呼吸様式が重心位置と浮心位置に与える影響： 水泳における水平姿勢維持への示唆

丸山 祐丞¹⁾ 近田 彰治²⁾ 矢内 利政²⁾

Yusuke Maruyama¹, Shoji Konda² and Toshimasa Yanai²: Influence of breathing technique on the center of mass and center of buoyancy: Its implications for horizontal alignment during swimming. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 57: 641-651, December, 2012

Abstract : The purpose of this study was to test the hypothesis that the position of the center of buoyancy (CB) relative to the center of mass (CM) lay more caudally when the abdominal breathing technique is used, as compared with the chest breathing technique. Ten healthy men who practiced the abdominal and chest breathing techniques participated. The position of the CB, CM, and the distance between them (CB-CM distance) were determined as time-series data during inhalation with each breathing technique, and the changes in the positions and distance due to inhalation were compared between the two techniques. The results showed that both the CB and CM translated due to the inhalation and that the amount and direction of the translations differed between the two techniques ($p < 0.01$). The increase in the CB-CM distance was significantly smaller ($p < 0.01$) with abdominal breathing (1.11 cm) than with chest breathing (1.21 cm). For both breathing techniques, the CB was located more cranially to the CM, regardless of the amount of inhalation. These data demonstrate clearly that the position of the CB relative to the CM lies more caudally with the abdominal breathing technique than with chest breathing, thus supporting our hypothesis. These results indicate that breathing technique influences the magnitude of the moment of buoyant force around the CM and the swimmer's ability to float horizontally on the water surface.

Key words : front crawl, abdominal breathing, moment

キーワード：クロール泳，腹式呼吸，モーメント

I 緒 言

水泳は人が水中で行う移動運動の一つであり，多様な泳法が確立されている．その中でも，クロール泳は最も泳速度が高い泳法として様々な水中競技で用いられる泳法であり，そのパフォーマンスを向上させる技術は水中競技の選手やコーチにとって大きな興味の対象である．クロール泳において，パフォーマンスの指標である泳速度や泳効率を向上させるためには，大きな推進力を獲得すると同時に，水の流れによって生じる抵抗を減

少させることが重要となる (Maglischo, 2003)．

そのため泳者は，水の流れに対して流線型となる姿勢，すなわち身体の長軸が進行方向に沿った姿勢，(以下「水平姿勢」と略す)を維持しながら前進することが求められる．しかしながら，クロール泳中に身体に加わる様々な外力は身体重心を通る横断軸まわりのモーメント (以下「モーメント」と略す)を生み出し，身体に矢状面上の回転をもたらす．そのため，クロール泳中に加わる水の抵抗を減少させるには，水平姿勢において外力のモーメントがつり合うように泳動作を行う必要がある．

1) 早稲田大学スポーツ科学研究科
〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15

2) 早稲田大学スポーツ科学学術院
〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15

連絡先 矢内利政

1. Graduate School of Sport Sciences, Waseda University
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama 359-1192

2. Faculty of Sport Sciences, Waseda University
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama 359-1192
Corresponding author tyamai@waseda.jp

クロール泳中にモーメントを生み出す外力は、主に、ストロークによって手部に作用する流体力、キック動作によって足部に作用する流体力、そして浮力が考えられる (Yanai and Wilson, 2008). 上肢のストロークによって手部に作用する流体力は足が沈む方向にモーメントを生み出し、泳者の下半身が沈む傾向をもたらす (中島, 2005; Yanai, 2001). そのため、外力のモーメントを釣り合わせるためには、ストロークが生み出すモーメントに対して、足が浮き上がる方向のモーメントを下肢のキック動作によって生み出さなければならない (Yanai and Wilson, 2008). しかしながら、キック動作のみで獲得できる速度を大きく上まわるクロール泳の場合、キック動作は水の流れによって生じる抵抗を増加させ (Counsilman, 1968), 泳速度や泳効率の低下の原因となりうる. よって、高い泳速度で泳効率のよいクロール泳を行うためには、キック動作による流体力のモーメントに依存しないで水平姿勢を維持することが重要である.

