

# 3T MRI の四肢・関節領域への応用

青木隆敏, 興 梶 征 典

産業医科大学放射線科

## はじめに

全身用の 3T MRI が本邦でも 2005 年に認可され、四肢・関節の各領域でも臨床的に 3T MRI を撮影できる準備が整いつつある。動きのアーチファクトが少ないこの領域は高磁場 MRI 装置の純粋な長所である SNR の増加を生かしやすい領域であり、詳細な構造変化の解析や微小病変の検出において 1.5T MRI で得られる情報を凌駕すると期待される。3T 高磁場装置の主な特徴として 1) 信号雑音比 (SNR) の増加, 2) 化学シフトの増加, 3) 磁化率効果の増大, 4) T<sub>1</sub> 緩和時間の延長, 等が挙げられる。本稿では我々の経験をもとに四肢・関節領域における 3T と 1.5T MRI の違いを述べ、3T MRI の問題点や今後の課題についても触れてみたい。

## 3T における SNR と画質の向上

1.5T MRI に比べて SNR が約 2 倍増加することが 3T MRI の最大の利点である。我々は正常ボランティアを用い、3T 装置と 1.5T 装置の SNR および正常構造の描出能を実際に比較してみた。1.5T, 3T ともに GE 社製の MRI 装置を使用した。撮像法は T<sub>1</sub> 強調像, T<sub>2</sub> 強調像, 脂肪抑制併用プロトン強調像, グラジエントエコー像の 4 つで、条件は基本的に 1.5T, 3T ともに同一にした。

## 1. 標準頭部コイルを用いた足関節の描出

導入当初は使用可能なコイルに制限があったため標準頭部コイルを用いて足関節の正常構造の描出能を比較した。SNR (骨, 関節軟骨, 脂肪, 筋肉, 腱) の評価では、いずれの組織においても多くの撮像で 3T MRI が 1.5T MRI の 2 倍以上の値を示した (Fig. 1)。また、T<sub>1</sub> 強調像と T<sub>2</sub> 強調像で骨と筋肉および骨と腱の CNR を、脂肪抑制併用プロトン強調像とグラジエントエコー法で骨と関節軟骨の CNR を測定したが、いずれも 3T MRI の CNR が高値を示した (Table 1)。両者の比 (3T CNR/1.5T CNR) は 1.9 以上であり、グラジエントエコー法での骨と関節軟骨の両者の比 (3T CNR/1.5T CNR) は 3.6 と大差が認められた。

次に、足関節の正常構造の描出能を踵骨の骨梁, 関節軟骨, 足底腱膜, 距踵靭帯に関して 4 段階のスコア (Score 1: 描出されていない, Score 2: 描出されているが評価はできない, Score 3: 描出され評価も可能である, Score 4: 極めて明瞭に描出されはっきりとした輪郭を伴う) を用いて比較検討した (Table 2)。グラジエントエコー法で骨梁, 関節軟骨, 足底腱膜, 距踵靭帯のすべての構造の描出において 3T MRI が 1.5T MRI よりも有意に優れていた (Fig. 2)。T<sub>2</sub> 強調像でも骨梁の描出に有意差があり、3T MRI が 1.5T MRI に比べて優れていた (Fig. 3)。

