

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 20 日現在

機関番号：32527

研究種目：若手研究 B

研究期間：2010～2011

課題番号：22700548

 研究課題名（和文） 外乱付加時の姿勢応答の再考-単関節筋と二関節筋の機能に注目して-
 研究課題名（英文） Reconsidering postural response to external disturbance - Focusing on the functions of monoarticular and biarticular muscles -

 研究代表者 松田 雅弘 (MATSUDA TADAMITSU)
 (植草学園大学・保健医療学部・講師)

研究者番号：40453485

研究成果の概要（和文）：外乱刺激時に二関節筋の筋緊張の有無における立位姿勢制御を明らかにすることを目的とした。二関節筋の筋緊張有無で前方・後方外乱時に、健常学生を床反力計上で立位保持させ、下肢筋活動と関節角度を分析した。両外乱において筋緊張により床に対する方向制御が増し、筋活動・関節角度変化は少なかった。単関節筋と二関節筋の活動を少なく協調的に働かせており、二関節筋は姿勢制御のために重要な調整機能を果たしていることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：

The aim of the present study was to clarify standing posture control, with and without muscle tension in biarticular muscles, in response to external disturbance (the ground suddenly shifting). Subjects, seven healthy students, were asked to maintain a standing posture on a force plate during anterior and posterior external disturbance (movement of the plate) with and without muscle tension in biarticular muscles. Ground reaction force was captured, to analyze muscle activity in the lower limbs and joint angles. With both posterior and anterior external disturbance, there was an increase in control in the direction towards the floor due to muscle tension, and there were small changes observed in muscle activity and joint angles. The results suggested that monoarticular and biarticular muscles were made to function cooperatively, reducing activity, and biarticular muscles have an important adjusting function in postural control.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：人間医工学

科研費の分科・細目：医療・福祉、リハビリテーション

キーワード：リハビリテーション、姿勢制御、二関節筋、バランス

1. 研究開始当初の背景

外乱応答時の立位姿勢反応の見直しを実施し、現行まで考えられてきた立位姿勢制御

戦略である股関節戦略と足関節戦略の評価手法を再考することで、新規の評価手法を確立していくことを目的とした。現在までは

Nashner による報告によると、弱い外乱では足関節戦略を主に利用することで立位姿勢制御を行い、強い外乱では股関節戦略を用いることで立位姿勢制御を行っている。前方動揺（床面の後方外乱）では、弱い外乱で腓腹筋、ハムストリングス、脊柱起立筋などの身体後方の筋をおもに活動させ、反対に弱い後方動揺（床面の前方外乱）では、前脛骨筋、大腿四頭筋、腹部筋の筋を活動させることで対応する。また、強い前方動揺（床面の後方外乱）では弱い動揺とは逆に身体前面の筋である腹筋群、大腿四頭筋が活動する。強い後方動揺（床面の前方外乱）では弱い動揺とは逆に身体後面の筋である脊柱起立筋群、ハムストリングスが活動する。

このように、前後の外乱の違いによる筋活動が異なることを、Nashner は外乱応答時の関節の主たる動きを戦略という形でまとめた。しかし、近年、二関節筋が何故人体に存在するのか、その二関節筋の役割について多くの報告が見られるようになった。単関節筋は重力に対応する抗重力筋としての役割が大きく、二関節筋は制御担当に存在することが考えられる。そのなかで二関節筋は四肢の先端での出力方向を調整する機構を、筋電図解析から、系先端（四肢先端）の出力方向と筋活動に一定の法則があることを発見した（kumamoto, 1994 年）。これは、人工筋を装着したロボットにより人体と同一の結果が再現され、理論的、実験的にも協調制御理論の正しさが証明された。このように姿勢制御の観点から単純な関節の戦略ではなく二関節筋の働きに注目した姿勢制御の方略の変化を明らかにする必要性を感じた。

