体幹の回旋運動に対する腹横筋の寄与

——健常者と慢性腰痛症例の比較——

*A Comparison of the Contribution of the Transversus Abdominis to Trunk Rotation
in Normal Subjects and Subjects with Chronic Low Back Pain*

三浦 拓也¹⁾ 山中 正紀²⁾ 遠山 晴一²⁾ 斎藤 展士²⁾
寒川 美奈²⁾ 小林 巧²⁾ 武田 直樹³⁾

TAKUYA MIURA, RPT¹⁾, MASANORI YAMANAKA, RPT, PhD²⁾, HARUKAZU TOHYAMA, MD, PhD²⁾,
HIROSHI SAITO, RPT, PhD²⁾, MINA SAMUKAWA, RPT, PhD²⁾, TAKUMI KOBAYASHI, RPT, PhD²⁾,
NAOKI TAKEDA, MD, PhD³⁾

¹⁾ Graduate School of Health Sciences, Hokkaido University: Kita12, Nishi15, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 060-0812, Japan.
TEL+81 11-706-3383 E-mail: miu_tak_pt@yahoo.co.jp

²⁾ Faculty of Health Sciences, Hokkaido University

³⁾ Department of Orthopaedic Surgery, Hokuto Hospital

Rigakuryoho Kagaku 29(2): 207-212, 2014. Submitted Sep. 11, 2013. Accepted Oct. 24, 2013.

ABSTRACT: [Purpose] To study the activities of the deep abdominal muscles during trunk rotation using ultrasound imaging. [Subjects] The subjects were 10 healthy persons with no lower limb or trunk disorders, and 6 chronic low back pain (LBP) patients. [Methods] In the sitting position, trunk rotation was performed voluntarily, and passively with a device. The thickness changes in the transversus abdominis (TrA) during performance of the task were compared between the healthy subjects and LBP patients. [Results] We found that the TrA thickness increased unilaterally in trunk rotational movement of the healthy subjects, but not in the LBP patients. [Conclusion] The difference observed in the TrA activities of healthy subjects and LBP patients suggests TrA contributes to trunk rotation, and TrA functionality is one aspect of the difference between healthy subjects and LBP patients.

Key words: trunk rotational movement, deep abdominal muscles, ultrasound imaging

要旨:〔目的〕超音波画像診断装置を使用して体幹回旋運動時における腹部深層筋の動態を究明すること。〔対象〕下肢・体幹に障害のない健常者10名、および慢性腰痛症例6名とした。〔方法〕座位にて下部体幹を回旋させることが可能な装置による他動的な回旋と、随意的な回旋を実施した。課題中における腹横筋の筋厚の変化を健常者と慢性腰痛症例との間で比較した。〔結果〕体幹回旋運動に対する腹横筋の一側性の筋厚増加が健常者では認められ、慢性腰痛症例においては認められなかった。〔結語〕観察された健常者と慢性腰痛症例の腹横筋活動の違いは、体幹回旋に対する腹横筋の関与と、健常者と慢性腰痛症例における腹横筋の機能性の違いの一端を示唆する。

キーワード: 体幹回旋運動, 体幹深層筋群, 超音波画像診断装置

¹⁾ 北海道大学大学院 保健科学院: 北海道札幌市北区北12条西5丁目 (〒060-0812) TEL 011-706-3383

²⁾ 北海道大学大学院 保健科学研究院

³⁾ 社会医療法人北斗 北斗病院整形外科

I. はじめに

屈曲、伸展、側屈、回旋を含む体幹の運動は主に、腹部、および背部に位置する筋群によって制御されている。この制御は最も小さいスケールでは脊椎椎骨間にて行われている。このレベルにおける制御の結果が腰椎骨盤の方向性コントロール、全身平衡のコントロールといったより大きなスケールにおける制御に影響する。Hodgesら¹⁾は、脊椎椎骨間において安定性が考慮されなければならないとしている。また、脊椎のコントロールに関わる最も基本的な運動である椎骨の平行移動と回旋運動は、しばしば分離して考える必要があり、これらの間の調和が重要である²⁾。さらに、一つの椎骨を除き全ての分節に筋が付着しているモデルは、筋が全く付着していない場合と同じ安定性を持つことが示されている³⁾。したがって、脊椎の安定性には分節間のコントロールが不可欠である。

