

筋収縮および弛緩が同肢内他筋の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響

Effect of Muscle Contraction and Relaxation on Corticospinal Excitability of Other Muscles in the Same Limb

伊藤 優史 (早稲田大学大学院スポーツ科学研究科)

加藤 孝基 (南山大学体育教育センター)

彼末 一之 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

抄録

筋の収縮・弛緩は他肢の皮質脊髄路興奮性に影響を及ぼすことが報告されている。しかし、筋の収縮・弛緩が同肢内他筋の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響は明らかになっていない。本研究は、経頭蓋磁気刺激法 (TMS) を用いて肩関節外転筋 (三角筋: DM) の収縮および弛緩が同肢内の手関節筋、指関節筋の皮質脊髄路興奮性に与える影響とその部位差を検討した。健康な成人男性 24 名は収縮している肩関節外転筋を音合図に合わせて弛緩する課題を行った。音合図後に 6 つのタイミング (50, 150, 250, 350, 500, 1000ms) で手内在筋 (第一背側骨間筋: FDI), 前腕筋 (橈側手根伸筋: ECR) の一次運動野支配領域に TMS 刺激した。これにより得た運動誘発電位 (MEP) の振幅値により皮質脊髄路興奮性を評価した。DM の収縮および弛緩時、FDI の MEP 振幅値は安静時と比べ有意な変化が認められなかった。一方で、ECR の MEP 振幅値は DM 収縮時には安静時と比べ大きな値となり、弛緩に伴い減少した。これらの結果より、肩関節外転筋の収縮・弛緩は、手内在筋と前腕筋の皮質脊髄路興奮性に異なる影響を及ぼすことが明らかになった。

1. 緒言

スポーツ動作や楽器演奏は、様々な筋肉を同時に収縮・弛緩させることで成り立っている。バドミントンにおけるスマッシュ時の筋活動を測定した研究では、熟練者はインパクト直後、上腕三頭筋 (Triceps brachii: TB), 橈側手根屈筋 (Flexor carpi radialis: FCR) を弛緩しているのに対し、未熟練者はインパクト後にもそれらの筋を収縮していることが報告されている (Sakurai and Ohtsuki, 2000)。ドラムの打音動作時の筋活動を測定した研究では、熟練者は尺側手根屈筋、橈側手根伸筋 (Extensor carpi radialis: ECR) の共収縮強度が未熟練者と比べ小さ

いことが明らかとなっている (Fujii et al., 2009)。これらのように、スポーツや楽器演奏において高いパフォーマンスを発揮するためには複数の筋肉を適切な強度やタイミングで収縮・弛緩させることが必要である。

随意的な収縮時には大脳運動関連領域が賦活することが知られている。また、解剖学的な繋がりのない他筋に影響を及ぼす間接的な効果も表れる。複数肢の筋を対象とした研究では、同側の上・下肢の周期運動時に、上肢の動作は下肢の動きに影響を受けることが明らかとなっている (Baldissera et al., 1991)。また、経頭蓋磁気刺激法 (Transcranial magnetic stimulation: TMS) を用いた研究では、下肢の筋収縮は、同側上肢の筋を支配する皮質脊髄路興奮性を促進させることが明らかになっている (Tazoe et al., 2009)。さらに、筋収縮は同側だけでなく対側の筋を支配する皮質脊髄路の興奮性を高める (Hortobagyi et al., 2003)。これらのことから、ある筋の収縮は他肢の筋の皮質脊髄路興奮性を促進することで、筋活動に影響を与えていることが示唆される。

一方、筋弛緩時にも大脳運動関連領域が賦活することが明らかになっている。筋の収縮動作や弛緩動作中の脳活動を機能的磁気共鳴画像 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) を用いて比較した研究では、弛緩動作時にも収縮動作時と同様に一次運動野と補足運動野の活動を伴うことが報告されている (Toma et al., 1999)。つまり、筋弛緩とは脳神経学的には、興奮性介在ニューロンの活動が低下することによる筋収縮の終了ではなく、抑制性介在ニューロンの働きという脳のアクティブな活動を伴うプロセスである。また、複数肢の筋を対象とした研究では、下肢の筋弛緩は同側および対側上肢の筋収縮力を低下させることが明らかとなっている (Kato et al., 2015; 2016b)。さらに、TMS を用いた研究では、下肢の筋弛緩は同側上肢の筋の皮質脊髄路興奮性を抑制させることが明らかとなっている (Kato et al., 2016a)。このことから、下肢の筋弛緩は他肢の筋の皮質脊髄路興奮性を抑

Masashi ITO (Graduate School of Sport Sciences, Waseda University)

Kouki KATO (Physical Education Center, Nanzan University)

Kazuyuki KANOSUE (Faculty of Sport Sciences, Waseda University)

