

総説 中枢神経領域におけるSusceptibility-weighted imagingの有用性

杉原 修司、金崎 佳子、藤井 進也、松末 英司、小川 敏英

鳥取大学医学部病態解析医学講座 医用放射線学分野

Efficacy of susceptibility-weighted imaging in clinical neuroimaging

Shuji Sugihara, Yoshiko Kanasaki, Shinya Fujii, Eiji Matsusue, Toshihide Ogawa

Division of Radiology, Department of Pathophysiological and Therapeutic Science,
Faculty of Medicine, Tottori University.

抄録

Susceptibility-weighted imaging (SWI) は血管内血液の酸素飽和度変化、あるいは出血・鉄沈着を鋭敏に捉えることが可能となる撮像方法である。3TMRI装置の特徴の一つは磁化率変化がより鋭敏となって現れることである。従って、SWIは超高磁場MRI装置の特徴を十分に発揮しうる撮像方法といえる。本稿では中枢神経領域におけるSWIの有用性について解説した。

Abstract

Susceptibility-weighted imaging (SWI) is sensitive to changes of oxygenation level of blood, blood products and changes of iron content. The susceptibility effect is more sensitive at high field strength MR system. Therefore, SWI is considered to be the useful method that the characteristic feature at high field strength can fully be demonstrated. We explained the efficacy of SWI in clinical neuroimaging in this article.

Key words : MRI, susceptibility effect, blood oxygen level dependence, hemorrhage

はじめに

MRIは高いコントラスト分解能を有することなどから、あらゆる領域の画像診断において多くの恩恵を与えている。これまで中枢神経領域では、T1強調画像、T2強調画像、MR angiographyを中心として画像診断が行われることが多かったが、これらに加えFLAIR画像、拡散強調画像といった撮像方法を追加することにより、更なる診断能の向上が得られている。

最近になりsusceptibility-weighted imaging (SWI)の登場により、新たな組織間コントラストを有する画像が得られるようになった。SWIではこれまで診断に

用いられてきた強度画像に位相画像で得られた情報を付加することにより、磁化率の異なる組織のT2*短縮によるコントラストをより強調した撮像方法である。SWIでは血管内血液の酸素飽和度変化、あるいは微量な出血・鉄沈着を鋭敏に捉えることが可能であり、デオキシヘモグロビン化された静脈のコントラストを上昇させることにより、高分解能を維持したままで髄質静脈を画像化することが可能である。このため、SWIは当初MR high-resolution BOLD (blood oxygenation level-dependent) venographyとして血管奇形などに対する高い診断能が報告されてきた^{1),2)}。また最近で

は、外傷による微小出血の検出^{3),4)}に加え、急性期脳血管障害⁵⁾、脳腫瘍^{6),7)}、変性脱髄性疾患⁸⁾に対する有用性についても報告されてきている。

一方、日本では2003年に3TのMRI装置が頭部に限って薬事承認され、また2005年には全身用の3T MRI装置が薬事承認されるに至った。これを機会に国内でも臨床用の3T MRI装置が普及し始めている。MRIでは静磁場強度に比例して信号強度が上昇することが知られており、より高空間分解能な画像が得られることがメリットとして知られている。その他、高磁場MRI装置の代表的な特徴としては磁化率効果がより鋭敏となって現れることが知られている。この点でもSWIは高磁場MRI装置の特徴を十分に発揮しうる撮像方法といえる。

本稿では、SWIの原理・撮像方法に関する概説に加え、血管奇形、外傷、急性期脳血管障害、脳腫瘍に対するSWIの有用性について、代表的症例を提示しながら文献的考察を加えて解説を行なう。

撮像方法および画像処理

Haackeら⁹⁾の提唱しているSWIは3Dのgradient echo法を用いて撮像する手法で、TEを長めに設定することにより磁化率効果を強調する。三軸方向にflow compensationを印可して撮像を行なうことにより、動脈血流の影響が軽減される。得られた位相画像は低周波成分を取り除くためにhigh-pass filterを通し、その後位相マスク画像を作成、これを強度画像と掛け合わせるによりSWIは作成される¹⁰⁾。強度画像と位相画像を癒合させることで、磁化率効果をより強調することが可能となる。位相マスク処理の過程において、Hamming窓サイズを変更することでもSWIのコントラ

