

## 脳実質を透視した EPI 拡散強調 MR 画像の 3 次元可視化 表示による超急性期脳虚血病巣の立体的画像評価\*

佐藤 透\*\*

### Evaluation of Hyperacute Cerebral Ischemic Lesions with Transparent 3D Visualization of Echo-planar Diffusion-weighted Magnetic Resonance Imaging

Toru SATOH

Department of Neurological Surgery, Ryofukai Satoh Neurosurgical Hospital

Transparent three-dimensional (3D) visualization of hyperacute cerebral ischemic lesions was reconstructed using parallel volume-rendering algorithm by selecting the high signal intensity area for ischemic lesion and the low signal intensity area for parenchymal margin, respectively, from the volume dataset of echo-planar diffusion-weighted magnetic resonance imaging (DWI). The 3D DWI can depict the ischemic lesions at the hyperacute stage of cerebral ischemia, transparently through the contours of brain and ventricular structures. Application of 3D DWI and evaluation of ischemic lesions were discussed in three cases of hyperacute cerebral infarction.

(Received: March 5, 2003)

**Key words** cerebral ischemia, diffusion-weighted imaging, magnetic resonance imaging,  
3D reconstruction, merging image

No Shinkei Geka 31(9): 976-987, 2003

#### . はじめに

近年の echo-planar imaging (EPI) による拡散強調画像 (diffusion-weighted image, DWI) や灌流画像 (perfusion image, PI) の急速な普及に伴い, 超急性期に脳虚血の状態を短時間で画像評価することが可能となり, 脳虚血超急性期における血流再開を目的とした治療戦略が革新されている<sup>3, 10, 16, 18-20</sup>. 特に, DWI では発症後間もない脳虚血病巣が検出可能なため, 虚血性脳血管障害治療の緒となる画像診断として, その有用性は広く認められている<sup>2, 4-6, 9, 10, 12, 13, 18, 19, 21, 22</sup>.

DWI 高信号強度領域で示される脳虚血病巣の

画像評価は, これまで, 1枚あるいは複数枚の元画像上で視覚判断されてきた. しかしながら, これら 2 次元画像では, 広範囲で複雑な虚血病巣の拡がりや, 散在する同時多発病巣の位置関係を立体的に把握することは困難な場合がある. また, 脳虚血の進行に伴い, 時間的・空間的に時々刻々と変化する超急性期病巣を画像追跡するためには, DWI 高信号強度領域を 3 次元可視化表示し, 立体的に画像評価することが必要と思われる.

\* 2003.3.5 受稿

\*\*(医療法人社団)涼風会 佐藤脳神経外科

[連絡先] 佐藤 透 = (医療法人社団)涼風会 佐藤脳神経外科 (〒729 0104 広島県福山市松永町 5 23 23)

Address reprint requests to: Toru SATOH, M.D., Department of Neurological Surgery, Ryofukai Satoh Neurosurgical Hospital, 5 23 23 Matsunaga-cho, Fukuyama-city, Hiroshima 729 0104, JAPAN

E-mail: ucsfbtrc@urban.ne.jp

今回、DWIで得られたvolume dataをopacity chart上で数値化し、平行投影volume-rendering法を用いたtransluminal imagingの手法<sup>14-17)</sup>で画像再構成し、高信号強度領域で示される超急性期の脳虚血病巣を信号強度閾値で選択し、脳表・脳室形態とともに立体的に可視化表示する、3次元拡散強調画像(three-dimensional DWI, 3D DWI)を新たに考案した。本稿では、3D DWIを用いた超急性期脳虚血病巣の立体的画像評価につき、症例を提示して報告する。

### ・対象と方法

対象は、DWIで診断した超急性期脳梗塞の3例(一過性脳虚血発作で発症した右中大脳動脈領域の同時多発脳梗塞例、新鮮脳梗塞治療中に2度の新たな梗塞巣を合併した多発脳梗塞例、発症直後に血栓溶解療法を施行し血流再開を得た左中大脳動脈閉塞例)である。

#### 1. DWIの撮像条件

DWIは、1.0 T Magnetic Resonance (MR) imager (Signa HiSpeed<sup>®</sup>, General Electric Medical Systems, Milwaukee, WI, U.S.A.)を使用し、single-shot, spin-echo echo-planar DWI sequenceでEPI-FLAIR( fluid-attenuated inversion recovery )/EPI-isotropic DWIを撮影した。撮影条件は、slew rate 77 mT/m/s, b-value 1,000 s/mm<sup>2</sup>, repetition time( TR )8,000 ms/echo time( TE )119.1 ms (minimum), 1-excitation, inversion time 1,800 ms, bandwidth 62.50 KHz, 128×128 matrix, 22-cm field of viewを使用した。

スクリーニング目的の標準EPI-FLAIR/EPI DWIは、8.0 mm thickness, 2.0 mm slice spacing, total scan time 0分48秒で撮影し, FLAIR/DWIそれぞれ12枚の連続した軸位元画像が得られた。この標準DWIで陽性所見を得た症例に対しては、引き続いて3.0 mm thicknessの精細EPI-FLAIR/EPI-DWIをtotal scan time 2分24秒で撮影し、それぞれ32枚の軸位元画像を得た。精細isotropic DWIで得られた元画像volume data(32 data)は、ワークステーション(Zio M900<sup>®</sup>, AMIN Co. Ltd., Tokyo, Japan)にDICOM転送した。

