

# 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

## 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

## 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

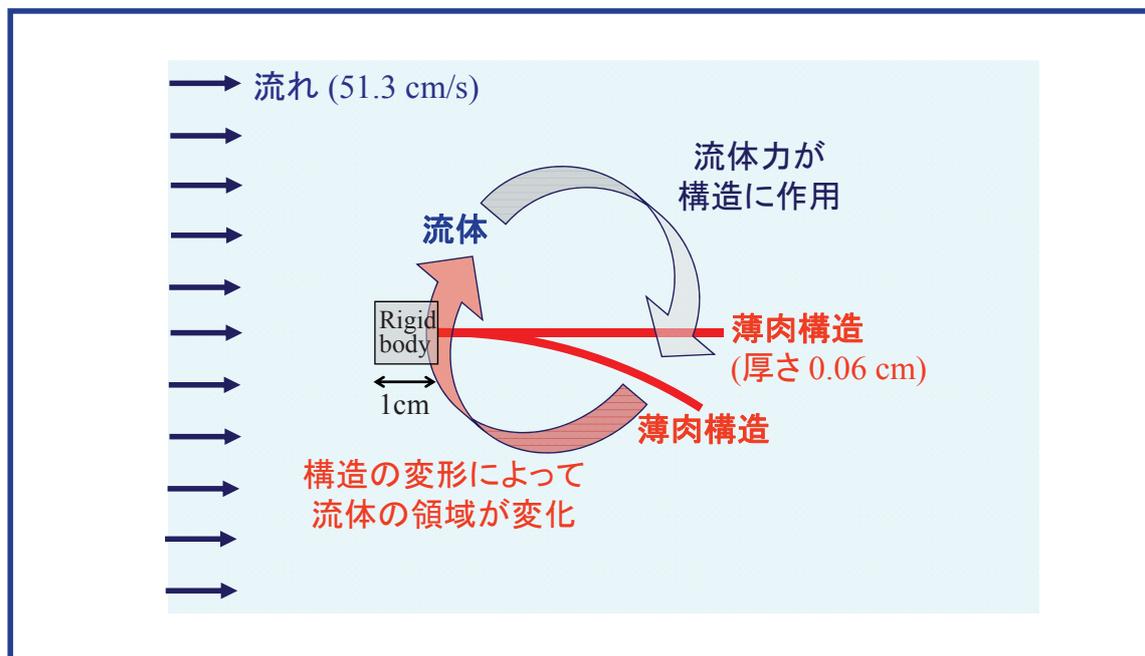
## 講演内容

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

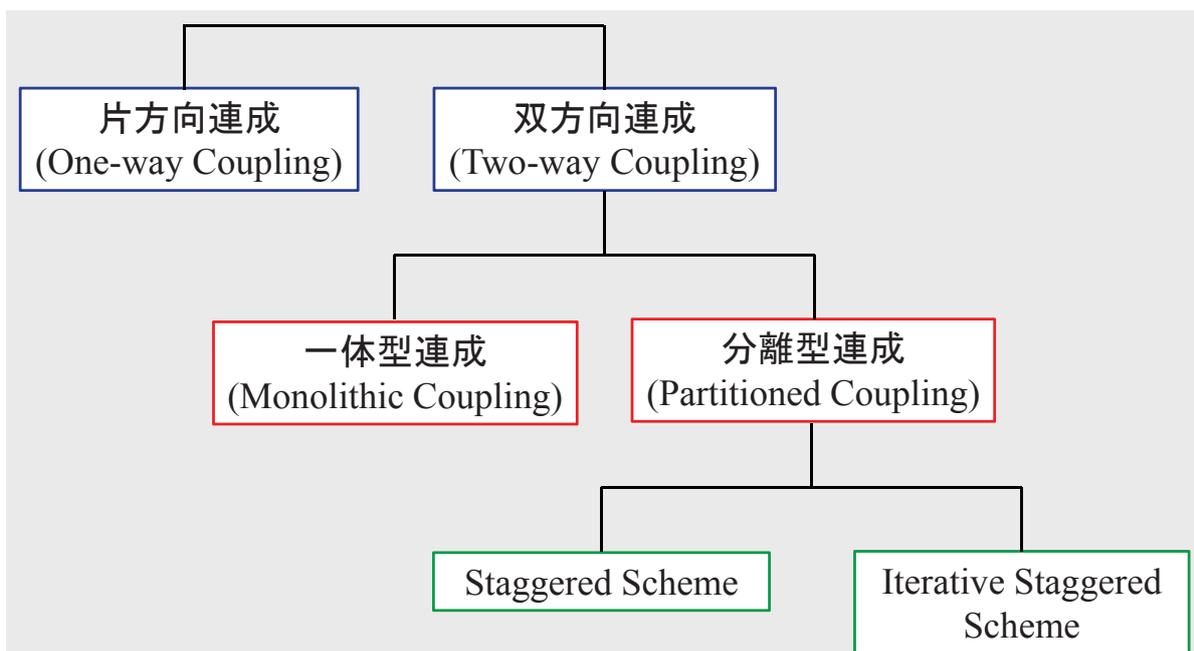
# Fluid-Structure Interaction (FSI)

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



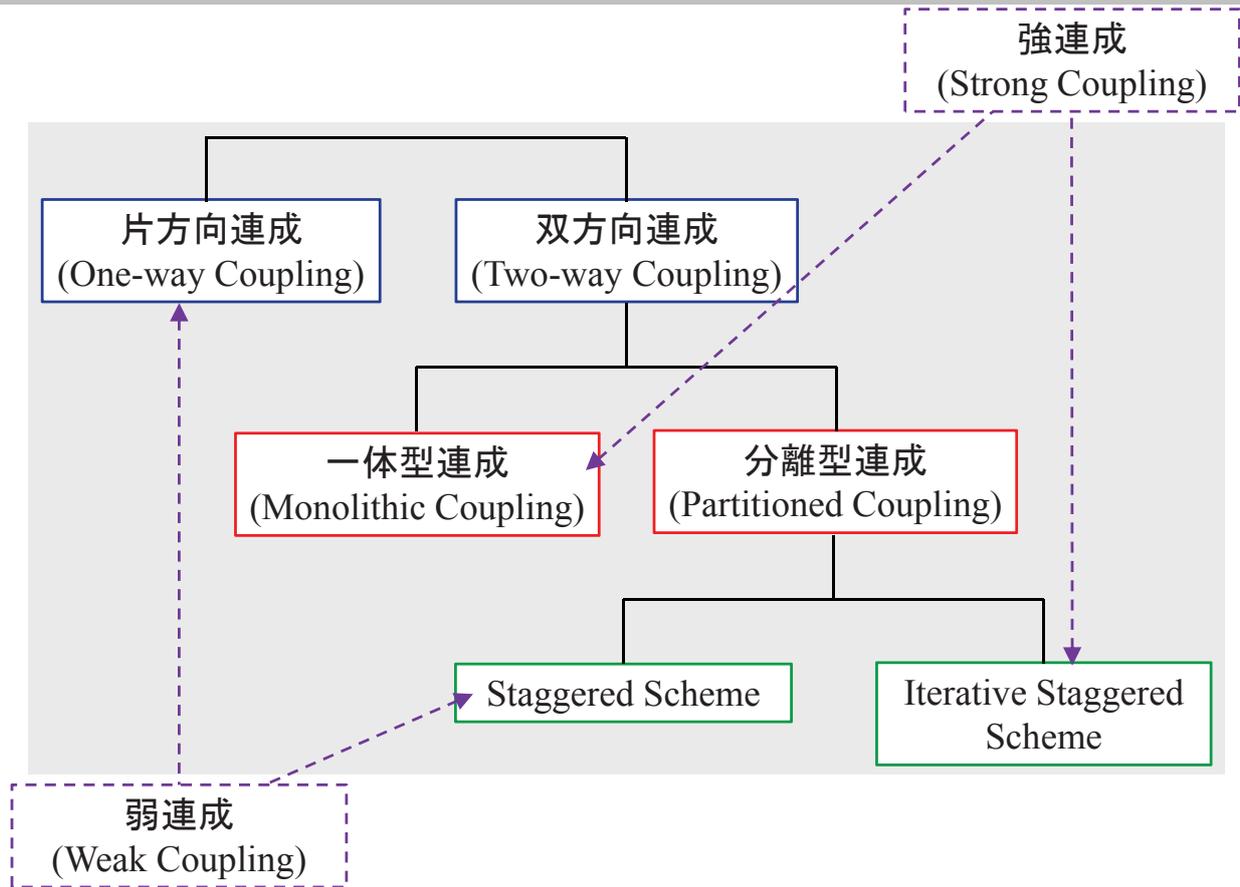
7

## 連成手法の分類 (1/2)

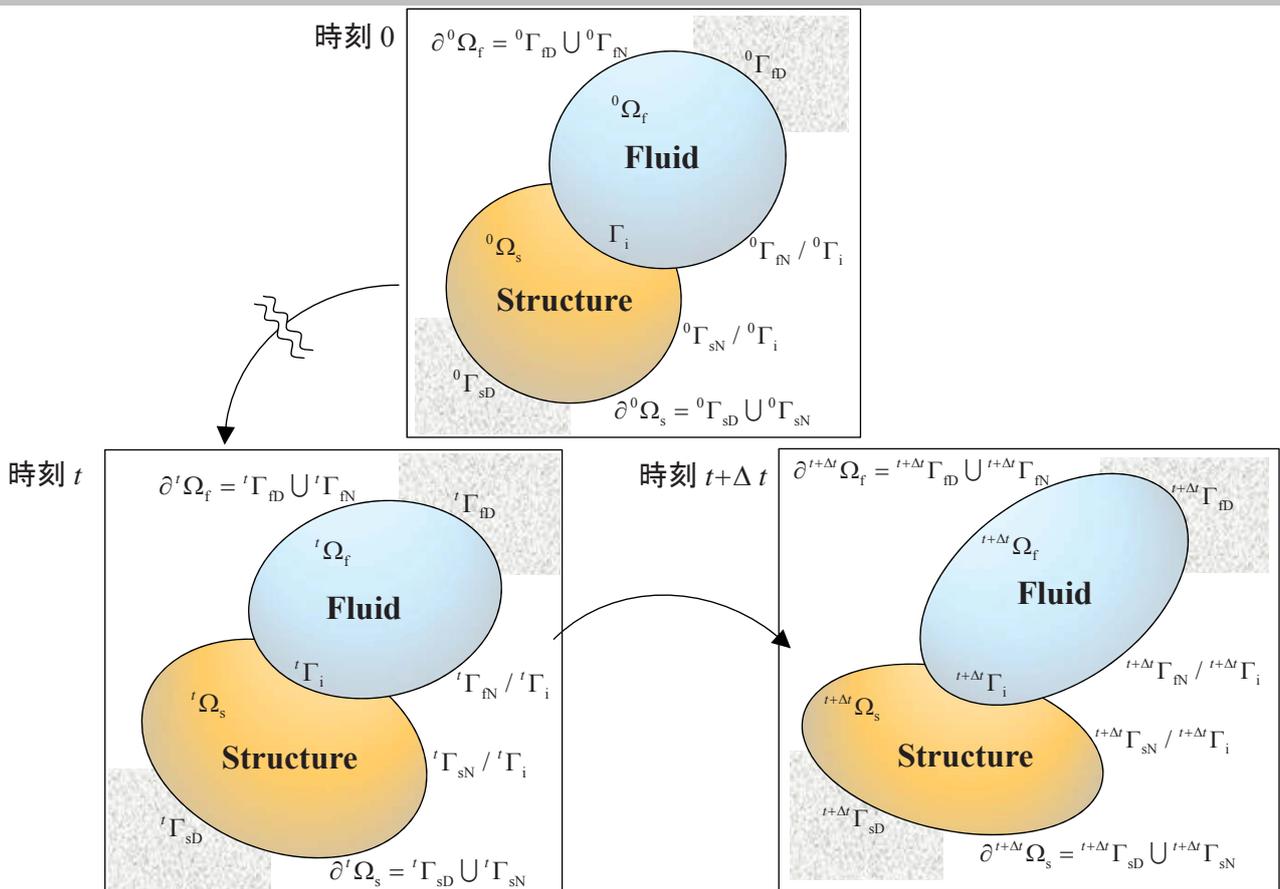


8

# 連成手法の分類 (2/2)



# 流体と構造の初期値・境界値問題



# 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

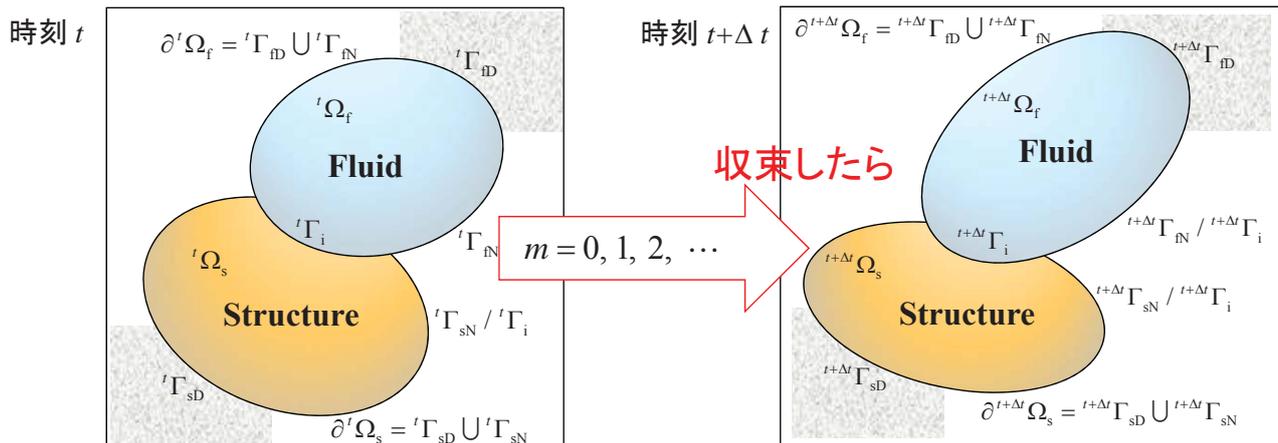
# 一体型連成

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)

