

膝前十字靭帯損傷に対する 保存療法例における silent period を用いた 健側および患側の神経・筋協調性の比較

Comparing neuro-muscular coordination using the silent period
between affected and non-affected sides in patients with an anterior
cruciate ligament tear who were treated conservatively

伊藤（大西）咲子*^{1,2}, 舟崎裕記*¹, 川井謙太郎*^{1,3}

キー・ワード：Silent Period, Non-operated Patients, Anterior Cruciate Ligament Tear
筋放電休止期, 膝前十字靭帯損傷, 保存療法

〔要旨〕 膝前十字靭帯 (ACL) 断裂後の競技復帰の際には、神経・筋機能の改善は重要である。筋放電休止期 (silent period : SP) は、上位中枢での統合機能を反映し、フィードフォワード機能や神経・筋協調性の評価の指標とされている。本研究では、この SP を用いて ACL 損傷後に保存加療された症例の神経・筋協調性を健側と患側間で比較した。保存療法後にスポーツ復帰した 7 例を対象とし、受傷後平均 7 か月で、光刺激に反応するジャンプ動作を行わせ、その際の筋電図から大腿直筋と大腿二頭筋の SP および Pre-motion time (PMT) を測定し、健側と患側間で比較した。その結果、Pre-motion SP (PMSP) の平均値は、健側 73 ± 26 ms, 患側 90 ± 23 ms, また、Switching SP (SSP) の平均値はそれぞれ 33 ± 17 ms, 42 ± 15 ms であり、PMSP, SSP ともに平均値では患側が遅延していたが、有意差はなかった。また、PMT は、健側 260 ± 61 ms, 患側 265 ± 42 ms であり、有意差はなかった。今回の検討から、ACL 損傷後保存療法後 7 か月程度では、神経・筋協調性は患・健側間で差を認めない可能性があることが示唆された。

はじめに

膝前十字靭帯 (ACL) 再建術後の患側下肢では、健側に比べて神経・筋協調性が低下することが報告されている¹⁾。また、膝関節の動的な安定性は膝関節周囲筋の神経・筋協調性に依存するとされており²⁾、ACL 損傷後のスポーツ復帰において、神経・筋協調性は、パフォーマンスの向上や再損傷を予防するために重要な機能であると考えられて

いる。ACL 断裂時は、接地後 40ms で最大の負荷が加わり、ごく短時間で断裂する³⁾ため、その予防には、固有受容器からのフィードバックのみならず、予測的制御 (フィードフォワード) による神経・筋コントロールや筋の切り替えをスムーズに行うような神経・筋協調性機能が重要とされている。しかし、このフィードフォワード機能や神経・筋協調性の定量評価は未だ確立されていない。著者らは、筋放電休止期、すなわち silent period (以下 SP) を患者のフィードフォワードによる神経・筋機能の評価として用いてきた⁴⁻⁶⁾。SP には動作前 SP (以下 PMSP) と切り替え動作時 SP (以下 SSP) があり、PMSP は主動作筋の筋放電休止期で、目的動作に合わせて動的筋力や動作の速度を調整し、主動作筋の活動状態を前もって準備する

*1 東京慈恵会医科大学スポーツ・ウェルネスクリニック

*2 東京工科大学医療保健学部リハビリテーション学科理学療法専攻

*3 東京医療学院大学保健医療学部リハビリテーション学科理学療法専攻

Corresponding author : 伊藤咲子 (ohnishisk@stf.teu.ac.jp)

