

原 著

T₂ 緩和時間を指標とした 15% 最大筋力時の 手関節伸展運動筋の解析

¹ 獨協医科大学 医学部生理学 (生体制御)

² 人間総合科学大学 保健医療学部リハビリテーション学科

³ 葵メディカルアカデミー 理学療法学科

吉田 一也^{1,2} 高森 正祥^{1,3} 秋山 純和^{1,2} 瀬尾 芳輝¹

要 旨 骨格筋緩和時間 (T₁, T₂) を指標とした MRI 法は、表面筋電図法、超音波法に加え新しい骨格筋の運動分析法として注目されている。本研究では、物を把持するなど日常生活で重要な手関節伸展運動について検討した。健康人 8 名を被験者とし、最大等尺性収縮筋力の 15% の等張性収縮運動の前後での T₂ 強調画像と T₂ の変化、および運動後 25 分の回復を測定した。測定筋は、短橈側手根伸筋、総指伸筋、小指伸筋、円回内筋、尺側手根伸筋、深指屈筋、浅指屈筋、尺側手根屈筋、橈側手根屈筋、腕橈骨筋とした。運動後 T₂ 強調画像から活動筋を弁別した。短橈側手根伸筋、総指伸筋、小指伸筋に T₂ の延長を認めた (P<0.01)。その後、緩やかに短縮したが、短橈側手根伸筋と総指伸筋では 25 分後まで T₂ の延長を認めた。尺側手根伸筋、円回内筋は延長傾向を認めたが、有意ではなかった。主動筋の短橈側手根伸筋に対して、総指伸筋、小指伸筋に協同作用としての活動が確認できた。屈筋群である尺側手根屈筋、橈側手根屈筋、深指屈筋、浅指屈筋、腕橈骨筋は非活動であった。以上より、T₂ を指標とした MRI 法により手関節運動筋の運動解析が可能であることが示された。

Key Words : 手関節, 伸展運動, 等張性収縮, T₂ 緩和時間, MRI

緒 言

運動時における筋活動を評価する方法としては、長年、筋電図法が用いられてきた¹⁾。また、近年、理学療法分野においても超音波診断装置を用いた活動評価が行われている²⁾。筋電図法による評価では、深部筋に対して筋電の導出が困難な場合や、他の筋電との区別が困難な場面も指摘されている³⁾。超音波診断装置を用いた検討においてはプローブ下の筋収縮の有無に関しては可能である。しかし、プローブ感度範囲は狭く、部位の離れた協同筋の観察は困難である。一方、MRI 画像法では、深部筋も明瞭に描出でき、また、同一画像で複数の筋の測定が可能である⁴⁾。かつ、侵襲を伴わないので、苦痛も軽減可能であり、有用性は非常に高いと考えられる。

MRI による筋活動評価に関して 1988 年 Fleckenstein らは運動後に骨格筋の緩和時間 (T₁, T₂) が延長する事を報告した⁵⁾。Weidman らは、無機リン・クレアチンリン酸比 (Pi/PCr) や pH の変化量が、T₂ 値の変化量と比例することから、T₂ 延長が運動強度の指標となる可能性を報告している⁶⁾。また、T₂ 変化は筋電図積分値及び運動強度との間に線形な関係にあり、収縮様式の相違に伴う T₂ 緩和時間変化は筋電図積分値と一致する関係にあることが報告されている⁷⁾。さらに、MRI を用いた T₂ 値変化は、運動の内容によるが 30 分程度で運動前の値に回復するので⁸⁾、完全に可逆的な変化と考えられ、安全性も高い方法であると考えられている。実際に、T₁ 強調画像による筋形態評価や T₂ 強調画像による機能評価を通してアスリートの筋機能評価やトレーニング効果の検証に用いられている⁹⁾。これらの技術を整形外科疾患や脳梗塞後遺症といった疾患に対する理学療法に応用することは現在のリハビリテーション医学における骨格筋評価に多くの情報を提供することが可能であり、治療効果の判定やリハビリテーション技術の向上に