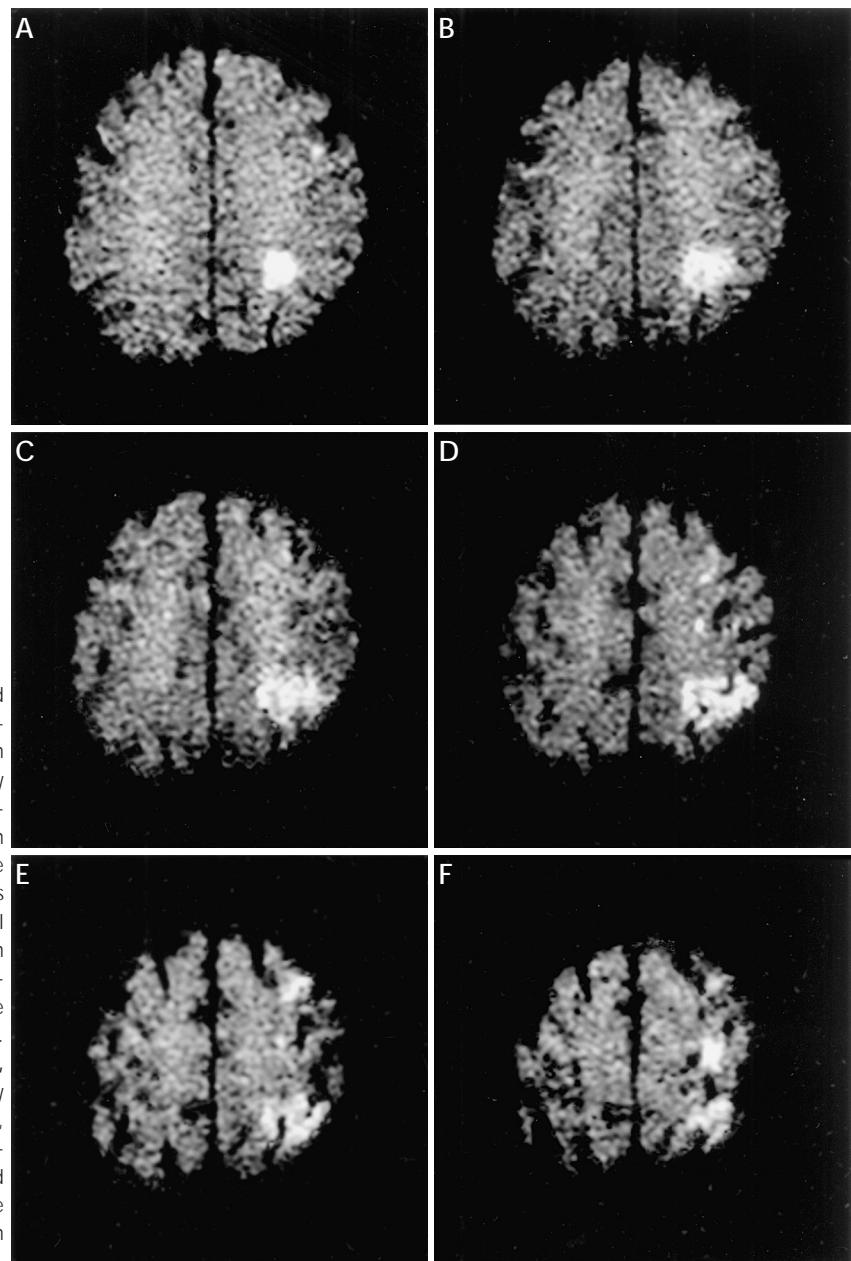
#### 2. 3D DWI画像再構成と立体的画像評価

3D DWIは、ワークステーションでDWIのvolume dataを0.8 mmに補間後、9秒で3D volume-rendering dataset(156 data)に変換し、平行投影volume-rendering法を使用したtransluminal imagingの手法<sup>14-17)</sup>で、11秒の再構成時間で作成した。元画像における脳表および脳室外壁境界に相応する信号強度のhistogram数値分析に基づいて、信号強度分布のopacity chartから、信号強度閾値60~70(peak value 65, 20% opacity level, window width 10)の二等辺三角形の変換関数を用いて、脳表・脳室境界面を選択的に抽出し、灰色に色づけした。続いて、信号強度閾値240、あるいは260(100% opacity level)以上のすべてのvolume dataを選択し、赤色で色づけした。これにより、高信号強度領域で示される超急性期の脳虚血病巣を信号強度閾値で選択し、脳表・脳室形態とともに立体的に可視化表示する3D DWIが、計20秒の再構成時間で作成された。

3D DWIは、その10度右回転した画像と立体観察することで、信号強度閾値で選択された高信号強度領域をより立体的に画像評価することが可能であった。また、3D DWIと等座標観察方向の最大値投影(maximum intensity projection, MIP)画像を作成し、高信号強度領域の視認性を参照した。3D DWIの画像再構成変換関数のパラメーターは、ワークステーション上でtemplateに保存可能であり、再構成画像の再現や同様な画像作成に応用可能であった。

### ・結果

超急性期脳虚血のDWIでは、いずれの症例においても、責任病巣と考えられる新鮮虚血病巣が検出された。3D DWIでは、DWIで得られたvolume dataから、高信号強度領域を信号強度閾値により3次元可視化表示することが可能であった。これにより、脳虚血病巣の立体的形態や散在する同時多発病巣相互の位置関係が把握された。また、時間的・空間的にdynamicな変化を来す超急性期の脳虚血病巣は、脳表・脳室形態とともに、立体的に画像評価することが可能であった。特に、発症間もない時間から数時間の間にDWIを再検した症例3では、虚血の進行に伴う虚血病巣での



**Fig. 1 (Case 1)** : A 67-year-old man with transient ischemic attack due to multiple infarctions in the right middle cerebral artery territory. Diffusion-weighted images (A-H) show several fresh ischemic lesions scattered in the cortical and sub-cortical areas over the fronto-parieto-occipital regions. Stereoscopic observation of the maximum intensity projection (MIP) of DWI (I, J) shows the spatial extension of these lesions. Three-dimensional (3D) DWI (K, L), selected by the signal intensity threshold above 260 and more, represents these lesions three-dimensionally with color rendered in red, and the contours of the brain surface and ventricles in gray.

DWI 信号強度の増大と閉塞血管再開通による虚血の回復に伴う信号強度の減少・消失が同時進行で画像追跡可能であった。以下に症例を提示した。

症例 1 67 歳、男性、一過性脳虚血発作で発症した右中大脳動脈領域の同時多発脳梗塞例。

左手の脱力発作で発症し、軽い違和感を残すも 2 時間後には症状が回復し、発症 12 時間後に来院した。DWI (Fig. 1 A-H) では、右中大脳動脈領域の頭頂葉から頭頂・後頭葉境界領域、一部前頭葉にかけて、皮質・皮質下に大小数箇所の高信号強度領域が散在して認められた。DWI の MIP 画像 (Fig. 1 I, J) では、高信号強度領域すべてが 1 枚の

