前腕筋および上腕筋への振動刺激が手関節と肘関節の同時運動に与える影響

関 博 之¹⁾ 与 那 正 栄²⁾ 内 藤 祐 子³⁾ 室 増 男⁴⁾

EFFECTS OF VIBRATION APPLIED ON FOREARM AND UPPER LIMB MUSCLES ON HUMAN VOLUNTARY MULTI-WRIST AND ELBOW MOVEMENTS

HIROYUKI SEKI, MASAE YONA, YUKO NAITO and MASUO MURO

Abstract

The effect of forearm and upper limb muscles vibration during extension and flexion movement of wrist and elbow was studied in 10 normal human subjects. In first experiment, a vibratory stimulation was applied to either the flexor carpi ulnaris (FCU) or the biceps brachii (BB) muscle during simple and simultaneous extension movement about wrist and elbow. In second experiment, vibratory stimulation was applied to either the extensor carpi radialis (ECR) or the triceps brachii (TB) muscle during simple and simultaneous flexion movement about wrist and elbow. The main new findings of the present study are as follows. During simple and simultaneous extension-flexion movements of the elbow, the application of vibration to the FCU or to the ECR produced an undershoot of the target position. However, no undershoot was observed by the application of vibration to the BB or the TB during simultaneous extension-flexion movements of the wrist. From these results, it was revealed that although there are cases where the phenomenon of undershoot resulting from vibration of the wrist and elbow during simple and simultaneous movements corresponds to the type of synaptic connection from muscle spindle group Ia sensory inputs to alpha motor neurons, as identified by Cavallari & Katz (1989) and Cavallari et al. (1992), the manifestation of undershoot is influenced by differences between the movement patterns of the wrist and elbow joints, as well as the differences between simple movement and simultaneous movement.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2011, 60 : 229~237)

Key words : motor control, muscle vibration, multi-movement, undershoot

I. 緒 言

目標位置に上肢を合わせる運動は、その運動に関係する筋が位置の感覚を手がかりに正確に遂行される。ヒトの肘関節運動中の拮抗筋に振動刺激を与えた研究結果では、上肢の運動は目標位置に対して過小運動が発生する^{1,2)}。この過小運動は筋振動刺激によって惹起する緊張性振動反射 (TVR)³⁾によるものとされ、それを引き起こす感覚入力は筋紡錘からの脊髄求心性入力であることが実証されてい

る^{4,5)}。ヒトにおける研究では、主に手および肘の単関節運動をモデルにした報告である^{6,7)}。実際のヒトの精巧な上肢運動は、手と肘関節運動の関連筋が連携して遂行される^{8,9)}。関ら¹⁰⁾は、手-肘関節の同時屈曲運動中に橈側手根伸筋に振動刺激を与えると、肘関節運動だけに過小運動が惹起することを明らかにした。しかし、手と肘の各々の単関節運動 (WR運動, EL運動) における位置と運動の感覚の役割は、手-肘関節の同時運動 (2関節同時運動, WR-EL運動) においても、同様な役割を持つのか

¹⁾ 東邦大学大学院医学研究科
〒143-8540 東京都大田区大森西5-21-16

²⁾ 東京薬科大学薬学部
〒192-0392 東京都八王子市堀之内1432-1

³⁾ 国士舘大学体育学部
〒206-8515 東京都多摩市永山7-3-1

⁴⁾ 東邦大学医学部
〒143-8540 東京都大田区大森西5-21-16

*Graduate School of Medicine, Toho University
5-21-16, Omori-nishi, Ota-ku, Tokyo, 143-8540, Japan
Tokyo University of Pharmacy and Life Science
1432-1, Horinouchi Hachioji City, Tokyo, 192-0392, Japan
Kokushikan University
7-3-1, Nagayama, Tama City, Tokyo, 206-8515, Japan
Toho University School of Medicine
5-21-16, Omori-nishi, Ota-ku, Tokyo, 143-8540, Japan*