平成 28 年 11 月 4 日受付, 平成 28 年 11 月 24 日受理
別刷請求先: 瀬尾芳輝

〒321-0293 栃木県下都賀郡壬生町北小林 880
獨協医科大学 医学部生理学 (生体制御)

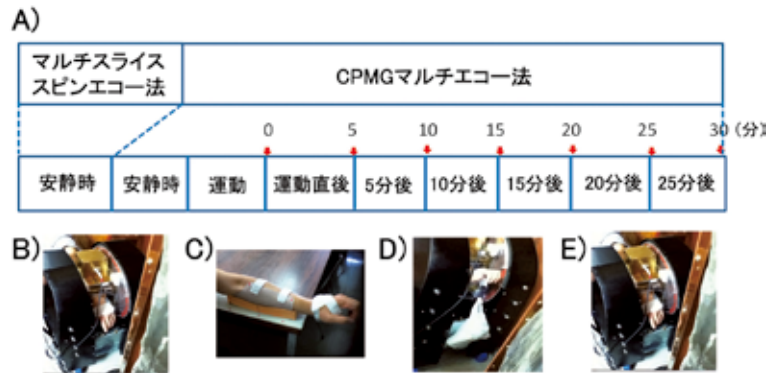


図1 手関節伸展運動プロトコール
(A) 実験のタイムテーブル. (B) 安静時測定. (C) 前腕固定器具. (D) 重錘による等張性負荷. 手関節運動のため前腕を前方に移動している. (E) 運動後測定.

役立つと考えられる.

前腕部の筋群は巧緻性に優れ、様々な運動方向に動くようたくさんの筋群で構成されている。前腕筋は様々な筋が入り組んでおり、下肢筋などのボリュームの大きな筋と比べ、筋電図法で正確なデータを取ることは難しい。著者らの研究グループでは、0.2 T MRI装置を使用し、筋電図法では測定が困難な前腕部の深層筋の筋活動の解析を進めてきた¹⁰⁾。従来は、最大等尺性収縮力の25% (25% Max) の強度での測定を行ってきたが、リハビリテーションなどへの応用を考え、本研究では、被験者の負担の小さい最大等尺性収縮力の15% (15% Max) の運動強度で筋活動分析を試みた。また、リハビリテーション医学のうち理学療法、作業療法の治療場面で、物を把持するときなど日常生活で重要な要素である手関節伸展運動に係わる筋をターゲットとして、 T_2 強調画像および T_2 緩和時間により、運動筋の検出、および運動後25分間の回復過程について検討した。

対象および方法

1. 被験者

健康人8名を被験者とした(成人男性6名、女性2名)(中央値(四分位偏差);年齢32.0(2.1),身長174.0(7.1)cm,体重65.5(4.6)kg)。獨協医科大学生命倫理審査会の承認を得て、被検者に研究の趣旨および目的を説明し、同意の上で実施した(承認番号:大学24003)。計測者および運動抵抗をかける者は、臨床経験10年以上の理学療法士とした。運動負荷量を決定するために、ミュータスF-1筋力計(アニマ,東京)を用い、手関節伸展運動(背屈運動)を5秒~6秒行わせ等尺性収縮筋力を測定した。最大等尺性収縮運動を3回施行し、平均値を100% Maxとした。

