

【原著】

## 脳動脈瘤手術シミュレーションにおける 3D プリンターの有用性

豊山 弘之\*<sup>1</sup> 厚見 秀樹\*<sup>2</sup> 松前 光紀\*<sup>2</sup>

Usefulness of the Simulation Using a 3D Printer in the Cerebral Aneurysm Surgery

Hiroyuki Toyama\*<sup>1</sup>, Hideki Atsumi\*<sup>2</sup>, and Mitsunori Matsumae\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup>Shida Memorial Neurosurgery Hospital, Shizuoka, Japan,

\*<sup>2</sup>Department of Neurosurgery, School of Medicine, Tokai University, Kanagawa, Japan

(Received October 2, 2014)

(Accepted April 1, 2015)

**Summary:** Recent significant advances in three-dimensional (3D) printer technology would be expected some generalizations in medical field. At our clinic, routine 3D printer use has provided a powerful diagnostic tool; it has, in part, helped us make more precise diagnoses and determine therapeutic modalities. Digital imaging and communications in medicine (DICOM) data were transformed into 3D images using a conversion software (OPT, Co.) from which acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic aneurysmal models were generated. These silicon-coated models were allowed to dissolve once pseudoluminal organ models were introduced for practical simulation assistance to facilitate knowledge regarding the method of application of aneurysm clips and coiling techniques.

In aneurysm surgery, it is essential to know many possible treatment methods according to the individual lesion shapes and locations; however, in most cases, preoperative simulations do not surpass the scope of imagination.

Models made using 3D printers facilitated an understanding of 3D vascular structures. Therefore, these 3D simulation techniques proved advantageous in the clipping or coiling of aneurysms after constructing pseudoluminal organs.

However, reproducibility in the 3D printer method is occasionally limited because of some changes such as arteriosclerosis or other vascular pathological alterations.

**Key Words:** 3D printer, Cerebral aneurysm, Surgical simulation

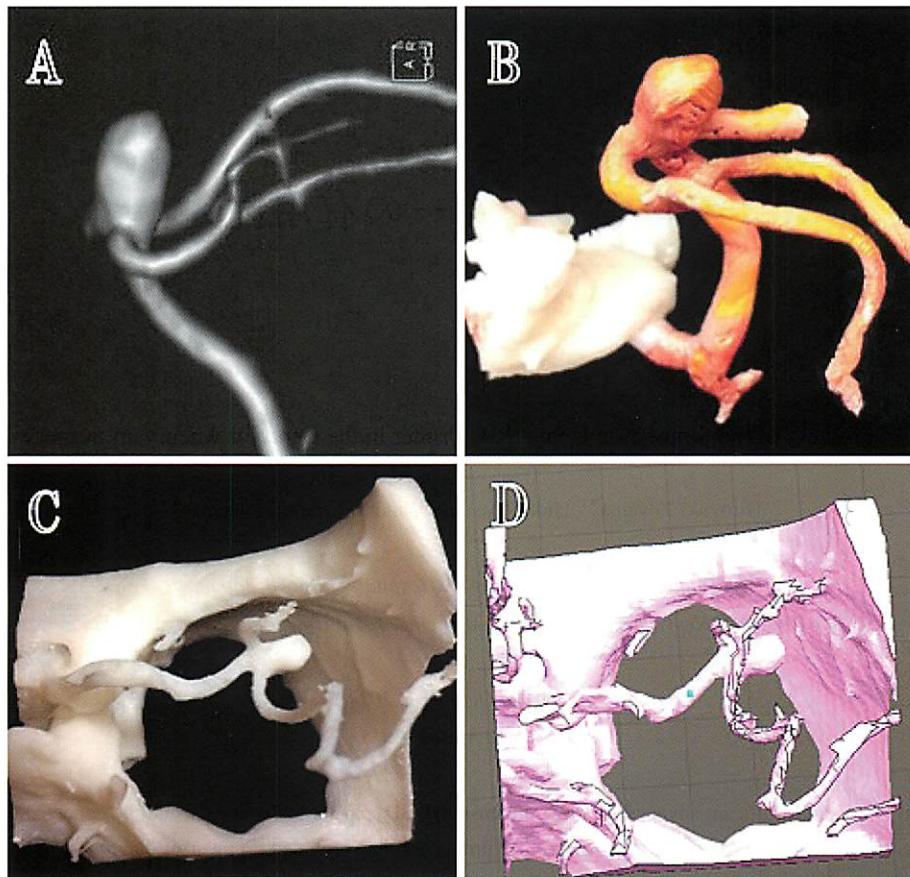
**使用機種:** OPT社 3Dプリンター UPPLUS, MRI: 日立メディコ社 ECHELON RX, 1.5T, MDCT: 日立メディコ社 ECLOS, Philips社 achieva 3.0T