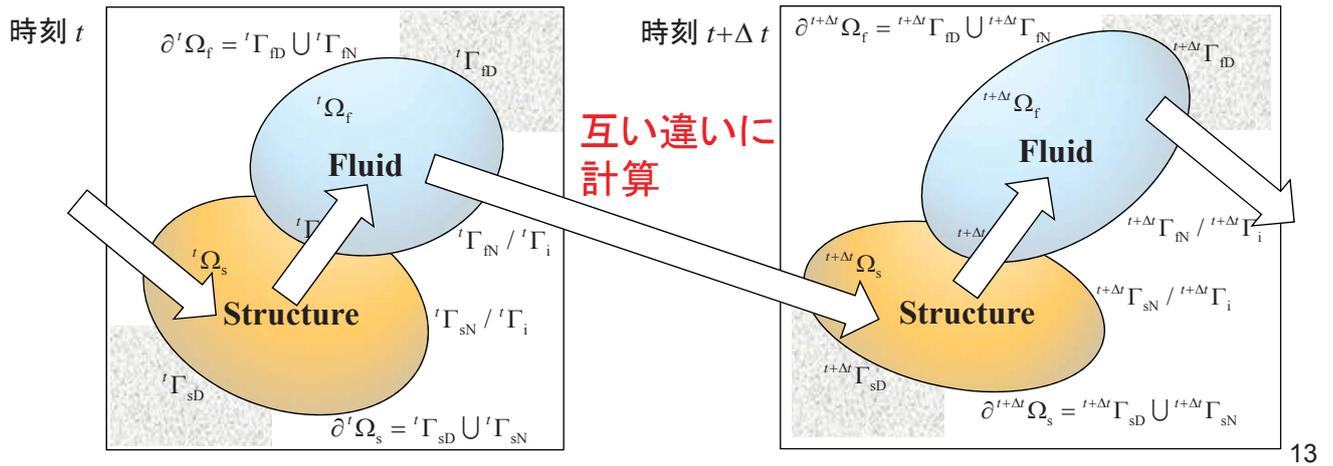
## Staggered Scheme

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

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)

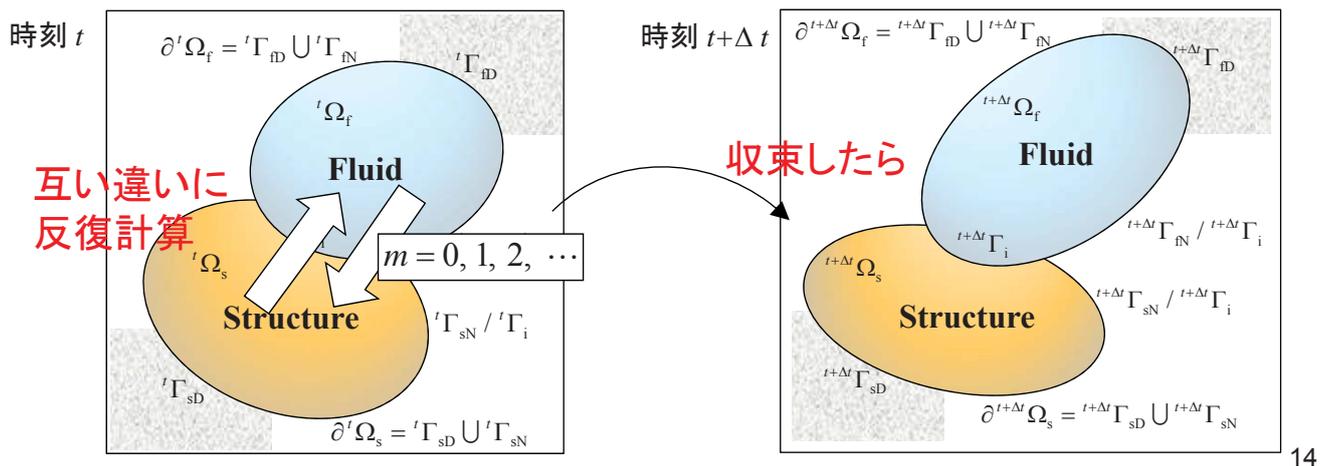
$$\mathbf{q}_s({}^{(m)} \mathbf{x}_s, {}^{(m-1)} \mathbf{x}_f) = {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}_s$$

固定

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

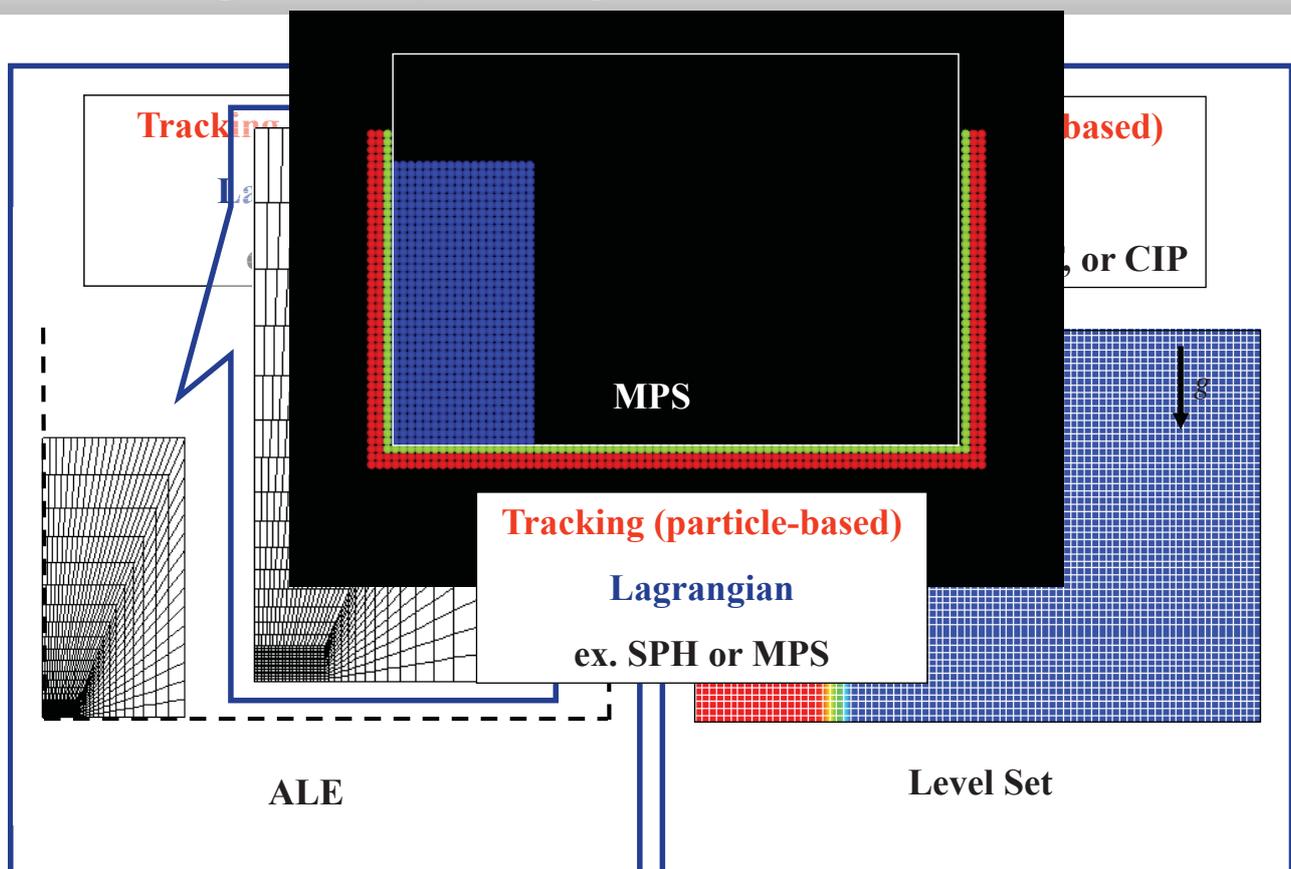
固定

反復計算



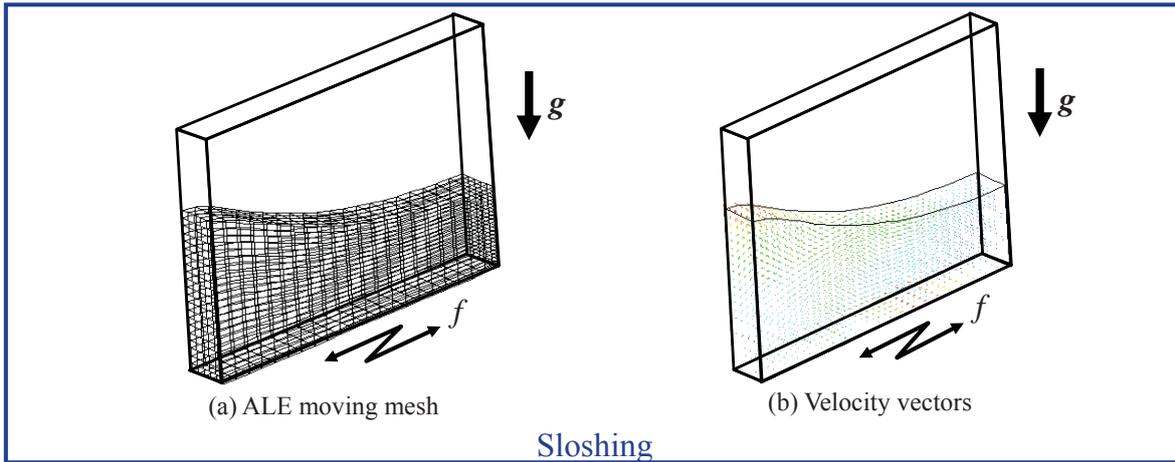
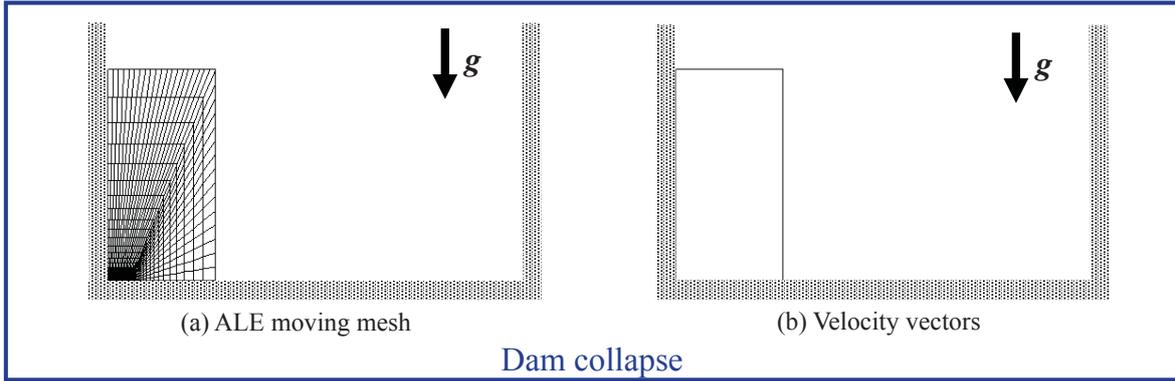
0. 自己紹介
1. 連成手法の分類
2. 種々の移動境界処理
3. 解析事例
  - 3.1. ブーメランの飛行
  - 3.2. 薄肉弾性板の渦励振
  - 3.3. エアバッグ展開
4. まとめ