2. MRI測定

MRI測定には膝用0.2 TコンパクトMRI装置(MR Technology,筑波)を使用した。図1Aに実験プロトコールを示す。まず、マルチスライススピンエコー法を用い T_2 強調画像を測定しスライス位置を確認した(図1B)。撮像条件は、撮像野(FOV)200×200mm,繰り返し時間(TR)2000ms,エコー時間(TE)39ms,スライス厚9.5mm,スライス枚数11枚(スライス間隔10mm),積算回数1回とした。ついでCPMGマルチエコー法を用い、安静時および運動後5分ごとに25分まで6回の T_2 値を測定した。撮像条件は、FOV 200×200mm,TR 2000ms,スライス厚9.5mm,8エコー(TE 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80ms),積算回数1回(撮像時間4分16秒)とし、画素数256×256で画像化した。スライス位置の再現性を確保するために、前腕を専用の固定器具で固定した(図1C)¹⁰⁾。安静時の T_2 値を撮像したのち、手関節伸展運動を行うために前腕を前方にスライドさせ、15% Max相当の重錘負荷をかけて(図1D)等張性収縮運動(手関節を最大背屈し1秒間保つ)を2秒周期(毎分30回)で行い、疲労して手関節が背屈できなくなるまで繰り返した。運動後、直ちに前腕位置を元の位置に戻し、5分ごとに T_2 値の測定を行った(図1E)。 T_2 強調MR画像の観察と T_2 緩和時間の解析には、専用計測ソフトiPlus(MR Technology,筑波)を用いた。測定筋は、短橈側手根伸筋、総指伸筋、小指伸筋、円回内筋、尺側手根伸筋、深指屈筋、浅指屈筋、尺側手根屈筋、橈側手根屈筋、腕橈骨筋とした。運動直後の T_2 強調MR画像を用い断層解剖カラーアトラス⁴⁾により筋の同定を行った(図2)。筋により断面積が異なるので、血管や脂肪組織を避け、できるだけ筋全体をカバーするように関心領域(ROI)を設定した。同じ

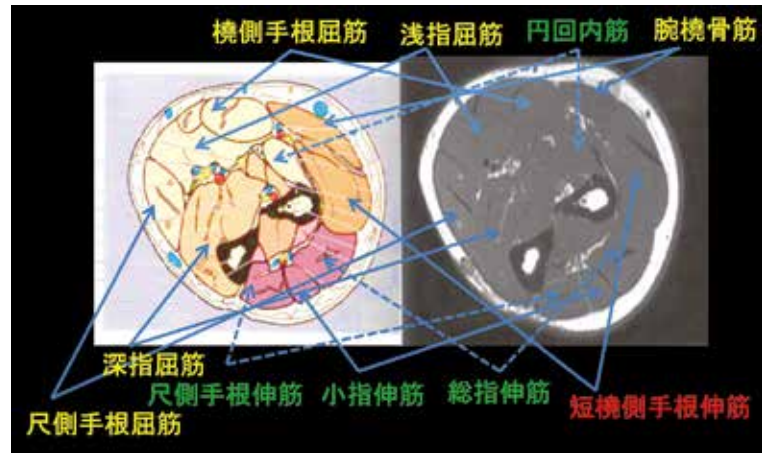


図2 本実験で測定した手関節伸筋群と屈筋群断層解剖カラーアトラス⁴⁾から変更して引用.

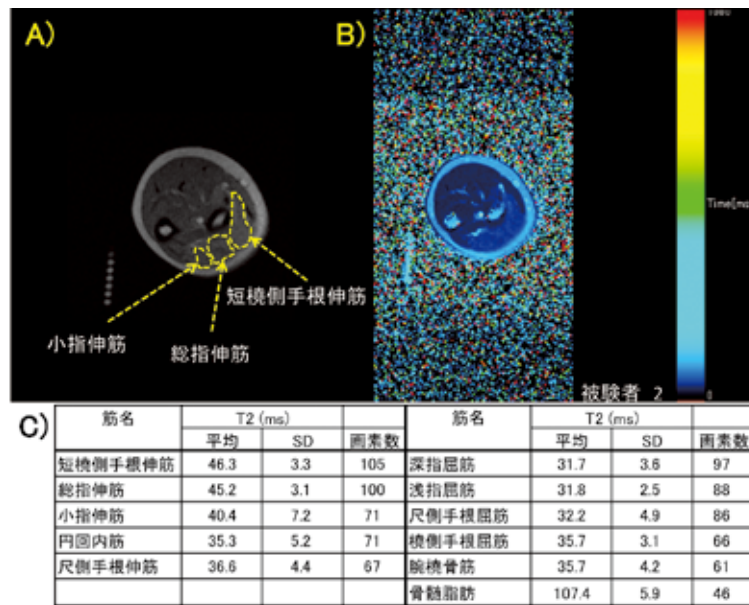


図3 15% Max 運動直後の T₂ 緩和時間測定例

(A) T₂ 強調 MR 画像 (TE 40 ms). 短橈側手根伸筋, 総指伸筋, 小指伸筋の領域を点線で示す. その他の筋に比べ, T₂ 値が高いため信号強度が高くなっている. (B) T₂ 計算画像. (C) 個別の筋の T₂ 値の平均値と標準偏差 (SD), および計算に用いた ROI の画素数.