脊椎分節間のコントロールに重要な役割を持つといわれる腹横筋は、腹部周囲を取り巻くように走行している筋であり、機能的な観点から体幹ローカル筋群に属している⁴⁾。脊椎の安定性に対する腹横筋の関与は、腹腔内圧 (intra-abdominal pressure) の上昇^{5,6)}、他の体幹筋群に先行し、かつ独立した活動 (anticipatory activity)⁷⁻⁹⁾、および仙腸関節の圧迫 (force closure)¹⁰⁾ などである。前述したように、腹横筋は概ね水平方向に走行するため体幹運動を生み出す能力は限られているが、体幹回旋努力中に活動が見られるとの報告が散見される^{11,12)}。しかしながら、腹横筋の一側性の収縮が体幹の軸回旋を引き起こすか否かに関しては議論の余地がある。体幹回旋運動時に腹横筋の活動はほとんどみられない⁵⁾といった報告に対し、一側性あるいは両側性の活動が見られる¹³⁾という報告もあり、一致した見解は得られていない。さらに、これらの多くが筋活動を解析したものであり、実験で使用されているワイヤー筋電図などを用いた手法には高い侵襲性や理学療法士の単独使用が不可能であること、ハイコストであること、臨床での使用が困難であることなど種々の問題が指摘されている。近年、運動器系理学療法で注目されている超音波画像診断装置については非侵襲性であること、利用方法も簡便で理学療法士単独での使用が可能であること、リアルタイムで腹横筋のような深層に位置する筋群の動態変化を捉えることが可能であること、さらに腰痛症例への臨床的なバイオフィードバックとしての有用性があること^{14,15)}などが報告されている。また、この診断装置による腹部深層筋群の計測法には高い信頼性、および妥当性のあることが報告されている¹⁶⁻¹⁹⁾。

慢性腰痛症例において、体幹の安定性に寄与する腹横筋に機能低下があることが示唆されている²⁰⁾。体幹の回旋動作は腰痛発症の一要因と考えられているが、腹横筋の機能低下が体幹回旋動作にどのような影響を持って

いるのか、また健常者と慢性腰痛症例の間に腹横筋の活動の違いがあるのかは現在のところ明確になっておらず、その関連性の一端を示すことは腰痛発症や慢性化の予防、リハビリテーションプログラムの考案など腰痛に対する適切な理学療法を提供する上での一助となると思われる。そこで、本研究の目的は臨床的に有用なツールである超音波画像診断装置を用いて体幹回旋運動時における腹部深層筋の動態を究明し、さらに健常者と慢性腰痛症例の比較を通して腹部深層筋の機能性の違いを示すこととした。

II. 対象と方法

1. 対象

体幹や下肢に整形外科的または神経学的既往歴の無い健常者10名 (年齢: 20.1 ± 1.6 歳; 身長: 167 ± 10.1 cm; 体重: 58.3 ± 8.9 kg) を健常群、および3か月以上続く慢性腰痛症例6名 (年齢: 20.8 ± 1.4 歳; 身長: 163.4 ± 8.0 cm; 体重: 55.2 ± 10.5 kg・Oswestry disability index (ODI): 14.0 ± 5.4 ・visual analog scale (VAS): 4.7 ± 2.0) を慢性腰痛群とした。慢性腰痛群における除外基準は体幹および下肢に手術歴がある者、神経学的所見がある者、実験時に腰痛が誘発される者とした。

なお、本研究の被験者には事前に書面と口頭により研究の目的、実験内容、考えられる危険性、データの取り扱い方法等を説明し、理解と同意を得られた者のみに同意書に署名させ、実験に参加させた。本研究は本学保健科学研究院の倫理委員会の承認を得て行った。

2. 方法

本研究では、腹部深層筋群の動態の計測に超音波画像診断装置 (Esaote社製 MyLab25) を使用した。プローブはリニア型、周波数は12 MHz、B-modeにて撮像した。プローブの位置は体幹正中線から水平方向に約10 cm、および第11肋骨から腸骨稜の中間の前腋窩線上とした。画像上における腹横筋筋厚の計測部位は腹横筋筋腱移行部から側方に約2 cmの位置で、その方向は画像に対し垂直方向とした。さらに、腹横筋は呼吸にも関与することから、筋厚計測は吸気終末に行った。

