



アドバンスソフトの 連成解析セミナー

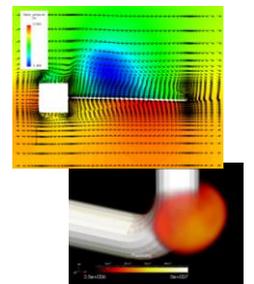


2015年5月15日(金)開催

プログラム

13:30~13:50 (20分)	アドバンスソフトの連成解析への取り組み	代表取締役社長 松原 聖
13:50~14:50 (60分)	特別講演 ; 「流体構造連成手法と解析事例」 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 講師 橋本 学 様	
14:50~15:00 (10分)	休憩	
15:00~15:25 (25分)	流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red を用いた連成解析事例	主任研究員 大西 陽一
15:25~15:50 (25分)	高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS を用いた連成解析事例	主任研究員 富塚 孝之
15:50~16:10 (20分)	構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR を用いた連成解析事例	研究員 尾川 慎介
16:10~16:20 (10分)	音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を用いた連成解析事例	代表取締役社長 松原 聖
16:20~16:30 (10分)	連成解析に関連するサービスのご紹介、質疑応答	営業部 河口 洋子

memo



アドバンスソフトの連成解析への取り組み

代表取締役社長 松原 聖

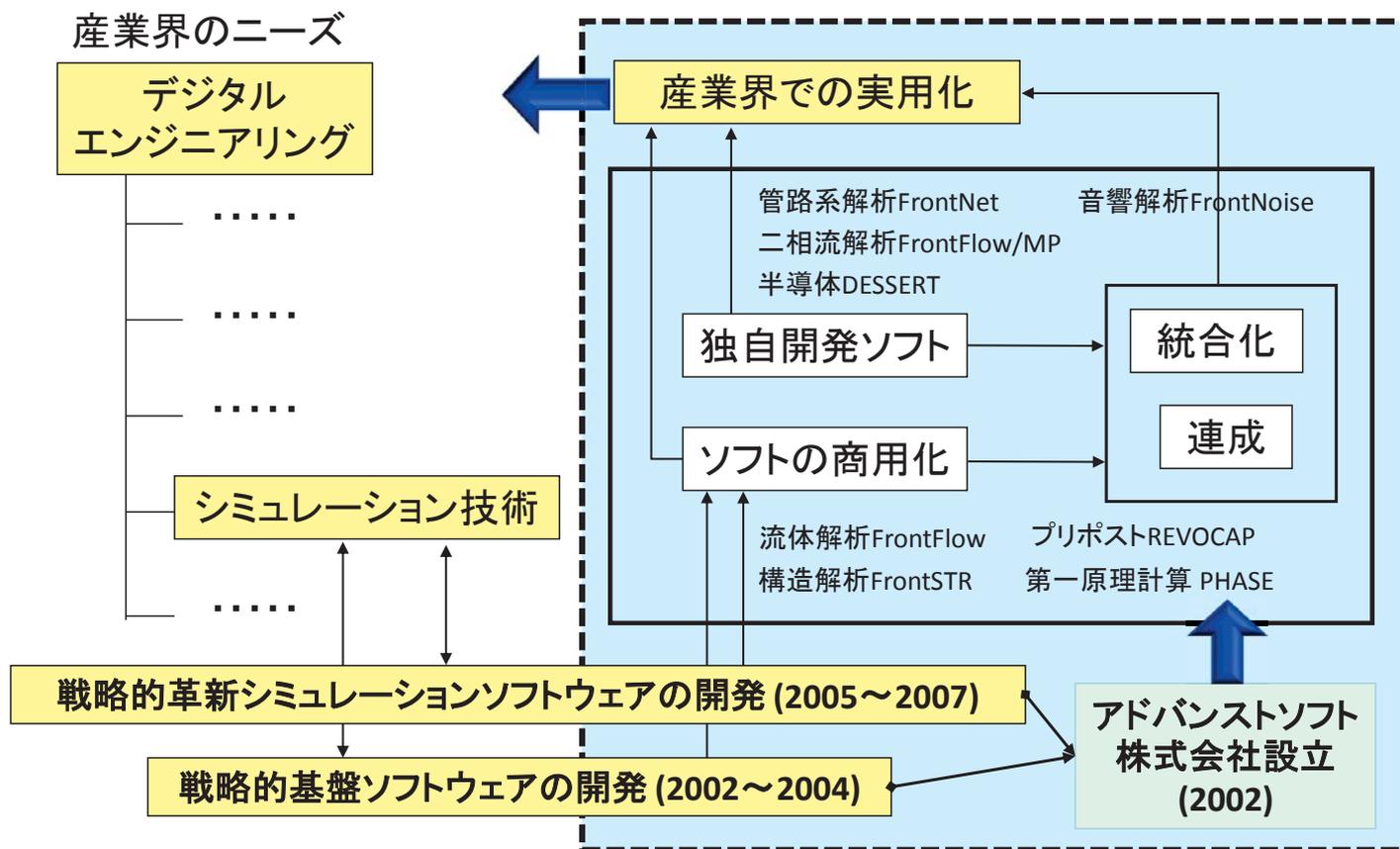
アドバンスソフトの連成解析セミナー
2015年5月15日（金）開催
アドバンスソフト株式会社

会社概要

<p>名 称 アドバンスソフト株式会社 (英文社名 AdvanceSoft Corporation)</p> <p>本 社 〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台4-3 新お茶の水ビル17階 TEL: 03-6826-3970 FAX:03-5283-6580</p> <p>設 立 2002年(平成14年)4月24日</p> <p>資本金 3,724万円</p> <p>社員数 74名(2015年5月15日現在)</p>

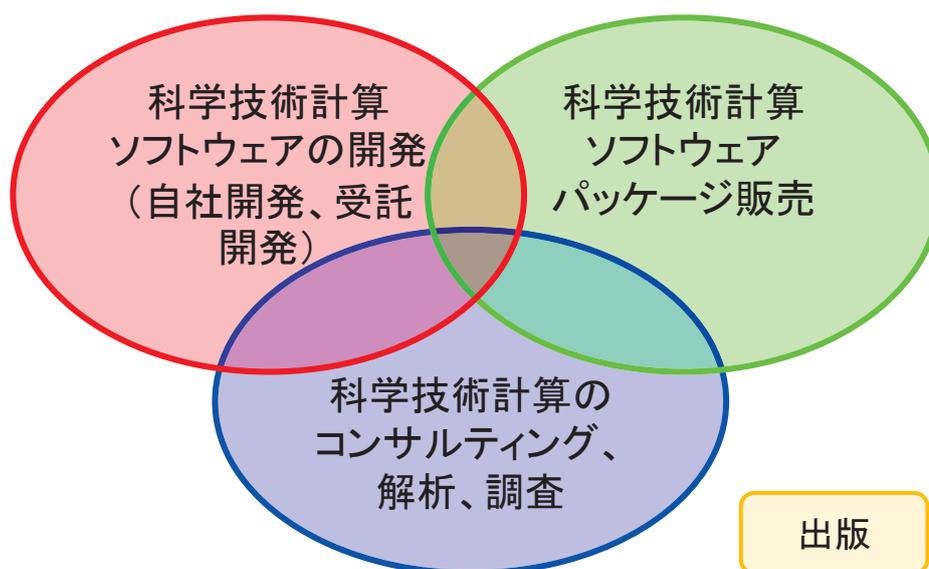
事業部	部	業務概要
第一事業部	事業部付	防災シミュレーション・連成システム開発など
	技術第1部	ナノ材料の第一原理計算、量子化学計算やメソ領域、半導体・T-CAD等に係る解析・開発など
	技術第2部	<ul style="list-style-type: none"> ・プリポスト、可視化システム、連成システム開発など ・J-PARCIに係わるプロジェクトの実施など ・構造解析エンジニアリングなど ・次世代TCADシステムの開発など
第二事業部	事業部付	二相流解析および原子力安全解析など
	技術第3部	<ul style="list-style-type: none"> ・混相流に係わる次世代流体システム開発など ・乱流、燃焼、化学反応等に係わる次世代流体システム開発など
	技術第4部	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス、液体パイプライン、農業用パイプライン、液体ロケットエンジン等の管路系流体解析・開発 ・火災・爆発に係わる防災リスク解析・開発など
	技術第5部	原子力・エネルギー利用に係る安全性解析など
—	総合企画部	<ul style="list-style-type: none"> ・コンサルティングサービスの提供など ・解析サービスの提供など
営業本部	営業部	お客様窓口
東海事業所		お客様窓口

アドバンスソフトとは



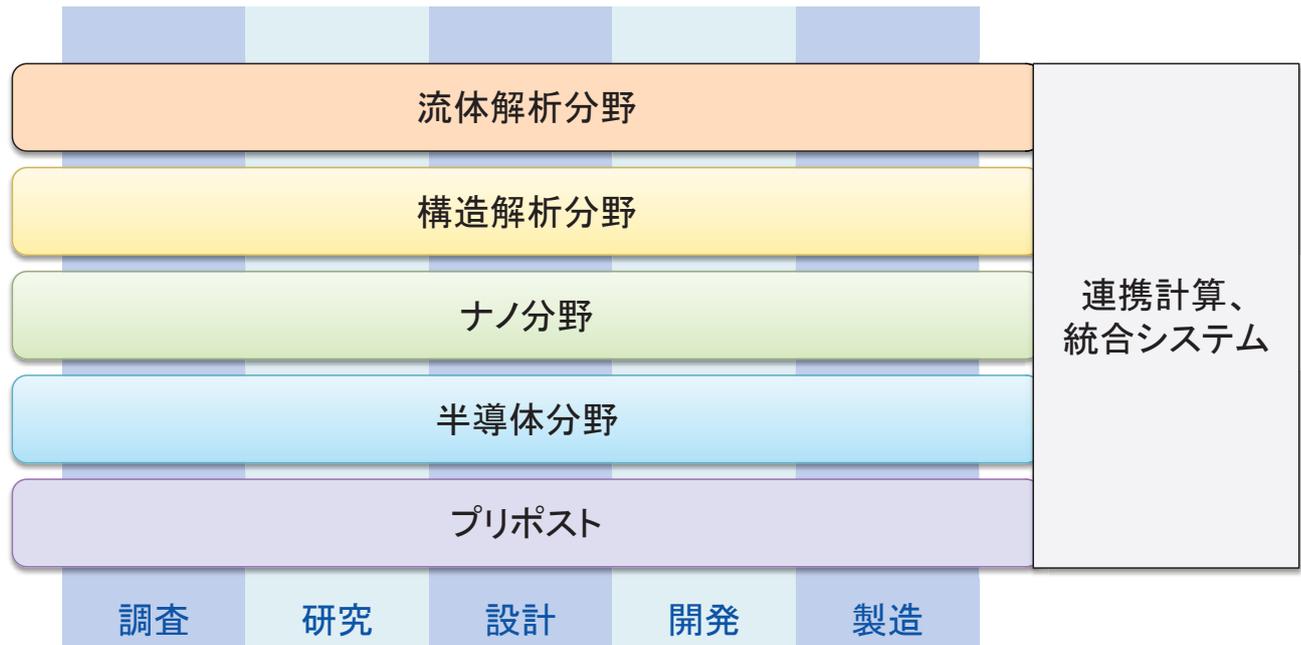
事業内容

アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。

事業分野



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

<p>流体</p> <p>Advance/FrontFlow/red Advance/FrontFlow/FOCUS</p> <p>Advance/FrontFlow/MP</p> <p>Advance/FrontNetシリーズ</p>	<p>構造</p> <p>Advance/FrontSTR</p>	<p>ナノ</p> <p>Advance/PHASE</p>
<p>半導体</p> <p>Advance/DESSERT</p>	<p>プリポスト</p> <p>Advance/REVOCAP</p>	

※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP (www.advancesoft.jp) をご参照ください。

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

ソフトウェア名称	解析内容
Advance/FrontFlow/red	流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MP	気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流・爆発解析ソフトウェア
Advance/FrontNet	管路系1次元流体解析ソフトウェア群
Advance/FrontSTR	構造解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise	音響解析ソフトウェア
Advance/PHASE	第一原理計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
Advance/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ

※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP (www.advancesoft.jp) をご参照ください。

本資料での「連成」に関する用語

- 一方向連成
 - AからBへの一方向連成とは、Bの解析結果がAのすべての解析結果に影響を及ぼさない連成方式です。ファイル経由で解析結果を渡すことが多い。
 - 例えば、流体力による構造物の応力を求めるが、構造物の変形の少ないとしていいケース
- 双方向連成
 - AとBとで連成させて時系列で解析を実施する場合に、決められた時間ステップ毎に情報を交換し、それぞれの結果が相手の結果に影響する場合。
 - 例えば、流体力による構造物の変形が大きいケースが相当し、十分にタイムステップを小さくすることにより、流れと変形が同時に求めることができる。
- 弱連成
 - AとBの連成計算を行う場合に、ひとつの計算点の中で、お互いの物理量を別々に求める連成方式
 - ひとつの計算点の中では、連成計算ではない個別の解析と同じ処理をする。
- 強連成
 - AとBの連成計算を行う場合に、ひとつの計算点の中で、お互いの物理量を関連付けて同時に求める連成方式。
 - 一つの計算点ですべての物理量を整合性を持って求める必要があるため、一つの計算点の中で同時に行列を解くことや反復計算が求められる。
- したがって、「一方向弱連成」、「双方向弱連成」、「(双方向)強連成」の3つのパターンに分類することができる。

技術雑誌「アドバンスシミュレーション」

- A) 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, (2010.11)
- B) 「換気系を持つ施設での急激火災3次元詳細解析—EVE SAYFAとFDSIによる火災連成解析—」アドバンスシミュレーション Vol.6, (2010.12)
- C) 「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, (2011.4)
- D) 吉岡 逸夫, 浜野 明千宏, 三橋 利玄「建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA 2.0」アドバンスシミュレーション Vol.10, (2011.12)
- E) 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, (2011.12)
- F) 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, (2013.1)
- G) 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, (2013.1)
- H) 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, (2013.5)
- I) 「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」アドバンスシミュレーション Vol.17, (2013.12)
- J) 松原 聖, 中森 一郎「音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseによる流れを伴うダクト開口端反射率の評価(第1報)」アドバンスシミュレーション Vol.17, (2013.12)
- K) 田中 洋一, 末光 啓二, 徳永 健一, 桑原 匠史, 中森 一郎「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」アドバンスシミュレーション Vol.19, (2014.10)
- L) 加藤 國男, 大家 史, 松原 聖「船舶居住区騒音を対象とした構造音響連成解析手法」アドバンスシミュレーション Vol.19, (2014.10)
- M) 松原 聖「音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseの構造音響強連成による減衰を含む透過音の解析」アドバンスシミュレーション Vol.19, (2014.10)



雑誌記事の分類

雑誌記事	AFFr	FFF	FSTR	FNoise	FrontNet	EveSayfa	その他
A	○		○	○			
B						◎	◎
C			☆		☆		
D						◎	◎
E		◎	◎				
F			○	○			
G		◎					◎
H	○		○	○			
I	◎		◎				
J		○		○			
K		◎	◎				
L			○	○			
M			☆	☆			
備考	本日紹介	本日紹介	本日紹介	本日紹介			

○: 一方向弱連成
◎: 双方向弱連成
☆: 強連成

解析対象と連成解析手法

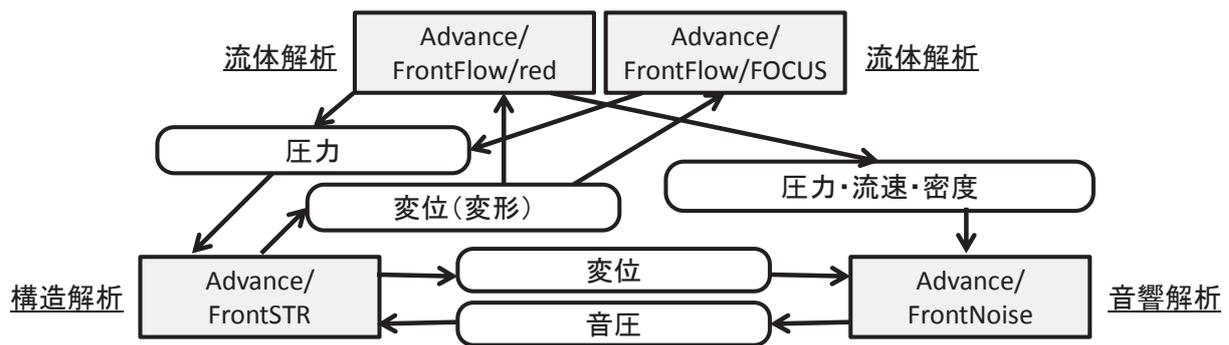
- 流れによる構造物への影響【流体構造連成】
 - 変形が少なく、構造物の応力を評価する → ①一方向弱連成
 - 変形が大きいが弾性変形の範囲内 → ②双方向弱連成
 - 変形が大きく、非線形の変形 → ③双方向弱連成
 - 流れによる騒音【流体音響連成】
 - 流れによる二重極・四重極音源による騒音 → ④一方向弱連成
 - 構造振動と音響伝播【構造音響/音響構造連成】
 - 構造物の振動を音源とする騒音 → ⑤一方向弱連成
 - 構造物振動と音響振動が強く関連している → ⑥双方向強連成
- ※ ①～⑥はつぎのスライド以降へ

連成解析手法と利用するソフトウェア

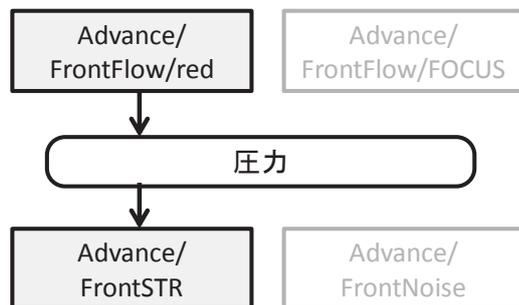
- 標準機能として装備した連成機能
 - ① Advance/FrontFlow/redの解析結果を利用したAdvance/FrontSTRによる流体構造一方向弱連成
 - ② Advance/FrontSTRのモード(固有値・固有ベクトル)を利用したAdvance/FrontFlow/redによる流体構造双方向弱連成
- Advance/REVOCAPを利用した連成機能
 - ③ Advance/FrontFlow/FOCUSとAdvance/FrontSTRを利用した流体構造双方向弱連成
- Advance/FrontNoiseの連成オプション機能による連成機能
 - ④ Advance/FrontFlow/redの非定常解析結果を利用したAdvance/FrontNoiseによる流体音響一方向弱連成
 - ⑤ Advance/FrontSTRの時系列解析結果を利用したAdvance/FrontNoiseによる構造音響一方向弱連成
 - ⑥ Advance/FrontSTRのモード(固有値・固有ベクトル)を利用したAdvance/FrontNoiseによる構造音響双方向強連成

連成解析への当社商品の適用(1)

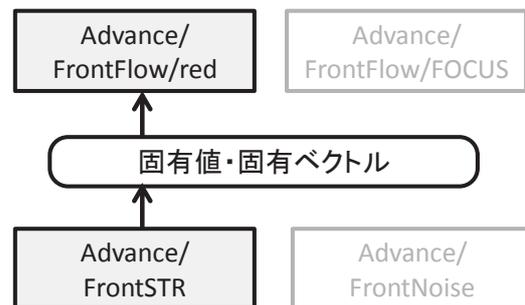
■代表的なデータの流れ



① 流体構造一方向弱連成

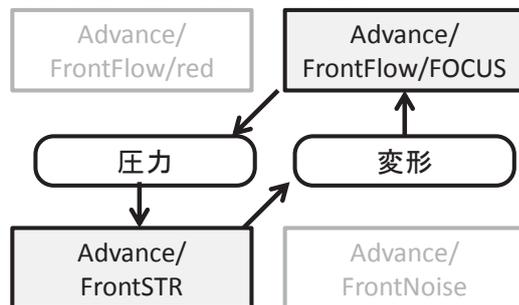


② 流体構造双方向弱連成

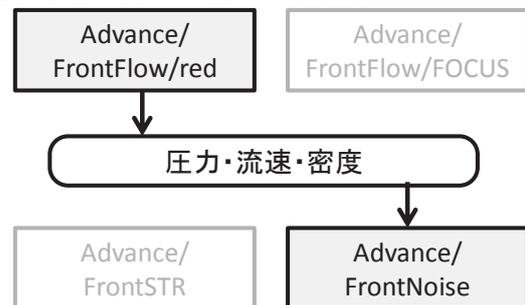


連成解析への当社商品の適用(2)

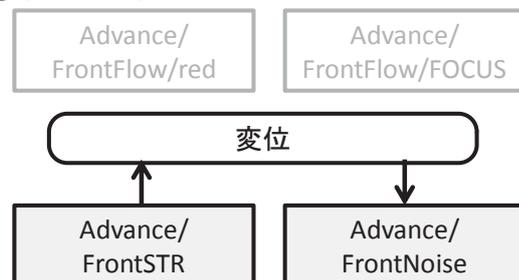
③ 流体構造双方向弱連成



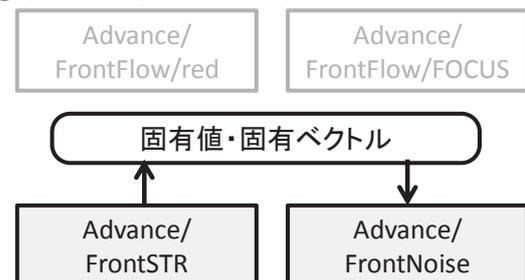
④ 流体音響一方向弱連成



⑤ 構造音響一方向弱連成



⑥ 構造音響双方向強連成



本日のセミナー

- 東京大学大学院 橋本先生のご講演
 - 特別講演;「流体構造連成手法と解析事例」
- 当社の連成解析事例
 - 各ソフトウェアの事例紹介では、下記2項目を説明します。
 - 個別のソフトウェアの説明(機能と大規模計算について)
 - 連成解析事例
 - 流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red を用いた連成解析事例
 - 高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS を用いた連成解析事例
 - 構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR を用いた連成解析事例
 - 音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を用いた連成解析事例
 - (時間があれば、その他の連成解析事例等)

facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>

<http://www.youtube.com/user/advancesoft>



アドバンスソフトは、高度な技術力、開発力、人材を武器に、最先端理論を応用した解析シミュレーションソフトウェアを開発・販売しています。受託解析、受託開発、パッケージソフトウェア、コンサルティング等多様なソリューションを通じて、お客様の問題解決に即戦力として貢献します。

流体構造連成手法と解析事例

東京大学
新領域創成科学研究科
人間環境学専攻
橋本 学

講演内容

0. 自己紹介
1. 連成手法の分類
2. 種々の移動境界処理
3. 解析事例
 - 3.1. ブーメランの飛行
 - 3.2. 薄肉弾性板の渦励振
 - 3.3. エアバッグ展開
4. まとめ

0. 自己紹介
1. 連成手法の分類
2. 種々の移動境界処理
3. 解析事例
 - 3.1. ブーメランの飛行
 - 3.2. 薄肉弾性板の渦励振
 - 3.3. エアバッグ展開
4. まとめ

3

自己紹介

橋本 学 (Gaku Hashimoto) 講師
東京大学 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻
工学部 システム創成学科B 兼任



(C) The University of Tokyo, <http://www.kashiwa.u-tokyo.ac.jp/tpp40.html>

〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5
新領域環境棟2階227室
Tel/Fax : 04-7136-4610
E-mail : ghashimoto@k.u-tokyo.ac.jp
URL : <http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/~ghashimoto/>

バスで8分

4

どんな研究をしているか？

- 工業製品の開発・製造から普及効果までを予測するため、
 - ・ 物理シミュレーション分野
 - ・ 社会シミュレーション分野
 - ・ 知識情報分野の手法を横断的に取り入れたシミュレーション技術を研究
- 従来の物理シミュレーション「マルチフィジックスシミュレーション」では、変位場 (速度場), 温度場, 電磁場などの“場の界面”における相互作用モデリングが重要
- この考えを発展させ, “異分野のシミュレーション技術の界面”における相互作用モデリングを研究
- オープンソース非線形有限要素法ソフトウェア「FrontISTR」の産業分野への普及活動 (FrontISTR研究会)

5

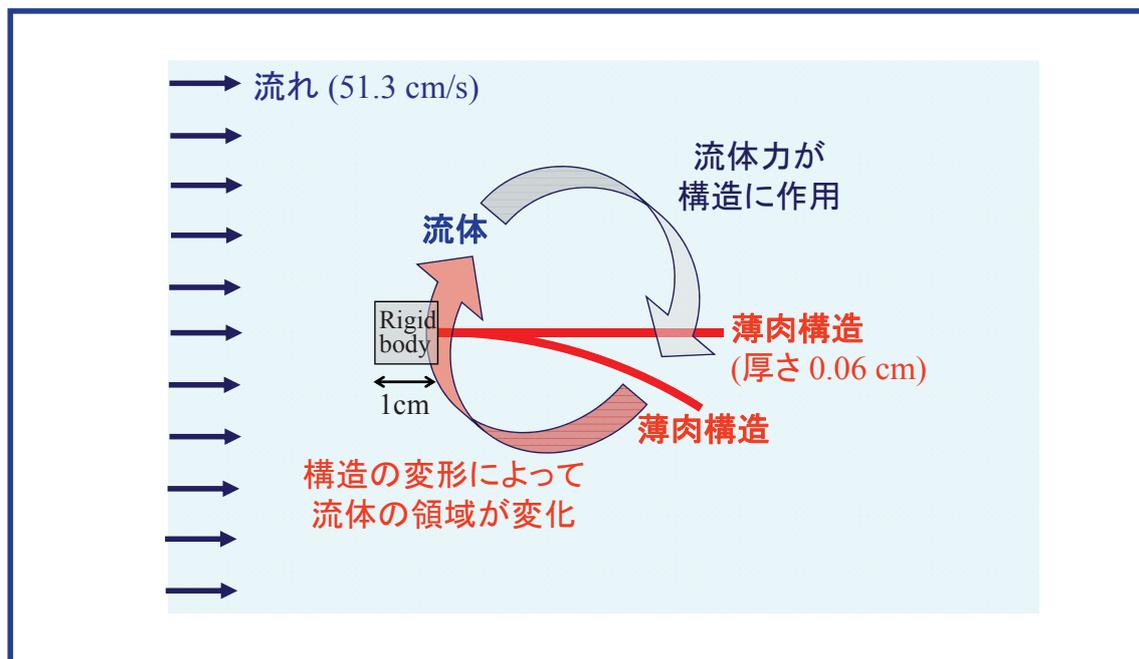
講演内容

0. 自己紹介
1. **連成手法の分類**
2. 種々の移動境界処理
3. 解析事例
 - 3.1. ブーメランの飛行
 - 3.2. 薄肉弾性板の渦励振
 - 3.3. エアバッグ展開
4. まとめ

6

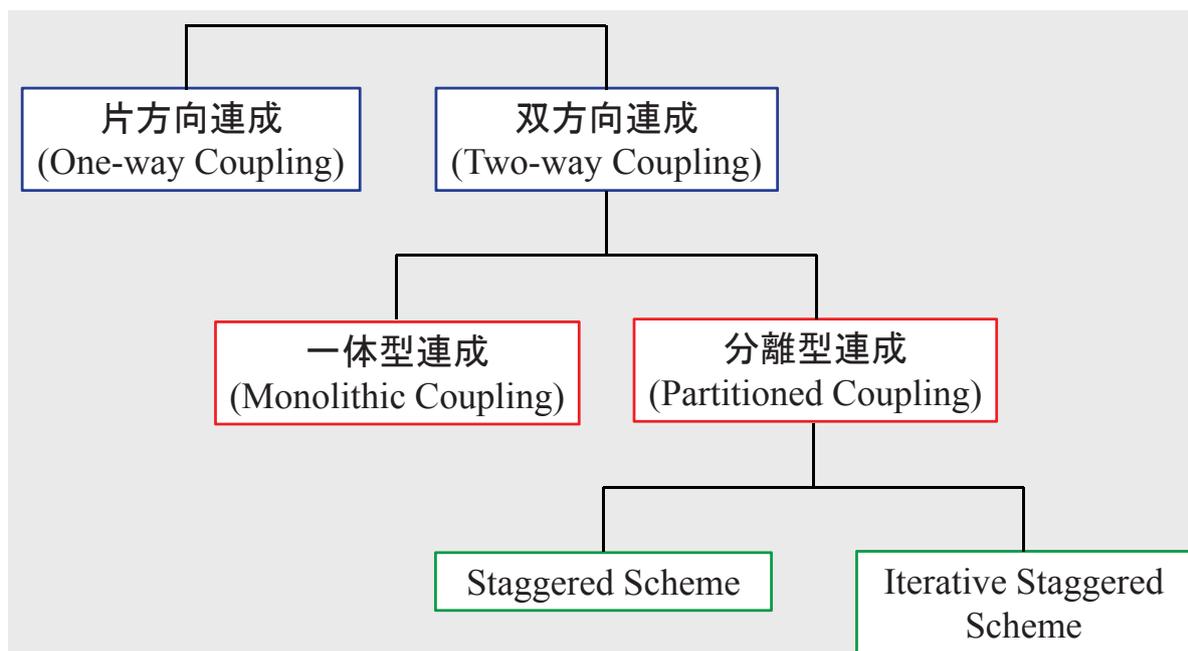
Fluid-Structure Interaction (FSI)

