卒業論文

大動脈弁開閉時の応力評価のための
流体構造連成解析手法の開発

令和 4 年 1 月 28 日　提出

指導教員　波田野　明日可　講師
03200163　池田卓彌

大動脈弁開閉時の応力評価のための流体構造連成解析手法の開発

03200163　池田　卓彌　　指導教員：波田野 明日可 講師

Keywords: Aortic Valve, Fluid Structure Interaction, Finite Element Method, Weak Coupling, Overset Grid Method

1. 諸言

大動脈弁疾患には収縮期に弁が十分に開いていないために左心室から全身に血液を送り出しにくくなってしまう大動脈弁狭窄症と拡張期に三尖弁のいずれかが完全に閉じきることができず，左心室に血液が逆流してしまう大動脈弁閉鎖不全症の 2 つの代表的な疾患が存在する．

これらの大動脈弁疾患の原因や病状の進行の仕方を明らかにするべく，動物実験や臨床試験などのアプローチが取られている[1]．しかし，実験や臨床試験によって弁のひずみ及び弁にかかる応力を測定，算出することは非常に困難である．

そこで近年ではコンピュータを用いてシミュレーションを実施することで，弁のひずみ及び弁の応力や血流動態を解明しようとする動きが多く見られている．

本研究では，渡邉[2]が実施したアクリルゴム製のモデルでの加圧実験と流体構造連成解析を行い，弁に生じる応力の観点から解析の妥当性を確認することを目的としている．

2. 研究手法

2.1　流体構造連成解析

流体解析と構造解析を別々のソフトウェアで実施し，弱連成解析による流体構造連成解析を実施した．時間連成手法として完全陽解法と反復解法の 2 種類を用いて解析し両者を比較することで，より解析精度の高いとされる反復解法に対して解析時間が短い完全陽解法が妥当な解析結果であるかどうかを評価した．

流体解析は有限体積法を用い，離散化した支配方程式を行列に組み込み反復法で計算する.構造解析では非線形有限要素法を用いた解析を実施した．

2.2 解析モデル

解析モデルは渡部[2]が作成したアクリルゴムのモデルを流体構造連成解析用のモデルとしてを作成した．流体解析時に必要な流路と弁のサイズと座標を合わせた上で，弁と流路の隙間がなくなるように流路を修正した Fig. 1(a)を作成した．これに流路を加えることで Fig1. (b)のような解析モデルを作成した．

(a) (b)

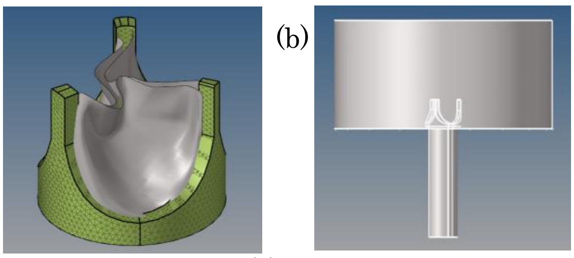

Fig. 1 Analysis model of (a) leaflets of aortic valve and (b) fluid channel

2.3 解析条件

流体解析では流体入口に流速条件を与え，流体出口は大気圧開放とした．

構造解析では弁尖と流路が接する部分を固定し，弁表面に流体解析で求めた圧力を与えた．弁は等方性弾性体と仮定し，物性値は渡部[1]が単軸引張試験によって求めた値を利用している．

3. 解析結果と考察

3.1　弁尖の変形

Fig. 2 のように大動脈弁が開く様子を圧力が発散してしまう直前まで再現できた．陽解法と反復解法で弁の変形がほぼ一致しており，陽解法による解析の妥当性が確認できた．

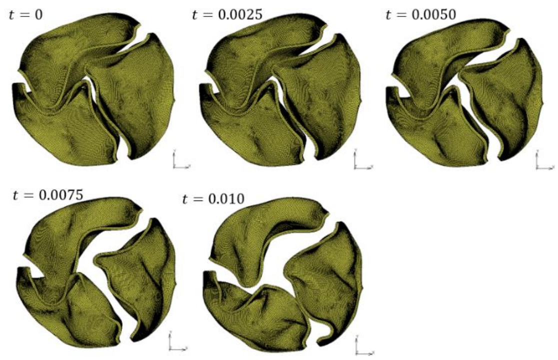

Fig. 2 Deformation of leaflets at each time

3.2　陽解法と反復解法の解析結果の比較

0.0025 秒, 0.0050 秒, 0.0075 秒, 0.010 秒の 4 つの時刻で比較を行った．0.0075 秒までは圧力，応力，変位はいずれもほぼ一致していた．Fig. 3 のように 0.010 秒後における第一主応力の分布はほぼ同じ結果となり，変位についてもほぼ同じ値が得られた．圧力に関しては0.010秒時点で発散傾向にあったため陽解法と反復解法で大きな違いが見られた．圧力が発散するまで圧力，応力，変位がほぼ一致していたことから，陽解法による解析結果は妥当な結果であると判断した．

(a) (b)

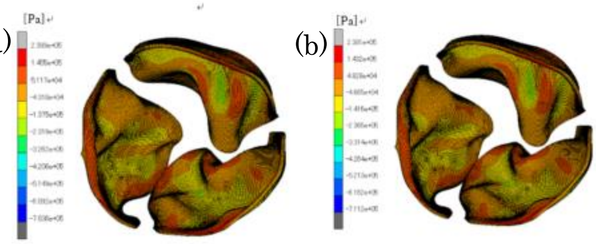

Fig. 3 Major principal value of stress with (a) explicit method and (b) iterative method at 0.010 s

4. 結論

流体解析と構造解析がともに発散していない状況では陽解法を用いた解析結果は妥当な結果であると判断できた．弁尖が開く途中で流体解析のメッシュ変形によって負体積が増加し圧力が発散するという問題があり，弁を完全に開かせたり閉じさせたりする際の課題が残された．

4. 参考文献

[1]: Mostafa Abbasi, Ali N. Azadani, “Leaflet stress and strain distributions following incomplete transcatheter aortic valve expansion.”, *Journal of Biomechanics, Vol. 48,* 2015, pp. 3663–3671.

[2]: 渡部拓哉, “デジタル画像相関法と有限要素法による大動脈弁閉鎖時の応力解析.”

.

目次

図目次

第1章　序論

1.1　背景

ヒトや猿などの哺乳類の心臓は２心房２心室から成っており，各部の壁を作っている心筋の収縮と弛緩によって全身に効率よく血液を送り出すための弁が備わっている．このうち，全身へ血液を送る左心室と大動脈との間を仕切る弁が大動脈弁である(図 1-1 左)．上から見ると 3 つの半月様の弁(semi-lunar valve) からなっており(三尖弁)，このうち 2 つの弁の付け根付近からそれぞれ左右の冠動脈が起始していることから，左冠尖（left coronary cusp)，右冠尖（right coronary cusp)，無冠尖（non-coronary cusp）と呼ばれる(図 1-1 右)．また大動脈基部には大動脈球と呼ばれる膨らみがあり，その内腔はバルサルバ洞（coronary sinus または sinus of Valsalva）と呼ばれ，弁の開閉に重要な役割を果たしていると考えられている．
機能的には大動脈弁は収縮期には 1 m/s に及ぶ流速にさらされ，拡張期には閉じることで大動脈と左心室の間に生じる 10 kPa もの圧力差を支えておりその組織には常に大きな機械的ストレスがかかっている．

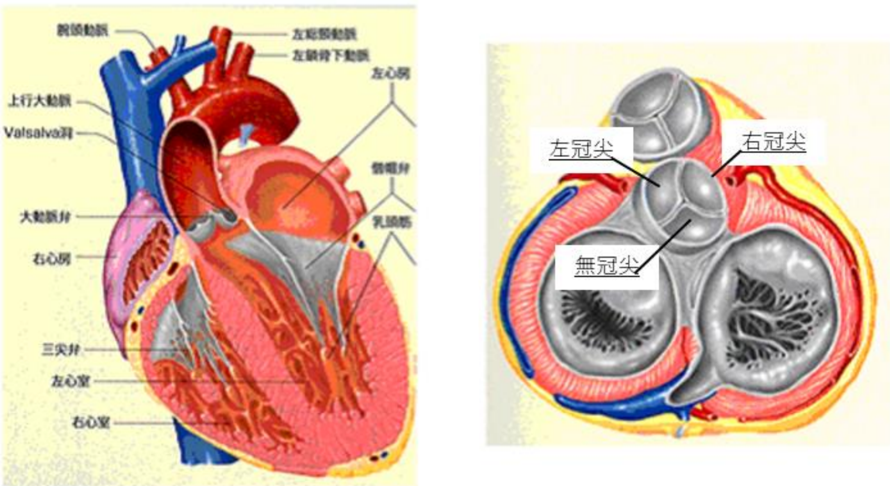

図 1-1 心臓断面図[1]

大動脈弁の疾患には大きく分けると 2 種類存在する．1 つ目は，収縮期に弁が十分に開いていないために左心室から全身に血液を送り出しにくくなってしまう大動脈弁狭窄症である．2 つ目は，拡張期に三尖弁のいずれかが完全に閉じきることができず，左心室に血液が逆流してしまう大動脈弁閉鎖不全症である．
近年では大動脈弁狭窄症の外科手術に代わる治療法として，経カテーテル大動脈弁移植術(TAVI:Transcatheter Aortic Valve Implantation)が注目されている．これは開胸して弁置換を行う外科手術に比べて体への負担がとても小さいため，外科手術に耐える体力がない高齢者

や, 開胸による手術を受けることができない理由のある患者に対して有効な治療法である. しかし弁置換によって埋め込まれる弁ほど機械的性質を長く保てないという欠点があることから, 体力が十分にある若い患者には外科手術が適用されることが多い[2].

これらの大動脈弁疾患の原因や病状の進行の仕方および治療の効果を明らかにするべく, 様々なアプローチが取られている. 動物実験や臨床試験によって, 弁が開閉する際の弁のひずみや弁にかかる応力を調査, 比較し病状との関連性を調べる研究が実施されている[3]. しかし, 実験や臨床試験によって弁のひずみ及び弁にかかる応力を測定, 算出することは非常に困難である.

そこで近年ではコンピュータを用いてシミュレーションを実施することで, 弁のひずみ及び, 弁の応力や血流動態を解明しようとする動きが多く見られる. 例えば, Wu ら[4]は患者の大動脈弁のモデルを作成して実験し, これと同じモデルで流体構造連成解析を実施して両者を比較することで大動脈弁の開閉時の応力の状態を解明しようと試みた.

1.2 先行研究

1.2.1 大動脈弁の流体構造連成解析に関する研究

大動脈弁の流体構造連成解析に関する研究として, 宮崎の研究[5]が挙げられる. この研究では 3 人の患者の大動脈弁の CT 画像から 3 次元モデリングすることで解析モデルを作成し, それぞれのモデルで血流に基づいた弁の開閉の様子を再現する流体構造連成解析を実施することに成功した. この研究ではナビエストークス方程式を弱形式化, 有限要素離散化, 線形化し構造解析の式と連成する強連成法による流体構造連成解析を実施した. 0.8 mm, 1.2 mm, 1.6 mm の 3 種類のメッシュサイズによる解析結果の比較を行ったところ, 0.8 mm では弁の開口面積の時刻歴を比較すると弁の開く早さはメッシュサイズによらず同程度であったが, 弁が閉じる早さに関してはメッシュサイズが小さいほど早いという結果になった. そのためさらに細かいメッシュサイズでの流体構造連成解析を実施する必要がある. また実際の患者の大動脈弁を用いて実験をすることはできず, この研究で得られた解析結果を実験結果と比較をすることは非常に困難である. そこで人工の大動脈弁で作成したモデルを使うことで, 実施された実験結果と解析結果を比較することができるようになる.

1.2.2 大動脈弁の加圧実験と有限要素解析の比較に関する研究

大動脈弁の加圧実験と有限要素解析を比較した研究として，渡部の研究[6]が挙げられる．この研究では，まずアクリルゴムで大動脈弁のモデルを作成し，空気を流すことで弁を閉じ，デジタル画像相関法によって弁の変位・ひずみ解析を実施した．同じ形状で解析モデルを作成し，有限要素解析を実施した．有限要素解析では弁表面に鉛直方向に 4 kPa の荷重をかけることで弁が閉じる様子を再現した．実験結果と弁表面に 4 kPa の荷重をかけた際の解析結果のひずみおよび応力を比較することによって，ひずみが局所的に大きな値をとる領域以外では実験結果と解析結果が概ね一致していることを確認した．この解析では構造解析しか実施していないため，実際に空気を流した実験結果との妥当性が確認されていない．これを踏まえて本研究では流体構造連成解析を実施することより実験結果と近い解析結果を得ることを期待している．

1.3 本研究の目的

弁に垂直に荷重を加える場合と，内部の流体の圧力変化によって弁に荷重を加える場合では，弁の開き方に違いがある．弁の開き方が違うということは，弁のひずみ及び弁にかかる応力も違うということになる．

本研究では，渡部[6]が実施したアクリルゴム製のモデルでの弁の開閉の様子を再現する流体構造連成解析を行い，流体解析と構造解析の時間連成手法の 1 つである完全陽解法で妥当な解析結果を導くことを目的としている．

大動脈弁の流体構造連成解析での解析結果が妥当であると判断できれば，大動脈弁疾患の患者の病状をきちんと把握できるようになり，医師の診断における 1 つの指標として扱うことができるようになる．

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．

第 1 章「序論」では研究背景や先行研究および本研究の目的について述べる．

第 2 章「解析手法」では本研究で使用する流体解析および構造解析の手法および両者の時間連成手法について述べる．

第 3 章「流体解析の解析モデルと境界条件」では流体解析用に作成した解析モデルと解析条件，および重合格子について述べる．

第 4 章「構造解析の解析モデルと境界条件」では構造解析用の解析モデルと解析条件について述べる.

第 5 章「結果と考察」

完全陽解法と反復解法の 2 種類で実施した解析結果を比較し, 解析結果の妥当性を評価する.

第 6 章「結言」では本研究で導かれた結論と今後の課題について述べる.