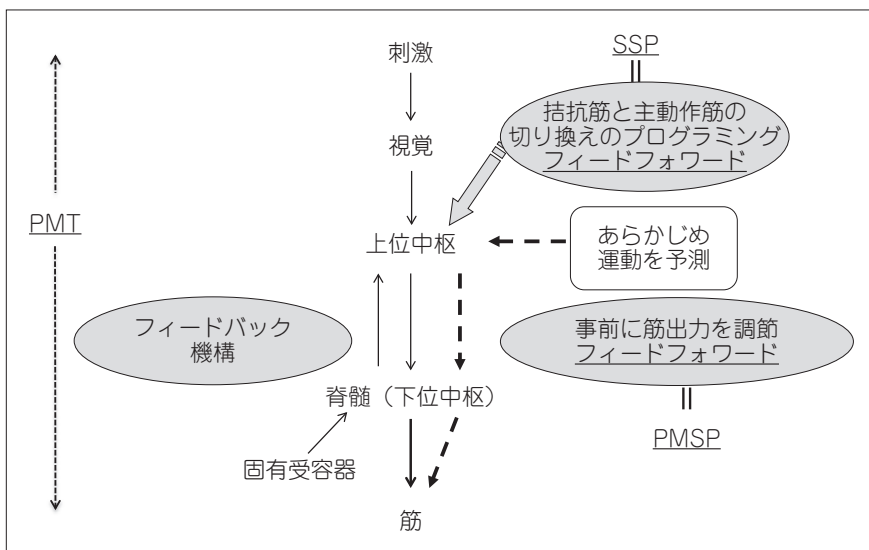


図 1 SSP・PMSP・PMT の模式図

予測性運動制御に関与していると報告されている⁷⁾(図 1)。また、佐々木らは、SSP は主動作筋と拮抗筋の切替の良さを反映し、神経・筋協調性の指標であるとした^{8,9)}。また、著者らは、ACL 再建術後、平均 11 か月において、患者に、光反応によるジャンプ動作を行わせ、健・術側における SP および Pre-motion time (以下 PMT) を比較した。その結果、PMT には有意差はなかったが、PMSP、SSP は術側で有意に延長していたことから、ACL 再建術後約 1 年の患肢では、フィードフォワード機能や神経・筋協調性機能は低下している可能性が示唆された⁴⁾。今回、本研究では、ACL 損傷後、保存療法を受けてスポーツ復帰した症例の神経—筋協調性機能を SP、PMT を用いて検討した。

対象および方法

対象は、ACL 損傷後に保存的に加療され、スポーツ復帰した男性 4 例、女性 3 例、計 7 例で、平均年齢は 30.1 ± 9.0 歳、平均身長 166.2 ± 7.8cm、平均体重 61.2 ± 7.7kg であった。全例、MRI で ACL の完全断裂が確認されたが、本人の強い希望で保存療法を選択した。KT-1000 では、3mm 以下 3 名、5mm 以上 4 名であった。スポーツレベルは、クラブまたは高校、大学においてスポーツ活動を行っている競技レベル(運動日数：週 5 日以上)の選手が 2 例、レクリエーションレベル(運動日数：週 0.5-1 日)が 5 例であった。スポーツ復帰に際しては、膝伸展筋力が健側比の 90% 以上、H/Q(ハ

ムストリングス/大腿四頭筋)比 60% 以上、4 種類のジャンプによるパフォーマンステスト患健側比 90% 以上を満たすことを条件としたが、全例とも受傷後平均 5 ヶ月でスポーツへ完全復帰した。本測定は、受傷後平均 7 ヶ月の時点で実施した。なお、本研究は、東京慈恵会医科大学の倫理委員会からの承認を受けて実施した〔受付番号：21-205 (6083)〕。

測定機器は、Noraxon 社製表面筋電図 TeleMyo DTS [EM-801](サンプリング周波数 1500 Hz)を用いて筋電図波形を導出した。電極は同社製アース一体型 EMG プロローブを使用し、電極パッドはブルーセンサー (M-00-S/50) を使用した。なお、電極貼付前に皮膚表面はアルコール消毒綿を用いて処理し、皮膚インピーダンスを 5KΩ 以下にした。筋電図の導出は双極誘導法で行い、電極間距離は 2cm とした。測定筋は、大腿直筋 (以下 RF) と大腿二頭筋長頭 (以下 BF) とし、筋電図の導出部位は、RF が上前腸骨棘と膝蓋骨上部を結ぶ線の中央、BF は膝関節後方と大転子を結ぶ線の遠位 2/3 周辺とし、いずれも筋腹に筋線維の走行に沿って電極を貼付した¹⁰⁾。課題は、被験者に光刺激に対して出来るだけ早く高くジャンプさせることとした。測定手順は、まず、基準値設定のため、安静背臥位での筋電図計測を 10 秒間、両膝 30° 屈曲立位で 3 秒間行い、その平均電位および最大電位を求めた。その後、片脚での膝屈曲 30° 立位となり、この肢位から光刺激に反応する課題を健・患側ともに 2 回ずつ実施し、その際得

