膝関節術後早期の筋力回復に伴う運動単位の活動様式の変化

Changes in Motor Unit Activity Associated with Early Recovery of Muscle Strength after Knee Arthroplasty

山田 英司¹⁾ 森田 伸¹⁾ 田仲 勝一¹⁾ 内田 茂博¹⁾
伊藤 康弘¹⁾ 藤岡 修司¹⁾ 板東 正記¹⁾ 田中 聡²⁾
真柴 賛³⁾ 千頭憲一郎³⁾ 有馬 信男³⁾ 山本 哲司³⁾

EIJI YAMADA¹⁾, SHIN MORITA¹⁾, SYOICHI TANAKA¹⁾, SHIGEHRO UCHIDA¹⁾,
YASUHIRO ITOH¹⁾, SYUJI FUJIOKA¹⁾, MASAKI BANDO¹⁾, SATOSHI TANAKA²⁾,
TASUKU MASHIBA³⁾, KENICHIROU CHIKAMI³⁾, NOBUO ARIMA³⁾, TETSUJI YAMAMOTO³⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation, Faculty of Medicine, Kagawa University Hospital: 1750-1 Ikenobe, Miki-cho, Kita-gun, Kagawa 761-0793, Japan. TEL +81 87-891-2306 FAX +81 87-891-2307 E-mail: yamada@kms.ac.jp

²⁾ Department of Physical Therapy, Prefectural University of Hiroshima, Faculty of Health and Welfare

³⁾ Department of Orthopedic Surgery, Faculty of Medicine, Kagawa University

Rigakuryoho Kagaku 25(3): 317-321, 2010. Submitted Sep. 17, 2009. Accepted Nov. 30, 2009.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to investigate changes in motor unit activity associated with early recovery of muscle strength after knee arthroplasty. [Subjects] The subjects were eleven patients who received unicompartmental knee arthroplasty. [Methods] The maximum strength of isometric knee extension and surface electromyographic activity of the right vastus lateralis were measured before and after the operation and until discharge. Average integrated electromyographic activity at maximum isometric knee extension and mean power frequency calculated by fast Fourier transform were normalized by the values at five days after the operation. [Results] The strength of maximum isometric knee extension decreased immediately after the operation and then gradually recovered. Mean power frequency decreased significantly after the operation. [Conclusion] The results suggest that synchronization is an important factor for recovery of the strength of isometric knee extension in the early postoperative period.

Key words: unicompartmental knee arthroplasty, neural factor, surface electromyography

要旨:〔目的〕膝関節術後早期の膝伸展筋力の回復と神経因子との関係について明らかにする。〔対象〕当院にて人工膝関節単顆置換術が施行された11名とした。〔方法〕術前と術後5日目より休祭日と特別な場合を除いて退院時まで毎日、最大等尺性膝伸展筋力と外側広筋の表面筋電図を測定した。最大筋力発揮時の平均積分値と高速フーリエ変換による中間周波数を算出し、術後5日目の値を100%として正規化し、比較した。〔結果〕最大等尺性膝伸展筋力は術直後、最も低下し、13日目以降の値は術前値と有意差を認めなかった。平均積分値も術直後に最も低下し、その後増加した。しかし、中間周波数は術後から有意に低下した。〔結語〕発揮する筋力を増強させ、かつ、積分値の増加と周波数の低下をもたらす因子は同期化のみである。これらのことから、術後早期の筋力回復に運動単位の同期化が関与している可能性が示唆された。

キーワード: 人工膝関節単顆置換術, 神経因子, 表面筋電図

¹⁾ 香川大学 医学部附属病院リハビリテーション部: 香川県木田郡三木町大字池戸1750-1 (〒761-0793)
TEL 087-891-2306 FAX 087-891-2307

