

2013年度 修士論文

バタ足の筋活動解析

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科
スポーツ科学専攻 スポーツ医科学研究領域

5012A020-0

神舘 盛充

研究指導教員： 金岡 恒治 教授

目次

1. 緒言	1
1-1. はじめに	1
1-2. バタ足の効果	1
1-3. バタ足が生み出す推進力	2
1-4. バタ足動作で重要なこと	2
1-5. 水中筋電測定 of 現状	3
1-6. バタ足の筋活動解析の意義	3
1-7. 速度の違いによる動作の影響	4
1-8. 本研究の目的	4
2. 方法	5
2-1. 被験者	5
2-2. 実験環境	5
2-3. 筋電測定	7
2-4. 課題試技	10
2-5. 動作解析	10
2-6. フェーズ分け定義	12
2-7. 筋電解析	14
2-8. 解析除外基準	15
2-9. 統計処理	16
3. 結果	17
4. 考察	30
4-1. フェーズの異なる原因	30
4-2. 各筋のフェーズ間による比較	31
4-3. 速度の違いによる筋活動の比較	36
4-4. 本研究の限界	39
5. 結論	40
6. 参考文献	41
7. 謝辞	47

1. 緒言

1-1. はじめに

競泳は水中で行う運動競技の一つである。自由形、背泳ぎ、平泳ぎ、バタフライの4種目がある。その中でも、自由形の泳ぎの一つであるクロール泳は、レースだけでなく自由形を専門としていない選手のトレーニングにも、多く取り入れられている種目である。その為、クロール泳に関する研究を行うことは、重要な課題の一つであると考えられる。

クロール泳の研究として、エネルギーコストに関する研究^{3,10,26,27,28,29,40,42}、上肢のストロークの動作解析^{14,33,35,45}などの研究が行われている。しかし、下肢動作(バタ足)に関する研究を行っている研究は少ない。

1-2. バタ足の効果

バタ足の効果として、Engesvikによるとバタ足が上手くないと、正しいストリームラインが保つことができない。クロール泳の際もストリームラインのバランスを取り、抵抗を減らす役割があると報告している⁹⁾。また Onusseit によると、1ストロークの中でキックの打つ回数によって、体の浮き沈みが違うことを報告している¹⁷⁾。1ストローク中に6回キックを打つシックスビートとキックは一番水面に体が浮かぶとしている。また Yanai は、バタ足は下肢を持ち上げるために使われている²⁴⁾。と報告している。同様に、中島はシミュレーションにて、バタ足は下肢を持ち上げる効果を発揮しているとしている。しかし、バタ足そのものは推進力を発揮しているが、手のかきによって得られる推力が大きく泳速度が速くなり、接線方向の抵抗力が大きくなってしまい、バタ足による推力が見かけ上なくなっている可能性がある⁴⁶⁾。とも報告している。バタ足から効果的に推

進力を得るためには,手が入水した際に効果的にバタ足を打つと,バタ足から推進力を得られるとも報告されている¹⁾.

1-3.バタ足が生み出す推進力

バタ足の推進力に関する研究は,いくつか行われている.Hollander によるナショナル・オリンピックレベルの選手を対象にした研究によると,バタ足による推進力は,全体の 27%であると報告している¹²⁾.短距離を泳いだ際のバタ足から得られる推進力として,Watkins らは男性より女性の方がバタ足による影響を受けていないとしているが,男女ともにバタ足から得ている推進力は 9%程度としている²³⁾.同様に,Deschodt らも速度の速い際には,バタ足から得られる推進力は 10%程度と報告している⁸⁾.この結果を裏付けるように,Gatta らによると速度によってキック頻度が異なる場合,泳速度が速くなるとバタ足による推進力は低下する¹¹⁾.と報告し,泳速度 1.27m/s,50m 泳換算で 39 秒 37 のペースで泳いだ際に,最もバタ足から推進力を得ているとしている.以上の先行研究から,バタ足から得ている推進力は,泳速度によって異なるが全体の 10%~30%程度であるといえる.

1-4.バタ足動作で重要なこと

バタ足動作で重要なことは,足関節の柔軟性であると先行研究では挙げられている^{15,36)}.両研究とも足関節の柔軟性とキックスピードに相関がある.と報告している.しかし,Mookerjee らによると足関節の柔軟性とキックスピードに相関は見られなかった¹⁶⁾と報告しており,バタ足において足関節の柔軟性が重要であるとは,明確にはなっていない.

1-5.水中筋電測定の実状

水泳は水中で行うという、他の多くの競技にない特性を有している。その為、実験の機器を使用するに当たり、多くの機器に対し防水処理を施さなければならず、研究の困難を極めている。しかし、これら問題をクリアした研究も存在する。先行研究の中で水中動作の筋活動解析は、クロール泳に限ると、上肢に関する研究が散見される程度である^{5,19,20,21,30}。我々が知りうる限りでは、クロール泳の下肢の筋活動解析に関する先行研究は、ストローク頻度とストローク長の変化を見る際に、前頸骨筋、腓腹筋、大腿直筋、大腿二頭筋の4筋を測定した研究のみである³⁰。しかしこの先行研究は、200m泳において50mごとに筋活動を見ているのみであり、バタ足を細かいフェーズに分けて筋活動解析を行っている研究はない。

1-6.バタ足の筋活動解析の意義

バタ足の詳細な筋活動解析を行うことによって、筋のフェーズごとの活動がわかり、パフォーマンスの向上に役立つと考えられる。また、水中運動は免荷という特性を有しているため、水中歩行など低負荷運動を高年齢者への運動指導や、リハビリテーション等に用いられている^{47,48,50}。バタ足は多くのスイミングクラブで、泳法動作の習得の際に、最初に習う動作である^{34,39,43}。その為、バタ足は多くの人が動作可能な動きであると考えられ、今後リハビリテーションの分野での応用も期待できると考える。

よって本研究の目的の1つとして、バタ足動作時のフェーズごとの筋活動解析を行うこととした。

1-7.速度の違いによる動作の影響

クロール泳のストロークは,速度が上昇すると,Stroke Rate(SR)が増加し Stroke Length(SL)が減少するという報告がなされている^{2,6,25)}.また,速度の調整はSRで行われている³⁸⁾.という報告もなされている.このようにストローク局面に関しては,速度の変化によりストローク動作に変化が生じると考えられる.Dekerle らによると,疲労させることによりSRが増加し,SLが減少するという速度の上昇と同様のことが起こることを示している⁷⁾.また,疲労による筋活動の変化を見た先行研究では,尺側手根屈筋,上腕二頭筋,上腕三頭筋,三角筋,大胸筋,大腿直筋に変化が生じるとしている.しかし,前脛骨筋,腓腹筋,大腿二頭筋は変化が生じないという結果が示されている³⁰⁾.その為,クロール泳の速度を上昇,維持するためには,バタ足が重要であるとも考えられる.しかし,速度が異なることで筋活動がどのように変化するか検討を行っている先行研究はない.

よって本研究の2つ目の目的として,速度の違いによって筋活動が異なるかを明らかにすることとした.

1-8.目的

- 1.バタ足動作時のフェーズごとの筋活動を明らかにする.
- 2.バタ足の速度の違いによって,筋活動がどのように異なるのかを明らかにする.

2.方法

2-1.被験者

被験者は競泳経験を有する健常男性 15 名(年齢: 20 ± 2 歳, 身長 172.7 ± 4.2 cm, 体重 67.9 ± 5.6 kg, mean \pm SD)を対象とした.被験者には,研究に参加するにあたり研究内容に関する説明を実施し,同意を得た者を対象とした.なお,本研究は早稲田大学人を対象とする倫理委員会の承認を得て行った.

2-2.実験環境

本研究は,屋内プール(25m,水深 1.3m)で行った.バタ足動作は 2 次元矢状面上での動きであると仮定し,1 台の水中ハイスピードカメラ(HAS-220,DITECT 社製)にて,被験者の右側方より 2 次元にて撮影した.なお,水中ハイスピードカメラは 200Hz,ss1/500 で撮影した(図 2-1).

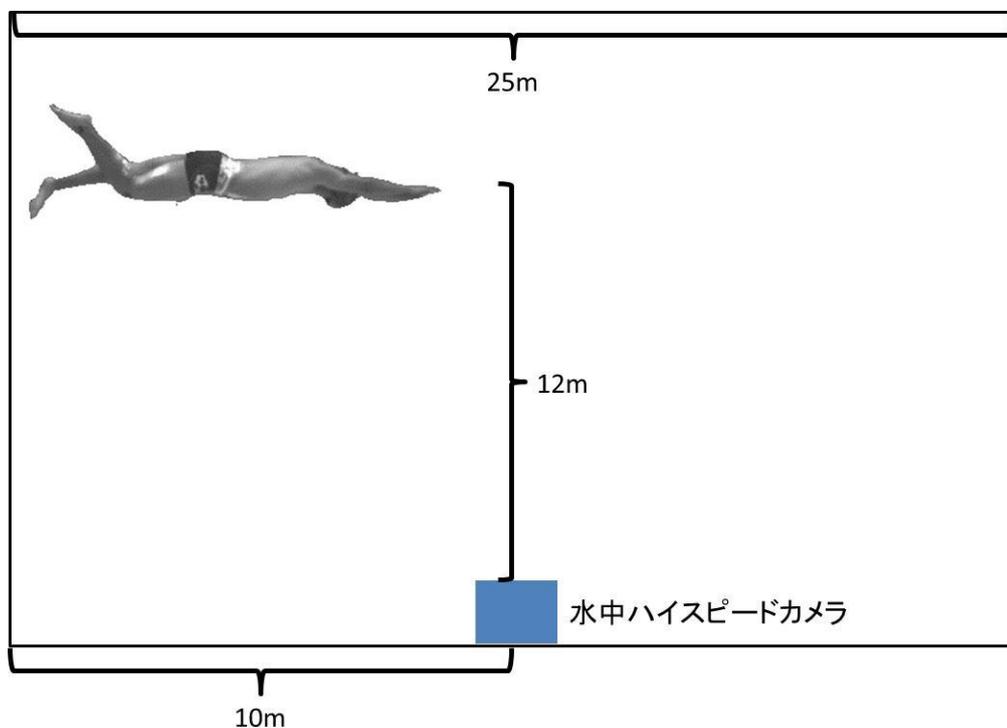


図 2-1.実験環境

体表マーカは,上前腸骨棘と上後腸骨棘を結んだ骨盤ライン,右側の
大転子,大腿骨外側上顆,外果に貼付した(図 2-2).



