

術前シミュレーションにおける3次元 コンピューターグラフィックスシミュレーション ソフトと手術イラストの比較検討

天野真太郎^{1, 2)}, 山城 慧¹⁾, 福本博順¹⁾, 小林広昌¹⁾, 竹本光一郎¹⁾, 森下登史¹⁾, 安部 洋¹⁾

1) 福岡大学医学部脳神経外科 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 7-45-1

2) 高知大学医学部脳神経外科

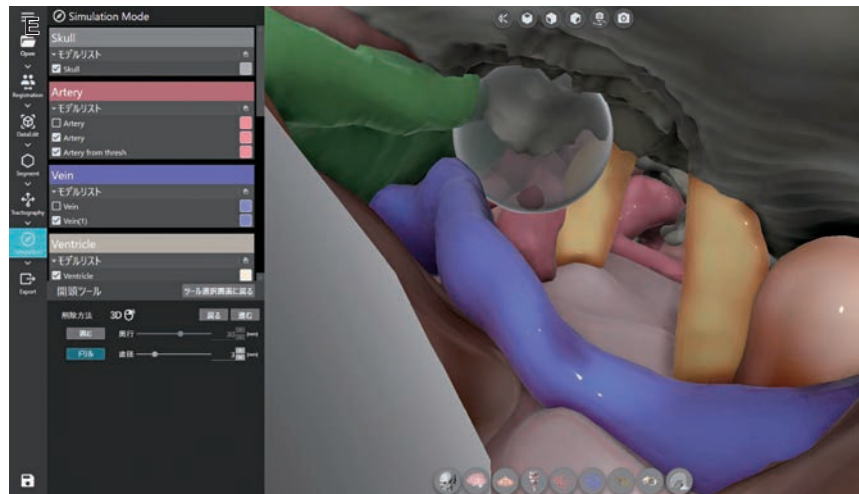
近 年医用画像編集ソフトの発達に伴い、3次元コンピューターグラフィックス（3DCG）画像を用いて手術アプローチを検討する機会が増えている。本報告では従来作成されてきた手術イラストと3DCGの術前検討における有用性を比較した。その結果、脳の変形を含めて3DCGは短時間で実用性

の高い術前シミュレーションが可能で、3次元の構造の理解を得るのに優れていた。一方、手術イラストは脳神経や硬膜などの組織が簡便に表現できる点において優れていた。それぞれの特性を理解し、術前検討においては両者を相補的に組み合わせることが肝要と考えられた。

Key Words

surgical simulation,
illustration,
three-dimensional
computer graphics

Key Slide



(Received June 10, 2024; Accepted June 18, 2024)

I. 緒言

脳神経外科領域の手術では術後合併症回避のために、正確な解剖構造の理解に基づいた綿密な術前計画を立てることが肝要である¹⁾。近年では各種術前画像の digital imaging and communications in medicine (DICOM) データをもとに3次元コンピュータグラフィックス (3DCG) 画像を作成し、手術アプローチを検討する機会が増えている²⁾。しかしながら、本邦で使用可能な医用画像編集ソフトの多くは脳べらで脳を牽引するなどの軟部組織を変形させる表現が難しいため、特に深部病変において3DCGによる手術アプローチの表現には限界があった。この点において従来作成されてきた手術イラストは自由な表現が可能で³⁾、依然として手術アプローチの術前検討において使用されている^{1, 3-6)}。しかし、脳神経外科手術の経験年数によりイラストの正確性に差が出ることや⁷⁾、心理的ハードルの高さからイラスト作成を継続的に行うことに課題が残ることも知られている^{3, 4, 6)}。

一方、医用画像編集ソフトの発展は著しく、Kompath が近年開発した手術検討ソフトウェアの GRID では、computed tomography (CT) や magnetic resonance imaging (MRI) といった複数のモダリティから得られた DICOM データの高精度な融合および組織の自動セグメンテーションが可能であり、さらにそこから作成された3DCGモデルを用いて脳を牽引する、動脈瘤にクリップをかける、といった実践的なシミュレーションが可能となっている⁸⁾。

以前より手術イラスト作成や3DCGモデルの有用性に関してそれぞれ報告されているものの¹⁻¹⁰⁾、

術前シミュレーションにおける手術イラストと3DCGモデルを比較・検討した報告はない。本研究では近年急速に発達している医用画像編集ソフトが術前シミュレーションにおいてどの程度手術イラストの代替となり得るか検討することを目的とし、従来の手術イラストによる術野予想イラストと、GRIDを用いた3DCG画像による術前シミュレーション画像とを実際の術野と後方視的に比較し、それぞれの有用性と課題を検討して報告する。

