

目的

脳動脈瘤の発生・破裂に血流動態、特に血管壁剪断応力(WSS))が重要な因子である。

ヒトの血流解析方法には3次元シネ位相コントラスト磁気共鳴法(3D cine PC MRI)を用いた磁気共鳴流体力学(MR fluid dynamics, MRFD)や計算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)などがあり、両者には様々な長所と欠点がある。その両者の長所を利用したものに、生体から流速情報を取得できる3D cine PC MRIの流速情報を境界条件(boundary condition, BC)とした、MR-based CFDがある。これにより、空間分解能や時間分解能に優れた血流解析が可能であるが、3D cine PC MRIデータを用いるBCがCFD結果に影響を及ぼす。

本研究の目的は、CFDの流入断面のBCとして、3D cine PC MRデータの速度プロファイルを用いた場合(補正流速BC-CFD)と流量をBCに用いた場合(流量BC-CFD)の何れが優れているかを調べるため、模擬3D cine PC MRデータを用いてシミュレーションを行い、親動脈から脳動脈瘤内の速度ベクトル、流線、WSSを正解データと比較した。

- 2) 誤差を持つ模擬 3D cine PC MRデータセットの生成
上記GSにノイズ成分(ノイズ成分は標準偏差0.035[m/sec]となる正規分布)を加算し、模擬3D cine PC MRデータとした(これは、3D cine PC MRのファントム撮影実験に基づく)。
- 3) 補正流速BCを用いたCFD(補正流速BC-CFD)
模擬 3D cine PC MRデータに流入部として内頸動脈C2 segmentに1か所を設定し(図1)、この断面の速度ベクトルプロファイルを得た。また、この断面積から流量Qを計算した。
模擬 3D cine PC MRデータセットに図1のように流入出部として3部位の各々10断面に対し、Flova で流量を計算し、その平均値を求めた。流入量Q'で流入部の速度プロファイルを補正した。
流入BCは補正流速プロファイルを用い、流出BCは上記で得られた流量を用いた。計算領域は実際の頭部3D cine PC MRでの撮像範囲を模し、図1の領域を計算対象とした。その他、流入、流出条件以外の計算条件は上記GSを生成した時のCFDと同様であった。得られたCFD結果を頭部の3D cine PC MRデータとほぼ同等の0.5mmの格子データに線形補間に変換した。

- 4) 流量をBCに用いたCFD(流量BC-CFD)
上記補正流速BC-CFDで得られた補正流量を用いた。
上記の流入血流量、流出血流量に基づいてCFD計算を行った。この時、流入部は図1のように動脈瘤から11mmの部位で40mm伸ばし、計算領域に達した流入部の血流プロファイルが十分に発達した流速プロファイルとなるようにした。
流入、流出条件と血管形態以外の計算条件は上記GSを生成した時のCFD計算と同様であった。
得られたCFD結果を頭部の3D cine PC MRデータとほぼ同等の0.5mmの格子データに変換した。

3. 比較検討
「正解としてのゴールドスタンダードの速度情報(GS)」、「補正流速BC-CFD結果」と「流量BC-CFD結果」を、Flovaにて解析した。次いで、1)速度ベクトル図の比較、2)速度ベクトルの差分ベクトル画像、3)各格子点の速度の相関、4)流線図の比較、5)WSSの比較 の検討を行った。