## 2. 表面コイルを用いた手関節の描出

3 インチ表面コイルが研究用に導入された後

キーワード 3T, MRI, bone, soft tissue, joint

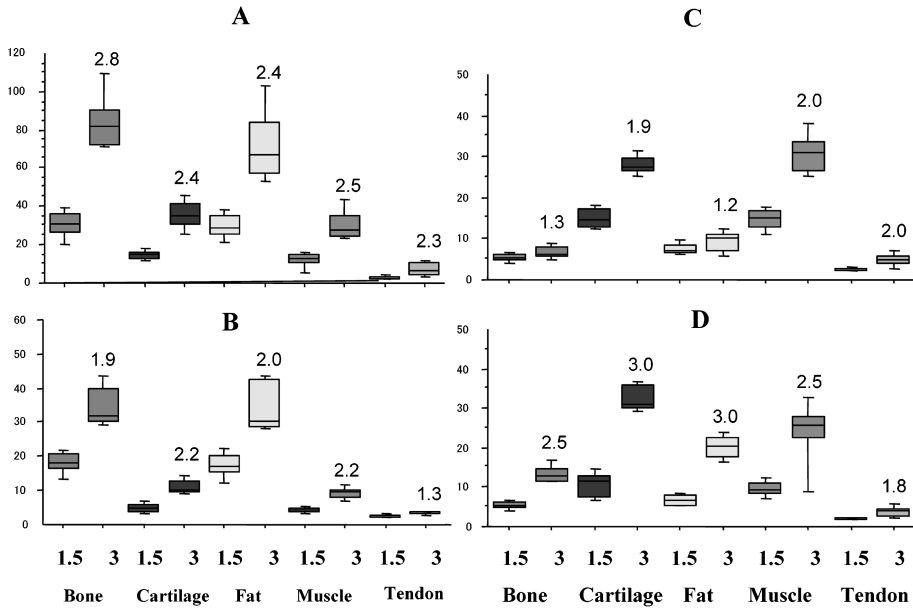


Fig. 1. SNR for foot structures by field strength  
 A : T<sub>1</sub>-weighted SE image, B : T<sub>2</sub>-weighted FSE image, C : Fat-saturated proton-density-weighted SE image, D : Gradient-echo image  
 The numeric values in each graph are calculated by dividing averaged SNR at 3T by that at 1.5T. All SNRs for bone, cartilage, fat, muscle, and tendon obtained at the 3T MRI are higher than those obtained at the 1.5T MRI for each sequence.

Table 1. CNR by Field Strength

		CNR		P Value	3T CNR/1.5T CNR
		1.5T	3T		
T <sub>1</sub> WI (SE)	Bone/Muscle	11.3±2.3	31.9±4.0	<.0001	2.8
	Bone/Tendon	16.7±4.1	46.8±5.2	<.0001	2.8
T <sub>2</sub> WI (FSE)	Bone/Muscle	7.4±1.4	13.8±2.9	.0004	1.9
	Bone/Tendon	8.3±1.7	17.0±2.9	<.0001	2.0
FS-PDWI	Bone/Cartilage	5.2±1.0	11.5±0.9	<.0001	2.2
GRE	Bone/Cartilage	2.8±1.4	10.2±1.4	<.0001	3.6

に、手関節の正常構造について1.5T MRI と3T MRIの描出能を比較検討した。手関節の評価では全く同一のプロトコールではなく、後述するT<sub>1</sub>値とT<sub>2</sub>値を考慮し、撮像時間がほぼ同

じになるようにTRとTEを設定して比較した。

表面コイルを用いた手関節の評価でも腱以外の骨軟部組織のSNRは3T MRIは1.5T MRIの1.6倍以上の高値を示した (Fig. 4)。足関

2006年9月4日受理

別刷請求先 〒807-8555 北九州市八幡西区医生ヶ丘1-1 産業医科大学放射線科 青木隆敏

Table 2. Visualization Grading of Bone and Soft Tissues at 3T and 1.5T

	T <sub>1</sub> WI (SE)			T <sub>2</sub> WI (FSE)		
	1.5T	3T	P Value	1.5T	3T	P Value
Bone trabeculae	1.5±0.5	1.9±0.4	0.8	2.4±0.7	3.4±0.9	0.01
Cartilage	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Plantar Aponeurosis	2.9±1.0	3.1±0.6	0.2	3.3±0.5	3.3±0.5	>.99
Talocalcaneal ligament	2.6±1.1	2.6±1.1	>.99	3.6±0.5	3.6±0.5	0.18

