臨床技術

T₂ 強調画像を用いた非造影 MRI 三次元脳表画像の有用性岩田直樹¹⁾・紙谷秀規²⁾・山下栄二郎¹⁾・平田吉春¹⁾論文受付
2009年9月3日論文受理
2010年1月20日

Code No. 261

1) 鳥取大学医学部附属病院放射線部

2) 鳥取県立厚生病院脳神経外科

緒言

Magnetic resonance imaging (MRI) による脳表および脳表在静脈の三次元画像である three dimensional surface anatomy scanning (3DSAS) は脳腫瘍術前のシミュレーションとして使用されており、その有用性については多くの報告がある^{1~3)}。

3DSAS の主な作成方法は、Gd 造影剤投与後の 3D fast spoiled gradient recalled acquisition in the steady state (3D-FSPGR) のデータを用いた volume rendering (VR) 法であり^{4~7)}、当院においても同様の方法を用いて

3DSAS を作成しており、ほとんどの症例で有用であったが、造影剤アレルギーのある患者や腎機能の悪い患者には利用できないといった問題点があった。また 3DSAS の描出が不十分であった症例を数例経験した (Fig. 1)。

これらの症例は硬膜が造影されることにより脳溝や脳回、また脳表在静脈の確認が困難となっていると考えられる。造影剤の使用は、非造影では確認できない血管の抽出や、診断能の向上目的で利用されており、MRI による 3DSAS においても造影剤の使用は必須で

Usefulness of Non-contrast MRI Three Dimensional Brain Surface Imaging Using a T₂ Weighted ImageNaoki Iwata,¹⁾ Hideki Kamitani,²⁾ Eijiro Yamashita,¹⁾ and Yoshiharu Hirata¹⁾

1) Department of Radiology, Tottori University Hospital

2) Department of Neurosurgery, Tottori Prefectural Public Welfare Hospital

Received September 3, 2009; Revision accepted January 20, 2010; Code No. 261

Summary

MR brain surface imaging using a 3D T₁ fast spoiled gradient recalled acquisition in the steady state (FSPGR) sequence with contrast medium is useful for surgical planning. However, this method has several problems such as use of the contrast medium. In this paper we evaluated the usefulness of MR 3D brain surface imaging using a non-contrast enhanced 3D T₂ fast recovery fast spin echo (FRFSE) sequence as a new alternative method. This study includes 5 volunteers who underwent 3D volume rendering (VR) imaging using both a non-contrast enhanced 3D T₁-SPGR sequence and a non-contrast enhanced 3D T₂-FRFSE sequence, and 10 patients with brain tumors, who underwent preoperative 3D VR imaging using both a contrast enhanced 3D T₁-SPGR sequence and a non-contrast enhanced 3D T₂-FRFSE sequence. Four neurosurgeons assessed the visibility of sulci, gyri, and brain surface veins using a 4-point confidence scale on each VR image. 3D VR imaging using a 3D T₂-FRFSE sequence was significantly superior to that using a 3D T₁-SPGR sequence in the visualization of the sulci and gyri ($p < 0.05$). In contrast, there was no significant difference between both sequences in the visualization of the brain surface veins. MR brain surface imaging using a non-contrast 3D T₂-FRFSE sequence is at least equal or superior to 3D imaging using a contrast enhanced 3D T₁-SPGR sequence in the preoperative planning.

Key words: magnetic resonance imaging (MRI), surface anatomy scanning (SAS), three-dimensional fast spoiled gradient recalled acquisition in the steady state (3D-FSPGR), three-dimensional fast recovery fast spin echo (3D-FRFSE), volume rendering (VR)

別刷資料請求先：〒683-8504 鳥取県米子市西町36番地1
鳥取大学医学部附属病院放射線部 岩田直樹 宛

Fig. 1 Case of a poor image obtained with MRI-3DSAS.
Sulci, gyri, and veins near the tumor almost cannot be seen in 3DSAS.
This is a consequence of the contrast effect of dura (arrow).

