

アーティスティックスイミングにおけるスラストの 動作解析および競技力に影響する因子の分析

王 夢 璐*^{1, 2}・松 崎 香 穂*²・地 神 裕 史*^{2, 3}

Analysis of thrust movement and factors affecting competitive ability in artistic swimming

Ou Muro*^{1, 2}, Kaho Matsuzaki*², Hirofumi Jigami*^{2, 3}

Abstract: Artistic swimming (AS) is an event that is scored based on acrobatic lift movement in addition to underwater artistry and synchronization. One of the basic elements of AS called thrust is the skill of raising the legs and pelvis high above the surface of the water quickly. This thrust movement consists of the pike posture underwater, floating using buoyancy, movement in a segmental extension of the pelvis and trunk (unroll), scouring the water with the hands, and elevation the legs high on the water surface. However, the optimal teaching method and necessary physical function have not been elucidated to date. In this study, we aimed to analyze the factors affecting the height of the thrust movement. We also aimed to assess the physical factors that affect movement. Thrust movement requires the spine and hip joint flexibility, and unrolling speed. However, these objective numerical quantifications have not been elucidated owing to the technical problems of performing three-dimensional motion analysis and electromyographic measurements in water. This study revealed that the athletes who had high skills of AS show high thrust height, and the maximum pelvic angular velocity was the most important factor affecting the height of the thrust movement. In addition, it was suggested that to increase the maximum rotational angular velocity of the pelvis, it is important not to extend the hip joint using the gluteus maximus but to extend the trunk segmentally using the erector spinae muscles.

Key words: Artistic swimming, Synchronized swimming, Thrust, Three-dimensional motion analysis, Electromyogram

1. はじめに

アーティスティックスイミング（以下AS）の種目にはソロ、デュエット、チーム、フリーコンビネーション、ミックスデュエット、ハイライトルーティンの6つがある。ソロ、デュエット、チームは3分30秒前後の曲の中で自由に演技するフリールーティンと2分20秒前後の曲中に決まった動きを取り入れるテクニカルルーティンの2つのプログラムが規定要素として決められている。テクニカルルーティンの一般規定には「すべての規定要素は高く、良くコントロールされ、かつユニフォームモーション（同調性のある動き）で行い、各部分が明確であること」とあり、特に「高さ」と「正確さ」が採点

の主眼となる¹⁾。ASの指導現場では、近年の急速な競技の発展および技の高難度化に伴い、動作の安定性とスムーズさに加えて、より水上に高く身体を上げることが求められている、と日本水泳連盟のAS委員長である本間氏が述べている²⁾。ASの演技の中で、現在水面から最も高さを得られる技はスラストと呼ばれる動作である²⁾。スラスト動作は脚から水上に高く飛び上がる瞬発的な動作であり、ASにおける多くの水上に脚を出す技の基本となる動作である（図1）。さらに、テクニカルルーティンのソロ、デュエット、チーム競技すべての規定要素やフィギュア競技で採点の対象となる重要な基本動作である。

ASにおける先行研究は強豪国の戦術に関する研究³⁾、水中で身体を浮かせるための基本動作であるスカーリングやエッグビーターキックに関する研究^{4) 5) 6) 7)}、テクニカルルーティン規定要素の水上高とその技術評価に関する研究²⁾、フィギュア種目の得点と選手の体格、身体

*¹セノー株式会社

*²国士舘大学 工学研究科 電気工学専攻

*³国士舘大学 理工学部 人間情報学系

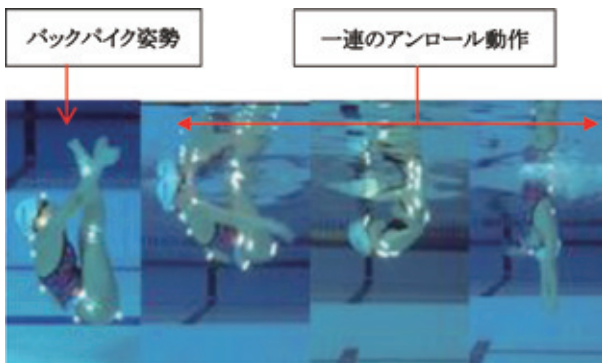


図1 スラスト動作

能力に関する研究^{8) 9) 10) 11) 12)}、心理的研究¹³⁾などが散見されるが、スラスト動作のようなAS特有の動作に関する研究はあまり行われていない。その要因としてAS動作の多くは水面下と水面上の両方を用いて実施されるが、水中と水上動作を同時に3次元動作解析することは煩雑な研究手法を要することが挙げられる。そのため、ASの動作解析や動作の質と身体機能に着目した研究は非常に少ない。

