

計算機生体力学の脳神経外科領域における応用

深作和明[#]、根来真[§]、姫野龍太郎[^]

理化学研究所 生体力学研究特別ユニット[#]

埼玉県和光市広沢 2-1

e mail: fukasaku@riken.jp

春日部中央総合病院 脳神経外科[^]

春日部市緑町 4-5-9

藤田保健衛生大学 脳神経外科[§]

愛知県豊明市田楽ヶ窪 1-98

mnegoro@fujita-hu.ac.jp

理化学研究所・情報基盤センター[^]

埼玉県和光市広沢 2-1

himeno@riken.jp

要旨 脳神経外科、特に、血管内手術の立場から主に血管障害の観点から生体力学研究の臨床応用について述べた。中枢神経系の動きが少ない点は診断機器を用いた三次元構造の取得に向いており、脳神経外科領域は計算機解析に向いている。脳血管障害、特に脳動脈瘤などの分野で流体解析を始めとするさまざまな力学的な情報に基づいた疾患の長期的な結果の推定や治療計画の立案に力学的な検討の有用性が期待される。また、治療のシミュレータや疾患モデルの作成についても言及した。

0. はじめに

神経系の疾患には血管障害、腫瘍、外傷、先天奇形、感染、炎症、変性疾患などがある。これらのうち、血管障害、腫瘍、外傷、先天奇形などに対しては外科的な治療が行われ、脳神経外科で取り扱われる。その中でも、高頻度なものは脳血管障害で、出血性のものとしてクモ膜下出血、脳内出血、虚血性のものとして、脳梗塞がある。

クモ膜下出血は主に脳動脈瘤の破裂によって、クモ膜下腔に出血を生じるもので、生命予後も未だに必ずしも良好ではない。脳動脈瘤は頭蓋内の深部の脳表面を走る比較的太い動脈に発生する、主に分岐部の動脈壁が嚢状に拡大したものである。クモ膜下腔には身体の他の部位と異なり、血管周囲に有力な支持組織が存在しない。

血管を取り囲んでいるのは正に蜘蛛の巣のような柔軟な組織であるクモ膜とその膜に包み込まれた脳脊髄液だけなので、動脈性の出血が生じた場合、大出血となってしまう。一方、脳内出血は、脳表面ではなく脳内部の細い動脈に生じた微細な動脈瘤や血管の壊死の破綻により、脳組織中に出血するものである。

脳梗塞には、脳血管自体に狭窄を生じ閉塞してしまう血栓症と心臓や頸部血管で生じた血栓などが血流に乗って流され、脳血管に引っ掛かり閉塞させる塞栓症、及び両者の合併がある。

これらのうち、クモ膜下出血は、出血源となった動脈瘤の止血処置を早期に行わないと、再出血を繰り返しかねない。血管内手術や開頭術の早期施行が必要な疾患である。

これら脳血管障害には、生物学的な側面の他

に、血流現象自体の関与が考えられ、流体解析を含めた工学的な解析が必要である。

また、中枢神経系の臓器、特に脳組織は、他臓器と比べて呼吸、体動に伴う動きに極めて乏しく、CT、MRI などの診断機器を用いて高精度の三次元情報を比較的容易に手に入れることができる。周囲を骨に囲まれているため、超音波診断には不向きであるが、一方、骨にピンを打つなどすれば、複数の診断機器間で共通のマーカを利用できるなどの利点もある。また、脳組織はその部位ごとに、さまざまな機能を分担している。診断機器から得られた高精度の三次元情報に、局在する機能を重ね合わせ、脳機能に対する影響を少なく抑えて腫瘍などの病変を

摘出することも可能である。

脳神経外科領域での治療は従来から行われてきた頭蓋骨を開いて病変に直接アプローチする開頭術と血管内腔に治療用の細管（カテーテル）を通して治療を行う血管内手術、更に、多方向から標的部位に集中的に放射線を当てて病巣を破壊する集中放射線療法（ガンマナイフなど）が主なものである。

血管内治療はカテーテル技術や DSA (digital subtraction angiography) などの画像技術の進歩、塞栓物質に代表される治療物質の改善などに支えられて、急速な進歩を遂げた。

血管内治療は、X 線透視下に治療が行われ、まず、大腿動脈などから頸部の血管までガイディングカテーテルという比較的太いカテーテル（6 French size 程度 = 外径 2 mm 程度）を留置する。そのガイディングカテーテルの内腔を通して治療に使うための、頭蓋内血管に誘導可能な柔軟で繊細なマイクロカテーテル（外径 2 F = 0.7 mm 程度）を目的部位に誘導して、血管病変を閉塞させたり、閉塞血管を再開通させたり、狭窄部を拡張するなどの治療を行う。

