

# オープンMRI装置における新技術開発

Technology Development on Open MRI Apparatus

高橋 哲彦 Tetsuhiko Takahashi  
谷井由美子 Yumiko Yatsui  
永尾 尚子 Hisako Nagao

瀧澤 将宏 Masahiro Takizawa  
阿部 貴之 Takayuki Abe  
後藤 智宏 Tomohiro Goto

株式会社日立メディコ 技術研究所

オープンMRIの性能は近年急速に向上しており、従来は不可能と考えられていた撮影法が実用化されつつある。心臓シネMRI、冠動脈撮影、時間分解MRA、パラレルイメージングなど最先端計測技術を用いたアプリケーションの開発が進んでいる。本稿では、その一端を報告し、オープンMRIの将来技術についても述べる。

Performance of open MRI apparatus is improving rapidly in these days. Thus, some imaging technique that has seemed impossible on open MRI becomes realized now.

Cutting edge technologies such as cardiac cine MRI, coronary artery imaging, time resolved MR angiography and parallel imaging etc. are developed for advanced clinical application. This report shows some of these new technique and features on open MRI in near future.

**Key Words:** MRI, Cardiac Imaging, Contrast Enhanced MRA, Parallel Imaging

## 1. はじめに

近年、磁気共鳴撮影(magnetic resonance imaging ; MRI)の技術革新が進み、その臨床適用範囲が大いに広がっている。中低磁場MRIでは、開放性が高く安心感があるオープンMRIが主流となった。また最近、高磁場性能を有するオープンMRIも出現している。オープンMRIはその構造から“ハンバーガー型”とも呼ばれており、高磁場で主流のトンネル型MRIと比べ、寝台に横たわった被検者は両手両脇が開放される(図1)。その結果、被検者の開放感と安心感が高まる。オープンMRIは、汎用MRIとして十分な基本画質を有することに加え、従来ハイエンドの高磁場MRIでのみ可能と考えられてきた各種機能が実用化されつつある<sup>1)2)</sup>。本稿では、オープンMRIの新機能として、心臓撮影、パラレルイメージング、時間分解MR angiography (MRA)を紹介し、オープンMRIの現時点の能力と将来技術について述べる。



図1：オープンMRI装置の概観図

商用化されている世界最高磁場のオープンMRI装置(0.7T:Altair)。シングルショットEPIやBASGを始めとする高速撮影が可能で、拡散撮影や心臓撮影などの高機能撮影が可能な高性能オープンMRI装置。

## 2. 心臓撮影

高速撮影技術の向上により、MRIで心臓を高コントラスト、高分解能で撮影できるようになりつつある。特に定常状態でエコーを取得するBalanced SARGE(BASG)シーケンス(図2)を用いることによりマルチスライスマルチフェイズで心臓を高コントラストで撮影可能となった<sup>3)</sup>。BASGシーケンスは、T2/T1コントラストを呈するため、心筋が抑制され心室が高信号となる<sup>4)</sup>。図3は非造影息止め下で撮影した7スライス11フェイズのシネ短軸像であり、体動アーチファクトがなく心筋・心室が高コントラストで描出されている。シネ画像を使って心室容積、壁厚、駆出率などを算出するなどの高精度な心機能解析が可能になると期待されている<sup>5)</sup>。

BASGに脂肪抑制パルス(chemical shift saturation : CHESS)を併用することにより、冠動脈周辺の脂肪を抑制でき冠動脈を非造影で撮影できる。しかし、冠動脈撮影では高空間分解能が必要なため、短時間の息止め撮影では良好な

