

博士論文

競泳 Grab start の跳び出し角度が  
スタートパフォーマンスに与える影響

平成 19 年度

筑波大学大学院博士課程人間総合科学研究科体育科学専攻

武田 剛

## 目次

|  |        |
|--|--------|
| 略語の定義.....   | - 5 -  |
| 用語の定義.....   | - 7 -  |
| 表のタイトル一覧.....  | - 8 -  |
| 図のタイトル一覧.....  | - 9 -  |
| 関連論文.....  | - 12 - |
| 緒言.....  | - 13 - |
| 1-1. 研究の目的.....  | - 18 - |
| 文献研究.....  | - 19 - |
| 2-1. スタートパフォーマンス決定要因.....                              | - 19 - |
| 2-2. 台上スタート技術の変遷.....                                  | - 21 - |
| 2-3. Swing start , Grab start , Track start の比較研究..... | - 29 - |
| 2-4. 競泳スタート台上動作と垂直跳びの関係.....                           | - 39 - |
| 2-5. 跳躍方向の制御に関する研究.....                                | - 40 - |
| 研究の課題.....   | - 42 - |
| 研究の限界.....   | - 44 - |
| 4-1. 標本における限界.....                                     | - 44 - |
| 4-2. 実験方法における限界.....                                   | - 44 - |
| 2次元における動作分析による限界.....                                  | - 44 - |

|   |        |
|---|--------|
| 実験設定上の限界 .....                                  | - 45 - |
| 試技設定上の限界 .....                                  | - 45 - |
| 【研究課題 1】 (Experiment 1) .....                   | - 47 - |
| 5-1. 目的 .....                                   | - 47 - |
| 5-2. 方法 .....                                   | - 48 - |
| 被験者 .....                                       | - 48 - |
| 実験試技.....                                       | - 49 - |
| 競泳スタート動作のモデル化.....                              | - 49 - |
| 変数の定義.....                                      | - 51 - |
| データ収集.....                                      | - 54 - |
| データ処理.....                                      | - 57 - |
| 5-3. 結果 .....                                   | - 58 - |
| 飛び出し角度と飛び出し時の身体角度の関係 .....                      | - 58 - |
| 飛び出しまでの身体重心速度，回転要素，伸展要素の変化.....                 | - 58 - |
| 飛び出し速度，飛び出し速度の回転要素と伸展要素，ブロックタイムと飛距離の変化<br>..... | - 58 - |
| 5-4. 考察 .....                                   | - 64 - |
| 飛び出し角度の減少による飛び出し速度の増加.....                      | - 65 - |
| 適切な飛び出し角度の検討.....                               | - 67 - |
| 5-5. 要約 .....                                   | - 69 - |

|                                    |         |
|------------------------------------|---------|
| 【研究課題 2】 (Experiment 2) .....      | - 71 -  |
| 6-1. 目的 .....                      | - 71 -  |
| 6-2. 方法 .....                      | - 72 -  |
| 被験者 .....                          | - 72 -  |
| 実験試技 .....                         | - 72 -  |
| データ収集 .....                        | - 74 -  |
| 測定項目および測定方法 .....                  | - 76 -  |
| 6-3. 結果 .....                      | - 84 -  |
| スタート動作中の地面反力の変化 .....              | - 87 -  |
| 関節トルク，関節トルクパワーとセグメント角度の変化 .....    | - 87 -  |
| 各セグメントの角加速度の変化 .....               | - 93 -  |
| 6-4. 考察 .....                      | - 99 -  |
| 上肢によって発揮される力 .....                 | - 99 -  |
| Grab start の角度制御に関わる要因 .....       | - 99 -  |
| Stretch-Shortening-Cycle の利用 ..... | - 101 - |
| パフォーマンス向上への示唆 .....                | - 104 - |
| 今後の課題 .....                        | - 105 - |
| 6-5. 要約 .....                      | - 106 - |
| 総合討論 .....                         | - 108 - |
| 7-1. 研究の目的 .....                   | - 108 - |

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| 7-2. 課題設定.....            | - 108 - |
| 7-3. 研究結果.....            | - 109 - |
| 【研究課題 1】 .....            | - 109 - |
| 【研究課題 2】 .....            | - 109 - |
| 7-4. 討論 .....             | - 110 - |
| 飛び出し角度制御 .....            | - 110 - |
| 飛び出し角度が飛び出し速度に与える影響.....  | - 112 - |
| 飛び出し角度がパフォーマンスに与える影響..... | - 114 - |
| 実践への示唆 .....              | - 127 - |
| 結論.....                   | - 131 - |
| 謝辞.....                   | - 132 - |
| 文献.....                   | - 133 - |

## 略語の定義

本研究で用いる略語は以下のとおりである。

- CG : 身体重心 Center of gravity
- CMJ : Counter-Movement Jump
- $F_e$  : 線分  $l$  方向の地面反力成分 Extensional component of ground reaction force
- $F_x$  : 地面反力水平成分 Horizontal ground reaction force
- $F_y$  : 地面反力垂直成分 Vertical ground reaction force
- $l$  : スタート台先端と身体重心を結ぶ線分 Line from starting block edge to CG
- SSC : 伸張—短縮サイクル Stretch Shortening Cycle
- $T$  : 関節トルク Joint torque
- NT : 通常の跳び出し角度で行う Grab start 試技 Normal take-off angle trial
- HT : NT よりも大きな跳び出し角度で行う (高く跳ぶ) Grab start 試技 High take-off angle trial
- LT : NT よりも小さな跳び出し角度で行う (低く跳ぶ) Grab start 試技 Low take-off angle trial
- $P_k$  : 膝関節トルクパワーの負のピーク値 Negative peak value of knee joint torque power
- $t_{pk}$  : 膝関節伸展トルクが最大値を迎える時間 Time at peak knee joint torque
- $V$  : 身体重心合成速度 Velocity of center of gravity

- $V_0$  : 飛び出し時の身体重心合成速度 (飛び出し速度) Take-off velocity
- $V_e$  : 身体重心速度の伸展要素 Extensional component of  $V$
- $V_{e0}$  : 飛び出し速度の伸展要素 Extensional component of  $V_0$
- $V_r$  : 身体重心速度の回転要素 Rotational component of  $V$
- $V_{r0}$  : 飛び出し速度の回転要素 Rotational component of  $V_0$
- $V_{x0}$  : 飛び出し水平速度 Horizontal take-off velocity
- $V_{y0}$  : 飛び出し垂直速度 Vertical take-off velocity
- : 飛び出し時角度 Take-off angle
- $\theta$  : 身体角度 Body angle
- $\theta_0$  : 飛び出し時の身体角度 Body angle at the take-off
- $\theta_i$  : セグメント  $i$  のセグメント角度 Segment angle of segment  $i$

## 用語の定義

### スタート動作

競泳競技において、スタート動作とはスタート台上あるいはスタート台壁面からの蹴り出し動作を含む跳躍運動を指す。本研究では特に台上からの Grab start 動作を対象としているため、台上から水面への飛び込み動作あるいは跳躍動作をスタート動作と定義した。

### スタートパフォーマンス

競泳競技においてレースは、スタート動作を含むスタート局面、ストローク局面、ターン局面、フィニッシュ局面に分類される。このスタート局面におけるパフォーマンスの評価として、近年競泳におけるスタート動作を対象とした研究や各国の機関が実施するレース分析では、この局面の所要時間が採用されている。したがって、本研究はスタート局面の通過時間 (15m) をスタートパフォーマンスと定義した。



## 表のタイトル一覧

Table 1 Physical characteristics and swim performance of subjects (Experiment 1).

Table 2 Comparisons of kinematical variables among HT, NT and LT (Experiment 1).

Table 3 Physical characteristics and swim performance of subjects (Experiment 2).

Table 4 Kinematic variables of HT, NT and LT (Experiment 2).

Table 5 Maximum joint torque at shoulder, knee and ankle, minimum joint torque power at knee,  $t_{pk}$ ,

body angle at  $t_{pk}$ , segment angle of foot, shank, thigh and trunk at  $t_{pk}$  (Experiment 2).

## 図のタイトル一覧

Fig. 1 Diagram of kinematical variables in relation to the trajectory of center of gravity (CG) during aerial phase.

Fig.2 Various types of Swing start.

Fig.3 Circular outward swing recommended by Counsilman (1968).

Fig.4 Grab start (a) and Track start (b).

Fig.5 Normal type and Bunch start of Track start.

Fig.6 Modified starting block (a) for Handle start (b) (Pearson et al. 1998).

Fig.7 Forward type (a) and Rear type (b) of Track start.

Fig.8 Various types of arm-swing introduced by Maglischo (2003).

Fig.9 Classification of start technique on the starting block.

Fig.10 Flat start (a) and Scoop start (Pike start) (b).

Fig.11 Definitions of rotational component ( $V_r$ ) and extensional component ( $V_e$ ) of velocity of CG ( $V$ ) in a pendulum model.

Fig.12 Diagram of the definitions of kinematic variable (Experiment 1).

Fig.13 Image photographed in high speed camera (FASTCAM PCI, Photron Inc.).

Fig.14 Marking on subject body for identification of body segments at present study.

Fig.15 Relationship between body angle at the take-off ( $\theta_0$ ) and take-off angle ( $\alpha$ ) in LT, NT and HT.

Fig.16 Changes in velocity of CG ( $V$ ), rotational component ( $Vr$ ) and extensional component ( $Ve$ ) of  $V$  during NT of subject H.

Fig.17 Changes in take-off velocity ( $V_0$ ), flight distance, rotational component ( $Vr_0$ ) and extensional component ( $Ve_0$ ) of  $V_0$ , horizontal take-off velocity ( $Vx_0$ ) and block time caused by changes in take-off angle ( ) in each trial (HT, NT and LT).

Fig.18 Force platform at this study.

Fig.19 Free body diagram of starting block at present study.

Fig.20 Definitions of segment angle (a), relative joint angle (b) and body angle (c).

Fig.21 Free body diagram of segment i.

Fig.22 Definitions of joint torque ( $T_{\text{shoulder}}$ ,  $T_{\text{hip}}$ ,  $T_{\text{knee}}$ ,  $T_{\text{ankle}}$ ).

Fig.23 Relationship between body angle at the take-off and take-off angle.

Fig.24 Changes in averaged ground reaction force (n=12) of HT, NT and LT.

Fig.25 Changes in averaged joint torque (n=12) of HT, NT and LT.

Fig.26 Changes in relative joint angular velocity (a), joint torque (b) and joint torque power (c) at knee of Sub.J during HT and LT.

Fig.27 Relationship between take-off angle and body angle at  $t_{pk}$  (a), foot segment angle at  $t_{pk}$  (b), shank segment angle at  $t_{pk}$  (c), thigh segment angle at  $t_{pk}$  (d), trunk segment angle at  $t_{pk}$  (e).

Fig.28 Relationship between negative peak value of knee joint torque power ( $P_k$ ) and maximum knee joint torque.

Fig.29 Changes in averaged angular acceleration of each segment.

Fig.30 Changes in averaged moment generated to each segment by joint torque and joint force.

Fig.31 Changes in relative joint angular velocity (a), joint torque (b) and joint torque power (c) at knee of Sub.G during HT and LT.

Fig.32 Center of gravity at the take-off of each subject in Experiment 2.

Fig.33 Take-off angle and flight distance, horizontal take-off velocity and entry angle related to body angle at the take-off based on following equations.

Fig.34 CG trajectories and flight distance related to body angle at the take-off from Experiment 1 data.

Fig.35 Comparison of CG trajectories when body angle at the take-off were 30.8deg (A) and 45deg (B).

Fig.36 Cross sectional area which is determined by segment angle ( $\theta_e$ ) at the water entry.

Fig.37 Angular displacement of the whole body from take-off to water entry in order to perform hole entry.

## 関連論文

本論文は、以下に示した関連論文をまとめたものである。

1. 武田剛，市川浩，杉本誠二，野村武男：競泳スタートにおける飛び出し角度の変化が飛び出し速度，飛距離とブロックタイムに与える影響，体育学研究：51 (4)，515-524，2006 **【研究課題 1】(Experiment 1)**
2. 武田剛，市川浩，杉本誠二，三輪飛寛，椿本昇三，野村武男：競泳クラブスタートの飛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)，183-197，2007 **【研究課題 2】(Experiment 2)**

## 緒言

競泳のレースのパフォーマンスは、スタートシグナルから泳者のゴールタッチまでの時間によって決定される。競泳におけるパフォーマンス向上とは時間短縮と言い換えられ、選手はレースにおける様々な局面に要する時間短縮を試みている。競泳のレースの局面構造はスタート局面、ストローク局面、ターン局面、フィニッシュ局面に分類される。中でもストローク局面は所要時間が長く、パフォーマンスへの貢献度は高い。このため、多くの選手や指導者がパフォーマンス向上のほとんどをストローク局面の泳ぎと捉えていることが多い。ストローク局面の泳ぎは競泳のパフォーマンス向上に貢献する一要因であるが、実際に実力の伯仲するレースにおいては、ストローク局面以外において勝敗が左右されることも少なくない。

競泳レースにおけるスタート局面は、スタート台あるいはプール壁面から動作を開始するため、レース中に最も高い速度を実現できる局面である。また、競技種目の距離が短くなるほど、最終的な競技記録に対するスタートパフォーマンスへの貢献度は大きくなる (Thayer and Hay 1984)。Counsilman et al. (1988) は、10yard 通過タイムと 100yard の自由形の記録に高い相関が見られたと報告し、若吉ほか (1996) も 100m 自由形の平均泳速とスタート局面の平均泳速との間に男女ともに有意な相関が見られたと報告した。したがって、競泳の最終的な競技記録に占めるスタート局面の重要性は、特に短距離種目において高くなる。

背泳ぎ以外の競技種目において、スタート局面はスタート台上でのブロック期、空

中でのフライト期，完全入水までのエントリー期，ストローク開始までのグライド期の4つの局面に分けられる．先行研究においては，スタートパフォーマンスに貢献する主要な局面はグライド期にあるとされてきた (Zatsiorsky et al. 1979 , Guimaraes and Hay 1985 , 本間ほか 1997) . しかしながら，ブロック期においてレース中に最も高い速度が達成されること，そしてこの速度からの減速を抑えることがスタートパフォーマンスを決定する点を考慮すると，スタートパフォーマンスにおけるブロック期の重要性は高い．

競泳のスタート局面を扱った研究においては，ブロック期の台上動作を対象とした研究がこれまで数多くなされてきた (Zatsiorsky et al. 1979 , Guimaraes and Hay 1985 , Counsilman et al. 1988 , Vilas-Boas et al. 2000 , Benjanuvatra et al. 2004) . この台上動作は，現在に至るまでさまざまな技術変遷がなされてきた．1960年代以前の競泳競技のスタート動作は，プールサイドあるいはスタート台からの Swing start が主流であり (Maglisho 2003) , スタート台先端に両足の指先を掛け，前方への腕振りを伴って前方に飛び出すスタート台上技術である．その後，この台上での所要時間の短縮を目指して，構え時にスタート台先端を両手で握る Grab start (Hanauer 1967) と，構え時にスタート台先端を握り片方の足を後方に配置する Track start (Fitzgerald 1973) が紹介され，これらの台上技術が現在まで普及されてきた．

スタート台上動作を対象とした先行研究は，これらのスタート台上技術間の比較 (Ayalon et al. 1975 , Zatsiorsky et al. 1979 , Counsilman et al. 1988 , Holthe et al. 2001 , Issurin and Verbitsky 2003 , Kruger et al. 2003 , Miller et al. 2003 , Vilas-Boas et al. 2003 , Takeda and

Nomura 2006) や , スタートパフォーマンスと垂直跳びの跳躍高との関連性を示すものが多い (Zatsiorsky et al. 1979 ,Counsilman et al. 1988 ,Breed and Young 2002 ,De La Fuente et al. 2003) . 先行研究においては , 各台上技術に関して , 詳細な動作分析からのスタート動作の記述やスタート動作メカニズムの解明を行い , 動作の最適化を目指した研究はほとんど見当たらない .

スタート台上動作の最適化を考える際 , ブロック期においては短時間でスタート台から離台し , 泳者の進行方向に対して高い速度を実現し , さらに抵抗の少ない空中で長い飛距離を獲得することが求められる . すなわち , スタート台上所要時間 , 離台時の身体重心速度ベクトルの大きさと向きが重要なパラメーターとなる . このうちスタート台上所要時間 (ブロックタイム) はスタートパフォーマンスへの貢献度が小さいと報告されている (Tanner 2001) . また , 離台した泳者に作用する空気抵抗の影響は小さく , 離台後の泳者の身体重心は重力を受け , 放物運動をするとみなすことが出来る . したがって , 空気抵抗を無視すると , 離台後の泳者の身体重心の変位は , スタート台下の水面位置を原点とした , 水平方向を  $x$  軸 , 垂直方向を  $y$  軸とした 2 次元平面において , 以下の式で表すことが出来る (1), (2) .

$$x = V_0 \cos \phi t + l \cos \theta_0 \quad (1)$$

$$y = V_0 \sin \phi t - \frac{1}{2} g t^2 + l \sin \theta_0 + h \quad (2)$$

ここで  $V_0$  は跳び出し時の身体重心速度ベクトルの大きさ (合成速度) ,  $\phi$  はこの速度ベクトルの向き (速度ベクトルが水平面となす角) ,  $t$  は離台後の時刻 ,  $g$  は重力加速度 ,  $l$  は跳び出し時における身体重心とスタート台先端との距離 ,  $\theta_0$  は  $l$  が水平面



となす角,  $h$  は水面からのスタート台の高さを表す (Fig.1) .

これらの式 (1),(2) から, 離台時の身体重心速度ベクトルの大きさ ( $V_0$ ) と向き ( ) によって, 飛び出し時の進行方向速度 ( $V_0 \cos \theta$ ), 入水までの飛距離 ( $y=0$  となる時刻  $t$  における  $x$  座標) が決定される. さらには入水時 ( $y=0$  となる時刻  $t$ ) の身体重心速度の水平成分 ( $V_0 \cos \theta$ ) と垂直成分 ( $V_0 \sin \theta - gt$ ), 入水速度ベクトルの大きさ (合成速度) と向き (入水角度) も決定されることになる. これらの点から, ブロック期において達成される身体重心速度ベクトルの大きさ ( $V_0$ ) と向き ( ), すなわち飛び出し速度 ( $V_0$ ) と飛び出し角度 ( ) がスタートパフォーマンスにとって極めて重要なパラメーターとなる. 飛び出し速度 ( $V_0$ ) に関しては, その重要性は周知のものであるが, 飛び出し角度 ( ) に関して検討した研究はほとんど見当たらない. また水泳の指導書においても, 力学的な根拠に基づいた適切な飛び出し角度 ( ) の提示や, 飛び出し角度 ( ) の制御方法に関する記述はほとんど見当たらない.

飛び出し角度 ( ) には, この角度の変化の影響を受ける進行方向の飛び出し速度と入水速度, 飛距離, そして身体重心の入水角度といったパラメーターのパフォーマンスへの影響を加味した最適な値が存在することになる. スタート動作の最適化を目指す研究においては, 15m の通過時間が最も短くなるような理論的な飛び出し角度 ( ) の最適値を導き出すことが求められる. そのためにはスタート局面全体にわたるスタート動作中の詳細な Kinematics・Kinetics を把握し, この飛び出し角度 ( ) の変化に伴うスタート動作の Kinematics・Kinetics の変化がスタートパフォーマンスに与える影響も考慮しなくてはならない. さらには, 被験者の発揮する筋出力情報, 泳者

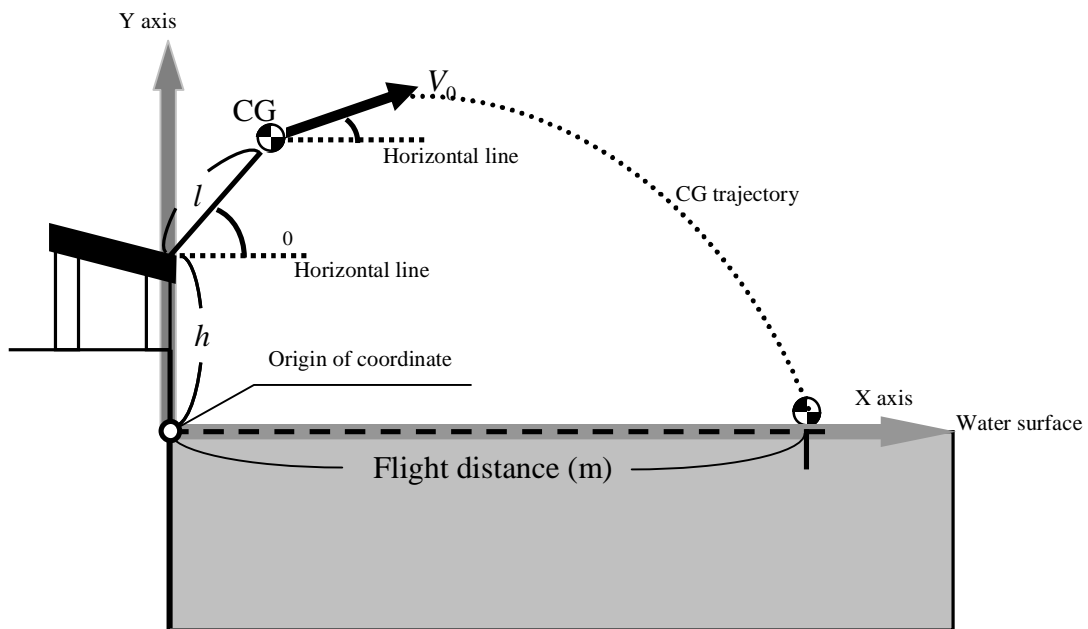


Fig.1 Diagram of kinematical variables in relation to the trajectory of center of gravity (CG) during aerial phase.

- $V_0$  : Take-off velocity; velocity of CG at the take-off.
- $\theta_0$  : Take-off angle; the angle between horizontal line and take-off velocity vector .
- $l$  : Line between edge of starting block and CG.
- $h$  : Height of starting block from water surface.

が水から受ける流体力に関する情報に至るまで、膨大な情報を収集する必要がある。

前述したように、競泳スタートに関する先行研究においては、スタート動作の詳細な Kinematics・Kinetics が明らかにされていない。また跳び出し角度（ ）の変化に伴う Kinematics・Kinetics の変化の実験的検証も十分に行われておらず、現在までに最適な跳び出し角度（ ）の導出に必要な力学的データが十分に収集されていないのが現状である。

### 1-1. 研究の目的

本研究は、現在一般的なスタート技術の一つである Grab start における跳び出し角度の変化がスタートパフォーマンスに与える影響を検討するため、跳び出し角度の制御に関わる Kinematics・Kinetics 的要因を明らかにすることと、さらに跳び出し角度の変化が跳び出し速度、ブロックタイム、飛距離に与える影響を明らかにすることを目的とした。

## 文献研究

### 2-1. スタートパフォーマンス決定要因

現在，一般的にスタート局面はスタートから 15m までと定義され，この局面のパフォーマンスは 15m における泳者の頭部通過時間によって評価される．過去の先行研究や各国の機関（オーストラリアスポーツ研究所，ドイツ水泳連盟，カナダ水泳スポーツ科学センター，フランス水泳連盟，日本水泳連盟）が実施しているレース分析においては，スタート局面の定義が一貫しておらず，その範囲は 7.5m から 15m であった（野村ほか 2000）．しかしながら，1998 年の FINA（国際水泳連盟）の競泳競技規則改正により，従来は背泳ぎだけであったスタートとターン後の 15m までの潜行距離制限（1991 年に改正）が，自由形とバタフライにおいても適応されたため，以降のスタート局面の定義はスタートから 15m までとされるようになった．

スタート局面は，台上からのスタートを行う種目においては，スタートシグナルから泳者がスタート台から離台するまでのブロック期，離台から泳者の指先が入水するまでのフライング期，指先入水から泳者の完全入水までのエントリー期，完全入水からストローク開始までのグライド期と定義される．Guimaraes and Hay (1985) は，9m 通過時間とグライド期の所要時間，そして 9m 通過時間とグライド期の平均水平速度との間に，それぞれ， $r = 0.97$  と  $r = -0.84$  の有意な負の相関が見られることを報告した．Zatsiorsky et al. (1979) は，足先の 5.5m 通過時間と頭の入水から 5.5m 通過までの時間（Glide time）との間に， $r = 0.94$  の有意な相関を報告した．また本間ほか (1997)

もスタート局面におけるグライド期の重要性を述べている。これらの先行研究から、スタート局面における最も重要なパフォーマンス決定要因はグライド期における高い進行方向速度であると考えられてきた。これは、スタート局面に対してグライド期の占める移動距離が最も長く、さらに水中において泳者が受ける抵抗は空中よりも極めて大きいため、水中におけるグライド期の抵抗を軽減させる技術の優劣がパフォーマンスに直結しやすいためである。したがって、グライド期において生じる減速を如何に小さくするかによりスタートパフォーマンスが決定されることになる。

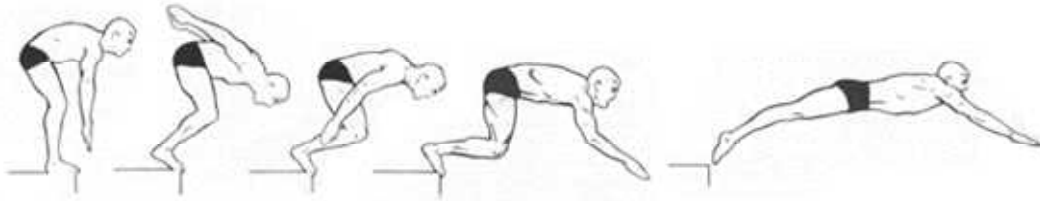
スタートパフォーマンス向上には、グライド期における減速を小さくすることが最も重要になるが、高い速度からの減速を抑えることで最大の効果が期待できる。したがって、ブロック期において達成される跳び出し水平速度も、スタートパフォーマンスには重要なパラメーターである。本間ら (1997) は 10m 通過時間と跳び出し水平速度との間に  $r = -0.70$  の有意な負の相関を報告し、吉田と斉藤 (1981) は跳び出し水平速度と 5m 通過時間との間に  $r = -0.737$ 、跳び出し水平速度と 25m 通過時間との間に  $r = -0.599$  の有意な負の相関を報告した。さらに Zatsiorsky et al. (1979) は跳び出し水平速度とグライド期の泳速度との間に  $r = 0.60$  の有意な相関を報告した。このように、ブロック期における跳び出し水平速度は、グライド期の高い泳速度実現の前提条件であり、パフォーマンスに対する影響も大きいため、スタート局面におけるブロック期の重要性は高い。

## 2-2. 台上スタート技術の変遷

Maglischo (2003) は、その著書のなかで、1960 年代以前のスタート技術は、前方への腕振りを伴う Swing start であったと記述している。この Swing start は腕を真っ直ぐ下ろした状態で構え、手がスタート台に触れないスタート台上技術を指す。この Swing start には上肢の腕振り (Arm-swing) の種類が 4 つ存在する (宮下ほか 1973)。スタートシグナルとともに腕を後方に振り、前方に振り出しながら跳び出す Straight backswing start (Fig.2-a)、肩関節をあらかじめ伸展させておき、スタートシグナルとともに前方に振り出しながら跳び出す Arm back start (Fig.2-b)、そして腕を真っ直ぐ下ろした状態で構え、スタートシグナルとともに腕を回しながら上方に振り上げ、頭を越して振り下げられて、前方にまた振り上げながら跳び出す Circular backswing start (Fig.2-c)、さらに Counsilman (1968) が考案した、上肢を横から振り上げその後上肢を腰まで回し上方に振り上げる Circular outward swing の 4 つである (Fig.3)。

1960 年代に入ると、現在多くの競泳選手に採用されている Grab start が Hanauer (1967) によって紹介され、その後急速に普及し始めるようになった。このスタートはスタートの構え時に手でスタート台をしっかりと握り (Grab)、素早く前方に跳び出すことを重視したスタート動作である (Fig.4-a)。1970 年代に入ると、Fitzgerald (1973) によって、Track start が紹介され、このスタートもこの後普及し始めるようになった。これまでの Swing start と Grab start は、両足をスタート台先端にかけていたが、Track start は、両足を前後に開き、片足だけスタート台先端にかけて構えるスタートである (Fig.4-b)。この Track start は Grab start よりも短時間で跳び出すことが可能であるとさ

**Straight backswing start (a)**



Modified from Counsilman (1968)

**Arm-back start (b)**



Modified from Counsilman (1968)

**Circular backswing start (c)**



Wilkie and Juba (1986)

**Fig.2 Variations of Swing start.**

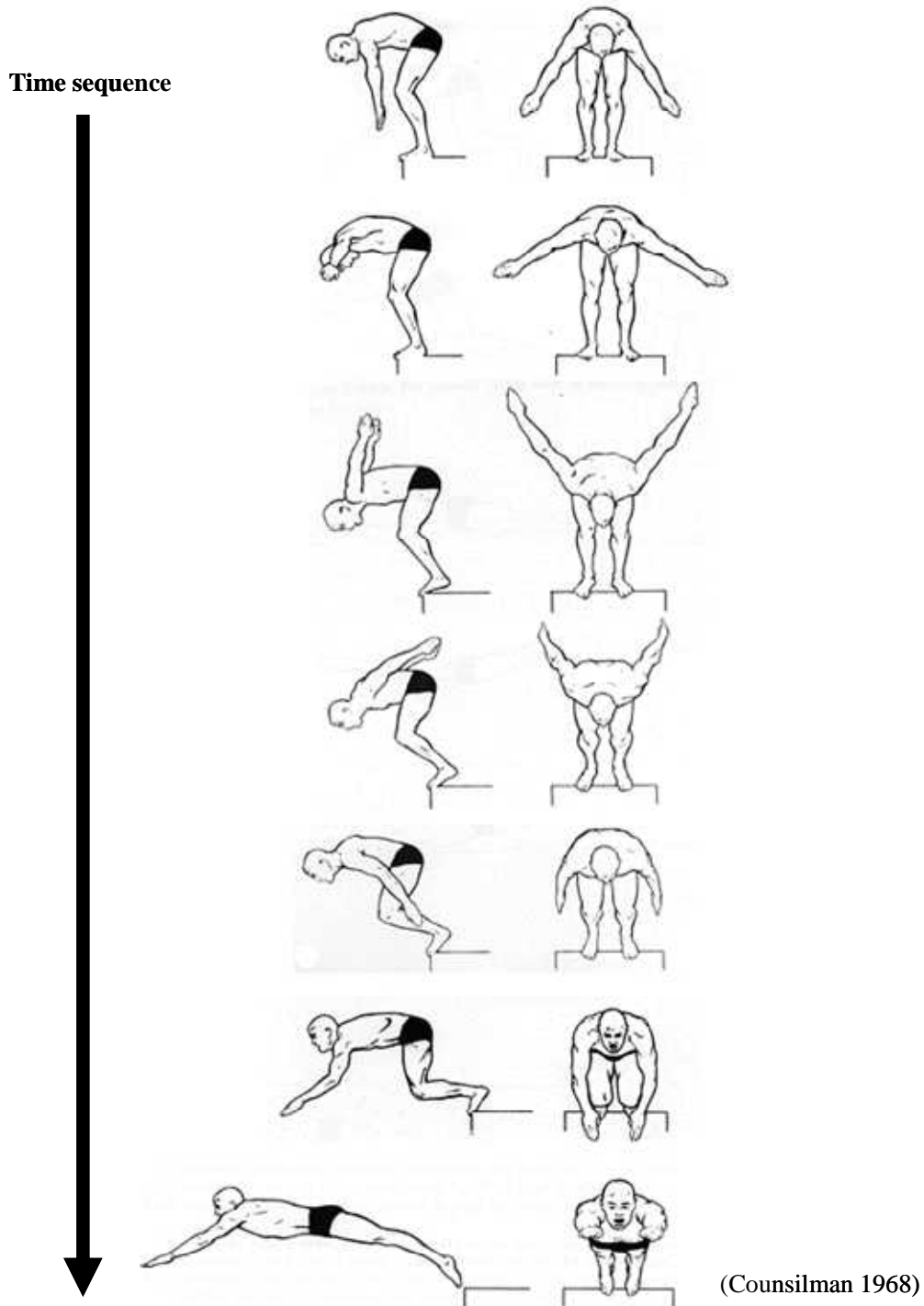


Fig.3 Variation of swing start recommended by Counsilman (1968).



