

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：13103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25871146

研究課題名(和文)局所的な筋疲労後に疲労していない他肢の努力感は軽減するか

研究課題名(英文)Force output based on sense of effort in non-fatigued limb after muscle fatigue

研究代表者

松浦 亮太(Matsuura, Ryouta)

上越教育大学・学校教育研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10551278

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、局所的な筋疲労後に疲労していない他肢の一次運動野興奮性が変化することに注目し、その変化が筋力発揮時の努力感軽減に関連づけられるか否かを検討した。片側ハンドグリップによる筋疲労後、安静時における下肢の皮質脊髄路興奮性は変化したが、下肢を筋収縮させた場合には消失した。ただし、片側ハンドグリップによる筋疲労後において、下肢筋収縮時の皮質脊髄路興奮性と一定の努力感に基づいて発揮された筋力の間には正の相関関係が見出された。以上から、片側上肢の筋疲労後において、下肢による一定の努力感に基づいた筋力発揮は、筋収縮中における皮質脊髄路の入力・出力特性によって決定されることが示唆された。

研究成果の概要(英文):The purpose of this study was to examine relationship between changes in motor cortical excitability in non-fatigued muscle after muscle fatigue and force output based on sense of effort in the non-fatigued muscle. At rest, corticospinal excitability in non-fatigued lower limb changed after muscle fatigue elicited by unilateral handgrip. In contrast, corticospinal excitability in the non-fatigued lower limb did not change when the non-fatigued muscle was contracting after muscle fatigue by unilateral handgrip. However, when the non-fatigued muscle was active, corticospinal excitability was positively correlated with force output based on fixed sense of effort. Therefore, it is suggested that input-output properties when contracting muscle determine force output based on fixed sense of effort in non-fatigued lower limb after muscle fatigue elicited by unilateral upper limb.

研究分野：運動生理学

キーワード：筋疲労 努力感 運動誘発電位

### 1. 研究開始当初の背景

軽い物体と重い物体を持つ場合、軽い物体を持つ方が簡単に行える。また、同じ重さの物体を長時間保持していると、重さは変わらないのにより重く感じるようになり、保持は困難になっていく。このような運動課題に対する実行可能性は、運動遂行時の努力感に依存しているとされている。事実、一定負荷による運動を持続する際、努力感は時間経過に応じて直線的に増大し、努力感が最大に達すると運動は継続できなくなる (Eston et al. Psychophysiol, 2007)。このことは、任意の運動課題に対する運動開始時の努力感を軽減することで、運動遂行の実行可能性が高まることを示唆している。つまり、努力感の軽減は運動遂行を「楽」にし、運動継続時間を延長させると考えられる (図1)。

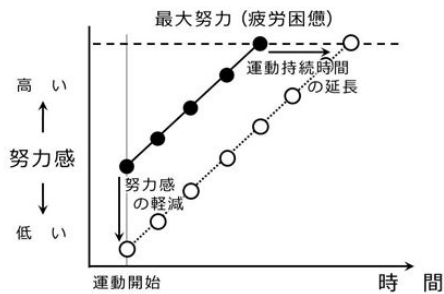


図1. 一定負荷運動時の努力感

従来、運動遂行時の努力感は、一次運動野から筋への出力の遠心性コピーによって形成されると考えられてきた (Sperry J Comp Physiol Psychol, 1950) が、最近では高位の中枢から一次運動野への入力が必要であることを示す知見が蓄積されてきている (Carson et al. J Physiol, 2005; Gelli et al. Eur J Neurosci, 2005)。したがって、運動前に一次運動野興奮性を増大させると、同等の運動出力を生み出すための努力感が軽減し、運動遂行が「楽」になる可能性が高い。意図的に一次運動野興奮性を増大させることが出来れば、運動課題の実行可能性を必要に応じて高めることが可能となり、リハビリテーションやトレーニングの効果を高めることが期待される。

