

早稲田大学審査学位論文

博士（スポーツ科学）

水泳における腹式呼吸の導入が
浮心 - 重心距離・水力抵抗・泳タイムに与える影響

Influence of Adopting
Abdominal Breathing Manoeuvre on
The Location of Centre of Mass and Buoyancy,
the Drag, and Swimming Time

2016年7月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

丸山 祐丞

研究指導教員： 矢内 利政 教授

第一章 序論

- 1、序・・ 1
- 2、研究小史・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

第二章 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

- 1、緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2 4
- 2、方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2 7
- 3、結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3 8
- 4、考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4 1
- 5、まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4 4

第三章 呼吸様式がグライド泳中の受動抵抗に与える影響

- 1、緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4 5
- 2、方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4 7
- 3、結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5 1
- 4、考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5 3
- 5、まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5 9

第四章 総括論議

- 1、腹式呼吸の導入が水泳パフォーマンスに与える影響・・・・・・・・ 6 1
- 2、本研究の限界・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7 0
- 3、結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7 2
- 参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7 3

第1章 緒論

1、序

“水泳競技は、まさに抵抗との戦いである”（高木ら、1997）と言われるように、水中を前進する泳者は流体である水から大きな抵抗を受けながら前進する。遊泳において水から受ける抵抗は遊泳の最大速度やエネルギー効率を決定する因子の一つであり、抵抗を軽減する技術は水泳競技の選手やコーチにとって大きな興味の対象であろう。遊泳中の水の抵抗を減らすために、泳者は頭部から足部にかけて身体の長軸が進行方向である水平方向に添う姿勢（以下「水平姿勢」と略す）を維持しながら前進し、水の流れに正対する身体の面積を最小化することが求められる。しかしながら、遊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周りの回転効果（以下「回転効果」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、遊泳中の抵抗を減少させるためには水平姿勢維持に関する外力の回転効果の釣り合いを考慮して遊泳が行われる必要がある。

遊泳中に回転効果をもたらす流体力の一つに浮力が挙げられる。人が水平姿勢で完全に水に沈んだ際、浮力の作用点である浮心は重力の作用点である重心よりも頭側に位置することで足沈み方向の回転効果（以下、足沈み効果）を生み出す（Gagnon and Montpetit, 1981; McLean and Hinrichs 2000 a, b）。浮力の足沈み効果の大きさは、遊泳中の水平姿勢に影響をあたえることで、グライド泳の到達距離（Lebranc et al., 2010）や、クロール泳のエネルギー効率（Pendergast et al., 1977; Zamparo et al., 1996）と関連することが知られており、遊泳パフォーマンスを決定する要因の一つである。

浮力の足沈み効果の大きさは泳者の身体的特徴の結果として考えられており、技術によって変化することがないものとして扱われてきた。しかしながら、浮力の足沈み効果は呼吸の技術によって変化する可能性がある。水平姿勢で吸気を行うことにより、浮心は重心

に対して頭側に移動し (McLean and Hinrichs 2000)、浮力の足沈み効果が増加する (Zamparo et al.1996)。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することで、浮心が頭側に移動するためであると考えられる。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 (Konno and Mead 1966; 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) では吸気に伴う浮心の移動が異なることで、浮力の足沈み効果が小さくなるものと考えられる。ゆえに、水泳競技で行われる様々な遊泳において、腹式呼吸を導入することは遊泳中の水平姿勢を向上させ、速度やエネルギー効率といった泳パフォーマンスを向上させるであろう。

そこで、本学位論文では、遊泳中に腹式呼吸を用いることで、胸式呼吸と比較して、浮力の足沈み効果が減少し、遊泳パフォーマンスが向上するという仮説を検証することを目的に研究を行った。

2、研究小史

遊泳中、身体の水平姿勢を維持し、水の抵抗を減少させるために重要な要素の一つである。本研究小史では、浮力の足沈み効果について行われてきた先行研究の知見についてまとめると共に、足沈み効果と遊泳パフォーマンスとの関連を説明するメカニズムについて言及することで、腹式呼吸の導入が遊泳パフォーマンスを向上させる論理について詳細に述べる。

2-1、浮力の足沈み効果

1、浮力

流体とは断続的に変形する物体であり、せん断ストレスが加わった際に流れが生じる物体として定義される。静止した流体を一つの系として定義した場合、系はその表面で接触する物体に法線方向の力を加える。この力を単位面積あたりの大きさとして表したものが流体の圧力である。

静止している流体の圧力は重力方向の深さに依存してその大きさが変化する。図 1 は水槽内で静止する水について、点線で囲まれた円柱部を系とした際の自由物体図である。系として定義した水は静止状態であるため、柱の長軸方向と短軸方向の運動方程式は以下のように成り立つ。

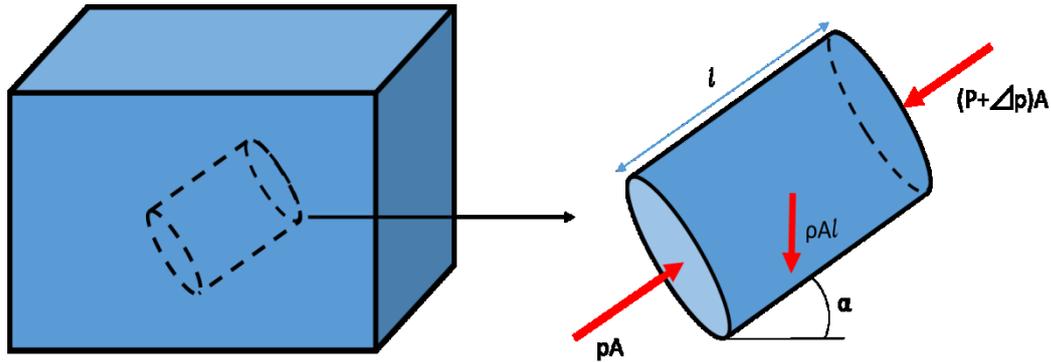


図 1 - 1 流体の自由物体図

$$\sum F_{\text{短軸方向}} = 0$$

$$pA - (p + \Delta p)A - \gamma Al \sin \alpha = 0 \quad (\text{式 1 - 1})$$

ここで、 p は円に加わる圧力の平均値、 Δp は 2 つの円に加わる圧力の平均値の差分、 A は円柱の長軸方向における横断面積、 γ は水の比重量、 l は円柱の長軸方向の長さ、 α は円柱の長軸と水平線が成す角度である。式を円柱の体積 (Al) で除し、式 1 - 1 を整理すると以下ようになる。

$$\frac{\Delta p}{l} = \gamma \sin \alpha$$

系の長軸方向の長さを極限まで 0 に近づけた場合、以下の式が成り立つ。

$$\frac{dp}{dz} = -\gamma \quad (\text{式 1 - 2})$$

式 1 - 2 は、静止している流体内では①深さが同じ点の圧力は一定であり、圧力は鉛直方向の深さによって変化すること、②流体の圧力は深さが増すことで増大すること、③流体内の圧力差は流体の比重量と深さの差分の積となることを示す。

流体内に沈んだ物体の面に加わる圧力の大きさは以下のように決定される。図 2 は静止した水中に沈んだ立方体の物体について描かれた図である。面 ABFE には、面の法線方向、すなわち x 軸の正の方向には深さに依存した圧力が加わりっており、その大きさは以

下の式で表わされる。

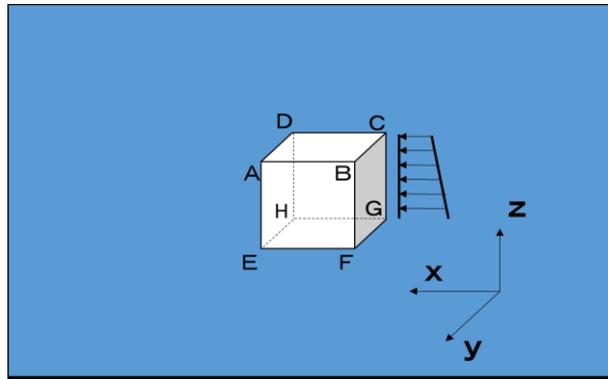


図 1 - 2 水中に沈んだ立方体

$$dF = (p_o + \gamma z) dA \quad (\text{式 1 - 3})$$

ここで、 p_o は点 o における圧力である。式 1 - 3 を面 $ABFE$ について積分すると以下の式が得られる。

$$F = \int_A (p_o + \gamma z) dA$$

$$F = p_o A + \gamma z_c A$$

ここで、 z_c は面 $ABFE$ の図心の z 座標である。 γz_c は点 o と面の図心との圧力差であるため、面 $ABFE$ に作用する圧力の合力は以下の式で表すことができる。

$$F = (p_o + p_c) A$$

また、面 $ABFE$ に加わる圧力の合力の作用点はモーメントの釣り合いのより以下の式で表される。

$$z_c F = \int_A z dF \quad (\text{式 1 - 4})$$

$$z_p = z_c + \frac{I}{z_c A} \quad (\text{式 1 - 5})$$

ここで、 I は面の断面 2 次モーメントを表す。式 1 - 4 と式 1 - 5 は、流体中に沈んだ物体の投影面に作用する圧力の合力について①力の大きさが面の図心の位置と面積によること②合力の作用点が面の図心の位置と面積、そして面積の分布によることを示す。

図 2 における面 B C G F には x 軸の正方向に水から圧力が加わる。同様に、面 A E H D には x 軸の負の方向に水から圧力が加わる。これら 2 つの面は図心の z 座標が同じであり、面積の大きさ、断面 2 次モーメントも等しい。そのため、これらの面に加わる圧力の合力は 0 となる。同様に面 A B E F と D C G H に加わる y 軸方向の圧力についてもその合力は 0 である。一方で、面 A B C D と面 E F G H に加わる z 軸方向の圧力の合力は面の図心の z 座標が異なる。そのため、力の大きさが異なり、その合力は鉛直上向き方向の力となり、その大きさは以下の式で表される。

$$F_z = \gamma V$$

この流体中に沈んだ物体に作用する鉛直上向き方向の圧力の合力は浮力と呼ばれ、その大きさは物体が排除した流体の体積と等しく、また排除した流体の体積の中心に作用する。

2、人に作用する浮力

プールで水の中に入ると、たとえ体が静止した状態でも、床に足を着かずに水面に浮かぶことができる。このようなことは多くの人が経験的に知りうる事実であろう。静止状態の体が水面に浮かぶことができるのは、体に作用する水の浮力が重力よりも大きくなるからである。浮力と重力の大きさや作用点の関係は、体が水中でどのように浮かぶかを定めるものであり、人の体の水に浮く能力として古くから研究の対象とされてきた。

浮力は水中の圧力の不均衡に起因して生じる力であり、水に沈んだ物体に鉛直上向き方に作用する。その力の大きさは物体が排除した水の重量と等しいため、体が水面に浮かぶには体の重量が同じ体積の水よりも小さい必要がある。ゆえに、体が水に浮かぶ能力は身体の重量と同じ体積の水の重量の比、すなわち、体の比重によって評価することができる。体の比重が 1 よりも大きな場合、静止状態で水に沈んだ身体は水面に浮かぶことなく水底に接地するまで沈む。一方、体の比重が 1 よりも大きな場合、静止状態で水に沈んだ身体は水面に向かい浮上し、身体に作用する浮力の大きさと重力の大きさが等しくなるように水面に浮かびあがる。また、体の比重が 1 の場合、静止状態で水に沈んだ身体は、水中で静止する。

現存する資料の中で、人の体の比重を初めて調べた研究は 18 世紀に行われた **Robertson** の研究であろう。**Robertson(1757)**は男性被験者を対象に水を溜めたタンクの中に沈むように指示し、タンク内の水位の上昇量から身体の体積と比重を求めた。この研究では 10 人の被験者のうち 9 人が水よりも軽く、身体の比重は 0.799 から 1.001 であったことが報告されている。**Robertson** の用いた方法論は、タンクの直径を小さくすることで測定の精度が上げられ (**Spivak, 1933**)、全身の比重の計測のみならず、体の各セグメントの比重の算出に用いられている(**Drillis, 1966**)。体の比重は、身体に作用する浮力と重力の差分、すなわ

ち水中体重を測定することでも算出することが可能である。Sandon (1924)や Rork ら (1937)は、重さと浮力が既知の重りを持って水中に沈んだ被験者をバネばかりで支えることで水中に静止させ、体重とバネばかりの測定値から体に作用する浮力の大きさを算出した。タンクや水中体重を用いた研究では、人の体の比重は概して 1 に近い数値であることが示された (0.976-1.049, Spicak1933; 0.923-1.002,Sandon 1924, 1935)。また、人の体は浮きやすさは性差、年齢、呼吸の影響を受けることが示されており、女性の体は男性の体と比較して比重が低いこと(Sandon 1935)、子供は成人よりも比重が低く、成長につれて比重が増加すること(Sandon, 1924; Boyd, 1933)、吸気を行うことにより身体の比重が減少し体が水に浮きやすくなること(Boyd, 1933)が示されている。

身体が水に浮かぶ能力は比重を算出するという定量的評価以外に、単純に水に浮かぶか否かという定性的な評価でも行われている。Whiting (1963, 1965)は 9 歳から 24 歳までの男性 1080 名と 10 歳から 24 歳までの女性 877 名を対象に息を吸った状態、息を吐いた状態で体が水に浮かぶか否かを調べた。この研究では①男女共に息を吸った状態で水に浮くことができない人は少数であること (1957 人中 65 人)、②15 歳以上の男性では全ての被験者が息を吐いた状態で水面に浮かぶことができなかったこと③女性は男性よりもより水に浮きやすい体をしていることが報告されている。Whiting の研究は、体が水に浮かぶか否かという点しかわからない一方で、幅広い属性の被験者を数多く評価しているため、人の身体が水に浮くか否かという疑問にわかりやすく答えを出した研究であると言えよう。

3、水平姿勢で加わる浮力の回転効果

体を水面に浮かせることは多くの人が行うことができる (Whiting 1963, 1965)。一方で、体が水に浮いている際に水平姿勢で体を静止させることができる人は稀であり、多くの人足が沈む傾向にあることが知られている (Rork 1937; Whiting 1963, 1965)。体が同一姿勢を維持しているにも関わらず、体に回転運動が生じてしまうのは浮力が回転効果を生み出すからである。水中にある物体の浮心と重心が鉛直線上に並ぶ場合、浮力が回転効果を生み出すことは無いため、その物体に回転運動は生じず、姿勢が安定した状態であるといえる。浮心と重心が鉛直線上に並ばない場合は、浮力が重心周りに回転効果を生み出し、その物体には回転運動が生じる。静止した状態で人の体が水平姿勢を保てるか否かは、古くは水上に浮かんで自然に呼吸をすることができるかという水上での生存能力に関連した事柄として研究が行われ、近年では、遊泳のパフォーマンスに関連する体の能力として研究が行われてきた。

浮力の回転効果の評価は研究間で異なる指標が用いられてきた。Pendergast らの研究グループは、水中に作成した天秤ばかりに被験者を固定し、天秤を水平に支えるために必要な力の大きさを測定することで浮力の回転効果の評価を行ったが、その回転効果は天秤ばかりの支点周りのモーメントとして算出されたものであった (Pendergast et al., 1977; Capeli et al., 1995; Zamparo et al., 1996) (図 1 - 3)。これらの研究では天秤の支点位置を決めるにあたり、呼吸を行っても計測値が変化しない点を探しだし、その点を空気中心と定義し回転効果を算出した。Under water torque と呼ばれるこの指標は、水中計測のみで指標が算出されるという利点があるものの、その指標が持つ力学的意味を正確に解釈することが難しい。一方で、Gagnon ら(1981)は、Pendergast らと同様に水中に作成した天秤ばかりを用いて浮力の回転効果を測定したが、事前にリアクションボード法 (Hay 1993)

