

## 特集 ■ 3D プリンタと VR

## コンピュータ支援脳神経外科手術



渡辺英寿

Watanabe Eiju



益子敏弘

Mashiko Toshihiro

自治医科大学

## 1. はじめに

コンピュータ支援外科という概念は脳神経外科の手術で最も早くから実用化された。1970 年台に発明された CT スキャンの出現を境に脳の病変はそれまでの 2 次元面への投射画像から一気に 3 次元データとして立ち現れた。これを手術中にも 3 次元データとして扱おうとするのは時間の問題であった。術中に観察している部位を CT や MRI 上に表示して、道を間違わないようにするという方法がみだされた。ニューロナビゲータの出現である。

## 2. ニューロナビゲータ

これは脳外科の手術中に操作部位を 3 次元計測し、これを座標変換して CT 画像上にポイントとして提示するものである。興味深いことに 1986 年から 3 年間で、私の論文 [9] も含め三つの論文が相次いで発表された。3 次元計測する方法として、一つは機械式アームを用いる方法 [9]、一つは超音波を用いる方法 [2]、他の一つは磁気勾配を用いる方法 [3] が使用された。当時の状況ではコンピュータの性能が悪く詳細な画像処理はできなかったが、CT 断面上にカーソルで手術中の位置を提示することができた。私はこの時この装置にニューロナビゲータという名称を与え、これが現在も標準名として世界的にも使用され続けている。その後 MRI の出現とともに画像は MRI が中心となり、3 次元位置計測に関しては光学式が標準的となり、コンピュータ技術の広がりとともに美しい 3 次元画像上に手術部位が表示されるようになったが、基本的な機能には大きな変化はなく広く臨床で用いられている。図 1 にその画面を示す。

ナビゲータは近年では脳神経外科学会の専門医訓練施

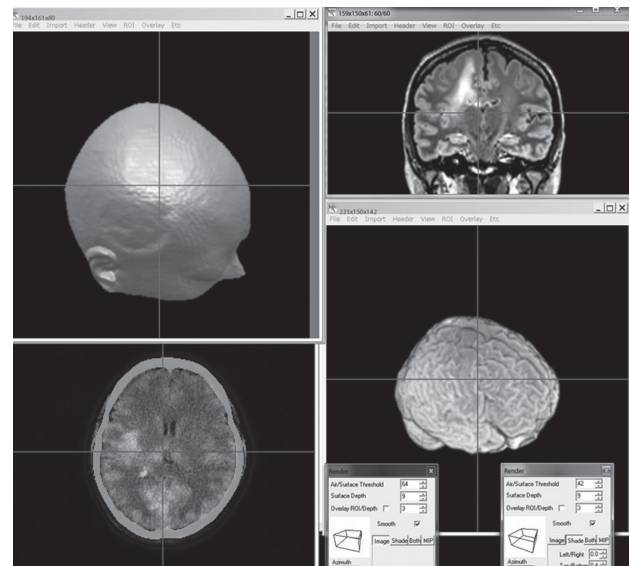


図 1 ナビゲータの画面。現在手術している部位がカーソルで示されている。画像は CT, MRI, DTI, PET など、自由に組み合わせることが可能である。

(口絵にカラー版掲載)

設の施設要件に組み込まれているほど、必要不可欠な手術支援装置との評価を得ている。この技術は脳神経外科を中心に発達してきたが、その最大の理由は手術中は頭部が堅固に手術台に固定されている点と頭蓋内が脳で満たされていて見通しが全くきかない部位であることの 2 つであると思う。頭部の固定は顕微鏡下での手術には不可欠なものなので好都合であった。また、頭蓋内の見通しが悪いためにナビゲータのような誘導装置が渴望されていたためでもある。しかし、問題点も残されている。例えば腫瘍などを除去してゆくと次第に脳が変位してくる。したがって、術前の MRI 画像を基準にナビゲーション

ンを行うと必ず誤差が出る。これを回避するために、変位をコンピュータでシミュレーションするとか、術中MRIを行って画像を更新するなど様々な試みがなされてきたが、完璧な手法は今のところ開発されていない。そのような問題点を乗り越え、ナビゲータは手術支援に不可欠なものとして日々使用されている。