受付日: 2019/6/26 受理日: 2020/3/10

制することにより筋活動を低下させることが示唆される。

以上のように、ある筋の収縮・弛緩は他肢の筋活動に影響を及ぼすことが明らかになっている。歩行運動や姿勢制御では下肢と上肢の筋による協調運動が必要であることから、筋活動が他肢の筋に及ぼす影響が発生する要因には機能的意義があると考えられる。

さらに、筋収縮および弛緩は他肢の筋活動だけでなく同肢内の筋活動にも影響を及ぼす。国分ら(2017)の研究では、ピンチング動作の際に、肘関節筋の収縮・弛緩を行うと、指関節の収縮力に影響が起ることを明らかにしている。しかし、この時、皮質脊髄路興奮性にどのような影響が起きているかについては明らかとなっていない。また、国分ら(2017)の研究では肘関節筋が手内在筋に及ぼす影響のみを調査しており、影響を及ぼす筋を変えることによる影響の違いには着目していない。筋シナジー解析を用いた研究では、様々な動作で同肢内の複数筋が協調的に活動していることが報告されている(Matsunaga et al., 2018)。また、リーチング動作の一種であるポインティング動作時には肘関節筋だけでなくECRや肩関節筋(三角筋, Deltoid muscle: DM)が同時に活動する(Devanne et al., 2002)。これらより、同肢内の筋による協調運動では肘関節筋や前腕筋だけでなく肩関節筋(DM)も重要な役割を果たすことが示唆される。そのため、物に手を伸ばすといった動作に関わる肩関節筋(DM)の活動は、肘関節筋と手内在筋の組合せと同様に前腕筋に影響を及ぼす可能性が示唆される。一方、TMSを用いて単一筋の神経入力を検討した研究では、筋の収縮強度を大きくした際、手内在筋は最大随意収縮(Maximum voluntary contraction: MVC)の20%ほどで運動誘発電位(Motor evoked potential: MEP)の振幅値が飽和するのに対し、前腕筋では100%MVCに達してもMEP振幅値が増加することを明らかにしている(Wu et al., 2002)。このことは、手内在筋では運動単位における発火頻度の増加が筋の力発揮の変調でより顕著な役割を果たしているが、前腕筋では運動単位動員数の増加がより重要な役割を果たすことを示しており、手内在筋と前腕筋とでは運動制御機構に違いがあることが示唆される。身体の中で複雑な動きを担う手内在筋と、比較的自由度の低い動きを担う前腕筋では、他の筋から受ける影響に違いがある可能性が示唆される。

そこで本研究では、“肩関節外転筋の収縮時には手内在筋と前腕筋を支配する皮質脊髄路に促進性信号が送られ、弛緩時には抑制性信号が送られるが、その影響には違いがある”という仮説の下、肩関節外転筋の収縮および弛緩が同肢内他筋の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響について明らかにすること、またその部位差について明らかにすることとした。

II. 方法

(1) 被験者

被験者は神経科学的疾患のない健康な男性24名(手内在筋試技12名: 22.7 ± 0.9 歳, 前腕筋試技12名: 22.4 ± 0.7 歳)とした。利き腕は全員右利きであった。被験者には本研究の趣旨および考えられるリスクを十分に説明した後、同意を得た。この研究は早稲田大学の人を対象とした倫理委員会の承認を得て行われた。

(2) 経頭蓋磁気刺激装置(TMS)

磁気刺激装置(Magstim 200, Magstim Ltd., UK)に接続された8の字コイル(直径70 mm)を左半球の一次運動野に刺激し、MEPを得た。被験者は刺激位置を記したスイミングキャップを被った。各被験者はそれぞれ手内在筋試技か前腕筋試技を行った。各試技はTMS刺激位置を変えることで行われた。手内在筋試技では、TMS刺激は第一背側骨間筋(First dorsal interosseous: FDI)、前腕筋試技では橈側手根伸筋(Extensor carpi radialis: ECR)のMEP振幅を最も誘発できる位置に与えられた。安静時運動閾値(Resting motor threshold: RMT)は特定部位を10回刺激した際に5回以上の確率で0.05 mV以上のMEP振幅を誘発できる最低の刺激強度と定義した(Motawar et al., 2012; Kato et al., 2016a)。

(3) 課題と実験手順

被験者は椅子に座り、フォースセンサーを設置した肘掛けに右肘を90°に曲げた状態で置いた(図1)。被験筋は肩関節外転動作の主働筋である三角筋(Deltoid muscle: DM)とその拮抗筋である大胸筋(Pectoralis major muscle: PMM)とした。また、手内在筋試技ではFDI、前腕筋

