

■教育講演

脳機能局在とMR画像

渡部 恒也*

要旨：MR画像から脳機能局在を知るには、形態的な画像情報と機能的な画像情報が用いられる。前者の情報を得るには脳組織の固有緩和時間の違いに由来する画像コントラストが基本となり、適正な画像コントラストが得られれば、白質内部の神経線維路の一部も解析可能である。機能的な情報を得るには、MR造影剤注入後の経時的な血流信号変化を追跡する灌流画像的な撮像法、光や運動負荷などの皮質刺激から生じる局所の脳血流の変化を還元型ヘモグロビンによる susceptibility 効果の変化として直接画像信号輝度に反映させる手法、さらには、各神経線維に沿った水の異方性拡散を利用した、拡散画像あるいは拡散強調画像などがある。

神経心理学 11; 17~21, 1995

Key Words：MR画像, 脳機能, 画像コントラスト, 磁化率効果, 拡散

MR imaging, brain function, image contrast, susceptibility effect, diffusion

はじめに

大脳皮質の機能局在に関する画像解析は古くから行なわれてきましたが、1980年代に入ってからにはPETやSPECTのような非侵襲的な核医学画像が解析の手法として用いられるようになりました。80年代末からはMR画像が中枢神経系の画像診断の中心を占めるようになりましたが、MR画像を用いた脳機能局在の画像化の方法にはさまざまなものがあります。ここではこれらの方法の概略をお伝えしながら、MR画像が脳機能局在に関して果たす役割を述べることにいたします。

I 組織緩和時間と画像コントラスト

MR画像から脳機能局在を知るには、形態的な情報によるものと、MR造影剤やなんらかの負荷刺激を与えることから得られる信号輝度の変化を経時的に観察することから得られるも

のとがあげられます。これらの方法に共通して言えることは、いずれの方法においても励起領域内のプロトン密度、あるいは励起スピンのもたらす緩和現象が画像信号輝度に深く関与していることです。

通常のMR画像ではこれらの緩和時間の変化はそれぞれT1強調画像、プロトン密度強調画像、あるいはT2強調画像として画像表示されますが、これら以外の特殊な撮像法においても、この緩和現象がなんらかの形で関与していることを認識しておく必要があります。

II 形態的な画像情報からみた脳機能局在

MR画像上に描出された病変の位置や形態から機能局在を評価する場合には、脳内組織が固有に持つ緩和時間の違いを画像コントラストとして反映させ、このコントラストから形態的な情報を得ることが必要になります。脳機能というものを考える場合に必要なのは、電気的

1995年3月6日受理

Localization of Brain Function and Magnetic Resonance Imaging

*埼玉医科大学放射線科, Tsuneya Watabe : Department of Radiology, Saitama Medical School

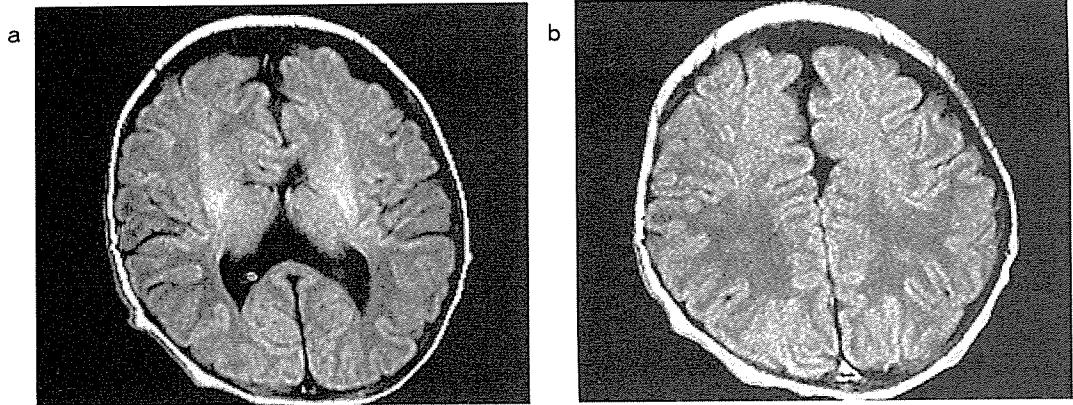


図1 Atypical myelination in a patient with holoprosencephaly

A four-month old boy with holoprosencephaly. Agenesis of corpus callosum is apparent on T1-weighted axial spin echo image (Fig. 1a). Notice central connection of each hemispheres in Fig 1a, forming a holosphere. Myelinating fibers are delineated as bright intensities in the white matter. However, the direction of myelination is dominant toward the frontal regions (Figs 1a and 1b), quite different from that of normal myelination.

