

外乱刺激に対する予測の可否が体幹筋の 筋活動に与える影響

太田 恵*, 建内 宏重*, 井上 拓也*
永井 宏達*, 森 由隆**, 市橋 則明*

Modulation of Trunk Muscle Activity by Anticipation of the Sudden Perturbations

Megumi OTA, Hiroshige TATEUCHI, Takuya INOUE,
Kotatsu NAGAI, Yoshitaka MORI and Noriaki ICHIHASHI

Abstract: This study investigated the modulation of trunk muscle activity with the expectation of sudden perturbations in ten healthy male volunteers. The activities of the internal and external abdominal oblique, rectus abdominal, multifidus and thoracic and lumbar erector spinae muscles were measured using surface electromyography. Unexpected and expected perturbations were applied to the trunk by sudden loading. The subject was instructed to maintain his initial standing position. The results showed that the activation of the multifidus and lumbar and thoracic erector spinae muscles was increased significantly more in the expected condition than in the unexpected condition in anticipation of postural adjustment. The activation of the multifidus and lumbar erector spinae muscles was increased significantly more than 150 msec before the perturbations, while that of the thoracic erector spinae muscles was increased significantly, 50 msec before the perturbations. The increased activation of the multifidus and lumbar erector spinae muscles appears to be a mechanism designed to improve the stability of the trunk through stiffening of the entire segment during forward loading.

Key words: 表面筋電図, 体幹筋, 外乱刺激

はじめに

立位を保持しながら、四肢の運動を遂行する場合には、重心の変位に適切に反応し、重心が支持基底面内にあるように姿勢を適宜調節しなければならない。先行研究¹⁻⁴⁾では、健常者において、上肢または下肢の随意運動の際、主動筋に先行して姿勢保持筋が活動することが確認されている。これは予測的姿勢制御と呼ばれ、随意運動の遂行に伴う姿勢の乱れを予測し、随意運動に先行して姿勢保持筋を予め活動させることによって、姿勢の乱れの影響を最小限に抑えようとした結果だと考えられている⁵⁾。また四肢の主動筋に対して体幹筋が先行して活動することが脊椎の安定性における重要な役割を果たしているといわれており、腰

痛患者においては体幹筋の活動が減弱および遅延することが確認されている^{6,7)}。

しかし、日常生活やスポーツ場面においては、必ずしも外乱刺激の予測が可能とは限らず、外乱刺激の予測の可否によって、筋活動に変化が生じる可能性が考えられる。Yamamoto らの研究⁸⁾では、前腕の屈側に突然加えられた負荷に対して抵抗するような課題が与えられたときの肘関節屈筋の筋活動量を測定した結果、外乱刺激のタイミングが予測可能な条件では不可能な条件と比較して、外乱刺激から 50~100 msec の相において有意に高い筋活動を示したとしている。また Cresswell らの研究⁹⁾では、ハーネスを用いて突然体幹が屈曲するような前方への負荷を加え、そのときの腹横筋・内腹斜筋・外腹斜筋・腹直筋・脊柱起立筋の筋活動の開始時期を測定した結果、最初に筋活動がみられたのは腹横筋であったが、外乱刺激のタイミングに対する予測の可否による影響は認められなかったとしている。このように、外乱刺激のタイミングに対する予測の可否と、四肢あるいは体幹の筋活動との関係を調べた研究は存在するが、報告数が少なく一致した見解は得られていない。

そこで、本研究の目的は外乱刺激に対する予測の可

* 京都大学大学院医学研究科人間健康科学系専攻
〒606-8507 京都府京都市左京区聖護院川原町53
Human Health Science, Graduate School of Medicine, Kyoto University

** 青年海外協力隊
〒151-8558 東京都渋谷区代々木 2-1-1 新宿マインズタワー 6~13階
Japan International Cooperation Agency

受稿日 2008年9月30日

受理日 2008年12月24日

否が、体幹筋の筋活動にどのような影響があるかを明確にすることとした。

方 法

1. 対 象

対象は健康成人男性10名（年齢 22.7 ± 2.3 歳，身長 173.0 ± 4.3 cm，体重 61.2 ± 8.2 cm）とした。四肢および脊椎に重篤な疾患の既往がある者，日常生活で腰痛がある者は対象から除外した。全ての対象者には，本研究について文書にて説明し，同意を得た。