### はじめに

3Dプリンター (three-dimensional printer/以下3Dプリンターと略す) は飛躍的な進歩を遂げ一般化されつつあり、医療分野においてもさらなる普及が待たれる<sup>1,2)</sup>。近年

DICOM (digital imaging and communication in medicine/以下DICOMと略す) データ取り込み変換ソフトの低価格化や画像診断機器との連携が簡便化されており、脳神経外科領域においても実戦的ツールとして期待される<sup>2,3)</sup>。当施設では2013年10月より3Dプリンターを用いた病変モデルを日常的に作成し、症例検討の一材として使用している。今回我々はその有用性について検討したので、代表症例を提

\*<sup>1</sup>医療法人社団 志太記念脳神経外科【連絡先: 〒425-0073 静岡県焼津市小柳津 371-1】、\*<sup>2</sup>東海大学医学部 脳神経外科



**Fig. 1** An 82-year-old woman with a growing right middle cerebral artery aneurysm. **A:** Three-dimensional (3D) computed tomography (CT). **B and C:** Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic model generated with a 3D printer. **D:** Arranged view transformed to 3D stereolithography (SLT) data from DICOM.

示し報告する。

#### 方法と対象

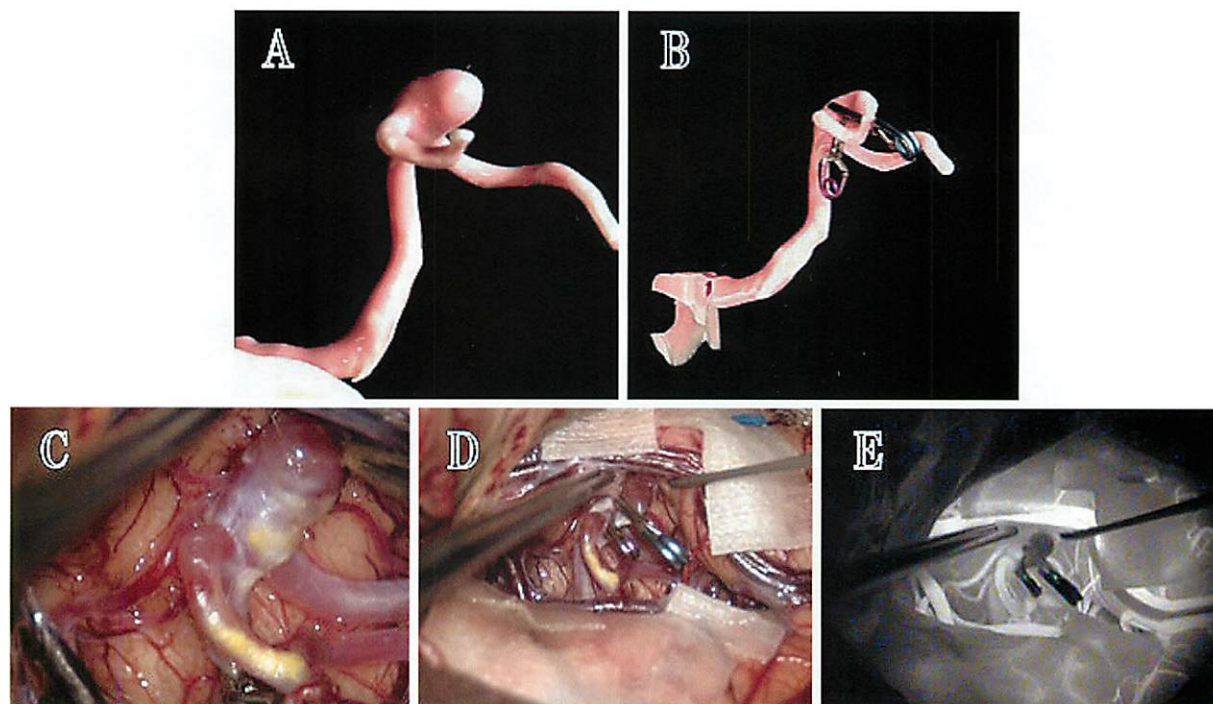
対象は2013年10月より2014年9月まで行われた脳動脈瘤クリッピング術32例(内頸動脈瘤7例/直径平均5.1mm, 中大脳動脈瘤20例/直径平均4.2mm, 前大脳動脈瘤1例/9mm, 前交通動脈瘤4例/直径平均2.9mm), コイル塞栓術10例(内頸動脈瘤7例/直径平均5.9mm, 脳底動脈瘤3例/直径平均7.3mm), 計42例(38歳から82歳, 平均68.4歳, 男女比9:23, 全例未破裂動脈瘤, 血栓化動脈瘤なし)の術前に3Dプリンターモデルを作成した。

