

オープンCAEシンポジウム2011

境界非適合メッシュ型の 有限要素解析手法の可能性

- 先進技術で築くメッシュから解放されたCAE -

澤田 有弘

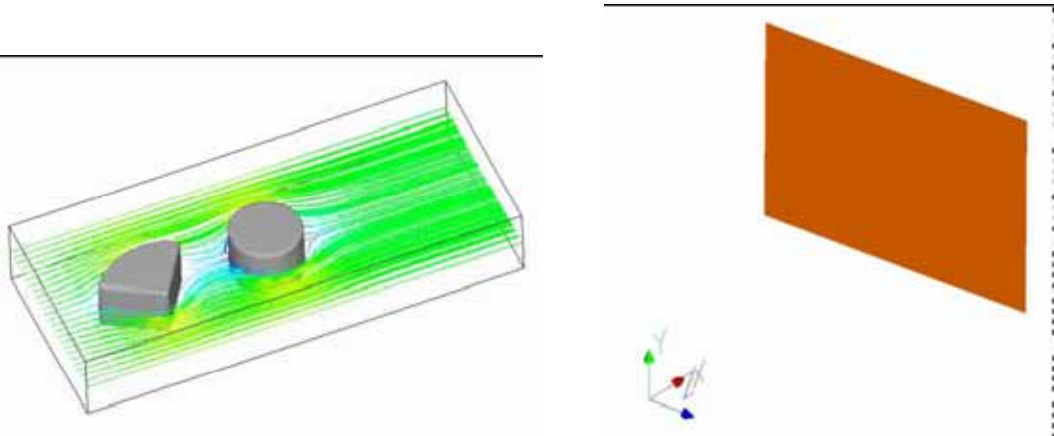
(独)産業技術総合研究所

JSME, JSCES, JACM 正員, 博士(科学)

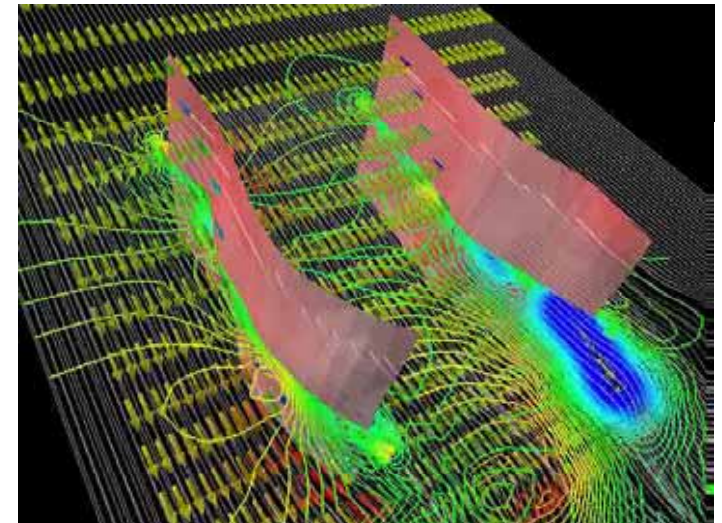
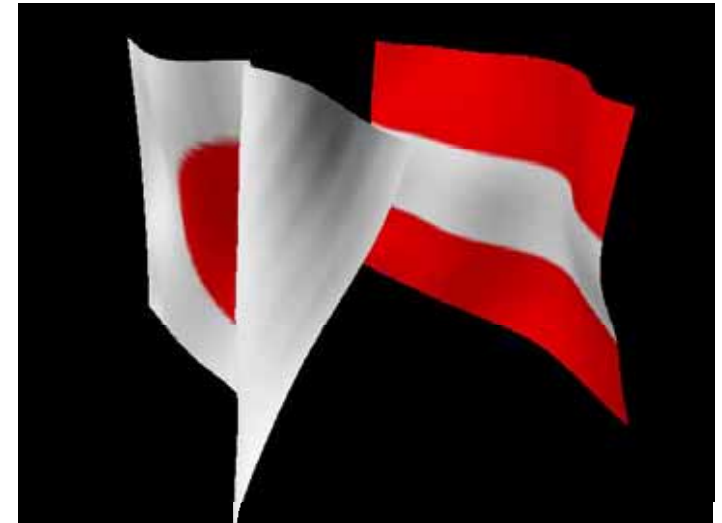
tomohiro-sawada@aist.go.jp

専門の紹介

- 計算力学、有限要素法
- 流体解析、構造解析、連成解析
 - コードは主にC言語で開発



- 連成ダイナミクスが面白い
 - 知的好奇心
 - 現象研究の究極的ツールの開発



趣味の紹介



- 平日(仕事)はなぜかPCの前で、
計算力学手法の研究やソフトウェア開発
- 休日(趣味)はソフトからハードへ一転し、
車やラジコンの改造に明け暮れる。
 - 最近は、息子と遊ぶのが楽しい。

メカトロ&先進材料が集結

- 1/16スケール(全長35cm程度)
で100km/h超の走行スピード(おも
ちゃと言ってバカにできない)。
- 通常あり得ないことが多発
- 全体考慮の設計の大切さを遊び
の中で学ぶ良い媒体

（話を戻して、）より視野を広げると...

- 期待・ニーズの一方、計算力学がものづくりに中々役立たない
①守備範囲狭い、②利用や活用が難、③産学のかい離

大学・研究機関コミュニティ
(学会、日本計算工学会など)

産業界コミュニティ
(CAE懇話会、市販ソフトウェアユーザー会など)

教育的コミュニティ
(非線形CAE協会など)

オープンソースコミュニティ
(オープンCAE学会など)

ハブ
橋渡し

- ハブや橋渡しとなれるような研究活動、研究課題の設定
(できれば嬉しい)
- 人依存のSimulation Technique (in-house) から、
科学技術としてのSimulation Technology (out-of-house) へ

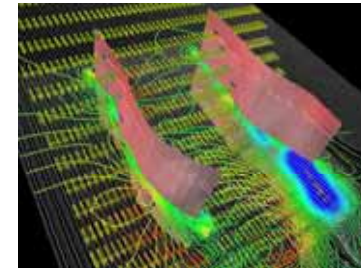
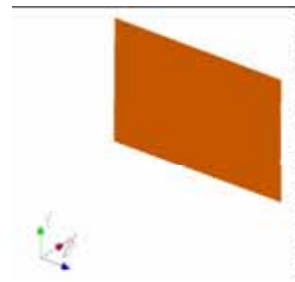
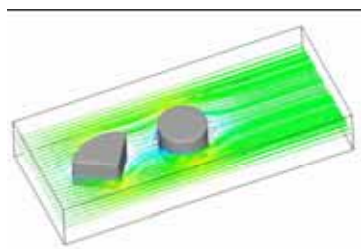
最近の活動(交流会における講演系・国内)

CAEをキーワードとしたものを挙げると、

- 【参画】 上信越公設研ネットWG、CAE分野技術交流会、2008-2010
- 【研究紹介】 つくばサイエンスアカデミー、第2回賛助会員交流会、2009/6
- 【研究紹介】 東芝グループ、第10回紙送りワークショップ、2010/3
- 【研究紹介】 明大GCOE、第8回現象数理若手シンポジウム「航空機の数理 流体モデルと数値解析」、2011/1
- 【研究紹介】 日本設計工学会、第50回CAE/CAE研究会、2011/7
- 【話題提供】 日本計算工学会、第6回ものづくりのための計算工学研究会、2011/10
- 【日本計算工学会 若手代表講演】 日本学術会議、第1回計算力学シンポジウム、2011/11
- 【参加のみ】 日本計算工学会、1DCAE公開シンポジウム、2011/12
- 【研究紹介】 オープンCAE学会、オープンCAEシンポジウム2011、2011/12
- 【非ユーザ特別講演】 COMSOL社、COMSOLカンファレンス2011東京、2011/12

今回の話題

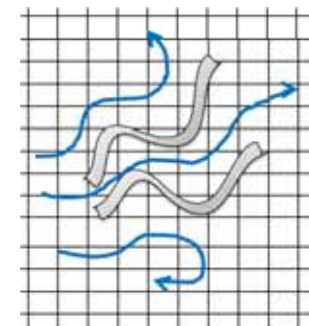
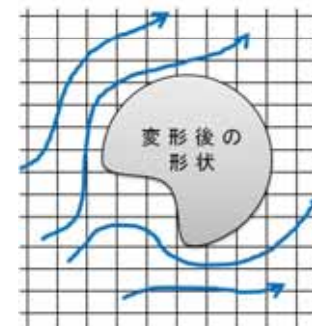
- マクロ系計算力学手法やモデリングの基盤となりえる
流体構造連成シミュレーションを技術水準ベンチマークとして、