II. 対象・方法

対象症例

従来の医用画像ソフトウェアで表現が難しかった深部病変のうち、病変周囲に脳神経や硬膜、動脈静脈などの様々な組織が近接している内頸動脈—後交通動脈瘤、鞍結節髄膜腫、三叉神経痛を本研究の対象疾患とした。これらの疾患に対して2022年4月～2024年4月までに当院で初回開頭手術を行った症例から、無作為に1症例ずつ選択して検討対象とした。なお、GRIDで画像を作成するのに十分な画像データが使用できない症例は症例選択の時点で除外した。

手術イラスト作成

手術イラストは過去の報告に基づき、iPad Pro および Apple Pencil (Apple) でデジタルイラストレーションの技法を用いて作成した^{1, 6)}。イラスト描画ソフトウェアはProcreate (Savage Interactive) を使用し、レイヤー機能を用いてラフスケッチ、線画、色塗り、陰影付けを順に行ってイラストを作成した⁶⁾。Procreate 取得費用は無料であった。また、深部病変で病変に至るまでに折り重なる複数の層構造を強調したい場合は、レイヤー機能を用いて正常構造を描き分け¹⁾、手前

の構造物の透過性を上げることで深部病変とその手前の正常構造が一目で理解できるように努めた。

手術イラストは各種術前検査の元画像および Ziostation 2 (ザイオソフト) で描画された脳血管画像を参考にして作成した。手術記録や実際の術野、術後画像はみない状態でイラストを作成したが、frontotemporal approach など実際に行われた開頭方法の情報のみをイラスト作成の参考とした。作成にかかった時間は Procreate 上の記録から判断した。

また、脳神経外科経験年数により手術イラストの正確性に差が出ることから⁷⁾、手術イラストは術前後で日常的にイラストを作成している卒後 13 年目の脳神経外科専門医 (K. Y) が作成し、使用した。

3DCG 画像作成

3DCG 画像は GRID (Kompath) を用いて作成した。術前 MRI, CT, digital subtraction angiography (DSA) などの DICOM データを取り込み、それぞれの画像を融合させた後に自動セグメンテーション機能などを用いて骨・大脳・小脳・脳幹・動脈・静脈を描出した。脳神経と硬膜はソフトでの自動認識が難しく、必要に応じて任意の範囲を手動で描き出した。そのうえで 3DCG モデルを作成し、標準装備されている開頭ツールを用いて開頭モデルを作成した。GRID への DICOM データの読み込みから 3DCG モデルができるまでを画像作成時間として測定した。

軟部組織の牽引に関しては、前頭葉や側頭葉など、牽引したい正常組織を分離したモデルを作成し、部分移動機能を用いて変形させた。3DCG 作成においても実際に行われた開頭方法の情報のみを参考とし、手術記録および実際の術野や術後画

像はみない状態で画像編集を行った。画像編集は日常的に GRID を使用している卒後 12 年目の脳神経外科専門医 (H. F) が行った。

評価方法

手術イラストと 3DCG 画像をそれぞれ実際の術野と比較し、病変と正常構造の位置関係の正確性や術前シミュレーションとしての有用性を評価・検討した。位置関係の正確性に関しては定量評価が難しいため、大きな差異があったかどうかのみを著者らで検討した。動脈瘤であればクリップをかける術野、髄膜腫であれば主に腫瘍摘出を行った術野、三叉神経痛であれば transposition する術野を評価対象とした。

III. 結 果

左内頸動脈—後交通動脈瘤

術前イラストと 3DCG 画像を Fig. 1 に示す。それぞれの画像作成に要した所要時間はイラストで 54 分、3DCG 画像で 15 分だった。

実際の術野との比較では、3DCG とイラストの両者ともにおおむね術野との相違はなく、3DCG では前床突起・内頸動脈・動脈瘤の位置関係が正確に表現され、脳べらでの前頭葉・側頭葉の圧排の程度も良好に再現されていたが、吸引管で動脈瘤を移動させる表現はイラストのほうが実際に近い形で表現されていた。また、脳槽内の動眼神経は硬膜に張り付くようにして走行していたため GRID での描出が困難で、anterior petroclinoid fold といった硬膜の襞もイラストのほうがより正確に表現されていた。

左前床突起髄膜腫

術前イラストと 3DCG 画像を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。それぞれの画像の作成に要した時間はイ