²⁾ 県立広島大学 保健福祉学部理学療法学科 ³⁾ 香川大学 医学部整形外科

受付日 2009年9月17日 受理日 2009年11月30日

I. はじめに

筋力トレーニングによる筋力の増加には筋収縮組織の形態学的な変化と運動単位の活動様式などの神経因子の変化が関与していると考えられている¹⁻³⁾。その中でも短期的な筋力トレーニング後の筋力増加と、筋あるいは筋線維の横断面積の変化との間にはわずかな相関関係しか認められないことから^{4,5)}、形態学的な変化よりも筋の活動水準を決定する神経因子の変化の影響が大きいと考えられている。Moritaniら²⁾は大学生と高齢者を対象として同一条件下で筋力トレーニングを行わせ、表面筋電図の筋積分値を用いて筋力増加の生理学的機序の違いを明らかにした。彼らはトレーニング初期（開始後4週）では両群とも神経因子の変化によって筋出力は増加し、トレーニング後期（開始後8週）では大学生では筋肥大による筋力増加が主となるが、高齢者では筋肥大の傾向は示すものの、大部分の筋力増加は神経因子の改善によって起こると報告している。

短期間の筋力トレーニングによる筋力の増加は筋の活動水準を決定する神経因子の変化に起因することが報告されてきた。その生理学的機序として主動筋における活動に参加する運動単位の数の増加や発火頻度の上昇および同期化などの脳の興奮水準の増加^{1,6-8)}、拮抗筋の活動の低下⁹⁾、共同筋との協調性の改善⁹⁻¹¹⁾、運動学習効果¹²⁾などが考えられている。

膝関節術後における理学療法において筋力は歩行に影響を及ぼす重要な因子であり、積極的な筋力トレーニングが行われている。術後早期の筋力の回復も神経因子の影響が大きいと考えられるが、その生理学的機序については明らかにされておらず、未だ筋肥大を目的として確立された理論に基づいた筋力トレーニングが実施されているのが現状である。そこで今回我々は脳の興奮水準の変化による主動筋の運動単位の活動様式に着目した。本研究の目的は膝関節術後早期の膝伸展筋力の回復に神経因子の改善が関わっているかどうかを明らかにすることであり、等尺性膝伸展筋力と神経因子である運動単位の活動様式の術後の変化を分析した。

II. 対象および方法

対象は変形性膝関節症による人工膝関節単顆置換術を施行し、さらに本研究の主旨を理解し同意を得た11名（男性4名、女性7名）とした。平均年齢は 73.8 ± 5.4 歳、平均身長は 155.3 ± 5.8 cm、平均体重は 60.3 ± 9.5 kg

であった。手術側は右側7名、左側4名であった。全例において、手術に先立ち関節鏡が施行され、前十字靱帯および外側関節面が保たれていることが確認された。また全例において、侵入法は小皮切の最小侵入法であった。術後の理学療法は臨床パスに従い統一されたプログラムを施行した。そのプログラムは手術翌日よりベッドサイドにて開始した。術後5日目より訓練室で痛みに応じた荷重歩行を開始した。基本的なプログラムは関節可動域練習、筋力トレーニング、歩行練習、アイシングからなり、退院時の歩行様式はT字杖歩行あるいは独歩とした。

方法は術前と術後5日目より休祝日と特別な場合を除いて退院時まで毎日、膝伸展筋力のインデックスとして最大等尺性膝伸展筋力と神経因子のインデックスとして外側広筋の表面筋電図を同時に測定した。なお、実際の術後測定日数は14日が2名、15日が6名、16日が3名であった。等尺性膝伸展筋力には等尺性筋力測定装置（アニマ社製 μ Tas F-1）を用いた。端座位にて体幹を垂直位に保つように指示し、センサーパッドを被験者の下腿遠位部前面に設置し、膝関節屈曲角度が70度となるようにベルトの長さを調節して、後方の検査台支柱にベルトを締結した。測定中は、センサーパッドのずれを防止するために検者が前方で軽く支持した。約5秒間の最大努力による等尺性膝伸展運動を被験者毎に各3回実施し、それぞれの最大値を採用した。

表面筋電図の測定にはMyosystem1200s（NORAXON社製）を使用した。電極部位は大腿外側で膝蓋骨上縁より10 cm近位の筋腹部とし、電極間距離3 cmで十分な皮膚処理後に外側広筋の筋線維と平行に電極を貼付した。サンプリング周波数は1 kHzとし、MyoResearch98（NORAXON社製）を用いてA/D変換を行った。そして、最大筋力発揮時の安定した2秒間の波形の平均積分値と高速フーリエ変換による中間周波数を算出した。表面筋電図の測定において、電極の貼り替えによる微細な測定部位の違いが測定値に影響を及ぼすことが報告されている^{13,14)}。そこで貼り替えによる電極位置のずれを最小限にするためにマジックにてマーキングを行った。また、測定値は細胞外液の量や浸透圧、皮下脂肪、皮膚温の影響を受ける^{13,14)}。そこで、測定時間を理学療法施行前のほぼ同一時刻に統一した。術前後の測定部位の状態は腫脹や皮膚温の変化などにより大きく異なるため、これらの影響を最小限にするために全ての項目において術後5日目の値を100%として正規化し百分率で比較した。また等尺性伸展運動中の疼痛の程度をVisual Analog Scale（以下VAS）を用いて評価した。