動作課題は座位での体幹回旋運動とした。我々はこの動作課題が遂行可能となるよう、過去にZazulakら²¹⁾が作製した腰椎部の固有感覚を調べる装置を参考に体幹回旋運動装置を試作した。モーターによる座面の他動的な回旋を可能とする本装置により、体幹の他動回旋およびモーターをoffにし被験者自身に運動を行わせる自動回旋を実施した。中間位とする骨盤の位置で、座面の回転軸にL4-5の長軸が一致するように背もたれのマット厚を調節し、座位姿勢をとらせた。また被験者の上部体幹

を胸骨レベルで交差させたベルトにより背もたれに固定し、確実に下部体幹のみが動くようにした。股関節および膝関節は90°屈曲位とし、足部は座面からつながる足台に乗せた。回旋運動は20°の右回旋とし、座面が正面を向いた状態の開始位置(0°)から右へ20°下部体幹を回旋させた終了位置で保持する。他動回旋課題では回旋はモーターによる他動的な運動であるため、被験者には安静座位をとるよう指示した。自動回旋課題では0°の開始位置から随意的に体幹を20°回旋させるよう指示し、目標角度達成は被験者の前に設置されたモニタにて被験者および検者の両方で確認した。

本実験の信頼性検討のために健常群の被験者より無作為に6名を抽出し、1～4週間の期間において同様の計測を行った。1回目と2回目の計測に対して級内相関係数(以下、ICC)を使用し、検者内信頼性の検討を行った。

被験者の身体特性(年齢、身長、体重)の比較には対応のないt検定を用いた。超音波画像診断装置による筋厚計測の対象は腹横筋とし、開始位置と終了位置において筋厚を左右3回ずつ取得し、それぞれ3回の平均を算出した。解析対象とする代表値は各計測側(左右)における各回旋条件(他動、自動)、各回旋角度(0°、20°)に対する腹横筋の平均筋厚とした。筋厚の比較については、回旋条件と回旋角度の二要因での二元配置分散分析および多重比較(Bonferroni法)を使用した。統計解析にはSPSS Advanced Statistics 17 (IBM 社製)を使用し、有意水準は5%未満とした。

III. 結果

被験者の身体特性である年齢、身長、体重で群間に有意差は認められなかった(表1)。

腹横筋筋厚に対する測定法の検者内信頼性をみると、ICC (1,1) が0.81～0.91と、高い信頼性が得られた。

回旋条件と回旋角度の二要因での二元配置分散分析の結果、健常群では左腹横筋での解析において交互作用($p<0.05$)が認められたため回旋条件にて多重比較を行った。多重比較の結果、自動回旋において、開始位置(0°)と終了位置(20°)との間で有意な筋厚の増大が認められた($p=0.026$)が、他動回旋においては回旋角度間に有意

差は認められなかった。また終了位置の時、他動回旋に比して自動回旋で有意に筋厚が大きかった($p=0.044$)(表2)。健常群の右腹横筋での解析ではいずれの比較においても有意な主効果、交互作用ともに認められなかった。慢性腰痛群における回旋条件と回旋角度の二要因での二元配置分散分析の結果、いずれの比較においても有意な主効果、交互作用ともに有意差は認められなかった(表2)。

IV. 考察

腹横筋筋厚計測の信頼性については過去に多くの研究で高い値が示されている¹⁶⁻¹⁹⁾が、体幹回旋時の計測に関する信頼性については検討されていない。本研究により、左右非対称な体幹の動作中において高い検者内信頼性が認められたが、今後は検者間信頼性についても検討していくべきであろう。

超音波診断装置を使用した腹横筋筋厚計測に対してはこれまで高い妥当性が示されている。Hodgesら¹⁾は腹横筋中部線維において12-23%MVC(maximal voluntary contractions: 最大随意収縮)までは筋活動と筋厚との間に正の相関があるとし、McMeekenら¹⁹⁾は全ての筋活動範囲においても正の相関がみられると報告している。Hidesら²⁴⁾は腹横筋筋厚とslide量(腹横筋の収縮による、腹横筋筋腱移行部の側腹方向への移動量)とともに、超音波画像診断装置とMRIによる測定値の間に正の相関がみられたと報告している。また、体幹回旋時における腹横筋の筋活動は0.2-29.6%MVCの大きさであるとの報告²²⁾があるため、本研究における体幹回旋時の筋厚変化はおおよそHodgesら¹⁾が報告している相関範囲内の活動であると思われる。

