

後下小脳動脈瘤塞栓術に対する テーラーメイド中空型動脈瘤モデルを 使用した術前シミュレーションの有用性

馬場美希子, 春間 純, 藤田淳太郎, 川上真人, 五月女悠太, 木村 颯, 平松匡文,
杉生憲志, 田中將太

岡山大学大学院医歯薬学総合研究科脳神経外科学 〒700-8558 岡山県岡山市北区鹿田町 2-5-1

3 Dプリンタを用いた中空型動脈瘤モデルを用いた術前シミュレーションが後下小脳動脈瘤治療に有用であった症例を2例経験したため、報告する。いずれも瘤のネックが後下小脳動脈に騎乗し、また分岐が急峻であったため、ステント併用コイル塞栓術を行った。同側アプローチが困難と予想されたため対側椎骨動脈経路でのアプローチを検討し、3D血管モデルを用いて術前シミュレーションとして治療戦略とデバイス選択を検討した。治療当日は術前シミュレーションどおりに合併症なく治療が可能であった。今後、中空型動脈瘤モデルを用いたテーラーメイドの術前シミュレーションを行うことで、治療成績と安全性の向上、手術時間の短縮が期待される。

Key Words

3D printer, VA-PICA aneurysm, simulation, endovascular treatment, contralateral approach

Key Slide



(Received January 6, 2025; Accepted February 13, 2025)

1. 緒言

外科系領域では3Dプリンタによる実物大臓器モデルの有用性が報告されており、解剖理解に対する報告が増えている¹⁾。しかし、脳神経血管内治療（脳血管内治療）領域では、いまだ少数の報告に留まっている²⁾。

当院では、分岐部動脈瘤など治療困難が予測される症例には、患者ごとにテーラーメイド中空型3D脳動脈瘤モデル（3Dモデル）を作製し、詳細な術前検討を行って治療に臨んでおり、術前に具体的な検討を行うことで、患者侵襲軽減や合併症の回避を目指している。今回、vertebral artery and posterior inferior cerebellar artery（VA-PICA）瘤に対する3Dモデルを用いた術前検討を行い、対側vertebral artery（VA）を介したアプローチ方法で術前シミュレーションどおりに良好な治療成績を得られた症例を経験したので、報告する。

3Dプリンタでの中空型血管モデルを使用したシミュレーションに関する研究について、岡山大学倫理委員会からの承認、ならびに患者同意を得て発表する（倫理審査委員会番号 研1911-023 2019年10月23日承認）。

II. 方法

〈3Dモデル作製方法〉

3Dモデルは既報の方法で作製し、概略は以下のとおりである^{2, 3)}。使用するデータは3D digital subtraction angiography（3D DSA）のdigital imaging and communications in medicineデータで、画像解析アプリケーションziostation2（ザイオソフト）でデータ処理を行う。Ziostation2で

3Dモデルに必要な血管データを残し、血管データ全体を拡大させ、そこから元データを減算し、血管壁を作製することで中空型血管データを完成させる。この中空型血管データをstandard triangulated languageデータに変換および出力し、3DプリンタForm 3（Formlabs）専用のスライサーソフトPreform（Formlabs）を使用し、最後にForm 3で造形を行う。造形した3Dモデル内部のレジンを除去し、Form Cure（Formlabs）を使用した光照射で硬化作業を行い、サポート材を除去して3Dモデルが完成する（Fig. 1A）。

〈術前シミュレーション方法〉

セットアップは実際の治療で使用したデバイスを丁寧に洗浄・消毒したものを再利用してバイブレーション血管撮影装置（Fig. 1C）下に実施している。

3Dモデルの近位側にYコネクタを接続し（Fig. 1B）、6 Fr ガイディングシース（GS）を留置する。続いて、GS内に5 Fr または6 Fr distal access catheter（DAC）を挿入し、DAC内に、目的のシミュレーション方法に合わせたデバイスを挿入する（Fig. 1D）。本シミュレーションでは、基本操作としてマイクロカテーテル（MC）形状確認、マイクロガイドワイヤー（MG）操作、1st coilのサイズ確認、ステントサイズと展開操作確認などが可能である。実際の治療をデバイスサイズも含めて具体的に検証することができる。

