

脳神経領域における3次元画像解析ワークステーションの有効利用

洛和会音羽病院 脳神経外科・脳卒中センター*

洛和会音羽病院 正常圧水頭症センター**

山田 茂樹***・武澤 正浩*・岩室 康司*・岡本 新一郎*・山本 一夫*・石川 正恒**

【要旨】

昨今の『3Dワークステーション』による3D画像処理技術の進歩を、洛和会ヘルスケアシステムに導入されている3次元画像解析システムSYNAPSE VINCENTを使って紹介する。CTやMRIの断層撮影とコンピュータグラフィックスの技術革新により、2D画像で解剖学的位置関係を学習していた時代から3D画像で人体の中を立体的に可視化できる時代となった。さらに、複雑な画像処理の自動化により解析時間が短縮され、いろいろな用途で臨床応用できるようになった。以前から3D画像は脳動脈瘤など複雑な脳血管の評価に利用されてきたが、今では患者がMRI撮影を終えて外来診察室に歩いて来るまでの間にVINCENTで3Dの脳血管を作成でき、マウスで3Dモデルを動かして、診断や説明に有効利用できる環境にある。また、CTでも膜下出血と診断された時には、そのまま引き続いて3D CT Angiographyを行い、VINCENTで迅速・簡便に破裂脳動脈瘤を発見して、初期対応に当たることが可能である。さらに、緊急手術を準備しているまでの短時間のうちに、術前開頭シミュレーションを行って脳動脈瘤に対する手術戦略を練ることができる有用なツールとなっている。

Key words : 3D画像、ワークステーション、脳神経外科、術前シミュレーション

【緒言】

21世紀の医療の発展にIT (Information Technology) は欠かせない。2000年にITの発展・普及を称した『IT革命』という言葉が流行語大賞を受賞し、同時期より国家戦略として『我が国のIT利用産業が好循環構造を構築し、我が国全体が高い国際競争力を発揮できる社会』を掲げられた。医療分野においては2001年に「保健医療分野の情報化にむけてのグランドデザイン」が公表され、電子カルテシステムの積極的導入・普及が推進されてきた。洛和会ヘルスケアシステムは、全国に先駆けて2001年の音羽クリニックの開設とともに電子カルテを導入しており、当初モデルケースとして取り上げられていた実績がある¹⁾。今からわずか15年ほど前までは、どこの病院でもレントゲンフィルムをシャウカステンにかけて画像診断が行われていたが、今やフィルムレス化は全国に普及し、病院でシャウカステンが光っているところを見かけることはほとんどなくなってしまっ

た。このような電子カルテ、フィルムレスPACS画像診断支援システムなどのブロードバンド化技術と同様に、ITの一つとして3次元 (3D) コンピュータグラフィックスは急速に発展し続けている。3Dコンピュータグラフィックスとは、コンピュータ上で仮想的な立体空間を構成する技術であり、特に映画やアニメーションの分野に浸透しているが、医療分野ではCTやMRIの医療画像を元に『3Dワークステーション』を使って作成された3D画像として認知、活用されている。2000年頃からサイオソフトやテラリコンといった3D画像処理専用ソフトの会社が現れ、広く日本全国の医療機関で導入されるようになり、今では4,000台以上のワークステーションが稼働している。洛和会ヘルスケアシステムでは、富士フィルムメディカル株式会社の『3次元画像解析システムSYNAPSE VINCENT』(以下VINCENT)を導入しており、今回、VINCENTで作製された3D画像について、主に脳神経領域の実例を挙げて紹介する。

【3D画像とは】

まず、ここで述べる3D画像とは、映画館で3Dメガネをかけて立体視で見る3D映画とは異なり、2次元のパソコン画面上で、物体に色や質感をつけ (texture mapping)、光源の種類や位置・数などを設定して陰影をつける (shading) ことによって、あたかも立体的に見える遠近感のある画像を作成する (rendering) ことを指す。このrendering作業を高速かつ高精細に行うことに特化して作られたパソコンを『3Dワークステーション』として、一般のパソコンとは区別して呼ばれている。当初はUNIX系OSを使ったSun Microsystems社製 (2010年にOracle社に吸収合併) のワークステーションが多く、動作環境が悪くて使いづらく、脳血管を3D表示するのに数時間かかっていたが、今では汎用性に優れたWindowsが主流であり、ワンクリックするだけで3秒とかからずに3D表示でき、パソコンに精通していなくても比較的簡単に扱える使用に改善されている。当院に導入されているVINCENTは、細かな色調、質感、陰影、透過性などを簡便に自在に設定して、優れた3D表示が可能である。さらに、画面設定で両眼立体視を選択すると、2つの異なる角度から見た画像が並列で表示され、寄り目にして2つの画像を重ね合わせた虚像を間に作ることで、いわゆる『立体視』も可能である。