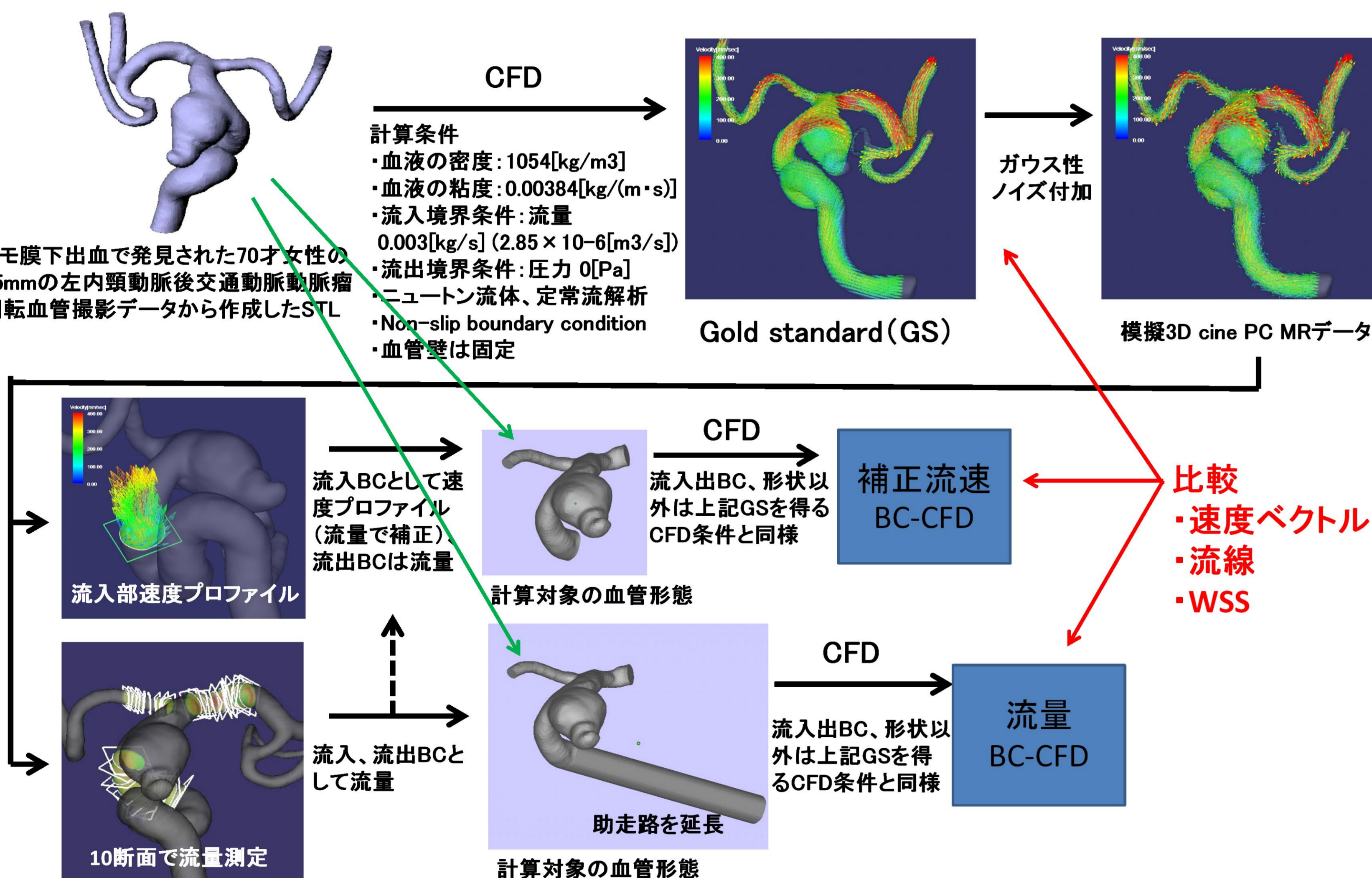


図1. 研究方法の概略

方法

研究の概略を図1に示した。

1. 血管モデル

対象はクモ膜下出血で発見された15mmの左内頸動脈後交通動脈動脈瘤を持つ70才女性で、回転血管撮影がなされた。得られたDICOMデータをFlova (Flow visualization and analysis, (株)アールテック社)を用い、形状を生成し、3次元データをSTLフォーマットで出力した(図1)。

2. CFD計算を含めた解析処理

1) Gold standard (GS) としての3次元速度場の生成

上記脳動脈瘤の3次元血管形状データに「ANSYS GAMBIT」を用いメッシュを張った。メッシュ代表長は約0.13mmとした。メッシュの総計は「約425万」であった。これに「ANSYS FLUENT」を用い、ナビエ-ストークス方程式を解くCFD解析を行った。

このCFD結果を頭部の3D cine PC MRデータとほぼ同等の0.5mm間隔の格子データに線形補間を用いて変換した。これをヒト体内の真の血流情報に相当した正解と見做し、ゴールドスタンダード (Gold standard, GS) とした。

結果

1) ベクトル図 (図2)

