

競泳キックスタートにおけるバックプレート位置がスタート・パフォーマンスに与える影響

酒井 紳¹⁾ 武田 剛²⁾ 佐藤 智俊³⁾ 椿本 昇三⁴⁾ 高木 英樹⁴⁾

Shin Sakai¹, Tsuyoshi Takeda², Satoshi Sato³, Shozo Tsubakimoto⁴ and Hideki Takagi⁴: Effect of the back plate position on the kick-start performance of competitive swimmers. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 62: 133-144, June, 2017

Abstract : In a competitive swimming race event, the back plate can be placed on the starting block. Although the back plate has different setting positions, the effect of the plate position on start performance has not yet been clarified. This study was conducted to investigate the effect of the back plate position on the kick-start performance of competitive swimmers. Six male swimmers dived from an instrumented starting block that contained 2 force plates and force sensors to measure the reaction forces exerted by the hands and front and rear feet. Four high-speed cameras were used to obtain kinematic data on the swimmers. The horizontal take-off velocity of the front plate position resulted in a better outcome than the back plate position ($p < 0.05$). In the front plate position, a longer rear foot contact time generated a large impulse, and swimmers were able to achieve a higher take-off velocity. To generate a larger impulse, the contact time on the starting block needed to be longer. However, swimmers were able to achieve a higher take-off velocity using the front plate position without extending the block time. In this manner, the front plate position did not affect the time on the block. Moreover, different setting positions of the back plate influenced the joint angle of the postural set before the starting signal. Differences in the joint angle led to an increase in the horizontal component of the force impulse of the rear leg. Therefore, revealing the relationship between the joint angle of the postural set and start performance would provide detailed information on the optimum start posture for swimmers, including the plate position.

Key words : horizontal reaction force, horizontal take-off velocity, rear foot off time, rear foot reaction force, 10 m-time

キーワード : 水平反力, 跳び出し水平速度, 後足離れ時間, 後足反力, 10 m 通過時間

1) 筑波大学大学院人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
2) 順天堂大学スポーツ健康科学部
〒270-1695 千葉県印西市平賀学園台 1-1
3) 栃木県立学悠館高校
〒328-8558 栃木県栃木市沼和田町 2 番 2 号
4) 筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
連絡先 高木英樹

1. Graduate School Comprehensive Human Sciences,
University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
2. Faculty of Health and Sports Science, Juntendo University
1-1 Hirakagakuendai, Inzai, Chiba 270-1695
3. Gakuyukan high school, Tochigi
2-2 Numawada, Tochigi, Tochigi 328-8558
4. Faculty of Health and Sport Sciences, University of
Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
Corresponding author takagi.hideki.ga@u.tsukuba.ac.jp

緒 言

競泳のレースはスタート、ストローク、ターン、フィニッシュの4つの局面に分けられるが、特に50 mや100 mなどの短距離種目においては、スタート局面の重要性が指摘されている(武田ほか, 2007)。スタート局面はスタートを行ったプール壁から15 mまでの距離と定義されており(日本水泳連盟編, 2005)、当該局面は50 m種目の約30%、100 m種目の15%の距離を占めることになり、泳距離が短くなるほどレース全体に占めるスタート局面の割合は大きくなる。スタート局面が15 mと定義されていることに関しては、日本水泳連盟競技規則(日本水泳連盟, 2014)に、平泳ぎを除く3泳法では、壁から15 m地点までに頭は水面上に出なければならぬ競技規則(SW5.3, SW6.3, SW8.5)が存在し、泳者は15 m地点までは水中を推進することが可能となっている。そのため、スタート入水後に体が完全に水没しているこの局面は、各泳法のストロークとは異なる局面であることから、スタート局面は15 mと設定されている。さらに短距離種目においては、スタート局面でついたタイム差は最終的な競技結果のタイム差より大きいことが報告されており(De la Fuente and Arellano, 2010)、スタート局面の優劣がそのまま競技結果を左右すると言っても過言ではない。そのスタート局面において、最も重要とされるのがスタート台から離台した瞬間の跳び出し水平速度であり、その跳び出し水平速度はその後の通過時間との間に高い負の相関関係が認められている(本間ほか, 1997; 吉田・斉藤, 1981)。

高い跳び出し水平速度を達成するためには、スタート台上の動作が重要となるが、現在の競泳レースでは、主に「トラックスタート」と呼ばれるスタート技術が用いられている。トラックスタートは、スタート台上で片足をスタート台先端に置き、もう一方の足をスタート台後方に置いて、陸上競技の短距離種目におけるスタートと同様な構えをとる。後足に関しては、2009年の国

際水泳連盟による競泳競技規則変更により、スタート台後方に後足を載せるバックプレートを設置することが可能になった(但し、会場によってはバックプレートが設置されていない場合もある)。このバックプレートを利用したトラックスタートは、バックプレートを利用しないトラックスタートと区別するために「キックスタート」と呼ばれている。バックプレート設置が可能となったことで、キックスタートの方がバックプレート無しのトラックスタートより高い跳び出し水平速度を獲得できることが報告されている(Honda et al., 2012; Ozeki et al., 2012; 尾関ほか, 2014; Nomura et al., 2010)。このバックプレートは、5段階で移動させることが可能であり、各選手は自分の好みにあったプレート位置でスタート動作を行う事ができる。このバックプレート位置について、その違いがスタートパフォーマンスに与える影響を検討した研究はいくつか報告されている(Honda et al., 2012; Slawson et al., 2011; Takeda et al., 2012)。このうちSlawson et al., (2011)の報告は、対象者が1名と事例的研究にとどまっており、得られた結果を普遍化するのには難しい。またHonda et al., (2012)は、計18名(男子9名、女子9名)のエリートスイマーを対象として、選手が普段使用しているプレート位置を基準に、前後に1段階ずつプレート位置を変化させた場合のスタートパフォーマンスを比較した。その結果、プレートを普段より1段階後方に設置した場合に跳び出し水平速度が向上したと報告している。しかしその差は僅か0.01 m/sの向上に留まり、その後の5 m, 7.5 m通過時間にも有意な差は認められなかったため、バックプレート位置の違いは、さほどスタートパフォーマンスに影響を与えないとしている。以上の先行研究はすべて外国人選手が対象であるが、日本人選手を対象にした研究としては、Takeda et al., (2012)が日本人大学男子競泳選手10名を対象として、プレート位置を3段階(0.29, 0.44, 0.59 m)に変化させ、跳び出し水平速度や5 m通過時間などのスタートパフォーマンスを比較検討した報告がある。その報告によれば、最も前方に設置し

