

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—

Evaluation of neuromuscular coordination at the time of returning to sports activity after reconstructive surgery of the anterior cruciate ligament and its correlation with subjective symptoms
—Examination using the silent period—

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

キー・ワード：silent period, neuromuscular coordination, awareness
サイレントピリオド, 神経・筋協調性, 自覚症状

〔要旨〕 膝前十字靭帯 (ACL) 再建術後のスポーツ復帰時では、動作時の自覚的不安感や自覚的パフォーマンスレベルの低下を訴えるものがあり、これらは、神経・筋協調性の低下に起因するとの仮説を立て、ACL 再建術後、スポーツ復帰 1 か月時における神経・筋協調性を silent period (SP) を用いて評価し、この SP と膝に対する自覚症状との関連性について検討した。方法は、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 pre-motor time (PMT) と switching silent period (SSP) を表面筋電図にて測定し、患、健側間の比較を行った。また、アンケートで、スポーツ時の自覚的不安感、さらに、受傷前との自覚的パフォーマンスレベルとの比較をし、患健側比との相関を検討した。その結果、PMT は患、健側間で有意差はなかった。一方、SSP は、患側が健側に比べて有意に延長していた。SSP の患健側比と自覚的不安感との間には強い相関を認めた。しかし、SSP の患健側比とパフォーマンスレベルとの間、また、自覚的不安感と自覚的パフォーマンスレベル間での相関は弱かった。以上のことから、ACL 再建術後のスポーツ復帰 1 か月時においても神経・筋協調性は低下しており、自覚症状としてカッティングやターンなどの動作時不安感がそれを最も強く反映していると考えた。

緒 言

膝前十字靭帯 (以下 ACL) 再建術後のスポーツ復帰時においては、筋力や可動域などの機能は改善しているにもかかわらず、動作時の膝への不安感やパフォーマンスレベルの低下を訴える症例も少なくない。ACL 再建術後のスポーツ復帰の指標

として主に、術後期間、Magnetic resonance imaging (MRI) 所見、膝関節の安定性、筋力、可動域、反応性、静的・動的なアライメント、能動的な片脚ジャンプテストなど¹⁻³⁾ が用いられている。一方、膝関節の動的安定性は膝周囲筋の神経・筋協調性によって得られるとされていることから^{4,5)}、復帰指標として、神経・筋協調性の客観的評価を行うことも重要である。しかし、その手法は未だ確立されておらず、さらに、この神経・筋協調性

* 東京慈恵会医科大学スポーツ・ウェルネスクリニック

が実際のプレー中のいかなる自覚症状に関連しているかは不明である。

著者らは、ACL 再建術後約 11 か月の患者において、手術側は非手術側に比べて神経・筋協調性が低下していることを silent period (以下、SP) を用いて報告した⁶⁾。この SP は表面筋電図を用いて、あらかじめ主動筋に軽い収縮を与えた状態から、急激に随意的な反応動作を起こした時に、その動作に先行して見られる主動筋の筋放電休止期であり⁷⁾、主動筋から拮抗筋への筋収縮の切り替え時に伴って出現する switching silent period (以下 SSP) は上位中枢神経系のフィードフォワード機構を反映し、運動の協調性やバランス能力に関与するとされている⁸⁾。本研究では、ACL 再建術後、可動域、筋力、膝関節の安定性 (KT-1000)、MRI 所見、ステップ動作、ジャンプ動作などの当科における復帰基準を満たしたうえでスポーツ復帰した症例に対して、神経・筋協調性の評価を行うために SSP を測定し、健患側間で比較した。さらに、この神経・筋協調性を反映する簡便な主観的指標を検索するため、SSP と自覚的不安感および自覚的パフォーマンスレベルとの関連性を明らかにすることを目的とした。本研究の仮説は、術後スポーツ復帰 1 か月時では患側の SSP の延長を認め、さらに SSP と動作時の自覚的不安感が関連していることとした。