Yanai (2001) は、クロール泳のほぼ全ての局面において、浮力が生み出すモーメントが足を浮き上がらせる方向に作用する、すなわち、浮力のモーメントはストロークによる流体力が生み出す足沈み方向のモーメントを打ち消すように作用することを示した. このことから、足が浮き上がる方向に作用する浮力のモーメントを上昇させることは、水平姿勢を維持するために必要なキック動作を減少させるため、パフォーマンスを向上させる一つの手段となり得ると考えた (Yanai and Wilson, 2008). また Capelli et al. (1995) や Zamparo et al. (1996) は、重心よりも尾側 (腰) に巻かれたチューブの中に密度の異なる物質を挿入し、浮力のモーメントを実験的に変化させた場合、より密度が低いものを挿入することでクロール泳の泳効率が向上することを報告している. これらの先行研究は浮力のモーメントが泳効率に影響を及ぼすことを示すと同時に、重心に対する浮心の相対位置がより尾側に位置する、すなわち浮心が重心よりも頭側に位置する際には浮心と重心の水平距離 (以下「浮心-重心距離」と略す) を

短くし、浮心が重心よりも尾側に位置する際には浮心-重心距離を長くすることで、クロール泳の泳効率が向上することを示唆するものである.

浮心と重心の位置関係は身体の体積分布と質量分布によって決定される. そのため、体幹部の膨張、収縮によって生じる呼吸は浮心と重心の位置関係を変化させる. 先行研究によると、吸気を行うことにより浮心は重心に対してより頭側に移動することが明らかとなっている (Gagnon and Montpetit, 1981; McLean and Hinrichs, 2000). これは吸気時に取り込まれる空気によって胸郭上部が膨張し、浮心が頭側に移動するためであると考えられる. クロール泳においては、息継ぎを行うたびに吸気が行われるが、それは同時に浮力のモーメントに泳効率を低下させる変化をもたらすこととなる. しかしながら、人の呼吸は胸郭上部の膨張だけで生じるのではなく、胸郭の下部や腹部の膨張によっても生じる (ニューマン, 2005). 胸郭の膨張を伴う呼吸 (以下「胸式呼吸」と略す) と比較して、胸郭下部と腹部のみを膨張させる呼吸 (以下「腹式呼吸」略す) では、浮心の頭側への移動距離が減少し、重心に対する浮心の相対位置がより尾側に位置した状態で呼吸を行うことができると考えられる.

ストロークやキック動作による外力と比較して (Schleihauf, 1979; 中島, 2005), 体重と同等に加わる浮力は極めて大きな力であるといえる. そのため、重心に対する浮心の相対位置の変化は、それが微小なものであっても、外力のモーメントの釣り合いに大きな影響を及ぼす. このことから体幹部の部位を選択的に膨張させる呼吸は、浮心と重心の位置関係に変化を及ぼすことで、泳効率に影響を及ぼす技術となる可能性を有すると考えられる. しかしながら、これまでどの部位を膨張させるかという呼吸様式の違いが浮心と重心の位置関係に与える影響について検討した研究は存在しない. そこで本研究は腹式呼吸と胸式呼吸を比較した場合、重心に対する浮心の相対位置が腹式呼吸を行うことで、より尾側に位置するという仮説を検証することを目的とした.

Ⅱ 方 法

1. 被験者

被験者は健康な男性10名（年齢 25.4 ± 2.8 歳，身長 172.5 ± 6.7 cm，身体質量 69.8 ± 7.0 kg）であった．実験は早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認を得て行われた．被験者には本研究の目的，試行，危険性及び被験者の権利について説明を行い，実験参加への同意を得た．

実験に先立ち，被験者は胸式呼吸，腹式呼吸の各呼吸様式を区別して行えるように，陸上で行う練習，および水中で行う練習の2つを行った．陸上で行う練習はレスビトレース（PRM-131C，A.M.I. 社製）を用いて行った．この機械は胸部，腹部に巻かれたバンドによって，周径囲の変化を計測する機械である．被験者は，呼吸中の周径囲変化をビジュアルフィードバックされた状態で，胸式呼吸では胸部のみを膨張させて，腹式呼吸では腹部のみを膨張させて呼吸をする練習を行った．陸上の練習は1日30分の練習を2日間行うものであった．練習の前後にはフィードバックを行わない状態でそれぞれの呼吸様式の周径囲変化を取得し，被験者が各呼吸様式を区別して行える

かの確認を行った（Fig. 1）．陸上の練習が終了した後，被験者は水中で各呼吸様式を行う練習を行った．水中で行う練習は実際の測定姿勢で，それぞれの呼吸様式の練習を30分間行うものであった．

