

博士論文

分離反復型解法に基づく  
大規模並列流体構造連成解析

片岡 俊二

## 目次

1. 序論 .....	4
1.1. はじめに.....	4
1.2. 流体構造連成現象.....	4
1.3. 流体構造連成の数値解法.....	6
1.4. 研究目的.....	7
1.5. 8	
1.6. 構成と概要.....	9
2. 流体・構造連成方程式の分離型解法 .....	10
2.1. はじめに.....	10
2.2. 音響流体・構造連成問題の定式化.....	10
2.2.1. 構造領域の定式化 .....	11
2.2.2. 流体領域の定式化 .....	11
2.2.3. 流体・構造の連成界面条件 .....	12
2.2.4. 音響流体(Acoustic Fluid Formulation).....	12
2.2.5. 音響流体・構造の連成界面の条件 .....	13
2.2.6. 分離反復法を用いた音響流体・構造連成問題 .....	14
2.3. 粘性流体構造連成解析の定式化.....	15
2.3.1. ALE 法による非圧縮粘性流体の定式化.....	15
2.3.2. メッシュ制御 .....	16

2.3.3.	分離反復法を用いた非圧縮粘性流体構造連成 .....	17
2.4.	音響流体・非圧縮粘性流体の使い分け .....	18
2.5.	まとめ .....	19
3.	並列分離反復連成システム .....	20
3.1.	はじめに .....	20
3.2.	分離反復法のアルゴリズム .....	21
3.2.1.	Block Gauss Seidel 法 .....	21
3.2.2.	Broyden 法 .....	22
3.2.3.	Backtrack 法 .....	24
3.3.	ADVENTURE_Coupler への実装 .....	24
3.3.1.	物理量の補間・マッピング .....	24
3.3.2.	並列環境での連成界面情報の交換 .....	29
3.4.	ソルバへのカプライブラリの組み込み .....	31
3.5.	まとめ .....	31
4.	音響流体・構造連成解析への適用 .....	33
4.1.	はじめに .....	33
4.2.	音響流体・構造連成解析システム .....	34
4.3.	検証 .....	36
4.3.1.	検証 1 単純形状における分離反復型連成解法の収束性と精度 .....	36
4.3.2.	検証 2 並列環境での性能検証 .....	38

4.3.3.	検証 3: 疑似原子炉燃料集合体の連成振動 .....	44
4.4.	燃料集合体の地震応答解析 .....	46
4.5.	まとめ .....	55
5.	非圧縮性流体-構造連成解析への適用 .....	56
5.1.	はじめに .....	56
5.2.	連成解析システム .....	57
5.3.	連成解析システムの検証 .....	60
5.3.1.	検証 1 : 液体中で微小振動する構造の付加質量・付加減衰 .....	60
5.3.2.	目的 .....	60
5.3.3.	解析条件 .....	61
5.3.4.	検証 2   フィン付き角柱の渦連成振動 .....	68
5.3.5.	まとめ .....	73
5.4.	人工飛翔体の羽ばたき解析 .....	74
5.4.1.	解析対象 .....	74
5.4.2.	羽ばたきのモデル化 .....	75
5.4.3.	流体領域のモデル化 .....	76
5.4.4.	解析結果 .....	77
5.5.	まとめ .....	83
6.	結論 .....	84

---

# 1. 序論

---

## 1.1. はじめに

工学分野で取り扱われる現象や問題の多くは, 様々な要素から成り立つ複雑システムの応答の結果である. このためその現象を正確にとらえるためには, 一般に複数の要素の間に生じる相互作用を考慮しなければならない. 例えば, 地上ではほとんどすべての構造物が空気等の流体に囲まれて存在している. 構造物が変形あるいは振動しようとするときには空気や風から生じる抵抗などの相互作用が発生する. このように複数の要素の間に生じる相互作用は, 連成あるいは連成現象とよばれている. 数学的には, 二つの異なる方程式で表される現象の間に相互作用を表す項が存在する時, 二つの方程式が連成すると表現され, 連成した二つの方程式の解を求めることを連成解析と呼ぶ. 連成の度合いが大きければその現象は強い連成と, 連成の度合いが小さければ弱い連成と呼ばれるが, 連成の影響が強いときに生じる流れ場と構造の間の相互作用は流体-構造連成(Fluid-Structure Interaction, FSI)とよばれており, 工学上の重要性から多くの研究者が研究対象としてきた.

## 1.2. 流体-構造連成現象

流体-構造連成と考えられる現象は様々なものが存在するが Zienkiewicz は流体-構造連成現象を以下の(a)~(c)の3つのカテゴリに分け説明している<sup>[1]</sup>.

(a) 流れ場構造物が大きな相対変位を持つ現象

(b) 短い時間で生じる流れ場・構造ともに限られた変形しか生じない現象

(c) 長い時間を要する問題で、限られた変形しか生じない現象

(a) は流れが構造物の変形速度に比べて早い場合に発現する連成現象で、最も典型的な流体-構造連成問題である。例としては航空機翼のフラッター、吊り橋の振動等があげられる。ここでは流体の粘性の影響や構造物の下流に生じる渦の剥離が重大な影響を持つため、流体そのレイノルズ数に応じて適切に設計に反映されなければならない。(b) は海中での爆発に対する潜水艦の応答など、衝撃荷重による極短時間の応答である。

最後に(c)は構造物がゆっくりと液中を動く際の現象であり、船体の波浪によるゆれや、タンク内部の液体のスロッシング、液中の管群の地震応答などが考えられる。ここでは流体の粘性力は減衰として構造物に作用し、流体質量による慣性力や付加質量が重要な働きを示す。

このような工学的な問題における流体-構造連成は、その工学構造物の設計に対する重要性から、古くから着目されている。原子力構造物・海洋構造物などの重要な構造物については、数多くの実験的・理論的研究に基づいた簡略化手法によって設計目的に応じて保守的にその影響を考慮する手法が確立している。しかしながら、流れによって発生した渦を機震源とする振動が原因となり、構造物が破壊する事例は現在でも数多く存在している。その理由として、実験では再現できていなかったような複雑な構造物の相互作用が発現し想定できない応答を示したことなどがあげられる。また、流体-構造連成現象の影響と考えられながらもその影響が十分に把握できていない現象も数多い。

一方で、自然界においても流体-構造連成の結果であると考えられる現象がしばしばあらわれる。たとえば、鳥や昆虫が飛行する時には何らかの連成のメカニズムがそこにあると考えることができる。このような複雑な現象を把握し、人工物の設計に応用していくことでより安全で信頼性の高い、そして効率の良い人工物の設計が可能になると考えられる。このため、幅広い流体-構造連成現象の数値シミュレーション手法の確立が求められてきた。

### 1.3. 流体-構造連成の数値解法

連成解析の手法は、大別すると一体型解法(monolithic method)と分離型解法(partitioned method)の二つに分けられる。前者は、複数の物理現象の方程式を連成条件を考慮しながら時間・空間方向に離散化し、得られた一つのマトリクス方程式を解く手法である。後者は、それぞれの物理現象を時間・空間方向に離散化した式を個別に解き、各時間ステップにおいて物理量を交換し、連成条件に従いながら解く分離型(partitioned) 解法である。

一般に一体型解法は精度と安定性に優れると考えられており、解析規模が比較的小さく線形代数ソルバに直接法が用いられる場合には一体型解法がもっぱら用いられている。しかし一体型解法では解くべき問題が大規模になり、また多くの場合、解くべき連立一次方程式が非対称形になることから、直接法を用いられる範囲は限定されている。このような場合、連立方程式の解法には反復法の適用が必要となり、流体領域および構造領域の両方に適した前処理手法の開発が必須といえる。たとえば、Tezduyar<sup>[2]</sup>らによって開発された Segregated Equation Solver for Fluid Structure Interactions (SEFSI)法<sup>[5][6][7][8]</sup>や Manguoglu などによって開発された<sup>[8][9]</sup>nested iterative solver などの手法がある。また構造が大規模で複雑な場合には、単純な反復アルゴリズムでは収束性が著しく悪くなることが知られている。この解決のためには、数値大規模複雑構造モデルに対しても有効なより洗練されたソルバの開発が必要である。代数的マルチグリッド法(Algebraic Multi Grid)の応用として開発された手法が流体-構造連成解析にも適用された事例が報告されている。Balancing Domain Decomposition (BDD)法を南ら<sup>[12]</sup>が音響流体-構造連成解析向けには適用した例や、Mandel が<sup>[4]</sup>Finite Element Tearing and Interconnection (FETI)法を適用した例などが挙げられる。

一体型解法による流体-構造連成解析において、ソルバの研究開発が進んでいる一方で、分離型解法では構造解析あるいは流体解析向けに開発されてきた個別のソルバを最大限に活用することができる、というメリットがある。また、各時刻において固定点

反復を行う分離反復型の解法を用いることで一体解析と同等の精度が得られることがわかっている。

多くの流体-構造連成問題は本質的に非定常な現象を取り扱うことから、数値計算の負荷が大きくなる傾向にある。このような場合に、大規模解析向けの特異なアルゴリズムやハードウェアの特徴に応じた効率的な実装を備えたソフトウェア資産を活用できることは、大きな価値があると考えられる。また、分離型解法を用いることで、解析規模や効率以外にも、既存のソフトウェア資産を活用することで、それぞれの問題に適した材料モデルや離散化手法などによらず、既存のソフトウェアが活用できる範囲において、幅広い工学問題への拡張が可能である。

## 1.4. 研究目的

様々な流体-構造連成現象を解明することは、安全で信頼性の高い、あるいは効率の高い構造物の設計に資するものであると考える。しかしながら、そのためには幅広い連成現象を実用的な時間でシミュレーションを行うことのできる手法の開発が必須である。

本研究のターゲットとする領域を Figure 1-1 に図示する。流体構造連成解析にたいして、線形代数ソルバに直接法を用いることができる規模を小規模、反復法を用いることが必須である領域を大規模と定義し、陽解法や逐次連成解法である Staggered Method とでは十分な精度を得ることが困難な強い連成現象の解明を対象とする。さらに、容易に流体-構造の両方を表す連立一次方程式を直接法で解くことのできる小規模な問題や、流体-構造のいずれかを静的縮約やモデル化等の手法によって効率化することが困難な構造・流体のいずれもが大規模で複雑な形状を持つ問題の解析の実現を目指す。実用的かつ広範囲の問題へ適用できる連成解析手法の開発を念頭におき、本研究では大規模な問題を効率的に解析することのできる既存の並列ソルバを有効活用しながら大規模な連成問題を並列環境で効率よく解析することのできる手法として、分離型の連成解法に着目する。さらに、強い連成の状態を精度よく再現するため、一体型解法と同程度の精



度を持ちかつ安定に解析を行うことができる反復型解法を用いた連成解析手法を適用し、これをベースに種々の連成解析システムを構築する。実際の大規模な連成問題への適用を行うことでその実用性を示すことが本研究の目的である。

これまでに分離型あるいは分離反復型連成解析に関する研究は数多く行われており、また分離型連成解析の実現のためのツールも徐々に整備されてきたが、大規模並列ソルバに対して分離反復法を適用し、実際の問題に適用した事例はこれまでに報告されていない。本研究は分離反復型連成解法を大規模連成問題に適用するための、プラットフォームとして必要となる連成システムのおよび背景となる理論の研究・開発を行いその成果をまとめる。

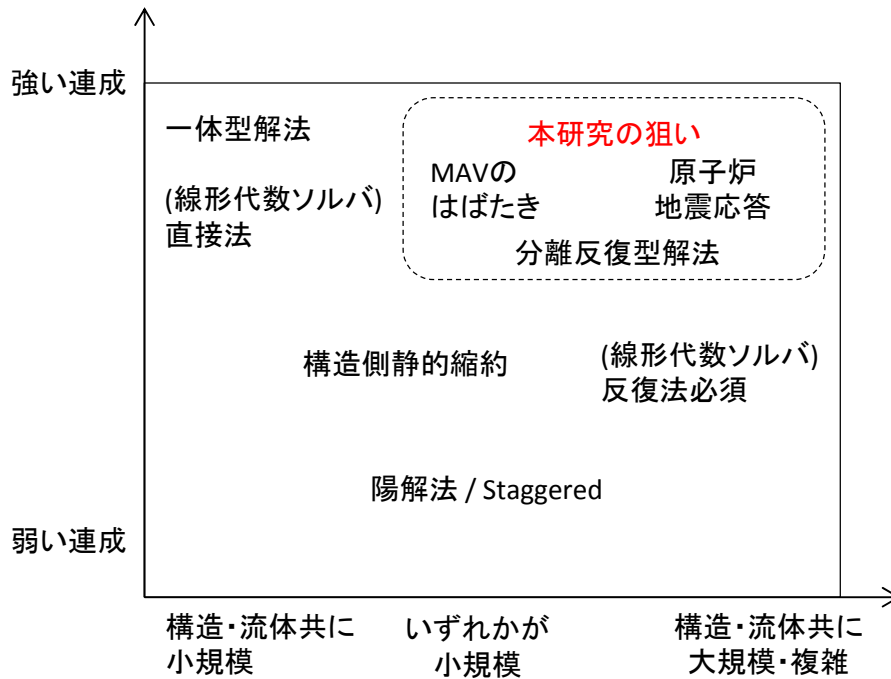


Figure 1-1 本研究のねらい

## 1.5. 構成と概要

第 2 章では，本研究で取り扱う二つの流体-構造連成問題である音響流体と構造の連成および非圧縮性・粘性流体と構造の連成問題の基礎方程式について述べ，分離型の連成問題を定義する

第 3 章では並列の流体-構造解析ソルバをつなぐ分離型連成解析のための連成インターフェイスソフトウェアである，ADVENTURE\_Coupler の構成と，ADVENTURE\_Coupler への分離反復型解法の実装について述べる．

第 4 章では前述の枠組みを音響流体-構造連成現象に適用し，連成解析の精度および効率の検証を行う．そして，実用問題への適用事例として沸騰水型(Boiled Water Reactor: BWR) 型原子炉の燃料集合体の連成振動の解析への適用について述べる．

第 5 章では，当該連成解析手法を非圧縮性粘性流体-構造連成問題に適用し，その解析結果の妥当性について調べる．次に小型飛翔体(Micro Air Vehicle:MAV)の羽ばたき現象の解析に適用する．

最後に，第 6 章で結言を述べる．

---

## 2. 流体-構造連成方程式の分離型解法

---

### 2.1. はじめに

本研究では既存ソフトウェアに分離反復型の連成解析手法を適用し, 構造物と音響流体および非圧縮粘性流体の連成解析を行う. 音響流体とは **acoustic-fluid** の訳で, 非粘性の遅い流れ場を圧力  $p$  を変数として定式化したものであり, 線形の圧縮性を考慮した音の伝播を扱う波動方程式と等価である.

本章では, まず音響流体-構造の連成方程式について述べ, 次に流体領域の支配方程式について述べ, それを非線形方程式の形で表すことによって分離反復型解法を適用する. 次に非圧縮性粘性流体の基礎方程式とその分離型連成解法への適用について述べる.

### 2.2. 音響流体-構造連成問題の定式化

流体-構造連成は Figure 2-1 に模式的に示されるように, 構造領域( $\Omega_s$ )と流体領域( $\Omega_f$ )が共通の界面(インターフェイス)である  $\Gamma_1$  を持つとする. 構造および流体の各領域は各々の支配方程式に従い流体-構造界面で相互作用を持つ. 流体-構造連成問題を解くためには, 各領域の支配方程式とインターフェイス上での相互作用を表す方程式を同時に満たさなければならない.

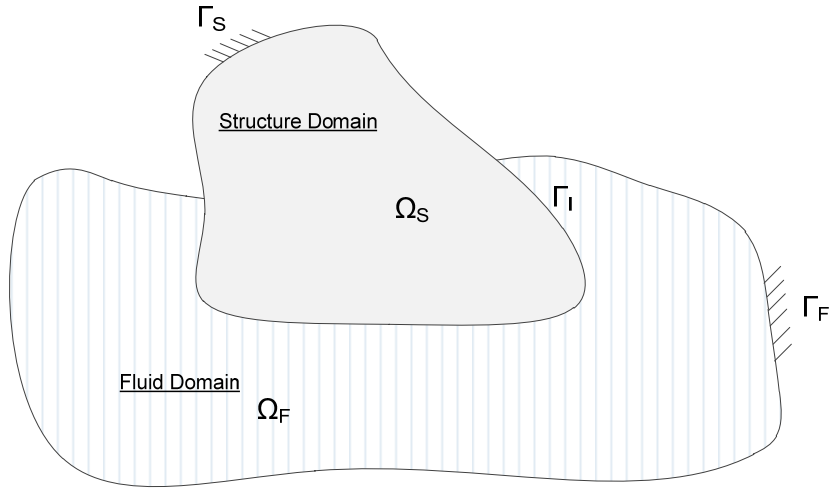


Figure 2-1 流体-構造連成問題の模式図

### 2.2.1. 構造領域の定式化

構造領域は以下の方程式に従う。ここで  $\mathbf{d}$  は構造の変位，  $\rho_s$  は構造の密度，  $\boldsymbol{\sigma}_s$  は構造の応力テンソルであり，  $\mathbf{f}_s$  は構造への外力である。

$$\rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{d}}{\partial t^2} + \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_s}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{f}_s \quad (2-1)$$

ここで，  $\boldsymbol{\sigma}$  は応力テンソルであり，線形の応力ひずみ関係には弾性テンソル  $\mathbf{E}$  およびひずみテンソル  $\boldsymbol{\varepsilon}$  を用いて

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2-2)$$

で表される。

### 2.2.2. 流体領域の定式化

非粘性の Navier-Stokes の運動方程式は以下の式(2-3)で記述できる。

$$\rho_F \dot{\mathbf{u}} + \rho_F \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_F}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{f}_F \quad (2-3)$$

$\mathbf{u}$  は速度ベクトル,  $\rho_F$  は流体密度,  $\mathbf{f}_F$  は流体への外力,  $\mu$  は流体の粘性係数である. このとき  $\boldsymbol{\sigma}_F$  は流体の応力テンソルであり, 以下の式のように粘性および圧力の影響を持つ.

$$\boldsymbol{\sigma}_F = \nabla(p\mathbf{I} - \mu\nabla\mathbf{u}) \quad (2-4)$$

ここで,  $p$  は流体領域の圧力である. 流体の非粘性と s 非圧縮性を仮定すると, 流体では連続の式である式(2-5)を同時に満たさなければならない.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2-5)$$

圧力の微小な変化を許容する時, 流体の微小な圧縮性を考慮すると, 連続の式(2-6)で表すことができる.

$$\frac{1}{K}\dot{p} + \frac{1}{K}\mathbf{u} \cdot \nabla p + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2-6)$$

ここで,  $K$  は流体の体積弾性率である.

### 2.2.3. 流体-構造の連成界面条件

流体-構造の境界面においては力のつり合いを満たす必要があるため, 式に示すように応力の平衡条件を満たさなければならない. ここで  $\mathbf{n}_{\Gamma,F}$  および  $\mathbf{n}_{\Gamma,S}$  はそれぞれ流体および構造の連成境界面  $\Gamma$  上での法線方向ベクトルである.

$$\boldsymbol{\sigma}_F \cdot \mathbf{n}_{\Gamma,F} + \boldsymbol{\sigma}_S \cdot \mathbf{n}_{\Gamma,S} = \mathbf{0} \quad (2-7)$$

また, 境界面上で構造・流体の境界位置を一致させるためには, 次の式(2-8)(2-9)に示すように変位に関する条件式と同時に, 速度に関する条件を満たさなければならない.

$$\mathbf{d} = \int \mathbf{u} dt \quad (2-8)$$

$$\dot{\mathbf{d}} = \mathbf{u} \quad (2-9)$$

### 2.2.4. 音響流体(Acoustic Fluid Formulation)

ここで、非圧縮・非粘性の遅い流れを考え、対流項を消去すると、Navier-Stokes 方程式の粘性項および移流項を消去でき、次の式(2-10)で表すことができる。

$$\dot{\mathbf{u}} = -\frac{1}{\rho_F} \nabla p \quad (2-10)$$

また、連続の式の移流項を消去すると、次の式(2-12)で表すことができる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{K} \dot{p} \quad (2-11)$$

式(2-10)および式(2-11)より流体領域の方程式は次の式(2-12)のように表すことができる。

$$\frac{1}{c^2} \ddot{p} = \Delta p \quad (2-12)$$

ここで  $c$  は音速で、 $c = \sqrt{K / \rho_F}$  の関係を持つ。境界条件の変動が音波の伝播に対して十分に遅く、圧力の分布がほぼ定常とみなせる場合には、次の式(2-13)で表すことができる。

$$\Delta p = 0 \quad (2-13)$$

### 2.2.5. 音響流体-構造の連成界面の条件

式(2-10)より速度  $\hat{\mathbf{u}}_\Gamma$  を持つ境界上  $\Gamma_I$  では以下の式(2-14)に示される境界条件が課される。流体と構造物が界面を共有する場合は構造物の界面上での速度  $\dot{d}_{\Gamma_I}$  と流速  $\hat{\mathbf{u}}_{\Gamma_I}$  が一致することから、流体-構造連成界面では以下の方程式が満足されなければならない。すなわち境界面上での構造物の加速度が流体領域の境界条件となる。ここで  $\mathbf{n}_F$  は境界の法線方向である。

$$\rho_F \mathbf{n}_F \cdot \dot{\hat{\mathbf{u}}} = -\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} \quad (2-14)$$

## 2.2.6. 分離反復法を用いた音響流体-構造連成問題

構造の方程式(2-1)および流体の方程式(2-13)に減衰項を加え、有限要素法で離散化すると、連成方程式は式(2-15)で表される行列で表すことができる。ここで $\mathbf{S}$ は連成界面 $\Gamma_I$ 上でのみ値を持つインターフェイスマトリクスである。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_S & 0 \\ \rho\mathbf{S} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{d}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_S & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{d}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_S & -\mathbf{S}^T \\ 0 & \mathbf{K}_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{R}^{ext} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2-15)$$

Newmark's  $\beta$  法を用いて時間方向に離散化すると、時刻 $t^n$ における変位および圧力は、次の式(2-16)で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{Seff} & \mathbf{S}^T \\ \rho_F\mathbf{S} & \mathbf{K}_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}^n \\ \mathbf{p}^n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{R}^{ext} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2-16)$$

当該方程式は非対称の方程式であり、これを効率的に解くために、対称な方程式が得られる定式化を行う場合がある。Olson and Bathe<sup>[11]</sup>は流体圧力の代わりに速度ポテンシャルを用いることで同一問題を対称の問題として解析可能であることを示した。また線形代数ソルバに直接法を用いることのできないような大規模・並列環境において効率的に解を求めるためには、方程式の特徴に応じた前処理を適用しなければならない。Minami ら<sup>[12]</sup>は当該連成方程式の圧力項を変位ポテンシャルで表すことにより対称化し、BDD 前処理を適用することで、並列環境において大規模問題を効率的に解析できることを示した。

一方で、分離反復法を用いる場合、場合構造と音響流体領域はそれぞれ個別のソルバで解かれる。このとき、時刻 $t^n$ において構造音響流体間の相互作用を表す式(2-15)の非対角項を右辺に移項すると、以下の(2-17)で表される。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{Seff} & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}^n \\ \mathbf{p}^n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{R}^{ext} - \mathbf{S}^T \mathbf{p}^n \\ \rho\mathbf{S}^T \ddot{\mathbf{d}}^n \end{Bmatrix} \quad (2-17)$$

インターフェイス $\Gamma$ に着目すると、境界上での構造の速度 $\mathbf{d}_\Gamma^n$ 、圧力 $\mathbf{p}_\Gamma$ を求める問題と考えることができ、以下のように表現することができる。

$$\mathbf{d}_\Gamma^n = S(\mathbf{p}_\Gamma^n) \quad (2-18)$$

$$\mathbf{p}_\Gamma^n = F(\mathbf{d}_\Gamma^n) \quad (2-19)$$

ここで、Newmark's  $\beta$  法では各時刻ステップにおいて加速度と速度の間に式(2-20)のように線形の関係がある。このことから、式(2-17)では圧力の方程式の右辺は加速度  $\ddot{\mathbf{d}}^n$  が条件であるが、式(2-19)の右辺を加速度  $\ddot{\mathbf{d}}^n$  の方程式として表記しても差し支えない。

$$\mathbf{d}^n = \mathbf{d}^{n-1} + \Delta t \dot{\mathbf{d}}^{n-1} + \Delta t^2 \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{\mathbf{d}}^{n-1} + \Delta t^2 \beta \ddot{\mathbf{d}}^{n+1} \quad (2-20)$$

このとき、連成問題を関数  $Z(\mathbf{d}_\Gamma^n)$  を用いて次の式(2-21)で表すことができ、非線形方程式としての各時刻点での残差は次式(2-22)で定義される。

$$\mathbf{d}_\Gamma^n = S(F(\mathbf{d}_\Gamma^n)) = Z(\mathbf{d}_\Gamma^n) \quad (2-21)$$

$$\mathbf{r}^n = \mathbf{d}_\Gamma^n - Z(\mathbf{d}_\Gamma^n) \quad (2-22)$$

ここで各時刻ステップにおいて、残差が最小となるように境界上での変位を  $\mathbf{d}_\Gamma^n$  を求めることで流体-構造連成方程式の解が求まる。

## 2.3. 粘性流体-構造連成解析の定式化

### 2.3.1. ALE 法による非圧縮粘性流体の定式化

流れ場と構造の連成を取り扱う多くの問題では、流れ場と構造の相対的な位置関係が大きく変動する移動境界問題である。移動境界問題を取り扱うための方法として、界面の移動を格子や節点とともに移動する座標系によって Lagrange 的にとらえ解析する直接的な手法と、一般的な流体解析で用いられるように固定された格子の中で Euler 的にとらえる間接的手法の2種類に大別できる<sup>[13]</sup>。



前者は、流れ場と構造物の変形が相対的に小さな場合に有効な解析手法であり、また流れ場の方程式を Lagrange 的に解釈することで通常の構造解析と同様の定式化が適用できる。このことから Dassault Systemes の Abaqus や Livermore Software Technology Corporation の LS-Dyna などの商用コード、特に陽解法をベースとしたソフトウェアでは早くから取り上げられてきた。しかしながら、渦の影響などによって節点が複雑に移動する問題ではメッシュが過度に変形する等様々な問題がある。一方で後者の場合、固定されたメッシュの中で流体境界の移動を取り扱わなければならないため、VOF 法<sup>[15]</sup>や Level Set 法<sup>[16]</sup>などの手法を用いて界面の移動を取り扱う必要があるため。しかしながら、境界を間接的に取り扱うこれらのメッシュでは、Lagrange 的な取り扱いに比べると細かいメッシュが必要とされる。

低レイノルズ数から高レイノルズ数までの幅広い領域で高い精度を発揮する、Arbitrary Lagrangian Euralian(ALE)法が広く用いられている。空間座標系に対する参照座標系の速度を  $\hat{\mathbf{u}}$  とおくと、ALE 表記された流体の運動方程式は次式で表される。これは、式(2-3)の移流項のみが置き換えられたものである。

$$\rho_F \dot{\mathbf{u}} + \rho_F ((\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}) \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_F}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{f}_F \quad (2-23)$$

また、圧力の方程式は式(2-6)の同じく移流項を置き換えた次式(2-24)である。

$$\frac{1}{K} \dot{p} + \frac{1}{K} (\mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}) \cdot \nabla p + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2-24)$$

