

# 神経制御に基づく水中ドルフィンキックの 巧みな運動制御構造の解明

筑波大学 山川啓介

## Research on The Structure of Segmental Coordination Based on Neural Control During Underwater Dolphin Kicking

by

Keisuke Kobayashi-Yamakawa  
*Institute of Health and Sport Sciences,  
University of Tsukuba*

### ABSTRACT

Kinematic-muscle synergy analysis is a method capable of estimating the functional role of muscle synergies in real space. This study aimed to clarify the spatial role of muscle synergies involved in the underwater dolphin kick for competitive swimmers using this method. Eight female competitive swimmers participated in the study. They performed 15-m underwater dolphin kick swims with maximum effort. During the trials, kinematic and electromyography data were collected. A mixed factor decomposition algorithm was used to extract the kinematic-muscle synergies involved in one cycle of the movement from both the electromyography and segment angle data. The results revealed that four participants controlled their movements using three synergies, while the remaining four used four synergies. Four synergies were classified as a result of grouping the extracted synergies: Synergy 1, active during the first half of the downkick; Synergy 2, active during the transition from the downkick to the upkick; Synergy 3, active during the middle of the upkick; and Synergy 4, active during the latter half of the upkick and involved in core movements. Therefore, it was suggested that the underwater dolphin kick movement in competitive swimmers is primarily

achieved through these four coordinated actions related to the muscle synergies.

## キーワード

競泳, 運動制御, 動作解析, 筋電図, 筋シナジー

## Keyword

Competitive swimming, Motor control, Motion analysis, Electromyography, Muscle synergy

## 要旨

近年提案されている運動学—筋シナジー解析は、筋シナジーの実空間における機能的役割を推定できる手法である。本研究の目的は、この手法を用いて、競泳選手の水中ドルフィンキックに関与する筋シナジーの空間的な役割を明らかにすることであった。本研究には女性競泳選手8名が参加し、15 mの全力水中ドルフィンキック泳を実施した。その際、運動学的データおよび筋電図データを収集した。混合因子分解アルゴリズムを用いて、筋電図とセグメント角度データの双方から1周期の動作に関与する運動学—筋シナジーを抽出した。その結果、4名は3つのシナジー、残る4名は4つのシナジーを用いて動作を制御していたことが明らかになった。抽出シナジーのグループ化の結果、ダウンキックの前半に活性するSynergy 1, ダウンキックからアップキックの切り替えしに活性するSynergy 2, アップキックの中盤に活性するSynergy 3, アップキックの後半の体幹動作に関与するSynergy 4の4つのシナジーに分類できた。そのため、競泳選手における水中ドルフィンキックの動作は、主に筋シナジーに関連する4種類の協調動作によって達成していることが示唆された。

## 緒言

水泳は、歩行や走動作と同様に周期的な運動であり、ヒトにおける水中でのロコモーションの一デサントスポーツ科学 Vol. 47

形態である。支持点のない水中環境においては、バランスを維持しながら、移動時に生じる水の抵抗を最小限に抑えるために、身体は水平姿勢を取る必要がある。その中で、上肢によるストローク動作と下肢によるキック動作によって水に運動量を与え、推進力を生み出す。このように、水泳は全身を巧みに連携させる運動であり、複雑な運動制御が求められる。

近年、スポーツ動作における運動制御構造を明らかにする手法の一つとして、筋シナジー解析が用いられている<sup>1)</sup>。筋シナジーとは、筋活動のまとまりを指し、筋シナジー解析は、ヒトの運動がシナジー単位で制御されているというベルンシュタインの仮説<sup>2)</sup>に基づいた手法である。この仮説では、多数の筋の活動を少数のシナジーに集約することで、運動制御の次元が簡略化されると考えられている。水泳に関する先行研究では、平泳ぎ<sup>3)</sup>、水中ドルフィンキック<sup>4)</sup>、バタフライ<sup>5, 6)</sup>、自由形および背泳ぎ<sup>7)</sup>において筋シナジー解析が実施されており、いずれも2から4種類の筋シナジーが泳動作に関与していたことが報告されている。これらの知見は、水泳動作が中枢神経系から発せられる少数の運動指令によって制御されている可能性を示唆している。

一方、従来の筋シナジー解析には、方法論上のいくつかの制約がある。例えば、筋電図(EMG)データのみを用いて筋シナジーを抽出するため、得られたシナジーと関節運動との対応関係が不明瞭であり、抽出されたシナジーの実空間上の機能