### 3. 3D プリンタの活用

ここ数年、3D プリンタの急速な普及により、コンピュータ画像上ではなく、実際の手に持てるモデルを比較的容易に作製することが身近なものとなりつつある。我々もここ数年で複数の3D プリンタを導入し、様々な形で臨床応用を試み、それぞれの用途に想像以上の有用性を見出してきているので[10]、その一端を紹介する。我々が使用しているのは主として石膏でモデルを作るZ Printer (3D-system 社) とABS樹脂でモデルを作るUP!printer(オーピーティ社)の二つである。

次に述べるように大別して4つの用い方をしている。

- (1) 石膏モデルを用いた頭蓋内病変のモデル
- (2) ひと手間かけた柔らかい脳、中空で柔らかい血管のモデル
- (3) 上の二つを組み合わせた手術訓練用シミュレータの作成
- (4) ABSモデルを中心にした手術用ツールの試作(CAD/CAMとして)

である。これらを順に概説する。

さて、詳細に移る前に我々の使用している画像や機器を提示する。

#### 画像の仕様

- (1) T1 強調画像 MP-RAGE 法  
(TR 9ms, TE 2.86ms, TI 800ms,  
voxel size : 1.1mm×0.8mm×0.8mm)
- (2) TOF-MRA  
(TR 25ms, TE 7ms,  
voxel size : 0.9mm ×0.4mm×0.65 mm)
- (3) CT  
(Base matrix : 512×512×512,  
slice thickness : 0.8mm)

#### 画像処理ソフト

画像処理は Amira® を用いた。CT と MRI は必要に応じて Amira で fusion し、同じ座標系に変換して合成などを行った。

#### 3D プリンタ

- (1) 石膏モデル用として、3D Systems 社 Z Printer®450.

装置の大きさは 1220mm×790mm×1400mm で重量は 193 kg ある。石膏粉末の薄層にフルカラーで印刷・固着したものを積層する方式で、解像度はZ方向に 0.1mm、造形可能な大きさは 203mm×254mm×203 mm である。

- (2) ABSモデル用として、OPT 社製 UP! Plus 3D Printer®. 装置の大きさは 245mm×260mm×350 mm、重量 5kg と小型軽量である。260℃に加熱し融解したABS樹脂をノズルから射出することにより出力を行い、それを 0.15mm 厚で繰り返し積層することで立体を形成する。作製できる最大の大きさは 140mm × 140mm ×135 mm である。

### 3.1 石膏モデルを用いた頭蓋内病変のモデル

既に多くの利用例が報告されている標準的な使用方法である [1,5,6]。我々も多くの症例でこの方法を使って術前シミュレーションを行ってきた [8,12]。Amira で皮膚、骨、脳実質、腫瘍、動脈、静脈を分離・抽出し、それぞれをSTLで出力し、色分けして3Dプリンタに送信する。モデルの設計に当たり、手術に必要な情報が可及的に得られ、かつ無駄のないモデルになるよう心がけた。図2にその例を示す。Aは小脳テントに乗った髄膜腫である。正中から右側だけを造形している。テントが緑、腫瘍がピンクに、静脈が青で着色されている。Bは頭蓋外頸椎の脇にある腫瘍である。腫瘍が緑に、動脈(赤)、静脈(青)が造形されている。この例では、腫瘍を取り巻く重要な血管群の走行がリアルに確認できるので、手術中には予め危険部分の予想を立てながらの切除ができ、心理的にも安定した的確な手術が可能であった。心配しつつ手探りするような作業が極めて少なくなるのは大きな利点である。

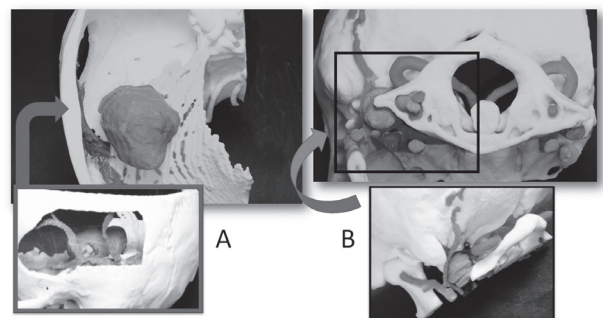


図2 標準的な石膏モデルを示す。  
A:小脳テントの髄膜腫。挿図は横からの像で手術のアプローチのシミュレーション。  
B:頭蓋底の脊椎腫瘍。挿図は斜め横からの像で手術アプローチに近い。  
(口絵にカラー版掲載)

