

膝関節硝子軟骨のMR撮像 —3D-fat-saturation FLASH法による正常例 および変形性膝関節症症例の検討—

佐藤克彦

杏林大学医学部放射線医学教室

緒言

関節硝子軟骨の損傷は円滑な関節運動の障害を来すだけでなく、疼痛発生のメカニズムにも関与しており¹⁾、関節硝子軟骨の損傷の程度を非侵襲的な画像診断を用いて評価することは、治療法の選択、手術適応など治療計画に際し有用である。単純X線像による関節硝子軟骨の評価は、関節裂隙の狭小化という間接的所見により評価するため、関節硝子軟骨の欠損を伴わない変性初期や限局性の関節硝子軟骨欠損では、正確な判定が困難である²⁾。関節硝子軟骨のMR撮像による診断は現在までに多くの研究者により検討され、spin-echo (SE) 法、gradient-echo (GE) 法、magnetization transfer contrast (MTC) 法、chemical shift selective (CHESS) 法などさまざまな方法が報告されている。しかしいずれの撮像法にも何等かの問題点があり、硝子軟骨を明瞭には描出することができない。

SE法 T₁強調像を用いた撮像では軟骨最外層が低信号となるため、軟骨表層の微細病変の描出は困難であり、また関節液の貯溜が認められる場合には、軟骨外層を確認できない^{3)~7)}。

GE法を用いた撮像においては、Three-dimensional fast low-angle shot (3D-FLASH) 法では関節液の信号は抑制できるが、骨髓内の脂肪信号は抑制できず、軟骨・骨髓間の境界が不明瞭となり⁸⁾、Three-dimensional fast imaging with steady precession (3D-FISP) 法では軟骨を高信号として描出できるが、関節液と骨髓内の脂肪の高信号を抑制できず硝子軟骨を明瞭に捉えることができない⁹⁾。

また、脂肪抑制撮像であるCHESS法とMTC法は、硝子軟骨が高信号となるが、関節液も高信号となり両者を区別できないことがあるなどの問題点がある^{9),10)}。

そこで、関節液と骨髓内脂肪の信号をともに抑制し、軟骨を高信号として描出できる3D-fat-saturation FLASH法に着目し、硝子軟骨描出のための最適撮像条件を検討し、加えて変形性膝関節症症例を用いた臨床的有用性の評価を試みたので、ここに報告する。

対象

基礎的検討には、ボランティア10例(男性7例、女性3例、平均年齢25.6歳)と30%ホルマリン固定し、5%ホルマリン—3%フェノ

ール溶液中で保存した下肢検体 2 例を用いた。臨床的検討には、40 歳以上の臨床的に変形性膝関節症と診断された患者 39 例（男性 11 例、女性 28 例 平均年齢 65.5 歳）を対象とした。

方 法

使用した装置は Siemens 社製 Magnetom Vision で、撮像には transmit-and-receive extremity coil を用いた。撮像シーケンスは、CHES 法による脂肪抑制を併用した 3D-FLASH 法であり本稿では 3D-fat-saturation-FLASH (以下 FSF) 法と称する。基礎的検討として、ボランティア 10 例を repetition time (TR) 50 の条件のもとで echo time (TE) を 5・10・15 ms, flip Angle (FA) を 20・40・60 度と変化させて撮像し、それぞれの組合せについて検討を行い最適撮像条件を求めた。slice thickness 2 mm, FOV 8 cm, matrix 160×256 とした。撮像は横断面で行い、膝蓋骨硝子軟骨、膝蓋骨骨髄、生理食塩水に 1 pixel (3×3 matrix), の関心領域 (ROI) を設定しその部位での平均信号強度の測定を TE を 5・10・15 ms, FA を 20, 40, 60 度と変化させてそれぞれの組合せについて行った。

