

# Time-of-flight MR angiography を用いた EC/IC バイパス 術後の脳血流動態の評価 — Pre-saturation pulse による血流方向性の解析 —

青樹 毅<sup>1</sup>, 宝金清博<sup>1</sup>, 阿部 弘<sup>1</sup>, 宮坂和男<sup>2</sup>,  
柏葉 武<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北海道大学医学部脳神経外科 <sup>2</sup>同 放射線科  
<sup>3</sup>柏葉脳神経外科病院

## はじめに

Magnetic resonance angiography (MRA) は流体現象を画像化したものであり、現在は主に血管の形態診断法として臨床応用されている<sup>1)~3)</sup>。MRA の画像情報としての利点の1つに、MRA の血流信号には血流様式や速度情報も含まれており、圧注入による X 線血管撮影とは異なり、生理的条件下での血流情報が得られる可能性を持っていることがあげられる<sup>4)~10)</sup>。反面、MRA 画像では血流の経時的描出が通常困難であるため血流の方向性の評価はできず、臨床問題となる症例も少なくない。そのため血流の方向性を同定する手法が試みられているが、pre-saturation pulse sequence を用いて血流を標識する手法<sup>9)</sup>が簡便法の1つと思われる。

今回、頭蓋内閉塞性血管障害に対する extracranial-intracranial arterial bypass (EC/IC バイパス) 術施行例につき、通常の時-of-flight (TOF) MRA と血流の方向性を同定するため pre-saturation pulse を用いた MRA を

施行し、EC/IC バイパス術後の頭蓋内血管の血流方向性の同定を試み、さらにはバイパスを介する血流の灌流域の同定からバイパスの機能評価における有用性について検討した。

## 方法および対象

使用MRI装置は、Siemens社製、Magnetom SP (1.5T) である。通常MRAの撮像法は、FISP (fast imaging with steady precession) を用いた3次元time-of-flight (3D-TOF) 法であり、各撮像パラメータは、繰り返し時間 (TR) 33~36ms, エコー時間 (TE) 7ms, flip angle 20~35°, matrix 256×256×64 もしくは 256×192×64, FOV 160~200 mm, スライス厚 50~80 mm, 加算回数1回で、ウィリス動脈輪に平行な撮像範囲を設定しスキャンした。再構成画像は最大信号投影法 (maximum-intensity-projection; MIP) を用いて、軸位像、前後像、側面像の立体視像を作成しフィルム上で観察した。さらに血流の方向性の評価は、通常TOF MRAの3次元データ取得と同時に、幅10~50mmのpre-

**キーワード** MR angiography, blood flow direction, time-of-flight method, extracranial-intracranial arterial bypass, pre-saturation pulse

saturation pulse を加えた MRA も施行し, slab (pulse band) 内の組織の縦磁化を「飽和」することにより無信号化し, slab 内を通過し標識された血管および血流の範囲から同定した。バイパスの機能評価は, 標識されたバイパス血管の灌流する血管の範囲から判定した。

対象は, 浅側頭動脈—中大脳動脈吻合術もしくは橈骨動脈移植による頸部外頸動脈—中大脳動脈吻合術が施行され, 手術後の X 線血管撮影でバイパスの patency が確認されている内頸動脈閉塞 4 側, 内頸動脈狭窄 12 側, 中大脳動脈閉塞 10 側, 中大脳動脈狭窄 2 側, 計 28 病側であり, これらの MRA 所見と同時期に施行された X 線血管撮影所見とを比較検討した。また血流の方向性を確認する目的で経頭蓋ドップラー血流計 (EME 社製 TC 2-64) による中大脳動脈水平部の血流方向性の同定も 23 病側で行った。

## 結 果

### 1) 代表症例

以下, 代表的な症例を呈示する。

〈症例 1〉 49 歳, 男性

右上下肢脱力の繰り返す一過性脳虚血発作で発症し, X 線血管撮影で左内頸動脈末端部から中大脳動脈起始部にかけての狭窄が認められ, 4 年前に左浅側頭動脈—中大脳動脈吻合術を施行されている。X 線総頸動脈撮影では前記の所

