

伸張性筋活動量が超音波画像の強度変化に及ぼす影響

堀田典生・山本薫¹・前野信久・石田浩司²

The Effects of the Amount of Eccentric Muscle Activity on Change in the Intensity of Transverse Ultrasound Images

Norio HOTTA, Kaoru YAMAMOTO¹, Nobuhisa MAENO,

Koji ISHIDA²

Abstract: We examined how the amount of eccentric muscle activity (ECC) affected the intensity of transverse ultrasound images (Echo-Intensity) and the relationship between the change in muscle strength and Echo-intensity from before to after ECC. Six subjects performed several sets of ECC (“heavy”) using one leg (H-leg) and did half the number of sets of ECC (“light”) utilizing the other leg (L-leg). The actual measurements were performed just before (pre) and 2 days after (post) ECC. Although the Echo-Intensity was significantly strengthened after ECC, there was no significant difference between the H- and L-leg. We also could not observe any significant correlation coefficient between change in the Echo-Intensity and muscle strength from pre to post. These results suggest that changes in Echo-Intensity may not completely reflect the magnitude of ECC-induced muscle damage.

Keywords: 伸張性筋活動, 筋損傷, 最大筋力, エコー画像

Eccentric muscle activity, muscle damage, maximal voluntary contraction, echo image

1. 緒言

骨格筋の動的収縮様式には、筋線維が縮みながら収縮する短縮性収縮と引き伸ばされながら収縮する伸張性収縮がある。スポーツや運動の場面において、骨格筋は打撲などの外傷や筋線維の断裂などにより損傷するが、頻繁に発生する事例としては伸張性筋活動(Eccentric muscle activity: ECC)による損傷である(野坂, 2009)。筋損傷との因果関係は未だ不明であるが、筋活動に伴う遅発性の筋機械痛覚過敏(遅発性筋痛)も ECC を行うと生じる(Hotta et al. 2006, 2007a, 2009)。ECC は短縮性筋活動に比べて大きな張力を発揮できる。しかし、収縮に動員される運動単位が少なく、1本あたりの筋線維に対する負担が強くなるため、損傷が生じやすいと考えられている(Clarkson et al. 1992)。

筋損傷を可視的にとらえるには、バイオプシーによる侵襲的な筋サンプル採集や、磁気共鳴画像(MRI)、Bモード超音波画像が必要となる。しかし、ECCによる筋損傷は、顕微鏡下でのみ観察できるZ線の乱れや筋細胞膜の微細構造の変化、炎症細胞の浸潤などの組織学的な変化である

¹ 名古屋大学教育発達科学研究科

² 名古屋大学総合保健体育科学センター

2010.11.16 受稿、2011.1.21 受理

ため(Warren et al. 1999), MRI や超音波断層画像で捉える形態的画像変化として異常所見を評価することは難しい. しかし, 筋損傷によって浮腫が生じた場合, MRI 信号(T2 緩和時間)や B モードエコー信号の強度変化として, ECC に伴う損傷の存在を確認することが可能となる(Nosaka and Clarkson 1996b).

例えば, 最大筋力や体肢の周囲長のような筋損傷を示す間接的な指標は ECC により変化し(堀田ほか. 2009), その変化の程度は ECC の回数や強度の違いにより異なることが報告されている(Nosaka et al. 2001; Hotta et al. 2007a). ECC 後, エコー信号の強度は強くなることが知られているが(堀田ほか. 2009), ECC の量によりその変化の程度が異なるか否かは分かっていない. そこで本研究では, ECC の回数がエコー信号の強度変化に及ぼす影響を検討することを目的とした.

ところで, 最大筋力の低下は筋損傷をよく反映する指標と考えられおり(Warren et al. 1999), 多くの研究者が ECC 後の筋損傷を評価するために用いている. しかし, 最大筋力の変化とエコー信号の強度変化の関係を明らかにした研究は少ない(堀田ほか. 2009). そこで, 最大筋力とエコー信号の強度変化の関係を検討することを第二の目的とした.

超音波診断装置は MRI に比べて安価であり, 多くの医療機関, 研究機関に設置されている. また, その診断は非侵襲的であり, エコー信号の強度変化の観察に絞れば ECC 後の筋損傷を視覚的に捉えやすい. エコー信号の強度変化だけで, 筋損傷の程度を捉えることができるかを明らかにできれば, 体育やスポーツ医学, 運動処方, 運動療法などの分野に貢献でき得るとの背景の下に本研究は行われた.