は未だ詳細に明らかにされていない。その点を検討するために、先行研究において神経生理学的に同定されている脊髄神経回路（筋紡錘のGIIa感覚入力から α 運動神経細胞にシナプス結合する回路）を利用して、2関節同時運動に対する随意運動中の筋振動刺激における影響について調べた。研究に应用する脊髄神経回路は、post-stimulus time histogram法で同定されたものであり、前腕の伸筋と屈筋からGIIa入力が非相反的に上腕の伸筋に対して α 運動神経細胞（ α -MNs）にシナプス的に抑制し、上腕の屈筋に対して α -MNに単シナプス性に促通する¹¹⁾。また、上腕の伸筋と屈筋のGIIa入力が前腕の伸筋および屈筋に α -MNsのそれぞれ2シナプス性に抑制している¹²⁾。したがって、筋振動刺激の効果がGIIa入力に強く依存した現象として過小運動が惹起するならば、 α -MNへのGIIa入力の結合様式に依存してその現象（過小運動）が出現されるはずである。そこで本研究は、単関節運動における筋振動刺激の影響が、WR-EL運動において一致するかどうか検討するものである。

II. 方 法

A. 被験者

被験者は、神経疾患のない健常な右利き成人男子6名、女子4名（38.3 $\pm$ 13.5歳）であった。各被験者には研究開始前に本研究の目的ならびに測定事項を十分に説明し同意を得た上で、研究を行った。本研究は東邦大学医学部倫理委員会（承認番号21030）の承認を得た。

B. プロトコール

被験者の運動課題として、WR運動、EL運動およびWR-EL運動を行わせた。それぞれの運動課題について測定前にオシロスコープを用いて、自己ペースで目標角度に合わせる手関節角度と肘関節角度の視覚フィードバック練習を行わせ、本実験の運動課題に習熟させた。後日、同じ方法で運動課題を5回行わせ習熟度の均一をはかった直後に、被験者の前額面前方20cmをスクリーンでブラインドし、運動肢が見えない状態で5回の実験試行を行わせた。練習および実験試行はそれぞれ5回を1ブロックとし、1つの運動課題において2ブロックを行わせ、10試行をデータとした。また、運動課題の順序

はランダムとした。測定中に疲労、振動刺激による影響が生じないように1ブロックごとに2分の休息と課題条件間に3分の休息を挟んで行った。また、運動課題の半分の3課題が終了後に30分の休息を取った。

筋振動刺激は振動刺激装置（TMT-18, 平和電子製）を使用し、それぞれの筋の起始部と停止部を結んだ中央部分の筋腹上に、筋の走行に沿って円筒形のバイブレーター（長さ7cm, 直径3cm）をベルトで装着し、運動開始から目標角度到達までの間、振動周波数100Hz, 振幅0.7mmの振動刺激を与えた。手および肘関節の動きはゴニオメータ（型番6639S-1-202, Bourns社製, USA）から導出し、その信号はサンプリング周波数1kHzでコンピュータ信号解析装置（Power Lab SP8064, AD Instruments, Australia）に記録した。その記録より、運動誤差を目標角度40°に対する誤差として算出した。得られた運動誤差値は目標運動角度40°を基準の0%として、コントロール時および振動刺激時の運動誤差をそれとの割合で算出した。また、コントロール時の誤差を基準として、運動角度が小さくなると過小運動（undershoot(-)）、大きくなると過大運動（overshoot(+)）とした。次に、WR-EL運動における手関節運動（WR運動）と肘関節運動（EL運動）の運動開始時間（Movement onset time, MOT）差と順序性を検討するために、手関節運動の開始時点（ゴニオメータの動きのonset）を基準として、肘関節運動開始時点との時間差を算出した。

C. 運動課題

1. 伸展運動課題

被験者を実験装置の背もたれに、背部を密着させ体幹の動きを固定し座らせ、肩関節はリラックスした肢位で前腕中間位を保たせた（図1）。振動刺激の影響を脊髄神経回路の機能から検討するために、 α -MNsへの筋紡錘GIIa感覚入力の結合様式に対応させた運動課題を6課題設定した。筋振動刺激は手と肘関節の伸展または屈曲運動において伸張されるそれぞれの拮抗筋に与え、筋紡錘からの感覚入力を同定されている α -MNsに収束させた。すべての運動課題は右手で行わせた。また、目標運動角度は40°に設定し、自己ペースで運動を行わせた。運動課題は手と肘関節それぞれの単関節運動課題（WR

Fig. 1 A schematic presentation of the experimental setup and the motor task.