ストは変化するとされ、目的に応じた適切な位相マスク処理が必要とされる¹¹⁾。このようにして作成された画像を最小値投影法(minimum intensity projection: mIP)を用いて画像再構成し、読影を行なう。

代表的疾患

・血管奇形

MRIで血管奇形を評価する場合には、これまではT2強調画像、あるいはプロトン密度強調画像においてflow voidを検出すること、またはMRAにおいて増生した血管を検出することにより行われてきた。しかしこれらの撮像方法では血流の遅い血管、もしくは微小な血管を評価することが困難な場合が多かった。前述の如く、SWIは当初MR high-resolution BOLD venographyとして登場した側面があり、これまで検出が困難とされてきた遅延した血流を示す静脈奇形の検出に対する有用性が特に高いとされる²⁾。SWIでは血中のデオキシヘモグロビンによる磁化率効果を反映して静脈が描出される点が、血流そのものを描出する他の撮像方法とは異なる。このためSWIでは検出能が向上する反面、血管径を過大評価する可能性があるなど、注意すべき点もある。

またSWIでは造影を追加することにより静脈の描出が向上するとの報告もある¹²⁾。このことを利用して、造影剤を用いることにより撮像時間を短縮できる可能性もある。また造影を追加することにより、静脈と出血の鑑別が可能である。

・外傷

微小出血の検出はSWIが最も得意とする分野である。出血を伴う外傷性変化としてはびまん性軸索損傷

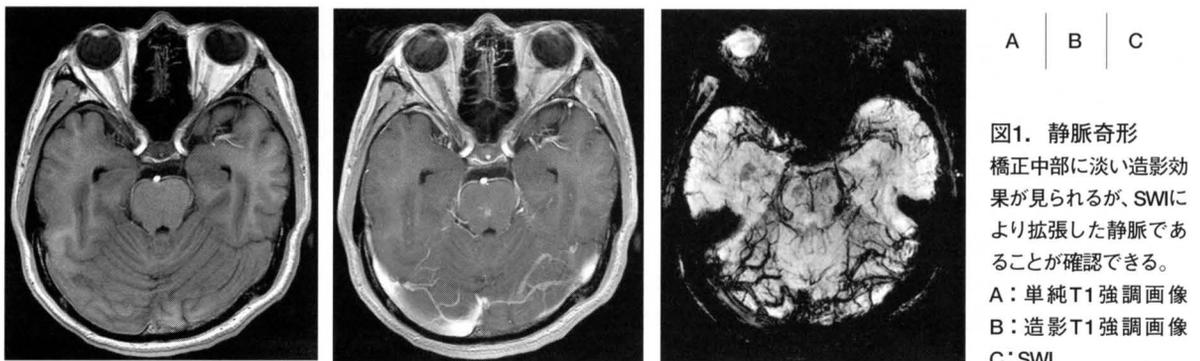


図1. 静脈奇形
橋正中部に淡い造影効果が見られるが、SWIにより拡張した静脈であることが確認できる。
A: 単純T1強調画像
B: 造影T1強調画像
C: SWI

