原 著

ウイリス動脈輪閉塞症診断における time-of-flight MR angiography の検討

庄 野 禎 久 池 崎 清 信 松 島 俊 夫
井 上 亨 藤 井 清 孝 福 井 仁 士

The Diagnostic Accuracy of Time-of-flight MR Angiography in Diagnosing Moyamoya Disease

by

Tadahisa Shono, M.D., Kiyonobu Ikezaki, M.D., Toshio Matsushima, M.D.
Tooru Inoue, M.D., Kiyotaka Fujii, M.D., and Masashi Fukui, M.D.

from

Department of Neurosurgery, Kyushu University Faculty of Medicine

Conventional cerebral angiography is essential for achieving the diagnosis of Moyamoya disease. It is, however, an invasive examination, especially for the pediatric patients. In this paper, we report on the results of an investigation as to whether MRA is able to accurately visualize the steno-occlusive changes in the carotid fork and the basal moyamoya vessels less invasively.

Twenty patients among them 16 children, who were diagnosed as having Moyamoya disease with conventional angiography underwent MRI and MRA using a 1.5T MR unit (Signa, G. E.). Angiographically, 37 sides were determined to be in stage 3. MRA was performed using two-dimensional time-of-flight (2D-TOF), 3D-TOF, and gadolinium (Gd)-enhanced 3D-TOF methods.

The 3D-TOF MRAs showed almost equal sensitivity to that of conventional angiography for the detection of steno-occlusive changes in the carotid fork. However, it was difficult to visualize the moyamoya vessels clearly. Further, 3D-TOF, 2D-TOF, and Gd-enhanced 3D-TOF methods depicted the moyamoya vessels in 65%, 79%, and 80% of the examined sides, respectively. In contrast, MRI visualized the moyamoya vessels as multiple flow voids in the basal ganglia in 38 of 40 sides (95%).

Based on the above findings, it thus was concluded that approximately 90% of the stage 3 Moyamoya disease cases could be diagnosed by a combination of 3D-TOF MRA and MRI without the use of conventional angiography.

(Received October 14, 1994 ; accepted February 10, 1995)

Key words : time-of-flight MR angiography, moyamoya disease, diagnosis
Jpn J Neurosurg (Tokyo) 4 : 458-464, 1995

はじめに

1988年に改訂された厚生省特定疾患ウイリス動脈輪閉塞症（以下、本症）調査研究班による診断の手引きによると、本症の確定診断には脳血管撮影が必須で、その

所見上、①頭蓋内内頸動脈終末部、前および中大脳動脈近位部に狭窄または閉塞がみられること、②その付近に異常血管網（モヤモヤ血管）が動脈相においてみられること、③これら2つの血管病変が両側性にあること、とされている。しかし通常の脳血管撮影は、本症が小児期

九州大学医学部脳神経病研究施設外科／〒812 福岡市東区馬出3-1-1〔連絡先：庄野禎久〕

Address reprint requests to : Department of Neurosurgery, Kyushu University Faculty of Medicine, 3-1-1 Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 812, Japan

Table 1 Cases

Total : (4/93-11/93)	20 cases
Age : Children (≤ 18 y. o.)	16 cases
Adult (> 18 y. o.)	4 cases
Angiographical stage : 1	1 side
2	2 sides
3	37 sides

Table 3 Obstructive changes in the distal ICA (3D-TOF)

3D-TOF	ICAG			occlusion
	normal	mild	severe	
normal	1	1		
stenosis mild		3	2	
severe			5	3
occlusion			3	22

ICAG : internal carotid angiography

に多いことと、年少児には全身麻酔が必要なことを合わせて考えると、侵襲の強い検査であり、確定診断のための入院検査が必要である。その点、magnetic resonance angiography (MRA) は外来で施行可能なより非侵襲的な検査であり、簡便性、安全性、血管病変の診断能などに優れ、本症の診断や経過観察における有用性が期待されている¹⁾²⁾⁴⁾¹¹⁾¹³⁾。したがって、MRA により本症の確定診断が下せるならば、患者にとっての福音は計り知れない。