そのため、今回の Nashner が提唱した研究報告をもとに、単関節筋と二関節筋の作用を注目して外乱刺激時の身体活動について再考することを目的とする。そのため単純に関節にかかるトルク概念ではなく、その外乱刺激が筋の活動のなかでも筋の形状により役割があることを提案でき、そのことで新規の外乱応答に対する各筋・関節別で新たな外乱応答に対する運動療法の開発を行っていくことへつながる可能性を含むものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、二関節筋の制御に関する重要性を説いた熊本水頼らが提唱する 3 対 6 筋協調制御モデルのリハビリテーション臨床応用を探り、リハビリテーションの新たな立位姿勢制御の評価手法の確立を行っていくことを第 1 の目的とする。その立位姿勢制御能力の評価手法を見直すことによって、姿勢外乱反応の改善に対するリハビリテーション運動プログラムを見直すことができると考えられる。そのなかで、外乱時の下肢単関節

筋と二関節筋の協調的な制御能力について再考していく。このことが、近年増加している転倒高齢者の運動療法における、新たな筋・関節トレーニング立案につながることに寄与できるものと考えられる。

外乱刺激時の姿勢制御を関節トルクのみで表現するのではなく、形状の異なる筋の活動の変化を詳細にとらえ、筋の特徴による違い、二関節筋の生体における役割を明らかにすることを目的として実験を行った。

3. 研究の方法

対象は下肢整形外科的な疾患または既往歴のない健常男性 7 名（平均年齢 21.0 歳：20-22 歳）とした。被験者には事前に研究の説明を行い、文書にて同意を得た者とした。被験者は身長 173.4±4.3cm、体重 68.8±9.8kg の者であった。

計測前に基礎データとして、背臥位にて竹井機器製試作機器（第 1 号機）と、FEMS プログラム（計算力学研究センター社製）を同期させて、実行筋力を計測した。これは四肢の先端に作用する筋力を計測できる装置とプログラムになる。

外乱装置は既存の機器を使用するとデータの同期が困難なことや刺激を学習しやすいため、独自に外乱装置を作成し、その上に、床反力計（Kisler 社製）を取り付けた。被験者には 3 次元動作解析装置内（MAC3D）で外乱装置の上に、開眼、肩幅に下肢を開いた状態で立位姿勢を保持させた。また、ヘレンヘイズのマーカセットの方法にのっとり、全身に 3 次元動作解析用のマーカーを 29 個貼り付けた。前方外乱とは床面が前方へ移動する刺激であり、Nashner らによる後方動揺と同様であり、後方外乱とは床面が後方へ移動する刺激であり、Nashner らによる前方動揺と同様である。弱い外乱とは被験者の体重の 10% の張力による外乱刺激で、強い外乱とは被験者の体重の 20% の張力の外乱とした。

表面筋電計（Noraxon）を用いて、被検筋 7 筋（大殿筋、大腿二頭筋長頭、大腿直筋、外側広筋、内側広筋、腓腹筋〔内側頭〕、前脛骨筋）から筋波形を算出した。サンプルは 1000Hz で算出し、筋波形は標準化とスムージングして外乱が加わってからの反応時間と 1 秒間の反応を検討した。また、拮抗二関節筋（大腿直筋・大腿二頭筋）に予備的筋緊張を被験者にフィードバックするためモニターを見せ、該当の二関節筋が活動していることを示した。

3 次元動作解析装置と筋電計、床反力を同期させた。3 次元動作装置により下肢関節角度の変化と床反力のデータより FEMS で 3 対 6 筋の協調制御の変化を取り込んだ。

上記の手法により、弱い外乱（前方・後方）と強い外乱（前方・後方）を付加したときの

筋活動量、関節角度の変化、床反力の変化、FEMS の変化についての数値を算出し、どのような姿勢反応をしているのかを比較検討を実施した。

4. 研究成果

下肢の実行筋力を測定した結果、平均 F1+E1 は $190.4 \pm 43.2\text{Nm}$ 、平均 F2+E2 は $143.5 \pm 51.1\text{Nm}$ 、平均 F3+E3 は $122.2 \pm 25.2\text{Nm}$ となった。F1+F2 は股関節に働く単関節筋の筋力、F2+E2 は膝関節に働く単関節筋の筋力、F3+E3 は股関節と膝関節に働く二関節筋の筋力である。

