

エリート女性競泳選手の水中毒ルフィンキックにおける 体幹, 大腿, 下腿の筋活動様式

小林 啓介¹⁾ 下門 洋文²⁾ 高木 英樹³⁾ 椿本 昇三³⁾ 仙石 泰雄³⁾

Keisuke Kobayashi¹, Hirofumi Shimojo², Hideki Takagi³, Shozo Tsubakimoto³ and Yasuo Sengoku³: Pattern of muscular activity in the trunk, thigh and lower leg during the underwater dolphin kick in elite female competitive swimmers. *Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.* 61: 185-195, June, 2016

Abstract : The purpose of this study was to clarify the pattern of muscular activity in the trunk, thigh and lower leg during the underwater dolphin kick in elite female competitive swimmers. The participants were 9 national-level competitive female swimmers who performed underwater dolphin kick swimming for 15 m at maximum effort. Sagittal movement was recorded for 2-D motion analysis, and surface electromyographic (EMG) data were recorded from 6 muscles: rectus abdominis (RA), elector spinae (ES), rectus femoris (RF), biceps femoris (BF), tibialis anterior (TA), and gastrocnemius (GAS). The EMG data were used to investigate the active phase during one kick cycle. Furthermore, the co-active phases between the agonist and the antagonist in the trunk, thigh and lower leg were evaluated in terms of estimated muscular coordination. The kinematic results indicated that the average swimming velocity and the strouhal number for these swimmers were similar to those for Olympic swimmers in a previous study. Furthermore, a whiplash-like action was observed in their underwater dolphin kick movement. The EMG results indicated that the active phases of all subjective muscles during one kick cycle were approximately 60%. Co-active phases were observed in all pairs (RA-ES: 24.1 ± 10.1%, RF-BF: 23.2 ± 5.5%, TA-GAS: 45.5 ± 20.2%), and the co-active phase of TA-GAS was significantly larger than for the other pairs ($p < 0.05$). From these results, two main findings emerged with regard to the muscular activity pattern during the underwater dolphin kick in elite female competitive swimmers: (1) the muscular activity patterns in the trunk and thigh muscles were reciprocal; (2) the co-active phase for the lower leg muscles was larger than for the other parts and occurred during the first half of the upward kick phase.

Key words : 2-D motion analysis, electromyography, co-activation

キーワード : 2次元動作分析, 筋電図, 共活動

1. 緒 言

水中ドルフィンキックは、競泳競技においてス

タート後とターン後の潜水泳として用いられている。水中を推進する際に身体が受ける水の抵抗は、水面近傍を泳ぐ際に比べて小さい (Lyttle et al., 2000)。そのため、水中ドルフィンキック

1) 筑波大学大学院人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
2) 新潟医療福祉大学健康科学部
〒950-3198 新潟市北区島見町1398
3) 筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
連絡先 小林啓介

1. Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
2. Department of Health and Sports, Niigata University of Health and Welfare
1398 shimami-cho, Kita-ku, Niigata, Niigata 950-3198, Japan
3. Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
Corresponding author keke0223tst@gmail.com

は、スタートやターンで獲得した高い泳速度の減速を抑え、他泳法で泳ぐよりも高い泳速度を維持することができる (Arellano et al., 2002 ; Takeda et al., 2009). 近年、水中ドルフィンキックは競泳競技における近代4泳法 (クロール, 平泳ぎ, 背泳ぎ, バタフライ) に加え、「第5のストローク」として取り上げられており (Collard et al., 2013), その重要性が指摘されている.

水中ドルフィンキックは、両上肢を拳上した姿勢を保ちながら、両下肢のキック動作によって推進する周期運動である。ドルフィンキックの動作は、蹴り下げと蹴り上げの動作によって構成され、両動作において推進力が生じることが報告されている (杉本ほか, 2008). 水中ドルフィンキックの動作を矢状面から観察すると、手部の振幅は最も小さく、足先側にいくほど動作は増幅され、足先の振幅が最も大きい (Hochstein and Blickhan, 2014 ; Von Loebbecke et al., 2009). さらに、エリート競泳選手の水の中ドルフィンキックの矢状面動作は、ムチのしなりのような動きを伴うことが報告されている (Gavilán et al., 2006 ; 下門ほか, 2014 ; Ungerechts, 1982). 水中ドルフィンキック中のムチのような動作は、下肢の運動連鎖により、足先の移動速度を高くすることができる。Atkison et al. (2014) は、水中ドルフィンキック中の泳者の平均泳速度と蹴り上げ時における足先鉛直速度の最大値には正の相関関係があったと報告している。従って、ムチのような動作による高い足先鉛直速度の達成は、水中ドルフィンキック中の高い泳速度と関係する。しかしながら、これまで水中ドルフィンキックを対象としたキネマティックな研究は数多く報告されているものの、水中ドルフィンキック中の筋電図 (以下「EMG」と略す) を分析した研究はなく (Martens et al., 2014), 水中ドルフィンキックにおける素早いムチ打ちのような動作がどのような筋活動で生じるかは明らかになっていない。