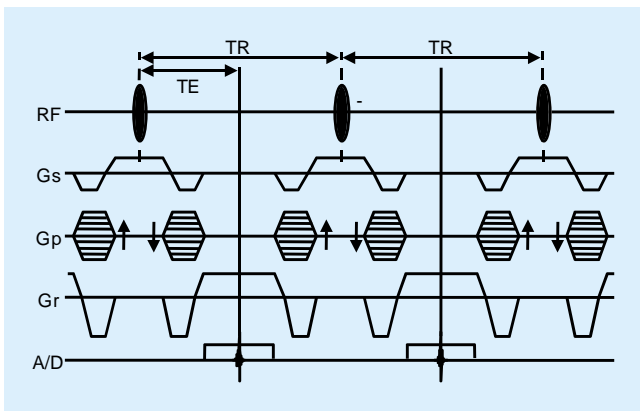


図2 : BASGパルスシーケンス

短TR短TEでエコーを取得する。典型的なTRは3-6ms程度。TEはTR/2に等しい。図中、RF:高周波磁場、Gs :スライス傾斜磁場、Gp :位相エンコード傾斜磁場、Gr :読み出し傾斜磁場、A/D : 信号検出。

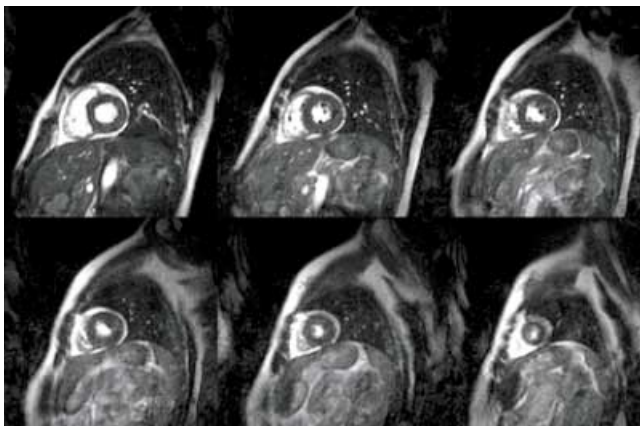


図3 : 心臓短軸断面マルチスライスシネ撮影例

7スライス11フェイズ(図では6スライスのみ表示)、32秒息止め撮影。TR/TE=4.0/2.0ms、スライス厚=7mm、画像マトリクス=256x256。(Altaire)

冠動脈撮影ができない。そこで、われわれはCHESSとナビゲーター呼吸同期法(図4)を併用し、自由呼吸下でターゲットド3次元(3D)撮影を行い、最大値投影法(maximum intensity projection: MIP)により右冠動脈を描出した(図5)<sup>3)</sup>。図からわかるように、ナビゲーターを用いることにより自由呼吸下で冠動脈を鮮明に描出できる。このような非造影冠動脈撮影は、今後、心疾患の経過観察などへの活用が期待される。なお、冠動脈撮影では、3点位置決め法やInteractive Scan Control (ISC)などの新規の撮影断面決定法を用いることにより、従来に比べ簡便に冠動脈を含む撮影断面を決定できる。

## 3. パラレルイメージング

複数の受信コイル(multiple array coil : MAC)を活用した高速撮影法 - パラレルイメージング - の実用化が進んでいる<sup>6)-8)</sup>。パラレルイメージングは、取得エコー数を削減した状

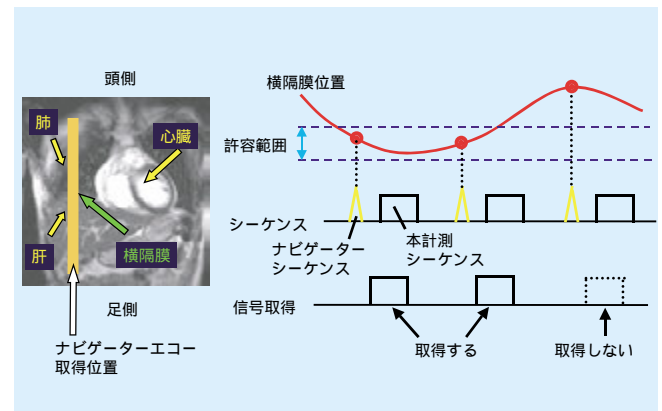


図4 : ナビゲーター呼吸ゲート法の原理

ナビゲーターシーケンスで横隔膜を含む断面をペンシル状に励起しエコー信号を取得する。ナビゲーターエコー信号から横隔膜位置を逐次検出し同じ位置のときのみゲートをかけた本撮影(例えば3D心臓冠動脈撮影)を行う。この結果、非息止めでも横隔膜(および心臓)が常に同じ位置で撮影でき呼吸アーチファクトのない心臓撮影が行える。

