

上腕の運動方向の違いが三角筋の筋放電 パターンに及ぼす影響

川西 正行*・笠井 達哉**・矢作 晋***

Effects of Different Directions of Arm Movement on EMG Discharge
Patterns of Deltoid Muscle

Masayuki Kawanishi, Tatsuya Kasai and Susumu Yahagi

Abstract

The present study was undertaken to investigate the direction-sensitivity of the arm control system using an appropriately modified version of the shoulder flexion movement. The results indicated that small initial shoulder abduction angles were associated with longer agonist (anterior deltoid muscle) EMG durations. Moreover, as initial shoulder abduction angles became smaller, EMG onsets of the antagonist (posterior deltoid muscle) occurred nearer to those of the agonist. Modulations of duration of the agonist EMG burst can be explained by changes in movement amplitudes. With regard to modification of time difference between agonist and antagonist, the interpretation concerns the changing role of the antagonist to a synergist dependent on decreased initial shoulder abduction angles. Based on the present findings, it is suggested that shoulder abduction angles are an important determinant of agonist-antagonist muscle activity of deltoid during flexion of the shoulder.

Key word: deltoid muscle, agonist-antagonist activity, shoulder abduction angle, shoulder flexion movement

はじめに

われわれの行う随意運動（特に四肢の運動）は、運動を遂行する様々な要因（環境条件）に規定され、その条件に相応して運動プログラムを多様に変容させながら遂行されている。特に、随意運動を遂行する上で最も重要な要因である運動の大きさ、運動の速さ、そして運動の方向は、関与する筋の組合せや筋収縮パターンを変容させた結果として発現する。これまでに、運動の大きさと運動の速さに関しては特に単関節運動をモデルに、主動筋と拮抗筋の関与の仕方についてある程度明らかにされてきた（Latash, 1993）。しかしながら、運動の方向の違いが主動筋と拮抗筋の組み合わせにどのように依存して発現するかについては未だ不明な点が多い。

そこで、本研究では運動の方向をある程度自由に変えることができる上腕の運動（肩関節の運動）に着目した。上腕の運動に関与する肩関節は、可動範囲が単関節に比べて大きい。したがって、上腕の運動はその方向性が多様であり、その神経生理学的機序は単関節の運動に比べ

* 広島文教女子大学, ** 広島大学, *** 広島修道大学

て複雑なものと考えられる。この上腕での運動で中心的に働く筋は三角筋である。上肢挙上動作に参与する三角筋の活動は、次のような3つの典型的なパターンにおいて特徴的に発揮される。それは、肩関節屈曲（前方挙上）運動では、三角筋の前部が、肩関節外転（側方挙上）運動では、三角筋の中部が、肩関節伸展（後方挙上）運動では、三角筋の後部が中心的な役割を担うことである。

上腕の運動に伴う三角筋の筋放電パターンに関する報告は、手首の関節や肘関節のような単関節の報告に比べて極めて少ない。その中で、Pantaleoら（1988）は、運動の方向を一定にした場合に運動の速さや大きさによって三角筋の筋放電が単関節と同様の変化を示すことを報告している。また、奈良ら（1990）は、同じ上腕の屈曲運動で、動作開始前の肩関節角度の違いによって筋放電パターンが変化することを報告している。それでは、上腕の運動方向の違いに依存して、筋放電パターンはどのような修飾を受けるのであろうか。本報告は、この点について検討したものである。

方 法

1. 実験1：上肢挙上動作に関係する筋の放電パターン

被験者は健康な成人男子3名であった。なお、彼らには数回の練習を行わせ、運動課題に慣れさせた後実験を開始した。運動課題は、単純反応動作課題下での上肢挙上動作であった。被験者は椅子に腰掛け、肘関節完全伸展位、手関節0度、肩関節0度の状態から、予告刺激後に呈示される反応刺激に対し、肩関節90度外転、肩関節屈曲（水平屈曲方向30度）、および肩関節伸展（水平伸展方向30度）の3方向のいずれかに素早く反応し、ターゲットに合わせて静止するよう教示された。各方向とも20～40試行を行い、その結果を解析の対象とした。

