Title page

1）論文種別 ：原著

2）論文タイトル

ステント併用脳動脈瘤コイル塞栓術後評価における PETRA-MRA の有効性

3）著者名

佐藤圭輔 1)，朝野暁大 2)，小林勉 1)，青木洋 1)，神宮字伸哉 1)，瀬戸大樹 1)，出町洋 3)，長谷川仁 4)，藤井幸彦 4)

4）所属施設・部署

1） 富山県立中央病院　脳神経外科

2） 富山県立中央病院　医療技術部　画像技術科

3） 富山県立中央病院　放射線診断科

4） 新潟大学脳研究所　脳神経外科

5）連絡著者の氏名・連絡先

佐藤圭輔　　富山県立中央病院　脳神経外科

〒930-8550 富山県富山市西長江 2 丁目 2 番 78 号

TEL.076-424-1531（代表） E-mail; k-suke0412@bri.niigata-u.ac.jp

6）キーワード

PETRA-MRA, Stent assisted coil embolization, Cerebral aneurysm, Ultrashort TE MRA, postoperative evaluation

7）宣言

本論文を，日本脳神経血管内治療学会 機 関誌 JNET Journal of Neuroendovascular Therapy に投稿するにあたり，筆頭著者，共著者によって，国内外の他雑誌に掲載ないし投稿されていないことを誓約致します．

ステント併用脳動脈瘤コイル塞栓術後評価における PETRA-MRA の有効性

和文要旨

【目的】ステント併用脳動脈瘤コイル塞栓術後症例に対する PETRA-MRA の有効性につき検証した.

【方法】6 症例 6 病変を対象とし, PETRA/TOF-MRA と DSA を比較しステント内腔描出と塞栓結果を評価した.ステント内腔の描出良好を 4 点とし 1-4 点で評価した.

【結果】動脈瘤内訳は IC：2 例, MCA：2 例, BA tip：1 例, VA-PICA：1 例, 使用ステントは Neuroform Atlas：3 例, Enterprise2 VRD：1 例, Neuroform Atlas の Y ステント：1 例, Neuroform Atlas と Enterprise2 VRD の Y ステント：1 例であった. 術後評価は DSA で neck remnant: 5 例, complete obliteration: 1 例であり, PETRA-MRA：6 例中 5 例(83.3%), TOF-MRA：6 例中 2 例(33.3%)で評価が合致した.ステント内腔評価は PETRA-MRA は平均 3.33±0.82 点, TOF-MRA は 2.17±1.33 点であった.

【結論】PETRA-MRA はステント併用脳動脈瘤コイル塞栓症例の術後画像フォローアップにおいて有益な手段と考えられる.

本文

緒言：

昨今，従来コイル単独では治療困難であった症例に対し，ステント併用下での脳動脈瘤コイル塞栓術が広く行われている[1)]．

TOF(time of flight)-MRA を用いることで非侵襲的に脳血管の評価が可能であり[2-5)]，コイル単独による塞栓術後であれば比較的良好に neck remnant も描出される．しかしステント使用の際には金属アーチファクトが顕著となるため塞栓術後状態及びステント内腔の評価には DSA が有用とされている．なお，DSA では詳細な評価が可能となる反面，検査に伴う塞栓性合併症や被曝，造影剤アレルギーなどの問題がある[6)]．また contrast enhanced MRA の報告もあるが，やはりアレルギーをはじめとした造影剤副作用の懸念がある[5,7,8)]．

近年 Silent Scan MRA (GE Healthcare, Milwaukee, Wisconsin; Silent MRA)などの echo time の非常に短い (Ultrashort echo time) MRA が登場し，磁化率アーチファクトを軽減した画像が得られることが報告され，注目されている[1,9-12)]．また，コイル塞栓術後だけでなく，ステント併用コイル塞栓術後の評価についても報告が認められる[10,11,13)]．今回我々は，PETRA(Pointwise Encoding Time reduction with Radial Acquisition)法にて撮影した ultrashort echo time MRA である PETRA-MRA を用い，ステント併用脳動脈瘤コイル塞栓術後の症例に関し，コイル塞栓術後状態の評価，及びステントが留置された母血管の内腔描出につき評価を行い，PETRA-MRA の有効性について検証したので報告する．

対象と方法：

2017年4月から2020年2月まで，当院にて脳動脈瘤に対しステント併用コイル塞栓術を施行しPETRA－MRAでフォローアップし得た未破裂脳動脈瘤6例，6病変を対象とし，後方視的に検証した（Table).