素早い周期運動を対象とした研究において、EMGを用いて筋活動のコーディネーションが評価されている。例えば、指のタッピングやドラム

動作の研究では、主働筋-拮抗筋のコーディネーションを調査している。Heuer (2007) は、指のタッピングにおいて、高い運動頻度が達成できる利き腕は、指の屈曲筋と伸展筋が同時に活動する共活動が少ないことを報告している。また Fujii et al. (2009) は、ドラム動作において、運動頻度が高い演奏者ほど手関節の屈曲筋と伸展筋が素早く交互活動すると報告している。一方で、主働筋と拮抗筋の共活動は、両筋が同時活動することで互いが発揮した力を相殺して関節運動を阻害する非効率的な活動様式である (Winter, 1990). そのため、素早い周期運動において、主働筋と拮抗筋の共活動は非効率であり、両筋が共活動する局面を可能な限り少なくするべきである。水中ドルフィンキックは、体幹、股関節、膝関節、足関節の屈曲-伸展運動で構成される素早い周期運動であるため (下門ほか, 2014), 体幹、大腿、下腿における各部位の主働筋と拮抗筋が交互に活動している可能性が考えられる。

そこで本研究は、エリート女性競泳選手の水の中ドルフィンキック中のEMGを測定し、体幹、大腿、下腿における主働筋と拮抗筋の筋活動様式を明らかにすることを目的とした。

2. 方 法

2.1 対象者

本研究の対象者は、全国大会出場レベルの女性競泳選手9名 (年齢: 20.7 ± 1.8 歳, 身長: 1.63 ± 0.06 m, 体重: 55.4 ± 5.2 kg, 競技歴: 12.8 ± 3.0 年) とした。対象者は、日々のトレーニングで水中ドルフィンキックを行っていたため、水中ドルフィンキック動作に習熟していた。対象者には実験の方法、目的、リスク、安全対策について事前に説明し、書面にて参加同意を得た。本研究は、大学の研究倫理委員会の承認を得て実施した。

2.2 実験試技

実験は、屋内50mプール (水温: $27.2 \pm 0.8^\circ\text{C}$) にて実施した。対象者は、十分なウォーミングアップを行った後、実験試技として水中ドルフィン

キック泳を実施した。対象者には、実験試技について、「水中で壁を押し蹴った後、水中ドルフィンキックを用いて、スタート位置から15 mの区間を、泳速度を最大にして水平に通過する」よう指示した。また、水面付近の水深は造波抵抗による影響が大きいため (Lyttle et al., 2000)、水深1.0 m付近で水中ドルフィンキックを行うように指示した。実験試技は3回実施し、試技間は3分程度の休息を挟んだ。

2.3 映像データ収集とキネマティクス変数

Fig. 1のように、泳者側方にビデオカメラ (High speed 1394 Camera, DKH Inc.) を2台設置し、水中窓越しに側方からの映像を撮影した。カメラのサンプリング周波数は100 Hz、シャッタースピードは1/250 secに設定した。映像の画角は、Arellano et al. (2002) に従い、スタート位置から8.0—14.0 mの範囲に調整した。なお、カメラから泳者までの距離は11 mであった。

泳者の身体合成重心位置を算出するため、身体右側の12点 (第5中手骨端、尺骨茎状突起、肘頭、肩峰、第5中足骨端、踵骨隆起、足関節外顆、大腿骨外側上顆、大転子、耳珠点、胸骨上縁、肋骨下端) に無線自発光マーカー (煌, Nobby Tech Inc.) を取り付けた。本研究において、身体合成重心位置は日本人アスリートを対象とした身体部分慣性係数 (Ae et al., 1992) を使用して計算した。身体合成重心位置の算出に必要な頭頂点は、水中ドルフィンキック中に腕で隠れるため、下門ほか (2014) の方法に従って推定した。

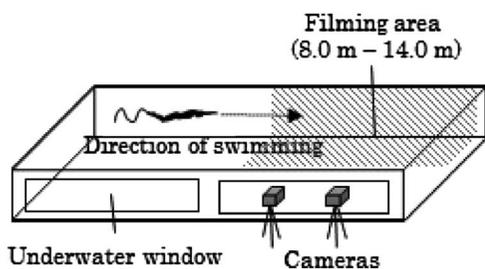


Fig. 1 The setting of experiment.

撮影した映像から、各分析点の座標を画像解析ソフトウェア (Tracker, open source physic) を用いてデジタル化し、数値解析ソフトウェア (MATLAB 2013a, Math works Inc.) を用いて2D-DLT法により2次元座標値を得た。算出した実座標データは、遮断周波数6 Hzのバターワースフィルターによって平滑化した。なお、各実験日におけるキャリブレーションオブジェクトの分析点の実測値と算出値における標準誤差は、 0.008 ± 0.002 mであった。この値は、下門ほか (2014) が報告した標準誤差の0.009 mと同程度の値であった。また、自動デジタル化の再現性を確認するために、ランダムに選択した1試技を2回デジタル化し、平滑化した各データを用いて平均誤差を算出した。その結果、全座標データにおける平均誤差は0.004 mであった。本研究の平均誤差の値は、Atkison et al. (2014) が報告した手動デジタル化による平均誤差0.020 mよりも小さな値であった。