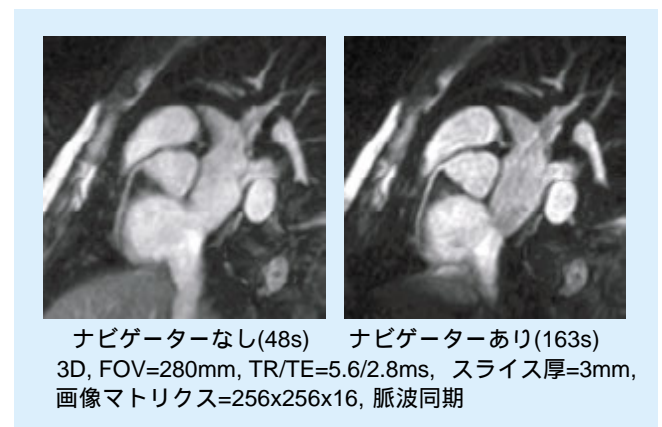


図5 : 右冠動脈撮影例

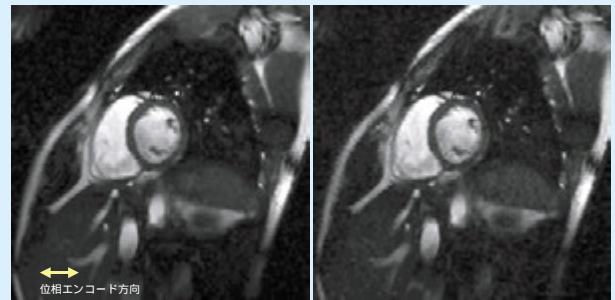
ナビゲーターなし(48s) ナビゲーターあり(163s)  
3D, FOV=280mm, TR/TE=5.6/2.8ms, スライス厚=3mm,  
画像マトリクス=256x256x16, 脈波同期

態で撮影するとともに、エコー数削減に伴う折返しアーチファクトを各受信コイルの感度分布を活用した行列演算により除去し撮影を高速化する。われわれは、これをオープンMRIに適した形で実現し<sup>9) - 11)</sup>、Rapid Acquisition through a Parallel Imaging Design(RAPID)と命名した。オープン型MRI装置では、図6のように静磁場の向きが体軸に対して垂直であり、磁気共鳴により発生する水平面内の高周波(radio frequency ; RF)磁場を検出する。したがって、トンネル型のMRI装置(静磁場が体軸方向と一致、RF磁場は体軸と垂直な平面)とは異なり高感度なソレノイド型受信コイルが利用できる。そこでソレノイドコイルを活用したRAPID用RF受信コイルを開発した。図7に心臓用のRAPIDコイルの構成例を示す。この例はポリウムタイプの4チャンネルコイルで2つのソレノイドコイルと2つの8の字型表面コイルで構成され、任意断面の2倍速撮影が可能である<sup>9)</sup>。RAPIDは、心臓短軸・長軸・4腔像のシネ撮影などへの臨床適用が期待される。心臓撮影では、RAPIDの演算に必要なRFコイルの感度分布を本撮影中に取得するセルフキャリブレーションを併用することで、動きの早い心臓撮影が安定に行える(図8～図10)<sup>11)</sup>。図から、MACに比べ2倍高速に撮影しても、折り返しアーチファクトや体動アーチファクトが見られず良好に心臓が描出できることがわかった。

