タイトルページ

- 1) テクニカルノート
- 2) 脳動脈瘤コイル塞栓術における光造形 3D プリンターを用い た術前シミュレーションの有用性
- 3)恩田 敏之、野中 雅、野村 達史、稲村 茂、本田 修、大坊 雅彦
- 4) 札幌白石記念病院脳神経外科
- 5) 恩田 敏之、札幌白石記念病院、脳神経外科、北海道札幌市白石区本通 8 丁目、0118635151、t-onda@ssn-hp.jp
- 6) 3D printing, unruptured aneurysm, preoperative simulation, catheter shaping

7)

「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.」

テクニカルノート

脳動脈瘤コイル塞栓術における光造形 3D プリンターを用いた術前シミュレーションの有用性

和文要旨

Objective 光造形 3 D プリンターで作成した脳血管中空モデルにて術前シミュレーションを行った脳動脈瘤コイル塞栓術を報告する

Case Presentations 66歳女性。経過観察中、拡大する paraclinoid aneurysm に対して脳動脈瘤コイル塞栓術を計画した。光造形 3 D プリンターにより脳血管中空モデルを術前に作成した。カテーテルのシェイピングを行い、実際に中空モデルに挿入。カテーテルの走行や安定性、挿入の行い易さなどを確認することが可能であった。実際の手技ではシェイプし直すことなく、容易にカテーテルを動脈瘤内に挿入することができた。安定性も問題なく手技を終えた。

Conclusion 脳血管中空モデルの使用は術前シミュレーターと して有用であり、手技の安全性が向上した。

緒言

脳動脈瘤コイル塞栓術において、カテーテルの安定性や、挿入の し易さは手技の難易度や安全性に直結する要素である。 ¹⁾²⁾³⁾ 従来、脳動脈瘤塞栓術におけるカテーテルシェイピングは 3D digital subtraction angiography(DSA)などの 3 次元的な画像を用 いて動脈瘤と親血管の位置を把握しスチームやホットガンなどでシェイピングを行っていた。しかし、画像上、実物のスケールと異なることや、生体内でカテーテルが走行するルートを想像することは熟練した経験が必要になる。このような方法は術者の経験によるところが大きく、手技が一定にならない。カテーテルが不安定になることもあり、シェイピングをやり直すこともしばしば経験する。

解決方法の一つとして近年は3Dプリンターを用いる方法も報告されている。従来報告されている方法として実物大に作成した脳血管モデルを実際に見て、直接、モデルと比較しながら血管に沿う形でマンドレルをまげて、カテーテルシェイプする方法がある。4)このような方法で精度は向上するが、実際に挿入した場合のカテーテルがどのように走行するかはわからず、挿入するルートによってはシェイピングが合わないという問題点があった。より安全に、正確なシェイピングを造るために脳血管中空モデルを作成し、実際にモデルに挿入し確認する方法は確実である。

今回、3Dプリンターにて作成した脳血管中空モデルへの挿入が シェイピング決定の参考になった症例を報告する。

症例呈示

66 歳女性

現病歴 未破裂脳動脈瘤に対して、脳血管 MRA にて定期検査を施行していたところ拡大傾向を認めた。脳動脈瘤コイル塞栓術を希望され、治療を計画した。脳動脈瘤は左 paraclinoid aneurysm、

最大径 3.9mm,dome/neck ratio 1.39 であった。(Fig.1) 既往歴・家族歴 特記すべき既往歴家族歴は認めなかった 3 D プリンター使用に際して、3 D 術前用意 DICOM(Digital Imaging and COmmunications in Medicine)画像 を ZAIO STATION 2 (Ziosoft, Tokyo, Japan) 7 stereolithography(STL) file に変換した。モデルの中空化には meshmixer(Autodesk, San Rafael, California,USA)を使用し、壁 の厚さは 0.25mm に設定した。その後、データの破損チェック、 の付与を preform (Formlabs, Somerville, Massachusetts,USA)を用いて行った。3D プリンターは Form 3 (Formlabs, Somerville, Massachusetts,USA) を用いて脳血管中 空モデルを作成した。