2. 方法

1) 被検者

本実験の被検者は健康な男子 5 名, 女子 1 名であった. 被検者の年齢, 身長, 体重は 23.3 ± 3.1 歳, 170.7 ± 6.8 cm, 65.3 ± 14.3 kg(平均値 \pm 標準偏差)だった. 全ての被検者に本研究の目的と方法を説明した後, 研究に参加することの同意を得た. 本研究は, 名古屋大学総合保健体育科学センターの倫理委員会の了承の下で行なわれた.

全ての測定は ECC の直前(pre)と 2 日後(post)に行い, 対象部位は膝関節伸展筋群とした.

2) ECC

ECC は我々の先行研究(Hotta et al. 2007a)で用いたものと同じであった. すなわち, 4 秒に 1 度, 約 1 秒間かけて膝高の椅子に片脚で座るという Takahashi et al. (1994)が考案した ECC を, 最低 20 分間行った(平均 35 分). 休憩をとった後, 反対側の脚にてはじめの脚の半分の時間だけ ECC を行った. 前者の脚を H-ECC(Heavy-eccentric exercise)脚, 後者を L-ECC(Light-eccentric exercise)脚と定義した. 利き脚と非利き脚の割り当てはランダムに行った.

3) 超音波断層画像

B モード超音波断層画像は超音波診断装置(GE 横河メディカルシステム, Logiq5Pro)を用いて得た. 膝から約 15cm 中枢位の中央部分に大腿部長軸に対して垂直にプローブをあてて断層画像を撮った. 油性フェルトペンで印をつけ, 毎回同じ箇所を撮影した. その際のプローブ角度は測定日間で統一した.

エコー強度(Echo-intensity)の測定は, 上記で得られた大腿部伸展筋群横断面を用いた. Echo-intensity の測定箇所は画像上の大腿骨と皮膚の間で, 先行研究に従い, $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ の正方形内(Chen and Nosaka 2006)とした. 1 名の女性被検者では, その範囲であると皮膚や大腿骨を含

んでしまうため、1 cm × 1 cm の正方形内(Nosaka and Clarkson 1995; Nosaka et al. 2005)とした。ImageJ ソフトウェア[National Institutes of Health (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>)]上で白を 255、黒を 0 としてエコーで得られた画像の白さを任意単位(Arbitrary unit: A.U.)で表わした。

4) 最大筋力

本研究では膝関節屈曲 90°位における等尺性最大伸展筋力(Maximal voluntary contraction force: MVC-force)を測定した。その測定方法は我々の先行研究(Hotta et al. 2007b)に従った。すなわち、膝関節角度 90°位における MVC 発揮中の力をロードセル(共和電業, 100KSB340D)とストレインアンプ(共和電業, DPM-711B)を用いて測定した。約 1 分間の休憩を挟んで 3 回行い、その最大値を MVC-force と定義した。

5) 筋痛

筋痛の評価のために視覚的アナログスケール(Visual analogue scale: VAS) (O'Connor and Cook 1999)を用いた。100mm のスケールとし、左端には「痛みなし」、右端には「想像出来る最大の痛み」と記載し、その間を被検者の主観で自由に示させた。pre における MVC-force の 5%に相当する重量の重りを足首にまいて 1 秒に 1 回の頻度にて 20 回の膝の伸展-屈曲運動を行っている最中の痛みと、検者が被検者の脚を 1 秒に 1 回の頻度にて 20 回、受動的に伸展-屈曲させている最中の痛みをアンケートした。運動と受動動作を各 5 セット程度行った。本研究では、運動と受動動作の平均値を痛みの代表値(Muscle pain)とした。H-ECC 脚と L-ECC 脚の測定の順番は被検者ごとランダムに変更した。

6) 統計方法

値はすべて平均値±標準誤差で示した。ECC の影響が H-ECC 脚と L-ECC 脚で異なるか検討するために 2 要因の分散分析[時間(pre 対 post), 脚(H-ECC 脚対 L-ECC 脚)]を行った。多重比較には Scheffe 法を用いた。Muscle pain は、Wilcoxon 符号付順位検定を用いて H-ECC 脚と L-ECC 脚間にて比較した。

