

## 膝伸展位と屈曲位による前十字靭帯再建術後のMR評価

新津 守<sup>1</sup>, 池田耕太郎<sup>2</sup>, 福林 徹<sup>2</sup>, 越後純子<sup>1</sup>,  
高橋英幸<sup>1</sup>, 女屋博昭<sup>1</sup>, 吉岡 大<sup>3</sup>, 阿武 泉<sup>1</sup>,  
松本邦彦<sup>1</sup>, 板井悠二<sup>1</sup>

<sup>1</sup>筑波大学臨床医学系・放射線科   <sup>2</sup>同 整形外科  
<sup>3</sup>放射線医学総合研究所

### はじめに

膝関節前十字靭帯の画像診断におけるMRIの役割は、MR機器が広く普及した現在、その臨床の場で必要不可欠なものとなっている。前十字靭帯再建術後の移植腱の断裂の有無や骨組織との適合性の判定にもMRIは有用である<sup>1),2)</sup>。

本施設では特製の膝装具と標準装備のflexible surface coilを用いて、超電導MR装置のマグネット内での膝関節の可動範囲を最大伸展位から平均約45度の屈曲位まで確保するシステムを開発した。本研究は膝関節の伸展位と屈曲位における術後の再建前十字靭帯についてそのMRI描出能を検討した。

### 方 法

超電導MR装置(GYROSCAN ACS-11, 1.5 T, Philips Medical Systems)のマグネット内で膝関節を最大伸展位から“半”屈曲位(最大60度, 平均45度)まで屈曲, 保持出来るように非磁性体を用いて膝装具を作成した(Fig.1)。膝を前面から両側面まで覆う, MR装置に標準

装備されているflexible surface coil(E1 coil, Philips Medical Systems)を用いて, 伸展位と屈曲位のMR画像を撮像した。プロトン密度強調fast(turbo) spin echo法(TR/TE 1300/12ms, turbo factor 6, field of view 16cm, 201×256 matrix, 4 averagings)を用いて膝関節全体をカバーする3mm厚の連続斜矢状断画像(成人の場合19から23断面, 撮像時間約4分)を得た。伸展位, 半屈曲位ともに横断像, 冠状

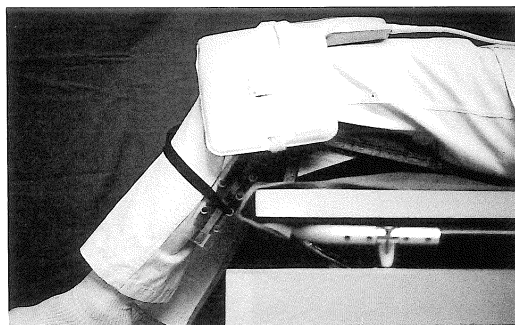


Fig.1. Using a mobile knee brace and a flexible surface coil, knee joint is either fully extended and bent to a semi-flexed position (average 45° of flexion) within the superconducting magnet bore.

キーワード anterior cruciate ligament, reconstruction, MRI, knee flexion

断像からなる位置決め画像上にて intercondylar space 内の再建靭帯の走行に平行する斜矢状断画像を設定した。

症例は前十字靭帯断裂により半腱様筋腱と薄筋腱による前十字靭帯再建術が行われた 28 症例 (男性 17 名, 女性 11 名, 17 歳-35 歳) の 28 膝であり, 手術から MRI 検査までの期間は最長 6 年, 最短 3 ヶ月, 平均 11 ヶ月であった。徒手検査および MRI 検査にて再建靭帯不全の疑われた 3 症例は MRI 検査に引き続いて関節鏡検査が行われた。他の 25 膝は臨床的経過には問題なくその後の関節鏡検査は行われていない。

上記健常と判断された 25 膝と, impingement が見られた 1 症例の計 26 膝について, 再建靭帯の描出能を膝屈曲位の MR 画像を膝伸展位の画像と比較することにより 5 段階に判定評価した。

