

# Silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像による 脳動脈瘤コイル・クリップ治療後のネック・ドームの評価

医療法人社団 涼風会 佐藤脳神経外科  
佐藤 透

## はじめに

脳動脈瘤の治療には、血管内コイル塞栓術や開頭ネック・クリップ術が行われ、良好な成績が報告されているが、治療後の再発が少なからず認められる<sup>1,5)</sup>。私達は、治療後評価に、silent MRA(Zero TE MRA)とheavily T2-weighted 3D fast spin-echo MR cisternographic imaging(FSE-MRI)を使用し、ネック、ドームの形態を可視化した<sup>3-5)</sup>。Silent MRAでは金属による磁化率アーチファクトの影響を受け難く、コイルやクリップ後のネックや母血管の形態が良好に描出された。また、FSE-MRIでは、コイル後のネックやドームの形態、クリップ後のネック形態が詳細に描出された。さらに、silent MRAとFSE-MRIそれぞれの3D画像を重畳描画する3D融合画像を作成することで、コイル後のネック・レムナントやクリップ後のレスト・ネックが明瞭に描出された<sup>5)</sup>。本稿では、脳動脈瘤治療後の画像評価における、silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像の有用性につき報告する。

## 対象と方法

2017年7月から2019年1月までに、コイルやクリップ治療後の破裂・未破裂脳動脈瘤34例(コイル後15例、クリップ後19例)の画像評価にTOF-MRA、silent MRA、FSE-MRIの3D融合画像を作成した(表)。

MRI撮影:TOF-MRA、silent MRA、FSE-MRIは、3-Tesla MRI(Signa Pioneer;GE Healthcare、Milwaukee、WI)を使用して同時に連続して撮像した。TOF-MRAのスキャン・パラメータは、TR/TE、25/3.4ms;フリップ角、20°;FOV、180×180mm;マトリックス、288×92;スライス厚、1.2mm;NEX、1;バンド幅、35.71kHz。撮像時間5分41秒で、144枚の軸状断元画像が得られた。

Silent MRAのスキャン・パラメータは、TR/TE、880/0.016ms;フリップ角、5°;FOV、180×180mm;フリーケンシー、200;スポーク、320;スライス厚、1.0mm;NEX、1.5;バンド幅、31.25kHz。撮像時間12分48秒で、400枚の軸状断元画像が得られた。

FSE-MRIのスキャン・パラメータは、TR/TE、1900/100ms;FOV、180×180mm;マトリックス、356×256;スライス厚、1.2mm;NEX、1;バンド幅、31.2kHz;echo-train length、128。撮像時間5分53秒で、60枚の軸状断元画像が得られた。

画像再構成:ネックと母血管は、ワークステーション(Ziostation-

2;Ziosoft-AMIN)を使用して、TOF-MRAでは閾値400以上を、silent MRAでは閾値300以上のデータを選択し、遠近投影法で3D描出した。FSE-MRIでは、閾値1200以下のデータを選択して、ネックと母血管およびドームの形態を、脳実質・脳神経など瘤周囲構造物を含めて3D画像表示した。TOF-MRA、silent MRA、FSE-MRIの3D融合画像は、3D再構成した上記画像を重畳し、1枚の3D画像として表示した。なお、3D融合画像1枚の画像再構成には、120秒を要した。

治療後画像評価:治療後の瘤形態は、TOF-MRA、silent MRA、FSE-MRIそれぞれの元画像と3D再構成画像、3D融合画像で比較し、ネックやドームや母血管の描出能を画像評価した。

