

体幹背部筋疲労前後の立ち上がり動作と 体幹・下肢の筋活動の変化

松田 雅弘 ^[1]	植草学園大学保健医療学部
新田 収 ^[2]	首都大学東京大学院人間健康科学研究科
小山 貴之 ^[3]	日本大学文理学部
越田専太郎 ^[4]	了徳寺大学健康科学部
川田 教平 ^[5]	了徳寺大学健康科学部
宮島 恵樹 ^[6]	了徳寺大学健康科学部
高梨 晃 ^[7]	了徳寺大学健康科学部

Change in Trunk and Lower Extremities Muscle Activities and Sit-to-stand Movement following Back Trunk Muscle Fatigue

Tadamitsu MATSUDA	Faculty of Health Sciences, Uekusa Gakuen University
Osamu NITTA	Faculty of human health sciences, Tokyo Metropolitan University
Takayuki KOYAMA	College of Humanities and Sciences, Nihon University
Sentaro KOSHIDA	Faculty of Health Sciences, Ryotokuji University
Kyohei KAWADA	Faculty of Health Sciences, Ryotokuji University
Shigeki MIYAJIMA	Faculty of Health Sciences, Ryotokuji University
Akira TAKANASHI	Faculty of Health Sciences, Ryotokuji University

体幹は身体を中心を支持し、その支持力が姿勢や動作に大きな影響を及ぼす。体幹筋疲労における静的な姿勢制御に関する報告は多いが、動作の検討は散見される程度である。今回、体幹背部筋疲労前後での立ち上がり動作における関節角度の変化と筋活動を明らかにすることを目的とした。対象者は健常男性11名（平均21.0歳）とし、対象者には研究の説明を行い、同意を得た。体幹背部筋の疲労はSorensenの方法を使用し、体幹筋疲労前後で立ち上がり動作を3次元動作解析装置（MAC3D）と、体幹・下肢筋活動を筋電計（Noraxon）にて計測した。疲労後に体幹前傾動作が増大し、脊柱起立筋と右大殿筋の筋活動が増大した。体幹背部筋の疲労によって、より体幹を前傾させ、その影響により疲労筋でもある体幹伸展筋の筋活動が増大したと考え

-
- [1] 著者連絡先：松田 雅弘
 [2] 新田 収
 [3] 小山 貴之
 [4] 越田専太郎
 [5] 川田 教平
 [6] 宮島 恵樹
 [7] 高梨 晃

られる。疲労による立ち上がり動作の姿勢制御が変化することが明らかになった。

キーワード：筋疲労，立ち上がり動作，動作解析，筋活動

It is known that the trunk muscles affect posture and stability of movement. Many studies of trunk muscle fatigue have examined its effects on static postural control, but few have examined its effects on dynamic postural control. This study investigates kinematic and muscle activity during sit-to-stand movements under condition of back trunk muscle fatigue. Subjects, 11 healthy males (mean age; 21.0 yrs) with no significant medical history or current medical problem, who gave written informed consent were enrolled. Fatigue was induced according to the Sorenson protocol. Before and after the induction of fatigue, three-dimensional kinematic (MAC3D) and electromyography (Noraxon) data of the trunk and lower extremities during sit-to-stand movements were collected. There was a significant increase in forward trunk bending motion and trunk extensor and right gluteus maximus muscle activities after fatigue induction. A significant change in postural control was observed during stand-to-sit movements due to fatigue.

