

流体解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/redを用いた流体-構造連成解析

小川 哲司* 松原 聖**

Fluid-Structure Interaction Calculation using Advance/FrontFlow/red

Tetsuji Ogawa* and Kiyoshi Matsubara**

アドバンスソフトでは、流体解析は Advance/FrontFlow/red、構造解析は Advance/FrontSTR を自社商品として取り扱っている。これらはいずれも社内に開発者を擁し、ソフトウェアをカスタマイズする技術を持っている。このような背景から、当社では多くの連成解析に取り組んできた[1]～[10]。本稿では、その中から、流体解析技術者が比較的手軽に実施可能な流体-構造連成解析の手法について述べる。ここで紹介する手法では、構造物の固有値および固有ベクトルをあらかじめ計算し、その情報を利用して流体解析実行時に流体メッシュの変形と構造物のモード解析を行うことにより、流体構造の双方向連成を実現可能とした手法である。ここでは、その手法を紹介する。

Key word: 連成解析、流体解析、構造解析、モード解析、ALE 法

1. はじめに

流体-構造連成解析では、流体の流れと構造の変形とを連成させた解析を行う。流体からの力が構造に作用することで構造の変形が生じ、その変形は流体領域の変化となって流れに影響を与え得る。本稿では、流体解析に Advance/FrontFlow/red、構造解析に Advance/FrontSTR を用いた、流体構造双方向連成解析の手法について紹介する。

2. 計算方法

2.1. 各種の流体構造連成手法

当社では、構造解析、流体解析、音響解析のソフトウェアのソースコードをハンドリングできる技術者および技術を有しており、お客さまの具体的な問題に対して連成解析の実績を積んできた。

連成計算は、片方向にのみ物理量を受け渡す方法（以下、片方向連成と呼ぶ）、および、双方向に物理量をやりとりする方法（以下、双方向連成と呼ぶ）がある。

前者の片方向連成については、当社では、流体解析から構造解析への片方向連成、例えば流れによるプラント構造物の振動解析を実施してきた。また、流体解析から音響解析への片方向連成では流れにより発生した音源による音響解析、構造解析から流体解析では振動源の流体挙動への影響評価を行っている。さらに、音響解析から構造解析への片方向連成では音源の構造物強度への影響評価、構造解析から音響解析への連成解析では構造物の振動に起因する音響解析を行った。

後者の双方向連成は、流体力での構造物の変形による流路の変化を流体解析にフィードバックさせながら流体および構造計算を行う流体構造連成解析である。この双方向連成について、当社はいくつかの取り組みをしている。ひとつは、流体解析プログラムと構造解析プログラムを同時に実行して、そのプロセス間通信により物理量を双方に受け渡し、2つの解析を並行して実行する方法である。この手法は、2つのソフトウェアの機能のすべてを利用できるという利点があるが、

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部

2nd Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 第1事業部

1st Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

かなり大掛かりな仕組みが必要である。また、この手法を適用する場合には、構造解析と流体解析に関する知識や技術が必要でありユーザーにとってはかなりハードルの高い方法となっている。

そこで、われわれが取り組んでいるもうひとつの方法は、構造物の変形が線形弾性の範囲で変化することを仮定した比較的手軽に実行できる連成解析の手法である。詳細は次の節で述べるが、この手法では、まず、構造解析を実行しあらかじめ固有値と固有ベクトルを求める。その情報を流体解析に渡すことで、構造物の振動モードに関する情報を与える。そののちに、流体解析を実行するが、モード解析および流体メッシュの変形を行うユーザーサブルーチンを組み込むことで、流体解析中に構造との連成を行う。この手法を利用すれば、固有値と固有ベクトルさえ入手すれば、流体解析を実行しているユーザーにとっては比較的手軽に流体構造連成を行うことができる。

また、このような連成計算では、格子系から異なる格子系に物理量を補間して渡す（以下、マッピングと呼ぶ）処理が重要である。ここでは、面から面へのマッピングと体積から体積へのマッピングの2種類がある。面から面は、構造の振動面の情報を音響解析に受け渡す構造音響連成等の場合等に利用する。ここで、上流の面から下流の節点へのマッピングする場合には、ギャップの概念の利用および面の法線情報を利用する/しないの選択が重要となってくる。また、体積から体積へのマッピングでは、同様に上流の節点から下流の節点へのマッピングを行うが、近接点探索が重要であり、われわれのツールではバケット法を利用している。体積から体積へのマッピングは、非常に処理時間を要するが、数百万節点から数百万節点のマッピングでは1時間程度で処理可能となっている。本稿で紹介する手法では、固有ベクトルに関しマッピングするため、双方向連成の中ではマッピングの処理を行わないで、処理を進めることができる。