PETRA/TOF-MRA画像はSiemens Healthcare社製3T MRI装置MAGNETOM Skyraを用いて同時に撮像し，DSA画像はキヤノンメディカルシステムズ社製Infinix Celeve-i INFX-8000VまたはPhilips社製Allura Clarity FD20/15を用いて得た.これらPETRA/TOF-MRA画像とDSA画像を比較し，コイル塞栓術後状態と，ステントが留置された母血管の内腔描出につき評価した.

当施設におけるPETRA-MRAの撮像条件は，repetition time: 3.45msec, echo time: 0.07msec, flip angle: 6°, field of view: 240mm, voxel size: 0.75 (isovoxel), reconstruction matrix: 320, radial spokes: 63000, phase partial Fourier: offであり，撮像時間は10分11秒であった.また，TOF-MRAの撮像時間は4分24秒であった.

なお，DSA，TOF-MRA，PETRA-MRAのMIP(maximum intensity projection)像とvolume rendering (VR)画像はwork station富士フィルム社SYNAPSE VINCENTを用いて作成した.標準的評価にはMIP像を用いたが，VR法での視覚的立体感の高い画像も参考とした(Fig. 1D,E,F).

評価は脳神経外科専門医3名と脳神経血管内治療専門医1名にて行い，塞栓術後状態についてはCO(complete obliteration),NR(neck

remnant), BF(body filling)の3つに分類評価した．また，ステント内腔の血管描出評価については入江らによるスコアリングを用い[10], 1; not visible (almost no signal in the stent), 2; poor (structures are slightly visible but with significant blurring or artifacts, not diagnostic), 3; good (good quality diagnostic information with minimal blurring or artifacts), 4; excellent (excellent-quality diagnostic information; the shape of depiction is nearly equal to that of DSA)の4つに分類した．なお，塞栓術後評価の際に，上述のステント内腔評価が2点以下の場合は，ステント併用脳動脈瘤コイル塞栓術後の評価としては不十分と判断し，評価不能(UE: unevaluable)とした．

結果：

脳動脈瘤の部位は内頚動脈2例，中大脳動脈2例，脳底動脈先端部1例，椎骨動脈-後下小脳動脈分岐部1例であった．

TOF/PETRA-MRAとDSAの施行時期のインターバルは平均65.1日(2-192日)であった．

使用ステントはNeuroform Atlas (Stryker, Kalamazoo, MI, USA)：3例，Enterprise2 VRD(Johnson & Johnson, Raynham, Miami, Florida, USA)：1例，Neuroform Atlasを2本用いたYステント：1例，Neuroform AtlasとEnterprise2 VRDを用いたYステント：1例であった．

塞栓術後評価では，DSAにおいてNR: 5例，CO: 1例であり，これら評価と合致したものは，PETRA-MRAでは6例中5例(83.3%)，

TOF-MRA では 6 例中 2 例(33.3%)であった(Table). PETRA－MRA では TOF-MRA と比較し，母血管へのコイル突出部や neck remnant 部の詳細な評価が可能であった（Fig. 1D,E,F).

また，ステント留置された母血管内腔描出のスコアリング結果では，PETRA-MRA は平均 3.33±0.82 点(2 点:1 例，3 点:2 例，4 点:3 例)，TOF-MRA は 2.17±1.33 点(1 点:3 例，3 点:2 例，4 点：1 例)であった(Table). なお，TOF-MRA, PETRA-MRA の MIP 像と VR 画像においてコイル塞栓術後評価及びステント内腔の描出評価の結果に差異は認めなかった.

