

オープンソース連成解析ツール Elmer を用いた 流体構造連携解析の基礎的検討

ー大動脈解離の2次元モデルでの分析ー

柴田良一^{1†} 白川岳² 辰岡正樹³

¹岐阜工業高専 ²紀南病院 ³アルゴグラフィックス

Fundamental study on analysis of fluid structure interaction analysis using open source multi physics analysis tool Elmer

- For two dimensional model of aortic dissection -

Ryoichi SHIBATA ^{††} Takashi SHIRAKAWA ^{**} Masaki TATSUOKA ^{***}

^{*} NIT, GIFU College ^{**} KINAN Hospital ^{***} ARGO GRAPHICS Inc.

Keywords: Open Source, Elmer, Multi Physics, Fluid Structure Interaction, Aortic Dissection

1. 緒言

現在では、構造解析や流体解析など、単独の物理現象を解析する技術が実用的な段階に達している。しかし、現実の現象は様々な現象が複雑に関連した結果として生じるものであり、複数の物理現象の関係性までを考慮する連成解析が必要である。この連成解析技術の進展は、ものづくりだけではなく医療への応用が期待されている。例えば血管内の血流解析では、非常に柔らかな構造物である血管とその内部を拍動して流れる血流の相互作用を無視することはできず、流体構造連成解析を活用する必要がある。このように、工学分野での知見と医療面での必要性を合わせた研究が必要であると考え、本研究では大動脈解離を対象とした流体構造連成解析の基礎的検討を行った。

2. 連成解析の考え方

連成解析では、解析対象のモデル化の寸法レベルの扱い方によって2つの連成が考えられる。A1：通常は実際の物体の寸法に対応したモデル化（要素）に限定し、これを対象に複数の物理現象を分析する。例えば流体中のカルマン渦による弾性体の振動現象などがある。別の方向性としては、A2：実際の物体をマクロモデルとし、分子原子をミクロモデルとすることで、ミクロモデルの挙動がマクロモデルの変化を生じさせる階層化された連成解析もある。例えば金属分子の結合破断から材料の亀裂を評価して、さらには構造体の破壊までを検討する課題も今後は考えられる。現在のところ、対象の規模を限定したモデルを用いたA1形式の連成解析が多い。

また、実際の解析手順を考える場合には2つの手法がある。B1：1つの対象に複数の物理現象を適用する解析で、例えば金属製発熱体に対して電流が作用すると抵抗で発熱し、熱応力から構造体に変形する現象では、電流と熱流と構造の3つの物理モデルを用いて連成解析を行う。B2：複数の対象の複数の物理現象を適用する解析で、例えば流体中の弾性体の振動では、流体部分を流体解析で圧力などを分析し、これを構造側部分に荷重として与えて構造解析で変形を評価する。

さらに具体的に解析を実現する上で、システムの構成には2つの形式がある。C1：独立型では、単独の物理現象を対象とした各ソルバー間で情報交換して連成解析を実現する方法であり、特定のソルバー間でのみの連携を可能にする試みが多い。C2：統合型では、複数の物理現象を対象としたソルバーを、1つのツールに統合したものであり、オープンソースで公開された統合型の連成解析ツール Elmer[1]では、いずれの形式においても連成解析が可能である。

[†] ryos@gifu-nct.ac.jp

3. 連成解析ツール Elmer の概要

オープンソースの連成解析ツール Elmer (エルマー) は、本質的には偏微分方程式を解くための有限要素法による汎用ソフトウェアパッケージである。偏微分方程式で記述される複数の物理現象を取り扱うことが可能であり、さらにこれらを連成して処理することが可能である。これよりマルチフィジックスに対応した多機能で統合型の連成解析ツールとして注目されている。

この Elmer は 1995 年からフィンランドの技術基金 : Tekes に基づいた国家的な CFD プロジェクトによって開発が始まり、既に 20 年以上継続している。当初のプロジェクトが終了した後、開発は CSC (フィンランド科学 IT センター) によって多面的な研究開発が継続されてきた。2005 年に GPL のライセンスで公開され、ユーザー数が増加している。

