

令和 5 年 4 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22889

研究課題名(和文) Stanford B型大動脈解離における血流動態解析とCFDモデルの最適化

研究課題名(英文) Hemodynamic Analysis and CFD Model Optimization in Stanford Type B Aortic Dissection

研究代表者

樋口 慧 (Higuchi, Satoshi)

東北大学・大学病院・医員

研究者番号：90876715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：Stanford B型大動脈解離は慢性期の偽腔拡大による晩期合併症が問題となっている。偽腔の拡大が見られる症例において、真腔及び偽腔内の血流動態は非常に複雑であり、血流は真腔内から偽腔内だけでなく、一度偽腔内に入った血流が再び真腔側へ逆流するような血流動態もあることを証明した。また、4D flow MRIによる血流動態パラメータは偽腔径の拡大率と関連することを示すことができた。一方で、この複雑な血流動態は血管形態からコンピューター上でシミュレーションを行うCFDでは再現することは難しく、適切なモデルの作成よりもCFDは血流動態評価の別モダリティとして認識する必要があることが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

4D flow MRIによって評価した血行動態のパラメータは慢性期Stanford B型大動脈解離の血管径拡大率の予測に寄与することを示したことで、4D flow MRIによる血流動態評価はより早期に治療介入が必要な患者の選別や合併症発生のリスク層別化に寄与することができると考えられる。また、CFDによる血流動態評価は4D flowの血流動態を再現することが困難であることがわかったことで、今後は4D flow MRIとは別のモダリティとして血管径拡大率の予測が可能かどうかを検討する必要があることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Stanford type B aortic dissection is associated with late complications due to false lumen enlargement in the chronic phase. We have demonstrated that the hemodynamics in the true and false lumen are very complex in patients with false lumen enlargement, and that the blood flow is not only from the true lumen into the false lumen, but also flows back into the true lumen once it has entered the false lumen. We also showed that hemodynamic parameters derived from 4D flow MRI were associated with the false lumen diameter enlargement rate. On the other hand, such complex hemodynamics are difficult to reproduce by CFD, which is a computer simulation based on vessel morphology. It turns out that CFD needs to be recognized as a separate modality from 4D flow MRI for hemodynamic assessment rather than creating an appropriate model.

研究分野：心血管画像診断

キーワード：大動脈解離 Stanford B型 慢性期 4D flow MRI CFD 血流動態

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Stanford B型大動脈解離はこれまで保存的治療が標準的な治療法とされてきたが、その5年後、10年後の予後は必ずしも良好でないことがわかってきた。約40-60%の症例で偽腔が拡大し、動脈瘤となって破裂などの合併症を生じる。一方で、どのような症例に対してどの時点で外科的治療を行うのかは依然として不明である。慢性期の偽腔拡大の因子として、大動脈の径や偽腔の部分血栓化の有無、偽腔の厚みやentryのサイズなどCTで得られる大動脈解離の形態からその予後を予測する研究が行われているが、血管内を流れる血流動態もその拡大を予想する因子として重要であることが分かってきている。近年の画像技術の進歩により、4D flow MRIを用いると大動脈内の血流動態を描出することができる。具体的には血流の速度や方向を可視化し、任意の断面での血流速度や血流量の測定や、血流のエネルギー損失、渦流の程度を評価することができる。大動脈解離に対して血流動態という質的な評価を加えることで慢性期偽腔拡大リスクのさらなる層別化を目指しているが、4D flow MRIにも弱点がある。撮像時間が長く、患者の身体への負担が大きく、解析にも多くの時間を要する点である。また、空間分解能の限界によって大動脈から起始する小さな血管は評価が困難であり、撮影パラメータの設定によって可視化できる血流速度の範囲は決まっており、設定された血流速度以上の速い血流や設定速度以下の遅い血流は見るできないなどである。これに対して、Computational Fluid Dynamics(CFD)は既知の血管形態にコンピューター上で血流を流し、その血管内の血流動態をシミュレーションすることができる。そのため、検査は形態評価のためのCTのみで、検査時間は短く、4D flow MRIでは描出しにくい血流を描出することで、患者の予後に関わる新たな因子、治療すべき症例の鑑別や治療時期の同定につながる可能性がある。しかし、CFDでの血流動態シミュレーションにおいては、適切なCFDモデルの作成が必要である。