Grab start (a)



Track start (b)



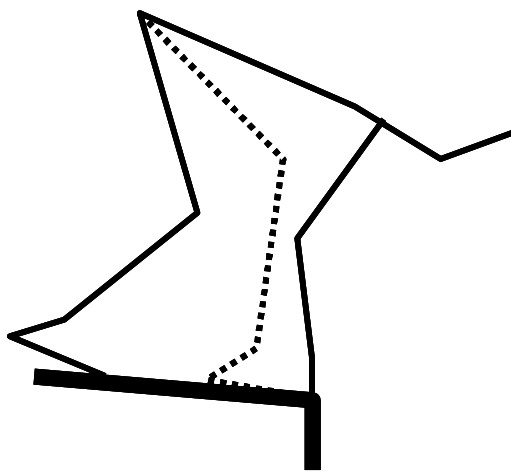
Fig.4 Grab start (a) and Track start (b).

れている。

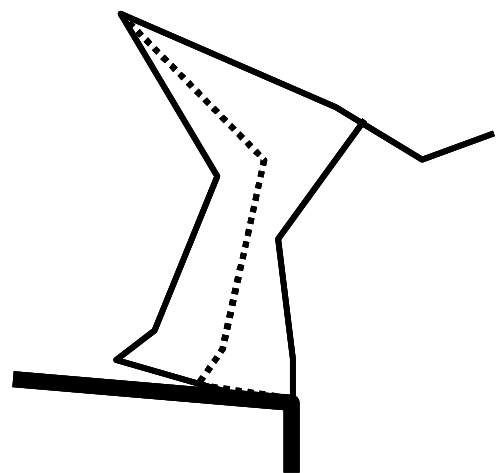
Track start という名前は、陸上競技の短距離種目におけるスタート技術に類似していることに由来している。このため前足と後足の配置の距離間隔が狭い Track start は特に、Bunch start と呼ばれる (Ayalon et al. 1975, LaRue 1985) (Fig.5)。また水泳の指導書、現場の選手と指導者の間においては、Track start は Crouching start と呼ばれることも多い。この Track start は、従来の構え姿勢において身体重心とスタート台先端の水平距離が短くなるように身体全体を前傾させる Track start Forward type (TSF) に加え、近年では身体重心とスタート台先端の水平距離が長くなるように身体全体を大きく後傾させる Track start Rear type (TSR) の 2 種類が見られるようになった (Vilas-Boas et al. 2000) (Fig.6)。

1998 年には Grab start の改良型として、FINA のスタート台に関する規定に準じて改良されたスタート台 (Fig.7-a) においてのみ可能となる Handle start が Pearson et al. (1998) によって紹介された。この Handle start は、スタート台の側面に設置された Handle を握り、台上の泳者の身体重心がスタート台先端よりも前方に配置されるようなスタート台上技術である (Fig.7-b)。この研究においては、Grab start と Handle start を比較し、ブロックタイムが Handle start において有意に短くなる結果が示された。従来のスタート台においては、Handle が設置されていないため Handle start の実施は困難である。またこの改良されたスタート台の導入が実際にはほとんど行われていないため、この Handle start の普及はあまりなされていない。

Issurin and Verbitsky (2003) は 2000 年のシドニーオリンピックの背泳ぎを除く準決



(a) Normal type of Track start



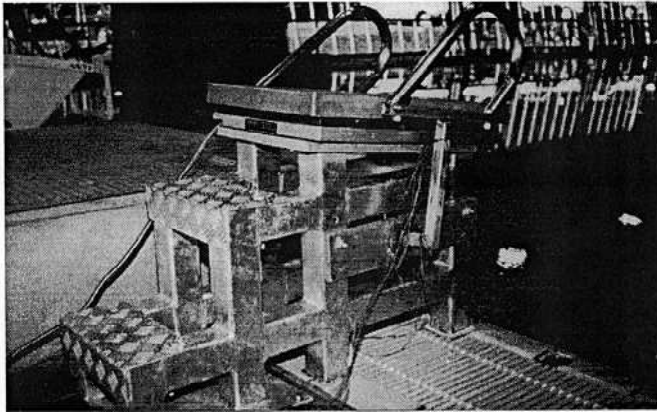
(b) Bunch start of Track start

Fig.5 Normal type and Bunch start of Track start.

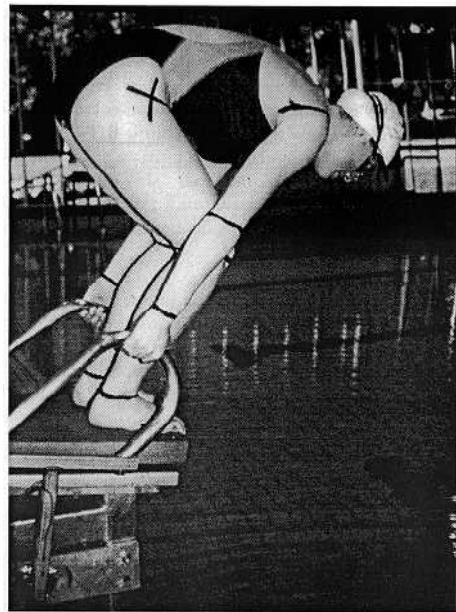


岩原・窪 (2004) より抜粋

Fig.6 Rear type (a) and Forward type (b) of Track start.



(a) Modified starting block



(b) Set position for Handle start.

Fig.7 Modified starting block (a) for Handle start (b) (Pearson et al. 1998).

勝と決勝種目における Track start の使用率を、男子で 37%、女子では 40% と報告した。近年までは最も多くの競泳選手が採用するスタート技術は、Grab start であった。しかしながら、Track start を採用する競泳選手は年々増加し、現在では競泳の台上スタート技術は Grab start と Track start の 2 つに大別されるようになってきた。

Swing start 以外の台上技術は、台上での構え姿勢の違いを分類してきたものであるが、台上動作中の上肢の動きについても 3 つの種類が存在する (Maglischo 2003)。構え姿勢から手が離台するとそのまま前方に上肢を振り上げる従来の Forward swing (Conventional arm-swing)、構え姿勢から手が離台すると一端後方に上肢を振り上げ、その後前方に上肢を振り上げる Straight back-swing (Fig.8)、そして構え姿勢から手が離台すると後方に上肢を振り上げそのまま頭を越して前方に上肢を回す Butterfly arm-swing (Fig.8) の 3 つのタイプである。

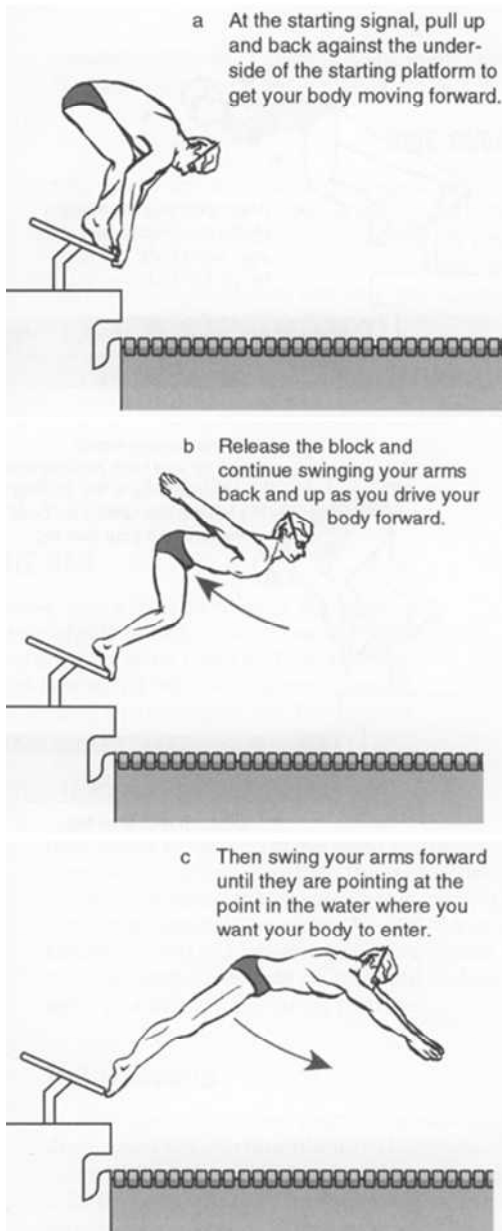
上記のスタート台上技術の分類を Fig.9 にまとめた。

### 2-3. Swing start , Grab start , Track start の比較研究

異なるスタート技術の比較に関する研究は数多く行われている。現在までのスタート技術の変遷の歴史をたどると、スタート台上動作はスタート台上所要時間 (ブロックタイム) の短縮を目指した技術改良がなされてきた。

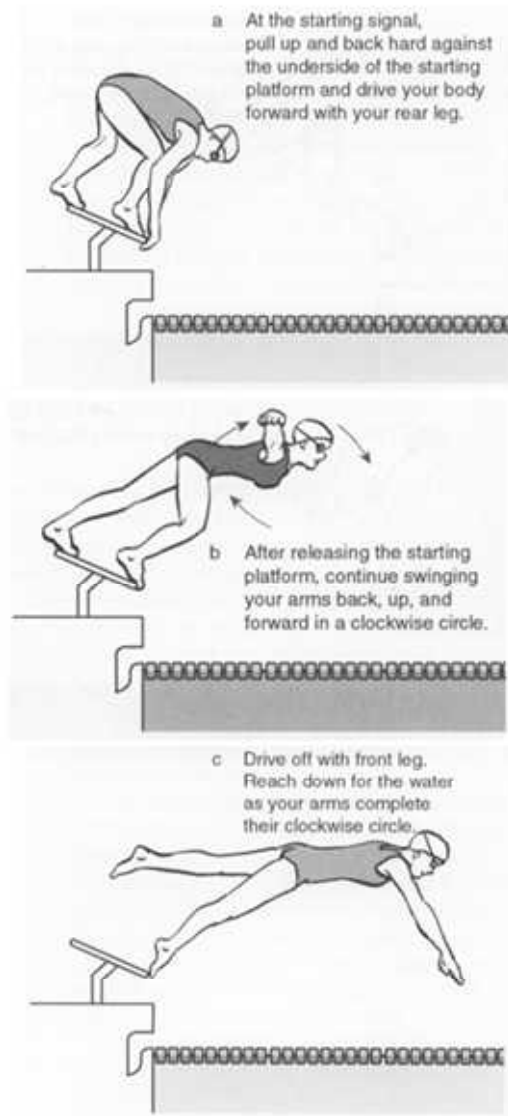
Hanauer (1972) はアメリカ大学選手権 50yard 自由形優勝選手 1 名を対象に、Swing start (Straight Backswing start) と Grab start の比較を行った。この結果、空中期の水平速度に差はないが Grab start のブロックタイムが短くなると報告した。また、

**Time sequence**



Maglischo (2003)

<Straight back swing>



Maglischo (2003)

<Butterfly arm swing>

Fig.8 Various types of arm-swing introduced by Maglischo (2003).

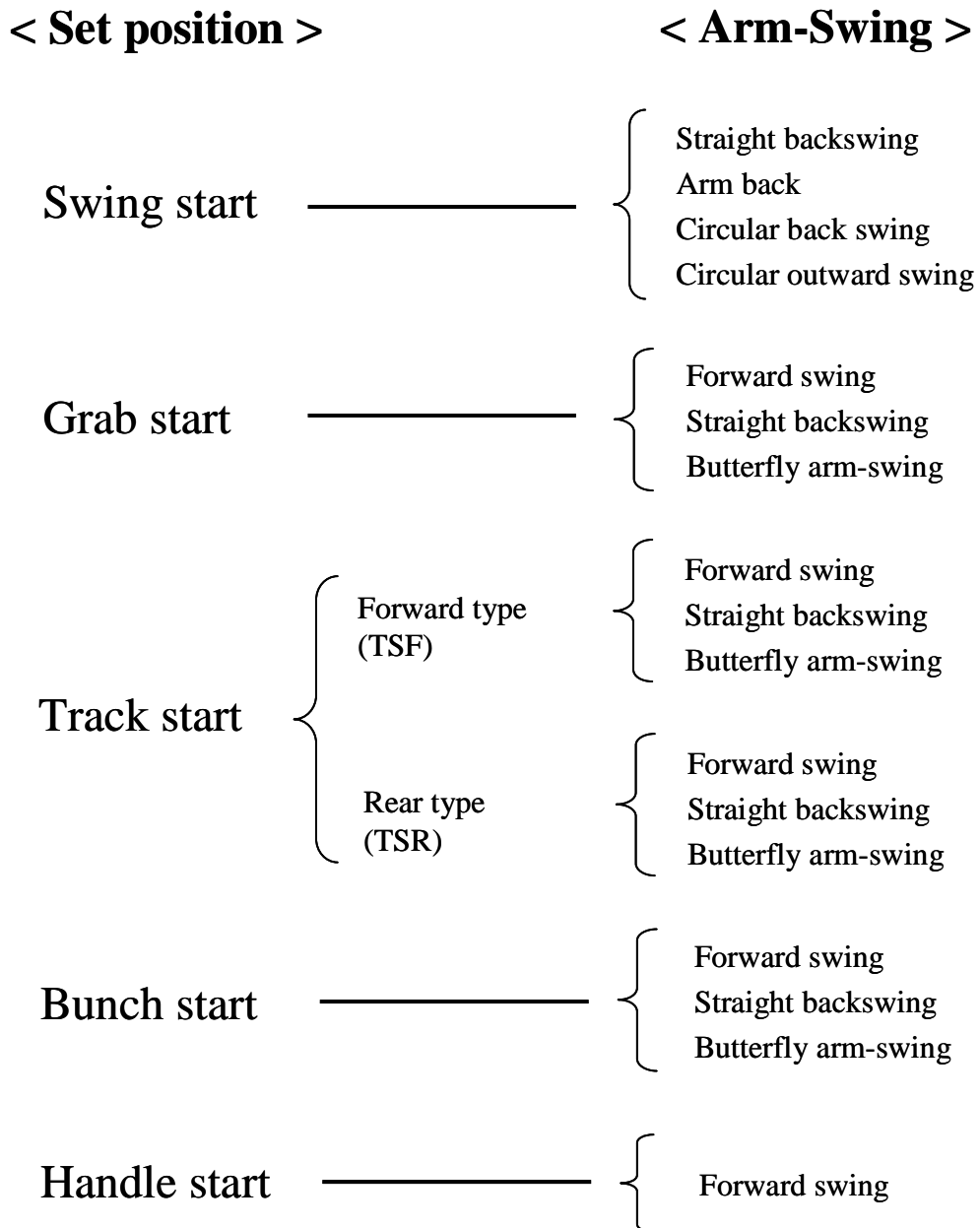


Fig.9 Classification of start technique on the starting block.



Roffer (1972) は、8 名男子と 1 名の女子大学競泳選手を対象に、Swing start と Grab start の比較を行った。結果は被験者全員で Grab start のほうがブロックタイムと 12feet 通過時間が短くなったと報告した。

Ayalon et al. (1975) は、日常的にトレーニングを行っていない 20 名の男性を対象とし、Swing start (Straight backswing start)、Grab start、Bunch start、Track start の比較を行った。結果として Bunch start と Track start は、Swing start と Grab start よりも有意にブロックタイムが短くなり、5m 通過時間においては Track start と Bunch start、Swing start と Bunch start との間に有意差が認められ、Track start、Swing start、Grab start、Bunch start の順に 5m 通過時間が短くなったと報告した。

Bowers et al. (1975) は、全国大会出場レベルの 6 名の女子大学競泳選手を対象に、Swing start (Circular armswing start) と Grab start の比較を行った。跳び出し時の身体重心速度は、両スタート間に有意差は認められなかったが、Grab start の平均ブロックタイムが Swing start よりも 0.17 sec 有意に短くなるという結果を示した。そして 10yard の平均通過時間は Grab start が Swing start よりも 0.184 sec 有意に短くなったが、この差のほとんどがブロックタイムの差であることを報告した。

Bloom et al. (1978) は、過去のスタート技術の経験の差を取り除くために、競泳の競技歴のない 30 名の女子大学生を対象に、Arm swing のタイプ (Fig.2) を制限しない Swing start と Grab start を比較した。10feet 通過時間とスタートシグナル反応時間 (スタートシグナルから泳者の動き出しまでの時間) と台上動作時間 (泳者の動き出しから離台までの時間) を比較し、台上動作時間にのみ有意差が認められ、Grab start の

ほうがこの時間が短くなると報告した。

Zatsiorsky et al. (1979) は、45 名のエリート男子競泳選手を対象に Forward arm swing start, Full arm swing start, Grab start, Track start の 4 つのスタートの 5.5m の通過時間を報告し、Track start は他の 3 つのスタートに比べ 5.5m 通過時間が有意に長くなる結果を示した。また Grab start と Arm-swing start の地面反力データから、Grab start のブロックタイムが短くなると述べた。

LaRue (1985) は 18 名の全米選手権出場レベル女子大学競泳選手を対象に、Grab start と Track start の比較を行い、ブロックタイムと飛び出し速度に有意差は認められなかったものの、Track start の空中期の所要時間と 4m 通過時間が有意に短くなる結果を示した。

Counsilman et al. (1988) は、37 名の男子大学競泳選手を対象に、入水方向が異なる 2 種類の Grab start である Scoop start (Pike start) と Flat start と、Track start の 3 種類のスタートを 12.5yard の通過時間で比較した。Scoop start とは、指先入水位置と足先入水位置との距離が小さくなるように一点で入水 (Hole entry) するようなスタート技術を指す (Fig.10)。またこのスタートは一点で入水する様から Pike (矛) start とも呼ばれる。Flat start はこの距離が大きくなるようなスタート技術を指す (Fig.10)。12.5yard の平均通過時間は、Scoop start で 4.37 sec、Flat start で 4.16 sec、Track start で 4.25 sec と報告した。12.5yard 通過時間の平均値においては Scoop start が最も遅くなり、Scoop start において 12.5yard 通過時間が最も短くなった被験者が 1 人もいなかった結果を示した。しかしながら、この研究における被験者は長年 Flat start を使用していた競

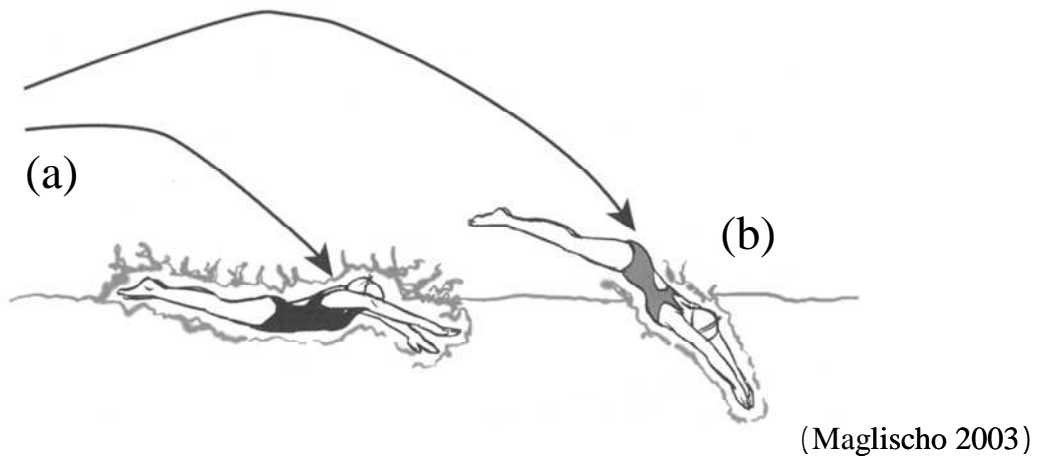


Fig.10 Flat start (a) and Scoop start (Pike start) (b).

泳選手であったため、各スタート技術間の熟練度の差を無視することは出来ないことから、スタート技術間の差について結論を導き出すことは出来ないとした。

Holthe and McLean (2001) は、10名の男子大学競泳選手を対象に Grab start、Bunch start と Track start の比較を行った。両スタートの跳び出し速度と飛距離に有意差が認められなかったものの、Track start が Grab start よりも有利になる結果が示されたことから、Track start の有効性を主張している。

Kruger et al. (2003) は、ドイツのエリート女子競泳選手7名を対象に、画像による動作分析、地面反力と筋電図分析を行い Grab start と Track start を比較した。その結果、動作中の Kinematics・Kinetics 的要因の差異は小さいと述べ、Grab start の跳び出し速度が速くなり、7.5m の通過時間は Grab start のほうが有意に短くなる結果を示した。しかしながら、この結果に関して Counsilman et al. (1988) と同様に過去のスタート技術の経験が結果に影響していることを述べている。

Issurin and Verbitsky (2003) は、シドニーオリンピック競泳競技において、Grab start と Track start を使用する選手のブロックタイムと 15m 通過時間を男女全種目について調査した。男女ともにほとんどの種目において Track start のブロックタイムが有意に短くなり、女子の 800m 自由形、100m と 200m の平泳ぎとバタフライにおいて Track start を使用する選手のほうが 15m 通過時間が有意に短くなる結果が示された。これらの結果から Track start の有効性を主張している。

Vilas-Boas et al. (2000) は、ポルトガルのトップレベルの男子競泳選手 11 名を対象に、Track start における TSF (Track start Forward type) と TSR (Track start Rear type) (Fig.7)

の比較を行った。台上動作時間、ブロックタイムは TSF で有意に短く、跳び出し水平速度は TSR で有意に高くなるが、6.07m 通過時間は両スタートに有意差が認められない結果を示した。これら結果について Vilas-Boas et al. (2000) は、TSR においては、構え時に泳者の身体重心が後方に配置され、長い重心移動距離に渡り地面反力を得られると説明している。さらにこの重心移動距離がブロックタイムの延長を引きこし、跳び出し速度を高くすると考察した。さらにこの研究グループは、11 名のポルトガルトップレベルの男子競泳選手を対象に、Grab start と TSR と TSF を比較した (Vilas-Boas et al. 2003)。この結果、Grab start は、シグナルへの反応時間 (Reaction time) が TSF と TSR よりも短くなるが、水平方向と垂直方向力積は TSR と同等の値を示したと報告した。最終的な 6.07m の通過時間には有意な差は認められなかったと結論付けた。

Miller et al. (2003) は、8 名の男子と 7 名の女子の大学競泳選手を対象に、Grab start と Track start を比較した。両スタート間のブロックタイムに有意差は認められなかったが、Grab start の水平方向と垂直方向の力積と指先入水までの飛距離が有意に大きくなる結果を示した。この結果の原因については、この研究における Track start は Bunch start に近いスタート技術であり、後足から得られる反力が制限されたためと述べた。

Takeda and Nomura (2006) は、6 名の大学男子競泳選手を対象に Grab start と Track start の比較を行った。ブロックタイムは Track start において有意に短くなったが、跳び出し速度においては両スタート間に有意差が認められなかったと報告した。Track

start のブロックタイムが短くなった原因については、片足が後方に配置されることで、地面反力によって身体全体に前方回転モーメントを生じさせやすいため、Grab start と比較すると身体重心水平速度を立ち上げやすいと推察している。この点に関して、窪(2005)も Track start は後方に引いた脚と前方の腕および脚の動作により偶力を生じさせやすく、初期の水平速度の立ち上がりを強調できると述べている。

以上の先行研究をまとめると、従来の Swing start、Grab start、Track start の順に跳び出し速度が高く、Track start、Grab start、Swing start の順でブロックタイムが短い特徴が示された。これらの特徴から、スタート台上動作の技術変遷は、跳び出し速度を犠牲にし、ブロックタイムを短縮をさせるという結果をもたらした。

Swing start の跳び出し速度が高くなる原因は、上方への腕振りに伴う上肢の運動量が全身の運動量に加味されるためであるとされている (Roffer 1972, Wilkie and Juba 1986)。この点に関して、跳躍方向が競泳スタートとは異なるが、垂直跳びの腕振りに関して同様な結果が報告されており (Feltner et al. 2004)、上方への腕振りに伴う跳躍高の増大という知見がすでに一般化されている。

Track start は、後方の足がスタート台表面に配置され、泳者が得られる水平反力はスタート台表面との摩擦력에依存することになる。Grab start は両足の指先をスタート台先端に掛けるため Track start に比べると大きな摩擦力が得られると考えられる。したがって Grab start は Track start に比べ下肢の蹴り出しによって高い跳び出し速度が実現できると考えられている (Miller et al. 2003, Takeda and Nomura 2006)。

Maglischo (2003) は Grab start のブロックタイムが Swing start よりも短くなる理由

を、腕でスタート台を引き付けることによって素早く身体を前方に動かせると説明している。この点に関して Cavanagh et al. (1975) と Guimaraes and Hay (1985) は Grab start の台上動作中において手で発揮される力を測定し、上肢はスタート台を引きつけるような力発揮を行っていることを報告した。このような先行研究から、Grab start はスタート台先端を両手で握ることによってブロックタイムが短くなるとされている。

最終的なスタートパフォーマンスについては、Grab start と Track start は Swing start よりも勝るという結論が示されているが、Track start と Grab start の統計的に有意なスタートパフォーマンスの差に一貫性が見られない。この背景には、Counsilman et al. (1988) や Kruger et al. (2003) が述べたような、被験者の使用するスタート技術の経験が結果に強く影響することや、さらに各先行研究で採用される最終的なスタートパフォーマンスの評価方法が 10feet (約 3m) から 12.5yard (約 11.43m) までと統一されていない問題が存在する。

以上のように、これまでの先行研究によって Kinematics 的変数の比較から各スタート技術の Kinematics 的特徴が明らかにされてきた。しかしながら、各スタート技術の Kinetics は十分に明らかにされておらず、これらのスタート技術間の Kinematics の差の原因究明には至っていない。各スタート技術における動作の最適化や、Track start と Grab start 間の優劣を決定するためにも、各スタート技術の詳細な Kinetics を調査する必要がある。

## 2-4. 競泳スタート台上動作と垂直跳びの関係

スタート動作が跳躍運動の一種であることから，垂直跳びとスタートパフォーマンスの関係を論じた研究が存在する (Zatsiorsky et al. 1979 , Counsilman et al. 1988 , Breed and Young 2002 , De La Fuente et al. 2003) .

Zatsiorsky et al. (1979) は 60 名の競技レベルの異なる競泳選手において ,5.5m の通過時間と垂直跳びの成績との間に  $r = -0.64$  の有意な負の相関を報告し , さらに 5.5m の通過時間は身長と体重との間にも有意な負の相関が認められたと報告した (身長 :  $r = -0.67$  , 体重 :  $r = -0.75$ ) . この点に関して Counsilman et al. (1988) も男子 55 名 , 女子 66 名のジュニア競泳選手において , 10yard 通過時間と垂直跳びとの間に強い負の相関が認められたと報告した . これらの研究によって , スタートパフォーマンスにおいて , 体力的要素としての下肢筋力に大きく依存する跳躍能力の重要性が示された .

