

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：34517

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350796

研究課題名(和文) 競泳練習機トレーニングによる実泳時の疲労緩衝効果に関する筋電図的検証

研究課題名(英文) Electromyographic study of training effects using a machine of new development on muscle fatigue in swimming race

研究代表者

伊東 太郎 (ITO, Taro)

武庫川女子大学・健康・スポーツ科学部・教授

研究者番号：40248084

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：競泳時の泳速を増大させる要因として、ストローク長と頻度を両方高めることが重要であるが、トップスイマーはストローク頻度を抑えることでレース中の疲労を緩衝しようとする傾向がみられる。研究代表者は、ストローク長を伸ばすことで頻度を抑えられるよう、実泳時に近似した上肢、上肢帯および体幹筋群の筋作用機序を地上で再現し、その状況下で同筋群を一定あるいは漸増負荷で鍛えるため、空気ファン負荷を利用した競泳練習機を独自に開発した。本研究では競泳練習機稼働中および実泳中の筋電図データを中心に用い、水泳競技選手に2年間の練習機トレーニングを課すことで泳速の増大、ならびに疲労緩衝への効果を検証したものである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to inspect the training effects using a machine of new development on the increase of swimming-speed and buffering muscle fatigue during swimming. The top and middle female swimmers participated in this machine training for 2 years. It was elucidated that training effects in the machine training on increasing a stroke length and reducing the total stroke numbers mainly.

研究分野：トレーニング科学

キーワード：競泳 競泳練習機 疲労緩衝 筋電図 トレーニング効果

1. 研究開始当初の背景

競泳におけるパフォーマンスを向上させるには、上肢・下肢の運動で前方推進力を獲得するとともに揚力発揮により体幹や下肢の水平姿勢を保持し水抵抗を減少させ、泳速の増大を図る必要がある。また、主として上肢による水のキャッチ-プル-プッシュまでで生み出されるストローク長とその頻度は泳速を決定づける要因となる。このストローク長と頻度に関しては、競泳のレース展開の指標として実際の競技場面で多くのデータが収集されている(野村ら 1990)。しかし、レース中にストローク長および頻度を変化させる要因は、筋発揮出力や筋疲労の状況変化が深く関わると考えられ、実泳中の筋作用機序や筋活動量の変化を精査する必要があると考えられる。

水中での電気生理学的な生体情報の検出は困難であり、水泳に関する筋電図の研究はきわめて少ない(山下 1984)。生田ら(2010)は、水中用に改良した筋電図電極で 200m クロール泳において上肢筋群だけでなく下肢筋群の筋電図変化を詳細に解析しているが、筋電図単独のデータではパフォーマンス低下と筋活動量変化を結びつけて考察することはきわめて難しい。研究代表者の研究室では、カヌーの全日本トップ選手の 200m レース中の筋電図変化の解析において、艇加速度を同期記録することによって 1 回ごとのパドリングによる加速度の増減が、筋電図放電量や周波数変化と符合していることを明らかにしており(植杉ら 2012)、競泳レース中の筋電図変化分析にあたっては筋電図だけでなく加速度や推進力そのものを同期記録することの重要性を実感している。また、水泳運動において体幹筋群の筋活動様態とその機能的意義について明らかにされていないことも競泳における筋電図の研究の課題と考える。

一方、泳速を制約する生理学的要因は筋内での乳酸蓄積による筋収縮機能低下、すなわち筋疲労の影響が大きいと考えられる。乳酸は肝臓でグルコースに転換されたり、輸送担体により遅筋等で利用されたりする栄養物質ではあるが、運動継続中には筋疲労を引き起こす一因となる。もし、乳酸蓄積の著しい特定の筋を検出できれば、耐乳酸策としてトレーニングに適用する可能性も高まる。競泳(クロール泳)中の推進力には上肢プルが下肢キック動作より貢献度が高いという観点(Counsilman 1968)から、本研究では推進力を生み出す上肢・上肢帯筋群のうち、筋疲労の著しい筋を筋電図法により特定することが可能と考えている。

運動で誘発される筋疲労は、随意での最大発揮筋力の減少をとめない、筋レベルでの末梢的变化だけでなく中枢からの下行信号にも影響が現れる(Gandevia 2001)。単関節の運動課題で強度の高い等尺性(Person & Kudina, 1972)あるいは等張性(Potvin 1997)