	FS-PDWI			GRE		
	1.5T	3T	P Value	1.5T	3T	P Value
Bone trabeculae	ND	ND	ND	1.8±0.7	3.1±0.8	0.01
Cartilage	3.1±0.6	3.4±0.5	0.2	2.9±0.4	3.6±0.4	0.001
Plantar Aponeurosis	3.3±0.9	3.4±0.7	0.35	3.0±0.9	3.8±0.4	0.02
Talocalcaneal ligament	1.9±0.8	2.1±0.6	>.99	2.3±0.7	3.0±0.9	0.02

ND=no data

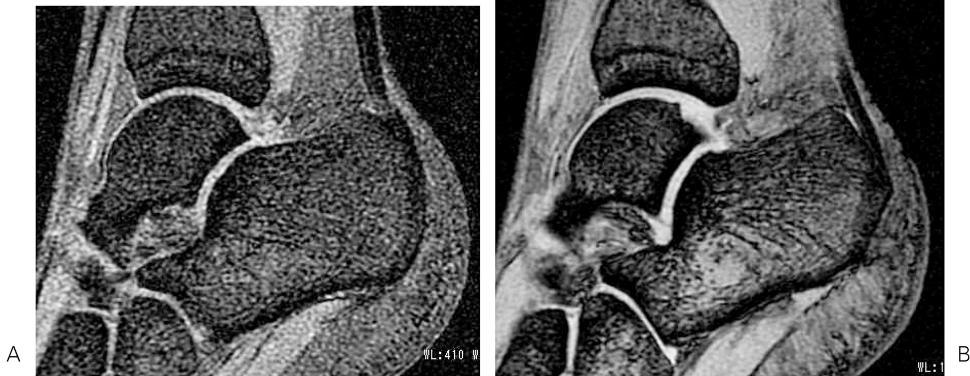


Fig. 2. Sagittal gradient-echo images with head coil of a healthy volunteer obtained at 1.5T MRI (A) and 3T MRI (B). The visibility of the calcaneal bone trabeculae, articular cartilage, and plantar aponeurosis is better in B than in A.

節と同様に骨と筋肉、骨と腱、骨と関節軟骨の CNR を測定したが、両者の比 (3T CNR/1.5T CNR) は 1.8~2.7 であり、いずれも 3T MRI が高値であった。

手関節では三角線維軟骨複合体、正中神経、関節軟骨、舟状月状靱帯の描出能について視覚的評価を行ったが、T<sub>2</sub>強調像ではこれらすべての正常構造において 3T MRI の描出能が 1.5T MRI に比べて優れていた (Fig. 5)。グラ

ジエントエコー像では正中神経や舟状月状靱帯の描出において 3T MRI が 1.5T MRI よりも優れ (Fig. 6)、脂肪抑制併用プロトン強調像では三角線維軟骨複合体と関節軟骨が 3T MRI でより明瞭に描出された。

