超音波剪断波イメージング法による

マラソン後の筋損傷部位および程度の定量

~適切なトレーニングおよびリカバリープログラムの作成に向けて~

 鹿屋体育大学
 平田浩祐

 (共同研究者)同
 宮本直和

Evaluation of Region and Extent of Muscle Damage after Marathon Running by Using Ultrasound Shear-Wave Elastograph

by

Kosuke Hirata, Naokazu Miyamoto National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

ABSTRACT

Muscle damage induced by marathon running has been often evaluated by changes in maximal voluntary contraction torque or blood creatine kinase activity. However, these parameters cannot characterize the region and extent of muscle damage of individual muscles. It was recently reported that individual muscle stiffness assessed by ultrasound shear-wave elastography can quantify the extent of exercise-induced muscle damage. The present study aimed to evaluate the extent of marathon running-induced muscle damage of the lower limb, by using ultrasound shear-wave elastography. Twelve college recreational runners participated in the present study. Muscle stiffness were obtained from the vastus medialis, vastus lateralis, biceps femoris, semitendinosus, semimembranosus, and medial gastrocnemius, before and 1-3 days after the marathon running. Significant increase in muscle stiffness was observed only in the medial gastrocnemius after 1 and 2 days after marathon running. Moreover, it is suggested that the muscle damage of the plantar flexor was recovered 3 days after the marathon running.

要 旨

これまで、マラソンによる筋損傷の程度は、最 大筋力や血中クレアチンキナーゼ活性値の変化な どから評価されてきた、しかしながら、これらの 方法は個別の筋の損傷を示すものではない.一方. 近年、超音波剪断波エラストグラフィを用いた筋 の硬度(剛性率)の測定により、個々の筋の損傷 の程度を評価可能であることが報告されている. そこで本研究は、この方法を用い、マラソン後の 下肢の筋の損傷の程度を定量し、筋損傷がどの部 位において生じているのかを明らかにすることを 目的とした. 被験者は大学生市民ランナー12名 とし、超音波剪断波エラストグラフィによる剛性 率測定の対象筋は、内側広筋、外側広筋、大腿二 頭筋、半腱様筋、半膜様筋および腓腹筋内側頭と し、マラソン前、マラソン終了1~3日後の計4 回測定を行った. マラソン後の有意な剛性率の増 加がみられたのは腓腹筋内側頭のみであり、マラ ソン1日後に最も高値を示した。その後、経時変 化に伴い筋の剛性率は低下したものの、2日後に はマラソン前に比べ有意な変化が認められたが. 3日後には有意な差は認められなかった。これら の結果から、市民ランナーがマラソンを行うこと により,足関節底屈筋に顕著な筋損傷が生じるが, 3日後には回復することが明らかとなった。また、 膝関節伸展筋および膝関節屈曲筋には大きな損傷 が生じないことが示唆された.

緒言

近年,健康の維持・増進への関心が高まり,ラ ンニングに注目が集まっている.実際,日本にお けるランニング人口(週に1回以上ランニングを 実施した人)は、2002年に211万人であったの に比べ、2014年には550万人となり、12年間で2.6 倍にまで膨れ上がっている¹⁾.しかしながら,ラ ンニングによる傷害発生率は22~55%と報告され デサントスポーツ科学 Vol.37 ているため²⁾, ランニング人口の増加に伴い, 傷 害発生件数も多くなっていることが予想される. このため, ランニングにともなう傷害について見 識を深めることは急務である.

ランニング愛好家が経験する主なランニング傷 害の一つに筋損傷が挙げられる。 Hill et al.³⁾ は、 ランニング愛好家24名を対象にした実験を行い フルマラソン直後から数日間にわたり、最大随意 筋力の低下. 血中クレアチンキナーゼ活性値の増 加および主観的筋痛が生じることを報告してい る、このように、特にマラソンレースなどの長時 間にわたるランニングにおいては、筋に度重なる 負荷がかかり、筋損傷が発生すると考えられてい る.しかしながら.筋損傷の間接的指標としてし ばしば用いられる最大筋力^{3,4,5)}や血中クレアチ ンキナーゼ活性値^{3,6,7)}は、複数の筋群の損傷を 間接的に評価する指標である。また、主観的筋痛³、 8) は客観的な指標ではない. このため、これらの 指標では、マラソンによって、どの部位(筋)に 損傷が生じているのかについて明らかにすること はできない.