な刺激の発火点としての皮質構造と、その伝導路としての白質線維群とを画像コントラストの面から識別する必要があります。

図1は生後4カ月の男児で、脳奇形のひとつである全前脳胞症の症例であります。軸位断 T1 強調画像において、独立した左右半球が形成されず、正中中部で癒合したままの、いわゆる全球型の大脳構築を有していることが分かります(図1a)。重要なことは、前頭部白質内に対する高輝度信号域が認められることです。これは白質内神経線維の髓鞘形成を示す部分ですが、正常例ではこのような有髓化に伴う白質神経線維の高輝度信号像は、運動野へ向かうことが Girard ら(1991)によって指摘されております。Yakovlev (1959)は全前脳胞症における運動野のみかけの前頭葉側に相当することを指摘していますが、この症例のMR画像ではこのような発生学的な機能局在の異常にともなう非定型的な髓鞘

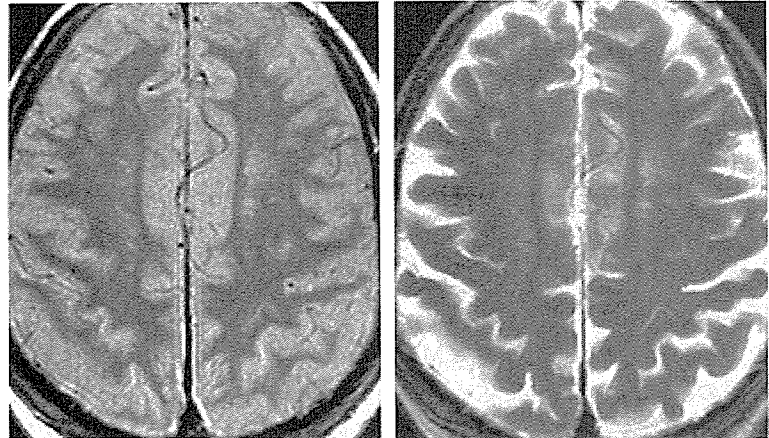


図2 MR delineation of fascicular structures in the brain

On both of the axial proton density weighted (left) and T2-weighted (right) images, a pair of hypointense bands are visible in the subcortical white matter of each cingulate gyrus, corresponding to cingulum.

形成所見が示されているということが出来ます。

また、正常脳のMR画像では、T1 強調画像や T2 強調画像のいずれにおいても、皮質側の緩和時間は白質側よりも長いといっただけの画像コントラストを見る事が多いのですが、注意して画像を観察いたしますと、白質内部でも、特定の神経路は固有の信号輝度を持つことが観察できます。この固有の信号輝度は神経線

維の構築の違いを反映するものですが、例えば、図2のように、帯状回内に存在する cingulum などはプロトン密度強調画像や T2 強調画像にて左右対称の低信号を示す帯状構造として認めることができます。このような白質内部の解剖学的な構造を正確に把握することも、皮質機能を評価する場合にも必要なことではないかと思われまます。

III MR 画像と脳血流評価

MR 画像では、対象領域を RF パルスで励起した後、その励起スピン系の磁化成分に起因する MR 信号を画像データに変換します。励起によって生じた磁化成分が局所によって大きく異なるような場合には、これらの領域間でその信号成分が互いに相殺しあい、結果として得られる画像信号輝度が減少してしまいます。

このような磁化率の違いにともなう信号輝度の減少は Steiner (1986) が述べているように、一般に susceptibility 効果と称されますが、MR 画像から局所の脳血流変化を得る手段としては、Villringer ら (1988) が最初に述べたような、血管壁を介して血管内腔と血管外腔との間に生じた局所の磁化率の違い、あるいは、近年 Ogawa ら (1990) の研究から注目を集めるようになった、静脈血側に分布する還元ヘモグロビンの有する T2 短縮効果などに起因する susceptibility 効果が利用されます。

IV MR 造影剤を用いた susceptibility 効果

前者の方法としては MR 造影剤注入後の経時的な血流信号変化を追跡する灌流画像的な撮像法があげられます。現在用いられている MR 造影剤の代表的なものは Gd に代表される希土類金属イオンですが、通常の MR 画像ではこれらの造影剤の有する T1 緩和時間の短縮効果が利用されております。

しかし、これらの造影剤が高濃度で血中に存在する場合には、造影剤が潜在的に有する susceptibility 効果に伴なう T2 短縮効果が強く働きます。この効果を利用しますと Rosen ら (1990) が指摘したように、血中内に投与さ