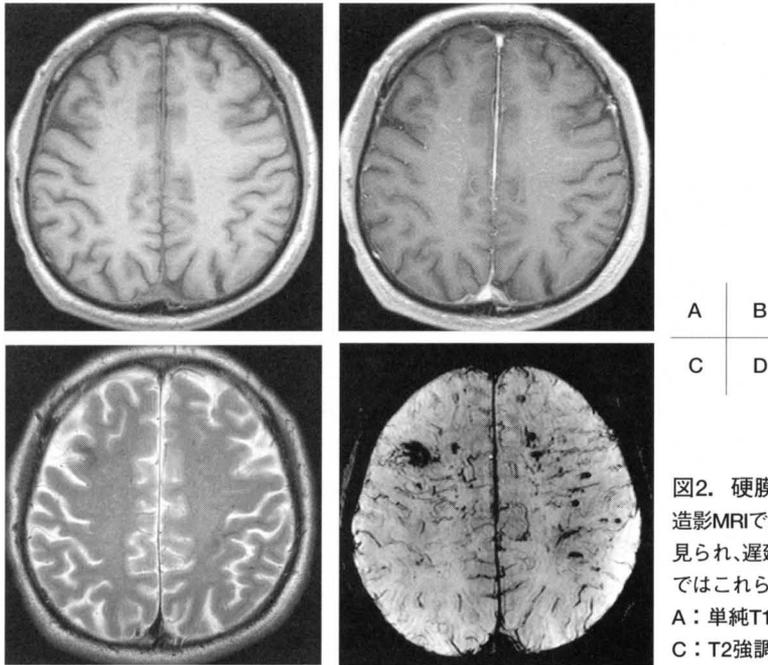


図2. 硬膜動静脈瘻

造影MRIでは両側大脳半球深部白質に淡い線状に造影効果が見られ、遅延した血流を示す異常血管の存在が疑われる。SWIではこれら血管が明瞭な低信号として描出される。

A：単純T1強調画像、B：造影T1強調画像、

C：T2強調画像、D：SWI

(DAI) が有名である。びまん性軸索損傷では一般的に出血を伴う症例が、出血を伴わない症例に比べて予後が不良となることが知られている。Tongらは、DAI症例でSWIによって描出された出血数と容積が、予後と相関があったと報告している⁴⁾。注意点としては血管奇形と同様に出血病変が過大評価される点がある。また脳実質内の小出血に加えて、くも膜下出血もSWIでは明瞭な低信号として検出される。

・脳血管性障害

脳血管障害では急性期塞栓子の検出、出血性梗塞の早期診断、急性期miserly perfusionの評価に関する有用性が挙げられている¹⁰⁾。SWIでは塞栓子を明瞭な低信号として捉えることが可能である。ただし脳溝内には低信号として皮質静脈も認められるため、これが塞栓子と紛らわしくなる場合もある。またWycliffeらの報告⁵⁾では、SWIは出血性梗塞の早期診断にも優れるとしている。これまで出血の早期診断にはMRIではT2*強調画像が有用とされてきたが、この報告ではT2*強調画像と比較してもSWIの早期診断能が優れるとしている。その他、皮質枝の急性期梗塞では梗塞領域に一致して皮質静脈、および髄質静脈が健側と比較して増強し

て見られることがある。これは還流静脈血の相対的なオキシヘモグロビン濃度の低下、およびデオキシヘモグロビンの濃度上昇によると変化され、いわゆるmiserly perfusionを反映しているとされている¹⁰⁾。

・脳腫瘍

脳腫瘍の悪性度評価として一般に濃染パターン、あるいは内部に生じた出血の程度で評価されることが多い。これまでの報告ではgradient echo法を用いて、内部の出血の程度によりgliomaの悪性度を評価するといった報告がある¹³⁾。SWIはより鋭敏に出血を捉えることが可能であり、これら脳腫瘍の悪性度評価への可能性も期待される。また出血に加え、局所オキシヘモグロビン濃度の低下、局所デオキシヘモグロビン濃度の上昇、および局所静脈血液量の増加などがSWIにて信号低下を来す原因として考えられている。またSWIでは造影を追加することにより造影T1強調画像で得られた情報に加えて、腫瘍の内部性状などに新たな情報が追加できるとしている。SWIにおける腫瘍の造影効果は様々であるが、これは静脈構造の描出、あるいは脳血液関門の破綻による造影剤漏出などが関連しているとされる⁷⁾。