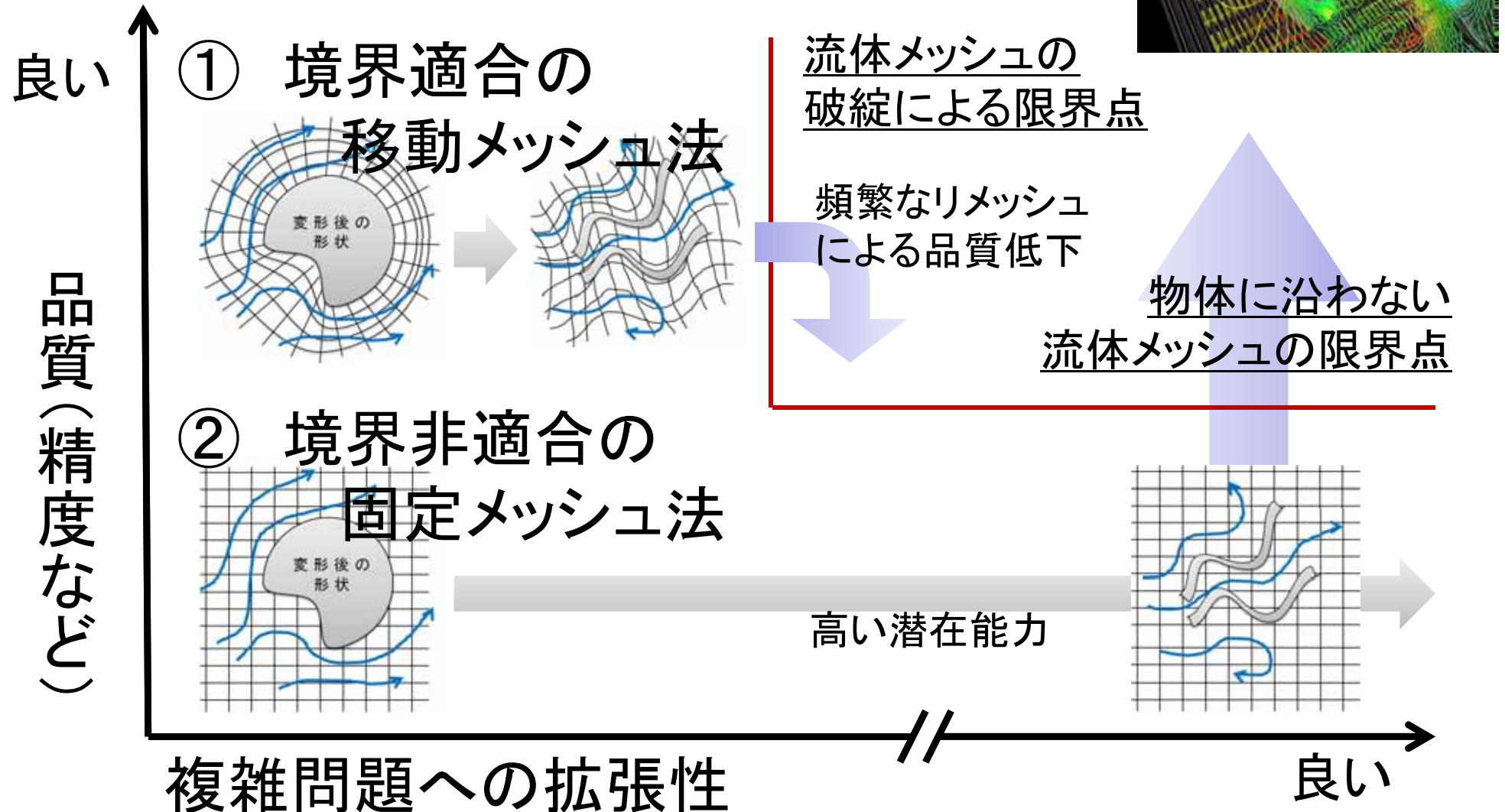
空間固定メッシュが適する 変形追従メッシュが適する どのように両立？

- 解析実行に人的テクニックの介入を極力排除したテクノロジー化手法。
 - 手法先端化による使用者負担の増加というトレードオフの解消(CAEの典型課題)。
 - プログラム化・ソフトウェア化されたとき、使用者に如何に優しいか。

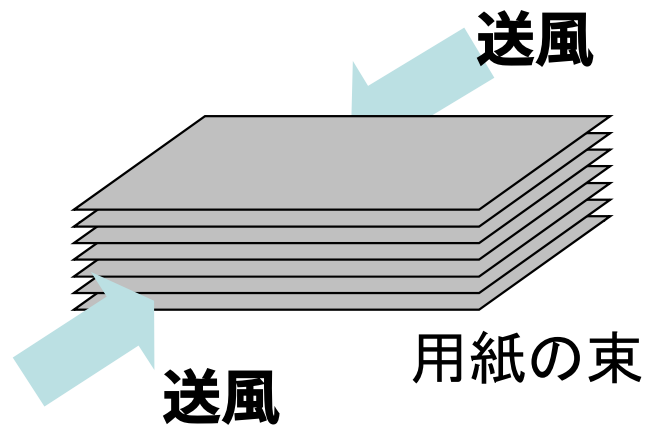
- 現在検討中のR&D内容として、
境界非適合メッシュに基づく
アプローチを紹介。



二つのアプローチ

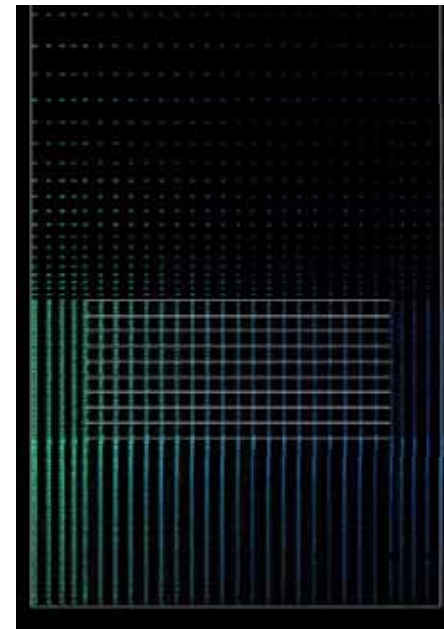


(例えばこんな問題を解きたいという例) 用紙の束の気流連成シミュレーション



用紙束の側面に風を吹き付けることで、
用紙の取出し不良を低減する。
 $Re = 3000$.

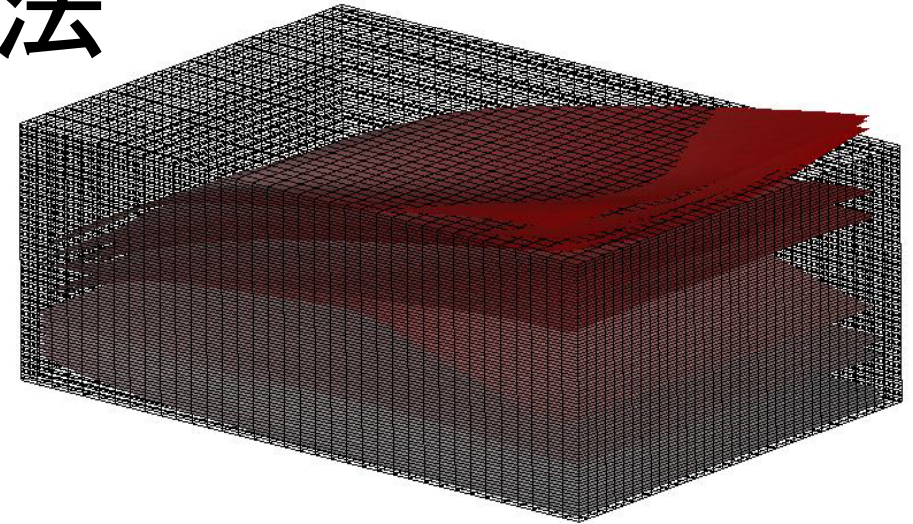
移動メッシュ法による
シミュレーション(2D, 10枚)