対象および方法

1. 対象

受傷から 3 か月以内に ST-G 法 (15 例) および BTB 法 (15 例) による ACL 再建術を施行し、術後、同一のプロトコル (表 1) にて当科スポーツ復帰基準 (膝関節可動域左右差なし、膝屈伸筋力患健側比 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健側比 90% 以上) を満たし、かつ KT-1000 の値が 3mm 以下 (平均 1.1 ± 0.7 mm)、pivot shift test 陰性であった男性 18 例、女性 12 例の計 30 例 (平均年齢 22.4 ± 5.1 歳、平均身長 167.6 ± 9.6 cm、平均体重 66.5 ± 9.8 kg) を対象とした。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、陸上 2 例、その他 5 例であった。いずれも週 5 日以上、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選手であった。手術から復帰までの期間は 8 か月～10 か月、平均 9.2 か月で

あった。

2. 測定方法

ジャンプ動作時の筋活動については、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⁹⁾。

3. 測定手順

測定は平上ら¹⁰⁾ や佐々木ら^{11,12)} 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 (図 1)。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、その際の筋電図を計測した。

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-129 M) に取り込み、波形を全波整流した後に解析を行った。

5) PMT および SSP の算出方法

光刺激から Quad の片脚立位最大電位以上となるまでの時間 (Quad on) を (Pre motor time : 以下、PMT) とし、SSP は、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



図1 ジャンプ課題
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」ジャンプを行った。

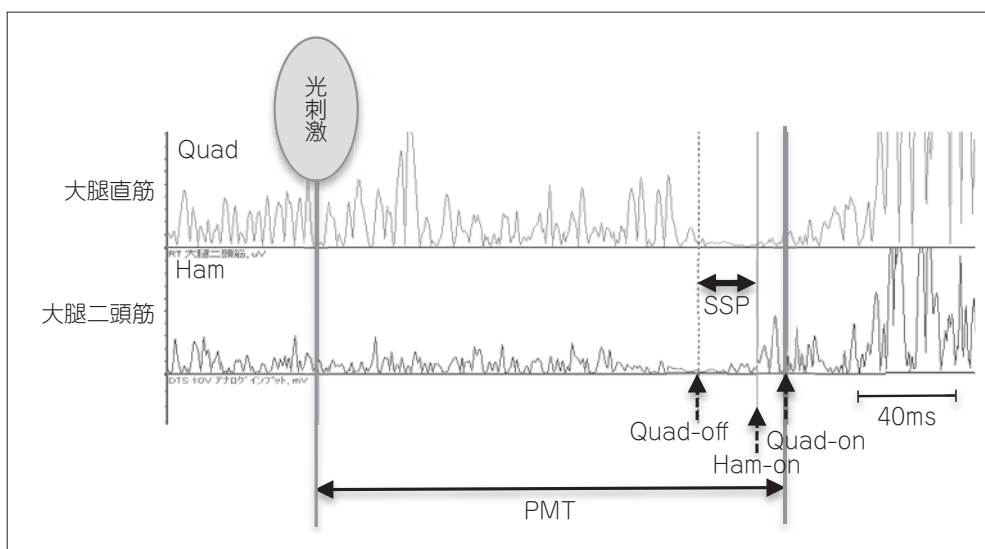


図2 表面筋電図上のPMT・SSPの算出
光刺激からQuad放電開始(Quad on)までをPMT，さらにQuadの放電が消失し(Quad off)，Hamの放電が開始(Ham on)するまでをSSPとして算出した。

の時間とした(図2)。

4. 自覚度アンケート

スポーツに完全復帰後1か月時にアンケートを行った(表2)。調査項目は各スポーツ時の膝に関する自覚的不安感，ならびに受傷前と比較した自覚的なパフォーマンスレベルとし，これらをvisual analog scale(以下，VAS)で表記した。さらに，膝に不安を感じる具体的な動作についても調査し，5項目(ダッシュ，急なストップ，急な方向

転換または切り返し，ジャンプ，相手との接触，その他)の項目選択とその他の自由記載で行った。

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。また，復帰早期は長期離脱から生じる心理的な不安感も強いいため，今回の調査時期は完全復帰から1か月後とした。

