

課題名(タイトル):

## データ同化血流シミュレーションの研究開発

利用者氏名:

○伊井 仁志(1)

理研における所属研究室名:

(1)情報システム本部 計算工学応用開発ユニット

研究背景と目的および関係するプロジェクト

個別血流場の再現に向けた数値流体解析において、境界条件の設定は重要な課題である。近年、医用計測により得られた血流速度を用いたデータ同化解析に基づき境界条件を逆推定することで、実際に即した個別血流場を数値再現する試みがなされている。脳動脈瘤を対象とした場合、通常、母血管を含めた血流解析が行われるが、データ同化アプローチの性質を鑑みると、動脈瘤のみを解析対象とすることも可能である。この達成は、解析コストの低減や計測データ SN 比の改善に繋がる。本研究の目的は、動脈瘤のみを対象としたデータ同化による個別血流解析に向けた基礎的方法の確立である。本研究は、ポスト「京」開発事業(フラッグシップ 2020 プロジェクト)、重点課題 2・サブ課題 B と関連しており、実データを用いたデータ同化血流シミュレーション開発の基礎的研究として実施されている。

## 1. 具体的な利用内容および計算方法

定常非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を流れの支配方程式(モデル式)に採用する。動脈瘤を母血管から切り離れた解析形状を用いるが、この際、切断面上で速度およびその分布を境界条件として課す。動脈瘤壁は固定壁とし滑りなし境界条件を与える。ここで以下のような逆問題を導入する。目標速度(計測データを想定)とモデル速度の平均二乗誤差を評価関数とし、その最小化問題を設定する。この際、拘束条件として NS 方程式が課されており、求める制御変数は動脈瘤入口境界での速度成分値である。データ同化手法として変分法を適用することで、それにより導出される随伴方程式および元のモデル式を併せて逐次的に解き、入口境界速度を推定する。なお、流体解法には、ボクセル格子に基づく定式化を採用する。解法には圧力プロジェクション法を採用し、有限差分法により離散化を行う。また、領域分割に基づく OpenMP+MPI のハイブリッド並列により計算が実行される。

## 2. 結果

手法の妥当性検証として、脳動脈瘤を含む実形状血管モデルに対し、母血管に流入口で一様流速を与えて順解析を行い、定義した瘤領域において順解析結果を間引いて抽出し瘤内の疑似計測速度を取得し、瘤形状においてデータ同化解析を行った。なお、疑似計測データの解像度を 0.5 mm、流体計算の解像度を 0.1 mm とした。図 1 では、瘤断面における順解析およびデータ同化解析による速度絶対値を比較している。瘤内速度は空間分布も含め定性的に良く一致し、目標速度(順解析速度)との正規化誤差ノルムは約 6%となり定量的な一致も示すことができた。

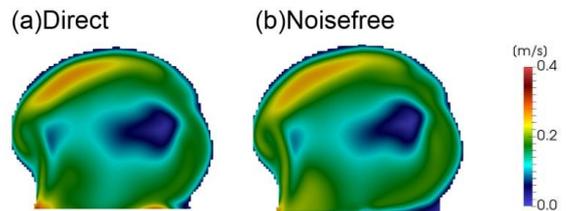


図 1 瘤断面における順解析(左)とデータ同化解析(右)により得られた速度分布の比較

## 3. まとめ

本研究では、動脈瘤内の個別血流再現に向けたデータ同化血流解析の基礎的方法の確立を行った。計測速度とモデル速度の平均二乗誤差である評価関数の最小化問題を解くことで、入口境界速度を逆推定した。これにより同定された速度場は目標速度場を良く再現した。

## 4. 今後の計画および展望

評価関数を構築する際に、解の不定性を避けるために正則化項と付随するパラメータを導入している。今後、本パラメータが推定結果に与える影響を系統的に調査するとともに、妥当な推定結果が保証されるパラメータ値の決定手法を確立する。これにより実計測データを用いた解析に適用していく。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

1. 谷口悠, 小林純哉, 伊井仁志, 渡邊嘉之, 越山顕一郎, 武石直樹, 和田成生, 脳動脈瘤領域のみを対象としたデータ同化血流解析手法の提案, 日本機械学会関西学生会 2017 年度学生員卒業研究発表講演会, 2018 年 3 月, 大阪.

【依頼講演】

1. 伊井仁志, 生体物理現象の解明に向けた計算科学アプローチの確立, TAMA 協会「地域イノベ・医療イノベーションフォーラム」, 2018 年 7 月, 東京.
2. 伊井仁志, 生体内の巨視的流動現象に対する数値計算アプローチの今と未来, バイオエンジニアリング部門若手講演交流会, 2018 年 7 月, 静岡.
3. 伊井仁志, 個人別に異なる生体现象をコンピュータでどうやって再現するか?, 大阪大学数理・データ科学教育研究センター公開講座「データサイエンスが切り拓く生命科学・生体工学の未来」, 2018 年 9 月, 大阪.
4. 伊井仁志, 生体内現象の連続体シミュレーションと計測データを活用した逆解析アプローチの紹介, 第11回数理デザイン道場, 2019 年 1 月, 東京.