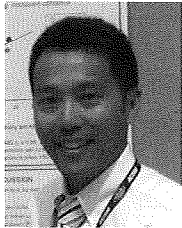


筋疲労を軽減させるメカニズムとしての協働筋間活動交替の 可視化・定量化に関する研究

Visualization and quantification of the alternations in synergistic muscle activation
as a mechanism for diminishing muscle fatigue

1071006



研究代表者	早稲田大学スポーツ科学学術院	助 教	衣 笠 竜 太
共同研究者	Georgia Institute of Technology, School of Applied Physiology, Associate Professor		篠 原 稔

〔研究の目的〕

疲労は日常生活における様々なストレスの延長線上にあり、疾病への下地となる。本研究は、疲労状態で生体系、特に骨格筋、が働くための指令や信号などの生体情報を検出する技術を開発し、国民の疲労回復・予防に役立てたい。人間が疲労状態に陥ると筋力の低下がみられ、それを軽減するために協働筋内で“交替で休息をとる”ような現象（協働筋の活動交替）が起こる。しかしながら、活動交替の発現部位については不明であり、これを計測するための技術開発が求められている。本研究は、筋力発揮中における筋内部の活動分布を計測する方法論を確立し、協働筋間活動交替の発現部位を可視化・定量化することを目的とする。

〔研究の仮説〕

ヒト骨格筋の神経・筋の活動特性を評価するため、運動誘発性の磁気共鳴画像法（MRI）の横緩和時間（T2）強調シーケンスが用いられてきた。この方法は、1）最大筋力の40%以上の収縮強度で運動を実施しなければならない、2）3分間以上の撮影時間を要する、という測定上の制約があった。MRIのT2は、比較的高い収縮強度で運動を実施することにより、

代謝産物の蓄積に由来した水分量を反映することになる。

そこで我々は、低い収縮強度でも、陽圧負荷を併用することにより、代謝産物を蓄積させることができると考えた。しかしながら、問題はMRIの撮影時間である。MRIは信号の消失を防ぐため、ラジオ波の照射後に100msの間隔をおいてから画像の構築を行う。また筋活動を評価する従来のT2強調MRIの撮影手順は、安静時のMRIの撮影を行い、続いて数十回の運動を遂行した後に、再びMRIの撮影を行うというものである。エコープラナーイメージング（EPI）は単一のラジオ波パルス照射後、10ms以内に画像構築を完了できる特殊な撮影方法である。このEPIは収縮中の筋活動をリアルタイムに評価できる可能性がある。そこで本研究は、EPIと陽圧負荷の組み合わせが、低い収縮強度での運動中の筋活動をリアルタイムに計測できる、という仮説を立てた。

〔研究の方法〕

7名の健康な若年男性（平均年齢29歳、身長173cm、体重68kg）が本研究に参加した。被験者はMRIのベッドに仰臥位となり、右足を膝関節180度、足関節90度の状態でMRI対応の筋力計に固定した（Figure 1）。足関節

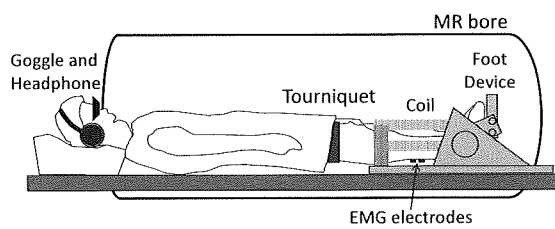


Figure 1 Experimental setup.

底背屈の関節軸は筋力計の回転軸と一致させた。筋力計の足部背面には、ファイバーのストレインゲージを貼付し、足底屈力を計測した。被験者は最大随意足底屈力の測定後、陽圧負荷有り (100 mmHg と 150 mmHg) と無しの状態で最大筋力の 5 %, 10 %, 20 % の収縮強度で 60 秒間の等尺性足底屈収縮を行った。100 mmHg の陽圧負荷は静脈流出の遮断, 150 mmHg の陽圧負荷は更に動脈流入を減少させることを意図した。また、陽圧負荷と収縮強度の順番は被験者間でランダムとした。

MRI の撮影には、1.5 テスラの超伝導型装置 (Signa, GE 社製) を用いた。コイルは頭部用コ

イルを用いた。EPI は、繰り返し時間 6000 ms, エコー時間 15.4 ms, スライス厚 10 mm, 関心領域 40×40 cm, 64×128 マトリックスの設定で、60 秒間の収縮中、6 秒毎に横断画像を得た (Figure 2)。画像解析には、ImageJ (NIH 社製) を用いて、筋腹中央部に位置する一横断面における腓腹筋内側頭の信号強度を算出し、これを筋活動の指標とした。MRI の撮影は全被験者 2 回行い、安静時の信号強度の再現性を確認した。