2. 測 定

1) 課 題

被験者に両側肩関節30度屈曲位でかご（ $20 \times 30 \times 15$ cm）を把持させた。感圧センサー（ノラクソン社製）を介した状態で重錘（1.5 kg）をかごの底部に紐で接続し，重錘が落下すると紐が牽引されて，身体に対して前方への負荷がかかるように設定した（図1）。その旨を被験者に説明し，そのままの姿勢を保持するよう指示した。

予測が可能か不可能かによって2条件に分類した。予測が不可能な条件では，被験者の前に衝立を設置して視覚的に遮断し，重錘が落下するタイミングを知らせなかった（以下：予測不可条件）。予測が可能な条件では，衝立を排除して，重錘が落下するタイミングを5秒前からカウントダウンで知らせた（以下：予測

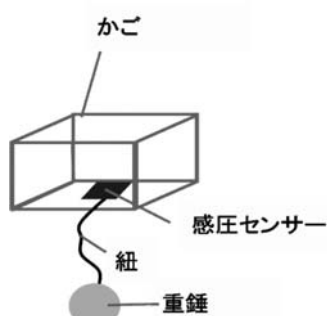
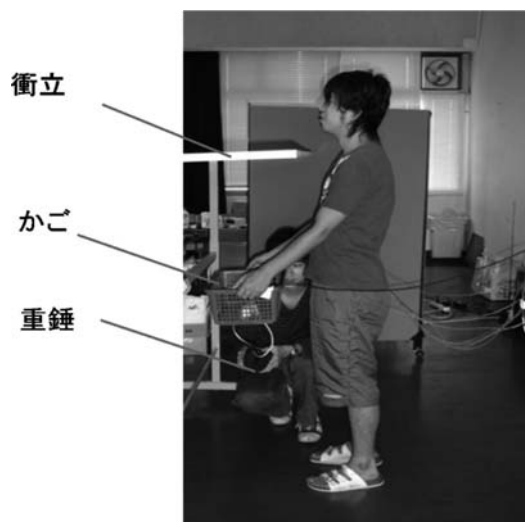


図1 測定方法

可条件)。予測可条件および予測不可条件について，それぞれ練習を5回実施後，10回施行し測定した。その10試行の結果を加算平均した。2条件の順序は無作為とした。

2) 筋電図の測定

表面筋電図の測定には，表面筋電計（ノラクソン社製テレマイオ2400・アンプ周波数帯域10～500 Hz）を使用した。サンプリング周波数は1,500 Hzとした。測定筋は，内腹斜筋，外腹斜筋，腹直筋，多裂筋，胸部および腰部脊柱起立筋群，三角筋前部線維とした。三角筋前部線維は右側，体幹筋はいずれも左側を測定側とした。測定部位は，内腹斜筋が上前腸骨棘より2横指内側かつ2横指尾側，外腹斜筋が上前腸骨棘の鉛直線上における第12肋骨との中点，腹直筋が臍より3 cm 外側，多裂筋が第5腰椎より2 cm 外側，胸部脊柱起立筋群が第9胸椎より5 cm 外側，腰部脊柱起立筋群は第2腰椎の高さで後上腸骨棘と最下肋骨を結ぶ直線から1横指内側，三角筋前部線維が肩峰より1横指遠位かつ1横指腹側とした。十分な皮膚処理後，電極間距離2 cm でディスプレイザブル電極を貼付した。

3. 解 析

かごに負荷がかかったタイミングは，感圧センサーによって導出した。感圧センサーが反応した時点から $-150 \sim +150$ msec を解析区間とし，50 msec ごとに6相に分けた（図2）。原波形を10 msec ごとのRoot Mean Squareにより平滑化し，各相の筋活動量の平均値を算出した。次に，その値を予測可条件における解析区間内の最大活動量の平均値で除すことで正規化し，%筋活動量とした。各筋における条件間の比較は対応のあるt検定，各相の間の比較は分散分析と多重比較（Tukey法）を用いた。有意水準は5%とした。