意図的かつ一定時間にわたって一次運動野興奮性を高める手段として反復経頭蓋刺激 (rTMS) が挙げられるが、rTMS は高価な刺激装置や技術的な知識が必要であることから、一般的に用いることが難しい。そこで、本研究では筋疲労後に起こる一次運動野興奮性の変化に着目した。本研究代表者はこれまでの研究で、筋疲労後に疲労していない他肢 (非疲労筋) の神経調節や運動機能に及ぼす影響を検討してきた (科学研究費補助金 若手研究 (スタートアップ) 平成 21~22 年; 松浦と緒方 第 67 回日本体力医学会, 2012)。その中で、筋疲労後に他肢の一次運動野興奮性

が減少・増大する運動課題条件を見出している。これは、筋疲労が他肢の努力感を軽減させる可能性を示唆している。この可能性を明らかにするため、1) 筋疲労が他肢の一次運動野神経活動を变化させる機序を理解し、2) その変化が努力感と筋疲労発生機序に影響を及ぼすか、を実証しなければならない。

### 2. 研究の目的

本研究では、努力感の軽減により運動課題の実行可能性を高める方法を明らかにすることを目的として、筋疲労が他肢の一次運動野神経活動および努力感に及ぼす影響を検討した。特に以下の課題を設定した。

片腕上肢による筋疲労収縮中および筋疲労後における下肢の一次運動野神経活動の把握

片腕上肢による筋疲労後における下肢の一次運動野神経活動の変化と努力感の因果関係

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、以下の3つの実験を実施した。

(1) 努力感の軽減に結びつく予想される上肢筋疲労後における下肢の一次運動野興奮性の増大を導く一次運動野神経活動のふるまいを把握するため、片腕上肢による筋疲労収縮中および筋疲労後に下肢の皮質脊髄路興奮性を大脳磁気刺激 (TMS) によって測定した。メイン実験は4条件で実施し、実施の順番は無作為であった。メイン実験に先立ち、各被験者は右手での等尺性ハンドグリップによる最大随意筋収縮 (MVC) を測定した。

**条件 1**: 初めに、TMS を用いて、安静時の右外側広筋 (VL) から振幅が 0.5 mV となる刺激強度で運動誘発電位 (MEP) を 12 回記録した。次に、50%MVC の右ハンドグリップを 2 分間行っている間に、5 秒間隔で右 VL から MEP を記録した。ハンドグリップ終了直後、再度右ハンドグリップで MVC を測定した。50%MVC の右ハンドグリップ終了 5・10・15・20・25・30 分後に、それぞれ安静時の右 VL から MEP を 12 回記録した。

**条件 2**: 条件 1 における右 VL を左 VL に変えて実験を行った。

**条件 3**: 条件 1 における 50%MVC の右ハンドグリップを 10%MVC に変えて実験を行った。

**条件 4**: 条件 3 における右 VL を左 VL に変えて実験を行った。

(2) 努力感に基づいた筋力発揮は、その時点で発揮可能な MVC に影響を受けるため、片腕上肢による筋疲労後に下肢の MVC が変

化するか否かを調査した。メイン実験は2条件で実施し、実施の順番は無作為であった。

**条件 1**: 初めに、最大上強度 (最大 $\times 1.5$ ) の経皮的定電流電気刺激 (ES: 200  $\mu\text{s}$ ) を腓骨頭付近の総腓骨神経 (CPN) へ与え、安静時の右前脛骨筋 (TA) から最大 M 波 (Mmax) を 3 回記録した。次に、右の足関節背屈で MVC を 3 回実施し、MVC 中および MVC 終了 2 秒後に最大上強度の ES を CPN へ 2 連発 (100 Hz) で与え、interpolated twitch 法により随意的動員度 (VA) を算出した。これらの測定後、右ハンドグリップによる MVC を 3 回測定し、30%MVC の右ハンドグリップを 2 分間行った。終了直後に再度右ハンドグリップで MVC を測定した。30%MVC の右ハンドグリップ終了直後・5・10・15・20・25・30 分後に、それぞれ Mmax・右足関節背屈 MVC・VA を測定した。

