

## 競泳競技のスプリントトレーニングにおける手部推進力と機械的パワーに関する研究

角川隆明<sup>1)</sup>, 古賀大樹<sup>2)</sup>, 萬久博敏<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 筑波大学体育系

<sup>2)</sup> 筑波大学大学院人間総合科学研究科

<sup>3)</sup> 鹿屋体育大学スポーツ・武道実践科学系

キーワード: 水泳, 競泳競技, トレーニング, 流体力, モーションキャプチャ

### 【要 旨】

本研究では, 競泳競技で行われているスプリントトレーニング中の動作や泳者が発揮する手部推進力, 手部で水を押すために発揮した機械的パワー ( $P_K$ ) を定量的に評価することを目的とした. 研究には大学男子競泳選手 5 名が参加した. 試技では, Push-off 試技, Float 試技, Assist 試技, Resist 試技の 4 種類のスプリントトレーニングを 1 回ずつ行い, 試技中は圧力分布計測とモーションキャプチャによる 3 次元動作分析を行った. その結果, Assist 試技が他の 3 試技と比較して有意に高い泳速度を示したが, 平均手部合力や  $P_K$  は他の 3 試技と比較して有意に低い値を示した. また, Push-off 試技, Float 試技, Resist 試技における平均手部合力や  $P_K$  には差が見られなかったが, Resist 試技は他の試技と比較して有意に高い最大手部推進力を示した. このように, 本研究では競泳競技で取り入れられている 4 種類のスプリントトレーニングの特徴を定量的に評価することができた. 選手や指導者は, それぞれのメリットやデメリットを理解してトレーニングに取り入れることで, より効果的にトレーニングを実施できると考えられる.

スポーツパフォーマンス研究, 13, 181-194, 2021 年, 受付日: 2021 年 1 月 28 日, 受理日: 2021 年 4 月 7 日

責任著者: 角川隆明 305-8574 つくば市天王台 1-1-1 筑波大学体育系

tsunokawa.takaaki.ke@u.tsukuba.ac.jp

\* \* \* \*

## **Propulsion force of swimmers' hands and mechanical power in sprint training**

Takaaki Tsunokawa<sup>1)</sup>, Daiki Koga<sup>2)</sup>, Hirotohi Mankyu<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> University of Tsukuba

<sup>2)</sup> Graduate School, University of Tsukuba

<sup>3)</sup> National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

Key words: swimming, swimming competition, training,

hydrodynamics, motion capture

**【Abstract】**

The present study reports a quantitative evaluation of the mechanical power ( $P_k$ ) of the propulsion force of the hands of swimmers when doing sprint training for swimming competitions. The participants were 5 male university swimmers. The swimmers did four kind of sprint training (a push-off trial, a float trial, an assist trial, and a resist trial), once each. During these trials, three-dimensional motion analyses were conducted including measurement of the distribution of pressure and motion capture. The swimming speed in the assist trials was significantly higher than in the other three trials, but the average propulsion force of the swimmers' hands and their mechanical power were significantly lower. No significant differences were found in average propulsion force or mechanical power in the push-off trials, float trials, and resist trials, but significantly higher maximum propulsion force was found in the resist trials compared to the other trials. In conclusion, the present study enabled a quantitative evaluation of features of 4 methods of sprint training. It is suggested that, for effective training, swimmers and coaches should be more aware of the positive and negative aspects of each of these methods.

## I. 緒言

競泳競技では、泳者は上肢と下肢の動作によって推進力を発揮して前方へ推進している。一方で、泳者の身体は常に水から抵抗力を受けて前方へ推進することを妨げられている。そのため、泳者は水の抵抗に打ち勝って前方へ推進するためにエネルギーを消費することとなる。特に、泳者の身体に働く抵抗力は泳速度のほぼ 2 乗に比例して増加し (Hollander et al., 1986), さらにその抵抗力に打ち勝つために消費されるエネルギー量は泳速度の 3 乗に比例して大きくなることがわかっている (Toussaint et al., 1988; Ogita et al., 1996; Ogita et al., 1999)。また、近年では泳者の身体に働く抵抗力は泳速度の 3 乗以上に比例して大きくなる場合があることが報告されており (成田ほか, 2018), より高い泳速度を達成するためには大きなエネルギー量を消費していると考えられる。つまり、競技会のレースでより高い泳速度で泳ぐことを目指す場合、身体が受ける抵抗を減らす泳技術を身に付けることはもとより、レース中に産生できるエネルギー量を増大するための体力トレーニングが重要となる (仙石ほか, 2017)。特に、短距離種目ではレース中により長い時間エネルギーを産生し続ける能力を高めることよりも、短時間により大きなエネルギーを産生する能力を高める必要があり、レースの距離や時間に応じてトレーニングもその目的に応じて内容を調整することが大切である。