### 3. SNR の向上を生かした臨床応用

このように 3T 装置では、SNR の増加に伴って空間分解能が向上する。臨床例でも以前に 1.5T MRI で撮像された画像と 3T MRI 導

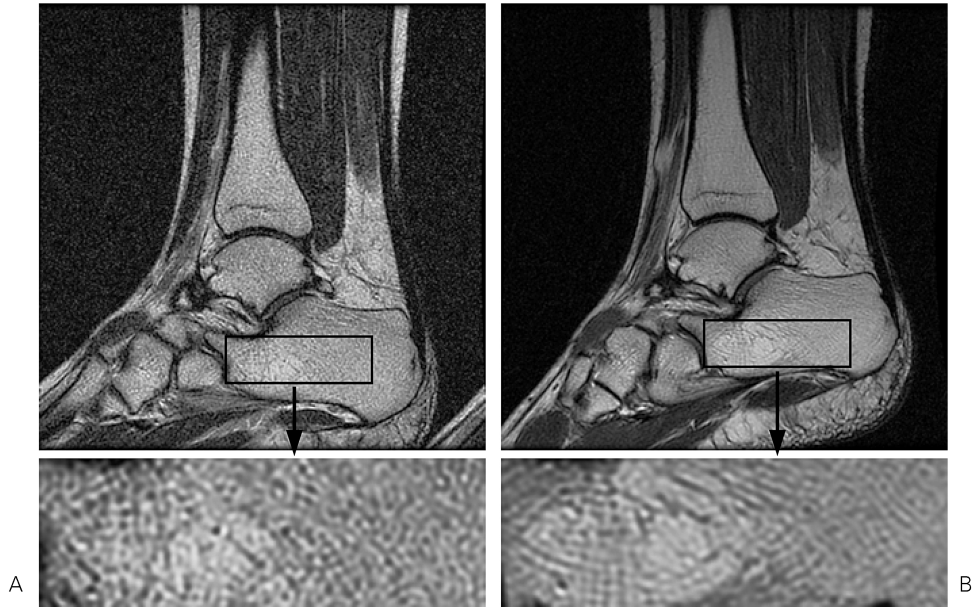


Fig. 3. Sagittal T<sub>2</sub>-weighted FSE images with head coil of a healthy volunteer obtained at 1.5T MRI (A) and 3T MRI (B). The visibility of the calcaneal bone trabeculae is better in B than in A.

入後に撮像された画像を比較すると、3T MRIの方が病変の内部性状や正常骨軟部組織をより明瞭に描出している症例に遭遇する (Fig. 7)。また、3T MRIではスライス厚を薄くしても画質の劣化がみられず、様々な撮像法で高分解能画像を得ることができるようになった (Fig. 8)。高い空間分解能を利用することで、撮像視野 (FOV) を大きくして撮像し、一方でスライス厚を薄くし、マトリックスサイズを上げて撮像することも可能である。このような条件で撮像された広範囲の画像では、目的部分を電子的に拡大して表示することで詳細な骨軟部構造の観察が可能であり (Fig. 9)、これは臨床における3T装置の有用性の一つといえる。

撮像時間についても1.5T MRIと同じ空間分解能の画像を得るのであれば時間を大幅に短縮することができる<sup>1)</sup>。さらにマルチチャンネルコイルによるパラレルイメージングを用いることで高速撮像も可能である。四肢・関節の撮

像では痛みや可動域制限があるため一定の肢位を長時間保つことが難しい場合も多く、撮像時間の短縮は被験者の負担軽減や動きのアーチファクトの防止につながる。

### そのほかの3Tの特徴

#### 1. T<sub>1</sub>値とT<sub>2</sub>値

1.5T MRIと3T MRIでは骨軟部組織のT<sub>1</sub>値やT<sub>2</sub>値に違いが生じることが知られている。通常、生体組織のT<sub>1</sub>値は静磁場強度の上昇に伴って延長する。T<sub>2</sub>値は原理的には静磁場強度に依存しないが、実際は磁場強度の上昇に伴ってT<sub>2</sub>値は短縮することが多い。Goldらは骨軟部組織のT<sub>1</sub>値とT<sub>2</sub>値について1.5T MRIと3T MRIの違いを報告している<sup>2)</sup>。T<sub>1</sub>値は筋肉で20.4%、軟骨で14.5%、関節液で21.2%、皮下脂肪で22.3%、骨髄で21.1%延長し、T<sub>2</sub>値は筋肉で10.1%、軟骨で12.3%、



