肘関節における素早い伸展動作切り換え時の筋活動

高德 希¹⁾ 藤原 素子²⁾

Nozomi Takatoku¹ and Motoko Fujiwara²: Muscle activity patterns during quick change in elbow extensions. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci., 54: 293-306, December, 2009.

Abstract : In this study, we investigated a motor strategy for changing the amplitude or direction of movement during rapid extensions of the elbow joint. We focused on changes in the triphasic electromyographic (EMG) pattern, i.e. the first agonist burst (AG1), the second agonist burst (AG2) and the antagonist burst (ANT), in relation to changes in the amplitude and direction of movement required after the initiation of movement. Ten seated subjects extended the elbow 40 degrees in the Basic task and 80 degrees in the Wide task, and then returned to the starting position after reaching for a target in the Basic task (Return task). The tasks were performed under two conditions: while performing a predetermined task (SF condition), and while performing a task in response to a visual stimulus after movement commencement (ST-BW condition—the subject performed either the Basic task or the Wide task; ST-BR condition—the subject performed either the Basic task or the Return task). Kinematic and temporal parameters, and EMG activity from the agonist (triceps brachii) and the antagonist (biceps brachii) muscles were recorded. Comparing the Wide task with the Basic task, the onset latency of AG2 increased, and the duration in all bursts increased. In the ST-BW condition, the onset latency of AG1 and AG2 and the duration of AG1 increased compared with the SF condition. Comparing the Return task with the Basic task, the onset latency of ANT and AG2 increased. The duration of all bursts and the average EMG (a-EMG) of ANT in the Return task increased compared with the Basic task. There was no difference between the SF and ST-BR conditions. It is concluded that the motor strategy for changing the amplitude of initiated movement is to control the duration of AG1 depending on the amplitude of movement in order to change the timing to stop movement, and that the motor strategy for changing the direction of initiated movement is to increase the duration and amplitude of ANT in order to stop at the target and flex continuously.

Key words : elbow joint movement, rapid movement modification, triphasic EMG pattern

キーワード : 肘関節運動, 素早い動作修正, 3 相性筋放電パターン

I 緒 言

我々は日常生活において様々な随意運動を遂行しており、刻一刻と変化する外部環境には必要に応じて動作を変更しつつ対応している。しかしながら、環境が変化するタイミングによっては動作を素早く変更することが困難な場合も多い。特に「バリスティック運動」のような遂行時間が短い動

作を素早く切り換えることは、ゆっくりとした動作の切り換えに比べると非常に困難である。このような「動作切り換えの素早さ」は日常生活のみならず、スポーツ場面等においては結果を左右する重要な能力の一つである。

素早い動作についての研究では、課題として手関節や肘関節などの単関節による特定のターゲットまでの運動が多く用いられており (Wadman et al., 1980; Soechting and Lacquaniti, 1983; Gielen et al.,

1) 奈良女子大学大学院人間文化研究科
〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋西町

2) 奈良女子大学文学部人間科学科
〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋西町

連絡先 高德 希

1. Graduate School of Humanities and Sciences, Nara Women's University

Kitaoyanishi-machi, Nara, 630-8506

2. Department of Human Sciences, Nara Women's University

Kitaoyanishi-machi, Nara, 630-8506

Corresponding author aan.takatoku@cc.nara-wu.ac.jp

1984; van Sonderen et al., 1988; Kudo and Ohtsuki, 1998), 中枢神経系における運動制御過程を解明するための一助となっている。

素早い動作遂行時には、主動筋第1放電－拮抗筋放電－主動筋第2放電の連続する放電から成る3相性筋放電パターンが観察され (Hallett et al., 1975; Hallett and Marsden, 1979; Brown and Cooke, 1981; Hannaford and Stark, 1985), 各放電はそれぞれ以下のような役割を担っているといわれている。最初に観察される主動筋第1放電は運動開始時の加速 (Hallett and Marsden, 1979; Brown and Cooke, 1981; Flament et al., 1984; Hoffman and Strick, 1990), 続く拮抗筋放電は特定のターゲットでの動作停止 (Engelhorn, 1983; Mustard and Lee, 1987), その後観察される主動筋第2放電は動作を最終ターゲットで停止するための位置調整に関わっている (Brown and Cooke, 1990; Almeida et al., 2006) と考えられている。また、各筋活動の放電時間や振幅は課題によって変化し、特に主動筋第1放電の振幅あるいは放電時間を変更することで様々な動作に対応しているという仮説が提唱されている (Corcos et al., 1989; Gottlieb et al., 1989a)。

さらに、3相性筋放電パターンは末梢からの求心性情報が遮断された神経疾患を持つ被験者においても観察されたことから (Sanes and Jennings, 1984), 中枢神経系において予めプログラムされた運動指令であると考えられ (Cooke et al., 1985; Sanes et al., 1985; Mills and Kimiskidis, 1996; MacKinnon and Rothwell, 2000), これによって動作の素早い実行が可能となっている (Schmidt and Lee, 1999)。

その反面、遂行中に突然の動作変更を余儀なくされた場合には随意的な修正が困難であり (Schmidt and Lee, 1999), 素早い動作の修正過程について検討した研究もいくつかみられる (Soechting and Lacquaniti, 1983; van Sonderen et al., 1988; Kudo and Ohtsuki, 1998)。Kudo and Ohtsuki (1998) は、肘関節による素早い伸展動作を用いて途中停止を要求する課題を設定した実験を行い、途中停止が指示された場合でも3相性筋放電パターンが発現すること、予めプログラムされている動作でも主動筋と拮抗筋の活動をそれぞれ修正

