

研究報告

両側性運動における一側筋力調節時の対側最大筋力への影響*

竹林秀晃^{1)2)#} 宮本謙三¹⁾²⁾ 宅間 豊¹⁾ 井上佳和¹⁾
 宮本祥子¹⁾ 岡部孝生¹⁾ 滝本幸治¹⁾ 八木文雄²⁾

要旨

筋力評価や筋力トレーニングは、徒手筋力検査法や等速度運動機器など、一側を対象として行われることが多い。しかし、身体運動の多くは、左右の四肢を非常に巧みに協応させて行われており、左右肢間の相互作用を考慮した両側性運動を考慮する視点も必要と思われる。本研究では、一側に筋力調節課題を与えることで注意の方向を統一し、その調節水準を変化させることによる対側との相互干渉の変化を、下肢運動課題を用いて検討した。対象は健康成人9名とし、運動課題には右膝伸展筋筋力の筋力調節下（等尺性収縮による100%最大随意収縮：Maximal Voluntary Contraction (MVC), 75% MVC, 50% MVC, 25% MVC)で、対側である左膝伸展最大等尺性筋力を発揮するという両側性運動を用いた。加えて、左側単独での膝伸展最大等尺性筋力も測定した。測定に際しては右膝伸展筋力の調整量保持を絶対条件とし、注意の方向性を統一した。データ分析対象は、各運動課題遂行時の左膝伸展最大筋力の変化とした。その結果、右膝伸展筋力を調整することによる左膝伸展最大筋力への影響は、右膝伸展筋力の調節水準が低くなるに従い、左膝伸展最大筋力も同様に低下するという同調的变化を示した。これは、両側性機能低下のメカニズムの一つである認知・心理レベルでの注意の分割が関与しており、神経支配比が大きい下肢筋での筋力調節の要求は、課題の難易度が高く、運動の精度を高めるためより多くの注意が必要であるため、左膝伸展最大筋力が低下したと考えられる。

キーワード 筋力調節, 両側性運動, 両側性機能低下

はじめに

ヒトの四肢は左右で対をなしており、それに対応するかのようには脳にも左右の半球が存在し、脳梁を介して結ばれている。左右半球は個々に身体各部位を制御し、一側運動野の指令の多くが対側四肢に投射する対側性支配と考えられてきた¹⁾。しかし、近年の脳科学の知見は同側性・両側性支配の存在も明らかにし²⁾、さらには身体の一側性運動と両側性運動の制御メカニズムの特性に

ついても検討がすすめられている³⁾⁴⁾。

理学療法における筋力評価や筋力トレーニングにおいては、徒手筋力検査法 (Manual muscle testing : MMT) やハンドヘルドダイナモメーター (Hand Held Dynamometer : HHD), 等速度運動機器など、一側の単関節運動を対象とした方法が数多く用いられている。近年、多関節運動を考慮した閉鎖性運動連鎖 (Closed Kinetic Chain : CKC) での運動も考慮されつつあるが、その概念も基本的には同一肢での運動連鎖を念頭に置いたものである。しかし、身体運動の多くは複数の部位を巧みに協応させており、こうした一肢あるいは同側上下肢の運動だけでなく、左右肢間の動きを考慮した評価やトレーニングも今後の理学療法に必要な視点と思われる⁵⁾。これまでの理学療法では、左右肢間の相互作用を十分考慮してきたとは言い難い。その背景には両側性運動や複数体肢の運動が、筋力や運動スキルにどのような影響を及ぼすのか、明確に整理されていない現状がある。

両側性運動に関する研究の代表的なものとしては、両側性機能低下 (bilateral deficit) があげられ、両側同時

* Influence of Unilateral Muscle Force Control during Bilateral Movement on Maximum Contralateral Muscle Force

1) 土佐リハビリテーションカレッジ 理学療法学科
 (〒781-5453 高知県香南市香我美町山北2833)
 Hideaki Takebayashi, RPT, MS, Kenzo Miyamoto, RPT, MEd,
 Yutaka Takuma, RPT, MS, Yoshikazu Inoue, RPT, MEd, Shoko
 Miyamoto, RPT, Takao Okabe, RPT, Koji Takimoto, RPT:
 Department of Physical Therapy, Tosa Rehabilitation College
 2) 高知大学大学院医学系研究科
 Hideaki Takebayashi, RPT, MS, Kenzo Miyamoto, RPT, MEd,
 Fumio Yagi, PhD: Medical Graduate School, Kochi Medical School
 # E-mail: ptrc.takebayashi@tosareha.ac.jp
 (受付日 2005年7月4日/受理日 2006年2月7日)