「補正流速BC-CFD」と「流量BC-CFD」では大きな違いはないが、GSと比べると、最高流速が低かった。

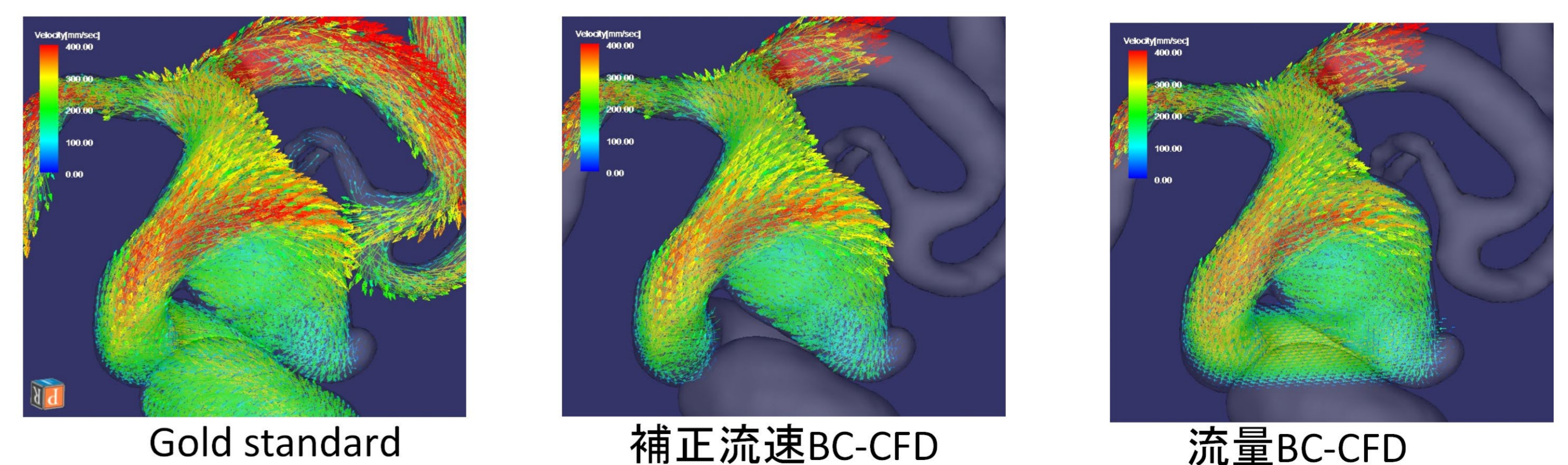


図2. ベクトル図の比較

2) 速度ベクトルの差分画像 (図3)

「補正流速BC-CFD」では、全体的に約20 mm/sec程度の差分ベクトルが観察されたが、「流量BC-CFD」では、親動脈から動脈瘤頸部、瘤内の一部にかけて、約80 mm/sec程度の差分ベクトルが見られ、前者よりも差異が大きかった。

考察

本研究では模擬3D cine PC MRデータを用いて検討したところ、流量BC-CFDよりも補正流速BC-CFDの方が、脳動脈瘤近傍の血流速度ベクトルが正確に求められた。流量BC-CFDは適切な長さの助走路を用いれば、流入断面において、十分に発達した流れになり、放物線に近い速度プロファイルを持つ。しかし、蛇行するヒト血管における速度プロファイルの主流は、血管のセンターラインに沿うとは限らない。このため、この蛇行部位に流入断面を設定せざるを得ない場合は、正しい流入BCとならない。血管形状を十分に大きく取り、関心血流解析部位よりも十分に上流に流入血流断面を設定できれば、流量BC-CFDの結果も補正流速BCの結果と変わらないと推測できる。ただし、解析時間が掛る。また、臨床現場で、患者が許容できる撮影時間で撮影できる高分解能3D cine PC MRの撮影範囲は限られており、これらのデータを用いて、形状作成、BC設定を行うことを前提とするMR-based CFDにおいては、補正流速BCによるMR-based CFDが推奨される。

本研究の限界として次のようなことが挙げられる。

検討数は1例であり、今回得られた結果が普遍的か、あるいは血管形状に依存する血流動態の違いにより結果が変わるかは、明確でなかった。今後、より多数例での検討を要する。

今回、流入断面の検討は1断面のみであった。流入断面の位置によっても、BCの影響が異なる可能性があった。血管の直線部位に流入断面を設定した場合は、補正流速BC-CFDと流量BC-CFDの差は少ない可能性がある。ただし、臨床現場で、患者が許容できる撮影時間で撮影できる高分解能3D cine PC MRの撮影範囲は限られており、流入断面を常に直管部位に設定できない可能性は高い。

補正流速BC-CFDと流量BC-CFDに用いた脳動脈瘤の形状は正解であるGSと同じものを使用したが、実際のCFDでは真の形状と異なり、この形状の影響を強く受ける可能性があった。BCによる影響よりも形状の違いによる影響の方が大きい可能性もあり、今後、この点についても検討の余地がある。