Keywords: Muscle fatigue, Sit-to-stand movement, kinesiology, muscle activity

1. はじめに

腰背部の筋群は脊柱や内臓を含む腹部を支持するために重要な筋群であり、近年コアスタビリティエクササイズ¹⁾などで注目を浴びるなど、腹部・脊柱の安定化が姿勢制御に重要である。身体が安定することで、動作にも安定性が与えられることは知られている。一方、腰痛患者は、腰背部と腹部に筋疲労や筋を含む軟部組織の硬さで苦慮しており、特に慢性腰痛では腰背部筋機能の低下が知られている²⁻⁴⁾。体幹部の能動的な筋活動による支持によって脊柱の安定性を確保するが、静的な状態で腰背部の筋の硬さと筋疲労があることで、その支持する機能が十分に発揮できない筋疲労に近い状態である。そのため、脊柱の安定性を確保するための筋活動が不十分になることや、脊柱に関する筋の非協調的な収縮パターンにより、外傷のリスクや腰痛を増悪させるような不安定性を引き起こす。腰痛患者に筋反応時間の遅れや筋応答の問題²⁾、modified reflex latency³⁾、異常な筋活動⁴⁾を生じさせる報告がされている。そのため体幹部の脊椎を支える周囲の筋の機能異常は、体幹の安定性の低下を引き起こしている。筋機能異常による運動制御能力の低下が急性・慢性の腰痛症に強い関連があることが知られている⁵⁾。姿勢制御のための体幹筋の協調性低下は、慢性的腰痛症の患者の姿勢制御能力に影響する。

筋疲労に関する研究は多く、筋疲労による固有感覚入力の変化は姿勢制御の損失を招く^{6,7)}。また、筋疲労と姿勢制御の関連性についての報告⁸⁾では、股・膝関節屈伸筋の筋疲労により、疲労前と比較し片脚立位中の圧中心振幅速度が有意に増加した。腰部の筋疲労^{9,10)}、大腿の筋疲労⁸⁾、下腿の筋疲労¹¹⁾でも同様に、筋疲労によって重心動揺が大きくなったとする報告がみられる。さらに下肢全体の筋疲労と重心動揺の特徴についても検討されており、股関節周囲の筋疲労のほうが重心動揺に大きな影響を与えた¹²⁾。しかし、筋疲労に伴う動作への影響に関する文献は散見する程度である。

また、姿勢の動揺の増大が転倒リスクを高めることに大きな関連性がある^{5,13)}。そのため、体幹筋疲労による重心動揺の増大は転倒リスクを高める要因になるものと考えられる。さらに動作への影響も明らかになることで、腰部体幹筋疲労が姿勢制御に及ぼす影響について更なる知見になり得るものと考えられる。

加えて、中枢神経機構 (Central nervous system : CNS) は運動を認識し、急激な外乱刺激に対して、身体状況を予測し筋活動を先行して命令する。筋疲労のない状態では必要量だけ出来るだけ素早く姿勢を制御する筋活動を生成するためにCNSが効果的に働く^{14,15)}。しかし、CNSが素早い姿勢制御を促しても、筋実質に十分に反応できる状態ができていなく

れば、筋反応が遅れ、姿勢制御に影響を及ぼす。また、疲労筋から正常の感覚入力が入力されないと、適切な姿勢制御は起きない。

体幹筋が体幹の安定性に関して重要であることが知られているにも関わらず体幹筋の疲労が姿勢制御に及ぼす影響について、動的な姿勢制御に関しては散見する程度である。腰痛患者では、腰部の機械的なメカニズムの崩れを生じており、姿勢制御に問題があるために腰痛が機能改善しないことも考えられる。身体中心の腰背部の筋疲労による動作の戦略変更は、下肢など他の部位に代償動作をとまうことが予想される。本研究では、体幹背部筋の疲労が、立ち上がり動作の姿勢変化と筋活動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 対象

対象は神経学・整形外科的な疾患の既往のない健康大学生の男性11名(21歳, 平均年齢21.0歳)であった。被験者の平均身長171.5±3.7cmは、平均体重は64.6±5.7kgであった。

2.2 倫理的配慮

ヘルシンキ宣言に沿って、すべての対象者に実験の趣旨を説明し、参加することの承諾を得た。実験中は被験者に疲労度を確認して、過度な負担になっていないことを確認した。また計測に前後で休憩を入れるなどの配慮を行った。

2.3 方法

腰部筋疲労前後における立ち上がり動作を3次元動作解析装置であるMac3D motion analysis system (Motion analysis社製)による撮像と、表面筋電図測定装置 (Telemaio 2400; Noraxon社製)を利用して各機器よりデータを収集した。動作解析装置によるマーカーセットはHelen Hayseのマーカーセットを参考に全身に29個のマーカー(頭頂部, 前頭部, 後頭部, 右側肩甲骨, 両側肩峰, 両側肘関節外側上顆, 両側尺骨橈骨茎状突起間中央, 上後腸骨棘間中央, 両側上前腸骨棘, 両側大腿部外側, 両側膝関節内・