### 3.2 ひと手間かけた柔らかい脳，中空で柔らかい血管のモデル

#### 3.2.1 柔らかい脳モデル

頭蓋内は脳が充満しているため見通しがきかない。したがって，脳外科の手術では，深部の病巣に達するためには常に手前の脳を圧排して手術操作のための通路を作ることになる。しかし，限度を超えて圧排すると脳組織に障害を作り，不要な術後後遺症を作ることになる。このため，脳の圧排には限度があり，勢い狭い隙間から奥を覗くような操作にならざるを得ない。ここに脳の手術の難しさがある。硬い石膏モデルでは脳の圧排を模擬することは不可能である。しかし，これが再現できなければ実用的なシミュレーションにはならない。一般的には予め圧排した形で脳組織をデジタル的に削除したモデルを用いることが多いが，シミュレーションの確度を向上するため，圧排の操作までをシミュレーションできる圧排が可能な柔らかい脳モデルを考案した。実は光硬化樹脂を用いた高価なプリンタでは硬軟様々な硬さの部分を一いちどきに作成できる機種も検討したが，この脳の柔らかかさまでは到達できなかった。

まず上記 (1) の方法で Z プリンタを用いて脳の石膏モデルを造形した。これを原型として，シリコンで鋳型を作り，これに軟質なポリウレタン（エクシールコーポレーション製「人肌のゲル・硬度 0」）を流し込んで脳モデルを形成した。このままでも柔軟性はあるが，マイクロスパーテルで圧排するにはまだ硬いので，感覚的に実際の小脳に似た硬さになるようにさらに内部をくりぬいた。

#### 3.2.2 軟らかく中空の血管モデル

脳動脈瘤では血管をクリップして動脈瘤への血流を遮断して破裂を予防する手術をするが，この手術シミュレーションを目的として軟らかく中空の血管モデルが考案されている [4,14]。我々も自作の方向で検討した [7,13]。

まず ABS プリンタにより動脈の ABS モデルを作製する。これに液状のシリコンを塗布し，これが硬化した後有機溶剤で中の ABS 原型を溶解・除去すると，中空で柔らかい動脈と動脈瘤のモデルが完成する。図 4 に示すようにちょうど手術で行うように，血管を圧排して動脈瘤のネックを展開し，これにクリップをかける操作までシミュレーションできる。特に，血管の枝を押し広げる操作は，固いモデルでも，コンピュータ上の 3D 表示でも不可能なので，柔らかいモデルの価値は高い。図 5 A はその例である。動脈瘤を右側に少

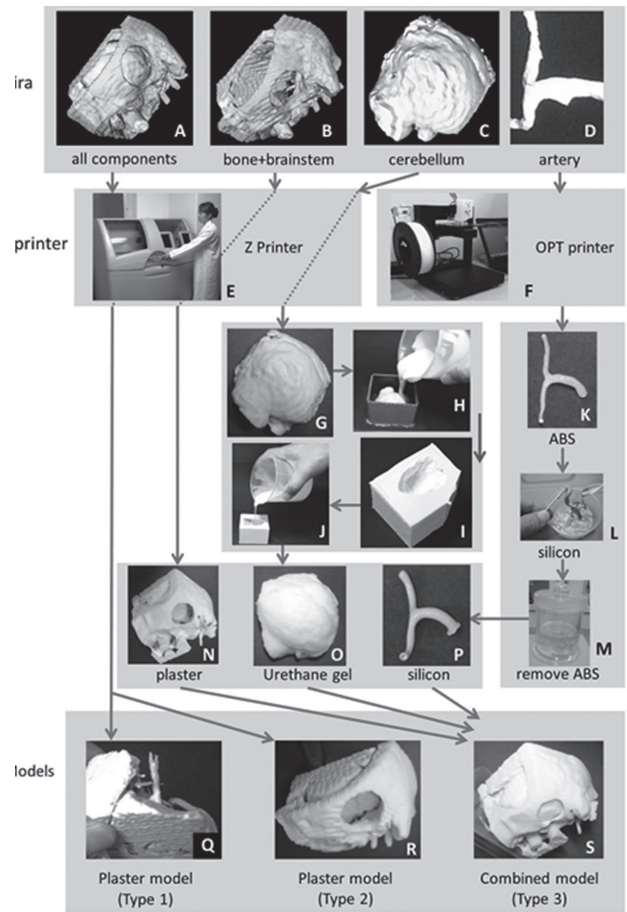


図 3 柔らかい脳，中空の動脈などの作成方の概略  
(口絵にカラー版掲載)