血液はニュートン流体、血管壁は固定、non-slipを仮定した。しかし、同条件で比較しているため、結果に影響を及ぼしていないと考えられた。

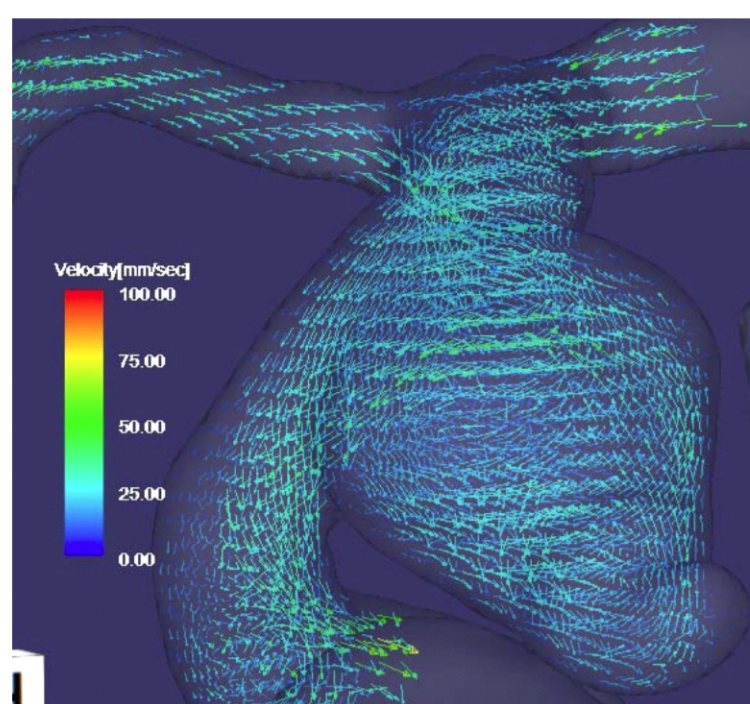
今回の検討は定常流のみでの比較であり、拍動流での検討は行っていない。今後の検討を要する。

結論

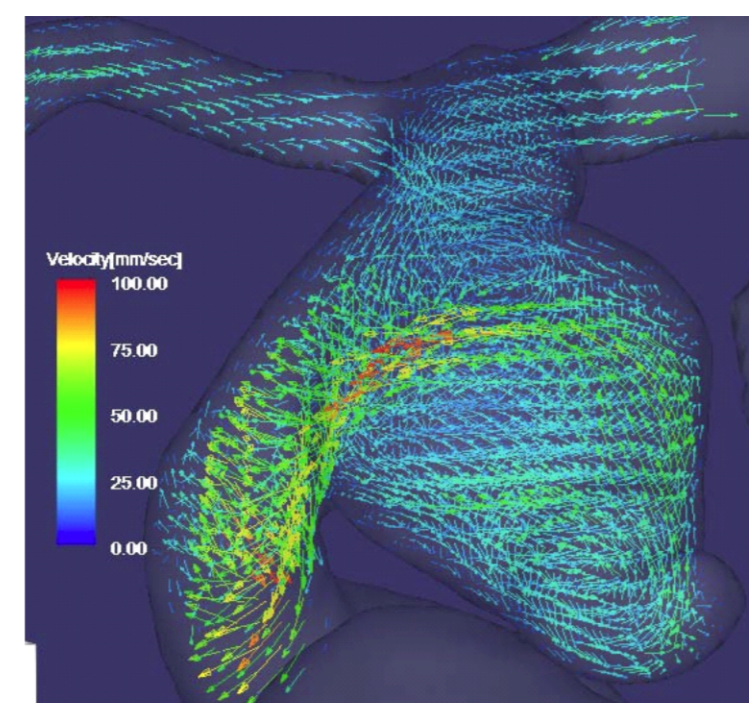
脳動脈瘤のCFD結果は、「流速(流量補間)BCに基づいたCFD」は「流量BCに基づいたCFD」よりも正確であった。インビボでヒトから直接得られる3D cine PC MRデータセットは誤差を含むが、本研究を基にすると、この流速ベクトルプロファイルをBCに用いたMR-based CFDでは、正確な3次元速度場が得られると考えられた。

文献

1. Malek AM, et al. JAMA 282:21;2035-2042
2. Shojima M, et al. Stroke 2004;35:2500-2505.
3. Meng H, et al. Stroke 2007;38:1924-1931.
4. Wang Z; Neurosurgery 2009;65:169-178.
5. Shimogonya Y, et al. J Biomech 2009;42:550-554.
6. Isoda H, et al. Neuroradiology 2010;52:913-920.
7. Isoda H, et al. Neuroradiology 2010;52:921-928.
8. van Ooij P, et al. NMR Biomed. 2012;25:14-26.