一方で De La Fuente et al. (2003) は , 44 名の男子と 21 名の女子大学競泳選手を対象として , Counter-Movement Jump (CMJ) とスタートパフォーマンスとの関係を調査した . 垂直方向へ跳ぶ CMJ の垂直速度と飛び出し水平速度との間に有意な相関が認められなかったことから , CMJ とスタート台上動作の運動様式の違いから , CMJ によってスタート台上動作中に泳者がスタート台に作用させる力を予測することは出来ないと述べた . また Breed and Young (2002) は , 水泳の競技歴がない体育を専攻する女子大学生 23 名を対象とし , 垂直跳びを向上させることを目的とした週 3 回 9 週間のレジスタンストレーニングがスタートパフォーマンスを向上させるかを検討した . レ



レジスタンストレーニングの結果、腕振りありと無しの CMJ の跳躍高と、スクワットジャンプ中の膝関節のアイソキネティック（等速性）筋力がそれぞれ 12.3% (pre : 37.8±6.9cm , post : 43.1±6.2cm) , 10.3% (pre : 27.3±4.8cm , post : 30.6±4.7cm) , 13.8% (pre : 113±19.8Kg , post : 132±19.9Kg) 有意に増加した。しかしながら、レジスタンストレーニング後において飛距離の有意な増加は認められず、下肢によってスタート台に発揮される力積に有意な増加が見られなかった。これらの結果から、跳躍能力の向上は直接的にスタート台上動作に変換されないと述べ、スタート台上動作における技術要素の重要性を主張した。

これらの研究は、水平跳躍運動であるスタート台上動作と垂直跳びの動作様式の違いを、台上スタート動作と垂直跳びの相関が見られなかった要因であるとしている。これらの研究により、スタートパフォーマンスにおける体力要素としての下肢筋力の重要性に加えて、技術要素の重要性も示された。

## 2-5. 跳躍方向の制御に関する研究

競泳スタート動作以外の静止状態からの跳躍運動において、その跳躍方向の制御に関する研究はいくつか存在する (Ridderikhoff et al. 1999 ,鳥海ほか 2002 ,Fukashiro et al. 2003) 。Ridderikhoff et al. (1999) は、Counter-Movement (反動動作) と上肢の運動を制限したスクワットジャンプの跳躍方向の制御に関して、跳躍方向を実験的に変化させた試技の Kinetics の比較を行った。さらに Ridderikhoff et al. (1999) は骨格筋モデルを用いて、垂直跳び時の筋出力で様々な身体の傾きで飛び出した際のシミュレーションを

実行し、飛距離が最大となる時の Kinetics を算出した。これらの結果、実験試技とシミュレーションから求めた下肢関節トルクの変化が非常に類似していたことから、跳躍方向は下肢関節の伸展動作前の身体全体の前傾によって制御されると述べた。

Fukashiro et al. (2003) は上肢の運動を制限した垂直跳びと立ち幅跳を比較し、跳躍方向の制御は、下肢関節伸展動作前の体幹の位置と二関節筋の筋活動が関与すると報告した。また鳥海 (2002) は Counter-Movement と上肢の運動を制限した垂直跳びと立ち幅跳びを比較し、跳躍方向を水平にするためには膝関節のトルクを小さくすることが必要十分条件になると述べ、その理由として二関節筋の co-activation によるものと説明した。

垂直跳びと比較して、立ち幅跳びの膝関節のトルクが小さくなる現象は、Robertson and Fleming (1987)、鳥海 (2002)、Fukashiro et al. (2003) によって報告され、下肢関節の伸展動作前における身体の前傾が跳躍方向に関わる現象は、Ridderkhoff et al. (1999)、Fukashiro et al. (2003) と窪 (2003) によって報告されている。このような先行研究から跳躍方向の制御には身体全体の前傾と二関節筋の筋活動が大きな役割を担っていると考えられている。

しかしながらこれらの先行研究においては対象としている試技条件（上肢の運動の制限条件：Counter-Movement）が統一されておらず、報告された結果には相違が見られ、跳躍方向の制御のメカニズムに関していまだ明らかとなっていない部分も多い。さらに競泳の台上スタート動作において跳び出し方向の制御メカニズムに関する力学的な検討を行った先行研究は現在のところ見当たらない。

## 研究の課題

前述の先行研究から、競泳におけるスタート台上動作に関して以下の問題点が指摘された。

- (1) スタート台上動作に関して、詳細な動作分析からの Kinematics・Kinetics 情報が不足しており、台上動作の運動の記述が十分に行われていない。
- (2) 飛び出し角度はスタートパフォーマンスにとって重要なパラメーターであるが、この飛び出し角度が決定される Kinematics・Kinetics 的要因が明らかになっていない。
- (3) 飛び出し角度の変化が飛び出し速度、ブロックタイムと飛距離に与える影響が実験的に検証されておらず、飛び出し角度変化がパフォーマンスに与える影響が明らかになっていない。

前述の問題点を解決するために以下の研究課題を設定した。

### 【研究課題 1】(Experiment 1)

Grab start の飛び出し角度制御に関わる Kinematics 的要因を明らし、飛び出し角度

変化に伴うスタートパフォーマンスへの影響を検討する。

**【研究課題 2】(Experiment 2)**

Grab start の跳び出し角度制御に関わる Kinetics 的要因を明らかにする。

## 研究の限界

本研究には、研究方法において制限が存在し、得られた知見の一般化・普遍化に関する限界が存在する。

### 4-1. 標本における限界

本研究では、被験者選定の制限として男子大学競泳選手（全国大会優勝から出場レベル）を対象としたことが挙げられる。このため、本研究から得られた結果をそのまま異なる年齢層と競技者レベルに適応することには限界がある。

### 4-2. 実験方法における限界

#### 2次元における動作分析による限界

本研究では競泳の Grab start 動作を泳者の推進方向である水平方向と垂直方向の2次元的な運動であると仮定し剛体リンクモデルによってモデル化を行い、分析を行った。競泳の Grab start 動作では、体幹の捻りなどが少ないことから、その運動のほとんどを2次元で説明できるが、本来の人間の動きは3次元的な運動であり、厳密に考えれば3次元的に動作を分析する必要がある。バイオメカニクス的手法を用いた研究論文は、運動が主として矢状面内で行われる運動に関しては2次元運動として捉えて分析することが多い。したがって、本研究においては競泳の Grab start 動作を2次元動作として分析した。

### 実験設定上の限界

本研究の実験では、スタート台傾斜板の下に 1 台の防水型フォースプレート (9253B11 Kistler 社製) を設置し、被験者がスタート台上動作中に受ける地面反力を測定した。この地面反力データと画像分析から得られた 2 次元実座標データを用いて、逆動力学解析により四肢の関節トルクを算出した。本研究の研究対象である Grab start は両手と両足をスタート台先端にかけて構える動作であるため、本研究の実験設定上、スタート台上の被験者には力学的閉ループが形成される。したがって被験者の両手と両足がスタート台に触れている局面においては、両手と両足が受ける地面反力を分離することが出来ない。このため本研究では、被験者の両手に作用する地面反力は 0 であると仮定した上で逆動力学解析を行い、四肢の関節トルクを求めた。しかしながら、力学的閉ループの問題からこの仮定により求められた両手両足がスタート台に触れている局面における関節トルクは妥当な値ではないため、この局面の関節トルクは取り扱うことは出来ない。

### 試技設定上の限界

本研究では、跳び出し角度変化に伴う Kinematics・Kinetics の変化を検討するために、被験者に実験試技として跳び出し角度を 3 段階に変化させた Grab start を実施させた。これらの試技は被験者が普段から行っている跳び出し角度で跳び出す Grab start (Normal Trial : NT) , NT よりも跳び出し角度が大きくなるように跳び出す Grab start (High Trial: : HT) , NT よりも跳び出し角度が小さくなるように跳び出す Grab start

(Low Trial : LT) とした。これらの試技において、HT と LT は被験者が普段から行っていない飛び出し角度で Grab start を行うため、NT と比べ熟練度に差が生じる可能性が存在する。この熟練度の差の影響を出来るだけ小さくするために、被験者は競技歴の長いエリート競泳選手を対象とし、さらに実験の実施に先立って、本研究の被験者に実験試技の LT と HT の練習を 1 週間前から実施した。しかしながら、NT との実験経験の差を埋めることは容易ではないため、本研究では熟練度の差が結果に影響しない可能性を排除できない。

## 【研究課題 1】(Experiment 1)

「Grab start の跳び出し角度制御に関わる Kinematics 的要因と跳び出し角度変化がスタートパフォーマンスに与える影響」

関連論文

「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 , 2006

### 5-1. 目的

スタート局面のブロック期においては、跳び出し水平速度 ( $V_{x_0}$ ) と飛距離を決定する跳び出し速度ベクトルの大きさと向きが重要な要因となる。この速度ベクトルの大きさ ( $V_0$ ) に関しては、その重要性は周知のものであるが、速度ベクトルの向き、すなわち跳び出し角度 ( ) に関して検討した研究は見られない。また、水泳の指導書においてもこの跳び出し角度 ( ) に関して、制御方法や、スタートパフォーマンスへの影響を加味した上で適切な角度を明示したものは見当たらない。

競泳スタート以外の跳躍運動を対象とした研究において、跳躍方向の制御に関わる Kinematics 的要因として、身体の傾きが挙げられている (Ridderkhoff et al. 1999 , Fukashiro et al. 2003 , 窪 2003) 。現在まで、競泳スタート動作を対象とした研究においては、身体の傾きと跳び出し角度 ( ) の関係を検討した研究は見当たらず、跳び出し角度 ( ) 制御に関わる Kinematics 的要因が明らかになっていない。

競泳以外の競技において、投射運動の投射速度と投射角度について検討した研究が



いくつか存在する (三浦ほか 1983, Linthorne 2001, Wakai and Linthorne 2005)。これらの両変数の関係について、三浦ほか (1983) は投射する重量物に働く重力の影響により投げの角度が低いほど速い初速度が得られたと報告し、同様な結果として、Linthorne (2001) は砲丸投げにおいて、投射角度の減少に伴う初速度の増加を報告した。さらに、Wakai and Linthorne (2005) は立ち幅跳びにおいて、重力の影響による跳び出し角度の減少に伴う跳び出し速度の増加を報告した。競泳のスタート動作も泳者を重量物と見立てた投射運動とみなすことが出来るので、泳者に働く重力の影響から跳び出し角度 ( ) が低くなると、跳び出し速度 ( $V_0$ ) が速くなると予期できる。しかしながら、競泳スタートの研究において、この推察を実験的に検証した研究は存在しない。

【研究課題 1】では、エリート男子大学競泳選手を対象に、現在最も一般的な競泳のスタートである Grab start の跳び出し角度 ( ) と身体の傾きの関係を明らかにすることと、同一被験者内での跳び出し角度 ( ) の変化が跳び出し速度 ( $V_0$ )、飛距離とブロックタイムに与える影響を明らかにすることを目的とした。

## 5-2. 方法

### 被験者

被験者は、Grab start を普段から採用している大学水泳部に所属する男子競泳選手 12 名とした。被験者の競技レベルは 2005 年度関東学生選手権出場レベルから、2005 年度日本学生選手権上位入賞レベルであった。被験者のスタートパフォーマンスを評価するため 15m クロール最大努力泳の頭部通過時間を測定した。すべての被験者の身

長，体重，年齢，専門種目，ベストタイム，15m クロール最大努力泳頭部通過時間を Table 1 に示した．なおすべての被験者に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．

### 実験試技

本研究では被験者全員に，通常試技として大会のレースと同じ跳び出し角度（ ）で行う Grab start (Normal Trial : NT) ，実験試技として，NT よりも跳び出し角度（ ）が大きくなるように高く跳び出す Grab start (High Trial : HT) ，NT よりも跳び出し角度（ ）が小さくなるように低く跳び出す Grab start (Low Trial : LT) の 3 種類の試技を行うよう指示した．被験者に十分なウォーミングアップを行わせ，身体計測点にマーキングを行った後に試技を実施した．

実験試技は被験者にとって不慣れな試技であるため，実験において指示通りに跳び出し角度（ ）を変化させることが出来るように，実験当日の一週間前から HT と LT の試技を各々 1 日 5 回ずつ毎日練習を被験者に行わせた．

### 競泳スタート動作のモデル化

岩原・窪 (2004) と窪 (2005) は振り子モデルを用いて競泳スタート動作のモデル化を行った．この振り子モデルは身体重心とスタート台先端が結ばれる線分で構成され，スタート動作を，スタート台先端を中心としたこの線分の回転 (回転要素) と伸縮 (伸展要素) から構成される運動としてモデル化したものである．本研究では，この岩原・

Table 1 Physical characteristics and swim performance of subjects (Experiment 1).

| Subject | Specialty         | Best record |          | Age   | Height | Weight | 15m time |
|---------|-------------------|-------------|----------|-------|--------|--------|----------|
|         |                   |             | [m:s.ms] | [yrs] | [cm]   | [Kg]   | [sec]    |
| A       | Freestyle         | 50m         | 23.78    | 20    | 187.0  | 84.0   | 6.37     |
| B       | Freestyle         | 100m        | 50.76    | 20    | 174.0  | 64.8   | 6.63     |
| C       | Individual medley | 400m        | 4:28.89  | 20    | 175.0  | 70.5   | 6.83     |
| D       | Freestyle         | 50m         | 23.54    | 20    | 187.0  | 70.0   | 6.85     |
| E       | Breaststroke      | 200m        | 2:14.93  | 19    | 182.0  | 77.5   | 6.93     |
| F       | Butterfly         | 200m        | 2:02.86  | 23    | 176.0  | 74.0   | 7.02     |
| G       | Individual medley | 200m        | 2:15.03  | 22    | 176.0  | 68.5   | 7.07     |
| H       | Freestyle         | 100m        | 52.70    | 21    | 182.4  | 69.0   | 7.10     |
| I       | Freestyle         | 200m        | 1:52.66  | 22    | 180.0  | 75.3   | 7.13     |
| J       | Breaststroke      | 200m        | 2:16.65  | 22    | 172.0  | 66.0   | 7.20     |
| K       | Individual medley | 400m        | 4:30.48  | 22    | 180.5  | 74.8   | 7.23     |
| L       | Individual medley | 200m        | 2:16.54  | 21    | 167.0  | 63.0   | 7.40     |
| Mean    |                   |             |          | 21.0  | 178.2  | 71.5   | 6.98     |
| ±SD     |                   |             |          | 1.2   | 5.8    | 5.7    | 0.3      |

Note: 15m time is the time for the head of the subject to pass over 15m. All subjects swam in front-crawl.

窪 (2004) の方法を参考に , Fig.11 に示したように跳び出し時の身体重心速度 ( $V$ ) を回転要素 ( $V_r$ ) と伸展要素 ( $V_e$ ) に分解した .

### 変数の定義

本研究で測定した変数は以下のように定義した . なお , その概略図を Fig.12 に示した .

#### 跳び出し速度 ( $V_0$ )

跳び出し時 (泳者の足がスタート台から離れた時点) の身体重心合成速度を跳び出し速度とした .

#### 跳び出し角度 ( )

跳び出し速度ベクトルが水平線となす角とした .

#### 身体角度 ( $\theta$ )

身体重心とスタート台先端を結ぶ線分 ( $l$ ) が水平線となす角とし , 跳び出し時の身体角度を  $\theta_0$  とした .

#### 飛距離

身体重心入水時における壁からの水平距離とした .

#### ブロックタイム

スタートシグナルから泳者の足がスタート台から離れるまでの時間とした .

#### 身体重心速度の回転要素 ( $V_r$ ) と伸展要素 ( $V_e$ )

回転要素と伸展要素は以下の式 (3) , (4) を用いて求めた .

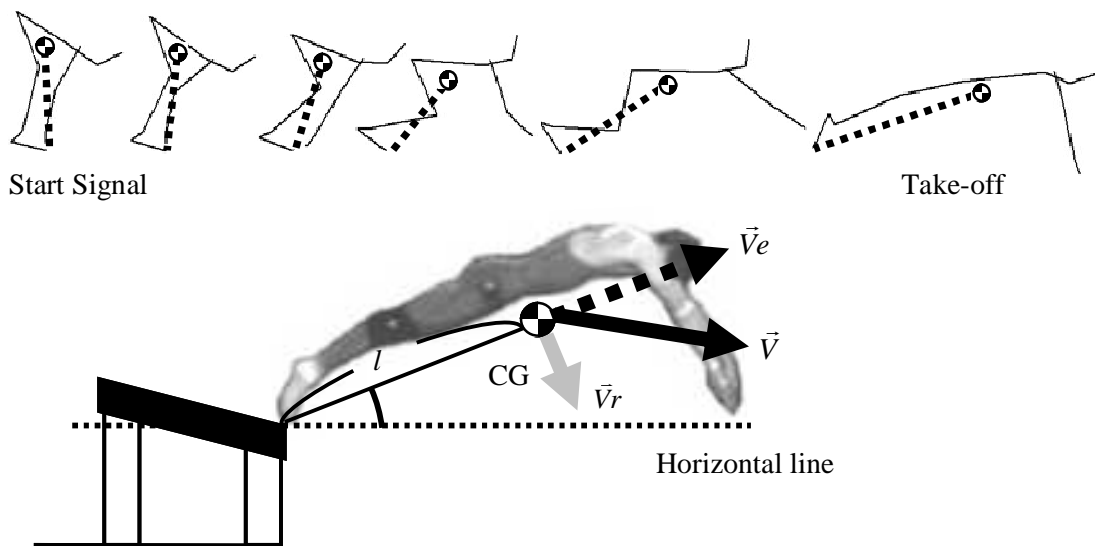


Fig.11 Definitions of rotational component ( $V_r$ ) and extensional component ( $V_e$ ) of velocity of CG ( $V$ ) in a pendulum model.

$V$  is the vectorial sum of  $V_r$  and  $V_e$ . The starting movement was modeled as a movement composed of the rotation of segment  $l$  around the front edge of the starting block ( $V_r$ ) and expansion-contraction of segment  $l$  ( $V_e$ ). Body angle ( ) represents the angle between the segment  $l$  and horizontal line.

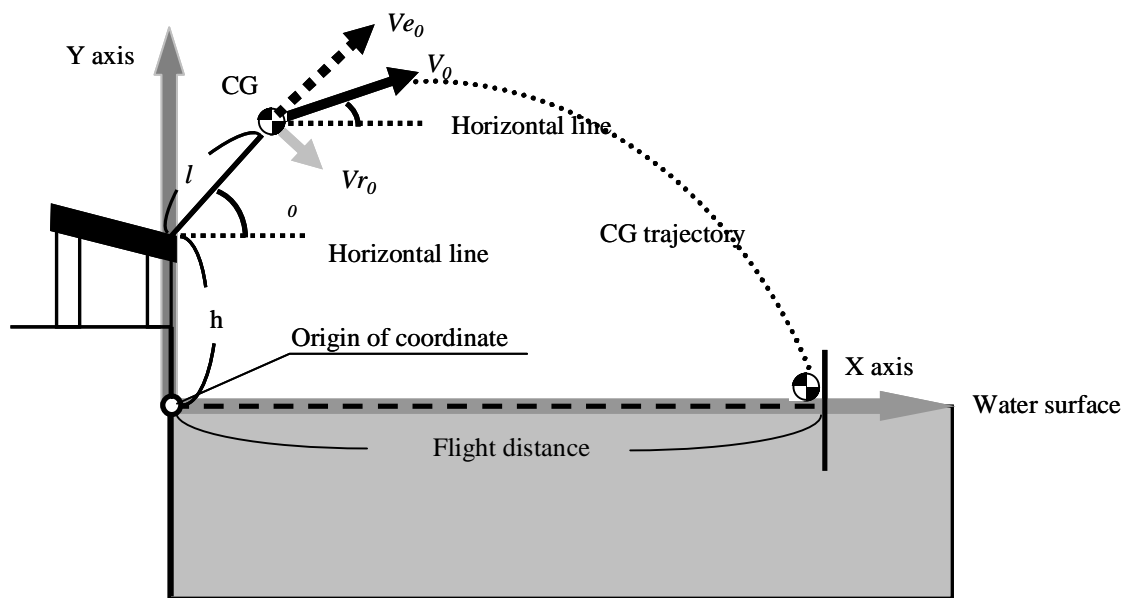


Fig.12 Diagram of the definitions of kinematical variable (Experiment 1).

$\theta_0$  : take-off angle

$\theta_0$  : body angle at the take-off

$V_0$  : take-off velocity

$V_{r0}$  : rotational component of  $V_0$

$V_{e0}$  : extensional component of  $V_0$

$h$  : height from water surface to the edge of the starting block ( $h = 0.7\text{m}$ )

The segment  $l$  is drawn between the edge of the starting block and CG.

$$Vr = -l\dot{\theta} \quad (3)$$

$$Ve = \dot{l} \quad (4)$$

なお，飛び出し時の身体重心速度（飛び出し速度）の回転要素（ $Vr$ ）と伸展要素（ $Ve$ ）をそれぞれ  $Vr_0$  ,  $Ve_0$  とした．

### データ収集

T 大学屋内プール（50m×7 レーン，水深 1.3m）で，スタート試技を高速度カメラ（FAST-CAM PCI Photron 社製）でシャッタースピード 1/250 sec，撮影スピードは 125 フレーム/sec に設定し撮影した．被験者のスタートの構え姿勢から水中への入水動作をすべて撮影できるように画角を設定した．スタートシグナルはスタートシステム（Electronic Start System. Model SS2, Colorado Time System 社製）を用いて合図音とフラッシュを同時に出した．スタートシステムとカメラの同期は，スタートシステムのスタートフラッシュをカメラに撮影することによって行った．スタート台下の水面位置を原点とした，被験者の進行方向である水平方向を  $x$  軸，垂直方向を  $y$  軸とする静止座標系を設定し，スタート試技を側方から撮影した（Fig.13）．被験者の頭頂，耳珠点，胸骨上縁，中手指節関節，手首，肘，肩峰，大転子，膝，外果，踵，つま先の 12 点を身体各部および関節の目印とするためビニールテープと球体発砲スチロールマーカーでマーキングを行った（Fig.14）．



Fig.13 Image photographed in high speed camera (FASTCAM PCI, Photron Inc.).  
(Experiment 1)  
Shutter speed was 1/250 seconds and, frame rate was 125Hz.





Fig.14 Marking on subject body for identification of body segments at present study.

## データ処理

スタート動作は 2 次元平面上で行っており，左右対称の運動であると仮定した．高速カメラで撮影した映像はパーソナルコンピュータに取り込まれた．この映像から画像分析ソフト（フレームディアス version .DKH 社製）において手動デジタイズによって得られた画像上の座標値から 2 次元 DLT 法を用いて被験者のマーキングポイントの実座標を算出した．また，阿江ほか（1992）の身体部分慣性係数を用いて身体重心の座標を算出し，2 次のラグランジェの多項式を用いた数値微分より身体重心速度 ( $V$ ) を算出した．

画像分析により得られた実座標データはフィルタ処理を行い，データの平滑化を行った．本研究では，Butterworth Digital Filter を使用し，スタート動作の飛び出し後のフライト期において身体重心水平速度が空気抵抗を無視すると変化しないことを利用し，飛び出し後の身体重心水平速度が一定の値をとるように，全ての部位の  $x$  と  $y$  座標値について各被験者の試技ごとに遮断周波数を 7~11 Hz に設定した．

統計処理として，LT，NT と HT の試技それぞれにおける飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と飛び出し角度 ( )，そして NT における飛び出し角度 ( ) とブロックタイムの変数間の関係はピアソンの相関分析を行った．各試技における平均値の差の検定には一元配置分散分析 (ANOVA) および Tukey's post hoc test を用いた．いずれの統計処理においても，有意水準は危険率 5% とした．

### 5-3. 結果

#### 跳び出し角度と跳び出し時の身体角度の関係

LT, NT, HT において, 跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) を独立変数とし, 跳び出し角度 ( $\alpha$ ) を従属変数とした両変数の関係を Fig.15 に示した. これらの関係にはいずれの試技においても有意な正の相関が認められ, 相関係数は LT で  $r = 0.94$  ( $p < 0.01$ ), NT で  $r = 0.93$  ( $p < 0.01$ ), HT で  $r = 0.93$  ( $p < 0.01$ ) と非常に高い値を示し, 両変数間に明らかな直線性が認められた.

#### 跳び出しまでの身体重心速度, 回転要素, 伸展要素の変化

Fig.16 に一例として被験者 H のスタートシグナルから跳び出しまでの身体重心速度 ( $V$ ), 身体重心速度の回転要素 ( $V_r$ ) と伸展要素 ( $V_e$ ) の変化を示した. 跳び出しまでの前半部分では  $V_r$  の増加が身体重心速度 ( $V$ ) の増加に大きく貢献しており, 後半部分に  $V_e$  の増加が見られ,  $V_r$  に  $V_e$  がベクトル加算されていく様子が分かる. また  $V_e$  は下肢関節の屈曲により負の速度を示し,  $V_e$  の増加に伴い  $V_r$  が減速する傾向も見られた. この特徴はすべての被験者において見られ, Grab start の身体重心速度変化の共通の特徴であると考えられた.

#### 跳び出し速度, 跳び出し速度の回転要素と伸展要素, ブロックタイムと飛距離の変化

Table 2 には HT, NT, LT における跳び出し角度 ( $\alpha$ ), 跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ),

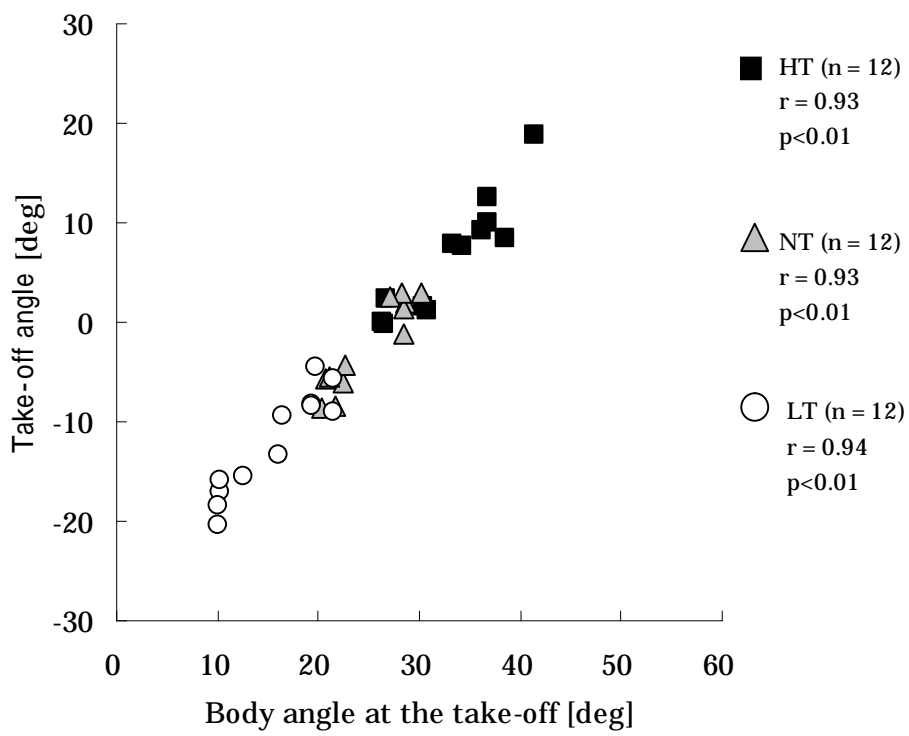


Fig.15 Relationship between body angle at the take-off ( $\theta_0$ ) and take-off angle ( $\theta$ ) in LT, NT and HT.

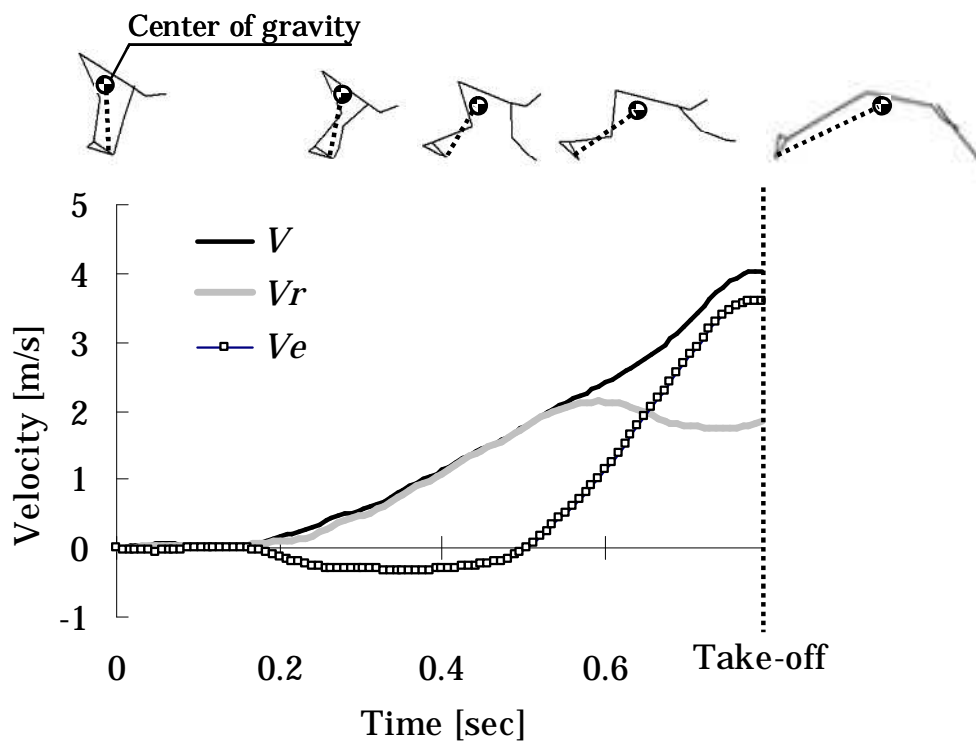


Fig.16 Changes in velocity of CG ( $V$ ), rotational component ( $V_r$ ) and extensional component ( $V_e$ ) of  $V$  during NT of subject H .

The dotted line is the time at the take-off.

Table 2 Comparisons of kinematical variables among HT, NT and LT. (Experiment 1)

|  | HT            |       | NT            |       | LT            |       | Significant difference |       |       |
|--|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|------------------------|-------|-------|
|  | Mean          | SD    | Mean          | SD    | Mean          | SD    | HT-NT                  | NT-LT | HT-LT |
| Take-off angle                             | 6.6 ± 5.8     | 5.8   | -2.3 ± 4.6    | 4.6   | -12.2 ± 5.3   | 5.3   | **                     | **    | **    |
| Body angle at the take-off                 | 33.1 ± 5.0    | 5.0   | 25.0 ± 3.8    | 3.8   | 15.6 ± 4.7    | 4.7   | **                     | **    | **    |
| Take-off velocity                          | 4.01 ± 0.23   | 0.23  | 4.30 ± 0.18   | 0.18  | 4.56 ± 0.13   | 0.13  | **                     | **    | **    |
| Rotational component of take-off velocity  | 1.80 ± 0.11   | 0.11  | 1.99 ± 0.12   | 0.12  | 2.13 ± 0.13   | 0.13  | **                     | *     | **    |
| Extensional component of take-off velocity | 3.58 ± 0.25   | 0.25  | 3.81 ± 0.18   | 0.18  | 4.03 ± 0.15   | 0.15  | **                     | **    | **    |
| Horizontal take-off velocity               | 3.96 ± 0.26   | 0.26  | 4.28 ± 0.17   | 0.17  | 4.44 ± 0.13   | 0.13  | **                     | *     | **    |
| Flight distance                            | 3.30 ± 0.16   | 0.16  | 3.15 ± 0.20   | 0.20  | 2.80 ± 0.26   | 0.26  |                        |       |       |
| Block time                                 | 0.806 ± 0.061 | 0.061 | 0.804 ± 0.038 | 0.038 | 0.855 ± 0.067 | 0.067 |                        |       |       |
| 15m time                                   | 7.08 ± 0.30   | 0.30  | 6.98 ± 0.28   | 0.28  | 7.08 ± 0.30   | 0.30  |                        | **    | **    |

\* : significant difference at  $p < 0.05$ .

