

関節軟骨の 3T MRI

藤井正彦¹, 岩間祐基¹, 青山信和², 川光秀昭²,
黒田良祐³, 杉村和朗⁴

¹神戸大学医学部附属病院放射線科 ²同放射線部

³同大学院外科系講座整形外科学分野 ⁴同大学院内科系講座放射線医学分野

はじめに

関節軟骨は、厚さ数ミリの層状の構造で関節を構成する骨の表面を覆い、円滑な動きと下肢では衝撃吸収の役割を担う。関節軟骨は驚異的な耐久性を有し、運動機能と生活の質 quality of life を支えているが¹⁾、高齢化が進むにつれて関節軟骨の変性や破壊に基づく変形性関節症 (osteoarthritis ; OA) が増加し、OA は現在最も重要な生活習慣病の一つになっている。

本稿では、関節軟骨の全層を非侵襲的に評価できる唯一の画像診断法である MRI について、基本的な撮像法、生化学的情報を提供する新しい撮像法、3T MRI の有用性、OA の診断や治療における MRI の役割と今後の展望について概説する。

関節軟骨の構造と機能

関節軟骨には栄養血管やリンパ管、神経などは存在せず、主に関節液から栄養される。関節軟骨の役割は、筋肉の力を関節の円滑な動きに変えるとともに、関節への負荷を吸収することである。この役割を可能にしているのは、関節

軟骨の複雑な構造である。

関節軟骨は湿重量の 60～80% が水分であり、残りの 20～30% が細胞外基質 (マトリックス)、軟骨細胞は 1% 程度である²⁾ (Table 1)。

軟骨細胞には細胞同士の直接的な結合は見られず、関節への負荷が加わったり解除されたりすることより、関節液が軟骨内に拡散することで栄養されている。軟骨細胞の重要な役割は、マトリックスを産生することであるが、軟骨細胞自体は生理的状态では再生能力はほとんど見られない。

マトリックスの主成分はプロテオグリカンとコラーゲンである。プロテオグリカンは、芯となるタンパク質にコンドロイチン硫酸やケタラン硫酸などのグルコサミノグリカン (GAG: glycosaminoglycan) と呼ばれる多糖類が結合

Table 1. Components of Articular Cartilage

1. Water	60-80%
2. Extracellular matrix	20-30%
a) Glycosaminoglycans	
b) Collagen (type II)	
c) Hyaluronic acid	
3. Chondrocytes	1%

この総説は、第 35 回日本磁気共鳴医学会大会特別講演「関節軟骨」での講演を中心にまとめたものである。

キーワード articular cartilage, high-resolution MRI, 3 Tesla, cartilage repair

した糖蛋白質である。コラーゲンはⅡ型が90%程度を占め、Ⅰ型などとともにコラーゲン線維を形成して網目構造をとり、軟骨の形を維持している。プロテオグリカンはリンク蛋白とともにヒアルロン酸に結合し、大量の水を保持してゲル状物質となり、コラーゲンの網目構造に取り込まれ、衝撃吸収機能と潤滑を担っている³⁾。

関節軟骨の厚さは1 mm から最大で7 mm 程度、平均2, 3 mm という非常に薄い組織である。表層・中間層・深層・石灰化層の4層からなり、深層と石灰化層の間にはtidemarkと呼ばれるヘマトキシリン染色で濃染する線状の構造がある (Fig. 1)。表層では軟骨細胞は扁平で、コラーゲン線維は関節面に平行に配列する。中間層は最も厚く、軟骨細胞は円形で、コラーゲン線維はやや太く不規則な配列を示す。深層では軟骨細胞は柱状に配列し、コラーゲン

線維は太く、軟骨基質が最も多い。石灰化層は、軟骨を軟骨下骨と強固に連結する。

MRI では、この層構造を反映してT₂値が変化し、表層と中間層はT₂値が長く、深層と石灰化層はT₂値が短い。このため、T₂強調像では表層から深層になるにつれて、信号強度が低下する (Fig. 2)。

外傷や肥満など、力学的に過剰な負荷が関節軟骨に加わると、軟骨の構造を維持しているコラーゲン線維が破綻し浮腫を引き起こす。力学的な負荷は軟骨細胞にも影響し、軟骨基質の分解酵素の産生が起り、軟骨の変性と破壊が進行する⁴⁾。

軟骨 損傷

関節軟骨の損傷は、外傷による急性損傷と、OAに代表される慢性損傷がある。急性損傷では、前十字靭帯 (ACL) 損傷において42%の症例で軟骨損傷が認められ⁵⁾、特に大腿骨外顆と脛骨後縁で多く認められる。膝蓋骨脱臼では

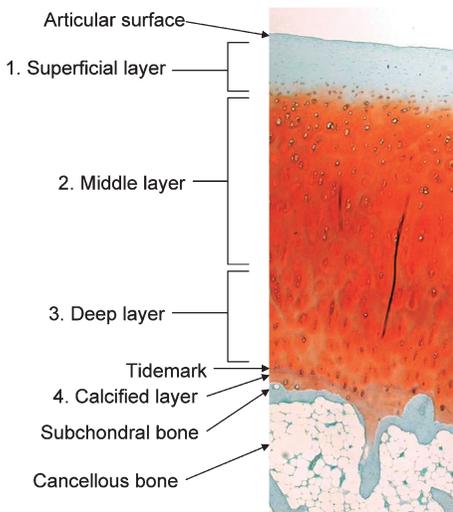


Fig. 1. Histology of the articular cartilage
The articular cartilage is formed from four levels of superficial, middle, deep, and calcified layers. There is a linear structure called tide-mark between deep and calcified layer.

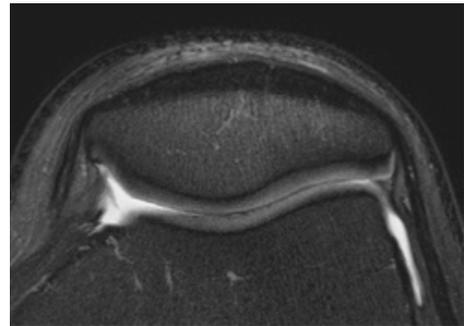


Fig. 2.
Axial fat-suppression T₂-weighted image of normal patellar cartilage shows decreasing signal intensity as deepened from articular surface, because T₂ values of superficial and middle layer are long, and those of deep and calcified layer are short.