見に加え, 拡張発達した浅側頭動脈と中大脳動脈皮質枝とのバイパスの patency が確認され, また中大脳動脈水平部 ( $M_1$ ) は逆行性に造影された (Fig. 1A)。通常の MRA でも同様に, バイパスの patency が明瞭に同定されたが, 中大脳動脈の血流の方向性は同定困難であった (Fig. 1B)。pre-saturation pulse を用いて浅側頭動脈からの血流を無信号化すると, 中大脳動脈皮質枝, 水平部ともに無信号化され, 中大脳動脈はバイパスを介する血流により灌流されていることが確認された (Fig. 1C)。また pre-saturation pulse により左内頸動脈の血流を無信号化しても, 中大脳動脈は明瞭に描出され, 同様にバイパスに依存していることが認められた (Fig. 1D)。経頭蓋ドップラー法でも, 中大脳動脈水平部において探触子から遠位側へ向かう逆行性の血流が検出された (Fig. 1E, F)。

〈症例 2〉 67 歳, 女性

構語障害, 右上肢の異常感覚の一過性脳虚血発作で発症, X 線血管撮影で左内頸動脈海綿洞部から末端部にかけて高度の狭窄が認められ, 2 年前に橈骨動脈移植による頸部外頸動脈—中大脳動脈バイパス術を施行されている。通常の MRA では, 左中大脳動脈はバイパス血管 (橈骨動脈) との連続性が明瞭に認められ (Fig. 2A), バイパス血管の血流を pre-saturation pulse により無信号化すると, 中大脳動脈も同様に無信号化され, 中大脳動脈の血行はバイパスにより灌流かつ依存していることが診断された (Fig.

Fig.1. A case of severe stenosis of the origin of left middle cerebral artery (MCA) received arterial bypass surgery. A : Anteroposterior projection of contrast angiogram shows the patency of arterial bypass and post-operative collateral blood flow from left superficial temporal artery (STA). B : Post-operative axial MR angiogram demonstrates the patency of the arterial graft (arrow), though the direction of blood flow and the origin of blood supply are not accurately identified. C and D : Presaturation of left STA eliminates signal from left MCA and presaturation of the origin of left MCA does not eliminate signal in left MCA, indicating blood supply of left MCA is primarily from left STA. E and F : Post-operative transcranial doppler sonograms detect the retrograde blood flow at the horizontal portion of left MCA.