することによって途中停止が可能であることを明らかにした。

しかし、実際場面でみられる動作変更のタイミングは様々であり、特にスポーツ場面においては動作開始後に変更しなければならない場面が多い。また、動作を途中で停止するだけでなく、さらに遠方の目標点へと動作の大きさを変更したり、動作開始位置に戻るために動作の方向を変更したりしなければならない場合もある。動作の「大きさ」や「方向」は運動の構成要素であり (Schmidt and Lee, 1999), これらが異なることによって運動指令における各筋の活動量や放電開始のタイミングに影響を及ぼしていることから、遂行動作の「大きさ」や「方向」の切り換えは途中停止よりも困難であると考えられる。一旦開始された動作遂行中に「大きさ」や「方向」をできる限り素早く切り換えるためには、運動指令をリセットせずに切り換えができるか否かが重要である。それゆえ、動作開始後に動作の変更を要求された場合にみられる3相性筋放電パターンの変化から、効率的な素早い切り換え動作について検討する必要があるだろう。動作の「大きさ」あるいは「方向」を素早く切り換える場合、それぞれ以下のような筋活動の制御が考えられる。

1) 動作の「大きさ」が異なる場合、主動筋第1放電の活動時間あるいは活動量によって動作速度を制御して「大きさ」を調節する。そのため、動作遂行中に「大きさ」を切り換える場合は、遂行中に動作速度を増加するために加速に関わる主動筋第1放電を調節する必要があるが、動作開始後に変更を指示された場合は短時間で連続的に既に活動している主動筋第1放電の変更は困難であると考えられる。よって、主動筋第1放電ではなく、動作停止に関わる拮抗筋や主動筋第2放電の放電時間あるいは放電量が制御される。

2) 動作の「方向」が異なる場合、共通したターゲットまでは類似した運動学的特性がみられるが、停止してから反対方向へと加速するために拮抗筋の活動が増加する。動作遂行中に「方向」を切り換える場合は、変更以前の動作と共通するターゲットでの停止と反対方向の出力が同時に必要と

Fig. 1 (a) Illustration of experimental setup showing the start position (SP) of the subject and the target (first target: T1, second target: T2). (b) Experimental tasks. (c) Experimental conditions. (d) Recording of EMG bursts for the Basic task in the SF condition.

なることから、素早く遂行するためには動作停止のために活動している拮抗筋放電が制御される。

このような動作遂行中に「大きさ」あるいは「方向」を切り換える場合の筋活動の変化について検討するために、本研究では以下の課題と条件を設定した。課題は、基本動作となる特定のターゲットまでの素早い伸展動作、これに対してさらに遠方のターゲットへの伸展動作と、ターゲットで停止した後に直ちに動作開始位置に戻る動作という3種類とした。これらの課題は予め教示された通りに素早く遂行する条件で行った後、さらに動作遂行中の切り換えとして設定した動作開始後に呈示された課題を遂行する条件で行った。後者の条件で得られた各課題の運動学的特性と筋活動が、前者の条件と比較してどのように変化するかという点から、動作開始後に動作の「大きさ」あるいは「方向」を素早く切り換えるための筋活動の制御について検討することを目的とした。

II 方法

1. 被験者

右利きの成人女子10名を被験者とした（平均年齢±標準偏差 = 23.1±3.4歳）。被験者は事前に実験についての説明を受け、実験への参加を承諾してから参加した。

2. 実験設定

レバーアーム（38×6cm）が取り付けられた装置（77.5×60cm）を座位姿勢の被験者の肩の高さで水平に設置した（Fig. 1a）。被験者は肩関節を約90°外転し装置上で上肢を水平に保持し、レバーアームの中心に肘関節を合わせて持ち手を右手で握った。被験者が装置上で最大伸展した位置を180°として、動作開始位置を50°、第1ターゲット（T1）を90°と第2ターゲット（T2）を130°に設定した。また、被験者の前方約70cmのところに課題を呈

示するためのLEDを埋め込んだ刺激提示版を配置した。赤色LEDを動作開始刺激、橙色LEDと2つの緑色LEDを課題提示刺激とし、それぞれ2cm間隔で配列した。

3. 実験課題

被験者は動作開始刺激に対して、できる限り早くターゲットまで肘関節を伸展するように教示された。課題は、第1ターゲットまで伸展するBasic課題（伸展角度40°）、第2ターゲットまで伸展するWide課題（伸展角度80°）、第1ターゲットまで伸展後すぐに動作開始位置に戻るReturn課題であった（Fig. 1b）。音刺激発生装置から呈示される500ms間の聴覚刺激を予告刺激、刺激提示版の赤色発光ダイオード（LED）より500ms間呈示される視覚刺激を動作開始刺激とした。予告刺激から動作開始刺激までの間隔は2, 2.5, 3, 3.5sのいずれかとした。

4. 実験条件

Figure 1cに示すように、実験条件は各試行の開始前に教示された課題を動作開始刺激に反応して素早く遂行するSelf（以下SF）条件と被験者の動作開始後に刺激によって呈示された課題を遂行するStimulus（以下ST）条件であった。