特に Neuroform Atlas を 1 本のみ使用した No. 1-3 の症例においては，PETRA-MRA で全例 4 点とステント内腔の描出が良好であり，DSA と塞栓術後評価も全て一致していた.また，Neuroform Atlas を Y ステントにて 2 本用いた症例 4 において TOF-MRA では 1 点とステント内腔の描出が不良であったが，PETRA-MRA では 3 点となり，TOF-MRA と比較して良好な結果を示した.

なお，Enterprise2 VRD を用いた椎骨動脈-後下小脳動脈瘤(VA-PICA An)の No. 5 では，PETRA/TOF-MRA におけるステント内腔の母血管描出は不十分であった.

症例提示：

1. 症例 No. 2

患者：69 歳，男性

未破裂右中大脳動脈瘤(5×4×4mm)(Fig. 1A)に対し，Neuroform Atlas 3.0×21mm を右 M2 inferior trunk から M1 まで展開し（Fig.

1B)，軽度の NR にて塞栓を終了した(Fig. 1C)．

本症例につき，術後 2 年時のフォローアップ DSA 及び，DSA から 24 日後に施行の PETRA/TOF-MRA 検査の結果を比較すると，いずれも NR の評価であった（Fig. 1D,E,F)．詳細検討すると，TOF-MRA と比較し，PETRA-MRA と DSA では，よりコイル近傍まで描出されていた（Fig. 1D,E,F)．

2. 症例 No. 4

患者：49 歳，女性

未破裂の左中大脳動脈瘤(4×2.5×2.5mm)（Fig. 2A）に対し，Neuroform Atlas 3.0×15mm を左 anterior temporal artery から M1 まで留置し，さらに Neuroform Atlas 3.0×21mm を Y stent となるように M1 distal から M1 proximal にかけ展開し，CO にて塞栓を終了した（Fig. 2C)．

本症例につき，手術 7 日後のフォローアップ DSA 及び，手術 2 日後施行の PETRA/TOF-MRA 検査の結果を比較したところ，TOF-MRA では anterior temporal artery が描出されず UE の評価であったが，DSA と PETRA-MRA では anterior temporal artery の内腔評価が可能であり CO の評価であった（Fig. 2D,E,F)．本例は Neuroform Atlas 2 本を用いた Y stent 症例となったが，PETRA-MRA では DSA と同様の評価が可能であった．

3. 症例 No. 5

患者：53 歳，女性

再増大を認めたコイル塞栓術後の右 VA-PICA 瘤(12×11×11mm)に対し，Enterprise2 VRD 4.0×16mm を右 PICA より右 VA 遠位部にかけ展開し，NR にて塞栓を終了した（Fig. 3A,B).

本症例における手術 6 か月後のフォローアップ DSA（Fig. 3C）では NR の評価であったが，手術 9 か月後に施行した PETRA/TOF-MRA 検査では，ステント内腔評価において TOF-MRA は 1 点，PETRA-MRA は 2 点と描出が不十分であり,塞栓術後評価はともに UE とした(Fig. 3D,E,F). しかし,PETRA-MRA では TOF-MRA と比較し，NR や右 VA のステント留置部が明瞭に描出されていた他，ステントが留置された PICA も淡く描出されていた（Fig. 3E）.

考察：

脳動脈瘤コイル塞栓術後には，コイルコンパクションといった再発兆候の確認のため，画像学的フォローアップが必要である. TOF-MRA を用いることである程度の評価は可能であるが，磁化率アーチファクトの問題から，neck remnant や body filling の評価では不十分となることもあり，詳細な評価には DSA がより望ましいと考えられる.

近年では GE healthcare 社 Silent MRA 法が開発され，コイルの磁化率アーチファクトを軽減させた画像の報告がなされており，注目されている [10,11].

Silent MRA と PETRA-MRA は，ultrashort echo time を利用して磁化率アーチファクトを軽減させた血管像を得るという点で共通しているが，Silent MRA が arterial spin-labeling を用いた MRA テク

ニックであるのに対し[9-12]，PETRA-MRAはin-flow効果(saturation pulseが印加されていない動脈血が撮像範囲内に流入した際に，周囲組織と比較し信号強度が強くなる現象)により信号を得ている点で異なる[13-15].このPETRA-MRAでは,通常のPETRA法で得たin-flow効果を含めた画像から，血液流入部にsaturation pulseを印加しin-flow効果を打ち消したPETRA画像を，サブトラクションすることで血管描出像を得ている.