筋電図は、肩関節の運動に対して主動筋として働く三角筋前部（Anterior Deltoid: AD）、三角筋中部（Middle Deltoid: MD）および三角筋後部（Posterior Deltoid: PD）と、肩関節の運動に対して協働筋として働く体幹筋として、棘下筋（Infraspinatus: IS）、大胸筋（Pectoralis Major: PM）および広背筋（Latissimus Dorsi: LD）から導出した。各筋から導出した筋電図は、双極表面電極法により、時定数0.03秒、ハイカット・フィルター3kHzで、生体増幅器（日本電気三栄製、1253A）により増幅し、A/D変換ボードを通して記録した。さらに、運動の速さを確認するために、加速度計を指先に装着した。筋電図と加速度計の記録は、サンプリング周波数5kHzでA/D変換し、PC-9801VX（NEC製）で画像表示した。

2. 実験2：運動方向の違いによる前方挙上動作の筋放電パターン

被験者は平均年齢28.3歳の健康な成人男子10名であった。運動課題は、実験1と同様単純反応動作課題下での上肢挙上動作であった。ただし、本実験では、肩関節屈曲、すなわち前方挙上動作だけを実施した。被験者は椅子に腰掛け、肘関節完全伸展位、手関節0度の状態で、肩関節を30度外転の位置から15度ずつ5段階、すなわち、30度、45度、60度、75度および90度の外転位置に変化させ（準備期の肩関節角度の変化）、それぞれの位置からターゲットに向かって急速反応運動を行った。ターゲットは、各被験者の肩関節水平屈曲方向30度にセットした（図1参照）。被験者は予告刺激後に呈示される反応刺激に対して素早く反応し、ターゲットに合わせて静止するよう教示された。各被験者とも各肩関節外転角度毎に10試行を行った。筋電図および加速度の記録は実験1と同様であった。また分析は、画像表示された記録より、AD、MD、PDの第一放電と第二放電の開始時点および第一放電の消失時点を計測し、各筋の潜時、

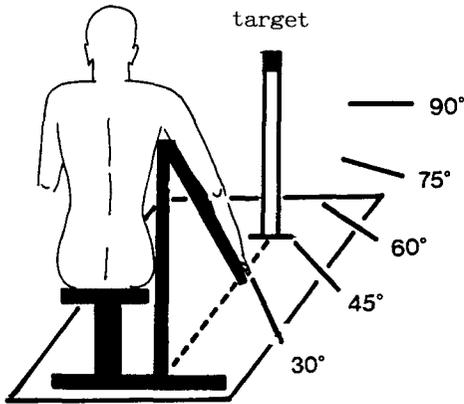


図1. 肩関節屈曲動作の模式図。各角度は肩関節外転の角度を示す。

第一放電持続時間および筋放電量を計測した。

結 果

1. 上肢挙上動作における三角筋の筋放電パターン

単純反応課題における上肢挙上動作において、どのような筋がどのように関わって運動が発現されるかを明らかにするために、三角筋の3部位と上肢挙上動作の遂行に関わる体幹筋の3部位の筋電図を記録した。しかし、体幹筋の筋電図はいずれもさほど大きな変化は認められず、奈良ら(1990)の報告と同様の結果であった。図2は、三角筋の3部位、棘下筋および加速度計の典型的な記録例を示したものである。三角筋の3部位と棘下筋の間では、拮抗筋活動と思われるような著しい筋放電は観察されなかった。また、主動筋である三角筋の3部位とも各方向に対して特徴的な放電はみられなかった。しかし、Cの肩関節伸展運動(水平伸展方向30度)の場合に、他の運動方向に比べて三角筋前部の筋放電が小さくなった(図2の白丸印)。その他の特徴では、主動筋である三角筋の3部位とも第二筋放電が顕著であった(図2の黒丸印)。

