

肺癌の画像診断の基礎：CT・MRI の最新技術

大野良治¹・野上宗伸¹・東野貴徳¹・松本純明¹・
竹中大祐²・真庭謙昌³・里内美弥子⁴・大林千穂⁵・
西村善博⁴・吉村雅裕³・杉村和朗¹

要旨 CT 及び MRI における近年の技術革新には目覚ましいものがあり、従来の高分解能 CT や MRI における T1 強調像及び T2 強調像にて確立された画像診断法にくわえて、新たにマルチディテクター CT (multidetector-row CT: MDCT) によって得られた高精細な volume data を用いた様々な再構成画像や各種画像法によって得られた新たな MRI による形態・機能診断が可能になりその臨床応用も進んできている。本稿においては肺癌の最新の CT 及び MRI 診断について、(1) 肺結節の質的診断や肺腺癌の分化度の推定、(2) TNM 因子診断、及び(3) 肺癌における MRI を用いた肺機能診断に関して最新の知見を踏まえて述べる。(肺癌 . 2005;45:63-73)

索引用語 CT, MRI, 肺, 肺癌, 病期診断

New CT and MR Imaging of Lung Cancer

*Yoshiharu Ohno¹; Munenobu Nogami¹; Takanori Higashino¹; Sumiaki Matsumoto¹;
Daisuke Takenaka²; Yoshimasa Maniwa³; Miyako Satouchi⁴; Chiho Ohbayashi⁵;
Yoshihiro Nishimura⁴; Masahiro Yoshimura³; Kazuro Sugimura¹*

ABSTRACT Recent advances in computed tomography (CT) and magnetic resonance (MR) imaging such as the multidetector-row CT system, the parallel imaging technique, new sequences and software provide new reconstructed CT images and new MR imaging for diagnosis of TNM staging and assessment of pulmonary function. In this review, we describe recent advances in MR imaging of lung cancer, focusing on (1) characterization of solitary pulmonary nodules and differentiation of subtypes of adenocarcinoma ; (2) assessment of T-, N-, M-stage, and (3) pulmonary functional MR imaging. (*JJLC*. 2005;45:63-73)

KEY WORDS CT, Magnetic resonance, Lung, Lung cancer, Staging

緒言

肺癌の診断には胸部単純写真，喀痰細胞診，気管支鏡や CT 下生検，胸部 CT 及び MRI，骨シンチが用いられ

る。これらの中でも，その利便性から CT は肺癌診断にもっとも広く用いられる画像診断法であり，近年のマルチディテクター CT (multidetector-row CT: MDCT) の開発及び臨床応用が進むにつれて，画質の改善とともに各

神戸大学大学院医学系研究科 ¹生体情報医学講座放射線医学分野，³呼吸循環動態医学講座呼吸循環器外科学分野，⁴呼吸循環動態医学講座循環呼吸器病態学分野；²加西市立加西病院放射線科；⁵神戸大学医学部附属病院病理部。

別刷請求先：大野良治 神戸大学大学院医学系研究科生体情報医学講座放射線医学分野，〒650-0017 神戸市中央区楠町 7-5-2 (e-mail: yosirad@med.kobe-u.ac.jp, yosirad@kobe-u.ac.jp, yoshiharuohno@aol.com)。

Department of ¹Radiology, Division of ³Cardiovascular, Thoracic and Pediatric Surgery, ⁴Cardiovascular and Respiratory Medicine,

Department of Internal Medicine, Kobe University Graduate School of Medicine, Japan; ²Department of Radiology, Kasai Municipal Hospital, Japan; ⁵Division of Pathology, Kobe University Hospital, Japan.

Reprints: Yoshiharu Ohno, Department of Radiology, Kobe University Graduate School of Medicine, 7-5-2 Kusunoki-cho, Chuo-ku, Kobe 650-0017, Japan (e-mail: yosirad@med.kobe-u.ac.jp, yosirad@kobe-u.ac.jp, yoshiharuohno@aol.com)

© 2005 The Japan Lung Cancer Society

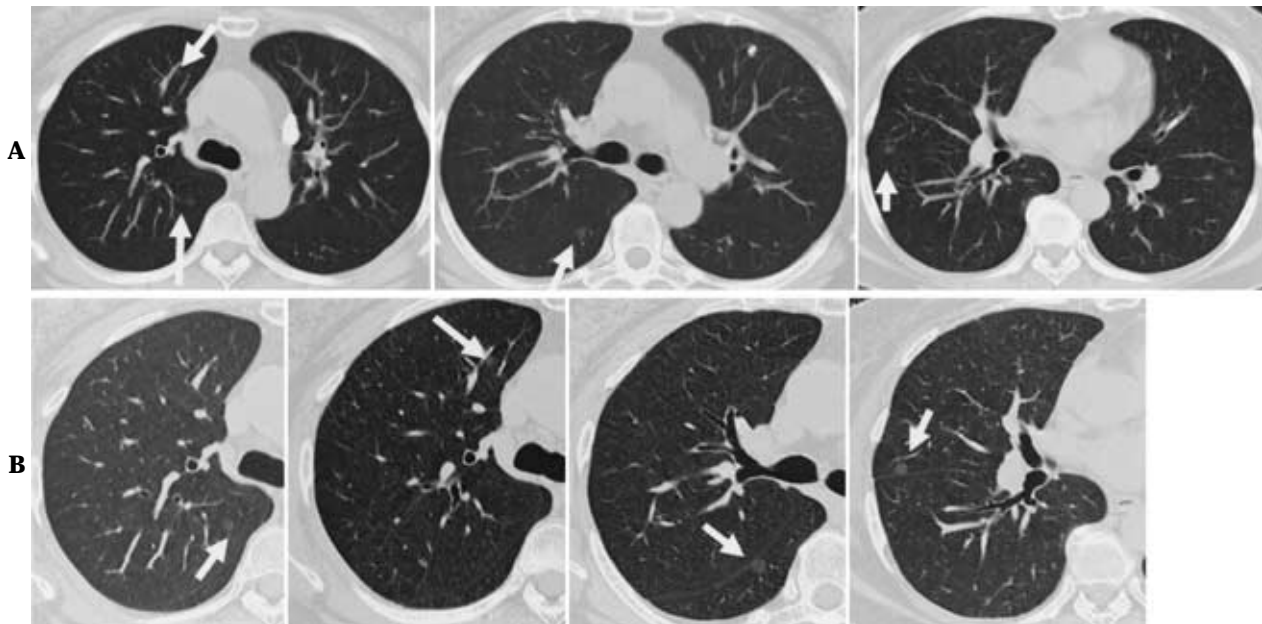


Figure 1. 66-year-old woman with atypical adenomatous hyperplasias (AAHs) and adenocarcinomas (Noguchi's type A). **A**: Routine CT demonstrates multiple ground-glass attenuations (GGAs) in the right upper, middle and lower lobes (arrows). **B**: Thin-section CT reconstructed from the same raw data clearly shows multiple GGAs in the right upper, middle and lower lobes (arrows).