た場合 (0.29 m), 他の2条件 (0.44, 0.59 m) よりパフォーマンスが低下することを報告している。しかしながら通常の国内競技会で用いられているスタート台は, バックプレートを最前方に設置した場合でもスタート台先端から 0.37 m であり, 0.29 m という条件設定は実際の競技環境とはかなり異なっているため, 結果の解釈については注意が必要である。このように, プレート位置とスタートパフォーマンスとの関連を検討した研究はいくつか報告されているが, 指導現場レベルで活用できる有益な知見は未だ得られておらず, 競技環境に即した系統的かつ詳細な研究が待たれている。また, Takeda et al., (2016) は, スタートのパフォーマンスを決定する要因を検討するためには, キックスタートの特性上, 前足, 後足そして上肢で発揮される水平及び垂直反力を独立して同時に計測することが必須であると指摘している。しかしながら, 既製のスタート台ではそれらの条件を満たすことは困難であり, 競泳のスタート研究の妨げとなっていた。

そこで本研究では, 日本国内の一流競泳選手を対象とし, 前足, 後足, 上肢によって発揮される水平・垂直方向の力を同時かつ個別に測定できるシステムを作製し, バックプレート位置の違いがスタートパフォーマンスに与える影響とその機序を明らかにすることを目的とした。

2. 方 法

2.1 対象者

本実験の対象者は, 大学水泳部に所属し, キックスタートに習熟している男子競泳選手 6 名とした。対象者は全員が自由形短距離種目を専門としており, 全員が全国大会出場経験を有していた。対象者の年齢, 身長, 体重, 50 m 自由形のベストタイムと FINA Point を Table 1 に示した。対象者には事前に実験の趣旨と内容, および危険性について説明をし, 書面にて参加の同意を得た。実験は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認 (体28-3) を得て実施された。

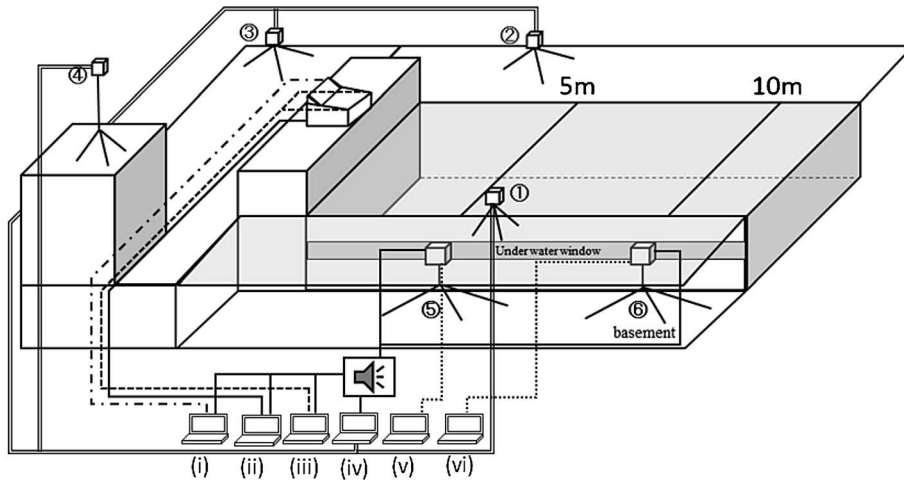
Table 1 Characteristics of subjects and back plate position.

Variables unit	Age years	Height cm	Weight kg	50 m Best time s ^{ms}	FINA Point	Backplate position
A	21	175.0	73.4	23 ⁶⁷	689	3
B	21	172.3	65.7	23 ⁹²	668	3
C	20	177.1	70.3	23 ⁸¹	677	3
D	19	165.0	59.8	24 ⁰⁶	656	3
E	20	173.1	68.5	23 ⁷⁹	679	4
F	19	169.0	58.9	23 ¹⁹	733	4
mean	20	171.9	66.1	23 ⁷⁴	684	
SD	0.9	4.3	5.8	0 ³⁰	26.6	

2.2 実験装置

Fig. 1 に本実験で用いた機材の構成及び配置図を示す。スタート台上の身体重心位置および各身体部位の変位を求めるために高速度カメラ (高速 1394 カメラ B-cam, DKH 社製) 4 台 (Fig. 1-①—④) を設置して, 水上の台上動作を撮影した (撮影スピード: 100 fps, 露光時間: 1/500 sec)。5 m・10 m 地点の通過時間を算出するために, プール地下の水窓を介して 5 m (Fig. 1-⑤) と 10 m (Fig. 1-⑥) の位置にビデオカメラ (color video camera TK-C1381, victor 社製) を設置し撮影を行った (撮影スピード: 59.94 fps, 露光時間: 1/250 sec)。通常スタート局面は 15 m とされているが, 15 m 通過時間では, 入水後の影響が大きいと考えられる。そのため, プレート位置の変化が与える影響を明らかにするために, 本研究では 5 m・10 m 地点の通過時間を算出することとした。

