

骨関節疾患の MRI

上谷 雅孝

長崎大学医学部放射線科

はじめに

骨関節疾患の MRI を行う場合、ルーチンの検査以外に、目的とする病変に応じた種々の撮像を追加することが多い。ここでは、骨・骨髓、関節軟骨、滑膜に焦点を絞って、正常解剖に関する基本的知識とルーチンで行われる MR 撮像法についてまとめるとともに、最近注目されている MR 撮像法を紹介し、その臨床応用と限界について解説する。

骨・骨髓

1. 正常骨髓

MRI で描出される骨変化はほとんどが骨髓の変化とよく、正常骨髓のパターンを知っておくことが重要である。骨髓は赤色髄（造血髄）と黄色髄（脂肪髄）に大別され、成人ではそれぞれ約 1/2 を占める。生下時の骨髓はほとんどが赤色髄で、年齢が進むに従って黄色髄に転換（conversion）し、30 歳までには成人の骨髓分布となる。長管骨骨端の化骨核は生後数か月で既に黄色髄に変化しているが、骨端以外では骨幹から遠位骨幹端、次いで近位骨幹端の順に黄色髄に変化する^{1)~4)}。成人で赤色髄が豊富に見られる部位は、脊椎、胸骨、頭蓋骨、肋骨、近位上腕骨、近位大腿骨である^{1)~4)}。

造血髄の破壊や溶血によって造血髄が更に必要になると、黄色髄から赤色髄への変化（re-

conversion）が起こる。この変化は conversion とは逆に、躯幹部が先で末梢の骨髓ほど後に起こる。Reconversion の原因には貧血や種々の骨髓疾患（転移、多発性骨髓腫、骨髓線維症など）がある。健常者でも長管骨骨幹端又は骨端の骨髓に赤色髄の増加が見られ、喫煙者、肥満の人、マラソン選手に多いことが報告されている^{5),6)}。MRI で腫瘍性病変との区別が問題になることがあるので注意が必要である（Fig. 1）。



Fig. 1. Red marrow hyperplasia in the distal femur in an asymptomatic 35-year-old female. T₁-weighted coronal image of the knee (TR/TE=300/15) shows areas of decreased signal intensity indicative of hyperplasia of red marrow.

キーワード MR imaging, bone marrow, articular cartilage, synovium

2. 撮像法と正常 MR 像

スピンエコー (SE) 法又は高速スピンエコー (FSE) 法：ルーチンで使用され、S/N 比の高い画像が得られるが、病変部と正常骨髄とのコントラストは STIR より劣る。黄色髄は脂肪を反映して T₁/T₂ 強調像共に中間信号となる。赤色髄は細胞成分と脂肪成分の割合により異なるが、T₁ 強調像で低信号、T₂ 強調像で低～等信号を示す。FSE 法は多くの施設で T₂ 強調像に用いられているが、脂肪が強い高信号を示すために病変部と正常骨髄のコントラストは SE 法に比べて劣る。後述する脂肪抑制法の併用が有用である。

Short inversion time inversion recovery (STIR) 法：脂肪の信号を抑制するとともに水を強調した画像で、黄色髄は著明な低信号、赤色髄又は骨髄の病変は高信号に描出される。スピンエコー法で明確でない病変を明瞭な高信号として描出するのに適している。

脂肪抑制法：STIR 法では T₁ 時間の短縮した他の組織も抑制されるために、脂肪の選択的信号抑制は得られない。また造影 MRI でエンハンスされた領域を明確にする目的では STIR 法は使用できない。脂肪の信号を選択的に抑制する方法としては主に次の 2 種類の方法がある。

- i) Presaturation pulse 法：脂肪の共鳴周波数に相当する presaturation pulse を与える方法。低磁場の装置では十分な脂肪抑制が得られない。また、手・足、頭蓋-頸椎移行部など不規則な形態で磁場が不均一になりやすい部位では、均一な脂肪抑制を得ることが難しい。
 - ii) Dixon 法：脂肪と水の位相の違いを利用するもので、同位相 (in-phase) と逆位相 (out-of-phase) の 2 種類の画像から脂肪抑制又は水抑制画像を得ることができる。
- Presaturation pulse 法に比べて、低磁場

の装置でも利用でき、磁場の不均一性に影響されないが、撮像時間が長く、二回の撮像の間に動きがあるとアーチファクトが生じるなどの問題もある⁷⁾。

グラディエントエコー (GRE) 法：適切なパラメータを選択することでスピンエコー法の T₁ 又は T₂ 強調像と類似した画像が得られる。海綿骨による磁場の不均一性に敏感なために海綿骨の豊富な部位で信号強度が低下すること、TE の長さによって in-phase 画像と out-of-phase 画像が決定され、赤色髄の信号が変化することを知っておく必要がある (NOTE 参照)。