結 果

1. 2条件間の比較（表1・図3）

内腹斜筋および外腹斜筋は第4相（0～50 msec）において予測不可条件より予測可条件の方が有意に高かった（ $p < 0.05$ ）。多裂筋および腰部脊柱起立筋群は第1～5相（ $-150 \sim 100$ msec）において予測不可条件より予測可条件の方が有意に高く（ $p < 0.01$ ），胸部脊柱起立筋群は第3～5相（ $-50 \sim 100$ msec）において予測不可条件より予測可条件の方が有意に高かった（ $p < 0.05$ ）。三角筋前部線維は，第5相（50～100 msec）において予測可条件の方が有意に高く，第6相



図2 解析区間

表1 各相の%筋活動量

%筋活動量 (%)		1 相	2 相	3 相	4 相	5 相	6 相
内腹斜筋	予測不可条件	22.7±9.0	23.1±9.1	22.2±7.1	22.5±8.9	25.0±8.0	50.0±14.1
	予測可条件	23.1±8.4	24.4±9.5	25.1±11.1	25.4±10.9	31.0±9.3	47.2±9.7
外腹斜筋	予測不可条件	25.2±8.0	26.9±7.2	23.4±5.3	23.1±7.5	35.3±21.7	50.9±17.4
	予測可条件	27.0±11.3	26.7±11.2	26.2±9.3	29.6±8.5	31.5±7.2	41.8±8.6
腹直筋	予測不可条件	26.1±13.2	25.4±10.7	24.3±8.6	23.2±10.5	27.8±14.0	43.3±16.1
	予測可条件	28.2±11.5	24.4±11.9	23.9±8.5	26.4±10.7	29.3±10.0	35.2±8.3
多裂筋	予測不可条件	14.2±7.8	14.5±8.2	14.6±7.9	15.2±8.4	20.6±8.9	48.4±14.5
	予測可条件	20.7±9.4	20.8±10.0	21.0±9.0	22.6±12.7	45.0±9.2	40.0±8.5
胸部脊柱起立筋群	予測不可条件	18.1±8.7	18.7±8.6	16.2±7.1	15.8±6.7	24.6±12.7	59.4±26.2
	予測可条件	20.7±10.3	18.3±8.6	19.3±7.9	22.7±11.2	40.6±12.5	45.4±5.4
腰部脊柱起立筋群	予測不可条件	12.5±7.8	12.5±7.9	12.3±7.6	12.8±8.2	16.2±8.1	48.2±19.0
	予測可条件	16.8±8.5	17.5±10.3	17.8±9.0	19.5±12.2	38.7±13.1	46.3±9.2
三角筋前部線維	予測不可条件	17.8±6.6	17.8±7.5	18.7±8.2	16.9±7.6	36.7±14.4	36.5±14.6
	予測可条件	18.1±7.2	20.2±6.9	18.6±6.8	19.3±6.0	49.6±3.4	18.8±6.9

(100~150 msec) においては予測不可条件の方が有意に高かった ($p < 0.01$)。腹直筋は、いずれの相においても条件間で有意差はなかった。

2. 各相の比較

予測不可条件では、いずれの筋も第6相(100~150 msec)でそれ以前の相より高い傾向がみられた。予測可条件では、内腹斜筋および外腹斜筋は第4相(0~50 msec)から高くなる傾向がみられ、第6相(100~150 msec)でそれ以前の相より有意に高かった ($p < 0.01$)。多裂筋・胸部および腰部脊柱起立筋群・三角筋前部線維は第5相(50~100 msec)でそれ以前の相より有意に高かった ($p < 0.01$)。腹直筋はいずれの条件においても各相で有意差はなく一定していた。

考 察

本研究では、外乱刺激のタイミングに対する予測の可否が、体幹筋の筋活動に与える影響を検討した。

内腹斜筋および外腹斜筋は外乱刺激が加わった直後から50 msec 後までの第4相で、外乱刺激の予測可条件の方が有意に高かった。また、いずれの条件においても第6相で最も高い筋活動を示したが、予測可条件では外乱刺激が加わった直後から高くなる傾向がみられた。また多裂筋および腰部脊柱起立筋群は、外乱刺激が加わる150 msec 前から100 msec 後までの第1~5相で、予測可条件の方が有意に高かった。一方で、胸部脊柱起立筋群は外乱刺激が加わる50 msec 前から100 msec 後までの第3~5相で、予測可条件の方が有意に高かった。