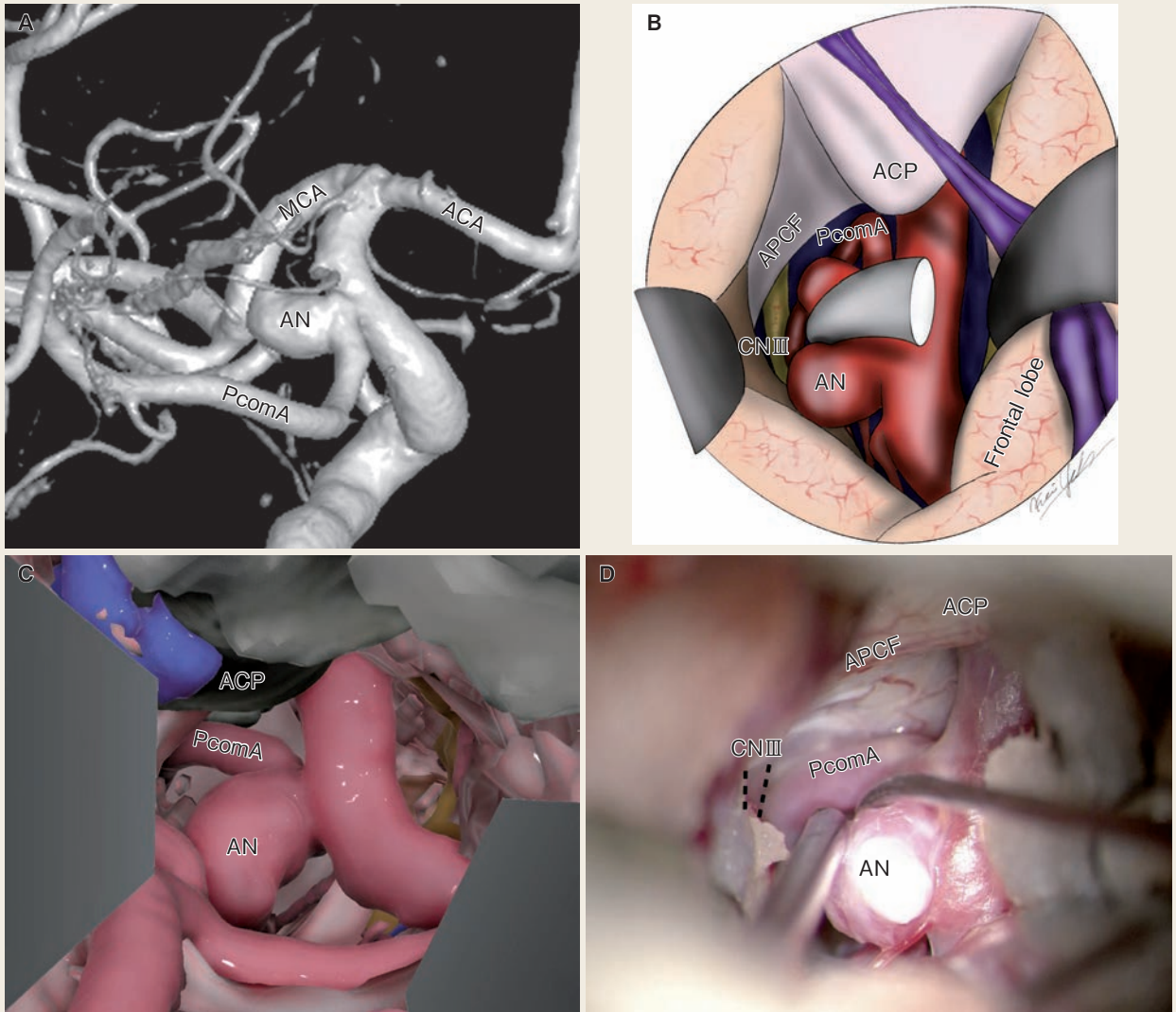


Fig. 1

(A) Preoperative left-side internal carotid artery angiography (posteromedial view) ; (B) a surgical illustration; (C) a three-dimensional computer graphics image; (D) an intraoperative photograph.
 ACA : anterior cerebral artery. MCA : middle cerebral artery. AN : aneurysm. ACP : anterior clinoid process. CN III : oculomotor nerve. PcomA : posterior communicating artery. APCF : anterior petroclinoid fold.
 Dotted line in (D) : Lateral border of the oculomotor nerve.

ラストで52分、3DCG画像で20分だった。

実際の術野との比較では、3DCGとイラストの両者ともにおおむね術野との相違はなく、3DCGでは前床突起と視神経および内頸動脈の位置関係が正確に表現されており、前頭葉を大きく挙上する様子もイラスト同様に実際の術野と近似した形

で表現されていた (Fig. 2)。また、3DCGでは自由に画像を回転できて多方向から病変を観察できるため、術野から見て腫瘍背側の3次元解剖理解が得られやすかった (Fig. 3C, D)。また、3DCGではDSA画像をもとに腫瘍栄養血管がどの部分から腫瘍に入り込んでいるかを明確に示すことが