造影 MRI：造影 MRI における正常骨髄のエンハンス効果は年齢や部位によって異なり、赤色髄の多い部位ほどエンハンス効果が高く、黄色髄ではほとんどエンハンス効果は見られない。腰椎では年齢が若いほどエンハンス効果が高いが、若年者でも 40% を超える信号上昇を認めることは少ない⁸⁾。これに対して、腫瘍、炎症、浮腫性変化などの骨髄病変は正常骨髄に対してエンハンス効果が高いことが多く、脂肪抑制法を併用すると病変部と正常骨髄の高いコントラストが得られる。

NOTE : in-phase と out-of-phase

脂肪と水の共鳴周波数はわずかに異なり、1.5T の磁場強度で TE の長さを変化させると、脂肪と水のプロトンは約 4.4 ms のサイクルで同位相 in-phase と逆位相 out-of-phase (opposed-phase) になる。SE 法ではこの位相の差を 180 度パルスによって解消するが、GRE 法では位相の差が信号に直接影響する。つまり同位相では脂肪と水の信号が加算され、逆位相では水と脂肪の信号を差し引かれる。したがって、水と脂肪が混在している組織は out-of-phase 画像で著明な信号強度の低下が見られる。

正常の赤色髄は水と脂肪を含むため、GRE



Fig. 4. A 56-year-old male with multiple myeloma

A : Bone marrow of the thoracic spine shows diffuse low signal on T1-weighted image (TR/TE=400/14).

B : On STIR sequence (TR/TE/TI=3000/14/160), patchy areas of high signal intensity are demonstrated throughout the thoracic spine, indicating hypercellular marrow.

C, D : After chemotherapy, abnormal signal in the bone marrow is markedly decreased on both T1-weighted (C) and STIR (D) images.

には STIR 又は脂肪抑制 T₂ 強調像を追加することが望ましい (Figs. 3, 4). 赤色髄と腫瘍性病変の区別が問題になる例では out-of-phase 画像が有用である. 造影 MRI は脂肪抑制法と併用することで, エンハンスされる病変を明瞭に描出することができるが, その臨床的意義についてはまだ議論の余地がある.

高速撮像法 (高速 STIR) を用いた全身 MRI によって骨転移の検索を行い, 骨シンチグラムよりも優れた診断能が得られたという報告があるが^{10),11)}, その臨床的意義については今後の検討が必要である.

関節軟骨

1. 正常関節軟骨

関節軟骨は軟骨細胞と軟骨基質からなる硝子軟骨である. 軟骨基質は主にコラーゲン, proteoglycan, および大量の結合水からなる. 組織学的には深部から次の4層に分類される^{12),13)}.

i) Calcified zone: 最も深部の石灰化した軟骨層

ii) Radial zone: 大型の軟骨細胞およびコラーゲン線維が軟骨表面に対して垂直に走向する.

iii) Transitional zone: コラーゲン線維がランダムに配列し, proteoglycan を最も多く含む.

iv) Superficial zone: 軟骨表面に対してコラーゲン線維が平行に配列し, proteoglycan の量が他の層よりも少ない.

Radial zone と transitional zone は proteoglycan が豊富で結合水を多く含み, 軟骨の shock absorber としての柔軟な構造に大きく関与している. また, コラーゲン線維によって形成される密なフレームは, 軟骨の強度を保つとともに proteoglycan を保持しその拡散を防ぐ役割を果たしている.

2. 撮像法と正常 MR 像

SE 法: 関節軟骨は関節液と比べると T₁ 強調像で関節液よりやや高信号, プロトン密度強調像で関節液よりやや低信号, T₂ 強調像で更に低信号の構造として描出される (Fig. 5). 特に高速スピネコー法の T₂ 強調像では MTC 効果のために関節軟骨が強い低信号を示