すなわち膝屈曲位における再建靭帯の描出能が伸展位に比べてきわめて優れているものをランク 5 とし, 優れているもの: ランク 4, 等しいもの: ランク 3, 劣っているもの: ランク 2, きわめて劣っているもの: ランク 1 と 5 段階にランク付けし判定した。この評価については intercondylar space 内に描出されるべき再建靭帯の全長にわたる描出が可能か, 信号強度が周囲関節内組織とのコントラストをつけるに十分に低信号であったか, 再建靭帯の辺縁が明瞭に描出されたか, の各点を総合的に評価し, 読影には膝関節 MRI の経験豊富な医師 2 名により合議の末の統一評価が下された。さらに MR 画像上において, 再建靭帯の長軸方向が静磁場方向 (矢状断画像上では上下 (頭尾) 方向) に対する角度も計測した。

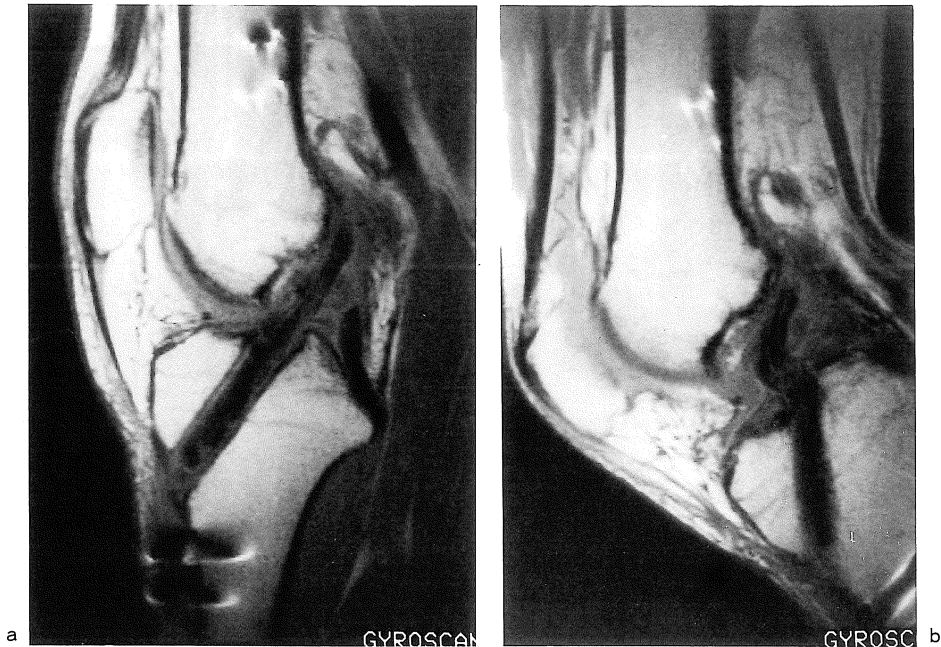


Fig.2. Normal ACL graft, 3-mm-thick oblique sagittal proton-weighted images with the knee fully-extended (a), and with 40° of flexion (b). In the extended position, the ACL graft is seen as a taut, straight low-intensity band. In semi-flexion, the ligament is lax and bent.

## 結 果

26 膝の膝屈曲位の MR 画像と膝伸展位の画像との比較では、ランク 5 が 10 例、ランク 4 が 10 例、ランク 3 が 4 例、ランク 2 が 2 例、そしてランク 1 が無し、であった。簡略化のためランク 5 とランク 4 とまとめて膝屈曲位における再建靭帯の描出能が伸展位に比べて良好な例とし (20 例)、ランク 2 とランク 1 を不良例 (2 例) と統合して、符号検定 (ノンパラメトリック法) で統計的有意差を検定した。この結果、膝屈曲位の MR 画像は膝伸展位に比較して再建靭帯の描出能において有意に優れていた ( $P < 0.01$ )。

健常な再建靭帯は intercondylar space 内に低信号の索状物として描出された。緊張を示す伸展位に比較して膝半屈曲位では再建靭帯は“たわみ”を示した (Fig.2)。伸展位における膝関節