れた造影剤が脳組織内を灌流する際に生じる経時的な信号変化を追跡することにより、一連の灌流画像を得ることができます。

図3は Gd イオンからなる MR 造影剤を用いた、内頸動脈閉塞例における灌流画像ですが、造影剤投与後、健側半球では造影剤がある程度の径を有する脳動脈系内を通過する際に、それに伴って生じた susceptibility 効果から信号輝度が一過性に低下するのに比べ、患側半球では血管閉塞に伴なう血流変化のために、このような所見を欠くことが分かります。

ただし、このような撮像を行うには高速グラディエントエコー撮像法のような高速撮像法を用いる必要があり、これらの画像の性格上、本来の画質や S/N 比があまり高くないことが、灌流情報を定量的に評価する場合の問題ともなります。

V BOLD コントラスト

一方最近では、光刺激や運動負荷などの皮質刺激から生じる局所の脳血流の変化を脳静脈内の還元型ヘモグロビン量の増減に反映させ、その変化にともなう susceptibility 効果の程度を直接画像信号輝度に反映させる手法が一般的となってきました。

このような画像信号輝度の変化は一般に BOLD (blood oxygen level dependent) コントラストとして知られていますが (Ogawa et al, 1990), 現在その画像信号輝度の変化となる責任部位が脳実質内の静脈系なのか、あるいは皮質をとりまく脳表の静脈系なのかで議論が分かれており、用いる撮像法、使用する静磁場強度などにも依存する面があり、明確な結論は出ておりません。また BOLD 効果は、3 テスラあるいは4 テスラというように、静磁場強度が高くなるほど、その効果が強くなりますが、このような高磁場での撮像装置は研究のものに限られており、BOLD 効果を利用した撮像法が実際の臨床へ応用されるには、まだ時間を要するものと思われまます。

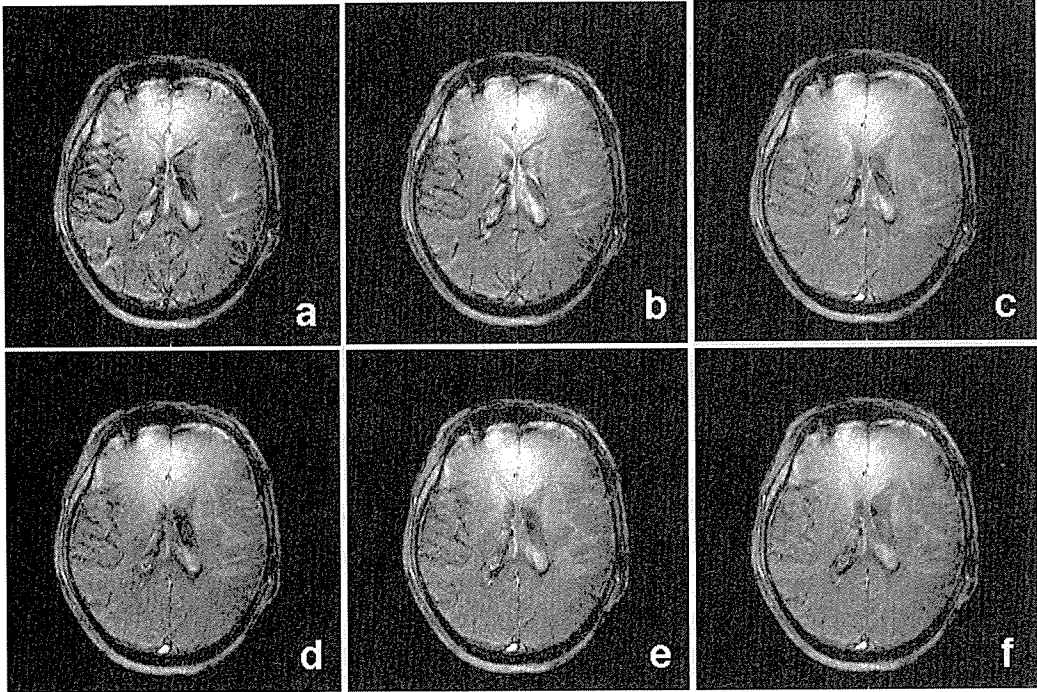


図3 Perfusion images using susceptibility effect of MR contrast agent.