ここで、参照座標系は任意に選ぶことができ、 $\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{u}$  のときラグランジュ型に、 $\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{0}$  のときオイラー型記述に一致する。ただし、移動境界問題を取り扱う場合は境界上で参照座標系の移動速度と境界面の移動速度は一致している必要がある。

$$\hat{\mathbf{u}}_{\Gamma} = \mathbf{u}_{\Gamma} \quad (2-25)$$

### 2.3.2. メッシュ制御

構造の変形によって流体境界が大きく移動する問題を ALE 法で解く場合、流体領域のメッシュを境界面の移動に従って移動させなければならない。メッシュの移動をコン

トロールする方法として、本研究では疑似弾性体スムージング手法を用いた。疑似弾性体スムージングでは、メッシュの移動量  $\chi$  を以下の式で各時刻ステップ毎に解く。

$$\frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{x}} = 0 \quad (2-26)$$

$$\chi = \mathbf{D} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2-27)$$

ここで、 $\mathbf{D}$  はメッシュ領域の弾性変形を表す構成方程式である。

本研究では、各要素の変形量を要素体積に応じて変化させる Jacobian-based Stiffening を採用した。本手法では、メッシュの各要素の体積に応じて要素の弾性率を変化させ小さな要素に変形が集中するのを抑制することができる。

### 2.3.3. 分離反復法を用いた非圧縮粘性流体-構造連成

2.2.6 と同様に、分離反復法を用いて非圧縮性流体-構造連成問題を考える場合、流体-構造の連成問題はある時刻ステップ  $n$  での構造の変位  $\mathbf{d}_\Gamma^n$ 、流体の流速  $\mathbf{u}_\Gamma^n$ 、圧力  $\mathbf{p}_\Gamma^n$  およびメッシュの配置  $\chi_\Gamma^n$  を用いて、以下のように書き直すことができる。

$$\chi_\Gamma^n = M(\mathbf{d}_\Gamma^k) \quad (2-28)$$

$$\mathbf{d}_\Gamma^n = S(\mathbf{u}_\Gamma^n, \mathbf{p}_\Gamma^n) \quad (2-29)$$

$$(\mathbf{u}_\Gamma^n, \mathbf{p}_\Gamma^n) = F(\chi_\Gamma^n) \quad (2-30)$$

ここで、 $M, S, F$  はそれぞれメッシュ、構造、流れ場、を解くための関数である。メッシュのこの時流体-構造連成問題は次の式(2-31)のように書き直すことができる。

$$\mathbf{d}_\Gamma^n = S(F(M(\mathbf{d}_\Gamma^n))) = Z(\mathbf{d}_\Gamma^n) \quad (2-31)$$

上述の非線形方程式は次式の残差を最小化する問題と考えることができる。

$$\mathbf{r}^n = \mathbf{d}_\Gamma^n - Z(\mathbf{d}_\Gamma^n) \quad (2-32)$$

## 2.4. 音響流体・非圧縮性粘性流体の使い分け

構造の応答に着目し流体-構造連成問題を表すと、式(2-33)のようにあらわされる。

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_{add})\ddot{\mathbf{d}} + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_{add})\dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K}\mathbf{d} = \mathbf{R}_{ext} + \mathbf{R}_{fluid} \quad (2-33)$$

ここで $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$ は構造の質量, 減衰, 剛性マトリクス,  $\mathbf{M}_{add}$ ,  $\mathbf{C}_{add}$  流体の影響による付加質量および流体(付加)減衰項である。 $\mathbf{R}$ は流体以外から受ける構造への外力であり,  $\mathbf{R}_{fluid}$ は流体から受ける構造への外力項である。

流体-構造連成解析を用いない, 構造に限定した解析モデルで連成の効果を表現する場合, 流体からの影響である付加質量および流体(付加)減衰項や流体力の影響を近似的に求める必要がある。

音響流体の定式化を採用する場合には, 流体領域は線形の挙動を仮定し, 微小変形領域での流体の応答のみしか評価できないものの, 流体の付加質量効果を表現できる。ただし, 微小変形領域であっても, 流体の粘性から生じる減衰効果を考慮することはできないため, 流体からの減衰力が影響する場合には, 別途実験や近似式などから算出した流体力を用いて構造の減衰項を推定しなければならない。

一方で, 非圧縮性粘性流体の定式化を採用する場合には流体力の影響を統一的な一つの手法で解くことが可能であるため理想的であるが, 特に付加減衰項に強く影響すると考えられる粘性の影響を充分定量的に把握しようとする, 流体-構造連成界面近傍でのメッシュの解像度を充分高くとる必要があるため, 数値計算のコストは前者に比べると莫大なものとなる。疎なメッシュで安定に数値解析を行う場合には数値粘性の影響が大きく, 過減衰傾向となる場合があり構造の応答を過小評価する懸念がある。

本研究で取り扱うような大規模な数値計算モデル, 特に複雑で広い流体-構造連成界面を持つ原子炉燃料集合体の地震応答の問題などでは, 正確に粘性の効果を見積もることは現段階ではその計算コストの制約から困難であり, 低コストで定量的に付加質量の影響を評価できる音響流体の定式化を採用する。

一方で、構造の変動が大きく流体粘性や渦による著しい非線形効果が発生する問題に対しては非圧縮性粘性流体の定式化を採用し、粘性の影響を高精度に評価できるメッシュを用いることとした。

## 2.5. まとめ

本章では本研究で取り扱う方程式である音響流体・非圧縮性粘性流体・および構造の基礎方程式を示した。2.2.6 および 2.3.3 について、連成解析における境界面の基礎方程式を示し、分離型連成解析のための非線形方程式として表記した。

本研究では本章で示した支配方程式を並列環境で効率よく取り扱うことのできる、既存のソルバを活用し、流体-構造連成問題の解析を行う。

---

## 3. 並列分離反復連成システム

---

### 3.1. はじめに

既存のシミュレーションソフトウェアを活用し連成シミュレーションシステムを構築するためには複数のソルバ間で情報を共有しながら協調させシミュレーションを進めなければならない。特に分離反復型連成解法を用いたシミュレーションを行うためには以下の3点の要件を満たす、連成インターフェイスソフトウェアの開発が必要である。

- ① 効率的な分離反復アルゴリズムの実行
- ② 並列環境下での効率的な動作
- ③ 連成界面上の物理量の交換

連成解析のためのインターフェイスソフトウェアとしては、MPCCI<sup>[30]</sup>や Farhat らの Mathcer プログラム<sup>[31]</sup>などが知られているが、分離反復法向けに開発されたソフトウェアは知られていない。ADVENTURE Project では、大規模な並列連成解析向けのプラットフォームとして、上述の3つの機能を有するカプラプログラムと、各ソフトウェアに組み込むための通信ライブラリから成る ADVENTURE\_Coupler が開発されている。

本章では ADVENTURE Project で開発された ADVENTURE Coupler に分離反復連成のアルゴリズムを追加し、並列システム上での効率的な連成解析システムを構築した。

## 3.2. 分離反復法のアルゴリズム

### 3.2.1. Block Gauss Seidel 法

分離型の連成解法において安定にかつ精度よく解析を行うために、本研究では時間ステップごとに固定点反復を行う分離反復アルゴリズムを適用する。分離反復型の解法では、境界上の物理量の更新のために境界自由度にかかわるマトリクスのヤコビアンを利用する手法と、各ソルバからの出力のみを取り扱う手法がある。前者は流体-構造各領域のマトリクスの情報を把握していなければ適用できない一方で、後者ではその必要はない。本研究では既存のソルバを活用できる後者を採用する。

分離反復型連成解法では、式(2-22)および式(3-1)で示される残差が無視できるほど小さくなるように、各時刻点において繰り返し計算を行う。ここで、ある時刻  $n$  において、境界  $\Gamma$  上での変位を求めるため  $k$  回目の時刻内反復における変位  $\mathbf{d}_{\Gamma,k}^n$  から残差  $\mathbf{r}_k$  は次のように定義される。

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{d}_{\Gamma,k}^n - \mathbf{Z}(\mathbf{d}_{\Gamma,k}^n) \quad (3-1)$$

最も広く用いられている連成アルゴリズムである Aitken 補外付 Block Gauss Seidel 法<sup>[32][33][34]</sup>では、解の更新量  $\mathbf{s}_k$  を残差  $\mathbf{r}_k$  方向を用いて以下のように定義されている。

$$\mathbf{s}_k = -\omega_k \mathbf{r}_k \quad (3-2)$$

$$\mathbf{d}_{\Gamma,k+1}^n = \mathbf{d}_{\Gamma,k}^n + \mathbf{s}_k \quad (3-3)$$

$\omega$  は緩和係数である、付加質量効果に代表される連成の影響が強い場合、適切な緩和係数を導入しない限り連成解は収束しないことが知られている。ここで、Aitken extrapolation を用いて動的に決定する手法が広く用いられている。

$$\omega_k = -\omega_{k-1} \frac{\mathbf{s}_{k-1}(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k-1})}{\|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k-1}\|^2} \quad (3-4)$$

### 3.2.2. Broyden 法

上述の Block Gauss Seidel 法以外にも, Line Exterpolation 法[ 59], Newton-Klyrov 法[ 18], 準ニュートン法等の数多くの分離反復型連成手法が提案されている. 分離反復型連成解法では, 連成方程式を分離する際に陽的に扱われる項, すなわち一体型連成方程式の非対角項の大きさが収束性に影響することが知られている. たとえば, 音響流体-構造連成方程式では流体密度と構造密度の比が収束性に影響を与える因子である. Minami and Yoshimura<sup>[19][20]</sup>は流体-構造連成問題に様々な分離反復型連成アルゴリズムを適用し, 流体-構造の密度比やレイノルズ数などが収束性に与える影響を比較した. その結果, 準ニュートン法の一つである Broyden 法<sup>[21]</sup>と Line search を組み合わせることで, 分離反復型解法では収束しにくいといわれている, 流体と構造の質量比が大きく, かつレイノルズ数が高い問題に対しても安定して収束解を得られることを示している.

本研究ではよりロバストに解を求められ, かつ並列化にも適する Broyden 法を採用する. 準ニュートン法では解の更新量をヘッシアンの逆行列の近似値  $\mathbf{B}$  を用いて次式 (3-2)を用いて定める.

$$\mathbf{s}_k = -\mathbf{B}_k \mathbf{r}_k \quad (3-5)$$

準ニュートン法では, 実際に  $\mathbf{H}$  を直接算出する必要はなく  $-\mathbf{H}_k \mathbf{r}_k$  の近似値を再帰的な計算で算出することができる. 本研究では省メモリで実装でき, 計算および通信負荷の少ないアルゴリズムであるリスタート型の Broyden アルゴリズムを採用した.

次に, Broyden 法のアルゴリズムを次に示す. 本アルゴリズムでは, 境界面上の物理量の内積処理以外はプロセス間の通信を要しない.

Algorithm: Broyden method

---

- 1: Give an initial guess  $\mathbf{d}_\Gamma^{-1}$ ,
- 2:  $\mathbf{s}^0 = -\omega^0 (\mathbf{d}_\Gamma^{-1} - Z(\mathbf{d}_\Gamma^{-1}))$ ,
- 3:  $\mathbf{d}_\Gamma^0 = \mathbf{d}_\Gamma^{-1} + \mathbf{s}^0$ ,
- 4: For  $k = 0, 1, \dots, M-1$  do:
- 5:  $\mathbf{r}^k = \mathbf{d}_\Gamma^k - Z(\mathbf{d}_\Gamma^k)$ ,
- 6: If converged, exit with the solution  $\mathbf{d}_\Gamma^k$
- 7:  $\mathbf{q}^0 = -\mathbf{r}^k$ ,
- 8: For  $j = 0, 1, \dots, k-1$  do:  
 $a = \omega^i / \omega^{i+1}$ ,  $b = \omega^i - 1$
- 9:  $\mathbf{q}^{j+1} = \mathbf{q}^j + (\mathbf{s}^j, \mathbf{q}^j) / \|\mathbf{s}^k\|^2 \cdot (a\mathbf{s}^{i+1} + b\mathbf{s}^i)$ ,
- 10: End for
- 11:  $\mathbf{s}^{k+1} = \frac{\mathbf{q}^k - (1 - \omega^k)}{1 - \omega^k (\mathbf{s}^k, \mathbf{q}^k) / \|\mathbf{s}^k\|^2} \mathbf{s}^k$
- 12:  $\mathbf{d}_\Gamma^{k+1} = \mathbf{d}_\Gamma^k + \omega^{k+1} \mathbf{s}^{k+1}$
- 13: End for
- 14:  $\mathbf{d}_\Gamma^{-1} = \mathbf{d}_\Gamma^M$
- 15: Repeat

ここで,  $\omega^{k+1}$  は Line Search パラメータである.



### 3.2.3. Backtrack 法

Broyden 法では準ニュートン法に従って最適な解の更新量の近似値を求める手法である。このため非線形性が弱く、解が安定して求まる連成問題であれば、Block Gauss Seidel 法で用いられるような緩和係数は不要である。一方で、非圧縮性流体解析のように非線形性の強い問題を取り扱う場合に、Broyden 法に従って求めた変位の更新値が特異な値を示すことで、解が求まらないケースがある。このように非線形性の強い問題において、解の破綻を防ぐために Backtrack を適用した。Backtrack は、ある設定された収束のクライテリアを満たさない場合に解の更新幅を小さくし、安定な領域で最適解を探索する。

Backtrack のアルゴリズムを次に示す。ここで  $\alpha$  は 1 未満となる任意の値である。

#### Algorithm: Backtrack

---

```
1:   Give default step,  $\omega_{\max}$ , minimum step  $\omega_{\min}$  and reduction factor s,
2:    $\omega_{k,0} = \omega_{\max}$ ,
3:   For I = 0, 1, ... do:,
4:       If a criterion is satisfied or  $\omega_{k,i} < \omega_{\min}$ , exit,
5:        $\omega_{k,i+1} = \alpha \cdot \omega_{k,i}$ 
6:   End for
```

## 3.3. ADVENTURE\_Coupler への実装

### 3.3.1. 物理量の補間・マッピング

流体-構造連成解析では構造ソルバ-流体ソルバ間で各時刻ステップ毎、あるいは時間内反復毎に境界面上での物理量を交換しなければならない。しかしながら流体-構造連成界面上のメッシュ分割や節点位置は一般的には不一致である。

さらに、離散化手法、要素タイプや次数の違いによりその要素組み合わせが不適合な場合を考慮しなければならない。このような場合に安定かつ精度良く境界上の物理量情報の交換を行う手法が必要である。

本研究では、音響流体-構造連成解析および非圧縮性流体-構造連成解析の二つの連成解析を対象としており、Table 3-1 にまとめられたように様々な物理量の組み合わせを用いている。構造における変位および音響流体および非圧縮性粘性流体とほとんどの物理量が節点上で定義される値であるが流体の粘性力に起因する項は速度場の空間微分量である。

**Table 3-1 Combination of variables exchanged during analysis**

連成モデル	送信側		受信側	
	ソルバ	物理量	ソルバ	物理量
音響流体- 構造	構造	加速度 (変位)	音響流体	加速度 (変位)
	音響流体	圧力	構造	圧力
非圧縮性 粘性流体-構造	構造	変位 (加速度)	メッシュ 流体	変位 速度
	流体	圧力 + トラクション	構造	変位

分離型連成解析における物理量の交換手法について、その精度や効率について議論が行われてきた。それらは節点上変数の連続性を満たすための ①Point-wise Interpolation Method, ②荷重の保存性を満たすことを主目的とした Consistent Interpolation Method, 前述の 2 つを同時に満たすよう試みる, ③Lagrange multiplier method の 3 つの手法に大別できる。

Pidaparti<sup>[37]</sup>は航空機の fluttering 解析などを目的とした流体-構造連成解析において、流体解析ソルバと構造ソルバの間の物理量を交換するために物理量算出に用いた形状関数と同じ形状間を用いる手法を提案した。Inverse Isoparametric Mapping Method を提案した。また、Farhat ら<sup>[38][39]</sup>も類似の手法を採用しており、Consistent Interpolation Method

と呼ばれている。本手法物理量  $\phi$  の領域 A における近似値  $\phi^A$  および  $\phi^B$  は形状関数 N を用いて表す。

$$\phi^A \cong \sum_{i=1}^M N_i^A \phi_i^A \quad (3-6)$$

このとき、位置  $x$  における受信側プロセス B の物理量は送信元プロセスの形状関数  $N^A$  および節点物理量  $\phi^A$  を用いて次式を用いて補間される。

$$\phi^B(x) = \sum_i N_j^A(x) \phi_j^A \quad (3-7)$$

Figure 3-1 に 1 次元表面における補間の模式図を示す。本手法は流体-構造連成解析において構造の変位を流体メッシュの移動に受け渡す場合や、音響流体-構造連成解析において節点変数である圧力を構造側に受け渡す場合などのように解析で用いる主変数をそのまま受け渡す場合には最もシンプルな手法と考えられる。また図に示すようにメッシュ分割に応じて必然的になめらかな分布を持った変位を受信側に受け渡すことができるため、連続的な分布を持つ物理量のマッピングに適した最も汎用性の高い手法であると考えられる。

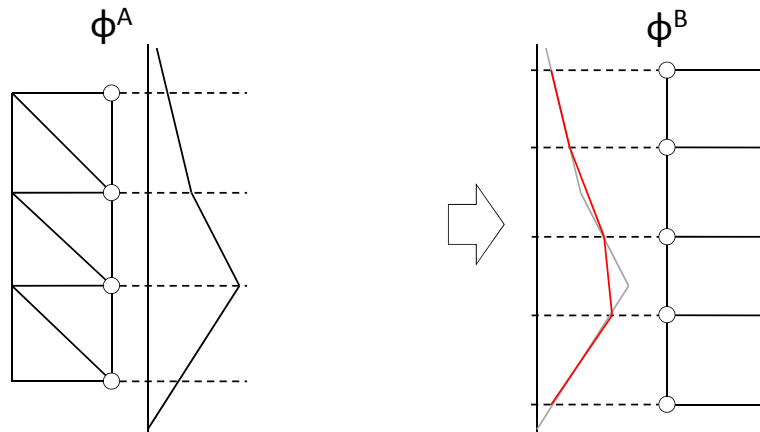


Figure 3-1 Point-wise Interpolation Method (Nodal Variable)

一方で、流体解析における粘性によるトラクションや、構造解析における応力など主変数の空間微分量の交換を行う場合は、表面における微分量を伝達する必要がある。

$$\phi \cong \sum_{i=1}^M \frac{dN_i}{dx_j} \phi_i \quad (3-8)$$

この場合，位置  $x$  における受信側プロセス  $B$  の物理量は送信元プロセスの形状関数  $N^A$  および節点物理量  $\phi^A$  を用いて次式を用いて補間される．

$$\phi^B(x) \cong \sum_{i=1}^M \frac{dN_i^A(x)}{dx_j} \phi_i^A \quad (3-9)$$

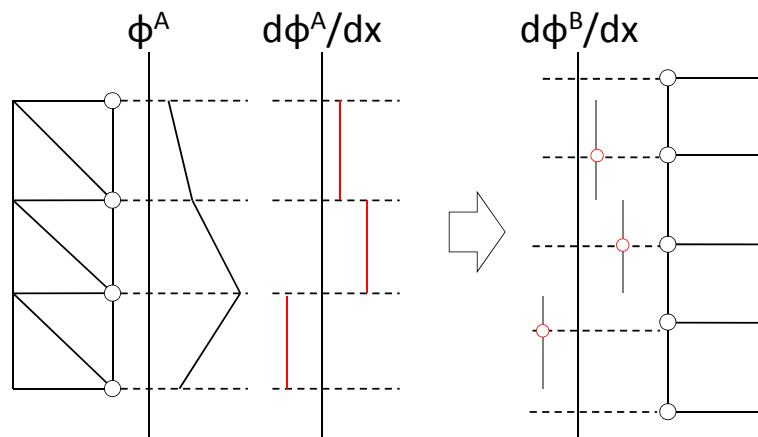
Figure 3-2 に 1 次元における補間の模式図を示す．有限要素法解析では空間微分量は数値積分点であるガウスポイント上で求められることから，要素形状関数を用いて算出した連成界面上の応力値はガウス点からの外挿値となってしまう．このため微分量の表面値の精度は必ずしも保障されない．このため微分量の交換の際にはソルバから出力された節点での集中トラクション  $\mathbf{f}_T$  から，表面上に分布する表面トラクション  $\mathbf{T}_F$  を算出し，表面トラクションを前述の節点補間法によって構造側に引き渡すこととした．

表面トラクションのベクトルを次式(3-10)に示すように節点での近似値  $\bar{\mathbf{T}}$  を用いて有限要素近似する．

$$\mathbf{T}_F \approx \sum_i N_i^T \bar{\mathbf{T}}_i \quad (3-10)$$

境界面上でのエネルギー残差がゼロとなるように式(3-11)を算出する．実装に際しては，要素表面マトリクス  $\mathbf{N}_e^T \mathbf{N}_e$  の計算には集中化マトリクスを用い，逆行列の演算を簡略化することで，補間に要する計算時間を最小化している．

$$\delta \mathbf{T}_T = \int_{\Gamma} \delta \mathbf{T}_F d\Gamma \cong \sum_e \mathbf{N}_e^T \mathbf{N}_e \bar{\mathbf{T}}_i \quad (3-11)$$



**Figure 3-2 Point-wise Interpolation Method (Gradient of Nodal Variable)**

前述の Consistent Interpolation Method はある程度滑らかな分布を持つ場に対しては有効かつ安定に振る舞うが、圧縮性流体における衝撃波などのように急激な場の変化を伴うような問題やインターフェイス上の要素サイズに大きなかい離がある場合など、必ずしも表面上のフラックスの総量が送信側・受信側で一致しない。精度に問題が生じる場合がある。本研究では実装していないが、この問題への対処のために、様々な研究が実施されている。

この問題を解決するため、Cebal and Lohner<sup>[40]</sup>は流体の圧力場を構造側の荷重として送信する際の表面積分に対して流体要素の形状関数を用いた Galekin 法の定式化を行い送信側のガウス点で圧力の積分を評価することで、構造側に引き渡す Quadrature Projection method を提案した。また Farhat ら<sup>[31]</sup>は類似の Node projection method を提案している。これらの手法は送信側のメッシュに比べ受信側のメッシュが荒いときは容易に取扱いができるが、その逆である場合にすべての構造節点に均等に荷重がいきわたらないという短所がある。この場合、非物理的な不連続荷重が生じるため不安定な数値アルゴリズムの場合、解が発散する要因となりうる。Cebal and Lohner が提案するように、表面のメッシュを細分化し、評価すべきガウス点を増加させることでこの問題は解決できる<sup>[40]</sup>。さらに高精度の結果を得るため、二つの界面のメッシュが完全に一致するようにメッシュを再分割し荷重伝達を行う Common Refinement Method が Jiao ら<sup>[41]</sup>によつ

で提案されている。より高精度で安定な解析のためには、これらの保存型物理量伝達スキームの導入は今後の課題である。

### 3.3.2. 並列環境での連成界面情報の交換

ADVENTURE Coupler では、流体-構造その他のソルバが MPI ライブラリによって並列化されていることを想定し、高速に通信を行う。Figure 3-3 に並列構造解析ソルバおよび並列流体解析ソルバのそれぞれが MPI を用いて並列化されている場合の並列連成解析実行時のソルバおよびカプラのプロセス構成を示す。流体解析や構造解析などの連続体の大規模並列解析では解析モデルは各 CPU 毎に領域分割されており、それぞれが MPI などの通信ライブラリを用いて独立して演算を行っている。このため ADVENTURE Coupler では並列プロセスに子プロセスを立ち上げ、データの処理を行う構造を採用した。流体ソルバ・構造ソルバのそれぞれのプロセス毎に、カプラ 1 プロセスを利用するため、流体ソルバのプロセス数を  $x$ 、構造ソルバのプロセス数を  $y$  とするとき、 $x+y$  個のカプラプロセスが同時に実行される。

一般に流体-構造連成界面上の自由度数が多い場合には交換されるデータ量も莫大になるため、ファイルによるデータ交換は連成解析における計算速度のボトルネックになりやすい。そこで、ソルバ・カプラ間通信には socket 通信を用いることで、計算速度のボトルネックとなりやすいファイルシステムへのアクセスがプリプロセス以外では生じないようにされている。また socket 通信は MPI などの並列計算用ライブラリを用いず通信を行うため、MPI などの特定の通信ライブラリをすでに実装している既存のソフトウェアへの大幅な改良を要しない。

物理量のマッピングに際して行われる通信の方式を Figure 3-4 に示す。A~D は各自由度を保持するプロセスの名前を示しており、図中の矢印はプロセス M からプロセス N への通信を示している。不一致メッシュ上での物理量のマッピングでは、送信元 (sending) プロセスでまず物理量の補間を行い、その後受信側 (receiving) プロセスへと送信される。こうすることで、受信側の節点が領域をまたがる不要なデータ通信を行わずに済むよう実装で配慮されている。

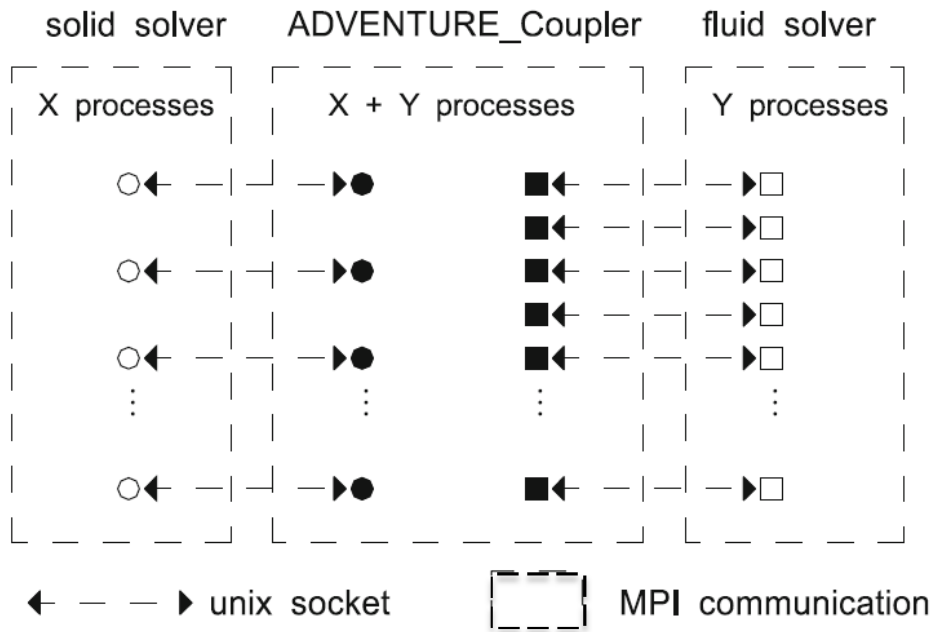


Figure 3-3 Communication model of coupled analysis using ADVENTURE\_Coupler

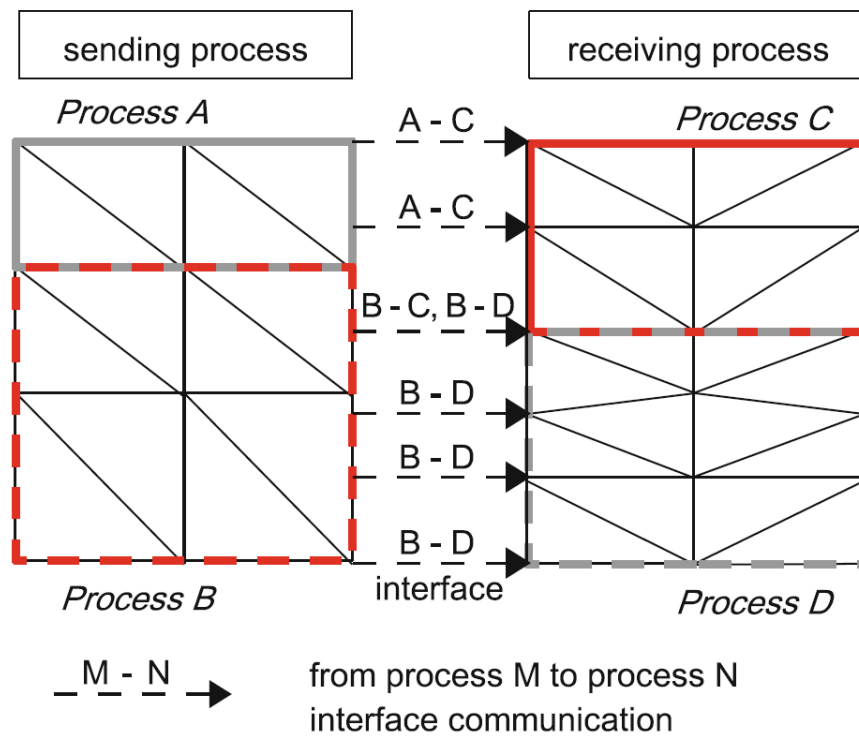


Figure 3-4 Communication model of coupled analysis using ADVENTURE\_Coupler

### 3.4. ソルバへのカプラライブラリの組み込み

ADVENTURE\_Coupler を用いて既存ソフトウェアを活用した連成解析を行う場合、次の2点について既存ソルバの変更が必要である。

#### A) 並列解析向けカプラ通信ライブラリの組み込み

構造ソルバ・流体ソルバの各ソルバは、並列環境下でそれぞれがカプラと通信を行うため、ソルバ起動時にカプラのライブラリと、カプラプロセスの通信先の情報、共有節点の情報などの初期化を行う。