本研究では、水中ドルフィンキックの1周期を、足先 (第5中足骨端) が鉛直方向の最高点に達してから次の最高点に達するまでと定義した。Connaboy et al. (2010) の報告に従い、連続したキック3周期分のデータを分析に用いた。水中ドルフィンキックの局面分けは、足先が鉛直方向の最高点に達してから最低点に達するまでをけり下げ局面、足先が鉛直方向の最低点に達してから次の最高点に達するまでをけり上げ局面と定義した。足先座標データから、けり幅とキック頻度を算出した。けり幅はキック1周期における足先の鉛直方向の最高点から最低点までの鉛直距離と定義し、キック頻度はキック1周期に要した時間の逆数と定義した。平均泳速度は、キック1周期における身体合成重心の水平移動速度の平均値と定義した。鉛直座標データから、手部 (第5中手骨端)、手関節点 (尺骨茎状突起)、肩関節点 (肩峰)、肋骨下端、股関節点 (大転子)、膝関節点 (大腿骨外側上顆)、足関節点 (足関節外顆) の各点における鉛直振幅を算出した。全身の身体鉛直振幅は、水中ドルフィンキックにおける身体全体のムチ打ち動作の特徴を評価するために用い

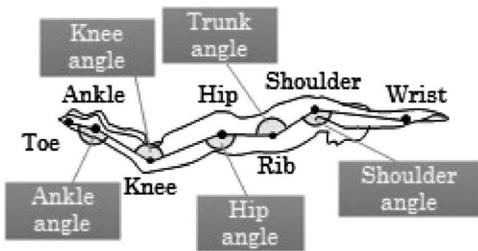


Fig. 2 The definition of the joint angles.

られた (Gavilan et al., 2006 ; Hochstein and Blickhan, 2014).

Fig. 2 のように、肩関節、体幹、股関節、膝関節、足関節の角度を分析した。肩関節角度は屈曲方向が正、体幹角度は屈曲方向が正、股関節角度は伸展方向が正、膝関節角度は伸展方向が正、足関節角度は底屈方向が正と定義した。

また、推進効率の指標として、ストローハル数を算出した。ストローハル数は、以下の式(1)で算出した。

$$St = A \cdot f \cdot U^{-1} \quad (1)$$

St はストローハル数、 A はけり幅、 U は平均泳速度、 f はキック頻度を示す。ストローハル数は、けり幅を、平均泳速度とキック頻度の比で標準化して記述される無次元数である。ストローハル数の値は低いほど効率が良いとされ、クジラとイルカでは 0.2—0.4 (Rohr and Fish, 2004)、国際大会レベルの競泳選手では 0.79、ジュニアのエリート競泳選手では 0.95 であった (Arellano et al., 2002) と報告されている。

2.4 EMG 測定と EMG 変数

EMG は、表面筋電計 (Biolog2, S&ME Inc.) を使い、サンプリング周波数 1000 Hz で測定した。被験筋は、右側の腹直筋 (以下「RA」と略す)、脊柱起立筋 (以下「ES」と略す)、大腿直筋 (以下「RF」と略す)、大腿二頭筋 (以下「BF」と略す)、前脛骨筋 (以下「TA」と略す)、腓腹筋内側頭 (以下「GAS」と略す) の 6 筋と

した。電極の貼付位置は、Cram et al. (1998) の記述に従って決定した。皮膚表面のアーチファクト成分を除去するために、電極貼付前に体毛処理と皮膚前処理剤を使用した皮膚処理が行われた。電極内への漏水は EMG 波形に大きな影響を与えるため、Kobayashi et al. (2015) の方法を用いて電極部分の防水処理を行った。

EMG データはコンピューター内に記録され、波形処理は数値解析ソフトウェア (MATLAB 2013a, Math works Inc.) を使用して行った。EMG データは、測定時のアーチファクト成分を除去するために、バンドパスフィルター (通過周波数帯: 10—500 Hz) でフィルタリングした。フィルタリング後の EMG データは、50 msec 間の二乗平均平方根 (以下「RMS」と略す) 波形に変換した。算出された RMS 波形の分析区間におけるピーク値が調査され、RMS 波形はピーク値で標準化された (以下「%peak RMS」と略す^{注1)})。筋活動量の変化タイミングと筋間の活動様式を評価するために、キック 1 周期における %peak RMS のアンサンブル平均波形を算出した。

各筋の活動時間は、Stirn et al. (2011) の方法に従って算出した。整流化したデータ (x) を用いて、式(2)により EMG energy の包絡線を導出した。

$$E(t_0) = \int_{t_0-125}^{t_0+125} x^2(t) dt \quad (2)$$

$E(t)$ は時系列の EMG energy のデータ、 t_0 はある時刻、 $x(t)$ は時系列の整流化データを示す。EMG energy の包絡線から各周期におけるピーク値を調査し、各周期内におけるローカルピーク値の 30% 以上の値を示した局面を筋活動時間と定義した (Conceição et al., 2014 ; Stirn et al., 2011)。キック 1 周期の時間は対象者間で異なるため、各周期において筋活動時間が占める割合 (%) を算出し、それを Active phase と定義した。