【CTやMRIを3Dで撮影する】

CTやMRIの3D画像は、従来の断層撮影による平面の2D画像を元にして作成されているわけではない。(技術的には、2D画像の断面と断面の間の情報を予測して補間処理とスムージングを行うことで3D表示は可能だが、診療に使えるレベルではない。) 撮影時から3D画像を意識して平面ではなく、体積情報を収集する必要がある。

体積情報を収集できるようになった技術として、CTではX線を発する管球と透過X線を受ける検出器が連続して回転するスパイラルスキャンという技術が1990年頃に開発された。その後、検出器を1つではなく横に並べて広い範囲を同時に撮影できる多列化技術が進歩し、より短時間で高画質の体積情報を取得できるようになった。より画質の良い3D画像を作成するためには、元となる撮影画像の『画質』が重要となる。『画質』とはデジタルカメラなどで知られているが、一般的に『空間分解能』×『濃度分解能』×『時間

分解能』で決まる。『空間分解能』とは画素数のことであり、平面画像の画素数のことを英語でpicture elementと表記することからピクセル (pixel) という造語の単位が普及しており、体積データではvolumeの画素数ということでボクセル (voxel) という新たに造られた単位に使われている。『時間分解能』はCTでは検出器の数によって向上する。洛和会音羽病院では2014年時点で、2管球×128列のDual Source CTと64列のMulti-slice CTが稼働しており、最高画質の3D画像を作成するのに十分な体積情報が収集可能である。一方、MRIは3T (テスラ) と1.5Tの2台が稼働しているが、磁場強度と画質の関係は、もう少し複雑であり、見たい対象物の信号値 (signal) とその周辺の見なくてよい対象の信号値 (noise) のコントラスト比 (S/N比) を基準として画質を評価している。S/N比の高い、境界鮮明な画像を得るためには、MRI装置の磁場強度を上げるだけではなく、各種撮像法や撮像パラメーター、計測の加算回数 (撮像時間) などを調整する必要がある。CTと比較して、MRIは圧倒的に撮像時間が長いことがデメリットであり、体積情報を収集するための撮像法では通常の撮像よりもさらに長時間の静止が要求される。MRIの3D撮像法としては、Gradient-echo (GE) 系の3D MPRAGE (Magnetization Prepared Rapid Gradient Echo) やVIBE (Volumetric Interpolated Breath-hold Examination) とSpin-echo (SE) 系の3D SPACE (Sampling Perfection with Application optimized Contrasts using different flip angle Evolution)²⁾、さらに従来から非造影血管抽出に使われる3D TOF (Time of Flight) MRAや3D PC (Phase Contrast) などが挙げられるが、いずれも5分前後の撮像時間を要する。

【3Dワークステーションで3D画像にする】

VINCENTでは、元画像を初期設定で読み込む時点で、煩雑なrendering、shading作業が自動的かつ瞬時になされている。VINCENTの「3Dビューア」アプリケーション (以下アプリ) の3D画像は、初期設定でVR (Volume Rendering) 画像を示しているが、SSD (Shaded Surface Display) 画像やMIP (Maximum Intensity Projection) 画像などへの変更はボタン一つで可能である。VR画像とは、陰影処理を行うことで立体的に見せる最近の3D画像のことであり、元データの輝度毎にグラディエーションを付けて

