

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月7日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13000

研究課題名(和文) 吸気筋と浮力の複合的観点からトップスイマーのパフォーマンス向上への挑戦

研究課題名(英文) Relationship between respiratory muscle function and swimming performance

研究代表者

吉武 康栄 (Yoshitake, Yasuhide)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号：70318822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の結果、

1) 吸気筋の活動様相は、これまでほとんどその1部しか考慮されていなかった吸気能力、flow rate、吸気量、吸気抵抗によって決定される、2) 吸気による肺気量が小さくなると泳動作中のボディポジションは低下する、3) 競泳競技の後半では吸気筋の筋疲労によって肺気量が低下することに起因してボディポジションが低下する、ことが明らかとなった。さらに、4) ボディラインスキャナによる身体形状情報と水中モーションキャプチャによる各セグメントの三次元位置情報を統括することにより、より正確な前方投影面積が算出できる技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、COPD患者や競泳アスリートを対象とした、呼吸筋機能を向上させるトレーニング時の呼吸パラメーター(呼吸抵抗の大きさ、flow rate、吸気量等)の決定方法に一役買う。さらに、本研究で開発した競泳中の前方投影面積を簡便かつ正確に算出する方法論は、アスリートのさらなるパフォーマンス向上、もしくはスランプからの脱却を目指したトレーニング時の参考資料として活用できる。この工学技術は、選手やコーチに対し科学的サポーターとして有用であり、長年に渡り社会問題になっている体罰や理不尽な指導からの逸脱を可能にする。以上のことから本研究は学術的意義だけではなく、社会的意義もあると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The main findings of this study are 1) the recruitment and activation of the neck inspiratory muscles depends on both inspiratory muscle strength and inspiratory resistance. 2) intentionally smaller lung volume during swimming decrease the body position. 3) the reduction in swimming performance with swimming distance resulted, at least in part, from a decrease in body position, which is owing to decline in lung volume and respiratory muscle fatigue. Additionally, we developed methodology that enables more accurate estimation of projected frontal area of a individual swimmer during swimming by means of body line data detected on the land and position data of limb segments detected during swimming.

研究分野：バイオメカニクス 運動生理学

キーワード：競泳 呼吸筋 吸気筋 浮力 前方投影面積 水中モーションキャプチャ 筋電図 吸気抵抗

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トップスイマーは“体力的要因”である最大酸素摂取量が頭打ちになっており、“体力的要因”からの泳パフォーマンス向上の見込は少ない (Lucia et al. 2006). また、競泳は、陸のスポーツとは異なり、空気よりも密度が約 800 倍高い“水”の中という特殊環境下で行われる。したがって、トップレベルになるほど、競泳パフォーマンスは、“体力的要因”というよりも、泳者に生じる水力抵抗の如何という“技術的要因”に決定される比率が高まる (Toussaint et al. 2000, Lucia et al. 2006)。

一方で、競泳のように水面付近で遊泳する場合、身体がより高く浮いた位置で推進している時ほど水力抵抗は小さくなる。したがって、浮力の源のひとつとなる吸気量の増減は、泳パフォーマンスを左右する重要因子となる (Holmér & Gullstrand.1980)。そのため、多大な吸気量を獲得する生理学的因子を解明し、その後、その因子と泳パフォーマンスとの実際の関連性を究明することが、泳パフォーマンスの今後の向上に直結すると考えられる。

水中での身体運動は、水圧の影響により呼吸に対し余剰の仕事量が求められ (Lundgren 1984)、かつ、呼吸がストローク時のみ可能と限定される (Rodriguez 2000) という特殊性もある。したがって、競泳運動中の吸気量は、吸気筋の収縮機能に依存することが予想される。さらに、競泳 200m レース後には、陸上での同一運動量時には認められない吸気筋の筋疲労が誘発され、吸気能力が低下する (Lomax et al. 2015)。つまり、競泳では特殊環境ゆえに、吸気筋の筋活動量が亢進し筋疲労が誘発されやすく、ひいては、吸気能力の低下→吸気量の減少→浮力の低下→水力抵抗の増加→泳パフォーマンスの低下という一連の流れになっていることが予想される。言い換えると、吸気筋に特化したトレーニングだけでも、水泳運動中の吸気筋の筋疲労を軽減できれば、浮力の低下を軽減でき、結果的に泳パフォーマンスを向上させ得ると仮説立てられる。