→ 精度低下と不安定化を伴う
リメッシュが頻繁に必要。

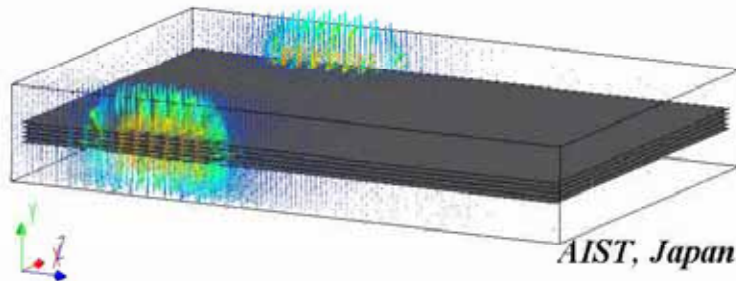
開発した固定メッシュ法 による適用例

必要最低限の入力パラメータ。
ケーススタディが非常に容易になる。
シミュレーション実験の加速。
知見獲得、設計活用の加速。



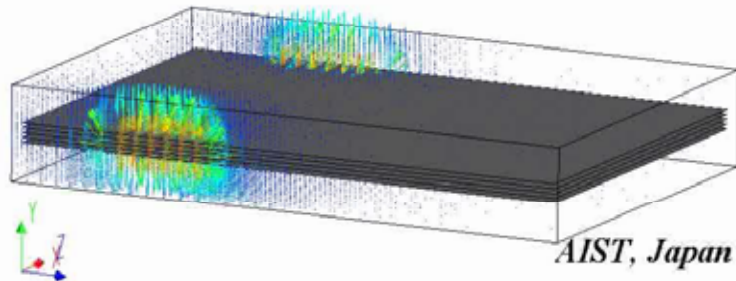
(普通紙)
5枚

5 A4 Standard Papers / Blower power 100 %



(厚手紙)
5枚

5 A4 CLC Papers / Blower power 100 %



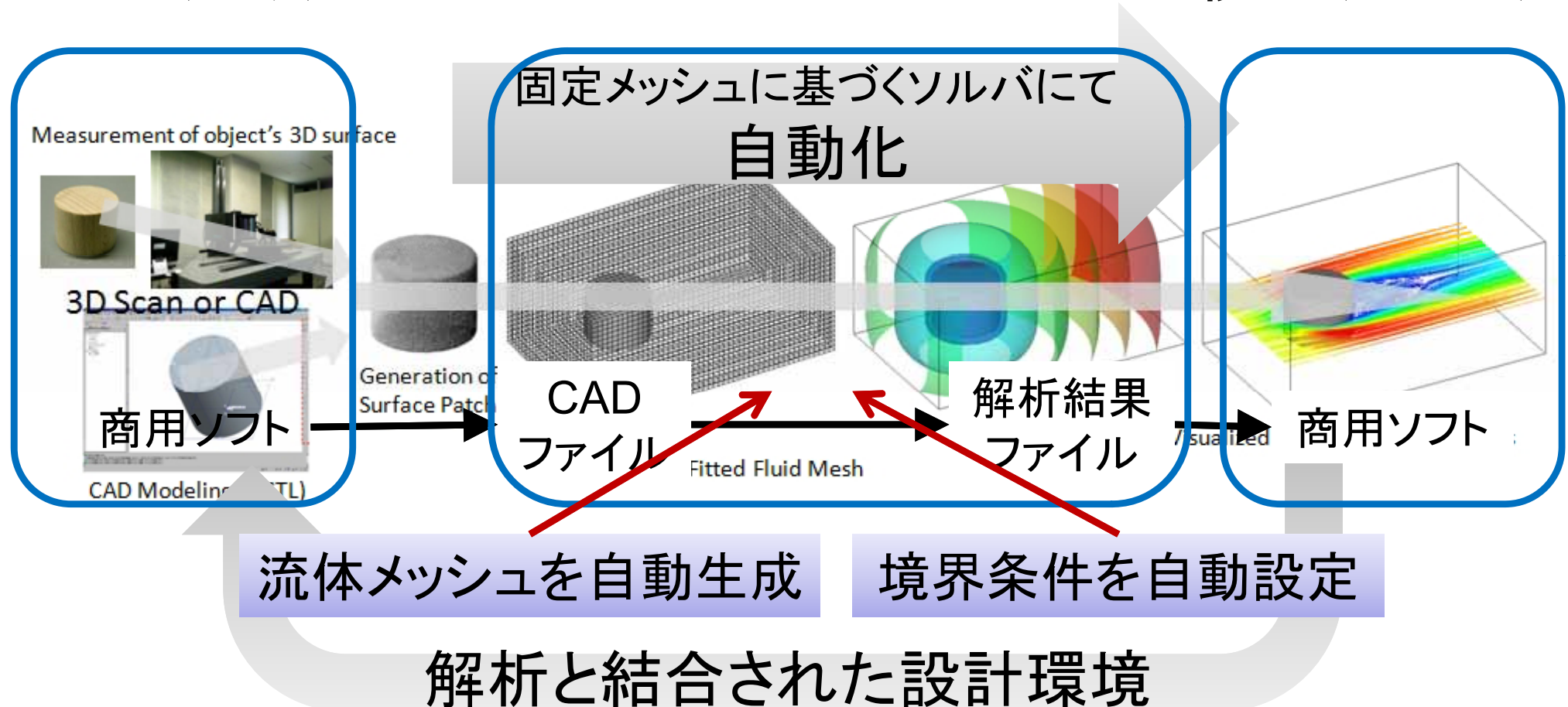
* 中本秀一(東芝)、澤田有弘、服部俊介
(東芝)、手塚明、東芝レビュー、Vol.65
No.8 pp.35-39、2010

体系化 (解析を自動化するソルバとして)

CAD (プリ)

ボトルネック部

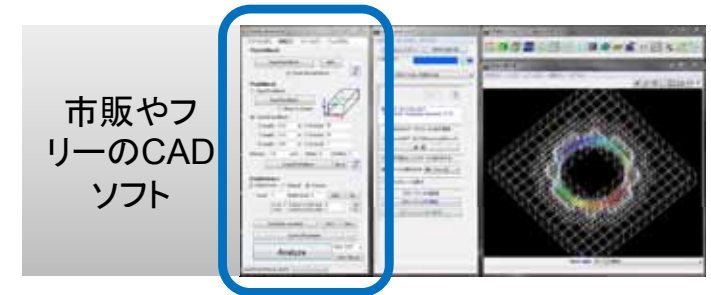
可視化 (ポスト)



* 澤田有弘, 長濱俊 (東理大), 佐々木信也 (東理大), 手塚明, Trans. JSCES 20110003, 1-13.

解析結果を見ながらの設計

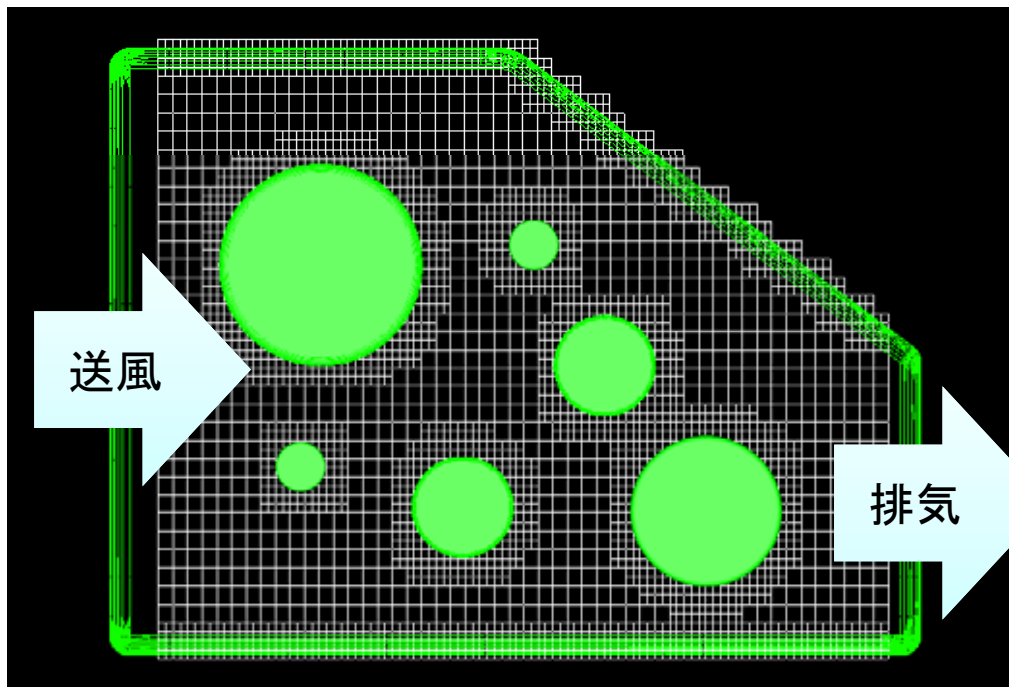
→ 内部ソルバーが、形状変更や物体追加を検知すると、自動的に流体メッシュ生成を生成、境界条件を処理し、解析結果を出力。