各部位の主働筋と拮抗筋の筋活動様式は、両筋の共活動時間を算出して評価した。本研究では、キック 1 周期において主働筋と拮抗筋の活動時

間が重なる局面を共活動時間と定義した。また、各部位の主働筋と拮抗筋をペアとして、体幹の筋のペアはRA-ES、大腿の筋のペアはRF-BF、下腿の筋のペアはTA-GASと定義した。Active phaseと同様に、各周期において共活動時間が占める割合(%)を算出し、それをCo-active phaseと定義した。本研究で算出したCo-active phaseは主働筋と拮抗筋の筋活動様式を示す指標にもなる。Co-active phaseが0である場合、2筋の活動様式は完全な交互活動型である。Co-active phaseの時間がより長ければ、2筋の活動様式はより共活動型であると評価した。

2.5 統計処理

各分析変数はキック3周期の平均値を代表値とし、各対象者において平均泳速度が最も高かった試技のデータを統計処理に用いた。キネマティクス変数とEMG変数の結果は、平均値±標準偏差(以下「Mean±SD」と略す)で示した。統計処理は、統計解析ソフトウェア(SPSS for windows 22.0, IBM Inc.)を使用して行った。データの正規性は、Shapiro-Wilk検定で確認した。鉛直振幅の身体点間、Active phase、Co-active phaseの部位間の比較では、一元配置分散分析を行った後、事後検定としてTukey法による多重比較を行った。統計処理における有意水準は、危険率5%未満とした。

3. 結果

各キネマティクス変数の結果として、平均泳速度は $1.36 \pm 0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、キック頻度は $2.05 \pm 0.17 \text{ Hz}$ 、けり幅は $0.47 \pm 0.05 \text{ m}$ 、ストローハル数は 0.71 ± 0.06 、けり下げ局面は $46.1 \pm 3.2\%$ 、けり上げ局面は $53.9 \pm 3.2\%$ であった。Fig. 3には、キック1周期における各関節角度の平均波形を示した。各関節角度の平均波形が最高値に達したタイミングは、肩関節角度が100%、体幹角度が19%、股関節角度が41%、膝関節角度が57%、足関節角度が63%の時点であった。Fig. 4には、各身体点における鉛直振幅の結果を示した。鉛直

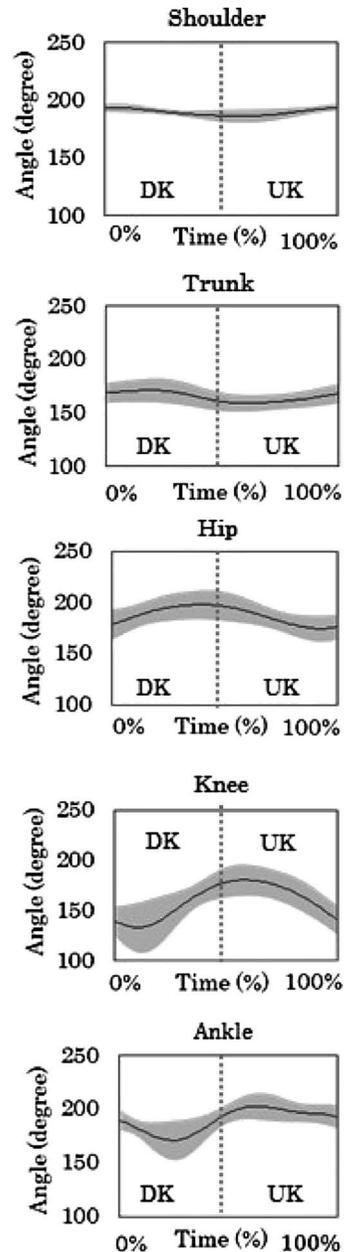


Fig. 3 The normalized time-course data of the joint angles during one-kick cycle. The black lines are the average values of all swimmers ($n=9$). The gray areas are the standard deviations.

振幅における身体点間の比較では有意な主効果($F=108.44$, $p<.05$)が確認された。また多重比較の結果から、足先とその他の身体点との間において有意差が確認され($p<.05$)、肋骨下端と股

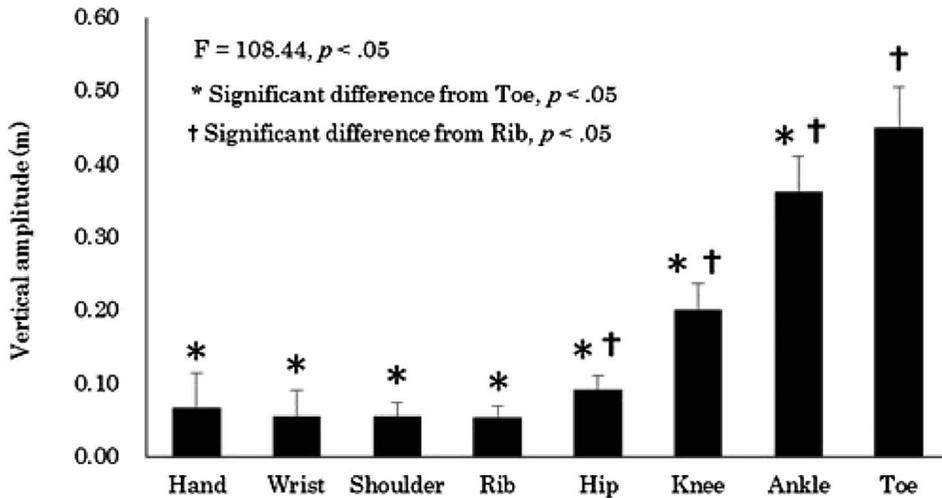


Fig. 4 The result of the vertical amplitudes in each body point.