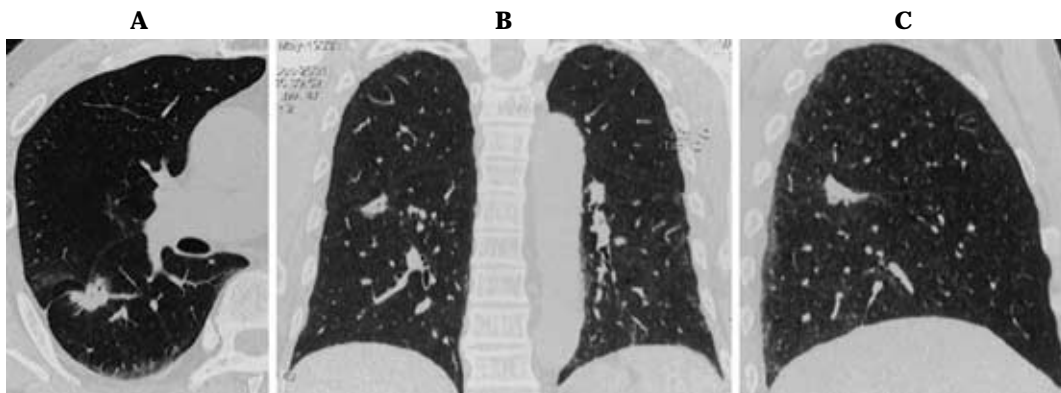


Figure 2. 68-year-old man with adenocarcinoma (Noguchi's type C). **A**: Thin-section CT demonstrates adenocarcinoma with notching, spicula formation and pleural indentation in the right lower lobe. **B, C**: Thin-section MPR images also show the same radiological findings on coronal and sagittal plane as almost isotropic voxel image.

種の再構成画像が広く臨床に用いられるようになってきている。一方、MRIは1991年のRadiologic Diagnostic Oncology Group (RDOG)によるCTと心電同期を使用しないMRIのT1強調像(T1-weighted image: T1WI)による肺癌病期診断能の比較が報告されて以来、縦隔・胸壁浸潤診断等の一部の場合に限りCTに対して相補的に用いられるにとどまってきた！近年のCT及びMRIにおける技術革新には目覚ましいものがあり、従来の高分解能CTやMRIにおけるT1強調像及びT2強調像にて確立

された画像診断法にくわえて、新たにMDCTによって得られた高精細なvolume dataを用いた様々な再構成画像や各種画像法によって得られた新たなMRIによる形態・機能診断が可能になりその臨床応用も進んできている。本稿においては肺癌の最新のCT及びMRI診断について、(1)肺結節の質的診断や肺腺癌の分化度の推定、(2)TNM因子診断、及び(3)肺癌におけるMRIを用いた肺機能診断に関して最新の知見を踏まえて述べる。

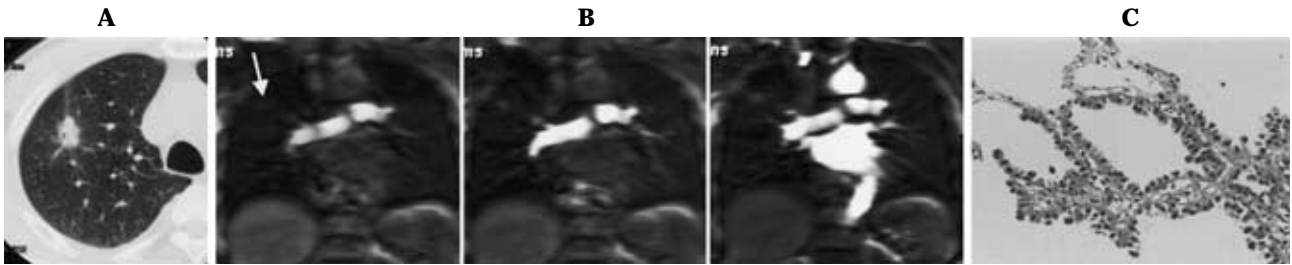


Figure 3. 63-year-old female with localized bronchioloalveolar carcinoma (BAC, Noguchi's type B) in the right upper lobe (文献 15 より許可を得て掲載). **A** : Thin-section CT demonstrates a spiculated small peripheral nodule with pleural indentation and ground-glass opacities in the right upper lobe. **B** : Dynamic MR images (L to R; $t = - 5.5$ s, $t = - 4.4$ s, $t = 1.1$ s) demonstrate the enhancement effect of tumor (arrow) and localized BAC enhanced within the early part of the pulmonary circulation phase. Note that t indicates the corrected start time where the enhancement of the aorta is used as the reference time ($t = 0$). The maximum enhancement ratio was 0.85. The slope of tumor enhancement of this case was 0.13/s. The corrected start time was $- 5.5$ s. **C** : High-power field photomicrograph of histologic specimen shows columnar shaped cells proliferate along alveoli with slight thickening of interstitium (H&E, $\times 100$)

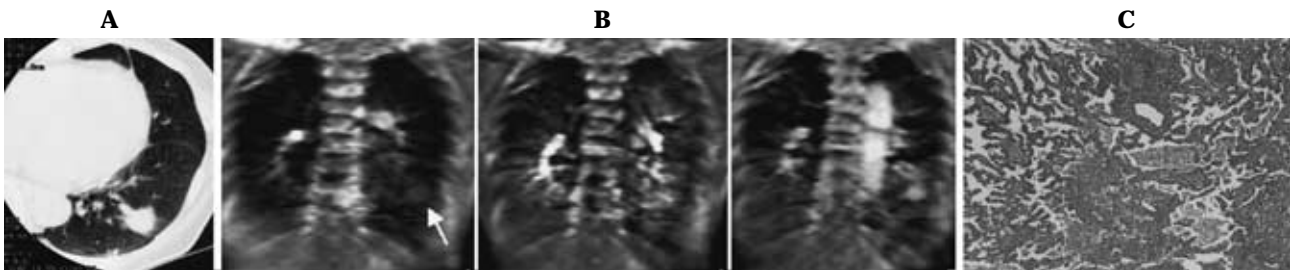


Figure 4. 68-year-old man with adenocarcinoma with mixed acinar, papillary and BAC component in the left lower lobe (文献 15 より許可を得て掲載). **A** : Thin-section CT demonstrates spiculated small peripheral nodule with pleural indentation. **B** : Dynamic MR images (L to R; $t = - 3.3$ s, $t = - 2.2$ s, $t = 4.4$ s) demonstrate the enhancement effect of tumor (arrow) adenocarcinoma with mixed acinar, papillary and BAC enhanced within the late part of pulmonary circulation phase. The maximum relative enhancement ratio was 0.62. The slope of tumor enhancement of this case was 0.08/s. The corrected start time was $- 3.3$ second. **C** : High power photomicrograph of histologic specimen demonstrates tumor cells showing acinar or papillary patterns surrounded by BAC pattern (H&E, $\times 50$)