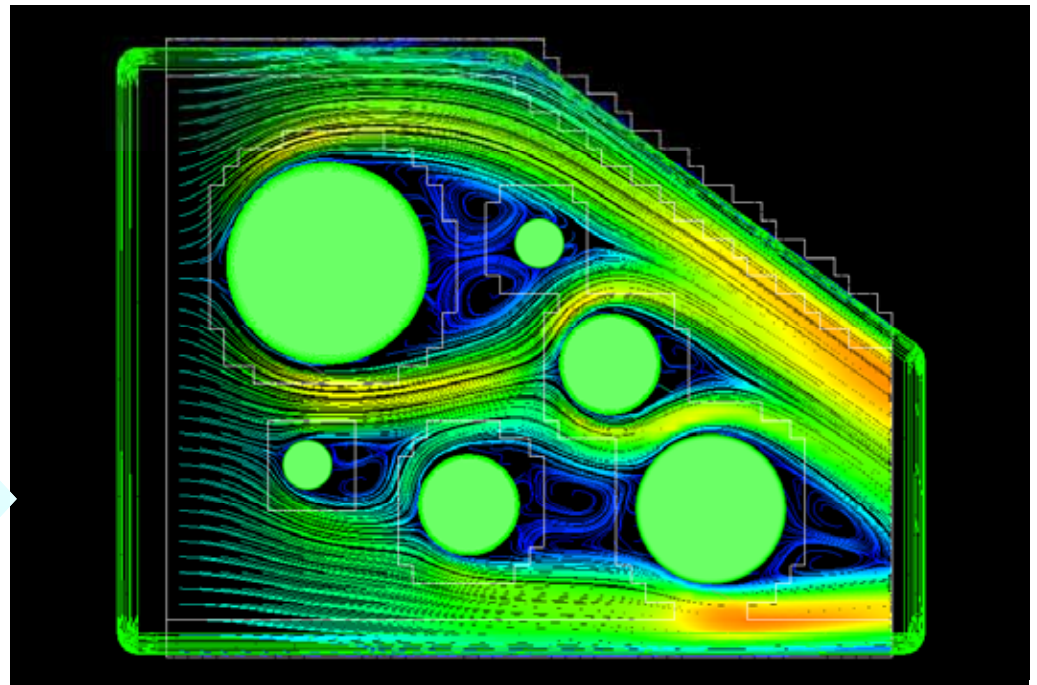
市販やフ
リーのCAD
ソフト

固定メッシュソルバ

プリ (CADからメッシュの自動生成)

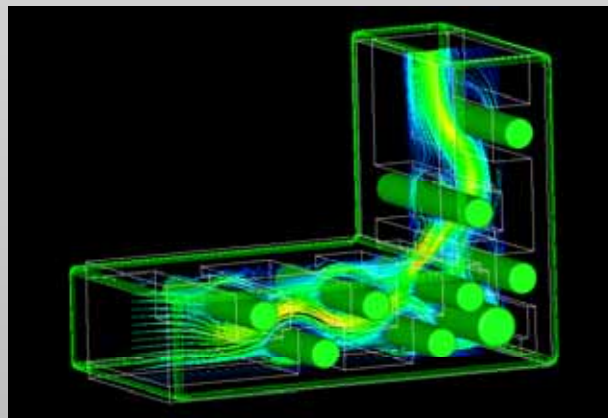
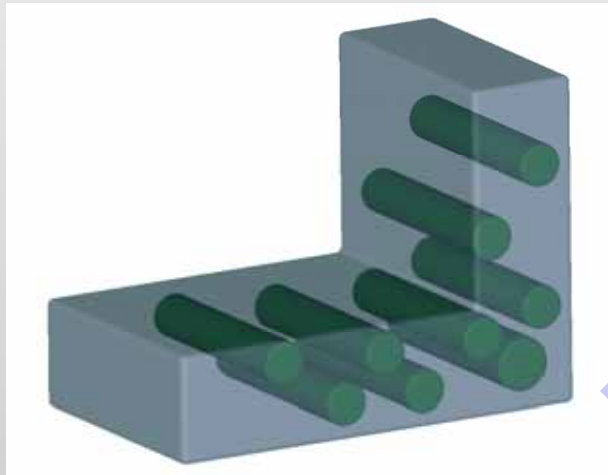


ポスト (可視化と知見の獲得)



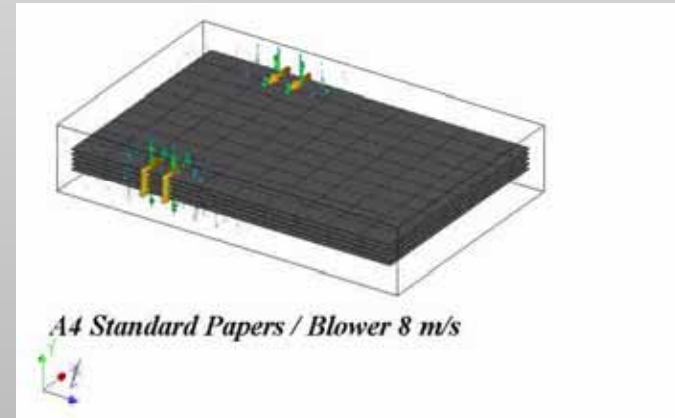
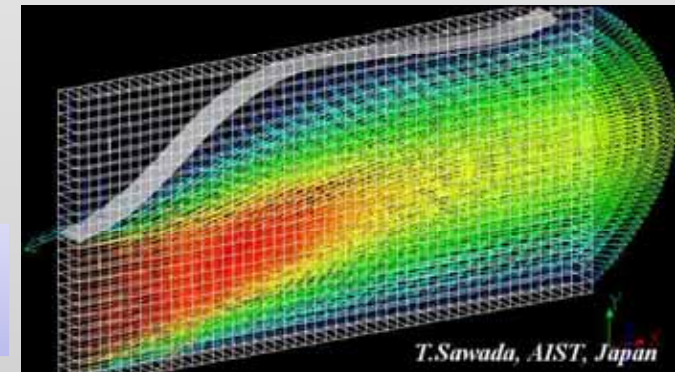
解析フレームワークのFSI化

The CAD/CAE framework
for engineers and designers



Will be
integrated

With advanced FSI
simulation technology



開発・実装した手法

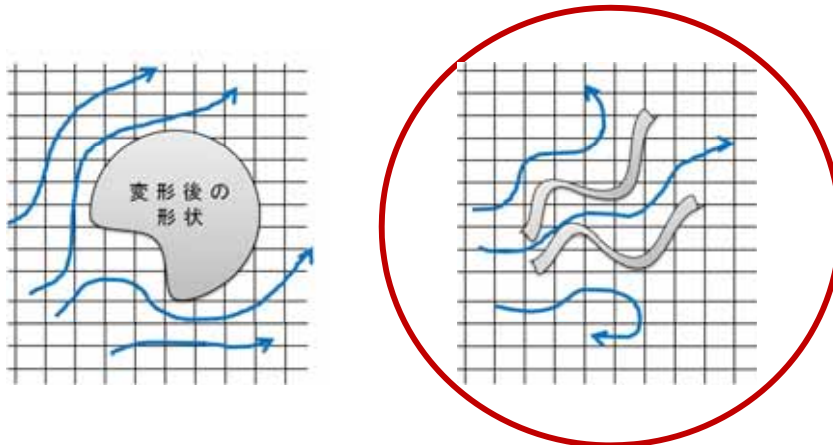
* T. Sawada & A. Tezuka,
Int. J. Numer. Meth. Fluids 2010,
64: 1219-1239.

* T. Sawada & A. Tezuka,
Comput. Mech. 2011,
48: 319-332.

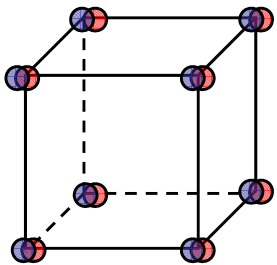
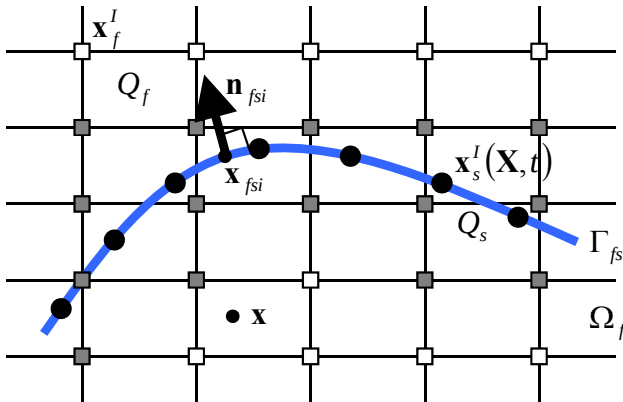
* 澤田有弘, 手塚明,
Trans. JSCES 20100015, 1-16.

* 澤田有弘, 手塚明,
Trans. JSCES 20100017, 1-16.

* 澤田有弘, 長濱俊, 佐々木信也, 手塚明,
Trans. JSCES 20110003, 1-13.



