、身体だけで水中や水面を移動するスポーツである。主な泳法には、クロール、平泳ぎ、背泳ぎ、バタフライがある。水中での移動は、手足の動きによる流体力を推進力として利用する。泳ぐ際の姿勢は、立位ではなく、腹臥位や仰臥位が一般的である。人の平均密度は水よりも高いため、浮かぶためには上方向への力が必要である (Brožek et al., 1963^[27])。泳者の重心は足に偏っており、足が沈む方向への回転が生じやすい。効果的な水泳を実現するためには、継続的な訓練が不可欠である。オリンピックでは、マラソンスイミング、アーティスティックスイミング、飛び込み、水球などの水中スポーツがあり、それぞれが独自の技術や戦略を持つ。そのため、これらの競技は学術的にも非常に興味深いものである。

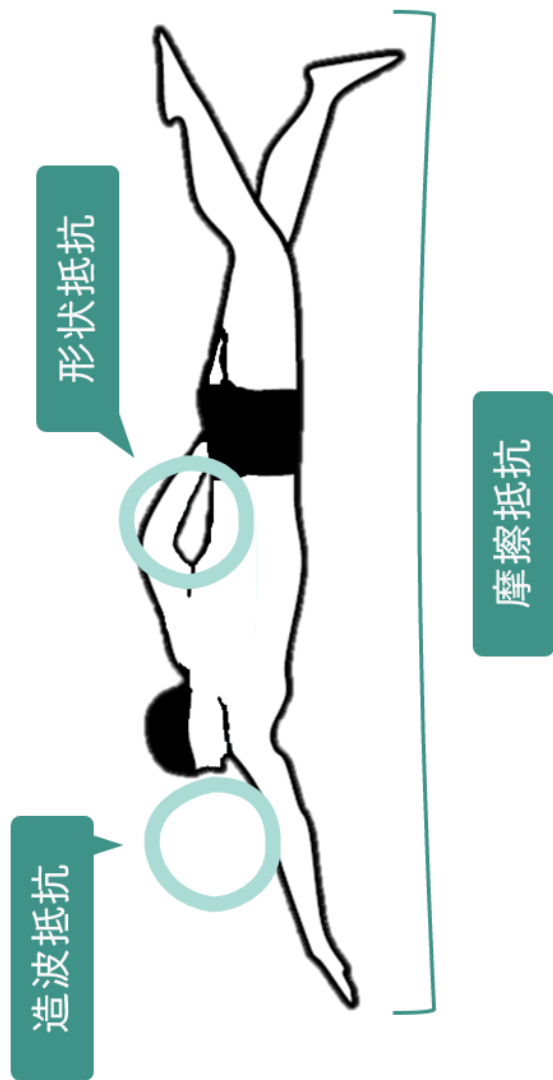


Fig. 1. The main resistance experienced by swimmers.

1.2 本研究の意義と目的

本研究は、水中運動に関する生体力学的要因の詳細な解析を通じて、水中環境下での力学的解析手法の確立を試みる。特に、競泳競技における力学的運動効率と競技力との関連性の明確化を目的とする。

競泳に関する科学的研究は、競技技術の向上や選手のパフォーマンス最適化だけでなく、広い社会的影響を持つ。健康促進の観点から、科学的知見は一般市民の水泳活動における効果的なトレーニング方法の提供に応用される可能性がある（Counsilman, 1968^[28]; Wakayoshi et al., 1992^[29]）。これは、公衆の健康維持・向上、さらにはスポーツ文化の普及と深化に寄与すると期待される。教育・研究の領域でも、競泳に関する科学的研究の重要性が強調されている（松井ほか, 2016^[30]）。スポーツ科学、生理学、生体力学などの学問分野の発展は、教育機関の研究活動やカリキュラムの質向上に寄与している。総じて、競泳競技の科学的研究は、スポーツの領域を超えて、多岐にわたる社会的な側面においてその意義を持つものであると言える。

水中運動に関する生体工学的要因の解析は、競技者の動作やパフォーマンスの向上に不可欠である。競泳は、スタートからゴールまでの所定の距離を最短時間で進行することを目的とし、その中には多くの工学・力学的要因が絡む。各レースは、スタート、ターン、フィニッシュ、ストロークの局面に分けられ、これらの局面ごとの動作解析が競技力向上の鍵となる（生田ほか., 1999^[31]）。近代4泳法の中でも、クロール泳は最速の泳法として知られており、上肢と下肢を交互に動かして推進する特性を持つ。特に、上肢動作によって生じる推進力は、他の泳法と比較して顕著であり、全体の推進力の大部分を占める。このような背景から、上肢動作が泳速度への影響が大きいとされ、その力学的要因の解明が求められている。また、クロール泳においては、体幹部のローテーション動作が手部の移動方向や速度に影響を及ぼすとの報告がある（Payton et al., 2002^[32]）。しかし、多くの研究では体幹のローテーション動作を一つの剛体として捉えており、肩と腰のローテーション動作を区別しての分析は限られている。この点を考慮すると、体幹のローテーション動作と泳速度の関係性の解明は、競技力向上のための新たな視点を提供する可能性がある。

そのため本研究の主要な目的は、競泳競技における生体工学を用いて、力学的運動効率と競技力の関係を解明することである。このために、水中運動（クロール泳）の生体力学的要因を詳細に解析し、水中環境下での効果的な力学的解析方法を確立することを試みる。

1.3 本論文の構成

本論文は5章に分かれて詳述されている。

第1章では、研究の背景、動機、目的、及び意義を明確にする。研究の重要性や学問的な文脈での位置付けについて詳しく触れる。

第2章では、泳速度に影響を及ぼすスタート動作の3次元動作解析を中心に、先行研究

とその成果を参照しながら詳述する。使用した計測システム、対象者の選択基準、環境設定、実験プロトコル、身体マーカの位置、及び身体座標の解析手法についても触れる。

第3章では、クロール泳技術の中の肩・腰のローテーション動作の解明を目的とし、体幹の捻転動作と泳速度の関連性を中心に研究を進める。3次元動作分析の測定項目、上肢ストロークの局面分け、ストローク頻度、ストローク長、泳速度の変化と体幹動作の関連性について詳しく探る。計測システムや解析結果、現場での実用性や意義についても考察する。

第4章では、クロール泳中の体幹筋活動の解明を目的とする。筋の機能や役割、筋放電量の解析手法、泳速度と筋放電量の関係、筋放電量と泳動作のタイミングの関連性について詳細に解析する。

第5章では、前章での研究結果を総合的に評価し、本研究の成果、貢献、及び今後の研究の方向性について総括する。

第2章 競泳競技におけるスタート動作の3次元動作解析

2.1 緒言

競泳競技の各セグメントは、スタート台からの飛び込みを伴うスタート局面、特定の泳法に従った水中推進のメインストローク局面、壁での転換を伴うターン局面、及びレース終了時の壁へのタッチを伴うフィニッシュ局面に細分化される(若吉,1992^[33])。上肢及び下肢を活用して推進力を生成するストローク局面は、レース時間の大半を占め、最も重要な局面と評価される(生田ほか.,1999^[31])。一方、スタート台を活用するスタート局面では、ストローク局面に比べて高速な推進が可能である。通常、スタート局面はスタートから15mを示すものとし、最も泳速度が高い50m自由形のレース平均速度と、スタート局面の速度との間に顕著な関連性が確認されている(生田ほか,1995^[34])。これらの結果を基に、競泳競技におけるトレーニングでは、ストローク局面の速度向上と同時に、スタート局面のパフォーマンスの最適化が必須であるとされる。

2010年に、国際水泳連盟(FINA)の規定が改訂され、スタート台の後方に30度の傾斜を持つ5段階調整可能なバックプレートが導入された。このバックプレートを用いたスタートは、両足を前後に配置し、後足をバックプレートに設置する形態で行われ、跳躍時にバックプレートを蹴る動作から「キックスタート」と呼称される。キックスタートに関して、従来のスタートとの比較で、飛び出し速度の向上が確認され、飛び出し直後の推進速度と泳速度との間に高い相関性が存在することが示唆されている(本間ほか,1997^[35]; Garcia et al.,2015^[36])。武田ほか(2006)^[37]の研究では、飛び出し角度が小さい場合、飛び出し速度が増大し、逆に飛び出し角度が大きい場合、入水までの距離が伸びることが報告されている。この点から、スタート台上での適切な飛び出し角度の選定が、競泳競技におけるキー要因となると考えられる。

Takeda et al.(2017)^[38]は、スタート時の上肢動作に関して、フォースプレートを活用し工学・力学的分析を実施した。この研究において、スタート台を掴む上肢による力のベクトルが、下肢と比較して推進方向よりも鉛直方向に大きいことが確認された。小椋ほか(2015)^[39]も、上肢動作による力の発生に関し、鉛直方向の力ベクトルの存在と、スタート時の上肢の機能について、飛び出し角度が鉛直方向に偏らないように姿勢を維持する役割があるとの解析を行っている。しかしながら、これらの研究では、フォースプレートから得られたデータを基に上肢動作の役割が推測されているものの、実際の上肢動作に関する詳細な情報は未解明である。3次元動作分析を実施するためには、被験者を取り囲むカメラの配置が要求され、プールという特有の環境下での分析は課題が多い。特に、明るい環境下での水面における光の散乱によるノイズが発生し、精確なデータ取得が困難であるとの指摘がある(兵頭ほか,2021^[40])。これらの要因から、キックスタート動作の3次元デ

ータに基づく研究は、他のスポーツ動作分析と比較して、進行が遅れている状況である。

従って、本研究の目的は、キックスタート時の上肢動作が、離台時の身体の移動速度に与える影響について、3次元動作分析を通じて詳細に解明することである。

2.2 計測システム

2.2.1 対象者

本研究には14名が参加した (Table 1)。これらの参加者は、週に6日間以上の水中トレーニングを受けており、公式な競技会への出場経験を有する選手である。特筆すべきは、全ての参加者が50 m種目に出場した経験を持ち、定期的にキックスタートのトレーニングを実施している点である。

実験への参加に際しての同意は、参加者が未成年である場合、その保護者の自由意志に基づいて取得した。参加者及びその保護者に対して、研究への参加を任意の時点で撤回する権利があり、その結果として何ら不利益な取扱いを受けないことを、実験開始前に詳細に説明した。さらに、研究によって収集される個人情報に関して、情報の漏洩や滅失を防ぐための適切な管理措置が施されることを確約した。これらの説明を踏まえ、参加者およびその保護者から、研究の目的及び手法に関する明確な同意を取得した。

Table 1. Physical characteristics performance level of subjects.

Subject	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Specially	Best Record of 50 m front crawl (s ^{''})	Fina Point
A	19	171	63	Front crawl	24.34	634.0
B	19	168	57	Butterfly Stroke	26.81	474.4
C	20	175	65	Front crawl	23.87	672.2
D	22	184	78	Breast Stroke	25.65	541.8
E	30	176	75	Individual Medley	24.26	640.3
F	21	180	84	Breast Stroke	25.17	573.3
G	20	190	82	Front crawl	22.71	780.6
H	25	176	68	Back Stroke	23.61	694.7
I	21	168	67	Butterfly Stroke	25.53	549.4
J	21	174	66	Front crawl	23.78	679.9
K	20	168	68	Breast Stroke	26.06	516.6
L	30	188	90	Front crawl	21.67	898.4
M	26	180	80	Back Stroke	23.70	686.8
N	22	177	78	Butterfly Stroke	23.99	662.2
mean	22.6	176.8	72.9		24.37	643.2
SD	3.6	6.8	9.1		1.36	110.7

2.2.2 環境設定

本研究は、K大学の公式認定された屋内プール（25m×8レーン）にて行われた。キックスタートの撮影の際、日本水泳連盟公認のスタート台（スターティングブロック、SEIKO Inc, Fig.2）を採用した。10台のモーションキャプチャカメラ（VENUS 3D R, Nobby Tech Inc, Fig.3）をスタート台の周囲に設置し、各カメラが計測領域の中心に対して15度以上の角度を有するよう配置した。カメラの最大検出範囲は9mで、そのため、いくつかのカメラはプール内に設置された。本研究で使用したプールは、4コース毎に水深を調整可能な可動床を備えており、非使用コースの水深は0.3mに設定し、この設定により、プールの中心部からも参加者を撮影できるよう配慮した。さらに、このプールは最大水深が3mまで可動可能であり、この水深はオリンピックなどの国際大会でも採用される水準である。さらにプール中央で水深を変更できる特性からも、研究にも最適化されたプールであると言える。したがって、本研究で使用したプールは国内でもトップレベルの公認プールであり、これにより、先行研究よりも高いデータ取得精度が期待される。カメラのLEDは、シャッターと同期して850nmの近赤外線を放射し、身体に取り付けられた反射マーカからの反射光を通じて参加者の位置を識別した。カメラのレンズとセンサー間には、850nmの波長のみを透過するフィルターを装着し、他の光源からの干渉を除外した。カメラの配置は、参加者の体型を鑑み、2台以上のカメラからマーカが撮影可能となるよう最適化された(Fig.4, Fig.5)。実験中の光の反射を低減する目的で、室内照明はオフとし、外部の太陽光はカーテンで遮蔽した。照度計（KEW5204, KYORITSU Inc）を用いて、スタート台、入水点、及び水面上の照度が50lx以下であることを確認した。太陽光の入射角度の変動を考慮し、試技毎に照度を計測し、50lxを超過する場合はカメラの角度を微調整して照度を50lx以下に維持し、試技間の誤差を最小化する措置を講じた。



Fig. 2. The starting brock used in this study.



Fig. 3. The motion capture camera used in this study.

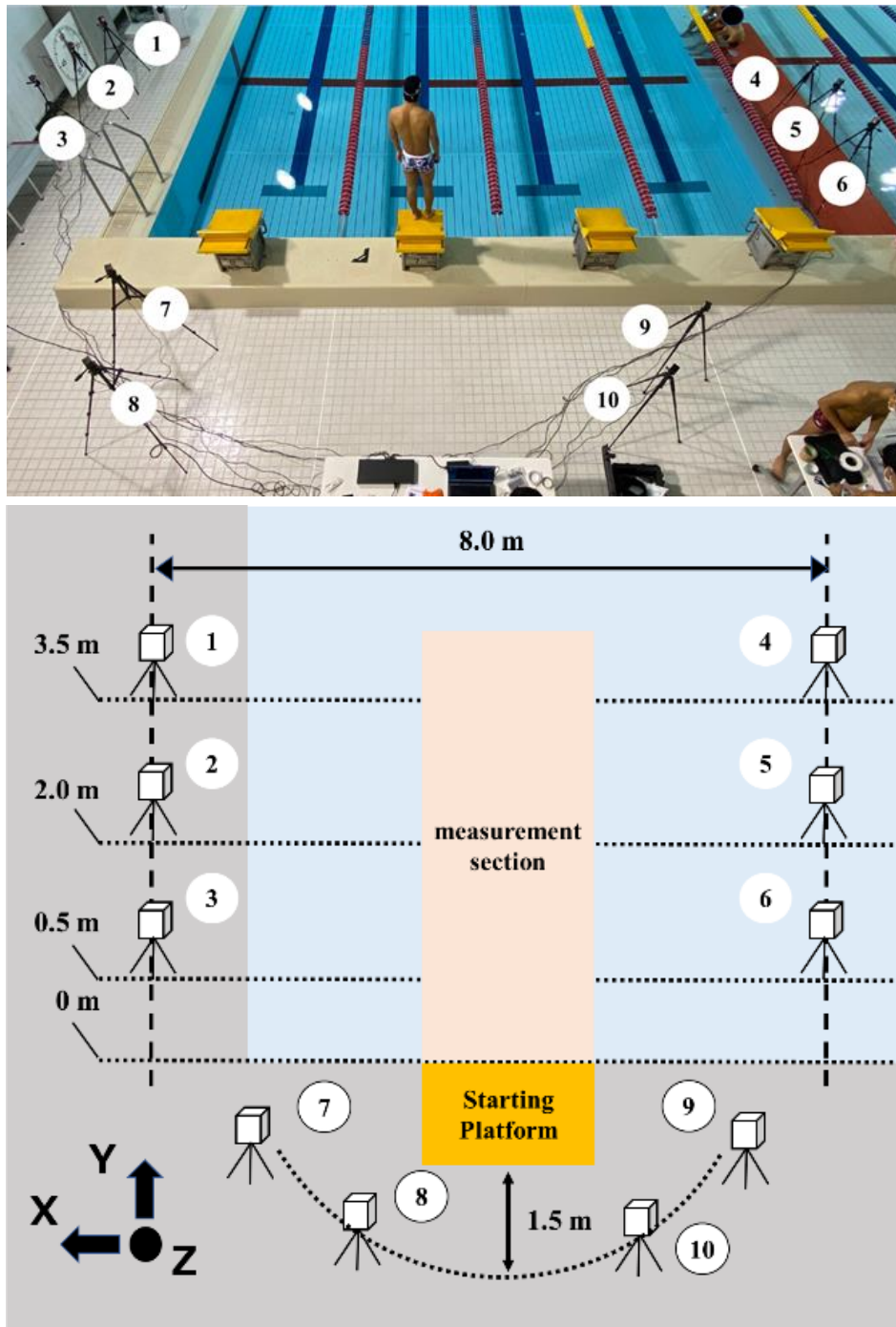


Fig. 4. The layout of the motion-capturing cameras. Two cameras are placed 1.5 m apart on each side to measure aerial posture(1~6) . For movements on the platform, cameras are placed 1.5 m apart, surrounding the starting platform (7~10) .

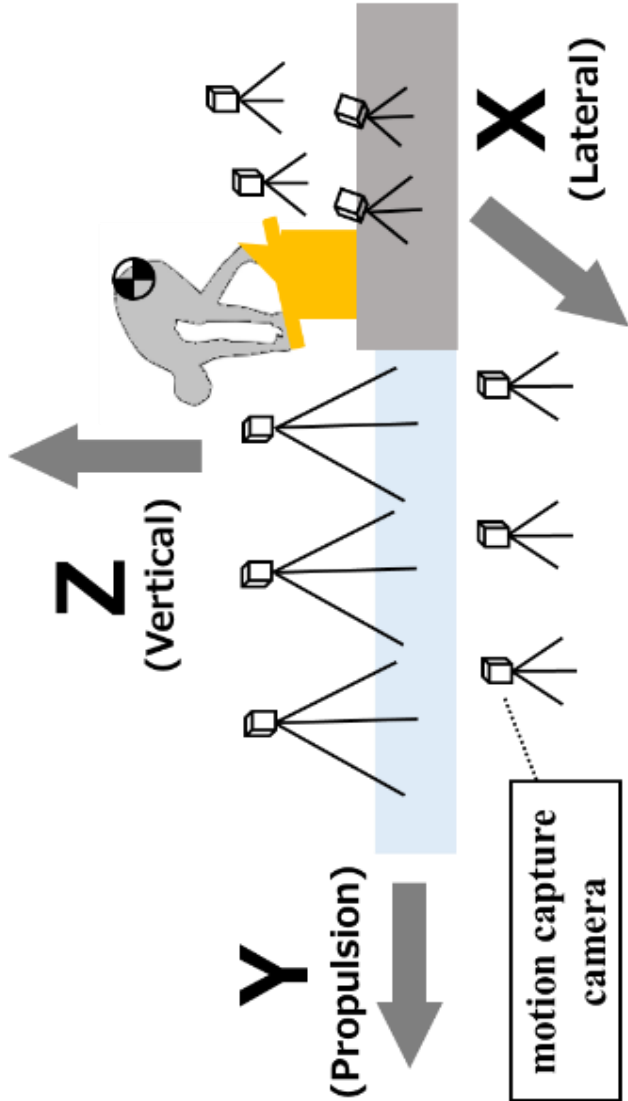


Fig. 5. The layout of the motion-capturing cameras. Eight cameras are used to capture a starting motion sequence on a starting platform. The right-handed coordinate system (X-Y-Z) was used, and the origin is set at the lower end of the starting platform. X, Y, Z axes, respectively, refer to the swimmer's lateral, longitudinal and front-back directions.

