

非構造格子系熱流体解析システム

SCRYU/Tetra[®]
Version 12

ユーザーズガイド
流体構造連成(Abaqus[®])編
(オプション)

株式会社ソフトウェアクレイドル

2015年6月

SCRYU/Tetra[®]は、株式会社ソフトウェアクレイドルの商品名です。本書の一部または全部を無断で複製・転載・改編することを禁じます。

CRADLE 株式会社ソフトウェアクレイドル
Software Cradle Co., Ltd.

本 社 : 大阪市北区梅田3丁目4番5号
毎日インテシオ
TEL : 06-6343-5641 FAX : 06-6343-5580

東京支社 : 東京都品川区大崎1-11-1
ゲートシティ大崎ウエストタワー
TEL : 03-5435-5641 FAX : 03-5435-5645

SCRYU/Tetra©2015 Software Cradle

Abaqus[®]©Dassault Systèmes 2010

Abaqus[®]は、Dassault Systèmesまたはその子会社の商標または登録商標です。

目次

第1章 機能概要

(1) 連成解析の目的	1-2
(2) 必要な環境	1-2
(3) 連成解析手法	1-2
(4) ソフトウェア間での授受可能な物理量	1-3
(5) 連成解析の種類	1-4
(6) 連成解析の設定	1-4

第2章 リファレンス(プリ)編

[解析条件] - [条件ウィザード] - [連成解析]	2-2
-----------------------------------	-----

第3章 リファレンス(ソルバー)編

3.1 コマンドデータ	3-2
CSIMコマンド	3-3
CSMDコマンド	3-5

第4章 操作例題

4章をお読みになるまえに	4-2
機能説明	4-3
注意事項	4-3
結果として出力されるもの	4-3
関連コマンド	4-3
4.1 操作例題1 翼表面の圧力変化による流体構造連成	4-4
解析モデル	4-4
解くべき方程式	4-5
解析選択	4-6
解析条件	4-6
特記事項	4-7
解析手順	4-13
解析メッシュ	4-15
解析結果	4-17
4.2 操作例題2 VOF法を使用した板の変形解析	4-19
解析モデル	4-19
解くべき方程式	4-19
解析選択	4-19
解析条件	4-20
特記事項	4-21
解析手順	4-24
解析メッシュ	4-28
解析結果	4-31

4.3 操作例題3 リードバルブ開閉時の流体構造連成解析	4-34
解析モデル	4-34
解くべき方程式	4-34
解析選択	4-34
解析条件	4-35
特記事項	4-36
解析手順	4-38
解析メッシュ	4-41
解析結果	4-44

マニュアルの構成について

SCRYU/Tetraのマニュアルは、下記の13分冊構成となっております。

- **基礎編**
熱流体解析の基本的な考え方だけでなく、**SCRYU/Tetra**の各機能の詳細説明を含んだ総合解説書です。熱流体に初めて触れられる方から、各機能の理論的背景を確認されたい方まで、**SCRYU/Tetra**を使用される全ての方々を対象としています。
- **操作編**
SCRYU/Tetraの基本的な操作を基本例題を通して学ぶことができるチュートリアルです。実際に**SCRYU/Tetra**の操作を始める際には、まずこのガイドを紐解いてください。基本例題で基礎体力が付いたら、例題編もお試してください。
- **リファレンス(プリ)編**
SCRYU/Tetraのプリプロセッサ(プリ)の詳細解説書です。
- **リファレンス(ソルバー)編**
SCRYU/Tetraのソルバーの詳細解説書です。ソルバーコマンドとユーザー関数のリファレンスを含みます。
- **リファレンス(ポスト)編**
SCRYU/Tetraのポストプロセッサ(ポスト)の詳細解説書です。
- **リファレンス(VBインターフェース)編**
SCRYU/Tetraのプリプロセッサ、ソルバー、ポストプロセッサに用意されているVBインターフェースのメソッドリファレンスです。
- **リファレンス(ツール)編**
SCRYU/Tetraに付随した各種ツールについての操作説明書です。
- **例題編**
SCRYU/Tetraの解析機能とその利用法を学ぶための例題編です。解析機能特有の考え方を学んだり条件設定のしかたを調べたりと、解析機能を使いこなす際の足がかりとして最適です。実際の工業製品を模した解析事例も紹介しています。
- **構造解析編(オプション)**
SCRYU/Tetraのオプションである構造解析機能の詳細解説書です。プリプロセッサ(プリ)とソルバーのリファレンス、また、操作を学ぶための例題を含みます。
- **流体構造連成(Abaqus®)編(オプション)(本書)**
SCRYU/TetraのオプションであるSCRYU/Tetra I/F Option for Abaqus®の詳細解説書です。プリプロセッサ(プリ)とソルバーのリファレンス、また、操作を学ぶための例題を含みます。
- **最適化編(オプション)**
SCRYU/Tetraのオプションである最適化機能の詳細解説書です。最適化についての概要、操作説明、また、**SCRYU/Tetra**と連携した例題を含みます。
- **1D/3Dカップリング(GT-SUITE)編(オプション)**
SCRYU/TetraのオプションであるSCRYU/Tetra I/F Option for GT-SUITEの詳細解説書です。
- **ファンモデリング・解析ツール(SmartBlades®)編(オプション)**
SmartBlades®についての操作説明書です。

本書をお読みになるまえに

1. 本書が対応しているソフトウェアのバージョン

- **SCRYU/Tetra V12**
- **Abaqus 6.14-1**

なお、本書は開発中のリリースを用いていますので、リリースにより計算時間、結果などが異なることがあります。

2. 本書で使用しているドライブ名やフォルダ名は、実際と異なることがあります。
3. [ファイル] - [開く]等の記述は、メニューバーの[ファイル]を選択し、さらに[開く]を選択することを意味します。

倍精度版プログラムについて

倍精度版は、単精度版では32bitのデータ長で扱っていた実数を倍の64bitのデータ長で扱うことによって、桁落ちなど、計算機の誤差を、より小さくできることが期待できるプログラムとなっています。従いまして、倍精度版では、単精度版での計算では桁落ちなどにより十分な計算精度が得られなかったような計算が実行できるようになることが期待できます。しかしながら、反面、下に記しますような制限や条件が生じます。倍精度版の御利用にあたっては、是非とも下記を御留意の上、御利用頂けますと幸いです。

1. 倍精度版プログラムの利用にあたっての注意事項

- 倍精度版の実行では、単精度版の実行と比較して、計算時間, 必要メモリ量, また入出力されるデータファイル容量が増加します。**次項目** 参照。
- 倍精度版での解析の結果は、単精度版での解析の結果と比べて、内部で扱う数値の絶対精度が異なるため、両者の結果としては、必ずしも全ての数値が完全一致することはありませんが、これは不具合ではありません。
- 単精度版の結果と比較して、倍精度版の結果は、内部数値の有効桁が異なるのみです。倍精度解析を行うことと、物理的な観点から熱流れの現象を高精度に表現するということは別の問題であり、例えば、明らかに実現象を表現しきれていない単精度解析を倍精度版で実行し直せば、その結果が実現象に近似するかということについては、全く保障はありません。
- 定常解析において、既存の単精度版での解析を倍精度版で再現した場合、収束サイクルが若干異なることがあります。
- 原則として、倍精度解析を行う際は、倍精度版のPreprocessor、Postprocessorを用い、データ精度の一貫性を保つことを推奨致します。

2. 単精度版プログラムと倍精度版プログラムの計算時間等の比較

	計算(処理)時間	メモリ使用量	ファイル容量
Preprocessor	15%	10%	10% (PREファイル容量)
Solver	10%	70%	70% (リスタートファイル容量)
Postprocessor	0%	10%	40% (FLDファイル容量)

表は、単精度版プログラムでの実行時の数値に対する倍精度版での実行時の数値の増加割合を示しています。本数値は目安です。全ての解析でこの数値比になるとは限りません。

SCRYU/Tetraの場合、単精度版ではPreprocessorとSolverの実行時のメモリ使用量がほぼ同等でしたが、倍精度版ではSolverの方がメモリ使用量が大きくなります。

このため、計算機に搭載されているメモリ容量内で、メッシュは作成できても、計算ができなくなる、という現象が起きる可能性があります。

3. 各プログラムにおけるデータの取り扱い

SCTpre.exe

- 単精度版Preprocessorは単精度のMDL, PREファイルを(..._meshsurf.mdl, ..._tetra.preはそれぞれmdl, preに含みます)、倍精度版Preprocessorは、倍精度のMDL, PREファイルを読み込むことが原則ですが、単精度版Preprocessorで倍精度のファイル、倍精度版Preprocessorで単精度のファイルを読み込むことは可能です。この場合、メッセージウィンドウに警告が出ます。

また、倍精度ファイルを単精度版Preprocessorで読み込んだときは、読み込み時の倍精度データ分のメモリを確保し、内部で単精度データに変換次第、不要なメモリを解放します。従いまして、倍精度データを読み込む場合、計算機には必ず倍精度データを読み込める分のメモリが搭載されていなければなりません。

- HIS, PRPファイルは(meshautoexec.his, default.hisを含む)単精度・倍精度共通ですが、単精度版Preprocessorで出力するときは数値の表示桁数に制限があります。
- 出力されるファイルの精度はプログラムの精度に従います。

SCTsolver.exe

- 単精度版は単精度のリスタートファイル、倍精度版は倍精度のリスタートファイルを読むことが原則ですが、単精度版で倍精度のリスタートファイル、または倍精度版で単精度のリスタートファイルを読むことも可能です。この場合、Lファイルに警告が出ます。
- 出力されるR, FLDファイルはプログラムの精度に従います。変更・選択はできません。

SCTpost.exe

- 単精度版Postprocessorは単精度版SolverのFLDファイル、倍精度版Postprocessorは倍精度版SolverによるFLDファイルを読むことが原則ですが、単精度版Postprocessorで倍精度データを含むファイル、または倍精度版Postprocessorで単精度データを含むファイルを読むことも可能です。この場合、メッセージウィンドウに警告が出ます。
- STA, HEN, iFLDファイルは、現状では単精度データとして取り扱われます。

4. 単精度と倍精度の数値の表現例

倍精度は、単精度と比較して、数値を表現する際の"有効桁数"が異なります。

1.234567	Single	1.234567
	Double	1.23456700000000
1.23456789012345	Single	1.234567
	Double	1.23456789012345
123.456789012345	Single	123.4567
	Double	123.456789012345

UNICODE化について

本製品では、V12より、多言語対応を目的として、UNICODE化がなされております。その一環として、全てのファイル入出力をUTF-8にて行う形式に、動作仕様が変更されました。以下の点にご注意ください。

- V12では、V11のプログラムが出力した全てのファイル群の入力に対応しております。
- V12のプログラムで出力されたファイル群は、原則として、V11以前の製品では使用できません。
- 本書における「文字数」もしくは文字列の「バイト数」という記述は、UTF-8ではASCII文字（半角英数記号）は1文字＝1バイト、それ以外は1文字＝2～4バイトを意味しております。

第1章 機能概要

(1) 連成解析の目的

SCRYU/Tetraは主に熱流体解析を目的として開発が行なわれています。これに対して世の中には熱流体解析以外を目的として開発が行なわれているソフトウェアがあります。**SCRYU/Tetra**とこれらのソフトウェアとを組み合わせることで、各々のソフトウェアの特徴を活かした、解析を行なうことが可能となります。

ここでは外部ソフトとして**Abaqus**を相手として、片方向、双方向のデータのやり取りを行ないながら解析を行ないます。主に流体側の速度、圧力、温度などの計算を**SCRYU/Tetra**が、固体側の変位、応力、接触、温度などの解析を**Abaqus**が担当することにより、流体-構造双方向連成解析を行なうことが可能になります。

(2) 必要な環境

Abaqusとの連成解析を行なうには、**SCRYU/Tetra**が実行できる環境に加え以下が必要です。

- **SCRYU/Tetra**の**SCRYU/Tetra I/F Option for Abaqus®ライセンス**があること
- **Abaqus 6.14-1**及びその修正版がインストールされて実行可能なこと
- **SCRYU/Tetra**との連成解析を行うには、**Abaqus 6.14-1**の他に別途ソルバートークンおよびcseライセンスが必要です。お近くのSIMULIAオフィスにお問い合わせください。

SCRYU/Tetraと**Abaqus**の連成解析はソフトウェアクレイドルが動作保障・サポートします。

(3) 連成解析手法

連成解析の手法としては、それぞれの物理場の方程式を独立に解く弱連成解析と、物理場の方程式を組み合わせることで全ての物理量を一度に解く強連成解析があります。**SCRYU/Tetra**と**Abaqus**の連成解析は、それぞれのソフトウェアそれぞれの担当の物理量を解く弱連成解析を行なっています。

SCRYU/Tetraと**Abaqus**の連成解析の時間進行法では2種類の手法の中から選択が可能です。まず、1つ目の方法はガウス-ザイデル法です。**SCRYU/Tetra**から送られてきたNサイクルの結果を元に、**Abaqus**がN+1サイクルを計算します。次にこの**Abaqus**のN+1サイクルの結果を参照して、**SCRYU/Tetra**がN+1サイクルを計算します。このように、同時に**SCRYU/Tetra**と**Abaqus**が同時に時間進行するのではなく、**Abaqus**が先に時間進行します。2つ目の方法は反復解法です。まずガウスザイデル法と同様に、**SCRYU/Tetra**から送られてきたNサイクルの結果を元に、**Abaqus**がN+1サイクルを計算します。次にこの**Abaqus**のN+1サイクルの結果を参照して、**SCRYU/Tetra**がN+1サイクルを計算します。このN+1サイクル目の結果を受けて、**Abaqus**がN+1サイクルの計算を行ないなおします。さらに**Abaqus**の計算しなおしたN+1サイクルの結果を参照して、**SCRYU/Tetra**がN+1サイクルを計算しなおします。これをお互いの物理量が収束するまで繰り返します。1サイクルの最大反復回数は20回に制限されています。

SCRYU/Tetraではメッシュの変形は、表面の移動量を**Abaqus**より決定される移動量と、メッシュが変形しないと指定した領域により算出します。メッシュの移動量よりメッシュ移動速度が決まり、メッシュ変形の影響はALE法を利用して考慮しています。

反復解法時には、**Abaqus**より決定される表面の移動量に緩和を掛けることが出来ます。これは流体抵抗が無いことに起因する過大な移動量予測に対して反応する流体の過大な圧力を抑制するために、メッシュの移動量を制限することになります。**SCRYU/Tetra**では表面の移動量への緩和の掛け方に2種類の手法を用意しています。1つ目の手法は、ガウスザイデル法です。ガウスザイデル法ではn+1サイクル目のk+1回目のメッシュ変形量を緩和するために、

$$d_{k+1}^{n+1} = \omega \tilde{d}_{k+1}^{n+1} + (1-\omega)d_k^{n+1}$$

d_k^{n+1} ; 一つ前の反復時のメッシュ変位量
 \tilde{d}_{k+1}^{n+1} ; 今回受け取った構造の変位量
 d_{k+1}^{n+1} ; 今回のメッシュ変位量
 ω ; 緩和係数(入力)

と緩和を掛けます。ここで緩和係数には定数値を与えます。2つ目の手法は直線探索法です。n+1サイクル目のk+1回目のメッシュ変形量を次のように求めます。

$$\tilde{r}_k^{n+1} = \tilde{d}_{k+1}^{n+1} - d_k^{n+1}$$

$$r_k^{n+1} = \alpha \tilde{r}_k^{n+1} + (1-\alpha)\tilde{r}_{k-1}^{n+1}$$

$$d_{k+1}^{n+1} = \alpha d_k^{n+1} + (1-\alpha)d_{k-1}^{n+1} + \beta r_k^{n+1}$$

d_{k-1}^{n+1} ; 二つ前の反復時のメッシュ変位量
 d_k^{n+1} ; 一つ前の反復時のメッシュ変位量
 \tilde{d}_{k+1}^{n+1} ; 今回受け取った構造の変位量
 \tilde{r}_k^{n+1} ; 今回の変位量の残差
 r_k^{n+1} ; 今回の変位量の残差を線形補間した残差ベクトル
 d_{k+1}^{n+1} ; 今回のメッシュ変位量
 α ; r_k^{n+1} を最小化する値(\tilde{r}_k^{n+1} , \tilde{r}_{k-1}^{n+1} より計算する)
 β ; 反復間で構造変位dの探索空間が同一直線上にならないようにするための係数(入力)