流体と構造の方程式



Fluid:
Q1Q1 element
With
SUPG/PSPG
method

Structure:
4-node MITC
shell element

- **Navier-Stokes equations** for incompressible viscous flows in the **Eulerian form**

$$\rho_f \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \Big|_x + \mathbf{v} \cdot \nabla_x \mathbf{v} \right) = \nabla_x \cdot \mathbf{T} + \rho_f \mathbf{g}, \quad \nabla_x \cdot \mathbf{v} = 0 \quad \text{in } \Omega_f \quad \mathbf{T} = -p\mathbf{I} + 2\mu\mathbf{D}, \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2} \left\{ (\nabla_x \mathbf{v}) + (\nabla_x \mathbf{v})^T \right\}$$

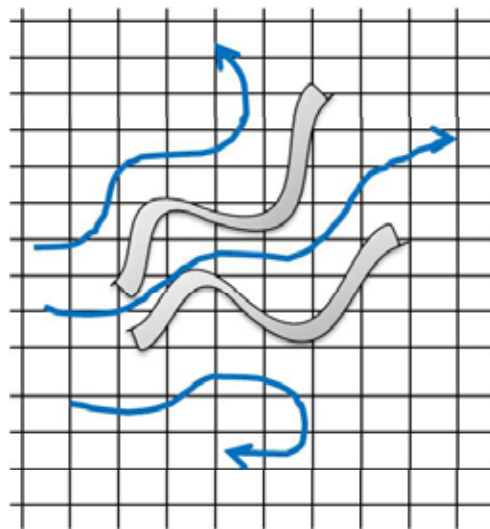
$$\int_{\Omega_f} \delta \mathbf{v} \cdot \rho_f \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \Big|_x + \mathbf{v} \cdot \nabla_x \mathbf{v} \right) d\Omega + \int_{\Omega_f} \delta \mathbf{D} : \mathbf{T} d\Omega + \int_{\Omega_f} \delta p (\nabla_x \cdot \mathbf{v}) d\Omega = \int_{\Omega_f} \delta \mathbf{v} \cdot \rho_f \mathbf{g} d\Omega + \int_{\Gamma_f} \delta \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma$$

- **Cauchy equilibrium equation** for linear-elastic deformations in the total **Lagrangian form**

$$\rho_{0s} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \Big|_x = \nabla_x \cdot (\mathbf{S} \cdot \mathbf{F})^T + \rho_{0s} \mathbf{g} \quad \text{in } \Omega_{0s} \quad \mathbf{S} = \mathbf{C} : \mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = \frac{1}{2} \left\{ (\nabla_x \mathbf{u}) + (\nabla_x \mathbf{u})^T + (\nabla_x \mathbf{u}) \cdot (\nabla_x \mathbf{u})^T \right\}$$

$$\int_{\Omega_{0s}} \delta \dot{\mathbf{u}} \cdot \rho_{0s} \ddot{\mathbf{u}} d\Omega_0 + \int_{\Omega_{0s}} \delta \dot{\mathbf{E}} : \mathbf{S} d\Omega_0 = \int_{\Omega_{0s}} \delta \dot{\mathbf{u}} \cdot \rho_{0s} \mathbf{g} d\Omega_0 + \int_{\Gamma_s} \delta \dot{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{t} d\Gamma$$

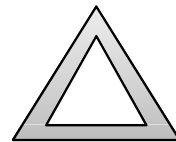
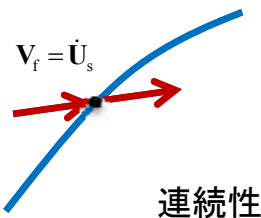
品質向上における固定メッシュ法の問題点 (4つの境界条件、評価の基準)



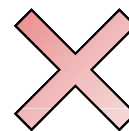
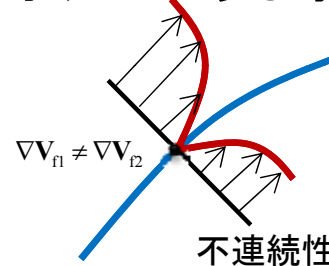
既存の手法

- IB法, VB法, IFE法,
- II法,
- DLM/FD法, etc.

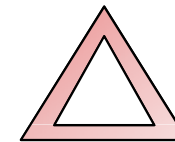
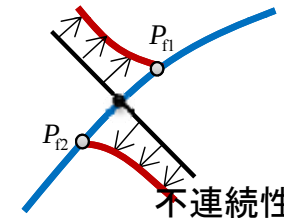
①
速度が
一致する事



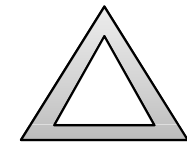
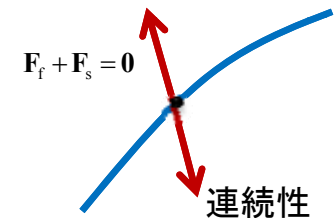
②
流れが表裏
独立である事



③
圧力も表裏
独立である事



④
力が
平衡する事



目標・提案手法

Lagrange未
定乗数法

X-FEM

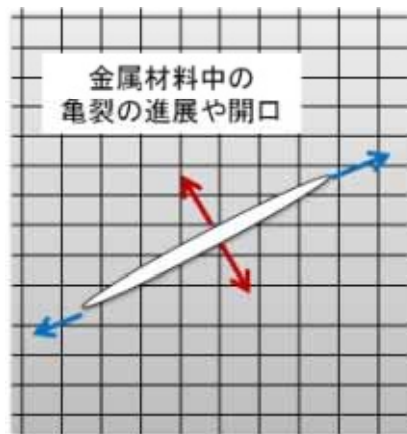
X-FEM

Lagrange未
定乗数法

X-FEMによる品質改善(劇的な)

X-FEM for 亀裂

亀裂による変位の不連続性、
応力の特異性の
直接モデリング手法

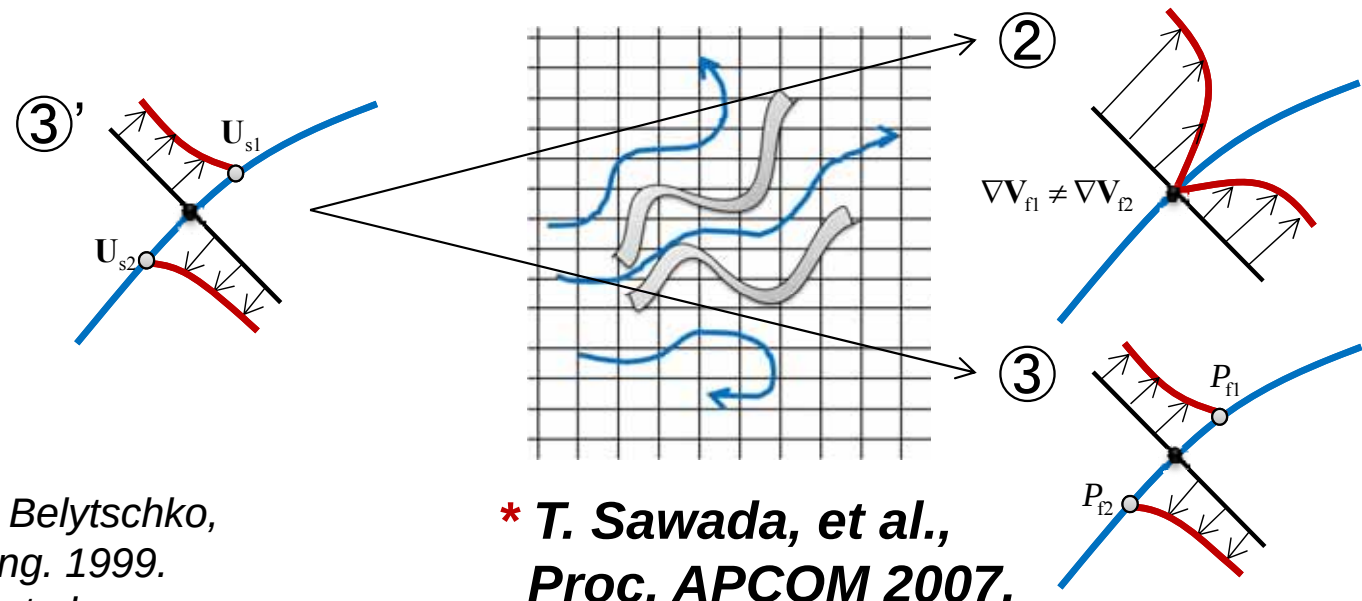


- * N. Moes, J. Dolbow & T. Belytschko, *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 1999.
- * T. Belytschko, N. Moes, et al., *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 2001.

