

研究題目
クロール泳における巧みなキック動作のメカニズム解明

研究代表者名
松田 有司

目 次

要約	1
諸言	2
方法	3
結果	6
考察	11
謝辞	12
参考文献	12

研究題目

クロール泳における巧みなキック動作のメカニズム解明

松田	有司	(大阪体育大学)
山田	陽介	(京都府立医大)
牛田	泰志	(大阪教育大学)
小田	伸午	(関西大学人間健康学部)

要約

本研究は、一流競泳選手と競泳未経験者のクロール泳のキック動作中の下肢の筋活動パターンの違いを検討することを目的とした。被験者は、一流男子大学競泳選手 7 名(経験者)と競泳を競技として行ったことがない被験者 7 名(未経験者)であった。被験者は、回流水槽において、3 種類の泳速度で 20 秒間(全力泳(100%)、全力泳の 80 と 90%)クロール泳のキック動作を行った。キック動作中に被験者はビート板を用いて、上肢を動かすことなく試技を行った。被験筋は、右下肢の前脛骨筋、腓腹筋、大腿直筋、および大腿二頭筋とした。筋電図信号は、2000Hz のサンプリングレートで取得し、その後、平滑化と全波整流を施し、筋電図信号のオンセットとオフセットの判定を行った。データのオフセットとオンセット判定は、筋活動を行っていない時の筋電図信号の平均値 $\pm 4SD$ を閾値として行った。また、試技中泳者の側方よりビデオカメラで撮影を行い、LED を用いて筋電図データと同期を行った。得られたビデオ映像をデジタイズし、股関節、膝関節、および足関節の関節角度、ならびに角速度データを得た。なお、1 キックサイクルの開始を右足の外踝点が最も垂直方向に高い位置に来た地点と定義し、10 キックサイクルを分析の対象とした。すべての速度条件において、経験者は未経験者に比べて大腿直筋の筋活動のオンセット時間とオフセット時間が有意に早かった。この結果より、経験者と未経験者で大腿直筋の作用が異なる可能性が示唆された。大腿二頭筋と腓腹筋には、両群間で全ての速度条件において有意な差は認められなかった。また、大腿直筋と大腿二頭筋が同時に活動している期間(共収縮)が、すべての条件において経験者が未経験者よりも有意に短かった。すべての速度条件で、経験者が未経験者と比較して股関節最大屈曲角速度と股関節最大伸展角速度が高い値を示した。未経験者の大腿直筋の活動オンセット時間が遅く、共収縮時間が長い結果が、股関節角速度に関連していることが示唆された。大腿直筋、大腿二頭筋、および腓腹筋のオンセット、オフセット時間において、すべての速度条件間で有意な差は認められなかった。それゆえに、キック動作の強度が変化しても、泳者は同じ下肢筋活動パターンでキック動作を行っていることが示唆された。

代表者所属:大阪体育大学

〒590-0469 大阪府泉南郡朝代台 1-1

諸言

クロール泳中の泳者は、手と足を動かし泳いでいる。泳者が発揮する推進力のほとんどが、上肢で発揮されるため、上肢に関する研究は、非常に多く行われている (Payton et al., 1995, Cholet et al., 2000, Bergeret et al., 1995)。一方で、下肢動作に関する研究は、非常に少ない。しかしながら、クロール泳中のキック動作を行う事によって、競技記録が約 10% 増加することが報告されていることや (Deschodt et al., 1999)、キック動作は、上肢で発揮された下肢を沈める働きをするトルクを打ち消し、泳者の体を水平に保つ働きをすることが報告されている (Yanai 2001)。それゆえに、競技力を向上させるためには、巧みな下肢動作もまた必要不可欠であるといえる。

クロール泳のキック動作は、左右の足を交互に上下に動かす動作であり、屈曲と伸展動作が主な関節運動となる。最も遠位部の足セグメントの速度を大きくすることによって、大きな推進力を発揮することができ、その為には、下肢をムチ動作のように動かすことが必要である。Sanders ら (2007) は、泳者の下肢の角速度の最大値は大腿、下腿、足の順に現れることを報告しており、競泳経験者は未経験者に比べて角速度の最大値が現れる時間が遅くなることを報告している。キネマティクスデータは、いくつかの文献で報告されているが、筋電図分析はほとんど行われておらず、下肢の筋が近位から遠位の順に働いているかどうかは明らかではない。