運動、EL運動）とWR-EL運動を行わせた。

被験者への伸展運動課題は3課題行わせた。1課題目は目標角度に手関節だけで運動肢を合わせる手関節伸展運動（WR_E運動）を行わせた。課題条件は、筋振動刺激を与えないコントロール試行、WR_E運動の拮抗筋の尺側手根屈筋（FCU）に振動刺激を与えた試行、肘関節伸展運動（EL_E運動）の拮抗筋の上腕二頭筋（BB）に振動刺激を与えた試行である。2課題目は目標角度に肘関節だけで運動肢を合わせるEL_E運動を行わせた。課題条件は、筋振動刺

激を与えないコントロール試行、BBに振動刺激を与えた試行、FCUに振動刺激を与えた試行である。3課題目は目標角度に手関節と肘関節の2関節を同時に伸展させて運動肢を合わせるWR-EL_E運動を行わせた。課題条件は、筋振動刺激を与えないコントロール試行、FCUに振動刺激を与えた試行、BBに振動刺激を与えた試行である。

2. 屈曲運動課題

次に、4課題目は目標角度に手関節だけで運動肢を合わせる手関節屈曲運動（WR_F運動）を行わせ

た. 課題条件は, 筋振動刺激を与えないコントロール試行, WR_F 運動の拮抗筋の橈側手根伸筋 (ECR) に振動刺激を与えた試行, 肘関節屈曲運動 (EL_F 運動) の拮抗筋の上腕三頭筋 (TB) に振動刺激を与えた試行である. 5 課題目は目標角度に肘関節だけで運動肢を合わせる EL_F 運動を行わせた. 課題条件は, 筋振動刺激を与えないコントロール試行, TB に振動刺激を与えた試行, ECR に振動刺激を与えた試行である. 6 課題目は目標角度に手関節と肘関節の 2 関節を同時に屈曲させて運動肢を合わせる手-肘同時屈曲運動 ($WR-EL_F$ 運動) を行わせた. 課題条件は, 筋振動刺激を与えないコントロール試行, ECR に振動刺激を与えた試行, TB に振動刺激を与えた試行である.

D. 統計処理

各課題における運動誤差値および $WR-EL$ 運動における WR 運動と EL 運動の開始時点の時間差については平均値 $\pm$ 標準偏差で示した. それぞれの測定値の比較には, 繰り返しのあ一元配置分散分析および Bonferroni/Dunn 法による多重比較を実施した. また, WR 運動と EL 運動における, 単関節運動時と同時運動時での運動誤差値の比較には対応のある t 検定を実施した. 有意水準はすべて危

険率 5%未満とした. 統計処理には統計ソフト Stat View 5.0 software (Stat View, SAS Institute Inc., USA) を使用した.

Ⅲ. 結 果

A. 伸展運動課題

図2 (WR angle) は, WR_E 運動および $WR-EL_E$ 運動における手関節の運動誤差値を示した. WR_E 運動の運動誤差は, コントロール, FCU の振動刺激, BB の振動刺激間において有意差が認められた ($F(2, 27)=95.245$, $p<0.0001$). 多重比較の結果, コントロール時に対して FCU の振動刺激で有意差が認められた ($p<0.0001$). 次に, $WR-EL_E$ 運動の運動誤差は, コントロール, FCU の振動刺激, BB の振動刺激間において有意差が認められた ($F(2, 27)=112.360$, $p<0.0001$). 多重比較の結果, コントロール時に対して FCU の振動刺激で有意差が認められた ($p<0.0001$).