5. 検討項目

PMTおよびSSPの患側と健側間をpaired t-

表 1 当科 ACL 再建術後リハビリプログラム表

術前・後経過期間	装具	リハビリ内容
術前		下肢筋力強化, ROM
術後 1 週	0 ~ 90°	松葉杖歩行, 下肢筋力強化, 自動 ROM etc
3 週	0 ~ 100°	前方ランジ, ハーフスクワット, カーフレイズ etc
6 週	制限なし	固定バイク, カーフレイズ (片脚) etc
8 週	屋内 OFF	早歩, 片脚スクワット, バランスディスク etc
3 ヶ月	OFF	ジョギング, マラソン (筋力: 患健側比 70% 以上, Quad 単位体重筋力 2.0 倍以上) マシントレーニング
6 ヶ月		練習開始 (筋力: 患健側比 80% 以上, Quad 単位体重筋力 2.4 倍以上)
8 ~ 10 ヶ月		スポーツ完全復帰 (復帰基準) 関節可動域の獲得, 筋力, 4 種類のパフォーマンステスト, 患健側比 90% 以上

表 2 スポーツ復帰後の自覚度アンケート

1. 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?
 まったく感じない |-----| 非常に感じる

※どのような動作で不安を感じますか? (複数回答可)

①ダッシュ
 ②急なストップ
 ③急な方向転換または繰り返し
 ④ジャンプ
 ⑤相手との接触
 ⑥その他 ()

2. パフォーマンスレベルは, 受傷前と比較して低下していると感じますか?
 まったく感じない |-----| 非常に感じる

表 3 PMT と SSP の健側・患側間の比較

	PMT (msec)	SSP (msec)
健側	194.9 ± 38.4	32.5 ± 6.9
患側	200.8 ± 38.5	37.3 ± 7.4

平均値 ± 標準偏差. *p < 0.05 (paired t-test)

test を用いて比較した. また, SSP の患健側比と膝の自覚的不安感 (VAS), および自覚的パフォーマンスレベル (VAS) との相関, さらに, 膝の自覚的不安感 (VAS) と自覚的パフォーマンスレベル (VAS) との相関について Pearson の積率相関係数を用いて検討した. 有意水準はいずれも 5% 未満とした.

結 果

1. PMT と SSP の健側・患側間比較

PMT は健側が 194.9 ± 38.4ms, 患側が 200.8 ± 38.5ms であり, 健側・患側間において有意差を認めなかった. 一方, SSP は健側が 32.5 ± 6.9ms, 患

側が 37.3 ± 7.4ms であり, 患側が健側に比べて有意に延長していた (表 3).

2. SSP の患健側比と自覚的不安感および自覚的パフォーマンスレベル

SSP の患健側比と自覚的不安感の間には r = 0.75 (p < 0.05) と強い相関を認めた (図 3). また, 自覚度アンケート調査において, 最も膝に不安を感じる動作は, 急な方向転換または繰り返し動作 (59%) であり, 続いてジャンプ動作 (41%), ダッシュ (32%), 急なストップ (27%), 相手との接触 (9%), その他 (6%) の順であった. さらに, SSP の患健側比と自覚的パフォーマンスレベルの間には r = 0.38 (p < 0.05) と弱い相関であった (図 4).

3. 自覚的不安感と自覚的パフォーマンスレベル

膝に対する自覚的不安感と自覚的パフォーマンスレベルの間には r = 0.39 (p < 0.05) と弱い相関を認めた (図 5).