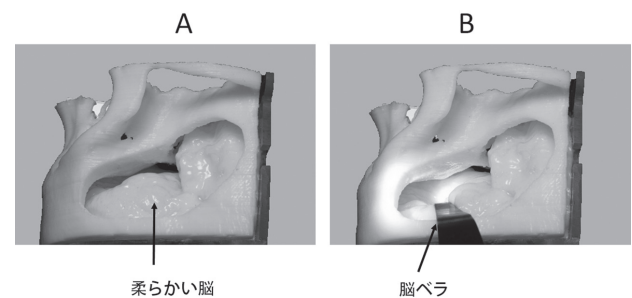


図 4 柔らかいウレタン製の脳を圧排する。A: 圧排前, B: 前頭蓋底を見るため，脳ベラで前頭葉を圧排したところ。  
(口絵にカラー版掲載)

し倒し，動脈瘤を取り巻いて走る細い動脈を押し分けて動脈瘤のネックを露出できることをシミュレーションで示している。図 5 C は複雑な形状の動脈瘤の例で，術前に複数のクリップで閉鎖をなんども試み最適のクリッピング方法 (図 5 D) を試行してから実際の手術に臨むことができた。

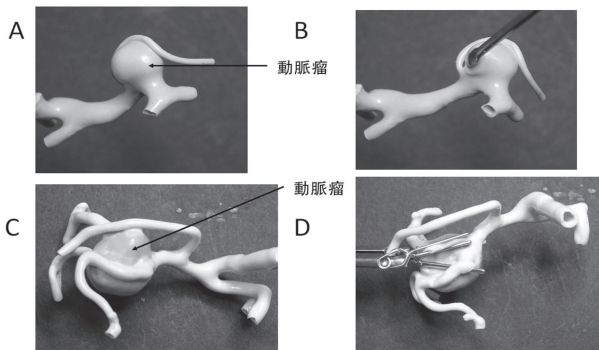


図 5 柔らかく中空の同ミュアクト動脈瘤のシリコンモデル. B は A の動脈瘤をマイクロスパーテルで圧排し、動脈瘤を取り巻くように走行する細い動脈と動脈瘤の間を展開している. C は複雑な形状の動脈瘤. D: のように複数のクリップでクリッピングを試みる術前シミュレーション.

(口絵にカラー版掲載)

### 3.2.3 脳を透明に表現したモデル

透明ポリウレタンまたは透明レジン等材料としたモデルを作製した. これは、脳内腫瘍や、脳組織に隠れる部分を観察したい場合などに非常に有用であった. 図 6 にその例を示す. 斜台の髄膜腫で大きくはないが、後ろからのアプローチではすべてが延髄の背側部に隠れてしまうことがわかった. 極力側方まで術野を展開し、摘出を行った. この際延髄は圧排して動かすことはできないので、圧排モデルは意味が無い. そこで予め延髄を透明にしたモデルで延髄の影になっている部分を観察しながら手術を行い、延髄を触らないようにしつつ安全確実な操作をすることができた.

### 3.3 上の二つを組み合わせた訓練用手術シミュレータ

上記のように作製したモデルを適宜組み合わせ使用した. 例えば、開頭した頭蓋骨・軟らかい脳・動脈瘤を含めた軟らかい脳を組み合わせたモデルを作製し、クリッピング術のシミュレーションに用いた. 図 7 にその操作を示す. これを顕微鏡下で操作し、通常のアプローチとほぼ同様の方法で、シルビウス裂と呼ばれる脳と脳の間を左右にゆっくりと押し広げ深部にある動脈瘤を露出し、これにクリップをかけるまでの一連の操作がシミュレートできる. これは中級の術者にとっては非常に良い練習になることがわかった.

### 3.4 ABS モデルを用いた手術用ツールの試作

CAD(computer aided design) ソフト Rhinoceros 3D® を用いて、設計を行い、このデータから OPT プリンタで造形した. 驚くべきことに、精度強度共にそのままの状態である実際の手術に使用できることが可能である [11].