Micro catheter をあらかじめヒートガンでシェイピングし、脳血管中空モデルに挿入しシミュレーションを行った。最初は脳血管中空モデルを外から目視で観察し J shape を想定した。実際に挿入してみたところ、動脈瘤の対側を通過するような走行であり、先端が動脈瘤に向かわず内頚動脈遠位に向かって通り過ぎてしまうような動きであった。(Fig 2) トルネード状など何度か他のシェイプも試してみたが挿入困難であった。先端を長くした J shape で挿入可能であったが安定性が悪く、安定性が良いシェイプをさらに検討し、最終的に 1cm のクランク状にし、先端のみ90 度に曲げるような形にシェイピングした。(Fig 3) そのような形にシェイピングした。(Fig 3) そのような形にシェイピングすることで micro wire なしに直接カテーテルが動脈瘤に挿入できるような状態となり、血管壁にカテーテルの支

点が 2 点でしっかりと当たるようになり安定した。(Fig 4)手術時にすぐにカテーテルをシェイピングできるように、作成したマンドレルを滅菌した。

治療

全身麻酔下に手術を行った。大腿動脈経由で Axcelguide 6Fr (Medikit,Tokyo,Japan)を左内頚動脈に留置後、6Fr セルリアンカテーテル DD6 (Medikit,Tokyo,Japan)を中間カテーテルとして 留置した。 Micro catheter は Headway 17 (Terumo,Tokyo,Japan)を使用した。

術前に計測したマンドレルを術野に出し、計画通りに Headway 17を 1cm のクランク状にし、先端のみ 90 度に曲げるような形に作成した。ラジフォーカスガイドワイヤーM 0.012 double angle (Terumo, Tokyo, Japan)を使用し、動脈瘤内に容易にカテーテルを挿入することができた。 Dome/neck ratio が低く stent assistにてコイル塞栓術を行った。 Excelsior SL-10(Stryker, Kalamazoo, Michigan, USA)を 用いて Neuroform Atlas 4.0 x 21(Stryker, Kalamazoo, Michigan, USA)を展開。 Jail された Headway 17より、コイルを挿入していった。カテーテルは非常に安定していた。カテーテルが押し出されたところで手技を終了した。 (Fig 5) 術後、合併症はなく画像上も完全閉塞を認めた。翌日の MRI でDWI high intensity はなく、出血も認められなかった。

考察

脳動脈瘤コイル塞栓術は技術的進歩にも関わらず,決して低いと

はいえない morbidity,mortality,再開通率を有する。5)6)7)8)脳動脈瘤コイル塞栓術において、安全に治療を行うためには解剖学的な血管走行と動脈瘤の位置の把握は重要である。しかしながら、脳血管の複雑な形状は従来の MRA、CTA、3DDSAといったmodalityを用いた治療ではしばしば術者を惑わすことがある。3Dプリンターにより造形した脳血管中空モデルを用いたシミュレーションを行うことにより、脳血管の解剖学的な位置の把握や、カテーテル走行位置の把握は治療を最適化することが期待される。

3 D プリンターには様々な種類があり、造形方式や機種の違いにより使用する材料や、価格、精度、造形速度、造形可能な大きさなどが関連してくる。

個人使用で最も普及している造形方式は熱溶解積層方式である。この方式は低価格化が先行したために、一般に普及しており、カテーテルシェイピングへも応用されてきている。実体モデルを作成し目視でカテーテルシェイピングを行う方法が報告されており精度向上に役立っている。4)低価格モデルで中空モデルを作成しようとすると脳血管のような小さな構造物では壁が厚くなり挿入困難となったり、一般に透過性の低い材料を使用するためカテーテルの走行を外から目視で確認することが難しいという問題があった。そのため中空モデル作成のためにはシリコーンを実体モデルに塗布し、内腔部分を溶解除去する必要があり、非常に手間と時間のかかる方法であった 9)10)。