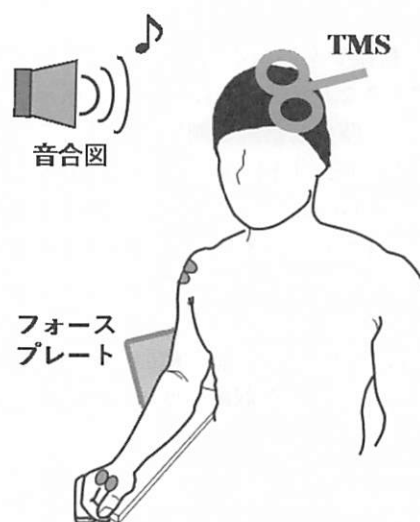


図1. 実験模式図

試技ではECRを筋電計(MEB-2216 Neuropack, Nihon Kohden, Jpn)により測定した。紙やすりで皮膚表面を削り、アルコール綿でふき取ることによって皮膚抵抗を低減した。その後、電極を各筋の筋腹に貼付した。電極はAg-AgCl電極(Bluesensor N, Ambu, DEN)を用いた。電極間距離は2 cmであった。実験を始める前にインピーダンスレベルをチェックし、抵抗が大きい箇所には新たに電極を張り替えた。導出した筋電図(Electromyogram: EMG)の信号はA/D変換装置(ML880 powerlab 16/10, ADInstruments, AUS)を介してサンプリング周波数は1 kHzで取得した。

被験者はまず、肩関節外転力の最大随意収縮(Maximum voluntary contraction: MVC)を測定した。肩関節外転力は、フォースセンサー(FP3, Biometrics Ltd, UK)を用いて導出した。Force levelの信号は、EMGと同様にA/D変換装置を介してサンプリング周波数は1 kHzで取得した。3秒以上のMVCを行い、Forceの最大値を含む1秒間の平均値をその被験者のForce levelと主動筋EMGの最大値とした。

肩関節外転筋を対象に、収縮する肩関節外転筋を音合図に合わせて素早く弛緩する課題をした。被験者には肩関節外転筋を弛緩する際、拮抗筋(PMM)の活動をできる限り用いないように教示した。課題は十分に練習を行った後に行った。被験者には、Force level変化をリアルタイムでPC画面に表示する視覚的なフィードバックを与えた。収縮強度は50%MVCで行った。課題中の音合図後、50、150、250、350、500、1000 ms後にTMS刺激をFDI、ECRに与えることで、MEP振幅を取得した。刺激間隔はメトロノームの信号を受けた電気刺激装置(SEN-8203, Nihon kohden, Jpn)よりTMS刺激装置への出力潜時を変化させることで調整した。

TMSの刺激強度はRMTの120%とした。以上のタイミングに加えて、安静時にTMS刺激を与える(以下rest)計7タイミングを各15回ずつランダムに計105回行った。被験者は「いきます」という掛け声を聞いた後に50%MVCの肩関節外転を行い出力が安定してから2-5秒の間にランダムで鳴らされた音合図に反応して、できるだけ素早く筋を弛緩した。被験者の疲労を防ぐため、20回ごとに5分以上の休憩を取った。音合図前500 msから音合図後2500 msまで計3000 ms間のDM、PMMおよび手内在筋試技ではFDI、前腕筋試技ではECRのEMGを記録した。

(4) 解析方法

皮質脊髄路興奮性は、FDIおよびECRのMEP振幅によって評価した。MEP振幅値はTMS刺激後に続くMEP発現からの最大値と最小値の差とした(図2)。また、算

出したMEP振幅値はrest時の値で正規化した。DMの筋活動量はTMS刺激前100 msの二乗平均平方根(Root mean square: RMS)とし、MVCの値で正規化した。DMのrelaxation onsetはEMGの波形より安静状態のレベルに戻る瞬間とした(Buccolieri et al., 2004; Kato et al., 2016a)。一課題ごとにrelaxation onsetに対するTMS刺激時間を算出した(図3)。その後、Relaxation onsetを0 msとして時系列を揃え(Kato et al., 2016)、100 msごとに平均値および標準偏差を算出した(-100 ms, -101-0 ms, 1-100 ms, 101-200 ms, 201-300 ms, 301-400 ms, 401 ms-)。また、TMS刺激は音合図後に7つのタイミングで行うので、様々な弛緩フェイズの各筋の皮質脊髄路興奮性を評価することができる。そこで、各筋の皮質脊髄路興奮性変化と様々なDMの筋活動フェイズ(収縮時、弛緩初期、弛緩中期、弛緩終期)の関係を明らかにするために一試技ごとにDMの活動量の大きさで並び替え10%ごとに平均値および標準偏差を算出した(0-9%MVC, 10-19%MVC, 20-29%MVC, 30-39%MVC, 40-49%MVC, 50-59%MVC, 60%MVC-)。