使用機器はOPT社(東京都中央区銀座2-12-3 株式会社オーピーティ) DICOM変換ソフトVolume Extractor Ver.3.0で前述したME機器のDICOMデータを3次元STL(standard triangulated language/以下STLと略す)変換し, OPT社3DプリンターUPPLUS(商品名)にてABS(acrylonitrile-butadiene-styrene/以下ABSと略す)樹脂の動

脈瘤モデルを作成して画像診断の一助とした。さらにシリコンでコーティング後ABS樹脂を溶解し中空の管腔擬似臓器(以下中空シリコンモデルと略す)を作成した<sup>6)</sup>。またこれらのモデルをクリッピング術やコイル塞栓術の手術シミュレーションに用いた。

#### 結 果

作成にあたって前述のソフトはWindows7で動作可能であり, ソフト, プリンター本体および専用パソコンなど総額100万円未満の初期投資額で導入可能であった(2013年10月時点)。作成時間は大きさにもよるが, 等倍の頭蓋骨を含むモデルでプリントアウトに約6時間要し, 原型モデルから血管や動脈瘤を切り出したABS樹脂モデル作成には平均約1時間の手作業を要した。頭蓋骨を含まない病変部を中心とした血管のみのABS樹脂モデルであれば, プリントアウトおよび手作業で全工程を2時間程度で作成可能であった。中空シリコンモデル作成には切り出したABS



**Fig. 2** A: Pseudoluminal organ model after silicon coating. B: Simulation technique applied during surgery. C, D, and E: Views during surgery. It was useful to select the clip blade length and presume the width between blades when the clip was open; however, a section of the M2 artery was supposed to be obstructed when a lip was applied according to the simulation technique. The clip was later applied appropriately at the best position, as sclerosis had advanced further than expected.

樹脂モデルをシリコンコーティングし、アセトンにてABS樹脂を溶解するが、時々攪拌しながらの溶解時間は約24時間程度必要であった。作成コストは1個あたり数十円程度（材料費、光熱費）と推測された。

3DプリンターのABS樹脂モデルは42例の全例において作成可能であった。中空シリコンモデルは中大脳動脈瘤で4例、内頸動脈瘤で4例、脳底動脈瘤で1例作成された。これらを用いた術前の手術シミュレーションや術中所見から、以下の点で作成条件の違いや傾向が見られた。

- ・CTデータを用いた場合、頭蓋骨と血管構造を忠実に再現できたが、動脈瘤が頭蓋底に埋没している場合は分離困難な場合があった（内頸動脈瘤クリッピング例で2例）。

- ・CTデータを用いた場合、動脈-静脈の接触や癒着は分離困難な場合があった（内頸動脈瘤クリッピング例で2例、中大脳動脈瘤クリッピング例で2例）。

- ・CTデータを用いた場合、動脈瘤と静脈との癒着や接触は分離困難な場合があった（中大脳動脈瘤クリッピング例で3例）。

- ・いずれのME機器においても動脈-動脈、動脈-動脈瘤の癒着や接触は分離困難（例：Fig. 5 A, 5 B）であった（内頸動脈瘤クリッピング例で2例、前交通動脈瘤クリッピン