表1 術前後における最大等尺性膝伸展筋力, 平均積分値, 中間周波数, Visual Analog Scaleの変化

術後日数	等尺性膝伸展筋力(%)	平均積分値(%)	中間周波数(%)	Visual Analog Scale(cm)
術前	235.2 ± 96.4	319.3 ± 176.7	103.4 ± 29.7	1.7 ± 2.6
5	100*	100*	100*	6.0 ± 2.2*
6	130.2 ± 21.9*	165.9 ± 37.8*	92.5 ± 12.2	4.5 ± 2.0*
7	151.8 ± 74.6*	189.5 ± 80.9*	84.3 ± 23.7*	4.0 ± 2.4*
8	152.1 ± 74.1*	189.2 ± 72.1*	83.0 ± 19.6*	4.0 ± 2.3*
9	164.3 ± 71.1*	192.6 ± 47.1*	85.4 ± 13.0*	3.5 ± 2.7
12	142.7 ± 66.0*	210.2 ± 129.3*	82.5 ± 15.3*	3.5 ± 2.8
13	173.1 ± 75.3*	194.0 ± 83.7*	88.2 ± 14.0	2.9 ± 2.2
14	186.0 ± 62.2	199.4 ± 49.9*	86.9 ± 9.9*	2.3 ± 2.0
15	196.4 ± 69.1	195.2 ± 74.7	82.5 ± 14.4*	1.7 ± 1.7
16	234.0 ± 116.4	230.4 ± 77.5	69.0 ± 18.2*	2.3 ± 0.6

平均値±標準偏差, *: 術前値との比較 $p < 0.05$.

最大等尺性膝伸展筋力, 平均積分値, 中間周波数は術後5日目の値を100%として正規化し百分率で表した.

統計学的検定には測定項目毎に一元配置分散分析を用いた。また, 多重比較にはFisherのPLSDを用い, 術前値との比較を行った。なお, 有意水準は5%とした。

測定の前に電極の貼り替えによる測定値の再現性を検討した。6肢を対象とした日を変えた3回の測定の結果, 最大等尺性筋力, 平均積分値, 中間周波数の級内相関係数はそれぞれ0.93, 0.86, 0.85であった。級内相関係数の評価基準として, 0.9以上は優秀, 0.8異常は良好とされており¹⁵⁾, 今回の研究における再現性は問題ないと判断した。

III. 結 果

最大等尺性膝伸展筋力は術後5日目に最も低下し, その後徐々に増加した。14日目以降の値は術前値との間に有意差は認められなかった。平均積分値も術後5日目に最も低下し, 15日目までは有意に低い値を示した。16日目の値は術前値との間に有意差は認められなかった。しかし, 中間周波数は術後5日目から徐々に低下し, 術前値と比較すると7日目より有意な低下を示した。VASは術後5日目が最も高く, 8日目まで術前値より有意に高い値を示したが, その後徐々に減少した。

IV. 考 察

術直後に有意に低下した最大等尺性膝伸展筋力は徐々に増加し, 14日目には術前の筋力まで回復した。筋力は筋の断面積に比例するといわれているが, 筋力

トレーニングによる筋肥大が起こるためにはトレーニング開始後ある程度の期間が必要であり, 高齢者においてはさらにその傾向が強いことが報告されている³⁾。Akimaら¹⁶⁾は2週間の短期間の筋力トレーニング前後において, MRIを用いて測定した大腿四頭筋の断面積は変化しなかったことを報告しており, 今回測定した術後の筋力回復にも筋の形態学的変化は伴っていないと考えられる。