図2 (EL angle) は, EL_E 運動および $WR-EL_E$ 運動における肘関節の運動誤差値を示した. EL_E 運動の運動誤差は, コントロール, FCU の振動刺激, BB の振動刺激間において有意差が認められた ($F(2, 27)=74.534$, $p<0.0001$). 多重比較の結果, コントロール時に対して FCU および BB の振動刺激で

Fig. 2 Movement errors of the simple and multi-extension movements. Effects of varying amplitude of the movement errors (%) under the self-paced simple and multi-extension movements. Means and S.D.s ($n=10$) shows undershoot or overshoot under the control (non-vibration) and vibration (FCU and BB). Significant difference, $**P<0.0001$: vs. control, $*†P<0.01$: simple movement vs. multi-movement.

有意差が認められた ($p<0.0001$). 次に, $WR-EL_E$ 運動の運動誤差は, コントロール, FCUの振動刺激, BBの振動刺激間において有意差が認められた ($F(2, 27)=158.991, p<0.0001$). 多重比較の結果, コントロール時に対してFCUおよびBBの振動刺激で有意差が認められた ($p<0.0001$).

次に, 振動刺激 (FCUまたはBB) による手関節と肘関節運動の運動誤差値について, 単関節運動課題と同時運動課題間でその大きさを比較すると, 手関節の運動誤差は両運動課題間で有意差が認められなかった. 一方, 肘関節の運動誤差の大きさは, FCUおよびBBの振動刺激で同時運動すると有意に増加した ($p<0.01$).

B. 屈曲運動課題

図3 (WR angle) は, WR_F 運動および $WR-EL_F$ 運動における手関節の運動誤差値を示した. WR_F 運動の運動誤差は, コントロール, ECRの振動刺激, TBの振動刺激間において有意差が認められた ($F(2, 27)=62.542, p<0.0001$). 多重比較の結果, コントロールに対してECRの振動刺激で有意差が認められた ($p<0.0001$). 次に, $WR-EL_F$ 運動の運動誤差は, コントロール, ECRの振動刺激, TBの振動刺激間において有意差が認められなかった.

図3 (EL angle) は, EL_F 運動および $WR-EL_F$ 運動における肘関節の運動誤差値を示した. EL_F 運動の運動誤差は, コントロール, ECRの振動刺激, TBの振動刺激間において有意差が認められた ($F(2, 27)=148.426, p<0.0001$). 多重比較の結果, コントロールに対してECRおよびTBの振動刺激で有意差が認められた ($p<0.0001$). 次に, $WR-EL_F$ 運動の運動誤差は, コントロール, ECRの振動刺激, TBの振動刺激間において有意差が認められた ($F(2, 27)=112.824, p<0.0001$). 多重比較の結果, コントロールに対してECRおよびTBの振動刺激で有意差が認められた ($p<0.0001$).

次に, 振動刺激 (ECRまたはTB) による手関節と肘関節運動の運動誤差値について, 単関節運動課題と同時運動課題間でその大きさを比較した. 同時運動によって手関節の運動誤差は, ECRの振動刺激で有意に減少するが ($p<0.001$), TBの振動刺激では両運動課題間で有意差は認められなかった. 一方, 肘関節の運動誤差の大きさは, ECRおよびTBの振動刺激で同時運動時に有意に増加した (ECR: $p<0.001$, TB: $p<0.01$).

C. 手-肘関節運動の開始遅延

図4は, $WR-EL_E$ 運動および $WR-EL_F$ 運動おけ

Fig. 3 Movement errors of the simple and multi-flexion movements.

Effects of varying amplitude of the movement errors (%) under the self-paced simple and multi-flexion movements. Means and S.D.s ($n=10$) shows undershoot or overshoot under the control (non-vibration) and vibration (ECR and TB). Significant difference, *** $P<0.0001$; vs. control, * $P<0.01$, ** $P<0.001$; simple movement vs. multi-movement.