また、RAPIDは、頭部撮影におけるシングルショット拡散強調撮影の画像歪低減などにも有効と考えられている<sup>12)</sup>。

#### 4. 時間分解造影 MRA

造影MRAは、ガドリニウム(Gd)造影剤のT1短縮効果を利用した高速血管撮影法であり、撮影時間10-40秒で高コント

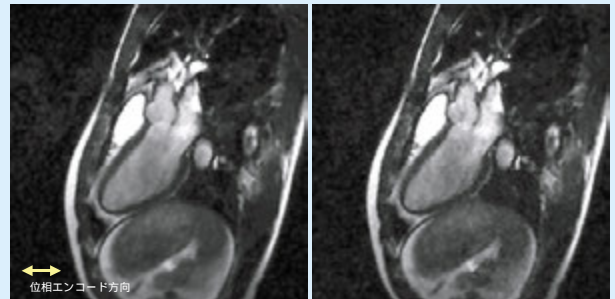


M A C

2倍速RAPID

BASG, TR 4.4ms, TE 2.2ms, FOV 320mm, Thickness 8mm, Data matrix 140(Freq.) x 140(Phase), Breath hold, Scan time 5R-R

図8：心臓短軸像撮影例

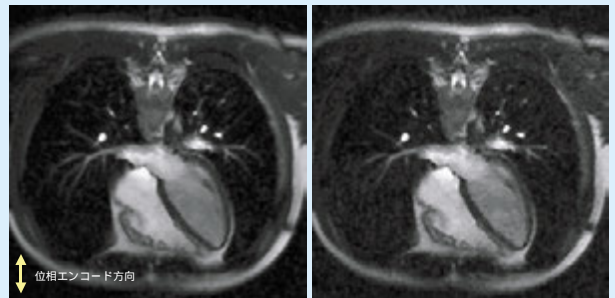


M A C

2倍速RAPID

BASG, TR 4.4ms, TE 2.2ms, FOV 320mm, Thickness 8mm, Data matrix 140(Freq.) x 140(Phase), Breath hold, Scan time 5R-R

図9：心臓長軸像撮影例



M A C

2倍速RAPID

BASG, TR 4.4ms, TE 2.2ms, FOV 320mm, Thickness 8mm, Data matrix 140(Freq.) x 140(Phase), Breath hold, Scan time 5R-R