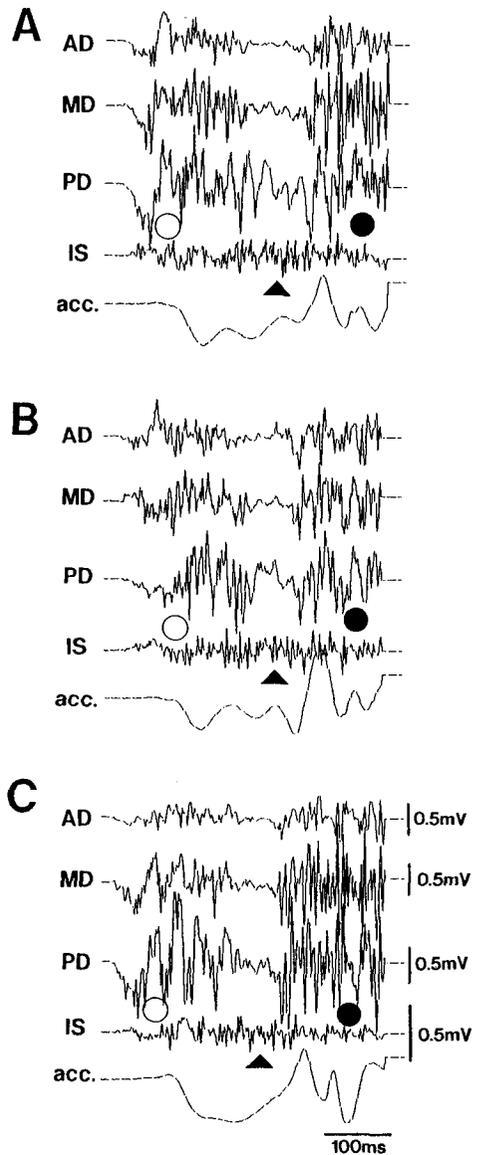


図2. 3方向への上肢挙上動作時の代表的な筋電図の記録例。Aが肩関節屈曲運動(水平屈曲方向30度)で、Bが肩関節外転運動で、Cが肩関節伸展運動(水平伸展方向30度)である。図中のADは三角筋前部、MDは三角筋中部、PDは三角筋後部、ISは棘下筋、acc.は加速度計の記録である。図中の白丸印は拮抗筋と考えられるPDに大きな違いがないことを示している。図中の黒丸印は、三角筋の3部位ともに第二放電が顕著なことを示している。図中の黒三角印は体幹筋の1つである棘下筋がどの方向に対しても変化していないことを示している。

2. 運動方向の違いによる肩関節屈曲動作の筋放電パターン

図3は、2つの異なった方向への肩関節屈曲運動における代表的な筋電図記録である。この記録例から、三角筋後部が運動方向の違いにより時間的な変化を示した(図3の黒三角印)。このことから、肩関節屈曲動作においては、三角筋前部が主動筋として働き、三角筋後部が拮抗筋として働くことがわかった。また、肩関節外転角度を変えたにも関わらず、体幹筋である大胸筋と棘下筋には大きな違いは観察されなかった。この事実から、運動開始前の肩関節外転角度の変化は、肩関節屈曲運動に関与する体幹筋の関与の仕方には大きな影響を与えないことがわかった。以上のことから、肩関節屈曲運動の方向性の違いが、主動筋および拮抗筋の活動にどのような変化をもたらすかを明らかにするために、本研究では、特に三角筋前部と後部に

