

# 高速流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/FOCUSを用いた 流体－構造連成による爆発解析

田中 洋一\* 末光 啓二\* 徳永 健一\* 桑原 匠史\* 中森 一郎\*\*

## Overview of Coupled Analysis for Gas Explosion Using Advance/FrontFlow/FOCUS

Yoichi Tanaka, Keiji Suemitsu, Ken-ichi Tokunaga, Takuhito Kuwabara, Ichiro Nakamori

Advance/FrontFlow/FOCUS は圧縮性流体専用の解析ソフトウェアであり、構造解析ソフトウェアとの流体－構造連成により爆発現象を解析することを目的として開発されてきた。ここでは、構造解析ソフトウェア DYNA3D との連成手法を用いた爆発解析に関連して、その基本機能および使用方法を示す。

**Key word:** 水素爆発、破壊、爆轟、燃焼、火炎モデル、連成解析、構造解析、流体解析、埋め込み境界法

### 1. はじめに

近年の計算機の発達に伴って、従来では計算負荷が大き過ぎて困難であった計算も可能となってきた。特に、複数の異なる現象をお互いの影響を考慮しながら解析する連成解析が可能となり一般的に広く普及してきた。なかでも、流体と構造の連成解析は最も需要の多いものの1つとなっている。とりわけ、高圧かつ高速な流れと構造物が相互作用するような問題を解析するには、衝撃波や爆轟波をはじめとする種々の圧力波を安定かつ効率的に扱いながら構造物との相互作用に必要な物理量を迅速に情報交換することが必要である。また、その計算は流体、構造計算ともに非定常的でなければならず、計算アルゴリズムが高速であることが必須である。このような背景を踏まえ、当社では圧縮性が顕著に現われる流れ専用のソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS を開発してきた。

流体－構造連成解析においては、複雑な構造物の形状を流体の計算領域内に取り込む必要に迫

られ、計算格子を構造物の形状に沿って作成することは多大な時間と作業者の能力が求められることが多い。そのため、解析モデルの作成から流れの解析を経て解析データの処理に至る一連の作業のうち、計算格子の作成に充てられる割合は無視できない。このような状況に対して、流体計算の直交格子ソルバーに埋め込み境界法（Immersed Boundary 法）を適用することにより、上記した計算格子の生成に関わる困難を回避することが可能となる。また、埋め込み境界法の最大の利点は、そこで扱われる物体形状は流体格子において解像できるレベルにて取り込まれるものの、物体の配置の変化、寸法の若干の変更、または物体の移動速度への追従といったパターンに対して、計算格子を作成し直すことなく、流体ソルバーを速やかに適応させることができるところにある。

Advance/FrontFlow/FOCUS では、この埋め込み境界法を適用しており、構造解析ソフトウェアとの連成解析システムを開発してきた。開発対象とする構造解析ソフトウェアは、破壊を伴う大変形を扱えること等を理由として、DYNA3D を選定した。DYNA3D は米国 Lawrence Livermore 研究所において開発され、公開コードとなっている有限要素法構造解析ソフトウェアである[1]。破

\*アドバンスソフト株式会社 第1事業部

1<sup>st</sup> Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

\*\*アドバンスソフト株式会社 第2事業部

2<sup>nd</sup> Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

壊を伴う大変形衝撃解析のような非線形が強い現象の動解析を実現するために陽解法が採用されている。これにより、応力波が時刻歴で伝播していくことで破壊や変形が発生するような問題の大規模かつ長時間解析が可能になるとともに、計算の高速化が達成されている。

本章では、Advance/FrontFlow/FOCUS と DYNA3D を組み合わせた連成解析システムについて、流体－構造連成解析機能の概要と使用方法、さらにこの機能を用いた解析事例を紹介する。

## 2. 流体－構造連成解析機能

流体－構造連成解析は、解析モデルの支配方程式の解き方によって2種類の解析方法に分けられる(表1)。1つは、流体モデルと構造モデルを1つの系として、それぞれのモデルの支配方程式を同時に厳密に解く強連成解析である。この解析方法では、高精度の解が得られるが、計算コストがかかり、難易度も上がる。もう1つは、流体モデルと構造モデルで互いに関係する情報を交換しながら、それぞれのモデルの支配方程式を別々に解く弱連成解析である。この解析方法では、強連成解析に比べて解析精度は劣るが、計算コストを低く抑えることができるというメリットがある。さらに弱連成解析は、情報交換を片方向のみに行う方法と双方向に行う方法があるが、互いのモデルの情報がともに相手方のモデルに与える影響が大きい場合には、双方向の情報交換を行う必要がある。

表1 連成解析の分類

連成解析種類	データの伝達	精度	難度
弱連成解析 (各解析を独立実行し、結果を伝達)	片方向	低	易
	双方向	中	中
強連成解析 (支配方程式を同時に解析。結果伝達はなし)	同時	高	難

ここでは、流体モデルと構造モデルが双方向に

物理データの授受を行う弱連成解析を適用し、この連成解析における解析機能について紹介する。

### 2.1. 連成解析の流れ

図1は、Advance/FrontFlow/FOCUS と DYNA3D による双方向連成解析でのデータ授受を示した模式図である。Advance/FrontFlow/FOCUS による流体解析で得られた圧力データを DYNA3D に渡し、その圧力による構造解析を DYNA3D で行う。そして、構造解析によって得られた構造物の変形・速度を Advance/FrontFlow/FOCUS に渡し、構造物の変形・速度を反映した状態で再度流体解析を行う。