によって被験者の身体重心位置を測定することによって、浮力の身体重心周りの回転効果を算出した。身体重心周りの回転効果は、**under water torque** と比較して、その指標が持つ力学的意味を解釈することが容易である。**Gagnon** らの研究以降、浮力の足沈み効果の大きさに関する研究は、性差の影響(**McLean and Hinrichs 1998; 2000**)、姿勢の影響(**McLean and Hinrichs 2000**)、身体組成の影響(**Zamparo et al., 1996b; Mclean and Hinrichs 1998**)、呼吸の影響 (**Zamparo 1996b; McLean and Hinrichs 2000**)といった被験者の属性や状態に関する研究がなされている。これらの研究では女性は男性と比較して浮力の足沈み効果が小さいこと、上肢を進行方向に伸ばした、いわゆるストリームライン姿勢では上肢を体幹の横に沿わせた姿勢と比較して足沈み効果が小さくなること、息を吸うことで足沈み効果が増大することが示されている。

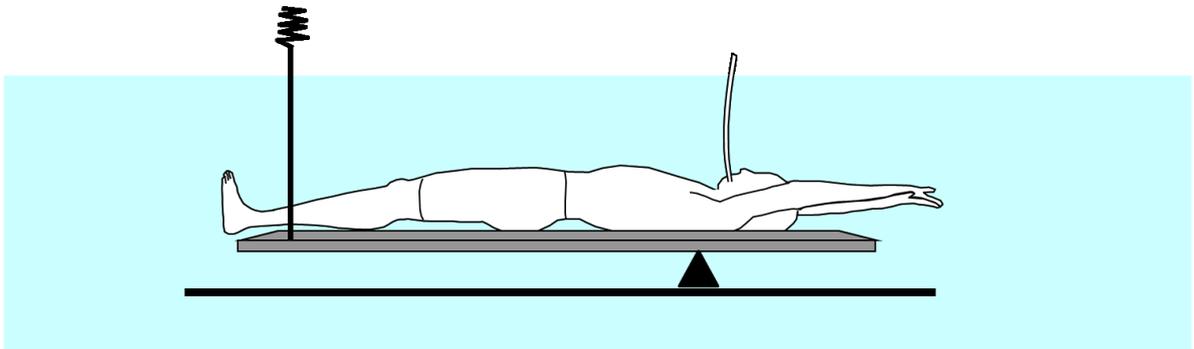


図 1-3 先行研究における浮心位置の測定

Chatard らは浮力の大きさを身体組成の結果とみなし、“swimming aptitude”(水泳の適正)と表現した。また、**Gagneon** らは浮力の足沈み効果を“Physical property”(身体の特性)と表現している。これらの言葉が示すように、人の浮力について行われてきた一連の先行研究では、浮力やその足沈み効果の大きさが泳者の身体的特徴の結果として解釈されている。浮力の足沈み効果が技術の介入により変化しうるものであるという発想で行われた研究はなく、呼吸様式の違いが、浮心の位置や、浮力の足沈み効果にどのような影響を及ぼ

すかは明らかとされていない。

1-2、グライド泳における浮力の回転効果とグライドパフォーマンスへの影響

人が遊泳を行う場合、人の体は水中を移動する。遊泳が川や海で行われた場合には、体のみではなく水も移動するであろう。水と体の間に相対速度が有る場合、体には圧力以外に接線方向の力である摩擦力が働く。また、法線方向の力である圧力もその大きさが位置のみに依存するのではなく、水と体の相対速度によっても変化する。このように、水と体の間に相対速度が生じる場合は静止状態とは異なった流体力が作用する。

水や体の相対速度によって生じる力のうち、相対速度に平行な方向に成分分けしたものは抗力、垂直に成分分けしたものは揚力と呼ばれる。抗力や揚力の方向は体と水の相対速度によって決定するため、同一の動作を行っている場合でも、体のどの部分を系とするかによってその方向が異なる。体全体を系とした際は、抗力の方向は体全体の進行方向と逆向きとなり、遊泳における水の抵抗とその方向が一致する。また、手部や足部を系とした場合、抗力や揚力の方向は動作に伴い向きが変化し、推進力や抵抗になる。本節では、遊泳中の身体周りの水の流れが生み出す流体力に関するこれまでの研究についてまとめると共に、それらの力と浮力が遊泳中の水平姿勢との関連について詳しく述べる。

1、受動抵抗

競泳におけるスタートやターンにおいては、泳者はスタート台や壁を蹴ることにより、遊泳動作によって得られる前進速度よりも大きな速度で進む。このような状況下では、遊泳動作を行うよりも一定の姿勢を維持し前進することで、速い速度をより長い時間維持することが可能である (Lyttle et al., 2000)。一定の姿勢を維持して前進する移動様式は一般的にグライド泳と呼ばれ、水泳競技の基礎的泳法の一つである。グライド泳中に作用する水の抵抗は受動抵抗とよばれ、その大きさはグライド泳のパフォーマンスを決定する重要

な要素である。

受動抵抗の大きさに関する研究は 1900 年代初頭より行われており、その方法は水中で一定の姿勢を維持した泳者を牽引によって前進させることで測定される。泳者の体を牽引によって水平方向に前進させ、その速度が一定となった場合、泳者の体に作用する力系は平衡状態にあるといえ、被験者の体の運動方程式は、以下のように表わされる。

$$F_{\text{牽引}} + F_{\text{抵抗}} = 0$$

進行方向の外力は牽引の張力と水の抵抗のみである。すなわち、推進力である牽引張力の大きさと受動抵抗の大きさは等しく、牽引の張力を計測することでその速度で前進する際の受動抵抗を知ることができる。この方法は単純、かつ簡便に測定が可能であり、異なる姿勢で前進する際の抵抗の比較、(Karpovich 1933, Counsilman 1955, Clarys 1975)、体格と受動抵抗の関係(Clarys 1974, Benjaunlle et al., 2001)、身体に作用する浮力と受動抵抗の関係 (Chatard et al., 1990)、体が前進する水深と抵抗の関係を調べた研究(Lyttle et al., 1998)、水着が抵抗に与える影響(Mollendorf et al., 2004, Chaterd and Wilson, 2008)など、数多くの研究が測定をおこなっている。

グライド中の受動抵抗は摩擦抵抗、圧力抵抗、造波抵抗の 3 つに大別される (Hay 1993)。摩擦抵抗は泳者の身体表面の接線方向に加わる力である摩擦力によって生じる抵抗であり、その大きさは泳者の前進速度、身体表面積、身体表面の滑らかさによって変化する。圧力抵抗は泳者の身体の前面に加わる圧力と後面に加わる圧力の差分によって生じる抵抗であり、その大きさは泳者の前進速度、水の流れと直行する平面に投影した身体の面積、身体の形状によって変化する。Clays ら (1974) は牽引によって計測される受動抵抗の大きさと泳者の身体的特徴との関係を調べる研究を行い、胸部の周径囲と体の細長さの指標として用いた浸水体積が受動抵抗の大きさに影響を及ぼすことを示した。これらの身体的特徴

は圧力抵抗の大きさに関わる因子である。また、Bixlar ら (2007) はストリームライン姿勢をとったマネキン人形のグライド泳を対象にシミュレーション解析を行い受動抵抗のうち圧力抵抗が 4 分 3 を占めることを報告している。これらの研究結果は、圧力抵抗の大きさが受動抵抗の大きさを決める主要な要因であり、グライド中の受動抵抗を最小化するためには、水の流れと直行する平面に投影した身体の面積が小さく、水の流れに対する身体形状が滑らかとなるグライド姿勢をとることが重要であることを示唆している。

人の身体においてどのようなグライド姿勢が圧力抵抗の大きさを最小化するかについて、論理をもって説明した研究は今のところ存在しない。しかしながら、一般的には、グライド泳中の圧力抵抗は、上肢や下肢が胴体と直線上で並ぶように伸展することで体の形状を一直線に保ち、水平姿勢を維持することで一直線の体のラインを水の流れの方向に向けることで最小化すると考えられている。このようなグライド姿勢はストリームライン姿勢とよばれ、水泳競技の現場で広く用いられているグライド姿勢である。

2、浮力の足沈み効果とグライドのパフォーマンス

浮力の足沈み効果の大きさはグライド泳中の水平姿勢を決める要因の一つである。グライド泳を行う泳者をその体が静止するまで観察すると、多くの人が前進速度の高い期間では水平姿勢を保っているのに対し、速度が低下すると共に体が足沈み方向に回転し (柴田 1992)、静止時には水平姿勢を保つことができない (Rork 1937; Whiting 1963, 1965) ことがわかる。前項で述べたように水平姿勢における浮力は足沈み効果を生み出しており、これに対して回転効果の釣り合いを保つには、水の流れによる流体力が足浮かせ効果を生み出す必要がある。また、浮力の回転効果の大きさはグライドの到達距離と負の相関関係を示すことが報告されている (Lebranc et al., 2010)。これらの観察結果や実験結果を基に、

浮力の足沈み効果とグライドパフォーマンスの関係は以下のようなメカニズムによって説明がなされてきた。グライド中の水平姿勢維持は浮力の足沈み効果と、水の流れによって生じる流体力の足浮かせ効果の釣り合いによって達成される。浮力の足沈み効果が大きい場合はより大きな足浮かせ効果を生み出すために、体を足沈み方向に傾ける必要があり、結果として抵抗が大きくなり、パフォーマンスが低下する（Gagnon and Montpetit, 1981, Mclean and Hinrichs, 2000a, b, Zamparo et al., 2009, Leblanc et al., 2010）（図 1-5）。

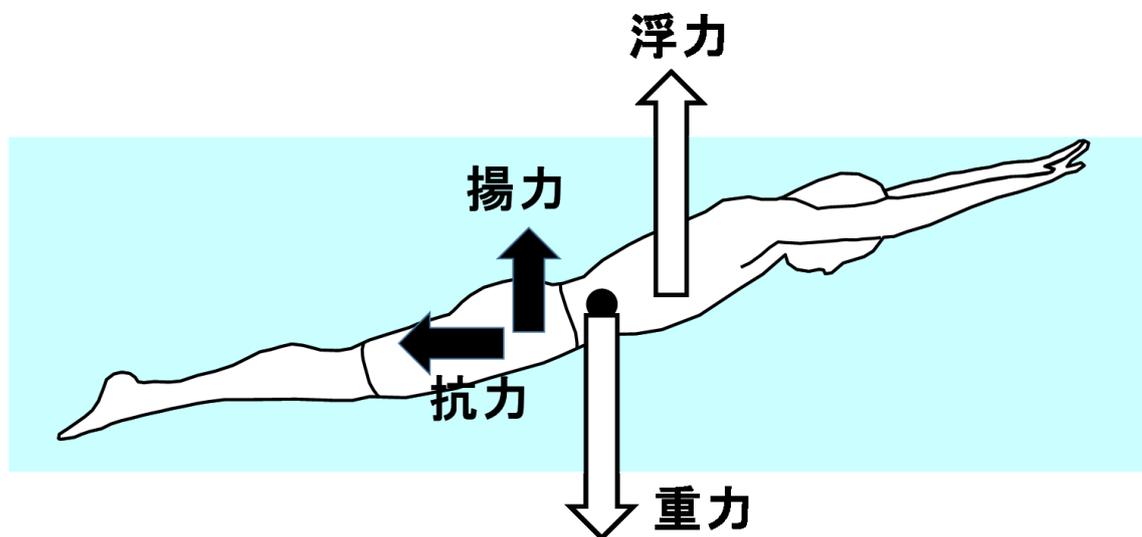


図 1-4 先行研究におけるグライド泳中の泳者についての自由物体図

先行研究では直線の身体形状を維持し、足沈み方向に体を沈めたグライド姿勢によって、外力の回転効果の釣り合いが保たれると考えられてきた。

しかしながら、上記のメカニズムはグライド中の進行方向の移動速度については説明できるものの、進行方向と直行する鉛直方向の移動速度について説明することができない。泳者が足沈み方向に体傾けた際に生じる揚力は、足浮かせ効果を生み出すだけでなく、身体重心が鉛直上向き方向に加速させる効果も生み出す。一方で、水中でグライド泳を行う

泳者を観察すると、浮力が足沈み効果を生み出しているのにも関わらず一定の距離や期間で水平にグライドすることが可能である。体を一直線に保った状態で足を傾けることで生じる流体力の足浮かせ効果と浮力の足沈み効果が回転効果の釣り合いを保つというメカニズムでは、泳者が水平にグライド泳を行うことができるというこの観察を説明することができない。体が水平に進むグライド泳を行うためには、水の流れによる流体力が上向き方向の揚力と同時に下向き方向の揚力を生み出す必要がある。よって、浮力の足沈み効果とグライド泳のパフォーマンスの関係を説明するメカニズムはこの下向き方向の揚力獲得のメカニズムが内包された形に修正される必要がある。下向き方向の揚力の獲得は首や上半身を足浮かせ方向に傾け体を一直線の形状から変化させ、水の流れを鉛直上向方向に変化させることで達成されるであろう。従って、浮力の回転効果とグライドのパフォーマンスの関係を説明するメカニズムは以下のように修正される必要がある。浮力の足沈み効果が大きいことにより、泳者の体が足沈め方向に傾くと共に、体が直線の形状から逸脱することにより、水の流れが乱されることで受動抵抗が増加する（図1-5）。

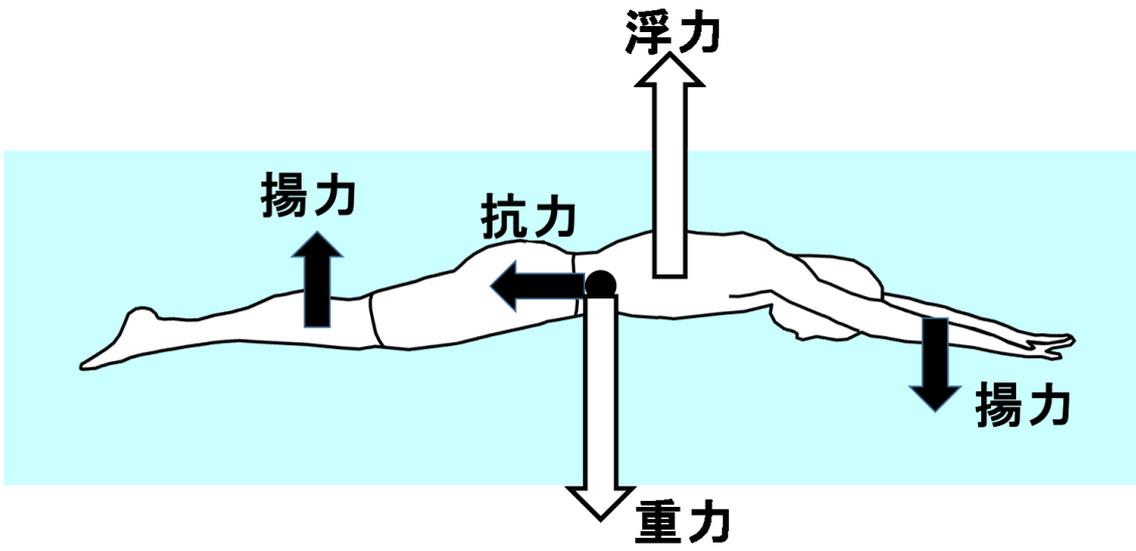


図1-5 水平なグライド泳を行う泳者についての自由物体図

1-3、クロール泳における浮力の回転効果とそのパフォーマンスへの影響

遊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泳者は左右の上肢を交互に矢状面上で回転させるストローク動作と同時に、左右の下肢を交互に上下方向に動かすキック動作を行うことによって身体を前進させる。クロール泳動作では身体の前進運動による水の流れが抵抗や揚力といった流体力を作用させるのみならず、ストローク動作やキック動作によっても流体力が作用するため、遊泳動作中の水平姿勢維持はグライド泳とは異なったメカニズムによって達成される。本節では、クロール泳動作中の浮力、キック動作、ストローク動作によって生じる流体力とその回転効果について詳しくのべ、クロール泳中の回転効果の釣り合いについて論ずる。