図 2-2.体表マーカ

2-3.筋電測定

筋電測定には多用途無線筋電計(Bio Log DL-5000:S&ME社)を用いた。

被検筋は右側の腹直筋,内腹斜筋,中殿筋,脊柱起立筋,大腿直筋,内側広筋,大腿二頭筋,腓腹筋とした(図 2-3)。

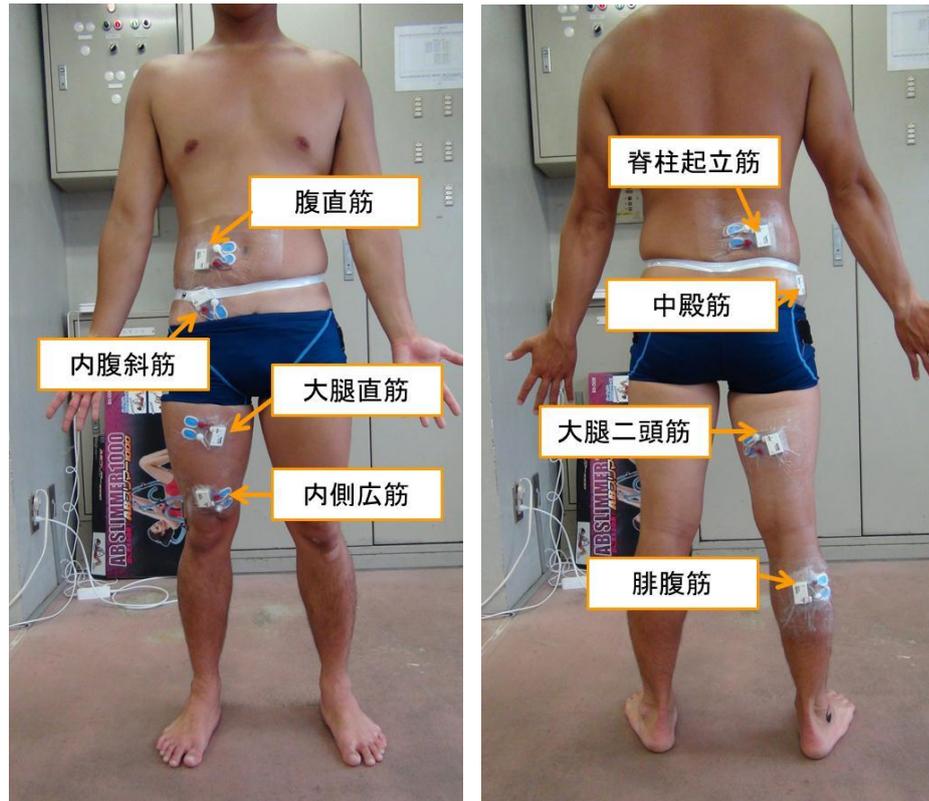


図 2-3.被検筋(正面図,背面図)

表面電極を貼付する前に,皮膚研磨剤(スキんピュア:日本光電社製)およびアルコールを用いて皮膚抵抗が $4k\Omega$ 以下になるまで角質除去を行った.表面電極にはブルーセンサー(N-00-S:株式会社メッツ)を用い,2つの電極を各筋の筋線維方向に沿って貼付した。

その後,防水加工されたデータロガーを皮膚上に両面テープで貼付し,医療用防水シート(防水フィルムロールタイプ:ニチバン株式会社製)で防水処理を施した(図 2-4)。

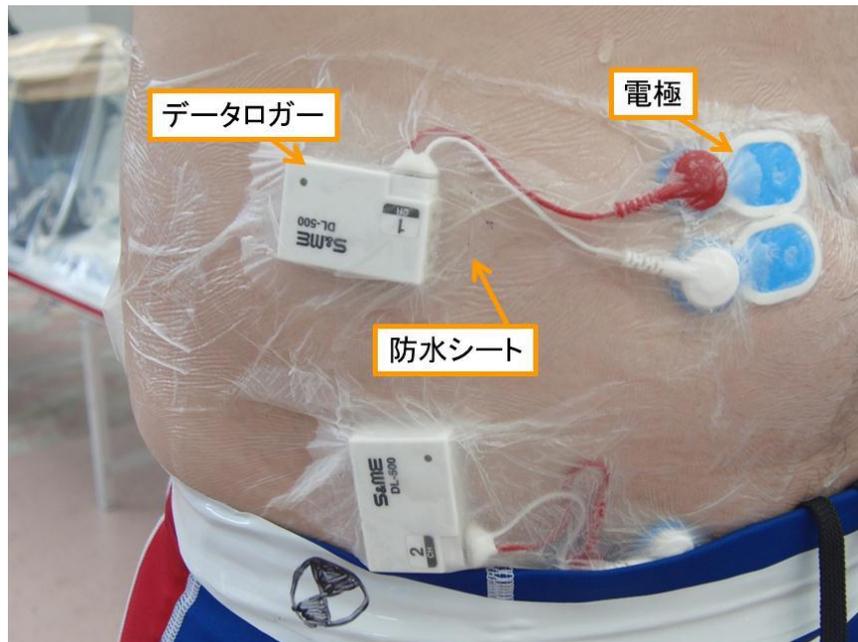


図 2-4.防水処理

筋電導出部位は参考資料¹⁸⁾のもと,腹直筋は臍から約3cm外側,内腹斜筋は上前腸骨棘から2横指内側,中殿筋は腸骨稜の midpointより2.5cmほど遠位部,脊柱起立筋は第3腰椎棘突起から3cm外側,大腿直筋は上前腸骨棘と膝蓋骨上縁を結んだ線分の midpoint,内側広筋は膝蓋骨上内側縁より4横指近位部,大腿二頭筋は腓骨頭と坐骨結節を結んだ線分の midpoint,腓腹筋は膝関節の裏側から5横指遠位部とした(図2-3).

最大随意収縮(Maximum Voluntary Contraction : 以下 MVC)時の筋電位測定

正規化のために,随意的な最大等尺性収縮を約 5 秒間測定し,その筋電位を記録した.なお,MVC 測定にあたり被験者は予備的な練習を行い,肢位および収縮方法が十分に確認された状態で筋電位測定を行った.

腹直筋は仰臥位,膝関節屈曲 90° で両手を胸の前で組ませ,体幹屈曲 45° にて両肩に徒手抵抗を加えて測定した.

内腹斜筋は腹直筋と同様の測定肢位から体幹を右回旋させ,左肩に徒手抵抗を加えて測定した.

中殿筋は左側臥位にて股関節伸展位で下腿に徒手抵抗を加えて,股関節を外転させて測定した.

脊柱起立筋は腹臥位に大腿部を固定し,両手を頭の後ろで組ませ,体幹の伸展を行わせ,肩甲骨に徒手抵抗を加えて測定した.

大腿直筋,内側広筋は椅子に座った状態(股関節 90° ,膝関節 90°)から膝関節の伸展を行わせ,下腿前面に徒手抵抗を加えて測定した.

大腿二頭筋は腹臥位にて膝関節屈曲 90° で膝関節屈曲を行わせ,徒手抵抗を加えて測定した.

腓腹筋は片足のつま先立ちで測定した.

2-4.課題試技

被験者には水中にて,ストリームライン姿勢で以下の課題試技を行った.

1. 最大努力下でバタ足を行う(以下最大努力下バタ足).
2. 非最大努力下でバタ足を行う(以下非最大努力下バタ足).

1,2の試技を十分な休息を挟んで行った.

なお,本研究の非最大努力下とは,最大努力下に比べ速度が遅いことを指す.

2-5.動作解析

撮影した画像から画像解析ソフト(DIPP-MOTION PRO:DITECT 社製)にて,手動デジタイズによって得られた画像上の座標値から,被験者の体表マーカの股関節角度および膝関節角度を算出した.

画像分析によって得られた角度データにおける手動デジタイズや演算に伴うノイズを取り除くため,4次の Butterworth Digital Filter 法を使用し,遮断周波数 6Hz にて平滑化^{32,41,44)}を行った.

得られた角度変化のグラフから,最大伸展位および最大屈曲位となる時間を算出した.

また各試技の泳速度を画像解析ソフト(Image J)を用い,0.1秒間の座標の変化を算出し,泳速度を得た.

本研究では股関節角度および膝関節角度を以下のように定義した(図2-5).

股関節角度:大転子と大腿骨外側上顆を結んだ線と骨盤ラインのなす角

膝関節角度:大転子,大腿骨外側上顆と外果のなす角

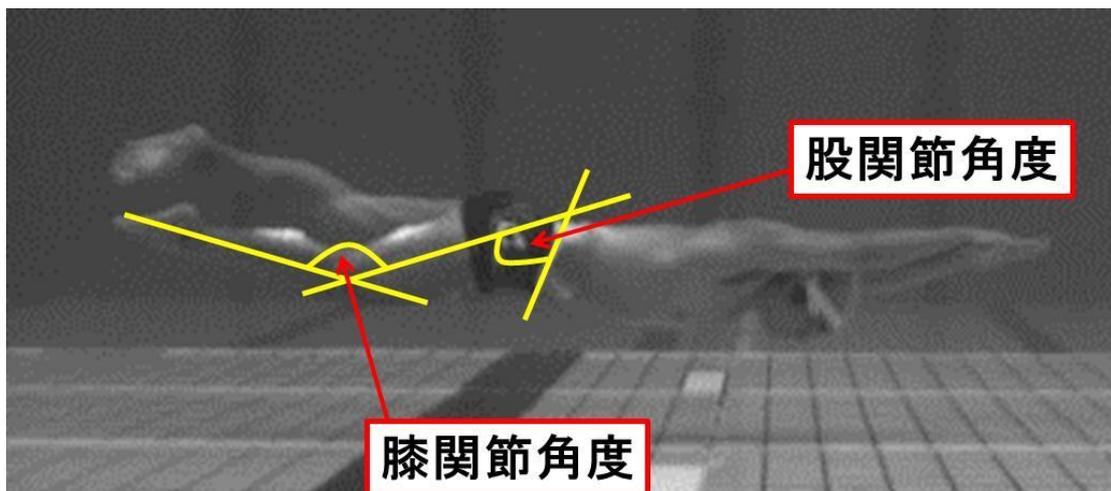


図 2-5.関節角度定義

2-6. フェーズ分けの定義

動作解析で算出した,股関節,膝関節データをもとに全 4 フェーズに期分けした(図 2-6,7,8,9,10).

- ① アップキック前期(股関節伸展開始～膝関節屈曲開始)
- ② アップキック後期(膝関節屈曲開始～股関節屈曲開始)
- ③ ダウンキック前期(股関節屈曲開始～膝関節伸展開始)
- ④ ダウンキック後期(膝関節伸展開始～股関節伸展開始)

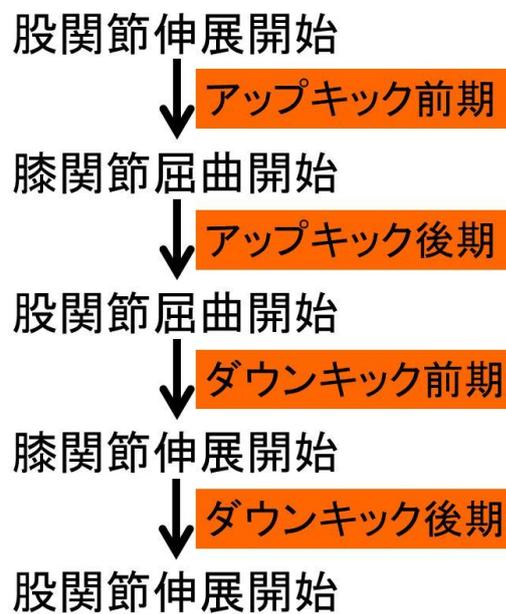


図 2-6.フェーズ分け

各フェーズの関節の状態は以下の通りである(表 1).