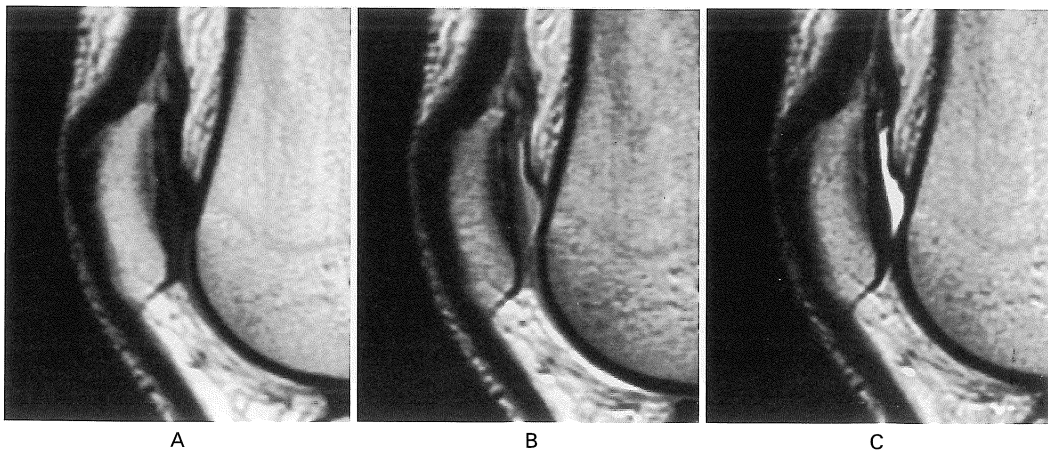


Fig. 5. Normal patellar cartilage on spin echo images

A, B, C: The signal intensity of the cartilage is slightly high on T₁-weighted image (A) (400/14), slightly low on PD-weighted image (B) (3000/15) and low on T₂-weighted image (C) (TR/TE=3000/105), compared with the signal intensity of joint fluid.

し、関節液と軟骨を明瞭に区別できる。軟骨下骨は無信号の構造として描出されるが、chemical shift artifact との区別に注意する必要がある。

GRE 法： T_2^* 強調像では軟骨は関節液よりやや低信号を示すが、関節液と明確に区別できない。GRE 法 T_1 強調像 (SPGR, FLASH など) では、軟骨が関節液よりも高信号に描出され、関節液とのコントラストが良い。3D データ収集により薄いスライスが得られ、任意の再構成断面が得られる利点があり、これに脂肪抑制法を加えた方法が関節軟骨の評価に広く用いられるようになった。

脂肪抑制法：関節軟骨の評価に脂肪抑制法を併用すると、1) chemical shift が軽減され軟骨の厚さの正しい評価ができる、2) 軟骨と骨髄の高いコントラストが得られる、3) ダイナ

ミックレンジが拡大するために軟骨の変性による軽度の信号変化の描出に優れる、4) 脂肪からのアーチファクトが抑制される、などの利点がある。プロトン密度強調像 (Figs. 6, 7) や GRE 法 T_1 強調像 (SPGR, FLASH など) (Fig. 9) と併用することが多い。

Magnetization transfer contrast (MTC 法) : MTC 効果により関節軟骨の信号が低下することを利用して関節軟骨と関節液とのコントラストを得る。関節軟骨の collagen が MTC 効果に関与していると考えられており、軟骨変性の早期診断への応用が期待されている^{14),15)}。MTC 負荷前後で subtraction を行うために、撮像時間が長く、subtraction 前後で動きによるずれが起こりうるという欠点がある。

MR 関節造影：正常軟骨は proteoglycan のために負の電荷を有し、同じく負の電荷を有する造影剤 (Gd-DTPA) を排除すると考えられている。軟骨変性では proteoglycan の減少が起こり、軟骨の変性した部位に造影剤の集積 (しみ込み) をきたす¹⁶⁾。したがって、MR 関節造影では関節表面の変化だけでなく早期の軟骨変性を描出できると考えられているが、臨床



Fig. 6. Effect of fat-suppression for delineation of the cartilage
The cartilage is clearly delineated as high intensity structure on PD-weighted image with fat-suppression (TR/TE=3000/15) (cf. PD-weighted image without fat-suppression in Fig. 5B).

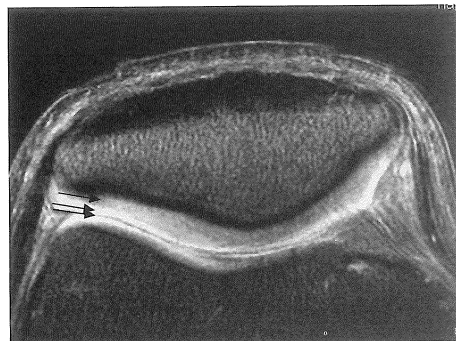


Fig. 7. Laminar structure of the cartilage
Axial high resolution image of the patellar cartilage acquired with a 3 inch surface coil (field of view, 8 cm ; 3 mm section thickness, 512×256 matrix, 3 NEX) shows three laminae : superficial low signal, intermediate high signal and deep low signal.