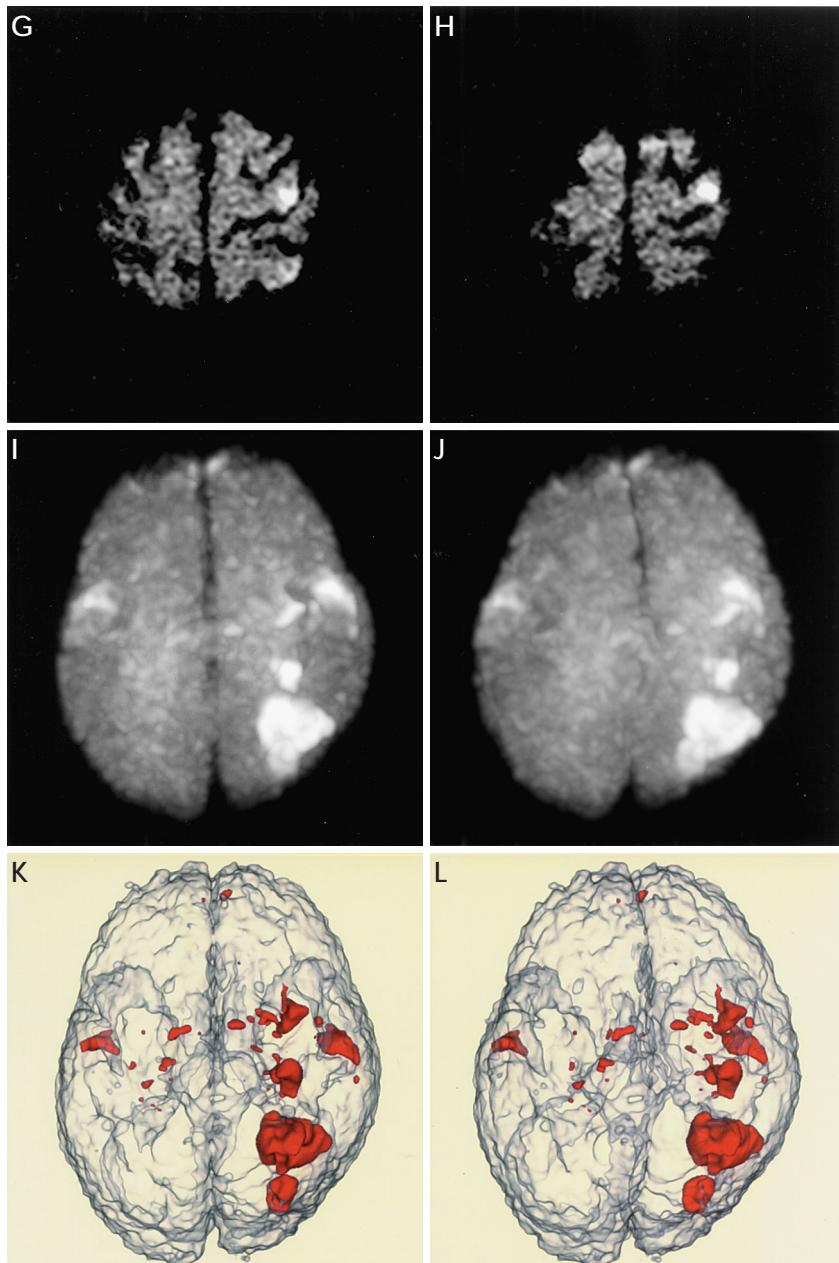
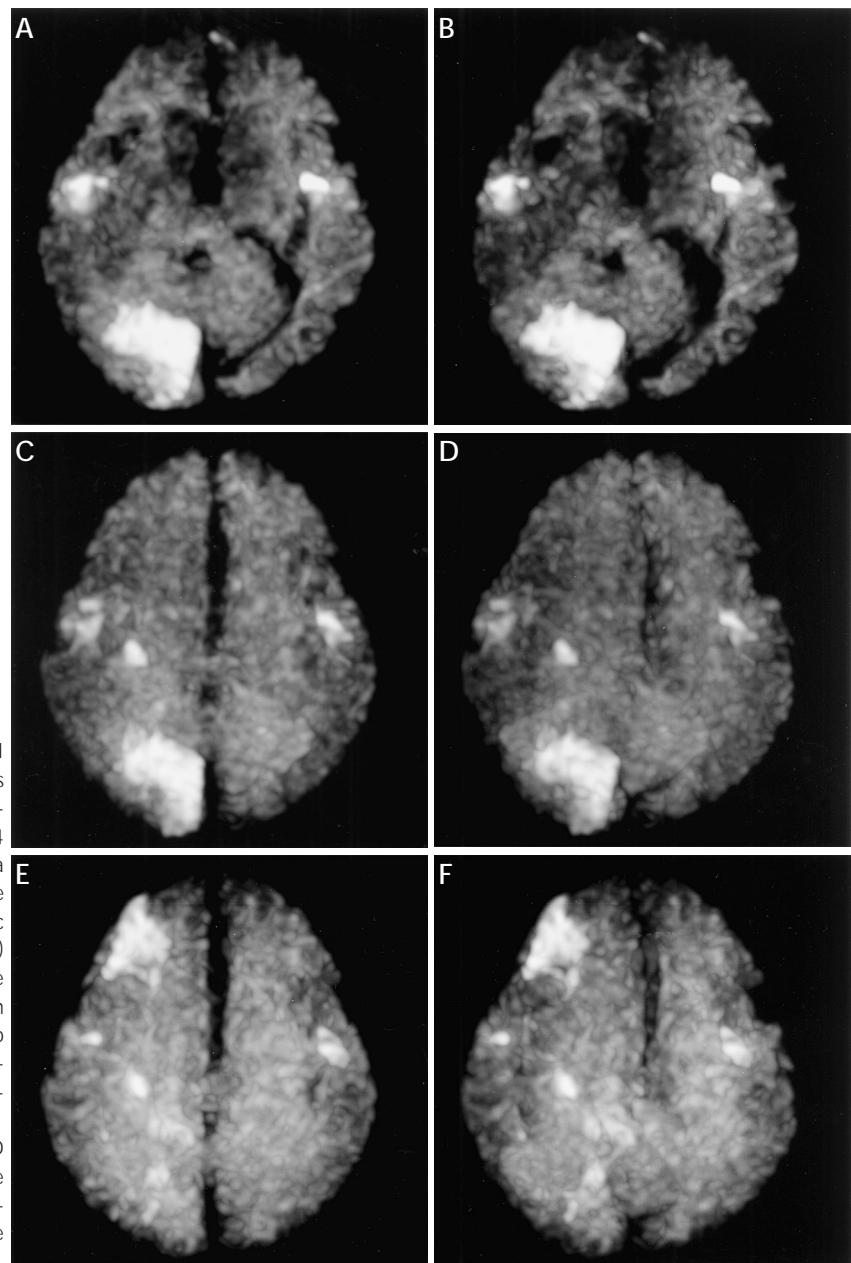