Bergmark¹⁰⁾ は、脊椎の安定化における主な機械的役割から体幹筋をローカル筋システムとグローバル筋システムに分類している。ローカル筋システムは、腰椎に起始または停止している深部の筋で、脊椎の分節

を制御する機能を有していると考えられ、これには横突間筋、棘間筋、多裂筋、胸最長筋の腰部、腰腸筋の腰部、腰方形筋の内側線維、腹横筋、内腹斜筋の胸腰筋膜に付着する線維を含んでいる。一方、グローバル筋システムは、表在にある比較的大きな体幹筋群であり、脊椎の運動だけでなく、胸郭と骨盤の間の直接的な負荷の伝達にも関与していると考えられている。これには胸最長筋の胸部、腰腸筋の胸部、腰方形筋の外側線維、腹直筋、外腹斜筋、内腹斜筋を含み、その主な役割は、体幹に加えられた外的負荷と均衡を保つことであり、腰椎に伝達された残りの力はローカル筋群によって処理されると述べている。また Lee¹¹⁾ によると、外腹斜筋は胸郭から腸骨へと内下方へと走行している筋で、内腹斜筋は腸骨から胸郭へと外上方へと走行している筋である。これらの腱膜は正中線をまたいでX字型の網目構造を呈しており、それにより胸郭から骨盤にかけての固定性に関与しているといわれている。

立位姿勢を保持した状態で、加えられた負荷に抗するためには、重心位置を支持基底面内に収めるように姿勢を調節する必要があり、それには体幹筋が関与する。特に、前方への負荷に対しては、背側の筋の筋活動が必要とされる。外乱刺激の予測が可能な条件においては、外乱刺激が加わった直後から50 msec 後の第4相もしくは50 msec 後から100 msec 後の第5相に、腹斜筋群や多裂筋および腰部脊柱起立筋群が、有意に高い筋活動を示していた。先行研究^{12,13)} では、突然の外乱刺激から多裂筋の筋活動までの潜時が60 msec または55 msec 以下と報告されており、第4相における筋活動は短潜時反射だけではなく、外乱刺激が加わる以前から前方への負荷に抗して姿勢を保とうとする予測的姿勢制御によるものと考えられる。骨盤および