一方,近年,超音波剪断波エラストグラフィが 開発され、簡便に生体組織の長軸方向の硬さ(伸 びにくさ)を計測することが可能である。Eby et al.⁹⁾は、ブタから摘出した上腕筋を対象に、超音 波剪断波エラストグラフィにより計測した剛性率 と、応力 - 歪み関係より求めたヤング率に高い相 関関係 ($\mathbf{R}^2 = 0.92 - 0.99$) があることを報告して おり、超音波剪断波エラストグラフィが、筋の材 質特性(硬さ)の評価法として妥当であることを 示している。また、Lacourpaille et al.¹⁰⁾は、上腕 二頭筋を対象にこの方法を用い、伸張性収縮後に 剛性率が上昇することを報告しており、剛性率が 筋損傷の指標となることを示唆している。このよ うに、超音波剪断波エラストグラフィにより筋の 剛性率を計測することで、筋損傷の生じている部 位やその程度を評価することが可能であると考え

-60-

られる.

そこで本研究は、大学生市民ランナーを対象 に、マラソンレースによる下肢筋群の損傷を超音 波剪断波エラストグラフィを用いて評価し、損傷 の部位および程度について検討することを目的と した.

1. 研究方法

1.1 被験者

被験者は、陸上競技部や地域のランニングク ラブに所属していない健常な大学生市民ラン ナー12名であった(男性10名,女性2名,年齢 22.3±1.4歳,身長171.2±5.9cm,体重66.1±7.4kg: 平均値 ± 標準偏差).また、1日30分程度のラ ンニングを週に2回以上、習慣的に行っている者 であった.実験実施時において、下肢に傷害を有 する者はいなかった.各被験者には、実験の目的、 方法、注意事項、危険性に関して口頭で説明を行 い、書面にて実験参加の同意を得た.なお本研究 は、ヘルシンキ宣言に則り、また、鹿屋体育大学 の倫理審査委員会の承認を得て実施した.

1.2 マラソンレース

本研究で対象としたマラソンレースは, 筑後 川マラソン(2014年10月)およびいぶすき菜の 花マラソン(2015年1月)の2レースであった. 筑後川マラソンには, 男性5名および女性2名が 参加し(完走タイム:3時間5分54秒~5時間4 分52秒),いぶすき菜の花マラソンには男性5名 が参加した(完走タイム:3時間39分29秒~7 時間45分16秒).

1.3 プロトコル

マラソンレースによる筋損傷部位および程度を 評価するため、マラソンレースが行われる4日 前または5日前に事前測定を行った(PRE).ま ず,超音波剪断波エラストグラフィを用いた筋の 剛性率の計測を行い、その後に、最大随意による 等尺性収縮(MVC)トルクの計測を行った.な お、事前測定の際には、下肢に筋損傷や筋痛が生 じていないことを口頭にて確認した.また、事後 測定は、マラソンレースの1~3日後の計3日間 にわたり計測を行った(POST 1-3).計測の手順 は PRE 測定と同様であった.

1. 4 筋の剛性率の測定

1. 4. 1 対象筋および計測位置

筋の剛性率の測定は、右脚の内側広筋、外側広 筋、大腿二頭筋、半腱様筋、半膜様筋、腓腹筋内 側頭を対象とした.計測位置は、内側広筋の大腿 長遠位 20% 部位,外側広筋、大腿二頭筋、半腱 様筋、および半膜様筋の大腿長 50% 部位, 腓腹 筋内側頭の下腿長近位 30% 部位とし、測定日に より計測位置が変化しないよう努めた. なお、大 腿長は大転子から膝窩皺、下腿長は膝窩皺から外 果までの距離とした.

