

膝前十字靭帯再建術後の スポーツ復帰後における神経・筋協調性と 自覚的不安感の回復過程

Recovery process of neuromuscular coordination and subjective anxiety
after return to sports in patients who had undergone anterior
cruciate ligament reconstruction

相羽 宏*, 舟崎裕記*, 川井謙太郎*
林 大輝*, 村山雄輔*, 大西咲子*

キー・ワード：Neuromuscular coordination, Subjective anxiety, Recovery process
神経・筋協調性, 自覚的不安感, 回復過程

【要旨】 膝前十字靭帯 (ACL) 再建術後のスポーツ復帰後 1 か月時と術後 20 か月時の神経・筋協調性と膝の自覚的不安感を switching silent period (SSP) およびアンケート調査を用いて評価し, その回復過程について検討した. ACL 再建術後の 41 例を対象とし, 光反応による片脚ジャンプを行い, 大腿直筋と大腿二頭筋の SSP を表面筋電図にて測定した. 復帰後 1 か月時の SSP は, 患側が健側に比べて有意に長くなっており, SSP の患側比はスポーツレベル, 復帰期間と有意な相関を認めた. 術後 20 か月時にも SSP が測定可能であった 12 例においては, 患側の SSP が復帰後 1 か月時と比べ有意に短くなり, 健側, 患側間の比較においても有意差はなかった. 自覚的不安感は, 復帰後 1 か月時に比べて, 術後 20 か月時では有意に減少していた. ACL 再建術後のスポーツ復帰後 1 か月時においては神経・筋協調性の低下および自覚的不安感を認めたが, 術後 20 か月までには神経・筋協調性の回復が得られ自覚的不安感も減少していた.

緒 言

膝前十字靭帯 (以下 ACL) 再建術後, スポーツへの復帰基準として, 術後期間, 膝関節可動域, 安定性, 周囲筋の筋力, および, 動的アライメントなどを評価することが重要とされている¹⁻³⁾. さらに, 急な方向転換や切り返し, ジャンプなどのパフォーマンスも重要な因子であるが, これらの動作では, 膝の動的安定性を得るために, 拮抗筋と主動作筋が円滑に切り替わる神経・筋協調性が必要である⁴⁾. これが不十分であると, 他の復帰基準を満たしていても膝の不安感を抱えながら競技を行っている症例も少なくない⁵⁾.

そこで, 著者らは Silent period (以下 SP) という指標を用いて神経・筋協調性機能を検討した. SP とは, 表面筋電図において, あらかじめ主動作筋に軽度の収縮を入れた状態から, 光刺激に対して素早い反応動作を行う際, その動作に先行して見られる主動作筋の筋放電休止期であり, 上位中枢神経系のフィードフォワード機構を反映しているとされている⁶⁾. また, SP の中でも switching silent period (以下 SSP) は, 主動作筋から拮抗筋への筋収縮の切り替えの良さを反映し, その持続時間が短い程, 姿勢調節能力やバランス能力が高いとされ, 神経・筋協調性の指標とされている⁷⁻⁹⁾. 著者らは, SSP を用いて, ACL 再建術後のスポーツ復帰時における神経・筋協調性の評価を行った結果, 術後約 11 か月では手術側は非手術側

* 東京慈恵会医科大学スポーツ・ウェルネスクリニック

表 1 対象者の背景

	BTB 法	ST-G 法	P 値
症例数 (男性 : 女性)	22 (22 : 0)	19 (3 : 16)	<0.01
年齢, 歳	23.5±4.9	21.3±5.5	n.s.
身長, cm	172.9±5.6	162.2±7.4	<0.01
体重, kg	68.9±8.8	57.5±10.1	<0.01
スポーツレベル, 競技 : レク	17 : 5	12 : 7	n.s.
復帰期間, 月	9.9±2.6	9.9±2.2	n.s.