ここでは非直線パラメータで定数値を与えます。またk=1のときは、ガウスザイデル法を用いて変位量を予測します。

SCRYU/TetraとAbaqusの連成解析は非定常解析のみが可能であり定常解析は行なえません。

(4) ソフトウェア間での授受可能な物理量

SCRYU/TetraからAbaqusへ送信可能なデータは、圧力ベクトル、熱流束及び雰囲気温度になります。逆にSCRYU/TetraがAbaqusから受信可能なデータは変位、表面温度となります。また、データの授受可能な場所は固体表面または、解析領域外との境界になります。

(5) 連成解析の種類

主な連成解析のパターンは以下があります。

第一に、もっとも一般的なパターンとして、**SCRYU/Tetra**から圧力ベクトルを、**Abaqus**から変位を送信する、流体-構造双方向連成があります。これは、構造の変形が流れに与える影響が無視できないほど大きく、また構造の変形が主に流体力により影響を受ける場合に該当します。

第二に、**SCRYU/Tetra**から圧力ベクトルを送信するだけの、流体-構造一方向連成があります。これは、流体の圧力により構造は微小変形しか行なわれず、構造の変形が流れに影響を与えない場合です。流れの圧力により受ける力よりも強度が十分かを検討する場合が該当します。

第三に、**Abaqus**から変位を送信するだけの、流体-構造一方向連成があります。これは、流体が与える力が変形に対して無視できるような場合です。強制変位と接触などにより、物体が変形していく場合などが該当します。

以上は熱が関係無い連成解析の場合ですが、熱が関係した連成解析も行なえます。

SCRYU/Tetraで流体部分の熱を、**Abaqus**で固体部分の熱をそれぞれ解きます。授受する物理量としては、**SCRYU/Tetra**が熱流束を、**Abaqus**が固体表面温度をそれぞれ送信します。オプションとして**SCRYU/Tetra**から雰囲気温度を送信することも可能です。これらの結果による熱応力を**Abaqus**で求めます。非定常の除熱状態の熱応力の解析などが該当します。

(6) 連成解析の設定

SCRYU/Tetraでは、**Abaqus**との連成解析を以下の手法を採用しています。

- ・ 解析の時間間隔を**SCRYU/Tetra**が制御を行います。
- ・ 連成解析手法は**GAUSS-SEIDEL**を採用しています。
- ・ 解析は**Abaqus**が先行し**SCRYU/Tetra**が追従します。
- ・ `codeName`及び`component name`は"SC-Tetra"となります。

この設定に合う様に、**Abaqus**の入力ファイル(SIMULIA Co-Simulation Engine configuration file)を作成する必要があります。

また**SCRYU/Tetra**側の`timeIncrementation`の`lockstep`には`true`を指定します。`connector`の`variables`で指定する受け渡し変数は解析の内容によって変わります。解析の内容に矛盾しないように指定します。連成解析手法として反復解法を採用する際には、`execution`の`modelOfComputation`, `continuousTime`にて`iterativeCoupling`を追加します。

また、**SCRYU/Tetra**のデフォルトの接続先ホストとポート番号は、
接続先ホストとポート番号localhost:59010
となっています。

詳しくは**Abaqus**のマニュアルである**Abaqus Documentation**をご参照ください。

注意事項

- ・ 接触問題を解析するときには、接触の状態が変わる瞬間に解析が不安定になり解けないことがあります。
- ・ 流体と固体の密度比が小さい場合には解析が不安定になり解けないことがあります。反復解法を使用することで、解析が可能になることがあります。
- ・ 熱解析においては時間刻みが大きいと温度の振動が生じることがあります。
- ・ **SCRYU/Tetra**と**Abaqus**のデータの授受の際には、座標系・単位系の変換は行ないませんので、両者の解析において、座標系・単位系を一致させる必要があります。

第2章 リファレンス(プリ)編

[解析条件] - [条件ウィザード] - [連成解析]

機能 連成解析の条件を設定します。

操作



Abaqusとの連成解析を行う場合は、[Abaqusとの連成解析を行う]をチェックし、[データの受け渡しを行う領域]を選びます。

注意事項

[条件ウィザード] - [解析選択]に[連成解析]の項目がない場合、次の設定を行う必要があります。

1. メニューバーの[オプション] - [プログラムの詳細設定]を選択し、[プログラムの詳細設定]ダイアログを開きます。
2. 左のツリーの[プログラムの動作] - [条件ウィザード]を選択します。
3. 下部の[連成解析に関する項目を表示する]をONにします。
4. OKをクリックしてダイアログを閉じます。
5. SCTpreを再起動します。

[時間]

The screenshot shows a software window with three tabs: '時間' (Time), 'データの引き渡し' (Data Transfer), and 'データの受け取り' (Data Reception). The '時間' tab is active. Inside this tab, there is a section titled '解析時間' (Analysis Time). Below this title, there are three input fields with labels: '開始時間' (Start Time) with a value of '0', '終了時間' (End Time) with a value of '1', and 'オフセット時間' (Offset Time) with a value of '0'. Each input field has a unit selector on the right, currently set to 's' (seconds).

[開始時間], [終了時間], [オフセット時間]を指定します。

[データの引き渡し]

時間	データの引き渡し	データの受け取り
データを相手のソルバーに渡すかどうかを指定します。		
圧力		
<input type="radio"/> 渡さない		
<input checked="" type="radio"/> 渡す		
熱流束		
<input checked="" type="radio"/> 渡さない		
<input type="radio"/> 渡す		
雰囲気温度		
<input checked="" type="radio"/> 渡さない		
<input type="radio"/> 渡す		

[圧力], [熱流束], [雰囲気温度]のデータを相手のソルバーに渡すかどうかを指定します。

[データの受け取り]

時間 | データの引き渡し | データの受け取り

データを相手のソルバーから受け取るかどうかを指定します。

壁面温度

☒ 受け取らない
☐ 受け取る

変位

☐ 受け取らない
☒ 受け取る

メッシュ変形が行われる領域

☐ heater1
☐ heater2

メッシュ変形時固定する領域

☐ inlet
☐ outlet
☐ symm_plane
☐ walls
☐ wall_heater1
☐ wall_heater2

[壁面温度]と[変位]のデータを相手のソルバーから受け取るかどうかを指定します。

[変位]のデータを受け取る場合には、[メッシュ変形が行われる領域]と[メッシュ変形時固定する領域]を指定します。

領域の登録

領域の登録をクリックすると、[モデルの閉空間・領域]ダイアログが現れます。このダイアログで領域を登録してください。

詳細設定

詳細設定をクリックすると、[規定値]ダイアログが現れます。

規定値

連成解析の様々な規定値を設定します。

Abaqusとの連成の手法

☒ ガウスサイデル法
☐ 反復解法

メッシュ変形

動いていないとみなす距離の閾値

☐ 数値で指定
☒ モデルサイズに対する比で指定

X 1e-006
Y 1e-006
Z 1e-006

メッシュ要素の変形しやすさ 2

☐ メッシュ移動で回転を考慮する
☒ 現在のメッシュからの差分を求める

反復解法時のメッシュ移動量への緩和法

☐ ガウスサイデル法
☒ 直線探索法

緩和係数 0.5
非直線パラメータ 0.3

マトリクス解法

種類

☐ MILUCG-STAB法
☐ AMG法
☒ AMGCG-STAB法

最大収束回数 100
収束打ち切り相対誤差 0.0001

圧力

基準圧力 0 Pa
初期圧力
☒ 基準圧力
☐ リスタートファイルまたは初期条件の内容

壁面温度

熱流束を渡して壁面温度を受け取らない際に使用される壁面温度 0 °C

詳細設定

Abaqus接続先のホスト名とポート番号
localhost:59010

OK キャンセル

[Abaqusとの連成の手法]

Abaqusとの連成手法を[ガウスザイデル法]または[反復解法]から選びます。

[メッシュ変形]

[動いていないとみなす距離の閾値]を指定します。指定方法を[数値で指定]または[モデルサイズに対する比で指定]から選び、[X], [Y], [Z]に値を入力します。

[メッシュ要素の変形しやすさ]を指定します。この値が0の場合、メッシュ要素は均等に変形します。この値が大きいほど、メッシュサイズが小さいと変形しにくく、大きいと変形しやすくなります。

[メッシュ移動で回転を考慮する]をチェックすると、メッシュ移動の際に回転が考慮されます。

[現在のメッシュからの差分を求める]をチェックすると、メッシュ移動の際に現在のメッシュからの差分が求められます。

[反復解法時のメッシュ移動量への緩和法]を[ガウスザイデル法]または[直線探索法]から選びます。

[ガウスザイデル法]では[緩和係数]を、[直線探索法]では[緩和係数]と[非直線パラメータ]を入力します。

[マトリックス解法]

[種類]を[MILUCG-STAB法], [AMG法], [AMGCG-STAB法]から選択します。

[最大収束回数]と[収束打ち切り相対誤差]を入力します。

[圧力]

[基準圧力]を入力します。

[初期圧力]を[基準圧力を初期圧力とする]または[リスタートファイルまたは初期条件の内容を初期圧力とする]から選びます。

[壁面温度]

[熱流束を渡して壁面温度を受け取らない際に使用される壁面温度]を入力します。

[詳細設定]

[Abaqus接続先のホスト名とポート番号]を入力します。

参照

CSIMコマンド
CSMDコマンド

第3章 リファレンス(ソルバー)編

3.1 コマンドデータ

CSIMコマンド

目的

連成解析を行なう。

入力形式

```

◆ CSIM
◇ TYPE
  * TYPE=1 のとき
  ◇ SWP, SWD, SWTW, SWHF, SWTA
  ◇ STIM, ETIM, OFST
  [
    ◇ MAPR
      [/まで繰り返す]
      * SWD>0 のとき
      [
        ◇ MOVR
          [/まで繰り返す]
        [
          ◇ FIXR
            [/まで繰り返す]
          ]
        ]
      ]
  ]

```

入力変数の意味

TYPE	:	連成解析を行う相手のソルバー -1のとき連成解析を行なわない 1のとき Abaqus
SWP	:	圧力を相手のソルバーへ渡すかどうか 0のとき渡さない 2のとき圧力の向きと大きさを渡す
SWD	:	変位を相手のソルバーから受け取るかどうか 0のとき変位を受け取らない 1のとき変位を受け取る
SWTW	:	壁面温度を相手のソルバーから受け取るかどうか 0のとき壁面温度を受け取らない 1のとき壁面温度を受け取る
SWHF	:	熱流束を相手のソルバーへ渡すかどうか 0のとき熱流束を渡さない 1のとき熱流束を渡す
SWTA	:	雰囲気温度を相手のソルバーへ渡すかどうか 0のとき雰囲気温度を渡さない 1のとき雰囲気温度を渡す
STIM	:	連成解析開始時間
ETIM	:	連成終了時間
OFST	:	オフセット時間 STIM<現在時間-OFST となったとき連成が開始する。
MAPR	:	連成解析でデータの受け渡しを行う領域
MOVR	:	メッシュ変形が行われる領域
FIXR	:	メッシュ変形時固定する領域

デフォルト

連成解析を行なわない。(TYPE=-1)

注意事項

- **Abaqus**の入力ファイル(SIMULIA Co-Simulation Engine configuration file)で
 - 解析の時間間隔を**SCRYU/Tetra**が制御
 - 連成解析手法は**GAUSS-SEIDEL**
 - 解析はAbaqusが先行し**SCRYU/Tetra**が追随
 - **codeName**及び**component name**は**"SC-Tetra"**となるように設定する必要がある。
- **Abaqus**の*CO-SIMULATION REGIONでは圧力に関してCFを指定する。
- 定常解析では行えない。

CSMDコマンド

目的

連成解析の様々な規定値の変更を行う。

入力形式

◆ CSMD
 [◇ ITEM, VAL
 [/まで繰り返す]

入力変数の意味

ITEM : 変更する項目名。以下の項目名から選択する。
 VAL : 新たに設定する値。

項目名	初期値	意味
メッシュ変形関連用設定		
TREX	-1×10^{-6}	X方向の動いていないとみなす距離の閾値 正のとき TREX 負のとき X方向モデルサイズ \times TREX
TREY	-1×10^{-6}	Y方向の動いていないとみなす距離の閾値 正のとき TREY 負のとき Y方向モデルサイズ \times TREY
TREZ	-1×10^{-6}	Z方向の動いていないとみなす距離の閾値 正のとき TREZ 負のとき Z方向モデルサイズ \times TREZ
METH	4	メッシュ移動の方法 1のとき 回転を考慮する 2のとき 回転を考慮しない 3のとき 回転を考慮して、現在のメッシュからの差分を求める。 4のとき 回転を考慮せず、現在のメッシュからの差分を求める。
FOMO	2	変形時のメッシュ要素の変形しやすさ 0で均等に変形する。 この値が大きいくほどメッシュサイズが小さいと変形しにくく、大きいと変形しやすい。
LPMT	2	反復解法時のメッシュ移動量への緩和の掛け方 1のとき ガウスザイデル法 2のとき 直線探索法
OMGA	0.5	ガウスザイデル法の緩和係数
BETA	0.3	直線探索法の非直線パラメータ
連成解析時に使用するマトリクス用設定		
CMSW	8	マトリクスを解く際に使用する解法の選択 SOLVコマンド参照
MITR	100	マトリクスを解く際の最大反復数
EPSS	10^{-4}	マトリクスを解く際の収束判定値
連成解析圧力の設定		
POFS	0	基準圧力 圧力+POFSが連成先のソルバーへ渡される。
INPV	0	初期圧力の設定 0のとき 基準圧力 1のとき リスタートファイルまたは初期条件の内容

項目名	初期値	意味
連成解析温度の設定		
TOUT	0	熱流束を渡して壁面温度を受け取らない際に使用される壁面温度
Abaqus用詳細設定		
RMCN	"localhost:59010"	Abaqus接続先のホスト名とポート番号
SCHM	1	Abaqusとの連成の手法の指定 1のとき ガウスザイデル法 4のとき 反復解法

デフォルト

上記の初期値

第4章 操作例題

4章をお読みになるまえに

1. 本書が対応しているソフトウェアのバージョン

- **SCRYU/Tetra V12**
- **Abaqus 6.14-1**

リリースにより、本書とは計算時間, 終了サイクル, 結果などが異なることがあります。また、本書の計算は倍精度版で行っています。

- ### 2. 本書で使用するサンプルデータの利用方法については、ユーザーズガイドリファレンス(ツール)編 第1部 アプリケーション起動ツール 1.5.2 ユーザーフォルダ・ユーザーデータの設定をご参照ください。
- ### 3. 本書は、"ユーザーズガイド操作編" に記載されている基本操作を既に習得している読者を対象としています。そのため、一部の基本的な操作については説明を省略しています。
- ### 4. [連成解析]を表示するための設定が必要です。詳細は、第2章 リファレンス(プリ)編 [解析条件] - [条件ウィザード] - [連成解析]をご参照ください。

機能説明

- 流体解析を**SCRYU/Tetra**が、構造解析を**Abaqus**が行ない、流体と構造の相互作用を考慮した解析を行ないます。
- 双方向連成だけでなく、一方向連成も可能です。

注意事項

- **SCRYU/Tetra**のSCRYU/Tetra I/F Option for Abaqus®**ライセンス**が必要です。
- **Abaqus 6.14-1**及びその修正版がインストールされて実行可能なことが必要です。
- **SCRYU/Tetra**との連成解析を行うには、**Abaqus 6.14-1**の他に別途ソルバートークンおよびcseライセンスが必要です。お近くのSIMULIAオフィスにお問い合わせください。
- **SCRYU/Tetra**と**Abaqus**で座標系・単位系を一致させる必要があります。
- 接触問題では解析が不安定になることがあります。
- 流体と固体の密度比が小さい場合、反復解法を使用することで、解析が可能になることがあります。
- 熱解析においては時間刻みが大きいと温度の振動が生じる場合があります。