筋電図 (EMG) は、双極誘導の表面電極法により記録した。電極は、MRI に対応した直径 5 mm の銀円盤の銀-塩化銀電極 (ユニークメディカル社製) を用い、20 mm の電極間距離にて腓腹筋内側頭の筋腹中央部の皮膚表面に貼付した。EMG の信号は、生体アンプ (MEG-6108 M, 日本光電社製) で増幅し、時定数 0.03 秒で導出した。

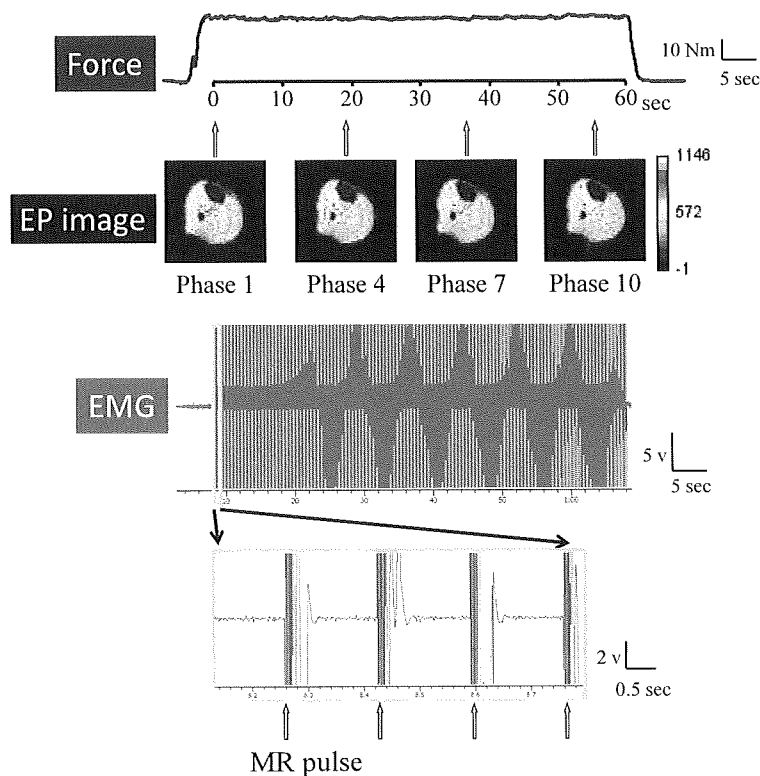


Figure 2 Example recordings of force, EP image, and EMG during 60-s muscle contraction.

[研究の成果]

信号強度の級内相関係数は0.99であった。信号強度は一回目と二回目の値との間に有意な差を示さなかった。従って、EPIを用いた信号強度の再現性は高いと判断した。

第一フェイズ（最初の6秒間）における信号強度は全ての収縮強度において、他の9つのフェイズよりも有意に高値であった。2フェイズ目から10フェイズ目の信号強度には有意差が認められなかった。1フェイズ目に観察された信号強度の高さは今後検討することとするが、これ以降は、6フェイズ目から10フェイズ目（30秒～60秒）を分析の対象とした。

陽圧負荷なしの状態において、信号強度は安静時（607.1 ± 56.9）よりも10%と20%の収縮強度で有意に高値であった（Figure 3）。一方、100 mmHgと150 mmHgで陽圧負荷した場合、信号強度はいずれの収縮強度でも有意な

変化を示さなかった。

3つの収縮強度、3つの陽圧負荷の条件を一つのグラフにプロットして、信号強度と平均筋電図との関連性をみてみると、信号強度は、平均筋電図との間に有意な正の相関関係（ $r = 0.69$, $P < 0.05$ ）を示した。

150 mmHgの陽圧負荷時において、両者は収縮強度の増加に対して漸増的な増加を示した（Figure 4）。一方、陽圧負荷なしと100 mmHgでの陽圧負荷の場合、両者は収縮強度の増加に対して漸増的な変化を示さなかった。このことから、100 mmHgの陽圧負荷は静脈流出を完全に遮断できず、静脈流出の抑制は筋収縮自体による効果と同等であったと考えられる。また、動脈の流入量の減少が、信号強度変化を誘発する代謝産物の蓄積に必要であることが伺える。