の筋力発揮では一側での筋力発揮より出力量が低下する現象として報告されている⁶⁾⁷⁾。過去の報告における bilateral deficit のメカニズムには、脊髄・末梢性レベルや心理・中枢性レベルなどいくつかの報告がある。脊髄レベルのメカニズムは、Sherrington が報告している二重相反神経支配（交叉性伸展反射）の関与である。これは、刺激された筋の対側の同名筋が抑制され、拮抗筋が促通されるという対側肢には同側肢とは逆の興奮配分が出現することである。Ohtsuki ら⁸⁾ は、右肘屈曲と左肘伸展とを同時に行かせた方が、両側同時に同名筋を取縮させるより筋力が高くなるが、有意な変化は見られず、二重相反神経支配の関与は少ないとしている。末梢レベルのメカニズムでは、Koh ら⁹⁾ の報告において等尺性膝関節運動を急激に行なう step 収縮と徐々に筋収縮力を高める ramp 収縮をさせた方法では、後者の方が bilateral deficit の割合が大きかったことより Type II 線維の抑制が原因と推察されている。しかし、抑制される筋線維 Type に関しては、課題に大きく左右されると考えられる。認知・心理レベルのメカニズムでは、注意の分割が影響するとされている。有限な量の注意が各々の課題に分配されるとするならば、各々の体肢に割り当てられる注意の量は減少し、その結果筋力も低下するとされている。つまり、注意の処理能力の減少は、筋力の減少につながると考えられる。中枢性レベルのメカニズムには、大脳半球を結ぶ交連線維を介在する抑制現象である大脳半球間抑制（Interhemispheric inhibition）が報告されている。このように bilateral deficit のメカニズムは様々な観点で報告されているが、いまだ明確になっていないのが現状である。

従来の bilateral deficit に関する研究は、両側同時握力発揮¹⁰⁾ や肘関節屈曲・伸展¹¹⁾¹²⁾、膝伸展同時発揮¹³⁾ など、左右同時かつ最大筋力発揮下での研究として行われてきた。しかし、理学療法が問題とする日常動作では、両側同時に最大筋力を発揮する場面は少なく、左右の筋出力レベルが異なる状況や筋収縮様式が異なる状況など、多様な運動様式のもとで両側性運動が行われている。しかしながら、両側性運動課題において多様な運動課題を要求した研究報告は数少ない。Cohen¹⁴⁾ は、一側で手関節掌屈の等尺性筋力を一定レベルに維持させたうえで、反対側の手関節掌屈を素早く行かせた場合、等尺性筋力レベルは保持され対側肢の影響を受けないと報告している。一方、Seki¹⁵⁾ や小田⁷⁾ は、上肢の握力発揮や肘関節屈曲運動において、一側の筋力調節と対側の最大筋力発揮という左右異なる運動課題では、筋力調節側の同調的増大や最大筋力側の同調的低下が起こるとしている。こうした見解の相違は、複数の運動を同時に遂行するために生じる注意の非対称性が影響したものと考えられており、注意の方向性を考慮した実験モデルを検討す

る必要があると思われる。また、これらの報告は上肢を用いて行われており、下肢での報告は見当たらない。上下肢では神経支配比が異なるとされているため、筋力の微調整がより難しいと考えられる下肢筋での検討も理学療法として興味あるところである。

本研究の目的は、一側の筋力調節課題を与えることで注意の方向性を統一し、筋力調節課題の水準を変化させることによる対側との相互干渉の変化を、下肢運動課題を用いて明らかにすることである。

対象と方法

1. 対象

本研究では下肢の運動機能に支障のない健常成人9名（男性3名、女性6名）を対象とした。対象者の平均年齢は 23.1 ± 2.1 歳、身長 162.7 ± 7.7 cm、体重 57.3 ± 9.4 kg であった。対象者の利き脚はすべて右脚であった。なお、すべての対象者に対して、本実験の説明を行い、同意を得た。