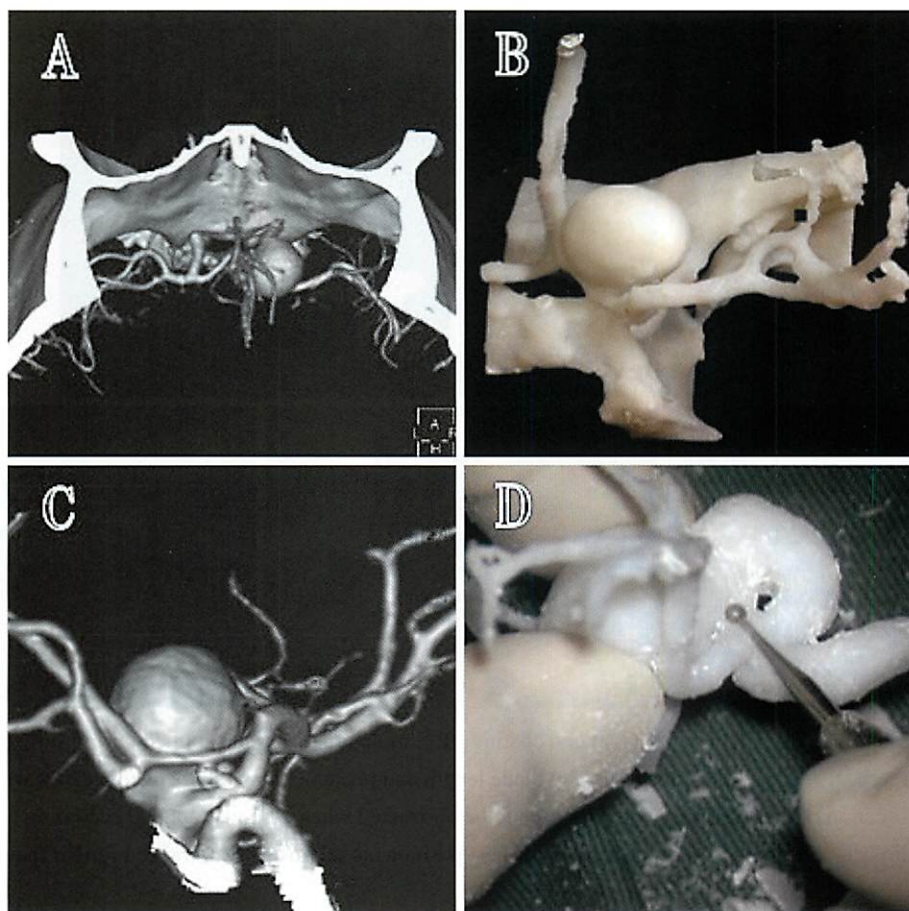
グ例で2例、中大脳動脈瘤クリッピング例で3例）。

- ・MRIデータを用いた場合、動脈相のみの条件で再現が可能であった。

- ・当機での3Dプリンターの積層ピッチは等倍の場合は0.15mmであるが、等倍で切り出しが困難な場合でも倍率を上げることにより平面画像に描出できた血管はモデル化可能であった。

- ・クリッピングシミュレーションに中空シリコンモデルを用いた場合、生体とクリップとの接着は適度な湿潤や固定性が要求され距離感や角度の把握、サイズの推測には有用であったが、実際のクリッピングの臨場感と相違点が多かった（中大脳動脈瘤クリッピング例3例、内頸動脈瘤クリッピング例1例）。

- ・コイルシミュレーションに3Dプリンターモデルを用いた場合、マイクロカテーテルを3次的にシェイピング（Fig. 6 E）する際の資料として有用性が高かった（コイル例10例）。また中空シリコンモデルを用いた場合、マイクロカテーテルの動きや血管の進展については再現性が高かった（脳底動脈瘤コイル例1例）。



**Fig. 3** A 39-year-old woman with an aneurysm at the right anterior clinoid process. The lesion diameter was 16mm. The right carotid artery was cannulated to secure its circulation, and a clip was applied after suction to decompress the aneurysm. **A** and **C**: 3D CT scan. **B** and **D**: ABS plastic model.

#### 代表症例

症例1 (**Fig. 1, 2**): 82歳女性, 2009年より右中大脳動脈瘤を経過観察していたが急速増大したため, 2013年11月開頭クリッピング術となる。術前に3DプリンターモデルとしてABS樹脂モデルおよび中空シリコンモデルを作成しクリッピングシミュレーションを行った。親血管と動脈瘤の動脈硬化が強いためと思われる, シミュレーションとの相違点があった。

症例2 (**Fig. 3, 4**): 39歳女性, 脳ドックにて検出された右内頸動脈瘤。頸動脈確保の上 suction decompression 法でクリッピング術を施行した。硬膜外からの anterior clinoidectomy の術前シミュレーションは解剖構造や動脈瘤との距離感を把握するために有用であった。3Dプリンターモデルは頭蓋底と動脈瘤との分離が困難であった。