競技 = 競技レベル, レク = レクリエーションレベル

に比べて神経・筋協調性が低下していた¹⁰⁾ことや、スポーツ復帰後1か月時における神経・筋協調性の低下は膝の自覚的不安感と相関している⁵⁾ことを報告した。そこで、今回、著者らは、スポーツ復帰後1か月時におけるSSPと年齢、復帰期間、スポーツレベルとの関連性について検討した。さらに、術後20か月時にもSSPおよびアンケート調査を行った症例については、神経・筋協調性と自覚的不安感の回復過程を明らかにするために、スポーツ復帰後1か月時との比較を行った。

対象および方法

1. 対象

受傷から3か月以内に当院でACL再建術を施行後、同一のプロトコルに準じてリハビリテーション（以下リハビリ）を行い、当科におけるスポーツ復帰基準（膝関節可動域左右差なし、膝屈伸筋力患側側比90%以上、4種類のジャンプによるパフォーマンステスト患側側比90%以上⁵⁾を満たし、かつKS measureの値が3mm以下（平均 1.1 ± 0.8 mm）、pivot shift test陰性であった41例（男性25例、女性16例）を対象とした。スポーツ種目は、バスケットボール8例、サッカー5例、格闘技4例、バレーボール3例、スキー3例、バドミントン2例、ラグビー2例、陸上2例、その他12例であった。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27例、レクリエーションレベル（運動日数：週0.5-1日）が14例であった。手術から復帰までの期間は平均 9.9 ± 2 か月（7-13か月）であった。なお、手術法は、原則として男性にはBTB法、女性にはST-G法を選択したが、今回の対象では、男性の3例に対しては日常の活動様式（膝をつく動作）を考慮し、ST-G法を行った。両術式間では、年齢、

スポーツレベル、復帰期間における有意差はなかった（表1）。

2. 方法

2.1 測定機器

筋活動については、筋電図測定装置（Noraxon社製表面筋電図Tele-Myo DTS EM-801 サンプリング周波数1500Hz）を用いて計測し、電極は同社製アース一体型EMGプローブ、電極パッドはブルーセンサー（M-00-S/50）を使用した。測定筋は、左右の大腿直筋（以下Quad）および大腿二頭筋長頭（以下Ham）とし、電極の位置はQuadが上前腸骨棘と膝蓋骨上部を結ぶ線の中央、Ham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設置した¹¹⁾。

2.2 測定手順

測定は佐々木ら^{8,9)}や平上ら¹²⁾の方法に準じて以下のように施行した。

1) 安静臥位における平均電位の算出

振幅の安定した時点で筋電図波形を5秒間測定し、各筋の平均電位を算出した。なお、平均電位については、測定した5秒間のうち振幅の安定した3秒間のRoot mean square（RMS）とした。

2) 安静片脚立位における最大電位の算出

振幅の安定した時点で各筋の筋電図を5秒間測定し算出した。なお、最大電位は、測定した5秒間のうち振幅の安定した3秒間の最大電位の絶対値とした。

3) ジャンプ課題時の筋電図の計測

片脚立位膝屈曲30°から、光刺激に対し、できるだけ素早く高くジャンプすることを課題とした。光刺激にはランプを用い、被験者の前方1m、目線の高さに設置した。ジャンプ課題については学習効果の影響を除くため、あらかじめ練習を十分に行った後、両側3回ずつ実施した。その際の筋電図を計測し、それぞれ3回の平均値を採用した。

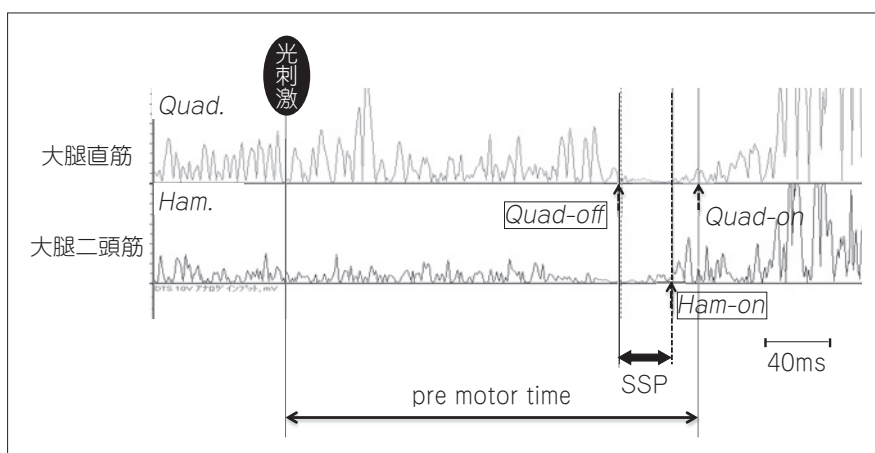


図1 表面筋電図上のSSPの算出
光刺激からQuadの放電が消失し(Quad off), Hamの放電が開始(Ham on)するまでをSSPとして算出した。

4) 筋電図のデジタル信号処理

表面筋電図 Tele-Myo DTS で計測したデータを Noraxon 社製 マイオリサーチ XP (EM-129M) に取り込み、波形を全波整流した後に解析を行った。