ROIを運動前後の画像に用い, T₂の平均値と標準偏差を求めた. 運動前後での T₂ 値の差の検定には, 正規分布を検証するには例数が少ないため, 代表値と散らばりの程度は, 各々, 中央値と四分位偏差で表し, 対応のある場合は Wilcoxon の符号付順位検定¹¹⁾を行い, T=0 (危険率1%)で, 対応の無い場合は Wilcoxon の順位和検定¹¹⁾を用い, U=0 (危険率1%)で有意差判定を行った.

結果

8名の被験者の最大等尺性収縮 (100% Max) は16.9 (1.3) kg, 運動負荷量 (15% Max) は2.6 (0.2) kgであった. 運動が継続できない状態になるまでの手関節伸張回数は207 (47) 回であった. 図3Aに典型的な運動後の T₂ 強調 MR 画像を示す. 短橈側手根伸筋, 総指伸筋, 小指伸筋は, その他の筋に比べ信号強度が高くなってお

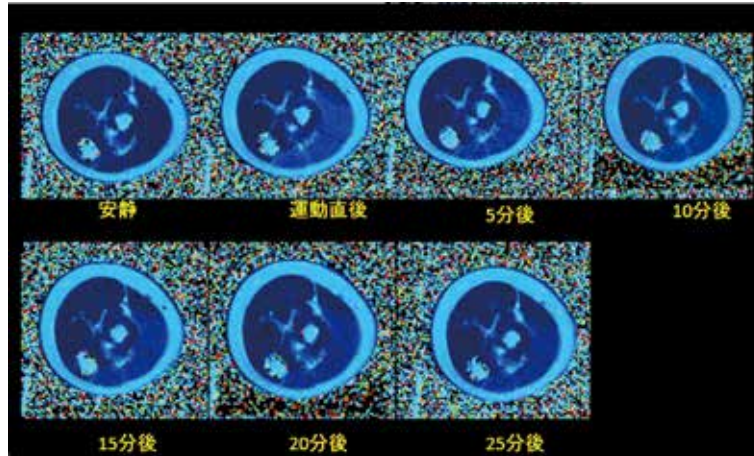


図4 15% Max 運動前後での T_2 計算画像の変化

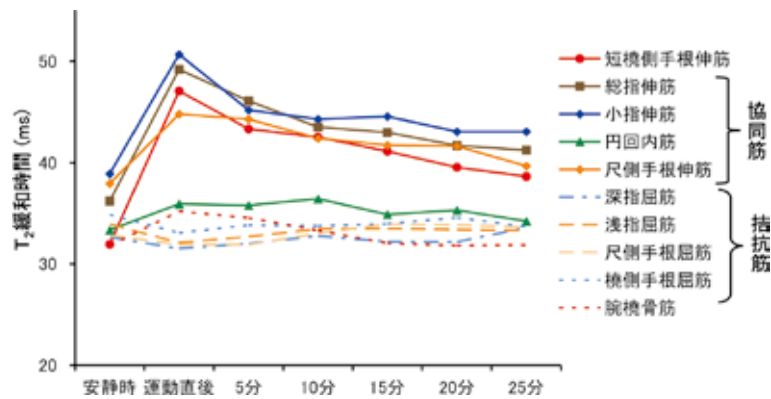


図5 15% Max 運動前後での T_2 値の変化
8名の被験者の中央値を示す。

り、活動筋を良好に弁別できる。図3Bに T_2 計算画像、図3Cに10筋と骨髄脂肪の T_2 値を示す。運動前の骨格筋の T_2 は、ほぼ同じ値 (34.4 (1.7) ms) であったが、運動後直後に、短橈側手根伸筋、総指伸筋、小指伸筋に T_2 値の延長 (45.2 (1.5) ms, $P < 0.01$) を認めた。一方、その他の7筋の T_2 値は安静時とほぼ同じ T_2 値 (35.3 (1.9) ms) に留まった。図4に典型的な運動前後の T_2 計算画像の変化を示し、図5に8例の T_2 値の中央値の変化を示す。運動直後に、短橈側手根伸筋、総指伸筋、小指伸筋に有意な T_2 値の延長を認めた ($P < 0.01$) (表1)。その後、緩やかに T_2 値は短縮したが、短橈側手根伸筋と総指伸筋では25分後まで、小指伸筋では15分後まで、 T_2 の延長を認めた。尺側手根伸筋、円回内筋は延長傾向を認めたが、有意ではなかった。深指屈筋、浅指屈筋、尺側手根屈筋、橈側手根屈筋、腕橈骨筋は運動前後で有意な T_2 値の変化を認めなかった。また、骨

髄脂肪の T_2 値は運動前後で変化無く、 T_2 測定の再現性が良いことを示している。

考 察