表. コイル後(15例)とクリップ後(19例)脳動脈瘤の臨床・画像所見

Case	Sex	Location	Symptoms	Remnant size (mm)	Remnant Volume (mm <sup>3</sup> )	Dome Size (mm)	Dome Volume (mm <sup>3</sup> )	Remnant/Dome (%)	Results
1	F	AComA	Unrup'd	0	0.0	4.5x3.6x4.0	33.9	0.0	Complete
2	M	AComA	Unrup'd	2.0x2.0x1.8	3.8	4.8x3.9x4.8	47.1	8.0	Follow-up
3	M	AComA	Unrup'd	3.3x2.1x3.4	12.3	5.6x10.9x7.4	236.5	5.2	Follow-up
4	F	AComA	Unrup'd	5.6x5.5x5.7	91.9	13.9x14.0x17.8	1813.7	5.1	Follow-up
5	M	AComA	Unrup'd	1.0x1.9x2.3	2.3	2.8x3.0x2.7	11.9	19.3	Follow-up
6	F	AComA	Unrup'd	13.3x11.2x17.4	1605	17.6x18.29x22.1	5350.0	30.0	Follow-up
7	F	A2-A3	Unrup'd	0	0.0	3.7x4.1x4.5	35.7	0.0	Complete
8	F	Lt ICPC	Unrup'd	3.5x2.5x3.9	17.9	6.1x5.8x6.5	120.4	14.8	Retreat
9	M	IC Achor	Unrup'd	3.4x2.2x2.8	14.5	4.3x3.4x3.9	29.9	36.7	Follow-up
10	F	Lt MCA	SAH	3.2x2.8x3.1	14.5	19.9x2.8x11.4	332.6	4.4	Follow-up
11	F	Rt IC3	Unrup'd	0	0.0	11.1x7.9x5.0	2920.0	0.0	Complete
12	F	Lt IC-Oph	Unrup'd	0	0.0	3.5x3.3x4.4	81.3	0.0	Complete
13	F	BA-tip	Unrup'd	5.0x4.9x4.0	52.4	16.2x15.5x17.3	2274.5	2.3	Follow-up
14	F	BA-tip	SAH	4.0x3.0x1.3	8.2	4.5x5.2x7.9	80.2	6.9	Follow-up
15	F	BA-tip	Unrup'd	10.5x7.4x7.0	284.8	11.9x12.2x10.9	828.6	34.4	Retreat

Case	Sex	Location	Symptoms	Dome Size (mm) FSE-MRC	Rest-neck size (mm) Silent MRA	Result
16	F	AComA	Unrup'd	NA	2.5x1.2x2.4	Follow-up
17	F	AComA	Unrup'd	NA	none	Complete
18	F	Rt IC-PC	Unrup'd	NA	none	Complete
19	F	AComA	Unrup'd	NA	none	Complete
20	F	Lt IC-PC	Unrup'd	NA	none	Complete
21	F	AComA	Unrup'd	NA	none	Complete
22	F	Rt IC-OphA	Unrup'd	NA	2.6x3.6x2.9	Follow-up
23	F	Lt IC-OphA	Unrup'd	NA	none	Complete
24	F	Lt MCA	Unrup'd	NA	none	Complete
25	F	Rt MCA	Unrup'd	NA	none	Complete
26	F	AComA	Unrup'd	NA	none	Complete
27	M	Rt MCA	Unrup'd	NA	none	Complete
28	F	Rt MCA	Unrup'd	NA	0.4x0.6x0.4	Follow-up
29	F	Lt IC-AchoA	Unrup'd	NA	none	Complete
30	M	AComA	Unrup'd	NA	none	Complete
31	M	Rt IC-AchoA	SAH	NA	none	Complete
32	M	Rt IC-OphA	Unrup'd	NA	none	Complete
33	F	Rt MCA	Unrup'd	NA	none	Complete
34	F	Lt IC-PC	Unrup'd	NA	2.2x2.8x3.3	Follow-up

コイル後のネック・レムナント、クリップ後のレスト・ネックはsilent MRAの元画像で計測。コイル後のドーム・サイズはFSE-MRIの元画像で計測。クリップ後のドーム・サイズは計測不能(NA)。

ネック・レムナントとドームおよびレスト・ネックのサイズとボリュームの計測:コイル後のネック・レムナント、ドームおよびクリップ後のレスト・ネックのサイズは、TOF-MRA、silent MRA、FSE-MRIの軸状断元画像、冠状断と矢状断の再構成画像を用いて計測した。ネック・レムナント、ドーム、レスト・ネックのボリュームは、元画像にこれらのROIを設定し、連続画像でマスクし、元画像のピクセル・サイズから計算されたボクセルのサイズとマスク領域内のボクセル数との積算で算出した。

## 結果

コイル治療例:コイル後の15例においては、TOF-MRAでは、金属による磁化率アーチファクトの影響で、全例において瘤ネックの描出は不鮮明であった。一方、silent MRAでは、磁化率アーチファクトの影響はほとんど認められず、ネックの形態が、ネック・レムナントや母血管を含めて良好に描出された。また、FSE-MRIでは、ネック、母血管、塞栓後ドームの形態が、周囲脳実質や脳神経を含めて明瞭に描出された。Silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像では、ネック・レムナントやドームなど、コイル後の瘤形態が、周囲脳実質・脳神経を含めて1枚の3D画像に描出され、詳細に画像評価することが可能であった(図1)。