補正流速BC-CFDとgold standardの速度ベクトルの差分ベクトル図

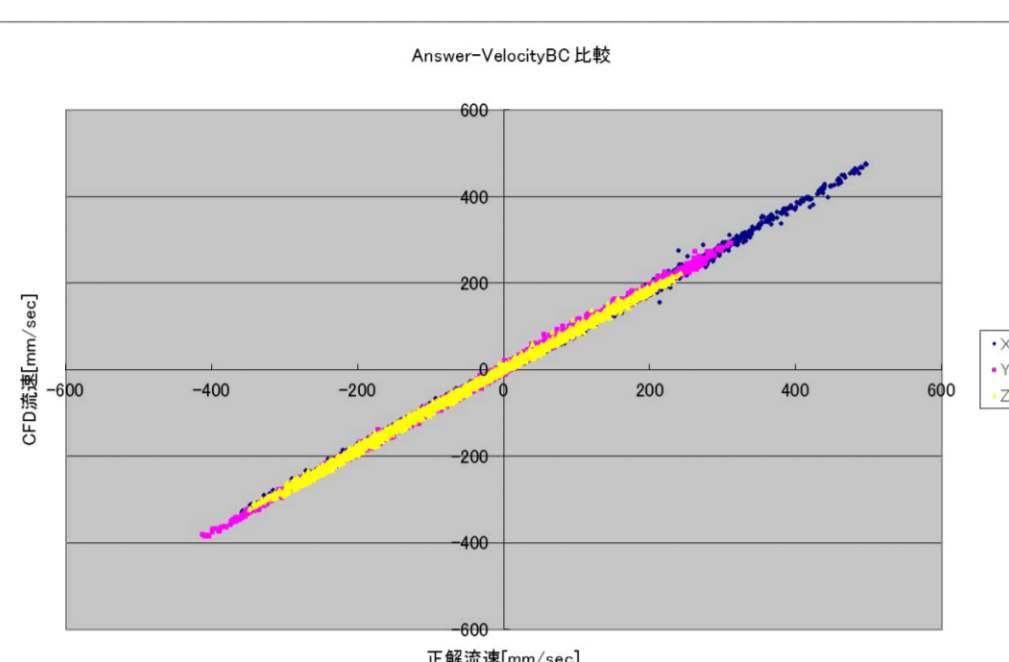


流量BC-CFDとgold standardの速度ベクトルの差分ベクトル図

図3. 速度ベクトルの差分ベクトル画像の比較

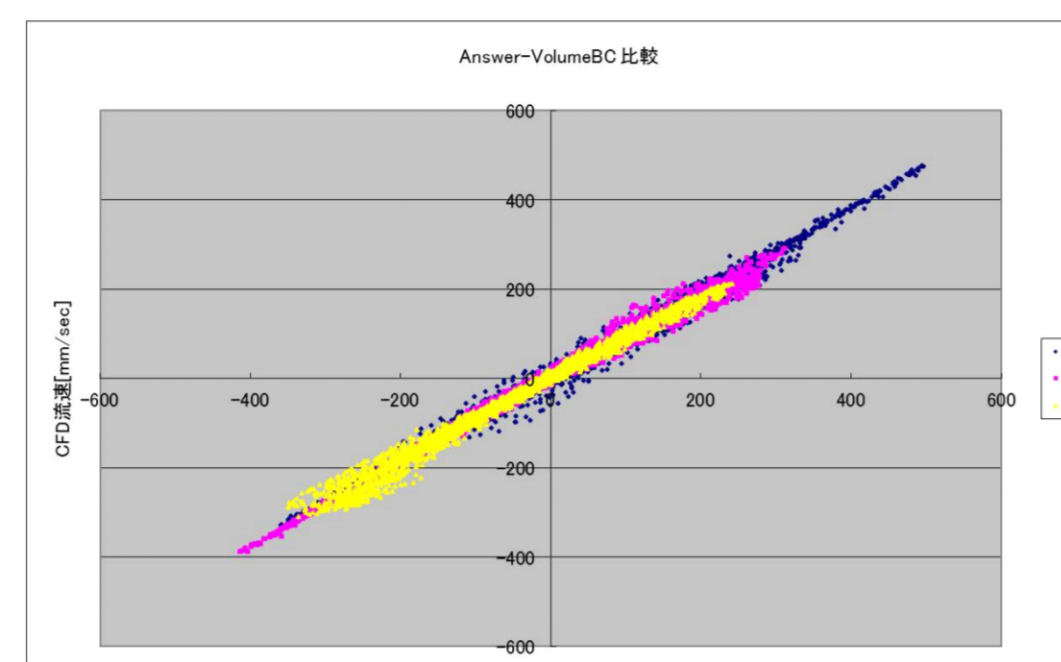
3) 各格子点の速度の相関(図4)