2009年3月11日受理

別刷請求先 〒650-0017 神戸市中央区楠町7-5-2 神戸大学医学部附属病院放射線科 藤井正彦

95%に関節鏡で軟骨損傷を認めたと報告されており、膝蓋骨の内側と大腿骨の外顆側に多く認められる⁶⁾。このほか、離断性骨軟骨炎では、大腿骨内顆の外側面に損傷が見られることが多い。

慢性損傷では、変形性関節症(OA: osteoarthritis)が最も重要である。関節軟骨の変性・消失を特徴とし、骨関節疾患の中で最も発症頻度の高い疾患の一つである。日本だけでも約700万人の患者がいると推定され、関節痛や歩行障害などを引き起こし、中高年者の quality of life を損う最大の原因の一つであり、高齢化社会における最も重要な生活習慣病である。OA は、ACL 損傷や半月板損傷に伴って認められることも多く、OA の risk factor と考えられている⁷⁾。

軟骨損傷のMRI診断

膝関節のMRIでは、靭帯や半月板の損傷を疑って撮像されることが多く、通常の撮像法では関節全体を撮像範囲とするためスライス厚が5mm以上になることが多く、薄い構造の関節軟骨は部分体積効果の影響が避けられず、見過ごされる場合も少なくない。また、撮像法の面からも、軟骨の評価に不可欠な脂肪抑制を併用すれば全体のSNRが低下するため、低信号を示す靭帯や半月板が評価しにくくなる。このため、軟骨損傷の評価には高磁場MRIが不可欠であり、薄いスライス厚と脂肪抑制を併用する必要がある。

また、MRIを診断する場合には、急性損傷における軟骨損傷の好発部位を理解した上で、損傷の程度と損傷範囲をできるだけ正確に診断することが、後述する軟骨修復治療の適応や治療方法の選択において非常に重要である。さらに、慢性損傷のOAにおいても、人工関節置換術の適応や人工関節の種類を選択に、MRIによる軟骨損傷の情報は不可欠である。

軟骨損傷のMRI診断は、形態面からの評価

Table 2. Magnetic Resonance (MR) Classification of Cartilage Abnormality

Grade 0 : Normal
Grade 1 : Signal abnormality with normal contour
Grade 2 : Superficial fraying, erosion, fissuring, or Partial thickness defect of <50%
Grade 3 : Partial thickness defect of $\geq 50\%$ and < 100%
Grade 4 : Full thickness defect

(Outerbridge RE, JBJS Br 1961 : 43 : 752-767)

については、Outerbridgeらによって提唱された関節鏡における分類に沿ったMRIのgrade分類が理解しやすい^{8),9)}(Table 2)。1.5T MRIによる関節軟骨損傷の診断率は、これまでの報告では全病変に対する正診率は85%前後とかなり高いが、grade 1や2など変性や軽度の損傷では正診率は50%前後と低い^{10)~15)}。しかし、3T MRIを用いれば、高いS/Nを活用して面内分解能が50~100 μ というマクロ病理像に迫る高解像度のMR画像を得ることができる^{16)~19)}。これにより、表層の損傷や小さな亀裂などをこれまで以上に正確に評価することができる(Fig. 3)。さらに、軟骨損傷の早期所見である浮腫や、軟骨基質の減少などの生化学的な変化などが、後述するような新しい撮像法を活用すれば評価可能になる^{20),21)}。

3T MRI と 1.5T MRI の比較

1.5T MRI と 3T MRI の比較を健常ボランティア15名で比較した。対象は女性15例、年齢は20歳から60歳、平均41歳。使用装置はPhilips社製MRI Achieva 1.5T および Achieva 3Tで、使用コイルは8 channel SENSE Knee coil。撮像方法は、脂肪抑制T₂強調像(TR/TE=3265/60)矢状断像・冠状断像・横断像、脂肪抑制PD強調矢状断像、T₁強調矢状断像、3D-T₁強調GRE像である。

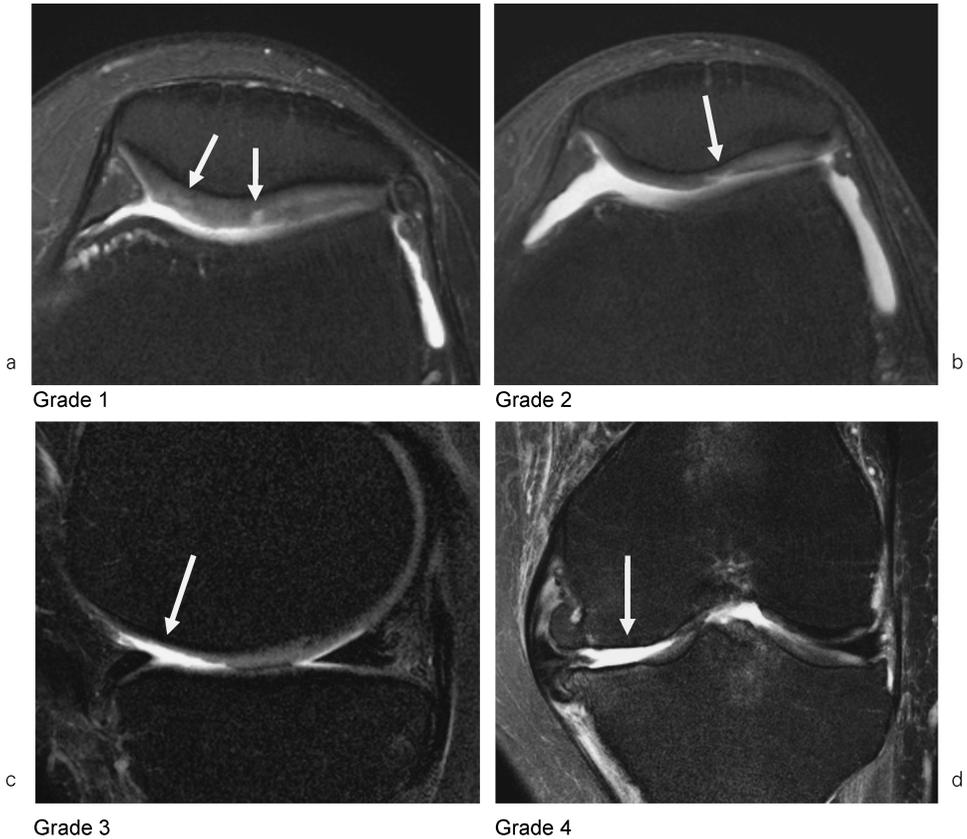


Fig. 3. Cartilage abnormalities on T₂-weighted image
(a) Axial T₂-weighted image showing heterogeneous high signal changes in the patellar cartilage (arrow). (b) Axial T₂-weighted image showing a partial thickness cartilage fissure in the patella (arrow). (c) Sagittal T₂-weighted image showing irregular cartilage thinning in the medial condyle of femur (arrow). (d) Coronal T₂-weighted image showing a full cartilage defect in the medial condyle of femur (arrow).

a) 信号雑音比 SNR : SNR は静磁場強度にほぼ比例するため、同じ撮像パラメータであれば 3T MRI は 1.5T MRI の約 2 倍の SNR が得られる²²⁾。我々が健常ボランティアで検討した結果でも、関節軟骨は T₂ 強調像および PD 強調像で、半月板と靭帯は PD 強調像で、それぞれ 2 倍以上の SNR が得られた (Table 3)。高い SNR を画質の向上に充てる場合には、matrix を大きく、スライス厚を薄くして高分解能 MRI を撮像することが可能となり (Fig.