4. 大動脈解離の流体構造連成解析を目指した試み

大動脈解離では、大動脈内膜に生じた亀裂から中膜に血流が入ることにより血管壁が剥離して新たに隔壁 (フラップ) が形成され、血流や血圧の作用によって血管径の拡大や破裂といった病状経過をたどることがある。この現象を分析するためには、脈動する血流を流体解析で求め、その圧力を荷重として作用させてフラップや血管壁の挙動を構造解析で求めることが必要である。

本研究では、オープンソースのプリポストツール SALOME [2] 用いて図 1 (a) に示す 2 次元モデルから UNV 形式のメッシュ (b) のように作成した。2 次元モデルとすることで計算量が圧縮できることを期待し、四面体の有限要素数は 214, 151 要素 (流体 + 構造) であった。流体部分と構造部分を一体化して作成し、連成解析で相互作用が必要な境界面を定義した。

この解析では、血管壁が剥離してフラップが形成される発症時の変化ではなく、フラップにより隔てられた真腔と偽腔が形成された状態を初期状態として、血流が作用した時の血管やフラップの変形を流体構造連成解析で分析した。

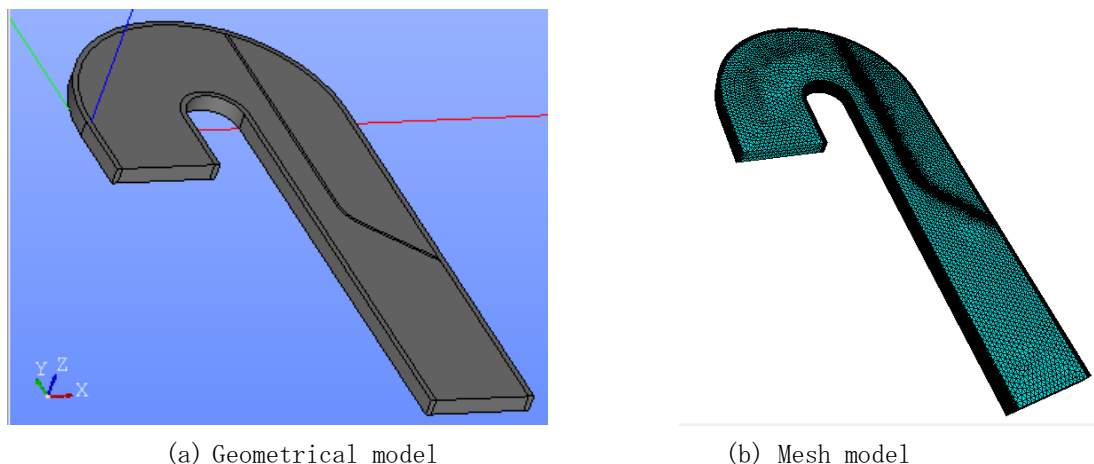
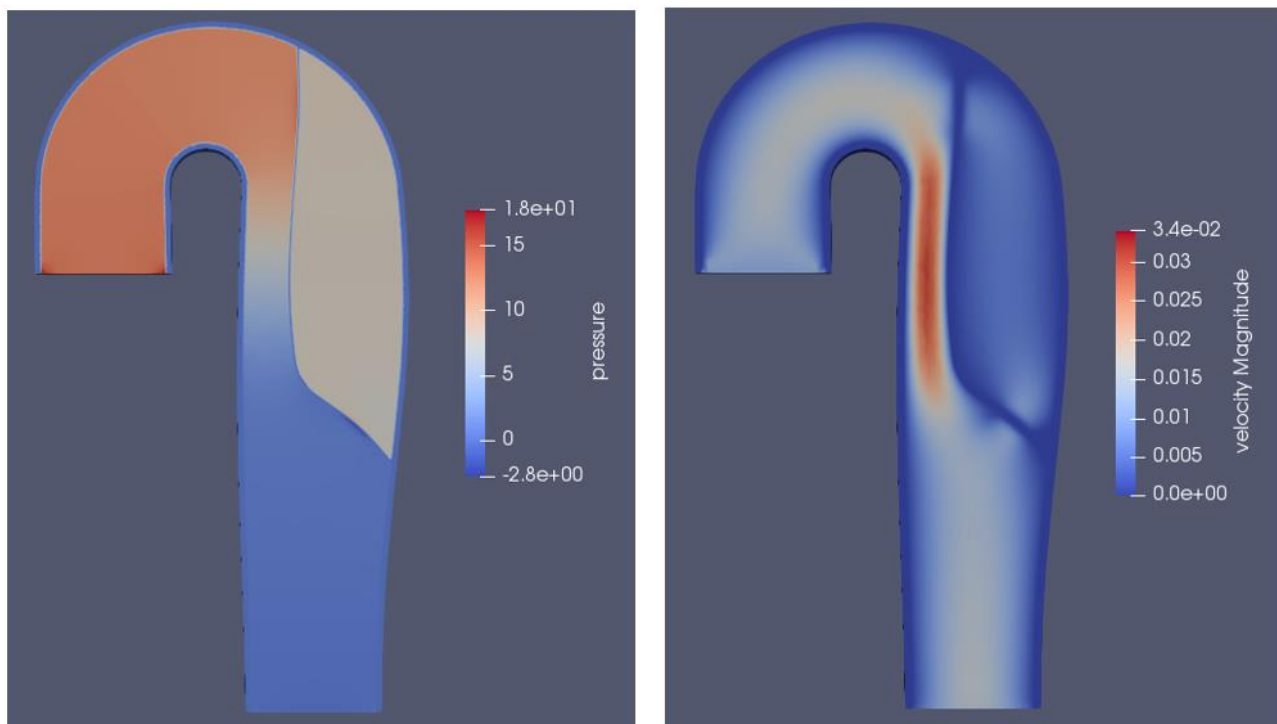