この一連の解析の流れを繰り返しながら、連成解析を進めていく。連成解析におけるデータ授受は、当社の Advance/REVOCAP が行う。

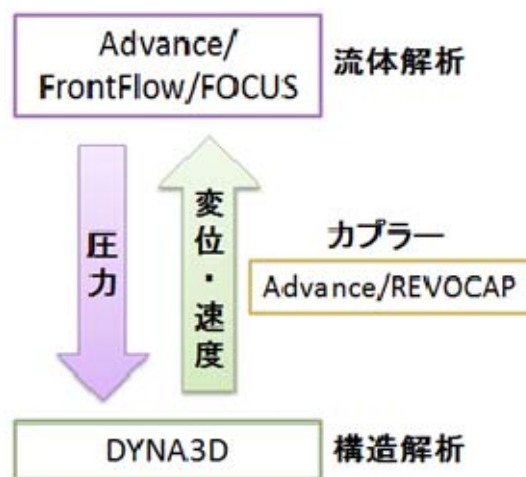


図1 双方向連成解析におけるデータ授受

### 2.2. 連成解析における各ソフトウェアの基本機能と特長

ここでは、連成解析における各ソフトウェアの基本機能と特長について述べる。

#### 2.2.1. 高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS

冒頭でも述べたように、Advance/FrontFlow/FOCUS は圧縮性が顕著に現われる流れ専用のソフトウェアである。Advance/FrontFlow/FOCUS の基本機能および理論詳細については、

過去に当雑誌より出版しているのでそちらを参照頂きたい[2]。ここでは、流体-構造連成解析の観点から見て重要となる構造物の取り扱いの機能について説明する。

流体-構造連成解析を行う際、Advance/Flow/FOCUS では流体領域に直交格子を適用して解析を行っており、流体領域の内部にある構造物に対しては、埋め込み境界法 (Immersed Boundary 法) という手法を適用している。流体解析でよく使用されるのは、構造物の形状に沿って生成された境界適合格子 (図 2 左) であるが、埋め込み境界法では、予め構造物の形状を意識せずに作成した直交格子に構造物の形状データを取り込み、その境界を計算格子に埋め込む (図 2 右)。この場合、格子形状と構造物の境界は必ずしも一致しないが、流体セルに隣接する構造物セル(仮想セル)の速度ベクトル  $V_j$  を、構造物境界面に対して流体セルの速度ベクトル  $V_i$  と対称となるように設定する (図 3)。そうすることで、セル境界において、構造物の境界面に垂直な方向(法線ベクトル  $n_j$  の方向)の数値流束をゼロにすることができ、構造物の形状を模擬することができる。また、構造物が速度  $U_j$  で移動する場合には、構造物セル(仮想セル)の速度ベクトル  $V_j$  にその速度を加えることで移動境界問題にも適用が可能になる。以上のことを考慮した構造物セル(仮想セル)の速度ベクトル  $V_j$  は、以下の式で与えられる。

$$V_j = V_i - 2(V_i \cdot n_j)n_j + (U_j \cdot n_j)n_j \quad (1)$$

埋め込み境界法では、物体の変形や移動に対して、計算格子はそのまま構造物セル(仮想セル)の速度ベクトル  $V_j$  のみを変更するだけでよいことから、物体の大幅な変形や移動を伴う問題への適用性に優れている。

Advance/Flow/FOCUS は、連成解析時に構造物の変位・移動速度を Advance/REVOCAP を介して DYNA3D から受け取り、その情報を埋め込み境界法に利用して、流体領域内の構造物の情報を更新しつつ解析を行っている。

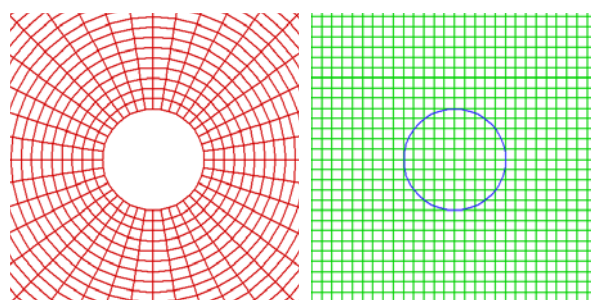


図 2 円形の構造物に対応した境界適合格子 (左) と埋め込み境界法 (右) の計算格子比較

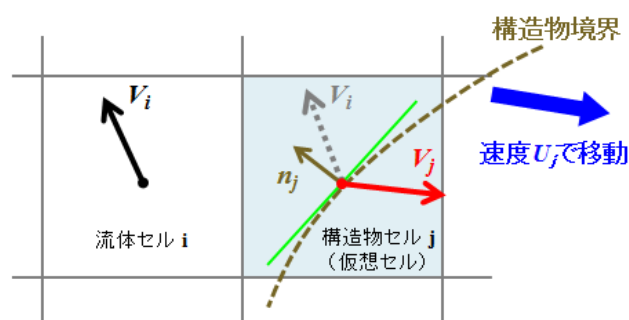


図 3 埋め込み境界法における構造物セル (仮想セル) の速度ベクトル  $V_j$  の設定

## 2.2.2. DYNA3D

DYNA3D の大きな特徴は、陽解法による非線形動解析である。この陽解法の実装と連成解析は相性がよく、時刻ステップごとの計算に流体ソルバーとの連携機能を追加した。追加した機能を主体にして連成解析の処理フローを図 4 に示す。流体ソルバーからの外力となる圧力は、DYNA3D に元々実装されている Pressure loads として扱い、入力データで負荷面を予め設定する。そして、圧力値を時刻ステップごとに Advance/REVOCAP を介して取得する。