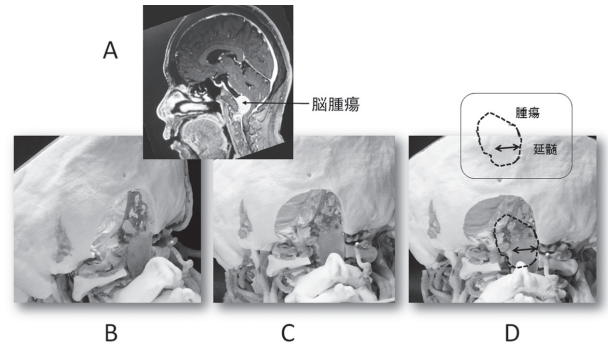


図 6 A: 延髄の前方にある斜台の腫瘍を示す MRI. B,C,D は小脳を透明に、腫瘍をオレンジに、動脈を赤く、静脈を紫に彩色した混合モデルを少しずつ回転して提示した. D の点線にあるように腫瘍が延髄の奥に見られ、両矢印が延髄の差し渡しを示す. B が手術の時に見る方向に近い.

(口絵にカラー版掲載)

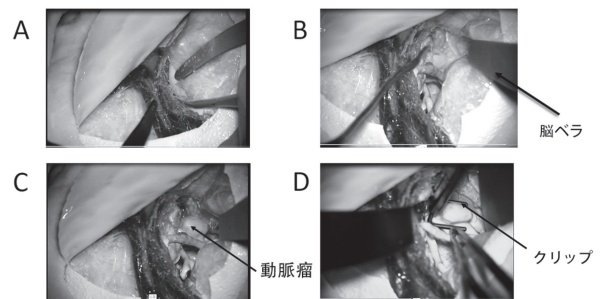


図 7 柔らかい脳と、柔らかい動脈(ピンク)、静脈(紫)で作った顕微鏡下のシミュレーションモデル. くも膜も薄いプラスチック膜で作成した(A). 脳をゆっくりと圧排して(B)その奥にある動脈瘤を露出し(C)、クリッピングを行っている(D).

(口絵にカラー版掲載)

デジタル物作り、簡単そうでいてその意味するところは深い. つまりは、旋盤もドリルもなしで試作品ができてしまうのだ. 私が若い頃、動物実験の実験器具を作る必要に迫られた場合、行きつけの旋盤工の作業所におしかけて、アクリルや真鍮で、この寸法でこの辺りにこのくらいの穴をあけて、ここにねじをきってください、などと頼んだものである. そしてその後 10 万円は下らない工作費用が請求されてくる. ところが 3D プリンタが使えると、なんとこのくらいなら簡単な CAD で 1 時間で設計し、CAD のデータを 3D プリンタに送ると 3 時間くらいで製品が手に入るのである. もちろん費用は材料費以外無料. 極端ではあるが試作にはもう旋盤はいらないと言っても過言ではない. これは物作りの社会構造の変化そのものを表して、ものづくり立国の日本にとってこのようなデジタル加工は人件費をかけずノウハウを直接迅速に反映するので、空洞化で象徴されるものづくりの海外流出を国内に呼び戻す良い契機になるかもしれない. 時代は轟音をたてて変化している. 脳外科も

変化しなければならない。

それらの例をお示しする。

〔第 1 例〕

従来の定位手術枠にナビゲータを取り付ける計画を練った。ナビゲータコントロールの定位脳手術枠である。CT や MRI コンソールでの面倒くさい計算は一切不要。MRI をフレーム無しで撮影してナビゲータに読み込む。頭部を定位脳フレームで固定。ナビ起動。ナビゲータのカーソルを見ながら定位フレームの XYZ 軸を動かして、ナビカーソルがターゲットにあたらしたらそれで終了。やるべきことはナビと定位枠とのリンクのみである。

さてナビゲータを定位枠にどうリンクするかであるが、ナビの反射ボールを定位枠に組み込めば良いことはわかる。ナビの反射球をどうやってフレームに装着するか。テープでとめるようないい加減なことでは正確な穿刺はできない。がっちり定位枠のどこかにナビのターゲットを固着しなくてはならない。従来なら早速機械屋さんに電話するところである。そして試作を注文し 2 ヶ月後忘れていた頃ようやく試作品が到着。しかし、今は CAD がある。あらかじめ用意しておいたボルト・ナットのデータを再利用して 1 時間で設計、4 時間で図 8 のようにプリントが仕上がった。翌日にはプラズマ滅菌して実際の手術に試用した。ところが、別の構造の方が適切とわかり、別の部品を作製した。金額的な持ち出しは自分の労働力以外皆無である。これを外注して試作していたら、無駄な物に 20 万円、作業工程に 2 ヶ月がかかったらう。