症例3 (**Fig. 5**): 63歳女性, 左中大脳動脈瘤。クリッピングシミュレーションのためABS樹脂モデルおよび中空シリ

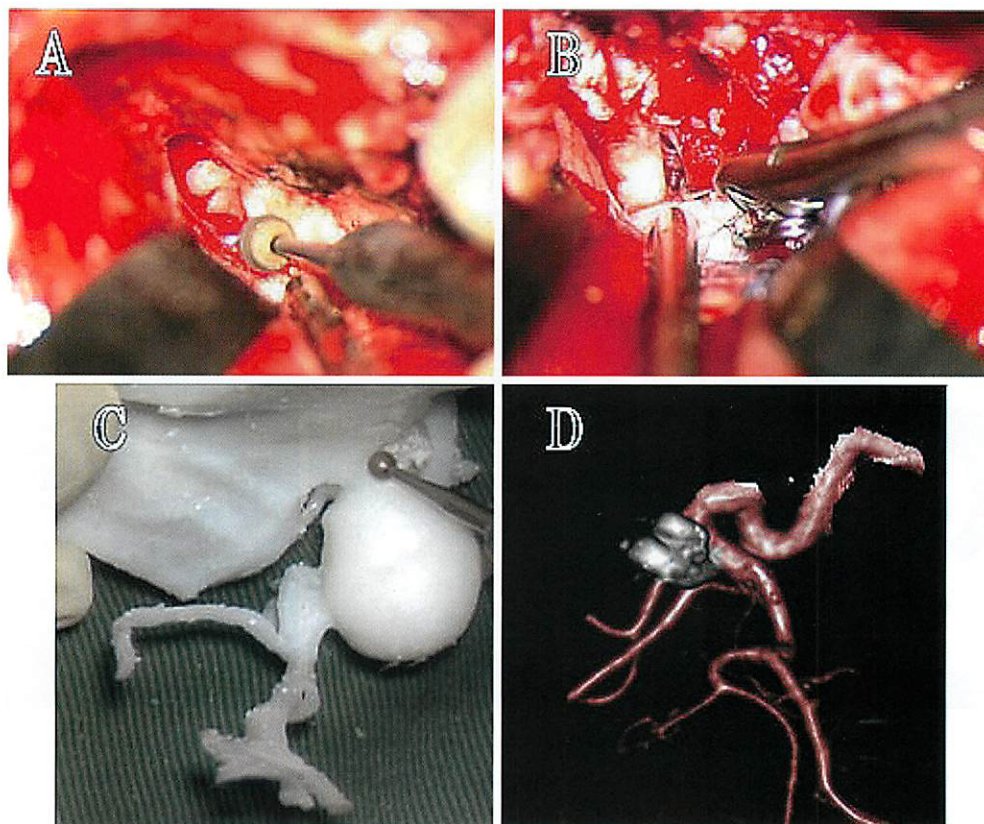
コンモデルを作成した。動脈瘤と中大脳動脈(M2)が癒着していたため3Dプリンターにおける再現性には限界があった。

症例4 (**Fig. 6, 7**): 51歳女性, 脳底動脈瘤。ABS樹脂モデルを用い術中マイクロカテーテルのシェイピングをより立体的に行うことができた。中空シリコンモデルを用いたマイクロカテーテル誘導のシミュレーションは, カテーテルの術中の動きを予測する上で有用であった。

#### 考 察

脳動脈瘤手術は大きさ, 形状, 他の血管との位置関係, ワーキングアングル, 頭位, デバイスやクリップの種類など個体差が大きく, 術者は様々なノウハウを要求される。

近年は画像診断の進歩がめざましく3D画像が一般化され術前診断はより正確になり, 3D画像を術者が編集し病変を把握することは術前シミュレーションを行っていること



**Fig. 4** A and B: Surgical views. C: Simulation of the anterior clinoidectomy. D: Postoperative 3D CT scan.

に他ならず、経験が積算され立体把握が精鋭化するため推奨されてきた。

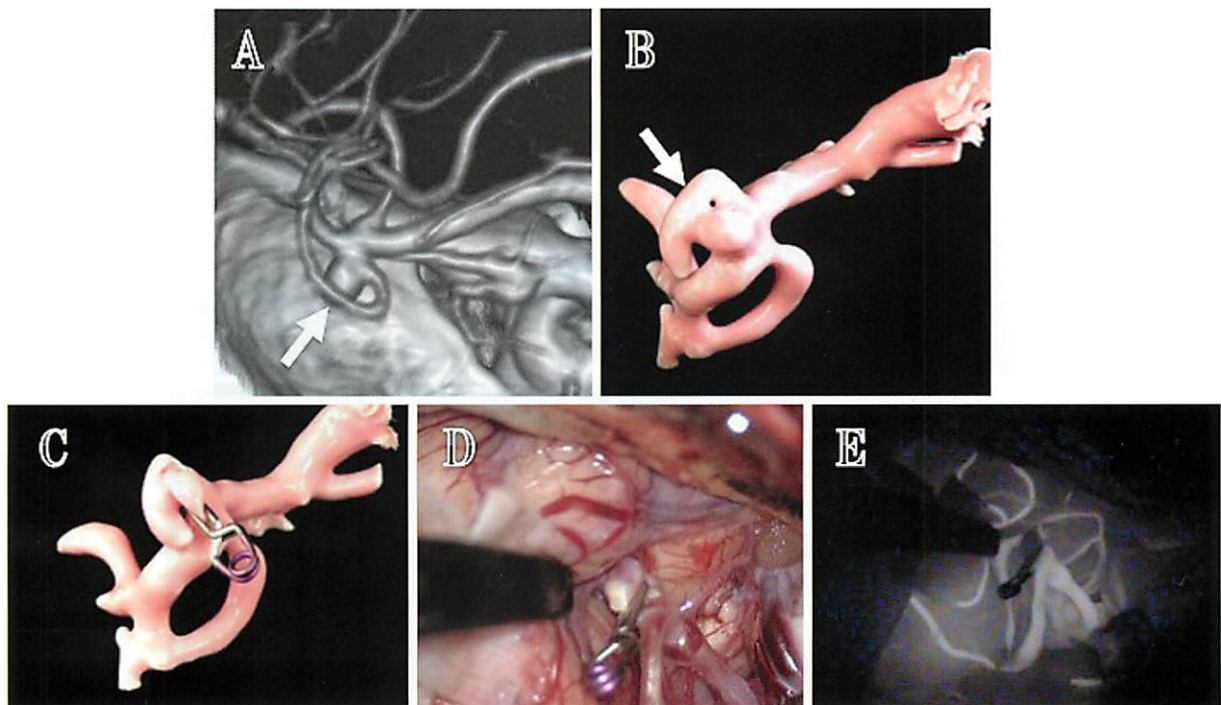
3D プリンターによる脳動脈瘤モデルの作成は、従来の平面画像を立体化することにより手術シミュレーションをさらに踏み込んだものにするのが可能となった。