1、キック動作が生み出す流体力とその回転効果

クロール泳では左右の下肢を交互に動かすフラッターキックが用いられるが、フラッターキックによって生じる流体力は解明が困難な領域の一つである。クロール泳ではストローク動作とキック動作が同時に行われるが、遊泳中のキック動作が推進力を生み出すのか抵抗を生み出すかについては古くから議論が行われてきた。Councilman(1968)はその著書の中で、キック動作が生み出す流体力に関する考察を行っている。クロール泳はストロークのみで泳いだ場合とキックのみで泳いだ場合で比較した時、ストロークのみで泳いだ場合のほうが遊泳速度が高い特徴を持つ (Bucher 1975)。Councilman は、この特徴をもってクロール泳中の泳者を前輪が後輪よりも速い回転速度で回転する車に置き換え、後輪が

推進力ではなく抵抗を生み出す事実もって、キック動作が抵抗を生み出していると考えた。一方で、Hollander ら(1988)は、Mad system を用いて、ストローク動作、キック動作を両方行った通常のクロール泳動作と、足部に浮きを装着し上肢のストロークのみで遊泳の機械的仕事率を算出し、両条件間の機械的仕事率の差をもってキックが推進力を生み出していることに答えを出そうとした。この研究では、18人の被験者のうち15人の被験者でキックによって機械的仕事が生み出されていること結果が示され、最大努力の泳速度においてもキック動作が推進力を生み出すことに貢献していると考えられている。

“The kick is now accepted by most expert as an important propulsive agent, but the mechanism responsible for that propulsion remains a mystery.” (Maglisco 2003)と言われるように、クロール泳中のキック動作が推進力を生み出すかあるいは抵抗になるかについては現在も統一的な知見は得られていない。しかしながら、キック動作によって生じる流体力が生み出す回転効果は明らかに足浮かせ方向の回転効果を生み出しているであろう。Yanai はビート板を用いた一般的なキックの練習を例にキックが足浮かせ効果を産み出していることを説明している。一般的なフラッターキックの練習ではビート板を両上肢で持った状態で水平姿勢をとり、キック動作のみで体を前進させる。この際、キック動作を止めると、体は徐々に前進速度が遅くなり、体は足が沈む方向に傾いていく。キックを行っている際に加わる流体力の中で、浮力、ビート板が手部に加える力は足沈み効果を生み出していることは明らかである。また、水の抵抗は力の大きさが浮力と比較して小さく、そのモーメントアームも最大でも体の前後長までであるため、浮力の足沈み効果と比べて小さいことが予想される。ゆえに、この練習におけるキック動作以外の流体力が生み出す回転効果の合計は足沈み方向であることは明らかであり、キック動作によって水平姿勢が保たれるという事実はキック動作が足浮かせ効果を生み出していることを明確に示している。

2、遊泳動作中の浮力の回転効果

水平姿勢における浮力の足沈み効果の大きさはクロール泳のエネルギー効率に影響を及ぼす。Pedergast(1977)らは浮力の空気中心周りの回転効果と遊泳の酸素消費量に有意な相関関係があることを示した。また、Capeliら(1995)やZamparo(1996)らは重心よりも足部側に位置する腰部にチューブを巻きつけ、チューブに密度が異なる水、空気、重りをそれぞれ充填することで浮力の足沈み効果を変化させ、一定の速度でクロール泳を行かせた際のエネルギー効率を測定した。この研究では密度が高い内容物の順番にエネルギー効率が悪くなることが示されている。浮力の回転効果の大きさと遊泳パフォーマンスの関係を明らかとしたこれらの研究では、遊泳中の外力の回転効果の釣り合いが浮力の足沈み効果とキック動作による足浮かせ効果によって成されていると解釈され、浮力の足沈み効果が大きな泳者は①水平姿勢を保つために、より大きなキック動作を行う必要がある、あるいは②水平姿勢がより傾くことで水の抵抗が増加し、エネルギー効率が悪化すると解釈された。

この初期の研究では遊泳のパフォーマンス指標としてエネルギー効率が算出され、浮力の足沈み効果が最大速度に与える影響は検討されていなかった。そんな中、McLeanら(2000)は浮力の足沈み効果の大きさの個人間差と遊泳の最大速度の個人間差の相関関係を調べる研究を行っている。この研究では、クロール泳動作に伴う上肢の姿勢変化が浮力の足沈み効果に影響を及ぼしていることを考慮し、①被験者に両上肢を頭の上で進行方向に伸ばしたストリームライン姿勢、②右上肢のみを頭の上で進行方向に伸ばした姿勢、③両上肢を胴体に沿わせた姿勢、の3つの姿勢で足沈み効果の大きさを測定した。しかしながら、どの姿勢における足沈み効果の大きさも遊泳の最大速度との間に有意な相関関係はみ

られなかった。

McLean ら (2000) が測定した浮力の足沈み効果は遊泳中の浮力の回転効果を評価するにあたり大きな問題点を有する。それは遊泳中の身体が水から出ることによる浮心の移動を考慮できていないことである。浮心の位置は体が排除した水の体積中心であるため、体の一部が水面から出るとは浮心の位置を大きく移動させる。ゆえに、浮力が生み出す回転効果は体のどの部位が水面から出るかによって変化する。Rork ら(1937)は水面で水平姿勢をとる被験者の足部にバネばかりを装着し、姿勢を安定させるために必要な力の大きさを測定することで浮心重心間の距離を測定した。その結果、水面では 27 人の女性被験者のうち、1 人の被験者が水平姿勢で姿勢を安定させることができたことに対して、手首の伸展により手部を水面から出るようにした場合は浮心重心間の距離が減少し、27 人中 6 名が水平姿勢で姿勢を安定させることが可能であったことを報告している。クロール泳中はストローク動作によって水から出る身体部位が刻一刻と変化するため、遊泳中の浮力の回転効果を正確に評価するには体が水面から出る影響を考慮した分析が必要となる。

遊泳中は動作に応じて浮力以外の外力が作用するため、の浮力やその回転効果を Pendergast ら(1977)や Gagnon ら(1981)のように実測から算出することは極めて困難であり、現在もその方法論は確立されていない。しかしながら、Yanai(2001)はクロール泳を行う大学競泳選手を対象に 3 次元動作分析を行い、遊泳中の身体ランドマーク座標を用いて身体各部位を単純幾何学形状に見立てたモデルを再構築することで、遊泳中の浮力の回転効果を推定した (図 1-6)。この研究では、①静止した水平姿勢では浮心が重心よりも頭側に位置し浮力は足沈み効果を生み出しているのに対して、②クロール泳中は上肢、頭部、肩が水から出る影響で浮心が足部側に移動すること、③クロール泳動作の 1 ストロークを通じた平均では足浮かせ効果を生み出していることが示された。

Yanai(2001)が示した結果は、クロール泳中の水平姿勢が浮力の回転効果とキック動作による流体力の回転効果の釣り合うによって維持されるという定説を覆すものであった。クロール泳中の浮力の回転効果とキック動作の流体力の回転効果は共に足浮かせ効果を生み出しているため、これらの力の回転効果の釣り合いが水平姿勢を維持するというメカニズムはその論理が破綻している。Yanaiら(2001,2008)はその矛盾を考慮し、クロール泳中の水平姿勢が①浮力の足浮かせ効果、②キック動作による流体力の足浮かせ効果、③ストローク動作による流体力の足沈め効果の釣り合いによって維持されるというメカニズムを提唱している。また、Yanai(2008)は提唱したメカニズムを基に、クロール泳のパフォーマンスを向上の方策として①ストローク動作の足沈み効果の大きさを減少させる、②遊泳中の浮力が生み出す足浮かせ効果を増大させる、ことで遊泳中の水平姿勢が向上、あるいはキック動作を行う必要が減少し、泳パフォーマンス向上すると考えた。

1-4、本研究との関連

グライド泳において泳者に作用する浮力の足沈み効果が小さいことで、泳者は体をより直線に近い形に保つことができると共に、水平に近い姿勢を維持できることで、受動抵抗の大きさが減少することが考えられる。また、クロール泳では泳者に作用する浮力の足浮かせ効果が大きいことで、泳者はより小さなキック動作で水平姿勢を保つことができる、あるいはストローク動作によってより大きな推進力を獲得した場合でも、キックを大きくすることなく水平姿勢が保てることにより、遊泳の速度が向上することが考えられる。これらのメカニズムを考慮すると、遊泳中の腹式呼吸の導入は重心に対する浮心の位置がより足部側に位置することで、胸式呼吸と比較して、グライド泳、クロール泳のパフォーマンスが向上することが考えられる。しかしながら、腹式呼吸、胸式呼吸といった呼吸様式の変化が浮力の足沈め効果に与える影響は今までに検討されておらず、その遊泳パフォーマンスへの影響も検討は行われていない。

そこで、本学位論文ではまず、腹式呼吸の導入によって、胸式呼吸と比較して水平姿勢における浮力の足沈み効果が減少するという仮説を検証することで、呼吸様式の違いが浮力の足沈み効果に与える影響を検討する。次に、腹式呼吸の導入によって、胸式呼吸と比較してグライド泳時の受動抵抗が減少するという仮説の検証を行う。これらの基礎的知見を基に、グライド泳やクロール泳といった遊泳のパフォーマンスに腹式呼吸の導入が与える影響について検討を行う。

第 2 章 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

2-1、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であり (Maglischo, 2003)、泳者は水平姿勢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回転効果を生み出し、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回転効果がつり合うように泳動作を行う必要がある。

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)。ストローク動作による流体力は足沈み効果を生み出し、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、外力の回転効果を釣り合わせるためには、ストロークが生み出す回転効果に対して、足浮かせ効果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、浮力が足浮かせ効果を生み出すことを示した。このことから、Yanai ら (2008) はクロール泳中の浮力の足浮かせ効果を上昇させることが、水平姿勢維持に必要なキック動作を減少させ、遊泳パフォーマンスを向上させると考えた。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回転効果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、これまでに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。そこで本章で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。

2-2、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ピトレース（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（図 2-1）。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。

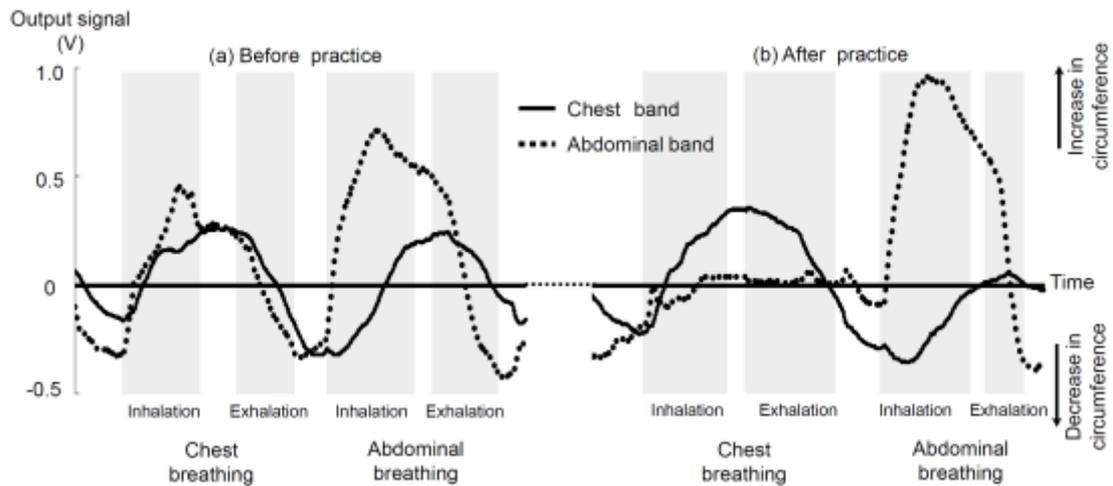


図 2-1 呼吸様式練習におけるレスピトレース計測の典型例

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 1993)。長さ 200cm、幅 60cm、厚さ 6.5cm 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。フォースプレートの信号は A/D 変換機、(Power Lab、A/D Instruments 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挙上させた

水平姿勢をとらせた（図2-2）。足部を固定するための板は足部側の支点から1.6cm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2-1）。被験者を左側方から見た際（図2-2）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。

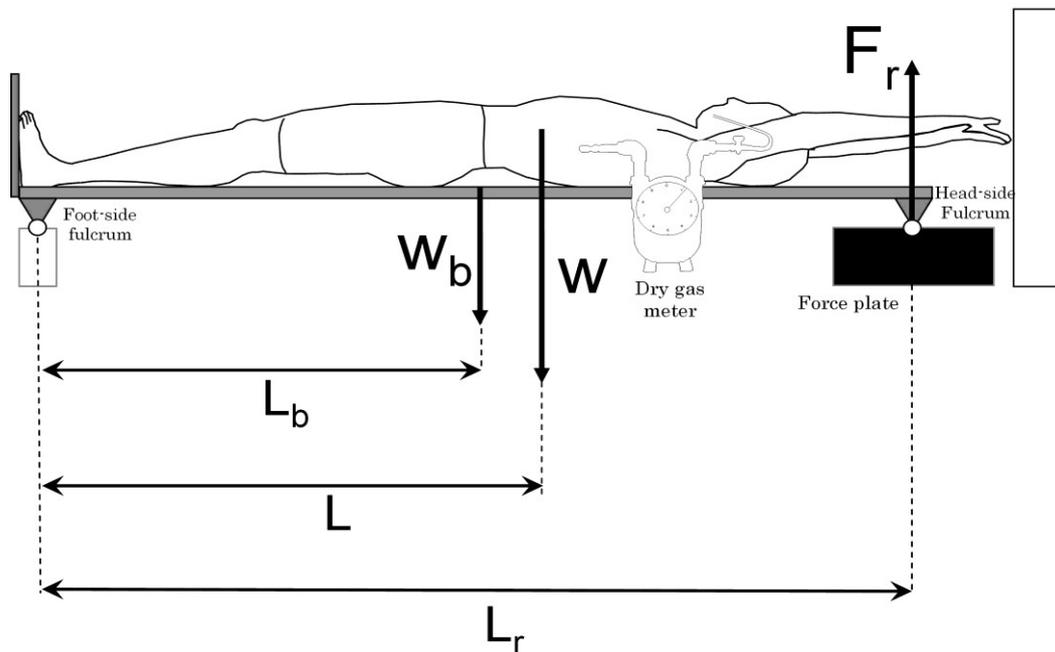


図2-2 重心位置測定の実験設定

$$\begin{aligned} \sum M_{foot-side\ fulcrum} &= F_r \times L_r - W \times L - W_b \times L_b \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{式2-1})$$

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2-2）。

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

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 (1.6cm) である。

被験者には測定姿勢を維持した状態で、乾式ガスマーター (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・吸気試行をあわせて 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マ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マ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 180cm、幅 60cm、高さ 150cm) の両端に、重りを取り付けた木製の板 (長