5) SSPの算出方法

ジャンプ課題時に得られた波形をもとに、Quadの安静臥位での平均電位以下(Quad off)となった時点からHamが片脚立位の最大電位以上(Ham-on)となるまでの時間とした(図1)。

2.3 自覚度アンケート

調査項目は、「スポーツを行っている時、膝の不安感をどれくらい感じますか」とし、これを visual analog scale (以下VAS) で表記した。なお、本調査におけるスポーツ完全復帰は、受傷前と同等の練習内容をすべて行うことが可能な状態と定義した。

2.4 測定時期と対象

測定時期は、当科のスポーツ復帰基準を満たした後に完全復帰した1か月時とした。なお、復帰直後は可動域や筋力が改善しているにもかかわらず、長期離脱から生じる心理的な不安感などの交絡因子が考えられるため、初回の測定時期は復帰後1か月に設定した。41例全例に対してSSP測定と自覚的アンケート調査を行った。また、先行研究^{13,14)}において、ACL再建術後の固有感覚や大腿部の神経筋機能の十分な回復には、術後18か月以上を要するとの報告があることから、術後平均 20 ± 1.4 か月(18-22か月)時に経過観察が可能であった41例中12例に対しても同様に、SSP測定

とアンケートを施行した。

2.5 統計学的解析

復帰後1か月時における健側と患側のSSPを paired t-test を用いて比較した。さらに、SSPの患健側比(患側/健側)と年齢、復帰期間(月)との相関を Pearson の積率相関係数を用い、SSPの患健側比とスポーツレベル(競技群・レクリエーション群)の相関については、相関比を用いて検討した。さらに、術式別にみた同様の検討も行った。次に、術後20か月時(復帰後平均9.9か月、7-12か月)にも測定可能であった12例においては、各時期におけるSSPの健側、患側間の比較、および、健側、患側それぞれのSSPの復帰後1か月時と術後20か月時との比較、さらに膝の自覚的不安感の復帰後1か月時と術後20か月時との比較を paired t-test を用いて行った。統計解析には SAS 9.4 for Windows を用い、有意水準はいずれも5%未満とした。

結果

1. 復帰後1か月時におけるSSPの健側・患側間比較

復帰後1か月時のSSPは健側が 32.5 ± 6.6 ms、患側が 37.2 ± 7.8 msであり、患側が健側に比べて有意に長かった($p < 0.05$) (表2)。なお、術式間における健側、ならびに患側のSSPの有意差はなかった(表3)。

2. 復帰後1か月時のSSPの患健側比と年齢、復帰期間、スポーツレベルとの相関

復帰後1か月時のSSPの患健側比とスポーツ

表2 復帰後1か月時のSSPの健側・患側間比較 (n=41)

	健側	患側
SSP (msec)	32.5 ± 6.6	37.2 ± 7.8

* : P<0.05

表3 術式別にみた復帰後1か月時のSSPの健側・患側間比較 (n=41)

	SSP (msec)	
	健側	患側
BTB 法	31.5 ± 5.3	36.7 ± 6.6
ST-G 法	33.5 ± 7.8	37.8 ± 7.4

* : P<0.05

表4 復帰後1か月時のSSPの患健側比と各項目との相関関係 (n=41)

	スポーツレベル	復帰期間	年齢
SSP 患健側比	0.60*	0.56*	0.19

* : P<0.05

レベルは $\eta^2=0.60$ ($p<0.05$), 復帰期間は $r=0.56$ ($p<0.05$) であり, いずれも中等度の正の相関を認めた. また, 年齢については $r=0.19$ であり, 相関を認めなかった (表4). なお, 術式別の検討においても同様の結果であった (表5).

3. 復帰後1か月時と術後20か月時のSSPの比較

復帰後1か月時におけるSSPは健側が 33.7 ± 6.9 ms, 患側が 38.7 ± 9.2 ms であり, 患側のSSPが有意に長かった ($p<0.05$). 一方, 術後20か月時のSSPは, 健側が 31.8 ± 6.5 ms, 患側が 30.2 ± 6.1 ms であり, 患側のSSPは術後1か月時と比べ有意に短くなり ($p<0.05$), 健側, 患側間でも有意差は認めなかった (表6).