SF条件においては、Basic、Wide、Return課題を各4試行ずつランダムに並べた計12試行を1ブロックとし、3ブロック行った。

ST条件においては、動作開始刺激によって被験者が動作を開始した後、肘関節伸展角度が5°に到達した時点で刺激提示版の橙色（Basic課題）あるいは緑色LED（右：Wide課題、左：Return課題）によって呈示される課題をできる限り素早く行った。この条件は、BasicあるいはWide課題のいずれかが呈示されるST-BW条件とBasicあるいはReturn課題のいずれかが呈示されるST-BR条件の2条件とし、それぞれ2種の課題（ST-BW: BasicとWide、ST-BR: BasicとReturn）を各4試行ずつランダムに並べた計8試行を1ブロックとして、各条件で3ブロックずつ行った。ST条件において、被験者には動作開始刺激に対してできる限り

早くBasic課題を行うように教示した。SF条件、ST条件の順で行い、ST-BWおよびST-BR条件の順序は被験者間でカウンターバランスをとった。

5. 測定項目および分析

レバーアームの軸として用いた可変抵抗の電圧変化を動作角度として記録し、上腕三頭筋（主動筋）および上腕二頭筋（拮抗筋）の筋腹に沿って2cm間隔で取り付けられた電極から表面筋電図を記録した。すべての記録はMP150（BIOPAC Systems, Inc.）を介して1000Hzで5秒間取り込んだ。

動作角度は5Hzのデジタルフィルターで処理した後、角速度を算出した。さらにピーク動作角度（peak movement amplitude）およびピーク角速度（peak angular velocity）を算出した。動作開始については8deg/s以上の角速度が25ms以上継続した区間の最初の時刻、動作終了については8deg/s以下の角速度が25ms以上継続した区間の最初の時刻と定義した（Kudo and Ohtsuki, 1998）。動作時間（movement time）は動作開始から終了までの時間とした。

筋電図については全波整流し、ローパスフィルター（50Hz）で処理した。主動筋および拮抗筋における動作開始刺激呈示前200ms間の背景筋電図+4SDを閾値とし、主動筋第1放電（first agonist burst: AG1）、拮抗筋放電（antagonist burst: ANT）、主動筋第2放電（second agonist burst: AG2）の振幅が25ms以上継続して超えた最初の時点を放電開始、閾値未満が25ms間連続して継続した時点を放電終了と定義した（Hodges and Bui, 1996; Kudo and Ohtsuki, 1998）。Figure 1dに定義された各放電の典型例を示す。各筋放電成分について筋放電開始潜時（onset latency）、放電開始から終了までの筋放電持続時間（duration）と平均筋放電量（average EMG: a-EMG）を算出した。さらに、主動筋第1放電開始から拮抗筋放電開始までの時間および主動筋第2放電開始（AG1on-ANTon, AG1on-AG2on）までの時間を求めた。

6. 統計処理

Basic課題とWide課題、Basic課題とReturn課

Fig. 2 The ensemble average of (a) movement amplitude and (b) angular velocity, and (c) agonist/antagonist (inverted) EMG recorded for the Basic task of the SF and ST-BW conditions (one subject). In Fig. 2c, the horizontal arrows on the EMG represent the duration from the onset to the offset of each burst (SF: dotted arrows, ST-BW: solid arrows). AG1: first agonist burst, AG2: second agonist burst, ANT: antagonist burst.

Fig. 3 The ensemble average of (a) movement amplitude and (b) angular velocity, and (c) agonist/antagonist (inverted) EMG recorded for the Wide task of the SF and ST-BW conditions (one subject). In Fig. 3c, the horizontal arrows on the EMG represent the duration from the onset to the offset of each burst (SF: dotted arrows, ST-BW: solid arrows). AG1: first agonist burst, AG2: second agonist burst, ANT: antagonist burst.

題における運動学的指標および筋活動の比較から Wide 課題と Return 課題の動作特性をふまえ、さらに各課題における SF 条件と ST 条件の差を検討するために、課題 (Basic と Wide, Basic と Return) と条件 (SF と ST-BW, SF と ST-BR) を因子とする 2 要因の反復測定分散分析を用いて差の検定を行った。また、交互作用が有意であった場合は、各因子における単純主効果の検定を行った。なお、全ての検定における有意水準は 5% 未満とした。

III 結 果

1. Basic 課題および Wide 課題

1) 運動学的な課題特性

Figure 2 には、Basic 課題における動作角度 (Fig. 2a) および角速度 (Fig. 2b) を、Fig. 3 には Wide 課題における動作角度 (Fig. 3a) および角速度 (Fig. 3b) を示した。いずれも被験者 1 名において得られた 10 試行の平均波形を示している。特に Fig. 3a に示した動作角度および Fig. 3b に示した角速度の波形から、Wide 課題における ST-BW 条件の波形は SF 条件とは顕著に異なっていたと

Fig. 4 Means and standard deviations of the kinematic and temporal parameters in the SF and ST-BW conditions for all subjects. (a) Peak movement amplitude, (b) Peak angular velocity, (c) Movement time. *: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$.

Fig. 5 Means and standard deviations of EMG parameters in the SF and ST-BW conditions for all subjects. (a) Onset latency, (b) AG1on-ANTon and AG1on-AG2on, (c) Duration, (d) a-EMG. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

いえる。ピーク動作角度、ピーク角速度および動作時間の全被験者平均値および標準偏差を Fig. 4 に示した。課題 (Basic, Wide) および条件 (SF, ST-BW) を因子とする 2 要因の反復測定分散分析を行った。

ピーク動作角度については、課題の主効果が有意であり ($F_{(1,9)}=639.38$, $p < 0.001$), 条件の主効果および交互作用は有意ではなかった。Wide 課題が Basic 課題より有意に大きかった。