〔第 2 例〕

現在開発中の簡易型ナビゲータシステムの部品を制作。一種の治具である。試行錯誤を 3 回重ねて形状が完成した (図 9 左)。プラスチックなのでそのまま利用している。これで最終形と考え、金属で作製したところである (図 9 右)。試作までの費用は自分の人件費のみだから本質的に無料。効率よく金属製品が完成できた。

〔第 3 例〕

光トポグラフィのプローベホルダを頭部に簡単に堅固に自由度を持たせて固定する、相反する仕様を一気に解決するためにヘッドギアを開発している。ラピッドプロトタイピングのまさに神髄。はじめは有り合わせの部品で試作。ここまでは完全アナログ戦略。ともかくだいたい形が決まったので、コンピュータ上で CAD で設計し、3D プリンタで試作した。まず平均的な大きさの頭の MRI を撮像し、その表面データを CAD に取り込む。この頭のデータにフィットするようにフ

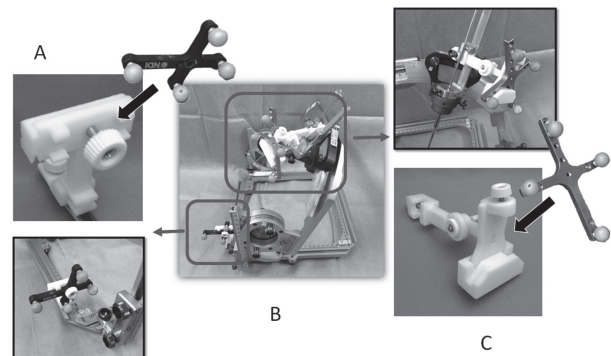


図 8 定位脳手術フレームにナビゲータを装着する部品を ABS 樹脂で作成した。B が脳手術枠で、A、C が装着部品で、それぞれの白い部品が ABS 樹脂製の 3D プリンタ出力。(絵にカラー版掲載)



図 9 ナビゲータの部品を ABS 樹脂で試作。これを十分使用した後、形を決定して右のように金属で最終製品を作成した。(口絵にカラー版掲載)

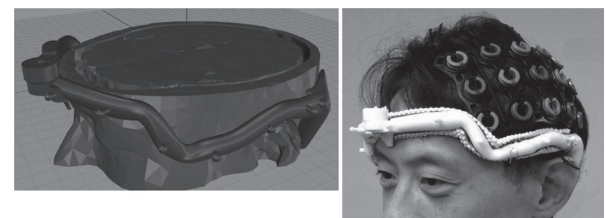


図 10 光トポグラフィのプローベ固定具を試作。右のように実際の頭部の MRI データに巻きつけるようにフレーム(紫の部分)を設計し、左図のようなフレーム(白い部分)を作成した。最終的には量産できないため、3D プリンタの出力をそのまま実用している。(口絵にカラー版掲載)

レームを設計した (図 10 左)。出来上がった試作品を NIRS 検査に試用した (図 10 右)。その後、細かい仕様変更を数回繰り返し、デザインが固まったが、量産できるものではないので 3D プリンタの出力をそのまま実用している。

#### 4. 脳外科医として 3D プリンタに関して考えること

昨今 3D プリンタがマスコミで大きく取り上げられ、なんでもできてしまうような印象がひとり歩きしている。しかし所詮プラモデルである。これで車を作っても乗れるわけではないし、ケーキを作っても食べられるわけではない。決して夢のようなものではない。日常的に

有用な場面がそう多くあるとは思えない。ところが、脳外科の日常臨床の場で使いはじめると、いたるところにこの技術を活かす場面が転がっていることに気づいた。今回お示したような術前のシミュレーション一つとっても、様々な材質を組み合わせればかなり高度なシミュレータも自作可能である。また、実験器具づくり、手術ツールの試作なども短時間で自作できるメリットは計り知れない。自作ということは自分で気に入るようなものを何度も試行錯誤できることを意味する。この方向では夢は大きく膨らんでゆく。外注も良いが、自分の手元に3Dプリンタのある生活は、かつてコンピュータがパソコンとして自分で持てるようになった時と同じようなパラダイムシフトを予感させる。気楽に日常的に使えるようにしておけば、今後の臨床にきっと役立つと確信している。