1. 肺結節及び腫瘍の質的診断 及び肺腺癌の分化度の推定

孤立性肺結節及び腫瘍は胸部単純写真でもっともよく見られる所見であるが、その質的診断をより非観血的で簡便かつ可能な限り正診率を高く行うことは重要なことであり、多くの研究者が CT, MRI, 18 F-fluoro-2-deoxy-D-glucose (FDG) によるポジトロンエミッショントモグラフィー (positron emission tomography: PET) 等を用い試みている²⁻⁷。一般に CT においては結節及び腫瘍と胸膜、胸壁、気道や縦隔との関連性や造影剤検査による造影能等を評価することによって行われている。一般に良性疾患を示唆する所見としては腫瘍の形態、辺縁性状、周囲の肺組織との関係、内部の石灰化の有無等が挙げられる⁸。最新の MDCT では 1 回の撮像により、ルーチン画像としての全肺 5 (10) mm スライス厚画像

のみならず、病変部を (0.5) 1.25 (2) mm スライス厚の薄層 CT (thin-section CT: TSCT) として再構成することも可能である (Figure 1)。これにより、腫瘍内部の微細な石灰化や壊死を評価し得る。また、近年関心の高い肺末梢発生の小型肺癌等の診断で、同時に複数の肺結節、腫瘍やすりガラス影を評価していくことが必要な場合に被曝線量を増加させることなく、様々なスライス厚での評価が可能である。また、造影 CT を用いた腫瘍内部構造の把握は従来の dynamic CT に比してコントラストが低くなる傾向があるものの、ほぼ 15 ~ 40 HU の従来のカットオフ値はルーチン画像において使用可能ではある^{2,9,10}。さらに MDCT においては連続性に富んだ高精細な volume data を取得することが可能であるため、今まで横断像においてのみ観察可能であった肺病変の評価を高分解能の multiplanar-reconstruction image (MPR image) を用いて、胸膜、血管・気管支の関与や、腫瘍の

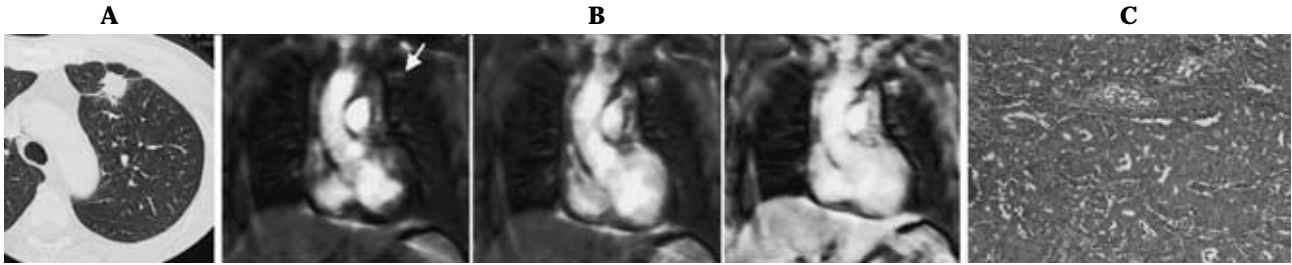


Figure 5. 71-year-old man with poorly differentiated adenocarcinoma (Noguchi's type D) in the left upper lobe (文献 15 より許可を得て掲載) **A**: Thin-section CT demonstrates a spiculated small peripheral nodule with pleural indentation in the left upper lobe. **B**: Dynamic MR images (L to R; t = 0 s, t = 1.1 s, t = 6.6 s) demonstrate the enhanced adenocarcinoma (arrow) in the systemic circulation phase. The maximum relative enhancement ratio was 0.40. The slope of tumor enhancement was 0.06/s. The corrected start time was 0 s. **C**: High-power-field photomicrograph of histologic specimen shows columnar or polygonal tumor cells forming cell nests with small glands (H&E, $\times 50$)

形態の3次元的に可能とし、形態診断の一助となる (Figure 2)。

一方、MRIにおいては肺野からのMR信号が少ないため、CTのように肺野末梢の解剖学的情報を得ることが困難であること、心臓や呼吸のアーチファクトによる画質の劣化等のため、胸部単純写真、胸部断層写真及びCTの過去の研究より得られた悪性腫瘍の画像診断学的特徴を評価することは困難である。¹¹ しかしながら、このような制約はあるものの、MRIは高い組織分解能を有しており、造影剤を使用し、CTと併用することにより肺癌診断の一助となることは、諸家の報告でも明らかである。^{7,12,13} 従来のスピンエコー (spin-echo: SE) 法、ターボスピンエコー (turbo spin-echo: TSE) 法やグラジエントエコー (gradient-echo: GRE) 法による造影MRIにおいて、その造影能を評価することにより3 cm以下の肺癌では壊死を伴うことが少ないため均一に強く造影され、結核腫においては乾酪壊死巣を伴うことが多いので、リング状に造影される (thin-rim enhancement sign)。^{7,12,13} しかし、肺癌とその他の良性肺腫瘍との間には造影効果の重なりがあり、造影MRIのみでの鑑別は困難である。^{7,12,13} したがって、新たに造影剤併用3次元高速GRE法を用いたdynamic MRIの有用性が示唆されている。この新たなdynamic MRIにおいては全肺の肺循環及び体循環支配の評価を可能とし、肺腫瘍の血行動態解析をCTよりも高時間分解能かつ高精細に半定量的に行うことを可能とした。¹⁴ この手法を用いることにより悪性腫瘍と結核腫並びに過誤腫等の非炎症性良性肺結節の鑑別を行うことを可能とし、一部の器質化肺炎をのぞく急性炎症性肺結節との鑑別も可能とした。¹⁴ また、その診断能はFDG-PETを凌駕するものであり、かつ肺結節を肺癌及び炎症性結節等の“要生検群”と結核腫や過誤腫等の良性肺結節である“生検不要群”に高正診率にて行う

ことが可能であり、dynamic MRIはCT検診等にて発見された肺結節のマネジメントの決定に有用であることが示唆されている。¹⁴ 更に本法は肺腺癌の分化度の推定にも有用である。¹⁵ 一般に野口分類type A及びBにおいては肺動脈優位の血流支配をしており、病変は肺動脈相早期にて造影される (Figure 3)。一方、type Cになれば、病変の血流支配は肺動脈優位から気管支動脈優位に変化し、病変は肺動脈早期相から体循環早期相に移行する (Figure 4)。更にtype D, E及びFになれば気管支動脈優位の血流支配をしており、病変は体循環相にて造影される (Figure 5)。本法は過去のTSCTを用いた報告よりも正確に分化度の推定が可能であり、肺腺癌縮小手術等の適応決定等に応用可能であると考えられる。¹⁵

2. TNM 因子診断

1) T 因子診断

肺癌におけるT因子診断、すなわち原発巣の病期、は手術適応及び手術範囲の決定に重要である。T因子診断は大きく、縦隔・肺門部浸潤、胸壁浸潤、葉間胸膜浸潤及び椎体や大血管への浸潤に分けられる。T因子診断能に関しては1991年のRDOGのレポートにあるように、CT・MRIでその診断能に差がないとされているが、縦隔浸潤、胸壁浸潤に関しては当初からMRIが有用である、とされている。また、近年のMRA (MR angiography) の臨床応用により、MRAが左房浸潤や縦隔・肺門部浸潤の診断能の改善に有用である、という報告もなされている。^{16,17} これらの報告の意味するところは主に、CTが横断面での観察であるのに対して、MRI及びMRAは任意断面での観察とMRIの特徴である高い組織コントラストによる診断能の改善である。しかし、MDCTでは前述したように連続性に富んだvolume dataを有しているため、高分解能MPR imageの作成により、組織コントラス

