水泳のバイオメカニクス研究における 表面筋電図の活用

山川 啓介 (Keisuke Kobayashi YAMAKAWA)

日本女子体育大学

(abstract)

Electromyography has been used for half a century as a method for evaluating muscle activity during swimming. In swimming research, surface electromyography is mainly measured, and from the data, it is possible to know which muscles at what timing and how much are active during swimming motions. In some previous studies, surface electromyography was also used to evaluate muscle coordination and muscle fatigue. In recent years, with the technological evolution of surface electromyography system, it has become much easier than before to measure muscle activity during swimming. Therefore, some recent studies have attempted muscle synergy analysis using data obtained by measuring multiple muscles. As the future prospect, it is expected that electromyography studies combined with other analytical methods, the studies focusing on swimming styles other than front crawl, and the ones analyzing the effects of trainings on muscle activity will be reported.

Key words: 水泳, バイオメカニクス, 筋活動, 筋電図, 文献レビュー

1. はじめに

スポーツバイオメカニクス研究において、筋電図 (Electromyography, EMG) は運動中の筋活動を評価する手法として用いられている。水泳では、1964年のIkai et al.⁵⁾の研究に始まり、現在でも毎年数本の研究論文が国内外誌で出版されている。近年では、防水仕様かつ計測データを記録するデータロガーを内蔵したワイヤレス表面筋電計が使用されるようになり、水中環境でのEMG計測は従来に比べて簡便になってきている。しかしながら、2000年以降に出版された学術論文数は1980年台や1990年台と比べて少ないことが報告されている¹¹⁾。そこで本稿では、水泳EMG研究のさらなる発展のために、これまでの文献をレビューしながらその特性を整理するとともに、近年の水泳のバイオメカニクス研究におけるEMGの活用事例について記す。

2. 水泳中のEMGから得られる情報

EMGとは、筋収縮に伴う筋電位を視覚化したものである。運動中の筋電位を導出する手法にはいくつかの種類があり、電位を導出する電極の種類によってEMGから得られる情報が変わってくる。EMGの電極には、表面電極、針電極、ワイヤー電極などがあり、水泳研究では非侵襲的な表面電極を使用した表面筋電図 (Surface Electromyography, sEMG) が計測されることが多い。

sEMGでは、表面電極を体表に貼付することで筋線維から発生した活動電位を検知する。そのため、sEMGではその特性に伴う計測上の限界が存在する。まず、EMGは筋収縮に伴う活動電位を視覚化する手法であるため、EMGから直接的に筋力や筋の形態・組成を評価することはできない。また、sEMGで計測されたデータは、動員される運動単位数、発火頻度、電極貼付位置、皮膚抵抗などの影響を受けるため、絶対値データを対象者間や筋間で直接的に比較することもできない。そのため、対象

者間や異なる筋間でデータを比較する場合には、等尺性最大筋力 (Maximum Voluntary Contraction, MVC) 法や最大ピーク法といったデータの正規化 (標準) 化を行う必要がある。さらに、sEMG では体表に電極を貼付するため、浅層に別の筋が存在する深層筋の活動を単独で評価することは難しい (他筋の活動が EMG に混入することをクロストークと呼ぶ)。以上のように、sEMG データからでは評価が難しい事柄が存在するため、その特性を十分に理解した上で sEMG のデータを扱っていかねばならない。

次に、sEMG データから得られる情報について整理していく。水泳中の EMG を世界で最初に報告した Ikai et al.⁵⁾ の研究では、1) どの筋が動作中に動員されるか、2) どのタイミングで筋が活動するか、3) どの程度筋が活動するか、といった情報が EMG のデータから得られると述べられている。

上記についての理解を深めるために、平泳ぎキック中の下肢の筋活動パターンの例を Fig. 1 に示した。Fig. 1 の例では、各筋の正規化した EMG の包絡線が 20%MVC を超えた時点を各筋の活動開始時点と定義している。従って、例示した 4 筋は平泳ぎキック中に動員された筋であると言える。このように EMG データからその泳動作に関