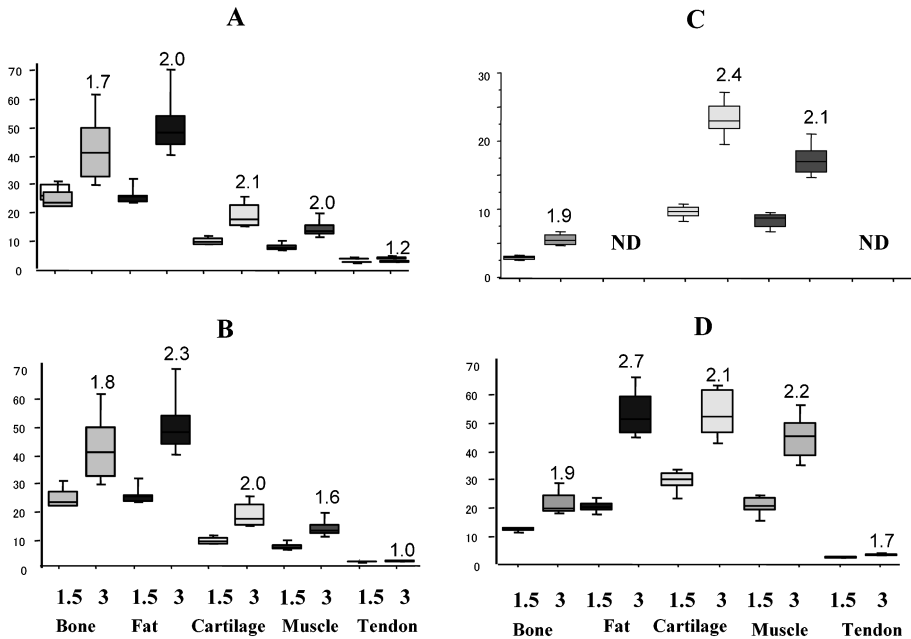


Fig. 4. SNR for wrist structures by field strength  
 A : T<sub>1</sub>-weighted SE image, B : T<sub>2</sub>-weighted FSE image, C : Fat-saturated proton-density-weighted SE image, D : Gradient-echo image  
 Most SNRs for bone, cartilage, fat, muscle, and tendon obtained at the 3T MRI are higher than those obtained at the 1.5T MRI for each sequence.

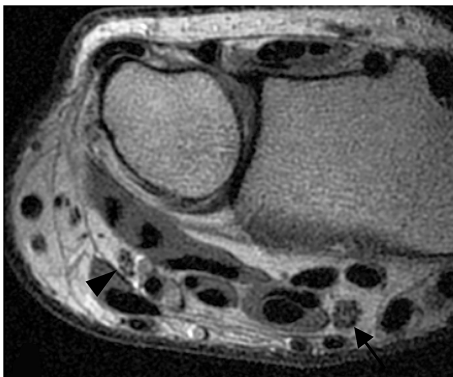


Fig. 5. Axial T<sub>2</sub>-weighted FSE MR image with an 8 cm FOV obtained at 3T MRI. Both median nerve (arrow) and ulnar nerve (arrowhead) are clearly visualized on this image.

関節液で 36.6%，皮下脂肪で 19.3%，骨髓で 19.3%短縮することが報告されている。したがって 3T MRI では 1.5T MRI よりも T<sub>1</sub> 値の延長を考慮して TR をやや長めに設定する必要があり，T<sub>2</sub> 値が短縮することから TE はやや短めに設定する必要がある。

また，inflow 効果増強や組織の信号抑制により TOF MR アンギオグラフィの画質も向上する<sup>3)</sup>。T<sub>1</sub> 緩和時間の延長により増強効果の改善をもたらし，さらに SNR の向上も加わり造影能はさらに良好となる (Fig. 10)。T<sub>1</sub> 緩和時間の延長はスピンエコー法の T<sub>1</sub> 強調像における組織コントラストの低下にもつながるが<sup>4)</sup>，我々の足関節や手関節の正常組織の視覚的評価では，スピンエコー法の T<sub>1</sub> 強調像で 3T MRI の描出能が 1.5T MRI よりも劣っていた構造はなく，すべての構造で同等もしくはやや優れ