#### B) 収束判定および Line Search (Backtrack 法)の状況に応じた時間進行の再解析

分離反復型の連成解析手法では、各時刻ステップ毎に、時刻内の反復計算で収束判定を行い、収束していない場合同時刻の時刻ステップを再度解析する。このため、時刻内ステップの開始時点での各変数を記憶しておき、収束判定の結果によって次時刻ステップへ進行するか、同時刻ステップを再度解析するか選択しなければならない。

Figure 3-5 に各ソルバ内で Coupler の関数の実際の呼び出し位置を示す。赤字で示される部分がカプラ関数の呼び出される位置を示している。

### 3.5. まとめ

本章では、まず、分離反復型解法を効率的に行うための手法である分離反復アルゴリズムについて述べた。次に連成解析のためのプラットフォームである ADVENTURE Coupler のアルゴリズムと特徴について述べ、分離反復型連成解法を実際に適用する際にソルバに追加した点を示した。

本章に示したように、ADVENTURE\_Coupler と既存ソルバを用いたシステムを構築することで、大規模な問題に対して連成解析を実行可能である。



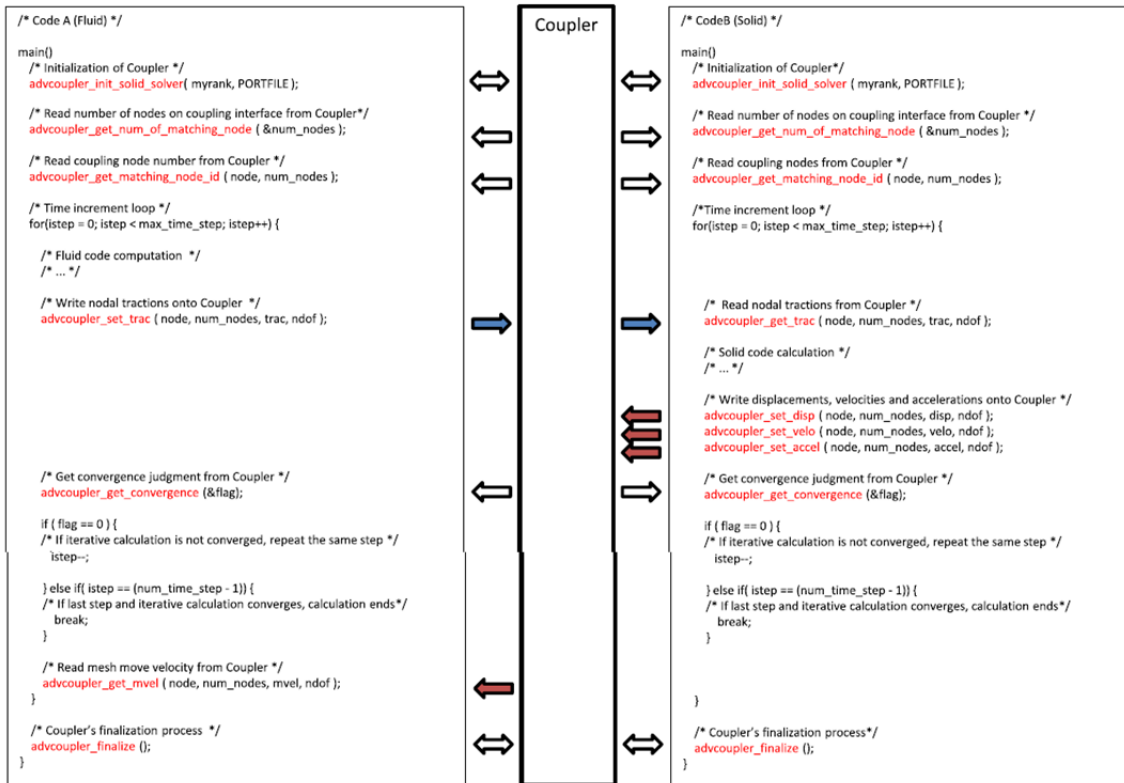


Figure 3-5 Quasi-Coding illustration of partitioned iterative analysis

---

## 4. 音響流体-構造連成解析への適用

---

### 4.1. はじめに

石油精製・化学プラントにおける熱交換器や、原子炉反応器における燃料集合体や蒸気発生器など、液中に固定された棒群をもつ構造物は多く、その振動特性や動的応答を定量的に評価することは工学上重要である。特に原子力構造物ではその安全性を担保するため数多くの研究・検討が行われてきた。その一つに地震時の燃料集合体の挙動が挙げられる。液中の構造物の動的応答を決定する因子として、流体力によって構造物に見かけ上の質量増加が生じる付加質量効果、流体力によって二つの離れた構造物の間に相互作用が生じる相互作用、流体の粘性に起因する構造物の減衰である付加減衰効果などが挙げられる。燃料集合体の地震応答現象では、構造物の変形が微小である場合に、流体領域を非圧縮非粘性の遅い流れと仮定する速度ポテンシャル理論や音響流体(圧力の波動方程式)の方程式を流体領域に仮定することで、有限要素法により直接流体-構造連成問題を解くことができる。これによって、構造物の動的応答における付加質量および付加剛性効果をかなりの程度正確に把握できると考えられる。

Fritz<sup>[43]</sup>は環状液体領域を持つ同心円断面について、付加質量の計算式と連成効果を考慮した外筒と円柱の運動方程式を示し、二つの構造物間に生じる連成効果を考慮した動的現象の解析方法を提案した。また、Chen<sup>[44]</sup>は速度ポテンシャル理論を用いて円管棒群の動的応答解析を解析する方法を提案している。また、国内においては、藤田<sup>[45]</sup>や笠井ら<sup>[46][47][48]</sup>が複数棒群の動的応答について流路網理論を用いて様々の棒群の連成振動の解析を試みている。

近年では計算機能力の進歩から直接的な解析手法も用いられるようになってきた。例えば Sigrist<sup>[49][50]</sup>らは音響流体-構造の連成有限要素法により原子炉の地震荷重およびシヨック荷重に対しての動的応答の解析を試みている。

これらの解析から得られた知見をベースに耐震応答を簡略化し、バネ質点系の解析モデルを構築して実際の原子炉および建屋の設計は行われてきた。しかしながら、実際には棒群の連成振動では長さ方向の挙動に対する付加質量の分布、燃料集合体間の相互作用の変化、燃料棒上下端での流体境界条件など3次元効果の影響による振動特性の変化の考慮が必要であるが、これらの検討は2次元あるいは軸対象形状の解析にとどまっておき、実際の連成効果を正しく把握するためには3次元のフルモデルにおける解析との比較が必要である。3次元解析の例としては、Sigrist and Broc<sup>[71]</sup>が管群を均質化法によりモデル化した事例があるが、このような簡略化は周期的な構造が前提であり、適用できる対象が限られる。

3次元かつフルスケールの問題への適用を目的として、分離反復型解法を適用した流体-構造連成解析プログラムを開発し、3次元の実形状について棒群の動的応答を求めめるため、ADVENTURE\_Coupler/ADVENTURE\_Solid/ADVENTURE\_Thermal を用いた連成解析手法を構築し、3次元空間での動的応答解析への適用のための精度および計算効率の検証を行う。また、大型試験モデルとの比較を行い十分な精度を持つことを確認する。

## 4.2. 音響流体-構造連成解析システム

前章にて説明した、ADVENTURE\_Coupler と並列ソルバの各領域の解析には、大規模並列解析向けに開発された ADVENTURE システムを用いた。すなわち、構造領域の解析には並列固体解析ソルバ ADVENTURE\_Solid (AdvSolid)を、音響流体領域の解析には並列熱伝導解析ソルバ ADVENTURE\_Thermal (AdvThermal) を用いた。

階層型領域分割法(HDDM: Hierarchical Domain Decomposition Method) に基づく反復法をベース<sup>[52]</sup>に Mandel<sup>[51]</sup>により提案された BDD (Balancing Domain Decomposition) 前処理が適用されている。また荻野ら<sup>[53]</sup>によって提案された不完全 BDD 前処理も実装

されており、両者を使い分けることにより、PC クラスタから地球シミュレータなどの超並列計機まで<sup>[54]</sup>様々な並列環境下で高い性能を発揮することが様々な対象において実証されている。本研究によって構築された並列音響流体-構造連成解析システムの流れを Figure 4-1 に示す。

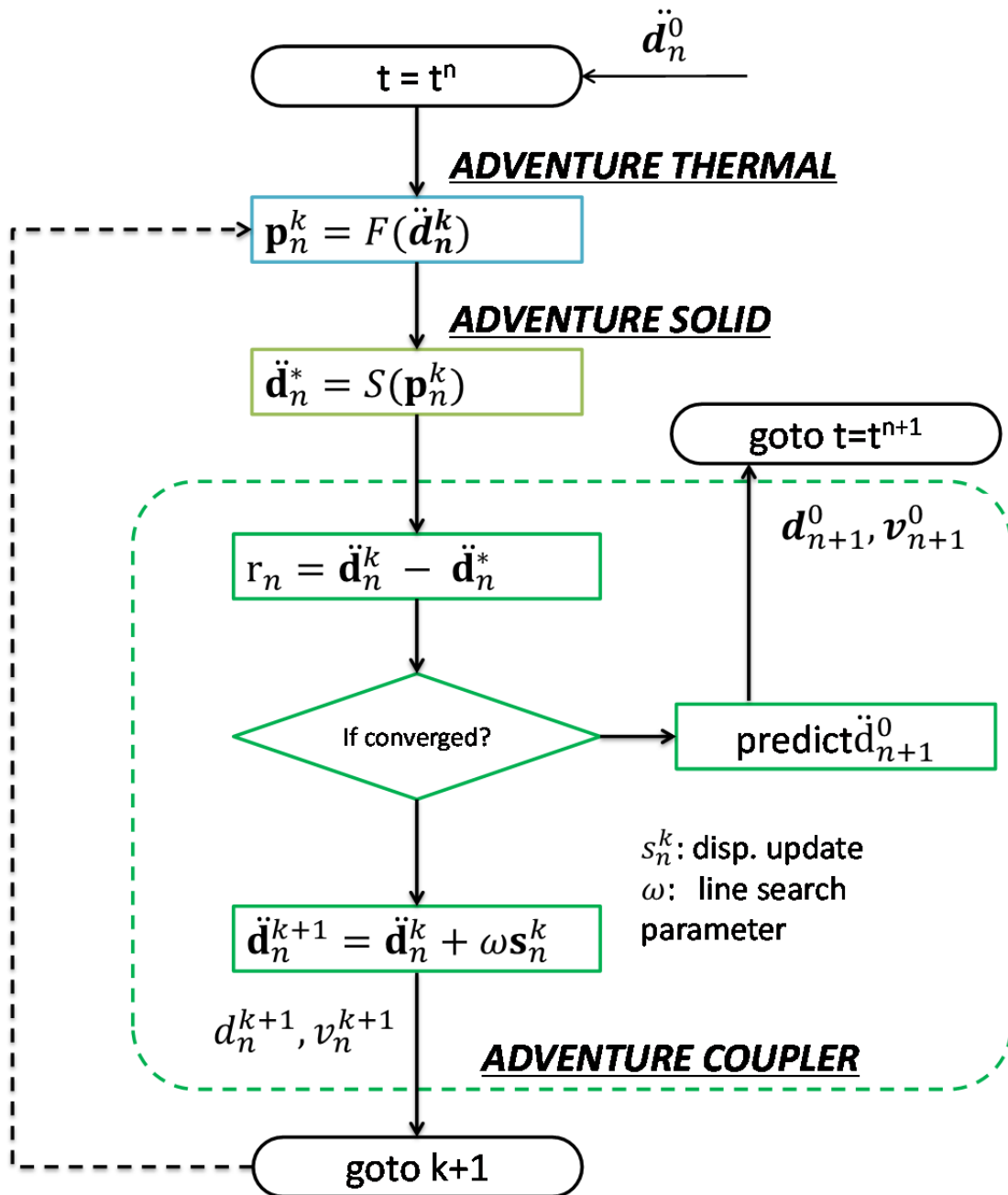


Figure 4-1 Analysis flow for acoustic fluid structure interaction analysis

ここで、 $F(\ddot{\mathbf{d}}_n^k)$ は音響流体解析ソルバである ADVENTURE\_Thermal を、 $S(\ddot{\mathbf{d}}_n^k)$ は構造解析ソルバである ADVENTURE\_Solid の解析を表している。Figure 4-1 では、音響流体解析ソルバへの境界条件が加速度であるため、加速度で表記したが、2.2.6 に記載した通り、ADVENTURE\_Coupler の処理は Newmark's  $\beta$  法によるため速度・加速度のいずれを用いても得られる結果および収束性に大きな差異がないと考えられる。

### 4.3. 検証

#### 4.3.1. 検証 1 単純形状における分離反復型連成解法の収束性と精度

本研究で実装した分離反復解法の収束性と精度検証を目的として、小規模単純形状のステップ応答の解析を行った。解析モデルの形状を Figure 4-2 に示す。液中に置かれた一辺の長さが 0.25m の矩形断面を有する長さ 5m の棒の上端に水平方向にステップ荷重が作用する場合の時刻歴応答を評価する。

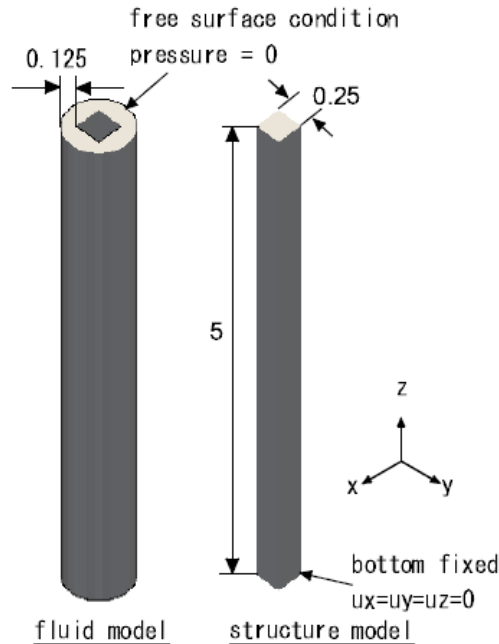


Figure 4-2 Validation model of a Cantilever Beam with Rectangular Cross Section

流体領域は直径が 0.603m の円筒とし、上面に自由表面の条件を課す。構造の縦弾性係数は 3,840MPa とし、質量密度を 2000kg/m<sup>3</sup> と仮定した。この時、構造モデルの片持ち梁としての 1 次固有振動数は 2Hz である。有限要素モデルは 10 節点四面体二次要素を用いて作成し、断面の 1 辺が 4 分割されるように分割した。その結果、構造領域の要素数は 9,920、節点数は 16,005 となった。また流体領域は直径約 6.03m の円筒形状とし、上面に自由表面の条件を与えた。その結果要素数は 28,933 であり、節点数は 46,125 となった。分離反復型解法の収束性に与える影響を比較するため、流体の質量密度をパラメータとして  $\rho_F = 100, 1000, 10000\text{kg/m}^3$  の 3 ケースの解析を行った。

これらの解析結果を一体型解法で解いた結果と比較するため、同一の問題を汎用ソフトウェア Abaqus Ver.6.10 を用いて解析した。構造の 2 次振動モードまでを解像するため、時間刻み幅には  $\Delta t=0.005$  を用い、収束判定基準として  $\epsilon_{tol} = 10^{-6}$  を採用した。Figure 4-3 に分離反復型(partitioned) および一体型(monolithic) 解法を用いた場合の棒上端での変位の時刻歴応答を示す。M は一体型解法での解析結果、P は分離型解法での計算結果を示している。参考のため、付加質量効果のない真空中での結果 ( $\rho_F = 0\text{kg/m}^3$ ) を併記した。各時刻ステップの時刻内反復に要した平均反復数を Table 4-1 に示す。流体の質量密度の上昇に伴い固定点反復数は増加しているが、流体密度が大きな  $\rho_F = 10,000\text{kg/m}^3$  の場合でも安定して収束解が得られることが確認でき、また分離反復型解法を用いることで、一体型解法と同様に正確に付加質量効果を考慮した解析が可能であることが示された。

**Table 4-1 Average number of fixed point iterations depending on fluid density**

$\rho_F$	average number of iterations
$1.0 \times 10^2$	5.0
$1.0 \times 10^3$	9.7
$1.0 \times 10^4$	23.7

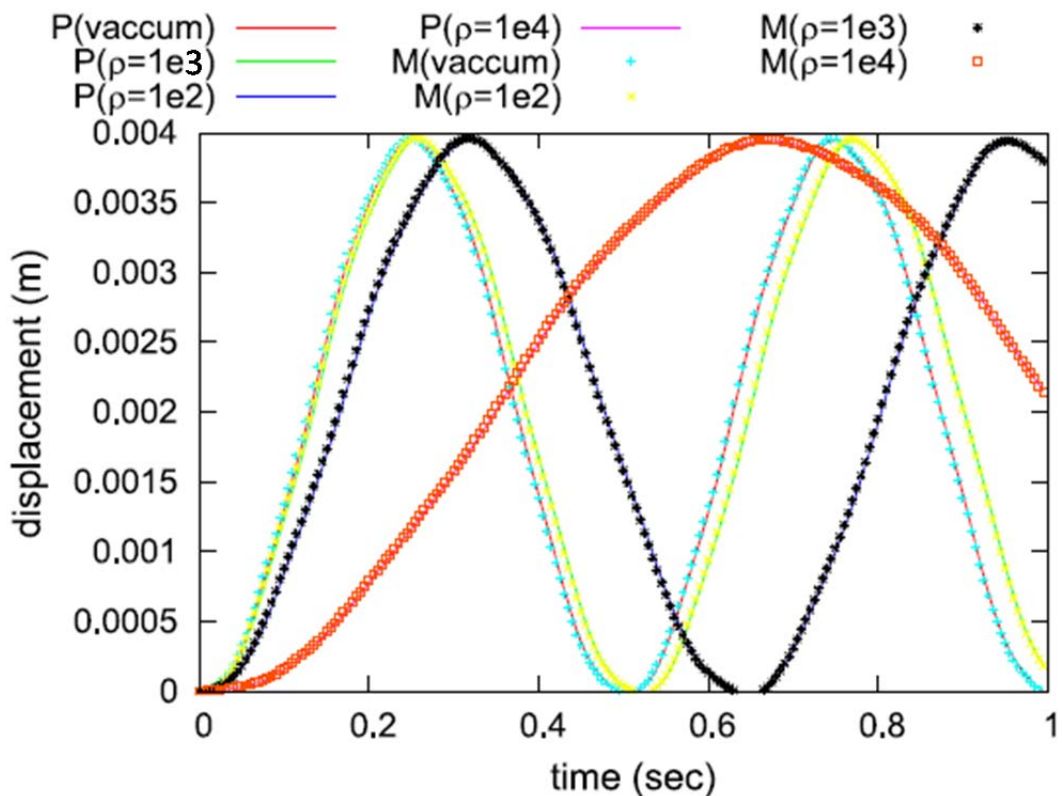


Figure 4-3 Comparison of displacement response at the tip of the cantilever beam

#### 4.3.2. 検証 2 並列環境での性能検証

次に複数棒群のモデルを用いて並列環境での本解析システムの性能検証を行った。解析モデルは前節と同様の断面形状と長さを持つ梁を間隔 0.125m で正方格子状に複数配置したものである。Table 4-2 に示すように、棒の本数は 1~324 本 (1×1~18×18) まで変化させ、解析モデルの規模を変化させた。

Table 4-2 Validation model-2 : number of beams and degrees of freedom for model

model	num.	structure	fluid	interface
no.	beams	dofs	dofs	dofs
1	1	48,015	46,125	23,184
2	4	189,984	184,827	92,736
3	9	423,831	367,241	208,656
4	25	1,179,615	908,971	579,600
5	64	3,014,832	2,069,487	1,483,776
6	169	7,952,607	5,048,896	3,918,096
7	324	15,239,232	9,010,446	7,511,616

解析モデルの例として  $5 \times 5$  棒群の例を示す. 解析には 16 台の PC クラスタを用いた. CPU は Intel core i7 950 (3.07GHz), それぞれが 12Gbyte のメモリを搭載し, gigabit Ethernet で接続されている. モデル 1~7 に対して 16 コアの CPU を用いた並列解析を行い, 1 固定点反復あたりに要した実計算時間と問題規模の関係を調べた. 本解析で用いたクラスタは 1 ノードあたり 1CPU を搭載し, 1CPU あたり 4 コアを有するが, 本計算では 1 ノードあたり 1 コアのみを使用した.



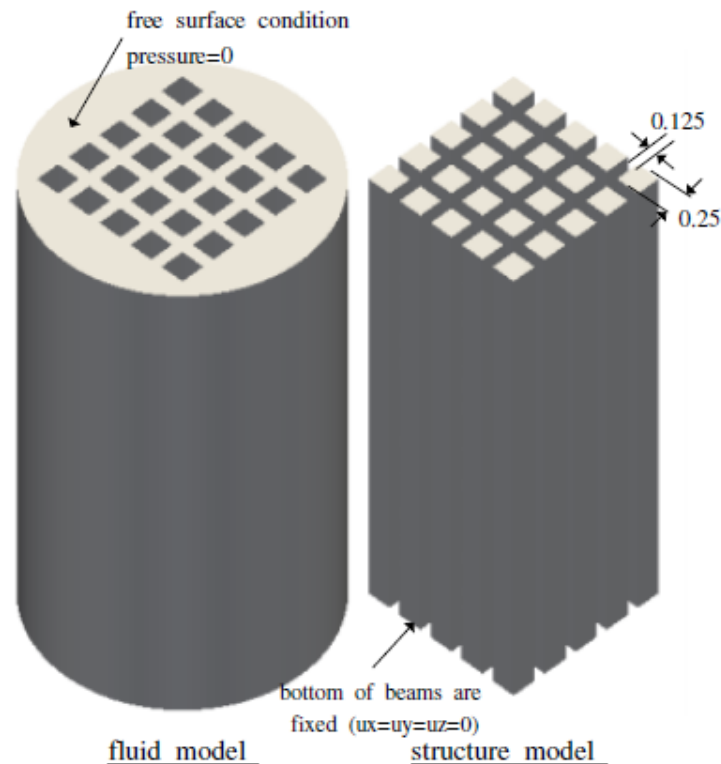
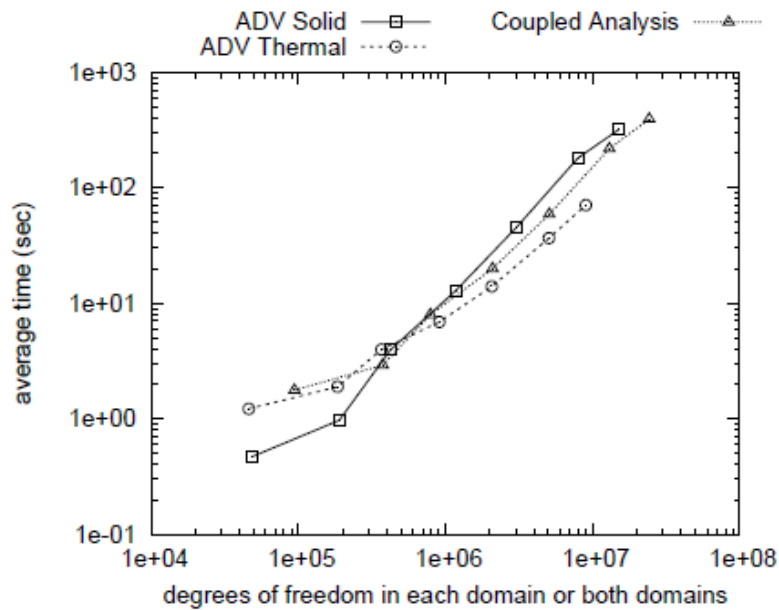


Figure 4-4 Example of validation model 2: Beam bundle with 5x5 beams

解析に要した時間を測定した結果を Figure 4-5 に示す。縦軸は 10 時刻ステップまでの 1 固定点反復あたりの計算時間であり、横軸は各領域の総解析自由度数および全体解析自由度数である。ADVENTURE Solid および ADVENTURE Thermal のいずれのソルバも線形代数ソルバに反復法を用いるため、問題の形状や規模ごとに線形代数ソルバの反復回数が変わってしまう。このため全体の計算時間には多少のばらつきはあるものの、1,000 万自由度規模の問題に対してもほぼ自由度数に比例した時間で計算ができていることがわかる。

Figure 4-6 に 1 反復ステップあたりにカプラの各関数の実行に要した時間を示す。カプラの動作は、ソケット通信・Broyden 法による更新量の算出・領域間での物理量交換 (mapping) の機能に分けられる。最も計算時間を要しているのは複数プロセス間での通信を要する mapping 機能であった。一方で Broyden 法の反復に要した時間は mapping に比べ短く、0.01 秒前後であった。カプラとソルバ間の通信に用いられるソケット通

信に要した時間は問題規模によらず、0.1 sec 前後である。Broyden 法の計算時間の増加には、解析規模の増大に伴う純粋な計算量の増加と、収束までに必要な連成計算反復数の増加が寄与している。今回の結果をみると、解析規模の増大による計算時間の大幅な増加は見られず、ベクトル内積処理などの通信にかかわる待ち時間が律速となっているものと考えられる。以上のように ADVENTURE Coupler の適用によって数百万自由度以上の連成境界上自由度を持つ問題においても、各ソルバの解析時間に対して十分短い時間でデータの交換および連成アルゴリズムの実行が可能であることが示された。



**Figure 4-5 Relationship between average computation time of coupled analysis and model size**

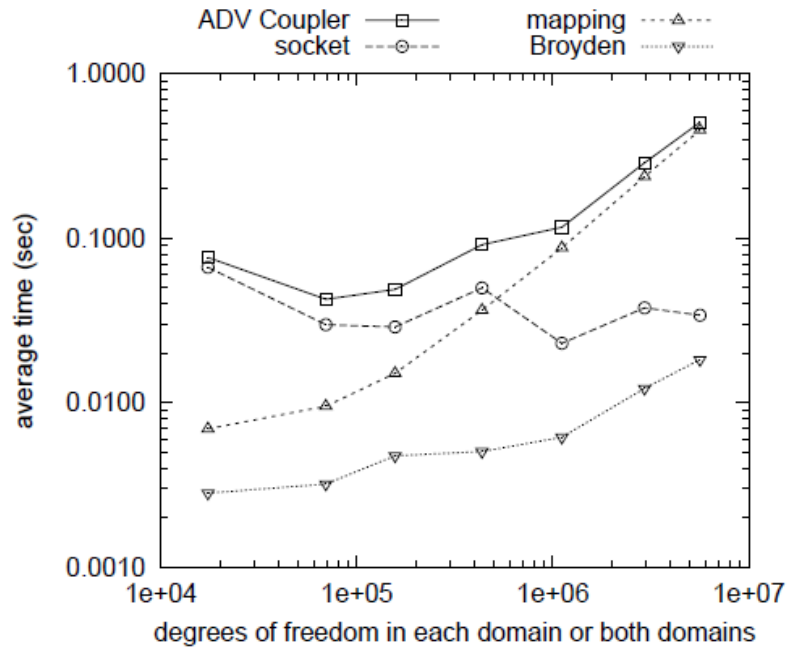


Figure 4-6 Required time for each function of ADVENTURE\_Coupler

次に並列数と解析時間の関係をモデル 5 を対象に調べた結果を Fig.10 および Fig.11 に示す. この計算では, 16 コアまでの計算結果には 1CPU あたり 1 コアを用いているが, 32 コアおよび 64 コアの計算結果はそれぞれ 1CPU あたり 2 コア, 4 コアを利用したものである. 音響流体解析においては 32CPU および 64CPU のケースで並列化による計算速度の向上が少ないが, これは ADVENTURE\_Thermal がマルチコア向けに最適化されておらず, メモリバンド幅の制約により十分な性能が得られていないことが原因である. 一方で, 16 並列から 32 並列へ並列数を増加しひた際に, ADVENTURE\_Solid の解析時間が大きく減少している. これは構造解析モデルの領域分割が良好であったため構造解析ソルバの反復回数が小さかったことが原因であると推測される. 一方, カプラの計算時間は並列数に依存せずほぼ一定であり, Broyden 法に関しては並列数の増加に伴いあの計算時間の低下が確認できた.