流体の流れは構造を変形，構造の変形はその周囲の流れに影響



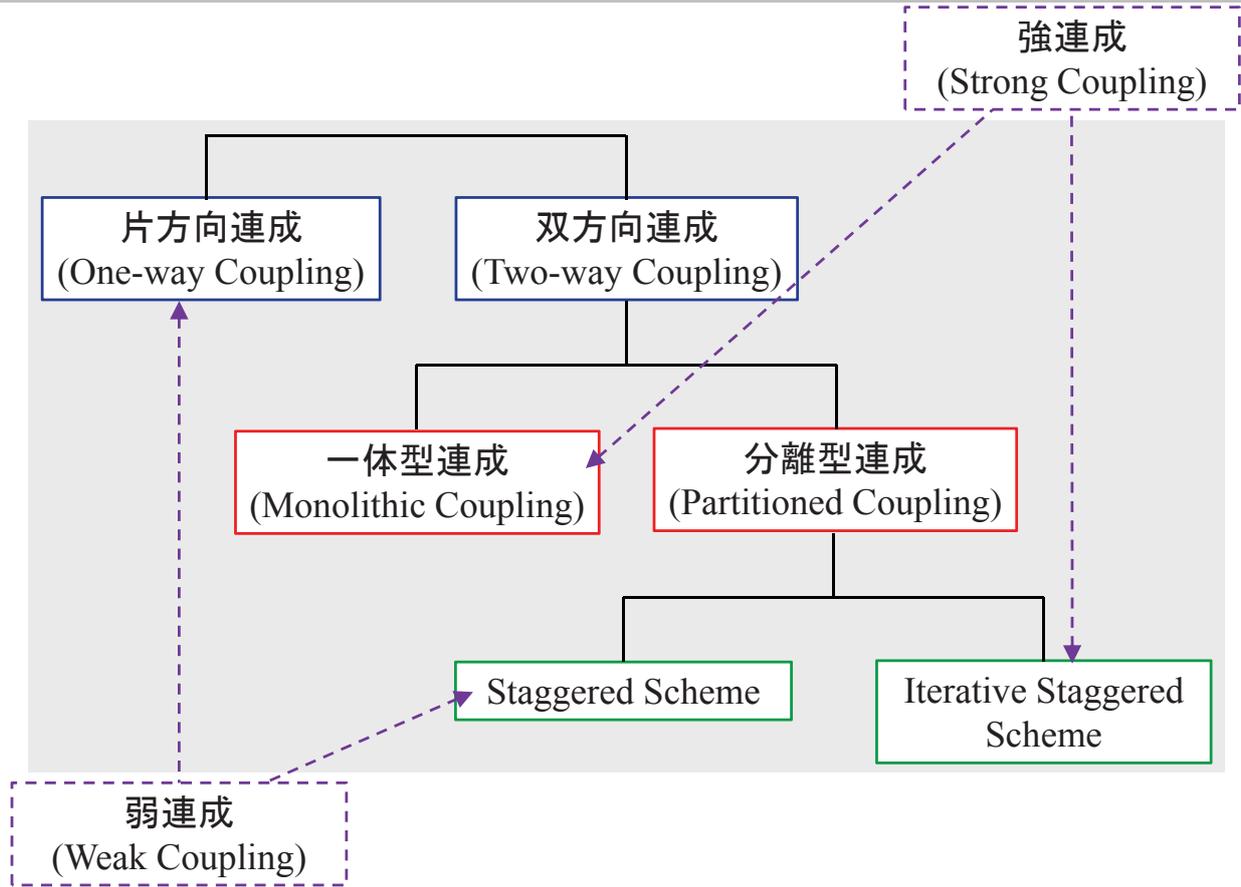
7

連成手法の分類 (1/2)



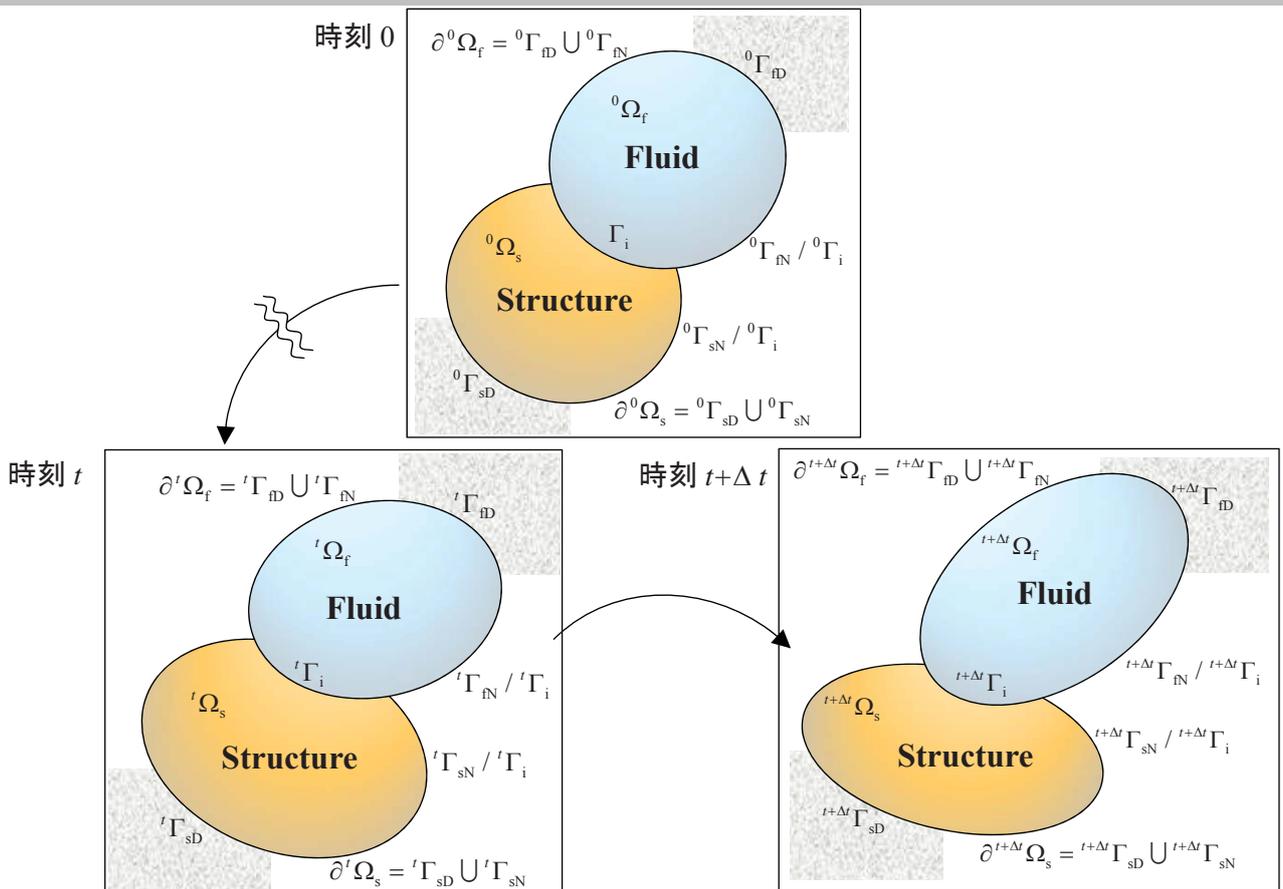
8

連成手法の分類 (2/2)



9

流体と構造の初期値・境界値問題



10

流体と構造の有限要素離散化

構造の未知量

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_s = {}^{t+\Delta t} \mathbf{u}_s$$

変位

流体の未知量

非圧縮性流体の場合 圧縮性流体の場合

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_f = \begin{pmatrix} {}^{t+\Delta t} \mathbf{v}_f \\ {}^{t+\Delta t} \mathbf{p}_f \end{pmatrix} \quad {}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_f = \begin{pmatrix} {}^{t+\Delta t} \rho_f \\ {}^{t+\Delta t} \mathbf{v}_f \\ {}^{t+\Delta t} \mathbf{p}_f \end{pmatrix}$$

速度・圧力 密度・速度・圧力

構造側の有限要素離散化式

$$\mathbf{q}_s({}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_s, {}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_f) = {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}_s$$

外力ベクトル【既知】

慣性カベクトル + 内カベクトル + 相互作用カベクトル【未知】

流体側の有限要素離散化式

$$\mathbf{q}_f({}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_f, {}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_s) = {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}_f$$

外力ベクトル (圧力項, 拡散項, 重力項)【既知】

慣性カベクトル + 内カベクトル + 相互作用カベクトル【未知】
(非定常項, 対流項) (圧力項, 拡散項) (圧力項, 拡散項)

11

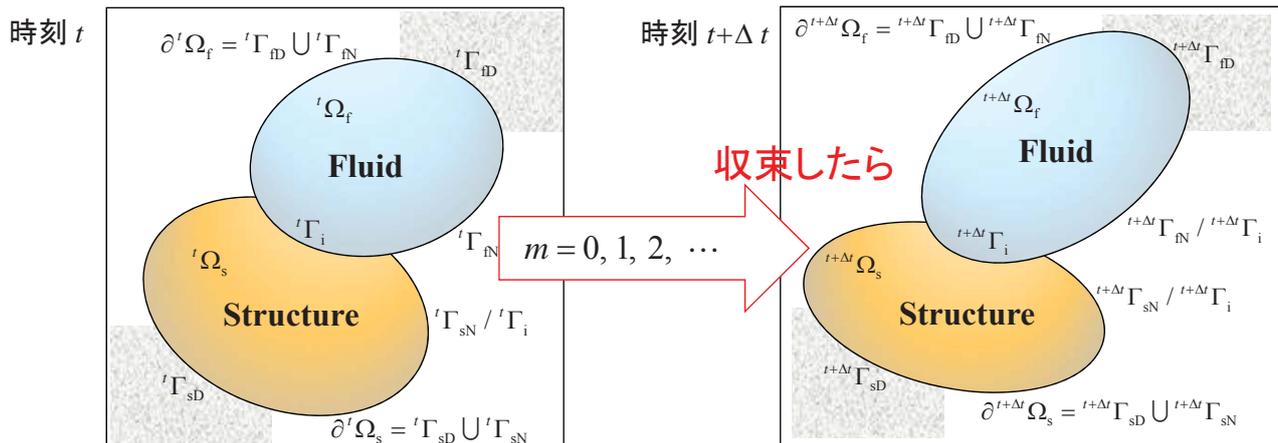
一体型連成

線形化した流体と構造の離散化式を繋ぐ

$$\begin{pmatrix} (m-1) \mathbf{K}_{ss} & (m-1) \mathbf{K}_{sf} \\ (m-1) \mathbf{K}_{fs} & (m-1) \mathbf{K}_{ff} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (m) \Delta \mathbf{x}_s \\ (m) \Delta \mathbf{x}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}_s - (m-1) \mathbf{q}_s \\ {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}_f - (m-1) \mathbf{q}_f \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} (m) \mathbf{x}_s = (m-1) \mathbf{x}_s + (m) \Delta \mathbf{x}_s \\ (m) \mathbf{x}_f = (m-1) \mathbf{x}_f + (m) \Delta \mathbf{x}_f \end{cases}$$

反復計算



12

分離型連成 (1/2)

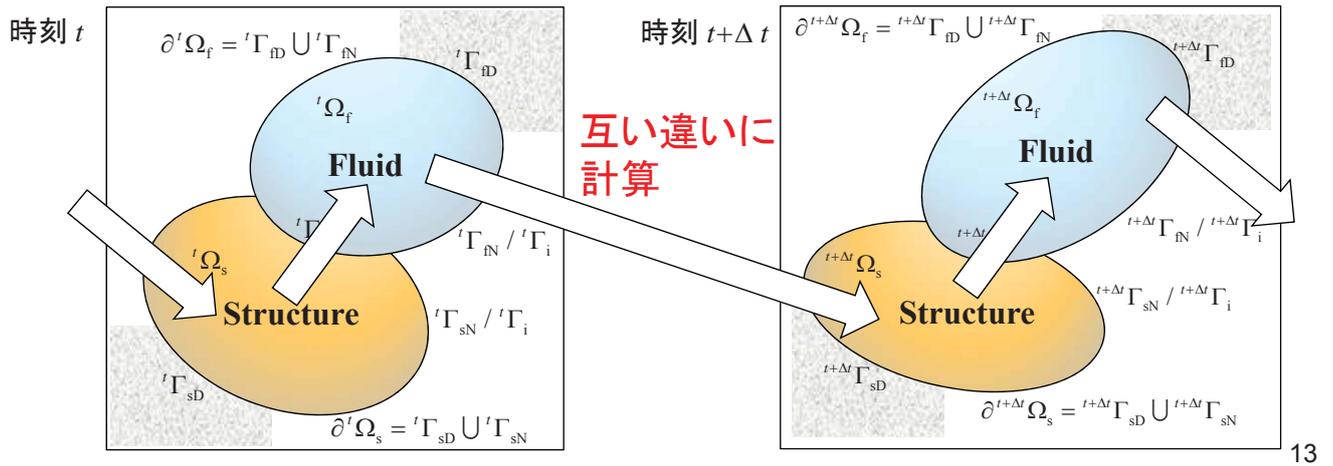
Staggered Scheme

$$\mathbf{q}_s({}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_s, {}^t \mathbf{x}_f) = {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}_s$$

固定

$$\mathbf{q}_f({}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_f, {}^{t+\Delta t} \mathbf{x}_s) = {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}_f$$

固定



分離型連成 (2/2)

Iterative Staggered Scheme (ブロックGauss-Seidel法)

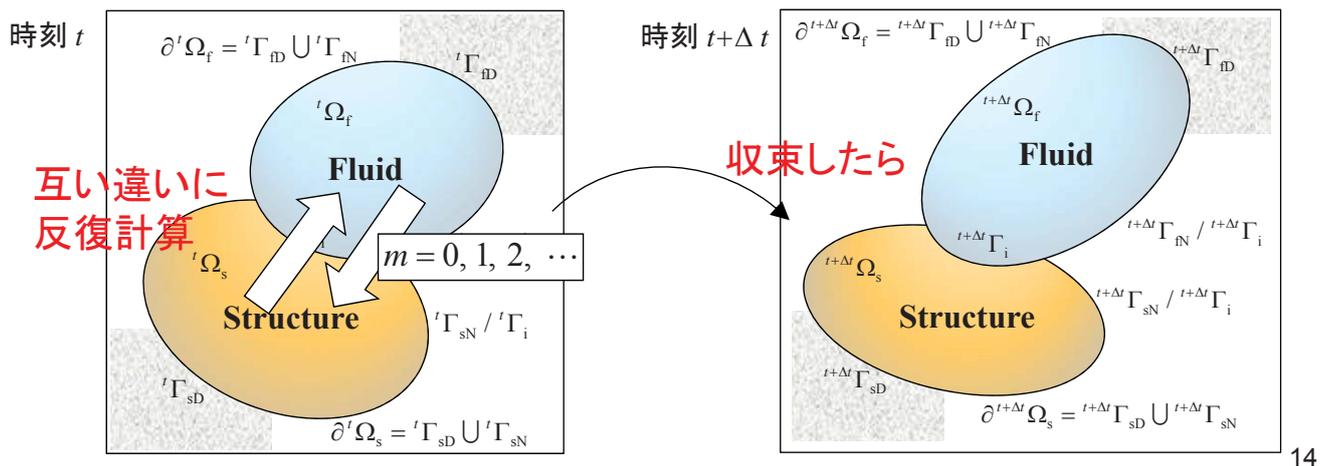
$$\mathbf{q}_s({}^{(m)} \mathbf{x}_s, {}^{(m-1)} \mathbf{x}_f) = {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}_s$$

固定

反復計算

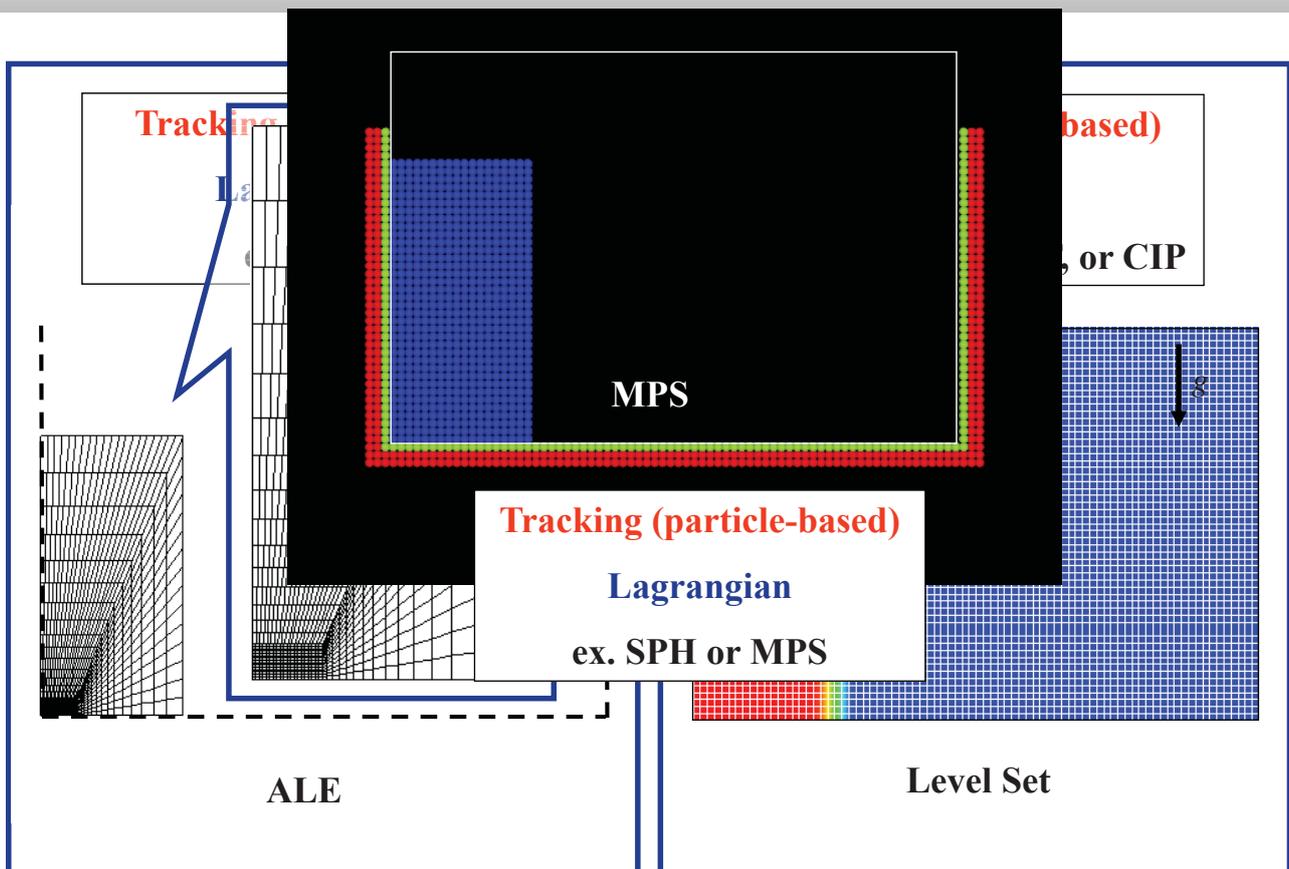
$$\mathbf{q}_f({}^{(m)} \mathbf{x}_f, {}^{(m)} \mathbf{x}_s) = {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}_f$$

固定



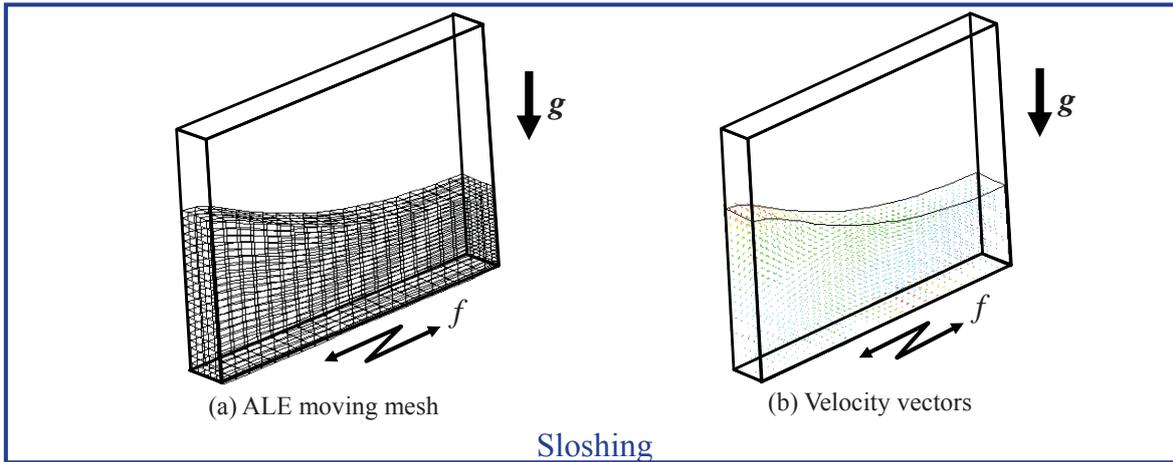
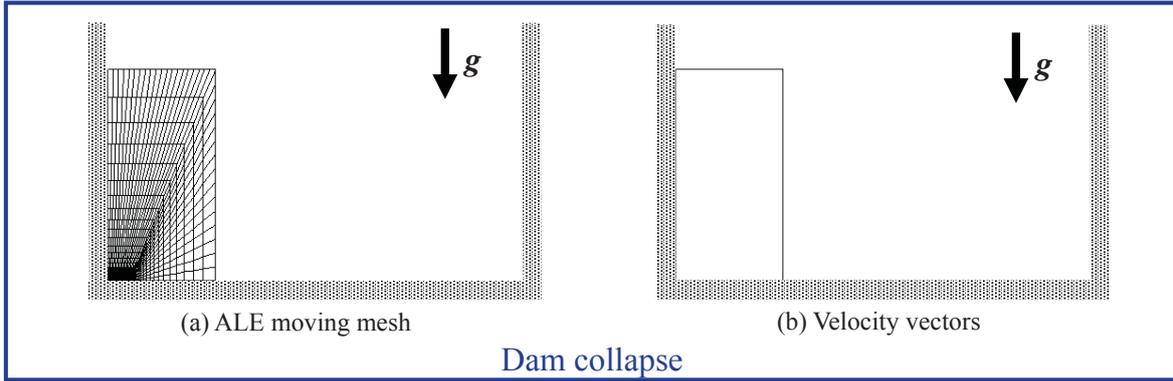
0. 自己紹介
1. 連成手法の分類
2. 種々の移動境界処理
3. 解析事例
 - 3.1. ブーメランの飛行
 - 3.2. 薄肉弾性板の渦励振
 - 3.3. エアバッグ展開
4. まとめ

Tracking or Capturing of Interface



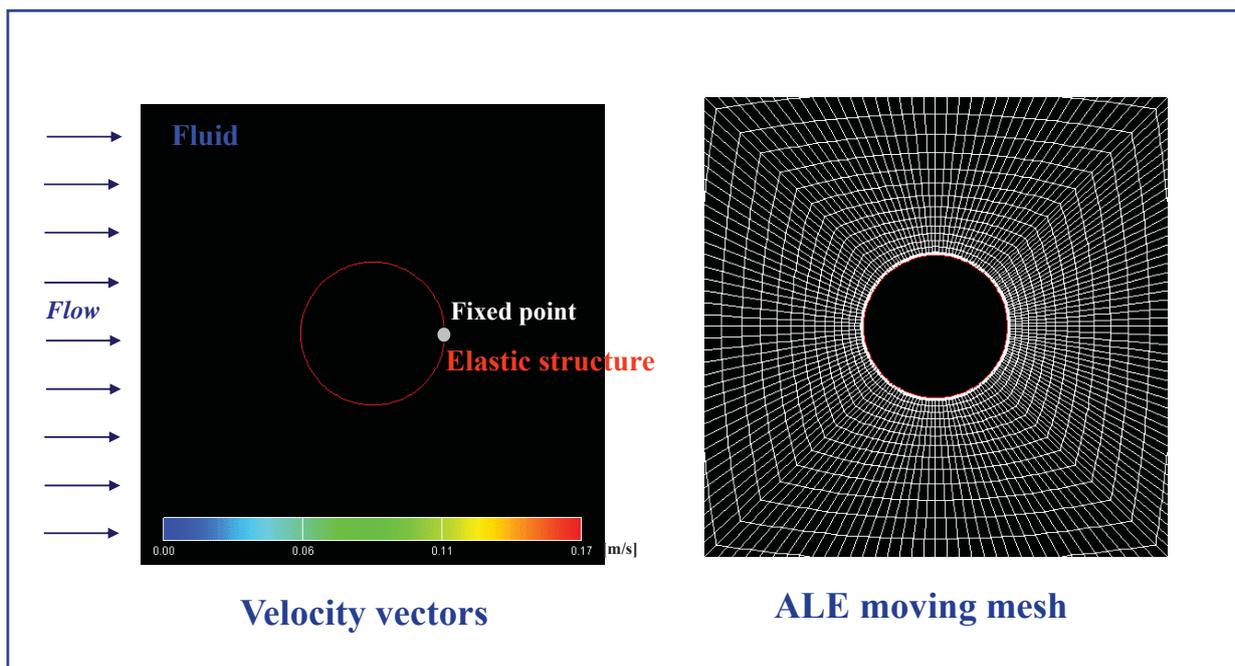
ALE法による自由表面解析

界面から遠方の流体: Eulerianメッシュ
 界面周囲の流体: ALEメッシュ
 界面: Lagrangianメッシュ



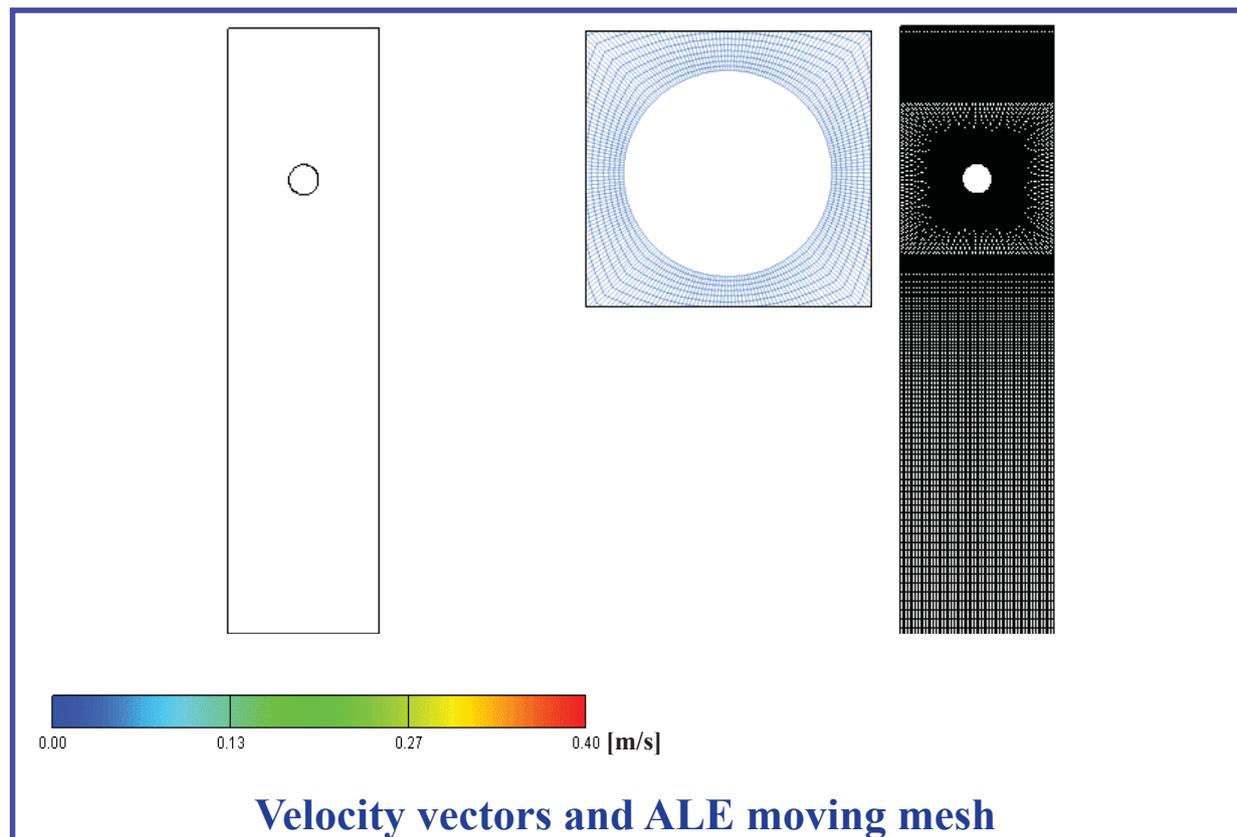
17

ALE法による弾性円筒の振動解析



18

ALE法による剛体の落下解析



19

講演内容

0. 自己紹介
1. 連成手法の分類
2. 種々の移動境界処理
3. 解析事例
 - 3.1. ブーメランの飛行
 - 3.2. 薄肉弾性板の渦励振
 - 3.3. エアバッグ展開
4. まとめ

20

解析事例「ブーメランの飛行」

本研究は、「安岡 志朗・野口 裕久・橋本 学, “ブーメランの流体構造連成解析,” 日本計算工学会 第11回計算工学会講演会, 2006.」で発表したものです



Boomerang with 4 wings



Actual flight orbit of the boomerang with 4 wings

回転の影響が物体の運動に顕著に反映

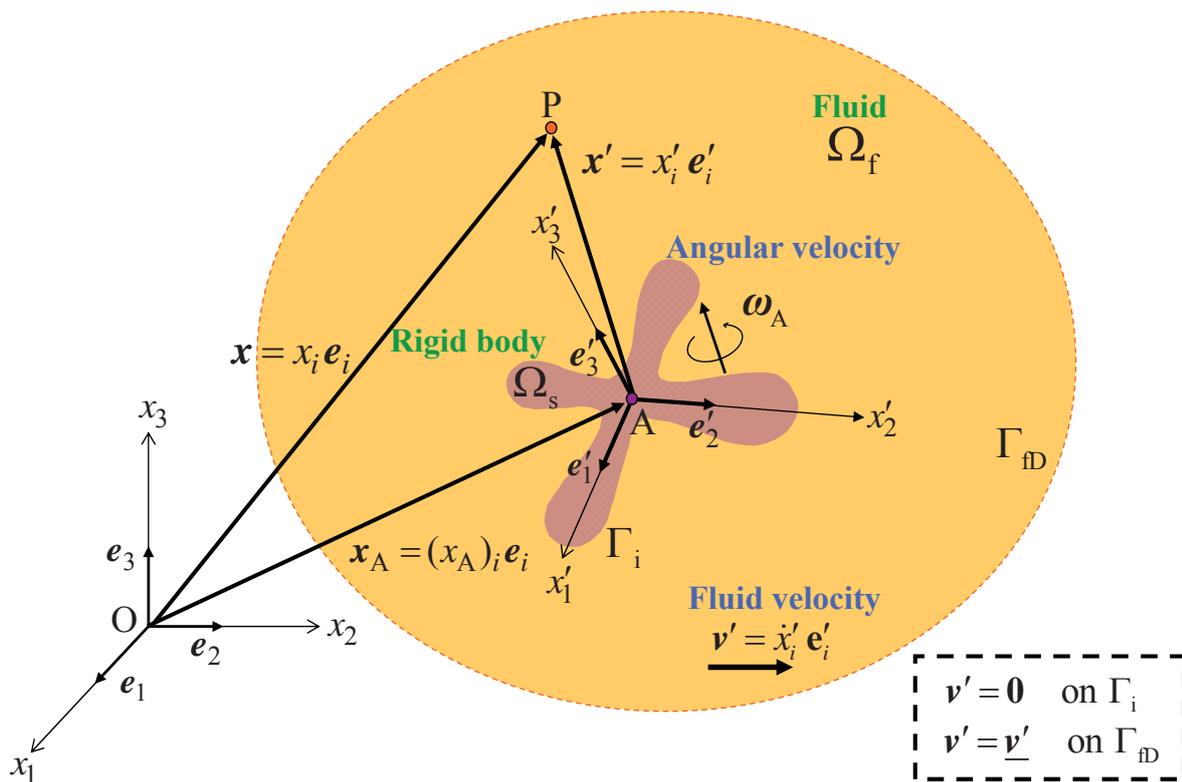
21

解析モデル

- ブーメラン(剛体): 飛行中にほとんど変形しないと仮定
 - ・ 剛体の運動: 重心の運動方程式とEulerの運動方程式
 - ・ 流体の運動によって, 運動方程式の外力が変化
- 空気(流体): 流体領域は十分に大きい
 - ・ 流体の運動: ブーメランに固定された動座標系で記述された連続の式とNavier-Stokes方程式
 - ・ 剛体の運動によって, 運動方程式の慣性力から現れる見かけの力と流体の境界条件が変化