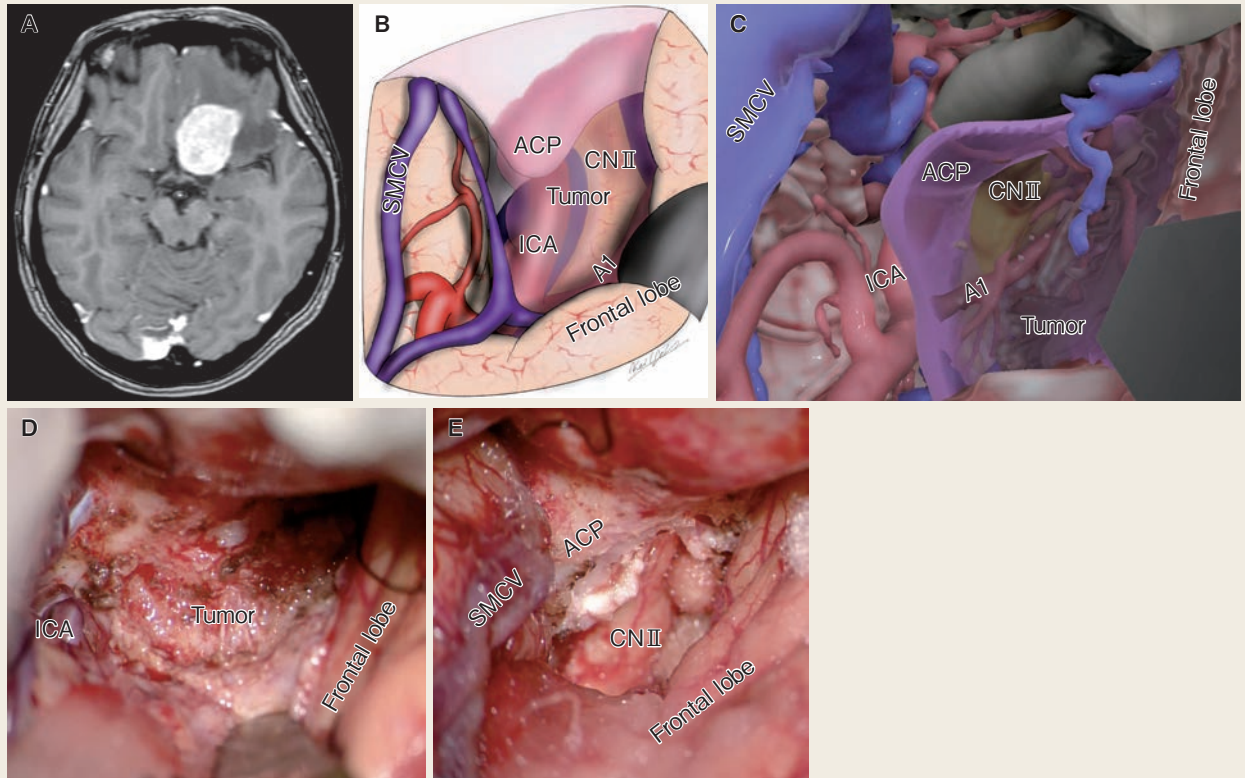


Fig. 2

(A) Preoperative magnetic resonance imaging; (B) a surgical illustration; (C) a three-dimensional computer graphics image; (D, E) intraoperative photographs.

ACP : anterior clinoid process. CNII : optic nerve. SMCV : superficial middle cerebral vein.
ICA : internal carotid artery.

可能であった (Fig. 3, 腫瘍血管は青色で強調).

右三叉神経痛

術前画像・イラスト・3DCG・術中写真を Fig. 4A-D に示す. それぞれの画像作成の所要時間はイラストで 40 分, 3DCG 画像で 17 分だった.

実際の術野との比較では, 三叉神経と責任血管の位置関係や suprameatal tubercle が 3DCG および専門医のイラストの両方で良好に表現されており, 小脳の牽引の程度も術中と相違なく表現されていた. ただし, 上錐体静脈が牽引されている様子に関してはイラストのほうがより実際に近い形で表現されていた. 一方で Fig. 4E で示すように, GRID では開頭ツールを用いて突出した

suprameatal tubercle 削除のシミュレーションが可能で, suprameatal tubercle の影になっている部分の三叉神経の走行を確認することが容易であった.

IV. 考察

作成時間

はじめに, イラストと 3DCG の作成時間については 3DCG のほうが作成時間が短く, 日常診療を行ううえで利便性が高いものと考えられた. ただし, 手術イラストも 1 時間以内で作成されており, 術前検討の一部として作成するのに無理がなく, 継続可能な作業時間と考えられた.