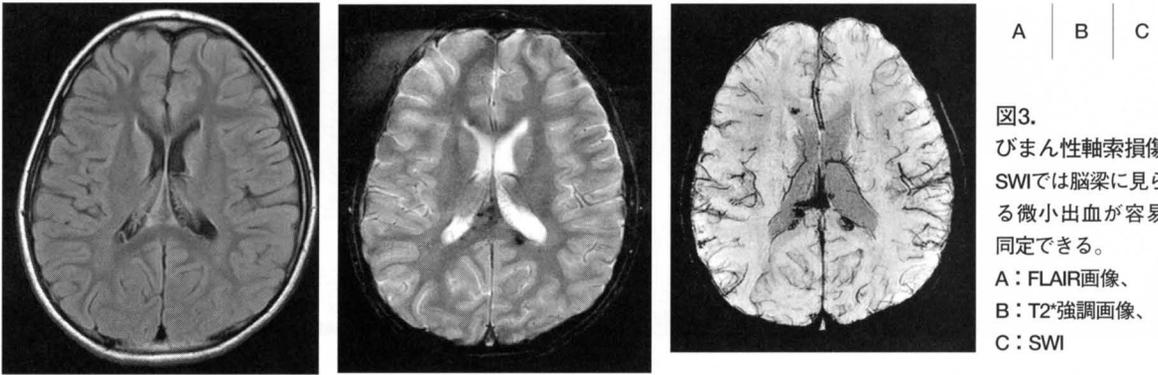


図3. びまん性軸索損傷
SWIでは脳梁に見られる微小出血が容易に同定できる。
A：FLAIR画像、
B：T2*強調画像、
C：SWI

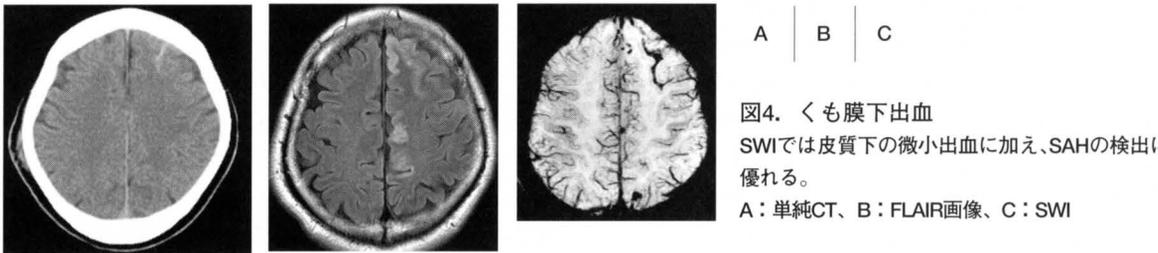


図4. くも膜下出血
SWIでは皮質下の微小出血に加え、SAHの検出にも優れる。
A：単純CT、B：FLAIR画像、C：SWI

症例提示

症例1 静脈奇形 (図1)

造影T1強調画像では橋正中に淡い造影効果が認められるが、この画像のみでの診断は困難である。SWIではこの病変に向かって正中に走行する帯状の低信号を認め、静脈奇形であることが分る。このような微細な血管奇形の検出にSWIは有用である。

症例2 硬膜動静脈瘻 (図2)

T1強調画像、T2強調画像では両側大脳半球深部白質にわずかにflow voidが認められ、造影T1強調画像ではわずかに造影効果が観察される。遅延した血流が存在することが推測される。SWIではこれら異常血管が明瞭な低信号帯として捉えることが可能となる。またこの異常血管に加え、皮質下の小出血巣も低信号として明瞭に捉えられる。

症例3 びまん性軸索損傷 (図3)

FLAIR画像では頭蓋内に生じた小出血病変を捉えることは困難であるが、T2*強調画像では脳梁の微小出血を低信号として捉えることが可能となる。SWIでは、より明瞭にこれら微小出血巣を捉えることが可能となる。微小出血のコントラストはT2*強調画像よりもSWIの方が優れる。

症例4 くも膜下出血 (図4)

頭部外傷により生じた外傷性くも膜下出血である。一般的にはCTよりもFLAIR画像がSAHの検出には有用とされるが、SWIでは脳構内の著明な低信号として捉えることが可能である。

症例5 心原性脳塞栓症 (図5)

急性期脳塞栓症の症例である。CTでは左中大脳動脈にhyperdense MCA signが認められるが、SWIではこの塞栓子が著明な低信号として描出される。ただし脳溝には皮質静脈による低信号も認められることから、

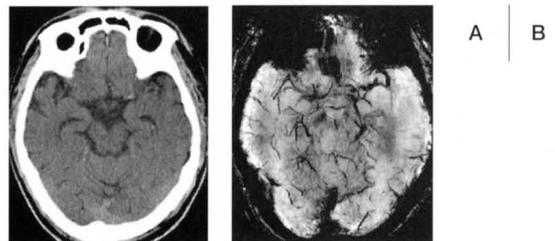
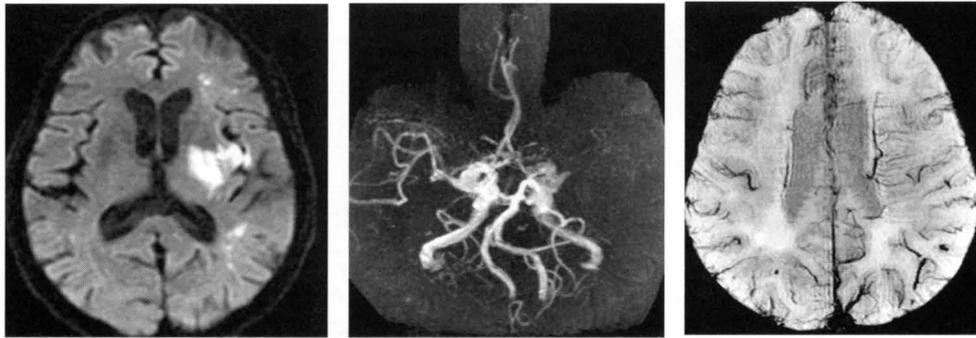