2. 研究の目的

上記の仮説を立証するために、

(1) 吸気筋の筋活動量と吸気抵抗・吸気速度 (flow rate)・吸気量との関連性

(2) 競泳中での吸気量と浮力 (ボディポジション) との関連性

(3) 競泳 200m の後半に発生するボディポジションの低下と吸気筋の筋疲労との関連性を明らかにする。さらに、ボディポジションの定量化の精度の向上を目指し、

(4) デジタルヒューマン技術を用いた水泳中の前方投影面積の算出

を目指した。

3. 研究の方法

(1) 吸気筋の筋活動量と吸気抵抗・吸気速度 (flow rate)・吸気量との関連性

健康な若齢成人男性 13 名を対象に、吸気抵抗なし・ありの条件下で、最大 flow rate の 20-100% を目標値に吸気動作を行った。その際、吸気補助筋と考えられている斜角筋および胸鎖乳突筋より表面筋電図 (with double differential configuration) を導出した。Flow rate およびその積分値である吸気量も同時に測定した。

(2) 競泳中での吸気量と浮力 (ボディポジション) との関連性

競泳日本選手権の出場経験を有する若齢男性を対象に、息を吐き切った状態 (吐き切り条件)、息を吸い切った状態 (吸い切り条件)、および主観的にそれらの中間の肺気量にした状態 (中間条件) の 3 条件下にて、同一の最大下努力度でのクロールをランダムに 3 回ずつ 15m 泳がせた (計 9 試行)。水中モーションキャプチャシステム (Qualisys 社) を用いて、複数の関節の座標を測定した。ボディポジションの評価値とした身体重心高 (プール底からの高さ) と定義) は、左右ストローク 1 サイクル中の座標から阿江らの日本人アスリートの身体部分係数を用いて算出した。各条件下での 3 試行のデータの平均値をそれぞれ算出した。

(3) 競泳 200m の後半に発生するボディポジションの低下と吸気筋の筋疲労との関連性

日本学生選手権の出場経験を有する若齢男性スイマー 10 名を対象に、25m プールにて 200m クロール泳の全力努力試技を実施した。プール中央を囲むように配置された水中モーションキャプチャシステムを用いて、身体標識点の位置座標を時系列データとして測定した。身体重心高と高い一貫性 (ICC = 0.977) が確認された剣状突起と左右大転子の midpoint の鉛直軸成分をボディポジションの評価値とし、水面を基準とした鉛直軸成分 (水深) について 1 ストロークサイクル中の平均値を 25m 区間ごとに算出した。その後、ボディポジションについて、距離区間を要因とした一元配置分散分析 (8 区間) を行った。また、全力泳前後に吸気筋力の指標である最大吸気圧を測定し、その変化率より吸気筋の筋疲労を評価した。その後、最大吸気圧の変化率と、0-25 m 区間と 150-175 m 区間におけるボディポジションの変化量の関連についてピアソンの相関係数を算出した。