## Tracking or Capturing of Interface



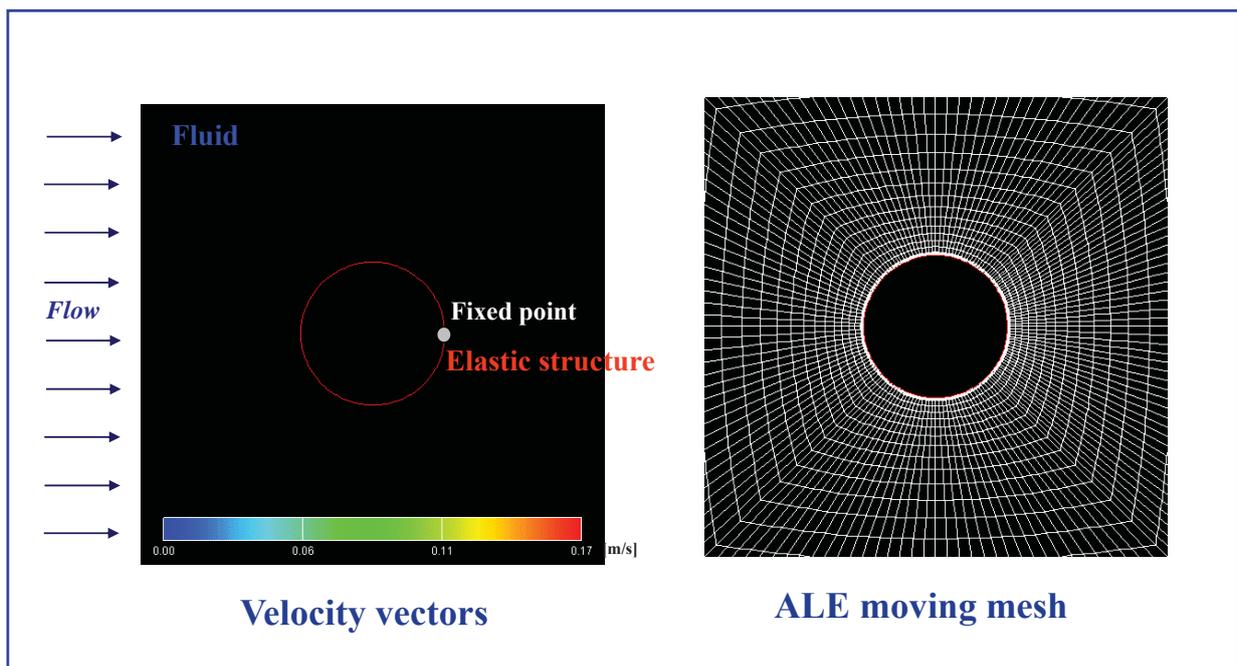
# ALE法による自由表面解析

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



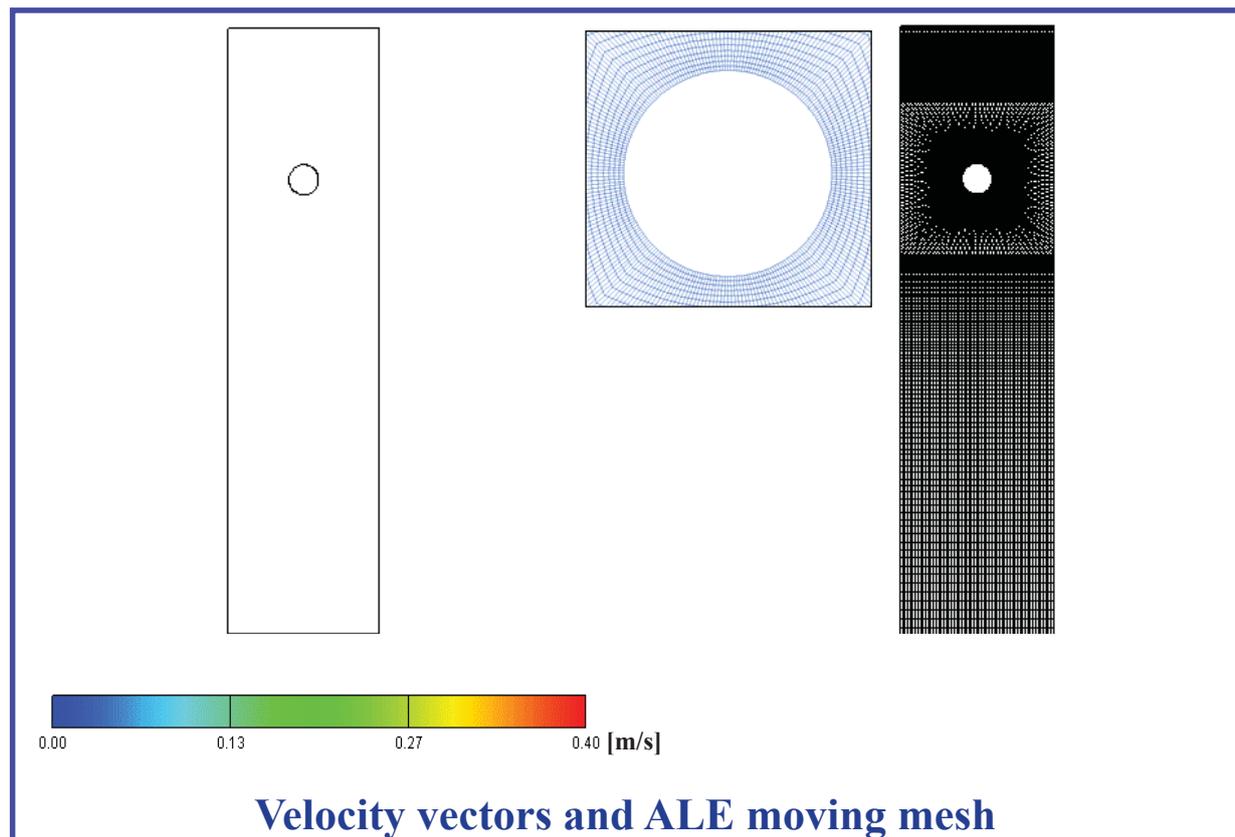
17

# 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

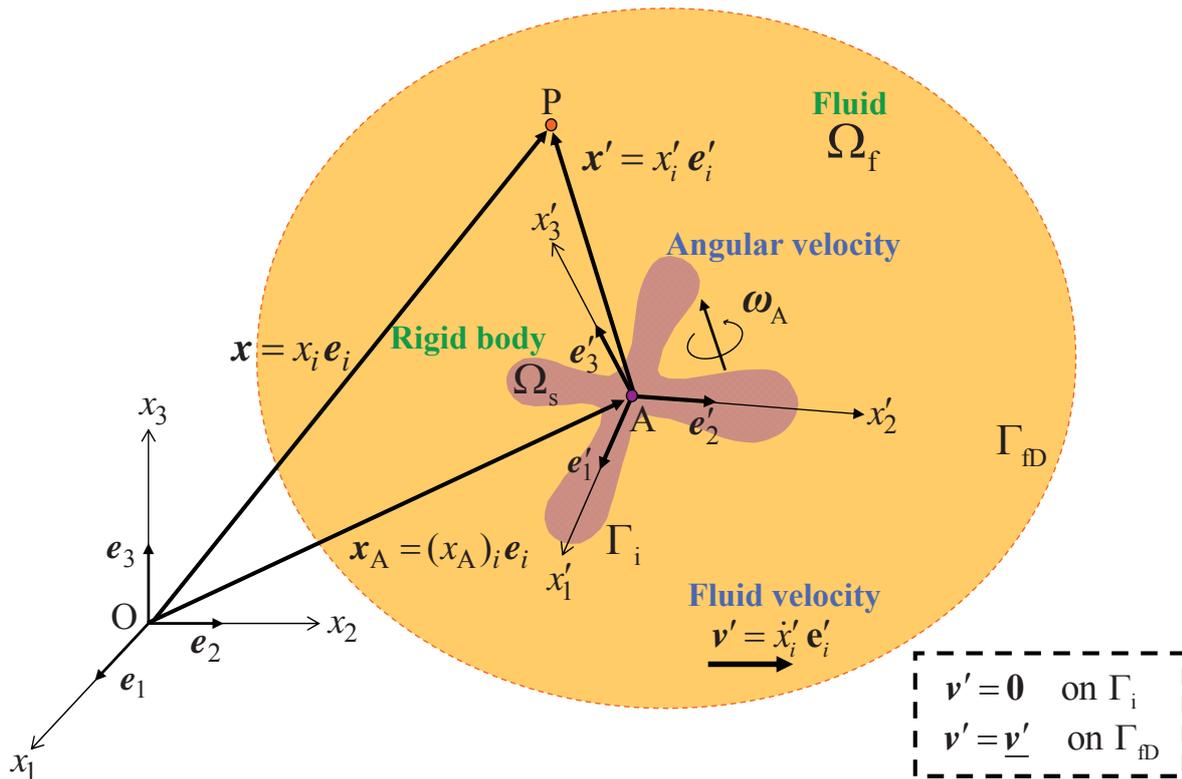
21

## 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

# 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)

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

$\dot{\phantom{x}} = d/dt$  : 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 [ $\text{N} \cdot \text{m}$ ]

# 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]

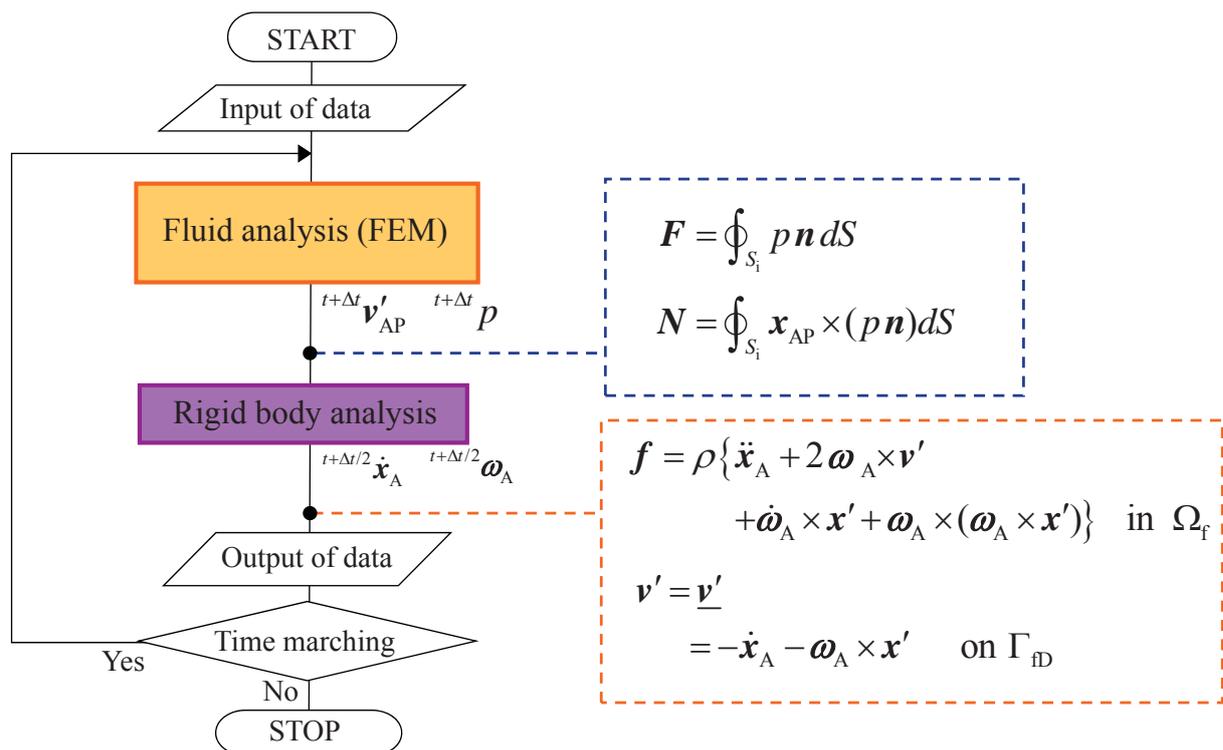
$\rho$  : 流体密度 [kg/m<sup>3</sup>]  $d\rho/dt = 0$        $\eta$  : 粘性係数 [Pa·s]

$p$  : 圧力 [Pa]

$\mathbf{D}$  : 変形速度テンソル [1/s]

25

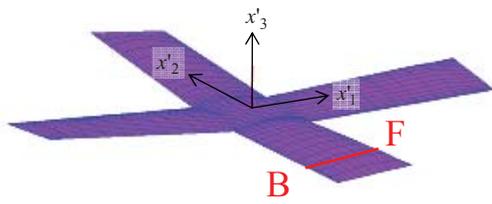
# 流体-剛体連成解析の計算方法



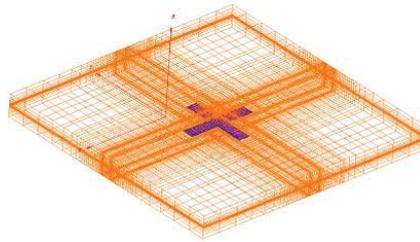
Algorithm of fluid-rigid body interaction analysis

26

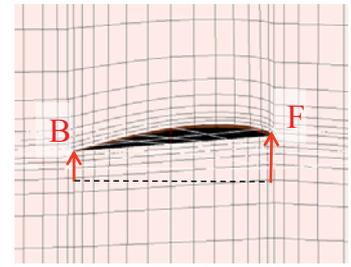
# 解析メッシュ



(a) Boomerang



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



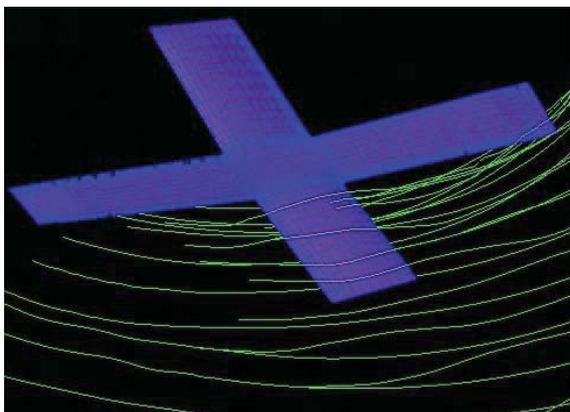
(c) Cross section F-B

## Analysis model of Model 2 with twist and the fluid mesh

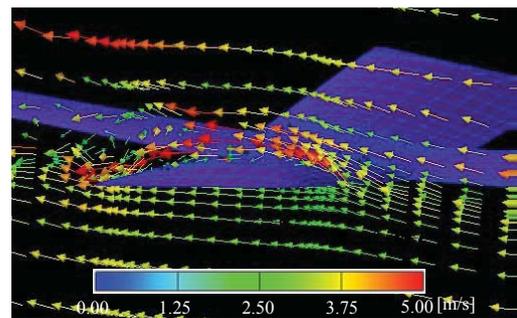
27

# 計算結果

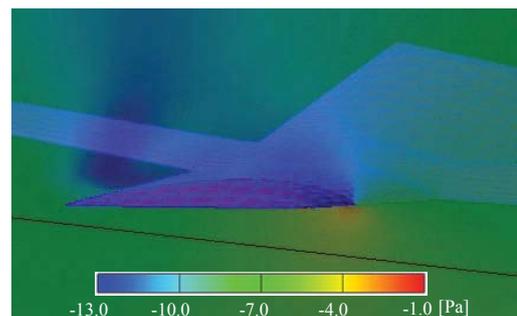
Flight direction of boomerang



(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.