また、Echo-Intensity と MVC-force の変化の相関を検討するため、それぞれ pre からの変化率を算出し、Pearson の相関係数(r)を用いて検定した。相関の有意性の検定を行うために Fisher の r の z 変換を行い、相関係数が 0 でないか検討した。本研究では、危険率 5%未満をもって有意とした。統計解析には StatView5.0 ソフトウェアを用いた。

3. 結果

1) Muscle pain

ECC が膝伸展筋群に筋機械痛覚過敏を生じさせたかを調べるために、運動および、受動動作による機械刺激中の痛みの程度を VAS で示した。全ての被検者の大腿部前面に筋痛が生じた。H-ECC 脚と L-ECC 脚の VAS の値は、それぞれ 49.1±11.5mm, 30.0±6.3mm であった。H-ECC 脚の VAS のほうが L-ECC 脚のそれに比べて高い傾向であった(P=0.07)。

2) MVC-force

本研究では、筋の損傷を評価するために、MVC-force を求めた(Fig.1)。H-ECC 脚, L-ECC 脚とも pre に比べて post で有意に低下した(P<0.05)。また、脚と時間効果の交互作用が有意(P=0.01)であることから、ECC に伴う H-ECC 脚の低下の程度は L-ECC 脚よりも有意に大きかった。

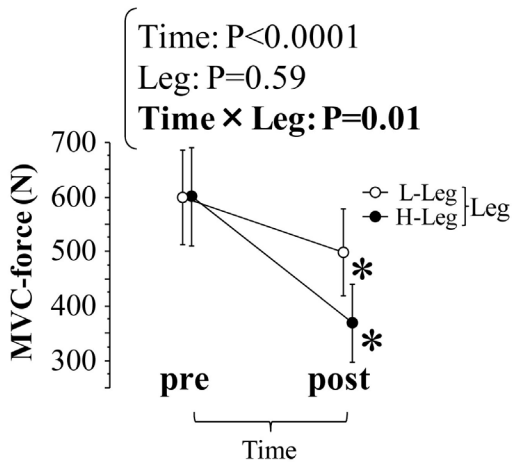


Fig. 1 Maximal voluntary contraction (MVC) force before (pre) and 2 days after (post) eccentric muscle activity (ECC). The H-Leg performed twice as much ECC as the L-Leg; the L-leg did half as much ECC as the H-leg. Significant differences between pre and post are indicated with an asterisk (*).

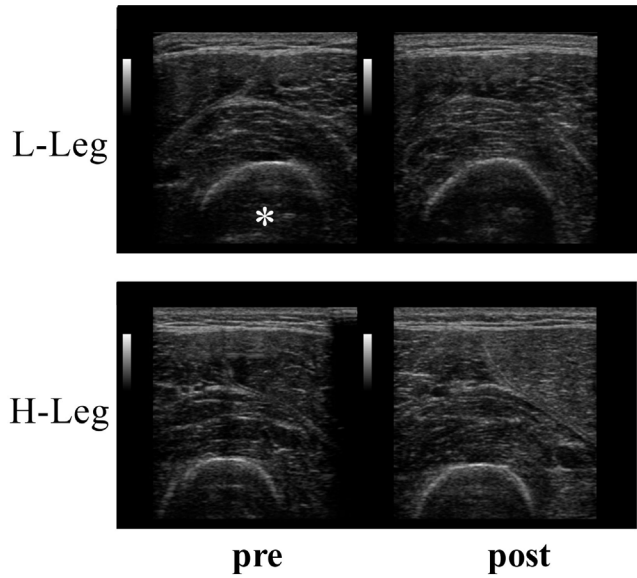


Fig. 2 A series of transverse ultrasound images of one representative subject before (pre) and 2 days after (post) eccentric muscle activity (ECC). Asterisk indicates femoris.

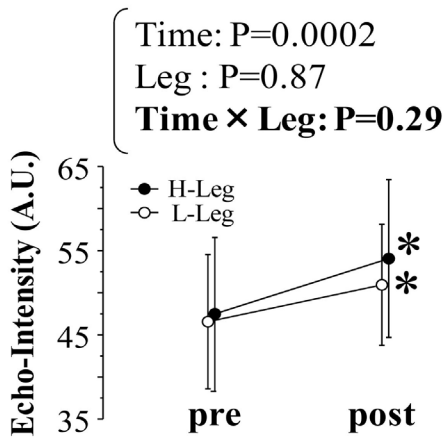


Fig. 3 Intensity of transverse ultrasound image (Echo-Intensity) before (pre) and 2 days after (post) eccentric muscle activity (ECC). The H-Leg performed twice as much ECC as the L-Leg; the L-leg did half as much ECC as the H-leg. Significant differences between pre and post are indicated with an asterisk (*).