短距離種目のクロール泳中の泳者のストローク頻度 (1 分間あたりのストローク回数) は、60 回を超える泳者もいることが報告されている (Craig et al., 1985)。また、短距離種目においては、1 ストロークで 6 回のキックを打つ (6 ビート) ことが一般的であり、以上のことよりキックは 1 分間で 360 回、1 秒では 6 回左右の足を上下に交互に動かしているということとなる。それゆえに、非常に素早い動作を行う事が必要であるといえる。このような、高い運動頻度を必要とする動作の例としては、指のタッピング動作や (Aoki et al., 2005)、ドラム動作が挙げられる (Fujii et al., 2006)。これらの動作においては、長年経験を積んだ被験者は、主動筋と拮抗筋の働きを交互に切り替えて、共収縮している時間が短いことを報告している (Fujii et al., 2009)。それゆえに、競泳中の下肢筋群においても、長年競技を経験している一流競泳選手は、主動筋と拮抗筋の共収縮の時間が短い可能性が考えられる。一方で、クロール泳の尺側手根屈筋と伸筋は、共収縮をし、関節のスティフネスを高めることによって、手部で発生した推進力に対抗していることが報告されている (caty et al., 2007)。したがって下肢においても、主動筋と拮抗筋を共収縮させて、関節スティフネスを高めるといった戦略をとっている可能性も考えられる。

本研究の目的は、一流競泳選手と競泳未経験者の下肢筋群の筋活動パターンの違いを検討することとした。

方法

被験者は、日本学生選手権出場者を含む大学競泳男性部員7名と、学校授業において水泳を行った経験はあるが、競技として水泳を行ったことがない競泳未経験者男性7名を対象とし、それぞれ経験者群と未経験者群と定義した。(経験者群: 20.0 ± 0.9 years, 178.1 ± 4.0 m height, 73.3 ± 6.0 kg weight, and 54.1 ± 1.0 s best time for the 100m front crawl、未経験者群: 21.4 ± 0.7 years, 173.5 ± 3.5 m height, 64.9 ± 5.8 kg weight)。なお、被験者には実験前に実験内容について十分に説明を行い、同意書に同意を得た。本研究の実施にあたっては、事前に京都大学大学院人間・環境学研究科倫理委員会の承認を得た。

試技

泳者は、キック板を用い、回流水槽においてキックの試技を行った。泳者は、手でキック板を持ち、顔は水上に上げ、いつでも呼吸を行ってよいと指示した。また、回流水槽の一定の位置を維持して泳ぐように指示を行った。泳者は異なる3種類の速度(80、90、100%)で泳いだ。

被験筋

筋電図は、電極サイズ 7×1 mm、電極間距離 12 mm のアクティブ電極(DL-141, 4assist 社製)を、右側の前脛骨筋、腓腹筋、大腿直筋、および大腿二頭筋の筋腹中央部に添付し、測定を行った。筋電図信号は、電極に内蔵されたプリアンプで増幅し Powerlab (ADInstruments) を介して、コンピューターにサンプリングレート 2000Hz で取り込んだ(図 1)。その後、10Hz から 1000Hz の bandpass フィルター処理を施したのち、全派整流を行った。

筋電図のオンセットとオフセット判定

大腿直筋と大腿二頭筋の筋電図データに対して 50Hz の Lowpass フィルターを施した(図 2)。筋電図信号のオンセットは閾値を超えた時点とした。閾値は、試技とは別に、筋活動を行っていない時の筋電図信号を記録し、その平均値 $\pm 4SD$ を 25ms 間超えた時点を筋電図信号のオンセットと判定した(Kudo and Ohtsuki, 1998)。また、オフセットは閾値を下回った時点として、上記と同様の方法を用いて、判定を行った。オンセットの時間とオフセットの時間を算出し、それぞれの時間が1キックサイクルに要した時間を100%とした時に、何%に位置するのかを算出した。なお、10キックサイクルを分析対象とした。

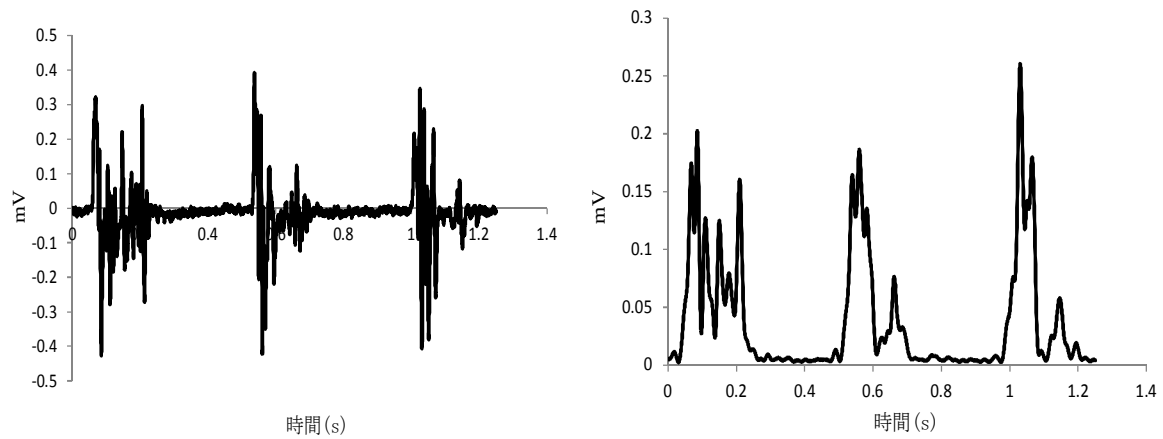


図1 筋電図信号の生データ(左)と平滑後のデータ(右)