内または脛骨骨孔内の靭帯の信号強度は半屈曲位に比較して上昇し、全体としての再建靭帯の描出能は屈曲位に比べて劣る症例が多かった (Fig.3)。

2 症例では伸展位、屈曲位共に intercondylar space 内に靭帯線維は全く認められず完全断裂と判定された (Fig.4)。また 1 例では intercondylar roof anterior edge での靭帯の impingement も認められた (Fig.5)。これらはその後の関節鏡検査でその所見が確認された。

再建靭帯線維の静磁場方向に対する角度は、伸展位で 15~45 度、平均 30.8 度、屈曲位では 0~15 度、平均 6.7 度であった。

## 考 察

膝関節 MRI 検査における surface coil の使用

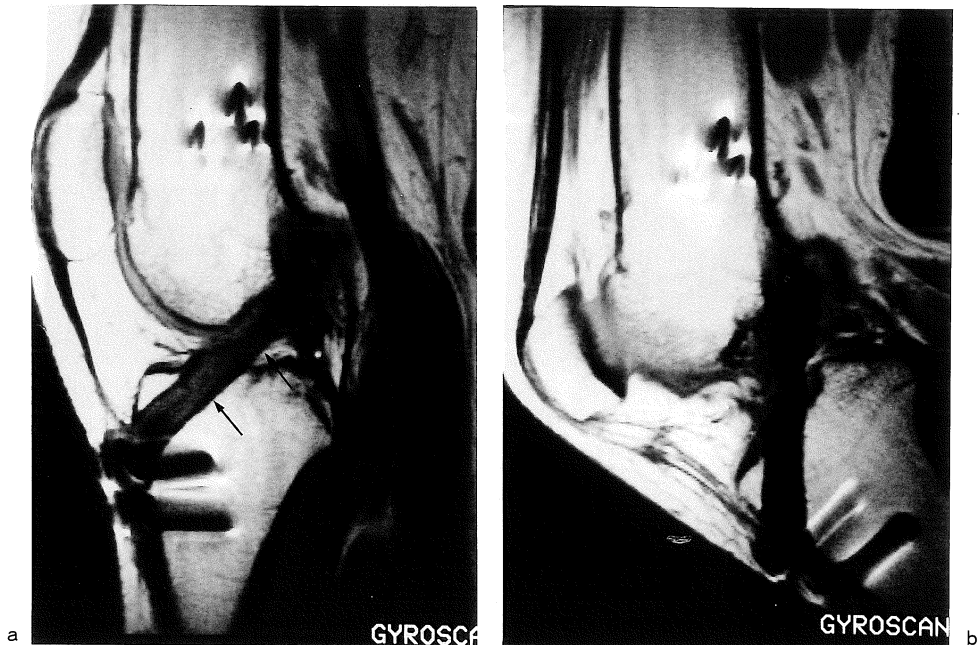


Fig.3. Normal graft, with the knee fully-extended (a), and with 50° of flexion (b). In the extended position, both the intercondylar portion and the tibial tunnel portion of the graft appear relatively high intensity (arrow) compared with the knee semi-flexion. Angle of the graft axis relative to the static magnetic field is 45° in the knee extension and 5° in semi-flexion.