そのような中で、競泳競技のトレーニングにはスプリントトレーニングと呼ばれる様々な短時間の高強度トレーニングが取り込まれている。スプリントトレーニングは、水中から壁を蹴ってスタートする一般的なもののから、水面に浮いた状態からスタートの合図に合わせて壁を蹴らずにスタートするもの、水上のスタート台から飛び込んでスタートするもの、ゴム製のチューブを用いたもの、パドルやフィンといった各種トレーニング器具を用いたものまで多岐にわたる (マグリシオ, 2005)。その中に、ゴム製のチューブを泳者の腰部に装着し、前方からチューブに牽引されながら泳ぐアシステッドトレーニングや、反対に後方からチューブに牽引されながら全力で泳ぐレジステッドトレーニングがある。アシステッドトレーニングでは、チューブの弾性によって泳者の身体が前方に牽引されるため、泳者自身では達成できない高い泳速度で泳ぐことが可能となる。また、レジステッドトレーニングではチューブの弾性によって前方へ進むことが妨げられる状況にて、チューブの弾性に抗するように全力で運動する形でトレーニングが行われる。Sengoku et al. (2014) は、Ogita et al. (2014) によって提案された 5 秒間の全力運動を 10 秒間の休息を挟んで 5 セット反復するプロトコルをレジステッドトレーニングによって実施し、心拍数と血中乳酸濃度が回流水槽で実施した場合と同程度まで上昇すると報告した。回流水槽を利用できるトレーニング環境は限られるが、ゴム製のチューブを用いたトレーニングは広く普及しているため、実際のトレーニング現場ではレジステッドトレーニングによって Ogita et al. (2014) のプロトコルでのトレーニングを実施することが現実的である。また、短い休息時間を挟んで高強度のトレーニングを反復するトレーニングプロトコルでは、休息時間中にプール壁まで戻ることが難しく、毎回壁を蹴ってから泳ぎ始めることができない場合がある。そのため、競泳競技のトレーニングには水面に浮いた状態からスタートの合図に合わせて壁を蹴らずにスタートするものもしばしば取り入れられる。このようなトレーニングでは、チューブを用いたトレーニングのように身体に外的な力が働かないため、より自然な泳フォームで泳ぐことが可能となるが、壁を蹴ってスタートしないためトレーニング中の泳速度は低くなると考えられる。

このように、競泳競技のトレーニングでは様々なスプリントトレーニングが実施され、そのトレーニング効果を検証する研究が行われている。しかしながら、これらの研究では生理学的指標やトレーニング介

入前後の泳パフォーマンスに着目したものが多く、スプリントトレーニング中の泳動作の変化や、それに伴って変化する推進力は明らかにされていない。また、トレーニング強度に重点を置いたトレーニングであるにもかかわらず、これまでは泳動作中に泳者が水を押すために発揮した機械的パワー（以下「 $R_k$ 」と略す）を評価することが困難であったため、スプリントトレーニング中の  $R_k$  を定量的に評価した研究は見当たらない。

そのような中で、近年では水中モーションキャプチャと圧力分布測定を併用して泳動作中に泳者が発揮する推進力を評価する研究が進められている (Tsunokawa et al., 2018; 角川ほか, 2019)。また、この方法では身体に働く力と身体の動きの双方を計測することができるため、泳動作中の  $R_k$  を算出することができる。Tsunokawa et al. (2019) は、この測定方法を用いてパドルトレーニング中の  $R_k$  を評価した。その結果、パドルの使用の有無にかかわらず同泳速度であれば手部推進力に差は見られなかったが、パドルを用いることで手部スピードが低下するため  $R_k$  は低下すると報告している。すなわち、パドルトレーニングでは上肢動作における  $R_k$  を高めることが主な目的とされるが、実際には本来のトレーニングの意図とは異なる場合があることが明らかとなった。このように、泳動作中の推進力や  $R_k$  を定量的に評価することで、トレーニングの効果やトレーニングメニューを立案する際に留意すべき事項を客観的に理解することができると考えられる。

そこで本研究では、競泳競技で行われているスプリントトレーニング中の動作や泳者が発揮する手部推進力、 $R_k$  を定量的に評価することを目的とした。

## II. 方法

### 1. 対象者

大学水泳部に所属し、よくトレーニングを行っている男子競泳選手 5 名（身長  $1.85 \pm 0.05$  m, 体重  $73.2 \pm 5.1$  kg, 年齢  $20 \pm 1$  歳）が本研究に参加した。対象者の長水路における 100 m 自由形自己最高記録は  $51.34 \pm 0.84$  秒であり、世界記録が 1000 ポイントとなるように計算され、種目や性別の違いによらず泳記録のレベルを表す FINA ポイントは  $763.8 \pm 37.7$  ポイントであった。対象者には実験の趣旨とその危険性を事前に説明し、書面にて参加の同意を得た。本研究は著者の所属する機関の研究倫理審査委員会の承認を得て実施された。

### 2. 実施試技

実験は、縦 50 m, 横 25 m の屋内プール（水深 2.0 m, 水温  $27.2^\circ \text{C}$ ）を長さ 25 m のプールとなるように用いて実施した。本研究では、クロール泳にて 4 種類のスプリントトレーニングをそれぞれ 1 回ずつ実施し、その時の動作や手部で発揮する推進力、 $R_k$  を定量的に評価した。なお、普段のトレーニング中に実施されるスプリントトレーニングを再現するため、下肢によるキック動作は制限せずに行った。対象者は試技の実施前に任意のウォーミングアップを 20 分程度行った。

Fig. 1 に試技に用いたトレーニング用のゴム製チューブと使用方法, Fig. 2 に 4 種類のスプリントトレーニング試技の概要を示す。本研究にて実施した試技は、水中から壁を蹴ってスタートし、25 m を最大努力で泳ぐ試技（以下「Push-off 試技」と略す）、分析範囲の 1 m 手前の水面に浮いた状態からホイッスルによるスタートの合図に合わせて泳ぎ始め、分析範囲を完全に通過するまで最大努力で泳ぐ試技

(以下「Float 試技」と略す), 腰部にゴム製のチューブを装着した状態で水中から壁を蹴ってスタートし, 前方からチューブに牽引されながら 25 m を最大努力で泳ぐ試技 (以下「Assist 試技」と略す), 腰部にゴム製のチューブを装着した状態で水中から壁を蹴ってスタートし, 後方からチューブに牽引されながら 10 秒間最大努力で泳ぐ試技 (以下「Resist 試技」と略す) の 4 種類のスプリントトレーニングとした. それぞれの試技の順序はランダムとし, 試技間には十分な休息を挟み, 疲労の影響がないようにした. Assist 試技では, 実験補助者がスタート地点から 25 m 前方のプールサイドに立ち, 対象者のスタートと同時にチューブを最大努力で牽引して試技を実施した. また, Resist 試技では, 実験補助者がスタート地点後方のプールサイドにてチューブを持ち, 対象者はチューブを牽引しながら分析範囲内を泳いで試技を実施した.