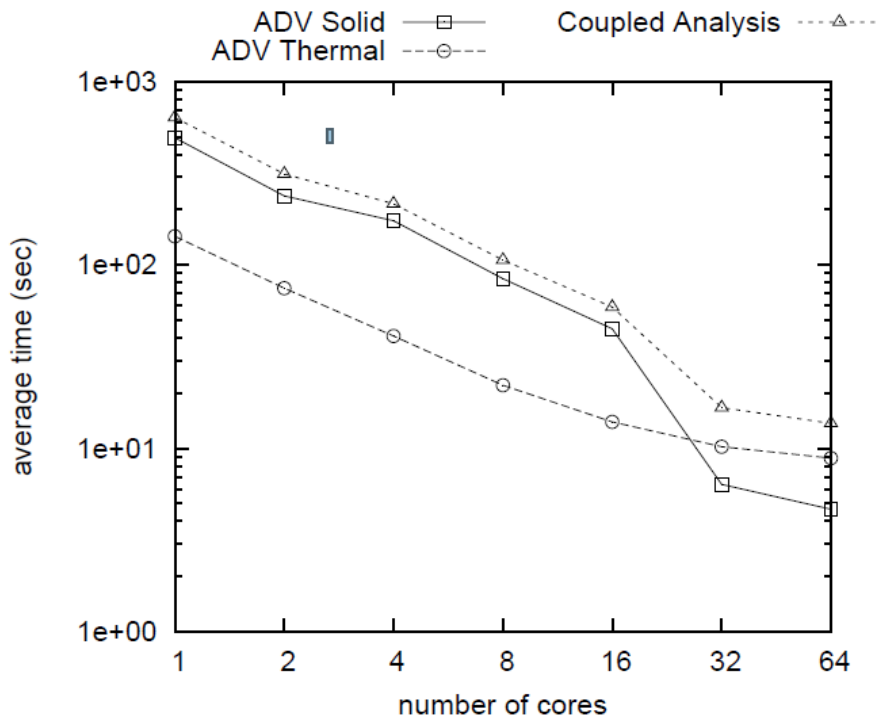


Figure 4-7 Calculation times of solid and Poisson solves and Coupler for different number of cores

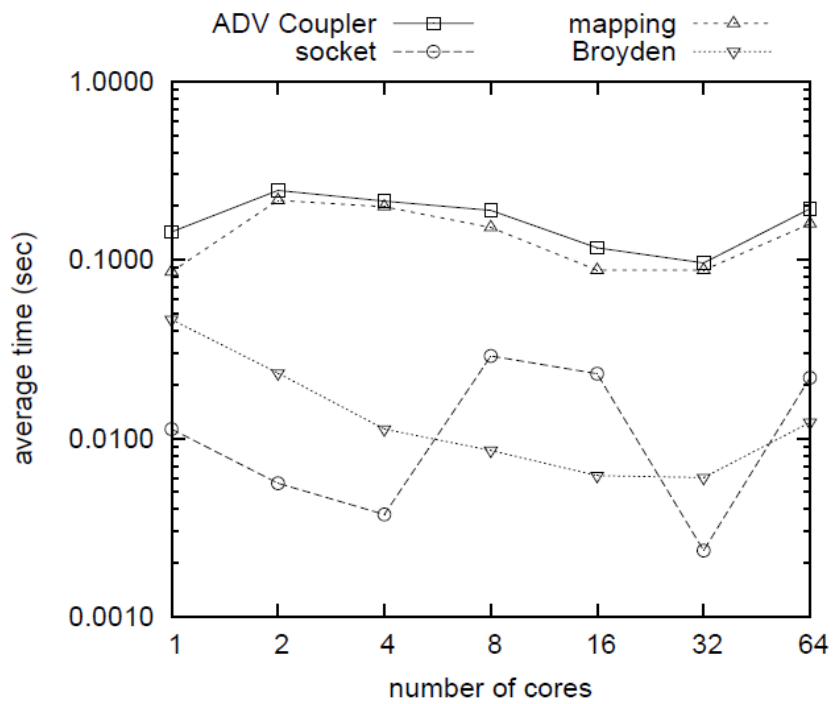


Figure 4-8 Processing time of ADVENTURE Coupler for different numbers of cores

#### 4.3.3. 検証 3: 疑似原子炉燃料集合体の連成振動

沸騰水型原子炉内部の燃料集合体が地震力などの外的な励振力により振動する場合、核燃料集合体と炉心シュラウドおよび冷却材である水の相互作用によりその振動特性である固有振動数や、振動のモードが大きく変化することが知られている。本解析システムの実機レベルの問題への適用性を確認するため、炉心シュラウドおよび 368 体の燃料集合体を模擬した形状の地震応答計算を行った。計算モデルを Figure 4-9 に示す。直径 4.5m、厚さ 50mm の円筒形容器の中に、長さ 4.2m の矩形断面の燃料集合体が配置されている。構造領域は 1,922,214 節点、5,766,642 自由度であり、流体領域は 2,858,307 節点、2858,307 自由度である。解析モデルの総自由度数は 8,624,949 自由度である。本解析ではモデル底部 X 方向に地震波を与え、梁の中間地点における点 A から E までの応答を観測した。解析では 340gal 程度の最大加速度をもち、構造物の地震応答の検証目的でよく用いられる El Centro 地震波を入力地震波として用いた。

解析の時間刻みを  $dt=0.01$  秒とし、300 ステップの計算に、2.4GHz の Core 2 Quad Q6600 を搭載した PC15 台を用いた 30 並列の計算を行い、トータルで 36 時間の計算時間を要した。観測点における変位の時刻歴を Figure 4-10 に示す。長い時刻ステップの計算においても安定して結果を得ることができ、流体との相互作用による棒群の複雑な応答を確認することができた。

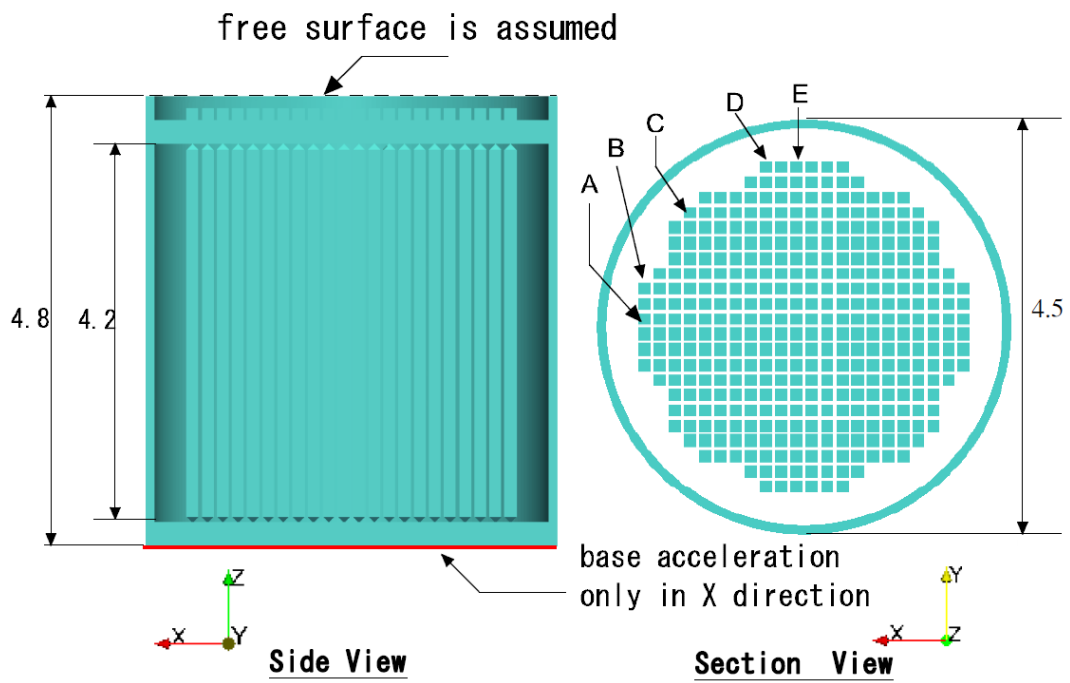


Figure 4-9 Analysis model for rod bundle with its surrounding structures

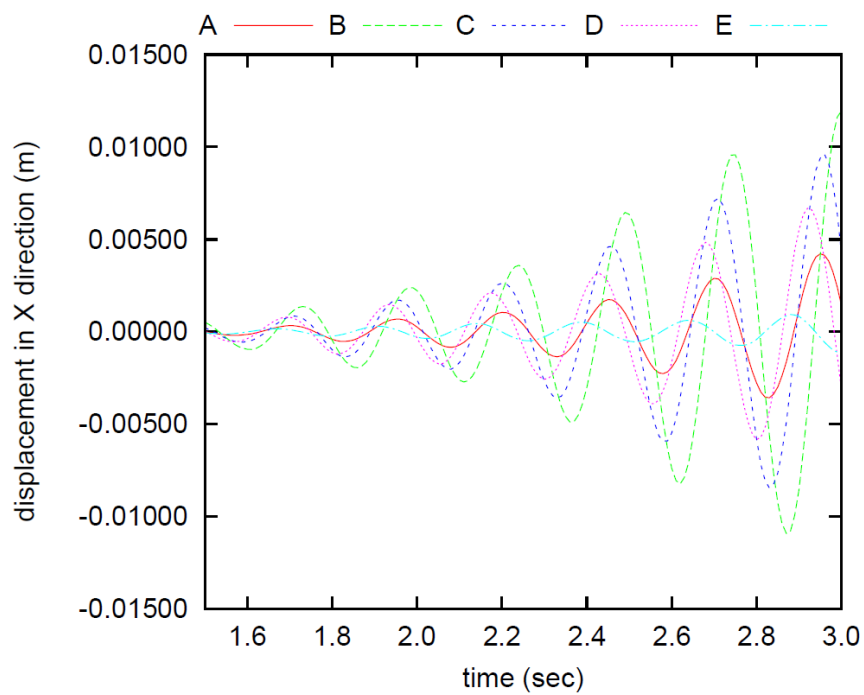
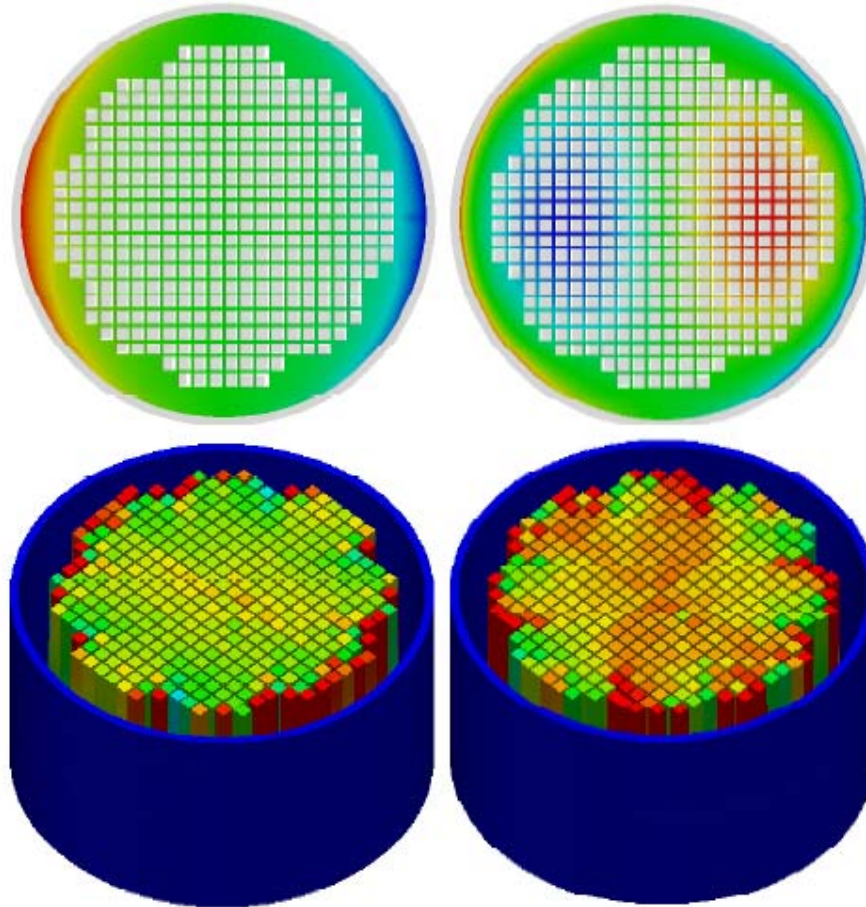


Figure 4-10 Relative Displacement at Point A-E center of the beam in X direction against the base motion



**Figure 4-11 (Upper) Pressure distribution of the fluid domain at the location 2.1m from the bottom of the beam and (Lower) displacement modes at the times  $t=2.7$  sec and  $t=2.77$ sec respectively. Displacements are magnified by factor of 25**

#### 4.4. 燃料集合体の地震応答解析

検証問題を通じて、本解析手法が大規模な音響流体-構造連成解析に対して十分な精度と効率を持つことが確認された。次に本システムを実際の構造に適用し、その適用性を示す。

適用モデルは先の検証モデル3 とほぼ同様のものであるが、棒群の配列等やピッチなどを(財)原子力発電技術機構(NUPEC)が 1986 年に実施した地震応答模擬実験<sup>[55][56]</sup>と一致するようにモデル化を行った。燃料集合体を表す要素はその曲げ剛性が構造物に一致するようセットし、上下端部が単純支持となるよう上下端の要素のヤング率を 1/460 とした。シュラウド部分は剛体であると仮定し周囲に比べ  $10^4$  剛性を高めている。

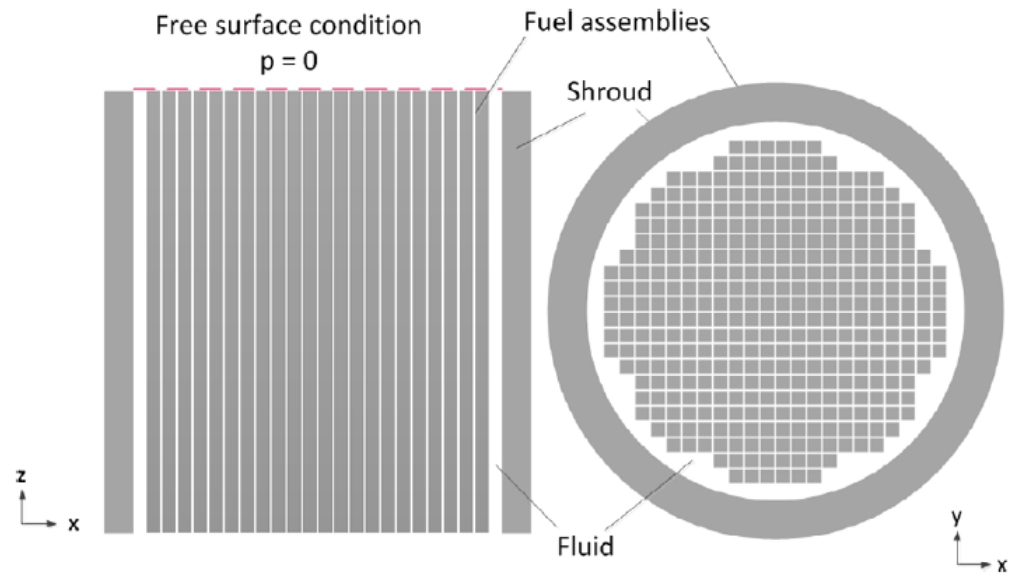
解析モデルは音響流体領域および構造領域ともに 10 節点の四面体二次要素で離散化されており、総自由度数は約 1 千万自由度、流体自由度が 4,302,313 自由度、構造自由度が 2,048,960 自由度であった。

NUPEC の模擬実験結果では水中に燃料集合体を配置し、固有振動数や応答を測定している。この実験結果ではほとんどの燃料集合体の固有振動数が 4.8Hz であったことから剛性比例の Rayleigh Damping を用い、実験的に求められた 7%の臨界減衰比が 4.8Hz で得られるように、Rayleigh Damping のパラメータを調整し、入力した。

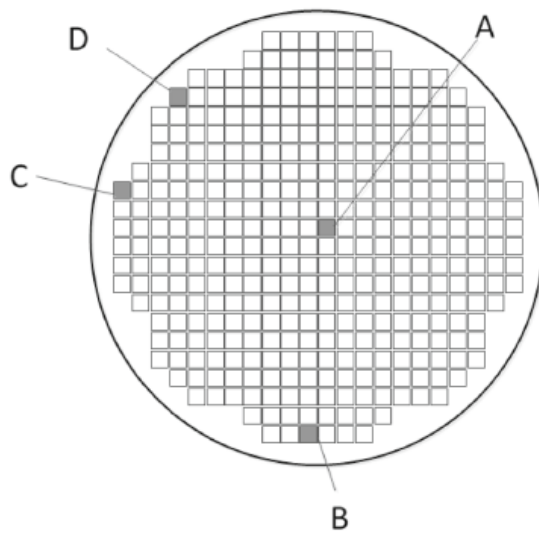
x 軸方向に NUPEC の模擬実験で与えられたものと同様の地震波形を与える。入力データのサンプリングデータと同じ  $\Delta t=0.005$  秒の時間刻み幅を用いて、連成方程式の収束クライテリアとして、 $\varepsilon_{\text{tol}}=10^{-6}$  を用いた。

解析は 8 台の PC から構成される PC クラスタを用いて行った。それぞれの PC は 3.4GHz の CPU クロックと 16GB のメモリを搭載しており、Giga Bit Ethernet で接続されている。収束までの平均反復回数は 26.7 回であった。





**Figure 4-12 Image of 368 fuel assemblies analysis model**



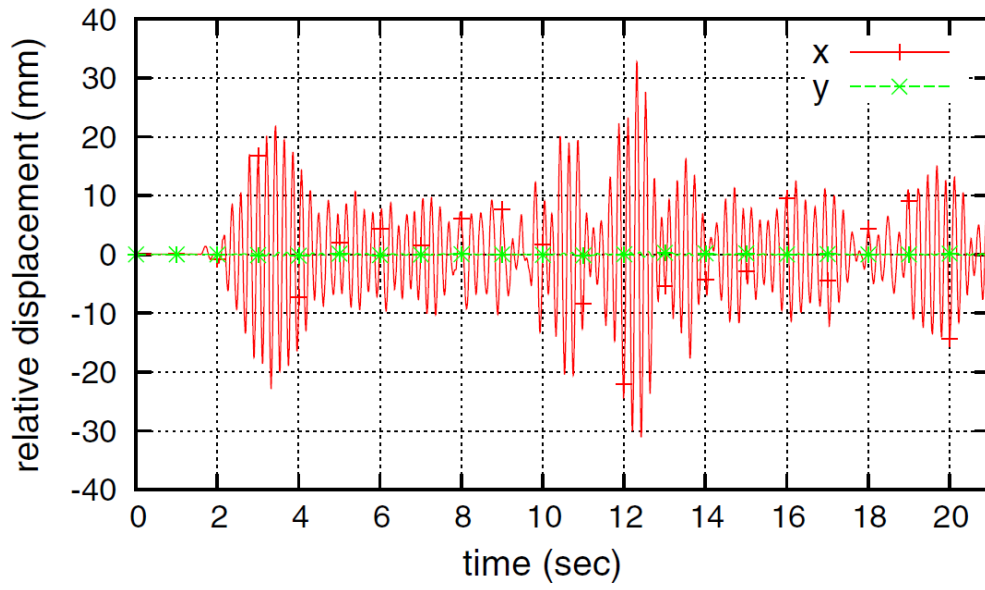
**Figure 4-13 Location of investigated fuel assemblies**

解析モデルより，Figure 4-13 に示される A-D の 4 本の燃料集合体を選択し応答結果を精査した．Figure 4-14-Figure 4-17 は A-D 各燃料集合体の変位応答の計算値の時刻歴を長さ方向に中央となる点でサンプリングした結果である．4 本の燃料集合体は，その

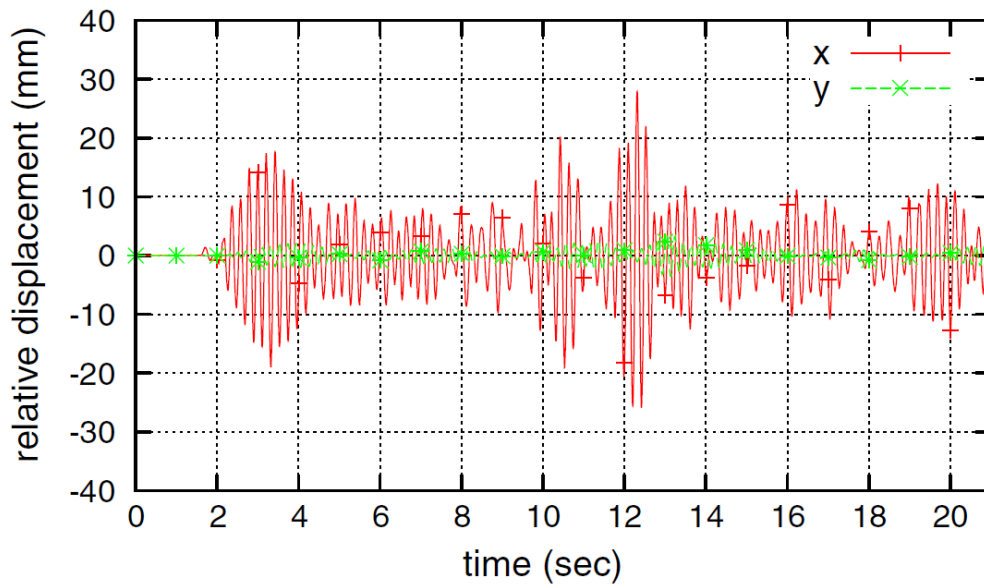
振幅, 位相に関してそれぞれ異なった挙動を示している. これは付加質量の影響および隣接する棒群から与えられる流体力の影響が関係して起こるものである.

Figure 4-18 および Figure 4-19 はそれぞれ A および B での棒の長手中央部位置での X 方向の変位について, NUPEC の実験値と解析結果を比較した図である. 応答の波形や振幅は実験値と非常によく一致しており, また変位がピーク値を取る回数, すなわち振動の周期も非常によく一致している. このように, 当該システムが実際の問題において十分な精度を持つことが確認できた.

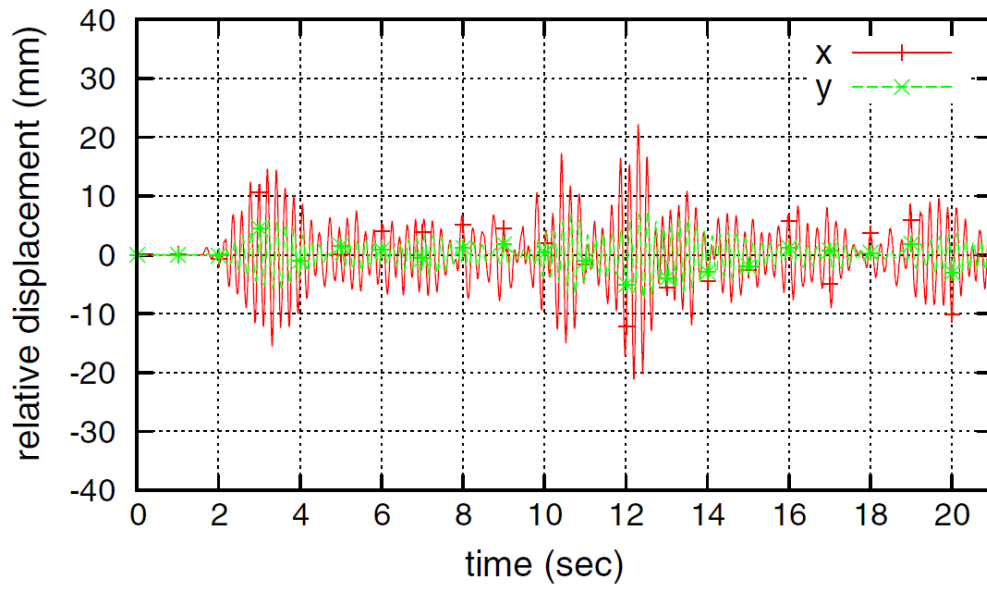
Figure 4-20 に燃料集合体の位置ごとの変位応答の周波数スペクトルを示す. 黄色のロッド, すなわち内部に存在する燃料集合体は主に加振力方向に振動しているのに対し, 最外周の赤, および一つ目の青のロッドは加振力方向と直角方向に加振力方向と同程度の大きさの変形することが確認できた. これは外周部における流体力の非対称性に起因するものであると考えられる.