の筋収縮を続けると、それにとまなう筋疲労により筋放電量は漸増する一方、筋電図周波数(MPF)は低下する。これは筋疲労に対し発揮筋力を維持するため、中枢が運動単位動員とインパルス発射頻度の増加を図る一方、命令信号を同期化し各運動単位の力発揮を集中させることを示唆する。多関節運動でもエルゴメータの下肢(Lucia et al. 1999)および上肢ペダリング(植杉ら 2011)、あるいはカヌーのパドリング動作(植杉ら 2012)において、漸増負荷にとまない特定筋が局所筋疲労を起こし、筋放電量が増加あるいは MPF が低下する。特に、運動負荷試験実施時の換気からみた無酸性作業閾値(VT)は筋電図放電量増加の開始時間と密接な相関関係があり(Lucia et al. 1999)、電気生理学的な現象が筋内の乳酸蓄積状況を反映している(Moritani et al. 1986)。

競泳中の疲労は、筋機能における筋疲労や持久的疲労の徴候と、それを検知する感覚機能が統合され、ふたたび神経系システムに伝達される統合システム、すなわち運動時における神経系システム全体から検討されるべきである。しかし、そのような観点から実泳中の疲労緩衝に着目した報告はみられない。疲労を遅延させる方策を構築することは、競泳パフォーマンスを向上させる上で重要であるが、これらの観点からの研究は国内外で見当たらないのが現状である。

2. 研究の目的

競泳時の泳速を増大させる要因として、ストローク長と頻度を両方高めることが重要であるが、トップスイマーはストローク頻度を抑えることでレース中の疲労を緩衝しようとする傾向がみられる。研究代表者は、ストローク長を伸ばすことで頻度を抑えられるよう、実泳時に近似した上肢、上肢帯および体幹筋群の筋作用機序を地上で再現し、その状況下で同筋群を一定あるいは漸増負荷で鍛えるため、空気ファン負荷を利用した競泳練習機を独自に開発した(方法に記載)。

本研究では競泳練習機稼働中および実泳中の筋電図データを中心に選手個別の局所筋疲労の実態を精査するとともに、水泳競技選手に 2 年間の練習機トレーニングを課すことでストローク長および泳速の増大、ならびに疲労緩衝への効果を検証しようとするものである。

3. 研究の方法

実験は大きく 2 種の実験から構成された。実験 1 では実泳および競泳練習機を使った疑似泳における筋電図記録による筋疲労の実態把握、実験 2 では競泳練習機にとまなうトレーニング効果について筋電図を中心に検討した。これらの実験に参加した被験者はすべて女子大学競泳選手であり、延べ人数はクロール泳 36 名、パタフライ泳 26 名、背泳 3 名をそれぞれ専門とする計 65 名であった。

うち、ユニバーシアード優勝選手1名、日本学生選手権A決勝進出者2名、B決勝進出者10名のトップクラス選手を含んでいた。他の選手は日本選手権出場～日本学生選手権出場のレベルであった。

実験で用いた競泳練習機は、体幹部を全く制約せず、あえて伸身の姿勢保持を困難にする不安定な状況に暴露するよう工夫し、水中同様の体幹筋群の動員を促し、バックストロークを含むすべての泳法による牽引を可能とするよう、研究代表者と株式会社「結」との共同開発で製作されたものである（製品名Swim Trainer 01、図1参照）。上肢や下肢によるロープ牽引の競泳トレーニング機は、負荷の種類として、ウエイト重量では初動時しか適切な負荷がかからず、チューブでは牽引終盤につれて負荷が増大し、両者とも実泳とは力の発揮状態が大きく異なる。そのため、この新開発の競泳練習機は空気ファン負荷を採用し、キャッチ-プル-プッシュまで常時負荷がかかり、ロープ牽引速度の増加に伴い負荷が増大するという、水中運動に近い負荷方式を採用している。しかもリカバリーにおいて戻り負荷をかけるため、主動筋の弛緩を可能とし速い抜き動作も体感できるよう工夫して製作している。2012年には実泳時と練習機運動時の筋電図の筋作用機序と筋負担量がほぼ近似していることを確認し学会で報告している（図2）。



図1. 使用された競泳練習機(伊東研究室と株式会社「結」との共同開発機 Swim Trainer 01)

【実験1】

競泳練習機を用い、被験者にメトロノームでベストタイムレースのストローク頻度を課し、2分間の全力擬似泳（負荷は実泳時における最大努力時の上肢プル牽引力）を実施した。その際に、練習機のロープ牽引力をロードセルで、呼吸・循環機能の変化を呼気ガスおよび心拍数測定で、上肢・上肢帯および体幹筋群の筋活動をテレメータ筋電図で、フォーム変化を3次元解析装置により同期記録し解析した。なお、ラクテート・プロ2（アークレイ社製）を用い、安静時、EN3直後および3分後の3回、血中乳酸の測定をした。