図5. 心原性脳塞栓症
単純CTでは左中大脳動脈にhyperdense MCA signを認める。SWIでは左中大脳動脈に見られる塞栓子が低輝度として明瞭に描出されている。
A：単純CT、B：SWI



A | B | C
 図6. 急性期脳梗塞
 左中大脳動脈領域に生じた急性期梗塞である。梗塞領域に一致した髄質静脈に低信号の増強が認められる。
 A: 拡散強調画像、
 B: MRA、C: SWI

塞栓子と紛らわしいこともある。

症例6 左中大動脈領域の急性期梗塞 (図6)

拡散強調画像では左中大脳動脈領域に急性期梗塞巣が見られる。SWIではこの還流異常領域に一致して髄質静脈の拡張が見られる。この所見は還流静脈血の相対的なデオキシヘモグロビン濃度の上昇による変化とされ、misery perfusionを反映していると考えられている。

症例7 転移性脳腫瘍 (図7)

いずれも転移性脳腫瘍である。造影効果が顕著である症例 (症例7.2) では、SWIで内部に出血による低信号域が多数認められる。この症例では出血部位以外も、腫瘍は全体に信号が低下している。これは局所デオキシヘモグロビン濃度の上昇、あるいは局所静脈血量の増加などが反映していることが推測される。

症例8 脳腫瘍術後再発 (図8)

造影T1強調画像では腫瘍辺縁部に造影効果が認められる。造影SWIでは辺縁に低信号帯が出現し、その周囲に淡い造影効果が認められる。これは静脈血管とBBB

の破綻による造影剤漏出による変化を反映していると考えられる。

おわりに

SWIは高磁場MRI装置で撮像することにより、そのコントラストをより強調することが可能な撮像方法である。従来報告されてきたvenographyとして用いることにより、より詳細な静脈構造、および静脈奇形の検出が可能となる。また出血性病変への感度の高さから、外傷、脳血管性障害および腫瘍性病変などへの診断に対する可能性も持ち合わせている。これら特徴を十分に理解することにより、SWIは中枢神経領域における新たな診断ツールとして確立されていくと考えられる。

参考文献

1. Reichenbach JR, Jonetz-Mentzel L, Fitzek C, et al. High-resolution oxygen-level dependent MR venography (HRBV) : a new technique. *Neuroradiology* 43: 364-369, 2001.