各点の速度をGSデータと比較した相関は、「補正流速BC-CFD」が「流量BC-CFD」よりも優れていた。



速度成分の相関係数
X成分: 0.99929
Y成分: 0.999175
Z成分: 0.998979

補正流速BC-CFDとgold standardの速度の相関図



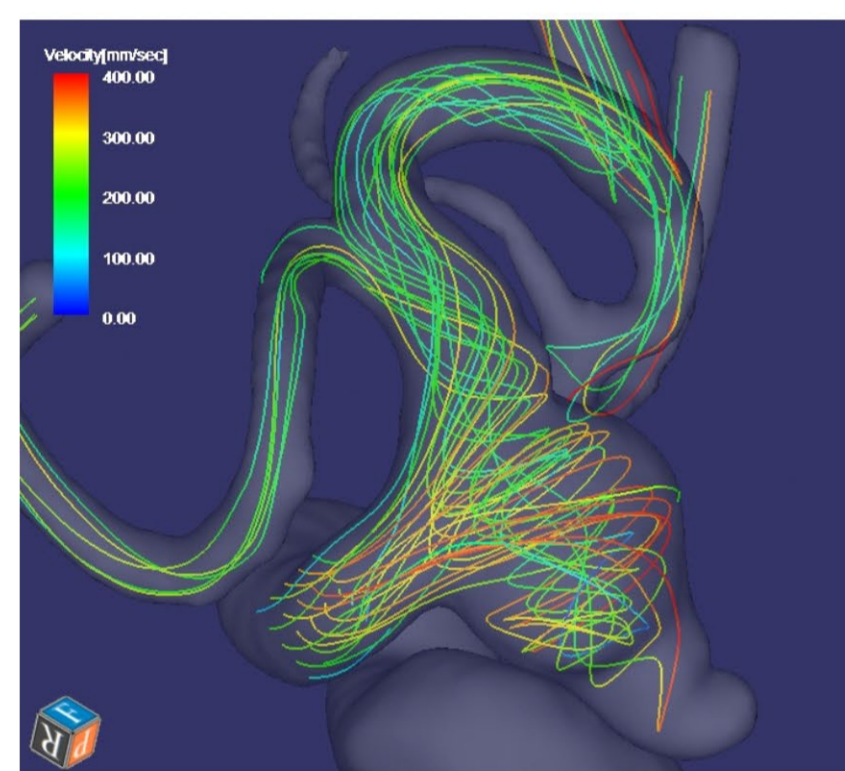
速度成分の相関係数
X成分: 0.999317
Y成分: 0.996258
Z成分: 0.995104

流量BC-CFDとgold standardの速度の相関図

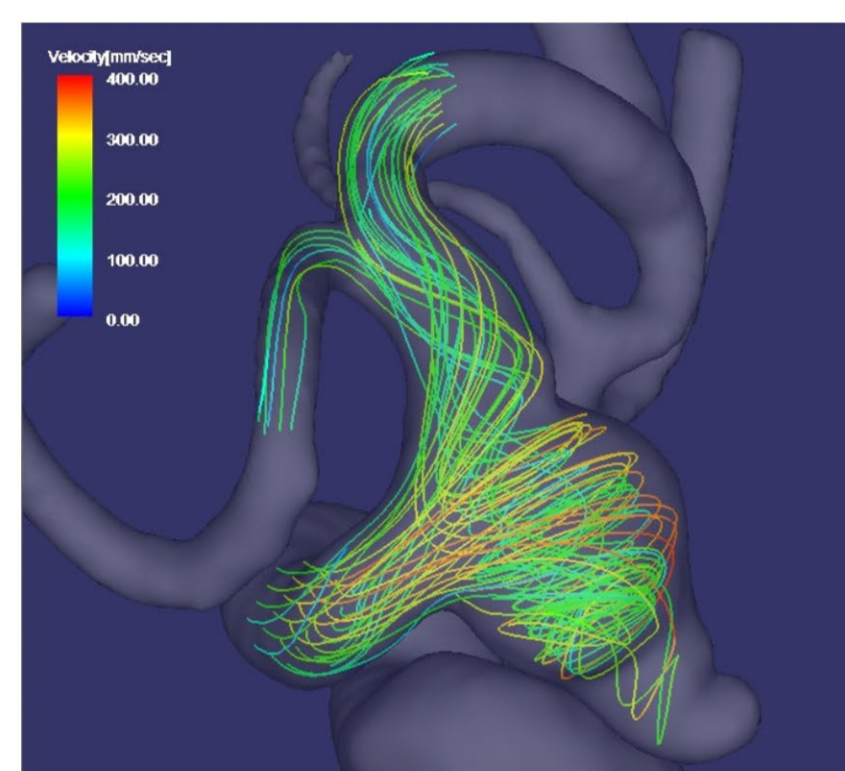
図4. 各格子点の速度の相関の比較

4) 流線図の比較(図5)

