

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*

理研での所属研究室名 : *情報基盤センター 計算工学応用開発ユニット

1. 研究背景と目的および関連するプロジェクト

医用計測により取得した血管形態および血流速度を用いた数値流体解析(CFD)により個人別の血流動態を数値的に再現することで、循環系疾病機序の理解および予測に繋げる試みが行われている。この際、PC-MRI などにより時間・空間方向の四次元速度分布が取得されるが、得られた速度データを CFD にどのように反映されるか定式化が必要である。これまでに本利用者は、フィードバック制御を基にしたデータ同化アプローチにより、定常問題に対してこれを達成している(Ii et al., 2018, Int J Numer Meth Biomed Eng, 34, e2910)。しかし実際の血流は拍動現象であることから、本研究では、時系列データを用いた非定常解析の達成を試みる。なお本研究は、ポスト「京」開発事業 (フラッグシップ 2020 プロジェクト: FLAGSHIP2020 Project) , 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。

2. 具体的な計算方法・利用内容

これまでに本利用者が提案しているフィードバックに基づく血流データ同化手法では、計測速度に関して瞬時の目標値が必要となる。PC-MRI により得られる速度データの時間分解能は、拍動一周期に対しおよそ 15 フレームほどと時間方向に疎であるため、フーリエ級数展開により時間方向に連続的分布を構築し、瞬時目標値を評価する。流体解析には、非定常非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に対しボクセル格子に基づく数値流体解法を適用する。任意形状を持つ剛体壁は、Boundary data immersion method (Weymouth and Yue, 2011, J Comput Phys, 230, 6233)により陰的に表現される。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。

3. 結果

提案手法の妥当性を検証するために、直円管流れに対する数値テストを行う。Womersley の解析解を用い、任意の時空間解像度において等間隔に疑似的な計測データを作成した。ここで、時系列データを用いた非定常解析(unsteady)および時相を固定した定常解析(steady)に対し結果を比較した。解析には実際の血流条件に近いパラメータを用いた。Fig. 1 に、時相 $t/T = 0, 0.5$ における軸方向速度の管内分布を示す。 T は拍動周期である。Steady 解析に比べ unsteady 解析が Womersley 解をより正しく再現したことより、拍動にともなう非定常性の重要性と、本手法がこれらを正しく扱えることを示すことができた。

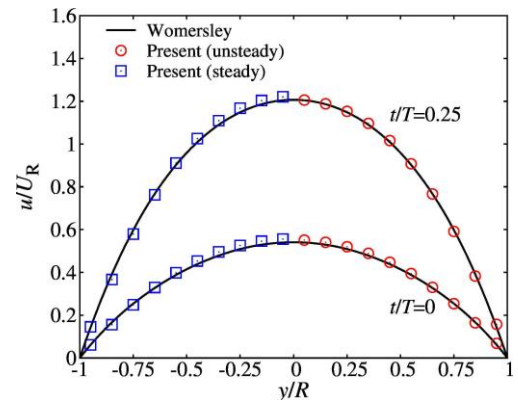


Fig. 1: Comparison of velocity profiles between the Womersley solution and estimations by the steady and unsteady data assimilations at different time.

4. まとめ

フィードバック制御に基づくデータ同化手法により、時系列計測データを用いた非定常解析への実現可能性を示すことができた。

5. 今後の計画・展望

PC-MRI で取得した実際の血流速度データを用いて手法の妥当性を検討していく。

平成 29 年度 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

1. S. Ii, M.A.H.M. Adib, Y. Watanabe, S. Wada, Physically consistent data assimilation method based on feedback control for patient-specific blood flow analysis, *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 34 (2018) e2910 (20 pages).