2.2.3 実験プロトコル

第1の試技（以下「Standard」と称する）では、参加者は標準的なキックスタートを実行した。前後の脚は競技会で使用されるバックプレートの位置に合わせて配置され、「Take your marks」の指示に従い、スタート台を両手で掴んだ。その後、スタートのシグナルに従って動作を開始した。第2の試技（以下「Lower」と称する）では、参加者は通常のキックスタートの姿勢を取ったが、「Take your marks」の指示時にスタート台を掴まないように指示をした。これにより、離台時の上肢動作による力がスタート台に伝わらないように設定した（Fig. 6）。この試技中、第三者が監視し、参加者の手がスタート台に触れていないことを確認した。各試技の後、入水時の水圧により反射マークが剥がれる場合があったため、再配置が必要であり、1試技ごとに約15分の間隔を設けた。予備実験の結果を基に、参加者が最適なパフォーマンスを維持できる時間を約60分と推定し、各試技を2回実施した。その後、2回の試技の平均値を算出した。

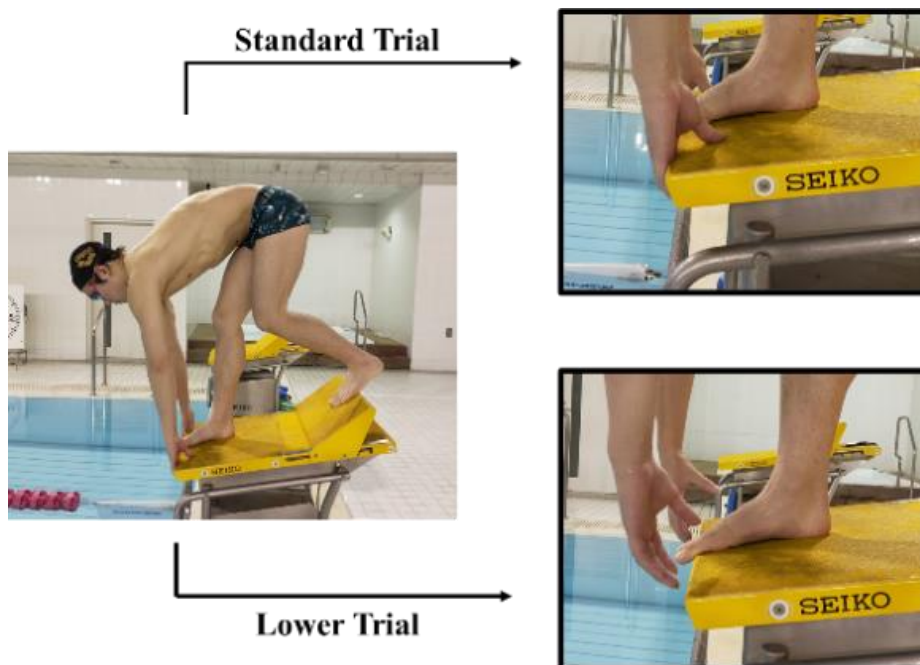


Fig. 6. "Standard" and "Lower" trials performed in the study.

2.2.4 身体マーカ貼付位置

参加者のスタート動作中の身体の座標変動を詳細に分析する目的で、Sakai et al. (2021)^[41]の研究手法を参考に、参加者の身体各セグメントの端点において15箇所（頭頂、左右の肩峰、左右の肘関節、左右の第5中手指節関節、左右の大転子、左右の膝関節、左右の足関節、および左右の第5中足指節関節）に反射マーカを取り付けた（Fig. 7）。

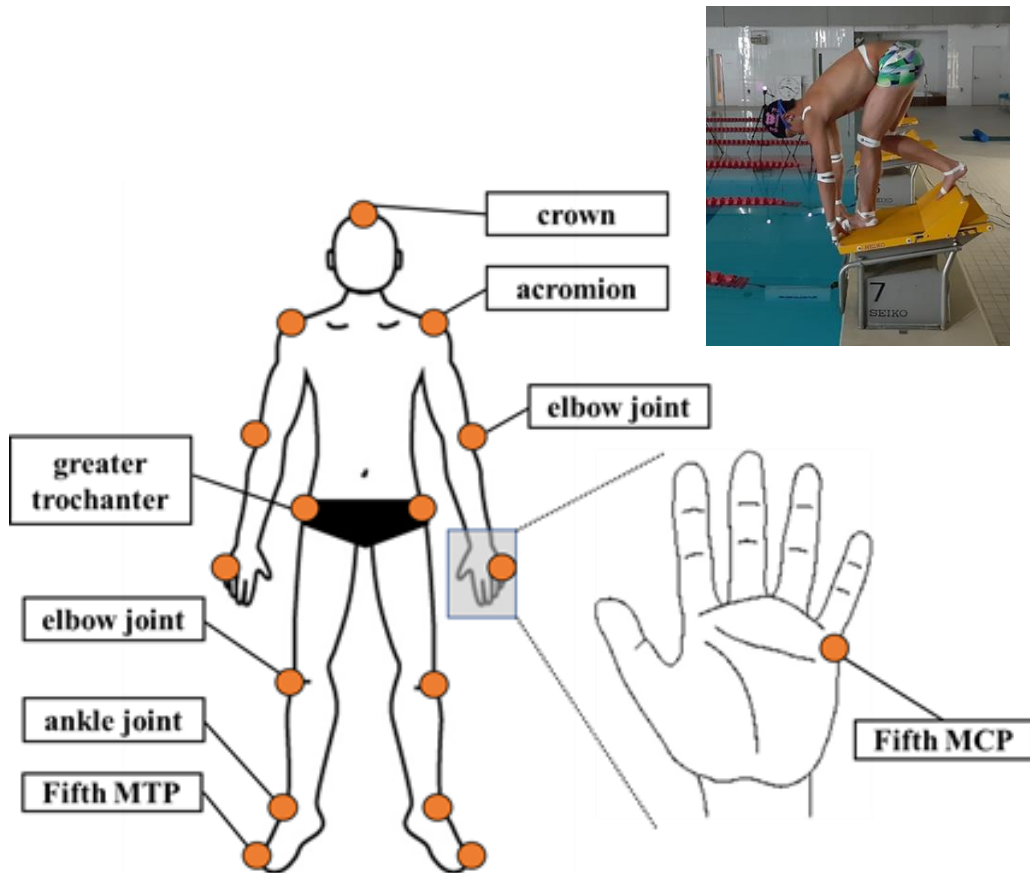


Fig. 7. Placement of reflective markers.

2.2.5 身体座標値の解析

解析には、画像分析ソフト (VENUS 3D R, Nobby Tech Inc) を用いて、エピソードマッチングアルゴリズムにより、各カメラで得られた 2 次元平面の角度と距離を用いて、2 次元平面上の座標値 (X, Y) から、空間に対して仮想の垂線を定義し、その後、仮想垂線が複数の角度から空間上に投影されることで発生する交点により、エピソード方程式を用いて、奥行 (Z) を特定し 3 次元座標値 (X, Y, Z) を算出した。

参加者の身体の 3 次元座標系は、左右方向を X 軸 (左側を正方向)、進行方向を Y 軸 (推進方向を正方向)、鉛直方向を Z 軸 (頭頂側を正方向) として定義した (Fig. 3, Fig. 4)。取得した座標データは、ローパスフィルタを適用し、ノイズを除去してデータを平滑化した。

キャリブレーションの初期段階では、特定のキャリブレーションワンドを活用し、各カメラの視野内でワンドを動かして、1500 以上のサンプル点を取得した。これにより、カメラの角度、カメラ間の距離、及びレンズの歪みを補正した。キャリブレーション時のモーションキャプチャの標準誤差は 0.1mm 以下であった。さらに、キャリブレーション後、視野内の複数の位置で既知の長さのワンドを用いて計算誤差を検証した (古賀ほか., 2021^[42])。測定範囲内の 3 か所 (スタート台の前方、上部、後方) でワンドの長さを 100 サンプル計測し、その誤差は最大で 0.1mm 以下であった。

収集した座標データを基に、特定のパラメータを算出し、詳細に分析した。離台時の飛び出し速度は、参加者の左右大転子の中点の変位速度に基づき計算された。また、第 5 中足骨指節関節に配置した反射マーカが Z 軸方向に変位した瞬間を離台時と定義し、各方向の速度成分を算出した。これらの速度成分は、左右方向 (X 軸) の「TLV (Take-off Lateral Velocity)」, 推進方向 (Y 軸) の「TPV (Take-off Propulsion Velocity)」, および鉛直方向 (Z 軸) の「TVV (Take-off Vertical Velocity)」として識別された。離台時の飛び出し角度は、「TA (Take-off Angle)」として定義され、離台時の膝関節に配置した反射マーカと水平面が形成する角度を基にした (Fig. 8)。

データ分析の際、Standard 試技と Lower 試技の間の平均値の差が統計的に有意であるかを検証するため、対応のある t 検定を適用した。全ての統計分析は SPSS Statistics ver.25 (IBM, USA) を使用し、有意水準を 5% と設定した。

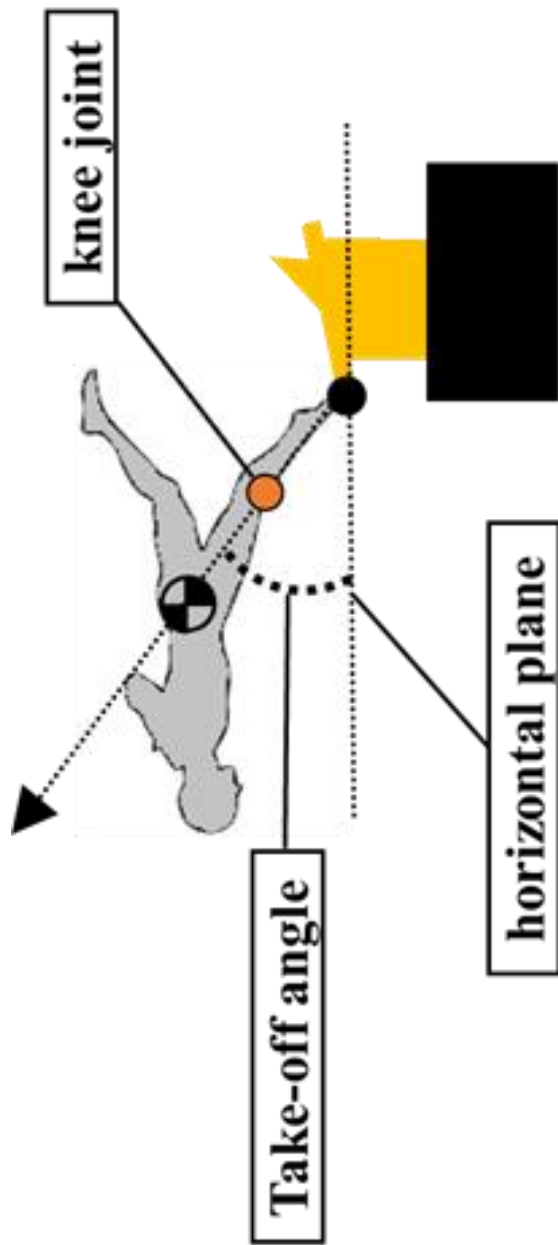


Fig. 8. Definition of Take-off Angle.

2.3 解析結果

Table 2 には、各試技における TLV, TPV, TVV の速度を示した。また、Table 3 には、TA をそれぞれ平均値と標準偏差を示した。

Table 2. Mean values and standard deviations of take - off velocity.

Subject	TLV (X-Axis) (m / s)		TPV (Y-Axis) (m / s)		TVV (Z-Axis) (m / s)	
	Standard	Lower	Standard	Lower	Standard	Lower
A	-0.02	0.05	2.33	2.17	-0.14	0.05
B	0.01	0.13	2.49	2.23	-0.14	-0.14
C	0.10	-0.01	2.16	2.00	-0.23	-0.01
D	0.05	-0.09	4.18	4.14	-0.49	-0.19
E	-0.17	0.01	4.21	3.96	-0.30	-0.23
F	0.14	-0.20	4.09	4.07	-0.23	0.16
G	-0.03	-0.12	3.58	3.57	-0.43	-0.01
H	0.12	0.22	4.42	2.39	-0.85	-0.46
I	-0.04	0.21	4.55	4.39	-0.71	-0.83
J	-0.27	0.20	4.68	4.21	-0.89	-0.33
K	-0.24	-0.18	4.69	4.64	-1.24	-0.74
L	-0.06	0.10	5.09	5.07	-0.91	-1.20
M	0.05	0.05	4.61	4.66	-0.25	-0.68
N	0.12	0.11	4.26	4.29	0.22	0.94
mean	-0.02	0.03	3.95 *	3.70	-0.47 *	-0.26
SD	0.13	0.13	0.91	1.01	0.38	0.50

Significant difference between conditions. * p<0.05

Table 3. Mean values and standard deviations of take - off angle.

Subject	Take-off angle (deg)		
	Standard	Lower	difference
A	35.4	41.1	-5.6
B	33.1	37.3	-4.1
C	32.8	34.8	-1.9
D	46.4	48.1	-1.7
E	28.4	31.4	-2.9
F	52.4	47.2	5.2
G	30.3	35.5	-5.2
H	40.4	53.1	-12.7
I	30.3	32.3	-2.0
J	31.9	35.0	-3.1
K	30.7	29.0	1.7
L	30.6	32.4	-1.8
M	36.9	36.3	0.5
N	47.6	50.8	-3.1
mean	36.2 *	38.9	-2.6
SD	7.3	7.5	3.9

Significant difference between conditions. * $p < 0.05$

2.3.1 離台時飛び出し速度

離台時の移動速度に関して、Standard 試技の TPV は Lower 試技に比べて有意に高い値を示した。この結果は、キックスタート時の上肢動作が離台時の TPV において 6.3%の寄与をしていることを示唆している。先行研究において、TPV とレース中の泳速度との間に高い相関が存在することが明らかにされている（本間ほか, 1997^[35]）。この事実を鑑みると、キックスタートの上肢動作は、離台時の推進方向速度だけでなく、入水後のレース全体のタイムにも影響を及ぼす可能性が考えられる。さらに、小椋ほか（2015）^[39]の研究では、離台前の 0.3 秒間の推進方向加速度と前脚膝屈曲筋力の筋出力との間に有意な相関が確認され、離台時の TPV への前脚の筋出力の影響が示唆されている。この観点から、キックスタートの上肢動作がスタート台を後方に押すことで TPV に直接的な影響を及ぼすのではなく、スタート動作中の前脚が適切な角度で推進方向への力を発揮するサポートをしていると推測される。また、Takeda et al.（2017）^[38]の報告によれば、上肢動作はスタート台に対する上肢からの力の発揮時に、負の鉛直方向成分が顕著であるとされている。本研究においても、TVV に関して Standard 試技は Lower 試技に比べて有意に低い値を示しており、先行研究との一致が確認された（Table 2）。これらの結果を踏まえ、上肢動作と膝関節角度との関連性を深く探るため、離台時の飛び出し角度も本研究の分析項目として考慮された。

2.3.2 離台時飛び出し角度

離台時の飛び出し角度、すなわち水平面と膝関節が形成する角度である TA において、Standard 試技は Lower 試技に対して有意に低い値を示している（Table 3）。この結果は、Standard 試技における離台時の前脚からスタート台への力の方向が、Lower 試技よりも水平に近似していることを示唆している。Takeda et al.（2017）^[38]の研究によれば、上肢動作が推進方向速度に直接的な影響を及ぼすのではなく、手部によるスタート台の把持が鉛直下向きの力を生み出し、後脚の蹴り出しによる身体の鉛直上向きの動きを制約していると考えられる。この観点から、上肢動作は前脚がスタート台を蹴り出す直前に股関節を伸展させることで、離台角度が鉛直方向に偏ることを防ぐ役割を果たしており、これが TPV に影響を及ぼす可能性が考えられる。Bobbert & Zandwijk（1999）^[43]、武田ほか（2007）^[44]、および Takeda et al.（2012）^[45]は、キックスタートの飛び出し時の TPV が下肢関節の動作に影響されることを明らかにしている。本研究の結果も、離台時の膝関節の伸展角度の変動という観点から、これらの先行研究を支持するものとなった。しかしながら、今回の実験試技では、選手の本래のスタート動作における上肢の役割を測定するため、後脚を設置するバックプレートの位置を、通常のレースで使用する個々で最適な位置に設定した。このため、構え姿勢時の後脚の角度の比較が同条件下で行われていない。よって、前脚以外で TPV に影響を及ぼすとされるバックプレートに設置した後脚の影響を考慮できていない。今後の研究では、後脚の蹴り出し角度の影響も考慮することが必要である。さらに、

キックスタート時の3次元動作解析と筋活動量の同時測定により、筋活動と身体の制御の関連性を明らかにすることが期待される。これは、トレーニング手法や機器の開発に寄与する可能性がある。したがって、今後の研究方向として、本研究の結果を基盤とし、上肢動作と前脚・後脚の筋出力のタイミングの関連性について詳細に検討することが提案される。

2.4 結言

本研究は、キックスタート時の上肢動作の有無が離台時の身体移動速度への影響を、3次元動作分析を用いて詳細に解明することを目的とした。特定のプール環境での計測は困難とされるが、本研究では先行研究と同様の精度で身体速度と関節角度の3次元データを同時に取得することに成功した。この結果は、プール環境下でのキックスタート動作の詳細な分析において、本研究の方法論や実験環境が有効であることを示している。

分析の結果、Standard 試技と Lower 試技の間で、TPV における Standard 試技が有意に高い値を示す一方、TVV と TA では Standard 試技が有意に低いことが明らかとなった。これらの結果は、キックスタート時の上肢動作が前脚のスタート台蹴り出し直前の股関節伸展や姿勢維持に寄与しており、これが TPV に影響を及ぼす可能性を示唆している。以前の研究において、飛び出し時の TPV が泳速度と高い相関を持つことが報告されており、これは競泳パフォーマンスへの直接的な影響を持つ可能性があることを示している（本間ほか, 1997^[35]; Garcia et al., 2015^[36]）。