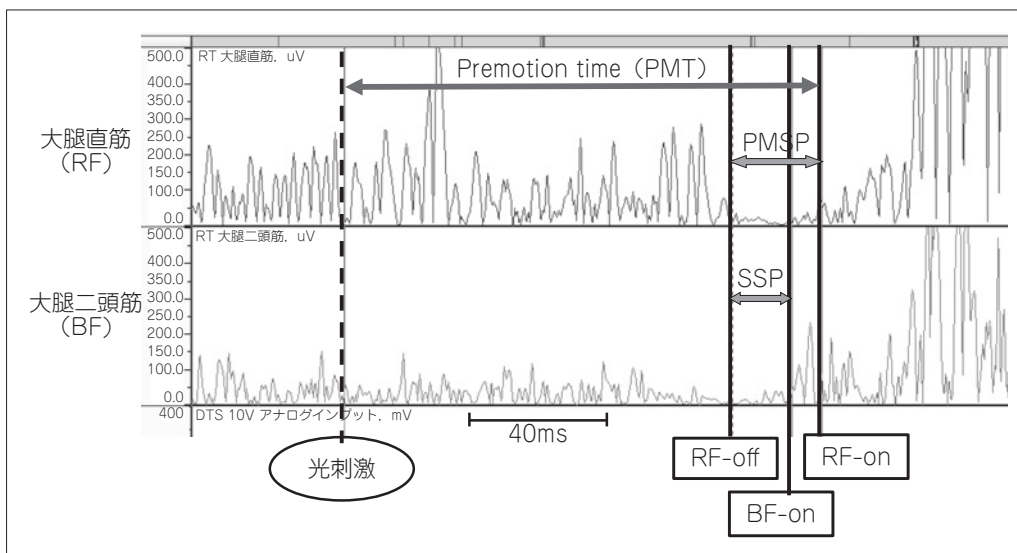


図2 表面筋電図上での SSP・PMSP・PMT の算出
PMT は光刺激から RF-on, PMSP は RF-off から RF-on, SSP は RF-off から BF-on までとした。

表1 健側・患側の SSP・PMSP・PMT の値とその出現率 (平均値±標準偏差)

	PMSP (ms)	SSP (ms)	PMT (ms)	PMSP 出現率 (%)	SSP 出現率 (%)
健側	73 ± 26	33 ± 17	260 ± 61	86	64
患側	90 ± 23	42 ± 15	265 ± 42	86	50
	n.s.	n.s.	n.s.		

られた筋電図から SP, PMT を算出した。健側・患側の課題実施については、ランダムに順番を決定した。課題中の筋電図波形で、RF 電位が臥位での同筋平均電位以下になった時点を RF-off, RF と BF の電位が両膝 30° 屈曲立位での同筋最大電位以上になった時点をそれぞれ RF-on, BF-on と定め、RF-off から RF-on を PMSP, RF-off から BF-on を SSP, 光刺激から RF-on を PMT とした^{8,9,11)}(図2)。なお、PMSP, SSP ならびに PMT の統計学的解析は Wilcoxon 符号順位和検定を用い、有意水準を $p < 0.05$ とした。また、G*power を用いて、事後の検定力分析 (post hoc power analysis) も行った。

結果

PMSP の出現率は 86%, 平均値は健側 73 ± 26 ms, 患側 90 ± 23 ms であった。SSP は、健側の出現率が 64%, 平均値が 33 ± 17 ms, 患側ではそれぞれ 50%, 42 ± 15 ms であった。また、PMT は平均値が健側 260 ± 61 ms, 患側 265 ± 42 ms であり、PMSP, SSP, PMT すべてにおいて両側間に有意