それぞれの組合せにおいて膝蓋骨硝子軟骨と生理食塩水の平均信号強度の差を求めバックグラウンドの標準偏差 (直径 1 cm の正円形の ROI を使用) で割ることによって contrast-to-noise ratio (CNR) を算出し、同様に膝蓋骨硝子軟骨と膝蓋骨骨髄の CNR も算出した。そして求められたそれぞれの CNR を基に最適撮像条件を求めた。続いて、この求められた最適撮像条件のもとでフェノール加ホルマリン溶液にて保存した下肢検体を用い、横断面を撮像して肉眼解剖所見との比較検討を行った。検体はマイナス 30 度にて凍結し、電動鋼鉄製のこぎりを使用し 1 cm 厚スライスを作成して観察し

た。

臨床的評価では、変形性膝関節症 (OA) 患者 39 例 (男性 11 例, 女性 28 例) を対象に、基礎的検討で得た最適条件を使用し矢状断 MR 撮像 (撮像時間 5 分) を行ってその所見を検討した。またこれを仰位単純 X 線像と比較した。単純 X 線像から関節腔に異常を認めないもの、関節腔軽度狭小化を認めるもの、関節高度狭小化 (2 mm 以下) を認めるもの、の 3 群に分類して、それぞれにつき MR 所見を調べた。観察は、femorotibial joint の medial compartment と lateral compartment の 2 ヲ所を選んで行った。

結 果

ボランティアを用いた基礎的評価を Table 1 に示す。膝蓋骨硝子軟骨と生理食塩水の CNR と膝蓋骨硝子軟骨と膝蓋骨骨髄の CNR は、TE が 10 ms 以下、FA が 40 度以下のときに高値を示し、硝子軟骨を鮮明に描出する傾向が認められたが、この 2 つの条件にて撮像した画像を二人の放射線科医にて比較検討を行い、

Table 1. Contrast-to-Noise Ratio for the 3 D-Fat-Saturation FLASH

Sequence		Contrast-to-Noise Ratio	
Echo Time (ms)	Flip Angle (degree)	Cartilage vs Fluid	Cartilage vs Bone Marrow
5	20	17.5±5.5	32.0± 9.6
5	40	23.1±3.6	24.9± 5.9
5	60	20.2±1.9	18.1± 4.3
10	20	12.7±5.0	34.1±10.5
10	40	20.7±4.3	31.3± 5.0
10	60	14.4±4.3	21.8± 3.8
15	20	7.4±3.2	26.7± 7.8
15	40	14.5±4.1	21.5± 6.1
15	60	11.7±2.9	15.4± 3.5

1996年3月12日受理 1996年5月8日改訂

別刷請求先 〒181 東京都三鷹市新川 6-20-2 杏林大学医学部放射線医学教室 佐藤克彦

硝子軟骨が視覚的により鮮明に描出されている TE 10 ms, FA 40 度を撮像条件と決定した。

次にこの条件を用いて撮像した下肢標本の MR 像と肉眼所見との比較を行った。正常膝蓋骨硝子軟骨の MR 像は、検体標本の硝子軟骨の肉眼所見とよく対応しており (Fig. 1), 膝蓋骨硝子軟骨の欠損についても MR 画像所見および肉眼所見は極めてよく一致した。(Fig. 2)

39 例の OA 症例で見られた MR 所見は, Table 2, 3 のように分類された。正常例 (Fig. 3) が medial compartment で 8 例, lateral com-

partment で 15 例, 軟骨層は保たれているが信号強度が低下しているもの (Fig. 4) が, medial compartment で 1 例, lateral compartment で 7 例, 軟骨の菲薄化 (Fig. 5) が, medial compartment で 11 例, lateral compartment で 7 例, 軟骨の部分欠損 (Fig. 6) が medial compartment で 4 例 lateral compartment で 8 例, 軟骨の広範な欠損 (Fig. 7) が medial compartment で 15 例, lateral compartment で 2 例であった。