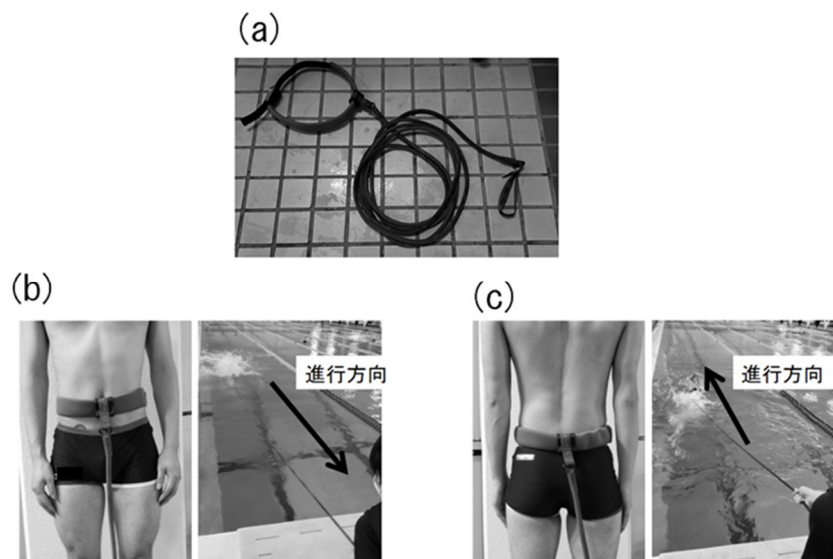


Fig.1 トレーニング用のゴム製チューブ

(a) トレーニング用ゴム製チューブ, (b) Assist 試技での装着方法と使用方法, (c) Resist 試技での装着方法と使用方法

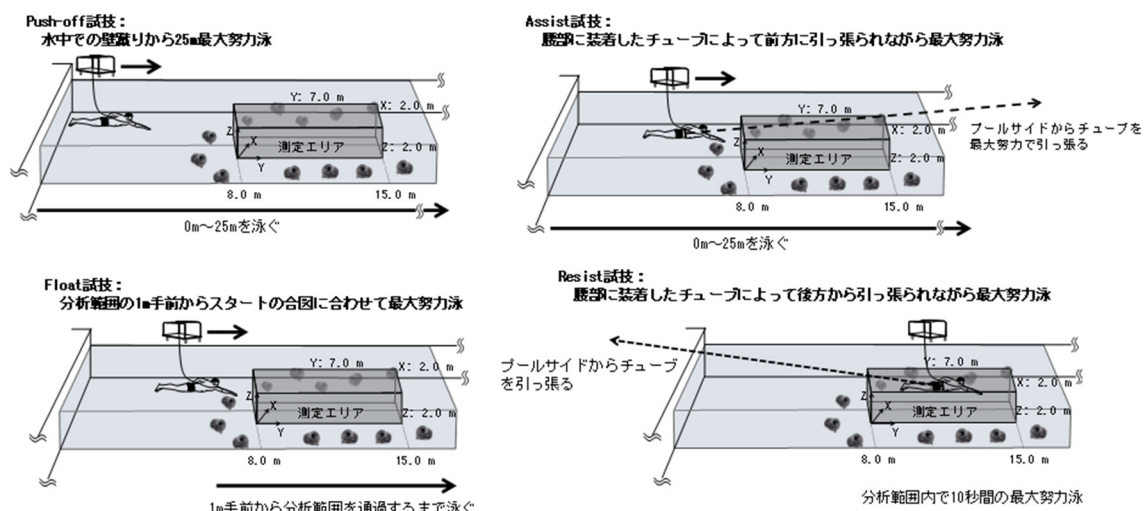


Fig.2 4 種類のスプリントトレーニング試技の概要

### 3. 実験設定

試技中は、手部表面の圧力分布を計測するため、左右の手部それぞれ 3 か所の手掌側と手背側の計 12 点に小型圧力センサ (PS05-KC, 共和電業) を貼付した。圧力センサの貼付位置は、圧力分布計測を用いて手部推進力を分析した先行研究 (Tsunokawa et al., 2018) に従い第 2 中手指節間関節、第 3 中手指節間関節、第 5 中手指節間関節とし、それぞれ手掌側と手背側に対して貼付した。圧力センサが出力した信号は移動用の台車に搭載したユニバーサルレコーダ (EDX-100A, 共和電業) を経由し、サンプリング周波数 200 Hz で PC に記録した。本研究で用いた圧力センサは有線で計測を行ったため、試技中は泳者の移動に合わせて台車を移動させて計測を行った。実験に用いた圧力センサのキャリブレーションのため、試技実施前にそれぞれの圧力センサを水深 0.1 m から 1.3 m までは 0.2 m ずつ水中に沈め、静水圧を計測した。計測された静水圧の値と理論上の静水圧の誤差は 2.5%未満であることが確認された。