1992年10月13日受理

別刷請求先 〒060 札幌市北区北15条西7丁目 北海道大学医学部脳神経外科 青樹 毅

Time-of-flight MR angiography による EC/IC バイパス術後の脳血流動態

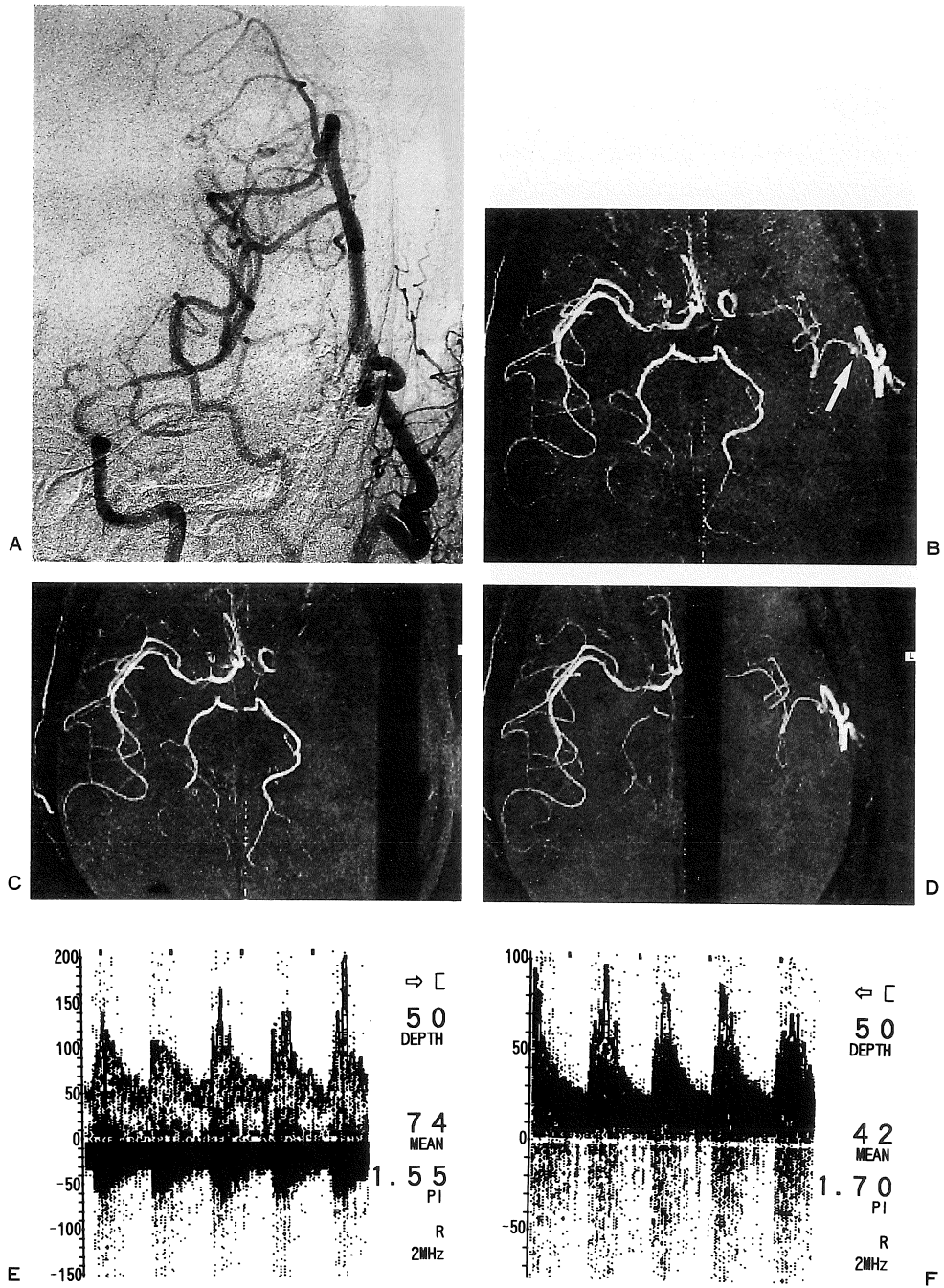


Fig. 1

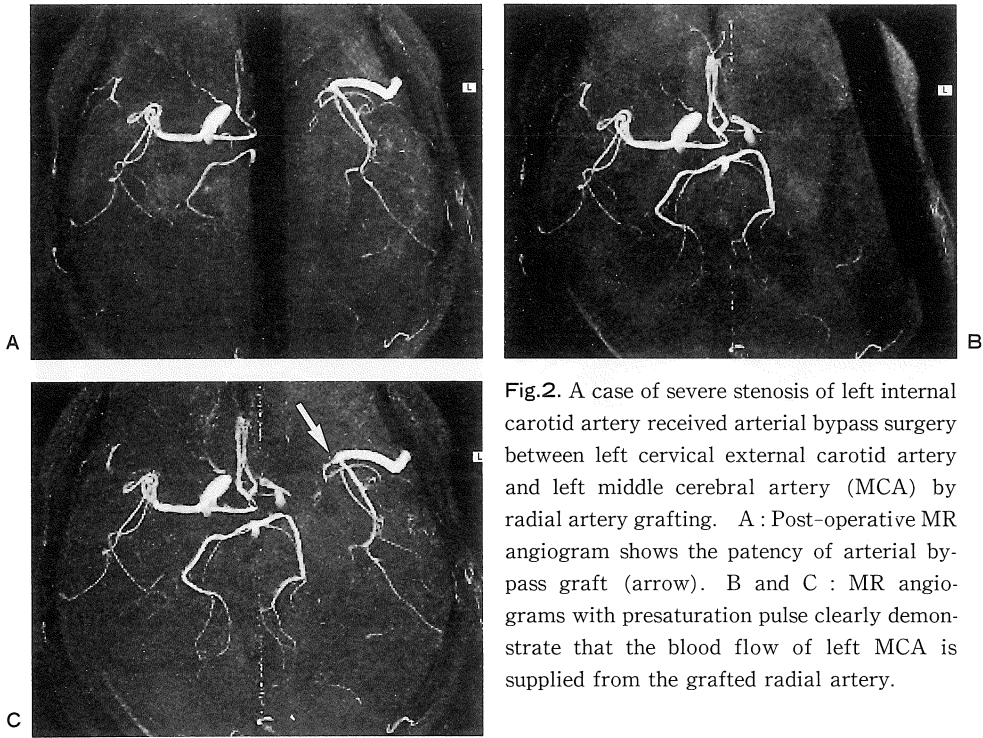


Fig.2. A case of severe stenosis of left internal carotid artery received arterial bypass surgery between left cervical external carotid artery and left middle cerebral artery (MCA) by radial artery grafting. A : Post-operative MR angiogram shows the patency of arterial bypass graft (arrow). B and C : MR angiograms with presaturation pulse clearly demonstrate that the blood flow of left MCA is supplied from the grafted radial artery.

2B, C).

### 2) MRA によるバイパスの patency の同定

今回検討した症例は X 線血管撮影においてバイパスの patency が確認されているが、MRA でも同様にバイパスによる頭蓋内外の血管の連続性が全症例で同定可能であった。しかしながら、通常の MRA 画像では血流の方向性が評価できないため、特に中大脳動脈水平部の非閉塞例においては順行性の血行とバイパスを介する血行との鑑別は困難であった。

