

## 2. 前十字靭帯再建術後のスポーツ復帰における再建靭帯の MRI 評価の有用性

齊藤雅彦\*

### ●はじめに

前十字靭帯 (ACL) 再建術は、手術手技や術後リハビリテーションの進歩により、スポーツ復帰に関して安定した成績が期待できるようになった。一方で、スポーツ復帰時期を決定する基準は未だ確立されていない。従来、術後期間、筋力、バランスおよびパフォーマンステスト、心理的評価を組み合わせて基準としてきたが、移植靭帯を直接評価する方法の確立が求められる。MRI は非侵襲的かつ詳細な組織評価が可能であり、移植靭帯の輝度 (SI) は組織学的変化および力学的強度を反映し、SI が低いほど靭帯の成熟が進んでいると報告されており<sup>1-4)</sup>、MRI による移植靭帯の評価はスポーツ復帰基準として有用である可能性がある。本研究では、ACL 再建術後の移植靭帯の MRI 評価がスポーツ復帰基準の指標となり得るかを以下の 3 点について検討した。

1. 移植靭帯の MRI 信号強度の経時的変化の評価
2. スポーツ復帰時期と MRI 信号強度の関連の検討
3. 再損傷と MRI 信号強度の関連の検討

### ●対象と評価項目

当院でハムストリング靭帯を用いた二重束 ACL 再建術を受けた患者 400 例のうち、術後 2 年まで追跡可能であった 290 例を対象とした。複合靭帯損傷例、ACL 再々建術例、骨端線閉鎖前の小児例を除外した。

評価項目は患者背景 (年齢、性別)、主観的評価

(IKDC subjective score, Lysholm score)、活動レベル (Tegner activity scale)、膝前方安定性 (Knee Lax を用いた 132N での健患差)、スポーツ復帰時期、および MRI における移植靭帯の輝度変化とした。

MRI 評価には、プロトン密度強調像 (PD-weighted images) の移植靭帯に沿った斜矢状断像を用い、術後 1 週、3 ヶ月、6 ヶ月、12 ヶ月、24 ヶ月の計 5 回実施した。前内側束 (AMB) および後外側束 (PLB) の実質中央に ROI (Region of Interest) を設定し、SNQ (Signal Noise Quotient) を算出した。SNQ は移植靭帯と PCL の信号強度の差を背景信号強度で除して算出した<sup>1,2)</sup> (図 1)。統計解析は EZR を用い、 $p$  値  $< 0.05$  を有意差ありとした。

### ●結 果

#### 1. 移植靭帯の MRI 信号強度の経時的変化

SNQ は術後 1 週から 6 ヶ月まで有意に増加し、6 ヶ月をピークに 24 ヶ月まで減少したが、24 ヶ月時点でも PCL と同等まで改善していなかった。術後 6-12 ヶ月の SNQ 変化に注目すると SNQ が 6 ヶ月でピークを迎える症例と術後 12 ヶ月まで増加して、12 ヶ月がピークとなる症例に分けられ (図 2)、SNQ が減少する Group A (128 例) と増加する Group B (142 例) に分類された。患者背景、臨床成績について 2 群間で比較検討すると、Group A の方が有意に年齢が低かったが、臨床成績には 2 群間には有意差を認めなかった (表 1)。

#### 2. スポーツ復帰時期と SNQ の関連

290 例中 212 例 (73.1%) がスポーツ復帰した。そのうち 9 ヶ月で当院のスポーツ復帰基準をみたし復帰した早期復帰群 (86 例) と基準を満たせな

\* 千葉メディカルセンタースポーツ医学センター

Corresponding author : 齊藤雅彦 (masahi1214@hotmail.com)

かったもしくは早期復帰希望がなかった遅延復帰群（126 例）に分類した。早期復帰群は年齢が低かったが、臨床成績に有意差はなかった（表 2）。術後 6 ヶ月の SNQ は早期復帰群で有意に低く、早期復帰群では移植腱の成熟が進んでいる可能性が示唆された。