まず 3D プリンターモデルを作成するために、当機において ME 機器からの DICOM データを 3 次元 STL データに変換後に ABS 樹脂にてプリントアウトするが、プリントアウト直後のモデルはプラモデル様に梁となる支えが存在しており、実用的な立体モデルを作成するためにこの梁の部分を作り出す必要がある。細い穿通枝を残しながら等倍のモデルを作成するには繊細な技術を要することになり、2 次元画像診断と照らし合わせながらモデル作成を進めることは手術手技を意識したものとなり効果的なシミュレーションの前段階となる。これは術者に限らずパラメディカルや学生まで施行可能であり、共同作業にすることにより幅広く症例の情報を共有することになる。

クリッピングシミュレーションに対してのモデル作成には、他の解剖構造との位置関係に伴ったワーキングアングルやクリップの深さ、角度やクリップ後の血管の変形を推

測する目的が主体となる一方、コイルシミュレーションにあたっては頭蓋骨との位置関係よりも血管や動脈瘤内を通過するデバイスのイメージを把握する目的のモデル作成が望まれる。そのためクリッピングシミュレーションに対するモデルは 3D CT を基としたモデルが参考としやすく、コイルシミュレーションに対するモデル作成は内腔を忠実に再現し、頭蓋骨を含まない MRI を基としたモデルが参考となりやすい傾向があると思われる。

症例 1 の場合、クリッピング術前シミュレーションに中空シリコンモデルを作成したが、クリップのブレードの長さやクリップを開いた際のブレード間の距離と瘤の関係についての推測には有用であったが、本症例の場合シミュレーション通りにクリップすると全体的に動脈硬化が強く M2 が閉塞することになり、わずか手前の最良な場所でクリップをとどめることになった。脆弱な瘤壁と母血管との硬度のギャップに伴う内壁の寄りに伴う閉塞と考えられた。動脈瘤の壁性状までは再現ができなかったと思われるが、今後より詳細な CT 値の違いなどを反映することにより一歩進んだ再現が可能となるかもしれない。また未だモデル作成の経験はないが、血栓化動脈瘤の場合なども同様



**Fig. 5** A 63-year-old woman. The left middle cerebral artery aneurysm was clipped. In such cases when an artery and aneurysm are adhered, the 3D printer method provides somewhat obscure pictures because of some consecutive model presentations. **A**: 3D CT scan. **B** and **C**: Silicon model simulation was used in which the aneurysm and middle cerebral artery were severed. **D** and **E**: Preoperative views.