第2章　解析手法

本章では流体構造錬成の解析手法について説明する．まず流体解析の手法について説明し，続いて構造解析の手法について説明する．そして流体解析と構造解析の連成手法について説明する．

2.1　流体解析の手法

2.1 では[7][8]を参考にした．この節で用いた変数は以下のように設定した．

i	次元($i = 1,2,3$)	単位
ρ	密度	[kg/m^3]
x_i	位置座標	[m]
u_i	x_iの速度	[m/s]
t	時間	[s]
p	流体の圧力	[Pa]
μ	粘性係数	[Pa・s]
μ_t	渦粘性係数	[Pa・s]
g_i	加速度	[m/s^2]
ν	動粘性係数	[m^2/s]
C_p	定圧比熱	[J/(kg・K)]
T	温度	[K]
K	熱伝導率	[J/(m・s・K)]

表 2-1　支配方程式と離散化の変数

2.1.1 流体解析の流れ

本研究では有限体積法による陰解法汎用流体解析コード scFLOW (ver2021，ソフトウェアクレイドル社製, 以後 scFLOW)を用いて流体解析を実施した． 解析の流れを説明する．解析開始時にまずメッシュを読み込み, 次に境界条件を設定する．

各インクリメントではまず時間をタイムステップ分だけ更新して， 連立方程式を構築する． 続いて構築した連立方程式を解いて収束判定を行う． 収束しなかった場合は再び連立方程式を解く． 連立方程式が収束したら現時刻が計算終了時間なのかを判定し， 終了時刻ではなかった場合は次のインクリメントへと進み， 終了時刻だった場合には解析を終了する．

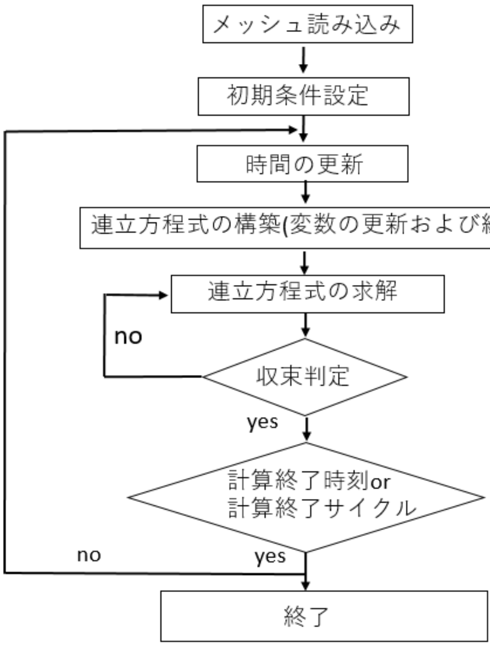

図 2-1 流体解析のフローチャート

2.1.2 基礎方程式

流体の質量保存式(連続の式)は以下のように表される．

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho u_i = 0 \qquad (2\text{-}1)$$

本研究では非圧縮性の空気 $(\rho = \mathrm{const})$ を流体に指定するため，$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$となる． ゆえに質量保存式は以下のように簡略化される．

$$\frac{\partial \boldsymbol{u_i}}{\partial \boldsymbol{x_i}} = \boldsymbol{0} \tag{2-2}$$

流体の運動方程式であるナビエ・ストークス方程式は以下のように表される．

$$\frac{\partial \boldsymbol{\rho u_i}}{\partial \boldsymbol{t}} + \frac{\partial \boldsymbol{u_j(\rho u_i)}}{\partial \boldsymbol{x_j}} = -\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \boldsymbol{x_i}} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x_j}} \boldsymbol{\mu} \left(\frac{\partial \boldsymbol{u_i}}{\partial \boldsymbol{x_j}} + \frac{\partial \boldsymbol{u_j}}{\partial \boldsymbol{x_i}} \right) + \boldsymbol{\rho g_i} \tag{2-3}$$

質量保存式と同様， 非圧縮性流体であることを考慮すると上式は以下のように表される．

$$\frac{\partial \boldsymbol{u_i}}{\partial \boldsymbol{t}} + \frac{\partial \boldsymbol{u_j u_i}}{\partial \boldsymbol{x_j}} = -\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\rho}} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \boldsymbol{x_i}} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x_j}} \boldsymbol{\nu} \left(\frac{\partial \boldsymbol{u_i}}{\partial \boldsymbol{x_j}} + \frac{\partial \boldsymbol{u_j}}{\partial \boldsymbol{x_i}} \right) + \boldsymbol{g_i} \tag{2-4}$$

2.1.3 離散化法

本研究で使用する scFLOW では離散化法として有限体積法を使用している. 有限体積法で計算をするために 2.1.1 で説明した基礎方程式を書き換える.

2.1.1 記載の基礎方程式はいずれも物理量fとすると以下のように表すことができる.

$$\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{t}} + \frac{\partial \boldsymbol{f u_j}}{\partial \boldsymbol{x_j}} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x_j}} \left(\boldsymbol{\alpha} \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x_j}} \right) + \boldsymbol{S} \tag{2-5}$$

上式は Einstein の縮約記法を用いており，jはダミーインデックスである． また，Sは単位時間単位体積あたりの生成量を表している．

この式の各項を左から順に非定常項， 移流項， 拡散項， 生成項と呼ぶ． この式を体積積分し， 移流項と拡散項をガウスの発散定理を用いて体積積分から面積分の形にすることで以下の式を得る．

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{t}} \int_{\boldsymbol{V}} \boldsymbol{f dV} + \int_{\boldsymbol{S}} \boldsymbol{f u_j n_j dS} = \int_{\boldsymbol{S}} \boldsymbol{\alpha} \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x_j}} \boldsymbol{n_j dS} + \int_{\boldsymbol{V}} \boldsymbol{SdV} \tag{2-6}$$

更に各項を書き換えていく． まずは非定常項から書き換えていく． 要素の体積をΔV，時間変化をΔtとすると

$$\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{t}} \approx \frac{\boldsymbol{f^{n+1}} - \boldsymbol{f^{n}}}{\boldsymbol{\Delta t}} \tag{2-7}$$

と近似することができる．これを体積積分すると

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V f dV \approx \frac{(f^{n+1} - f^n)\Delta V}{\Delta t} \tag{2-8}$$

と表せる．

続いて移流項を書き換える．移流項はベクトルなので流入流出の向きを考慮する必要がある．下図の要素番号の小さい方から大きい方に流れる物理量を計算する事を考える．要素番号 N の左面の数値流速を求める際に，要素番号 N-1 のデータを参照する方法を 1 次風上差分，これに加えて要素番号 N+1 のデータも参照する方法を中心差分, N-1 と N-2 のデータを参照する方法を 2 次風上差分と呼ぶ, 2 次のほうが精度は上がるが，物理量の変化が大きい箇所では計算解が収束せず振動してしまう可能性があるため，本研究では 1 次風上差分を用いている．

1 次風上差分の場合は移流項は以下のように表される．

$$\int_S f u_j n_j dS = \sum_k \left(f u_j n_j\right)_k \tag{2-9}$$

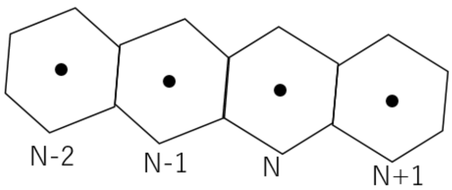

図 2-2 移流項の離散化のイメージ図

拡散項は物理量が周囲に均一に拡散していくのを表しているため移流項のように向きを考慮する必要はない． 必要になるのは要素面での値とその勾配である． 勾配は最小二乗法によって求められた要素中心の勾配を内挿して求める． 移流項と同じように計算すると拡散項は以下のように離散化される．

$$\int_S \alpha \frac{\partial f}{\partial x_j} n_j dS = \sum_k \left(\alpha \frac{\partial f}{\partial x_j} n_j\right)_k \tag{2-10}$$

生成項は流れや周囲の要素とは無関係にその要素内での生成または消滅を表す項で以下のように近似される．

$$\int_V S dV \approx S\Delta \mathrm{V} \tag{2-11}$$

以上から、離散化された支配方程式は以下のように表される.

$$\frac{(\boldsymbol{f^{n+1}}-\boldsymbol{f^{n}})\Delta\boldsymbol{V}}{\Delta\boldsymbol{t}}+\sum_{\boldsymbol{k}}\left(\boldsymbol{f u_j n_j}\right)_{\boldsymbol{k}}=\sum_{\boldsymbol{k}}\left(\boldsymbol{\alpha}\frac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\boldsymbol{x_j}}\boldsymbol{n_j}\right)_{\boldsymbol{k}}+\boldsymbol{S}\Delta\mathbf{V} \tag{2-12}$$

これを上記の基礎方程式全てに当てはめることで離散化した形で流体解析の計算を実施する。離散化した各式を以下のように行列化する. f_iおよびS_iは上記の離散化した支配方程式の各要素におけるfおよびSを表している. 行列$[A]$は係数行列と呼ばれる.

$$\begin{bmatrix} & & \\ & \boldsymbol{A} & \\ & & \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cdots\\ \boldsymbol{f_i}\\ \cdots\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cdots\\ \boldsymbol{S_i}\\ \cdots\end{bmatrix} \tag{2-13}$$

この$[A]$の逆行列を求めることでfを求めることができる.

$$\begin{bmatrix}\cdots\\ \boldsymbol{f_i}\\ \cdots\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} & & \\ & \boldsymbol{A} & \\ & & \end{bmatrix}^{-\boldsymbol{1}}\begin{bmatrix}\cdots\\ \boldsymbol{S_i}\\ \cdots\end{bmatrix} \tag{2-14}$$

逆行列を求めるために反復法を用いる. 解を仮定して適切な補正をかけつつその解と指定した差未満になるまで繰り返し計算する. scFLOW では CG-STAB 法, AMG CG-STAB 法等の反復解法が用意されており, 各物理量に対して適切な方法を用いる. 安定性を重要視する物理量に対しては CG-STAB 法を用いる. 計算効率を重要視する場合には AMG CG-STAB 法を用いる.

2.1.4 圧力補正法

本研究では流体として非圧縮性の空気を用いる. 非圧縮性流体の場合, 連続の式, ナビエ・ストークス方程式, エネルギー保存式はそれぞれ独立に解くことができてしまう. それぞれから求められた流速は離散化して計算されたものであるため, 必ずしも正しい値であるとは言えない. そこで連続の式及びナビエ・ストークス方程式から得られる以下の式を満たすようにして流速を求める.

$$\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{x_i}}\left(\frac{\partial\boldsymbol{p}}{\partial\boldsymbol{x_i}}\right)=\boldsymbol{0} \tag{2-15}$$

この式を 2.1.2 で説明したように離散化した上で反復解法で計算を行い, 圧力を補正する. scFLOW では SIMPLE 法[9], SIMPLEC 法[10], PISO 法[11],および SIMPLEC 法のタイムステ

ップが小さい場合に安定する手法を用いることができる．本研究では SIMPLEC 法を用いて圧力補正を行う．

2.2　構造解析の手法

2.2 では[12]を参考にした．

2.2.1 構造解析の流れ

本研究では有限要素法による陰解法汎用構造解析コード Marc (ver2021.2, MSC Software 社製, 以後 Marc)構造解析を行う．図 2-3 に非線形有限要素法の解析の流れを示す．

まずメッシュ形状を読み込む．次に反復計算のループに入る．反復計算のループ内ではまず荷重ベクトルを生成し，続いて接線剛性マトリクスを生成する．このマトリクスの解を計算してひずみ，応力，内力を計算する．収束を判定して収束していない場合は荷重ベクトルの生成からもう一度やり直し，収束していた場合は結果を出力する．結果を出力した後，現時刻が解析終了時刻かどうかを判定し解析終了時間でない場合は次のインクリメントへ進み，解析終了時刻であった場合はそこで解析を終了する．

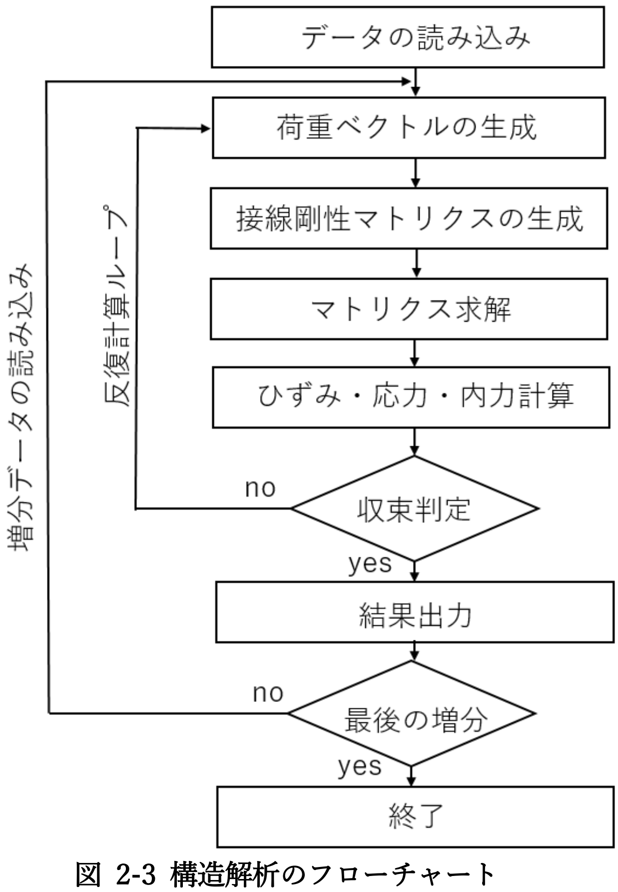

図 2-3 構造解析のフローチャート

2.2.2 非線形有限要素法の解法

非線形有限要素法における解法として Newton-Raphson 法を用いる.

変位u, $n-1$回目の計算時の変位との残差をΔu_n, 目標荷重Fとn回計算したあとの荷重$f(u)$との残差をΔf_nとすると

$$\boldsymbol{\Delta f_n = F - f(u)} \tag{2-16}$$

$$\boldsymbol{\Delta f_n = \frac{df(u)}{du}\Delta u_n} \tag{2-17}$$

となり, $\frac{df(u)}{du}$を接線剛性マトリクスと呼び, これと上式を用いてΔu_nを求める. このΔu_nをもとにn回目のときと同じように計算を行う.

$$\boldsymbol{\Delta f_{n+1} = F - f(u + \Delta u_n)} \tag{2-18}$$

$$\boldsymbol{\Delta f_{n+1} = \frac{df(u+\Delta u_n)}{du}\Delta u_{n+1}} \tag{2-19}$$

これを繰り返し, Fに十分近づくまで計算を繰り返すことで変位の値を算出する.

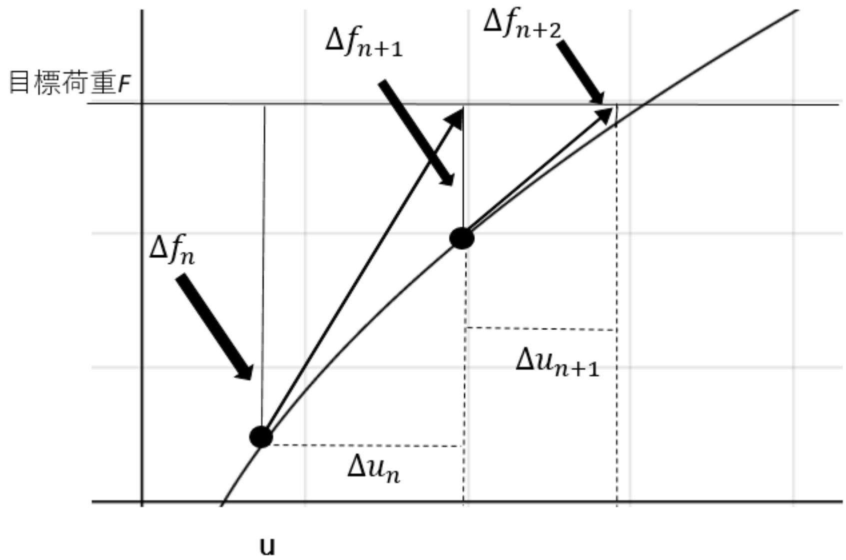

図 2-4 ニュートンラプソン法のイメージ図

2.2.3 接触

本研究では三尖弁の開閉の際に, 3 枚の弁同士が接触する. Marc では 2 物体がどれくらいの距離まで近づいたら接触とみなすかを設定することができる.