図 1 ACL 再建術後の MRI での移植腱の評価

### 3. 再損傷と SNQ の関連

再損傷は 290 例中 11 例 (3.4%) で、平均年齢 18.8 歳、スポーツ復帰時期は平均 9.0 ヶ月 (7-15 ヶ月)、再損傷時期は平均 19.6 ヶ月 (6-52 ヶ月) であった。再損傷の時期は術後 6-12 ヶ月で 2 例、12-24 ヶ月で 5 例、24 ヶ月以降で 4 例であった。再損傷群では、いずれの時期でも SNQ が高く、成熟が遅い可能性が示唆された（図 3）。

### ●考 察

本研究により、移植腱の SI の変化が成熟過程を反映し、MRI 評価がスポーツ復帰基準や再損傷予測の指標となり得ることが示唆された。

移植腱の SNQ は術後 6 ヶ月をピークに減少し、移植腱の成熟過程の時間軸<sup>5)</sup>と一致しており、成熟過程を反映していると考えられる。移植腱の成熟に影響を与える因子として、活動レベル<sup>6)</sup>、移植腱の種類<sup>3)</sup>、骨孔位置<sup>7)</sup>などが報告されているが、本研究の結果から年齢も影響因子である可能性が示唆された。移植腱の輝度変化の経時的変化につ

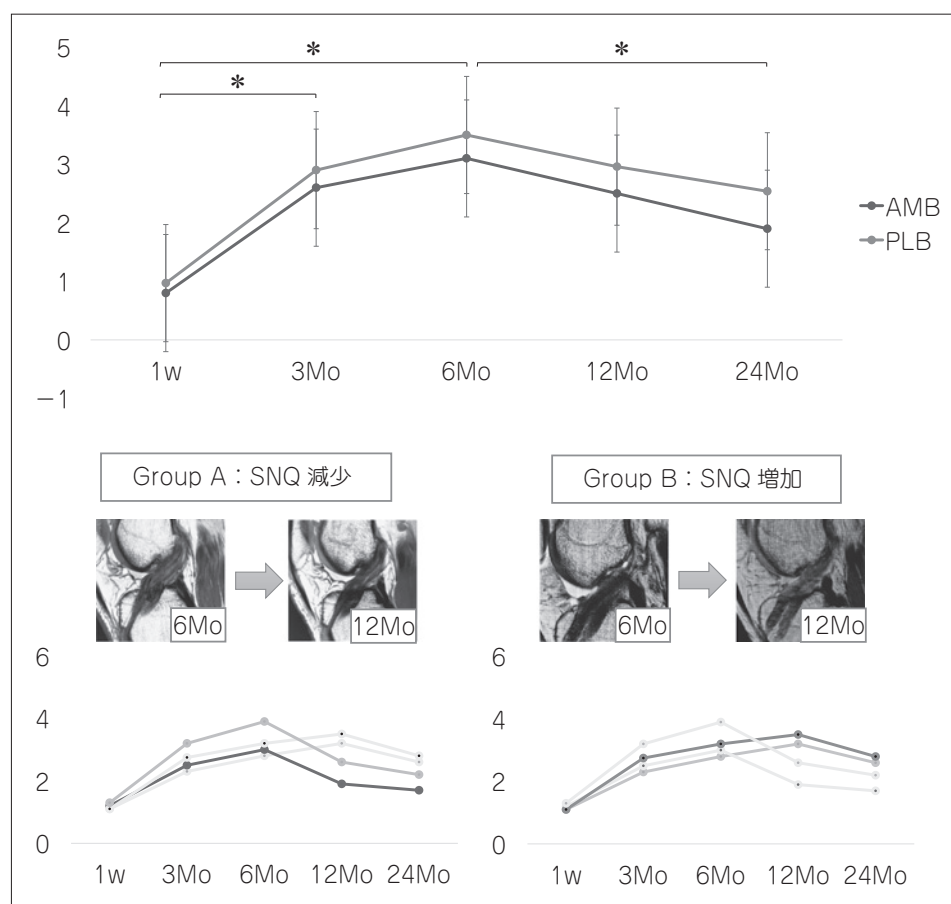


図 2 ACL 再建術後の MRI における移植腱の経時的な輝度変化

表1 ACL再建術後のMRIにおける移植腱の経時的な輝度変化

	Group A (n=128)	Group B (n=142)	P-value
Age (years old)	24.4±9.6	27.8±11.2	0.026
IKDC score	90.2±10.9	87.3±10.8	n.s
Lysholm score	91.1±9.0	92.6±9.1	n.s
Tegner activity scale	6.3±1.5	5.5±1.5	n.s
Anterior Translation (mm)	2.0±2.0	1.2±2.3	n.s
RTS (Mo)	11.1±2.6	11.4±4.5	n.s