色を設定し、透過度を調整することで、脳や肝臓などの充実性臓器の複雑な形体を立体的に表現できる手法である。SSD画像とは、対象物の表面データに光を当てた時の距離と角度による反射率を数値化したデータを基に3D画像を作成する技術であり、計算が少なく初期のワークステーションで使われていたが、現在はあまり使われていない。MIP画像とは、日本語で最大値投影法といい、対象物のある方向から見た場合に最も輝度が高いところを投影する技術であり、3D TOF MRAで撮影した血管を観察する方法として最も古くから使われている方法である。3D画像というよりも影絵のようなイメージの画像で、一つの方向からの絵では立体的に見えず、角度を変えて観察することで立体を頭の中でイメージするものであり、演算処理が少ないためワークステーションでなくともMRI装置本体で簡便に作成することができる。造影剤を使ったCT Angiographyでは、MIP画像はVR画像よりも血管壁の石灰化を強調して描出ことができ、広範囲の石灰化の分布状況を観察するのに適しており、またノイズの影響を受けにくいなど利点があることは知っておく必要がある^{3) 4)}。VINCENTの「3Dビューア」アプリでは、初期設定で4分割表示にVR画像と3軸方向のMPR (Multi Planar Reconstruction) 画像が同時に映し出されるが(図1)、VR画像だけではなく、MPR画像を確認しておくことは非常に重要である。MPR画像とは、体積

情報をX、Y、Z軸の平面に分割した断面で観察する方法であり、従来のCTやMRIの原画像を見るような感覚で使われているが、3軸方向のみならず、自由に見たい角度の断面や、断面に厚みを持たせて観察することができる。MPR画像は、VINCENTでは「3Dビューア」アプリ以外に「2Dビューア」や「MPRリフォーマット」などのアプリで使用できる。また、MPR画像の応用でCPR (Curved Planer Reformation) 画像が、血管の狭窄率を計測する方法として使われている。この方法は、細長くて曲がった管腔構造を直線状にトレースして、中心線とそれに対する直行断面を作成することで、連続的な断面積や直径を計測・解析して、狭窄率を診断する方法であり、主に頸動脈や冠動脈のCT Angiographyで使用されている。

VINCENTの基本パッケージに入っている他の有用なアプリとして、「マルチ3D」、「ヒュージョン」、「脳血管抽出」などが挙げられるが、これらはいずれも複数の撮影された画像を重ね合わせて3D画像を作成するものであり、応用編として紹介する。

【3D画像の応用1：複数の撮像を重ね合わせた3D画像】

「マルチ3D」アプリは、別々に撮像した画像を最大で5つまで同一空間に配置して3Dを表示する方法である。实例として、2013年11月に洛和会音羽病院に3T MRI装置 (MAGNETOM

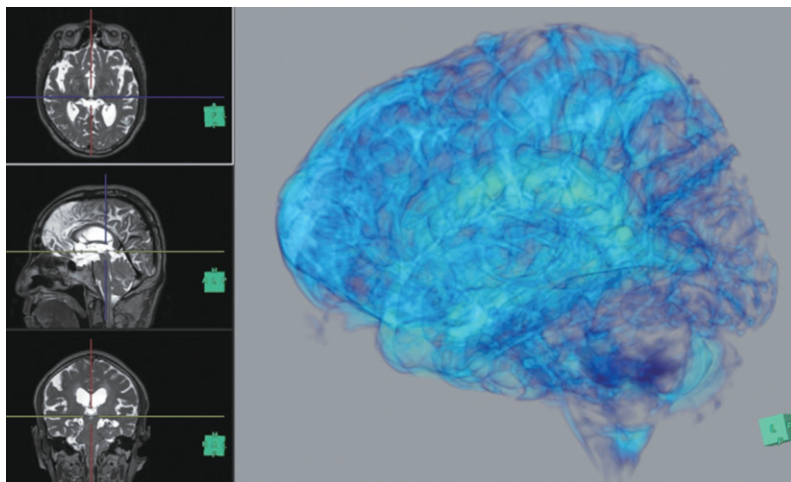


図1 VINCENT「3Dビューア」で表示した3D VR画像(右)と3軸断面のMPR画像(左)
MRI T2強調画像で高信号域を選択して、自動抽出し、色と光、透過度を設定した3D VR画像

Skyra, Siemens社) が導入された時に、筆頭著者である山田の脳をテスト撮影したデータで作成した3D画像を図2に提示する。この画像は、T1強調3D MPRAGE撮像法と3D TOF MRA撮像法で撮影された脳実質と脳血管の体積情報を重ね合わせて3D VR表示したものである。この画像をVINCENT上で自在に移動、回転、透過させることで立体的に構造をイメージすることがさらに容易となった。こ