(4) デジタルヒューマン技術を用いた水泳中の前方投影面積の算出

男性競泳選手 6 名 (21.5 ± 1.6 歳) を対象とした。息を吐き切った状態 (吐き切り条件)、吸い

切った状態(吸い切り条件),および主観的にそれらの中間の肺気量を保持した状態(中間条件)にて,同一最大下努力度による15mクローリング泳をランダムに3回ずつ実施させた.水中カメラ15台と陸上カメラ10台で構成された水中モーションキャプチャシステム(Qualisys)は,5-15m区間をキャプチャするように配置した.身体各部に貼付した36点の反射マーカ-の位置座標の時系列データを100Hzのサンプリング周波数で取得した.なお,前方投影面積の値と比較するために,位置情報からボディポジション(center of mass)を算出した.水中モーションキャプチャ測定時と同じマーカ-セットおよび同じ肺気量条件にてボディラインスキャナ(C9036 Body Line Scanner, 浜松ホトニクス)より立位姿勢時の身体形状データを取得した.まず各選手の身体形状データを産業技術総合研究所(産総研)で開発されたデジタルヒューマン技術を扱うソフトウェア(DhaibaWorks6)に読み込んだ.その後,産総研の保有する人体寸法モデルDhaiba6と同じマーカ-セットを再現するために,身体形状表面に57点の特徴点を配置した.これにより,各選手の各セグメント長に則したリンクセグメントモデルが同定される.このリンクセグメントモデルは,Dhaibaモデル上に復元されるため,各選手の身体形状データと入れ替えた.その後,リンクセグメントモデルと身体形状データから表皮変形モデルSSD6を作成した.最後に,水泳中のマーカ-セットを再現するために,身体形状表面に36点の特徴点を配置した.この一連の処理を各肺気量条件の身体形状データにて行った.作成した個人モデルおよび,それに対応する肺気量条件のモーションキャプチャデータを用い,逆運動学計算より,水泳中の姿勢を復元した.DhaibaWorks上にて,水上部分を遮蔽するオブジェクトを配置し,毎フレームについて進行方向からみた画面をスクリーンショットした.画像のしきい値処理より,身体形状データの水中部分のpixel数を取得し,面積を既知のリファレンスより平方cmに単位変換した.各試技について1ストロークサイクル中の平均値を算出した後,各肺気量条件の平均値を代表値とした.

4. 研究成果

(1) 吸気筋の筋活動量と吸気抵抗・吸気速度(flow rate)・吸気量との関連性

各条件および各筋において,横軸に最高Flow rateで正規化された平均Flow rate,縦軸に正規化されたEMG振幅値をプロットし,曲線推定を行った(Flow rate-EMG関係).その結果,全被検者の各筋において,有意な指数回帰曲線が得られた.その増加勾配は,高い肺気量時に高まり,またEMGの出現が開始するflow rateは,吸気抵抗の存在によって早まることが明らかになった.また,個人間比較をすると,最大吸気圧が高い,言い換えると,吸気能力が高いほど,呼吸補助筋のEMG出現開始地点が遅延した.吸気筋の筋活動に関する研究ではこれまでほとんどコントロールされていないが,本研究より吸気筋の筋活動は,少なくとも吸気抵抗・flow rate・吸気量の因子に影響を受けることが明らかになった.さらに,EMG出現開始地点は,吸気能力に依存することも明らかとなった.今後,吸気筋活動様相や呼吸筋トレーニングに関する研究に関しては,以上の要因を厳密にコントロールして進める必要があることが示唆された.

(2) 競泳中での吸気量と浮力(ボディポジション)との関連性

推進方向の身体重心速度(泳速度)は,吐き切り条件で1.32 m/s,吸い切り条件で1.37 m/s,中間条件で1.36 m/sであった.また,身体重心高は,高い順に吸い切り条件(171.7 cm),中間条件(171.1 cm),吐き切り条件(167.9 cm)となり,吸い切り条件と中間条件の差は0.6 cm,吸い切り条件と吐き切り条件の差は3.8 cmであった.このことより,吸い切り条件および中間条件と比較して吐き切り条件では,ボディポジションは低下し,前方投影面積が大きくなっていたことが推察される.以上より,肺気量が小さくなると泳動作中のボディポジションは低下することが明らかとなった.競泳レース後半に肺気量が小さくなるのであれば,仮説通り,それがパフォーマンスの低下の一要因になる可能性が示唆された.

(3) 競泳200mの後半に発生するボディポジションの低下と吸気筋の筋疲労との関連性

全力泳後の最大吸気圧は,前と比較して9.7%低下した($P < 0.05$).一元配置分散分析の結果,ボディポジションに距離の主効果が認められ($P < 0.05$),距離に伴い低下した.相関分析の結果,最大吸気圧の変化率とボディポジションの変化量の間には有意な正の相関関係が認められた($r = 0.70, P < 0.05$).このことより,200mクローリング全力泳によって吸気筋の筋疲労が発現し,その疲労度は,泳運動後半のボディポジションの低下量に関連していることが明らかとなった.以上より,競泳パフォーマンス発揮中の後半では吸気筋の筋疲労によってボディポジションが低下し,そして前方投影面積の増大に伴う水力抵抗の増大が競泳パフォーマンスの低下を引き起こす一要因となる可能性が示唆された.

