

# 平成 29 年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目：個人研究

研究期間：平成 29 年 4 月～平成 29 年 9 月

研究課題名：直交格子法を用いた数値流体計算による左心房内血流の患者別解析手法の構築  
ラボ長

所属：機能創成専攻 生体工学領域

氏名：大谷智仁

## 研究成果

本研究では、心原性脳梗塞の主要因である左心房内血栓症の患者別リスク評価にむけ、患者個々の状態を反映した心房内血流の数値流体計算手法を構築する。左心房は自ら能動的に伸縮することで左心室の補助ポンプとして機能しており、血流計算にあたっては患者個別の左心房形状だけでなく動態の考慮が求められる。本研究の達成にあたり、最終的な目標である臨床応用にむけた多数症例データ解析を見据え、左心房の複雑な形状や動態を可能な限り簡易的に扱える手法を検討し、その方策として、直交座標系に固定された計算格子をそのまま用いて流体の支配方程式を解く直交格子法の適用を考えた。本手法は非構造格子を用いる従来手法と比較して計算の前処理を大幅に簡略化できることが知られているが、今回対象とする、固体領域と流体領域との境界が経時的に移動する移動境界問題について、直交格子法では汎用的に使用可能かつ数値的に安定な解法が確立していない。そこで本研究では、壁面の移動境界問題を安定的に扱える直交格子法ソルバを構築し、さらに CT 画像データに基づく実際の患者の左心房内血流解析へ構築したソルバの応用を試みた。

直交格子法による内部流れの数値解法として、Boundary data immersion (BDI 法) (Weymouth and Yue., *J. Comput. Phys.*, 2011) を用いた。本手法では、直交格子中における固体領域と流体領域を定義するにあたり Volume fraction (VOF) 関数  $\phi$  を導入し、直交格子の各格子について、

$$\phi = \begin{cases} 0 & \text{in } \Omega_s \\ (0,1) & \text{in } \Gamma_i \\ 1 & \text{in } \Omega_f \end{cases} \quad (1)$$

を定義することで流体領域  $\Omega_f$  と固体領域  $\Omega_s$ 、さらにその界面  $\Gamma_i$  を連続的に表現する。ここで、固体・流体領域を含む全計算領域中の任意の座標の速度を  $\mathbf{u}$  とすれば、固体の支配方程式は既知の速度  $\mathbf{U}$  を用いて、 $B(\mathbf{u}) = \mathbf{u} - \mathbf{U} = 0$  と表され、また流体の支配方程式は、一般的に用いられる非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を変形して  $F(\mathbf{u}, p) = 0$  とできる。これらを用いて、流体領域と固体領域全体の支配方程式を VOF 関数  $\phi$  により、

$$M(\mathbf{u}, p) = (1 - \phi)B(\mathbf{u}) + \phi F(\mathbf{u}, p) \quad (2)$$

と統一して表す。式(2)と連続の式(非圧縮条件)を一般的な有限差分法による数値流体計算の手順に従い離散化し、Fractional step 法を用いて速度と圧力を分離して解く。

本研究にて提案する移動境界問題に対する直交格子法ソルバの構築にあたり、上記の BDI 法における VOF 関数  $\phi$  と固体領域の既知の速度  $\mathbf{U}$  が時々刻々変化する場合を考える。ここで代表者らの先行研究 (Otani et al., *Ann. Biomed. Eng.*, 2016) において、対象とする左心房の壁面は三角形要素の集合として与えられるとともに、壁面の速度場は複数の正弦波の重ね合わせとして計算され、

三角形要素の各節点に定義される。これらの情報を直交格子内へ投影するアルゴリズムを構築した。

まず、左心房壁面を直交格子上に投影するにあたり、MPI 並列化 Fast Marching Method (Yang and Stern, *J. Comput. Phys.*, 2017) を用い、壁面の位置をゼロとする符号付距離関数 (レベルセット関数)

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\min|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}| & \text{in } \Omega_s \\ 0 & \text{in } \Gamma_i \\ \min|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}| & \text{in } \Omega_f \end{cases} \quad (3)$$

where  $\hat{\mathbf{x}} \in \Gamma_i$

を直交格子を構成する全節点に設定した。この関数に基づき、各格子における VOF 関数を連続的に表現した。次に、三角形要素の各節点に定義された速度場  $\mathbf{U}$  を直交格子中に外挿するにあたり、符号付距離関数の空間勾配 (壁の法線方向) を移流速度とする下記の移流方程式を解く。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} - \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{x}} = 0. \quad (4)$$

三角形要素と最近接する直交格子の節点に対し、三角形要素の速度場を線形補間で与え、式(4)を一次風上差分により収束するまで繰り返し解くことで、三角形要素が持つ速度情報を直交格子内へ伝播させた。この処理を CFD 計算の各時間ステップで繰り返し行うことで、時々刻々変化する左心房壁面と壁面の速度場を直交格子法で表現した。