\*\* : significant difference at  $p < 0.01$ .

飛び出し速度( $V_0$ ), 飛び出し速度の回転要素 ( $V_{r0}$ ) と伸展要素 ( $V_{e0}$ ) , 飛び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ), 飛距離, ブロックタイムと 15m 頭部通過時間の平均値と標準偏差を示した. 飛び出し角度 ( ) と飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) はいずれの試技間にも有意差が認められ ( $p < 0.01$ ), HT, NT, LT の順に角度が大きかった. 飛び出し速度 ( $V_0$ ) と, 飛び出し速度の回転要素 ( $V_{r0}$ ) と伸展要素 ( $V_{e0}$ ), そして飛び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) に関して, いずれの試技間にも有意差が認められ ( $p < 0.01$ ,  $V_{e0}$  と  $V_{x0}$  の NT-LT のみ:  $p < 0.05$ ), HT, NT, LT の順に速度が高くなった. 飛距離は, NT と LT, HT と LT との間で有意差が認められ, LT の飛距離が有意に短くなった ( $p < 0.01$ ). ブロックタイムと 15m 頭部通過時間に関しては, 3 試技間に有意差が認められなかった.

Fig.17 には被験者全員の HT, NT, LT の飛び出し角度 ( ) に対する飛び出し速度 ( $V_0$ ), 飛び出し速度の回転・伸展要素 ( $V_{r0}$ ,  $V_{e0}$ ), 飛び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) 飛距離とブロックタイムの関係を示した. 全被験者 12 名中 10 名が飛び出し角度 ( ) の増加に伴い, 飛び出し速度 ( $V_0$ ) の減少を示し, 残りの 2 名の被験者は, NT で最も高い飛び出し速度 ( $V_0$ ) を示し, 次いで LT, HT と飛び出し速度 ( $V_0$ ) が低くなっていた.

$V_{r0}$  については, 全被験者 12 名中 11 名が飛び出し角度 ( ) の増加に伴いこの速度の減少を示し, 残りの 1 名の被験者は NT において最も高い値を示し, 次いで LT, HT と  $V_{r0}$  が低くなっていた.  $V_{e0}$  については, 全被験者 12 名中 10 名が飛び出し角度 ( ) の増加に伴い, この速度の減少を示し, 残りの 2 名の被験者は NT において最も高い値を示し, 次いで LT, HT と  $V_{e0}$  が低くなっていた. ほとんどの被験者について, 飛び出し角度 ( ) の減少に伴い, 飛び出し速度の回転要素 ( $V_{r0}$ ) と伸展要

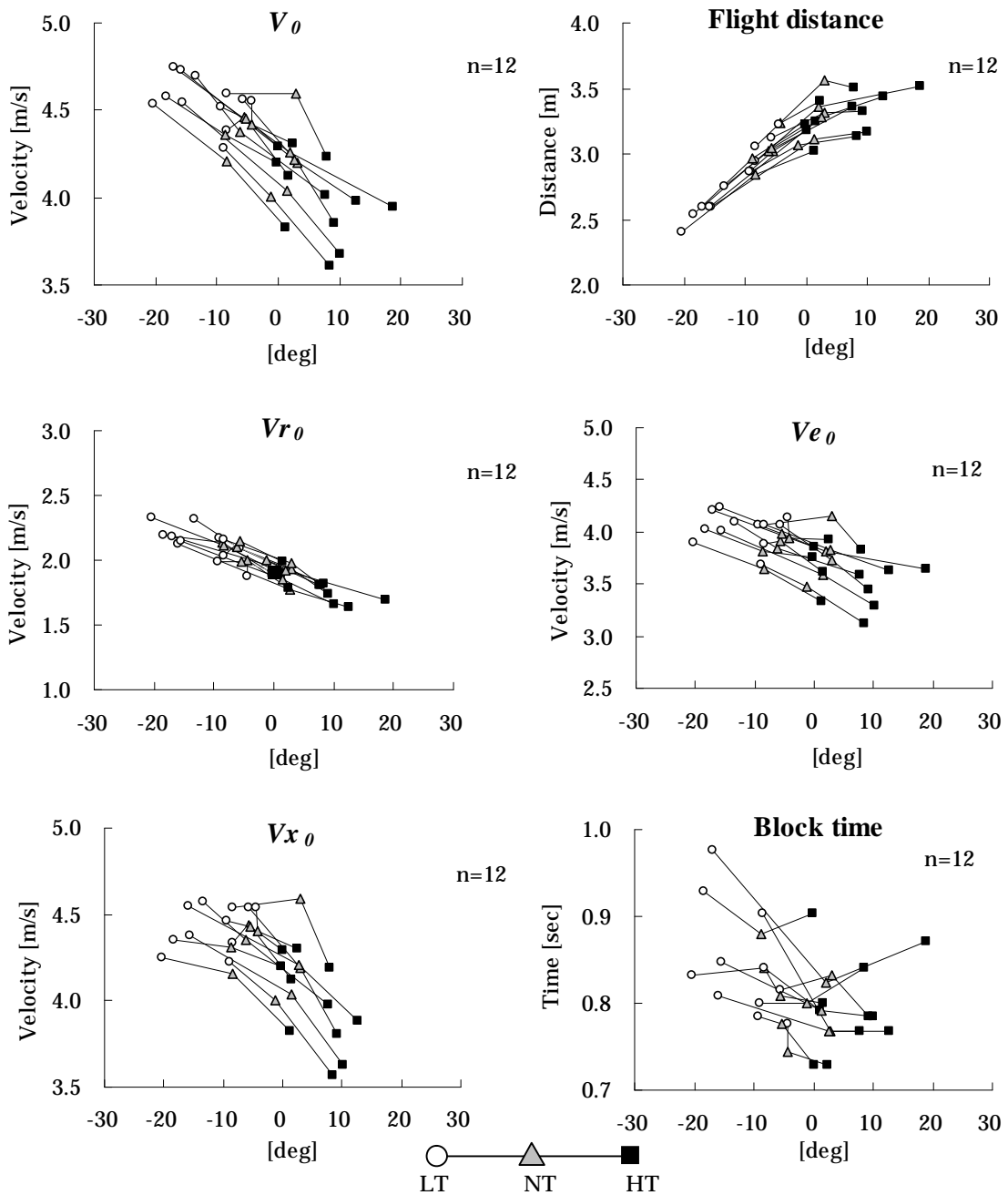


Fig.17 Changes in take-off velocity ( $V_0$ ), flight distance, rotational component ( $Vr_0$ ) and extensional component ( $Ve_0$ ) of  $V_0$ , horizontal take-off velocity ( $Vx_0$ ) and block time caused by changes in take-off angle ( ) in each trial (HT, NT and LT).  
The lines are drawn between each trial of the same subject.



素 ( $V_{e_0}$ ) が増加し、その結果跳び出し速度 ( $V_0$ ) が増加する傾向が示された。跳び出し水平速度 ( $V_{x_0}$ ) は、全被験者 12 名中 10 名が跳び出し角度 ( ) の減少に伴い速度が増加する傾向が示された。ブロックタイムは HT, NT, LT において他の変数に比べて最も試技間の増減のばらつきが大きく、全被験者 12 名中の 4 名が NT において最も短いブロックタイムを示した。NT と比べ不慣れな試技である HT と LT を比較すると、12 名中 11 名が HT の試技の方が LT よりもブロックタイムが短くなった。しかしながら、NT 試技における被験者全員の跳び出し角度 ( ) とブロックタイムとの関係には統計的に有意な相関は見られなかったことから ( $r = -0.389$ ,  $p = 0.21$ )、他の変数と比べると跳び出し角度 ( ) とブロックタイムとの関連性が薄いことが示された。飛距離に関しては、全被験者 12 名中 11 名が、 $-20.9 \text{ deg}$  から  $18.8 \text{ deg}$  の範囲内で跳び出し角度 ( ) の増加に伴い、飛距離の増加を示した。

#### 5-4. 考察

本研究では、同一被験者において Grab start の跳び出し角度 ( ) の変化に伴う跳び出し速度 ( $V_0$ )、飛距離とブロックタイムに与える影響について、実験的に検証を行った。

振り子モデルにおいては、跳び出し角度 ( ) は跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と、跳び出し速度の回転要素 ( $V_{r_0}$ ) と伸展要素 ( $V_{e_0}$ ) で式 (5) のように表される。

$$\phi = \theta_0 - \arctan\left(\frac{V_{r_0}}{V_{e_0}}\right) \quad (5)$$

このうち飛び出し速度の伸展要素 ( $V_{e0}$ ) は振り子モデルの線分 ( $l$ ) 方向の速度ベクトルの大きさであり,そして回転要素 ( $V_{r0}$ ) はこの線分 ( $l$ ) に直交する速度ベクトルの大きさであるため,飛び出し角度 ( ) は,主に線分 ( $l$ ) の傾きを表す飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) によって決定されると考えられる.さらに飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と飛び出し角度 ( ) との間には有意な相関が認められた.したがって, Grab start においては,泳者が身体を前方に倒しこんで傾ける角度によって,飛び出し角度 ( ) が決まることが示された.

#### 飛び出し角度の減少による飛び出し速度の増加

Table 2 と Fig.17 より飛び出し角度 ( ) の減少に伴い飛び出し速度 ( $V_0$ ) の増加が見られた.実験試技として実施した LT の試技において飛び出し速度 ( $V_0$ ) は NT より有意に高い値を示し,ほとんどの被験者が LT においてこの速度を増加させていた.飛び出し速度 ( $V_0$ ) は,振り子モデルによって分解した成分の回転要素 ( $V_{r0}$ ) と伸展要素 ( $V_{e0}$ ) のベクトル和であることから,飛び出し角度 ( ) の減少に伴いこれらの成分が増加したことが飛び出し速度 ( $V_0$ ) の増加に結びついたと考えられる.

飛び出し角度 ( ) を減少させるためには,飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が小さくなるように,身体全体を前方に傾けて飛び出しまでの身体角度変位を増加させる必要がある.この飛び出しまでの身体角度変位の増加が飛び出し速度の回転要素 ( $V_{r0}$ ) の増加に結びついたと考えられる.

飛び出し速度の伸展要素 ( $V_{e0}$ ) の増加も身体角度 ( $\theta$ ) によって説明できる.飛び出

し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が 0 deg から 90 deg の範囲内において減少すると、振り子モデルの身体重心とスタート台先端を結ぶ線分 ( $l$ ) の方向はより水平に近づく。これは伸展要素によって線分 ( $l$ ) 方向に身体がスタート台から受ける力積の水平成分の割合の増加を意味している。伸展要素により得られた水平方向、垂直方向のスタート台反力をそれぞれ  $Fe_x$  と  $Fe_y$  とすると、水平方向、垂直方向の跳び出し速度の伸展要素である  $Ve_{0_x}$  と  $Ve_{0_y}$  はそれぞれ (6) と (7) の式で表すことが出来る。 $m$  は質量を表し、BT は力を発揮した時間 (ブロックタイム) を表す。

$$Ve_{0_x} = \frac{\int_0^{BT} Fe_x dt}{m} \quad (6)$$

$$Ve_{0_y} = \frac{\int_0^{BT} (Fe_y - mg) dt}{m} \quad (7)$$

垂直方向のスタート台反力 ( $Fe_y$ ) は重力 ( $mg$ ) の影響を受ける。そのため、跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が 0 deg から 90 deg の範囲内においては、重力に抗うスタート台反力 ( $Fe_y - mg$ ) が  $Ve_{0_y}$  に反映されるが、水平方向のスタート台反力 ( $Fe_x$ ) は重力の影響を受けないため、直接的に  $Ve_{0_x}$  に反映される。したがって、身体角度 ( $\theta$ ) の減少によって線分 ( $l$ ) が水平に近づき、伸展要素によって発揮される力の水平成分が増加することで、身体がスタート台から受ける正味の力積が増加し、跳び出し速度の伸展要素 ( $Ve_0$ ) が増加したと考えられた。

競泳スタートの身体重心速度を回転要素 ( $Vr$ ) と伸展要素 ( $Ve$ ) に分解して検討した研究は、岩原・窪 (2004)、窪 (2005) 以外には見当たらない。これまで競泳のスター

ト動作は一種の跳躍動作であることから，跳躍能力を評価する垂直跳びとスタートパフォーマンスとの関連性が主張されてきた (Zatsiorsky 1979, Counsilman et al. 1988, Pearson et al. 1998) . 一方で Breed and Young (2002) は，レジスタンストレーニングによる垂直方向への CMJ の跳躍高の向上が跳び出し速度の増加に反映されなかったと述べ，De La Fuente et al. (2003) は，垂直方向への CMJ 中の地面反力とスタート動作中にスタート台に発揮される力との関係性は薄いことを報告した．これらの矛盾は，本研究において示されたように，Grab start の跳び出し速度には下肢の屈曲伸展などによる  $V_e$  だけでなく，スタート台先端回りの回転運動による  $V_r$  が大きく貢献するために，跳び出し角度 ( ) の減少に伴い，跳び出し速度 ( $V_0$ ) が増加した事実によって説明できると考えられる．

### 適切な跳び出し角度の検討

競泳スタートについては，力学的な観点からスタートパフォーマンスにとって適切な跳び出し角度 ( ) はこれまで検討されていない．競泳スタートは一種の投射運動とみなすことができる．そのため，跳び出し速度 ( $V_0$ ) が一定であると仮定し，跳び出し後の泳者の身体重心の軌跡を力学的な観点から考えると，最大の飛距離が得られる跳び出し角度 ( ) は 45 deg となるが，スタート台の高さや，身体角度 ( $\theta$ ) によって跳び出し角度 ( ) を調節していることを踏まえるとこの角度はさらに低くなる．また跳び出し速度の回転要素 ( $V_{r0}$ ) と伸展要素 ( $V_{e0}$ ) も身体角度 ( $\theta$ ) が小さくなると両要素ともに増加するため，飛距離が最大となる角度はそれよりもさらに低くなると考

えられる。さらに競泳の競技特性を考慮すると、グライド期における高い泳速を実現するためにはブロック期における高い飛び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) が前提となるため、飛距離をある程度犠牲にしても飛び出し角度 ( ) を低くすることで飛び出し速度 ( $V_0$ ) を大きくした方が有利であると考えられる。また飛び出し角度 ( ) を低くしすぎても、負の飛び出し垂直速度が大きくなり極端に飛距離が短くなってしまふ。

Grab start の飛び出し角度 ( ) を報告した先行研究において、本間ほか (1997) は、競技歴 10 年以上のエリート男子大学競泳選手 10 名の平均飛び出し角度 ( ) を  $-3.98 \pm 4.96$  deg と報告し、Arellano et al. (2000) はスペインの全国大会出場レベルから国際大会出場レベルの競技力の高い 17 名のエリート競泳選手の平均飛び出し角度 ( ) を  $-3.26 \pm 8.55$  deg と報告した。本研究の NT における平均飛び出し角度 ( ) は  $-2.31 \pm 4.57$  deg であり、いずれの研究も飛距離が最大となるような飛び出し角度 ( ) ではなく、飛び出し速度 ( $V_0$ ) の水平成分が最大となるような 0 deg 付近で飛び出している。このことから、競技力の高い競泳選手は経験的に飛び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) を重視するような飛び出し角度 ( ) を選択していると推察できる。【研究課題 1】における実験結果のみによってスタート局面全体のパフォーマンスにとって、最適な飛び出し角度 ( ) までには言及することは出来ない。しかしながら泳者の入水までのブロック期からフライト期では高い水平速度が求められるため、入水までのパフォーマンスにおいては、飛び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) が高くなるように、Grab start の飛び出し角度 ( ) は 0deg 付近が望ましいと考えられる。

飛び出し角度 ( ) の変化に対するブロックタイムの変化に関しては、被験者に

とって不慣れな HT と LT についての熟練度が影響し、両変数の関連性を示すような傾向は見られなかった。しかしながら、熟練度の影響を除いた HT と LT の比較においては、飛び出し角度 ( ) の減少に伴い、ブロックタイムが増加する傾向が示された。したがって、飛び出し角度 ( ) の減少とブロックタイム増加の関連性が考えられる。

飛び出し角度 ( ) を小さくするためには、飛び出しまでの大きな身体角度変位が必要になる。この身体角度変位の増加が飛び出しまでのスタート台上での所要時間、すなわち、ブロックタイムの増加を招くと考えられる。しかしながら、NT 試技において飛び出し角度 ( ) とブロックタイムに有意な相関が認められないことは、身体角度変位増加によるブロックタイムの増加を抑制できる可能性を示すものであると考えられる。さらに飛び出し角度の減少に伴い、ブロックタイムが増加するという傾向については、スタート局面や短距離種目のパフォーマンスへのブロックタイムの貢献は小さい (Tanner 2001) と報告されていることから、スタートパフォーマンスへのデメリットは小さいと考えられる。

## 5-5. 要約

本研究はエリート大学男子競泳選手を対象に、同一被験者内における Grab start の飛び出し角度 ( ) の変化が飛び出し速度 ( $V_0$ )、飛距離、ブロックタイムに与える影響を実験的に検証することを目的とした。

本研究から得られた知見は以下の通りである。

- (1) Grab start における飛び出し角度は，スタートシグナルから飛び出しまでにスタート台先端を中心に身体全体が前方に回転する角度変位によって決まる．
- (2) 飛び出し角度を減少させると，飛び出し時の身体角度の減少により飛び出し速度の回転要素と伸展要素がそれぞれ増加し飛び出し速度が増加した．
- (3) 飛び出し角度の減少に伴い飛び出し速度が増加するため，泳者の進行方向である水平速度の重要性を考慮すると，Grab start の入水までのブロック期とフライト期のパフォーマンスにとって飛び出し角度は 0deg 付近が望ましいと考えられた．

## 【研究課題 2】(Experiment 2)

「Grab start の飛び出し角度に影響を与える Kinetics 的要因」

### 関連論文

「競泳クラブスタートの飛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 , 2007

### 6-1. 目的

【研究課題 1】にて , 実験的な検証から重力の影響により飛び出し角度 ( ) の減少に伴い飛び出し速度 ( $V_0$ ) が増加し , この飛び出し角度 ( ) は飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) , すなわち飛び出し時の身体の傾きによって決定されることが明らかになった .

したがってこの身体の傾きがスタート台上動作中の Kinetics に与える影響に関して検討する必要がある . 前述したように飛び出し角度 ( ) はスタートパフォーマンスにとって重要なパラメーターであるため , 飛び出し角度 ( ) の最適値の決定や , 飛び出し角度 ( ) 制御の効果的な指導を行うためには , 飛び出し角度 ( ) の変化に伴う Kinematics とあわせて Kinetics の変化を調査し , 飛び出し角度 ( ) 制御メカニズムを明らかにする必要がある .

また , 先行研究で示されたように , 競泳スタート台上動作に関する研究は Kinematics ・ Kinetics までを詳細に検討した研究は少なく , 関節トルクや関節トルクパワーといった詳細な Kinetics まで調査した研究はほとんど見られない . パフォーマンス向上を目的とした研究においては , 対象とする動作の最適化を目指すために , その動作の詳細な Kinematics と Kinetics を把握する必要がある .



したがって【研究課題2】では、Grab start の Kinetics を記述することと、跳び出し角度（ ）変化に伴う Kinetics と Kinematics の変化から、跳び出し角度（ ）制御に関わる Kinetics 的要因を明らかにすることとした。

## 6-2. 方法

### 被験者

被験者は、大学水泳部に所属する男子競泳選手 12 名であった。被験者の競技レベルは日本学生選手権優勝から日本学生選手権出場レベルであった。被験者の年齢、身長、体重、専門種目とその自己最高記録を Table 3 に示した。なお、全ての被験者には実験の趣旨と内容、及び危険性の有無について事前に説明をし、書面にて参加の同意を得た。

### 実験試技

被験者には、【研究課題1】における試技と同様に競技会でのレースと同じ跳び出し角度で行う Grab start (NT), NT よりも跳び出し角度が大きくなるように高く跳び出す Grab start (HT), NT よりも跳び出し角度が小さくなるように低く跳び出す Grab start (LT) の 3 種類の試技を行ってもらった。試技前に被験者には十分なウォーミングアップを行わせ、身体計測点にマーキングを行った後、試技を実施させた。

Table 3 Physical characteristics and swim performance of subjects (Experiment2).

| Subject | Age<br>[yrs] | Height<br>[cm] | Body mass<br>[Kg] | Specialty         | Best record<br>[m.s.ms] |         |
|---------|--------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|---------|
| A       | 20           | 173.6          | 66.2              | Free-Style        | 100m                    | 50.76   |
| B       | 19           | 176.5          | 73.1              | Butterfly         | 200m                    | 2.01.27 |
| C       | 20           | 179.0          | 68.1              | Free-Style        | 50m                     | 23.41   |
| D       | 21           | 186.3          | 88.0              | Free-Style        | 50m                     | 23.33   |
| E       | 19           | 177.4          | 79.5              | Free-Style        | 50m                     | 23.98   |
| F       | 20           | 175.7          | 72.6              | Breast Stroke     | 100m                    | 1.01.51 |
| G       | 21           | 167.0          | 59.0              | Butterfly         | 100m                    | 56.13   |
| H       | 19           | 168.5          | 65.9              | Butterfly         | 200m                    | 2.01.14 |
| I       | 20           | 186.5          | 69.0              | Free-Style        | 50m                     | 23.54   |
| J       | 21           | 175.0          | 71.2              | Individual Medley | 200m                    | 2.04.90 |
| K       | 19           | 174.2          | 66.0              | Individual Medley | 400m                    | 4.26.12 |
| L       | 19           | 168.3          | 67.6              | Free-Style        | 200m                    | 2.00.55 |
| Mean    | 19.8         | 175.7          | 70.5              |                   |                         |         |
| SD      | 0.8          | 6.3            | 7.4               |                   |                         |         |

## データ収集

T 大学屋内プール (50m×7 レーン 水深 3.8m) でスタート試技を側方から高速度カメラ (FAST-CAM PCI Photron 社製) で、シャッタースピードを 1/250 sec、撮影スピードを 250 フレーム/sec に設定し撮影した。被験者の進行方向を  $x$  軸、垂直方向を  $y$  軸、スタート台先端を原点とする固定座標系を設定した。被験者の頭頂、耳珠点、胸骨上縁、中手指節関節、手首、肘、肩峰、大転子、膝、外果、踵、つま先の 12 点を身体各部および関節の目印とするためビニールテープと球体発砲スチロールマーカでマーキングを行った。

スタート動作は 2 次元平面上で行われており、左右対称の運動であると仮定した。高速度カメラで撮影した映像はパーソナルコンピューター (Latitude D600, Dell 社製) に取り込まれた。この映像から画像分析ソフト (フレームディアス version , DKH 社製) において手動デジタイズによって得られた画像上の座標値から 2 次元 DLT 法を用いて被験者のマーキングポイントの実座標を算出した。また、阿江ほか (1992) 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。

スタート動作中の地面反力は、スタート台の傾斜板 (傾斜角  $\beta=7\text{deg}$ ) の下に設置した防水型フォースプレート (9253B11, Kistler 社製) (Fig.18) によって、サンプリング周波数 250Hz にて計測した。画像データと地面反力データとの同期は、スタートシステム (Electronic Start System. Model SS2, Colorado Time System 社製) からスタートシグナルとして音声と共に出力されるフラッシュを高速度カメラに写しこみ、同時に出力される同期信号が地面反力データとともに AD 変換されコンピューターに入力さ



Force plate (9253B11, Kistler Inc.)

Fig.18 Force platform at present study.

れるようにした。得られた実座標データは【研究課題 1】と同様な基準の下に Butterworth Digital Filter により遮断周波数 6Hz にて平滑化を行った。また地面反力データは、Benjanuvatra et al. (2004) の先行研究を参考にし、防水型フォースプレート上に配置された傾斜板の振動の影響を取り除くために遮断周波数 20Hz により平滑化を行った。

## 測定項目および測定方法

### ブロックタイムとグリップタイム

ブロックタイム (BT) は【研究課題 1】と同様にスタートシグナルから被験者の足がスタート台から離れるまでの時間とした。またスタートシグナルから被験者の手の離台までの時間をグリップタイムと定義した。これらの時間は高速度カメラから得られた映像より計測した。

### 跳び出し速度と跳び出し角度

跳び出し速度と跳び出し角度の定義【研究課題 1】と同様にした。なお、【研究課題 2】においては地面反力データから式 (8), (9) にて跳び出し水平速度 ( $V_{x_0}$ ) と跳び出し垂直速度 ( $V_{y_0}$ ) を算出し、これらの合成速度 ( $V_0$ ) を求めた。

$$V_{x_0} = \frac{\int_0^{BT} F_x \cdot dt}{m} \quad (8)$$

$$V_{y_0} = \frac{\int_0^{BT} (F_y - mg) dt}{m} \quad (9)$$

$F_x$  は水平地面反力,  $F_y$  は垂直地面反力,  $m$  は被験者の質量,  $g$  は重力加速度を示す.

跳び出し角度 ( ) は式 (10) にて求めた.

$$\phi = \arctan\left(\frac{V_{x_0}}{V_{y_0}}\right) \quad (10)$$

### 圧力中心点の算出

スタート台傾斜板上に存在する圧力中心点 ( $r_x, r_y$ ) は, スタート台先端回りモーメントの釣り合い式 (11) と, スタート台傾斜板の表面を表す式 (12) の連立方程式を解くことによって求めた. これらの式を以下に示す (Fig.19 参照).

$$(r_x \times F'_y - r_y \times F'_x) + (a \times F_{y_1}) + (b \times F_{y_2}) - c(F_{x_1} + F_{x_2}) = 0 \quad (11)$$

$$r_y = -r_x \cdot \tan \beta \quad (12)$$

ここで,  $a$  はスタート台先端からセンサ 1 までの水平距離,  $b$  はスタート台先端からセンサ 2 までの水平距離,  $c$  はスタート台先端からセンサ 1 とセンサ 2 までの垂直距離,  $F'_x$  と  $F'_y$  はフォースプレートに加えられた合計の力の水平成分と垂直成分,  $F_{x_1}$  と  $F_{y_1}$  はセンサ 1 で検出された反力の水平成分と垂直成分,  $F_{x_2}$  と  $F_{y_2}$  はセンサ 2 で検出された反力の水平成分と垂直成分である.  $r_x$  と  $r_y$  は圧力中心点 (泳者によって加えられた力の作用点) の座標,  $\beta$  は傾斜板の傾きである ( $\beta = 7\text{deg}$ ).

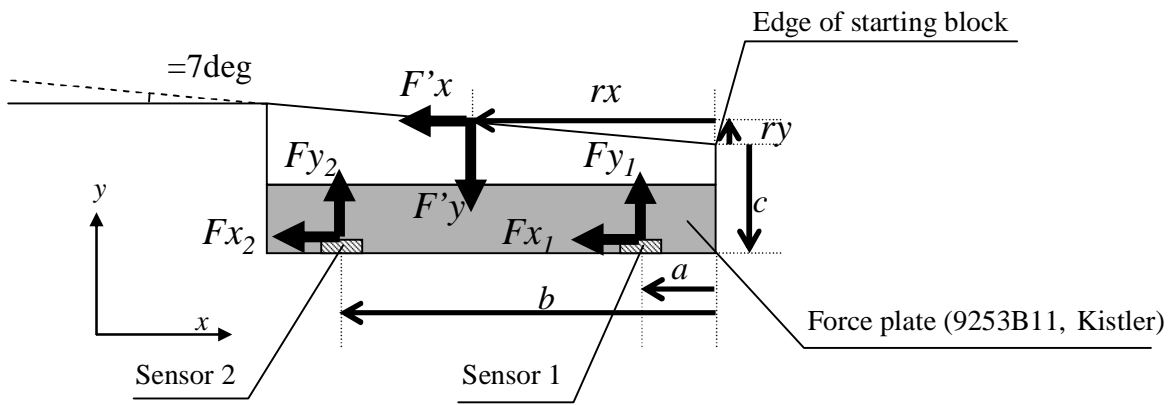


Fig.19 Free body diagram of the starting block at present study.

Center of pressure on the starting block was calculated by equilibrium equation of moment about edge of starting block and by equation that express the inclination of the starting block surface.