差を認めなかった(表1)。事後の検定力分析 (post hoc power analysis) における標本検定力は 0.31 であった。

考察

ACL 損傷後のリハビリテーションにおいて、神経・筋協調性機能の評価は重要であるが、その客観的評価法は未だ確立されていない。著者らは、過去に silent period を指標とした ACL 再建術後患者の神経・筋協調性機能の評価について検討してきた⁴⁾。ACL 再建術後の競技復帰後 1 か月(術後平均 11 か月程度)時点での SSP は、患側では健側より有意に延長しており、患側では、復帰後 1 か月時と術後 20 か月時を比較すると、健・患側間に有意差を認めなかったことを報告した⁵⁾。また、SSP は筋疲労や脳疲労により遅延することも報告した⁶⁾。本研究の結果、ACL 損傷後に保存的に加療された患者において、平均 7 ヶ月経過した後では、SSP, PMSP はともに健側に比べて患側の方が遅延していたが、有意差は認めなかった。受傷後、早期に本課題を実行することが困難であるため、

同時期の SP の測定はできないが、ACL 損傷後の保存療法後では、手術療法後に比べて早期に、健・患側間での神経・筋協調性の有意差がなくなる可能性があることが示唆された。その場合の要因としては、保存療法例では、再建術例よりも免荷期間が短く、早期に運動が開始できること、また、手術による侵襲がないため、機械受容器が温存されるためと推察した。ACL 再建術後例では、保存療法例よりも、より多くの安静期間が必要となり、運動感覚の入力が減少し、それが継続することにより、上位中枢での神経・筋コントロール機能も低下させている可能性があると考えた。また、Adachi ら、ACL 損傷後の固有受容機能と機能的安定性が、残存レムナントの機械受容器の数と密接に関連していると報告し¹²⁾、さらに、Nagai らは、膝の固有受容感覚の機能が低い者ほど運動中の最初の足底接地で、膝の屈曲角度をより適切に制御できるとした¹³⁾。SSP や PMSP は、より高次中枢での運動の統合の良さを反映しているとされており、直接、固有受容感覚を反映しているものではない。しかし、著者らは、健常者においてバランスマット上での訓練後に SSP が即時的に短縮し、フィードフォワードによる神経・筋協調性が改善したことを報告した¹⁴⁾ように、保存療法例の方が、より多くの機械受容器が温存されたことによって、中枢神経系の改善に貢献した可能性があるかと推察した。

本研究の限界として、まず、ACL 損傷後の保存的治療例は少なく、被験者数が少ないことが挙げられる。G*power による標本検定力の検定でも、0.31 であったことから、症例数が不足しており、今後、症例数を増やして検討する必要がある。また、症例数を増やして検討することで今回の結果が変化することも考えられるため、更なる検討が必要と考える。次に、指標となる健側筋力に関して、受傷前の筋力を測定できていないため、受傷後7か月時点での筋力を用いていることである。また、本研究では神経・筋協調性やフィードフォワード機能が、どのような機序で早期に回復または温存されているのかが明らかでないことが挙げられる。保存加療症例において、神経・筋機能を保持するために、どのような要素が貢献しているのかを検討する必要がある。これらを明らかにすることが、ACL 損傷後、神経・筋協調性機能やフィードフォワード機能改善のための効果的なりハビリ

テーションやトレーニングを検討する上で、重要であると考えられる。

結 語

ACL 損傷後保存療法を行った7例に対して、受傷後7か月時点で、神経・筋協調性の定量的評価として SSP, PMSP を測定した。その結果、SSP, PMSP ともに健・患側間で有意差はみられなかった。保存療法例は、先行研究による ACL 再建術後例よりも早期に健・患側間での神経・筋協調性の有意差がなくなる可能性が示唆された。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

著者貢献

全ての著者は、(1) 研究のコンセプトやデータ解析、解釈に大きく貢献した；(2) 原稿を起草し、または重要な知的内容について批判的に改訂し、(3) 掲載される原稿の最終版を承認し、(4) 研究のすべての側面について責任を負うことに同意した。