スラスト動作は図1に示すように水中でバックパイク姿勢を取り、浮力を利用して浮きあがりながら骨盤の回転や脊柱の伸展(アンロール)、手で水を掻くスカーリングや手掌で水中を押し動きなどによって、身体を一直線にした状態で水面上に脚と体幹下部を出す動作である。アンロール(unroll)の語源は、「巻物を広げるように展開する」という英語であり、脊柱を丸めた状態から分節的に伸展させ、脚を水面上に突き上げる際に身体を一直線にすることが重要である。このスラスト動作において選手自身が意識するポイントは選手ごとに異なり、指導者に現場でヒアリングした際にも、「スラストは最も指導が難しい動作」と回答する指導者が多かった。このようにスラスト動作は指導法や、より良い動作を習得する上で必要な身体機能は未だ解明されていない。

我々が行った先行研究において、スラスト動作の一部であるアンロールの速度は、スラスト動作の最大到達高を高めるために重要であることが明らかとなった¹⁴⁾。また、本間らは、最大到達高を高めるためには、アンロールにおいて股関節を急激に素早く伸展させるべきであると報告している¹⁵⁾。本研究では競技レベルの異なるAS選手を対象にスラスト動作の3次元動作解析と筋活動解析を行い、スラスト動作の高さに影響するアンロール速度や脊柱や骨盤周囲の筋活動、脊柱の柔軟性との関係を明らかにすることを目的とした。

なお、本研究は国士館大学の人を対象とした研究に関する理工系倫理評価委員会に承認を受け実施した。(受付番号6)

2. 方法

2-1. 対象

対象は実験の趣旨を十分に説明し、実験参加に関する同意を得られた女子AS選手8名(年齢 20.9 ± 2.1 歳、身長 161.2 ± 4.7 cm)とした。8名中3名は日本代表に選ばれたことがある選手(日本代表レベル選手)、5名は大学AS部選手(大学レベル選手)であった。

2-2. 実験場所

国士館大学メープルセンチュリーホール地下2階温水プール(水深2m、水温30℃)

2-3. 使用機器

動作計測にはモーションキャプチャカメラ7台(PRIME13)を用いた。空間の校正(キャリブレーション)にはソフトウェア(Motive, Optitrack社製)及び校正治具(キャリブレーションワンド250mm・グラウンドプレーン)を使用し空間の校正を行った。解析にはソフトウェア(VENUS 3D, ノビテック社製)を用いた。筋活動計測は、水中でも計測可能なワイヤレス筋電図計測機器(Mini Wave Infinity・Wave Plus EMG, Cometa社製)と電極(Blue Sencer P, Ambu社製)を用い、測定及び解析にはソフトウェア(EMG and Motion Tools, Cometa社製)を使用した。

2-4. 実験条件

水中での動作計測の前に、被験者各個人の脊柱の可動性を陸上で計測した。

水中での動作解析にはモーションキャプチャカメラを水中に4台、陸上に3台配置し、陸上と水中の空間の校正や原点の設定を行った。以下に記載する自発光LEDマーカーを体表面に貼付した後、競技中と同様に最高の高さを出すようにスラスト動作を5回実施させた。なお、選手によってスラストに要する時間が異なるので、アンロールを基準として、骨盤の動き始めた時点をアンロール開始とし、その1秒後をアンロール終了と定義した。さらに、定義したその1秒間をパーセンテージで表示した。

2-5. 脊柱の可動性

水中での動作計測の前に陸上で触診にて各被験者の第1胸椎(TH1)、第6胸椎(TH6)、第7胸椎(TH7)、第12胸椎(TH12)、第1腰椎(L1)、第5腰椎(L5)の棘突起を確認し、マーカーを貼り付けた。先行研究^{19) 20)}と同様に本研究も第1胸椎～第6胸椎を上部胸椎、第7胸椎～第12胸椎を下部胸椎、第1腰椎～第5腰椎を腰椎と定義した。陸上にてデジタルカメラ(OLYMPUS社製)を用いて安静姿勢時(図2)、上部胸椎最大屈曲時

