

泳者のストリームライン姿勢保持能力を定量化するための新たな評価法の検討
～Breathing Balance Ratio の提案～

渡邊 泰典

目 次

要約.....	1
I. 諸言.....	2 - 3
II. 方法.....	4 - 8
III. 結果.....	9 - 12
IV. 考察.....	13 - 14
V. 摘要.....	15
VI. 謝辞.....	16
VII. 文献.....	17

泳者のストリームライン姿勢保持能力を定量化するための新たな評価法の検討
～Breathing Balance Ratio の提案～

渡邊 泰典¹ 若吉 浩二¹ 野村 照夫²

要約

本研究の目的は、呼吸サイクルに伴う浮力の増減が、泳者のストリームライン姿勢に及ぼす影響を検証するとともに、手部と足部にそれぞれかかる鉛直方向の荷重の時系列的変化を観察し、詳細に分析・検討しながら、泳者自身が有する水平姿勢保持能力を簡便かつ定量化するための新たな評価法として Breathing Balance Ratio を提案することであった。上肢・下肢の鉛直方向にかかる荷重は、吸気とともに増大することから、直線の関係と言える。この横軸 x を肺換気量、縦軸 y を浮力と定める、上肢・下肢それぞれの一次方程式 ($F1:y = a1x + b1$, $F2:y = a2x + b2$) の傾き a の値を用いて算出される Breathing Balance Ratio (=BBR) は、1 に近づくほど水平維持度が高いことを表す。つまり、呼吸によって浮力が増大しても、胸部を上方へ突き上げようとする力を抑制しながら、上肢・下肢共に均等に浮力を受けて水平姿勢を保持し続けることができる能力を示すものである。本研究の被験者は、水泳不得意群(過去に専門的な水泳指導を受けたことがない一般アスリート(Non Swimmer), 以下 NS と略す)8 名、水泳得意群(大学競泳選手(Collegiate Swimmer), 以下 CS と略す)8 名と、ジュニアトップスイマー群(国際大会出場レベルの競泳選手(Junior Top Swimmer), 以下 JTS と略す)10 名であった。

分析の結果、BBR において、JTS 群は、NS 群、CS 群と比べ、有意に高い値を示した(いずれも $p<0.001$) ことから、JTS 群はその他と比べ、より安定して水平姿勢を保持することができると言える。身体に働く重心まわりの回転トルクでは、最高換気量時の上肢トルク(T_{F1})は水泳技能の習熟度が上がるにつれて大きくなり、下肢トルク(T_{F2})は水泳技能の習熟度が上がるにつれて小さくなった。浮力トルク(T_B)は、3 群間の違いは認められないものの、JTS 群が CS 群と比べて統計学的有意傾向を示した($p=0.54$)。浮心重心間距離は、CS 群が、NS 群、JTS 群と比べて、短い結果を示した。肺換気量の結果では中性浮力換気量、最高換気量共に 3 群間の統計学的有意差は認められず、なおかつ、浮力の結果についても同様に統計学的有意差が認められなかった。

本研究では、身体的特徴、すなわち、脂肪量や身体各部の脂肪組織の分布、あるいは肺換気量によって獲得する浮力に違いがなくても、姿勢保持能力に違いがみられた。JTS 群の浮心重心間距離は、3 群の中でも最も延長したにもかかわらず、高い水平姿勢維持率を実現した本研究の検証結果は、従来の浮心重心間距離の短縮が下肢沈み込みトルクの発生を抑制することができるとする報告に対して有用な示唆を与える。JTS 群は、 T_{F1} の値がその他の群と比べて有意に大きかった。したがって、上肢が沈むトルクを相殺し、水平姿勢を維持するためには T_B が大きく働かなければならず、その実現のために、浮心重心間距離が延長する可能性がある。本研究課題では、単に浮心重心間距離の短縮がそのまま理想的な低抵抗姿勢の獲得に直結するわけではなく、適切な場所に浮心位置を調整することのできる能力こそが、水中水平姿勢を維持するために大変重要となる可能性が示唆された。BBR による水平姿勢の評価は、トップスイマーの発掘や専門種目の選択、あるいは初心者の水泳指導の際の基礎資料の一つとして大きく貢献できる可能性があることから、今後、現場での活用が期待される。

代表者所属:1.びわこ成蹊スポーツ大学 2.京都工芸繊維大学

I. 諸言

泳者の身体に作用する浮力について思案することは、水泳の技能を評価するために大変重要である。水泳技能の良し悪しを決定づける要因は様々あるが、水中特有の物理的作用である浮力をうまく利用することができれば、泳者のパフォーマンス向上が期待できる。過去の幾つかの研究においても人工的に浮力を付与するなどして、人為的に浮力に介入することで swim time, energy cost, and drag force などの泳パフォーマンスに有益な影響を及ぼすことが報告されている (Capelli et al., 1995; Chatard, Senegas, Selles, Dreanot, & Geyssant, 1995; Cordain & Kopriva, 1991; Toussaint, et al., 1988; Zamparo, Capelli, Termin, Pendergast, & di Prampero, 1996). 最近では、浮力トルクが実際のパフォーマンスに及ぼす影響を検討するため、モデルを用いたシミュレーション解析が盛んに行われている (Yanai, 2001, 2004; Nakashima, 2007). これらは興味深い幾つかの示唆を与えてはいるものの、実際にヒトの身体に作用する浮力そのものを実測したものではない。

水中で行う水泳では、ヒトは浮力と重力という 2 つの物理的影響を常に受ける。一般的に泳者のストリームライン姿勢において、浮力を受ける点 (浮心) と重力を受ける点 (重心) の位置関係には“ずれ”があり、浮心は頭部側に、重心は足部側に位置する (Hay, 1993). 浮心と重心の位置関係が遠くなればなるほど、buoyancy torque が大きくなり、下肢が沈む。下肢の沈みこみは、推進方向に対する迎角が大きくなることから圧力抵抗が増加すると考えられており、パフォーマンスの低下を引き起こす一つの要因となる。浮心位置に関する過去の研究では、年齢や性差、あるいは体格の違いや姿勢の違い、さらには肺活量の違いが、人体に働く浮力、浮心重心間距離へ及ぼす影響について報告している (Carter, 1955, 1956; Carmody, 1965; Gagnon & Montpetit, 1981; McLean & Hinrichs, 1998, 2000; Rork & Hellebrandt, 1937).