MR 画像において病変を認めた症例を単純 X 線像所見と比較した検討の結果を Table 4,

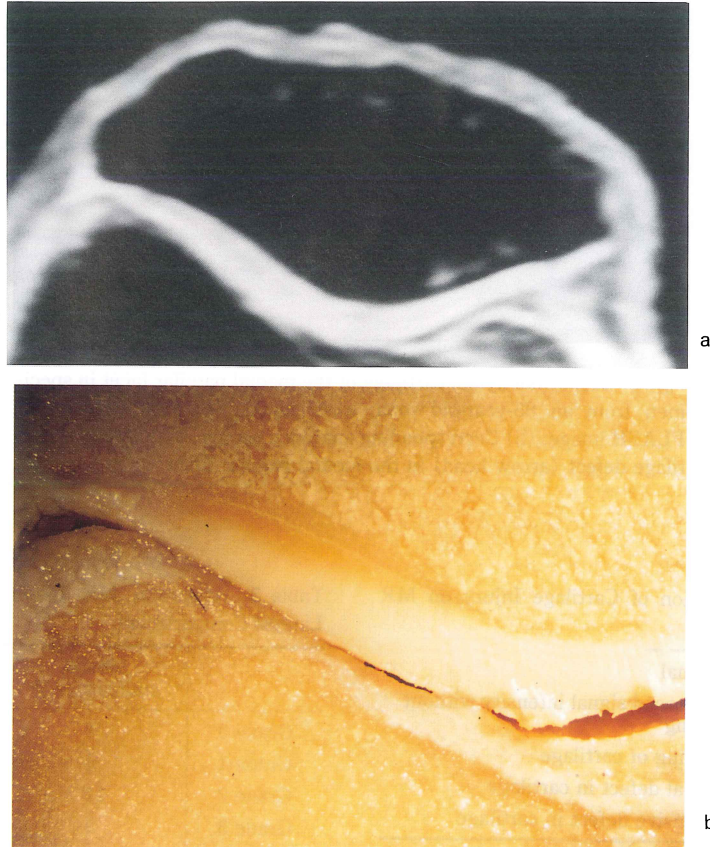


Fig. 1. Normal hyalin cartilage of the medial patellar facet in specimen from an 85-year-old woman, axial plane. (a) 3D-fat-saturation FLASH image (TR=50, TE: 10, with flip angle of 40°). (b) Corresponding anatomic section.