ピーク角速度については、課題 ($F_{(1,9)}=97.61$, $p <$

0.001) および条件 ($F_{(1,9)}=17.53$, $p < 0.01$) の主効果と交互作用 ($F_{(1,9)}=44.12$, $p < 0.001$) が有意であり、両条件ともに Wide 課題が Basic 課題より大きく (SF 条件: $p < 0.001$, ST-BW 条件: $p < 0.05$), Wide 課題において SF 条件が ST-BW 条件より有意に大きかった ($p < 0.001$)。

動作時間についても課題 ($F_{(1,9)}=172.76$, $p < 0.001$) および条件 ($F_{(1,9)}=20.8$, $p < 0.001$) の主効果と交互作用 ($F_{(1,9)}=17.83$, $p < 0.01$) が有意であり、両条件ともに Wide 課題が Basic 課題より長く (いずれも

$p<0.001$), Wide 課題においてのみ ST-BW 条件が SF 条件より有意に長かった ($p<0.001$).

よって, Wide 課題は, Basic 課題と比較すると動作角度および角速度が増加し, 特に ST-BW 条件においては角速度の減少と動作時間の延長がみられた.

2) 動作遂行時の筋活動にみられる課題特性

Figure 2c には Basic 課題, Fig. 3c には Wide 課題における主動筋および拮抗筋の平均筋電図波形を示した. 各課題および条件に共通して, 素早い単関節運動時にみられる 3 相性筋放電パターンが観察された. さらに, 各筋放電成分において, 放電の振幅における顕著な変化はみられなかったが, Basic 課題より Wide 課題で, また SF 条件より ST-BW 条件で放電時間が長くなる傾向がみられた. これらの筋活動について, それぞれ筋放電開始潜時, AG1 放電開始から ANT および AG2 放電開始までの時間, 筋放電持続時間, 平均筋放電量を求め, 全被験者平均値および標準偏差を Fig. 5 に示す. 課題および条件を因子とする 2 要因の反復測定分散分析を行った.

筋放電開始潜時については, 主動筋第 1 放電における条件の主効果が有意であり ($F_{(1,9)}=13.15, p<0.01$), ST-BW 条件が SF 条件より有意に長かった. 課題の主効果および交互作用は有意ではなかった. また, 主動筋第 2 放電における課題 ($F_{(1,9)}=26.77, p<0.001$) と条件 ($F_{(1,9)}=13.12, p<0.01$) の主効果が有意であり, 交互作用は有意ではなかった. 両条件ともに Wide 課題が Basic 課題より有意に長く, 両課題ともに ST-BW 条件が SF 条件より有意に長かった. 拮抗筋放電においては, 各要因の主効果および交互作用は有意ではなかった.

主動筋第 1 放電開始から拮抗筋および主動筋第 2 放電開始までの時間については, 主動筋第 2 放電において課題の主効果のみが有意であり ($F_{(1,9)}=17.67, p<0.01$), Wide 課題が Basic 課題より有意に長かった. 条件の主効果および交互作用は有意ではなかった. また, 主動筋第 1 放電開始から拮抗筋放電開始までの時間については, 各要因の主効果および交互作用は有意ではなかった.

筋放電持続時間については, 主動筋第 1 放電に

おける課題 ($F_{(1,9)}=34.93, p<0.001$) と条件 ($F_{(1,9)}=5.14, p<0.05$) の主効果が有意であり, 交互作用は有意ではなかった. 両条件ともに Wide 課題が Basic 課題より有意に長く, 両課題ともに ST-BW 条件が SF 条件より有意に長かった. 拮抗筋および主動筋第 2 放電においては, 課題の主効果が有意であり (拮抗筋: $F_{(1,9)}=8.1, p<0.05$; 主動筋第 2 放電: $F_{(1,9)}=35.93, p<0.001$), 条件の主効果および交互作用は有意ではなかった. 拮抗筋および主動筋第 2 放電ともに Wide 課題が Basic 課題より有意に長かった.

平均筋放電量については全ての筋放電成分における各要因の主効果および交互作用は有意ではなかった.

よって, Basic 課題より動作角度の大きい Wide 課題では, 主動筋第 1 放電と拮抗筋放電における筋放電開始潜時には差はみられず, 主動筋第 2 放電のみ遅延した. また, 全ての筋放電成分における放電時間が延長した. さらに ST-BW 条件においては, SF 条件と比較すると両課題ともに主動筋第 1 放電および第 2 放電の放電開始潜時が遅延し, 主動筋第 1 放電の放電時間が延長したが, 拮抗筋放電のみ条件間の差はみられなかった.

2. Basic 課題および Return 課題

1) 運動学的な課題特性

Figure 6 には, Basic 課題における動作角度 (Fig. 6a) および角速度 (Fig. 6b) を, Fig. 7 には Return 課題における動作角度 (Fig. 7a) および角速度 (Fig. 7b) を示した. いずれも被験者 1 名において得られた 10 試行の平均波形を示している. Figure 6a の Basic 課題における動作角度波形については, SF 条件および ST-BR 条件ともに第 1 ターゲット付近まで同様の角度変化を示し, Fig. 6b の角速度波形についてもピークまでの速度変化が類似していた. 一方, Fig. 7a に示した Return 課題においては, SF 条件と ST-BR 条件におけるピーク角度には顕著な差はみられなかったが, ST-BR 条件ではピーク角度に到達するまでが遅く, Fig. 7b より角速度のピークは減少した. ピーク動作角度, ピーク角速度, 動作時間における全被験者平均値

Fig. 6 The ensemble average of (a) movement amplitude and (b) angular velocity, and (c) agonist/antagonist (inverted) EMG recorded for the Basic task of the SF and ST-BR conditions (one subject). In Fig. 6c, the horizontal arrows on the EMG represent the duration from the onset to the offset of each burst (SF: dotted arrows, ST-BR: solid arrows). AG1: first agonist burst, AG2: second agonist burst, ANT: antagonist burst.