McLean & Hinrichs (1998) は、ストリームライン姿勢における人体の浮心位置の測定を試みた。この研究は、足部 (足首) の鉛直方向にかかる荷重の計測によって浮心位置を算出し、泳者の水平姿勢を評価するものであった。過去の Gagnon & Montpetit (1981) の研究では、被験者は仰臥位、上肢は体側に位置し、アルミ製のテーブルに全身を固定された状態で浮力測定が実施されたのに対し、この研究では、被験者は全身が浮遊する状態で浮力測定が実施されたことから、泳者の姿勢保持能力を検証するための研究としては、より実践的な試みであった。しかしながら、この時の被験者の荷重測定は水面にて行われ、被験者の身体多くの部分は水面から出た状態であった。さらに、McLean & Hinrichs (2000) では、手部と足部の鉛直方向荷重から浮心位置の算出を行った。この研究における浮力測定では、被験者は水面から 28 cm 下に設置されたテザーによって浸水状態で水中にとどまったが、測定中に呼吸によって被験者の身体が浮き上がったため、体の一部が水面から出ていたとの記述があり、完全浸水状態が維持されることはなかった。部分的浸水状態では、水中において人体にかかる浮力を正確に測定しているとは言い難い。さらに、この研究では肺換気量が異なる条件 (0, 25, 50, 75, and 100% of vital capacity, VC) での浮力測定と浮心位置算出が行われているが、それぞれの測定は別々に行われていることから、連続する呼吸サイクルに伴う浮心位置の移動動体を時系列的に観察することができなかった。

Cureton (1933) は、上方向に働く力が下方向に働く力よりも勝って十分に得られているとき、身体が浮きあがることを flotation とし、下向きにかかる力のことを考慮せず、単なる上方向の力のみをあらわす buoyancy との違いについて言及しながら、呼吸が人体の浮力や浮き上がりに関する能力、さらにはボディーバランスに及ぼす影響に関して記述している。アルキメデスの原理に従えば、泳者は水中に水没させた自らの体が押しのけた水の重量と等しい大きさの浮力を得ることになる。一般的に知られている通り、ヒトが

吸気すると身体の体積は増大するので、その分身体が受ける浮力も大きくなる。それとは逆に呼気の場合では、肺の浮き袋としての機能が減少するので身体は沈みやすくなる。それでは、果たして、吸気と呼気を繰り返す呼吸サイクルによって、その物理的作用が泳者の姿勢に及ぼす影響はいかなるものか、また、水泳技能の習熟度によって姿勢保持能力に違いがあるのかとの疑問を持つにいたる。あるいは、浮きあがることは依然として重要な要素ではあるものの、泳者がより効率的に推進方向に進むことを実現するためには、吸気することで増大する浮力の影響によって、胸部を上方向へと突き上げようとする力を抑制し、水平姿勢を維持し続けることが重要なのではないか。

したがって、本研究の目的は、呼吸サイクルに伴う浮力の増減が、泳者のストリームライン姿勢に及ぼす影響を検証するとともに、手部と足部にそれぞれかかる鉛直方向の荷重の時系列的変化を観察し、泳者の水平姿勢を簡便かつ定量的に評価するための新たな指標を提案することである。

II. 方法

本研究に関わる全ての実験は、びわこ成蹊スポーツ大学図書・学術委員会にて承認され、ヘルシンキ宣言の理念に則り実施された。本研究の目的や手順、関連するリスクについて十分に説明し、全ての被験者から書面によるインフォームドコンセントを得た。

【課題 1】水泳得意者と水泳不得意者の浮力・浮心重心間距離の比較

1-1 被験者

大学水泳部に所属する競泳選手 8 名（水泳得意群）と、大学運動部に所属し、これまでに専門的な水泳指導を受けたことがない一般アスリート（ラグビー：1 名，サッカー：5 名，バスケットボール：1 名，バドミントン：1 名）の 8 名（水泳不得意群）であった。水泳得意群は、いずれも 8 年以上の競技歴があり、週 12 時間以上のトレーニングを積んでいる者であった。水泳不得意群は、日頃からトレーニングに励む一般アスリートを対象に、クロールの泳力チェックテストを実施し、特に下肢の沈み込みが著しい者、もしくは、25 m を泳ぎ切ることができなかった者を抽出した。各被験者の年齢、身長、体重の平均値と標準偏差は、それぞれ、水泳得意群が年齢 19.0 ± 0.7 歳，身長 170.2 ± 5.0 cm， 65.4 ± 4.6 kg で、水泳不得意群が、年齢 18.8 ± 0.4 歳，身長 172.8 ± 6.1 cm， 67.5 ± 8.6 kg であった。

1-2 身体重心位置の算出

身体重心位置（Center of Mass，以下 CoM と略す）の測定はリアクションボード法（Hay, 1993）を参考に、簡易型フォースプレートを用いて新たに開発した重心動揺測定システム G-Gravity（フォーアシスト社製）を使用して陸上にて実施した。被験者は、仰臥位上肢拳上姿勢（ストリームライン姿勢）を保持した（図 1 参照）。被験者は吸気状態で息を止めて 3 秒間静止した。ストリームライン姿勢において、足部（外果）から手部（握り拳の中心）までの長さを x ，足部から身体重心位置までの長さを y とし、体重（ W ）は手部（ $F1$ ）と足部（ $F2$ ）にかかる鉛直方向の力の和とし、身体重心位置を次の式より求めた。

$$y = F1 \cdot x / (F1 + F2) \quad (1)$$

測定は各被験者 3 回ずつ実施し、それぞれ採取した 3 秒間の荷重データから 3 試技分の身体重心位置を算出した。得られた身体重心位置データを平均化し、各被験者の身体重心位置を決定した。

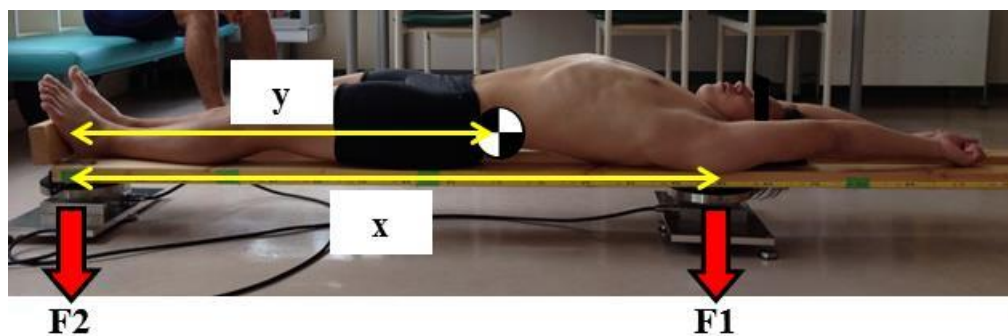


図 1. 身体重心位置の測定概要

1-3 浮力測定装置

浮力測定は、McLean & Hinrichs (2000) によって行われたものを参考にした。プールサイドに身体固定用のフレームを設置し、手部と足部の鉛直方向に、それぞれ Tension/ Compression Load Cells (LUR-A-200NSA1, KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD) を取り付け、手部および足部の鉛直方向の力の荷重から求めた。サンプリングされた信号は Digital Transducer Indicator (TD-250T, TAKEI KIKI KOGYO CO., LTD) によって増幅され、コンピュータで記録した。それぞれの被験者には、すべての測定においてスノーケルを通して呼吸をおこなうことを教示し、口以外から空気が漏れ出ること防ぐためにノーズクリップの着用を指示した。スノーケルの先にはニューモタコグラフ方式センサ (Pneumotachograph type sensor, ARCO SYSTEM Inc.) を取り付け、専用アンプ (FM-200XB, ARCO SYSTEM Inc.) に接続し圧力差を導出した。圧力差は専用アンプで速度データに変換、出力されるので、これらをデジタル変換し、コンピュータで記録した。流量は、その速度データを積分することによって求めた。手部 (F1) にはハンドグリップを、足部 (F2) には両足の外踝を揃えて固定するためのテザーを設置し、被験者がストリームライン姿勢を保持した時、手部と足部を結ぶ線が水面と平行となるように、ハンドグリップと足部テザーの高さを調整した。また、ハンドグリップと足部テザーは、水面より 20cm の水深に設定された。この深さは、被験者が吸気することによって、身体に働く浮力が増加しても体が水面に出ることがなく、なおかつ、水圧の影響を最小限に抑え、被験者の呼吸に負担がかからないように配慮されたことによるものである。また、ハンドグリップと足部テザーには、それぞれ 4.5 kg と 2 kg の錘を設置し、対象者が安定したストリームライン姿勢で水中にとどまることができるように配慮した (図 2 参照)。