Figure 1. Analysis model of blood flow and vessel deformation.

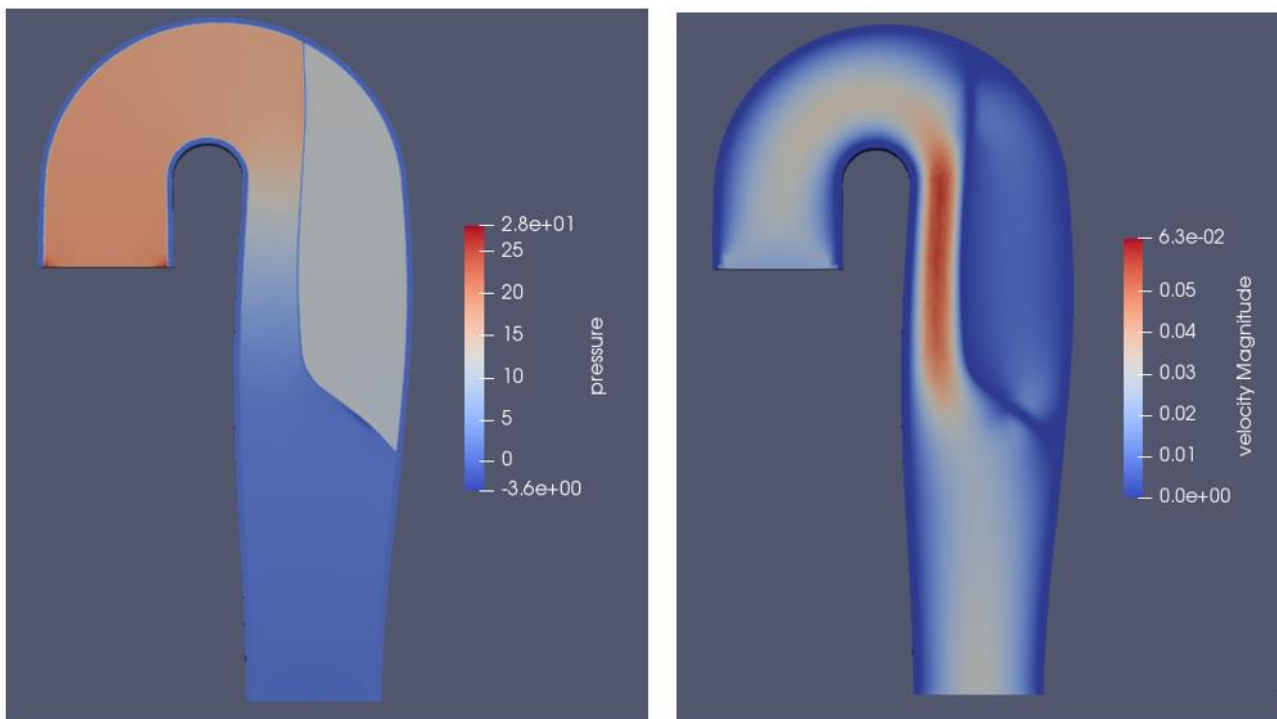
このメッシュモデルを用い、統合型連成解析ツール Elmer において、流体解析には Navier-Stokes ソルバー、構造解析には Nonlinear-Elasticity ソルバーを設定し、相互作用が必要な境界面には Mesh-Update ソルバーを割り当てることで流体構造連成解析を実現した。これらの設定は、Elmer GUI ツールを用いてメニュー選択より効率的に設定可能であった。