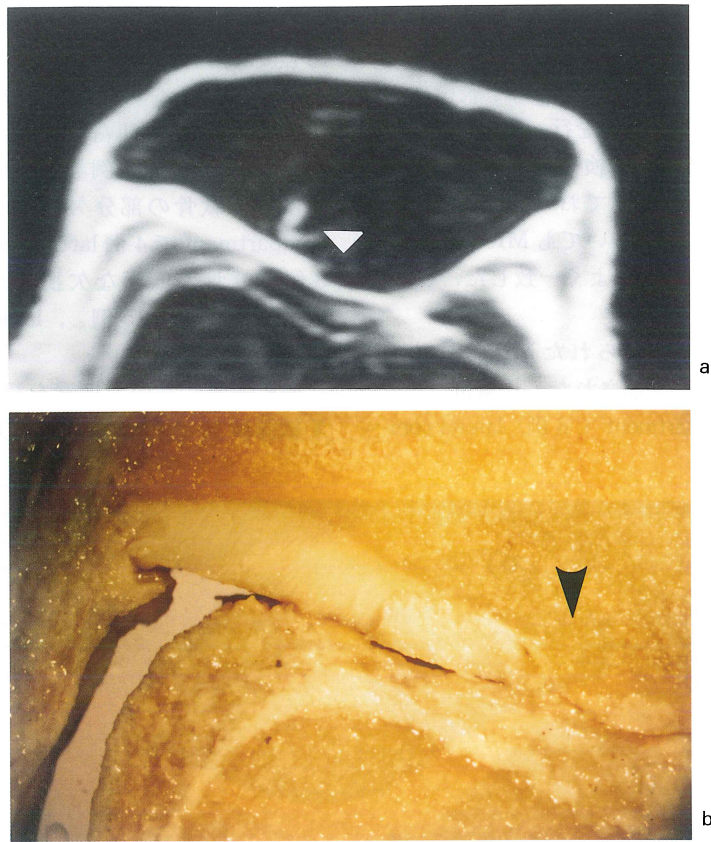


Fig. 2. Abnormal hyalin cartilage of the medial patellar facet in specimen from an 85-year-old man, axial plane. (a) 3D-fat-saturation FLASH image. (b) Corresponding anatomic section Note the focal cartilage defect (arrow head) in the medial patellar facet.

Table 2. Classification of Cartilage Injury on MR Findings

Grade 0	Normal
Grade 1	Decreased signal intensity without thinning
Grade 2	Thinning of cartilage
Grade 3	Partial defect in cartilage
Grade 4	Extensive defect in cartilage

Table 3. Abnormal MR Findings in Medial and Lateral Compartment

	Medial compartment	Lateral compartment
Grade 0	8	15
Grade 1	1	7
Grade 2	11	7
Grade 3	4	8
Grade 4	15	2

5に示す. medial compartment では, 39 例中 31 例に MR 画像で軟骨損傷が認められたが, 単純 X 線像で関節腔に狭小化を認めない症例で MR 像でのみ異常を指摘できる症例は 13 例で, MR 画像上で軟骨層は正常に保たれているが信号強度が低下しているものが 1 例, 軟骨

の菲薄化が 2 例, 軟骨の部分欠損が 2 例, 軟骨の広範な欠損が 8 例あった. lateral compart-



Fig. 3. 3D-fat-saturation FLASH image of normal cartilage from an 40-year-old woman, sagittal plane. The cartilage is demonstrated as a linear structure of high signal intensity.

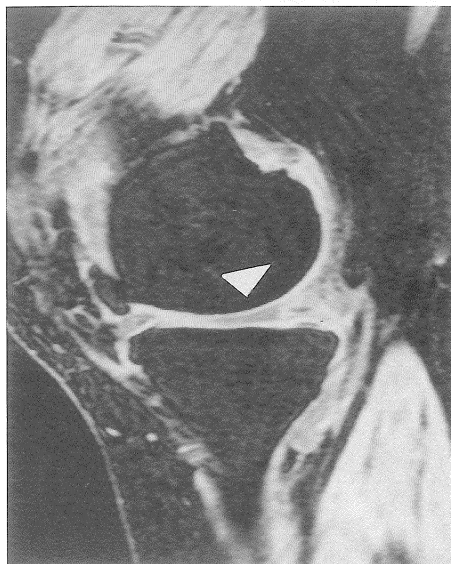


Fig. 5. 3D-fat-saturation FLASH image of abnormal cartilage from an 51-year-old woman, sagittal plane. Focal thinning of the cartilage is noted. (arrow head)

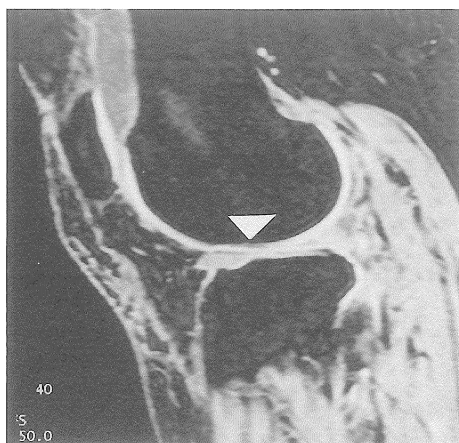


Fig. 4. 3D-fat-saturation FLASH image of abnormal cartilage from an 57-year-old man, sagittal plane. Focal area of decreased signal intensity without thinning of the cartilage (arrow head) is noted.