2. 実験設定

胸式呼吸，腹式呼吸を行っている際の重心位置を陸上で，そして浮心-重心距離を水中で測定することで，呼吸中の重心，浮心の位置関係を算出した．測定は呼吸様式の違いに伴う体幹形状の変化が測定装置によって阻害されないように背臥位の姿勢で行った．クロール泳は腹臥位の姿勢で行われるが，背臥位と腹臥位は共に身体の長軸が水平方向を向いていることから，両姿勢間で浮力のモーメントは同様の傾向を示す（Gagnon and Montpetit, 1981; McLean and Hinrichs, 2000）．よって背臥位の測定によりクロール泳時の浮力のモーメントについて検討が可能である．

1) 重心位置の測定

重心位置の測定はリアクションボード法と呼ばれる方法を用いた（Hay, 1994）．長さ200 cm，幅60 cm，厚さ6.5 cmの木製の板の両端に尖った支点を取り付け，片端をフォースプレート（9281C，Kistler 社製）に乗せた．フォースプ

Fig. 1 Typical output signal from the respitrace during chest and abdominal breathing before and after practice.

Fig. 2 Experimental set up for measuring the location of center of mass (CM).

レートは A/D 変換機, (Power Lab, A/D Instrments 社製) を用いてパーソナルコンピュータに取り入れた. 被験者には足部を固定するための板に足底を合わせた状態で, 背臥位で上肢を頭の横に拳上させた水平姿勢をとらせた (Fig. 2). 足部を固定するための板は足部側の支点から 1.6 cm の位置に設置した. この実験設定において, 板に加わる外力の足部側の支点まわりの合成モーメントを計算する. 力が計測された瞬間に板は静止状態であるため, 以下の式が成り立つ (式 1). 被験者を左側方から見た際 (Fig. 2) に, 足部側の支点まわりの反時計まわりに作用するモーメントを正とする.

$$\sum M_{\text{foot-side fulcrum}} = F_r \times L_r - W \times L - W_b \times L_b = 0 \quad (\text{式 1})$$

ここで, W は被験者の重量の大きさ, W_b は板の重量の大きさ, F_r は頭部側の支点に加わる垂直抗力の大きさ, L は足部側の支点から被験者の重心までの水平距離, L_b は支点から板の重心までの水平距離, L_r は二つの支点間の水平距離である. 式 1 より, 足底からの被験者の重心位置は以下の式によって算出される (式 2).

$$L_{\text{CM}} = L + L_f = \frac{F_r \times L_r - W_b \times L_b}{W} + L_f \quad (\text{式 2})$$

ここで, L_{CM} は足底からの被験者の身体重心までの距離, L_f は足部側の支点から足を固定するための板までの距離 (1.6 cm) である.

被験者には測定姿勢を維持した状態で, 乾式ガスメーター (NDS-2A-T, Sinagawa 社製) につながれた細いチューブを用いて呼吸を行わせた. 試技は最大呼気の状態から胸式呼吸, 腹式呼吸で最大吸気を行う試行をそれぞれ 3 回ずつ交互に連続して行わせるものであった. 被験者には試行をゆっくりと行うように指示し, 1 回の呼気・吸気試行はあわせて 10 秒以上の時間をかけて行わせた. 測定される重心位置の変化に, 上肢の移動による影響や肩甲骨の移動といった呼吸以外の体幹変形が影響を与えないように, 被験者はあらかじめ設定された位置に固定されたマーカーに指先を触れた状態で呼吸を行った. 各吸気試行の吸気量を乾式ガスメーターにより計測し, デジタルビデオカメラ (Exilim EX-F1, Casio 社製) とシンクロナイザー (PH-120 および PH-140, DKH 社製) によってフォースプレートの信号と時間的に同期した. 本研究に用いたフォースプレートは時間の経過と共に基線がドリフトする傾向を有していた. そのため, 測定開始時と終了時に被験者が板より降りた状態の測定を行うことで測定中 (約 3 分間) に生じたドリフト量を計測し, 計測値の補正を行った. また, 一連の測定を 2 回行うことで, 重心位置の測定における再現性を確認した. 重心位置の測定終了後, 最大呼気の状態から乾式ガスメーターにつながれたチューブより最大努力で吸気を行うことで肺活量の測定を行った. 肺活量測定は立位姿勢で行った.