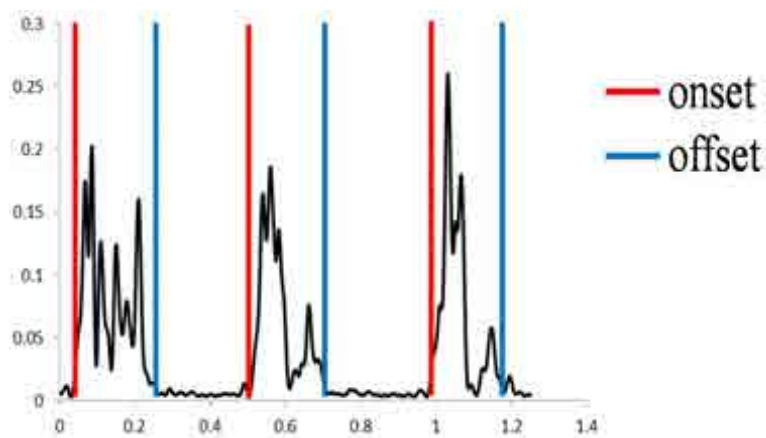


図2 筋電図信号のオンセットとオフセット判定

ビデオ分析

泳者の側方、回流水槽の外側より、1台のビデオカメラ(60Hz、HDR-CX270、Sony)を用いて泳者のキック動作を撮影した。なお、筋電図信号とビデオ映像はLEDを用いて同期を行った。その際、泳者の肋骨下端、大転子、膝関節中心、外踝、にマーカーを添付し、添付されたマーカーのデジタイズ(Frame DiasIV、DKH)を行った。得られた2次元座標に対して、10HzのLowpassフィルターを施し、平滑化を行った。中足指節関節—外踝—膝関節中心の成す角を足関節、外果—膝関節中心—大転子の成す角を膝関節、膝関節中心—大転子—肋骨下端の成す角を股関節と定義した。得られた各関節の角度データを微分することにより、角速度データを算出した。足関節は底屈、膝関節は屈曲、および股関節は伸展すれば角度が小さくなるように定義した。得られたキネマティクスデータで、外踝が最も高い位置に来た地点を1キックサイクルの開始と定義し、10キックサイクル分のキネマティクスデータを分析対象とした。

統計処理

データの平均値±標準偏差で示した。筋電図のオンセット時間、duration、共収縮時間、各関節の最大伸展速度、最大屈曲速度を従属変数とし、速度条件を被験者内因子、競泳の経験による群分けを被験者間因子として繰り返しのある二元配置分散分析を行った。交互作用が得られたときは、Tukey 法により競技レベル別に速度条件間を比較した。なお、すべての統計的有意水準は 5%未満とした。

結果

各筋のオンセット、オフセット時間、duration, および共収縮時間

図3、4、および5に80、90、および100%速度条件における、各筋の筋活動の典型例を示した。また、表1において、各筋のオンセットとオフセット時間、duration、および共収縮時間を算出した。大腿直筋におけるオンセット時間に関して、二元配置分散分析を行った結果、有意な交互作用は得られなかった。速度条件の主効果も認められなかったが、群間で有意な主効果が得られた。すべての条件において、経験者が未経験者に比べて大腿直筋のオンセット時間が有意に早かった。また、オフセット時間に関しても、二元配置分散分析を行った結果、有意な交互作用は得られず、群間のみに有意な主効果が認められた($p < 0.05$)。経験者群が未経験者群と比較して、大腿直筋のオフセット時間が有意に早い値を示した。

腓腹筋と大腿二頭筋のオンセットとオフセット時間に関して、二元配置分散分析を行った結果、有意な交互作用は認められず、また速度条件と群間においても有意な主効果が認められなかった。なお、腓腹筋の筋電図信号にノイズが混入していたため、4名ずつの被験者を分析の対象とした。

大腿直筋、大腿二頭筋、腓腹筋のdurationに関して、二元配置分散分析を行った結果、有意な交互作用は認められず、また速度条件と群間においても有意な主効果は認められなかった。

大腿直筋と大腿二頭筋の共収縮時間に関して、二元配置分散分析を行った結果、有意な交互作用は認められず、群間のみに有意な主効果が認められた。経験者群が未経験者群と比較して、有意に大腿直筋と大腿二頭筋の共収縮時間が短いことが明らかになった。