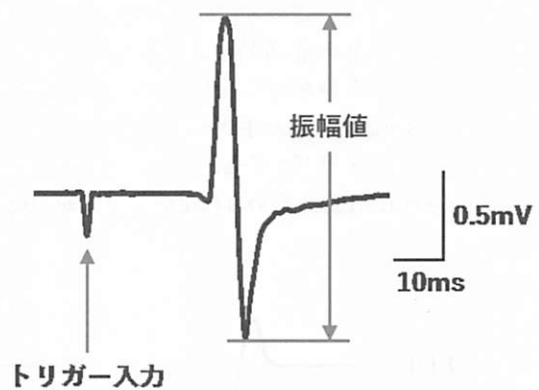


図2. MEP振幅値算出方法

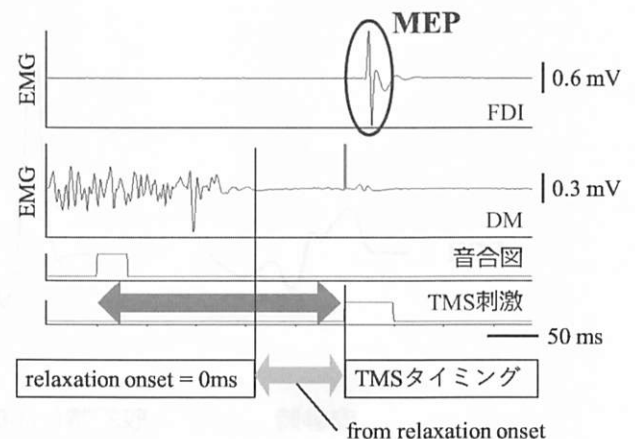


図3. relaxation onsetに対するTMS刺激時間

皮質脊髄路興奮性を測定する筋の背景筋電図はTMS刺激前50 ms間のRMS値とし、25 μ Vを超えた試技を解析から除外した(Kato et al., 2016a)。また、音合図後からTMS刺激までの間に拮抗筋(PMM)の活動を確認し、過度な活動(50 ms間のRMS値が200 μ V以上)が認められた場合は統計から除外した。

(5) 統計処理

安静時のMEP振幅値と時系列で並び替えた弛緩動作時のMEP振幅値(前項で述べた7つのTMSタイミング)をWilcoxonの符号付き順位検定を用いることで比較した。Bonferroni補正を行い、統計的有意水準は5%未満とした。また、DMの筋活動量毎のMEP振幅値(前項で述べた7つのDM収縮強度)を、Friedman検定を用いることで比較した。統計的有意水準は5%未満とした。

III. 結果

手内在筋試技および前腕筋試技に参加した各1人の被験者から得られた、DM安静時、収縮時、および弛緩時のFDI、ECRのMEP波形を図4に示した。

TMS前FDIの活動が認められた31試技(全1260試技の2.4%)およびECRの筋活動が認められた15試技(全1260試技の1.1%)を解析から除外した。また、拮抗筋(PMM)の活動が認められた手内在筋試技の10試技(全1260試技の0.7%)を解析から除外した。前腕筋試技では拮抗筋の過度な活動は認められなかった。安静時を1

としたFDIのMEP振幅値はrest時と比べてどの区間においても有意な差が認められなかった(-100 ms: 1.42 ± 0.75 , -99-0 ms: 0.97 ± 0.54 , 1-100 ms: 0.93 ± 0.62 , 101-200 ms: 0.97 ± 0.48 , 201-300 ms: 1.25 ± 0.58 , 301-400 ms: 1.39 ± 0.40 , 401 ms- : 1.32 ± 0.50)。また、DMの活動量毎のMEP振幅値には主効果が認められなかった($P > 0.05$, $Z = 9.43$) (図5-A, 表1)。

ECRのMEP振幅値は-100 ms以前は 2.86 ± 0.90 ($p < 0.01$, $Z = 3.06$)、101-200 msは 1.78 ± 0.74 ($p < 0.05$, $Z = 2.90$)、201-300 msは 1.66 ± 0.82 ($p < 0.05$, $Z = 2.75$)、400 ms以上は 1.54 ± 0.47 ($p < 0.05$, $Z = 2.82$) でrest時と比べて有意な増加が認められた。一方、-99-0 ms (1.69 ± 0.67)、1-100 ms (1.67 ± 0.67)、301-400 ms (1.66 ± 0.82) のMEP振幅は安静時のMEPと比べて有意な差が認められなかった。DMの活動量毎のECRのMEP振幅値には主効果が認められた($p < 0.01$, $Z = 37.23$) (図5-B, 表1)。その後、post hoc testによって40-49%MVC (2.91 ± 0.93 , $p < 0.01$, $Z = 3.82$)、50-59%MVC (2.92 ± 0.78 , $p < 0.01$, $Z = 3.94$)、60%MVC- (3.17 ± 1.07 , $p < 0.01$, $Z = 4.17$) のMEP振幅値は0-9%MVC時のMEP振幅値 (1.71 ± 0.64) と比べて有意な増加が認められた。また、40-49%MVC (2.91 ± 0.93 , $p < 0.01$, $Z = 4.00$)、50-59%MVC (2.92 ± 0.78 , $p < 0.01$, $Z = 4.13$)、60%MVC- (3.17 ± 1.07 , $p < 0.01$, $Z = 4.38$) のMEP振幅値は10-19%MVC時のMEP振幅値 (1.70 ± 0.53) と比べて有意な増加が認められた。