結果として出力されるもの

- 図化ファイル

- [CSIM DISP (DSDI)] : メッシュ変形量ベクトル

- 計算時メッセージ

- メッシュ変形のマトリクス情報が出力されます。
- **Abaqus**との接続状況や警告・エラーが出力されます。

関連コマンド

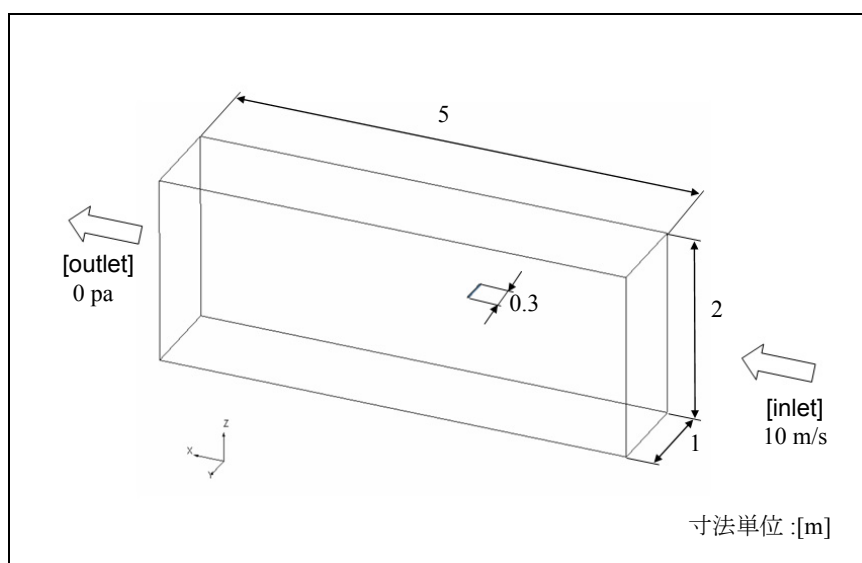
- CSIM : 連成解析の設定
- CSMD : 連成解析のデフォルト設定

4.1 操作例題1 翼表面の圧力変化による流体構造連成

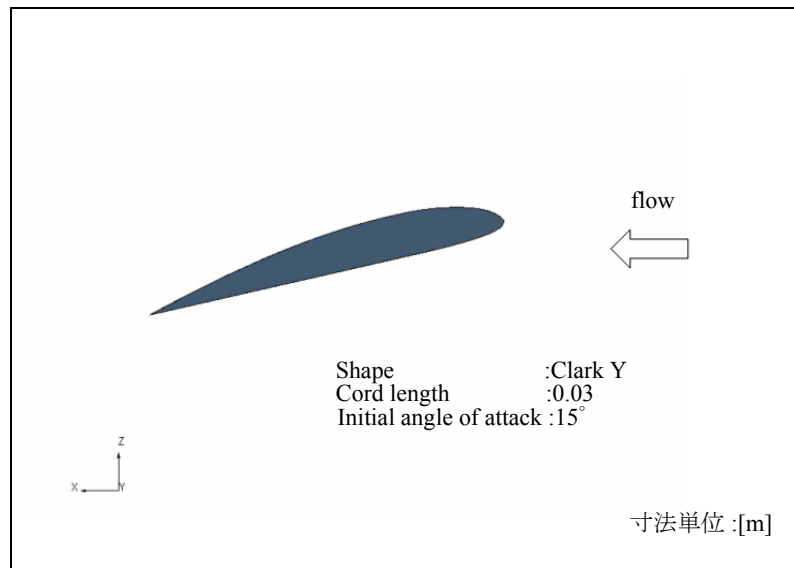
翼表面の圧力変化によって生じる翼のフラッターを解析します。

解析モデル

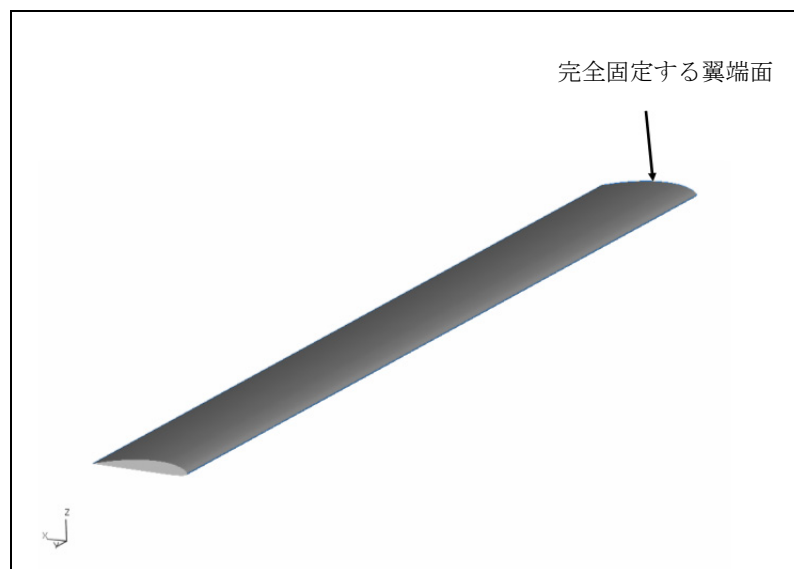
- 解析モデル(全体図)



- 解析モデル(拡大図)



- 解析モデル(構造解析)



3次元非圧縮性乱流

壁に長さ0.3 [m], 弦長約0.03 [m]の翼型の一端を固定し流れを当てます。翼型は流れに対して15度の迎角を持って固定されます。

解くべき方程式

- 運動量保存式
- 質量保存式(圧力補正式)
- k- ω 方程式

解析選択

- 流れ(乱流) : 乱流解析を行います。
- 連成解析 : 流体構造連成解析を行います。

解析条件

- 物性値

- MAT=1 : 空気(20℃)
物性値ライブラリより[流体(非圧縮性)] - [空気(非圧縮20℃)]を使用します。

- 境界条件

- 流入口 [inlet] : 流速規定 10 [m/s]
流入乱流量 k 0.0001 [m²/s²]
ε 0.0001 [m²/s³]
- 流出口 [outlet] : 表面圧力規定 0.0 [Pa]
- 壁面 [wall] : 静止壁
- [wing_surf] : メッシュの速度を壁面の速度とする

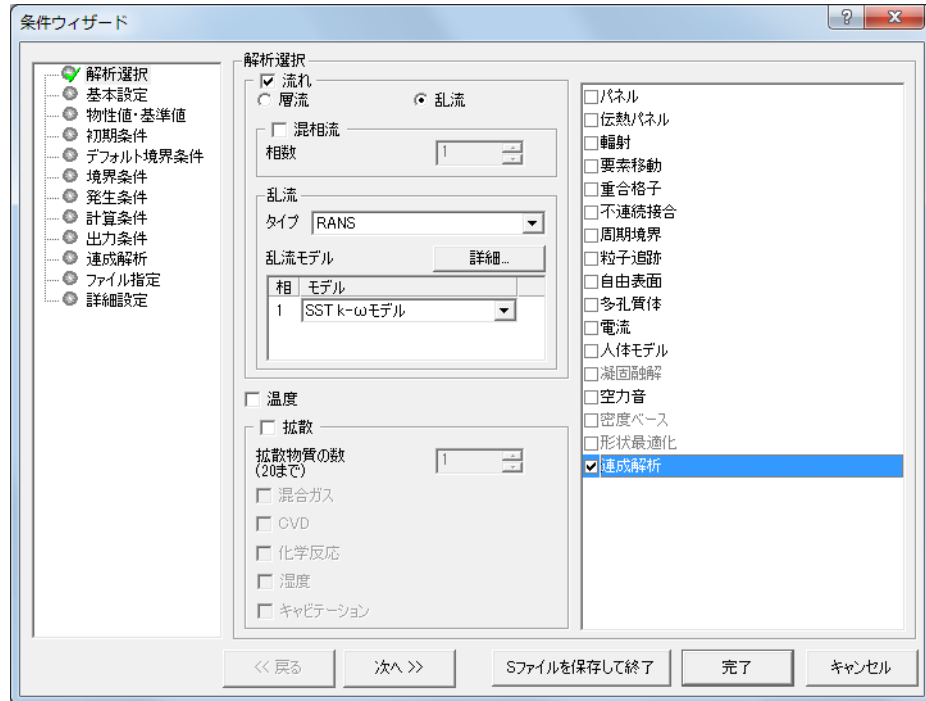
- その他

- 解析の種類
非定常解析
- 計算サイクルおよび時間間隔
計算サイクル : 2,020[サイクル]
固定時間間隔 : 5×10^{-4} [s]
- 乱流モデル
SST k- ω モデル
- 連成解析の設定
データの受け渡しを行う領域 [wing_surf]
解析時間
開始時間 0 [s]
終了時間 1 [s]
オフセット時間 0.01 [s]
データの引き渡し
圧力 : 渡す
データの受け取り
変位 : 受け取る
メッシュ変形が行われる領域 [deform]
メッシュ変形時固定する領域 [wall], [inlet], [outlet]
- 出力条件
圧力 : [wing_surf]
- 図化ファイル
出力タイミング : 指定サイクル毎に出力(サイクル間隔 10[サイクル])

特記事項

- 連成解析を行うための設定

- ・ [条件ウィザード] - [解析選択]の[連成解析]をONにします。

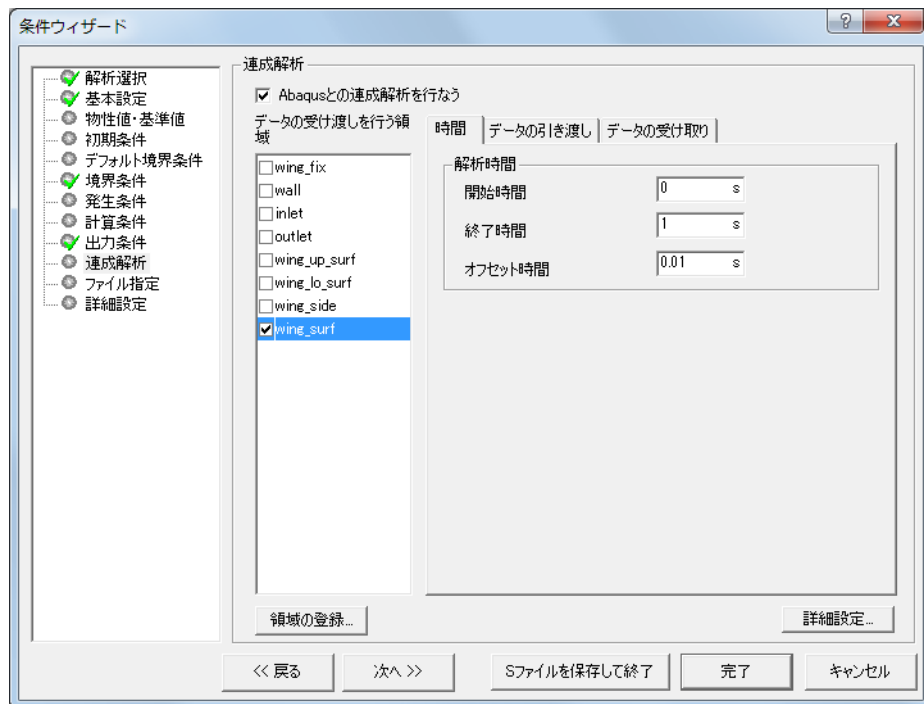


注意事項

[条件ウィザード] - [解析選択]にて[連成解析]の項目がない場合、次の設定を行う必要があります。メニューの[オプション] - [プログラムの詳細設定]を選択します。[プログラムの詳細設定]ダイアログの[プログラムの動作] - [条件ウィザード]にて、[連成解析に関する項目を表示する*]をONにする必要があります。次回起動時からは、[条件ウィザード] - [解析選択]に[連成解析]の項目が追加されます。

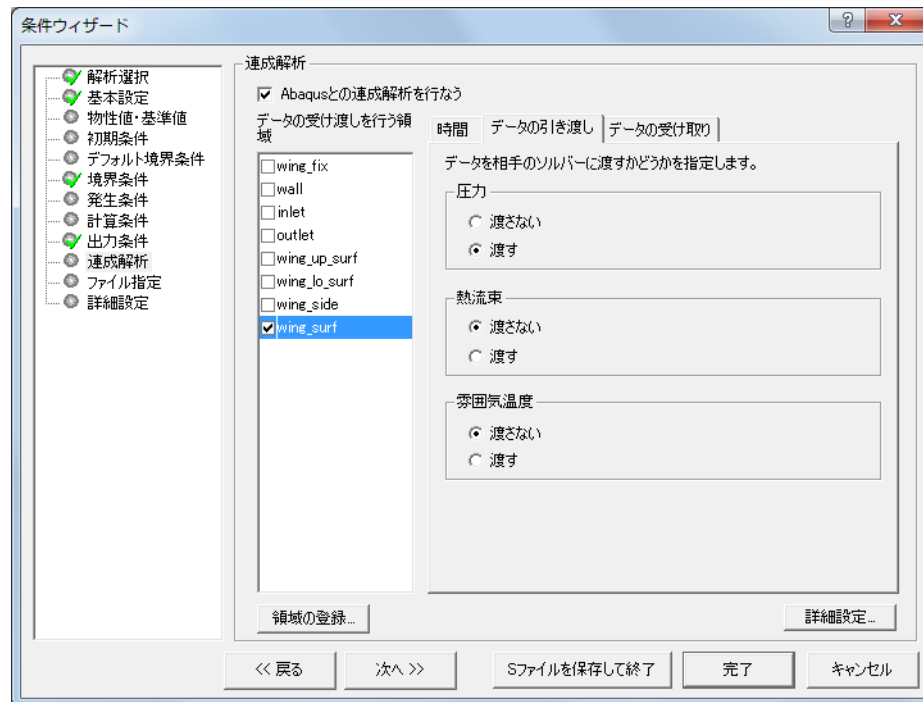
- 連成解析の設定(SCTpre)

- [条件ウィザード] - [連成解析]にて、[Abaqusとの連成解析を行なう]をONにします。[データの受け渡しを行なう領域]で[wing_surf]をONにします。
- [時間]タブにて、連成解析の解析時間の設定を行ないます。[解析時間]の[開始時間]に[0 s]、[終了時間]に[1 s]、[オフセット時間]に[0.01 s]と入力します。



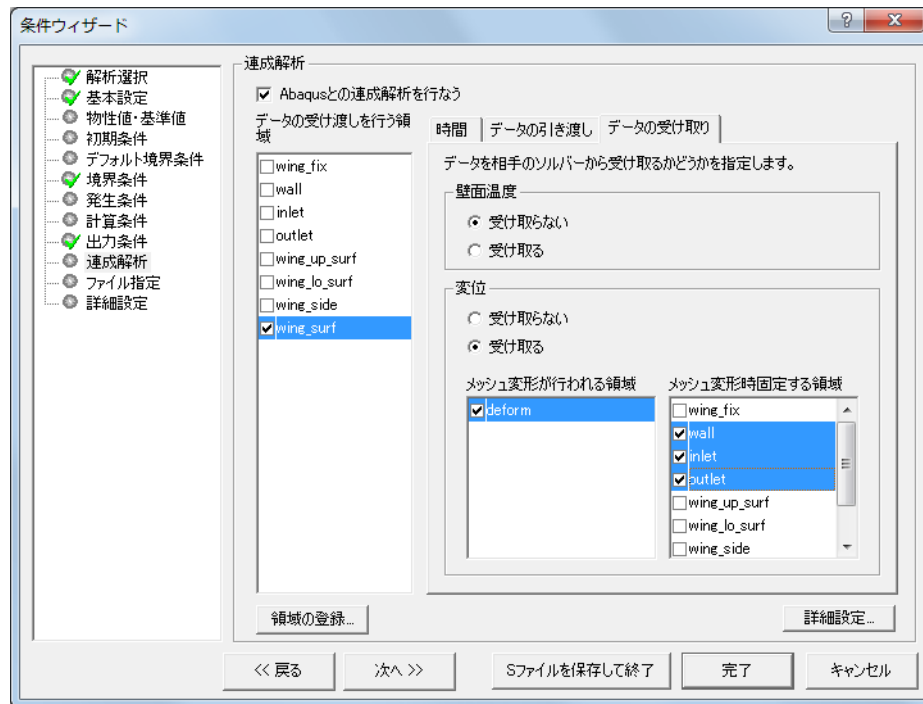
(メモ) [オフセット時間]が[0.01 s]であるため、最初の[0.01 s]は連成解析を行わず流体解析のみが行なわれます。

- [データの引き渡し]タブにて、**SCRYU/Tetra**から**Abaqus**へと引き渡す変数の設定を行います。
[圧力]にて、[渡す]を選択します。



- 次に[データの受け取り]タブにて、**Abaqus**から**SCRYU/Tetra**が受け取る変数の設定を行います。**[変位]**にて、**[受け取る]**を選択します。このとき、メッシュ変形の制御を行う領域の設定を以下のように設定します。

[メッシュ変形が行われる領域]
[deform] : ON
[メッシュ変形時固定する領域]
[wall], [inlet], [outlet] : ON



- 詳細設定をクリックします。[規定値]ダイアログの[動いていないとみなす距離の閾値]の[X], [Y], [Z]に[0]を入力します。

- 連成解析の条件と設定(Abaqus)

