

【論文の内容の要旨】

論文題目：

FUNCTIONAL SIGNIFICANCE OF Ia AFFERENT INPUTS FOR THE DETERMINATION OF NEUROMUSCULAR ACTIVITY LEVELS IN HUMAN SYNERGISTIC MUSCLES

(和訳：協働筋の神経筋活動レベルの決定に Ia 群線維活動が担う機能的役割)

氏名： 牛山 潤一

【緒言】

ヒトの身体運動は多様かつ複雑であり、巧みな動作を作り出すためには、複数の筋の活動が協調される必要がある。そのような協調的な筋活動パターンは、主として中枢神経系において形成される。しかし、身体各部の感覚受容器によって検知され、求心性神経を介して上行性に伝達される感覚情報は、身体内外部の環境の変化に応じて時々刻々と筋活動パターンを変化させ、身体の動きを調整する。すなわち、末梢感覚神経系は、中枢神経系によって形成された筋活動パターンを修飾するという重要な役割を担う。なかでも筋紡錘は、唯一筋に関する固有感覚を検知可能な感覚受容器として知られ、筋紡錘と Ia 群線維によって構成される回路は、工学分野での制御におけるフィードバックループとのアナロジーから、運動制御における貢献が多くの研究において注目されてきた。

これまで、身体運動における Ia 群線維活動の貢献は、走歩行 (Stein & Capaday 1988) や起立 (Nashner 1977) における伸張反射の役割や、随意筋力発揮におけるガンマ環の役割 (Bongiovanni et al. 1990) が考察されてきたが、多くは単一筋についてのみ言及しているにすぎない。最も単純な身体運動である単関節運動時でさえ、協働筋間の筋活動パターンは運動課題に応じて異なる (e.g. Nardone et al. 1989; Moritani et al. 1990; Kouzaki et al. 2002)。従って、筋の解剖学的特徴 (単関節筋か多関節筋か) や生理学的特性 (筋線維組成など) の差異に起因して、筋活動パターンの制御に果たす Ia 群線維活動の役割は協働筋間で異なるものと考えられ、これらを検討することは、運動制御のメカニズムの解明に有用な知見を提供し得るものと考えられる。

本研究では、解剖学的特徴や生理学的特性の差異が協働筋間で顕著であり (Johnson et al. 1973)、かつ走歩行・起立・跳躍といった日常的にヒトが行う運動に対して貢献度の高い下腿三頭筋を対象とし、足底屈静的随意最大収縮 (MVC) における Ia 群線維の貢献 (研究 1)、および腓腹筋からヒラメ筋への Ia 群線維の投射が下腿三頭筋の活動パターンに及ぼす影響 (研究 2, 3) を検討することで、協働筋の

神経活動レベルの決定に Ia 群線維活動が担う役割を考察することを目的とした。

【研究 1】静的随意最大収縮における足底屈協働筋のガンマ環の貢献

MVC において、高閾値アルファ運動ニューロンの発火には、ガンマ線維と Ia 群線維からなる環状の回路(ガンマ環)が必要である(Hagbarth et al. 1986)。一方、筋や腱へ機械的振動刺激を長時間適用することで、Ia 群線維活動は低減することが知られており(Bongiovanni et al. 1990; Kouzaki et al. 2000)、この手法を用いることで随意筋力発揮へのガンマ環の貢献を調べることが可能となる。研究 1 では、アキレス腱へ長時間振動刺激を適用し、MVC へのガンマ環の貢献および、貢献度の協働筋間での相違を検討した。被検者は膝関節 0 度(完全伸展位)、足関節底屈背屈 0 度の座位姿勢をとり、足底屈 MVC トルク測定を行った。MVC 時の筋電図(EMG)を腓腹筋内側頭(MG)、腓腹筋外側頭(LG)、ヒラメ筋(SOL)より導出した。また、三筋の H 波最大振幅(Hmax)、M 波最大振幅(Mmax)の計測を行い、両値の比(H/Mmax)を算出した。その後、アキレス腱へ周波数 100Hz の振動刺激を 30 分間与えた。刺激後、再度 MVC ならびに H 波、M 波の計測を行った。結果、三筋の H/Mmax はほぼ均一に低下した(MG, $-34.0 \pm 8.2\%$; LG, $-38.6 \pm 8.4\%$; SOL, $-36.1 \pm 8.1\%$)。これは、本研究で採用した刺激法が、三筋の Ia 群線維活動を同程度低下させ得たことを示す。一方、MVC トルクは振動刺激後、 $189.3 (\pm 5.4) \text{ Nm}$ から $158.1 (\pm 8.3) \text{ Nm}$ と $-16.6 (\pm 3.7)\%$ 有意に低下したのに対し、MVC 時の EMG 平均振幅(mEMG)は、MG, LG のみ有意に低下し、SOL に変化はみられなかった。この結果は、振動刺激後の Ia 群線維活動の低下に伴い、高閾値アルファ運動ニューロンの動員が困難になり、相対的に高閾値アルファ運動ニューロンを多く有する MG, LG でその影響が顕著に現れたことを示唆する。以上より、本研究より得られた知見は、MVC においてガンマ環は高閾値アルファ運動ニューロンの動因に不可欠であるという Hagbarth et al. (1986) の仮説を支持し、その貢献度は SOL に比して MG, LG において高いことが示唆された。