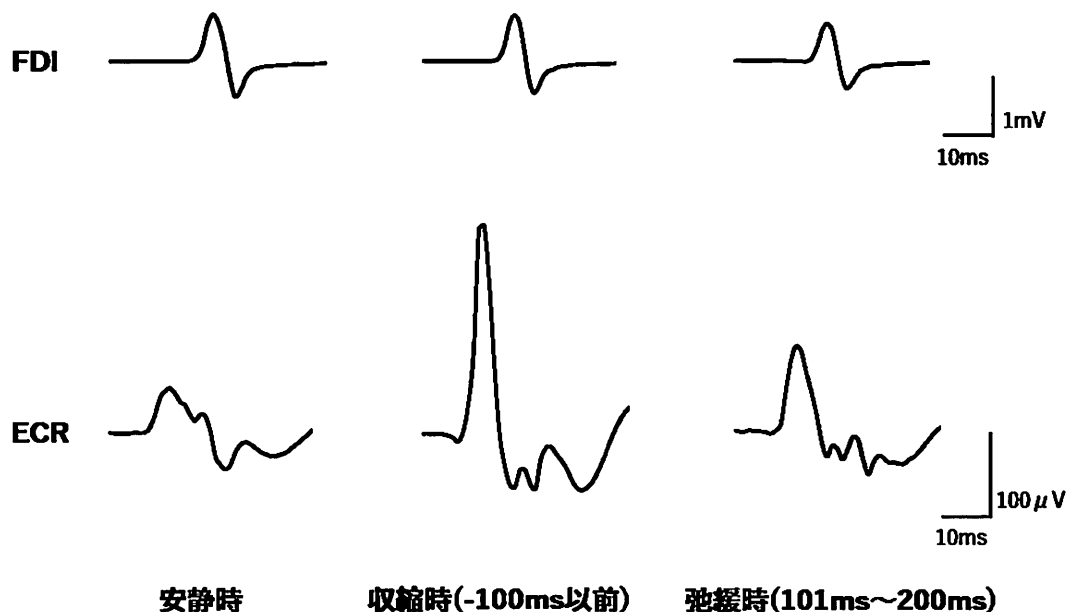


図4. 一人の被験者から得られた肩関節外転筋安静時、収縮時および弛緩時の手内在筋(FDI)、前腕筋(ECR)のMEPの波形

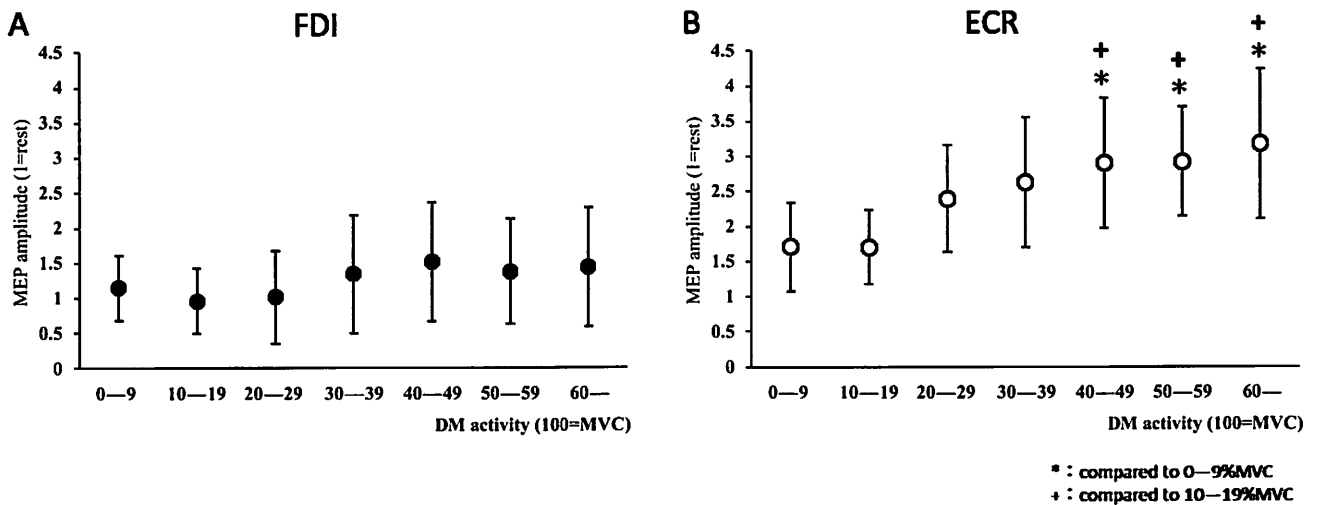


図5. 肩関節外転筋(DM)活動とMEP振幅値

A. 第一背側骨間筋(FDI)のMEP振幅値変化 B. 橈側手根伸筋(ECR)のMEP振幅値変化

表1. DMの活動とFDIおよびECRのMEP振幅値(1=肩関節外転筋安静時) (平均値±標準偏差)