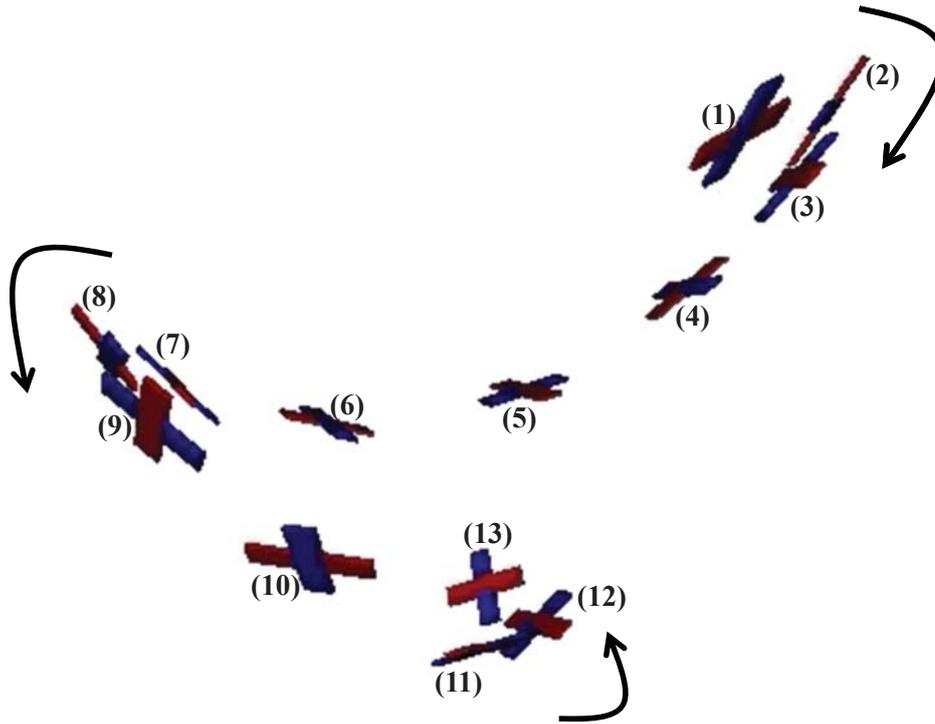
Noguchi, H. and Hisada, T., *Comp. & Struct.*, 47-4/5, (1993), pp. 699-710.

29

## 計算結果



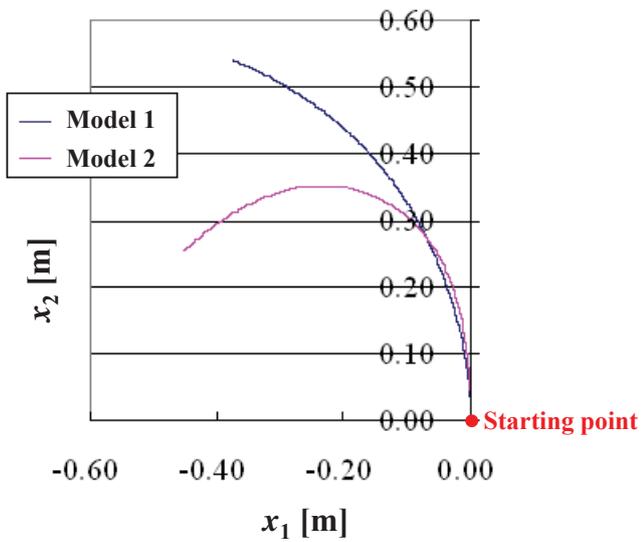
# 計算結果



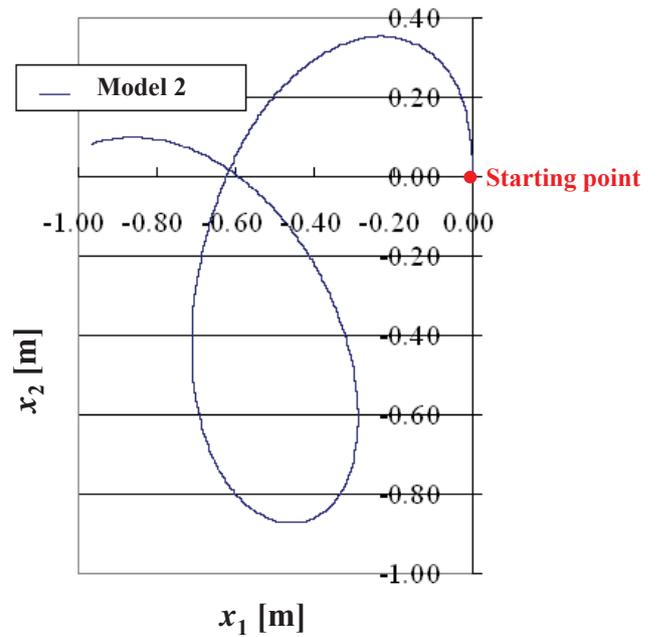
Flight of boomerang

# 計算結果

Model 1: 迎角無  
Model 2: 迎角有



Flight orbits of boomerang (Model 1 and Model 2)



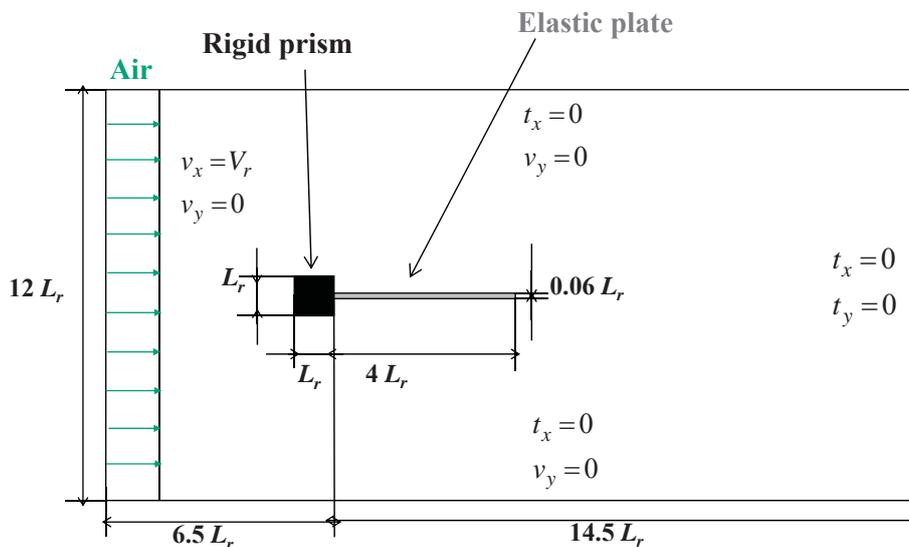
Flight orbits of boomerang (Model 2)

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/m<sup>3</sup>]

$d/dt$  : 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 [-]

$\lambda$   $\mu$  : Lamé 定数 [Pa]

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

$E$  : Young率 [Pa]

$\nu$  : 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)

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

$\rho$  : 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]

$\nabla$  : 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 [-]

$\eta$  : 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)

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

$\rho$  : 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]

$\nabla$  : 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 [-]

$\eta$  : 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]

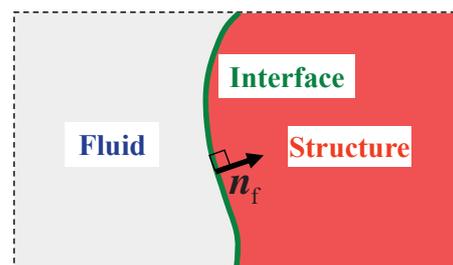
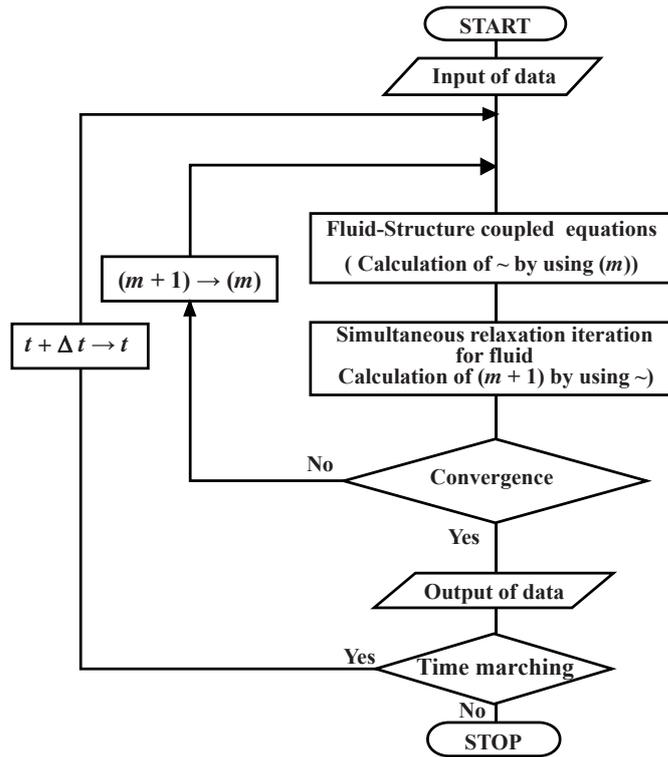


Fig. Definition of the outward unit normal vector

38

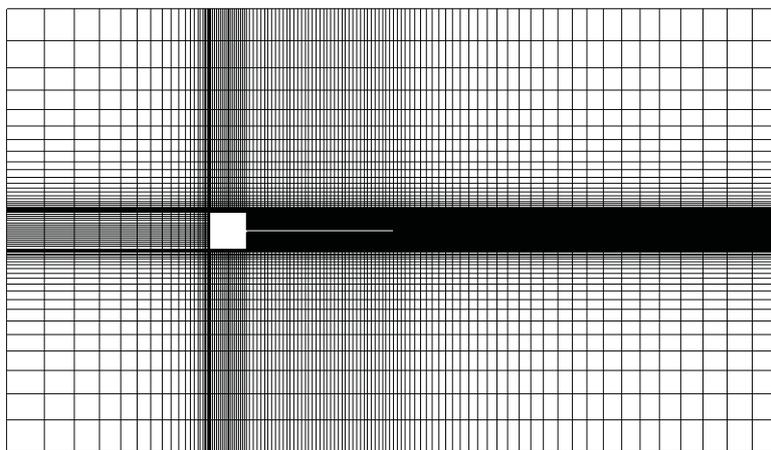
# GSMAC-ALE有限要素法に基づいた流体固体連成解析



Flowchart of FSI analysis based on ALE GSMAC-FEM

39

## 解析メッシュ



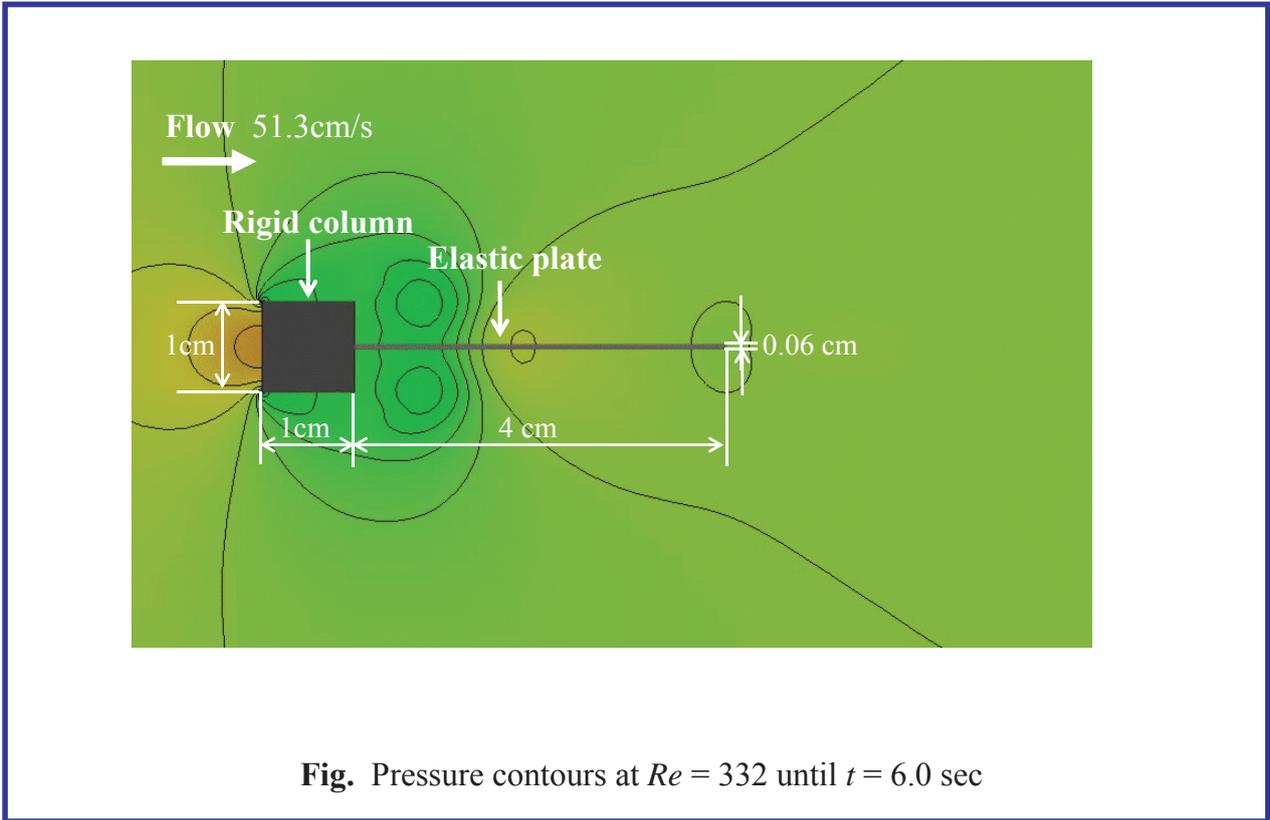
Analysis mesh (solid:  $40 \times 2$   $Q_1$ -elements, fluid: 8,680  $Q_1Q_0$ -elements)