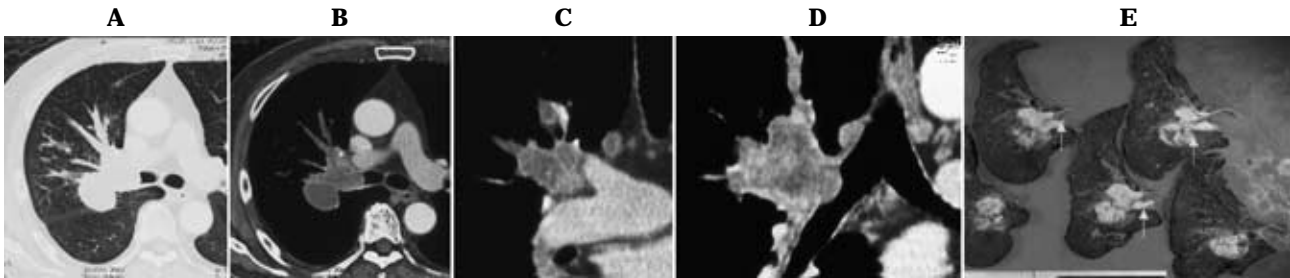


Figure 6. 68-year-old man with squamous cell carcinoma. **A, B** : Thin-section CTs suspect bronchial and mediastinal invasions. **C, D** : Thin-section contrast-enhanced MPR images clearly demonstrate bronchial invasion, although there is no apparent evidence of mediastinal invasion. **E** : On pathological examination after right upper sleeve lobectomy, bronchial invasion is diagnosed (arrows) However, surgical and pathological examinations ruled out the mediastinal invasion.

トはMRIに比して相対的に低いものの、MRIやMRAと同様に任意断面での観察を可能にすることからCTの診断能の改善が期待できる (Figure 6)。また、造影CTを一度撮像するだけで、種々の再構成画像を駆使し、必要な情報を他科に供給することも可能であるため、画像診断の効率化を図ることが可能である。したがって、今後T因子診断はMDCTの導入によるMPR画像の効果的な臨床応用により更なる向上が期待できるとともに、診断過程の効率化が図られる可能性がある。

2) N 因子診断

肺癌患者においてN因子の評価は治療の選択及び予後の観点において重要である。一般に非小細胞癌においてN1, N2においては外科治療法が考慮されるが、N3においては保存的治療法が選択される。CTやMRIにおけるリンパ節浸潤診断能はその潜在的な限界があることから、欧米においては縦隔鏡による検査が用いられることが多い^{1,18-20}。一般にCT, MRIにおけるN因子診断はリンパ節の短径によっている。RDOGの報告においても両者の診断能は気管分岐部やA-P windowのリンパ節の評価にMRIの任意断面での観察が有用であるのみで、有意差は認められなかったとしている¹。したがって、MDCTにおいてもこのような気管分岐部やA-P windowのリンパ節などの評価がし易くなることは予想される。しかし、リンパ節の短径による診断基準によるN因子診断は特異度は高いものの感度が低く、現在ではPETによる診断の有用性の報告がなされている¹⁸⁻²⁰。これはとりもなおさず、リンパ節の短径の変化として描出されない微小リンパ節転移が存在していることによっている。MDCTにおいては任意断面での観察が容易となったことから、気管分岐部やA-P windowのリンパ節の評価が正確に行えるようになったものの、同じ診断基準を用いているので、MDCTの導入のみでは根本的な解決法にはなり得ない。

一方、PETにおいては¹⁸F-FDGによる細胞のグルコー

ス代謝の評価や¹¹C-cholineによる細胞のアミノ酸代謝の評価によるリンパ節転移診断能に関する研究がなされ、高い診断能を示している¹⁸⁻²⁰。したがって、近年FDG-PETの臨床応用が急速に進められつつある。FDG-PETにおいては腫瘍細胞のグルコース代謝を画像化している点で従来の画像診断法と異なり、新たな可能性を秘めている。しかし、細胞生物学的に炎症細胞においてもグルコース代謝が促進されることは知られており、アメリカの中西部や日本を含めたアジア地域等の基礎疾患に結核等の炎症性肉芽腫を伴う場合において従来の画像診断と同様偽陽性が多いことが最近指摘されつつある。また、PET検査においては他の画像診断法に比して高コストであること、低空間分解能であること、PET装置数が米国に比して決定的に少ないこと等の様々な問題点があることも指摘されている。

近年、新たな転移診断法としてMRIを用いたshort inversion time (TI) inversion recovery (STIR)法のリンパ節転移診断や遠隔転移診断における有用性が示唆されている²¹⁻²³。一般にSTIR法では転移リンパ節は高信号に描出され、非転移リンパ節は低信号に描出される (Figure 7, 8)。STIR法の転移リンパ節診断能は感度88~100%、特異度86~96%、正診率86~96%と報告されており、PETやPET-CTと同等の高い診断能でリンパ節転移診断が可能である²¹⁻²³。本法においては腫瘍組織及び非腫瘍組織固有のT1及びT2緩和時間の違いを信号強度に反映するのみならず、その相補により従来のT1WIやT2WIよりもより鋭敏に信号強度の差として画像化することができる。また、TIを80~150msに設定することにより、磁場の均一性が保ちにくい胸部領域においても、良好な脂肪抑制画像を得ることを可能にし、CTとは異なる診断基準においてリンパ節転移を診断することを可能にしている²¹⁻²³。

3) M 因子診断

肺癌の遠隔転移診断は治療法の選択及び予後の面から

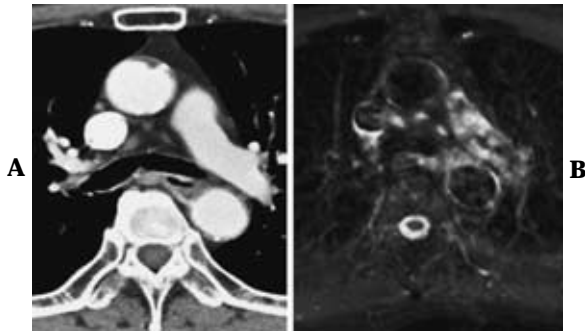


Figure 7. 75-year-old man with metastatic lymph node from adenocarcinoma (文献 23 より許可を得て掲載). **A**: Contrast-enhanced CT in an axial plane demonstrates the lower paratracheal nodes. Short-axis diameters of the lymph node were 3 and 4 mm. **B**: STIR turbo spin-echo (SE) image in axial plane demonstrates these lymph nodes as high signal intensities (arrows). Short-axis diameters of these lymph nodes are 3 and 4 mm. High-power field photomicrograph (H&E, not shown) of histologic specimen of lower paratracheal node showed nodular lesions composed of metastasizing poorly differentiated adenocarcinoma, i. e., invasive growth of neoplastic cells in between normal lymphoid tissue.