図10：心臓四腔像撮影例

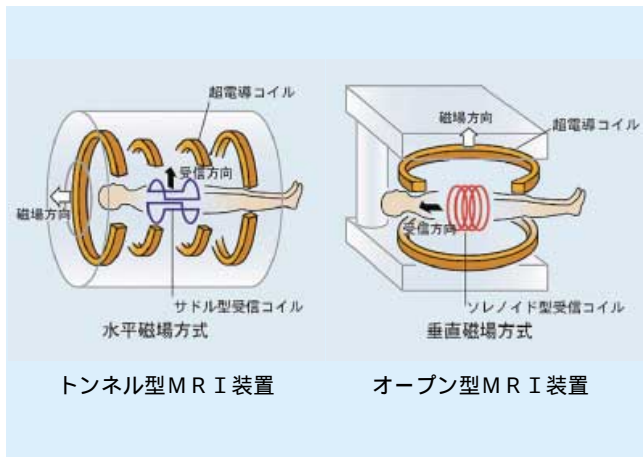


図6：静磁場方向と受信方向の違い

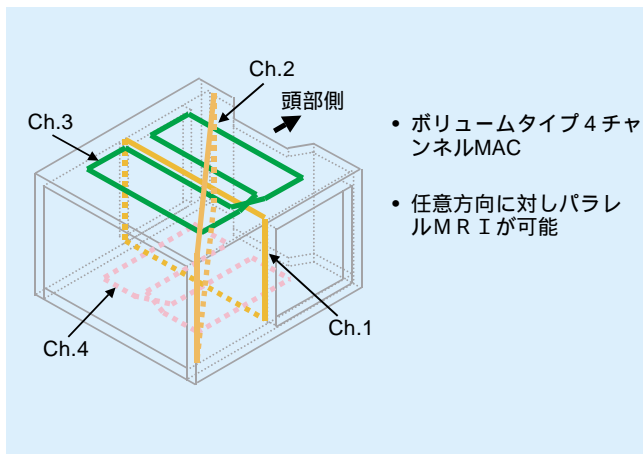


図7：心臓用RAPIDコイルの構成例

ラストの下肢・体幹部などの3次元(3D)血管撮影が可能なることから、臨床に広く普及しつつある。また、造影MRAをさらに高速にして撮影を繰り返すことで、血行動態を低侵襲で画像化でき、これを3D時間分解MRAという(図11)。われわれはMRA撮影シーケンスの高速化のため、厚スラブ2次元(2D)撮影の採用およびエコーシェアリングによる高速化手法(partial phase encoding; PAPE)や3D撮影の位相エンコード順を新規に考案してきた(peak artery enhancing k-space filling sequence; PEAKS)<sup>13)</sup>。図12にPAPEによる3D撮影の高速化の原理を示す。これらの結果、オープンMRIにおいて、体幹部で時間分解3D造影MRAを、頭部で同2D造影MRAを実現した(図13、図14)。時間分解造影MRAは血管腫、動静脈奇形の診断と治療、側副血行路の描出などをX線被曝なしに行えるため、病態の経過観察などに有用と期待されている<sup>14)</sup>。

## 5. 将来技術

心臓MRIでは、シネ撮影/心機能解析にとどまらず、ブラックブラッド法を用いた心筋・血管壁の形態観察や、遅延造

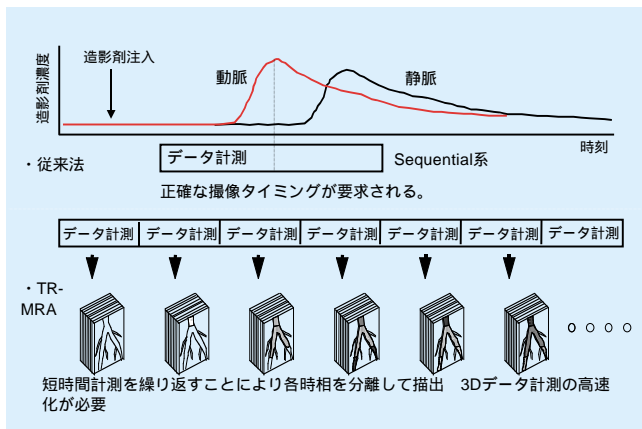


図11：3次元時間分解造影MRAの原理

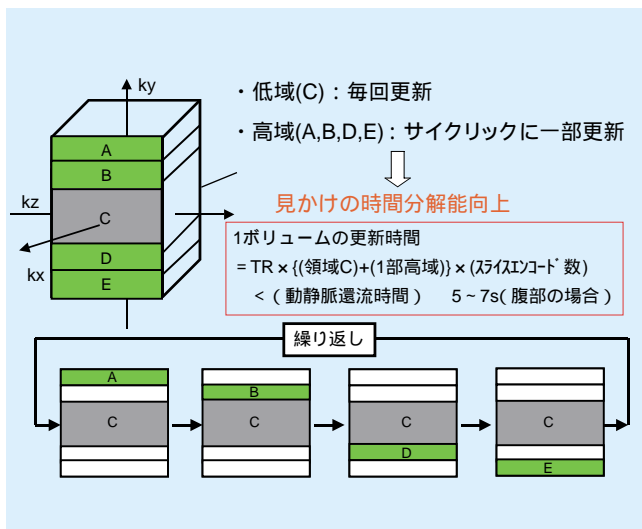


図12：3次元計測の高速化：PAPE

影撮影やファーストパス造影心筋パーフュージョン撮影を用いた心筋バイアピリティ評価などの臨床有用性が議論されている。このような撮影法もオープンMRIでの実現が期待されている。