図 1、2 に示す通り弱い前方外乱では二関節筋に予備的な筋緊張により波形は同様の波形を示すが、関節角度変化は半減することと、股関節に関する反応が减弱した。また、膝関節の反応時間が早まる傾向にあった。

強い前方外乱 (図 3、4) においても同様の関節角度変化を示し、二関節筋の緊張により、角度変化は早まり減少し、股関節において角度変化は减弱した。

外乱直後の筋活動を比較した図 5、6 で、筋活動を比較すると、弱い外乱も強い外乱時も二関節筋は変化も大きく、単関節筋の活動も二関節筋の作用により活動が减弱した。また、緊張による筋反応時間は大腿直筋と大殿筋で予備的な緊張によって反応時間は短縮して、さらに筋の活動の違いによる姿勢保持戦略の違いがみられた。これは、二関節筋の活動により外乱刺激時の床に対する方向制御が増し、抗重力筋の活動は减弱する、また緊張によって下肢関節の変化は少なかった。実行筋力の制御を上手に行う被験者ほど、二関節筋の緊張時の外乱刺激に対する筋活動が減少していた。

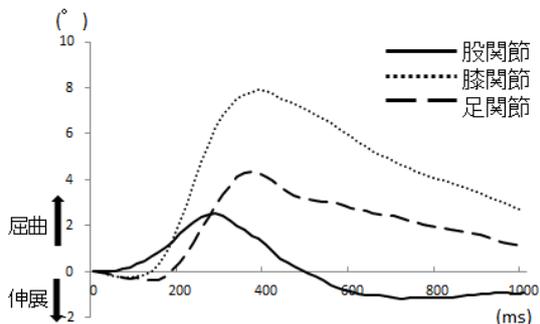


図 1 弱い前方外乱時の下肢関節角度の変化 (二関節筋に緊張なし)

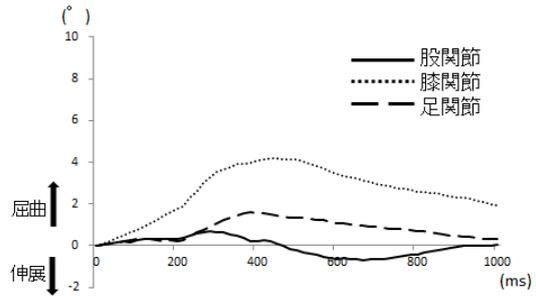


図 2 弱い前方外乱時の下肢関節角度の変化 (二関節筋に緊張あり)

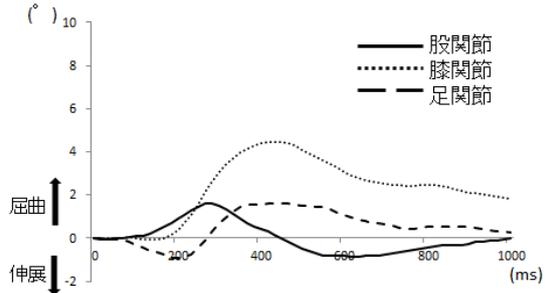


図 3 強い前方外乱時の下肢関節角度の変化 (二関節筋に緊張なし)

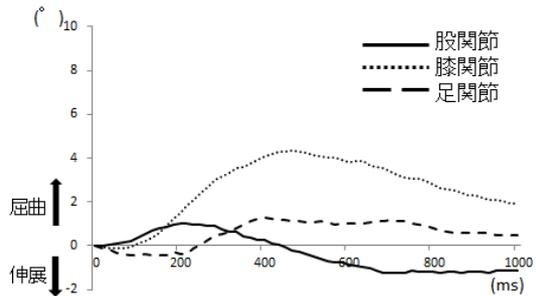


図 4 強い前方外乱時の下肢関節角度の変化 (二関節筋に緊張あり)