今回、われわれは脳血管撮影で確定診断された症例、つまり上記の3つの条件を満たした症例に MRA を施行し、異なった撮像法におけるそれぞれの病変の描出を検討した。そして MRI・MRA で上記の条件がどの程度満たせるかを判定し、現時点で MRI・MRA のみで本症の確定診断が可能か否かを検討したので報告する。

対象および方法

対象症例は1993年4月～11月に脳血管撮影にて、本症と確定診断された20症例で、ほぼ同時期に MRI、MRA が施行された (Table 1)。18歳以下の小児が16例、成人が4例で、鈴木らの脳血管撮影分類上⁹⁾、stage 3 が37例、stage 1 が1例、stage 2 が2例であった。

使用 MR 装置は General Electronics 社製、Signa (1.5T) で、MRA は Two-dimensional time-of-flight 法 (以下、2D-TOF 法)、Three-dimensional time-of-flight 法 (以下、3D-TOF 法)、Gadolinium (以下、Gd) 造影 3D-TOF 法にて撮像した。撮像条件を Table 2 に

Table 2 Imaging method and scan parameters

	TR (ms)	TE (ms)	FA (degree)	FOV (cm)	Matrix
3D-TOF	32	4.8	20	15	256×128
2D-TOF	45	8.8	60	15	256×128

MR device : G. E. Signa 1.5T (version 5.3)

TR : repetition time TE : echo time

FA : flip angle

FOV : field of view

3D-TOF : three-dimensional time-of-flight

2D-TOF : two-dimensional time-of-flight

Table 4 Obstructive changes in the distal ICA (2D-TOF)

2D-TOF	ICAG			occlusion
	normal	mild	severe	
normal				
stenosis mild				
severe				
occlusion	1		3	20

ICAG : internal carotid angiography

示す。主に血流の速い主幹動脈の閉塞性変化をみる目的で 3D-TOF 法を全例に施行し、血流の遅いモヤモヤ血管をみる目的で、2D-TOF 法あるいは Gd 造影 3D-TOF 法を用いた。Gd 造影 3D-TOF 法は Gd の bolus injection 直後より 3D-TOF と同じ撮像条件で撮像した。

それぞれの撮像法について、1) 内頸動脈終末部の閉塞性変化、2) basal moyamoya の描出率、について検討した。1) に関しては病変を normal, mild stenosis, severe stenosis, occlusion の4段階に分けて、それぞれ脳血管撮影と MRA を比較した。MRA は冠状断および水平断の所見を中心に判定し、血流が線状の信号として捉えられるものを mild stenosis、点状であるが本来の血管走行に沿って血流信号が追えるものを severe stenosis、血流信号がまったく認められないものを occlusion と判定した。また2)に関しては、MRA 水平断での病変の描出率および MRI T1 強調像での基底核部の flow void の描出率について検討した。また basal moyamoya の描出が不良な一部の症例には、2D-TOF target MIP (maximum intensity projection) 像を追加した。

結 果

① 内頸動脈終末部の閉塞性変化

3D-TOF 法と脳血管撮影を比較すると、脳血管撮影上の閉塞性変化は、軽度狭窄の1例を除きすべて MRA で描出可能であった (Table 3)。描出率は98%である。こ

Fig. 1 A 2-year-old female with bilateral stage 3 lesions

- A** : Bilateral internal carotid angiograms showing occlusion of the supraclinoid portion of the ICA and well-developed basal moyamoya vessels
- B** : A 3D-TOF MRA axial view showing severe bilateral M1 stenosis and mild bilateral M1 and bilateral A1 stenoses. The basal moyamoya vessels are visible on both sides.