RAPIDは、現時点では心臓・頭部の撮影を第一に臨床アプリケーションの検討を行っているが、今後、体幹部や四肢への適用、より多チャンネルのRF受信コイルを使った撮影も考えられる。

時間分解造影MRAは、循環器系疾患の治療、低造影剤濃度でのスクリーニング検査など、新しい臨床応用が期待されている<sup>15)</sup>。特に急性期脳梗塞に対する診断と治療モニタリングに向け、拡散強調撮影や脳造影パーフュージョン撮影、さらにはX線装置との併用を考えた臨床プロトコルの確立が期待されている<sup>16)</sup>。

以上、説明した技術は、高速化技術を循環器アプリケーションに適用した例であるが、高速化撮影技術は、インターベンショナルMRIにおける治療ガイド、治療モニタのアプリケーションにも有効と考えられる<sup>17)-21)</sup>。たとえば前述のISCをバイオプシや経皮的治療での穿刺ガイドに用いることもあ

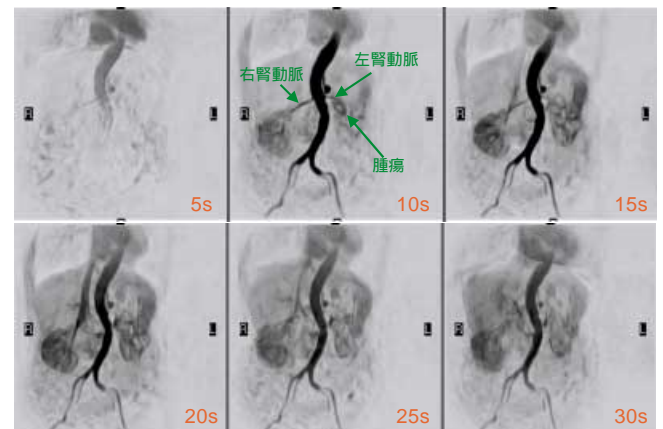


図13：3D時間分解造影MRA例：腹部  
資料提供：東邦大学医学部附属大橋病院殿

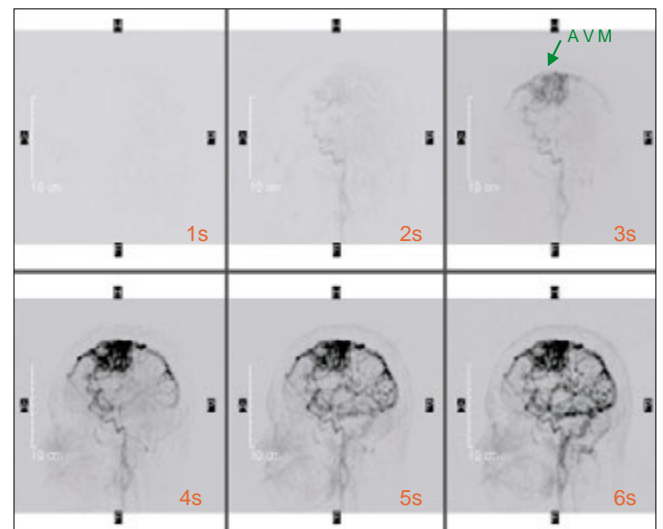


図14：2D時間分解造影MRA例：頭部  
資料提供：東邦大学医学部附属大橋病院殿

り<sup>18)</sup>、この面でも今後、技術向上と臨床普及が進むと考えられる<sup>21)</sup>。

## 6. まとめ

本稿では、オープンMRIの新機能として、心臓撮影、パラレルイメージング、時間分解MR angiography (MRA)を紹介した。MRIの高速化・高画質化の技術と臨床ニーズが結びつき、オープンMRIによる循環器系撮影という新しいアプリケーションが出現しつつある。