22

ブーメランと流体の解析領域



Coordinate system fixed on a boomerang

23

ブーメランの基礎方程式

(重心の運動方程式)

$$M_A \ddot{\mathbf{x}}_A = \mathbf{F}$$

(Eulerの運動方程式)

$$\mathbf{I}_A \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_A + \boldsymbol{\omega}_A \times (\mathbf{I}_A \cdot \boldsymbol{\omega}_A) = \mathbf{N}$$

$\dot{} = d/dt$: 物質時間微分 [1/s]

$\mathbf{x}_A = (x_A)_i \mathbf{e}_i$: ブーメランの重心位置 [m]

M_A : ブーメランの質量 [kg]

\mathbf{F} : 外力 [N]

\mathbf{I}_A : 慣性テンソル [$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$]

$\boldsymbol{\omega}_A$: 角速度 [1/s]

\mathbf{N} : 外力モーメント [$\text{N} \cdot \text{m}$]

24

非圧縮性流体の基礎方程式

(連続の式)

$$\nabla \cdot \mathbf{v}' = 0$$

(Navier-Stokes方程式)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t'} + \rho (\mathbf{v}' \cdot \nabla) \mathbf{v}' = \nabla \cdot \mathbf{T} - \mathbf{f}$$

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{1} + 2\eta\mathbf{D} \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2} \{ \nabla \otimes \mathbf{v}' + (\nabla \otimes \mathbf{v}')^T \}$$

$$\mathbf{f} = \rho \left\{ \ddot{\mathbf{x}}_A + 2\boldsymbol{\omega}_A \times \mathbf{v}' + \frac{d\boldsymbol{\omega}_A}{dt'} \times \mathbf{x}' + \boldsymbol{\omega}_A \times (\boldsymbol{\omega}_A \times \mathbf{x}') \right\}$$

$\partial / \partial t' = \partial / \partial t|_{\mathbf{x}'}$: 位置 \mathbf{x}' を一定とした時間微分 [1/s]

$\mathbf{v}' = \dot{x}'_i \mathbf{e}'_i$: 速度ベクトル [m/s]

$\nabla = \partial / \partial x_i \mathbf{e}_i = \partial / \partial x'_i \mathbf{e}'_i$: 空間座標のナブラ [1/m]

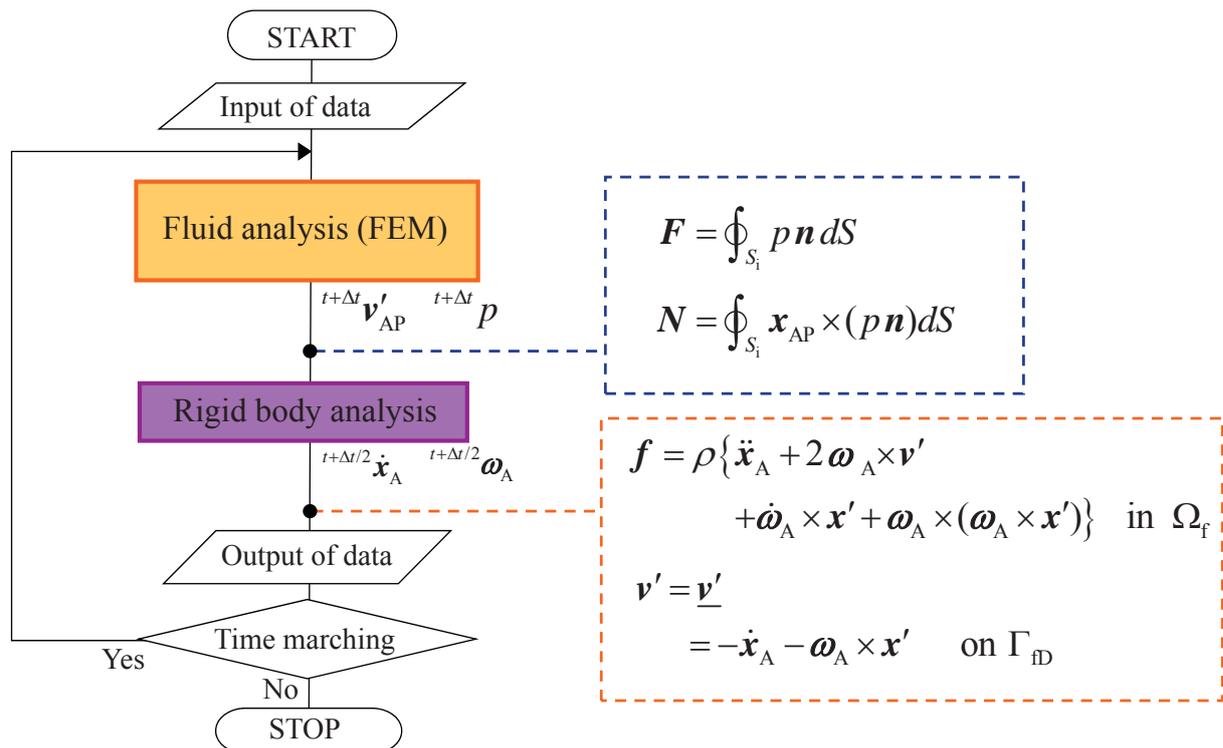
ρ : 流体密度 [kg/m³] $d\rho/dt = 0$ η : 粘性係数 [Pa·s]

p : 圧力 [Pa]

\mathbf{D} : 変形速度テンソル [1/s]

25

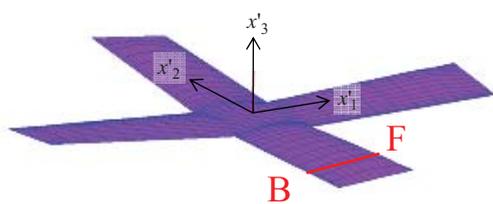
流体-剛体連成解析の計算方法



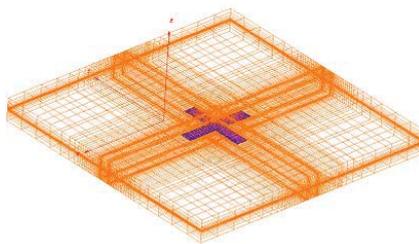
Algorithm of fluid-rigid body interaction analysis

26

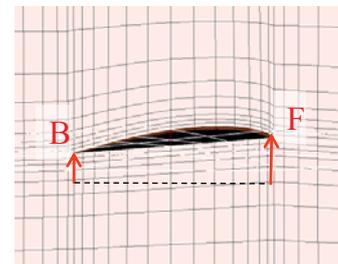
解析メッシュ



(a) Boomerang



(b) Fluid domain (58,320 nodes, 52,488 elements and 227,448 DOFs)



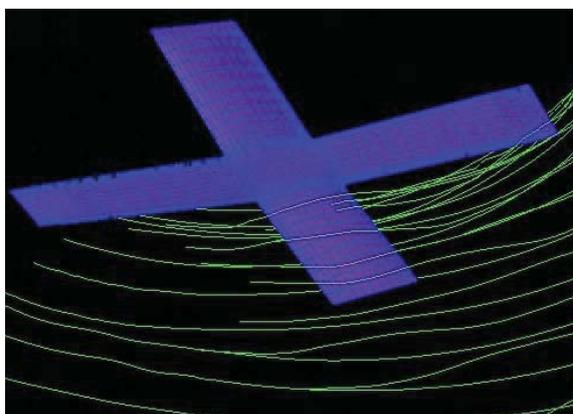
(c) Cross section F-B

Analysis model of Model 2 with twist and the fluid mesh

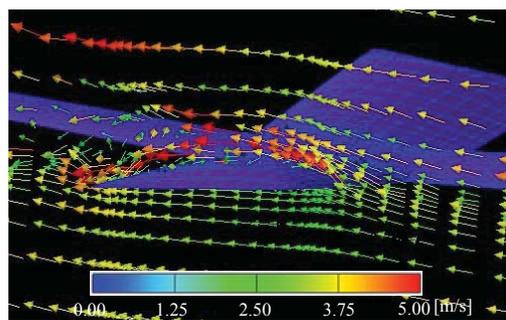
27

計算結果

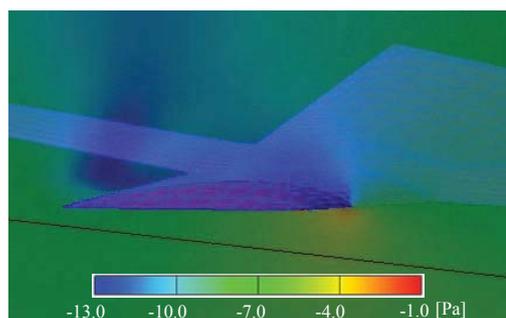
Flight direction of boomerang



(a) Streamlines



(b) Velocity vectors



(c) Pressure contours

Flow field around the boomerang

28

ブーメランの姿勢の計算方法

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{x} = {}^t\mathbf{x}_A + \Delta t {}^{t+\Delta t/2}\dot{\mathbf{x}}_A + x'_i \underline{{}^{t+\Delta t}_t\mathbf{R}} \cdot {}^t\mathbf{e}'_i$$

有限回転テンソル (Argyris(1982), Noguchi and Hisada (1993)) を利用

$$\underline{{}^{t+\Delta t}_t\mathbf{R}} = \mathbf{1} + \frac{\sin(\Delta t |{}^{t+\Delta t/2}\boldsymbol{\omega}|)}{\Delta t |{}^{t+\Delta t/2}\boldsymbol{\omega}|} {}^{t+\Delta t}_t\boldsymbol{\Phi} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sin(\Delta t |{}^{t+\Delta t/2}\boldsymbol{\omega}|/2)}{\Delta t |{}^{t+\Delta t/2}\boldsymbol{\omega}|/2} \right)^2 ({}^{t+\Delta t}_t\boldsymbol{\Phi})^2$$

$$\begin{aligned} {}^{t+\Delta t}_t\boldsymbol{\Phi} = \Delta t \{ & -{}^{t+\Delta t/2}\omega_3 \mathbf{e}_1 \otimes \mathbf{e}_2 + {}^{t+\Delta t/2}\omega_2 \mathbf{e}_1 \otimes \mathbf{e}_3 \\ & + {}^{t+\Delta t/2}\omega_3 \mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{e}_1 - {}^{t+\Delta t/2}\omega_1 \mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{e}_3 \\ & - {}^{t+\Delta t/2}\omega_2 \mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{e}_1 + {}^{t+\Delta t/2}\omega_1 \mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{e}_2 \} \end{aligned}$$

剛体の大回転運動を精度良く求めることが可能

Argyris, J., *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, 32, (1982), pp. 85-155.

Noguchi, H. and Hisada, T., *Comp. & Struct.*, 47-4/5, (1993), pp. 699-710.

29

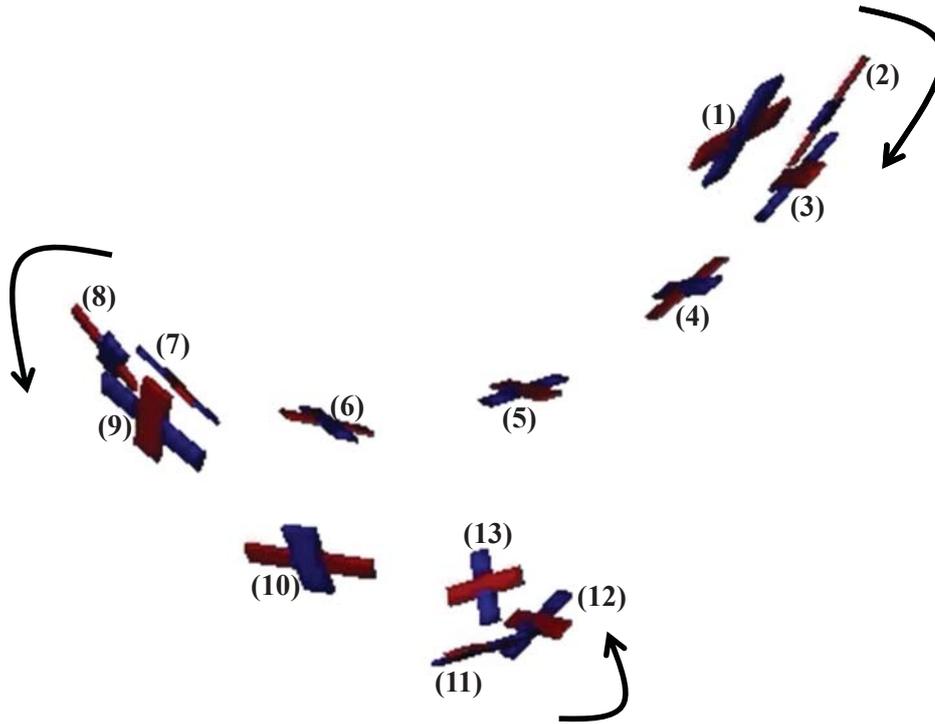
計算結果



Flight of boomerang

30

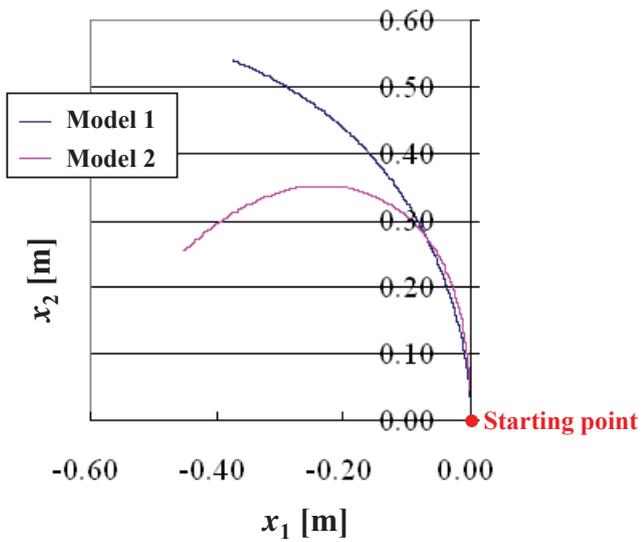
計算結果



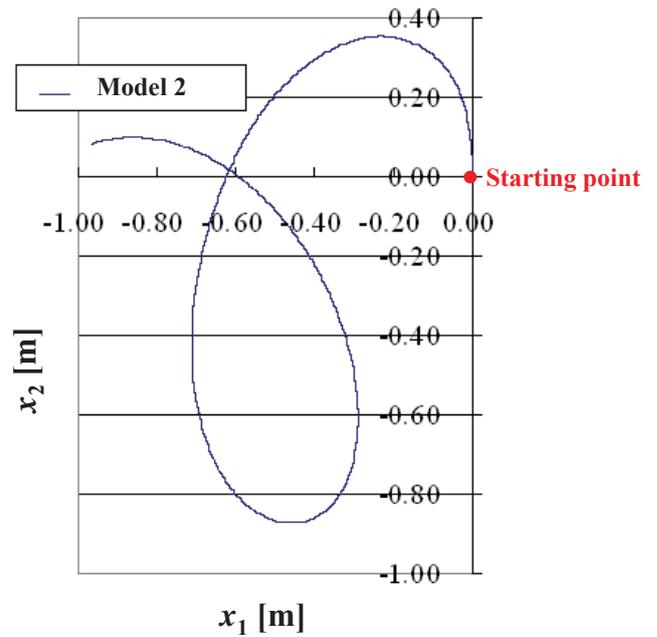
Flight of boomerang

計算結果

Model 1: 迎角無
Model 2: 迎角有



Flight orbits of boomerang (Model 1 and Model 2)



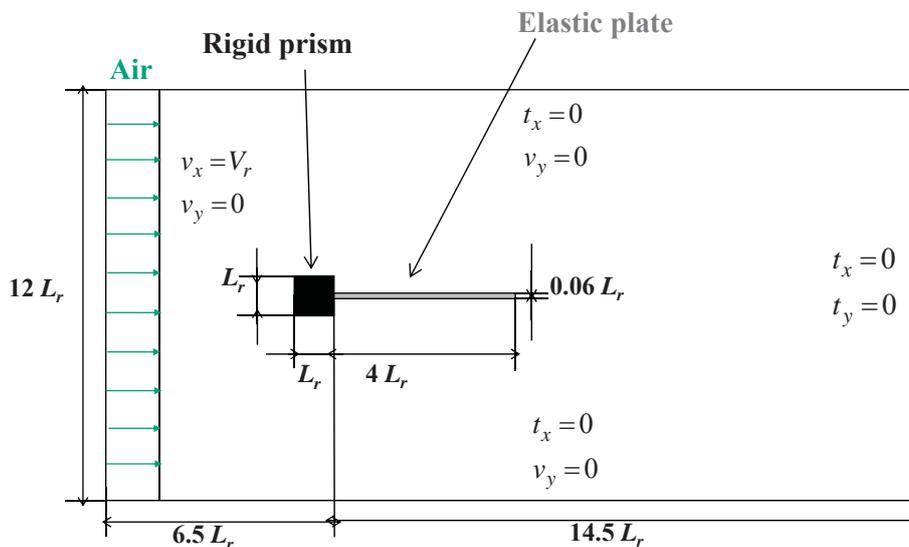
Flight orbits of boomerang (Model 2)

0. 自己紹介
1. 連成手法の分類
2. 種々の移動境界処理
3. **解析事例**
 - 3.1. ブーメランの飛行
 - 3.2. **薄肉弾性板の渦励振**
 - 3.3. エアバッグ展開
4. まとめ

33

解析事例「薄肉弾性板の渦励振」

本研究は、「橋本 学・山本 秀知・棚橋 隆彦, “GSMAC-ALE有限要素法に基づいた流体固体連成解析”, 日本計算工学会論文集, 論文番号20060019, (2006), pp.1-126.」, 他で発表したものです



$$L_r = 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}, V_r = 51.3 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

Analysis model and boundary conditions

34

構造の支配方程式

構造 (圧縮性, 弾性を仮定)

(運動方程式)

$${}^0\rho \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = {}^0\nabla \cdot (\mathbf{S} \cdot \mathbf{F}^T)$$

(St. Venant-Kirchhoff体の構成方程式)

$$\mathbf{S} = \lambda (\text{tr} \mathbf{E}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{E}$$

(ひずみの定義式)

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T - \mathbf{I})$$

(変形こう配の定義式)

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} + ({}^0\nabla \otimes \mathbf{u})^T$$

${}^0\rho$: 密度 (基準配置) [kg/m³]

d/dt : 物質時間微分 [1/s]

\mathbf{u} : 変位 [m]

\mathbf{S} : 第2Piola-Kirchhoff応力 [Pa]

\mathbf{F} : 変形こう配テンソル [-]

${}^0\nabla$: ナブラ (物質座標) [1/m]

\mathbf{I} : 恒等テンソル [-]

\mathbf{E} : Green-Lagrangeひずみテンソル [-]

λ μ : Lamé 定数 [Pa]

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

E : Young率 [Pa]

ν : Poisson比 [-]

35

流体の支配方程式 (1/2)

流体 (非圧縮性, 粘性を仮定)

(連続の式)

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

(運動方程式)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \Big|_x + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{T}$$

(Newton流体の構成方程式)

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + 2\eta \mathbf{D}$$

(変形速度の定義式)

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} \{ \nabla \otimes \mathbf{v} + (\nabla \otimes \mathbf{v})^T \}$$

ρ : 密度 $d\rho/dt = 0$

$\partial/\partial t$: 移動しない位置 \mathbf{x} を固定した時間微分 [1/s]

∇ : ナブラ (空間座標) [1/m]

\mathbf{v} : 速度ベクトル [m/s]

\mathbf{T} : Cauchy 応力テンソル [Pa]

p : 圧力 [Pa]

\mathbf{I} : 恒等テンソル [-]

η : 粘性係数 [Pa]

\mathbf{D} : 変形速度テンソル [1/s]

36

流体の支配方程式 (2/2)

流体 (非圧縮性, 粘性を仮定)

(連続の式)

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

(運動方程式)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \Big|_{x_a} + \rho \{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_a) \cdot \nabla\} \mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{T}$$

(Newton流体の構成方程式)

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + 2\eta\mathbf{D}$$

(変形速度の定義式)

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} \{ \nabla \otimes \mathbf{v} + (\nabla \otimes \mathbf{v})^T \}$$

ρ : 密度 $d\rho/dt = 0$

$\partial/\partial t$: 任意に動く位置 x_a を固定した時間微分 [1/s]

∇ : ナブラ (空間座標) [1/m]

\mathbf{v} : 速度ベクトル [m/s]

\mathbf{v}_a : 任意の速度ベクトル [m/s]

\mathbf{T} : Cauchy 応力テンソル [Pa]

p : 圧力 [Pa]

\mathbf{I} : 恒等テンソル [-]

η : 粘性係数 [Pa]

\mathbf{D} : 変形速度テンソル [1/s]

37

流体構造界面での条件 (粘性ありの場合)

流体構造界面 (接線方向へのすべり無し条件を考慮)

(運動学的条件)

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{u}}{dt}$$

流体と構造の速度が一致

(動力的条件)

$$\mathbf{n}_f \cdot \mathbf{T}_f = \mathbf{n}_f \cdot \mathbf{T}_s$$

流体と構造のトラクションが釣り合う

\mathbf{n}_f : 流体領域の外向き単位法線ベクトル [-]

\mathbf{v}_f : 流速 [m/s]

\mathbf{u}_s : 構造変位 [m]

\mathbf{T}_f : 流体のCauchy応力テンソル [Pa]

\mathbf{T}_s : 構造のCauchy応力テンソル [Pa]

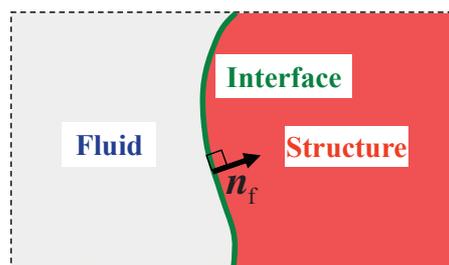
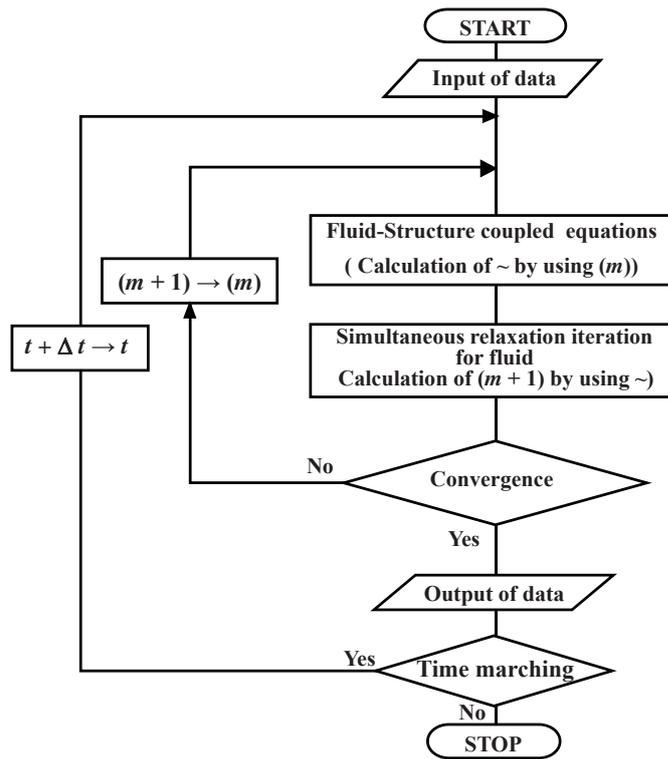


Fig. Definition of the outward unit normal vector

38

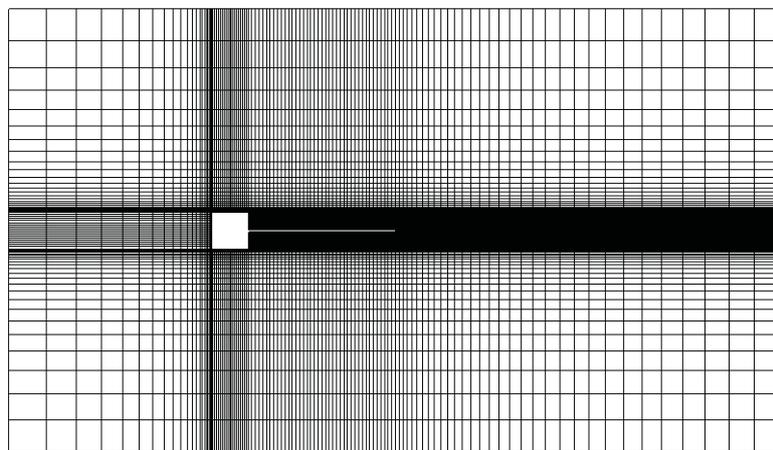
GSMAC-ALE有限要素法に基づいた流体固体連成解析



Flowchart of FSI analysis based on ALE GSMAC-FEM

39

解析メッシュ



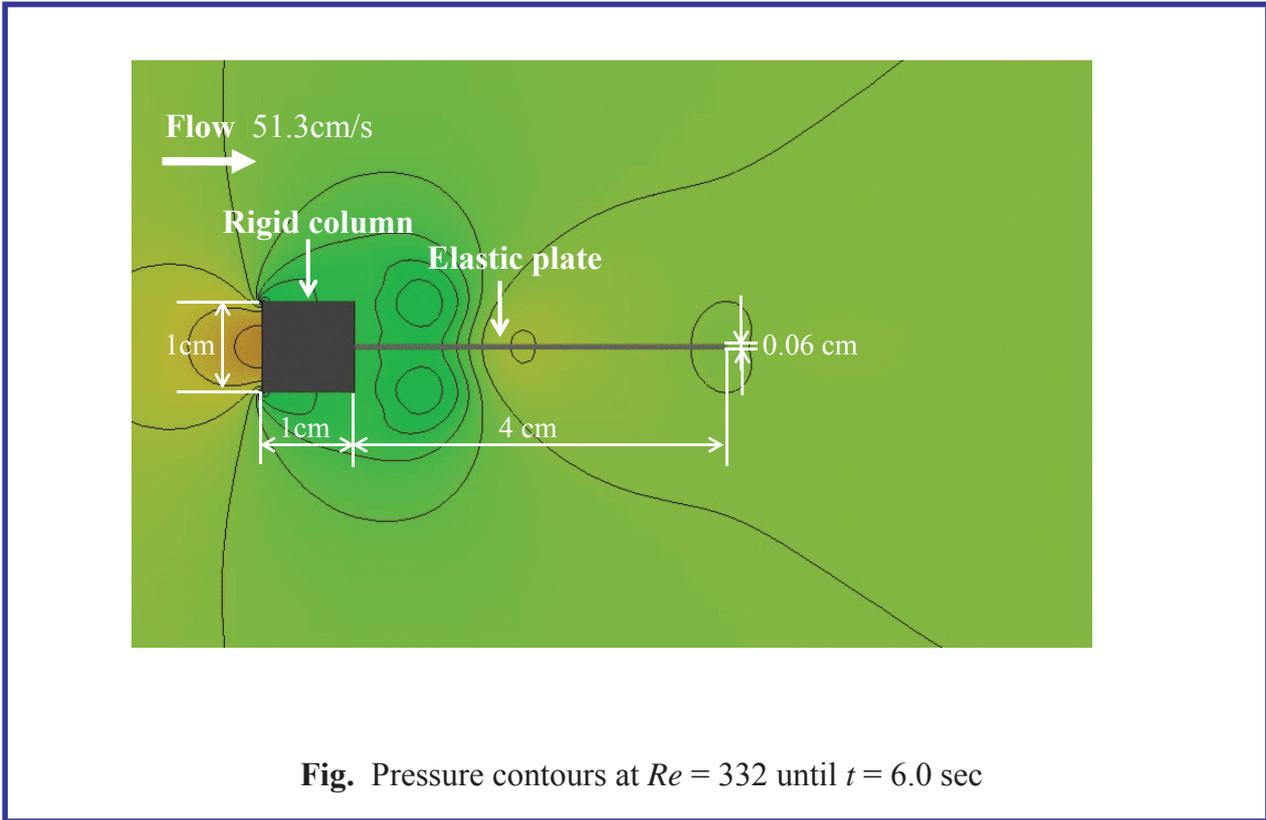
Analysis mesh (solid: 40×2 Q_1 -elements, fluid: $8,680$ Q_1Q_0 -elements)

メッシュの制御方法

ALE法のメッシュ速度: 弾性板の壁面から流体領域の遠方へ線形に変化

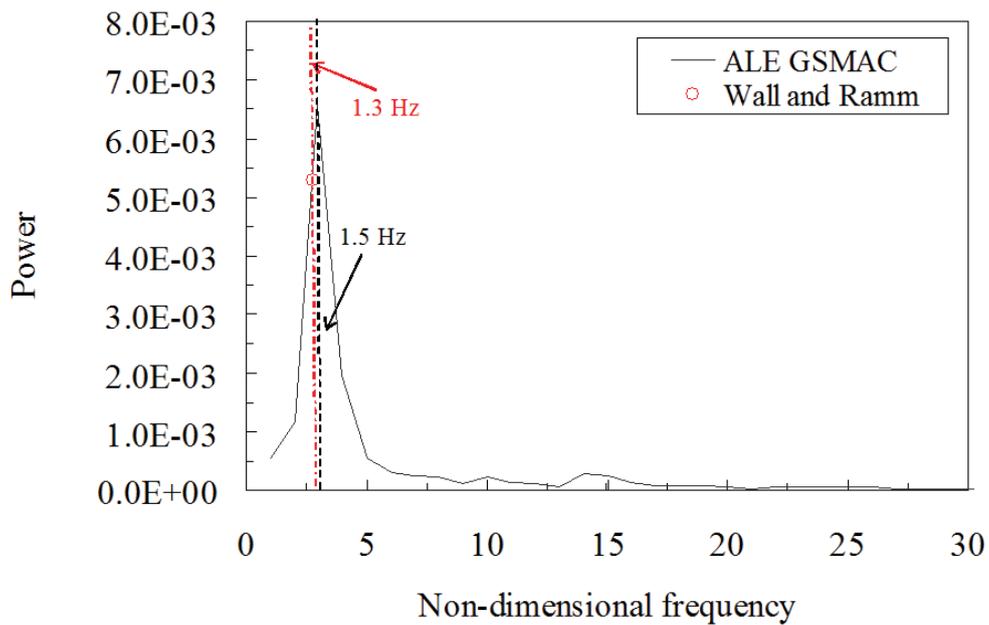
40

計算結果



41

連成振動の検討



Frequencies of displacement at the tip of elastic plate

Wall, W. A. and Ramm, E., *Comput. Mech. (World Congress)*, New Trends and Applications, (1998), pp.1-20.