2) 浮心-重心距離の測定

浮心-重心距離の測定は, 重心測定と同様の原理を用いて行った. 鉄パイプで組まれた直方体 (長さ 180 cm, 幅 60 cm, 高さ 150 cm) の両端に, 重りを取り付けた木製の板 (長さ 180 cm, 幅 45 cm, 厚さ 2 cm) を吊るした. 板を吊るしたストラップにはロードセル (LU50KSB34, Kyowa 社製) が取り付けられており, ストラップに加わる張力の計測が可能である (Fig. 3a). この装置を水中に沈めた際に, 板に加わる外力の合力と任意の点 P まわりの合成モーメントを計算する. 板は静止状態であるため, 以下の式が成り立つ (式 3, 4). 被験者を左側方から見た際

Fig. 3 Experimental set up for measuring the distance between CM and center of buoyancy (CB).

(Fig. 3) に、鉛直上向き方向を正、任意の点 P まわりに反時計まわりのモーメントを正とする。

$$\sum F = B_b + F_{t1} + F_{t1} - W_b - W_h - W_t = 0 \quad (式 3)$$

$$\sum M_p = W_b \times l_w + (F_{h1} - W_h) \times l_h - B_b \times l_b - (F_{t1} - W_t) \times l_t = 0 \quad (式 4)$$

ここで、 B_b は板に作用する浮力の大きさ、 F_{h1} ・ F_{t1} はストラップに加わる張力の大きさ、 W_b は板の重量の大きさ、 W_h ・ W_t は重りの重量と重りに加わる浮力の差である。また l_b ・ l_w ・ l_t ・ l_h は任意の点 P からそれぞれの外力の作用点までの水平距離である。式 4 より、板に作用する浮力と重力の任意の点 P まわりの合成モーメントは以下の式によって表される (式 5)。

$$B_b \times l_b - W_b \times l_w = (F_{h1} - W_h) \times l_h - (F_{t1} - W_t) \times l_t \quad (式 5)$$

被験者は板の上にて重心位置の測定と同じ姿勢をとった状態で、姿勢に変化が生じないようにストラップによって足部と上腕部を板に固定された (Fig. 3b)。足部のストラップの位置は足底から 10 cm の位置に設定した。この実験設定において被験者及び板に加わる外力の合力と被験者の身体重心まわりの合成モーメントを計算する (式 6, 式 7)。式 4 における任意の点を被験者の身体重心とした場合、測定中の被験者の姿勢は一定であり、板と被験者の合成重心の位置にはほぼ変化がないため、以下の式が成り立つ。

$$\sum F = B + B_b + F_{h2} + F_{t2} - W - W_b - W_h - W_t = 0 \quad (式 6)$$

$$\sum M_{CM} = B \times d - B_b \times l_b + W_b \times l_w + (F_{h2} - W_h) \times l_h - (F_{t2} - W_t) \times l_t = 0 \quad (式 7)$$

ここで、 W は被験者の重量の大きさ、 B は被験者の身体に作用する浮力の大きさ、 F_{h2} ・ F_{t2} は被験者が板に乗った際のストラップの張力の大きさ、 d は浮心-重心距離である。式 3, 式 5 より被験者に作用する浮力及び浮心-重心距離は以下の式によって求められる (式 8, 9)。

$$B = W + W_b + W_h + W_t - B_b - F_{h2} - F_{t2} \quad (式 8)$$

$$d = \frac{(F_{t1} - F_{t2}) \times l_t - (F_{h1} - F_{h2}) \times l_h}{B} \quad (式 9)$$

被験者には測定姿勢を維持した状態で、細いチューブを用いて呼吸を行わせた。試技は重心測定と同様の試行を行わせるものであった。各吸気試行の吸気量は最大呼気時から、ロードセル (分解能 0.063 N) によって計測される浮力 1 N の上昇を 102 ml の吸気量として換算することで推定した。浮心-重心距離の計算に用いられる被験者の重心位置には、重心測定で計測された位置を使用した。また、一連の測定を 2 回行うことで、浮心-重心距離測定における再現性を確認した。各被験者について試行中の呼吸様式を確認するため、水中窓越しに設置したビデオカメラ (HDC-

TM650, Panasonic 社製)を用いて、撮影速度30 fps で矢状面映像の撮影を行った (Fig. 6).