例における診断能についてはまだ十分検討されていない。また、軟骨内への造影剤のしみ込みをみるには、関節内に造影剤を投与後数時間経過してから MRI を行わなければならないという制限がある。

NOTE : 関節軟骨の層構造

高解像度の MRI において関節軟骨に層構造を認めることが報告されている^{17)~20)}。層の数については2~5層と報告者によってまちまちで、それらの層構造がどのような組織や組成を反映しているのかまだ明確にされていないが、コラーゲン線維の密度や走向、あるいは proteoglycan の濃度に関連した結合水の多寡が影響するものと考えられている。また、truncation artifact や magic angle effect などのアーチファクトも関与していることがわかっているが、一定した見解はまだ得られていない^{21),22)}。我々の経験では脂肪抑制法を併用した高解像度のプロトン密度強調像で、膝蓋骨軟骨に少なくとも3層の層構造が認められた (Fig. 7)。

3. 臨床応用

関節軟骨の異常はあらゆる関節疾患で起こりうるもので、ルーチンの MR 撮影でも、関節軟骨に注意すると菲薄化あるいは腫大、欠損、亀裂、信号異常などの異常が発見されることがしばしばある。特に膝蓋骨軟骨は厚いために通常の撮像法 (横断像) でも異常を指摘できることが多く、膝蓋骨軟化症 (Fig. 8) については多くの検討が行われている^{23),24)}。大腿骨-脛骨間の軟骨は膝蓋骨軟骨に比べて薄いために評価が難しく、ルーチン検査での診断能を検討したものは少ない。我々は膝関節の変形性関節症について、高速スピネコ法 T₂ 強調像による軟骨病変の診断能を検討したが、軽度の病変以外は比較的良好な診断能を認めた²⁵⁾。

関節軟骨の撮像だけを目的に撮像することは日常臨床では少ないが、最近は関節鏡下の軟骨修復手術や軟骨修復を促すための薬剤治療なども試みられており、軟骨病変の早期診断や治療評価が必要となりつつある。このような目的に

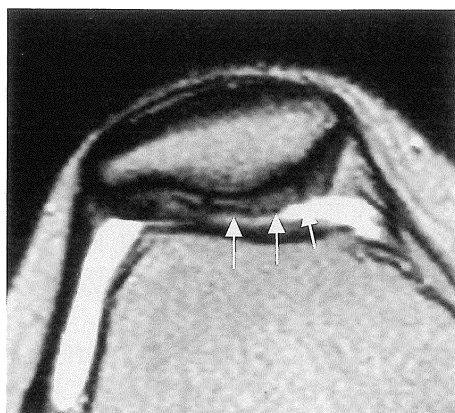


Fig. 8. Chondromalacia patellae in a 25-year-old female
Axial T₂-weighted image (TR/TE=4000/100) of the patella shows an irregular defect and high signal intensity within the retropatellar cartilage.

即した関節軟骨の撮像法としては次のようなことが要求される。

- i) 軟骨と周囲の関節液、滑膜、半月板などとの区別が明確にできる。
- ii) 軟骨の細かな病変を描出するのに十分な空間分解能をもつ。
- iii) 軟骨の厚さや体積の正確な評価が可能。
- iv) 非侵襲的である。

関節軟骨の撮像を目的とした撮像のうち最もよく報告されているのは、脂肪抑制併用の GRE 法 T₁ 強調像 (SPGR, FLASH など) である^{25),26)} (Fig. 9)。関節軟骨のみを抽出して軟骨の容積を測定することも可能で、実際の軟骨容積との間に良好な相関が得られている^{27),28)}。しかし、MR microscopy を使った *in vitro* の研究では関節軟骨の早期変性を描出するには少なくとも 150 μ m 程度の解像度が必要であることがわかっており、臨床の装置でこの解像度を実現することは難しい²⁹⁾。また、この方法では変性に伴う軟骨の信号変化を捕らえることが困難なこと、軟骨と肥厚滑膜との区別が明確でないことなど問題点も多く、今後の検討が待た