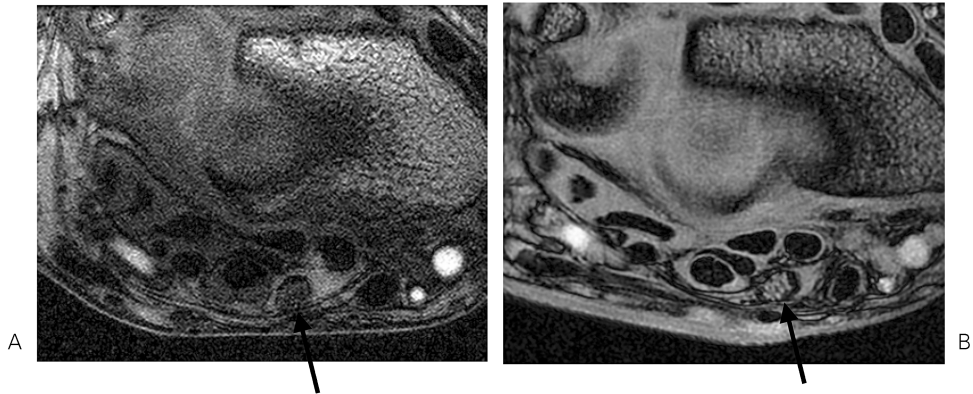


Fig. 6. Axial gradient-echo images with a 6 cm FOV obtained at 1.5T MRI (A) and 3T MRI (B). The visibility of the median nerve (arrows) and flexor tendons is better in B than in A.



Fig. 7. Axial T<sub>2</sub>-weighted FSE images with same protocol obtained at 1.5T (A) and 3T (B). 3T MRI image demonstrates the internal structures of vertebral hemangioma (arrows) more clearly than 1.5T MRI image.

ていた。

## 2. 化学シフト

化学シフトは一般的に磁場強度に比例するので、3T MRI では 1.5T MRI の 2 倍となる。化学シフトの増加は組織選択画像を撮像する際の利点となり、広範囲を撮影しても均一な脂肪

抑制画像を得ることができる。四肢・関節領域では皮下脂肪組織や骨髄の広範な病変の検出や広がりの評価に役立つと思われる。MR スペクトロスコピーではスペクトル周波数方向の分解能が向上し、各ピークはより明瞭となる。SNR の増加も伴い、代謝産物濃度のより正確

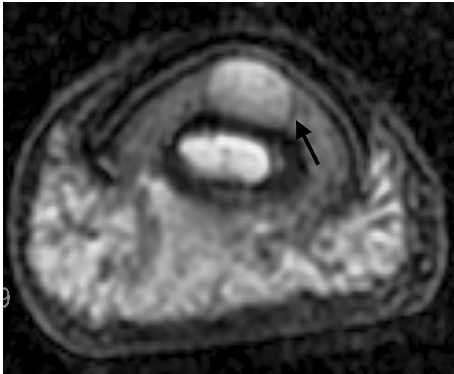


Fig. 8. Axial T2-weighted FSE image with an 8 cm FOV obtained at 3T MRI. A 2.5 mm-diameter glomus tumor with high intensity (arrow) is well visualized in a middle finger. The contrast between the nail bed and the tumor is high.

な測定も期待できる。一方で、化学シフトアーチファクトも周波数方向で顕著となる。臨床例で化学シフトアーチファクトが問題となる場合には脂肪抑制法の併用などで対処しなければならない。

### 3. 磁化率効果の増大

3T MRIは磁化率効果に鋭敏であり、磁化率アーチファクトや画像のゆがみを招く<sup>5)</sup>。四肢・関節領域では固定具などの金属異物のアーチファクトが増大し、大きな問題となる (Fig. 11)。また、エコープレイナー法では画像のゆがみが顕著となり、パラレルイメージングを併用することで **train length** を短くしてアーチファクトを減少する必要がある。一方、磁化率効果の増大は欠点ばかりでなく、明らかな画像の乱れを来さない程度の磁化率効果は画像コントラストとして利用できる。組織内の微量な鉄や出血による磁化率効果は 1.5T MRI と比べ



Fig. 9. A : Sagittal T2-weighted FSE images with 35 cm FOV obtained at 3T MRI (2 mm slice thickness, 512×512 matrix). B : Digitally magnified image of A. High spatial resolution image with a large FOV is feasible at 3T MRI.