(図3), 下部胸椎屈曲時 (図4), 腰椎最大屈曲時 (図5) の4パターンを側方より撮影した。弯曲を円の弧の一部とみなして, 各棘突起に貼付したマーカーにおける接線を引いた。さらに, その直線に対する垂線を引き, 垂線同士のなす角度を求めた (図3)。上部胸椎, 下部胸椎, 腰椎をそれぞれ最大に屈曲させた際の可動性を算出した。安静立位姿勢時の各棘突起のなす角を基準として上部胸椎, 下部胸椎, 腰椎の最大屈曲時のなす角度と比較した時の角度を上部胸椎可動性, 下部胸椎可動性, 腰椎



図2 安静立位姿勢時

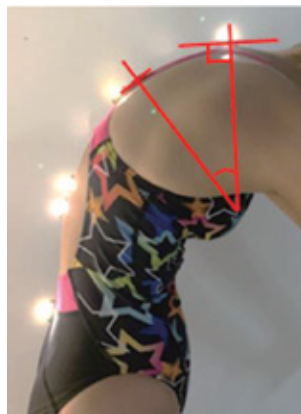


図3 上部胸椎最大屈曲時

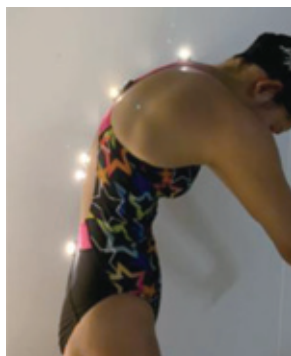


図4 下部胸椎最大屈曲時

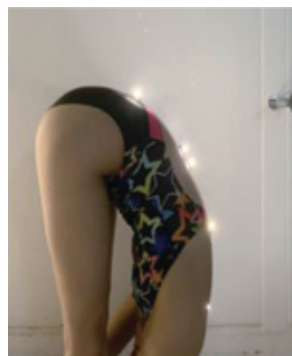


図5 腰椎最大屈曲時

可動性と定義し, そのなす角度が大きいほど可動性が高いと評価した。カメラは対象者より2m離れた場所に固定して撮影した。

2-6. 3次元動作解析方法および解析項目

自発光LEDマーカーを額の中央 (A)・右肩峰 (B)・右上後腸骨棘 (C)・右上前腸骨棘 (D)・右大転子 (E)・右脛骨粗面 (F)・右外果 (G) の7か所に貼付した。B・E・Gのマーカーから矢状面を構成し, C・D・Eと矢状面から, 骨盤の回転角度を算出した。これらに基づき, 本研究では以下の1-3の解析項目を中心に比較検討を行った。なお, サンプリング周波数は240Hzとした。

(1) Thrust height index (THI)

動作中に水面からどの程度脚を高く出せたか (スラストの到達高) を数値化するために, 解析ソフト VENUS3D を用いて, 図6のように水面から外果のマーカー (I) までの垂直距離を算出した。数値が大きいほど水面から出た脚の高さが高く, 良い評価となる。しかし, 選手によっては下肢長が異なることで水上に出る脚の高さに影響を与えるので, 陸上にてメジャーを用いて大転子から外果までの距離 (転子果長) を測定し, 下肢長とした。選手間の到達高を正規化するために, 外果の最高到達高を下肢長で除した値Thrust height index (THI) をスラストの到達高の指標とした。

(2) 骨盤の最大回転角速度

アンロールは骨盤の回転運動も含むため, 本研究はC-E-Dの3点を骨盤と定義し, アンロール時の骨盤の最大回転角速度を算出した (図7)。

(3) 額-脛骨粗面の距離

図8のように矢状面におけるアンロール時の額 (A) と脛骨粗面 (F) の距離を加算平均し, 距離が短いほど脊柱と脚が離れずに骨盤を回転し, 脊柱を伸展できていると評価した。