4)、より詳細な形態診断が可能になり、軽度の軟骨損傷における診断能の向上が期待される^{16),17)}。

b) 化学シフト : 化学シフトは、脂肪と水の共鳴周波数の違いにより生じるが、3T MRI では脂肪と水の共鳴周波数の差が 1.5T MRI の 2 倍になるため、関節軟骨周囲の chemical shift artifact が 3T MRI では顕著になる。この対応としては脂肪抑制が有効であるが、3T MRI では選択的な脂肪励起がしやすくなるため、

Table 3. Changes of the SNR of the Bone and Soft Tissue : Comparison between 1.5T and 3T

	T ₂ WI		PDWI		T ₁ WI	
	3T	1.5T	3T	1.5T	3T	1.5T
Bone marrow	23.2±8.7	17.1±10.9	28.9±7.1	23.3±8.9	158.8±34.3	95.6±26.9
meniscus	13.0±4.0	14.2±13.3	48.1±20.6	19.8±6.6	26.5±14.5	15.6±5.1
Articular cartilage	91.6±23.9	13.5±13.6	142.9±55.7	68.9±22.3	59.1±30.5	36.1±11.7
Ligament	17.1±5.7	14.3±8.7	63.1±24.0	25.8±12.8	30.9±14.2	19.9±6.7
Tendon	9.6±2.9	13.3±11.9	17.6±6.8	9.8±5.0	15.4±7.1	9.5±4.3
Fat	37.1±7.4	13.1±8.3	49.1±19.0	38.8±16.0	176.1±42.5	105.6±42.7

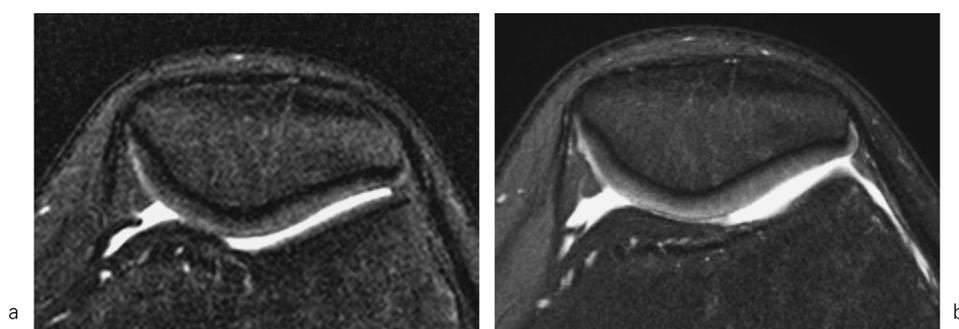


Fig. 4. A difference of image quality between 1.5T and 3T MR image
Image quality of (b) 3T MR image is obviously superior to (a) 1.5T MR image.

1.5T MRI より均一な脂肪抑制画像が得られる。このほか、RF (radiofrequency) パルスの送信バンド幅を大きくすることも有効である¹⁶⁾。

c) 緩和時間：1.5T MRI と 3T MRI では、組織の T₁ 値や T₂ 値が変化する。骨軟部領域では、我々の測定においても、関節軟骨の T₁ 値は 17% 延長し、T₂ 値は 12% 短縮していた (Table 4)²³⁾。3T MRI において、T₁ コントラストを 1.5T MRI と同程度に維持するには、TR を約 20% 延長させる必要がある。T₂ コントラストについては、1.5T MRI と同程度に維持するには TE をやや短く設定する必要がある。

d) 磁化率効果：3T MRI では磁化率効果が大きくなるため、T₂ 強調像や T₂* 強調 GRE 像で関節軟骨深層の信号が低下し、関節軟骨の厚さ

を過小評価する可能性がある。TE を 10 ms から 120 ms まで徐々に延ばした場合に、関節軟骨の内部信号と、軟骨と関節液のコントラストが大きく変化する。3T MRI では、T₂ 値が短縮する影響もあり、関節軟骨の描出にとって至適な TE は 1.5T MRI より短くなり、TE = 60 ms 前後が内部信号および関節液とのコントラストの両面で優れていると考える (Fig. 5)。

関節軟骨の MRI 撮像法 (Table 6)

1. 基本的撮像法

関節軟骨の基本的な撮像方法は、T₁ 強調像、プロトン (PD) 密度強調像、T₂ 強調像である。関節面は前後左右に彎曲しており、損傷の評価にはできる限り直行する 2 方向からの撮像が望ましい。その中で、脂肪抑制 T₁ 強調

Table 4. Rate of Change of T₁ and T₂ Values in Bone and Soft Tissue between 1.5T and 3T MR Image

Tissue	T ₁ value		rate	T ₂ value		rate
	1.5T	3T		1.5T	3T	
Muscle	1.13	1.42	1.26	0.035	0.032	0.91
Fat	0.29	0.37	1.28	0.17	0.13	0.76
Bone marrow	0.29	0.37	1.28	0.17	0.13	0.76
Articular cartilage	1.06	1.24	1.17	0.042	0.037	0.88
Fluid	2.85	3.62	1.27	1.21	0.77	0.64

Table 5. Summary of MR Imaging Techniques for Cartilage Evaluation

MR technique	Evaluation	Advantage	Disadvantage
T ₁ W SE	Morphology	Subchondral bone	Low contrast between cartilage and joint fluid
T ₂ W SE	Morphology	Surface, internal detail	Low SNR
PDW SE	Morphology	High SNR and spatial resolution	Unclear internal detail
Fat suppressed T ₁ W 3D SPGR	Morphology	High contrast	Blurring, truncation
T ₂ mapping	T ₂ value	Quantitative, early assessment	Low SNR, time consuming
Delayed Gd enhanced MRI of cartilage (dGEMRIC)	GAG	Matrix (GAG), early assessment	Contrast media, time consuming
T ₁ ρ mapping	T ₁ ρ value	Quantitative, early assessment	Limited availability, time consuming
Diffusion-weighted image (DWI)	ADC	Matrix, early assessment	Artifact, low SNR
Ultrashort TE (UTE)	Morphology	Calcified layer	Limited availability

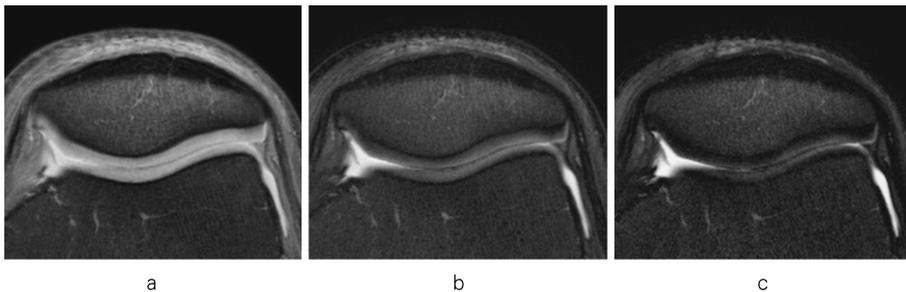


Fig. 5. Signal change of articular cartilage on T₂-weighted image with different TE (b) T₂-weighted image with moderate TE (60 ms) shows internal structure of cartilage more clearly than (a) short TE (10 ms) and (c) long TE (90 ms) images.