表 1.各フェーズ中の関節の状況

	股関節の伸展	股関節の屈曲
膝関節の伸展	アップキック前期	ダウンキック後期
膝関節の屈曲	アップキック後期	ダウンキック前期

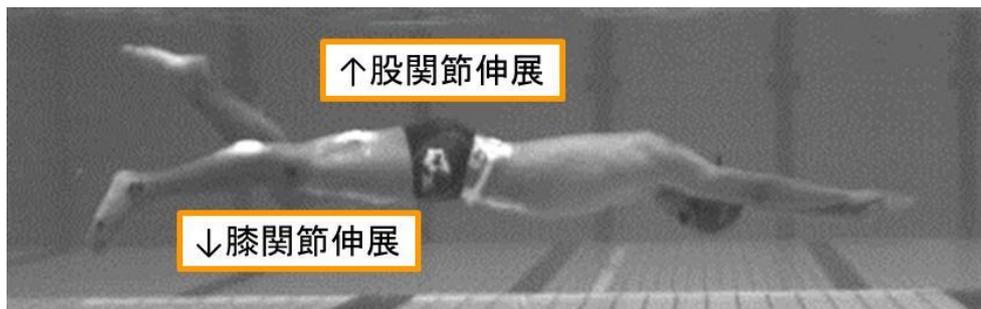


図 2-7. アップキック 前期

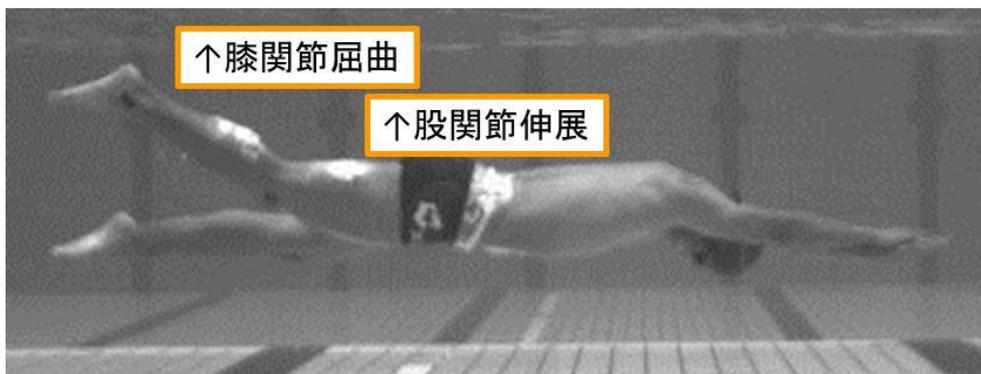


図 2-8. アップキック 後期

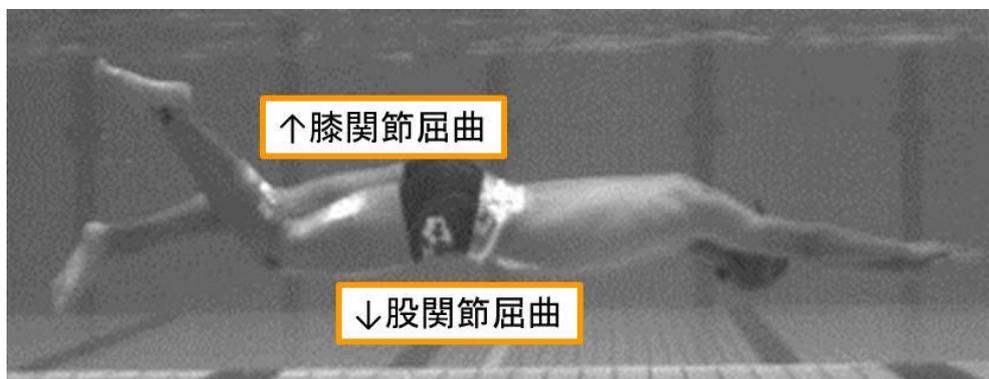


図 2-9. ダウンキック 前期



図 2-10. ダウンキック 後期

2-7.筋電解析

解析には BIMUTUS-Video(KISSEI COMTEC 社製)を使用した.その際に 20~500Hz のバンドパスフィルターをかけ^{30,35)},全波整流を行った.その後,各 Root Mean Square(RMS)を算出し,MVC 時の RMS で除することによって,%MVC を算出し比較対象とした.MVC 時の筋電位は,0.2 秒間の振幅の合計が最大となる区画を特定し,その時の RMS を算出した.

また,全波整流のデータを遮断周波数 15Hz の 4 次の Butterworth Digital Filter 法を使用し,平滑化を行い⁴⁹⁾包絡線を得た.得られた包絡線データから,フェーズ 10% ごとの値を抽出し,平均値を算出した.

2-8.解析除外基準

解析を行うにあたり以下の条件に該当するデータは除外し,解析を行った。

1. 規定したフェーズ(図 2-6)通りに行わなかった試技
2. 機器の水没等によりデータを収集できなかった被検筋

各試技の解析を行った,試技および被検筋は以下のとおりである(図 2-11)。

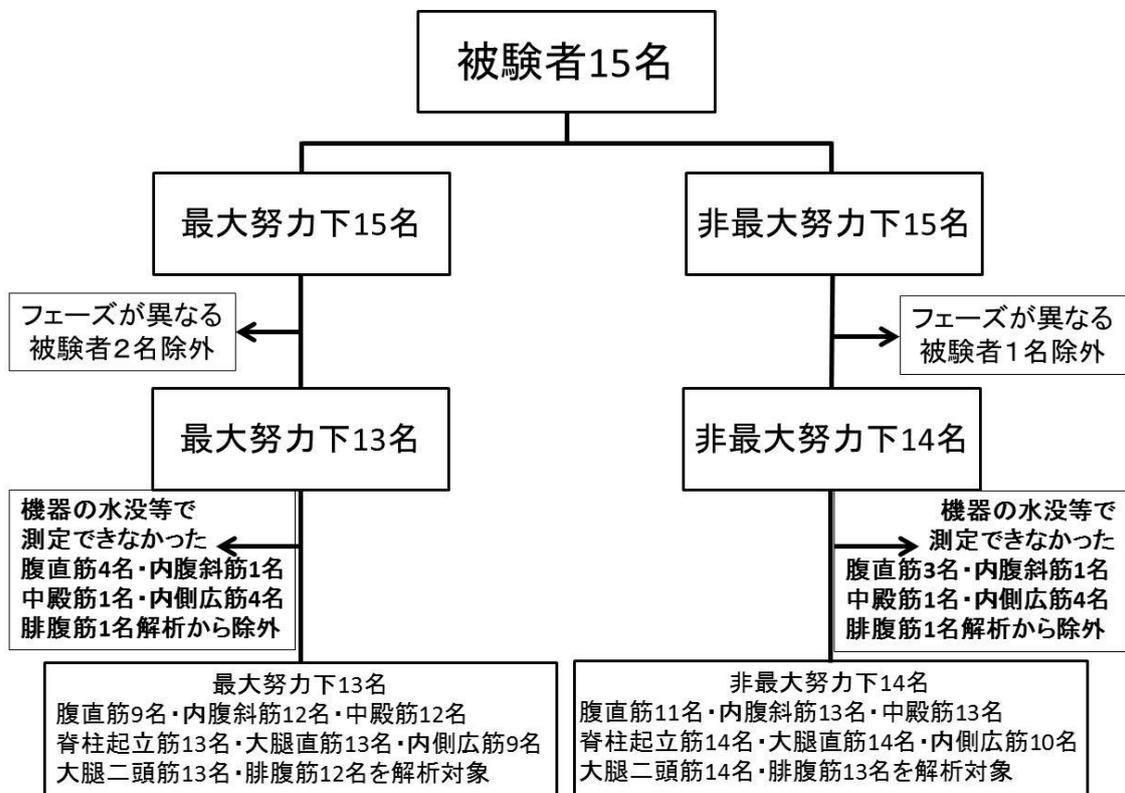


図 2-11.解析試技および被検筋

2-9.統計処理

2 試技の泳速度の比較は対応のない t 検定を行った。

最大努力下バタ足,非最大努力下のバタ足に関し,各筋の各フェーズにおける比較をフリードマン検定にて行い,有意差がみられた場合のみ多重比較検定を行った。

各フェーズの筋活動量と 2 試技の比較を対応のない t 検定を行った。

有意水準は 5%として検定を行った。統計処理には,統計ソフトウェア SPSS Statistics19 を使用した。

3. 結果

各試技の速度の比較を以下に示す(図 3-1).

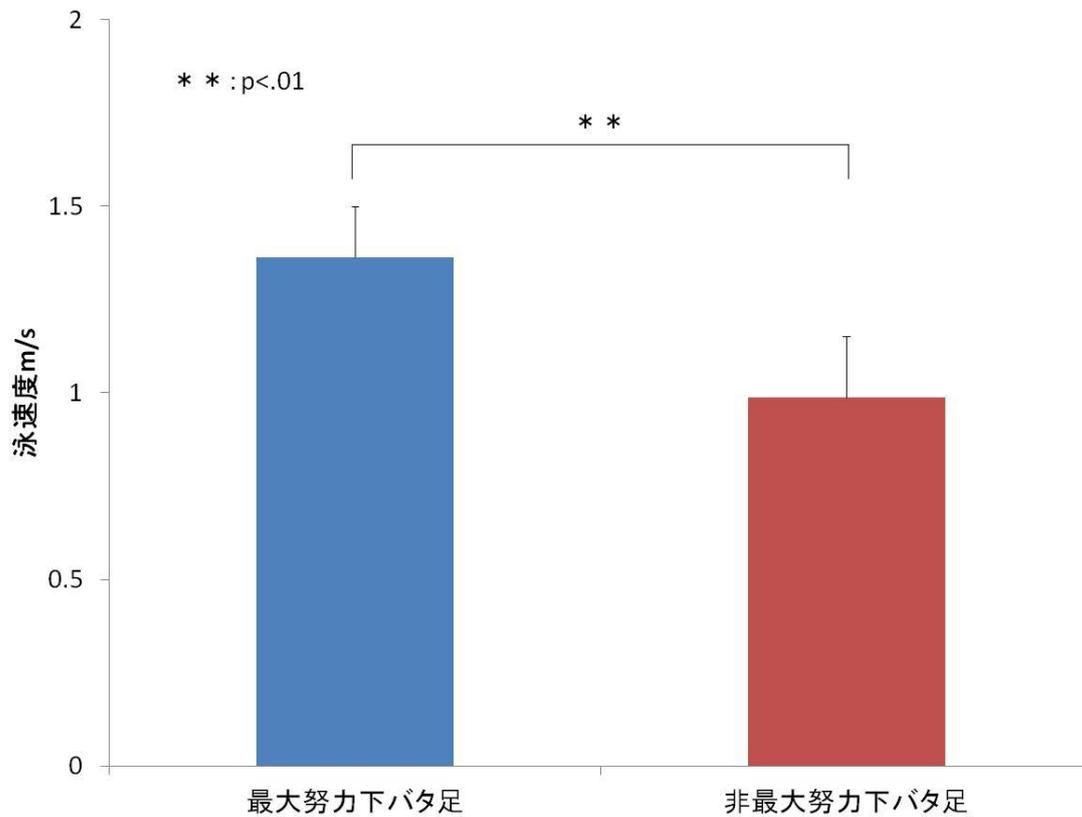


図 3-1. 泳速度

最大努力下バタ足の泳速度は, $1.36 \pm 0.14 \text{ m/s}$. 非最大努力下バタ足の泳速度は, $0.98 \pm 0.17 \text{ m/s}$ となり, 最大努力下バタ足の方が有意に速かった.

最大努力下バタ足における各筋のフェーズにおける比較を示す(図

3-2).

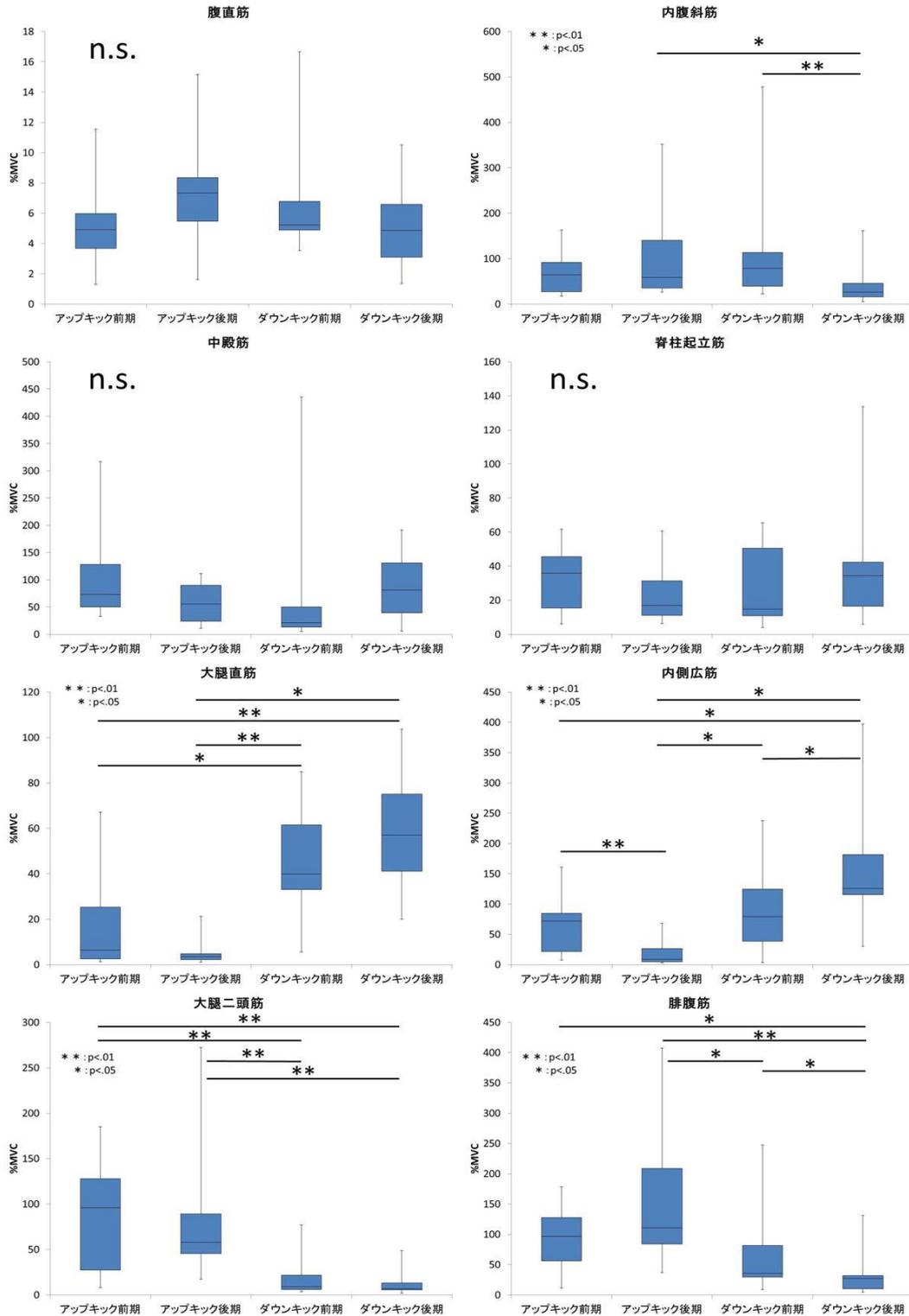


図 3-2.最大努力下バタ足のフェーズ間の比較

腹直筋,中殿筋,脊柱起立において各フェーズに有意差はなかった.