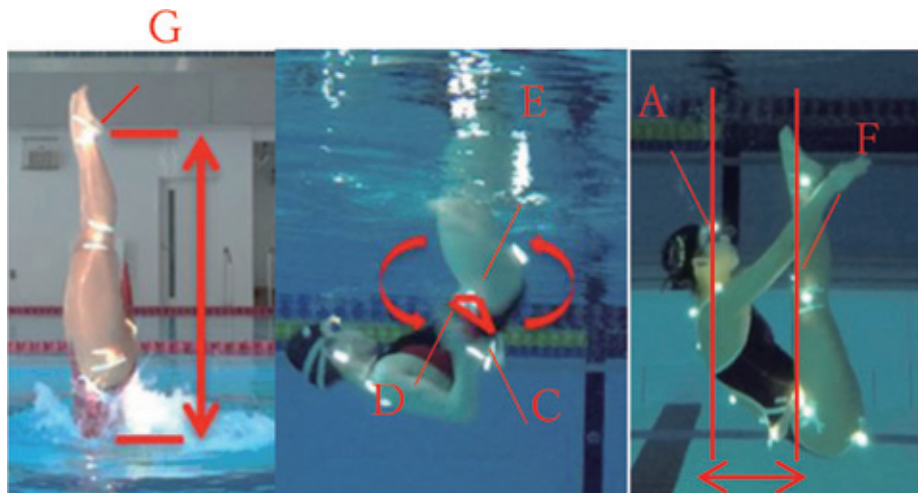


図6 THI

図7 骨盤の回転角速度

図8 額-脛骨粗面の距離

2-7. 筋電図解析方法および電極貼付部位

電極は脊柱起立筋中部 (H)、腹横筋 (I)、大臀筋下部 (J)、半膜様筋 (K)、大腿直筋 (L) に貼付した。上記の試技における動作時の筋電図信号 (Electromyogram : EMG) を計測した後、各筋の最大筋活動値 (Maximum Voluntary contraction : MVC) を計測した。解析のタイミングは骨盤が動き始めるまでの2秒間から動き始めた後の1秒間、計3秒間の筋活動を解析した。

解析はバンドパスフィルタ (20Hz-500Hz) をかけた後、全波整流化し、スムージング処理を行った。各筋のスラスト中のデータは陸上での最大随意筋力 Maximum Voluntary Contraction (MVC) 発揮時の最大値で除し、% MVC を算出し、比較検討した。サンプリング周波数は2000Hzとした。

2-8. 統計処理

各測定項目の平均値および標準偏差を求めた。スラストの高さ、骨盤の回転速度と各測定項目の相関係数を検討するためピアソンの相関係数を用いた。すべての項目は有意水準5%未満を有意とした。

3. 結果

本研究にて算出した各解析項目の結果を選手別に表1にまとめた。被験者Bのスラスト動作の高さが一番高くTHIが1.36であった。一方、被験者FのTHIが一番低い1.19であった。

各変数の相関関係を表1にまとめた。THIと骨盤の最大回転角速度および下部胸椎可動性には有意な正の相関関係、THIと動作中の大臀筋の最大筋活動は負の相関関係が認められた (それぞれ、 $r=0.92$, $r=0.74$, $r=-0.82$, $p<0.05$)。骨盤の最大回転角速度と動作中の脊柱起立筋の最大筋活動、骨盤の最大回転角速度と動作中の大臀筋の最大筋活動に有意な相関関係が認められた (それぞれ、 $r=0.80$, $r=-0.78$, $p<0.05$)。額-脛骨粗面の距離と下部胸椎可動性、額-脛骨粗面の距離と腰椎可動性においても有意な負の相関関係が認められた (それぞれ、 $r=-0.72$, $r=-0.83$, $p<0.05$)。統計学的に有意ではなかったが、THIと額-脛骨粗面距離、額-脛骨粗面距離と脊柱起立筋の筋活動に相関する傾向が見られた (それぞれ、 $r=-0.64$, $r=-0.71$)。上部胸椎可動性、腰椎可

動性、大腿直筋の筋活動は各測定項目と相関関係が見られなかった。

日本代表レベル選手3名と大学レベル選手5名のスラスト実施中の各筋の平均筋活動をそれぞれ図9と図10に示した。図9からアンロール時、日本代表レベル選手の脊柱起立筋の活動は常に大臀筋の活動より大きい結果となった。一方、図10から大学レベル選手は脊柱起立筋より大臀筋の活動が有意に ($p=0.0009$) 大きい結果となった。

4. 考察

本研究により、スラストの到達高には骨盤の最大回転角速度が関連していることが明らかとなった。さらに、骨盤の最大回転角速度の速い選手は大臀筋ではなく脊柱起立筋を多く活動させている傾向であることが明らかと