2.2. 今回の連成方法

解析対象のうち、変形しうる構造の部分弾性

体として扱い、有限要素法によるモード解析によって固有値・固有ベクトルを求める。この解析は、流体計算に先立って行い、その固有値・固有ベクトルはファイルに保存する。その後の、流体解析では、ユーザーサブルーチンの機能を用い、時間ステップごと、もしくは数ステップおきに流体から構造物へ作用する力を求め、モード解析の結果を利用して構造物の変形量を計算する。構造物が変形することで、流体メッシュの境界面は移動するので、その移動に合わせて流体メッシュを変形し、流体計算では Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 法で格子移動の効果を考慮する。

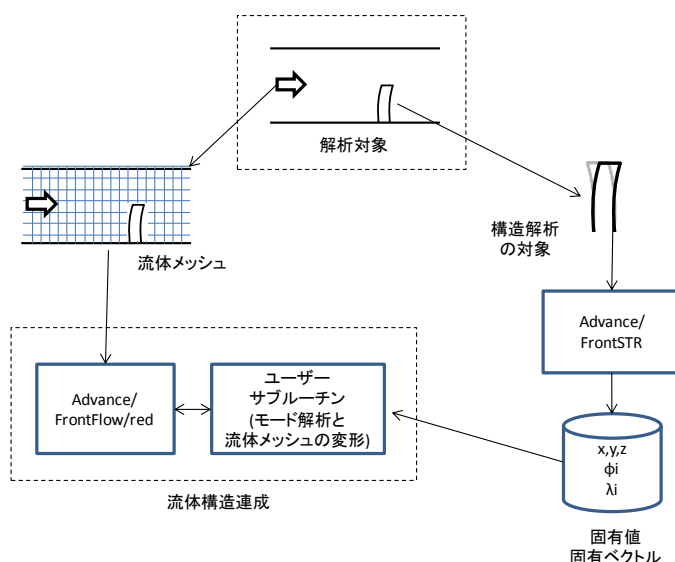


図 1 流体構造連成解析計算の流れ

2.3. 構造のモード解析

弾性体の運動方程式は、次式のようにになる。

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{f}(t)\} \quad (1)$$

$[\mathbf{M}]$ は質量行列、 $[\mathbf{K}]$ は剛性行列、 $\{\mathbf{x}(t)\}$ は変形ベクトル、 $\{\mathbf{f}(t)\}$ は外力ベクトルである。

ここで、次の固有値問題、

$$([\mathbf{K}] - \lambda[\mathbf{M}])\{\boldsymbol{\varphi}\} = 0 \quad (2)$$

の解の固有ベクトル $\{\boldsymbol{\varphi}_i\}$ 、固有値 λ_i を利用して、変形ベクトル $\{\mathbf{x}(t)\}$ を固有ベクトルの線形結合で表す。

$$\{\mathbf{x}(t)\} = \sum_i \alpha_i(t) \{\boldsymbol{\varphi}_i\} \quad (3)$$

(3)式を(1)式へ代入し、左から $\{\boldsymbol{\varphi}_j\}^T$ をかけると、

$$\sum_i \ddot{\alpha}_i(t) \{\varphi_j\}^T [\mathbf{M}] \{\varphi_i\} + \sum_i \alpha_i(t) \{\varphi_j\}^T [\mathbf{K}] \{\varphi_i\} = \{\varphi_j\}^T \{f(t)\} \quad (4)$$

となり、固有ベクトルの直交性

$$\begin{aligned} \{\varphi_j\}^T [\mathbf{M}] \{\varphi_i\} &= \delta_{ij} \\ \{\varphi_j\}^T [\mathbf{K}] \{\varphi_i\} &= \lambda_i \delta_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

を用いると、1 変数微分方程式

$$\ddot{\alpha}_j(t) + \lambda_j \alpha_j(t) = \{\varphi_j\}^T \{f(t)\} \quad (6)$$

が得られる。

流体からの力 $\{f(t)\}$ を受けた時の構造体の変形 $\{x(t)\}$ は、1 変数の常微分方程式(6)式を解くことで各モードの振幅 $\alpha_i(t)$ を計算し、(1)式へ代入することで求められる。

2.4. 流体から構造へ作用する力

流体計算から、壁面に平行方向の壁面せん断応力

$$f_{\text{shear}} = \rho u_\tau^2 S \quad (7)$$

および壁面に垂直な圧力

$$f_{\text{pressure}} = P S \quad (8)$$

を求め、この和を構造に作用する力 $\{f(t)\}$ とする。ここで、 ρ は密度、 u_τ はせん断速度、 S は壁面要素の面積、 P は圧力である。

2.5. 流体メッシュの変形

構造の変形によって、流体と構造の境界面は移動する。この移動に合わせて、メッシュを切り直すことなく、格子点を移動することで流体内部のメッシュを変形する。今回は、非構造格子にも適用できるように、格子の節点が仮想的なばねでつながれていると考えてメッシュを変形する方式を試みた。