本研究の手法を適用することで、通常の競技プールにおいても照度調整を行うことで、スタート動作中の精緻な3次元動作データの取得が実現可能であることが確認された。しかしながら、本研究では各被験者の関節間の長さを考慮していないため、関節トルクの推定は未実施である。今後の研究の方向性として、被験者の体格差を考慮した関節トルクのデータ収集、さらに競技力向上の観点からの異なるパフォーマンスレベル間の比較や、競技レベルと上肢動作との関連性の詳細な調査が求められる。特に、離台から入水までの膝関節や足関節の内側マーカの精確な計測が必要である。しかし、本研究の実験環境においては、一部の視野でカメラが撮影できない範囲が存在したため、下肢関節の内側マーカの計測は困難であった。今後の研究において、カメラ配置の最適化や、水中からの撮影を可能とするカメラの防水処理等の改良が必要であると考えられる。

第3章 クロール泳における肩・腰・体幹ローテーション動作の解明

3.1 緒言

青年期および壮年期の男性に関して、体幹部の筋量が全身筋量の約50%を占めることが明らかにされている(原田ほか, 2018^[46])。この顕著な筋量を持つ体幹部は、競泳における泳動作の核心としての重要性が認識されている。特にクロール泳では、水中で水平保持を維持しながら、上肢及び下肢を用いて推進力を生成する動作が特徴的である(Hollander et al., 1986^[47])。この際、体幹部は固定支点の欠如する環境下で力を適用する必要がある。体幹部の安定性は腹腔内圧の変化により制御され、腹部筋群、腹横筋、骨盤底筋の協調的収縮により調整される(Norris, 2000^[48])。泳速度の増加に伴い腹腔内圧が上昇し、体幹部の剛性を強化して抵抗を減少させる効果が示唆されている(Moriyama et al., 2014^[49])。さらに、体幹部はキック動作の方向性に影響を及ぼし、身体の左右の振動を低減する機能を果たすとされている(Counselman, 1968^[28])。これらの事実から、体幹部は泳動作中の身体の安定性を強化する重要な要素として機能していると評価されている。

一方、体幹部が推進力に対しても影響を及ぼす可能性が示唆されており、クロール泳における体幹の回転動作は「体幹ローテーション」として定義されている(Yanai, 2003^[50])。Payton et al. (2002)^[32]による研究では、クロール泳中の体幹ローテーションと手部との相互作用が調査され、Pull局面において体幹ローテーションが手部の動きに影響を及ぼすこと、および手部の速度との関連性が報告されている。流体力学の観点から、手部速度の増加は推進力の増大に寄与し、泳速度の向上を促進する(Narita et al., 2017^[51]; 角川ほか, 2019^[52]; Tsunokawa et al., 2019^[53])。体幹ローテーションが手部における推進力の生成に影響を与えることも指摘されている(Kudo et al., 2017^[54])。従って、泳速度の向上を志向する上で、泳動作中の体幹ローテーションの特性を詳細に把握することが不可欠であるが、このテーマに関する研究は未だ十分に実施されていない。

Psycharakis & Sanders (2008)^[55]は、体幹ローテーションが肩と腰で異なる角度の回転運動を伴うことを明らかにしている。また、Yanai (2003)^[50]は、体幹ローテーションを肩と腰のローテーションに分けて検討し、ストローク頻度の増加に伴って両者のローテーション角度が低下する可能性を示唆している。これらの研究結果を踏まえると、体幹ローテーションの特性を詳細に理解するためには、肩と腰のローテーションを別々に考察することが重要であると考えられる。しかし、Yanai (2003)^[50]の研究では、泳速度が100m自由形のベストタイムの60~80%という中距離種目程度の速度であったため、短距離種目における高速泳動作に関するデータは不足している。この背景を鑑みて、短距離種目における高速泳動作中の体幹ローテーションの特性は未だ明確にされていないと評価される。

生田ほか(1998)^[56]の研究によれば、泳速度の変化に伴い、ストローク頻度も変化し、

これが泳ぎの特性に影響を及ぼすとされている。競泳の短距離種目である 50 m 自由形と 100 m 自由形の平均泳速度を世界記録から評価した場合、50 m 自由形の記録は 20.91 秒で、平均泳速度は 2.39 m/s、一方、100 m 自由形は 46.91 秒で、平均泳速度は 2.13 m/s となり、0.26 m/s の差異が確認される。国内の全国大会レベルの選手においても、短距離種目の泳速度は 2.0 m/s を超えることが多い。Narita et al., (2018) [64]の研究によれば、泳中の身体が受ける流体抵抗は、泳速度の約 3 乗に比例して増加する。このことから、高速泳動作の環境下では、顕著な抵抗が生じると推測される。従って、50 m 自由形と 100 m 自由形の泳ぎの特性は、泳速度の差異により大きく異なる可能性が考えられる。この視点から、体幹ローテーション動作に関しても、両種目の泳動作の特性を独立して評価することが必要であると推察される。

推進力の生成に関する研究では、全身の推進力の約 90%が上肢動作によって生み出されることが複数の研究により示唆されている (Watkins et al., 1983[65]; Hollander et al., 1986[47]; Deschodt et al., 1999[66]; Gourgoulis et al., 2014[67])。肩のローテーション角速度の増加が手部速度の増加に影響し、推進力の発揮に寄与することが、過去の研究で示されている (Tsunokawa et al., 2019[68]; Schleihau et al., 1983[69]; Grimston & Hay, 1986[70]; Payton et al., 2002[32]; Kudo et al., 2013[71])。さらに、クロール泳では固定された支持点がない状況での力の発揮が必要であり、腹腔内圧は腹部筋群、腹横筋、骨盤底筋の協働的収縮によって変化することが Norris (2000) [48]によって示されている。泳速度の増加に伴い腹腔内圧も増加し、体幹部の剛性が増加することが Moriyama et al. (2014) [49]によって示されている。このことから、体幹部は泳動作中の身体の安定性を向上させる役割を果たしていると考えられる。しかし、これらの先行研究は設定された泳速度が長距離種目を対象としているため、推進力がより必要とされる短距離種目に関する情報は不足している。したがって、本研究の目的は、短距離クロール泳法における異なる泳速度中の肩と腰のローテーション角度、および体幹捻転角度の変化を詳細に調査し、泳速度と体幹捻転動作との関係を解明することである。

3.2 計測システム

3.2.1 対象者

本研究には 10 名の参加者が参加した (Table. 4)。参加者の特性は以下の通りである：平均年齢 21.0 ± 2.5 歳、平均身長 179.8 ± 6.7 cm、平均体重 77.3 ± 5.9 kg。すべての参加者は週に 6 日のトレーニングを実施し、全員が全国大会への出場経験を有していた。

実験への参加に際しての同意について、未成年の参加者からは保護者の承諾を取得した。また、参加の承諾は自由意志に基づくものであり、承諾後でも任意の時点で撤回が可能であること、そして撤回に伴い参加者に不利益が生じることはないことを、実験開始前に詳細に説明した。さらに、研究に伴う個人情報の取得に関して、その情報の漏洩や滅失を防

ぐための適切な管理措置を講じることを確約した。これらの説明を受けた上で、参加者から研究の目的及び手法に関する明確な同意を取得した。

Table 4. Physical characteristics performance level of subjects.

Subject	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Best Record of 50 m FreeStyle (s [*])	Fina Point	Best Record of 100 m FreeStyle (s [*])	Fina Point
A	21	189	80	23.37	716.3	51.74	745.3
B	20	169	71	23.94	666.3	53.04	691.8
C	23	180	83	23.41	712.6	51.34	762.8
D	18	180	76	24.06	656.4	51.72	746.1
E	22	180	74	23.59	696.4	51.91	738.0
F	18	185	72	23.40	713.5	52.11	729.5
G	21	169	72	23.87	672.2	50.95	780.5
H	20	183	75	24.26	640.3	51.43	758.8
I	20	175	79	23.95	665.5	51.33	763.3
J	27	188	91	21.67	898.4	48.35	913.3
mean	21.0	179.8	77.3	23.55		51.39	
SD	2.5	6.7	5.9	0.69		1.15	

3.2.2 実験プロトコル

実験試技における泳速度は、参加者の 50 m および 100 m クロール泳の最高記録から計算された。飛び込みの影響を排除するため、スタートの合図から 15 m 地点までの区間をスタート局面と定義し、各最高記録からこのスタート局面を除外した区間の平均泳速度を試技の設定泳速度として採用した。十分なウォームアップの後、初めに 100 m クロール泳の平均泳速度試技（以下「V100 m」と称する）、次に 50 m クロール泳の平均泳速度試技（以下「V50 m」と称する）をそれぞれ 10 秒間実施した。試技中の泳速度が一定であることを確保するため、プールの底部にマーカを配置し、参加者が計測区間から逸脱しないよう指示した。さらに、参加者のキック動作はレース時と同様の 6 ビートキック（1 ストロークあたり 6 回のキック）を採用し、呼吸によるストローク動作への影響を除外する目的で、無呼吸の試技を実施した。

3.2.3 環境設定

本研究においては、側面及び底面がガラス製であり、人工的に水流を生成し泳動速度を調整可能な実験用回流水槽（五十嵐工業社製、日本）が採用された。該当する回流水槽は、インペラを活用して水路内に流速を生じさせ、連続的かつ長期に渡る流れ場を構築することが可能であり、その結果、安定した流速環境を提供することができる。本水槽には 2 つのインペラが搭載されており（垂直循環型 2 インペラ方式）、それにより、水面近辺及び水槽底部の観測部において均一な流速分布を持つ流れを生成することが可能である。この特徴により、清澄な流れを生み出すための水槽形状の研究、各種整流装置の開発、流速生成用インペラの設計などが行える。また、この垂直循環型 2 インペラ方式を採用した回流水槽は、競泳、船舶流体力学、土木水理学、海洋機器開発、航空宇宙力学、漁業機器開発、水産工学研究、数値流体力学の検証実験など、多岐にわたる工学分野での応用が期待される。さらに、泳者の観察を目的とした場合、回流水槽の左右及び底面に設置されたガラス面は、モーションキャプチャカメラを用いた撮影や動作分析に最適な環境を提供する。モーションキャプチャカメラ（VENUS 3D, Nobby Tech Inc, 日本）は、水中動作の計測を目的として回流水槽の周囲に設置された。具体的には、泳者の左右に 5 台ずつ、底部に 8 台、合計 18 台のカメラが水中動作をキャプチャした。水上動作は、回流水槽上部に配置された 4 台のカメラにより撮影された（Fig. 9）。撮影はサンプリング周波数 200 Hz で実施され、ガラス面による屈折を考慮し、カメラはガラス面に対して画角が垂直になるよう設置し、身体に取り付けられたマーカが少なくとも 2 台のカメラからの画角内に収まるよう調整した。本研究で用いたカメラは総数 22 台のカメラを使用し、データの精度の向上を行った。本研究で使用された総計 22 台のカメラによるデータ収集は、身体動作解析において、これまでに例を見ないほどの多数のカメラが用いられ、解析精度の向上が期待される。照明環境においては、室内の太陽光はカーテンで遮断し、LED マーカの誤検出を防止する措置が

施された。照度は照度計（KEW5204, KYORITSU Inc, 日本）により計測され、水面上及び水中の照度が 50lx 以下であることを確認した。3次元座標系の構築のためのキャリブレーションは、専用のキャリブレーションワンドを用いてダイナミックキャリブレーションが施され、各カメラの視野内でワンドを動かすことで、各カメラから 1500 以上のサンプルが取得された。水中と水上のキャリブレーションは独立して行われ、その後のモーションキャプチャの標準誤差は、水中及び水上ともに 0.5 mm 以下であった。本研究では、誤差距離をキャリブレーションワンドに取り付けられた反射マーカ間の既知の距離と、実験中に算出された 3次元空間で計測した同マーカ間の距離との比較によって定量化した。この既知の距離は、キャリブレーションプロセスにおいて精密な手法を用いて事前に決定され、その後、実験中のマーカ間距離の実測値と照合された。身体の移動速度が約 2.0 m/s であったことを考慮すると、計測誤差が 0.5mm 以内であったことは、非常に高い計測精度を示している。これにより、本研究の計測システムが高度な精度で動的な身体運動を捉える能力を有していることが確認された。続いて、水中と水上の 3次元座標系を統合するため、水面に L字型に 3点配置したキャリブレーション用 LED マーカプレートを浮かべ、30秒間のキャリブレーションを実施した。水中と水上からマーカの位置をキャプチャすることで水面を特定し、水中と水上の座標系を統一し、空間の原点を確定した。実際にはプレートに厚みが存在し、水中と水面上のマーカ間に隙間が生じるため、この隙間の長さを計測し、座標系の統一時にその差を考慮した。さらに、キャリブレーション後に視野内の複数の位置で既知のサイズのワンドの長さを計測し、計算上の誤差を評価した(古賀ほか, 2021^[57])。測定範囲内の 3位置(前, 中, 後)でワンドの長さを 100 サンプル計測し、その誤差は最大で 0.5mm 以下であった。

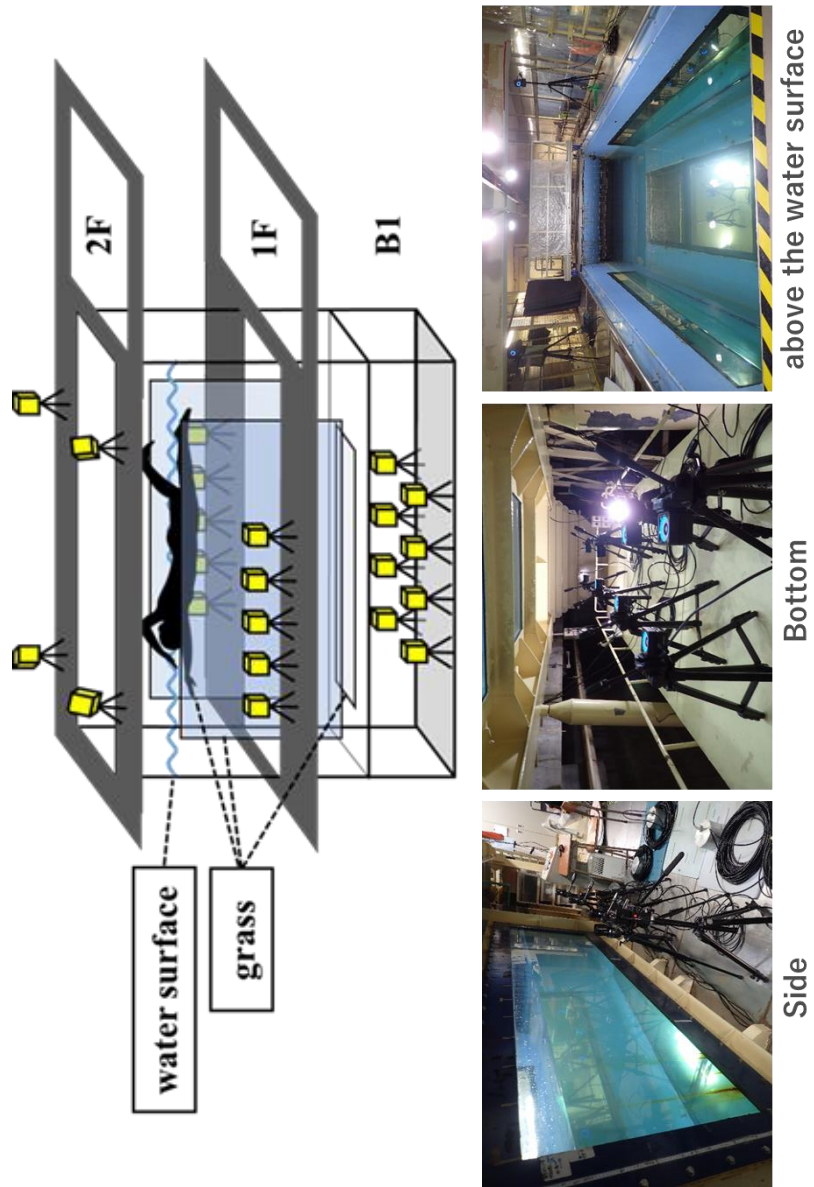


Fig. 9. Diagram of experimental setting.

3.2.4 身体マーカ貼付位置

参加者の上肢及び体幹の動作を評価するため、身体の7箇所（頭頂部、左右の肩峰、左右の第5中手骨、左右の大転子）に無線自発光LEDマーカ（煌, Nobby Tech Inc, 日本）を貼付した（Fig. 10）。データの解析には、画像処理ソフトウェア（VENUS 3D R, Nobby Tech Inc, 日本）を活用し、参加者の身体から取得された3次元座標データを基に3次元空間を構築した。取得データに対して、ローパスフィルタを適用し、異常値を排除してノイズを低減させ、データの平滑化を行った。

本研究の主要な目的は、各変数と泳動作との関連性を詳細に解明することである。この目的のため、Chollet et al. (2000) [58]の方法論を参考に、上肢のストローク動作を複数の局面に細分化した（Fig. 11）。この局面の分類は、泳者の相対座標系ではなく、絶対座標系に基づいて行われた。ストロークの1周期は以下の4つの局面に区分される。

Glide 局面：第5中手骨のZ座標が水面より下方（マイナス）となる時点（入水点）から、手部が水中で進行方向と逆向きに移動を開始するまでの期間であり、手部が水面付近の水中で静止している局面と定義する。

Pull 局面：手部が水面付近の水中で静止している局面であるGlide局面が終了し、第5中手骨のY座標が肩峰のY座標の真下に達するまでの間において、主に手部が後方に移動し始め、プールの底方向に移動する局面と定義する。

Push 局面：第5中手骨のY座標が肩峰のY座標の真下に到達した後、主に手部が後方に移動しつつ、水面側に移動する局面であり、最終的に第5中手骨のZ座標が水面より上方（プラス）となる時点（出水点）までの期間と定義する。

Recovery 局面：第5中手骨のZ座標が水面より上方（プラス）となる時点（出水点）であるPush局面の終了から、第5中手骨のZ座標が水面より下方（マイナス）となる時点（入水点）であるGlide局面の開始までの期間と定義する。

上記の4つの局面（Glide局面、Pull局面、Push局面、Recovery局面）を手部ストロークの1周期とし、局面毎に分析を行った。

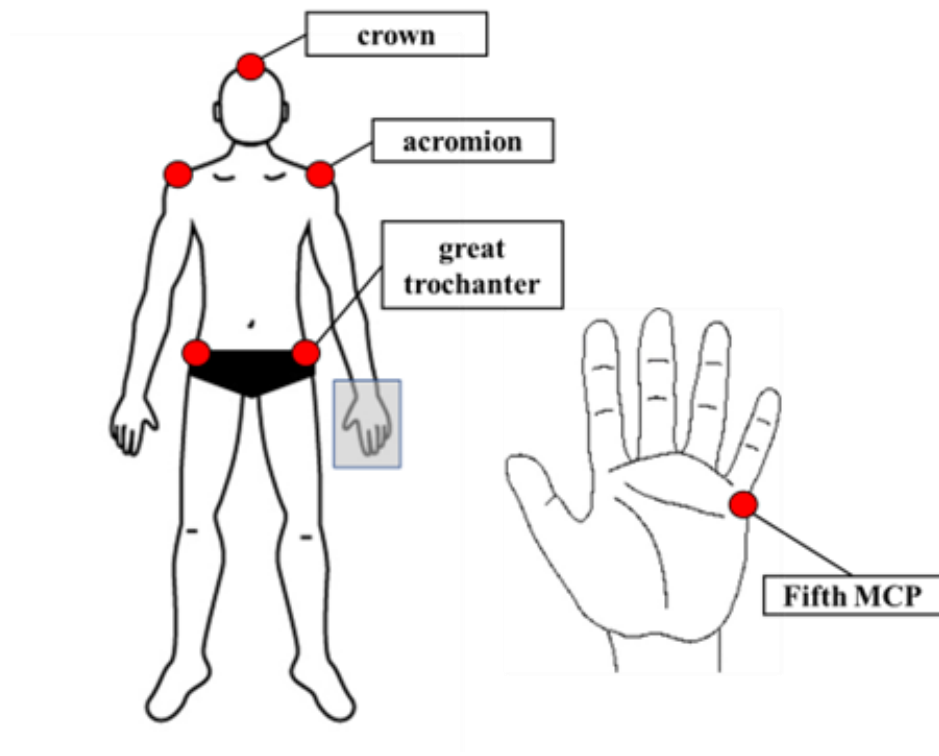


Fig. 10. Diagram of marking points.