外側裂隙, 両側下腿外側, 両側外果, 両側内果, 両側踵骨, 両側第二中足骨)を貼付する。

筋活動の測定は、表面筋電図測定装置を用い、サンプリング周波数1500Hzとして行った。得られた筋電波形はA/D変換してパーソナルコンピュータに取り込み、全波整流を行い、積分筋電図($\mu V \cdot sec$)として算出した。被検筋はすべて右側とし、腹直筋・腰部脊柱起立筋・大殿筋・大腿直筋・内側広筋・外側ハムストリングス・下腿三頭筋(外側頭)の7筋とした。皮膚処理剤およびアルコール綿にて処理を行ったのち、電極中心距離2cmとしてBlue sensor M-00-S (Ambu社製)を筋線維の走行に沿って貼付した。電極貼付位置は、腹直筋は臍の約2~3cm外側で線維走行に沿って設置、腰部脊柱起立筋はL3棘突起の2~3cm外側の筋腹の線維走行に沿って設置、大殿筋は大転子と仙骨を結ぶ線の1/2の筋腹で走行に沿って設置し、大腿直筋は上前腸骨棘と膝関節を結ぶ線の中央に筋走行設置、内側広筋は膝蓋骨上端からおおよそ2cm内側で約55°の傾斜で筋走行に沿って設置、外側ハムストリングスは膝関節後方と大転子を結ぶ線の遠位2/3の筋腹に筋走行に沿って設置、下腿三頭筋は膝関節の下方で下腿正中線の外側2cmあたりの筋腹走行に沿って設置した。最初の立ち上がり前に各筋の積分値を最大等尺性収縮5秒間の波形が安定した1秒間の積分値を基準に正規化した(%MVC: Maximum voluntary contraction)。最大等尺性収縮の測定にはDaniels and Worthing-hamの徒手筋力検査法の肢位を用いた¹⁶⁾。

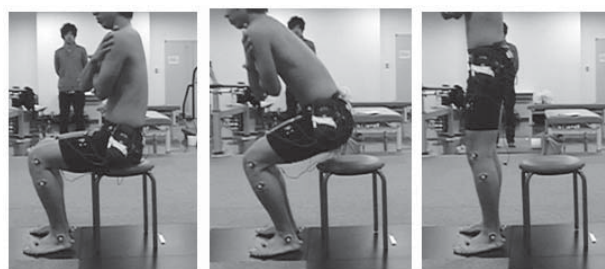
図1に示すように体幹伸展筋の疲労はSorensenらの方法¹⁷⁾に準じ、被験者にはベッド上で腹臥位となり、臍より上部をベッド端より外に出した。両上肢は胸部の前で組むこととし、被験者の大腿部を検査者が手によって固定した。筋疲労の手法はGrondin DE, Potvin JR¹⁸⁾の方法を参考にして、被験者には3kgの重錘を持ったまま、体幹を出来るだけ伸展した状態で保持し、ベッド面より平行以上を保持しきれなくなったら一度ベッド上で休憩を30秒間とった。この手法を繰り返し計3回行ったが、被験者にはBorg scoreを聞き、疲労による辛さが18を超えた場合は実験を中止した。



図1 体幹背部筋の疲労方法 (Sorensenの方法)

動作解析装置であるMAC3Dで撮像したデータと筋電図計で収集したデータは、Kineanalyzer (キッセイコムテック社)に取り込み、関節角度の変化、筋電図の波形の解析を行った。立ち上がり動作を3相に分け、第1相を体幹前傾～離殿まで、第2相を離殿から立位までと規定した(図2)。立ち上がり動作6回を各相の時間において正規化したあとに、関節角度変化、%MVC・secの加算平均を行った。関節角度は矢状面の角度を対象とし、体幹前後傾、股関節屈伸、膝関節屈伸角度を算出した。股関節・膝関節は静止立位時のマーカー3点より、関節中心点を求めて、その結んだ線を各関節の求める点とした。その各相において疲労前後での比較を実施した。