〈症例選択〉

今回、posterior inferior cerebellar artery（PICA）がVAから急峻な角度で分岐して、かつ動脈瘤neckの大部分がPICAに騎乗している症例を選択した。PICAにneckが騎乗している症例ではPICA温存と動脈瘤根治性を考慮したstent-assisted coil（SAC）での良好な治療成績が報告

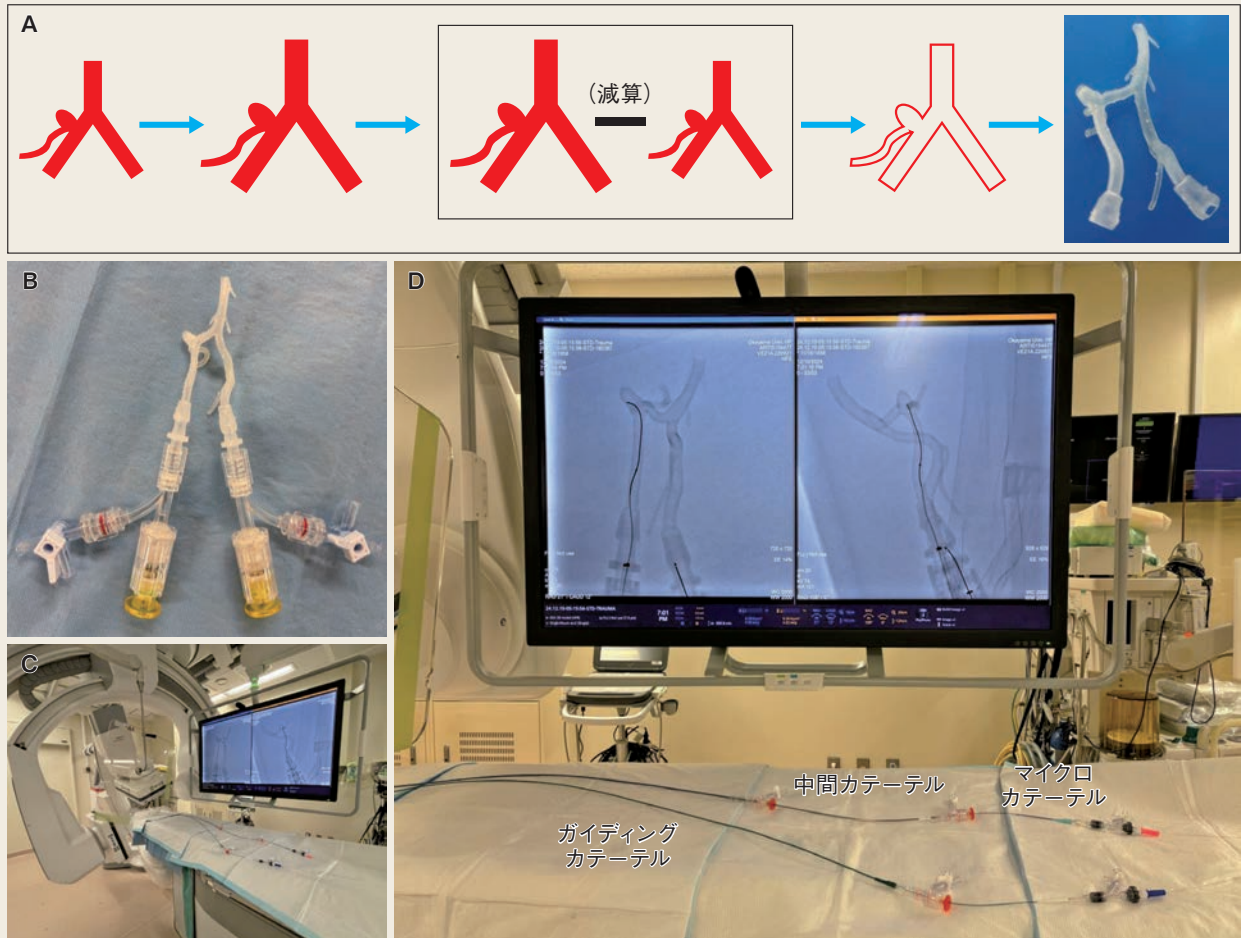


Fig. 1 Preparation of the hollow 3D aneurysm model and preoperative simulation setup

A: Overview of the hollow 3D aneurysm model creation process. The model is generated from 3D-digital subtraction angiography (3D DSA) data using image processing software, followed by 3D printing and post-processing steps to obtain a patient-specific vascular model. **B-D:** Setup for the preoperative simulation under a biplane angiography system.