DYNA3D では、対象構造物の破壊を解析できる。設定には、破壊条件が指定可能な材料モデルを用いる。破壊条件は材料モデルごとに異なり、例えば Type 13 の弾塑性材料モデルでは、破壊に達する相当塑性ひずみを指定する。破壊条件は要素ごとに検査され、破壊に達するとその要素は解析対象から取り除かれる。なお、本実装では取り除かれた要素を、解析結果としてポスト処理用ファイルに出力する。

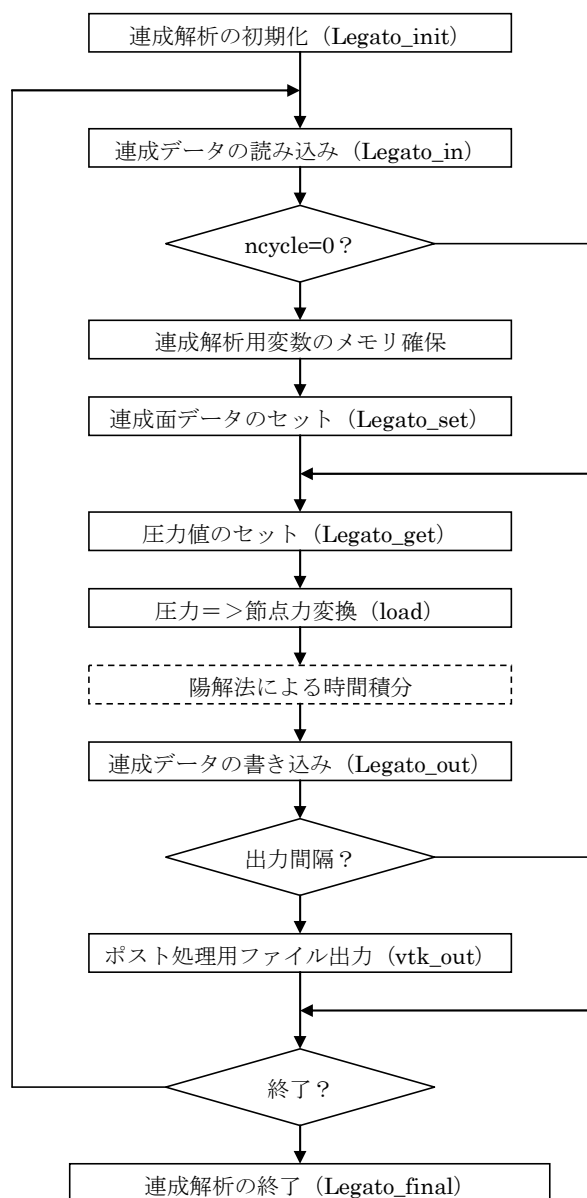


図 4 DYNA3D の連成解析の処理フロー

### 2.2.3. 汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP

双方向連成解析を実現するために、カプラーに必要とされることは、物理量のマッピングに加えてそれぞれのプロセスのステップ数の制御である。さらに Advance/FrontFlow/FOCUS と DYNA3D の組み合わせによる連成解析では、埋め込み境界法と有限要素法との間の物理量のマッピングが必要となることに注意する。ここでは当社の汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP における格子入出力機能、物理量補間機能、形状処理機能を利用して汎用の双方向対応のカプラーをライブラリとして開発した。このラ

イブラリを Advance/FrontFlow/FOCUS および DYNA3D にリンクすることで連成解析を実現した。

表 2 本連成解析において使用したカプラーの機能

連成の種類	双方向弱連成
カプラーの提供方法	ライブラリ
解析ソフトウェア間の通信方法	ファイル受け渡し
流体→構造	圧力
構造→流体	変位、速度

構造解析から流体解析への変位物理量の受け渡しは、上述の埋め込み境界法に準ずる。流体解析から構造解析への圧力物理量の受け渡しは、構造物の境界面で流体のセルで与えられる圧力を面積分することで与える。

それぞれの解析ソフトウェアのプロセス制御は、カプラーが相手方の解析ソフトウェアのファイル出力を監視して、必要な情報が得られるまで待機することによって行われる。また、ファイル受け渡しによりファイルシステムに負荷をかける場合を考慮して、自動的に不要なファイルを削除する機能も備える。

### 3. プログラム実行に必要な入力データ

2.2.で紹介したソフトウェアを用いて連成解析を実行するためには、以下の 3 つの入力ファイルを用意する必要がある。

- 流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS の入力ファイル
- 構造解析ソフトウェア DYNA3D の入力ファイル
- 汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP(カプラー機能制御)の入力ファイル