Heoらは PETRA-MRAにより，ステント併用コイル塞栓術を施行した前方循環脳動脈瘤の術後評価が可能であったと報告しており[16]，本研究結果においても，塞栓術後状態の評価ではPETRA-MRAはDSAの評価と6例中5例が一致していた.PETRA-MRAのMIP像,VR画像ともに，塞栓術後評価において差異は認めないものの，VR画像では視覚的立体感が強調され，形態学的評価に有用であった(Fig. 1D,E,F).しかし，MIP像やVR画像を用いて血管径を計測した場合，その計測結果が正確な値ではないことに注意が必要であり,精密な評価には,DSA画像の利用が適切と考えられる.

なお，PETRA-MRAは非造影，非侵襲であり，繰り返しの検査が可能であるなどの利点を有するが，サブトラクションから画像を得る方式のため，当施設の条件では10分以上の撮影時間を要する.さらに，体動アーチファクトの影響を大きく受けるという弱点があり，撮影中静止してもらう必要があり，患者協力が必須である.

今回の結果ではVA-PICA瘤の症例においてステント内腔の評価が不十分であったが，前方循環症例におけるコイル塞栓術後状態の評価やステント内腔の描出では良好な結果が得られた.ただし，

VA-PICA 症例においてステント内腔の描出が不十分であった点については，その母血管径が小さかったことが結果に影響している可能性があると考えられた．

また，ステント併用脳動脈瘤コイル塞栓術後のフォローアップ画像として，造影 MRA が有効であったという報告があるため[17]，いずれ PETRA-MRA と造影 MRA との比較検討も行うべきである．

本研究では，少数例の報告に留まっており，low-profile visualized intraluminal support（LVIS; Microvention. Inc, Aliso Viejo, CA, USA）ステントも含まれていない．将来的にはより多くの症例を対象とし，各種ステントにおけるステント内腔の描出状況の違いについても検証する必要がある．

結語：

本研究の結果から，PETRA-MRA はステント併用脳動脈瘤コイル塞栓症例に対し，低侵襲に塞栓術後評価，及びステント内腔の評価が可能な点で，術後の画像フォローアップにおいて有益な手段と考えられる．

利益相反の開示

筆頭著者および共著者全員が利益相反はない．

文献

1) Mine B, Aljishi A, D'Harcour JB, et al: Stent-assisted coiling of unruptured intracranial aneurysms: long-term follow-up in 164 patients with 183 aneurysms. J Neuroradiol 2014:41;322-28

2) Cho WS, Kim SS, Kim SH, et al: The effectiveness 3T time-of flight magnetic resonance angiography for follow-up evaluations after the stent-assisted coil embolization of cerebral aneurysms. Acta Radiol 2014:55;604-13

3) Maciano D, Soize S, Pietrot L, et al: Follow-up intracranial aneurysms treated with stent-assisted coiling: Comparison of contrast-enhanced MRA, time-of-flight MRA, and digital subtraction angiogramphy. J Neuroradiol 2017:44;44-51

4) Thamburaj K, Cockroft K, Kalapos P, et al: A comparison of Magnetic resonance angiography techniques for the evaluation of intracranial aneurysms treated with stent-assisted coil embolization. Cureus 2016:8; e909.