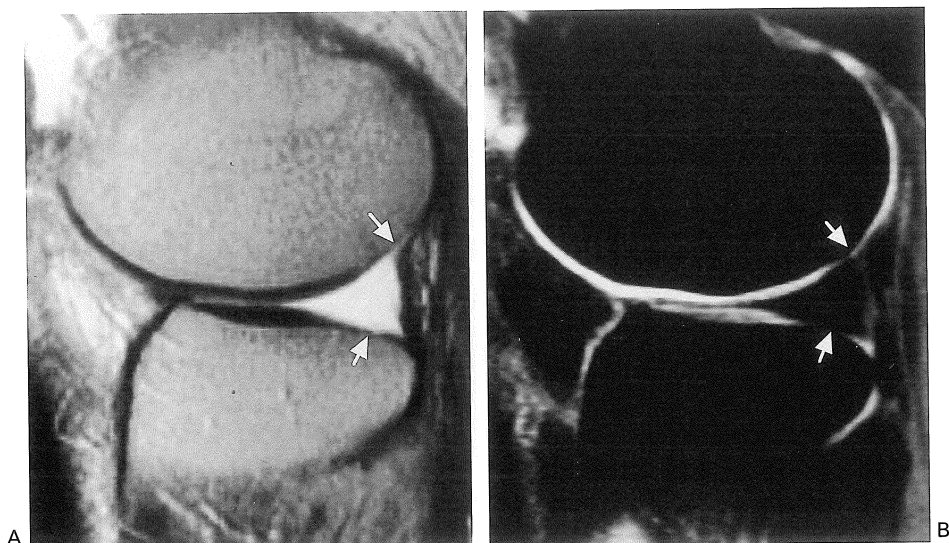


Fig. 9. Osteoarthritis of the knee in a 49-year-old male

A, B: Both T₂-weighted image (A) (TR/TE=4000/100) and fat-suppressed SPGR sequence (B) (TR/TE=50/11, flip angle=60) clearly show the localized thinning of the articular cartilage in the lateral femoral and lateral tibial condyles (arrows). The contrast between the cartilage and surrounding structures on fat-suppressed SPGR sequence is superior to that of T₂-weighted image.

れる。

滑 膜

1. 正常滑膜

関節（滑膜関節）は厚い線維性の関節包に囲まれ、その最も内面に滑膜がある。滑膜は関節包の内面の他に、関節内の靱帯や腱、関節内の骨（bare area）を被覆しているが、軟骨や半月板、関節唇の表面には滑膜がない。滑膜は組織学的には表層の細胞に富む部分（intima）とその深層の血管に富む部分（subintima）に分かれる。その主な機能は関節液の産生、異物の貪食や関節内の老廃物の吸収である。

2. 撮像法

正常の滑膜はMRIでは同定できず、後述する種々の関節疾患に伴って肥厚した滑膜を認めるようになる。滑膜の肥厚する病態では関節液を伴うことが多く、関節液との区別が必要にな

る。肥厚した滑膜の信号パターンは炎症の時期や活動性、線維化の程度、ヘモジデリンやアミロイド沈着により異なるが、T₁強調像で関節液と同程度の低信号、T₂強調像で関節液に比べて低～等信号を示す。造影MRIは肥厚した滑膜を描出するのに有用で、早期から強いエンス効果を示す。脂肪抑制の併用が有用で、肥厚した滑膜と骨との区別が容易になる^{30),31)}。Dynamic studyでは炎症性滑膜は動脈相早期から急峻な立ち上がりを示し、その後はプラトーに達する。造影剤投与後5分以上経過すると造影剤の関節液への移行が見られるため、早期の撮像が必要である。

3. 臨床応用

滑膜肥厚は種々の関節疾患に伴って認められるが、単純X線では認識が難しく、間接所見として、腫瘤陰影あるいは骨のerosionを認めるにすぎない。MRIでは造影MRIで滑膜肥厚の有無や肥厚の程度を把握することが可能

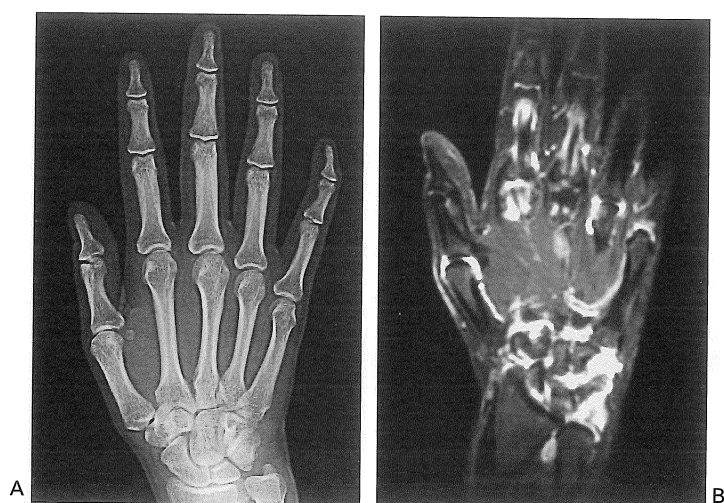


Fig. 10. Rheumatoid arthritis in a 24-year-old female

A : A radiography of the hand shows mild periarticular osteoporosis, but is otherwise unremarkable.