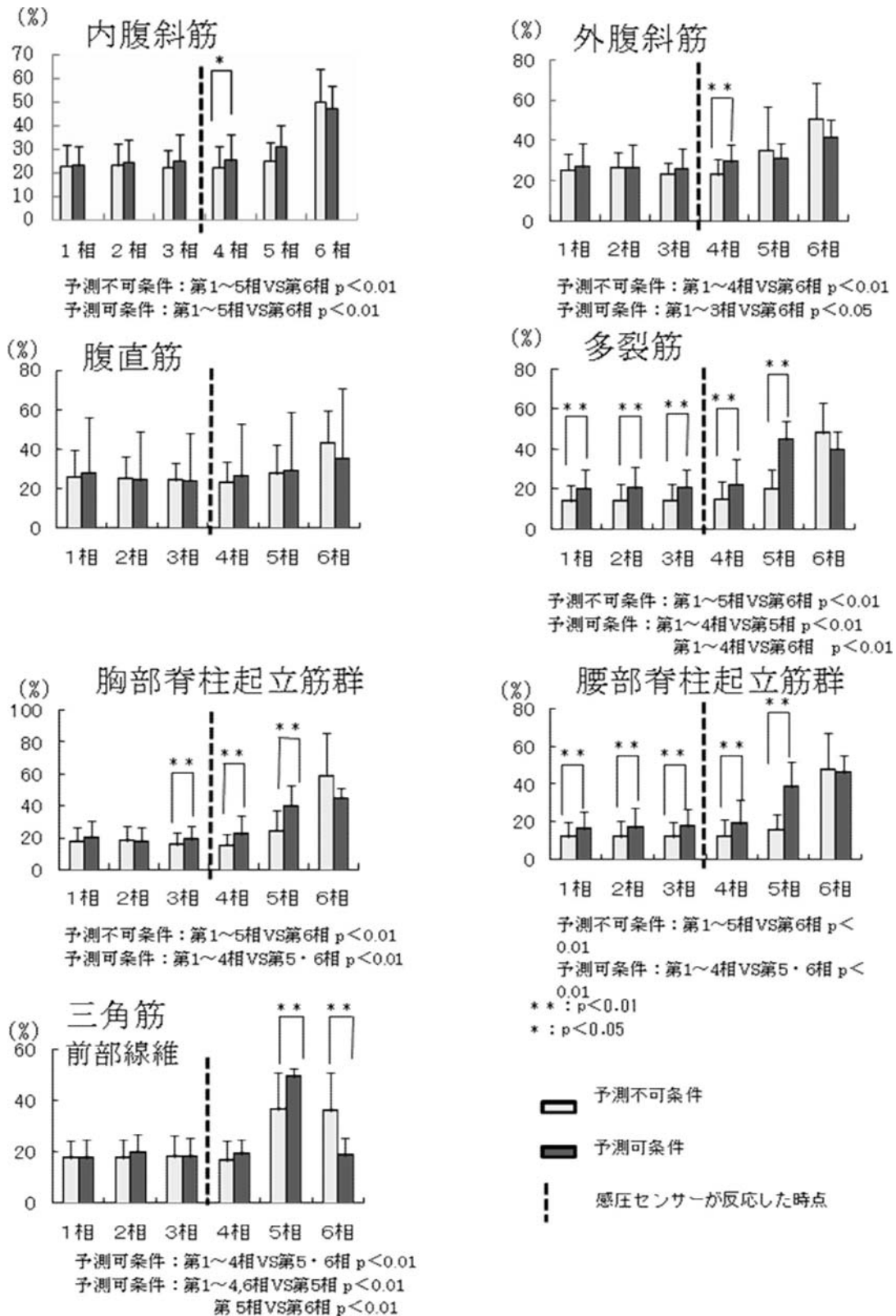


図3 各相の%筋活動量

胸郭の制御に関与する腹斜筋群や、脊椎の分節を制御に関する多裂筋および腰部脊柱起立筋群が、筋活動を高めることで体幹の安定性を確保し、さらにグローバル筋に分類される胸部脊柱起立筋群が前方への負荷に抗するように、外乱刺激のタイミングに合わせて活動

していたと考えられる。

また Yamamoto らの研究⁸⁾では、重錘が落下し被験者の上肢に負荷がかかるように設定し、被験者に対して急激に加えられた負荷に抗することなく自然に上肢を下ろさせるような運動課題を与えた場合には主動作

筋に誘発される伸張反射応答が減衰し、反対に負荷に抗するような運動課題を与えた場合には伸張反射応答が増大することが報告されている。さらに、外乱刺激の予測が可能な場合と不可能な場合において、予め指示された運動課題に応じて、伸張反射応答が変化すると報告されている。それについて、目的とする運動課題を遂行するために反射の調節が行われている可能性があるとして推測している。また、これらの変化は脊髄より上位の中枢を経由する長潜時伸張反射において顕著にみられる一方、脊髄以下を介する短潜時伸張反射では変化がみられないと述べている。本研究においても、予測可条件では、多裂筋・胸部および腰部脊柱起立筋群はより早期から高い収縮を示していた。さらに、三角筋前部線維は外乱刺激が加わってから 50 msec 後から 100 msec 後の第 5 相で有意に高い筋活動がみられた。その理由として、予測的姿勢制御によるものだけではなく、外乱刺激が加わった後の筋活動量の増加については長潜時伸張反射応答が増大した、もしくは長潜時伸張反射の潜時時間が短縮した可能性も一因として考えられる。

また、腹直筋については、いずれの時期においても条件間に差がなかった。このことから、予測可能な前方への負荷に対して予め体幹筋の筋活動を高め、安定性を確保しようとする場合、体幹に対して屈曲方向のトルクを発揮する腹直筋の関与は小さいものと考えられる。