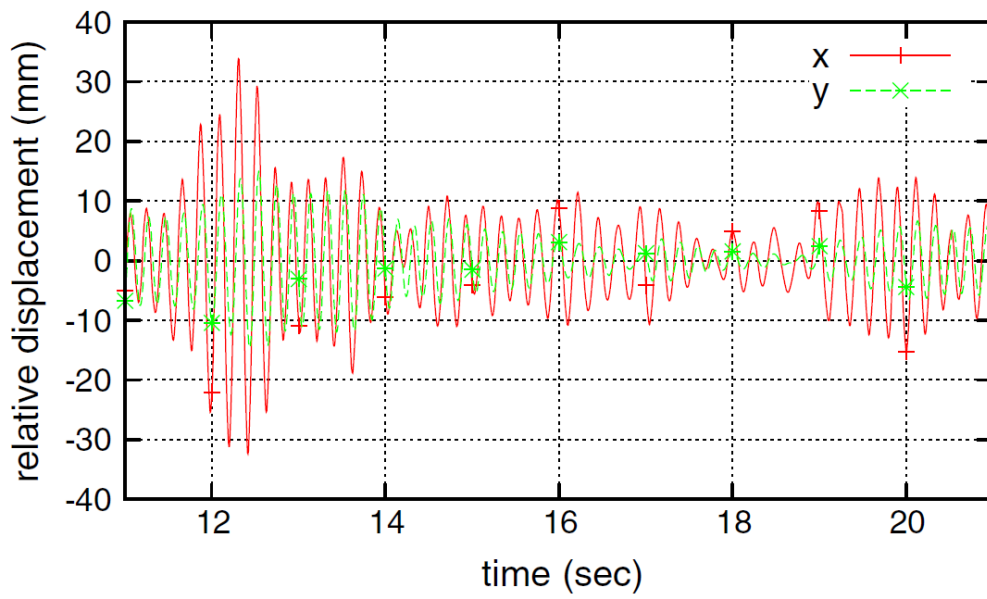
**Figure 4-14 Relative Displacement of Fuel Assembly A**



**Figure 4-15 Relative Displacement of Fuel Assembly B**



**Figure 4-16 Relative Displacement of Fuel Assembly C**



**Figure 4-17 Relative Displacement of Fuel Assembly D**

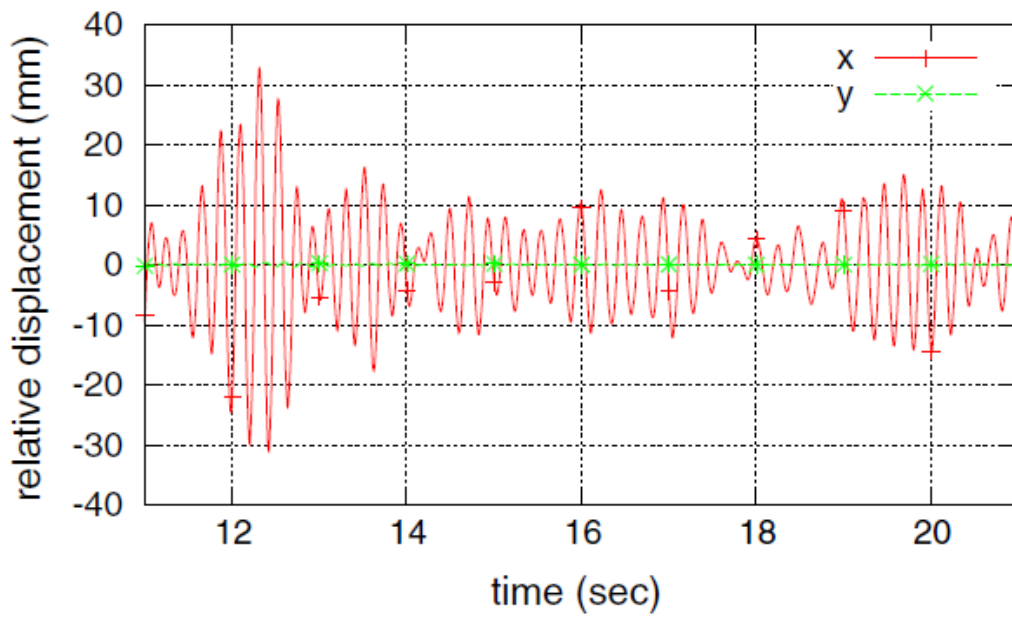
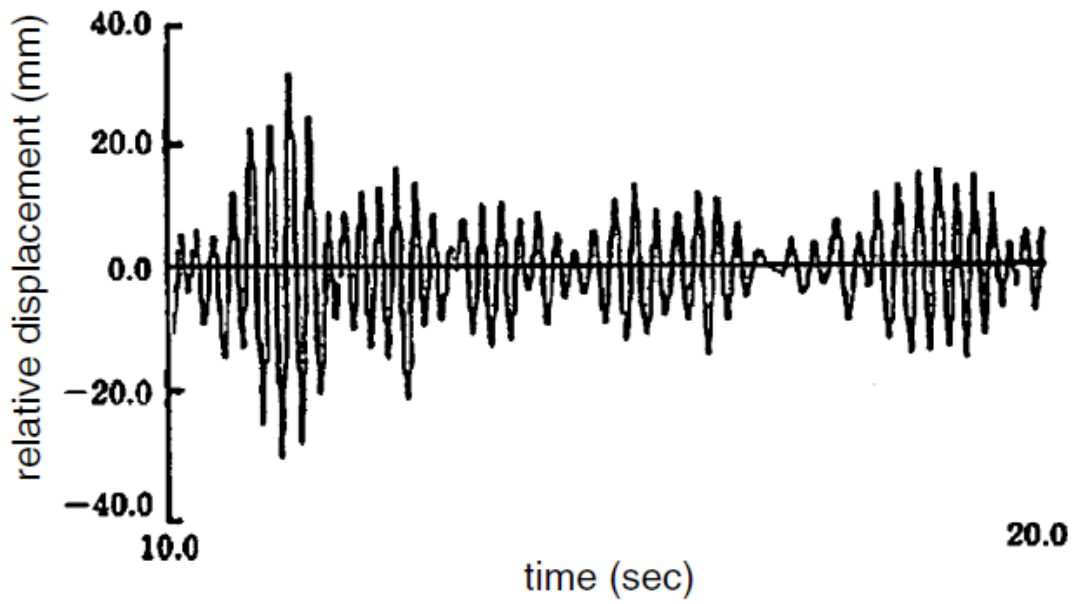


Figure 4-18 Relative displacement of fuel assembly A (top NUPEC's experimental result, bottom numerical result)

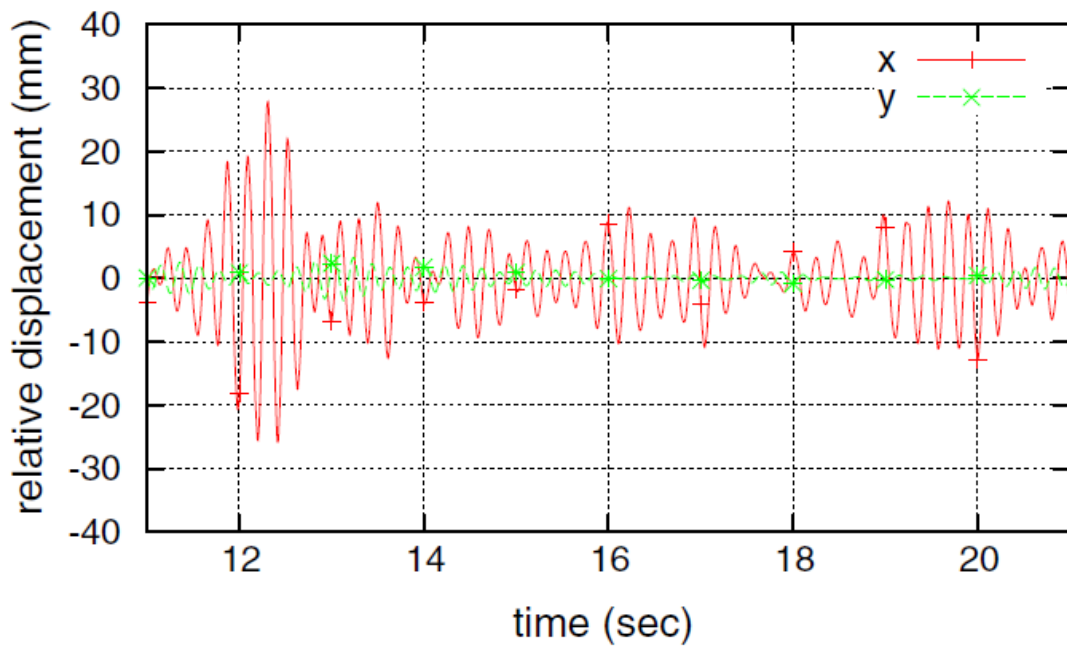
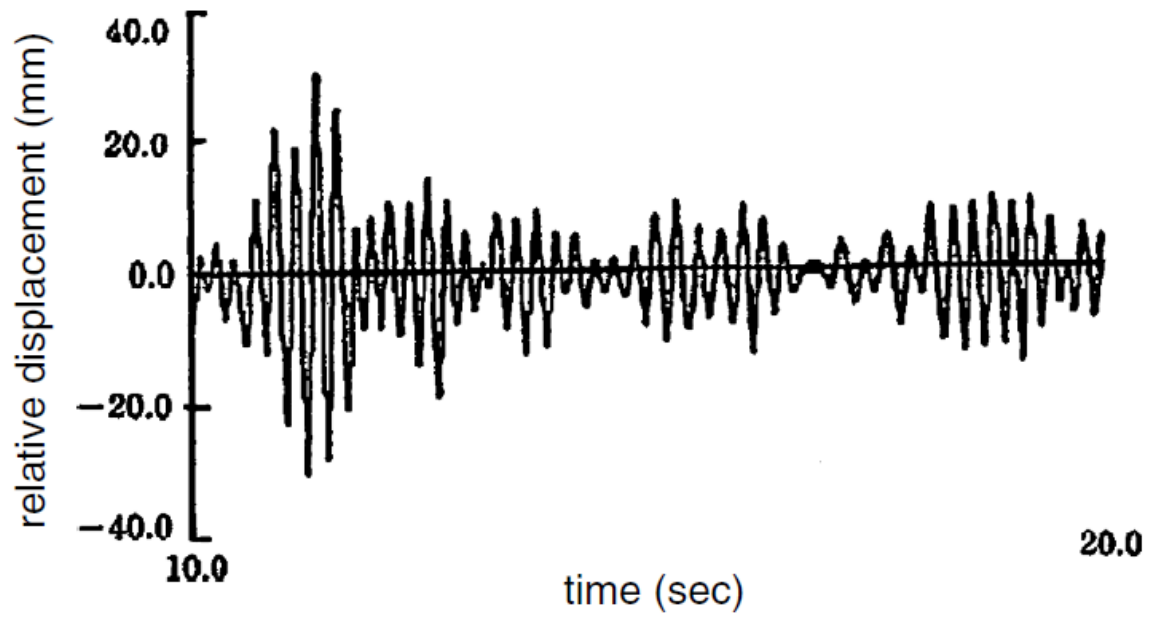


Figure 4-19 Relative displacement of fuel assembly B (top NUPEC's experimental result, bottom numerical result)

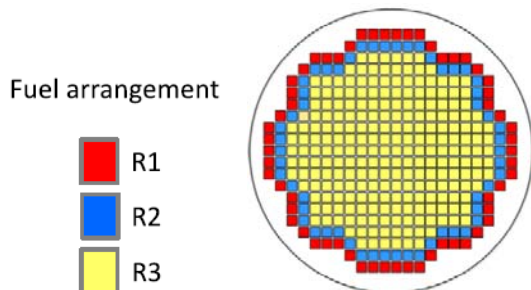
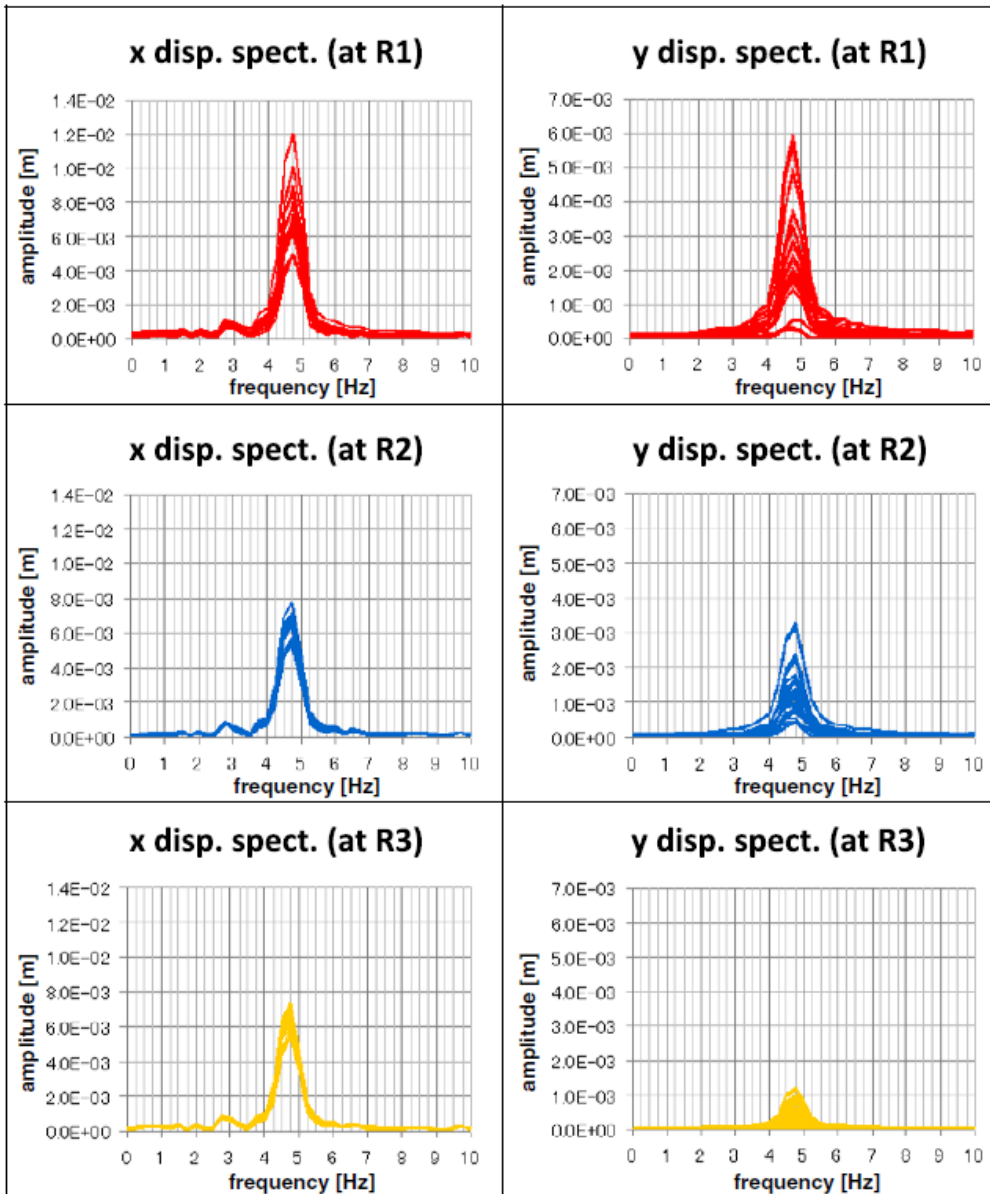


Figure 4-20 Dependence of Displacement on assemblies locations

## 4.5. まとめ

本章では，分離反復型連成システムを音響流体-構造連成解析に適用し，システムの精度の検証を行った．結果本解析システムの結果は一体型解析と同等の精度が得られることが確認できた．次に，大規模な自由度を持つ問題に本解析システムを適用し，並列環境でのソルバの効率を検証した．その結果，大規模並列環境化で高いパフォーマンスを示す各ソルバの性能を阻害することなく，解が得られることが示された．

最後に，本システムを原子炉 BWR 圧力容器の地震応答問題に適用し，既往実験の結果と比較した．これによって大規模な音響流体-構造連成解析が実用に耐えうるだけの精度を持つことが確認できた．



---

## 5. 非圧縮性流体-構造連成解析への適用

---

### 5.1. はじめに

災害現場や配管内等の限られた場所での調査や観察に役立てるため、90年代半ばより小型飛翔体(MAV: Micro Air Vehicle)と呼ばれる無人飛行機の研究開発が盛んにおこなわれてきた<sup>[62]</sup>。その中でも小型 MAV のように小さな構造物においては、必然的にレイノルズ数の低い流となるため、航空機やヘリコプターなどのような大型の人工物とは全く異なる飛行メカニズムを適用しなければならない。これを克服するために、様々なアプローチが考えられているが、その一つに羽ばたき飛行がある。鳥や昆虫の多くが羽ばたきにより飛行する。このような生物は、旋回性、静音性などのさまざまな面から、人工物に比べ効率的にその性能を発揮していると考えられる。自然界における飛行のメカニズムをよく把握し、その特性を MAV 等の人工物の設計に反映することが求められている。

生物の羽ばたきについては様々な研究がおこなわれているが、3つのアプローチがある。一つ目は観測により、現象をより詳細に把握するアプローチである。近年では、ハイスピードカメラなどを用いて昆虫や鳥の羽ばたき運動を詳細に観測できるようになった。たとえば、Ellington ら<sup>[63]</sup>はハイスピードカメラを用いて自由飛行する昆虫の翼の運動を詳細に観測している。二つ目は実験によるアプローチである。実験では Dickinson<sup>[64]</sup>らはショウジョウバエのモデルを用いて、翼の特徴的な流れ場の観測を行っている。3つ目は計算機シミュレーションである。Takizawa ら<sup>[65][66]</sup>や Nakata<sup>[67]</sup>のように近年では3次元効果や翼の剛性を考慮した翼周りの計算機シミュレーションが徐々に実現しつつある。数値シミュレーションでは実験では取得することの困難な圧力や流束などの情報を可視化できるだけでなく、形状や運動をパラメトリックに変更さ

せることが可能なため、人工物の設計を目的とする場合に最も適した手法であると考えられる。

本章では、ADVENTURE\_Coupler を用いた非圧縮性流体-構造連成解析のシステムを構築し、その精度の検証を行う。また、羽ばたき飛行の解析モデルに適用し、MAVをはじめとした人工物設計に本解析システムが活用できることを示す。

## 5.2. 連成解析システム

非圧縮性粘性流体のソルバとして、犬塚<sup>[62]</sup>によって ALE 法と疑似弾性体メッシュムービング手法が導入された Front Flow/ Blue (FFB) ver.5.2 の四面体要素版を用いた。

Front Flow / Blue<sup>[70]</sup>は東京大学生産技術研究所の加藤らによって開発された流体解析コードで、PC クラスタからスパコンまでの広範囲なアーキテクチャに適用された実績を持つコードである。特に非定常の流れ場の予測に実績があり、本研究の対象とする流体-構造連成解析に適していると考え、これを採用した。

Front Flow /Blue では四面体版である les3ct<sup>[72]-[74]</sup>では、圧力および流速の両方に四面体 1 次要素を用い連続の式を Fractional Step 法により分離解法で解く。移流項の安定化手法として BTD(Balancing Tensor Diffusivity)法を導入し、連立一次方程式を Element by Element で並列化された反復法 BiCG-Stab で解く。

乱流モデルを用いない解析手法の他に、非定常の乱流モデルとして LES (standard Smagorinsky model および dynamic Smagorinsky model)および DES (Detached Eddy Simulation)など、非定常な乱流場の影響を考慮するための手法が取り入れられている。

構造ソルバには音響流体-構造連成解析と同様に ADVENTURE Solid を用いたが、音響流体-構造連成解析が微小変形領域での応答に着目していたのに際して、非圧縮性粘性流体-構造連成解析では流体場の大きな変動を取り扱う。それに伴い構造の変形は線形弾性の範囲を超える場合には、Total Lagrangian 法によって幾何学的非線形を考慮している。

Figure 5-1 に各時刻内での分離反復型解法のフローを示す。各時刻内反復ステップでは境界上のメッシュの位置および境界上での速度の予測値を初期の入力とし、Front Flow / Blue によってメッシュ移動および流れ場の解析を行う。次に得られたトラクションに基づいて、構造の変位を解析する。次に得られた構造の変位をもとに、残差を評価し収束判定を行い、収束していない場合には Aitken 補外付の Block Gauss Seidel 法かまたは Broyden 法を用いて解の更新量を評価する。

ADVENTURE Solid では時間方向に Newmark's  $\beta$ 法を採用しているため、変位・速度・加速度のいずれかの値が求まれば、その他の成分を算出することができる。このため、残差は変位、速度、加速度のいずれか一つの成分を用いれば評価できるが、メッシュ変形および流体解析の入力条件として境界面上の変位と速度が必要である。

実際の解析では構造ソルバから得られる境界上の変位を ADVENTURE\_Coupler 内部で分離反復アルゴリズムに基づいて修正し、その修正値に従った変位および速度を流体ソルバ側に引き渡す必要がある。

このため、ADVENTURE\_Coupler 内部で解の更新量や次時刻ステップでの予測値を算出した後に ADVENTURE Solid と同様の Newmark's  $\beta$ 法のパラメータを用いて修正された変位および速度を算出することとした。このため、Figure 5-1 では分離反復法の適用を行う変数を構造側変位として記述しているが実際には Coupler 内部で加速度および変位を算出するため、変位および加速度のいずれを用いることも可能である。

ただし、変位と加速度を比較すると加速度のほうが相対的に高周波数の応答成分を大きく反映するため、誤差の評価や分離反復の更新量の算出で多少の差異が生じる場合がある。

解の予測値が不正確で、流体解析メッシュの破綻あるいは、流れ場の解析の破綻によって解析が停止した場合、backtrack 法によって前時刻内反復における Line search parameter である  $\omega$  を修正した上で流体領域の再解析を行うため、Front Flow /Blue と Coupler 間での収束判定の通信を行う。

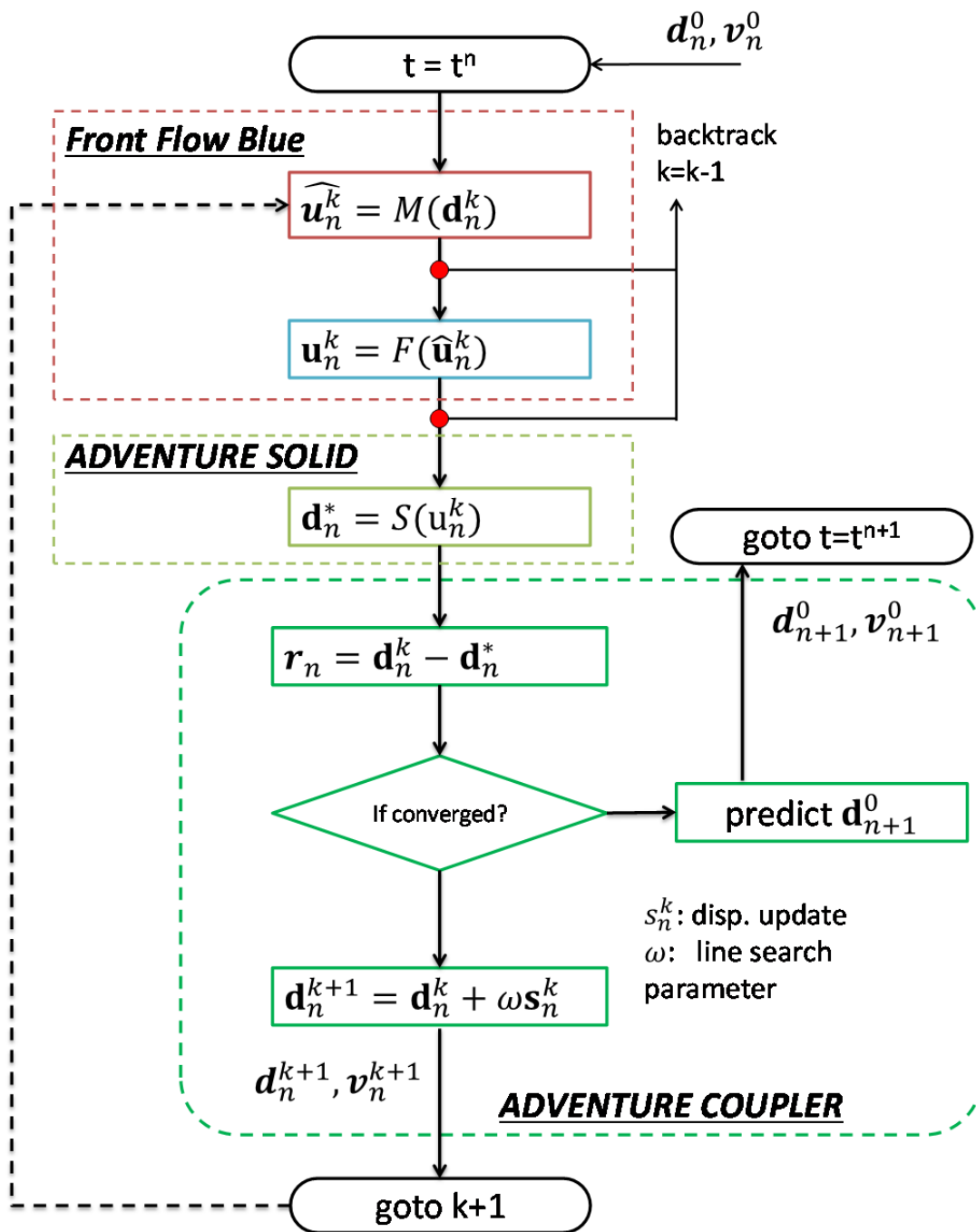


Figure 5-1 Analysis flow for fluid structure interaction analysis

## 5.3. 連成解析システムの検証

### 5.3.1. 検証1：液体中で微小振動する構造の付加質量・付加減衰

#### 5.3.2. 目的

非圧縮性流体-構造連成解析では、解析が安定に実行されることのみならず、以下のような項目が正しく再現できることを確認しなければならない。

付加質量、すなわち構造の固有振動数への影響が正しく評価できること

- ① 付加減衰、すなわち流体粘性力による減衰効果が正しく評価できること
- ② 流体力の不安定振動とのフィードバックによる連成振動が正しく評価できること
- ③ 3次元的な形状においても、計算が正しく進行すること

本章では、ADVENTURE\_Coupler と Front Flow/Blow および ADVENTURE\_Solid を用いた連成解析システムが、定量的に妥当な解析結果を示すことを確認するための、ベンチマーク解析によって性能評価を行った。

流体-構造連成解析の影響を構造側からとらえた場合の影響の評価には、流体による構造物の固有振動数の変化(付加質量効果)および、流体力による減衰効果(付加減衰)の二つのパラメータを評価することが有効である。非圧縮性粘性流体-構造連成における分離反復型連成解法の有効性を検証するための基礎検討として円筒内で微小振動する剛体(円柱)の解析を行い付加質量、付加粘性の検討を行った。この問題は閉領域を取り扱うため、流体の非圧縮性の特性が強く生じる。分離解法においては流体と剛体のエネルギーのやり取りが正しく扱われていなければ減衰や付加質量を正しく評価できない可能性があること、流体-構造連成解析の基礎的なベンチマークとして用いられてきた。結果を野村ら<sup>[57]</sup>による一括型解法や単純互い違い法による結果と比較した。

なおChenら<sup>[58]</sup>は、ストークス流れを仮定した場合の本問題の理論解の導出や実験値の算出を行っており、野村らの結果はこれと良く一致していると報告されている。