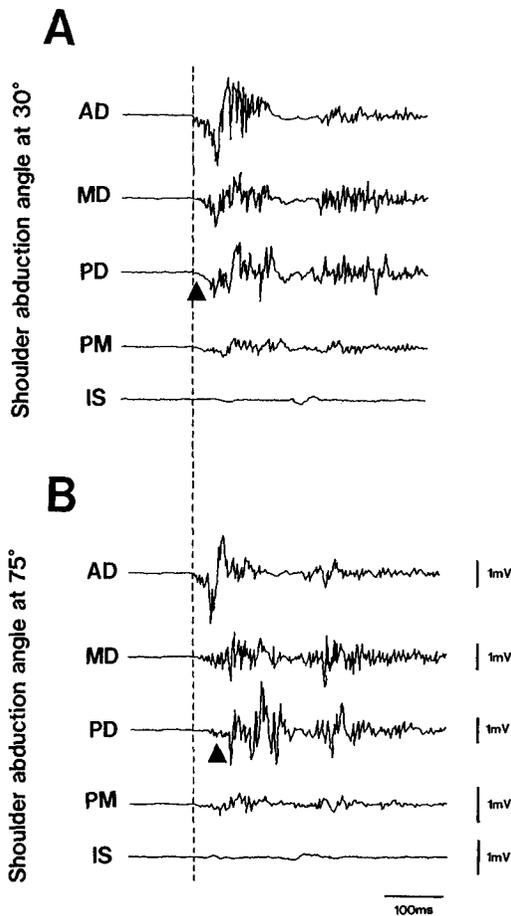


図3. 2方向への肩関節屈曲運動時の代表的な筋電図の記録例。動作開始の位置がAは肩関節外転角度30度で、Bは肩関節外転角度75度である。縦の点線は、肩関節外転角度30度と75度での肩関節屈曲運動の主動筋であるADの筋放電開始時点を示す。両者ともに上から順にAD, MD, PD, PM(大胸筋)およびISの筋電図である。図中の黒三角印は、PDの筋放電開始時点を示しており、肩関節角度の違いによりPDの筋放電開始時点が変化したことを示している。体幹筋であるPMとISには、肩関節角度の違いによる変化はみられなかった。

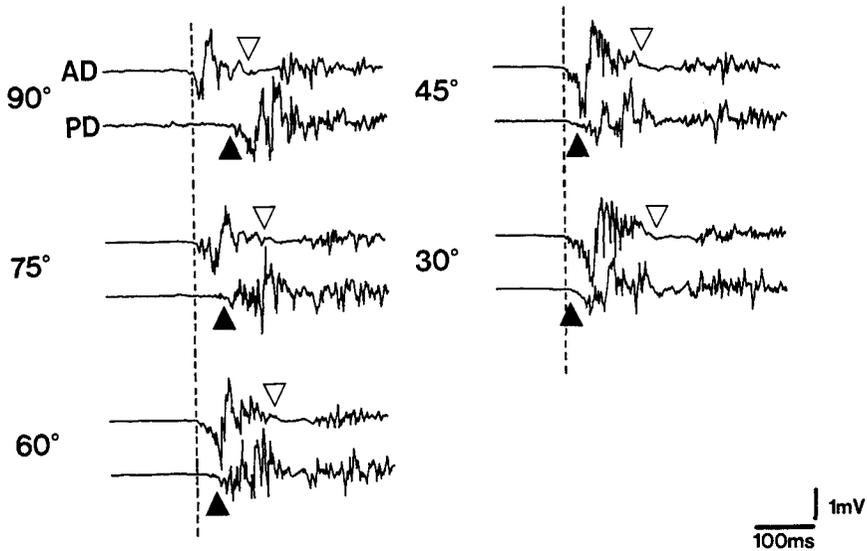


図4. 5段階の肩関節外転角度毎にADとPDの代表的な筋放電パターンを表した記録例。図中の白三角印はADの第一放電消失時点を示す。白三角印が示すように、肩関節外転角度が小さくなるにしたがってADの第一放電消失時点は遅くなった。図中の黒三角印はPDの筋放電開始時点を示す。黒三角印が示すように、肩関節外転角度が小さくなるにしたがってPDの筋放電開始時点は早くなった。

注目して解析を進めた。

5段階の肩関節外転角度毎に、三角筋前部と三角筋後部の実際の筋放電パターンを記録した結果の一例が図4である。三角筋前部では、肩関節外転の角度が小さくなるにしたがって、第一放電の消失時点が遅くなった。すなわち、肩関節外転の角度が小さくなるにしたがって、三角筋前部の第一放電持続時間が長くなっていった(図4の白三角印)。また、三角筋後部は、肩関節外転の角度が小さくなるにしたがって、筋放電開始時点が三角筋前部の筋放電開始時点に近づいていった。すなわち、肩関節外転の角度が小さくなるにしたがって、三角筋前部と後部が協働活動をするようになった(図4の黒三角印)。