**条件 2**: 条件 1 における右 TA を左 TA に変えて実験を行った。

(3) 上肢筋疲労後において、努力感に基づいて発揮される下肢の筋力とその際の一次運動野興奮性と因果関係を有するか否かを調査するため、片腕上肢の筋疲労後に下肢を活動させた状態で皮質脊髄路興奮性を測定し、一定の努力感に基づいて発揮される筋力との関係性を検討した。メイン実験は 2 条件で実施し、実施の順番は無作為であった。

**条件 1**: 初めに、右足関節背屈で MVC を 3 回実施し、その際の最大筋電図活動 (EMGmax) を測定した。次に、TMS を用いて右 TA から安静時運動閾値 (RMT) を測定した後、右 TA で 5%EMGmax に相当する筋活動を発揮している時に、TMS を用いて振幅が 0.7~1.0 mV となる刺激強度で MEP を 10 回記録した。その後、30%EMGmax に相当する筋活動を右 TA で発揮してもらいながら、TMS を用いて silent period を 5 回記録した。さらに、CPN へ単発の ES を与え、TA から Mmax を 3 回記録した。その後、Borg のスケールを用いて主観的運動強度 (RPE) が 5 となるように、5 秒間の右足関節背屈を 15 秒間隔で 3 回行った。これらの測定後、右ハンドグリップによる MVC を 3 回測定し、30%MVC の右ハンドグリップを 2 分間行った。終了直後に再度右ハンドグリップで MVC を測定した。30%MVC の右ハンドグリップ終了直後・10・20・30 分後に、それぞれ MEP・silent period・Mmax・RPE が 5 の筋力発揮を測定した。

**条件 2**: 条件 1 における右 TA を左 TA に変えて実験を行った。

#### 4. 研究成果

それぞれの実験について、以下の成果が得

られた。

(1) 7 名の健常成人を対象に行った。2 分間の右グリップ中において VL の MEP は増大した。右ハンドグリップ中における MEP の増大の程度は、右ハンドグリップが 10%MVC の時よりも 50%MVC の時の方が大きかったが、どちらの強度においても左右の VL で MEP に差は見られなかった。この結果に対して、右ハンドグリップ後の MEP 変化には左右の VL で違いが見られた。特に左 VL の MEP は増大し、右 VL の MEP よりも大きな値を示した。右ハンドグリップ後の MEP に見られたこれらの変化は、右ハンドグリップが 10%MVC の時と 50%MVC の時で差が見られずに同様であった。

片側上肢での筋疲労後に下肢の皮質脊髄路興奮性が左右で異なる変化を示すという本実験の結果は、片側下肢で筋疲労を引き起こした後に上肢の MEP を測定した先行研究 (Matsuura and Ogata, J Physiol Anthropol, 2015) の結果と類似するものであった。右ハンドグリップ後に見られた VL の皮質脊髄路興奮性の変化は、右ハンドグリップ中に VL の皮質脊髄路興奮性を促通させる神経経路の可塑的变化に関連して生じていたわけではないと考えられる。また、右ハンドグリップ中に促通された VL における皮質脊髄路興奮性の after effect が、右ハンドグリップ後の左 VL における MEP 増大を生じさせた可能性もあるが、ハンドグリップ中の MEP 増大は左右 VL で同様であったため、after effect で全てを説明することはできない。ハンドグリップによる筋疲労の大きさも 10%MVC と 50%MVC では異なっていたため、ハンドグリップによって生じた中枢性疲労の違いが VL における皮質脊髄路興奮性の変化の原因ではないと考えられる。片側下肢の筋疲労後に上肢一次運動野の半球間抑制は変化することが報告されている (Matsuura and Ogata J Physiol Anthropol, 2015)。本実験では半球間抑制を測定していないが、半球間抑制と促通効果の相互作用によって左 VL の皮質脊髄路興奮性が増大したのかもしれない。右ハンドグリップの強度に関わらず、2 分間の持続的収縮により左下肢の皮質脊髄路興奮性は増大することが明らかとなった。