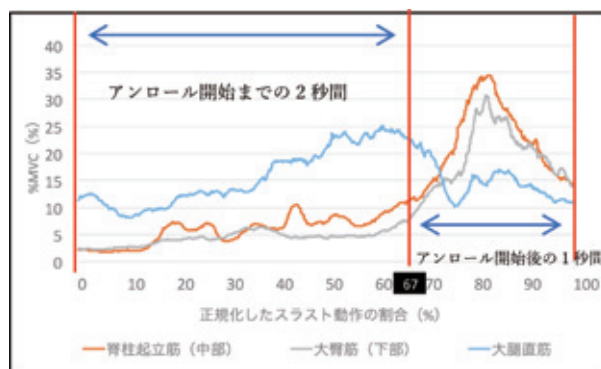


図9 日本代表レベル選手の平均筋活動水準



図10 大学レベル選手の平均筋活動水準

表1 各変数の相関係数

	骨盤の最大回転角速度	額と脛骨粗面の距離	下部胸椎可動性	腰椎可動性	脊柱起立筋(中部)の筋活動	大臀筋(下部)の筋活動
THI	0.92*	-0.62	0.74*	0.48	0.67	-0.82*
骨盤の最大回転角速度	-	-0.62	0.77*	0.45	0.80*	-0.78*
額と脛骨粗面の距離	-0.62	-	-0.74*	-0.81*	-0.69	0.14

$p<0.05$

なった。これらの結果について以下に考察する。

本間らはスラストの最高到達高の高い選手は到達高までの脚の上昇速度が速いことを報告している¹³⁾。つまり、スラストの最大到達高を高くするためには、可能な限り骨盤の回転を速くし、脚を素早く上昇させる必要があると考えられる。本研究においてもTHIと骨盤の最大回転角速度には有意な正の相関がみられたことから、本間らの報告を裏付ける結果となった。

骨盤の最大回転角度速度と下部胸椎可動性に有意な相関関係が認められた。角運動量保存の法則により回転半径が小さいほうが回転は速くなる。そのため、胸椎可動性の高い選手(図11)はアンロール時、下部胸椎の屈曲が大きい状態で脊柱を伸展させていることで骨盤を回転する時の半径が小さくなり、回転速度が上がったと考えられる。

下部胸椎可動性、腰椎可動性の高い選手は額と脛骨粗面の距離が小さいため、アンロール時は脊柱の屈曲が大きい状態(図11)から脊柱を伸展させている。その時、脊柱や体幹伸展に作用を有する脊柱起立筋の活動が高まり、骨盤の回転角速度に影響を与えたと考えられる。解剖学的に大臀筋は起始部である恥骨翼外面で後臀筋線の後方、仙骨の外側、尾骨の外側縁、胸腰筋膜、仙結節靭帯から停止部である腸脛靭帯、大腿骨の臀筋粗面にかけて幅広く走行している。大臀筋は股関節伸展作用があるが、骨盤を直接回転させる作用はない。本研究において日本代表レベル選手の大臀筋の活動は大学レベル選手と比べ低い傾向であった。日本代表レベル選手は上述したように、脊柱起立筋を使って脊柱を伸展させているため大臀筋の筋活動が小さくなったと考えられる。一方、大学レベル選手は脊柱を伸展させているのではなく股関節を伸展させているため大臀筋の活動が大きくなった。よって、股関節伸展動作が大きくなり、骨盤を回転させる時の半径が大きいため回転速度に影響を与えたと考える。さらに、図10から大学レベル選手は図9の日本代表レベル選手に比べ大臀筋の活動が動作の後半に出現している。筆者らが行なった予備研究¹⁴⁾ではスラストの到達高が低い選手は最高到達高を達した後にさらに脊柱を伸展させていることを明らかにしたことから、垂直姿勢

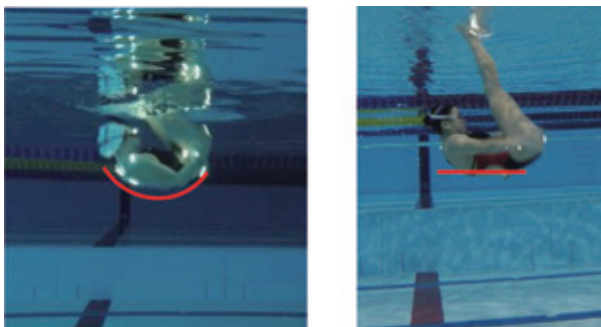


図11 胸椎可動性の高い選手(左)と胸椎可動性の低い選手(右)

時による過伸展が大臀筋の活動を増加させた原因ではないかと考えられる。

本間らは、スラストを動作解析した結果、アンロールは股関節の素早い伸展によって急激に行うべきであると報告している¹⁵⁾が、筋活動の研究はされていない。本研究は動作解析と筋活動を測定した結果、日本代表レベル選手はアンロール時の骨盤の回転速度が速く、大臀筋よりも脊柱起立筋を使って脊柱を伸展させている傾向であった。