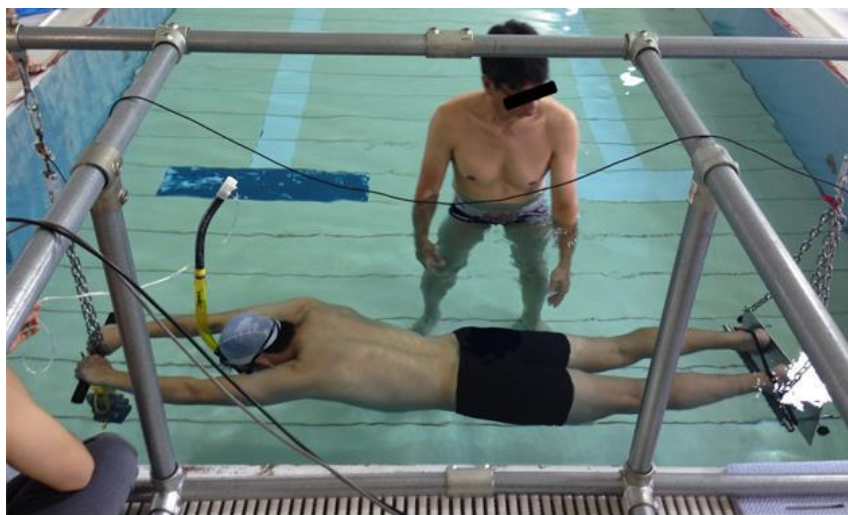


図 2. 浮力測定の実験の様子

換気流量計とロードセルによって測定されるデータは、コンピュータで完全に同期した。これら、すべての実験機器がセットされた状態で、キャリブレーションを行い、ハンドグリップと足部のテザーに取り付けられている錘にかかる浮力を相殺し、基準値 0 を規定した。また、キャリブレーションは静水状態にて行った。

1-4 浮心位置の算出

浮心位置 (Center of Buoyancy, 以下 CoB と略す) の測定では、被験者は身体重心位置測定時と同様のストリームライン姿勢を保持し、身体が水中に完全浸水した状態で測定された。被験者は、ハンドグリップと足首を結ぶ直線が水平となるように心掛け、吸気することによって増大する浮力の影響で、体が水面からでないように姿勢を保持した。被験者は両手を揃えてハンドグリップを握り、足部テザーに両足を揃えて固定することによって、ストリームライン姿勢を保持して水中に留まった。ロードセルは、F1 では被験者が握るハンドグリップの中心をとる鉛直線上に、F2 では対象者の外踝の中心をとる鉛直線上にそれぞれ設置した (図 3 参照)。

被験者が、水中で静止した状態で留まっており、身体に作用する全ての力が釣り合っていると仮定すると、下記の式により浮力(=Buoyancy force, 以下 B と略す)を求めることができる。

$$B + W + F1 + F2 = 0$$

$$B = -W - F1 - F2 \quad (2)$$

足部からの浮心位置(z)は、(1)および(2)を用い、下記の式により求めることができる。

$$F1x + Bz - Wy = 0$$

$$z = (F1x + Wy) / W \quad (3)$$

従って、水中水平姿勢での浮心重心間距離(d)は下記の式により求めることができる。

$$d = z - y \quad (4)$$

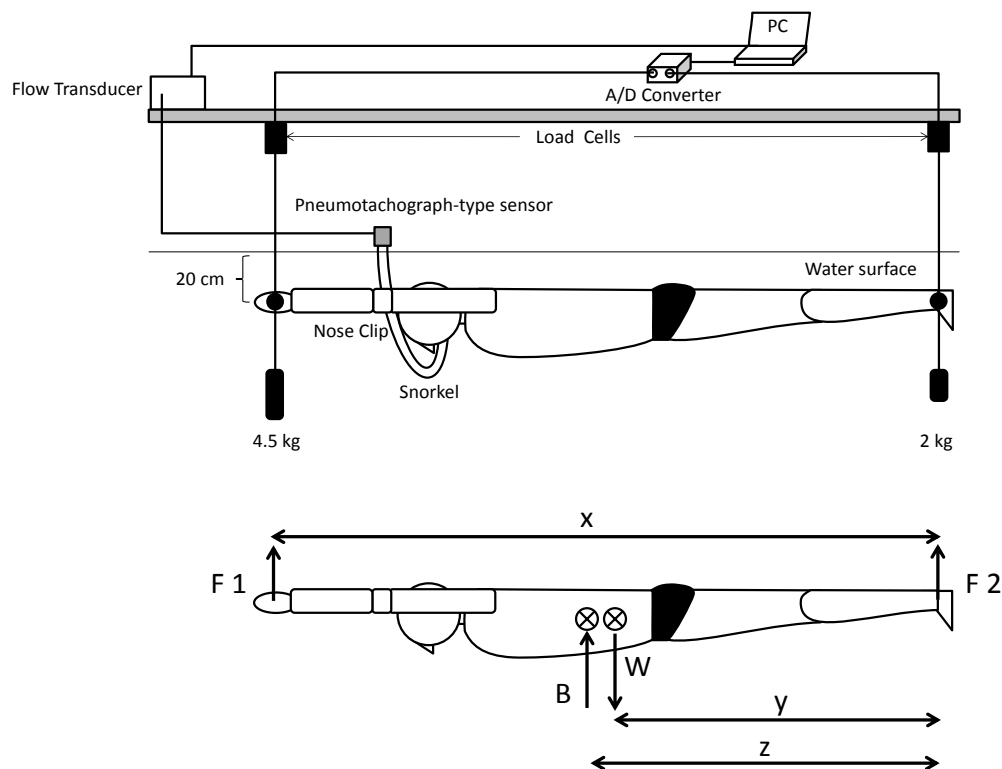


図 3. 浮力測定の概要とフリーボディーダイアグラム

1 回の試技における測定時間は 60 秒、サンプリング周波数は 100Hz とした。被験者は、測定開始の合図とともに吸気を開始した。被験者の呼吸はメトロノームによって 6 呼吸/分(5 秒吸気-5 秒呼気)にコントロールされた。浮心位置の算出にあたっては、浮力測定開始後 20 秒経過の後に最も安定した 3 呼吸分の荷重データを採用した。なお、全ての測定は静水状態で行われた。