3D-GRE 像が軟骨損傷の形態的な診断能としては最も高く、正診率は90%前後と言われている。軟骨体積の測定にも用いられる^{24),25)}。

a) T₁強調像：T₁強調像は、関節軟骨が関節液と同程度の低信号になるため、関節軟骨自体の評価には適していないが、骨髓腔が高信号を示すため軟骨損傷に伴う軟骨下骨の評価に有用である (Fig. 6a)。

b) PD 強調像：PD 強調像は信号雑音比 (signal to noise ratio ; SNR) が最も高く、関節軟骨の信号は関節液よりも低いが中等度となり、T₁強調像よりも識別しやすい (Fig. 6b)。PD 強調像では、脂肪抑制を併用すれば関節軟骨が相対的に著明な高信号となり、軟骨の全体像の評価に有用である (Fig. 6c)。

c) T₂強調像：T₂強調像では関節液が高信号、関節軟骨が低信号となるため、関節軟骨の表面性状が関節造影に近い画像となり評価しやすいが、SNR が低下するため軽微な損傷の評価は困難である (Fig. 6d)^{26)~28)}。特に3T MRIでは、1.5T MRIと同程度のTEでは軟骨の信号低下が著しいので、やや短く設定する必要がある。

d) T₁強調 3D-GRE 像：3D 画像のため分解能も高く、関節軟骨の厚さや体積を評価するのに最も優れている (Fig. 6e)。脂肪抑制を併用すれば関節軟骨が均一な高信号となり、軟骨下骨の脂肪髄が低信号となり、関節液とのコントラストも大きくなる。欠点としては、撮像時間が長いこと、磁化率効果の影響を受けやすいこと、truncation artifactが見られることである²⁴⁾。

e) 水選択励起 GRE 像：d)の脂肪抑制と同様の効果を得るものとして、水を選択的に励起する撮像法がある。この方法でも関節軟骨が著明な高信号を示し、軟骨の厚さや体積などの定量的評価に有用である。しかし、FSE法の脂肪抑制PD強調像と比較すれば、blurringによる辺縁のぼけや、軽度のtruncation artifactが見られる (Fig. 6f)²⁹⁾。

Table 6. Structure and T₂ Value of Articular Cartilage

Layer	Thickness	T ₂ value
Superficial	10-20%	30-40 ms
Middle	40-60%	40-50 ms
Deep	20-30%	4-10 ms
Calcified	5-10%	1 ms

2. 生化学的情報のための撮像法

a) T₂ mapping：MRIでは関節軟骨の層構造を反映してT₂値が変化し、表層と中間層はT₂値が長く、深層と石灰化層はT₂値が短い (Table 6)。軟骨が損傷された場合、コラーゲン線維が破綻して浮腫を来すが、組織の水分含量を反映するT₂ mappingは、軟骨の浮腫を客観的に早期に評価する上で有用と考えられている^{30)~33)}。しかし、関節は球状ないし蝶番状の形態を示すことが多く、magic angleに近い角度の関節面では、関節軟骨の表層のコラーゲン線維が関節面に平行に走行するため、magic angle effectを受けてT₂が延長する傾向があり注意が必要である³⁴⁾ (Fig. 7)。

b) 拡散強調像：組織内の水分子の拡散を評価する拡散強調画像は、軟骨損傷によりコラーゲン線維が破綻した場合に、拡散の異方性の変化としてとらえることができると考えられており、軟骨損傷の早期診断に期待が寄せられている³⁵⁾ (Fig. 8)。しかし、関節軟骨では周囲組織の磁化率が大きく異なるためアーチファクトが強く、臨床応用にはさらなる画質の改善が必要である。

c) dGEMRIC：軟骨基質 (GAG) の濃度を反映する方法として、Gd-DTPA 遅延造影画像 (dGEMRIC : delayed gadolinium-enhanced magnetic resonance imaging of cartilage) が注目されている。GAGは陰性荷電するため、同じく陰性荷電した造影剤 Gd-DTPA を投与すると、軟骨中のGAGとGd-DTPAが反発し、GAG濃度と反比例して造影剤が分布するた

