

[研究助成 (A)]

中枢神経回路の疲労回復を促進する技術

Facilitation technique of central fatigue recovery

2211012



研究代表者

九州産業大学
健康・スポーツ科学センター

助 教

齋 藤 輝

[研究の目的]

人間の身体運動の動力源である骨格筋は、筋収縮を持続的に発揮すると疲労する。骨格筋の疲労は、一時的に筋機能を低下させるだけでなく、身体運動パフォーマンスや運動意欲にも悪影響を及ぼす。そのため、骨格筋の疲労を軽減する方法や回復を促す手法を確立する試みは、健康・スポーツ科学にとって非常に重要である。

骨格筋の疲労は、骨格筋の活動をコントロールする中枢神経回路の疲労が主要因である。実際、経頭蓋磁気刺激法によって中枢神経回路の興奮レベルを長時間運動の前後で計測すると、長時間運動後において、中枢神経回路の興奮レベルの一時的な低下が見られ、運動前の興奮レベルまで回復するには、数分～数十分の時間を要する。しかしながら、中枢神経回路が疲労回復する神経機序に関しては、明らかになっていない点が多い。そのため、中枢神経回路の疲労回復の神経機序が明らかになれば、疲労回復を促進する技術開発に寄与することができると考えられる。

中枢神経回路の神経活動を変調させる手法として、経頭蓋直流刺激法がある。これは、大脳皮質に微弱な直流刺激（1-2 mA 程度）を与え、中枢神経回路の興奮レベルを変調させる手法である。経頭蓋直流刺激は、骨格筋の疲労を軽減させることが示されている。したがって、経頭蓋直流刺激を用いて中枢神経回路の興奮レベル

を変調させておけば、中枢神経回路の疲労回復が促進される可能性がある。

本研究の目的は、経頭蓋直流刺激による中枢神経回路の変調が疲労回復に与える影響と、神経活動の回復が生じる具体的な神経回路まで明らかにすることであった。経頭蓋直流刺激を用いて中枢神経回路の疲労回復を促進させる手法を提案することを本研究の最終目標とする。

[研究の内容、成果]

1. 内容

1-1. 対象者

対象者は、右利きの健常な成人男性 10 名（年齢 26.1 ± 2.5 歳，身長 175.5 ± 5.8 cm，体重 69.6 ± 9.7 kg）であった。すべての対象者は、実験の 1 日以上前に実験室を訪れ、随意最大筋力および最大下での筋力発揮の練習を行った。

1-2. 実験デザイン

対象者の頭皮に貼付した電極から経頭蓋直流刺激を 10 分間与えた。直流刺激後、対象者は右手の人差し指の外転筋力を最大筋力の 20% 筋力レベルで疲労困憊まで発揮した。直流刺激前から疲労困憊 30 分後まで、経頭蓋磁気刺激で中枢神経回路の興奮レベルを計測した（図 1）。直流刺激のプラセボ効果を最小限にするために、対照群として疑似刺激条件を設けた。

1-3. 経頭蓋直流刺激

経頭蓋直流刺激は定電流刺激装置（DC-

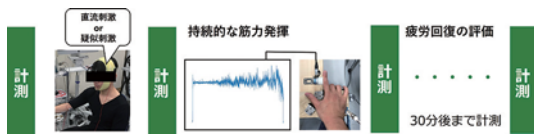


図1 実験デザインの模式図

Stimulator Plus, neuroConn 社製，ドイツ）を用いた。陽極（7×5 cm）を対象者の左側の頭皮に，陰極（7×5 cm）を右肩に貼付して，左半球の大脳皮質に直流刺激を与えた。なお，陽極の貼付位置は，経頭蓋磁気刺激法を用いて第一背側骨間筋のホットスポットとした。直流刺激中，刺激強度は 2 mA とし，刺激時間は 10 分間とした。なお，別日に疑似刺激条件での実験を設け，二重盲検法でプラセボ効果を最小限にした。

1-4. 筋力発揮

対象者は実験椅子に座り，右手を特製の筋力計に置き，人差し指を張力計に固定した。人差し指の外転筋力を記録し，対象者の正面のモニタに表示した。

対象者は第一背側骨間筋を収縮させて，随意最大筋力および持続的な筋力発揮を行った。随意最大筋力の計測では，最大筋力に達して筋力を 3 秒間維持し，1 分間のインターバルを設け 3 回実施した。最大下の筋力発揮では，対象者はモニタに表示された随意最大筋力の 20% レベルのターゲット筋力に合わせて，できる限り長く筋力を維持した。発揮筋力が 5 秒以上ターゲット筋力に達しなかった時点で収縮を終了させた。