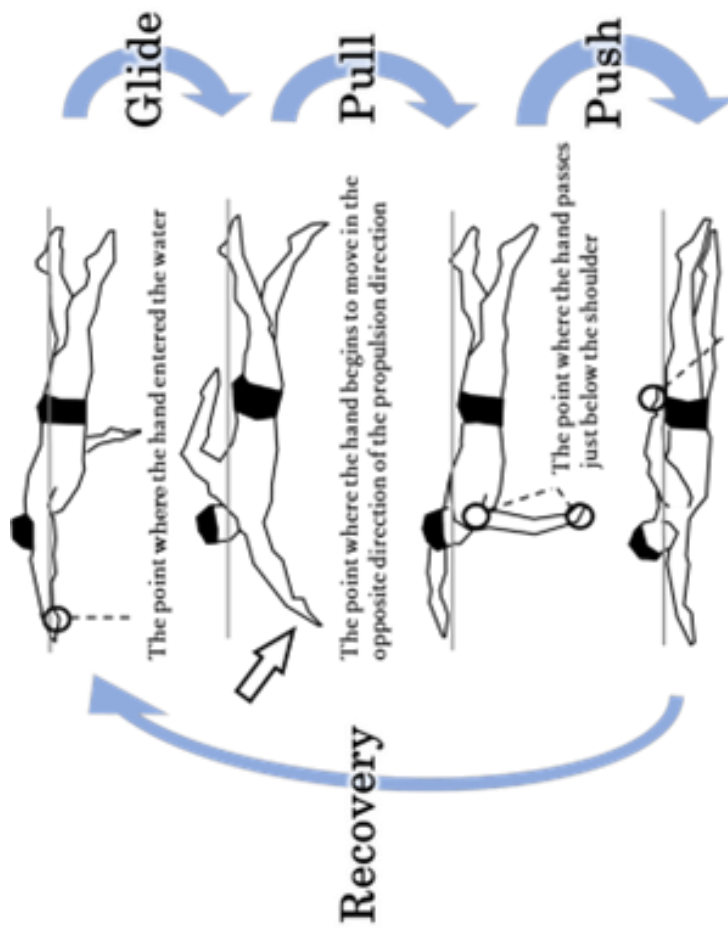
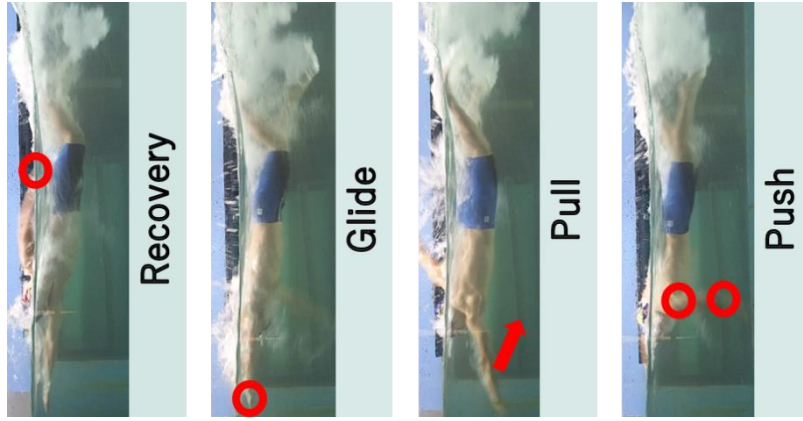


Fig. 11. Phase division of upper limb stroke.

3.2.5 身体座標値の解析

座標系は、参加者の泳ぎの姿勢を基準に設定された。具体的には、左右方向を X 軸，進行方向を Y 軸，鉛直方向を Z 軸と定義した。各軸の正の方向は、X 軸では参加者の右方向，Y 軸では進行方向，Z 軸では天井方向とした。この座標系は右手系の固定座標系を採用している (Fig. 12)。

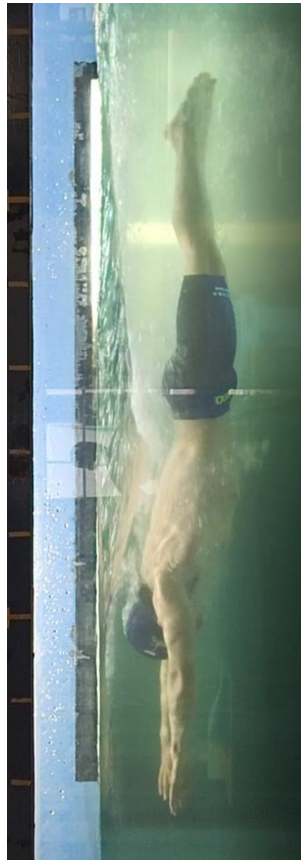
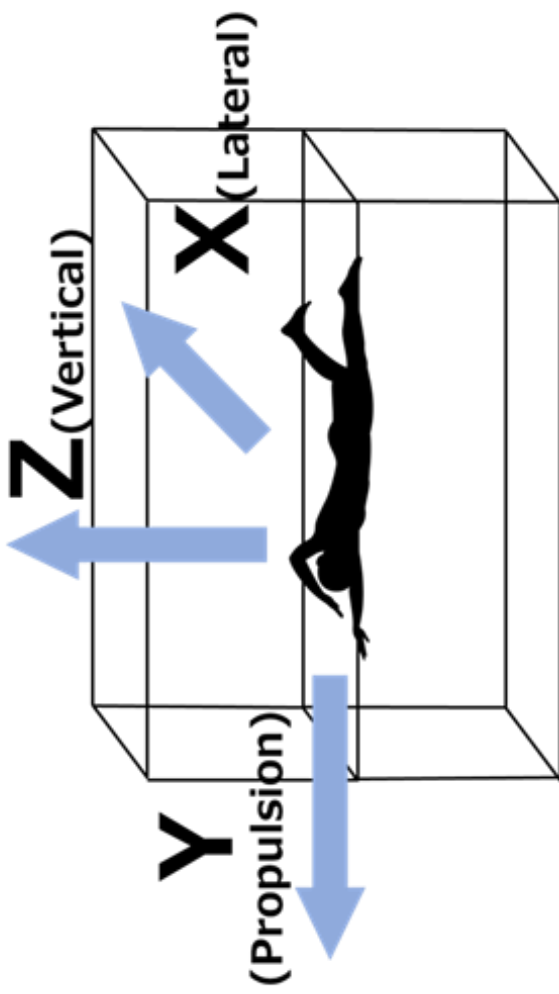


Fig. 12. Coordinate axis definition.

本研究での分析対象項目は以下のとおりであり、各項目に対する略称も併せて示されている。

ストローク頻度 (SF: Stroke Frequency): 手部の Z 軸方向の動きを基準に、1 周期のストロークを計算し、その周期の時間を基に 1 秒あたりの回転数を求めた。

ストローク長 (SL: Stroke Length): 設定された泳速度から SF を除算し、Kennedy et al. (1990) [59]の方法に基づきストローク長を算出。

肩ローテーション角度 (ShR: Shoulder Roll): 左右の肩峰を接続する直線が XZ 平面に投影されたときの角度を測定。

腰ローテーション角度 (HiR: Hip Roll): 左右の大転子を接続する直線が XZ 平面に投影されたときの角度を測定。

ローテーション角度の最大値のタイミング (Peak Time): この最大角度が現れるタイミングは、局面の開始からその時点までの相対時間 (%) で示される。局面の開始を 0%, 終了を 100%と定義し、肩のローテーション角度が最大となるタイミング (ShR Peak Time %) および腰のローテーション角度が最大となるタイミング (HiR Peak Time %) を算出した。異なる泳速度での比較のため、各試技時間を 100%に正規化し、局面の開始から最大角度が現れるまでの時間を局面割合 (%) で示した。

肩ローテーション角速度 (ShRAV: Shoulder Roll Angular Velocity) および腰ローテーション角速度 (HiRAV: Hip Roll Angular Velocity): ShR と HiR の変位を時間で微分することで、肩及び腰のローテーション角速度を算出した。Pull 局面において、移動方向が負から正へと変化する際、右肩がプール底方向へ移動し、負の方向に回転する部分を Pull Roll 局面と称し、水上方向への移動、すなわち正の方向への回転部分を Pull Roll Back 局面と称する。さらに、Pull 局面の終了から手が水面上に出るまでの部分を Push 局面と定義し、それぞれの局面における平均角速度を算出した。

体幹捻転角度 (TA: Twist Angle): 和田ほか (2003) [73]の手法を基に (Fig. 13), ShR と HiR の角度差をもとに算出される。角度差が最大となるタイミングを捻転のピークとし、その時点の角度を体幹捻転角度とした。

データの正規分布は Shapiro-Wilk 検定を用いて検証した。異なる泳速度における試技間の差異は、対応のある t 検定を用いて評価した。変数間の関連性は Pearson の相関係数を用いて検証し、無相関検定を実施した。Hopkins et al. (2009) [74]の基準に基づき、相関係数の閾値を small (0.1), moderate (0.3), large (0.5), very large (0.7), nearly perfect (0.9) とした。全ての統計的解析は SPSS Statistics ver.25 (IBM, USA) を使用し、有意水準は 5%と定めた。

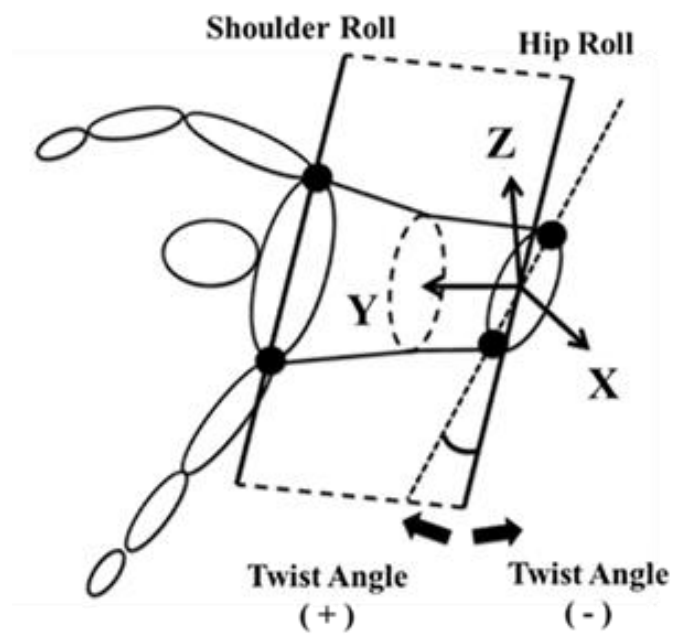
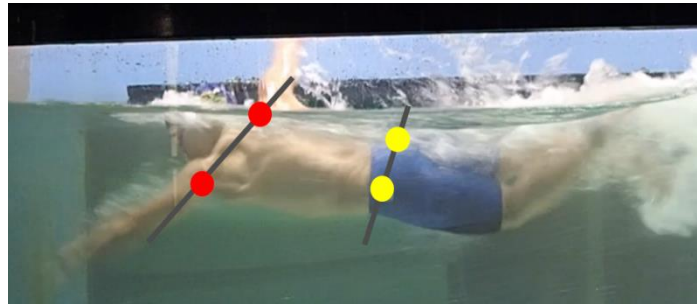


Fig. 13. Definition of trunk twist angle.

3.3 解析結果

Table 5 は、各試技に関する泳速度 (SV), ストローク頻度 (SF), およびストローク長 (SL) のデータを示す。Table 6 には、肩のローテーション角度 (ShR), 腰のローテーション角度 (HiR) の結果を示す。Table 7 には、Peak Time %の平均値と標準偏差を示した。Table 8 と Table 9 には、肩のローテーション角速度(ShRAV), 腰のローテーション角速度(HiRAV) の結果を各局面に応じて示している。Table 10 には、V100m に対する V50m の TA の変化率と、各局面における ShRAV と HiRAV の変化率との間の相関係数を示した。

Table 5. Mean value of each variables at V50 m and V100 m.

Subject	SV (m / s)		SF (stroke / s)		SL (m / stroke)	
	V50 m	V100 m	V50 m	V100 m	V50 m	V100 m
A	1.97	1.85	1.09	0.98	1.81	1.89
B	1.94	1.81	1.04	0.89	1.86	2.03
C	1.97	1.86	0.99	0.91	1.99	2.05
D	1.92	1.86	1.09	0.99	1.77	1.88
E	1.98	1.85	1.12	0.97	1.76	1.91
F	1.99	1.84	1.03	0.86	1.93	2.13
G	1.93	1.88	1.16	1.01	1.66	1.86
H	1.90	1.86	0.93	0.88	2.05	2.12
I	1.94	1.88	1.06	1.02	1.82	1.84
J	2.14	1.98	1.00	0.93	2.14	2.12
mean	1.97**	1.87	1.05**	0.94	1.88**	1.98
SD	0.06	0.04	0.06	0.05	0.14	0.11

SV = Swimming Velocity

Significant difference between conditions. ** p<0.01

Table 6. Mean value of ShR and HiR at V50 m and V100 m.

Subject	ShR (deg)		HiR (deg)	
	V50 m	V100 m	V50 m	V100 m
A	40.8	36.3	22.4	25.0
B	64.6	72.3	38.1	39.6
C	76.6	81.1	44.3	50.5
D	51.5	54.0	41.6	30.0
E	49.1	50.9	27.4	26.3
F	53.0	49.5	24.4	27.1
G	71.0	73.4	30.4	34.9
H	46.1	52.5	19.1	23.6
I	35.8	42.0	18.8	26.3
J	40.6	46.3	23.8	25.1
mean	52.9 *	55.8	29.0	30.8
SD	12.9	14.0	8.8	8.1
				5.0

Significant difference between conditions. * p<0.05

3.3.1 肩のローテーション動作

Yanai (2003) ^[50]の研究によれば、SFが高い場合に ShR が低い値を示すとの結果が示されている。本研究の成果もこれを裏付けるもので、V50 m 試技では V100 m 試技に比べて SF が有意に高く、同時に ShR が有意に低かった。しかしながら、Yanai (2003) ^[50]の調査における泳速度は 1.3 m/s から 1.6 m/s であり、本研究では 1.87 m/s から 1.97 m/s という異なる範囲での試験が実施された。それにも関わらず、両研究で類似の結果が観察されたことから、ShR の低下と泳速度の増加との関連性は、泳者の特性や泳ぐ距離に依存せず、一般的な傾向として存在すると推察される。この現象の背後には、泳者が速度を上げるためには SF を高め、1 ストロークあたりの時間を短縮する必要があるという事実がある。この 1 ストロークの時間の短縮は、体幹のローテーション動作の時間も同様に短縮することを示唆している。従って、限られた時間内での肩のローテーション動作を効率的に完了させるため、ShR の動作範囲が制限されると考えられる。

3.3.2 腰のローテーション動作

Table 6 に示されたデータに基づくと、各試技における HiR の間に泳速度の変化に関連する有意な差異は検出されなかった。Yanai (2003) ^[50]の報告によれば、SF の増加とともに HiR が低下するという関係が存在するが、本研究の結果ではそのような関連性は確認されなかった。この結果の違いの背後には、Yanai (2003) ^[50]の調査での泳速度が 1.3 m/s から 1.6 m/s の範囲で、その差が 0.3 m/s であるのに対し、本研究の V50 m 試技は 1.97 m/s、V100 m 試技は 1.87 m/s と、試技間の泳速度の差が 0.1 m/s となっていることが挙げられる。この微小な泳速度の差が、HiR の変化の少なさに関連していると推察される。Psycharakis & Sanders (2008) ^[55]の研究によれば、キック動作の強度が増加すると HiR が低下するとされている。McCabe et al. (2011) ^[60]も、泳速度の変化に伴うキック動作の変化を示しており、本研究の結果はこれらの先行研究と整合的であると解釈できる。さらに、ShR の平均値は V50 m 試技で 52.9°、V100 m 試技で 55.8°となり、一方で HiR の平均値は V50 m 試技で 29.0°、V100 m 試技で 30.8°であった。このデータから、ShR が HiR よりも広い動作範囲を持つことが明らかとなった。従って、HiR の動作範囲が ShR に比べて制約されており、泳速度の影響は ShR により顕著であると推察される。

3.3.3 肩と腰のローテーション動作のタイミング

Table 7 に示されたデータに基づくと、各試技における ShR および HiR は、Pull 局面においてピーク値を示している。この観察を基に、ShR および HiR がピーク値を示すタイミングをそれぞれ「ShR Peak Time%」および「HiR Peak Time%」として定義し、Pull 局面の開始からピーク値までの期間を計算した。分析の結果、V50 m 試技における HiR のピークまでの期間は、V100 m 試技と比較して有意に短縮していた。これは、高速度での泳ぎにおい

て、腰のローテーションがより早くピーク値に達することを示している (Fig. 14)。一方、ShR のピークまでの期間においては、試技間で有意な差異は認められなかった。これは、泳速度の変化に伴い、肩と腰のローテーションのタイミングが異なることを示唆している。さらに、Pull 局面における肩と腰のローテーション角速度は、Pull Roll 局面、Pull Roll Back 局面、および Push 局面に分けて評価された。その結果、Push 局面における ShRAV は V50 m 試技で有意に高かった。この事実は、腰のローテーションのタイミングの変化が手の動きに影響を及ぼしている可能性を示唆している。Kudo et al. (2017) [54] の報告によれば、体幹のローテーションは Pull 局面で手の左右の動きを促進し、Push 局面で手の鉛直方向の速度に影響を与える。したがって、V50 m 試技においては、腰のローテーション角度のピーク値までの早期化が Push 局面の肩のローテーション角速度に影響を与え、手の鉛直方向の動きに寄与していると推測される。

Table 7. Mean value of ShR Peak Time and HiR Peak Time at V50 m and V100 m.V100 m.