内腹斜筋は,ダウンキック後期と比較して,アップキック後期とダウンキック前期は有意に高い値を示した.

大腿直筋は,ダウンキック前期およびダウンキック後期と比較して,アップキック前期とアップキック後期は,それぞれ有意に低い値を示した.

内側広筋は,ダウンキック後期と比較して,アップキック前期,アップキック後期とダウンキック前期は,それぞれ有意に低い値を示した.ダウンキック前期と比較して,アップキック後期は有意に低い値を示した.またアップキック前期と比較して,アップキック後期は有意に低い値を示した.

大腿二頭筋は,アップキック前期およびアップキック後期と比較して,ダウンキック前期とダウンキック後期は,それぞれ有意に低い値を示した.

腓腹筋は,ダウンキック後期と比較して,アップキック前期,アップキック後期とダウンキック前期は,有意に高い値を示した.またアップキック後期と比較して,ダウンキック前期は有意に低い値を示した.

非最大努力下バタ足における各筋のフェーズにおける比較を示す(図 3-3).

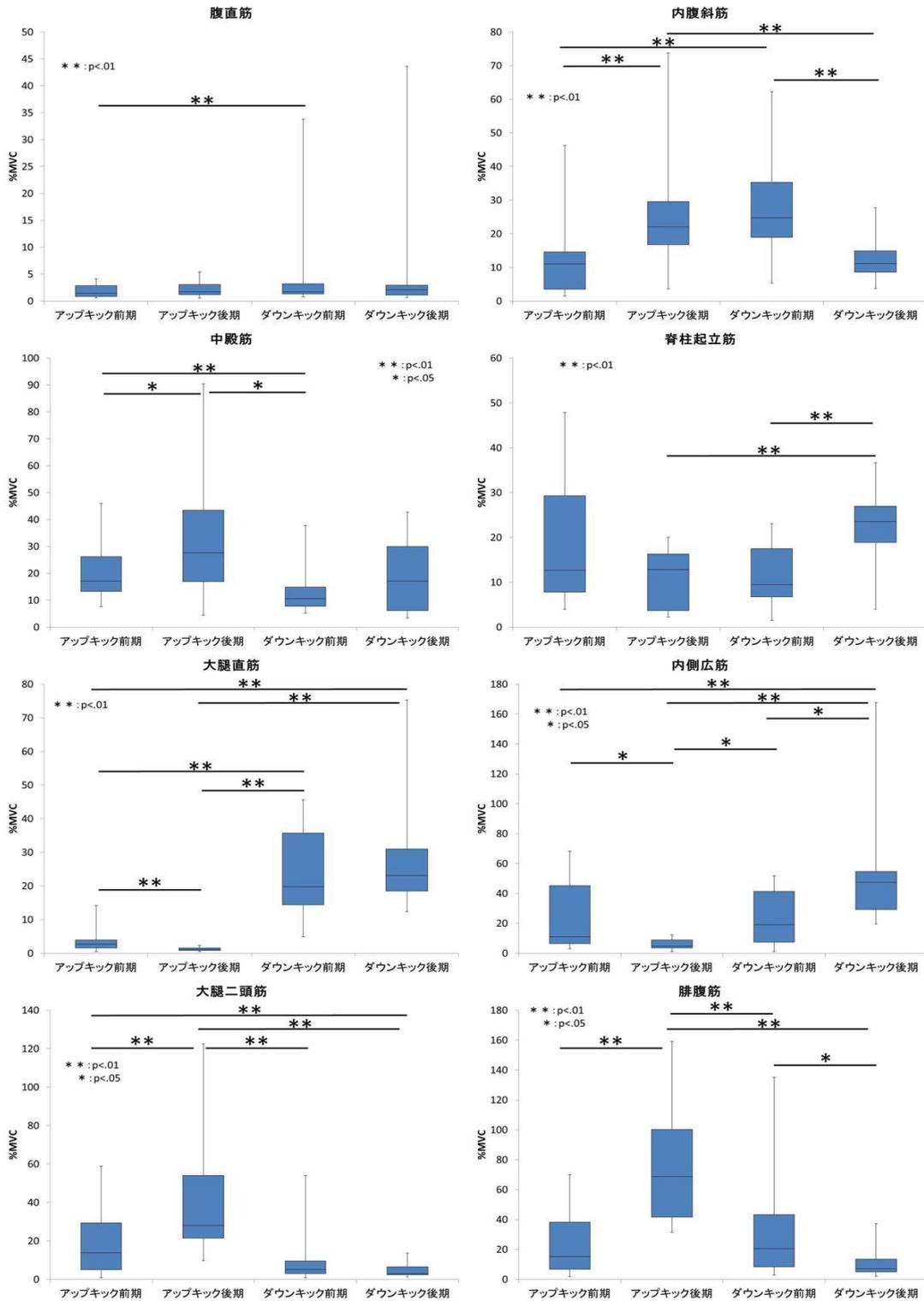


図 3-3.非最大努力下バタ足のフェーズ間の比較

腹直筋は,ダウンキック前期と比較して,アップキック前期は有意に低い値を示した.

内腹斜筋は,アップキック後期およびダウンキック前期と比較して,アップキック前期とダウンキック後期は有意に低い値を示した.

中殿筋は,アップキック前期と比較して,ダウンキック前期は有意に低い値を示した.また,アップキック後期と比較して,アップキック前期とダウンキック前期は,有意に低い値を示した.

脊柱起立筋は,ダウンキック後期と比較して,アップキック後期とダウンキック前期は,有意に低い値を示した.

大腿直筋は,アップキック前期と比較して,アップキック後期は有意に低い値を示した.ダウンキック前期およびダウンキック後期と比較して,アップキック前期とアップキック後期は,それぞれ有意に低い値を示した.

内側広筋は,ダウンキック後期と比較して,アップキック前期,アップキック後期とダウンキック前期は,有意に低い値を示した.アップキック前期およびダウンキック前期と比較して,アップキック後期は有意に低い値を示した.

大腿二頭筋は,アップキック後期と比較して,アップキック前期,ダウンキック前期とダウンキック後期は,有意に低い値を示した.また,アップキック前期と比較して,ダウンキック後期は有意に低い値を示した.

腓腹筋は,アップキック後期と比較して,アップキック前期,ダウンキック前期とダウンキック後期は,有意に低い値を示した.また,ダウンキック前期と比較して,ダウンキック後期は有意に低い値を示した.

各フェーズでの各試技間での比較を以下に示す(図 3-4,5,6,7).

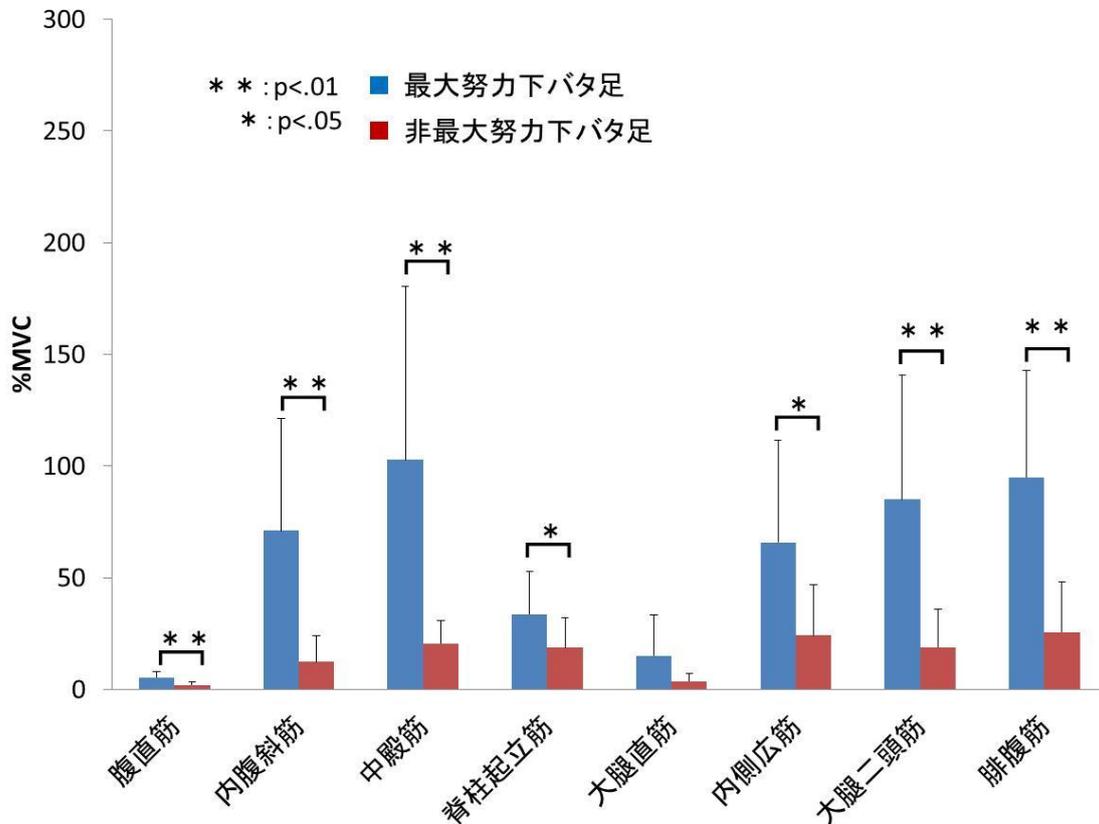


図 3-4.アップキック前期

腹直筋,内腹斜筋,中殿筋,脊柱起立筋,内側広筋,大腿二頭筋,腓腹筋の各筋ともに最大努力下バタ足の方が,有意に筋活動量が増加した.腹直筋 5.38 ± 2.75 vs 1.93 ± 1.30 ,内腹斜筋 71.15 ± 50.17 vs 12.37 ± 11.85 ,中殿筋 102.79 ± 77.47 vs 20.63 ± 10.25 ,脊柱起立筋 33.78 ± 18.86 vs 18.73 ± 13.16 ,内側広筋 65.85 ± 45.51 vs 24.13 ± 22.89 ,大腿二頭筋 84.98 ± 55.91 vs 18.84 ± 17.06 ,腓腹筋 95.06 ± 47.79 vs 25.72 ± 22.49 (最大努力下バタ足 vs 非最大努力下バタ足,mean±SD)