## セグメント角度，関節相対角度と身体角度

頭頂を中枢端，指先と足先を末梢端と定義した上で，足部，下腿，大腿，体幹セグメントの末梢端から中枢端へ向かうベクトルが水平面となす角をセグメント角度 ( $\theta_{\text{foot}}$ ,  $\theta_{\text{shank}}$ ,  $\theta_{\text{thigh}}$ ,  $\theta_{\text{trunk}}$ ) と定義した．また関節を始点とした各セグメントがなす角を関節相対角度と定義した．身体角度 ( $\theta$ ) の定義は【研究課題 1】と同様である．これらの角度定義を Fig.20 に示す．

## 関節トルクと関節トルクパワー

身体を両側の手部，前腕，上腕，足部，下腿，大腿および頭部と体幹からなる 2 次元剛体リンクモデルに置き換えた．2 次元 DLT 法により実長換算した 2 次元座標データと阿江ほか (1992) による身体部分慣性係数を用いて各セグメントの質量，重心位置，慣性モーメントを推定し，足関節，膝関節，股関節，肩関節，肘関節，手関節について関節力及び関節トルクを逆動力学解析手法により算出した．下肢の関節に関しては地面反力データを用いて足部から，各セグメントの運動方程式 (13), (14), (15) を解いた (Fig.21 参照)．一方，上肢の関節については，足部からの演算に伴う誤差の増幅を考慮し，手部を自由端として手部から運動方程式を解いた．

$$m_i \cdot ax_i = Fx_A + Fx_B \quad (13)$$

$$m_i \cdot ay_i = Fy_A + Fy_B - m_i g \quad (14)$$

$$I_i \cdot \alpha_i = T_A + T_B + (\vec{r}_A \cos \theta_i \times Fy_A - \vec{r}_A \sin \theta_i \times Fx_A) + (\vec{r}_B \cos \theta_i \times Fy_B - \vec{r}_B \sin \theta_i \times Fx_B) \quad (15)$$



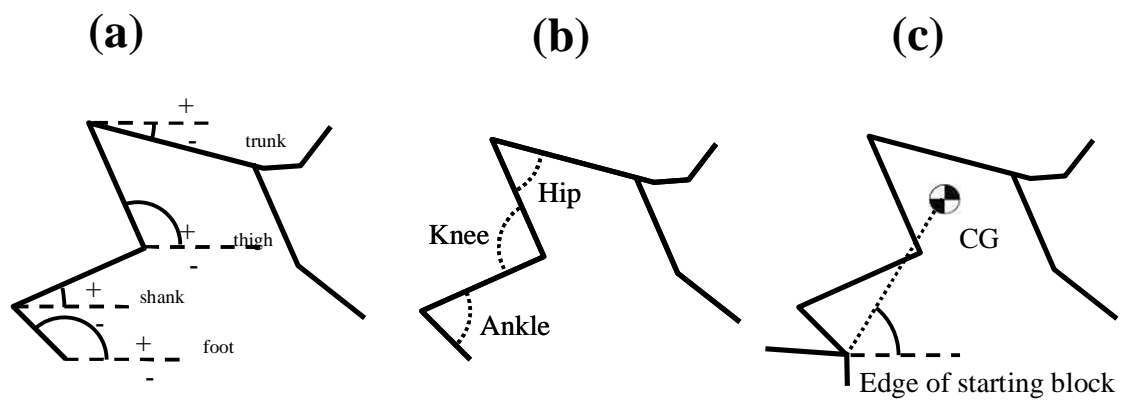


Fig.20 Definitions of segment angle (a), relative joint angle (b) and body angle (c) (Experiment 2).  
 A segment angle was defined as the angle between horizontal line and the vector from distal to proximal.  
 A relative joint angle was defined as the angle between vectors from each joint.  
 A body angle was defined as the angle between horizontal line and the vector from the edge of starting block to CG.

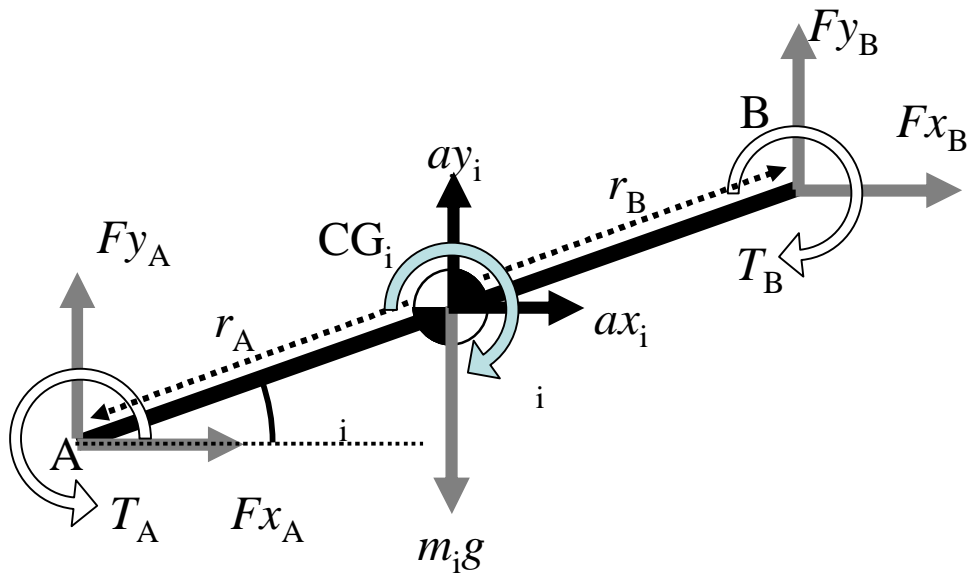


Fig.21 Free body diagram of segment i (Experiment 2)

|              |  |
|--------------|--|
| $CG_i$       | :center of gravity of segment i                              |
| $m_i$        | :mass of segment i   |
| $ax_i$       | :horizontal acceleration of $CG_i$                           |
| $ay_i$       | :vertical acceleration of $CG_i$                             |
| $I_i$        | :moment of inertia of segment i                              |
| $i$          | :angular acceleration of segment i                           |
| $Fx_A, Fx_B$ | :horizontal force acting on A and B                          |
| $Fy_A, Fy_B$ | :vertical force acting on A and B                            |
| $g$          | :acceleration of gravity                                     |
| $T_A, T_B$   | :torque acting on A and B                                    |
| $i$          | :angle between segment i and horizontal line (segment angle) |
| $r_A$        | :vector from $CG_i$ to A                                     |
| $r_B$        | :vector from $CG_i$ to B                                     |

関節トルクの方法は、伸展方向を正、屈曲方向を負として定義した (Fig.22)。関節トルクパワーは関節トルクと関節相対角速度の積から求めた。

### データの規格化と統計処理

本研究において地面反力は被験者の質量と重力加速度の積で、関節トルクは被験者の質量で除することで規格化した。また各セグメントに生じる総モーメント ( $I_i\alpha_i$ ) に対してそのセグメントの両端に働く力 ( $F_{x_A}, F_{y_A}$ ), ( $F_{x_B}, F_{y_B}$ ) とトルク ( $T_A, T_B$ ) によって生じるモーメントは、被験者の各セグメントの慣性モーメント ( $I_i$ ) で除すること (角加速度:  $\alpha_i$ ) で規格化した。

さらにこれらの時系列データはブロックタイムを 100% として規格化し、被験者 12 名分の平均値を求め、規格化時間 ( $t@$ ) に対する変数の推移を平均パターンとした。

HT, NT, LT における跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳び出し角度 ( ), 膝関節トルクの最大値と膝関節トルクパワーの負のピーク値 (結果にて後述) については、ピアソンの相関分析を行った。また、跳び出し角度 ( ) の変化に伴う各変数の平均値の差の検定には、一元配置分散分析 (ANOVA) および Tukey's post hoc test を用いた。なお、統計処理の有意水準は危険率 5% 未満とした。

### データの取り扱いについて

Grab start は手でスタート台先端を握るスタートであるため、手がスタート台から離れるまでは力学的に閉ループが形成される。したがって、本研究では手でスタート台

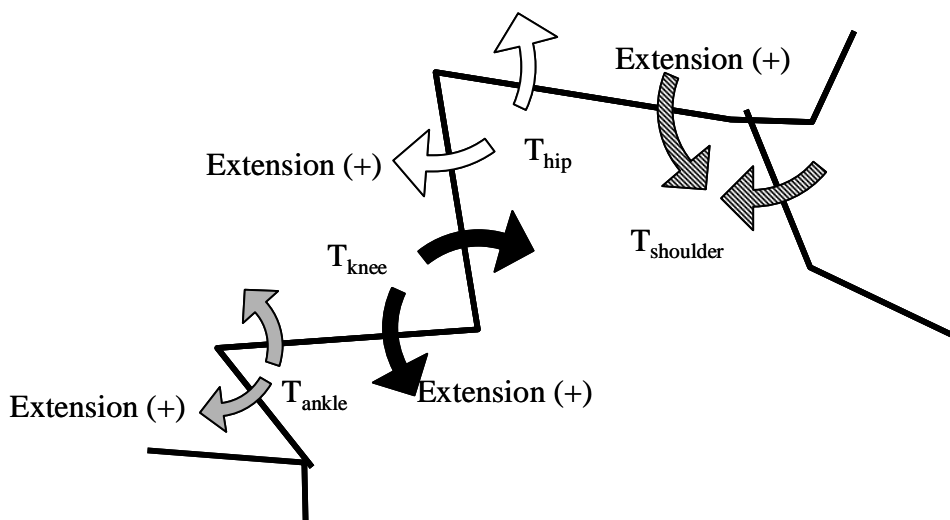


Fig.22 Definitions of joint torque ( $T_{\text{shoulder}}$ ,  $T_{\text{hip}}$ ,  $T_{\text{knee}}$ ,  $T_{\text{ankle}}$ ).

に触れているグリップタイム中の逆動力学解析により求めた変数（関節トルク，関節トルクパワー，関節力）については結果と考察において図示するものの，取り扱わないこととする．

### 6-3. 結果

Table 4 に HT, NT と LT における跳び出し角度 ( ), ブロックタイム, グリップタイム, ブロックタイムに占めるグリップタイムの割合 (以下「%Grip time」と略す), 跳び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ), 跳び出し垂直速度 ( $V_{y0}$ ), 跳び出し速度 ( $V_0$ ), 跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) の平均値を示した．跳び出し角度 ( ) は, いずれの試技間においても有意差が認められ (HT-NT :  $p < 0.01$ , NT-LT :  $p < 0.05$ , HT-LT :  $p < 0.01$ ), HT, NT, LT の順に値が大きく, 本研究の被験者が指示通りに跳び出し角度を変化させていたことが確認された．ブロックタイム, %Grip time は, いずれの試技間においても有意差は認められなかった．跳び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) と跳び出し速度 ( $V_0$ ) は, HT の値が NT と LT よりも有意に小さく ( $p < 0.01$ ), 跳び出し垂直速度 ( $V_{y0}$ ) は, HT と NT, NT と LT, HT と LT のいずれの試技間においても有意差が認められ (HT-NT :  $p < 0.01$ , NT-LT :  $p < 0.05$ , HT-LT :  $p < 0.01$ ), HT, NT, LT の順に値が大きかった．跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) も同様に, いずれの試技間にも有意差が認められ ( $p < 0.01$ ) HT, NT, LT の順に値が大きかった．

Fig.23 には跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳び出し角度 ( ) との関係を示した．両変数間の相関係数は, HT で  $r = 0.96$ , NT で  $r = 0.84$ , LT で  $r = 0.83$  であり, いずれ

Table 4 Kinematic variables of HT, NT and LT.

|                              | n=12  | HT            |       | NT            |       | LT            |       | Significant difference |       |       |
|------------------------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|------------------------|-------|-------|
|                              |       | Mean          | SD    | Mean          | SD    | Mean          | SD    | HT-NT                  | NT-LT | HT-LT |
| Take-off angle               | [deg] | 3.8 ± 4.8     | 3.5   | -6.5 ± 3.5    | 3.7   | -10.2 ± 3.7   | 3.7   | **                     | *     | **    |
| Block time                   | [sec] | 0.852 ± 0.035 | 0.036 | 0.852 ± 0.036 | 0.072 | 0.883 ± 0.072 | 0.072 |                        |       |       |
| Grip time                    | [sec] | 0.505 ± 0.043 | 0.038 | 0.538 ± 0.038 | 0.073 | 0.563 ± 0.073 | 0.073 |                        |       |       |
| %Grip time                   |       | 59% ± 5%      | 2%    | 63% ± 2%      | 4%    | 64% ± 4%      | 4%    |                        |       |       |
| Horizontal take-off velocity | [m/s] | 4.09 ± 0.19   | 0.13  | 4.42 ± 0.13   | 0.19  | 4.45 ± 0.19   | 0.19  | **                     |       | **    |
| Vertical take-off velocity   | [m/s] | 0.27 ± 0.333  | 0.28  | -0.50 ± 0.28  | 0.31  | -0.81 ± 0.31  | 0.31  | **                     | *     | **    |
| Resultant take-off velocity  | [m/s] | 4.11 ± 0.171  | 0.14  | 4.46 ± 0.14   | 0.21  | 4.54 ± 0.21   | 0.21  | **                     |       | **    |
| Body angle at the take-off   | [deg] | 29.3 ± 4.6    | 2.9   | 20.5 ± 2.9    | 3.7   | 16.3 ± 3.7    | 3.7   | **                     | **    | **    |

\* : significant difference at  $p < 0.05$ .

\*\* : significant difference at  $p < 0.01$ .

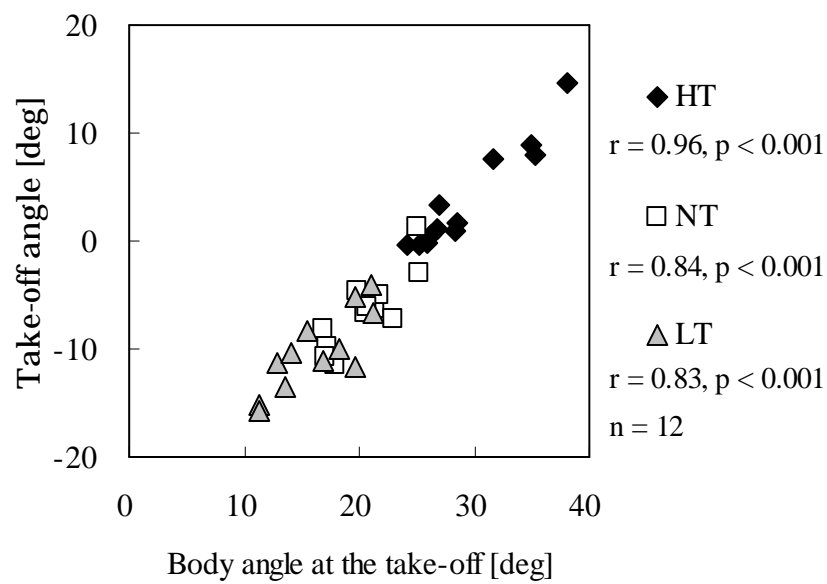


Fig.23 Relationship between body angle at the take-off and take-off angle.

の試技においても有意な相関が認められた ( $p < 0.01$ ) .

### スタート動作中の地面反力の変化

Fig.24 には HT ,NT ,LT における跳び出しまでの地面反力変化の平均パターンを示した . 水平反力は , 全ての試技に共通して跳び出しまでに 2 回の正のピークを迎える変化を示した . そして , グリップタイム以降に大きな水平反力が得られていた . 試技間の比較では , グリップタイム以降に水平反力の差が大きくなり , HT の水平反力は , NT と LT に比べて最大値が小さくなることが観察された . 一方 , 垂直反力は全ての試技に共通する変化を示し , グリップタイム中に抜重を示す反力の減少とグリップタイム以降において水平反力に先行して最大値を迎えていた . 試技間の比較では , 水平反力と同様にグリップタイム以降に垂直反力の差が大きくなり , HT , NT , LT の順で最大値が大きくなることが観察された .

### 関節トルク , 関節トルクパワーとセグメント角度の変化

Fig.25 には HT , NT , LT における跳び出しまでの肩関節 , 股関節 , 膝関節 , 足関節の関節トルク変化の平均パターンを示した . 全ての試技に共通して肩関節トルクはグリップタイム以降から屈曲トルクが発揮され ,  $t@80\%$  以降から伸展トルクが発揮されていた . 股関節トルクはグリップタイム以降から比較的大きな伸展トルクが発揮され , 跳び出しに向かって伸展トルクが減少し , 跳び出し直前に屈曲トルクが発揮される変化を示した . 膝関節トルクはグリップタイム以降から伸展トルクが発揮され ,



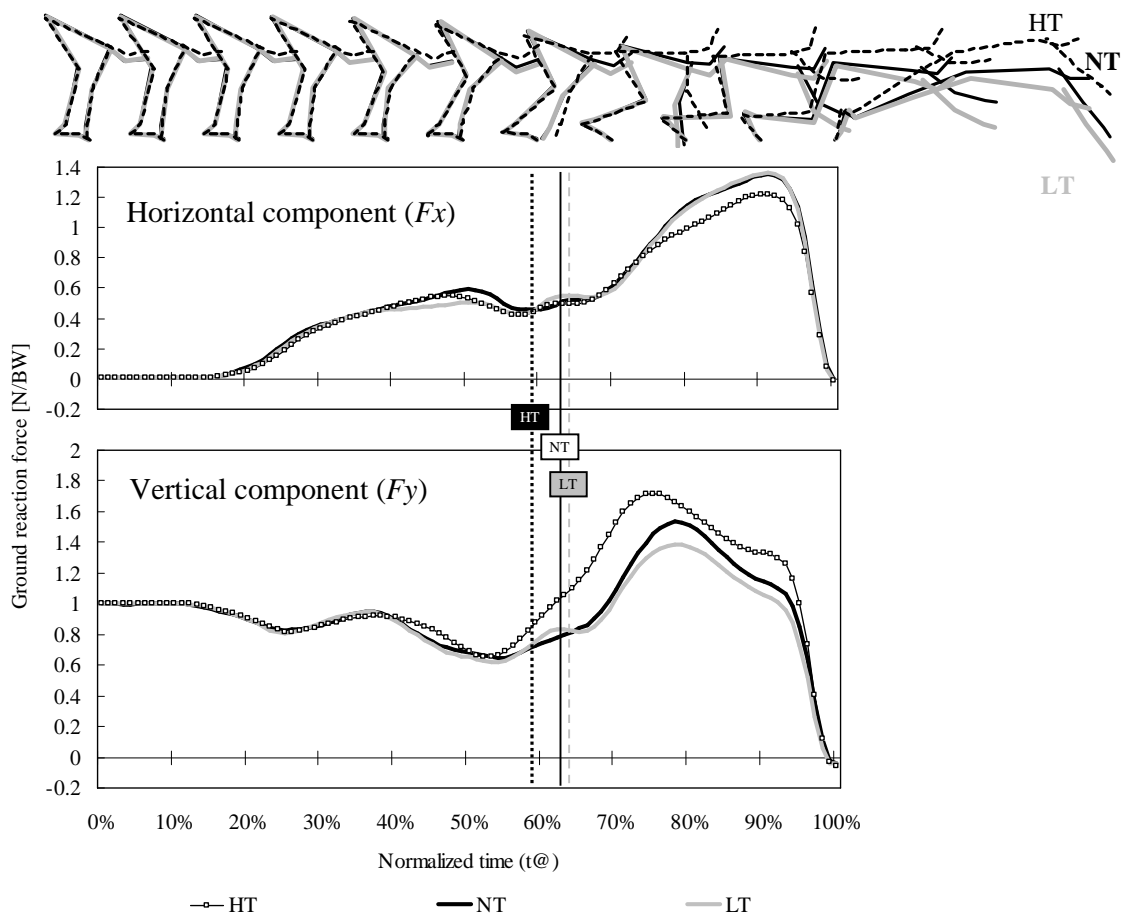


Fig.24 Changes in averaged ground reaction force (n=12) of HT, NT and LT.

Vertical line indicated the time (Mean grip time) when subject released the hands from the starting block.

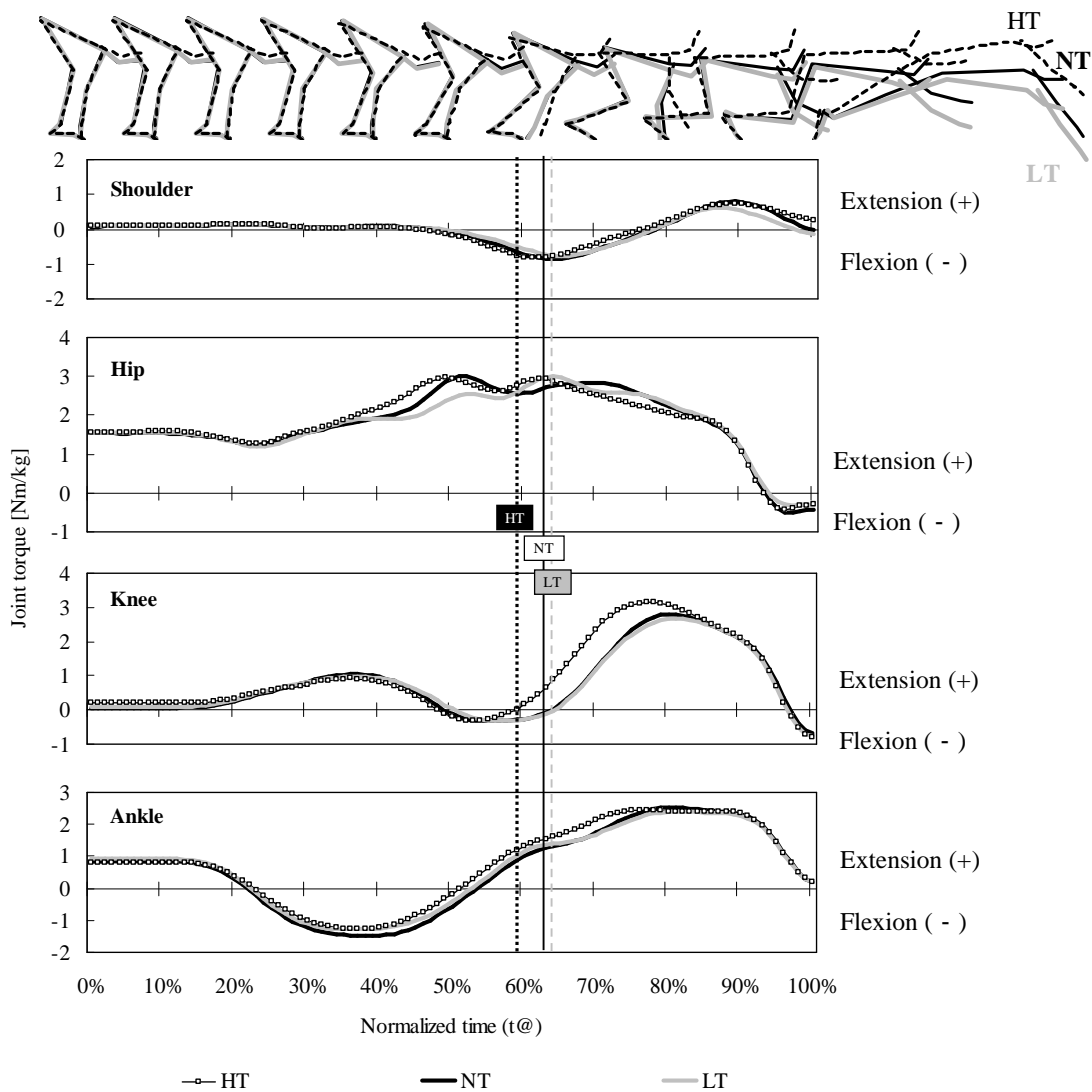


Fig.25 Changes in averaged joint torque (n=12) of HT, NT and LT.

Vertical line indicated the time (Mean grip time) when subject released the hands from the starting block.

$t@80\%$  付近で最大値を迎え、跳び出しに向かって伸展トルクが減少する変化を示した。足関節トルクは、グリップタイム以降から伸展トルクが発揮されており、股関節と膝関節に比べ跳び出し直前まで大きな伸展トルクが発揮される変化を示した。

HT, NT, LT を比較すると、グリップタイム以降の肩関節、股関節、足関節トルクの変化パターンに顕著な差はなく、類似した変化パターンを示した。膝関節トルクのグリップタイム以降の変化パターンは HT の最大値が NT と LT に比べて大きくなる傾向が見られ、その最大値が出現する時間 ( $t_{pk}$ ) も早くなる傾向が見られた。

HT において膝関節トルクの最大値が大きくなる原因を検討するために、Fig.26 には一例として Sub.J の膝関節相対角速度 (a)、膝関節トルク (b) とトルクパワー (c) の跳び出しまでの変化を示した。膝関節相対角速度はグリップタイム以降に屈曲を示す負の値から伸展を示す正の値へと変化していた。膝関節トルクパワーはグリップタイム以降に負のピーク ( $P_k$ ) が出現し、その後大きな正の極大値を迎え、跳び出し直前に再度負の値になる変化を示した。

Table 5 には、HT, NT, LT における肩関節トルクの最大値、膝関節トルクの最大値、足関節トルクの最大値、膝関節トルクパワーの負のピーク値 ( $P_k$ )、膝関節トルクの最大値出現時間 ( $t_{pk}$ )、 $t_{pk}$  時の身体角度、 $t_{pk}$  時の足部、下腿、大腿、体幹のセグメント角度の平均値を示した。なお、股関節トルクの最大値に関しては、グリップタイム以降の股関節トルクに明確な極大値が認められず、平均パターンに関しても顕著な差が認められなかったため、検討を行わなかった。

肩関節トルクと足関節トルクの最大値は、いずれの試技間にも有意差は認められな

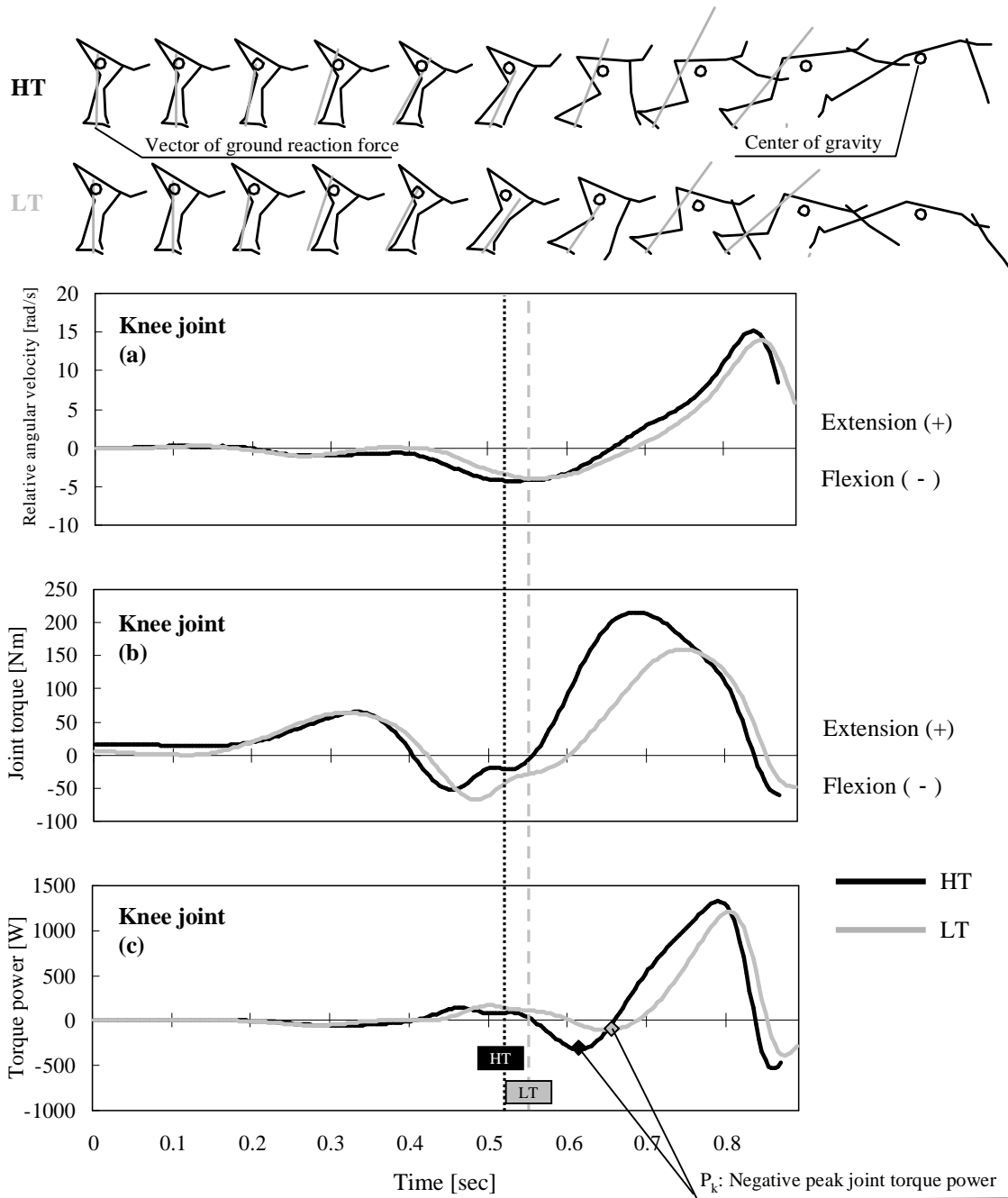


Fig.26 Changes in relative joint angular velocity (a), joint torque (b) and joint torque power (c) at knee of Sub.J during HT and LT.

Vertical line indicated the time (Grip time) when subject released the hands from the starting block.

Table 5 Maximum joint torque at shoulder, knee and ankle, negative peak joint torque power at knee,  $t_{pk}$ , body angle at  $t_{pk}$ , segment angle of foot, shank, thigh and trunk at  $t_{pk}$ .

|                                       | n=12  | HT             |    | NT             |    | LT             |    | Significant difference |       |       |
|---------------------------------------|-------|----------------|----|----------------|----|----------------|----|------------------------|-------|-------|
|                                       |       | Mean           | SD | Mean           | SD | Mean           | SD | HT-NT                  | NT-LT | HT-LT |
| Maximum shoulder joint torque         | [Nm]  | 66.7 ± 14.3    |    | 67.6 ± 13.5    |    | 65.6 ± 16.2    |    |                        |       |       |
| Maximum knee joint torque             | [Nm]  | 231.4 ± 32.0   |    | 205.7 ± 31.7   |    | 201.2 ± 35.6   |    | *                      |       | **    |
| Maximum ankle joint torque            | [Nm]  | 183.7 ± 23.9   |    | 188.5 ± 24.4   |    | 181.8 ± 18.6   |    |                        |       | **    |
| Negative peak knee joint torque power | [W]   | -498.4 ± 171.0 |    | -346.6 ± 142.4 |    | -347.4 ± 169.2 |    | **                     |       | **    |
| $t_{pk}$                              | [sec] | 0.650 ± 0.048  |    | 0.677 ± 0.048  |    | 0.714 ± 0.086  |    |                        |       |       |
| Body angle at $t_{pk}$                | [deg] | 51.9 ± 4.1     |    | 42.4 ± 3.7     |    | 37.8 ± 7.2     |    | **                     | *     | **    |
| Foot segment angle at $t_{pk}$        | [deg] | 145.6 ± 5.5    |    | 140.0 ± 7.1    |    | 135.2 ± 8.7    |    | **                     | *     | **    |
| Shank segment angle at $t_{pk}$       | [deg] | 8.8 ± 5.3      |    | 3.1 ± 4.6      |    | -1.5 ± 6.4     |    | **                     | **    | **    |
| Thigh segment angle at $t_{pk}$       | [deg] | 114.1 ± 6.9    |    | 101.8 ± 7.2    |    | 97.4 ± 11.9    |    | **                     |       | **    |
| Trunk segment angle at $t_{pk}$       | [deg] | 2.1 ± 6.3      |    | -8.1 ± 4.3     |    | -13.4 ± 4.5    |    | **                     | *     | **    |

\* : significant difference at  $p < 0.05$ .