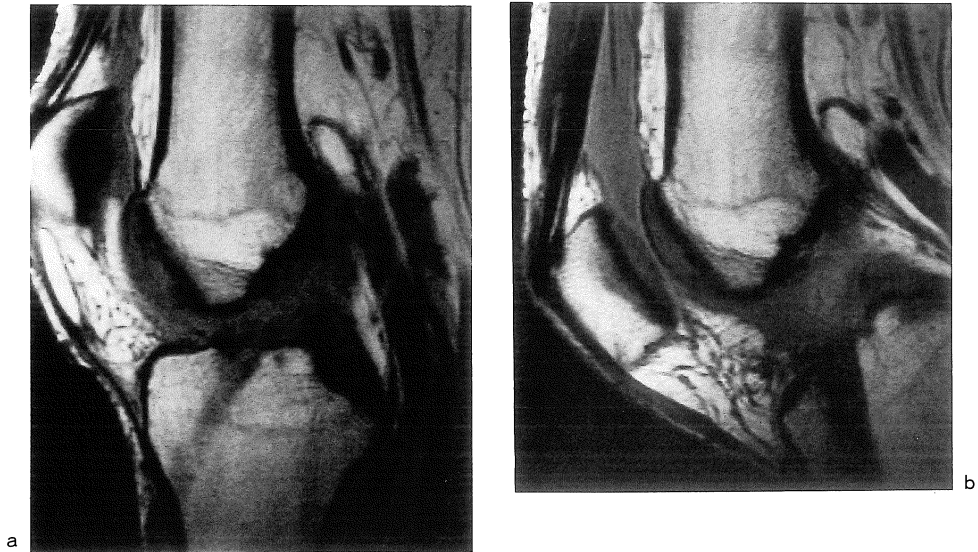


Fig.4. Torn ACL graft with the knee fully-extended (a), and with 45° of flexion (b). Both with the knee extension and semi-flexion, no ligamentous structure can be observed within the intercondylar notch. Subsequent arthroscopy verified complete disappearance of the ligament graft.

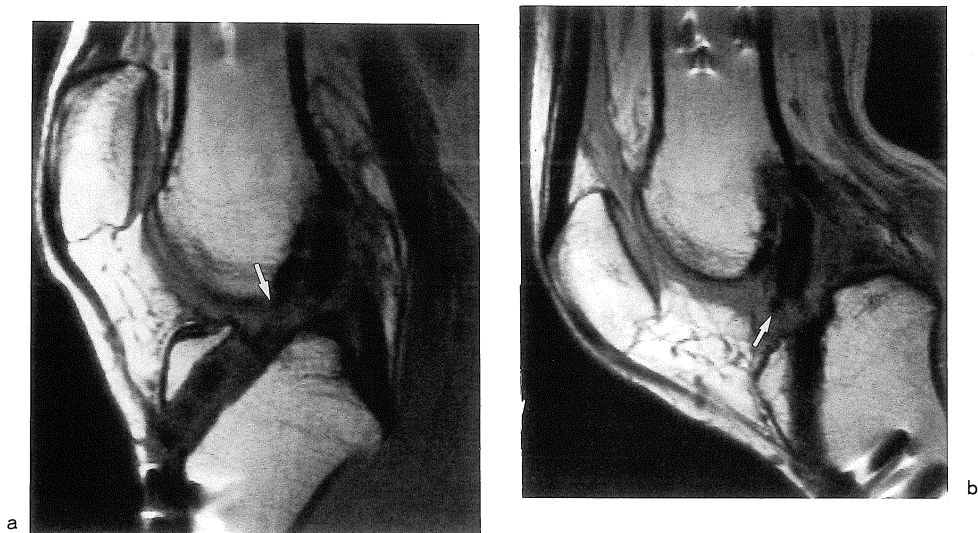


Fig.5. ACL graft with impingement with the knee fully-extended (a), and with 45° of flexion (b). Stretched against the intercondylar roof, a faint discontinuity of the graft is observed in the extended position (arrow). When the knee is semi-flexed, the graft interruption is apparent at the tibial end (arrow). A wider space below the intercondylar roof facilitates delineation of the entire configuration of the graft.