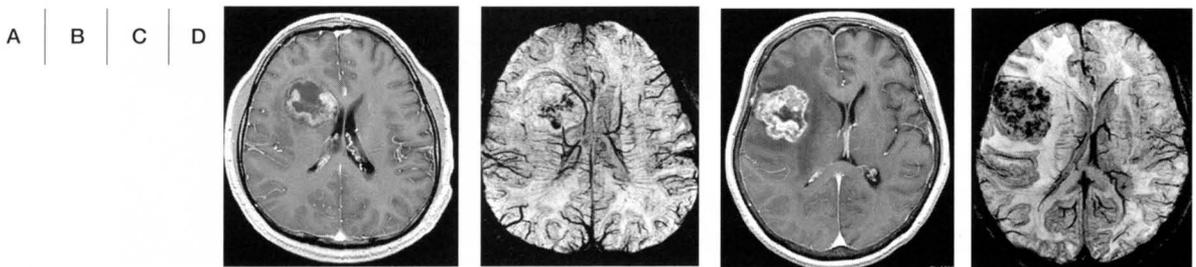


図7. 転移性脳腫瘍

いずれも転移性脳腫瘍の症例である。造影効果が顕著である症例8では、SWIにて内部に出血を疑う低信号域が目立つ。その他の実質部分も信号は低下している。

症例7.1: A: 造影T1強調画像、B: SWI

症例7.2: C: 造影T1強調画像、D: SWI

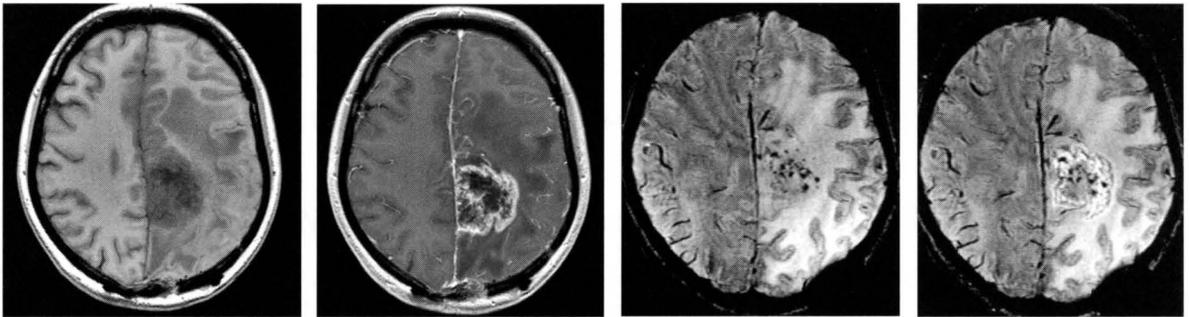


図8. 脳腫瘍術後再発

脳腫瘍術後の症例で生検にて術後再発が証明された症例である。T1強調画像では辺縁部に造影される領域が認められるが、SWIでは辺縁に低信号を示す領域とその周囲に淡い造影効果を示す領域が見られる。

A: 単純T1 強調画像、B: 造影T1強調画像、C: SWI、D: 造影SWI

2. Lee BCP, Vo KD, Kido DK, et al. MR high-resolution blood oxygen level-dependent venography of occult (low-flow) vascular lesions. *AJNR Am J Neuroradiol* 20: 1239-1242, 1999.
3. Babikian T, Freier MC, Tong KA, et al. Susceptibility-weighted imaging: Neuropsychologic outcome and pediatric head injury. *Pediatr Neurol* 33: 184-194, 2005.
4. Tong KA, Ashwal S, Holshouser BA, et al. Diffuse axonal injury in children: clinical correlation with hemorrhagic lesions. *Ann Neurol* 56: 36-50, 2004.
5. Wycliffe ND, Choe J, Holshouser B, et al. Reliability in detection of hemorrhage in acute stroke by a new three-dimensional gradient recalled echo susceptibility-weighted imaging technique compared to computed tomography: a retrospective study. *J Magn Reson Imaging* 20: 372-377, 2004.
6. Haacke EM, Herigault G, Kido D, et al. Observing tumor vascularity noninvasively using magnetic resonance imaging. *Image Anal Stereol* 21: 107-113, 2002.
7. Sehgal V, Delproposito Z, Haddar D, et al. Susceptibility-weighted imaging to visualize blood products and improve tumor contrast in the study of brain masses. *J Magn Reson Imaging* 24: 41-51, 2006.
8. 佐々木真理、神原芳行、柴田恵理、他: 3Tesla磁化率強調画像を用いた多発性硬化症における脱髄病変の評価. *日磁医誌* 26: 61-62, 2006.
9. Haacke EM, Xu Y, Cheng YCN, et al. Susceptibility-weighted imaging (SWI). *Magn Reson Med* 52: 612-618, 2004.
10. 井田正博、吉澤寿、元良健一、他: SWIの臨床応用 一画像再構築の原理と急性期梗塞における有用性. *INNERVISION* 21・9: 41-46, 2006.
11. 神原芳行、佐々木真理、松村豊、他: 磁化率強調画像における位相マスク処理の有用性. *日磁医誌* 26: 58-59, 2006.
12. Lin w, Mukherjee P, An H, et al. Improving high-resolution MR bold venographic imaging using a T1 reducing contrast agent. *J Magn Reson Imaging* 10: 118-123, 1999.
13. Bagley LJ, Grossmann RI, Judy KD et al. Gliomas: correlation of magnetic susceptibility artifact with histologic grade. *Radiology* 202: 511-516, 1997.

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F FAX:03-3475-5619 E-mail:info@jaacc.jp

複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619