徒手筋力検査法 (manual muscle test ; MMT)¹²⁾ によると、手関節の伸展運動に係わる主動筋は短橈側手根伸筋であり、協同筋は総指伸筋、小指伸筋、尺側手根伸筋、円回内筋とされている。また、拮抗筋である深指屈筋、浅指屈筋、尺側手根屈筋、橈側手根屈筋は非活動と推定されている。これら前腕筋の筋活動分析は、主に筋電図法で行われてきた¹²⁾。筋電図法は、可能な限り個別の筋機能を評価することができること、多数の筋活動を同時に測定できること、動きに伴い逐次筋活動を確認できること、量的因子だけでなく時間的因子も考慮して評価できること、周波数解析により筋疲労や筋線維タイプの変化・老化を評価できることなど様々な利点があ

表1 運動前後での T₂ 値の変化

筋名	安静時 T ₂ (ms)		運動直後 T ₂ (ms)		運動前後
	中央値	四分位偏差	中央値	四分位偏差	T 値
短橈側手根伸筋	31.9	1.5	47.1	2.6	0
総指伸筋	36.2	2.2	49.2	2.5	0
小指伸筋	38.9	2.3	50.7	2.9	0
円回内筋	33.4	2.0	35.9	3.6	7
尺側手根伸筋	38.0	2.1	44.8	5.0	3
深指屈筋	32.7	1.8	31.5	2.0	10
浅指屈筋	33.9	1.7	32.1	1.0	3
尺側手根屈筋	32.9	2.0	31.9	1.2	9
橈側手根屈筋	34.9	1.9	33.1	1.6	4
腕橈骨筋	31.8	1.9	35.2	1.8	3
骨髄脂肪	109.7	4.5	105.9	5.5	9

被験者数 8 名. 対応のある Wilcoxon の符号付順位検定¹¹⁾により, T=0 (危険率 1%) で有意差ありと判定した.

る. しかし, 欠点もあり, 筋の位置情報がわからないこと, 筋活動分析には筋電図と筋力の両方を測定しなければならないこと, 針筋電図では侵襲が大きいこと, 表面筋電図では対象とする筋以外の筋の電位が混入すること (クロストーク), 深層筋の測定が困難なこと, 小さな筋の測定が困難なことなどが挙げられる^{13~15)}. 本研究で測定した筋に関しては, 前腕の回内と回外を行う筋として円回内筋の筋電図法による筋活動分析が行なわれている^{16,17)}. さらに, 手指を屈曲および伸展させる筋として, 深指屈筋, 浅指屈筋, 総指伸筋の分析の報告もある⁸⁾. しかし, 涉猟し得た限りでは, 今回測定した 10 筋中これら 4 筋以外の 6 筋については, 筋電図法による報告は無く, 筋の骨への附着部から関節運動を推定し, MMT を決定している¹²⁾.