2. 運動課題

実験対象とした運動は膝伸展等尺性運動で、測定肢位は膝関節90度屈曲位での端坐位とした。運動課題は、①一側性運動として左側単独での膝伸展最大等尺性運動（膝伸展最大運動）と、②両側性運動として右膝筋力調節下（100% MVC, 75% MVC, 50% MVC, 25% MVC）での左膝伸展最大運動とした。右膝伸展の筋力調節方法は等速性運動機器（Cybex-NORM）を用いて、事前に右側の膝伸展最大運動を測定した後、最大筋力値の25%・50%・75% MVCの調節値を保つよう筋力調節をモニターで視覚的に確認をさせながら行った。左膝伸展最大筋力については、HHD（日本メディクス社製 Power Track II）を固定させて計測し、この計測値の変化を比較データとして用いた。なお、両側性運動においては注意の方向性を一定にするために右膝筋力調節課題を一定水準で保持することを絶対条件とし、そのうえで左膝伸展最大運動を行うこととした。被検者には、右膝伸展調節課題に集中し、目標とする% MVCに到達した時点で左膝伸展最大運動を行い、その際にも右膝伸展の調節目標値を維持するよう教示した。適切な筋力調節課題が遂行されているという判断基準の範囲は、各目標% MVCの $\pm 10\%$ 未満とした。各運動課題はランダムに行われ、適切に課題を遂行できた2回分をデータとして採用した。

3. データ分析

データの分析対象は、各運動課題遂行時の左膝伸展最大筋力の変化である。また、両側性運動における筋力調節量の違いによる対側の変化を捉えるため、両側性機能

低下の指標として用いられる左一側での膝伸展最大筋力 (Unilateral運動: UL運動) に対する両側性運動 (Bilateral運動: BL運動) 時の左膝伸展最大筋力の比 (BL/UL Ratio) を算出した。

統計学的分析は、反復測定一元配置分散分析と Tukey の多重比較法を用いて、一側性運動と両側性運動における最大筋力の比較と、右膝伸展の筋力調節量の変化による左膝伸展最大筋力への影響を分析した。なお、有意水準は5%未満とした。

結 果

1. 一側性運動と両側性運動の比較

各運動課題遂行時の左膝伸展最大筋力の変化は、右膝伸展 25% MVC 時では 204.4 ± 64.1 N, 50% MVC 時では 219.0 ± 52.3 N, 75% MVC 時では 225.8 ± 54.5 N であった。右膝伸展 100% MVC 時では 232.6 ± 51.7 N, さらに左一側の最大運動時では 289.2 ± 70.1 N であった。一側性運動と各両側性運動における比較では、一側性運動より両側性運動の方が有意に左膝伸展最大筋力の低下を認めた。また、右膝伸展筋力調節時の左膝伸展最大筋力への影響は、25% MVC 時と 100% MVC 時, 25% MVC 時と 75% MVC 時で有意差を認め、右膝伸展の筋力調節量が低いほど、左膝伸展最大筋力の有意な低下が認められた (p < 0.05) (表1)。

2. 両側性運動における BL/UL Ratio

BL/UL Ratio は、右膝伸展 25% MVC 時では 0.69 ± 0.17, 50% MVC 時では 0.77 ± 0.15, 75% MVC 時では 0.79 ± 0.14, 100% MVC 時では 0.82 ± 0.14 であった。右筋力調節レベルの違いによる左膝伸展最大筋力への影

響は、25% MVC 時と 100% MVC 時, 25% MVC 時と 75% MVC 時で 25% MVC 時の左膝伸展最大筋力の BL/UL Ratio に有意な低下が認められた (p < 0.05) (表2)。

考 察

本研究の結果から、両側性運動では一側性運動に比べ左膝伸展最大筋力が有意に低下し、bilateral deficit が認められた。さらに、両側性運動では、右膝伸展の筋力調節レベルが低いほど同調的に左膝伸展最大筋力の低下が認められた。これは、課題遂行するうえで機能的に協同筋と考えられる筋間において抑制がみられることから左右肢間妨害作用 (interlimb interference)⁷⁾ と捉えることもでき、遠心性協同筋抑制¹⁶⁾ といわれている。また、両手協応運動におけるタイミング制御の実験研究では、右手と左手を同じ位相で動かす同相モードとまったく逆の位相で動かす逆相モードを用いた課題では、運動振動数が増加するにしたいがい、逆相モードでは両手間のタイミングは不安定となり、同相モードへと移行する両手間の位相引き込み (entrapment) が報告されている。こうした研究から左右の協応運動においては左右肢間相互作用が発生することが明らかにされている¹⁷⁾。このような左右肢間相互作用の存在を前提として、今回の実験では筋力調節に注意を向けさせ、その調節量を変化させることで、提唱されているメカニズムの一つである認知・心理的側面の注意の分割を操作したものである。