### 3) pre-saturation pulse を用いた MRA による血流方向性の同定とバイパスの機能評価

通常の MRA に pre-saturation pulse を加え slab 内のスピンの縦磁化を飽和すると、MRA 上 band 内の静止組織ならびに band 内を貫通する血管の信号は消失し (無信号化)、同時に band 内を通過した血流が灌流する領域の血管も無信号化された。すなわち、pre-saturation pulse を

用いて血流を標識することにより血流の方向性が同定可能となり、さらにはバイパスが灌流する領域内の動脈が同定され、通常の MRA では評価困難であったバイパスを介する血流を特定することが可能となった。通常の MRA で手術側の中大脳動脈皮質枝が十分に描出され、かつ pre-saturation pulse を加えた MRA でバイパスを介する血流と判定される場合、バイパス術は十分機能し、患側の頭蓋内血流はバイパスに依存していると診断された。しかしながら、MRA の空間分解能は不十分な面もあり中大脳動脈皮質枝の詳細な評価には限界が認められた。

なお、経頭蓋ドップラー法 (TCD) による中大脳動脈水平部の血流方向性の判定との比較では、TCD を施行した 23 病側全例で pre-saturation pulse による方向性の同定結果と一致していた (Table 1)。

Table 1. Flow direction of MCA(M<sub>1</sub>) detected on MRA and transcranial doppler sonography (TCD)