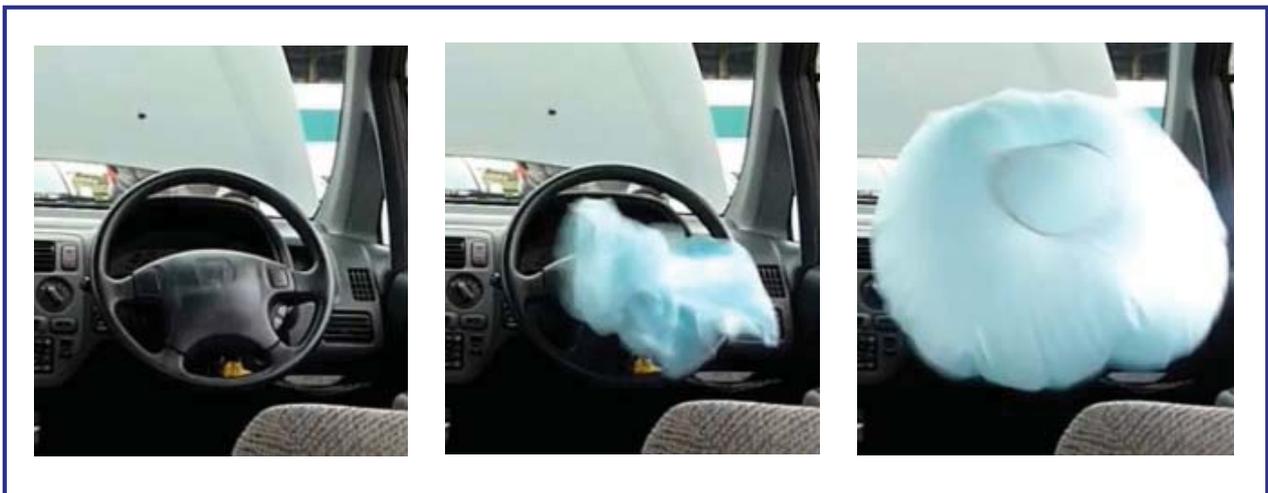
42

0. 自己紹介
1. 連成手法の分類
2. 種々の移動境界処理
3. **解析事例**
 - 3.1. ブーメランの飛行
 - 3.2. 薄肉弾性板の渦励振
 - 3.3. **エアバッグ展開**
4. まとめ

解析事例「エアバッグ展開」

本研究は、「橋本 学・小野 謙二・野口 裕久, 日本計算工学会論文集, 論文番号 20080028, (2008), pp.1-15.」, 「Gaku Hashimoto and Kenji Ono, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.58, (2010), pp.325-342.」 「Gaku Hashimoto, Kenji Ono and Hiroshi Okuda, *Interaction and Multiscale Mechanics*, Vol.5, No.3, (2012), pp.287-318. 」, 他で発表したものです

高速流・構造大変形・自己接触・摩擦のような物理現象を含むFSI問題



構造の支配方程式

構造 (圧縮性, 弾性を仮定)

(運動方程式)

$${}^0\rho \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = {}^0\nabla \cdot (\mathbf{S} \cdot \mathbf{F}^T)$$

(St. Venant-Kirchhoff体の構成方程式)

$$\mathbf{S} = \lambda (\text{tr} \mathbf{E}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{E}$$

(ひずみの定義式)

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T - \mathbf{I})$$

(変形こう配の定義式)

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} + ({}^0\nabla \otimes \mathbf{u})^T$$

${}^0\rho$: 密度 (基準配置) [kg/m³]

d/dt : 物質時間微分 [1/s]

\mathbf{u} : 変位 [m]

\mathbf{S} : 第2Piola-Kirchhoff応力 [Pa]

\mathbf{F} : 変形こう配テンソル [-]

${}^0\nabla$: ナブラ (物質座標) [1/m]

\mathbf{I} : 恒等テンソル [-]

\mathbf{E} : Green-Lagrangeひずみテンソル [-]

λ μ : Lamé 定数 [Pa]

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

E : Young率 [Pa]

ν : Poisson比 [-]

45

流体の支配方程式

流体 (圧縮性, 非粘性, 断熱, 理想気体を仮定)

(連続の式, 運動方程式, 圧力変動方程式)

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{f} = \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{,i}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{f}_{,i} + (\mathbf{v}_{,i} \cdot \nabla) \mathbf{f} = \mathbf{g}_{,i}$$

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} \rho \\ \mathbf{v} \\ p \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{g} \equiv \begin{pmatrix} g_\rho \\ \mathbf{g}_v \\ g_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \\ -\frac{\nabla p}{\rho} \\ -\kappa p \nabla \cdot \mathbf{v} \end{pmatrix}$$

$\partial/\partial t$: 空間時間微分 [1/s]

ρ : 密度 (現配置) [kg/m³]

∇ : ナブラ (空間座標) [1/m] $(, = \frac{\partial}{\partial x_i})$

\mathbf{v} : 速度 [m/s]

p : 圧力 [Pa]

κ : 比熱比 (空気: 1.4) [-]

46

流体構造界面での条件 (粘性なしの場合)

流体構造界面 (接線方向へのスリップ条件を考慮)

(運動学的条件)

$$\mathbf{n}_f \cdot \mathbf{v}_f = \mathbf{n}_f \cdot \frac{d\mathbf{u}_s}{dt}$$

流体と構造の法線速度成分が一致
(界面を横切る質量流量がない)

(動力的条件)

$$-p \mathbf{n}_f = \mathbf{n}_f \cdot \mathbf{T}_s$$

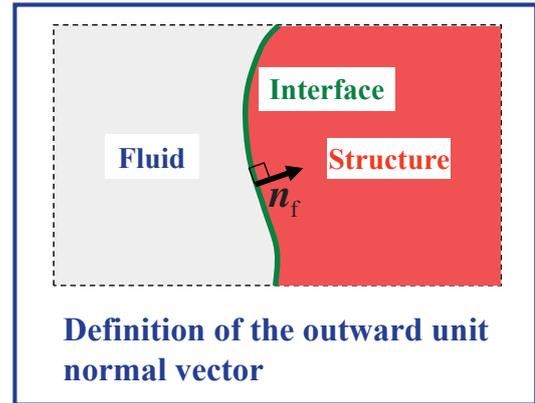
流体と構造のトラクションがつり合う

\mathbf{n}_f : 流体領域の外向き単位法線ベクトル [-]

\mathbf{v}_f : 流速 [m/s]

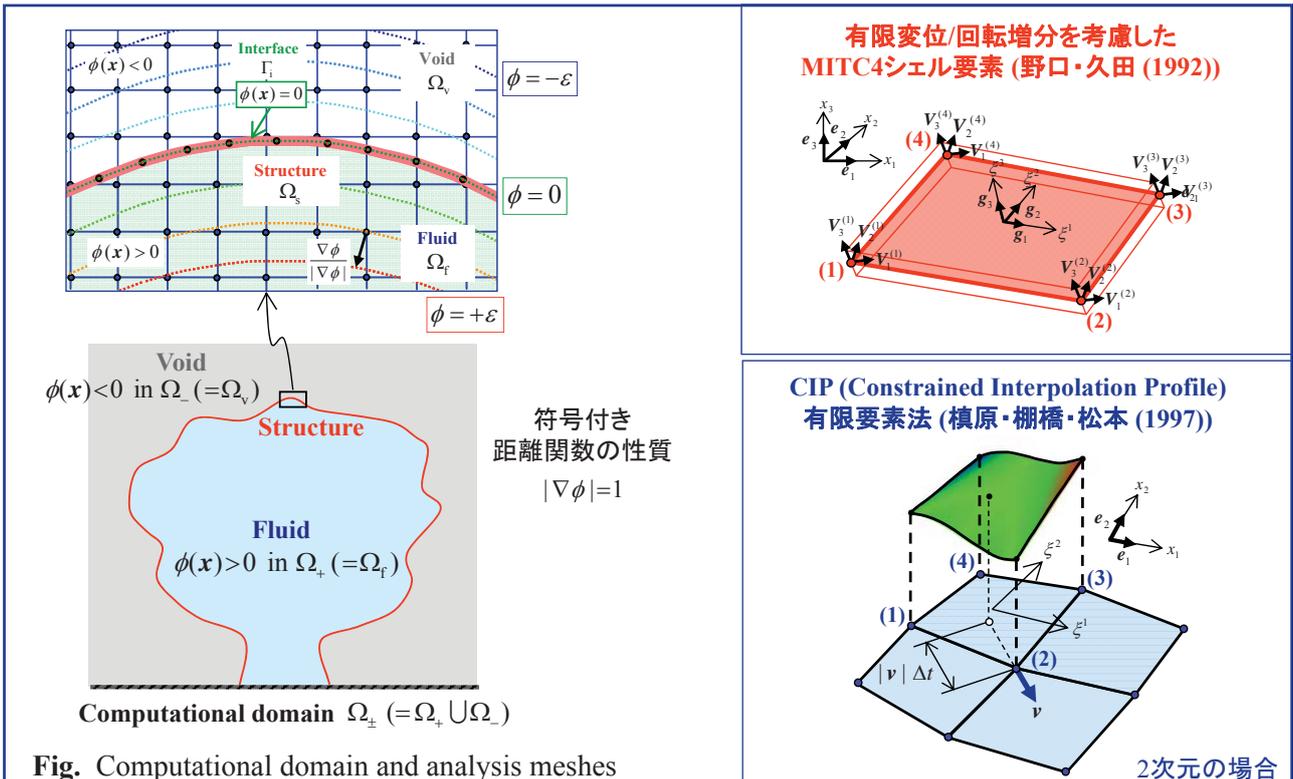
\mathbf{u}_s : 構造変位 [m]

\mathbf{T}_s : 構造のCauchy応力テンソル [Pa]



47

薄い弾性構造の内側の流体領域に対するアプローチ



野口裕久・久田俊明, 機論A, 58-550, (1992), pp.943-950.
槇原孝文・棚橋隆彦・松本昌昭, 機論B, 63-609, (1997), pp.1612-1619.

48

レベルセット関数による界面のCapturing

(仮想粒子「レベルセット仮想粒子」)
レベルセット関数の値
 $\phi_{vp}^J = 0, \pm {}^0L_s, \pm 2 {}^0L_s, \pm 3 {}^0L_s, \dots$
法線速度の値
 $(v_n)_{vp}^J$: 法線 (点線) でつながっている構造と同じ

MLS (Moving Least Squares) 近似

$$\phi^I \simeq \phi_h(x^I) \equiv \sum_{J \in \Lambda^I} \{w(x^I - x_{vp}^J, h_{vp}^J) p^T(x^I) A^{-1}(x^I) p(x_{vp}^J)\} \phi_{vp}^J$$

$$A(x^I) = \sum_{J \in \Lambda^I} w(x^I - x_{vp}^J, h_{vp}^J) p(x_{vp}^J) p^T(x_{vp}^J)$$

$$\mathbf{f} = (\rho \quad \mathbf{v} \quad p)^T$$

$$\mathbf{v} = v_n \left(-\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) + \mathbf{v}_t$$

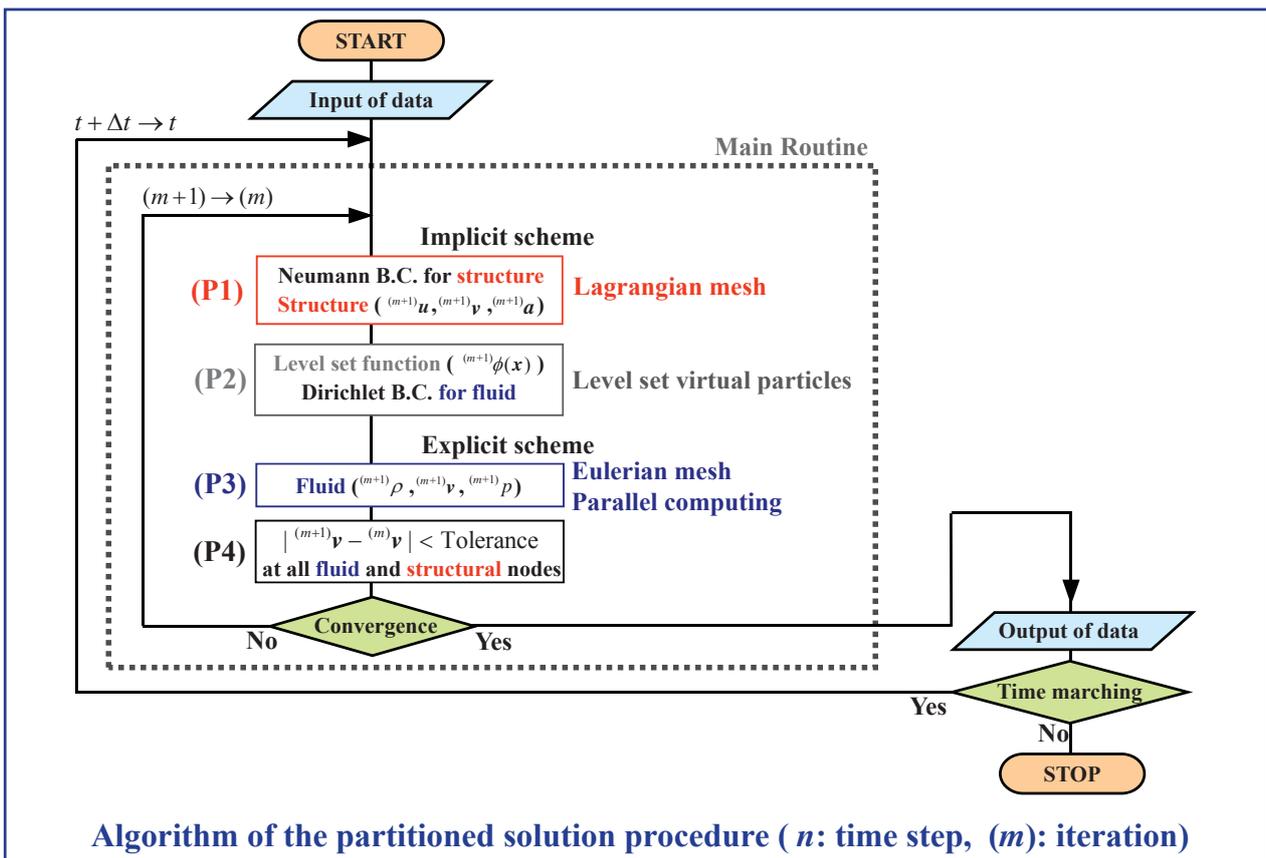
外挿式 [9]

$$\mathbf{f}_P = \left(1 - \frac{\phi_P}{\phi_R} \right) \mathbf{f}_Q + \left(\frac{\phi_P}{\phi_R} \right) \mathbf{f}_R$$

Fluid mesh, structural mesh and level set virtual particles

49

流体構造連成解析手法のアルゴリズム



50

ベンチマーク問題: レベルセット関数の生成能力の検討

構造に与える速度 (Enright (2002))

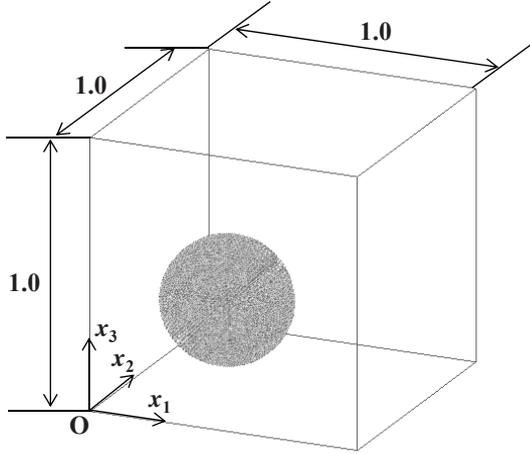
$$v_1 = 2 \sin^2(\pi x_1) \sin(2\pi x_2) \sin(2\pi x_3)$$

$$v_2 = -\sin(2\pi x_1) \sin^2(\pi x_2) \sin(2\pi x_3)$$

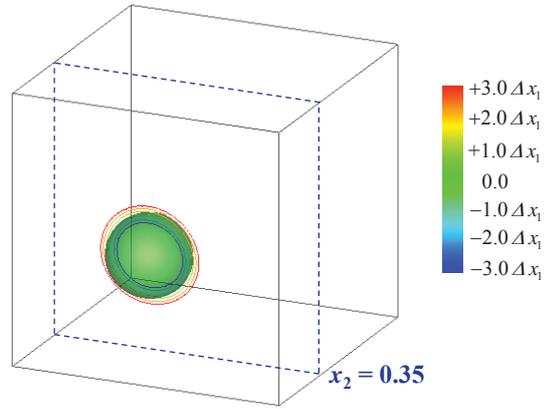
$$v_3 = -\sin(2\pi x_1) \sin(2\pi x_2) \sin^2(\pi x_3)$$

Calculation conditions

Fluid element	Structure element	Time increment Δt
$100 \times 100 \times 100$	7,776	1.0×10^{-2}
$(\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = 1.0 \times 10^{-2})$	$(\Delta L_{\max} = 6.576 \times 10^{-3})$	



(a) Initial state of particles



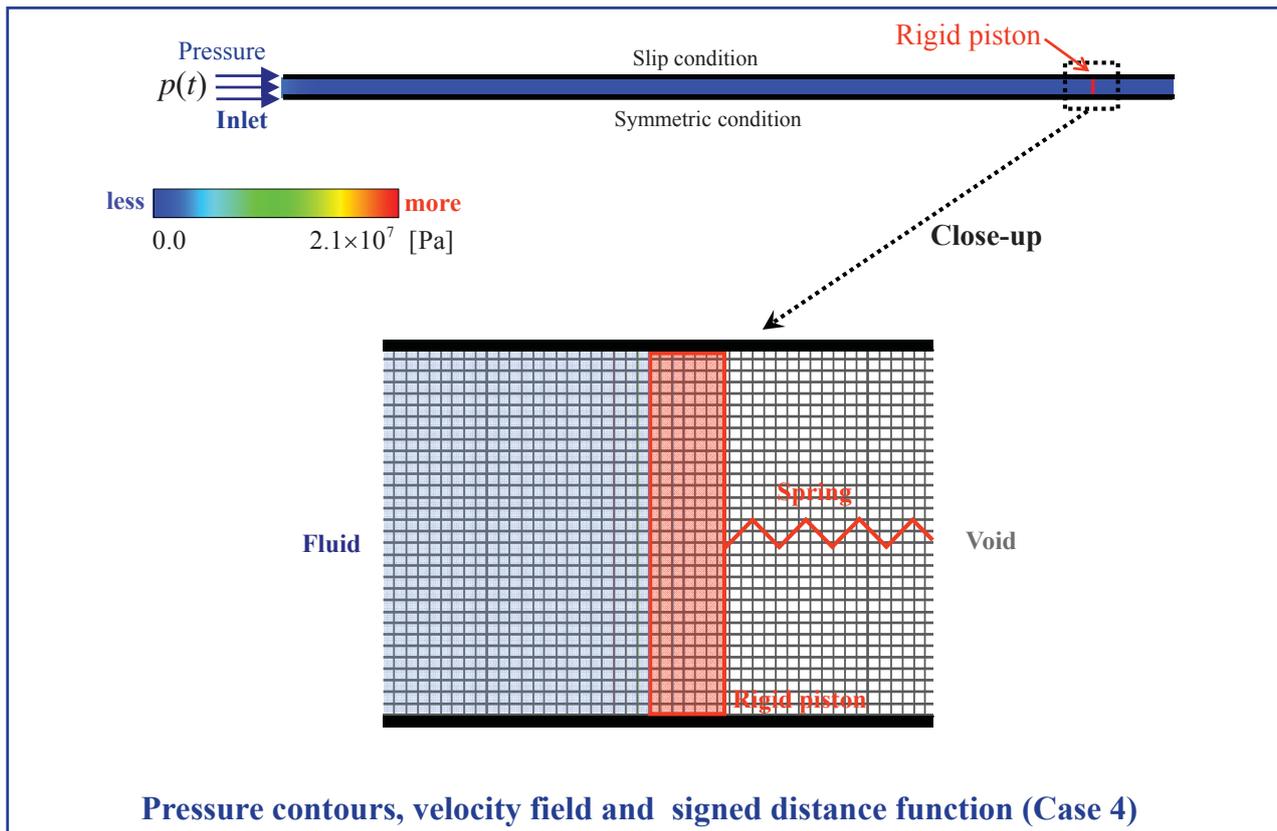
(b) Level set function $\phi(x)$

Generation of the level set function on the fluid mesh until $t = 0.5$

Enright, D., Fedkiw, R., Ferziger, J., Mitchell, I., *Journal of Computational Physics*, 183, (2002), pp.83-116.

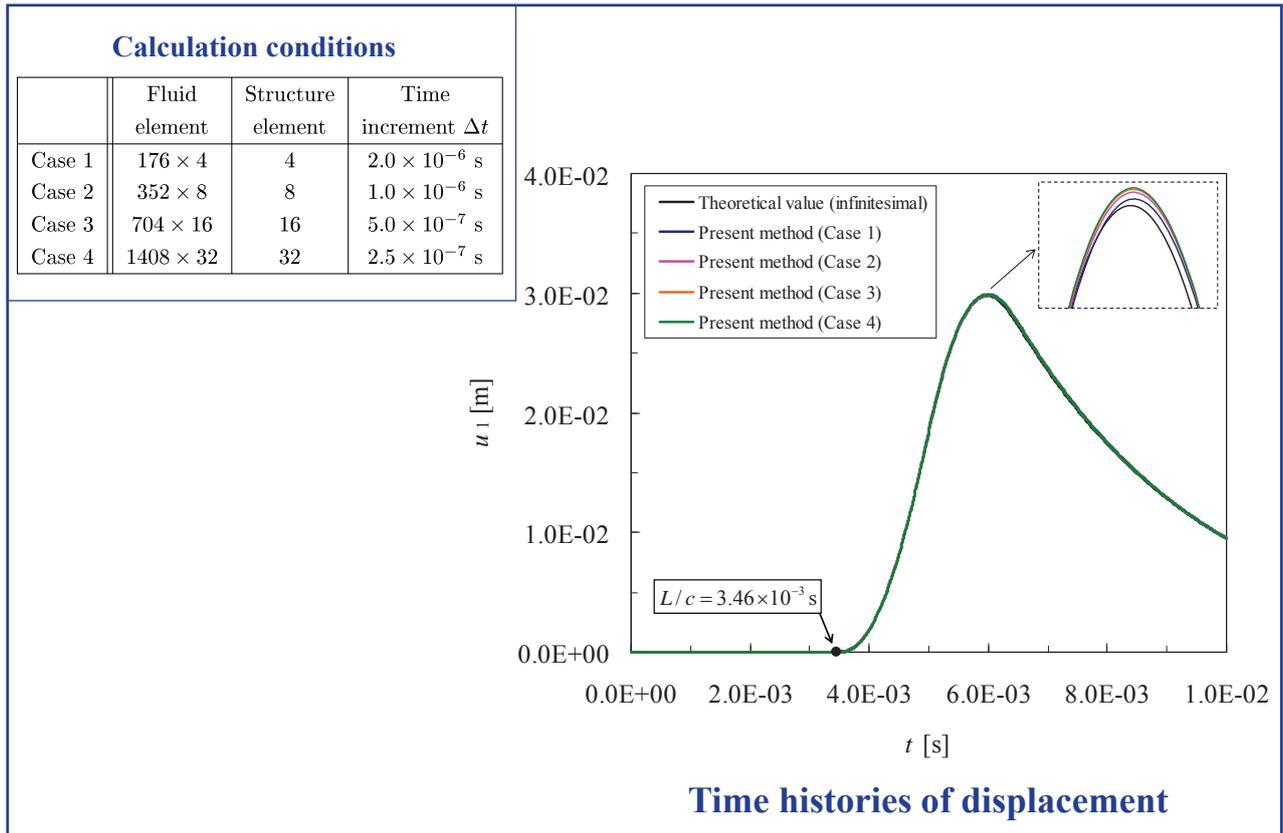
51

ベンチマーク問題: 水とバネ-ピストン系の連成解析 (1/3)



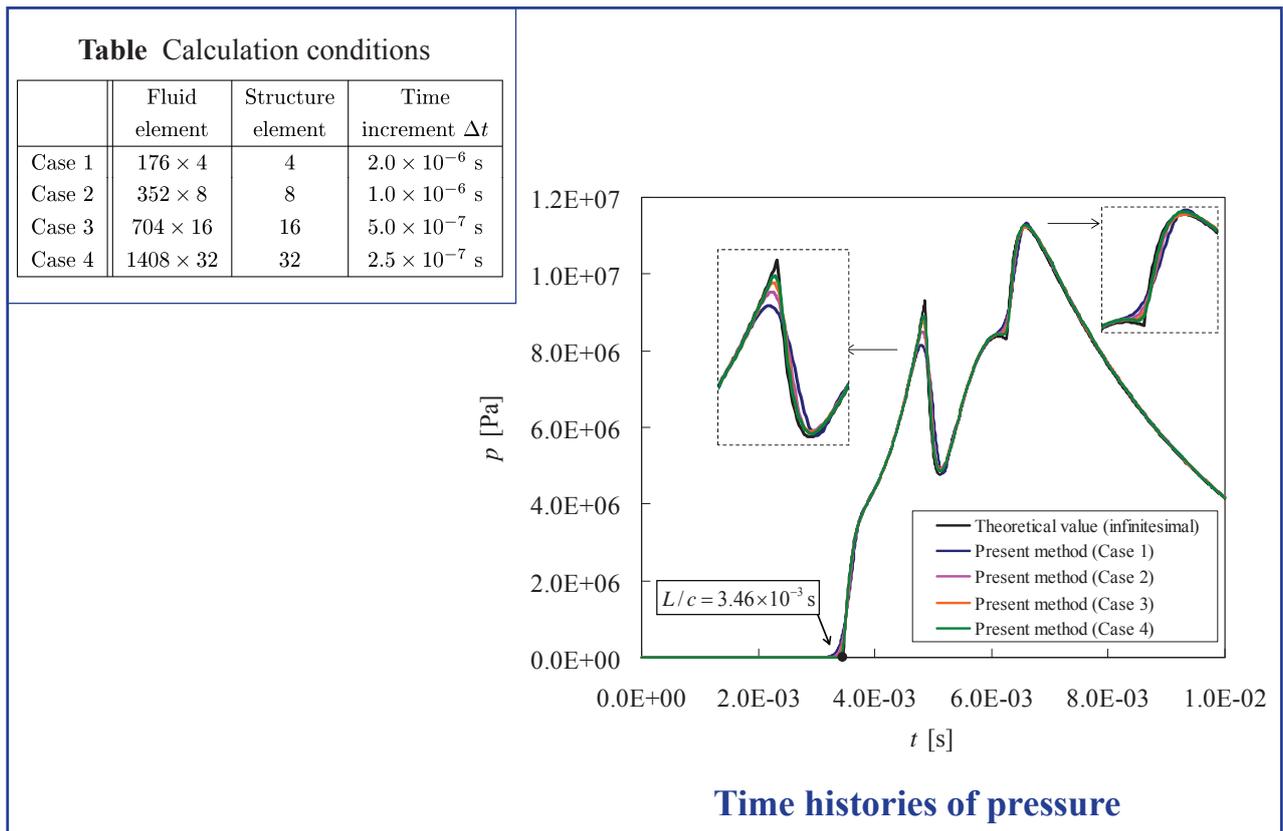
52

ベンチマーク問題:水とバネ-ピストン系の連成解析 (2/3)



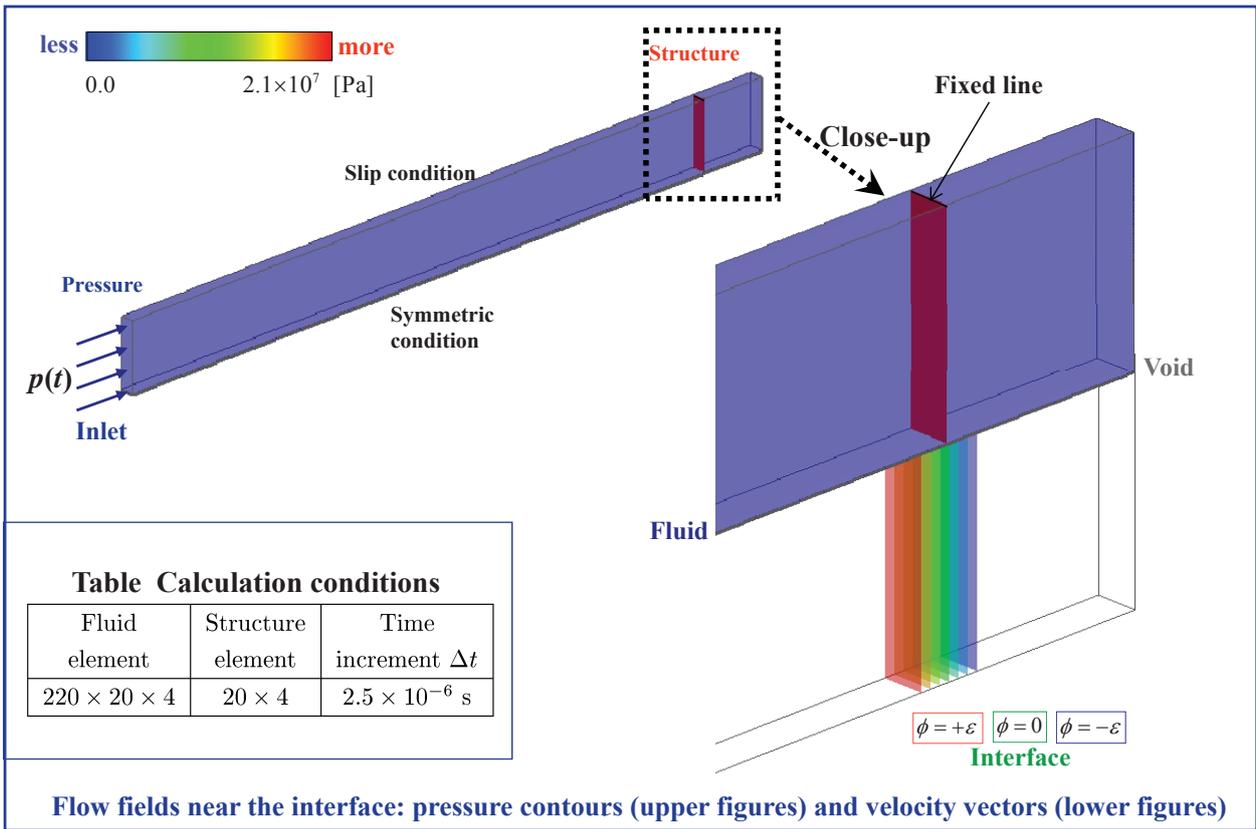
53

ベンチマーク問題:水とバネ-ピストン系の連成解析 (3/3)