Fig. 7 The ensemble average of (a) movement amplitude and (b) angular velocity, and (c) agonist/antagonist (inverted) EMG recorded for the Return task of the SF and ST-BR conditions (one subject). In Fig. 7c, the horizontal arrows on the EMG represent the duration from the onset to the offset of each burst (SF: dotted arrows, ST-BR: solid arrows). AG1: first agonist burst, AG2: second agonist burst, ANT: antagonist burst.

および標準偏差を Fig. 8 に示す。課題 (Basic, Return) および条件 (SF, ST-BR) を因子とする 2 要因の反復測定分散分析を行った。

ピーク動作角度については、条件の主効果が有意であり ($F_{(1,9)}=9.3$, $p<0.05$), SF 条件が ST-BR 条件より有意に大きかった。課題の主効果および交互作用は有意ではなかった。

ピーク角速度については、各要因の主効果および交互作用は有意ではなかった。

動作時間については、課題 ($F_{(1,9)}=331.77$, $p<0.001$) および条件 ($F_{(1,9)}=7.51$, $p<0.05$) の主効果が有意であり、Basic 課題より Return 課題が有意

に長く、SF 条件が ST-BR 条件より有意に長かった。交互作用は有意ではなかった。

これらの結果をまとめると、第 1 ターゲットでの伸展動作の停止が共通している Basic 課題と Return 課題では、ピーク角度および角速度における顕著な差はみられなかった。また、SF 条件と ST-BR 条件を比較すると、ST-BR 条件においては両課題ともにピーク角度が小さくなり、動作時間が短かった。

2) 動作遂行時の筋活動にみられる課題特性

Figure 6c には Basic 課題, Fig. 7c には Return 課題における主動筋および拮抗筋の平均筋電図波形

Fig. 8 Means and standard deviations of the kinematic and temporal parameters in the SF and ST-BR conditions for all subjects. (a) Peak movement amplitude, (b) Peak angular velocity, (c) Movement time. *: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$.

Fig. 9 Means and standard deviations of EMG parameters in the SF and ST-BR conditions for all subjects. (a) Onset latency, (b) AG1on-ANTon and AG1on-AG2on, (c) Duration, (d) a-EMG. **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

を示した。Figure 6c より、Basic 課題においては、動作の大きさを切り換える場合と同様に 3 相性筋放電パターンがみられた。また、Fig. 7c より Return 課題においても 3 相性の筋放電パターンがみられ、Basic 課題と比較すると拮抗筋の活動が増加する傾向を示した。これらの筋活動について、それぞれ筋放電開始潜時、主動筋第 1 放電開始から拮抗筋および主動筋第 2 放電開始までの時間、筋放電持続時間、平均筋放電量を求め、全被験者平均値および標準偏差を Fig. 9 に示す。課題およ

び条件を因子とする 2 要因の反復測定分散分析を行った。

筋放電開始潜時については、拮抗筋および主動筋第 2 放電における課題の主効果が有意であり（拮抗筋： $F_{(1,9)}=19.29$, $p < 0.01$ ；主動筋第 2 放電： $F_{(1,8)}=26.42$, $p < 0.001$ ），ともに Return 課題が Basic 課題より有意に長かった。両放電ともに条件の主効果および交互作用は有意ではなかった。主動筋第 1 放電においては、各要因の主効果および交互作用は有意でなかった。

また、主動筋第1放電開始から拮抗筋および主動筋第2放電開始までの時間についても、ともに課題の主効果が有意であり（拮抗筋： $F_{(1,9)}=14.2$, $p<0.01$ ；主動筋第2放電： $F_{(1,9)}=23.94$, $p<0.001$ ），Return課題がBasic課題より有意に長かった。条件の主効果および交互作用は有意ではなかった。

筋放電持続時間については、全ての筋放電において課題の主効果が有意であり、Return課題がBasic課題より有意に長かった（主動筋第1放電： $F_{(1,9)}=11.43$, $p<0.01$ ；拮抗筋放電： $F_{(1,9)}=56.65$, $p<0.001$ ；主動筋第2放電： $F_{(1,9)}=11.8$, $p<0.01$ ）。いずれの放電においても条件の主効果および交互作用は有意ではなかった。

平均筋放電量については、拮抗筋放電においてのみ課題の主効果が有意であり、Return課題がBasic課題より有意に大きかった（ $F_{(1,9)}=29.69$, $p<0.001$ ）。条件の主効果および交互作用は有意ではなかった。主動筋第1放電および第2放電においては、各要因の主効果および交互作用は有意ではなかった。

これらの結果より、最終的なターゲット方向が異なる両課題における主動筋第1放電の開始潜時には差はみられなかった。しかし、拮抗筋および主動筋第2放電の開始潜時については、Return課題がBasic課題より遅延した。また、全ての筋放電においてBasic課題よりReturn課題で放電時間が延長したが、放電量については拮抗筋放電においてのみ増加した。一方、SF条件とST-BR条件を比較したところ、条件による差はみられなかった。

IV 考 察

1. 本研究における肘関節伸展動作の特性について

本研究では、40°の伸展動作であるBasic課題を基本動作として、80°の伸展動作であるWide課題とBasic課題と同じターゲットで停止した後動作開始位置に戻るReturn課題を用いた。SF条件Basic課題との比較からWide課題とReturn課題の動作特性について明らかにする。