的役割を正確に特定することはできていなかった。この課題に対する解決策として、近年、混合因子分解 (MMF) アルゴリズムを用いた新たな解析手法が提案されている<sup>8, 9)</sup>。この手法では、EMGデータと関節角度などのキネマティクスデータの双方をアルゴリズムに入力し、データの特徴に応じた次元削減処理を通して、運動学一筋シナジーを抽出する。この運動学一筋シナジー解析では、筋シナジーに対応する運動学シナジー (キネマティクス由来のシナジー) も同時に得られるため、抽出された筋シナジーが空間的にどのような役割を担っているかを明確にすることができる。そのため、本手法を応用することで、泳動作に関与する筋シナジーの実空間上の機能的役割を特定できると考えられる。

水中ドルフィンキックは、競泳においてスタート後やターン後に用いられる潜水泳法であり、飛び込みや壁蹴りで得られた高い速度を維持する手段として広く活用されている。この泳法は、左右対称の下肢によるキック動作のみで推進するという比較的シンプルな運動構造を持つため、多くの水泳研究で取り上げられている。そこで本研究では、運動学一筋シナジー解析を用いて、競泳選手の水中ドルフィンキックに関わる筋シナジーの空間的な役割を明らかにすることを目的とした。この研究目的を達成することで、水中ドルフィンキックの動作がどのような神経制御によって達成されているかを明確にし、技術改善に向けた適切な指導やトレーニング方法の立案に役立つ情報を提示できると考えた。

## 1. 研究方法

### 1. 1 対象者

本研究には、全国大会出場から入賞レベルの女性競泳選手8名 (年齢:  $20.6 \pm 1.8$  歳, 身長:  $1.63 \pm 0.06$  m, 体重:  $55.5 \pm 5.2$  kg) が参加した。対象者は同一の大学水泳部に所属し、週6日、1日あたり

5000 - 12000 mの水泳トレーニングを行っていた。対象者の専門種目は、自由形2名、背泳ぎ1名、バタフライ3名、個人メドレー1名であった。全ての対象者は実験の方法、目的、リスク、安全対策について事前に説明を受け、書面にて研究への参加に同意した。なお、本研究は筑波大学の研究倫理委員会の承認を得て実施された。

### 1. 2 実験試技

実験は屋内50mプールで実施された。対象者は30分間の任意のウォームアップを行った後、実験試技として最大努力での15m水中ドルフィンキック泳を3回行った。試技のスタートは水中プッシュオフスタートを採用し、水深0.5 - 1.0 m付近で可能な限り水平に移動すると指示した。また、疲労の影響を考慮して、試技間は最低でも5分以上の休息を挟んで実施した。

### 1. 3 データ収集

試技中の映像データを収集するために、2台のカメラ (High speed 1394, Q'sfix社製) をプール側面の水中窓越しに設置して撮影した (図1a)。カメラのサンプリングレートは100 fps、シャッター速度は1/250 secに設定した。映像の画角は、スタート位置から8.0 - 14.0 mの範囲に調整した。

また、試技中の動作情報を収集するために、対象者の身体右側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) に自発光LEDマーカー (煌, Nobby Tech社製) を取り付けた。

試技中のEMGデータは、防水型無線表面筋電計 (DL-5000, S&ME社製) を用いて、サンプリング周波数1000 Hzで計測した。筋電位の導出はディスプレイ電極を用いた双極導出法で行い、電極間距離は2 cmに設定した。本研究の被験筋は、右側の腹直筋 (RA)、脊柱起立筋 (ES)、大腿直筋

(RF), 大腿二頭筋 (BF), 前脛骨筋 (TA), 腓腹筋内側頭 (GAS) の6筋とした。また, Kobayashi et al.<sup>10)</sup>の方法に従い, 電極部分の防水処理を行った。撮影した映像とEMGデータの時間同期のために, LED同期装置 (PTS-110, Q'sfix社製) を用いて試技の開始タイミングが映像と筋電計の両方に記録されるように設定した。

#### 1. 4 データ分析

撮影した映像データから, 画像解析ソフトウェア (Tracker, オープンソース) を用いて各身体分析点をデジタル化し, Direct Linear Transformation法を用いて二次元実座標値を得た。算出した実座標データは, 遮断周波数6 Hzのローパスフィルターを通して平滑化した。

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直前まで」と定義した。さらに, キック中の局面分けとして, 「足先が鉛直方向の最高点に達してから最低点に達する直前まで」をダウンキック (DK) 局面とし, 「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直前まで」をアップキック (UK) 局面と定義した。キック頻度 (KF) は, キック1周期に要した時間の逆数と定義した。けり幅 (KA) 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た。平均泳速度 (SV) は, キック1周期における身体合成重心位置の水