さ 180cm、幅 45cm、厚さ 2cm) 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 (図 2-3a)。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 2-3、2-4)。被験者を左側方から見た際 (図 2-3) 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。

$$\begin{aligned}\sum F &= B_b + F_{h1} + F_{t1} - W_b - W_h - W_t \\ &= 0\end{aligned}\quad (\text{式 2-3})$$

$$\begin{aligned}\sum M_p &= W_b \times l_w + (F_{h1} - W_h) \times l_h - B_b \times l_B - (F_{t1} - W_t) \times l_t \\ &= 0\end{aligned}\quad (\text{式 2-4})$$

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 2-5)。

$$B_b \times l_B - W_b \times l_w = (F_{h1} - W_h) \times l_h - (F_{t1} - W_t) \times l_t \quad (\text{式 2-5})$$

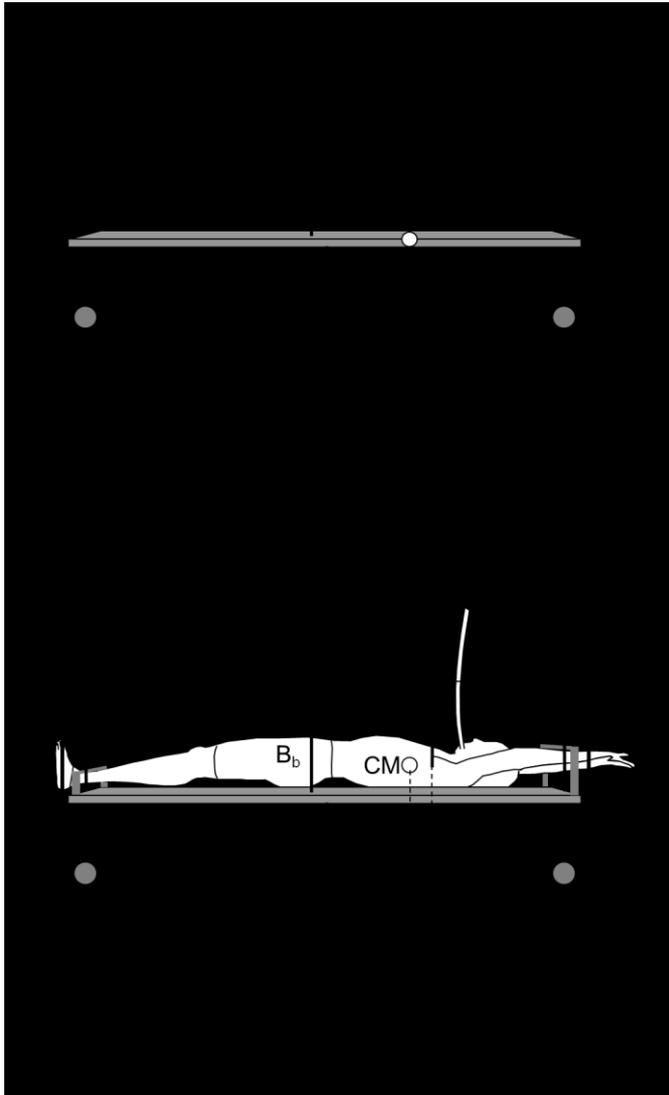


図 2-3 浮心位置測定の実験設定

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ストラップによって足部と上腕部を板に固定された (図 2-3 b)。足部のストラップの位置は足底から 10cm 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 2-6、式 2-7)。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。

$$\begin{aligned}\sum F &= B + B_b + F_{h2} + F_{t2} - W - W_b - W_h - W_t \\ &= 0\end{aligned}\quad (\text{式 2-6})$$

$$\begin{aligned}\sum M_{CM} &= B \times d - B_b \times l_B + W_b \times l_W + (F_{h2} - W_h) \times l_h - (F_{t2} - W_t) \times l_t \\ &= 0\end{aligned}\quad (\text{式 2-7})$$

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 2-8、式 2-9)。

$$B = W + W_b + W_h + W_t - B_b - F_{h2} - F_{t2} \quad (\text{式 2-8})$$

$$d = \frac{(F_{t1} - F_{t2}) \times l_t - (F_{h1} - F_{h2}) \times l_h}{B} \quad (\text{式 2-9})$$

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 0.063N) によって計測される浮力 1N の上昇を 102ml 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 30fps で矢状面映像の撮影を行った (図 2-4)。

胸式呼吸



腹式呼吸



図 2-4 呼吸様式を用いた吸気の典型例。写真は最大吸気時と最大呼気時を重ね合わせたものである。各白線は計測位置を示す。

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、0.4Hz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（図2-5）。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（図2-6）。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。

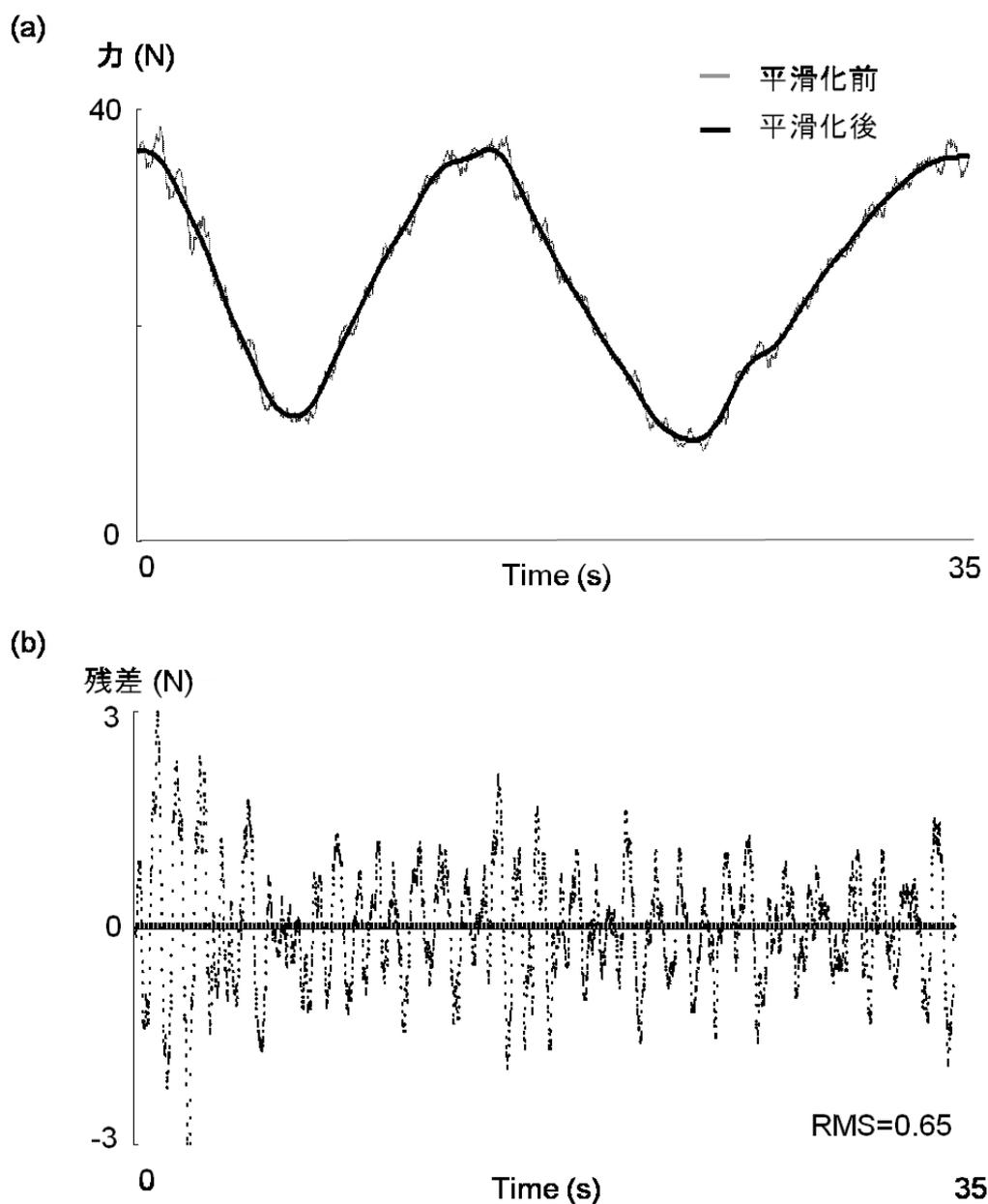


図 2-5 ロードセルによって計測された計測値データと平滑化されたデータ、及び残差

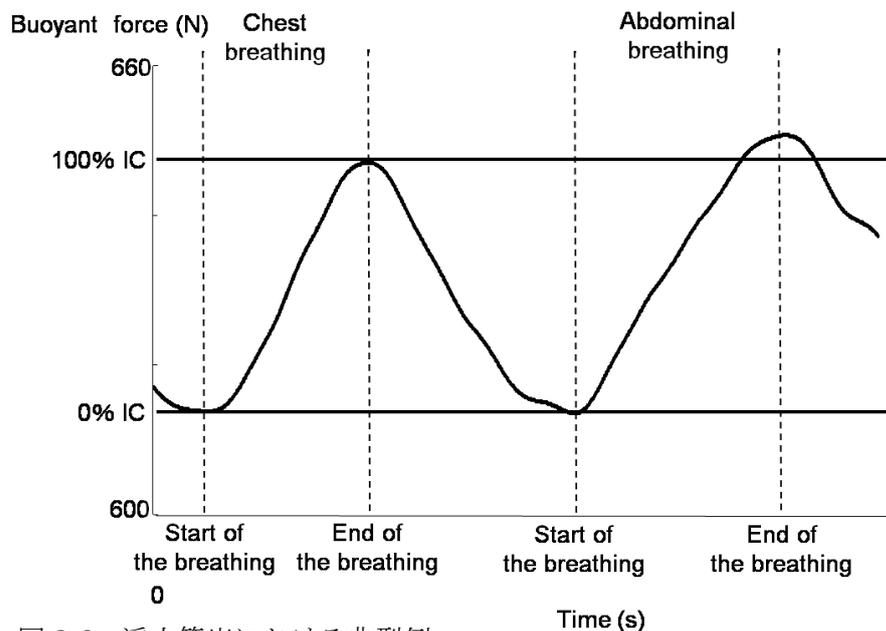


図 2-6 浮力算出における典型例

浮心 - 重心距離測定時に得られた映像から画像解析ソフト (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 (図 2-4)。厚みを計測した位置は被験者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 ($p < 0.05/6$)。

2-3、結果

各試行における吸気量は、胸式呼吸で $2.8 \pm 0.7L$ 、腹式呼吸で $2.7 \pm 0.6L$ であった。100% IC の吸気量は $2.7 \pm 0.6L$ 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 (表 2-1)。再現性の検証結果、測定間の誤差は重心測定で $0.14 \pm 0.06\%BH$ 、浮心-重心距離で $0.059 \pm 0.031cm$ であった (表 2-2)。

表 2-1 肺活量と腹式呼吸、胸式呼吸における吸気量

	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

表 2-2 重心位置、重心-浮心距離測定の再現性

		Position of CM (%BH)							
Air in lungs		Chest				Abdominal			
(%IC)	1st	2nd	Mean	RMSE	1st	2nd	Mean	RMSE	
0%	80.47	80.47	80.47	0.11	80.42	80.46	80.44	0.12	
20%	80.53	80.58	80.55	0.14	80.23	80.28	80.26	0.13	
40%	80.51	80.58	80.55	0.18	80.08	80.15	80.12	0.17	
60%	80.47	80.51	80.49	0.18	80.01	80.04	80.03	0.15	
80%	80.42	80.45	80.44	0.17	80.97	80.01	80.99	0.16	
100%	80.38	80.41	80.40	0.17	80.96	80.99	80.98	0.16	
Mean				0.15				0.14	

		CB-CM distance (cm)							
Air in lungs		Chest				Abdominal			
(%IC)	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	1.28	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 (図 2-7)。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。

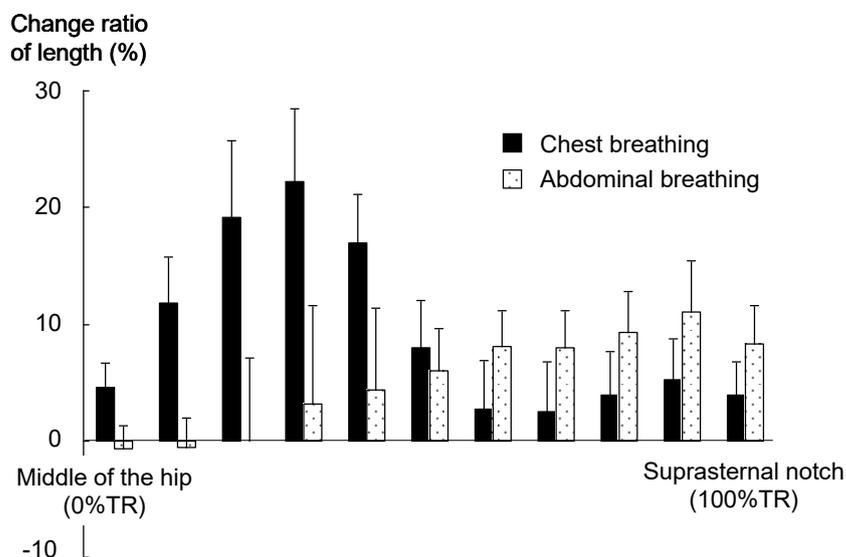


図 2-7 重心—浮心距離測定中の胴体部の変形

吸気に伴う重心、浮心の位置の変化を図に示した（図 2-8）。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 ($p < 0.01$)、ボンフェローニの 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 ($p < 0.008$)。

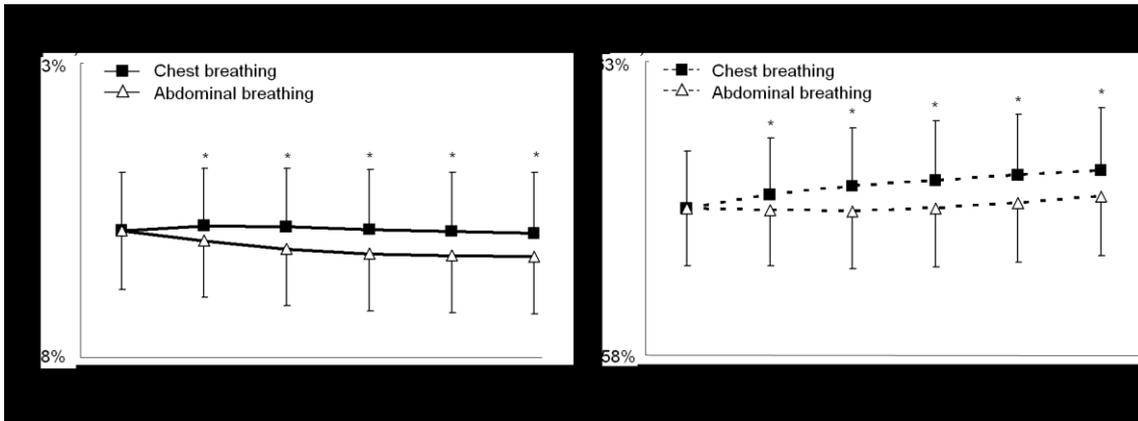


図 2-8 各呼吸様式中の重心位置と浮心位置。*は呼吸様式間で有意な差があったことを示す ($p<0.008$)。

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 (図 2-9)。胸式呼吸では浮心 - 重心距離は 0%IC から 100%IC にかけて $0.61 \pm 0.24\text{cm}$ から $1.80 \pm 0.30\text{cm}$ に増加し、腹式呼吸では $0.61 \pm 0.25\text{cm}$ から $1.70 \pm 0.31\text{cm}$ 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 ($p<0.008$)。