与する筋を特定することができる。また、EMG データから条件等の違いによって動員される筋が変化するか否かについても調査することが可能である。例えば、Ikuta et al.⁶⁾ は、20 人の男子大学競泳選手を対象に 200 m 自由形を想定した 50 m クロール泳×4 本を実施した結果、最終ラップ (4 本目) において大胸筋の活動度合が増加したことを報告し、疲労時のクロールでは代償的に大胸筋が動員されることを指摘している。一方で、Fig. 1 の例のように活動開始時点や活動ピーク時点などを分析することにより、筋の活動タイミングや活動順番についても記述することもできる。例えば、小林ほか⁹⁾ は、8 名の女子大学競泳選手を対象に 15 m 全力水中ドルフィンキック泳を実施した結果、体幹の腹直筋と脊柱起立筋がキック中に交互に活動していたことを報告し、下肢による蹴り下げ動作と蹴り上げ動作の反動を相殺するような筋活動を体幹で行っていると指摘している。このように EMG と動作情報を合わせて分析することにより、泳動作中に生じた筋活動の役割について言及することができる。さらに、Fig. 1 の例では MVC 法によるデータの正規化を行っているため、異なる筋間の活動度合の違いについて言及できる。同様に、データの正規化を行うことで熟度の違いや性差などの対象者間比較でも筋活動度合の違いにつ

Fig. 1. An example of the muscle activity patterns during a breaststroke kick (Yamakawa et al., 2021 unpublished data).

The arrows indicate the start of the muscle activity above 20% of maximum voluntary contraction, and the black dots indicate the peak of the muscle activity during the kick cycle.

いて記述することができる。なお、電極を貼り替えずに計測した同一筋の活動度合を比較する場合には必ずしも正規化を行う必要はない。また、筋の活動度合は動作様式や力発揮の変化に関連して変化する。例えば、Jammes et al.⁷⁾は、健康成人男女7人を対象にビーフィン泳によるキック頻度漸増テストを実施した結果、測定した全ての筋においてキック頻度、推進力、酸素摂取量の増加に伴ってEMGの筋放電量が増加したことを報告した。また、内側広筋と腓腹筋に比べ、前脛骨筋は活動増加の度合が少なかったことから、前脛骨筋の上記の変数への貢献度合は低いことを指摘している。このように水泳中の筋活動度合は、ストローク頻度や推進力の変化とよく対応していることが明らかになっている。

EMGとは別に筋骨格シミュレーションは泳動作中の筋活動を推定できるものの、EMGとシミュレーションの結果は完全には一致しない。Nakashima et al.¹⁴⁾は、2名の大学競泳選手の平泳ぎ中のキネマティクスデータとsEMGデータを計測し、測定したsEMGと筋骨格シミュレーションから推定された筋活動パターンの比較を行っている。その結果、筋骨格シミュレーションは筋活動パターンとピークタイミングを十分に推定できたものの、過剰な筋活動や二関節筋の筋活動は推定できなかったことを報告している。この理由は、特定の動作に対応する最も効率の良い筋活動を筋骨格シミュレーションが提示するためである。従って、泳動作中の過剰な筋活動や二関節筋の筋活動を分析する場合にはsEMGで分析するほうが有用であると考えられる。

また、いくつかの水泳研究では、特定の関節周りの屈筋と伸筋の共活動に着目した分析を行っている。一般的に、関節を素早く曲げ伸ばす場合には、その屈筋と伸筋が交互に活動する (Fig. 2)。Matsuda et al.¹²⁾は、10名の競泳選手と10名のレクリエーションレベル泳者を対象に回流水槽でフラッターキック泳を実施した結果、キック中の股関節を伸展させながら膝関節が伸展する局面において競泳選手の大腿直筋と大腿二頭筋の共活動の度合が低かったことを報告している。この結果について、下肢の素早い切り返し動作が求められる局面において競泳選手は不必要な筋活動を生じさせていないことが指摘されている。一方、関節運動を静止する場合や、外力に対して関節角度を保つ場合にはその屈筋と伸筋が共活動する (Fig. 2)。例えば、Laure et al.¹⁰⁾は、10名の国際レベルの

