



文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発
 「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」
 M-SPhyR マルチスケール・マルチフィジックス循環系解析システム
 Research and Development for Next-generation Information Technology of MEXT,
 “Revolutionary Simulation Software”
 M-SPhyR, multi-scale and multi-physics circulatory analysis system

東京大学生産技術研究所 ————— 計算科学技術連携研究センター

- 分類 生命現象シミュレーション
- キーワード マルチスケール、マルチフィジックス、血管モデリング、大規模血流解析、血流血管壁連成解析
- 開発者 福成 洋、徳田茂史、畝村 毅、大島まり
- 公開年月 2007年12月
- コード名 M-SPhyR
- 使用言語 Fortran 90、Visual C++

◇システム概要

血管病変の発症・進行には血液の流れや壁面せん断応力などの血行力学的因子が影響を与えていると考えられている。この血管病変の発症・進行のメカニズム解明に役立てるべく、器官・組織・細胞レベルに着目したマルチスケール・フィジックス・シミュレーションを実現するシミュレーションシステムとして M-SPhyR (Multi-Scale and Physics simulator) システム (図1) を開発した。

M-SPhyR は 3 個の主要プログラムモジュールから構成されている。医用画像から血管の表面形状モデルを構築する M-SPhyR Modeling、大規模 3 次元血流解析を行なう M-SPhyR BFlow、特定箇所について血流と血管壁の相互作用を詳細に解析する M-SPhyR DIAS である。各プログラムは共通の GUI を用いて設定・操作を行なうことができる。

◇3次元血管モデリングツール M-SPhyR Modeling

M-SPhyR Modeling は、MRI や X 線 CT などの既存の医療診断装置から得られる画像をベースに血管の表面構造を 3 次元的に抽出・構築するプログラムである。本プログラムを用いて医用画像から直接 3 次元モデル作成することで、患者個人ごとの形状に基づく血流解析が実現できる。

M-SPhyR Modeling の特徴としては、(1)医用機器で用いられる標準的ファイル形式である DICOM フォーマットに対応、(2)血管表現に B-Spline 関数曲線・曲面を使用しており、形状の修正が容易、(3)曲率や捻れ度などの血管の形状パラメータを算出可能、などが挙げられる。構築した血管表面は市販の格子作成ソフトに読み込ませて計算格子を作成することができる。

◇3次元血流解析ツール M-SPhyR BFlow

M-SPhyR BFlow は、M-SPhyR Modeling により作成した血管形状を用いてイメージベースドの大

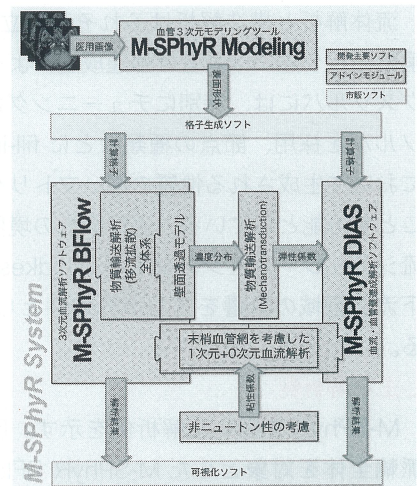


図1 M-SPhyR システム概要

規模3次元血流解析を行うソフトウェアである。文部科学省ITプログラム戦略的基盤ソフトウェア開発プロジェクトにおいて開発された流体解析ソフト FrontFlow/red をベースとした有限体積法に基づく3次元流体解析プログラムであり、基本的な流体解析についての精度・性能は FrontFlow/red に準じる。

M-SPhyR BFlow特有の機能として、末梢血管網の効果を模擬するために、1次元・0次元解析モジュールを装備しており、3次元解析の流出境界条件として接続することで数mmオーダーの血管から毛細血管網にわたるマルチスケールシミュレーションが実行できる。また血流による物質の輸送および血管壁への物質透過を解析する物質輸送解析モジュールも装備しており、例えば悪玉コレステロールの血管壁への透過現象などマルチフィジックスな解析が可能である。さらにここで得られた濃度分布を基に血管壁の弾性係数を求め、M-SPhyR DIAS と接続することで血管の長期的変性予測などの解析も可能である。

◇血流・血管壁連成解析ツール M-SPhyR DIAS

M-SPhyR DIAS は、血流と血管壁の連成解析を行う、流体構造連成 (FSI) 解析ソフトウェアである。流体解析では移動境界問題として非圧縮性流体を用いた ALE 有限要素法を採用し、構造解析では線形弾性体の他、超弾性体を用いた混合型有限要素法が使用可能である。幾何学的非線形性、材料非線形性を考慮した大変形問題も取扱い可能となっており、管径が10%程にも変化する血管の変形を考える際には重要となる。

流体解析と構造解析はそれぞれ独立に行うこともできるが、FSI解析を行う際には両者は強連成法によって結び付けられる。マトリクスソルバには、特別にチューニングされた ILU 前処理付 GMRES ソルバを採用、節点の種類ごとに fill-in レベルを調整し、FSI 解析において生成される性質の悪いマトリクス方程式をロバストに解くことを可能としている。流体解析の境界条件に関しては、血管・血流シミュレーションに有用な Windkessel モデルも装備しており、下流血管域の影響を圧力境界条件として加味した解析が可能である。

◇主な解析例

M-SPhyR を用いた解析例を示す。図2は脳の Willis 動脈輪全体を対象とした M-SPhyR BFlow によるマルチスケール血流解析で得られた壁面せん断応力分布である。この量は血管疾患の発生や進行に重要な指標である。血管形状はある患者の MRI 画像から M-SPhyR Modeling を用いて構築した。図3は M-SPhyR BFlow により実行した血管壁への悪玉コレステロール (LDL) 輸送解析の例である。血管は総頸動脈分岐部であり、MRI 画像から M-SPhyR Modeling により作成している。さらに動脈硬化症を想定し、得られた LDL 濃度分布を基に血管壁の弾性係数分布を求め、血管壁の構造解析を M-SPhyR DIAS により行なった。この解析から血管壁にかかる主応力分布を得ることができた (図4)。

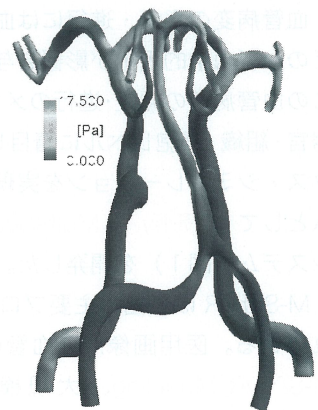


図2 壁面せん断応力分布

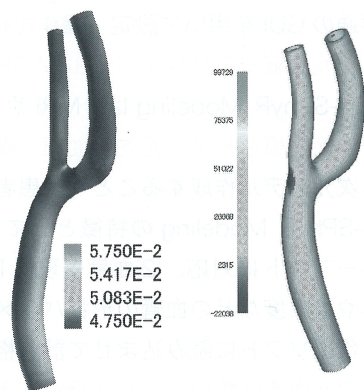


図3 LDL 濃度分布 図4 主応力分布