(Fig 1) マイクロカテーテルにはガイドワイヤーというカテーテル誘導に用いるワイヤーを併用するもの（オーバーザワイヤーと呼ばれ、こちらが現在主流）とワイヤーを併用せずに血流に乗せて病変部に誘導するフローガイドカテーテルとがある。言うまでもなく、オーバーザワイヤーの方が自由度が高いが、フローガイドの方が血管に愛護的である。ガイディングカテーテルとマイクロカテーテルの間、マイクロカテーテルとガイドワイヤーの間には血栓の発生を防ぐために抗凝固剤（ヘパリン）を加えた生理的食塩水を微量で還流する。

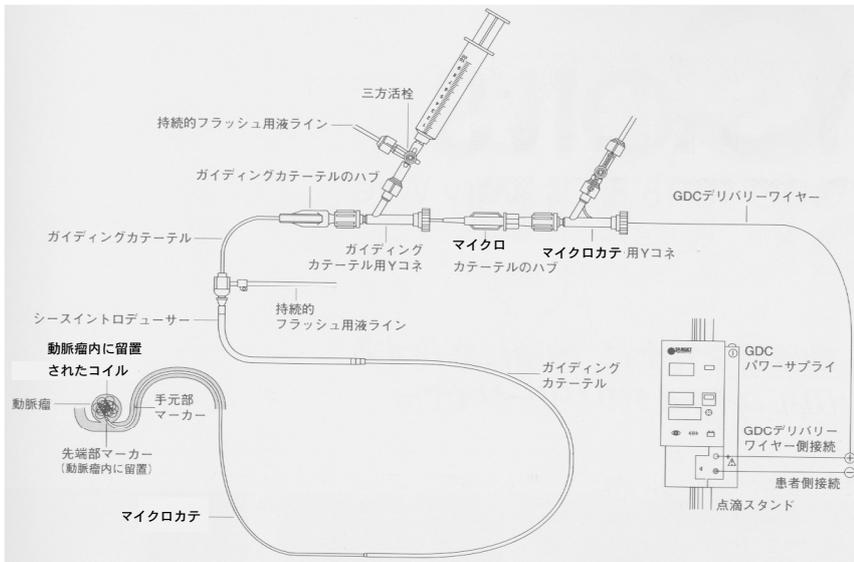


Fig 1 血管内手術の基本的セットアップ

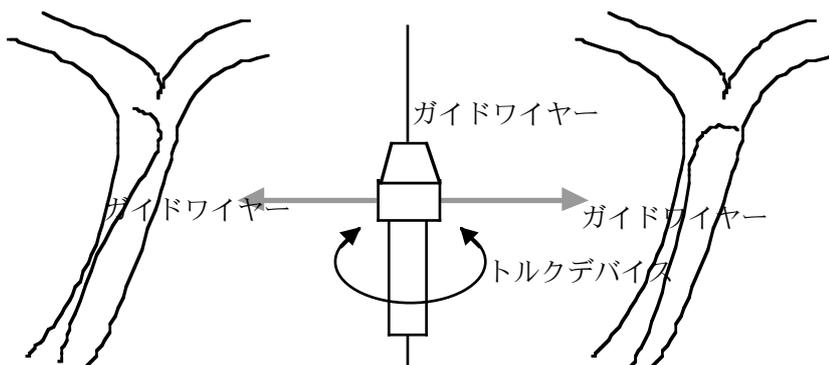


Fig 2 ステアラブルワイヤーでの血管の選択

ガイドワイヤー手元に取りつけたトルクデバイスでワイヤー先端の曲がりの向きを変えて血管を選択する。

オーバーザワイヤーではガイドワイヤー先端に曲がりをつけ、手元に取り付けたトルクデバイスでその方向を変え、血管を選択していく。(Fig 2) そのワイヤーに沿わせてマイクロカテーテルを進め、目的血管に誘導する。

1. 動脈瘤

1-1. 疫学、自然歴

動脈瘤の罹患率としては全人口を対象として2 - 5%, 1 - 9 % 等と報告されている。年間の破裂率としては1 - 5 % 程度の幅がある。偶発的に発見された脳動脈瘤では 20 歳男性の生涯の出血の危険率は16%, 60 歳をこえると5 % という報告や、未破裂に対しての治療が行われていなかった1979 年までのデータの解析から累計的出血率として10 年で10 % 20 年で26 %, 30 年で32 % とする報告がある。現在、日本でも未破裂動脈瘤に対する追跡調査が開始されている。

1-2. 治療法

治療は前述の通り、開頭術と血管内手術である。開頭術では頭蓋骨を外して、脳のしわをわけて病変部に到達して瘤の頸部に金属製のクリップをかけて動脈瘤に流れ込む血流を遮断する(fig 3)。