本研究は、超音波画像診断装置を使用して体幹回旋動作時における腹横筋の筋厚変化を観察し、健常者と慢性腰痛症例との腹横筋の機能性の違いを検討したものであり、我々が知りうる限り、体幹回旋時の腹横筋の機能を健常者、慢性腰痛症例を用いて調査した初めての研究である。結果より、健常者においては体幹の自動回旋時、0°と20°の比較において左腹横筋の筋厚に有意差が認められた。体幹回旋時の腹横筋筋活動に関して、ワイヤー筋電図を用いた研究では腹横筋の下部線維および中部線維

表1 被験者の身体特性

	健常群 (n=10)	慢性腰痛群 (n=6)
年齢 (歳)	20.1 ± 1.6	20.8 ± 1.4
身長 (cm)	166.7 ± 10.1	163.4 ± 8.0
体重 (kg)	58.3 ± 8.9	55.2 ± 10.5
Oswestry disability index (ODI)	—	14.0 ± 5.4
visual analog scale (VAS)	—	4.7 ± 2.0

数値は平均値 ± 標準偏差を表す。

表2 課題時における腹横筋筋厚の比較

		他動回旋		自動回旋	
		0°	20°	0°	20°
健常群 (n=10)					
腹横筋	右	3.7 ± 0.7	3.2 ± 0.6	3.8 ± 0.9	3.3 ± 0.8
	左	3.5 ± 1.0	3.6 ± 0.9	3.5 ± 0.9	4.0 ± 1.1*†
慢性腰痛群 (n=6)					
腹横筋	右	3.6 ± 0.3	3.7 ± 0.4	3.7 ± 0.3	3.6 ± 0.4
	左	3.6 ± 0.2	3.8 ± 0.2	3.7 ± 0.3	3.8 ± 0.3

数値は平均値 ± 標準偏差 (単位: mm) を表す。

* 同一課題内における 0° vs. 20° ($p < 0.05$).

† 同一回旋角度における他動回旋 vs. 自動回旋 ($p < 0.05$).

は体幹の同側回旋に関与し、対して上部線維は対側回旋に関与しているという報告²²⁾があり、腹横筋の線維別による機能の違いを示している。またCresswellら¹¹⁾は、我々が行った下部体幹の回旋ではなく、骨盤が固定された状態での上部体幹の回旋運動を行いHodgesら²²⁾と同様の結果を示している。しかしながら、他の先行研究では体幹回旋中に腹横筋の活動はほとんどみられないという報告^{5,23)}もある。例えば、Misuriら²³⁾は体幹回旋時、腹横筋の筋厚は全体的に変化しなかったと報告しているが、この研究では被験者の半数以上が左右いずれかの回旋方向にて腹横筋の筋厚変化を認めている。このように、体幹回旋動作時における腹横筋の動態について種々の研究が行われているが、これら先行研究では体幹回旋動作に対する腹横筋の寄与については明確に示されていない。その原因として、体幹腹部筋群の走行や付着部、線維の形態学的多様性が考えられる。例として、腹横筋の上部線維は概ね水平方向に走行し、中部および下部線維は胸腰筋膜や腸骨稜に連結するため比較的内外方に走行する。この解剖学的な理由によって腹横筋は回旋運動のためのトルク産生に機械的に不利であることが考えられる。さらに、これに内腹斜筋や外腹斜筋など主として体幹回旋に作用する筋群の解剖学的走行を加味すると、それぞれの線維の機械的特性の違いにより複雑な腹部リクルートメントが生じていることが考えられる。本研究の動作課題は下部体幹を右に回旋させるものであり、上部体幹は骨盤に対して相対的に左回旋位となる。そのため、下部腰椎に対する上部腰椎も相対的に左回旋位になっているため、本結果で示されたような左腹横筋での有意な筋厚増大が観察され、先行研究^{11,22)}とも矛盾しない結果が示された。しかしながら、本研究においては腰椎そのものの回旋を調査していないため、胸腰筋膜を介して腰椎に付着する腹横筋が腰椎の回旋方向の違いによりどのような動態を示すかについてより詳細な検討が必要である。また、本研究結果から、左腹横筋において他動回旋と自動回旋の間で有意差が認められた。この結果の説