Table 5 Visualization of the moyamoya vessels

	Sides	Cases
3D-TOF	65% (26/40)	45% (9/20)
3D-TOF+Gd	80% (8/10)	80% (4/5)
3D-TOF+2D-TOF	79% (19/24)	75% (9/12)
3D-TOF+MRI	95% (38/40)	90% (18/20)

Table 6 Diagnosis of the Moyamoya Disease

	Cases
3D-TOF	45% (9/20)
3D-TOF+Gd	80% (4/5)
3D-TOF+2D-TOF	75% (9/12)
3D-TOF+MRI	90% (18/20)

のうち3側で脳血管撮影上の高度狭窄を閉塞と過大評価した。また逆に2側で脳血管撮影上の高度狭窄を軽度狭窄に、3側で閉塞を高度狭窄に過小評価した。2D-TOF法と脳血管撮影を比較すると、2D-TOF法では脳主幹動脈は全例閉塞しているように描出された (Table 4)。

② basal moyamoya の描出率 (Table 5)

basal moyamoya は、3D-TOF 法単独では40例中26側、65%で描出可能であった。Gd 造影 3D-TOF 法では10例中8側、80%と描出率は上昇した。2D-TOF 法では24例中19側、79%で描出可能であった。また MRI T1 強調像では、40例中38側、95%で脳基底核部に複数の flow void が認められ、basal moyamoya の所見と判断できた。

③ 診断率 (Table 6)

1)、2)の病変がともに描出でき、両側性に認められ

たものを、本症の確定診断可能と判定し診断率を求めた。3D-TOF 法単独では20例中9例 (45%) で確定診断が可能であった。3D-TOF 法に Gd 造影 3D-TOF 法を組み合わせると5例中4例 (80%)、3D-TOF 法に 2D-TOF 法を加えても12例中9例 (75%) と診断率が上昇した。最も診断率が高かったのは、3D-TOF 法に MRI を組み合わせた場合で、診断率は90% (20例中18例) に達した。

代表症例を提示する。すべて鈴木らの脳血管撮影分類上 stage 3 の症例である。

【症例 1】

患者：2歳、女児。3D-TOF 法のみで診断可能であった症例。

脳血管撮影で両側内頸動脈終末部および A1, M1 の起始部の閉塞と顕著な basal moyamoya を認めた (Fig. 1A)。3D-TOF 水平断では両側 M1 起始部の強度狭窄と

Fig. 2 A 6-year-old male with bilateral stage 3 lesions

- A :** Bilateral internal carotid angiograms showing severe right ICA stenosis and bilateral basal moyamoya vessels
B : A 3D-TOF MRA axial view showing severe bilateral A1 and left M1 stenoses. The moyamoya vessels are only visible on the left side.
C : A Gd (+) 3D-TOF MRA axial view visualizes the basal moyamoya vessels on both sides.

両側 A1 起始部の軽度狭窄, 両側の basal moyamoya を認めた (Fig. 1B). 2D-TOF 水平断では basal moyamoya はさらに明瞭に描出されていた (Fig. 1C).

【症例 2】

患者: 6 歳, 男児. 3D-TOF 法単独で確定診断ができず, Gd 造影 3D-TOF 法を組み合わせることで確定診断が可能であった症例.

脳血管撮影で左側内頸動脈終末部と左側 M1 の強度狭窄, 両側 A1 の閉塞および両側の basal moyamoya を認めた (Fig. 2A). 3D-TOF 水平断では両側 A1, 左側 M1 の強度狭窄と右側 M1 の軽度狭窄を認めた. 左側では軽度 basal moyamoya が認められるが, 右側ではほとんど認められなかった (Fig. 2B). Gd 造影 3D-TOF 法では, 右側でも軽度 basal moyamoya が描出されていた (Fig. 2C).

【症例 3】

患者: 3 歳女児. 3D-TOF 法単独では確定診断ができず, 2D-TOF 法や MRI T1 強調像を組み合わせることで確定診断が可能であった症例.

脳血管撮影で両側内頸動脈終末部の閉塞と両側の basal moyamoya を認める (Fig. 3A). 3D-TOF 水平断では, 両側 A1, M1 の閉塞は認められたが, basal

moyamoya は認められなかった (Fig. 3B). 2D-TOF target MIP 像では, 両側の basal moyamoya が認められ (Fig. 3C), MRI T1 強調像でも両側の basal moyamoya が大脳基底核部の flow void として認められた (Fig. 3D).