1. 4. 2 測定姿勢

大腿筋群を計測する際,被験者は仰臥位にて 筋力計(CON-TREX MJ, PHYSIOMED, German) のベッドに固定された.右股関節は90度屈曲位, 左股関節は解剖学的正位とした.内側広筋および 外側広筋を対象とする際は右膝関節を135度屈曲 位に,大腿二頭筋,半腱様筋,および半膜様筋を 対象とする際は右膝関節を45度屈曲位において 測定を行った.被験者の姿勢を安定させるため, 被験者の腰部および左脚を筋力計のベッドに,右 足首部を筋力計のアタッチメントに非伸縮性のス トラップを用いて固定した.足関節底屈筋の計測 は腹臥位にて行った.その際,膝関節は完全伸展 位,右足関節は20度背屈位にて筋力計のアタッ チメントに非伸縮性のストラップを用いて固定し た.また,臀部を筋力計のベッドに固定した.

4.3 超音波剪断波エラストグラフィによる測定

剛性率を評価するため,超音波剪断波エラス トグラフィ (Aixplorer Ver.6; Supersonic Imagine, France) および 4-15 MHz のリニアプローブ (SL 15-4, Supersonic Imagine, France) を用いた.計測 には,超音波装置の SWE モードの MSK プリセッ トを使用した.超音波プローブと筋束の走行の なす角度により計測値が変化するため¹¹⁾,超音 波プローブが各対象筋の筋束の走行に沿うようプ ローブ位置を調整した.また,超音波プローブと 皮膚の間にジェルを十分塗布し,超音波プローブ が筋を圧迫することによる計測値への影響がない よう留意した.さらに,随意的な筋活動による剛 性率への変化を避けるため,被験者に完全に脱力 するよう指示をした.測定は各筋につきそれぞれ 3回行い,計測する筋の順番はランダムとした.

1. 4. 4 分析方法

各筋の剛性率(μ)は、下記の式により算出した. $\mu = \rho \cdot \mathbf{c}^2$

 ρ は筋の密度(1055 kg/m³)¹²⁾を示し, c は超 音波剪断波エラストグラフィにより得られた, 筋 組織を伝播する剪断波の速度を表している. 剪断 波速度の取得範囲は, 超音波 B モード画像を参 考に, 皮下脂肪や腱膜組織を含まず,可能な限り 大きな円となるようにした(直径=約1.5 cm)(図 1). 各筋の剛性率は, 3 回の計測の平均値として 算出した.

1. 5 MVC トルクの計測

膝関節伸展および膝関節屈曲の MVC トルクの 計測は仰臥位にて行った.右股関節および右膝関 節は 90 度屈曲位,左股関節および左膝関節は解 剖学的正位とした.足関節底屈 MVC トルクの計 測は腹臥位にて行い,足関節角度は解剖学的正位 とした.筋力計への固定法は剛性率の計測時と同 様とした.また固定の際に,ダイナモメータの デサントスポーツ科学 Vol.37



図1 超音波剪断波エラストグラフィ画像の 典型例(半腱様筋)

四角で囲んだ範囲は剪断波速度計測の関心領域を示し、丸で囲 んだ範囲は分析範囲を示す.

軸と関節の軸が合っていることを確認した.各 MVCトルクの計測は2回行い,再現性の確認が 取れなかった(2回の計測値に5%以上の差異が 認められた)場合は3回以上の計測を行った.各 MVCトルクの統計処理には最大値を用いた.

1.6 統計

結果はすべて, 平均値 ± 標準偏差で示した. 各筋の剛性率および各 MVC トルクの経時変 化を観察するため,時間 (PRE, POST 1, POST 2, POST 3)を要因とする繰り返しのある一元 配置分散分析を行った.有意であった場合は, Dunnett の方法による多重比較検定を行った.有 意水準は P < 0.05 とした.すべての統計処理は統 計 ソフト (SPSS Statistics 22, IBM Japan, Japan) を用いて行った.