B : Fat-suppressed contrast enhanced T₁-weighted image (TR/TE=400/14) shows marked enhancement of the thickened synovium (pannus) of the hand.

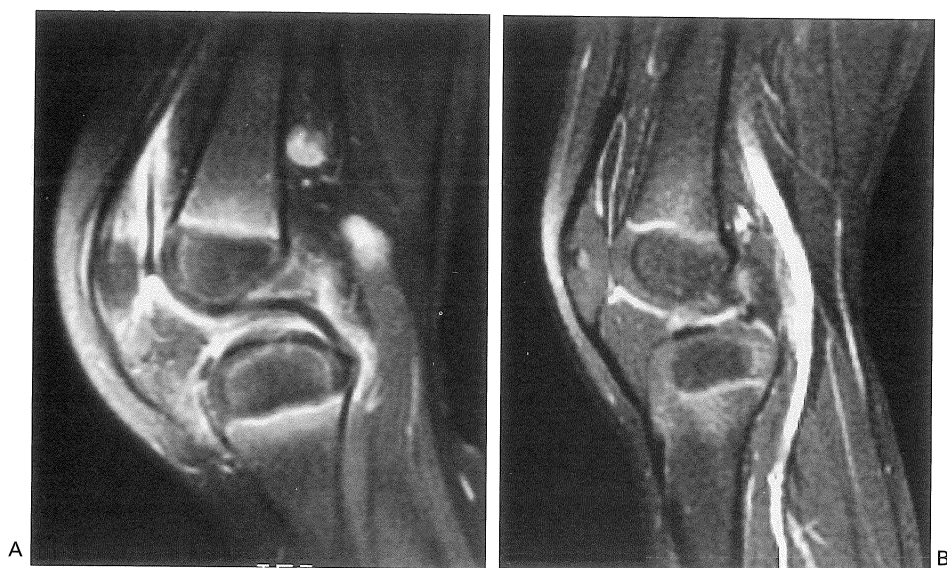


Fig. 11. Juvenile rheumatoid arthritis in a 2-year-old girl

A : Fat-suppressed contrast enhanced T₁-weighted image (TR/TE=550/20) shows diffuse enhancement of the synovium of the knee joint.

B : After 4 month of treatment with steroid and anti-inflammatory drugs, the synovial enhancement has reduced.

で、滑膜切除における術前検査、関節リウマチの早期診断 (Fig. 10)、関節炎の活動性や治療効果の判定への応用が試みられている^{32)~39)} (Fig. 11)。活動性や治療効果判定のために、造影された滑膜の領域のスコア化、エンハンスされた滑膜の容積を産出する方法、dynamic study などが考案されているが、いずれも手間のかかる方法で再現性のある結果が得られにくいという欠点がある。今後の課題として、エンハンスされた領域を自動抽出する方法を確立することが必要と考えられる。また、関節リウマチのような多発関節炎の治療効果判定のためには単関節を検査するだけでは不十分であり、臨床的有用性については更に検討が必要である。

ま と め

骨髓、関節軟骨、滑膜について、MRI の撮像法を中心に解説した。骨関節の種々の解剖構造や病変の描出にはいろいろな撮像法を選択する必要があるが、限られた時間で適切な検査を行うには、臨床所見や他の画像所見に基づいてMRI の目的を十分に把握しておくことが重要である。