男子競泳選手を対象に200 m 全力クロール泳を実施した結果、リカバリーの後半から手部の入水までを含む水上局面後半において上腕二頭筋と上腕三頭筋の共活動度合が高まっていたことを報告している。この結果について、入水前に手部速度を調整するためであると考察されている。このように主働筋と拮抗筋 (屈筋と伸筋) の共活動に関する分析は、運動中の筋間の協調性 (コーディネーション) の評価にも応用できる。

さらに、筋疲労に伴ってEMGの周波数が低下するという特性から、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) を用いた周波数解析によって筋疲労を評価することも可能である。例えば、Stirn et al.¹⁶⁾は、11名の競泳選手を対象に100 m 全力クロール泳を実施し、レース序盤と終盤のEMGデータから筋疲労の評価を行った結果、すべての筋においてEMGの平均周波数が低下していたことを報告している。この研究では、ストローク中に筋活動が生じた局面のデータを抽出し、FFTでパワースペクトルを導出してEMGの低周波数化をストローク単位で評価している。同様の手法を用いて200 m クロール泳中の筋疲労を評価した研究⁴⁾や、200 m 平泳ぎ泳中の筋疲労を評価した研究²⁾も報告されている。しかしながら、EMGの信号は動作様式に影響を受けるため、これらの手法ではレース終盤で泳動作が大きく変化していないことを前提としていることに注意する必要がある。

3. 近年の水泳 EMG 研究の動向

2010年頃からの研究では、防水仕様かつデータロガーを内蔵したワイヤレス筋電計が使用されるようになった。従来の筋電計は防水仕様ではなかったため、陸上に設置したテレメータと泳者に貼付した電極を長いリード線を介して連結させていた。そのため、従来の計測手法では、泳者の動作を大きく阻害し、モーションアーチファクト (動作に伴って生じるノイズ) も増大していた。筋電計のワイヤレス化はこれらの問題解決に貢献したと考えられる。さらに、水中sEMG計測では電極部分への防水処理が必要不可欠である²⁰⁾。従来の手法ではリード線部分に配慮しながら完全な防水処理をしなければならなかったが、筋電計のワイヤレス化に伴い、防水処理も機器全体を防水テープで覆うだけになった (Fig. 3)。

このような水中EMG計測の簡便化に伴い、現在では複数の筋からsEMGを同時に計測することが容易になっ

Fig. 2. A pattern diagram about a reciprocal activation (the upper figure) and a co-activation (the lower figure) between a flexor and an extensor in a joint.

Fig. 3. Waterproofing methodology for the wireless device

てきている。近年では、複数の筋の EMG データから筋シナジー解析を行った水泳研究も報告されている^{13, 19)}。筋シナジーとは、筋の協調構造を意味しており、端的に言えば多数筋の同時活動のことである。筋シナジー解析では、非負値行列因数分解などの数理学的手法を用いて複数の sEMG データから筋シナジーを抽出する。抽出する筋シナジー数は元データの再現度合を評価して決

定し、各筋シナジーの結果は筋の協調性を示す“Muscle weighting”と Muscle weighting の活動のタイミングを決定する“Activation coefficient”の2つの要素で構成される (Fig. 4)。Vaz et al.¹⁹⁾ は、8 名の競泳選手と 8 名の初心者を対象に 25 m 平泳ぎ中の sEMG を測定して筋シナジー解析を行った。その結果、両者の上肢と下肢の Muscle weighting は類似していたものの、初心者の上肢における筋シナジーの Activation coefficient は競泳選手よりも遅延していた。このことから、著者らは平泳ぎにおける泳技能の差は筋の協調性よりも上肢と下肢の筋活動のタイミングに表れると指摘している。また、Matsuura et al.¹³⁾ は 9 名の男子競泳選手を対象に水中ドルフィンキック中の筋シナジー解析を実施した結果、アップキックからダウンキックに移行する局面で機能する大腿直筋、内腹斜筋、腹直筋を含む筋シナジー、ダウンキック中に機能する多裂筋、脊柱起立筋、前脛骨筋を含む筋シナジー、アップキック中に機能する大腿二頭筋と腓腹筋を含む筋シナジーの 3 シナジーが抽出されたことを報告している。また、Matsuura et al.¹³⁾ は抽出された筋シナジーと骨盤の前後傾運動の結果から、体幹の筋活動による骨盤の前後傾

Fig. 4. An example of the muscle synergies analysis using the surface electromyography data during underwater dolphin kicking (Yamakawa et al., 2019 unpublished data).