### 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

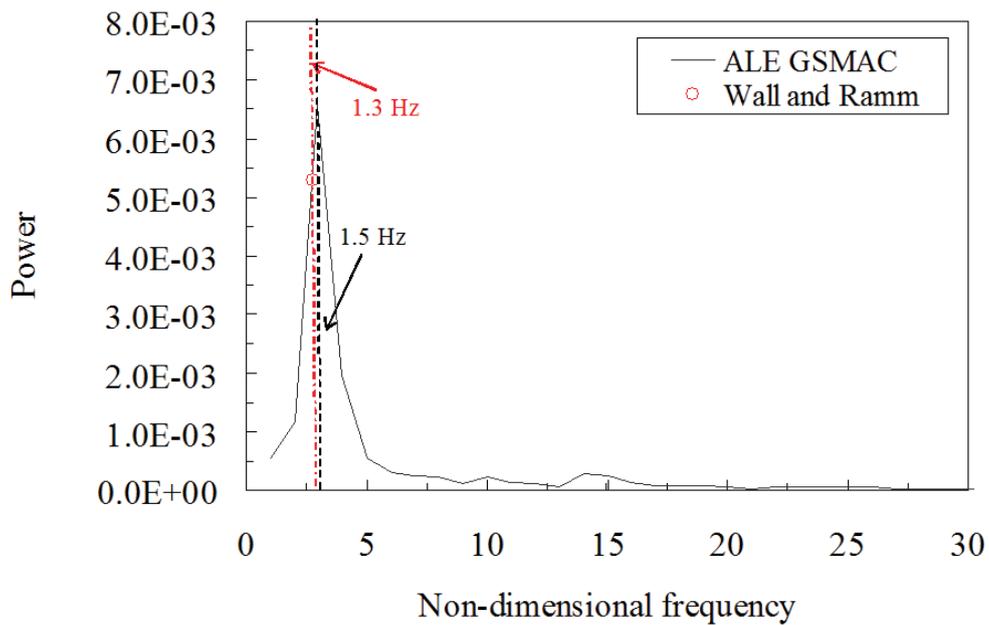
40

# 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.

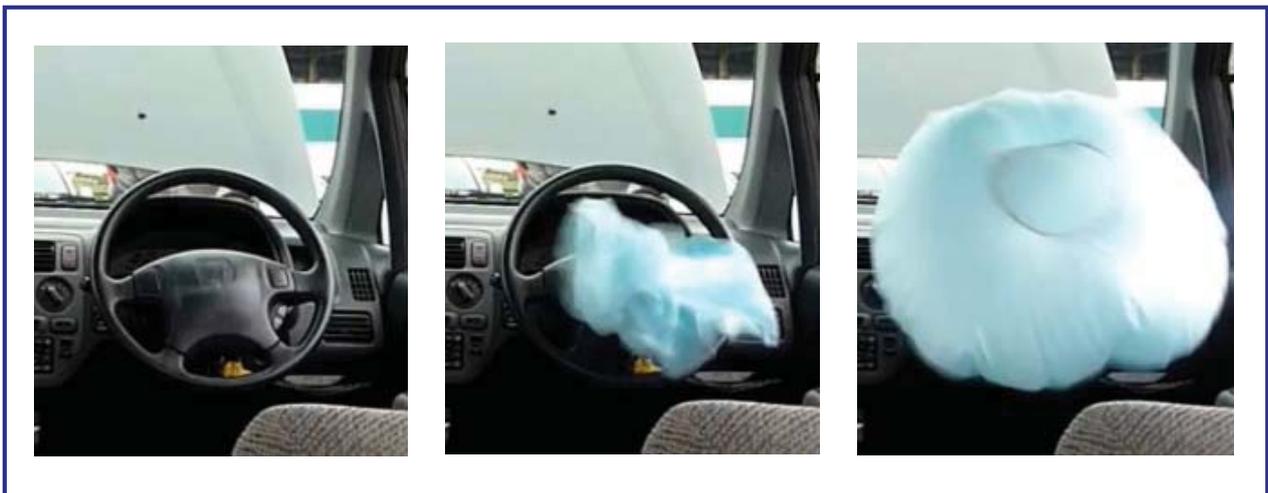
42

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/m<sup>3</sup>]

$d/dt$  : 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 [-]

$\lambda$   $\mu$  : Lamé 定数 [Pa]

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

$E$  : Young率 [Pa]

$\nu$  : 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]

$\rho$  : 密度 (現配置) [kg/m<sup>3</sup>]

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

$\mathbf{v}$  : 速度 [m/s]

$p$  : 圧力 [Pa]

$\kappa$  : 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)

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

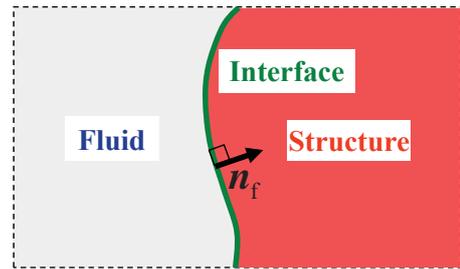
流体と構造のトラクションがつり合う

$\mathbf{n}_f$  : 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]



Definition of the outward unit normal vector

# 薄い弾性構造の内側の流体領域に対するアプローチ

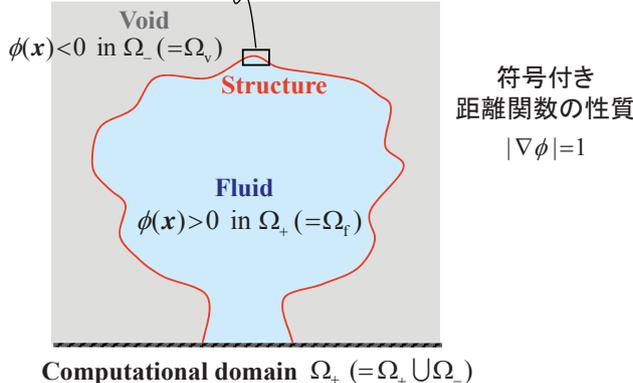
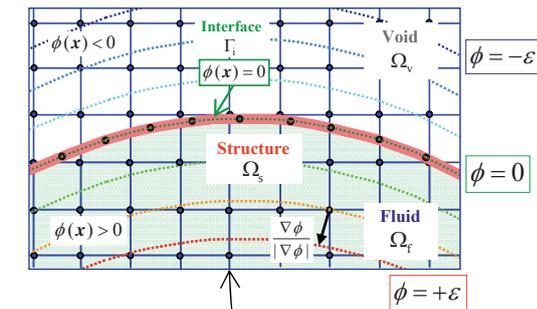
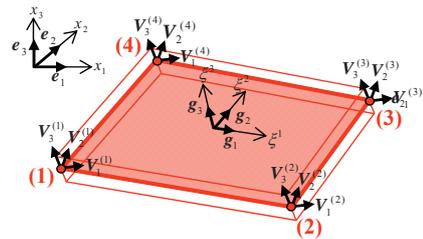
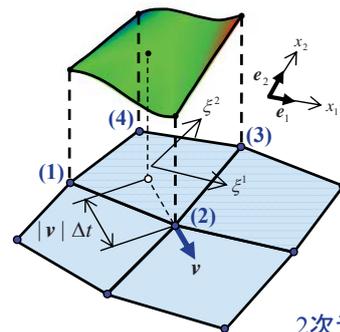


Fig. Computational domain and analysis meshes

有限変位/回転増分を考慮した MITC4シェル要素 (野口・久田 (1992))

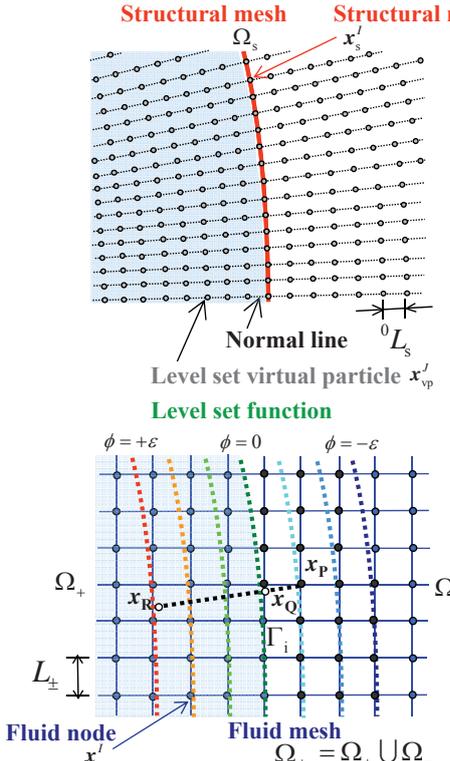


CIP (Constrained Interpolation Profile) 有限要素法 (槇原・棚橋・松本 (1997))



2次元の場合

# 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**  

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

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

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

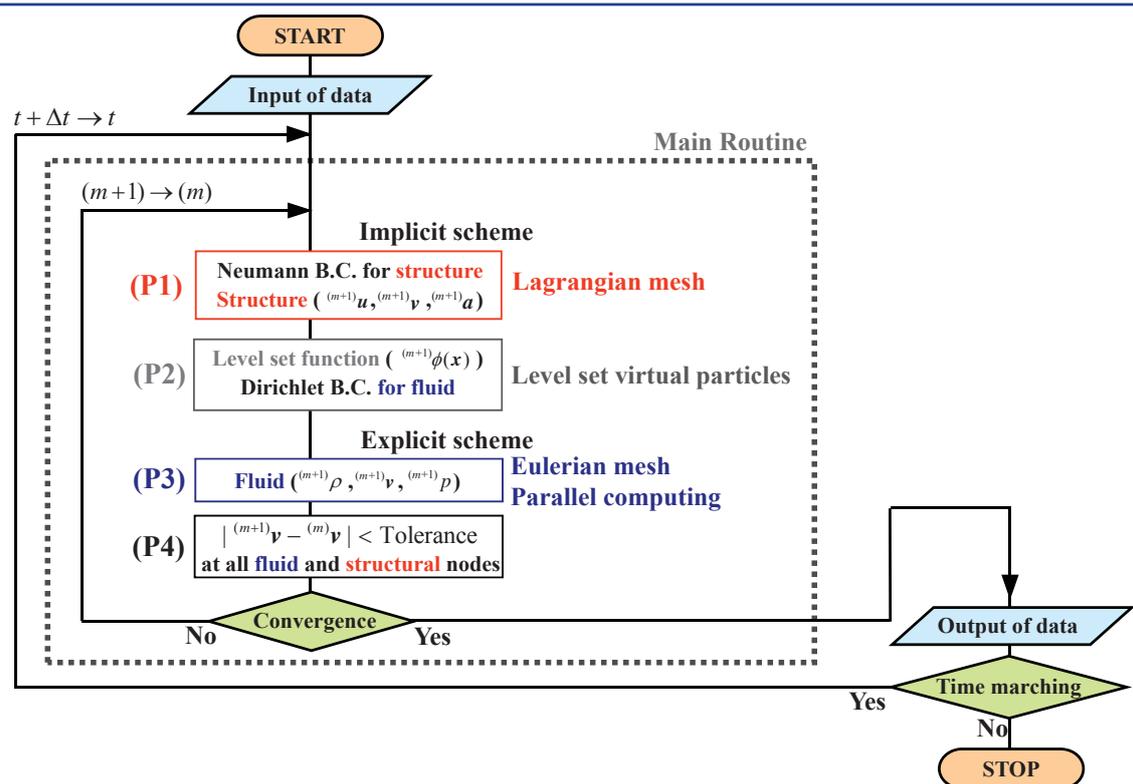
$$\mathbf{v} = v_n \left( -\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) + \mathbf{v}_t$$
**外挿式** [9]  

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

**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



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

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))

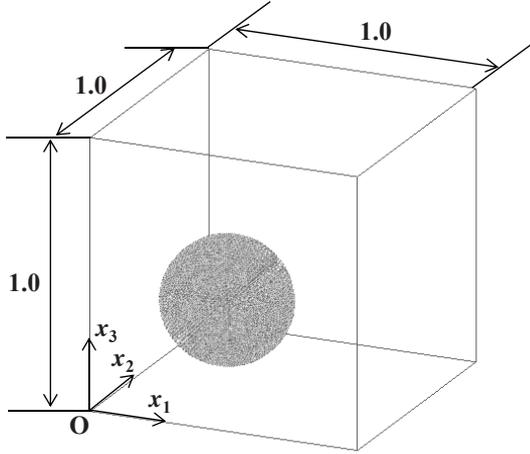
$$v_1 = 2 \sin^2(\pi x_1) \sin(2\pi x_2) \sin(2\pi x_3)$$

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

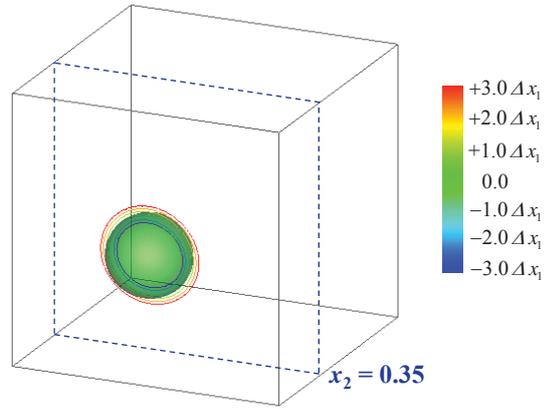
$$v_3 = -\sin(2\pi x_1) \sin(2\pi x_2) \sin^2(\pi x_3)$$