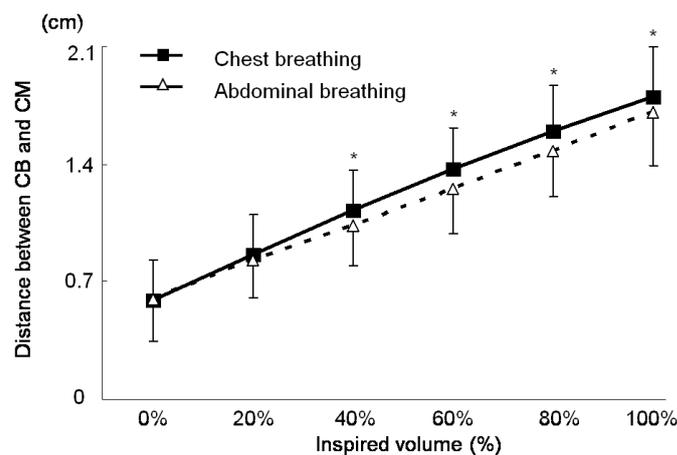


図 2-9 各呼吸様式における浮心 - 重心距離。*は呼吸様式間で有意な差があったことを示す ($p<0.008$)。

2-4、考察

本実験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。これらの結果は本実験の仮説を支持するものであった。

本実験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 0.59cm であった。この値は本実験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、0.56cm 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 (表 2-2)。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えていたことを示すものである。したがって、本実験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あ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 0.10cm (0.06%BH に相当) しか差がみられなかった (図

2-9)。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(図 2-8)。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 1Hz 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(図 2-10)。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。

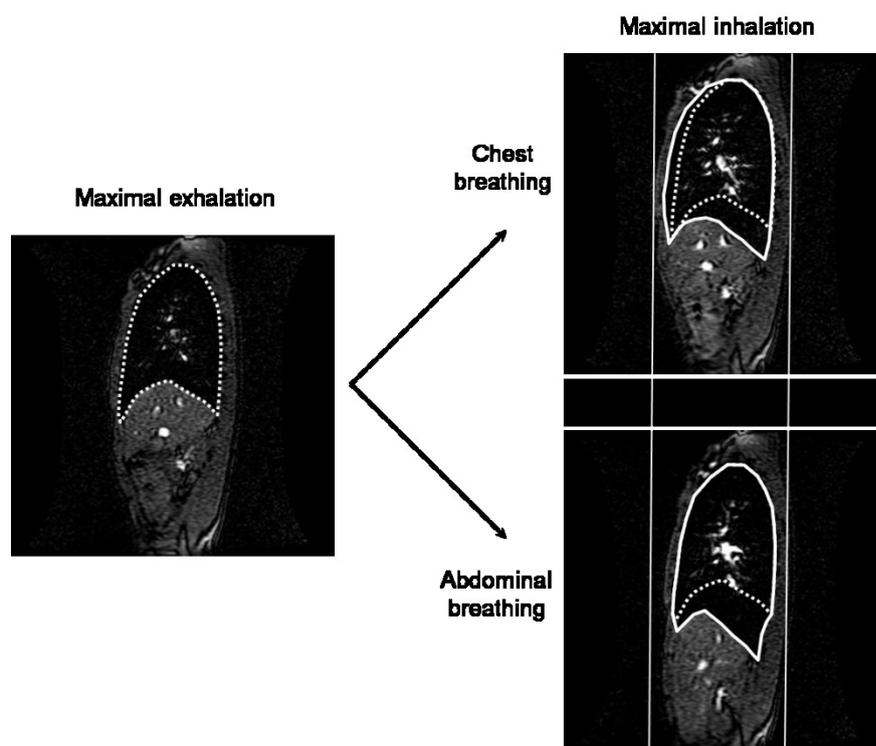


図 2 - 1 0 腹式呼吸、胸式呼吸中の胴体部MR 画像。実線と破線はそれぞれ最大吸気時と最大呼気時の肺の形状を示す。

2-5、まとめ

本実験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、より尾側に位置し、浮力の足沈み効果が減少することが明らかとなった。

第3章 呼吸様式がグライド泳中の受動抵抗に与える影響

3-1、緒言

競泳競技において、泳者はスタートやターンの後に四肢を動かさずに一定の姿勢を維持し前進する。グライドと呼ばれるこの移動様式を用いることで、泳者は遊泳動作を行うよりも水の抵抗を減少させるため (Lyttle et al. 2000) スタートやターン時の高い速度を長い時間で持続させることができる。グライド時の水の抵抗、すなわち受動抵抗を最小化することで、泳者はより長い時間で高い速度を維持することができ、グライド時の受動抵抗を減らす技術は競技者やコーチにとって大きな興味の対象である。

グライドする泳者の体に作用する受動抵抗は、摩擦抵抗、圧力抵抗、造波抵抗の三つの成分に分けることができる (Hay 1993)。これら全ての成分はグライドの速度に大きく依存する。また、速度以外でも、摩擦抵抗は泳者の身体表面積に依存し、圧力抵抗は身体の形状や姿勢、そして進行方向に対する体の角度である迎え角に依存する。Bixler ら(2007)は、体の各セグメントが一直線上に並ぶように上肢を頭の後ろで伸ばした姿勢で、水の流れに対して体のラインが傾いていない状態の泳者が行う水中でのグライドを対象に流体シミュレーション分析を行い、受動抵抗のうちの約4分の3を圧力抵抗が占めることを示した。この結果は、グライド時の形状や姿勢、水の流れに対する体の角度がグライド時の受動抵抗の大きさ決める重要な要因であることを示唆している。そのため、競技現場において、選手は上肢や下肢が胴体と直線上で並ぶように伸展することで体の形状を一直線に保ち、その体のラインを水の流れに対して平行に向ける姿勢でグライドするように指導される。

グライド中の水の流れに対する体のラインの傾きを決める要因の一つに浮力の足沈み効果が挙げられる。Leblanc ら(2010)は浮力の足沈み効果の大きさと壁を蹴って行うグライドとの距離に負の相関関係があることを示した。これはグライド中の浮力の足沈み効果が小

さいことにより、泳者がより直線的な体の姿勢を維持すると同時に、体のラインをより水平に向けることができるためであると考えられる。第二章では腹式呼吸と胸式呼吸それぞれの呼吸様式を用いて吸気を行った際の浮力の足沈み効果を調べ、腹式呼吸を用いることで胸式呼吸よりも浮力の足沈み効果が減少することが明らかとなった。このことより、グライド時に腹式呼吸を用いることは、胸式呼吸を用いた場合と比較して、グライド時の姿勢がより体のラインを直線に近い姿勢を保つことができかつ、そのラインを水平に保つことができるようになり、受動抵抗が減少するものと考えられる。そこで第三章ではグライド泳時に腹式呼吸を導入することで、胸式呼吸を用いた場合よりも受動抵抗が減少するという仮説を検証することを目的に実験を行った。

3-2、方法

1、被験者

被験者は健康な男性 11 名 (年齢 24.0 ± 2.5 歳, 身長 172.0 ± 6.2 cm, 身体質量 69.9 ± 6.9 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、陸上での練習を行った。練習中、被験者には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息を吸い、その胴体形状を維持する試技を 30 分間繰り返し行うせた。練習中はデジタルカメラ(Exilim EX-F1、Casio 社製)を用いて、被験者の矢状面映像を撮影した。撮影された映像を用いて、①腹部や胸部を適切に膨張させているか、②吸気に伴う膨張以外で姿勢に変化がないかを評価し、被験者にフィードバックした。練習は日を分けて 2 回行い行った。

2、実験設定

水中牽引測定専用の装置 (Torrent E-Rack Electronic Swim Power Trainer, Hector Engineering 社製) を用いて被験者を水中で牽引することでグライド泳を行わせた。牽引は 4 段階の張力(34.3、39.2、58.9、98.1N)で行い、牽引の速度を 100Hz のサンプリング周波数で記録した (図 3-1)。牽引装置は特注のアルミニウム製フレーム(Creative Idea Sales 社製., Japan)を用いてプールの壁に固定した。このフレームには水上、水中に 1 つずつ滑車が設置されており、牽引ケーブルを滑車に通すことで、泳者を任意の高さで水平に牽引することが可能である。水中の滑車は水面から 0.65m の高さに設置し、被験者をこの深さで水平に牽引できるように設定した。被験者の牽引はケーブルを被験者が着用した装

着具に取り付けることで行った。牽引は 25m コースに沿って行った。被験者には牽引開始から最初の 5m までに牽引の深さと姿勢を安定させるように指示をした。また、牽引開始から 5m 以降については、胸部、あるいは腹部を各呼吸によって膨張させた状態を維持しながら、上肢を完全に伸展させ、胴体に沿わせた姿勢を維持するように指示を行った。牽引開始から 5m 以降では水面から 0.4m の深さから 0.9m の深さの間を通るように指示を行った。水深の上限は (深さ 0.4m)、0.4m より深い牽引では受動抵抗に影響がなかった(Lyttle et al. 1998)という報告を基に設定した。また、水深の下限(深さ 0.9m)はプールの床面(深さ 1.4m)から被験者の体が 0.5m 以上離れるようにするために設定した。

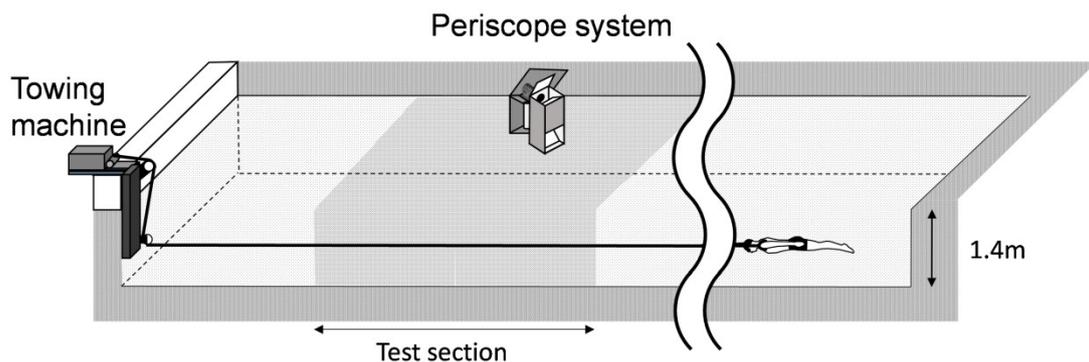


図 3 - 1 牽引測定の実験設定

牽引中の被験者の体に作用する浮力と重力の大きさを同じにするため、ガスメータ (NDS-2A-T, Shinagawa 社製)を用いて吸気量を測定した。牽引測定に先立ち、各被験者の牽引時の吸気量を決定するために、被験者には吸気量を測定した状態で両膝を上肢でかかえた姿勢で水中に潜るように指示した。水中に潜った被験者が 5 秒の間浮かび上がらない、あるいは沈まない吸気量をその被験者の試技中の吸気量に設定した。試技中の吸気量は全ての被験者の平均で $2.51 \pm 0.38L$ であった。各牽引測定の際には、被験者に最大限息を吐ききった後、ガスメータに接続したチューブを通じて決められた量の空気を吸気させ、試

技中は息を止めるように指示を行った。

牽引速度が安定している区間のみを分析するために、25mコースの10mから20mの区間を分析区間とした。デジタルビデオカメラ(HDC-TM650, Panasonic 社製)を取り付けたポータブル潜望鏡システム(Yanai et al. 1996)をプールの壁に設置し、牽引試技中の被験者の矢状面映像を撮影できるようにした。デジタルビデオカメラの液晶ファインダーに印をつけることで、被験者の体が分析区間を通った水の深さを試技の直後に評価できるようにした。各牽引試行は以下の4つの基準を基にその成功、失敗を判断した。(a)牽引試技中、検者が認識できる大きさの波ができていない。(b)被験者の肩が水面から0.4mの深さと0.9mの深さの間を水平に移動している。(c)分析区間で被験者の姿勢が一定に保たれている。(d)各呼吸様式で適切な胴体部の膨張を行えている。試技の成否は試技直後に検者が撮影された映像を確認することで行った。試技は各条件で3回の成功試技が得られるまで行った。

3、データ分析

本実験で用いた牽引装置は被験者を一定の張力で牽引し、その間の速度を計測する。各牽引試技において、被験者の体は牽引張力と受動抵抗が釣り合う牽引速度になるまで徐々に加速する。この実験設定において、グライドの流体力学的な特徴の被験者間差や条件間差は、受動抵抗の大きさではなく牽引の定常速度の大きさとして表される。各試技の牽引の定常速度(V)は被験者の体が分析区間を通っている時の3秒間の平均速度とした。この3秒間でサンプリングされた速度の変動係数は全被験者の全試技の平均で $1.0 \pm 0.4\%$ であった。牽引中の牽引速度が定常状態にある場合、受動抵抗の大きさと牽引張力の大きさは等しいはずである。そのため、各試技におけるグライドの抗力係数は以下の式によって求められる。

$$C_d = \frac{2FF_D}{\rho AV^2}$$

$$F_d = F_t$$

ここに、 ρ は水の密度、 A は被験者の身体表面積であり、身長と体重から設楽ら（2009）の推定式を用いて推定した値を使用した。このモデルを用いて算出される抗力係数はグライド中の水の流れに対する体のラインの角度のみならず、体の形や姿勢の影響を受ける無次元数となる。

$$A = 105.29 \times \text{身長}^{0.619} \times \text{身体質量}^{0.460}$$

本実験では、被験者の体は完全に水中に没しており、試技ごとに同じ量の空気を吸っていたことから、各被験者で使用する身体表面積の値は呼吸様式間で同じ値を使用した。同一条件で行われた3回の測定において、定常速度の変動係数は2.2%であり、抗力係数の変動係数は3.9%であった。

4、統計処理

各条件で3回行われる測定のうち、定常速度が最も速かった値をその条件の代表値として統計分析に用いた。結果は全て全被験者の平均と標準偏差で示した。定常速度と抗力係数に関して、2元配置の分散分析（呼吸様式×牽引張力）で検定を行い、主効果、交互作用の有無によって呼吸様式の影響を調べた。また、有意水準は5%未満とした。

3-3、結果

牽引の定常速度は両呼吸様式において牽引張力の平方根に比例して増加した(図3-2)。定常速度は牽引張力が34.3Nから98.1Nに増加した際、胸式呼吸において 1.11 ± 0.08 m/sから 1.90 ± 0.08 m/sに増加したのに対して、腹式呼吸においては 1.13 ± 0.09 m/sから 1.95 ± 0.11 m/sに増加した(表3-1)。2元配置の分散分析の結果、定常速度には呼吸様式と牽引張力の要因に有意な主効果がみられ($p < 0.05$)、交互作用はみられなかった。この結果は腹式呼吸を用いた時の定常速度が胸式呼吸を用いた時よりも有意に速かったことを示す。抗力係数の値は胸式呼吸で 0.030 ± 0.003 から 0.031 ± 0.002 であったのに対して、腹式呼吸で 0.028 ± 0.002 から 0.030 ± 0.004 であった(図3-2)。2元配置の分散分析の結果、呼吸様式の要因に有意な主効果がみられ($p < 0.05$)、交互作用はみられなかった。