そこで、主動筋である三角筋前部の各条件における変化を全被験者10名のもので統計処理をして示したのが図5である。Aは図4と同じもので、肩関節外転角度が小さくなるにしたがって、三角筋前部の第一放電消失時点が遅くなっていくことを示している。そこで、Bは全被験者の各条件毎の三角筋前部の第一放電の筋放電持続時間の平均値をプロットしたものである。肩関節外転角度が大きくなるにしたがって、主動筋として働く三角筋前部の第一放電持続時間は有意に短縮した($F=5.31, df=4, p<0.01$)。Cは主動筋として働く三角筋前部の単位時間当たりの筋放電量を計測した結果である。この結果から、肩関節外転角度が変化しても、主動筋の筋放電量には顕著な変化はみられなかった。

次に、拮抗筋である三角筋後部の活動開始時点の変化を調べた結果が図6である。Aは図4と同じもので、肩関節外転角度が小さくなるにしたがって、三角筋後部の筋放電開始時点が早くなることを示している。そこで、主動筋である三角筋前部の第一放電と拮抗筋の役割を演じている三角筋後部の筋放電開始時点の時間差を全被験者の平均値で示したのがBである。この結果から、肩関節外転の角度が大きくなるにしたがって、主動筋の第一放電と拮抗筋の筋放電開始時点の差は有意に大きくなった($F=10.16, df=4, p<0.001$)。

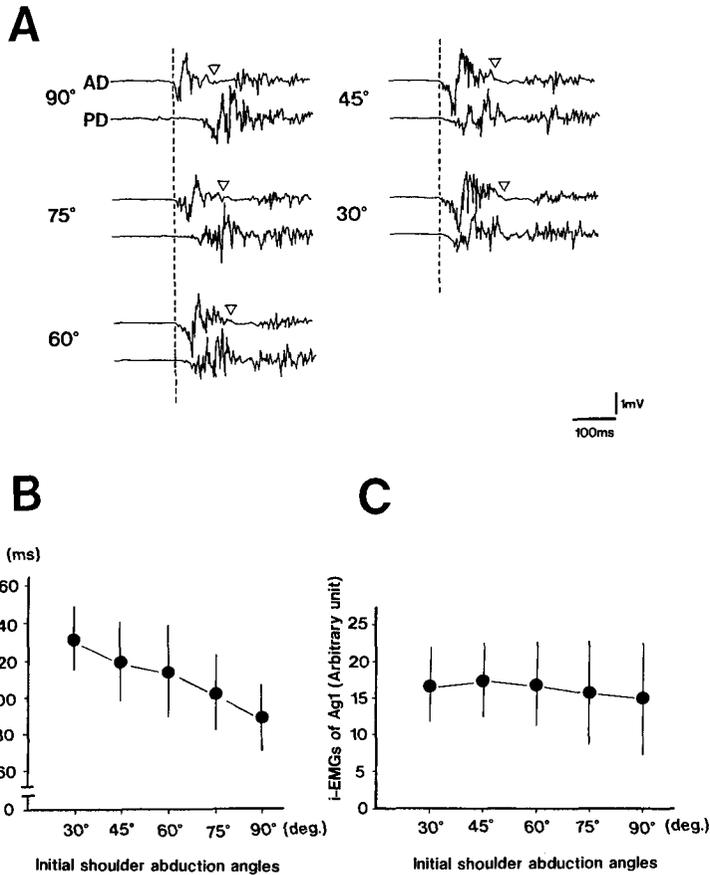


図5. 主動筋である三角筋前部 (AD) の各条件における変化。A は5段階の肩関節外転角度毎のADとPDの筋放電の記録例である(図4と同様の記録)。図中の白三角印はADの第一放電消失時点を示し、肩関節外転角度が小さくなるにしたがってADの第一放電消失時点は遅くなったことを示している。Bは全被験者のADの第一放電持続時間の変化を平均値と標準偏差で示す。縦軸は持続時間をmsで示す。横軸は肩関節外転角度で示す。肩関節外転角度が大きくなるにしたがってADの第一放電持続時間が短くなった。Cは全被験者のADの単位時間当たりの筋放電量の変化を平均値と標準偏差で示す。縦軸は筋放電量を任意単位で示す。横軸は肩関節外転角度で示す。肩関節外転角度が変化してもADの筋放電量に大きな変化はなかった。