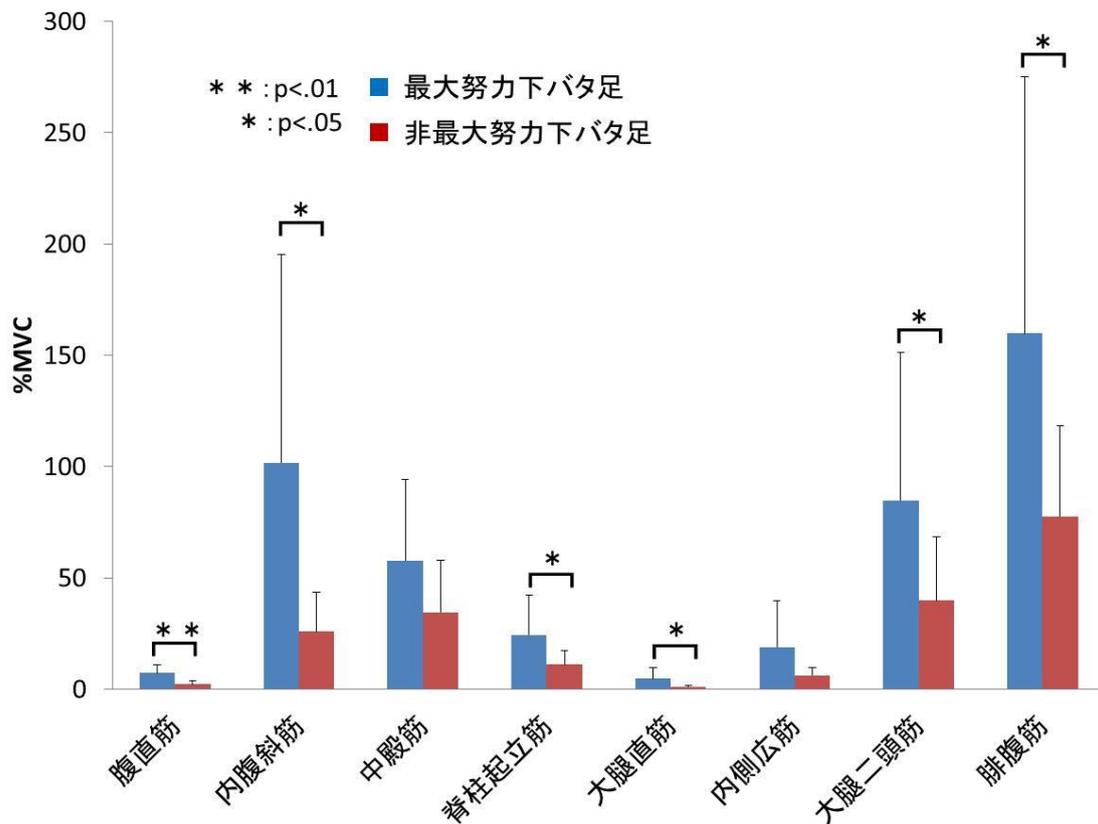


図 3-5. アップキック後期

腹直筋,内腹斜筋,脊柱起立筋,大腿直筋,大腿二頭筋,腓腹筋の各筋ともに最大努力下バタ足の方が,有意に筋活動量が増加した。

腹直筋 7.38 ± 3.59 vs 2.31 ± 1.62 ,内腹斜筋 101.65 ± 93.65 vs 25.94 ± 17.49 ,脊柱起立筋 24.37 ± 17.77 vs 11.16 ± 6.37 ,大腿直筋 4.74 ± 4.97 vs 1.21 ± 0.52 ,大腿二頭筋 84.86 ± 66.45 vs 39.92 ± 28.55 ,腓腹筋 159.83 ± 115.21 vs 77.71 ± 40.66 (最大努力下バタ足 vs 非最大努力下バタ足, mean \pm SD)

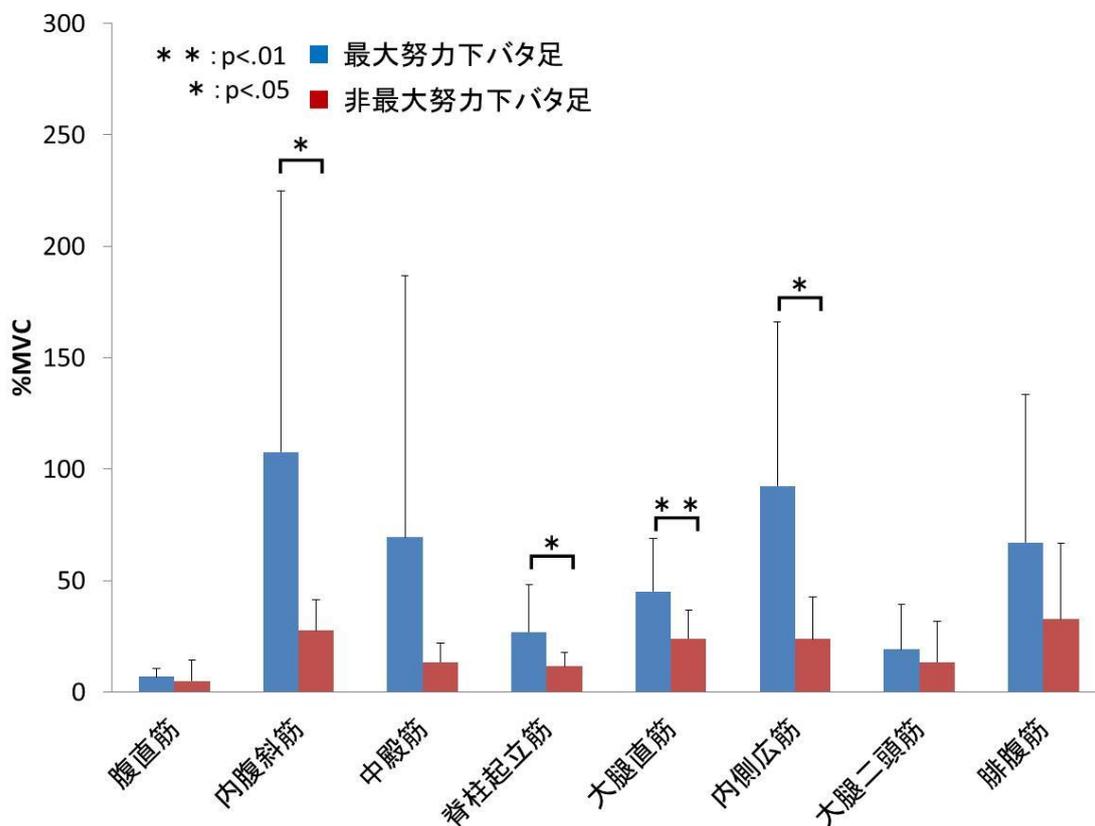


図 3-6.ダウンキック前期

内腹斜筋,脊柱起立筋,大腿直筋,内側広筋の各筋ともに最大努力下バタ足の方が,有意に筋活動量が増加した.

内腹斜筋 107.64 ± 117.24 vs 27.54 ± 13.82 ,脊柱起立筋 27.03 ± 21.24 vs 11.54 ± 6.30 ,大腿直筋 45.19 ± 23.68 vs 23.93 ± 12.82 ,内側広筋 92.40 ± 73.52 vs 23.78 ± 18.73 (最大努力下バタ足 vs 非最大努力下バタ足,mean \pm SD)

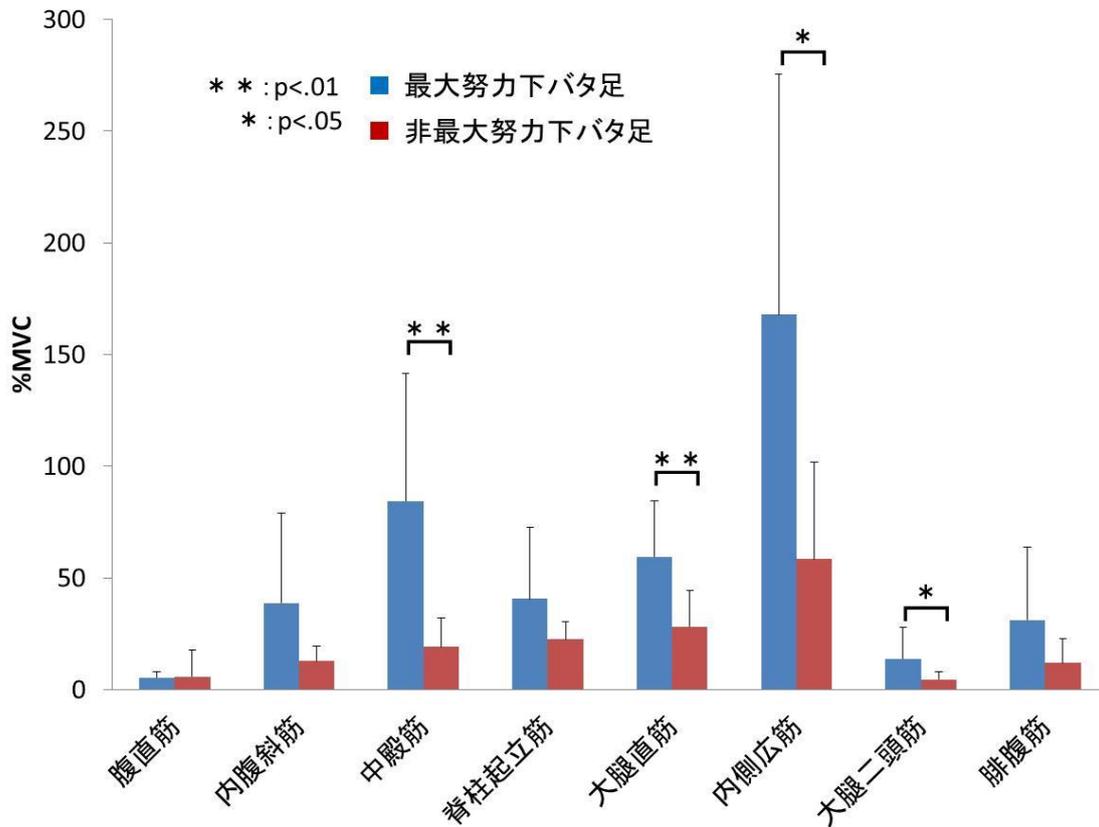


図 3-7.ダウンキック後期

中殿筋,大腿直筋,内側広筋,大腿二頭筋の各筋ともに最大努力下バタ足の方が,有意に筋活動量が増加した。

中殿筋 84.35 ± 57.05 vs 19.14 ± 13.14 ,大腿直筋 59.51 ± 24.91 vs 28.10 ± 16.21 ,大腿二頭筋 13.78 ± 14.14 vs 4.51 ± 3.37 (最大努力下バタ足 vs 非最大努力下バタ足, mean \pm SD)

最大努力下バタ足の包絡線を以下に示す(図 3-8).

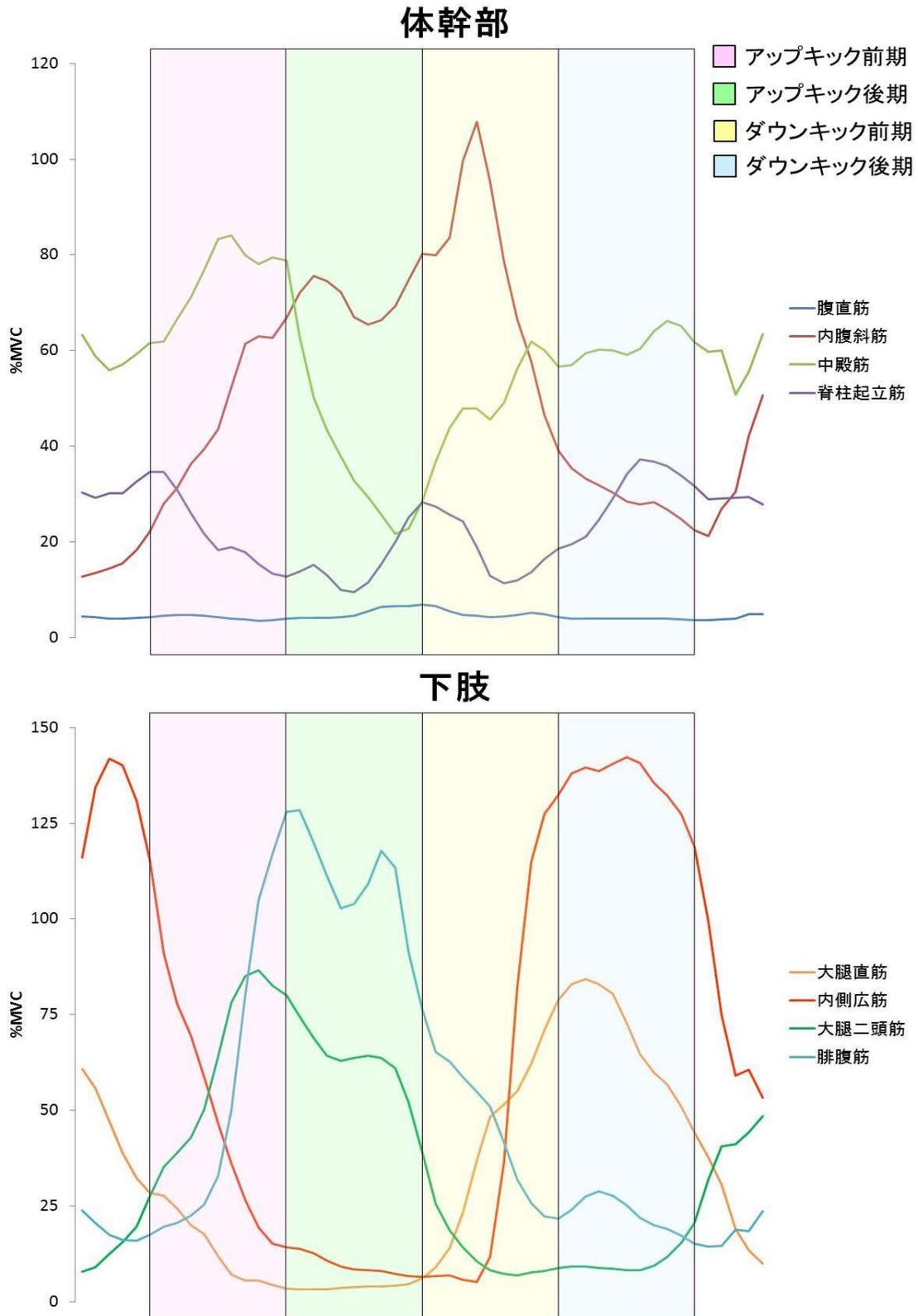


図 3-8.最大努力下バタ足の包絡線

腹直筋は,すべてのフェーズでほぼ一定の筋活動量を示している.