表面筋電図により測定した筋電図積分値は活動している運動単位の量的指標であり, 積分値の増加は活動に参加した運動単位の数の増加や発火頻度の上昇を反映する^{17,18)}。これまでも多くの研究で神経因子の指標として用いられてきており, トレーニングによる筋力の増加に伴う積分値の増加が報告されている。Hakkinenら¹¹⁾は非鍛錬者を対象とした筋力トレーニングにおいて筋力の増加に伴い積分値が増加し, その理由として活動に参加した運動単位の数の増加および発火頻度の上昇を挙げている。また, 神経因子の中でも張力の調節に重要な役割を果たすと考えられている運動単位の同期化も積分値を増加させる¹⁹⁾。よって今回術直後に低下した筋力は徐々に増加したが, ほぼ同様に積分値も術直後に最も低下し, その後増加したことから外側広筋において活動に参加した運動単位の数や発火頻度の増加あるいは同期化が起こったことが影響を及ぼしている可能性がある。

筋電図周波数解析は筋の質的評価として用いられており, 周波数解析によって得られたパワースペクトルは活動に参加している運動単位の数や種類¹⁷⁾, 発火頻

度²⁰⁾、同期化²¹⁾および筋線維伝導速度²²⁾などの影響を受ける。パワースペクトルの代表値である中間周波数は術後5日目より徐々に低下し、術前値と比較すると7日目より有意に低下し、その後も徐々に低下した。中間周波数と運動単位の活動様式との関係は多くの研究で報告されており、活動に参加する運動単位の増加と発火頻度の上昇は共に中間周波数を高周波化することが報告されている^{17,18)}。よって、筋力と積分値が増加したにもかかわらず中間周波数が低下したことは、術後早期の回復過程では活動に参加した運動単位の増加と発射頻度の上昇の影響より筋力を増加させ且つ中間周波数を低下させる他の因子の影響の方が関与しているのではないかと考えられた。

運動単位の同期化は発揮張力を調節する活動様式の一つであり、過去の研究においても短期的な筋力トレーニングによる筋力増強の神経因子として着目されてきた²³⁾。生理学的な緩徐な随意筋力発揮では活動する運動単位相互が同期化して放電することはないが、急激に大きな筋力を発揮する場合²⁴⁾、筋疲労時²⁵⁾あるいは筋力トレーニング後²⁶⁾などの条件下では運動単位の同期化が認められている。発揮する張力を増加させる運動単位の活動様式の中で積分値を増加させ、かつ、中間周波数を低下させる因子は同期化のみである²¹⁾。これらのことから、術後早期の筋力回復には運動単位の同期化が影響を及ぼしているのではないかと考えられた。

膝関節術後は術前からの関節原性の筋の抑制や術創部の疼痛などにより高い筋力を発揮することは困難である。Jenniferら²⁷⁾は人工膝関節置換術を施行された患者を対象に術後の筋力低下に影響を及ぼす因子を検討している。それらの結果、術後の筋力低下はその半分以上が関節原性の筋の抑制の増加と疼痛によるものであると報告している。VASを用いて評価した膝伸展運動中の疼痛は術直後に上昇したが、その後徐々に低下していた。術後の筋力の回復に影響を及ぼす因子の一つは疼痛であることは疑う余地もなく、疼痛の改善が術後筋力の回復において最も重要であると考えられる。関節外科術後における筋力トレーニングは未だ筋肥大を目的として確立された理論に基づいた方法が実施されているのが現状である。今後は筋肥大という量的な視点からだけでなく、いかに疼痛を早期に改善させ、運動単位の動員様式を変化させるかという質的な視点から効率的な筋力トレーニング方法を再検討していく必要があると考えられた。