考 察

単純反応条件下での上肢挙上動作(肩関節の反応動作)において、運動方向の違いがどのように三角筋や体幹筋(大胸筋、広背筋、棘下筋)の筋放電の発現動態に影響を及ぼすかを検討した。体幹筋である大胸筋、広背筋および棘下筋では、運動方向の違いによって著しい筋放電の変化は起こらなかった。また、三角筋の3部位(AD, MD, PD)においても筋放電の顕著な変化は観察されなかった(図2)。その理由は、実験1の条件が、運動の大きさと速さを固定し、運動方向を変える条件にはなっていたが、結果として運動の質をも変化させていたためと考えられる。すなわち、肩関節屈曲、肩関節外転および肩関節伸展というまったく質の異なる運動を比較したことになったからである。しかし、特徴的なことは、どの方向においても主

上腕の運動方向の違いが三角筋の筋放電パターンに及ぼす影響

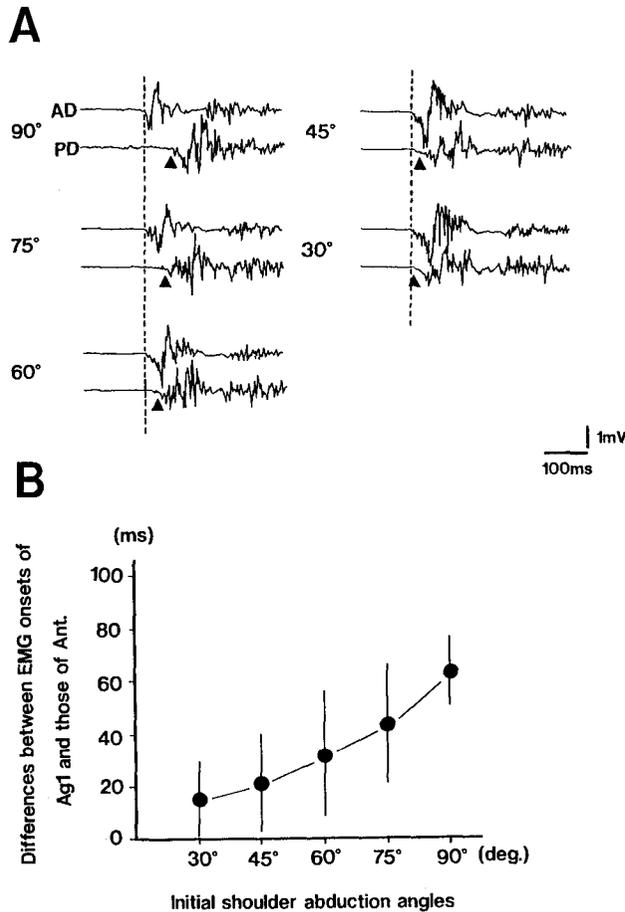


図6. 拮抗筋である三角筋後部 (PD) の各条件における変化。A は5段階の肩関節外転角度毎のADとPDの筋放電の記録例である(図4と同様の記録)。図中の黒三角印はPDの筋放電開始時点を示し、肩関節外転角度が小さくなるにしたがってPDの筋放電開始時点は早くなったことを示している。BはAD第一放電とPDの筋放電開始時点の時間差を全被験者の平均値と標準偏差で示す。縦軸はAD第一放電とPDの筋放電開始時点の時間差をmsで示す。横軸は肩関節外転角度で示す。肩関節外転角度が大きくなるにしたがってAD第一放電とPDの筋放電開始時点の差が大きくなった。