3. データ分析

それぞれの測定で得られたフォースプレートとロードセルの信号には、0.4 Hz のカットオフ周波数で線形位相型ローパスフィルターをかけた (Fig. 5). 各呼吸様式3回のうち、それぞれの2回目の吸気試行を分析対象とし、吸気量が同じ状態の比較を行うために吸気量の正規化を行った (Fig. 6). 両呼吸様式による吸気試行のうち、吸気開始時点での浮力が大きい試行を最大吸気量の0% (以下「%IC」と略す) とし、吸気終了時点での浮力が小さい試行の吸気量を100%IC とした. この吸気量を基に0%IC から100%IC までの間で、20%IC ごとに重心位置、浮心-重心距離、浮心位置を算出した. それぞれの測定で計測された重心位置、浮心位置は足底からの距離として算出し、各被験者の身長で正規化したものを表記した (以下「%BH」と略す). 重心測定、浮心-重心距離、それぞれの測定を2回行って得られた値を用いて測定の再現性の確認を行った. 2回目の試行についての分析は、1回目の測定で正規化された吸気量を基に行った.

浮心-重心距離測定時に得られた映像から画像

Fig. 4 A typical pictures of both breathing techniques in which the picture at the max inhalation and exhalation are overlapped. White line indicates the place of measurement.

解析ソフト (Image J, NIH) を用いて、吸気試行時に膨張した体幹部を定量化した. 分析対象である吸気試行の映像から、体幹部が膨張を開始する時の画像および体幹部が収縮を開始する直前の画像を、それぞれ吸気開始時及び吸気終了時の画像として選び出し、体幹の厚み (前後長) を計測した (Fig. 4). 厚みを計測した位置は被験者

Fig. 5 A typical data set of the raw and filtered signals recorded by the load cell and the corresponding residual.

Fig. 6 A typical data set of calculated buoyant force.

の臀部の中心から頸切痕までを10分割した位置で計測した（以下「%TR」と略す）．呼吸による体幹各部位の膨張は，呼吸による長さ変化を吸気開始時の長さで正規化したもので表記した．

4. 統計処理

結果はすべて平均±標準偏差で示した．計測の再現性には同じ条件における測定間の誤差のRoot-mean-square 値によって評価した．また重心位置，浮心位置，浮心-重心距離に関して2元配置の分散分析（呼吸様式×吸気量）で検定を行い，交互作用の有無から吸気に伴う変化の呼吸様式間での差を調べた（ $p<0.05$ ）．交互作用がみられた際の下位検定には，各吸気量の呼吸様式間に関して有意水準をボンフェローニ法によって補正したt検定を用いた（ $p<0.05/6$ ）．

Ⅲ 結 果

各試行における吸気量は，胸式呼吸で 2.8 ± 0.7 L，腹式呼吸で 2.7 ± 0.6 Lであった．100%ICの吸気量は 2.7 ± 0.6 Lであり，この吸気量は肺活量の77%に相当するものであった（Table 1）．再現性の検証結果，測定間の誤差は重心測定で $0.14\pm0.06\%$ BH，浮心-重心距離で 0.059 ± 0.031 cmであった（Table 2）．

Table 1 Vital capacity and intake volume of chest and abdominal breathing

	Vital capacity (L)	Chest breathing (L)	Abdominal breathing (L)
Average of intake volume	3.5 ± 0.9	2.8 ± 0.7	2.7 ± 0.6

Table 2 The results of the repeatability test

Position of CM (%BH)								
Air in lungs (%IC)	Chest				Abdominal			
	1st	2nd	Mean	RMSE	1st	2nd	Mean	RMSE
0%	60.47	60.47	60.47	0.11	60.42	60.46	60.44	0.12
20%	60.53	60.56	60.55	0.14	60.23	60.28	60.26	0.13
40%	60.51	60.59	60.55	0.18	60.09	60.15	60.12	0.17
60%	60.47	60.51	60.49	0.18	60.01	60.04	60.03	0.15
80%	60.42	60.45	60.44	0.17	59.97	60.01	59.99	0.16
100%	60.38	60.41	60.40	0.17	59.96	59.99	59.98	0.16
Mean	0.15				0.14			
CB-CM distance (cm)								
Air in lungs (%IC)	Chest				Abdominal			
	1st	2nd	Mean	RMSE	1st	2nd	Mean	RMSE
0%	0.61	0.65	0.63	0.09	0.61	0.67	0.64	0.10
20%	0.88	0.90	0.89	0.07	0.84	0.88	0.86	0.07
40%	1.14	1.15	1.14	0.05	1.04	1.08	1.06	0.06
60%	1.38	1.37	1.38	0.04	1.26	1.28	1.27	0.04
80%	1.60	1.58	1.59	0.04	1.48	1.48	1.48	0.04
100%	1.80	1.78	1.79	0.04	1.71	1.65	1.68	0.07
Mean	0.05				0.06			

浮心-重心距離測定時の呼吸による体幹形状変化を示した (Fig. 7). 0%TR から40%TR の位置で、腹式呼吸時の膨張が胸式呼吸時の膨張と比較して大きな値となった. また70%TR から100%TR の位置で胸式呼吸時の膨張が腹式呼吸時の膨張と比較して大きな値となった. この結果は全ての被験者において共通したものであり、浮心-重心距離測定において、全ての被験者が本研究の定義する呼吸様式を行っていたことを示すものである.