は高画質、高分解能画像を得るためには不可欠である。従来の surface coil は送受信両用の円筒型の膝専用コイルを用いる場合が多かったため、膝関節は伸展位、またはごく軽度の屈曲位で撮像されていた。本研究では膝装具と flexible surface coil を用い、超電導 MR マグネット内での膝関節の可動範囲を最大伸展位から半屈曲位 (最大 60 度) まで確保した。現在、各 MR 機器メーカーは永久磁石等による開放型マグネットや、四肢さらには膝専用の MRI 装置を開発、臨床応用中であり、膝関節の屈曲伸展による機能的 MR 画像法も近い将来に重要な診断手法となることが予想される。

膝関節を強制的に周期運動させた cine MRI では膝の屈曲伸展につれて前十字靭帯の形状と信号強度の変化が報告されている<sup>3)</sup>。死体膝を用いた研究では膝伸展時には前十字靭帯の信号強度が上昇すると報告され、靭帯に加わる緊張の変化がその要因の一つであると言われている<sup>4)</sup>。膝伸展時の前十字靭帯信号強度の上昇は、周囲関節内組織とのコントラスト低下により靭帯線維の描出を悪化させ診断能の低下にもつながる。本研究と同様のシステムを用いての正常前十字靭帯における経験では、膝の半屈曲位のほうが伸展位に比較して靭帯の信号強度も低く、矢状断像において大腿骨外側顆との partial volume averaging も少なく、靭帯線維の描出には優れていた<sup>5)</sup>。膝伸展位では再建靭帯は intercondylar roof に平行に密着するように走行し両者の partial volume averaging が問題となるが、半屈曲位では intercondylar roof の脛骨側の関節間隙が拡大するため再建靭帯の全長にわたっての描出がより容易になることも一助となる。本研究では術後の再建靭帯を対象に用いたが、伸展位に対しての膝半屈曲位 MR 画像の靭帯線維の描出能の優位性は、上述のごとく多様な MR 機器の登場も相まって、従来の膝伸展位中心の前十字靭帯 MRI 検査法についてその再考慮を促すものである。

膝伸展時の前十字靭帯信号強度の上昇には上

述の靭帯への荷重変化の他に、magic angle effect の関与が考えられている<sup>6)</sup>。これは靭帯等の索状構造物が静磁場方向に対して 55 度前後の角度で位置した場合に、内部の分子配列の方向性によりその信号強度が特異的に上昇する現象であり、靭帯断裂等の異常所見と混同しやすいといわれる。本研究での再建靭帯線維の静磁場方向に対する角度は、伸展位で平均 30.8 度と屈曲位に比較して有意に大きく、詳細な検討は *in vitro*, *in vivo* での更なる追求を必要とするが、magic angle effect が膝伸展時の再建前十字靭帯の信号強度の上昇に関与する可能性があると考えられる。

再建靭帯の impingement は靭帯の intercondylar roof の最前縁である anterior edge との接触、圧迫が問題となる。この場合靭帯と anterior edge が最も接近する伸展位が膝関節位置として重要であり、単純 X 線写真上での評価も膝伸展位での intercondylar roof と脛骨骨孔との位置関係に対して評価されていた<sup>7)</sup>。MR 画像はこれらの骨性要素のみならず再建靭帯自身の描出が可能であり、impingement の評価には適した画像法であるといえる。本研究のシステムでは膝関節は特製の膝装具により伸展位、さらには過伸展位まで保持、撮像可能であり、屈曲位とともに impingement の評価に有効な伸展位、過伸展位を装具の角度を調整するのみで連続して撮像できる利点もある。

膝伸展位での再建靭帯は半屈曲位に比べより直線状の走行を示した。正常前十字靭帯は膝伸展位で最大緊張を示し、約 40 度から 50 度の半屈曲位でその緊張は最小となる<sup>8)</sup>。再建前十字靭帯も大腿骨と脛骨トンネルの作成を健常靭帯の走行に近似させて行っているため、膝半屈曲位では再建靭帯は若干の“たわみ”を示すものと考えられる。MRI 上で断裂等の異常所見の認められなかった 25 膝は、膝の動揺性など臨床的にも問題はなく経過しており、この“たわみ”も正常範囲と考えられる。ただし再建靭帯へのストレスは、関節の屈曲角度の他にも下腿の内外