ここでは、これらの 3 つの入力ファイルの内容、および作成方法について説明する。

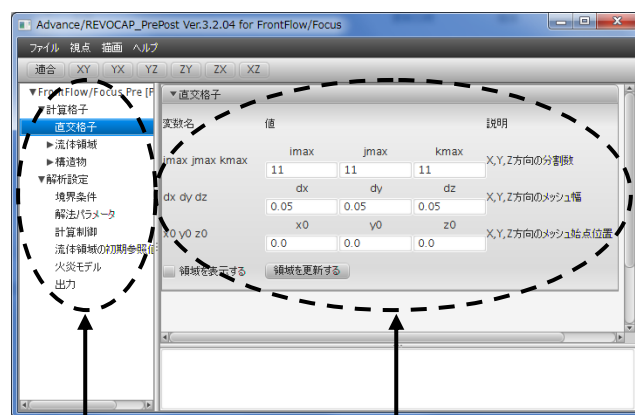
### 3.1. 高速流解析ソフトウェア Advance/Front Flow/FOCUS の入力ファイル

Advance/FrontFlow/FOCUS の入力ファイルは、流体解析における格子、解析条件、出力条件等を設定するためのファイルである。表 3 に入力ファイルで設定する項目を示す。設定項目の詳細は Advance/FrontFlow/FOCUS のマニュアルに記載されている。

表 3 入力ファイルで設定する項目

設定項目	入力内容
直交格子の設定	x, y, z 方向の格子数 格子幅 格子原点
流体領域の指定	流体領域内に位置する座標を指定。(構造物の領域と区別するため。複数選択可。)
境界条件	x, y, z 方向の流体領域端の境界条件。自由流出、周期境界、対称が設定可能。
計算時間に関する設定	計算ステップ数 クラン数 計算時間の刻み リスタート計算の ON/OFF
流体領域の初期値設定	流速 圧力 温度
解法に関する設定	時間積分法の選択 火炎モデル、水素燃焼モデルの ON/OFF MUSCL 法の ON/OFF 粘性考慮の ON/OFF 乱流モデルの選択
火炎モデル適用時の着火設定	着火領域 反応熱 層流火炎伝播速度 未燃気体の音速
水素燃焼モデル適用時の着火設定	着火領域 着火領域の温度 水素の体積率 水素の反応熱
出力設定	結果ファイル名 結果出力のステップ間隔

これらの設定項目は当社の汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP のプリ機能を用いて入力することができる。図 5 は、Advance/REVOCAP によるパラメータの入力画面であり、表 3 に示した各設定項目は GUI を通して入力することができる。Advance/REVOCAP による入力方法の詳細は、Advance/REVOCAP のマニュアルに記載されている。



設定項目の  
選択

設定内容の入力

図 5 Advance/REVOCAP によるパラメータ  
入力画面(直交格子の設定)

```
&ORTHOGONALGRID
IMAX      =      11,
JMAX      =      11,
KMAX      =      11,
DX        =  5.00E-002,
DY        =  5.00E-002,
DZ        =  5.00E-002,
X0        =  0.00E+000,
Y0        =  0.00E+000,
Z0        =  0.00E+000
/
```

図 6 Advance/FrontFlow/FOCUS の  
入力ファイル(直交格子の設定)

入力が完了すると、入力内容が記載された入力ファイル(拡張子は.ctl)を出力することができる。図 6 に入力ファイルの一部を示す。入力ファイルには、各設定内容が Fortran の namelist 形式で記述されており、この出力された入力ファイルを直接編集することもできる。

### 3.2. 構造解析ソフトウェア DYN3D の入力ファイル

DYN3D は汎用の構造解析ソフトウェアであるため、連成解析では使用しないデータを含めてその入力内容は多岐にわたる。また、DYN3D にはプリ処理用のツールがない。そこで、入力データ作成の利便性を向上させるために、別の構造解析ソフトウェア Abaqus 用の入力データファイルを DYN3D 用に変換するソフトウェアを作成して用いている。

この変換ソフトウェアにより、連成解析に必要な入力内容として、以下のデータが DYN3D フォーマットに変換される。

#### (1) コントロールデータ

カード 1 からカード 9 までの所定フォーマットパラメータにより、入力データ制御と解析実行制御を行う。

#### (2) 材質パラメータデータ

Type1 から Type70 までの材質データが実装されており、使用するすべての材質データを順次記述する。

#### (3) 節点定義データ

メッシュ要素を構成する節点の座標を記述する。また、節点ごとの拘束条件が指定可能である。

#### (4) 要素定義データ

メッシュ要素を構成する節点の並びを記述する。また、要素ごとの材質データを(2)で記述した番号により指定する。

#### (5) ロードカーブ定義データ

負荷する境界条件の時間的変化を点列で記述する。連成解析の場合ダミーデータであるが、記述は必須である。

#### (6) 圧力面定義データ

流体ソルバーから受け渡される圧力が作用する面を構成する節点の並びを記述する。Advance/REVOCAP を介して流体ソルバーからも受け取るが、同じデータを記述する必要がある。