近年、光造形3Dプリンターの低価格化が進んできている。こ

の方式では液体の樹脂を紫外線で硬化させることで造形するため、脳血管のような小さく複雑な角度をもつ形状も高い精度で造形することができ、透過性の高い材料も使用できるため直接中空化も可能である。中空化のメリットとしては、実際にカテーテルを挿入することができるため、シェイピングを実際に試すことが可能となり、カテーテルの走行、挿入角度、安定性などを実際に確かめることができることがあげられる。治療デバイスを使用することが可能な状況であれば、コイルやステントなどの治療デバイスを術前に留置し評価することも可能である 11)12)。

本症例では術前にシミュレーションを行うことで、初回に想定していたシェイピングが不適合であることが確認され、大幅なシェイピングの変更が行われた。実際の治療ではただ一度のカテーテルシェイピングで動脈瘤に挿入することができ、短時間のうちに治療を終了することができた。術前シミュレーションが無ければ、数度のカテーテル挿入のやり直しが予想され、術中出血や血管解離などの術中操作による合併症のリスクは上昇していたと思われる。加えて、長時間のカテーテル留置は塞栓性合併症の原因になるため 13) 、術前シミュレーションは手技全体の安全性向上につながっていると考えられる。

一方、このような 3 D プリンターの術前シミュレーションにはいくつか問題点がある。まずコストの問題は無視できない。本体価格(本症例では約 60 万円)の問題もあるが造形を行うための樹脂などのランニングコスト(本症例では 1 0 0 - 2 0 0 円/個)がかかることも無視できない。また、プリンターに付属している

ソフトでは中空化は不可能なことが多く、別途 software を用意する必要があり、DICOM 処理から、中空化、3D print 出力まで可能な多機能な software もあるが、現時点では高価なことが多いことも問題に上げられる。

そのほか注意するべき問題点としては、プリンターが可能な出力範囲の大きさがある。一般的には造形範囲が小さければより低価格になるが、カテーテルシェイピングを決定する場合、動脈瘤周辺だけではなく、カテーテルの走行も重要な要素となる。特に内頚動脈サイフォン部など大きく曲がる場所は重要となる。このような要素は無視できないため、ガイディングカテーテル留置位置から、動脈瘤までをカバーできる造形を出力できる大きさのプリンターが理想と考える。

3 D プリンターを用いてカテーテルシェイピングを決定した場合、治療時にシェイピングを正確に再現することも問題となる。複雑な形状でなければ、計測値をもとにシェイピングを再現することも可能だが、複雑な形状の場合、事前にシェイピングしたマンドレルを滅菌し治療時に直接シェイピングに使用することができ手術時間短縮につながる。また、このような方法以外に実際挿入したカテーテルを使用する方法も報告されている。Xuらによると術前に滅菌した中空モデルにカテーテルを動脈瘤に挿入した状態で50度の湯で5分間加温することで、カテーテルがシェイピングされ直接治療に利用する方法も報告されている14)。

3D プリンターによる脳血管モデルは、以前より術前のカテーテ

ルシェイピングの利用だけではなく、AVMのような複雑な形状の病変の把握がしやすくなることからも ¹⁵⁾、安全性の向上に寄与するものと考えられてきた。脳血管中空モデルでは、さらに脳血管内治療の術前シミュレーターとして活用できる可能性が示唆された。新規デバイスの術前トレーニングに使用することや、flow diverter の位置決めに使用することも考えられ ¹⁶⁾、将来的に、より実践的な血管内治療の教育に利用できる可能性がある ^{12)17)。}

結 語

脳動脈瘤のシェイピングを術前に施行することでカテーテルの誘導性、安定性を確認可能となり手技の安全性が向上した。
3 D プリンターで造形した脳血管中空モデルの使用は術前シミュレーターとして有用である。

利益相反の開示

本論文に対して、筆頭著者および共著者全員が利益相反はない

文 献

- 1) Kwon BJ, Im SO, Park JC, et al. Shaping and navigating methods of microcatheters for endovascular treatment of paraclinoid aneurysms. Neurosurgery 2010; 67: 34-40.
- 2) Jia ZY, song Ys, sheen JJ, et al. loop microcatheter technique for coil embolization of paraclinoid aneurysms. Acta Neurochir 2018;160:1755-60.