Fig. 1

2次元画像に表示され、その立体視観察により、散在する高信号領域が脳全体の輪郭とともに立体的に把握された。信号強度閾値260以上で選択した高信号強度領域の3D DWI (Fig. 1 K, L)では、複雑な形態をした大小4カ所の主たる皮質・皮質下梗塞巣と、その周囲に散在する数個の小梗塞巣が、脳表・脳室形態とともに立体的に描出された。

しかし、前頭洞・前頭蓋底部や錐体骨部での magnetic susceptibility artifacts による高信号強度領域や一部白質での微小な高信号強度領域も同時に画像化されたため、脳虚血病巣の画像評価には元画像を参照した注意深い判断を必要とした。

T2強調画像では、頭頂・後頭部の1病巣のみが淡く描出されたが、そのほかの病巣は認められな



**Fig. 2 (Case 2) :** An 83-year-old man with double ischemic events during the treatment of a fresh infarction. DWI, examined 24 hours after the onset, shows a high signal intensity area in the left occipital lobe. Stereoscopic observation of the MIP (A, B) and 3D DWI (G, H) show the spatial extension of a single fresh infarction. In the following two days, another fresh infarction occurred at the area of the left corona radiata area and was confirmed by MIP (C, D) and 3D DWI (I, J). On the 27th day, one more fresh infarction was observed at the left frontal to the operculofrontal area (E, F, K, L).

かった。MR Angiography (MRA) では、右中大脳動脈に狭窄性病変は認められず、それ以外の脳主幹動脈血流も良好であった。同時多発脳梗塞と診断し、抗凝固療法、抗血小板療法、脳保護療法、抗浮腫療法を行った。発症翌日、発症7日後の追跡DWIでは、新たな病巣の出現は認められなかつたが、高信号強度領域の信号強度は一部で増大・

減少、内容の不均一化がみられ、高信号強度領域の軽度拡大も認められた。

**症例2** 83歳、男性、新鮮脳梗塞治療中に2度の新たな梗塞巣を合併した多発脳梗塞例。

6年前に右後頭葉梗塞の既往があり、今回、皮質盲で発症し、24時間後に来院した。DWIでは、

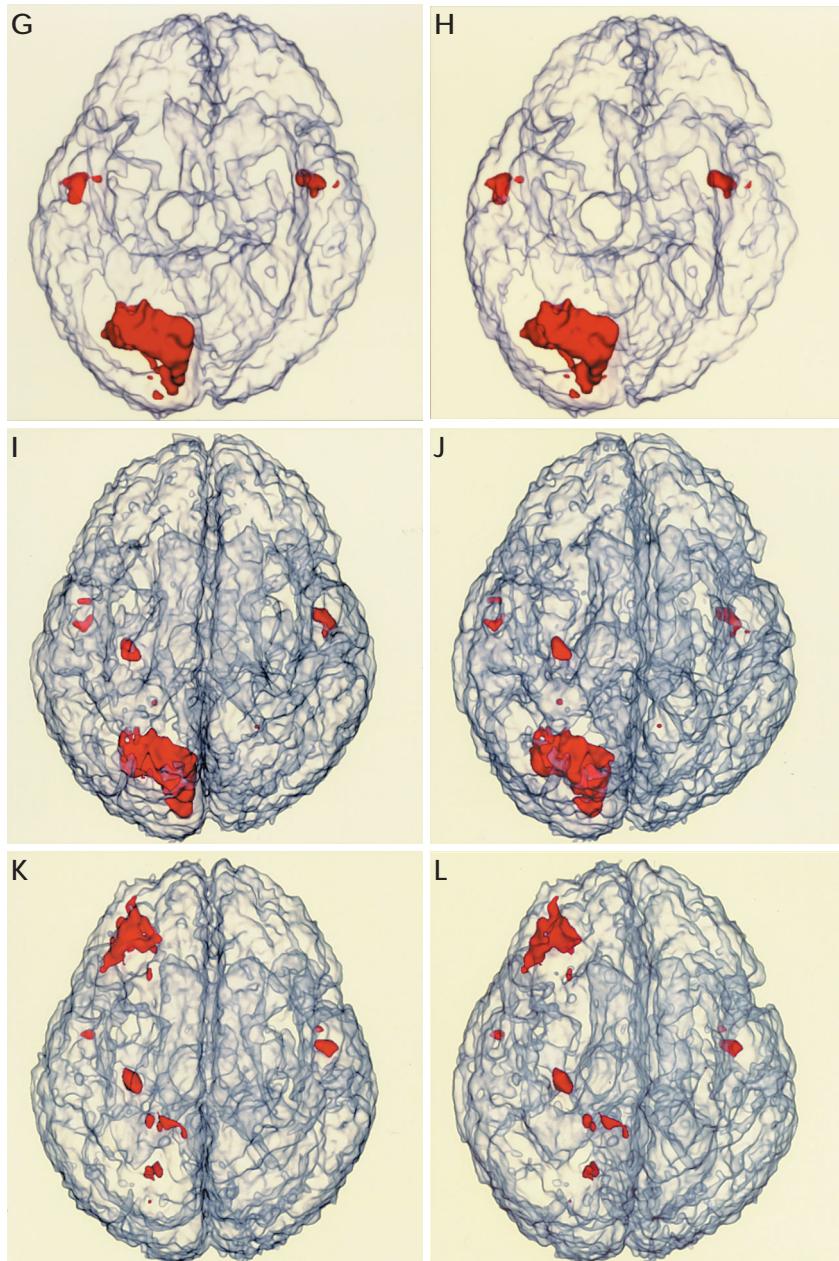
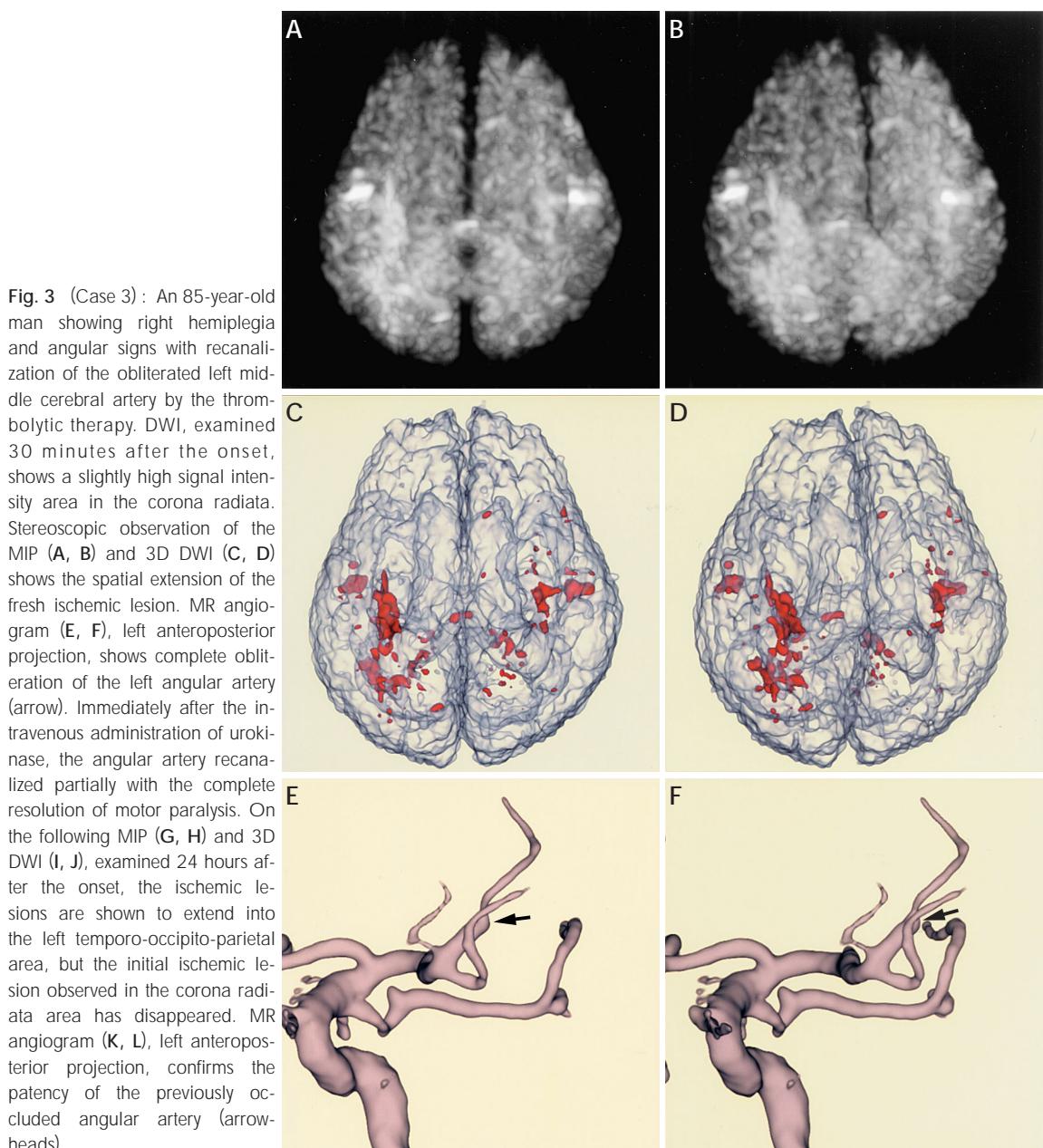