Table 1 The result of co-active phase in each part.

Variable	Unit	RA-ES	RF-BF	TA-GAS	F-value
Co-active phase	%	24.1 ± 10.1 [†]	23.2 ± 5.5 [†]	45.5 ± 20.2	4.86*

* Significant main effect, $p < .05$

[†] Significant difference vs. TA-GAS, $p < .05$

関節、膝関節、足関節、足先の間において有意差が確認された ($p < .05$)。手部から肋骨下端の鉛直振幅は同程度の値を示したが、肋骨下端から足先の鉛直振幅は、末端に向けて大きくなっていった。

Fig. 5 には、%peak RMS の平均波形を示した。%peak RMS の波形において、RA, ES, RF, BF, GAS は一峰性のピークを示す波形を示し、TA は二峰性のピークを示す波形を示した。また、体幹の RA と ES の平均波形と大腿の RF と BF の平均波形は、2 筋が交互に活動する様式を示した。

各筋における Active phase の平均値は、RA が $62.7 \pm 6.3\%$ 、ES が $60.9 \pm 5.8\%$ 、RF が $57.1 \pm 5.1\%$ 、BF が $65.9 \pm 4.1\%$ 、TA が $72.6 \pm 17.2\%$ 、GAS が $67.0 \pm 15.5\%$ であった。Active phase における筋間の比較では、有意な差は示されなかった。

Table 1 には、各部位における Co-active phase の結果を示した。Table 1 に示したように、すべ

ての部位で共活動が生じていた。Co-active phase における部位間の比較では、有意な主効果 ($F = 4.86$, $p < .05$) が確認された。また多重比較の結果から、RA-ES と TA-GAS の間、RF-BF と TA-GAS の間において有意差が確認され ($p < .05$)、下腿の Co-active phase は、体幹と大腿よりも有意に大きかった。Fig. 6 には、ある対象者における足先の鉛直変位 (Fig. 6-(a))、各筋の活動時間と各部位の共活動時間の時系列データ (Fig. 6-(b)) の典型例を示した。Fig. 6-(b) の典型例において、下腿の共活動は、蹴り下げ局面終盤から蹴り上げ局面中盤において生じ、体幹と大腿と比べて長い共活動時間が観察された。

4. 考 察

本研究は、エリート女性競泳選手の水の中ドルフィンキック中の EMG を測定し、体幹、大腿、下腿における主働筋と拮抗筋の筋活動様式を明らか

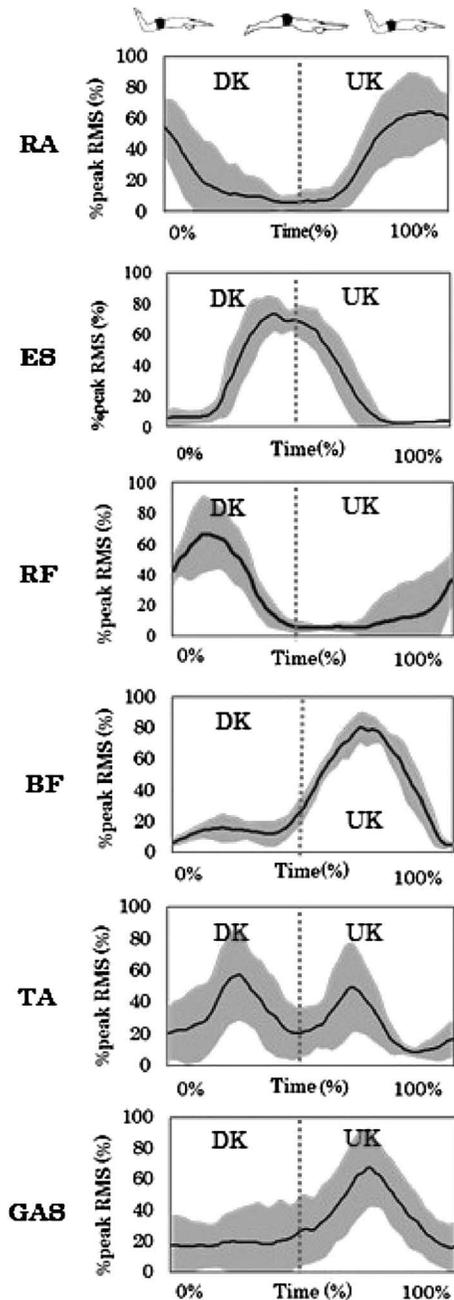


Fig. 5 The normalized time-course data of the %peak RMS in each muscle. The black lines are the average values of all swimmers ($n=9$). The gray areas are the standard deviations.