脂肪量、体脂肪率、身体各部位の脂肪率は、インピーダンス式体組成計(タニタ製型承 D9421 号)を用いた測定した。

1-5 ストリームライン姿勢の評価

各被験者の水中水平姿勢は、中性浮力状態(F1, F2)にかかる鉛直方向の力を加算した場合に値が0となるポイント)における浮心重心間距離を基準に評価し、水泳得意者と不得意者のストリームライン姿勢を比較・検討した。

1-6 統計処理

水泳得意群と水泳不得意群のストリームライン姿勢の比較は、t検定(対応なし)を用いた。なお、有意水準は危険率5%とした。

【課題2】泳者の姿勢保持能力を簡便かつ定量的に評価する新たな評価法の開発

2-1 被験者

課題1に参加した水泳得意者8名、水泳不得意者8名と、国際大会出場レベルのジュニアトップスイマー(ジュニアトップスイマー群)10名であった。

2-2 身体重心位置及び浮力・浮心位置の測定

課題1と同様の方法にて、全ての被験者の身体重心位置、浮力・浮心位置を算出した。

2-3 水平姿勢保持能力の評価

本研究において最も重視される点は、呼吸サイクルに伴う手部・足部の鉛直方向の荷重変化から、泳者の水中水平姿勢保持能力(水中バランス保持能力)を簡便かつ定量的に評価するための新たな指標を検討することである。本研究では、この新たな指標を呼吸バランス比(Breathing Balance Ratio, 以下 BBR と略す)と定義し、泳者の水平姿勢保持能力を評価する方法として、以下の手順で算出した。

吸気によって肺換気量が増加すると、それに伴って手部・足部の鉛直方向の荷重も増加することから直線の関係が成り立つ。したがって、横軸 x を肺換気量、縦軸 y を浮力と定める一次方程式 $y=ax + b$ の式が成立する。手部(上肢)にかかる浮力と肺換気量の関係を $y = a_1x + b_1$ とあらわし、足部(下肢)にかかる浮力と肺換気量の関係を $y = a_2x + b_2$ と定義した。上記2つの式の傾き a の値を用い、被験者の水中でのストリームライン姿勢の水平維持度を示す、BBR は下記の式によって求めることができる。

$$BBR = \frac{a_2}{a_1}$$

2-4 身体に作用するトルクの算出

泳者のストリームライン姿勢維持能力を検証するため、F1, F2 にかかる荷重、CoB に作用する Buoyancy Force からトルクを算出した。これら3つの力(F1 荷重, F2 荷重, 浮力)の推定は、それぞれの力を縦軸 y 、換気量を横軸 x と定める一次方程式から息を吐き切った状態($x=0$)、最高換気量($x=Maximum Value$)の値を代入して求めた。

図4は泳者の身体に働く力の関係を模式的に示している。泳者がストリームライン姿勢を保持するとき、上肢(F1)と下肢(F2)には、鉛直方向に対して下向きの力がかかる。それに対し、浮心には肺にためられた空気の影響によって、上向きの力が発生する。泳者の身体に作用する3つの力が釣り合い、水平姿勢が保

持されていると仮定すれば, $F_1 - B = F_2$ の関係が成り立つ. トルク(T) = $F \cdot d$ によって求められることから, CoMを回転中心とする上肢トルク(T_{F1})は $F_1 \cdot d_1$ によって求めることができる. 同様に, 下肢トルク(T_{F2})は $F_2 \cdot d_2$ によって求めることができ, 浮力トルク(T_B)は, $B \cdot d_3$ によって求めることができる. 本研究課題では, T_{F1} の上肢が沈む方向のトルクを正のトルク, T_{F2} と T_B の下肢が沈む方向のトルクを負のトルクと定義した.

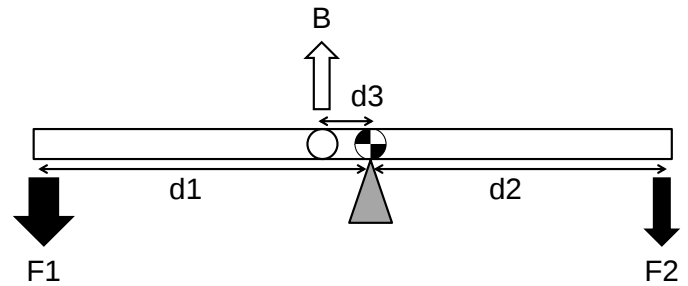


図 4. 泳者の身体に働く力の関係

CoM を回転軸とした右边と左边にかかるトルクが釣り合い, 水平姿勢が保持されていると仮定すれば T_{F1} と T_B の差が T_{F2} と等しくならなければならない. よって, $T_{F1} - T_B = T_{F2}$ の式が成り立つ.

以上の方法によって, 呼吸に伴う上肢・下肢の鉛直方向の荷重変化から, 被験者の身体に作用する浮力の大小関係, 浮心位置の移動動態, さらには, 身体に作用するトルクの関係を検証し, 水泳技能の習熟度と水中水平姿勢保持能力の関係を比較・検討した.

2-5 統計処理

各測定項目を, 水泳の技能習熟度別に比較するため一元配置分散分析(対応なし)を用いた. 有意水準は危険率 5%とした.

Ⅲ. 結果

【課題 1】

表 1 に各被験者の専門種目と身体的特徴を示す。年齢, 身長, 体重, 体脂肪率, 体脂肪量と, 身体各部位の脂肪分布率(足部脂肪量/体脂肪量, 手部脂肪量/体脂肪量, 体幹脂肪量/体脂肪量)の平均値の比較では, 水泳不得意群(NS), 水泳得意群(CS)の両群間に統計学的有意差は認められなかった。

表 1. 被験者の専門種目と身体的特徴

Subject	Group*1	Event	Age (year)	Hight (cm)	Weight (kg)	Body Fat (%)	Fat (kg)	Legs Fat (%)	Arms Fat (%)	Trunk Fat (%)
1	NS	Rugby Football	19	170.0	85.8	30.7	26.3	34.6	8.4	57.0
2	NS	Football	19	172.5	72.6	19.4	14.1	38.3	8.5	53.2
3	NS	Football	19	169.5	61.3	15.9	9.8	37.8	8.2	54.1
4	NS	Football	19	165.0	57.5	13.0	7.5	44.0	8.0	48.0
5	NS	Football	18	170.0	67.3	17.2	11.6	40.5	8.6	51.7
6	NS	Basket Ball	18	187.0	72.3	16.1	11.6	34.5	6.9	56.9
7	NS	Football	19	175.0	62.2	17.1	10.6	36.8	7.5	56.6
8	NS	Badminton	19	173.5	61.3	16.3	10.0	36.0	7.0	57.0
9	CS	Butterfly	20	165.0	64.1	16.5	10.6	43.4	8.5	49.1
10	CS	Butterfly	20	161.5	62.3	18.0	11.2	42.9	8.9	49.1
11	CS	Free style	19	170.7	69.1	22.0	15.2	38.2	7.9	57.9
12	CS	IM/Free style	18	173.1	71.9	22.5	16.2	38.3	7.4	54.3
13	CS	Backstroke	19	176.2	58.4	14.2	8.3	36.1	7.2	57.8
14	CS	Free style	19	177.1	66.7	17.7	11.8	39.0	6.8	55.1
15	CS	Butterfly	18	168.9	70.2	20.7	14.5	39.3	8.3	52.4
16	CS	IM/Breaststroke	19	168.8	60.4	15.5	9.4	39.4	8.5	52.1
Mean	NS		18.8	172.8	67.5	18.2	12.7	37.8	7.9	54.3
SD			0.4	6.1	8.6	5.0	5.4	3.0	0.6	3.0
Mean	CS		19.0	170.2	65.4	18.4	12.2	39.6	7.9	53.5
SD			0.7	5.0	4.6	2.9	2.7	2.3	0.7	3.2