Fig. 2

左後頭葉皮質・皮質下に高信号強度領域が認められ、その MIP 画像の立体視観察 (Fig. 2 A, B) では、梗塞巣は高信号強度領域として把握された。信号強度閾値 260 以上で選択した高信号強度領域の 3D DWI (Fig. 2 G, H) では、急性期皮質・皮質下梗塞巣が、脳表・脳室形態とともに描出された。MRA では、軽度の動脈硬化性変化は認められた

が、脳主幹動脈血流は良好に保たれていた。心房細動もなく、頸部超音波ドップラーエコー検査で、頸部内頸動脈に軽度の stump が認められたが、血栓源は明らかでなかった。

抗血小板療法、脳保護療法、抗浮腫療法中の 2 日後、突然、上肢に強い右不全片麻痺を來した。DWI 再検 (Fig. 2 C, D, I, J) では、左放線冠部に新



**Fig. 3 (Case 3):** An 85-year-old man showing right hemiplegia and angular signs with recanalization of the obliterated left middle cerebral artery by the thrombolytic therapy. DWI, examined 30 minutes after the onset, shows a slightly high signal intensity area in the corona radiata. Stereoscopic observation of the MIP (A, B) and 3D DWI (C, D) shows the spatial extension of the fresh ischemic lesion. MR angiogram (E, F), left anteroposterior projection, shows complete obliteration of the left angular artery (arrow). Immediately after the intravenous administration of urokinase, the angular artery recanalized partially with the complete resolution of motor paralysis. On the following MIP (G, H) and 3D DWI (I, J), examined 24 hours after the onset, the ischemic lesions are shown to extend into the left temporo-occipito-parietal area, but the initial ischemic lesion observed in the corona radiata area has disappeared. MR angiogram (K, L), left anteroposterior projection, confirms the patency of the previously occluded angular artery (arrowheads).

たなラクナ梗塞巣の合併が認められ、urokinase 42万単位経静脈急速投与による血栓溶解療法を追加施行した。急性期治療が終了し、塩酸チクロピジン、ワーファリン内服中の発症27日後、構音障害を来し、DWIを再検(Fig. 2 E, F, K, L)したところ、左前頭葉底部から弁蓋部にかけて新たな皮質・皮質下梗塞巣の出現が認められ、抗凝固療法