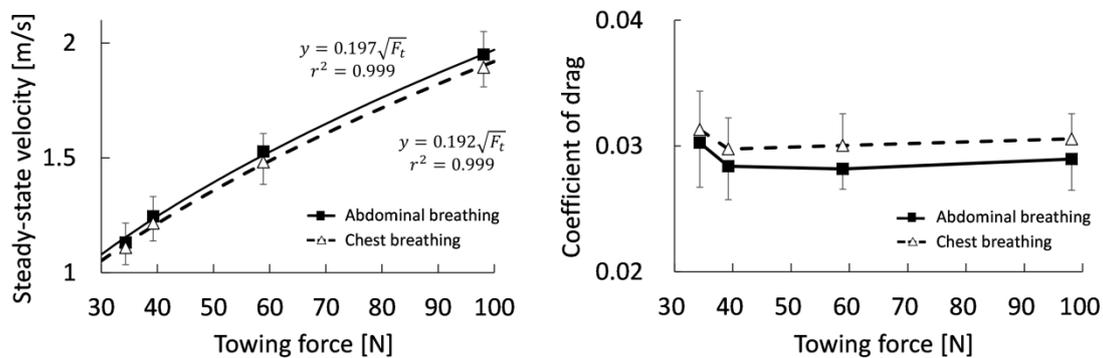


図3-2 腹式呼吸、胸式呼吸における定常速度と抗力係数

表 3 - 1 結果の要約

Breathing manoeuvre	F_d [N]	v [m/s]	F_d/v^2 [N s ² /m ²]	C_d
	34.3	1.13 ± 0.09	27.2 ± 4.7	0.030 ± 0
Abdominal breathing	39.2	1.25 ± 0.08	25.6 ± 3.4	0.028 ± 0
	58.9	1.52 ± 0.08	25.3 ± 2.4	0.028 ± 0
	98.1	1.95 ± 0.11	26.0 ± 2.9	0.029 ± 0
Chest breathing	34.3	1.11 ± 0.08	28.2 ± 4.1	0.031 ± 0
	39.2	1.22 ± 0.07	26.8 ± 3.5	0.030 ± 0
	58.9	1.48 ± 0.09	27.0 ± 3.5	0.030 ± 0
	98.1	1.89 ± 0.08	27.4 ± 2.5	0.031 ± 0

3-4、考察

本実験の目的はグライド泳時に腹式呼吸を用いることにより、胸式呼吸と比較して受動抵抗が減少するという仮説を検証することであった。牽引の定常速度は腹式呼吸によって速くなり、抗力係数は腹式呼吸によって低くなった。この結果は腹式呼吸によって受動抵抗が減少することを示す結果であり、本実験の仮説を支持するものであった。

牽引張力が 58.9N の際、グライドの定常速度は胸式呼吸で 1.48 ± 0.09 m/s、腹式呼吸で 1.53 ± 0.08 m/s であった。これは約 1.5m/s のグライド速度で加わる受動抵抗の大きさが 58.9N であったことを意味しており、同様の牽引速度で受動抵抗を測定した先行研究が報告する値の範囲に収まる数値である。また、本研究で算出された抗力係数の値については Chatard ら (1990) や高木ら (1997) が報告する値の範囲に収まっているのに対して、Mollendorf ら (2004) や Zamparo (2009) らが報告する値とは大きく異なっている。抗力係数の値が先行研究と大きく異なった主な理由は係数算出に用いた代表面積の違いである。Mollendorf ら (2004) や Zamparo (2009) らは代表面積として身体の横断面積を使用しているのに対して、本研究や Chatard (1990) や高木ら (1997) の研究では身体表面積を使用している。Zamparo ら (2009) の研究で報告されている受動抵抗、牽引速度、身体表面積の平均値を用いて抗力係数を再計算したところ、その値は本研究の値と同様の数値であった (表 3-2)。このことから、本研究で測定された受動抵抗や抗力係数の値は先行研究との比較が可能であり、信頼にたる結果であったといえよう。

表 3-1 先行研究における受動抵抗と抗力係数の平均値

Author	Participants		F_d [N]	v [m/s]	A ([m ²])	C_d
	Gender	Number				
Chatard et al. (1990)	M	90	50.3	1.40	SA (1.69)	0.031
	F	77	48.1		SA (1.39)	0.031
Takagi et al. (1997)	M	24	58.3	1.50	FA (0.07)	0.840
					SA (1.84)	0.030
	F	9			FA (0.06)	0.770
					SA (1.56)	0.030
Mollendorf et al. (2004)	M	7	56.7	1.50	FA	0.978
Zamparo et al. (2009)	M	14	47	1.42	FA (0.15)	0.360
					SA (1.83)	0.025*
	F	11	40		FA (0.14)	0.330
Present study (Chest) (Abdominal)					SA (1.70)	0.024*
	M	11	58.9	1.48 1.53	SA (1.84)	0.029 0.030

注 *は先行研究で報告されている平均値を用いて再計算した値である

腹式呼吸を用いたことで受動抵抗が減少した理由に、腹式呼吸によって浮力が生み出す足沈み効果が減少することで、被験者がグライド中の体をより直線に近い形を保つことができた、あるいは体のラインをより水平方向に保つことができたのではないかと考えられる。一定の速度で牽引されている場合、被験者の体は力学的に平衡状態であったといえる。グライド中の体が平衡状態を保つためには、(a)体に作用する鉛直上向き方向の揚力と鉛直下向き方向の揚力は釣り合う必要があり、かつ(b)水の流れによって生じる流体力が足浮かせの回転効果を生み出し、浮力の足沈みの効果と拮抗する必要がある。グライド中、頭部や上半身を下向きに傾けることで、上半身には下向き方向の揚力が体に作用するものと予想される (図 3-3 a)。この下向き方向の揚力が生み出す回転効果は足浮かせの回転効果である。同様に下半身を下向き方向に傾けることで、下半身には鉛直上向き方向の揚力が作用するものと予想される (図 3-3 b)。この上向き方向の揚力が生み出す回転効果は足浮かせの回転効果である。試技中のビデオ映像から上半身と下半身の水平に対する傾き角

度を調べたところ (図 3-3 a b)、上半身の傾き角度は統計的に下向き方向であったのに対して、下半身の傾き角度は統計的に 0 度との有意差はみられなかった。このことから、浮力の足沈み効果に拮抗する足浮かせ効果は上半身に作用する下向き方向の揚力によって生み出されていたことが考えられる。上半身の傾き角度は腹式呼吸が胸式呼吸より有意に小さいものであった。胸式呼吸では大きな浮力の足沈み効果に拮抗するために、上半身の傾きを大きくし、大きな足浮かせ効果を生み出す必要があったのに対して、腹式呼吸は浮力の足沈み効果が小さくなることでより一直線に近い体の形状を保つこと、かつ体のラインをより水平に保つことができ、結果として受動抵抗が減少したものと考えられる。

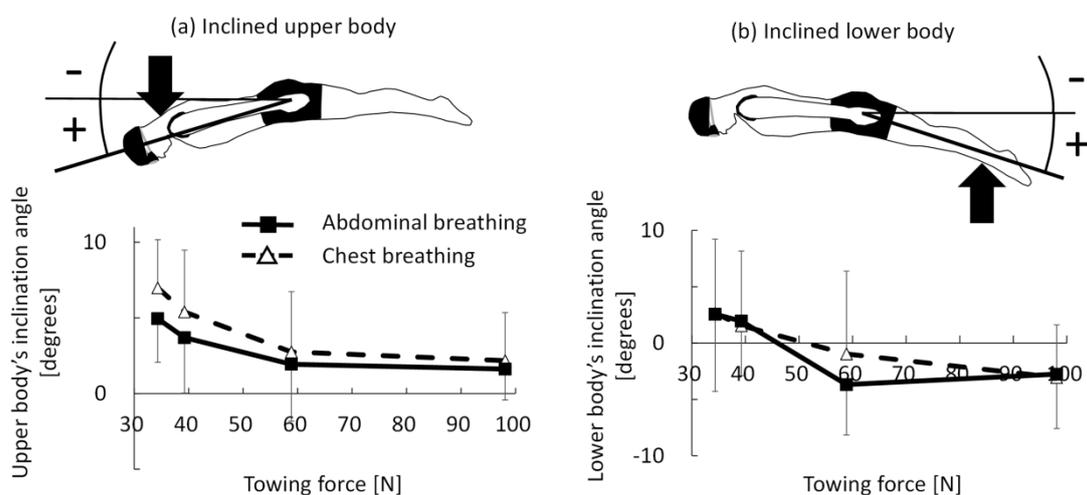


図 3-3 上半身の傾き角度 (a) と下半身の傾き角度 (b)。黒塗り矢印はグライド

する泳者に作用するはずである揚力である。

腹式呼吸によって受動抵抗が減少したもう一つの理由に、胴体部の形状の違いが挙げられる。試技中のビデオ映像から胴体部の前後方向の厚みを計測したところ、腹式呼吸では胸式呼吸と比べて、胴体部の凹凸の深さが小さかった (図 3-4)。この結果は腹式呼吸を用いることで、胴体部の形状がより流線形になることを示唆するものである。胴体部がより流線形になることで、胸部から腹部にかけて生じる渦 (Pacholak 2014) が減少し、ある

いは水の流れの剥離点がより足部側に移動し、結果として受動抵抗が減少したものと推察される。

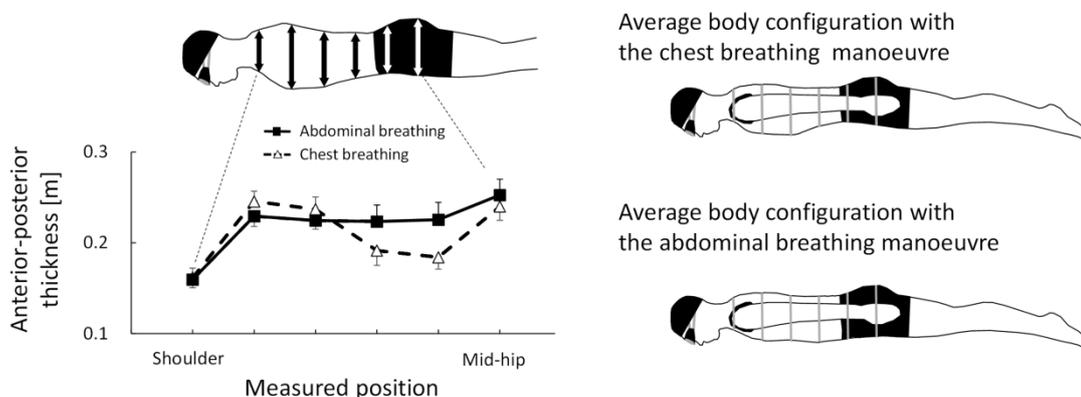


図 3-4 胴体部の前後長

本実験では各試技における牽引の深さを 0.4m から 0.9m と設定したため、牽引の深さが試技間で統一されていない。そのため、試技間の牽引高さの違いが抗力係数の結果に影響を及ぼした可能性がある。そこで、牽引深さが抗力係数に与えた影響を調べるため、被験者と呼吸様式の変数を統制した偏相関分析により牽引高さと抗力係数の関係を調べた。その結果、牽引高さと抗力係数の間には有意な相関関係はみられなかった。これは試技間の牽引高さのばらつきは抗力係数のばらつきに影響を及ぼしていないことを示唆するものである。これらの分析から、本研究で得られた呼吸様式に関する知見は牽引高さの違いによるものではなかったと結論付けられる。

本実験では測定時のグライド姿勢として、両上肢を胴体に沿わせて完全伸展させた姿勢を用いた。この姿勢は競泳競技において一般的に使用されるグライド姿勢であるストリームライン姿勢（両上肢を進行方向に伸ばした姿勢）とは異なる。呼吸様式が受動抵抗に与える影響を検討するにあたり、体の形状や牽引張力の作用点といった呼吸様式以外の条件は試技間で統一される必要がある。一般的なストリームライン姿勢で測定を行った予備

実験では、身体が加速する期間に被験者が上肢の姿勢を変化させることで体に作用する力系のバランスを保っていた。身体の加速期間の終盤には姿勢や形は安定するが、安定した際の姿勢は試技間で異なることが散見された（図3-5）。ストリームライン姿勢で上肢の長さ 60cm の被験者が肩の挙上角度を 1 度変化させた場合、牽引力のモーメントアームには 1cm の変化が生じる。したがって、肩の挙上角度が 7 度異なった場合は浮力の足沈み効果を打ち消すだけの回転効果が牽引力によって生じる。ストリームライン姿勢で生じる上肢の姿勢の違いはグライド中の体の回転運動の平衡状態到達のメカニズムに影響を与えうるものであり、定常速度の測定再現性を低下させるものであった。Vilas-Boas ら（2010）はストリームライン姿勢と本実験で用いた姿勢ではストリームライン姿勢の抗力係数が小さいことを報告している。従って、本研究で算出された抗力係数はストリームライン姿勢で行うグライドよりも大きなものであったことが予想される。一方で、腹式呼吸、胸式呼吸の試技間で生じる浮力の足沈み効果の差はどちらのグライド姿勢においても同じであるはずである。よって、腹式呼吸を導入することで生じるグライド泳のパフォーマンス向上は、その向上の度合いは異なる可能性はあるものの、一般的なストリームライン姿勢でも得られることが予想される。

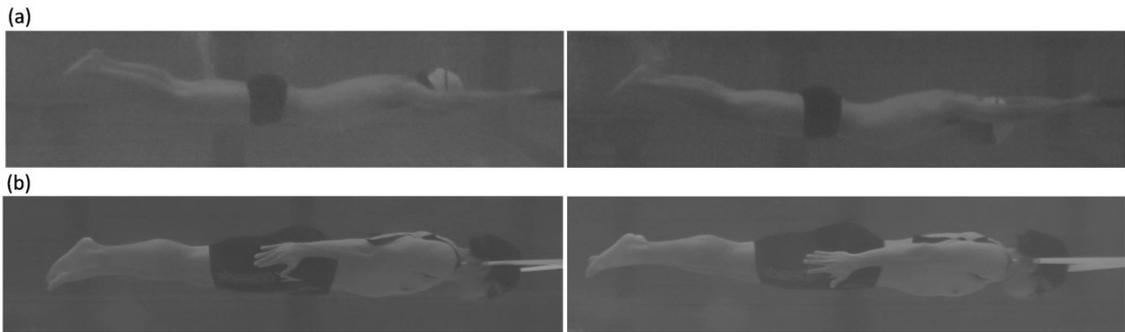


図3-4 2回の測定試技でみられたグライド姿勢。(a)上肢を進行方向に伸ばしたグライド姿勢。(b)上肢を胴体に沿わせたグライド姿勢。予備実験において上肢を進行方向に伸ばしたグライド姿勢は試技間で変化が生じ、定常速度の再現性の低下が生じた。

3-5、まとめ

本実験は腹式グライド泳時に腹式呼吸を導入することで、胸式呼吸を用いた場合よりも受動抵抗が減少するという仮説を検証することを目的に実験を行った。その結果、腹式呼吸の導入により、グライド泳時に作用する受動抵抗が減少することが示された。

4 章 総括論議

本論文の目的は、遊泳中に腹式呼吸を導入することで、胸式呼吸と比較して浮力の足沈み効果が減少し、遊泳パフォーマンスが向上するという仮説を検証することであった。そこで 2 章では腹式呼吸を用いることで、胸式呼吸と比較して重心に対する浮心の位置がより尾側に移動し、浮力の足沈み効果が減少するという仮説の検証を行った。また、3 章では腹式呼吸を用いることで胸式呼吸と比較して受動抵抗が減少するという仮説の検証を行った。各章での主な知見は以下の通りである。

2 章では腹式呼吸、胸式呼吸それぞれの呼吸様式で吸気を行っている際の、重心・浮心位置の測定を行い、それぞれの呼吸様式で浮力の足沈み効果の比較を行った。その結果、呼吸様式が異なることは浮心位置のみならず重心位置にも影響が生じること、そして、重心、浮心位置の移動が異なることにより、吸気に伴う足沈み効果の増加が腹式呼吸を用いることで胸式呼吸と比較して減少することが明らかとなった。この結果は腹式呼吸を導入により、浮力の足沈み効果が減少することを示すものであった。