Fig. 4 Movement onset time (MOT) of the multi-extension and flexion movements. Effects of varying MOT (ms) under the self-paced multi-extension (WR-EL_E) and flexion (WR-EL_F) movements. Means and S.D.s (n=10) shows MOT under the control (non-vibration) and vibration (FCU, BB, ECR and TB). Significant difference, *P<0.001, **P<0.0001: vs. control, *†P<0.001: vib (FCU) vs. vib (BB).

るWR運動とEL運動開始の順序性について、WR運動の開始時点とEL運動の開始時点との時間差(MOT差)を示した。縦軸の0ms時点はWR運動とEL運動が同時に開始した時点、正(+)の方向はWR運動が先行して開始し、負(-)の方向はEL運動が先行して開始したことを示す。WR-EL_E運動のMOT差は、コントロール、FCUの振動刺激、BBの振動刺激間において有意差が認められた($F(2, 27)=68.532$, $P<0.0001$)。多重比較の結果、MOT差はコントロールに対してFCUおよびBBの振動刺激で有意差が認められ、振動刺激時にELの運動開始がWRの運動開始に先行していた($p<0.001$)。また、FCUとBBの振動刺激時のMOT差は、両間に有意差が認められ、BBの振動刺激時にELの運動開始が先行していた($p<0.001$)。一方、WR-EL_F運動におけるMOT差は、コントロール、ECRの振動刺激、TBの振動刺激間に有意差が認められた($F(2, 27)=279.328$, $P<0.0001$)。多重比較の結果、MOT差は、コントロールに対して、ECRおよびTBの振動刺激で有意差が認められ、振動刺激時にELの運動開始がWRの運動開始に先行していた($p<0.0001$)。

IV. 考 察

本研究は、神経生理学的に同定されている脊髄

GIa入力回路^{11,12)}から、単関節と2関節同時運動に対する筋振動刺激の運動誤差の発現機構について調べた。

A. 手および肘関節の単関節運動課題

単関節運動課題におけるWR_E運動、WR_F運動、EL_E運動およびEL_F運動では、それぞれの拮抗筋(FCU, ECR, BB, TB)に振動刺激を与えると過小運動誤差が生じた。この結果は先行研究結果と一致した^{6,7)}。これは従来から支持されている発現機構に照らし合わせると、GIa投射による錯覚誤差に起因しているものと考えられる^{4,5)}。しかし、単関節運動課題でも、別の関節運動に係る拮抗筋に振動刺激を付加すると、WR運動とEL運動の運動誤差は異なる結果を示した。本研究結果では、WR_E運動とWR_F運動の両課題における上腕の拮抗筋(BB, TB)への振動刺激で、過小運動誤差が出現しなかった。この結果は、先行研究で示された上腕の伸筋と屈筋のGIa入力、前腕の伸筋および屈筋の α -MNsにそれぞれシナプス抑制結合する¹²⁾脊髄神経回路に対応して、過小運動誤差を示すと考えられるが、本実験では示されなかった。

一方、EL_E運動とEL_F運動の両課題において、前腕の拮抗筋(FCU, ECR)への振動刺激は、有意に過小運動誤差を出現した。EL_E運動の結果は、同

定されているGIIa入力¹¹⁾に依存して、前腕屈筋FCUからGIIa入力为上腕の伸筋 α -MNsにシナプス性抑制の結合が関係しているものと考えられる。しかし、EL_F運動の結果は、GIIa入力¹¹⁾に依存して運動誤差が生じるとすれば、前腕伸筋ECRからGIIa入力为上腕の屈筋 α -MNsに単シナプス性に促進により、過大運動誤差が惹起すると考えられる。しかし、結果は反対で、過小運動誤差が出現した。本実験において、運動誤差の発生は手関節運動に発生しにくく、肘関節運動には発生し易い結果が示され、手と肘の差異は手指運動における精細な運動制御機構が係っているものと考えられる。