1) Wide 課題

Wide課題はBasic課題に比べてピーク動作速度が増加するという運動学的特性は、先行研究（Freund and Büdingen, 1978; Cooke, 1980; Georgopoulos et al., 1981; Kudo and Ohtsuki, 1998）でみられた結果と共通しており、動作速度の増加によって動作を大きくしていたといえる。筋活動についてみると、動作角度に関わらず、主動筋第1放電の放電開始潜時は変化しなかった。これについては、SF条件が予め遂行する動作が決定されている単純反応動作であったこと、運動の構成要素である動作の「大きさ」が異なる場合でも共通した筋活動パターンを基にして動作が遂行されることから（Schmidt and Lee, 1999）、運動指令の構成に要する時間には影響しなかったと推察される。Wide課題における主動筋第1放電の放電時間の延長については、主動筋第1放電の放電時間あるいは放電量が動作の加速と関連していること（Hallett and Marsden, 1979; Brown and Cooke, 1981; Flament et al., 1984; Hoffman and Strick, 1990）、本研究においてもWide課題における動作速度が増加していたことから、速度を増加するためであったと考えられる。また、Wide課題における拮抗筋の放電時間の延長は増加した速度の減速のために、主動筋第2放電開始の遅延と放電時間の延長は最終的なターゲットでの動作停止のためにそれぞれ必要な活動量を生み出すためであったと推察される。

このように、BasicおよびWide課題に共通する肘関節伸展動作の筋活動パターンを基に、動作の「大きさ」が異なるWide課題を遂行するために、主動筋第1放電の放電時間を増加することによって動作速度を増加していたこと、この速度の増加に対して動作停止の働きを担う拮抗筋と主動筋第2放電の活動時間を延長していたことが示唆された。

2) Return 課題

伸展動作の停止後直ちに動作開始位置へと戻るReturn課題においては、Basic課題に対してピーク角度およびピーク角速度における顕著な差はみられなかった。Gottlieb（1998）の研究においても同じターゲットでの停止では運動学的指標における

顕著な差はみられなかったことから、Basic および Return 課題に共通したターゲットまでの伸展動作についても運動学的観点では類似していたといえる。筋活動については、最終的なターゲット方向が異なっているにもかかわらず、主動筋第1放電の開始潜時は変化しなかった。一方、拮抗筋および主動筋第2放電の開始潜時と主動筋第1放電開始からのタイミングについては Basic 課題より増加し、この違いが「動作開始位置に戻るための屈曲動作」を行うために重要であったと考えられる。さらに拮抗筋および主動筋第2放電の開始が遅延した要因として主動筋第1放電の放電時間の延長も挙げられる。しかしながら、拮抗筋は主動筋と独立して制御されていることから (Gottlieb et al., 1989b, 1992; Kudo and Ohtsuki, 1998), 拮抗筋の放電開始は主動筋の活動に関わらず「動作開始位置に戻る動作」の課題特性によって決定され、拮抗筋の放電開始を遅らせて主動筋第1放電と同時に活動する区間を短くし、さらに放電時間と放電量を増加させることで伸展動作の停止と屈曲動作を連続して遂行していたと考えられる。また、主動筋第2放電における開始潜時の遅延は主動筋第1放電における放電時間の延長によるものであり、動作を素早く停止するために放電時間を延長していたと示唆される。

このように、Basic 課題と Return 課題は「同じターゲットまでの伸展動作」という点では共通していたが、最終的なターゲット方向によって筋活動パターンが異なり、特に Return 課題を遂行する場合には伸展動作停止と屈曲方向の出力を同時に生み出す拮抗筋の活動を効率的に増加させることが重要であることが示唆された。

2. 素早い伸展動作切り換え時の筋活動

本研究では、SF 条件をコントロール条件として設定したことから、SF 条件でみられた運動学的指標と筋活動は各課題の動作特性であったと考えられる。この筋活動パターンを基に、動作遂行中に動作の「大きさ」あるいは「方向」を切り換える ST 条件でみられた筋活動の制御について検討するために条件間の比較を行った。

1) 「大きさ」の素早い切り換え

ST-BW 条件において動作遂行中に動作の「大きさ」を切り換える課題は Wide 課題が呈示された場合に該当する。

基本動作とした Basic 課題ではピーク角速度および動作時間における条件間の顕著な差はみられなかったが、Wide 課題においては SF 条件より ST-BW 条件のピーク角速度が減少し、動作時間が延長した。よって、被験者は ST-BW 条件において指示された「Basic 課題を基本動作として動作を開始する」という教示通りに Basic 課題を開始していたといえる。教示の影響によって被験者が用いる遂行方略が異なる点については、先行研究においても指摘されている (Engelhorn, 1997)。ST-BW 条件の Wide 課題においては、Basic 課題に比べて緩やかに減速していたことから、ST-BW 条件では動作停止までの速度を調節していたと考えられる。

次に、Basic および Wide 課題の両課題において ST-BW 条件では SF 条件に比べ、主動筋第1放電および第2放電の開始潜時が遅延し、主動筋第1放電の放電時間が延長したが、拮抗筋については条件による顕著な差はみられなかった。また、全ての筋放電成分について条件による平均放電量の変化はみられなかった。

