

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：32671

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19519

研究課題名（和文）バタフライ泳で求められる全身のコーディネーションに関わる神経制御の解明

研究課題名（英文）Analysis of the neural control of the whole-body coordination required for butterfly stroke swimming.

研究代表者

山川 啓介（Yamakawa, Keisuke）

日本女子体育大学・体育学部・准教授

研究者番号：60783785

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、バタフライの泳動作に関わる神経制御を解明することにより、熟練者の巧みな泳技能を筋活動の観点から明らかにし、効果的な泳法指導やトレーニング方法に関する具体的な示唆を得ることであった。主な結果として、熟練者と非熟練者のバタフライ泳中の神経制御の特徴について筋シナジー解析を行ったところ、熟練者はキックによる効果的な加速を生み出すために、敢えて独立したシナジーを用いて下肢のダウンキック（けり下げ動作）を行っている可能性が示された。この結果を踏まえて、熟練者のようなバタフライを行うためには適切なタイミングでキックを行うトレーニングが重要であることが考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の学術的意義として、熟練者と非熟練者のバタフライ泳に関わる泳技能の違いについて、動作中の筋活動を単純に比較するだけでなく、近年発展してきた筋シナジー解析の手法を用いて「筋間の協調性」という新しい観点から比較することができた。また社会的意義として、本研究課題では上肢、体幹、下肢の全身のコーディネーションに関する知見が得られたため、我々の結果は全身運動である水泳技能の理解を深めることに貢献したと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research project was to elucidate the neural control involved in butterfly stroke swimming, to clarify the characteristics of skilled swimmers in terms of muscular coordination, and to obtain specific suggestions for effective coaching and training methods. We investigated the characteristics of neural control for skilled and unskilled swimmers during butterfly stroke swimming using the muscle synergy analysis method. The main result suggested that skilled swimmers may dare to down kick with independent synergies to produce effective acceleration by kicking. Based on this finding, it was suggested that training to perform appropriately timed kicks is important to perform butterfly stroke swimming like skilled swimmers.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：水泳 運動制御 バイオメカニクス 表面筋電図 筋シナジー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

研究開始当初の背景

バタフライは、クロール、背泳ぎ、平泳ぎと並ぶ近代 4 泳法の一つであるが、その泳動作の“難しさ”ゆえに、他種目と比べて泳法習得に多くの時間を有することが指摘されている(川上ほか, 2018)。そのため、バタフライに必要な泳技能を正しく理解するとともに、より効果的な指導法やトレーニング方法についても検討することが重要であると言える。しかしながら、バタフライ泳中の筋活動に関する先行研究は少なく(Martens et al., 2015)、バタフライの泳動作が「どのような神経制御で生じているのか？」は明らかになっていない。筋電図を用いた水泳運動中の筋活動の定量化は、筋間の共活動および筋コーディネーションに関する情報を提示し、効果的に推進力を発揮する巧みな泳技能の解明に貢献できる。さらに、近年報告されている筋シナジー解析は、筋電図データから複雑な全身運動を構成する神経制御を明かにできる。そのため、バタフライ泳中の全身の筋電図データに基づく筋シナジー解析を行うことにより、「バタフライがどのような神経制御で行われているか？」を解明し、適切かつ具体的な指導方法やトレーニング方法の考案に役立てることができると考えられる。

研究の目的

本研究課題の目的は、バタフライの泳動作に関わる神経制御を解明することにより、熟練者の巧みな泳技能を筋活動の観点から明らかにし、効果的な泳法指導やトレーニング方法に関する具体的な示唆を得ることであった。

研究の方法

本研究では、上記の目的を達成するためにこれまで 3 つの実験的検証が行われた。

(1) 熟練者と非熟練者におけるバタフライ中の筋コーディネーションの違いの解明

- ・対象：大学水泳部に所属する女性競泳選手 8 名
レクリエーションレベルで水泳を日常的に行っている女性大学生 8 名
- ・方法：25 m 全力バタフライ泳中の上肢、体幹、下肢の 12 筋の表面筋電図を計測し、測定データから筋シナジー解析を実施し、両群の筋シナジー解析の結果を比較した。