MRA	TCD	
	antegrade	retrograde
antegrade	7	0
retrograde	0	16

## 考 察

現在、脳血流動態を評価する診断手段としては、脳血管を直接造影する従来からの X 線血管撮影や digital subtraction angiography (DSA) の他に transcranial doppler sonography (TCD), dynamic CT, dynamic MR, 脳循環そのものを評価する single photon emission CT (SPECT), positron emission tomography (PET) などがあり、また近年進歩の著しい magnetic resonance angiography (MRA) は血流信号を強調することにより X 線血管撮影と類似の画像を得ることができる新しい脳血管検査法であり、脳血管障害のスクリーニング検査や手術後の経過観察における検査法として臨床で実用化され始めている<sup>1),2),6)</sup>。一方、MRA は空間分解能の限界、血流の方向性の同定などの問題点も認められる。MRA での血流の方向性の評価については、通常 MRA 画像は血管構築が全体として描出される static image であり、血流の経時的描出が困難であるため方向性の同定はできないが、saturation pulse により血流を標識する縦磁化を利用する方法<sup>5)</sup>、位相情報を解析する横磁化を利用する方法<sup>9)</sup>などにより方向性に関する情報が得られる。我々の用いた手法は前者であり、きわめて簡便で臨床的に即実用可能な手法であると考えられる。また同時に施行した経頭蓋ドップラー法による血流方向の測定結果とも一致しており信頼性も高いと思われる。

EC/IC バイパス術施行例に対する MRA は、今回の検討からはバイパスの patency 自体はバイパスを介する血行が十分発達しているものか

ら軽度に関与しているものまで通常 MRA で十分診断可能と思われた。また time-of-flight MRA における血流信号は、「wash-in effect」により速い血流は静止組織とのコントラストが大きくなり高信号の血流として描出され<sup>7)</sup>、バイパス術後の中大脳動脈の描出される範囲およびその信号強度を観察することにより頭蓋内の血行動態の変化が評価可能と思われた。しかしながら、バイパスを介さない順行性の血行が存在する場合は、通常 MRA では順行性の血流とバイパスを介する逆行性の血流との鑑別は困難であり、本法のように pre-saturation pulse を応用した MRA では順行性あるいはバイパス内の血流を無信号化することによりバイパス内の血液が中大脳動脈にどれだけ灌流しているかを視覚的に判定可能で、さらにはバイパスの機能的な評価が診断可能と考えられる。つまり、バイパス内の血液の無信号化により、その下流の中大脳動脈皮質枝も無信号化される症例ではバイパスに血流を依存し、かつバイパスの機能が十分確立していると判定でき、反対に中大脳動脈皮質枝が無信号化されない症例では、バイパスの頭蓋内血行への関与は低いと判定できる。また、X 線血管撮影では造影剤を圧注入する検査法であるため、必ずしも血行を正確には描出しておらず、本法はより生理的条件下での評価が可能であるといえる。さらに本法の利点としては、放射線被曝、造影剤を使用しない点など X 線血管撮影と比較して極めて侵襲が低く、検査時間も通常 MRA の撮影に加え約 7 分間と実用範囲で pre-saturation pulse を加えた MRA を施行しうることから、特に外来的な経過観察として繰り返し施行できる点も有用と思われる。また、バイパス術後の血行動態の評価のみならず、脳主幹動脈の閉塞性病変での側副血行路の評価<sup>8)</sup>や巨大脳動脈瘤の親血管結紮術や人工塞栓術後の頭蓋内の血行の評価などにおいても本法は有用と思われる。ただし、バイパスの機能評価に関しては、X 線血管撮影や MRA などの主に血管の形態的情報のみばかりではなく、

SPECT や PET による脳血流量や脳血管反応性に関する情報も重要であること<sup>8)</sup>, また MRA の空間分解能が現時点では matrix で  $256 \times 256$  と限界があること, さらに血流の末梢側においては「wash-in effect」が減少しコントラストが低下するため中大脳動脈皮質枝領域の描出が十分とは言えないことなど問題点も認められる。

今後, MRA の空間分解能は matrix が  $512 \times 512$  以上が実現されると思われ, より精度の高い非侵襲的で簡便な脳血管の「形態的」検査法となるばかりではなく, このような血流の方向性や脳血管の血行動態に関して「機能的」検査法としても有用な情報を提供する。