\*\* : significant difference at  $p < 0.01$ .

$t_{pk}$ : The time at peak knee joint torque.

かった。膝関節トルクの最大値は、HT の値が NT と LT に比べ有意に大きかった (HT-NT :  $p < 0.05$  , HT-LT :  $p < 0.01$ )。膝関節トルクパワーの負のピーク値 ( $P_k$ ) は、HT の値が NT と LT に比べて有意に小さかった ( $p < 0.01$ )。  $t_{pk}$  はいずれの試技間にも有意差は認められなかった。  $t_{pk}$  時における身体角度、足部と体幹のセグメント角度は、いずれの試技間にも有意差が認められ (HT-NT :  $p < 0.01$  , NT-LT :  $p < 0.05$  , HT-LT :  $p < 0.01$ ) , HT , NT , LT の順に値が大きかった。  $t_{pk}$  時における下腿のセグメント角度は、いずれの試技間にも有意差が認められ ( $p < 0.01$ ) , HT , NT , LT の順に値が大きかった。  $t_{pk}$  時における大腿のセグメント角度は、HT の値が NT と LT よりも有意に大きかった ( $p < 0.01$ )。

Fig.27 には、HT、NT、LT における跳び出し角度と、 $t_{pk}$  時の身体角度 (a)、 $t_{pk}$  時の足部、下腿、大腿、体幹のセグメント角度 (b、c、d、e) の関係を示した。Fig.27 より、いずれの角度も跳び出し角度が大きくなるほどその値が大きくなる傾向が示された。

Fig.28 には、HT、NT、LT における膝関節トルクパワーの負のピーク値 ( $P_k$ ) と膝関節トルクの最大値の関係を示した。両変数間の相関係数は、HT で  $r = -0.40$  , NT で  $r = -0.84$  , LT で  $r = -0.93$  であり、NT と LT において両変数間に有意な負の相関が認められた ( $P < 0.001$ )。

### 各セグメントの角加速度の変化

Fig.29 に HT、NT、LT における体幹、大腿、下腿、足部の角加速度の平均パターンを示した。いずれのセグメントの角加速度の平均パターンも試技間に顕著な違いは見

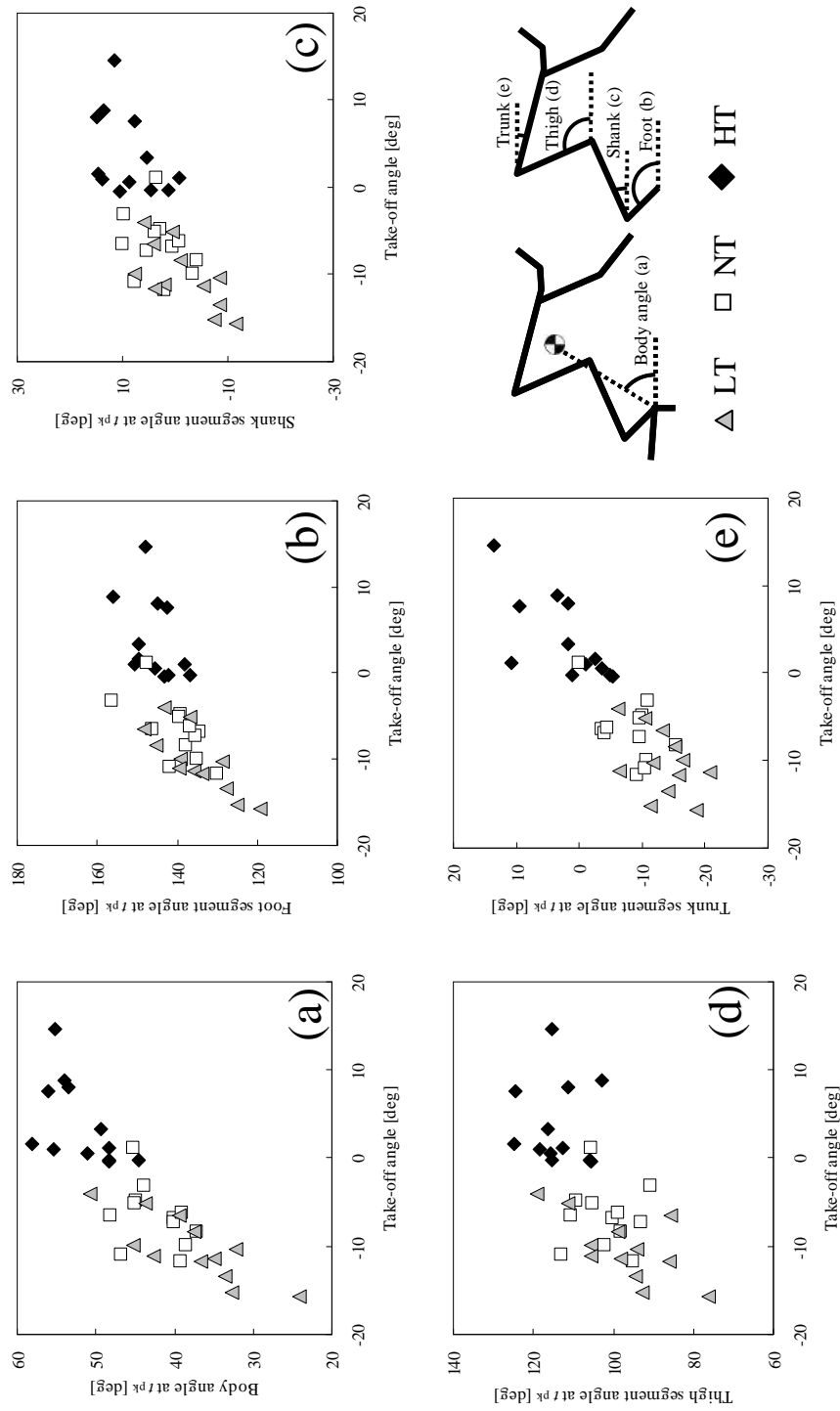


Fig.27 Relationship between take-off angle and body angle at  $t_{pk}$  (a), foot segment angle at  $t_{pk}$  (b), shank segment angle at  $t_{pk}$  (c), thigh segment angle at  $t_{pk}$  (d), trunk segment angle at  $t_{pk}$  (e).  
 $t_{pk}$  : the time at peak knee joint torque.

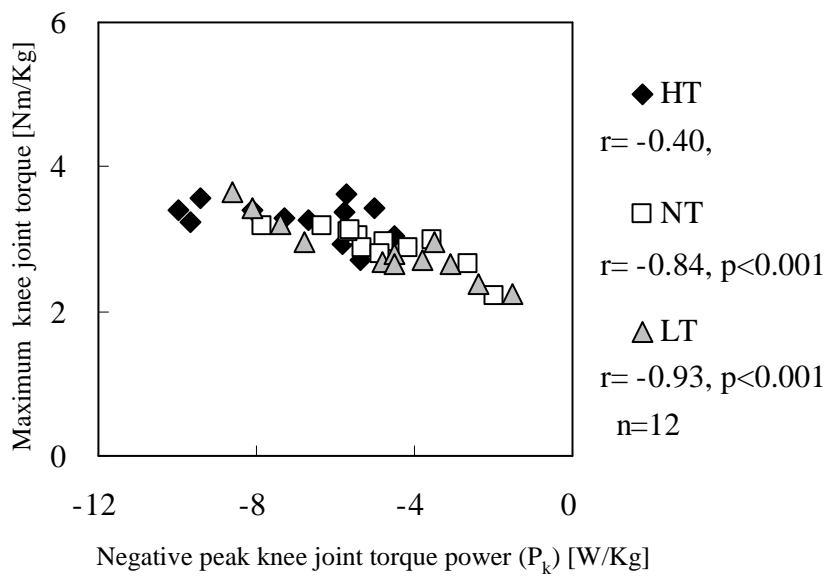


Fig.28 Relationship between negative peak value of knee joint torque power ( $P_k$ ) and maximum knee joint torque.



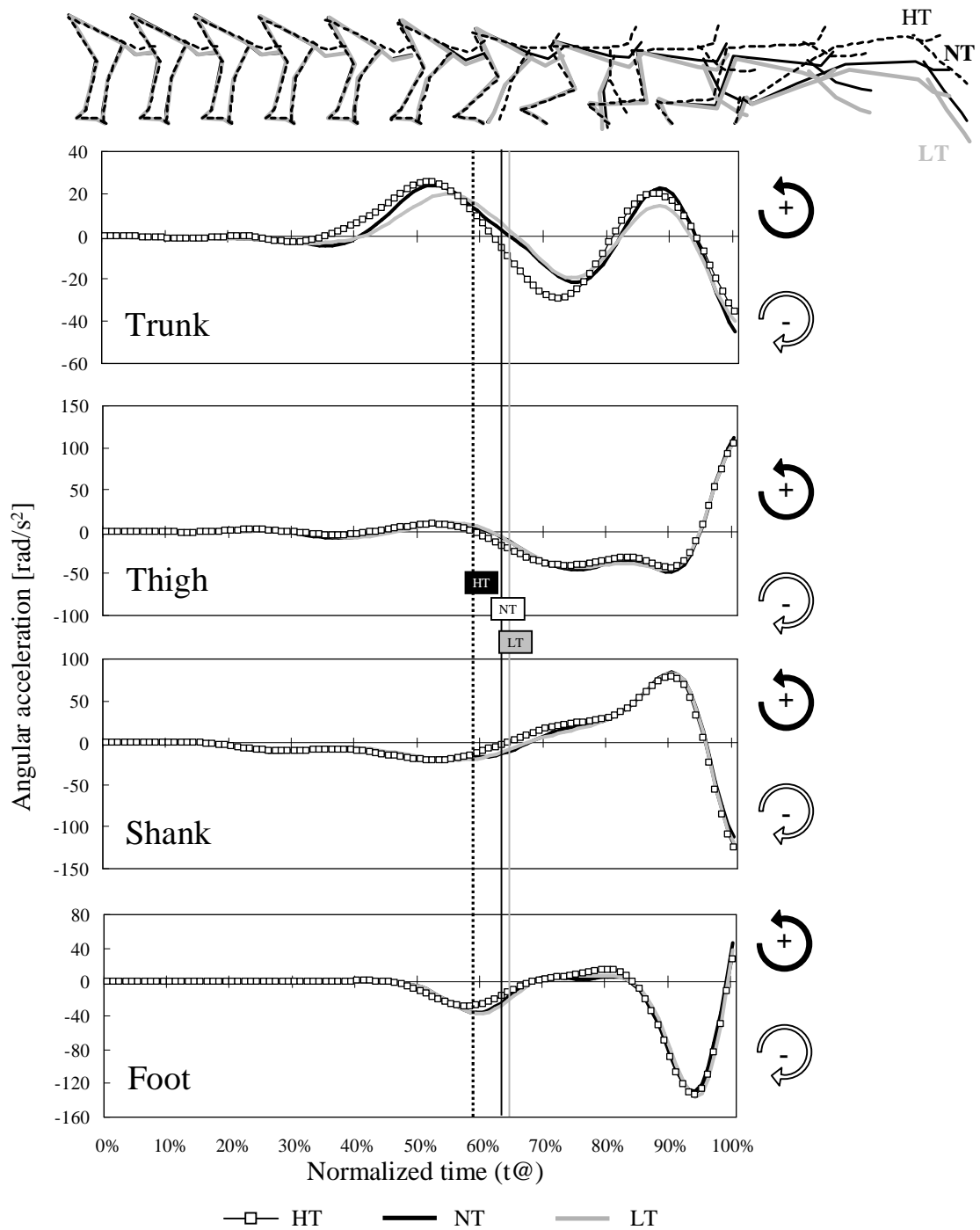


Fig.29 Changes in averaged angular acceleration (n=12) of each segment.  
 Vertical line indicated the time (Mean Grip time) when subject released the hands from the starting block.

られず，類似した変化パターンを示した．Fig.30 に HT，NT，LT における各関節に働く関節力と関節トルクが体幹，大腿，下腿，足部に生じさせる角加速度成分の平均パターンを示した．グリップタイム以降の各角加速度成分は，いずれのセグメントにおいても試技間に顕著な差は見られず，類似した変化パターンを示した．また，いずれの試技のいずれのセグメントにおいても，グリップタイム以降については，関節力および地面反力のモーメントと関節トルクが互いに逆向きのモーメントとして作用している傾向が示された．

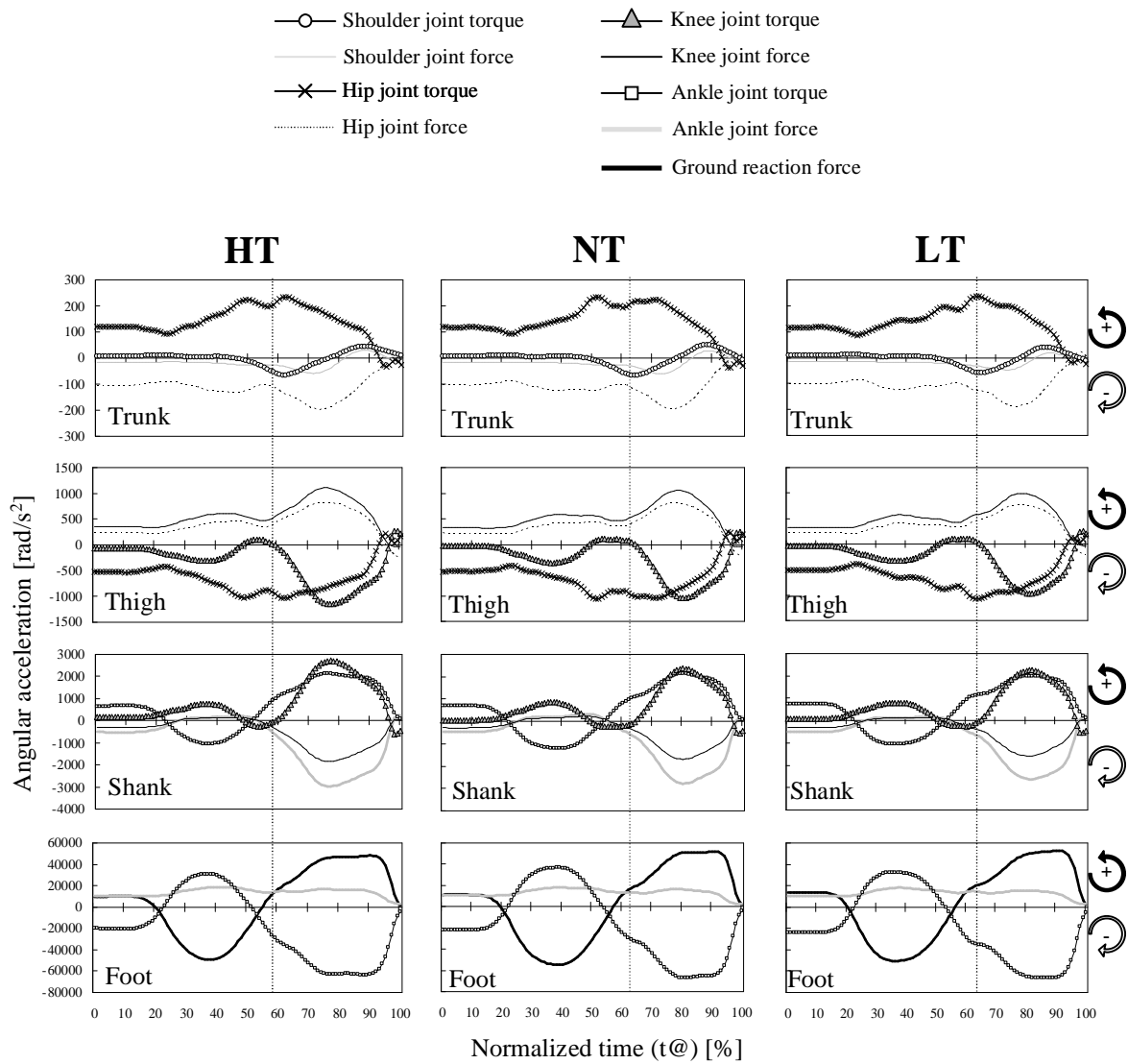


Fig.30 Changes in averaged moment (n=12) generated to each segment by joint torque and joint force. Vertical dotted line indicated the time (Mean Grip time) when subject released the hands from the starting block.

## 6-4. 考察

### 上肢によって発揮される力

【研究課題 2】においては，1 台のフォースプレートで地面反力を計測したため，手がスタート台に触れている局面においては，閉ループの問題から手と足で発揮された力を分離することは出来ない．しかしながら，両手でスタート台先端を握っている時間（グリップタイム）がブロックタイムの約 63% に相当し（%Grip time），この時間に獲得される水平成分の力積が，全体の力積の約 3 分の 1 にも相当することを踏まえると，Grab start 動作を力学的に説明する上で，上肢で発揮される力を無視することは出来ない．両手がスタート台先端に触れない Swing start と Grab start を比較した先行研究（Zatsiorsky et al. 1979）において，Grab start の特徴として，手でスタート台先端を握ることによるブロックタイムの短縮が報告されていることから，スタート動作において上肢によってスタート台に加えられる力が持つ役割の重要性は高いと考えられる．したがって今後手と足でスタート台に加えられる力を個々に計測し，スタート動作全体の動力学を解明する必要があると考えられる．

### Grab start の角度制御に関わる要因

【研究課題 1】において，跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳び出し角度 ( ) との間に強い相関が認められ，跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) によって跳び出し角度 ( ) が決まることが明らかとなった．【研究課題 2】においても HT，NT，LT のいずれの試技においても跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳び出し角度 ( ) との間に有意な相関が認

められた (Fig.23) .

さらに跳び出し角度 ( ) の減少に伴い,  $t_{pk}$  時の足部, 下腿, 大腿と体幹のセグメント角度が減少する傾向が示され (Fig.27), 試技間のこれらの角度の平均値のほとんどが, HT, NT, LT の順で値が大きかった (Table 5) . これらの結果は, 跳び出し角度 ( ) が小さくなるにつれて, 身体の前傾を大きくした状態で関節伸展トルクを發揮していることを示している .

跳び出し角度 ( ) は, 身体が受ける正味の力積の水平成分と垂直成分の比率によって決定される . したがって, 各関節トルクと跳び出し角度 ( ) の関係を検討する上では, この関節トルクによって生じる各セグメント重心の加速度を考慮する必要がある . 剛体リンクモデルにおいてはセグメント重心加速度 ( $ax_i, ay_i$ ) と角加速度 ( $\alpha_i$ ) との関係は以下の式 (14), (15) が成立する (金子・福永編 2004 を改変) .

$$ax_i = ax_A - \vec{r}_A \sin \theta_i \cdot \alpha_i - \vec{r}_A \cos \theta_i \cdot \omega_i^2 \quad (16)$$

$$ay_i = ay_A + \vec{r}_A \cos \theta_i \cdot \alpha_i - \vec{r}_A \sin \theta_i \cdot \omega_i^2 \quad (17)$$

この式 (16), (17) より, セグメント重心加速度には, セグメント角度 ( $\theta_i$ ) とセグメントの角加速度 ( $\alpha_i$ ) が関与することが分かる . Fig.30 で示されたようにいずれの試技においても, グリップタイム以降については, セグメントに生じる総モーメント ( $I_i \alpha_i$ ) に対して, そのセグメントの両端に作用する関節力のモーメントと関節トルクの関係は, そのほとんどが互いに逆向きに作用し合い, これらの試技間の変化に顕著な差は認められなかった . また, グリップタイム以降における各セグメント角加速度と関節トルク方向がほとんどの時間において一致しているため, セグメント角加速度には

隣接する関節トルクが大きく貢献していることが分かる。さらに、各試技の各セグメント角加速度の平均パターンにも顕著な差は認められず、各関節で伸展トルクが発揮されるグリップタイム以降に各セグメントの角加速度の値が大きく変化していたことが示された (Fig.29)。

セグメント角加速度 ( $\alpha_i$ ) によるセグメント重心加速度の水平成分 ( $-\bar{r}_A \sin \theta_i \cdot \alpha_i$ ) と垂直成分 ( $\bar{r}_A \cos \theta_i \cdot \alpha_i$ ) は、セグメント角度 ( $\theta_i$ ) によってその値が変化することになる。したがって、LT 試技においては、各セグメント角度 ( $\theta_{\text{foot}}, \theta_{\text{shank}}, \theta_{\text{thigh}}, \theta_{\text{trunk}}$ ) が小さくなるように身体の前傾を大きくし、NT と HT と比べると各セグメントが時計回りに転位した状態で関節伸展トルクを発揮するため、これに伴って各セグメント重心加速度のセグメント角加速度による加速度成分の向きが HT と NT に比べると時計回りに転位することとなる。これによってセグメント重心加速度ベクトルの向きも時計回りに転位し、最終的な跳び出し角度 ( ) が小さくなったと考えられた。

### Stretch-Shortening-Cycle の利用

試技間の関節トルクの大きさの比較においては、HT における膝関節トルクの最大値の平均が NT と LT よりも有意に大きかった (Table 5)。この原因を検討するために Fig.26 を見るとグリップタイム以降に、膝関節トルクは正の値、関節相対角速度は屈曲を表す負の値を示し、関節トルクパワーが負の値を示しているため、膝関節において反動動作を利用していると推察できる。さらに、Sub.J は LT に比べ HT のほうがグリップタイム以降に見られる膝関節トルクパワーの負のピーク値 ( $P_k$ ) が小さく、後

に出現する膝関節伸展トルクの最大値が大きかった。この傾向は、HT と LT における膝関節伸展トルクパワーの負のピーク値 ( $P_k$ ) と膝関節伸展トルクの最大値の平均値においても見られた (Table 5)。そして NT と LT において、膝関節トルクパワーの負のピーク値 ( $P_k$ ) と膝関節トルクの最大値との間に有意な負の相関が認められた (Fig.28)。これらの結果は Stretch-Shortening-Cycle (以下「SSC」と略す) の効果的利用の可能性を示唆するものである。したがって SSC の効果的利用により、HT においては膝関節トルクの最大値が大きくなる現象が引き起こされたと推察できる。

本研究の結果からは、HT において膝関節トルクの最大値が NT と LT に比べ大きくなる傾向が示されたが、12 名の被験者のうち 2 名の被験者は LT において膝関節トルクパワーの負のピーク値 ( $P_k$ ) が小さく、膝関節の伸展トルクの最大値が大きかった。Fig.31 には、LT において膝関節トルクの最大値が大きかった Sub.G の HT と LT における膝関節相対角速度、膝関節トルクとトルクパワーを示した。Sub.G は膝関節相対角速度が負の値を示す局面において、LT の膝関節伸展トルク発揮のタイミングが HT より早く、そして伸展トルク発揮の勾配も大きかった。したがって、Sub.G は LT において SSC を効果的に利用し、膝関節トルクの最大値が大きくなったと考えられた。これらの結果から、膝関節トルクの最大値が大きくなることは、SSC の効果的利用によって引き起こされたと考えられた。

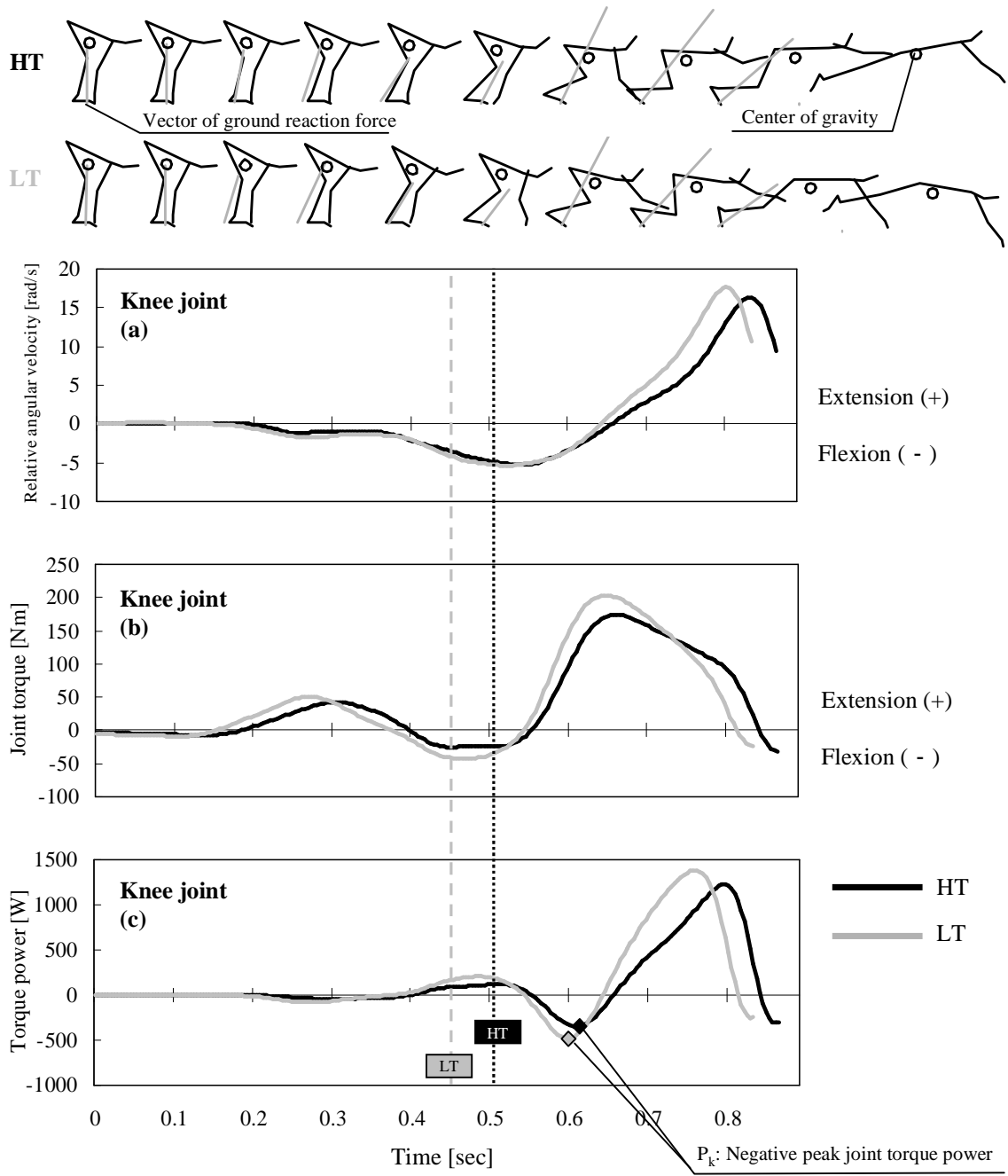


Fig.31 Changes in relative joint angular velocity (a), joint torque (b) and joint torque power (c) at knee of Sub.G during HT and LT.  
Vertical line indicated the time (Grip time) when subject released the hands from the starting block.