応用

X-FEM for 流体と構造の境界

境界における速度と圧力の
不連続性の直接モデリング

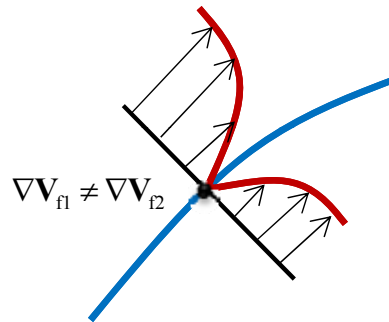


- * T. Sawada, et al., *Proc. APCOM 2007.*

X-FEM

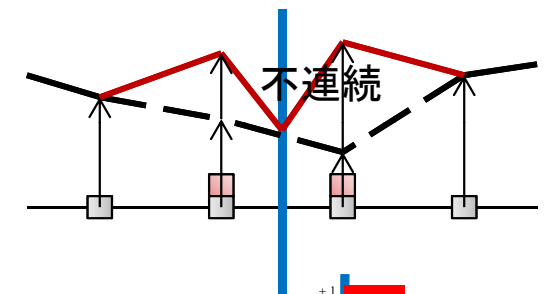
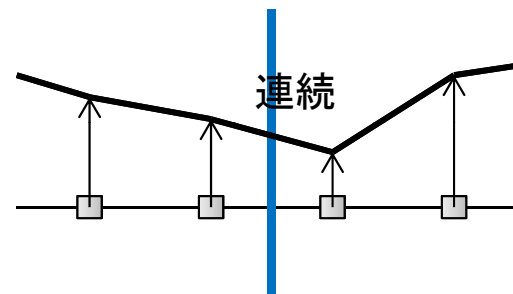
→ 通常の基底(連続)に不連続化の基底を足し込む

② 速度勾配の不連続化

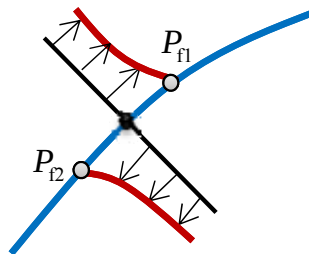


$$\underline{v} = N_k \underline{V}_k$$

$$+ \quad \bar{v} = e(\underline{x}, t) \cdot N_k \bar{V}_k$$

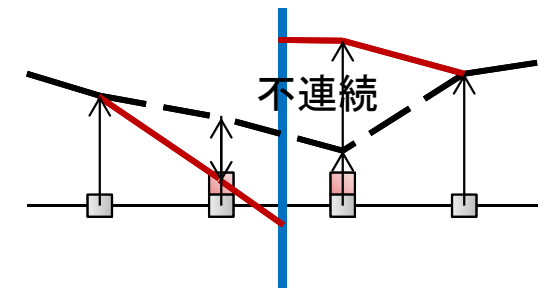
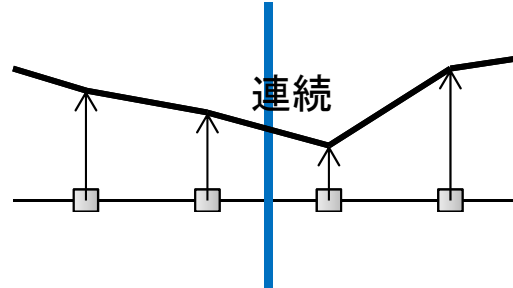


③ 圧力の不連続化



$$\underline{p} = N_k P_k$$

$$+ \quad \bar{p} = h(\underline{x}, t) \cdot N_k \bar{P}_k$$

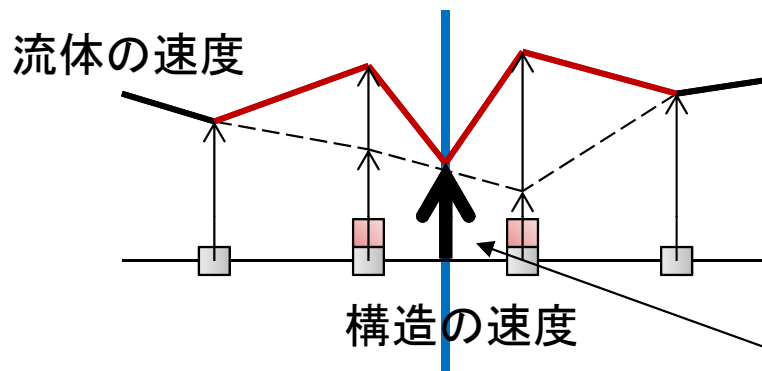


* T. Sawada & A. Tezuka,
Int. J. Numer. Meth. Fluids 64, 2010.

→ 理論上、沿うメッシュと同じ

速度一致と力の平衡の組み込み

→ Lagrange未定乗数法による連立定式化



$$(\text{流体の方程式}) + (\text{構造の方程式}) + \delta\lambda \cdot (\mathbf{v}_f - \dot{\mathbf{u}}_s) + \lambda \cdot (\delta\mathbf{v}_f - \delta\dot{\mathbf{u}}_s) = 0$$

① 速度の一致

④ 力の平衡

* T. Sawada & A. Tezuka, *Comput. Mech.* 48, 2011.

$$\mathbf{v}_f = \dot{\mathbf{u}}_s$$

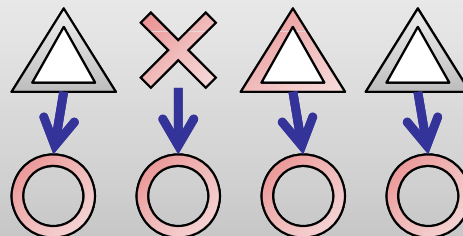
$$\mathbf{F}_f + \mathbf{F}_s = 0$$

$$\lambda = \mathbf{F}_f$$

$$\lambda = -\mathbf{F}_s$$

既存の手法

本手法



X-FEM & Lagrange未定乗数法

得られる連立方程式(接線行列記述)

Lagrange multiplier matrices for interaction

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ff} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \dot{\Phi}_f \\ \Delta \ddot{\Phi}_s \\ \phi \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ff} & \mathbf{0} & -\mathbf{B}_{f\lambda} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_{s\lambda} \\ -\mathbf{B}_{f\lambda}^T & \mathbf{B}_{s\lambda}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \Phi_f \\ \Delta \dot{\Phi}_s \\ \Delta \Lambda \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi \\ \Delta \Phi_s \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_f \\ \mathbf{F}_s \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \mathbf{Q}_f \\ \mathbf{Q}_s \\ \mathbf{Q}_\lambda \end{Bmatrix}$$

$$\Phi_f = \{\mathbf{V} \quad \bar{\mathbf{V}} \quad \mathbf{P} \quad \bar{\mathbf{P}}\}^T$$

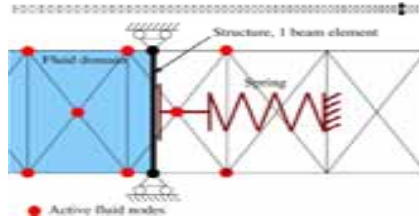
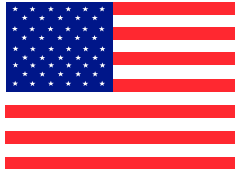
$$\Phi_s = \{\mathbf{U} \quad \Theta\}^T$$

- Newton-Raphson method
- **Newmark- β method**
- ILU(1)-GMRES solver

陰解法で直接求解

- Θ Rotation angle of the shell, and
- ϕ No unknowns.
- $\mathbf{M}$ Mass matrices,
- $\mathbf{C}$ Fluid convection, viscous, gradient matrices,
- $\mathbf{K}$ Tangent stiffness matrix of the structure,
- $\mathbf{F}$ External forces
- $\mathbf{Q}$ Internal forces including all effects.
- $\mathbf{B}$ **Lagrange multiplier matrices**