### 5.3.2.1. 検討モデル

本検証で用いたモデルを、Figure 5-2 に示す。質量  $m$  を持つ直径  $a$  の内筒を直径  $b$  の閉鎖した空間(外筒)内に配置し、仮想的なバネでモデルを拘束する。なお、野村らの検討では 2 次元問題として本解析を取り扱うが本検討では構造側・流体側共に 3 次元解析ソフトウェアを用いるため、厚み  $H$  を考慮する。

この内筒部分に変位が円筒直径の  $1/10$  および  $1/100$  となるような体積力を与え、内筒の変位履歴から付加質量効果および付加減衰効果を算出する。

なお、構造解析側の弾性係数を十分に高く設定し、内筒を疑似的に剛体とみなしている。

### 5.3.3. 解析条件

流体には silicon oil, mineral oil, 水, 空気の 4 種類の物性を定義した。構造側の物性値および基礎形状のパラメータを Table 5-1 に、流体の物性値を Table 5-2 に示す。

分離反復法のアルゴリズムとして、構造側への付加質量効果/付加粘性効果ともそれほど大きくないため、最も一般的な Aitken 補外付き Gauss Seidel 法を用いて解析を行った。収束判定として全ステップからの変位の残差を  $\varepsilon_{\text{tol}} < 10^{-4}$  に設定となるよう設定している。

**Table 5-1 Dimensions and Mechanical Properties**

a	0.0127	m
b	5a	M
m	0.00341	Kg
k	34.6	N/m
H	0.01	m

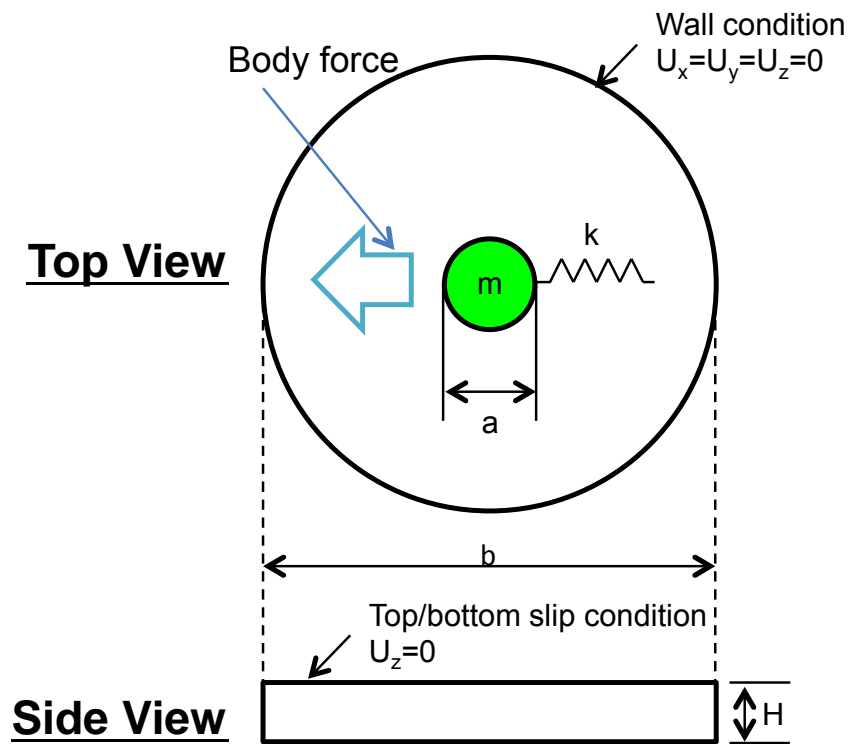
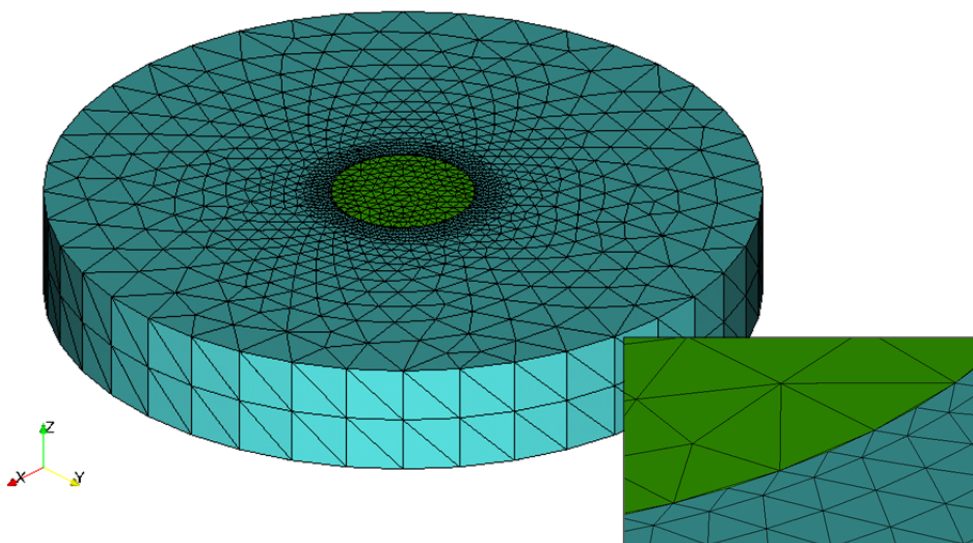


Figure 5-2 Oscillating rigid body in confined fluid

Table 5-2 Material Properties

	density (kg/m <sup>3</sup> )	dynamic viscosity (m <sup>2</sup> /s)	Bulk modulus (Pa)
Silicon oil	956	$1.517 \times 10^{-04}$	$1.87 \times 10^9$
Mineral oil	935	$4.385 \times 10^{-05}$	$1.87 \times 10^9$
Water	1000	$1.330 \times 10^{-06}$	$0.45 \times 10^9$



**Figure 5-3 Finite Element Model**

#### 5.3.3.1. 解析結果

流体を Silicon oil とし，静的変位量が  $a/10$  となるように体積力を設定した場合のメッシュの変形および圧力の分布を Figure 5-4 に示す．剛体の変形に応じて，流体領域のメッシュが変化し安定に圧力・流速場が得られていることが確認できる．

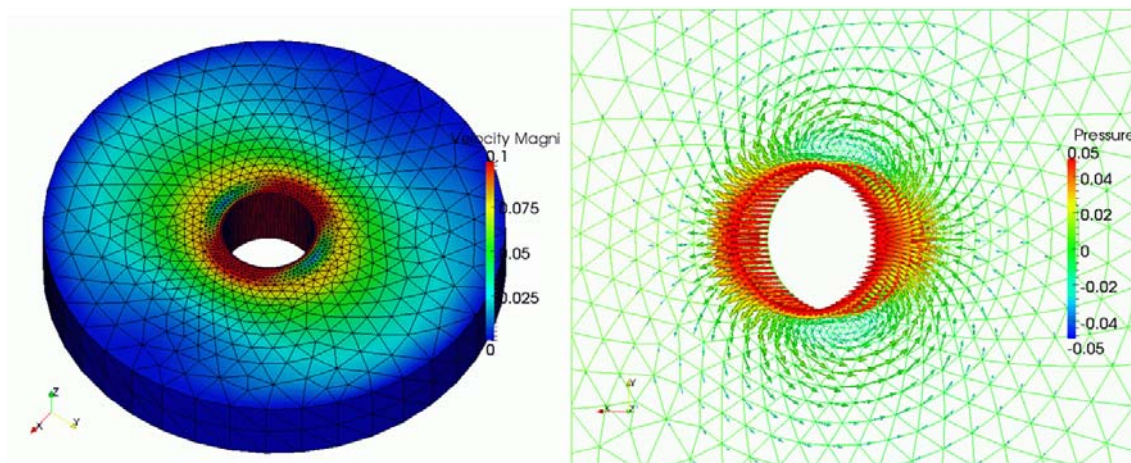
また，静的変位量が  $a/100$  となるように体積力を与えた場合における，各流体の解析より得られた剛体の変位履歴をに示した．また収束に要した分離反復法の平均反復回数を Table 5-3 に示した．

分離反復法の平均反復回数は Water, Silicon oil, Mineral Oil の順大きかった．この原因として流体の密度が影響していると考えられる．



**Table 5-3 Average number of iterations for 1000 time step**

	average number of iterations
Silicon Oil	5.52
Mineral Oil	5.48
Water	5.83



**Figure 5-4 Snapshot of Velocity Magnitude and Pressure (Right)**

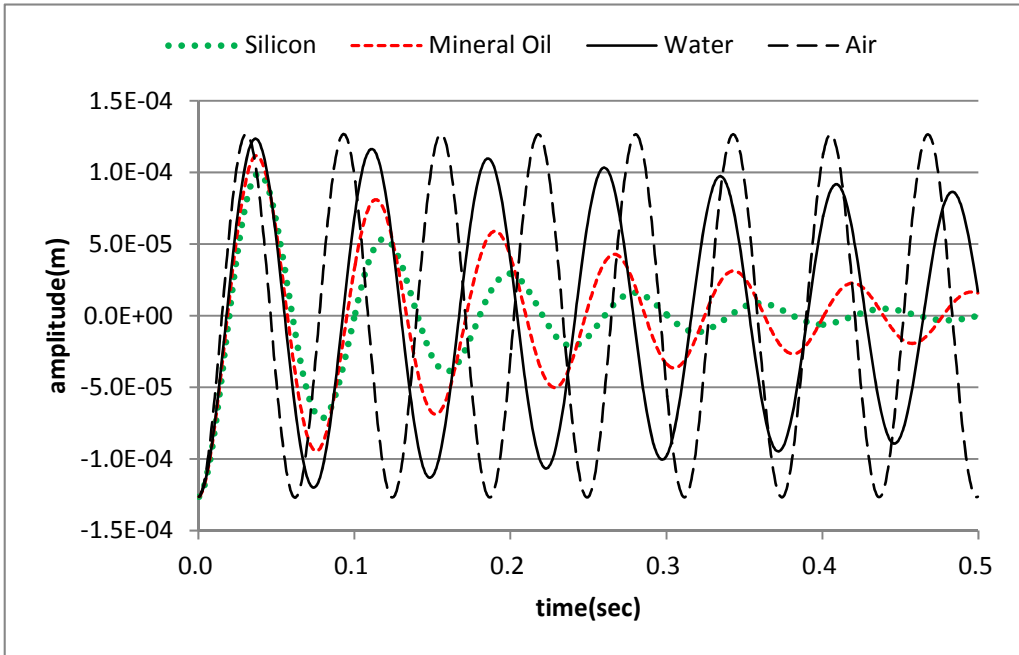


Figure 5-5 Displacement amplitude for each fluid case

### 5.3.3.2. 考察

解析結果の精度を議論し、野村らの検討結果との比較を行うため、以下のように解析結果を正規化しグラフ上にプロットした。剛体の運動方程式は以下の(5-1)で表される。

$$(M + C_M^*)a + C_V^*v + kx = 0 \quad (5-1)$$

$C_M^*$ は流体からの付加質量、 $C_V^*$ は流体からの付加減衰であり、それぞれ、式(5-2)および(5-3)で表すことができる。

$$C_M^* = \frac{k}{\omega^2 + \frac{\zeta^2}{T^2}} \quad (5-2)$$

$$C_V^* = \frac{-2\zeta(M + C_M^*)}{T} \quad (5-3)$$

ここで、 $T$ は振動子の周期、 $\omega$ は角速度、 $\zeta$ は対数減衰率であり、解析結果の変位の時刻歴より数値を求めた。

解析結果は以下のように無次元化する。無次元化された付加質量係数、付加粘性係数は以下の式(5-4)および(5-5)で表される。

$$C_M = \frac{4C_M^*}{\rho\pi d^2} \quad (5-4)$$

$$C_V = \frac{4C_V^*}{\rho\pi d^2 \omega} \quad (5-5)$$

また、無次元振動数を次式で定義する。

$$R_\omega = \frac{\omega d^2}{\nu} \quad (5-6)$$

解析結果の妥当性を検証するため、Chen ら<sup>[58]</sup>によって導かれた理論式との比較を行った。Chen の著書によれば、同心円状に配置された円筒状構造物が液中で振動する場合の単位重量当たりの付加質量は以下の式(5-7)で表すことができる。

$$C_M = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \frac{2}{a} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \quad (5-7)$$

ここで、構造物全体への付加質量は以下の式(5-8)で表せるとした。

$$M_{added} = \pi \frac{a^2}{4} C_M \quad (5-8)$$

また、Chen ら<sup>[58]</sup>は無限に広がる流体中で円柱が振動する時の抗力係数を算出し、粘性が比較的小さいときの近似式を導いた。これを整理すると、単位重量・単位角速度当たりの抗力は以下の式で表される。

$$C_V = \frac{8}{d} \sqrt{\frac{\nu}{2\omega}} \quad (5-9)$$

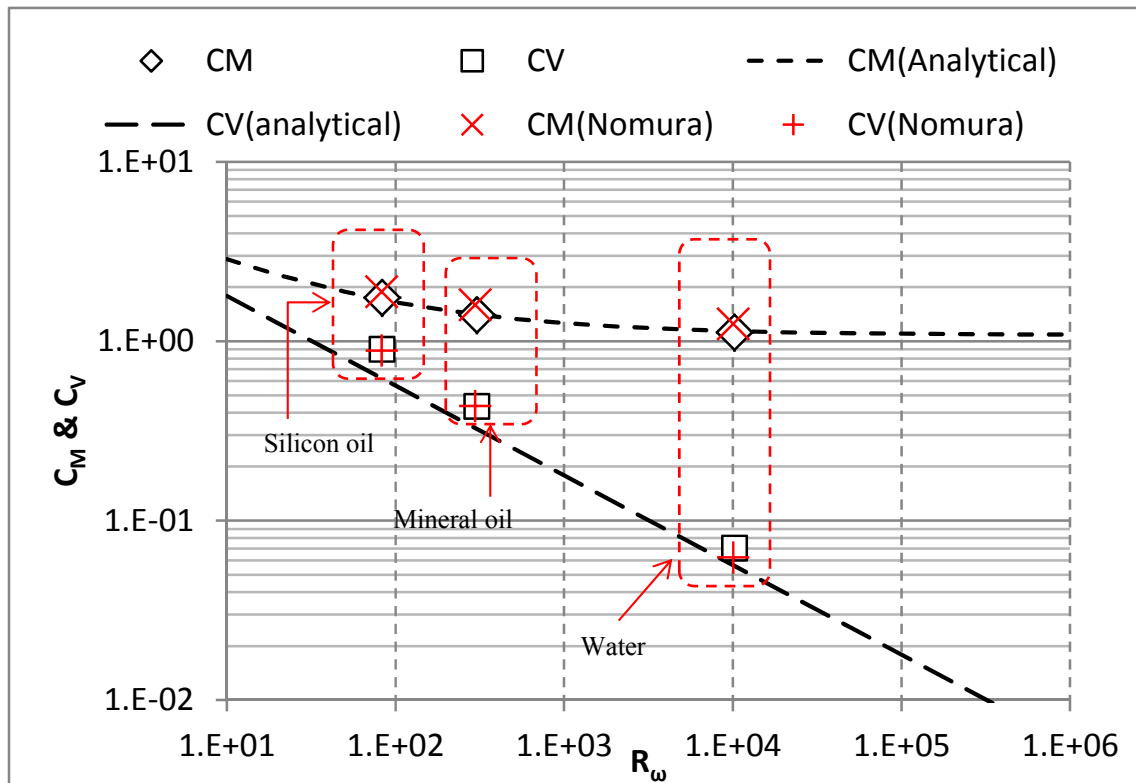


Figure 5-6 Resultant normalized added mass and added damping

Figure 5-6 に示した通り，正規化された付加質量  $C_M$  は無次元振動数  $R_\omega$  の増加に対して低下する傾向が表れた．これは理論解および，Nomura らの数値解と一致している．また，正規化された付加減衰である  $C_V$  については本結果は理論解として示した線からは若干離れている．これは，無限遠中の剛体の運動をモデル化した  $C_V$  と数値解との違いである．Nomura らの数値解との比較でも Silicon oil および Mineral oil 中ではほぼ同様の結果が得られた．Water 中での応答に関して若干 Nomura らの数値解を上回る結果となったが，これは他に比ベレイノルズ数が高いため，境界層近傍でのメッシュ分割が必要される分割に比べて幾分疎であったことが影響していると考えられる．

### 5.3.4. 検証2 フィン付き角柱の渦連成振動

#### 5.3.4.1. 目的

フィン付角柱の渦連成振動問題を取り上げ、本解析の妥当性を検証する。本問題は、流れの不安定さから生じる渦と構造物の相互作用による連成現象のベンチマークとして、取り上げられている問題である。Dettmer and Peric<sup>[60]</sup>は流体-構造連成方程式の Jacobian を直接求め、Newton-Rahpson 法により連成方程式の収束解を得る分離型解法によって本問題を解析した。Yamada and Yoshimura<sup>[59]</sup>は非線形方程式の解法に用いられる Line search 法を分離型連成解析に応用した Line Extrapolation Method を用いて同問題の解を導いている。過去の検証事例では2次元の方程式で解を導いているが本検討では3次元解析ソフトウェアを用いるので、ある厚みを持った疑似2次元モデルを作成し3次元問題として解析している。

#### 5.3.4.2. 検討モデル

検討モデルを、Figure 5-7 に示す。構造物は幅 0.01m の正方形断面をもつ角柱に 0.0006m の厚さで 0.04m の長さを持つフィンが取り付けられている。モデル左端より 0.53m/sec の速度をもつ均質な流れが当該構造に流れ込む際、当該フィンは角柱部で生じる渦の影響により流体力を受け変形する。この変形は、角柱部で生じる渦は、この渦による変形による当該構造物の変形量を予測する。

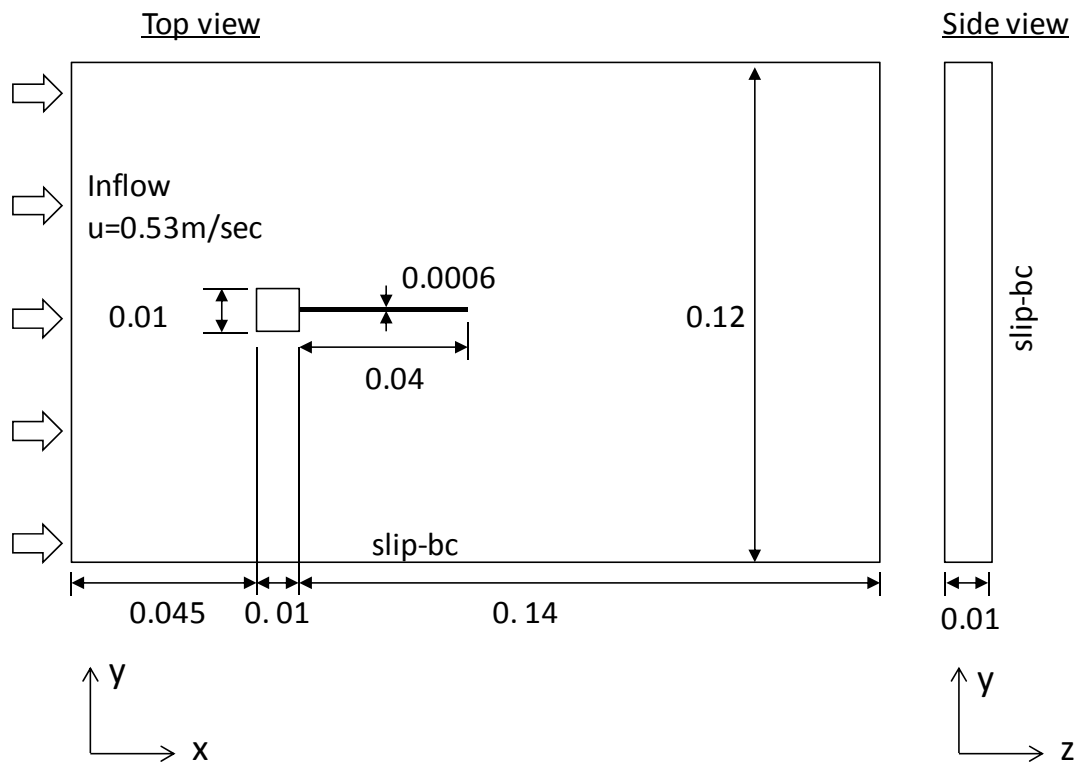


Figure 5-7 フィン付き角柱の連成振動解析モデル

### 5.3.4.3. 解析条件

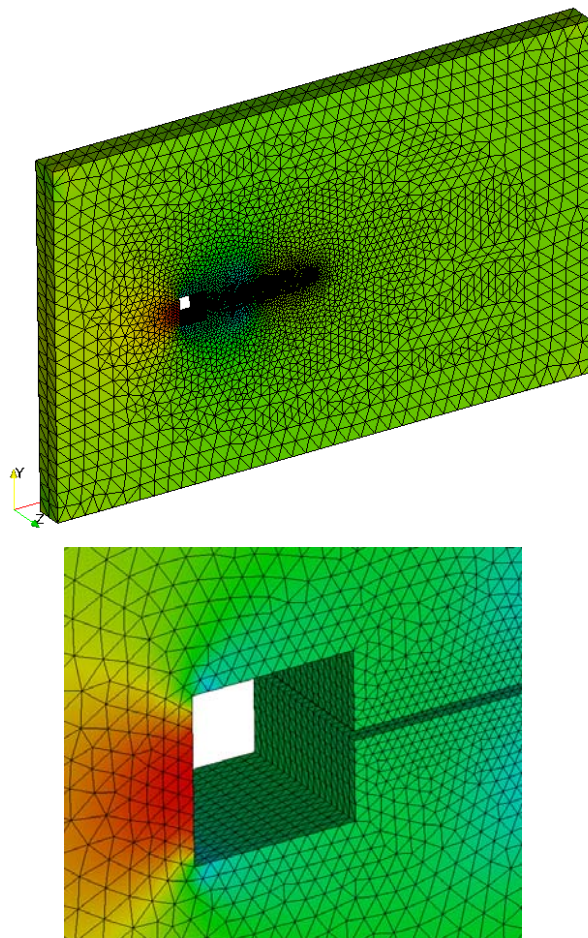
構造物および流体の物性は Table 5-4 に示す。この時、当該問題のレイノルズ数は角柱の直径を代表長さにとると 343 である。

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu} = \frac{0.53 \times 0.01}{(1.82 \times 10^{-5} / 1.18)} = 343 \quad (5-10)$$

解析で用いた流体領域の有限要素メッシュを Figure 5-8 に示す。流体領域の要素数は 156,312 要素、節点数は 31,187 節点である。本解析では流体の初期流れ場として、流体領域のみで計算を行った後に流れ場を算出し連成解析を実施している。

**Table 5-4 Material Properties**

Structure	Elastic Modulus	250,000	Pa
	Poisson's ratio	0.35	
	Density	100	kg/m <sup>3</sup>
Fluid	Viscosity	$1.82 \times 10^{-5}$	Pa.s
	Density	1.18	kg/m <sup>3</sup>



**Figure 5-8 Mesh Partition for Fluid Domain**

#### 5.3.4.4. 解析結果

Figure 5-9 にフィン先端での上下方向の変位の時刻歴プロットを示す。また、Figure 5-10 に圧力および流速のスナップショットを示す。Figure 5-10 に示すように、角柱交流に発生した渦が駆動力となって、Fin を定常的に振動させていることが確認できた。

Yamada ら<sup>[59]</sup>、および Peric の解析結果<sup>[60]</sup>と比較すると、いずれも 10mm 程度の先端での変位が得られており、また 3Hz 近傍で先端が振動している。このことから、従来のベンチマーク解析結果とほぼ同様の結果が得られていることが確認できた。

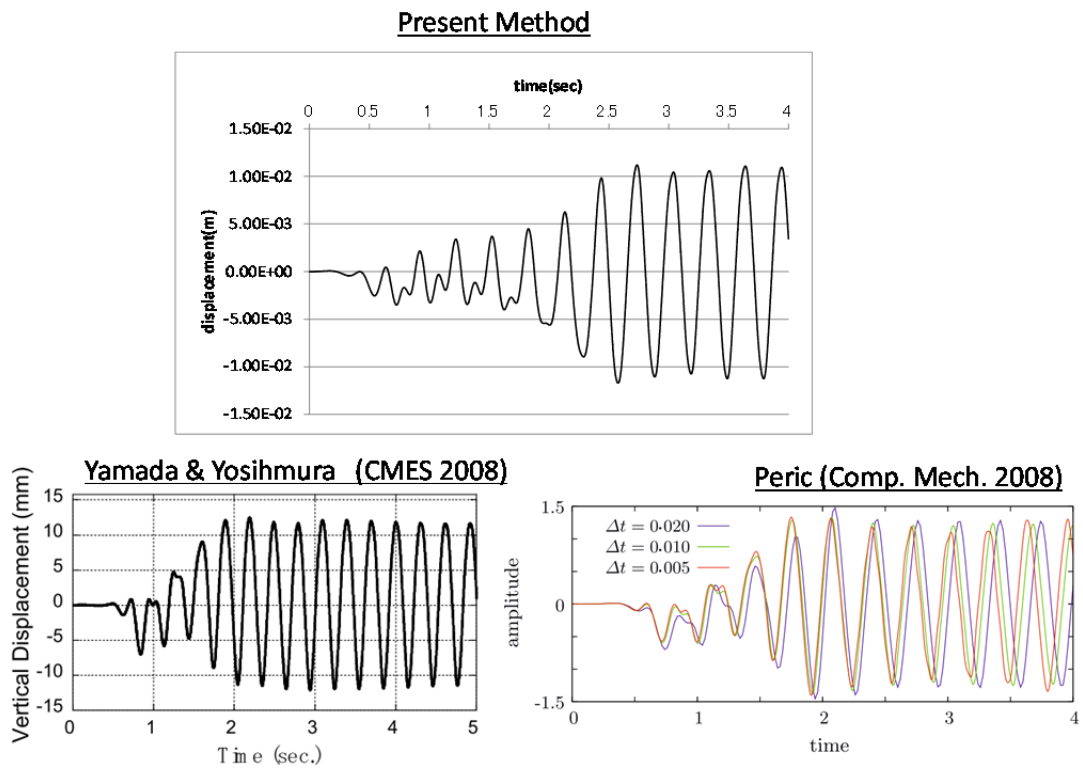
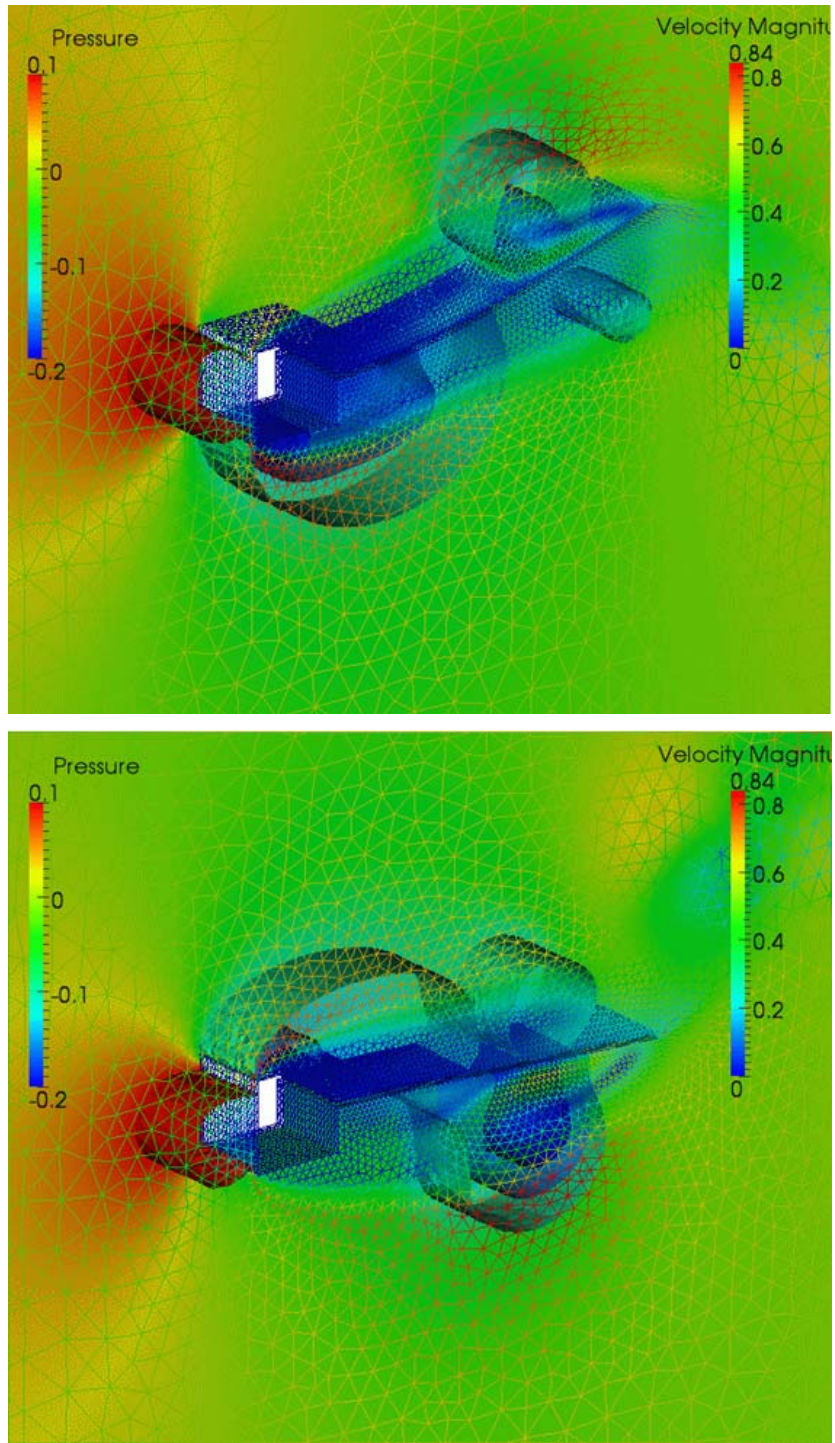


Figure 5-9 Time history of the vertical displacement on the tip of the flexible plate





**Figure 5-10** Snapshots of deformation mode and pressure/velocity around fin

### 5.3.5. まとめ

ADVENTURE Coupler, ADVENTURE Solid, および Front Flow Blue を用いた非圧縮性粘性流体-構造連成解析システムをベンチマーク問題に適用した.