- 3) Cho YD, Rhim JK, Park JJ, et al.Microcatheter Looping to Facilitate Aneurysm Selection in Coil Embolization of Paraclinoid Aneurysms. Korean J Radiol. 2015;16(4):899-905.
- 4) Ishibashi T, Takao H, Suzuki T, et al. Tailor- made shaping of microcatheters using three- dimensional printed vessel models for endovascular coil embolization. Comput Biol Med 2016;77:59-63.
- 5) Molyneux AJ, Kerr RS, Yu L-M, et al. International subarachnoid aneurysm trial (ISAT) of neurosurgical clipping versus endovascular coiling in 2143 patients with ruptured intracranial aneurysms: a randomised comparison of effects on survival, dependency, seizures, rebleeding, subgroups, and aneurysm occlusion. Lancet 2005; 366: 809-817.
- 6) Crobeddu E, Lanzino G, Kallmes DF, et al. Review of 2 decades of aneurysm-recurrence literature, part 1: reducing recurrence after endovascular coiling. AJNR Am J Neuroradiol 2013; 34: 266-70.
- 7) Ringer AJ, Rodriguez-Mercado R, Veznedaroglu E et al. Defining the Risk of Retreatment for Aneurysm Recurrence or Residual After Initial Treatment by Endovascular Coiling. Neurosurgery 2009; 65: 311-315.
- 8) Pierot, L, Wakhloo, AK. Endovascular treatment of intracranial aneurysms: current status. Stroke 2013; 44: 2046-2054.
- 9) Namba K, Higaki A, Kaneko N, et al. Microcatheter shaping

- for intracranial aneurysm coiling using the 3- dimensional printing rapid prototyping technology: preliminary result in the first 10 consecutive cases. World Neurosurg 2015;84:178-86.
- 10) Kaneko N, Mashiko T, Ohnishi T, et al. Manufacture of patient-specific vascular replicas for endovascular simulation using fast, low-cost method. Sci Rep 2016;6:39168
- 11) Kaneko N, Arjun M, Tateshima S, et al.Pre-procedural simulation for precision stent-assisted coiling of cerebral aneurysm. Interv Neuroradial 2019;25(4):419-422.
- 12)Kono K, Shintani A, Okada H, et al. Preoperative simulations of endovascular treatment for a cerebral aneurysm using a patient-specific vascular silicone model. Neurologia medico-chirurgica 2013;53:347-351.
- 13) Tokunaga K, Hatano T, Nakahara I, et al. Factors Associated with Postprocedural Diffusion-Weighted Imaging-Positive Lesions in Endovascular Treatment for Unruptured Cerebral Aneurysms. World Neurosurg 2019;130:457-462.
- 14) Xu Y, Tian W, Wei Z, et al. Microcatheter shaping using three-dimensional printed models for intracranial aneurysm coiling. J NeuroIntervent Surg 2020;12:308-310
- 15) Mengqi Dong, Guangzhong Chen, Jianyi Li, et al. Three-dimensional brain arteriovenous malformation models for clinical use and resident training. Medicine 2018;97:3
- 16) Sean Sullivan, Aguilar-Salinas Pedro, Santos Roberta, et al.

Three-dimensional printing and neuroendovascular simulation for the treatment of a pediatric intracranial aneurysm: case report. Journal of Neurosurgery. Pediatrics 2018;22:601-718

17) Jian-Li Wang, Zi-Gang Yuan, Guo-Liang Qian, et al. 3D printing of intracranial aneurysm based on intracranial digital subtraction angiography and its clinical application. Medicine 2018; 97:24

図表の説明

Fig.1 Preoperative 3D DSA images(A)Frontal view(B)Lateral view (right side) (C)Caudal view

Fig. 2 (A) The micro catheter was shaped into a J-shape.

The catheter was not inserted into the aneurysm

And showed movement through the aneurysm along the internal carotid artery(B)Frontal view(C)Lateral view (right side)(D)Caudal view

Fig.3 The catheter was shaped into a 1 cm crank shape with the tip bent at 90 degrees (A and B)

Fig. 4 (A) Frontal view (B) Lateral view (right side) (C) Caudal view The crank shaped catheter was easily inserted into the aneurysm. The catheter was supported and stabilized at two points (arrows) in the wall of the internal carotid artery.