#### 参考文献

- [1] Cristian Gagnaniello, Remi Nader, Tristan van Doormaal, Mahmoud Kamel, F.R.C.S., Eduard H. J. Voormolen, Giovanni Lasio, Emad Aboud, Luca Regli, Cornelius A. F. Tulleken, and Ossama Al-Mefty. Skull base tumor model -Laboratory investigation. *J Neurosurg* 113:1106-1111, 2010
- [2] Friets EM, Strohbehn W, Hatch JF, Roberts DW: A frameless stereotactic operating microscope for neurosurgery. *IEEE Trans BME*, 36:608-617,1989.
- [3] Kato A, Yoshimine T, Hayakawa T, Tomita Y, Ikeda T, Mitomo M, Harada K and Mogami H, A frameless, armless navigational system for computer-assisted neurosurgery. *J Neurosurg* ,74: 845-849, 1991.
- [4] Kimura T, Morita A, Nishimura K, et al. Simulation of and training for cerebral aneurysm clipping with 3-dimensional models. *Neurosurgery*. 65(4):719-726,2009
- [5] Makoto Oishi, Masafumi Fukuda, Naoki Yajima, Kenzo Yoshida, Machiko Takahashi, Tetsuya Hiraishi, Tetsuro Takao, Akihiko Saito, and Yukihiko Fujii. Interactive presurgical simulation applying advanced 3D imaging and modeling techniques for skull base and deep tumors. *J Neurosurg*. 2013 119:94-105
- [6] Makoto Oishi, Masafumi Fukuda, Tetsuya Hiraishi, Naoki Yajima, Yosuke Sato, and Yukihiko Fujii. Interactive virtual simulation using a 3D computer graphics model for microvascular decompression surgery. *J Neurosurg* 117:555?565, 2012
- [7] Mashiko T, Otani K, Kawano R, Konno T, Kaneko N, Ito Y, Watanabe E. Development of 3-dimensional Hollow Elastic-model for Cerebral Aneurysm Clipping Simulation Enabling Rapid and Low-cost Prototyping. *World Neurosurg.*, S1878-8750,2013
- [8] 益子敏弘, 楊強, 金子直樹, 紺野武彦, 山口崇, 渡辺英寿, 片側顔面痙攣に対する微小血管減圧術の立体モデルを用いた術前シミュレーション, *脳神経外科*, 43(1),41-49,2015
- [9] Watanabe E, Watanabe T, Manaka, S, Mayanagi Y and Takakura K: Three dimensional digitizer (neuro-navigator): A new equipment for CT guided stereotaxic surgery, *Surg Neurol*, 27: 543-547, 1987.
- [10] 渡辺 英寿,3Dプリンターによるデジタルものづくり入門 (その1) 話題の3Dプリンターを脳外科臨床にフル活用, *脳神経外科速報*,23巻9号 Page1014-1016,2013
- [11] 渡辺 英寿,3Dプリンターによるデジタルものづくり入門 (その2) デジタルものづくりの実際, *脳神経外科速報*,23巻10号,Page1142-1145,2013
- [12] 渡辺 英寿,3Dプリンターによるデジタルものづくり入門 (その3) 手術症例に応じた3Dモデルの作製, *脳神経外科速報*,23巻12号,Page1396-1398,2013
- [13] 渡辺 英寿, 益子 敏弘, 手術シミュレーション 3Dプリンターによるデジタルものづくり入門 (その4) 動脈瘤・血管モデルと脳モデル, *脳神経外科速報* 24巻1号 Page90-93,2014
- [14] Wurm G, Tomancok B, Pogady P, Holl K, M.Trenkler J. Cerebrovascular stereolithographic biomodeling for aneurysm surgery. *J Neurosurg*. 100(1):139?145,2004

#### 【略歴】

渡辺英寿 (WATANABE Eiju)

自治医科大学 脳神経外科 教授

1976年, 東京大学医学部卒業, 1980～1985年, 東京大学助手, 1985～1987年, 西ドイツ・エルランゲン大学留学. 1988～2004年, 東京警察病院, 2004年より現職. 専門は脳神経外科とコンピュータ支援外科.

益子敏弘 (MASHIKO Toshihiro)

自治医科大学 脳神経外科 准教授

1985年, 自治医科大学医学部卒業. 1985年から10年間, 栃木県職員として地域医療に従事. 1995年, 自治医科大学脳神経外科, 2003-2005年, Albert Einstein 医科大学留学 (博士研究員) を経て, 2010年より現職. 博士 (医学).