のサンプル動画は、洛和会音羽病院ホームページの脳神経外科・脳卒中センター内の3D脳動画コーナー (<http://www.rakuwa.or.jp/otowa/shinryoka/nougeka-3d.html>) でYouTubeを介して閲覧できるので、御笑覧頂きたい。わずかな頭の向きや位置のずれがある場合でも自動または手動で位置を合わせられるため、CTとMRIの撮像画像を重ね合わせることもできる (図3)。

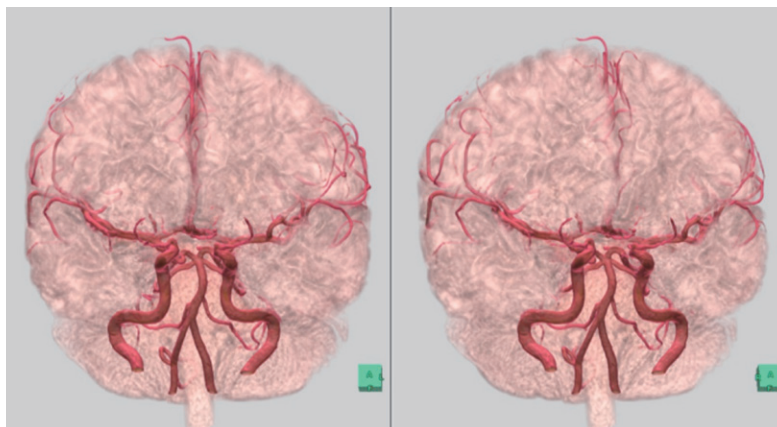


図2 VINCENT「マルチ3D」で、脳実質と脳血管を重ね合わせた3D VR画像
両眼立体視 (寄り目にして、2つの図の間に重ね合わせた立体的虚像を作る)

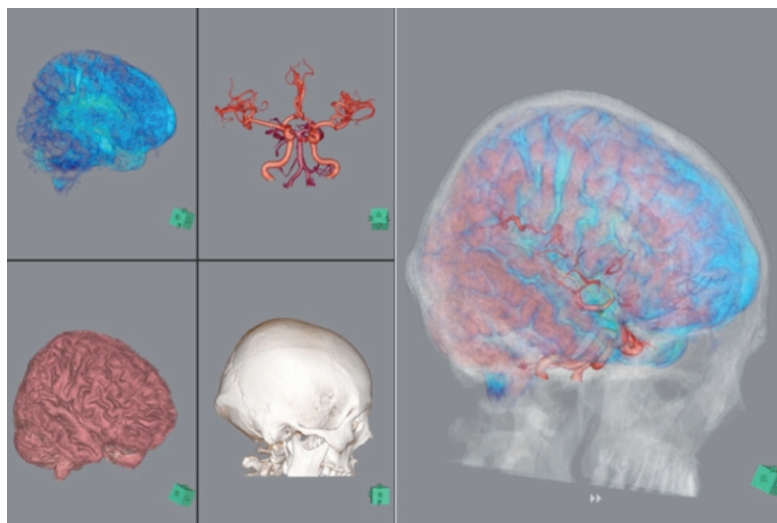


図3 VINCENT「マルチ3D」で、MRIとCTを重ね合わせた3D VR画像
左上隅：T2強調画像から「3Dビューア」(図1)で作成した脳脊髄液の3D VR画像
左下隅：T1強調画像から作成した脳実質の3D VR画像
中 上：3D MRAで脳血管を抽出した3D VR画像
中 下：CTで頭蓋骨を抽出した3D VR画像
右 : 4つの左3D VR画像を透過性を調整して重ね合わせた3D VR画像