### 3.3. 汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP(カプラー機能制御)の入力ファイル

カプラーを制御するための入力ファイルは

legato.rcfg という名前のファイルに yaml 形式で作成する。

表 4 カプラーの入力ファイルで設定する項目

解析ソフトウェアの情報	識別子 格子ファイル名 格子ファイルフォーマット 物理量格納方法(セル中心か節点か)
物理量の受け渡し制御	受け渡しの方向 受け渡す物理量 連成するステップ間隔 物理量補間方法 相手のソルバーの最大待ち時間

カプラー自体は汎用の連成解析ライブラリとして開発されているため、設定内容も汎用性を反映している。流体－構造双方向弱連成の場合は解析ソフトウェアの情報は流体解析ソフトウェア、構造解析ソフトウェアのそれぞれについて記述し、物理量の受け渡し制御は流体から構造と、構造から流体のそれぞれについて記述する必要がある。

## 4. プログラムの実行方法と解析結果

ここでは、連成解析の実行方法と解析結果について説明する。

### 4.1. プログラム実行のための事前準備

プログラムを実行するには、連成解析で用いるソフトウェアの実行ファイルとこれまでに説明してきた各ソフトウェアの入力ファイルが必要である。図 7 に、この連成解析システムのパッケージに収録されている実行ファイルと入力ファイルのサンプルのフォルダ構成を示す。

実行ファイルは、Advance/FrontFlow/FOCUS と DYN3D の実行ファイルの 2 つであり、Advance/REVOCAP のカプラー機能についてはそれらの実行ファイルの中に組み込まれている。また、図 7 に示した入力ファイルはサンプルであり、入力ファイルのファイル名は変更可能である。



ただし、DYNA3D と Advance/REVOCAP の入力ファイルは“couple\_data”というフォルダの中に入れるように注意する。

ここで紹介している流体－構造連成解析ソフトウェアの動作 OS は Linux である。そのため、解析を実行する Linux 計算機に、図 7 に示したファイル一式をコピーする。

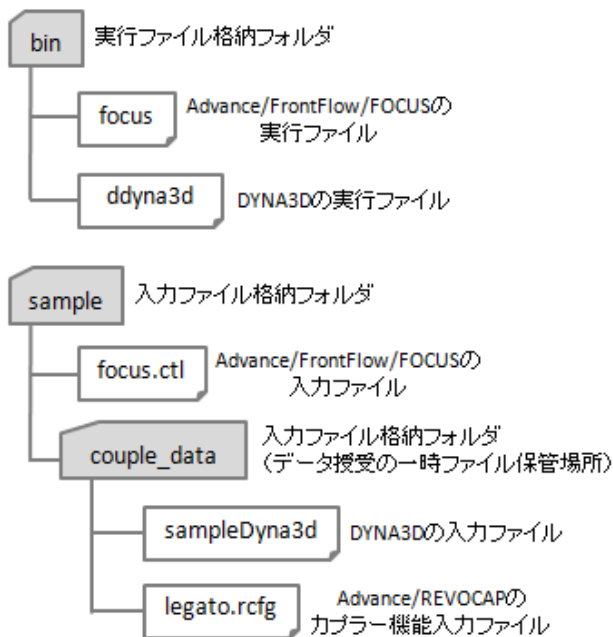


図 7 実行ファイルと入力ファイル(サンプル)のフォルダ構成

## 4.2. プログラムの実行方法

入力ファイル格納フォルダ(図 7 の"sample")に移動し、図 8 のようにコマンド入力して、Advance/FrontFlow/FOCUS と DYNA3D の両方のソフトウェアを実行して連成解析を行う。その際、片方のソフトウェアはバックグラウンドで動かす(コマンドの最後に&を付加)。

```
$ ../bin/focus focus.cti &
$ ../bin/ddyna3d i=couple_data/sampleDyna3d
```

図 8 連成解析実行のコマンド

コマンド入力後、Advance/FrontFlow/FOCUS と DYNA3D の両方のソフトウェアが実行されて、Advance/REVOCAP のカプラー機能がそれらの

間でのデータ授受を行いながら解析が進んでいく。解析が正常終了した場合、図 9 のような解析終了を示すメッセージがログに表示される。

### Advance/FrontFlow/FOCUS

```
Computing done successfully.
```

### DYNA3D

```
normal termination
```

図 9 正常終了時に表示されるメッセージ

## 4.3. 異常終了時の対処方法

本連成解析システムが異常終了を起こす原因は、以下の 2 つに分けられる。

- ① 流体解析、構造解析のソルバー自身の中で問題が発生した場合
- ② 連成解析によるデータ授受において問題が発生した場合

①に関しては、各ソルバー内部の問題であり、エラーログの内容やソルバーのマニュアルを見て対応する。一方、②に関しては、データ授受がうまく行われずに異常終了してしまう場合である。この場合、データを受け取れなかったソルバーの方のログに、図 10 のようなメッセージが表示される。

```
REVOCAP Legato watching notice file... 29 30.00
REVOCAP Legato watching notice file... 30 30.00
REVOCAP Legato watching notice file... 31 30.00
REVOCAP Legato Error : timeout
```