2. 研究結果

図2に、マラソン前後における各筋の剛性率 を示した.一元配置分散分析の結果,腓腹筋内側 頭および半腱様筋の剛性率の変化に有意性が認め られた(P=0.005 および P=0.036)が,内側広筋, 外側広筋,大腿二頭筋および半膜様筋の剛性率に 有意な経時変化は認められなかった(それぞれ, P=0.217, P=0.752, P=0.141, P=0.448).多重比 較検定の結果,腓腹筋内側頭において, PRE と



図2 マラソンレース前後における剛性率の経時変化 * vs. PRE (P < 0.05)

POST 1 および POST 2 との間に有意差が認めら れた (PRE vs. POST 1: 55.4 vs. 67.7 kPa, P = 0.005; PRE vs. POST 2: 55.4 vs. 65.3 kPa, P = 0.025) が, PRE と POST 3 における剛性率には有意な差はみ られなかった (PRE vs. POST 3: 55.4 vs. 58.7 kPa, P = 0.685). 一方, 半腱様筋においては, PRE と POST における剛性率に有意差は認められなかっ た.

マラソン前後における膝関節伸展,屈曲およ び足関節底屈 MVC トルクの変化を図3に示し た. いずれの MVC トルクも PRE に比べ POST 1において有意に低い値を示した.しかしながら, POST 2 および POST 3 における各 MVC トルク は, PRE のそれと有意な差が認められなかった.

3. 考察

本研究より,以下の結果が得られた.1)マラ ソンレースの2日後まで,腓腹筋内側頭に有意 な剛性率の増加がみられたが,3日後においては レース前と有意な差は認められなかった.2)内 側広筋,外側広筋,大腿二頭筋,半腱様筋および 半膜様筋には有意な剛性率の変化はみられなかっ た.市民ランナーがマラソンを行うことにより, 足関節底屈筋に顕著な筋損傷が生じるが,3日後 には回復することが明らかとなった.また,膝関 節伸展筋および膝関節屈曲筋には大きな損傷が生



図3 マラソンレース前後における筋力の経時変化 A: 膝関節伸展MVCトルク, B: 膝関節屈曲MVCトルク, C: 足 関節底屈MVCトルク. * vs. PRE (P < 0.05)

じないことが示唆された.

本研究では、マラソンレースの2日後まで、 有意な腓腹筋内側頭の剛性率の増加がみられ た. Morgan and Allen¹³⁾は、伸張性収縮によっ て、サルコメアと共に筋鞘や筋小胞体、横行小 管といった微細組織に損傷が生じ、筋内のCa²⁺ の恒常性が崩れることを示唆している.また、 Lacourpaille et al.¹⁰⁾は、漏出したCa²⁺によって、 安静時におけるクロスブリッジの結合が強まり、 筋が硬くなる、すなわち筋の剛性率が高くなると 述べている.本研究においても、マラソンレース によって、腓腹筋が繰り返し伸張性収縮を行うこ とにより筋損傷が生じ、結果として剛性率が増加 したと考えられる.

本研究において、足関節底屈 MVC トルクは1 日後においてのみ低下し、2日後にはPREの値 と有意な差は認められなかった。一方、剛性率の 結果を踏まえると、腓腹筋内側頭は、2日後まで 損傷していたと考えられる. この相違が生じた理 由の一つとして、足関節底屈 MVC トルクにおけ る腓腹筋内側頭の貢献度が挙げられる. Ward et al.¹⁴⁾は、屍体を用いて下肢の筋形状について報 告しており, 腓腹筋内側頭の生理学的筋横断面積 が下腿三頭筋全体のそれに占める割合は26%程 度であることを示している. さらに、後脛骨筋や 長腓骨筋など他の足関節底屈筋群を考慮すると、 腓腹筋内側頭の損傷が足関節底屈 MVC トルクに 及ぼす影響は26%よりも小さくなる、すなわち、 腓腹筋内側頭の損傷は2日後まで生じていたが. 他の筋の損傷はほとんど生じていなかったため. 足関節底屈筋力の低下は1日後までであったと推 察される.