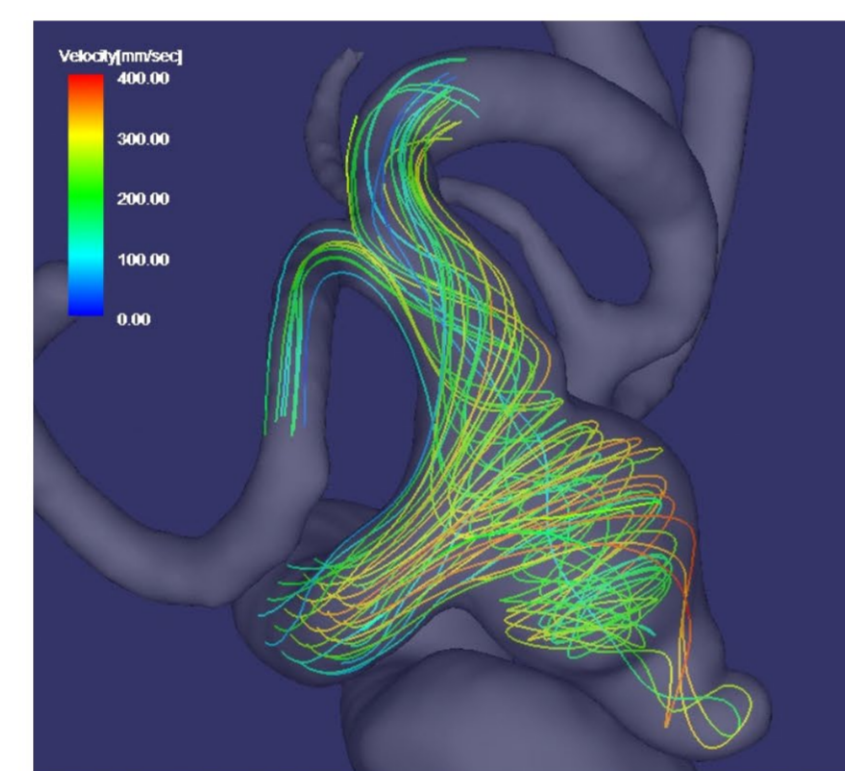
「補正流速BC-CFD」と「流量BC-CFD」では大きな違いはない。GSに対し、「補正流速BC-CFD」と「流量BC-CFD」の流線が多く描かれ、流れが瘤の中で滞留して回転する回数が、やや多い。