血管内治療では瘤内にマイクロカテーテルを

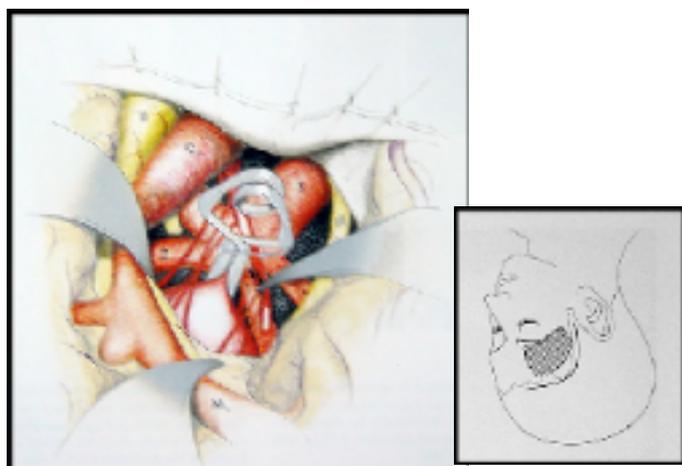


Fig 3 開頭、クリッピング術

右図のように骨を外し、左図のように動脈瘤頸部に金属製のクリップをかける。

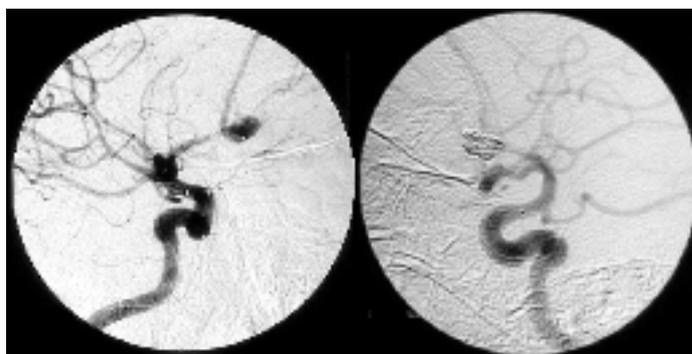


Fig 4 コイル塞栓術（血管内手術）

左が治療前で、プラチナコイルを動脈瘤に詰めると右のようになり破裂が防止される。

誘導し、柔軟なプラチナ製のコイルを留置し、瘤内血流を遮断する (Fig 4)。

いずれも、100 % 安全な訳ではなく、術中破裂や麻酔に伴うトラブルが考えられる。開頭術では目的以外の血管を巻き込んでクリップがかかってしまう可能性や、クリップ先端が周囲の神経にあたって障害を起こしたり、脳組織の圧排に伴って脳挫傷が生じたりすることがある。また、術後の脳血流検査を行うと、血流低下がみられることもある。血管内手術では圧排に伴うリスクはないが、一旦、術中出血が起こると対処法に乏しい。

動脈瘤に対する治療は未破裂であっても、これら、開頭クリップと塞栓術が主なものである。血栓化巨大動脈瘤など、特殊な動脈瘤では近位血管の閉塞などの治療を行うこともある。

1-3. 治療適応

治療に全くリスクがないわけではない以上、治療に当たっては、その必要性を熟慮しなければならない。特に、未破裂動脈瘤では、一旦、破れた場合のリスクは小さくないが、治療で合併症があった場合、元々は全く健康だった人に治療によって障害を起こしかねない訳であり、治療適応の決定は慎重であるべきと考えられている。

脳動脈瘤には破裂しやすいとされる発生部位が知られており、脳底動脈分岐部や前交通動脈の動脈瘤には破裂のリスクが高いと言われる。また、瘤の形態が球状で表面の滑らかなもので

は破裂の可能性は低いと考えられており、予防的治療の適応になりにくい。一方で、分葉状のもの (Fig 5) や、瘤から更に瘤が生じているもの、頭蓋内の構造物 (硬膜など) により変形しているものなどは破裂のリスクが高

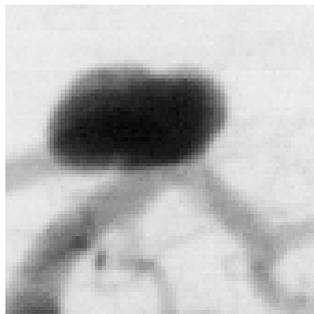


Fig 5 分葉状の動脈瘤

いと考えられ、積極的な治療が勧められる。また、大きさも問題とされ、現時点では 10 mm 以上の径のものが危ないとされるが、このような検討は動脈瘤の絶対的なサイズだけでなく、発生母地となった親血管の径との関連を併せて検討する必要がある。

未破裂動脈瘤の治療適応は、以上のような限られた主に疫学的な条件から検討され、年間 1-2 % とされている。しかし、一人ひとりの患者管理において必要であるのは、自分の動脈瘤がハイリスクかどうか、である。疫学だけでなく、個々の動脈瘤に於ける血行動態が判明すると、壁にかかる力を推定、動脈瘤の予後判定、治療適応の検討に有用となることが期待される。