1-5. 経頭蓋磁気刺激

経頭蓋磁気刺激法で対象者の左半球の大脳皮質を刺激して右側の第一背側骨間筋から運動誘発電位（motor evoked potential; MEP）を計測し，これを中枢神経回路の興奮レベルとした。経頭蓋磁気刺激の刺激位置は，コイルを移動させながら複数個所を刺激して，第一背側骨間筋の表面筋電図の振幅が最も大きい位置とした。MEP の振幅が 50 mV を超えた刺激強度を MEP の閾値とし，その 120% を刺激強度とし

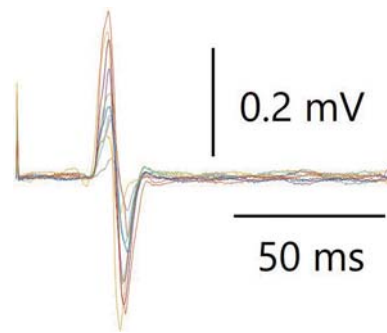


図2 運動誘発電位（MEP）の生波形

た。経頭蓋磁気刺激による MEP の計測は各計測タイミングで 10 回ずつ行った（図 2）。なお，10 回分の MEP の平均値を各計測の代表値とし，それらを分析に用いた。

1-6. 末梢神経刺激

定電流刺激装置を用いて尺骨神経に電気刺激を与え，第一背側骨間筋から M 波を計測した。尺骨神経の刺激強度は，M 波の振幅が最大を示す最大強度の 120% の強度に設定した。末梢神経刺激による M 波の計測は，経頭蓋磁気刺激と併せて同じ時点で行った。

1-7. データ分析

各計測時点における随意最大筋力を算出し，持続的な筋力発揮前からの随意最大筋力の低下率で筋疲労を評価した。MEP と M 波の最大振幅値を算出し，MEP の振幅値を M 波の振幅値で標準化した。持続的な筋力発揮前からの標準化 MEP の低下率を中枢神経回路の疲労の指標とし，経頭蓋直流刺激の条件間（直流刺激条件 vs. 疑似刺激条件）で比較した。また，持続的な筋力発揮前からの M 波振幅値の低下率を末梢神経の疲労の指標とし，これも条件間で比較した。

2. 成果 2-1. 筋力発揮の持続時間

第一背側骨間筋が疲労困憊に至るまでに要した筋力発揮の持続時間は，直流刺激条件：405.7±194.9 秒，疑似刺激条件：490±405 秒であり，条件間で有意差は見られなかった。

2-2. 筋疲労

図 3 に各計測時点における随意最大筋力を示

し、その変化から持続的な筋力発揮による筋疲労を評価した。直流刺激条件における随意最大筋力は、持続的な筋力発揮前に 11.5 ± 2.7 N、持続的な筋力発揮直後に 8.8 ± 1.6 N であり、疲労によって $26.5 \pm 17.3\%$ 低下した。その後、随意最大筋力は次第に回復していき、疲労困憊 10 分後に随意最大筋力は 11.3 ± 2.4 N となり、疲労困憊前の水準まで回復した。

疑似刺激条件における随意最大筋力は、持続的な筋力発揮前に 11.2 ± 3.0 N、持続的な筋力発揮直後に 8.3 ± 1.4 N であり、疲労によって $32.6 \pm 10.3\%$ 低下した。その後、随意最大筋力は次第に回復していき、疲労困憊 10 分後に、随意最大筋力は 11.0 ± 3.9 N となり、疲労困憊前の水準まで回復した。

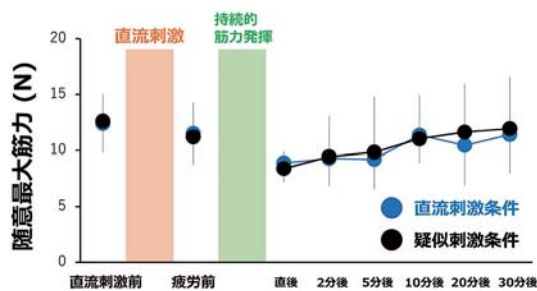


図3 随意最大筋力の経時的変化

2-3. 中枢神経回路の疲労回復

図4に中枢神経回路の疲労の指標であるM波で標準化されたMEPの経時的な変化を示した。直流刺激条件における標準化MEPは、直流刺激前に $7.9 \pm 7.6\%$ 、持続的な筋力発揮前に $7.5 \pm 6.7\%$ であり、疲労困憊2分後に最も低い $2.2 \pm 2.0\%$ を示した。その後、標準化MEPは次第に増加していき、疲労困憊30分後には $6.2 \pm 6.7\%$ に達したが、直流刺激条件において標準化MEPは疲労困憊前の水準に回復しなかった。