また、水中モーションキャプチャによる三次元動作分析を行うため、ネオジウム磁石と伸縮性のある医療用コットン製テープを用いて左右の大転子と右手部 5 点に直径 19 mm のモーションキャプチャ用半球状反射マーカを貼付した。反射マーカの貼付位置は先行研究 (Gourgoulis et al., 2008) に従い第 3 指末節骨頭、第 2 中手指節間関節側面、第 5 中手指節間関節側面、尺骨茎状突起、橈骨茎状突起、左右の大転子とした。実験を実施した屋内プールの中には 15 台の水中モーションキャプチャカメラ (Qualisys Opus Underwater, Qualisys) を設置し、モーションキャプチャ用ソフトウェア (Qualisys Track Manager, Qualisys) を用いてサンプリング周波数 200 Hz にて泳者に装着した反射マーカの位置を自動で認識した。反射マーカはカメラの LED から発せられる光を反射し、カメラの CCD センサが反射された光を認識した。水中モーションキャプチャシステムと圧力センサによるデータ集録は、同時に入力した電圧変化点をトリガとして開始されるように設定して同期した。本研究では、泳者の左右方向を X 軸、推進方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸とした右手系固定座標を用い、分析範囲は X 軸方向に 2.0 m、Y 軸方向に 7.0 m、Z 軸方向に 2.0 m とし、Y 軸方向は試技のスタートを行った壁から 8.0 m から 15.0 m 地点が分析範囲となるように設定した。試技の実施前には、両端に反射マーカを取り付けたグラスファイバー製の棒を水中モーションキャプチャカメラに映るように移動させ、キャリブレーションを行った。なお、キャリブレーション時には分析範囲内での水中モーションキャプチャの精度が誤差 0.5%未満であることが確認された。

### 4. データ処理

モーションキャプチャで計測された身体の座標データおよび圧力センサで計測された圧力データは Butterworth 型の Low-pass デジタルフィルタを用いて平滑化した。遮断周波数は、残差分析法 (Winter, 2009) を用いて決定し、座標データは 17 Hz、圧力データは 19 Hz とした。

本研究では、水中モーションキャプチャの分析範囲内で行われた最初の完全な 1 ストローク周期を分析の対象とし、反射マーカを貼付した右第 3 指末節骨頭が入水してから水中でのストローク動作と水上でのリカバリー動作を行い、再び入水するまでの 1 周期を分析した。本研究では、1 周期における左右の大転子の midpoint の座標の Y 軸方向への移動距離をストローク長、1 周期に要した時間から算出した 1 秒間当たりのストローク回数をストローク頻度、ストローク長とストローク頻度の積を平均泳速度とし

て算出した。また、手部 5 点に貼付した反射マーカーが全て入水している局面において、手部 5 点に貼付した反射マーカーの中心の合成速度を手部スピードとし、左右それぞれの手部における平均スピードと最大スピードを算出した。さらに、手部 5 点に貼付した反射マーカーが全て入水している局面において、手部 5 点に貼付した反射マーカーの中心の推進方向速度を算出し、左右それぞれの手部における最大値と最小値を示した。なお、本研究で設定した座標系では、泳者の前方が推進方向速度の正、後方が推進方向速度の負となるため、最大推進方向手部速度は手部が前方へ移動する局面、最小推進方向手部速度は手部が後方へ移動する局面にて出現することとなる。

手部表面の圧力分布と手部の平面積から手部に働く流体力を推定する方法 (Takagi and Wilson, 1999; 角川ほか, 2020) に従い、手掌側と手背側の圧力差 ( $\text{N/m}^2$ ) に手部の平面積 ( $\text{m}^2$ ) を乗じて流体力 ( $\text{N}$ ) の合力を算出した。左右それぞれの手部の平面積は、事前に撮影した写真から画像分析ソフト (Image J, NIH) を用いて算出した。手掌側と手背側の圧力差は、手掌側の圧力値から手背側の圧力値を減じ、動圧のみを算出した。本研究では、左右の手部をそれぞれ 3 つのセグメントに分割し、各セグメントの手掌側と手背側に圧力センサを対にして貼付した。そして、各セグメントで算出された手掌側と手背側の圧力値が各セグメントを代表する圧力差と仮定した。各セグメントに働く流体力はこれらの圧力差に各セグメントの面積を乗じて算出し、左右それぞれの手部に働く流体力は各セグメントで算出された流体力を足し合わせたものとした。なお、本研究では左右それぞれの手部での流体力の合力を算出したため、左右の手部での合力を合計し、1 周期中の平均値 (以下「平均手部合力」と略す) を算出した。

手部に貼付した反射マーカーの座標から手部平面に対して垂直な法線ベクトルを算出し、算出した流体力の合力を各方向成分に分解した。本研究では、各方向成分に分解した流体力のうち推進方向 (Y 軸方向) に働く流体力を推進力と定義した。なお、本研究では左右それぞれの手部での推進力を算出したため、左右の手部での推進力を合計し、1 周期中の平均値 (以下「平均手部推進力」と略す) と最大値 (以下「最大手部推進力」と略す) を算出した。さらに、平均手部推進力を平均手部合力で除し、手部に働いた流体力のうち推進方向に働いた流体力の割合を示す推進力比率を算出した。また、先行研究 (Gourgoulis et al., 2008; 角川ほか, 2019) に従い、以下の式を用いて泳者が水に対して手部で発揮した  $R_K$  を算出した。

$$P_K = F_R \cdot V_{\text{hand velocity}} \cdot \cos(\alpha)$$

$F_R$  は手部に働く流体力の合力、 $V_{\text{hand velocity}}$  は手部の合成速度、 $\cdot$  は手部に働く流体力の合力ベクトルと手部合成速度ベクトルのなす角度である。 $R_K$  の算出には手部合成速度ベクトルと流体力の合力ベクトルのなす角も考慮されているため、手部平面が手部合成速度ベクトルに対して垂直に近くなる、つまり手部平面の迎角が大きくなるほど  $R_K$  は大きくなる。なお、本研究では左右の手部における  $R_K$  を合計し、1 周期中の平均値として示した。

## 5. 統計処理

シャピロウィルク検定にて各分析項目の正規分布を検定したところ、全ての分析項目のいずれかの

試技にて正規分布が認められなかった。そのため、本研究では各分析項目における試技間の比較にはフリードマン検定を用い、有意差が認められた場合にはウィルコクソンの符号順位和検定にて多重比較を行った。統計処理には SPSS Statistics 26 for Windows (IBM) を用い、有意水準は危険率 5%未満とした。