考 察

ウィリス動脈輪閉塞症の MRA 診断において重要なことは, 血流の速い主幹動脈の閉塞性変化と, 比較的血流の遅いモヤモヤ血管という, スキャンパラメーターの設定上ある意味で相反する病変を高い解像度で描出し, 鋭敏に捉えるという必要性があることである. MRA から得られる情報は time of flight 法でも phase contrast 法であっても, 血流速度に依存しており, 1 つの撮像法でこの 2 つの病変を同時に描出することはむずかしい⁵⁾¹⁰⁾. したがって病変によって撮像法を選択し, それぞれの撮像法の長所を生かす必要がある.

ある程度の流速がある主幹動脈の閉塞性病変を捉えるには, 一般に 3D-TOF 法が優れている⁸⁾. 今回の本症の検討では, 3D-TOF 法でほぼ脳血管撮影に一致した主幹動脈の閉塞性所見が得られ, 脳血管撮影に比べて逆にやや過小評価の傾向があった. 本症においては, 脳血管撮影所見, 特に A1・M1 の閉塞性所見は, モヤモヤ血管の

Fig. 3 A 3-year-old female with bilateral stage 3 lesions

- A :** Bilateral internal carotid angiograms showing occlusion of the supraclinoid portion of the ICA and the basal moyamoya vessels
B : A 3D-TOF MRA axial view showing bilateral A1 and M1 occlusion. Moyamoya vessels are not detected.
C : A 2D-TOF sagittal view (target MIP). Basal moyamoya vessels are visible bilaterally.
D : This MRI T1-weighted image visualizes the basal moyamoya vessels as flow voids on both sides.

増生が強い場合完全閉塞なのか狭窄なのか、モヤモヤ血管を介して A2・M2 が描出されているのか、不明確なことが多い。3D-TOF 法水平断ではモヤモヤ血管との重なりが少なく、A1・M1 の閉塞性病変と A2・M2 の関係がよくわかる。血流の速い比較的大きな血管では、乱流などの artifact が原因で閉塞性病変を過大評価する傾向にあるが⁶⁾¹¹⁾、本症においては脳血管撮影所見よりも 3D-TOF 法水平断の方が、A1・M1 の閉塞性病変に伴う血流の変化や A2・M2 における循環動態をよりの確に反映しているのではないかと考えられた。今回の検討から、現時点でも 3D-TOF 法のみで主幹動脈の閉塞性病変の評価が可能であると考えられた。一方、2D-TOF 法は撮像面に平行に流れる flow の描出が悪いため、主幹動脈の閉塞性病変の評価は不可能と思われた。

一方、血流の遅い basal moyamoya は、3D-TOF 法

で 65% に認めたにすぎなかった。しかし、2D-TOF 法や Gd 造影 3D-TOF 法では、約 80% と比較的高い描出率を得ることができた。MRA で basal moyamoya を描出できなかった症例は、脳血管撮影でも basal moyamoya が比較的未発達の症例であった。さらに MRI T1 強調像や 3D-TOF 法の元画像では 95%、stage 3 に限れば 37 例中 36 例、97% で基底核部に複数の flow void として認められ、basal moyamoya の判定に有用であった。

以上の結果から、2 つの異なる血管病変を両側に認める本症の確定診断率は、主として basal moyamoya の描出率に依存していることがわかる。3D-TOF 法に 2D-TOF 法や Gd 造影 3D-TOF 法、あるいは MRI を加えることにより、stage 3 の本症の 90% が診断可能となる。また、少なくとも MRI で flow void として描出される

basal moyamoya を確実に描出できれば、MRA のみで stage 3 の本症の診断が可能となる。そのためには MRA の画質をさらに改良する必要があり、空間解像度の改善、血流信号の向上、バックグラウンド信号の処理などがポイントになると思われる。空間解像度の改善のためには、マトリックスを大きくし、ピクセルサイズを小さくする必要があるが、SN 比は逆に低下する。これを防ぐためにはできるだけ高い磁場強度あるいは撮像時間の延長が必要である⁷⁾。一方、血流信号の向上のためには、TR やスラブ厚などが工夫されているが⁸⁾、われわれは今回 Gd を投与する方法³⁾を用いて良好な結果を得た。また 3D-phase contrast 法で flow encode を低く設定することで、basal moyamoya 血管の描出率が上昇するという報告もある¹⁾。さらに RF パルスによる飽和を防ぐため、薄いスラブを重ね合わせるマルチスラブ法や、RF パルスをデジタル的に制御しスラブ内の位置によって RF パルスのフリップ角を変える方法である TONE 法 (tilted optimized nonsaturating excitation) の実用化により、末梢の血流はさらに良好に描出されるであろう。バックグラウンド信号の処理としては、target MIP (maximum intensity projection) や血流以外の脳組織の信号を抑制する MTS (magnetization transfer saturation) などが利用されている²⁾。

