

Tensiomyographynによる筋収縮特性の回復過程

Recovery process of muscle contractile properties by Tensiomyography

平塚和也, 角田直也

Kazuya HIRATSUKA and Naoya TSUNODA

I. はじめに

筋は、身体活動をする上で重要な器官であり、筋を鍛え、良いパフォーマンスを発揮するためには、筋の状態を評価する必要がある。特に、疲労時における筋の状態を評価することはスポーツ障害及び傷害の予防手段としても有効であると考えられる。しかしながらスポーツ現場において、筋疲労の度合いをモニタリングする重要性は認識されてきているものの、競技者自身が主観的にその状態を把握している場合が多いのが実情である。それゆえ、競技パフォーマンスに直接影響すると考えられる筋自体がどのような状態にあるかは競技者の主観的な尺度にすぎない。競技者の主観的尺度は必要であるが、時として間違った判断へと導く場合がある。そのため、筋の状態を数値化し、客観的なデータとして評価することが重要である。

近年、筋の疲労状態を数値化し、筋の疲労度合いを客観的に評価^{2) 3) 4)}することが可能なTensiomyography (TMG)が開発され、その評価指標の一つとして国外で注目されている。TMGは、電気刺激装置を用いて筋上の体表面に電気刺激を与え、筋が収縮する際に、その径が側方へ変形するときに生じる変位をデジタルセンサーで計測し、変位-時間曲線から筋収縮特性を評

価したものである⁷⁾。この測定は、非侵襲的であるため被験者に負担を与えることなく安全に測定でき、かつ短時間に測定できるという簡便性を有している¹⁾。また、この測定は不随意で測定するため被験者のモチベーションによる影響を除くことができることからスポーツ現場で手軽に利用することが可能である。

これまでに、TMGを用いて、筋疲労に関する先行研究は数多く存在する^{2) 3) 4)}。例えば、アームカールエクササイズにおける運動負荷の違いによって、運動課題後の上腕二頭筋の収縮特性が異なることが報告されている²⁾。また、トレーニング直後に筋収縮特性が変化することが示されており、トレーニング前後における筋収縮特性の変化と最大筋力発揮の変化との間に相関関係があるということが示されている³⁾。従って、この手法を用いることにより、筋収縮特性から筋の状態を数値化することが可能となり、疲労度合いを客観的にモニタリングすることができる。しかしこれまで、TMGを用いた研究は、疲労度合いを数値化した報告が殆どであり、その後の回復過程についての報告は非常に少ない³⁾。またその報告³⁾は、伸張性収縮後の筋損傷に伴う回復過程であり、他の収縮様式後の回復過程については検討されていない。

そこで本研究は、運動課題を等尺性収縮とし、

TMGを用いて筋疲労から回復過程までの筋力及び筋収縮特性の変化について検討した。

II. 方 法

A. 被験者

本研究における被験者は健常男性20名（年齢：21.2±2.7、身長：172.2±5.4、体重：68.7±8.5）を対象とした。なお、本研究は国士舘大学研究倫理評価委員会に申請し、許可を得た上で実施した。被験者には事前に研究プロトコルやそれに伴うリスク等を口頭及び書面にて説明し、すべての被験者から書面にて同意を得た上で測定を行った。

B. 測定手順

測定手順は、運動課題前（before）にTMG及び最大随意筋力（Maximal voluntary contraction；MVC）測定を行い15分の休憩を挟んで運動課題を実施した。その後、運動課題後（after）、1時間後（1h）、24時間後（24h）及び48時間後（48h）にも運動課題前と同様の測定を行った。なお、本測定3時間前から食事を禁止し、飲料は水のみとした。また、各被験者は同一時間帯に測定を実施した。さらに、環境条件として実験中の室内温度は24℃になるよう設定した。

C. 運動課題

運動課題は総合筋力測定装置（Biodex System3、Biodex社製）を用いて等尺性最大随意収縮による肘関節屈曲筋力発揮を実施し、5秒間の筋力発揮を1秒間の休憩を挟み50回実施した。測定姿勢は、被験者を総合筋力測定装置の椅子に座らせ、体幹が動かないようにベルトで固定した。