5) Agid R, Schaaf M, Farb R. CE-MRA for follow-up of aneurysms post stent-assisted coiling. Interv Neuroradiol 2012:18;275-83

6) Kaufmann, TJ Huston J 3rd, Mandrekar JN, et al. Complications of diagnostic cerebral angiography: evaluation of 19,826 consecutive patients. Radiology 2007;243:812-19

7) Takayama K, Taoka T, Nakagawa H, et al. Usefulness of

contrastenhanced magnetic resonance angiography for follow-up of coil embolization with the Enterprise stent for cerebral aneurysms. J Comput Assist Tomogr 2011;35:568 -72

8) Choi JW, Roh HG, Moon WJ, et al. Time-resolved 3D contrastenhanced MRA on 3.0T: a non-invasive follow-up technique after stent-assisted coil embolization of the intracranial aneurysm. Korean J Radiol 2011;12:662-70

9) Takano T, Oishi H, Aoki S, et al: Non-contrast-enhanced silent scan MR Angiography of intracranial anterior circulation Aneurysms Treated with a low-profile visualized intraluminal support device. AJNR Am J Neuroradiol 2017:38;1610-16

10) Irie R, Oishi H, Aoki S, et al: Assessing blood flow in an intracranial stent: A feasibility study of MR angiography using a silent scan after stent-assisted coil embolization for anterior circulation aneurysms. AJNR Am J Neuroradiol 2015:36;967-70

11) Takano N, Oishi H, Aoki S, et al: Usefulness of non-contrast enhanced MR angiography using a silent scan for follow up after Y-configuration stent-assisted coil embolization for basilar tip Aneurysms. AJNR Am J Neuroradiol 2017:38;577-81

12) Satoh T, Hishikawa T, Hiramatsu M, et al: Visualization of Aneurysmal Neck and Dome after Coiling with 3D Multifusion

Imaging of Silent MRA and FSE-MR Cisternography. AJNR Am J Neuroradiol 2019: 40; 802-807

13) Ida M, Wakayama T, Nielsen ML, et al: Quiet T1-weighted imaging using PETRA: initial clinical evaluation in intracranial tumor patients. J Magn Reson Imaging. 2015:41;447-53

14) Grodzki DM, Jakob PM, Heismann B. Ultrashort echo time imaging using pointwise encoding time reduction with radial acquisition (PETRA). Magn Reson Med 2012:67;510-18

15) Yutaka Natsuaki RG, Grimm R, Grodzki D, et al. PETRA quiet MRA: improved robustness with 3D elastic cross-registration. In: Proceedings of the Annual Meeting and Exhibition of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, Singapore. May7-8,2016

16) Heo YJ, Jeong HW, Baek JW, et al: Pointwise Encoding Time Reduction with Radial Acquisition with Subtraction-Based MRA during the Follow-Up of Stent-Assisted Coil Embolization of Anterior Circulation Aneurysms. AJNR Am J Neuroradiol 2019: 40; 815-819

17) Agid R, Schaaf M, Farb R. CE-MRA for follow-up of aneurysms post stent-assisted coiling. Interv Neuroradiol 2012:18:275-83

Fig. 1

A: Working view of the right internal carotid angiogram shows a wide neck M1M2 aneurysm.

B: Neuroform Atlas was deployed from M2 inferior trunk to M1 (between white arrows).

C: Right internal carotid angiogram right after the procedure shows slightly neck remnant (black arrow) of the aneurysm. The white arrows show the distal end of the stent and proximal end of it.

D: MIP and VR images of 2-year follow-up DSA can show the remnant of the aneurysm (black arrow) and inside of the stent also.

E: MIP and VR images of 2-year follow-up PETRA-MRA can show the remnant of the aneurysm (black arrow) and inside of the stent as well as DSA.

F: MIP and VR images of 2-year follow-up TOF-MRA can show the remnant, but there is some defect of the remnant area (black arrow).

Fig. 2

A: Working view of the left internal carotid angiogram shows M1-anterior temporal artery aneurysm.

B: 2 loops of 1st coil were at the orifice of ATA and M1 (black arrow).

C: 2 Neuroform Atlas were deployed from distal anterior temporal artery to M1 and from distal M1 to proximal M1. The white arrows show the distal end of the stents and proximal end of them.
D: Fusion MIP image of DSA at 7 days after the procedure can show the inside of the stent clearly and show M1 and anterior temporal artery (white arrow head) also.
E: Fusion MIP image of PETRA-MRA at 2 days after the procedure can show the inside of the stent (white arrow head) almost as well as DSA.
F: Fusion MIP image of TOF-MRA at 2days after the procedure cannot show the inside of anterior temporal artery (white arrow head), and the caliber of M1 is made small.