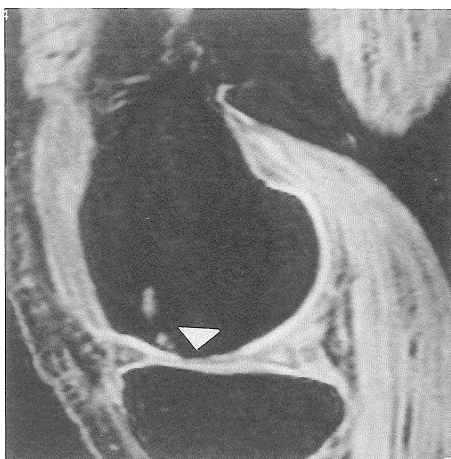


Fig. 6. 3D-fat-saturation FLASH image of abnormal cartilage from an 76-year-old man, sagittal plane. Focal cartilage defect is clearly demonstrated. (arrow head)



Fig. 7. 3D-fat-saturation FLASH image of abnormal cartilage from an 76-year-old man, sagittal plane. An area of extensive cartilage defect is demonstrated. (arrow head)

ment では、39 例中 24 例に MR 画像で軟骨損傷が認められたが、単純 X 線像で関節腔に狭小化を認めず MR 画像でのみ異常を指摘できる症例が 19 例で、MR 画像上軟骨層は正常に保たれているが信号強度が低下しているものが 6 例、軟骨の菲薄化が 6 例、軟骨の部分欠損が 5 例、軟骨の広範な欠損が 2 例であった。

単純 X 線像では膝関節腔に狭小化を認めないが、FSF 法による MR 撮像で軟骨の広範な欠損が見られた症例を Fig. 8 に示す。単純 X 線像で関節腔軽度狭小化のみを示す症例については、MR 画像上で軟骨層は正常に保たれているが、信号強度が低下しているものは、lateral compartment でのみ 1 例認められ、medial compartment では、軟骨の菲薄化 9 例、軟骨の部分欠損 2 例、軟骨の広範な欠損 4 例に細分できた。また lateral compartment では、信号強度が低下しているもの 1 例、軟骨の菲薄化 1 例、軟骨の部分欠損 3 例に細分できた。

単純 X 線像で関節腔高度狭小化の症例は medial compartment においてのみ 3 例認めら

れ、MR 像で軟骨の広範な欠損が観察された。

内側膝関節腔の高度狭小化を単純 X 線像で認め、FSF 法による MR 撮像において軟骨の広範な欠損が見られた症例を Fig. 9 に示す。

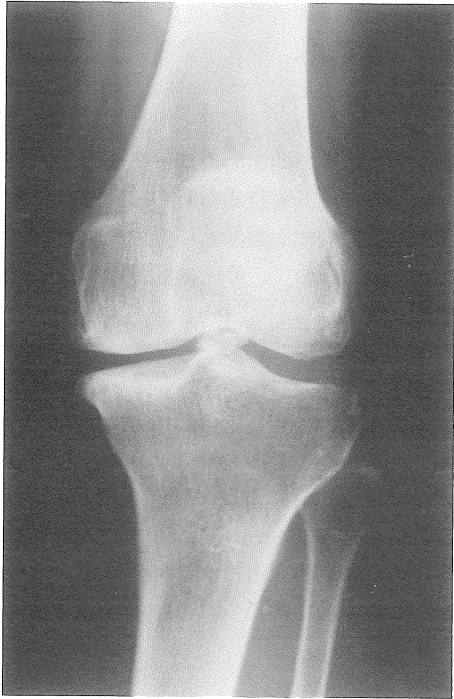
以上のように、medial compartment では高度の軟骨損傷を呈する症例が多く、lateral compartment では軽度の軟骨損傷を呈する症例が多く見られた。MR 画像は、medial compartment においては、単純 X 線像正常群の 21 例中 13 例 (61.9%) に、lateral compartment においては、単純 X 線像正常群の 34 例中 19 例 (55.9%) に軟骨の異常所見を描出し、また単純 X 線像にて関節腔が狭小化している異常群においても軟骨損傷をより詳細な形態的变化として描出した。