されているが⁴⁾, PICAの分岐角度が急峻な場合は治療難易度が高くなる。このような症例では、術前にPICAへのアプローチ方法が検証できれば術者にとって有益であるが、具体的に術前検証をした報告はない。これに対し、我々は3Dモデルを使用して術前検討を行い、シミュレーションどおりに治療を実施し、良好な治療結果が得られた結果を本研究の術前シミュレーションの有用性と定義した。

III. 症 例

【症例 1】 50 歳代, 女性

現病歴: 偶発的に左 VA-PICA 瘤を指摘され、経過観察を行い徐々に増大していたため治療の方針となった。

画像所見: Digital subtraction angiography (DSA) で最大径 5.5 mm/neck 径 2.9 mm で bleb を伴う左 VA-PICA 瘤を認めた (Fig. 2A, B)。PICA 径は 1.2 mm で、VA は左側が優位側で右 VA は

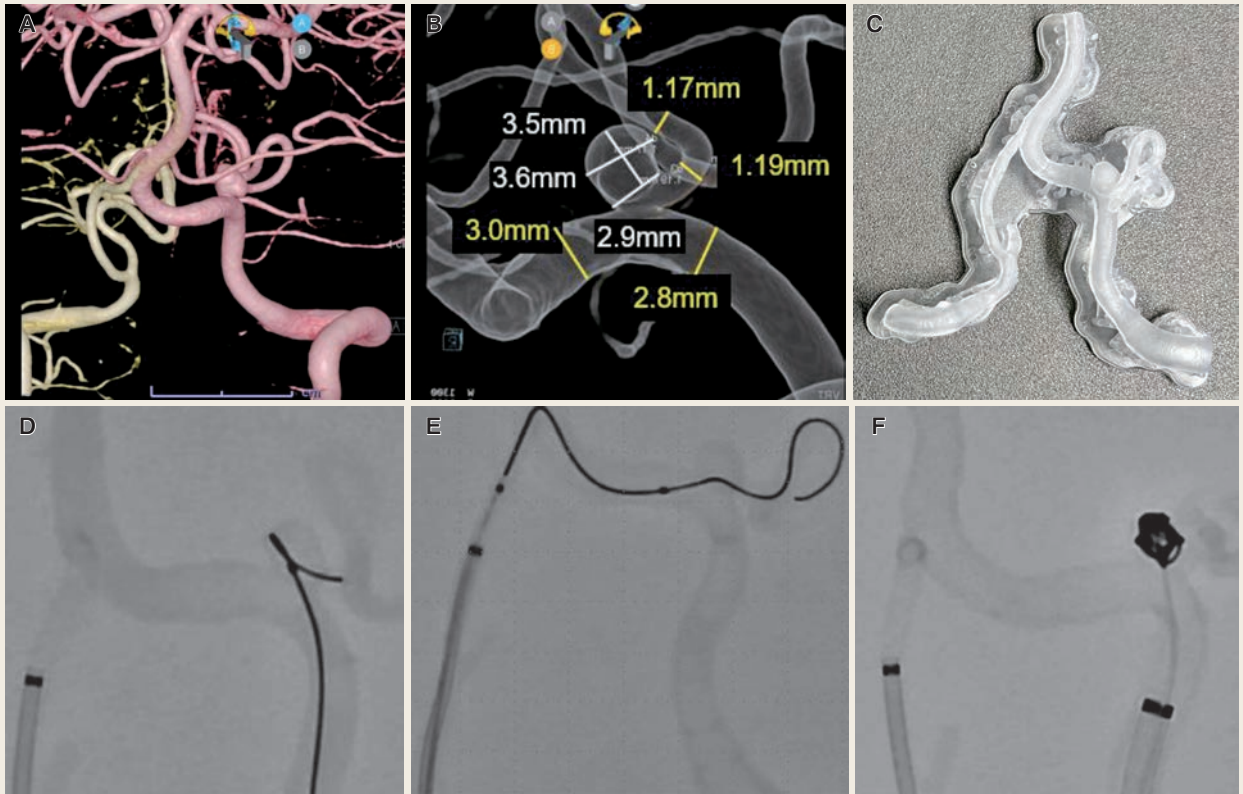


Fig. 2

A, B: Preoperative 3D-digital subtraction angiography (3D DSA) images. **C:** A patient-specific 3D model. **D:** In the ipsilateral approach simulation, the torque application to the microguidewire resulted in its entry into the aneurysm, indicating a high risk of catheterization failure via this route. **E:** In contrast, the contralateral approach allowed the microguidewire