Fig. 3
A: Preoperative working view of the right vertebral angiogram shows the remnant of VA-PICA aneurysm.
B: Final angiogram shows CO of the aneurysm. The white arrows show the stent from PICA to VA.
C: Lateral view of 6-month follow-up angiogram shows regrowth of neck remnant. The white arrows show the distal end of the stent and proximal end of it and the patency of PICA was good.
D: Fusion VR of DSA can show PICA (white arrow head) and inside of the stent clearly.

E: MIP image of 9-month follow-up PETRA-MRA can show the inside of the stent at PICA (white arrow head) slightly. But it can show the inside of the stent at right VA and the remnant of aneurysm (white arrows) clearly.

F: MIP image of 9-month follow-up TOF-MRA cannot show the inside of the stent from PICA to VA (white arrow heads) at all.

Table. Characteristics of all patients

Case No.	Age (y.o.)	Sex	Aneurysms location / Size (mm)	ID of PA (mm)	Stent / Length (mm)	Visualization score of the flow in stent		Aneurysm occlusion status				Interval between from EVT	
						PETRA	TOF	Right after	DSA	PETRA	TOF	to DSA	to MRA
No.1	93	F	IC / 6x6x6	3.8	Neuroform Atlas / 4.5x30	4	3	NR	NR	NR	NR	0 day	3 month
No.2	69	M	MCA / 5x4x4	2.4	Neuroform Atlas / 3.0x21	4	4	NR	NR	NR	NR	2 year	2 year
No.3	71	F	IC / 8x5.5x5	3.9	Neuroform Atlas / 4.5x21	4	3	BF	NR	NR	CO	6 month	1 year
No.4	49	F	MCA / 4x2.5x2.5	1.2	Neuroform Atlas / 3.0x15 & 3.0x21	3	1	CO	CO	CO	UE	7 day	2 day
No.5	53	F	VA-PICA / 12x11x11	1.3	Enterprise2 VRD / 4.0x16	2	1	NR	NR	UE	UE	6 month	9 month
No.6	77	M	Basilar tip / 10x9x9	2.7	Neuroform Atlas / 4.0x21 Enterprise2 VRD / 4.0x23	3	1	NR	NR	NR	UE	0 day	2 day

BF: Body filling, CO: Compete obliteration, EVT: Endovascular treatment, IC: Internal carotid artery, ID: Internal diameter, MCA: Middle cerebral artery,

NR: Neck remnant, PA: Parent artery, PICA: Posterior inferior cerebellar artery, UE: Unevaluable, VA: Vertebral artery,

Visualization score of the flow in stent:

1; not visible (almost no signal in the stent), 2; poor (structures are slightly visible but with significant blurring or artifacts, not diagnostic),

3; good (good quality diagnostic information with minimal blurring or artifacts), 4; excellent (excellent-quality diagnostic information; the shape of depiction is nearly equal to that of DSA)