2. 研究の目的

大動脈のCFDモデルに関しては、過去に健常成人を対象に撮像した4D flow MRIをもとに、東北大学流体科学研究所と共同でモデルを作成した。そこで、大動脈解離の血流動態を解析する際に、このモデルが大動脈解離に対しても4D flow MRIと同様の血流動態を描出できるか、どのような点が問題となるのかを検討する必要がある。そこで、本研究の目的はStanford B型大動脈解離症例に対して4D flow MRIから得られた血流動態とCT画像からCFDを用いて得られた血流動態の比較を行い、現在のCFDモデルの問題点を挙げ、より良い大動脈解離CFDモデルを作成することである。

3. 研究の方法

慢性期Stanford B型大動脈解離症例に対して4D flow MRIを撮像した。研究開始前から撮像した症例を含めて20例を対象とした。撮像した4D flow MRIに画像解析を行い、entryから真腔へ流れる血流量、血流速度、entryから偽腔に流れる血流量、血流速度、偽腔内を流れる血流の螺旋度、渦度を計測した。次に、同じ症例に対して4D flow MRIと同時期に撮影した造影CTから血管形態を抽出し、それに対してCFDによる血流シミュレーションを行った。

4. 研究成果

4D flow MRIでの解析ではentry部の加速血流が速く、信号欠損となってしまった1例を除いて真腔及び偽腔内の血流動態を評価することができた(図1)。entry部では収縮期に真腔から偽腔内へjetが流れる様子が観察されたが、拡張期では偽腔から真腔内へ逆流する流れが全例で見られた(図2,3)。CFDの解析はそのうち数例で行い、入り口となる上行大動脈に4D flow MRIで取得した信号を入力し、それぞれ真腔、偽腔内へ流れる血流のシミュレーションを行った。しかし、4D flow MRIでは描出された、entry部の偽腔から真腔内へ逆流する血流は描出することができなかった(図4)。その後、大動脈から起始する血管(出口)の血流条件を様々変えながら検討を行ったが、4D flow MRIと同じような血流は描出することができなかった。CFDでは出口の血流条件を設定する必要があるが、その数が多く、また、途中には真腔と偽腔との交通も複数存在する。その条件を正確に決定するにはそれぞれの血管の実測の血流パターンを入力する必要がある。一方で、そのような実測を行うためにはMRIの撮像が必要となってしまう、4D flow MRIを撮像せずに血管形態から血流動態を描出するCFDの本来の目的と異なってしまう。