本実験用に作成した特製のスタート台を Fig. 2 に示す。本装置はスタートシグナルから離台するまでの下肢の力発揮を 2 台のフォースプレート (前足: 9253B11 Kistler 社製, 後足: TF-2050-W テック技販社製) を用いて測定し, 上肢の力発揮は, 3 軸ロードセル (TL3B04 テック技販社製) が両端に取り付けられたハンドグリップで測定するなど, 台上動作の力を独立した力として別々に測定した。なお, 前足と後足のフォースプ



- ①—④: High-speed cameras to record movement on the starting block.
- ⑤, ⑥: Digital video camera to record the transit time at 5 and 10m.
- (i)—(iii): PC for Force Plates and Force Sensor.
- (iv): PC for control of High-speed cameras
- (v) and (vi): PC for basement video cameras of 5m and 10m.

Fig. 1 Schematic view of cameras and PC setting.

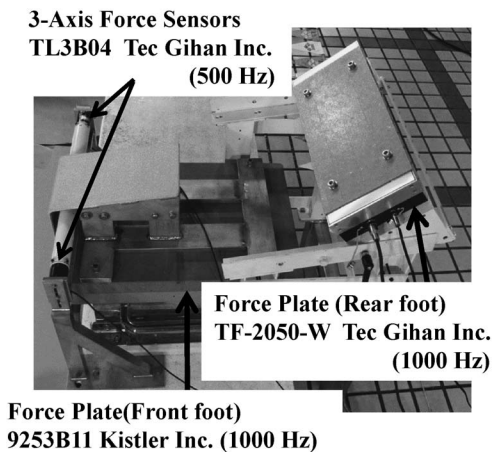


Fig. 2 Originally developed Starting block.

レートのサンプリング周波数を 1000 Hz, 上肢用ロードセルを 500 Hz に設定した. また計測にあたっては, Takeda et al., (2016) の方法を参考にし, 上肢の反力は 3 軸ロードセルからの

出力値を力に変換するために, 水平方向と垂直方向について実荷重とセンサ出力の校正実験を行った. この校正実験から校正係数と Crosstalk 係数を算出した. その結果, 校正係数の値は水平成分 (0.997) と垂直成分 (1.045) が示され, Crosstalk 係数は水平成分 (0.099) と垂直成分 (-0.066) が示された. 両成分とも定格容量と定格出力間及び定格出力と別成分出力間の誤差は 1% 程度であることが示された. また, 反力データは, Takeda et al., (2016) と同様に, 遮断周波数 20 Hz でバターワース・ローパスフィルターにより平滑化された. 本研究で使用したスタート台は前足設置位置の先端とプール水面間の高さが 0.75 m であった. また, 日本水泳連盟が公認しているスターティングブロック (セイコタイムシステム社製) と同様に, 前足用プレートは水平面から 10 度傾斜しており, バックプレートは前足用プレートからさらに 30 度傾斜していた. 本研究においてバックプレート位置は, ス

スタート台先端から Front 位置で 38 cm, Middle 位置で 46 cm, Back 位置で 56 cm であった。日本水泳連盟が公認しているスターティングブロックはスタート台先端からバックプレートの距離が一番前で 37 cm, 一番後ろで 55 cm とされており、本研究のバックプレート位置は完全には一致していないものの、ほぼ同様の位置であった。また、対象者が普段の練習や試合においてバックプレートを設置する位置を、バックプレート位置がスタート台先端に最も近い位置を 1, 遠いものを 5 とし、5 段階で申告させ、Table 1 に表記した。

2.3 実験試技

対象者には30分程度の既定のウォーミングアップを行わせた。その後、本研究のために作成したスタート台を使って3段階（Front, Middle, Back）にプレート位置を変更し、各設定位置から複数回スタート練習を行わせた。スタート練習を行った後、十分な休息を取り、実験試技を行った。対象者の身体重心を算出するために頭頂、耳珠点、胸骨上縁、肋骨下端、肩峰、肘、手首、第3中指節関節、大転子、膝、足首、踵、つま先の計25点（胸骨上縁は前後、頭頂を除いた他のポイントは左右に添付）にビニールテープと球体発泡スチロールマーカーでマーキングを行った。対象者にはスタート台からプレート位置を Front, Middle, Back の3条件に変化させ3試技ずつ計9回、全力でスタートを行うよう指示した。このとき3種の試技順序はランダムとした。なおプレート位置が変化した場合でも、荷重位置（前足荷重なのか、後足荷重なのか）や重心位置（高い姿勢位なのか、低い姿勢位なのか）については、任意として特段指示は行わなかった。また、水中動作の巧拙の影響を出来る限り排除するために、スタート台から入水後10m通過するまで、如何なる推進動作を行わず、グライド姿勢を保持するように指示した。

2.4 データ収集

高速度カメラとフォースプレート、ロードセルはスタートシグナルの電気信号と同時にデータ取

集を開始するように設定した。5mおよび10m通過を撮影したカメラは画角の範囲内に、スタートシグナル時に点灯するように設定したLED同期ランプを映しこむことで同期を行った。画像データと反力データはAD変換されコンピュータ内に入力・保存されるようにした。

その後、コンピュータ内に保存された高速度カメラ4台の映像をもとに画像分析ソフト（Frame Dias version IV, DKH社製）を用いて手動デジタイズを行い、得られた画像上の座標値から3次元DLT法により実座標を算出した。その後、阿江ほか（2002）の身体部分慣性係数を用いて身体重心の座標を算出した。また座標データは画像分析ソフト上で遮断周波数6Hzのローパスフィルターにより平滑化を行った。