動筋の第二筋放電が顕著に認められたことである。これまで、三相性筋放電の主動筋第二放電の役割は、素早い動作の終わりに生じる不必要なゆらぎを減衰させるため (Ghez & Martin, 1982)、または、最終的に肢位を固定するため (Hannaford & Stark, 1985) と考えられている。しかし、単関節の運動では、主動筋の第二筋放電が本実験で記録した三角筋の第二筋放電ほど顕著ではない (Brown & Cooke, 1986)。しかも、肩関節の運動においては、単関節では明確に出現する三相性の筋放電パターンは見い出せなかった。これらは、肩関節運動では単関節運動のように運動の方向が一定でないことから、主動筋と拮抗筋の関係がさほど明確に区別されていないことによるものと考えられる。また、三角筋第二放電の顕著な活動は、素早い動作とターゲットでの制止を被験者に強調した結果と考えられ、これも正確な上腕の運動停止を行う上での三角筋の制御機構の複雑さを示すものと思われる。すなわち、単関節の運動と異なって、

肩関節の運動における運動の正確性は、三角筋の第二筋放電の量を増大させることで補償されているものと推察される。

運動方向の違いによる筋放電パターンをより明らかにするために、肩関節屈曲運動に焦点を当てて検討した。肩関節屈曲運動では、三角筋前部と三角筋後部が主動筋と拮抗筋として働くことがわかり(図3)、単関節での三相性の筋放電パターンとの異同を検討できる可能性を見出した。しかし、体幹筋には大きな変化は出現せず、本実験条件では考察の対象から除外できることがわかった(図3)。肩関節外転角度の変化に対応して、主動筋である三角筋前部と拮抗筋として働く三角筋後部がどのように変化するか注目した。肩関節外転角度が減少するにしたがって、三角筋前部は第一筋放電の消失時点が遅くなり、三角筋後部は筋放電開始時点が早くなることがわかった(図4)。まず、主動筋である三角筋前部を見ると、肩関節外転角度が増加するにしたがって主動筋である三角筋前部の第一筋放電持続時間が短縮した(図5のB)。これまでの報告から主動筋の第一筋放電持続時間の変化は、運動の大きさと運動の速さに依存することがわかっている(Brown & Cooke, 1984; 奈良ら, 1990)。したがって、この結果は、もし運動の速さが一定であれば運動の大きさが変化したことを意味し、運動の大きさが一定であれば運動の速さが変化したことを意味する。そこで、運動の速さを検討するために主動筋の単位時間当たりの筋放電量を調べたところ、肩関節外転角度が変化しても主動筋の筋放電量に顕著な変化はみられなかった(図5のC)。主動筋の筋放電量は運動の速さに依存する(Marsden et al. 1983; Beneck et al. 1985; Forget & Lamarre, 1987; Mustard & Lee, 1987)ことから、主動筋の第一放電持続時間の変化は、運動の大きさによる変化であると推察される。実際、本実験条件下で運動距離を実測してみると、30度で1番長く、90度で1番短くなっていた。したがって、この条件下では、運動の速さは一定であるが、運動の大きさが変化した結果、主動筋第一放電の持続時間が肩関節角度の変化に依存して変化したことを示唆していた。

次に、拮抗筋である三角筋後部の変化を見てみると、肩関節外転角度が大きくなるにしたがって、三角筋前部の第一筋放電と三角筋後部の筋放電開始時点の差が大きくなった(図6のB)。単関節の運動を用いた Mustard & Lee (1987) の報告によれば、運動の速さが一定で運動の大きさが変化する場合、拮抗筋はブレーキングとして働き、運動距離が短いと主動筋第一放電と拮抗筋の筋放電開始時点の差は小さくなり、運動距離が長いとその差も大きくなる。ところが、今回の結果は全く逆の結果になった。本実験は、運動の速さが一定で運動の大きさが変化しているという点で、条件的には Mustard & Lee の実験と同じであるが、運動の方向性に関しては異なっていた。すなわち、彼らの実験では単関節の運動であるために、運動の方向性については考慮されていなかった。しかし、本実験では単関節の運動ではなく、肩関節の運動であり、しかも、運動方向を変化させた実験条件であった。したがって、本実験結果は、運動方向の変化にともなって、拮抗筋は運動のブレーキングとして働くと同時に、運動方向を決定することにも大きく寄与するようになることを意味している(Kasai et al. 1995)。しかし、本実験での条件では、運動の大きさも変化したため拮抗筋の筋放電開始時点の変化が運動方向の違いだけに依存していると断定することはできない。この点を明らかにすることが、今後の重要な課題となろう。