*1 NS: Non Swimmer, CS: Collegiate Swimmer

図 5 に水泳不得意群と水泳得意群の中性浮力における肺換気量と浮心重心間距離の結果を示す。ストリームライン姿勢における肺換気量を比較した結果, 水泳不得意群で 2.51 ± 0.39 l, 水泳得意群で 2.20 ± 0.41 l となり, 両群間に統計学的有意差は認められなかった(図 5-a)。一方で, 浮心重心間距離では, 水泳不得意群が 2.08 ± 0.40 cm に対し, 水泳得意群が 1.66 ± 0.25 cm となり, 両群間に統計学的有意差が認められた($p < 0.05$) (図 5-b)。

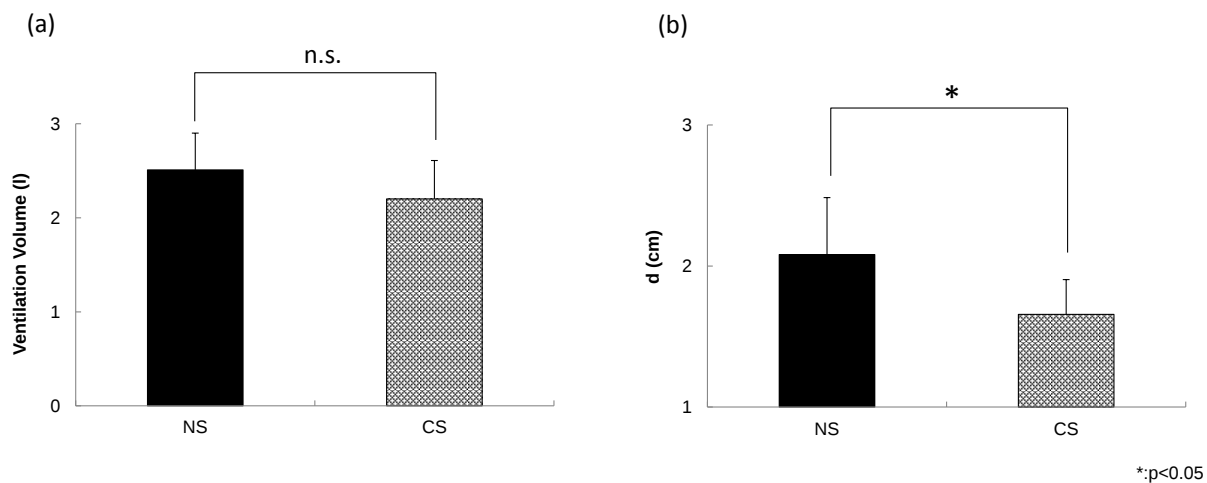


図 5. 中性浮力時の肺換気量と浮心重心間距離の比較

【課題 2

表2に各被験者の呼吸バランス比(BBR), 中性浮力の肺換気量と浮心重心間距離, 最高換気量と浮心重心間距離の結果を示す.

表 2. 各被験者の呼吸バランス比, 肺換気量, 浮心重心間距離の結果

Subject	Group ^{*1}	BBR	LV _N ^{*2}	d _N ^{*3}	LV _{Max} ^{*4}	d _{Max} ^{*5}
1	NS	0.63	2.16	1.10	3.37	1.50
2	NS	0.65	3.35	2.13	3.03	2.01
3	NS	0.59	2.30	2.09	2.20	2.03
4	NS	0.64	1.99	2.29	1.41	2.03
5	NS	0.63	2.79	2.34	2.63	2.27
6	NS	0.59	2.48	2.01	2.81	2.15
7	NS	0.63	2.49	2.14	2.50	2.14
8	NS	0.62	2.51	2.55	2.43	2.52
9	CS	0.72	1.77	1.54	2.91	1.92
10	CS	0.62	1.72	1.16	2.25	1.37
11	CS	0.65	2.07	1.64	2.59	1.82
12	CS	0.67	2.51	1.47	3.20	1.71
13	CS	0.60	1.81	1.85	2.07	1.99
14	CS	0.63	2.80	1.96	2.80	1.95
15	CS	0.64	2.75	1.73	2.48	1.58
16	CS	0.64	2.18	1.89	2.26	1.91
17	JTS	0.67	2.77	1.94	3.73	2.38
18	JTS	0.70	2.80	1.92	2.77	1.90
19	JTS	0.74	2.03	2.21	3.38	2.80
20	JTS	0.69	1.61	2.35	2.43	2.80
21	JTS	0.71	1.94	1.88	3.36	2.51
22	JTS	0.71	1.32	1.90	1.84	2.18
23	JTS	0.71	2.20	1.59	2.80	1.84
24	JTS	0.70	1.43	1.70	2.26	2.08
25	JTS	0.68	2.51	1.76	3.90	2.29
26	JTS	0.73	2.09	1.87	2.42	2.02
Mean	NS	0.62	2.51	2.08	2.55	2.08
SD	NS	0.02	0.39	0.40	0.55	0.27
Mean	CS	0.65	2.20	1.66	2.57	1.78
SD	CS	0.04	0.41	0.25	0.36	0.20
Mean	JTS	0.70	2.07	1.91	2.89	2.28
SD	JTS	0.02	0.49	0.21	0.64	0.33

*1 NS: Non Swimmer, CS: Collegiate Swimmer, JTS: Junior Top Swimmer

*2 Lung Volume at the Neutral Buoyancy

*3 CB/CM distance at the Neutral Buoyancy

*4 Lung Volume of the Maximum value

*5 CB/CM distance when the Maximum Value of Lung Volume

図 6 に、水泳技能習熟度別に各群から 1 名ずつ抽出した 1 試行の解析データを示す。被験者 3 は、水泳不得意群、被験者 11 は水泳得意群、被験者 20 はジュニアトップスイマー群であり、被験者番号は、表 2 と対応している。被験者の浮力測定における F1 ならびに F2 の荷重データの切片の値は、空気を吐き切った状態での鉛直方向の力を示していることから、この 2 つの力の合計は、各被験者の水中体重として置き換えることができる。3 群間の平均値は、水泳不得意群が F1:11.17±2.46 N, F2:17.36±2.80 N, 水泳得意群が F1:9.83±2.49 N, F2:14.61±2.44 N, トップスイマー群が F1:10.41±2.98 N, F2:16.49±2.27 N であり、群間に統計学的有意差は認められなかった。