非常に重要である。しかし、現状において遠隔転移診断法に関しては定まった方法は示されていない。²⁴ 遠隔転移診断に関しては従来では造影 CT、骨シンチや造影 MRI が用いられているが²⁵⁻²⁸ 近年の PET を用いた遠隔転移診断の有用性の報告が欧米を中心に報告され、わが国においても PET の保険適応と臨床導入の推進により一般臨床現場においても頻繁に用いられるようになった。現時点においてはサイクロトロンを有する一部の施設においてのみ PET 検査が可能であるが、近い将来には FDG の delivery も始まることや PET 装置、PET 検査の可能な PET-SPECT のハイブリッド装置及び PET-CT 装置の導入が進むことにより、FDG を用いた M 因子診断は更に臨床応用が進むと考えられている。一般に FDG-PET の M 因子診断の有用性は CT に比して高い診断能を有することと全身撮像が可能であることが挙げられる。しかし、欧米の PET の報告においては脳転移、副腎及び肝転移や骨転移における PET の診断の有用性は CT とのみ比較されており、MRI との比較はされていない。²⁵⁻²⁸ 脳転移、副腎及び肝転移や骨転移における CT と MRI の診断能の比較において、MRI は各種撮像法や造影剤の併用により PET と同様 CT に比して、有意に改善することができることも知られている。²⁹⁻³¹ 更に、MRI においても全身造影 MR angiography 用の moving table と各種コイルの出現及び parallel imaging の手法との併

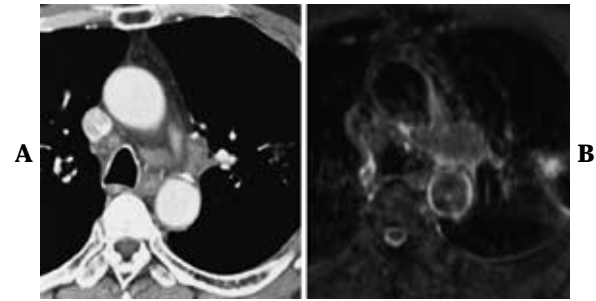


Figure 8. 58-year-old woman with lymph node without metastasis from adenocarcinoma (文献 23 より許可を得て掲載). **A**: Contrast-enhanced CT in axial plane demonstrates the lower paratracheal, and subaortic nodes. Short-axis diameters of these lymph nodes ranged between 3 and 11 mm. **B**: STIR turbo SE image in axial plane demonstrates these lymph nodes as low signal intensities (arrows). Short-axis diameters of these lymph nodes ranged between 3 and 11 mm. High-power field photomicrograph (H&E, not shown) of histologic specimen of subaortic lymph node showed no evidence of metastatic tumor cell nests and fibrotic scars in the lymph node.

用により、MDCT と同等の空間分解能で、MRI の高い組織分解能を有した全身 MRI による M 因子診断も可能になった (Figure 9)。³²⁻³⁵ したがって、今後全身 MRI と FDG-PET との対比による有用性の証明により将来新たな遠隔転移診断法として脚光を浴びる可能性もある。

3. 肺機能診断

従来の肺の機能画像では核医学を用いた検査法が標準化され、一般肺機能検査とともに広く用いられ、MRI の関与する余地はなかった。しかし、最近の MR 装置における急速な進歩、gadolinium 造影剤等の新たな造影剤の開発、100% 酸素を用いた換気画像法を可能とする画像解析ソフトの開発と相まって、MRI による肺の画像は新しい局面を迎えている。したがって、本項では最新の撮像法と画像解析用ソフトを駆使した MR 肺換気・灌流画像 (MR ventilation and perfusion imaging) の臨床応用について簡潔に述べたい。

1) MR 灌流画像 (MR perfusion imaging)

胸部における MRI を用いた血流情報による機能診断として、MR perfusion imaging が挙げられる。本法は造影 MR angiography において通常用いられる inflow 効果に依存しないで、造影剤の T1 短縮効果を利用、高速 GRE 法を更に高速化し、非常に短い TE (最短 0.6 ms) を用いた超高速 GRE を用いて行う。最新の知見によれば、MR perfusion imaging にて測定された局所肺血流量は核医学検査による局所肺血流量と比して $\pm 10\%$ 以下の誤差

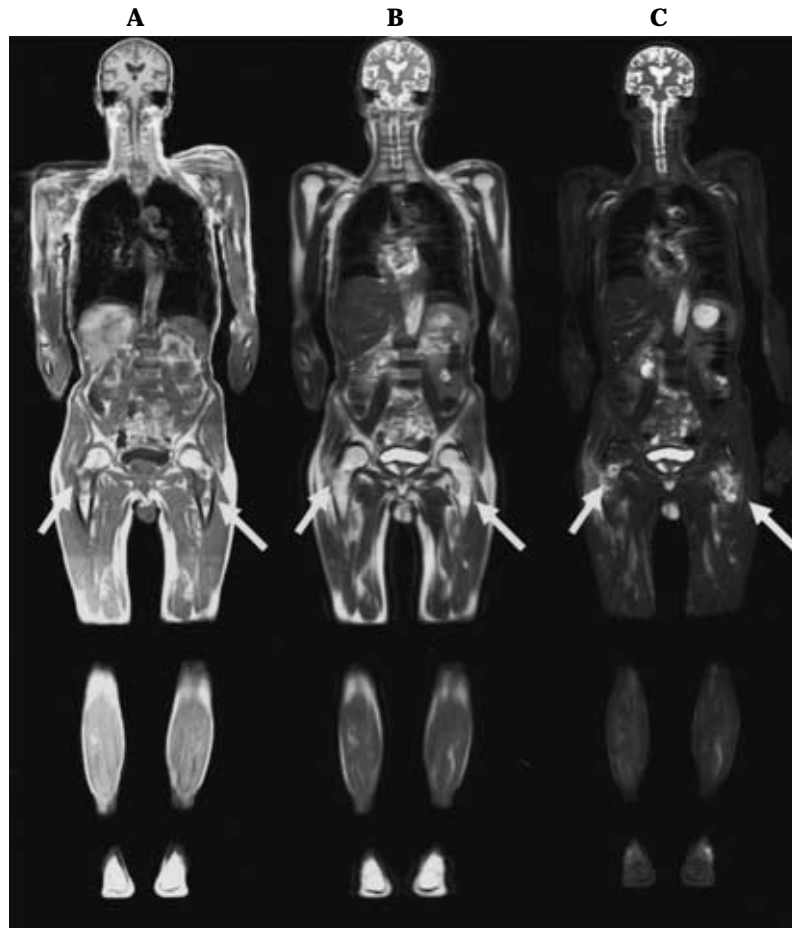


Figure 9. 70-year-old man with bilateral femoral bone metastases from adenocarcinoma. **A** : T1-weighted whole body MRI clearly demonstrated bone metastases as low signal intensities in the bilateral femoral bones(arrows). **B** : T2-weighted whole body MRI shows bone metastases as high signal intensities in the bilateral femoral bones (arrows) **C** : STIR whole body MRI clearly demonstrated bone metastases as high signal intensities in the bilateral femoral bones (arrows)