Subject	ShR Peak Time (%)		HiR Peak Time (%)	
	V50 m	V100 m difference	V50 m	V100 m difference
A	46	20	15	15
B	33	44	36	40
C	49	49	51	52
D	39	41	26	29
E	33	42	31	42
F	42	47	43	48
G	27	27	22	26
H	37	48	38	43
I	17	22	12	22
J	30	34	16	22
mean	35	37	29 **	34
SD	9	10	12	12
				3

Significant difference between conditions. ** p<0.01

Table 8. Mean value of ShRAV at V50 m and V100 m.

Subject	Pull Roll (rad / s)		Pull RollBack (rad / s)		Push (rad / s)	
	V50 m	V100 m difference	V50 m	V100 m difference	V50 m	V100 m difference
A	-2.0	-3.4	1.4	1.4	4.7	3.3
B	-4.5	-4.7	0.2	-1.0	6.3	5.6
C	-4.0	-4.1	0.1	0.5	4.2	3.6
D	-3.9	-3.7	-0.2	0.0	4.7	5.0
E	-4.9	-4.2	-0.7	-0.9	5.6	4.7
F	-3.8	-3.4	-0.4	0.7	5.0	4.1
G	-3.5	-5.4	1.9	0.4	5.2	4.3
H	-2.5	-2.4	-0.1	-1.3	3.6	2.6
I	-2.0	-4.3	2.3	0.0	5.4	5.7
J	-3.8	-2.1	-1.7	-0.7	5.8	5.0
mean	-3.5	-3.8	0.3	0.0	5.0**	4.4
SD	1.0	1.0	1.2	1.0	0.7	1.0

Significant difference between conditions. ** p<0.01

Table 9. Mean value of HiRAV at V50 m and V100 m.

Subject	Pull Roll (rad / s)		Pull RollBack (rad / s)		Push (rad / s)				
	V50 m	V100 m difference	V50 m	V100 m difference	V50 m	V100 m difference			
A	-2.8	-2.7	-0.1	1.4	1.6	-0.2	2.5	2.1	0.4
B	-2.9	-2.5	-0.4	2.4	2.6	-0.2	3.0	3.1	-0.1
C	-2.0	-2.2	0.2	4.8	4.5	0.3	2.4	2.5	-0.1
D	-3.1	-2.1	-1.0	2.3	2.2	0.1	3.1	2.6	0.5
E	-3.1	-2.5	-0.6	1.5	2.6	-1.1	3.3	2.7	0.6
F	-2.0	-2.1	0.1	3.6	3.1	0.5	2.3	1.9	0.4
G	-2.5	-3.1	0.6	1.6	1.5	0.1	1.9	2.3	-0.4
H	-0.5	-0.6	0.1	2.4	2.6	-0.2	0.7	0.9	-0.2
I	-1.5	-3.6	2.1	1.4	1.5	-0.1	3.3	3.6	-0.4
J	-2.3	-2.0	-0.3	1.7	1.5	0.2	2.1	2.1	0.0
mean	-2.3	-2.3	0.1	2.3	2.4	-0.1	2.5	2.4	0.1
SD	0.8	0.7	0.8	1.0	0.9	0.4	0.7	0.7	0.4

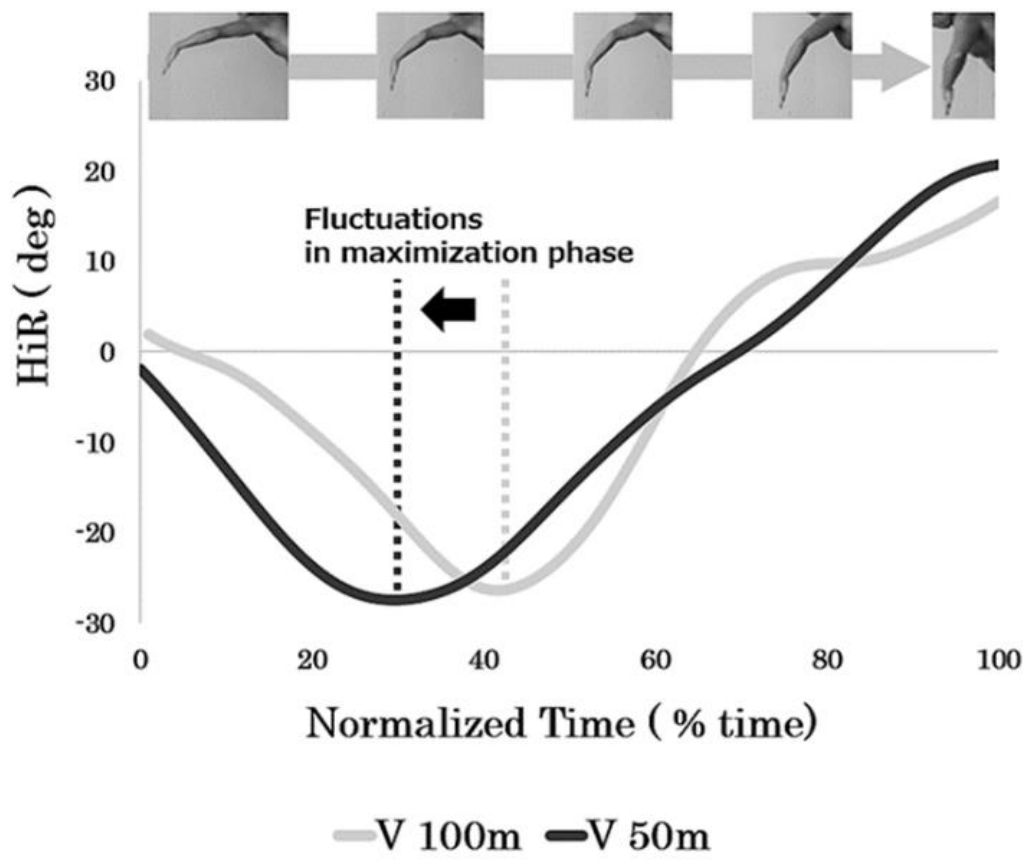


Fig. 14. Peak HiR of normalized time.

3.3.4 泳速度の変化による個人内変化率の比較

Table 10 には, V100m に対する V50m の TA の変化率と, 各局面における ShRAV と HiRAV の変化率との間の相関係数が示している. 相関分析の結果, Pull Roll 局面において肩と腰のローテーション角速度の変化率との, TA に間に有意な相関は確認されなかった. しかしながら, Pull Roll Back 局面においては, TA と ShRAV の変化率の間に中程度の相関 ($r = 0.575$, $p < 0.05$) が観察された. Push 局面では, TA と ShRAV の変化率の間に強い相関 ($r = 0.722$, $p < 0.01$) が確認され, 同様に TA と HiRAV の変化率の間にも強い相関 ($r = 0.748$, $p < 0.01$) が見られた.

高橋ほか (2018) [75]は, 体幹捻転動作に関して, 体幹捻転動作の主動筋である外腹斜筋や広背筋の活動が増加することで, 肩のモーメントが増大することを報告している. また, 比留間ほか (2010) [76]は, 体幹捻転動作が体幹筋群の伸長 - 短縮サイクル (Stretch Shortening Cycle) 運動を伴うことで, ShR がピークを迎えた後のひねり戻しの ShRAV の向上に寄与していることを示している. 本研究でも, TA の変化率と ShRAV のひねり戻し局面である Pull Roll Back 局面と Push 局面の変化率との間の強い相関が確認されたことから, 先行研究と同様の結果が得られたと考えられる. この結果から, 短距離クロール泳中の TA の増加が, 体幹筋群の伸長 - 短縮サイクル (Stretch Shortening Cycle) 運動を引き起こし, ShR がピークを迎えた後のひねり戻し局面の ShRAV の変化に影響していることが示唆される. Kudo et al. (2017) [54]および Koga et al. (2020) [72]は, Push 局面の肩の角速度の上昇が, Push 局面の推進力の向上に関連していることを報告している. これらの結果から, TA の増加が角速度の上昇を促進し, 推進力の向上に寄与する可能性が示された. 今後の研究では, 上肢のリカバリー動作を含む体幹のローテーション動作の発生要因や, 体幹筋群との関連について詳細に調査する必要があると推察される.

Table 10. Correlation coefficients between the percent change in TA at V50 m relative to V100 m and the percent change in ShRAV and HiRAV for each phase.

Variables		Rate of Change (%)	Correlation Coefficient (r) vs TA
TA		110.9	
ShRAV	Pull Roll	92.7	.080
	Pull Roll Back	99.7	.575 *
	Push	105.7	.722 **
HiRAV	Pull Roll	97.6	-.317
	Pull Roll Back	97.7	.117
	Push	104.3	.748 **

Significant difference between conditions. * p<0.05, ** p<0.01

3.4 結言

3.4.1 現場への示唆

本研究の結果、V50 m 試技は V100 m 試技と比較して、ShR において有意に低い値を示すことが確認され、泳速度と肩のローテーション動作との関連が明らかとなった。加えて、ShR 及び HiR のピークタイミングを検討した結果、V50 m 試技における肩と腰のローテーション動作の時間差がより顕著であったことが示された (Fig. 13)。Welch et al. (1995) [61] の報告によれば、体幹のローテーション動作は、肩のローテーションが開始される前に腰のローテーションが先行して行われることで、主動筋の活動が増強され、体幹筋群の伸長 - 短縮サイクル (SSC) 運動が効果的に行われるとされている。この動作は、肩のローテーションにおけるモーメントの増大と角速度の増加に寄与すると考えられる。Andersen et al. (2019) [62] も、泳速度の増加に伴い、内腹斜筋の活動が増強することを確認しており、この筋活動はローテーション角度がピークを迎えた後、逆方向へのローテーション動作をサポートするとされている。これは、SSC 運動の短縮局面において内腹斜筋が収縮し、ローテーション動作の角速度に寄与していることを示唆している。本研究においても、V50 m 試技では、肩のローテーション動作よりも先に腰のローテーション動作が開始されることが確認された。この時間差は、体幹の捻り動作を介して SSC 運動が効果的に発揮されていることを示している。Kudo et al. (2017) [54] の研究によれば、肩のローテーション角速度は、Push 局面の手部の鉛直方向の速度に影響を与え、推進力に寄与するとされている。本研究においても、Push 局面における肩のローテーション角速度は、V50 m 試技で有意に高かった。しかしながら、Yanai (2001) [63] は、水中でのローテーション動作の発生には、流体力や浮力が影響を及ぼす可能性があるとは指摘している。このことから、肩のローテーション角度が大きくなることで、浮力が増加し、流体力によるローテーション動作への影響が強まることが考えられる。本研究では、高い泳速度の条件下で、肩のローテーション角度が有意に低かったにも関わらず、Push 局面の角速度は有意に高かった。これは、浮力以外の要因、例えば身体の動作が、Push 局面の肩のローテーション角速度の増加に寄与していることを示唆している。その結果、手部の鉛直方向の速度に影響を与え、推進力に寄与すると考えられる。しかし、泳者がどのように流体力や浮力を調整し、ローテーション動作を行っているのかは明確でない。今後の研究では、体幹部の筋活動とローテーション動作の関係を詳細に調査し、ローテーション動作と推進力の関係を明らかにすることが必要である。これらの結果から、肩と腰のローテーション動作の時間差を考慮することは、手部推進力の向上に寄与する可能性があると考えられる。したがって、短距離クロール泳を専門とする選手のトレーニングにおいて、体幹筋群の SSC 運動を活用したトレーニングの導入が必要であると提案される。

さらに、短距離クロール泳における選手は、高い泳動作を追求する中で、体幹の捻転角度の増加が確認された。この動作は、主動筋である外腹斜筋や広背筋の活動増強により、

体幹筋群の伸長 - 短縮サイクル (Stretch Shortening Cycle) 運動が促進されることを示唆している。このメカニズムは、肩のモーメントの増大やローテーション角速度の向上に寄与すると推察される。従来、クロール泳においては、抵抗の最小化を目的として全面投影面積の縮小が重視され、体幹筋のトレーニングは、アイソメトリックトレーニングなどの安定性を中心とした方法が主流であった。しかしながら、短距離クロール泳においては、ストローク頻度の増加がパフォーマンスの向上に不可欠であると指摘されており、特に ShRAV の増加が重要視されている (Kudo et al., 2017^[54]; Koga et al., 2020^[72])。この背景から、体幹の捻転動作をサポートする主要筋、特に外腹斜筋や広背筋のトレーニングの重要性が強調される。指導者は、筋収縮のみならず、ひねり戻しの角速度を最大化するための弛緩と収縮を組み合わせたトレーニングの導入を検討することで、短距離クロール泳における泳速度向上に寄与すると考えられる。

3.4.2 結論

本研究は、短距離クロール泳の距離特性に基づく泳速度と、肩および腰のローテーション動作との関連性を明らかにすることを目的とした。V50 m 試技及び V100 m 試技の2つの試技における動作解析の結果、V50 m 試技では ShR が有意に低い値を示す一方で、HiR については有意な差異は認められなかった。しかしながら、HiR のピークタイミングに関しては、V50 m 試技においてより早期にピークを迎えることが確認された。これらの結果を基に、50 m 自由形と 100 m 自由形の短距離クロール泳における異なる泳速度により、ShR と HiR のピークタイミングが変化し、それが肩と腰のローテーション動作の同期性に影響を及ぼしている可能性が示唆された。また、体幹捻転角度に関しては、高速な泳動作を追求する中で、体幹の捻転角度の増加が確認された。そのため、今後の研究では、上肢のリカバリー動作を含む体幹のローテーション動作の発生要因や、体幹筋群との関連についても詳細に調査する必要があることが考えられる。

第4章 クロール泳における体幹筋活動量の解明

4.1 緒言

クロール泳技術における速度変動は、ストロークの長さよりも、ストロークの頻度の変動との相関が高いことが確認されている(生田ほか, 1999^[77])。この結果を基に、泳ぎの速度はストロークの頻度によって主に調整されていると推察される。クロール泳技術においては、上肢の動きに連動して体幹の回転、すなわち「体幹ローテーション」が行われる。この体幹ローテーションは、手の移動速度や方向性に影響を及ぼすことが以前の研究で明らかにされている(Payton et al., 2002^[32])。さらに、手の移動速度の増加は泳ぎの速度との強い関連性があることが示されている(Tsunokawa et al., 2019^[68])。これらの研究結果から、クロール泳技術における手の推進力はパフォーマンス向上において重要であり、体幹のローテーション動作がより速い泳動作を獲得するために必要であることが示唆されている(兵頭ほか, 2021^[40])。

クロール泳技術では、上肢と下肢が左右非対称に動作するため、体幹筋群は連続的な伸縮動作を伴う。この特性は、野球のバッティングやバレーボールのスパイクなどのスポーツ動作にも見られ、ローテーション角速度に影響を及ぼすことが以前の研究で確認されている(和田ほか, 2003^[73])。森山ほか(2016)^[78]によれば、クロール泳技術では上肢と下肢を交互に動かすため、パフォーマンス向上のためには体幹筋群の収縮制御が不可欠であるとされている。体幹筋群には、姿勢維持や安定化のために持続的な低強度の収縮が必要とされる筋が存在し、その機能は筋部位によって異なることが知られている(加藤ほか, 1998^[79])。クロール泳技術においては、水中の支点のない環境と体幹のローテーション動作が複合的に作用するため、陸上運動とは異なる筋活動が要求されると考えられる。表面筋電図(EMG)は筋活動を非侵襲的に計測する手法であり、筋電位の計測により筋収縮や弛緩の動態を評価することが可能である。この技術を活用して、クロール泳技術中の体幹の動作や筋活動の解析を行うことで、推進力向上に関する新たな知見が得られると予測される。しかしながら、クロール泳技術に関するEMG研究は存在するものの、短距離クロール泳技術における体幹筋群の動態に特化した研究はまだ少ない(Rouard et al., 1990^[80]; Caty et al., 2007^[81])。

従って、本研究の目的は、短距離クロール泳中の速度変動に伴う体幹筋の筋活動量を非侵襲的に解析し、体幹の捻転動作への影響を詳細に明らかにすることである。

4.2 方法論

4.2.1 対象者

本研究には7名の参加者が含まれる(Table. 11)。参加者の平均年齢は 19.3 ± 1.0 歳、平

均身長は 173.1 ± 7.5 cm, 平均体重は 68.1 ± 5.7 kg となっている。これらの参加者は週に 6 日間のトレーニングを行っており, また, 各参加者は全国大会への出場経験を有している。

実験への参加に関する同意手続きにおいて, 参加者が未成年である場合には, 保護者の自由意志に基づく明示的な同意を事前を取得した。この同意はいつでも撤回可能であり, その撤回に際して参加者に何ら不利益が生じることはない, 実験実施日前に確認した。さらに, 研究過程で収集される個人情報に関しては, 情報の漏洩や滅失を防ぐための適切な管理措置を講じることを明言した。これらの手続きと説明を踏まえ, 参加者から研究の目的および手法に関する同意を得た。

Table 11. Physical characteristics performance level of subjects.