今, 図 2-5 の下側の接触相手のボディと上側の物体が接触することを考える. 次のインクリメントでは下の 1 から 4 の位置にいることになる. 1 は節点が要素の外側で接触判定距離からも外れている場合を表している. この場合は接触していないとみなし, 何も処理をせずに次のインクリメントへと進む. 2 は節点が要素の外側であるが, 節点が接触相手の接触判定距離内に入っている場合である. この場合は一旦接触しているとみなし, 乖離判定を行う. 3 は節点が接触相手の要素の内側まで入っており, 接触判定距離にも入っている場合である. この場合は接触しているとみなし, 節点が接触相手の要素表面まで押し戻される. 4 は節点が接触相手の要素の内側まで入っており, 接触判定距離の外側に節点が存在する場合である. この場合は貫通しているとみなす.

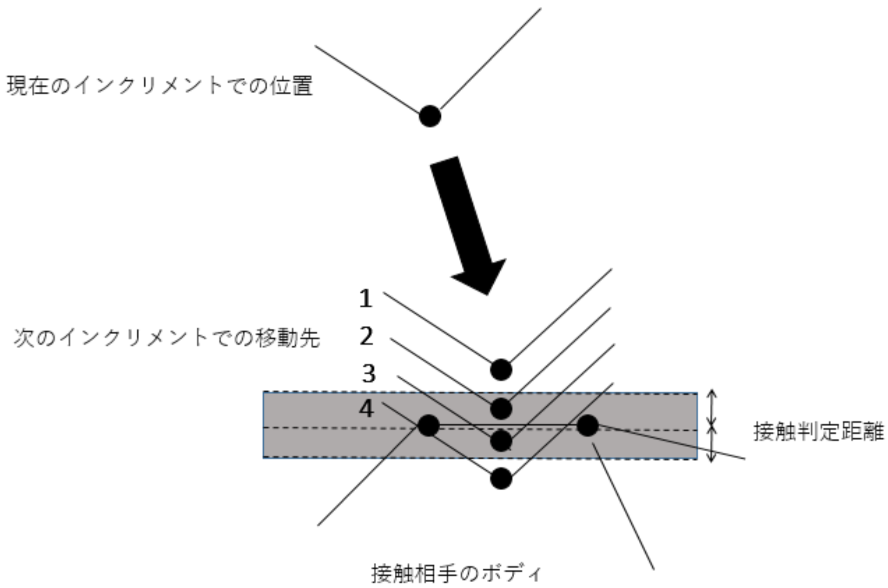

図 2-5 構造解析における接触のイメージ図

接触判定距離は最小要素エッジの$1/20$となっている. 上図の 2 の範囲を狭く, 3 の範囲を広く取ることで接触判定の精度を上げることができる. 図 2-6 で接触判定距離を$dist_{tol}$, とすると,接触バイアストレランスファクターをB $(0 \leq B \leq 1)$とすると, 図 2-5 における 2 の

領域の厚みを$dist_{tol}(1-B)$, 3 の領域の厚みを$dist_{tol}(1+B)$としている．なお本研究では$B=0.95$と設定している．

図 2-6 接触判定距離のイメージ図

2.2.4 構成則

本研究では弁の材料を等方性弾性体とするため，応力―ひずみの関係式である構成則は以下のように表すことができる．ただしE,νはそれぞれヤング率，ポアソン比であり，横弾性係数Gは$G=\frac{E}{2(1+\nu)}$である．

$$\boldsymbol{d\sigma_{ij}=2G\left(\delta_{ik}\delta_{jl}+\frac{\nu}{1-2\nu}\delta_{ij}\delta_{kl}\right)d\varepsilon_{kl}} \tag{2-20}$$

2.3 流体構造連成解析の手法

この節の内容は[7], [12], [13]を参考にした．

流体構造連成解析のカップリング手法として，各物理場の方程式を独立に解く弱連成解析と物理場の方程式を組み合わせてすべての物理量を一度に解く強連成解析の 2 種類が存在する．本研究では流体解析は scFLOW を用い，構造解析は Marc を用いる．これらを連成解析カップリングソフト MSC CoSim(ver 2022, MSC Software 社製, 以後 CoSim)というソフトウェアを用いて連成する弱連成解析を実施する．

図 2-7 に流体構造連成解析のフローチャートを示した．左の列が流体解析のソフトウェアである scFLOW の流れを，真ん中の列が流体解析と構造解析の連成を行う CoSim の流れを，右側が構造解析のソフトウェアである Marc の流れをそれぞれ示している．まず流体解析と構造解析を連成し情報股間をする準備をする．次に流体解析と構造解析でそれぞれ境界条件等の解析条件を読み込んだ後，メッシュ変形の連成界面での節点の座標情報を共有して本計算を開始する．本計算内では流体解析によって算出された連成界面の圧力を構造解析側に共有し，構造解析を実施して得られた連成界面の移動ベクトルを流体解析側に共有しメッシュ変形を行う．完全陽解法を用いる場合は 1 サイクルで圧力および移動ベクトルの

流体解析と構造解析間の通信を 1 回のみ実施する．反復解法を用いる場合には流体解析と構造解析の値がそれぞれ収束するまで繰り返し通信を行う．完全陽解法で 1 回の通信が完了または反復解法で値が収束すると，次のインクリメントへ進みこれを解析終了時間まで繰り返す．

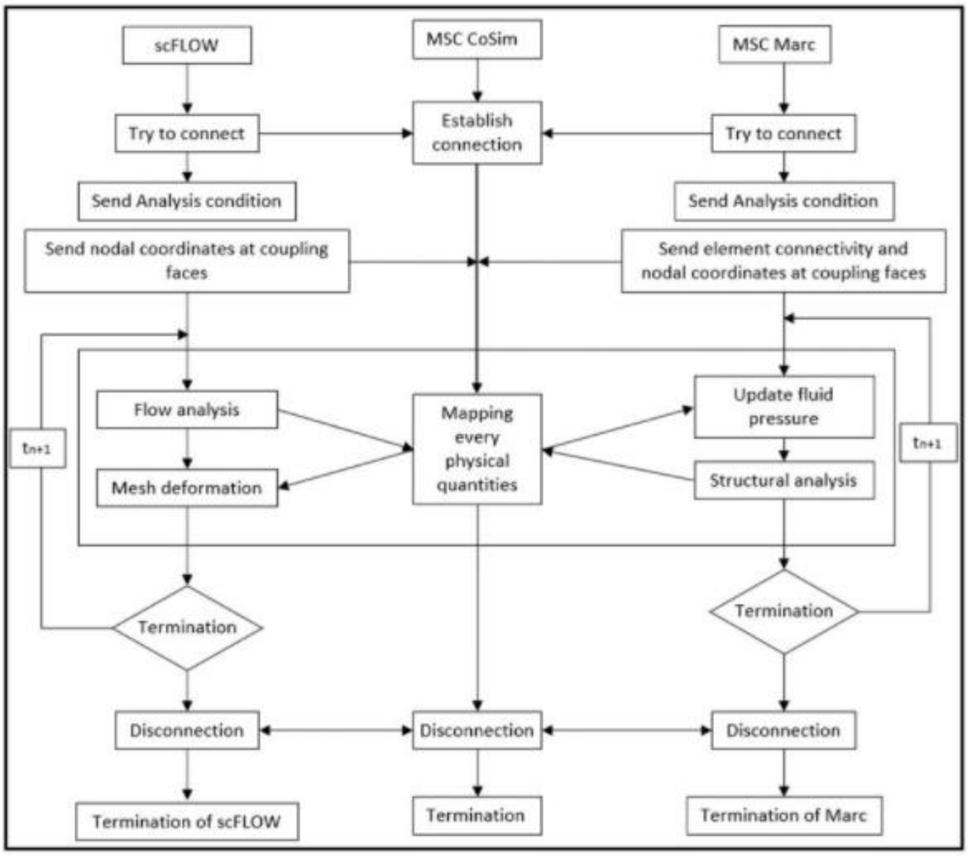

図 2-7 流体構造連成解析のフローチャート

本研究で用いたソフトウェアの時間連成手法には完全陽解法と反復解法の 2 種類がある．まず完全陽解法の手法について述べる．構造解析，流体解析の支配方程式をそれぞれN_s，N_fとして，解析ステップnまたはt_nに対する弁の変位，圧力をそれぞれu_n，P_nとする．まず支配方程式N_sにu_n，P_nを与えて次の方程式を見たすようなu_{n+1}を解く．

$$\boldsymbol{N_s(u_{n+1}, \overline{P}_{n+1}, u_n, P_n) = 0} \tag{2-21}$$

$$\boldsymbol{N_f(P_{n+1}, \overline{u}_{n+1}, P_n, u_n) = 0} \tag{2-22}$$

$\overline{P}_{n+1}$，$\bar{\mathrm{u}}_{n+1}$はnステップ以前のデータから陽的に算出されるP_{n+1}，u_{n+1}の予測値である．

各変数の関係は図 2-8 のようになっている．

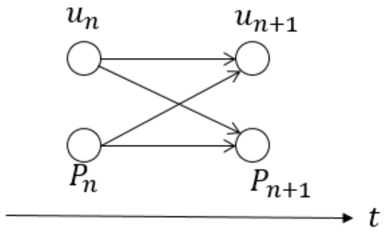

図 2-8 完全陽解法の概念図

続いて反復解法の手法について説明する．解析ステップnまたは解析時間t_nにおける解析リサイクル数$k = 0, 1, 2, \ldots$での弁の変位と圧力をそれぞれu_n^k，P_n^kとする．支配方程式N_s, N_fにu_n，P_n，u_{n+1}^k，P_{n+1}^kを代入して 2 つの独立な方程式を満たすようなu_{n+1}^{k+1}，P_{n+1}^{k+1}を算出する．

$$\boldsymbol{N_s}\left(\boldsymbol{u_{n+1}^{k+1}}, \boldsymbol{P_{n+1}^{k}}, \boldsymbol{u_n}, \boldsymbol{P_n}\right) = \boldsymbol{0} \tag{2-23}$$

$$\boldsymbol{N_f}\left(\boldsymbol{P_{n+1}^{k+1}}, \boldsymbol{u_{n+1}^{k}}, \boldsymbol{P_n}, \boldsymbol{u_n}\right) = \boldsymbol{0} \tag{2-24}$$

各変数の関係は図 2-9 のようになっている．

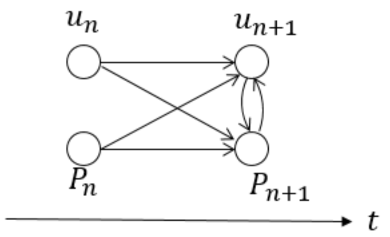

図 2-9 反復解法の概念図

第3章　流体解析のモデルと解析条件

3.1　解析モデル

本研究では渡部[6]が作成したアクリルゴムのモデルを流体構造連成解析用のモデルとして作成する．このモデルは自己心膜を用いた大動脈再建術に使用される OZAKI VRecS™の大動脈弁膜の形状を参考にして作成されている．自己心膜とヤング率が近い値であることからアクリル系ゴムシート(3M™ハイパーソフト放熱シート 5580H)を材料に用いている．

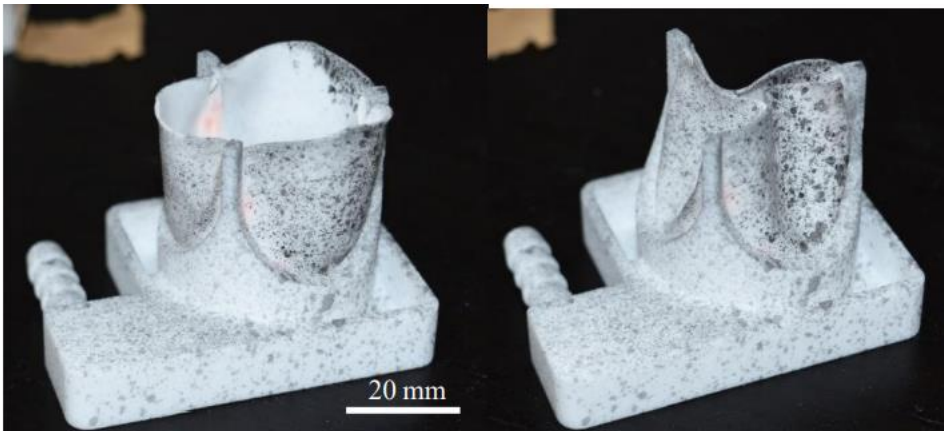

図 3-1 渡部[6]が作成した実験用モデル

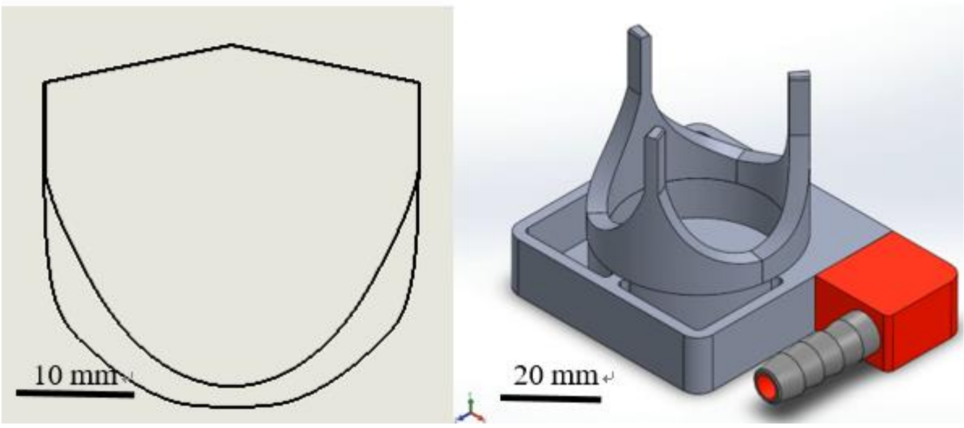

図 3-2 渡部[6]が作成した弁膜形状(左)と治具形状(右)

図 3-1 および図 3-2 をもとに以下の手順での図 3-3 のようなモデルを作成した．なお弁を固定する治具及び弁の形状は渡部[6]が作成した物であり，本研究では形状の parasolid のファイルを使用した．治具および弁は別々のモデルで，重ね合わせただけでは座標やサイズが一致しなかったため, Altair の HyperMesh を用いて位置合わせ及びサイズ合わせを行った．弁と治具が当たる場所に隙間が生じていたため, HyperMesh で治具の形状を弁との隙間がなくなるように修正した．

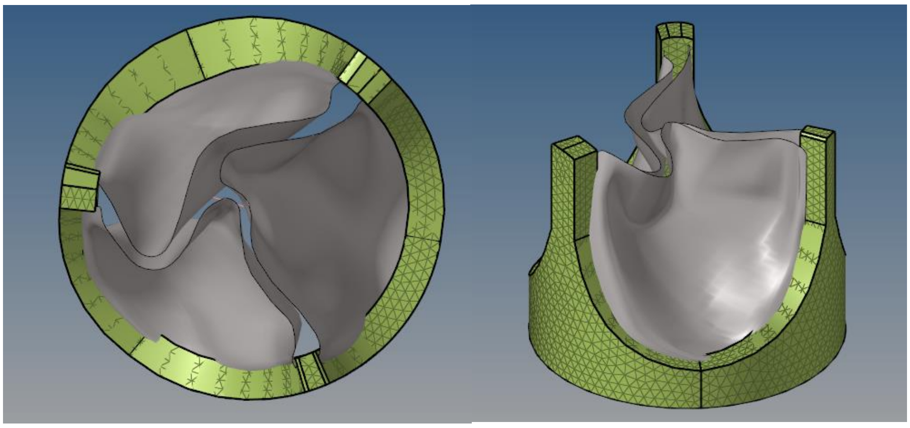

図 3-3 流体解析用のモデル

さらに治具底面に半径 10 cm の円と半径 1.8 cm の 2 つの円を作成し，半径 10 cm の円を図 3-4 の上方向に 10 cm, 半径の 1.8 cm の円を下方向に 10 cm 延長することで下図のように流路を作成した．図下面が流体の入り口，上面が流体の出口である．弁を通過した空気は大気開放されるので，大きな領域を設けている．