引用文献

- 1) Moritani T, deVries HA: Neural factor versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med*, 1979, **58**(3): 115-130.
- 2) Moritani T, deVries HA: Potential for gross muscle hypertrophy in older man. *J Gerontol*, 1980, **35**(5): 672-682.
- 3) Sale DG, McComas AJ, MacDougall JD, et al.: Neuromuscular adaptation in human thenar muscles following strength training and immobilization. *J Appl Physiol*, 1982, **53**(2): 419-424.
- 4) Ploutz LL, Tesch PA, Biro RL, et al.: Effect of resistance training on muscle use during exercise. *J Appl Physiol*, 1994, **76**(4): 1675-1681.
- 5) Staron RS, Karapondo DL, Kraemer WJ, et al.: Skeletal muscle adaptation during early phase of heavy-resistance training in man and woman. *J Appl Physiol*, 1994, **76**(3): 1247-1255.
- 6) Hakkinen K, Alén M, Komi PV: Changes in isometric force-and relaxation time, electromyographic and muscle fibre characteristics of human skeletal muscle during strength training and detraining. *Acta Physiol Scand*, 1985, **125**(4): 573-585.
- 7) Narici MV, Roi GS, Landoni L, et al.: Changes in force, cross-sectional area and neural adaptation during strength training and detraining of the human quadriceps. *Eur J Appl Physiol*, 1989, **59**(4): 310-319.
- 8) Yue G, Cole KJ: Strength increases from the motor program: Comparison of training with maximal voluntary and imagined contraction. *J Neurophysiol*, 1992, **67**(5): 1114-1123.
- 9) Carolan B, Cafarelli E: Adaptation in coactivation after isometric resistance training. *J Appl Physiol*, 1992, **73**(3): 911-917.
- 10) Hakkinen K, Kallinen M, Izquierdo M, et al.: Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol*, 1998, **84**(4): 1341-1349.
- 11) Hakkinen K, Alén M, Kallinen M, et al.: Neuromuscular adaptation during prolonged strength training, detraining and re-strength-training in middle aged and elderly people. *Eur J Appl Physiol*, 2000, **83**(1): 51-62.
- 12) Gabriel DA, Kamen G, Frost G: Neural adaptation to resistive exercise: Mechanism and recommendations for training practices. *Sport Med*, 2006, **36**(2): 133-149.
- 13) Griffin L, Cafarelli E: Resistance training: Cortical, spinal, and motor unit adaptation. *Can J Appl Physiol*, 2005, **30**(3): 328-340.
- 14) Kollmitzer J, Ebenbichler GR, Kopf A: Reliability of surface electromyographic measurements. *Clin Neurophysiol*, 1999, **110**(4): 725-734.
- 15) 桑原洋一, 斉藤俊弘, 稲垣義明: 検者内および検者間の Reliability (再現性, 信頼性) の検討, なぜ統計学的有意が得られないのか. 呼と循, 1993, **41**(1): 945-952.
- 16) Akima H, Takahashi H, Kuno SY, et al.: Early phase adaptation of muscle use and strength to isokinetic training. *Med Sci Sports Exerc*, 1999, **31**(4): 588-594.
- 17) Desmedt JE, et al.: Progress in clinical neurophysiology. Basel, Karger, New York, 1983, p5.

-
- 18) Frederiksen AF: The motor unit firing rate and power spectrum of EMG in humans. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 1988, **70**(1): 68-72.
 - 19) Semmler JG, Nordstrom MA: Motor unit discharge rate and force tremor in skill and strength training individuals. *Exp Brain Res*, 1998, **119**(1): 27-38.
 - 20) Moritani T, Muro M: Motor unit activity and surface electromyography power spectrum during increasing force of contraction. *Eur J Appl Physiol*, 1987, **56**(3): 260-265.
 - 21) Yao W, Fuglevand RJ, Enoka RM: Motor-unit synchronization increases EMG amplitude and decreases force steadiness of simulated contractions. *J Neurophysiol*, 2000, **83**(1): 441-452.
 - 22) Lindstrom L, Magnusson R, Petersén I: Muscular fatigue and action potential conduction velocity changes studied with frequency analysis of EMG signals. *Electromyography*, 1970, **10**(4): 341-356.
 - 23) Milner-Brown, Stein RB, Lee RG: Synchronization of human motor units: Possible role of exercise and supraspinal reflex. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 1975, **38**(3): 245-254.
 - 24) Hakansson CH: Conduction velocity and amplitude of action potential as related to circumference in the isolated fiber of frog muscle. *Acta Physiol Scand*, 1956, **37**(1): 14-34.
 - 25) Person RS, Kudina LP: Cross-correlation of electromyograms showing interference patterns. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1968, **25**(1): 58-68.
 - 26) Person RS, Mishin LN: Auto and cross correlation analysis of the electrical activity of muscle. *Med Electron Biol Engin*, 1964, **2**: 155-159.
 - 27) Jennifer ES, Ryan LM, Lynn SM: Quadriceps strength and volitional activation before and after total knee arthroplasty for osteoarthritis. *J Orthop Res*, 2003, **21**(5): 775-779.