《原 著》

足関節の Cocontraction 時における Ib 抑制回路の活動性

鏡原 康裕*¹ 正門 由久*²

Ib Inhibition Activity during Cocontraction at the Ankle Joint

Yasuhiro KAGAMIHARA,*¹ Yoshihisa MASAKADO*²

Abstract: Cocontraction of pairs of antagonistic muscles is not always pathological; it may be a type of normal voluntary movement. It functions to keep the position of the joint constant and markedly increases its stiffness. It is reported that there is selective activation of the medial gastrocnemius muscle during cocontraction at the ankle joint. Activity in the Ib inhibitory pathway, which leads to the soleus motoneuron from the gastrocnemius medialis nerve (GM), is important in the cocontraction mechanism. We examined the activity of this circuit during cocontraction and compared it with activity in the ankle at rest and in tonic dorsiflexion and tonic plantarflexion. Ib inhibition did not significantly differ in the four situations. Although reciprocal Ia inhibition was markedly depressed during cocontraction, Ib inhibition to the soleus from the medial gastrocnemius muscle was maintained throughout. This constant activity in the Ib inhibitory pathway might be attributable to the fact that the excitability of the medial gastrocnemius muscle is relatively larger than that of soleus muscle during cocontraction. (*Jpn J Rehabil Med* 2004; 41: 686-691)

要 旨: 拮抗筋同士の収縮 (cocontraction) は姿勢保持などの際にみられる正常な随意運動である。足関節の cocontraction 運動では下腿三頭筋の中で内側腓腹筋が特別な役割を果たしていると考えられている。ヒラメ筋から記録した H 反射を運動ニューロンの興奮性の指標として、内側腓腹神経に条件刺激を与えることにより Ib 線維を求心性入力とする Ib 抑制を誘発することができる。本研究では H 反射と加算表面筋電図を用いて、足関節の背屈、底屈および cocontraction 運動時における内側腓腹神経からヒラメ筋への Ib 抑制回路の活動性を比較した。Ib 抑制回路の活動性は安静時を加えた 4 つの状況下で有意な変化を示さなかった。Cocontraction 時では拮抗筋を抑制する Ia 抑制回路の活動性は著明に低下する一方で、共同筋からの抑制系である Ib 抑制回路の活動性は保たれていた。この回路の活動性が保持されることによって、下腿三頭筋の中で内側腓腹筋の活動がヒラメ筋よりも相対的に優位になるように調節されていると考えられた。(リハ医学 2004; 41: 686-691)

Key words: Ib 抑制 (Ib inhibition), cocontraction, 内側腓腹筋 (gastrocnemius medialis muscle), H 反射 (H-reflex), 関節の固さ (joint stiffness)

はじめに

痙性疾患、小脳性失調症、パーキンソン病などの中枢性運動疾患では主動筋のみの運動が要求される時、すなわち相反性運動時に拮抗筋に対する抑制 (相反性

抑制) 障害のために拮抗筋同士の収縮 (cocontraction) が生じ、そのために目的とする円滑な運動が障害されることがある^{3,6,7)}。しかし、cocontraction 自体は必ずしも病的な状態でみられる現象ではなく、正常な随意運動の一つである。例えば、不安定な場所で

2004 年 6 月 25 日受付, 2004 年 9 月 29 日受理

*¹ 東京都立神経病院・神経内科/〒183-0042 東京都府中市武蔵台 2-6-1

Department of Neurology, Tokyo Metropolitan Neurological Hospital

*² 慶應義塾大学月が瀬リハビリテーションセンター・リハビリテーション科/〒410-3293 静岡県伊豆市月ヶ瀬 380-2

Department of Rehabilitation, Keio University, Tsukigase Rehabilitation Center

の起立保持やバランスが必要な線上歩行の時には足関節底屈筋と背屈筋の cocontraction が出現する。Cocontraction の役割は関節の固さ (stiffness) を増加させることにより、姿勢を一定に保持することにある⁴⁾。Stiffness は筋伸張反射による成分 (reflex stiffness) と随意筋活動による成分 (non-reflex stiffness) から制御されているが¹⁰⁾、足関節の cocontraction 時には下腿三頭筋の中では主に内側腓腹筋の活動が増加することにより、stiffness を増加させていると報告されている¹⁰⁾。同じ2関節筋である外側腓腹筋では cocontraction 時に内側腓腹筋のような筋活動の増加は認められていない。このように足関節の cocontraction 時では内側腓腹筋には単純な足関節底屈運動時と異なる運動調節機構が働いていることが予想される。