平移動速度の平均値と定義した。なお, 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<sup>11)</sup>を用いて計算した。また, 運動学-筋シナジー解析のために, 上脛のセグメント角度 ( $A_{UTrunk}$ ), 下脛のセグメント角度 ( $A_{LTrunk}$ ), 大腿のセグメント角度 ( $A_{Thigh}$ ), 下腿のセグメント角度 ( $A_{Leg}$ ), 足部のセグメント角度 ( $A_{Foot}$ ) を算出した (図1b)。

収集したEMGデータは, 通過周波数帯20 - 500 Hzのバンドパスフィルターを用いてフィルタリングした。フィルタリングしたEMGデータは整流化し, 遮断周波数12 Hzの位相ずれのない4次のローパスフィルターを通して平滑化した。

#### 1. 5 運動学-筋シナジー解析

運動学-筋シナジー解析は, 先行研究<sup>9)</sup>で提案されたMMFのアルゴリズムを用いてMATLABソフトウェア (Version 2024b, Math works社製) 上で実施した。本研究では, 6筋のEMGデータと5部位のセグメント角度データを用いて, 入力データセットを作成した。なお, EMGとセグメント角度の振幅は周期中の最大値を用いて正規化した。先行研究<sup>8)</sup>を参考に, EMG信号と関節運動の間のタイムラグは50 msに設定し, 周期の開始時点の50 ms前から1周期が終了するまでのデータセットを解析に用いた。入力データセット行列 (E) は, 変数 (m) × 時間数 (p) の行列とし, MMFアルゴリズムは式1が成立するように設計

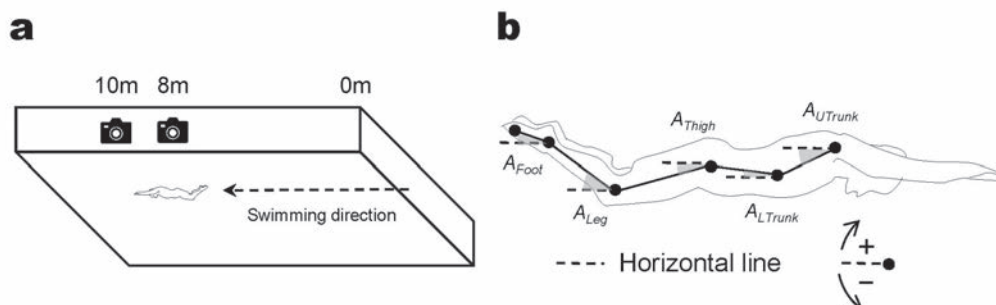


図1 実験設定図 (a) とセグメント角度の定義 (b)

された。

$$E \approx W \cdot C \quad (式1)$$

ここで、Wはm×シナジー数(s)の行列、Cはs×pの行列になる。Wはシナジーに含まれる筋とセグメント運動の組み合わせを反映する空間的要素、Cはシナジーが活性したタイミングを反映する時間的要素である。先行研究<sup>8)</sup>に従い、sはWとCを用いた入力データの再構築精度を反映する決定係数( $R^2$ )を用いて決定した。本研究では、 $R^2$ が0.8を超える最小のsを分析周期のシナジー数とした。また、抽出したシナジーは、対象者間のWのコサイン類似度(CS)が0.60を超えるシナジーを同一グループのシナジーとして分類し、グループ化できなかったシナジーは対象者固有のシナジーとした。また、シナジーの活性タイミングの識別には信号の半値幅を採用した。

## 2. 結果

表1に、対象者における分析したキック3周期のシナジー数の結果を示した。本研究では、各対象者において分析した3周期の内、2周期以上で確認されたシナジー数を対象者のシナジー数として判断した。さらに、決定したシナジー数を有するキック周期において $R^2$ が最も高かった周期のデータをその後の分析に用いた。

表2に、分析対象となったキック周期のキネマティクス変数の結果を示した。図2に、シナジー数が3であったSwimmer Eとシナジー数が4で

表1 各対象者における分析周期のシナジー数の結果  
網掛けはその後の分析対象として用いた周期を示す

	Number of synergies		
	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3
Swimmer A	4	4	4
Swimmer B	4	4	4
Swimmer C	4	4	4
Swimmer D	3	3	4
Swimmer E	3	3	3
Swimmer F	3	3	4
Swimmer G	4	4	4
Swimmer H	3	3	4
Mean	3.5	3.5	3.9
SD	0.5	0.5	0.4