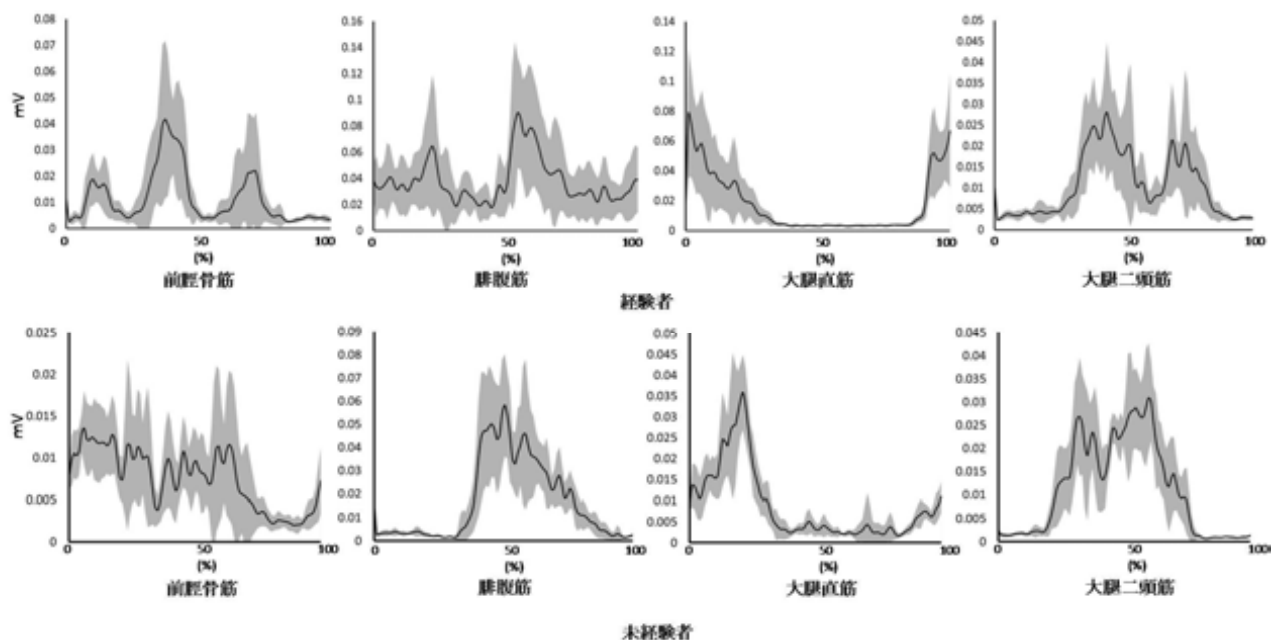


図3 80%条件における、経験者と未経験者の各筋の筋電図データ

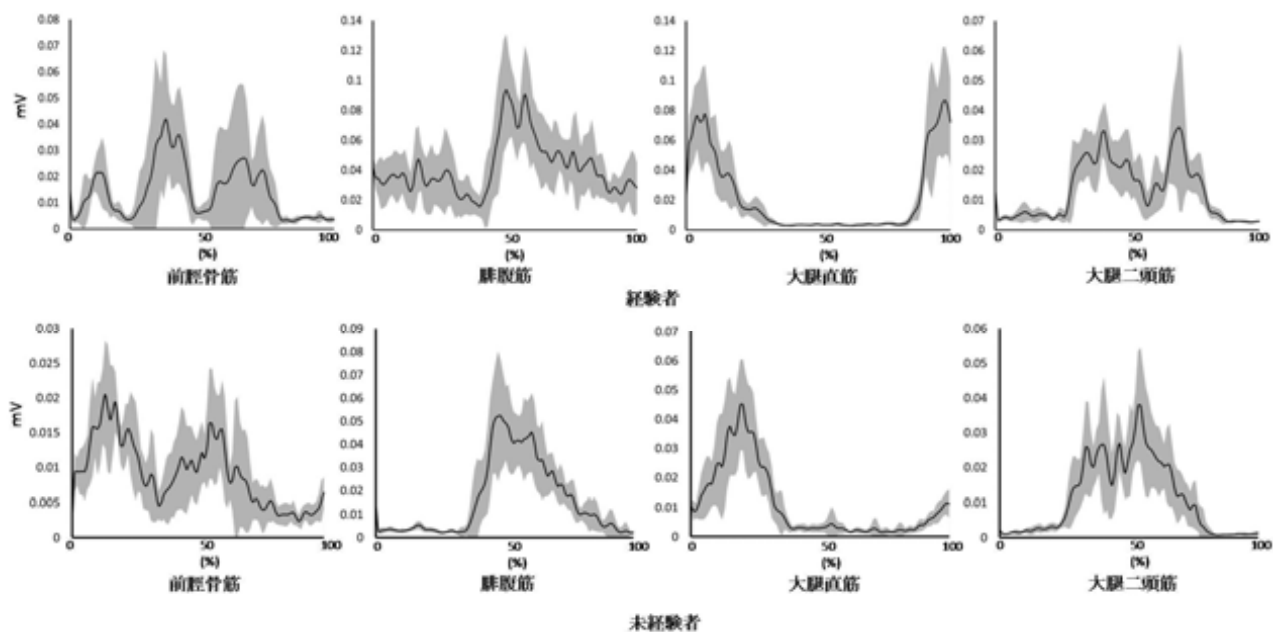


図4 90%における経験者と未経験者の各筋の筋電図データ

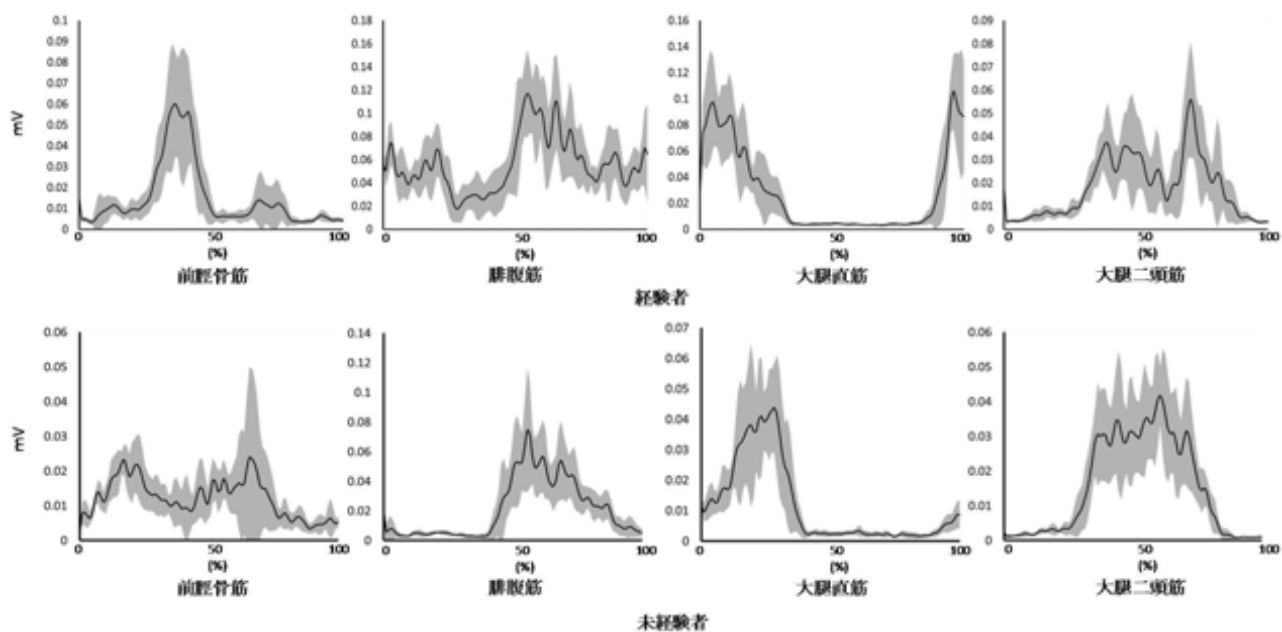


図5 100%条件における未経験者と経験者の各筋の筋電図活動

表1 大腿直筋、大腿二頭筋、および腓腹筋の筋活動onsetとoffset

			80%	90%	100%
大腿直筋	onset (%)	未経験者	96.63±3.98	93.25±4.11	94.01±5.56
		経験者	81.11±9.46	* 83.48±10.13	* 84.07±7.15 *
	offset (%)	未経験者	46.31±10.78	49.32±12.60	47.00±6.15
		経験者	24.69±10.17	* 32.76±4.31	* 30.65±5.53 *
	duration (%)	未経験者	49.67±9.3	56.08±9.15	53.07±6.63
		経験者	44.08±8.70	48.12±11.06	57.25±12.14
大腿二頭筋	onset (%)	未経験者	28.39±6.51	24.58±8.57	26.47±8.47
		経験者	21.30±12.50	31.66±8.40	31.41±9.58
	offset (%)	未経験者	86.08±8.27	85.33±7.28	87.12±7.72
		経験者	83.13±14.56	92.21±6.01	83.60±11.94
	duration (%)	未経験者	57.69±8.80	60.75±10.94	60.64±7.03
		経験者	61.83±25.84	60.55±9.51	52.18±19.52
腓腹筋	onset (%)	未経験者	43.21±11.06	49.64±2.52	48.32±11.60
		経験者	42.52±8.22	51.69±5.18	47.22±13.49
	offset (%)	未経験者	88.53±8.86	86.37±12.08	93.46±8.26
		経験者	77.30±10.80	82.44±14.55	78.15±15.40
	duration (%)	未経験者	43.16±21.44	38.19±6.77	45.15±18.98
		経験者	39.91±20.98	25.61±11.88	30.92±27.57
共収縮	(%)	未経験者	17.91±8.62	24.74±12.70	20.52±10.30
	(%)	経験者	12.22±9.51	* 4.66±3.27	* 6.93±6.56 *
キック時間	(s)	未経験者	0.50±0.97	0.47±0.78	0.36±0.17
	(s)	経験者	0.53±0.63	0.51±0.55	0.47±0.07