【3D画像の応用3：脳血管抽出】

緊急頭部CT 検査で「くも膜下出血」と診断した時の初期対応で最も注力すべき事は、脳動脈瘤再破裂のリスクを減らすことである。できるだけ移動を少なく、出血源である破裂脳動脈瘤を迅速に発見するために、診断に引き続いて即座にCT Angiographyを行えるようになったことは、治療成績向上に大きく貢献し、今や脳神経外科緊急手術を行う多くの病院で整備されている。CT Angiographyは、MRIと比較して頭蓋底部の骨が脳動脈瘤の早期発見の妨げとなることが知られているが、VINCENTでは骨のCT値を自動抽出・削除する方法に加えて、造影後の画像から造影前の画像を減算して得られるサブトラクション3D画像の自動作成を目的とした「脳血管抽出」アプリを作っている。この

アプリはVINCENTの操作に精通していなくとも迅速に脳血管を抽出することを目的としており、くも膜下出血の診断から破裂脳動脈瘤の発見・治療方針決定までを10分以内に行うことが可能となった。

【3D画像の応用4：手術戦略の立案】

皮膚・筋肉、頭蓋骨、脳、動脈、静脈などを個別に抽出し、配色した後に、実際の手術と同じように開頭した頭蓋骨を新たに作成して、脳や動静脈を重ね合わせて表示することで、開頭窓から見えるであろう動静脈の位置関係を術前に視覚的にイメージすることができる。先ほど紹介した「脳血管抽出」アプリでも、破裂脳動脈瘤の診断を行ってから5分とかからずに、図4のように開頭された頭蓋骨から脳動

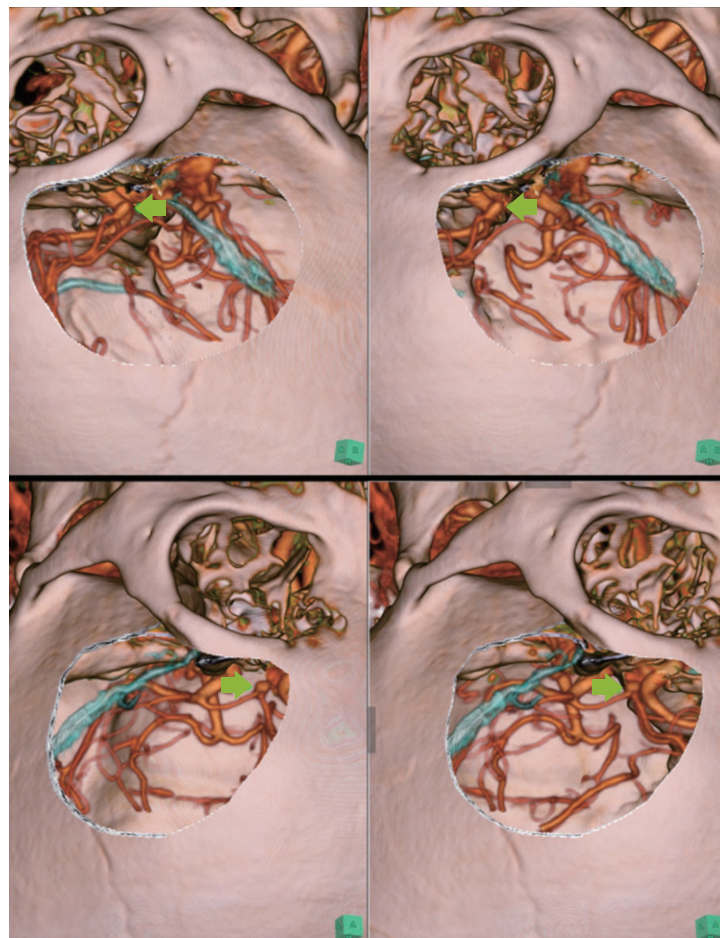


図4 前交通動脈瘤破裂によるくも膜下出血に対して、開頭脳動脈瘤頸部クリッピング術の緊急手術前に行ったシミュレーション画像

脳動脈瘤（黄緑の矢印）を、右前頭側頭開頭（上段）と左前頭側頭開頭（下段）の視野から確認。動脈（赤）と静脈（水色）を両眼立体視でさらに立体的にイメージ。

脈瘤が手術中に周辺血管と合わせて、どのように見えるのか術前に把握しておくことができる。脳腫瘍や脳動静脈奇形などの手術においても、術前MRIにおいてガドリニウムT1強調画像やT2強調、MRAなどを3Dで撮影しておくことで、VINCENT上で画像を組み合わせて詳細な手術戦略を十分に練ることができ、また患者説明用資料としても大変有用である（図5）。最新バージョンの第4世代VINCENTでは、「開頭シミュレータ／テンソル解析」アプリがオプションパッケージとして追加されており、ほぼ全自動で非常に簡単に開頭頭蓋骨と脳血管の3D画像合成を得ることができるようになっている。この「開頭シミュレータ／テンソル解析」アプリでは、拡散テンソルMRI画像から複雑な神経線維の走行を自在に抽出して、よりハイレベルな画像診断が可能となっている。