を追加施行した。

**症例3 85歳、男性、発症直後に血栓溶解療法を施行し血流再開を得た左中大脳動脈閉塞例。**

右完全片麻痺、左角回症状で発症30分後に来院。DWIでは、左中大脳動脈領域の側頭葉から角回部、頭頂・後頭葉境界領域、放線冠から半卵円

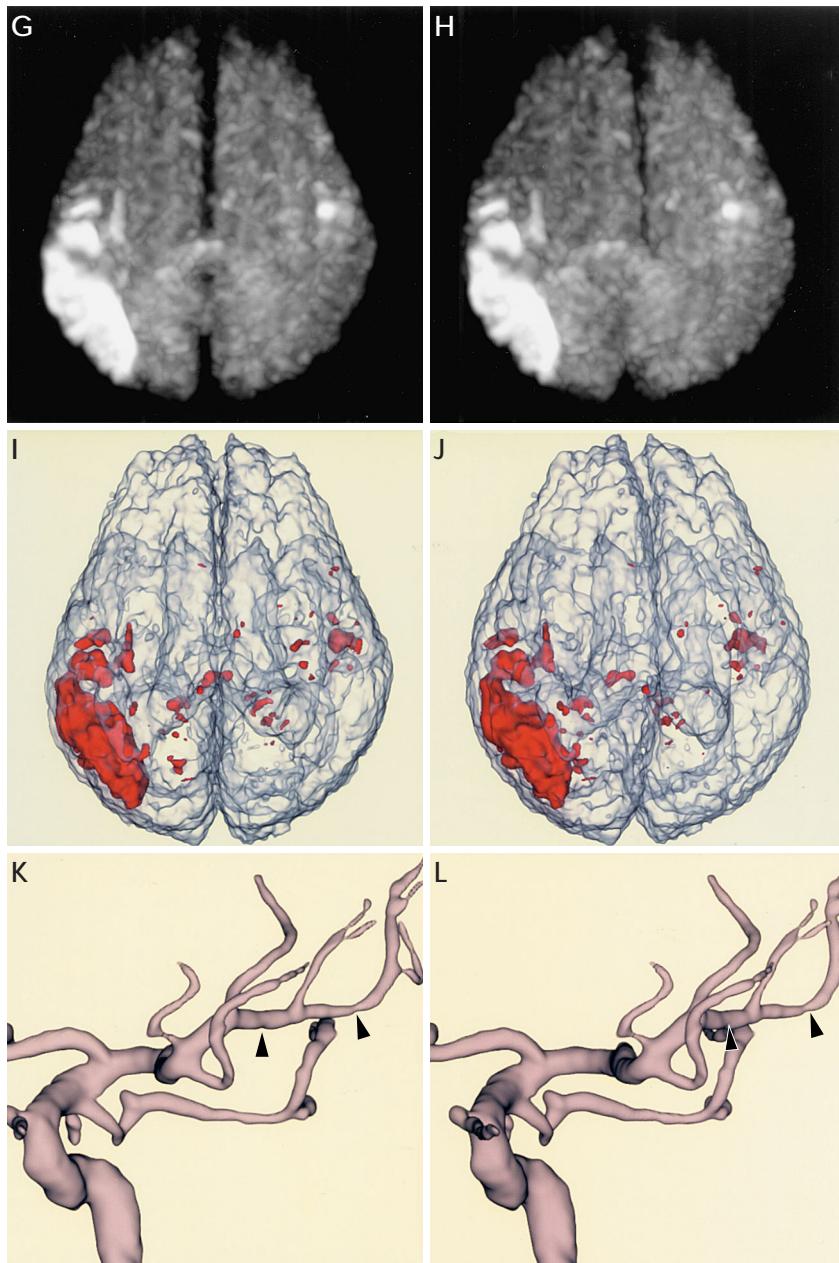


Fig. 3

中心にかけて、淡い不鮮明な高信号強度領域が広範囲に認められた。MIP 画像立体視観察 (Fig. 3 A, B) では、淡い高信号強度領域が不整形な塊として脳表の輪郭とともに把握された。信号強度閾値 240 以上で選択した高信号強度領域の 3D DWI (Fig. 3 C, D) では、脳表・脳室の形態とともに、超急性期の脳虚血病巣が、特に放線冠から半卵円

中心にかけて明瞭に描出された。MRA (Fig. 3 E, F) では、M1-M2 分岐部直後の operculofrontal artery 群の描出不良と angular artery の起始部での閉塞が認められた。

左 M2 superior branch 閉塞と診断し、発症 45 分後に urokinase 42 万単位を経静脈急速投与したところ、左角回症状は持続したが、片麻痺の速やか

な回復を得た。この直後のcomputed tomographic angiography (CTA)ではangular arteryの部分的再開通が認められた。引き続いて抗凝固療法を施行し、4時間後のDWI再検では、放線冠から半卵円中心にかけて認められた淡い不鮮明な高信号強度領域は部分的に消失し、同時に頭頂葉から頭頂・後頭葉境界領域にかけて信号強度の増大が認められた。

発症24時間後の追跡DWI MIP画像(Fig. 3 G, H)および3D DWI (Fig. 3 I, J)では、放線冠から半卵円中心にかけて認められた淡い不鮮明な高信号強度領域は完全に消失し、側頭葉から角回部、頭頂・後頭葉境界領域では信号強度のさらなる増大が認められたが、新たな病巣の出現は認められなかつた。発症2日目の追跡MRA (Fig. 3 K, L)では、operculofrontal artery群の一部に軽度狭窄像は遺残するものの、angular arteryは再開通し、anterior et posterior parietal arteriesも良好に描出された。しかし、発症3日後の追跡DWIでは、側頭葉から角回部領域の梗塞病巣に軽度の出血性梗塞が認められた。

### 考 察

近年、発症3時間以内の脳梗塞に対するtissue-type plasminogen activator (t-PA)の経静脈投与や発症6時間以内の中大脳動脈閉塞例におけるprourokinaseあるいはurokinaseの経動脈投与など脳梗塞超急性期における血栓溶解療法の有効性が報告されている<sup>3, 18, 20)</sup>。これら脳虚血超急性期の画像診断は、DWIやPIなどEPIを用いた超高速撮影法の臨床応用に拠るところが大きい。このなかで、DWIは空間分解能がやや劣り、magnetic susceptibility artifactsによる画像の歪みや信号強度の低下などの弱点がみられるものの、それらに優る超高速の時間分解能と鮮明な濃度分解能を有するvolume dataが得られることから、脳虚血超急性期病巣を検出するうえで、最も信頼できる形態画像診断法の1つである<sup>2, 4-6, 9, 10, 12, 16, 18, 19, 21, 22)</sup>。

#### 1. EPI isotropic DWI

Single-shot EPIを用いたDWIは、180度RFパルスの前後に方向性のある一対の強力な傾斜磁場(motion probing gradient; MPG)を印化して移動

するスピンの位相の乱れを惹起し、検出MPGの反転を繰り返すEPI手法で、水分子の拡散運動を超高速でデータ収集する撮影法である<sup>5, 9)</sup>。拡散運動速度の低い水分子では、最初のMPGで引き起こされた位相のずれは、180°パルス後の逆方向MPGでほぼ元に戻るため、定常状態での信号強度を示す。しかし、拡散運動速度の高い水分子では位相のずれが大きく進み復元されず、信号強度の低下を来す。その結果、DWIでは水分子の拡散が遅いほど高信号強度で、速いほど低信号強度として強調表示される。また、DWIでは、MPGの磁場にx, y, z軸の方向性があるため、水分子の拡散現象には、白質有髄線維の方向により、不等方向性が生じ、拡散の方向が磁場に平行なものでは低信号強度で、垂直なものでは高信号強度に描出される。拡散の等方向性(isotropic diffusion)を得るためにには、MPGをx, y, z軸の3方向に印加し、3回のsingle-shot EPIで得られたDWIの合成により、拡散の不等方向性を排除した、isotropic DWIが得られる<sup>5)</sup>。