統計処理には統計ソフトであるSPSS ver20.0 (Windows)を利用して、腰部背筋疲労前後で、関節角度変化、%MVC・secの変化を、対応のあるt検定を用いて有意水準5%未満で検討した。



第1相 第2相

図2 立ち上がり動作の相分け

3. 結果

表1に示すように、体幹筋疲労前後の%MVC・secで第1相の脊柱起立筋と、第2相の脊柱起立筋と大殿筋に有意な活動の増大がみられた($p < 0.05$)。その他の体幹と下肢筋活動で有意差はなかった。

3次元動作分析を行った結果、体幹・下肢の変化を相別に算出した(図3)。第1、2相において、図3-2と図3-3に示すように股関節・膝関節の屈曲・伸展の下肢関節角度の変化は疲労前後で変化なかったが、図3-1の体幹前傾角度の変化は疲労後で有意に大きかった。最大体幹前傾角度を比較すると、体幹筋疲労前は 9.71 ± 15.21 (deg)が疲労後 16.03 ± 12.93 (deg)でより大きく体幹が前傾した。

4. 考察

腰背部筋は体幹の支持を司る重要な筋であり、腰

表1 立ち上がりの筋活動量の比較 (%MVC・sec)

	第1相		第2相	
	疲労前	疲労後	疲労前	疲労後
脊柱起立筋	12.15±4.84	19.34±6.07*	23.87±16.69	40.01±21.49*
腹直筋	0.89±0.72	1.37±0.9	1.89±1.21	2.47±1.72
大殿筋	3.36±1.91	3.27±2.29	13.39±6.42	19.38±7.95*
大腿直筋	4.96±3.4	4.43±2.59	8.35±6.16	6.27±3.98
内側広筋	10.59±2.82	8.79±3.56	17.28±7.29	15.43±6.72
大腿二頭筋	10.72±5.31	8.38±5.19	17.88±9.26	17.96±7.16
腓腹筋	2.37±1.41	2.47±2.44	5.54±2.42	8.92±7.02

mean±SD * $p < 0.05$

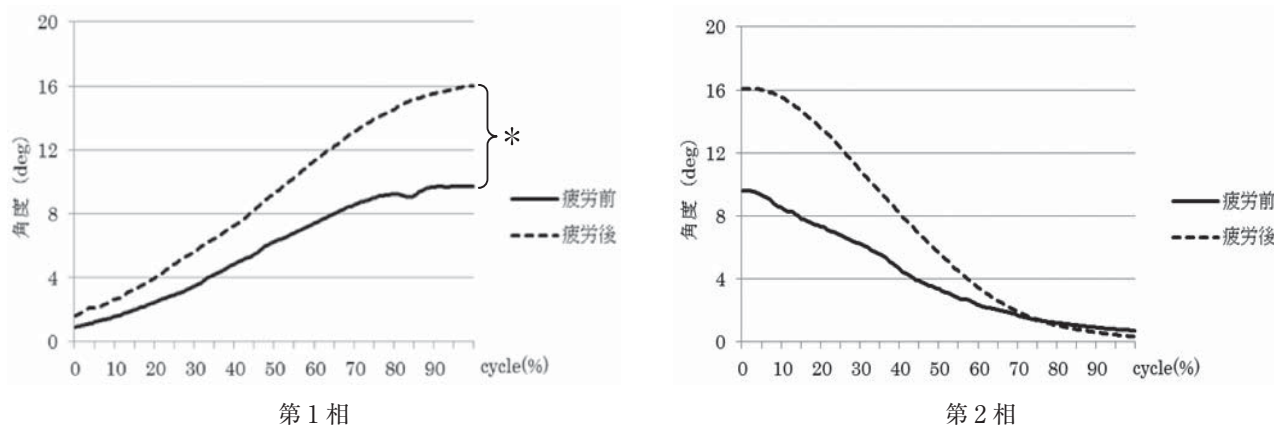


図3-1 体幹前後傾の関節角度の変化 (+:前傾, -:後傾)