ヒトにおいて内側腓腹筋からヒラメ筋に対して Ib 線維を求心性線維とする Ib 抑制回路が存在していることが報告されている¹²⁾。本研究では安静時、足関節背屈時、底屈時および cocontraction 時の Ib 抑制回路の活動性を調べた。Cocontraction 時の Ib 抑制回路が Ia 抑制回路と異なる活動性を示し、この回路が下腿三頭筋の筋活動を調節している可能性について述べた。

対象と方法

著者ら2名を含む、健康男性成人6名(年齢24~46歳)を対象とした。全ての被験者に対して実験内容を説明し、同意を得た。被験者を特設のリクライニングチェアに座らせ、右側の足をトルクメーターに接続した不動性の足ペダルに固定した。膝関節屈曲60度、足関節背屈10度に保持した。被験者の眼前のオシロスコープにペダルにかかるトルクおよびヒラメ筋、前脛骨筋からの筋電図を整流し積分した値を表示した。

被験者にはオシロスコープ上の設定したラインにトルクラインが重なるように足関節を背屈あるいは底屈するように指示した。Cocontraction は先ず、足関節を背屈させ、前脛骨筋の筋電図量を維持しながら、底屈させトルクラインをゼロレベルに戻すように指示した⁹⁾。本実験では背屈、底屈力とも収縮力を最大の15%に設定した。これはこの収縮力が比較的容易に cocontraction 運動、即ち筋電図量を変化させることなく、トルクをゼロレベルに維持させることのできたた

めである。

Ib 抑制は H 反射および加算表面筋電図によって評価した^{1,12)}。両方法とも内側腓腹神経(腓腹筋内側頭への分枝)に条件刺激を与えた。表面電極を刺激と記録の両方で用いた。筋電図はヒラメ筋、内側腓腹筋、前脛骨筋に加えて、実験によっては外側腓腹筋や腓骨筋から記録し、増幅した(frequency band, 50~3 kHz)。刺激は1msの矩形波にて電気刺激した(日本光電社製, model SS-104 J)。脛骨神経を膝窩部で刺激しヒラメ筋から H 反射を誘発した。実験の開始時にヒラメ筋の最大 M 波の振幅を測定した。条件刺激は試験刺激の位置から6~11 cm 遠位部、4~5 cm 内側部にて内側腓腹神経に加えた。刺激強度は内側腓腹筋の M 波の閾値を基準とした。刺激のタイミング、H 反射振幅測定などはパーソナルコンピュータ(NEC 社製, PC)によって制御した。条件刺激効果は試験 H 反射サイズが異なると効果量(抑制量や促進量をコントロールのパーセントで表示した場合)も変化することが報告されている²⁾。従って、条件刺激による効果量を定量的に比較する場合には試験 H 反射サイズを一定にする必要がある。同じ試験刺激強度では足関節背屈時にはヒラメ筋 H 反射は抑制され、底屈時には促進されて、試験 H 反射サイズが異なってくる。本実験では背屈時には刺激強度を強く、底屈時には弱くして、異なる運動負荷時においても試験 H 反射サイズが一定となるように調節した。被験者によっては背屈時にはいくら刺激強度を強めても最大 M 波の15%以上にならないこともあり、6例の被験者では15から25%の範囲内に設定した。コントロールの H 反射と条件刺激を加えた H 反射はランダムに誘発した。刺激頻度は1/3 Hz で各刺激間隔につき少なくとも10回施行した。運動負荷と安静時の検査は交互に施行した。平均値の比較は t 検定により有意差を判定した。