そのため、最近臨床的に普及してきた三次元 CT 血管撮影 (3D CTA) や三次元 MR 血管撮影 (3D MRA) などから得られた血管の三次元情報に基づいて計算機流体解析を行うことを試みてきた。3D 画像から血管構造を抽出し、三次元構造のファイルに変換、CFD に渡し、流線、shear stressなどを計算している。

1-4. 流体解析

前項の通り、発生してしまった個々の動脈瘤に関しての破裂の可能性の検討には十分な情報

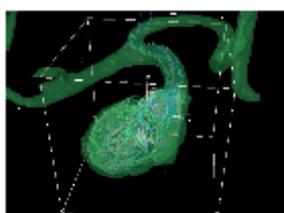


Fig 6 MRA からの CFD CG で描いたコイルが瘤内においてある。

がない。そこで、計算機流体解析による壁にかかる各種の力の計算に期待が集まっている。

計算に当たっては当初は 3D CTA, MRA の画像を直接使うことを試みた (Fig 6)。診断機器側で再構成間隔を変えるなど、疑似的に解像度を上げる試みはしたが、CFD を満足させるだけの解像度が得られたとは言い難い。このため、血管構造の中心線を計算し、計測された径に拡大、平滑な血管構造を構築しての解析を試みた (Fig 7) ところ、良好な結果が得られた。本法には動脈瘤や狭窄性病変の自動診断への進展が非常に強く期待される。と、同時に血管を円筒状の構造とする前提が入ってしまうため、病的、或いは生理的な血管の変形を必ずしも反映できるとは限らない。また、血管の分岐部や合流部の内腔に突出して構造がうまく反映できるかも問題である。

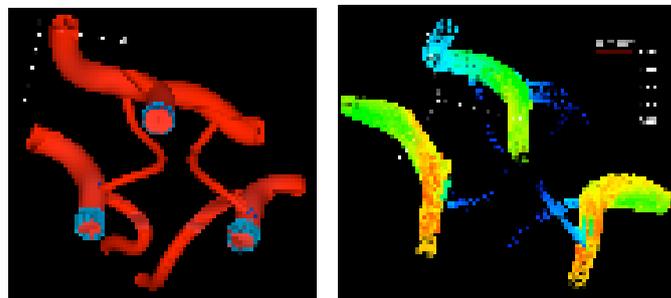


Fig 7 中心線を拡大して作成した Willis ring 周囲の血管構造 (左) とその解析結果 (右)

計算機解析に当たって必要なものには、血管の三次元構造の他に、流入部の流速及びその分布などの境界条件が挙げられる。

既存の診断機器から得られるものの代表は超音波 Doppler 法による計測であるが、中枢神経系では周囲が骨構造に囲まれているため、通常の Doppler 検査は困難である。側頭部の骨の菲薄部からの検討は可能であるが、高周波数の超音波が使えず、解像度の面で満足すべきものを得るのは困難である。脳を栄養する血管は二対四本あり、内頸動脈を椎骨動脈である。このうち、椎骨動脈は頸椎の血管孔を通るため、超音波検査は必ずしも容易ではないが、頸動脈は体表から触知可能で、超音波検査も容易であ

る (Fig 8)。



Fig 8 頸動脈の超音波検査

また、頭蓋内血管に誘導可能なマイクロカテーテルを通して誘導可能なドップラープローブが開発 (Fig 9) されており、透視などと組み合わせれば、頭蓋内血管の流速の時間変化をリアルタイムで観察することも可能である。プローブ自体がある程度硬いため、全ての血管を対象とすることは困難であるが、近位部であれば、ほぼ目的の血管の計測が可能である。



Fig 9 Doppler Wire (FloWire) による計測
左の矢印部分に Doppler の Probe が誘導されており、右のような流れの波形が得られる。

超音波検査で問題となるのは、三次元情報が得づらいこと、検査担当者の技量に依存する部分があることなどであるが、中でも大きな問題となるのはプローブと血管との関係である。Doppler 法を用いる以上、計測に当たって、血管とプローブとの成す角度は計測結果に大きく影響を与えるが、その角度を正確に計測する有効な方法がない。Probe 自体に三次元位置検出器を装着し、データ収集後に再構成するなどの解決策が考えられる。

MR 装置を用いた流速計測では phase contrast 法を用いることが多い。一般的な MR 装置での PC 法では空間解像度や VENC (velocity encode) の調整に若干の難がある。

MR を用いた流れの可視化には tag 技術を用いた方法もある。目的とする血管を拭くんだ面に presaturation pulse を打ち、心拍に同期させて画像を収集し、presaturation によって信号抑制された流れを追いかける方法 (Fig 10) で、三次元収集すれば三次元的な流れが得られる。本法では presaturation 面内の流れの観測が困難である。