5. 今後の課題

本研究によりスラストを高く行うためには脊柱の伸展が重要であることが示唆された。しかし、研究対象者の人数が少ないため統計結果に限界がある。また、スラスト中の脊柱の可動性について十分な評価が行えなかったのと、アンロールにおける骨盤の最大回転速度のみ算出したので、今後は被験者数を増やし、スラスト中の脊椎の一つずつの動きや可動性を測定する必要がある。さらに、アンロール中の骨盤の動きを時系列化する必要があると考える。スラストはアンロールの速さに加えて、手で水を掻く動作であるスカーリング動作や浮力も影響すると考えられる。今後はこれらの検討も行う必要があると考える。

参考文献

- 1) FINA: アーティスティックスイミング 競技規則. 公益財団法人 日本水泳連盟, 2018.
- 2) 本間三和子, 伊藤浩志: シンクロナイズドスイミングのテクニカルルーティン規定要素の水上高とその技術的評価. スポーツ方法学研究, 18 (1): 85-99, 3 2005.
- 3) 足立夢実: シンクロナイズドスイミングにおける強豪国の戦術に関する研究. 早稲田大学大学院スポーツ科学研究科, 2015.
- 4) 本間正信: シンクロナイズドスイミングにおけるスカーリング動作の運動学的研究. 日本体育学会第60回, 60: 218, 2009
- 5) 本間三和子: シンクロナイズドスイミングにおけるスカーリングとエッグビーターキックの技術に関する文献研究. 筑波大学体育科学系紀要, 29: 1-14, 2006.
- 6) 本間三和子: シンクロナイズドスイミングにおける推進技術の動作特性と指導観点. 筑波大学, 2007.
- 7) 本間三和子: シンクロナイズドスイミング選手の浮力と基本姿勢時の水上荷重負荷. 日本体育学会第69回, 67: 230, 2014
- 8) 本間三和子, 久野譜也: シンクロナイズドスイミング選手の立ち泳ぎ能力と筋力, 筋形態との関連 (【トレーニング】). 体力科学, 50 (6): 929, 2001
- 9) 川上正人: シンクロナイズドスイミングのクーリングダウンの有効性について~血中乳酸濃度を指標として~. 神奈川歯科大学 基礎科学論集, (32): 5-10, 2014
- 10) 川上正人: シンクロナイズドスイミング選手の整形外科的メディカルチェックの有用性について~柔軟性に着目して~. 神奈川歯科大学 基礎科学論集, (34): 7-17, 2016
- 11) 河瀬雅夫, 阿部育子, 岸檜夫, 伊藤道郎: シンクロナイズドスイミング競技中の心拍数変化について. 日本体育学会

第34回：205, 1983

- 12) 丸山征：ロシアのシンクロナイズドスイミングの選手の恐るべき循環の秘密. 血管医学, 17 (3) : 343-346, 2016
- 13) 本間三和子：シンクロナイズドスイミング日本代表選手の心理的競技能力. 水泳 水中運動科学, 12 (1) : 1-9, 2009
- 14) 王夢路, 松崎香穂, 地神裕史：アーティスティックスイミングにおけるスラストの動作解析. 一般社団法人 電気学会 電子・情報・システム部門 (C部門), 2018
- 15) 本間三和子：シンクロナイズドスイミングのスラスト動作の競技特性. 科学研究費助成事業 研究成果報告書, 2017
- 16) Ferreira PH, et al : Discriminative and reliability analyses of ultrasound measurement of abdominal muscles recruitment. *Man Ther*, 16 (5) : 463-469, 2011.
- 17) Hodges PW, et al : Measurement of muscle contraction with ultrasound imaging. *Muscle Nerve*, 27 (6) : 682-692, 2003.
- 18) McGill S, et al : Appropriately placed surface EMG electrodes reflect deep muscle activity (psoas, quadratus lumborum, abdominal wall) in the lumbar spine. *J Biomech*, 29 (11) : 1503-1507, 1996.
- 19) Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, et al : Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence : standard values and prediction of lordosis. *Eur Spine J*, 15 : 415-422, 2006.
- 20) 塩本祥子, 松村純, 森健太郎, 三秋泰一：端座位における骨盤前後傾中の脊柱の運動分析. 理学療法科学, 26 (3) : 337-340, 2011