にすることを目的とした。その結果、体幹と大腿における主働筋と拮抗筋は交互に活動する筋活動様式を示した。また下腿の Co-active phase は、

他の部位よりも有意に大きな値を示し、下腿の筋は蹴り上げ局面において共活動を行っていることが明らかになった。

Von Loebbecke et al. (2009) は、オリンピックに出場した女性泳者の水中ドルフィンキックを分析し、平均泳速度は $1.38 \pm 0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、キック頻度は $2.08 \pm 0.36 \text{ Hz}$ 、けり幅は $0.49 \pm 0.07 \text{ m}$ であったと報告している。これらの結果と本研究結果は類似した値であった。また、本研究の対象者におけるストローハル数は、Arellano et al. (2002) が報告した国際大会レベルの競泳選手の平均値 0.79 よりも低い値を示しており、本研究の対象者の推進効率も先行研究よりも高いことが明らかとなった。以上の結果より、本研究の対象者は、オリンピック出場選手と同程度の高い水中ドルフィンキックパフォーマンスを有していたと言える。

キネマティクス変数の分析結果より、水中ドルフィンキック中、肩関節角度はほとんど変化しなかったが、体幹、股関節、膝関節、足関節の角度は屈曲と伸展を交互に行っていることが示された (Fig. 3)。また、体幹、股関節、膝関節、足関節における関節角度のピークは、手部側の関節から足先側の関節に向け、順々に位相ずれが生じており、肋骨下端から足先の鉛直振幅は、末端に向けて増幅されていた (Fig. 4)。Gavilán et al. (2006) は、水中ドルフィンキックにおける関節運動の位相ずれや股関節から足先へと振幅が大きくなるという動作の特徴を明らかにしており、下腿がムチ打ちのような動作を行うと結論付けている。本研究における関節角度と身体鉛直振幅の結果は、Gavilán et al. (2006) の先行研究と一致していた。そのため、本研究の対象者は、肋骨下端からムチ打ちのようなドルフィンキック動作を行っていたことが示唆された。

水中ドルフィンキック中の EMG の分析結果より、RA と ES の Active phase は両筋とも約 60% であり、RA と ES の %peak RMS の平均波形はドルフィンキック中に交互に活動する様式を示した (Fig. 5)。RA-ES の Co-active phase の平均値は約 25% であったが (Table 1), Fig. 6-(b)に

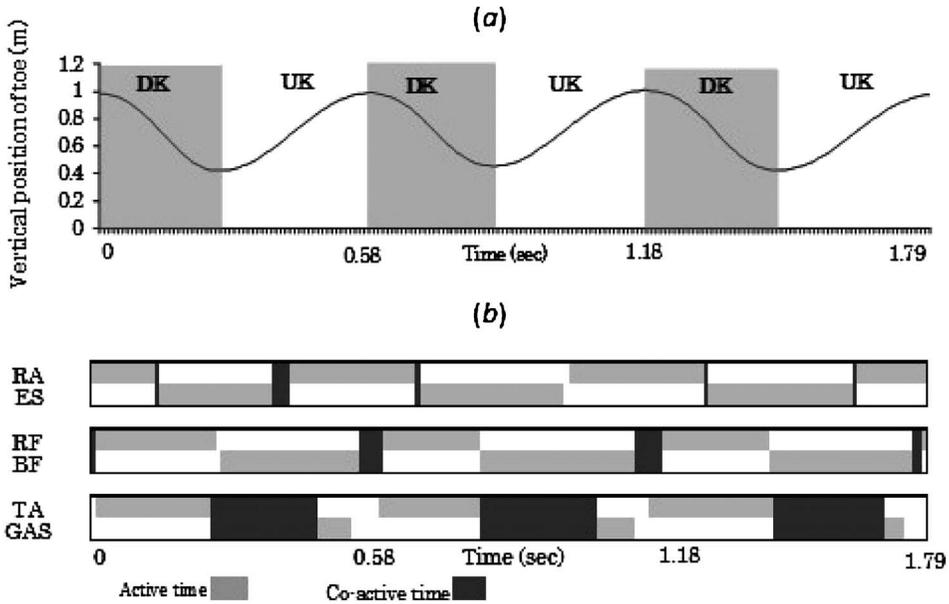


Fig. 6 The example of the time-course data of the vertical toe position in Swimmer 1 (a), and the example of the time-course data of the active time and the co-active time in Swimmer 1 (b). (a) The gray areas are downward kick phase and the white areas are upward kick phase. (b) The gray areas are the active times which are not co-active times. The deep gray areas are co-active times.

示した典型例のように共活動は両筋の活動が切り替わる局面で主に生じていた。以上の結果から、体幹筋は水中ドルフィンキック中に交互型の活動を行っていたと考えられた。RA と ES は体幹の屈曲運動と伸展運動に機能する筋であるため、体幹筋の交互活動は体幹の屈曲-伸展運動に関与する筋活動様式と言える。この結果は、泳者が体幹からムチ打ちのような動作を行っていたとするキネマティクス変数の分析結果と一致する。従って、本研究の対象者は、体幹筋で交互活動を行い、体幹からムチ打ちのようなドルフィンキック動作を実現していたと考えられた。また Nakashima (2009) は、コンピューターシミュレーションの結果として、体幹からうねり動作を行うドルフィンキックは、上半身の姿勢を安定させ、泳速度と推進効率の両方を改善させると報告している。本研究における対象者のドルフィンキックは、上半身の振幅が小さく、体幹からムチ打ちのような動作を行っていたため、Nakashima (2009) が報告した効率的なドルフィンキック動作と類似していた。ゆえに、エリート競泳選手は