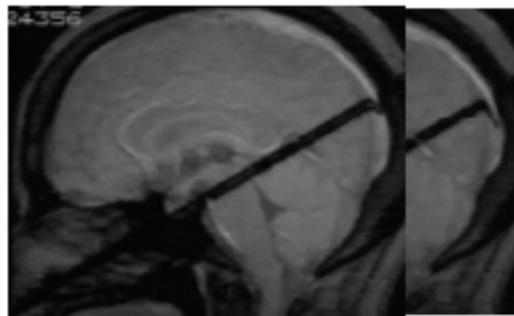


Fig 10 Tagging による流れの可視化
Presat pulse によって作られた上矢状洞部の低信号 (黒いバンド) が流されている。

流れに影響を与える要素の一つに重力も考えられる。現在の診断機器は臥位での検査が前提となっている。しかし、ヒトの主な生活は立位で行われている。そこで、立位での血管撮影の試みも開始している。静脈系の flow pattern には若干の差異がみられているが、今後更に症例を増やしての検討が必要である。

脳動脈瘤の治療には瘤内塞栓術の他に主に巨大動脈瘤に対して行われる親血管或いは近位血管の閉塞がある。巨大動脈瘤は単に巨大であるだけでなく、血栓化した分厚い血管壁を伴うことが多い。

多くの場合、このような治療は効果が期待されるが、術後に生ずる flow pattern の変化は事前の閉塞試験などで検討される。試験閉塞をしたままで血管の三次元情報を得ることは必ずしも容易ではないため、CFD での検討に期待される。

1-5. コイル塞栓術の問題点

瘤内塞栓術で使用されたコイルは必ずしも長期的に安定しているとは限らない。充分量 (動

脈瘤内腔の体積の 20 -30 %) を詰められた場合には、長期の安定が期待されるが、それは手技的には必ずしも容易ではない。充分量でなかった場合、長期的にコイルが圧縮されて、内腔が再度開いてくることがある。これはコイルコンパクションと呼ばれ、本治療の問題点の一つである。また、極めて稀ではあるが、長期的に塞栓後のコイルが瘤外、親血管側に脱出することがあるとの報告もある。コンパクションではないが、瘤内でのコイルの移動の結果であると推定される。このような長期的な安定性を検討するには、塞栓後の瘤内のコイルの三次元構造を知る必要がある。理研保有の micro CT にて検討したところ、限定的ながらコイル断面像を得ることができた。しかしながら、コイルはもともと X 線を通さないように設計されたものであり、X 線を用いた検討には不向きである。今

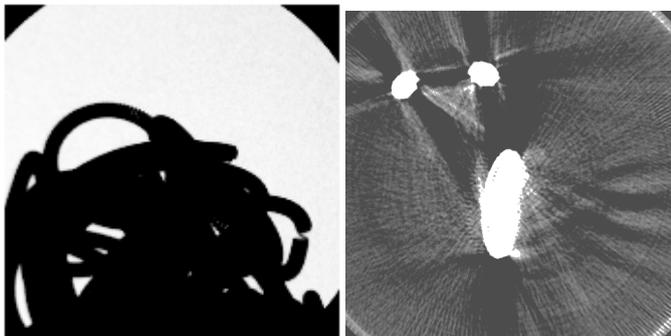


Fig 11 MicroCT での Coil の観察

右図のようなコイルの破損が認められた。断面画像（左）ではコイルの存在は確認できるが、十分な構造が得られなかった。特に、コイルが大量に存在する断面では有効な断層像は得られなかった。

後 X 線出力など検討して X 線 CT での検討を続ける必要があるが、併せて、他の方法で三次元情報取得を検討していく必要がある。なお、本検討には、クモ膜下出血で発見された破裂動脈瘤に対する塞栓術後、他の原因で死亡した症例の病理解剖で得られた動脈瘤を用いた。塞栓術自体はスムーズに行われたにもかかわらず、予期しなかったコイルの損傷が発見された

(Fig 11)。

コンパクションへの対策として、親水性ゲルを巻き付けて、それが膨潤することで内腔を埋めるコイルや炎症を起こして線維性の物質で内腔を満たしてしまおうとするコイルなどが開発されてきているが、現時点では、従来のコイルが治療の主流と考えて良い。このような単なるプラチナだけのコイル (bare coil と呼ばれることが多い) は血栓性はほとんど期待できないとされる。やはり、塞栓術後のコイル構造と内部流れを検討する必要がある。

1-6. ステント療法

今後の動脈瘤の血管内治療にはステントの利用に大きな期待がかかっている。ステントは管腔臓器の内腔狭窄に対する治療法の一つとして開発された。網目状に加工した金属の円筒で、それを主にはバルーンで拡張して内腔に残し、管腔構造を維持させるものである。従来は上記の通り狭窄性病変に対して用いられてきたが、ステントのストラットによる整流作用や side neck な動脈瘤に対する neck plasty など、今後、脳動脈瘤に対する治療への発展が多いに期待される。CG で描いたものではあるが、ステントを置いた血管、動脈瘤の流体解析も可能である。