表2 スポーツ復帰時期による臨床成績及び移植腱の輝度変化に違い

	≤9Mo (n=86)	>9Mo (n=126)	
年齢(歳)	22.3±8.5	25.5±10.7	p=0.03
復帰時期(月)	8.1±0.9	12.3±1.9	p=0.01
Knee-Lax(健患差mm)	1.2±1.1	1.1±1.3	n.s
IKDC score(1年時)	89.7±9.7	90.3±9.1	n.s
Lysholm(1年時)	93.2±6.7	92.9±6.1	n.s
Tegner activity scale(1年時)	6.3±1.5	6.0±1.2	n.s

Figure 2: Bar chart showing the change in MRI signal intensity (SI) for ACL grafts at 9 months (AMB) and 12 months (PLB) post-surgery. The y-axis represents SI from 0 to 5. The x-axis shows two groups: AMB (9 months) and PLB (12 months). For each group, there are two bars: a light gray bar for the ≤9Mo group and a dark gray bar for the >9Mo group. Error bars represent standard deviation. Significance levels are indicated by asterisks: \*p=0.03 for AMB and \*p=0.01 for PLB.

いて、術後12ヶ月まで増加するという報告<sup>8)</sup>がある一方で、AMBは術後6ヶ月、PLBは術後9ヶ月でSI上昇のピークを迎えるとの報告もあり<sup>9)</sup>、未だ一定の見解が得られていない。これは移植腱のSI変化に影響する因子が多因子であるためと考えられるが、それに加え、本研究の結果から術後6-12ヶ月のSI変化は症例により異なるため、先行研究の対象としている症例にも影響されることが考えられる。

スポーツ復帰とSNQの関連では、早期復帰群の方が術後6ヶ月時点のSNQが低く、早期復帰群の方が移植腱の成熟が早かった。これは、早期復帰群は若年者が多く、年齢が移植腱の成熟過程に影響を及ぼす可能性が示唆された。これらの結果は、単に時間経過だけではなく、MRI評価を

復帰基準に追加することの重要性が示唆された。従来の筋力評価や心理的評価に加え、MRIを用いた成熟度評価を導入することで、より安全な復帰計画が可能となる可能性がある。

再損傷群ではSNQが非再損傷群より高い傾向を示し、再損傷例の多くは術後12ヶ月以降に発生しており、成熟が遅れることで再損傷リスクが増加することが示された。この結果は、術後の移植腱の高信号が再損傷の予測因子となる可能性を示した先行研究の報告と一致している<sup>10,11)</sup>。移植腱近位の高信号は再損傷の予測因子であり、SIRが1上がると再断裂のリスクが40%上がる<sup>10)</sup>との報告や、術後2年のMRIにて移植腱が高信号だと再断裂リスクのオッズ比は12.1との報告<sup>11)</sup>があり、移植腱のSNQは再断裂の予測因子となりうる可