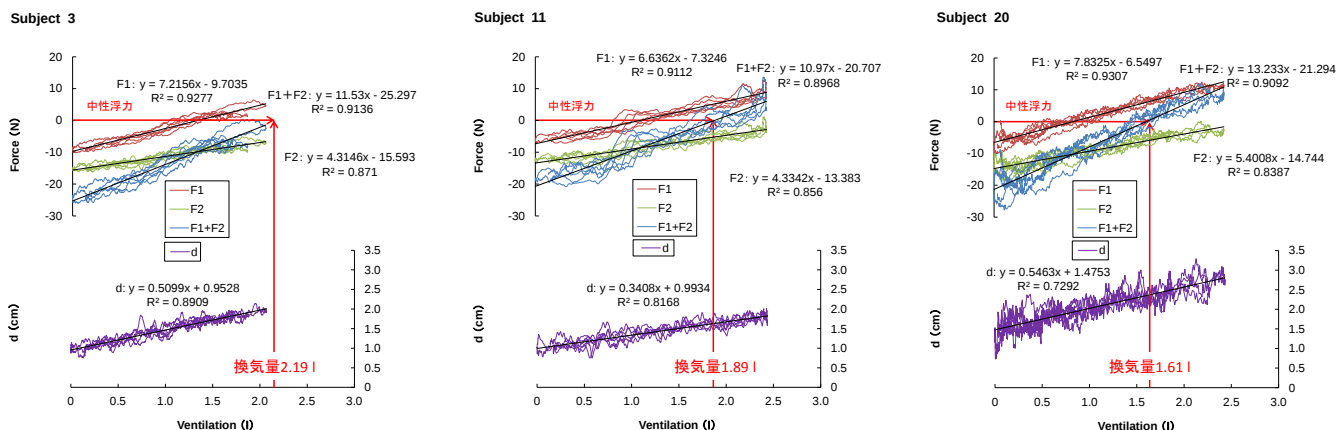


図 6. 技能習熟度別の浮力・浮心重心間距離の比較

図 7 に、各項目の平均値を水泳習熟度別に比較した結果を示す。呼吸バランス比でジュニアトップスイマー群が水泳不得意群、水泳得意群と比べて有意に高い値を示した($p<0.001$) (図 7-a)。肺換気量では、中性浮力換気量(LV_N)ならびに最高換気量(LV_{Max})共に3群間の違いは認められなかった(図 7-b)が、最高換気量から中性浮力換気量を除いた肺換気変化量では、ジュニアトップスイマー群が 0.82 ± 0.46 l で、水泳不得意群の 0.04 ± 0.51 l と比べて有意に高い値を示した($p<0.01$) (図 7-c)。中性浮力時の浮心重心間距離(d_N)では、水泳不得意群が 2.08 ± 0.40 cm で、水泳得意群の 1.66 ± 0.25 cm と比べて有意に高い値を示した($p<0.05$)。最高換気量の浮心重心間距離(d_{Max})では、ジュニアトップスイマー群が 2.28 ± 0.33 cm で、水泳得意群の 1.78 ± 0.20 cm と比べて有意に高い値を示した($p<0.01$) (図 7-d)。

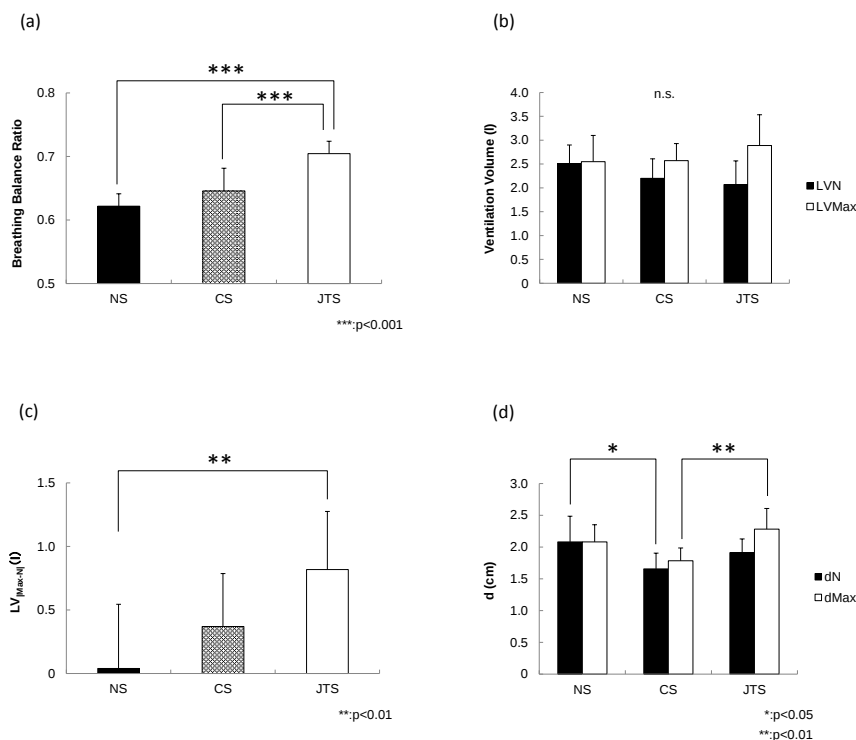


図 7. 呼吸バランス比、肺換気量と浮心重心間距離の比較

図 8 に、身体に働くトルクの平均値を水泳習熟度別に比較した結果を示す。息を吐き切った状態では、F1 荷重、F2 荷重の結果に 3 群間で違いは認められず、各トルクの平均値の結果も同様に、3 群間で統計学的有意差は認められなかった(図 8-a)。一方で、最高換気量における F1、F2 の荷重では 3 群間に統計学的有意差が認められた(F1、F2 共に $p<0.01$)。最高換気量における上肢トルク(T_{F1})と下肢トルク(T_{F2})の平均値の結果では、3 群間で統計学的有意差が認められた(図 8-b)。息を吐き切った状態、最高換気量における浮力の結果に、3 群間で違いは認められなかったが、浮力トルク(T_B)では、ジュニアトップスイマー群と水泳得意群の間に統計学的有意傾向が見られた($p=0.54$)。