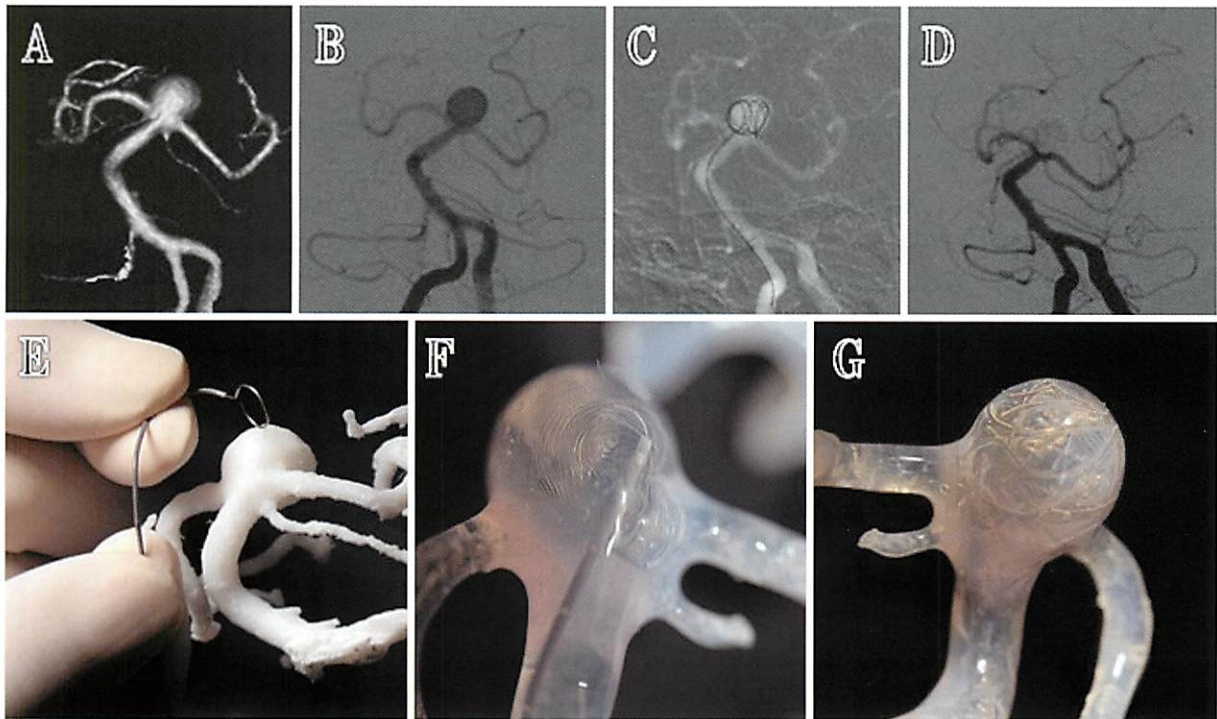
の課題となるであろう。

頭蓋骨と血管、病変を一体化してモデリングすることは、到達角度やワーキングアングルを推定し頭位角度を固定の時点で決定する際に有用となる。症例2で示した頭蓋底と接するようなケースで硬膜外から頭蓋底を削りアクセスする場合、病変との距離感や動脈瘤頸部との位置関係を事前に把握し頭蓋底の削り込みをシミュレーション可能である (**Fig. 3 D**)。

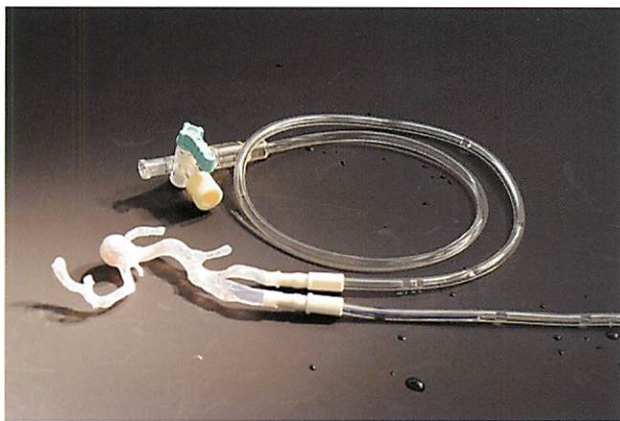
症例3のように動脈瘤と血管との癒着は画像上も連続して描出されるため、3Dプリンターではさらにぼやけた印象となる (**Fig. 5 A, 5 B** 矢印)。同様にCT画像が基の場合は静脈との癒着も分離が不可能であり、このような場合は動脈相のみのMRI画像が優先される。また高機能機種を用いた文献では報告例があるが<sup>3)</sup>、DSA画像データがより簡単に取り込めるようになれば血流相に分けたさらに詳細なモデルも作成可能と思われる。

症例4を代表するコイリングケースは頭蓋骨を省いたモデル作成が望まれるためMRIデータを基とすることが多いが、3DCTデータから効率よく血管構造のみを抽出できる最新の高機能ワークステーションも存在しており、今後活用を考慮している。血管内治療は治療そのものが平面画

像を観ながら行うため、biplane機種であっても透視に対して前後の距離感の把握は立体視しているクリッピングに比較して感覚的な要素が大きくなる。またデバイスの動きを制御しながら行う必要があり、その制御法としてマイクロカテーテルのシェイピングは術者が定められる重要な要素と考える。マイクロカテーテルが壁面に支点をつくりながら動脈内を通過する際に、特に手元側のアングルの方向は安定したマイクロカテーテルの瘤内留置を達成するために決め手となる場合があり、術中にモデルをみながらシェイピングアングルを決定することは有用性が高いと思われた (**Fig. 6 E**)。またマイクロカテーテルやガイドワイヤーが動脈内を通過する際にたわみをつくりながら、動脈を進展させながら進んでいくが、実際の例と同様の動きをする傾向があると思われ、透明モデル内を進むマイクロカテーテルやガイドワイヤーの動きの観察は手術シミュレーションをする上で多くの情報が得られた (**Fig. 6 F, 6 G**)。ABS樹脂モデルでは血管内腔は鋳型にモデル化されるため、中空シリコンモデルは内腔の忠実な再現となる。また透明シリコンモデルは着色シリコンモデルに比較し作成上柔らかく仕上がる傾向にあり、生体の血管弾性に近似する印象であった。さらにカテーテルがジャンピングするようリスクの