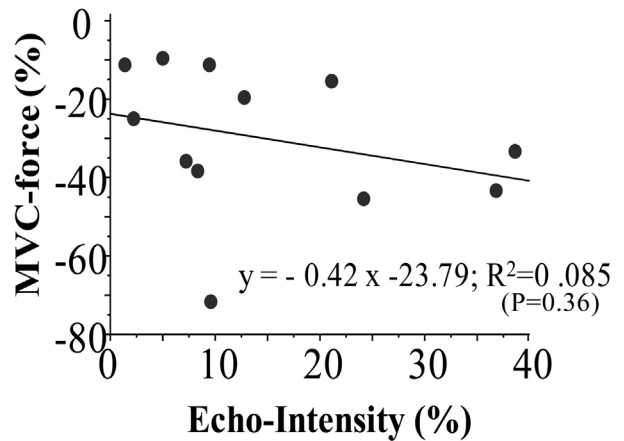


Fig. 4 The relationship between the change in maximal voluntary contraction (MVC) force and the change in the intensity of the transverse ultrasound image (Echo-Intensity) of the knee extensors from before (pre) to 2 days after (post) eccentric muscle activity (ECC). The regression equation is indicated [the change in Echo-Intensity (%) = x, the change in MVC force (%) = y, coefficient of determination = R^2].

3) Echo-Intensity

本研究では、Bモード超音波断層画像から Echo-Intensity を測定した。Fig.2 に pre, post における代表的な超音波画像を示した。また、Fig.3 に H-ECC 脚、L-ECC 脚における Echo-Intensity の pre から post の変化を示した。H-ECC 脚、L-ECC 脚共に、post にて有意に Echo-Intensity は増加した($P < 0.05$)。しかし、有意な交互作用は認められなかった($P = 0.29$)。

4) Echo-Intensity と MVC-force の変化の関係

Echo-intensity と MVC-force の変化の関係を調べるために、指標間の相関の有無を検討した。Fig.4 に Echo-Intensity と MVC-force の変化率の関係をプロットした散布図、回帰直線、決定係数ならびに回帰直線の検定結果(P 値)を示した。両者の変化において有意な相関は認められなかった($r = -0.3$, $P = 0.37$)。

4. 考察

本研究の目的は、(1)ECC の回数がエコー信号の強度変化に及ぼす影響を検討すること、(2)ECC 前後における最大筋力とエコー信号の強度変化の関係について検討することであった。

1) ECC が大腿部筋群に及ぼす影響

本研究では、post において筋機械痛覚過敏が生じ、MVC-force の低下(Fig.1)、Echo-Intensity の増加(Fig.3)が観察された。これらのことは、これまでの多くの先行研究の結果(野坂 2003; Nosaka et al. 2006; 堀田ほか. 2009)と一致する。

ECC 後の最大筋力の低下は、筋線維の物理的損傷の他、興奮収縮連関の異常と収縮タンパク質の低下で説明されている(Warren et al. 2002)。本研究の ECC により、これらのことが生じて MVC-force が低下したと考えられた。

筋損傷と筋機械痛覚過敏の因果関係は未だ不明であるが、筋の損傷やそれに伴う炎症がトリガーとなり筋機械痛覚過敏が生じるというのが現在主流な考え方である(Armstrong 1984; Smith 1991; 野坂 2003)。本研究の筋痛形成の正確な機序は特定できないが、ECC に伴う筋損傷がその一因として考えられる。

筋の損傷に伴い浮腫が生じる。浮腫は筋組織内圧の増大、筋横断面積の増加、水分の流入によると説明され(Fridén et al. 1988; 水村, 2008)、それは B モードエコー画像においてはより白く表現される(van Holsbeeck and Introcaso 1992)。本研究の Echo-Intensity の増加は損傷に伴う浮腫を反映していると考えられた。