#### 2. 脳虚血急性期画像診断におけるDWI

脳虚血においては、血管の閉塞により組織への酸素供給が低下し、エネルギー代謝が障害される結果、細胞膜のNa<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>ATPaseによる細胞内外間でのイオンの能動輸送が停止し、細胞内に水が貯留する細胞内浮腫(cytotoxic edema)とこれに伴う細胞間隙の狭小化により、組織内水分子の拡散は遅延する<sup>2, 4, 8, 12)</sup>。これら、超急性期から急性期の虚血脳組織における水分子の拡散状態がDWIにおける高信号につながるとされる。また、虚血脳組織では、時間が経過するとともに細胞膜が破壊され、血管壁の透過性が亢進し細胞外の水が増大する、いわゆる血管性浮腫(vasogenic edema)の状態となり、組織内水分子の拡散は全体として速くなる。そのため、DWIでは、脳虚血の亜急性期から慢性期にかけて、病巣部は高信号から低信号へと次第に変化する。DWIの高信号強度領域は、発症15分～3時間の早期から出現し、7～14日間認められるが、その発現時間や持続期間は一定しない<sup>2, 5, 12)</sup>。脳虚血急性期における虚血病巣の灌流状態は多様であり、個々の症例における虚血時間、虚血程度、残存血流量、側副血行路などが複

雑に関与するためと思われる。

DWI の高信号強度領域は、虚血の進行とともに、不可逆的梗塞巣に陥る虚血中心核 (ischemic core) と考えられている。Astrup ら<sup>1)</sup>は脳血流の閾値において神経細胞の電気的活動停止を示す領域とイオンチャネルの活動停止により anoxic depolarization を示す領域との間を penumbra と名付けた。虚血中心核と正常組織との間に存在する境界領域は ischemic penumbra とされ、早期に血流再開がなされれば脳梗塞に至ることなく回復可能な領域と考えられている。この ischemic penumbra に対して治療効果を発揮できる時間帯が、therapeutic time window と呼ばれ、血栓溶解療法、抗凝固療法、抗血小板療法、脳保護療法、抗浮腫療法など各種治療が積極的に行われる<sup>3,5,20,22)</sup>。現在のところ、脳虚血超急性期においては、DWI で示される高信号強度領域と脳血流を評価する PI (あるいは CT 灌流画像) で認められる低灌流領域との形態乖離領域 (diffusion-perfusion mismatch) に ischemic penumbra が含まれると考えられ、血流再開による脳機能回復を目的とした急性期血栓溶解治療の臨床的 target とされている<sup>6,10,18-22)</sup>。

### 3. 3D DWI による脳虚血超急性期病巣の

#### 立体的画像評価

脳虚血超急性期の治療計画を考えるうえで、DWI による虚血病巣の検出は重要であるが、得られた画像情報の解析はいまだ不十分と思われる。DWI 高信号強度領域で示される超急性期の脳虚血病巣は、これまで、2 次元表示の DWI 元画像上で視覚判断されてきた。今回、isotropic DWI で得られた volume data を opacity chart 上で数値化することで、高信号強度領域を信号強度閾値で選択し、脳虚血超急性期病巣を 3 次元可視化表示する 3D DWI を作成した。臨床例における DWI 高信号強度領域の 3 次元画像解析による脳虚血超急性期病巣の立体的画像評価は、これまで報告されていない。

3D DWI では、脳虚血超急性期病巣が、脳表・脳室形態とともに 1 枚の画像で立体表示され、信号強度閾値を選択することにより、脳虚血巣の時間的・空間的変遷を立体画像評価することが可能であった。同時多発脳梗塞例 (症例 1, Fig. 1) で

は、広範囲に散在し、複雑な形態を呈する多発梗塞巣が 3 次元画像表示された。これらを立体視観察することで、同時多発病巣の空間的位置関係をより立体的に把握することが可能であった。また、時間的・空間的に増悪する多発梗塞例 (症例 2, Fig. 2) では、それら虚血病巣の進展を立体的に追跡評価することができた。さらに、血栓溶解療法で閉塞血管の再開通が得られた中大脳動脈閉塞例 (症例 3, Fig. 3) では、発症初期に認められた淡い高信号強度領域は一部で可逆的に消失し、相応する脳機能の完全な回復が得られた。しかし、残りの領域では虚血巣の信号強度は増大し、新たな高信号強度領域の出現・拡大を来し、これらの領域は、最終的に皮質・皮質下梗塞に陥った。

### 4. 脳虚血超急性期における 3D DWI の

#### 臨床応用と展望

3D DWI は、元画像 volume data の数値化による画像解析であり、高信号強度で示される脳虚血超急性期病巣は、これまでの視覚判断に拠ることなく、信号強度閾値に基づいて選択的に抽出され 3D 可視化表示される。3D DWI では、虚血の進行に伴う病巣の dynamic な変化を、信号強度閾値で選択された量的変化として定量化して追跡評価することが可能である。また、脳虚血病巣を信号強度分布として捉えることで、病巣の質的変化を信号強度閾値に基づいて経時的に画像評価することも可能となる。さらに、DWI で得られた高信号強度領域を信号強度閾値で color-code 表示することも可能である。

Volume data の数値化は、撮影条件の異なる modality で得られた volume data から、関心領域を共通の座標軸空間で立体表示するうえで必要な画像解析技術である。これにより、たとえば、DWI と PI それぞれの volume data から得られた脳虚血病巣を 3 次元画像上で fusion あるいは subtraction することで、diffusion-perfusion mismatch 領域を立体画像表示することが可能になると思われる。さらに、3D 可視化技術を用いて DWI 脳虚血病巣を T2 reverse 画像や MRA 画像と merging することで、脳虚血急性期における脳全域の病態把握に有用な立体画像を作成することも近い将来可能になるものと考えられる。

3D DWI では、超急性期の血流再開に伴う高信号強度領域の可逆的消失が、3次元可視化画像上で評価可能である。特に、発症間もない時間のDWI で示される淡い高信号強度領域には、可逆的回復の可能性を有する、まさに救援を待つ脳虚血領域が含まれると考えられ、DWI に特異的な画像所見と思われる。しかしながら、DWI で捉えられる高信号強度領域の可逆性や DWI の有する情報伝達特性の詳細はいまだ不明な点も多く<sup>5, 7, 8, 11, 13)</sup>、3D DWI による脳虚血超急性期病巣の立体的画像評価は、DWI、PI、MRA や CTA など各種画像情報や臨床症状などをもとに総合的に判断されるべきものと考えられる。