【研究 2】腓腹筋の活動がヒラメ筋運動ニューロンプールの興奮性に与える影響

研究 1 では、MVC における各筋の Ia 群線維から同名筋運動ニューロンプールへの促通効果の貢献度を比較した。しかし、ヒトの腓腹筋と SOL との間には、Ia 群線維を介した抑制性の投射が存在することが報告されており(Gritti & Schieppati 1989)、研究 1 の結果をより詳細に議論するためには、協働筋間の相互作用についても検討する必要がある。そこで、研究 2 では、下腿三頭筋のうち腓腹筋のみが活動する静的随意膝屈曲運動を用い、腓腹筋の筋活動が SOL の運動ニューロンプールの興奮性に与える影響を検討した。被検者は、足関節を底屈背屈 0 度に固定した状態で、股関節角度 80 度、膝関節角度 50 度の座位姿勢をとった。膝屈曲 MVC の 0(安静時)、10、20、30% に相当するトルク発揮中に SOL の Hmax および Mmax を誘発し、トルクレベルごとに H/Mmax を算出した。その結果、トルクレベルの上昇に伴う MG, LG の筋活動レベルの増加とともに、SOL の H/Mmax は低下した(10%MVC, $-39.0 \pm 5.5\%$; 20%MVC, $-71.7 \pm 7.1\%$; 30%MVC, $-75.2 \pm 7.7\%$)。この結果は、ガンマ環の賦活に伴う腓腹筋の Ia 群線維活動が、単に同名筋の活動を強化するだけでなく、SOL の運動ニューロンプールにも抑制性的影響を与えることを示すものである。以上より、たとえ SOL の筋活動を伴わない運動条件下でも、SOL の運動ニューロンプールの興奮性は腓腹筋の活動によって調整されることが示唆された。

【研究3】腓腹筋の受動的な筋線維長変化がヒラメ筋運動ニューロンプールの興奮性に与える影響

研究2では、腓腹筋の活動に伴う Ia 群線維活動によって、SOL の運動ニューロンプールの興奮性は抑制されることが示された。しかし、運動課題が随意のものである以上、上位中枢からの指令による影響は無視できない。身体運動における協働筋間の情報伝達の意義をより詳細に議論するためには、上位中枢からの指令のない運動条件下で、腓腹筋の Ia 群線維活動が SOL の運動ニューロンプールの興奮性に及ぼす影響を検討する必要がある。そこで、研究3では、Ia 群線維が、ガンマ運動ニューロンからの入力が無くとも筋線維の長さ・速度変化によって活動すること(Proske et al. 2000)に着目し、受動的膝伸展・屈曲運動に伴う腓腹筋の筋線維長変化が SOL の運動ニューロンプールの興奮性に与える影響を検討した。被検者の姿勢は、研究2同様、足関節底屈背屈 0 度、股関節角度 80 度の座位であり、膝関節 10-30 度、30-50 度、50-70 度、70-90 度の 4 区間で 5 deg/sec での膝伸展および屈曲を行わせた。その間、膝関節 20, 40, 60, 80 度時に SOL より Hmax, Mmax を誘発し、H/Mmax を算出した。同時に、超音波 B モード法により、MG の筋線維長変化を実測した。また、腓腹筋の筋線維長そのものの影響も検討するために、膝関節 20, 40, 60, 80 度において、静止時の Hmax, Mmax ならびに筋線維長の計測も行った。結果、受動的屈曲時には、H/Mmax は MG の長さや速度の変化によらずほぼ一定の値を示した。一方、静止時ならびに受動的伸展時には、MG の筋線維長の増加に伴い H/Mmax は減少し、特に受動的伸展時においてその傾向は顕著であった。これらの結果は、1) 静止時ならびに膝伸展時には、腓腹筋の筋線維の伸長に伴う Ia 群線維活動は SOL の運動ニューロンプールに抑制性の入力をもたらし、特に速度の要因が含まれる受動的伸展時にはその程度が増すこと、2) 膝屈曲時には、腓腹筋の筋線維の短縮に伴って筋紡錘の感度が低下するため、SOL の運動ニューロンプールの興奮性には影響を及ぼさないこと、を示すものであり、腓腹筋の Ia 群線維からの投射により、腓腹筋のキネマティクスの変化が SOL 運動ニューロンプールの興奮性に影響することが示唆された。

【まとめ】

本研究はヒト下腿三頭筋を対象とし、協働筋の神経筋活動レベルの決定に Ia 群線維活動が担う役割を検討した。その結果、MVC における筋活動の強化には Ia 群線維活動が不可欠であり、協働筋間でこの貢献度が異なること(研究1)、腓腹筋から SOL への Ia 群線維の投射という下位のシステムにより、上位中枢からの運動指令によらず、協働筋の活動パターンが影響されること(研究2, 3)が示唆された。

運動に関与する複数の筋の活動パターンを調整することは、合目的な身体運動の形成に不可欠ではない。本研究より得られた知見は、協働筋各筋の Ia 群線維から同名筋あるいは異名筋の運動ニューロンプールへと結ばれる末梢感覚システムが、それぞれの筋の解剖学的特徴や生理学的特性を反映した活動パターンの形成・制御に必要不可欠なものであることを示すものといえる。