また、5m・10m通過時間においても撮影した映像を画像分析ソフト（Frame Dias version IV, DKH社製）内に取り込むことで通過時間の算出を行った。

2.5 測定項目および変数の定義

本研究で測定した変数とその定義を以下に示す。

- 1) 身体合成重心位置 (COG) : スタートシグナルから離台までのスタート台上動作を撮影した高速度カメラの映像から身体合成重心を求めた。スタートシグナル時のスタート台先端から身体合成重心までの水平距離を COG (length), 垂直距離を COG (height) とした (Fig. 3).
- 2) 後脚の足関節角度 (Rear leg ankle angle) : スタートシグナル時の後脚の足関節角度とし、後足の踵から足先までのベクトルと踵から膝までのベクトルがなす角とした (Fig. 3).
- 3) 後脚の膝関節角度 (Rear leg knee angle) : スタートシグナル時の後脚の膝関節角度とし、後脚の膝から踝までのベクトルと膝から大転子までのベクトルがなす角とした (Fig. 3).
- 4) 後脚の股関節角度 (Rear leg hip angle) : スタートシグナル時の後脚の股関節角度とし、後脚の大転子から膝までのベクトルと大転子から肋骨下端までのベクトルがなす角とした (Fig. 3).
- 5) 手離れ時間 (Hands off time) : 台上動作を

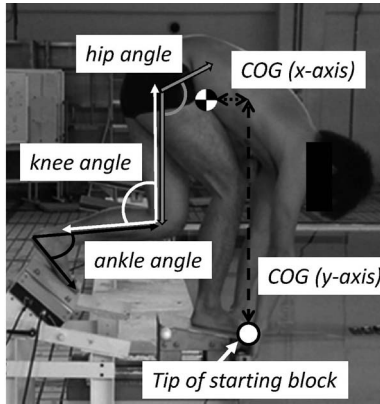


Fig. 3 Definitions of joint angles and center of gravity (COG)

撮影した高速度カメラの映像を用いて、スタートシグナルから泳者の両手がスタート台から完全に離れるまでの時間を計測した。

6) 後足離れ時間 (Rear foot off time) : 上記の映像を用いて、スタートシグナルから泳者の後足の足部がバックプレートから離れるまでの時間を計測した。

7) ブロックタイム (Block time) : 上記の映像において、スタートシグナルから泳者が完全に離台するまでの時間を計測した。

8) 5 m・10 m 通過時間(5 m and 10 m time) : LED 同期ランプが点灯してから泳者の頭頂が 5 m に到達するまでの時間を 5 m 通過時間、10 m に到達するまでの時間を 10 m 通過時間とした。通過時間は画像分析ソフトによりスタートシグナルから泳者の頭頂が 5 m もしくは 10 m に到達するまでのフレーム数 (F_{5m} または F_{10m}) を確認し、以下の式により通過時間を算出した。

$$5\text{ m time} = F_{5m} * (1/59.94) \quad (1)$$

$$10\text{ m time} = F_{10m} * (1/59.94) \quad (2)$$

9) 水平反力の最大値(Horizontal peak force) : 台上動作中にスタート台に上肢、前足、後足で加えた力の最大値とした。上肢の力は hands、前足の力は Front foot、後足の力は Rear foot として示した。

10) 水平反力の力積 (Horizontal impulse) : 台上動作中にスタート台に上肢、前足、後足から加えられた力積の値を求めた。また、全ての力積は対象者の体重で除した値とした。

11) 跳び出し水平速度 (Horizontal take-off velocity)・垂直速度 (Vertical take-off velocity): Takeda et al., (2016) の方法を参照して、ロードセルとフォースプレートで計測された反力データから以下の(3), (4)式を用いて跳び出し水平速度と跳び出し垂直速度を算出した。

$$V_{x_{BT}} = \frac{\int_0^{BT} F_x(\text{hands} + \text{frontfoot} + \text{rearfoot}) \cdot dt}{m} \quad (3)$$

$$V_{y_{BT}} = \frac{\int_0^{BT} F_y(\text{hands} + \text{frontfoot} + \text{rearfoot} - mg) \cdot dt}{m} \quad (4)$$

V_x は跳び出し水平速度、 V_y は跳び出し垂直速度、 BT はブロックタイム (Block time)、 m は選手の体重、hands, frontfoot, rearfoot は上肢、前足、足で測定された力積、 g は重力加速度を表す。

12) 跳び出し角度 (Take-off angle) : 重心の跳び出し速度ベクトルが水平線となす角とし、式(5)にて求めた。また、ベクトルが水平線に対して上向きが正、下向きが負として定義した。

$$\phi = \arctan \left(\frac{V_{y_{BT}}}{V_{x_{BT}}} \right) \quad (5)$$

$V_{y_{BT}}$ は跳び出し垂直速度、 $V_{x_{BT}}$ は跳び出し水平速度を示す。

13) 跳び出し水平速度への貢献度 (% $V_{x_{hands}}$, % $V_{x_{rear\ foot}}$, % $V_{x_{front\ foot}}$) : 本研究は上肢、前足、後足の力積から跳び出し速度を算出したため、各バックプレート位置での跳び出し水平速度への各部位の貢献度を以下の式(6)により算出した。

$$\% Vx_i = \frac{Vx_i}{Vx_{BT}} * 100 \quad (6)$$

i は各部位の力積（上肢，前足，後足）成分を示す。

2.6 統計分析

本研究ではバックプレート位置が各変数に与える影響を調査した。本研究では Shapiro-Wilk 検定により正規性の確認を行い，Mauchly の球面性の検定により等分散性を確認し，測定した全変数に正規性と等分散性が確認されたため，対応のある 1 要因分散分析を用いて変数の差の比較を行った。統計的有意が確認された変数には Bonferroni の多重比較検定を用いて事後検定を行った。統計処理は IBM SPSS Statistics 22 を用いて

