

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

1. 研究の背景, 目的, 関係するプロジェクトとの関係
個別血流場の数値再現に向け, 四次元変分法に基づくデータ同化解析手法により観測データを数値シミュレーションに取り込み境界条件を推定するアプローチの可能性が示されている. しかしながら, 非定常流れにおいては, 推定量の自由度増加による逆問題の悪条件性, 大規模メモリの必要性あるいはそれを回避するための多量の I/O 処理といった実用上の課題が残っている. 本研究では, フーリエ級数展開を利用した次数低減手法により上記課題を解決し, 個別血流場解析への実現可能性を示すことを目的とする. 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), 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. 具体的な利用内容, 計算方法

計算方法として, データ同化手法としてモデルとの整合性が高い四次元変分法を採用する. モデル速度 \mathbf{u} と観測速度 \mathbf{U}_{obs} の L_2 ノルムからなる評価関数 J に対し, ディリクレ境界条件である境界速度 \mathbf{g} を説明変数とする最適化問題を定義する. この際, 非圧縮性 NS 方程式を拘束条件とすることで, 境界速度 \mathbf{g} とモデル速度 \mathbf{u} が関係付けられる. ラグランジュ未定乗数法により, 非圧縮性 NS 方程式に対応する随伴方程式および評価関数 J の境界速度 \mathbf{g} に関する方向微分が導出される. これを逐次的に解き最適化問題を解く. ここで, 時間変化にフーリエ級数展開を利用することで, 時間方向のデータ量を圧縮するとともに, 本来, 計算時間刻み Δt で定義される境界速度 \mathbf{g} をフーリエ級数展開の最大次数まで自由度を削減し問題の悪条件性を緩和する. NS 方程式の解法には直交格子を用いた圧力プロジェクション法を採用する. 領域分割・ループ分割に基づく MPI/OpenMP ハイブリッド並列計算によりジョブを実行する.

3. 結果

数値検証として, 任意の境界条件 \mathbf{g} に基づく順解析結果を真値とし, 時空間的にデータを間引き正規分布誤差を与え

た疑似観測データを作成し, それに対し推定を行い, 結果を真値と比較する. 解析系は動脈瘤を模擬した流れ場を想定する. 図 1 に異なる時刻における観測速度, 推定速度場および真の速度場をそれぞれ示す. ノイズを含む時空間的に疎な計測データから真の速度場が定性的に良く再現されていることが分かる.

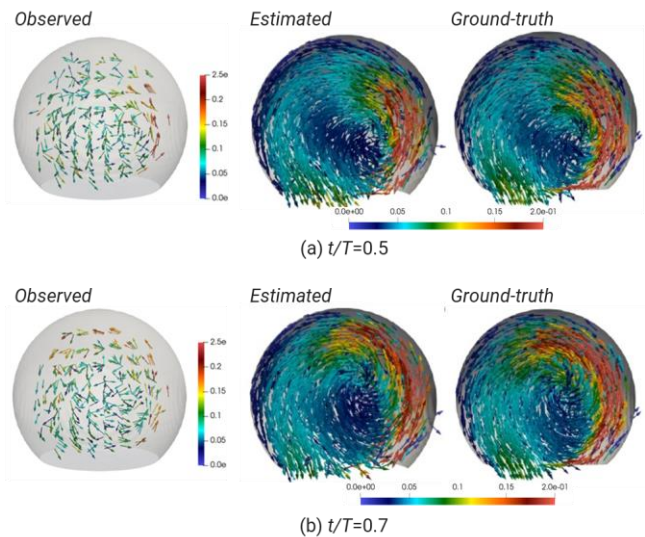


図 1 異なる時刻における観測速度(Observed), 推定速度場(Estimated)および真の速度場(Ground-truth).

4. まとめ

本研究では, 非定常血流場を対象とした変分データ同化解析における次数低減手法を提案した. 次数低減化により, 同解析で挙げられている課題とその解決に対して有用性を示すとともに, 本解析による個別血流場解析への実現可能性を示した.

5. 今後の計画・展望

実際の医用計測データとして Phase Contrast-MRI で取得された血流速度データを用い解析に展開し, アプローチの有用性を検証する.

謝辞

本研究遂行に当たり, 田中健吾氏(首都大学東京システムデザイン学部知能機械システム学部4年生)の協力を得た.

2019 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

1. 伊井仁志, 全脳血液循環の大規模数値解析と個別血流場の再現に向けたデータ同化アプローチ, TSFD (乱流シミュレーションと流れの設計) 定例会, 東京大学生産技術研究所, 東京, 2019 年 11 月 18 日 (招待講演).