D. 測定項目

1) MVC

MVCは総合筋力測定装置（Biodex System3、Biodex社製）を用い、5秒間の等尺性最大随意収縮時の肘関節屈曲筋力を測定した。計測は2回行い、最大値を代表値として採用した。なお、2回の計測が10%以上異なる場合には3回目を実施し、10%以内となった2回のうち高い方を代表値とした。測定姿勢は座位にて肘関節屈曲角度90度とし、附属のストラップを用いて代償動作を最小限にする為に、体幹部を装置に固定した。また、肘関節のアタッチメントへの固定は、肘関節の中央をダイナモメータの回転軸に合わせ、関節中心の上下への動きを抑えるために専用の肘当てを取り付け固定した。

2) 筋収縮特性

筋収縮特性は、筋収縮特性測定器（TMG-100、

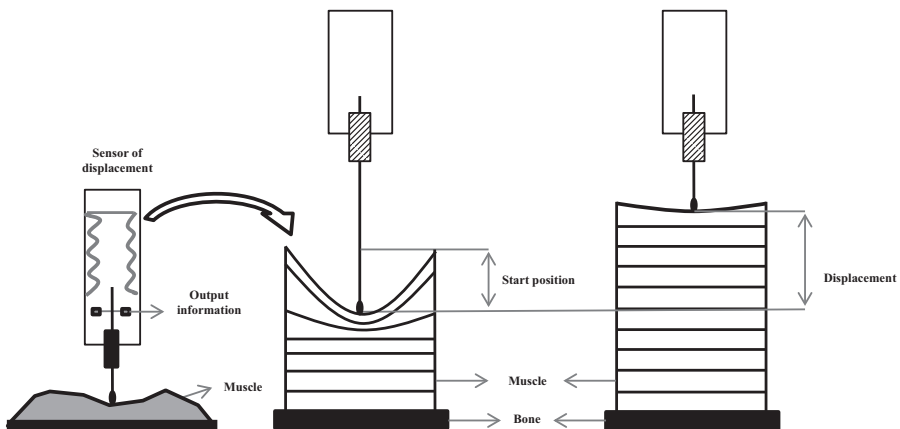


Fig.1 Principle of TMG measurement.

TMG社製、Tensiomyography (TMG) を用いて測定した。TMGの原理はFig.1に示した。TMGは、電気刺激装置を用いて皮膚表面に電気刺激を与え、筋が収縮する際に、その径が側方へ変形するときに生じる変位を、デジタルセンサーで計測し、変位-時間曲線から筋収縮特性を評価したものである⁷⁾。変位の測定には、初期圧力 $1.5 \times 10^{-2} \text{N/mm}^2$ に調整したデジタルセンサーを使用した。被験筋は上腕二頭筋 (Biceps brachii: BB) とし、デジタルセンサーの位置は、肩峰内側と肘窩のラインの遠位1/3とした。測定姿勢は座位姿勢とし、上体をベルトで固定した。また、上腕を体幹に沿わせ、肘関節角度が90度になるように肘を台の上に置き、前腕をベルトで固定した。なお、被験者には身体を安静にした状態で測定を行うよう指示した。電極位置は、デジタルセンサーを中心に近位部と遠位部に貼付し、電極間距離は5cmとした。また、電極を接触させる体表は、電極への抵抗を除去するために剃毛処理を行った。単一刺激のパルス幅は1msとした。刺激範囲は40mAから110mAとし、最大変位が発現するまで10mAずつ増加させた。また、刺激によって筋の疲労及び増強の影響を最小限に防ぐ為、刺激間の休憩時間を10秒とした。TMGから算出した項目は、最大変

位量 (最大変位の振幅、maximal displacement ; Dm) 及び収縮時間 (最大変位の10%から90%までの時間、contraction time ; Tc) とした (Fig.2)。

E. 統計処理

本研究における各項目の値は、全て平均値±標準偏差で示した。統計解析には各計測項目において経時変化を観察するため一元配置分散分析を行い、事後検定としてBonferroni検定を行った。なお、検定の有意水準は5%未満とした。