- 流体解析と構造解析でモデル位置と単位系を合わせる必要があります。
- 物性値条件として、密度 $1380.0[\text{kg/m}^3]$, ヤング率 $2.0 \times 10^9 [\text{Pa}]$, ポアソン比 0.4 を与えます。
- 本モデルでは、Y座標の最小値側の翼端に、完全固定条件を与えます。また、連成解析のための領域として、残りの面を[Surf-deform]として登録します。
- 連成解析の条件として、**Abaqus**の*CO-SIMULATIONコマンド,*CO-SIMULATION REGIONコマンドを設定します。
- **Co-Simulation Engine**の設定ファイル(XMLファイル)に、**SCRYU/Tetra**と**Abaqus**の設定条件を指定します。

<components>にて、以下のように指定します。

```
<components>
  <component name="Abaqus">
    <bottomUpImplementation>
      <codeName>Abaqus/Standard</codeName>
```

<componentInstances>にて、以下のように指定します。

```
<componentInstances>
  <componentInstance name="Abaqus">
    <component>Abaqus</component>
    <timeIncrementation>
      <lockstep>true</lockstep>

  <componentInstance name="SC-Tetra">
    <component>SC-Tetra</component>
    <timeIncrementation>
      <lockstep>true</lockstep>
```

<connectors>にて、以下のように指定します。

```
<connectors>
  <connector name="Abaqus_to_SC-Tetra_INPUT">
    <componentInstance>SC-Tetra</componentInstance>
    <variables>
      <input>
        <variable>displacement</variable>

  <connector name="Abaqus_to_SC-Tetra_OUTPUT">
    <componentInstance>Abaqus</componentInstance>
    <variables>
      <output>
        <variable>displacement</variable>

  <connector name="SC-Tetra_to_Abaqus_INPUT">
    <componentInstance>Abaqus</componentInstance>
    <variables>
      <input>
        <variable>force</variable>

  <connector name="SC-Tetra_to_Abaqus_OUTPUT">
    <componentInstance>SC-Tetra</componentInstance>
    <variables>
      <output>
```

```
<variable>traction_vector</variable>
```

<execution>にて、以下のように指定します。

```
<execution>
  <compositeActors>
    <compositeActor name="twoCodeContinuousTime">
      <actors>
        <atomicActor>Abaqus</atomicActor>
        <atomicActor>SC-Tetra</atomicActor>
      </actors>
      <modelOfComputation>
        <continuousTime>
          <algorithm>GAUSS-SEIDEL</algorithm>
          <negotiationMethod>MASTER</negotiationMethod>
          <masterActor>SC-Tetra</masterActor>
        </continuousTime>
      </modelOfComputation>
    </compositeActor>
  </compositeActors>

  <scenario>
    <duration>1.0</duration>
```

- 連成解析の実行方法

- **SCRYU/Tetra**と**Abaqus**の両方を同じコンピュータにて実行する必要があります。**SCRYU/Tetra**は通常の解析通り実行します。**Abaqus**では**Abaqus Command**にて、ジョブの実行とCo-Simulation Engineの実行を行います。まず、ジョブの実行を次のように行います。

1) ジョブの実行

```
abq6141 -job Abaqus -input exA01_Abaqus_fsi.inp -csedirector localhost:59010
```

として**-csedirector**に**localhost:59010**を指定して実行します。

なお、この例では**Abaqus**の実行ファイルとして、**exA01_Abaqus_fsi.inp**を指定しています。ファイル名**"exA01_Abaqus_fsi"**は適宜変更してください。

2) Co-Simulation Engineの実行

```
abq6141 cse -config exA01_Abaqus_fsi_config.xml -listenerport 59010
```

として、**-listenerport**に**59010**を指定して実行します。

(メモ) Windows、Unix/Linux共に、**Abaqus**は上記のコマンドで実行することができます。

解析手順

- モデル

SCTpreを起動して、[ファイル] - [開く]よりexA01_Abaqus_fsi.mdlを読み込みます。

- 条件設定

[条件ウィザード]で以下の設定を行い、Sファイルを保存します。

1. [解析選択]
 - [乱流モデル]にて、[SST k- ω モデル]を選択します。
 - [解析選択]の詳細は、特記事項 連成解析を行うための設定を参照してください。
2. [基本設定]
 - [解析方法]で[非定常解析]を選択し、[終了サイクル]を[2020]とします。
 - [時間間隔の設定]で[数値入力による]を選択し、[時間間隔]に[0.0005 s]を入力します。
3. [物性値・基準値]
 - MAT[1]は、デフォルトの[空気(非圧縮20°C)]を使用します。
4. [境界条件]
 - [領域]から[inlet]を選択し、流速規定をクリックします。[流速規定]ダイアログにて、[境界面に垂直な流速を指定]が選択されていることを確認し、以下のように設定します。

[流入流速]	:	[10 m/s]
[流入乱流量]	:	ON
[k]	:	[0.0001 m2/s2]
[ϵ]	:	[0.0001 m2/s3]
 - [領域]から[outlet]を選択し、表面圧力規定をクリックします。[表面圧力規定]ダイアログにて、[圧力指定]の[P]に[0 Pa]が設定されていることを確認して、OKをクリックします。
 - [領域]から[wall]を選択し、壁面をクリックします。[壁面]ダイアログにて、[フリースリップ壁]をOFFにして、OKをクリックします。
 - [領域]から[wing_surf]を選択し、壁面をクリックします。[壁面]ダイアログにて、[フリースリップ壁]をOFFにします。[壁面の速度]として、[メッシュの速度を壁面の速度とする]を選択し、OKをクリックします。
5. [出力条件]
 - [圧力]にて、[指定サイクル毎に出力]を選択し、[サイクル間隔]に[1]を入力します。[登録領域一覧(面の領域)]リストから、[wing_surf]を選択し、追加をクリックします。次に、小計をクリックします。[出力する領域群]リストに、[wing_surf], [-- 小計 --]が記載されます。
 - [FLD(サイクル)]にて、[出力のタイミング]として[指定サイクル毎に出力]を選択します。[サイクル間隔]に[10]を入力します。
6. [連成解析]
 - 特記事項 連成解析の設定(SCTpre)を参照してください。
7. [ファイル指定]
 - [デフォルト名]をONにして、[exA01_Abaqus_fsi]と入力します。

(メモ) Abaqusの設定については、特記事項 連成解析の条件と設定(Abaqus)を参考にしてください。

- 八分木

[ファイル]-[開く]よりexA01_Abaqus_fsi.octを読み込みます。

- メッシュ生成

[連続実行]ダイアログにて以下の設定を行い、メッシュを作成します。

- [境界層要素挿入パラメータ]ダイアログにて、以下の設定を行います。[厚みをオクタントサイズから自動で求める]はONにして設定します。

[領域名]	[1層目の厚さ]	[厚みの変化率]	[層数]
[wing_surf] [wall]	自動	[1.1]	[3]

- [境界層要素挿入パラメータ]ダイアログで詳細設定をクリックします。[詳細設定]ダイアログの[要素の質]タブにて、[低品質な要素の挿入する境界層の層数を減らす]をONにし、[その他]タブにて[先入れ(境界層要素挿入→体積メッシュ作成)]をONにします。
- [角度]タブにて以下の設定を行います。

[逆くさび形状判定角度(モデル非選択辺)]	:	[360]
[逆くさび形状判定角度(モデル選択辺)]	:	[360]

- 解析実行

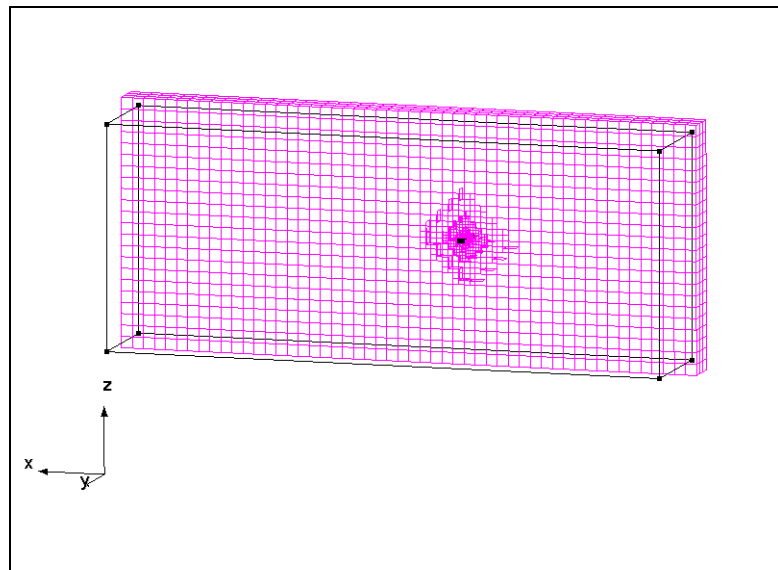
SCTsolverとAbaqusで解析を実行します。実行方法については、特記事項 連成解析の実行方法を参照してください。

- 計算コストの目安

- SCTsolverとAbaqusの実行時間
約12時間37分11秒
- 計算サイクル数
2,020サイクル
- * SCTsolver:2core, Abaqus:1core 使用時 (Intel Xeon X5680 3.33GHz)

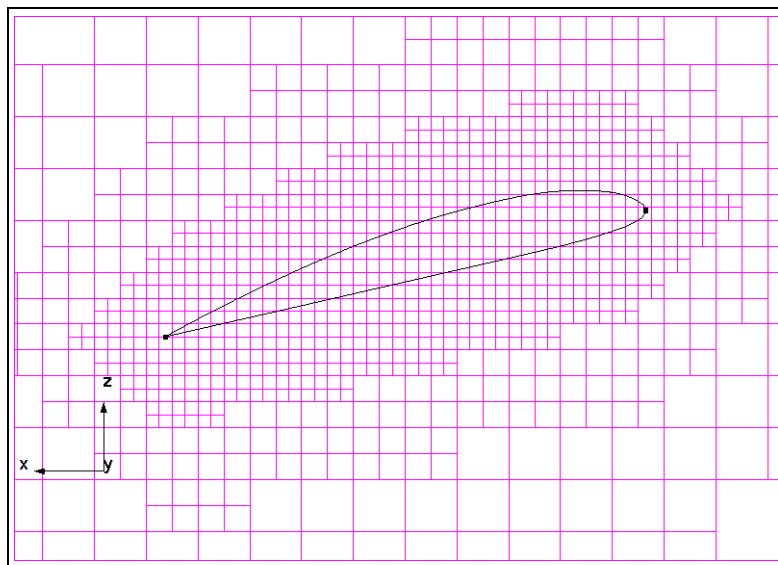
解析メッシュ

- 八分木図

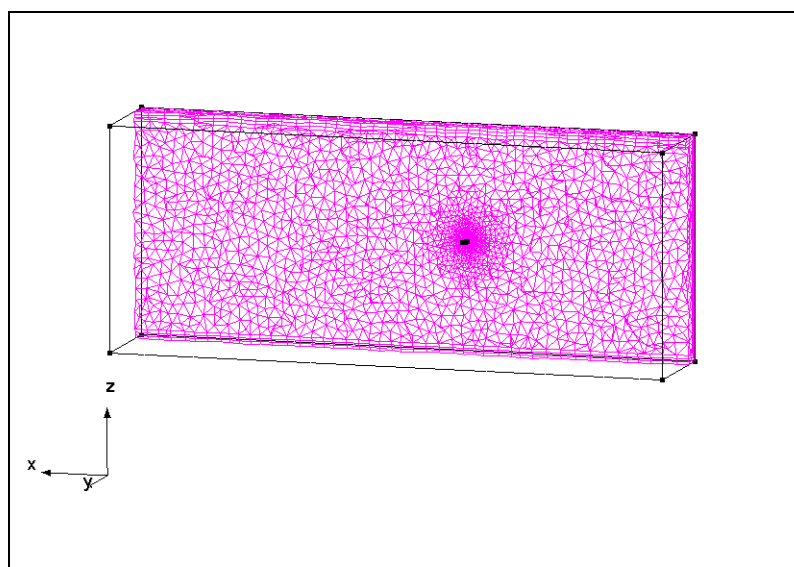


オクタントサイズ : 0.00078125[m]~0.1[m]

- 八分木図(拡大図)

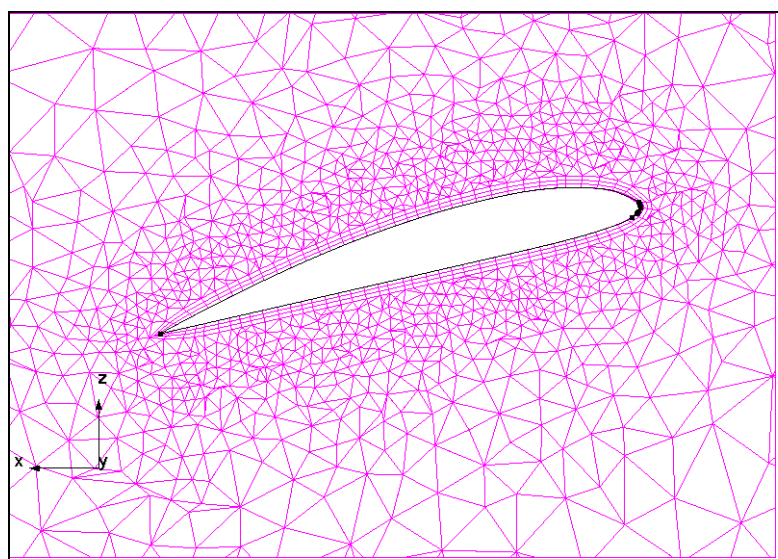


- メッシュ図



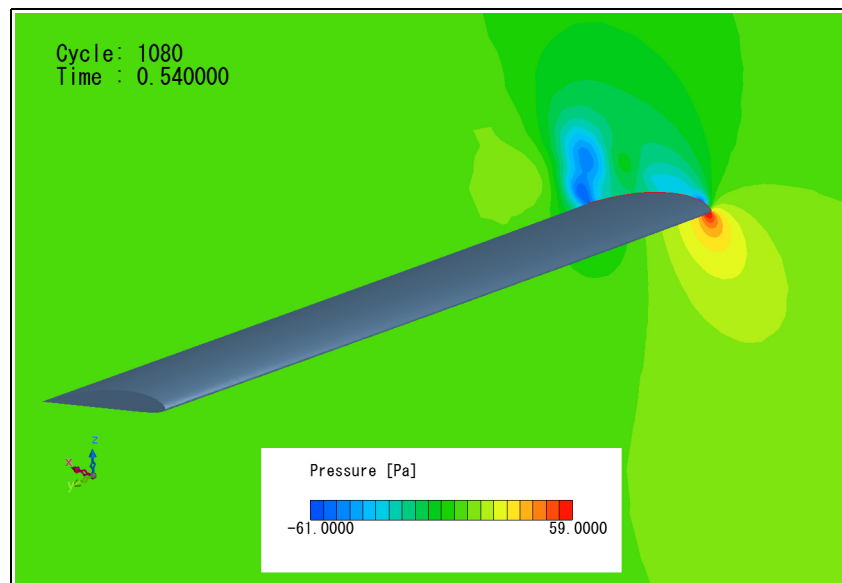
要素数 : 1,936,882

- メッシュ図(拡大図)