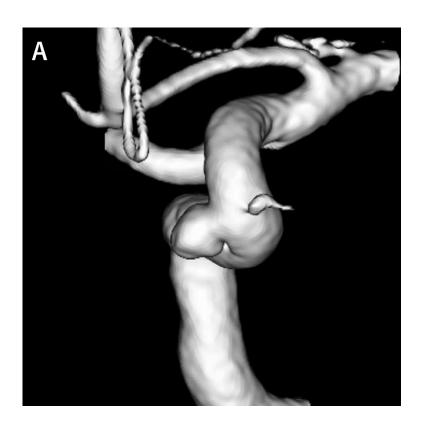
Fig. 5 The catheter was stabilized at two points (arrows) on

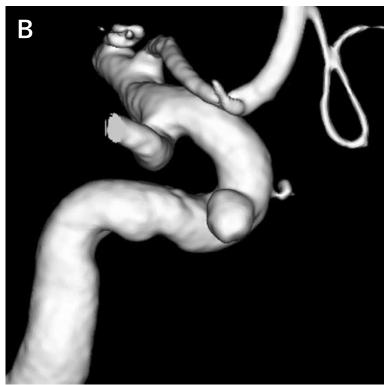
intraoperative angiography (A)

The catheter in the hollow cerebral blood vessel model is also stabilized at 2 points (arrows) (B)

The aneurysm was completely occluded by the coils without reposition (C)

Figure 1





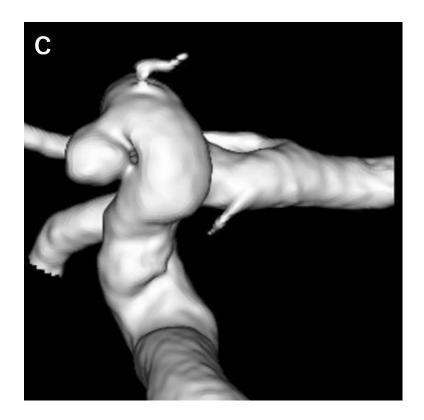
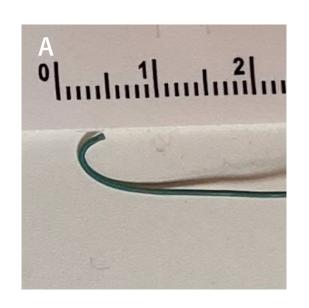
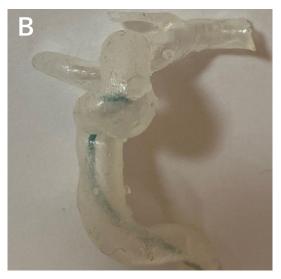
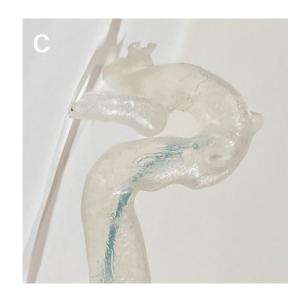
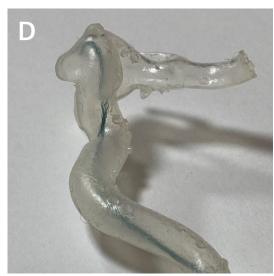