The surface electromyography data were measured from Rectus Femoris (RF), Vastus Lateralis (VL), Adductor longus (AD), Gluteus Maximus (Gmax), Gluteus Medius (Gmed), Biceps femoris (BF), Tibialis Anterior (TA), Gastrocnemius (GAS). The data of the one cycle which is from the start of downward kicking to the end of upward kicking were used for the muscle synergy analysis.

運動と下肢動作の協調性が重要であることを指摘している。このように筋シナジー解析を用いることで、筋の協調構造という新しい観点で筋活動パターンを記述することができる。今回紹介した文献はいずれも8筋のsEMGから筋シナジー解析を実行しているため、今後はさらに多くの筋からEMGを収集することで、水泳における筋の協調構造をより詳細に明らかにできると考えられる。

また、様々な計測機器の発展に伴って、従来よりもsEMG計測と他の分析手法を併用した実験が容易になってきている。いくつかの水泳研究では、sEMG計測と同時に三次元の動作分析を実施しており、筋活動に対応した関節運動を前額面や横断面の動作を考慮しながら分析している^{1), 3)}。さらに、近年では水中用モーションキャプチャシステムも利用されるようになってきている¹⁵⁾。そのため、今後はこれまで十分に議論されてこなかった筋活動と三次元的な関節運動（特に内転／外転や内旋／外旋）との関連について調査されることが期待される。また、手部や足部で生じた流体力を推定する圧力分布測定では泳者が発揮した推進力の時系列変化を示すことが

できる^{8), 17), 18)}。そのため、今後の研究では圧力分布測定を応用することでEMGと推進力発揮の関係性についてより深く議論されることが考えられる。

4. おわりに

水泳EMG研究の歴史は長いものの、研究すべき課題は未だ多く存在している。例えば、先行研究の多くはクロール泳を対象としており、他泳法に関する研究は少ない。そのため、他泳法中の筋活動に関する知見を増やすことが今後の課題である。一方で、クロール泳の泳技能も日々進化しているため、同時代のトップ選手におけるストローク動作中の筋活動についても随時調査する必要がある。また、水泳研究ではEMGを使用した縦断的な調査やEMGバイオフィードバックに関する研究が少なく、トレーニングによる筋活動パターンの変化についても取り上げるべき課題であると考えられる。最後に、本稿ではEMGデータの信号処理については解説しなかった。しかしながら、実際にEMGデータを取り扱う上ではEMGの信号処理はデータ解釈に関わる重要な点であ

るため、適切な信号処理の手法についても十分な理解が必要である。

5. 謝辞

本稿執筆にあたり、議論を通じて洞察的な意見をいただいた成田健造氏（鹿屋体育大学）、川合英介氏（国際武道大学）、酒井紳氏（東京女子体育大学）、佐藤大典氏（びわこ成蹊スポーツ大学）に感謝を表します。