(4) デジタルヒューマン技術を用いた水泳中の前方投影面積の算出

本手法は,これまでの身長・体重による推定ではなく,各個人の身体形状を計測したことで,体型の個人差を考慮した前方投影面積の算出を可能にした.さらには,各肺気量時の身体形状を計測したことで,肺気量による胸郭変形も考慮した前方投影面積の算出を可能にした.また,デジタイズによる算出と比較しても,個人モデルさえ作成すれば,簡単な画像のしきい値処理により算出できるため,解析者内・間の誤差なく,かつ解析に要する時間コストの大幅な縮小が見込める.上記の手法から算出した前方投影面積は,全対象者の全試技におけるボディポジ

ションと強い負の相関関係が認められた ($r = -0.82$, $P < 0.001$). このことは, 本手法が精確に前方投影面積を算出できたことを部分的に支持する. さらに, 前方投影面積は吸い切り条件で $1297.3 \pm 39.4 \text{ cm}^2$, 中間条件で $1330.4 \pm 49.1 \text{ cm}^2$, 吐き切り条件で $1493.3 \pm 59.2 \text{ cm}^2$ であり, 肺気量の減少に伴い増大した ($P < 0.01$). これらは, 肺気量変化に応じた前方投影面積の変化を定量化可能であることを示唆する.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)(全て査読あり)

- (1) Washino S, Mayfield DL, Lichtwark GA, Mankyu H, Yoshitake Y. Swimming performance is reduced by reflective markers intended for the analysis of swimming kinematics. J Biomech. 受理
- (2) Washino S, Mankyu H, Kanehisa H, Mayfield DL, Cresswell AG, Yoshitake Y. Effects of inspiratory muscle strength and inspiratory resistance on neck inspiratory muscle activation during controlled inspirations. Exp Physiol. 104(4):556-567. 2019.
- (3) Washino S, Kanehisa H, Yoshitake Y. Neck inspiratory muscle activation patterns during well-controlled inspiration. Eur J Appl Physiol. 117(10):2085-2097. 2017.

〔学会発表〕(計 5 件)

- (1) 鷲野壮平, 村井昭彦, 萬久博敏, 矢内利政, 吉武康栄. デジタルヒューマン技術を用いた水泳中の前方投影面積の算出. 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 大阪工業大学・梅田キャンパス, 12 月, 2018 年.
- (2) Sohei Washino, Hirotooshi Mankyu, Yasuhide Yoshitake. Estimation of vertical COG position by underwater motion-capture system with small number of markers during swimming, In Proceedings of The XIIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, Tsukuba University, Japan, September, 182-186, 2018.
- (3) 鷲野壮平, 矢内利政, 萬久博敏, 吉武康栄. 全力 200m クロール泳中のボディポジションの変化と吸気筋疲労の関係. 第 25 回日本バイオメカニクス学会大会, 日本体育大学世田谷キャンパス, 9 月, 2018 年.
- (4) Sohei Washino, Hiroaki Kanehisa, Yasuhide Yoshitake. Relation Between Inspiratory Muscle Strength and Recruitment Onset of Neck Inspiratory Muscles. American College of Sports Medicine (ACSM 2017), Denver (USA), MEDICINE AND SCIENCE IN SPORTS AND EXERCISE,49(5):798-798. 2017.
- (5) 鷲野壮平, 矢内利政, 萬久博敏, 吉武康栄. 肺気量の違いが泳動作中のボディポジションに及ぼす影響~水中モーションキャプチャを活用した試み~ 第 24 回日本バイオメカニクス学会大会, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス, 9 月 2016 年

〔その他〕

ホームページ等

<https://yoshitake-labratroy.jimdofree.com/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 矢内利政

ローマ字氏名: Yanai Toshimasa

所属研究機関名: 早稲田大学

部局名: スポーツ科学学術院

職名: 教授

研究者番号(8桁): 50387619

研究分担者氏名: 萬久博敏

ローマ字氏名: Mankyu Hirotooshi

所属研究機関名：鹿屋体育大学
部局名：スポーツ・武道実践科学系
職名：准教授
研究者番号(8桁): 50239167

(2)研究協力者
研究協力者氏名：鷲野壮平
ローマ字氏名：Washino Sohei