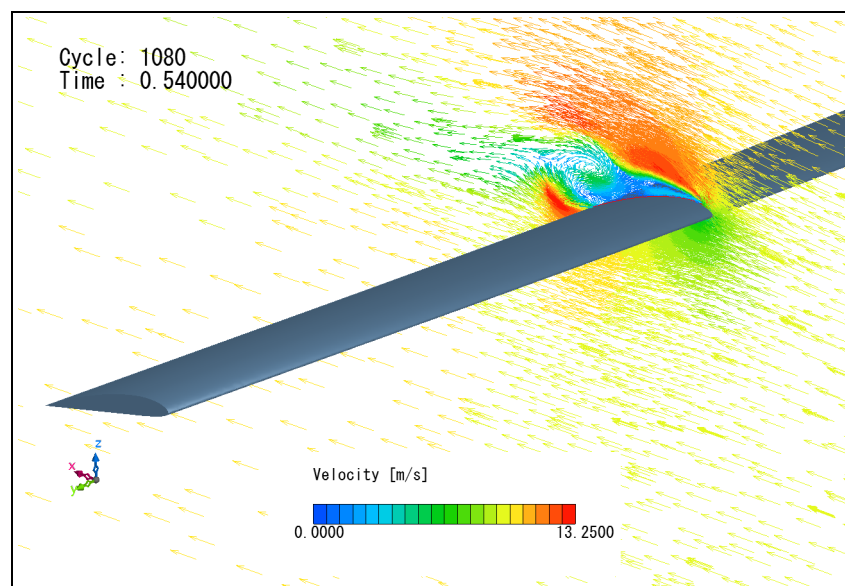


解析結果

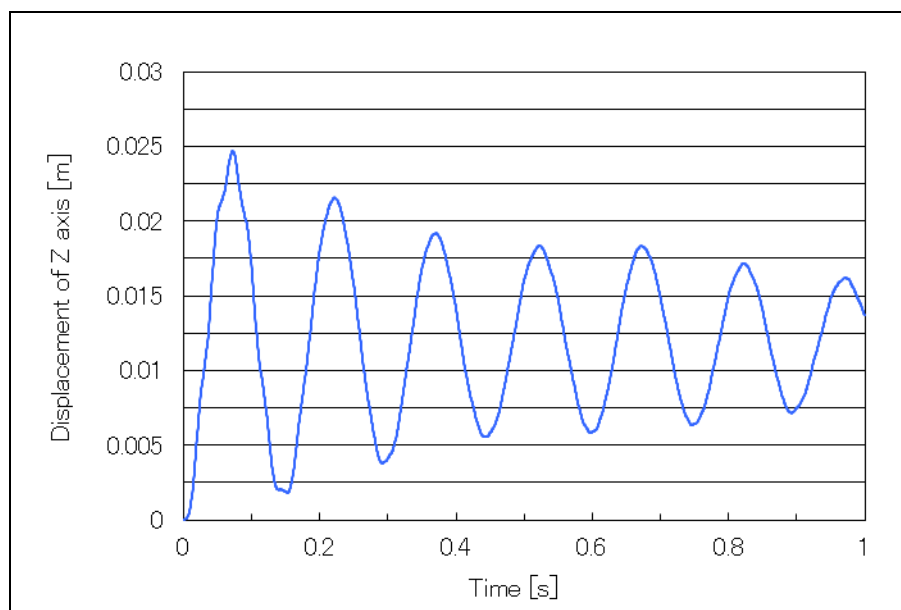
- 圧力コンター図(Time=0.54 [s])



- 流速ベクトル図(Time=0.54 [s])



- 先端の変位グラフ

**注意事項**

先端の変位グラフは、**Abaqus**の結果を使用しています。

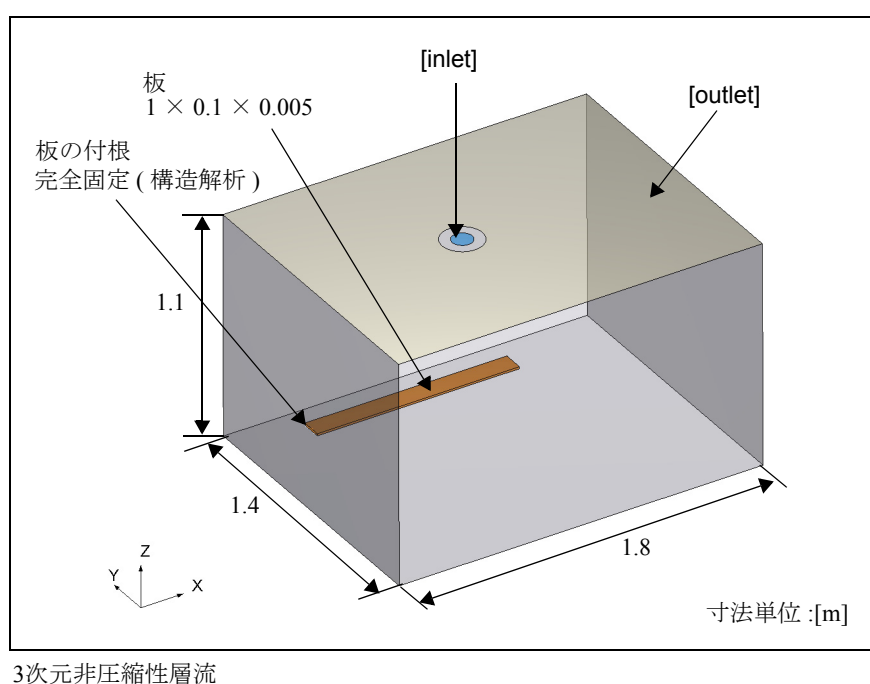
時間は流体解析の時間から、連成解析開始時までのオフセットを引いた時間です。

4.2 操作例題2 VOF法を使用した板の変形解析

VOF法を使用して水が落下したときの板の変形およびその時の水の挙動を解析によって確認します。本例題では板が大きく変形しますので重合格子を用います。これにより、従属領域のみのメッシュを変形させることになりますので、要素の形状を極端に変化させることなく解析を進めることができます。

解析モデル

- ・ 解析モデル(全体図)



解くべき方程式

- ・ 運動量保存式
- ・ 質量保存式(圧力補正式)
- ・ 体積率の移流方程式(VOF)

解析選択

- ・ 流れ(層流) : 層流解析を行います。
- ・ 重合格子 : 板が変形するため板の周りを従属領域として計算します。
- ・ 自由表面 : 2相流の気液界面解析のため、VOF法を用います。
- ・ 連成解析 : 流体構造連成解析を行います。

解析条件

- 基本設定

- 重力 : 考慮する(Z方向 : $-9.8[\text{m/s}^2]$)

- 物性値

- MAT=1 : 水(20℃)
物性値ライブラリより[流体(非圧縮性)] - [水(非圧縮20℃)]を使用します。
- MAT=2 : 銅(Cu)
物性値ライブラリより[純金属] - [銅(Cu)]を使用します。
- MAT=3 : 空気(20℃)
物性値ライブラリより[流体(非圧縮性)] - [空気(非圧縮20℃)]を使用します。

- 境界条件

- 流入口 [inlet] : 流速規定 テーブル入力
- 流出口 [outlet] : 表面圧力規定 0.0 [Pa]
- 壁面 [wall]
[ground] : 静止壁
- 板表面 [fsi_connect] : メッシュの速度を壁面の速度とする

- 初期条件


- デフォルト(設定不要)

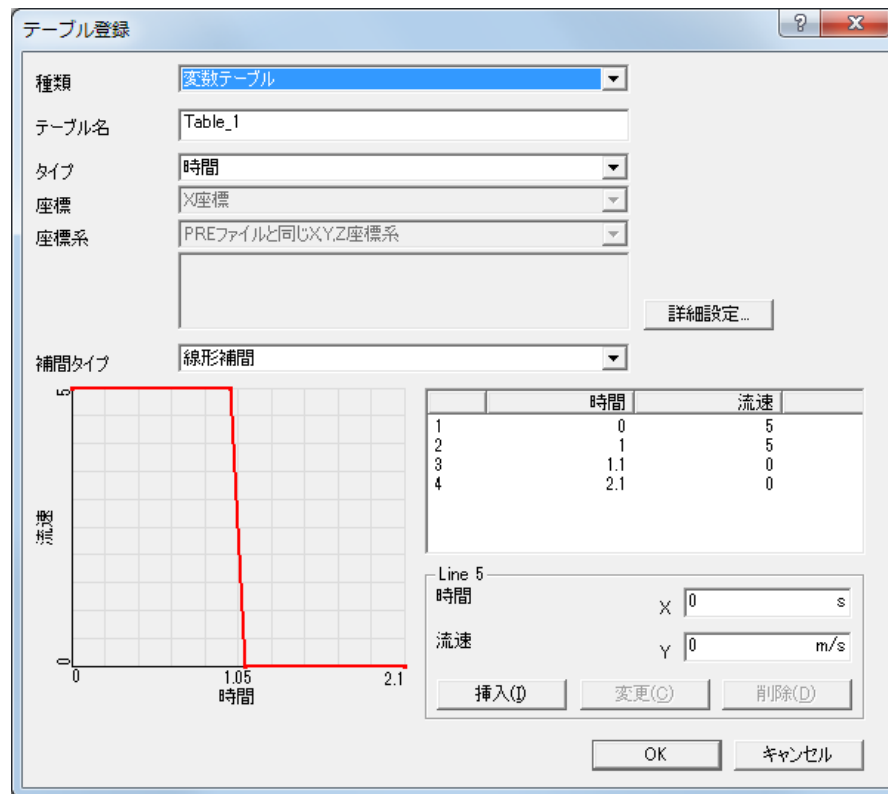
- その他

- 解析の種類
非定常解析
- 計算サイクルおよび時間間隔
計算サイクル : 4,000[サイクル]
固定時間間隔 : 0.0005[s]
- 重合格子
独立領域 従属領域
[region] [fsi_plate]
- 連成解析の設定
データの受け渡しを行う領域 [fsi_connect]
解析時間
開始時間 0 [s]
終了時間 2 [s]
オフセット時間 0 [s]
データの引き渡し
圧力 : 渡す
データの受け渡し
変位 : 受け取る
メッシュ変形が行われる領域 [fsi_plate]
メッシュ変形時固定する領域 [fsi_fix]
- 図化ファイル
出力タイミング : 指定時間間隔毎に出力(時間間隔 0.1[s])
初期場を出力する

特記事項

- 流入面の流速のテーブル設定

- 変数テーブルの設定方法には、テーブルファイルを用いる方法のほかに、SCTpreのダイアログ上で直接設定する方法もあります。本例題では流入流速のテーブルをダイアログ上で設定します。
- [条件ウィザード] - [境界条件]で[inlet]に流速規定を設定します。[流速規定]ダイアログにて、[流入流速]の  ボタンをクリックして、変数テーブルの設定を行います。[テーブル一覧]ダイアログで登録をクリックすると[テーブル登録]ダイアログが表示されます。ここで下図のように設定します。



	時間	流速
1	0	5
2	1	5
3	1.1	0
4	2.1	0

Line 5
 時間 X 0 s
 流速 Y 0 m/s

- 以上の設定でOKをクリックすると、[テーブル一覧]ダイアログに作成した変数テーブルが登録されます。
- 閉じるをクリックして、[流入流速]に登録した変数テーブルが選択されていることを確認します。

- 連成解析の条件と設定(Abaqus)

- 流体解析と構造解析でモデル位置と単位系を合わせる必要があります。
- 物性値条件として、密度8889.8[kg/m³], ヤング率 1.29×10^{11} [Pa], ポアソン比0.343を与えます。
- 本モデルでは、X座標の最小値側の板の付け根に、完全固定条件を与えます。連成解析のための領域として、板の表面を[fsi_connect]として登録します。
- 連成解析の条件として、Abaqusの*CO-SIMULATIONコマンド, CO-SIMULATION REGIONコマンドを設定します。
- Co-Simulation Engineの設定ファイル(XMLファイル)に、SCRYU/TetraとAbaqusの設定条件を指定します。

<components>にて、以下のように指定します。

```
<components>
  <component name="Abaqus">
    <bottomUpImplementation>
      <codeName>Abaqus/Standard</codeName>
```

<componentInstances>にて、以下のように指定します。

```
<componentInstances>
  <componentInstance name="Abaqus">
    <component>Abaqus</component>
    <timeIncrementation>
      <lockstep>true</lockstep>

  <componentInstance name="SC-Tetra">
    <component>SC-Tetra</component>
    <timeIncrementation>
      <lockstep>true</lockstep>
```

<connectors>にて、以下のように指定します。

```
<connectors>
  <connector name="Abaqus_to_SC-Tetra_INPUT">
    <componentInstance>SC-Tetra</componentInstance>
    <variables>
      <input>
        <variable>displacement</variable>

  <connector name="Abaqus_to_SC-Tetra_OUTPUT">
    <componentInstance>Abaqus</componentInstance>
    <variables>
      <output>
        <variable>displacement</variable>

  <connector name="SC-Tetra_to_Abaqus_INPUT">
    <componentInstance>Abaqus</componentInstance>
    <variables>
      <input>
        <variable>force</variable>

  <connector name="SC-Tetra_to_Abaqus_OUTPUT">
    <componentInstance>SC-Tetra</componentInstance>
    <variables>
      <output>
        <variable>traction_vector</variable>
```

<execution>にて、以下のように指定します。

```
<execution>
  <compositeActors>
    <compositeActor name="twoCodeContinuousTime">
      <actors>
        <atomicActor>Abaqus</atomicActor>
        <atomicActor>SC-Tetra</atomicActor>
```

```
</actors>
<modelOfComputation>
  <continuousTime>
    <algorithm>GAUSS-SEIDEL</algorithm>
    <negotiationMethod>MASTER</negotiationMethod>
    <masterActor>SC-Tetra</masterActor>

  </continuousTime>
</modelOfComputation>

<scenario>
  <duration>2.0</duration>
</scenario>
```

- 連成解析の実行方法

- **SCRYU/Tetra**と**Abaqus**の両方を同じコンピュータにて実行する必要があります。**SCRYU/Tetra**は通常の解析どおり実行します。**Abaqus**では、**Abaqus Command**にて、ジョブの実行とCo-Simulation Engineの実行を行います。まず、ジョブの実行を次のように行います。

1) ジョブ実行

```
abq6141 -double -job Abaqus -input exA02_Abaqus_fsi.inp -csedirector localhost:59010
```

として、-csedirectorにlocalhost:59010を指定して実行します。なお、この例題ではAbaqusの実行ファイルとして、exA02_Abaqus_fsi.inpを指定し、倍精度(-double)で計算を実行しています。

2) Co-Simulation Engineの実行

```
abq6141 cse -config exA02_Abaqus_fsi_config.xml -listenerport 59010
```

として、-listenerportに59010を指定して実行します。

(メモ) Windows, Unix/Linux共に、**Abaqus**は上記のコマンドで実行することができます。

解析手順

- ・ 従属領域([fsi_plate])

- モデル

sCTpreを起動して、[ファイル] - [開く]よりexA02_Plate_Abaqus_fsi.mdlを読み込みます。

- 条件設定

[条件ウィザード]で以下の設定を行います。

- ・ [物性値・基準値]
[物性値]タブにてMAT[2]を選択します。[純金属] - [銅(Cu)]を選択して適用をクリックします。
(メモ) 物性値の設定は、この後のメッシュ生成で固体側にプリズムが挿入されるのを回避するために行っています。

- 八分木

[ファイル] - [開く]よりexA02_Plate_Abaqus_fsi.octを読み込みます。

- メッシュ生成

[連続実行]ダイアログにて以下の設定を行い、メッシュを作成します。

- ・ [境界層要素挿入パラメータ]ダイアログにて、以下の設定を行います。[固体側にはプリズムを挿入しない]をONにします。また、[厚みをオクタントサイズから自動で求める]をONにして設定します。

[領域名]	[1層目の厚さ]	[厚みの変化率]	[層数]
[fsi_connect]	自動	[1.1]	[3]

- ・ このメッシュを[ファイル] - [保存]よりexA02_Plate_Abaqus_fsi.preとして保存します。

- 独立領域([region])

- モデル

SCTpreを起動して、[ファイル] - [開く]よりexA02_Region_Abaqus_fsi.mdlを読み込みます。

- 八分木

[ファイル] - [開く]よりexA02_Region_Abaqus_fsi.octを読み込みます。

- メッシュ生成

[連続実行]ダイアログにて以下の設定を行い、メッシュを作成します。

- [境界層要素挿入パラメータ]ダイアログにて、以下の設定を行います。また、[厚みをオクタントサイズから自動で求める]をONにして設定します。

[領域名]	[1層目の厚さ]	[厚みの変化率]	[層数]
[ground] [wall]	自動	[1.1]	[3]

このメッシュを[ファイル] - [保存]よりexA02_Region_Abaqus_fsi.preとして保存します。

次にexA02_Region_Abaqus_fsi.preが読み込まれた状態で、[ファイル] - [開く]より従属領域のメッシュexA02_Plate_Abaqus_fsi.preを読み込みます。[選択したファイルとマージ]を選択してOKをクリックします。

以上でメッシュの作成は完了です。マージしたファイルを[ファイル] - [保存]よりexA02_Abaqus_fsi.preとして保存します。

- 条件設定

[条件ウィザード]で以下の設定を行い、Sファイルを保存します。

1. [解析選択]

- [流れ]で[層流]を選択します。
- [重合格子], [自由表面], [連成解析]をONにします。

2. [基本設定]

- [解析方法]で[非定常解析]を選択し、[終了サイクル]を[4000]とします。
- [非定常解析]の[時間間隔の設定]にて、[数値入力による]を選択し、[時間間隔]に[0.0005 s]を入力します。
- [重力]にて[考慮する]をONにします。
 $[(X, Y, Z)] : [(0, 0, -9.8) \text{ m/s}^2]$

3. [物性値・基準値]

- [物性値]タブにてMAT[1]を選択します。[流体(非圧縮性)] - [水(非圧縮性20℃)]を選択して適用をクリックします。続けて、MAT[2]を選択します。[純金属] - [銅(Cu)]を選択して適用をクリックします。

4. [境界条件]