Subject	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Best Record of 50 m FreeStyle (s")	Best Record of 100 m FreeStyle (s")
A	20	189.0	80.0	22"71	51"32
B	18	172.0	65.0	23"23	50"13
C	18	177.0	69.0	24"32	54"20
D	19	164.0	60.0	24"01	55"90
E	19	170.0	65.0	24"10	52"12
F	21	172.0	70.0	23"75	51"93
G	20	168.0	68.0	24"64	52"32
mean	19.3	173.1	68.1	23"82	52"56
SD	1.0	7.5	5.7	0.61	1.77

4.2.2 実験プロトコル

実験中の泳速度は、参加者の 50 m および 100 m 自由形の最高記録（ベストタイム）を基準に計算された。スタート動作の飛び込みの影響を排除する目的で、スタートの合図から 15 m 地点までの区間をスタート局面として定義し、この局面を除外した部分の平均泳速度を設定泳速度とした。参加者は十分なウォームアップの後、初めに 100 m 自由形の平均泳速度試験（以下「V_100m」と称する）を、続いて 50 m 自由形の平均泳速度試験（以下「V_50m」と称する）をそれぞれ 10 秒間行った。泳速度の一貫性を確保するため、プールの底にマーカを設置し、参加者に計測区間内のみで泳ぐよう指示した。また、参加者は競技時と同様の 6 ビートキックを採用し、呼吸によるストロークへの影響を最小限に抑えるため、呼吸を控えて試験を実施した。各試験の設定平均泳速度は、V_100m で 1.82m/s、V_50m で 1.94m/s であった。

4.2.3 環境設定

実験は、専用の回流水槽を使用して行われた (Fig. 15)。当該回流水槽は、インペラによる流速の生成により、連続かつ長期間にわたる流れ場の確立が可能であり、これにより安定した流速環境を構築することができる。この特性に基づき、第 3 章で紹介されたものと同じの回流水槽が採用された。筋活動は表面筋電図 (EMG) を用いて、サンプリング周波数 1000Hz で計測した。3 次元動作分析のため、参加者を中心としてモーションキャプチャシステム (VENUS 3D, Nobby Tech Inc) のカメラを水槽の周囲に合計 24 台配置した。水中動作の計測を目的として、左右に 5 台ずつ、下部に 8 台のカメラを設置し、水上動作の撮影のために水槽上部に 6 台のカメラを配置した。キャリブレーションボリューム内の LED マーカの実際の座標値を取得した。撮影はサンプリング周波数 200 Hz で行われ、ガラス面による屈折を考慮して、カメラの光軸はガラス面に垂直に設置された。

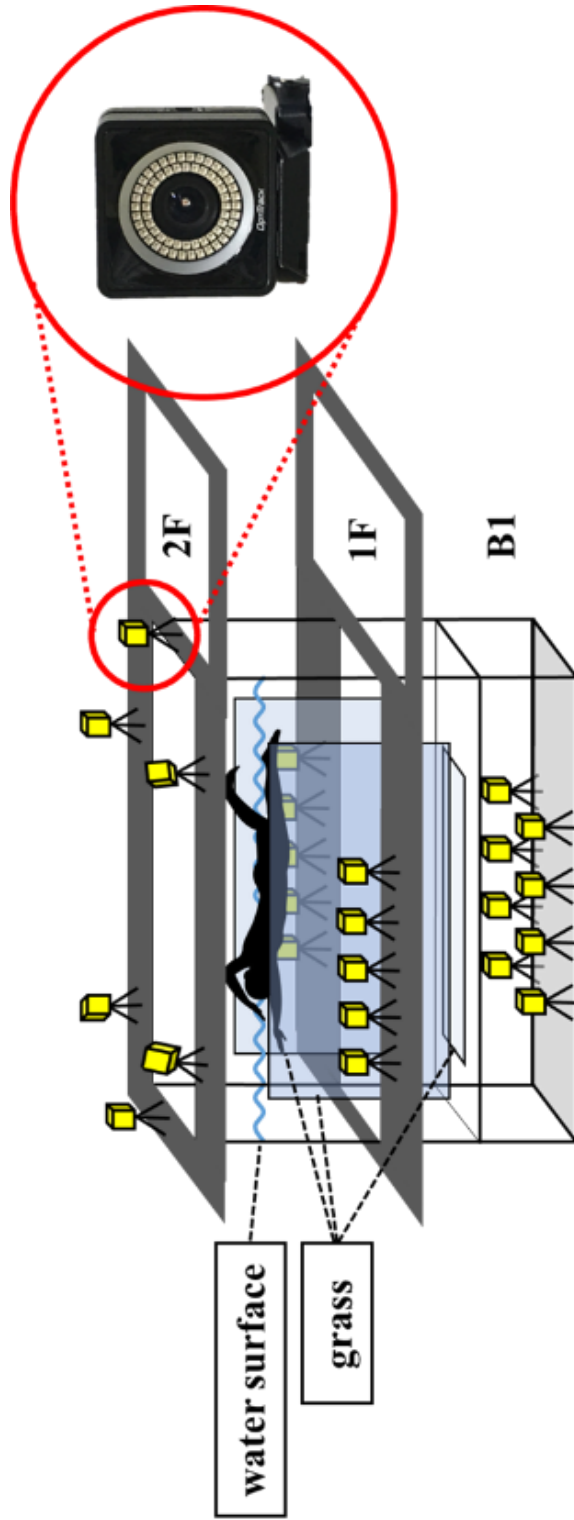


Fig. 15. Experimental setup.

4.2.4 身体マーカ・表面筋電図電極貼付位置

被参加者の身体には、自発光 LED マーカを 11 箇所に取り付けた (Fig. 16). 各局面の定義は第 3 章と同様に、泳者の相対座標系ではなく、絶対座標系に基づいて行われた。ストロークの 1 周期は以下の 4 つの局面に区分される。

Glide 局面：第 5 中手骨の Z 座標が水面より下方（マイナス）となる時点（入水点）から、手部が水中で進行方向と逆向きに移動を開始するまでの期間であり、手部が水面付近の水中で静止している局面と定義する。

Pull 局面：手部が水面付近の水中で静止している局面である **Glide 局面**が終了し、第 5 中手骨の Y 座標が肩峰の Y 座標の真下に達するまでの間において、主に手部が後方に移動し始め、プールの底方向に移動する局面と定義する。

Push 局面：第 5 中手骨の Y 座標が肩峰の Y 座標の真下に到達した後、主に手部が後方に移動しつつ、水面側に移動する局面であり、最終的に第 5 中手骨の Z 座標が水面より上方（プラス）となる時点（出水点）までの期間と定義する。

Recovery 局面：第 5 中手骨の Z 座標が水面より上方（プラス）となる時点（出水点）である **Push 局面**の終了から、第 5 中手骨の Z 座標が水面より下方（マイナス）となる時点（入水点）である **Glide 局面**の開始までの期間と定義する。

上記の 4 つの局面 (**Glide 局面**, **Pull 局面**, **Push 局面**, **Recovery 局面**) を手部ストロークの 1 周期とし、局面毎に分析を行った (Fig. 17)。

ローテーションの最大角度 (MRA) は「肩・腰・捻転」のそれぞれに関して計算された (Fig. 18)。推進力が生じる局面、すなわち **Propulsion Phase** 中に、体幹の捻転角度が最大になるまでの局面を **Roll Phase (RP)** として、捻転角度が最大となった後の局面を **Roll Back Phase (RBP)** として定義した。全参加者が右利きであったため、右腕の動作に焦点を当てて解析を進めた。

計測対象となった筋肉は、脊柱起立筋、広背筋、および腹斜筋で、これらを身体の左右に配置し、合計 6 筋として計測を行った (Fig. 16)。貼付位置は事前に、筋の長さを考慮し対象者毎に決定し、皮膚の角質層を医療用スキンケアクリーム (YZ-0019, 日本光電, 日本) を付着させた綿棒を用いて、角質を除去した後に電極を貼付した (Fig. 19)。EMG 電極の水漏れは波形に影響を及ぼす可能性があるため、防水性の医療用ドレッシングテープ (テガダームスームスフィルムロール, テガダーム™, 日本) を使用して防水対策を施した。

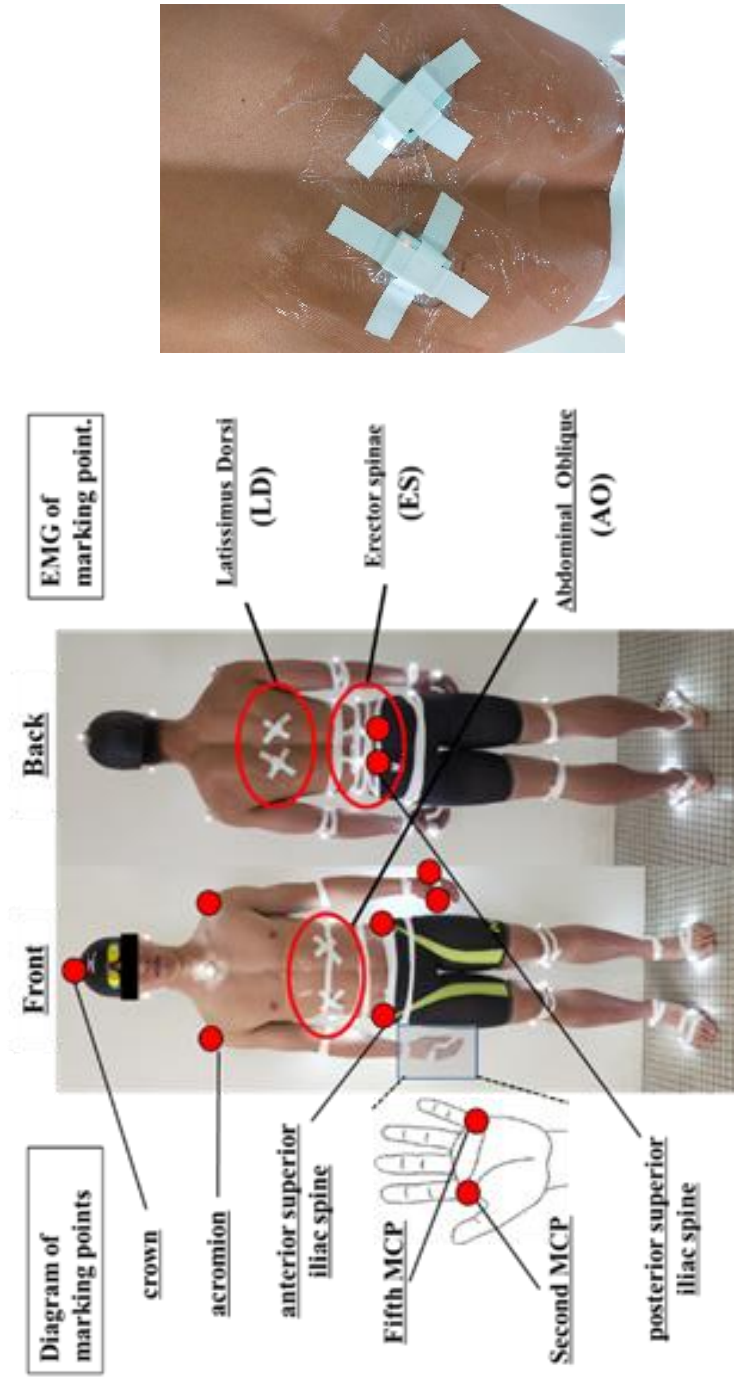


Fig. 16. EMG and Diagram of marking point.

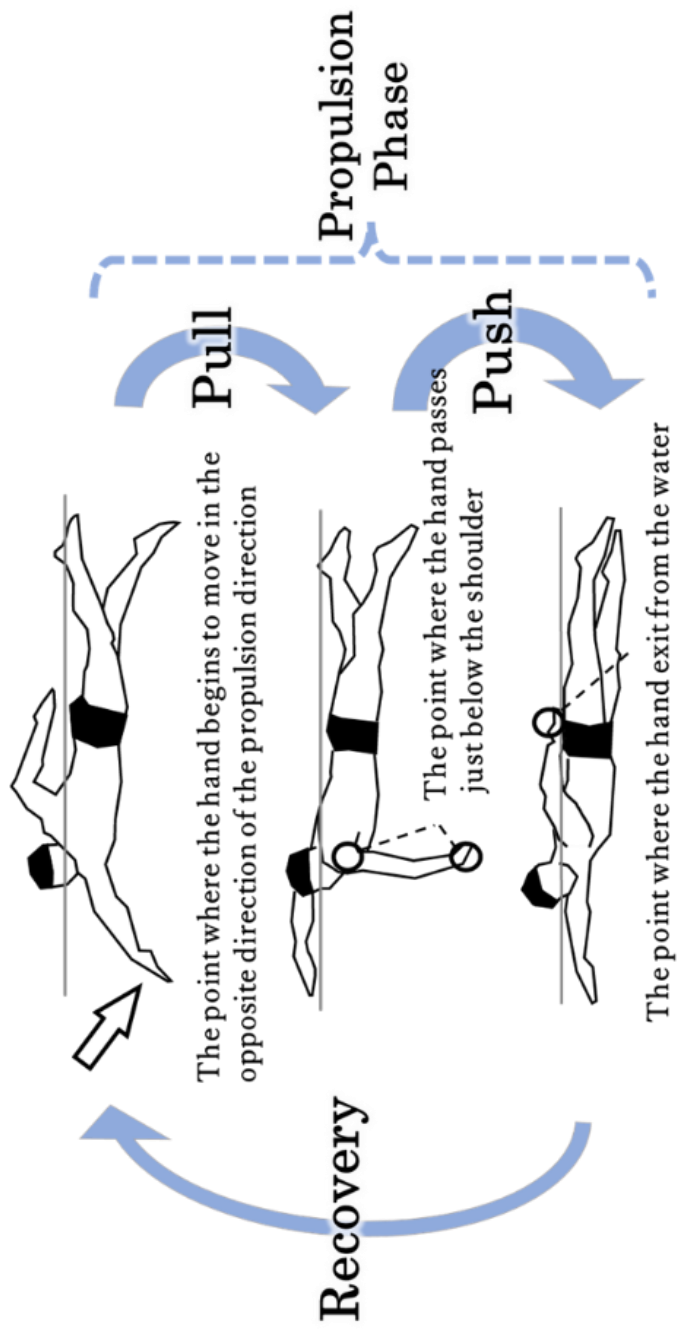


Fig. 17. Phase Division of Upper Limb Stroke.

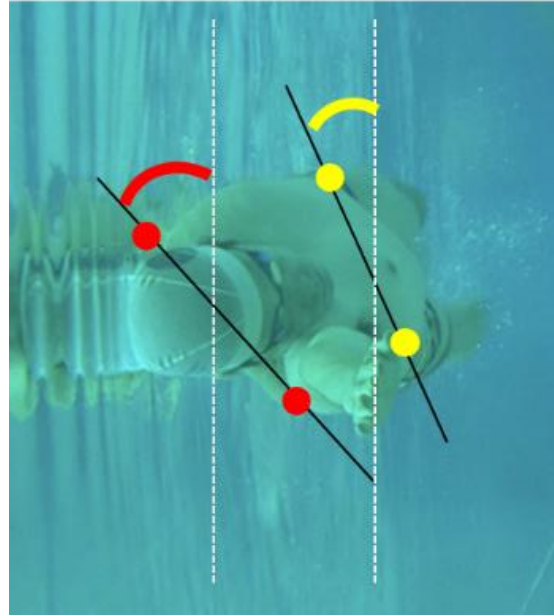


Fig. 18. Definition of each rotation angle.



Fig. 19. Removes the stratum corneum of the skin.



Fig. 20. Manual muscle testing.

4.2.5 筋活動量の解析

計測対象となった筋肉は、脊柱起立筋、広背筋、および腹斜筋で、合計6筋として計測を行った (Fig. 16)。取得されたデータは、アーチファクトの除去を目的として、バンドパスフィルター (通過周波数帯: 20-500Hz) を適用してフィルタリングを実施した。表面筋電図のデータは RMS 波形に変換され、筋活動の期間は、事前に実施された徒手筋力測定による各筋の最大値 (mvc) で正規化され、その結果を %mvcRMS として示された (Fig. 20)。さらに、%mvcRMS が 30%以上の値を示す筋活動の期間を「Active phase」として特定した。

4.3 解析結果

Table 12 には、各試験における Swimming Velocity, Stroke Time, 肩と腰のローテーション角度、ならびに体幹部の捻転角度を示す。Table 13 では、各試技の Active phase を RP および RBP の局面ごとに分類して示す。Table 14 には、肩と腰のローテーション角度が最大となるまでの各局面の相対的な時間が示されている。

Table 12. Comparison of mean of each variable between trials.

	Swimming velocity (m/s)	Stroke Time (s)	Shoulder roll MRA (degree)	Hip roll MRA (degree)	Trunk twist MRA (degree)
V_50m	1.94	0.99	50.06	26.75	30.97
V_100m	1.82	1.09	51.10	28.48	27.92
	** *	** *			*

* p<0.05, ** p<0.01

Table 13. Comparison of Active phase (%) between trials at peak trunk twist angle RP and RBP.

Active phase (%)	ES (R)		ES (L)		AO (R)		AO (L)		LD (R)		LD (L)	
	RP	RBP	RP	RBP	RP	RBP	RP	RBP	RP	RBP	RP	RBP
Trunk twist peak	15.03	17.11	11.27	31.94	21.76	26.44	20.18	18.12	21.17	31.08	11.12	6.14
V_50m	19.21	16.04	13.53	17.70	10.18	31.88	17.44	11.66	21.46	22.66	14.58	11.86

*p<0.05, **p<0.01

Table 14. Relative time until shoulder roll MRA and hip roll MRA reach their maximum values.

	Shoulder roll peak time (%)	Hip roll peak time (%)
V_50m	28.26	21.09
V_100m	28.59	27.20 *

* p<0.05, ** p<0.01

4.3.1 泳速度と筋活動の関係

試験間における体幹捻転角度には有意な差異が観察された。この結果は、先行研究の成果と一致している (Hyodo et al., 2023^[82])。しかしながら、Yanai (2003)^[50]は泳速度の増加とともに、肩のローテーション角度が減少することを指摘している。本研究での設定泳速度は 1.84m/s から 1.94m/s と、Yanai (2003)^[50]の研究に比べて高速な泳速度での試験が行われた。この泳速度の差は、200m から 400m の中距離種目と 50m から 100m の短距離種目の間の差として解釈できる。従って、短距離クロール泳においても、泳速度に応じて異なるローテーション角度で泳ぐ可能性が考えられる。ローテーション角度の変動は、手の移動方向や速度に影響を及ぼす可能性があるとされている (Payton et al., 2002^[32])。今後は、手の推進力と体幹のローテーション動作を総合的に検討することが求められる。また、ローテーション角度に試験間での有意差が認められず、ストロークタイムが短縮されていることから、高い泳速度においては、ストローク全体のローテーション角速度が増加していると推察される。しかしながら、本研究では水中と空中の境界において、肩と腰の LED マーカの追跡精度が不十分であったため、ストローク全体の詳細なローテーション角速度の計測は行えなかった。

筋放電量に関しては、左側の ES (脊柱起立筋) の RBP 局面において、V_50m 試験が有意に高い Active Phase (%) 値を示したことが確認された。また、右側の AO (腹斜筋) の RP 局面で、V_50m 試験が有意に高い Active Phase (%) 値を示した。これらの結果から、クロール泳における高速な泳速度では、体幹の捻転角度が最大となるまでの局面で、ストローク側の AO (腹斜筋) が活発に動作し、捻転角度の低下を促進していると解釈される。さらに、捻転角度が最大となった後の局面では、ストロークの反対側である左側の ES (脊柱起立筋) が活動し、切り返し時の体幹の安定を強化し、ローテーション角速度の増加に貢献していると推察される。

4.3.2 筋活動と泳動作のタイミング

肩と腰のローテーション動作が最大となるタイミングを、局面の相対時間に基づき検討した。その結果、V_50m 試験において、腰のローテーション動作の相対時間が有意に短縮し、切り返しのタイミングが早まることが明らかとなった。この結果は、先行研究の成果と一致している (Hyodo et al., 2023^[82])。高速な泳速度において、体幹捻転角度が増加し、RP 局面においてストローク側の右側の AO (腹斜筋) の活動が強化されていた。さらに、V_50m 試験では、泳速度の増加に伴い、ストロークタイムが短縮され、上肢ストローク動作の影響で、肩のローテーション動作が手の移動速度の増加と連動して強化されると考察される。これを基に、V_50m 試験においては、高速な泳速度でも肩のローテーション角度を維持するために AO (腹斜筋) を活用し、続けて ES (脊柱起立筋) を活動させて腰のローテーション動作の切り返しを促進することで、肩と腰のローテーション動作の角度差が