メッシュの各辺および各角に、距離変化および角度変化に比例する仮想的な力を生じるばねを想定する。このとき、節点 i に作用する力は、次式より計算できる。

$$\begin{aligned} F_{xi} &= - \sum_{j|i \text{ に隣接}} \frac{\partial U_{ij}}{\partial x_i} - \sum_{j,k|i \text{ に隣接}} \frac{\partial U_{kij}}{\partial x_i} \\ U_{ij} &= \frac{1}{2} k_{ij} (r_{ij} - r_{ij}^0)^2 \\ U_{kij} &= \frac{1}{2} k_{kij} (\theta_{kij} - \theta_{kij}^0)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 r_{ij}^0, θ_{kij}^0 は変形前の初期メッシュでの距離および角度、 r_{ij}, θ_{kij} は変形後の距離および角度である。ばね定数に相当する k_{ij} は、短い辺の長さの変化は小さく、長い辺の変化は大きくなるように、初期格子点間距離の逆数

$$k_{ij} = \frac{1}{r_{ij}^0} \quad (10)$$

に設定した。角度方向のばね定数 k_{kij} は境界面に近い節点では大きな値にするなどの調整をする。

流体と構造の境界面上の節点は固定して、内部節点を式(9)で求めた力の方向へ変位させることを繰り返して、メッシュを変形する。

2.6. 移動格子での流体計算

境界の変形によってメッシュを変形する手法は、空間固定した座標系から流れを記述するオイラー法と流体要素を追跡して動く座標系から記述するラグランジュ法の中間的な方法で、Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 法と呼ばれる。ALE 法での輸送方程式は、有限体積法では次式になる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho \phi (\mathbf{v} - \mathbf{v}_B) \cdot \mathbf{n} dS = \\ \int_S \Gamma \text{grad } \phi \cdot \mathbf{n} dS + \int_V q dV \end{aligned} \quad (11)$$

オイラー法との違いは対流項であり、コントロールボリューム界面を通過するフラックスの計算において、流体速度 $\mathbf{v}$ の代わりに界面の移動速度 $\mathbf{v}_B$ との相対速度 $\mathbf{v} - \mathbf{v}_B$ を用いる。

3. テスト計算

Wall と Ramm による 2 次元の流体構造連成系 [11] への適用を試みた。この系では、固定した、変形をしない角柱の背後に、薄い弾性体があり、その一端が角柱に固定されている。流体は図の左

側の流入境界から一様流速で流入し、右側の自然流出境界から流出する。

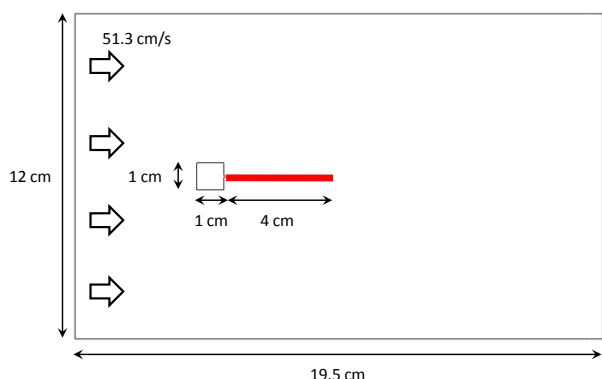


図 2 計算モデル (—部分が変形する構造部分)

この弾性体構造に対して、構造解析を行って固有ベクトルを求め、その固有ベクトルの方向へ弾性体を変形させた様子を図 3 に示す。ここでは、振動数が小さい方から 4 つのモードについて示した。流体構造連成計算での構造体の変形は、これらのモードの重ね合わせで表現される。

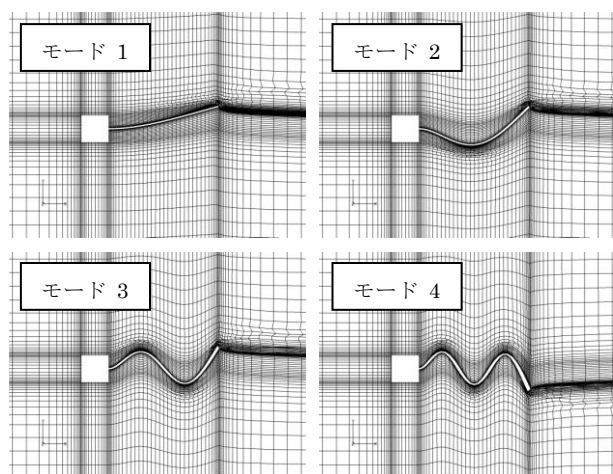


図 3 モード解析によって求めた振動モード

流体計算は、はじめに、すべての構造を固定して定常計算を行い、その後に弾性体のモード解析と流体メッシュの変形を伴う非定常計算を行う。流体計算での圧力分布・速度分布のスナップショットを図 4 に示す。現在、構造体が大きく変形しても流体メッシュが追従するように確認しつつ、解析を進めている。