Table 4. Medial Compartment Cartilage on MR and Radiographic Images (n=39)

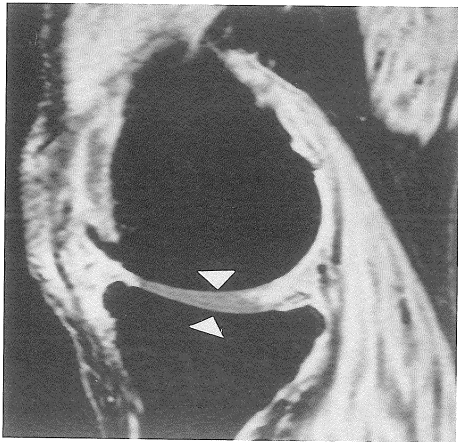
MR grading	Joint Space on Radiographs		
	Normal	Mild narrowing	Severe narrowing
Grade 0	8	0	0
Grade 1	1	0	0
Grade 2	2	9	0
Grade 3	2	2	0
Grade 4	8	4	3
Total	21	15	3

Table 5. Lateral Compartment Cartilage on MR and Radiographic Images

MR grading	Joint Space on Radiographs		
	Normal	Mild narrowing	Severe narrowing
Grade 0	15	0	0
Grade 1	6	1	0
Grade 2	6	1	0
Grade 3	5	3	0
Grade 4	2	0	0
Total	34	5	0

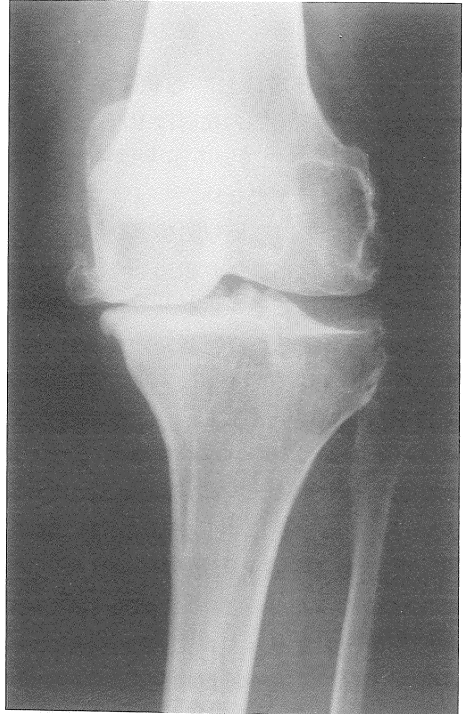


a

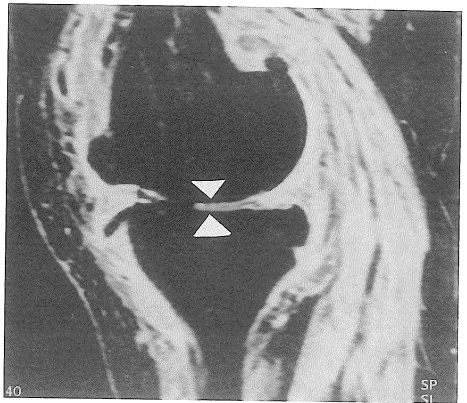


b

Fig. 8. 67-year-old woman. (a) Radiography in anteroposterior projection shows normally maintained joint spaces in medial and lateral compartments. (b) 3D-fat-saturation FLASH image in sagittal plane shows severe cartilage defect in the medial femoral condyle and tibial plateau. (arrow head)



a



b

Fig. 9. 69-year-old woman. (a) Radiography in anteroposterior projection shows severely narrowing of joint space in medial compartment in sagittal plane. (b) 3D-fat-saturation FLASH image in sagittal plane shows severe cartilage defect in the medial femoral condyle and tibial plateau. (arrow head) Moderate amount of joint effusion present in this case is suppressed and creates no high signal intensity-one of the advantages of this imaging technique.