吸気に伴う重心、浮心の位置の変化を図に示した (Fig. 8). 全ての呼吸様式、全ての吸気量において、浮心は重心に対して頭側に位置していた. 重心は、胸式呼吸では0%IC から40%IC にかけて0.1%BH 頭側に移動した後、40%IC から

100%IC にかけて0.1%BH 尾側に移動した. また腹式呼吸では0%IC から100%IC にかけて0.4%BH 尾側に移動した. 浮心は、胸式呼吸では0%IC から100%IC にかけて0.6%BH 頭側に移動した. 腹式呼吸では0%IC から40%IC にかけて0.1%BH 尾側に移動し、40%IC から100%IC にかけて0.3%BH 頭側に移動した. 2元配置の分散分析の結果、重心と浮心の両方において有意な交互作用がみられ ($p < 0.01$), ポンフェローニのt検定の結果、20%IC 以上の吸気量において呼吸様式間に有意な差がみられた ($p < 0.05/6$).

浮心-重心距離は、どちらの呼吸様式においても吸気量が増えるに従って増大する結果となった

Fig. 7 Deformation of the trunk during CB-CM distance measurement.

Fig. 9 Distance between CB and CM during breathing. * represents the significant difference between breathing techniques ($p < 0.008$).

Fig. 8 The locations of CM and CB during breathing. * represents the significant difference between breathing techniques ($p < 0.008$).

(Fig. 9). 胸式呼吸では浮心-重心距離は 0%IC から 100%IC にかけて 0.61 ± 0.24 cm から 1.80 ± 0.30 cm に増加し、腹式呼吸では 0.61 ± 0.25 cm から 1.71 ± 0.31 cm に増加した. 二元配置の分散分析の結果、呼吸様式と吸気量の因子間には有意な交互作用がみられ ($p < 0.01$), 40%IC 以上の吸気量において呼吸様式間に有意な差がみられた ($p < 0.05/6$).

Ⅳ 考 察

本研究の仮説は腹式呼吸と胸式呼吸を比較した場合、腹式呼吸を行うことで、重心に対する浮心の相対位置がより尾側に位置するというものであった. 分析の結果、呼吸様式、吸気量に関わらず、浮心は常に重心に対して頭側に位置していたこと、および浮心-重心距離は腹式呼吸が胸式呼吸と比較して短くなることが明らかとなった. これらの結果は本研究の仮説を支持するものであった.

本研究で計測された重心位置は 0%IC 時に腹式呼吸で 60.47%BH, 胸式呼吸で 60.42%BH であった. また浮心-重心距離は 0%IC 時に両呼吸様式で共に 0.61 cm であった. この値は本研究と同様の被験者を対象に、同じ姿勢、同じ吸気量での計測を行った Gagnon et al. (1981) が報告している 60.06%BH, 0.56 cm と同様の値であった. また重心、浮心-重心距離それぞれの測定において、2 回の測定間の誤差は非常に小さく、この誤差は呼吸様式間の差を下回るものであった (Table 2). これらのことは、呼吸様式間に生じる差は小さいながらも、選択した測定方法はそれらの差を検出できる精度を有することを示すものである. また陸上における呼吸様式の練習時に用いたレスピトレースによる分析や浮心-重心距離測定時の映像による体幹変形の分析は、重心位置、浮心-重心距離の両測定において本研究が定める呼吸様式が適切に行っていたことを示すものである. したがって、本研究によって明らかになった呼吸様式の違いが重心、浮心位置というパラメータに影響を及ぼすという結果は十分に信頼性

のにおけるものであると結論づけられる.