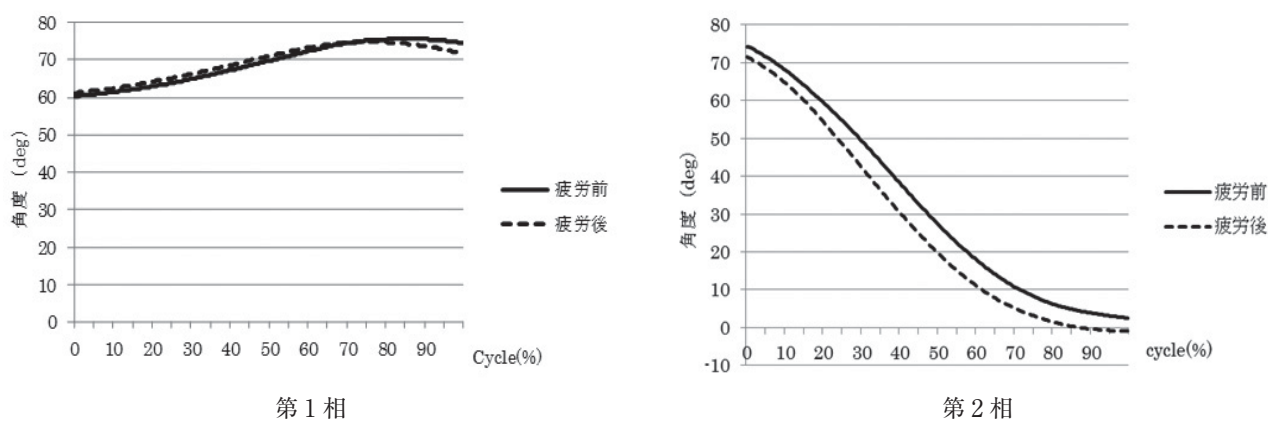


図3-2 股関節の関節角度の変化 (+:屈曲, -:伸展)

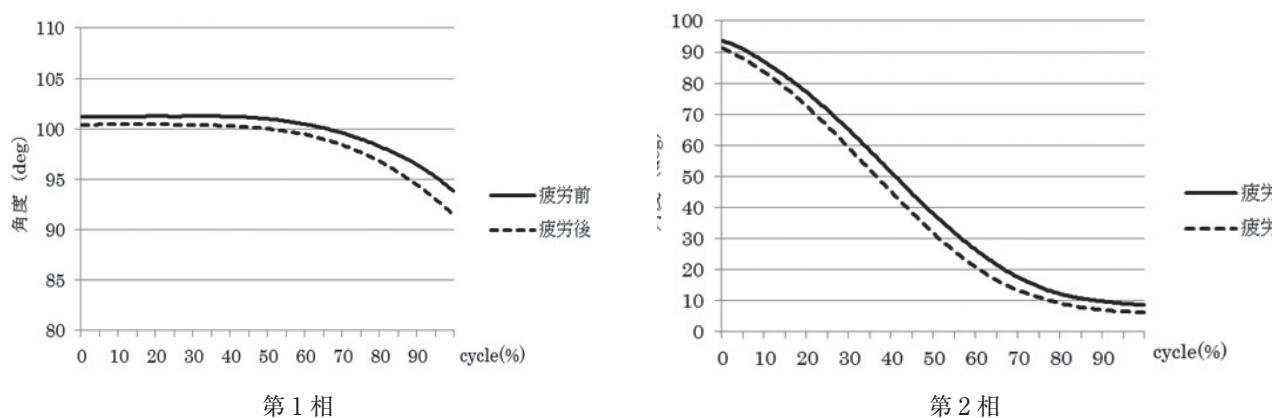


図3-3 膝関節の関節角度の変化 (+:屈曲, -:伸展)

図3 立ち上がり動作時の各関節角度の変化

痛症においては筋機能異常ともなって姿勢制御機構に異常が生じることが知られており、理学療法士が治療する機会も多い。現在までに腰部筋疲労によって静的な姿勢制御⁹⁾に影響を及ぼすことが知られているが、動作に関する影響について詳細に検討

している報告に関しては散見される程度である。そこで今回、腰背部筋疲労前後で立ち上がり動作の体幹と下肢の関節角度変化、筋活動にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることを目的とした。