IV. 結果及び考察

本研究はTMGを用いて筋疲労から回復過程までの筋力及び筋収縮特性の変化について検討した。

Fig.3Aには、等尺性収縮後におけるMVCの経時的变化を示した。本研究では、等尺性収縮によって筋疲労が生じていることを確認するために総合筋力測定装置を用いて計測した。その結果、MVCは運動課題前と比較して運動課題後に有意な低下を示した。運動によって生じる筋疲労の定義のひとつとして、運動に必要な力を発揮できなくなる状態があげられる⁶⁾。今回の運動課題が高強度であったため、運動によって生じた代謝産物

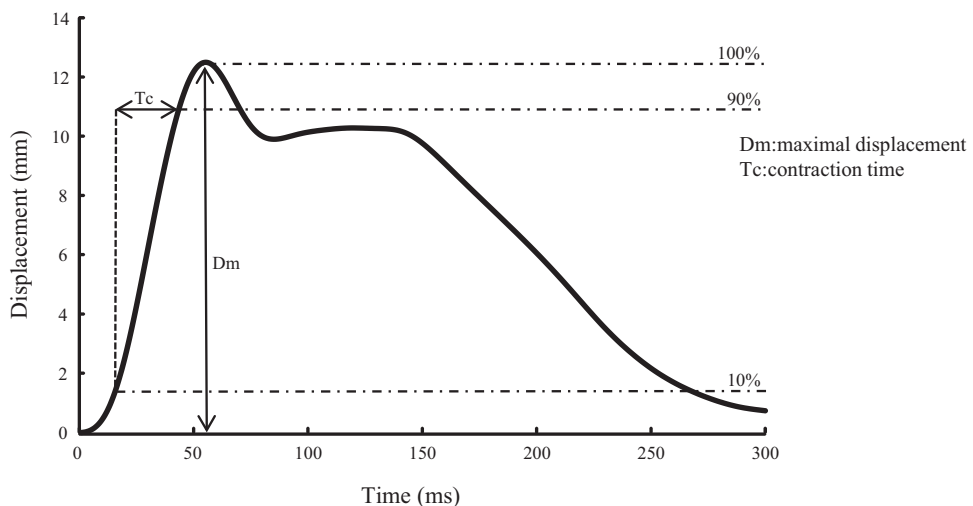


Fig.2 TMG parameters definition.