本研究において, 膝関節伸展および屈曲 MVC トルクはマラソンレースの1日後においてのみ有 意な低下がみられた.本研究結果と同様に, Hill et al.³⁾ も,マラソンレースの1日後に膝関節伸展 MVC トルクが低下することを報告している.し デサントスポーツ科学 Vol.37

かしながら, 膝関節伸展筋である内側広筋および 外側広筋、膝関節屈曲筋である大腿二頭筋、半腱 様筋、および半膜様筋に有意な剛性率の増加はみ られなかった.この相違が生じた理由として.筋 力が低下する要因の違いが考えられる、すなわち、 膝関節伸展および屈曲 MVC トルクの低下は、筋 損傷ではなく筋痛による神経系の抑制が関わって いる可能性が挙げられる¹⁵⁾.前述のように、筋 線維に損傷が生じていれば剛性率が増加するた め、マラソンレース後に大腿部の収縮要素には 顕著な損傷は起きていないと考えられる. Lau et al.¹⁶⁾は、筋内に挿入した針によって筋の収縮要 素や筋膜に電気刺激を行い、筋痛が生じている箇 所の同定を試みている。その結果、筋膜は筋組織 より痛みに対し敏感であることが示された.また, 筋膜において、電気刺激に対する感受性により評 価した筋痛の程度と、筋を圧迫することにより評 価した筋痛の程度に有意な相関関係が得られたこ とを報告している、すなわち、痛みによる神経系 の抑制は、筋の収縮要素の損傷が生じずとも起こ りうると考えられる、このため、本研究によって 生じた MVC トルクの低下は、筋膜の損傷による 筋痛が神経系の抑制をもたらしたことに起因する のではないかと推察された.

剛性率と MVC トルクの経時変化に相違がみら れる理由として、剛性率を計測する際の関節角度 (筋の長さ)の影響が挙げられる.筋線維の Ca²⁺ の感受性は、伸長位において高いことが知られて いる¹⁷⁾.また、Lacourpaille et al.¹⁰⁾は、上腕二 頭筋において、筋損傷による剛性率の増加は肘関 節伸展位にて顕著であり、肘関節屈曲位において は観察されないことを報告している.すなわち、 超音波剪断波エラストグラフィを用いて筋損傷を 明確に評価するには、筋伸長位において剛性率を 計測することが必要だと考えられる.この点を踏 まえ本研究では、各剛性率の計測は軽度伸長位に て行った.以上の点から、本研究においてみられ たマラソンレース前後の剛性率と MVC トルクの 経時変化の相違は,計測時の関節角度の影響によ るものではないと考えられる.

本研究の結果から、マラソンレースによる筋 損傷は2日後まで顕著であることが示唆された. しかしながら、本研究にて計測した剛性率は、筋 線維や筋内膜、筋周膜、筋小胞体などの微細損傷 を反映していると考えられる.一方、筋外膜や腱、 筋間の結合組織などに損傷が及んでいるかは検 討できていない.このため、今後の課題として、 筋腱複合体の全体および周囲の組織における損 傷を定量化することで、マラソンレース後のト レーニング再開時期などを明確にすることが求 められる.

結 論

本研究は、市民ランナーがマラソンレースを行 うことによって生じる下肢の筋の損傷を定量し、 筋損傷がどの部位において生じているのかを明 らかにすることを目的とした、マラソンレース前 後の剛性率を超音波剪断波エラストグラフィに より計測した結果、腓腹筋内側頭にのみ、有意な 剛性率の増加が観察された.また、マラソンレー スの3日後における剛性率はマラソン前のそれ と有意な差が認められなかった.このことから、 マラソンによる筋損傷は足関節底屈筋に顕著に 生じ、3日後には回復することが明らかとなった. また、膝関節伸展筋および膝関節屈曲筋には大き な損傷が生じないことが示唆された.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり,研究助成を賜りま した公益財団法人石本記念デサントスポーツ科 学振興財団に厚く御礼申し上げます.