文 献

- 1) Ricci C, Cova M, Kang YS, Yang A, Rahmouni A, Scott WW, Jr., Zerhouni EA : Normal age-related patterns of cellular and fatty bone marrow distribution in the axial skeleton : MR imaging study. *Radiology* 1990 ; 177 : 83-88
- 2) Taccone A, Oddone M, Dell'Acqua AD, Occhi M, Ciccone MA : MRI "road-map" of normal age-related bone marrow. II. Thorax, pelvis and extremities. *Pediatr Radiol* 1995 ; 25 : 596-606
- 3) Taccone A, Oddone M, Occhi M, Dell'Acqua AD, Ciccone MA : MRI "road-map" of normal age-related bone marrow. I. Cranial bone and spine. *Pediatr Radiol* 1995 ; 25 : 588-595
- 4) Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B : Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiol* 1998 ; 27 : 471-483
- 5) Poulton TB, Murphy WD, Duerk JL, Chapek CC, Feiglin DH : Bone marrow reconversion in adults who are smokers : MR Imaging findings. *AJR* 1993 ; 161 : 1217-1221
- 6) Shellock FG, Morris E, Deutsch AL, Mink JH, Kerr R, Boden SD : Hematopoietic bone marrow hyperplasia : high prevalence on MR images of the knee in asymptomatic marathon runners. *AJR Am J Roentgenol* 1992 ; 158 : 335-338
- 7) Maas M, Dijkstra PF, Akkerman EM : Uniform fat suppression in hands and feet through the use of two-point Dixon chemical shift MR imaging. *Radiology* 1999 ; 210 : 189-193
- 8) Baur A, Stabler A, Bartl R, Lamerz R, Scheidler J, Reiser M : MRI gadolinium enhancement of bone marrow : age-related changes in normals and in diffuse neoplastic infiltration. *Skeletal Radiol* 1997 ; 26 : 414-418
- 9) Disler DG, McCauley TR, Ratner LM, Kesack CD, Cooper JA : In-phase and out-of-phase MR imaging of bone marrow : prediction of neoplasia based on the detection of coexistent fat and water. *AJR* 1997 ; 169 : 1439-1447
- 10) Steinborn MM, Heuck AF, Tiling R, Bruegel M, Gauger L, Reiser MF : Whole-body bone marrow MRI in patients with metastatic disease to the skeletal system. *J Comput Assist Tomogr* 1999 ; 23 : 123-129
- 11) Eustace S, Tello R, DeCarvalho V, Carey J, Wroblecka JT, Melhem ER, Yucel EK : A comparison of whole-body turbo STIR MR imaging and planar ^{99m}Tc-methylene diphosphonate scintigraphy in the examination of patients with suspected skeletal metastases [see comments]. *AJR* 1997 ; 169 : 1655-1661
- 12) Recht MP, Resnick D : MR imaging of articular cartilage : current status and future directions. *AJR Am J Roentgenol* 1994 ; 163 : 283-290
- 13) Peterfy CG, Genant HK : Emerging applications of magnetic resonance imaging in the evaluation of articular cartilage. *Radiol Clin North Am* 1996 ; 34 : 195-213
- 14) Kim DK, Ceckler TL, Hascall VC, Calabro A, Balaban RS : Analysis of water-macromolecule proton magnetization transfer in articular car-

- tilage. Magn Reson Med 1993 ; 29 : 211-215
- 15) Seo GS, Aoki J, Moriya H, Karakida O, Sone S, Hidaka H, Katsuyama T : Hyaline cartilage : *in vivo* and *in vitro* assessment with magnetization transfer imaging. Radiology 1996 ; 201 : 525-530
- 16) Bashir A, Gray ML, Burstein D : Gd-DTPA²⁻ as a measure of cartilage degradation. Magn Reson Med 1996 ; 36 : 665-673
- 17) Lehner KB, Rechl HP, Gmeinwieser JK, Heuck AF, Lukas HP, Kohl HP : Structure, function, and degeneration of bovine hyaline cartilage : assessment with MR imaging *in vitro*. Radiology 1989 ; 170 : 495-499
- 18) Modl JM, Sether LA, Haughton VM, Kneeland JB : Articular cartilage : correlation of histologic zones with signal intensity at MR imaging. Radiology 1991 ; 181 : 853-855
- 19) Recht MP, Kramer J, Marcelis S, Pathria MN, Trudell D, Haghighi P, Sartoris DJ, Resnick D : Abnormalities of articular cartilage in the knee : analysis of available MR techniques. Radiology 1993 ; 187 : 473-478
- 20) Rubenstein JD, Kim JK, Henkelman RM : Effects of compression and recovery on bovine articular cartilage : appearance on MR images. Radiology 1996 ; 201 : 843-850
- 21) Erickson SJ, Waldschmidt JG, Czervionke LF, Prost RW : Hyaline cartilage : truncation artifact as a cause of trilaminar appearance with fat-suppressed three-dimensional spoiled gradient-recalled sequences. Radiology 1996 ; 201 : 260-264
- 22) Frank LR, Brossmann J, Buxton RB, Resnick D : MR imaging truncation artifacts can create a false laminar appearance in cartilage. AJR 1997 ; 168 : 547-554
- 23) Yulish BS, Montanez J, Goodfellow DB, Bryan PJ, Mulopulos GP, Modic MT : Chondromalacia patellae : assessment with MR imaging. Radiology 1987 ; 164 : 763-766
- 24) McCauley TR, Kier R, Lynch KJ, Jokl P : Chondromalacia patellae : diagnosis with MR imaging. AJR 1992 ; 158 : 101-105
- 25) Kawahara Y, Uetani M, Nakahara N, Doiguchi Y, Nishiguchi M, Futagawa S, Kinoshita Y, Hayashi K : Fast spin-echo MR of the articular cartilage in the osteoarthrotic knee. Correlation of MR and arthroscopic findings. Acta Radiol 1998 ; 39 : 120-125
- 26) Disler DG, McCauley TR, Kelman CG, Fuchs MD, Ratner LM, Wirth CR, Hospodar PP : Fat-suppressed three-dimensional spoiled gradient-echo MR imaging of hyaline cartilage defects in the knee : comparison with standard MR imaging and arthroscopy. AJR 1996 ; 167 : 127-132
- 27) Peterfy CG, van Dijke CF, Lu Y, et al. : Quantification of the volume of articular cartilage in the metacarpophalangeal joints of the hand : accuracy and precision of three-dimensional MR imaging. AJR 1995 ; 165 : 371-375
- 28) Piplani MA, Disler DG, McCauley TR, Holmes TJ, Cousins JP : Articular cartilage volume in the knee : semiautomated determination from three-dimensional reformations of MR images. Radiology 1996 ; 198 : 855-859
- 29) Rubenstein JD, Li JG, Majumdar S, Henkelman RM : Image resolution and signal-to-noise ratio requirements for MR imaging of degenerative cartilage. AJR 1997 ; 169 : 1089-1096
- 30) Nakahara N, Uetani M, Hayashi K, Kawahara Y, Matsumoto T, Oda J : Gadolinium-enhanced MR imaging of the wrist in rheumatoid arthritis : value of fat suppression pulse sequences. Skeletal Radiol 1996 ; 25 : 639-647
- 31) Rand T, Imhof H, Czerny C, Breitenseher M, Machold K, Turetschek K, Trattnig S : Discrimination between fluid, synovium, and cartilage in patients with rheumatoid arthritis : contrast enhanced Spin Echo versus non-contrast-enhanced fat-suppressed Gradient Echo MR imaging. Clin Radiol 1999 ; 54 : 107-110
- 32) Sugimoto H, Takeda A, Masuyama J, Furuse M : Early-stage rheumatoid arthritis : diagnostic accuracy of MR imaging. Radiology 1996 ; 198 : 185-192
- 33) Yanagawa A, Takano K, Nishioka K, Shimada J, Mizushima Y, Ashida H : Clinical staging and gadolinium-DTPA enhanced images of the wrist in rheumatoid arthritis. J Rheumatol 1993 ; 20 : 781-784
- 34) Ostergaard M, Gideon P, Sorensen K, Hansen M, Stoltenberg M, Henriksen O, Lorenzen I : Scoring of synovial membrane hypertrophy and