を行い，有意水準は危険率 5% 未満とした。

3. 結 果

本研究における，実座標算出のためのキャリブレーション誤差は平均で $x=0.003$ m, $y=0.005$ m, $z=0.003$ m であり，最大で $x=0.007$ m, $y=0.009$ m, $z=0.009$ m であった。Table 2 に，本研究で測定した変数の値を平均値±標準偏差で示した。バックプレート位置によりスタートシグナル時の身体重心位置は変化しなかったが，後脚の足関節，膝関節，股関節角度に関しては，Front と Back の条件間で有意な差が認められた ($p < 0.05$)。また，股関節に関しては，Middle と Back の条件間にも有意な差が認められた ($p < 0.05$)。時間に関する変数では，後足離れ時間に

Table 2 Mean and Standard deviation of the variables of each back plate positions.

Variables	unit	Front Mean ± SD	Middle Mean ± SD	Back Mean ± SD	multiple comparison
COG (length)	m	0.20 ± 0.04	0.20 ± 0.05	0.22 ± 0.05	
COG (hight)	m	0.59 ± 0.03	0.58 ± 0.03	0.57 ± 0.03	
Rear leg ankle angle	degree	67.8 ± 4.7	65.1 ± 3.5	59.1 ± 4.2	† F > B
Rear leg knee angle	degree	84.6 ± 7.6	82.4 ± 8.5	78.5 ± 6.3	† F > B
Rear leg hip angle	degree	56.0 ± 11.9	60.9 ± 13.4	72.9 ± 12.6	† F < B # M < B
Hands off time	sec	0.55 ± 0.03	0.54 ± 0.02	0.54 ± 0.03	
Rear foot off time	sec	0.65 ± 0.03	0.63 ± 0.03	0.60 ± 0.04	† F > B
Block time	sec	0.75 ± 0.03	0.75 ± 0.01	0.76 ± 0.04	
5 m time	sec	1.59 ± 0.07	1.59 ± 0.07	1.60 ± 0.07	
10 m time	sec	4.70 ± 0.32	4.80 ± 0.34	4.87 ± 0.36	
Horizontal hands peak force	Ns	158.7 ± 41.5	157.1 ± 29.6	181.5 ± 36.9	
Horizontal rear foot peak force	Ns	559.9 ± 91.1	576.4 ± 78.9	589.0 ± 77.7	
Horizontal front foot peak force	Ns	500.7 ± 31.9	497.9 ± 45.8	511.7 ± 50.4	
Horizontal hands impulse	Ns/kg	0.65 ± 0.23	0.59 ± 0.26	0.68 ± 0.15	
Horizontal rear foot impulse	Ns/kg	3.14 ± 0.20	3.07 ± 0.15	2.97 ± 0.23	† F > B
Horizontal front foot impulse	Ns/kg	0.91 ± 0.21	1.04 ± 0.22	0.87 ± 0.28	
Horizontal take-off velocity	m/s	4.71 ± 0.25	4.70 ± 0.22	4.53 ± 0.29	† F > B # M > B
Vertical take-off velocity	m/s	-0.79 ± 0.22	-0.88 ± 0.23	-0.81 ± 0.13	
Take-off angle	degree	-9.47 ± 0.04	-10.54 ± 0.05	-10.25 ± 0.04	

*: significant difference between Front and Middle at $p < 0.05$

#: significant difference between Middle and Back at $p < 0.05$

†: significant difference between Front and Back at $p < 0.05$

F, M and B indicated plate position of Front, Middle and Back, respectively.

Table 3 Contribution of reaction force of hands, front and rear foot to horizontal take-off velocity.

Variables	unit	Front	Middle	Back
		Mean \pm SD	Mean \pm SD	Mean \pm SD
%V _{xhands}	%	13.8 \pm 4.5	12.4 \pm 5.2	15.0 \pm 2.7
%V _{xrear foot}	%	66.7 \pm 2.7	65.4 \pm 2.5	65.7 \pm 5.1
%V _{xfront foot}	%	19.6 \pm 5.0	22.3 \pm 5.2	19.3 \pm 5.8

においてバックプレート位置による影響が観察され、Front は Back に比べ有意に足離れ時間が長くなった ($p < 0.05$)。力に関する変数に関して、台上動作中に上肢、後足と前足で発揮された水平反力から計算された力積では、後足の力積に関して、バックプレートが Front にある場合、Back と比較して有意に大きな力積が発揮されていた ($p < 0.05$)。飛び出し水平速度は、バックプレート位置が Front, Middle の時に Back に比べ有意に高い飛び出し水平速度が獲得された ($p < 0.05$)。本研究に参加した対象者で最も高い飛び出し水平速度を記録したバックプレート位置は6人中3名が Front であり、残りの3名は Middle の位置であった。また、Back は全選手が最も低い飛び出し水平速度を記録した。

Table 3 に飛び出し水平速度達成に対する上肢、前足、後足の反力の貢献度を示した。バックプレートを移動させても飛び出し水平速度への貢献度に有意な差は認められなかったが、後足の飛び出し水平速度への貢献度はバックプレートの位置に関わらず、60%を超える高い値が示された。

Fig. 4 にバックプレートを3段階 (Front, Middle, Back) に変化させた場合の水平反力の平均値と標準偏差の変動を示した。なお、本研究では水平反力・垂直反力の両方を計測しているが、飛び出し水平速度のみ各条件間 (Front, Middle, Back) で有意差が示されたため、水平反力のみを結果として示す。反力データは Mathematica 9.0 (Wolfram, USA) の3次スプライン関数を利用し、最も離台時間の遅かった Back 位置のブロックタイムを101のデータに規格化することで0—100%表記とした。各バックプレート位置での