内腹斜筋は,ダウンキック前期に活動のピークを認め,アップキック前期で最も低値を示す.

中殿筋は,アップキック前期で活動のピークを認め,アップキック後期で最も低値を示す.

脊柱起立筋は,上下動はあるもののすべてのフェーズでほぼ一定の値を示す.

大腿直筋は,ダウンキック後期で活動のピークを認めた.その後,アップキック前期・後期では活動が低い値を示す.

内側広筋は,ダウンキック後期で活動のピークを認めた.また,筋の活動のタイミングとして,ダウンキック前期に急激に活動量が増えることを認める.

大腿二頭筋は,アップ前期で活動のピークを認める.その後,ダウンキック前期・後期では活動が低い値を示す.

腓腹筋は,アップキック後期で活動のピークを認めた.ダウンキック後期はでは他のフェーズに比べ低い値を示す.

非最大努力下バタ足の包絡線を以下に示す(図 3-9).

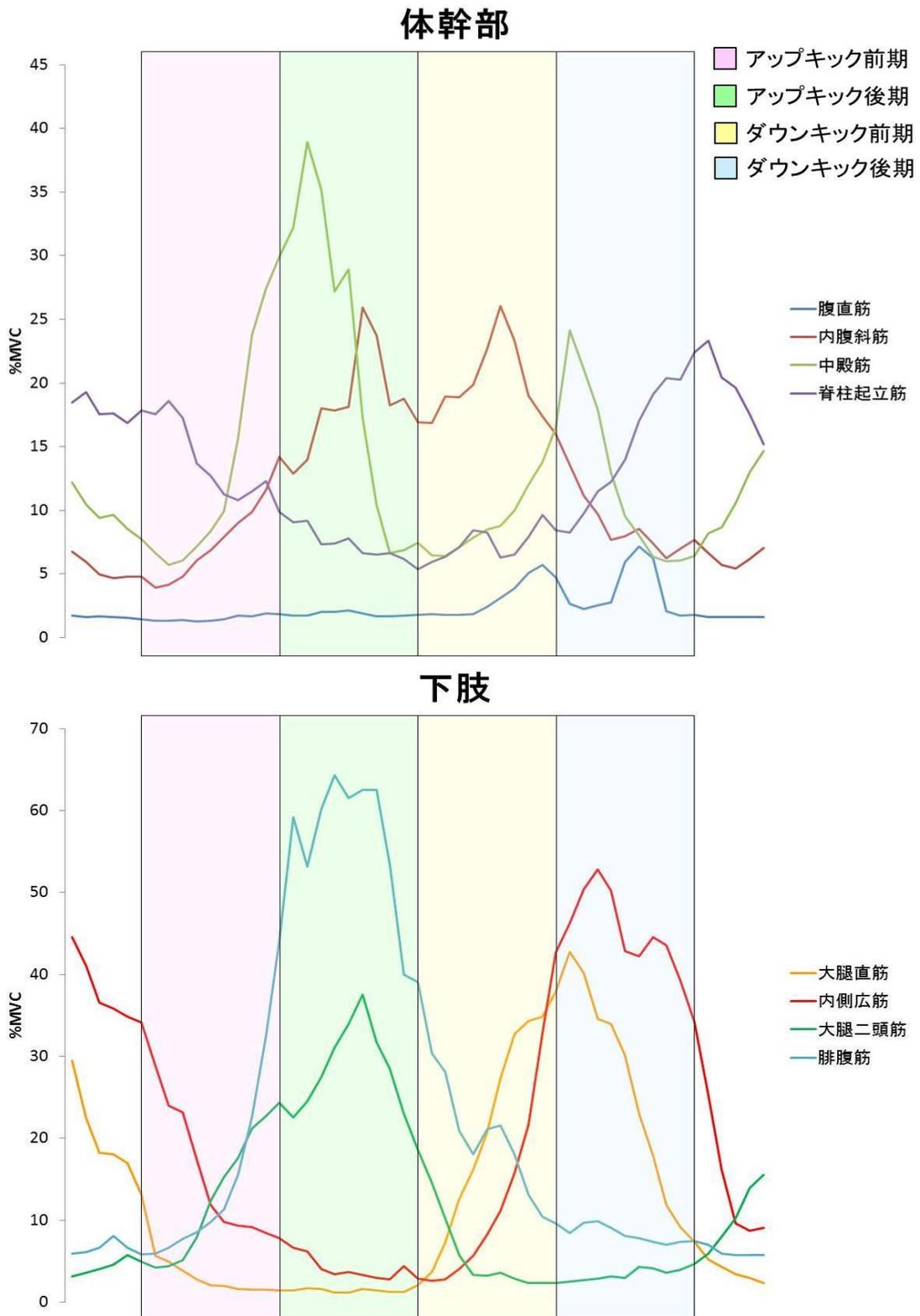


図 3-9.非最大努力下バタ足の包絡線

腹直筋は,すべてのフェーズで低い値を示す.

内腹斜筋は,アップキック後期及びダウンキック前期に活動のピークを認める.

中殿筋は,アップキック後期で活動のピークを認め,ダウンキック前期で最も低い値を示す.

脊柱起立筋は,ダウンキック後期で筋活動の増加を認める.

大腿直筋は,ダウンキック後期で活動のピークを認める.また,アップキックはダウンキックと比較し低い値を示す.

内側広筋は,ダウンキック後期で活動のピークを認める.また,大腿直筋よりもわずかに遅れて筋活動が開始しているといえる.

大腿二頭筋は,アップキック後期で活動のピークを認める.また,ダウンキックはアップキックと比較し低い値を示す.

腓腹筋は,アップキック後期で活動のピークを認める.アップキック前期とダウンキック後期は筋活動が低い値を示す.

4. 考察

4-1. フェーズの異なる原因

本研究はバタ足のフェーズ分けとして,アップキック前期,アップキック後期,ダウンキック前期,ダウンキック後期の4つのフェーズに分けた(図4-1左).しかし,全30試技のうち10%にあたる3試技で,このフェーズ分けに該当しない試技が生じた.その3試技すべて,以下の動作を行っていた(図4-1右).

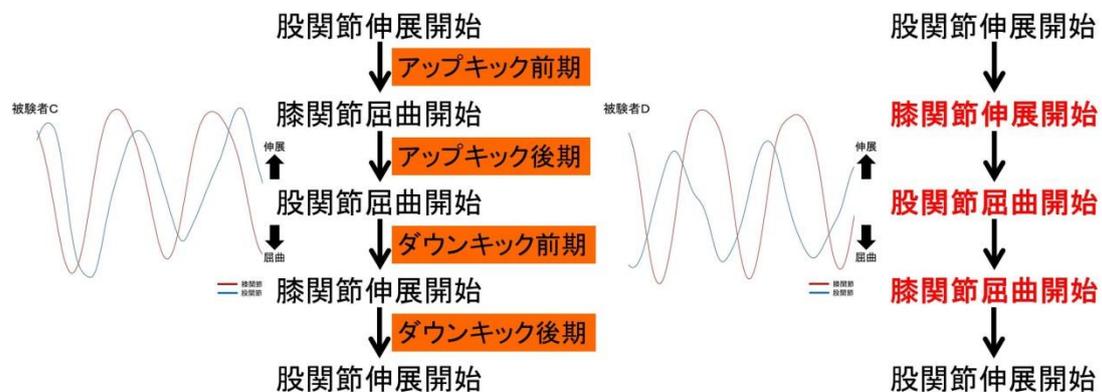


図4-1.左,フェーズ分け.右,異なるフェーズを行った被験者の動作

このようなフェーズの異なる試技が生じた原因として,個人間でバタ足の動作が異なることが考えられる.また,バタ足は矢状面上の単純な動作であると考え2次元解析を行ったが,実際は2次元解析では評価できない下肢の複雑な動きを伴っていることも考えられる.本研究は2次元での画像解析を行った為,キックの際の体幹部の回旋が大きいなどの要素によって,正しい座標値が得られていない可能性がある.その影響により,このようなフェーズの異なる動きになってしまった可能性も否定できない.今後の課題として,3次元での動作解析が必須であると考えられる.

4-2.各筋のフェーズ間による比較(図 3-2,3)(図 3-8,9)

最大努力バタ足は各フェーズの時間が短く,筋のフェーズによる違いを明らかにすることは困難であると考え,非最大努力下バタ足での結果に関し考察する.また水中にて動作を行った為,以下の考察はクロール泳の時など水面でのバタ足動作で同じことがいえるとは限らないと考える.

4-2-1.腹直筋,脊柱起立筋

腹直筋に関してバタ足では各筋と比較し,各フェーズであまり働いていない傾向にあった.この結果は,腹直筋はストローク動作に合わせ活動している.という先行研究の結果と一致していると考え¹³⁾.

脊柱起立筋に関し,今回の試技であるストリームライン姿勢でのバタ足は,同時に左右で違う力が働いているため,上肢が不安定になりやすいと考える.その為,脊柱起立筋はフェーズに関係なく活動していると推察される.

4-2-2.内腹斜筋

アップキック前期とダウンキック後期と比較し,アップキック後期とダウンキック前期は有意に筋活動が高い結果となった.アップキック後期とダウンキック前期は,右足が正中線より後方にある局面である.その為,体幹が背屈方向に引っ張られていると考えられ,内腹斜筋の働きで水平に保つ働きをしていると推察される.また,推進力を生み出す直前の局面と考えられる⁴⁶⁾ので,内腹斜筋を活動させることにより,支点となりより大きな推進力を得ようとしていると考える.

4-2-3.中殿筋

アップキック後期の筋活動量が,アップキック前期とダウンキック前期と比較し,有意に高い値となった.推進力はダウンキックで得ていると考えられ⁴⁶⁾,右足がアップキック後期の際,左足はダウンキック後期で推進力を得ている局面であると考えられる.一方アップキック後期である右足は,推進力を得ていない局面であると考えられ,左右で力の差が生じてしまい,不安定な局面であると考えられる.その為,中殿筋の機能である外転,内外旋²²⁾といった働きによって不安定である右側の下肢の安定化を図っているのではないかと考える.しかし,股関節の外転,内外旋は今回のような二次元の解析では解析困難な動きであり,正確な動作を明らかにすることはできないと考える.