本研究より、疲労後において立ち上がり動作時の

松田 雅弘 他：体幹背部筋疲労前後の立ち上がり動作と体幹・下肢の筋活動の変化

脊柱起立筋と離殿から立ち上がり動作の伸展相である第2相における右大殿筋に有意な筋活動の増大がみられた(表1)。特に腰背部筋の疲労によって立ち上がり動作を要求する場合、疲労筋である脊柱起立筋の活動の増大と、体幹・下肢の伸展筋の活動の増大がみられ、動作解析の結果より、下肢の関節角度には大きな変化はみられなかったものの、体幹の前傾に関して有意に大きくなった(図3)。立ち上がり動作で、疲労後はより体幹の前傾を大きくして立ち上がるように変化していた。体幹の前傾角度の増加により、重心が前方に移動するために、その伸展を制御し、体重心を制御するために体幹の伸展筋と、大殿筋の活動の増大がみられたと考えられる。

筋疲労が筋反応時間に遅延を生じさせることや、筋反応のタイミングが変化する報告^{4,7)}からも、筋疲労により立位姿勢制御に必要な筋活動に変化をもたらす、姿勢制御系の変容をもたらすことが考えられる。今回の研究では、疲労前は筋活動が少なく、最も効率的に立ち上がり動作を行っていたが、背部体幹筋の疲労により、体幹をより前傾し、前方重心にすることで立ち上がりやすく姿勢を制御している。しかし、その影響で体幹伸展筋と股関節伸展筋の伸展筋活動の増大へとつながった。体幹を支持する筋群の疲労による機能異常によって、姿勢調節機構に影響を及ぼしたものと考えられる。随意運動として行動の発現には姿勢制御が先行し、随意運動によってバランスが不安定にならないように予測的姿勢制御(Anticipatory postural adjustments; APA)が働く¹⁹⁾。運動においてCNS機構による予測的な姿勢制御によって、安定のある動作が可能となる。筋疲労のない状態ではCNSは反射的・随意的に素早い姿勢制御^{7,19)}のために姿勢保持の必要な筋活動を促す。しかし、筋疲労を生じていることで筋から遠心性の感覚情報は正常に伝わらないため、APAなどの予測的な姿勢制御が困難となる。また、筋へ求心性入力情報後の筋反応の低下によって、疲労状態ではCNSを含む筋活動の回路に異常を生じさせる。そのため立ち上がり動作を疲労のない状態と同様に調整することが困難となり、前方への動きの増大が生じたことが考えられる。体幹前傾の制御のために脊柱起立筋の遠心性収縮の増大と、第2相の体幹後傾の求心性収縮ともに可動性の増大と関連して、体幹伸展筋の

活動の増大も要求されたとみられる。

筋疲労により筋の伸張性が制限されることは知られている。体幹背部筋の伸張性が制限されているのにも関わらず、体幹前傾角度が増大しているのは、体幹を前傾して体重心を前方に移動することで、立ち上がり動作をより行い易くするために前方への重心移動していることが考えられる。下肢への筋活動による立ち上がりを要求している協調的な体幹の伸展および下肢の伸展活動が、体幹背部筋疲労によって困難になったことが考えられる。

今回は体幹背部筋疲労により体幹背部筋と股関節伸展筋の活動の増大、体幹前傾角度の増大、疲労前後によって関節角度変化と筋活動変化がみられ、立ち上がり動作の姿勢制御が異なることが示唆された。特に、疲労筋の活動の増大と、体幹前傾角度の増大は、体幹背部筋の過剰な活動を要求することにつながり、そのことで体幹背部への負担は増加するものと考えられる。腰痛患者は背部に慢性疲労を有していることで動きに制限が加わり、今回の研究より体幹背部筋疲労によって更なる体幹背部に負担をかけることが示唆された。体幹背部に負担の少ない動作を指導することで、疲労筋への負担を少なくし、更なる疲労の増大を抑制し、腰痛の悪化を予防することにつながると考えられる。

今後、体幹背部筋疲労に伴う姿勢変容と、腰痛の疼痛の変化について明らかにしていきたい。体幹背部筋の疲労の特徴を明らかにすることで、理学療法プログラムの選択に役立ち、適切なりハビリテーションの提供が可能となる。さらに、筋疲労時の姿勢制御は転倒予防以外にも、スポーツ選手などの腰痛の再発防止の動作練習など、スポーツリハビリテーションに応用できる。