3 章では腹式呼吸、胸式呼吸それぞれの呼吸様式で吸気し息を止めた状態でグライドした際の受動抵抗の大きさを呼吸様式間で比較を行った。その結果、腹式呼吸を用いることで胸式呼吸よりも受動抵抗の大きさが減少することが明らかとなった。

4-1、腹式呼吸の導入が水泳パフォーマンスに与える影響

競泳競技において、腹式呼吸を導入することは体が完全に水に沈んだ時に体に作用する浮力の足沈み効果を減少させ(2章)、グライド中の受動抵抗が減少する(3章)。そのため、一定の距離を泳ぐ時間を競う競泳種目中に腹式呼吸を導入することで競泳競技の記録向上につながることを期待される。この節では、腹式呼吸の導入がスタート局面やターン局面、あるいは自由形種目のストローク局面といったそれぞれの局面におけるパフォーマンスに与える影響について検討を行う。

1、グライド泳におけるパフォーマンスの向上

競泳競技のスタートやターンにおいて、選手はスタート台やプールの壁を蹴ることにより身体の前進速度を高めるため、スタートやターン時にはストローク中の前進速度も高い速度を生み出すことが可能である。競泳選手はスタートやターン時に獲得した高い速度をできる限り長く維持するために、スタートやターン後にグライド泳を行うことが一般的に推奨される(Maglischo 2003)。スタートやターン局面で行われるグライド泳時に腹式呼吸を導入することは、より長い時間で速い速度を維持することにつながり、競技パフォーマンスの向上をもたらすことが期待される。そこで、腹式呼吸導入によるスタートやターン時のパフォーマンスの向上を試算するために、シミュレーション分析を行った。グライド泳を行う泳者について全身を一つの系とした場合の運動方程式および受動抵抗の大きさは以下の式によって表される。

$$F_d = ma \quad (\text{式 4-1})$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A V^2 \quad (\text{式 4-2})$$

式4-1に式4-2を代入し、時間について積分すると式1は以下ようになる。

$$\int \frac{1}{v^2} dt = \frac{C_d \rho A}{2m} \int dt \quad (\text{式 4-3})$$

式 3 を速度について整理することで、以下の式が得られる

$$v = \frac{2m}{C_d \rho A t + 2mC}$$

ここでCは積分定数である。この式に 3 章で得られた全被験者の抗力係数の平均値、身体表面積の平均値を代入し、グライド中の速度の推定を行った (図 4-1)。また、式 4 を時間について積分することにより、グライドの到達距離を推定した (図 4-1)。その結果、平均的な体格を有する選手では、腹式呼吸を用いることにより胸式呼吸よりも、ターンの 2 秒後に 0.03m/s の早い速度で前進しており、4 秒後にはその到達距離が 0.12m の長いという結果であった (表 4-1)。Chow ら (1984) は国際大会の試合におけるターン後の分析をした際、競泳選手はストローク開始前に 2 秒から 4 秒のグライドを行っていることを報告していることから、この結果は競泳種目における腹式呼吸の導入は競技パフォーマンスに注目に値する影響を及ぼすことを示唆するものであると言えよう。

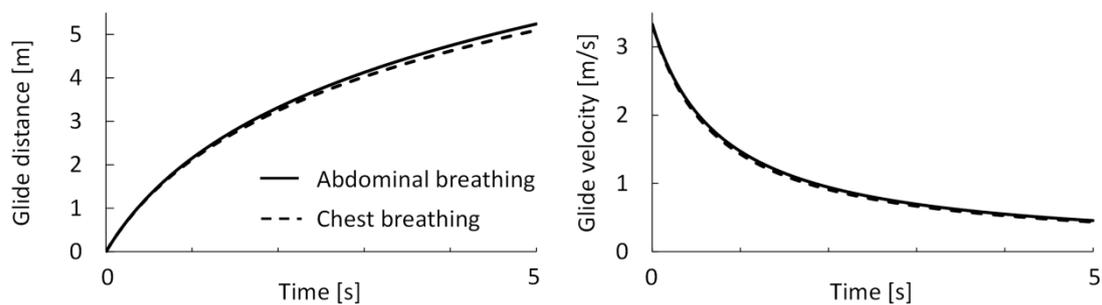


図 4-1 腹式呼吸、胸式呼吸によるグライド距離とグライド速度の時系列変化。グライド距離と速度は2次の微分方程式を解くことにより推定した。全被験者の身体質量、身長、98.1Nの牽引測定時の抗力係数を入力値として使用し、グライドの初期速には3.33m/sを用いた (Takeda et al., 2009)

表4-1 シミュレーション分析結果の要約

Glide duration [s]	Glide distance [m]		Glide velocity [m/s]	
	2	4	2	4
Abdominal breathing	3.32	4.74	0.94	0.55
Chest breathing	3.25	4.62	0.91	0.53
Difference	0.07	0.12	0.03	0.02

2、クロール泳におけるパフォーマンスの向上

クロール泳における水平姿勢は浮力の足浮かせ効果、キックによる足浮かせ効果、ストロークによる足沈め効果の釣り合いによって保たれる (Yanai and Willson, 2008)。Yanai らはこの水平姿勢に関するメカニズムを考慮して、遊泳中の浮力の足浮かせ効果が増大させることが、水平姿勢の向上、あるいはキック動作の減少によって、遊泳のエネルギー効率が向上すると考えた。2 章では 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 0.09cm 短くなる、すなわち浮心の重心に対する相対位置は 0.09cm 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 691.5N 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、浮力の足浮かせ効果が約 0.6Nm 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回転効果の変化は、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。2 章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—0.8m/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 1m 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 0.6Nm の浮力のモーメントの差は、水泳経験者が 0.6—0.8m/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。

また、クロール泳が最大努力で行われた場合は、腹式呼吸の導入により水平姿勢の向上やキック動作の減少によって水の抵抗が減少し、遊泳速度が向上することが考えられる。しかしながら、これまでの研究において浮力の回転効果の変化がクロール泳の最大速度に与える影響を検討した研究はない。そこで、クロール泳中の腹式呼吸導入がクロール泳の最大遊泳速度に与える影響を検討するために、浮力の足沈み効果の変化がクロール泳の速度や動作に与える影響を検証する実験を行った。実験は 7 名の大学競泳選手を対象に行った。密閉可能なビニール袋に発泡スチロール製の粒を詰めた特性の浮きを作成し、腹部（腹式呼吸）、あるいは胸部（胸式呼吸）に装着させることで浮力の足沈み効果を変化させた。浮きの装着はポリエチレン製のテーピングラップで体に密着させ、ラップの頭部側の端を水中用テーピングテープによって固定することで浮きの装着が水の流れを過度に変化させないように留意した。被験者には特性の浮きを装着させた状態で、息を最大努力で吐かせ、20mクロール泳を息継ぎを行うことなく最大努力で泳がせた。浮きが完全に水中に没した際の浮力は 19.6N であった。この実験設定により、2L の空気を腹式呼吸、胸式呼吸それぞれの呼吸様式で吸気して行う遊泳を再現した。スタート地点から 15m地点の側方にポータブル潜望鏡に取り付けたデジタルビデオカメラを用いてクロール泳の遊泳速度を算出した。その結果、腹式呼吸における遊泳速度が $2.03 \pm 0.06 \text{m/s}$ であったのに対して、胸式呼吸では $1.99 \pm 0.05 \text{m/s}$ であり（図 4-2）、対応のある t 検定の結果、遊泳速度に有意な差がみられた ($p < 0.05$)。この結果はクロール泳中の浮力の足浮かせ効果を増大させることがクロール泳の最大速度が速くなることを示唆するものである。

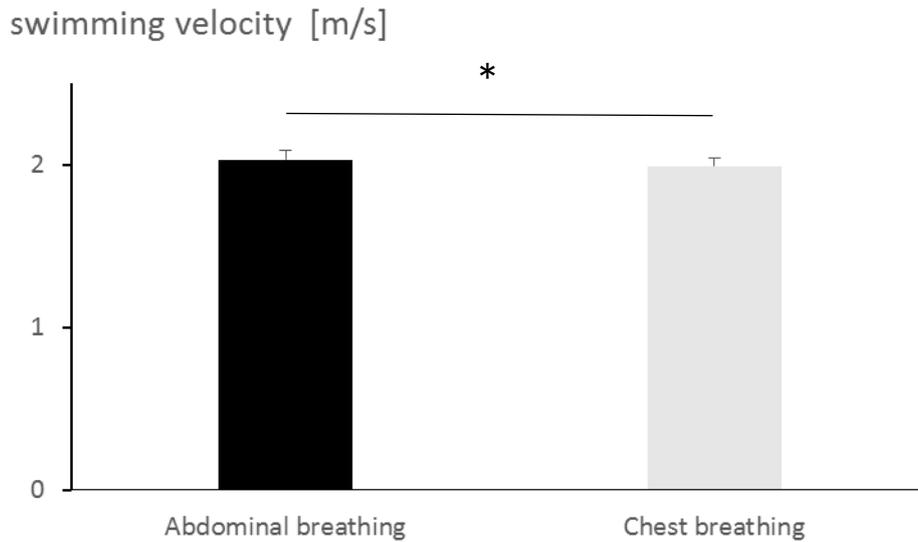


図4-2 腹式呼吸、胸式呼吸におけるクロール泳速度。*は有意な差を示す($p < 0.05$)

クロール泳中に浮力の作用点が移動することで遊泳速度が上がる理由に、クロール泳中の水平姿勢が向上したことが考えられる。図4-3に腹式呼吸と胸式呼吸間で全被験者の平均値を上回る速度差がみられた被験者Aの画像を重ねた連続写真を示した。両条件間で大転子マーカ―は同じ位置にあるのに対して、足部のマーカ―の高さが異なる。大転子と足部を結んだ直線と水平線がなす角度が最大に達したときを下肢の傾斜角度として算出したところ、この被験者では3回の左下肢のキックのうち、1回目のキックと2回目のキック傾斜角度が腹式呼吸で小さいという結果であった。この被験者については遊泳中の浮力の足浮かせ効果が増加することで、より水平に近い姿勢で遊泳を行うことができたため、同じキック動作を行っても下肢がより水平方向を向くようになり、水の抵抗が減少することで遊泳速度が向上したものと考えられる。一方で、全ての被験者について下肢の最大傾斜角度を分析したところ、上記の被験者と同様に、最大傾斜角度の平均値がキック1とキック2において腹式呼吸で胸式呼吸よりも小さいものであったが、2元配置の分散分析の結果、下肢の傾斜角度について呼吸様式の影響について有意な主効果は認められなかった

($p=0.064$)。

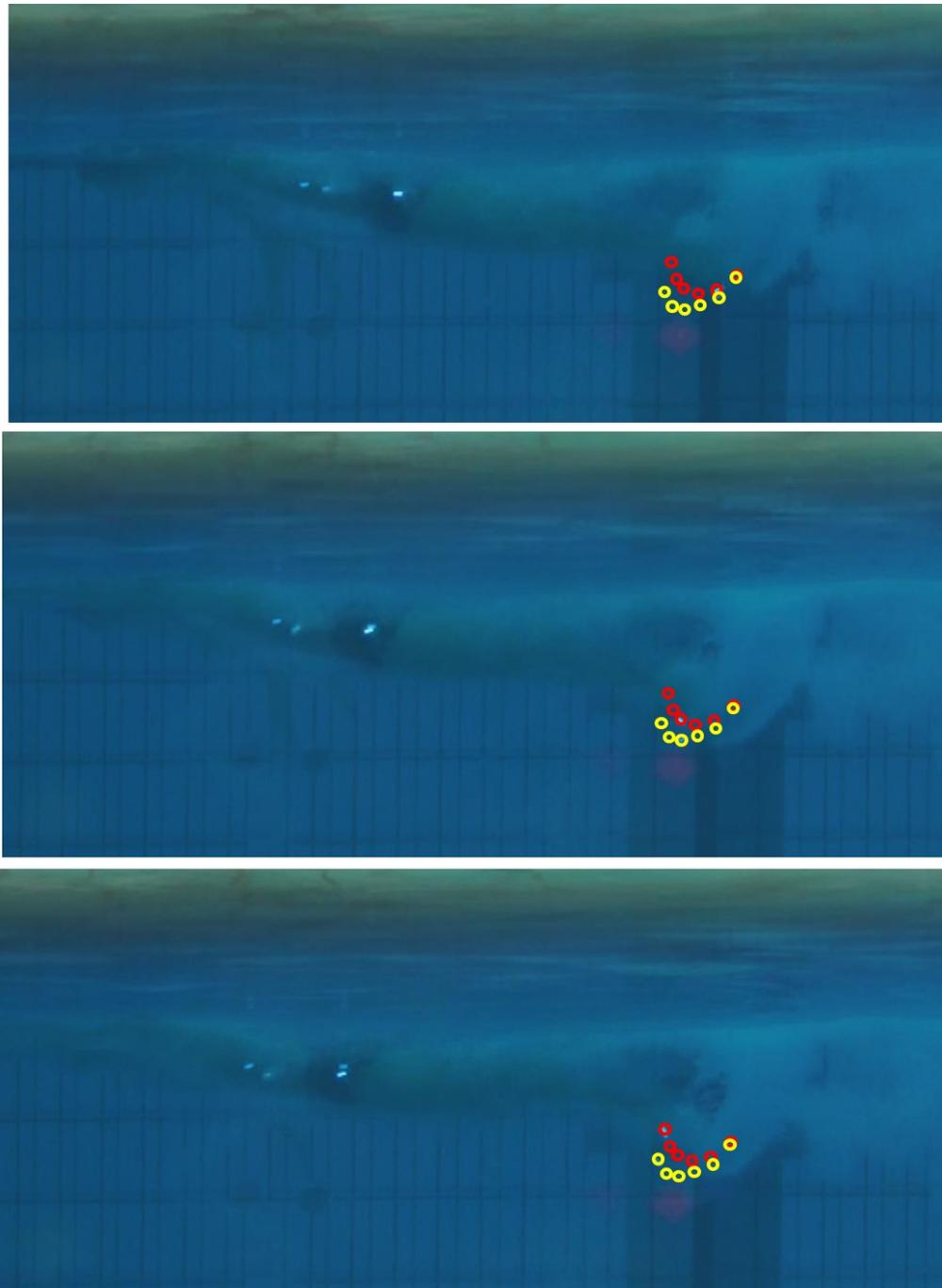


図4-3 腹式呼吸、胸式呼吸におけるクロール泳中の連続写真。各写真は両呼吸様式中の写真を大転子マーカを基準に重ね合わせたものである。赤丸は腹式呼吸、黄丸は胸式呼吸時の足部のマーカ位置を示す

腹式呼吸と胸式呼吸の間で遊泳速度に差がみられるにも関わらず、下肢の傾斜角度に群間差がみられないのは、上肢のストローク動作の変化によって速度が向上すると共に、変化したストローク動作が生み出した推進力による足沈み効果が増加した被験者がいたためと考えられる。図 4-4 に腹式呼吸と胸式呼吸間で平均を上回る差が生じた被験者の中で、腹式呼吸におけるキックの傾斜角度が大きかった被験者の手部の軌道を大点子マーカールの位置について示した。手部の入水から鉛直下向きに水を掻く局面において、腹式呼吸では手部が直線的に鉛直下向きに動いているのに対して、胸式呼吸では手部が曲線的に動く様子が伺える。にこの局面で手部に作用する流体力は重心周りに大きなモーメントアーム持ち、大きな足沈み効果を生み出す (Yanai 2001)。この被験者は腹式呼吸において直線的に手部を動かすことで、大きな推進力を獲得した一方で、水の掻き始めの局面で生じる足沈み効果が増加することで、結果として速度が上昇したにも関わらず足部の傾斜角度に変化が生じなかったものと考えられる。