本研究における運動課題の特性は、左右に異なる運動課題が要求され、かつ同時に処理するという二重課題 (dual task) である。注意の方向性は中枢神経系の活動を変化させるという報告¹⁸⁾ などから、運動制御を行う

表1 一側性運動と両側性運動における左膝伸展最大筋力の変化

	UL 条件		BL 条件		
	100% MVC	75% MVC	50% MVC	25% MVC	
左膝伸展最大筋力 (N)	289.2 ± 70.1	232.6 ± 51.7	225.8 ± 54.5	219.0 ± 54.3	200.4 ± 64.1

* : p < 0.05. (mean ± SD)

表2 両側性運動における BL/UL Ratio の変化

	BL 条件			
	100% MVC	75% MVC	50% MVC	25% MVC
BL/UL Ratio	0.82 ± 0.14	0.79 ± 0.14	0.77 ± 0.15	0.69 ± 0.17

* : p < 0.05. (mean ± SD)

BL/UL Ratio : 左一側での膝伸展最大筋力に対する両側性運動時の左膝伸展筋力の比。

上である身体部位に注意を向けることは非常に重要な意味を持つ¹⁹⁾。注意の主な機能の一つは、処理する必要のある情報を選択することである。本研究の運動課題では、左右に異なる課題が要求されているために注意の非対称性が生じている。結果からは、右側の筋力調節レベルが低いほど同調的に左膝伸展最大筋力の低下が認められており、筋力調節への注意は対側の最大筋力に影響を及ぼし、その筋力調節量に影響を受けることが明らかになった。

両側性運動での最大筋力の同調的低下現象は、求められる運動課題の特性に大きく依存するものと考えられることから、両側同時に最大筋力発揮する場合と筋力調節を行いながら対側の筋力を発揮する場合には、そのメカニズムは異なる可能性がある。Basmajian²⁰⁾は、運動単位における発火頻度の増加 (rate coding) と運動単位の活動参加数 (recruitment) の活動様式について小さな筋はまず rate coding によって、大きな筋は recruitment によって筋出力を調節するとしている。また、吉田ら²¹⁾は、recruitment では筋張力が離散的に増加するが、rate coding では連続的増加が可能であるため筋張力の微細な制御が可能としている。今回の運動課題は、下肢筋の筋力調節課題が絶対的条件であるため、上肢筋に比べ神経支配比が大きい大腿四頭筋での筋力調節は難易度が高くなる可能性がある²²⁾。直接的には比較できないが、筋力調節課題と同時に対側の最大筋力を発揮する上肢の研究報告では、同様に筋力調節レベルが低いほど対側の最大筋力の同調的低下を示しているが、BL/UL Ratio の比較では本研究の結果ほど低下していない³⁾。本研究では、神経支配比が大きい下肢筋での筋力調節を要求されるため、筋力調節レベルが低いほど運動のコントラストを高めることが必要となる。つまり、筋力調節レベルが低い方が筋力調節課題に対して課題の難易度が高く、運動の精度を高めるためより多くの注意が必要であるため、左膝伸展最大筋力が低下したと考えられる。これは、注意が払われていない対象に対するニューロン活動を減少させる視覚の周辺抑制 (surround inhibition) と類似しており、筋を感覚器として捉えるならば同様のメカニズムが考えられる。また、Cybex のモニターを確認させながら筋力調節を行ったことで、注意が視覚情報に奪われ運動感覚情報が少なくなった可能性もある²³⁾。視覚が他の感覚に対して優位性を持つことは様々な条件下で明らかにされており、注意が視覚情報に奪われ運動感覚情報が少なくなったことが、筋力調節課題においてより左膝伸展最大筋力が低下した要因と関連していると考えられる。