Figure 2



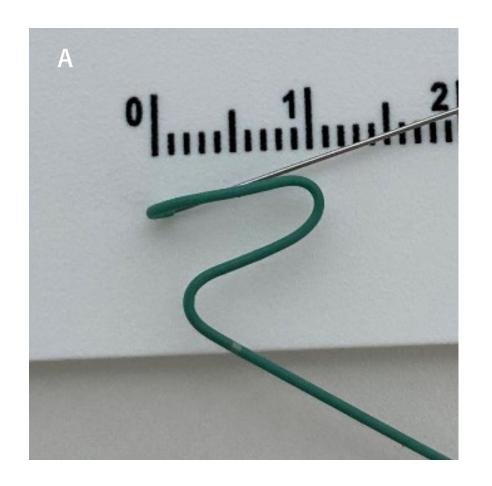


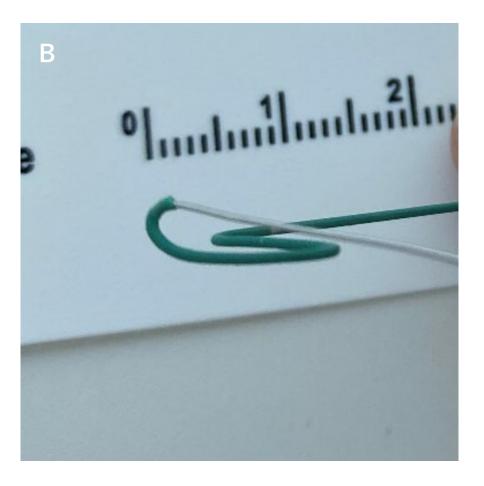




(A)The microcatheter was shaped into a J-shape.
The catheter was not inserted into the aneurysm
And showed movement through the aneurysm along the internal carotid artery.
(B)Frontal view(C)Lateral view (right side)(D)Caudal view

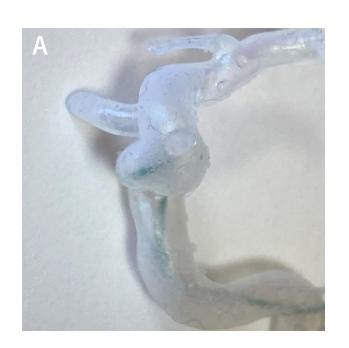
Figure 3

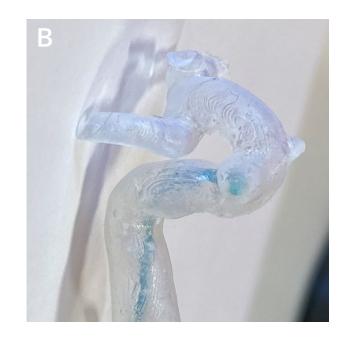


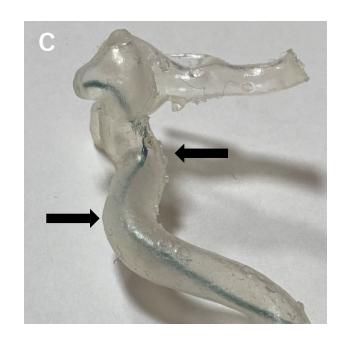


The catheter was shaped into a 1 cm crank shape with the tip bent at 90 degrees.(A and B)

Figure 4



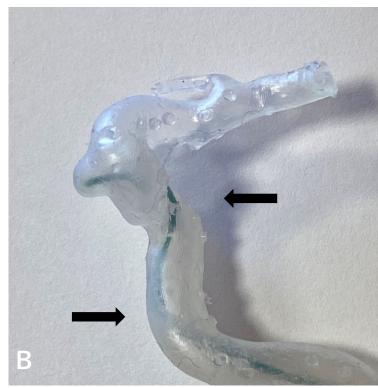


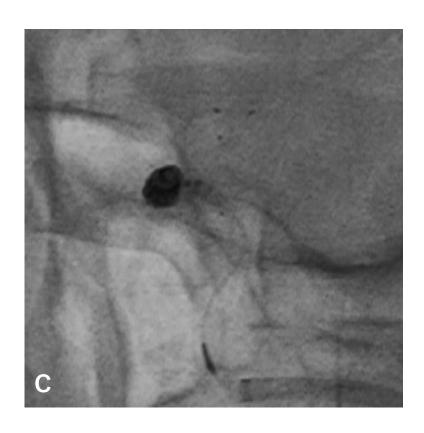


(A)Frontal view(B)Lateral view (right side)(C)Caudal view The crank shaped catheter was easily inserted into the aneurysm. The catheter was supported and stabilized at two points(arrows) in the wall of the internal carotid artery.

Figure.5







The catheter was stabilized at two points(arrows) on intraoperative angiography.(A) The catheter in the hollow cerebral blood vessel model is also stabilized at 2 points(arrows). (B) The aneurysm was completely occluded by the coils without reposition.(C)