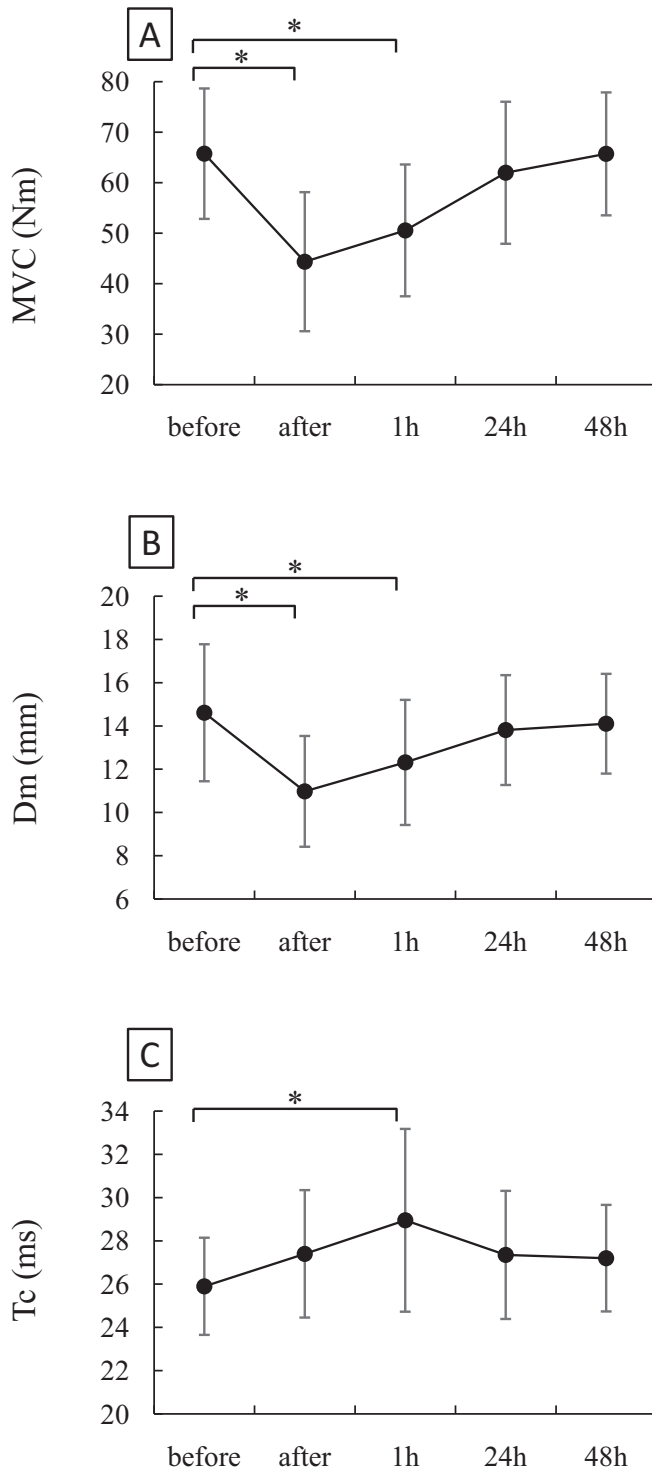


Fig.3 The time course of MVC and muscle contractile properties : (A) maximal voluntary contraction, (B) maximal displacement, (C) contraction time (* : p < 0.05).

が蓄積し、その結果によって生じるエネルギー供給率の低下から興奮・収縮連関の機能低下が起こり、筋収縮力が低下したものと考えられる⁶⁾。そのため、今回の等尺性収縮における運動課題から筋力の有意な低下が認められたことは、筋疲労を引き起こすには十分な運動課題であったことが確認された。

Fig.3Bには、等尺性収縮後におけるDmの経時的变化を示した。その結果、Dmは運動課題前と比較して運動課題後に有意な低下を示した。TMGを用いて電気刺激後におけるDmの変化を検証したMacgregor et al.⁴⁾によると、Dmは電気刺激前と比較して、電気刺激後に有意に低下したことを報告している。つまり、Dmは随意収縮及び電気刺激であったとしても筋疲労が生じればDmが低下することが考えられる。Dmは筋緊張や筋の硬さを示す指標として報告がされている^{4) 5)}。一般的に、運動直後には、筋内水分(血液・組織液)量が急性的に増加し、これが運動課題前の状態へ回復するまでに時間必要であることが知られている。この間は、筋内圧が高まり、筋が張った感覚が生じる。従って、本研究の等尺収縮後におけるDmの低下は、この筋内水分量変化によって筋が硬くなりDmの低下に繋がったと推察される。

本研究におけるDmの回復過程では、運動課題後に最低値となり、24時間後には運動課題前と同程度の値に戻り、その後大きな変化は認められなかった。運動課題後における筋の硬さを経時的に調査した柳澤⁸⁾によると、筋の硬さは運動直後に変化するものの、30分後には運動課題前と有意差を認めないレベルまで回復することが示されている。一方、伸張性収縮後におけるDm(緊張や筋の硬さ)の経時的变化を調査したHunter et al.³⁾によると、筋損傷が生じた場合は運動課題直後に最低値となり、その後少しずつ回復傾向を示すものの、6日間経過しても運動課題前には戻らないことを報告している。このように筋疲労後における筋の硬さは短期間のうちに回復するも

の、筋損傷を生じさせる伸張性収縮の場合は回復時間が遅くなるといった回復過程に違いがあることが考えられる。本研究のDmは短期間のうちには回復せず、24時間後に回復した。その要因は、運動課題の違いによるものだと考えられる。本研究の運動課題は等尺性最大随意収縮を5秒間行い、その後1秒の休憩を挟み、50回繰り返す高強度であったため、このような結果になったと考えられる。今回は、異なる運動課題(収縮様式や運動負荷)を比較していないが、Dmは運動課題(収縮様式及び運動負荷)によって、回復過程が異なる変化を示す可能性が考えられる。さらに、本研究のMVCとDmの経時的变化は、運動課題後に低下し、24時間後には回復した。つまり、MVC及びDmは、疲労及び回復過程の様相がよく似たものと推察される。したがって、Dmは回復過程においてもモニタリングできる可能性が示唆される。