2) ECC の回数とエコー信号の強度変化

本研究では、ECC の回数を左右の脚において変化させた。筋損傷をよく反映する(Warren et al. 1999)と考えられている最大筋力の低下の程度は、H-ECC 脚のほうが、L-ECC 脚に比べて大きかった(Fig.1)。この結果は肘関節屈曲筋群を対象にした先行研究と一致した(Nosaka et al. 2001)。このことは、H-ECC 脚のほうが、L-ECC 脚に比べて損傷の程度が強かったことを示唆している。事実、筋損傷との因果関係は未だ解明されていないが、損傷が契機となり形成し得る筋痛の程度も H-ECC 脚のほうが L-ECC 脚よりも強くなる傾向であった。この傾向は上腕を対象として行った我々の先行研究(Hotta et al. 未発表データ)と一致している。

しかしながら、損傷に伴う浮腫を反映し得る Echo-Intensity の変化の程度に、H-ECC 脚と L-ECC 脚間の有意差は観察されなかった(Fig.3)。さらに、上腕を対象とした我々の先行研究(堀田ほか。

2009)と同様に, Echo-Intensity と MVC-force の変化の間にも有意な相関は認められなかった(Fig.4).

Echo-Intensity において, H-ECC 脚と L-ECC 脚間の有意差や MVC-force の変化との有意な相関が認められなかった原因の一つとして, 脚間の損傷の程度の差が小さいことが考えられた. MRI の信号もエコー画像と同じように, 損傷に伴う浮腫により変化すると考えられている(Nosaka and Clarkson 1996b). 超音波画像よりも空間分解能が高い MRI の信号変化は, 最大筋力の低下と有意な相関があることが報じられている(Nosaka and Clarkson 1996a). そのため, 本研究にて Echo-Intensity における脚間の有意差や MVC-force の変化との有意な相関が得られなかったことには, 超音波診断装置の空間分解能が低く, 脚間のわずかな損傷の程度差を反映できなかったことが関係しているのかもしれない. このことについては, 左右の脚にて損傷の程度の差をさらに大きくして追試する必要がある.

その他の原因としては, (1)被検者数が少ないことに起因する検定力不足や, (2)エコー信号の強度変化が損傷以外の影響を受けている可能性(Aspelin et al. 1992)があること, (3)エコーの信号強度はあくまでも浮腫の程度を評価し得るもので, 筋の微細構造の変化自体をとらえているわけではないこと, (4)浮腫の程度あるいはエコー信号の強度が強くなるのは ECC2 日後以降であるため(野坂 2003; 堀田ほか, 2009), 本研究で観察した ECC2 日後では浮腫の差が小さすぎた可能性などが考えられた.

ECC 直後あるいは 1 日後における最大筋力の変化と, (a)損傷に伴う浮腫を評価し得る体肢の周囲長(ECC4 日後)や, (b)損傷に伴い制限される関節可動域(ECC2 日後), (c)筋細胞膜の損傷を示し得る ECC 後の血中クレアチンキナーゼ活性の最大値との間には, それぞれ有意な相関が観察されている(Nosaka et al. 2006). それに対し, エコー信号の強度変化において, 筋の損傷をよく反映し得る最大筋力の変化(Warren et al. 1999)と有意な相関が見いだせないことは, Echo-Intensity は, 筋の損傷を捉えることはできても, 損傷の程度の差を検出することは不得意であることを示唆しているのかもしれない. いずれにしても, 先行研究(Nosaka et al. 2006)とは測定日が異なり, 我々は大きく変化するような ECC2 日後以降のエコー強度を測定していない. 今後さらなる研究が望まれる.

5. 結論

ECC2 日後において Echo-Intensity は増加する. しかし, その変化の程度は異なる回数の ECC を行った脚間において有意差は認められなかった. また, 筋損傷をよく反映し得る MVC-force の変化と Echo-Intensity の変化間に有意な相関は認められなかった.

これらの結果は, Echo-Intensity は ECC 後の筋損傷を捉えることができるが, 損傷の程度までは評価し得ないことを示唆している.

付記

本研究に参加して下さった被検者の皆様に心より感謝致します. 本研究は, 本学共同研究(前野信久・堀田典生, 平成 22-23 年度)の一部として愛知淑徳大学研究助成(共同研究助成)を受けて行われた.