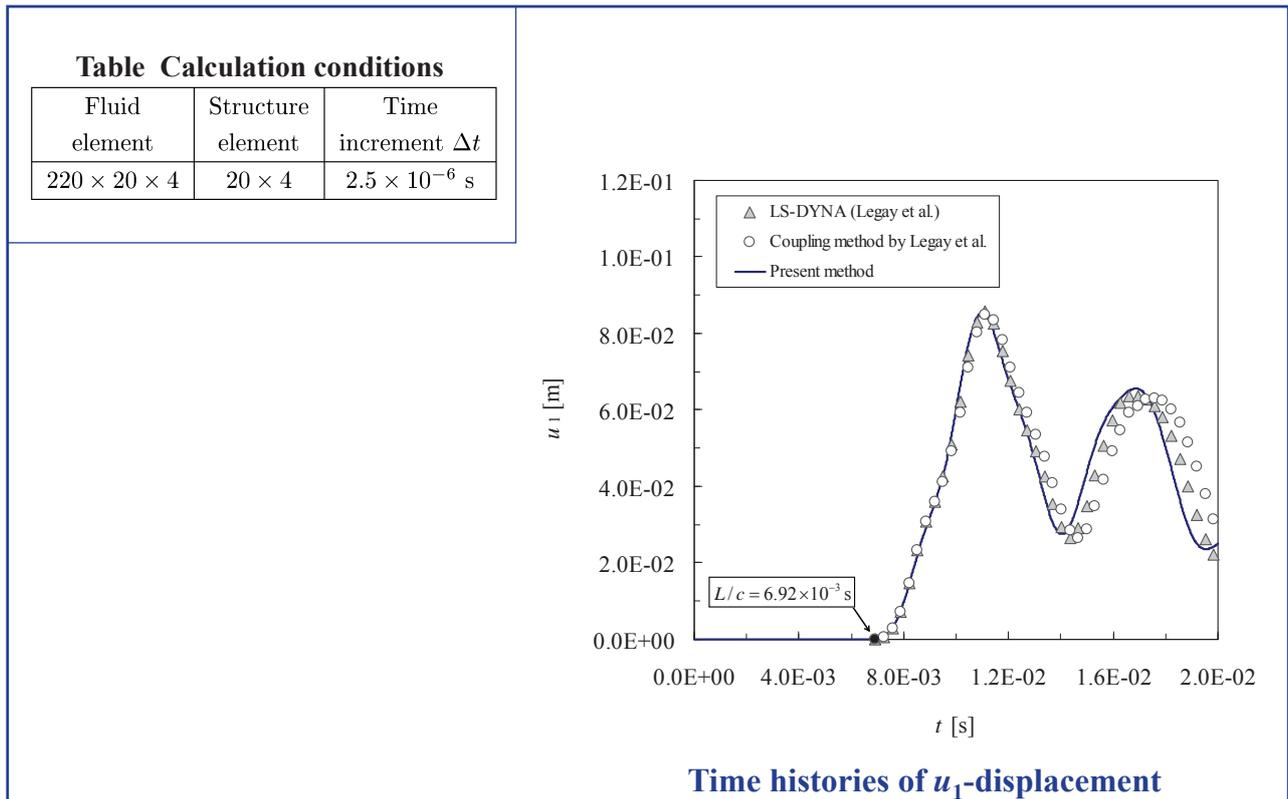
54

ベンチマーク問題: 水と薄い弾性構造の連成解析 (1/3)



[9] Legay A., Chessa, J. and Belytschko, T., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, (2006), pp.2070-2087. 55

ベンチマーク問題: 水と薄い弾性構造の連成解析 (2/3)

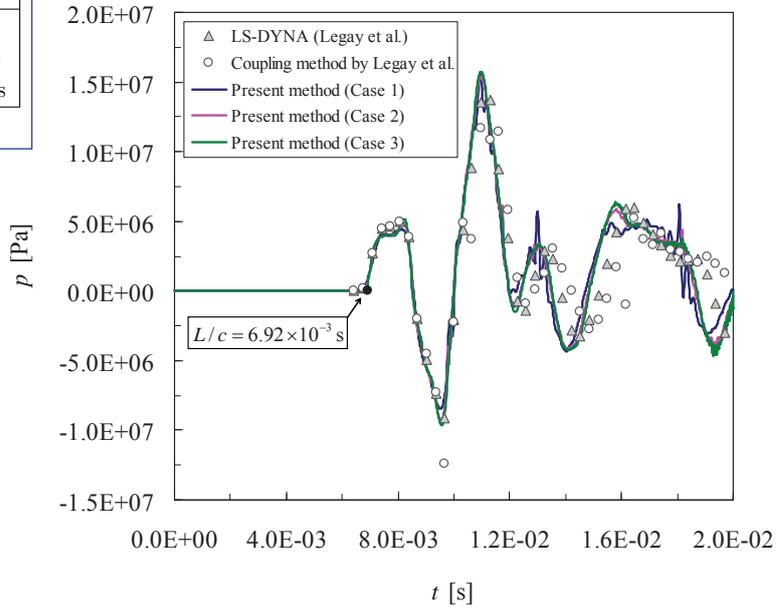


[9] Legay A., Chessa, J. and Belytschko, T., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, (2006), pp.2070-2087. 56

ベンチマーク問題:水と薄い弾性構造の連成解析 (3/3)

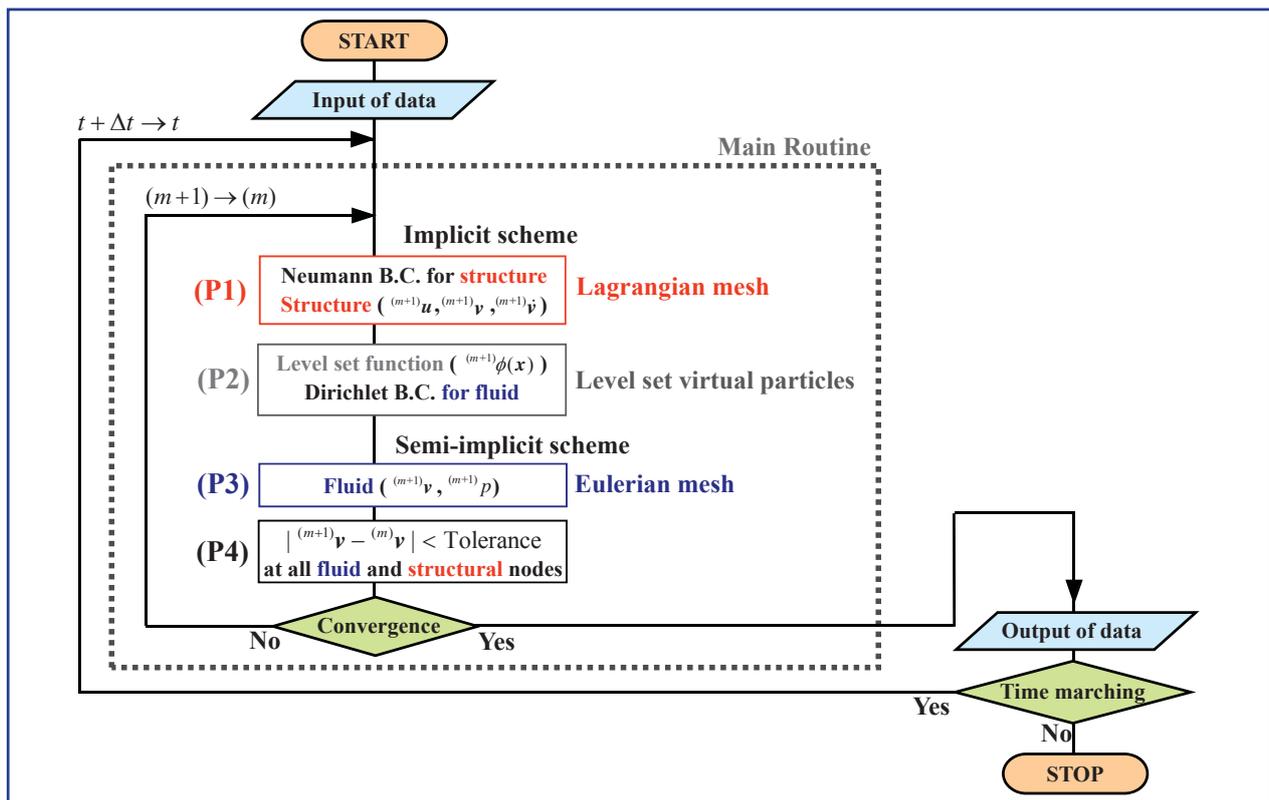
Table Calculation conditions

	Fluid element	Structure element	Time increment Δt
Case 1	220×20	20	2.5×10^{-6} s
Case 2	440×40	40	1.25×10^{-6} s
Case 3	880×80	80	0.625×10^{-6} s



57

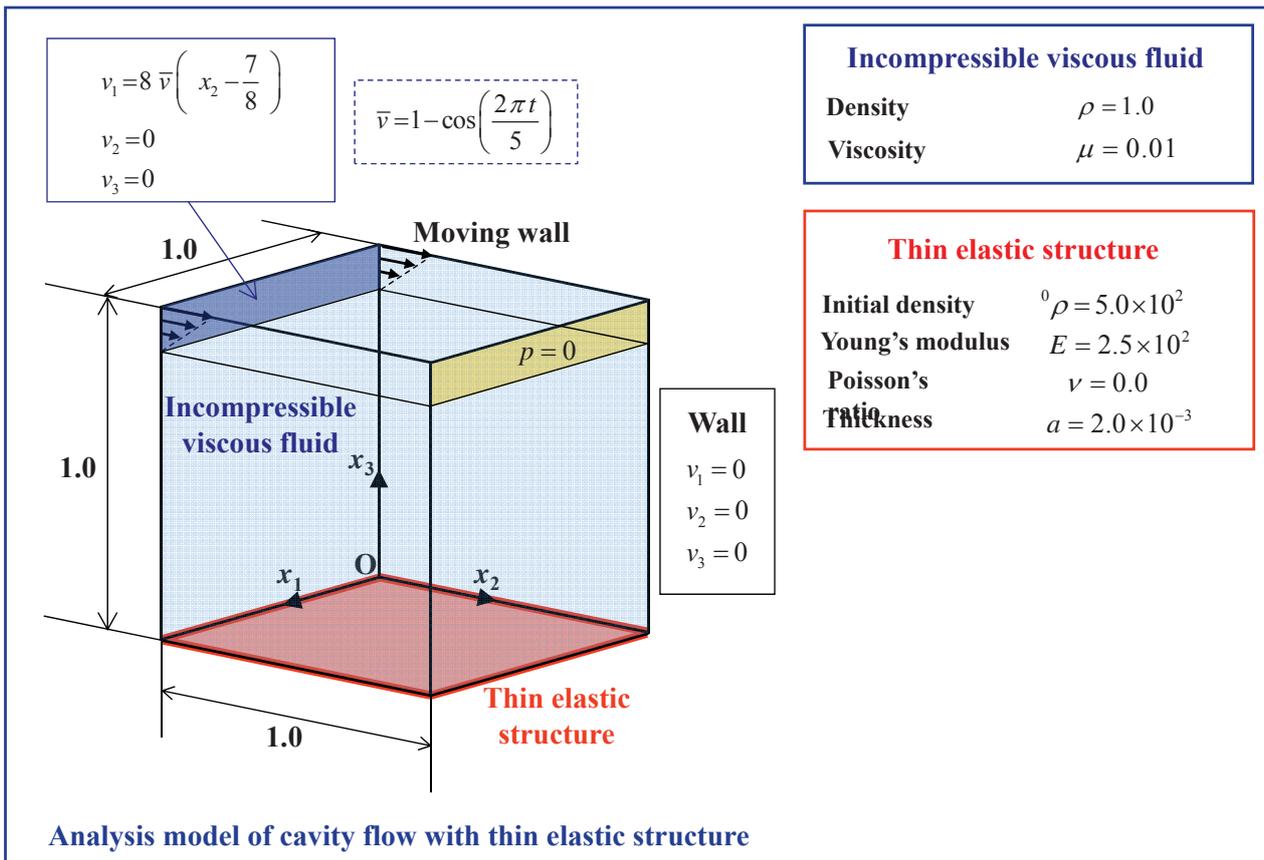
流体構造連成解析手法のアルゴリズム



Algorithm of the partitioned solution procedure (n : time step, m): iteration)

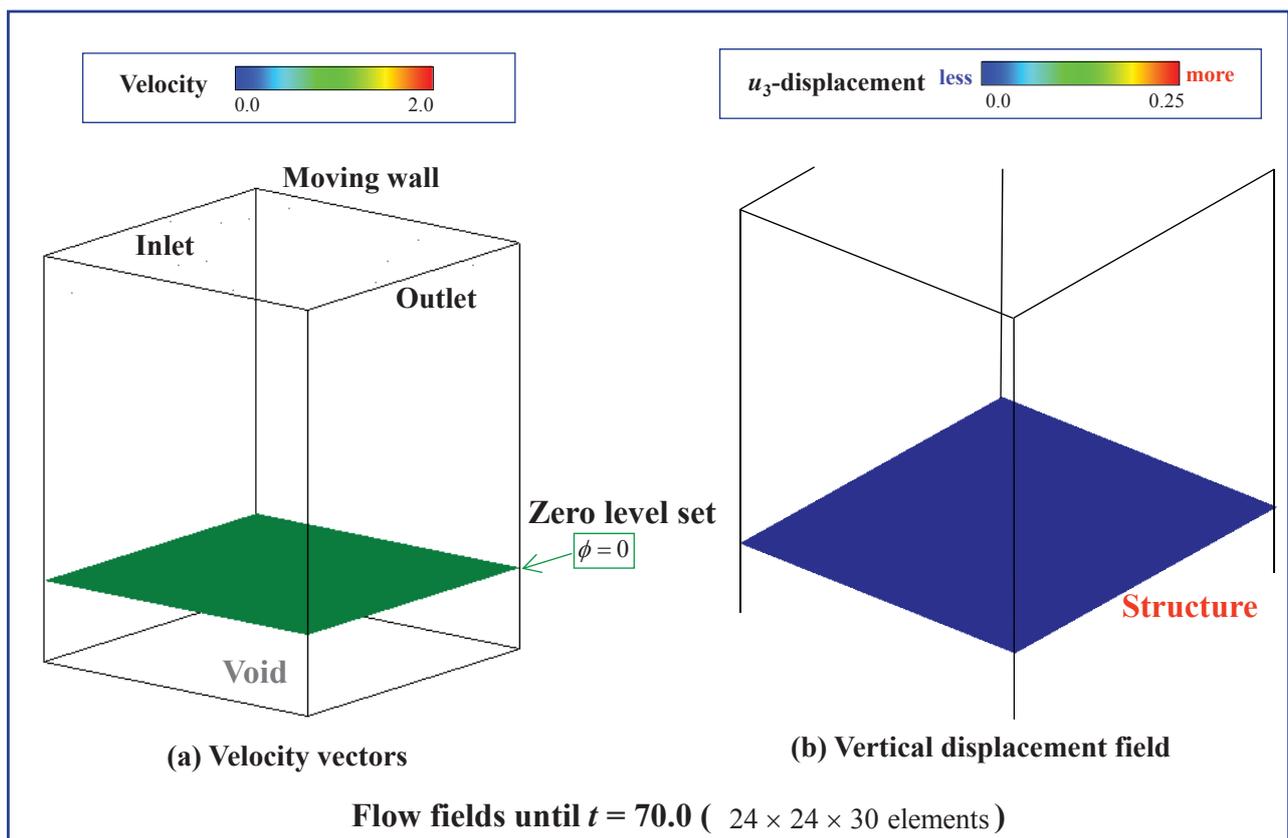
58

ベンチマーク問題:底に弾性構造を有するキャビティ内強制対流 (1/3)



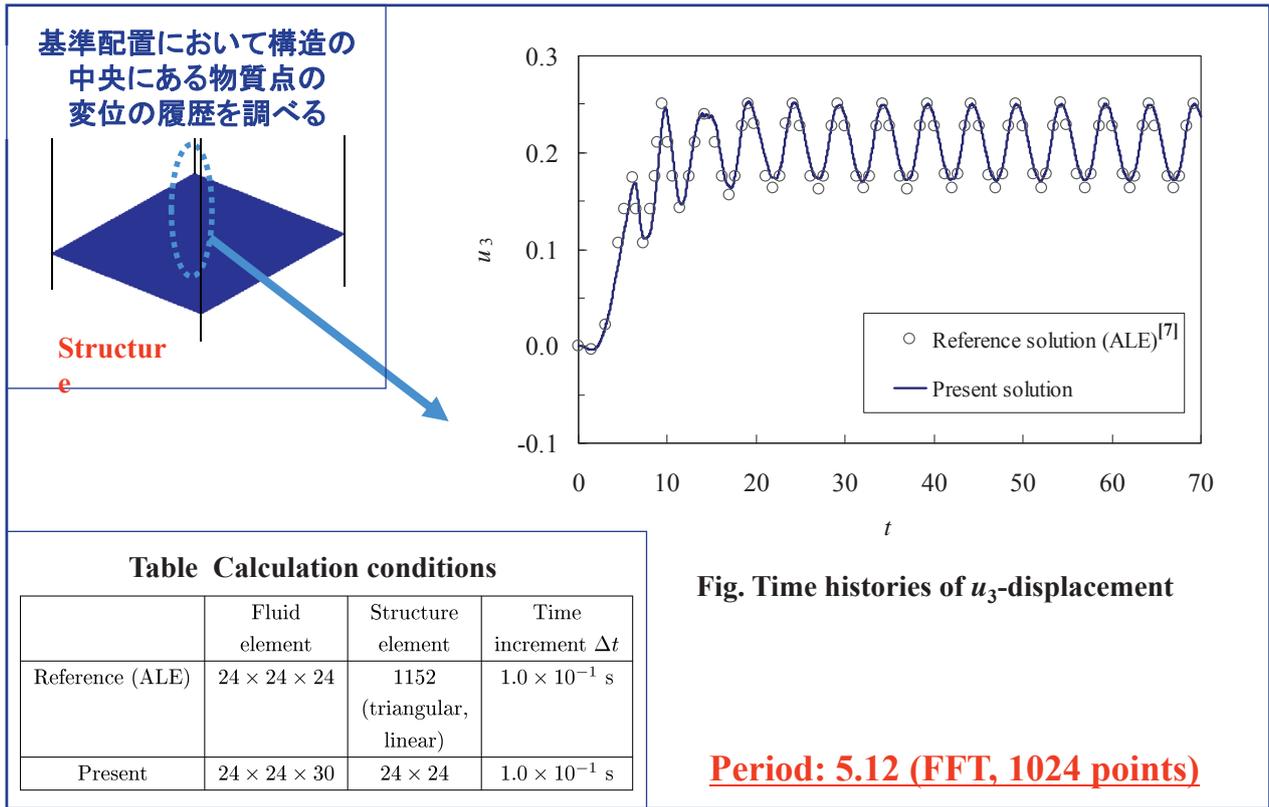
59

ベンチマーク問題:底に弾性構造を有するキャビティ内強制対流 (2/3)



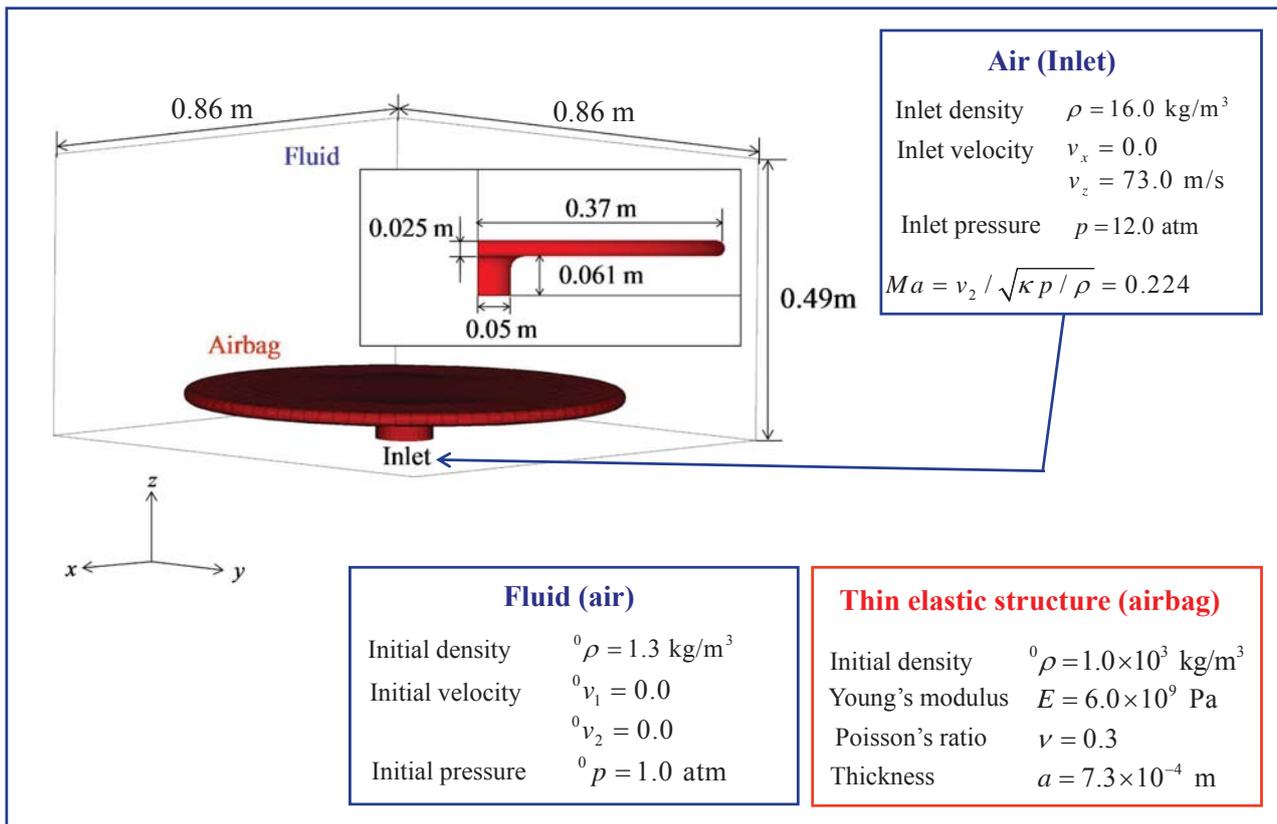
60

ベンチマーク問題:底に弾性構造を有するキャビティ内強制対流 (1/3)



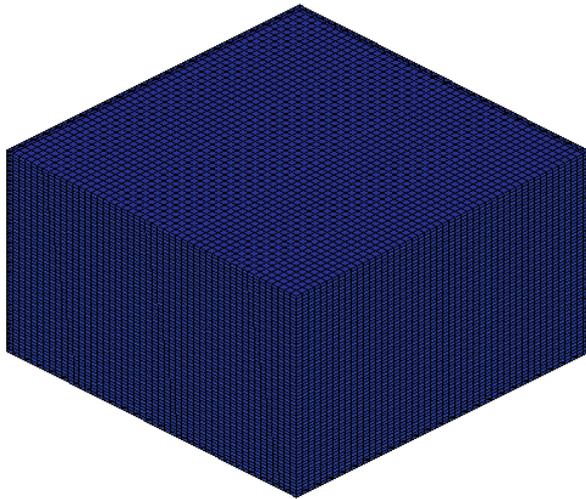
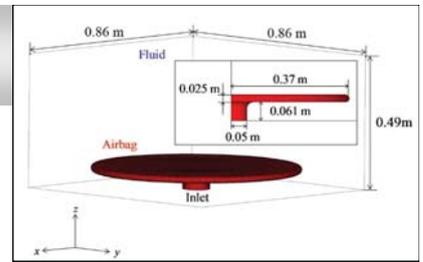
Vázquez, J.G.V., *PhD Thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2007.

解析モデル

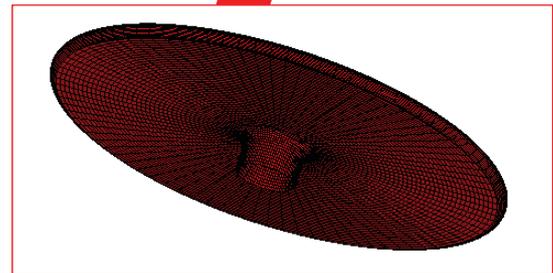
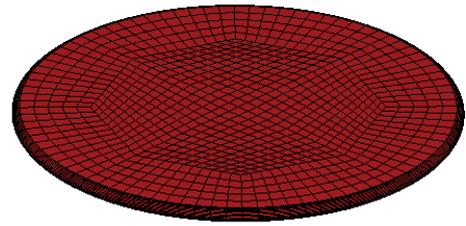
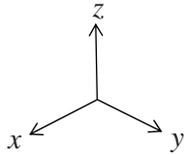


[6] Cirak, F. and Radovitzky, R., *Computers & Structures*, **83**, (2005), pp.491-498.

解析メッシュ



Fluid mesh: 8-node hexahedral elements
(151,263 nodes and 142,848 elements)

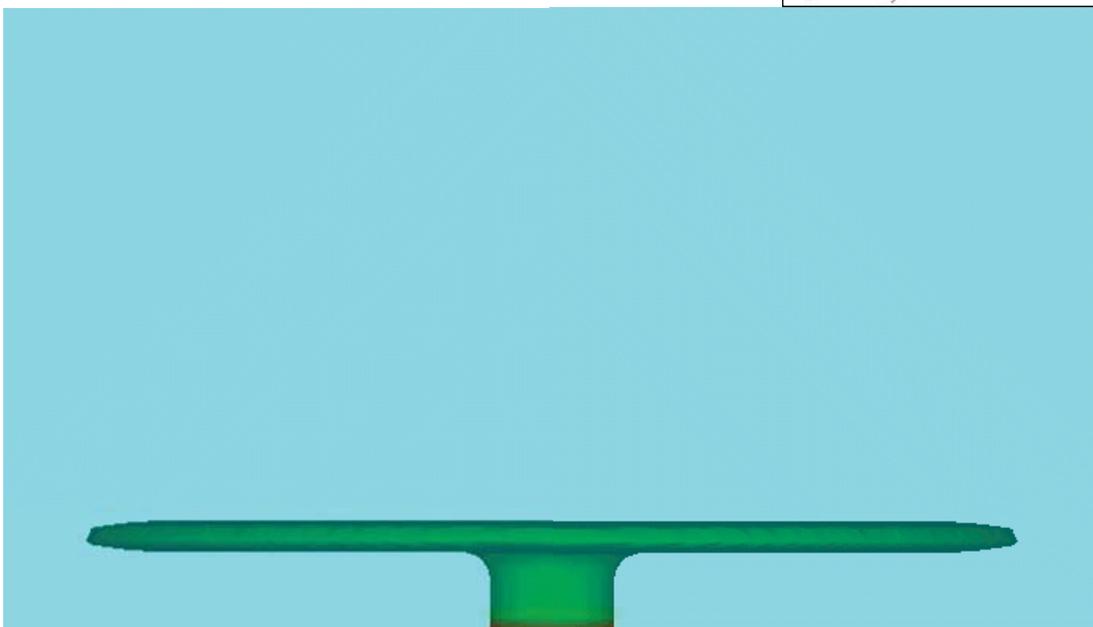
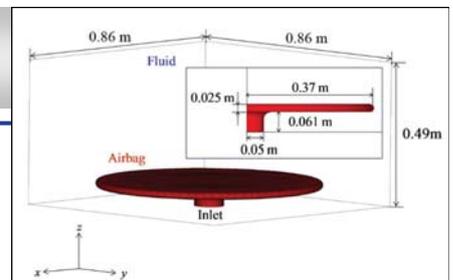


Structural mesh: 4-node quadrilateral elements
(7,305 nodes and 7,260 elements)

63

計算結果

FX10 (CPU: SPARC64™ IXfx, 32GBメモリ) を使用



Pressure contours and zero level set on the fluid mesh on $y = 0$ unitl $t = 7.0 \times 10^{-3}$ s

64

0. 自己紹介
1. 連成手法の分類
2. 種々の移動境界処理
3. 解析事例
 - 3.1. ブーメランの飛行
 - 3.2. 薄肉弾性板の渦励振
 - 3.3. エアバッグ展開
4. まとめ

まとめ

- 連成手法には、片方向／双方向，一体型／分離型，強連成／弱連成がある
- 移動境界の扱いには，ALE法や粒子法のようなTracking，Level Set法のようなCapturingがある
- 解析事例として，ブーメランの飛行，薄肉弾性板の渦励振，エアバッグ展開を紹介した
 - ・ブーメランの飛行では，分離型連成 (Staggered Scheme)，ブーメランと共に移動する座標系を使用した
 - ・薄肉弾性板の渦励振では，一体型連成 (圧力は分離) を使用し，ALE法による界面のTrackingを行った
 - ・エアバッグ展開では，分離型連成 (Iterative Staggered Scheme)，Level Set関数による界面のCapturingを行った

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red を用いた連成解析事例

主任研究員 大西 陽一

アドバンスソフトの連成解析セミナー
2015年5月15日（金）開催
アドバンスソフト株式会社

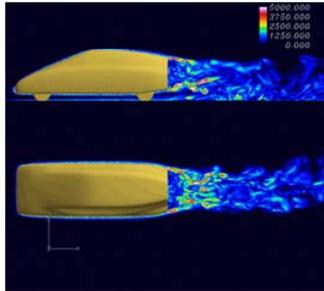
ご紹介内容

- Advance/FrontFlow/redの概要説明
- 1方向連成の解析事例
 - ・構造ソルバーとの応力連成解析
- 双方向連成の解析事例
 - ・格子変形機能
 - ・振動モード連成解析