### 結 語

頭蓋内閉塞性血管障害に対する EC/IC バイパス術施行例に pre-saturation pulse を用いた time-of-flight MRA を施行し, バイパスの patency の同定, 頭蓋内血管の血流方向性の同定, バイパスを介する血行の灌流状態およびその機能評価につき検討した。MRA によりバイパスの patency が同定可能であるばかりではなく, MRA に pre-saturation pulse を用いることにより血流の方向性が同定可能で, さらにはバイパスの機能評価, 頭蓋内血行動態の評価に関しても有用な検査法になると思われた。

### 文 献

- 1) 阿部 弘, 青樹 毅, 松沢 等, 他: 小児ウィリス動脈輪閉塞症の MR 診断—MRI および MRA の有用性と限界—. 厚生省特定疾患ウィリス動脈輪閉塞症調査研究班 (編), 平成 3 年度研究報告書, 1992, p98-105.
- 2) 青樹 毅, 上山博康, 阿部 弘, 他: 3 次元 MR アンジオグラフィー (3D-MRA)—頭蓋内血管病変への応用と問題点—. 日本臨床, 49 : 1598-1063, 1991.
- 3) Andrew WL : MR angiography : Reaching adolescence. AJNR, 12 : 1141-1142, 1991.
- 4) Dumoulin CL, Hart JR : Magnetic resonance angiography. Radiology, 161 : 717-720, 1986.
- 5) Edelman RR, Mattle H, O'Reilly GV, et al. : Magnetic resonance imaging of flow dynamics in the circle of Willis. Stroke, 21 : 56-65, 1990.
- 6) Edelman RR, Heinrich PM, Dennis JA, et al. : MR angiography. AJR, 154 : 937-946, 1990.
- 7) Felix WW : Time-of-flight effects in MR imaging of flow. Magn Reson Med, 14 : 187-193, 1990.
- 8) 黒田 敏, 瀧川修吾, 上山博康, 他: 慢性期脳虚血症例における脳血流不全の診断— $^{133}\text{Xe}$  SPECT における Diamox test の有用性—. 脳外, 18 : 167-173, 1990.
- 9) 原田貢士, 藤田典彦: 脊椎管内における CSF flow—第一頸椎レベルにおける動態—. 日獨医報, 34 : 77-81, 1989.
- 10) Masaryk TJ, Modic MT, Ross JS : Intracranial circulation : Preliminary clinical results with three-dimensional (volume) MR angiography. Radiology, 171 : 793-799, 1989.

**Analysis of Cerebral Blood Flow Dynamics and Evaluation of  
Extracranial-Intracranial Arterial Bypass Function Using  
Magnetic Resonance Angiography with Presaturation Pulse Sequence**

Takeshi AOKI<sup>1</sup>, Kiyohiro HOUKIN, Hiroshi, ABE<sup>1</sup>,  
Kazuo MIYASAKA<sup>2</sup>, Takeshi KASHIWABA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Department of Neurosurgery, Hokkaido University School of Medicine,  
Kita-15-jo Nishi-7-chome, Kita-ku, Sapporo 060*

<sup>2</sup>*Department of Radiology, Hokkaido University School of Medicine*

<sup>3</sup>*Kashiwaba Neurosurgical Hospital*

Magnetic resonance (MR) angiography was applied to the study of blood flow dynamics and evaluation of extracranial-intracranial arterial bypass function in patients received bypass surgery. Three-dimensional gradient-echo acquisitions with selective presaturation of individual vessels were used to determine the direction of blood flow. Presaturation causes signal loss within the territory supplied by the presaturated artery, without affecting vessels not coursing through the presaturation slab. The patency of arterial bypass graft could be demonstrated as properly with MR angiography as with conventional angiography. In addition to that, MR angiography with presaturation pulse clearly demonstrated the direction of blood flow and the territory supplied by arterial bypass graft. The results were correlated with those from transcranial Doppler sonography and conventional angiography. In conclusion, MR angiography is a noninvasive useful modality for the evaluation of dependency on post-surgical collaterals and bypass function.