外乱	緊張	TA	BF	VL	RF	VM	GM	Gastro
弱い	無	2442.3±99.1	276.6±106.0	307.4±124.8	365.6±126.7	403.2±53.8	84.1±27.2	256.5±82.9
	有	232.3±89.7	126.6±18.7	125.3±19.2	123.6±24.1	101.5±20.8	68.4±18.7	153.9±12.4
強い	無	2549.0±269.3	235.4±65.9	427.8±64.6	621.0±355.0	570.2±111.6	105.5±8.3	323.3±33.2
	有	162.6±31.7	145.4±43.0	147.0±25.9	143.8±20.9	125.7±26.2	51.0±32.8	164.0±31.0

注 単位% (外乱時の筋活動/静止立位の筋活動) ×100

TA: 前脛骨筋、BF: 大腿二頭筋長頭、VL: 外側広筋、RF: 大腿直筋、VM: 内側広筋、GM: 大殿筋、Gastro: 腓腹筋 (内側)

図 5 前方外乱時の筋活動の外乱の変化と緊張の有無による違い

外乱	緊張	TA	BF	VL	RF	VM	GM	Gastro
弱い	無	0.11±0.02	0.14±0.05	0.12±0.03	0.12±0.04	0.13±0.05	0.18±0.05	0.31±0.17
	有	0.12±0.02	0.21±0.13	0.14±0.05	0.13±0.04	0.13±0.03	0.17±0.05	0.33±0.21
強い	無	0.11±0.02	0.16±0.05	0.12±0.02	0.11±0.01	0.12±0.02	0.17±0.02	0.35±0.29
	有	0.11±0.02	0.14±0.04	0.13±0.05	0.13±0.03	0.13±0.04	0.21±0.08	0.29±0.25

注 単位 ms

図 6 前方外乱時の筋反応時間の外乱の変化と緊張の有無による違い

図 7、8 に示す弱い後方外乱においても前方外乱と同様に、姿勢時筋緊張を付加させたときに下肢関節の変化は少なく、特に股関節の可動性の減少と、中間関節の膝関節の動きが少なかった。

強い後方外乱 (図 9、10) においても同様の関節角度変化を示し、どの関節角度の変化もほとんど見られなかったが、緊張ありで股関節と膝関節の動きを少なく立位姿勢を制御していることがわかった。

外乱直後の筋活動を比較した図 11、12 で、筋活動を比較すると、弱い外乱も強い外乱時も二関節筋は変化、単関節筋の活動も二関節筋の作用により活動が減弱した。腓腹筋、大腿直筋、前脛骨筋、外側広筋の活動の減弱が顕著にみられた。また、緊張によって関節の可動性と筋活動を減らし、外乱に対する準備状態をつくっていることが示唆された。実行筋力の制御を上手に行う被験者ほど、二関節筋の緊張時の外乱刺激に対する筋活動が減少していた。

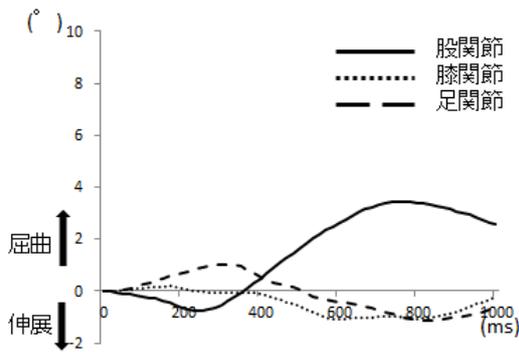


図 7 弱い後方外乱時の下肢関節角度の変化 (二関節筋に緊張なし)

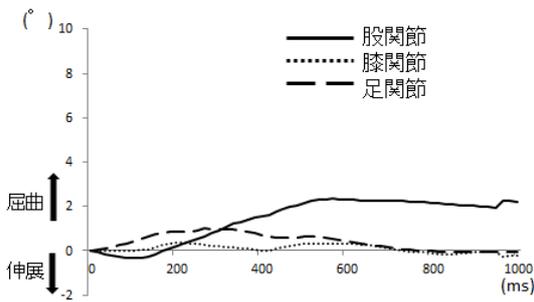


図 8 弱い後方外乱時の下肢関節角度の変化 (二関節筋に緊張あり)