浮心や重心の位置は呼吸に伴って移動しており、その移動は浮心と重心の位置関係に変化をもたらすものであった. 40%IC 以上の吸気量で腹式呼吸による浮心の頭側への移動量は、胸式呼吸と比較して 0.4%BH 小さい値であった. しかしながら、両呼吸様式間で浮心-重心距離の増大量を比べると 0.10 cm (0.06%BH に相当) しか差がみられなかった (Fig. 9). 呼吸様式間での浮心の移動量の差に対して浮心-重心距離増大の差が小さいことは、呼吸に伴う重心の移動が呼吸様式間で異なるためであると考えられる. 先行研究において、呼吸に伴う重心位置の変化は計測されておらず、浮心-重心距離の変化は浮心の移動によるものであると考察されている (McLean and Hinrichs, 2000). しかしながら本研究の結果より、重心位置は吸気と共に移動し、浮心-重心距離の変化に大きな影響を及ぼすことが示された. 特に、腹式呼吸においては、吸気の開始から終了にかけて 0.4%BH 尾側に移動していた (Fig. 8). これは浮心-重心距離の増大の 68% が重心の移動によって生じていたことを意味する. 対して、胸式呼吸では重心は吸気の前半で頭側へ 0.1%BH 移動した後、吸気の後半で尾側に 0.1%BH 移動することで吸気開始時の位置に戻っており、浮心-重心距離の増大は主に浮心の頭側への移動により生じたものであった.

呼吸に伴う重心位置の変化が呼吸様式間で差がみられるのは、呼吸を行う際の臓器の移動が呼吸様式間で異なったためであると考えられる. 1 人の被験者を対象に、それぞれの呼吸様式で呼吸を行っている際の体幹矢状面 Magnetic resonance imaging (以下「MR 画像」) を約 1 Hz のサンプリング周波数で取得し、最大吸気時の画像を比較した (Fig. 10). この MR 画像では、吸気と共に腹腔、及び腹腔内の臓器が尾側に移動すること、そしてその移動は呼吸様式間で異なることが伺える. 腹部のみを膨張させる腹式呼吸では、胸郭のみを膨張させる胸式呼吸と比較して腹腔及び腹腔内の臓器の尾側への移動が大きく、重心の位置が尾側に移動したものと考察される.

Fig. 10 MR images of trunk with chest breathing and abdominal breathing. Dotted and solid lines indicate the shapes of lung at the maximal exhalation and inhalation, respectively.

呼吸様式を変化させることによる浮心と重心の位置関係の変化は、クロール泳中に作用する浮力のモーメントを変化させるものである。100%ICの吸気量において、浮心-重心距離は腹式呼吸によって0.09 cm 短くなる、すなわち浮心の重心に対する相対位置は0.09 cm 尾側に移動するという結果であった。また、この吸気量における被験者の浮力は平均で691.5 Nであった。これらより、同一の泳者が呼吸様式のみを変化させてクロール泳を行った場合、ほとんどの局面で浮心は重心に対して頭側に位置するため (Yanai 2001)、腹式呼吸では胸式呼吸と比較して、浮力のモーメントが足が浮き上がる方向に約0.6 Nm 上昇することが期待される。この腹式呼吸を用いることによる浮力のモーメントの変化は、水平姿勢を維持するために必要なキック動作による流体力を減少させるものであり、泳効率の向上をもたらすものであると考えられる。Capelli et al. (1995) は、泳者の身体重心よりも尾側 (腰) に巻かれたチューブに密度の異なる物質を挿入し、泳者に作用する浮力のモーメントを実験的に変化させた状態でクロール泳の泳効率を計測することで、浮力の大きさ、そして、浮力のモーメントが泳効率にもたらす影響について回帰式を作成している。本研究で

得られた全被験者の100%IC時の浮力の平均値、平均体重、及び100%IC時の各呼吸様式における浮力のモーメントの平均値を、0.6—0.8 m/sのクロール泳について作成された回帰式に代入し、泳効率を算出した。その結果、体表面積あたり1 m 前進するために必要なエネルギーが胸式呼吸では $0.61 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1}/\text{m}^2$ 、腹式呼吸では $0.58 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1}/\text{m}^2$ であった。すなわち、呼吸様式を変化させることによって生じる0.6 Nmの浮力のモーメントの差は、水泳経験者が0.6—0.8 m/sで泳いだときの泳効率を5%改善することを意味する。このことはクロール泳中、どのような呼吸様式を用いるかが、泳パフォーマンスに影響を及ぼすことを示唆するものである。