↑ エラーメッセージ

↑ データ授受の最大待ち時間

図 10 データ授受において問題が発生した場合に表示されるメッセージ

Advance/REVOCAP のカプラー機能には、ソルバーからデータを受け取る際、待ち時間の上限が設けられている。これは、データを渡す側の解析が異常終了した場合、データを受け取る側の解析が終了せずに継続されるのを回避するためである。データを受け取れなかった原因として、データを渡す側の解析が異常終了した場合があるが、それは上記の①に該当するものであり、①と同じ

対処を行う。もう 1 つの原因として、データを渡す側の解析がデータ授受を行う待ち時間内に終了しなかった場合である。この場合は、表 4 に示した相手のソルバーの最大待ち時間をより長く設定すればよい。そうすることで、データを渡す側の解析が待ち時間内に終了することができ、データ授受による問題を回避することができる。

#### 4.4. 解析結果

解析が終了すると、流体解析と構造解析の結果がともに **vtk** 形式のファイルで出力される。流体解析および構造解析では、表 5 に示した物理量が解析結果として出力される。

表 5 解析結果の出力項目

流体解析	構造解析
<ul style="list-style-type: none"> <li>・密度</li> <li>・流速</li> <li>・圧力</li> <li>・エネルギー</li> <li>・温度</li> <li>・未燃/既燃率 (火炎モデル適用時)</li> <li>・水素の体積率 (水素燃焼モデル適用時)</li> <li>・乱流モデルにおける変数 (乱流モデル適用時)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・節点変位</li> <li>・節点速度</li> <li>・節点加速度</li> <li>・要素応力</li> <li>・要素ひずみ</li> <li>・要素ミーゼス応力</li> <li>・要素破壊フラグ (破壊モデル適用時)</li> </ul>

解析結果は、汎用プリポストプロセッサ **Advance/REVOCAP** のポスト機能を用いて表示することができる。**Advance/REVOCAP** を用いることで、表 5 に示した各種の解析結果をコンター図やベクトル図で表示することができる(図 11)。ポスト機能の使用方法的詳細についても、プリ機能と同様に、**Advance/REVOCAP** のマニュアルに記載されている。

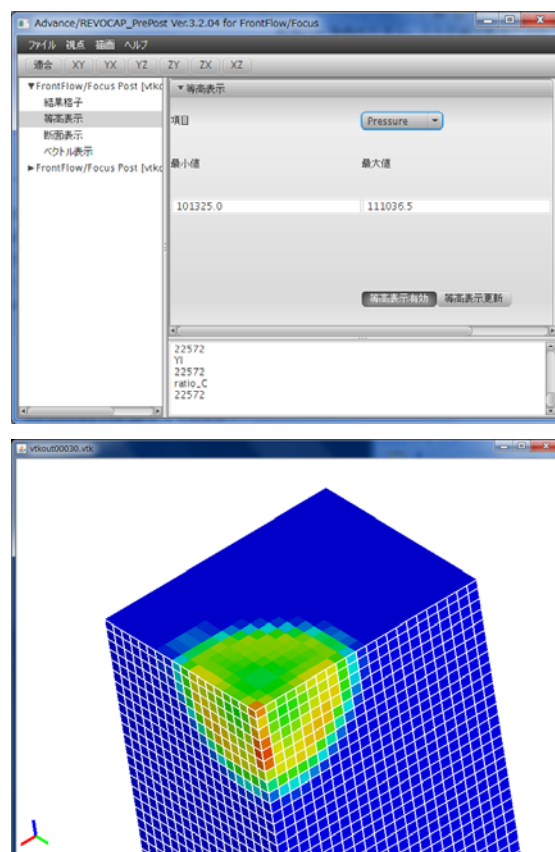


図 11 Advance/REVOCAP による結果表示  
設定画面(上)と結果のコンター表示(下)

#### 5. 解析事例

連成解析機能を用いた解析事例として、一般社団法人日本原子力技術協会で行われた爆轟波による配管の破断試験との比較検証計算を紹介する[3]。また、計算を実行するためのモデル作成や解析条件の設定方法についても説明する。

##### 5.1. 配管の破断試験

図 12 に破断試験で用いられた配管の概略図を示す。

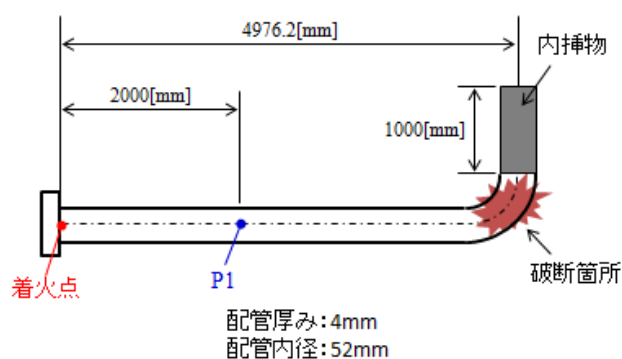


図 12 配管の概略図



この試験の目的は、実機で多数使用されているエルボ要素において爆轟波による強度を試験的に把握することである。その観点から、配管内に内挿物を設置し、エルボ近傍の拘束影響を除外する構造としている。

試験では、配管の端で着火を行い、管内の混合ガス（水素・酸素）を燃焼させている。それにより、配管内に爆轟波が生じ、エルボ部で配管が破断するという試験結果が得られている（図 13）。



図 13 配管エルボ部の破断(文献[3])