ある。しかし当院で経験した描出不良例においては、この造影剤による効果が負に働き、不必要な組織まで描出されたことが原因と考えられた。以上のことより、造影剤を使用せずに3DSASが作成できれば上記の問題を解決できると考えた。

今回、われわれは3D fast recovery fast spin echo (3D-FRFSE)法による T_2 強調画像での脳静脈のflow voidを利用した非造影の3DSAS法を考案し、従来法である造影剤併用3DSASとの比較検討を行ったので報告する。

1. 対象と方法

対象は正常ボランティア男性5例(平均35.8歳)、および2009年1~4月に撮影された脳腫瘍術前の臨床患者10例(男性4例、女性6例、平均61.7歳)であり、神経膠芽腫4例、転移性脳腫瘍4例、星細胞腫1例、髄膜腫1例である。

当院における3DSASは、非造影のFSPGRから作成した $SAS(T_1SAS)$ と造影後のFSPGRから作成した $SAS(Gd-T_1SAS)$ の両方をルーチンとしている。これは脳溝・脳回については T_1SAS 、脳表在静脈については $Gd-T_1SAS$ で評価を行っているためである。よってボランティアについては T_1SAS と非造影の3D-FRFSEから作成した $SAS(T_2SAS)$ を、臨床患者については $Gd-T_1SAS$ と T_2SAS の比較を、それぞれ脳溝・脳回、脳表在静脈について行った。なお臨床例においては脳腫瘍による脳の腫大のため脳溝が不鮮明になることが多い。よって正常状態の脳溝・脳回の比較のために、今回はボランティアも対象としている。

なお正常ボランティアおよび臨床患者については、本研究の目的と意義について十分に説明を行い本人

の同意を得、さらに当院の規定に則り検査を施行した。また画像データの使用に関しては、当施設における個人情報保護の規定に遵守して取り扱っている。

1-1 使用装置

MRI装置はSigna HD 3.0T(GE社)を用い、RFコイルはHead 8 channel coilを使用した。Workstation(WS)はVirtual Place Advance 300 ver3.0(株式会社AZE)を用いた。

1-2 撮像条件

3D-FSPGR法(T_1SAS)の条件は $TR=9.13$ msec, $TE=1.98$ msec, $FA=13^\circ$, 受信バンド幅=31.2 kHz, matrix=512×256, スライス厚=1.4 mm, FOV=210 mmで、撮像時間は4分17秒であった。3D-FRFSE法(T_2SAS)の条件は $TR=3,000$ msec, $TE=120$ msec, $FA=90^\circ$, 受信バンド幅=83.3 kHz, matrix=320×224, スライス厚=1.4 mm, FOV=210 mm, ASSET使用で撮像時間は6分21秒であった。両シーケンスともaxial planeで撮像した。

1-3 画像表示法

3DSASの作成手順について、成田らの方法⁵⁾が報告されているが、当院では以下の方法を用いた。撮像された元画像に対しWS上にてマニュアル操作で脳だけを囲むように線を描く。囲った範囲がregion of interest(ROI)として認識される。このときマニュアルで線を描くのは、元画像240枚に対し約15画像である。この15画像は全脳に対しほぼ等間隔になるように設定する。あとはWSが自動でROIを補間(線形補間)し、脳だけが抽出される。この抽出されたデータをVR表示することで3DSASとしている。なお、WSが半自動

Fig. 2 MRI-3DSAS using 3D-FRFSE.

(a) T₂SAS using a normal opacity curve and normal density.(b) T₂SAS using a reverse opacity curve and reverse density.

a | b

で脳を抽出するが、その抽出されたデータは完全ではなく、場合によっては脳以外の不必要な部分も抽出することがあるため、マスク画像の確認は必須である。脳の分離精度は作成者によって変わってくるが、当院の経験ではほぼ満足のいく結果が得られている。半自動処理について、筆者らは SAS 作成時間の短縮のために利用しているだけであり、T₂SAS の表示法については WS に特化した機能ではない。

T₁SAS と T₂SAS、および Gd-T₁SAS それぞれの三つのシーケンスにおいて、脳の抽出方法に関しては同じであるが、VR 表示時のオパシティカーブの形状は異なっており、T₁SAS と Gd-T₁SAS については右上がりのオパシティカーブを使用し、T₂SAS は左上がりのオパシティカーブを使用している。

T₂SAS において左上がりのオパシティカーブを使用する理由は、通常 T₂ 強調画像において動脈・静脈は flow void による低信号域として描出され、これを白黒反転すると低信号部分と高信号部分が逆転し、血管等は見た目上、高信号として表示される。この処理を 3D 画像の色域とオパシティカーブにも適用させることにより、非造影においても脳の表在静脈を脳表と同時に表示することが可能となる (Fig. 2)。

なお左上がりのオパシティカーブを使用したと述べているが、筆者の経験では元画像の信号分布に合わせたフリータイプのオパシティカーブを使用し、オパシティを若干下げた(透明度を上げる)方が良い結果になると考えている。しかしフリータイプのオパシティカーブを使用した場合でも、基本的にカーブは左上がりの形状である。