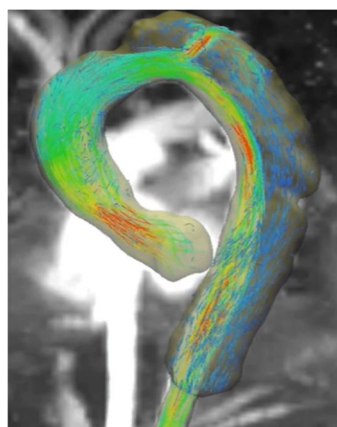


図1 慢性期Stanford B型大動脈解離の4D flow MRI: 真腔からentryを介して偽腔に加速するjetが流れる様子が見られる。

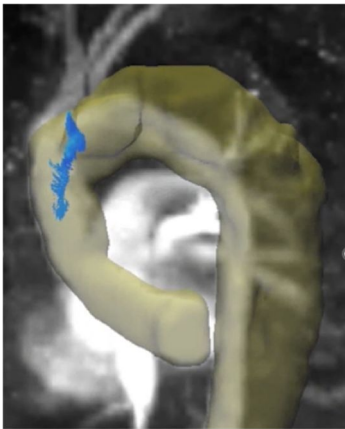


図 2 一度真腔から偽腔に入った血流が entry を介して逆流している。

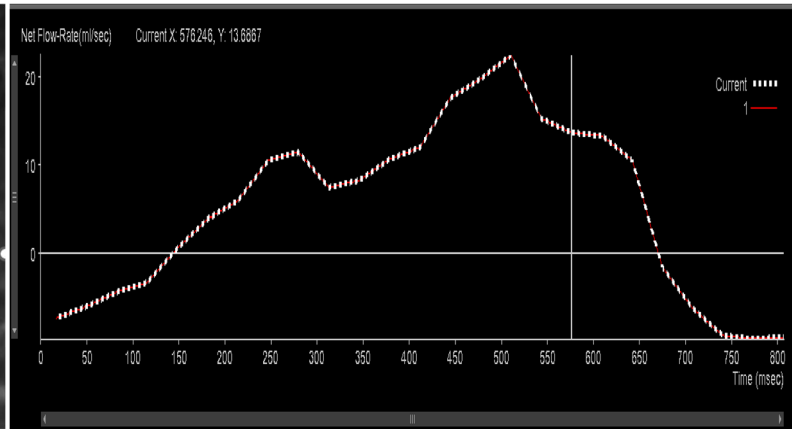


図 3 逆流率は定量化することができ、本症例では 35%と計測される。

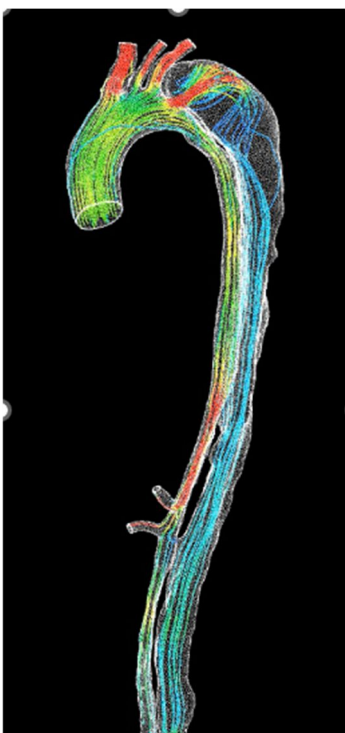


図 4 CT 画像から血管形態を抽出して解析した CFD 画像。真腔から偽腔へ流れる jet 血流は描出されるが、4D flow MRI で見られた entry を介した偽腔から真腔への逆流血流が描出されない。

そのため、CFD で 4D flow MRI と同じ血流動態を描出するためのモデルを作成することを断念し、CFD は 4D flow MRI と切り離して血流評価を行うこととした。現在、そのうち、大動脈径の経時的変化が確認できている患者 18 名を抽出した。13 名はその後治療が行われており、4 名はサイズの変化がなく、保存的治療が継続されていた。そこで、経時的な拡大率が高い症例と低い症例で 4D flow MRI から得られたパラメータの差を検討し、いくつかのパラメータで血管径の拡大率との相関があることを示した(2023 年 6 月 3~8 日にカナダ・トロントで開催される 2023 ISMRM Annual Meeting で発表予定)。さらに CFD は別モダリティとして同様の患者群で血流動態評価を行い、血管径の拡大率との関連を評価することで、CFD による評価と臨床経過との関連を示す初めての報告ができると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Satoshi Higuchi
2. 発表標題 Understanding Aortic Dissection with Flow: Present and Future
3. 学会等名 第81回日本医学放射線学会総会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Higuchi, Hideki Ota, Yoshiaki Komori, Hiroki Kamada, Ryuichi Mori, Ishinoseki, Kei Takase
2. 発表標題 Evaluation of hemodynamic parameters for prediction of aortic growth in patients with chronic Stanford type B aortic dissection using 4D flow MRI
3. 学会等名 2023 ISMRM & ISMRT Annual Meeting & Exhibition（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------