手離れ (Hands off)、後足離れ (Rear foot off)、ブロックタイム (Block time) の規格化時間は、それぞれ Front で72%, 86%, 99%, Middle で71%, 83%, 99%, Back で71%, 79%, 100%であった。

4. 考 察

本研究で測定した項目のうち、バックプレート位置の違いにより有意差が確認されたのは、後足の足関節角度、膝関節角度、股関節角度、後足離れ時間、後足の水平反力の力積と飛び出し水平速度の各変数に関してであった。また上肢、前足、後足の飛び出し水平速度への貢献度の割合は、プレート位置の影響を受けず、一貫して後足が60%を超える大きい貢献度を示した。Takeda et al., (2016) は、キックスタートにおける後足の役割は飛び出し水平速度を向上させることとしており、本研究の結果からプレート位置を変化させても、上肢、前足、後足の相対的役割は変化しないため、飛び出し水平速度への貢献度の割合は後足が一貫して高い値となったと考えられる。また上肢の反力はプレートの設置位置を変えても力積には大きな変化がないことが示された。Takeda et al., (2016) は、飛び出し速度の向上に優位に働く部位 (上肢、前足、後足) を明らかにするために、スタート台上に働く力を独立して測定している。本研究の結果も同様に上肢、前足、後足の3つの水平・垂直反力を同時に独立した力として測定することで初めて明らかになったため、非常に有益な情報であると考えられる。篠原・前田 (2013) は、競泳のスタートと類似していると考えられる陸上競技のクラウチングスタートでは前足の水平反力が大きくなることを報告している。競泳と陸上競技のスタート動作中における反力の違いには構え姿勢が影響していると考えられる。競泳では競泳競技規則 (SW4.1.2) により、スタート時にスタート台前方に少なくとも片方の足を掛けることが定められている。一方で、陸上競技のクラウチングスタートの先行研究ではスタートラインから前足ブロックまでの距離が 49.00 ± 3.74

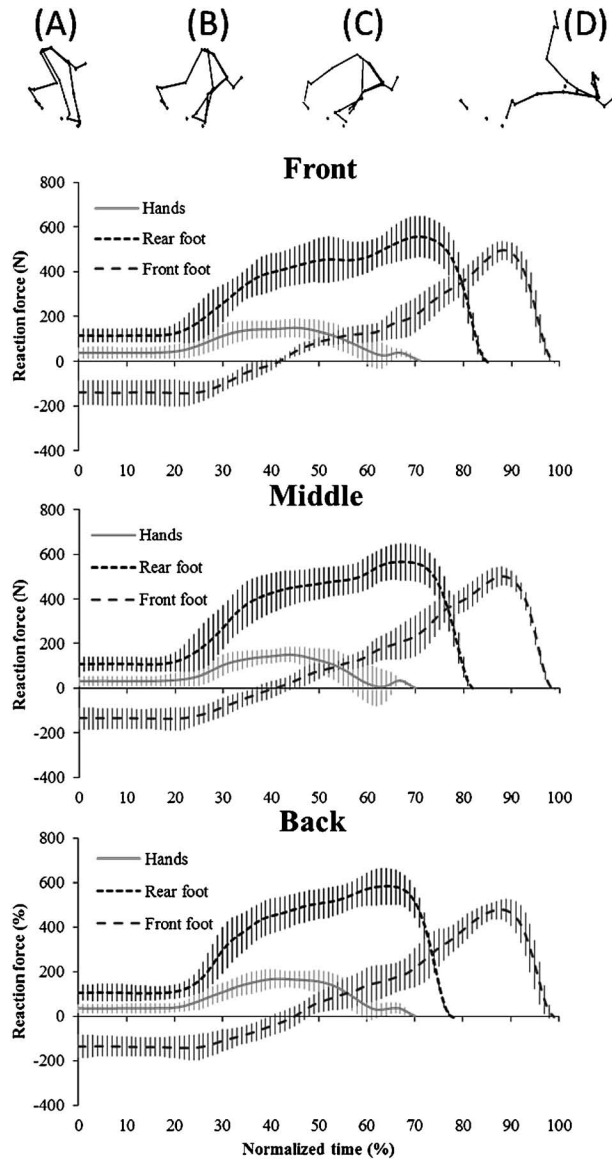


Fig. 4 Horizontal reaction force at each back plate position. (A: static posture at starting signal, B: posture at hands off, C: posture at rear foot off, D: posture at take-off)

cmであり、構え姿勢時の重心水平距離 (0.21 ± 0.05 m) よりも後方に位置していたことを示している (篠原・前田, 2014). 実際に計測された反力を観察すると競泳では Takeda et al. (2016) で観察された前足反力と同様に、本研究においてもスタートシグナル後40%付近まで前足で負の反力が観察された. 競泳と陸上のスタートは、スタートシグナルが発せられるまで静止する必要が

ある (競泳競技規則 SW4.2.3, 日本水泳連盟, 2014, 日本陸上競技連盟競技規則第162条 6, 日本陸上連盟, 2016). 静止するために競泳のキックスタートにおいては、後足と手部による正の水平反力を相殺させるために、スタート台先端に位置している前足は負の水平反力を発揮していた (Fig. 4). 一方、陸上競技のクラウチングスタートでは両足とも身体重心より後方にスターティング