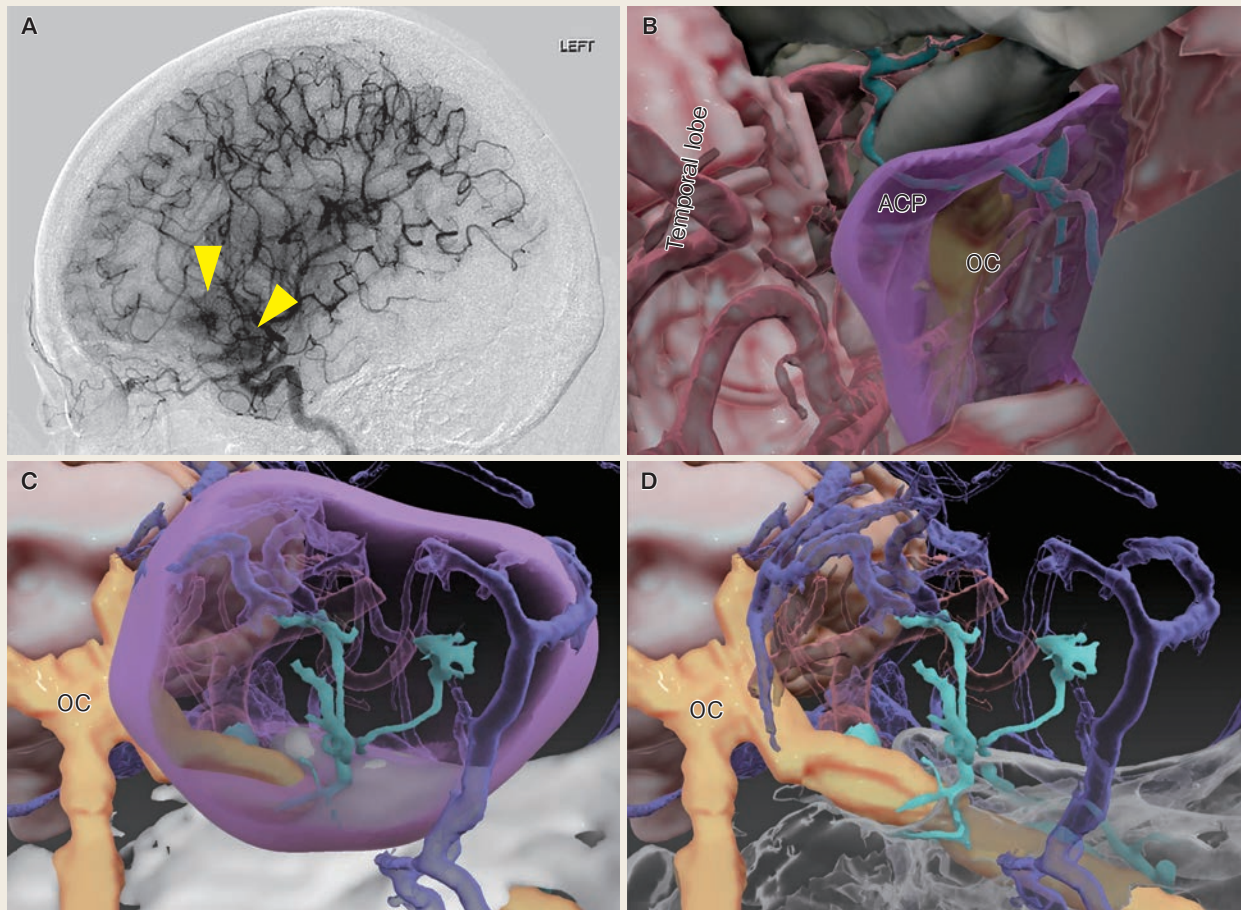


Fig. 3

(A) Preoperative digital subtraction angiography and (B-D) three-dimensional computer graphic images. ACP : anterior clinoid process. OC : optic chiasma. Arrowhead in (A) : Tumor staining.

費用

企業秘密に相当するため本論文で GRID の具体的な価格を示すことはできないが、3DCG と手術イラストの作成にかかる費用に関しては大きな差を認めた。GRID および Procreate とともに使用に際してハードウェアを用意する必要があるが、ソフトの価格差は非常に大きく、費用面における汎用性という観点から見ると手術イラストのほうが多くの施設で取り入れやすいだろう。

術野の描画

次に術野の描画に関しては、動脈瘤を移動させ

る場面や剥離した静脈を牽引する場面など細かな軟部組織の移動に関する表現は手術イラストのほうが優れていたものの、脳や小脳の牽引に関してはイラスト同様に GRID でも良好な表現が可能であった。これは、GRID の部分移動機能が物理特性を無視するかたちで対象物を変形させているため動静脈など細かな解剖構造に関しては変形した際の不正確性が目立つ一方で、脳や小脳など大きな構造物に関しては変形の対象が大きいことから細かな不正確性が目立たないためと考えられた。