to advance distally into the PICA successfully without entering the aneurysm. **F:** Further simulation revealed that the initially selected coil did not fit properly within the aneurysm.

PICA 遠位で狭小化していた。

シミュレーション: 3D モデルは両側 VA と basilar artery (BA) を含めたモデルを造形した (Fig. 2C)。両側 VA に DAC を留置して左側から MC を挿入し、コイルのみでの塞栓を試みたが、コイルが逸脱するためステントが必要と判断した。次に、左 VA から左 PICA へのアプローチを検証した。先端に急峻な曲がりをつけた MG で PICA 起始部へのカニューレーションは可能であったが、遠位へ進めようとトルクをかけると MG が動脈瘤内へ落ち込む動きを見せ (Fig. 2D)、同側アプローチは困難と判断した。

続いて、対側からのアプローチを検証した。MC は BA union を容易に越え、MG で PICA を選択および十分遠位まで進めることができた (Fig. 2E)。

治療経過: 全身麻酔下に右大腿動脈に 6 Fr GS、左大腿動脈に 5 Fr GS を挿入し、全身をヘパリン化した。右 VA に TACTICS (テクノクラートコーポレーション) を誘導し、左 VA に 6 Fr SOFIAFLOW Plus (テルモ) を留置した。術前検討どおりに TACTICS から Excelsior SL-10 (日本ストライカー) を動脈瘤近傍に留置し (Fig. 3A)、Synchro SELECT (日本ストライカー) で左 PICA を選択し、Excelsior SL-10 を PICA 遠位に誘導