Calculation conditions

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



(a) Initial state of particles



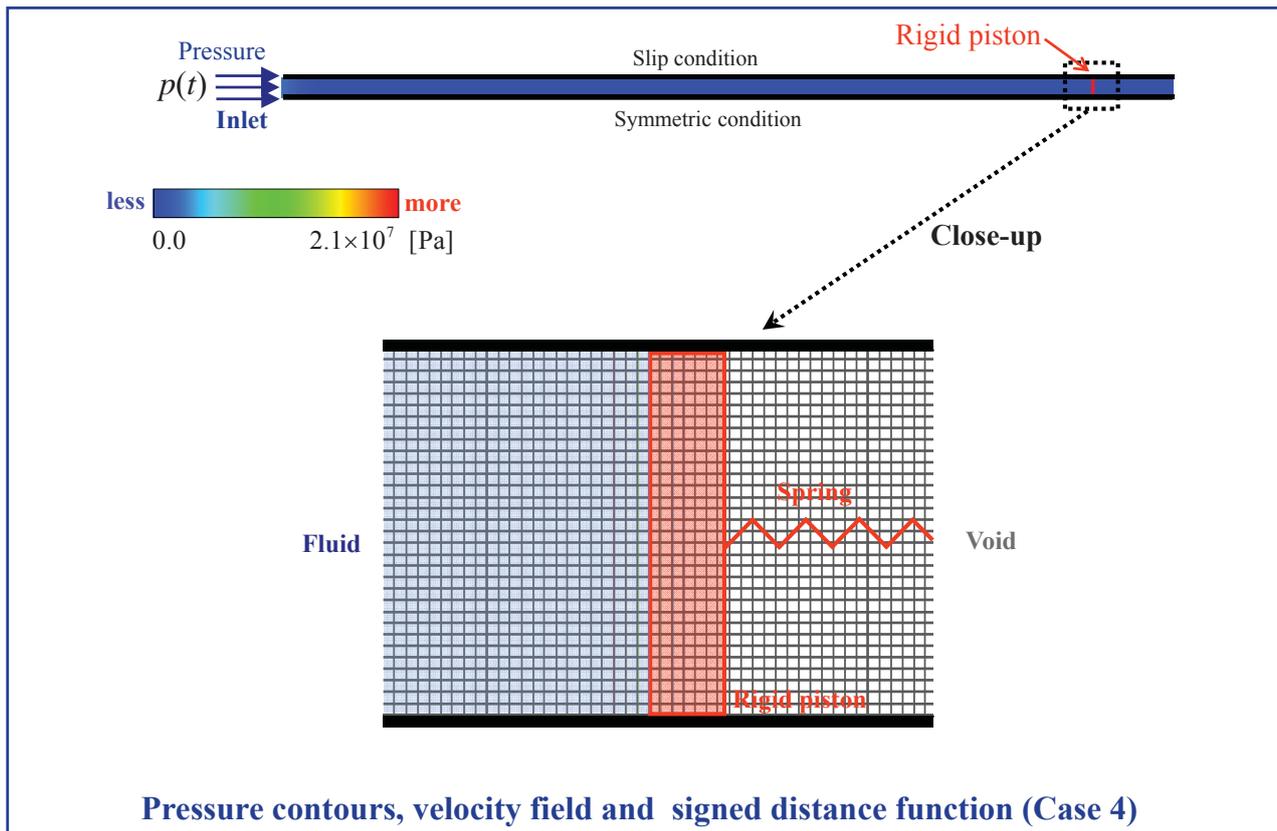
(b) Level set function  $\phi(x)$

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.