解剖構造の描画に関しては、脳神経や硬膜など

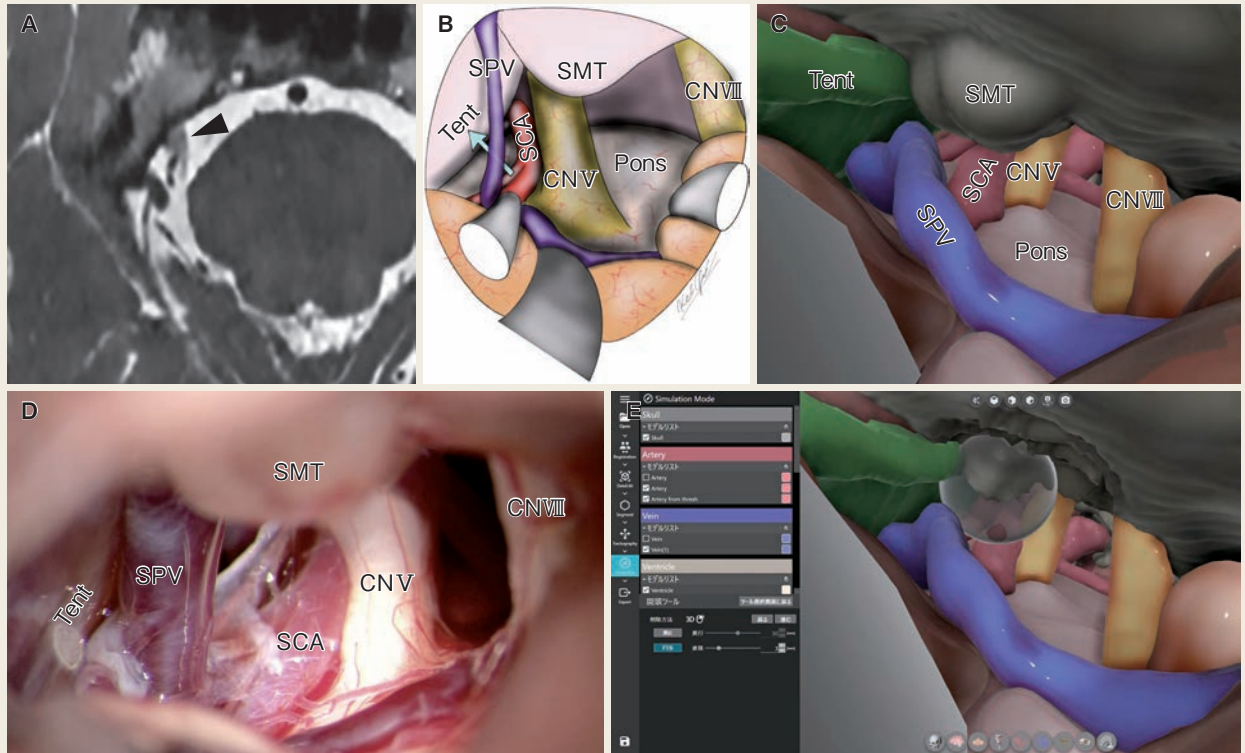


Fig. 4

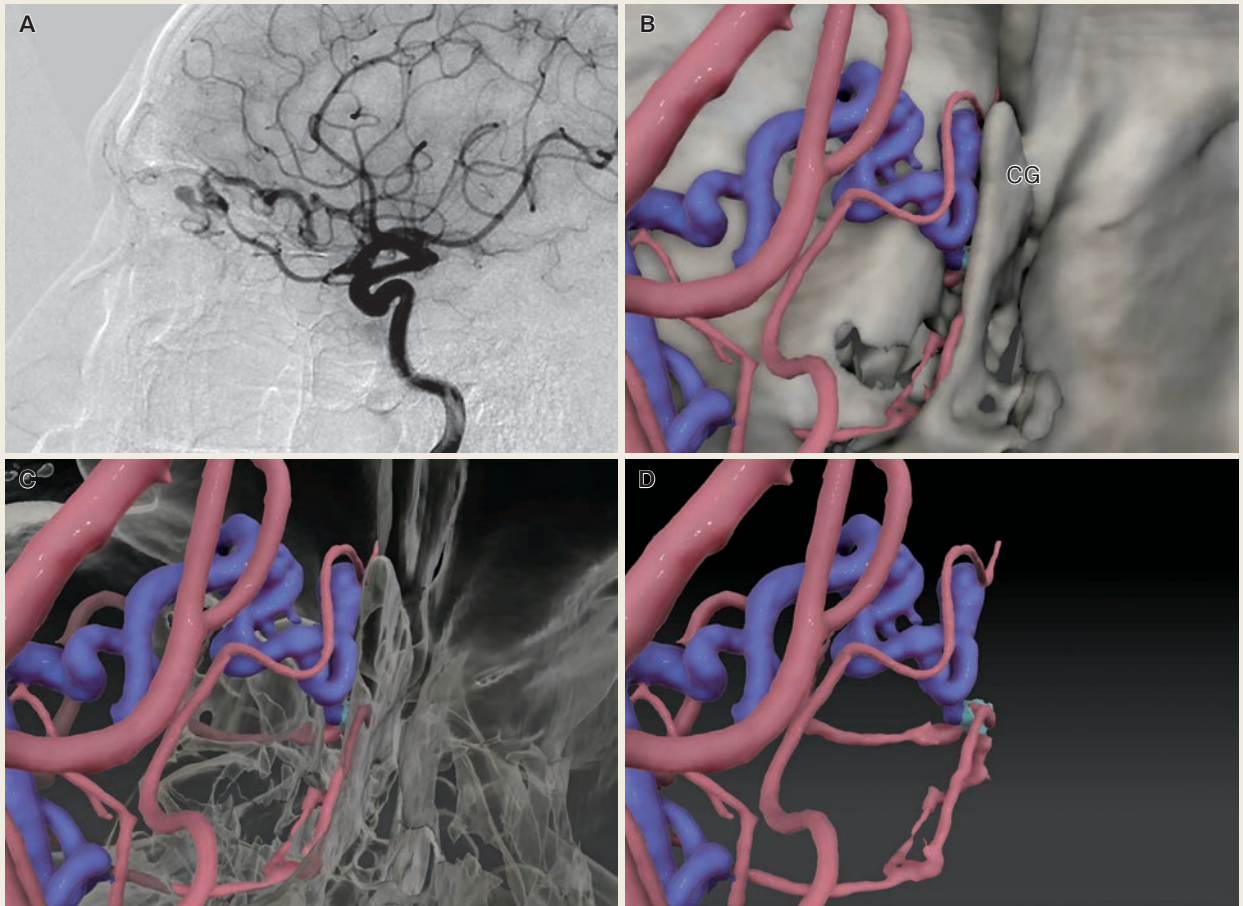
(A) Preoperative magnetic resonance imaging; (B) a surgical illustration; (C) a three-dimensional computer graphics image and (D) an intraoperative photograph. Scenes in (E) depict removal of the suprameatal tubercle.

Tent : cerebellar tentorium. SMT : suprameatal tubercle. SPV : superior petrosal vein. SCA : superior cerebellar artery. CNV : trigeminal nerve. CNVIII : acoustic nerve. Arrowhead in (A) : Trigeminal nerve.

の画像上コントラストが付きにくい構造物はGRIDで自動認識が難しく、手作業での描出が必要であった。イラスト同様に3DCGでも手作業で時間をかければ画像としての完成度は高くなるが、日常診療に負担がかからない範囲の時間で3DCG作成作業を終えようとするところらの解剖構造の描出に限界があり、硬膜の襞や脳神経はイラストのほうがより簡便に表現可能と考えられた。

腫瘍の裏側など病変深部の解剖構造に関しては、3DCGは観察方向の自由度が高く (Fig. 3C, D), また深部骨削除も容易で (Fig. 4E), イラストよりも3次元的構造の把握が容易であった。腫瘍摘出術のように術野の背後に隠れている解剖構造を理