実泳実験において、被験者は短水路25mプールで200mのクロール、バタフライあるいは背泳についてレース展開を考えず最初か

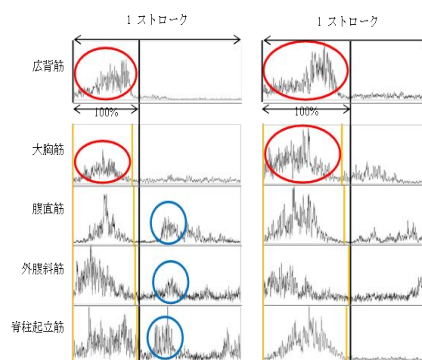


図2. 実泳時（左）および競泳練習機の稼働時（右）の筋活動様相（代表例）

ら全力で泳がせた。なお、最初はウォーミングアップとして主観的運動強度50%（EN1）、次を全力泳（EN3）とし、どちらも生体データを収集した。実泳中の筋電図をマルチメータシステム（日本光電、WEB-5000）、仙骨部の推進方向の加速度を多チャンネルテレメータシステム（WEB-7000）を用いて記録した。全ての器具は防水が必要であるため、筋電図電極の装着の際に両面テープを使用し、防水用シートを貼付して防水加工を行った。また、実泳中の進行方向の加速度を測定するため、加速度計はラミネートした上で、腰部にテープで装着した。実泳時に検者は被験者側方のプールサイドをテレメータ発信機が水に濡れないよう防水を施し並走した。ターン動作は通常のタッチターンで行った。水中姿勢を分析するために被験者の側方水中12.5mの地点に水中ビデオカメラ（Panasonic、HX-WA20）を設置し、撮影（60fps）を行った。

【実験2】

約2年間にわたり競泳練習機を使ったトレーニング効果について、バタフライ泳（100m・200m）を専門とする大学女子水泳選手を用い精査した。

トレーニングは、競泳練習は週6日、競泳練習機Swim Trainer 01での練習は週2日、実施した。競泳練習機でのトレーニング効果の検証は、実泳での実験、競泳練習機での実験および、カーブテストをトレーニング前後で実施し、比較することで行った。

実泳での実験は50mバタフライの全力泳を実施し、測定項目は上肢および上肢帯筋群・体幹筋群の筋電図、推進方向の加速度、防水ビデオカメラ映像とした。

競泳練習機を用いた実験では、2分間の一定負荷牽引をさせ、その際ロードセルの牽引力、呼気ガスデータおよび運動前後での血中乳酸値を測定した。筋電図は実泳実験と同じ被験筋から検出し、写真記録を参考に、同筋腹位置に添付した。なお、牽引のピッチはトレーニング期間中一定とし、ベスト記録を出したレース中のストローク頻度になるよう、メトロノームで統一した。カーブテストは200mを4本行い、選手全員に泳速度、距離、

サークルを指定し、セット毎にサークルを伸ばし、強度を 89%, 91%, 93%, 100% と上昇させていくディセンディングインターバル形式で行った。なお、血中乳酸値は安静時と実泳直後に測定した。

被験者となった大学女子競泳選手の年間出場レース（10～15 試合程度）のストロークインデックス（ストローク長、頻度および総ストローク数）の変化から、トレーニング効果について検討した。

なお、筋電図実験について、実験 1 と 2 とともに被験筋は三角筋前部・三角筋後部・大胸筋鎖骨部・広背筋・腹直筋・外腹斜筋・脊柱起立筋（レベル 4）の計 7 箇所とした。各筋放電量は、等尺性の最大随意筋力発揮（MVC）の筋電図で正規化し、単位時間あたりの平均振幅（%）として求めた。

4. 研究成果

【実験 1】

被験者はクロール泳を専門とする大学女子競泳選手のうち、ハイレベル（ユニバシアード優勝日本選手権入賞）とミドルレベル（日本選手権出場～日本 IC 出場）の 2 群で取得データを比較検討した。実泳実験（クロール泳 200m）の記録は、EN3 が 139.1 ± 2.9 s であった。ハイレベルの方が 5.4 秒も記録が早かった。EMG 平均振幅はハイレベルの大胸筋が終始 60～85% を示すのに対し、ミドルレベルは全筋 35% 以下の活動であった。ハイレベル選手は水をキャッチする際、最大努力に近い力発揮がなされていることが推察された。全被験者の平均より、前半（0-100m）と比して後半（100-200m）に記録は 5.2% 有意に低下した（ $p < 0.01$ ）。レベルによる疲労緩衝の差は検出できなかった。EN3 後の最大血中乳酸値の平均は、 7.8 ± 2.7 （range 11.9-4.2）mmol/l であった。後半の上肢・上肢帯筋群の EMG 平均振幅は、全被験者とも有意に低下した。この結果は、生田ら（2010）と一致した。研究代表者は、水泳とは異なる運動課題で主動筋を疲労させ、疲労していない協同筋の補償作用を検討してきた（伊東ら 2010, 2011, 2012; 植杉ら 2012）。例えば、カーブテストにおいて全日本代表強化選手は、レース時の主動筋疲労による著しい筋放電量増加が開始すると、共同筋動員が高まり、急速に主動筋活動量が低下し血中乳酸値を著しく抑える戦略を利用している。水泳時にはこのような共同筋の補償作用は認められなかった。