## パフォーマンス向上への示唆

Grab start において、下腿と体幹については、グリップタイム以降にセグメントの両端に作用する関節伸展トルクは後方回転モーメント（正のモーメント）を生じさせる。セグメント角度が 0deg 以上においてこの後方回転モーメントが生じると、セグメント角加速度によるセグメント重心水平加速度 ( $-\ddot{r}_A \sin \theta_i \cdot \alpha_i$ ) は負の値を示すことになる。Grab start のパフォーマンスを考える上では、この後方回転モーメントによる負の水平加速度を出来るだけ生じさせないことが重要になる。本研究の結果から跳び出し角度 ( ) と身体の傾きの関係が明らかになり、跳び出し角度 ( ) を大きくするためには、身体の前傾を小さくし関節伸展トルクを発揮させる必要がある。したがって高く跳び出すために下腿と体幹のセグメント角度が 0deg 以上となる状態で関節伸展トルクを発揮しても、この伸展トルクは効果的に正のセグメント重心水平加速度に反映されない。HT と LT における跳び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) の平均値を比較すると (Table 4), HT のほうが跳び出し角度 ( ) がより水平で 0deg に近いにも関わらず (HT :  $3.8 \pm 4.8 \text{deg}$ , LT :  $-10.2 \pm 3.7 \text{deg}$ ), LT の跳び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) のほうが HT よりも有意に高くなっていた (HT :  $4.09 \pm 0.19 \text{m/s}$ , LT :  $4.45 \pm 0.19 \text{m/s}$ )。これらのことから、下腿と体幹のセグメント角度が 0deg を超えて大きくなるように跳び出し角度 ( ) を大きくすることはスタートパフォーマンスにとって好ましくないことが示唆された。

また、本研究の結果から SSC の効果的な利用によって膝関節トルクの最大値が大きくなる可能性が示唆された。膝関節トルクパワーの負のピーク値 ( $P_k$ ) が小さくなることは HT の試技において多く見られたが、その原因は素早く屈曲から伸展に切り替え

るような膝関節の伸展トルク発揮によるものであると考えられた。さらに、2名の被験者が HT よりも LT において、膝関節トルクパワーの負のピーク値 ( $P_k$ ) が小さくなり、後の膝関節トルクの最大値が大きくなった結果を踏まえると、跳び出し角度 ( ) を小さくし、低く跳び出す場合でも SSC を効果的に利用し膝関節の伸展トルクを大きくすることが可能であると考えられる。

以上の点から、Grab start においては、下腿と体幹の前傾を大きくすることで後方回転モーメントによるセグメント重心の負の水平加速度を小さくし、素早く屈曲から伸展に切り替えるような膝関節の伸展トルク発揮を行うことで、高い跳び出し水平速度の実現が可能になることが示唆された。

### 今後の課題

本研究は、グリップタイム以降の関節トルクから、跳び出し角度 ( ) 制御には関節伸展トルクが発揮される時の身体の前傾が大きく関与する知見を導き出した。跳び出し角度 ( ) を決定する地面反力の水平成分と垂直成分の試技間の差が、グリップタイム以降に見られたことから (Fig.24)、この知見には十分な妥当性があるものと考えられる。しかしながら、本研究では、手と足によって形成される力学的閉ループの問題から、スタート台上動作全体にわたって関節トルクを算出できていない。関節の伸展トルクが発揮される時の身体の前傾は、グリップタイム中の関節トルク発揮によって決まると考えられる。したがって Grab start における跳び出し角度制御メカニズムの全てを明らかに出来なかった。今後の研究において、手と足で形成される

力学的閉ループを解消した上での逆動力学解析による Grab start 動作全体の Kinetics の把握と、順動力学解析を行う必要性があると考えられた。

## 6-5. 要約

【研究課題2】では、跳び出し角度（ ）を3段階 (HT, NT, LT) に変化させた Grab start 動作の Kinematics・Kinetics を記述し、これらの変化から跳び出し角度（ ）制御に関わる要因を明らかにすることを目的とした。【研究課題2】から得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) HT, NT と LT における肩関節, 股関節, 膝関節と足関節トルクの変化パターンに顕著な差が見られなかった。跳び出し角度（ ）が小さくなるにつれて、関節伸展トルクを発揮するときの各セグメント角度が小さくなり、関節伸展トルクによって生じるセグメント重心加速度の向きが下向きに転位していた。したがって、Grab start のおける跳び出し角度（ ）制御には、関節伸展トルクが発揮されるときの各セグメントの傾きが関与していると考えられた。
- (2) 関節伸展トルクによって下腿と体幹に生じる後方回転モーメントは、セグメント角度が 0deg 以上になると下位に位置する関節に対してセグメント重心を後方に加速させる。したがって、Grab start において、下腿と体幹のセグメント角度が 0deg を超えて大きくなるように跳び出し角度（ ）を大きくすることはスタートパフォーマンスにとって好ましくない。

- (3) 膝関節において、SSC の効果的な利用により膝関節トルクの最大値が大きくなる傾向が示された。この傾向は HT の試技において顕著に見られたが、2 名の被験者が LT において SSC の効果的な利用が見られたため、跳び出し角度 ( ) に依存しない SSC の効果的な利用の可能性が示唆された。

## 総合討論

### 7-1. 研究の目的

本研究は、現在一般的なスタート技術の一つである Grab start における跳び出し角度の変化がスタートパフォーマンスに与える影響を検討するため、跳び出し角度の制御に関わる Kinematics・Kinetics 的要因を明らかにすることと、さらに跳び出し角度の変化が跳び出し速度、ブロックタイム、飛距離に与える影響を明らかにすることを目的とした。

### 7-2. 課題設定

本研究の目的を達成するために以下の研究課題を設定した。

#### 【研究課題 1】(Experiment 1)

Grab start における跳び出し角度の制御に関わる Kinematics 的要因を明らかし、跳び出し角度変化に伴うスタートパフォーマンスへの影響を検討する。

#### 【研究課題 2】(Experiment 2)

Grab start における跳び出し角度の制御に関わる Kinetics 的要因を明らかにする。

### 7-3. 研究結果

#### 【研究課題 1】

大学男子競泳選手 12 名を対象とし、跳び出し角度 ( ) を変化させた試技 (HT, NT, LT) を行わせ、跳び出し角度 ( ) 変化に伴う跳び出し速度 ( $V_0$ ) とその回転要素 ( $Vr_0$ ) と伸展要素 ( $Ve_0$ )、跳び出し水平速度 ( $Vx_0$ )、跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ )、飛距離、ブロックタイムの変化を検討した。その結果、跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳び出し角度 ( ) との間にいずれの試技間にも有意な相関が認められた (LT :  $r = 0.94$ , NT :  $r = 0.93$ , HT :  $r = 0.93$ ) (Fig.15)。また跳び出し角度 ( ) の変化に伴い、跳び出し速度 ( $V_0$ ) とその回転要素 ( $Vr_0$ ) と伸展要素 ( $Ve_0$ ) が増加し、飛距離は減少した (Fig.17)。ブロックタイムは HT よりも LT の値が大きくなる傾向が認められたが、いずれの試技間にも有意差が認められず、NT における各被験者の跳び出し角度 ( ) とブロックタイムとの間に有意な相関が認められなかった。これらの結果により、Kinematics 的な分析からは跳び出し角度 ( ) は跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) によって決まり、跳び出し角度 ( ) 減少に伴い跳び出し速度 ( $V_0$ ) が増加することから、跳び出し速度の水平成分 ( $Vx_0$ ) を重視すると、跳び出し角度 ( ) は 0deg 付近が望ましいと考えられた。

#### 【研究課題 2】

大学男子競泳選手 12 名を対象とし、跳び出し角度 ( ) を変化させた試技 (HT, NT, LT) を行わせ、Grab start 動作を逆動力学解析し、動作中の泳者の Kinematics・Kinetics の変化を検討した。【研究課題 2】においても、跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳び出

し角度 ( ) と間に有意な相関が認められた (HT :  $r = 0.96$  , NT :  $r = 0.84$  , LT :  $r = 0.83$ ) (Fig.23) . さらに膝関節伸展トルクが最大値を迎える時間 ( $t_{pk}$ ) における足部 , 下腿 , 大腿と体幹のセグメント角度は , 跳び出し角度 ( ) が小さくなるにつれてその値が小さくなった (Fig.27) . そして各関節トルクの発揮パターンに顕著な差は認められなかった . 各試技における地面反力の差がグリップタイム以降に大きくなり (Fig.24) , この局面における各セグメント挙動にはセグメントの両端に作用する関節伸展トルクが大きく貢献していたことから (Fig.30) , Grab start の跳び出し角度 ( ) は関節伸展トルクを発揮する時の身体の傾きによって決まることが明らかとなった . さらに , 跳び出し角度 ( ) 制御とは独立して , 膝関節における反動動作による SSC の効果的利用により , 膝関節伸展トルクを大きく出来る可能性が示唆された .

#### 7-4. 討論

##### 跳び出し角度制御

【研究課題 1】と【研究課題 2】ともに跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳び出し角度 ( ) との間に有意な相関が認められた (Fig.15) (Fig.23) . 本研究の結果から Grab start の跳び出し角度 ( ) にとって身体の傾きが重要な意味を持つことになる . 【研究課題 1】の振り子モデルによる Grab start の Kinematics 的な分析においては , 跳び出し角度 ( ) は跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と振り子の回転による跳び出し速度成分 (回転要素 :  $V_{r0}$ ) と伸縮 (伸展要素 :  $V_{e0}$ ) による跳び出し速度成分によって決定されることになる .

$$\phi = \theta_0 - \arctan\left(\frac{Vr_0}{Ve_0}\right) \quad (5)$$

跳び出しまでの身体角度変位によって振り子の回転による速度成分（回転要素： $Vr$ ）が変化し，さらに振り子の傾きによって跳び出し速度の伸展要素（ $Ve_0$ ）に重力が与える影響も変化する．したがって，Grab start の跳び出し角度（ ）には身体の傾きが大きく影響することが明らかとなった．

【研究課題 2】ではスタート台反力から Grab start 動作の逆動力学解析を行い，跳び出し角度（ ）制御に関わる要因を Kinetics から検討した．跳び出し角度（ ）は泳者が跳び出しまでにスタート台から受ける力積の水平成分と垂直成分が重要となる．HT ,NT と LT における地面反力の水平成分と垂直成分の差はグリップタイム以降において顕著に見られた (Fig.24)．したがって泳者の手がスタート台から離れ，下肢の蹴り出し動作が行われるグリップタイム以降において跳び出し角度（ ）が決定される．グリップタイム以降は，下肢の関節によって伸展トルクが発揮され，蹴り出し動作が行われる．膝関節トルクが最大値を向かえる時間（ $t_{pk}$ ）における足部，下腿，大腿と体幹のセグメント角度は，跳び出し角度（ ）が小さいほどその値が小さかった (Fig.27)．この結果は，跳び出し角度（ ）が小さいほど，身体を前方に傾けながら下肢の伸展トルクを発揮していることを示す．【研究課題 2】においてはグリップタイム以降の各セグメントの拳動には各関節における伸展トルクが大きく貢献していることが明らかになった (Fig.30)．さらに HT ,NT と LT における各関節トルク発揮の変化パターンに顕著な差が見られなかった．したがって，跳び出し角度（ ）を小さくするために身



体の傾き ( $\theta, \theta_{foot}, \theta_{shank}, \theta_{thigh}, \theta_{trunk}$ ) を大きくして関節伸展トルクを発揮する必要があり、このトルクが生じさせるセグメント角加速度 ( $\alpha_i$ ) によるセグメント重心加速度ベクトル ( $-\vec{r}_A \sin \theta_i \cdot \alpha_i, \vec{r}_A \cos \theta_i \cdot \alpha_i$ ) の向きがそれぞれ下向きになる。これらのことから Grab start の跳び出し角度 ( $\theta$ ) の制御は、下肢で蹴り出し動作を行うまでのどの程度身体を傾けるかによって決まると言える。

本研究においてはスタート台傾斜板の下に配置した防水型フォースプレート 1 台にて泳者が受ける地面反力を計測したため、手と足が受ける地面反力を別々に計測出来なかった。さらに逆動力学解析により各関節に作用する関節トルクを求めたが、手と足がスタート台に触れている時間 (グリップタイム) においては力学的閉ループの問題から泳者の Kinetics を把握できなかった。本研究の結果からは身体の傾きが異なる状態で関節伸展トルクが発揮されることで、跳び出し角度 ( $\theta$ ) が変化することまでを明らかにすることが出来た。しかしながら、跳び出し角度 ( $\theta$ ) の制御メカニズムという点においては、関節伸展トルクを発揮するまでの身体の傾きをどのように達成しているかがより重要になる。今後は、上肢と下肢に作用する地面反力を別々に計測し、上肢と下肢の Kinetics を把握する必要がある。

### 跳び出し角度が跳び出し速度に与える影響

跳び出し角度 ( $\theta$ ) は泳者の跳躍方向、すなわち跳び出し速度 ( $V_0$ ) ベクトルの向きを表す変数である。この値によって泳者の進行方向である水平速度 ( $V_0 \cos \theta$ ) と、入水までの滞空時間や入水速度までに影響を与える垂直速度 ( $V_0 \sin \theta$ ) の比率が決定さ

れる．跳び出し速度 ( $V_0$ ) ベクトルの大きさが一定であるならば，跳び出し角度 ( $\theta$ ) が  $0\text{deg}$  の時に跳び出し水平速度 ( $V_0\cos\theta$ ) が最大になる．しかしながら，本研究の結果から，跳び出し速度 ( $V_0$ ) ベクトルの大きさは跳び出し角度 ( $\theta$ ) に大きく依存することが明らかとなった．したがってこの両変数間の関係を考慮した上でパフォーマンスへの影響を検討する必要がある．

競泳スタート動作以外の投射運動あるいは跳躍に関する研究において，重力の影響により投射・跳躍角度が小さくなるにつれて投射・跳躍初期速度が大きくなることが報告されている (三浦ほか 1983, Linthorne 2001, Wakai and Linthorne 2005)．本研究の結果から，跳び出し角度 ( $\theta$ ) の減少に伴い跳び出し速度 ( $V_0$ ) と跳び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) の増加が認められ (Fig.17)，これらの先行研究の結果は本研究の Grab start についても同様であることが確認された．この原因にはまず重力の影響が挙げられる．Grab start では，跳び出し角度 ( $\theta$ ) を大きくするためには重力に抗って上向きに力を発揮する必要がある．したがって大きな正の垂直速度を獲得するために，スタート台に発揮する力の垂直成分を大きくしても，発揮した力に対して効率よく跳び出し速度 ( $V_0$ ) に反映されない．逆に重力に抗わないように跳び出し角度 ( $\theta$ ) を小さくし，低く跳び出すほうが重力を利用し跳び出し速度 ( $V_0$ ) を大きく出来る．

重力の影響以外に跳び出し速度 ( $V_0$ ) が跳び出し角度 ( $\theta$ ) に依存する理由がもう一つ挙げられる．人間の運動は各関節を中心とした各セグメントの回転運動によりなされる．【研究課題 1】からは身体の傾きが跳び出し角度 ( $\theta$ ) 制御に大きな意味を持つことが明らかとなった．Grab start の場合，下肢の関節において伸展トルクが発揮

される時に、下腿と体幹には後方回転モーメントが生じることになる。これらのセグメントのセグメント角度 ( ) が 0deg 以上 (0deg ~ 180deg) において後方回転モーメントが生じると下腿と体幹のセグメント重心はそのセグメントの下端に対して、進行方向とは逆方向に加速してしまう。Grab start においては跳び出し角度 ( ) を大きくするためには身体の傾きを小さくしてスタート台から跳び出す必要がある。したがって Grab start では、高く跳び出すために身体の傾きが小さい状態 (下腿と体幹のセグメント角度が 0deg 以上) で下肢の伸展トルクが発揮されると、下腿と体幹に生じる後方回転モーメントによるセグメント重心の負の水平加速度成分 ( $-\vec{r}_A \sin \theta_i \cdot \alpha_i$ ) が大きくなり、跳び出し速度 ( $V_0$ ) を大きくすることが出来ない。これらの理由により跳び出し角度 ( ) の減少に伴い跳び出し速度 ( $V_0$ ) の増加が見られたと考えられた。

また跳び出し角度 ( ) を小さくして跳び出すためには跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) を小さくする必要があるため、跳び出しまでの身体重心変位が大きくなる。よって低く跳び出すためにはブロックタイムが長くなることが予想される。しかしながら、この下腿と体幹における負の水平加速度 ( $-\vec{r}_A \sin \theta_i \cdot \alpha_i$ ) が低く跳ぶことで小さくなるため、跳び出し角度 ( ) に最終的なスタート台上での所要時間であるブロックタイムにはあまり影響しない。

### 跳び出し角度がパフォーマンスに与える影響

跳び出し後の泳者の重心の軌跡は前述したように式 (1), (2) で表される (P.15)。本研究の結果から跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳び出し角度 ( ) との間に有意な相関

が認められ (Fig.15) (Fig.23), 飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) によって飛び出し角度 ( ) が決定されることが明らかとなった。したがって, この飛び出し時の身体角度は, 飛び出し水平・垂直速度 ( $V_0\cos$  ・  $V_0\sin$  ), 飛び出し時の身体重心の水平・垂直位置 ( $l\cos\theta$ ・ $l\sin\theta$ ) を決定する極めて重要なパラメーターである【研究課題 2】における HT, NT と LT における各被験者の飛び出し時の身体重心位置を Fig.32 に示した。この Fig.32 には被験者の飛び出し時の線分  $l$  の平均値である 1.12m を半径とした円を描いた。この Fig.32 を見ると, 各被験者の飛び出し時の身体重心位置がこの円の円周上にプロットされる様子が分かる。各試技における被験者のスタート台先端と身体重心との距離  $l$  の平均値を見ると【研究課題 1】においては HT で  $1.22\pm 0.03\text{m}$ , NT で  $1.22\pm 0.04\text{m}$ , LT で  $1.22\pm 0.03\text{m}$  となっており, 【研究課題 2】においては HT で  $1.13\pm 0.03\text{m}$ , NT で  $1.12\pm 0.04\text{m}$ , LT で  $1.13\pm 0.04\text{m}$  となっていた。各試技ごとに差はないものと考えられ, 本研究の被験者が飛び出した飛び出し角度 ( ) の範囲においては飛び出し時のスタート台先端と身体重心の距離  $l$  に差はないものと考えられた。これらの結果を踏まえると Grab start においては飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) によって飛距離が決定されることになる。

本研究では, 被験者に飛び出し角度 ( ) が変化するように実験試技を行わせ, 飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と飛び出し角度 ( ), そして飛び出し速度 ( $V_0$ ) の関係を明らかにすることが出来た。そこで, 本研究の【研究課題 1】において得られたこれらの変数の結果を元に, HT, NT と LT の全ての試技において被験者が示した飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と飛び出し角度 ( ) との関係と, 飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳

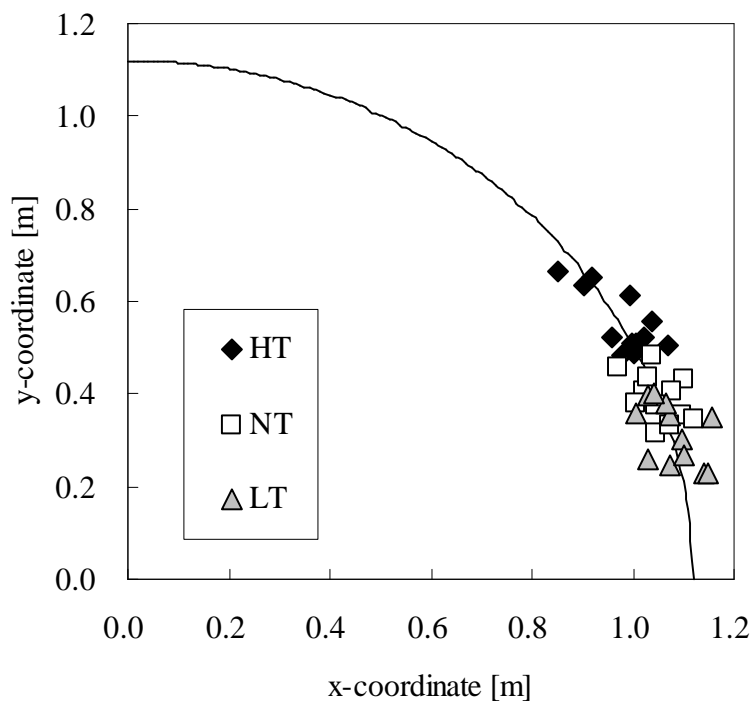


Fig.32 Center of gravity at the take-off of each subject at Experiment 2.  
 Curved line indicated circle of radius of the line  $l$  which was mean value (1.12m) in Experiment 2.  
 $l$ : the distance from the edge of starting block to center of gravity.

び出し速度 ( $V_0$ ) との関係を図形回帰式 (18), (19) によって表し, これらの回帰式と跳び出し後の身体重心の軌跡を表す投射運動の式 (1), (2) を用いて, さまざまな跳び出し時の身体角度を与えた時の飛距離の変化を求めた. なお, この計算においては空気抵抗は無視した.

$$\phi = 1.0711\theta_0 - 28.94 \quad (18)$$

$$V_0 = -0.0298\theta_0 + 5.0211 \quad (19)$$

$$x = V_0 \cos \phi \cdot t + l \cos \theta_0 \quad (1)$$

$$y = V_0 \sin \phi \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 + l \sin \theta_0 + h \quad (2)$$

この計算においては,  $l$  の値は【研究課題 1】の HT, NT と LT における跳び出し時の線分  $l$  の平均値である 1.22m とし, スタート台は高さである  $h$  の値は 0.7m とした. Fig.33 には上記の計算における跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ), 跳び出し角度 ( ), 飛距離, 跳び出し時の水平速度 ( $V_0 \cos$  ) と入水角度 ( $\phi$ ) の関係を示した. なお, 入水角度は身体重心が水面に達する垂直座標が 0 ( $y = 0$ ) になる時の時刻  $t$  における身体重心速度ベクトル ( $V$ ) が水平面となす角と定義した.

この計算結果によると跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が 38deg で跳び出し角度 ( ) が 11.8deg の時に飛距離が 3.36m で最大となり, この時の跳び出し水平速度 ( $V_0 \cos$  ) は 3.90m/s で入水角度は - 54.8deg となった. そして, 跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が 9.6deg で跳び出し角度 ( ) が - 18.7deg の時に跳び出し水平速度 ( $V_0 \cos$  ) が 4.49m/s で最大となり, この時の飛距離は 2.56m で入水角度は - 44.9deg となった. また跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が 6.0deg で跳び出し角度 ( ) が

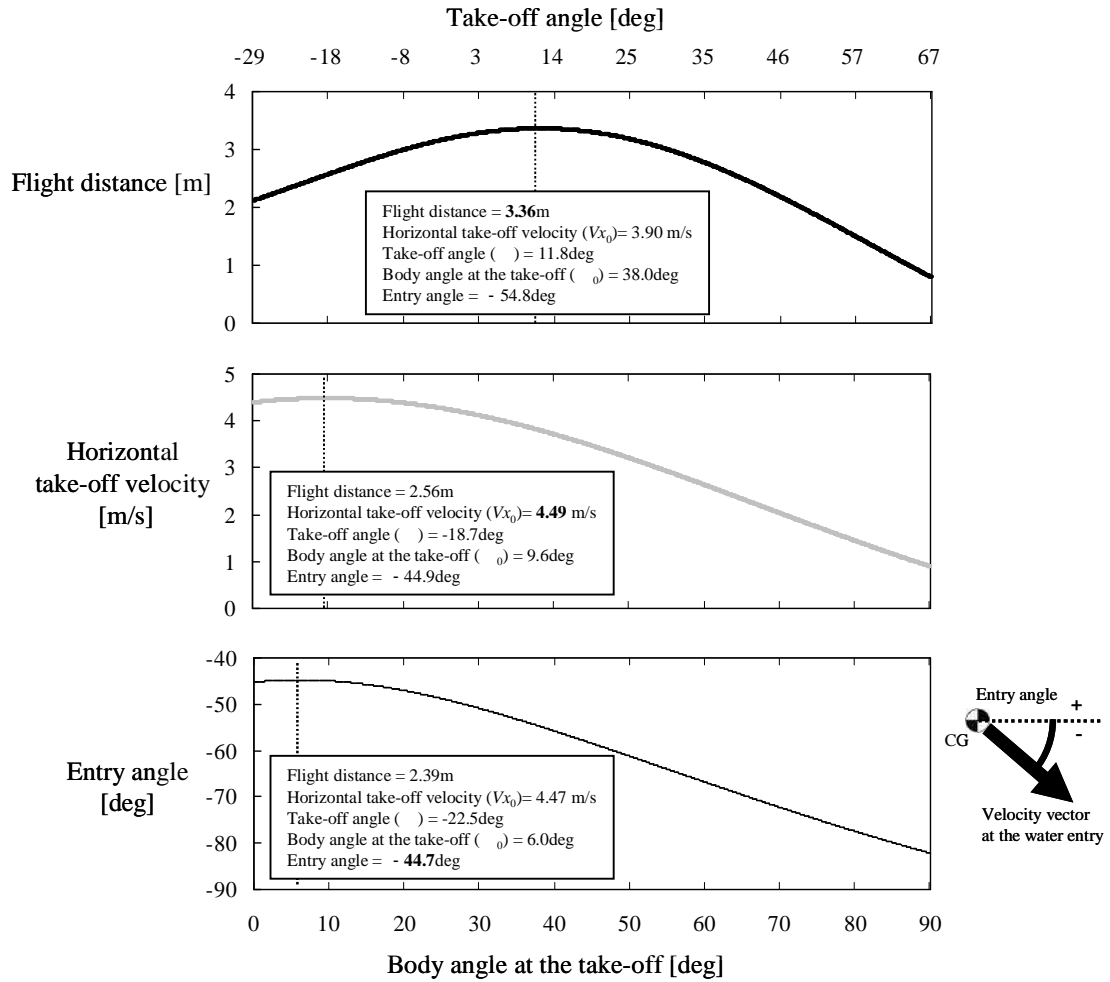


Fig.33 Take-off angle and flight distance, horizontal take-off velocity and entry angle related to body angle at the take-off based on following equations.

$$\phi = 1.0711\theta_0 - 28.94 \quad (18)$$

$$V_0 = -0.0298\theta_0 + 5.0211 \quad (19)$$

$$x = V_0 \cos \phi \cdot t + l \cos \theta_0 \quad (1)$$

$$y = V_0 \sin \phi \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 + l \sin \theta_0 + h \quad (2)$$

$l$  : mean distance (1.22m) between the edge of starting block and center of gravity in Experiment 1.

$H$  : height of starting block (0.7m)

$V_0$  : take-off velocity

$\theta_0$  : take-off angle

$\theta_0$  : body angle at the take-off

$g$  : acceleration of gravity

$t = 0$ : The time at the take-off.

- 22.5deg の時に入水角度 ( $\varphi$ ) が - 44.7deg で水平面に対して最も浅い角度となり、この時の飛び出し水平速度 ( $V_0\cos$ ) は 4.47m/s で、飛距離は 2.39m となった。この Fig.33 によって Grab start の跳躍方向が飛び出し水平速度 ( $V_0\cos$ ) と飛距離と入水角度 ( $\varphi$ ) に与える影響がわかる。ただし、この計算結果は、本研究の実験結果に基づくものであるため、本研究の【研究課題 1】における被験者が示した飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と飛び出し角度 ( ) の範囲から外れるほど ( $\theta_0$ : 10.1~41.4deg, : - 20.4~18.8deg) 計算結果の値の妥当性は低くなる。

Fig.34 には上記の計算に飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) を 0deg から 10deg 刻みで 70deg まで与えた場合と飛距離が最大となる飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が 38deg の飛び出し後の身体重心の軌跡を示した。この Fig.34 を見ると、飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が 0deg で飛び出すと、飛び出し時の身体重心の位置は水平方向に関しては長い距離を獲得できる。しかしながら、垂直方向に関して低い位置から飛び出し、飛び出し垂直速度 ( $V_0\sin$ ) の負の値が大きくなるため滞空時間が短くなり、飛距離が大きくなり、一方飛び出し時の身体角度が 70deg で飛び出すと、飛び出し時の身体重心の垂直位置に関しては高い位置から飛び出し、飛び出し垂直速度の正の値が大きくなるため滞空時間が長くなる。しかしながら、飛び出し時の身体重心の水平位置に関しては低く飛び出す場合と比べると十分な距離を獲得できない。さらに高く飛び出すほど飛び出し速度 ( $V_0$ ) と飛び出し水平速度 ( $V_0\cos$ ) を大きくすることが出来ないため飛距離は伸びない。この両方の利点のバランスがとれる飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が 38deg の時に飛距離が最大となる。



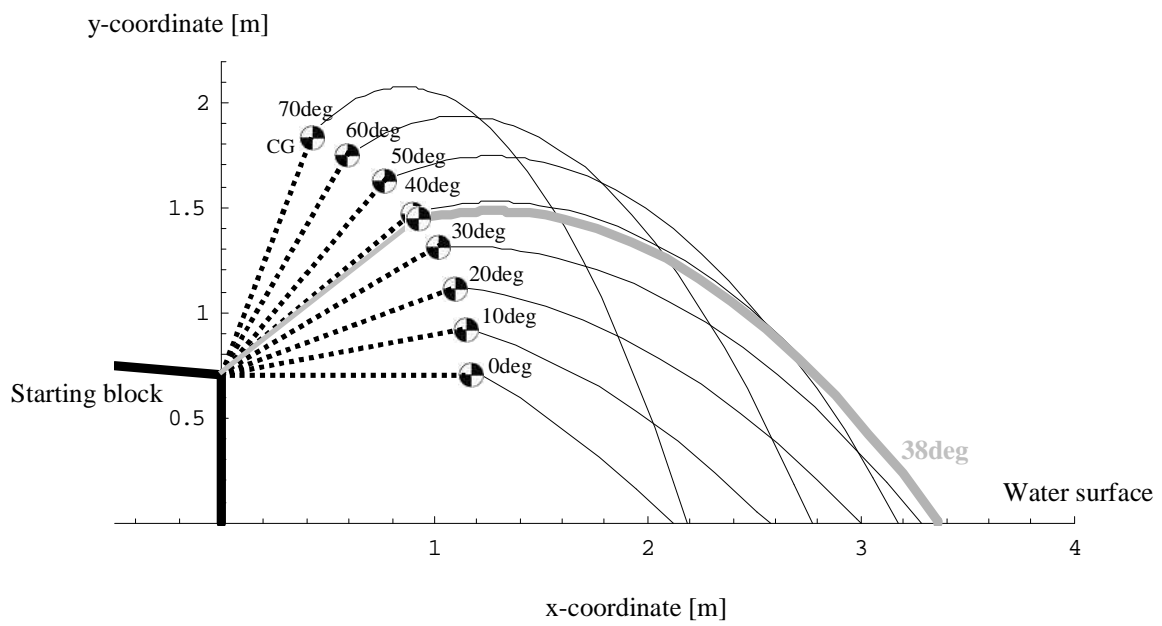


Fig.34 CG trajectories and flight distance related to body angle at the take-off from Experiment 1 data (See Fig.33).

飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) に対する飛距離の変化は身体角度が 0deg から 38deg までは増加し, 38deg 以上の身体角度 ( $\theta_0$ ) では飛距離は減少する変化を示す. したがって, 身体角度 ( $\theta_0$ ) が 38deg をまたいでほぼ飛距離が同値を示す身体角度 ( $\theta_0$ ) が存在することになる. 一例として, 飛距離が約 3.30m になる時の身体角度 ( $\theta_0$ ) は 30.8deg (A) と 45deg (B) の 2 条件存在する. この 2 条件 A, B 時の飛距離, 飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ), 飛び出し角度 ( $\alpha$ ), 飛び出し水平速度 ( $V_0 \cos \alpha : V_{x0}$ ) とこの 2 条件 A, B の飛び出し後の入水までの身体重心の軌跡を Fig.35 に示した. この 2 条件を比較すると, 飛距離が同じ場合の条件でも飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が 30.8deg で飛び出し角度 ( $\alpha$ ) が 4.0deg となるように低く飛び出す条件 A のほうが, 飛び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) が 4.09m/s となり, 条件 B よりも 0.62m/s 速い. さらに条件 A のほうが飛び出しから入水までの時間が 0.55sec となり 条件 B よりも 0.15sec 早く同じ入水地点 (3.30m) に身体重心が到達することになる. 実際には入水においては身体の姿勢を考慮する必要があり, 身体の一部が入水した時点で水の抵抗を受けるため, この時間差には多少の誤差が生じると考えられるが, 飛距離が同じであれば身体重心という質点の計算結果から高く飛び出すよりは低く飛び出すこと (小さな飛び出し角度を選択すること) の利点が大いことが分かる. 以上の結果により飛び出し角度 ( $\alpha$ ) の制御による飛び出し速度 ( $V_0$ ) と飛距離, そして入水速度と入水角度 ( $\varphi$ ) への影響を明らかにすることが出来た.