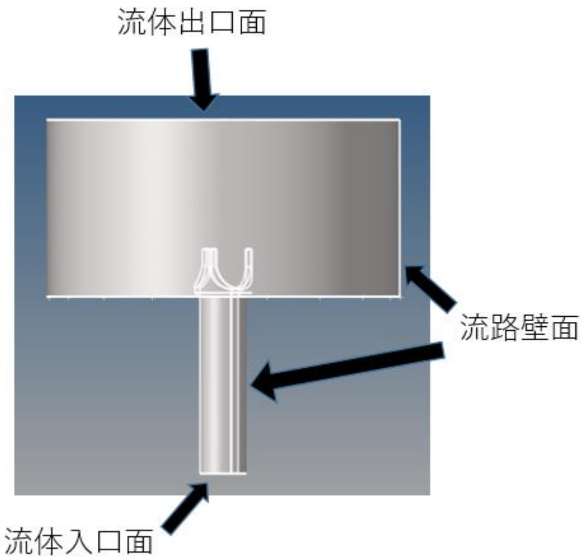

図 3-4 流路・治具・弁を合わせたモデル

3.2　解析条件

続いて解析条件について説明する．タイムステップは1.0×10^{-4} sとして終了時間を0.1sとした．構造解析との時間連成手法は完全陽解法と反復解法の 2 種類で実施した．反復解法では 1 サイクルでの反復数の上限を 100 回とした．

3.2.1 境界条件

流体入り口境界には下の図のような流速を与え，流体出口境界は大気圧開放とする．

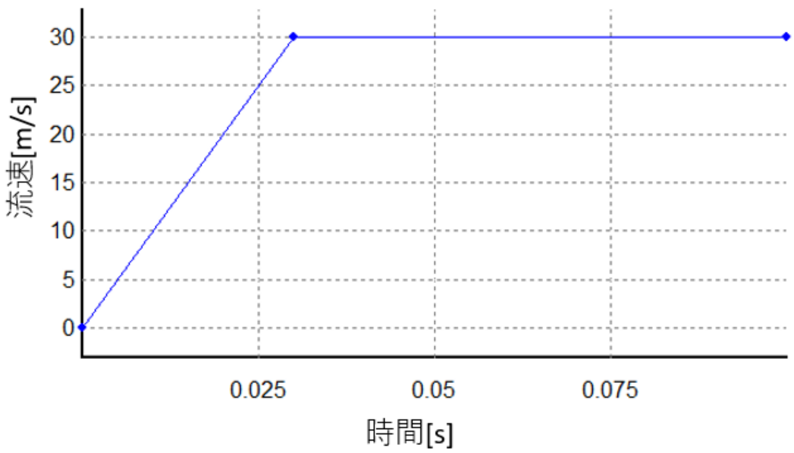

図 3-5 流体入口の圧力条件

流路壁面境界は，流体の速度ベクトルを$\boldsymbol{u}$，壁面の任意の点における単位法線ベクトルを$\boldsymbol{n}$として$\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{n} = 0$と表される．

3.2.2 物性条件

流体には非圧縮性の空気（20℃）を指定した．密度$\rho = 1.206\ \mathrm{kg/m^3}$，粘性係数$\mu = 1.83 \times 10^{-5}\ \mathrm{Pa \cdot s}$と設定した．

3.3 メッシュ

3.1 で説明した解析モデルを流体解析用のソフトウェアである scFLOW の読み込む．メッシュを作成するにあたり，まず八分木という立方体の格子でモデルを分割し，その後八分木のサイズ（オクタントサイズ）に基づいてメッシュを切る．オクタントサイズが小さい箇所はメッシュが細かくなり，オクタントサイズが大きい箇所ではメッシュが粗くなる． 八分木およびメッシュは下図のようになっている．

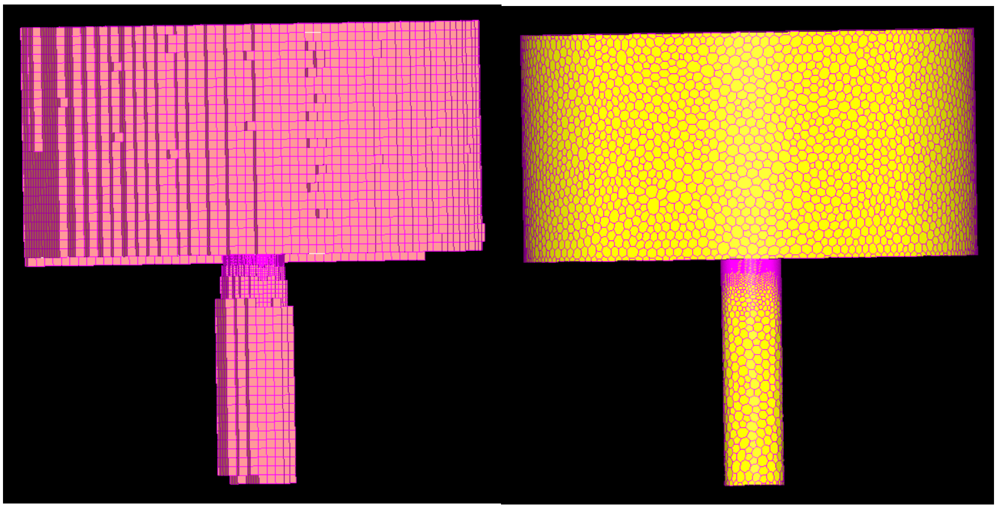

図 3-6 流路の八分木(左)とメッシュ(右)

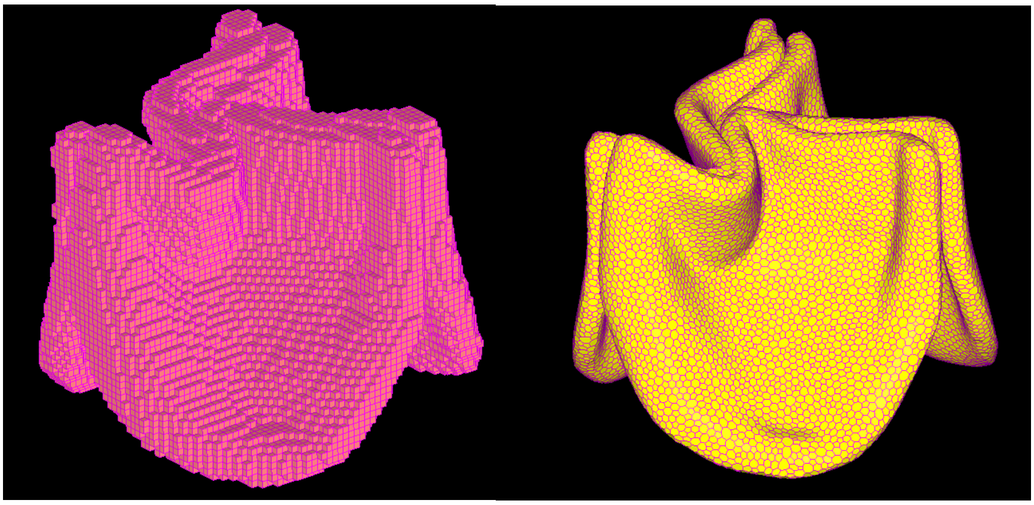

図 3-7 弁の八分木(左)とメッシュ(右)

メッシュは下図のようなポリヘドラルメッシュ（任意多面体）で作られている．

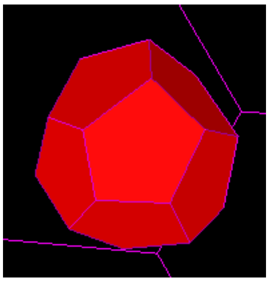

図 3-8 ポリヘドラルメッシュ

3.4 重合格子

scFLOW には重合格子という機能が備わっている．流路および弁をまとめてメッシュ作成をして解析すると，弁の変形に追いつけず流体のメッシュのアスペクト比が高くなってしまう．重合格子を用いることで複雑な物体移動を表現できるようになる．大動脈弁の動きは非常に複雑であるため本研究では重合格子を使用する．以下で重合格子の解析手法について説明する．

3.3 で説明したメッシュでは弁のメッシュと流路のメッシュが重なり合っている．この重なり合った部分から計算に使用する要素を決める．計算に使用する領域内で，他の領域の重なり合っているメッシュと情報を交換する境界要素（アクセプター）とその相手の要素（ドナー）のリストを作成する．図 3-7 から図 3-10 に本研究で使用する流体解析のモデルのカット面におけるアクセプターとドナーを表示する．アクセプター要素は図の赤い領域で，ドナー要素は図の青い領域で示されている．流路の流体領域を Meshing Unit[0]と設定し，図に表示されている弁の重合格子のうち，左側の弁の重合格子を Meshing Unit[1]，右側の弁の重合格子を Meshing Unit[2]，中央に示されている弁の重合格子を Meshing Unit[3]と設定した．弁の重合格子の中空になっている部分は弁であり，流体領域ではないためメッシュが切られていない．scFLOW で上記の 4 つのユニットをユニット番号の順に登録している．後に登録された領域を優先的に計算に使用する領域とするため，メッシュ要素のすべてがアクセプターとドナーになっている Meshing Unit[3]はすべての要素が計算に使用されている．一方流路の流体領域である Meshing Unit[0]では，優先順位が一番低いため弁と重なり合っている流体領域ではアクセプターとドナーがほとんど存在していないことがわかる．

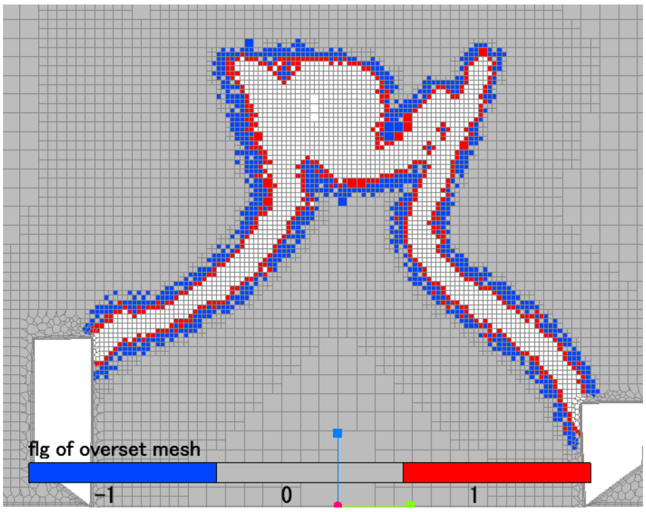

図 3-9 Meshing Unit[0]の重合格子のアクセプター要素とドナー要素

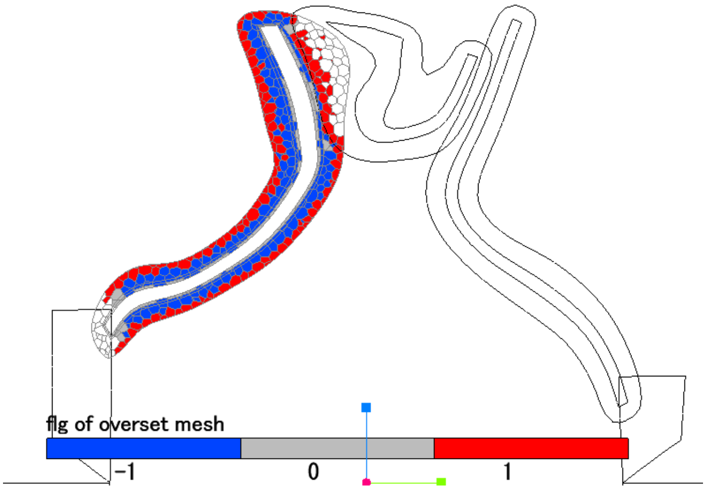

図 3-10 Meshing Unit[1]の重合格子のアクセプター要素とドナー要素

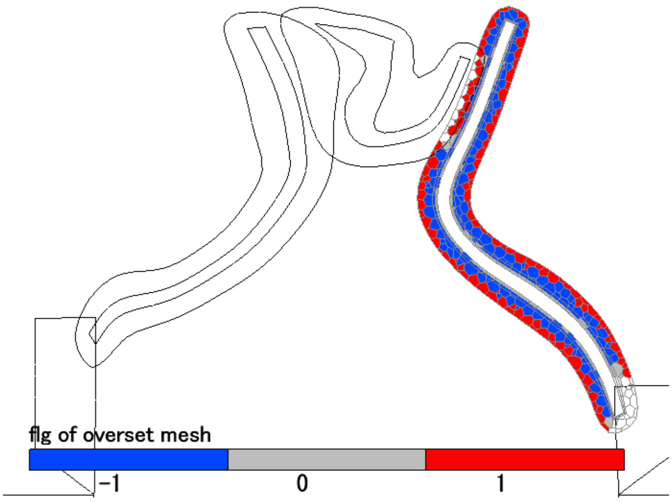

図 3-11 Meshing Unit[2]の重合格子のアクセプター要素とドナー要素

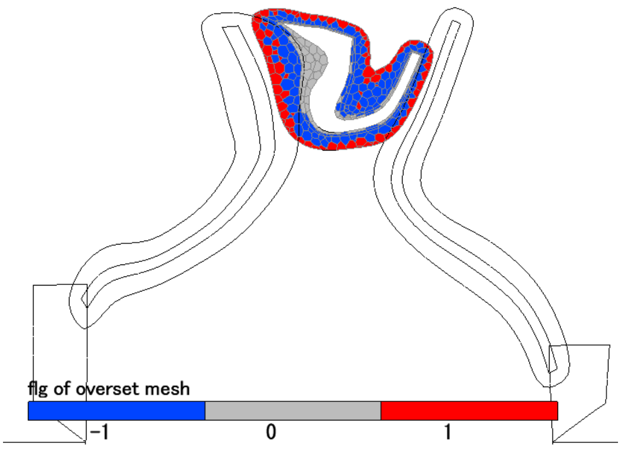

図 3-12 Meshing Unit[3]の重合格子のアクセプター要素とドナー要素

ここまでの作業を各インクリメントで行列計算の前に実施し，それぞれのメッシュで連続の式，ナビエ・ストークス方程式などの支配方程式を離散化して得られる係数行列（2.1.2で説明した行列$[A]$）をアクセプターとドナーのリストを用いて結合し，行列計算を行う．

第4章　構造解析のモデルと境界条件

4.1　解析モデルとメッシュ

構造解析では流体解析から弁表面に圧力を受け取るだけなので流路は不要である．流体解析と構造解析で使用する弁は形状が同じものであり，解析時に流体解析側と構造解析側で座標情報を使ってメッシュを結びつけるため，弁の座標やサイズも同じものである必要がある．