* p < 0.05 未経験者 VS 経験者

キネマティクスデータ

図6において、経験者と未経験者の関節角速度の典型例を示した。また、表2において、各関節の最大屈曲角速度と最大伸展角速度データを示した。股関節最大屈曲角速度と伸展角速度において二元配置分散分析を行った結果、有意な交互作用は認められなかった。群間に有意な主効果が認められ、経験者が未経験者よりも有意に高い値を示した。速度条件において、有意な主効果は認められなかった。

膝関節と足関節の最大屈曲角速度と伸展角速度において二元配置分散分析を行った結果、有意な交互作用は認められなかった。また、速度条件と群間においても有意な主効果は認められなかった。

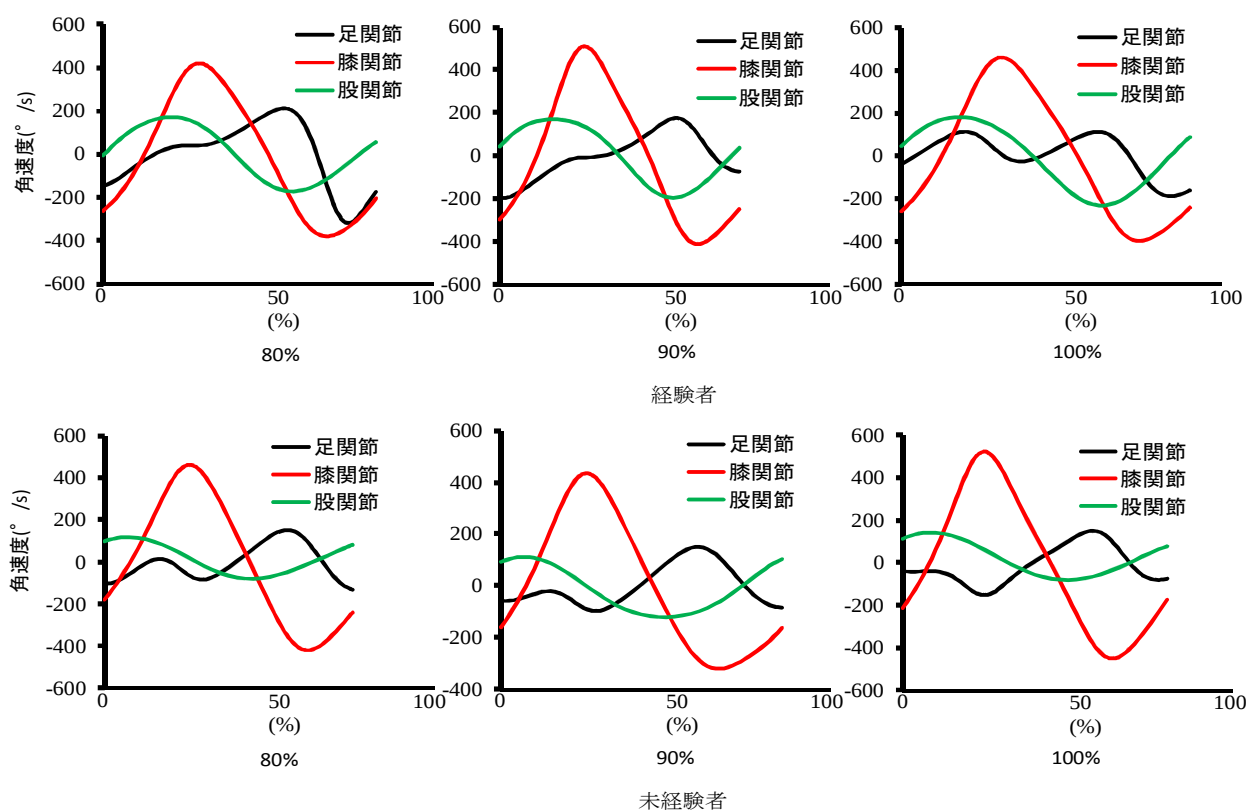


図6 各速度条件における経験者と未経験者の関節角速度

表2 下肢関節における最大角速度

	足関節背屈	足関節底屈	膝関節屈曲	膝関節伸展	股関節屈曲	股関節伸展
80%	未経験者(°/s) 159.3±70.6	138.4±47.0	339.0±80.9	389.4±100.5	104.4±20.7	113.6±23.6
	経験者(°/s) 202.1±53.8	156.8±36.1	392.5±33.6	453.6±46.1	140.2±30.4 *	155.6±30.7 *
90%	未経験者(°/s) 180.9±117.9	146.6±72.2	332.5±84.6	401.2±153.5	117.7±31.8	116.4±39.9
	経験者(°/s) 183.9±42.7	158.1±44.7	416.2±46.1	476.8±52.1	140.3±23.1 *	160.0±23.4 *
100%	未経験者(°/s) 135.3±48.8	109.4±43.9	324.7±120.3	354.6±132.5	86.6±24.1	92.6±29.6