あったSwimmer Bにおける分析周期のスティックピクチャ(図2a)、EMGデータ(図2b)、セグメント角度データ(図2c)の例を示した。分析対象となったキック周期から抽出されたシナジーをグループ化した結果、4つのシナジーグループ(Synergy 1, Synergy 2, Synergy 3, Synergy 4)と3つの対象者固有シナジーに分類できた(表3)。各グループ内における対象者間のCSの平均値は、Synergy 1で0.90(±0.05)、Synergy 2で0.73(±0.20)、Synergy 3で0.70(±0.19)、Synergy 4で0.70(±0.23)であり、各シナジーグループの集団内類似度は中程度以上であった。グループ化されたシナジーと対象者固有シナジーのWとCの結果を図3と図4に示した

## 3. 考察

本研究の目的は、運動学-筋シナジー解析を用いて、競泳選手の水中ドルフィンキックに関与す

表2 分析周期におけるキネマティクス変数の結果

	SV (m/s)	KF (Hz)	Variables		
			KA (m)	DK phase (%)	UK phase (%)
Swimmer A	1.43	2.13	0.50	46.8	53.2
Swimmer B	1.31	1.92	0.50	48.1	51.9
Swimmer C	1.37	1.64	0.55	45.9	54.1
Swimmer D	1.40	2.22	0.46	46.7	53.3
Swimmer E	1.22	2.04	0.47	51.0	49.0
Swimmer F	1.36	2.08	0.44	52.1	47.9
Swimmer G	1.33	2.04	0.38	44.9	55.1
Swimmer H	1.45	2.00	0.51	46.0	54.0
Mean	1.36	2.01	0.48	47.7	52.3
SD	0.08	0.17	0.05	2.6	2.6