DM activity	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-(%MVC)
FDI	1.14 ± 0.48	0.96 ± 0.46	1.01 ± 0.66	1.34 ± 0.85	1.52 ± 0.85	1.38 ± 0.75	1.14 ± 0.86
ECR	1.71 ± 0.64	1.70 ± 0.53	2.40 ± 0.77	2.63 ± 0.93	2.91 ± 0.93	2.92 ± 0.78	3.17 ± 1.07

IV. 考察

本研究の目的は、肩関節外転筋の収縮および弛緩が同肢内他筋の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響について明らかにすること、またその部位差について明らかにすることであった。三角筋(DM)の収縮および弛緩時、第一背側骨間筋(FDI)の皮質脊髄路興奮性はrest時と比べて有意な差が認められなかった。また、DMの活動量毎におけるFDIのMEP振幅値には有意な差が認められなかった。

一方、橈側手根伸筋(ECR)では、DMの収縮時である0-100 ms、DMの弛緩後である101-200 ms、201-300 ms、400 ms-でrest時と比べて有意な増加が認められた($p < 0.05$)。また、DMの活動量毎のECRのMEP振幅値には主効果が認められ($p < 0.01$)。その後、post hoc testにより、DMの収縮時(40-49%、50-59%、60%-)におけるECRのMEP振幅値は弛緩後(0-9%、10-19%)の振幅値と比べ有意な増加が認められた($p < 0.05$)。これらの結果から、肩関節外転筋の収縮はFDI皮質脊髄路興奮性に影響を及ぼさないがECRの皮質脊髄路興奮性には促進性の影響を及ぼすことが明らかとなった。さらに、肩関節外転筋の弛緩はFDIの皮質脊髄路興奮性に影響を及ぼさず、ECRの皮質脊髄路興奮性を一時的にrest状態

にまで低下させるが、その後、促進の影響を及ぼすことが明らかとなった。このことにより“肩関節外転筋の収縮時には手内在筋と前腕筋を支配する皮質脊髄路に促進性信号が送られ、弛緩時には抑制性信号が送られる”という仮説は棄却されたが、“肩関節外転筋の収縮および弛緩が手内在筋と前腕筋に及ぼす影響には違いがある”という仮説は支持された。

これまでに、複数肢の筋収縮を対象に行った研究では、下肢の筋収縮により、FDIおよびFCRの皮質脊髄路興奮性が促進することが明らかとなっている(Tazoe et al., 2009)。本研究結果では、肩関節外転筋収縮時に、ECRの皮質脊髄路興奮性は促進されたが、FDIの皮質脊髄路興奮性は影響を受けなかった。これらのことから、ECRは他肢、同肢内に関わらず全身の筋から同時に影響を受ける可能性が示唆された。また、FDIは下肢の筋といった離れた関節ではその影響を強く受けるが、影響を及ぼす筋がFDIに近づくほど、その影響は小さくなることが示唆された。一方、国分ら(2017)の研究では、指関節屈曲力を増加させるとキープしている肘関節屈曲力が増加し、肘関節屈曲力を増加させると指関節屈曲力に影響を及ぼさないことから、筋収縮が同肢内他筋に及ぼす影響は同一の筋間であっても筋活動パターンの組合せによって異

なることが報告されている。このことから、ある筋の収縮が同肢内他筋の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響は同一の筋の組合せであっても、影響を受ける筋によって部位差があることが示唆された。

肘関節屈曲筋の収縮はFDIの筋活動に影響を及ぼさない(国分ら2017)。本研究結果においても、DMの収縮はFDIの皮質脊髄路興奮性に影響を及ぼさなかった。このことから、FDIは肘関節屈曲筋や肩関節外転筋の筋活動の影響を受けにくいということが示唆された。ECRとFDIで影響の部位差が生じた要因として、関節の角度や運動を感知する筋紡錘やゴルジ腱受容器などの深部感覚受容器からの求心性信号の影響が考えられる。TMSを用いた研究では、受動的に肩関節が動かされ、関節角度が変化することによってECRの皮質脊髄路興奮性が変化することが明らかにされている(Ginanneschi et al., 2006)。また、Dominiciら(2005)は受動的に変化する肩関節の角度がFDIの皮質脊髄路興奮性に影響を及ぼさないことを明らかにした。これらのことから、ある関節の受動的な角度変化による深部感覚受容器の興奮はFDIとECRの皮質脊髄路興奮性に異なる影響をもたらすことが示唆される。本研究で行った三角筋の等尺性収縮でも、三角筋の収縮によって深部感覚受容器が活動することが推察される。そのため、能動的な三角筋収縮による深部感覚受容器の活動によってECRとFDIに異なる影響をもたらされた可能性が考えられる。