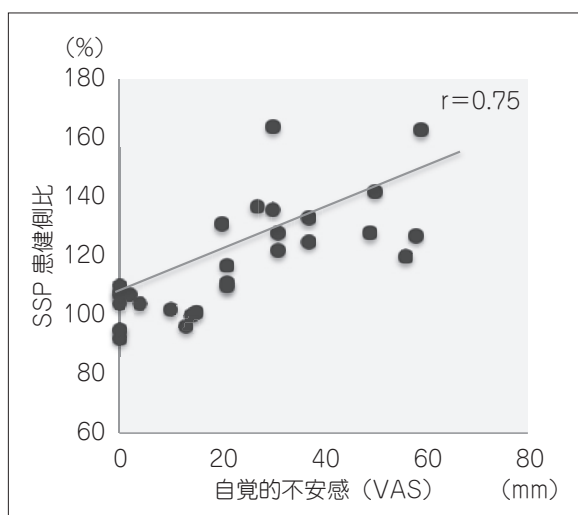


図3 SSPの患健側比と自覚的不安感 (VAS) の関係

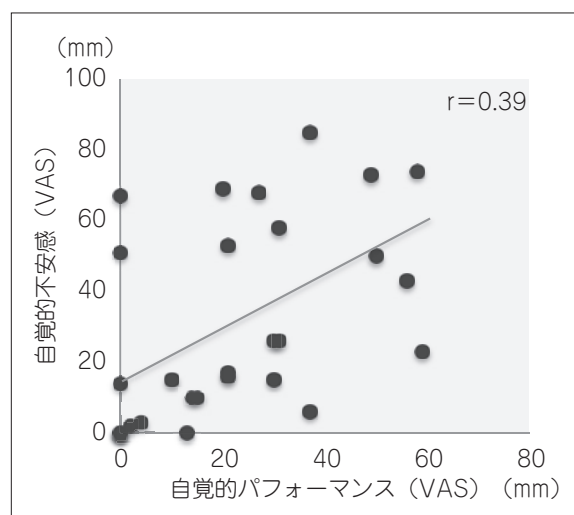


図5 自覚的不安感 (VAS) と自覚的パフォーマンスレベル (VAS) の関係

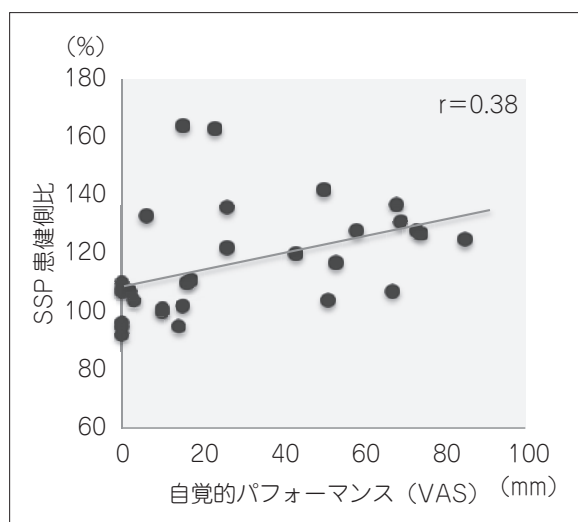


図4 SSP患健側比と自覚的パフォーマンスレベル (VAS) の関係

考察

本研究では、ACL再建術を行い、スポーツ復帰した症例の復帰後1か月でのSPを測定した。その結果、以前、著者らが行った研究⁶⁾と同様に、PMTは健側・患側間において有意差を認めなかったことから、中枢神経系の中でもフィードバック機構を反映するとされるPMTは、ACL再建術による影響は受けにくいと考えられた。一方、神経・筋協調性の指標となるSSPに関しても、以前の研究⁶⁾と同様に、患側が健側に比べ有意に延長していた。今回の研究では、対象を当科における可動域、膝関節の安定性、筋力、ステップ動作、ジャンプ動作などのスポーツ復帰基準を満

たし、かつ客観的に膝不安定性を認めなかった症例に限定したが、復帰後1か月の時点においても患側のSSPは延長していたことから、スポーツ復帰が可能となっても、早期の段階では神経・筋協調性の回復は十分に得られていない可能性があることが示唆された。Valerianiら¹³⁾は、ACL損傷後および再建術後では、膝関節の機械受容器の機能低下と同時に中枢神経系の機能にも影響を及ぼすことを指摘している。また、Wojtysら¹⁴⁾は、ACL再建術後、同一のプロトコルにてリハビリテーションを行った男女25名を対象に、脛骨の前方引き出し特殊装置を用いた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、神経・筋機能の経時的な回復過程を観察したところ、患側値が健側と同等に回復するまでに12~18か月を要したと報告した。本研究では、術後平均9.2か月時点でのSSPを測定したものであったが、パフォーマンステストや筋力など一般的に使用されている復帰基準を満たしているにもかかわらず、SSPの延長がみられたことから、術後の神経・筋協調性の回復にはパフォーマンスや筋力のみならず、術後の経過期間が重要な因子になっていることが示唆された。本研究ではSSPが回復するまで経時的に測定していないため明らかではないが、その回復には少なくとも1年を要することが推測された。