4. 復帰後1か月時と術後20か月時における膝の自覚的不安感の比較

復帰後1か月時にみられた膝に対する自覚的不安感のVASは 25.7 ± 21.5 mm であったが, 術後20か月時では 4.8 ± 4.5 mm となり有意に減少してい

表5 術式別にみた復帰後1か月時のSSPの患健側比と各項目との相関関係 (n=41)

	スポーツレベル	復帰期間	年齢
SSP 患健側比	0.50*	0.49*	0.01
	0.66*	0.43*	0.14

* : P<0.05

表6 復帰後1か月時と術後20か月時におけるSSPの比較 (n=12)

	SSP (msec)	
	健側	患側
復帰後1か月時	33.7 ± 6.9	38.7 ± 9.2
術後20か月時	31.8 ± 6.5	30.2 ± 6.1

* : P<0.05

た ($p<0.01$) (表7).

考 察

ACL再建術後のスポーツへの復帰にあたり, 膝関節の神経・筋協調性の回復は一つの重要な因子であるが, その客観的評価が困難であるため, これに言及した報告は少ない. Griffinら⁴⁾は, 動作時の膝関節制御は周囲筋の神経・筋機能が大きく関与するとし, Barrettら¹⁵⁾は, ACL再建術後の固有感覚を測定し, 患側が健側に比べ有意に低下していたと報告した. また, Valerianiら¹⁶⁾は, ACL損傷後および再建術後では, 固有感覚の低下と同時に大脳皮質体性感覚誘発電位(SEP)の低下を認め, 中枢神経系の機能にも何らかの影響を及ぼす可能性を示唆した. このように, ACL再建術後の神経・筋協調性の回復過程に関して, 膝関節の機械受容器や固有感覚機能などに関する検討はされているが, SSPを用いた報告はない. 著者らは, 神経・筋協調性の指標としてSSPが有用であり, また, ACL再建術後約11か月では手術側は非手術側に比べて神経・筋協調性が低下していた¹⁰⁾ことや, スポーツ復帰後1か月時における神経・筋協調性の低下は, 膝の自覚的不安感と相関している⁵⁾ことを報告した. 今回の研究では, まず, 復帰後1か月時のSSPの健側, 患側間の比較を検証し, さらに患健側比と年齢, 復帰期間, スポーツレベルとの相関を検討した. その結果, 以前と同様に, 復帰後1か月時のSSPは, 患側が健側に比

表7 復帰後1か月時と術後20か月時における膝の自覚的不安感 (VAS) の比較 (n=12)

	復帰後1か月時	術後20か月時
膝の自覚的不安感 VAS (mm)	25.7 ± 21.5	4.8 ± 4.5

* : P<0.01

べて有意に延長していた。また、SSPの患側比は年齢との関連性は低かったが、スポーツレベル、復帰期間と有意な相関を認めた。すなわち、SSPの患側比は、スポーツレベルが低い方が、また、復帰期間が長い方が大きかった。これは、術前のスポーツ活動頻度が低い症例では、復帰に期間を要し、術後のリハビリテーションにおいて筋力の回復のみならず、4~5か月以降の加速期に必要なアジリティートレーニングなどが遅延したため、復帰後1か月時では神経・筋協調性の回復も得られにくいためと推測した。また今回、術式別の検討も行ったが、健側、患側間の比較や患側比と年齢、復帰期間、スポーツレベルとの相関において同様の結果となり、本研究においては、術式の影響は少ないと考えた。

術後における神経筋機能の回復経過について、Wojtysら¹³⁾は、ACL再建術後、男女25名を対象に、ハムストリングの筋反応時間を術前、術後6、12、18か月時に測定し、経時的な回復過程を観察したところ、患側値が健側値と同等に回復するまでに12~18か月を要したと報告した。Iwasaら¹⁴⁾は、ACL再建術後の固有感覚を測定した結果、術後9か月より改善し、十分な回復には18か月以上を要したとしている。SSPを用いた本研究の結果、20か月時では、患側のSSPは有意に改善し、健側、患側間の有意差もなくなっていたことから、先行研究とほぼ同様に、遅くとも術後20か月までには神経・筋協調性の回復が得られる可能性が示唆された。なお、術式の違いによる復帰後の回復過程についても本研究においては影響が少ないと考えられた。

神経・筋協調性の主観的な指標として、著者ら⁵⁾は、SSPが膝の自覚的不安感と相関していることを報告したが、本研究においても、復帰後1か月時にみられた急な方向転換や繰り返し動作時の不安感は術後20か月時には有意に減少しており、SSPとともに膝の自覚的不安感も回復したと考