加算表面筋電図では内側腓腹神経を1Hzの間隔で刺激した。条件刺激をトリガーとして整流した筋電図を100~200回平均加算した。背景筋電図量として刺激前の50ms前の筋電図量を測定した。筋電図量の増減から促進・抑制を判断した。

結 果

足関節の cocontraction の実例を図1に示す。これは片足立ちを維持している時に表面電極により記録し

図1 片足立ち時の下腿筋(軸足側)の表面筋電図
被験者には片足で立っていることを指示, TA:前脛骨筋, SOL:ヒラメ筋, MG:内側腓腹筋, LG:外側腓腹筋, PER:腓骨筋

図2 (A)足関節底屈 (plantar flexion), 背屈 (dorsiflexion) および(B) cocontraction 時の表面筋電図

Cocontractionは先ず, 足関節を背屈し, 前脛骨筋筋電図量を減少されることなく, トルクをゼロレベルに戻すように指示した. TA:前脛骨筋, SOL:ヒラメ筋, MG:内側腓腹筋, LG:外側腓腹筋, PER:腓骨筋

た軸足側の下腿筋表面筋電図である。足関節背屈筋である前脛骨筋 (TA), 底屈筋であるヒラメ筋 (SOL), 内側腓腹筋 (MG) および外側腓腹筋 (LG), 腓骨筋 (PER) に筋電図活動が見られている。片足立ちのような不安定な姿勢を維持する場合, 下腿筋群の cocontraction 活動が必要であった。

図2Aに等尺性足関節底屈 (plantar flexion) 時および背屈 (dorsiflexion) 時の前脛骨筋と下腿三頭筋の表面筋電図を示した。それぞれの相反性運動時には相反性抑制回路により拮抗筋に抑制が働き, 筋活動はみられない。足関節底屈運動に注目すると下腿三頭筋の中でヒラメ筋の筋活動がもっとも多く, 内側腓腹筋

図3 Ia抑制およびIb抑制の時間経過

(A)(B)はIa抑制, (C)(D)はIb抑制。上段の(A)(C)は安静時, 下段の(B)(D)はcocontraction時の結果。横軸は条件-試験刺激間隔 (ms), 縦軸は条件刺激を加えた時のH反射振幅の平均値と標準誤差をコントロールの百分率にて表示した。

の筋活動は少ない。しかし, 前脛骨筋に一定の持続性筋収縮により筋電図量を維持しながら, cocontraction運動をさせるとヒラメ筋では底屈時に比べ, 筋電図量は減少し, 内側腓腹筋では増加した (図2B)。内側腓腹筋と同じ2関節筋である外側腓腹筋はむしろヒラメ筋と同じ動態, 即ち, cocontraction時に筋電図量が減少する傾向にあった。この図では明らかではないが, 被験者によっては下腿外側部に存在する筋としては内側腓腹筋のようにcocontraction時に筋電図量が増加する傾向は腓骨筋に認められた。

図3に同一被験者における安静時およびcocontraction運動時のヒラメ筋H反射を用いて評価したIa抑制とIb抑制の時間経過を示した。横軸は条件-試験刺激の時間間隔, 縦軸は条件刺激された時のH反射の振幅をコントロールの百分率にて表示した。Ia抑制では条件刺激を総腓骨神経に前脛骨筋M波の閾値強度で, Ib抑制では内側腓腹筋のM波閾値の

1.05倍に設定した。総腓骨神経に条件刺激を与えた時, 安静時には潜時1msからヒラメ筋H反射の抑制がはじまり, 2ms近辺にて抑制は最大となり, 5~6msでコントロール値に戻った (図3A)。この短潜時の抑制がIa抑制である。安静時に誘発されたIa抑制はcocontraction時にはほぼ完全に消失した (図3B)。内側腓神経に条件刺激を与えて誘発するIb抑制はIa抑制に比べて潜時が1~2ms遅れ, 持続もIa抑制よりも長く続いた (図3C)。Cocontraction時にはIa抑制と異なり, Ib抑制は消失せず, この被験者ではむしろ増強された (図3D)。健康人においても安静時にIa抑制が誘発されないことがあり, 全例においては個人間のIaおよびIb抑制の比較はできなかったが, 安静時に明瞭なIa抑制を誘発できた被験者においてはcocontraction時のIa抑制低下を確認できた。