テスト計算のため、実際の患者の CT 画像から 1 心拍中における左房の形状および速度場を取得した。肺静脈断面の境界条件として圧力一定 (=0 Pa) を設定するとともに、僧帽弁の閉鎖時 (左室収縮期) には僧帽弁領域を壁面境界と設定し、開放時には患者個別に計測した左房から左室への流出流量を与えた。京コンピュータを用いた 64 ノード×8 コア並列計算により、3 心周期分の左心房内血流計算を行った。3 心周期目における左心房内血流のスナップショットを図 3 に示す。結果は生理学的知見と定性的に一致しており、時々刻々変化する左房の複雑形状および速度場を直交格子法により安定的に取り扱えることを示した。今後は構築した手法を応用し、左心房の画像解析から左房内血流解析までを直交格子中で実施するシームレスな解析システムの構築により、左心房内における血栓形成リスクの患者別評価にむけた大規模臨床データ解析を実現する。

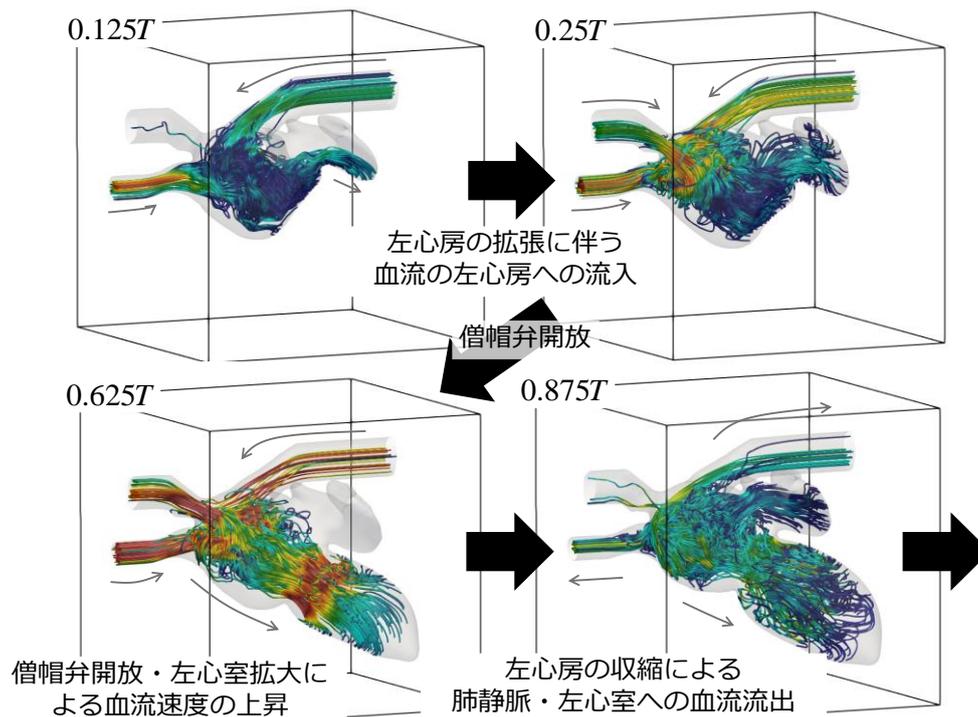


図1 1心拍中における左心房内の血流動態のスナップショット

キーワード：左心房，数値流体計算，直交格子法，レベルセット法

研究経費（H29年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0円	173,600円	45,536円	0円	0円	219,136円

共同研究者等

(1) 共同研究者（氏名・所属）

足利洋志・Johns Hopkins 大学医学部

和田成生・大阪大学大学院基礎工学研究科

(2) 研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

発表論文等（平成30年3月31日現在）

研究代表者および主な共同研究者の研究業績のうち、本研究課題に関連するもののみを、現在から順に発表年次を過去に遡って記入してください。

〔雑誌論文〕

〔著書〕

[学会発表]

- **大谷智仁**, 足利洋志, 和田成生, 直交格子法を用いた左心房内血流の患者個別解析、日本機械学会第 30 回バイオエンジニアリング講演会、京都、2017 年 12 月 (**Outstanding Poster Presentation 受賞**).
- **大谷智仁**, 大規模数値流体解析による左心房内血栓症の患者別リスク予測への挑戦、日本機械学会年次大会、埼玉、2017 年 9 月 (**招待講演**).

[その他]

- **大谷智仁**, 数値流体力学計算による左心房内血流の患者個別解析, Materialize 社ウェビナー (<http://www.materialise.com/ja/resources/medical/webinar-recording/a-personalized-blood-flow-analysis-in-human-left-atrium>)

外部資金獲得状況・申請状況 (本研究課題に関連して、科研費、JST 等の競争的資金、受託研究、奨学寄付金を受給された場合、また、申請された場合はその状況を記入ください)

なし.

参考となるHP等