下図が構造解析に用いるメッシュである．六面体要素で，弁の厚み方向は 2 層になっている．メッシュサイズは 0.25 mm である．

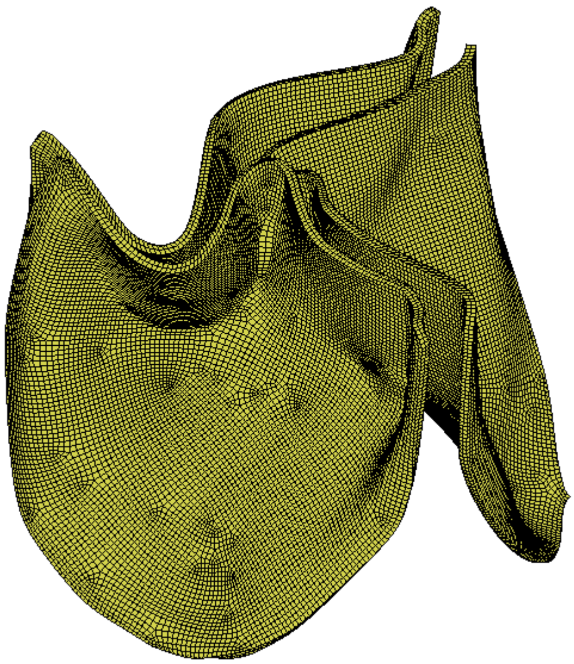

図 4-1 構造解析のメッシュ

4.2　解析条件

続いて解析条件について説明する．タイムステップは1.0×10^{-4} sで流体解析と同じ値とした．時間連成手法については流体解析と同様である．

4.2.1 境界条件

弁と流路が接する部分は動かないので，流路と接する要素の面（図 4-2 の青色の領域）の変位を 0 にしている．

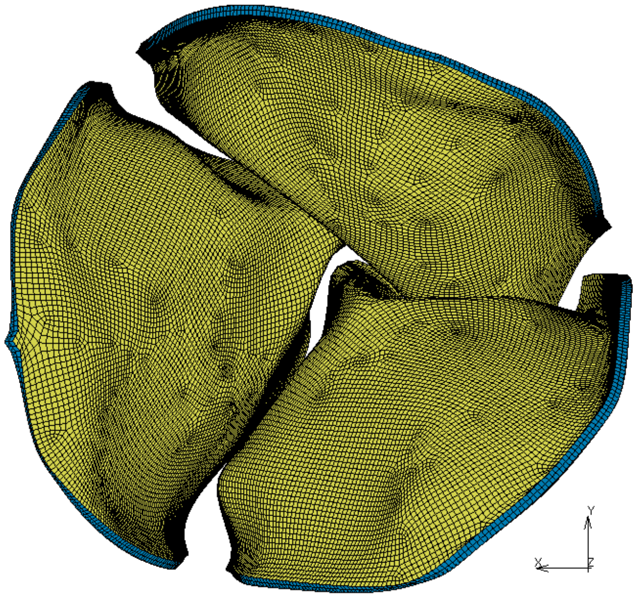

図 4-2 変位拘束している弁周囲の領域

また，弁が開く際に流体が当たる弁の内側の面（図 4-3 の青色の領域）に流体解析から受け取る圧力を与えている．

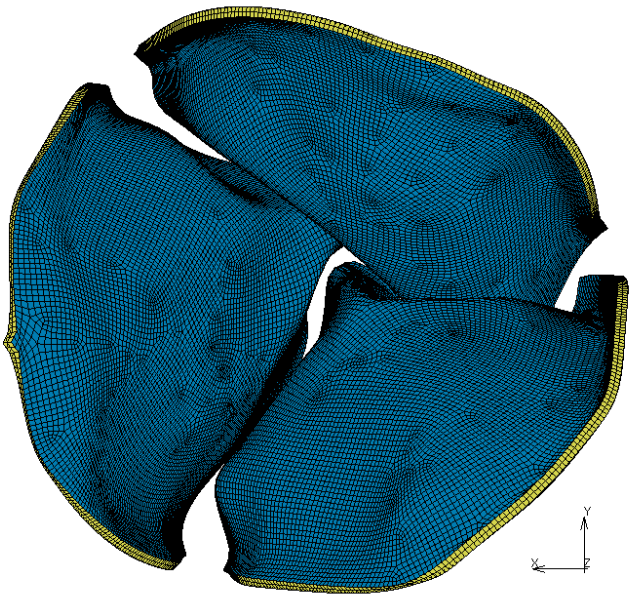

図 4-3 流体解析から渡された圧力を受ける領域

4.2.2 物性条件

材料は等方性弾性体と仮定し,密度$\rho = 2.1 \times 10^{-9}$ kg/m^3，ヤング率$E = 0.8$ MPa，ポアソン比$\nu = 0.45$とした．これらの弁の物性値は，渡部[6]が単軸引張試験によって求めた物性値である．

第5章　結果と考察

流体解析と構造解析でメッシュの変形が同期しているかを確認するために予備解析として構造解析から流体解析に移動ベクトルを渡す片方向の連成解析で閉じかかている弁が開く解析実施し，その後双方向の流体構造連成解析を実施した.

5.1　片方向連成解析の結果

構造解析から流体解析に移動ベクトルを渡す片方向の連成解析を実施した．構造解析における弁の物性値は 4.2.2 と同じものを使用した．境界条件として弁の表面に z 軸正方向に 980 m/s^2（重力加速度の約 100 倍の値）の荷重を与えた．図 5-1 は 0.1 秒後の構造解析のメッシュおよび流体解析のメッシュである．図 5-2 は 1.0 秒後の構造解析のメッシュおよび流体解析のメッシュである．左右のメッシュを見るとおおむねメッシュ変形が一致しているように見える.

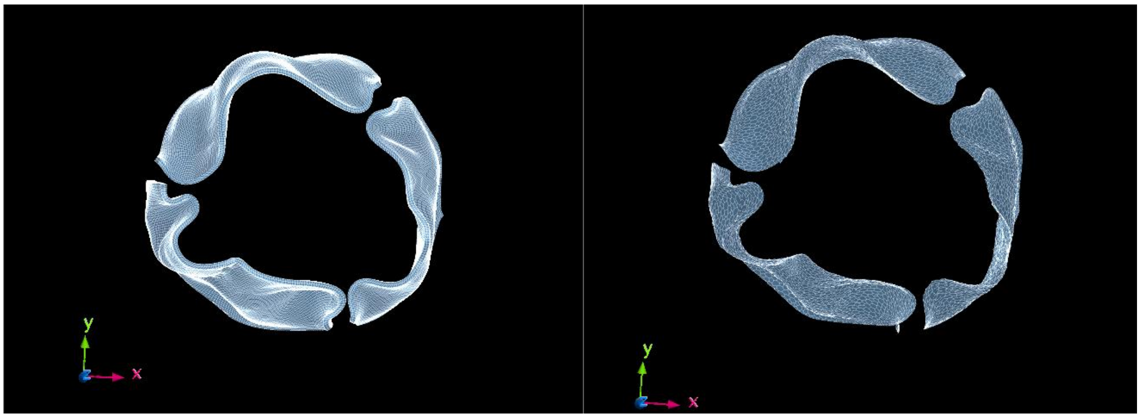

図 5-1 0.1 秒後の構造解析のメッシュ(左)と流体解析のメッシュ(右)

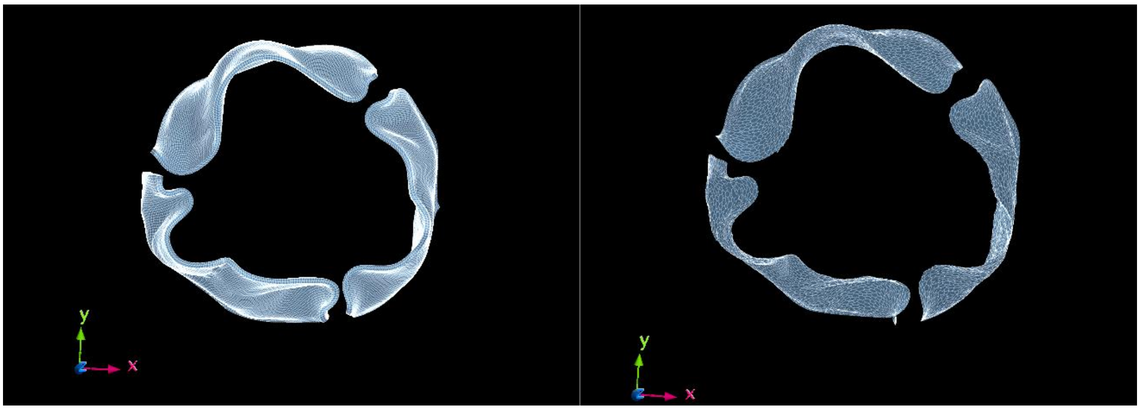

図 5-2 1.0 秒後の構造解析のメッシュ（左）と流体解析のメッシュ(右)

実際にメッシュ変形が同期しているかどうかを判断するために流体解析のメッシュと構造解析のメッシュを重ね合わせた図を図 5-3, 図 5-4 に示す．青白いメッシュが構造解析のメッシュで赤いメッシュが流体解析のメッシュである．流体解析のメッシュでは構造解析へ圧力を渡す面領域のメッシュを用いている． 図 5-3, 図 5-4 ともに流体出口側から見て右側の流体解析のメッシュが構造解析のメッシュに比べて開いていない箇所が存在する．残りの 2 枚の弁についてはところどころ赤い流体解析のメッシュが構造解析のメッシュの隙間から見えるが，流体解析のメッシュが広い範囲でつながって見えているわけではないことから，おおむね変形が一致していると判断した．

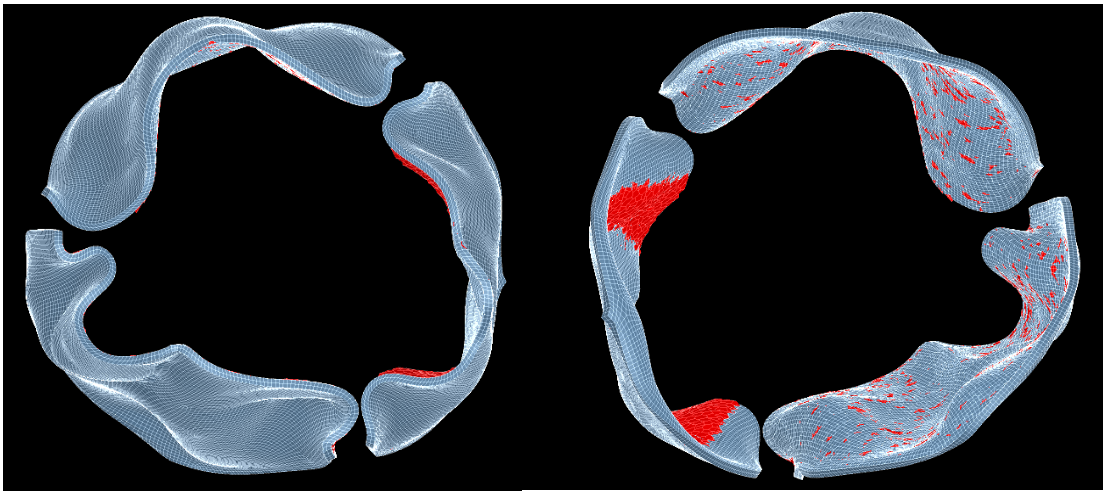

図 5-3 0.1 秒後のメッシュ変形を流体出口から見た図(左)と流体入口から見た図(右)

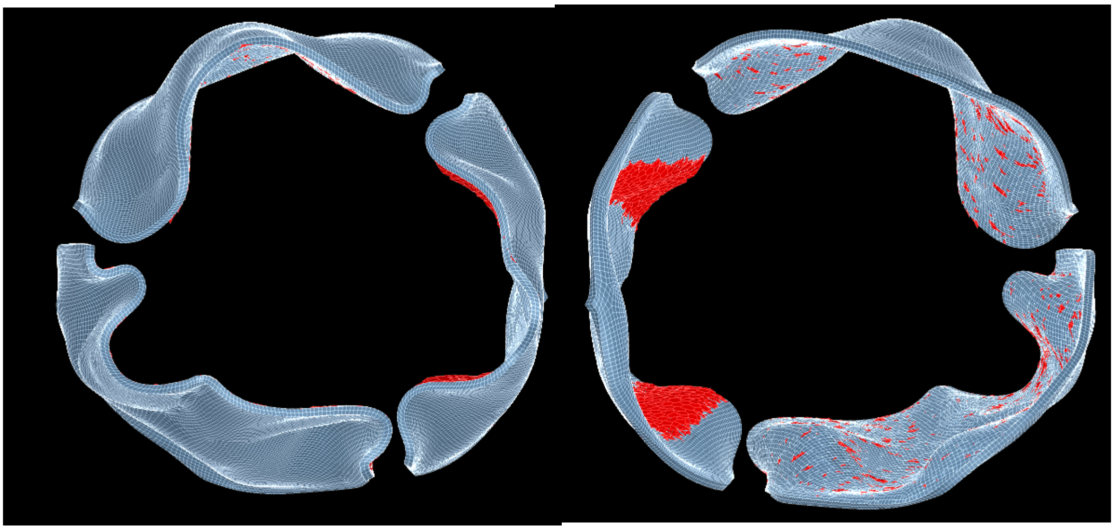

図 5-4 1.0 秒後のメッシュ変形を流体出口から見た図(左)と流体入口から見た図(右)

5.2 双方向流体構造連成解析の結果と考察

流体解析と構造解析間の時間連成の手法として反復解法を用いる場合と完全陽解法を用いる場合での解析結果の違いを比較する. 両者とも弁が開くにつれて流体解析のメッシュがつぶれて負体積の要素が増えたことにより圧力が発散してしまい, 時刻 0.01 秒程度で解析が止まってしまったため, その時間までの結果を比較する.

一般的に反復解法を用いた方が完全陽解法を用いた場合に比べて各タイムステップで収束を判定している分, 精度の高い解析結果が得られる. ただし今回の解析では 0.01 秒まで解析を実施するのに完全陽解法を用いた解析では約 150 分かかったのに対し, 反復解法を用いた解析では約 260 分かかっている. このことから完全陽解法を用いた解析結果が妥当なものであれば計算時間を短縮することができる. そこで両者の解析結果を比較した.

陽解法を用いた場合の変形図と反復解法を用いた場合の変形図を 0.0025 秒刻みで図 5-5 から図 5-9 に示す. 発散して解析が止まる直前の 0.010 秒までは弁が開く様子を再現できた. 0.0050 秒では左の弁と上の弁が接触寸前であることが確認できる. 0.0075 秒では左の弁と上の弁が接触しながら開いている様子が確認できる.

各時刻においてそれぞれ弁形状は陽解法を用いた場合と反復解法を用いた場合で変形がほぼ一致しているといえる. 弁の変位の評価については 5.2.3 で述べる.