	経験者(°/s) 177.0±62.4	140.2±51.7	377.8±42.0	428.5±65.4	125.3±86.6 *	135.4±44.7 *

* p<0.05 経験者 VS. 未経験者

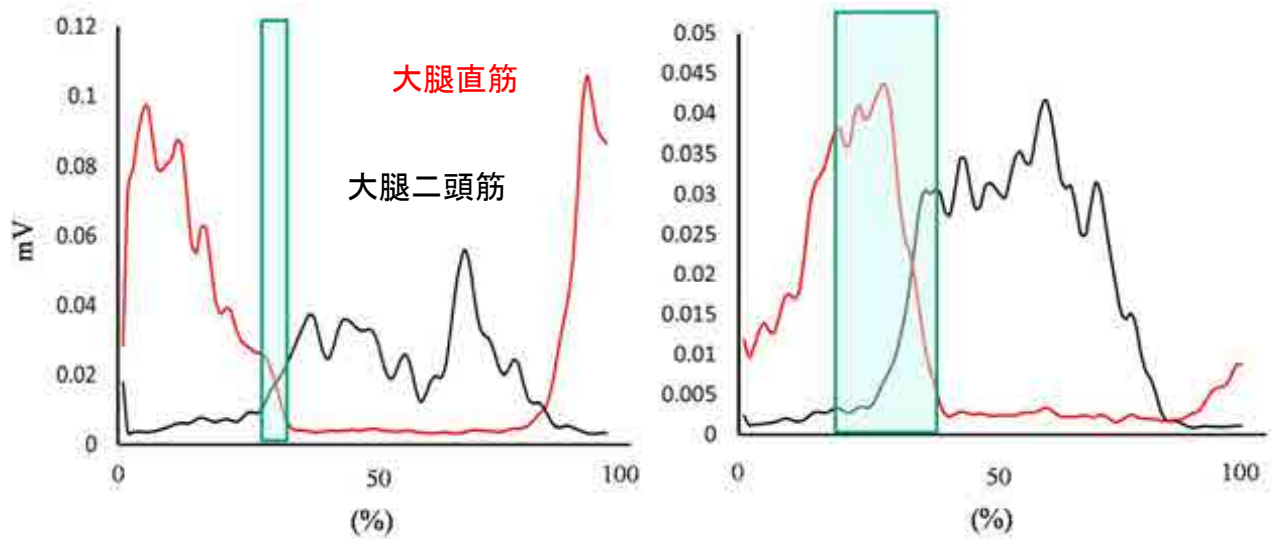


図7 大腿直筋と大腿二頭筋の共収縮の違い

左は経験者、右は未経験者の筋電図データを表している。

水色部分は共収縮が起きている期間を表している

考察

本研究は、クロール泳のキック動作の下肢筋活動を測定し、1)競泳経験者は未経験者に比べて、大腿直筋と大腿二頭筋の共収縮時間が短いこと、2)競泳経験者の大腿直筋活動のオンセットとオフセット時間が、未経験者と比較して早いこと、3)異なる速度条件において、下肢筋活動パターンは競泳経験者と競泳未経験者の両群で変化しないことが明らかになった。

下肢筋活動パターンは大腿直筋において、経験者が未経験者と比較して、筋活動オンセット時間が有意に早く、筋活動オフセット時間が有意に短かった。大腿直筋は2関節筋であり、その作用は股関節屈曲と膝関節伸展である。競泳経験者の大腿直筋の筋活動オンセットは、股関節が屈曲し始める地点に近く、また経験者の大腿直筋の筋電図信号が最大値を迎える地点は、股関節屈曲角速度が最大値に至る時点に近い。一方、未経験者の大腿直筋の筋活動オンセットは、膝関節伸展が始まっている地点であり、筋電図信号が最大値を迎える地点は、股関節屈曲角速度が最大値に至る時点に近い。それゆえに、大腿直筋は競泳経験者では股関節屈曲に、競泳未経験者では膝関節伸展に主に作用していると考えられ、大腿直筋の作用が競泳経験者と未経験者で異なることが示唆された。大腿二頭筋においては、活動のオンセットとオフセット時間に競技レベルで有意な差は認められなかった。下肢によって推進力を得られるのは、足を下方に打ち下ろす期間である、股関節屈曲と膝関節伸展動作時であり、それゆえ、大腿直筋に競技レベルで差が認められたのかもしれない。