生じ、体幹捻転角度が増加すると推察される。

4.4 結言

本研究において、試技間での体幹捻転角度における有意な差異が検出された。高い泳速度において、体幹のローテーション角度及び筋活動量に顕著な変化が観察された。V_50m試験においては、泳速度の増加とともに、肩のローテーション動作への影響が増大し、特定の筋群の活動パターンに変化が示唆された。これらの結果を基に、泳速度や筋活動の変動に伴い、体幹のローテーション動作や角度に変化が生じることが確認された。今後の研究課題として、これらの要因が泳ぎの効率性や動作メカニズムにどのように影響を及ぼすのかを詳細に検討し、短距離クロールにおける体幹トレーニングの方法論の確立や新たな泳技術の開発への寄与が期待される。

第5章 結論

本研究の主な目的は、水中運動における生体力学的要因を詳細に解析し、水中環境下での工学的解析手法を確立することである。特に、競泳競技における工学的運動計測・評価と競技力の関連性を明確にすることを目指した。

第2章では、キックスタート時の上肢動作が離台時の身体移動速度に及ぼす影響を、3次元動作解析を用いて詳細に調査した。従来の方法論を採用し、プール環境下での身体速度と関節角度のデータを正確に取得することに成功した。この研究方法は、水面付近でのプール環境下でのキックスタート動作分析に有効であることが示された。本研究では、これまでの実験とは異なり、実験環境の照度をコントロールすることでモーションキャプチャシステムを用いた動作計測で、計測誤差の少ないデータ取得を可能にした。このことは、競技環境において水面の反射があるオープンウォータースイミング、アーティスティックスイミング、飛込、水球などの他競技においても活用できる汎用性の高い結果であると考えられる。さらには、スポーツだけでなく水辺環境で発生する水落事故や、地面の凍結などによる転倒事故などの防止を目的とした、動作解析においても活用できる可能性を秘めており、水との関りが深い日本においては、今回の方法論の確立は大変重要な研究である。動作解析の結果としては、キックスタート時の上肢動作がスタート台からの蹴り出しと姿勢維持に寄与し、これが全体のパフォーマンス、特に離台時の速度（TPV）に影響を与える可能性が示唆された。以前の研究では、TPVが泳速度と高い相関を示すことが明らかにされており、これは競泳パフォーマンスに直接影響する可能性が示唆された。

第3章では、第2章での研究と同様に、モーションキャプチャカメラを用いた動作解析を行った。第2章との方法論上の違いは、対象の動作が水中であった点であり、第3章ではクロール泳中の水中での手部動作と体幹部の動作に焦点を当てた。本研究では、実験用の回流水槽を使用し、対象者の周囲に合計22台のモーションキャプチャカメラを配置した。これにより、これまで詳細なデータ収集が困難であった水中動作解析を試みた。第2章と同様に、実験室内の照度をコントロールすることで、計測誤差を0.5mm以下に抑え、水中動作解析においても高い解析精度を確保できることを確認した。しかしながら、対象者とモーションキャプチャカメラとの間にガラス面を挟む必要があり、カメラのレンズ方向とガラス面は垂直に配置する必要があることが明らかになった。また、2台以上のカメラからマーカを撮影する必要があり、モーションキャプチャカメラの配置には細心の注意が必要であることも明らかになった。本研究では、動作の変位を正確に反映するために、計測誤差を0.5mm以下に抑えることを目指し、実験方法の確立を実施し、このことにより、他のガラス面を挟むようなモーションキャプチャカメラも用いた実験においても、正確な計測が可能であることが示され、動作解析における汎用性の高い結果が得られた。動作解

析の結果からは、スタート動作に続く水中動作において、短距離クロール泳における泳速度と肩および腰のローテーション動作との関連性を探求した。具体的には、50m と 100m のクロール泳速度の試技において、泳ぎの動作を3次元動作解析し、これらの距離での泳速度差が肩 (ShR) と腰 (HiR) のローテーション動作にどのように影響するかを調査した。V50m 試技では、肩のローテーション (ShR) が有意に低い値を示したが、腰のローテーション (HiR) には有意な差異が見られなかった。しかし、HiR のピークタイミングは、V50m 試技でより早期に発生することが確認された。これらの発見に基づき、短距離クロール泳において、50m と 100m の試技での泳速度が肩と腰のローテーションタイミングに影響を与えることが示唆された。この結果は、特定の距離の泳速度において、肩と腰のローテーション動作の同期性が競泳パフォーマンスに重要であることを示している。さらに短距離クロール泳では、高速な泳動作を追求する中で、体幹の捻転角度の増加が確認された。この動作は、主動筋である外腹斜筋や広背筋の活動増強により、体幹筋群の伸長 - 短縮サイクル (Stretch Shortening Cycle) 運動が促進されることを示唆している。このメカニズムは、肩のモーメントの増大やローテーション角速度の向上に寄与すると考えられる。したがって、競泳選手は体幹捻転動作をサポートする主要筋のトレーニングの重要性が強調される。

第4章では、第3章で行った水中でのクロール泳の動作解析に加えて、筋電図計 (EMG) を用いて水中での筋活動を同時に計測した。本研究では、従来の動作解析手法に加えて、表面筋電計を防水処理し、水中での使用を可能にした。防水処理には、両面テープ、医療用の防水処理テープ、医療用のテーピングを使用した。特に体幹部の場合、上肢や下肢と比較して伸長運動や捻転運動が大きく、筋電計の貼り方や関節の可動を妨げないように細心の注意が必要であった。しかし、これらの工夫により、これまでに計測されなかった体幹部の筋活動を計測することが可能となった。動作解析では、より高速な泳ぎの際に体幹のローテーション角度と筋活動量に顕著な変化が認められた。V_50m 試技においては、泳速度の増加とともに、肩のローテーション動作への影響が増大し、特定の筋群の活動パターンに変化が示唆された。特に腹斜筋と脊柱起立筋で泳速度の変化により顕著な変化が認められた。そのため、泳速度や筋活動の変動に伴い、体幹のローテーション動作や角度に変化が生じることが確認され、泳速度の向上を目的としたクロール泳におけるトレーニングには、腹斜筋の伸長 - 短縮と脊柱起立筋の短縮 - 伸長を伴うトレーニングが推奨された。今後の研究課題として、これらの要因が泳ぎの効率性や動作メカニズムにどのように影響を及ぼすのかを詳細に検討し、短距離クロール泳における体幹トレーニングの方法論の確立や新たな泳技術の開発への寄与が期待される。さらに、本研究では、これまでにない詳細さと高い精度を備えたデータ及び情報、実験設定を用いたことにより、機械学習技術を活用して水中運動に関する人体モデルの構築に貢献できるデータの収集が可能となった。これにより、人体計測が難しい水難事故や、人が抵抗することができない流水環境下でのシミュレーションを可能とする学習データの収集に貢献する可能が考えられる。この

ような研究を進めるには、さらに多くの水中環境での身体動作に関するデータが必要であり、効率的な実験実施が今後の研究の課題である。

本研究では、主にクロール泳に焦点をあてた研究であるため、オリンピックで実施されるその他の泳法については実施していない。本研究での方法論と研究成果を生かし、その他種目も定量化することで、競泳競技全体の競技力向上に貢献することが期待できる。

参考文献

- [1] Jones, A. K., Yan, C. L., Rivera Rodriguez, B. P., Kaur, S., & Andrade-Bucknor, S. (2023). Role of wearable devices in cardiac telerehabilitation: A scoping review. *PloS one*, 18(5), e0285801.
- [2] Bashkirtsev, O., Gaevska, V., Bilous, Z., Lysa, L., & Zimba, O. (2023). Remote Monitoring for 5P (Predictive, Preventive, Participatory, Personalized, and Precision) cardiovascular medicine: Progress Amidst COVID-19 Pandemic. *Proceeding of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences*, 71(1).
- [3] Minocha, S., Tudor, A. D., Banks, D., Holland, C., McNulty, C., Ail, R., ... & Bowering, S. (2018). Role of digital health wearables in the wellbeing and quality of life of older people and carers.
- [4] Troiani, T., Napolitano, S., Terminiello, M., Vitiello, P. P., Ciardiello, F., Martinelli, E., ... & Romanelli, L. (2022). Enabling smart environment for monitoring cancer patients therapy through OncoSmart. *Journal of Smart Environments and Green Computing*, 1(4), 189-201.
- [5] Horvath, S. (2013). DNA methylation age of human tissues and cell types. *Genome biology*, 14(10), 1-20.
- [6] Buenrostro, J. D., Giresi, P. G., Zaba, L. C., Chang, H. Y., & Greenleaf, W. J. (2013). Transposition of native chromatin for fast and sensitive epigenomic profiling of open chromatin, DNA-binding proteins and nucleosome position. *Nature methods*, 10(12), 1213-1218.
- [7] Biswal, B., Zerrin Yetkin, F., Haughton, V. M., & Hyde, J. S. (1995). Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magnetic resonance in medicine*, 34(4), 537-541.
- [8] Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., ... & Joliot, M. (2002). Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *Neuroimage*, 15(1), 273-289.
- [9] Desikan, R. S., Ségonne, F., Fischl, B., Quinn, B. T., Dickerson, B. C., Blacker, D., ... & Killiany, R. J. (2006). An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest. *Neuroimage*, 31(3), 968-980.
- [10] Maklad, O. M. Y. (2019). Influence of fluid-structure interaction on human eye biomechanics under air puff non-contact tonometry. The University of Liverpool (United Kingdom).
- [11] Thiyagarajah, N., Achey, R., Rashidi, M., & Moore, N. Z. (2022). Computational Fluid–

Structure Interactions in the Human Cerebrovascular System: Part 1—A Review of the Current Understanding of Cerebrovascular Biomechanics. *Journal of Engineering and Science in Medical Diagnostics and Therapy*, 5(3), 030801.

- [12] Yousaf, K., Chen, K., & Khan, M. A. (2020). An introduction of biomimetic system and heat pump technology in food drying industry. In *Biomimetics*. IntechOpen.
- [13] Luo, Y., Wang, C., Huang, L., Ma, J., Xu, K., & Ding, X. (2022, December). Design and Analysis of Underactuated Robotic Hands for Spacecraft Surface Attachment. In *2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 87-92). IEEE.
- [14] 梶山俊仁, 黒川隆志, 古田久, 大江淳悟, 堀健太郎, & 松尾千秋. (2006). ミニサッカーゲームにおける心拍数の推移と推定. *コーチング学研究*, 19(1), 21-30.
- [15] 小山孟志, 藤井慶輔, 陸川章, & 山田洋. (2017). バスケットボールにおける心拍数を用いた高強度運動の評価についての検討. *東海大学スポーツ医科学雑誌*, 29, 7-11.
- [16] Cardinale, M., & Varley, M. C. (2017). Wearable training-monitoring technology: applications, challenges, and opportunities. *International journal of sports physiology and performance*, 12(s2), S2-55.
- [17] 澤田智紀, 大川原洋樹, 中島大輔, & 名倉武雄. (2022). 温冷交代刺激が筋疲労と自律神経活動に及ぼす影響. *デサントスポーツ科学*, 43, 178-187.
- [18] Umam, A. K., & Suherman, W. S. Effect of Small Sided Games Training on Anaerobic Endurance and Fatigue Index in U-17 Soccer Athletes.
- [19] 山本雄平, 田中成典, 中村健二, 姜文淵, & 田中ちひろ. (2017). GPS による戦術分析のためのアメリカンフットボールの可視化システムの開発. In *日本知能情報ファジィ学会 ファジィ システム シンポジウム 講演論文集 第 33 回ファジィシステムシンポジウム* (pp. 297-298). 日本知能情報ファジィ学会.
- [20] 相原伸平, 杉山恵玲奈, 澤田みのり, 松本実, & 伊藤浩志. (2018). 競技スポーツの実践現場における ICT 活用. *電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン*, 12(2), 98-104.
- [21] 湯浅景元, 島野敬四郎, & 藤松博. (1999). 日常生活動作およびスポーツ基本動作の骨格筋活動レベル. *中京大学体育学論叢*, 40(2), 1-8.
- [22] 稲尾拓海, 尾下真樹, 向井智彦, & 栗山繁. (2016). モーションキャプチャを用いたスポーツフォーム練習のための特徴量・可視化手法の検討. *研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)*, 2016(21), 1-7.
- [23] 原藤健吾, 小林秀, 二木康夫, & 名倉武雄. (2019). 3. モーションキャプチャーと画像解析から考えるスポーツサイエンス. *日本臨床スポーツ医学会誌/日本臨床スポーツ医学会編集委員会 編*, 27(3), 418-421.
- [24] Jankaew, A., Jan, Y. K., Hwang, I. S., Kuo, L. C., & Lin, C. F. (2023). Hamstring Muscle

Stiffness Affects Lower Extremity Muscle Recruitment and Landing Forces during Double-Legs Vertical Jump. *Sports Biomechanics*, 1-19.

- [25] Liu, H., Chen, X., Li, Y., Gao, Z., Huang, W., & Jiang, Z. (2023). Neuromuscular control strategies of the lower limb during a typical Tai Chi brush knee and twist step in practitioners with and without knee pain: a pilot study. *Research in Sports Medicine*, 1-16.
- [26] 成田健造, 中島求, 仙石泰雄, 本間三和子, 椿本昇三, & 高木英樹. (2018). 多段階の泳速度におけるクロール泳中の自己推進時抵抗とストリームライン姿勢中の受動抵抗の比較. *体育学研究*, 63(2), 505-515.
- [27] Brožek, J., Grande, F., Anderson, J. T., & Keys, A. (1963). Densitometric analysis of body composition: revision of some quantitative assumptions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 110(1), 113-140.
- [28] Counsilman, J. E. (1968). *The science of swimming*.
- [29] Wakayoshi, K., Ikuta, K., Yoshida, T., Udo, M., Moritani, T., Mutoh, Y., & Miyashita, M. (1992). Determination and validity of critical velocity as an index of swimming performance in the competitive swimmer. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 64(2), 153-157.
- [30] 松井敦典, 南隆尚, & 野村照夫. (2016). 日本の水泳教育における着衣泳の普及と取り扱いに関する論考. *水泳水中運動科学*, 19(1), 8-15.
- [31] 生田泰志・奥野景介・松井健・寺田晶裕・本部洋介・石川昌紀・野村照夫. (1999). 競泳のレース分析-スタート局面の細係 -100m および 200m 自由形のレース分析結果より-. *スポーツ方法学研究*, 12(1), 1-8.
- [32] Payton, C., Baltzopoulos, V., & Bartlett, R. (2002). Contributions of rotations of the trunk and upper extremity to hand velocity during front crawl swimming. *Journal of Applied Biomechanics*, 18(3), 243-256.
- [33] 若吉浩二. (1992). 競泳のレース分析-レース分析とその現場への応用. *バイオメカニズム学会誌*, 16(2), 93-100.
- [34] 生田泰志, 小堀優子, 加藤健志, 原田隆, 重松良祐, & 堀晶代. (1995). 競泳のレース分析-スタート局面の細分化と競技力の関係について. *日本体育学会大会号*, 46, 528.
- [35] 本間正信, 生田泰志, & 宮地力. (1997). 競泳スタートの水中動作の分析. *日本バイオメカニクス学会大会*, 13, 379-384.
- [36] García-Ramos, A., Feriche, B., de la Fuente, B., Argüelles-Cienfuegos, J., Strojnik, V., Strumbelj, B., & Stirn, I. (2015). Relationship between different push-off variables and start performance in experienced swimmers. *European journal of sport science*, 15(8), 687-695.
- [37] 武田剛, 市川浩, 杉本誠二, & 野村武男. (2006). 競泳スタートにおける跳び出し角度の変化が跳び出し速度・飛距離とブロックタイムに与える影響. *体育学研究*, 51(4),

515-524.

- [38] Takeda, T., Sakai, S., Takagi, H., Okuno, K., & Tsubakimoto, S. (2017). Contribution of hand and foot force to take-off velocity for the kick-start in competitive swimming. *Journal of Sports Sciences*, 35(6), 565-571.
- [39] 小椋優作, 春日晃章, 小栗和雄, & 内藤譲. (2015). 競泳キックスタートにおける台上動作と膝関節の等速性伸展・屈曲筋力との関連. *スポーツ健康科学研究*, 37, 13-20.
- [40] 兵頭洋樹, 古賀大樹, 和田匡史, & 仙石泰雄. (2021). 短距離クロール泳における肩・腰ローテーション動作の解明. *体育学研究*, 66, 841-852.
- [41] Sakai, S., Koike, S., Takeda, T., Sengoku, Y., Homma, M., & Takagi, H. (2021). Kinetics of four limb joints during kick-start motion in competitive swimming. *Sports Biomechanics*, 1-19.
- [42] 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の関係. *体育学研究*, 66, 207-218.
- [43] Bobbert, M. F., & van Zandwijk, J. P. (1999). Sensitivity of vertical jumping performance to changes in muscle stimulation onset times. *Biological cybernetics*, 81(2), 101-108.
- [44] 武田剛, 椿本昇三, & 野村武男. (2007). 地面反力から見た競泳スタート台上動作. シンポジウム：ヒューマンダイナミクス 2007, 284-286.
- [45] Takeda, T., Takagi, H., & Tsubakimoto, S. (2012). Effect of inclination and position of new swimming starting block's back plate on track-start performance. *Sports Biomechanics*, 11(3), 370-381.
- [46] 原田脩平, 佐野幸子, & 井上貴裕. (2018). 体組成計による筋肉量・脂肪量の測定報告. *理学療法-臨床・研究・教育*, 25(1), 98-102.
- [47] Hollander, A. P., De Groot, G., van Ingen Schenau, G. J., Toussaint, H. M., De Best, H., Peeters, W., & Schreurs, A. W. (1986). Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. *Journal of sports sciences*, 4(1), 21-30.
- [48] Norris, C. M. (2000). Back stability. *Human Kinetics Publishers*, 55-57.
- [49] Moriyama, S., Ogita, F., Huang, Z., Kurobe, K., Nagira, A., Tanaka, T., & Hirano, Y. (2014). Intra-abdominal pressure during swimming. *International journal of sports medicine*, 35(02), 159-163.
- [50] Yanai, T. (2003). Stroke frequency in front crawl: its mechanical link to the fluid forces required in non-propulsive directions. *Journal of Biomechanics*, 36(1), 53-62.
- [51] Narita, K., Nakashima, M., & Takagi, H. (2017). Developing a methodology for estimating the drag in front-crawl swimming at various velocities. *Journal of biomechanics*, 54, 123-128.
- [52] 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ーの関係. *体育学研究*, 64(1), 385-400.