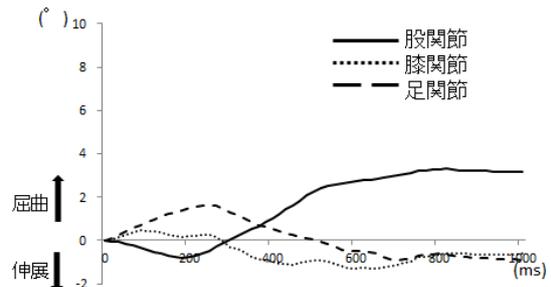


図 9 強い後方外乱時の下肢関節角度の変化 (二関節筋に緊張なし)

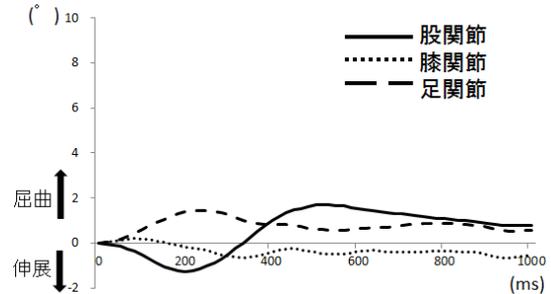


図 10 強い後方外乱時の下肢関節角度の変化 (二関節筋に緊張あり)

外乱	緊張	TA	BF	VL	RF	VM	GM	Gastro
弱い	無	349.6±99.1	142.7±106.0	319.7±70.8	484.0±126.7	186.3±17.1	153.5±27.2	255.2±62.9
	有	116.9±26.7	122.2±18.7	99.7±19.2	107.4±24.1	76.9±20.8	106.5±18.7	163.6±2.4
強い	無	373.8±269.3	165.1±65.9	706.4±234.6	407.0±355.0	382.7±111.6	155.8±8.2	175.3±33.2
	有	77.8±31.7	113.7±43.0	101.6±25.9	109.3±20.9	92.3±26.2	186.8±32.8	193.7±31.0

注 単位% (外乱時の筋活動/静止立位の筋活動) ×100

TA: 前脛骨筋、BF: 大腿二頭筋長頭、VL: 外側広筋、RF: 大腿直筋、VM: 内側広筋、GM: 大殿筋、Gastro: 腓腹筋 (内側)

図 11 後方外乱時の筋活動の外乱の変化と緊張の有無による違い

外乱	緊張	TA	BF	VL	RF	VM	GM	Gastro
弱い	無	0.15±0.03	0.22±0.06	0.27±0.15	0.27±0.10	0.23±0.09	0.32±0.12	0.13±0.02
	有	0.16±0.08	0.21±0.08	0.15±0.03	0.14±0.05	0.30±0.21	0.22±0.09	0.12±0.02
強い	無	0.13±0.02	0.18±0.04	0.20±0.05	0.23±0.11	0.19±0.07	0.30±0.17	0.13±0.03
	有	0.13±0.03	0.18±0.04	0.34±0.13	0.14±0.03	0.15±0.03	0.26±0.12	0.14±0.08

注 単位 ms

図 12 後方外乱時の筋反応時間の外乱の変化と緊張の有無による違い

両外乱とも二関節筋に予備的な筋緊張を増大させることで、単関節筋と二関節筋の活動を少なく協調的に筋を働かせていた。これは二関節筋を初期状態で働く準備状態に整えておくことで、下肢関節の可動域変化・筋活動減弱に影響を及ぼした。このことから、姿勢保持のために二関節筋は重要な調整機能を果たしていることが示唆された。また、下肢関節での戦略は今まで述べられてきた股関節戦略・足関節戦略のように関節レベルでの制御ではなく、単関節筋と二関節筋による協調的制御によっていることが示唆さ