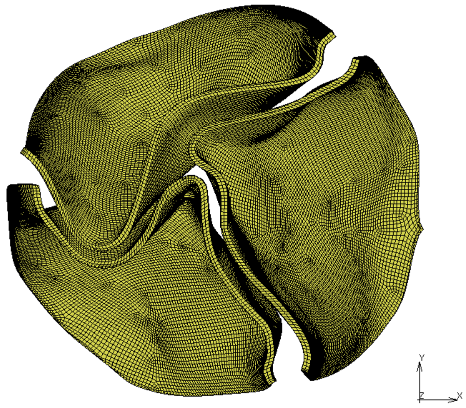

図 5-5 変形前の弁形状

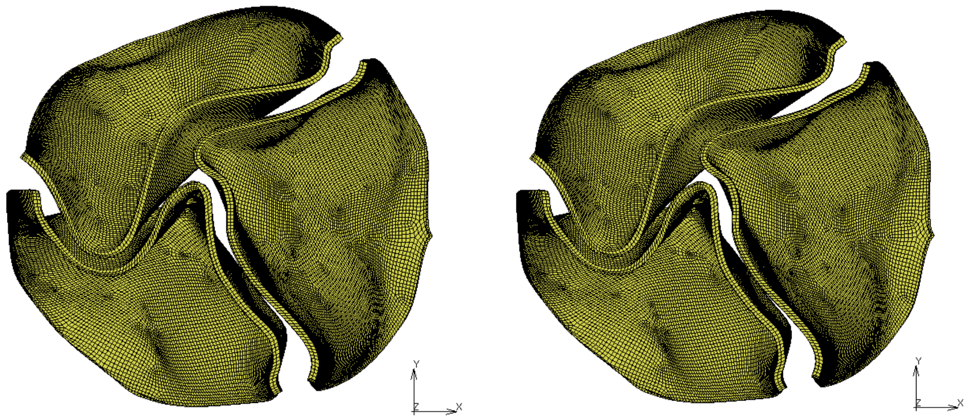

図 5-6 0.0025 秒後の陽解法を用いた際の弁形状(左)と反復解法を用いた際の弁形状(右)

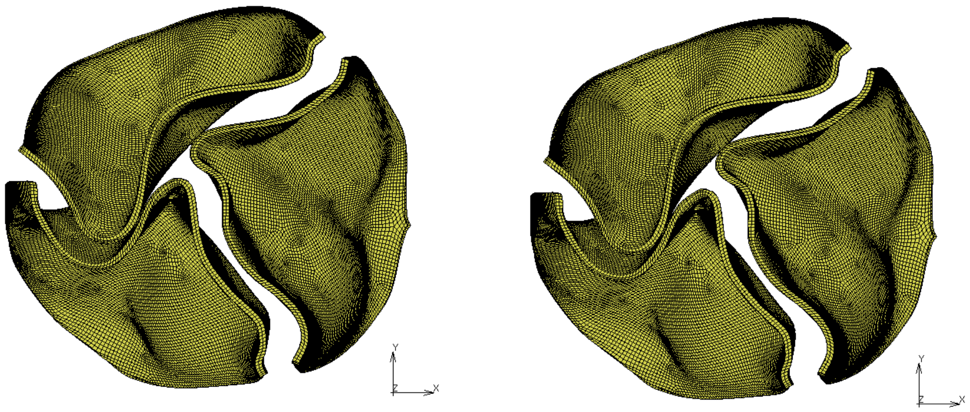

図 5-7 0.0050 秒後の陽解法を用いた際の弁形状(左)と反復解法を用いた際の弁形状(右)

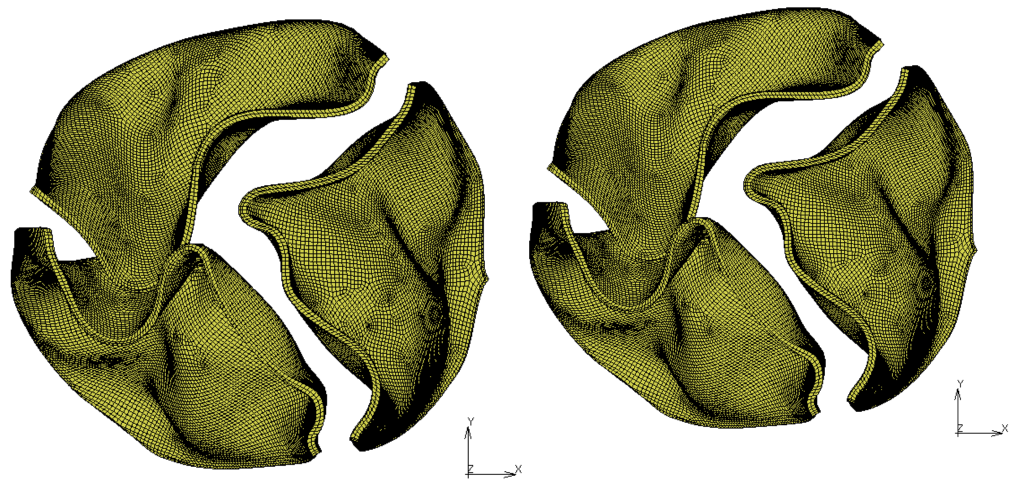

図 5-8 0.0075 秒後の陽解法を用いた際の弁形状(左)と反復解法を用いた際の弁形状(右)

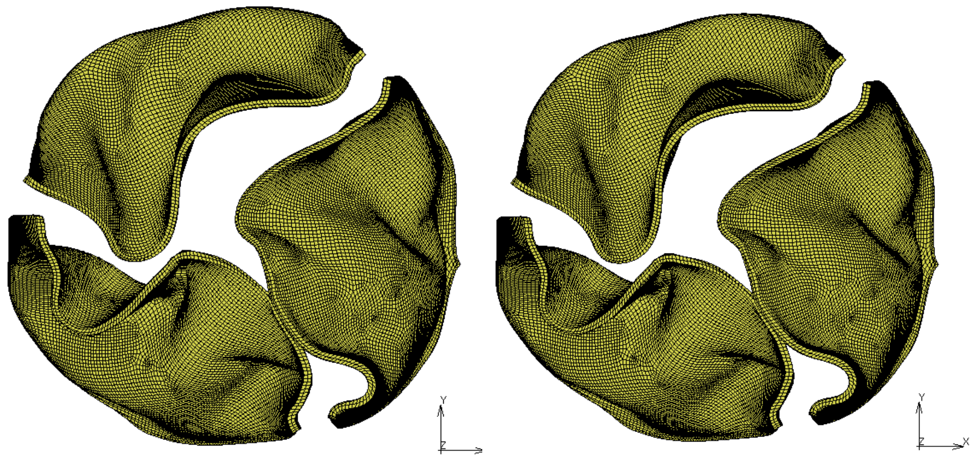

図 5-9 0.010 秒後の陽解法を用いた際の弁形状(左)と反復解法を用いた際の弁形状(右)

5.2.1 圧力の比較

まず流体の圧力を比較する． x軸に平行な断面における 0.0025 秒刻みで圧力のコンター図を図 5-10 から図 5-13 に示した．それぞれ左が完全陽解法を用いた場合，右が反復解法を用いた場合である．

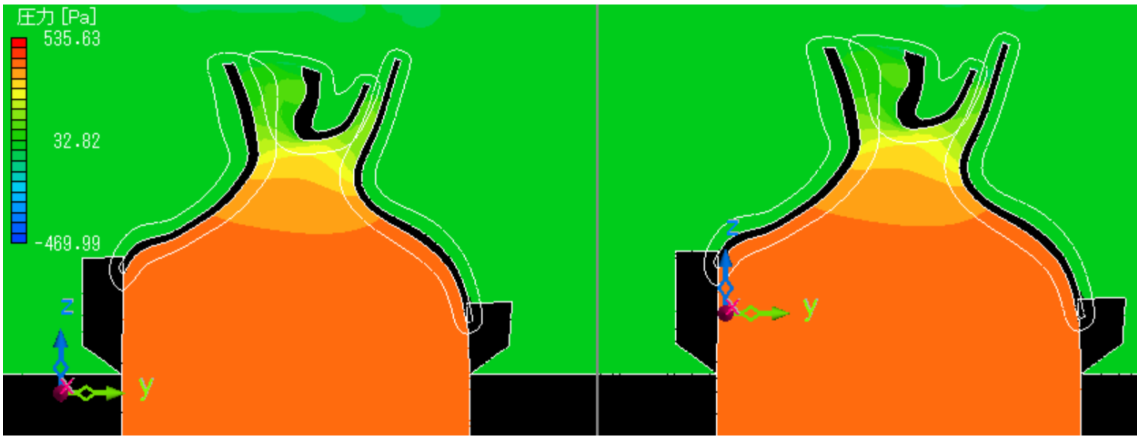

**図 5-10 0.0025 秒後の陽解法を用いた際の圧力分布(左)と
反復解法を用いた際の圧力分布(右)**

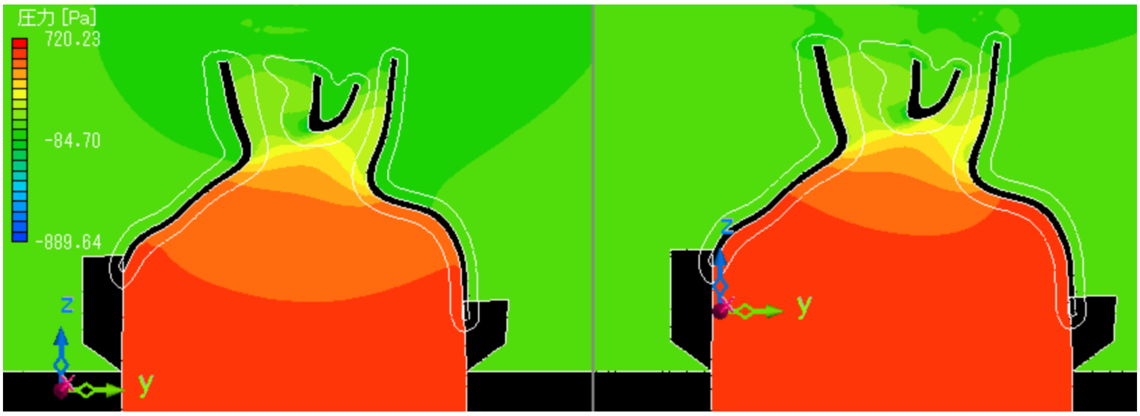

**図 5-11 0.0050 秒後の陽解法を用いた際の圧力分布(左)と
反復解法を用いた際の圧力分布(右)**

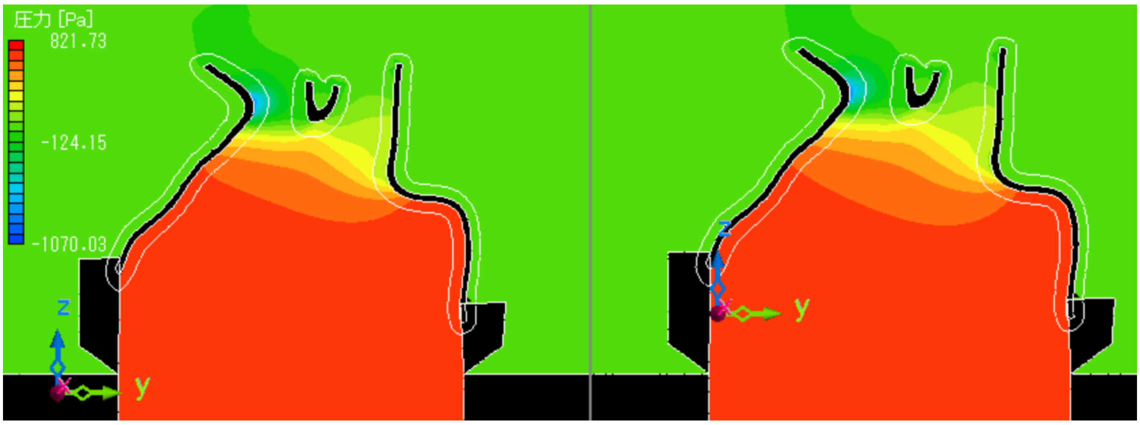

図 5-12 0.0075 秒後の陽解法を用いた際の圧力分布(右)と
反復解法を用いた際の圧力分布(右)

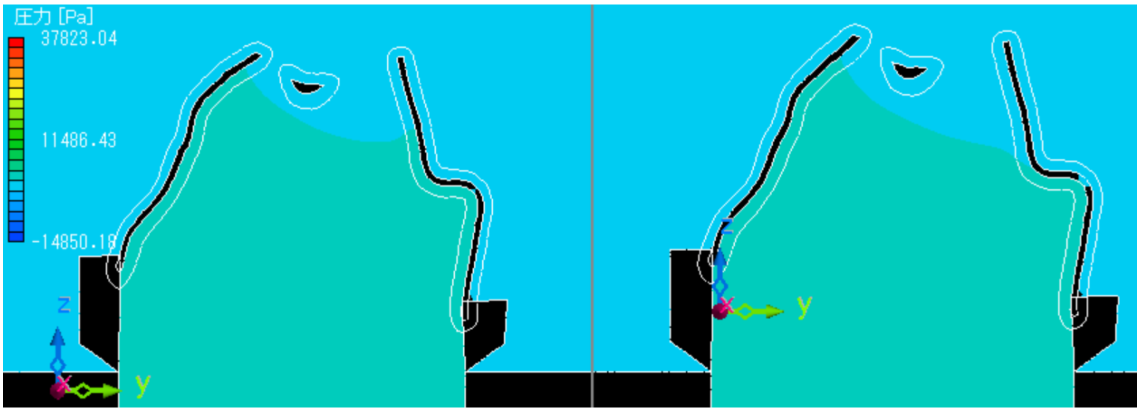

図 5-13 0.010 秒後の陽解法を用いた際の圧力分布(左)と
反復解法を用いた際の圧力分布(右)

図 5-10 の 0.0025 秒後の圧力コンター図を見ると圧力分布はほぼ一致していている．図 5-11 の 0.0050 秒後の圧力コンター図を見ると図中央で圧力分布に差が見られた．陽解法を用いた際の圧力が反復解法を用いた際の圧力より低い値となっている．弁表面の圧力(構造解析に渡す圧力)も陽解法を用いた際の圧力が小さくなっており，これによって弁が開きにくくなってしまう恐れがある．図 5-12 に示された 0.0075 秒後の圧力コンター図を見ると 0.0025 秒の時と同様に圧力分布はほぼ一致している．弁表面の圧力もほぼ一致していて，陽解法と反復解法でほぼ同じ圧力が構造解析に渡されているといえる．図 5-13 に示された 0.010 秒後の圧力分布を見ると圧力分布はほぼ一致しているが，右側の反復解法を用いた際の圧力分布を確認すると，右側の弁の真ん中に流体領域が弁の外側とつながっている領域が存在する．これは弁が開いたことで弁の移動先の流体メッシュが粗いことが原因であり，弁の表面から流体が漏れるという実現象では起こりえない状況になっている．流体域のメッシュを細かくすることでこの状況を防ぐことが可能だと考えられるが，これによって要素数が一気に多くなり， 計算負担が大きく解析時間が長くなってしまうためメッシュサイズおよびメッシュサイズの小さい領域をどこまで広げるかは慎重に議論する必要がある．

図 5-10 から図 5-13 を見ると圧力コンター図はおおむね一致しているが，陽解法を用いた際の圧力が反復解法を用いた際の圧力より小さく算出されている箇所があり，弁表面の圧力を比較し弁の開き方に影響を及ぼしているのかを議論する必要があるといえる．

そこで流体解析側から構造解析側にデータとして渡される弁の表面の圧力分布を図 5-14 から図 5-17 で示す．これらの図も左が完全陽解法を用いた際の圧力で右が反復解法を用いた際の圧力である．