Fig. 10. MR images of a rheumatoid arthritis obtained at 3T MRI. Sagittal T<sub>2</sub>-weighted FSE image (A) shows a small amount of joint effusion in the ankle joint. No definite bony abnormality is seen. Fat-suppressed gadolinium-enhanced T<sub>1</sub>-weighted image (B) revealed inflamed soft tissues (arrows) including synovial membrane.

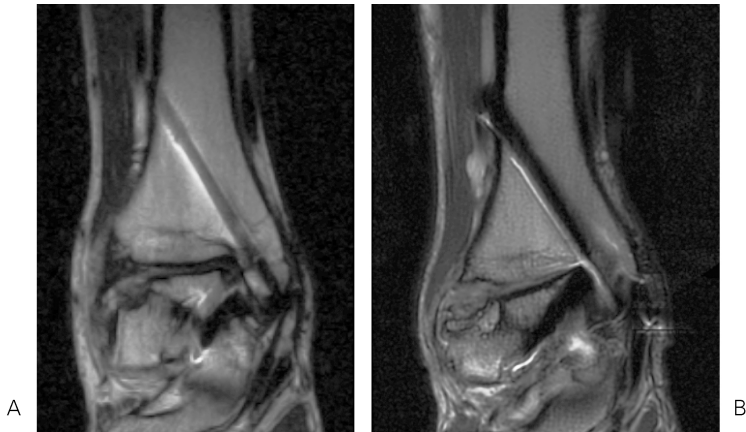


Fig. 11. Coronal T<sub>2</sub>-weighted FSE images obtained at 1.5T MRI (A) and 3T MRI (B). Metal artifact is more prominent in B than in A.

て3T MRIでより強調され、グラジエントエコー法などを用いて微視的磁化率効果をとることが容易となる<sup>6)</sup>。四肢・関節の微量なヘモジドリン沈着を特徴とする病変では、1.5T MRIに比べて診断への貢献度が高いと思われる。

### 3T MRIの問題点

#### 1. RF penetrationの制限

3T MRIでは共鳴周波数が1.5Tの2倍となり、RF penetrationが低下して局所磁場の不均一を生じ、T<sub>1</sub>強調像における信号むらを来しやすい<sup>7)</sup>。対処法としてはマルチチャンネルコイルがパラレルイメージングの感度補正と相まって磁場の不均一性を改善する方向に働く。

塩化ニッケルや塩化マンガンを含む 2L ほどの水枕など water bolus の使用も信号むら防止に役立つ。磁場均一性向上のために用いられるパッドもあり、四肢ではこれらを固定具として使用すると、動きのアーチファクトや信号むらを防ぐことができ、効果的である。

## 2. RF 発熱効果

RF 発熱効果も静磁場強度の 2 乗に比例して上昇し、3T MRI では 1.5T MRI の 4 倍の SAR となる。高密度に大きな再収束パルスを照射する撮像法では SAR の制限が問題となる。SAR の上昇にはスライス枚数の減少、エコー数の減少、繰り返しの延長などで対処することになるが、広い範囲を撮影するには撮像時間の延長を強いられる。この問題の解決にはパラレルイメージングの使用による撮像時間の短縮が必要となる。また、コントラストを保ちながら SAR を減少させるために RF duty cycle や flip angle を調整するなどの RF パルスの工夫もなされている<sup>8)</sup>。

## 3. 騒音・めまいなど

3T MRI では騒音が大きくなり、前庭刺激による一過性のめまいが出現することも知られている。浮遊感、視覚のちらつき、皮膚感覚刺激症状、などを生じることもある。また、体内や体外の金属に対する安全管理については従来よりも注意深い対応が必要である。

## 今後の課題

1.5T MRI に比べて 3T MRI は四肢・関節の解剖学的構造をより明瞭に描出する。しかし、3T MRI がもつ高分解能の威力を発揮し、1.5T MRI では十分に描出できなかった微細構造を十分に評価するためには四肢・関節の各領域に適したコイルの整備が不可欠である。本邦でもできるだけ早期に各領域のコイルが整備されることが望まれる。また、前述のように 3T MRI と 1.5T MRI では骨軟部組織の  $T_1$  値や  $T_2$  値は異なり、3T MRI には磁化率効果の増