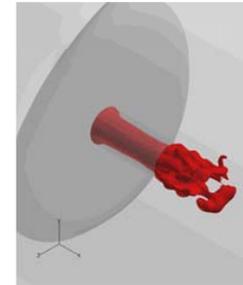
Advance/FrontFlow/redとは？

速度、圧力、温度、燃焼、物質拡散、騒音、キャビテーション、微粒子などの変動や平均分布を予測・解析するソフトウェア

空力



キャビテーション

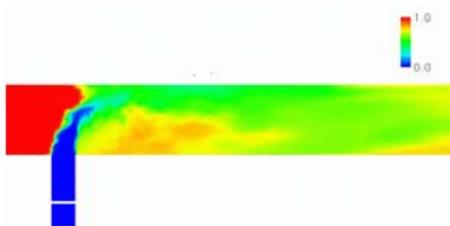


ラージエディシミュレーション
LES

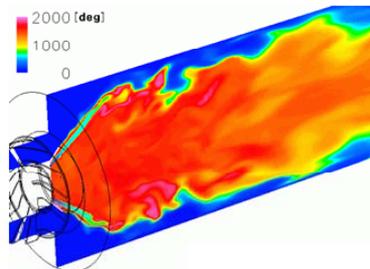
並列計算

コスト
パフォーマンス

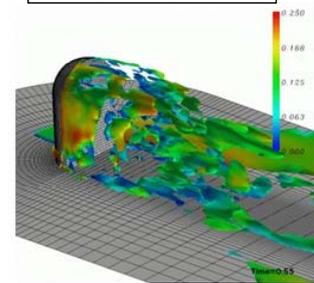
温度



燃焼



騒音



Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

3

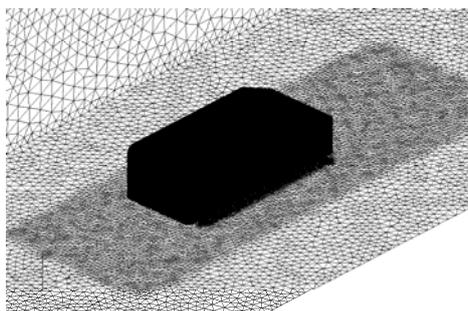
ソフトウェアの特長

- ① 文部科学省のプロジェクトで開発したFrontFlow/redをアドバンスソフトが改良・実用化したソフトウェア → 国産のソフトウェア
- ② ラージ・エディ・シミュレーション (LES) による流体解析
- ③ 並列化による大規模解析 → 並列計算のパフォーマンスを最大限に引き出すアルゴリズムを適用し、高い並列化効率を達成
- ④ 開発技術者によるお客様のサポート
- ⑤ 柔軟なカスタマイズ対応 → お客様が必要とする機能の追加

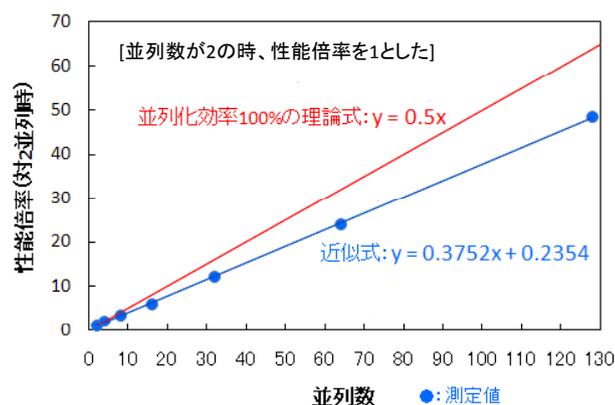
Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

4

Advance/FrontFlow/redの並列性能



評価モデルの計算格子



2並列に対する性能倍率

計算機: 富士通製BX922S6 1ノードあたり12コア

(財団法人計算科学振興財団FOCUSのスーパーコンピューターを使用)

評価モデル: 車体周り流れ解析の標準モデル(Ahmed車体モデル)

計算格子: テトラ、プリズムの混合要素

節点数: 1, 505, 423

要素数: 7, 638, 219

使用した並列数: 2、4、8、16、32、64、128

AFFrの流体構造連成解析

- ・流体解析中の構造変形は無視できる時

→ 1方向連成解析

流体解析で得られた固体表面上の圧力分布・温度分布を構造解析の境界条件として利用する。

- ・流体構造相互の影響を考慮しないといけない時

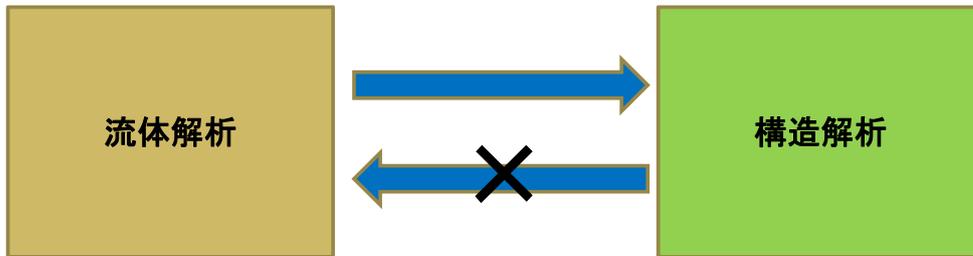
→ 双方向連成解析

構造変形量を流体解析の計算格子にフィードバック

1方向連成解析

- ・流体解析中の構造変形は無視できる時

物体表面上の圧力、温度を受け渡す。



構造物変形はフィードバックしない

- ・圧力、温度時系列データをファイルに出力し、構造ソルバー側で読み込む。
- ・物理量定義点が異なるため、ユーザーサブルーチン等で補間プログラムを作成。

1方向連成解析

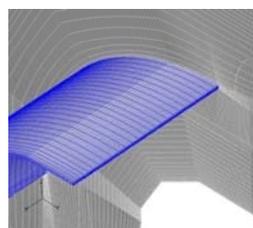
案内板溶接部の流体圧力による応力解析

[目的]

ご協力：株式会社電業社機械製作所 技術研究所様

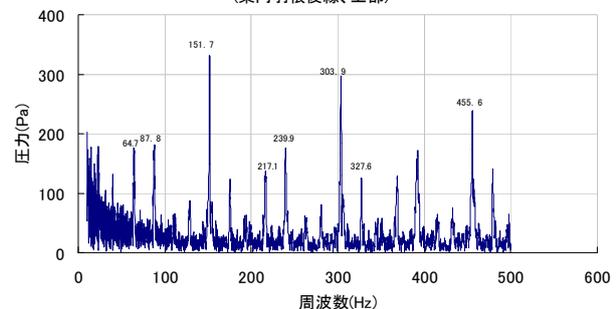
流体・構造連成解析により、案内板溶接部の応力解析を行う。

[解析対象]

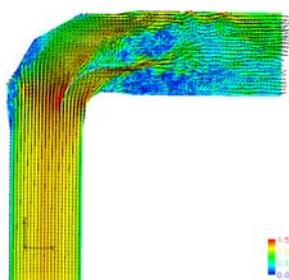


[解析結果]

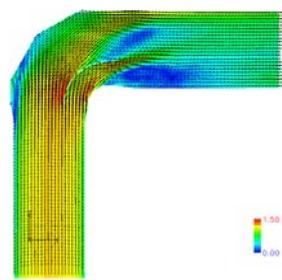
LES非定常流れ圧力変動の周波数分析
(案内羽根後縁、上部)



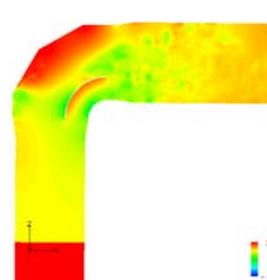
[解析結果]



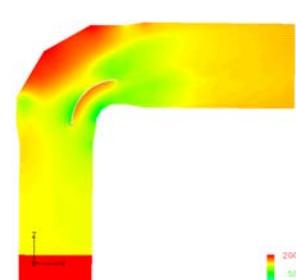
瞬時速度



平均速度



瞬時圧力

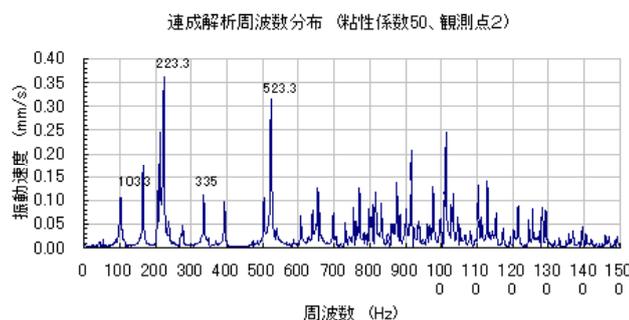
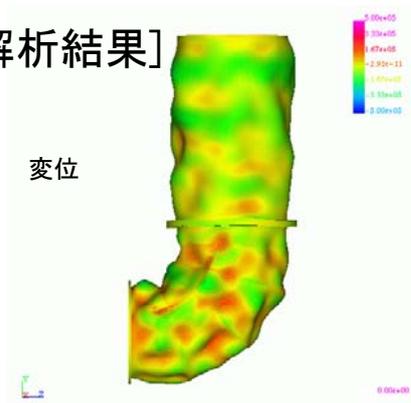


平均圧力

1 方向連成解析

案内板溶接部の流体圧力による応力解析

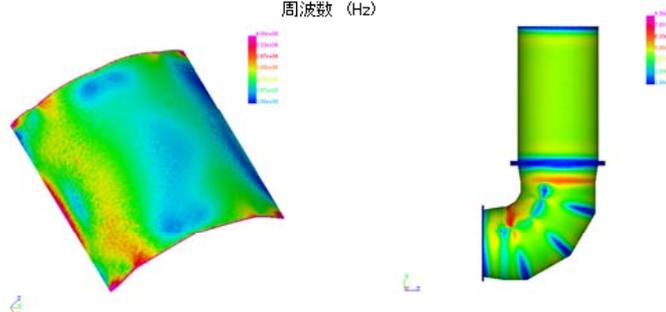
[解析結果]



解析時間設定:

- 流体解析側で圧力の出力
- 時間刻みは 5.0×10^{-7} [s]
- 1.0秒間の時系列を出力

汎用構造解析ソフトウェア
Advance/FrontSTRによる解析



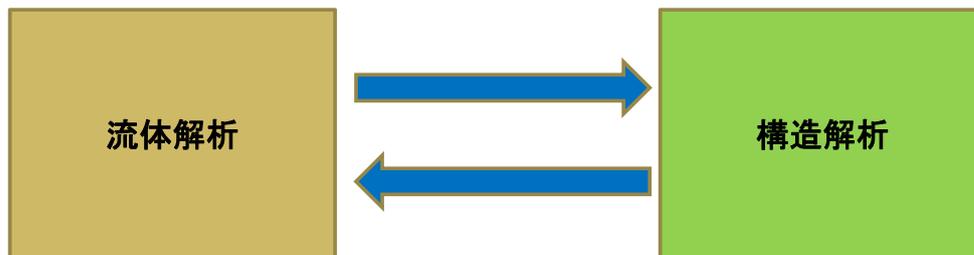
連成解析結果— 平均応力の分布

ご協力: 株式会社電業社機械製作所 技術研究所様

双方向連成解析

- ・構造変形量を流体解析格子にフィードバックしながら時々刻々解析する。

物体表面上の圧力、温度を受け渡す。



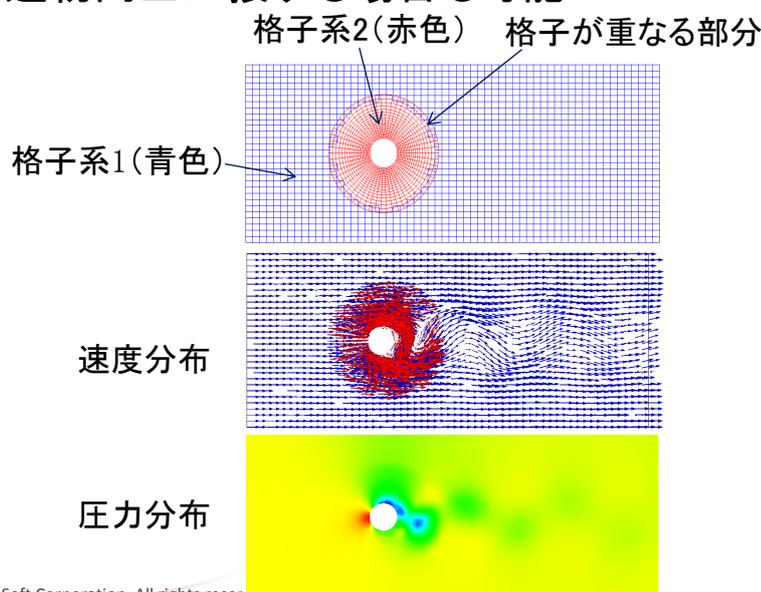
構造物変形はフィードバック

- ・圧力、温度時系列データをファイルに出力し、構造ソルバー側で読み込む。
- ・構造解析結果をフィードバックするために、流体解析では**格子変形解析機能**が必要。

AFFrの格子変形解析機能

- 重合格子

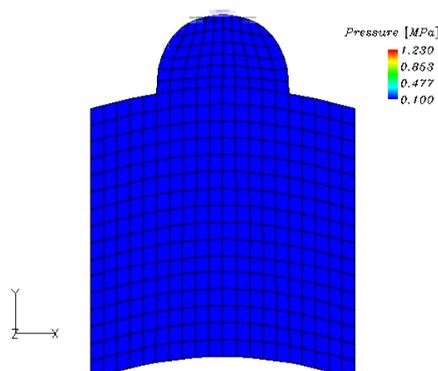
- 2つの格子系を移動させながら解析する。
- 構造物同士が接する場合も可能



AFFrの格子変形解析機能

- ALE

- 構造物の変位に応じて時々刻々格子変形を行う。
- 大変形には不向きであるが、物理量の保存性がよい。



双方向連成解析

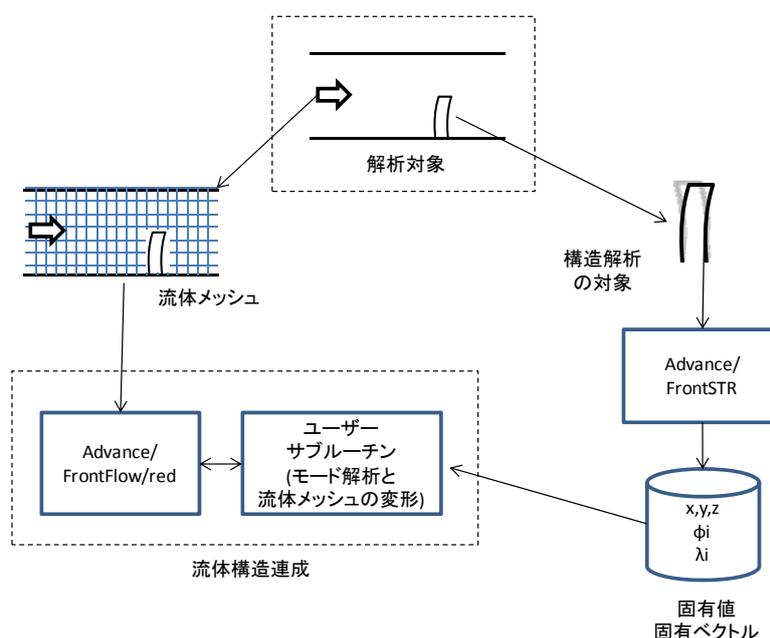
構造のモード解析+ALEを用いた連成解析

概要

- 構造解析部分のみで固有値解析を行い、固有値・固有ベクトルをあらかじめ算出しておく。これを流体ソルバに入力する。
- モード解析部分をモジュールとして分離し、流体ソルバに組込む
- 流体解析を行い、構造表面の圧力データから、構造解析用の荷重を算出する。
- 組込まれたモジュールでモード解析を行い変形量を得る
- **ALE手法を用いてメッシュを更新する**
- 適用範囲は線形弾性の範囲に限られるが、手軽に実行できる。

双方向連成解析

モード解析を用いた連成解析の流れ



双方向連成解析

構造のモード解析

弾性体の運動方程式

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad f(t): \text{外力 (流体解析の表面力データ)}$$

固有方程式

$$([K] - \lambda [M])\{\phi\} = 0$$

変位ベクトル

$$\{x(t)\} = \sum_i \alpha_i(t) \{\phi_i\}$$

各モードの振幅 α_j の微分方程式

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

この微分方程式を解いて節点ごとの各モードの振幅を求め、変位を算出する
→変位を基にAFFrのALE法によりメッシュ変形処理を行い、流体解析を行う

双方向連成解析

構造解析で得られた固有モード図

非公開

双方向連成解析 構造解析で得られた固有モード図



双方向連成解析 構造解析で得られた固有モード図



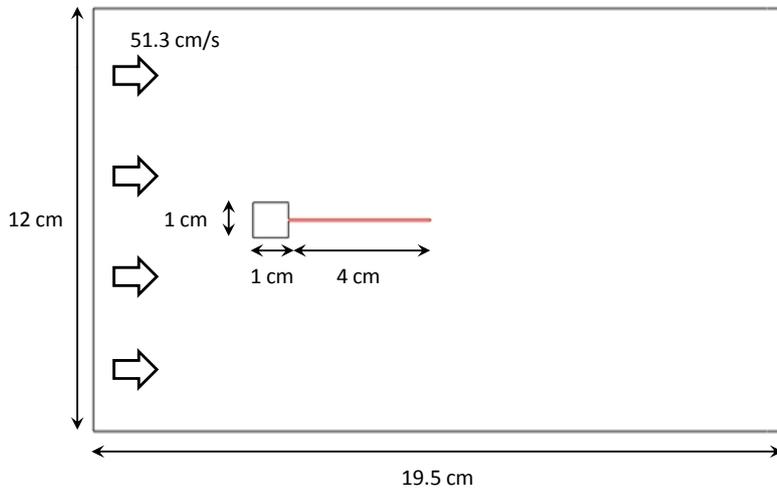
双方向連成解析 構造解析で得られた固有モード図



双方向連成解析 構造解析で得られた固有モード図



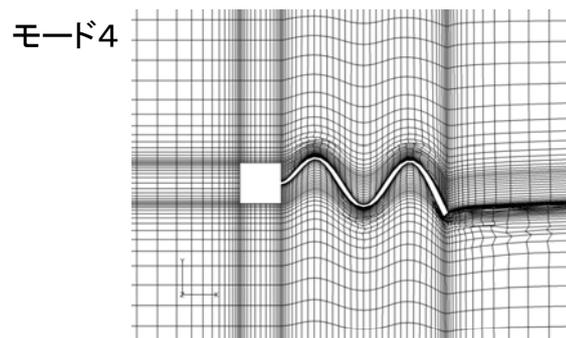
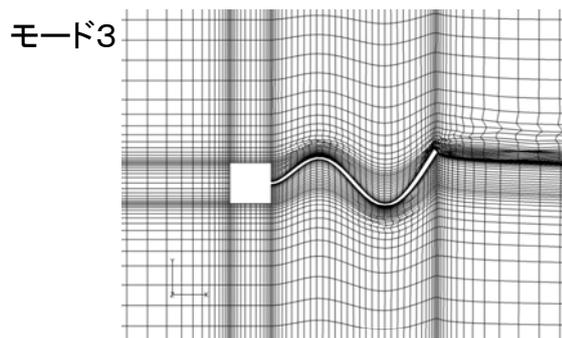
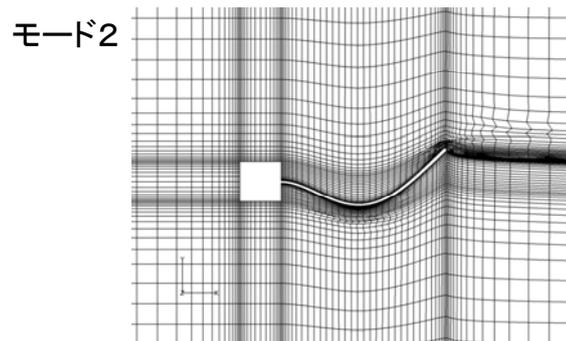
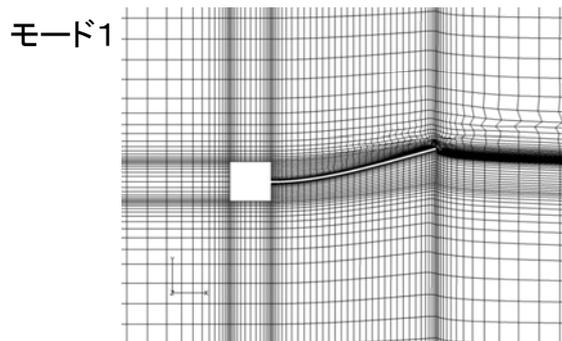
双方向連成解析 構造のモード解析



流体物性
密度 1.18[kg/m³]
粘性係数 1.82[Pa·s]

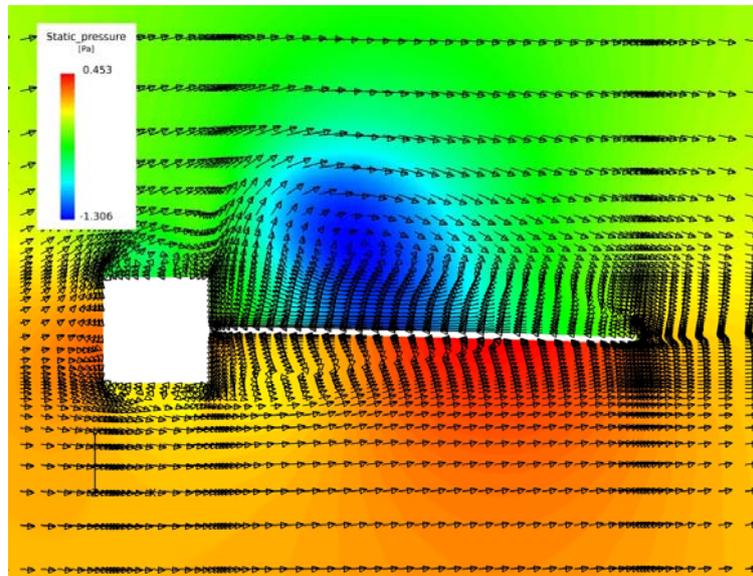
構造物物性
密度 100[kg/m³]
ヤング率 0.25[MPa]
ポアソン比 0.35

双方向連成解析 モード解析結果



双方向連成解析

流体-構造連成解析結果



まとめ

- ・当社の流体解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/redでは、格子変形機能を用いることで、よりダイナミックな構造連成解析が可能である。
- ・モード解析機能を使うことで、より手軽に構造連成解析が可能である。
- ・当社音響ソフトAdvance/FrontNoiseとの連成も可能(この後の発表で紹介)
- ・今後とも、流体/固体/音響ソフトのソースコードレベルでの開発が可能な利点を生かして、様々な連成解析を実施していく予定である。

高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS を用いた連成解析事例

主任研究員 富塚 孝之

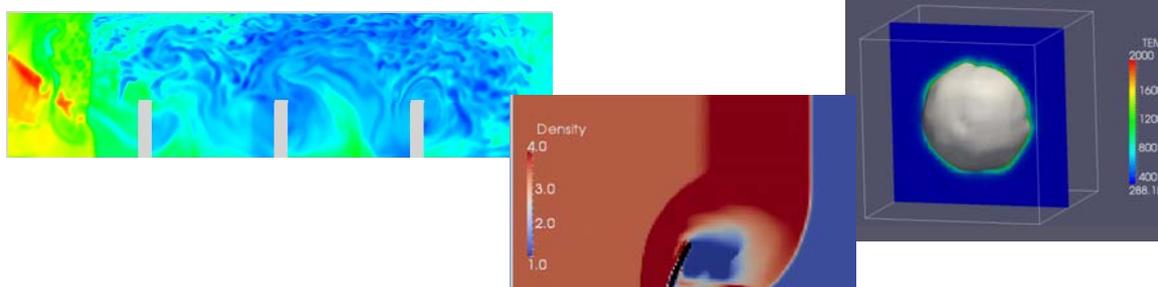
アドバンスソフトの連成解析セミナー
2015年5月15日（金）開催
アドバンスソフト株式会社

発表内容

- Advance/FrontFlow/FOCUS の連成機能
- 配管内での水素爆轟の解析事例
- 水素爆風圧を受けるコンクリート壁の解析事例

Advance/FrontFlow/FOCUSとは

- 高速流体(超・遷・亜音速)、燃焼流体を対象とした3次元流体解析ソフトウェア
- 気相燃焼(爆燃、爆轟)に関する様々な燃焼モデル、火炎伝播モデル
- 衝撃波、爆風圧が高速に計算可能な流体ソルバー
- Immersed boundary法(埋込み境界法)より構造物の取込み、格子作成が容易



Advance/FrontFlow/FOCUSの 基本機能の概要

- 時間積分
 - オイラー陰解法(LU-SGS陰解法)
 - 2次または4次精度ルンゲ-クッタ陽解法
- 対流項
 - 種々の衝撃波捕獲スキーム
 - 3次精度TVD補間
- 燃焼モデル
 - 火炎モデル
 - 層流火炎モデル
 - ✓ 高野モデル
 - ✓ G方程式モデル
 - 乱流燃焼速度モデル
 - ✓ 高野モデルからの拡張モデル
 - ✓ G方程式モデル
 - 爆轟波モデル
 - ✓ 1次元ZNDモデルと火炎モデルの統合化モデル
- 乱流モデル
 - 標準k-ε 2方程式をベースとした浮力乱流モデル(WETモデル)^[※]
 - 標準k-ε 2方程式モデル
 - Spalart-Allmaras 1方程式モデル
- LES
 - Smagorinskyモデル

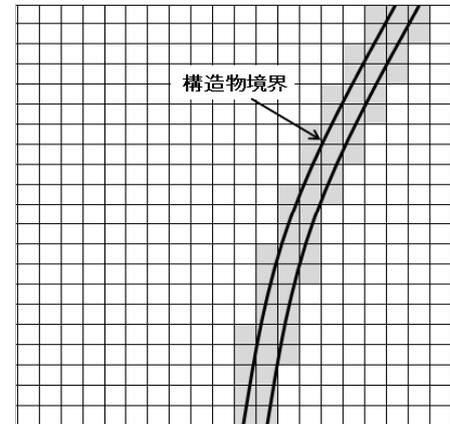
[※] 村上ほか、「浮力を考慮した修正k-εモデルによるサーマルブリュームのCFD解析」、生産研究、第50巻、第1号、pp. 27-30 (1998).

埋め込み境界法 (Immersed Boundary法)

- 複雑な形状に対する格子生成の困難をスキップ
 - 格子生成時間の大幅短縮
- 大変形と移動を伴う形状の扱いが可能

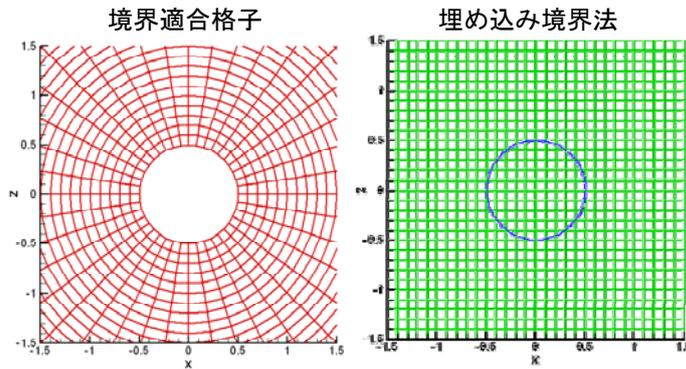
FOCUS
直交格子法 & 埋め込み境界法

埋め込み境界法での境界壁のイメージ
(灰色: 構造物の格子)



REVOCAP
構造物の格子を判定

物体境界の認識の違い



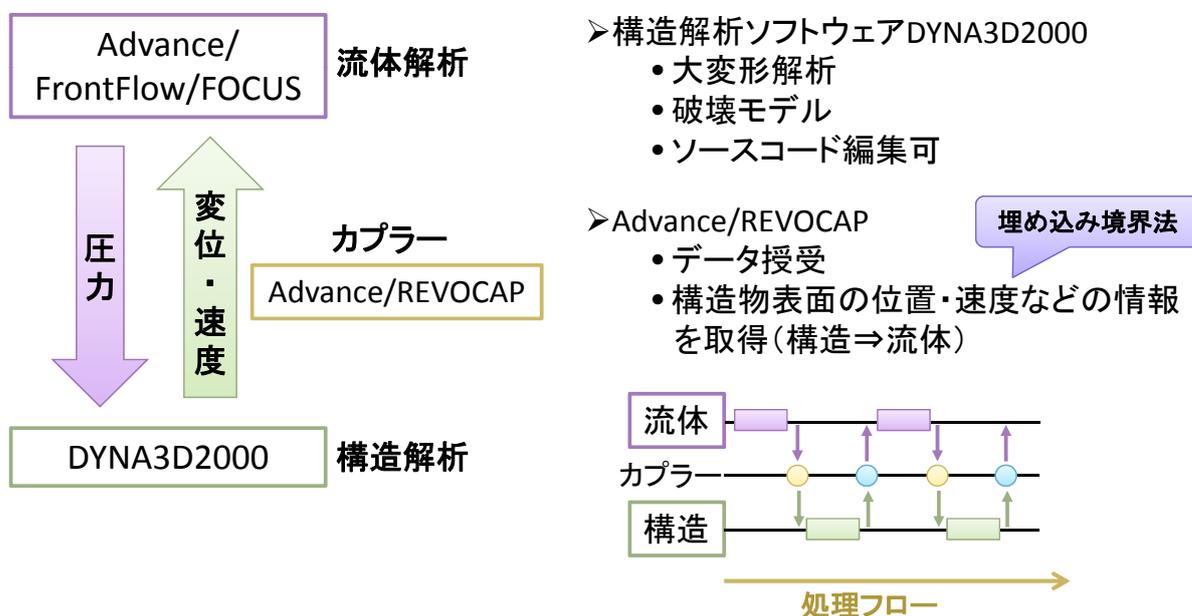
- 境界適合格子の場合は物体に沿う格子を用いる
- 埋め込み境界法では物体境界が流体計算の格子へ埋め込められる

Advance/FrontFlow/FOCUSの連成機能の概要

- 直交格子ソルバー機能
 - 流体の計算格子は立方体または直方体形状のみを使用
 - 物体表面の座標を取り込むためのメモリーを大幅に削減
 - Immersed boundary法(埋込み境界法)を採用
 - 移動壁境界も可能
- 流体構造連成機能
 - 構造解析ソフトウェアAdvance/FrontSTRと連成解析が可能
 - 構造解析ソフトウェアDyna3D2000と連成解析が可能
 - ▶ 連成解析の実施には当社の汎用プリポストプロセッサAdvance/REVOCAPを別途使用します

流体-構造連成解析機能

Advance/FrontFlow/FOCUS⇔DYNA3D2000による連成解析



配管内での水素爆轟の解析事例

配管の破断事故

浜岡原発における配管の破断事故(2001年)