- bone erosions by MR imaging in clinically active and inactive rheumatoid arthritis of the wrist. *Scand J Rheumatol* 1995 ; 24 : 212-218
- 35) Polisson RP, Schoenberg OI, Fischman A, Rubin R, Simon LS, Rosenthal D, Palmer WE : Use of magnetic resonance imaging and positron emission tomography in the assessment of synovial volume and glucose metabolism in patients with rheumatoid arthritis. *Arthritis Rheum* 1995 ; 38 : 819-825
- 36) Ostergaard M, Stoltenberg M, Gideon P, Sorensen K, Henriksen O, Lorenzen I : Changes in synovial membrane and joint effusion volumes after intraarticular methylprednisolone. Quantitative assessment of inflammatory and destructive changes in arthritis by MRI. *J Rheumatol* 1996 ; 23 : 1151-1161
- 37) Sugimoto H, Takeda A, Kano S : Assessment of disease activity in rheumatoid arthritis using magnetic resonance imaging : quantification of pannus volume in the hands. *Br J Rheumatol* 1998 ; 37 : 854-861
- 38) Tamai K, Yamato M, Yamaguchi T, Ohno W : Dynamic magnetic resonance imaging for the evaluation of synovitis in patients with rheumatoid arthritis. *Arthritis Rheum* 1994 ; 37 : 1151-1157
- 39) Ostergaard M, Stoltenberg M, Henriksen O, Lorenzen I : Quantitative assessment of synovial inflammation by dynamic gadolinium-enhanced magnetic resonance imaging. A study of the effect of intra-articular methylprednisolone on the rate of early synovial enhancement. *Br J Rheumatol* 1996 ; 35 : 50-59

MR Imaging of Skeletal Disorders

Masataka UETANI

*Department of Radiology, Nagasaki University School of Medicine
1-7-1 Sakamoto, Nagasaki 852-8501*

This article focuses on the use of MR imaging in the evaluation of the skeletal disorders involving bone/bone marrow, articular cartilage and synovium to emphasize the tailored approach for a particular pathology. Normal magnetic resonance anatomy and criteria for pathologic change are presented. Clinical application and limitations of recently developed MR imaging techniques are also discussed, illustrating some representative cases.