図4に6名の被験者において安静時にIb抑制が最

図4 被験者6名の安静時、足関節背屈(TDF)、底屈(TPF)、cocontraction時のIb抑制量
(A)は6名被験者の各データ。(B)は6名のデータの平均値と標準偏差値。

大となる条件-試験刺激間隔で、持続的足関節背屈(TDF)、底屈(TPF)およびcocontraction運動時のIb抑制値を示した。図4Aは個々の被験者のデータを、図4Bは6名被験者のデータの平均値と標準偏差値を示した。統計学的な有意差はこの4群の間では認められなかった。

Cocontraction時にIb抑制回路の活動性が低下しないことを加算表面筋電図によって4名の被験者によって確認した。図5はその内の1例の結果であり、内側腓腹神経刺激によりヒラメ筋筋電図を平均加算した時の結果を示した。足関節底屈時(A)とcocontraction時(B)の両運動時においてヒラメ筋筋電図は潜伏時約40msから減少し、約20ms続いた。加算表面筋電図法では定量的比較は難しいが、4名の被験者全例において、両運動時において明らかな筋電図量の減少には差は認められなかった。

図5 加算表面筋電図によるIb抑制
(A)Plantar flexion, (B)cocontraction.
内側腓腹神経への刺激をトリガーとしてヒラメ筋筋電図を200回加算。横軸は刺激からの時間(ms)、縦軸は筋電図量(μV)。

考 察

下腿三頭筋の中で内側腓腹筋のみが足関節底屈運動時に比べ、cocontraction運動時に底屈筋としてヒラメ筋よりも相対的に活動量が増加していた。これは姿勢保持に足関節の固さ(stiffness)を増加させるため、内側腓腹筋の活動が必要と考えられている¹⁰⁾。NielsenとKagamihara⁹⁾は単一運動単位を用いたPSTH(post-stimulus time histogram)から同名筋神経を刺激した時の単シナプス性のピーク値(興奮性シナプス後電位の大きさを反映する)を足関節の相反性運動とcocontraction時において比較した。前脛骨筋やヒラメ筋ではピーク値はcocontraction時には減少したが、内側腓腹筋では変化はみられなかった。これはIa線維終末に対するシナプス前抑制は前脛骨筋においてもヒラメ筋においてもcocontraction時にはそれぞれの筋単独の収縮時と比べ増加しているが、内側腓腹筋ではcocontraction時のシナプス前抑制の増加がないことを意味している。健康人では相反性運動とcocontraction運動は異なる運動プログラムにより発現している可能性が提唱された。事実、大脳磁気刺

激や positron emission tomography (PET) からの結果では cocontraction 発現のための特別な運動調節機構が存在していることが示唆されている^{5,11)}。

本研究では cocontraction 運動時における内側腓腹筋からヒラメ筋に作用する Ib 抑制回路の活動性を調べた。拮抗筋を抑制する Ia 抑制は cocontraction 時に抑制され、拮抗筋同士の収縮を妨げないようにしている。この現象は虚血による末梢からの入力遮断によっても変化せず、また末梢入力が脊髄内に到達する前の運動開始時にもみられることから、cocontraction 運動にともなう Ia 抑制回路の活動性低下は中枢性の神経機序によって生じる抑制と考えられている⁸⁾。Ib 抑制回路は cocontraction 時に被験者によっては増強している被験者もいたが、全体としては安静時や足関節背屈、底屈時と比べ有意な差はなかった。これまで随意運動時の Ib 抑制回路の活動性変化についての報告は Ia 抑制と異なり少ない。Yanagawa ら¹³⁾ は足関節背屈運動開始時の Ib 抑制の変化を報告している。最大収縮量の数パーセント以内であれば Ib 抑制は収縮量とともに増加するが、それ以上になると更なる抑制の増加はみられなくなった。これは介在性ニューロンレベルでの条件刺激と足関節背屈運動に伴う入力による閉塞によって説明されている。今回の結果では足関節背屈時にも安静時と比べ有意な差は認められなかったが、これは実験条件の違いによる可能性がある。今回の実験では Ib 回路の活動性を運動開始時ではなく持続的運動中で調べた点と試験 H 反射を安静時の大きさに等しくなるように試験刺激強度を調節した点が彼らの実験条件と異なっていた。Cocontraction 時での Ib 抑制回路を調べた報告はこれまでにない。本研究において、Ib 抑制回路の活動性は Ia 抑制回路と異なり、cocontraction 時でもその活動性が保持されていたことを報告した。Cocontraction 時には内側腓腹筋は単なる足関節の底屈時よりも興奮性が増加し、筋活動が増えることにより Ib 線維の発射活動も増加する。Ib 線維の発射活動の増加は Ib 抑制回路を介してヒラメ筋を抑制し、足関節の stiffness を増加するために足関節底屈力における内側腓腹筋の活動を相対的に優位にするように調節していると考えられた。