B. 手-肘関節同時運動課題

WR-EL_E運動における手関節と肘関節の運動誤差は、それぞれの拮抗筋（FCUまたはBB）に振動刺激を与えた時に顕著な過小運動誤差を示した。また、WR-EL_F運動における肘関節運動誤差はその拮抗筋（TB）に振動刺激を与えると同様に有意な過小運動誤差を示した。これらの結果から、単関節運動と2関節同時運動という質的に異なる運動課題であっても、筋振動刺激による単関節運動の主動筋と拮抗筋間の運動制御は、GIIa入力刺激筋の α -MNsにシナプス結合しているもので、過小運動誤差の出現に違いがないと推察される。しかし、WR-EL_F運動における手関節運動時にその運動の拮抗筋（ECR）に振動刺激を与えても過小運動誤差を示さなかった。

また、同時運動課題において別の関節運動に係る拮抗筋の振動刺激では、WR運動とEL運動における運動誤差は異なる結果を示した。すなわち、WR_E運動およびWR-EL_E運動における手関節の伸展運動誤差は、BBに振動刺激を与えると両運動ともに過小運動誤差を示さなかった。同様にWR_F運動およびWR-EL_F運動における手関節の屈曲運動誤差は、TBに振動刺激を与えても両運動とも過小運動誤差を示さなかった。これらの結果は上腕の伸筋と屈筋のGIIa入力前腕の伸筋および屈筋の α -MNsにそれぞれシナプス性抑制結合する¹²⁾脊髄神経回路に対応して、過小運動誤差を出現させると考えられる。しかし、単関節運動または同時関節運動（伸展および屈曲運動）の両運動課題において、正確な運動が行われていた。このことは、従来の報告にある運動制御機構からでは解釈できず、手関節運動と肘

関節運動の特異的運動制御機構の存在を示唆するものである。

一方、EL_E運動およびWR-EL_E運動における肘関節の伸展運動誤差は、FCUに振動刺激を与えると両運動とも過小運動誤差が惹起した。この結果はGIIa入力¹¹⁾に依存して、前腕の屈筋FCUからGIIa入力为上腕の伸筋 α -MNsにシナプス性抑制の結合が関係しているものと考えられる。同様にEL_F運動およびWR-EL_F運動における肘関節の屈曲運動誤差は、ECRに振動刺激を与えると両運動とも過小運動誤差を示した。これは従来の報告と異なる運動制御機構の関与が考えられ、手関節運動と肘関節運動の特異的運動制御機構の存在を示唆している。もしGIIa入力¹¹⁾に依存して運動誤差が生じるとすれば、前腕の伸筋ECRからのGIIa入力为上腕の屈筋 α -MNsに単シナプス性に促進して、より過大運動誤差が惹起すると考えられる。しかし、本実験のEL運動では、GIIa入力に依存しない過小運動誤差が認められた。先行研究において、手と肘関節運動に係る筋の制御機能が異なっており、手関節運動は運動の正確性に依存した制御を行っていると考えられる⁸⁾。本実験において、運動誤差の発生は手関節に発生しにくく、肘関節には発生し易い結果であった。Dounskaïら⁸⁾の手関節と肘関節運動制御機能が異なる報告に照らして、手と肘の差異は手指運動における精細な運動制御機構が係っているものと思われる。すなわち、過小運動誤差の発生には筋振動刺激によるGIIa入力の作用だけが係っているだけではなく、WR運動とEL運動の精細な運動制御の違いによって過小運動誤差の出現が修飾されていると考えられる。それを裏付ける結果として、EL運動における振動刺激の過小運動誤差は、同時運動時に有意に増加していた。この結果は、同時運動課題の制御機構が単関節運動とは異なっていることを示し、過小運動誤差の大きさの違いに現れたと考えられる。さらにこれらの結果に関連して、同時運動におけるMOT差がそれぞれで異なっている。筋振動刺激を与えない運動課題では、手関節のMOTが肘関節のそれに先行しているのに対して、振動刺激を与えると肘関節運動のMOTが先行する。このMOT順序の逆転は、手と肘関節の筋群間の共同活動における運動制御が筋振動刺激に影響され、その結果として過小運動誤差の変化に現れたものと考えられる。