(2) バタフライの泳速度調整に関わる筋コーディネーションの変化の解明

- ・対象：大学水泳部に所属する女性競泳選手 9 名。
- ・方法：25 m バタフライを 50 m, 100 m, 200 m レースを想定したペースで行い、その際の上肢、体幹、下肢の 12 筋の表面筋電図を計測した。測定データから筋シナジー解析を実施して試技間の筋シナジーの変化を調査した。

(3) 呼吸動作の有無がバタフライ中の筋コーディネーションに与える影響の解明

- ・対象：大学水泳部に所属する女性競泳選手 9 名。
- ・方法：25 m バタフライを毎ストローク毎に呼吸を行いながら全力で泳ぐ試技と 2 ストロークに 1 回は呼吸動作をしないストローク動作を行う試技を行い、その際の上肢、体幹、下肢の 12 筋の表面筋電図を計測した。二つの条件下での呼吸動作を含むストローク動作中の筋電図データと呼吸動作をしないストローク動作中の筋電図データを用いて筋シナジー解析を実施し、各条件下での筋シナジーの変化を調査した。

以上の実験結果を踏まえて、バタフライ泳における効果的な泳法指導やトレーニング方法について検討した。

研究成果

(1) バタフライ中の筋活動に関するミニレビュー論文

本研究課題における副産物として、学術雑誌「水泳水中運動科学」にミニレビュー論文 2 編を単著で執筆し、掲載した。

- ・ 山川啓介(2021). 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. 水泳水中運動科学, 24(1), 1-6.
- ・ 山川啓介 (2022). バタフライ中の筋活動に関するレビュー. 水泳水中運動科学, 25(1), 13-17.

(2) 熟練者と非熟練者におけるバタフライ泳中の筋シナジーの違い

方法 1) の実験では、熟練者と非熟練者における全力バタフライ泳中の表面筋電図データから非負値行列因子分解のアルゴリズムを用いて筋シナジーの抽出を行った。図 1 は、計算された筋

シナジーから表面筋電図データを再構築した場合の再現精度を示す VAF について抽出シナジー数を変動させた場合の結果を示した。この結果から、両群の VAF の平均値が 90% を越えた最小のシナジー数は 4 であったため、バタフライ泳中の筋シナジー数は熟練者と非熟練者の両方で 4 に決定された。

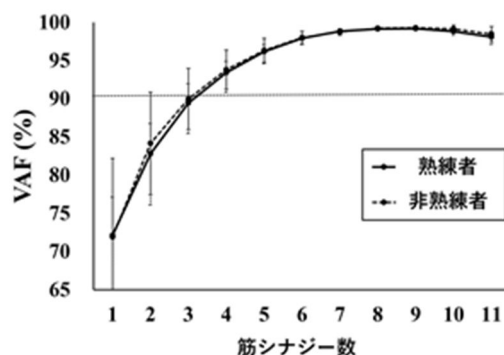


図1 各シナジー数におけるVAFの結果

次に 図2 から図5 に熟練者と非熟練者における各シナジーの貢献度 (Muscle synergy vectors) と各筋シナジーの活性タイミング (Activation coefficient) の結果を示した。