明として、以下の二つが考えられる。第一に、自動回旋動作により筋厚の増大が示されたということは、回旋作用による受動的な筋厚の形態的变化によるものではなく、腹横筋の筋活動による回旋動作に対する能動的な形態的变化を示しているということである。腹横筋の筋厚の変化と筋活動は前述した先行研究により一定の関連性があることが示されているため、本結果でみられた筋厚の増大は体幹回旋動作に対して腹横筋が主動的に働いたことを反映しているかもしれない。第二に、体幹を回旋させる機能を有する筋は主に腹斜筋群であることから、これら筋群による回旋動作に対して胸郭や腰椎の運動、胸腰筋膜の緊張、さらには仙腸関節といったいわゆる体幹を安定化させるために制御されるべき領域において腹横筋が関与した結果であるということも可能性として挙げられる。つまり、この場合は腹横筋はより安全に、安定した回旋動作の達成のために補助的に働いたかもしれない。しかしながら、本研究結果は腹横筋の肥厚はあくまでも体幹回旋に伴い生じることを示したものであり、腹横筋が主動的に、もしくは補助的に、さらにはこれら二つが同時に生じていた可能性も考えられるが、実際にどのように働いたのかは本研究結果から強く言及することはできないため、方法論も含めてより詳細な調査が必要であると思われる。

慢性腰痛症例では各回旋条件、回旋角度に対する全ての比較において有意差は認められなかった。先行研究では急激な四肢の運動にともなう腹横筋の活動に関して、健常者においては腹横筋の独立的、かつ先行的な筋活動がみられたが、再発性の腰痛患者においてはこの活動の遅延が観察されている²⁰⁾。また動作課題として腹部の引き込み運動 (abdominal drawing-in maneuvers: ADIM) を使用した研究では、慢性腰痛症例患者は健常者と比較して、ADIM時の腹横筋筋厚が有意に低下していた²⁵⁾。本研究においても体幹回旋動作時における腹横筋の動態に健常群と慢性腰痛群で異なる結果が示された。健常者においては体幹回旋のような非対称的動作を行う際に左

右での活動性を異にすることにより胸腰筋膜の張力を調整し脊椎に対して過剰な機械的ストレスが働かないよう制御するといういわゆる **motor control** が正常に機能している。しかし、慢性腰痛症例では脊椎の安定性を増加させる腹横筋の機能に不全が生じている可能性があり、そのためにこのような結果になったものと推察される。この慢性腰痛症例における **motor control** に関しては、四肢や体幹の筋に対して高張生理食塩水を注入し実験的に疼痛を誘発させた際、姿勢への応答的な反応、言い換えると筋の働きを制御するために前もって **planning** される姿勢戦略の変容がみられたとの報告がある^{26,27)}。そのメカニズムについてはコンセンサスが無く詳細は不明であるが、疼痛によって筋機能に変化することは確かなこととして受け入れられている。したがって、本研究の腰部に慢性的な疼痛を呈す対象者において、上記のように **motor control** が変容していた可能性があり、健常者で確認された腹横筋の一側性の活動がみられなかったものと思われる。また、慢性腰痛症例における腹横筋の機能不全に対する改善を目的とした特異的エクササイズ (ADIM) を実施すると疼痛や機能障害が減弱し、この効果はその後30カ月維持されたという報告²⁸⁾や、腰痛の再発率が対照群と比較してADIMを実施した群で有意に低下したという報告²⁹⁾、ADIMの介入前に遅延していた腹横筋の筋活動 onset が、介入後には早まったという報告など³⁰⁾がある。しかしながら、本研究で示されたような慢性腰痛症例における体幹回旋時の腹横筋機能の変容がこれら特異的エクササイズによって改善するかどうかについては未だ究明されていないため、より効果的なリハビリテーションプログラムを考案していく上で今後の研究が期待される。