れた。これは、大腿部の筋は姿勢制御の点から2つに分けられる報告があり、第一のグループは単関節筋とその一部の筋から成立し、抗重力筋として働いており、支持面との接触面積と高い相関がある。第二の筋群は二関節筋群からなり、水平方向の安定性によりいっそう寄与し、接触力の作用方向の微細な調整を助ける (Jacobs ら、1996)。また、スキーのエアリアルで着地するとき、足底からの感覚情報を得てフィードバック制御する時間的余裕がなくても、拮抗二関節筋を備えた3対6筋の拮抗筋群で制御された脚であれば、多少の凸凹でも安定した姿勢制御が可能である。それゆえに、拮抗二関節筋を獲得したからこそ動物やヒトは一義的にオープンループ制御で素早い動作を可能にした。このように二関節筋の予備的な緊張によって姿勢制御機能が高まることが示唆された。

二関節筋の筋緊張の維持が生体の直立位位の保持に重要なことから、二関節筋の筋緊張の変化により、身体制御能力に変化が生じる。二関節筋のように関節によって異なる作用のある筋があるため、関節トルクだけでは関節制御に関して論じることは難しいことかもしれない。また、リハビリテーション治療に置き換えた場合、どのような運動療法が姿勢制御能力の改善に寄与するか具体化できない。そのため、単関節筋と二関節筋を考慮した筋力増強運動などの運動療法が必要になることが示唆された。今後さらに関節角度の変化、筋活動の変化を外乱の程度をさらに細かく設定した制御機構を検討し、単関節筋と二関節筋の協調的な活動を考慮していく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ①相澤高治、松田雅弘、股関節屈曲・伸展筋力とジャンプ能力テストの関係性の検討、理学療法科学、Vol. 25 (No6)、889-892、2011、査読有
- ②松田雅弘、高梨晃、川田教平・他、股関節外転筋疲労が片脚立位姿勢の制御と筋活動に及ぼす影響、理学療法科学、Vol. 26 (No5)、679-682、2011、査読有
- ③松田雅弘、塩田琴美、小山貴之・他、健常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、2、27-30、2011、査読有
- ④Koshida S、Matsuda T、Kawada K、Lower extremity biomechanics during Kendo strike-thrust motion in healthy KENDO Athletes、Journal of Sports medicine and Physical fitness、51(3)、357-365、2011、

査読有

- ⑤Koshida S、Matsuda T、Kawada K、Kinematics of foot-shank complex in “KENDO” and its relationship with foot arch height、Portuguese Journal of Sport Sciences、11、295-298、2011、査読無
- ⑥松田雅弘、越田専太郎、宮島恵樹・他、すり足運動と足踏み運動後の身体バランスに及ぼす検討、了徳寺大学紀要、6、63-69、2012、査読有

[学会発表] (計8件)

- ①松田雅弘、塩田琴美、高梨 晃・他、腰部ベルト装着時の静的・動的立位バランスの特性 —健常高齢者による分析—、第45回日本理学療法学会大会(岐阜県)、2010
- ②相澤高治、松田雅弘、股関節筋力とジャンプ能力との関係、第45回日本理学療法学会大会(岐阜県)、2010
- ③Matsuda T、Shiota K、Koyama T、et al、Effects of back muscle fatigue on equilibrium ability、13th congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology (Aalborg, Denmark)、2010
- ④Koshida S、Matsuda T、Kawada K、Joint biomechanics of lower extremity during the strike-thrust motion in healthy Kendo athletes、28th International Society of Biomechanics in Sports Conference (Michigan, USA)、2010
- ⑤相澤高治、松田雅弘、等速性股関節屈伸筋力と方向転換要素を含む跳躍動作との関係、第46回日本理学療法学会大会(宮崎県)、2011
- ⑥松田雅弘、新田 収、宮島恵樹・他、立位平衡機能の発達による差異について—軽度発達障害児に着目して—、関東甲信越ブロック理学療法士学会集(新潟県)、2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 雅弘 (MATSUDA TADAMITSU)
植草学園大学・保健医療学部・講師
研究者番号：40453485

(2) 連携研究者

越田 専太郎 (KOSHIDA SENTAROU)
了徳寺大学・健康科学部・准教授
研究者番号：60532637