### Ⅲ. 結果

Table 1 に各試技における各変数の平均値と標準偏差を示し、Fig.3, Fig.4, Fig.5 にそれぞれ各対象者の平均泳速度、平均手部推進力、 $P_R$ を示す。また、Fig. 6 に典型例として Push-off 試技での平均泳速度が最も高かった対象者 E の推進方向右手部速度の推移を示す。

Table 1 各試技における対象者 5 名の平均値と標準偏差, 統計分析結果

| 分析項目        | 単位         | Push-off                     | Float                        | Assist                       | Resist                        | <i>p</i> |
|-------------|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------|
| 平均泳速度       | m/s        | 1.74 ± 0.07 <sup>b,c,d</sup> | 1.53 ± 0.06 <sup>a,c,d</sup> | 2.12 ± 0.09 <sup>a,b,d</sup> | 0.85 ± 0.14 <sup>a,b,c</sup>  | 0.002*   |
| ストローク長      | m/stroke   | 2.09 ± 0.15 <sup>b,c,d</sup> | 1.79 ± 0.16 <sup>a,c,d</sup> | 2.45 ± 0.06 <sup>a,b,d</sup> | 0.99 ± 0.15 <sup>a,b,c</sup>  | 0.002*   |
| ストローク頻度     | stroke/sec | 0.84 ± 0.05                  | 0.86 ± 0.07                  | 0.87 ± 0.05                  | 0.86 ± 0.04                   | 0.323    |
| 平均右手部スピード   | m/s        | 2.77 ± 0.15                  | 2.77 ± 0.10                  | 2.89 ± 0.15 <sup>d</sup>     | 2.65 ± 0.18 <sup>c</sup>      | 0.026*   |
| 平均左手部スピード   | m/s        | 2.72 ± 0.15                  | 2.74 ± 0.11                  | 2.83 ± 0.18 <sup>d</sup>     | 2.59 ± 0.11 <sup>c</sup>      | 0.010*   |
| 最大右手部スピード   | m/s        | 4.82 ± 0.60                  | 5.52 ± 1.05                  | 4.61 ± 0.41                  | 5.09 ± 0.84                   | 0.233    |
| 最大左手部スピード   | m/s        | 4.92 ± 0.81                  | 5.04 ± 0.77                  | 4.41 ± 0.36                  | 4.99 ± 0.66                   | 0.115    |
| 最小推進方向右手部速度 | m/s        | -3.05 ± 0.33                 | -3.07 ± 0.27                 | -2.89 ± 0.37                 | -3.18 ± 0.36                  | 0.075    |
| 最小推進方向左手部速度 | m/s        | -3.11 ± 0.10                 | -3.12 ± 0.39                 | -3.14 ± 0.19                 | -3.00 ± 0.25                  | 0.525    |
| 最大推進方向右手部速度 | m/s        | 2.70 ± 0.30                  | 2.31 ± 0.23 <sup>c</sup>     | 2.91 ± 0.25 <sup>b,d</sup>   | 2.12 ± 0.39 <sup>c</sup>      | 0.014*   |
| 最大推進方向左手部速度 | m/s        | 3.23 ± 0.89 <sup>d</sup>     | 2.42 ± 0.22 <sup>c,d</sup>   | 3.07 ± 0.45 <sup>b,d</sup>   | 1.96 ± 0.29 <sup>a,b,c</sup>  | 0.007*   |
| 平均手部合力      | N          | 73.1 ± 14.5 <sup>c</sup>     | 77.2 ± 12.6 <sup>c</sup>     | 64.4 ± 12.1 <sup>a,b,d</sup> | 75.2 ± 14.3 <sup>c</sup>      | 0.013*   |
| 平均手部推進力     | N          | 46.4 ± 6.1 <sup>c,d</sup>    | 45.4 ± 7.5 <sup>d</sup>      | 31.5 ± 5.8 <sup>a,d</sup>    | 56.3 ± 8.1 <sup>a,b,c</sup>   | 0.008*   |
| 最大手部推進力     | N          | 99.4 ± 13.1 <sup>c,d</sup>   | 96.6 ± 11.9 <sup>d</sup>     | 79.5 ± 6.8 <sup>a,d</sup>    | 106.7 ± 14.1 <sup>a,b,c</sup> | 0.021*   |
| 推進力比率       |            | 0.64 ± 0.07 <sup>d</sup>     | 0.57 ± 0.17 <sup>d</sup>     | 0.54 ± 0.14 <sup>d</sup>     | 0.76 ± 0.05 <sup>a,b,c</sup>  | 0.021*   |
| $P_R$       | W          | 140.7 ± 8.5 <sup>c</sup>     | 148.0 ± 13.0 <sup>c</sup>    | 122.3 ± 6.0 <sup>a,b,d</sup> | 144.2 ± 10.9 <sup>c</sup>     | 0.026*   |

\*:  $p < .05$ , Significant difference between <sup>a</sup>: Push-off, <sup>b</sup>: Float, <sup>c</sup>: Assist, <sup>d</sup>: Resist