また、ECRとFDIで影響の部位差が生じた要因として、機能的意義が異なることが考えられる。日常的に見られる手を伸ばして物を取る運動は、手を物がある場所に到達させるリーチング動作と、物を掴む、あるいはつかむ把持運動に分類することができる。同肢内の筋を対象に行った研究では、リーチング動作の一種であるポイントング動作時、遠位筋(ECR)と近位筋(DM)の同時活動が確認されることを明らかにしている(Devanne et al., 2002)。このことより、DMが主動筋である肩関節外転動作や、ECRが主動筋である手関節伸展動作は、ターゲットに向かって手を伸ばすリーチング動作に強く関与することが示唆される。そのため、生まれ持った先天的な神経回路として働くこと、あるいは動作を繰り返し行うために後天的に神経回路を最適に変容させることによって、DMの収縮に伴いECRの皮質脊髄路興奮性に促進させたと考えられる。一方、FDIが主動筋である指関節内転動作は掴み動作といった精密な把持運動に関与する。そのため、先天的な神経回路として、あるいは後天的に神経回路を変容させることによって、DMの収縮の影響を受けなかったと考えられる。これらの影響を明らかにするためには、fMRIや、三角筋弛緩時に一次運動野と運動前野に対し2連発磁気刺激を与え皮質脊髄路興奮性の変

化を比較することで影響の違いを比較する必要がある。

肩関節外転筋弛緩時には、FDIの皮質脊髄路興奮性には変化が見られず、ECRは $-99-0$ ms、 $1-100$ ms時に一時的にrest状態まで皮質脊髄路興奮性が低下したが、その後 $101-200$ ms、 $201-300$ ms、 400 ms以上で増加した。これまでに、複数肢の筋弛緩を対象に行った研究では、下肢の筋弛緩により、ECR、FCRの皮質脊髄路興奮性が安静時と比べて一時的に低下すること、またこの時、ECRおよびFCRの皮質内抑制介在神経の活動が高まることが明らかとなっている(Kato et al., 2016a)。本研究結果においても、DMの弛緩によって、ECRの皮質脊髄路興奮性に抑制性的影響が認められたが、抑制時のMEP振幅値は安静時と同等であった。このことから、肩関節外転筋の弛緩が同肢内他筋の皮質脊髄路興奮性に及ぼす抑制性的影響は、他肢の筋弛緩による影響に比べ小さいことが示唆された。この結果は、筋弛緩によって、影響を受ける筋の皮質内抑制性介在神経の活動が起らなかったことや、筋弛緩によって皮質内抑制性介在神経が活動したが、肩関節筋収縮時における皮質内興奮性介在神経の活動が持続することで促進と抑制の影響が相殺されたことを起因すると考えられる。一方、ECRではDMの弛緩後 $101-200$ ms、 $201-300$ ms、 400 ms以上の時点でも促進性的影響が及ぼされた。このことから、DMの収縮がECRの皮質脊髄路興奮性に及ぼす促進性的影響は長期にわたることが明らかとなった。しかしながら、 $-99-0$ ms、 $1-100$ ms時に促進性的影響が消失したことから、DMの弛緩による抑制性的影響が促進性的影響を一時的に消失させた可能性が示唆される。しかし、本研究ではDMの弛緩によるECRの皮質脊髄路興奮性変化の起源を明らかにすることはできなかった。したがって、二連発磁気刺激法を用いて大脳皮質の興奮性および抑制回路を評価することで皮質脊髄路興奮性変化の起源を検討する必要がある。

また、本研究ではDMの弛緩がFDIとECRの皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響についてのみを研究しており、これらの結果が同肢内における筋間で普遍的な結果であるか、影響を及ぼす筋や動作による特有の結果であるかを明らかにすることはできなかった。そのため、弛緩動作を行う筋を変えることや肩関節屈曲、伸展動作に変えることで影響を受ける筋の皮質脊髄路興奮性変化の違いについて検討する必要がある。また、本研究では実験室内再現性や条件毎の級内相関係数を測定しなかった。肩関節外転筋が同肢内他筋の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響の関係をより明らかにするために今後、環境による反応の変化について検討する必要がある。

本研究の「手内在筋が肩関節外転筋の弛緩による影響を受けづらい」という結果は多くのスポーツにおいて理想

的な協調運動確立の一助になると考えられる。例えば野球やアメリカンフットボールでは精度の高い投球を求められる。本研究結果により、他の筋から影響を受けやすい前腕筋を用いるかわりに、他の筋から独立した動きが可能な手内在筋を用いることで、精密な動作のコントロールが可能となりパフォーマンスの向上につながるだろう。