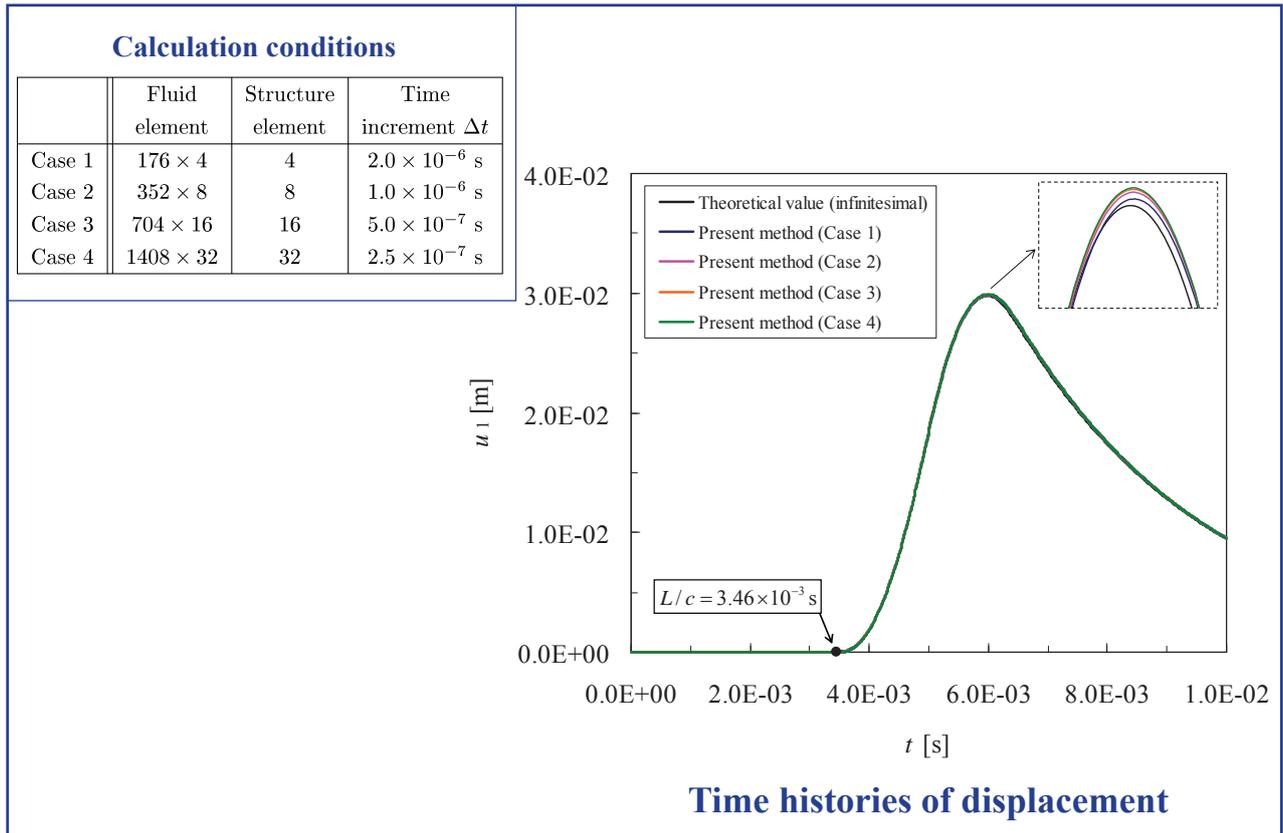
51

# ベンチマーク問題: 水とバネ-ピストン系の連成解析 (1/3)



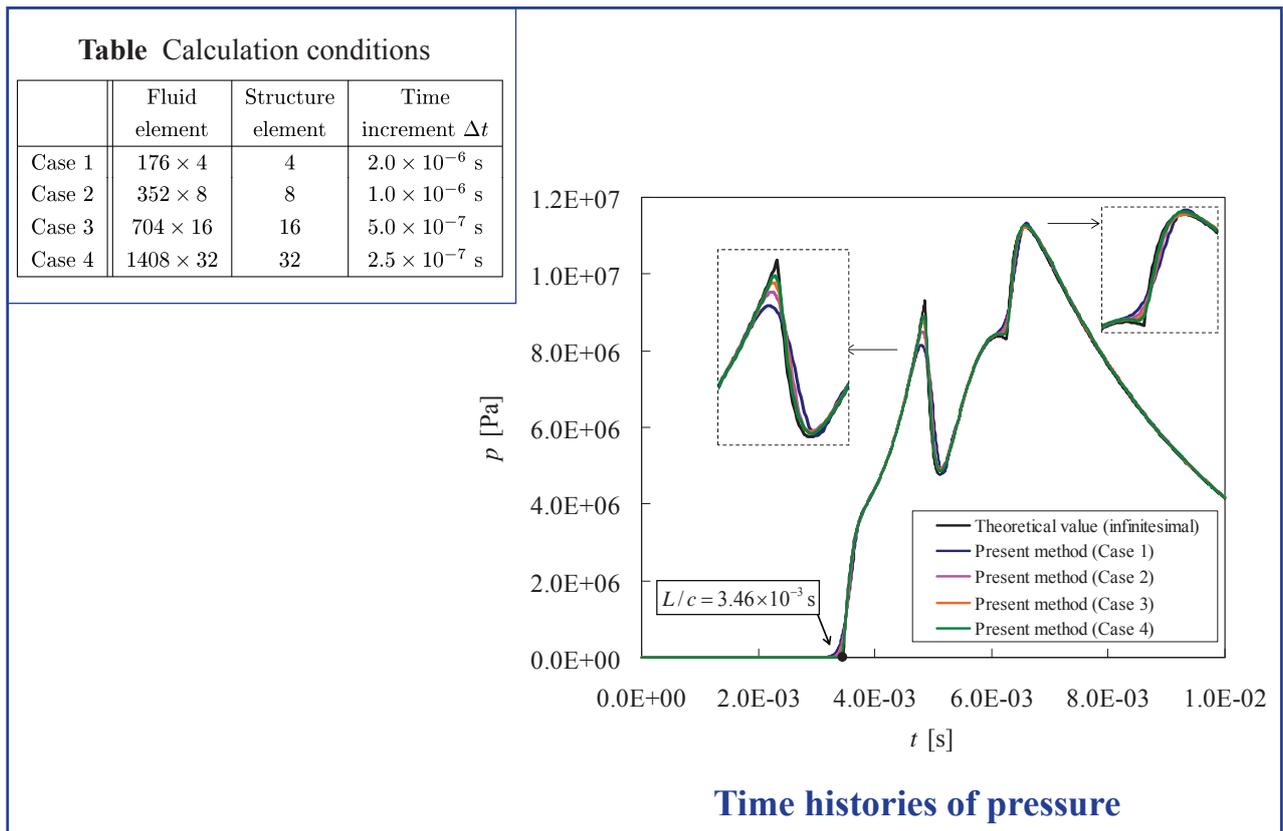
52

## ベンチマーク問題:水とバネ-ピストン系の連成解析 (2/3)



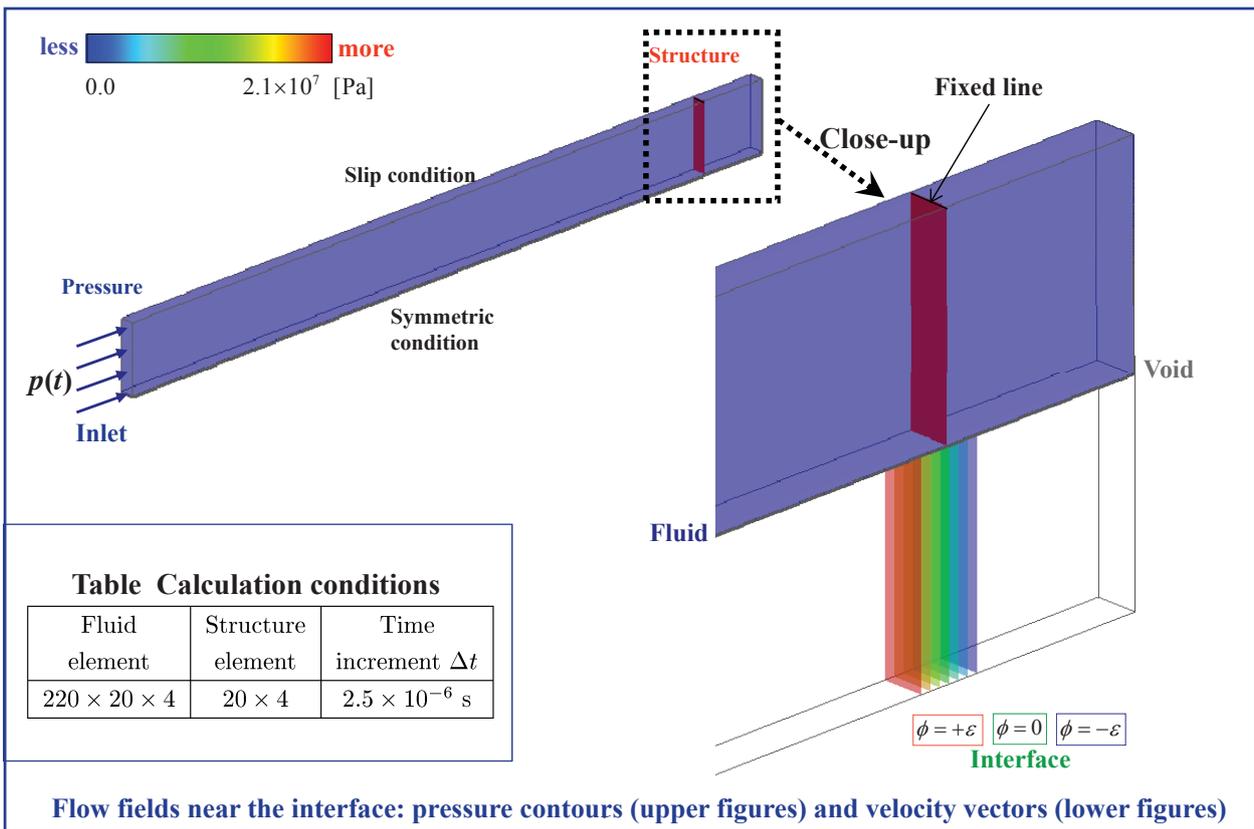
53

## ベンチマーク問題:水とバネ-ピストン系の連成解析 (3/3)



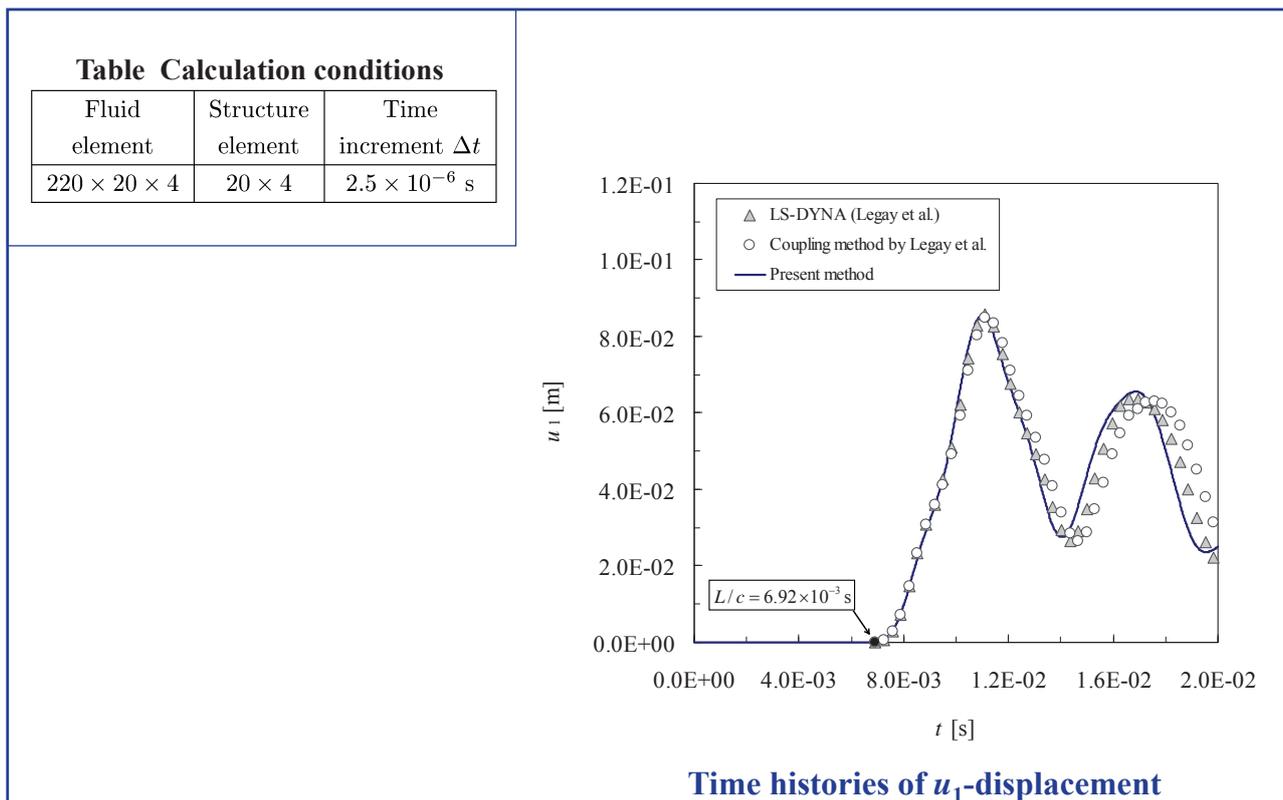
54

# 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)

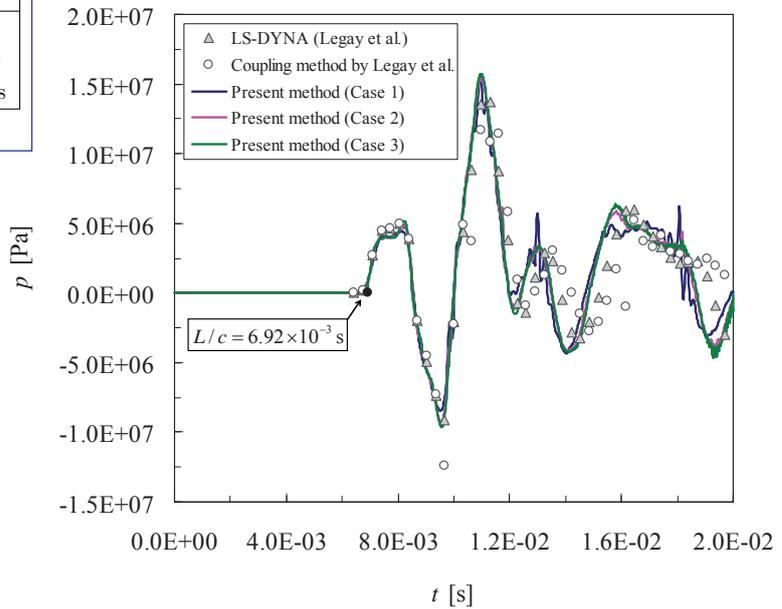


[9] Legay A., Chessa, J. and Belytschko, T., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, (2006), pp.2070-2087. 56

# ベンチマーク問題:水と薄い弾性構造の連成解析 (3/3)

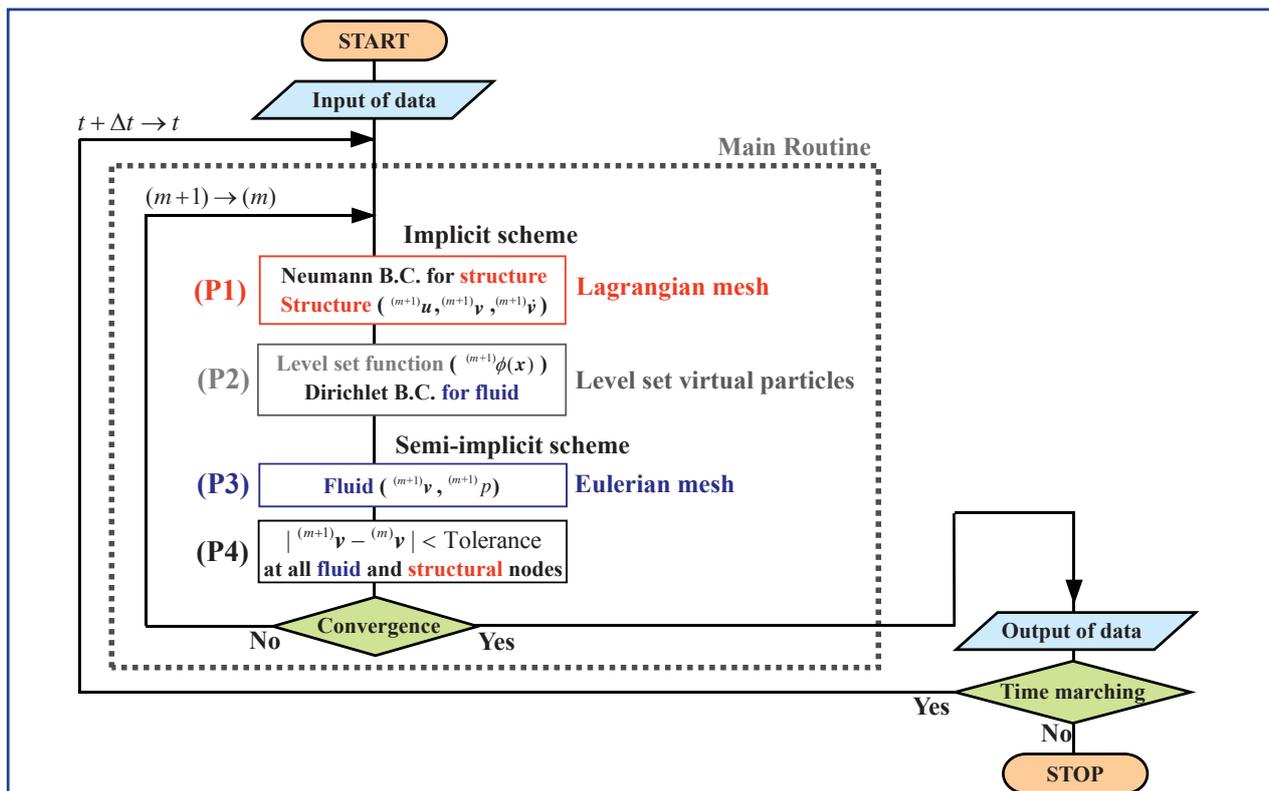
**Table** Calculation conditions

	Fluid element	Structure element	Time increment $\Delta t$
Case 1	$220 \times 20$	20	$2.5 \times 10^{-6}$ s
Case 2	$440 \times 40$	40	$1.25 \times 10^{-6}$ s
Case 3	$880 \times 80$	80	$0.625 \times 10^{-6}$ s