解する必要のある手術では、術前シミュレーションにおいてイラストより3DCGのほうが適している可能性が考えられた。加えて、3DCGではDSA画像を用いることで腫瘍栄養血管の位置を正確に表現することが可能であり (Fig. 3B-D, 腫瘍血管は青色で強調), この点は特に髄膜腫などの腫瘍栄養血管の処理が重要となる手術で大きな利点になると考えられた。さらに、今回の対象症例には含まれていないため参考所見ではあるが、DSA画像をもとに3DCGを作成することで硬膜動静脈瘻におけるシャント部位 (Fig. 5B-D, 青色強調部) を高い精度で描出することも可能で、特にDSAによって大きな情報が得られる疾患にお

**Fig. 5**

(A) Digital subtraction angiography and (B-D) three-dimensional computer graphics images of the anterior skull base dural arteriovenous fistula. In (B-D), images with varying skull permeability are shown in the same patient. CG : crista galli.

いて3DCGの有用性が高いと考えられた。

細かな軟部組織の変形や硬膜・脳神経の描出に課題が残るものの、病変周囲の3次元構造の理解が得られやすいことや画像の作成時間を考えると術前シミュレーションにおいてGRIDによる3DCGの利便性は高く、今回の検討では実用的な側面から見ておむね手術イラストと遜色ない程度の術野の表現が可能と考えられた。

術者教育

本研究では専門医の手術イラストを用いたが、手術教育において手術イラストの有用性は多く報

告されており^{1, 37, 9, 10}、特に専攻医が手術イラストを作成することで術者教育につながることを期待される。一方、本研究で検討した症例に対して専攻医が手術イラストを作成したところ、専門医の1.5～2.3倍のイラスト作成時間を要しており (data not shown)、働き方改革による勤務時間の短縮を求められる昨今ではより効率的な術者教育が求められるのも事実だろう。その点3DCGによる術前シミュレーションは短時間で作成可能であり、また過去の報告でも3DCGにより手術解剖の理解が深まることが示されていることを考え