肉厚11mmの炭素鋼

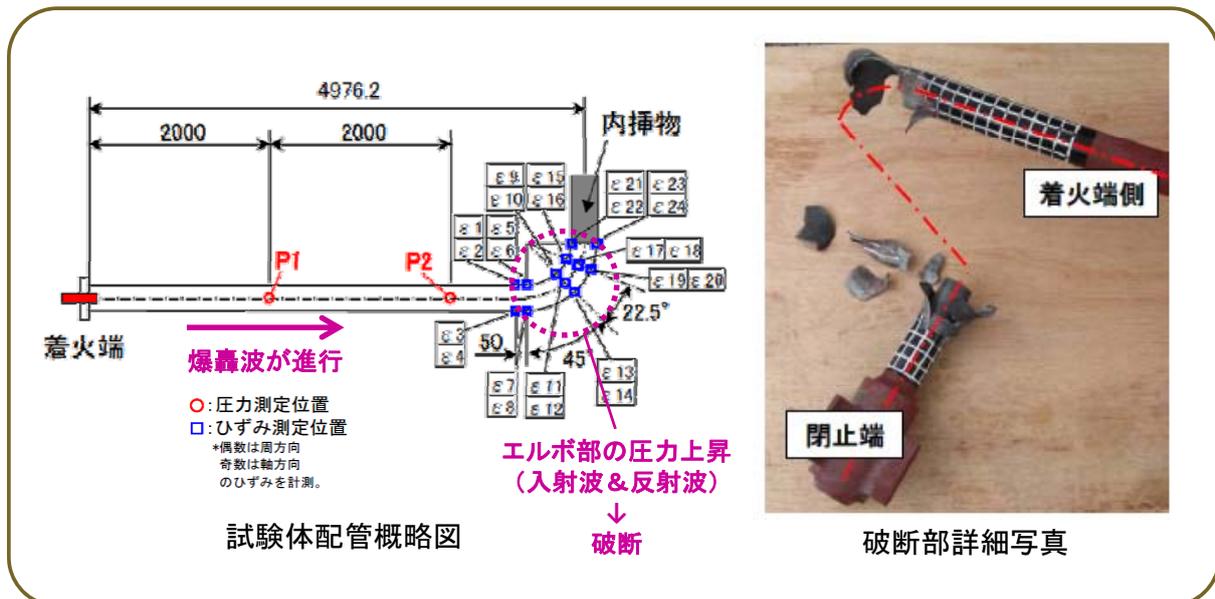
配管にたまっていた水素に着火
↓
爆轟波による破断と推定

水素爆発による配管破断 JAERI-Tech 2001-094 (2001年12月)、P.15

爆轟波による配管破断過程の解析が必要

配管の破断試験

爆轟波による配管の破断試験 (一般社団法人 日本原子力技術協会)

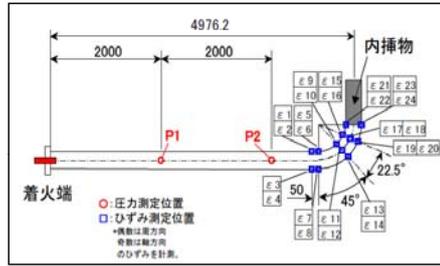


BWR(沸騰水型原子炉)配管における混合ガス(水素・酸素)の燃焼による配管損傷防止に関するガイドライン(第3版)

解析モデル

構造解析 (DYNA3D2000)

節点数: 15978
要素数: 11680



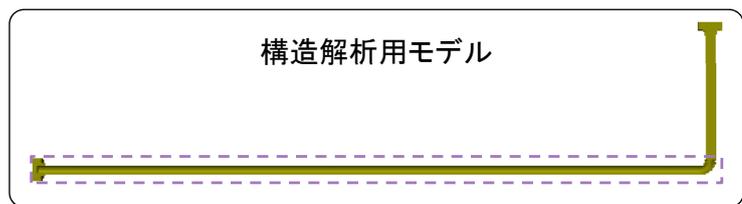
解析モデル

流体解析 (FOCUS)

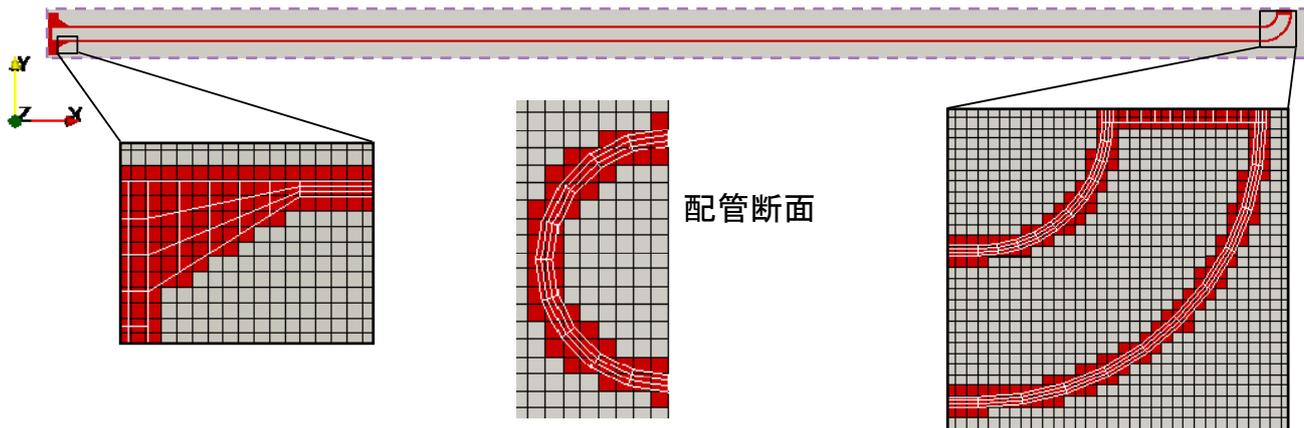
直交格子法 & 埋め込み境界法

格子幅: 4mm

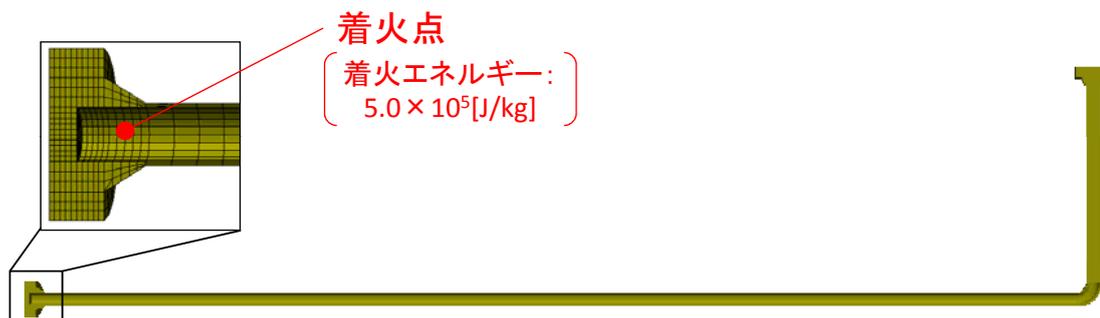
■ 格子: 構造物と認識された格子
白線: 構造解析用モデル



格子数: 1276(x方向) × 50(y方向) × 15(z方向) = 957,000



解析条件



[流体解析]

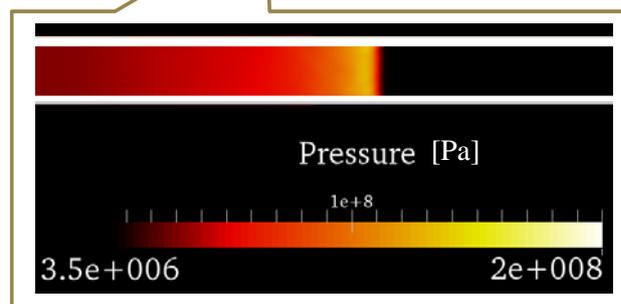
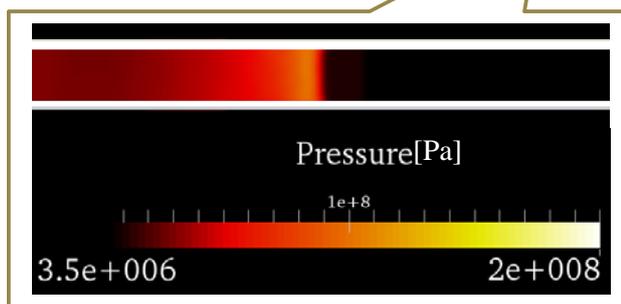
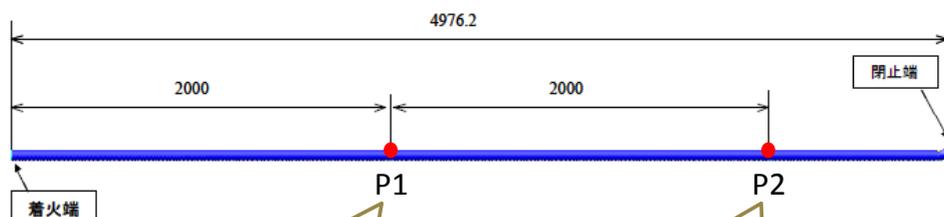
初期圧力: 3.5[MPa]
 初期温度: 15[°C]
 時間刻み: 1.0×10^{-7} [s]
 時間積分法: ルンゲクッタ陽解法

[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 (弾性域)
 降伏応力: 300[MPa]
 時間刻み: 1.0×10^{-7} [s]
 時間積分法: 陽解法

解析結果

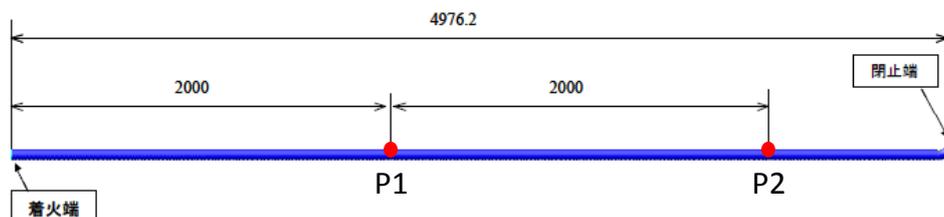
点P1,P2を爆轟波が通過時の圧力分布



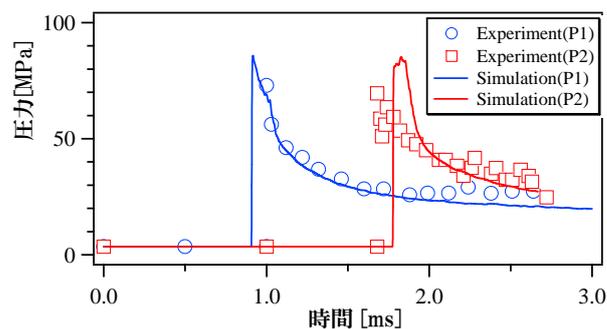
爆轟波の前後の圧力比は30~40

解析結果

点P1,P2における圧力値の時間変化

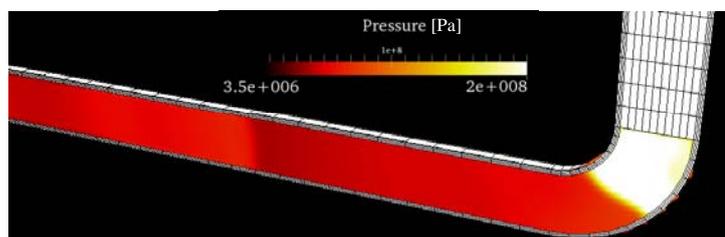
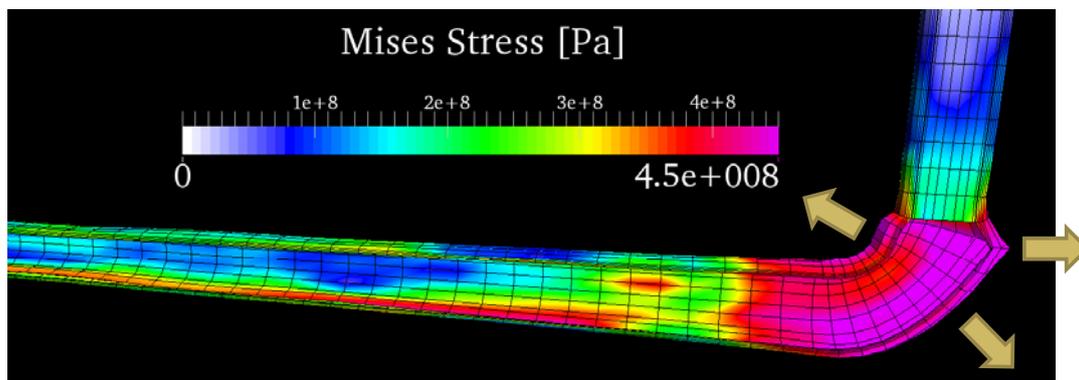


実験値との比較



解析結果

爆轟波がエルボ部に達した時の配管ミーゼス応力、配管変形(変形倍率5倍)



爆轟波による配管の膨張

水素爆風圧を受けるコンクリート壁の 解析事例

水素爆発実験

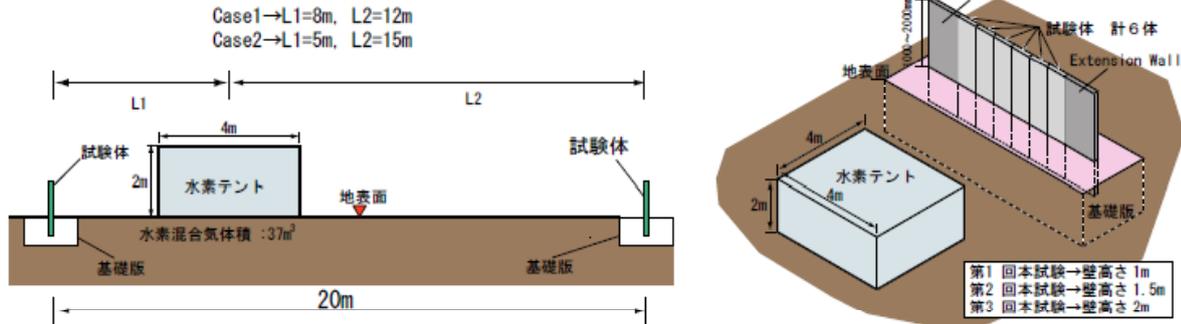


ビニールハウス内
に水素混合気を形成
↓
着火、爆轟させ、コンク
リート壁の影響を評価

【参考文献】

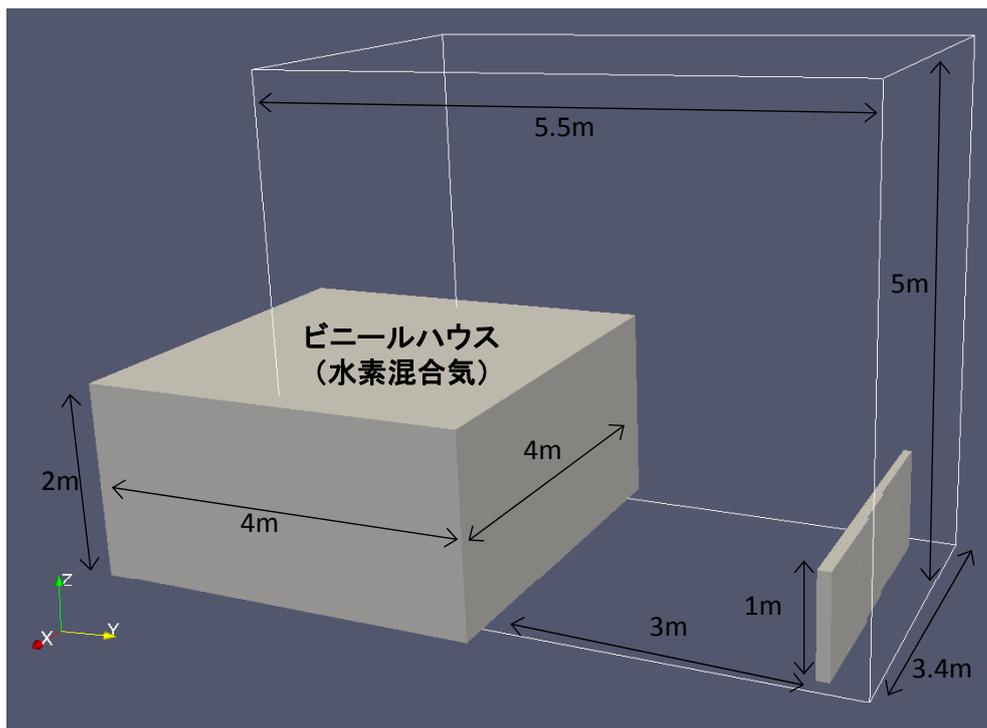
水素爆風圧を受けるRC壁の応答性状に関する実験的研究（大林組
技術研究所報 No.69 2005）

水素爆発実験

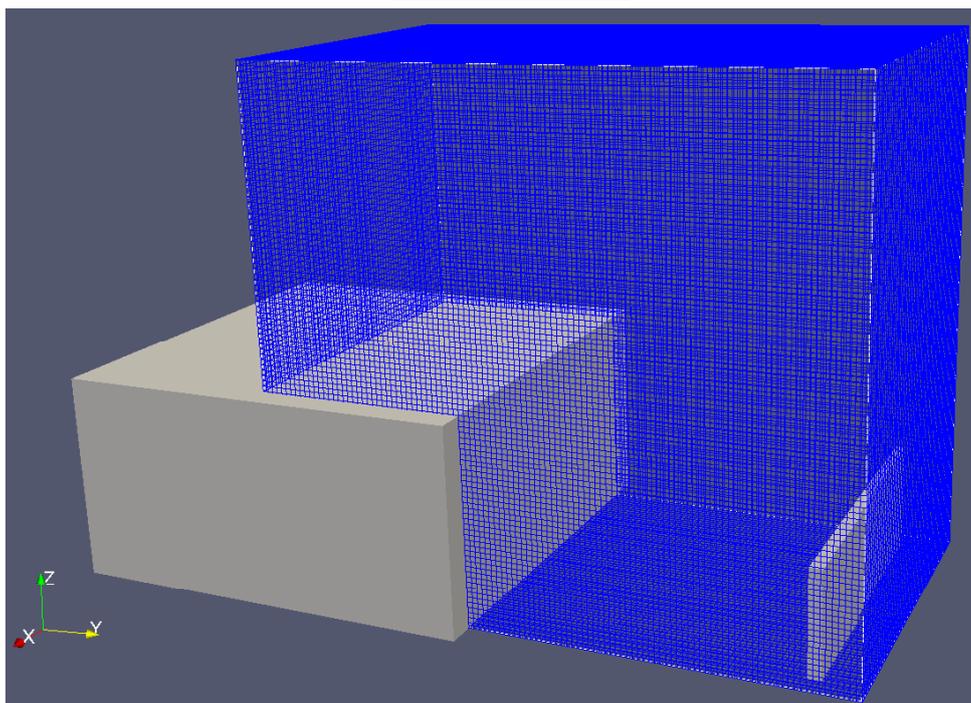


実験配置図

解析モデル



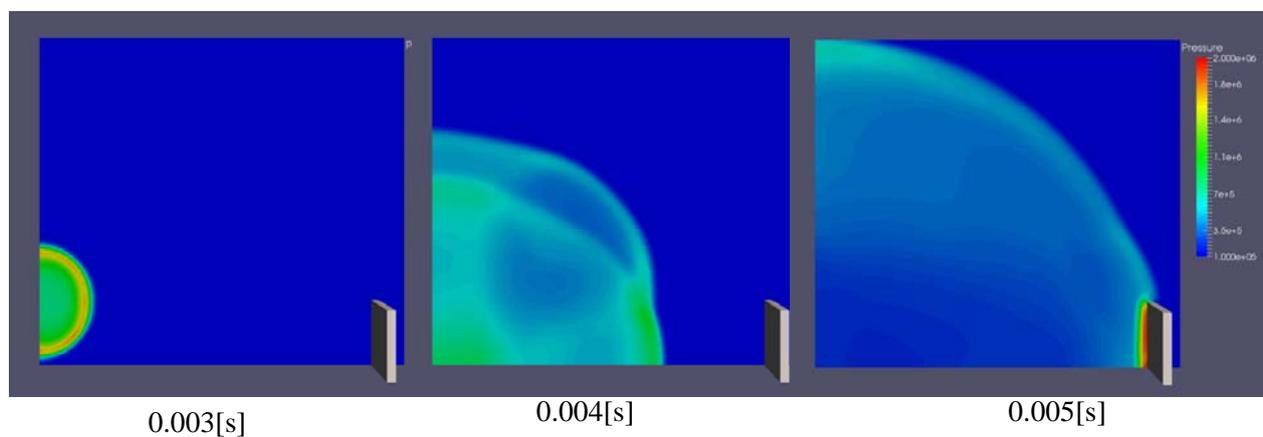
計算格子



$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.05\text{m}$ (68 × 110 × 100 = 748000メッシュ)

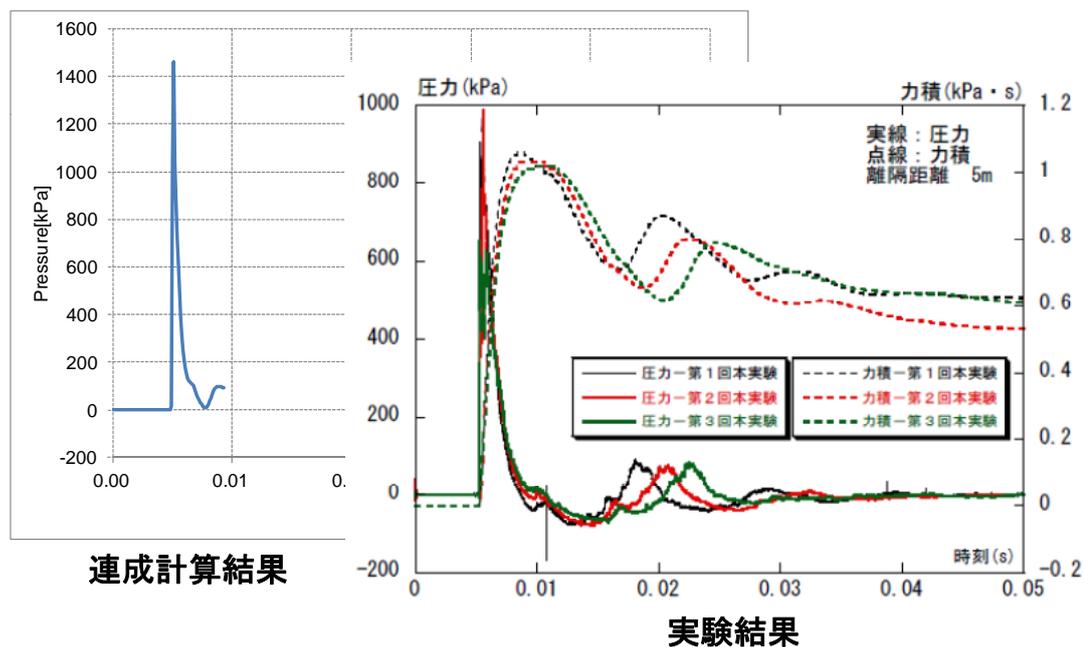
解析結果

爆風圧の経時変化



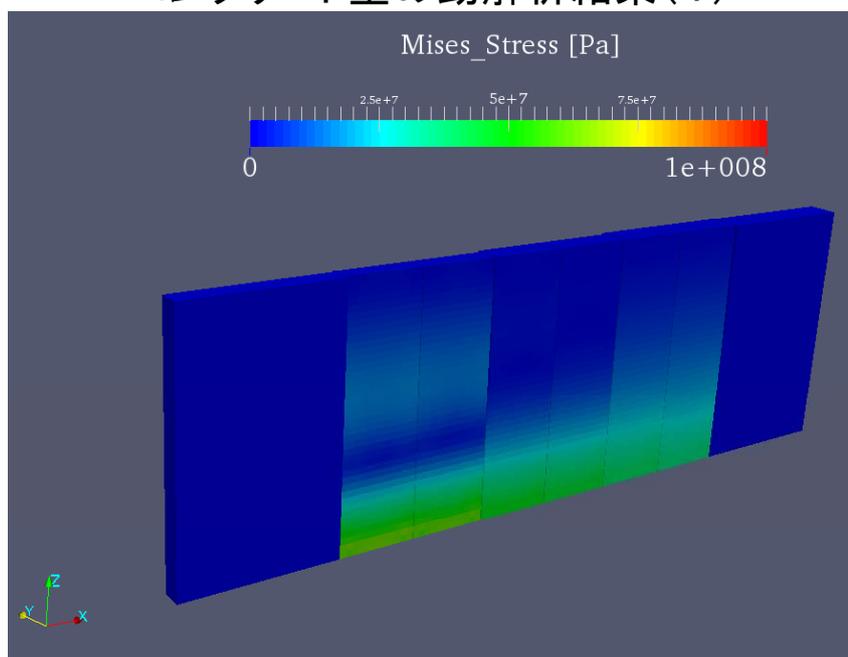
解析結果

壁面上の圧力経時変化(壁面中央)



解析結果

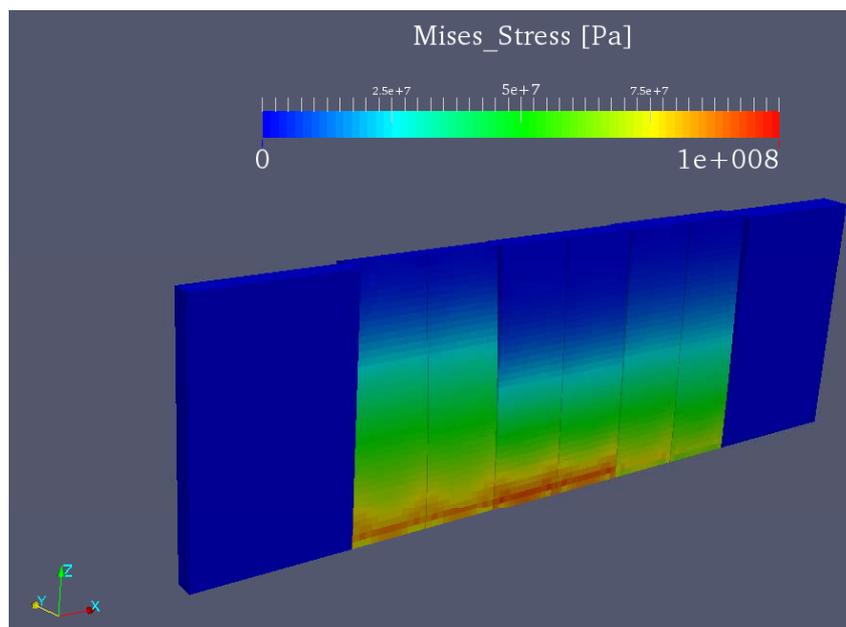
コンクリート壁の動解析結果(1)



ミーゼス応力分布[Pa]

解析結果

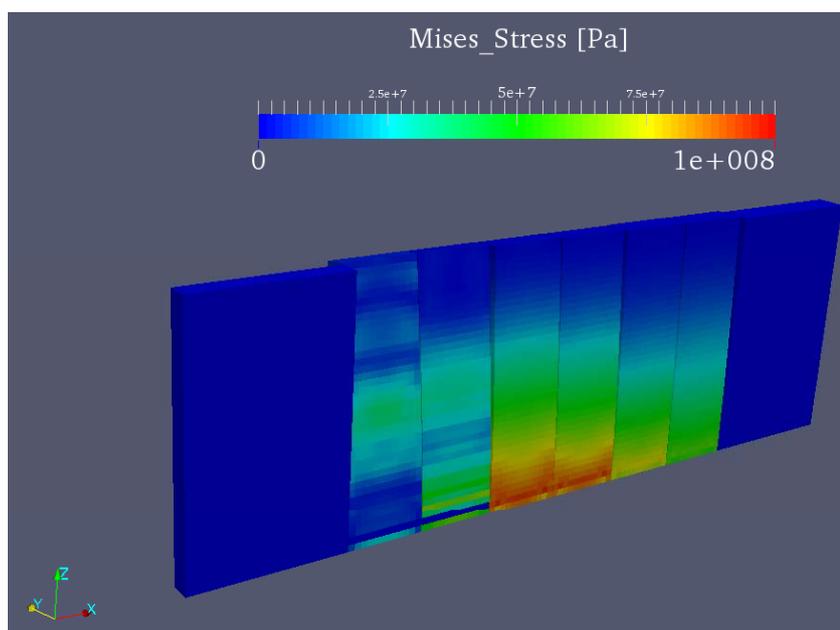
コンクリート壁の動解析結果(2)



ミーゼス応力分布[Pa]

解析結果

コンクリート壁の動解析結果(3)



ミーゼス応力分布[Pa]

まとめ

- Advance/FrontFlow/FOCUS および連成機能について
- 配管内での水素爆轟の解析事例のご報告
- 水素爆風圧を受けるコンクリート壁の解析事例のご報告

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR を用いた連成解析事例

研究員 尾川 慎介

アドバンスソフトの連成解析セミナー
2015年5月15日（金）開催
アドバンスソフト株式会社

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

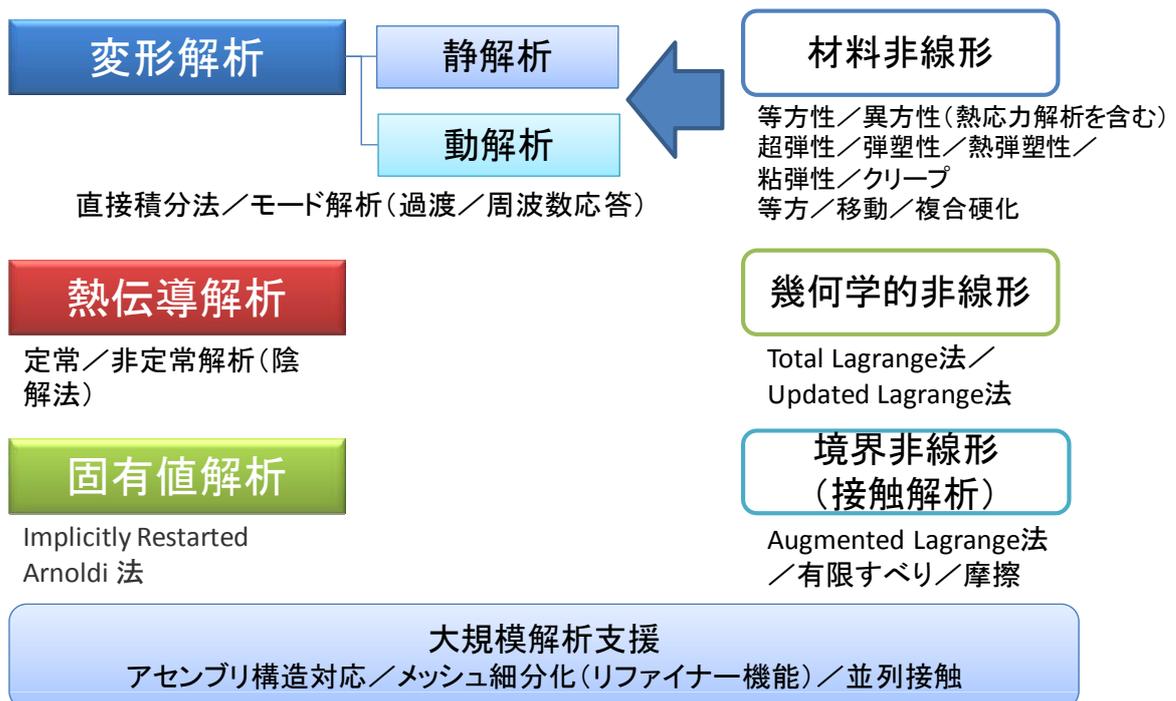
内容

- Advance/FrontSTR のご紹介
 - 解析機能
 - 大規模計算の性能
- 連成解析の事例紹介
 - 船舶居住区の騒音解析(構造音響 一方向弱連成)
 - 遮音試験のシミュレーション(構造音響 一方向弱連成)
 - マフラーの性能評価(構造音響 双方向強連成)
 - 衝撃圧解析(構造流体 一方向弱連成)