グブロックが設置されていることから、両足の水平反力を手部の反力により相殺することで静止姿勢をとっており、スタートシグナル時から両足で正の水平反力を発揮することができると考えられる。このように、競泳のキックスタートでは台上動作の40%付近まで前足により負の水平反力が発揮されることで前足の力積の水平成分は陸上のスタートに比べ小さいため、後足の力積の水平成分が60%を超える大きな値になったと考えられる。

本研究では、後足用のバックプレートをFrontに設置することでBackの場合と比較して、後足離れ時間が有意に長くなり (Back: 0.60 s → Front: 0.65 s)、跳び出し水平速度が有意に高くなる (Back: 4.53 m/s → Front: 4.69 m/s) ことが明らかとなった。先行研究において、跳び出し水平速度を向上させるためには、ブロックタイムを長くする必要性が指摘されている (Honda et al., 2012; Kibele et al., 2014; Welcher et al., 2008)。なぜなら、スタート台から跳び出す時の速度は、スタートシグナルから離台するまでに選手がスタート台に対して作用させた力の大きさと時間に依存し、力積が増加すれば跳び出し速度が向上するためである。よって多少ブロックタイムが延長しても、跳び出し水平速度を増加させることができれば、遅れた時間分を相殺し、結果的に通過タイムが早くなることが報告されている (Honda et al., 2012)。しかし本研究におけるブロックタイムに注目すると、バックプレートをFront (0.75 s) に設置した場合、Back (0.76 s) と比較すると、ブロックタイムを遅延させずに後足が発揮する力積を増加 (Back: 2.97 Ns/kg → Front: 3.14 Ns/kg) させることで高い跳び出し水平速度を達成することができており、短距離種目を専門とする選手には有益な情報であると言える。

10 m 通過時間に関しては、バックプレートをFront (4.70 s) に設置した場合、Back (4.87 s) と比較して平均で0.17 s 通過時間が早まった。この時間差には、統計的有意差は観察されなかったものの $p = 0.051$ の有意傾向が確認された。

2016年に東京辰巳国際水泳場で行われた第92回日本選手権男子 50 m 自由形決勝における1位と2位の差は0.05秒、3位と4位の差は0.06秒であったことを勘案すると、本研究における10 m 通過時間の短縮は順位が入れ替わるほどの影響力を持つことになる。

また本研究では、バックプレート位置を変化させることで、スタートシグナル時の構え姿勢における後脚の各関節角度に差が生じていた。一般的に筋の力発揮は関節角度により影響を受け、さらに各下肢関節では筋の力発揮が相互に影響しあっていることが先行研究で報告されている (江間ほか, 2010; 生田ほか, 2016; 山元ほか, 2015)。競泳スタートにおける構え姿勢の最適な関節角度に関する先行研究は存在しないが、FrontとBackの条件間では後脚の足関節 (Front: 67.8°とBack: 59.1°) 膝関節 (Front: 84.6°とBack: 78.5°)、股関節 (Front: 56.0°とBack: 72.9°) の角度に関してそれぞれ有意差が認められた。特に注目すべきは足関節であり、足関節はプレートをFrontにした場合、Backの時よりも構え時に大きな関節角度をとっているが、スタートシグナル後に足関節が底屈する前に、一度背屈動作が生じてから底屈動作に移行する動きが観察された。Bobbert et al., (1996) は、カウンタームーブメントジャンプがスクワットジャンプよりも跳躍高が大きくなる原因を、筋が短縮する前の筋が伸張する反動動作 (countermovement) により、筋に弾性エネルギーが蓄積され、このエネルギーを再利用することで跳躍高が大きくなるとしている。このように筋が短縮する前に一度伸長する現象は、伸張—短縮サイクル (stretch-shortening cycle: SSC) と呼ばれている (Komi, 2000)。杉崎ほか (2004) は、足関節のみに着目した反動動作においても、反動動作がない場合よりも跳躍時の底屈局面において機械的仕事量およびパワーが増加することを報告している。本研究においても、足関節が底屈する前に背屈する反動動作が確認され、この動作によりFrontはBackに比べ、後足によって発揮される力積の増大につながったと考えられる。よってプレート位置を決定する際

には単純にプレート位置を変化させるだけでなく、構え姿勢時の各関節角度も考慮する必要があると考えられる。しかしながら本研究では、関節トルクなどを計算していないため、本研究の結果のみでは、足関節がSSCを利用しているかを明確にすることはできない。そのため、関節トルクやトルクパワーを算出する研究が今後必要となると考える。

5. 今後の課題

本研究から、プレート位置の変化により、下肢関節角度が変化することで後足の発揮する力積が大きくなる可能性が示唆された。今後の研究では、まずは対象者数を増やし、プレート位置の変化だけでなく、構え姿勢時の関節角度とスタートパフォーマンスの関係性を明らかにすることで、プレート位置を加味した各選手に適したスタート姿勢などの情報を得られる可能性がある。またスタートシグナル後、スタート台から離台するまでの各関節の関節トルクなどを算出することが出来れば、跳び出し速度獲得に向け、どの関節運動が力積の増大に貢献しているかなどの詳細を明らかにすることが出来ると考える。

6. まとめ

本研究は、近年競泳のスタート台に設置されたバックプレート位置を変化させることでスタートパフォーマンスがどのように変化するかをkinematicとkineticsの両方の観点から明らかにしようとした研究である。本研究によりバックプレート位置の変化が上肢と下肢によって発揮される力積に与える影響が観察された。しかしながら、台上動作中の上肢、後足、前足の跳び出し水平速度への貢献度は、バックプレート位置に影響を受けず、変化しないことが明らかにされた。しかし、本研究に参加した選手はバックプレートをより前方にすることで後足離れ時間が長くなり、後足の水平方向の力積を大きく出来ることで、高い跳び出し水平速度を獲得していた。本研究の結