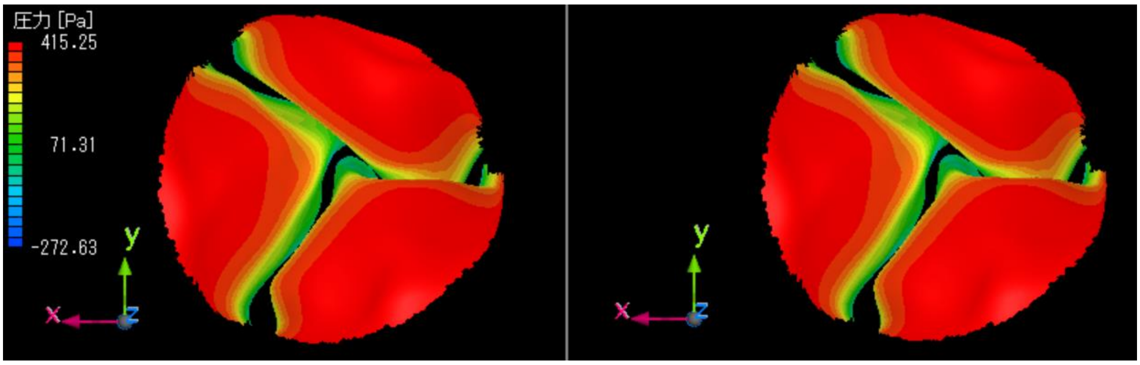

図 5-14 0.0025 秒後の弁表面の圧力分布

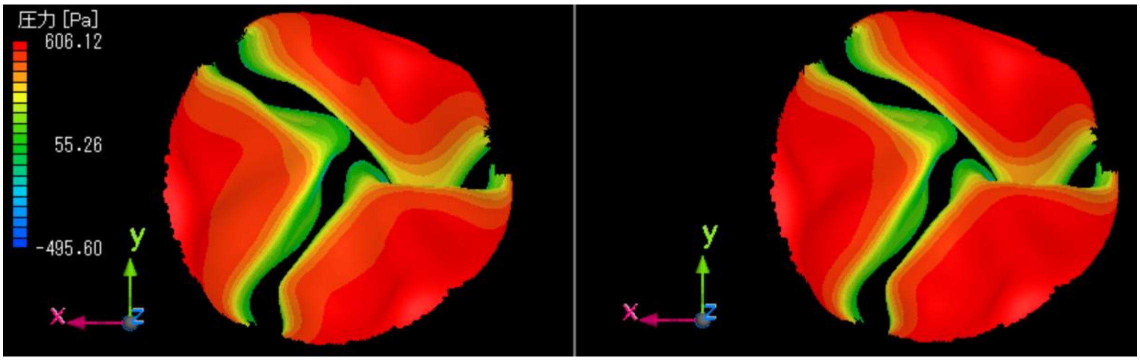

図 5-15 0.0050 秒後の弁表面の圧力分布

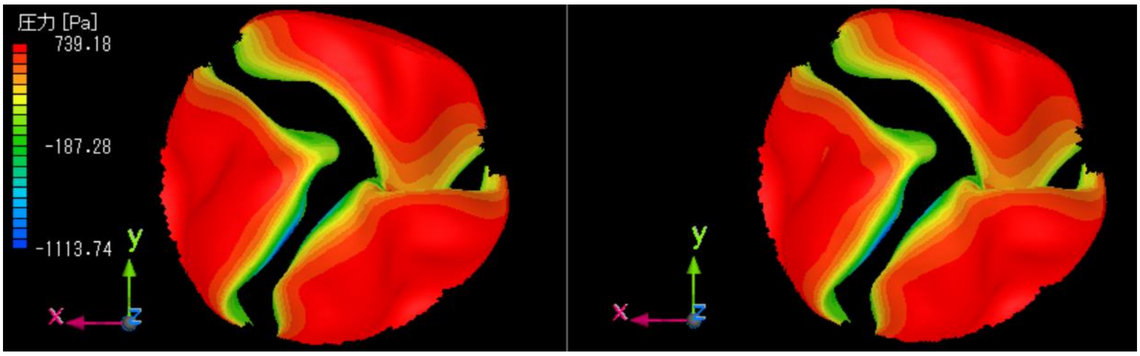

図 5-16 0.0075 秒後の弁表面の圧力分布

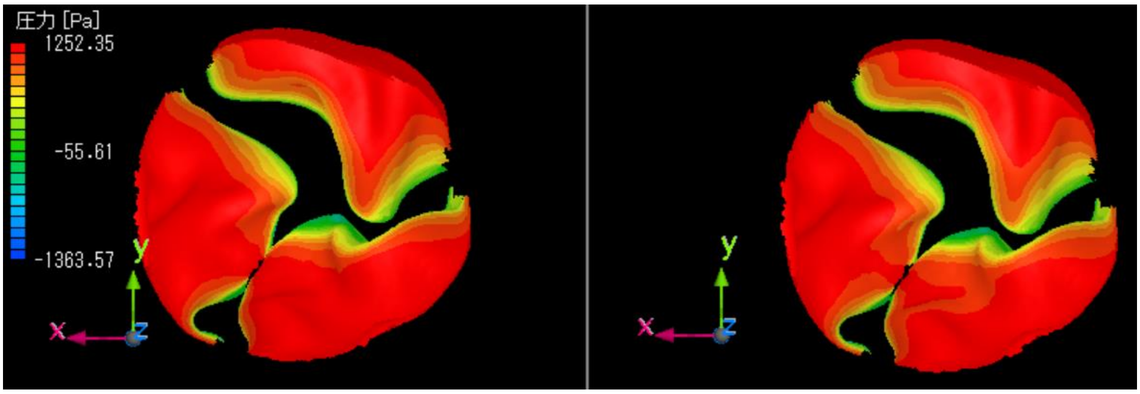

図 5-17 0.010 秒後の弁表面の圧力分布

図 5-14 の 0.0025 秒後の圧力分布を見ると，陽解法を用いた際の圧力分布と反復解法を用いた際の圧力分布はほとんど同じであるといえる．図 5-15 の 0.0050 秒後の圧力分布を見るとすべての弁の中央部で陽解法を用いた際の圧力の方が反復解法を用いた際の圧力に比べて低く算出されている．これは図 5-11 で議論した内容と一致している．これによって構造解析で弁が受け取る圧力が小さいと，弁が開くのが遅れてしまう可能性がある． 図 5-16 の 0.0075 秒後の圧力分布を見ると 0.0025 秒の時と同様にほとんど同じ分布になっている．これも図 5-12 で議論した内容と一致している．図 5-17 の 0.010 秒後の圧力分布を比較すると，左の弁と右上の弁に関しては圧力分布がおおむね一致しているが，右下の弁では陽解法を用いた際の圧力が反復解法を用いた際の圧力より高くなっている箇所が見られる．これによって弁が反復解法を用いた場合より早く開いてしまう可能性がある．

ここまで弁表面の圧力分布について議論したが，弁表面の圧力がどれほど違っているかを定量的に判断するために図 5-18 における黒のラインを評価のためラインとしての左下から上部に沿って圧力の評価を行った．この図に示された弁は図 5-14 から図 5-17 における右下の弁であり，陽解法によって算出された圧力と反復解法によって求められる圧力との差が大きいと考えれられる要素の値をとるように設定した．左下の要素番号を 1 として図上部の 89 番目の要素まで要素番号を割り振る．

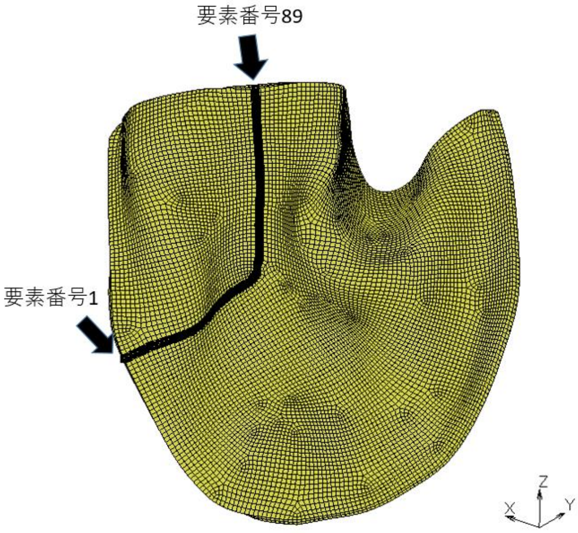

図 5-18 圧力評価のためのライン

図 5-19 から図 5-22 に 0.0025 秒刻みでの 2 種類の時間連成手法によって算出された圧力のグラフを示す.

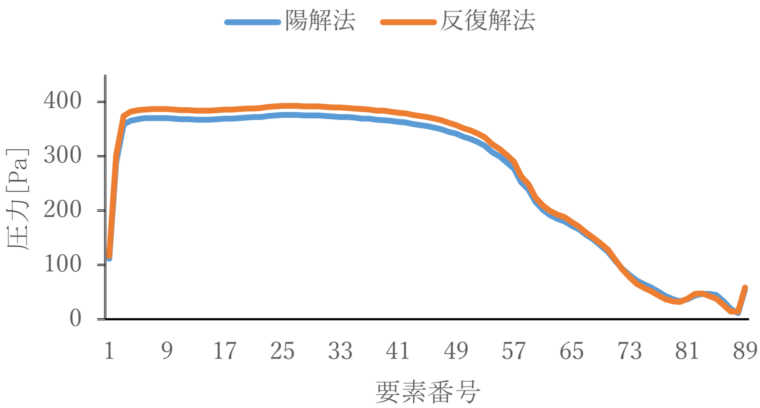

図 5-19 0.0025 秒後の評価ライン上の圧力

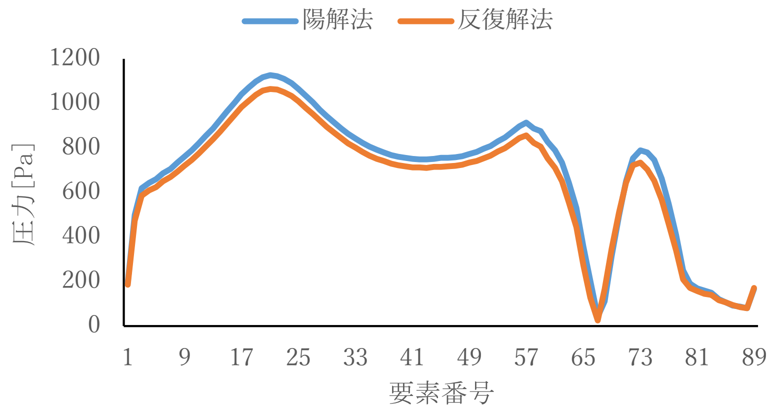

図 5-20 0.0050 秒後の評価ライン上の圧力

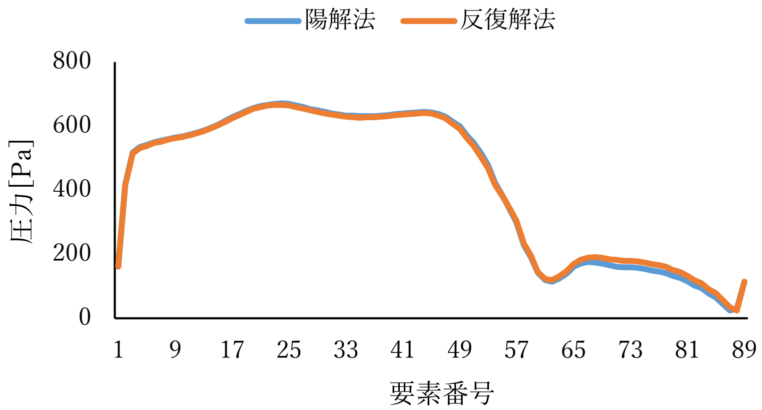

図 5-21 0.0075 秒後の評価ライン上の圧力

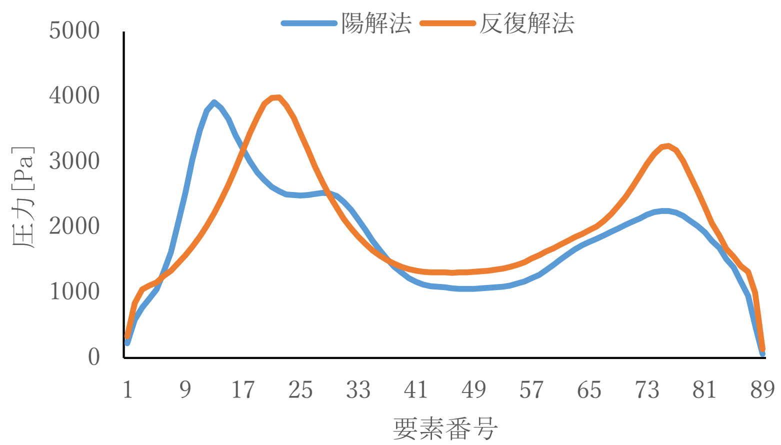

図 5-22 0.010 秒後の評価ライン上の圧力

0.0025 秒後では要素番号 29 から 31 で最大1.70×10 Paの差が生じているが 4 %程度の誤差であり，陽解法を用いた際の圧力と反復解法を用いた際の圧力はおおむね一致しているといえる．0.0050 秒後では要素番号 73 で最大2.11×10 Paの差が生じておりこれは約 11 %の差が生じている．しかし全体的にはおおむね一致しているといえる．0.0075 秒後では全体的に陽解法を用いた際の圧力が反復解法を用いた際の圧力に比べて高めの値を示しているがグラフの概形はおおむね一致している．ただし要素番号 68 では約 30 %の誤差があり，これによって弁に生じる応力に影響を及ぼす可能性がある．応力については後述する．最後に 0.010 秒後であるが，0.0075 秒までと違って圧力に大きな誤差が生じている．これは弁が変形する際に弁のメッシュが形状変形に追い付けず負体積の要素が増大して圧力が発散傾向にあることが原因だと考えられる．

圧力に関して流体解析と構造解析がともに収束している範囲では陽解法を用いて時間連成した際の圧力は妥当なものだと判断できる．

5.2.2 応力の比較

図 5-23 から図 5-26 に 0.0025 秒刻みでの流路入口側から見た第一主応力のコンター図を示す．5.1.1 の図と同様に左が完全陽解法を用いた場合，右が反復解法を用いた場合の第一主応力である．

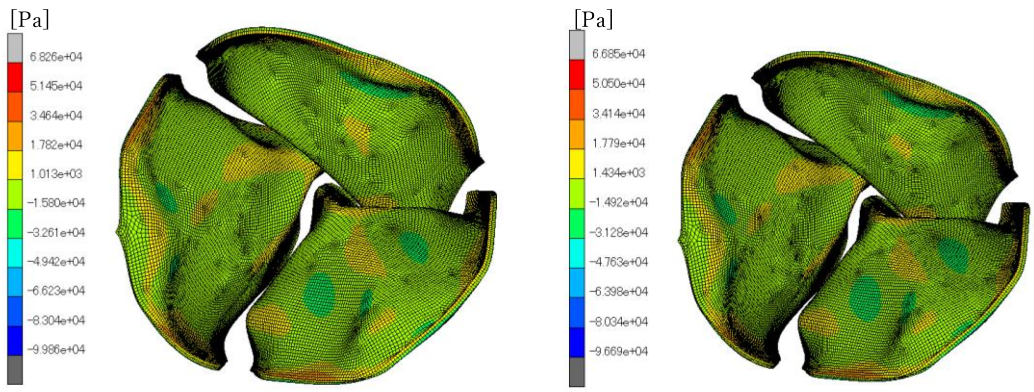

図 5-23　0.0025 秒後の陽解法を用いた際の第一主応力のコンター図(左)と反復解法を用いた場合の第一主応力のコンター図(右)