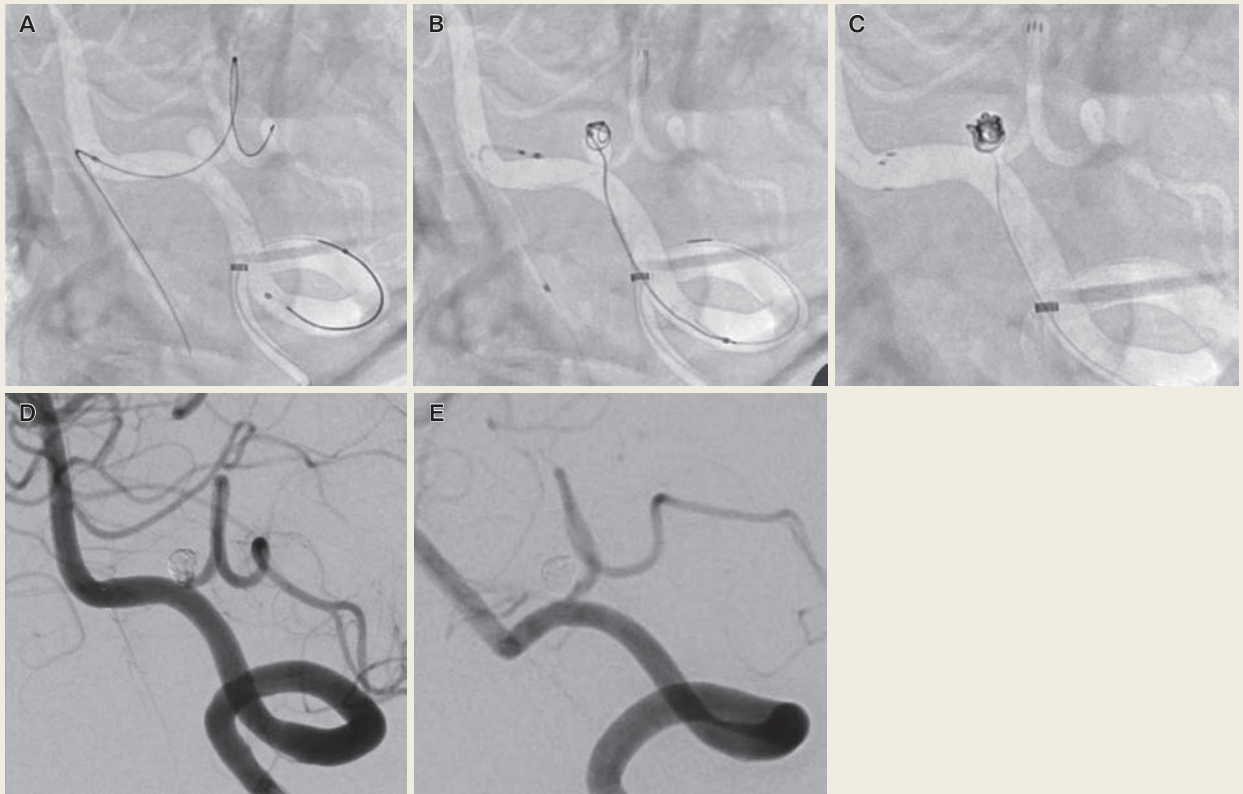


Fig. 3 Actual treatment in Case 1

A: The guidewire was successfully advanced into the left PICA using the contralateral approach. **B:** The Neuroform Atlas stent was deployed in the PICA to support coiling. **C:** Then, the initial coil was inserted. **D:** The final angiography. **E:** Digital subtraction angiography six months post-embolization.

した。その後、SOFIAFLOW Plus から Phenom 17 (日本メドトロニック) を瘤内へ留置した。Axium PRIME 3D (日本メドトロニック) 3.5 mm × 6 cm を挿入し (Fig. 3B), Excelsior SL-10 から Neuroform Atlas (日本ストライカー) 3 × 21 mm を展開後に framing を形成した (Fig. 3C)。予定どおり PICA を温存し、計 4 本のコイルを使用して volume embolization ratio (VER) 28.6% で塞栓を終了した (Fig. 3D)。周術期合併症はなく、術半年後の DSA でも完全閉塞を確認した (Fig. 3E)。

【症例 2】40 歳代、男性

現病歴：自損事故の際の頭部精査で動脈瘤が指摘され、経過観察を行い、増大傾向のため治療の

方針となった。

画像・検査所見：CTA, DSA では、最大径 5.5 mm/neck 径 3.8 mm で neck 近傍に bleb を伴う動脈瘤を認めた (Fig. 4A)。PICA 径は 1.6 mm で動脈瘤 distal neck 部以遠の血管が強く蛇行していた。左 VA は右と同程度の血管径であった。

シミュレーション：両側 VA と BA を含めた 3D モデルを作製し、両側 VA に DAC を留置し、PICA への同側アプローチは分岐角度が急峻で MG で右 PICA を選択することができなかった。コイルのみでの塞栓ではコイルが逸脱するため、ステントが必要と判断した (Fig. 4D)。最後に左 VA から右 PICA へのアプローチを検証した。