ると¹¹⁾、働き方改革時代の術者教育には3DCGが有用なツールの一つとなる可能性が考えられた。

限界

イラストと3DCG画像の比較が定量的な比較ではなく、著者らの主観によるところが大きい点が本研究の限界として挙げられる。過去には術前シミュレーションとして作成した手術イラストの正確性を半定量評価している報告もあるが¹¹⁾、本研究は症例数が少なく統計的評価が困難と考えられることや、クリッピング・腫瘍摘出・微小血管減圧術と異なる種類の手術を対象としており同一の評価法で比較することが難しいと考えられたため、半定量評価は施行していない。定量評価の難しい内容ではあるが、今後検討症例数を増やすことでより客観性のある検討につながる可能性が考えられた。

V. 結語

3DCGは細かな軟部組織を变形する表現や硬膜・脳神経の描出に関して課題はあるものの、短時間で作成可能で病変周囲の解剖構造の3次元的理解を得られやすく、有用性が高いと考えられた。加えて3DCGは腫瘍栄養動脈の位置などを直感的に理解しやすく、DSAによって大きな情報が得られる疾患において特に有用性が優れているものと考えられた。一方で手術イラストは脳神経や硬膜などの組織が簡便に表現できる点や、費用において優れていた。それぞれの特徴を理解したうえで必要に応じて両者を相補的に組み合わせる手術シミュレーションを行うことが肝要だろう。

COI

著者全員は日本脳神経外科学会へのCOI自己申告の登録を完了しています。本論文に関して開示すべきCOIはありません。

文献

- 1) 山城 慧 ほか：層構造を意識した手術イラストの作成。脳外誌 28：296-9, 2019
- 2) Saito N, et al: Surgical simulation of cerebrovascular disease with multimodal fusion 3-dimensional computer graphics. Neurosurgery 60: 24-9, 2013
- 3) 馬場元毅：Dr. BABAのメディカルイラストレーション講座：完成度の高い手術イラストの描き方。三輪書店、東京、128p, 2017
- 4) 馬場元毅 大畑建治：より質の高い手術記録を記載するための手術イラストの描き方。脳外誌 28：513-6, 2019
- 5) 西山悠也 ほか：手術イラストにおける深部構造描出の工夫。脳外誌 29：735-9, 2020
- 6) 土屋貴裕 ほか：脳神経外科手術のデジタルイラストレーション作成の有用性。脳外誌 33：50-6, 2024
- 7) 小嶋大二郎 ほか：脳神経外科領域における術前予想イラストレーションと術後イラストレーション製作の教育的、臨床的意義—片側顔面痙攣に対する微小血管減圧術を通じた検討—。日本メディカルイラストレーション学会雑誌 3：52-8, 2021
- 8) 井川房夫 ほか編：医療用3Dワークステーションで学ぶ脳神経外科手術戦略シミュレーション。中外医学社、東京、334p, 2024
- 9) 野田公寿茂 ほか：手術教育のためのデジタルイラストレーション。脳外誌 30：65-8, 2021
- 10) 吉金 努 ほか：若手脳神経外科医が解剖と手術を効率よく学ぶための手術イラストレーション作成法。脳外誌 28：733-7, 2019
- 11) Sugiyama T, et al: Immersive 3-Dimensional Virtual Reality Modeling for Case-Specific Presurgical Discussions in Cerebrovascular Neurosurgery. Oper Neurosurg (Hagerstown) 20: 289-99, 2021

Comparison of three-dimensional computer graphics simulation software and surgical illustrations in preoperative simulation

Shintaro AMANO^{1,2)}, Kei YAMASHIRO¹⁾, Hironori FUKUMOTO¹⁾,
Hiromasa KOBAYASHI¹⁾, Koichiro TAKEMOTO¹⁾, Takashi MORISHITA¹⁾, Hiroshi ABE¹⁾

1) Department of Neurosurgery, Fukuoka University

2) Department of Neurosurgery, Kochi University

The recent development of medical image-editing software increasingly presents opportunities to preoperatively simulate surgical approaches using three-dimensional computer graphics (3DCG) images. In this report, we retrospectively compared conventional surgical illustrations and 3DCG images with the actual surgical field and compared the usefulness of both in a preoperative simulation.

While practical preoperative simulation images created in a short time using 3DCG helped surgeons become familiar with the three-dimensional structures, conventional surgical illustrations offered superior ease of representing tissues (including cranial nerves and dura mater). The characteristics of surgical illustrations and 3DCG should be understood so that the two can be combined in a complementary manner in preoperative simulations.