**Fig. 6** A 51-year-old woman in whom a basilar artery aneurysm was incidentally found via magnetic resonance angiography (MRA). Thrombosis was achieved by the coiling method. **A:** 3D CT scan. **B, C, and D:** Views during interventional surgery. **E:** An equal-sized ABS model provided a 3D shaping technique assisted by microcatheterization. **F:** A microcatheter was left in place after generating a transparent silicon model. **G:** An aneurysmal thrombosis via coiling was simulated with a discarded coil.



**Fig. 7** A silicon model and an intravenous drip tube are connected to simulate an aneurysmal thrombosis via the coiling technique.

高いシミュレーションを行っておくことにより、安全対策の一助となると思われた。

この中空シリコンモデルは常に環流する必要があるため現在は既製品の点滴チューブと輸液ポンプを用いた還流シ

ステムを作成し、コストをかけずにシミュレーションしているが、従来の血管内治療シミュレーター<sup>4)</sup>と同期することによりさらに実践的なシミュレーションが行えるものと思われた。**Fig. 7**に報告した例では回収し廃棄となったコイルを流用したが、コイルは多種多様の製品が存在し繊細なデバイスであるため、コイルを使用したシミュレーションは全例には施行困難と考える。

今回の報告は脳動脈瘤手術シミュレーションの有用性の検討を目的としているが、3Dプリンターモデルは他の疾患の診断治療や正常解剖を理解するための教育ツールなど、幅広く応用が可能と思われた。

## 結 語

・3Dプリンターモデルを用いた脳動脈瘤手術シミュレーションは、作成段階より症例の病変構造を理解する上で有用であった。

・クリッピングシミュレーションはモデルの湿潤度や実際のワーキングアングル、組織間同士の癒着など臨場感において相違点が多かったが、クリップのサイズ、形状の決定、クリップをかけた後の動脈瘤の形状変化を予測するこ

とが可能であり有用であった。

・コイルシミュレーションにおいて、マイクロカテーテルの誘導留置については再現性が高く、マイクロカテーテルをシェイピングするなどデバイス選択の資料として有用性が高かった。

・脳動脈瘤手術シミュレーションにおける3Dプリンターは有用であったが、血管の性状、固さ、動静脈との癒着などの再現には限界があり課題と思われた。

## 文 献

- 1) 入江恵子：脳動脈瘤コイル塞栓術におけるシミュレーション・ハンズオン，脳神経外科，脳神経外科速報 **22 (8)**: 930-935, 2012
- 2) 泉 孝嗣，宮地 茂，原口健一，他：カテーテルの安定性が得られにくい内頸動脈の paraclinoid 瘤での螺旋状シェイピングの有用性，脳神経血管内治療 **4 (4)**: 250, 2010
- 3) 大石 誠，神宮宇伸哉，字塚岳夫，他：先進的3次元工学技術を応用した脳神経外科手術シミュレーションの開発，新潟医学会雑誌 **125 (2)**: 110, 2011
- 4) 佐久間潤，佐藤 拓，生沼雅博，他：術前シミュレーションにおける実物大立体モデルの臨床応用，新潟医学会雑誌 **115 (11)**: 615, 2001
- 5) 杉本真樹：3Dプリンターによる実物大臓器立体モデ

ルを用いた次世代手術ナビゲーション：生体質感造形 (R) Bio-Texture Modeling (R)，Surgery Frontier **20 (4)**: 458-463, 2013

- 6) 渡辺英寿，自治医科大学脳神経外科：3Dプリンターによるデジタルものづくり入門，脳神経外科速報 **23 (10)**: 1142-1145, 2013

## Comment

科学は新たなテクノロジーの開発に誘導されて進歩し、手術手技も同様である。脳動脈瘤手術においても、合併症回避のための術前シミュレーションは必須である。本論文では、術前の動脈画像を3Dプリンターで再構築し、ABS樹脂モデル、シリコンコーティングモデルを作成し、術前シミュレーションと術中所見につき経験内容を記載している。提示されているモデルは実際の動脈や手術解剖とは異なり、また、科学的解析が行われていないため、実臨床において有用な術前情報を提供することができるかどうか未定であるが、クリッピングの方向、コイルリングのステップなどにおいて有用な情報が得られる可能性がある。今後、解析項目を明確にし、前向きにデータ集積し統計解析を行うことで、新たな手術シミュレーションシステムを開発することが期待される。

野崎 和彦（滋賀医科大学医学部 脳神経外科）