大や化学シフトの増加など利点にも欠点にもなる特徴がある。各撮像法や疾患に応じて、これらの違いや特徴を考慮した至適パラメータを検討することも重要な課題の一つである。さらに、四肢・関節領域でも SAR の制限は 3T MRI の臨床上の支障となり、既に対処が進みつつあるが、SAR を減少するための技術的側面での課題はまだ多く残されている。

## ま と め

3T MRI はその優れた SNR により、1.5T MRI よりも四肢・関節の微細構造の描出に優れ、関節軟骨、骨梁、軟部組織の性状などをより詳細に評価できる。現時点では使用できるコイルに制限があり、ほかにも解決すべき課題が残されているが、高いポテンシャルにより四肢・関節領域において将来的に 3T 装置が MRI のスタンダードとなる可能性が高いと考えられる。3T MRI の特徴を真に生かした、従来の 1.5T MRI とは異なる臨床応用の可能性については、今後の研究を待つ必要がある。

## 文 献

- 1) Parker DL, Gullberg GT : Signal-to-noise efficiency in magnetic resonance imaging. *Med Phys* 1990 ; 17 : 250-257
- 2) Gold GE, Suh B, Sawyer-Glover A, Beaulieu C : Musculoskeletal MRI at 3.0T : initial clinical experience. *AJR Am J Roentgenol* 2004 ; 183 : 1479-1486
- 3) Willneck WA, Born M, Simon B, Tschampa HJ, Krautmacher C, Gieseke J, Urbach H, Textor HJ, Schild HH : Time-of-flight MR angiography : comparison of 3.0-T imaging and 1.5-T imaging : initial experience. *Radiology* 2003 ; 229 : 913-920
- 4) Stehling C, Niederstadt T, Kramer S, Kugel H, Schwandt W, Heindel W, Bachmann R : Comparison of a  $T_1$ -weighted inversion-recovery-, gradient-echo- and spin-echo sequence for imaging of the brain at 3.0 Tesla. *Rof* 2005 ; 177 : 536-542

- 5) Abduljalil AM, Robitaille PM : Macroscopic susceptibility in ultra high field MRI. *J Comput Assist Tomogr* 1999 ; 23 : 832-841
- 6) Scheid R, Preul C, Gruber O, Wiggins C, van Cramon DY : Diffuse axonal injury associated with chronic traumatic brain injury : evidence from T<sub>2</sub>\*-weighted gradient-echo imaging at 3T. *AJNR Am J Neuroradiol* 2003 ; 24 : 1049-1056
- 7) Alecci M, Collins CM, Smith MB, Jezzard P : Radiofrequency magnetic field mapping of a 3 Tesla birdcage coil : experimental and theoretical dependence on sample properties. *Magn Reson Med* 2001 ; 46 : 379-385
- 8) Hennig J, Scheffler K : Hyperechoes. *Magn Reson Med* 2001 ; 46 : 6-12

### 3T MR Imaging of the Extremities and Joints

Takatoshi AOKI, Yukunori KOROGI

*Department of Radiology, University of Occupational and Environmental Health  
1-1 Iseigaoka, Yahatanishi, Kitakyushu 807-8555*

Three-Tesla magnetic resonance (MR) imaging allows clearer visualization of normal bony, cartilaginous, tendinous, and ligamentous structures more clearly than that at 1.5T because of its enhanced signal-to-noise ratio (SNR) and higher spatial resolution, even with current coil technology. Coil development and technical solutions for some of the challenges at higher field strength, such as specific absorption rate (SAR), chemical shift, susceptibility, and T<sub>1</sub> time prolongation, are necessary to realize the full potential of 3T MR imaging. We believe that 3T MR imaging improves diagnostic capabilities in the extremities and joints.