「X-FEM+LM法」のContributors

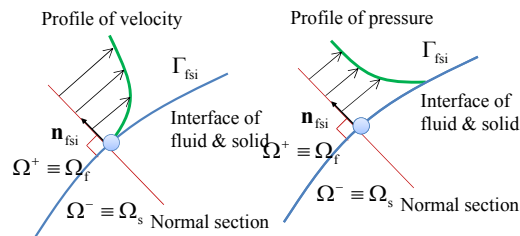


単純な移動境界連成,
ステップ関数

2006 journal

A. Legay, J. Chessa, T. Belytschko
(Northwestern U, USA)

流体・固体連成, ステップ関数 × 2

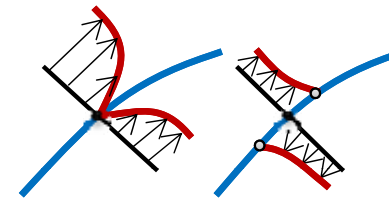


2006 proc / 2008 journal

A. Legay (CNAM, France),
A. Gilian (TU Braunschweig, Germany)

2006 proc / 2008 journal

A. Gerstenberger, U.M. Mayer,
W.A. Wall (TU Munchen, Germany)

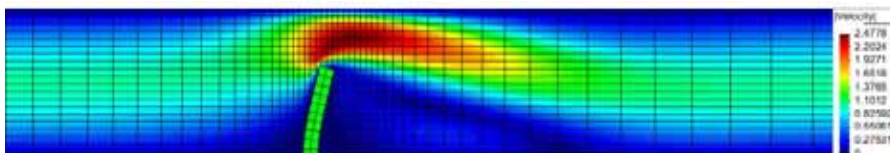


流体・シェル連成,
エッジ&ヘビサイド関数



2007 proc / 2010 journal

T. Sawada, A. Tezuka
(AIST, Japan)

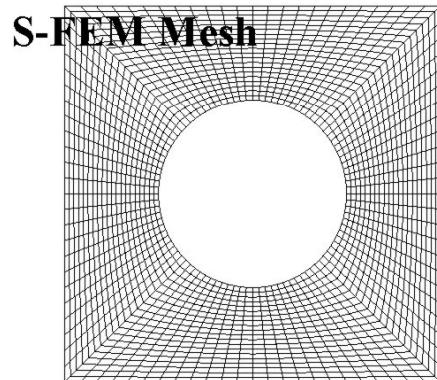


2010 proc

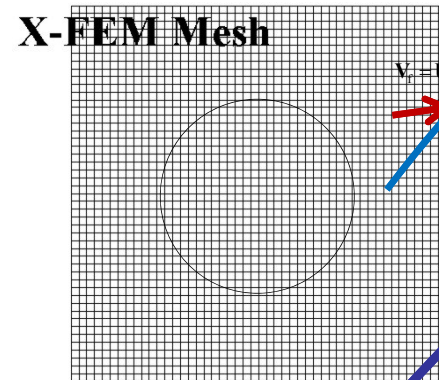
H.C. Gomes, P.M. Pimenta
(U Sao Paulo, Brazil)

円環周りの流れ解析による比較・検証

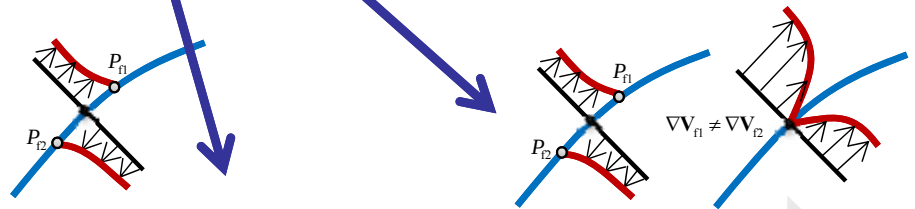
* T. Sawada & A. Tezuka,
Comput. Mech. 48, 2011.



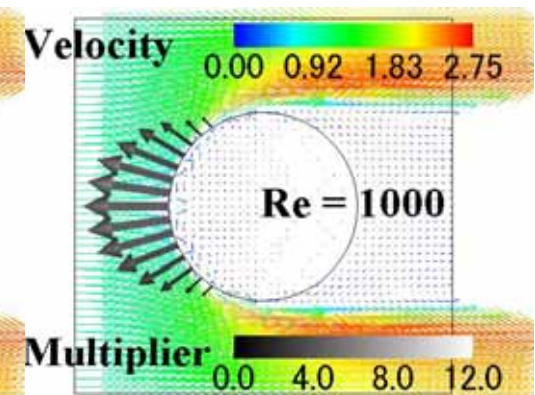
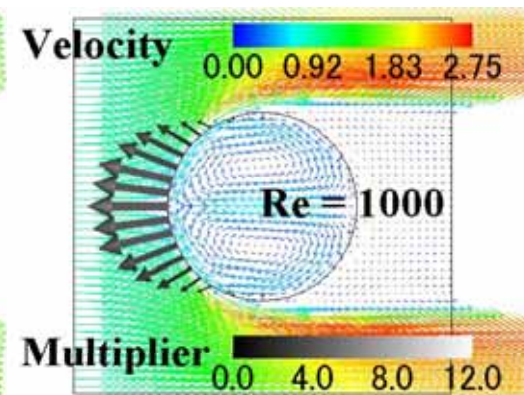
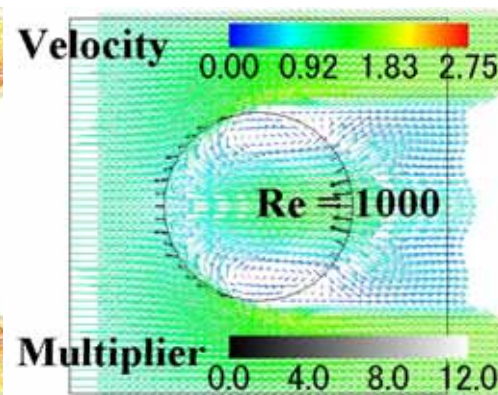
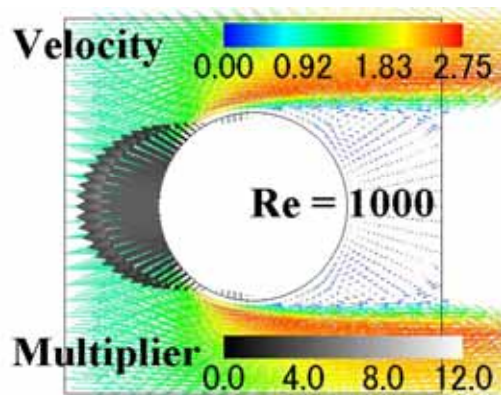
沿ったメッシュ
による解



不連続性なし
圧力不連続性あり
圧力と速度勾配不連続性あり



不連続化による品質向上



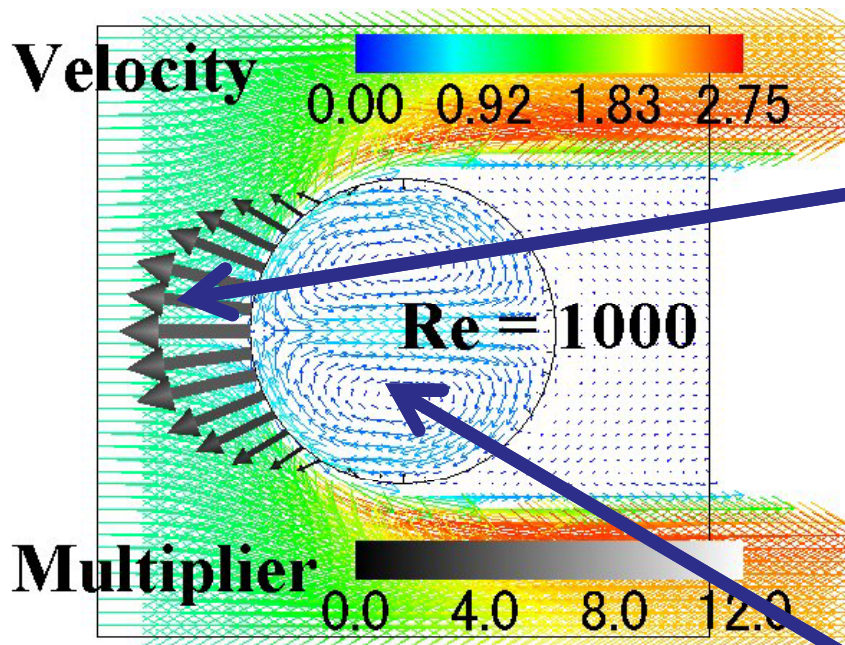
二つの性能指標

抵抗係数

$$C_D = \frac{1}{D} \frac{2}{\rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}} \int_{\Gamma_{fsi}} \lambda d\Omega$$