ステントは頸部が広くコイル塞栓術に向かない動脈瘤に対し、コイルの逸脱を防ぐためにも使われる。動脈瘤頸部にステントを留置、その編み目越しに瘤内にマイクロカテーテルを誘導して塞栓術を行えば、

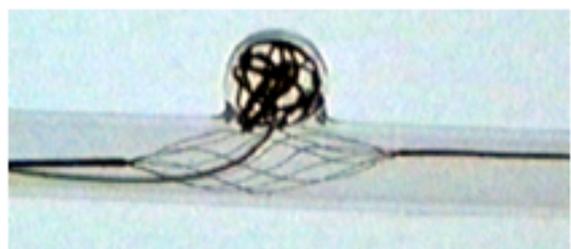


Fig 12 マイクロバスケット

頸部の広い動脈瘤でコイルの逸脱を防ぐために開発された。図のモデルのようにコイルを支えて wide neck であっても、コイル塞栓術を安全に行えるようにすることができる。

安全なコイル留置が可能となる。このようなネックプロテクションテクニックの為にマイクロバスケットを開発した (fig 12)。このマイクロカテーテルを通過できるバスケットは一時的に頸部を形成し、コイルを安全に留置するために開発されたが、さまざまな利用法があるため、現在は急性期脳塞栓症での血栓の破砕、回収や異物（主に逸脱したコイル）の回収を目的に市販されている。

1-7. 血管内治療のシミュレータ

血管内治療は脳に触れる必要のない優れた治療法ではあるが、一旦トラブルが起こると対処が困難である。開頭術が術野を広く確保し、容易に近位血管閉塞などを行えるのに比べると血管内治療ではそのような対応は必ずしも容易ではない。そのため、事前に十分な治療方針の検討が必要である。また、開頭術では助手として参加して顕微鏡下手術を徐々に体験していくことが可能であるが、血管内手術では用いられる道具はマイクロカテーテルとガイドワイヤーのみであり、初心者トレーニングも必ずしも容易ではない。これは、シミュレータを開発すれば解決が可能である。我々は患者画像を用いた

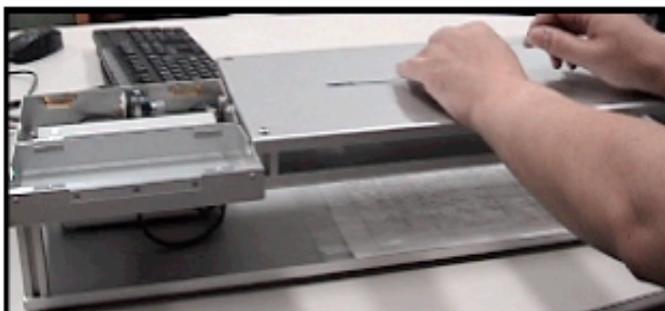
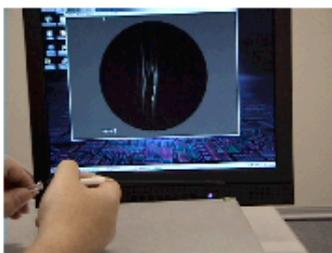


Fig 13 ガイドワイヤーシミュレータ

上図のような患者血管（垂直の二本の線）中を仮想ワイヤーが進んでいく。仮想ワイヤーは下図のような入力装置によって操作される。

シミュレータを開発した (Fig 13)。患者画像の高輝度部分を血管とし、その内腔に仮想ワイヤーを移動させることとした。術者の操作は専用の入力装置を作成し、ガイドワイヤー操作を模すこととした。

血管内手術において必須となる透視装置に関しては一般的な透視装置に準じたさまざまな視点の切り替えなどは既に作成しており、C Arm、テーブルの動きに関するシミュレーションは完了している。

仮想ワイヤーはワイヤーの弾性を考慮に入れて変形するように設計されている。現時点では、血管壁との摩擦は考慮していないが、元々、ガイドワイヤー、特に潤滑な親水性コーティングを施された最近のワイヤーでは、そのような摩擦はごく小さい。むしろ、ワイヤーを通すことで生じるうる血管の変形が問題であるが、血管などの力学的特性の情報不足していることもあり、現時点では、対応していない。

血管内手術はマイクロカテーテルとガイドワイヤーの組み合わせで施行される。今後はこのシミュレータもカテーテル、ワイヤー両方の組み合わせたシミュレーションに進展させる必要がある。

一方、今回作成した入力装置では高精度で術者の操作を拾い上げているため、無菌性を維持できれば、術中の操作を記録することも可能である。こうしてサンプリングしたワイヤー操作と術中の透視画像を併せて収録すれば、ちょうどフライトレコーダのように術中操作を記録することができ、繊細な、難易度の高い術中操作を再現したり、万が一トラブルが生じた時の原因の検討などに利用可能となる。