参考文献

- 1) Caty, V., Aujouannet, Y., Hintzy, F., Bonifazi, M., Clarys, J. P., and Rouard, A. H. (2007) Wrist stabilisation and forearm muscle coactivation during freestyle swimming. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 17 (3) : 285-291.
- 2) Conceição, A., Silva, A. J., Barbosa, T., Karsai, I., and Louro, H. (2014) Neuromuscular fatigue during 200 m breaststroke. *Journal of Sports Science and Medicine*. 13 (1) : 200-210.
- 3) De Jesus, K., De Jesus, K., Medeiros, A. I., Gonçalves, P., Figueiredo, P., Fernandes, R. J., and Vilas-Boas, J. P. (2015) Neuromuscular activity of upper and lower limbs during two backstroke swimming start variants. *Journal of Sports Science and Medicine*. 14 (3) : 591-601.
- 4) Figueiredo, P., Rouard, A., Vilas-Boas, J. P., and Fernandes, R. J. (2013) Upper-and lower-limb muscular fatigue during the 200-m front crawl. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 38 (7) : 716-724.
- 5) Ikai, M., Ishii, K., and Miyashita, M. (1964) An electromyographic study of swimming. *Japan Journal of Physical Education, Health and Sport Sciences*. 7 (4) : 47-54.
- 6) Ikuta, Y., Matsuda, Y., Yamada, Y., Kida, N., Oda, S., and Moritani, T. (2012) Relationship between decreased swimming velocity and muscle activity during 200-m front crawl. *European Journal of Applied Physiology*. 112 (9) : 3417-3429.
- 7) 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. *International Journal of Sports Medicine*. 31 (8) : 548-554.
- 8) Kawai, E., Tsunokawa, T., Sakaue, H., and Takagi, H. (2020) Propulsive forces on water polo players' feet from eggbeater kicking estimated by pressure distribution analysis. *Sports Biomechanics*. 1-15.
- 9) 小林啓介, 下門洋文, 高木英樹, 椿本昇三, 仙石泰雄 (2016) エリート女性競泳選手の水中ドルフィンキックにおける体幹, 大腿, 下腿の筋活動様式. *体育学研究*. 61 (1) : 185-195.
- 10) 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. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 23 (4) : 820-825.
- 11) Martens, J., Figueiredo, P., and Daly, D. (2015) Electromyography in the four competitive swimming strokes: A systematic review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 25 (2) : 273-291.
- 12) Matsuda, Y., Hirano, M., Yamada, Y., Ikuta, Y., Nomura, T., Tanaka, H., and Oda, S. (2016) Lower muscle co-contraction in flutter kicking for competitive swimmers. *Human Movement Science*. 45: 40-52.
- 13) Matsuura, Y., Matsunaga, N., Iizuka, S., Akuzawa, H., and Kaneoka, K. (2020) Muscle synergy of the underwater undulatory swimming in elite male swimmers. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2: 62
- 14) Nakashima, M., Hasegawa, T., Kamiya, S., and Takagi, H. (2013) Musculoskeletal simulation of the breaststroke. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*. 8 (2) : 152-163.
- 15) Olstad, B. H., Vaz, J. R., Zinner, C., Cabri, J. M., and Kjendlie, P. L. (2017) Muscle coordination, activation and kinematics of world-class and elite breaststroke swimmers during submaximal and maximal efforts. *Journal of Sports Sciences*. 35 (11) : 1107-1117.
- 16) Stirn, I., Jarm, T., Kapus, V., and Strojnik, V. (2011) Evaluation of muscle fatigue during 100-m front crawl. *European Journal of Applied Physiology*. 111 (1) : 101-113.
- 17) Takagi, H., Nakashima, M., Ozaki, T., and Matsuuchi, K. (2014) Unsteady hydrodynamic forces acting on a robotic arm and its flow field: Application to the crawl stroke. *Journal of Biomechanics*. 47 (6) : 1401-1408.
- 18) Tsunokawa, T., Nakashima, M., and Takagi, H. (2015) Use of pressure distribution analysis to estimate fluid forces around a foot during breaststroke kicking. *Sports Engineering*. 18 (3) : 149-156.
- 19) Vaz, J. R., Olstad, B. H., Cabri, J., Kjendlie, P. L., Pezarat-Correia, P., and Hug, F. (2016) Muscle coordination during breaststroke swimming: comparison between elite swimmers and beginners. *Journal of Sports Sciences*. 34 (20) : 1941-1948.
- 20) Veneziano, W. H., da Rocha, A. F., Gonçalves, C. A., Pena, A. G., Carmo, J. C., Nascimento, F. A. O., and Rainoldi, A. (2006) Confounding factors in water EMG recordings: an approach to a definitive standard. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 44 (4) : 348-351.