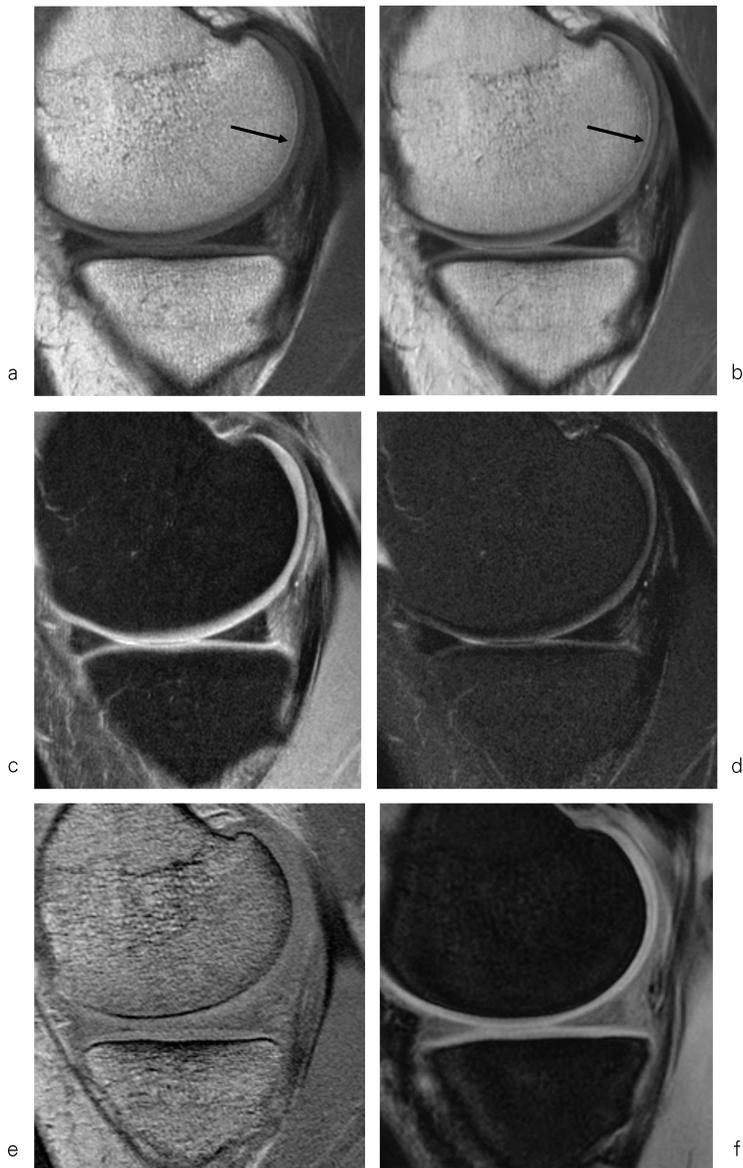


Fig. 6. Sagittal MR images of the knee
(a) T1-weighted and (b) proton density weighted SE image show chemical shift artifact on posterior contour of femoral condyle. Articular cartilage shows a significant high signal intensity on (c) fat suppression proton density weighted SE image. Signal intensity of articular cartilage decreases remarkably on (d) fat suppression T₂-weighted image. (e) Three-dimensional gradient echo (GRE) image without fat suppression and (f) GRE image with water selective excitation technique. Use of fat suppression or water selective excitation arrows more detailed demonstration of articular cartilage.

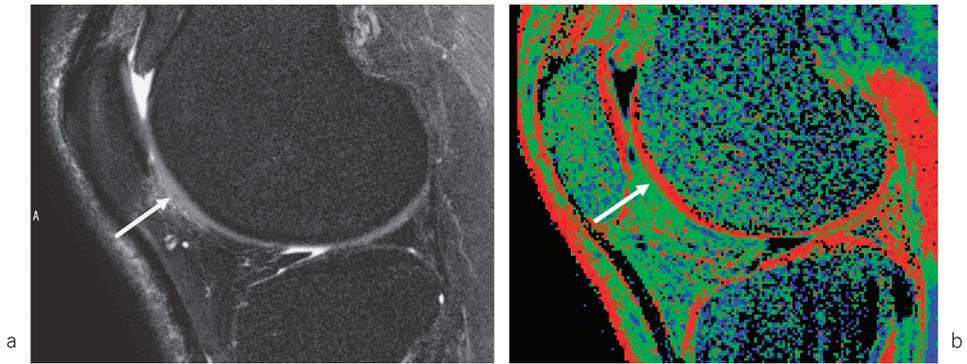


Fig. 7. At anterior articular surface of femoral condyle on magic angle, a signal intensity of articular cartilage is elevated on (a) fat suppression T₂-weighted image, and (b) T₂ mapping reveals slight elongation of T₂ value on superficial layer of articular cartilage (arrow).

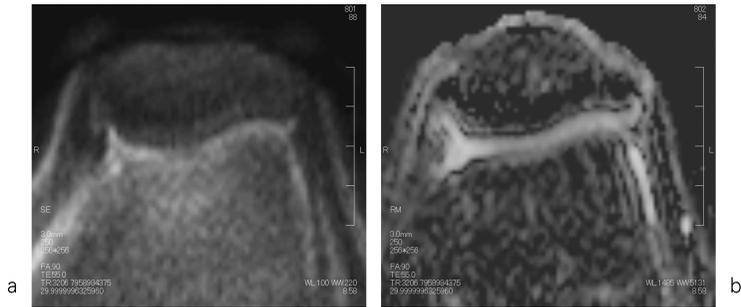


Fig. 8. (a) Axial diffusion-weighted image (DWI) and (b) apparent diffusion coefficient (ADC) map from a healthy volunteer. Image quality of DWI is insufficient because of inhomogeneity of the susceptibility.

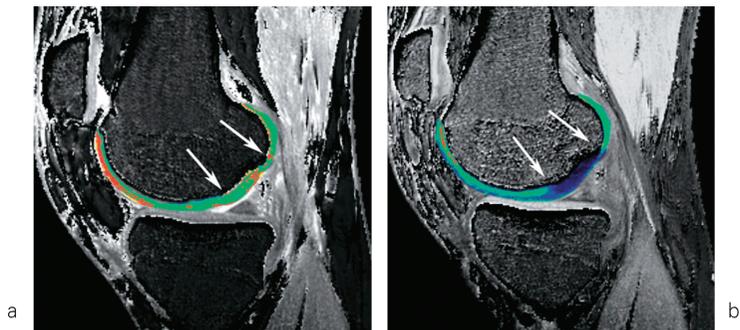


Fig. 9. (a) Color-coded cartilage transplant precontrast and (b) postcontrast images show contrast enhancement of cartilage repair site compared with adjacent normal hyaline cartilage (quoted from literature 39).

め、変性して GAG 濃度の低い部分の軟骨は造影効果が強くなる。関節軟骨の変性や、治療後の成熟過程を評価する上で有用と考えられている^{36)~39)}(Fig. 9)。

d) $T_{1\rho}$ 強調像：軟骨基質内の水分子の遅い拡散を評価する $T_{1\rho}$ 値は、軟骨基質の濃度を反映すると考えられ、軟骨変性の指標として T_2 値よりも感度が高いことが指摘されている。造影剤を使用せずに軟骨基質の濃度が評価できるが、spin rock time を変えて複数回撮像する必要がある、現時点では撮像時間が長く一般的にはなっていない^{40),41)}(Fig. 10)。

e) UTE (ultra short TE) 像：最近の報告で軟骨の深層、石灰化層の損傷は軟骨の不安定化を来し、最終的に浅層の変性を来すこと分かってきた。さらに、深層、石灰化層は一度の衝撃で損傷されてしまい、表層には変化が見られないこともある^{42),43)}。深層および石灰化層の T_2 値は非常に短いので、通常の撮像では評価が困難であったが、UTE 像では高信号域として描出される⁴⁴⁾(Fig. 11)。しかし、現時点ではハードの制約があり一般的にはなっていない。

f) DEFT (driven equilibrium Fourier transform) 法：縦磁化を強制的に熱平衡状態に戻すため、短い TR でも T_1 強調の少ない、プロトン密度像に近いイメージが得られる。軟部組織のコントラストは TR > 75 ms 以上で FLASH を上回ると報告されている⁴⁵⁾。

軟骨修復と MRI

OA の治療方法には保存療法と手術療法の二つがあるが、保存療法⁴⁶⁾の治療効果は必ずしも十分ではなく、関節破壊は徐々に進行し、最終的には人工関節置換術が行われなければ、疼痛や日常生活活動 (activities of daily living ; ADL) の改善が得られない。

しかし、人工関節に至るまでの早い段階で軟骨損傷を治療する方が望ましく、関節軟骨損傷に対して様々な治療方法^{47),48)}が開発されてき

たが、元々の硝子軟骨を再現することは困難であった。近年再生医療が非常に注目され、1994年に発表された自家培養軟骨移植術 (autologous chondrocyte implantation ; ACI)⁴⁹⁾が契機となり、関節軟骨の再生医療も大きな発展を遂げている。