しか有さないのみならず，肺癌患者の術後肺機能の評価においては核医学検査よりも正確に評価することが可能であり，短い検査時間，低侵襲性，低コストと相まって今後ますます臨床応用が期待できる分野である。³⁶ また，MR perfusion imaging の画像をピクセル毎に核医学と同様に定量評価し，定量的肺血流パラメータを求めることも試みられている (Figure 10)^{37,38} 最新の研究においては全肺野の局所肺血流を過去の SPECT や PET と同等のレベルで評価できるのみならず，原発性及び二次性肺高血圧症の病態生理学に基づく診断の可能性も示唆されている。³⁸

2) MR 換気画像 (MR ventilation imaging)

MR ventilation imaging においては，100% 酸素を造影剤として用いた，酸素造影 MR 換気画像 (oxygen-

enhanced MR imaging)³⁹⁻⁴³ とレーザーにより超偏極 (hyperpolarization) を施した He-3 や Xe-129 を利用し，T1 強調の GRE 法を用いた超偏極希ガス造影 MR 画像 (hyperpolarized noble gas MR imaging)⁴⁴⁻⁴⁸ の2種類の方法に大別される。Hyperpolarized noble gas MR imaging においては末梢肺における肺胞のサイズ，気道内の気流の評価による気管支狭窄等の評価で様々な情報を提供することが可能であるが，⁴⁴⁻⁴⁸ hyperpolarization を起こす励起装置等に対する設備投資や専用のコイル等の開発が必要であり，1回あたりの検査費用が通常の核医学検査と比して遥かに高額であるため，現時点において臨床応用は欧米の限られた施設でのみ行われ，わが国においては一部の施設で動物実験レベルの研究が行われているにすぎない。

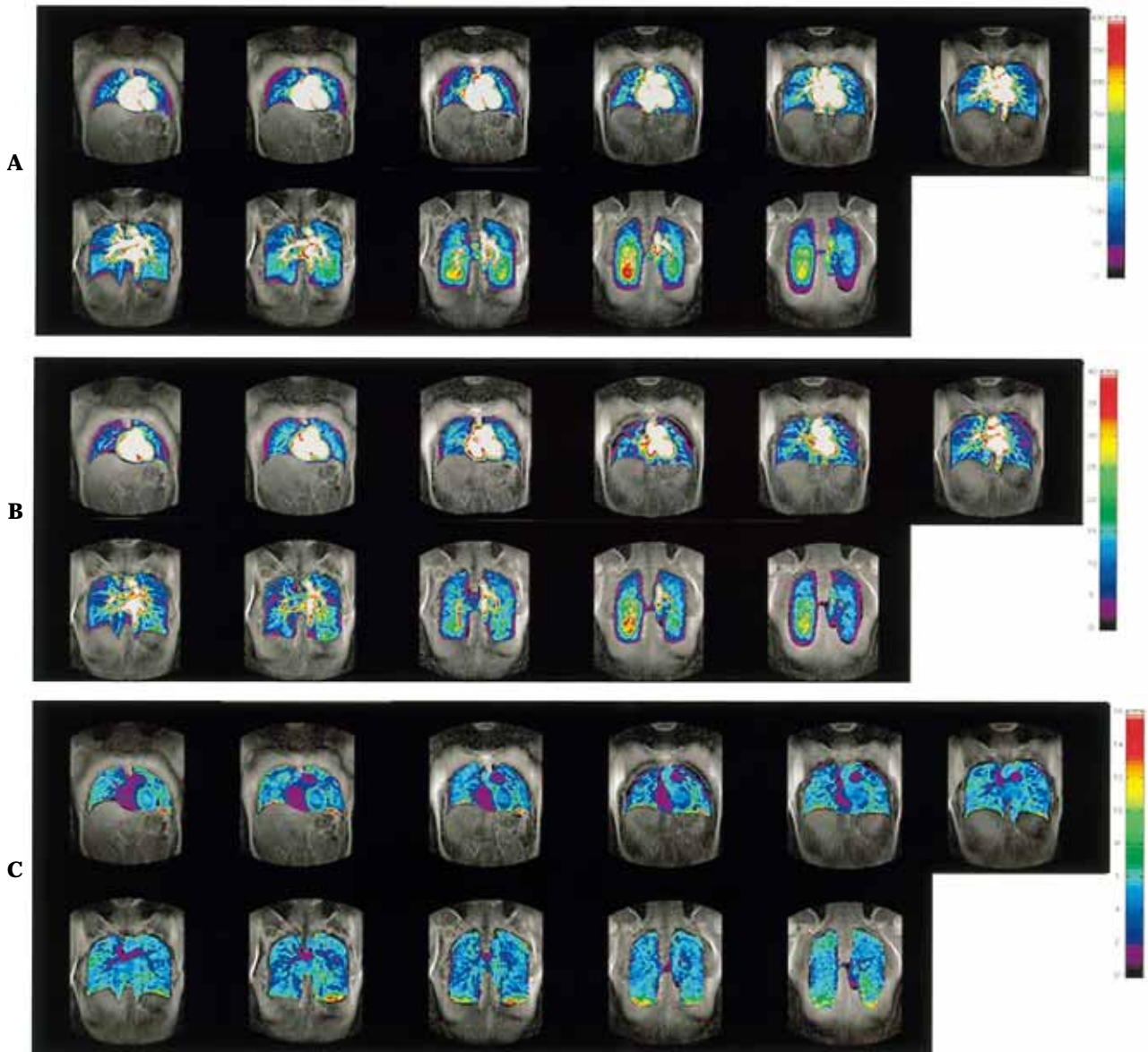


Figure 10. 30-year-old man volunteer (文献 38 より許可を得て掲載) **A** : Image maps (L to R: ventral to dorsal) of pulmonary blood flow (PBF) demonstrated regional changes of PBF in the gravitational and isogravitational directions. **B** : Image maps (L to R: ventral to dorsal) of pulmonary blood volume (PBV) demonstrated regional changes of PBV in the gravitational and isogravitational directions. **C** : Image maps (L to R: ventral to dorsal) of mean transit time (MTT) demonstrated regional changes of MTT in the gravitational and isogravitational directions.