SPの測定は、前述の方法のように、外来診療において簡便に短時間で測定することは困難である。そこで、今回、神経・筋協調性を反映する主

観的指標がないかを検索するため、SSP と自覚的不安感および自覚的パフォーマンスレベルとの関連性を検討した結果、SSP は自覚的不安感と強い相関を認めた。この自覚的不安感を生じる具体的な動作は、急な方向転換または切り返し動作が59%を占めていた。不安感を生じる要因として、再建術後の膝の安定性の関与が推測されるが、浅野ら¹⁶⁾は、ACL再建術を行った男女180例に対し、スポーツ復帰直後(術後平均9.3か月時)の膝の自覚的な怖さについて調査を行っている。その結果、KT-1000で患健側差2mm以下、ならびにpivot shift test 陰性を満たしていたにもかかわらず、スポーツ時の怖さを訴えていたものは約2/3の119例であったと報告した。一方、これらの怖さを訴えた症例は術後の経過期間とともに減少し、さらに、復帰直後から膝関節の不安定性があっても怖さを感じない症例も存在したことから、自覚的な不安感、客観的な安定性のみならず、筋力、関節固有感覚、競技への慣れ、神経筋機能などの因子の関与を推測した。本研究では、全症例において、スポーツ復帰時の筋力の健患側比90%以上、また、KT-1000では3mm以下、pivot shift test 陰性であり、不安感がSSPと強い相関関係がみられたことから、自覚的不安感、とくにACL損傷の受傷機転に多くみられる急な方向転換または切り返し動作時の不安感は神経・筋協調性と最も関連があると考えた。一方、術前と比べた自覚的なパフォーマンスレベルは、SSPや自覚的不安感といずれも弱い相関を示しており、これらは神経・筋協調性以外の心肺機能や全身の持久性、モチベーションなどの要因が関与していると推測した。

本研究の限界として、術前のSSPを測定していないことから、ACL損傷が元々の神経・筋協調性が低下していたことで生じた可能性も否定できない。また、前述のように術後どのぐらいの期間でSSPが回復するか、あるいはトレーニング介入によってSSPの回復過程に差がでるかについては不明であり、今後、検討していく必要がある。

結 語

ACL再建術後、スポーツ復帰基準を満たしたうえで復帰した症例においても復帰1か月時(術後平均9.2か月)における神経・筋協調性の指標であるSSPは患側が健側に比べて有意に延長して

いた。また、SSPの患健側比は自覚的不安感と強く相関していた。

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) 大工谷新一. スポーツ復帰に向けての客観的な理学療法評価: 筋電図評価の活用. *理学療法学.* 2014; 41(8): 610-616.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 猪飼道夫. 動作に先行する抑制機構. *日本生理誌.* 1955; 17: 292-298.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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—. *日職災医誌.* 2002; 50: 145-151.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system, part 1: The physiologic basis of functional joint stability. *J Athl Train.* 2002; 37: 71-79.
- 16) 浅野浩司, 仁賀定雄, 張 禎浩, 他. 前十字靭帯再建術後のスポーツ活動時における怖さの検討. *臨床整形外科.* 2004; 39: 297-301.
-
- (受付: 2018年7月24日, 受理: 2019年1月17日)

Evaluation of neuromuscular coordination at the time of returning to sports activity after reconstructive surgery of the anterior cruciate ligament and its correlation with subjective symptoms —Examination using the silent period—

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

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

Key words: silent period, neuromuscular coordination, awareness

[Abstract] Patients returning to sports after anterior cruciate ligament (ACL) reconstructive surgery complain of subjective anxiety during on-field movements and lowering of the subjective performance level. It was hypothesized that this is secondary to decreased neuromuscular coordination following the surgery. Post-surgical neuromuscular coordination was assessed at the time of returning to sport using the silent period (SP). The relationship between SP and subjective symptoms was examined. The one-leg jump test was assessed by photoreaction, and the pre-motor time (PMT) and switching silent period (SSP) of the rectus femoris muscle and biceps femoris muscle were measured by surface electromyogram. A questionnaire was also used and correlated with each subjective symptom, and the correlation with the ratio of the health side was examined. PMT was not significantly different between patients and control subjects, but there was a strong correlation between the SSP and the subjective anxiety of healthy controls. However, the correlation between the SSP ratio and the performance level as well as that between subjective anxiety and the performance level was weak. These data suggest that neuromuscular coordination is reduced at the time of returning to sports following ACL reconstruction. Subjective symptoms, such as anxiety during field play including cutting and turning, are likely caused by reduced neuromuscular coordination.