ここでは、配管内部での爆轟波の進行の様子やそれに伴う配管の変形について、Advance/Front Flow/FOCUS と DYNA3D による連成解析を用いたシミュレーションを行う。さらに、DYNA3D における破壊オプションを適用し、エルボ部の配

管破壊箇所から配管内部の流体が漏れ出る様子もシミュレーションする。

## 5.2. モデルの作成と解析条件の設定

構造解析のモデルは、実際の破断試験で用いられた配管形状（図 12 参照）に即した有限要素モデルを作成する。一方、流体解析では直交格子によるモデル化を行い、埋め込み境界法を用いて構造物を認識させる。そのためには、構造物も含めた範囲に流体解析の直交格子を作成する必要がある。図 14 は、構造解析の配管モデルを考慮して作成した流体解析の格子である。濃い色(■)色の格子は、埋め込み境界法により構造物として認識された格子であり、流体解析ではこの構造物格子の内部において流体解析を実行することになる。配管の内部と外部に直交格子が存在するが、内部を流体領域として計算したい場合には、3.1. で説明した Advance/FrontFlow/FOCUS の入力ファイルの“流体領域の指定”で配管内部の座標を指定すればよい。

解析条件については、文献[3]に記載された試験条件に即して設定する。構造解析および流体解析において、本解析で重要となる項目の解析条件を表 6 に示す。設定方法は、3.1.および 3.2.で述べた通りであり、それに沿って設定内容を入力ファイルに記入する。

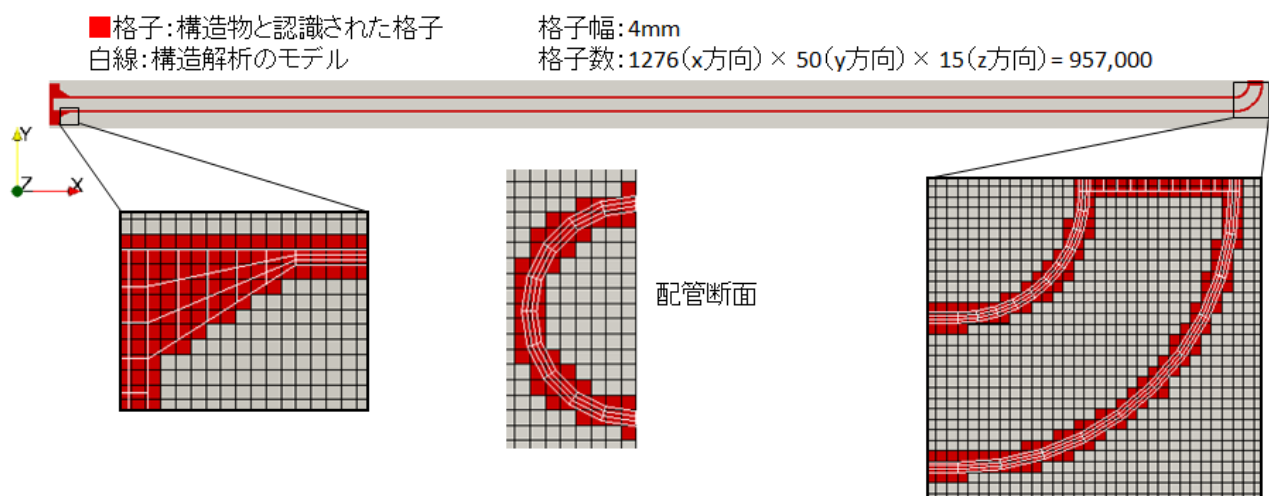


図 14 流体解析で用いる直交格子の断面図

表 6 解析条件

(本解析で重要となる項目のみ。詳細は文献[3]参照。)

流体解析
着火点：配管内の長手側の端にある格子 1 層
反応熱： $5 \times 10^5 [\text{J/kg}]$
配管内の初期圧力：3.5[MPa]
配管内の初期温度：15[°C]
構造解析
配管の物性：弾塑性材料
ヤング率：206[GPa]、ポアソン比：0.29
降伏応力：300[MPa]
拘束条件：配管の長手側の外端を完全拘束

### 5.3. 解析結果

図 15、図 16 は、エルボ付近における配管内を進行する爆轟波の圧力分布、および、爆轟波による配管の変形量分布である。

配管内の混合気体を着火させることで配管内に爆轟波が発生し、エルボ部に向かって爆轟波が進行していく様子が図 15 より分かる。また、爆轟波の進行に伴って、配管が外側に膨張するように変形している様子も図 16 より分かる。