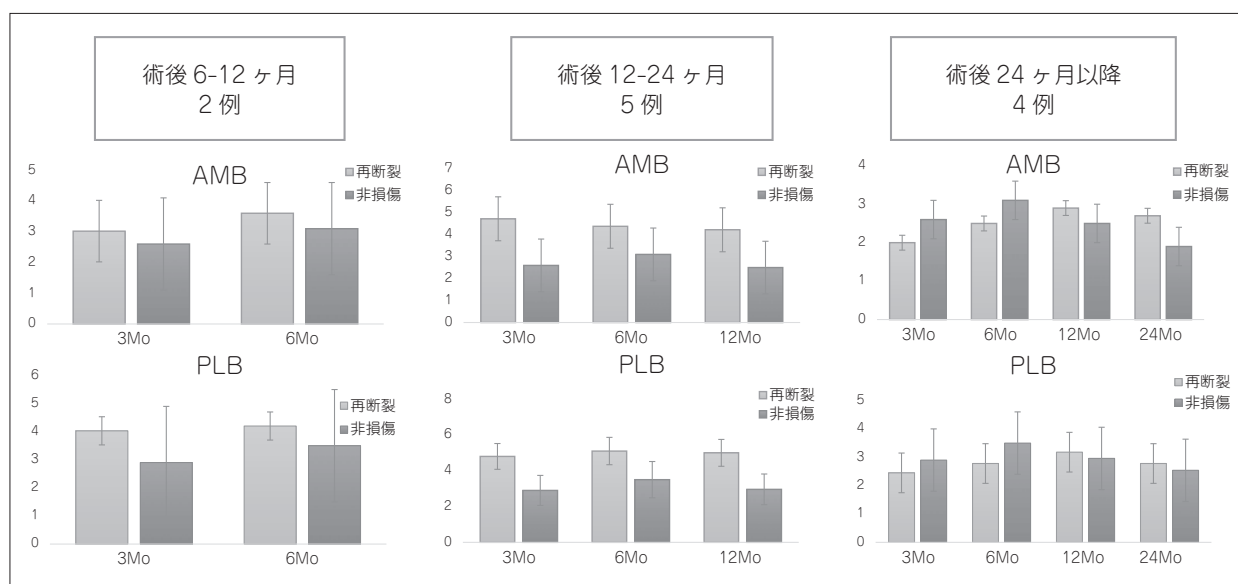


図3 ACL 再建術後の再断裂時期と移植腱の輝度変化

能性がある。

## ●おわりに

移植腱のMRI評価は、成熟過程や再損傷リスク予測に有用であり、スポーツ復帰基準に加えることで、安全かつ効率的な復帰計画が可能となる可能性がある。今後、多施設共同研究や長期追跡調査を通じて、スポーツ復帰基準への適用の可能性をさらに検討する必要がある。

## 文 献

- 1) Weiler A, Peters G, Maurer J, et al. Biomechanical properties and vascularity of an anterior cruciate ligament graft can be predicted by contrast-enhanced magnetic resonance imaging. A two-year study in sheep. *Am J Sports Med.* 2001; 29: 751-761.
- 2) Muramatsu K, Hachiya Y, Izawa H. Serial Evaluation of Human Anterior Cruciate Ligament Grafts by Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging: Comparison of Allografts and Autografts. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery.* 2008; 24: 1038-1044.
- 3) Li H, Tao H, Cho S, et al. Difference in Graft Maturity of the Reconstructed Anterior Cruciate Ligament 2 Years Postoperatively: A Comparison Between Autografts and Allografts in Young Men Using Clinical and 3.0-T Magnetic Resonance Imaging Evaluation. *Am J Sports Med.* 2012; 40: 1519-1526.
- 4) Sim J-A, Kim J-M, Lee S, et al. No difference in graft healing or clinical outcome between transportal and outside-in techniques after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2017; 137: 1-7.
- 5) Claes S, Verdonk P, Forsyth R, et al. The "Ligamentization" Process in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med.* 2011; 39: 2476-2483.
- 6) Li H, Chen S, Tao H, et al. Correlation Analysis of Potential Factors Influencing Graft Maturity After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine.* 2014; 2(10): 2325967114553552. doi: 10.1177/2325967114553552.
- 7) Chiba D, Yamamoto Y, Kimura Y, et al. Combination of anterior tibial and femoral tunnels makes the signal intensity of antero-medial graft higher in double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2020; 31: 1-10.
- 8) Ntoulia A, Papadopoulou F, Ristanis S, et al. Revascularization process of the bone-patellar tendon-bone autograft evaluated by contrast-enhanced magnetic resonance imaging 6 and 12 months after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med.* 2011; 39(7): 1478-1486.
- 9) Fukuda H, Asai S, Kanisawa I, et al. Inferior graft maturity in the PL bundle after autograft hamstring double-bundle ACL reconstruction. *Knee*

## 2. 前十字靱帯再建術後のスポーツ復帰における再建靱帯のMRI評価の有用性

- Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2019; 27(2): 491-497.
- 10) Putnis S, Oshima T, Klasan A, et al. Magnetic Resonance Imaging 1 Year After Hamstring Autograft Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Can Identify Those at Higher Risk of Graft Failure: An Analysis of 250 Cases. Am. J. Sports Med. 2020; 49: 1270-1278.
- 11) Yau W.P, Chan Y-C. Evaluation of Graft Ligamentization by MRI After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Am. J. Sports Med. 2023; 51: 1466-1479.