1-4 評価方法

検討は脳神経外科医(経験年数 20 年以上 2 名, 10 年以上 1 名, 5 年以上 1 名, 計 4 名)による視覚評価にて行った。視覚評価は 4 段階に点数をつけるスコア評価にて行い、得られた結果に対してノンパラメトリックな方法である Mann-Whitney の有意差検定を行った。比較項目は脳溝・脳回の描出能と脳表在静脈の描出能の二つであり、[十分評価が行える]が 4 点, [評価が可能である]が 3 点, [評価が困難である]が 2 点, [評価が不可能である]が 1 点とした。なおここでの評価とは、術前参考画像として使用できるかどうか(脳全体についての脳表在静脈, 脳溝・脳回の描出能)である。特に脳表在静脈については Trolard 静脈, Rolando 静脈, Labbe 静脈といった術前情報として重要な比較的太い静脈を対象にしている。

2. 結果

2-1 ボランティアでの比較

Fig. 3 に正常ボランティアにおける T₁SAS と T₂SAS のスコア評価の結果を示す。脳溝・脳回の描出能については、T₁SAS の平均が 3.90 ± 0.31 点, T₂SAS の平均が 3.40 ± 0.50 点で、検定では $p < 0.05$ で T₁SAS が有意に優れていた。脳静脈の描出能については、T₁SAS の平均が 2.40 ± 0.50 点, T₂SAS の平均が 3.95 ± 0.22 点であり、検定では $p < 0.05$ で T₂SAS が有意に優れている結果となった。

2-2 臨床患者での比較

Fig. 4 に臨床患者における Gd-T₁SAS と T₂SAS の

Fig. 3 Results of the score evaluation in the volunteer.

Fig. 4 Results of the score evaluation in the clinical patient.

スコア評価の結果を示す。脳溝・脳回の描出能については、Gd-T₁SASの平均が 2.58 ± 0.60 点、T₂SASの平均が 3.03 ± 0.74 点で、検定において $p < 0.05$ でT₂SASが有意に優れていた。脳静脈の描出能については、Gd-T₁SASの平均は 3.50 ± 0.56 点、T₂SASの平均が 3.39 ± 0.55 点で、検定において $p > 0.05$ でGd-T₁SASとT₂SASの両者に有意な差はなかった。

2-3 症例提示

2-3-1 髄膜腫 (Fig. 5)

左頭頂部に腫瘤を認める。非造影のT₂SASにおいて、造影剤併用T₁SASとほぼ同等の脳表在静脈の描出能が確認できる。またT₂SASでは腫瘤周囲の脳溝・静脈が確認できるが、Gd-T₁SASでは不明瞭である。

2-3-2 脳腫瘍術後再発 (Fig. 6)

右前頭葉の腫瘍再発であり、T₂SASで確認できる脳溝・静脈がGd-T₁SASでは不明瞭である。

2-3-3 神経膠芽腫 (Fig. 7)

脳実質内の腫瘍のためSAS上で腫瘍自体は確認できない。T₂SAS、Gd-T₁SASともに脳表在静脈は明瞭に描出されているが、一部でT₂SASで確認できない血管がGd-T₁SASで描出されている。

3. 考 察

脳腫瘍術前イメージにおけるMRI-SASとして当初用いられてきた方法はthick sliceによるheavy T₂強調画像を濃度反転した二次元画像であった。それが造影T₁強調画像を用いた三次元のSASに取って代わり、その有用性は飛躍的に高まった。しかし造影剤を使用することで侵襲度が上がり、また造影剤アレルギーや腎機能による制限も考慮する必要が生じた。今回われわれはFRFSE法によるT₂強調画像を利用し

た非造影におけるSASを考案したが、その表示法は3D画像処理上でオパシティカーブと濃度域を反転させたものであり、当初利用されていたheavy T₂強調画像を濃度反転させていた方法を参考にし、非造影においても脳腫瘍術前情報が得られる方法である。