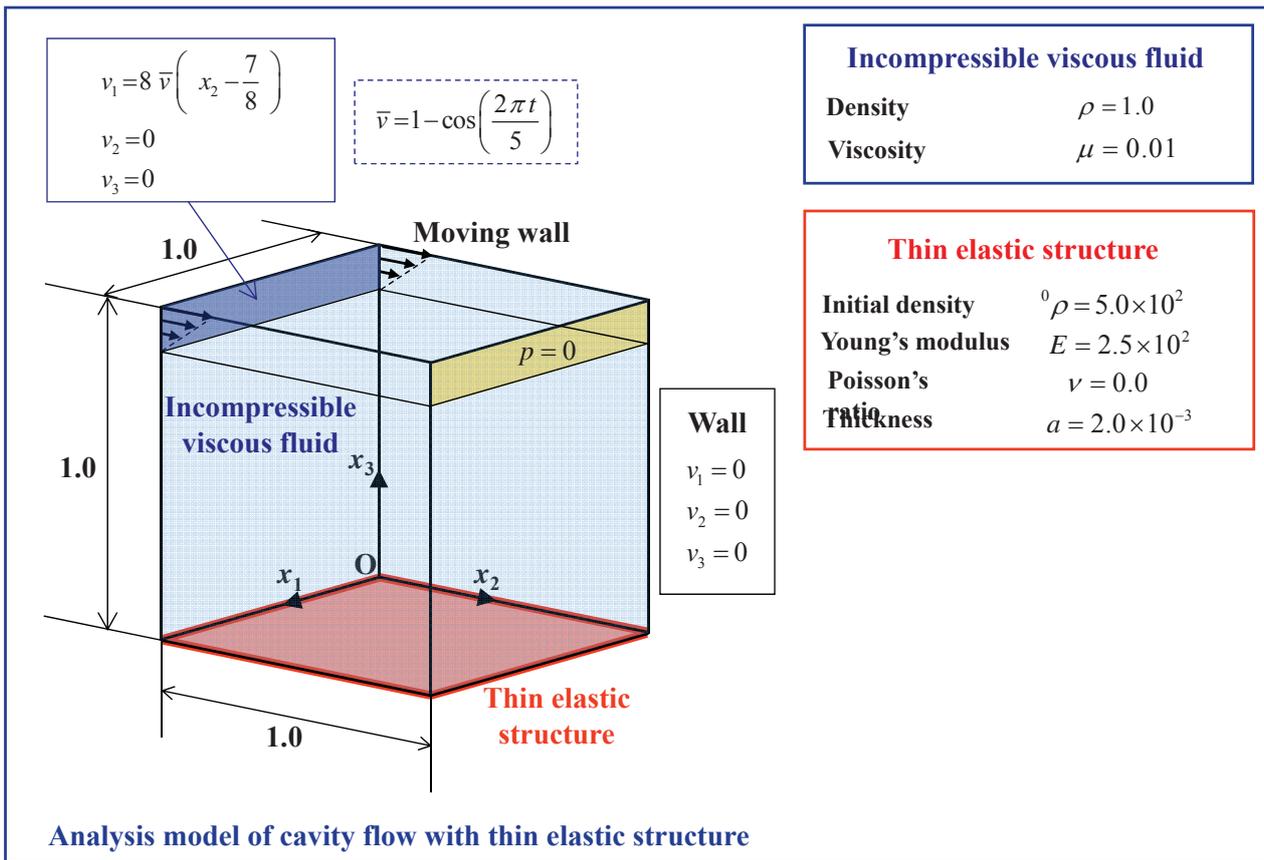
**Time histories of pressure**

# 流体構造連成解析手法のアルゴリズム

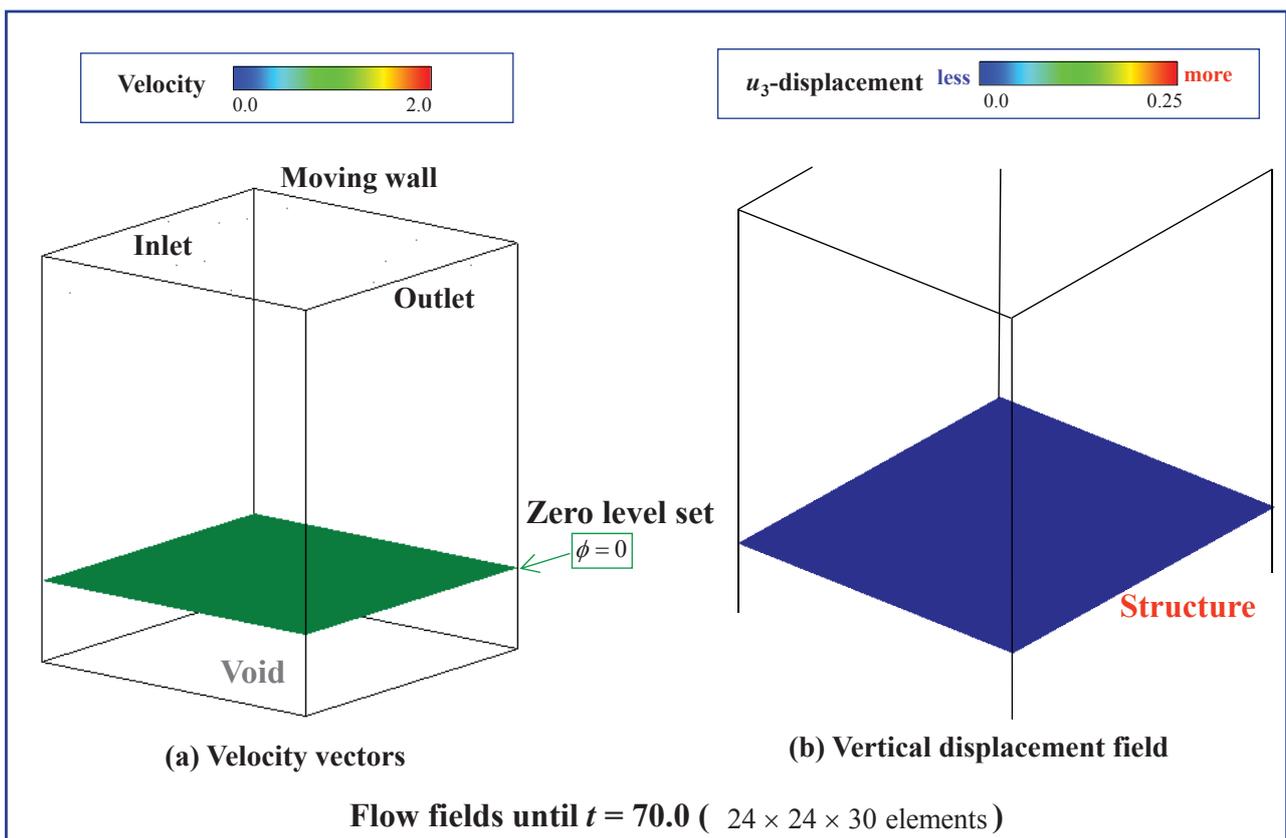


**Algorithm of the partitioned solution procedure ( $n$ : time step,  $m$ ): iteration)**

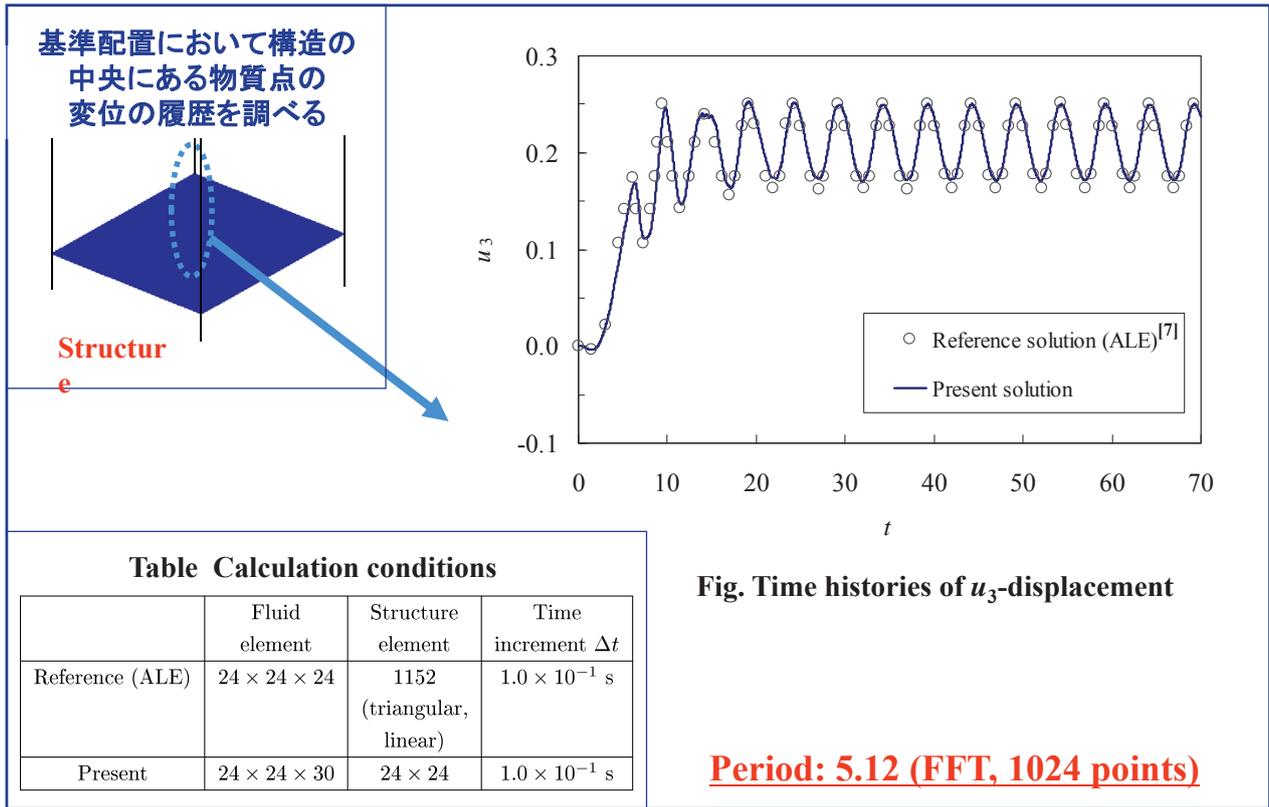
# ベンチマーク問題:底に弾性構造を有するキャビティ内強制対流 (1/3)



# 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)

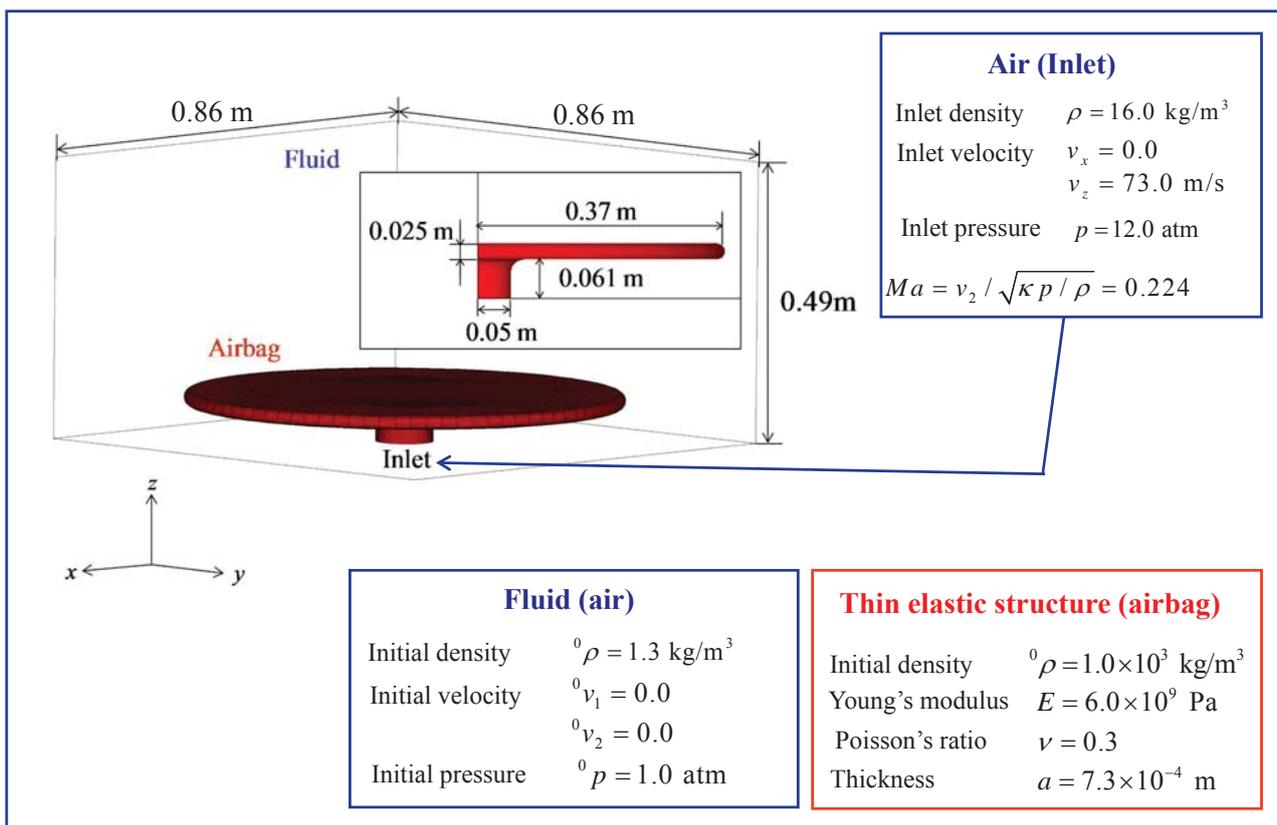


# ベンチマーク問題:底に弾性構造を有するキャビティ内強制対流 (1/3)



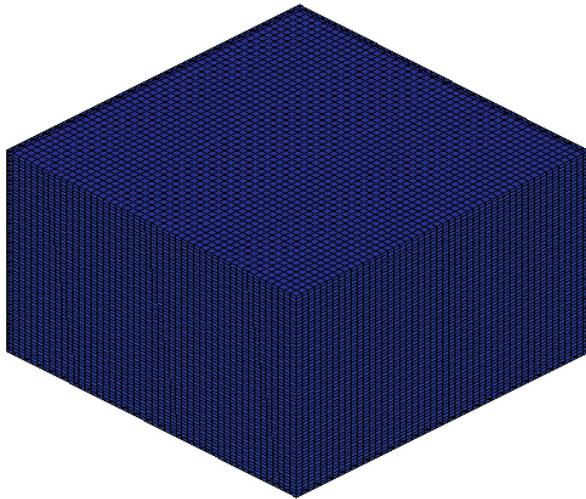
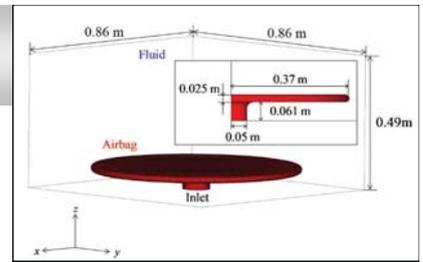
Vázquez, J.G.V., *PhD Thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2007.

## 解析モデル

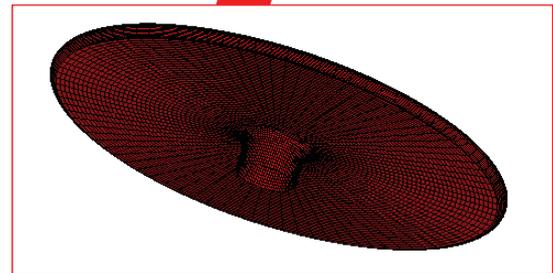
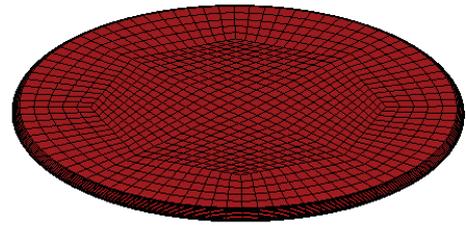
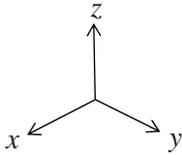


[6] Cirak, F. and Radovitzky, R., *Computers & Structures*, **83**, (2005), pp.491-498.

# 解析メッシュ

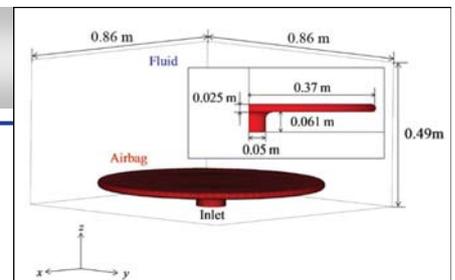


Fluid mesh: 8-node hexahedral elements  
(151,263 nodes and 142,848 elements)

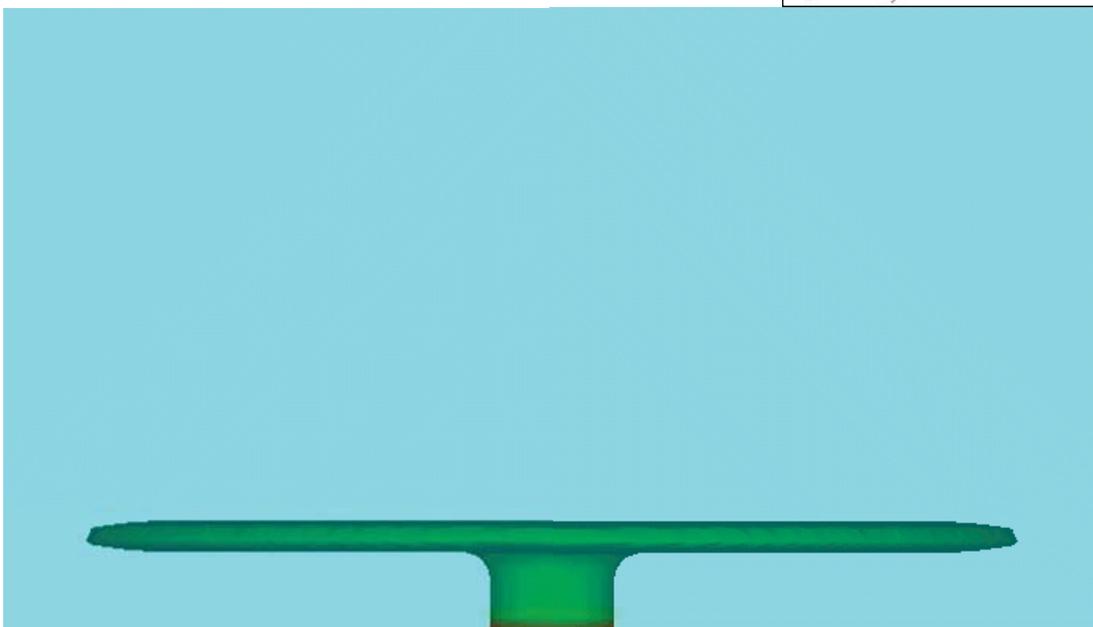


Structural mesh: 4-node quadrilateral elements  
(7,305 nodes and 7,260 elements)

# 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  $y = 0$  until  $t = 7.0 \times 10^{-3}$  s

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