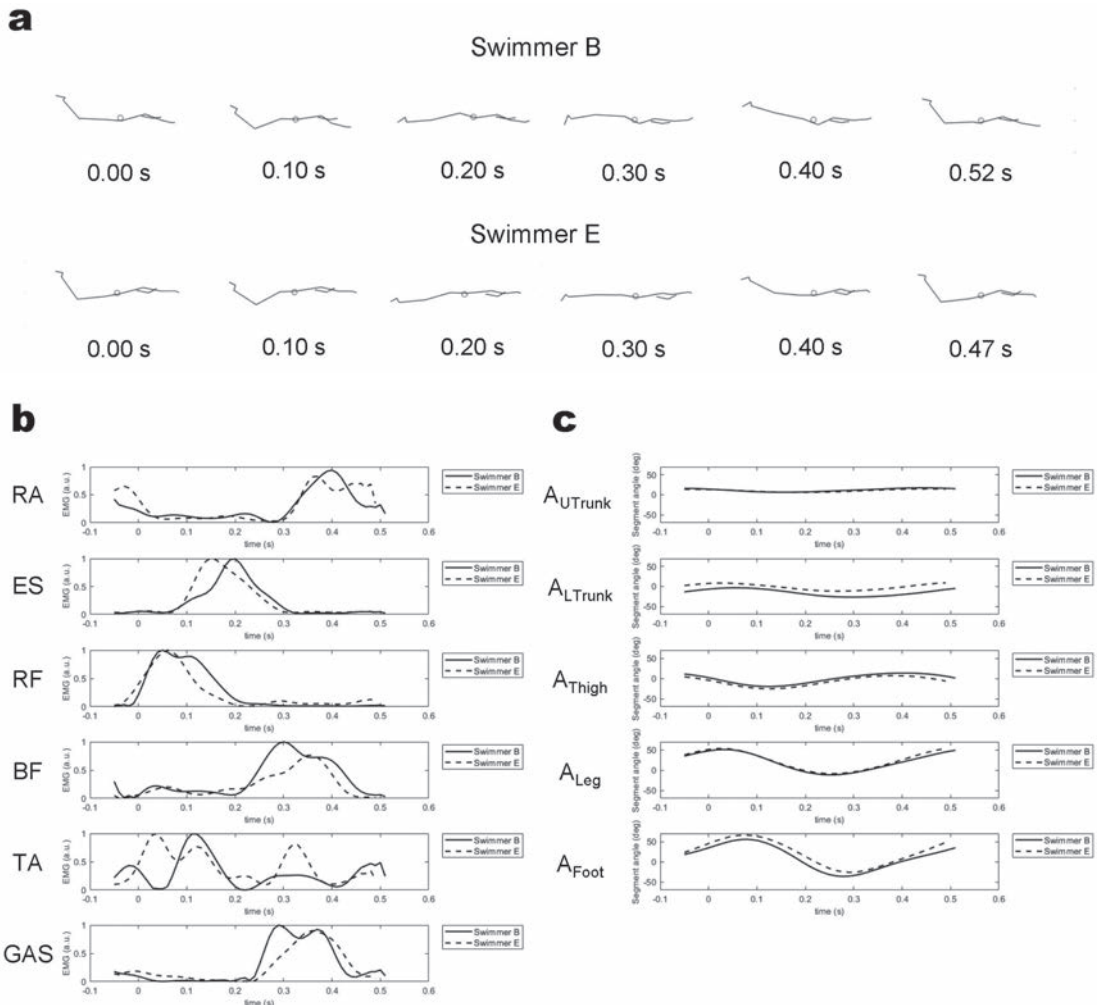


図2 対象者Bと対象者Eにおける分析周期のスティックピクチャ (a), 振幅を正規化した筋電図の包絡線 (b), セグメント角度の時系列データ (c).

表3 分析周期における抽出された運動学一筋シナジীরグループ化の結果

Swimmer A	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3, Synergy4
Swimmer B	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3, Synergy4
Swimmer C	Synergy2, Synergy 4, Subject-specific 1, Subject-specific 2
Swimmer D	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3
Swimmer E	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3
Swimmer F	Synergy1, Synergy 2, Synergy 4
Swimmer G	Synergy 2, Synergy 3, Synergy4, Subject-specific 3
Swimmer H	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3

る筋シナジীর空間的な役割を明らかにすることであった。その結果、水中ドルフィンキックの運動制御には、3または4種類の運動学一筋シナジীর

が関与している可能性が示され、対象者間で共通する4つのシナジীরグループ化が確認された。

Matsuura et al.<sup>4)</sup> は、エリート競泳選手を対象に水中ドルフィンキック中の8筋のEMGデータから筋シナジীর解析を行い、その結果、ダウンキックに関与するシナジীর、ダウンキックからアップキックへの切り返しに関与するシナジীর、アップキックに関与するシナジীর3つの筋シナジীর抽出されたことを報告している。本研究は、被験筋やシナジীর抽出方法において先行研究と異なる点があるものの、水中ドルフィンキックの動作