【実験 2】

競泳練習機では常に一定の負荷でトレーニングを実施したが、外腹斜筋以外の全筋において、トレーニング後に筋放電量が低下する傾向がみられた。競泳練習機の実験時における、呼気ガスの酸素摂取量は、トレーニング後において有意に低下した。一方、カーブテストにおいて AT の出現時期に遅れが有意

に認められた。これらのことから、実泳に近い動きの中で神経-筋機能、心肺機能および耐乳酸能の改善が行われたことが推測された。

トレーニング前後の実泳実験において、全力泳中のタイムに有意な差は認められなかった。筋放電量について、トレーニング後に脊柱起立筋のみ筋放電量の低下が有意に認められた。

トレーニング後の被験者の実際のレースタイム（200m バタフライ）は有意に短縮し、全被験者とも記録向上が認められた。トレーニング後、特に、レース中のストロークインデックスについて、ストローク頻度には有意な差はなかった（図 3 上図）が、ストローク長は有意に増加（図 3 中図）、総ストローク数は回数の減少が有意に認められた（図 3 下図）。このことから、ストローク頻度に変化はみられなかったが、ストローク長が増加したことにより、レースタイムが短縮したことが示唆された。レース中の総ストローク数の有意な低下は、疲労緩衝にも有効に作用すると考えられた。

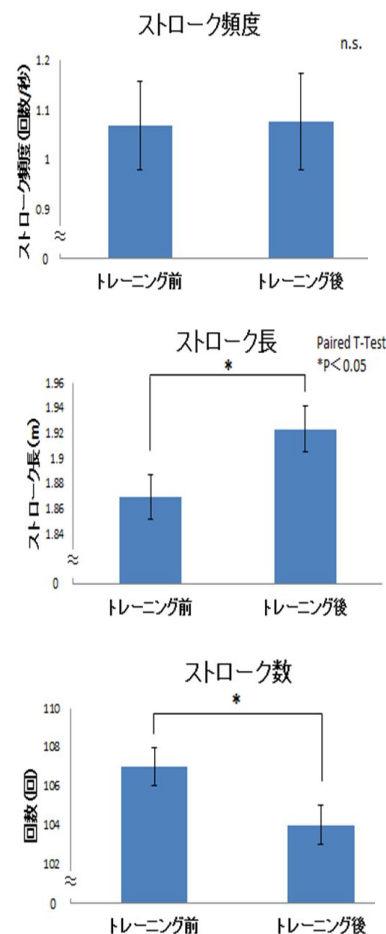


図 3. 競泳練習機トレーニングがレース時のストロークインデックスに及ぼす影響（上図：ストローク頻度，中図：ストローク長，下図：総ストローク数）

なお、有意な差は認められなかったが、競泳練習機の導入によって、200m レースにおいて約3秒の記録短縮が認められ、導入前の0.8秒の改善と比較し飛躍的に向上した。今回新開発された競泳練習機のトレーニング効果が証明されたと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 5件)

(1)長田結衣, 伊東太郎. 実泳時の疲労緩衝に関する筋電図的検証. 日本水泳・水中運動学会, 2016-10-15, 国立スポーツ科学センター.(東京都北区)

(2)百畑美希, 木下 博, 山下笑梨, 松島正知, 脇谷滋之, 伊東太郎. 体幹筋群の断面積におけるコアトレーニングの効果. 第 53 回大阪体育学会, 2015-03-15, 大阪産業大学.(大阪府大東市)

(3)山下笑梨, 松島正知, 百畑美希, 中西増代, 生田泰志, 伊東太郎. 大学女子競泳選手におけるバイオメカニクスのサポート. 第 53 回大阪体育学会, 2015-03-15, 大阪産業大学.(大阪府大東市)

(4)村上堯之, 山下笑梨, 渡邊文雄, 阿部洋平, 中西康人, 木下博, 伊東太郎. 競泳選手のための練習機の開発と評価についての筋電図的検証. 第 68 回日本体力医学会大会, 2013-09-23, 東京慈恵医科大学.(東京都港区)

(5)山下笑梨, 村上堯之, 渡邊文雄, 阿部洋平, 小幡哲史, 大澤智恵, 木下博, 伊東太郎. 新開発された競泳練習機のトレーニング効果について. 第 68 回日本体力医学会大会, 2013-09-23, 東京慈恵医科大学.(東京都港区)

6. 研究組織

(1)研究代表者 伊東 太郎(ITO TARO)
武庫川女子大学・健康・スポーツ科学部・教授
研究者番号：40248084