考 察

下肢検体や若年者におけるFSF法を用いた膝関節硝子軟骨描出能の検討はRecht等, Disler等により報告されているが^{11)~13)}, OA症例についての報告はまだない。

OAでは軟骨欠損により関節運動障害を起し, また, 軟骨欠損により露出した海綿骨に分布する神経終末に刺激を生じたり, 運動障害のため関節を支持する組織に異常なねじれや張力が生じ疼痛が発生すると考えられている¹⁾. 本研究はFSF法を用いることで, 従来の方法では描出できなかった微細な軟骨損傷を診断し早期のOA治療に役立てうる可能性につき検討した. OAを対象とした臨床的検討におけるFSF法と単純X線像の比較の結果, 単純X線像で関節腔の狭小化を認めずMR画像のみで軟骨の異常所見が見られた症例はmedial compartmentに比べlateral compartmentで多く見られ, またlateral compartmentの方が, 軽度の軟骨損傷を呈する症例が多いという結果が得られた。

これは, OAではmedial compartmentが力学的に破壊されるのに対してlateral compartmentにおける軟骨破壊は, 力学的病因だけではなく, 軟骨マトリックス成分の生合成異常や種々の蛋白分解酵素やインヒビターの産生異常, 細胞代謝調節因子の産生および反応性の変化などの生化学的病因がより関与しているためと^{2), 14)}単純X線像では荷重負荷の有無により関節腔の距離が変化するためと考えられる²⁾.

FSF法によるMR撮像では, 関節腔の距離に関係なく正常関節硝子軟骨は明瞭な高信号として描出でき, 軟骨の異常はこの高信号の部分的消失として描出される。

OAの軟骨損傷の評価として単純X線像では描出できない早期の変化を本法により捉えることができる。また関節液貯溜を来すことの多いOAでは, 骨髓内脂肪と関節液を抑制し,

硝子軟骨のみを高信号帯として描出する本法では軟骨・関節液間, 軟骨・骨髓間の境界を明瞭に区別することができるのも大きな利点である。(Fig. 9) X線診断では, 関節腔の狭小化以外に骨棘形成や関節面の骨硬化像など, その他の間接的な所見も認められるが, MR撮像では関節軟骨の変化を画像上に直接所見として描出できる点において, 診断精度の明らかな向上が期待できる。

FSF法は3次元撮像し, さらに短いTE時間の使用によりS/N比がよくなり分解能が向上していること, 骨髓内の脂肪と関節腔内の液体成分からの高信号の抑制により硝子軟骨の信号が相対的に高くなること, SE法に比べchemicalshift artifactや血流アーチファクトが少ないことなどの理由により硝子軟骨が鮮明に描出できるものと考えられる。

総 括

FSF法によるMR撮像は, 硝子軟骨を周囲の組織より高信号に描出し早期のOAの軟骨損傷の評価, 早期治療に有用な情報を提供できる可能性があると考えられた。撮像時間の一層の短縮, 関節鏡や手術標本所見との詳細な対比検討を経てその臨床的有用性が確立されていくものと思われる。

謝 辞

稿を終えるにあたり, 本研究の御指導をいただきました杏林大学医学部放射線医学教室蜂屋順一教授, 御協力いただきました同教室の諸先生と放射線技師諸氏, また御協力と貴重な御助言をいただきました整形外科教室石井良章教授, 林光俊, 宮崎裕之, 上村民子の諸先生・第一解剖学教室松村讓児教授に深謝致します。