Gold standard



補正流速BC-CFD

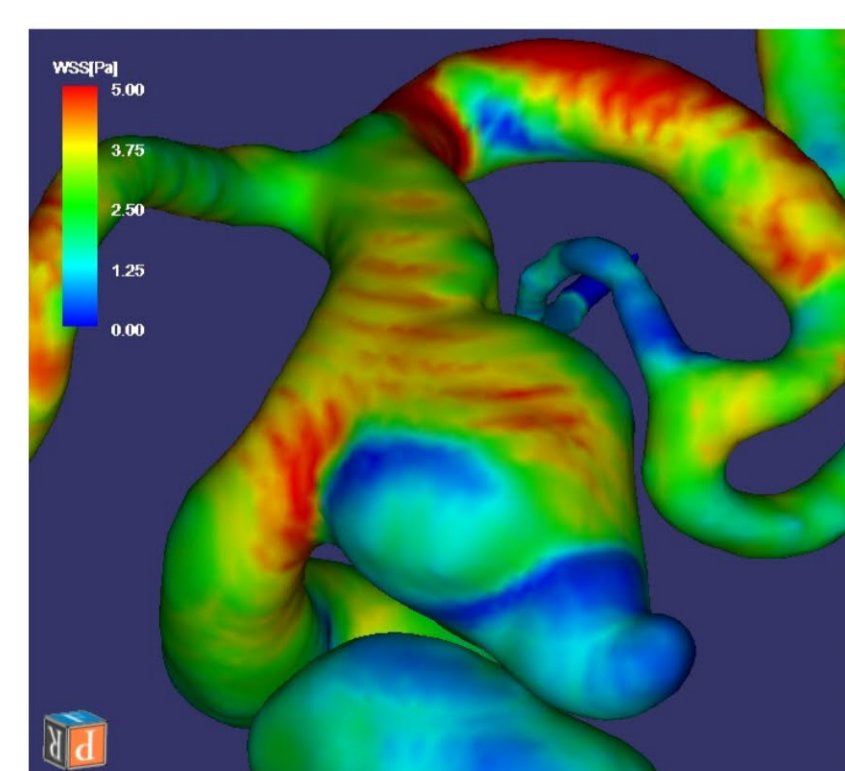


流量BC-CFD

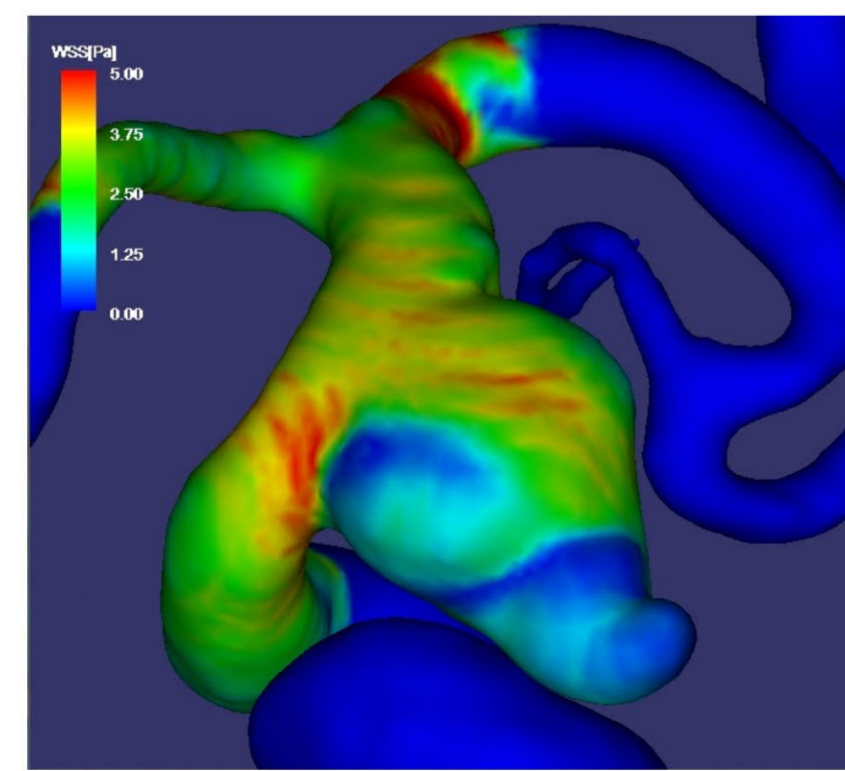
図5. 流線図の比較

5) WSSの比較(図6)

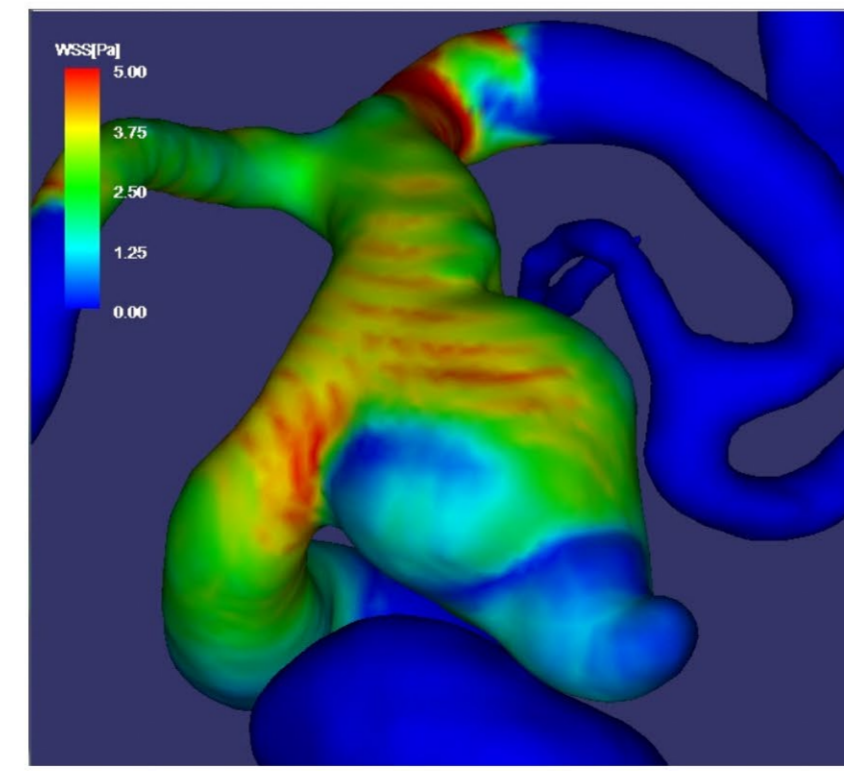
「補正流速BC-CFD」と「流量BC-CFD」と大きな差はなく、また、GSのWSSとも違いは少なかった。



Gold standard



補正流速BC-CFD



流量BC-CFD

図6. 流線図の比較

5) WSSの比較(図6)