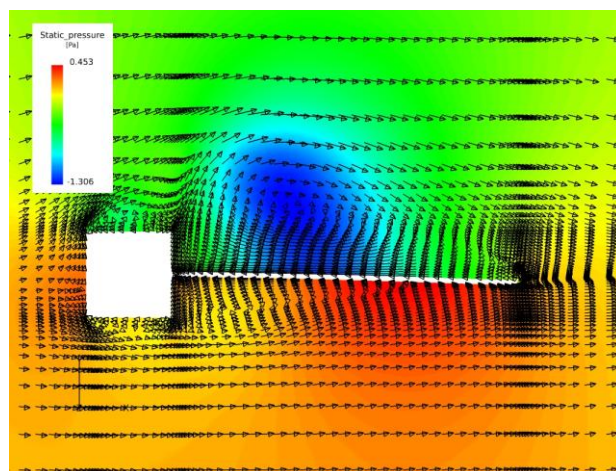


図 4 圧力および速度ベクトルのスナップショット

4. まとめ

本稿では、構造物の固有値および固有ベクトルをあらかじめ計算し、その情報を利用して流体解析実行時に流体メッシュの変形と構造物のモード解析を行うことにより、流体構造の双方向連成を行う手法について述べた。

本手法は、構造物が線形弾性の挙動をする場合への適用に限られるが、流体解析技術者にとっては比較的手軽に実施可能な流体構造連成解析である。また、流体解析の処理にもほとんど負荷がかからないことから、産業界においてもこれから利用の範囲が拡大する手法であると考えている。

課題としては、メッシュの移動をユーザーサブルーチンで記述する必要がある点であるが、この課題に対しては、今後事例を積み重ねることによってその記述をパターン化し、それをユーザーに提供することにより、解決できる見込みである。

参考文献

- [1] 菊池 愛子, 戸田 則雄, "連成解析のためのデータ連携ツール Advance/MPLink Ver.1.7," アドバンスシミュレーション Vol.4(2010)
- [2] 森田 秀利, 松原 聖, 菊池 愛子, "1次元気液二相流管路系解析シミュレータ Advance/FrontNet/TP," アドバンスシミュレーション Vol.7(2011)
- [3] 中森 一郎, 原田 昌紀, 塩谷 仁, "高速流解

析ソフトウェア Advance/FrontFlow/
FOCUS と流体－構造の連成解析機能の紹
介," アドバンスシミュレーション Vol.10
(2011)

- [4] 袁 熙, 松原 聖, 大家 史, "構造解析ソフト
ウェア Advance/FrontSTR Ver. 4.1,"アドバ
ンスシミュレーション Vol.13(2012)
- [5] 中森 一郎, "高速流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS と Dyna3D2000
を用いた爆発解析の紹介,"アドバンスシミュ
レーション Vol.14 (2013)
- [6] 松原 聖, 戸田 則雄,"音響解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise による構造音響および
流体音響連成解析,"アドバンスシミュレーシ
ョン Vol.14(2013)
- [7] 松原 聖, 桑原 匠史, 戸田 則雄, 大西 陽一,
大家 史,"音響解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise を利用した連成解析,"
アドバンスシミュレーション Vol.15(2013)
- [8] 富塚 孝之, 中森 一郎,"爆燃および爆轟の数
値シミュレーションについて,"アドバンスシ
ミュレーション Vol.16(2013)
- [9] 富塚 孝之, 中森 一郎,"高速流解析ソフトウ
ェア Advance/FrontFlow/FOCUS による可
燃性ガス爆発解析,"アドバンスシミュレーシ
ョン Vol.16(2013)
- [10] 松原 聖,"音響解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise の透過音解析機能,"ア
ドバンスシミュレーション Vol.16(2013)
- [11] W. A. Wall, E. Ramm, Fluid-structure
interaction based upon a stabilized (ALE)
finite element method, Computational
Mechanics: New Trends and Applications,
CIMNE, Barcelona, Spain, 1998.

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、ア
ドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュ
レーション図書館から、【カラー版】がダウンロ
ードできます。(ダウンロードしていただくには、
アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録
が必要です。)