【結 語】

3D画像は、コンピュータグラフィックスや演算処理技術の発展によって、信頼性が担保されるレベルとなり、診療補助の役割のみならず、最近の医学系全般の国際誌や和誌の図にも3D画像が使用されるようになってきた^{3) 4)}。全てのCTやMRIの医用画像は、患者のために最大活用されるべきであり、患者が最も分かりやすい形で情報提供されることが望ましい。そのために医療者側は、常日頃見慣れてい

る断面的な画像に固執することなく、医学知識の乏しい素人が見てもすぐに理解できるよう立体的な画像を使って説明を行うことで、患者からの信頼が容易に増すことを実感して頂きたい。

【参考文献】

- 1) 具承桓, 久保亮一 and 山下麻衣: 病院組織変革と情報技術の導入 - 洛和会ヘルスケアシステムにおける 電子カルテの導入事例 -. 早稲田大学IT戦略研究所ワーキングペーパーシリーズ 12 : 1-44, 2005
- 2) M. Reichert, J. N. Morelli, V. M. Runge, et al. : Contrast-enhanced 3-dimensional SPACE versus MP-RAGE for the detection of brain metastases : considerations with a 32-channel head coil. Invest Radiol, 48 : 55-60, 2013
- 3) S. Yamada, K. Hashimoto, H. Ogata, et al. : Calcification at orifices of aortic arch branches is a reliable and significant marker of stenosis at carotid bifurcation and intracranial arteries. Eur J Radiol, 83 : 384-390, 2014
- 4) S. Yamada, M. Oshima, Y. Watanabe, et al. : Intramural location and size of arterial calcification are associated with stenosis at carotid bifurcation. Eur J Radiol, 83 : 957-963, 2014

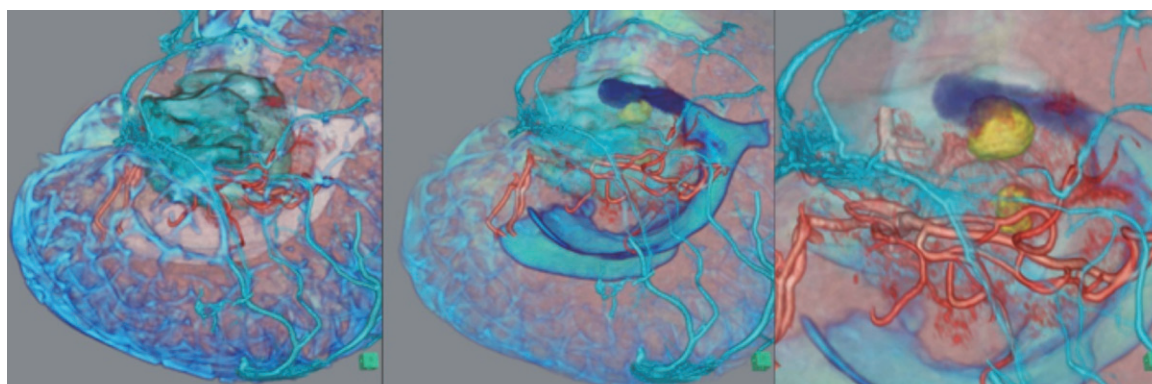


図5 左側頭開頭脳腫瘍摘出術のシミュレーション画像

左側頭葉の脳腫瘍（青緑色）と内部に造影される部分を2箇所（黄色）認める。

脳実質（透過性の茶色）とくも膜下腔内と側脳室内の髄液（水色）に加え、動脈（赤）と静脈（水色）を同時に配置することで、腫瘍と側脳室下角の位置関係や腫瘍栄養血管と正常血管の走行を立体的にイメージして手術シミュレーションを行う。