文 献

- 1) 平澤泰介, 時岡孝夫 : 疼痛の発生機序. 関節外科, 11 : 65-74, 1992.
- 2) Chan PW, Lang P, Stevens MP, et al. : Osteoarthritis of the Knee : Comparison of Radiography, CT, and MR Imaging to Assess Extent and Severity. AJR, 157 : 799-806, 1991.
- 3) Hayes CW, Sawyer RW, Conway WF : Patellar Cartilage Lesions : In Vitro Detection and Staging with MR Imaging and Pathologic Correlation. Radiology, 176 : 479-483, 1990.
- 4) Hayes CW, Conway WF : Evaluation of Articular Cartilage : Radiographic and Cross-sectional Imaging Techniques. Radiographics, 12 : 409-428, 1992.
- 5) Lehner KB, Rechl HP, Gmeinwieser JK, et al. : Structure, Function, and Degeneration of Bovine Hyaline Cartilage : Assessment with MR Imaging in Vitro. Radiology, 170 : 495-499, 1989.
- 6) Modl JM, Sether LA, Haughton VM, Kneel and JB : Articular Cartilage : Correlation of Histologic Zones with Signal Intensity at MR Imaging. Radiology, 181 : 853-855, 1991.
- 7) Chandnani VP, Ho C, Chu P, Trudell D, Resnick D : Knee Hyaline Evaluated with MR Imaging : A Cadaveric Study Involving Multiple Imaging Sequences and Intraarticular Injection of Gadolinium and Saline Solution. Radiology, 178 : 557-561, 1991.
- 8) Reiser MF, Bongartz G, Erlemann R, et al. : Magnetic resonance in cartilaginous lesions of the knee joint with three-dimensional gradient-echo imaging. Skeletal Radiol, 17 : 465-471, 1988.
- 9) Tyrrell RL, Gluckert K, Pathria M, Modic MT : Fast Three-dimensional MR Imaging of the Knee : Comparison with Arthroscopy. Radiology, 166 : 865-872, 1988.
- 10) Wolff SD, Chesnick S, Frank JA, Lim KO, Balaban RS : Magnetization Transfer Contrast MR Imaging of the knee. Radiology, 179 : 623-628, 1991.
- 11) Recht MP, Kramer J, Marcelis S, Pathria MN, et al. : Abnormalities of Articular Cartilage in the knee : Analysis of Available MR Techniques. Radiology, 137 : 473-478, 1993.
- 12) Recht MP, Piraino DW, Paletta GA, Schils JP, Belhobek GH : Accuracy of Fat-suppressed Three-dimensional Spoiled Gradient-Echo FLASH MR Imaging in the Detection of Patellofemoral Articular Cartilage Abnormalities. Radiology, 198 : 209-212, 1996.
- 13) Disler DG, Peters TL, Ratner LM, et al. : Fat-Suppressed Spoiled Gradient-Echo Imaging of Knee Hyaline Cartilage : Technique Optimization and Comparison with Conventional MR Imaging. AJR, 163 : 887-892, 1994.
- 14) 吉原愛雄, 新名正由 : 変形性膝関節症の病因. 関節外科. 11 : 10-19, 1992.

**Magnetic Resonance Imaging of Articular Cartilage in the Knee
—Evaluation of 3D-Fat-Saturation FLASH Sequence in Normal Volunteer
and Patient with Osteoarthritis—**

Katsuhiko SATO

*Department of Radiology, Kyorin University School of Medicine
6-20-2 Sinkawa, Mitaka-si. Tokyo 181*

MR imaging of normal and abnormal articular cartilage of the knee was performed using 3D-fat-saturation FLASH sequence (FSF). Contrast-to-noise ratios between the cartilage and fluid, and cartilage and bone marrow were evaluated respectively in 10 normal volunteers. The optimal imaging parameters were determined as flip angle of 40° and TE of 10 ms.

Good correlation was noted between MR images and macroscopic appearance of the hyaline cartilages in the cadaver knees. Comparison of MR and radiographic findings was made in 39 cases of osteoarthritis.

MR was significantly more sensitive than radiography in detecting cartilage abnormalities. In patient with radiographically normal joint spaces, cartilage abnormality was detected by MRI in the medial compartment of 13 cases and the lateral compartment of 19 cases.

Signal intensity of joint effusion was sufficiently suppressed and did not hamper evaluation of the cartilages. FSF method was considered as a valuable imaging technique in the evaluation of cartilage abnormalities of the knee.