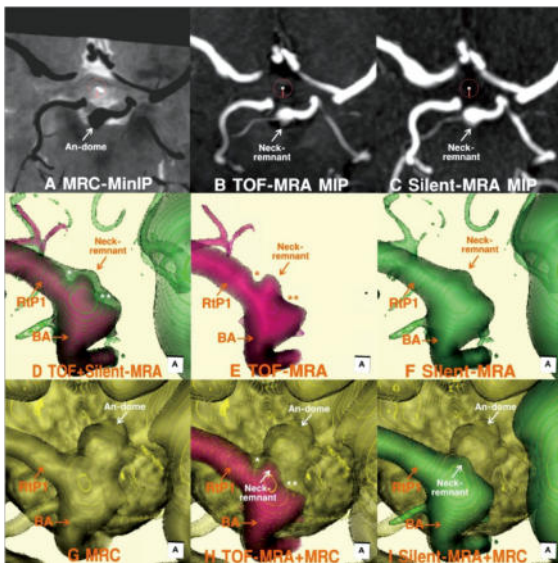


図1. 症例14:60代、女性、破裂脳底動脈先端部動脈瘤(5.4×5.3×5.3mm)。A:FSE-MRI最小値投影(minimum intensity projection,MinIP)画像の軸状断;脳底動脈先端部にコイル塞栓後の瘤ドームが描出されている。サークル内矢印(Encircled arrow)は以下の画像の観察視点を示す。B:TOF-MRA最大値投影(maximum intensity projection,MIP)画像の軸状断。C:Silent MRA MIP画像の軸状断。D:TOF-MRAと silent MRAの3D融合画像;TOF-MRA(赤色)では瘤ネック部と脳底動脈先端部に陰影欠損部が認められるが、silent MRA(緑色)では瘤ネック部が明瞭に描出されている。E:3D TOF-MRA画像(赤色);瘤ネック部と脳底動脈先端部に陰影欠損部(\*,\*\*)が認められる。F:3D silent MRA(緑色)では、瘤ネックの形態が、コイルによる磁化率アーチファクトに影響されることなく、良好に描出されている。G:3D FSE-MRI画像(黄色);塞栓後の瘤ドーム、ネック、親血管と周囲脳実質との解剖学的位置関係が明瞭に描出されている。H:TOF-MRAとFSE-MRIの3D融合画像。I:Silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像;コイル後のネック部にネック・レムナントがわずかに認められ、塞栓後ドームや周囲脳実質とともに、解剖学的関係が明瞭に可視化されている。An-dome:脳動脈瘤ドーム、BA:脳底動脈、P1:後大脳動脈first segment。

クリップ治療例:クリップ後の19例においては、TOF-MRAでは、金属による磁化率アーチファクトの影響で、全例でネック部の描出は不明瞭であった。Silent MRAでは、磁化率アーチファクトの影響はほとんど認められず、ネック形態がレスト・ネックや母血管を含めて良好に描出された。また、FSE-MRIでは、ネック部は、レスト・ネックや母血管、クリップや周囲構造物を含めて描出された。Silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像では、クリップ後のネック形態がレスト・ネックを含めて、周囲脳実質とともに3D画像に描出された。未破裂右中大脳動脈瘤で、母血管狭窄リスクのため意図的に不完全クリッピングを実施した症例では、silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像により、クリッピング終了後の術中写真に相応するレスト・ネックと母血管の形態が描出され、クリップ後の画像評価が可能であった(図2)。

ネック・レムナントとドームおよびレスト・ネックのサイズとボリュームの計測:TOF-MRAでは、金属アーチファクトにより、ネックとドームの描出が不完全なため、いずれの症例においても計測することができなかった。一方、silent MRAではネック・レムナントが、FSE-MRIではドームのサイズとボリュームの計測が可能であった(図2)。コイル治療例ではネック・レムナントは12例