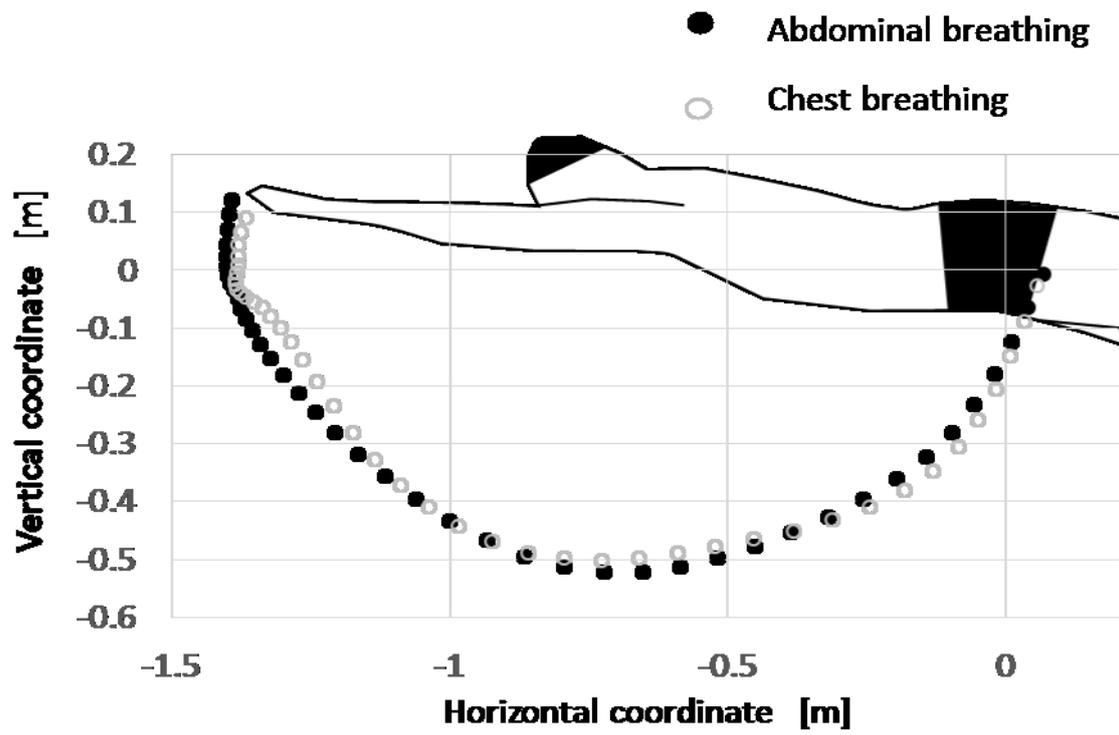


図4-4、大転子マーカを原点とした手部の軌跡

4-3、本研究の限界

1、被験者の特性

本研究は全ての実験において一般成人男性被験者を対象に実験を行ったため、その知見は女性や子供といった身体特性を有する人に適応可能かは不明である。女性や子供は成人男性と比較して身体の密度が低く (Sandon 1935)、浮心 - 重心間の距離が短い (Mclean and Hinrichs 1998, 2000a) ことが知られている。そのため、男性と同じ身体部位を膨張させた場合でも、浮心や重心と膨張部位の相対的な位置関係が異なることが予想される。また、女性は胴体の長さに対して肺の体積が男性よりも小さく (Crapo et al., 1982)、腹腔内に子宮を有する。このように胴体内の組織の体積比や構造に違いがあるため、意識的に腹部のみを膨張させた場合においても、膨張部位に性差が生じる可能性がある。これらを考慮すると、女性や子供において呼吸様式が変化した場合に浮心や重心位置が 2 章で得られた結果と同様に移動を行うかどうかは不明である。また、3 章では腹式呼吸を導入した際にグライドにおける受動抵抗が減少することを示したが、これは体が完全に水に没した際に浮力が足沈み方向の回転効果を生み出していることが論理の前提となっている。男性と比べてより足が浮きやすい女性、子供において、完全に水に沈んだ状態で浮心が重心よりも足部側に位置した場合、腹式呼吸の導入が受動抵抗に与える影響は異なる可能性が考えられる。女性や子供における腹式呼吸の導入の影響は今後の課題であろう。

本研究では腹部のみを膨張させて行う吸気を腹式呼吸、胸部のみを膨張させて行う吸気を胸式呼吸と定義し、研究を行った。2 章、3 章それぞれの実験において、呼吸様式間の膨張部位が異なる部位を膨張させた身体形状であったことは明らかであり、本研究は腹部のみ、胸部のみを膨張させた呼吸が浮力や遊泳に及ぼす影響を検討できていたと言えよう。一方で、人は胸郭、腹部を同時に変形することで呼吸を生み出すことが可能である (Cala et

al., 1996)。Aliverti ら(2002a, b)は被験者の胴体部に 86 個のマーカールを取り付け、エルゴメータ運動中の胴体部の体積変化と呼吸の関係を調べ、①胸郭、腹部に同時に体積変化が生じること、②胸郭と腹部の体積変化の割合に個人間差があること、③胸郭と腹部の体積変化の割合が運動強度の上昇に伴い変化することを示している。この研究結果は運動者が腹式呼吸、胸式呼吸といった技術を用いずに無意識に行う呼吸は①胸郭、腹部が同時に膨張することで行われる呼吸であり、②その呼吸には個人間差や個人内差があることを示唆している。本研究では胸郭のみ、腹部のみが膨張するという定義で研究を行ったため、胸郭、腹部が同時に膨張する呼吸の呼吸様式を定義することができない。従って、運動者が技術を用いずに無意識下で行う呼吸が浮力の足沈み効果に与える影響を議論することができない。このような呼吸の個人間差や個人内差が本研究の定義する呼吸様式とどのような関係にあり、浮力の足沈み効果やパフォーマンスにどのように影響を与えるかについては今後の課題であろう。

4-3、結論

本学位論文は、遊泳中に腹式呼吸を導入することによって、胸式呼吸と比較して浮力の足沈み効果が減少し、遊泳パフォーマンスが向上するという仮説を検証することを目的に研究を行った。腹式呼吸を用いて吸気を行った場合、胸式呼吸よりも足沈み効果が減少することが明らかとなった。また、腹式呼吸による足沈み効果の減少により、受動抵抗が減少することが明らかとなった。呼吸様式が変化することによるこれらの変化は、グライド泳やクロール泳のパフォーマンスを向上させることが示唆された。

参考文献

- Aliverti, A., Iandelli, I., Duranti, R., Cala, S. J., Kayser, B., Kelly, S., ... & Yan, S. (2002). Respiratory muscle dynamics and control during exercise with externally imposed expiratory flow limitation. *Journal of Applied Physiology*, 92(5), 1953-1963.
- Benjanuvatra, N., Blanksby, B. A., & Elliott, B. C. (2002). Morphology and hydrodynamic resistance in young swimmers. *Pediatric Exercise Science*, 13(3), 246-255.
- Bixler, B., Pease, D., & Fairhurst, F. (2007). The accuracy of computational fluid dynamics analysis of the passive drag of a male swimmer. *Sports Biomechanics*, 6(1), 81-98.
- Boyd, E. (1933). The specific gravity of the human body. *Human biology*, 5(4), 646.
- Bucher, W. (1975). The influence of the leg kick and the arm stroke on the total speed during the crawl stroke. *Swimming II*, 180-187.
- Cala, S. J., Kenyon, C. M., Ferrigno, G., Carnevali, P., Aliverti, A., Pedotti, A., ... & Rochester, D. F. (1996). Chest wall and lung volume estimation by optical reflectance motion analysis. *Journal of Applied Physiology*, 81(6), 2680-2689.
- 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
- Chatard, J. C., Bourgoin, B., & Lacour, J. R. (1990). Passive drag is still a good evaluator of swimming aptitude. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 59(6), 399-404.

- Chatard, J., & Wilson, B. (2008). Effect of fastskin suits on performance, drag, and energy cost of swimming. *Medicine and science in sports and exercise*, 40(6), 1149.
- Clarys, J. P., Jiskoot, J., Rijken, H., & Brouwer, P. J. (1974). Total resistance in water and its relation to body form. *Biomechanics IV*, 187-196.
- Chow, J. W., Hay, J. G., Wilson, B. D., & Imel, C. (1984). Turning techniques of elite swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 2(3), 241-255.
- Clarys, J. P., & Jiskoot, J. (1975). Total resistance of selected body positions in the front crawl. *Swimming II*, 110-117.
- Crapo, R. O., Morris, A. H., & Gardner, R. M. (1982). Reference values for pulmonary tissue volume, membrane diffusing capacity, and pulmonary capillary blood volume. *Bulletin europeen de physiopathologie respiratoire*, 18(6), 893-899.
- Counsilman, J. E. (1955). Forces in swimming two types of crawl stroke. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 26(2), 127-139.
- Counsilman, J. E. (1968). *The science of swimming*. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ
- Drillis, R., Contini, R., & Maurice Bluestein, M. (1966). Body segment parameters1. *Artificial limbs*, 44.
- 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
- Hollander, A. P., de Groot, G., van Ingen Schenau, G. J., Kahman, R., & Toussaint, H. M. (1988). Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming. *Swimming Science V*, 5, 39-44.

- Karpovich, P. V. (1933). Water resistance in swimming. *Research Quarterly. American Physical Education Association*, 4(3), 21-28.
- Konno, K., & Mead, J. (1967). Measurement of the separate volume changes of rib cage and abdomen during breathing. *Journal of Applied Physiology*, 22(3), 407-422.
- Leblanc, H., Seifert, L., & Chollet, D. (2010). Does floatation influence breaststroke technique? *Journal of Applied Biomechanics*, 26(2), 150-158.
- Lyttle, A. D., Blanksby B. A., Elliott B. C., & Lloyd D. G. (1998). The effect of depth and velocity on drag during the streamlined glide. *Journal of Swimming Research*, 13, 15-22.
- Lyttle, A. D., Blanksby B. A., Elliott B. C., & Lloyd D. G. (2000). Net forces during tethered simulation of underwater streamlined gliding and kicking techniques of the freestyle turn. *Journal of Sports Science*, 18, 801-807.
- Maglischo, E. W. (2003) Reducing resistance. In: *Swimming fastest. Human Kinetics: Champaign*, pp. 43-64.
- McLean, S. P., & Hinrichs, R. N. (1998). Sex differences in the centre of buoyancy location of competitive swimmers. *Journal of sports sciences*, 16(4), 373-383.
- McLean S. P., and Hinrichs R. P. (2000)a. 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
- McLean S. P., and Hinrichs R. P. (2000)b. Buoyancy, gender, and swimming performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 16, 248-263
- Mollendorf, J. C., Termin, A. C., Oppenheim, E. R. I. C., & Pendergast, D. R. (2004).

Effect of swim suit design on passive drag. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(6), 1029-1035.

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

Pacholak, S., Hochstein, S., Rudert, A., & Brücker C. (2014). Unsteady flow phenomena in human undulatory swimming: a numerical approach. *Sports Biomechanics*, 13(2), 176-194.

Pendergast D. R., di Prampero P. E., Craig Jr. A. B., Wilson D. R., Rennie D. W. (1977). 43(3). Quantitative analysis of the front crawl in men and women. *Journal of Applied Physiology*, 43(3), 475-479

Rork, R., & Hellebrandt, F. A. (1937). The floating ability of women. *Research Quarterly. American Physical Education Association*, 8(4), 19-27.

Robertson, J. (1757). An essay towards ascertaining the specific gravity of living men. *Philosophical Transactions*, 50, 30-35.

高木英樹, 野村照夫, 松井敦典, 南隆尚, (1997). 日本人競泳選手の抵抗係数. *体育学研究*. 41, 484-491

Takeda, T., Ichikawa, H., Takagi, H & Tsubakimoto, S. (2009). Do differences in initial speed persist to the stroke phase in front-crawl swimming? *Journal of Sports Sciences*, 27(13), 1449-1454.

Sandon, F. (1924). A preliminary inquiry into the density of the living male human body.

- Biometrika, 404-410.
- Sandon, F. (1935). A Note on the Specific Gravity of the Living Human Body. *Annals of Eugenics*, 6(4), 372-376.
- Schleihauf R. E. (1979) A hydrodynamic analysis of swimming propulsion. In: Teraudes J., and Bedingfield E. W. (Eds.) *Swimming III*, International series on sports science, volume 8. University Park Press: Baltimore, 70-109.
- 柴田義晴, (1992). 水泳指導についての一考察：け伸びの指導について. 東京学芸大学起用, 44, 133-140.
- 設楽佳世, 高井洋平, 太田めぐみ, 若原卓, 金久博昭, 福永哲夫, & 川上泰雄. (2009). 光学 3次元人体形状計測法に基づく体表面積の推定式の開発. *体力科学*, 58(4), 463-474.
- Spivak, C. D. (1915). The specific gravity of the human body. *Archives of Internal Medicine*, 15(4), 628-642.
- Whiting, H. T. A. (1963). Variations in floating ability with age in the male. *Research Quarterly*. 34(1), 84-90.
- Whiting, H. T. A. (1965). Variations in floating ability with age in the female. *Research Quarterly*. 36(2), 216-218.
- Yanai, T., Hay, J. G. & Gerot, J. T. (1996). Three-dimensional videography of swimming with panning periscopes. *Journal of Biomechanics*, 29(5), 673-678.
- Yanai, T. (2001). Rotational effect of buoyancy in frontcrawl: does it really cause the legs to sink?. *Journal of Biomechanics*, 34(2), 235-243.
- Yanai, T., & Wilson, B. D. (2008). How does buoyancy influence front - crawl performance? Exploring the assumptions. *Sports Technology*, 2(3), 89-99.

Zamparo P., Antonutto G., Capelli C., Francescato M. R., Girardis M., Sangoi R., Soule G., Pendergast D. R. (1996). Effects of body size, body density, gender and growth on underwater torque. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 6(5), 273-280.

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

謝辞

本学位論文は早稲田大学スポーツ科学学術院、矢内利政教授のご指導のもと執筆致しました。矢内先生には研究の事から人としての生き方まで、様々な事を学ばせていただきました。私がこの6年間で自由にのびのびと研究活動を行えたのは、矢内先生の暖かいご指導、ご支援あってのことで、夢のような6年間でした。将来、矢内先生と大きな仕事ができる日を夢見て、これからも精進していく所存です。本当に感謝いたしております。

早稲田大学矢内研究室の助手であった近田彰治先生、永見智行先生には多くのサポートを頂戴しました。特に、近田先生には実験の計画段階から多くの助言を頂きました。

早稲田大学矢内研究室、杜唐慧子さん、塩田義裕さん、安田武蔵さんには、同じ水泳グループのメンバーとして、データ収集、分析において多くのご支援を頂きました。杜唐慧子さんにおいては、最初の実験から最後の実験まで全ての実験に協力を頂きました。また、塩田義裕さん、安田武蔵さんには実験のお手伝いのみならず、予備実験の被験者としてご協力を頂きました。

早稲田大学バイオメカニクスグループの、城所収二さん、平田浩祐さん、杜唐慧子さん、森下義隆さん、上坂学さん、谷中拓哉さん、江間諒一さん、佐藤隆彦さん、茂木康嘉さん、福谷充輝さん、橋詰賢さんには公私にわたり多くのご支援を頂きました。厳しい大学院生生活の中にあっても、前向きに研究が行えたのは、皆さまと共に切磋琢磨、叱咤激励しあえたからです。本当に感謝いたしております。

最後に、いつも「自分のやりたいことを最後までやりなさい」と背中を押し、支援してくれた両親に心から感謝します。

2016年 7月 丸山祐丞