本研究において、速度条件で大腿直筋、大腿二頭筋、および腓腹筋の筋活動パターンは変化しなかった。キック頻度は、速度条件が高くなるにつれて有意に高くなった。つまり、運動の難易度は高くなったと考えられる。しかしながら、関節角速度に条件間で有意な差は認められず、また各関節の動作の相対的な屈曲と伸展時間は変化しなかった。それゆえ、キックの速度を変化させる際に、相対的な運動パターンと筋活動パターンを変化させない戦略を泳者がとっていることが示唆された。

本研究において、大腿直筋と大腿二頭筋の共収縮時間がすべての速度条件において、競泳経験者が未経験者と比較して有意に短かった。主動筋と拮抗筋の共収縮は、生理学的な効率性や筋の疲労と関与していることが、自転車のペダルリング動作などで示されている(Osu et al., 2002, Lay et al., 2002)。また、世界一のタップ頻度を誇るドラマーはドラム未経験者と比較して、橈側手根屈筋と伸筋の共収縮時間が短いことが報告されている(Fujii et al., 2009)。競泳経験者は、長期のトレーニングにより主動筋と拮抗筋の活動を相反的に支配でき、クロール泳のキック動作に適した筋活動を行っている可能性が示唆された。また、大腿直筋と大腿二頭筋の共収縮が認められた期間は、大腿直筋活動がオフセット、大腿二頭筋がオンセットを迎える期間であった。それゆえに、未経験者が大腿直筋のオフセット時間が遅いことが、共収縮時間が長いことに関与していたといえる。

また、本研究において、未経験者が経験者と比較して、股関節屈曲と伸展角速度が有意に小さかったが、未経験者は共収縮を行う事によって関節のスティフネスを高めていたことが原因であるのかもしれない。

謝辞

本研究の実施に対し助成を賜りました、財団法人上月スポーツ・教育財団に深く感謝申し上げます。また、測定にご協力を賜りました皆様はこの場をお借りして感謝申し上げます。さらに、実験の実施にご協力・ご助言をいただきました福岡大学 田中宏暁氏、安藤創一氏、平野雅巳氏、大阪体育大学荒木雅信氏に心より感謝申し上げます。

参考文献

- Aoki, T., Furuya, S., Kinoshita, H. Finger-tapping ability in male and female pianists and nonmusician controls. *Motor Control* 9 (2005), 23–39.
- Berger, M.A.M., de Groot, G. and Hollander, A.P. Hydrodynamic drag and lift forces on human hand/arm models. *Journal of Biomechanics*, 28 (1995), 125–133.
- Caty, V., Aujouannet, Y., Hintzy, F., Bonifazi, M., Clarys, JP, and Rouard, AH. Wrist stabilisation and forearm muscle coactivation during freestyle swimming. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 17 (2007), 285–291.
- Craig, A.B., Skehan, P.L., Pawelczyk, J.A., Boomer, W.L. Velocity, stroke rate, and distance per stroke during elite swimming competition. *Med Sci Sports Exerc* 17 (1985) 625–634.
- Deschodt VJ, Arsac LM, Rouard AH. Relative contribution of arms and legs in humans to propulsion in 25 m sprint frontcrawl swimming. *Eur J Appl Physiol* 80 (1999) 192–199
- Fujii S, Oda S. Tapping speed asymmetry in drummers for single-hand tapping with a stick. *Percept Mot Skills* 103 (2006) 265–72.
- Fujii S, Kudo K, Ohtsuki T, Oda S. Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer. *Neurosci Lett* 459 (2009) 69–73.
- R Osu, D.W. Franklin, H. Kato, H. Gomi, K. Domen, T. Yoshioka, M. Kawato, Short- and long-term changes in joint co-contraction associated with motor learning as revealed from surface EMG, *J. Neurophysiol.* 88 (2002) 991–1004.
- Kudo K, Ohtsuki T. Functional modification of agonist-antagonist electromyographic activity for rapid movement inhibition. *Exp Brain Res* 122 (1998) 23–30
- Payton, C.J. and Blett, R.M. Estimating propulsive forces in swimming from three-dimensional kinematic data.

Journal of Sports Sciences 13(1995) 447± 454.

B.S. Lay, W.A. Sparrow, K.M. Hughes, N.J. O'Dwyer, Practice effects on coordination and control, metabolic energy expenditure, and muscle activation, Hum. Mov. Sci 21 (2002) 807–830.

Sanders RH. Kinematics, coordination, variability, and biological noise in the prone flutter kick at different levels of a “learn-to-swim” programme. J Sports Sci 25 (2007) 213-227.

Yanai T. Rotational effect of buoyancy in front crawl: does it really cause the legs to sink? J Biomechanics 34 (2001) 235–243