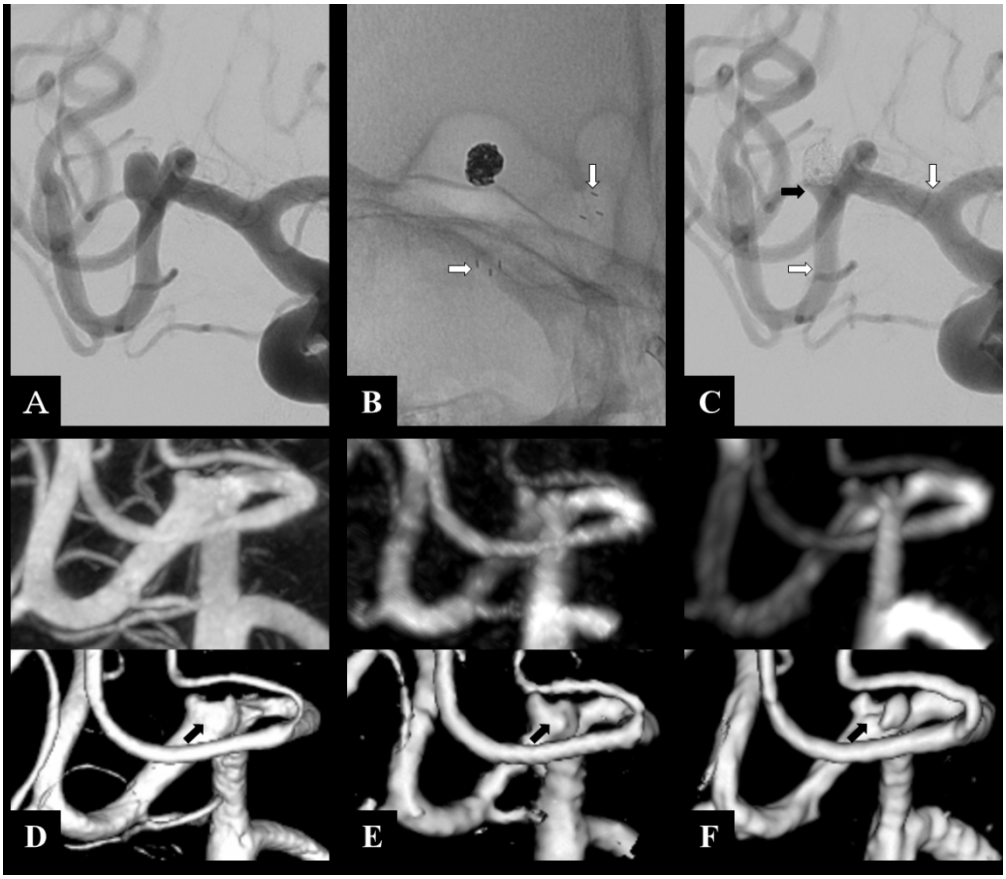

Fig. 1

199x173mm (150 x 150 DPI)