本研究の限界として第一に、体幹回旋時における腹横筋の一側性の活動は示されたが、回旋トルク産生に対して腹横筋がどのような機序で関連しているかについて詳細な所見は得られなかったことが挙げられる。一般的に腹横筋のレバーアームは他の体幹筋群と比べて短く、それゆえに体幹に対して回旋トルクを生み出すには不利であると考えられている。本研究の結果からは体幹の回旋運動に対して腹横筋の筋厚が変化することは示されたが、その詳細なメカニズムについては更なる研究が必要である。第二に、本研究で用いた姿勢は座位のみであり、その他の姿勢では検討していないことも限界として挙げられるだろう。先行研究では筋電図を用い体幹回旋時の腹横筋の筋活動を背臥位にて計測している³¹⁾。姿勢の違いが筋や筋膜の生体力学特性に与える影響や代償動作などを考慮すると、適切な姿勢の選択は重要である。第三に、本研究は筋電図を用いて腹横筋の筋活動を直接計測したものではない。腹横筋は体幹筋群の中でも最も深層に位置する筋であり、隣接する内腹斜筋などと相互に影響しあうものと考えられる。この点については、腹横筋

筋活動 onset のタイミングや経時的な筋活動量の変化などを計測することにより、体幹回旋に対する腹横筋の寄与がより詳細に明らかとなるだろう。最後に、被験者数の問題がある。本研究のサンプルサイズは小さく、標準偏差が大きいと、このことが結果に影響する可能性が考えられる。本研究では被験者数の少なさから群間の比較は行わず、あくまで健常群および慢性腰痛群内での腹横筋の機能性を示したものであり、結果的にそのパターンに違いがみられたものとしている。しかしながら、本研究の結果は過去行われた類似した研究とほぼ矛盾しない結果が得られたため、一定の示唆を与えることが可能であると考ええる。

本研究から体幹回旋動作時において健常者では腹横筋の一側性の活動が示され、慢性腰痛症例では同様の結果が認められなかった。これまで多くの研究で健常者と慢性腰痛症例での腹横筋機能の違いが示されてきたが、その測定姿勢や方法などは多様であり、本研究で用いたような適切な座位姿勢にて体幹回旋動作を調べたものはない。臨床意義としても超音波画像診断装置は近年、MRIよりも分解能が高いものもあり、その使用は的確でクオリティの高いリハビリテーションの提供につながるものと思われる。慢性腰痛症例における腹横筋の機能変化については未だにそのメカニズムが明確になっていないため、今後更なる研究を行っていく必要があると考える。

引用文献

- 1) Hodges PW, Pengel LH, Herbert RD, et al.: Measurement of muscle contraction with ultrasound imaging. *Muscle Nerve*, 2003, 27(6): 682-692.
- 2) Bogduk N: The anatomical basis for spinal pain syndromes. *J Manipulative Physiol Ther*, 1995, 18(9): 603-605.
- 3) Crisco JJ, Panjabi MM: The intersegmental and multisegmental muscles of the lumbar spine: a biomechanical model comparing lateral stabilizing potential. *Spine*, 1991, 16(7): 793-799.
- 4) Bergmark A: Stability of the lumbar spine: a study in mechanical engineering. *Acta Orthop Scand*, 1989, 230(60): 1-54.
- 5) De Troyer A, Estenne M, Ninane V, et al.: Transversus abdominis muscle function in humans. *J Appl Physiol*, 1990, 68(3): 1010-1016.
- 6) Cresswell AG, Thorstensson A: Change in intra-abdominal pressure, trunk muscle activation and force during isokinetic lifting and lowering. *Eur J Appl Physiol*, 1994, 68(4): 315-321.
- 7) Hodges PW, Richardson CA: Inefficient muscular stabilization of the lumbar spine associated with low back pain. A motor control evaluation of transversus abdominis. *Spine*, 1996, 21(22): 2640-2650.
- 8) Hodges PW, Richardson CA: Contraction of the abdominal muscles associated with movement of the lower limb. *Phys*