5. 謝辞

被験者として協力して頂いた学生と、研究の実施にあたり協力して頂いた了徳寺大学学生の吉野様、齋藤様、竹之内様、今井様、星川様に深謝致します。

6. 文献

- 1) 蒲田和芳. コアセラピーの理論と進め方. 平沼憲治, 岩崎由純監修, 蒲田和芳編集. 講談社. 2012: 1-12
- 2) Henry SM, Hitt JR, Jones SL, Bunn JY. Decreased limits of stability in response to postural perturbations in subjects with low back pain. *Clin Biomech.* 2006; 21: 881-832
- 3) Taimela S, Osterman K, Alaranta H, Soukka A, Kujala UM. Long psychomotor reaction time in patients with chronic low-back pain: preliminary report. *Arch Phys Med Rehabil.* 1993; 74: 1161-1164
- 4) Radebold A, Cholewicki J, Polzhofer GK, Greene HS. Impaired postural control of the lumbar spine is associated with delayed muscle response times in patients with chronic idiopathic low back pain. *Spine.* 2001; 26: 724-730
- 5) Silfies SP, Mehta R, Smith SS, Karduna AR. Differences in feedforward trunk muscle activity in subgroups of patients with mechanical low back pain *Arch Phys Med Rehabil.* 2009; 90: 1159-1169
- 6) Hiemstra LA, Lo IK, Fowler PJ. Effect of fatigue on knee proprioception: implications for dynamic stabilization. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2001; 31: 598-605
- 7) Taylor JL, Butler JE, Gandevia SC. Changes in muscle afferents, motoneurons and motor drive during muscle fatigue. *Euro J Appl Physiol.* 2000; 88: 106-115
- 8) Gribble PA, Hertel J. Effect of hip and ankle muscle fatigue on unipedal postural control. *J Electromyogr Kinesiol.* 2004; 14(6): 641-646
- 9) 松田雅弘, 塩田琴美, 小山貴之, 山元佐和子, 高梨晃, 宮島恵樹, 野北好春, 川田教平, 橋本俊彦, 新田収. 健康成人の背部筋疲労が重心動揺に及ぼす影響について. *理学療法の科学と研究.* 2011; 2: 27-30
- 10) Shiota K, Matsuda T, Koyama T, Nitta O. Influence of dynamic balance on lumbar muscle fatigue. The XVIII congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology 2010
- 11) Yaggie JA, McGregor SJ. Effects of iso kinetic ankle fatigue on the maintenance of balance and postural limits. *Arch Phys Med and Rehabil.* 2002; 83: 224-228
- 12) Reimer RC, Wikstrom EA. Functional fatigue of the hip and ankle musculature cause similar alterations in single leg stance postural control. *J Sci Med Sport.* 2009; 13(1): 161-166
- 13) Moseley GL, Nicholas MK, Hodges PW. Pain differs from non-painful attention-demanding or stressful tasks in its effect on postural control patterns of trunk muscles. *Exp Brain Res.* 2004; 156: 64-71
- 14) Allison GT, Henry SM. The influence of fatigue on trunk muscle responses to sudden arm movements: A pilot study. *Clin Biomech.* 2002; 17: 414-417
- 15) Vuilleme N, Forestier N, Nougier V. Attentional demands and postural sway: the effect of the calf muscles fatigue. *Med Sci Sports Exer.* 2002; 34: 1607-1612
- 16) Daniels and Worthingha. 新・徒手筋力検査法 第7版. 津山直一・中村耕三 監訳. 協同医書出版. 2008: 38-42, 200-203
- 17) Biering-Sørensen F. Physical measurements as risk indicators for low-back trouble over a one-year period. *Spine.* 1984; 9: 106-19
- 18) Grondin DE, Potvin JR. Effects of trunk muscle fatigue and load timing on spinal responses during sudden hand loading. *J Electromyogr Kines.* 2009; 19: 237-245
- 19) Shumway-Cook A, Wollacot. モーターコントロール—運動制御の理論と臨床応用—. 田中繁・高橋明監訳. 医歯薬出版. 1999: 235-323