4-2-4.大腿直筋,大腿二頭筋

大腿直筋は,アップキック両フェーズとダウンキック両フェーズ間に有意差が認められたことから,膝関節の動きではなく,股関節屈曲動作に連動し筋が活動をしていると考える.また,大腿二頭筋も非最大努力下バタ足ではアップキック前期とダウンキック前期に有意差は認めなかったが,最大努力下バタ足において,アップキック両フェーズとダウンキック両フェーズ間に有意差が認められたことから,膝関節の動きではなく股関節伸展動作に連動し筋が活動をしていると考える.多くの被験者は被験者A(図4-2)のように,大腿直筋(図4-2青線)はダウンキック前期から筋活動が開始され,ダウンキック後期終了時には筋活動が終了しているといえる包絡線を得た.また,大腿二頭筋(図4-2緑線)はアップキック前期に筋活動の開始を認め,ダウンキック前期の前半で筋活動が終了している包絡線を得た.その為,二関節筋である大腿直筋や大腿二頭筋は股関

節屈曲・伸展動作に連動し活動していると考えられる。しかし、被験者 B(図 4-3)のように被験者によっては膝関節の動きに合わせて、筋が発揮している被験者(3名)もいた。このような包絡線を得られた被験者は、大腿直筋(図 4-3 青線)はダウンキック前期後半から筋活動が開始され、アップキック前期で活動が終了するといえる包絡線を得た。大腿二頭筋(図 4-3 緑線)は、アップキック前期から活動を開始し、ダウンキック前期で活動が終了する包絡線を得た。以上のことから、被験者によっては膝関節屈曲・伸展動作に連動し活動していると考えられる。その為、大腿部の二関節筋は股関節屈曲・伸展動作に連動し筋が活動していないともいえる。しかし、最大努力下バタ足の泳速度を比較すると、膝関節の動きに合わせて大腿直筋と大腿二頭筋が活動している被験者 3名のうち 2名は、平均値(1.36m/s)より低い値(1.17m/s, 1.28m/s)を示していた。その為、パフォーマンスの向上という観点から考えると、これら二筋は股関節屈曲・伸展動作に連動し、大腿直筋、大腿二頭筋が筋発揮するのが良いと考えられる。

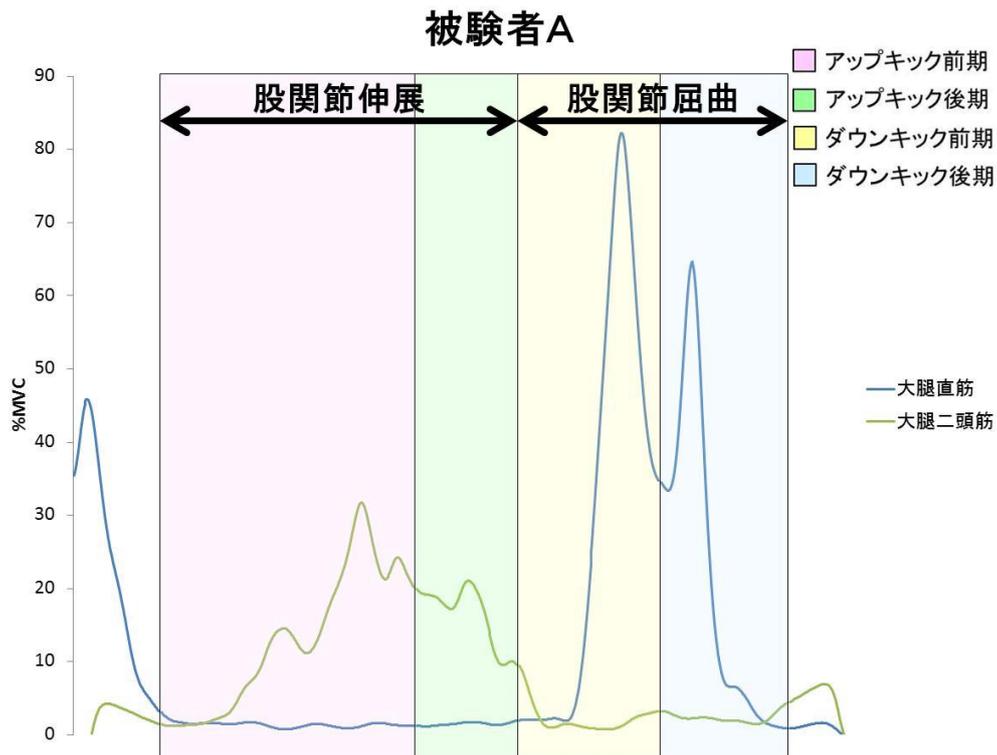


図 4-2.股関節の動きに合わせて筋が活動している被験者の下肢包絡線

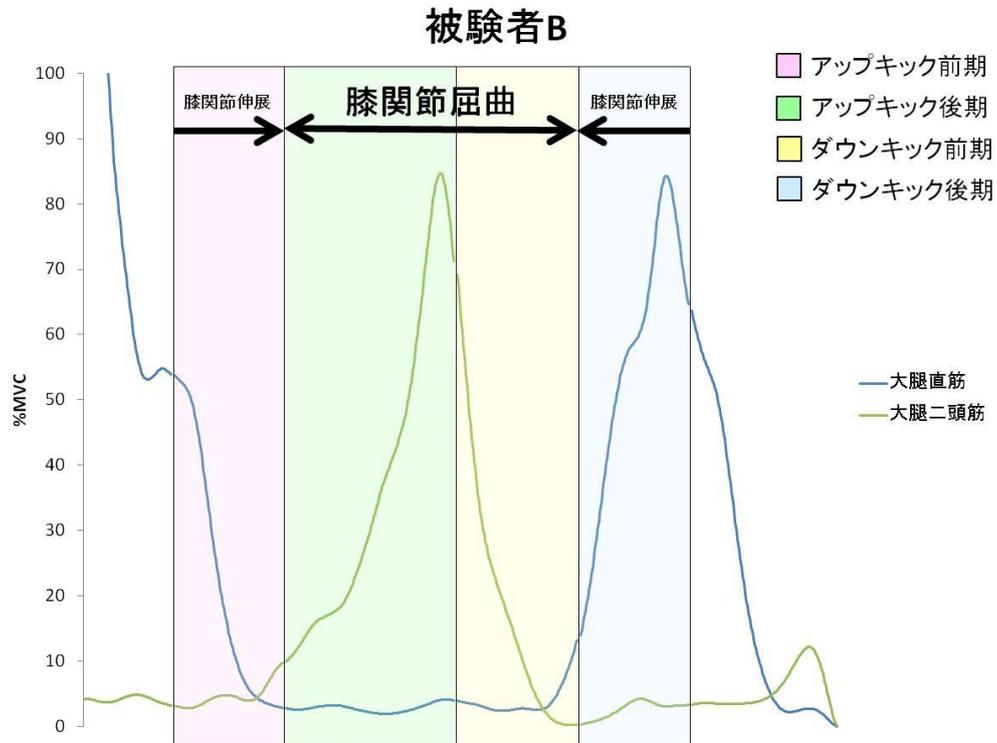


図 4-3.膝関節の動きに合わせて筋が活動している被験者の下肢包絡線

4-2-5.内側広筋

ダウンキック後期において,他の 3 フェーズに対し有意に筋活動量が高かった.また,包絡線の結果(図 3-8,9)から最大努力下バタ足,非最大努力下バタ足両試技ともに,ダウンキック後期でピークを認めることができた.ダウンキック後期は,膝伸展開始局面のため,内側広筋は膝の伸展局面で重要な働きをしていると考える.

4-2-6.腓腹筋

アップキック後期は,他の 3 つのフェーズに比べ有意に筋活動が高い結果を示した.アップキック後期は膝関節屈曲開始局面であるので,膝関節の動きに合わせて筋が活動していると考えられる.しかし,バタ足動作中は,足関節は常に底屈状態であると考えられ,膝関節伸展動作を行っている際は,アップキック前期とダウンキック後期では遠心性の収縮が起こっているとも推察される.

4-2-7.フェーズ間比較の結論

フェーズ間の比較によって以下の結果が得られた.

- ・ 二関節筋である大腿直筋,大腿二頭筋は股関節の屈曲・伸展動作に連動し活動していると推察される.
- ・ 内側広筋,腓腹筋は膝関節の屈曲・伸展動作に連動し活動していると推察される.

4-3.速度の違いによる筋活動の比較(図 3-4,5,6,7,8,9)

先行研究において,歩行速度が上がると筋活動量が増加していると報告されている⁴⁾.本研究も各フェーズ各筋で筋活動の増加を認めることから,水中での運動でも同様のことがいえると考ええる.

4-3-1.アップキック前期(図 3-4)

アップキック前期において,大腿直筋以外の 7 筋で最大努力下バタ足の方が有意に高い筋活動量を示した.包絡線を比較すると,中殿筋,大腿二頭筋,腓腹筋のピーク位置が非最大努力下バタ足に比べ,早くなっている傾向がある(図 3-8,9).最大努力下バタ足はキックの速度が速いと考えられ,その動きに対応するために筋発揮のピークが早くなっていると考えられ,非最大努力下バタ足と比較し,高い筋活動量を示されたと考ええる.内側広筋は,アップキック前期が膝関節伸展開始局面のため,速度増加に伴いより力を発揮するために,筋活動量が増加したと考える.腹直筋,内腹斜筋,脊柱起立筋の増加は,速度が速くなったことにより,股関節に加わるトルクが大きくなり,体幹を回旋させる力が生まれたと考える.その為,その回旋に対して拮抗し,筋活動量が増加したと考える.

4-3-2.アップキック後期(図 3-5)

アップキック後期は,腹直筋,内腹斜筋,脊柱起立筋,大腿直筋,大腿二頭筋,腓腹筋で最大努力下バタ足の方が有意に高い値を示した.腹直筋,内腹斜筋,脊柱起立筋の筋活動の増加は,アップキック前期と同様に速度が速くなったことにより,股関節に加わるトルクが大きくなり,体幹を回旋させる力が生まれたと考える.その為,その回旋に対して拮抗し,筋活動が増加したと考える.大腿直筋は,包絡線を比較する(図 3-8,9)と筋の活動タイ

ミング,ピークタイミングは速度により変化はないと言える.しかし,筋活動量が有意に増加したのは,アップキック後期は股関節屈曲動作の準備期にあたるといえる.キック速度が速いため,素早く股関節屈曲が出来るよう準備期として大腿直筋が活動していると考え.大腿二頭筋,腓腹筋は,アップキック後期が股関節伸展動作,膝関節屈曲動作を行っている局面なので,速度増加に伴いより力を発揮するために,筋活動量が増加したと考える.

4-3-3.ダウンキック前期(図 3-6)

ダウンキック前期では,内腹斜筋,脊柱起立筋,大腿直筋,内側広筋で最大努力下バタ足の方が有意に高い値を示した.内腹斜筋,脊柱起立筋はアップキック前期と同様の理論で速度が速くなったことにより,股関節に加わるトルクが大きくなり,体幹を回旋させる力が生まれたと考える.その為,その回旋に対して拮抗し,筋活動量が増加したと考える.大腿直筋は,股関節屈曲局面であるため速度増加に伴いより力を発揮するため,筋活動量が増加していると考え.内側広筋は,膝関節伸展筋であるが,ダウンキック前期は膝関節伸展の準備期と考えられ,筋発揮のピークを膝関節伸展開始タイミングに合わせるため,筋活動量が増加したと考える.

4-3-4.ダウンキック後期(図 3-7)

ダウンキック後期は,中殿筋,大腿直筋,内側広筋,大腿二頭筋で最大努力下バタ足の方が有意に高い値を示した.中殿筋の筋活動量増加の理由として,ダウンキック後期は他の3つのフェーズと比較し,股関節屈曲及び膝関節を伸展している為推進力を一番得ている局面と考えられ,より股関節が内旋していることにより,筋活動量が増加していると考えられ

る。大腿直筋,内側広筋は速度増加に伴いより力を発揮するために,筋活動量が増加したと考える。大腿二頭筋はフェーズ間比較の結論で述べたように,股関節の動きに合わせて活動していると推察されるが,ダウンキック後期は股関節伸展の準備期と考えられ,キック速度が速いため,素早く股関節伸展が出来るよう準備期として大腿二頭筋が活動していると考えられる。しかし,他の3フェーズと比較すると体幹筋群で有意差を認めることがなかった。ダウンキック後期は推進力を一番得ていると考えられ⁴⁶⁾,体幹部が推進力を得ていることにより安定している為,筋活動の増加がなかったと考える。

4-3-5.速度の違いによる筋活動の比較総合考察

フェーズ間の比較より,大腿直筋,大腿二頭筋は股関節屈曲・伸展動作に連動し活動を行っているおり,内側広筋,腓腹筋は膝関節屈曲・伸展動作に連動し活動していると考えた。これら筋は,速度が上昇するとフェーズ間の比較の際に活動が開始すると予想されるフェーズの1つ前のフェーズから筋活動の増加を認めた。これは,速度上昇により筋発揮の準備期として,筋活動の発揮のタイミングが早まったと考える。また,屈曲・伸展の切り返しの際に,水の抵抗では動きを止められないために,ブレーキの効果を生むために働いていると考える。そのため,速度が上昇することによって,大腿直筋はアップキック後期,大腿二頭筋はダウンキック後期,内側広筋はダウンキック前期,腓腹筋はアップキック前期で遠心性の収縮を行っている可能性が推察された。

4-3-5.速度の違いによる筋活動の比較の結論

速度の違いによる筋活動の比較を行い以下の結論を得た.