軟骨組織には栄養血管がなく細胞密度が低いことから、広範な軟骨欠損の自然治癒は期待できない。軟骨修復を目的とした治療法としては、marrow stimulation technique, 骨軟骨柱移植, 自家培養軟骨移植術の三つが挙げられる。

Marrow stimulation technique とは、軟骨欠損部の骨にドリルなどで傷を付けることで軟骨損傷部表面に骨髄からの凝血塊が付着し、骨髄に由来する間葉系細胞の遊走が促され、軟骨の再生を期待する方法である^{47),50)}。しかし、再生組織の大半は線維軟骨で、成績には限界があるといわれている。

骨軟骨柱移植術は、軟骨欠損部を埋めるように小さな骨軟骨片を移植する方法で (mosaicplasty)、完成された硝子軟骨と軟骨下骨が移植されるため、硝子様軟骨による修復が可能である。しかし、関節本来の非常に滑らかな状態を再現することは難しく、移植骨軟骨柱の硝子軟骨と、周囲の間隙の線維性軟骨との結合が成績を左右する。また、軟骨採取部の障害についても注意が必要である^{48),51)}。MRI では、関節面における軟骨の整合性だけでなく、骨髄側での移植骨片の生着状況も評価することができる (Fig. 12)。

自家培養軟骨移植術 (autologous chondrocyte implantation ; ACI) は、患者の非荷重部から少量の関節軟骨を採取し、体外で軟骨細胞を培養・増殖させ、欠損部に逢着した骨膜下に注入する方法である。ACI では硝子軟骨様組織で修復され、治療成績が良好という報告が多いが、hypertrophy や癒着などの問題も報告されている^{49),52)~54)}。ACI 以外にも、筋由来の幹細胞による移植も行われている⁵⁵⁾(Fig. 13)。

軟骨修復術後の治療効果判定として、MRI

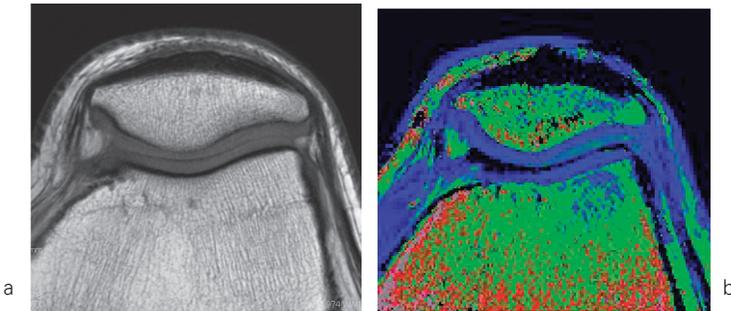


Fig. 10. Axial T1-weighted image and T1 ρ mapping of patellar cartilage (Courtesy of Philips Medical Systems Corp.)

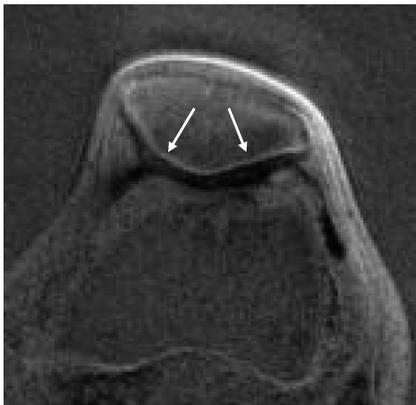


Fig. 11. Ultra short TE image of patellar cartilage. The deep and calcified layers with very short T2 value show a high intensity band on UTE image (arrows). (Courtesy of Hitachi Medico Corp.)

Subtraction image(TE0.45 – TE5)

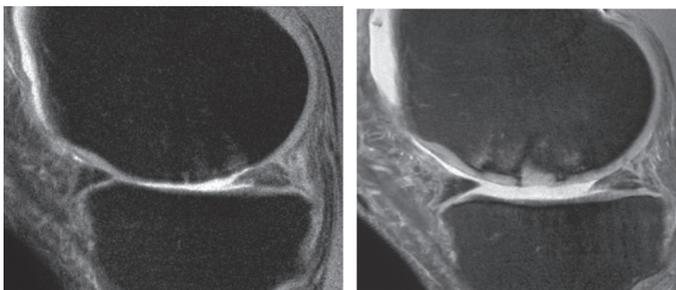
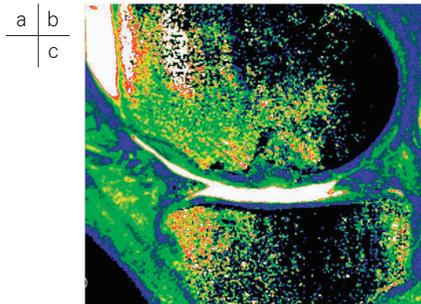


Fig. 12. (a) Sagittal proton density weighted preoperative image. (b) Sagittal proton density weighted image and (c) T2 mapping image transplanted autogenous osteochondral plugs within the medial femoral condyle at 9 months postoperatively.



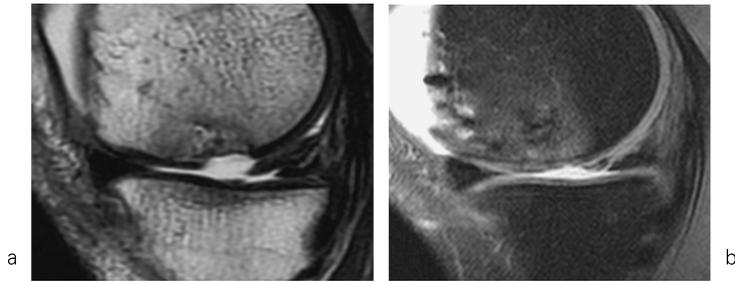


Fig. 13. (a) Sagittal T2-weighted preoperative image. (b) Sagittal proton density weighted image transplanted stem cells derived from muscle at 35 months postoperatively.