結果から3DSASの最大の目的ともいえる脳表在静脈の描出能について、T₂SASは従来のGd-T₁SASと比べて有意な差はなかった。このことよりT₂SASは脳腫瘍術前画像として従来の造影剤併用T₁SASと同等に扱えることが確認できた。また非造影においてもSASが作成できる意義は大きいと考える。脳溝・脳回の描出能について、T₂SASは、従来法であるFSPGR法を使用した非造影のT₁SASより劣っていたが、ボランティア5名における脳回の平均信号値の比を測定したところ、FSPGR法とFRFSE法で約10:1であったことからS/Nの差が理由であると考えられる。ただし今回使用したFRFSEのシーケンスについては臨床上、撮像時間の限界があるためにそれを超えない範囲で設定しており、特に時間短縮のためASSETを使用していることも影響していると考えられる。3D画像化した場合の描出能はオパシティカーブにも大きく依存するが、やはり目的部位の信号値が高い方が良好な結果となるので今後のT₂SASの利用のためにはS/Nを考慮したシーケンスの改良が必要である。またT₁SASのmatrixが512×256であるのに対し、T₂SASのmatrixが320×224と若干劣っており、このことも描出能の差に若干影響していると考えられる。しかし、いずれにおいてもFRFSE法を使用したT₂SASにおける脳溝・脳回の描出能は臨床上で十分使用できると思われる評価であった。

また、Fig. 5に示したように、T₂SASがGd-T₁SASよりも有用であると思われるケースがある。髄膜腫に

Fig.5 A clinical case (meningioma).
In Gd-T₁SAS, brain surface veins near the tumor cannot be seen owing to a contrast effect of dura due to meningioma. In T₂SAS, brain surface veins can be confirmed.

Fig. 6 A clinical case (post brain operation).
In Gd-T₁SAS, brain surface veins and sulci/gyri cannot be seen owing to contrast effect of dura due to first operation. In T₂SAS, brain surface veins and sulci/gyri can be confirmed.

Fig. 7 A clinical case (glioblastoma).
In Gd-T₁SAS the brain surface vein (circle) can be confirmed, but in T₂SAS it cannot be confirmed. This vein is the middle meningeal vein and it has no relationship in the operative view.

Fig. 8 Case of a poor image obtained with T₂SAS.

Fig. 9 The depiction of brain surface veins in non-contrast T₁SAS image.

代表されるような硬膜に造影効果のある病変において、従来の Gd-T₁SAS では腫瘍近傍の脳静脈、脳溝・脳回の確認が困難となることが多い。しかし、T₂SAS を利用することによって上記の問題が回避できる可能性がある。すなわち非造影であることより、硬膜の造影効果に関係なく脳溝・脳回そして脳静脈の描出が可能となり、従来法に比べてより低侵襲で術前画像情報を得ることができる。Fig. 6 に示した術後症例では、Gd-T₁SAS では最初の手術野に一致した硬膜の造影効果を認め、脳表や脳表在静脈の描出が不十分であるが、T₂SAS においては硬膜の造影効果に関係しないため脳表、脳表在静脈がよく描出されており、腫瘍再発症例等でも利用価値は高いと思われる。

Fig. 7 では、従来法である Gd-T₁SAS において、T₂SAS では確認できない血管が描出されている。これらは中硬膜静脈、浅側頭静脈および板間静脈等であり、実際の術野とは関係のない血管⁶⁾であり、術前画像としては描出されていない方が良くと脳神経外科医からコメントされている血管である。T₂SAS において術野外の静脈が見えなかった原因は、T₂SAS が造影効果によるものではなく flow void から静脈を作成しているためである。中硬膜静脈や板間静脈においても flow void はあると考えるが、flow void を T₂SAS 上で表示するためには、まわりに脳実質のような信号を持った組織が必要である。しかし中硬膜静脈など硬膜外の血管の周囲は flow void と同様にほとんど低信号を示す組織であるため 3DSAS 上では表示されず、結果 T₂SAS では脳の表在静脈のみが表示されると考えられる。

以上のように T₂SAS は Gd-T₁SAS と比べても有利な点が多々あり、今後の活用に期待が持てる方法であるが、以下に示す問題点もある。

SAS の元となるマスク画像の設定による画像情報の変化、すなわち画像作成者によって結果が変わってくるということである。これは従来の 3DSAS を含め 3D 画像全体にいえることであるが、今回の T₂SAS においては flow void のような低信号値を扱っており、他の 3D 画像に比べ若干難易度が高く、作成にはある程度の経験が必要と考える。なお、筆者らの作成時間は T₂SAS で約 10 分程度である。

Fig. 8 に T₂SAS での描出不良例を示す。濃度反転処理を行っているので比較的高い精度でのマスク設定を行わないと、脳表上にあたかも造影されたかのような領域が描出されるため注意が必要であり、今後の課題でもある。