文献

- 水村和枝 (2008) 遅発性筋痛の基礎最前線. 鈴木重行編, 理学療法 MOOK3 疼痛の理学療法慢性痛の理解とエビデンス. 三輪書店, pp 252-258
- 野坂和則 (2003) 筋肉痛の科学. 横浜市立大学論叢 自然科学系列 54: 51-98

- 野坂和則 (2009) 筋損傷, 筋肉痛と筋の適応. 宮村実晴編, 身体トレーニング 運動生理学から見た身体機能の維持・向上. 真興交易, pp 168-175
- 堀田典生, 山本薫, 前野信久, 石田浩司 (2009) 伸張性収縮運動後における筋機能と筋の状態や形態との関係. 東海保健体育科学 31: 41-48
- Armstrong RB (1984) Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. *Med Sci Sports Exerc* 16: 529-538
- Aspelin P, Ekberg O, Thorsson O, Wilhelmsson M, Westlin N (1992) Ultrasound examination of soft tissue injury of the lower limb in athletes. *Am J Sports Med* 20: 601-603
- Chen TC, Nosaka K (2006) Responses of elbow flexors to two strenuous eccentric exercise bouts separated by three days. *J Strength Cond Res* 20:108-116
- Clarkson PM, Nosaka K, Braun B (1992) Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Med Sci Sports Exerc* 24: 512-520
- Fridén J, Sfikianos PN, Hargens AR, Akeson WH (1988) Residual muscular swelling after repetitive eccentric contractions. *J Orthop Res* 6: 493-498
- Hotta N, Sato K, Sun Z, Katayama K, Akima H, Kondo T, Ishida K (2006) Ventilatory and circulatory responses at the onset of exercise after eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol* 97: 598-606
- Hotta N, Yamamoto K, Katayama K, Fukuoka Y, Ishida K (2007a) The effect of the amount of eccentric exercise on ventilatory response at the onset of exercise. *J Physiol Sci* 57: 193-197
- Hotta N, Yamamoto K, Katayama K, Ishida K (2009) The respiratory response to passive and active arm movements is enhanced in delayed onset muscle soreness. *Eur J Appl Physiol* 105: 483-491
- Hotta N, Yamamoto K, Sato K, Katayama K, Fukuoka Y, Ishida K (2007b) Ventilatory and circulatory responses at the onset of dominant and non-dominant limb exercise. *Eur J Appl Physiol* 101: 347-358
- Nosaka K, Chapman D, Newton M, Sacco P (2006) Is isometric strength loss immediately after eccentric exercise related to changes in indirect markers of muscle damage? *Appl Physiol Nutr Metab* 31: 313-319
- Nosaka K, Clarkson PM (1995) Muscle damage following repeated bouts of high force eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc* 27: 1263-1269
- Nosaka K, Clarkson PM (1996a) Variability in serum creatine kinase response after eccentric exercise of the elbow flexors. *Int J Sports Med* 17: 120-127
- Nosaka K, Clarkson PM (1996b) Changes in indicators of inflammation after eccentric exercise of the elbow flexors. *Med Sci Sports Exerc* 28: 953-961
- Nosaka K, Newton M, Sacco P, Chapman D, Lavender A (2005) Partial protection against muscle damage by eccentric actions at short muscle lengths. *Med Sci Sports Exerc* 37: 746-753
- Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P (2001) The repeated bout effect of reduced-load eccentric exercise on elbow flexor muscle damage. *Eur J Appl Physiol* 85: 34-40
- O'Connor PJ, Cook DB (1999) Exercise and pain: the neurobiology, measurement, and laboratory study of pain in relation to exercise in humans. *Exerc Sport Sci Rev* 27: 119-166
- Smith LL (1991) Acute inflammation: the underlying mechanism in delayed onset muscle soreness? *Med Sci Sports Exerc* 23: 542-551
- Takahashi H, Kuno S, Miyamoto T, Yoshioka H, Inaki M, Akima H, Katsuta S, Anno I, Itai Y (1994) Changes in magnetic resonance images in human skeletal muscle after eccentric exercise. *Eur J*

Appl Physiol 69: 408-413

van Holsbeeck M, Introcaso JH (1992) Musculoskeletal ultrasonography. Radiol Clin North Am 30: 907-925

Warren GL, Ingalls CP, Lowe DA, Armstrong RB (2002) What mechanisms contribute to the strength loss that occurs during and in the recovery from skeletal muscle injury? J Orthop Sports Phys Ther 32: 58-64

Warren GL, Lowe DA, Armstrong RB (1999) Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. Sports Med 27: 43-59