MRI 法においては, これら 10 本の骨格筋を同一の前腕断面で測定することができた. 短橈側手根伸筋は, 運動後 25 分後まで有意に T₂ 値が延長し, 筋活動をはっきりと捉えることができ, 主動筋であることを確認できた. 一方, 協同筋と考えられる 4 筋の中では, 総指伸筋と小指伸筋は運動後, 有意な T₂ 値の延長を認めたが, 円回内筋と尺側手根伸筋は, T₂ 値の延長傾向は認めたが有意差はなく, 協同筋の間で筋活動度に差があることが示唆された. さらに, 手関節屈筋群である尺側手根屈筋, 橈側手根屈筋, 深指屈筋, 浅指屈筋では, T₂ 値に変化を認めなかったため, これらの拮抗筋は手関節伸展運動には関与していないことが確認できた.

以上, T₂ 緩和時間を用いることにより, 従来直接的な証拠のなかった短橈側手根伸筋, 小指伸筋について手関節伸展運動への寄与を確認することができた. 筋電図法による直接的証拠データの無い筋は多く, 特に, 深部の筋や小さい筋は筋電図法での測定は困難である. 筋運動による T₂ 延長の機序としては, 筋組織水分量, 細胞内外の水交換速度, 筋血流量や筋温度の上昇が挙げられているが, 未解明の部分も残っている^{3,5)}. また, MRI 法では, 即時的な筋活動を観察できないこと, 測定時間が長いこと, 測定する場所が限られることなど欠点もあるが, X 線被曝が無く低侵襲であり, 深層筋の筋活動を観察できること, 筋の位置情報を把握できることなど, 筋電図法の欠点をカバーできる測定法となると考えている¹⁹⁾. 今後, MRI 法を用いる事により, 様々な関節運動に寄与する筋の検証を進めていく予定である. 理学療法士が理学療法評価やトレーニングを適切な運動方法で行うことは, 治療効果にも影響を及ぼすため重要と考える.

結 論

MRI 法により, 短橈側手根伸筋と小指伸筋について, 手関節伸展運動への寄与を確認することができた. MRI 法を用いる事により, 様々な関節運動に寄与する筋の検証が可能となり, 多くの理学療法士が理学療法評価やトレーニング方法として用いる運動方法の検討に有用である可能性が示された.

謝 辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(248533, 15K01430 秋山)と、関湊賞(平成17年度研究助成, 瀬尾)の補助を得て行われました。また、大塚博教授(人間総合科学大学)、拝師智之博士(MRTechnology)、早川美佳、大橋好偉 両技術員(獨協医科大学)の技術的サポートに感謝致します。