- [領域]から[inlet]を選択し、流速規定をクリックします。ここで[流入流速]に対してテーブルで設定を行いますが、この設定の詳細については特記事項 流入面の流速のテーブル設定を参照してください。
- [領域]から[outlet]を選択し、表面圧力規定をクリックします。[表面圧力規定]ダイアログにて、[圧力指定]が[0 Pa]となっていることを確認して、OKをクリックしてダイアログを閉じます。
- [領域]から[wall], [ground]を選択し、壁面をクリックします。[壁面]ダイアログにて[フリースリップ壁]をOFFにして、OKをクリックしてダイアログを閉じます。
- [領域]から[fsi_connect]を選択し、壁面をクリックします。[壁面]ダイアログにて[フリースリップ壁]をOFFにします。[壁面の速度]として、[メッシュの速度を壁面の速度とする]を選択し、OKをクリックしてダイアログを閉じます。

5. [重合格子]

- [独立領域(静止領域)]に[region], [従属領域(移動領域)]に[fsi_plate]を選択し、登録をクリックします。

6. [自由表面]

- [VOF法(界面捕獲法)]を選択します。
- [初期気液界面] タブで以下の設定を行います。

[設定する相]	:	[気相]
[$Ax+By+Cz=D$ の各係数]	:	[0, 0, 1, -1]

 以上の設定が完了したら登録をクリックします。
- [物性値]タブで[気体の物性]の編集をクリックします。[物性値]ダイアログで、[参照する物性値]から[空気(非圧縮20℃)]を選択します。OKをクリックして、[自由表面]ダイアログに戻ります。
- [流入条件]タブで[領域一覧]から[inlet]を選択します。続いて、[流入する相]から[液体]を選択して適用をクリックします。同様に[領域一覧]から[outlet]を選択し、[流入する相]から[気体]を選択後、適用をクリックします。

7. [出力条件]

- [FLD(サイクル)]にて、[出力のタイミング]として[指定時間間隔毎に出力]を選択します。[時間間隔]に[0.1 s]を入力して、[初期場]として[出力する]をONにします。

8. [連成解析]

- [Abaqusとの連成を行う]をONにします。[データの受け渡しを行う領域]で[fsi_connect]をONにします。
- [時間]タブで[解析時間]の[開始時間]に[0 s], [終了時間]に[2 s]と入力します。
- [データの引き渡し]タブにて[圧力]で[渡す]を選択します。
- [データの受け取り]タブにて[変位]で[受け取る]を選択します。このとき、メッシュ変形の制御を行う領域の設定を以下のように設定します。

[メッシュ変形が行われる領域]

[fsi_plate] : ON

[メッシュ変形時固定する領域]

[fsi_fix] : ON

- 解析実行

SCTsolverと**Abaqus**で解析を実行します。

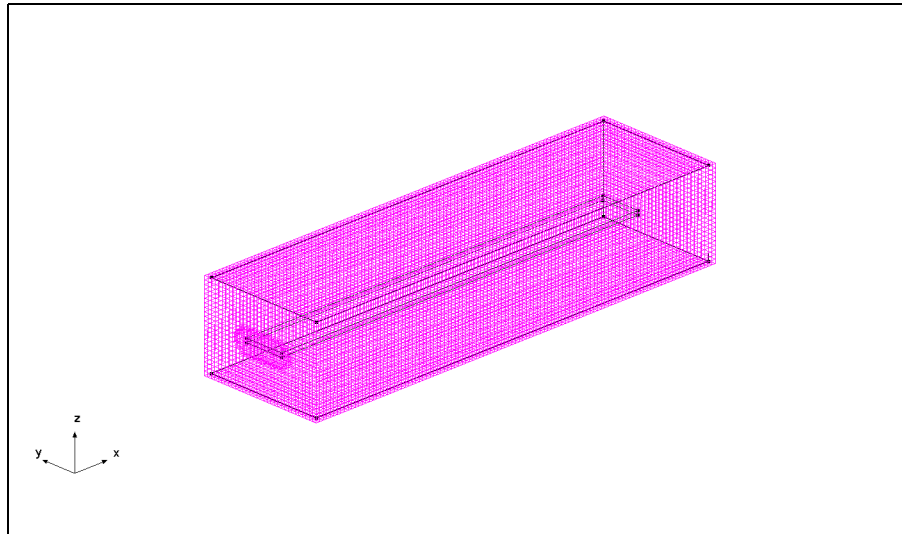
- 計算コストの目安

- SCTsolverと**Abaqus**の実行時間
約2日
- 計算サイクル数
4,000サイクル

* SCTsolver : 2core, **Abaqus** : 1core 使用時 (Intel Xeon X5680 3.33GHz)

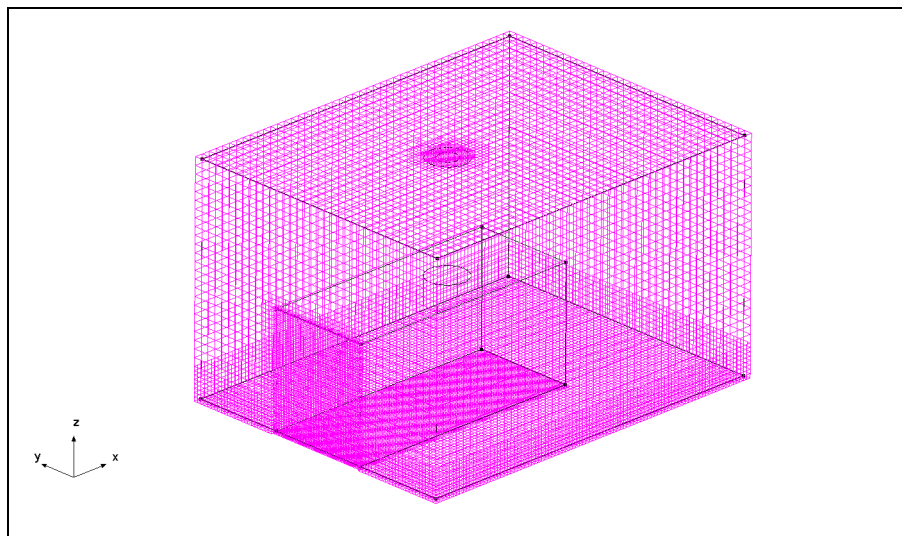
解析メッシュ

- 八分木図



従属領域[fsi_plate]

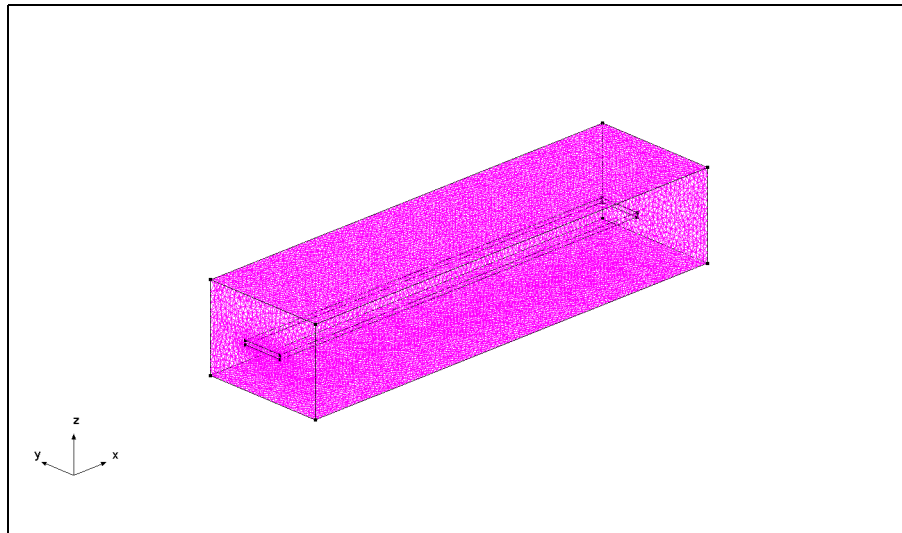
オクタントサイズ : 0.005[m]~0.01[m]



独立領域 [region]

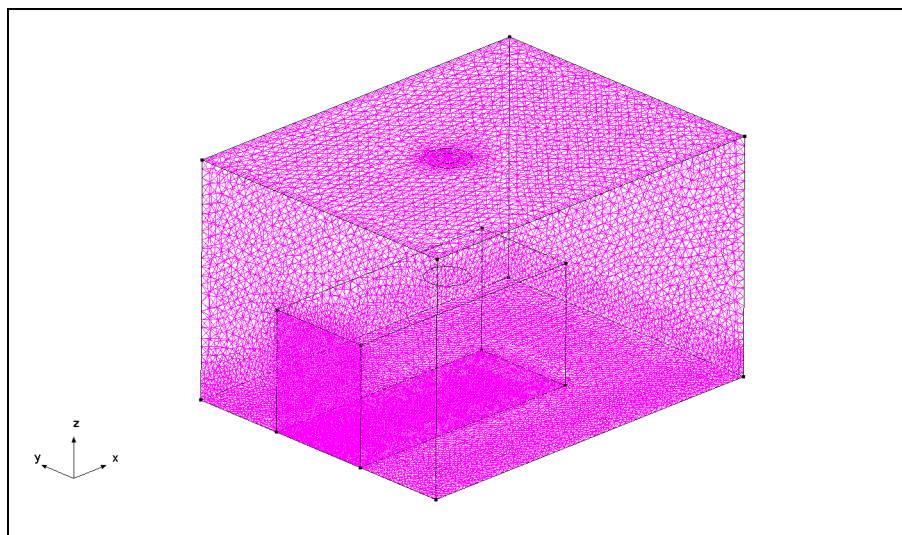
オクタントサイズ : 0.01[m]~0.04[m]

- メッシュ図



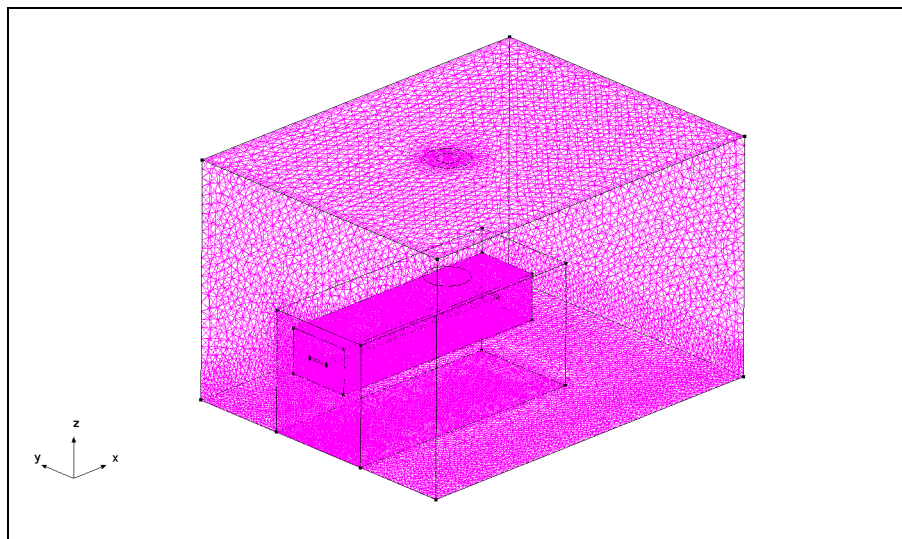
従属領域[fsi_plate]

要素数 : 900,351



独立領域[region]

要素数 : 3,466,287

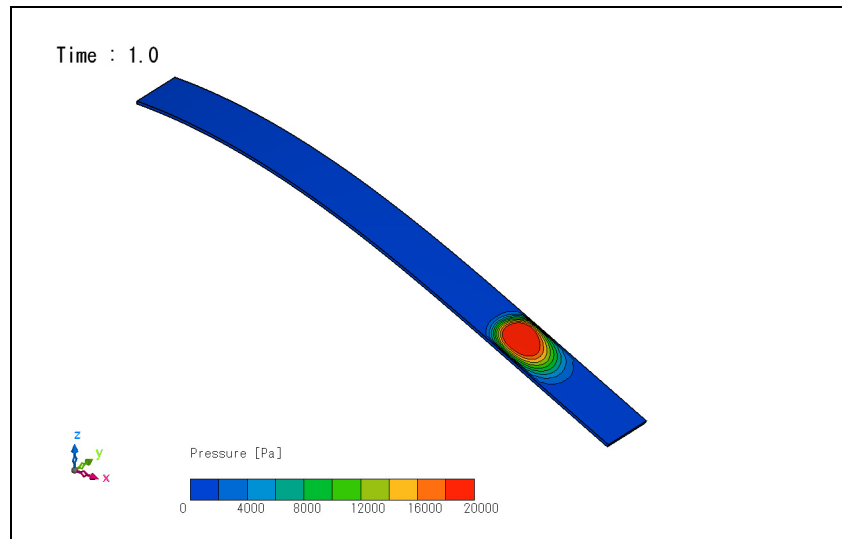


全体([fsi_plate]と[region]をマージしたもの)

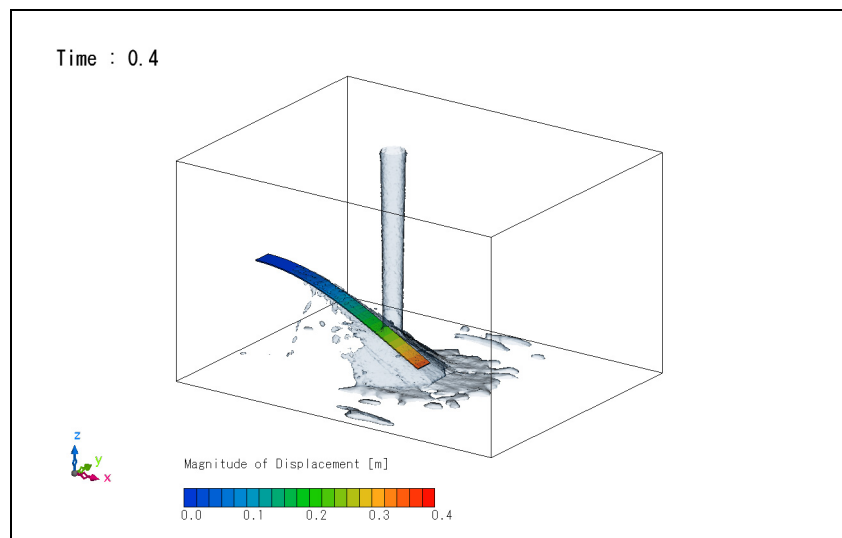
要素数 : 4,366,638

解析結果

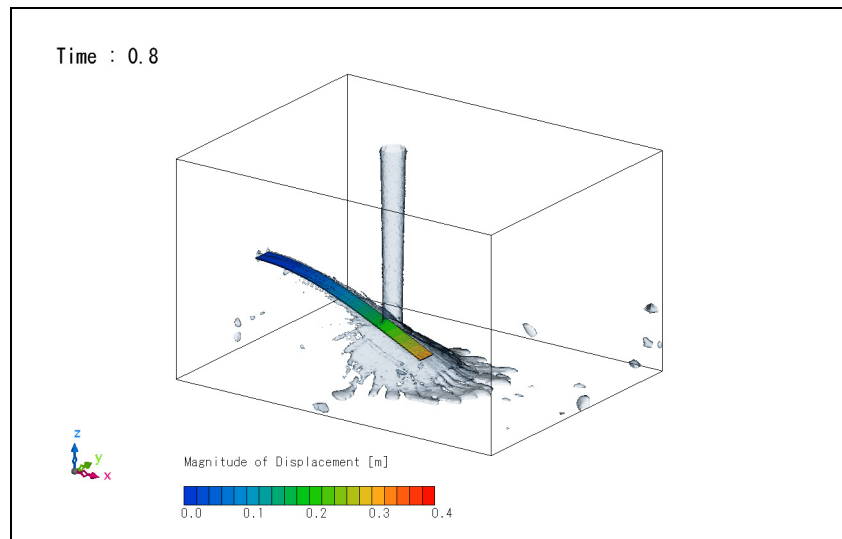
- 板表面圧力分布図 (1.0 [秒])