文 献

1) Bouaziz Z, Bouaziz M, Hugon M: Modulation of soleus electromyogram during electrical stimula-

- tion of medial gastrocnemius nerve in man. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1975; **15**: 31-42
- 2) Crone C, Hultborn H, Mazieres L, Morin C, Nielsen J, Pierrot-Deseilligny E: Sensitivity of monosynaptic test reflexes to facilitation and inhibition as a function of the test reflex size: a study in man and the cat. *Exp Brain Res* 1990; **81**: 35-45
- 3) Hayashi A, Kagamihara Y, Nakajima Y, Narabayashi H, Okuma Y, Tanaka R: Disorders in reciprocal innervation upon initiation of voluntary movement in patients with Parkinson's disease. *Exp Brain Res* 1988; **70**: 437-440
- 4) Humphrey DR, Reed DJ: Separate cortical systems for control of joint movement and joint stiffness: reciprocal activation and coactivation of antagonist muscles. *in* Motor Control Mechanisms in Health and Disease (ed by Desmedt JE). Raven Press, New York, 1983; pp 347-372
- 5) Johansson P, Christensen LOD, Sinkjaer T, Nielsen JB: Cerebral functional anatomy of voluntary contractions of ankle muscles in man. *J Physiol* 2001; **535**: 397-406
- 6) Kagamihara Y, Ohi K, Tanaka R: Disorder in reciprocal inhibition upon initiation of voluntary ankle dorsiflexion movement in cerebellar motor disorders. *in* Role of the Cerebellum and Basal Ganglia in Voluntary Movement (ed by Mano M, Hamada I, Delong M). Elsevier Science, Netherlands, 1993; pp 33-40
- 7) Kagamihara Y, Tanaka R: Disorder of the reciprocal Ia inhibitory pathway in spasticity. *in* Recent Advances in Clinical Neurophysiology (ed by Kimura J, Shibasaki H). Elsevier Science, 1996; pp 859-862
- 8) Nielsen J, Kagamihara Y: The regulation of disynaptic reciprocal Ia inhibition during co-contraction of antagonistic muscles in man. *J Physiol* 1992; **456**: 373-391
- 9) Nielsen J, Kagamihara Y: The regulation of presynaptic inhibition during co-contraction of antagonistic muscles in man. *J Physiol* 1993; **464**: 575-593
- 10) Nielsen J, Sinkjaer T, Toft E, Kagamihara Y: Segmental reflexes and ankle joint stiffness during co-contraction of antagonistic ankle muscles in man. *Exp Brain Res* 1994; **102**: 350-358
- 11) Nielsen J, Petersen N, Deuschl G, Ballegaard M: Task-related changes in the effect of magnetic brain stimulation on spinal neurones in man. *J Physiol* 1993; **471**: 223-243
- 12) Pierrot-Deseilligny E, Katz R, Morin C: Evidence for Ib inhibition in human subjects. *Brain Res* 1979; **166**: 176-179
- 13) Yanagawa S, Shindo M, Nakagawa S: Increase in Ib inhibition by antagonistic voluntary contraction in man. *J Physiol* 1991; **440**: 311-323