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

Advance/FrontSTR のご紹介

解析機能

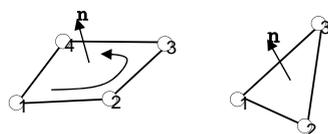
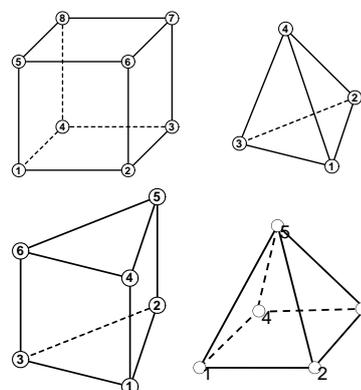


要素

- ソリッド
 - 六面体(2), 四面体(2), プリズム(2), ピラミッド(2)

- シェル
 - 三角形(2), 四辺形(2)

- 梁(3)
- トラス(3) など



※ 括弧内の数字は高次要素の最大次数

材料特性

- 弾性
- 弾塑性
 - 降伏関数 Mises, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager
 - 硬化則 等方硬化、移動硬化、複合硬化
- 超弾性
 - 8種類のモデル
- 粘弾性
- 熱特性

- 異方性や温度依存性も考慮可能

境界条件

- 変位
- 荷重(集中・分布)
- 速度
- 加速度
- ばね (弾性拘束)
- ダッシュポット (粘性拘束)
- 接触
- 温度
- 熱流束(集中・分布)
- 熱伝達
- 輻射

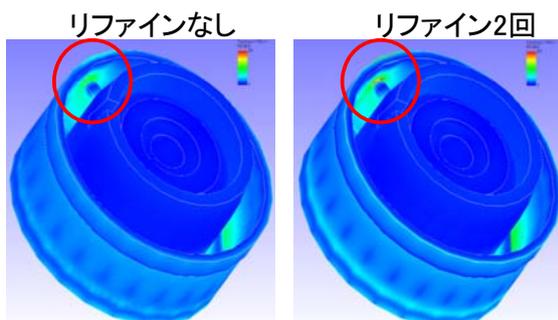
大規模計算の並列性能

解析対象

静応力解析(四面体二次要素)

リファイン	要素数	節点数
なし	684,807	1,008,911
1回	5,478,456	7,707,758
2回	43,827,648	60,089,084

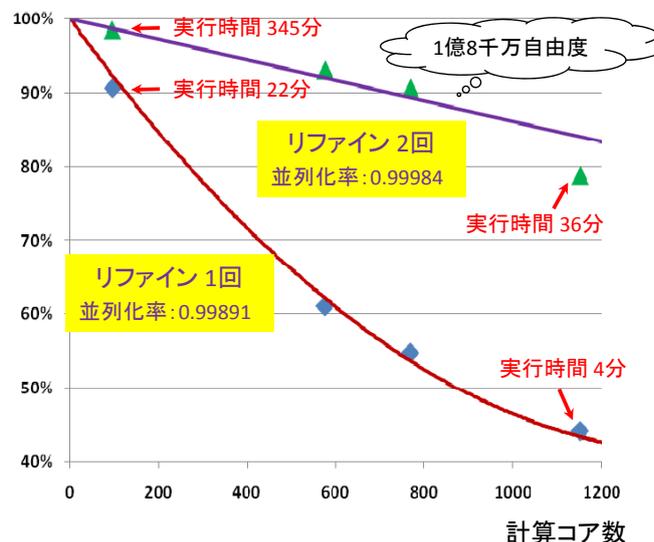
解析結果(ミーゼス応力分布)



使用計算機

計算科学振興財団さま FOCUSスパコン

並列化効率($T_1/(n \times T_n)$) ◆▲ : 計測 - - : 近似

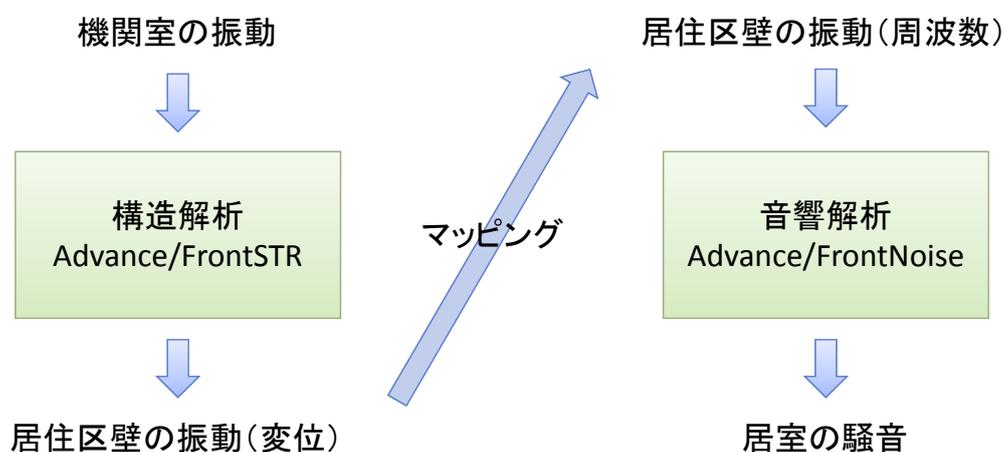


事例紹介

船舶居住区の騒音解析 (構造音響 一方向弱連成)

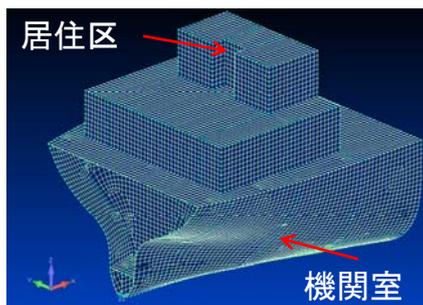
解析の流れ

- 機関室の振動が引き起こす居住区の騒音の解析
 - 居住区における騒音を一定レベル以下へ(規約改定)



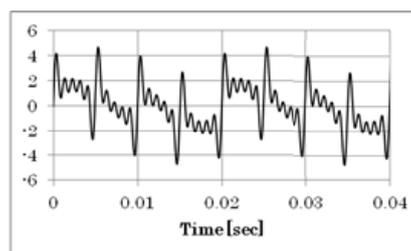
構造解析の条件

要素タイプ	四辺形1次要素
節点数	16,596
要素数	16,862



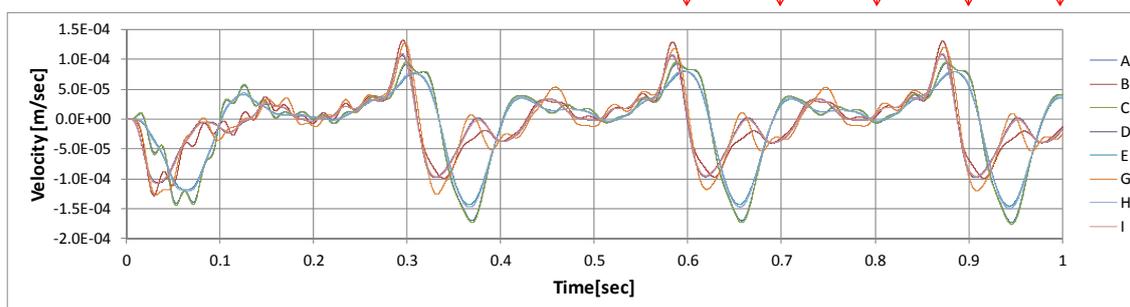
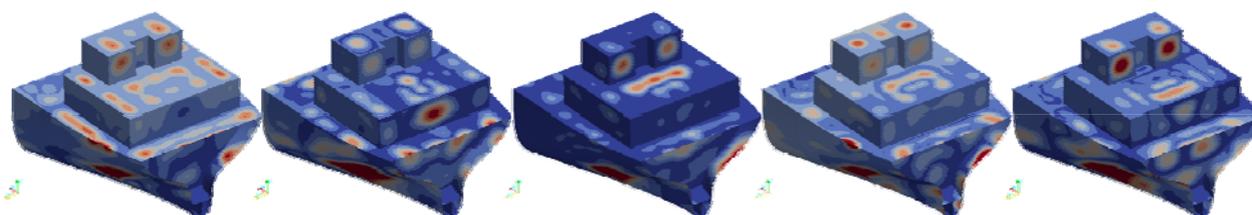
構造メッシュ

- メッシュサイズ: 0.2m
 - 周波数の上限 1.5 kHz
 - 金属中の音速 5 km/sec
- 時間刻み: 0.1 msec
 - 要求分解能 10 Hz (0.1 sec)
 - 周波数の上限 1.5 kHz
- 過渡解析からの定常状態の抽出
 - 1秒間の解析から0.5秒間

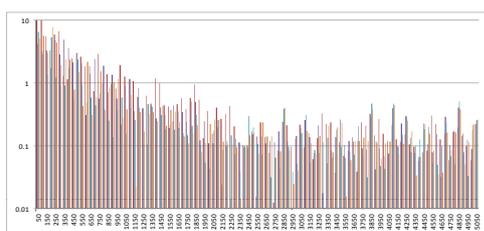


機関室の加振力

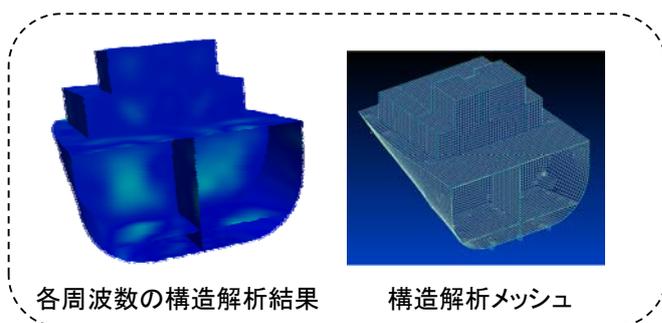
構造解析の結果



マッピング

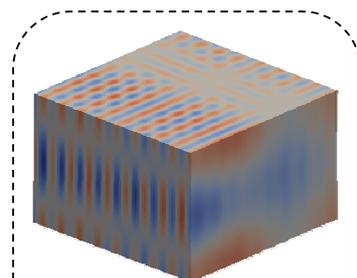


各節点の構造解析結果(FFT処理後)



各周波数の構造解析結果

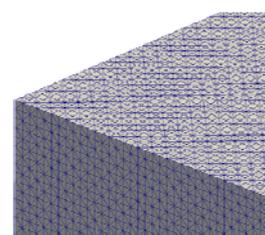
構造解析メッシュ



音響解析入力データ



マッピング

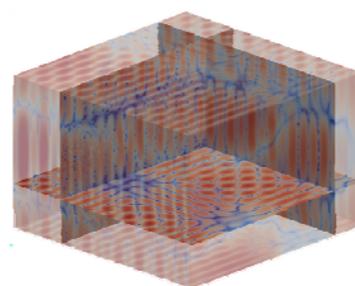


音響解析メッシュ

- 構造解析結果(居住区の節点変位の過渡応答)をFFT処理
- 寸法の異なるメッシュ間で値を補間し、音源データに変換した

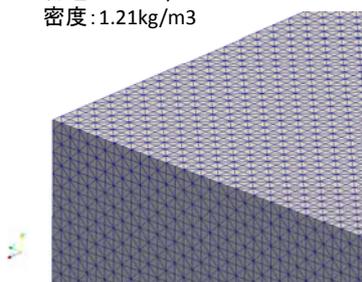
音響解析の結果

要素タイプ	四面体1次要素
節点数	732,676
要素数	4,293,315

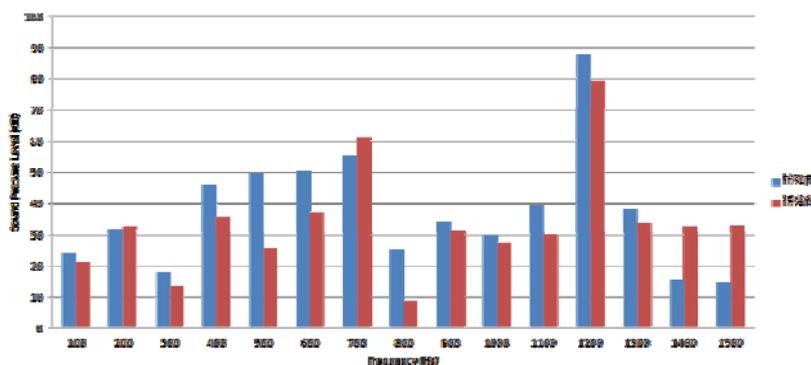


1kHz の音圧レベルコンター

音速: 346.0m/sec
密度: 1.21kg/m³



音響メッシュ



居室内的音圧レベル(補強前と補強後の比較)

事例紹介

遮音基礎試験のシミュレーション (構造音響 一方向弱連成)

解析の概要

非公開

計算機環境と処理時間

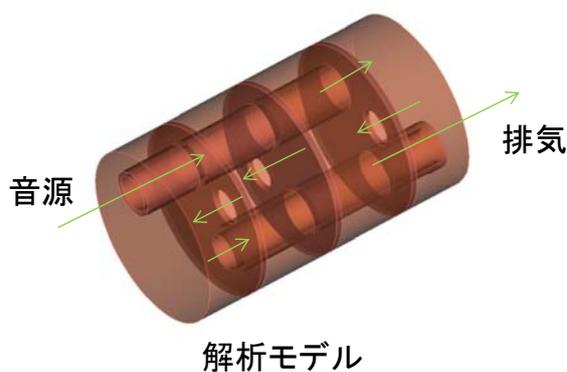
非公開

事例紹介

マフラーの性能評価 (構造音響 双方向強連成)

概要

- マフラー(消音器)の評価: 構造音響強連成解析
 - 音響による構造物の振動(減衰を含む)も考慮した



弱連成

構造 → 音響 または 音響 → 構造

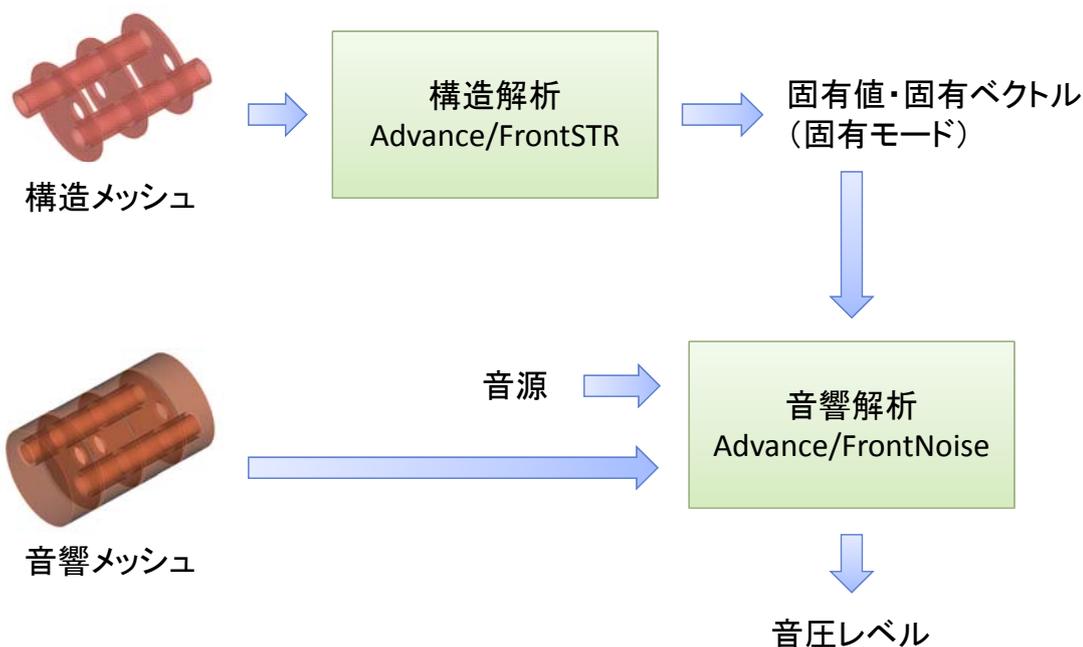
強連成

構造 → 音響 → 構造 → ...

音響 → 構造 → 音響 → ...

壁を介した振動の伝播を考慮可能

解析の流れ



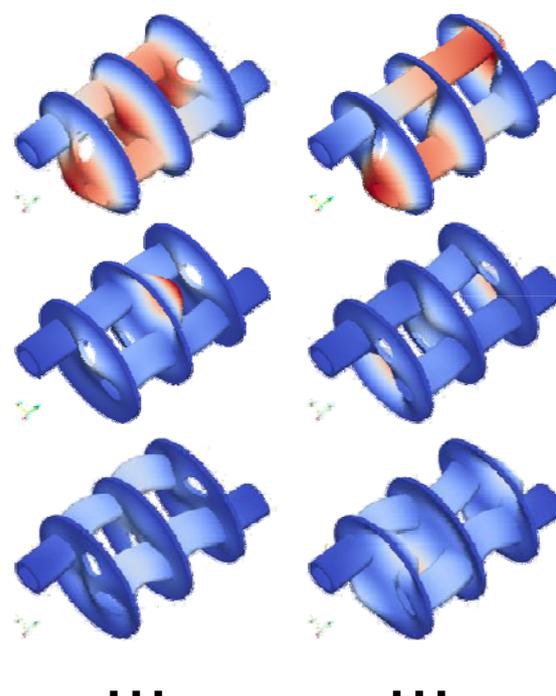
解析条件

- 境界条件: 入口は音源、出口はpc境界
- 構造物には振動(音源)を与えない
- 周波数: 100Hz~1.2kHz(5Hz間隔)
- 解析ケース: 音響解析のみ、
連成(構造減衰なし)、連成(構造減衰あり)

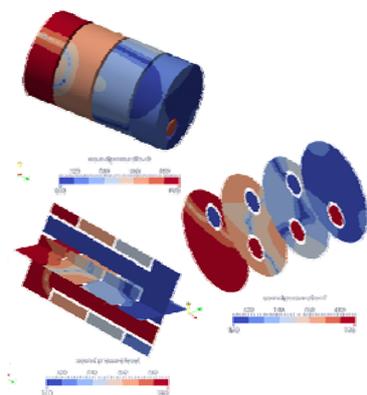
項目	構造解析	音響解析	連成面
節点数	9,111	45,323	7,984
要素数	29,494	229,697	15,340
要素	四面体2次要素	四面体1次要素	三角形要素
境界条件	円筒とのつながり部分 を3自由度固定652節点	音源:47要素面 pc境界:47要素面	構造解析と音響解析の 共通面の情報を共有
備考	固有モード数30		

構造解析の結果

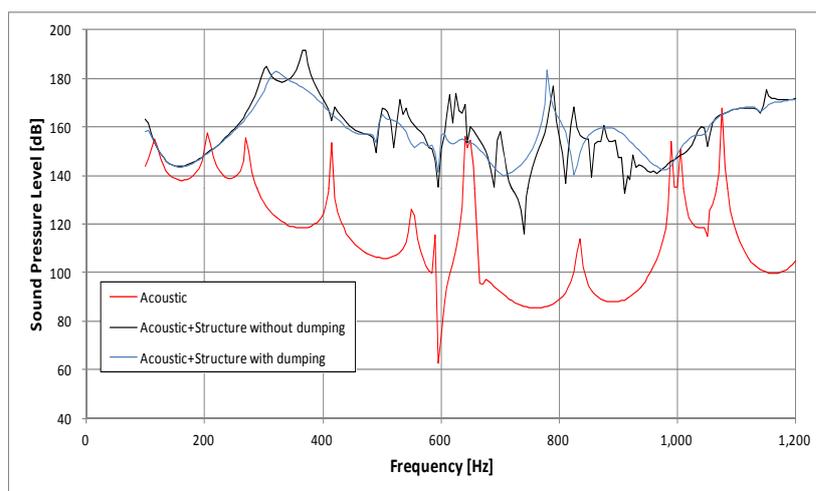
No.	固有値	周波数 Hz	No.	固有値	周波数 Hz
1	5.37E+06	369	16	2.13E+07	734
2	6.80E+06	415	17	2.58E+07	809
3	1.06E+07	517	18	2.85E+07	849
4	1.11E+07	530	19	2.91E+07	859
5	1.17E+07	543	20	2.98E+07	869
6	1.32E+07	577	21	2.99E+07	870
7	1.36E+07	588	22	3.04E+07	878
8	1.46E+07	609	23	3.16E+07	894
9	1.52E+07	620	24	3.24E+07	906
10	1.54E+07	624	25	3.26E+07	909
11	1.57E+07	631	26	3.29E+07	913
12	1.60E+07	637	27	3.35E+07	921
13	1.67E+07	650	28	3.44E+07	934
14	1.91E+07	696	29	3.60E+07	954
15	1.96E+07	704	30	3.65E+07	961



音響解析の結果



断面での音圧レベル



マフラー出口の音圧レベルの周波数特性

- 連成解析により、このモデルでは内部の壁を透過する振動が生じ、音圧レベルが全体的に上昇した
- 形状や材質のほか、触媒(多孔質媒体)の影響を考慮した解析も可能

事例紹介

衝撃圧解析 (構造流体 一方向弱連成)

医分野の事例： 衝撃圧解析

非公開

Advance/FrontSTR 連成解析のまとめ

- Advance/FrontSTR を利用した連成解析を紹介した。
 - 構造振動による音響評価
 - 構造物中の透過音を含む構造振動と音響の連成問題
 - 振動解析と流体解析を利用した衝撃圧の評価
- Advance/FrontFlow/red および Advance/FrontFlow/FOCUS で紹介した事例も合わせ、連成解析では Advance/FrontSTR の大規模並列計算を有効に利用できると考えられる。
- 今後とも、多様な解析ソフトウェアのソースコードをハンドリングできる当社の利点を生かして、ユーザ様からのニーズに応えた連成解析を実施していく予定である。

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を用いた連成解析事例

代表取締役社長 松原 聖

アドバンスソフトの連成解析セミナー
2015年5月15日（金）開催
アドバンスソフト株式会社

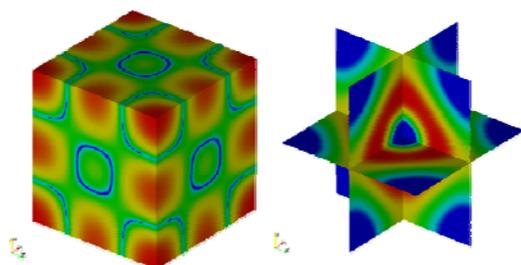
音響解析ソフトウェアAdvance/FrontNoise

- 有限要素法による音響解析機能(音源を与え解析領域の粒子速度のポテンシャルを解く)
- 周波数領域/時間領域の解析が可能
- 大規模並列計算が可能: 8億要素解析の実績あり
- 流れ場,温度を設定した領域での音響解析が可能
- 多孔材を含む領域の音響解析が可能
- 音響固有値解析が可能
- 行列計算には反復法/直接法を利用可能
- 構造音響双方向連成(強連成)機能を利用可能
- 構造-音響、流体-音響の一方向連成が可能(Advance/FrontSTRおよびAdvance/FrontFlow/redとの連成)

Advance/FrontNoise 大規模解析

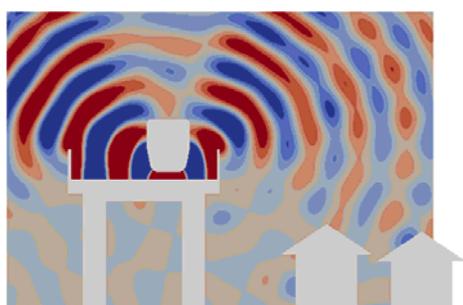
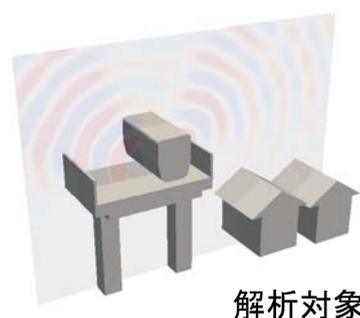
- 四面体一次
- 4億要素、7000万節点
- 領域分割での並列化
- 48CPU,400GB
- 12時間/周波数

要素数	節点数	自由度
92,629,494	15,625,000	31,250,000
116,790,654	19,683,000	39,366,000
137,437,824	23,149,125	46,298,250
160,385,394	27,000,000	54,000,000
185,754,864	31,255,875	62,511,750
255,051,294	42,875,000	85,750,000
301,460,454	50,653,000	101,306,000
381,127,194	64,000,000	128,000,000
425,747,664	71,473,375	142,946,750

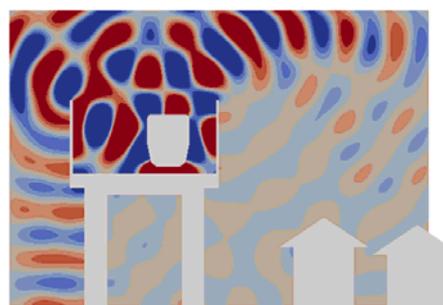


列車通過時の高架橋付近環境騒音

- 解析概要: 列車通過時において、高架橋付近の遮音壁の形状による騒音の違いを評価した。
- シミュレーションのメリット: 遮音壁の形状や材質を変化させて、その効果を推定することができる。音の伝播を可視化できるため、その対策を立てることが容易である。
- 本ソフトウェア利用のメリット: 大規模解析が可能であるため、高い周波数まで解析可能である。



遮音壁が低い場合



遮音壁が高い場合

音響解析の連成事例

- 本日、ここまでにご紹介した音響解析の連成事例
 - 船内居住区の振動騒音解析(一方向弱連成)
 - 消音器の構造音響解析(強連成)
- 本日よりご紹介する事例
 - 消音器の流体騒音解析(一方向弱連成)
 - 列車の車輪振動による環境騒音(一方向弱連成)
 - 空調機の騒音評価(一方向弱連成)
- その他の音響解析における連成解析の実績
 - プラントの音響破壊(一方向弱連成)
 -

流れによる音の発生を考慮した 音響解析によるマフラの性能評価

- 流体解析の結果から得られた二重極および四重極を音源として、音響解析を実施します。
- 一般に流体解析領域を含む大きな領域を音響解析の解析領域とします。
- 流体解析の時系列計算結果を利用するため、その中間結果ファイルが膨大な量(実用的な計算では1TB程度)となり、大規模なデータを取り扱うことのできるツールが必要です。

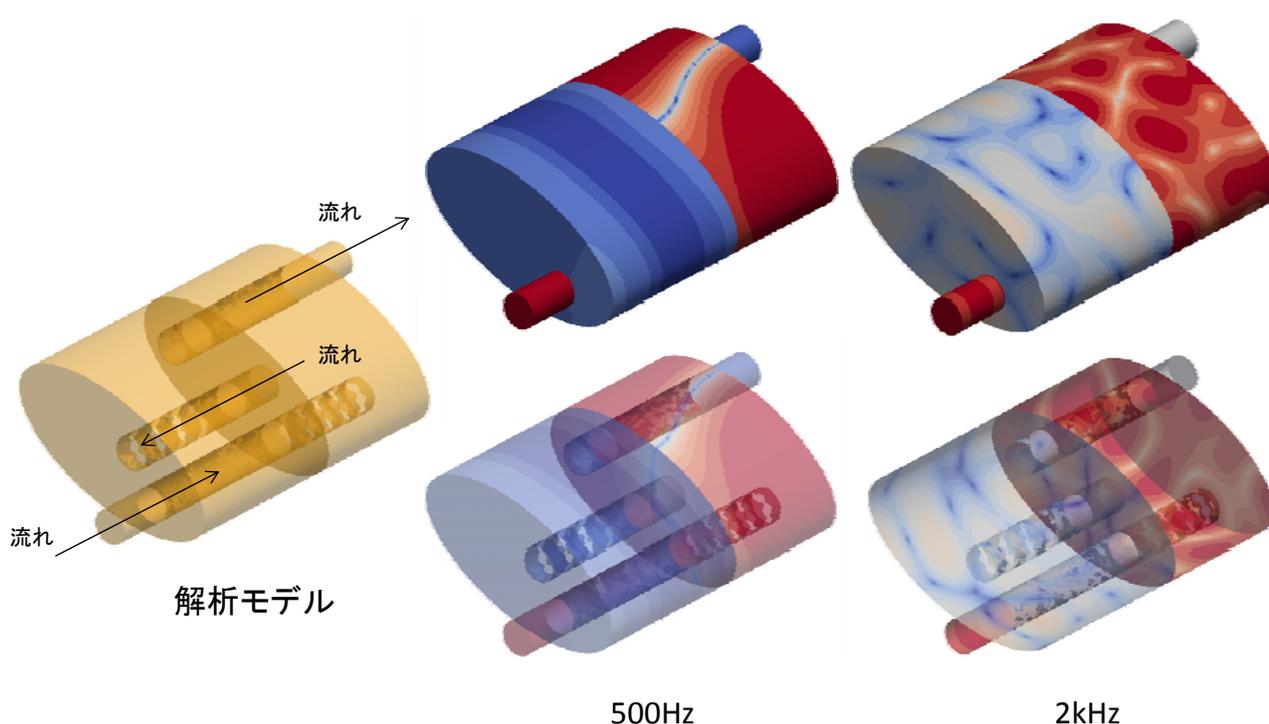
流体解析結果の利用(四重極音源)

- i. 流体解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/redの時系列ファイルをもとに音源となる可能性のある場所から出力する。 $T_{ij} = \rho v_i v_j$
- ii. 速度からLighthillの乱流応力カテナソルを求めめる。
- iii. 乱流応力カテナソルの2階微分を求めめる。 $\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$
- iv. 乱流応力カテナソルの2階微分をフーリエ変換する。
- v. 流体メッシュから音響メッシュに物理量をマッピングする。
- vi. 係数を乗じて、基礎方程式の右辺に加える。

$$\nabla^2 \varphi + k^2 \varphi = -i \frac{1}{\rho c k} \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

- vii. 音響解析を実施する。

流れによる音の発生を考慮した音響解析によるマフラの性能評価



500Hz

2kHz

Advance/FrontNoise連成解析のまとめ

- ハードウェアの性能向上により、構造および流体解析を利用した音源の解析が実用的になるにしたがい、そのポスト処理としての音響解析のニーズが増えてきた。
- 当社の音響解析ソフトウェアAdvance/FrontNoiseでは従来から取り組んできた音響の大規模解析の適用により、流体音響連成が可能となった。
- 構造および流体音響連成の実績を重ね、その解析手順を音響解析ソフトウェアのツールとして整備した。
- 今後とも、多様な解析ソフトウェアのソースコードをハンドリングできる当社の利点を生かして、ユーザー様からのニーズに応えた連成解析を実施していく予定である。



警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。