まず、ST-BW 条件は選択反応課題であったことから、反応肢の増加によって主動筋第1放電の開始が遅延したといえる。一方、拮抗筋の放電開始タイミングは条件による変化がみられなかった。これについては、先行研究 (Gottlieb et al., 1989b, 1992; Kudo and Ohtsuki, 1998) と同様に主動筋と拮抗筋の放電開始タイミングは独立して制御されていたといえる。さらに、主動筋第1放電の放電時間が延長したことによって、主動筋第1放電と拮抗筋が同時に活動する区間が延長し、その結果動作速度が抑制され、緩やかに減速していたと推察される。特に、Wide 課題が呈示された場合は、主動筋第1放電の放電時間がより延長したことから、動作停止を遅らせていたと考えられる。

主動筋第2放電の開始については、主動筋第1放電の開始とともに遅延し、主動筋第1放電開始から第2放電開始までの時間には条件間の差がみ

られなかったことから、主動筋第1放電の開始の遅延が主動筋第2放電の開始タイミングに反映されていたと考えられる。しかしながら、主動筋第1放電における放電時間が延長したために、主動筋第1放電終了から第2放電開始までの時間はSF条件よりも減少していた。このことから主動筋第2放電が第1放電とは独立して制御されることで、新たに要求されたターゲットで素早く正確に停止していたと考えられる。

本研究での動作遂行中に「大きさ」を切り換える場合においても、先行研究(Kudo and Ohtsuki, 1998)と同様に3相性筋放電パターンが維持され、主動筋と拮抗筋が独立して制御されていた。これに加えて、拮抗筋や主動筋第2放電の活動の制御によるものではなく、主動筋第1放電の開始後であってもその活動時間の延長を優先し、拮抗筋と同時に活動する区間によって動作停止のタイミングを変更することが示唆された。さらに、より素早い動作停止位置の固定を行うために主動筋第1放電と第2放電が独立して制御されていたことが新たに示唆された。

2) 「方向」の素早い切り換え

ST-BR条件において動作遂行中に動作の「方向」を切り換える課題はReturn課題が呈示された場合に該当する。

基本動作であるBasic課題、動作開始位置に戻るReturn課題の両課題において、各課題のSF条件との比較から、ST条件のピーク角速度には顕著な変化はみられなかったが、ピーク動作角度が減少したことで動作時間が短縮した。これについては、ST-BR条件が動作を開始してからBasic課題あるいはReturn課題のいずれかが呈示される選択反応動作であったことから、課題が呈示された際に咄嗟に動作を停止しようとして動作角度が減少したと考えられる。

一方、BasicおよびReturn課題における全筋放電成分の放電開始潜時、放電時間、放電量のいずれにも条件間の差はみられなかった。一般的に、選択反応においては反応選択肢の増加によって単純反応よりも放電開始潜時が遅延するが、ST-BR条件においても主動筋第1放電の開始時刻は変化

しなかった。これには、ST-BR条件の「Basic課題を基本動作として動作を開始」という教示の影響、「同じターゲットまでの伸展動作」が共通していたことによって運動指令の構成が比較的容易であったことが関与していると考えられる。

また、ST-BR条件でみられた両課題の筋活動は、それぞれSF条件と比較しても顕著な変化がみられなかったことから、ST-BR条件においてもSF条件と同様に筋活動を制御していた可能性が考えられる。

これらの結果は、動作停止と反対方向の出力を同時に行うために、拮抗筋を連続的に増加するといった仮説を支持するものであり、教示通りにBasic課題を開始した後、Return課題が呈示された場合には連続的にターゲットでの伸展動作の停止と屈曲方向への出力を同時に生み出すために拮抗筋の活動開始タイミングを遅らせ、かつ放電時間と放電量を増加させていたことが示唆された。

V ま と め

本研究では、肘関節の素早い伸展動作における動作の「大きさ」あるいは「方向」を切り換えるための筋活動の制御について、主動筋第1放電、第2放電、拮抗筋放電から成る3相性筋放電パターンの変化から検討した。40°の伸展動作であるBasic課題、80°の伸展動作であるWide課題、Basic課題のターゲットに到達した後動作開始位置に戻るReturn課題を設定し、予め教示された課題を遂行する条件(SF条件)と動作開始後に呈示される課題を遂行する条件(ST条件)の2条件で行った。各課題の動作特性をふまえ、ST条件において動作遂行中に「大きさ」あるいは「方向」を切り換える場合の筋活動をSF条件と比較検討し、以下の結果が得られた。

1) Basic課題とWide課題については、主動筋第2放電の放電開始潜時が増加し、全ての筋放電成分の放電時間が増加した。両課題のST条件においては、主動筋第1放電および第2放電の放電開始潜時と主動筋第1放電の放電時間がSF条件に比べて増加した。

2) Basic 課題と Return 課題については, Return 課題における拮抗筋と主動筋第 2 放電の放電開始潜時が両条件ともに Basic 課題より増加し, Return 課題の全ての筋放電成分の放電時間と拮抗筋の平均筋放電量が増加した。条件間の差はみられなかった。

以上のことから, 動作開始後に「大きさ」を切り換える場合は動作停止のタイミングを変更するために主動筋第 1 放電の放電時間を制御し, 動作の「方向」を切り換える場合は動作停止と屈曲を連続的に行うために拮抗筋の放電時間と放電量を増加する制御であったことが示唆された。