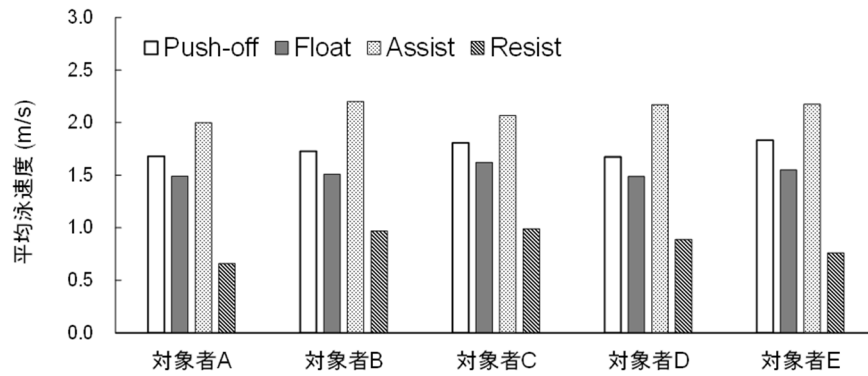


Fig.3 各対象者の各試技における平均泳速度

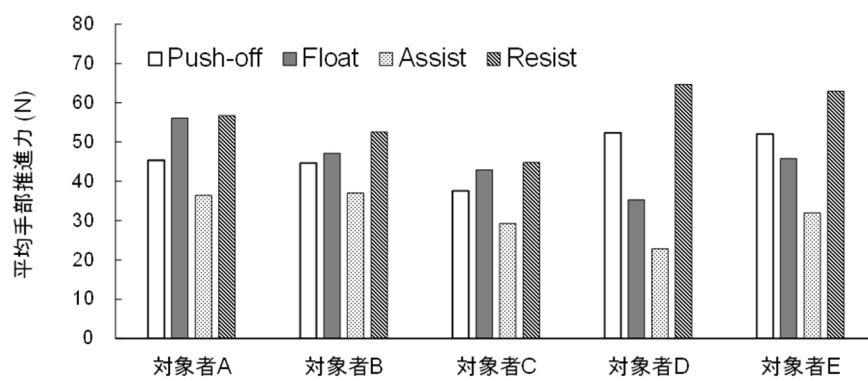


Fig.4 各対象者の各試技における平均手部推進力

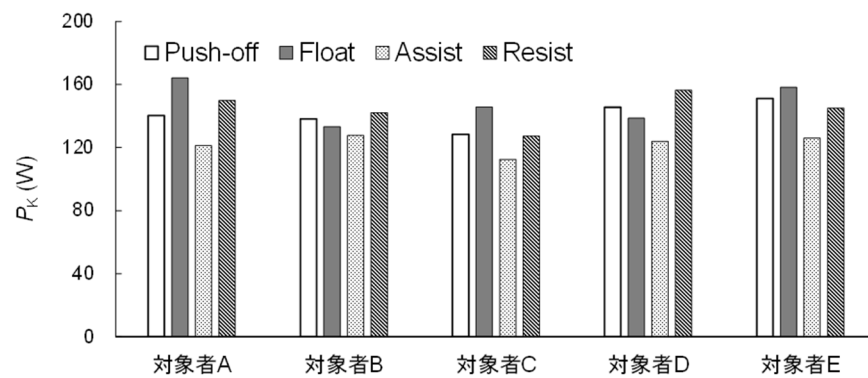


Fig.5 各対象者の各試技におけるPK

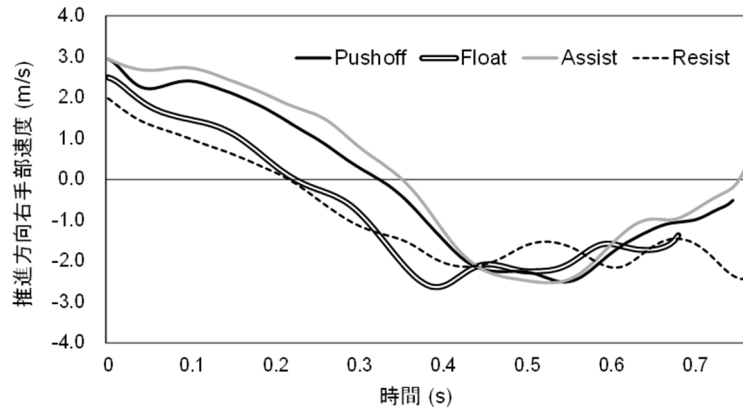


Fig.6 対象者 E の推進方向右手部速度の推移

平均泳速度は全ての試技間にて有意な差が認められ ( $p < .05$ ), Assist 試技が最も高く, 次いで Push-off 試技, Float 試技, Resist 試技の順となった. また, Fig. 3 に示す通り, いずれの対象者の平均泳速度も Assist 試技が最も高く, 次いで Push-off 試技, Float 試技, Resist 試技の順となった. ストローク頻度は, 試技間に有意な差は認められなかった. 一方でストローク長は試技間に有意な差が認められ ( $p < .05$ ), 平均泳速度の傾向と同じく, Assist 試技が最も高く, 次いで Push-off 試技, Float 試技, Resist 試技の順となった.

平均右手部スピードと平均左手部スピードは, Assist 試技が Resist 試技と比較して有意に高い結果となったが ( $p < .05$ ), 最大右手部スピードと最大左手部スピードには試技間で有意な差は認められなかった. 手部が後方へ移動する局面にて出現する最小推進方向手部速度は, 試技間に有意な差は認められなかった. 手部が前方へ移動する局面にて出現する最大推進方向手部速度は, 左右ともに Assist 試技が Float 試技と Resist 試技と比較して有意に高い値を示した ( $p < .05$ ). また, Fig. 6 に示す対象者 E の推進方向右手部速度は, 手部の入水直後は全ての試技において正の値を示し, 手部が前方へ移動していたことを示している. その後, 速度が正から負へと切り替わり, 手部の移動方向が前方から後方へ変化していることを示している.