最初のベンチマーク計算では, 円筒中での剛体の二次元的な応答を理論解および数値解と比較した. これによって, 定量的に流体からの付加質量および付加減衰の影響を考慮できることを確認できた.

次に流体の非線形性を代表する渦の発生と大変形する構造の振動が正確に表現できることを確認するため, Fin 付角柱の渦連成振動のベンチマーク問題の解析を行った. これによって, 当該システムが流体-構造連成の非線形現象を表現できることが確認できた.

## 5.4. 人工飛翅体の羽ばたき解析

本解析手法が人工飛翅体の羽ばたき解析に適用し、本手法によって3次元の羽ばたきメカニズムが解明できることを示す。

### 5.4.1. 解析対象

羽ばたき飛行時の流れ場の3次元的效果を確認するため、犬塚<sup>[62]</sup>は石原ら<sup>[68]</sup>の行った拡大モデル実験との対比できる、ガガンボ翼のモデルを参考に ALE 有限要素法を用いて翼移動を考慮した羽ばたきの数値解析を実施した。本研究でも同様のモデルを参考に、MAV 翼を想定した矩形翼の形状を定義した。翼の形状の有限要素モデル Figure 5-11 に示すように、翼長さ 5.36、幅 1、厚さ 0.075 に正規化された大きさを持つ矩形の板状構造である。実際の翼の厚さは翼幅の 1/300 程度と非常に薄いですが、構造モデルおよび流体領域メッシュの品質確保のため、流れ場に大きな影響がないと考えられる程度の薄い厚さを選択している。

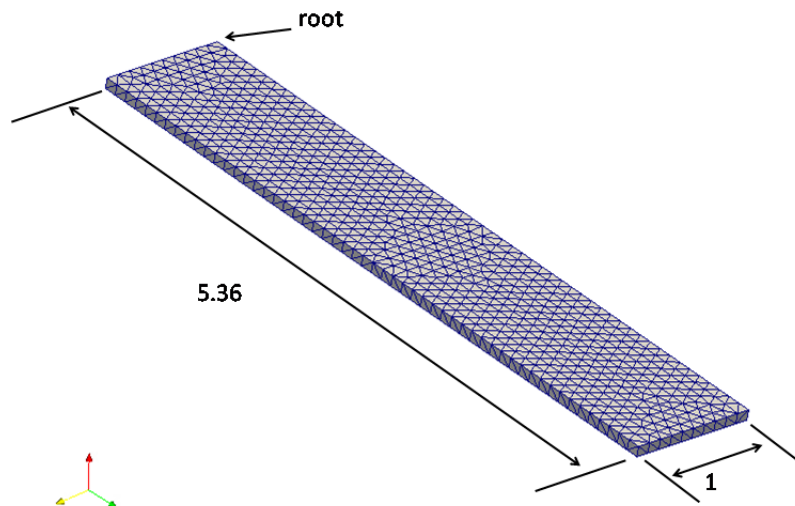


Figure 5-11 Solid analysis model for MAV wing

実際の生物の翼はその質量に比して非常に剛性の高い構造をしているが、その実際の計測値は、あまり知られておらずまた人工物の設計においては翼の剛性や重量は設計パラメータの一つである。

人工的な翼の研究では、様々な材料の組み合わせが考えうる。また、強度を出すために骨組み構造を採用するなどの工夫も想定されるが、本研究では試解析のために、一般的な軽い材料として、プラスチックなどの樹脂からなる材料の一般的なヤング率・密度値として 1000MPa、密度 100kg/m<sup>3</sup> の材料で翼が構成されていると考えた。

空気中の羽ばたき運動を想定し、正規化されたモデルの影響を考慮したうえで流体領域・構造領域パラメータを設定した。

**Table 5-5 Material Properties used for analysis**

Fluid Parameter		
Density	rho	1.792E-10
Dynamic Viscosity	nu	0.0544
Structure Parameter		
Young's modulus	Pa	5.43E-02
Density	kg/m3	5.34E-10

#### 5.4.2. 羽ばたきのモデル化

羽ばたき運動のモデル化手法として、磯貝ら<sup>[69]</sup>は以下の 3 つの運動パターンを定義している。

- Flapping 運動： 体軸に垂直な面内での運動。Heaving ともいわれる
- Lead-rag 運動： 翼軸を回転軸とするストローク面に垂直な方向への運動
- Pitching 運動： 翼前縁を軸とする翼面のひねり。Pitching とも言われる。

このうち、Lead-rag 運動に関しては Flapping 運動の 10%程度と相対的にその振幅が小さいため、無視されることが多い。

本研究では Figure 5-11 翼の root 部に Flapping および Pitching 運動として、各々の回転角度が正弦波となるような変位運動を定義し羽ばたき運動を模擬することとした。

#### 5.4.3. 流体領域のモデル化

疑似弾性体スージングに基づくメッシュ移動の解析では、初期メッシュのアスペクト比が良好でない場合、メッシュの過剰な変形による解析の破綻が起りやすいことが確認された。このため、翼表面からできるだけスムーズにメッシュを変化させることで、早期のメッシュの破綻を防止する。また、翼の運動によって流体領域のメッシュは大きく変形する。解析中に生じるメッシュの移動を吸収し、かつ翼周りで発生する圧力場が境界条件である外周部の影響を受けにくいように、モデルは十分に広い球形の領域とし、翼端部に変形を吸収するための比較的大きな要素を配置した。

流体領域は 68348 節点、404159 要素の四面体 1 次要素で構成される。

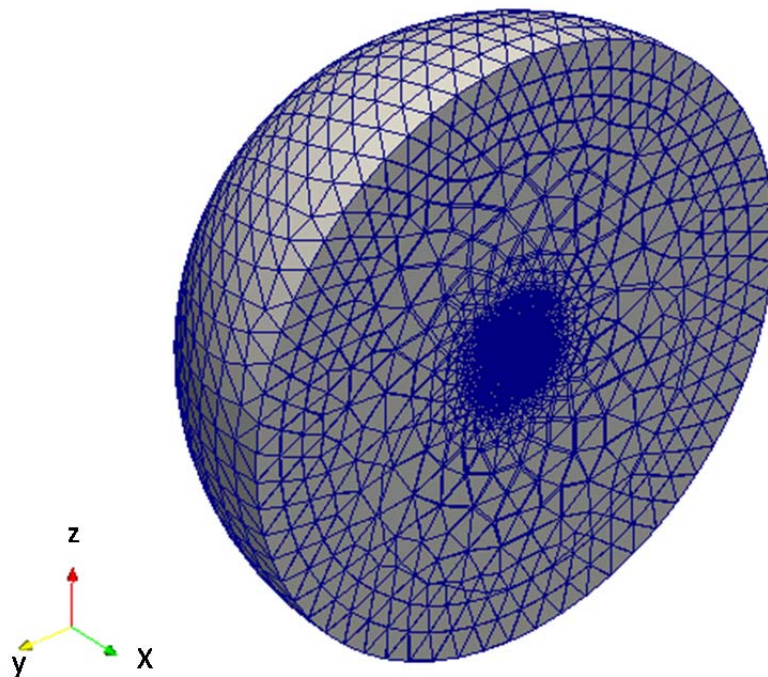
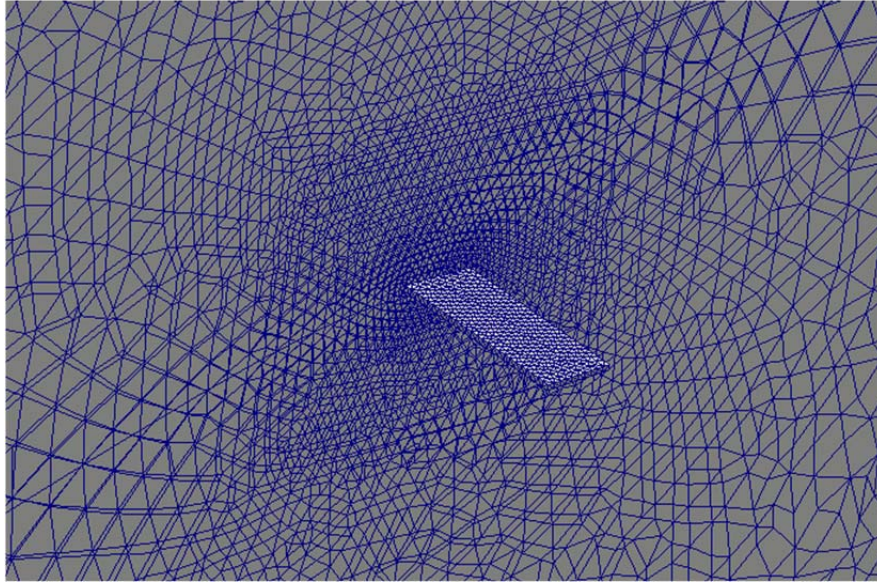


Figure 5-12 Mesh partition for fluid domain



**Figure 5-13 Mesh partition for fluid domain vicinity of the wing surface**

#### 5.4.4. 解析結果

Flapping および Feathering 角度を  $30^\circ$  , 位相差を  $60^\circ$  , 振動周波数を 1Hz として流体-構造連成解析を行い, 流体-構造連成解析システムが本問題に適用可能であることを確認した. ここで, 翼周りの流れのレイノルズ数は式(5-11)で算出する.  $U$  は翼先端の流速,  $f$  は flapping 周波数,  $A_{flap}$  は flapping 角度,  $\nu$  は動粘性係数であり,  $c$  は翼の幅である.

$$\text{Re} = \frac{cU_r}{\nu} = \frac{\pi c A_{flap} f R}{\nu} \quad (5-11)$$

算出された翼 Reynolds 数は 162 であり, 実際のガガンボの Reynolds 数が約 300 であり, ほぼ同程度のレイノルズ数領域であるといえる.

解析時刻ステップとして  $\Delta t=0.0005\text{sec}$  を採用し 5 秒間 10,00step の解析を行った. 流体-構造連成の収束判定基準  $\varepsilon_{tol}=10^{-3}$  とし, 残差の判定および Broyden 法による更新量の算出には, 連成界面上の加速度を用いている.

Intel core i7 2600 および 16GB のメモリを搭載したコンピュータ 4 台を用いて解析を行ったところ、解を安定に求めることができた。連成解析に要した時間は合計で約 3.5 日であった。

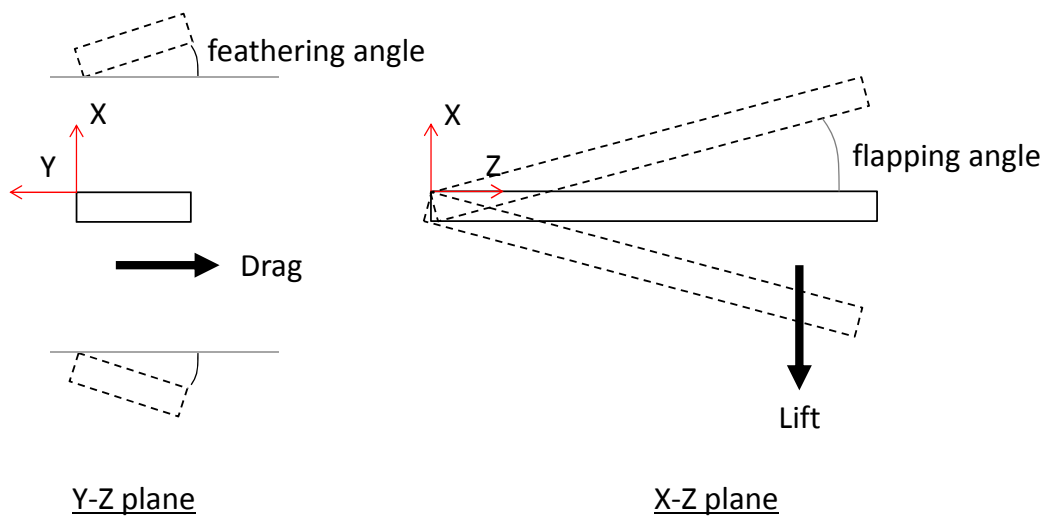
本計算では構造メッシュに比べ流体メッシュの自由度数が多い。計算の負荷としては、このため流体領域の Mesh 移動の解析に約 40%、流れ場の解析に 37%、構造変形の解析に約 23%の解析時間を要した。

Figure 5-15 および Figure 5-16 に、時刻  $t = 4.5\text{sec}$  および時刻  $t = 5.0\text{sec}$  での翼表面での圧力分布および流れの方向ベクトルを示す。前者は図下方向に向かって翼を振り下ろす際の、後者は振り上げる際の状態を示している。

流体-構造連成の影響を考慮する場合、しない場合の両方について比較を行うため、剛体翼を仮定し Front Flow/Blue を用いて同様の計算条件で解析を行った。その計算結果から得られた翼表面での圧力分布および流れの方向ベクトルを Figure 5-17 および Figure 5-18 に示す。

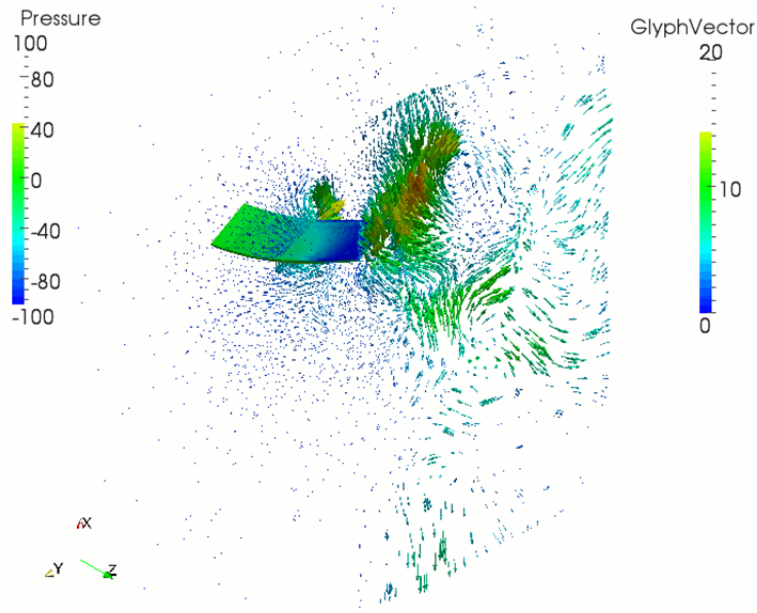
本検討では流れ場への影響が剛体翼の持つ慣性力に起因するのか、流体力に起因するのかを判別することはできないものの、弾性翼の解析モデルでは翼がその慣性力と流体力の影響からなる。それによって流れ場が影響されていることが確認できた。

翼の先端速度で定義される流体からの動圧で流体力を正規化し、時刻歴でその挙動を評価した。翼回転の中心方向において翼軸方向となる Z 方向の力を揚力、Y 方向の力を抗力と定義した。その時刻歴を弾性翼・剛体翼のそれぞれで比較したものを Figure 5-19 および Figure 5-20 に示す。翼の弾性変形により、流体力が変化していることが確認できる。

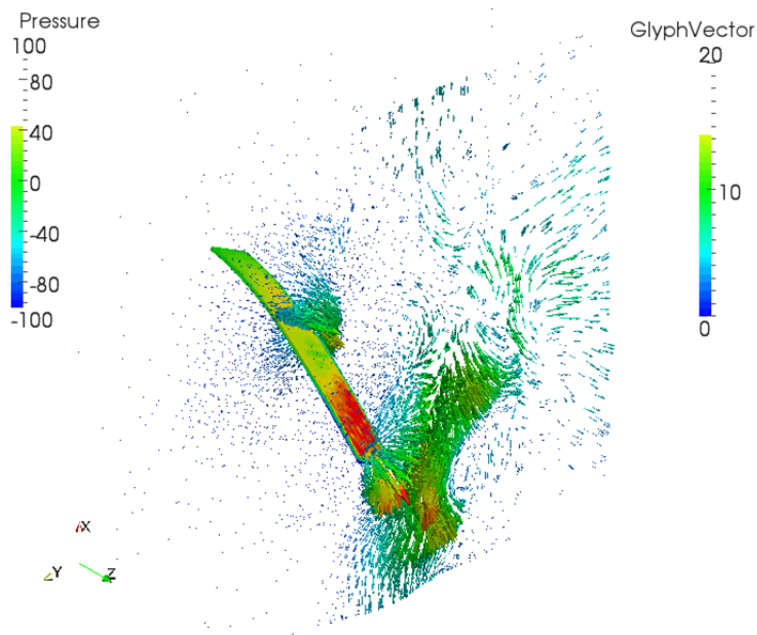


**Figure 5-14 Definition of Drag and Lift Force**

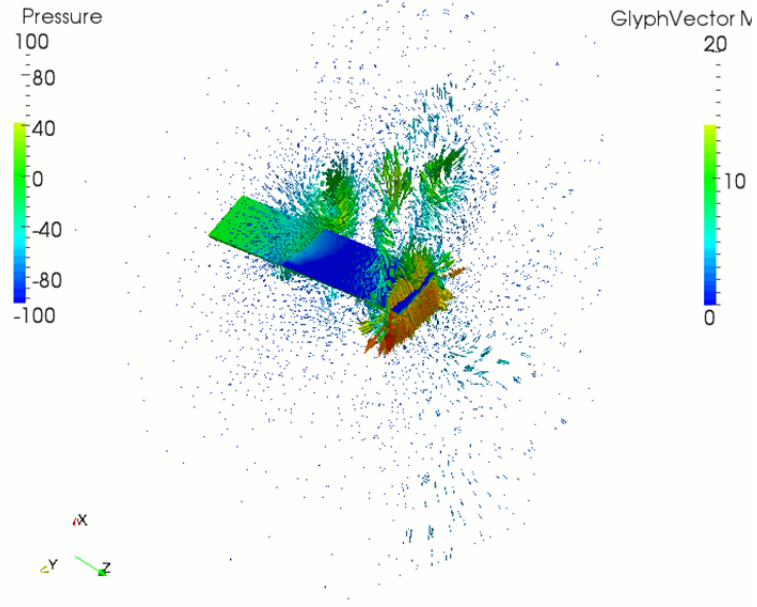




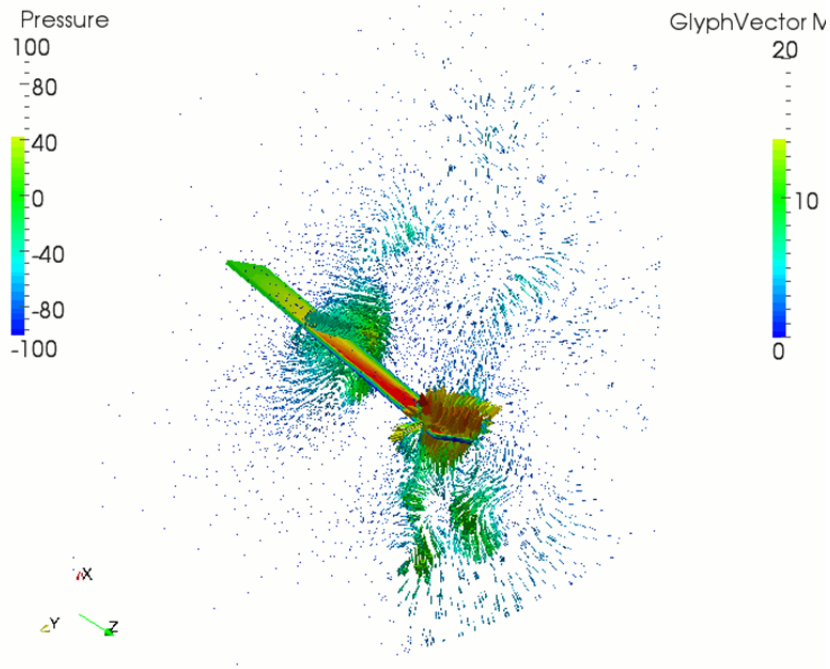
**Figure 5-15** Snapshot of pressure distribution and velocity vector with flexible wing  
(t=4.5sec)



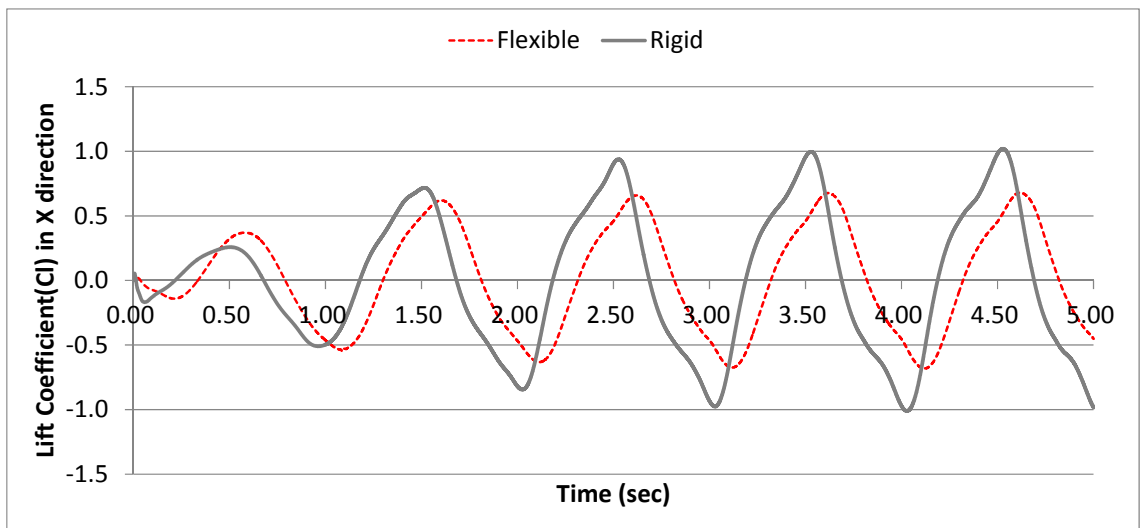
**Figure 5-16** Snapshot of pressure distribution and velocity vector with flexible wing  
(t=5.0sec)



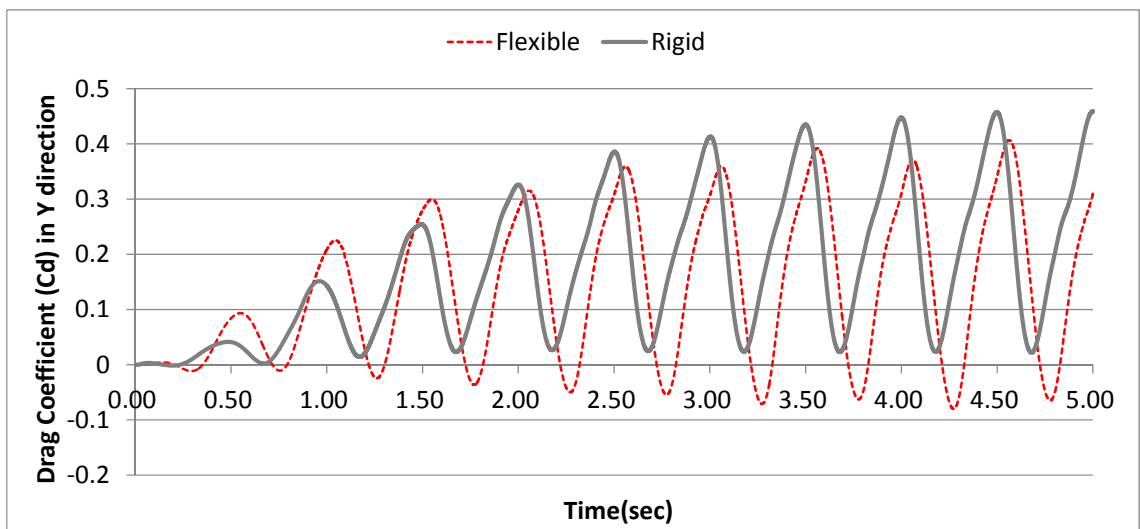
**Figure 5-17** Snapshot of pressure distribution and velocity vector with rigid wing (t=4.5sec)



**Figure 5-18** Snapshot of pressure distribution and velocity vector with rigid wing (t=4.5sec)



**Figure 5-19 Time history of lift coefficient in X direction**



**Figure 5-20 Time history of drag coefficient in Y direction**

## 5.5. まとめ

本章では分離反復型解法に基づく流体-構造連成解析システムを構築し、2つのベンチマーク問題についてその検証を行った。

結果、当該連成システムが過剰な減衰特性や解の発散傾向を示さず適切な付加質量・付加減衰効果を示すことが確認された。また、渦との相互作用による連成振動のような流体および構造の非線形性を持つ現象が再現できることが確認できた。このように、分離反復型解法を用いた並列連成解析システムより適切な解が得られることが確認できた。