このMOT差は正確な多関節の図形描写運動に重要な働きを持っていると考えられる。Verschuere et al.¹³⁾は、ペンで円を描く多関節運動課題を用いて、その運動に関わる上腕二頭筋と三角筋前部に振動刺激を与えながらその課題を行わせた。それによると、手、肘、肩関節の協調した運動として描かれた円軌跡に変化が惹起することを明らかにし、正確に円を描くためのそれぞれの関節の動きの係わりの重要性を示唆している。また、手-肘同時屈曲運動の正確な制御がなされる時にも、手と肘関節の主動筋と拮抗筋間の円滑な相反的制御だけではなく、三角筋との共同活動の重要性も示されている⁹⁾。これらの報告は本実験結果で見られたMOT差の出現に関係していることが考えられる。さらに先行研究では、ヒトにおける運動錯覚の速さと一次運動野(M1)および角回(angular gyrus)の活動レベルの関係について報告している¹⁴⁾。それによると、筋振動刺激が開始された400msまでの遅い錯覚と比較して速い錯覚では一次運動野の活動レベルが高くなる。しかし、角回の活動は、遅い錯覚と速い錯覚において同じであることが示されている。この報告は、本実験におけるMOT差がすべて400ms以内の変化にとどまっていることから、一次運動野の影響に何らかの関係を持っていることが考えられる。

一方、振動刺激時におけるWR運動、EL運動や2関節同時運動を遂行している時の脳局在性活動状態を明らかにした研究報告がある。NaitoとEhrsson¹⁵⁾によれば、PETやfMRIを用いて、本研究と同様な課題で研究を行っている。右手関節の伸筋の腱に振動刺激を与え、手関節の屈曲運動錯覚を惹起させた時に、反対側(左大脳皮質)の脳局在部位の活動レベルは、一次運動野、体性感覚野、運動前野、帯状回運動皮質、補足運動野で賦活することを確認している。さらに反対側の賦活状態以外に、同側(右大脳皮質)の8野、2野、縁上回、44野、45野、島にも賦活することを示した。そしてとくに右大脳皮質の2野が左右両肢の運動錯覚時に顕著な賦活を示したことから、四肢の知覚に関与する上位領域であることを示唆している¹⁶⁾。これらの報告も筋振動刺激に対する脳局在部位の活動レベルの違いを示していると考えられる。すなわち運動制御における運動感覚の役割は手関節運動と肘関節運動で異なることを想定させる。最後に、本実験課題の2関節同時運

動において、その運動制御に関連する脳領域は複数存在していると考えられるが、本実験のそれぞれの結果がどのように関係するかは、今後詳細に検討する必要がある。

V. ま と め

本研究は、同定されている脊髄神経回路を利用して、単関節運動における筋振動刺激の影響が、2関節同時運動において一致するかどうかを検討した。本研究で得られた主な結果をまとめると以下のようになる。

- 1) WR-EL_E運動における手関節と肘関節の運動誤差は、それぞれの拮抗筋(FCU, BB)に振動刺激を与えた時に有意な過小運動誤差を示した。また、WR-EL_F運動における肘関節運動誤差は、その拮抗筋(TB)に振動刺激を与えると有意な過小運動誤差を示したが、手関節運動誤差は、その運動の拮抗筋(ECR)への筋振動刺激を付加した時には運動誤差は変化しなかった。
- 2) WR_E運動およびWR-EL_E運動における手関節の伸展運動誤差は、BBへの振動刺激を付加した時には両運動とも運動誤差は変化しなかった。同様にWR_F運動およびWR-EL_F運動においても手関節の屈曲運動誤差は、TBへの振動刺激を付加した時には両運動とも運動誤差は変化しなかった。一方、EL_E運動およびWR-EL_E運動における肘関節の伸展運動誤差は、FCUに振動刺激を与えると両運動とも有意な過小運動誤差を示した。同様にEL_F運動およびWR-EL_F運動における肘関節の屈曲運動誤差は、ECRに振動刺激を与えると両運動とも有意な過小運動誤差を示した。
- 3) 筋振動刺激を与えた時の肘関節運動(伸展および屈曲)の運動誤差値は、単関節運動課題と比較して同時運動課題においてその大きさが有意に増加した。