一方 ,oxygen-enhanced MR imaging は分子状の酸素の T1 短縮効果を利用して肺換気画像を得る . 100% 酸素の吸入により信号強度は最大で 50% 程度上昇し , 吸入をやめることにより信号強度は前値に速やかに復する .³⁹⁻⁴³ 高濃度酸素は検査室の酸素の配管を利用することにより得ることができるため , 設備投資は不要で , 安価かつ安全に繰り返し検査を行えるのが最大の利点であるが , 信号強度変化が微弱で画像化が困難である . したがって , 画像化には専用の画像解析ソフトを使用せざるを得ない

ものの , 相対的信号強度変化率をピクセル毎に計算することにより oxygen-enhanced MR image を得ることができる (Figure 11) . 換気シンチや呼吸機能検査との対比により , 酸素による造影効果が酸素の局所換気量に相関するのみならず , 信号強度変化の原理から , 1 秒率や拡散能との良好な相関関係を有していることが知られている .³⁹⁻⁴³ また , 本法による局所肺の造影効果を元にした術後肺機能予測の研究においては , density-masked CT による評価よりも正確に肺気腫等の慢性閉塞性肺疾患

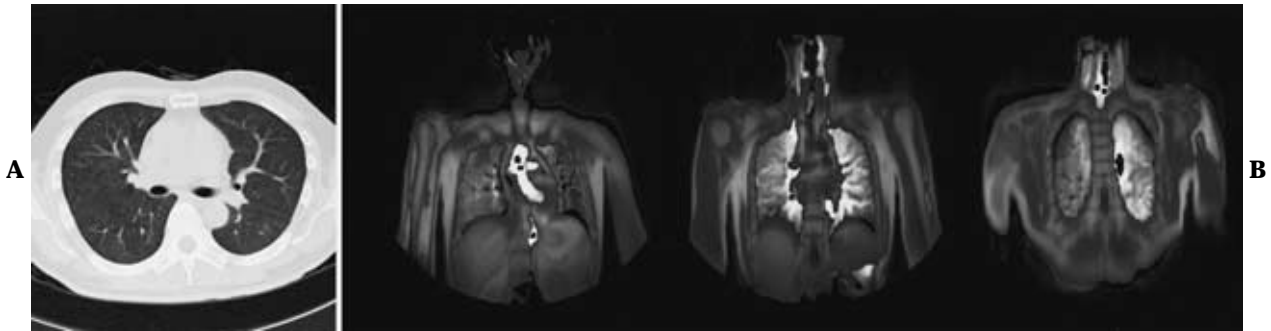


Figure 11. 45-year old non-smoking subject. **A** : Routine CT demonstrates no low attenuation areas in the both lungs. **B** : Oxygen-enhanced MRI finding (L to R: anterior to posterior) clearly demonstrate homogeneous and high oxygen-enhancement in both lungs.

(chronic obstructive pulmonary disease: COPD) に伴う肺機能の低下を評価し、肺血流シンチよりも正確に術後肺機能を予測できる可能性が示唆されている⁴⁹ したがって、oxygen-enhanced MR imaging においてはこれまでの核医学を用いた換気画像法にて評価されてきた換気情報のみならず、肺生理機能を肺局所レベルで評価できる可能性が示唆され、呼吸器核磁気共鳴医学及び放射線医学における新たな研究分野の確立とその発展が大いに期待される。

結 語

近年の MDCT 及び MRI の技術の進歩による最新の CT, MRI を用いた画像診断に関して解説した。今後も、医学、工学、薬学、物理学、分子生物学等の様々な分野での研究が進むことにより肺癌の画像診断は無限に進歩する可能性を秘めている。しかし、画像診断においては空間分解能やコントラスト分解能等の限界点が存在することもまた常である。したがって、我々はこれらの診断機器の有用性と限界点を熟慮した上で、肺癌診断を行う必要があると考える。

REFERENCES

- 1 . Webb WR, Gatsonis C, Zerhouni EA, et al. CT and MR imaging in staging non-small cell bronchogenic carcinoma: report of the Radiologic Diagnostic Oncology Group. *Radiology*. 191;178:705-713.
- 2 . Swensen SJ, Viggiano RW, Midthun DE, et al. Lung nodule enhancement at CT: multicenter study. *Radiology*. 2000;214:73-80.
- 3 . Patz EF Jr, Lowe VJ, Hoffman JM, et al. Focal pulmonary abnormalities: evaluation with F-18 fluorodeoxyglucose PET scanning. *Radiology*. 1993;188:487-490.
- 4 . Dewan NA, Gupta NC, Redepenning LS, et al. Diagnostic efficiency of PET-FDG imaging in solitary pulmonary nodules. *Chest*. 1993;104:997-1002.
- 5 . Kusumoto M, Kono M, Adachi S, et al. Gadopentetate-dimeglumine-enhanced magnetic resonance imaging for lung nodules: differentiation of lung cancer and tuberculosis. *Invest Radiol*. 1994;29:S255-S256.
- 6 . Gückel C, Schnabel K, Deimling M, et al. Solitary pulmonary nodules: MR evaluation of enhancement patterns with contrast-enhanced dynamic snapshot gradient-echo imaging. *Radiology*. 1996;200:681-686.
- 7 . Kono M, Adachi S, Kusumoto M, et al. Clinical utility of Gd-DTPA - enhanced magnetic resonance imaging in lung cancer. *J Thorac Imaging*. 1993;8:18-26.
- 8 . Naidich DP, Webb RW, Muller NL, et al. Lung cancer. In: Naidich DP, Webb RW, Muller NL, et al. eds. *Computed Tomography and Magnetic Resonance of Thorax*. 3rd ed. Philadelphia, Pa: Lippincott-Raven; 1999:343-380.
- 9 . Swensen SJ, Brown LR, Colby TV, et al. Pulmonary nodules: CT evaluation of enhancement with iodinated contrast material. *Radiology*. 1995;194:393-398.
- 10 . Yi CA, Lee KS, Kim EA, et al. Solitary pulmonary nodules: dynamic enhanced multi-detector row CT study and comparison with vascular endothelial growth factor and microvessel density. *Radiology*. 2004;233:191-199.
- 11 . White CS, Templeton PA, Belani CP. Imaging in lung cancer. *Semin Oncol*. 1993;20:142-152.
- 12 . 楠本昌彦 . 肺癌における Gd-DTPA enhanced MRI の有用性に関する臨床的研究 . 日本医放会誌 . 1992;52:358-371.
- 13 . Fujimoto K, Abe T, Muller NL, et al. Small peripheral pulmonary carcinomas evaluated with dynamic MR imaging: correlation with tumor vascularity and prognosis. *Radiology*. 2003;227:786-793.
- 14 . Ohno Y, Hatabu H, Takenaka D, et al. Solitary pulmonary nodules: potential role of dynamic MR imaging in management initial experience. *Radiology*. 2002;224:503-511.
- 15 . Ohno Y, Hatabu H, Takenaka D, et al. Dynamic MR imaging: value of differentiating subtypes of peripheral small adenocarcinoma of the lung. *Eur J Radiol*. 2004;52:144-150.
- 16 . Takahashi M, Shimoyama K, Murata K, et al. Hilar and mediastinal invasion of bronchogenic carcinoma: evaluation by thin-section electron-beam computed tomogra-