平均手部合力は, Push-off 試技, Float 試技, Resist 試技の間に有意な差は認められなかったが, Assist 試技は他の 3 試技と比較して有意に低い値を示した ( $p < .05$ ). また, 平均手部推進力と最大手部推進力において, Assist 試技が Push-off 試技と Resist 試技と比較して有意に低い値を示した ( $p < .05$ ). また, 平均手部推進力と最大手部推進力にて Resist 試技が他の 3 試技と比較して有意に高い値を示した ( $p < .05$ ). Fig. 4 に示す通り, いずれの対象者の平均手部推進力も Resist 試技が最も高く, Assist 試技が最も低い結果となった. Push-off 試技と Float 試技は対象者によって傾向に違いが見られた. 手部に働いた流体力のうち推進方向に働いた流体力の割合を示す推進力比率は, Resist 試技が他の 3 試技と比較して有意に高い値を示した ( $p < .05$ ).

$R_k$  は, Assist 試技が他の 3 試技と比較して有意に低い値を示し ( $p < .05$ ), Fig. 5 に示す通り全ての対象者において Assist 試技が最も低い結果となった. Push-off 試技, Float 試技, Resist 試技の間に有意な差は認められず, Fig. 5 に示す通り傾向は対象者によって違いが見られた.

#### IV. 考察

本研究では、競泳競技で行われているスプリントトレーニング中の動作や泳者が発揮する手部推進力、 $R_K$  を定量的に評価することを目的とした。試技では、Push-off 試技、Float 試技、Assist 試技、Resist 試技の 4 種類のスプリントトレーニングを行い、試技中は圧力分布計測とモーションキャプチャによる 3 次元動作分析を行った。

その結果、平均泳速度には試技間に有意差が認められ、対象者 5 名の平均値は Assist 試技が最も高く、次いで Push-off 試技、Float 試技、Resist 試技の順となった。対象者 5 名の 100 m 自由形自己最高記録の平均値  $51.34 \pm 0.84$  秒からスタートやターンの影響を考慮せずにレース中の平均泳速度を算出するとおよそ  $1.95 \text{ m/s}$  となる。それに対し、Assist 試技では  $2.12 \pm 0.09 \text{ m/s}$  であったことから、身体がゴム製のチューブで前方から牽引されたことで、対象者自身では達成できない泳速度を達成していたと考えられる。通常の泳動作や Assist 試技のように、泳者の身体が前方に推進する状況では、泳者が手部で水を後方に押し出す動作を行ったとしても、手部の後方への絶対速度は身体の前方向への速度に相殺されることとなる。そのため、高い泳速度で泳ぐ際にはより高い速度で手部を後方へ移動させなければ手部と水との相対速度を高め、推進力を増大することはできない。反対に、Float 試技と Resist 試技では、Push-off 試技や Assist 試技と比較して低い泳速度であった。そのため、Push-off 試技や Assist 試技と同じように上肢のストローク動作を行って水を後方へ押し出す動作を行ったとしても、相殺される身体の前方向への速度が低いことから、手部と水との相対速度は高くなると考えられる。

本研究では、平均泳速度の分析に加え、ストローク長、ストローク頻度、手部スピード、推進方向手部速度の分析を実施した。平均手部スピードと最大手部スピードは、分析範囲内の絶対座標系における手部スピードを示しているため、プールの水が静水と仮定すると手部と水との相対速度を示すこととなる。その結果、平均手部スピードは Assist 試技が有意に高い値を示し、先述の仮説に反する結果となった。これは、本研究で算出した平均手部スピードが手部の合成速度であり、移動方向を考慮していないためと考えられる。Assist 試技では、前方からチューブによって牽引されたため、手部が入水してから水を後方へ押し出す動作を始めるまでの期間中に手部が前方へ移動する影響を受けることとなる。最大推進方向手部速度は、左右ともに Assist 試技が有意に高い値を示しており、手部の入水後に前方へ高い速度で移動したことを示している。Fig. 6 に示した典型例を見ても、Assist 試技が入水直後に高い速度で前方へ移動したことを示しており、このような現象の影響によって Assist 試技の平均手部スピードが高くなったと推察される。

また、スプリントトレーニングにおいて泳者が発揮できるパワーを向上させることが目的の場合は、 $R_K$  を高めることが重要である。各試技における  $R_K$  を比較すると、Assist 試技が他の 3 試技と比較して有意に低い値を示した。Assist 試技では、最大手部スピードと平均手部合力が他の試技と比較して低かったため、その積によって求められる  $R_K$  も低くなったと考えられる。また、 $R_K$  の算出には手部合成速度ベクトルと流体力の合力ベクトルのなす角も考慮されているため、手部平面が手部合成速度ベクトルに対して垂直に近くなるほど  $R_K$  は大きくなる。泳者はクロール泳で手部を入水させるとき、指先から入水して手部を前方へ移動させるため、手部の迎角は小さくなると考えられ、Assist 試技において手部が入水後に前方へ高い速度で移動したとしても、 $R_K$  の増大にはつながらない。また、本研究では Float 試技の  $R_K$  が Push-off 試技や Resist 試技と比較して有意な差が無いことが明らかとなった。競泳競技のトレ

ニングでは、運動時間や休息時間を調整するために壁を蹴らずにスタートして泳ぎ始めるトレーニングがしばしば取り入れられ、壁を蹴ってスタートした場合より泳速度が低くなるが、 $R_k$  には差が認められなかったことから、同じトレーニング効果を得られると考えられる。また、Resist 試技の  $R_k$  とも差が認められなかったため、身体に外的な力が働かない自然なフォームでトレーニングを行いたい場合は、Float 試技のようなトレーニングを用いることが有用であると考えられる。