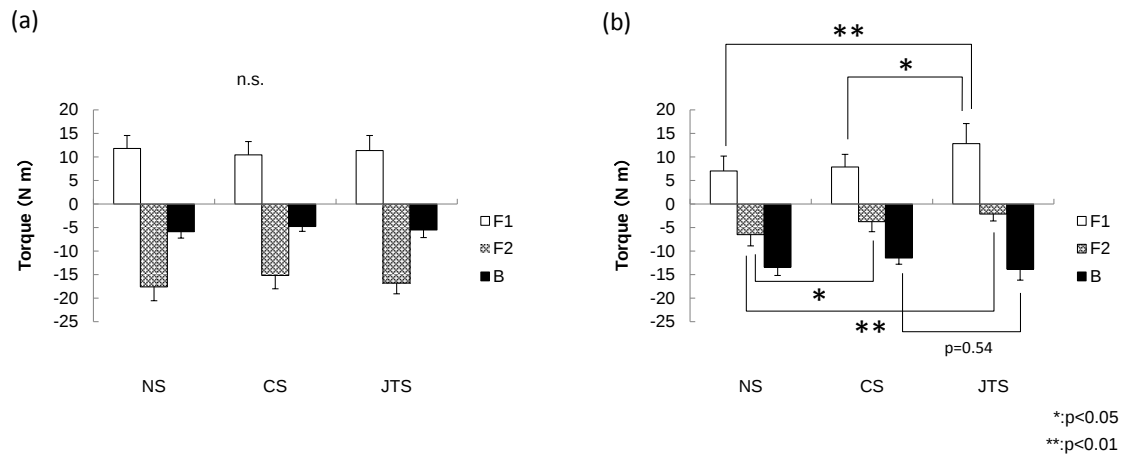


図 8. 息を吐き切った状態 (a) と最高換気量(b)における上肢トルク，下肢トルク，浮力トルクの比較

IV. 考察

【課題 1】では、水泳不得意群と水泳得意群の身体的特徴と浮力・浮心重心間距離の違いについて検討した。分析の結果、表 1 に示す通り、身長、体重、体脂肪率と身体各部位の脂肪率など、両群間の身体的特徴に統計学的有意差が認められなかった。McLean and Hinrichs (1998) による先行研究では、体脂肪率及び脂肪組織の分布の違いが、浸水している身体各部位の体積分布の違いを生じさせることから、浮心重心間距離に影響を及ぼす可能性があると報告している。また、女性が男性よりも浮心重心間距離が短かったのは、単に女性の方が男性と比べて体脂肪率が高いというだけではなく、下肢の脂肪組織の分布率が男性と比べて高いことがその要因であると記述している。下肢により多くの脂肪組織が分布する女性では、その影響によって下肢が沈みにくいと考えられることから、男性と女性の浮心位置の違いを生む可能性がある。確かに、脂肪組織は、筋組織よりも比重が小さいことから、下肢に位置する脂肪割合が多ければ水中トルクは軽減され、水平姿勢を維持できるように思われる。しかしながら、本研究課題のように、身体的特徴や中性浮力時の肺換気量に違いが認められないのにも関わらず、中性浮力時の浮心重心間距離の結果では、水泳得意群が水泳不得意群と比べて有意に短いことが示されたことは注目すべき点である。これらの結果は、McLean and Hinrichs が指摘した、浮心重心間距離を決定する要因が、脂肪量や身体各部位の脂肪組織の分布の違いだけではないことを意味する。したがって、体脂肪率や身体各部位の脂肪分布割合の違いなど、身体的特徴のみが泳者の水平姿勢を決定すると結論付けるには不十分であり、これらの要因以外の観点から、泳者の水平姿勢を評価することが大変重要となる。

【課題 2】では、呼吸が浮力・浮心重心間距離に及ぼす影響について、水泳熟練度別に 3 グループ(水泳不得意群、水泳得意群、ジュニアトップスイマー群)に分けて詳細に分析・比較しながら、泳者の水平姿勢を簡便かつ定量化するための新たな評価法の開発を検討した。本研究で提案する新たな評価法は、呼吸に伴う泳者のストリームライン姿勢の水平維持度を検討するものである。図 6 に示される通り、上肢・下肢の鉛直方向にかかる荷重は、吸気とともに増大することから、直線の関係と言える。この横軸 x を肺換気量、縦軸 y を浮力と定める、上肢・下肢それぞれの一次方程式($F1: y = a_1x + b_1$, $F2: y = a_2x + b_2$)の傾き a の値を用いて算出される Breathing Balance Ratio (=BBR) は、1 に近づくほど水平維持度が高いことを表す。つまり、呼吸によって浮力が増大しても、胸部を上方へ突き上げようとする力を抑制しながら、上肢・下肢共に均等に浮力を受けて水平姿勢を保持し続けることができる能力を示すものである。

水泳不得意群の被験者 3 では、中性浮力換気量が最高換気量を上回っていることが示されている。水泳不得意者は吸気によって空気を肺に溜めこむものの、下肢の浮き上がりが不十分であることが、被験者 3 のグラフからは読み取ることができる。脂肪量や身体各部の脂肪組織の分布の違いなど、身体的特徴の違いがなく、なおかつ、ヒトがストリームライン姿勢で肺の中に溜めこむことができる空気の量に違いがないのにもかかわらず、姿勢保持能力に違いがあるとすれば、その要因の一つに肺気中心位置の違いが関与する可能性が考えられる。

これまでの先行研究において、泳者の水平姿勢は、浮心と重心の位置関係によって評価されてきた (McLean & Hinrichs, 1998, 2000; Watanabe et al, 2014)。確かに、泳者の身体をひとつの剛体ととらえると、浮心位置と重心位置を近づけることができれば、下肢に働く沈むトルクを減少させることができる。仮に、浮心位置と重心位置が一致すれば、身体に作用するトルクは発生しないため、水平姿勢を維持し続けることができる。したがって、浮心重心間距離の短縮こそが理想的な低抵抗姿勢をもたらすと考えられてきた。しかしながら、Hay (1993) の記述にあるように、泳者のストリームライン姿勢において、浮心と重心の位置関係

に“ずれ”が生じるのであれば、泳者のストリームライン姿勢の評価には、従来の浮心重心間距離のみならず、実際に泳者の身体に働くトルクの影響を検討する必要がある。

従来のように、浮心重心間距離のみで水平姿勢を評価した場合、水泳得意群は、水泳不得意群、ジュニアトップスイマー群と比べて、短い結果を示した(図 7-d)。しかしながら、身体に働く重心まわりの回転トルクの結果に目を向けると、最高換気量時の T_{F1} は水泳技能の習熟度が上がるにつれて大きくなり、 T_{F2} は水泳技能の習熟度が上がるにつれて小さくなっている(図 8-b)。また、 $T_{F1} - T_B$ の差の値は統計学的有意差が認められないものの、水泳不得意群: $-7.38 \pm 2.82 \text{ Nm}$ > 水泳得意群: $-4.22 \pm 2.44 \text{ Nm}$ > ジュニアトップスイマー群: $-2.24 \pm 2.39 \text{ Nm}$ となり、水泳技能の習熟度が高いほど、下肢が沈むトルクに対して、上肢が沈むトルクがより強く働いている様子が観察される。実際に、BBR の結果において、ジュニアトップスイマー群は、水泳不得意群、水泳得意群と比べ、有意に高い値を示している(いずれも $p < 0.001$)ことから、ジュニアトップスイマー群はその他と比べ、より安定して水平姿勢を保持することができると言える(図 7-a)。上記のトルクの結果は、習熟度が上がるにつれて理想的な低抵抗ポジションである水平姿勢を実現している可能性を示すものであり、BBR の結果とも合致する。ジュニアトップスイマー群の浮心重心間距離は、3 群の中でも最も延長した(図 7-d)。それにもかかわらず、ジュニアトップスイマー群が BBR の結果において、高い水平姿勢維持率を実現した本研究の検証結果は、従来の浮心重心間距離の短縮が下肢沈み込みトルクの発生を抑制することができるとする報告に対して有用な示唆を与えると考える。