本研究は呼吸様式が浮力の重心まわりのモーメントに与える影響の基礎的な知見を得るため、一般の成人男性を対象に実験を行った。100%ICの吸気量は全被験者の平均で2.7 Lであり、肺活量の77%に相当した (Table 1)。Dicker et al. (1980) によれば、クロール泳中、泳者は肺活量の約80%の吸気量で泳動作を行うことが報告されている。このことから、本研究で検討された吸気量はクロール泳中の泳者の状態を反映しうるものであると考えられる。一方、競技レベルで水泳を行う選手は本研究の被験者よりも大きな肺活量を持つ傾向を有するため (Dicker et al. 1980; 出村 1989)、競泳のクロール種目中においては、吸気される空気の体積が本研究の100%ICよりも大きくなることが予想される。吸気量が大きくなることで、呼吸様式間で生じる差をより大きなものとするのが予想されるが、吸気量の違いで呼吸様式間の差がどのようになるかは不明であり、検討が必要である。また泳動作中、水から受ける抵抗は身体の形状に大きく左右される。胸式呼吸と腹式呼吸の間では体幹部の形状が異なるため、この形状差が水の抵抗に与える影響についても検討を行う必要があるであろう。

V 結 論

本研究の目的は腹式呼吸と胸式呼吸を比較した

場合、重心に対する浮心の相対位置が腹式呼吸を行うことで、より尾側に位置するという仮説を検証することであった。浮心と重心の呼吸に伴う移動は呼吸様式間で異なっており、腹式呼吸を用いることで胸式呼吸と比較して浮心の重心に対する相対位置が、より尾側に位置することが明らかとなった。

謝辞

本研究は早稲田大学グローバル COE プログラム(アクティヴ・ライフを創出するスポーツ科学)の助成を受けて行われた。

文 献

- Capelli, C., Zamparo, P., Cigalotto, A., Francescato, M.P., Soule, R.G., Termin, B., Pendergast, D.R., and di Prampero, P.E. (1995) Bioenergetics and biomechanics of front crawl swimming. *Journal of Applied Physiology*, 78(2): 674-679.
- Counsillman, J.E. (1968) The crawl stroke. In: *The science of swimming*. Prentice Hall: New jersey, pp. 19-66.
- 出村慎一 (1989) 大学競泳選手における体格とクロール泳パフォーマンスの関係. 金沢大学教育学部紀要教育科学編, 38: 135-143.
- Dicker, S.G., Lofthus, G.K., Thornton, N.W., and Brooks, G.A. (1980) Respiratory and heart rate responses to tethered controlled frequency breathing swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(1): 20-23.
- Gagnon, M. and Montpetit, R. (1981) Technological development for the measurement of the center of volume in the human body. *Journal of Biomechanics*, 14(4): 235-241.
- Hay, J.G. (1993) *The biomechanics of sports techniques* (4th ed.). Prentice Hall: New Jersey, pp. 134-137.
- McLean, S.P. and Hinrichs, R.P. (2000) Influence of arm position and lung volume on the center of buoyancy of competitive swimmers. *Research Quarterly for Exercise and Sports*, 71(2): 182-189.
- Maglischo, E.W. (2003) Reducing resistance. In: *Swimming fastest*. Human Kinetics: Champaign, pp. 43-64.
- 中島 求 (2005) 水泳人体シュミレーションモデルによる標準的 6 ビートクロール泳の力学的考察. 日本機械学会論文集 B 編, 71: 1370-1376.
- ニューマン: 嶋田智明・平田総一郎訳 (2005) 筋骨格系のキネシオロジー. 医歯薬出版: 東京, pp. 387-398.
- Schleihauf, R.E. (1979) A hydrodynamic analysis of swimming propulsion. In: Teraud, J. and Bedingfield, E.W. (Eds.) *Swimming III, International series on sports science*, volume 8. University Park Press: Baltimore, pp. 70-109.
- Yanai, T. (2001) Rotational effect of buoyancy in front-crawl: does it really cause the legs to sink?. *Journal of Biomechanics*, 34: 235-243.
- Yanai, T. and Wilson, B.D. (2008) How does buoyancy influence front-crawl performance? Exploring the assumptions. *Sports Technology*, 2(3): 89-99.
- Zamparo, P., Capelli, C., Termin, B., Pendergast, D.R., and di Pramper, P.E. (1996) Effect of underwater torque on the energy cost, drag and efficiency of front crawl swimming. *European Journal of Applied Physiology*, 73: 195-201.

(平成24年 5 月24日受付)
(平成24年 9 月18日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2012/10/19