その他、ボランティアでの結果より、T₁SAS における脳静脈の描出についてのスコアは平均 2.4 点と、T₂SAS や Gd-T₁SAS よりも低かったが、そのスコア内訳では評価不可能という画像はなく、すべて評価可能もしくは評価困難という結果であった。このことより単純の T₁SAS においても非造影で術前参考画像を作成できる可能性があり今後に期待できる (Fig. 9)。

また脳溝・脳回の描出能において T₂-SAS は T₁-SAS に劣っていたが、T₂-SAS と T₁-SAS を fusion させることにより脳溝・脳回の描出能を向上できるため、非造影 SAS としてさらなる有用性が望めると考える (Fig. 10)。

以上より T₂SAS は非造影でありながら、従来の造

Fig.10 T₁T₂hybridSAS.
T₂SAS was inferior to T₁SAS in the depiction of sulci/gyri, but it can be improved by fusing T₂SAS and T₁SAS.

影剤併用 T₁SAS とほぼ同等に扱えることが確認できたが、末梢静脈の描出能、空間分解能や S/N 等から従来法が gold standard であるのは変わらない。よって各症例に応じた使い分けが重要と考える。

4. 結 語

3D-FRFSE 法による T₂ 強調画像を用いた非造影の 3DSAS について検討を行った。脳手術前画像として、T₂SAS は従来の Gd-T₁SAS と同等に扱えることが確認できた。症例によっては T₂SAS の方がより有用性が

高い場合があり、今後の利用に期待できると考える。

謝 辞

本研究にあたり、ご助言くださいました放射線科の小川敏英先生、藤井進也先生ならびに脳神経外科の先生方に深く感謝致します。

なお、本論文の要旨は日本放射線技術学会第 65 回総会学術大会(横浜, 2009 年)にて発表した。

参考文献

- 1) 田邊純嘉. 脳神経外科手術における 3D 画像の有用性. Innervation 2005; 20(5): 26-35.
- 2) 片田和廣, 小倉裕子. MR 脳表撮像法(SAS)の原理と応用. 臨画像 1999; 15(3): 272-280.
- 3) 三木 均. MRI の三次元画像表示. 臨放 1996; 41(11): 1226-1233.
- 4) 平野 透, 田邊純嘉, 板東道夫, 他. CT, MRI による脳表の造影三次元画像(3D Surface CT Angiography, 3D Surface MR Angiography)の検討. 日放技学誌 2002; 58(12): 1622-1631.
- 5) 成田孔明, 佐々木齊喜, 桜田 渉, 他. 脳腫瘍の手術シミュレーションにおける MRI 三次元画像の有用性. 日放技学誌 2002; 58(12): 1632-1638.
- 6) 成田孔明, 戸村則昭, 笹嶋寿郎, 他. 3D-FSPGR 法を用いた 3D-SAS による三次元画像の解剖学的適合度. 日放技学誌 2005; 61(9): 1341-1348.
- 7) 福永健哉, 目代俊彦, 福岡正晃, 他. 開頭手術における Volume Rendering Stereo-movie の有用性. 日放技学誌 2007; 63(12): 1370-1376.

図表の説明

- Fig. 1 MRI-SAS 描出不良例
3DSAS 画像において腫瘍近辺の脳溝・脳回および脳静脈はほとんど確認できない。これは髄膜腫の特徴である硬膜への造影効果のためである(矢印)。
- Fig. 2 3D-T₂ 強調画像を用いた MRI-SAS 画像
(a) 通常のオパシティカーブと色域を用いた T₂SAS
(b) 逆オパシティカーブと濃度反転を用いた T₂SAS
- Fig. 3 ボランティアにおけるスコア評価の結果
- Fig. 4 臨床患者におけるスコア評価の結果
- Fig. 5 臨床例(髄膜腫)
Gd-T₁SAS では髄膜腫による硬膜への造影効果で腫瘍近傍の静脈が分かりにくい。T₂SAS では静脈の走行が確認できる(矢印)。
- Fig. 6 臨床例(脳腫瘍術後再発)
Gd-T₁SAS で確認できない静脈と脳溝が、T₂SAS で確認できる。
- Fig. 7 臨床例(神経膠芽腫)
Gd-T₁SAS で確認できる静脈(円内)は T₂SAS では確認できない。これは中硬膜静脈であり、実際の術野においては関係のない血管である。
- Fig. 8 T₂SAS 描出不良例
- Fig. 9 非造影 T₁SAS における脳表在静脈の描出
- Fig. 10 脳溝・脳回の描出能において T₂SAS は T₁SAS に劣っていたが、T₂SAS と T₁SAS を fusion させることにより、脳溝・脳回の描出能を向上できる。