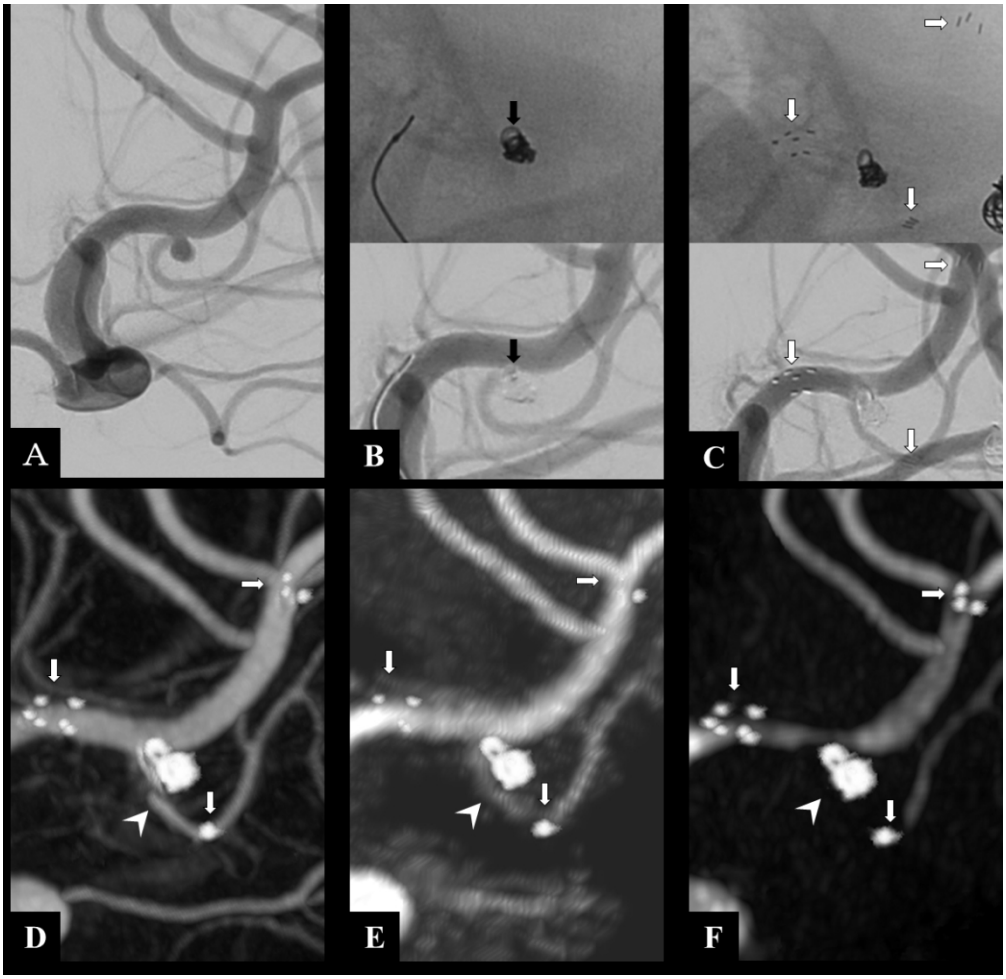

Fig. 2

200x194mm (150 x 150 DPI)

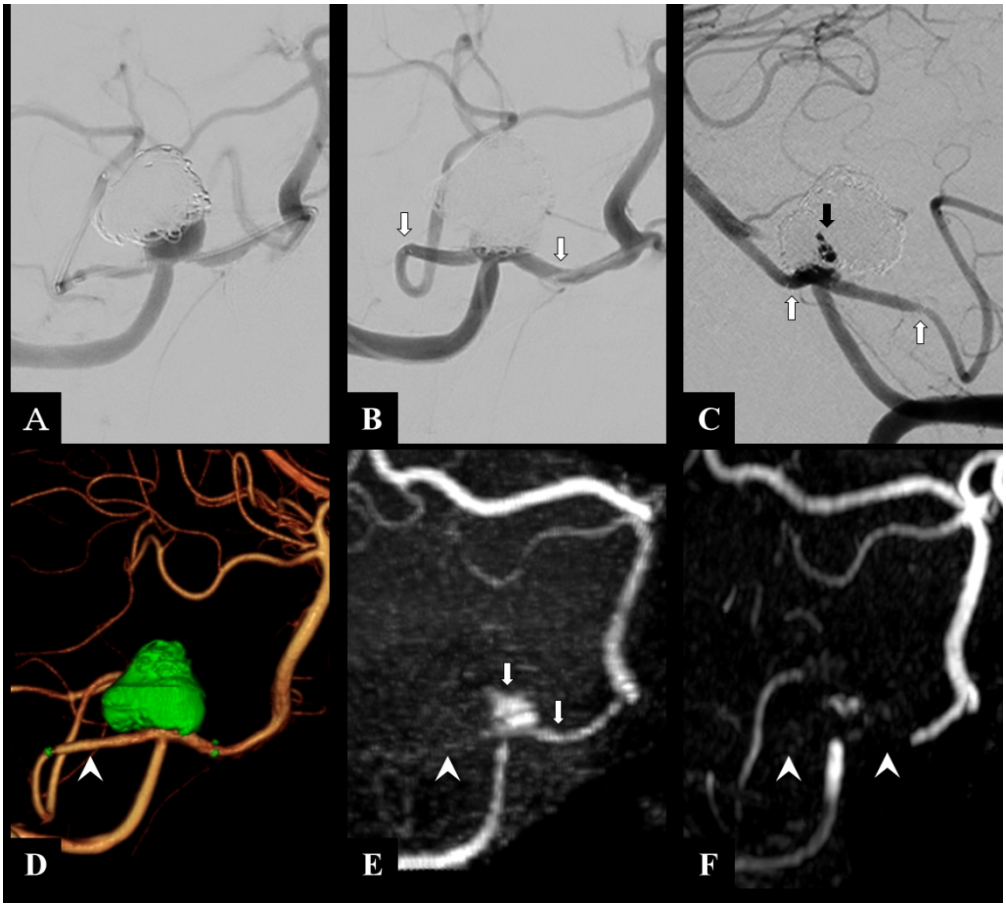

Fig. 3

197x177mm (150 x 150 DPI)