文 献

- Almeida, G. L., Freitas, S. M. S. F. and Marconi, N. F. (2006) Coupling between muscle activities and muscle torques during horizontal-planar arm movements with direction reversal. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 16: 303–311.
- Brown, S. H. and Cooke, J. D. (1981) Amplitude- and instruction-dependent modulation of movement-related electromyogram activity in humans. *J. Physiol.*, 316: 97–107.
- Brown, S. H. and Cooke, J. D. (1990) Movement-related phasic muscle activation. I. Relations with temporal profile of movement. *J. Neurophysiol.*, 63: 455–464.
- Cooke, J. D. (1980) The organization of simple, skilled movements. In: Stelmach, G. E. and Requin, J. (Eds.). *Tutorials in motor behavior*. Elsevier: Amsterdam, pp.199–212.
- Cooke, J. D., Brown, S., Forget, R. and Lamarre, Y. (1985) Initial agonist burst duration changes with movement amplitude in a deafferented patient. *Exp. Brain Res.*, 60: 184–187.
- Corcos, D. M., Gottlieb, G. L. and Agarwal, G. C. (1989) Organizing principles for single-joint movements. II. A speed-sensitive strategy. *J. Neurophysiol.*, 62: 358–368.
- Engelhorn, R. (1983) Agonist and antagonist muscle EMG activity pattern changes with skill acquisition. *Res. Quart. Exerc. Sport.*, 54: 315–323.
- Engelhorn, R. (1997) Speed and accuracy in the learning of a complex motor skill. *Percept. Motor. Skills.*, 85: 1011–1017.
- Flament, D., Hore, J. and Vilis, T. (1984) Braking of fast and accurate elbow flexions in the monkey. *J. Physiol.*, 349: 195–202.
- Freund, H. J. and Büdingen, H. J. (1978) The relationship between speed and amplitude of the fastest voluntary contractions of human arm muscles. *Exp. Brain Res.*, 31: 1–12.
- Georgopoulos, A. P., Kalaska, J. F. and Massey, J. T. (1981) Spatial trajectories and reaction times of aimed movements: effects of practice, uncertainty and change of target location. *J. Neurophysiol.*, 46: 725–743.
- Gielen, C. C. A. M., van den Heuvel, P. J. and Denier van der Gon, J. J. (1984) Modification of muscle activation patterns during fast goal-directed arm movements. *J. Motor. Behav.*, 16: 2–19.
- Gottlieb, G. L. (1998) Muscle activation patterns during two types of voluntary single-joint movement. *J. Neurophysiol.*, 80: 1860–1867.
- Gottlieb, G. L., Corcos, D. M. and Agarwal, G. C. (1989a) Organizing principles for single-joint movements. I. A speed-insensitive strategy. *J. Neurophysiol.*, 62: 342–357.
- Gottlieb, G. L., Corcos, D. M. and Agarwal, G. C. (1989b) Strategies for the control of voluntary movements with one degree of freedom. *Behav. Brain. Sci.*, 12: 189–210.
- Gottlieb, G. L., Latash, M. L., Corcos, D. M., Liubinskas, T. J. and Agarwal, G. C. (1992) Organizing principles for single-joint movements: V. Agonist-antagonist interactions. *J. Neurophysiol.*, 67: 1417–1427.
- Hallett, M. and Marsden, C. D. (1979) Ballistic flexion movements of the human thumb. *J. Physiol.*, 294: 33–50.
- Hallett, M., Shahani, B. T. and Young, R. R. (1975) EMG analysis of stereotyped voluntary movements in man. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry.*, 38: 1154–1162.
- Hannaford, B. and Stark, L. (1985) Roles of the elements of the triphasic control signal. *Exp. Neurol.*, 90: 619–634.
- Hodges, P. W. and Bui, B. H. (1996) A comparison of computer-based methods for the determination of onset of muscle contraction using electromyography. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 101: 511–519.
- Hoffman, D. S. and Strick, P. L. (1990) Step-tracking movements of the wrist in humans. II. EMG analysis. *J. Neurosci.*, 10: 142–152.
- Kudo, K. and Ohtsuki, T. (1998) Functional modification of agonist-antagonist electromyographic activity for rapid movement inhibition. *Exp. Brain Res.*, 122: 23–30.
- MacKinnon, C. D. and Rothwell, J. C. (2000) Time-varying changes in corticospinal excitability accompanying the triphasic EMG pattern in humans. *J. Physiol.*, 528: 633–645.
- Mills, K. R. and Kimiskidis, V. (1996) Motor cortex excitability

- during ballistic forearm and finger movements. *Muscle. Nerve.*, 19: 468–473.
- 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.
- Sanes, J. N. and Jennings, V. A. (1984) Centrally programmed patterns of muscle activity in voluntary motor behaviour of humans. *Exp. Brain. Res.*, 54: 23–32.
- Sanes, J. N., Mauritz, K. H., Dalakas, M. C. and Evarts, E. V. (1985) Motor control in humans with large-fiber sensory neuropathy. *Hum. Neurobiol.*, 4: 101–114.
- Schmidt, R. A. and Lee, T. D. (1999) *Motor control and learning: A behavioral emphasis.* (3rd ed.). Human Kinetics: Champaign.
- Soechting, J. F. and Lacquaniti, F. (1983) Modification of trajectory of a pointing movement in response to a change in target location. *J. Neurophysiol.*, 49: 548–564.
- van Sonderen, J. F., Denier van der Gon, J. J. and Gielen, C. C. A. M. (1988) Conditions determining early modification of motor programmes in response to changes in target location. *Exp. Brain. Res.*, 71: 320–328.
- Wadman, W. J., Denier van der Gon, J. J. and Derksen, R. J. A. (1980) Muscle activation patterns for fast goal-directed arm movements. *J. Hum. Mov. Stud.*, 6: 19–37.

(平成 20 年 10 月 20 日受付)
(平成 21 年 4 月 14 日受理)