- ・速度の上昇により,大腿直筋,大腿二頭筋,内側広筋,腓腹筋はフェーズによっては遠心性の収縮を行っている と推察された.

4-4.本研究の限界

バタ足は上下動の単純な動きと考え,本研究は 2 次元での解析を行った.しかし,解析を行うにつれ 2 次元では考察しきれない事象が生まれた.その為,今後は 3 次元での解析が必要である と考える.

筋電解析に際し SD 値が大きく,個人差が影響していると考えられた.その為,バタ足のレベルに差があるとも考えられた.今後はタイムの近い選手を対象として研究を行う必要がある.

被験者が少なかったため,どの筋活動パターンがパフォーマンス向上につながるかを明らかにすることは困難であった.今後は被験者の数を増やし,バタ足の筋活動パターンで分類し,解析することでパフォーマンス向上につながる結果が生まれる と考える.

5. 結論

本研究では以下の結論を得た。

- ① 二関節筋である大腿直筋,大腿二頭筋は,股関節の動きに合わせて,活動していると推察された。
- ② 内側広筋,腓腹筋は膝関節の動きに合わせて,活動していると推察された。
- ③ 速度の上昇により,大腿直筋,大腿二頭筋,内側広筋,腓腹筋はフェーズによっては遠心性の収縮を行っている と推察された。

6.参考文献

- 1) Adams Marshall: Thoughts on the Crawl Stroke, *Swimming Technique*,37(2),17-23,2000
- 2) Alberty Morgan, et al.: Changes in Swimming technique during time to exhaustion at freely chosen and controlled stroke rates, *Journal of Sports Science*,26(11),1191-1200,2008
- 3) Chatard.J. C., J. M. Lavoie, and J. R. Lacourl.: Analysis of determinants of swimming economy in front crawl, *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 61(1-2),88-92,1990
- 4) Christoph Anders, et al.: Trunk muscle activation patterns during walking at different speeds, *Journal of Electromyography and Kinesiology*,17(2),245-252,2007
- 5) Conceicao A, et al.: Electromyography in Front Crawl Technique-Case Study, *The open sports sciences journal*,3,67-69, 2010
- 6) Craig. ALBERT B., DAVID R. Pendergast.: Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming, *Med Sci Sports Exerc*,11(3),278-283,1979
- 7) Dekerle. J., et al.: Stoking Parameters in Front Crawl Swimming and Maximal Lactate Steady State Speed, *International journal of sports medicine*,26(1),53-58,2005

- 8) Deschodt.V.J.,Arsac.L.M.,Rouard.A.H.: Relative contribution of arms and legs in humans to propulsion in 25-m sprint front-crawl swimming, *European Journal of Applied Physiology*,80(3), 192-199,1999
- 9) Engesvik Fionnuala: The Importance of leg Movements in the Freestyle, *Swimming Technique*,29(1),14-16,1992
- 10) Figueiredo Pedro., et al.: An energy balance of the 200m front crawl race, *European Journal of Applied Physiology*,111(5), 767-777,2011
- 11) Girgio Gatta,Matteo Cortesi,Rocco Di Michele: Power production of the lower limbs in flutter-kick swimming, *Sports Biomechanics*,11(4),480-491,2012
- 12) Hollander A Peter,et al.: Contribution of the Legs to Propulsion inFront Crawl Swimming, *Swimming V*,39-43,1987
- 13) Martens Jonas,et al.: Lower trunk muscle activity during front crawl swimming in single amputee, *Portuguese Jornal of Sports Science*,11(2),751-754,2011
- 14) McCabe,Carla B.,Ross H. Sanders.: Kinematic differences between front crawl sprint and distance swimmers at a distance pace, *Journal of Sports Science*,30(6),601-608,2012
- 15) MCCULLOUGH.AMY S. ,et al.: Factors affecting flutter kicking speed in women who are competitive and recreational swimmers, *Journal of Strength and Conditioning Research*,23(7),2130-2136, 2009

- 16) Mookerjee Swapan ,et al.: Relationship between isokinetics strength, flexibility, and flutter kick speed in female collegiate swimmers, *Journal of Strength and Conditioning Research*,9(2), 71-74,1995
- 17) Onusseit.H.F.: TWO-BEAT VERSUS SIX-BEAT WHICH KICK IS BEST?, *Swimming Technique* 9,41-43,1972
- 18) Perotto Aldo O.(栢森良二翻訳): 筋電図のための解剖ガイド,西村書店,第3版第3刷,2007
- 19) Stirn I ,et al.: Change of mean frequency of EMG signal during 100 meter free style swimming, *IFMBE Proceedings*,16,1002-1005, 2007
- 20) Stirn I ,et al.: Evaluation of mean power spectral frequency of EMG signal during 100 metre crawl, *European Journal of Sport Science*,13(2),164-173,2011
- 21) Stirn Igor ,et al.: Evaluation of muscle fatigue during 100-m front crawl, *European Journal of Applied Physiology*,111(1),101-113, 2011
- 22) Thompson Clem W.,Floyd R.T.(中村千秋,竹内真希翻訳): 身体運動の機能解剖学,医道の日本社,改訂版 12 刷,2008
- 23) Watkins James,Gordon Andrew T.: The Effects of Leg Action on Performance in the Sprint Front Crawl Stroke, In *Biomechanics and Medicine in Swimming*,310-314,1983
- 24) Yanai Toshimasa: Rotational effect of buoyancy in front crawl : does it really cause the legs to sink?, *Journal of Biomechanics*, 34(2),235-243,2001

- 25) Yanai Toshimasa: Stroke frequency in front crawl: its mechanical link to the fluid forces required in non-propulsive direction, *Journal of Biomechanics*,36(1),53-62,2003
- 26) Zamparo. P., et al.: The interplay between propelling efficiency, hydrodynamic position and energy cost of front crawl in 8 to 19-year-old swimmers, *European Journal of Applied Physiology*, 104(4),689-699,2008
- 27) Zamparo. P., et al.: Energy cost of swimming of elite long-distance swimmers, *European Journal of Applied Physiology*,94(4-5), 697-704,2005
- 28) Zamparo. P., et al.: An energy balance of front crawl, *European Journal of Applied Physiology*,91(1-2),134-144,2005
- 29) Zamparo. P., et al. Energy cost of front-crawl swimming at supra-maximal speeds and underwater torque in young swimmer, *European Journal of Applied Physiology*,83(6),487-491,2000
- 30) 生田泰志ほか: クロール泳における泳速度,ストローク頻度およびストローク長の変化と筋活動の関係, *体力科学*,59(4),427-438,2010
- 31) 泉重樹ほか: ボクシングのパンチ動作において,最も速く収縮し始める筋は何か, *法政大学スポーツ健康学研究*,1,51-56,2010
- 32) 糸井紀,武田剛,椿本昇三: 背泳ぎスタートにおけるグリップを握る位置が手部の力発揮に与える影響, *水泳水中運動科学*,13(1),16-21, 2010
- 33) イトマンスイミングスクール:<http://www.itoman.com/>

- 34) 伊藤慎一郎: 競泳自由形の水中フォーム解析, 日本機械学会論文集 B 編,73(734),2058-2061,2007
- 35) 猪股伸晃ほか: 自由形ストローク動作の運動学的解析-陸上空間で模倣されたフォームと肩傷害との関連性についての考察-,理学療法科学,21(3),299-304,2006
- 36) 大庭昌照ほか:足部の柔軟性がバタ足に及ぼす影響について,筑波大学運動学研究,11,89-95,1995
- 37) 金子秀雄,永井良治,吉住浩平: 最大吸気圧測定 of 反復に伴う呼吸筋活動の変化, 理学療法科学,25(4),487-492,2010
- 38) 合屋十四秋,野村照夫,杉浦加枝子: 女子水泳選手におけるクロール泳の速度出力調整と動作との関係, スポーツ方法学研究,18(1), 75-83,2005
- 39) コナミスポーツクラブ:<http://www.konamisportsclub.jp/>
- 40) 清水潤,田口正公,森誠護: クロール泳における passive drag, active drag,最大泳パワーの比較, 福岡大学スポーツ科学研究,34(1),63-72,2004
- 41) 杉本誠二,中島求,市川浩,野村武男: 水中ドルフィンキックの推進力と関節トルクのシミュレーション解析, バイオメカニズム学会誌, 32(2),90-97,2008
- 42) 杉山康司,形本静夫: 最大下泳速度におけるフロントクロールおよびブレスとストロークの経済性について, Japan Society of Physiological Anthropology,11(6),635-640,1992
- 43) セントラルスポーツ:<http://www.central.co.jp/>

- 44) 武田剛,高木英樹,椿本昇三: 競泳スタート台の傾斜角度の違いがスタートパフォーマンスに与える影響, 水泳水中運動科学,12(1),18-27,2009
- 45) 長井力,土岐仁,齋藤和成: クロール泳法リカバリ動作に関する運動評価の一試み, 水泳水中運動科学,7(1),41-49,2004
- 46) 中島求, 水泳人体シミュレーションモデルによる標準的 6 ビートクロール泳の力学的考察, 日本機械学会論文集 B 編,71(705), 1370-1376,2005
- 47) 福崎千穂: 高齢者・身体に障害がある人のアクアエクササイズ, 体育の科学,60(12),835-839,2010
- 48) 福崎千穂,中澤公考: 水中歩行の運動生理学的特性, 体育の科学, 61(3),211-215,2011
- 49) 松尾信之介ほか: 走速度変化に伴う股関節内転筋群活動の変化, 体育学研究,56(2),287-295,2011
- 50) 三好扶,中澤公考,赤居正美: 水中歩行のバイオメカニクス, 日本リハビリテーション医学会誌,42(2),138-147,2005

7.謝辞

修理論文の執筆を終えるにあたり,多くの方々にご指導頂いたことに感謝致します.

早稲田大学スポーツ科学学術院金岡恒治教授には,指導員としていつも温かくご指導して頂いたこと,また本研究に対して多くのご助言を頂いたことに深く感謝いたします.副査として快く引き受けてくださり,多くのご助言を頂いた早稲田大学スポーツ学術院奥野景介教授,矢内利政教授に心から御礼申し上げます.奥野景介教授には,大学院ゼミへの参加を快く許可してくださり大変感謝しております.また,本研究の研究方や解析方法など多くのご助言やご意見を頂いた,早稲田大学スポーツ学術院武田剛助教授,健康科学大学の成田崇矢氏,埼玉医科大学の大久保雄氏,早稲田大学大学院スポーツ科学研究科の原怜来氏,原有美氏,西川亜夢子氏に感謝いたします.特に西川亜夢子氏には,日々研究に関しての相談に多く乗って頂き,言葉では表せないほど感謝しております.実験を行う際に快く手伝って頂いた,関根千恵氏,松永直人氏,飯塚哲司氏,上野彬恵氏,木野彩奈氏,梶原慶裕氏,小川原亮氏に感謝いたします.同期でともに切磋琢磨しながらも,私の苦手な英語で多くのアドバイスをしてもらった森本康広氏に感謝いたします.日々の研究で煮詰まった際に,ユーモアを交え励ましてくださった,長谷部清貴氏に感謝いたします.飛込の研究で共同研究者として多くのご助言を頂いた,いちほら病院整形外科の辰村正紀先生に深く感謝いたします.

本研究にご協力頂いた被験者の方々,日頃からたくさんのご支援を下さった金岡恒治研究室の皆様には感謝の意を表します.

最後に大学院への進学を許してくれた両親に感謝いたします.