(2) 8 名の健常成人を対象に行った。2 分間の右ハンドグリップ後、足関節背屈による MVC は左右ともに変化を示さず、VA も同様であった。2 連発の ES による単収縮および Mmax も変化しなかった。これらの結果から、右ハンドグリップによる筋疲労は、左右どちらの下肢においても中枢性疲労および末梢性疲労を生じさせないことが示された。したがって、30%MVC の右ハンドグリップを 2 分間行った後に行う一定の努力感に基づいた下肢の筋力発揮は、MVC の変化による影響を考慮せずに検討可能であることが明ら

かとなった。

(3) 8名の健常成人を対象に行った。2分間の右ハンドグリップ後、TA収縮中のMEPは左右ともに変化しなかった。Silent periodは左右で異なる変化を示し、右TAにおいて抑制が増大した。RPEが5となるように発揮された足関節背屈の筋力は左右ともに変化しなかったが、左右それぞれでTA収縮中に記録されたMEPと正の相関関係があった。また、右TAで記録されたsilent periodとRPEが5となるように発揮された足関節背屈の筋力は負の相関関係があった。

2分間の右ハンドグリップ後における下肢の皮質脊髄路興奮性は、安静時とは異なって筋収縮時には顕著な変化を示さず、左右の差も見られなかった。これらにより、片腕上肢の筋疲労後における下肢の皮質脊髄路興奮性は、安静時と筋収縮時において異なる神経経路の関与によって決定されることが推察される。ただし、左右のTAにおいて、RPEを5とするように発揮された筋力と収縮中のMEPに正の相関関係があったことは、一次運動野より高次の領野の活動に努力感が依存しているという前提に立てば、下肢筋収縮中における皮質内の興奮性・抑制性経路の貢献度合いが筋力発揮の大小に関連していると考えられる。また、silent periodは一次運動野より高次の領野における抑制の大きさを示す可能性についても指摘されている(Benwell et al. Exp Brain Res, 2007)。RPEを5とするように発揮された筋力と右TAのsilent periodに負の相関関係が見出されたことから、左大脳半球では、筋疲労により一定の努力感の下での一次運動野に対する入力が増弱していたのかもしれない。しかしながら、この減弱が筋疲労を生じさせた右腕と反対側の脳半球でのみ起こった理由については不明である。

以上の成果から、片側上肢の筋疲労後における下肢の皮質脊髄路興奮性の変化は、安静時のみに見られる現象であり、疲労していない下肢で筋収縮を実施した場合には消失してしまうことが明らかとなった。また、片側上肢の筋疲労後において、下肢による一定の努力感に基づいた筋力発揮は、筋収縮中における皮質脊髄路の入力出力特性によって決定されることが示唆された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

1) Matsuura R, Ogata T. Effects of fatiguing unilateral plantar flexions on corticospinal and transcallosal inhibition in the primary motor hand area. Journal of Physiological Anthropology

34(1): 4, 2015. 査読有

〔学会発表〕(計2件)

1) 松浦亮太, 喜多村拓, 緒方徹. 一側下肢の筋疲労が上肢の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響. 第68回日本体力医学会大会, 2013.09.21-23, 日本教育会館・学術総合センター(東京都千代田区)

2) 松浦亮太, 白川和希, 連長順, 肖錚, 大塚吉則, 矢野徳郎, 柚木孝敬. 遠隔筋の持続的収縮後における皮質運動路興奮性の変化は遠隔筋促通効果に関連しない. 第69回日本体力医学会大会. 2014.09.19-21, 長崎大学文教キャンパス(長崎県長崎市)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松浦 亮太 (MATSUURA RYOUTA)

上越教育大学・学校教育研究科・准教授

研究者番号: 10551278