次に本システムの工学的応用の準備として、人工飛翔体の羽ばたき飛行性能の検証問題に着目し、矩形断面をもつ薄板の羽ばたきによる流体-構造連成解析を行った。その結果、妥当な時間で安定に解析結果が得られることが確認できた。また、翼を剛性と仮定した場合と揚力および抗力の時刻変化を比較することで、連成の影響により流れ場とそこから現れる応答に変化が現れることが確認できた。本システムを用いることで、弾性翼の形状や強度パラメータ(剛性・質量等)と翼運動のパラメータ(羽ばたき角度、周波数)などが MAV などの人工物の運動や制御に対してどのように影響するかを定量的に評価できると考えられる。

---

## 6. 結論

---

本研究では、流体-構造連成問題を広く理解し、工学的に活用することを目的にし、既存ソフトウェアの性能を最大限に活用できる分離反復型の連成解析手法に着目し、大規模な連成解析を行うためのプラットフォームの研究・開発を行った。

第2章では、本研究で対象とする流体-構造連成問題の定式化を行った。音響流体-構造連成および非圧縮性粘性流体-構造連成の二つの連成問題に対して、連成方程式を非線形方程式の形で書き表すことにより、反復解法の適用が可能な形で示した。

第3章では、並列環境で動作する効率的な分離型の連成アルゴリズムとして準ニュートン法的一种である Broyden 法を採用し、大規模連成解析向けに活用された ADVENTURE\_Coupler への実装を行った。これに基づいて音響流体-構造連成解析、および流体-構造連成解析のシステムを構築した。並列環境で動作するソルバーを組み合わせ、分離反復型の連成解法を大規模な問題に適用するためのシステムはこれまでにないものである。

第4章では、大規模並列構造解析ソルバである ADVENTURE\_Solid と大規模並列熱伝導解析ソルバである ADVENTURE\_Thermal を組み合わせ、並列音響流体-構造連成解析システムの精度と並列環境化における性能を検証した。ベンチマーク問題を設定し、その精度が一体型解法とほぼ一致するものであることを確認した。次に、燃料集合体の本数を変化させることで問題の規模を変化させ、PC クラスタにおける並列環境下で当該システムが効率的に動作することを確認した。次に、原子炉 BWR 燃料集合体の地震応答問題の例として、NUPEC で実施された試験と同様の条件で解析を行い、実験結果と整合することが確認された。このように、流体-構造連成解析が、並列環境で効率的に動作し、実用的な工学問題にも適用できることを示した。

第5章では、大規模並列構造解析ソフトウェア ADVENTURE\_Solid と Front Flow /Blue を組み合わせ、非圧縮性粘性流体-構造連成解析システムを開発した。ベンチマーク問題の解析を行い、付加質量や付加減衰などの連成効果を定量的に表現できることおよび渦による流体-構造の非線形な挙動を表現できることが確認できた。本システムの工学的応用の可能性を示す一例として、人口飛翔体(MAV)の設計および性能評価への適用性を検証するため、弾性翼の羽ばたきにおける翼周りの流れの解析を実施し、流体-構造連成を考慮することによって弾性翼の変形の影響を考慮できることが確認された。

以上のように、本研究で構築された分離反復型解法に基づく連成解法システムは工学現象を並列環境下で効率的かつ定量的に評価することが可能であることが示され、本研究で開発されたプラットフォームの有効性が示された。本研究で開発された連成解析システムは原子炉や化学プラントなど、重要構造物をはじめとした様々な構造物の安全を正しく評価するために、また MAV 翼性能に影響する現象の解明や、飛行効率上昇のパラメータの算出など様々な問題に活用することが期待できる。

また、本研究のベースとなる分離反復型の連成解析のフレームワークは流体-構造連成に限らない様々な問題に適用可能である。また適切なソルバを選択することで解析の規模や、も影響されない汎用的な手法である。電磁場と構造物の変形の相互作用を表す磁場-構造連成や、音と構造物の相互作用、流れ場と音場の相互作用など、異なる支配方程式で表される現象の間に存在する様々な連成問題に適用し、種々の連成現象の解明に活用されることが期待される。

---

## 参考文献

---

- [ 1 ] Zienkiewicz, O. C., & Bettess, P. FLUID-STRUCTURE DYNAMIC INTERACTION AND WAVE FORCES . AN INTRODUCTION TO NUMERICAL TREATMENT. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1978, 13, 1–16.
- [ 2 ] Tayfun E. Tezduyar and Sunil Sathe, Modeling of fluid-structure interactions with the space time finite element solution techniques, International journal for numerical methods in fluids, 2007, Vol.54, Issue 6-8, pages 855-900, 30. June-20July,
- [ 3 ] T.Washio, T. Hisada, H.Watanabe and T.E. Tezduyar, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, Vol. 194, Issues 39-41, Page 4027-4047
- [ 4 ] J. Mandel An Iterative Substructuring Method for Coupled Fluid-Solid Acoustic Problems, Computational Physics, 2002, Vol 177, Issue 1, Page 95-116,
- [ 5 ] Tezduyar TE, Sathe S Modeling of fluid–structure interactions with the space–time finite elements: solution techniques. Int J Numer Methods Fluids 2007, 54:855–900
- [ 6 ] Takizawa K, BazilevsY, TezduyarTE Space–time and ALEVMS techniques for patient-specific cardiovascular fluid–structure interaction modeling. Arch Comput Methods Eng ,2012, 19:171–225
- [ 7 ] Takizawa K, Montes D, Fritze M, McIntyre S, Boben J, Tezduyar TE, Methods for FSI modeling of spacecraft parachute dynamics and cover separation. Math Models Methods Appl Sci, 2013, 23(3):307-338.
- [ 8 ] Manguoglu M, Sameh AH, Tezduyar TE, Sathe S, A nested iterative scheme for computation of incompressible flows in long domains. Comput Mech, 2008, 43:73–80

- [ 9 ] Manguoglu M, Takizawa K, Sameh AH, Tezduyar TE, Solution of linear systems in arterial fluid mechanics computations with boundary layer mesh refinement. *Comput Mech* 2010, 46:83– 89 19.
- [ 10 ] Manguoglu M, Takizawa K, Sameh AH, Tezduyar TE, Nested and parallel sparse algorithms for arterial fluid mechanics computations with boundary layer mesh refinement. *Int J Numer Methods Fluids*, 2011, 65:135–149
- [ 11 ] Olson, L., & Bathe, K.. Analysis of fluid-structure interactions. A direct symmetric coupled formulation based on the fluid velocity potential. *Computers & Structures*, 1985, 21(1), 21–32.
- [ 12 ] Minami, S., Kawai, H., & Yoshimura, S.. Parallel BDD-based monolithic approach for acoustic fluid-structure interaction. *Computational Mechanics*, 2012, 50(6), 707–718.
- [ 13 ] 登坂宣好, 宮田秀明, 島崎洋治, 野村卓史, 志村正幸, 畑中勝守 , 移動境界流れ解析, 1995, 東京大学出版会
- [ 14 ] 登坂宣好, 宮田秀明, 島崎洋治, 野村卓史, 志村正幸, 畑中勝守, 移動境界流れ解析, 1995, 東京大学出版会
- [ 15 ] Hirt C. and Nichols B.D, Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 1981, 39, 201-225
- [ 16 ] Osher S., Sethian J.A., Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations, *J. Compt, Phys.* 1988, 79: 12-49
- [ 17 ] K. Stein, T. Tezduyar, R. Benney, Mesh Moving Techniques for Fluid-Structure Interactions With Large Displacements, *Transactions of the ASME*, 2003, 70, 58-63,



- [ 18 ] Fernandez MA and Moubachir M., A Newton Method using exact Jacobians for Solving Fluid structure Coupling, Computers and Structures, 2005; 83(2-3):127-142
- [ 19 ] S. Minami and S. Yoshimura, Practical Performance of Non-linear Algorithms for Partitioned Iterative Method of Fluid-Structure Interaction Problems, Journal of Computational Science and Technology, 2009, Vol.3, No.1
- [ 20 ] S. Minami and S. Yoshimura, Performance evaluation of nonlinear algorithms with line-search for partitioned coupling techniques for fluid-structure interactions, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2010
- [ 21 ] C.G. Broyden Quasi-Newton Methods and Their Application to Function Minimization, Mathematics of Computation, 1967, Vol21, No.99, 368-381
- [ 22 ] C.T. Kelly, Iterative Methods for Linear and Non-linear Equations, Volume 16 of Frontiers in Applied Mathematics, SIAM, Philadelphia, 1995
- [ 23 ] Kolda T, Pawlowski R et al. NOX: An object-oriented nonlinear solver package. <http://software.sandia.gov/trilinos/packages/nox>, 2005
- [ 24 ] Yoshimura, S., Shioya, R., Noguchi, H., & Miyamura, T. Advanced general-purpose computational mechanics system for large-scale analysis and design. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2002, 149(1), 279–296.
- [ 25 ] Adventure project (2014). <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp>
- [ 26 ] Miyamura T, Yoshimura S, Generalized I/O data format and interface library for module-based parallel finite element analysis system. Adv Softw Eng., 2004 , 36:149-159
- [ 27 ] Ogino M, Shioya R, Kawai H, Yoshimura S., Seismic response analysis of full scale nuclear vessel model with ADVENTURE system on the earth simulator. J Earth Sim., 2005, 2:41-54

- [ 28 ] Yoshimura S. Virtual demonstration tests of large-scale and complex artifacts using an open source parallel CAE system, ADVENTURE. *J Solid State Phenom*, 2006, 110:133-142
- [ 29 ] Kawai H, Ogino M, Shioya R, Yoshimura S, Large scale elasto-plastic analysis using domain decomposition method optimized for multi-core CPU architecture. *Key Eng Mater* 2011, 462-463: 605-610
- [ 30 ] Joppich W, Kuerschner M., MPCCI- a tool for the simulation of coupled applications. *Concurr Comput: Pract Exp.*, 2006, 18(2): 183-192
- [ 31 ] Farhat C., Lesoinne M. and Le Tallec P., Load and Motion Transfer Algorithms for Fluid/Structure Interaction Problems with Non-Matching Discrete Interfaces: Momentum and Energy Conservation, Optimal Discretization and Application to Aeroelasticity, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, 1998, 157, 95-114
- [ 32 ] Mok DP, Wall WA. Partitioned analysis schemes for transient interaction of incompressible flows and nonlinear flexible structures, in: W.A. Wall, K.U. Bletzinger,
- [ 33 ] Simone Deparis. Numerical Analysis of Axisymmetric Flows and Methods for Fluid-Structure Interaction Arising in Blood Flow Simulation. PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2004.
- [ 34 ] Le Tallec P, Mouro J. Fluid structure interaction with large structural displacements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2001; **190**(24–25):3039–3067.
- [ 35 ] Mok DP, Wall WA. Partitioned analysis schemes for the transient interaction of incompressible flows and nonlinear flexible structures. *Trends in Computational Structural Mechanics*. CIMNE: Barcelona, 2001; 689–698.
- [ 36 ] Kuttler U, Wall WA. Fixed-point fluid–structure interaction solvers with dynamic relaxation. *Computational Mechanics* 2008; 43:61–72.

- [ 37 ] R. Pidaparti, Structural and Aerodynamic Data Transformation Using Inverse Isoparametric Mapping, *Journal of Aircraft*, VOL.29 No.3: 507-509
- [ 38 ] C. Farhat, M Lesoinne, and N. Maman, Mixed explicit/implicit time integration of coupled aeroelastic problems: three field formulation, geometric conservation and distributed solution, *IJNMF*, 1995, 21, 807-835
- [ 39 ] N. Maman and C. Farhat, Matching Fluid and Structure Meshes for Aeroelastic Computations: A Parallel Approach, *Computers and Structures*, 1995 (Technical Note)
- [ 40 ] Juan Raul Cebal, and Rainald Lohner, *AIAA journal*, 1997, Vol. 35, No. 4, April 1997
- [ 41 ] X. Jiao and M. T. Heath, Common-refinement-based data transfer between non-matching meshes in multiphysics simulations, *Int. J. Numer. Meth. Engng* 2004; 61: 2402-2427
- [ 42 ] 日本機械学会編,流体関連振動, 第2版, 技報堂出版
- [ 43 ] Fritz, R. (1972). The effect of liquids on the dynamic motions of immersed solids. *Journal of Engineering for Industry*, (5), 167–173.
- [ 44 ] Chen, S. (1975). Vibration of Nuclear Fuel Bundles. *Nuclear Engineering and Design*, 35, 399–422.
- [ 45 ] 藤田 勝久. (1981). 液体中の棒群の振動特性と地震応答解析. 機械学会論文集, 47(415), 251–262.
- [ 46 ] 笠井 洋昭, 加賀 万亀男森山 武夫. (1983). 液体中における棒群の連成振動の研究(第1報, 実験結果と解析値との比較). 機械学会論文集, 49(440), 525–534.
- [ 47 ] 笠井 洋昭, 尾上 佳史加賀 万亀男. (1984). 液体中における棒群の連成振動の研究 (第2報, 二次元配列の棒群の振動特性). 機械学会論文集, 50(449), 90–100.

- [ 48 ] 笠井 洋昭. (1984). 液体中における棒群の連成振動の研究 (第3報, 多数棒群の振動特性と近似計算法). 機械学会論文集, 50(454), 943–953.
- [ 49 ] Sigrist, J.-F., Broc, D., & Lainé, C. (2006). Dynamic analysis of a nuclear reactor with fluid–structure interaction. *Nuclear Engineering and Design*, 236(23), 2431–2443.
- [ 50 ] Sigrist, J.-F., Broc, D., & Lainé, C. (2007). Dynamic analysis of a nuclear reactor with fluid–structure interaction. *Nuclear Engineering and Design*, 237(3), 289–299.
- [ 51 ] Mandel J (1993) Balancing domain decomposition. *Commun Numer Methods Eng* 9:233–241
- [ 52 ] G. Yagawa and R. Shioya Advanced general purpose computational mechanics system for large-scale analysis and design, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 49(2002)
- [ 53 ] M. Ogino, R. Shioya, and H. Kanayama, An Inexact Balancing Preconditioner for Large-Scale Structural Analysis, *Journal of Computational Science and Technology*, Vol.2, No.1, 2008
- [ 54 ] Masao Ogino, Ryuji Shioya, Hiroshi Kawai and Shinobu Yoshimura, Seismic Response Analysis of Nuclear Pressure Vessel Model with ADVENTURE System on the Earth Simulator, *Journal of the Earth Simulator* March 2005, 41-54
- [ 55 ] Watabe M, Shibata H, Sato H, Kawakami S, Ohno T, Ichiki T, Sasaki Y (1989) Preliminary study on seismic proving test of BWR core internals. In: *Proceedings of 10th International Conference on SMiRT*, 841–846
- [ 56 ] Sato H, Suzuki K, Kamata T, Taira T, Niwa H, Nakajima M (1989) Test results on seismic proving test of BWR core internals. In: *Proceedings of 10th International Conference on SMiRT*, 847–852

- [ 57 ] Takashi, N., & Hughes, T. J. R. (1992). An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95(1), 115–138. doi:10.1016/0045-7825(92)90085-X
- [ 58 ] S.S. Chen, (1976) MW.W. Wambsganss, and J.A. Jendrzejczyk. Added mass and damping of a vibrating rod in confined viscous fluids. *Journal of Applied Mechanics*, pp. 325–329
- [ 59 ] Yamada T, Yoshimura S (2008) Line search partitioned approach for fluid structure interaction analysis of flapping wing. *CMES* 24(1):51–60
- [ 60 ] Dettmer W, Peric D. (2006) A computational framework for fluid-structure interaction: Finite element formulation and applications, *Computer methods in applied mechanics and engineering*; 195(41-43):5754–5779
- [ 61 ] 劉浩, 生物飛行のシミュレーションと小型飛翔体, 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, 第 12 卷, 第 3 号, 139-142, 2005.
- [ 62 ] 犬塚 一徹, ALE 有限要素法による羽ばたき翼シミュレーションと多目的デザイン, 平成 22 年度博士論文, 東京大学
- [ 63 ] C. P. Ellington, The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. III. Kinematics, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 305, 41-78, 1984.
- [ 64 ] M. H. Dickinson, F. O. Lehmann, S. P. Sane, Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight, *Science*, 284, 1954-1960, 1999.
- [ 65 ] K. Takizawa, B. Henicke, A. Puntel, N. Kostov, and T.E. Tezduyar, “Computer modeling techniques for flapping-wing aerodynamics of a locust”, *Computers & Fluids*, 85 (2013) 125–134

- [ 66 ] K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and N. Kostov, “Sequentially-coupled space–time FSI analysis of bio-inspired flapping-wing aerodynamics of an MAV”, *Computational Mechanics*, 54 (2014) 213–233,
- [ 67 ] Toshiyuki Nakata, Hao Liu, A fluid-structure interaction model of insect flight with flexible wings, *Journal of Computational Physics* 231 (2012) 1822-1847
- [ 68 ] D. Ishihara, Y. Yamashita, T. Horie, S. Yoshida and T. Niho, Passive Maintenance of High Angle of Attack and Its Lift Generation during Flapping Translation in Crane Fly Wing, *The Journal of Experimental Biology*, 212, 3882-3891, 2009.
- [ 69 ] 磯貝紘二, 鳥や昆虫の羽ばたきによる飛翔の数値シミュレーション, 日本流体力学学会数値流体力学部門 Web 会誌, 第 12 卷, 第 3 号, 85-112, 2005.
- [ 70 ] The Project of ‘Revolutionary Simulation Software’.  
<http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/>.
- [ 71 ] J. F. Sigrist, D. Broc, 2008, “Dynamic analysis of a tube bundle with fluid-structure interaction modeling using a homogenization method”, *Comput. Methods Appl. Engrg.* 197 1080-1099
- [ 72 ] C. Kato, Y. Yamade, H. Wang, Y. Guo, M. Miyazawa, T. Takaishi, S. Yoshimura, Y. Takano, Numerical Prediction of Sound Generated from Flows with a Low Mach Number, *Computers & Fluids*, 36, 53-68, 2007
- [ 73 ] 海保真行, 横張孝志, 池川昌弘, 加藤千幸, 四面体有限要素を用いた並列 LES 解析, 日本機械学会論文集 B 編, 66, 1264-1271, 2000
- [ 74 ] 山出吉伸, 加藤千幸, 郭陽, 塚本裕一, 四面体要素による乱流解析, 生産研究, 59, 77-82, 2007

[ 75 ] Joris Degroote, Robby Haelterman, Sebastiaan Annerel, Peter Bruggeman, Jan Vierendeels, Performance of partitioned procedures in fluid-structure interaction, *Computers and Structures* 88 (2010) 446-457

[ 76 ] Joris Degroote, Peter Bruggeman, Robby Haelterman, Jan Vierendeels, Stability of a coupling technique for partitioned solvers in FSI applications, *Computers and Structures* 86 (2008) 2224-2234

[ 77 ] Nocedal, J., Updating Quasi—Newton Matrices with Limited Storage, *Mathematics of Computation* (1980) 35 (151) 773-782

---

## APPENDIX 分離反復型アルゴリズム

---

本研究では, Block Gauss Seidel 法および準ニュートン法的一种である Broyden を採用したが, 採用に至るまでに, さまざまな分離反復法のアルゴリズムが検討されている. 付録として, 先行研究である Minami and Yoshimura<sup>[19][20]</sup>らの論文, その他のいくつかのアルゴリズムを紹介する.

### **Block Gauss Seidel Method**

Block Gauss Seidel 法では次式で定義される残差の方向に解を修正する.

$$r_k = d_{\Gamma,k}^n - Z(d_{\Gamma,k}^n) \quad (1)$$

$$s_k = -\omega_k r_k \quad (2)$$

$$d_{\Gamma,k+1}^n = d_{\Gamma,k}^n + s_k \quad (3)$$

本手法は, 準ニュートン法において  $\mathbf{B}_k$  を単位行列- $\mathbf{I}$  と置き換えたものであると考えられる.

### **Line Extrapolation 法**<sup>[59]</sup>

Line Extrapolation 法は Yamada and Yoshimura によって提案された手法であり, 過去 2 ステップの残差から解の修正方向を求める.



Algorithm: Line Search Method

---

- 1: Give an initial guess  $\mathbf{d}_\Gamma^0$ ,
- 2: Calculate  $\mathbf{r}^k = \mathbf{d}_\Gamma^k - Z(\mathbf{d}_\Gamma^k)$
- 3: If converged, exit with the solution  $\mathbf{d}_\Gamma^k$ . If not go to Step 4
- 4: Set  $\alpha_k = \arg \min \|\alpha^k \mathbf{r}^k + (1 - \alpha^k) \mathbf{r}^{k-1}\|$
- 5: Set  $\mathbf{d}^{k+1} = \alpha^k \mathbf{d}^k + (1 - \alpha^k) \mathbf{d}^{k-1} - \beta(\alpha^k \mathbf{r}^k + (1 - \alpha^k) \mathbf{r}^{k-1})$
- 6: Set  $k=k+1$ : goto Step 1

ここで、 $\alpha_k$  は解の残差の外挿値が小さくなるように定め、解の修正方向が単一方向になることを防ぐため、 $0 < \beta < 1$  となるパラメータを用いて探索方向を変化させる。本手法は Yamada らの論文[ 59]および Minami らの論文<sup>[19][20]</sup>のいずれにおいても、Aitken 補外よりやや少ない回数で収束に至ることが確認されている。

**Jacobian Free Newton-Klyrov 法<sup>[18]</sup>**

Algorithm: Jacobian Free Newton-Klyrov Method

---

- 1: Give an initial assumption  $\mathbf{d}_\Gamma^0$ ,
- 2: Calculate  $\mathbf{r}^k = \mathbf{d}_\Gamma^k - Z(\mathbf{d}_\Gamma^k)$
- 3: If converged, exit with the solution  $\mathbf{d}_\Gamma^k$ . If not go to Step 4
- 4: Find increment  $\mathbf{s}^k$  by solving equation  $\mathbf{J}^k \mathbf{s}^k = -\mathbf{r}^k$
- 5: Set  $\mathbf{d}^{k+1} = \mathbf{d}_\Gamma^k + \omega^k \mathbf{s}^k$
- 6: Set  $k=k+1$ : goto Step 1

ここで、 $\mathbf{J}^k \mathbf{v}^k \approx [Z(\mathbf{d}_\Gamma^k + \varepsilon \mathbf{v}) - Z(\mathbf{d}_\Gamma^k)] / \varepsilon$  であり、解の修正量を数値微分によって求める。本手法は数値微分パラメータである  $\varepsilon$  を適切に設定しなければ適切な解が得られず、非線形性の強い問題では解が発散するケースが多いと報告されている。

## Quasi-Newton 法

準ニュートン法では、次のようにヘッセ行列の逆行列の近似値  $\mathbf{B}$  を算出し、それをもとに、解の更新量を決定する。

$$\mathbf{s}_k = -\mathbf{B}_k \mathbf{r}_k \quad (6-1)$$

本研究で採用した Broyden 法の他には、非線形構造解析分野で用いられる BFGS (Broyden Fletcher, Goldfarb, Shanno)法がよく知られている。

Broyden 法および BFGS 法のいずれの手法も、密行列の記憶を必要としない省メモリなアルゴリズム L-Broyden あるいは L-BFGS<sup>[77]</sup>が知られており、残差量  $\mathbf{r}^k$  および解の更新量  $\mathbf{s}^k$  の履歴から計算コストの大きい行列演算を行わずに、次の解の更新量を算出できる。

L-BFGS 法を用いて分離反復型の流体-構造連成を行った例は報告されていないが、同一反復ステップでのベクトル・ベクトル演算の量が約 2 倍である。ADVENTURE\_Coupler への実装も行われているが、単純な問題においては Broyden 法との有意な差は確認できていないため、本研究では実績のある Broyden 法を採用している。

また、Degroote らが流体-構造連成問題の分離解法を主眼に開発した QNLS (Quasi Newton Least Square)<sup>[75][76]</sup>については本研究では十分にその適用性/効率を検証されていない。収束履歴中の残差ベクトルの QR 分解を用いるため、アルゴリズムがやや複雑である一方、高い効率が報告されているため、その導入と性能評価は今後の課題である。

---

## 謝辞

---

吉村忍教授は本研究を遂行し、学位論文をまとめるにあたり、多くのご支援とご指導を賜りました。受託研究員として受け入れていただき、本研究を進めるための環境を整備していただいていたからの長期にわたり、忍耐強く研究の遂行と論文の執筆を支えていただきました。深く感謝しております。

山田知典准教授には、本論文の作成にあたり、貴重な助言をいただきました。心から感謝いたします。

お忙しい中学位論文審査の副査を引き受けていただいた、奥田洋司教授、姫野武洋准教授、柴田和也講師には深く感謝いたします。

現諏訪東京理科大学河合浩志准教授には、有限要素法、並列解析から数学の知識に至るまで様々な面から本研究の基礎を提供していただきました。深く感謝いたします。また南さつき博士には本研究の理論と遂行の両面から研究をサポートしていただきました。心から感謝いたします。

諏訪東京理科大学杉本振一郎助教、名古屋大学の荻野正雄准教授、日本大学の宮村倫司講師、アライドエンジニアリングの淀薫氏には ADVENTURE System を活用するにあたっての様々な知見を提供していただきました。深く感謝いたします。

吉村・藤井・山田研究室博士課程の遊佐泰紀氏、三目直登氏には研究室での議論を通じて様々なヒントをいただきました。また、藤井秀樹講師、秘書の井上知子さんには受託研究員時代から様々な面でサポートいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

最後に、本研究に取り組むきっかけを与えてくださった日揮株式会社 佐藤拓哉博士と門謙一郎氏には、業務を離れて新しい知識と経験を得る機会を与えてくださったこと深く感謝申し上げます。

---

## 業績一覧

---

### [ジャーナル論文]

1) Shunji Kataoka, Satsuki Minami, Hiroshi Kawai, Tomonori Yamada, Shinobu Yoshimura, “A Parallel Iterative Partitioned Coupling Analysis System for Large-Scale acoustic fluid-structure interactions”, *Comput Mech* (2014) 53: 1299-1310

2) 片岡俊二, 南さつき, 河合浩志, 吉村忍, “分離反復型解法を用いた大規模並列音響流体-構造連成解析”, *日本計算工学会論文集*, Vol. 2012 (2012) P 20120007

### [国際会議予稿]

1) Shunji Kataoka, Hiroshi Kawai, Satsuki Minami, and Shinobu Yoshimura, Parallel Analysis of Incompressible Flow and Structure Interaction Using Partitioned Iterative Method, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2012-78633, pp. 67-72

2) Shunji Kataoka, Satsuki Minami, Hiroshi Kawai, Shinobu Yoshimura, Large Scale Dynamic Response Analysis of Rod Bundles in Fluid Using Partitioned Coupling Technique, Proceedings of ASME PVP Conference, PVP2011-57710

3) Shunji Kataoka, Satsuki Minami, Hiroshi Kawai, Shinobu Yoshimura, Three Dimensional FSI Simulation of Extruded Rod Bundles Immersed in Fluid Using Partitioned Coupling Technique, Proceedings of ASME PVP Conference, PVP2010-25305, pp159-165

### [その他国際会議発表]

1) Shunji Kataoka, Satsuki Minami, Hiroshi Kawai, Shinobu Yoshimura, Three dimensional partitioned iterative FSI simulation of extruded rod bundles immersed in fluid, Proc. Of SNA+MC2010,

[学会誌等記事]

- 1) 片岡俊二, 河合浩志, 吉村忍, 分離反復型解法による流体・構造連成解析 (燃料集合体の地震応答シミュレーション)”, 日本機械学会 計算力学部門ニューズレター, No.48, pp.21-22, (2012)