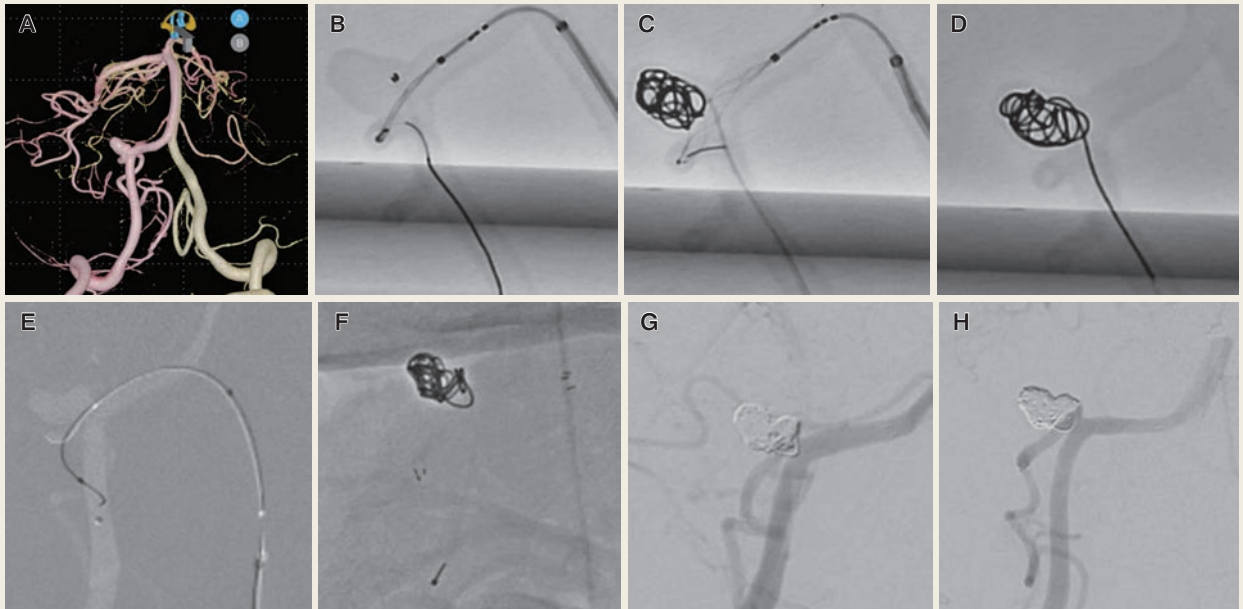


Fig. 4 Preoperative simulation and actual treatment in Case 2

A: Preoperative 3D-digital subtraction angiography (3D DSA). **B**: Preoperative simulation using a 3D model demonstrated that LVIS Jr. could not fully expand at the distal position. **C**: Instead, it could only be deployed near the aneurysm neck. **D**: Coil embolization without a stent resulted in coil prolapse. **E**: As in the simulation, the guidewire was successfully advanced into the right PICA using the contralateral approach. **F**: The stent was deployed, and the first coil was inserted into the aneurysm. **G**: The final angiography. **H**: Digital subtraction angiography six months post-embolization.

MCはBA unionを越え、MGは容易にPICAを選択し、遠位まで進めることができた (Fig. 4B)。LVIS Jr. (テルモ) 2.5 × 17 mmはneck近傍でしか展開できなかつたため、治療にはNeuroform Atlasを選択した (Fig. 4C)。また、Axium PRIME Frame (日本メドトロニック) 5 mm × 15 cmが1st coilで適切なサイズと確認し、対側アプローチでのSACが有効と判断した。

治療経過: 全身麻酔下に右大腿動脈に5 Fr Axcelguide (東郷メディキット)、右上腕動脈に5 Fr ショートシースを挿入し、全身をヘパリン化した。右VA起始部に5 Fr ENVOY (ジョンソン・エンド・ジョンソン) を留置し、左鎖骨下動脈に留置した5 Fr AxcelguideからDACとしてGuidepost (東海メディカルプロダクツ) を左VA

に進めた。左VAを經由してSynchro SELECTおよびExcelsior SL-10を右PICA遠位に誘導した (Fig. 4E)。次にHeadway 17 (テルモ) を瘤中央部へ留置し、シミュレーションどおりにコイルを挿入し、Neuroform Atlas 3 × 21 mmを展開後にframingを形成した (Fig. 4F)。PICAを温存し、計7本のコイルを使用してVER 29.7%で塞栓を終了した (Fig. 4G)。周術期合併症はなく、術半年後のDSAでも軽度のcoil compactionによりneck remnantを呈しているが、adequate occlusionは達成できていた (Fig. 4H)。

IV. 考 察

VA-PICA 瘤は全頭蓋内動脈瘤の0.5 ~ 3%を占める。脳幹や複数の脳神経が隣接するため、外科

的アプローチは非常に困難であり⁵⁾、治療戦略は議論の余地がある。コイル塞栓術の有用性も報告されてきたが⁶⁾、PICAが動脈瘤から分岐している難易度の高い症例が多く、脳血管内治療の場合もほかの箇所比べて術中破裂リスクが高く、PICAやVAの閉塞を選択する症例も報告されている⁷⁾。