また、このような入力装置と actuator を組み合わせれば、遠隔治療も期待できる。既に、virtual reality 分野で使用されている haptic device, PHANTOM を組み合わせた遠隔操作の試みに成功している。標準型の PHANTOM を master device とし、ジンバルの回転をも再現できる PHANTOM 6DF を slave device とした。Master device のジンバルをトルクデバ

イスとし、slave 側のジンバルでトルクデバイスの操作を再現、ガイドワイヤーを操作、ワイヤーの反力を mater 側に提示するようにした (fig 14)。



Fig 14 PHANTOM を組み合わせたガイドワイヤー遠隔操作装置

左の PHANTOM を操作すると右の PHANTOM 6DOF がその操作を再現する。

2. 脳内出血

脳内出血に対しては、かつては開頭血腫除去術が積極的に行われて時代もあった。しかし、本疾患では機能障害が出血による脳組織の損傷でほとんど規定されてしまう。このため、近年では、出血源となる血管病変に確認が必要な場合（皮質下出血など）や血腫を除去しないと生命に大きな危険が予想される一部の小脳出血などを除いては、系統術が行われることは少なくなった。

血腫に対する手術の目的には、血腫による圧迫をとることでの機能的な回復を早めることも期待される。であるが、そのためには、侵襲の大きな開頭術を用いなくともコイン大の孔を頭蓋骨に穿ち、そこから数 mm 径の針を血腫に刺入して吸引除去する方法でも十分な効果が期待できる。目標部になるべく脳に負担をかけず、確実に針を誘導するために、定位脳手術 (fig 15) が利用されるようになった。定位脳手術は、以前はパーキンソン病の治療に対して行われていた手技で、頭蓋骨に座標計測のためのフレームを固定、固定したフレームごと、CT などの画像診断を行い、目標点のフレームに対する座標を定めて、穿頭部から目標部に針を誘導する。

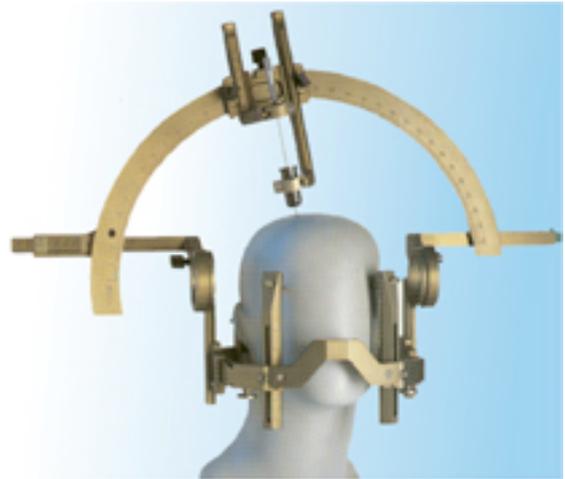


Fig 15 定位脳手術装置

頭部にフレームを固定し、CT/MR などを撮影して、刺入目標点を設定、図上方に見える穿刺針で安全なルートから穿刺する。

パーキンソン病に対して本術式が広く行われていた時期には CT が開発されていなかったため、当時は脳室造影を利用していた。現在、このパーキンソン病に対する定位脳手術は電気刺激装置を用いることで、再度注目されるようになってきている。定位脳手術は実は現在の画像誘導外科のおおもととなったと考えて良く、脳神経外科領域での画像誘導外科の研究者の多くが、かつては定位脳手術に関与していた。

4. 脳虚血について

虚血性脳疾患は生活様式の欧米化、高血圧の減少などに伴ってか、現在増加してきている。虚血性疾患は脳動脈瘤と比べて考慮すべき問題点が多い。

4-1. 原因

一部の不整脈に伴って心臓で発生した血栓や頸部の頸動脈分岐部（動脈硬化性の狭窄の後発部位）での血栓などが流れて脳血管に詰まる塞栓症と脳動脈自身の動脈硬化性変化で血管が詰まる血栓症とがあるが、もちろん、両者の合併もありうる。

虚血性脳障害を複雑にしているのは、塞栓症であれば血管を閉塞させた血栓などが自然に溶解して再開通を起こすことがあり、積極的に血

栓溶解療法を行ったとしても、それが、治療による効果なのか、それとも、自然経過なのか判らないである。また、局所で閉塞していく血栓症でも、その狭窄の進行がゆっくりであった場合には、側副血行路が発達し、例え閉塞しても無症状で済むことも有る点である。このような側副血行路は画像上で捕らえることが必ずしも容易ではない。さらには、脳血管には予備能が備わっている。能の血管にはもともと組織が必要とする以上の血流を供給する能力があり、脳血流予備能と呼ばれるが、このため、単に狭窄性病変を見つけても、それだけでは治療の適応とはなりにくい。今日では RI を利用した組織血流量を計測、さらに、組織血流に負荷をかけることによって、予備能の有無を計測、治療適応の判定に用いている。狭窄と言う形態的な情報のみから流体力学計算によって適応が決定されるようになると、検査が簡素化され、臨床的には有用と思われる。