マグリシオ (2005) は、Resist 試技にて実施したような泳者に負荷を加えて行うスプリントトレーニングでは、 $R_k$  の向上は期待できるものの、ストローク長が短くなり、フォームを崩す危険性があると述べている。そのため、Resist 試技のような形でのスプリントトレーニングを行う場合は、ストローク長を長くするためのトレーニング時間を確保することや、ストローク長が短く、フォームが崩れた状態でトレーニングを継続することには注意すべきと指摘している。一方で、本研究の Resist 試技では推進方向に働く流体力の割合を示す推進力比率が他の 3 試技と比較して有意に高いことが確認された。これは、Resist 試技では、チューブの張力に抗して推進力を発揮し続ける必要があることや、他の 3 試技と比較して泳速度が低いことが影響していると考えられる。他の 3 試技では、Resist 試技と比較して泳速度が高いため、身体が前方へ進みながら手部で水を後方へ押す動作をすることとなる。それに対し、Resist 試技ではチューブの張力によって身体が前方へ進む速度が低くなるため、Fig. 6 に示す典型例のように、推進方向手部速度が負を示す局面、つまり手部が後方へ移動する局面が長くなる。そのため、手部を後方へ移動させて推進力を発揮する時間を長くでき、推進力比率が高くなったと考えられる。また、Assist 試技のように泳者を補助するスプリントトレーニングでは、 $R_k$  の向上や筋力の向上は期待できないものの、ストローク長が長いフォームの獲得や、筋繊維の収縮速度の向上が期待できると述べている。本研究の結果は、マグリシオ (2005) の指摘の通り Assist 試技では  $R_k$  が有意に低い値を示したことから、これらの指摘を定量的なデータに基づいて検証することができた。このように、スプリントトレーニングの種類によって泳動作への影響は異なることや、同じスプリントトレーニングであっても、動作の局面によって影響が異なることを正しく理解してトレーニングに取り入れることで、より効果的なトレーニングを実施することにつながると考えられる。

## V. まとめ

本研究では、競泳競技で行われているスプリントトレーニング中の動作や泳者が発揮する手部推進力、 $R_k$  を定量的に評価することを目的とした。その結果、Assist 試技が最も高い泳速度を示したが、平均手部合力や平均手部推進力、最大手部推進力、 $R_k$  は他の試技と比較して有意に低い値を示した。また、Push-off 試技、Float 試技、Resist 試技における平均手部合力や  $R_k$  には差が見られなかったが、Resist 試技は他の試技と比較して有意に高い平均手部推進力、最大手部推進力を示した。これらのことから、Assist 試技のような泳者を補助して泳速度を高めるスプリントトレーニングでは、 $R_k$  を高めることを目的とするのではなく、ストローク長が長く効率的な泳フォームの獲得を目的とすべきことが示唆された。

## 文献

- ・Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Vezos, N., Kasimatis, P., Antoniou, P., and Mavromatis, G. (2008) Estimation of hand forces and propelling efficiency during front crawl swimming with hand paddles. *Journal of Biomechanics*, 41: 208–215.
- ・マグリシオ: 高橋繁浩・鈴木大地監訳 (2005) スイミングファステスト. ベースボール・マガジン社.  
<Maglischo, E. W. (2003) *Swimming fastest*. Human Kinetics Publishers.>
- ・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: 505–515.
- ・Hollander, A. P., De Groot, G., van Ingen Schenau, G. J. Toussaint, H. M., De best, H., Peeters, W., Meulemans, A., and Schreurs, A. W. (1986) Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. *Journal of Sports Sciences*, 4: 21–30.
- ・Ogita, F., Hara, M., and Tabata, I. (1996) Anaerobic capacity and maximal oxygen uptake during arm stroke, leg kicking and whole body swimming. *Acta Physiologica Scandinavica*, 157: 435–441.
- ・Ogita, F., Huang, Z., Kurobe, K., Ozawa, G., Nagira, A., Yotani, K., Taguchi, N., and Tamaki, H. (2014) Effects of sprint interval training on metabolic, mechanical characteristics and swimming performance. In: Mason, B. (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming XII*. Australian Institute of Sports: Canberra, pp. 453–457.
- ・Ogita, F., and Tabata, I. (1999) The effect of high intensity intermittent training under a hypobaric hypoxic condition on anaerobic capacity and maximal oxygen uptake. In Keskinen, K. L., Komi, P. V., and Hollander, A. P. (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII*. University of Jyväskylä: Jyväskylä, pp. 423–428.
- ・Sengoku, Y., Tsunokawa, T., Kobayashi, K., and Tsubakimoto, S. (2014) Comparison of the training load during high intensity interval resisted training programed by different exercise duration. In: Mason, B. (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming XII*. Australian Institute of Sports: Canberra, pp. 328–332.
- ・仙石泰雄・角川隆明・小林啓介・成田健造 (2017) 高強度トレーニングを柱とした競泳競技トレーニングシステム. *コーチング学研究*, 30(3): 61–65.
- ・Takagi, H., and Wilson, B. (1999) Calculating hydrodynamic force by using pressure differences in swimming. In Keskinen, K. L., Komi, P. V., and Hollander, A. P. (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII*. University of Jyväskylä: Jyväskylä, pp. 101–106.
- ・Toussaint, H. M., Beelen, A., Rodenburg, A., Sargeant, A. J., De Groot, G., Hollander, A. P., and van Ingen Schenau, G. J. (1988) Propelling efficiency of front-crawl swimming. *Journal of Applied Physiology*, 65: 2506–2512.
- ・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:圧力分布計測と水中モーションキャプチャを用いた分析. 体育学研究, 64: 385-400.

- ・ Tsunokawa, T., Tsuno, T., Mankyu, H., Takagi, H., and Ogita, F. (2018) The effect of paddles on pressure and force generation at the hand during front crawl. Human Movement Science, 57: 409-416.
- ・ Tsunokawa, T., Mankyu, H., Takagi, H., and 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. Human movement science, 64, 378-388.
- ・ Winter, D. A. (2009) Biomechanics and Motor Control of Human Movement, 4<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.