体幹筋の交互活動を行うことで、効率的な水中ドルフィンキック動作を実現していたことが示唆された。

体幹筋と同様に、RF と BF の Active phase は両筋とも約 60% であり、RF と BF の % peak RMS の平均波形も交互に活動する様式を示した (Fig. 5)。また、RF-BF の Co-active phase の平均値は約 25% であり (Table 1), Fig. 6-(b) の典型例のように共活動はけり上げ局面からけり下げ局面に切り替わる時に生じていた。以上の結果から、本研究の対象者における大腿の筋はキック周期中に交互型の活動を行っていることが明らかになった。Oka et al. (1979) は、熟練者と初心者のバタ足動作中の筋活動を事例的に比較し、熟練者は大腿直筋と大腿二頭筋、前脛骨筋と腓腹筋が交互に活動して滑らかなキック動作を行っていたと報告している。また Jammes et al. (2010) は、フィンスイミング時の下肢の筋活動を測定し、下腿の筋における交互的な活動様式を報告している。これらの研究では、足部の蹴り下げ動作と蹴り上げ動作を交互に行うバタ足動作やフィンスイ

ミング動作の特徴から、下肢の屈曲筋と伸展筋が交互に活動すると述べられている。そのため、水中ドルフィンキックにおける大腿の筋の交互活動は、足部の蹴り下げ動作と蹴り上げ動作の効率的な反復に貢献したと示唆される。

TA はキック 1 周期中に二峰性の活動ピークを示し、TA と GAS は蹴り上げ局面において同時に活動が増加していた (Fig. 5)。TA-GAS の Co-active phase は、ほぼ 1 周期の半分に相当する割合を示し、下腿の Co-active phase は体幹や大腿と比べて有意に大きかった (Table 1)。以上の結果から、下腿の筋における筋活動様式は、体幹や大腿と異なることが明らかになった。また、バタ足泳やフィンスイミングの先行研究は、下腿の筋の交互活動を報告している (Jammes et al., 2010 ; Oka et al., 1979)。そのため、水中ドルフィンキックにおける下腿の筋活動様式は、バタ足やフィンスイミングと異なることも示された。下腿の共活動のタイミングについて、Fig. 6-(b)で示した典型例のように、9 名中 7 名の対象者において蹴り上げ局面の序盤で共活動が生じていた。一般的に、共活動は関節周囲筋の同時活動によって特徴付けられ、外乱や不安定な負荷保持に対する関節の固定化に貢献することや (Franklin et al., 2004 ; Milner, 2002)、関節運動の制止に貢献することが報告されている (Hagood et al., 1990)。ドルフィンキックの蹴り下げ局面終盤では、足関節に膝関節の伸展に伴う背屈方向への内的トルクが生じること、また蹴り上げ局面では足部の足底側に水の抵抗力が作用することが考えられる。しかしながら、Fig. 3 の足関節角度の結果より、対象者は常に底屈位を保持していた。そのため、7 名の対象者は内的トルクや水の抵抗力の影響に抗して、足関節が過度に背屈しないように下腿の筋を共活動させたと推察された。Lauer et al. (2013) は、クロール泳におけるストローク動作の水中局面前半で肘関節周囲筋の共活動が生じることを報告している。彼らは、ストローク動作の水中局面前半において肘関節を固定化することで、水により多くの力を伝えることができる可能性がある」と述べている。ドルフィンキックの推進

力は主に足部によって生成され、蹴り上げ局面においても推進力が生成されることが明らかになっている (杉本ほか, 2008)。ゆえに、本研究で観察された蹴り上げ局面序盤における TA と GAS の共活動は、足関節の底屈角度を保持し、足底面で水を捉えて推進力を増大させる筋活動戦略であったと示唆された。従って、効率的に推進力を発揮する技術として、蹴り上げ局面において下腿の筋で共活動を行い、足関節底屈位を保持することが重要であると、エリート競泳選手における筋活動様式から推察された。

5. ま と め

本研究は、エリート女性競泳選手における最大努力の水中ドルフィンキックの 2 次元動作解析と EMG による筋活動解析を行い、体幹、大腿、下腿における主働筋と拮抗筋の筋活動様式について分析した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 体幹と大腿における主働筋と拮抗筋は、水中ドルフィンキック中に交互に活動していた。(2) ドルフィンキックの蹴り上げ局面序盤において、前脛骨筋と腓腹筋が共活動し、足関節の底屈位が保たれていた。

注

本研究で示した記号、略語を以下に示す。

注1) %peakRMS RMS におけるピーク値に対する相対値 (%)

文 献

- Ae, M., Tang H., and Yokoi T. (1992) Estimation of inertia properties of the body segments in Japanese athletes. *Biomechanisms*, 11: 23-33.
- Arellano, R., Pardillo, S., and Gavilán A. (2002) Underwater undulatory swimming: Kinematic characteristics, vortex generation and application during the start, turn and swimming strokes. In E.K. Gianikellis (ed.), *Proceedings of the XXth International Symposium on Biomechanics in Sports*.
- Atkison, R.R., Dickey, J.P., Dragunas, A., and Nolte, V. (2014) Importance of sagittal kick symmetry for underwater dolphin kick performance. *Hum. Mov.*