では移植部分の軟骨組織の表面性状や信号強度、軟骨下骨や移植骨周囲の信号変化に加えて、前述のように生化学的な評価として、 T_2 mapping 法や dGEMRIC の有用性が報告されている。dGEMRIC では、修復軟骨組織の深層では軟骨基質 (GAG) の濃度が高く、表層では低い傾向を示し、組織像をよく反映していたと報告されている^{31)~34),37)~39)}。

ま と め

関節軟骨の変性ではまず浮腫が生じ、変性の進行に伴って軟骨基質が減少し、軟骨の非薄化が進む。このような関節軟骨の変化は、MRI を用いれば軟骨内部まで非侵襲的に評価することができる。形態学的な評価は、脂肪抑制併用のプロトン密度強調像や T_2 強調像が有用であり、3T 装置を用いれば高分解能 MRI より詳細な評価が可能である。軟骨損傷の早期診断や軟骨修復治療の効果判定には、 T_2 mapping や $T_1\rho$ mapping, dGEMRIC などの生化学的な情報が有用である。これからの高齢化社会において、関節軟骨を非侵襲的に評価する MRI の役割はますます大きくなる。

文 献

- 1) Poole AR. Cartilage in health and disease. In : Arthritis and Allied Condition : A Textbook of Rheumatology, Koopman WJ, ed. Baltimore : Williams & Wilkins, 1997 ; 255-308
- 2) Pearle AD, Warren RF, Rodeo SA : Basic science of articular cartilage. Clin Sports Med 2005 ; 24 : 1-12
- 3) Mankin HJ, Brandt KD. Biochemistry and metabolism of articular cartilage in osteoarthritis. In : Osteoarthritis-Diagnosis and Medical/Surgical Management, Moskowitz, Howell, Goldberg, Mankin, eds. Philadelphia : WB Saunders, 1992 ; 109-154
- 4) 木村友厚 : 関節軟骨の構造と軟骨破壊の基礎. 関節外科 2006 ; 25 : 10-14
- 5) Maffulli N, Binfield P, King J : Articular cartilage lesions in the symptomatic anterior cruciate ligament-deficient knee. Arthroscopy. 2003 ; 19 : 685-690
- 6) Nomura E, Inoue M, Kurimura M : Chondral and osteochondral injuries associated with acute patellar dislocation. Arthroscopy 2003 ; 19 : 717-721
- 7) Hunter DJ, Zhang YQ, Niu JB, et al. : The association of meniscal pathologic changes with cartilage loss in symptomatic knee osteoarthritis. Arthritis Rheum 2006 ; 54 : 795-801
- 8) Outerbridge RE : The etiology of chondromalacia patellae. J Bone Joint Surg Br 1961 ; 43B :

- 752-757
- 9) Noyes FR, Stabler CL : A system for grading articular cartilage lesions at arthroscopy. *Am J Sports Med* 1989 ; 17 : 505-513
 - 10) Mori R, Ochi M, Sakai Y, et al. : Clinical significance of magnetic resonance imaging (MRI) for focal chondral lesions. *Magn Reson Imaging* 1999 ; 17 : 1135-1140
 - 11) Vaz CE, Camargo OP, Santana PJ, et al. : Accuracy of magnetic resonance in identifying traumatic intraarticular knee lesions. *Clinics* 2005 ; 60 : 445-450
 - 12) Yoshioka H, Stevens K, Genovese M : Articular cartilage of knee : normal patterns at MR imaging that mimic disease in healthy subjects and patients with osteoarthritis. *Radiology* 2004 ; 231 : 31-38
 - 13) Jungius KP, Schmid MR, Zanetti M, et al. : Cartilaginous defects of the femorotibial joint : accuracy of coronal short inversion time inversion-recovery MR sequence. *Radiology* 2006 ; 240 : 482-488
 - 14) Potter HG, Foo LF : Magnetic resonance imaging of articular cartilage : trauma, degeneration, and repair. *Am J Sports Med* 2006 ; 34 : 661-677
 - 15) Eckstein F, Cicuttini F, Raynauld JP, et al. : Magnetic resonance imaging (MRI) of articular cartilage in knee osteoarthritis (OA) : morphological assessment. *Osteoarthritis Cartilage* 2006 ; 14 : 46-75
 - 16) Mosher TJ : Musculoskeletal imaging at 3T : current techniques and future applications. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 2006 ; 14 : 63-76
 - 17) Ramnath RR : 3T MR imaging of the musculoskeletal system (part II) : clinical applications. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 2006 ; 14 : 41-62
 - 18) Link TM, Sell CA, Masi JN, et al. : 3.0 vs 1.5T MRI in the detection of focal cartilage pathology-ROC analysis in an experimental model. *Osteoarthritis Cartilage* 2006 ; 14 : 63-70
 - 19) Zuo J, Li X, Banerjee S : Parallel imaging of knee cartilage at 3 Tesla. *J Magn Reson Imaging* 2007 ; 26 : 1001-1009
 - 20) Torshizy H, Gold GE, Chung CB. *Cartilage A. In : Radiologic Perspective : Magnetic Resonance Imaging of Articular Cartilage-Conventional and Novel Imaging Techniques*. Pedwitz RA, Chung CB, Resnick D, eds. New York : Springer, 2008 ; 45-61
 - 21) Angel MJ, Sganlionne NA, Sharon S : *Orthopedic Perspective : Clinical Application of Magnetic Resonance Imaging of Articular Cartilage Pathology*. Pedwitz RA, Chung CB, Resnick D, eds. New York : Springer, 2008 ; 62-82
 - 22) 青木隆敏, 興梠征典 : 骨軟部領域における3T MRI装置の臨床応用—1.5T MRIとの比較—. *日獨医報* 2006 ; 51 : 617-624
 - 23) Gold GE, Han E, Stainsby J, et al. : Musculoskeletal MRI at 3.0T : relaxation time and image contrast. *AJR Am J Roentgenol* 2004 ; 183 : 343-351
 - 24) Disler DG, McCauley TR, Kelman CG, et al. : Fat-suppressed three-dimensional spoiled gradient-echo MR imaging of hyaline cartilage defects in the knee : comparison with standard MR imaging and arthroscopy. *AJR Am J Roentgenol* 1996 ; 167 : 127-132
 - 25) Winalski CS, Gupta KB : Magnetic resonance imaging of focal articular cartilage lesions. *Top Magn Reson Imaging* 2003 ; 14 : 131-144
 - 26) Imhof H, Nöbauer-Huhmann IM, Krestan C, et al. : MRI of the cartilage. *Eur Radiol* 2002 ; 12 : 2781-2793
 - 27) Bredella MA, Tirman PF, Peterfy CG, et al. : Accuracy of T₂-weighted fast spin-echo MR imaging with fat saturation in detecting cartilage defects in the knee : comparison with arthroscopy in 130 patients. *AJR Am J Roentgenol* 1999 ; 172 : 1073-1080
 - 28) Suh JS, Lee SH, Jeong EK, et al. : Magnetic resonance imaging of articular cartilage. *Eur Radiol* 2001 ; 11 : 2015-2025
 - 29) Mohr A, Priebe M, Taouli B, et al. : Selective water excitation for faster MR imaging of articular cartilage defects : initial clinical results. *Eur Radiol* 2003 ; 13 : 686-689
 - 30) Mosher TJ, Dardzinski BJ : Cartilage MRI T₂ relaxation time mapping : overview and applications. *Semin Musculoskelet Radiol* 2004 ; 8 : 355-368
 - 31) Dunn TC, Lu Y, Jin H, et al. : T₂ relaxation time