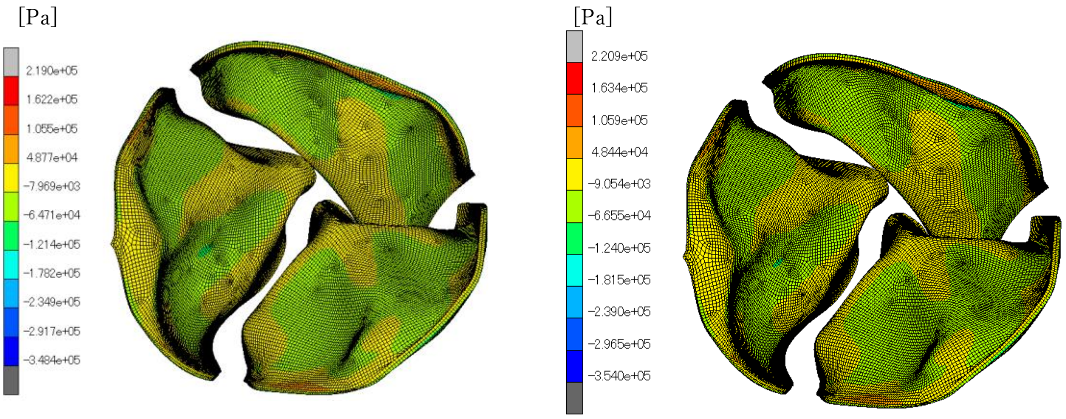

図 5-24 0.0050 秒後の陽解法を用いた際の第一主応力のコンター図(左)と
反復解法を用いた場合の第一主応力のコンター図(右)

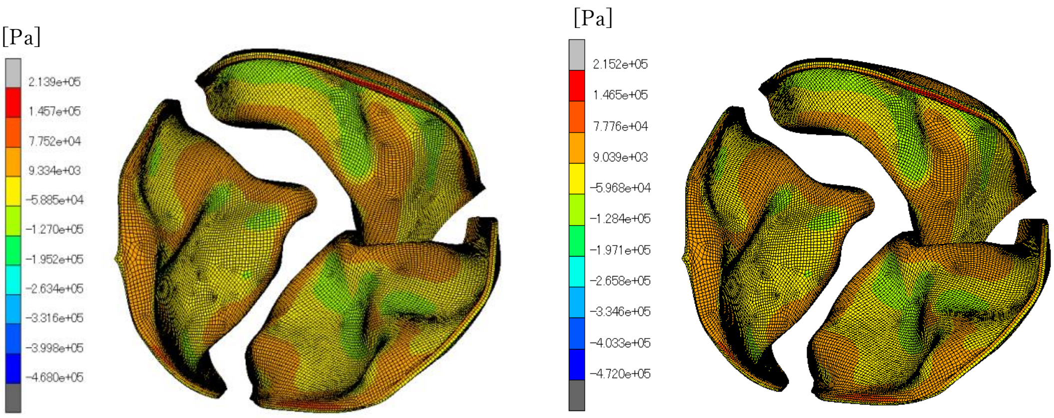

図 5-25 0.0075 秒後の陽解法を用いた際の第一主応力のコンター図(左)と
反復解法を用いた場合の第一主応力のコンター図(右)

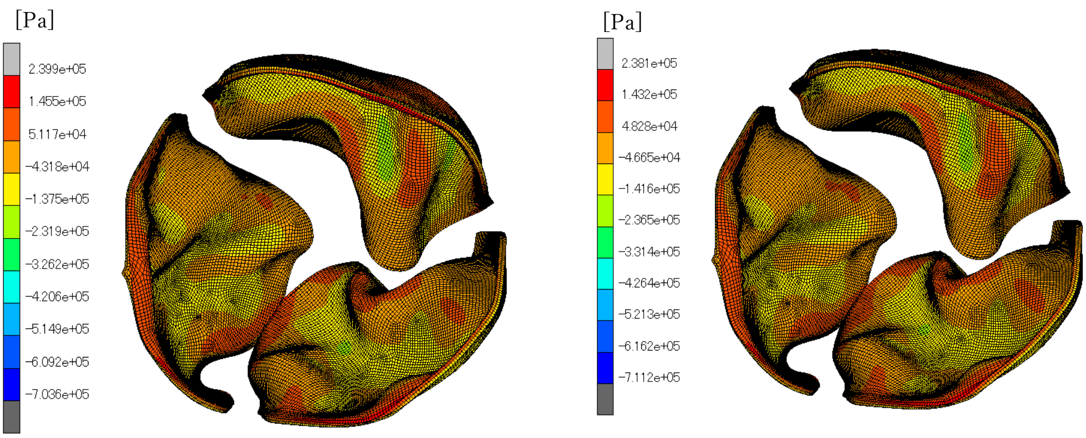

図 5-26 0.010 秒後の陽解法を用いた際の第一主応力のコンター図(左)と
反復解法を用いた場合の第一主応力のコンター図(右)

各時刻で応力分布はおおむね一致しており，弁が開くにつれて弁の治具との付け根部分の主応力が大きくなっている．これは弁が開く際に付け根付近の曲率半径が小さくなり，大きな曲げ応力が発生しているためだと考えられる．弁の曲率半径が小さい場所でも同じように弁表面の圧力が高くなるにつれて大きな曲げ応力が発生している．

0.010 秒では弁の変位が完全陽解法と反復解法で一致しない要素が増えてきており，これは流体解析側から渡される圧力が発散傾向にあり，5.2.1 で説明したように弁表面の圧力に大きな違いがあるからであるといえる．

第一主応力の観点からも，流体解析および構造解析双方が発散していない場合は完全陽解法の解析結果は妥当だといえる．

5.2.3 変位の評価

弁の変位が反復解法を用いた場合に対して陽解法を用いた場合にどれくらい誤差があるのかを確認するため，5.2.1 と同じ評価ラインで変位を評価する．図 5-27 から図 5-30 に 0.0025 秒刻みの評価ライン上での変位のグラフを示した．

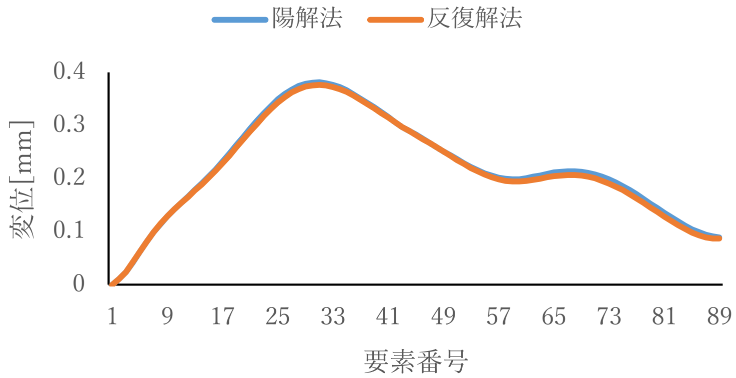

図 5-27 0.0025 秒後の評価ライン上の変位

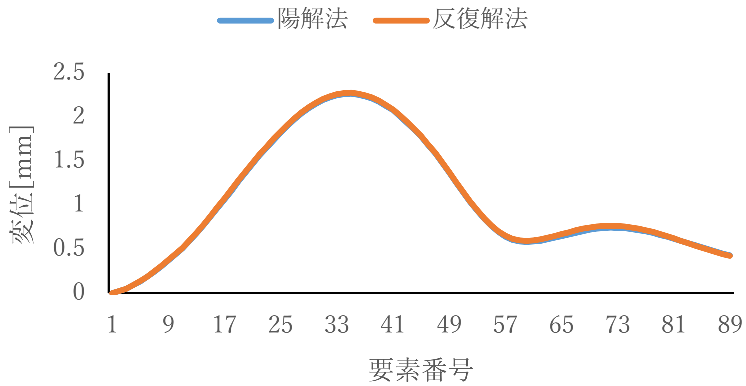

図 5-28 0.0050 秒後の評価ライン上の変位

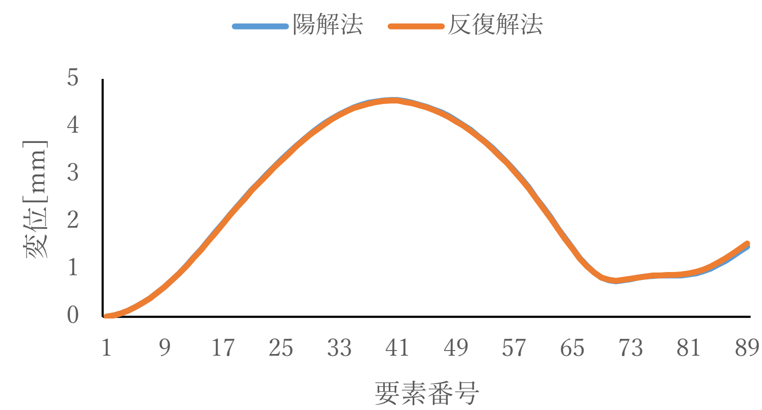

図 5-29 0.0075 秒後の評価ライン上の変位

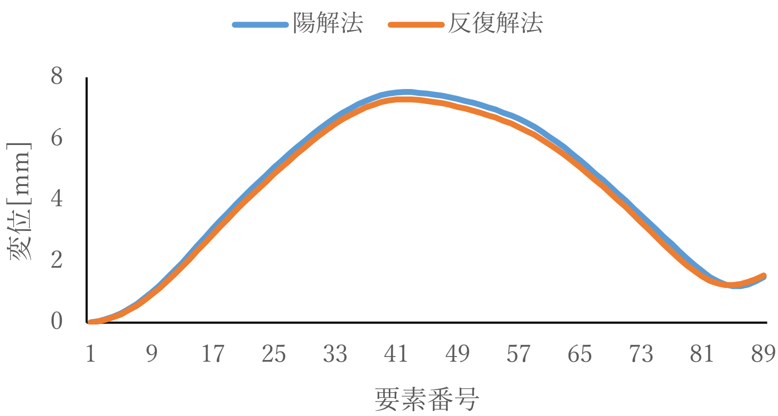

図 5-30 0.010 秒後の評価ライン上の変位

0.0025 秒後では要素番号 70 で最大0.0077 mm の差が生じたがこれはメッシュサイズが 0.25 mm であることからほぼ差がないとみなしてよい．このことから 0.0025 秒後の変位は陽解法を用いた場合と反復解法を用いた場合でほとんど一致しているといえる．0.0050 秒後では要素番号 69 で最大 0.026 mm の差が生じたがこれはメッシュサイズ 0.25 mm の 10 分の 1 程度であることから 0.0025 秒の時と同様にほぼ差がないとみなしてよい．このことから 0.0050 秒後の変位も陽解法を用いた場合と反復解法を用いた場合でほとんど一致しているといえる．0.0075 秒後では要素番号 89(弁尖の先端)で最大 0.067 mm の差が生じている．これはメッシュサイズ 0.25 mm の約 4 分の 1 程度であることからほとんど差がないとみなしてよい．0.010 秒後では要素番号 56 から 58 で最大 0.26 mm の差が生じている．これはメッシュサイズ 0.25 mm とほぼ同じ値であり，弁の厚み方向には 2 層のメッシュがあることから陽解法を用いた際の弁の変位は反復解法を用いた際の弁の変位に比べて弁の厚みの半分ほど変位がずれているということになる．これは 5.1.1 で述べた 0.010 秒では圧力が発散傾向

にあり，弁表面の圧力が陽解法を用いた場合と反復解法を用いた場合で大きく異なっていたためだと考えられる．

以上から弁の変位の観点では圧力が収束している限りは陽解法を用いた解析結果は妥当なものだと判断できる．

第6章　結言

6.1　結論

完全陽解法と反復解法という 2 種類の時間連成手法で解析を実施し，途中まででではあるが弁が開く様子を再現することができた. 0.0025 秒, 0.0050 秒, 0.0075 秒, 0.010 秒の 4 時刻で圧力と弁の第一主応力および変位を比較することによって，流体解析と構造解析がともに発散していない場合は完全陽解法での解析結果は妥当であると判断した.

6.2　今後の課題

本研究では，弁が開く際に流体解析における弁のメッシュが潰れてしまい，負体積の要素が増えることにより途中で発散してしまうという問題を抱えている．これによって弁が途中までしか開く様子を再現できなかった．流体解析での弁周辺の流路のメッシュサイズを細かくし，範囲を広げることで発散をある程度防ぐことができる可能性がある.

本研究では弁が閉じる解析を扱うことができなかった．弁が閉じる解析は変形量は弁が開く解析ほど大きくはないが，接触要素数が大きく増えるため構造解析のタイムステップを細かくする必要があり，タイムステップをそろえて流体解析と構造解析で各サイクル収束判定する反復解法よりも流体解析と構造解析でタイムステップを独立に設定できる完全陽解法を用いることが現実的である．本研究では完全陽解法と反復解法で同じタイムステップでの解析結果の妥当性を評価したが，タイムステップを独立で設定した場合の解析結果の妥当性も確認する必要がある.

謝辞

本研究を進めるにあたって, 様々な方から多大なるご指導, ご協力を賜りました. 感謝申し上げます.

指導教員である波田野講師には研究テーマをご提案していただいたり, 研究に行き詰まった際には声をかけていただいたりと多くの面で大変お世話になりました. 泉教授には波田野講師がアメリカに留学されて以降, 研究の方針や研究に関する学術的内容をご教授いただきました. 榊間助教には, ソフトウェアのインストールや PC の環境設定などの面で多大なるサポートをしていただきました.

本研究室の先輩方にもソフトウェアの使い方や研究方針など, 様々なご相談をさせていただきました.

共同研究先である HEXAGON Manufacturing Intelligence の渡邉様, 和久様, 佐藤様, 荒井様にはモデルの作成, 研究の方向性, scFLOW 及び Marc の使用方法などをサポートしていただき、心から感謝申し上げます.

参考文献

[1]　山科ら，心臓血管アトラス，協和企画.

[2]　Shinji Wakui and Masashi Tanaka, “Characteristics and Adaptation of Catheter and Surgical Treatments for Aortic Valve Stenosis”, 日大医誌, *pp. 131-134, 2017.*

[3]　Mostafa Abbasi, Ali N. Azadani, “Leaflet stress and strain distributions following incomplete transcatheter aortic valve expansion.”, *Journal of Biomechanics, Vol. 48,* pp. 3663–3671, 2015.

[4]　Wei Wu *et al*., “Fluid–Structure Interaction Model of a Percutaneous Aortic Valve: Comparison with an In Vitro Test and Feasibility Study in a Patient-Specific Case”, *Annals of Biomedical Engineering, Vol. 44, No. 2,* pp. 590-603, February 2016.

[5]　宮崎桜子, “卒業論文：患者個別大動脈弁モデルの流体構造連成解析による血流動態の評価”, 2020.

[6]　渡部拓哉, “修士論文：デジタル画像相関法と有限要素法による大動脈弁閉鎖時の応力解析”, 2021.

[7]　ソフトウェアクレイドル, “内部資料”.

[8]　岡澤拓史, “卒業論文：赤血球の影響を考慮した狭窄間内流れの造影剤動態評価”, 2021

[9]　Patanker S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", *Hemisphere Publishing, New York,* 1980.

[10]　Van Doormaal J.P. and Raithby G.D. "Enhancement of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows", *Num. Heat Transfer, Vol.7,* pp. 147-163, 1984.

[11]　Issa R.I., "Solution of the Implicit Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting", *Mechanical Engineering Report, FS/82/15, Imperial College, London*, 1982.

[12]　エムエスシーソフトウェア，“内部資料”

[13]　有限要素法による流れのシミュレーション，日本計算工学会編，丸善書店, 2017