これらの経緯から、SACはVA-PICA瘤に対して効果的な治療として有効性が報告されてきたが、分岐角度の急峻な瘤では同側アプローチでステントを留置することがしばしば困難である。ChoらはVA-PICA瘤における対側VA経由でのステント留置のメリットとして①ステント併用によりtight packingが可能であり、②急峻に分岐した血管では、同側からステントを置くよりも対側VA経由で留置したほうがステントの展開不良や狭窄を防ぐことができ、③ステントによる整流効果が期待できる、と報告している⁸⁾。

この報告に基づき、今回経験した2例では対側VA経由での治療選択が候補となった。画像上はPICAの角度が急峻であり、同側アプローチも含めてPICAへのアプローチの検証が必要であった。そこで、今回の症例では3Dモデルでの術前検討が有用であると考えた。3Dプリンタで造形した血管モデルを使用したシミュレーションの利点については報告があり、特に実物大の非中空血管モデルを使用したMCのシェイピングに対する有用性が多く報告されている⁹⁾。当院では、血管モデルを「中空型」にすることで、MCシェイピング以外にも詳細なデバイスサイズの検討や、最適なframing coilの選択など、より具体的な術前検討を可能とした。今回のVA-PICA瘤の場合、両側VAとBAを含めた3Dモデルを作ることで

同側・対側両方からのアプローチを検討することが可能であった。本報告のようにアプローチ方法を含めた詳細な術前検討を要するVA-PICA瘤における3Dモデルでのシミュレーションを実施した報告は、渉猟し得た限りない。

3Dモデルは再現精度が最も重要だが、我々のモデルではPICAのような1mm径の血管まで造形ができるため、より実際の手術に近い術前検討ができた。繰り返し検討するため、シミュレーション時はリリース可能なclosed stentが望ましく、3Dモデルで使用可能なステントに限界があるが、展開位置やサイズの確認には問題なかった。

このように、PICAの分岐角度が急峻なVA-PICA瘤において、術前シミュレーションは方針決定とデバイス選択に貢献した。本報告は対側VA経由で治療した2症例であるが、同側からのアプローチが可能である症例でもシミュレーションを行い、これを術前に確認することは術者にとって有益であると考え。血管外科領域ではすでに3Dモデルでのシミュレーションによる術者の自信の向上や、実際の技術的成果の達成、手術時間と造影剤使用量の削減が報告されており¹⁰⁾、脳血管内治療領域においても同様の効果が期待される。

しかし、我々の3Dモデルにはいくつかの問題点がある。まず、デバイス挿入時の血管偏位やデバイス操作時の抵抗感までは再現できない点である。生理食塩水を灌流することで抵抗を軽減しているが、実臨床とはやはり異なる。Moritaらの報告のように硬化時間の調整やシリコンスプレーを塗布するなど、弾性力や動摩擦力軽減を対策する必要がある¹¹⁾。また、我々の3Dモデルを使用した術前シミュレーションは90%以上の症例で

計画どおりの治療が行えているが、我々の過去の自験例で、末梢に位置する動脈瘤でデバイス挿入による血管偏位が生じ、術前計画どおりに治療ができなかった症例も経験している。さらに3Dプリンタで作製できるサイズには制限があるため、頸部や頭蓋外からモデルを作製することができない。今後、技術向上によりこれらの問題点が改善されれば、より実臨床に則した治療検討・術前の修練が可能になると期待される。

V. 結 語

3Dモデルでのシミュレーションどおりの対側VA経由でのSACが可能であったVA-PICA瘤2例を経験した。PICA分岐角度が急峻なVA-PICA瘤においても3Dモデルでのシミュレーションは治療方法決定とデバイス選択に有用であった。今後、さらなるデータ収集と実際の手技により近づけるための改善が必要である。