本研究課題において、肺換気量の結果(図 7-b)で、中性浮力換気量、最高換気量共に 3 群間の統計学的有意差は認められなかったことから、水中でストリームライン姿勢を保持した状態において、ヒトが出し入れできる空気の総量に差がないことが示されている。また、吸気によって働く浮力の結果についても同様に統計学的有意差が認められなかったことから、泳者の身体に働く物理的作用に違いがないことを意味する。最高換気量から中性浮力換気量を除した肺換気変化量(図 7-c)では、ジュニアトップスイマー群が水泳不得意群と比べて有意に高い値を示した($p < 0.05$)が、ジュニアトップスイマー群と水泳得意群の間に統計学的有意差は認められなかった。一方で、図 8-b に示す通り、水泳得意群とジュニアトップスイマー群の T_B の結果に有意傾向($p = 0.54$)が見られるということは、注目すべき点である。トルクは力と距離で決定される。浮力の結果に違いがなく、 T_B の結果に違いがあるとすれば、浮心位置が影響していることが考えられ、このことは、図 7-d の結果とも合致する。ジュニアトップスイマー群は、 T_{F1} の値がその他の群と比べて有意に大きい。なぜ、これほどまでにジュニアトップスイマー群の最高換気量における T_{F1} が大きくなるのかについて、本研究結果から説明することは困難であるが、上肢が沈むトルクを相殺し、水平姿勢を維持するためには T_B が大きく働かなければならず、その実現のために、CoB が延長する可能性がある。したがって、これまで近ければ近いほど良いとされていた浮心と重心の位置関係も、 T_{F1} と T_{F2} の大小関係に影響され、それぞれに最適な距離が存在する可能性が推察されることから、今後そのメカニズムの解明が期待される。

V. 摘要

本研究は、呼吸が浮力・浮心位置に及ぼす影響を浮心重心間距離とトルクの関係から詳細に分析し、検討しながら、泳者自身が有する水平姿勢保持能力を簡便かつ定量化するための新たな評価法として **Breathing Balance Ratio** を提案する。本研究は以下のように要約される。

1. **Breathing Balance Ratio** は、これまで注目されてこなかった“呼吸”と、泳者のストリームライン姿勢の関係を定量的に分析するための新たな評価法である。この評価法は、横軸 x を肺換気量、縦軸 y を手部・足部の鉛直方向の荷重と定める一次方程式を作成し、得られた式の傾きの値を用いて、水平姿勢維持度を評価するという点で、簡便かつ実践的である。**BBR** の結果は、身体に作用するトルクの結果からも裏付けることができることから実用可能な評価法と言える。
2. 身体的特徴、すなわち、脂肪量や身体各部の脂肪組織の分布、あるいは肺換気量によって獲得する浮力に違いがなくても、姿勢保持能力に違いがみられることが明らかとなり、その要因の一つに肺気中心位置の影響が関与する可能性がある。
3. 低抵抗ポジションである水平姿勢の実現のためには、浮心と重心の位置関係が必ずしも近い方が良いとはいいきれず、上肢と下肢に働くトルクの大小関係によって、それぞれに最適な距離が存在する可能性が推察される。

VI. 謝辞

本研究は、一般財団法人上月財団第 10 回スポーツ研究助成事業の研究助成を受けて実施されました。心より御礼申し上げます。

VII. 文献

1. Capelli, C., Zamparo, P., Cigalotto, A., Francescato, M.P., Soule, R.G., Termin, B., Pendergast, D.R., & di Prampero, P.E. (1995). Bioenergetics and biomechanics of front crawl swimming. *Journal of Applied Physiology*, 78, 674-679
2. Carmody, J.F. (1965). Factors influencing the horizontal motionless floating position of the human body. *New Zealand Journal of Physical Education*, 37, 15-18
3. Counsilman, E. J.(1968). *The Science of Swimming*. Prentice-Hall.
4. Carter, J.E.L. (1955). Buoyancy and flotation. *New Zealand Journal of Physical Education*. 6, 14-23
5. Carter, J.E.L. (1956) Buoyancy and flotation: Their relation to swimming ability and its teaching. *New Zealand Journal of Physical Education*. 8, 9-19
6. Chatard, J.C., Collomp, C., Maglischo, E. and Maglischo, C. (1990). Swimming skill and stroking characteristics of front crawl swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 11, 156-161
7. Cureton, T.K. (1933). Natural and artificial buoyancy, flotation and body balance in the water. *Beach and Pool*, 7, 272, 282-287
8. Cureton, T.K., Jr. (1951). *Physical Fitness of Champion Athletes*. Urbana, IL: University of Illinois Press.
9. Delavier, F. (2003). *Women's Strength Training Anatomy*. Champaign, IL: Human Kinetics.
10. Gagnon, M. & Montpetit, R. (1981). Technological development for the measurement of the center of volume in the human body. *Journal of Biomechanics*, 14, 235-241
11. Hay, J.G. (1993). *The biomechanics of sports technics* (4th ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
12. Highmore, G. (1955). The problem of the male non-floater. *Physical Education*, 49, 92-97
13. McLean, S.P. & Hinrichs, R.N. (1998). Sex differences in the center of buoyancy location of competitive swimmers. *Journal of Sports Science*, 16, 373-383
14. McLean, S.P. & Hinrichs, R.N. (2000). Influence of arm position and lung volume on the center of buoyancy of competitive swimmers. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 71, 2, 182-189
15. Maglischo, E. W. (1993). *Swimming Even Faster*, Mayfield.
16. Nakashima, M. (2007). Mechanical study of standard six beat front crawl swimming by using swimming human simulation model. *Journal of Fluid Science and Technology*, 2, 1, 290-301
17. Toussaint, H.M., de Groot, G., Savelberg, H.H.C.M., Vervoorn, K., Hollander, A.P. & Van Ingen Schenau, G.J. (1988). Active drag related to velocity in male and female swimmers. *Journal of Biomechanics*, 21,435-438
18. Watanabe Y., Wakayoshi K., Nomura T., Tachi M.: The Effect of Breathing on the Distance Between Center of Buoyancy and Center of Mass in Competitive Swimmers. *SPORT MONT*, 40, 41, 42. /XII, 98-104, 2014
19. Yanai, T. (2001). Rotational effect of buoyancy in frontcrawl: does it really cause the legs to sink?. *Journal of Biomechanics*, 34, 235-243
20. Yanai, T. (2004). Buoyancy is the primary source of generating bodyroll in front-crawl swimming. *Journal of Biomechanics*, 37, 605-612
21. Zamparo, P., Antonutto, G., Capelli, C., Francescato, M.P., Girardis, M., Sangoi, R., Soule, R.G. & Pendergast, D.R. (1996). Effects of body size, body density, gender and growth on underwater torque. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 6, 273-280.