V. 結論

本研究では、手内在筋および前腕筋を対象に、肩関節外転筋の弛緩が、同肢内他筋の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響について明らかにすること、またその部位差について検討した。その結果、肩関節外転筋の収縮はFDI皮質脊髄路興奮性に影響を及ぼさないがECRの皮質脊髄路興奮性には促進性の影響を及ぼすことが明らかとなった。さらに、肩関節外転筋の弛緩はFDIの皮質脊髄路興奮性に影響を及ぼさず、ECRの皮質脊髄路興奮性を一時的にrest状態にまで低下させるが、その後、促進の影響を及ぼすことが明らかとなった。したがって、肩関節外転筋の弛緩が同肢内他筋に及ぼす影響は小さいこと、また肩関節外転筋の収縮からの弛緩が同肢内他筋に及ぼす影響は組合せる筋によって異なるということが示唆された。

VI. 参考文献

- Baldissera, F., Cavallari, P., Marini, G., and Tassone, G. (1991). Differential control of in-phase and anti-phase coupling of rhythmic movements of ipsilateral hand and foot. *Experimental Brain Research*, 83(2): 375-380.
- Buccolieri, A., Abbruzzese, G., and Rothwell, J. C. (2004). Relaxation from a voluntary contraction is preceded by increased excitability of motor cortical inhibitory circuits. *Journal of Physiology*, 558.2: 685-695.
- Devanne, H., Cohen, LG., Kouchtir-Devanne, N., and Capaday C. (2002). Integrated motor cortical control of task-related muscles during pointing in humans. *Journal of Neurophysiology*, 87(6): 3006-3017.
- Dominici, F., Popa, T., Ginanneschi, F., Mazzocchio, R., and Rossi A. (2005). Cortico-motoneuronal output to intrinsic hand muscles is differentially influenced by static changes in shoulder positions. *Experimental Brain Research*, 164(4): 500-504.
- Fujii, S., Kudo, K., Ohtsuki, T., and Oda, S. (2009). Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer. *Neuroscience Letters*, 7; 459(2): 69-73.
- Ginanneschi, F., Dominici, F., Biasella, A., Gelli, F., and Rossi, A. (2006). Changes in corticomotor excitability of forearm muscles in relation to static shoulder positions. *Brain Research*, 1073-1074: 332-338.
- Hortobágyi, T., Taylor, JL., Petersen, NT., Russell, G., and Gandevia SC. (2003) Changes in segmental and motor cortical output with contralateral muscle contractions and altered sensory inputs in humans. *Journal of Neurophysiology*, 90(4): 2451-2459.
- Kato, K., Watanabe, T., and Kanosue K. (2015) Effects of muscle relaxation on sustained contraction of ipsilateral remote muscle. *Physiological Reports*, 3 (11): e12620.
- Kato K., Muraoka T., Mizuguchi N., Nakagawa K., Nakata H., Kanosue K. (2016 a) Muscle relaxation of the foot reduces corticospinal excitability of hand muscles and enhances intracortical inhibition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10: 218.
- Kato K. and Kanosue K. (2016 b) Effect of muscle relaxation in the foot on simultaneous muscle contraction in the contralateral hand. *Neuroscience Letters*, 633: 252-256.
- Matsunaga N, Kaneoka K. (2018) Comparison of Modular Control during Smash Shot between Advanced and Beginner Badminton Players. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2018: 6592357.
- Motawar, B., Hur, P., Stinear, J., and Seo, N. J. (2012). Contribution of intracortical inhibition in voluntary muscle relaxation. *Experimental Brain Research*, 221, 299-308.
- Sakurai, S., and Ohtsuki, T. (2000) Muscle activity and accuracy of performance of the smash stroke in badminton with reference to skill and practice. *Journal of sports sciences*, 18.11: 901-914.
- Tazoe, T., Sakamoto, M., Nakajima, T., Endoh, T., Shiozawa, S., and Komiyama, T. (2009). Remote facilitation of supraspinal motor excitability depends on the level of effort. *European Journal of Neuroscience*, 30(7), 1297-1305.
- Toma, K., Honda, M., Hanakawa, T., Okada, T., Fukuyama, H., Ikeda, A., ... and Shibasaki, H. (1999). Activities of the primary and supplementary motor areas increase in preparation and execution of voluntary muscle relaxation: an event-related fMRI

study. *Journal of Neuroscience*, 19(9), 3527-3534.

Wu, L., Goto, Y., Taniwaki, T., Kinukawa, N., Tobimatsu, S. (2002). Different patterns of excitation and inhibition of the small hand and forearm muscles from magnetic brain stimulation in humans. *Clinical Neurophysiology*, 113(8): 1286-1294.

国分 真秀・加藤 孝基・彼末 一之 (2017)「筋の弛緩および収縮が同肢内他筋の活動に及ぼす影響」東京体育学研究 第8巻.

連絡責任者

住所：〒359-1165 埼玉県所沢市堀之内135-1-108

早稲田大学スポーツ科学研究科

氏名：伊藤 優史

Tel & Fax : 04-2947-6826

E-mail : itomasashi.23@gmail.com