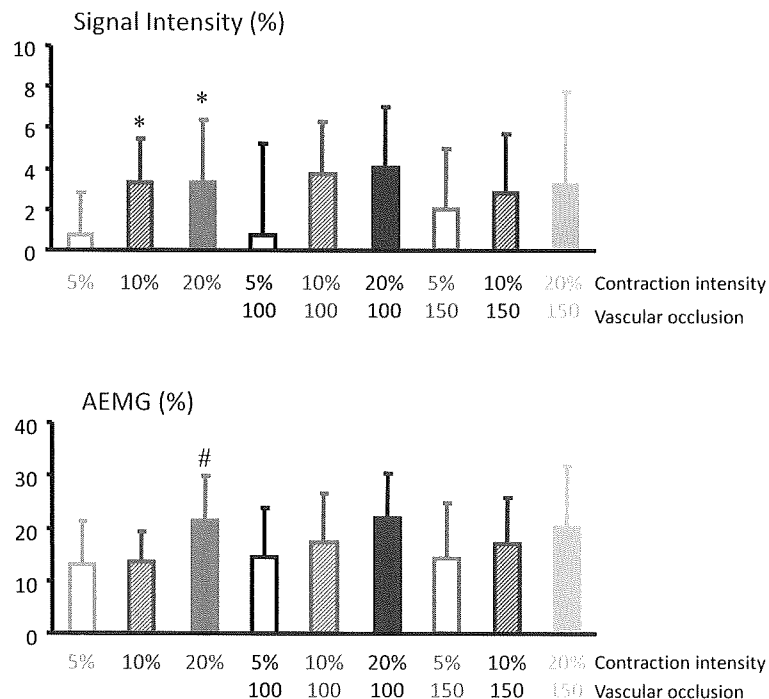


Figure 3 Signal Intensity and AEMG across contraction intensities and conditions for vascular occlusion. Values are means and SD
* $P < 0.05$ vs. 5 % in the respective condition ; * $P < 0.05$ vs. 5 % and 10% in the respective condition.

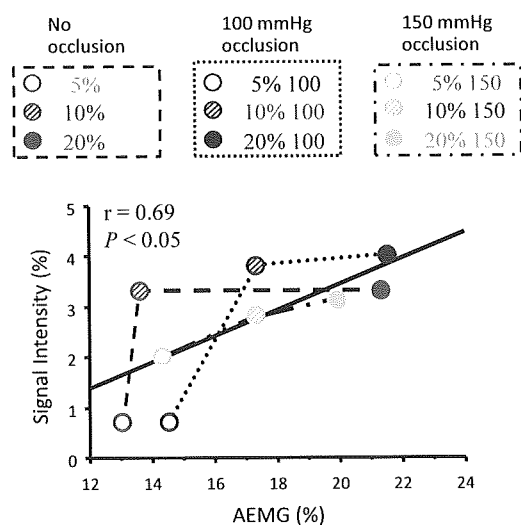


Figure 4 Association between signal intensity and AEMG for the mean values.

[研究の結論]

150 mmHg で陽圧負荷しながら低い収縮強度で運動している際、MRI の信号強度は筋電図の値と関連する。

[今後の研究の方向性、課題]

本研究では、低い力発揮レベル時の筋活動を評価する方法論の開発に一部成功した。しかしながら、なぜ 150 mmHg の陽圧負荷時に、信号強度と平均筋電図が全ての実験条件の中で最も高値を示さなかったのか？、という疑問が残る。今後は、収縮時間と陽圧負荷の条件を変えながら、疑問点の解決を目指す。

一方で、当初本研究の目標として掲げた、「協働筋間活動交替の発現部位の可視化・定量化」を実現するには到らなかった。上記の方法論が確立した段階で、研究の焦点を協働筋の活動交替に移し、活動交替の発現部位を同定し、骨格筋の解剖学的形状の特性との関連性を明らかにしたい。そして、活動交替発現の機能的意義の解明を目指したい。

[成果の発表、論文等]

受賞

- ACSM Vendor's Innovation in Research Award (2009)

招待講演

- 衣笠竜太：ヒト筋収縮中における筋・腱ユニットの力学特性と神経・筋の活動特性の in vivo 計測. シンポジウム「神経筋系・呼吸循環系の生体信号処理」. 日本機械学会 第 22 回バイオエンジニアリング講演会 (2010)

国際学会発表

- Kinugasa R. Shinohara M.: Possibility for assessing low-force muscle activation with real-time magnetic resonance imaging combined with vascular occlusion. The American College of Sports Medicine 56 th Annual Meeting (2009)

[謝 辞]

本研究課題に対して助成頂いた財団法人立石科学技術振興財団に謝意を表する。