血流は脈動するため本来は非定常解析が必要であるが、ここでは解析モデルの有効性を検証する目的のため、予備的に一定の血流による定常解析とした。材料特性は、流体の影響による構造の変化をわかりやすく示すための理想的な設定とした。

血流の設定は、Figure 1(a) に示す逆 U 字型の解析モデルの心臓側 (短い左側) から速度設定で秒速 0.01 m と 0.02 m の 2 種類をおき、右の長い下流側は圧力設定で 0 とした。



(a) Inlet velocity = 0.01 m/s



(b) Inlet velocity = 0.02 m/s

Figure 2. Analysis results of blood flow and vessel/flap deformation.

これらの結果は、血流がフラップ上部に設けられた Entry から流入し、血流が真腔側と偽腔側に分かれ、偽腔に充満して下部の Re-entry から流出する様子を示していた。偽腔の圧力が上昇することによりフラップが真腔側に向かって膨らみ、血管幅が左右に膨らむ様子がわかった。

左側の圧力分布を見ると、フラップの Entry 付近までの血管内圧が高く、次に偽腔内圧で、下流の血管内圧がもっとも低くなった。右側の速度分布を見ると、フラップにより狭められた真腔部分で、前後の2倍程度の増加が見られる。なお流入側の速度が2倍になることにより、各部位の圧力も速度も増加していること

がわかった。

実践的な規模の問題では計算量が多く、現実的な運用時間では連成解析は困難とも言われる。本研究の2次元モデルでは、解析時間は2,600秒（約44分）程度であった。

5. 結語

連成解析では様々な試みが報告されている。本研究では、流体構造連成解析を用いて2次元の大動脈解離モデルの血流と構造の分析を行い、定性的な挙動の変化を相対的に比較検討することが可能であった。ただし定量的な評価については、変形モードの不一致もあり、2次元の解析結果を3次元に拡張することは困難であった。

医療面から見ると、今回の流体構造連成解析により、偽腔内の血圧は比較的高くなり得る可能性があり、また血流の上昇でさらに内圧が上がる事が分かった。これは臨床的に極めて価値のある結果であり、今後は3次元モデルによる定量的な評価方法の確立が望まれる。

参考文献

- [1] 統合型連成解析ツール Elmer 公式ウェブ <https://www.csc.fi/web/elmer>
- [2] プリポストツール SALOME 公式ウェブ <https://www.salome-platform.org/>