ま と め

単純反応課題による上腕の運動方向の違いが、三角筋や体幹筋(大胸筋、広背筋、棘下筋)の筋放電の発現にどのような影響を及ぼすかを検討した。その結果以下のことがわかった：

1. 上腕の運動方向の違いは、体幹筋の筋放電には顕著な影響を及ぼさなかった。
2. 肩関節屈曲運動において運動方向の違いは、三角筋前部の第一筋放電と三角筋後部の筋放電開始時点を変化させた。すなわち、肩関節外転角度が大きくなるにしたがって、三角筋前部の第一筋放電の持続時間は短縮し、三角筋前部の第一筋放電と三角筋後部の筋放電開始時点の差は大きくなった。
3. 肩関節屈曲運動においては、拮抗筋は運動方向の変化にともなって、単関節運動の場合と同様に、運動のブレーキングとして働くが、同時に運動方向を決定することにも大きく関与することがわかった。
4. 本研究の実験条件では、運動の速さは一定であったが、運動の大きさが変化した。したがって、運動の方向だけに依存した結果は得られなかった。これは、今後の研究課題である。

文 献

- Beneck, R., Meinck, H. M. and Conrad, B. (1985) Rapid goal-directed elbow flexion movements: limitations of the speed control system due to neural constraints. *Exp. Brain Res.*, 59; 470-477.
- Brown, H. S. and Cooke, J. D. (1986) Initial agonist burst is modified by perturbations preceding movement. *Brain Res.*, 377; 311-322.
- Forget, R. and Lamarre, Y. (1987) Rapid elbow flexion in the absence of proprioceptive and cutaneous feedback. *Human Neurobiol.*, 6; 27-37.
- Ghez, C. and Martin, J. H. (1982) The control of rapid limb movement in the cat. III. Agonist-antagonist coupling. *Exp. Brain Res.* 45; 115-125.
- Hannaford, B. and Stark, L. (1985) Roles of the elements of the triphasic control signal. *Exp. Neurol.*, 90; 619-634.
- Kasai, T., Kawanishi, M., Nara, M. and Yahagi, S. (1995) Dependence of deltoid muscle upon initial shoulder abduction angles prior to flexion movement. *Brain Res. Bull.* (in press)
- Latash, M. L. (1993) Control of human movement. *Human Kinetics, Champaign.*
- Marsden, C. D., Obeso, J. A. and Rothwell, J. C. (1983) The function of antagonist muscle during fast limb movements in man. *J. Physiol.* 335; 1-13.
- Mustard, B. E. and Lee, R. G. (1987) Relationship between EMG patterns and kinematic properties for flexion movements at the human wrist. *Exp. Brain Res.*, 66; 247-256.
- 中村隆一, 齊藤 宏 (1987) 基礎運動学 第3版, 医歯薬出版, 119-126, 181-192.
- 奈良雅之, 笠井達哉, 古林俊晃 (1990) 上肢屈曲反応動作に伴う三角筋の筋放電様式 —動作開始前の肩関節外転角度の違いによる変化—, 日本体育学会第41回大会号, 218.
- Pantaleo, T., Benvenuti, F., Bandinelli, S., Mencarelli, M. A. and Baroni, A. (1988) Effects of expected perturbations on the velocity control of fast arm abduction movements. *Exp. Neurol.*, 101; 313-326.

—平成7年10月9日 受理—