Fig.3Cには、等尺性収縮後におけるTcの経時的变化を示した。その結果、Tcは運動課題前と比較して1時間後に有意な増加を示した。その後Tcは低下し、24時間後には運動課題前と比較して有意差が認められなかった。Macgregor et al.⁴⁾らは、筋疲労後のTcは変化しないと報告している。一方、伸張性収縮後のTcは増加し、6日間経過しても運動課題前には戻らないことを報告している。この様に見解が一致しない要因としては、運動課題の収縮様式及び運動負荷の条件が筋疲労後におけるTcの変化に影響を及ぼす可能性が考えられる。運動課題として伸張性収縮を実施し、TMGを用いて筋損傷を評価したHunter et al.³⁾によると、Tcは筋損傷の評価指標としてモニタリングできる可能性を示唆している。つまり、このような先行研究との結果の差異は筋損傷の程度の有無によるものであると推察できる。従って本研究は、伸張性収縮後における重度の筋損傷まではいかないものの、高強度・高頻度の運動課題であったため、軽度な筋損傷を起こし、Tcの増加に至ったことが考えられる。以上のことから、

Tcは筋損傷度合い及び回復過程を評価できる可能性があり、スポーツなどの実践現場で、筋の状態を競技者及びコーチングスタッフ等に客観的なデータとして提供することができると考えられる。しかしながら、上記で述べたように本研究は、等尺性収縮による運動課題のみである。つまりTMGの筋疲労及び回復過程をより詳細に把握するためには、他の収縮様式及び異なる運動負荷を比較していくことが、今後の検討課題である。

V. ま と め

本研究はTMGを用いて筋疲労から回復過程までの筋力及び筋収縮特性の変化について検討した。その結果、運動課題後にMVC、Dm及びTcは運動課題前と比較して有意な変化が認められ、24時間後にMVC、Dm及びTcは回復した。特に、MVC及びDmは疲労及び回復過程の様相がよく似ていたことから、Dmは回復過程を客観的にモニタリングすることができる可能性を示唆した。

本研究は、平成30年度国士舘大学体育学部附属体育研究所研究助成により実施した。

参考文献

- 1) García-Manso JM, Rodríguez-Ruiz D, Rodríguez-Matoso D, de Saa Y, Sarmiento S, Quiroga M (2011). Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography (TMG). *J Social Sciences*. Mar ; 29 (6) : 619-25.
- 2) García-Manso JM, Rodríguez-Matoso D, Sarmiento S, de Saa Y, Vaamonde D, Rodríguez-Ruiz D, Da Silva-Grigoletto ME. (2012). Effect of high-load and high-volume resistance exercise on the tensiomyographic twitch response of biceps brachii. *J Electromyogr Kinesiol*. 2012 Aug ; 22 (4) : 612-9.
- 3) Hunter AM, Galloway SD, Smith IJ, Tallent J, Ditroilo M, Fairweather MM, Howatson G. (2012) Assessment of eccentric exercise-induced muscle damage of the elbow flexors by tensiomyography. *J Electromyogr Kinesiol*. 2012 Jun ; 22 (3) : 334-41.
- 4) Macgregor LJ, Ditroilo M, Smith IJ, Fairweather MM. (2016) Reduced Radial Displacement of the Gastrocnemius Medialis Muscle After Electrically Elicited Fatigue *Journal of Sport Rehabilitation*. Volume : 25 Issue : 3 Pages : 241-247
- 5) Pisot R, Narici MV, Simunic B, De Boer M, Seynnes O, Jurdana M, Biolo G, Mekjavic IB (2008) Whole muscle contractile parameters and thickness loss during 35-day bed rest. *Eur J Appl Physiol*. Sep ; 104 (2) : 409-14.
- 6) 征矢 英昭 (2010). 中枢性疲労がもとなる運動限界. *体育の科学*. 60 (12) 794-796.
- 7) Valencic V, Knez N. (1997) Measuring of skeletal muscles' dynamic properties. *Artif Organs*. Mar ; 21 (3) : 240-2.
- 8) 柳澤 修、新津 守、栗原 俊之、福林 徹. (2020) 超音波Real-time Tissue Elastographyによる運動後の骨格筋硬度の評価. *日本臨床スポーツ医学会誌*, 19 (1), 132-136.