

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 Circulation 血流・血管壁連成解析ツール MC-DIAS
 Research and Development for Next-generation Information Technology of MEXT,
 “Revolutionary Simulation Software”
 MC-DIAS, simulation program for Blood Flow-Vessel Wall interaction analysis
 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	流体構造連成解析、FSI、ALE 有限要素法、超弾性体
開発者	福成 洋、大島まり
公開年月	2007年6月
コード名	MC-DIAS
使用言語	Fortran90

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。血管病変の発症・進行のメカニズム解明に役立つべく、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) Circulation システム (図1) を開発している。MC-DIAS は、M-SPhyR Circulation の主要コンポーネントの一つであり、MC-Modeling により医用画像から再構築した血管形状を用いて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。

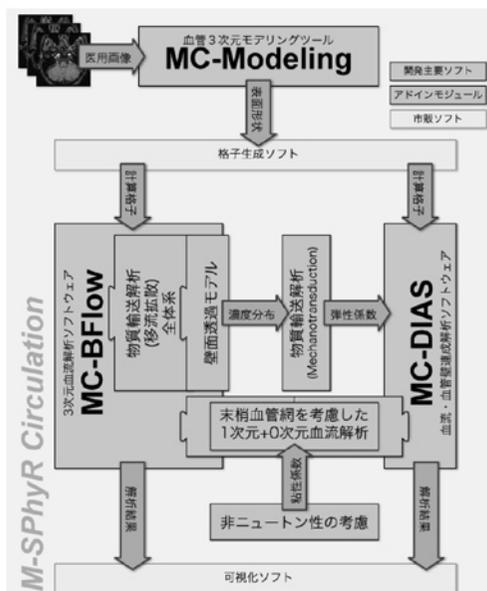


図1 M-SPhyR Circulation システム概要

◇ MC-DIAS の特徴

流体解析では移動境界問題を扱うために、非圧縮性流体を用いた ALE 有限要素法を採用している。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り、幾何学的非線形性、材料非線形性を考慮した大変形問題を取り扱うことができる。このことは、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。つまり流体領域と構造領域の境界面で両者は同じ節点を共有し、一つの全体係

数マトリクス（剛性マトリクス）を作る。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 ソルバを採用している。節点の種類ごとに fill-in レベルを調整するため、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、計算量を過度に増やすことなく、ロバストに解くことが可能になる。

流体解析の境界条件に関しては、通常の流速・圧力指定のほか、血管・血流シミュレーションに有用な Windkessel モデルを標準で装備しており、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。また、後処理に関しても、壁面せん断応力値の出力ツールなど、生体力学的考察に有用な機能が実装されている。さらに、MC-BFlow によって行われた物質輸送解析の結果（たとえばコレステロールの血管壁沈着状態）などを血管壁の弾性係数の形で取り込むことにより、血管の長期的変性予測などのシミュレーションが可能となる。

◇シミュレーション実行例

ここでは MC-DIAS を用いた流体構造連成解析の例を示す。中大脳動脈瘤解析で使用するモデルは、M-SPhyR Circulation の主要ソフトである MC-Modeling を用いて、ある患者の実際の頭部 MRA 画像から流体（血液）領域を作成し、それにあわせて血管壁（構造）領域を厚さ一様にして構築した。一つの流入口に流速境界条件を、二つの流出口に圧力抵抗を与え、構造は全端部を固定している。解析の結果、動脈瘤部に流入した血液は瘤内部で旋回しながら下流血管に流出していくという決流動態が明らかになった（図2）。FSI 解析の結果と、流体解析や構造解析のみの結果を比較すると、壁面せん断応力値や血管壁内部の応力値に有意な差があることから、動脈瘤のような解析では、血流と血管壁の相互作用を厳密に考慮する必要があることが示唆される。

頸動脈の解析では、MC-BFlow と物質輸送解析モジュールを組み合わせた解析で得られた LDL の血管壁堆積量を基に動脈硬化の進行を仮定し、得られた血管壁弾性係数の分布を求めた（図3）。これを構造の物性値として構造解析・FSI 解析を行うことで、血管病変の長期的予測が可能となる。

【福成】

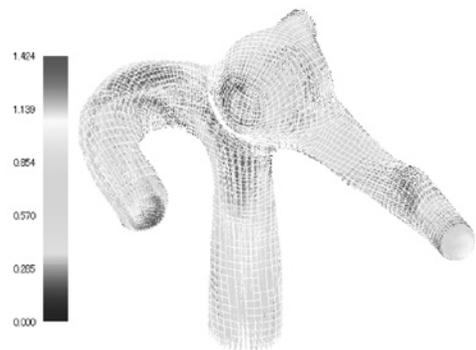


図2 中大脳動脈瘤内血流の流速分布

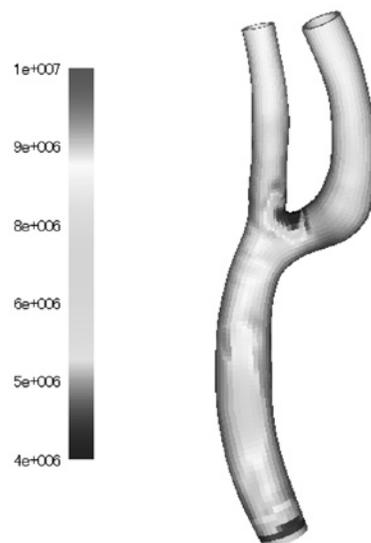


図3 LDL の血管壁堆積量から得られた血管壁の弾性係数分布