今回の検討より、現時点でも 1.5T 高解像度 MR を用いると、撮像法を組み合わせることで、stage 3 の本症の確定診断は可能であると思われる。鈴木らの脳血管撮影分類のうち、本症の診断基準を確実に満たすのは stage 3～5 で、basal moyamoya が認められるのは stage 2～5 である。stage 3 で最も basal moyamoya が発達することを考慮すると、stage 2, 4, 5 の basal moyamoya 血管の描出や、術前の詳細な脳血管の評価のためには、現在も脳血管撮影が必要である。また成人例に関しては、今回特に詳細な検討は行わなかったが、basal moyamoya 血管の描出が悪い場合は、その他の閉塞性血管障害との鑑別が問題となり、MR での診断決定には課題が残ると思われた¹²⁾。これらの点については、MR 撮像技術のさらなる革新や、その他の非侵襲的な検査法、診断法の開発が望まれる。

本論文作成にあたり、ご協力いただきました九州大学医学部放射線科の蓮尾金博助教授、水島 明先生および脳神経病研究施設外科

の野口千春氏に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 青樹 毅, 松沢 等, 宝金清博, 上山博康, 阿部 弘, 宮沢和男, 斎藤久寿: 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. 脳外 21: 305-311, 1993.
- 2) 阿部 弘, 宝金清博, 青樹 毅: 高解像磁気共鳴血管造影法 (MRA) によるウィリス動脈輪閉塞症の診断. 厚生省特定疾患ウィリス動脈輪閉塞症調査研究班平成 4 年度研究報告書, 1993, pp. 52-56.
- 3) Creasy JL, Price RR, Presbrey T, Goins D, Partain CL, Kessler RM: Gadolinium-enhanced MR angiography. *Radiology* 175: 280-283, 1990.
- 4) Demaerel P, Wilms G, Casteels-Van-Daele M, Marchal G, Van Fraeyenhoven L, Bosmans H, Casaer P, Baert AL: Moya-Moya. Diagnosis MRI and MR angiography. *J Radiol* 71: 119-123, 1990.
- 5) Dumoulin CL, Souza SP, Walker MF, Wagle W: Three-dimensional phase contrast angiography. *Magn Reson Med* 9: 139-149, 1989.
- 6) Evans AJ, Richardson DB, Tien R: Poststenotic signal loss in MR angiography: Effects of echo time, flow compensation, and fractional echo. *AJNR* 13: 1411-1422, 1993.
- 7) 池崎清信, 溝口昌弘, 松島俊夫, 井上 亨, 福井仁士, 蓮尾金博, 中山 卓: ウィリス動脈輪閉塞症の MRA 所見—磁場強度による違いについて. 厚生省特定疾患ウィリス動脈輪閉塞症調査研究班平成 5 年度研究報告書, 1994, pp. 99-103.
- 8) Ruggieri PM, Laub GA, Masaryk TJ, Modic MT: Intracranial circulation: Pulse-sequence considerations in three-dimensional (volume) MR angiography. *Radiology* 171: 785-791, 1989.
- 9) 鈴木二郎, 高久 晃, 旭方 祺: 日本人に多発する脳底部網状異常血管像を示す疾患群の検討. 第 2 報, 脳血管写における追跡. 脳神経 18: 897-908, 1966.
- 10) 高橋 健: 3 次元 time-of-flight MR アンギオグラフィにおける流速, 撮像変数の影響. 日磁医誌 11: 353-363, 1991.
- 11) 福井仁士, 松島俊夫, 池崎清信, 鈴木 諭, 水島 明, 田中 誠, 蓮尾金博, 内野 晃, 松本俊一, 増田康治: ウィリス動脈輪閉塞症の MR Angiography. 厚生省特定疾患ウィリス動脈輪閉塞症調査研究班平成 4 年度研究報告書, 1993, pp. 44-51.
- 12) 福井仁士, 松島俊夫, 水島 明, 蓮尾金博, 松本俊一, 増田康治, 古川達也, 中山 卓: モヤモヤ病の MRA 診断における PITFALL. 厚生省特定疾患ウィリス動脈輪閉塞症調査研究班平成 5 年度研究報告書, 1994, pp. 117-121.
- 13) Yamada I, Matsushima Y, Suzuki S: Moyamoya disease: Diagnosis with three-dimensional time-of-flight MR angiography. *Radiology* 184: 773-778, 1992.