両側性運動を中枢神経系から捉えた場合、左右半球間の協調的作用が必要になる。運動野の錐体路細胞は脊髄の α 運動ニューロンへ伸びる神経線維とは別に側枝を伸

ばし、脳梁を經由して対側の運動野錐体路細胞と連絡しているといわれている。さらに、両側性運動における筋力調節課題では、中枢神経系は二つの運動プログラムの処理が必要であるため、これらの線維が互いに神経系の活動水準に対して相互に干渉しあうことが考えられる。この考えは大脳半球間抑制 (Interhemispheric inhibition) として bilateral deficit のメカニズムのひとつにあげられている。Ferber²⁴⁾らによれば、両側性運動では左右大脳半球の運動関連脳電位の振幅値が対称性の低下を示し、一側性運動では両側性運動より振幅値が高くなると報告している。このことは、皮質運動野細胞が、筋力発揮における力の大きさを制御する側面があることを意味し、両側性運動では抑制効果が互いに重なり、神経系の干渉が起こることを示唆している。さらに、その大脳半球間抑制の程度は対側の筋力調節レベルが低いほど神経系の抑制の程度が大きいとしている。本研究の結果は、これらを筋力レベルで支持するものである。

しかし、注意の分割という認知的側面や中枢神経の処理活動との関連性を筋力の変化のみで解析することには限界があり、他のメカニズムに関しては今回の研究では言及できない。近年の脳イメージングを用いた研究では、一側性運動より両側性運動において運動関連皮質の活性化が認められるという報告や、両側性運動を実施したときだけ活動する領域の存在が報告されている²⁵⁾。今後は、bilateral deficit に存在する特異性を末梢の筋活動レベルで整理し、中枢での変化と結び付けていくことで、そのメカニズムを明らかにする必要があると考えている。

文 献

- 1) Charles TL: ヒトの動きの神経科学. 松村道一, 森谷敏夫・他 (監訳), 市村出版, 東京, 2002, pp173-197.
- 2) Tanji J, Okano K, et al.: Neuronal activity in cortical motor area related to ipsilateral, contralateral, and bilateral digit movements of the monkey. *J Neurophysiol* 60: 325-343, 1988.
- 3) 豊倉 穰, 室 伊三男・他: 両手動作時における感覚運動野と補足運動野の活性化に関する研究—機能的MRIを用いた分析—. *リハ医学* 34: 677-685, 1997.
- 3) 谷口有子: レジスタンス・トレーニングにおける lateral specificity. *体育の科学* 47: 549-554, 1997.
- 4) Kelso JA, Schönner G: Self-organization of coordinative movement patterns. *Hum Move Sci* 7: 17-26, 1988.
- 5) 沖田一彦, 菅原憲一・他: 筋力と身体諸機能 筋力と動作能力. *PT ジャーナル* 32: 757-763, 1998.
- 6) 大築立志: 複数体部の同時使用による筋力低下現象. *バイオメカニクス研究* 1: 122-131, 1997.
- 7) 小田伸午: 身体運動における右と左一筋出力における運動制御メカニズム. 京都大学学術出版会, 京都, 1998.
- 8) Ohtsuki T: Decrease in human voluntary isometric arm strength induced by simultaneous bilateral exertion. *Behav Brain Res* 7: 165-178, 1983.
- 9) Koh TJ, Granbinger MD, et al.: Bilateral deficit is larger for step for than for ramp isometric contractions. *J Appl*