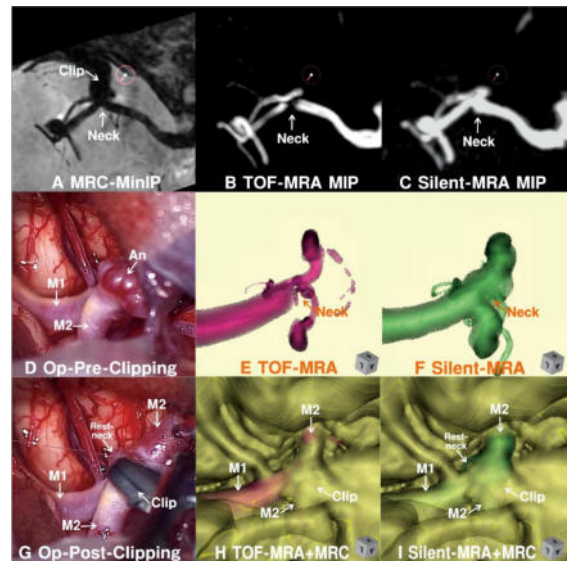


図2. 症例28:60代、女性、未破裂右中大脳動脈動脈瘤(2.5×3.1×3.3mm);Sugita titanium clip#21でネック・クリッピングを行うも、母血管狭窄リスクのため意図的に不完全クリッピングを実施。A:FSE-MRI最小値投影(MinIP)画像の軸状断;ネック部と母血管がクリップとともに描出されている。サークル内矢印(Encircled arrow)は以下の画像の観察視点を示す。B:TOF-MRA最大値投影(MIP)画像の軸状断;クリップの磁化率アーチファクトの影響でネック部が描出不良である。C:Silent MRA MIP画像の軸状断;磁化率アーチファクトの影響が最小で、ネック部が良好に描出されている。D:手術写真-1:クリッピング前の動脈瘤。E:3D TOF-MRA画像(赤色);瘤ネック部と母血管の形態描出が不完全である。F:3D silent MRA(緑色);瘤ネックの形態が、クリップによる磁化率アーチファクトの影響なく、明瞭に描出されている。G:手術写真-2:ネック・クリッピング後、意図的不完全クリッピングのため、レスト・ネックが認められる。H:TOF-MRAとFSE-MRIの3D融合画像;ネック部と母血管の形態描出が不完全である。I:Silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像;クリッピング手術後、ネック部と母血管が、クリップと周囲脳実質とともに描出されている。クリップの先端部分にレスト・ネックが認められ、クリッピング終了後の術中写真-2(G)に相応するレスト・ネックと母血管の形態が描出されている。Rest-neck:レスト・ネック、M1:中大脳動脈first segment、M2:中大脳動脈second segment。

中10例に認められ、ドームに対するネック・レムナントの残存ボリュームの割合は2.3-36.7%であった。完全閉塞2例、ネック・レムナントあり経過観察8例、再治療2例の結果であった。一方、クリップ治療例では、19例中15例で完全閉塞が得られたが、4例でレスト・ネックが認められ経過観察とした。

## 考察

脳動脈瘤治療後の瘤形態の画像評価は、これまで、X-ray digital subtraction angiography(DSA)が参照標準とされてきたが、侵襲的であり、カテーテル手技に関連したトラブル、ヨード造影剤の副作用、電離放射線による被爆などのリスクを伴う。そのため、DSAに代わって、3D time-of-flight(TOF)シーケンスによる単純もしくは造影MRAが、非侵襲的検査として広く実施されている。

TOF-MRAの問題点: TOF-MRAでは、管腔内を通過する血液プロトンの流入効果、すなわち最大心収縮期の血流流速によるフロー・ポイドをMR信号強度として検出することで、血管と周囲構造物とのコントラストが得られ、血管画像として表示される<sup>3-5)</sup>。しかし、血管内腔の幾何学的形態は、DSAやCTAで得られる造影剤充盈による真の内腔形態とは相違が認められる。また、TOF-MRAでは、遅い流れではスピン飽和に影響され、複雑な流れ・乱流では信号強度の消失が起こる場合がある。さらに、コイルやクリップ近傍では金属による磁化率アーチファクトやRF遮断効果の影響が発生する。したがって、TOF-MRAでは、造影剤の使用の有無にかかわらず、コイルやクリップ後のネックや母血管の形態を詳細に描出することは困難にならざるを得ない。