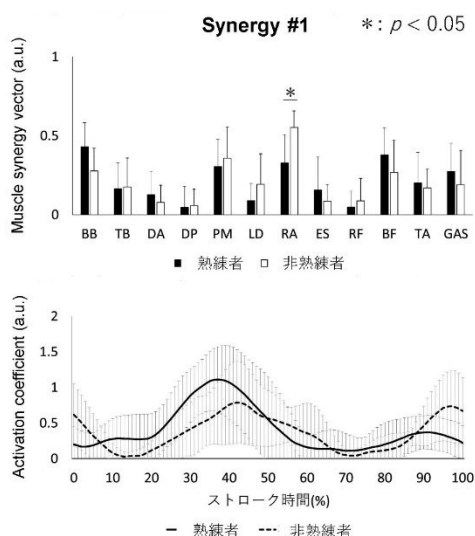


図2 シナジー#1における各筋の貢献度と活性タイミング

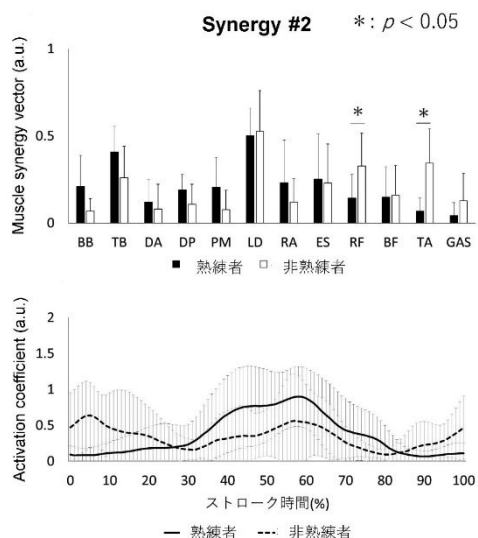


図3 シナジー#2における各筋の貢献度と活性タイミング

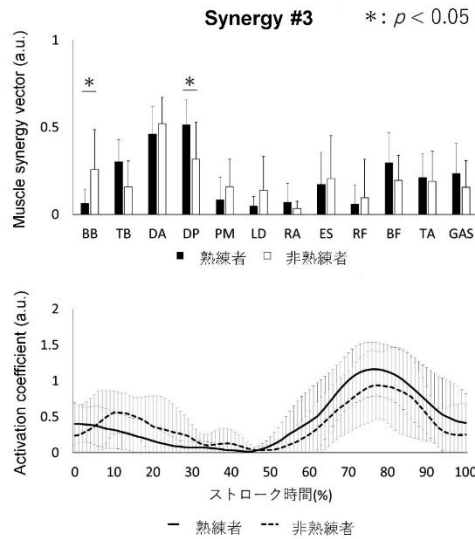


図4 シナジー#3における各筋の貢献度と活性タイミング

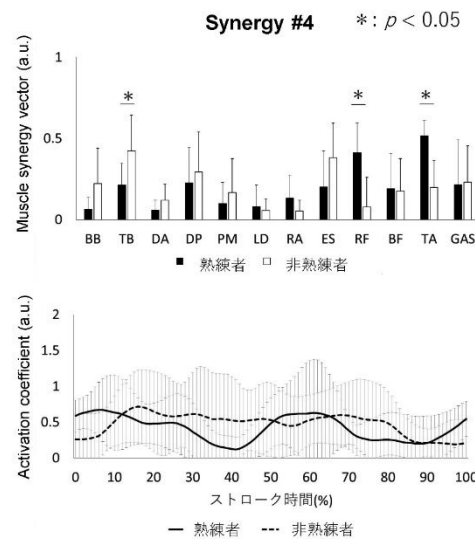


図5 シナジー#4における各筋の貢献度と活性タイミング

熟練者のシナジー#1は、ストローク周期中の25 - 49%で活性しており、BB, PM, RA, BFの貢献度が高いシナジーであった。このシナジーの活性タイミングはプル局面と対応しており、主にプル動作に関与するシナジーであったと推察された。シナジー#2は、ストローク周期中の36 - 69%で活性し、TB, LDの貢献度が高いシナジーであった。このシナジーの活性タイミングはプル局面からプッシュ局面に対応しており、主にプル動作とプッシュ動作に関与するシナジーであったと推察された。シナジー#3は、ストローク周期中の64 - 92%に活性し、TB, DA, DPの貢献度が高いシナジーであった。このシナジーの活性タイミングはリカバリー局面に対応しており、リカバリー動作に関与するシナジーであったと推察された。シナジー#4は0 - 30%, 48 - 70%および95 - 100%で活性し、RFとTAの貢献度が高いシナジーであった。このシナジーの活性タイミングはキックの蹴り下げ動作を行う局面と対応しており、キックの蹴り下げ動作に関わるシナジーであったと推察された。

非熟練者のシナジー#1は、ストローク周期中の0 - 3%, 30 - 58%および89 - 100%で活性し、BB, PM, RA, BFの貢献度が高いシナジーであった。このシナジーの活性タイミングは熟練者と類似していたため、主にプル動作に関与するシナジーであると推察された。シナジー#2は、ストローク周期中の0 - 21%, 41 - 68%, 97 - 100%で活性し、LD, RF, TAの貢献度が高いシナジーであった。このシナジーの活性タイミングはキャッチ局面とプッシュ局面に対応しており、上肢のキャッチ動作やプッシュ動作に関与するシナジーであると考えられた。また、シナジー#2はキックの蹴り下げ動作を行う局面とも対応しており、キックの蹴り下げ動作にも関与するシナジーであると推察された。シナジー#3は、ストローク周期中の8 - 16%, 65 - 91%で活性し、