- of cartilage at MR imaging : comparison with severity of knee osteoarthritis. *Radiology* 2004 ; 232 : 592-598
- 32) White LM, Sussman MS, Hurtig M, et al. : Cartilage T₂ assessment : differentiation of normal hyaline cartilage and reparative tissue after arthroscopic cartilage repair in equine subjects. *Radiology* 2006 ; 241 : 407-414
- 33) Li X, Benjamin Ma C, Link TM, et al. : *In vivo* T (1rho) and T (2) mapping of articular cartilage in osteoarthritis of the knee using 3T MRI. *Osteoarthritis Cartilage* 2007 ; 15 : 789-797
- 34) Mosher TJ, Smith H, Dardzinski BJ, et al. : MR imaging and T₂ mapping of femoral cartilage : *in vivo* determination of the magic angle effect. *AJR Am J Roentgenol* 2001 ; 177 : 665-669
- 35) Mamisch TC, Menzel MI, Welsch GH, Bittersohl B, Salomonowitz E, Szomolanyi P, Kordelle J, Marlovits S, Trattnig S : Steady-state diffusion imaging for MR in-vivo evaluation of reparative cartilage after matrix-associated autologous chondrocyte transplantation at 3 tesla-preliminary results. *Eur J Radiol* 2008 ; 65 : 72-79
- 36) Watanabe A, Wada Y, Obata T, et al. : Delayed gadolinium-enhanced MR to determine glycosaminoglycan concentration in reparative cartilage after autologous chondrocyte implantation : preliminary results. *Radiology* 2006 ; 239 : 201-208
- 37) McKenzie CA, Williams A, Prasad PV, et al. : Three-dimensional delayed gadolinium-enhanced MRI of cartilage (dGEMRIC) at 1.5T and 3.0T. *J Magn Reson Imaging* 2006 ; 24 : 928-933
- 38) Li W, Scheidegger R, Wu Y, Vu A, Prasad PV : Accuracy of T₁ measurement with 3-D Look-Locker technique for dGEMRIC. *J Magn Reson Imaging* 2008 ; 27 : 678-682
- 39) Trattnig S, Marlovits S, Gebetsroither S, et al. : Three-dimensional delayed gadolinium-enhanced MRI of cartilage (dGEMRIC) for *in vivo* evaluation of reparative cartilage after matrix-associated autologous chondrocyte transplantation at 3.0T : preliminary results. *J Magn Reson Imaging* 2007 ; 26 : 974-982
- 40) Li X, Han ET, Ma CB, et al. : *In vivo* 3T spiral imaging based multi-slice T (1rho) mapping of knee cartilage in osteoarthritis. *Magn Reson Med* 2005 ; 54 : 929-936
- 41) Pakin SK, Xu J, Schweitzer ME, et al. : Rapid 3D-T1rho mapping of the knee joint at 3.0T with parallel imaging. *Magn Reson Med* 2006 ; 56 : 563-571
- 42) Muir P, McCarthy J, Radtke CL, et al. : Role of endochondral ossification of articular cartilage and functional adaptation of the subchondral plate in the development of fatigue microcracking of joints. *Bone* 2006 ; 38 : 342-349
- 43) Donohue JM, Buss D, Oegema TR, et al. : The effects of indirect blunt trauma on adult canine articular cartilage. *J Bone Joint Surg Am* 1983 ; 65 : 948-957
- 44) Gatehouse PD, Thomas RW, Robson MD, et al. : Magnetic resonance imaging of the knee with ultrashort TE pulse sequences. *Magn Reson Imaging* 2004 ; 22 : 1061-1067
- 45) Gold GE, Fuller SE, Hargreaves BA, et al. : Driven equilibrium magnetic resonance imaging of articular cartilage : initial clinical experience. *J Magn Reson Imaging* 2005 ; 21 : 476-481
- 46) Fukuda K, Dan H, Takayama M, et al. : Hyaluronic acid increases proteoglycan synthesis in bovine articular cartilage in the presence of interleukin-1. *J Pharmacol Exp Ther* 1996 ; 277 : 1672-1675
- 47) Gill TJ : The treatment of articular cartilage defects using microfracture and debridement. *Am J Knee Surg* 2000 ; 13 : 33-40
- 48) Matsusue Y, Yamamuro T, Hama H. Arthroscopic multiple osteochondral transplantation to the chondral defect in the knee associated with anterior cruciate ligament disruption. *Arthroscopy* 1993 ; 9 : 318-321
- 49) Brittberg M, Lindahl A, Nilsson A, et al. : Treatment of deep cartilage defects in the knee with autologous chondrocyte transplantation. *N Engl J Med* 1994 ; 331 : 889-895
- 50) 吉矢晋一, 八木正義, 柴沼均, 他 : marrow stimulation technique. *関節外科* 2006 ; 25 : 41-46
- 51) 松永吉隆, 中川泰彰 : mosaicplasty による軟骨修復の臨床. *関節外科* 2006 ; 25 : 41-46
- 52) 中川晃一, 渡辺淳也, 和田佑一 : 単層培養を用

- いた自家培養軟骨移植. 関節外科 2006 ; 25 : 47-56
- 53) Choi YS, Potter HG, Chun TJ : MR imaging of cartilage repair in the knee and ankle. *Radio-graphics* 2008 ; 28 : 1043-1059
- 54) Welsch GH, Mamisch TC, Domayer SE, et al. : Cartilage T₂ assessment at 3-T MR imaging : *in vivo* differentiation of normal hyaline cartilage from reparative tissue after two cartilage repair procedures—initial experience. *Radiology* 2008 ; 247 : 154-161
- 55) 黒田良祐, 久保晴司, 黒坂昌弘 : 筋由来幹細胞を用いた関節軟骨修復. 関節外科 2006 ; 25 : 152-155

Magnetic Resonance Imaging of Articular Cartilage at 3 Tesla

Masahiko FUJII¹, Yuki IWAMA¹, Nobukazu AOYAMA²,
Hideaki KAWAMITSU², Ryosuke KURODA³, Kazuro SUGIMURA⁴

¹Department and ²Division of Radiology, Kobe University Hospital
Departments of ³Orthopaedic Surgery and ⁴Radiology, Kobe University Graduate School of Medicine
7-5-2 Kusunoki-cho, Chuo-ku, Kobe 650-0017

Smooth motor function can be maintained by articular cartilage. When the cartilage is injured, edema occurs, and as degeneration progresses, the cartilage thins and the cartilage matrix decreases. Magnetic resonance (MR) imaging allows noninvasive evaluation of these changes. Fat suppression proton density- and T₂-weighted imaging are useful in the morphologic evaluation of articular cartilage. High resolution, 3-tesla MR imaging provides more detailed evaluation. Biochemical information from T₂ mapping, T₁ρ mapping, and delayed gadolinium-enhanced MR imaging of cartilage (dGEMRIC) is useful for early diagnosis of cartilage injury and evaluation of cartilage repair. The role of MR imaging in evaluating articular cartilage will increase in the future aging society.