この入水動作が行われるエントリー期において泳者が水から受ける抵抗 ( $F_d$ ) は式 (20) にて表せる.

|   | Flight distance<br>[m] | $\theta_0$<br>[deg] | $\alpha_0$<br>[deg] | $V_{x_0}$<br>[m/s] |
|---|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| A | 3.30                   | 30.8                | 4.0                 | 4.09               |
| B | 3.30                   | 45.0                | 19.3                | 3.47               |

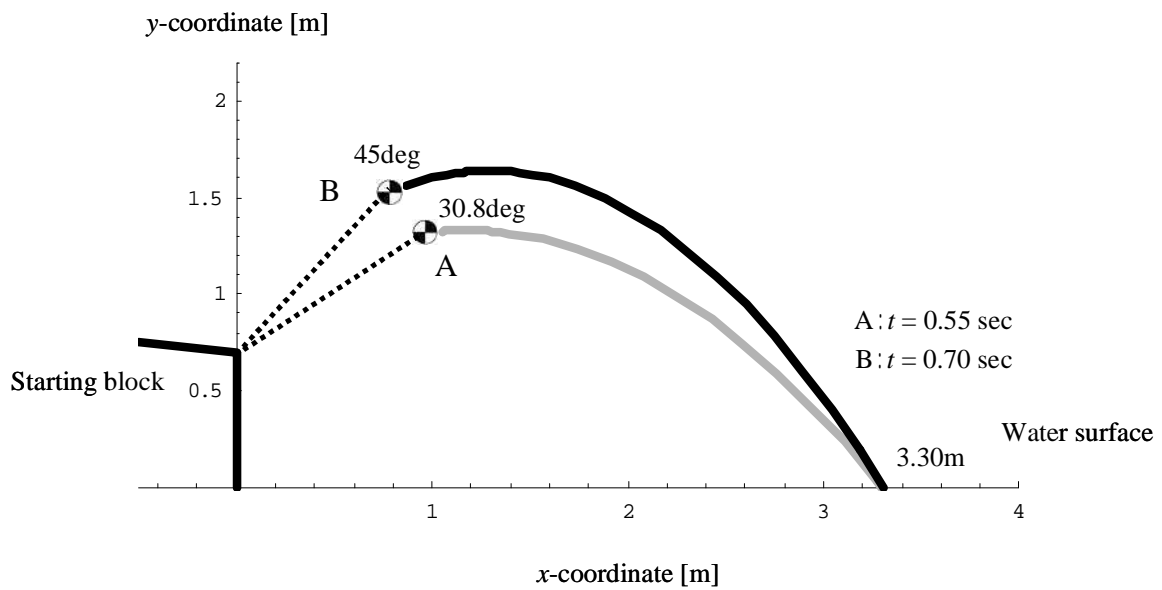


Fig.35 Comparison of CG trajectories when body angle at the take-off were 30.8deg (A) and 45deg (B).

$$F_d = \frac{1}{2} C_d S \rho V^2 \quad (20)$$

$C_d$  は抵抗係数、 $S$  は進行方向の垂直面積、 $\rho$  は流体の密度、 $V$  は物体の速度である。

$F_d$  を最小にするためには進行方向の垂直面積 ( $S$ ) を最小にしなければならない。この垂直面積 ( $S$ ) は、2次元平面において、入水時の泳者の身体を一つのセグメントに単純化すると、泳者の入水速度ベクトルとセグメントが水面となす角  $\varphi$  と  $\theta_e$  が一致することで垂直面積が最小になる (Fig.36)。この現象は先行研究や水泳の指導書において「一点入水」あるいは「Hole entry」とされ、入水抵抗を小さくする技術として一般化されている (本間・小林 1987, Maglischo 2003, 日本水泳連盟編 1993)。これらのことから入水抵抗  $F_d$  を最小にするために、フライト期における身体全体の適切な前方回転角度変位が必要となる。

本研究において明らかとなった結果を踏まえると、高く飛び出す場合は飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が大きく、さらに入水角度 ( $\varphi$ ) も負の値が大きくなるため、入水時において入水速度ベクトルの向き (入水角度:  $\varphi$ ) と身体の向き ( $\theta_e$ ) を一致させるためには、大きな身体全体の前方回転角度変位が必要となる (Fig.37)。一方低く飛び出す場合には、飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) が小さく、さらに入水角度 ( $\varphi$ ) の負の値が小さくなるため、一点入水を行うためのこの前方回転角度変位は小さくなる。

この前方回転角度変位には、ブロック期のスタート台上動作において獲得される飛び出し時の全身の角運動量、フライト期の空中での姿勢変化に伴う全身の慣性モーメントの変化 (角運動量の保存則)、そして滞空時間が関与する。ブロック期の台上動作とフライト期の空中動作によって、この前方回転角度変位の調整が行われていること

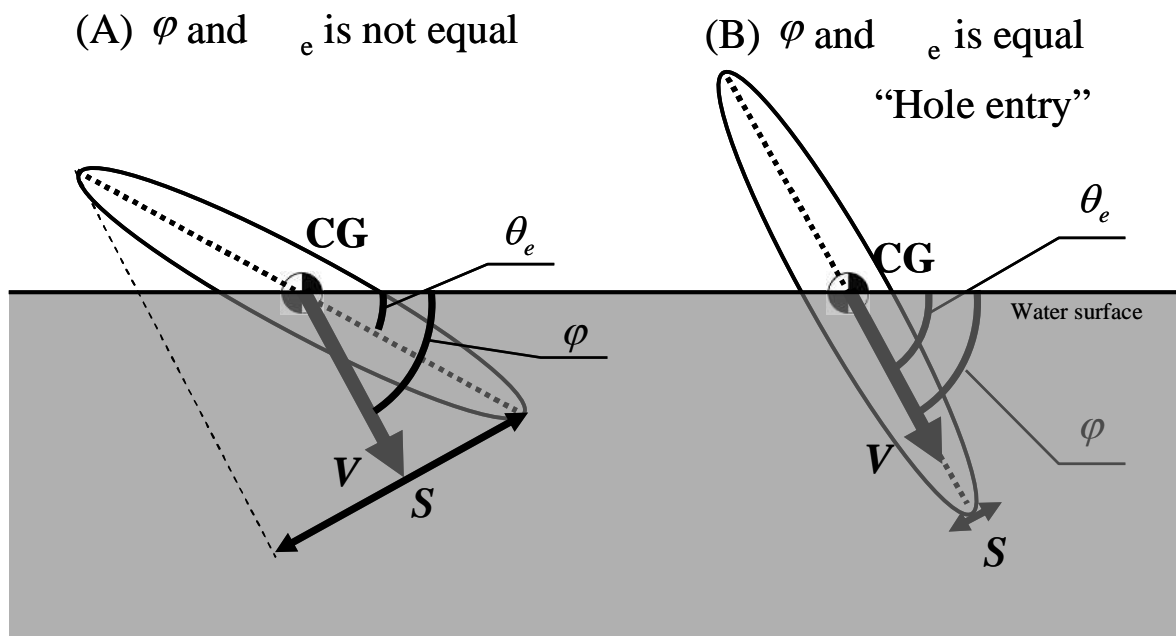


Fig.36 Cross sectional area which is determined by segment angle ( $\theta_e$ ) at the water entry.

$V$ : Velocity vector of center of gravity.

$\varphi$ : Entry angle

$\theta_e$ : Segment angle

$S$ : cross sectional area for  $V$  direction.

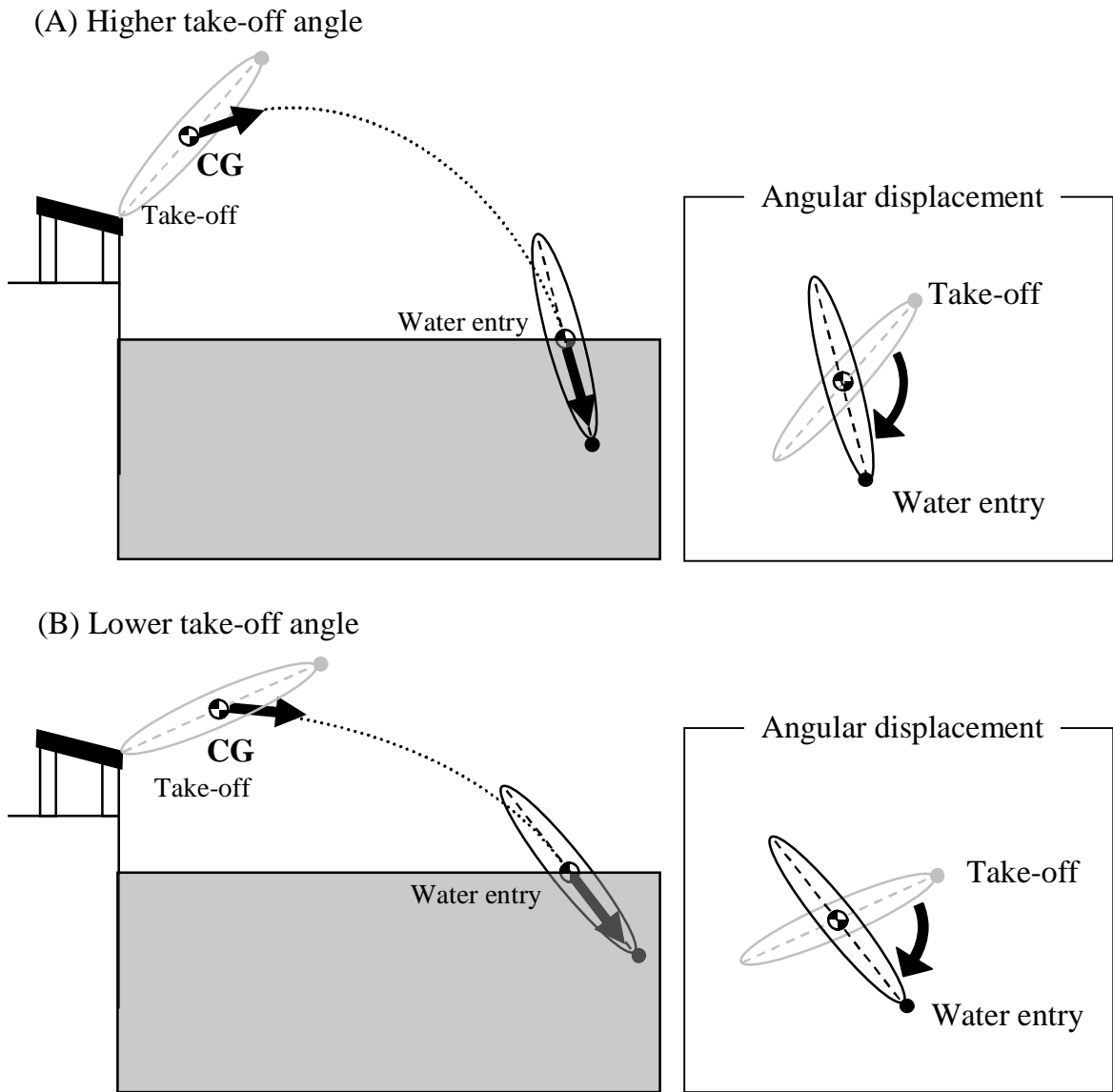


Fig. 37 Angular displacement of the whole body from take-off to water entry in order to perform hole entry.

になる。フライト期の所要時間である滞空時間は、飛び出し角度（ ）を大きくして飛び出す場合は初期位置が高く、正の飛び出し垂直速度 ( $V_{y0}$ ) が大きくなるため、この時間が長くなる。一方、飛び出し角度（ ）を小さくして飛び出す場合は初期位置が低く、負の飛び出し垂直速度 ( $V_{y0}$ ) が大きくなるため滞空時間は短くなる。したがって、飛び出し角度（ ）を小さくし、低く飛び出す場合においては滞空時間が短くなるため、一点入水を行うために必要な前方回転角度変位をフライト期の空中姿勢変化によって調整することが困難になると考えられる。低く飛び出すほど、この前方回転角度変位は台上動作での角運動量制御に大きく依存することになると考えられる。

さらに、本研究の結果から飛び出し角度制御は身体全体の前方への倒し込みによってなされることが明らかとなった。言い換えると、飛び出し角度（ ）によって飛び出しまでの各セグメントの回転角度変位が変わることになる。したがって、身体全体の前方への倒しこみによる飛び出し角度制御と飛び出し時の全身の角運動量には関連性があると考えられる。

これらをまとめると、台上動作の飛び出し角度制御によって、飛び出し時の全身の角運動量が増減する可能性があり、そして一点入水するために必要となるフライト期の身体全体の前方回転角度変位と、これを達成するための滞空時間が変化する。本研究では、質点としての身体重心の運動から飛び出し水平速度 ( $V_{x0}$ ) と飛距離への影響を踏まえた上で適切な飛び出し角度範囲を提示することが出来た。しかしながら、競泳スタートの入水動作を考えると全身の前方回転角度変位が必要となり、入水までの最適な飛び出し角度の導出には、入水時の抵抗も考慮する必要があるために、台上で

の角運動量制御メカニズムを明かし、飛び出し角度制御との相互関係も明らかにする必要がある。

競泳におけるスタートパフォーマンスの評価は 15m の通過時間である（日本水泳連盟編 2005）。したがって入水後のさまざまな要因も考慮した上で 15m の通過時間が最も短くなる飛び出し角度（ ）の値がスタートパフォーマンスにとって最適値となる。本研究において、実験結果を用いて飛距離が最大となる飛び出し角度（ ）の値を推定することが出来た。しかしながら飛び出し角度（ ）がこの値のときにスタートパフォーマンスが最大となるとは言い切れない。

今後は本研究から得られた知見を含め、台上動作の角運動量制御メカニズムの解明、そして入水後の水中での局面におけるスタートパフォーマンスに影響を与える要因を特定し、それぞれの要因の全体的な相互関係を明らかにした上で、スタートパフォーマンスにとって最適な飛び出し角度（ ）を検討する必要がある。

### 実践への示唆

現在まで数多くの競泳スタートに関する研究が行われ、多く水泳指導書（Counsilman 1968 ,Maglischo 2003 ,宮下ほか 1973 ,日本水泳連盟 1973; 1993; 2002; 2005 , Wilkie 1986）においてもスタート動作指導に関する記述が見られるが、飛び出し角度（ ）の調整方法や適切な飛び出し角度（ ）は明確に記述されてこなかった。本研究から得られた知見を元に飛び出し角度（ ）の調整方法と適切な角度範囲に関する示唆を以下に述べる。



## (1) 飛び出し角度の調整方法

本研究においては飛び出し角度 ( ) を飛び出し時の身体重心速度 ( $V_0$ ) ベクトルの向きとして定義した。これは質点としての身体の跳躍方向を示すという点においては妥当な定義であると考えられる。しかしながら、実際の Grab start の指導現場においてはこの身体重心の速度ベクトルの向きを指導者は実際の眼で確認することは困難である。

本研究の結果から飛び出し角度 ( ) は飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) によって決まることが明らかとなったため、指導者は選手の飛び出し角度 ( ) を飛び出し時の身体の傾きによって判断することが出来るものと考えられる。

【研究課題 1】において Kinematics 的な分析から飛び出し角度 ( ) は式 (5) で表すことが出来た (P.64)。この式中の飛び出し速度の伸展要素 ( $V_{e0}$ ) は下肢筋力に大きく依存するパラメーターであると考えられるため、異なる選手間においては飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と飛び出し角度 ( ) との関係が若干変化すると考えられる【研究課題 1】における飛び出し角度 ( ) に対する伸展要素 ( $V_{e0}$ ) の変化は回転要素 ( $V_{r0}$ ) に比べると値のばらつきが大きかった。筋力の強い選手は高い伸展要素 ( $V_{e0}$ ) を達成できると考えられ、【研究課題 1】にて示した飛び出し角度 ( ) を表す式 (5) における第 2 項の  $\arctan$  が小さくなる。したがって、下肢筋力に優れ高い飛び出し速度の伸展要素 ( $V_{e0}$ ) を達成できる選手ほど、同一の飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) で飛び出した場合においても飛び出し角度が大きくなると考えられる。このことから、指導者は選手の飛び出し角度 ( ) を眼で判断する際には、その選手の持つ下肢筋力あるいは跳

躍能力によって跳び出し角度 ( ) と跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) との関係が変わること  
に注意する必要がある。

また、【研究課題 1】より Grab start は振り子モデルにより、身体全体を前方への倒  
しこみながら下肢によって蹴り出す跳躍運動と解釈できた。よって、低く跳び出すよ  
うな指導を行う際には、身体全体の前方への倒し込みを強調させるか、あるいは下肢  
によって蹴り出すタイミングを遅らせるなどの指導を行うことで跳び出し角度を小さ  
くすることが出来ると考えられる。

## (2) 適切な跳び出し角度範囲

前述の【研究課題 1】の実験結果をもとに跳び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と跳び出し角  
度 ( ), 跳び出し水平速度 ( $V_{x_0}$ ), 飛距離, 入水角度の変化の計算結果より, 飛距離  
が最大となる跳び出し角度 ( ) は 11.8deg となった。一方跳び出し水平速度 ( $V_{x_0}$ ) が  
最大となる跳び出し角度 ( ) は - 18.7deg となった。入水までのスタートパフォーマ  
ンスを考慮すると, この飛距離と跳び出し水平速度の両変数が重要になるため, 跳び  
出し角度 ( ) が 11.8deg から - 18.7deg の範囲内が望ましいと考えられる。この角度  
範囲内において両変数の均衡が取れる値は, 中央値である - 3.5deg である。この値は  
跳び出し角度 ( ) を報告した過去の先行研究の値 (本間ほか 1997: - 3.98 ± 4.96 deg ,  
Arellano et al. 2000: - 3.26 ± 8.55 deg) と同等の値であった。本研究の力学的な根拠に  
基づく計算結果に加え, 実際の競泳選手の経験則からもこの値の妥当性が支持されたと  
考えられる。また, 前述したように泳者の持つ下肢筋力によって達成可能な跳び出

し速度の伸展要素 ( $V_{e0}$ ) が変化し、飛び出し時の身体角度 ( $\theta_0$ ) と飛び出し角度 ( ) の関係が変化すること考慮すると、入水までのスタートパフォーマンスにおける適切な飛び出し角度 ( ) 範囲は約 0deg 付近にあると考えられた。

スタートパフォーマンスの最適化を目指す研究においては、その評価指標である 15m 通過時間の短縮を目指すべきであるため、今後はこの飛び出し角度 ( ) が - 22.5deg 付近までは入水角度が浅くなることや、水中での局面を考慮に入れ、最適な飛び出し角度 ( ) を導き出すことが必要である。

## 結論

本研究は、現在一般的なスタート技術の一つである Grab start における跳び出し角度 ( ) の変化がスタートパフォーマンスに与える影響を検討するため、跳び出し角度 ( ) の制御に関わる Kinematics・Kinetics 的要因を明らかにすることと、さらに跳び出し角度 ( ) の変化が跳び出し速度 ( $V_0$ )、ブロックタイム、飛距離に与える影響を調査した。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 跳び出し角度は蹴り出し動作を行う際の身体の傾きによって決まる。
- (2) 跳び出し角度が減少するにつれて跳び出し速度が増加する。
- (3) 入水までのスタートパフォーマンスにとって適切な跳び出し角度は約 0deg 付近に存在する。

これらの知見は、15m 通過時間で評価する際のスタートパフォーマンスにとって最適な跳び出し角度 ( ) の値を導出するための重要な基礎資料となる。さらに、本研究において、Grab start のスタートパフォーマンスにおける跳び出し角度 ( ) の重要性を明らかし、この跳び出し角度 ( ) 制御に関わる Kinematics・Kinetics 的要因を明らかにすることが出来た。これらの知見は Grab start の効果的指導法の確立に大いに貢献するものである。

## 謝辞

本論文の作成には、多くの方々の御指導、御協力そして御支援を賜りました。簡単ではありますが御礼を述べさせていただきます。

筑波大学人間総合科学研究科教授の野村武男先生には、本研究の遂行に当たり、研究課題の設定や実験計画そして本論文作成に至るまで、終始丁寧な御指導を賜りました。私は野村先生から研究者としてあるべき姿だけでなく、一人の人間として、さらには水泳の指導現場に携わるコーチとしてあるべき姿を学ばせて頂きました。野村先生に心から御礼申し上げます。

また本論文の副査をお受け頂き、本研究に対する貴重な御助言を頂きました筑波大学人間総合科学研究科・高木英樹准教授、藤井範久准教授、そして筑波大学システム情報工学研究科・松内一雄教授に、深く感謝をいたします。

さらに、国立スポーツ科学センター・市川浩さんには、本研究遂行に際し、多くの時間を研究に対する議論に割いて頂き、研究に対する多くの貴重な御助言を頂きました。実験に際しては筑波大学水泳部競泳部門の榎本昇三監督、白木孝尚ヘッドコーチ、ならびスタッフの方々に御協力頂き、選手の皆さんには快く被験者を引き受けて頂きました。筑波大学水泳研究室の大学院生の皆様には、研究活動に際し多大な御支援を賜りました。これらの方々にも深い感謝の意を表します。

最後に、私が研究活動そして水泳指導に没頭する環境を応援してくれた両親と兄に心より感謝をいたします。

## 文献

阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志 (1992) : 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定 .

バイオメカニズム 11 , : 22-33. 東京大学出版会, 東京 .

Arellano R., Pardillo P., Funete B.D.L., and Garcia F. (2000) : A system to improve the

swimming start technique using force recording, timing and kinematic analyses.

Proceedings of XVIII International symposium on biomechanics in sports, : 609-613.

Hong Kong.

Ayalon A., Van Gheluwe B., Kanitz M. (1975) : A comparison of four style of racing start in

swimming. International Series on Sport Sciences, Volume 2, Swimming :

233-240.

Benjanuvatra N., Lyttle A., Blanksby B., Laekin D. (2004) : Force development profile of the

lower limbs in the grab and track start in swimming. Proceedings of XXII

International Symposium of Biomechanics in Sports : 399-401.

Bloom J.A, Hosler W.W., Dicsh J.G. (1978): Differences in flight, reaction and movement time

for the grab and conventional starts. Swimming Technique, 15 (2) : 34-36.

Bowers J.E, Cavanagh P.R. (1975) : A biomechanical comparison of the grab and conventional

sprint starts in competitive swimming. International Series on Sport Sciences,

Volume 2, Swimming : 225-23.

Breed R.V. and Young W.B. (2002) : The effect of a resistance training programme on the grab,

track and swing starts in swimming. Journal of Sports Sciences 21 : 213-220.

- Cavanagh P.R., Palmgrenm J.V., Kerr B.A. (1975) : A device to measure forces at the hands during grab start. International Series on Sport Sciences, Volume 2, Swimming : 43-50.
- Counsilman J.E. (1968) : The Science of Swimming. : 133-140. Pelhan books, London
- Counsilman J.E, Counsilman B.E., Nomura T., and Endo M. (1988) : Three types of grab starts for competitive swimming. International Series on Sport Sciences, 18 SWIMMING V : 81-91.
- De La Fuente B., Garcia F., and Arellano R. (2003) : Are the forces applied in the vertical countermovement jump related to the forces applied during the swimming start? Proceedings of the IXth World Symposium on Biomechanics and medicine in swimming. University of Saint-Etienne : 207-212.
- Feltner M.E., Bishop E.J. Perez C.M. (2004) : Segmental and kinetic contributions in vertical jumps performed with and without an arm swing. Research Quartely for Exercise and Sport 75 (3) : 216-230.
- Fizgerald J. (1973) : Track start in swimming. Swimming Technique, 10 (3) : 89-94.
- Fukashiro S., Besier T.F., Barrett R., Cochrane J., Nagano A., Lloyd D.G. (2005) : Direction control in standing horizontal and vertical jumps. International Journal of Sport and Health Science, 3 : 272-279.
- Guimaraes A.C.S., Hay J.G. (1985) : A mechanical analysis of the grab starting technique in swimming. International Journal of Sport Biomechanics, 1 : 25-35.

- Hanauer E.S. (1967) : The grab start. *Swimming world and junior swimmer*, 8 : 5, 42.
- Hanauer E.S. (1972) : Grab start faster than conventional start. *Swimming world and Junior swimmer*, 13(4) : 8,9,54,55.
- Hay J.G., Guimaraes A.C.S. (1983) : A quantitative look at swimming biomechanics. *Swimming Technique*, 20(2) : 11-17.
- Holthe J.M. and McLean S.P. (2001) : Kinematic comparison of grab and track starts in swimming. *XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports* : 31-34.
- 本間正信・小林一敏 (1987) : 競泳スタートにおける hole entry に関する考察 コンピュータ・シミュレーションの手法を用いて . *東京体育学研究* , 14 : 45-51
- 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 . *身体運動のバイオメカニクス* : 379-384.
- 岩原文彦・窪康之 (2004) : 競泳選手へのバイオメカニクスのサポート活動 . *バイオメカニクス研究* , 8 (4) : 237-241.
- Issurin V.B. and Verbitsky O. (2003) : Track Start vs grab Start; Evidence from the Sydney Olympic Games. *Proceedings of the IXth World Symposium on Biomechanics and medicine in swimming. University of Saint-Etienne* : 213-218.
- 金子公宥, 福永哲夫編 (2004) : *バイオメカニクス - 身体運動の科学的基礎 -* . : 471-472 , 杏林書院 , 東京 .
- Kruger T., Wick D., Hohmann A., EL-Bahrawi M., Koth A. (2003) : Biomechanics of the grab and track start technique. *Proceedings of the IXth World Symposium on*



- Biomechanics and medicine in swimming. University of Saint-Etienne : 219-223.
- 窪康之 (2003) : 大きなパワーの発揮が要求される全身運動の練習効果 —立幅跳の踏切動作を例にして— バイオメカニクス研究, 7(4) : 325-333.
- 窪康之 (2005) : 競泳のスタートおよびターン局面の動作に関するバイオメカニクスの研究 . バイオメカニクス研究, 9 (4) : 259-265.
- LaRue R.L. (1985) : Future start. Swimming Technique 2: 30-32.
- Linthorne N.P. (2001) : Optimum release angle in the shot put. Journal of Sports Sciences, 19: 359-372.
- Maglischo E.W. (2003) : Swimming fastest : 265-278. Human Kinetics.
- 三浦望慶・池上康男・松井秀治・橋本勲 (1983) : 投げの方向とボールの重さが初速度に及ぼす影響について . 日本バイオメカニクス学会編, 身体運動の科学 , : 杏林書院, pp.189-195.
- 宮下充正・波多野勲・林裕三 編著 (1973) : 現代スポーツコーチ全集 競泳のコーチング : 101-103, 252-259. 大修館書店, 東京 .
- 日本水泳連盟編 (1975) : 水泳指導教本 : 186-189. 大修館書店, 東京 .
- 日本水泳連盟編 (1993) : 水泳コーチ教本 : 47-52, 173-176., 大修館書店, 東京 .
- 日本水泳連盟編 (2002) : 水泳指導教本 : 95-98. 大修館書店, 東京 .
- 日本水泳連盟編 (2005) : 水泳コーチ教本 第2版 : 173-176., 大修館書店, 東京 .
- 日本水泳連盟・日本スイミングクラブ協会編 (2006) : 水泳教師教本 : 34-35, 204-205.
- 野村照夫・若吉浩二・奥野景介・生田泰志・高木英樹・後藤真二 (2000) : 競泳のレース

分析における局面距離変更に伴う問題の検討．水泳水中運動科学，3：42-46.

Pearson, C.T., McElroy, G.K., Blitvich, J.D., Subic, A., and Blanksby, B.A. (1998) A comparison of the swimming start using traditional and modified starting blocks. Journal of Human Movement Studies, 34：49-66.

Ridderikhoff A., Batelaan J.H., Bobbert M.F. (1999)：Jumping for distance: control of the external force in squat jumps. Medicine & Science in Sports & Exercise 31：1196-1204.

Robertson D.E.G and Fleming D. (1987)：Kinetics of standing broad and vertical jump. Canadian Journal of Sport Science 12 (1)：19-23.

Roffer B.J. (1972)：The grab start is faster. Swimming technique, 8：101-102.

高木英樹 (2002)：人はどこまで速くおよげるのか：岩波書店，東京．

Takeda T. and Nomura T. (2006)：What are the differences between grab and track start? In: Vilas-Boas J.P. , Alves F. and Marques A. (Eds.) , Biomechanics and Medicine in Swimming X. Portuguese Journal of Sport Sciences：102-105 , Porto.

Tanner, D.A. (2001)：Sprint performance times related to block time in Olympic swimmers. Journal of Swimming Research, 15：12-19.

鳥海清司・大島徹・熊本水頼 (2002)：関節トルクからみたヒトの跳躍方向の調節．バイオメカニズム，16：243-252.

Thayer, A. and Hay, J.G (1984) Motivating start and turn improvement. Swimming Technique, 20 (4)：17-20.

Wakai M. and Linthorne N.P. (2005) Optimum take-off angle in the standing long jump.

Human Movement Science, 24 : 81-96.

若吉浩二・宮下充正・河合正治・野村照夫・奥野景介・小粥由美子 (1996) 競泳にお

けるスタートの分析 . 水泳研究報告ファイル 第 9 報 日本体育協会スポーツ

科学委員会 (日本体育協会スポーツ医・科学研究報告競技種目別競技力向上

に関する研究) , : 39-43.

吉田章・斉藤慎一 (1981) 競泳におけるスタート動作の分析 . 筑波大学体育学系紀要 ,

4 : 49-54.

Vilas-Boas J.P., Cruz M.J., Sousa F., Conceição F., Carvalho J.M. (2000) : Intergrated kinematic

and dynamic analysis of two track-start techniques. Proceedings of XVIII

International symposium on biomechanics in sports, : 113-117. Hong Kong.

Vilas-Boas J.P., Cruz J., Sousa F., Conceição F., Fernandes R., Carvalho J. (2003) :

Biomechanical analysis of ventral swimming starts: Comparison of the grab start with

two track-start techniques. Proceedings of the IXth World Symposium on

Biomechanics and medicine in swimming. University of Saint-Etienne : 249-253.

Wilkie D., Juba K. (1986) : The handbook of swimming. : 140-149. Pelham books, London

Zatsiorsky, V.M., Bulgakova, N.Z., Chaplinsky N.M. (1979) : Biomechanical analysis of

starting techniques in swimming. International Series on Sport Science, 8

SWIMMING . Terauds J. and Bedingfield. EW. : 199-206.