BB, DA, DP の貢献度が高いシナジーであった。このシナジーの活性タイミングはプッシュ局面終盤からリカバリー局面に対応しており、リカバリー動作にかけて活性するシナジーであると推察された。非熟練者のシナジー#4 は、両要素において標準偏差の値が大きく、個人間で一般的な機能を示さなかった。

群間での比較において、熟練者と非熟練者におけるシナジー#1 から#3 は主に上肢動作に関わるシナジーであったが、シナジー#2 では下肢の蹴り下げ動作に関与する筋も含まれており、非熟練者はキャッチ局面とプッシュ局面において上肢と下肢の筋を同調させて制御していることが示唆された。対照的に、熟練者におけるシナジー#4 は下肢キック動作にのみ関与するシナジーであったことが示唆されたため、熟練者は下肢の蹴り下げ動作を独立した筋シナジーで制御していたと言える。また、この熟練者におけるシナジー#4 の活性タイミングはストローク周期中の加速タイミングと一致していたことから、熟練者におけるシナジー#4 の活性はバタフライ中のうねり動作による足先の加速を促進し、キックによる推進力の増大に寄与していた可能性が考えられた。そのため、熟練者のようなバタフライを行う上で、上肢のストローク動作や全身のうねり動作に合わせてキックを行うことが重要であることが考えられた。

これらの研究成果は、日本・水泳水中運動学会 2023 年次大会の口頭発表部門において研究奨励賞を受賞し、Journal of Applied Biomechanics に掲載予定である（受理済み）。

(3) 今後の予定

方法2)と3)の実験結果については、現在分析中である。これらの実験から得られた知見は、方法1)の研究成果と同様、学術論文にまとめ、国際的な学術雑誌に投稿することを予定している。また、上記の研究と関連した研究成果として、100 m バタフライ泳中の疲労に関連した筋シナジーの変化に関する事例研究を国際学会 ISBS 2024 conference で発表する予定である。最終的に、これらの知見を統合し、バタフライ泳に関する効果的な泳法指導やトレーニング方法についての提案し、指導書としてまとめて情報発信したい。

<引用・参考文献>

- ・ 川上光宣, 中瀬古哲, 永橋京 (2018) 学校体育における水泳指導に関する基礎的研究. ジュニアスポーツ教育学科紀要, 6, 9-23.
- ・ Martens, J., Figueiredo, P., & Daly, D. (2015). Electromyography in the four competitive swimming strokes: A systematic review. Journal of electromyography and kinesiology, 25(2), 273-291.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Keisuke K. Yamakawa, Rena Nishiwaki, Yasuo Sengoku	4. 巻 Ahead of Print
2. 論文標題 Muscle Coordination During Maximal Butterfly Stroke Swimming: Comparison Between Competitive and Recreational Swimmers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Applied Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1 10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1123/jab.2023-0186	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山川啓介	4. 巻 25
2. 論文標題 バタフライ中の筋活動に関するレビュー	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 水泳水中運動科学	6. 最初と最後の頁 13 17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2479/swex.25.13	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山川啓介	4. 巻 24(1)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 水泳水中運動科学	6. 最初と最後の頁 1,6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2479/swex.24.1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西脇 怜奈, 山川 啓介, 仙石 泰雄
2. 発表標題 熟練者と非熟練者における全力バタフライ泳中のコーディネーションの比較～キネマティクスと筋活動の違いに着目して～
3. 学会等名 日本水泳・水中運動学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山川 啓介, 西脇 怜奈, 仙石 泰雄
2. 発表標題 筋シナジーに基づくバタフライ泳中の運動制御の特徴：熟練度が異なる泳者の比較
3. 学会等名 日本水泳・水中運動学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	仙石 泰雄 (Sengoku Yasuo)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------