果は、ブロックタイムを長くせずに高い跳び出し水平速度を達成できるため、特に短距離選手には重要な情報となる。しかしながら、単純にプレートを前方に設置すれば良いのではなく、構え時の後足の関節角度も観察する必要があることが示唆された。また、10 m通過時間はFrontとBackを比較した場合、Frontは約0.17秒のタイムを短縮できることを示した。これは短距離種目の競技結果を変えるのに十分なタイムである。

文 献

- 阿江通良・藤井範久(2002) スポーツバイオメカニクス20講. 第5講 身体重心とその測定法. 朝倉書店, pp. 34-43.
- Bobbert, M. F., Gerritsen, K. G., Litjens, M. C., and Van Soest, A. J. (1996) Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Medicine and science in sports and exercise*, 28, 1402-1412.
- De la Fuente, B. and Arellano, R. (2010) Effect of start time feedback on swimming start performance. *XI International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming Proceedings*, 11: 249-251.
- 江間諒一・若原 卓・金久博昭・矢内利政・川上泰雄(2010) 股関節および膝関節角度が等尺性膝関節伸展トルクと大腿四頭筋の筋活動に与える影響. *スポーツ科学研究*, 7: 109-118.
- Honda, K., Sinclair, P., Mason, B., and Pease, D. (2010) A biomechanical comparison of elite swimmers start performance using the traditional track start and the new kick start. Paper presented at the XIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming: 94-96.
- Honda, K., Sinclair, P., Mason, B., and Pease, D. (2012) The effect of starting position on elite swim start performance using an angled kick plate. *30th Annual Conference of Biomechanics in Sports*: 72-75.
- 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. 第13回日本バイオメカニクス学会大会編集委員会編, 身体運動のバイオメカニクス. 日本バイオメカニクス学会, pp. 379-384.
- 生田啓記・井尻朋人・鈴木俊明(2016) 膝関節屈曲角度の変化に伴う膝関節伸展等尺性収縮時の大腿四頭筋における筋活動変化. *理学療法科学*, 31(1): 7-11.
- Kibele, A., Biel, K., and Fischer, S. (2014) Optimising

- individual stance position in the swim start on the OSB11. XII International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming Proceedings, 12: 158-163.
- Komi, P. V. (2000) Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics*, 33: 1197-1206.
- 日本水泳連盟編 (2005) 水泳コーチ教本. 大修館書店.
- 日本水泳連盟 (2014) 競泳競技規則 競技役員 (競泳) の手引き. pp. 11-14.
http://www.swim.or.jp/about/download/rule/r_swim201404.pdf, (参照日2016年11月5日)
- 日本陸上競技連盟 (2016) ルールブック・審判ハンドブック, 陸上競技ルールブック2016, 日本陸上競技連盟競技規則. pp. 173-178.
<http://www.jaaf.or.jp/athlete/rule/pdf/15.pdf>, (参照日2016年11月10日)
- Nomura, T., Takeda, T., and Takagi, T. (2010) Influences of the back plate on competitive swimming starting motion in particular projection skill. XI International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming Proceedings, 11: 135-137.
- 尾関一将・桜井伸二・田口正公 (2014) 競泳におけるキックスタートとトラックスタートの比較. *水泳水中運動科学*, 17(1): 4-11.
- Ozeki, K., Sakurai, S., Taguchi, M., and Takise, S. (2012) Kicking the back plate of the starting block improves start phase performance in competitive swimming. 30th Annual Conference of Biomechanics in Sports: 373-376.
- 篠原康男・前田正登 (2013) 短距離走スタートにおけるスターティングブロックに加えられた力とブロッククリアランスの関係. *体育学研究*, 58: 585-597
- 篠原康男・前田正登 (2014) クラウチングスタートのブロッククリアランスにおける力発揮と動作の関係. *体育学研究*, doi.org/10.5432/jjpehss.14012
- Slawson, S., Conway, P., Cossor, J., Chakravorti, N., Le-Sage, T., and West, A. (2011) The effect of start block configuration and swimmer kinematics on starting performance in elite swimmers using the Omega OSB11 block. *Procedia Engineering*, 13: 141-147.
- 杉崎範英・岡田純一・金久博昭・福永哲夫 (2004) 足関節の反動動作における弾性エネルギーが機械的仕事量および機械的パワーの増強に及ぼす影響. *人間工学*, 40(2): 82-89.
- 武田 剛・市川 浩・杉本誠治 (2007) 競泳グラブスタートの跳び出し角度に影響を与える動力学的要因. *バイオメカニクス研究*, 11(3): 183-197.
- Takeda, T., Takagi, H., and Tsubakimoto, S. (2012) Effect of inclination and position of new swimming starting block's back plate on track-start performance. *Sports Biomech.*, 11(3): 370-381.
- Takeda, T., Sakai, S., Takagi, H., Okuno, K., and Tsubakimoto, S. (2016) Contribution of hand and foot force to take-off velocity for the kick-start in competitive swimming. *J. Sports Sci.*, doi.org/10.1080/02640414.2016.1180417.
- Welcher, R. L., Hinrichs, R. N., and George, T. R. (2008) Front- or rear-weighted track start or grab start: which is the best for female swimmers? *Sports Biomech.*, 7(1): 100-113.
- 山元勇樹・加藤 基・福田 崇・津賀裕喜・宮川俊平 (2015) 等尺性股関節伸展運動における膝関節角度の影響. *体力科学*, 64(3): 289-294.
- 吉田 章・斉藤慎一 (1981) 競泳におけるスタート動作の分析. *筑波大学体育科学系紀要*, 4: 49-54.

(2016年9月23日受付)
 (2017年2月23日受理)

Advance Publication by J-STAGE
 Published online 2017/3/28