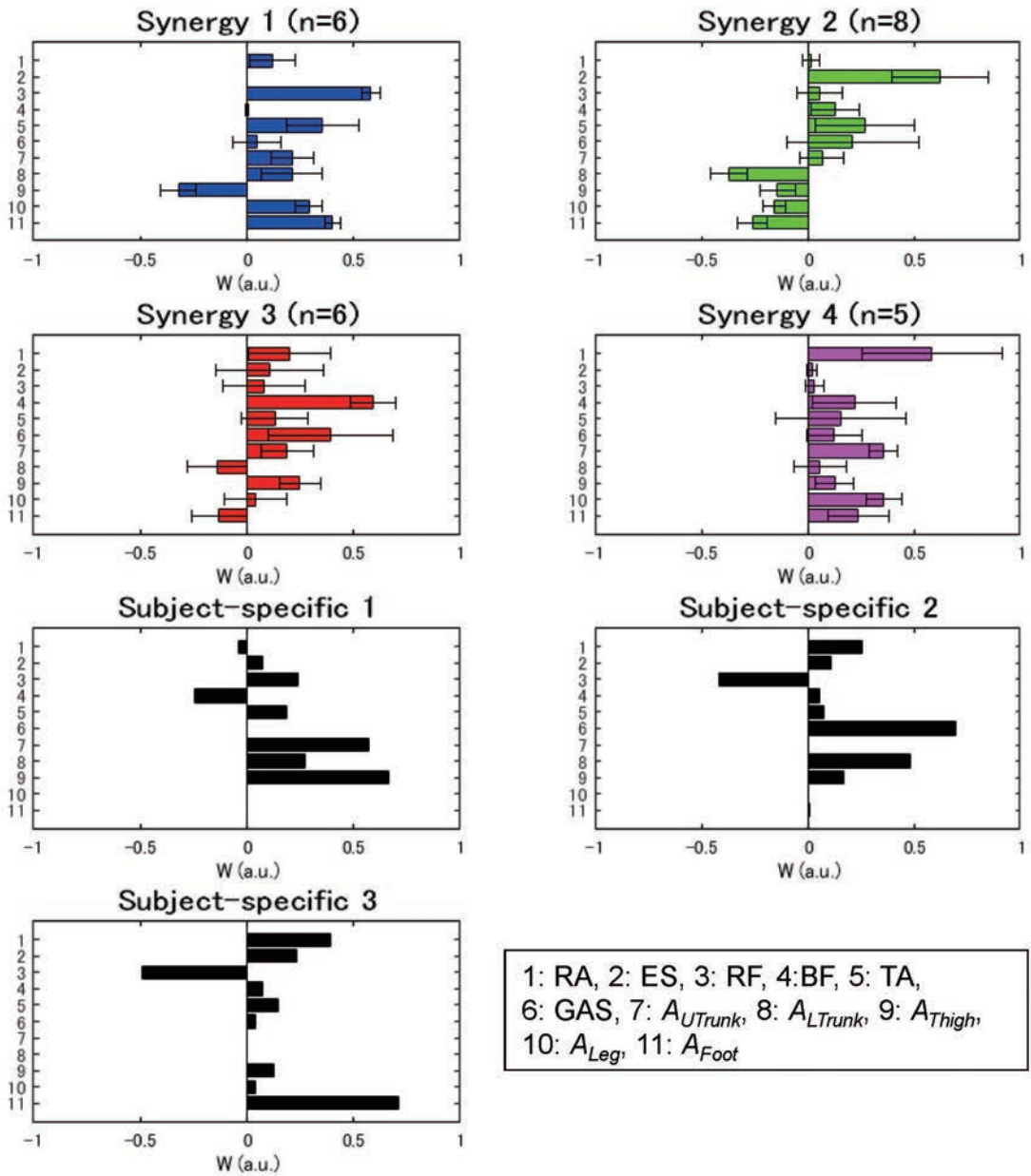


図3 分析周期から抽出された運動学-筋シナジーの空間要素 (W) の結果

が少数の筋シナジーによって制御されている可能性を支持する結果を示したと考えられた。

本研究では、抽出された運動学-筋シナジーをグループ化した結果、5名以上の対象者に共通する4つのシナジーグループが確認された(表3)。なお、4つのシナジーグループの平均的な活性化タ

イミングは図5に示す通りである。WとCの結果から、各シナジーグループが果たす主な空間的役割を特定することができる。Synergy 1はダウンキックの前半に活性し、主にRFとTAが寄与するシナジーであり、セグメント運動成分の結果から、体幹の屈曲、股関節および膝関節の屈曲、足