旋や脛骨の前方偏位, 加えては膝装具の形状や膝周囲筋群の緊張状態等が複雑に関与しており, MR 画像上での再建靭帯の定量的緊張度の評価は今後の課題である。

#### ま と め

①膝装具と flexible surface coil を用いて超電導 MR 装置のマグネット内での膝関節の可動範囲を最大伸展位から半屈曲位 (最大 60 度) まで確保し, 膝伸展位と屈曲位での再建前十字靭帯の MR 画像を得た。

②健全再建靭帯は伸展位にて緊張を示し半屈曲位では“たわみ”を示した。

③伸展位における再建靭帯の信号強度は半屈曲位に比較して上昇する場合が見られた。

④伸展位に比べて膝半屈曲位では再建靭帯の描出が良好であった。

#### 文 献

- 1) Moser P, Bechtold RE, Clark T, et al. : MR imaging of anterior cruciate ligament repair. J Comput Assist Tomogr, 13 : 105-109, 1989.
- 2) Rak KM, Gillogly SD, Schaefer RA, Yakes WF, Liljedahl RR. : Anterior cruciate ligament reconstruction : Evaluation with MR imaging. Radiology, 178 : 553-556, 1991.
- 3) Niitsu M, Anno I, Fukubayashi T, et al. : Tears of cruciate ligaments and menisci : Evaluation with cine MR imaging. Radiology, 178 : 859-864, 1991.
- 4) Smith KL, Daniels JL, Arnoczky SP, et al. : Effect of joint position and ligament tension of the MR signal intensity of the cruciate ligaments of the knee. JMRI, 4 : 819-822, 1994.
- 5) Niitsu M, Ikeda K, Anno I, Fukubayashi T, Itai Y. : Knee extension and flexion : MR imaging delineation of normal and torn anterior cruciate ligaments. submitted for publication.
- 6) Erickson SJ, Prost RW, Timins ME. : The “magic angle” effect : Background and clinical relevance. Radiology, 188 : 23-25, 1993.
- 7) 宗田 大, 山本春康, 朝比奈信太郎, 他 : 術中 2 方向 X 線撮影を用いた解剖学的指標による膝前十字靭帯再建術. 関節鏡, 19 : 19-23, 1994.
- 8) Kennedy JC, Weinberg HW, Wilson AS : The anatomy and function of the anterior cruciatee ligament. J Bone Joint Surg, 56A : 223-235, 1974.

## MR Imaging of the Knee Extension and Flexion : Diagnostic Value for Reconstructed Anterior Cruciate Ligament

Mamoru NIITSU<sup>1</sup>, Kotaroh IKEDA<sup>2</sup>, Tohru FUKUBAYASHI<sup>2</sup>,  
Junko ECHIGO<sup>1</sup>, Hideyuki TAKAHASHI<sup>1</sup>, Hiroaki ONAYA<sup>1</sup>,  
Hiroshi YOSHIOKA<sup>3</sup>, Izumi ANNO<sup>1</sup>, Kunihiko MATSUMOTO<sup>1</sup>,  
Yuji ITAI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Department of Radiology, <sup>2</sup>Department of Orthopedic Surgery,  
Institute of Clinical Medicine, University of Tsukuba  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305*  
<sup>3</sup>*National Institute of Radiological Sciences*

The purpose of this study is to determine the value of extended and flexed knee positions in MR imaging of the surgically reconstructed anterior cruciate ligament (ACL). With a mobile knee brace and a flexible surface coil, knee joint was enabled to extend to a full-extension and bend vertically to a semi-flexion (average 45° of flexion) within the confines of the magnet bore. Sets of 3-mm-thick oblique sagittal proton-weighted turbo spin echo MR images were obtained at both extended and flexed positions. Twenty-five knees with intact ACL grafts and three knees with arthroscopically proved graft tears were evaluated. Compared to the extended position, MR images of flexed knee provided better delineation of the intact and complicated ACL grafts with statistical significance. The intact graft appeared relaxed at the semi-flexion and taut at the extension. Overall lengths of the intact grafts were readily identified at the flexion. Stretched along the intercondylar roof, the grafts were poorly outlined at the extension. MR images with knee flexion delineated the disrupted site from the impingement more clearly than that with knee extension.