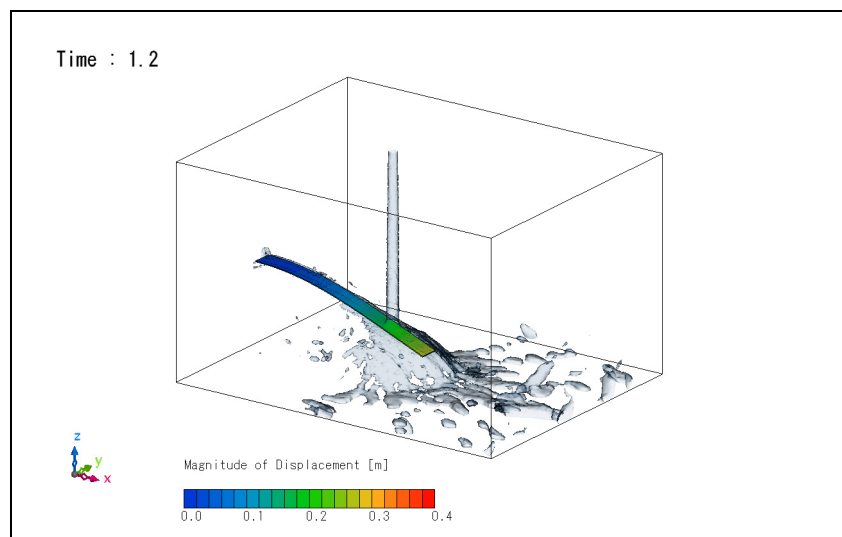
- 自由表面と変位コンター図 (0.4[秒])



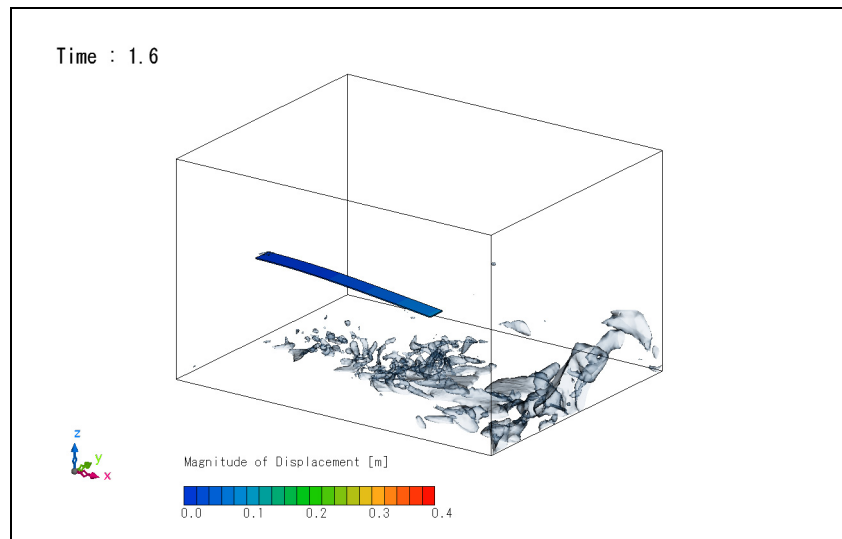
- 自由表面と変位コンター図 (0.8[秒])



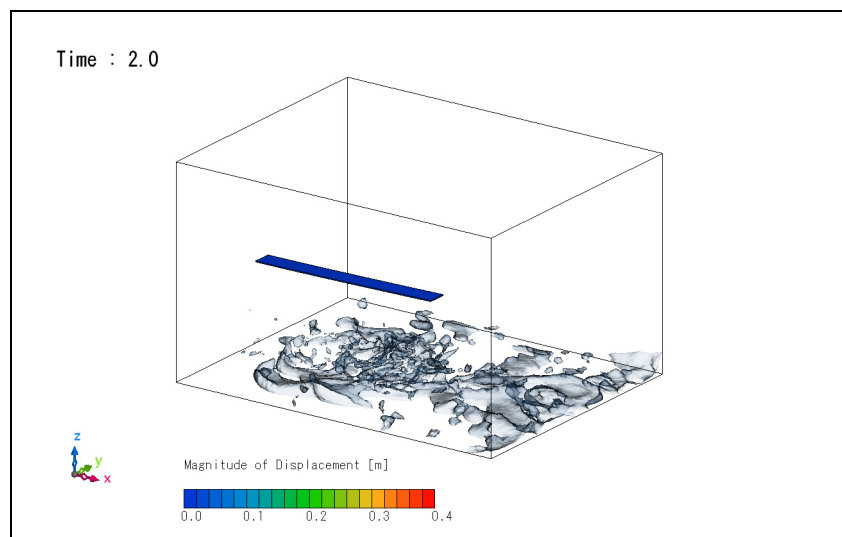
- 自由表面と変位コンター図 (1.2[秒])



- 自由表面と変位コンター図 (1.6[秒])



- 自由表面と変位コンター図 (2.0[秒])

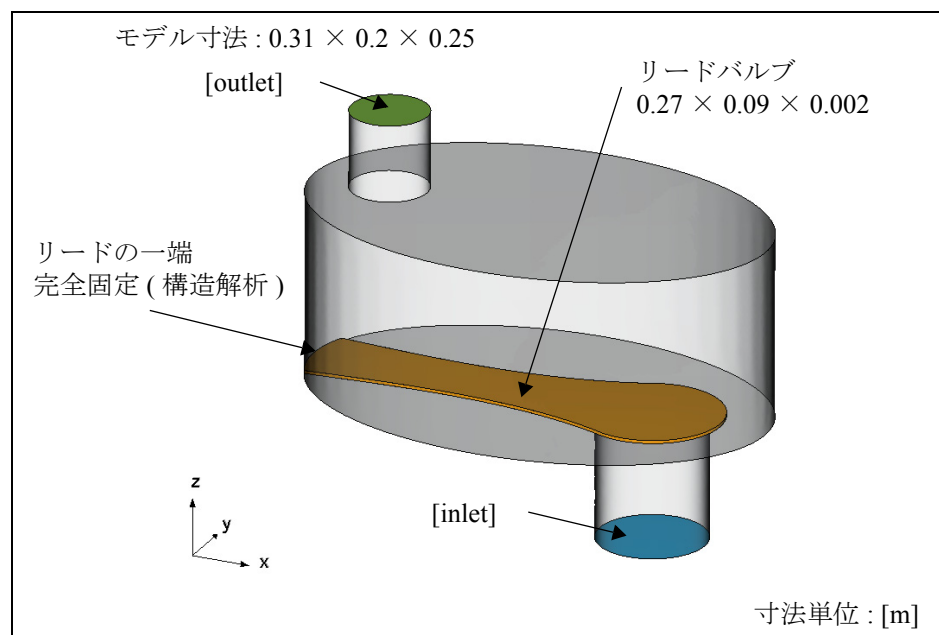


4.3 操作例題3 リードバルブ開閉時の流体構造連成解析

一端を固定したリードバルブが、流体から受ける圧力によって変形し、開閉する様子を解析します。本例題では、圧縮性解析を行うために温度を解きます。また、重合格子を用いてリードバルブ周辺を従属領域として取り扱います。

解析モデル

- 解析モデル(全体図)



3次元圧縮性乱流

解くべき方程式

- 運動量方程式
- 質量保存式(圧力補正式)
- エネルギー方程式
- k-ε方程式

解析選択

- 流れ(乱流) : 乱流解析を行います。
- 温度 : 温度の解析を行います。
- 重合格子 : リードバルブ周辺を従属領域として計算します。
- 連成解析 : 流体構造連成解析を行います。

解析条件

- 物性値

- MAT=1 : 空気(20°C)
物性値ライブラリより[流体(圧縮性)]-[空気(圧縮20°C)]を使用します。
- MAT=2 : 鉄(Fe)
物性値ライブラリより[流体(非圧縮性)]-[鉄(Fe)]を使用します。

- 基準値

- 基準圧力(MAT=1) : 101,325[Pa]
- 基準密度(MAT=1) : 0[kg/m³]

- 境界条件

- 流入口 [inlet] : 全圧規定 関数テーブル入力
流入乱流量 k 0.0001 [m²/s²]
ε 0.0001 [m²/s³]
- 流出口 [outlet] : 表面圧力規定0.0[Pa]
- 壁面 [wall] : 静止壁
[wall_Reed] : メッシュの速度を壁面の速度とする

- 初期条件

- 温度(全てのMAT) : 20[°C]

- その他

- 解析の種類
非定常解析
- 計算サイクルおよび時間間隔
計算サイクル : 10,000 [サイクル]
固定時間間隔 : 5×10^{-5} [s]
- 乱流モデル
標準k-εモデル
- 重合格子
独立領域 従属領域
[Tank] [wall_Reed]
DMIN : 1×10^{-6} [m]
- 連成解析の設定
データの受け渡しを行う領域 : [wall_Reed]
解析時間
開始時間 : 0 [s]
終了時間 : 0.49995 [s]
オフセット時間 : 5×10^{-5} [s]
データ引き渡し
圧力 : 渡す
データの受け渡し
変位 : 受け取る
メッシュ変形が行われる領域 : [region_Reed]
メッシュ変形時に固定する領域 : [wall], [inlet], [outlet]
- 図化ファイル
出力タイミング : 指定時間間隔毎に出力(時間間隔 0.01[s])

特記事項

- 連成解析の条件と設定(Abaqus)

- 流体解析と構造解析でモデル位置と単位系を合わせる必要があります。
- 物性値条件として、密度 $7870[\text{kg/m}^3]$, ヤング率 $2.1 \times 10^{11}[\text{Pa}]$, ポアソン比 0.29 を与えます。
- 本モデルでは、X座標の最小値側のリードバルブ端に、完全固定条件を与えます。また、連成解析のための領域として、リードバルブの表面を[wall_Reed]として登録します。
- 連成解析の条件として、**Abaqus**の*CO-SIMULATIONコマンド, *CO-SIMULATION REGIONコマンドを設定します。
- Co-Simulation Engineの設定ファイル(XMLファイル)に、**SCRYU/Tetra**と**Abaqus**の設定条件を指定します。

<components>にて、以下のように指定します。

```
<components>
  <component name="Abaqus">
    <bottomUpImplementation>
      <codeName>Abaqus/Explicit</codeName>
```

<componentInstances>にて、以下のように指定します。

```
<componentInstances>
  <componentInstance name="Abaqus">
    <component>Abaqus</component>
    <timeIncrementation>
      <lockstep>true</lockstep>

  <componentInstance name="SC-Tetra">
    <component>SC-Tetra</component>
    <timeIncrementation>
      <lockstep>true</lockstep>
```

<connectors>にて、以下のように指定します。

```
<connectors>
  <connector name="Abaqus_to_SC-Tetra_INPUT">
    <componentInstance>SC-Tetra</componentInstance>
    <variables>
      <input>
        <variable>displacement</variable>

  <connector name="Abaqus_to_SC-Tetra_OUTPUT">
    <componentInstance>Abaqus</componentInstance>
    <variables>
      <output>
        <variable>displacement</variable>

  <connector name="SC-Tetra_to_Abaqus_INPUT">
    <componentInstance>Abaqus</componentInstance>
    <variables>
      <input>
        <variable>force</variable>

  <connector name="SC-Tetra_to_Abaqus_OUTPUT">
    <componentInstance>SC-Tetra</componentInstance>
```

```

<variables>
  <output>
    <variable>traction_vector</variable>

```

<execution>にて、以下のように指定します。

```

<execution>
  <compositeActors>
    <compositeActor name="twoCodeContinuousTime">
      <actors>
        <atomicActor>Abaqus</atomicActor>
        <atomicActor>SC-Tetra</atomicActor>
      </actors>
      <modelOfComputation>
        <continuousTime>
          <algorithm>GAUSS-SEIDEL</algorithm>
          <negotiationMethod>MASTER</negotiationMethod>
          <masterActor>SC-Tetra</masterActor>
        </continuousTime>
      </modelOfComputation>
    </compositeActor>
  </compositeActors>
  <scenario>
    <duration>0.49995</duration>
  </scenario>

```

- 連成解析の実行方法

- **SCRYU/Tetra**と**Abaqus**の両方を同じコンピュータにて実行する必要があります。
SCRYU/Tetraは通常の解析どおり実行します。**Abaqus**では、**Abaqus Command**にて、ジョブの実行とCo-Simulation Engineの実行を行います。まず、ジョブの実行を次のように行います。
 - 1) ジョブ実行

```
abq6141 -double -job Abaqus -input exA03_Abaqus_fsi.inp -cshedirector localhost:59010
```

 として、-cshedirectorにlocalhost:59010を指定して実行します。なお、この例題では**Abaqus**の実行ファイルとして、exA03_Abaqus_fsi.inpを指定し、倍精度(-double)で計算を実行しています。
 - 2) Co-Simulation Engineの実行

```
abq6141 cse -config exA03_Abaqus_fsi_config.xml -listenerport 59010
```

 として、-listenerportに59010を指定して実行します。

(メモ) Windows, Unix/Linux共に、**Abaqus**は上記のコマンドで実行することができます。

解析手順

- 従属領域([region_Reed])

- モデル

SCTpreを起動して、[ファイル] - [開く]よりexA03_Reed_Abaqus_fsi.mdlを読み込みます。

- 条件設定

[条件ウィザード]で以下の設定を行い、Sファイルを保存します。

- [物性値・基準値]

[物性値]タブにて、MAT[2]を選択します。[純金属] - [鉄(Fe)]を選択して適用をクリックします。

(メモ) 物性値の設定は、この後のメッシュ生成で固体側にプリズムが挿入されるのを回避するために行っています。

- 八分木

[ファイル] - [開く]よりexA03_Reed_Abaqus_fsi.octを読み込みます。

- メッシュ生成

[連続実行]ダイアログにて以下の設定を行い、メッシュを作成します。

- [境界層要素挿入パラメータ]ダイアログにて、以下の設定を行います。[厚みをオクタントサイズから自動で求める]はONにして設定します。

[領域名]	[1層目の厚さ]	[変化率]	[層数]
[wall_Reed]	自動	[1.1]	[3]

このメッシュを[ファイル] - [保存]よりexA03_Reed_Abaqus_fsi.preとして保存します。

- 独立領域([Tank])

- モデル

SCTpreを起動して、[ファイル] - [開く]よりexA03_Tank_Abaqus_fsi.mdlを読み込みます。

- 八分木

[ファイル] - [開く]よりexA03_Tank_Abaqus_fsi.octを読み込みます。

- メッシュ生成

[連続実行]ダイアログにて以下の設定を行い、メッシュを作成します。

- [境界層要素挿入パラメータ]ダイアログにて、以下の設定を行います。[厚みをオクタントサイズから自動で求める]はONにして設定します。

[領域名]	[厚さ]	[変化率]	[層数]
[wall] [under_Reed]	自動	[1.1]	[3]


このメッシュを[ファイル] - [保存]よりexA03_Tank_Abaqus_fsi.preとして保存します。

- 次にexA03_Tank_Abaqus_fsi.preが読み込まれた状態で、[ファイル] - [開く]より従属領域のメッシュexA03_Reed_Abaqus_fsi.preを読み込みます。[選択したファイルとマージ]を選択してOKをクリックします。

- 以上でメッシュの作成は完了です。マージしたファイルを[ファイル] - [保存]より exA03_Abaqus_fsi.pre として保存します。

- 条件設定

[条件ウィザード]で以下の設定を行い、Sファイルを保存します。

1. [解析選択]
 - [温度], [重合格子], [連成解析]をONにします。
2. [基本設定]
 - [解析方法]で[非定常解析]を選択し、[終了サイクル]を[10000]とします。
 - [非定常解析]の[時間間隔の設定]にて、[数値入力による]を選択し、[時間間隔]に [0.00005 s] を入力します。
3. [物性値・基準値]
 - [物性値]タブにて、MAT[1]を選択します。[流体(圧縮)] - [空気(圧縮20°C)]を選択して適用をクリックします。
 - [物性値]タブにて、MAT[2]を選択します。[純金属] - [鉄(Fe)]を選択して適用をクリックします。
4. [初期条件]
 - 新規をクリックし、[初期値]ダイアログを開きます。[変数]を[温度]として、[値]を[20 °C]とします。[対象]にて[全てのMAT番号に適用する]をONにして、OKをクリックします。
5. [境界条件]
 - [領域]から[inlet]を選択し、全圧規定をクリックします。[全圧規定]ダイアログにて、[圧力指定]の  ボタンをクリックして、関数テーブルの設定を行います。
[テーブル一覧]ダイアログで登録をクリックすると、[テーブル登録]ダイアログが表示されます。ダイアログにて以下の設定を行い、挿入をクリックします。

[種類]	:	[関数テーブル]
[関数タイプ]	:	[sin]
[Item 1] [A]	:	[50000]
[B]	:	[6.28318]

 以上の設定が完了したら、OKをクリックすると、[テーブル一覧]ダイアログに作成した関数テーブルが登録されます。閉じるをクリックして、[圧力指定]に登録した関数テーブルが選択されていることを確認します。
続いて、以下の設定を行います。