えた。

本研究の限界として、スポーツ復帰後のSSPの経過であるため、術前、さらに術後から復帰までの経時変化については不明である。また、神経・筋協調性のトレーニング介入によってSSPおよび自覚的不安感の回復を早められるかについても今後、検討していく必要がある。

結 語

ACL再建術後、スポーツ復帰後1か月時の神経・筋協調性の指標であるSSPは、患側が健側に比べて有意に長く、自覚的不安感を認めたが、術後20か月時では、健側、患側間に有意差はなくなり、自覚的不安感も有意に減少した。また、スポーツ復帰後1か月時のSSPの患側比はスポーツレベルおよび復帰期間と相関していた。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

文 献

- 1) Smith FW, Rosenlund EA, Aune AK, et al. Subjective functional assessments and the return to competitive sport after anterior cruciate ligament reconstruction. Br J Sports Med. 2004; 38(3): 279-284.
- 2) Majima T, Yasuda K, Tago H, et al. Rehabilitation after hamstring anterior cruciate ligament reconstruction. Clin Orthop Relat Res. 2002; 397: 370-380.
- 3) Murakami Y, Sumen Y, Ochi M, et al. MR Evaluation of Human Anterior Cruciate Ligament Autograft on Oblique Axial Imaging. J Comput Assist Tomogr. 1998; 178(2): 553-556.
- 4) 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.
- 5) 相羽 宏, 舟崎裕記, 川井謙太郎, 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—. 日本臨床スポーツ医学会誌. 2019; 27(2): 235-241.
- 6) 猪飼道夫. 動作に先行する抑制機構. 日本生理誌. 1955; 17: 292-298.
- 7) 小宮山伴与志, 笠井達哉. 足関節底屈・背屈切り換え動作時の筋放電休止期—予備筋緊張量の違いと筋出力量の違いによる影響. JJSports Sci. 1988; 7: 263-268.
- 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ス能力との関係—切断者と健常者の比較—. 日職災医誌. 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(6): 855-860.
- 10) 伊藤咲子, 舟崎裕記, 林 大輝, 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.
- 11) 下野俊哉. 表面筋電図マニュアル基礎編 EM-TS 1. 東京: 酒井医療株式会社; 111-114, 2004.
- 12) 平上二九三, 香月達也, 西林喜代美, 他. 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(1): 35-41.
- 13) Wojtys EM, Huston LJ. Longitudinal effects of anterior cruciate ligament injury and patellar tendon autograft reconstruction on neuromuscular performance. Am J Sports Med. 2000; 28: 336-344.
- 14) Iwasa J, Ochi M, Adachi N, et al. Proprioceptive improvement in knees with anterior cruciate ligament reconstruction. Clin Orthop. 2000; 381: 168-176.
- 15) Barrett DS. Proprioception and function after anterior cruciate reconstruction. J. Bone Joint Surg. 1991; 73(5): 833-837.
- 16) Valeriani M, Restuccia D, Di Lazzaro V, et al. Clinical and neurophysiological abnormalities before and after reconstruction of the anterior cruciate ligament of the knee. Acta Neurol Scand. 1999; 99: 303-307.

(受付: 2020年3月10日, 受理: 2020年12月18日)

Recovery process of neuromuscular coordination and subjective anxiety after return to sports in patients who had undergone anterior cruciate ligament reconstruction

Aiba, H. *, Funasaki, H. *, Kawai, K. *
Hayashi, H. *, Murayama, Y. *, Ohnishi, S. *

* Department of Sports and Wellness Clinic, The Jikei University School of Medicine

Key words: Neuromuscular coordination, Subjective anxiety, Recovery process

[Abstract] This study examined the recovery process of neuromuscular coordination and subjective anxiety concerning the knee at 1 month after return to sports and 20 months after anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction surgery in 41 patients. The switching silent period (SSP) of the rectus femoris and biceps femoris muscles was measured using surface electromyography in response to a single-leg jump. At 1 month after return to sports, the ratio of SSP to the healthy side of the affected side was significantly correlated with the sports level and return to sports period and SSP was significantly longer on the affected than the healthy side. In 12 patients whose SSP was still measurable at 20 months postoperatively, the SSP on the affected side was significantly shorter than at 1 month after return to sports, and there was not a significant difference between the two sides. Subjective anxiety was also measured using a questionnaire and was significantly lower at 20 months postoperatively than at 1 month after return to sports after ACL reconstruction surgery. Neuromuscular coordination on the operated side was decreased at 1 month after returning to sports following ACL reconstruction and was reflected by subjective anxiety; however, there was significant recovery at 20 months postoperatively.