- Ther, 1997, 77(2): 132-142.
- 9) Hodges PW, Richardson CA: Feedforward contraction of transversus abdominis is not influenced by the direction of arm movement. *Exp Brain Res*, 1997, 114(2): 362-370.
 - 10) Snijders CJ, Vleeming A, Stoeckart R: Biomechanical modeling of sacroiliac joint stability in different postures. *Spine*, 1995: 419-432.
 - 11) Cresswell AG, Grundstrom H, Thorstensson A: Observations on intra-abdominal pressure and patterns of abdominal intra-muscular activity in man. *Acta Physiol Scand*, 1992, 144(4): 409-418.
 - 12) Juker D, McGill S, Kropf P, et al.: Quantitative intramuscular myoelectric activity of lumbar portions of psoas and the abdominal wall during a wide variety of tasks. *Med Sci Sports Exerc*, 1998, 30(2): 301-310.
 - 13) Cresswell AG: Responses of intra-abdominal pressure and abdominal muscle activity during dynamic trunk loading in man. *Eur J Appl Physiol*, 1993, 66(4): 315-320.
 - 14) Henry SM, Westervelt KC: The use of real-time ultrasound feedback in teaching abdominal hollowing exercise to healthy subjects. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2005, 35(6): 338-345.
 - 15) Hides JA, Richardson CA, Jull GA: Use of real-time ultrasound imaging for feedback in rehabilitation. *Man Ther*, 1998, 3(3): 125-131.
 - 16) Rankin G, Stokes M, Newham DJ: Abdominal muscle size and symmetry in normal subjects. *Muscle Nerve*, 2006, 34(3): 320-326.
 - 17) Ainscough-Potts AM, Morrissey MC, Critchley D: The response of the transverse abdominis and internal oblique muscles to different postures. *Man Ther*, 2006, 11(1): 54-60.
 - 18) Bunce SM, Hough AD, Moore AP: Measurement of abdominal muscle thickness using M-mode ultrasound imaging during functional activities. *Man Ther*, 2004, 9(1): 41-44.
 - 19) McMeeken JM, Beith ID, Newham DJ, et al.: The relationship between EMG and change in thickness of transversus abdominis. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2004, 19(4): 337-342.
 - 20) Hodges PW, Richardson CA: Delayed postural contraction of transversus abdominis associated with movement of the lower limb in people with low back pain. *J Spinal Disord*, 1998, 11(1): 46-56.
 - 21) Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, et al.: The effects of core proprioception on knee injury: a prospective biomechanical-epidemiological study. *Am J Sports Med*, 2007, 35(3): 368-373.
 - 22) Urquhart DM, Hodges PW: Differential activity of regions of transversus abdominis during trunk rotation. *Eur Spine J*, 2005, 14(4): 393-400.
 - 23) Misuri G, Colagrande S, Gorini M, et al.: In vivo ultrasound assessment of respiratory function of abdominal muscles in normal subjects. *Eur Respir J*, 1997, 10(12): 2861-2867.
 - 24) Hides JA, Wilson S, Stanton W, et al.: An MRI investigation into the function of the transversus abdominis muscle during "drawing-in" of the abdominal wall. *Spine*, 2006, 31(6): 175-178.
 - 25) Critchley D, Coutts F: Abdominal muscle function in chronic low back pain patients; measurement with real-time ultrasound scanning. *Physiotherapy*, 2002, 86(6): 322-332.
 - 26) Arendt-Nielsen L, Graven-Nielsen T, Sværre H, et al.: The influence of low back pain on muscle activity and coordination during gait: a clinical and experimental study. *Pain*, 1996, 64(2): 231-240.
 - 27) Zedka M, Chan M, Prochazka A: Voluntary control of painful muscles in humans. *Soc Neurosci Abstr*, 1999, 25(2): 2181.
 - 28) O'sullivan PB, Phytz GD, Twomey LT, et al.: Evaluation of specific stabilizing exercise in the treatment of chronic low back pain with radiologic diagnosis of spondylolysis or spondylolisthesis. *Spine*, 1997, 22(24): 2959-2967.
 - 29) Hides JA, Jull GA, Richardson CA: Long-term effects of specific stabilizing exercises for first-episode low back pain. *Spine*, 2001, 26(11): 243-248.
 - 30) Tsao H, Hodges PW: Immediate changes in feedforward postural adjustments following voluntary motor training. *Exp Brain Res*, 2007, 181(4): 537-546.
 - 31) 森奈津子, 池添冬芽, 市橋則明: 体幹運動による側腹筋の筋厚変化—上・中・下部線維別検討—. *体力科学*, 2011, 60(3): 319-326.