文 献

- 1) Griffin LY, Agel J, Albohm MJ, et al. Noncontact anterior cruciate ligament injuries: risk factors and prevention strategies. *J Am Acad Orthop surg.* 2000; 8: 141-150.
- 2) Kennedy JC, Alexander JL, Hayes KC. Nerve supply of the human knee and its functional importance. *Am J Sports Med.* 1982; 10: 329-335.
- 3) Koga H, Nakamae A, Shima Y, et al. Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *Am J Sports Med.* 2010; 38: 2218-2225.
- 4) 伊藤咲子, 舟崎裕記, 川井謙太郎, 他. 膝前十字靭帯再建術後における筋放電休止期の手術側と非手術側の比較. *JOSKAS.* 2014; 39: 821-825.
- 5) 相羽 宏, 舟崎裕記, 林 大輝, 他. 膝前十字靭帯再建術後のスポーツ復帰時における神経・筋協調性の評価,ならびに自覚症状との関連性: silent period を用いた検討. *臨床スポーツ医学会誌.* 2019; 27: 235-241.
- 6) Sakiko Ito-Oonishi, Takemura M, Miyakawa S, et al. Chronological changes in neuromuscular cooperativeness before and after muscle fatigue loading

- using the silent period of the quadriceps and hamstrings in young female athletes. *J Phy The Sci*. 2021; 233: 908-911.
- 7) Aoki H, Tsukahara R, Yabe K. Effects of pre-motion electromyographic silent period on dynamic force exertion during a rapid ballistic movement in man. *Eur J Appl Physiol*. 1989; 58: 426-432.
- 8) 佐々木久登, 荒井隆志, 金村尚彦, 他. 筋放電休止期と反応時間およびバランス能力との関係—切断者と健常者の比較—. *日本職業・災害医学会誌*. 2002; 50: 145-151.
- 9) 佐々木久登, 丸尾朝之, 松尾 篤. 反応時間の筋電図学的評価: 切り換え動作時 Silent period の臨床応用. *理学療法*. 2004; 21: 855-860.
- 10) 下野俊哉. 表面筋電図マニュアル基礎編 EM-TS1. 東京: 酒井医療株式会社; 111-114, 2004.
- 11) 平上二九三, 香月達也, 西林喜代美. 起立動作開始前にみられる Silent period の出現率とその持続時間について—健常人と片麻痺患者との比較—. *総合リハビリテーション*. 1985; 13: 35-41.
- 12) Adachi N, Ochi M, Uchio Y, et al. Mechanoreceptors in the anterior cruciate ligament contribute to the joint position sense. *Acta Orthop Scand*. 2002; 73: 330-334.
- 13) Nagai T, Sell TC, House AJ, et al. Knee proprioception and strength and landing kinematics during a single-leg stop-jump task. *J Athl Train*. 2013; 48: 31-38.
- 14) 伊藤咲子, 川井謙太郎, 中山恭秀, 他. バランスマット上での立位保持前後の Silent Period の変化. *体力科学*. 2012; 61: 415-419.

(受付: 2023年8月25日, 受理: 2023年12月1日)

Comparing neuro-muscular coordination using the silent period between affected and non-affected sides in patients with an anterior cruciate ligament tear who were treated conservatively

Ito Oonishi, S.^{*1,2}, Funasaki, H.^{*1}, Kawai, K.^{*1,3}

^{*1} Department of Sports and Wellness Clinic, The Jikei University School of Medicine

^{*2} Tokyo University of Technology, Division of Health Science, Department of Physical Therapy

^{*3} Division of Physical Therapy, Department of Rehabilitation, Faculty of Health Sciences, University of Tokyo Health Sciences

Key words: Silent Period, Non-operated Patients, Anterior Cruciate Ligament Tear

[Abstract] Neuromuscular function improvement is important after an anterior cruciate ligament (ACL) rupture. The silent period (SP), a pause in muscular electrical activity observed in sEMG, reflects neuromuscular coordination. In this study, we used the SP to compare neuromuscular coordination between the healthy and affected sides of patients who received conservative treatment after ACL injury. Seven patients who returned to sports after conservative treatment were asked to perform jumping movements in response to light stimulation approximately 7 months post-injury. The SP and pre-motion time (PMT) of the rectus femoris and biceps femoris muscles were measured via sEMG during these movements and the measurements were compared between the healthy and affected sides. The mean pre-motion SP (PMSP) was 73 ± 26 ms on the healthy side and 90 ± 23 ms on the affected side, and the mean switching SP (SSP) was 33 ± 17 ms and 42 ± 15 ms, respectively. The mean PMSP and SSP were both delayed on the affected side. These and the PMT were not significantly different from the healthy side. The present study suggests that there may be no difference in neuromuscular coordination between the affected and healthy side at about 7 months after conservative treatment after ACL injury.