(受理日 平成23年2月7日)

参 考 文 献

- 1) Eklund G. Position sense and state of contraction; the effects of vibration. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 35: 606-611, 1972.
- 2) Goodwin GM, McCloskey DM, and Matthews PBC. The contribution of muscle afferents to kinesthesia shown by vibration induced illusions of movement

- and by the effects of paralyzing joint afferents. *Brain*, 95: 705-748, 1972.
- 3) Hagbarth KE, and Eklund G. Motor effects of vibratory muscle stimulation in man. In: R Granit (Ed.), muscular afferents and motor control. Stockholm, Sweden: Almqvist & Wiksell, 1966, PP. 177-186.
 - 4) Roll JP, and Vedel JP. Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studies by tendon vibration and microneurography. *Exp Brain Res*, 47: 177-190, 1982.
 - 5) Roll JP, Vedel JP, and Ribot E. Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. *Exp Brain Res*, 76: 213-222, 1989.
 - 6) Cody FWJ, Schwartz MP, and Smith GP. Proprioceptive guidance of human voluntary wrist movements studies using muscle vibration. *J Physiol*, 427: 455-470, 1990.
 - 7) Inglis JT, Frank JS, and Inglis B. The effect of muscle vibration on human position sense during movements controlled by lengthening muscle contraction. *Exp Brain Res*, 84: 631-634, 1991.
 - 8) Dounskaia NV, Swinnen SP, Walter CB, Spaepen AJ, and Verschueren SMP. Hierarchical control of different elbow-wrist coordination patterns. *Exp Brain Res*, 121: 239-254, 1998.
 - 9) Seki H, Yona M, Tadano C, Tajima T, Shimose R, Naito Y, and Muro M. Effect of agonist and antagonist EMG activity during simultaneous movements of elbow and wrist. *13th ECSS Book of Abstracts*, 415, 2008.
 - 10) 関博之, 与那正栄, 只野千茅, 田島多恵子, 下瀬良太, 重田枝里子, 内藤祐子, 室増男, 筋振動刺激時の手・肘関節同時運動の制御, *Health Behav Sci*, 7: 19-24, 2009.
 - 11) Cavallari P. and Kats R. Pattern of projections of group I afferents from forearm muscles to motoneurons supplying biceps and triceps muscles in man. *Exp Brain Res*, 78: 465-478, 1989.
 - 12) Cavallari P, Kats R, and Penicaud A. Pattern of projections of group I afferents from elbow muscles to motoneurons supplying wrist muscles in man. *Exp Brain Res*, 91: 311-319, 1992.
 - 13) Verschueren SM, Swinnen SP, Cordo PJ, and Dounskaia NV. Proprioceptive control of multijoint movement: unimanual circle drawing. *Exp Brain Res*, 127: 171-181, 1999.
 - 14) Casini L, Roll, JP, and Romaiquere P. Relationship between the velocity of illusory hand movement and strength of MEG signals in human primary motor cortex and left angular gyrus. *Exp Brain Res*, 186, 349-353, 2008.
 - 15) Naito E, and Ehrsson HH. Kinesthetic illusion of wrist movement activates motor-related areas. *Neuroreport* 12: 3805-3809, 2001.
 - 16) Naito E, Roland PE, Grefkes C, Choi HJ, Eickhoff S, Geyer S, Zilles K, and Ehrsson HH. Dominance of the right hemisphere and role of area 2 in human kinesthesia. *J Neurophysiol* 93: 1020-1034, 2005.