文 献

1) 笹川スポーツ財団「スポーツライフに関する調査

報告書」2002,2004

- Kluitenberg B., van Middelkoop M., Diercks R., van der Worp H., What are the differences in injury proportions between different populations of runners? a systematic review and meta-analysis. *Sports Med.*, 45: 1143-1161 (2015)
- Hill J.A., Howatson G., van Someran J.A., Walshe I., Pedlar C.R., Influence of compression garments on recovery after marathon running. *J. Strength Cond. Res.*, 28: 2228-2235 (2014)
- 4) Petersen K., Hansen C.B., Aagaard P., Madsen K., Muscle mechanical characteristics in fatigue and recovery from a marathon race in highly trained runners. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **101**: 385-396 (2007)
- 5) Howatson G., McHugh M.P., Hill J.A., Brouner J., Jewell A.P., van Somernen K.A., Shave R.E., Howatson S.A., Influence of tart cherry juice on indices of recovery following marathon running. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 20: 843-852 (2010)
- Kyröläinen H., Pullinen T., Candau R., Avela J., Huttunen P., Komi P.V., Effects of marathon running on running economy and kinematics. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 82: 297-304 (2000)
- Kobayashi Y., Takeuchi T., Hosoi T., Yoshizaki H., Loeppky J.A., Effect of a marathon run on serum lipoproteins, creatine kinase, and lactate dehydrogenase in recreational runners. *Res. Q. Exerc. Sport*, 76: 450-455 (2005)
- 8) Tojima M., Noma K., Torii S., Changes in serum creatine kinase, leg muscle tightness, and delayed onset muscle soreness after a full marathon race. J. Sports Med. Phys. Fitness, Epub ahead of print
- Eby S.F., Song P., Chen S., Chen Q., Greenleaf J.F., An K.N., Validation of shear wave elastography in skeletal muscle. *J. Biomech.*, 46: 2381-2387 (2013)
- 10) Lacourpaille L., Nordez A., Hug F., Couturier A., Dibie C., Guilhem G., Time-course effect of exercise-induced muscle damage on localized muscle mechanical properties assessed using elastography. *Acta. Physiol.*, 211: 135-146(2014)
- 11) Gennisson J.L., Deffieux T., Mace E., Montaldo G., Fink M., Tanter M., Viscoelastic and anisotropic mechanical properties of in vivo muscle tissue assessed by supersonic shear imaging. *Ultrasound Med. Biol.*, 36: 789-801 (2010)
- 12) Ward S.R., Lieber R.L., Density and hydration of fresh and fixed human skeletal muscle. *J. Biomech.*,

38: 2317-2320 (2005)

- Morgan D.L., Allen D.G., Early events in stretchinduced muscle damage. J. Appl. Physiol., 87: 2007-2015(1999)
- 14) Ward S.R., Eng C.M., Smallwood L.H., Lieber R.L., Are current measurements of lower extremity muscle architecture accurate? *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 467: 1074-1082 (2009)
- 15) Prasartwuth O., Taylor J.L., Gandevia S.C., Maximal force, voluntary activation and muscle soreness after eccentric damage to human elbow flexor muscles. J.

Physiol., 15; 567: 337-348 (2005)

- 16) Lau W.Y., Blazevich A.J., Newton M.J., Wu S.S., Nosaka K., Changes in electrical pain threshold of fascia and muscle after initial and secondary bouts of elbow flexor eccentric exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **115**: 959-968 (2015)
- 17) Stephenson D.G., Wendt I.R., Length dependence of changes in sarcoplasmic calcium concentration and myofibrillar calcium sensitivity in striated muscle fibres. J. Muscle. Res. Cell. Motil., 5: 243-272(1984)