本研究により、予測不可条件では、予測可条件と比較して、ローカル筋群の筋活動量が低いことが明らかになった。これにより、日常生活やスポーツ場面などにおける外乱刺激の予測が不可能な状況下では、体幹の安定性が劣り、腰部の微細損傷や腰痛を惹起しやすいと推測できる。

本研究の限界として、予測不可条件においても外乱刺激に対して完全に予測不可能な状態を設定することは困難であり、随意的に予め準備していた可能性を否定できないことが挙げられる。しかしながら、本研究により、外乱刺激のタイミングを予測することが可能な条件においては、不可能な条件と比較して、多裂筋、腰部および胸部脊柱起立筋群の筋活動が高いことが明らかになった。これらの筋がより早期から高い筋活動を呈することにより、予め脊柱を安定化させ、前方への外乱刺激に抗する機構があることが示唆された。また本研究では、50 msec ごとに相分けをし、その区間の各筋の筋活動量を比較したが、今後は、各筋の発火のタイミングや反応課題開始時の姿勢変化などについても検討する必要がある。

先行研究¹⁴⁾では、背部の求心性活動中、不安定性のある脊椎間で多裂筋の筋活動が減少したと報告されている。脊椎の不安定性を呈する腰痛患者では、筋活

動量や筋活動の開始時期が健常者とは異なると推測できる。今後はさらに腰痛患者と健常者を比較し、腰痛の予防やリハビリテーションへ応用していきたいと考える。

結 語

外乱刺激のタイミングに対する予測が可能な場合においては予測が不可能な場合と比較して、多裂筋および腰部脊柱起立筋群の筋活動を高めることで脊柱を安定させ、さらに外乱刺激のタイミングに合わせて胸部脊柱起立筋群の筋活動を高めることで、前方への外乱刺激に備えていることが示唆された。

文 献

- 1) Cordo PJ, Nashner LM: Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements. *J Neurophysiol*, 1982; 47(2): 287-302
- 2) Friedli WG, Hallett M, Simon SR: Postural adjustments associated voluntary arm movements 1. Electromyographic data. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 1984; 47(6): 611-622
- 3) Hodge PW, Richardson CA: Transversus abdominis and the superficial abdominal muscles are controlled independently in a postural task. *Neurosci Lett*, 1999; 265: 91-94
- 4) Hodge PW, Richardson CA: Contraction of the abdominal muscles with movement of the lower limb. *Phys Ther*, 1997; 77(2): 132-142
- 5) Massion J: Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Prog Neurobiol*, 1992; 38(1): 23-56
- 6) Hodge PW, Richardson CA: Altered trunk muscle recruitment in people with low back pain with upper limb movement at different speeds. *Arch Phys Med Rehabil*, 1999; 80: 1005-1012
- 7) Hodge PW, Richardson CA: Delayed postural contraction of transversus abdominis in low back pain associated with movement of the lower limb. *J Spinal Disord*, 1998; 11(1): 46-56
- 8) Yamamoto C, Ohtsuki T: Modulation of stretch reflex by anticipation of the stimulus through visual information. *Exp Brain Res*, 1989; 77(1): 12-22
- 9) Cresswell AG, Oddsson L, Thorstensson A: The influence of sudden perturbations on trunk muscle activity and intra-abdominal pressure while standing. *Exp Brain Res*, 1994; 98(2): 336-341
- 10) Bergmark A: Stability of the lumbar spine. A study in mechanical engineering. *Acta Orthop Scand Suppl*, 1989; 230: 1-54
- 11) Dinae Lee: ベルビックアプローチ. 神奈川: 医道の日本社, 2001; 32-33
- 12) Moseley GL, Hodges PW, Gandevia SC: External perturbation of the trunk in standing humans differentially activates components of the medial back muscles. *J Physiol*, 2003; 547(2): 581-587
- 13) Radebold A, Cholewicki J, Panjabi MM, Patel TC: Muscle response pattern to sudden trunk loading in healthy individuals and in patients with chronic low back pain. *Spine*, 2000; 25: 947-954

- 14) Sihvonen T, Partanen J, Hänninen O, Soimakallio S: Electric behavior of low back muscles during lumbar pelvic rhythm in low back pain patients and healthy controls. Arch Phys Med Rehabil, 1991; 72(13): 1080-1087