## 謝辞

貴重な臨床データをご提供いただいた東邦大学医学部附属大橋病院殿に感謝いたします。

Altaireは株式会社日立メディコの登録商標です。

## 参考文献

- 1) 高橋哲彦, ほか: オープンMRIの新機能. 映像情報. 33(13): 121-130, 2001.
- 2) 吉野仁志, ほか: 永久磁石オープンMRI Apertoの開発. MEDIX, 37: 29-34, 2002.
- 3) 谷井由美子, ほか: 0.7TオープンMRIにおける心臓撮影の基礎検討. 日磁医誌, 22S: 170, 2002.
- 4) 増田智徳: Open MRI装置における最新撮影方法: BASG. INNERVISION, 17(9): 56-57, 2002.
- 5) 白旗 崇, ほか: MR心臓動画表示アルゴリズムの開発: 日放技第59回大会予稿集: 137, 2003.
- 6) Ra JB, et al: Fast imaging using sub-encoding data sets from multiple detectors. Magn Reson Med, 30: 142-145, 1993.
- 7) Pruessmann KP, et al: SENSE: Sensitivity encoding for fast MRI. Magn Reson Med, 42: 952-962, 1999.
- 8) Sodickson DK, et al: Simultaneous acquisition of spatial harmonics (SMASH): fast imaging with radiofrequency coil arrays, Magn Reson Med, 38: 591-603, 1997.
- 9) Taniguchi Y, et al: A computer simulator for designing receiver-coil arrays for parallel MRI. Proc. 10th Scientific Meeting ISMRM: 862, 2002.
- 10) Takizawa M, et al: Head-neck parallel imaging on 0.3-T open MRI system. Proc. 10th Scientific Meeting ISMRM: 907, 2002.
- 11) 瀧澤将宏, ほか: 0.7TオープンMRIによる心臓パラレルイメージング. 映像情報, 35(1): 36-41, 2003.
- 12) 清野秀徳: 垂直磁場方式MRI頭部パラレルコイルの検討: 日放技第59回大会予稿集: 272, 2003
- 13) 阿部貴之, ほか: 3次元造影MRAにおけるk空間計測順序の改良: 日磁医誌, 21: 316-324, 2001
- 14) 中村敏明, ほか: 0.3Tオープン型MRI装置における頭部2D MR - DSAの開発: 日磁医誌, 22S: 244, 2002
- 15) 増本智彦, ほか: 頭頸部・四肢の血管奇形に対するMRガイド下硬化療法におけるMRDSAの有用性の検討: 日磁医誌, 22S: 233, 2002.
- 16) 林 直人, ほか: アンギオ・インターベンショナルMRIシステムによる軟部組織欠陥腫硬化療法の初期経験: MEDIX, 35: 30-33, 2001.
- 17) Harada J, et al: Initial Experience of percutaneous renal cryosurgery under the guidance of a horizontal open MRI system: Radiation Medicine, 19: 291-296, 2001.
- 18) Mogami T, et al: A new image navigation system for MR-guided cryosurgery: Magnetic Resonance in Medical Sciences, 1(4): 191-197, 2002.
- 19) 森 壘, ほか: アンギオ・インターベンショナルMRシステム(Angio-I-MR)を利用した頭頸部癌の選択的動注化学療法: 初期臨床経験 日本医放会誌, 62: 32-34, 2002.
- 20) 最上拓児, ほか: 穿刺補助器具Interactive Scan Controlを使用したオープンMRIガイド下凍結療法: Radiology Frontier, 5(1): 9-13, 2002.
- 21) 増本智彦, ほか: オープンMRIの臨床応用 当院におけるアンギオ・インターベンショナルMRIシステムの紹介: Radiology Frontier, 5(1): 15-20, 2002.