4-2. バイパス手術

虚血性脳疾患に対する代表的な手術として、頭皮を栄養する動脈（浅側頭動脈 superficial temporal artery = STA）を開頭術を用いて頭蓋内血管（中大脳動脈 middle cerebral artery = MCA）につなぐ術式（STE-MCA anastomosis）がある（Fig 16）。現在、本手術を狭窄性病変に対しては施行するのは極めて稀となっている。狭窄病変の末梢にバイパスを行った場合に狭窄部からバイパス部までの血流がどう変化するか判らないためである。この部分での計算機血流解析も待たれるところである。

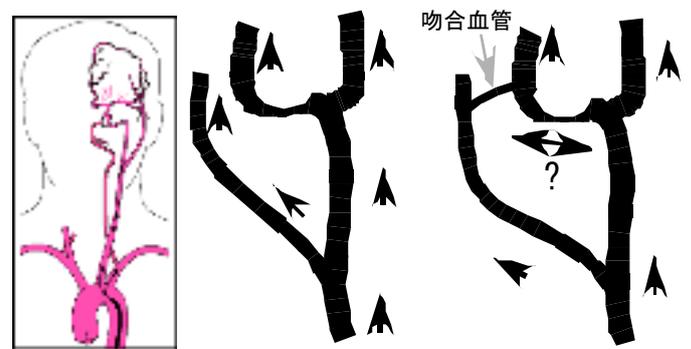


Fig 16 浅側頭動脈中大脳動脈吻合術
狭窄部を迂回するようなバイパス血管を設定した時に狭窄部での流れはどうか？

4-3. 血栓内膜剥離術とステント留置

頸部頸動脈の分岐部は前述の通り、動脈硬化性狭窄の好発部位である。これに対しては従来頸動脈血栓内膜剥離術（carotid endoarterectomy = CEA）が行われてきた。今回、術前の画像を解析してみたところ、狭窄部のみならず、狭窄部で発生して jet 状の流れが末梢部にあたり、高ずり応力部を形成していることが判明した。狭窄部のみならず、このような高ずり応力部での血栓形成の疑いがある。CEA に代わる術式として、血管内手術の一つ、stent 留置術が行われるようになってきた。Stent とは、網目状の機の属で作成した筒で、狭窄部に留置、拡張した内腔を金属で維持するものである。バルーンで狭窄病変ごと拡張するバルーン拡張型のものと金属の弾性を利用して拡張する自己拡張型のものがある。自己拡張型の場合でも、十分な拡張を得るために通常バルーンを併用する。Stent での合併症の一つに over load 現象がある。長期に渡る高度狭窄を stent 留置で一気に改善させることになるため、脳組織中の血管が高流量負荷に耐えきれずに破綻、脳内出血を生ずると考えられている。虚血にさらされていた期間や血管の脆弱性、高血圧の期間や程度など、さまざまな要因が関与すると思われる。現在確実に予見する方法がなく、更なる検討を要する状況である。

5. 開頭術と Navigator

脳腫瘍などの摘出術が必要となる疾患では、脳機能に対する障害を如何に小さくとどめるかが問題となる。言うまでもなく、病変部周囲を含めて、広範囲大量に摘出できれば生命予後は改善するかも知れないが、患者自身の術後の機能低下が大きなものとなるのは避けられない。現在、functional MRI や PET (positron emission tomography), SPECT (single photon emission CT), 光 CT, MEG (magneto-encephalography), TCMS (transcranial magnetic stimulation などによる局在機能の検討やこうして得られた局在情報を MRI や CT に重ね合わせて、病変部位との関係を検討できるようになりつつある。しかし、脳は柔らかい組織であるため、摘出術に当たって、開頭し、髄液を排除すれば待従により、視野の確保などのために脳を圧排すれば、圧排により、容易に変形してしまう。術中に MR を撮像することでこのような変形の問題を回避する試みが為されており、成果を挙げてきている。しかし、術中 MR 装置を普及させるのは容易ではないと考えられ、計算機シミュレーションによる脳変形を考慮したナビゲーションが可能となれば、開頭術の安全性の向上に有用と期待される。また、各場所の病変に対するアプローチルートを検討する上でも生体力学研究の有用性が期待される。

6. リハビリテーション

一旦脳障害を負ってしまうと、部位に応じて障害が残ることがある。運が良ければ、外見上ほとんど目立たない、或いは、無症候で経過することもあるが、高次機能障害や、失語症、半盲など、さまざまな症状が残りうる。最も多いのは片麻痺（右或いは左の半身の麻痺）である。現在行われている「筋骨格系モデルを用いた人体動作の変形」研究を応用して、このような片麻痺患者の日常生活能力の向上が期待される。リハビリテーション分野では FES (Functional Electrical Stimulation) として検討が行われてきており、運動解析と合わせれば、更なる進展が期待される。