Silent MRAの利点: Silent MRAは、非造影のMRAのため、ガドリニウム使用による腎臓や脳組織への蓄積など、短期的・長期的副作用は皆無である。また、MR撮像中の環境騒音は3dB以下(TOF-MRAでは100dB超)であり、ほぼ無音でMRA検査が実施できる。Silent MRAで使用される'Silenz'の撮像シーケンスでは、エコー時間がほぼ零秒のultrashort TE(0.016ms)とarterial spin-labeling(ASL)taggingが使用される<sup>2-5)</sup>。Silent MRAでは、頸部・総頸動脈高位でlong RF inversion pulseを照射し、励起された血液スピンの内因性トレーサーとして頭頂部に到達するまで、3D radial scanにより全脳の範囲で広くデータが収集される。励起後のデータから励起前のコントロール・データをサブトラクトすることで、動脈内腔を流れる血液の情報がT1強調画像として可視化される。Silent MRAでは、頭蓋底骨構造や静脈構造は描出されず、コイルやクリップなど金属近傍のネックや母血管での磁気体アーチファクトは最小限となる。

FSE-MRIの利点: 本研究では、脳動脈瘤の外壁形態の描出には、古典的なFSE-MRIを使用した。T2 high-resolution MRI(FIESTA、CISS、BFFE)では、CSFが高信号強度で、脳動脈瘤、脳血管、脳実質・脳神経は一様に低信号強度で描出されるため、脳動脈瘤・脳血管と脳実質・脳神経との境界は判別困難となる。これに対して、

FSE-MRIでは、広いバンド幅と比較的短時間のTR/TE(本研究では1900/100ms)を使用することで、CSFは高信号強度で描出され、脳動脈瘤や脳血管は高度低信号強度で、脳実質・脳神経は中等度低信号強度で描出される<sup>3-5)</sup>。その結果、脳動脈瘤や脳血管は周囲脳実質や脳神経と信号強度で区別され、脳動脈瘤と瘤周囲構造物との境界が判別可能となる。これにより、コイル後のドームやクリップ後のネックと脳実質や脳神経との解剖学的位置関係の把握が容易となる。

Silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像の課題と展望: Silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像を使用した本研究では、症例数が少なく、各種ステントやダイバータを使用したコイル治療や複数のクリップを使用した症例など、複雑な症例での検討が必要と思われる<sup>5)</sup>。また、silent MRAでは、ultrashort TEを使用することにより、金属による磁化率アーチファクトの影響を受け難い。しかし、プラチナ合金製のコイルやコバルトクロムを主成分とした当時の杉田クリップなどの強度磁性体材料では、磁化率やRF遮断効果の影響によるアーチファクトが発生する点、留意が必要である。

Silent MRAでは、ネック・レムナントのサイズとボリュームが、FSE-MRIでは、塞栓後ドームのサイズとボリュームが数値で計測される。これにより、コイル治療においては、治療成績の数値評価が可能となる。また、コイル後増大例では、ネック・レムナントとドームのサイズとボリュームを同時に描出・計測することで、ネック・レムナントの拡大とドームの増大とを鑑別して画像評価することができる。そのため、コイル後の経過観察で、再治療の必要性の有無につき有用な画像情報となる。さらに、クリップ後では、レスト・ネックの有無、そのサイズとボリュームが計測されるため、コイル後の経過観察に有用となる。

## 結論

Silent MRAとFSE-MRIの3D融合画像を作成し、コイルとクリップ後のネックと母血管およびドームを画像評価した。3D融合画像では、コイル後のネック・レムナントが、母血管、塞栓後ドーム、周囲脳実質とともに詳細に描出された。また、クリップ後では、レスト・ネックが母血管、クリップ、周囲脳実質とともに良好に描出された。3D融合画像では、治療後ネックとドームの形態が明瞭に描出され、サイズとボリュームが計測されるため、コイルおよびクリップ後の経過観察、さらには、再発例での治療を考慮する上で、有用な評価手段になると考えられた。

謝辞: MR検査を担当して戴いた、医療法人社団涼風会 佐藤脳神経外科 診療放射線技師: 佐々木 賜、臨床検査技師: 村上 佳奈のみなさまに感謝致します。

## 参考文献

- 1) *Neurosurgery* 62:103-106, 2015.
- 2) *AJNR Am J Neuroradiol* 36:967-70, 2015.
- 3) *AJNR Am J Neuroradiol* 26:2010-2018, 2005.
- 4) *Neurosurgery* 60:104-114, 2007.
- 5) *AJNR Am J Neuroradiol* 40:802-807, 2019.