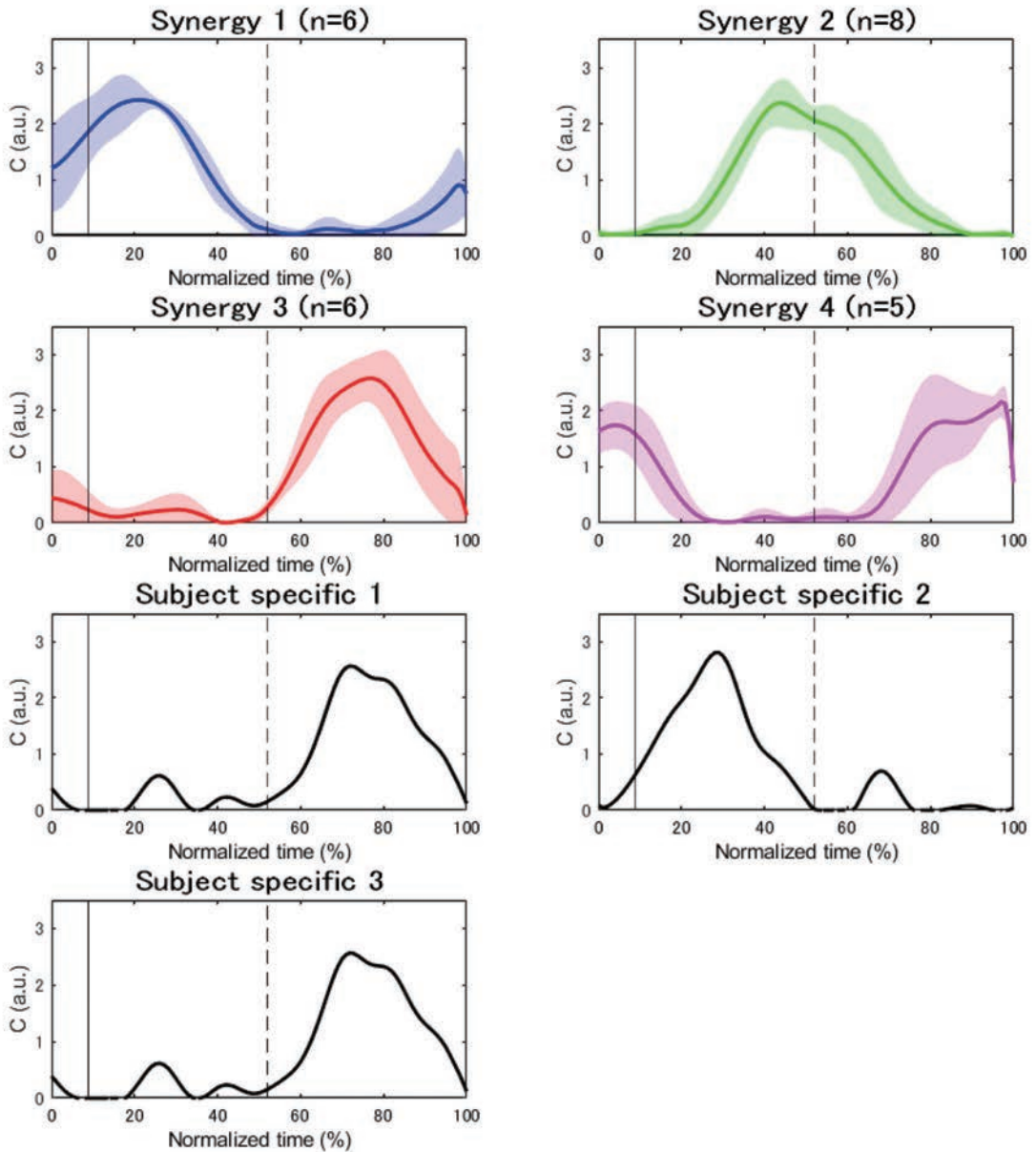


図4 分析周期から抽出された運動学-筋シナジーの時間的要素 (C) の結果  
 縦の実線は平均的なダウンキックの開始タイミングを示し、縦の破線は平均的なアップキックの開始タイミングを示す

関節の底屈の協調動作がこのシナジーに関与していたことが示唆された。Synergy 2はダウンキックの後半からアップキックの前半に活性し、主にES, TA, GASが寄与するシナジーであり、セグメント運動成分の結果から、体幹の伸展、股関節

および膝関節の伸展、足関節の背屈の協調動作がこのシナジーに関与していたことが示唆された。Synergy 3はアップキックの中盤に活性し、主にBFとGASが寄与するシナジーである、セグメント運動成分の結果から、体幹の伸展、股関節の

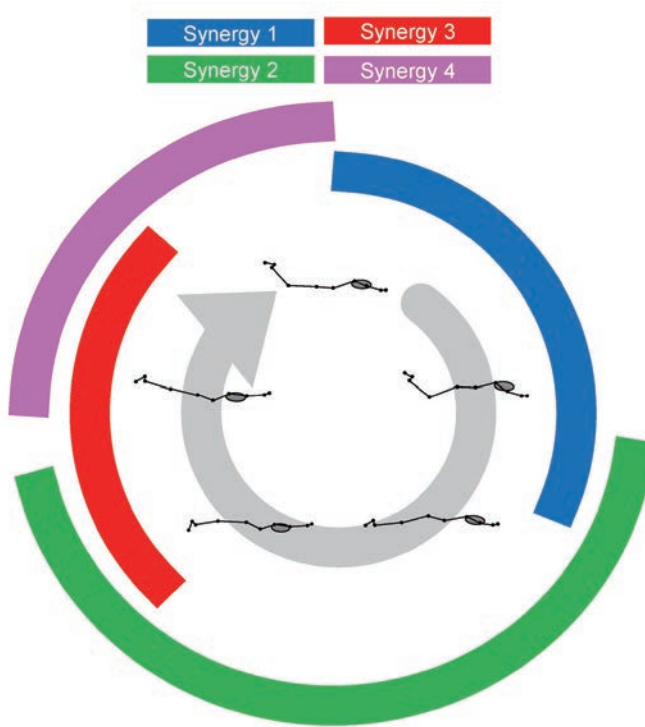


図5 4つのシナジーグループの平均的な活性タイミングとSwimmer Bの分析周期中のスティックピクチャの模式図

伸展、足関節の背屈の協調動作がこのシナジーに関与していたことが示唆された。Synergy 4はアップキックの後半からダウンキックの序盤に活性し、主にRAとBFが寄与するシナジーであり、セグメント運動成分の結果から、体幹の伸展、膝関節の屈曲、足関節の底屈の協調動作がこのシナジーに関与していたことが示唆された。以上のように、本研究の結果から、競泳選手における水中ドルフィンキック中の筋間の協調構造とそれに対応する空間的役割について抽出された運動学-筋シナジーから明確に示すことができたと考えられた。

本研究に参加した6名の対象者は、Synergy 1 - 4のうち3または4種類のシナジーを用いて水中ドルフィンキック動作を達成していた(表3)。図2aに示すように、3つのシナジー(Synergy 1, 2, 3)を用いたSwimmer Eと、4つのシナジー