- phy. *J Thorac Imaging*. 1997;12:195-199.
- 17 . Ohno Y, Adachi S, Motoyama A, et al. Multiphase ECG-triggered 3D contrast-enhanced MR angiography: utility for evaluation of hilar and mediastinal invasion of bronchogenic carcinoma. *J Magn Reson Imaging*. 2001;13:215-224.
 - 18 . Steinert HC, Hauser M, Allemann F, et al. Non-small cell lung cancer: nodal staging with FDG PET versus CT with correlative lymph node mapping and sampling. *Radiology*. 1997;202:441-446.
 - 19 . Gupta NC, Graeber GM, Bishop HA. Comparative efficacy of positron emission tomography with fluorodeoxyglucose in evaluation of small (< 1 cm), intermediate (1 to 3 cm), and large (> 3 cm) lymph node lesions. *Chest*. 2000;117:773-778.
 - 20 . Higashi K, Nishikawa T, Seki H, et al. Comparison of fluorine-18-FDG PET and thallium-201 SPECT in evaluation of lung cancer. *J Nucl Med*. 1998;39:9-15.
 - 21 . Fujimoto K, Edamitsu O, Meno S, et al. MR diagnosis for metastasis or non-metastasis of mediastinal and hilar lymph nodes in cases of primary lung cancer: detectability, signal intensity, and MR-pathologic correlation. *Nippon Acta Radiol*. 1995;55:162-171.
 - 22 . Takenaka D, Ohno Y, Hatabu H, et al. Differentiation of metastatic versus non-metastatic mediastinal lymph nodes in patients with non-small cell lung cancer using respiratory-triggered short inversion time inversion recovery(STIR)turbo spin-echo MR imaging. *Eur J Radiol*. 2002;44:216-224.
 - 23 . Ohno Y, Hatabu H, Takenaka D, et al. Metastases in mediastinal and hilar lymph nodes in patients with non-small cell lung cancer: quantitative and qualitative assessment with STIR turbo spin-echo MR imaging. *Radiology*. 2004;231:872-879.
 - 24 . Wong J, Haramati LB, Rozenshtein A, et al. Non-small-cell lung cancer: practice patterns of extrathoracic imaging. *Acad Radiol*. 1999;6:211-215.
 - 25 . Bury T, Dowlati A, Paulus P, et al. Whole-body 18FDG positron emission tomography in the staging of non-small cell lung cancer. *Eur Respir J*. 1997;10:2529-2534.
 - 26 . Marom EM, McAdams HP, Erasmus JJ, et al. Staging non-small cell lung cancer with whole-body PET. *Radiology*. 1999;212:803-809.
 - 27 . Marom EM, Sarvis S, Herndon JE 2nd, et al. T1 lung cancers: sensitivity of diagnosis with fluorodeoxyglucose PET. *Radiology*. 2002;223:453-459.
 - 28 . Stroobants SG, D 'Hoore I, Doooms C, et al. Additional value of whole-body fluorodeoxyglucose positron emission tomography in the detection of distant metastases of non-small-cell lung cancer. *Clin Lung Cancer*. 2003;4:242-247.
 - 29 . Korobkin M, Lombardi TJ, Aisen AM, et al. Characterization of adrenal masses with chemical shift and gadolinium-enhanced MR imaging. *Radiology*. 1995;197:411-418.
 - 30 . Yokoi K, Kamiya N, Matsuguma H, et al. Detection of brain metastasis in potentially operable non-small cell lung cancer: a comparison of CT and MRI. *Chest*. 1999;115:714-719.
 - 31 . Earnest F 4th, Ryu JH, Miller GM, et al. Suspected non-small cell lung cancer: incidence of occult brain and skeletal metastases and effectiveness of imaging for detection pilot study. *Radiology*. 1999;21:137-145.
 - 32 . Walker R, Kessar P, Blanchard R, et al. Turbo STIR magnetic resonance imaging as a whole-body screening tool for metastases in patients with breast carcinoma: preliminary clinical experience. *J Magn Reson Imaging*. 2000;11:343-350.
 - 33 . Lauenstein TC, Goehde SC, Herborn CU, et al. Three-dimensional volumetric interpolated breath-hold MR imaging for whole-body tumor staging in less than 15 minutes: a feasibility study. *AJR Am J Roentgenol*. 2002;179:445-449.
 - 34 . Lauenstein TC, Freudenberg LS, Goehde SC, et al. Whole-body MRI using a rolling table platform for the detection of bone metastases. *Eur Radiol*. 2002;12:2091-2099.
 - 35 . Lauenstein TC, Goehde SC, Herborn CU, et al. Whole-body MR imaging: evaluation of patients for metastases. *Radiology*. 2004;233:139-148.
 - 36 . Ohno Y, Hatabu H, Higashino T, et al. Dynamic perfusion MRI versus perfusion scintigraphy: prediction of postoperative lung function in patients with lung cancer. *AJR Am J Roentgenol*. 2004;182:73-78.
 - 37 . Levin DL, Chen Q, Zhang M, et al. Evaluation of regional pulmonary perfusion using ultrafast magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med*. 2001;46:166-171.
 - 38 . Ohno Y, Hatabu H, Murase K, et al. Quantitative assessment of regional pulmonary perfusion in the entire lung using three-dimensional ultrafast dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging: Preliminary experience in 40 subjects. *J Magn Reson Imaging*. 2004;20:353-365.
 - 39 . Edelman RR, Hatabu H, Tadamura E, et al. Noninvasive assessment of regional ventilation in the human lung using oxygen-enhanced magnetic resonance imaging. *Nat Med*. 1996;2:1236-1239.
 - 40 . Loffler R, Muller CJ, Peller M, et al. Optimization and evaluation of the signal intensity change in multisection oxygen-enhanced MR lung imaging. *Magn Reson Med*. 2000;43:860-866.
 - 41 . Ohno Y, Chen Q, Hatabu H. Oxygen-enhanced magnetic resonance ventilation imaging of lung. *Eur J Radiol*. 2001;37:164-171.
 - 42 . Ohno Y, Hatabu H, Takenaka D, et al. Oxygen-enhanced MR ventilation imaging of the lung: preliminary clinical experience in 25 subjects. *AJR Am J Roentgenol*. 2001;177:185-194.
 - 43 . Ohno Y, Hatabu H, Takenaka D, et al. Dynamic oxygen-enhanced MRI reflects diffusing capacity of the lung. *Magn Reson Med*. 2002;47:1139-1144.
 - 44 . Saam BT, Yablonskiy DA, Kodibagkar VD, et al. MR imaging of diffusion of ³He gas in healthy and diseased lungs. *Magn Reson Med*. 2000;44:174-179.
 - 45 . Wolber J, Cherubini A, Leach MO, et al. Hyperpolarized ¹²⁹Xe NMR as Probe for blood oxygenation. *Magn Reson Med*. 2000;43:491-496.

- 46 . Altes TA, Powers PL, Knight-Scott J, et al. Hyperpolarized ^3He MR lung ventilation imaging in asthmatics: preliminary findings. *J Magn Reson Imaging*. 2001;13:378-384.
- 47 . Salerno M, de Lange EE, Altes TA, et al. Emphysema: hyperpolarized helium 3 diffusion MR imaging of the lungs compared with spirometric indexes initial experience. *Radiology*. 2002;222:252-260.
- 48 . Salerno M, Altes TA, Brookeman JR, et al. Rapid hyperpolarized ^3He diffusion MRI of healthy and emphysematous human lungs using an optimized interleaved-spiral pulse sequence. *J Magn Reson Imaging*. 2003;17:581-588.
- 49 . Ohno Y, Hatabu H, Higashino T, et al. Oxygen-enhanced MR Imaging: Correlation with Postoperative Lung Function in Lung Cancer Patients. *Radiology* (in press).