本論文の要旨の一部は、第55回日本脳神経外科学会中国四国地方会（2003年4月6日、山口）において発表した。

### 文 献

- 1) Astrup J, Siesjo BK, Symon L: Thresholds in cerebral ischemia - the ischemic penumbra. *Stroke* **12**: 723-725, 1981
- 2) Fiebach JB, Jansen O, Schellinger PD, Heiland S, Hacke W, Sator K: Serial analysis of the apparent diffusion coefficient time course in human stroke. *Neuroradiology* **44**: 294-298, 2002
- 3) Furlan A, Higashida R, Wechsler L, Gent M, Rowley H, Kase C, Pessin M, Ahuja A, Callahan F, Clark WM, Silver F, Rivera F: Intra-arterial tPA for acute ischemic stroke. The PROACT II study: a randomized controlled trial. *Stroke* **28**: 2003-2011, 1999
- 4) Kamal AK, Segal AZ, Ulug AM: Quantitative diffusion-weighted MR imaging in transient ischemic attacks. *AJNR Am J Neuroradiol* **23**: 1533-1538, 2002
- 5) 古明地孝明, 鈴木進, 金相年, 斎藤孝次, 宝金清博: MRI拡散強調画像(DWI)と灌流画像(PI). *脳外速報* **12**: 411-423, 2002
- 6) Lovblad K-O, Baird AE, Schlaug G, Benfield A, Siewert B, Voetsch B, Connor A, Burzynski C, Edelman RR, Warach S: Ischemic lesion volumes in acute stroke by diffusion-weighted magnetic resonance imaging correlated with clinical outcome. *Ann Neurol* **42**: 164-170, 1997
- 7) Minematsu K, Li L, Sotak CH, Davis MA, Fisher M: Reversible focal ischemic injury demonstrated by diffusion-weighted magnetic resonance imaging in rats. *Stroke* **23**: 1304-1310, 1992
- 8) Miyasaka N, Nagaoka T, Kuroiwa T, Akimoto H, Haku T, Kubota T, Aso T: Histopathological correlations of temporal diffusion changes in a rat model of cerebral hypoxia/ischemia. *AJNR Am J Neuroradiol* **21**: 60-66, 2000
- 9) Moseley ME, Cohen Y, Mintorovitch J, Chilelli L, Shimizu H, Kucharczyk J, Wendland MF, Weinstein PR: Early detection of regional cerebral ischemia in cats: comparison of diffusion- and T2-weighted MRI and spectroscopy. *Magn Reson Med* **14**: 330-346, 1990
- 10) Nighoghossian N, Hermier M, Adeleine P, Drex L, Dugor JF, Philippeau F, Yilmaz H, Honnorat J, Dardel P, Berthezene Y, Froment JC, Trouillas P: Baseline magnetic resonance parameters and stroke outcome in patients treated by intravenous tissue plasminogen activator. *Stroke* **34**: 458, 2003
- 11) Pierpaoli C, Righini A, Linfante I, Tao-Cheng JH, Alger JR, Di Chiro G: Histopathological correlates of abnormal water diffusion in cerebral ischemia: diffusion-weighted MR imaging and light and electron microscopic study. *Radiology* **189**: 439-448, 1993
- 12) Reith W, Hasegawa Y, Latour LL, Daedzinski ME, Sotak CH, Fisher M: Multiple diffusion mapping for 3-D evolution of cerebral ischemia in a rat stroke model. *Neurology* **45**: 172-177, 1995
- 13) Ringer TM, Neumann-Haefelin T, Sobel RA, Moseley ME, Yenari MA: Reversal of early diffusion-weighted magnetic resonance imaging abnormalities does not necessarily reflect tissue salvage in experimental cerebral ischemia. *Stroke* **32**: 2362-2369, 2001
- 14) 佐藤透: 管腔壁を透視した3D-MRA transluminal画像による脳動脈瘤構築の解析. *No Shinkei Geka* **29**: 951-959, 2001
- 15) 佐藤透: 管腔壁を透視したthree-dimensional MRA transluminal flow imagingによる脳動脈瘤内血流の可視化. *No Shinkei Geka* **30**: 1173-1178, 2002
- 16) Satoh T, Onoda K, Tsuchimoto S: Visualization of intraaneurysmal flow patterns with transluminal flow imaging of three-dimensional MR angiograms in conjunction with aneurysmal configurations. *AJNR Am J Neuroradiol* **24**: 1436-1445, 2003
- 17) Satoh T, Onoda K, Tsuchimoto S: Intra-operative evaluation on aneurysmal architecture: comparative study with transluminal imaging of 3D MRA and 3D CTA. *AJNR Am J Neuroradiol* **24** (8): 2003
- 18) Schaefer PW, Hunter GJ, He J, Hamberg LM, Sorenson AG, Schwamm LH, Koroshetz WJ, Gonzalez RG: Predicting cerebral ischemic infarct volume with diffusion and perfusion MR imaging. *AJNR Am J Neuroradiol* **23**: 1785-1794, 2002
- 19) Schellinger PD, Fiebach JB, Jansen O, Ringleb PA, Mohr A, Steiner T, Heiland S, Schwab S, Pohlers O, Ryssel H, Orakcioglu B, Sartor K, Hacke W: Stroke magnetic resonance imaging within 6 hours after onset of hyperacute cerebral ischemia. *Ann Neurol* **49**: 460-469, 2001
- 20) The National Institute of Neurological Disorders and Stroke rt-PA Stroke Study Group: Tissue plasminogen

- activator for acute ischemic stroke. *N Engl J Med* **333** : 1581 1587, 1995
- 21) Ueda T, Yuh WY, Maley JE, Quets JP, Hahn PY, Magnotta VA : Outcome of acute ischemic lesions evaluated by diffusion and perfusion MR imaging. *AJNR Am J Neuroradiol* **20** : 983 989, 1999
- 22) Uno M, Harada M, Yoneda K, Matsubara S, Satoh K, Nagahiro S : Can diffusion- and perfusion-weighted magnetic resonance imaging evaluate the efficacy of acute thrombolysis in patients with internal carotid artery or middle cerebral artery occlusion? *Neurosurgery* **50** : 28 34, 2002