本論文内容に関する著者らの利益相反：なし

文 献

- 1) Clark KM, Holt LE and Sinyard J : Electromyographic comparison of the upper and lower rectus abdominis during abdominal exercises. *J Strength Cond Res* **17** : 475-483, 2003.
- 2) Critchley DJ and Coutts FJ : Abdominal muscle function in chronic low back pain patients : Measurement with real-time ultrasound scanning. *Physiotherapy* **88** : 322-332, 2002.
- 3) Segal RL : Use of imaging to assess normal and adaptive muscle function. *Phys Ther* **87** : 704-718, 2007.
- 4) Ellis H, Logan BM and Dixon AK : Human sectional anatomy. 2nd ed. CRC Press, London, 256p, 2001.
- 5) Fleckenstein JL, Canby RC, Parkey RW, et al : Acute effects of exercise on MR imaging of skeletal muscle in normal volunteers. *Am J Roentgenol* **151** : 231-237, 1988.
- 6) Weidman ER, Chales HC, Negro-Vilar R, et al : Muscle activity localization with ^{31}P spectroscopy and calculated T_2 -weighted ^1H images. *Invest Radiol* **26** : 309-316, 1991.
- 7) Adams GR, Duvoisin MR and Dudley GA : Magnetic resonance imaging and electromyography as indexes of muscle function. *J Appl Physiol* **73** : 1578-1583, 1992.
- 8) Fisher MJ, Meyer RA, Adams GR, et al : Direct relationship between proton T_2 and exercise intensity in skeletal muscle MR images. *Invest Radiol* **25** : 480-485, 1990.
- 9) 柳沢修 : T_2 強調像がもたらす情報—機能評価を中心に *Innervation* **27** : 11-14, 2012.
- 10) Takamori M, Akiyama S, Yoshida K, et al : Changes to muscle T_2 after single-finger exercise measured with 0.2T MR imaging. *Magn Reson Med Sci* **14** : 359-366, 2015.
- 11) 岡本晃典, 岡本美代, 尾崎美重, 他 : 実験生物学用統計解析プログラム, 大阪大学微生物研究所附属遺伝情報実験センター, 2002, <http://www.gen-info.osaka-u.ac.jp/testdocs/tomocom/> (Accessed Nov. 16, 2016)
- 12) Hislop HJ, Avers D and Brown M : Daniels and Worthingham's muscle testing : Techniques of manual examination and performance testing. 9th ed. Saunders, St. Louis, p528, 2013.
- 13) Basmajian JV and DeLuca CJ : Muscles alive : Their functions revealed by electromyography. 5th ed. Lippincott, Baltimore, p561, 1985.
- 14) Merletti R : Standards for reporting EMG data. International Society of Electrophysiology and Kinesiology, 1999, <http://www.isek.org/wp-content/uploads/2015/05/Standards-for-Reporting-EMG-Data.pdf> (Accessed Oct. 9, 2016)
- 15) 木塚朝博, 木竜徹 : 表面筋電図. 東京電機大学出版局, 東京, p167, 2006.
- 16) Matsuoka J, Berger RA, Berglund LJ, et al : An analysis of symmetry of torque strength of the forearm under resisted forearm rotation in normal subjects. *J Hand Surg Am* **31** : 801-805, 2006.
- 17) Basmajian JV and Travill A : Electromyography of the pronator muscles in the forearm. *Anat Rec* **139** : 45-49, 1961.
- 18) Long C : Intrinsic-extrinsic muscle control of the fingers. Electromyographic studies. *J Bone Joint Surg Am* **50** : 973-984, 1968.
- 19) 秋山純和, 富田浩, 吉田一也 : 運動時の筋活動分析—表面筋電図法とMRI法による分析. 人間総合科学大学紀要 **14** : 83-88, 2014.

Changes in T₂ Relaxation Time of Forearm Muscles by Wrist Extension of 15% Maximum Voluntary Isometric Contraction

Kazuya Yoshida^{1,2}, Masayoshi Takamori^{1,3}, Sumikazu Akiyama^{1,2}, Yoshiteru Seo¹

¹Department of Regulatory Physiology, Dokkyo Medical University School of Medicine

²Department of Rehabilitation, Faculty of Health Sciences, University of Human Arts and Sciences

³Department of Physical Therapy, Aoi Medical Academy

Electromyography (EMG) and ultrasound scanning have been used for the detection of muscle contraction. Recently, magnetic resonance imaging (MRI) has been used to monitor muscle activities by using relaxation time (T₁, T₂). In order to detect muscle activity with wrist extension, T₂-weighted magnetic resonance (T_{2w}-MR) images and T₂ relaxation time were detected by a 0.2 T compact MRI system. The subjects were 8 healthy adult volunteers. After T₂ values of the resting condition were measured, the exercise of wrist extension with 15% of maximum voluntary isometric contraction (15% Max) was repeated until the subject was unable to continue the exercise. After the exercise, T₂ values of the extensor carpi radialis brevis muscle, the extensor digitorum muscle and the extensor digiti minimi muscle increased significantly ($P < 0.01$). While, T₂ values of the extensor carpi ulnaris muscle and the pronator teres muscle tended to increase but not

significantly. T₂ values of the flexor muscles (the flexor carpi ulnaris muscle, the flexor carpi radialis muscle, the flexor digitorum profundus muscle and the flexor digitorum superficialis muscle and the brachioradialis muscle) did not change at all. This is the direct evidence of contribution of the extensor carpi radialis brevis muscle and the extensor digiti minimi muscle to the wrist extension. From these results, T₂ value is useful for detecting muscle activity that could not be detected by the EMG. Therefore, MRI must be useful to analyze muscle activities in the forearm, and also to increase the reliability of the manual muscle testing method.

Key words : wrist extension, wrist flexion, maximum voluntary isometric contraction, T₂ relaxation time, MRI