COI

本論文に関して、開示すべきCOIはありません。

文献

- 1) Tack P, et al: 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online* 15: 115, 2016
- 2) 春間 純 ほか: 3Dプリンタ作成テーラード中空型脳動脈瘤モデルを使用した脳血管内治療術前シミュレーション. *脳神経外科* 52: 299-308, 2024
- 3) Haruma J, et al: A New Method of Intracranial Aneurysm Modeling for Stereolithography Apparatus 3D Printer: The “Wall-Carving Technique” Using Digital Imaging and Communications in Medicine Data. *World Neurosurg* 159: e113-9, 2022
- 4) Kim MJ, et al: Stenting from the vertebral artery to the posterior inferior cerebellar artery. *AJNR Am J Neuroradiol* 33: 348-52, 2012
- 5) Singh RK, et al: Posterior inferior cerebellar artery aneurysms: Anatomical variations and surgical strategies. *Asian J Neurosurg* 7: 2-11, 2012
- 6) Kim J, et al: Coil Embolization Results of the Ruptured Proximal Posterior Inferior Cerebellar Artery Aneurysm: A Single-Center 10 Years' Experience. *World Neurosurg* 117: e645-52, 2018
- 7) Roh HG, et al: Retrograde stent placement for coil embolization of a wide-necked posterior inferior cerebellar artery aneurysm. *Korean J Radiol* 13: 510-4, 2012
- 8) Cho YD, et al: Stent-assisted coil embolization of wide-necked posterior inferior cerebellar artery aneurysms. *Neuroradiology* 55: 877-82, 2013
- 9) Onda T, et al: Usefulness of Preoperative Simulation Using a Stereolithographic 3D Printer in Cerebral Aneurysm Coil Embolization. *J Neuroendovasc Ther* 15: 736-40, 2021
- 10) Catasta A, et al: Systematic Review on the Use of 3D-Printed Models for Planning, Training and Simulation in Vascular Surgery. *Diagnostics (Basel)* 14: 1658, 2024
- 11) Morita R, et al: Mechanical Properties of a 3 Dimensional-Printed Transparent Flexible Resin Used for Vascular Model Simulation Compared with Those of Porcine Arteries. *J Vasc Interv Radiol* 34: 871-8, e3, 2023

Usefulness of 3D-printed patient-specific hollow aneurysm models for preoperative simulation of coil embolization in posterior inferior cerebellar artery aneurysms

Fukiko BABA, Jun HARUMA, Juntaro FUJITA, Masato KAWAKAMI, Yuta SOUTOME, Ryu KIMURA, Masafumi HIRAMATSU, Kenji SUGIU, Shota TANAKA

Department of Neurological Surgery, Okayama University Graduate School of Medicine, Dentistry and Pharmaceutical Sciences

3D-printed organ models have been reported to be useful for surgical planning, but there are still few reports on their applicability in endovascular treatment. This study describes the effectiveness of preoperative simulation using a 3D-printed patient-specific hollow aneurysm model for vertebral-posterior inferior cerebellar artery (VA-PICA) aneurysms.

The model was created based on the digital imaging and communications in medicine (DICOM) imaging data of a digital subtraction angiography (DSA) sample. Preoperative simulation using a hollow cerebral aneurysm model allows the use of the same devices used in clinical practice, enabling prior assessment of device selection, such as the first coil, microcatheter shape, and stent.

We performed preoperative simulation for two cases of VA-PICA aneurysms. In both cases, the neck was located on top of the PICA, and the PICA bifurcation angle was steep. During coil insertion, the coil easily prolapsed into the PICA with a standard coil technique, so we decided to use stent-assisted coiling. However, guiding the microcatheter into the PICA from the ipsilateral side was challenging, so we considered a contralateral approach. Since the contralateral approach is not a standard technique and its safety was uncertain, we used this 3D model for preoperative simulation.

The 3D models of these two cases included the bilateral vertebral and basilar arteries, enabling us to simulate the contralateral approach. Additionally, we assessed the size of the initial coil and selected an appropriate framing coil.

In both cases, the actual treatment was performed as planned based on the preoperative simulation, and no perioperative complications were observed. To our knowledge, no prior reports have described the use of 3D models for simulating the contralateral approach for VA-PICA aneurysms.

A highly accurate model reconstructed from 3D DSA images, incorporating the contralateral VA, allowed for the precise evaluation of our treatment strategies, including the approach route, leading to favorable treatment outcomes. This patient-specific simulation model facilitates preoperative planning tailored to each case in endovascular neurotherapy, with the potential to enhance treatment efficacy, improve safety, and reduce operative time.