Serial gradient echo images (from a to f) of a patient with left internal carotid artery occlusion after rapid injection of Gd chelate. Every image was taken with an interval of four seconds. Early image (a) about 14 seconds after injection shows signal drop of the right MCA branches due to susceptibility effect of Gd chelate, indicative of normal perfusion in the vessels. However, there is no remarkable signal drop on the contralateral side due to underlying carotid occlusion. Notice gradual signal recovery in the right MCA branches on the images of later phase. The bright part in the medial frontal region in each image is due to artifacts.

VI 白質内神経線維と拡散画像

白質内の神経線維は皮質間での機能的な結びつきを伝える経路として重要な働きを持ちます。通常のMR画像でもある程度白質内神経線維の走行を捉らえることは可能ですが、これらの神経線維が機能的にどのような役割を果たしているかを知るには、神経線維の走行経路の描出に焦点をあわせた撮像法が必要となります。

このような経路の描出法のひとつには、各神経線維に沿った水の異方性拡散を利用した、いわゆる拡散画像あるいは拡散強調画像が用いられ、Kucharczykら(1991)はこの手法を早期の虚血生変化を把握する手段に用いています。

MR画像はもともと液流の画像化に適した画像であり、これはMR血管撮影あるいは脳脊髄

液の動画像など、ひろい応用がこれまでにも行われてきました。拡散現象における水分子の動きも画像化の対象となるわけですが、MR血管撮影などに比べて問題となる点は、このような微視的な動きを画像として捉らえるには、通常の撮像に用いられる磁場勾配よりも磁場強度的にかなり高いものを印加する必要があることです。また、スピンエコー法のような従来の撮像法による拡散画像あるいは拡散強調画像では少しの体動によっても画質が損なわれるために、良好な画質を得ることが困難なことも問題点のひとつでありました。

最近ではいくつかの高速撮像法が開発されてきており、これらの撮像法を拡散現象の画像化に応用することにより、将来は白質内神経線維の走行についてもかなり高い情報が得られるも

のと考えております。

ま と め

以上、簡単ではありますが、脳の機能局在について、MR画像から得られる画像情報にはどのようなものがあるかということを中心に述べさせていただきましたが、MR画像の撮像技術は現在でも刻々進歩しつつあり、将来は空間分解能、コントラスト分解能および時間分解能にすぐれた画像を期待することができます。それに応じて、脳の機能局在に関するさまざまな画像情報についても、さらに精度のよい情報が得られるものと考えております。

文 献

- 1) Girard N, Raybaud C, du Lac P : MRI study of brain myelination. *J Neuroradiol* 18 ; 291-307, 1991
- 2) Kucharczyk J, Mintorovitch J, Asgari HS et al : Diffusion/perfusion MR imaging of acute cerebral ischemia. *Magn Reson Med* 19 ; 311-315, 1991
- 3) Ogawa S, Lee TM, Nayak AS et al : Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magn Reson Med* 14 ; 68-78, 1990
- 4) Rosen BR, Belliveau JW, Vevea JM et al : Perfusion imaging with NMR contrast agents. *Magn Reson Med* 14 ; 249-265, 1990
- 5) Steiner RE : Present and future clinical position of magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med* 3 ; 473-490, 1986
- 6) Villringer A, Rosen BR, Belliveau JW et al : Dynamic imaging with lanthanide chelates in normal brain : contrast due to magnetic susceptibility effects. *Magn Reson Med* 6 ; 164-174, 1988
- 7) Yakovlev PI : Pathoarchitectonic studies of cerebral malformations. III. Arrhinencephalies (holotelencephalies). *J Neuropathol Exp Neurol* 18 ; 22-55, 1959

Localization of Brain Function and Magnetic Resonance Imaging

Tsuneya Watabe

Department of Radiology, Saitama Medical School

The paper deals with the role of magnetic resonance (MR) imaging in functional localization of the brain. MR imaging can provide both of anatomical and functional information of the brain. The former information is based on the image contrast pertinent to the proton density and relaxation times in the area of concern, enabling the differentiation between the gray matter and white matter. Even within the white matter, a certain type of fiber tracts can be recognized as a distinct structure. For functional analysis of the brain, there are several imaging

methods : blood perfusion imaging using magnetic susceptibility effect of contrast media, BOLD (blood oxygen level dependent) imaging for task-related cortical function and diffusion or diffusion-weighted imaging for analysis of anisotropic water orientation along the nerve fibers. As high temporal resolution is mandatory for these imaging methods, those high-speed MR imaging methods including echo planar imaging will play an important role for functional imaging of the brain in the future.

(*Japanese Journal of Neuropsychology* 11 ; 17-21, 1995)