- Physiol 74: 1200-1205, 1993.
- 10) Ohtsuki T: Decrease in grip strength induced by simultaneous bilateral exertion with reference to finger strength. *Ergonomics* 24: 37-48, 1981.
 - 11) Henry FM, Smith LE: Simultaneous vs. separate bilateral muscular contractions in relation to neural overflow theory and neuromotor specificity. *Res Quart* 32: 306-316, 1961.
 - 12) Oda S, Moritani T: Maximal isometric force and neural activity during bilateral and unilateral elbow flexion in humans. *Eur J Appl Physiol* 70: 305-310, 1995.
 - 13) Secher NH, Rube N, *et al.*: Strength of two and one leg extension in man. *Acta Physiol Scand* 134: 333-339, 1988.
 - 14) Cohen L: Interaction between limbs during bimanual voluntary activity. *Brain* 93: 259-272, 1970.
 - 15) Seki T, Ohtsuki T: Influence of simultaneous bilateral exertion on muscle strength during voluntary sub maximal isometric contraction. *Ergonomics* 33: 1131-1142, 1990.
 - 16) 大築立志: 体育・スポーツ科学への応用. 運動の神経科学—基礎から応用まで—. 西野仁雄・柳原 大 (編), NAP, 東京, 2000, pp232-243.
 - 17) 田島 誠: 複雑な両手協応運動における学習とタイミング制御. 運動心理学の展開, 調枝孝治先生体幹記念論文集刊行会 (編), 遊戯社, 東京, 2001, pp111-131.
 - 18) Posner MI, Raichle ME: 脳を観る 認知神経科学が明かす心の謎. 養老孟司, 加藤雅子・他 (訳), 日経サイエンス社, 1997, pp214-244.
 - 19) 池田耕治: リハビリテーションは意識するからこそ成立する—神経認知リハビリテーションとの関係について概観する—. *認知運動療法研究* 4: 40-63, 2004.
 - 20) Basmajian JV, De Luca CJ: *Muscles Alive*. 5th Edition, Williams & Wilkins, 1985.
 - 21) 吉田正樹, 赤澤堅造・他: 張力発生における運動単位数と発火頻度の貢献度—筋の種類による検討—. 第3回生体・生理工学シンポジウム論文集: 231-234, 1988.
 - 22) 永田 晟: 筋と筋力の科学—筋収縮のスペクトル解析—. 不昧堂出版, 東京, 1993.
 - 23) 工藤孝幾: 意識の焦点と動作の焦点. *体育の科学* 52: 687-691, 2002.
 - 24) Ferbert A, Priori A, *et al.*: Interhemispheric inhibition of the human motor cortex. *J Physiol* 453: 525-546, 1992.
 - 25) 豊倉 穰, 室 伊三男・他: 両手の協調動作と大脳内側面に位置する運動関連皮質の活性化—機能的MRIを用いた分析—. *リハ医学* 37: 662-668, 2000.

〈Abstract〉

**Influence of Unilateral Muscle Force Control during Bilateral Movement
on Maximum Contralateral Muscle Force**

Hideaki TAKEBAYASHI, RPT, MS, Kenzo MIYAMOTO, RPT, MEd

Department of Physical Therapy, Tosa Rehabilitation College

Medical Graduate School, Kochi Medical School

Yutaka TAKUMA, RPT, MS, Yoshikazu INOUE, RPT, MEd, Shoko MIYAMOTO, RPT,

Takao OKABE, RPT, Koji TAKIMOTO, RPT

Department of Physical Therapy, Tosa Rehabilitation College

Fumio YAGI, PhD

Medical Graduate School, Kochi Medical School

The evaluation and training of muscle force is often limited to one side of the body, as seen in manual muscle testing and uniform movement devices. However, most physical movements result from the sophisticated coordination of the four limbs on both sides; and there is a view that it is necessary to take bilateral movement, which involves the interaction between both limbs, into account during training. In this study, an exercise requiring unilateral muscle force control during lower limb movement was assigned to consolidate the direction of attention, and the change in mutual interference with the opposite side in response to a change in the control level was examined. The subjects were nine healthy adults. Muscle force control of the right knee extensor (100%Maximal Voluntary Contraction (MVC), 75%MVC, 50%MVC, and 25%MVC by isometric contraction) was demanded, and at the same time, the subject was asked to make a bilateral movement, in which the maximum isometric extension muscle force of the left knee, the contralateral side, was demanded. The maximum isometric muscle force of knee extension on the left side alone was measured. The control measure of right knee extension muscle force was conserved as an absolute requirement during measurement, and the directionality of attention was consolidated. The analytical subject of data was the change in maximum left knee extension muscle force during exertion for each movement exercise. The results showed the influence of control of the right knee extension muscle force on the maximum left knee muscle force to be a syntonic change in which the maximum left knee extension muscle force decreased as the control level of right knee extension muscle force decreased. We believe this to derive from following mechanisms: the segmentation of attention at the cognitive and psychological levels, which is a mechanism of bilateral deficit, is involved, and the demand of muscle force control on the lower limbs, which has a high innervation ratio, demanded more attention due to both the increased difficulty level of assignments and the need for improving movement accuracy.