[流入温度]	:	ON
[温度指定] [T]	:	[20 °C]
[流入乱流量]	:	ON
[乱流量指定] [k]	:	[0.0001 m2/s2]
[e]	:	[0.0001 m2/s3]

 以上の設定が完了したら、OKをクリックしてダイアログを閉じます。
 - [領域]から[outlet]を選択し、表面圧力規定をクリックします。[表面圧力規定]ダイアログにて、[圧力指定]が[0 Pa]になっていることを確認して、OKをクリックしてダイアログを閉じます。
 - [領域]から[wall]を選択し、壁面をクリックします。[壁面]ダイアログにて、[フリースリップ壁]をOFFにして、OKをクリックしてダイアログを閉じます。

- [領域]から[wall_Reed]を選択し、壁面をクリックします。[壁面]ダイアログにて、[フリースリップ壁]をOFFにします。[壁面の速度]として、[メッシュの速度を壁面の速度とする]を選択し、OKをクリックしてダイアログを閉じます。

6. [重合格子]

- [重合領域の対]タブにて、[独立領域(静止領域)]に[Tank], [従属領域(移動領域)]に[region_Reed]を選択し、登録をクリックします。
- [既定値]タブにて、[独立と従属領域の物体間の距離が物体表面の流体要素サイズを下回る場合の扱い]として、[壁面間距離 \leq DMINのとき接触していると見なし流体は通過しない]を選択し、[DMIN]に[0.000001 m]を入力します。

7. [出力条件]

- [FLD(サイクル)]にて、[出力のタイミング]として[指定時間間隔毎に出力]を選択します。[時間間隔]に[0.01 s]を入力して、[初期場]に[出力する]を選択します。

8. [連成解析]

- [Abaqusとの連成を行う]のONにし、[データの受け渡しを行う領域]で[wall_Reed]をONにします。
- [時間]タブで[解析時間]の

[開始時間]	:	[0 s]
[終了時間]	:	[0.49995 s]
[オフセット時間]	:	[0.00005 s]

 と入力します。
- [データの引き渡し]タブにて[圧力]で、[渡す]を選択します。
- [データの受け取り]タブにて[変位]で、[受け取る]を選択します。このとき、メッシュ変形の制御を行う領域について以下のように設定します。

[メッシュ変形が行われる領域]		
[region_Reed]	:	ON
[メッシュ変形時固定する領域]		
[inlet], [outlet], [wall]	:	ON
- 詳細設定をクリックし、[規定値]ダイアログにて、[動いていないとみなす距離の閾値]の、[X], [Y], [Z]に[0]を入力します。続いて、[メッシュ移動で回転を考慮する]をONにします。

- 解析実行

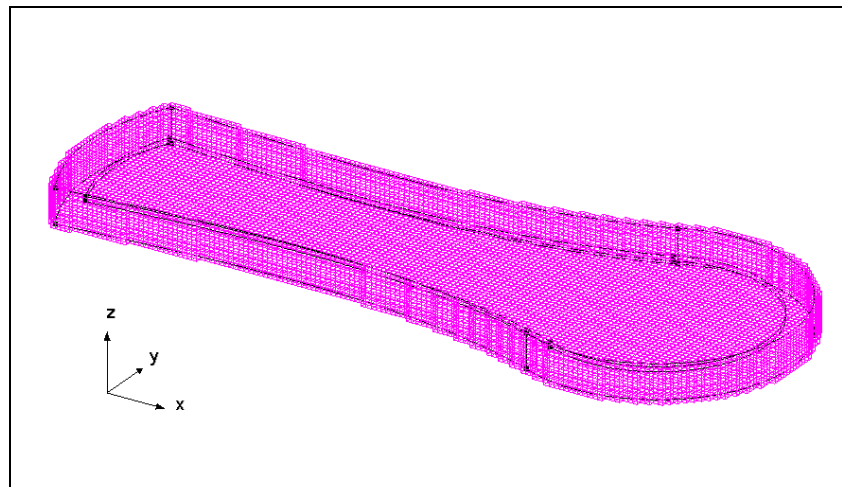
SCTsolverとAbaqusで解析を実行します。

- 計算コストの目安

- SCTsolverとAbaqusの実行時間
約1日
- 計算サイクル数
10,000サイクル
- * SCTsolver : 24core, Abaqus : 1core使用時 (Intel Xeon X5680 3.33GHz)

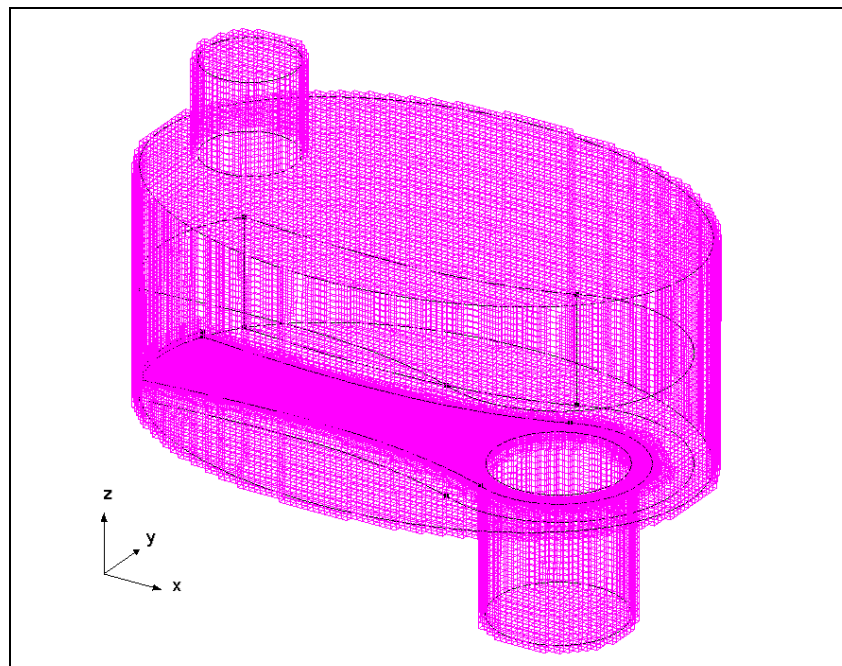
解析メッシュ

- 八分木図



従属領域[region_Reed]

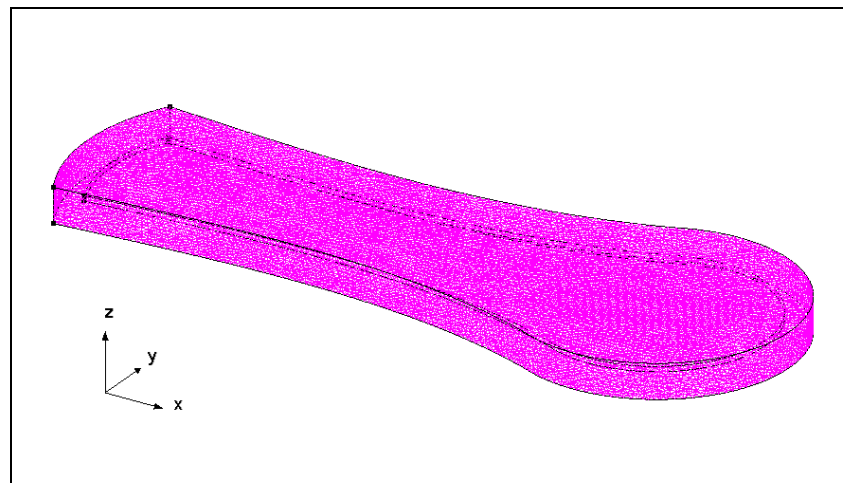
オクタントサイズ : 0.001[m]~0.002[m]



独立領域[Tank]

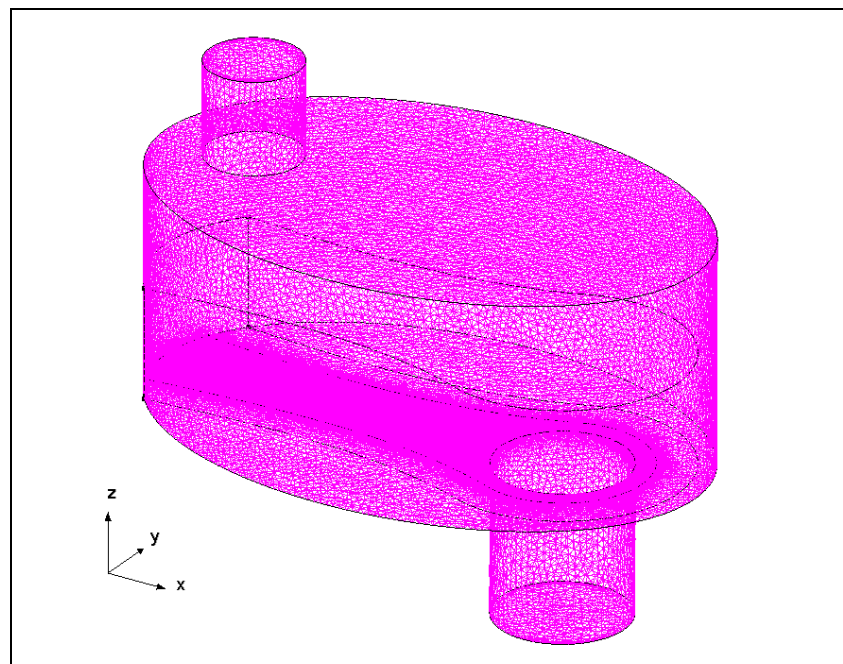
オクタントサイズ : 0.0008[m]~0.0064[m]

- メッシュ図



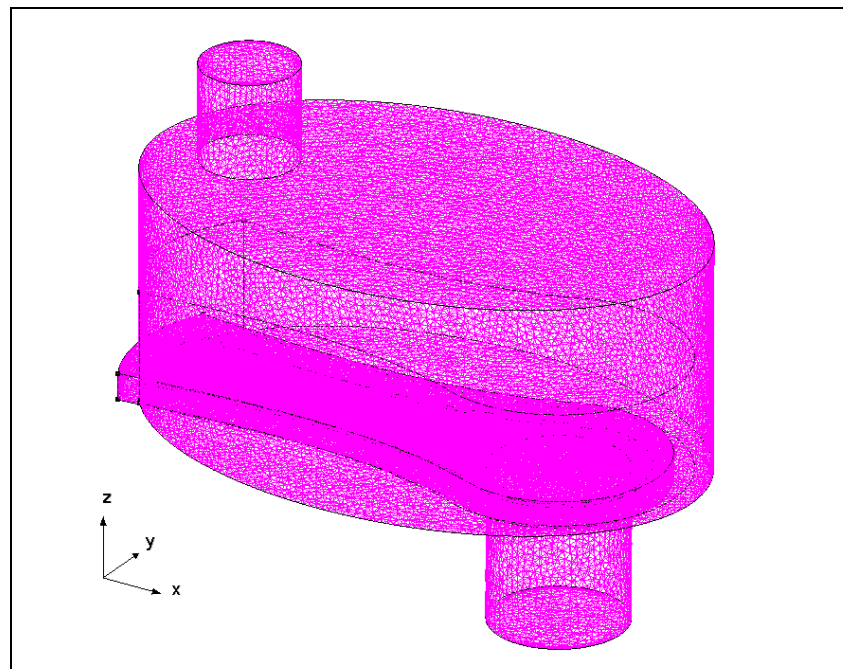
従属領域[region_Reed]

要素数 : 391,552



独立領域[Tank]

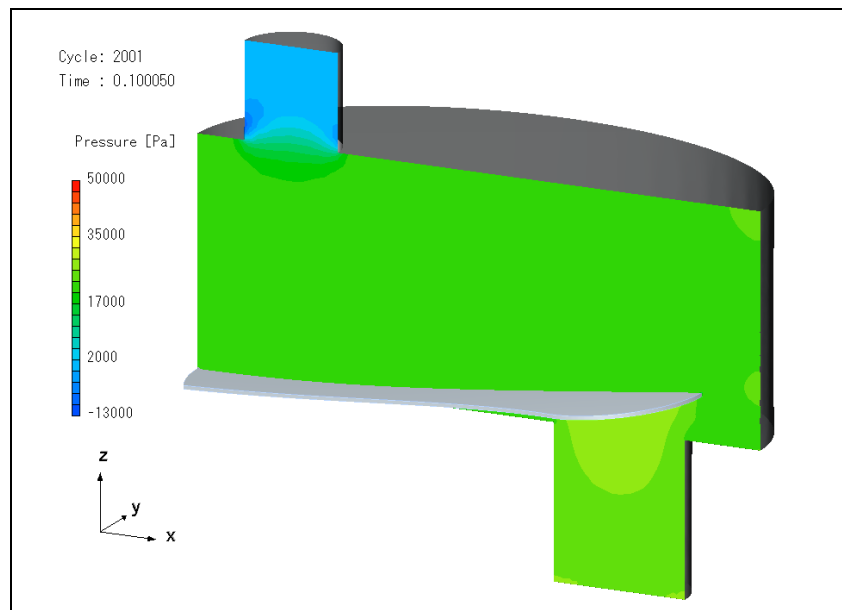
要素数 : 1,729,304



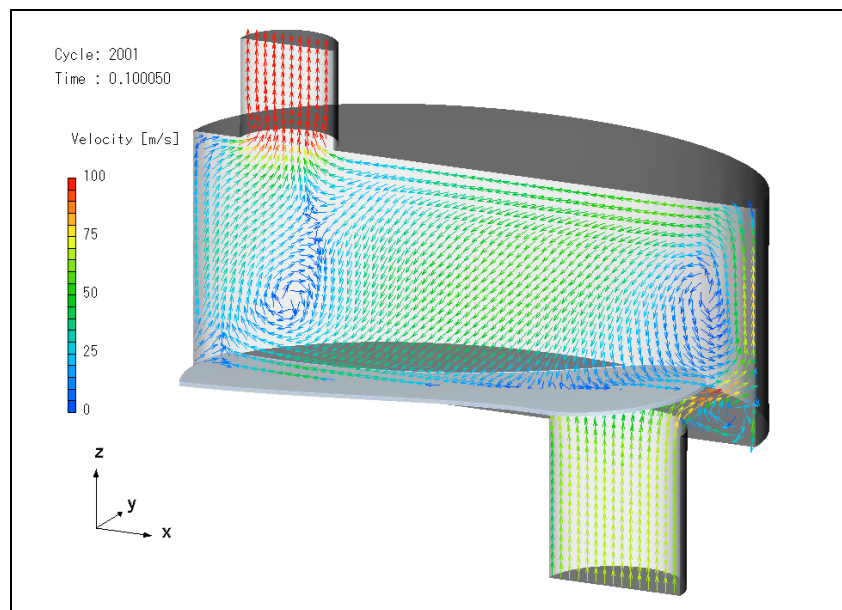
要素数 全体([region_Reed]と[Tank]をマージしたもの)
: 2,120,856

解析結果

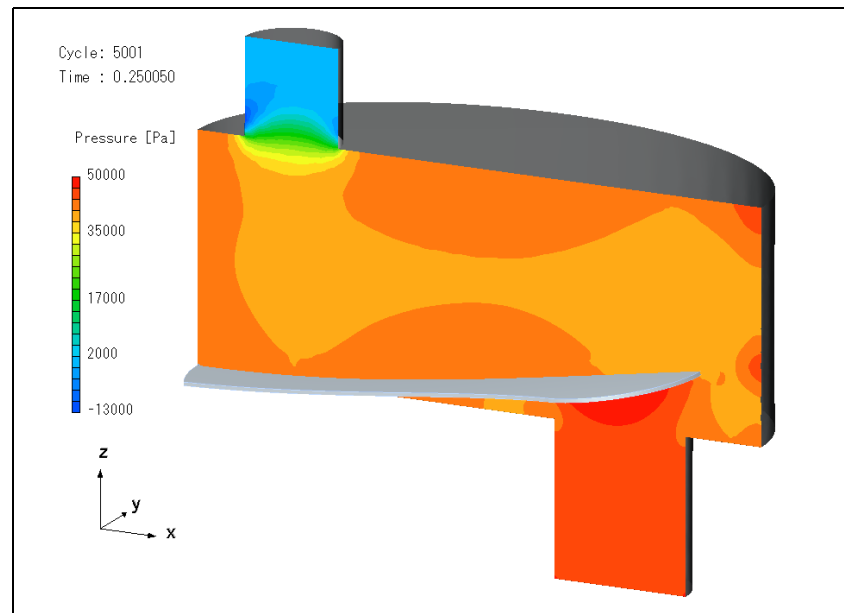
- 圧力コンター図(0.10[s])



- 流速ベクトル図(0.10[s])



- 圧力コンター図(0.25[s])



- 流速ベクトル図(0.25[s])