- Sci., 33: 298-311.
- Collard, L., Gourmelin, E., and Schwob, V. (2013) The fifth stroke: the effect of learning the dolphin kick technique on swimming speed in 22 novice swimmers. *Journal of Swimming Research*, 21(1).
- Conceição, A., Silva, A.J., Barbosa, T., Karsai, I., and Louro, H. (2014) Neuromuscular Fatigue during 200 M Breaststroke. *J. Sports Sci. Med.*, 13(1): 200-210.
- Connaboy, C., Coleman, S., Moir, G., and Sanders, R. (2010) Measures of reliability in the kinematics of maximal undulatory underwater swimming. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 42(4): 762-770.
- Cram, J.R., Kasman, G., and S. Holtz, J. (1998) Introduction to surface electromyography. Aspen Publishers, pp. 237-383.
- Franklin, D.W., So, U., Kawato, M., and Milner, T.E. (2004) Impedance control balances stability with metabolically costly muscle activation. *J. Neurophysiol.*, 92: 3097-3105.
- Fujii, S., Kudo, K., Ohtsuki, T., and Oda, S. (2009) Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer. *Neurosci. Lett.*, 459(2): 69-73.
- Gavilán, A., Arellano, R., and Sanders, R. (2006) Underwater undulatory swimming: Study of frequency, amplitude and phase characteristics of the 'body wave'. *Biomechanics and medicine in swimming X. Portuguese Journal of Sport Sciences*, 6: 35-37.
- Hagood, S., Solomonow, M., Baratta, R., Zhou, B.H., and D'ambrosia, R. (1990) The effect of joint velocity on the contribution of the antagonist musculature to knee stiffness and laxity. *The American journal of sports medicine*, 18(2), 182-187.
- Heuer, H. (2007) Control of the dominant and non-dominant hand: exploitation and taming of nonmuscular forces. *Exp. Brain Res.*, 178(3): 363-373.
- Hochstein, S. and Blickhan, R. (2014) Body movement distribution with respect to swimmer's glide position in human underwater undulatory swimming. *Hum. Mov. Sci.*, 38: 305-318.
- Jammes, Y., Delliaux, S., Coulange, M., Jammes, C., Kipson, N., Brerro-Saby, C., and Bregeon, F. (2010) EMG changes in thigh and calf muscles in fin swimming exercise. *Int. J. Sports Med.*, 31(8): 548-554.
- Kobayashi, K., Kaneoka, K., Takagi, H., Sengoku, Y., and Takemura, M. (2015) Lumbar alignment and trunk muscle activity during the underwater streamline position in collegiate swimmers. *Journal of Swimming Research*, 23(1): 33-43.
- Lauer, J., Figueiredo, P., Vilas-Boas, J.P., Fernandes, R.J., and Rouard, A.H. (2013) Phase-dependence of elbow muscle coactivation in front crawl swimming. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 23(4): 820-825.
- Lyttle, A.D., Blanksby, B.A., Elliott, B.C., and Lloyd, D.G. (2000) Net forces during tethered simulation of underwater streamlined gliding and kicking techniques of the freestyle turn. *J. Sports Sci.*, 18(10): 801-807.
- Martens, J., Figueiredo, P., and Daly, D. (2014) Electromyography in the four competitive swimming strokes: a systematic review. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 25(2): 273-291.
- Milner, T.E. (2002) Adaptation to destabilizing dynamics by means of muscle cocontraction. *Exp. Brain Res.*, 143: 406-416.
- Nakashima, M. (2009) Simulation analysis of the effect of trunk undulation on swimming performance in underwater dolphin kick of human. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 4(1): 94-104.
- Oka, H., Okamoto, T., Yoshizawa, M., Tokuyama, H., and Kumamoto, M. (1979) Electromyography and cinematographic study of the flutter kick in infants and children. In: *Swimming III*. Univ. Park Press, pp. 167-172.
- Rohr, J.J. and Fish, F.E. (2004) Strouhal numbers and optimization of swimming by odontocete cetaceans. *J. Exp. Biol.*, 207: 633-1642.
- 杉本誠二・中島 求・市川 浩・野村武男 (2008) 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.
- 下門洋文・仙石泰雄・椿本昇三・高木英樹 (2014) 屋内プールおよび回流水槽におけるドルフィンキック泳のキネマティクスと競泳泳者が抱く身体感覚. *体育学研究*, 59: 237-249.
- Stirn, I., Jarm, T., Kapus, V., and Strojnik, V. (2011) Evaluation of muscle fatigue during 100-m front crawl. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111(1): 101-113.
- Takeda, T., Ichikawa, H., Takagi, H., and Tsubakimoto, S. (2009) Do differences in initial speed persist to the stroke phase in front-crawl swimming?. *J. Sports Sci.*, 27(13): 1449-1454.
- Ungerechts, B.E. (1982) A comparison of the move-

ments of the rear parts of dolphins and butterfly swimmers, In: Hollander, A.P. (ed.), Biomechanics and medicine in swimming. Human kinetics pub. pp. 215-221.

Von Loebbecke, A., Mittal, R., Fish, F., and Mark, R. (2009) A comparison of the kinematics of the dolphin kick in humans and cetaceans, Hum. Mov. Sci., 28: 99-112.

Winter, D.A. (1990) Biomechanics and motor control of human movement. John Wiley & Sons Inc.

(2015年12月18日受付)
(2016年3月11日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2016/4/4