(Synergy 1 - 4)を用いたSwimmer Bの泳動作を比較すると、アップキックの中盤から終盤にかけて、Swimmer Bは体幹部の伸展・屈曲動作が大きく、これに対しSwimmer Eでは体幹部の動作が小さいことが確認された。Swimmer Bの動作にはSynergy 4が関与していたことから、体幹の屈曲を含む協調的な動作が別途生じていた可能性があると考えられた。水中ドルフィンキックにおける体幹動作は、下肢のキック動作に対する慣性ダンパーとして機能するとされており<sup>12)</sup>、下肢から発生するトルクの反動を抑制するために、体幹のトルク発揮が重要であることが指摘されている<sup>13)</sup>。このことから、体幹と下肢の協調動作は、効率的な泳動作の実現に寄与している可能性がある。しかしながら、本研究はサンプルサイズが小さく、パフォーマンスレベルの異なる対照群を設けていないことから、シナジー数や構成要素の違

いが水中ドルフィンキックのパフォーマンスに及ぼす影響については明確に論じることはできない。そのため、今後はより多くの対象者を用いた研究が求められる。

本研究の限界として、本研究では上肢の筋のEMGデータを収集しなかったため、上肢と体幹、上肢と下肢の協調動作については分析することができなかった。そのため、上肢と他の部位との協調動作については今後の研究課題であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究は、国内大会レベルの女性競泳選手における水中ドルフィンキック中の動作と筋活動のデータから、運動学-筋シナジー解析を行った。その結果、対象者は3または4種類の運動学-筋シナジーを用いて水中ドルフィンキックの動作の達成していることが示唆された。また、各シナジーの空間的・時間的要素の結果から、抽出されたシナジーにおける空間上の機能的役割を特定することができた。今後はこれらの水中ドルフィンキックに内在する協調動作に関する知見が、適切な指導法やトレーニング法の検討に活用されることが期待される。

#### 謝 辞

本研究の実験に参加した競泳選手ならびに実験協力者の皆様に感謝の意を表す。また、本研究の遂行にあたり助成金によって支援して下さった公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団（第47回自由課題学術研究）に深く御礼を申し上げる。

#### 文 献

1) Scano A., Lanzani V., Brambilla C., How Recent Findings in Electromyographic Analysis and Synergistic Control Can Impact on New Directions

for Muscle Synergy Assessment in Sports., *Applied Sciences*, **14** (23), 11360(2024)

2) Bernstein N.A., *The Coordination and Regulation of Movement*. New York, NY: Pergamon Press(1967)

3) Vaz J.R., Olstad B.H., Cabri J., Kjendlie P.L., Pezarat-Correia P., Hug F., Muscle coordination during breaststroke swimming: comparison between elite swimmers and beginners., *Journal of sports sciences*, **34** (20), 1941-1948(2016)

4) Matsuura Y., Matsunaga N., Iizuka S., Akuzawa H., Kaneoka K., Muscle synergy of the underwater undulatory swimming in elite male swimmers., *Frontiers in Sports and Active Living*, **2**, 62(2020)

5) Matsuura Y., Matsunaga N., Akuzawa H., Kojima T., Oshikawa T., Iizuka S., Okuno K., Kaneoka K., Difference in muscle synergies of the butterfly technique with and without swimmer's shoulder., *Scientific reports*, **12** (1), 14546(2022)

6) Yamakawa K.K., Nishiwaki R., Sengoku Y., Muscle Coordination During Maximal Butterfly Stroke Swimming: Comparison Between Competitive and Recreational Swimmers., *Journal of Applied Biomechanics*, **1**, 1-10(2024)

7) Matsuura Y., Matsunaga N., Akuzawa H., Oshikawa T., Kaneoka K., Comparison of muscle coordination during front crawl and backstroke with and without swimmer's shoulder pain., *Sports Health*, **16** (1), 89-96(2024)

8) Scano A., Mira R.M., d'Avella A., Mixed matrix factorization: A novel algorithm for the extraction of kinematic-muscular synergies., *Journal of Neurophysiology*, **127** (2), 529-547(2022)

9) Russo M., Scano A., Brambilla C., d'Avella A., SynergyAnalyzer: A Matlab toolbox implementing mixed-matrix factorization to identify kinematic-muscular synergies., *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **251**, 108217(2024)

10) Kobayashi K., Takagi H., Tsubakimoto S., Sengoku Y., Suitability of electrodes waterproofing treatment in underwater surface electromyography measurement. 筑波大学体育系紀要, **40**, 65-70(2017)

11) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志, 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. バイオメカニズム, **11**, 23-33(1992)

12) Nakashima M., 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(2009)

13) 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)