- [53] Tsunokawa, T., Mankyu, H., Takagi, H., & Ogita, F. (2019). The effect of using paddles on hand propulsive forces and froude efficiency in arm-stroke-only front-crawl swimming at various velocities. *Hum. Movement Sci.*, 64, 378–388.
- [54] Kudo, S., Sakurai, Y., Miwa, T., & Matsuda, Y. (2017). Relationship between shoulder roll and hand propulsion in the front crawl stroke. *Journal of sports sciences*, 35(10), 945-952.
- [55] Psycharakis, S. G., & Sanders, R. H. (2008). Shoulder and hip roll changes during 200-m front crawl swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(12), 2129-2136.
- [56] 生田泰志, 奥野景介, 松井健, 寺田晶裕, 小堀優子, 若吉浩二, & 野村照夫. (1998). 自由形短距離種目における泳速度, ストローク頻度およびストローク長の関係. *日本体育学会大会号*, 第 49 回, 478.
- [57] 古賀大樹, 角川隆明, 仙石泰雄, 本間三和子, & 高木英樹. (2021). クロールにおけるストローク頻度と手部推進力の関係. *体育学研究*, 20123.
- [58] Chollet, D., Chabies, S., & Chatard, J. C. (2000). A new index of coordination for the crawl: description and usefulness. *International journal of sports medicine*, 21(01), 54-59.
- [59] Kennedy, P., Brown, P., Chengalur, S. N., & Nelson, R. C. (1990). Analysis of male and female Olympic swimmers in the 100-meter events. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6(2), 187-197.
- [60] McCabe, C. B., Psycharakis, S., & Sanders, R. (2011). Kinematic differences between front crawl sprint and distance swimmers at sprint pace. *Journal of Sports Sciences*, 29(2), 115-123.
- [61] Welch, C. M., Banks, S. A., Cook, F. F., & Draovitch, P. (1995). Hitting a baseball: A biomechanical description. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 22(5), 193-201.
- [62] Andersen, J. T., Sinclair, P., Fernandes, R., Vilas-Boas, J. P., & Sanders, R. (2019). Do the torso muscles produce torso twist in front crawl? *ISBS Proceedings Archive*, 37(1), 340.
- [63] Yanai, T. (2001). What causes the body to roll in front-crawl swimming? *Journal of Applied Biomechanics*, 17(1), 28-42.
- [64] 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. *Journal of biomechanics*, 76, 197-203.
- [65] Watkins, J., & Gordon, A. T. (1983). The effects of leg action on performance in the sprint front crawl stroke. *International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming*, 14, 310-314.
- [66] 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.
- [67] Gourgoulis, V., Boli, A., Aggeloussis, N., Toubekis, A., Antoniou, P., Kasimatis, P., &

- Mavromatis, G. (2014). The effect of leg kick on sprint front crawl swimming. *Journal of Sports Sciences*, 32(3), 278-289.
- [68] Tsunokawa, T., Mankyu, H., & Ogita, F. (2019). Relationship between swimming velocity and stroke parameters during the front-crawl. *Japan Society of Physical Education, Health and Sport Sciences*, 64(1), 385-400.
- [69] Schleihauf, R. E. (1983). Three-Dimensional Analysis of Hand Propulsion in the Sprint Front Crawl Stroke. *Biomechanics and Medicine in Swimming*, 173-184.
- [70] Grimston, S. K., & Hay, J. G. (1986). Relationships among anthropometric and stroking characteristics of college swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 18(1), 60-68.
- [71] Kudo, S., Vennell, R., & Wilson, B. (2013). The effect of unsteady flow due to acceleration on hydrodynamic forces acting on the hand in swimming. *Journal of Biomechanics*, 46(10), 1697-1704.
- [72] Koga, D., Gonjo, T., Kawai, E., Tsunokawa, T., Sakai, S., Sengoku, Y., & Takagi, H. (2020). Effects of exceeding stroke frequency of maximal effort on hand kinematics and hand propulsive force in front crawl. *Sports Biomechanics*, 1-13.
- [73] 和田尚, 阿江通良, 遠藤俊郎, & 田中幹保. (2003). バレーボールのスパイク動作における体幹のひねりに関するバイオメカニクス的研究. *バレーボール研究*, 5(1), 1-5.
- [74] Hopkins, W., Marshall, S., Batterham, A., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine+ Science in Sports+ Exercise*, 41(1), 3.
- [75] 高橋和孝, 荻山靖, 吉田拓矢, 林陵平, & 浅井武. (2018). 伸張-短縮サイクル運動を伴う体幹捻転エクササイズにおける体幹の力・パワー発揮特性. *体育学研究*, 63(2), 641-657.
- [76] 比留間浩介, & 尾縣貢. (2010). 中学・高校野球選手の伸張-短縮サイクル運動を含むパワー発揮能力と投球スピードとの関係とその発達特性--上肢と体幹に着目して. *Journal of training science for exercise and sport*, 22(3), 205-216.
- [77] 生田泰志, 奥野景介, 松井健, 寺田晶裕, 本部洋介, 石川昌紀, & 野村照夫. (1999). 泳速度のコントロールとストローク頻度の関係—100m および 200m 自由形のレース分析結果より—. *コーチング学研究*, 12(1), 1-8.
- [78] 森山進一郎, 金沢翔一, 北川幸夫, & 柴田義晴. (2016). 競技経験のない一般女子学生のクロール泳における異なる速度による腹腔内圧および体幹筋活動の変化. *体育測定評価研究*, 15, 43-49.
- [79] 加藤浩, 藤野英次郎, 上島隆秀, 城石晴子, 時枝美貴, 高杉紳一郎, & 林和生. (1998). 随意収縮強度別 (% MVC) による表面筋電図周波数特性. *理学療法学*, 25(7),

425-431.

- [80] Rouard, A. H., & Billat, R. P. (1990). Influences of sex and level of performance on freestyle stroke: an electromyography and kinematic study. *International journal of sports medicine*, 11(02), 150-155.
- [81] Caty, V., Aujouannet, Y., Hintzy, F., Bonifazi, M., Clarys, J. P., & Rouard, A. H. (2007). Wrist stabilisation and forearm muscle coactivation during freestyle swimming. *Journal of electromyography and kinesiology*, 17(3), 285-291.
- [82] Hyodo, H., Koga, D., Sengoku, Y., & Wada, T. (2023). Relationship between swimming velocity and trunk twist motion in short-distance crawl swimming. *Biomechanics*, 3(2), 193-203.

研究業績

(学位請求に関わる論文を*で示す)

【学術論文】

- 1) ***兵頭洋樹**, 古賀大樹, 和田匡史, 仙石泰雄: 短距離クロール泳における肩・腰ローテーション動作の解明, 体育学研究, 第66巻, pp841-852, 2021.
- 2) ***兵頭洋樹**, 和田匡史: キックスタート動作の3次元動作分析～上肢動作が離台時の身体に及ぼす影響～, 電気学会論文誌C部門, Vol.143, No.1, pp32-36, 2023.
(**Hiroki Hyodo**, Tadashi Wada: 3D motion analysis of kick start motion – Effects of upper limb movements on the body when leaving the platform –, Electronics and Communications in Japan, Vol.143, No.1, pp32-36, 2023.)
- 3) ***Hiroki Hyodo**, Daiki Koga, Yasuo Sengoku, Tadashi Wada: Relationship between Swimming Velocity and Trunk Twist Motion in Short-Distance Crawl Swimming, Biomechanics, Vol.3, No.2, pp193-203, 2023.
- 4) Toshiro Izumi, **Hiroki Hyodo**, Tsuyoshi Yoshioka, Tadashi Wada: The Influence of Strategic Swimming Pool Facility Placement on Swimming Performance, Journal of Physical Education and Sport, Vol.23, No.7, pp1742-1750, 2023.

【国際会議論文 (査読有)】

- 1) Tadashi Wada, **Hiroki Hyodo**, Hirano Tomoya, Kashiwagi Yu, Shintaku Yuichi, Yamamoto Noriyuki: A possibility to improve the physical fatigue after artificial high concentration CO2 hot water immersion in athletes, 27th Annual Congress of the European College of Sport Science Book of Abstracts, pp551, 2022.
- 2) Tadashi Wada, Yuto Seki, Tomoya Hirano, **Hyodo Hiroki**, Toshiyuki Kurihara, Yu Kashiwagi, Yukinori Shintaku, Yukichika Kawakami, Yosuke Kawakami, Kimio Mashiko, Kuniyasu Mashiko, Noriyuki Yamamoto, Kazuo Funato, Seiji Nishino: Influence of exposure periodic hypobaric normoxia environment on night sleep, 28th Annual Congress of the European College of Sport Science Book of Abstracts, pp1179-1180, 2023.
- 3) ***Hiroki Hyodo**, Ryoko Yamashita, Koga Daiki, Tadashi Wada: Relationship between propulsive force and hip joint motion during eggbeater kick in Artistic Swimming, XXIX Congress of International/Japanese Society of Biomechanics 2023 Program & Abstract

Book, pp903, 2023.

- 4) * Masayuki Umemoto, Yasunori Fujito, Hiroki Hyodo, Natsumi Furuta, Tadashi Wada, Kazuo Funato : Changes in 5-10m elapse time in kick start of a swimming race at different back plate positionings, XXIX Congress of International/Japanese Society of Biomechanics 2023 Program & Abstract Book, pp878, 2023.
- 5) * Hiroki Hyodo, Daiki Koga, Yasuo Sengoku, Tadashi Wada : Relationship between swimming speed and trunk muscle activity in crawl swimming, Biomechanics and Medicine in Swimming 2023 Program, pp3, 2023.
- 6) * Daiki Koga, Hiroki Hyodo, Kenta Homoto, Takaaki Tsunokawa, Yasuo Sengoku, Shigetada Kudo, Hideki Takagi : Comparison of hand fluid force and hand kinematics by stroke phase in sprint front crawl swimming between performance level , Biomechanics and Medicine in Swimming 2023 Program, pp3, 2023.

【国際会議発表】

- 1) * Daiki Koga, Hiroki Hyodo, Yusaku Nakazono, Hideki Takagi, Yasuo Sengoku : Comparison of lower torso, upper torso rolls and hand propulsive force in the national and regional level swimmers, ARIHHP Forum 2022 program. pp8, 2023.
- 2) * Hiroki Hyodo, Daiki Koga, Yasuo Sengoku, Tadashi Wada : Elucidation of Trunk Muscle Activity at Different Swimming Speeds in Crawl Swimming, ARIHHP Forum 2023 program, pp9, 2023.

【国内会議発表および論文（査読有）】

- 1) * 兵頭洋樹, 甫本研太, 古賀大樹, 仙石泰雄 : 短距離クロール泳中の体幹ローテーションが手部速度に及ぼす影響, 日本水泳・水中運動学会大会 2019, pp16-21, 2019.
- 2) * 兵頭洋樹, 和田匡史, 仙石泰雄 : 短距離クロール泳における体幹ローテーションの解明, 日本体育・スポーツ・健康学会大会 第71回大会予稿集, pp358, 2020.
- 3) * 中澤嶺, 兵頭洋樹, 梅本雅之, 和田匡史 : キックスタートにおける上肢動作の有無がスタートパフォーマンスに与える影響, 第35回身体動作学研究会プログラム, pp1, 2022.
- 4) * 兵頭洋樹, 中澤嶺, 梅本雅之, 和田匡史 : 競泳競技におけるキックスタート時の上肢動作が離台時の身体移動速度に及ぼす影響, 第13回東京体育学会大会プログラム, pp15, 2022.
- 5) * 中澤嶺, 兵頭洋樹, 梅本雅之, 和田匡史 : 競泳キックスタートにおける上肢動作の

有無がスタートパフォーマンスに与える影響, 身体動作学研究会誌, Vol.1, No.1, P16-17, 2022.

- 6) 和田匡史, 山下遼子, 渋谷晃樹, 金川彩香, 小俣夏乃, **兵頭洋樹**: アーティスティックスイミング (AS) および水球選手のエッグビーターキックにおける下肢3関節の動作分析, 第14回東京体育学会大会プログラム, pp25, 2023.

【紀要論文】

- 1) 和田匡史, **兵頭洋樹**, 地神裕史, 土居裕和, 山本憲志: 人工炭酸泉入浴が高強度運動後の身体回復を促進する可能性, 国土舘大学理工学部紀要, 第14号, pp159-164, 2021.
- 2) *梅本雅之, 藤戸靖則, 古川なつみ, **兵頭洋樹**, 和田匡史, 船渡和男: 競泳キックスタートにおけるバックプレートの位置の違いがスタートパフォーマンスに与える影響, 国土舘大学体育研究所報, Vol.41, pp55-60, 2022.

【修士論文】

兵頭洋樹: 「短距離クロール泳における体幹のひねり動作と手部速度の関係」

令和元年度 筑波大学大学院人間総合科学研究科体育学専攻

指導教員: 仙石泰雄 准教授

謝辞

この博士論文の完成に至るまで、数多くの方々からの貴重な支援と助言を賜りました。ここに心からの感謝の意を表します。

はじめに、私の研究の指導と成長を導いてくださった和田匡史教授に、深い敬意と感謝を捧げます。和田教授からは、研究環境の整備から学会での発表支援に至るまで、幅広い面で絶え間ない支援と鼓舞を受けました。教授の豊かな知識と見識のもとで、研究者としての視野を大きく広げることができたのは、私にとって計り知れない財産です。

また、この場を借りて、副査を務めていただいた下山好充教授（新潟医療福祉大学健康科学部健康スポーツ学科）、二川佳央教授（国土舘大学大学院工学研究科教授）、大浦邦彦教授（国土舘大学工学研究科教授）に心からの感謝の意を表します。研究の進行において直面した数々の課題に対して、先生が示してくださった洞察力に満ちたアドバイスは、私の研究への理解を深め、より広い視野を持つことができました。また、研究のみならず、学問を追求する姿勢や倫理についても多くを学ばせていただきました。先生のご支援とご鞭撻に深く感謝申し上げます。

理工学部人間情報学系の先生方にも、ご支援と有益な助言を賜り、厚く御礼申し上げます。皆様の叱咤激励が、この研究の質を高める重要な要素となりました。

筑波大学の仙石泰雄准教授には、修士課程からの研究を支えていただき、研究施設や分析手法に関して多大なる支援を頂戴しました。先生の厳しくも献身的なご指導のもと、研究者として、また一人の人間として成長することができたことを、大変嬉しく思います。心からの感謝を申し上げます。

研究室の大学院生である渋谷晃樹さんと金川彩香さんには、研究のアイデアを具現化する過程での貴重な助力と、実験の準備やデータ分析における絶え間ないサポートに対して、心より感謝いたします。

国土舘大学水泳部、筑波大学水泳部、筑波大学水泳研究室の皆様を含む、学内外の多くの研究者と技術スタッフの方々にも、実験への協力や貴重な意見、技術的なサポートに対して、深く感謝いたします。

最後に、家族に最大の感謝を捧げます。父（兵頭一洋）、母（兵頭美貴）は、研究生生活を通じて直面した数々の困難に対して、常に理解と無限の支援を提供してくださいました。家族の愛とサポートがあったからこそ、この長い旅を乗り越えることができました。

この謝辞をもって、私の博士課程を通じて、直接的あるいは間接的に支援してくださった全ての方々への深い感謝の意を表します。

心より感謝申し上げます。

要旨

本研究は、生体工学の手法を駆使し、先端科学技術の躍進を背景に開発された様々なデバイスを活用して、スポーツ科学の領域における貢献を深掘りすることを主眼に置いている。特に、スポーツバイオメカニクスに注目し、運動選手がスポーツ活動に従事する際に示す身体動作や技術の深層にわたる科学的探究を進めている。本研究において、生体計測技術の重要性は、運動選手の生体情報をリアルタイムで捕捉し、得られたデータを基にトレーニングプログラムや戦略を調整することで、選手のパフォーマンスを最大化し、安全性を確保し、戦術を洗練させる上で、スポーツ界において極めて顕著であることが強調されている。本論文では、モーションキャプチャシステムや筋電図といった最先端の計測機器を使用し、スポーツパフォーマンスの最適化と技術革新に向けた取り組みを展開している。これらの技術の進歩は、スポーツ分野での競技力向上だけでなく、医療診断、治療、健康管理、研究領域における生体計測の精度と効率の向上を促進し、結果として、人々の健康と生活の質を大きく向上させる貢献をしている。

具体的には、この研究は水中運動、中でも競泳の生体工学的側面に特化して焦点を当てている。水中での運動は、陸上とは全く異なる物理的条件の下で行われるため、浮力、水の密度、圧力、熱伝導率など、多くの特有の要因を考慮する必要がある。競泳においては、特定の距離を最小限の時間で泳ぎきることが目指され、この目標達成において、力学的要素が極めて重要な役割を果たしている。本研究においては、泳速度に影響を及ぼすスタート動作を3次元的に分析し、キックスタート時の上肢動作の有無が離台時の身体の移動速度にどのように作用するかを3次元動作分析技術を駆使して明らかにしている。この分析から、上肢動作が離台時の推進方向および鉛直方向に影響を与え、飛び出し角度の調整において重要な役割を果たしていることが判明した。今後の研究においては、筋活動を含むより詳細なスタート動作の分析や、入水時の水しぶきを含むさらなる探求が必要とされる。

さらに、本研究では泳ぎのタイムと密接に関連するストロークに関しても深い研究を行っている。短距離クロール泳における泳速度と肩及び腰のローテーション動作との関係を解明し、泳距離に応じたストローク技術や、ストロークに関連する体幹部動作についても詳細に論じ、泳速度に適したフォームの開発が必要であることを示唆している。この研究では、体幹部の捻転動作についても詳細に調査し、肩と腰のローテーション動作とそれに伴う体幹部の捻転動作を新たな視点から分析し、これまでにない精度での体幹ローテーションの解析を実現している。体幹ローテーション研究においては、これまで計測が難しかった水中動作の精度を向上させるために、光学技術やカメラの配置、分析手法についても新たな提案をしており、これにより従来以上に高精度な計測を可能にしている。

この研究はさらに、体幹捻転動作によって生じる体幹筋群の伸長-短縮サイクル、いわゆる

る SSC 運動を支える体幹部筋群の筋活動についても探求しており、トレーニング方法の改善や運動メカニズムのさらなる解明を目指している。クロール泳における体幹筋群、特に腹斜筋と脊柱起立筋の主要な役割を明らかにし、これらの筋肉が体幹の捻転動作にどのように寄与し、泳速度とロールバック局面の推進力にどのように影響を与えるかを検証し、泳速度の向上に寄与する体幹ローテーション動作と筋活動の関係を深く理解することができ、パフォーマンス向上に対する新たな洞察を提供している。さらには、水中運動中の筋活動の分析に EMG 法（筋電図）を用い、これまでにないクロール泳における体幹筋群の筋活動の分析に成功した。この研究においては、複雑な体幹部動作に適応したデバイスの防水処理方法や、プロトコルについても詳細に記述しており、高い精度での筋活動の計測を実現した。

総じて、本研究の成果は、競泳における生体工学的要因の詳細な分析を通じて、アスリートの動作改善やパフォーマンス向上に寄与する具体的な知見を提供している。これにより、スポーツバイオメカニクス分野における水中運動に関する新たな科学的知見が得られ、その価値がスポーツ分野に留まらず、より広範な社会的側面での認識が期待される。