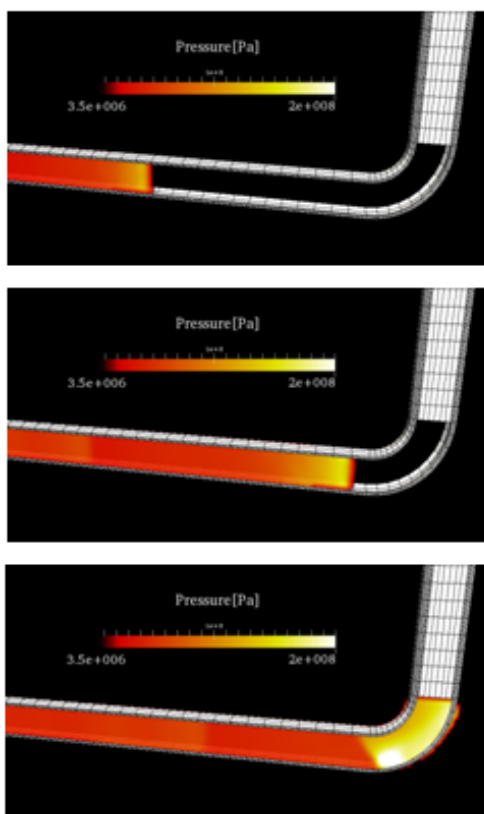


図 15 配管内を進行する爆轟波の圧力分布

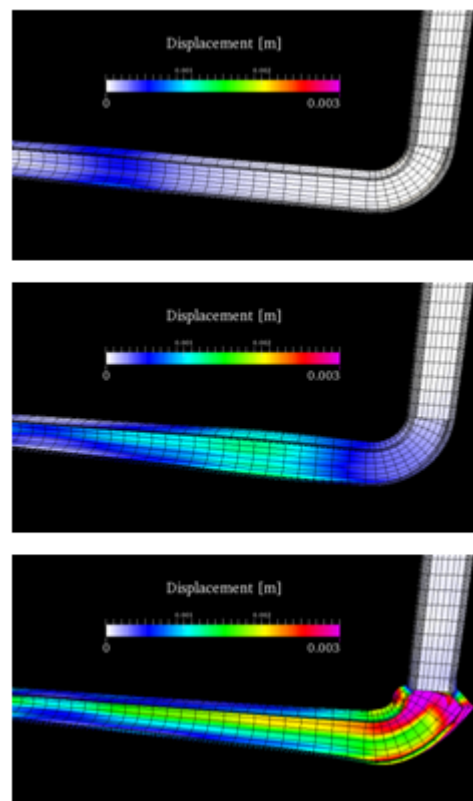


図 16 爆轟波による配管の変形量分布  
(変形倍率は 5 倍)

ここで、破断試験結果と解析結果との比較を示す。図 17 は、図 12 に示した観測点 P1 における圧力の時間変化を示したものである。

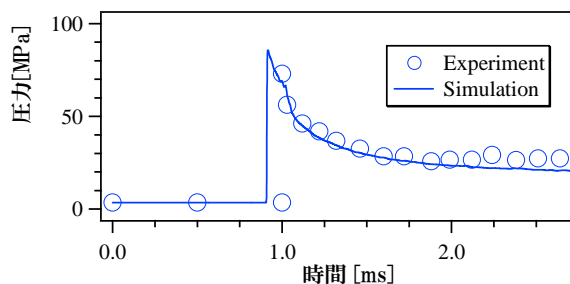


図 17 観測点 P1 における配管内圧力の時間変化

観測点 P1 を通過する爆轟波の圧力の解析結果は爆轟波前後の圧力比で 25 程度を示しており、実測値と良く一致していることが分かる。

爆轟波がエルボ部に侵入すると、爆轟波の入射波と反射波が重なりあって、配管内部の圧力が非常に大きくなり、配管も大きく変形する(図 16)。図 16 に示した解析での配管の構造モデルは、弾

塑性材料を用いた変形のみ生じる設定になっている。しかし、2.2.2.で説明した DYN3D の破壊オプションを配管の構造モデルに適用することで、配管を破壊することができ、図 18 は、DYN3D の破壊オプションを連成解析機能と併用した場合の圧力結果である。破壊された配管の穴から配管内部の流体が漏れ出る様子が分かる。

※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、PDF ファイル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。)

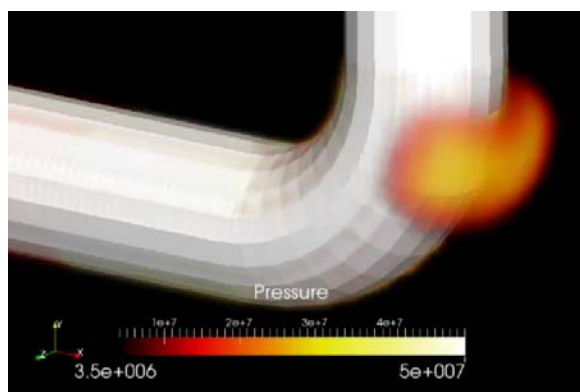


図 18 配管内部の流体が漏れ出る様子

## 6. おわりに

本章では、高速流解析ソフトウェア Advance/ FrontFlow/FOCUS と構造解析ソフトウェア DYN3D による連成解析機能と使用方法について解説した。また、連成解析機能の解析事例として、日本原子力技術協会で行われた配管破断試験に対する解析結果を紹介した。

## 参考文献

- [1] J. Lin, E. Zywickz, P. Raboin : “DYN3D Code Practices and Developments”, UCRL-ID-138654, LLNL (2000)
- [2] 中森 一郎, “高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS の概要”, アドバンスシミュレーション, Vol.16 (2013)
- [3] 一般財団法人 日本原子力技術協会 JANTI-NCG-01 「BWR 配管における混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管損傷防止に関するガイドライン（第3版）」平成 22 年 3 月