疑似刺激条件における標準化MEPは、直流刺激前に $4.5 \pm 3.6\%$ 、持続的な筋力発揮前に $5.4 \pm 4.2\%$ であり、疲労困憊5分後に最も低い $3.4 \pm 3.7\%$ を示した。その後、標準化MEPは次第に増加していき、疲労困憊30分後には

$6.5 \pm 6.1\%$ に達し、疑似刺激条件において標準化MEPは疲労困憊前の水準まで回復する傾向を確認することができた。

両条件間の比較において、直流刺激条件での標準化MEPは持続的な筋力発揮直後に有意に低下 ($-53.6 \pm 18.4\%$; 直流刺激前に対する変化率) が見られた。その一方で、疑似刺激条件での標準化MEPは持続的な筋力発揮直後に低下 ($-4.8 \pm 62.1\%$) したものの、有意差は見られなかった。したがって、直流刺激は中枢神経回路の疲労を促進させた可能性がある。

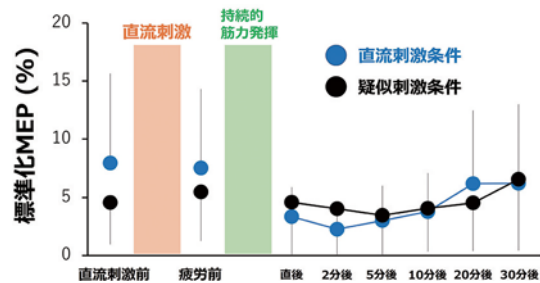


図4 標準化運動誘発電位 (MEP) の経時的変化

2-4. 末梢神経の疲労回復

図5に末梢神経の疲労の指標であるM波振幅値の経時的な変化を示した。直流刺激条件におけるM波振幅値は、直流刺激前に 13.1 ± 1.2 mV、持続的な筋力発揮前に 12.5 ± 2.0 mV であり、疲労困憊直後に 12.3 ± 1.7 mV を示した。その2分後にM波振幅値は 13.5 ± 1.8 mV であり、直流刺激条件においてM波振幅値に顕著な低下は見られなかった。

疑似刺激条件におけるM波振幅値は、直流刺激前に 12.8 ± 2.0 mV、持続的な筋力発揮前に 12.2 ± 2.3 mV であり、疲労困憊直後に最も低い 11.6 ± 3.2 mV を示した。その2分後にM波振幅値は 13.0 ± 2.3 mV であり、疑似刺激条件においてM波振幅値は疲労困憊直後に一時的な低下 ($-13.9 \pm 23.1\%$) が見られた。

両条件で共通して見られたM波振幅値の回復の傾向として、疲労困憊直後に振幅値が低値を示した後に2-5分で回復した。そして、疲労困憊の20-30分後に再びM波振幅値が低下す

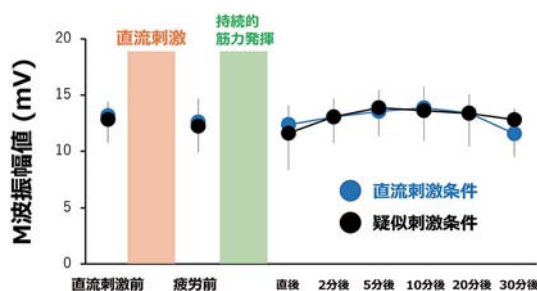


図5 M波振幅値の経時的変化

る傾向が見られた。実験後、第一背側骨間筋に筋肉痛のような症状が表れた対象者がいたため、これが末梢神経の疲労回復に影響した可能性がある。

[今後の研究の方向，課題]

本研究の目的は、経頭蓋直流刺激による中枢神経回路の変調が疲労回復に与える影響を明らかにすることであった。経頭蓋直流刺激は持続的な筋力発揮後の中枢神経回路の疲労を促進した可能性があるが、中枢神経回路の疲労回復を促進しなかった。その原因の1つとして、低強度の筋力発揮を疲労困憊まで行った本研究の運動課題の設定が考えられる。一部の対象者に中枢神経回路の疲労よりも末梢神経の疲労の方が強く出たことから、実験デザインを再考する必要があると考えられた。したがって、今後の研究では、より中枢神経回路の疲労が引き起こされる高強度・短時間の持続的な筋力発揮後の中枢神経回路の疲労回復に対する計測を行っていく予定である。