要 旨

ワイリス動脈輪閉塞症診断における time-of-flight MR angiography の検討

庄野 禎久 池崎 清信 松島 俊夫 井上 亨
藤井 清孝 福井 仁士

ワイリス動脈輪閉塞症の診断には脳血管撮影が必須とされているが、より非侵襲的な検査での診断が望まれる。われわれは脳血管撮影で本症と診断された 20 症例（脳血管撮影上 37 側が stage 3）に MRI および time-of-flight MR angiography を施行し、現時点で MRI, MRA のみで確定診断が可能か否かを検討した。

内頸動脈終末部の閉塞性変化は、3D-TOF 法でほぼ可能であった。basal moyamoya の描出率は、3D-TOF 法で 65%、2D-TOF 法で 79%、Gd 造影 3D-TOF 法で 80%であった。また MRI T1 強調像での basal moyamoya の flow void の描出率は 95%であった。stage 3 の本症の 90%が、3D-TOF 法と MRI T1 強調像の組み合わせで確定診断が可能と考えられた。

脳外誌 4: 458-464, 1995

脳神経外科ジャーナル

次号予告

第 4 巻 第 6 号 1995 年 11 月

原 著

脳神経外科領域の難治性感染症における pH4 処理酸性ヒト免疫グロブリン

併用療法 東京労災病院 工藤 千秋, 他
複合セラミックス顆粒とフィブリン糊を用いた頭蓋形成術

— 生体適合性に関する基礎的研究と臨床応用 — 九州大学 井上 亨, 他
脳神経外科的疾患における胆道系感染合併症 小張総合病院 杉本 耕一, 他

症例報告

体温療法により良好な経過を得た最重症頭部外傷の 1 例 広島大学 黒木 一彦, 他
頭蓋内粘液嚢腫を伴った副鼻腔骨腫の 1 例 佐世保市立総合病院 古賀 博明, 他
自然消失をみた非穿通性外傷性椎骨動静脈瘻の 1 例 千葉県救急医療センター 小林 英一, 他
脳血管撮影中に extravasation をきたした AVM の 1 例 藤沢脳神経外科病院 佐々木 健, 他
脳室穿破により急変したノカルジア脳膿瘍の 1 例 名古屋大学 柴山美紀根, 他
ステロイド剤投与により急速な縮小を示した分娩後下垂体部腫瘍症例

— リンパ球性下垂体炎に対する非手術的治療の可能性に関して — 弘前大学 大熊 洋揮, 他
インフルレン麻酔下、脳動静脈奇形摘出術中に悪性高熱症を合併した 1 例 慶應義塾大学 三谷 慎二, 他
Entirely suprasellar Rathke's cleft cyst の 1 手術例 国立岩国病院 萩原 直司, 他

短 報

単麻痺の病巣診断における MR fluid attenuated inversion recovery 法

の有用性 海南病院 山本 直人, 他
新チタン製脳動脈瘤クリップの臨床経験—CT, MRI に及ぼす影響— 藤田保健衛生大学 加藤 庸子, 他
脳卒中患者の肺塞栓症における経皮的下大静脈フィルター留置術 三之町病院 小澤 常德, 他

編集の都合上内容が若干異なる場合がありますのでご了承ください。