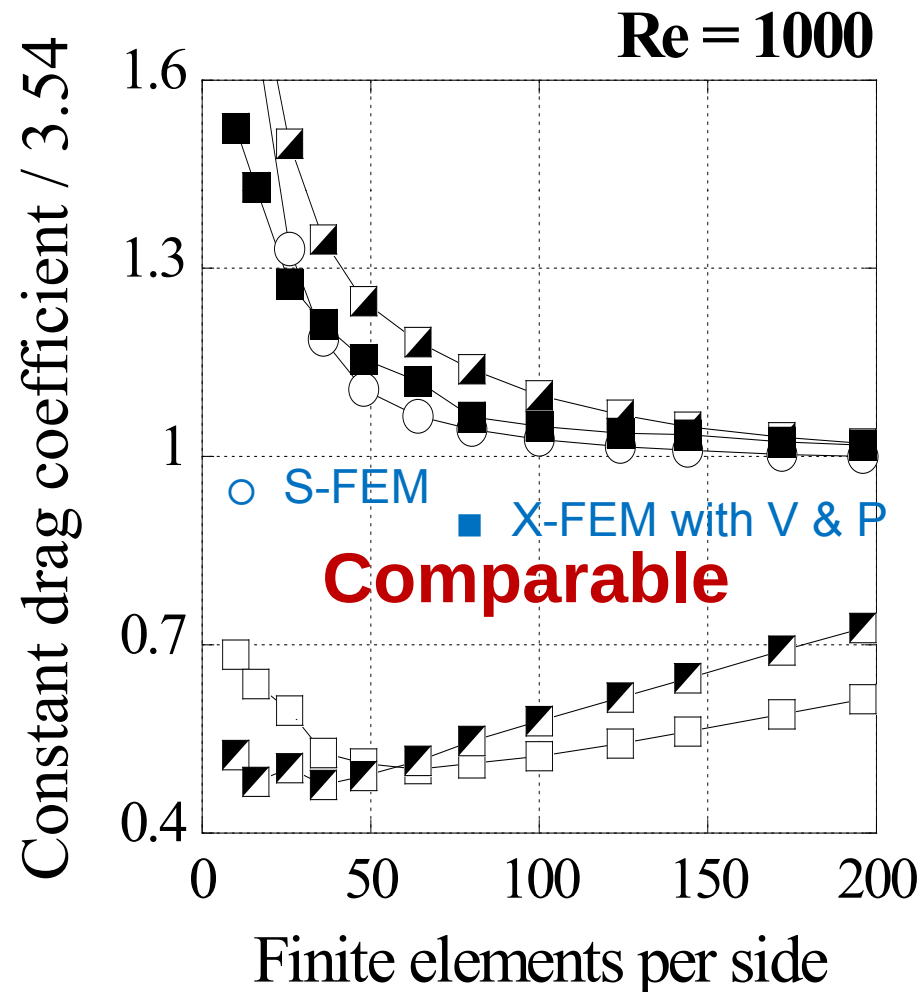
流れの伝播率

$$C_V = \frac{1}{\|\mathbf{V}\|} \int_{\Omega_B} \|\mathbf{v}\| d\Omega / \Omega_B$$

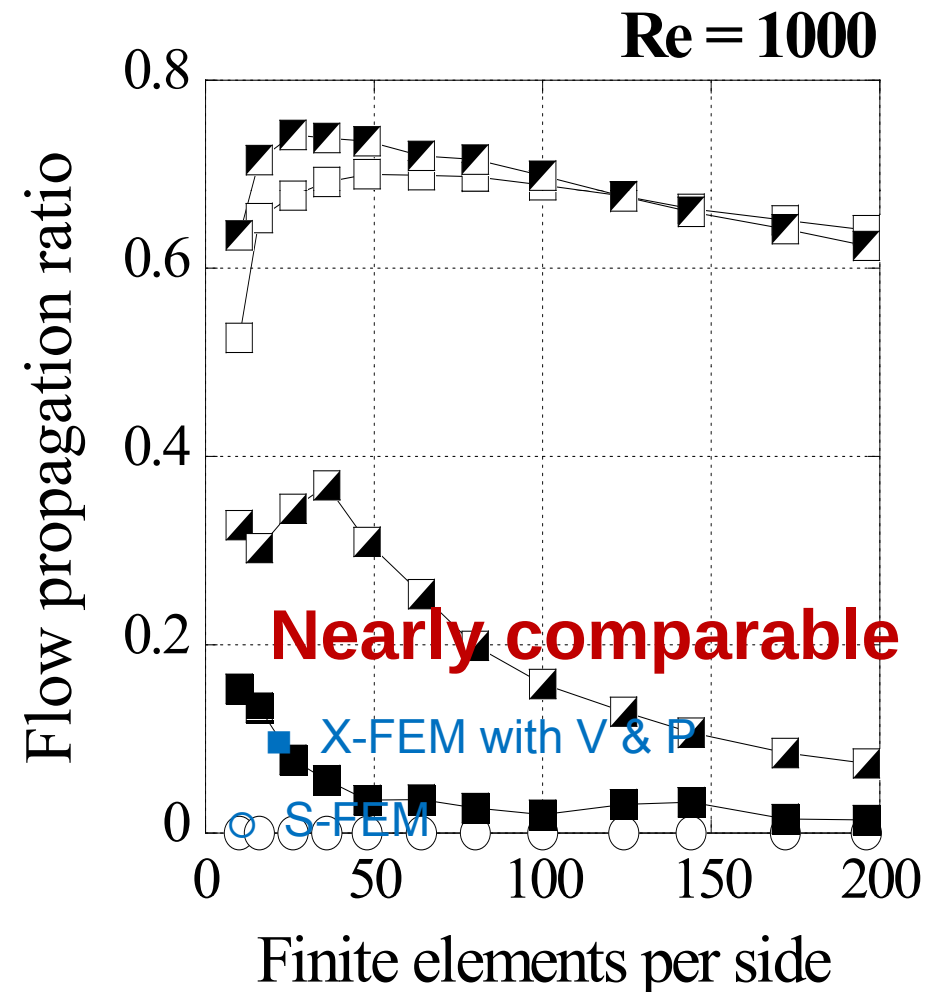


空間収束性能

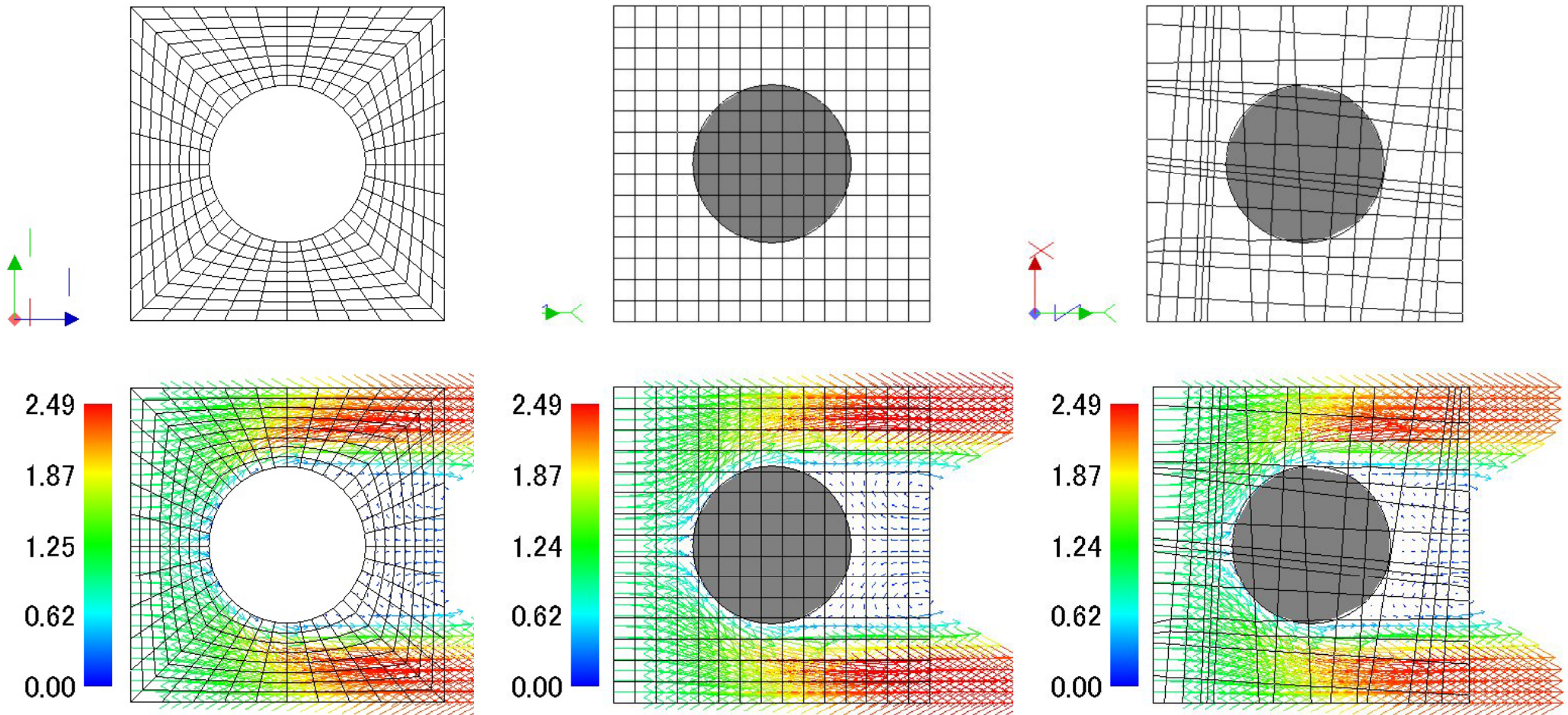
抵抗係数



流れの伝播率



FEMに基づくので、 不規則メッシュにも適用可能

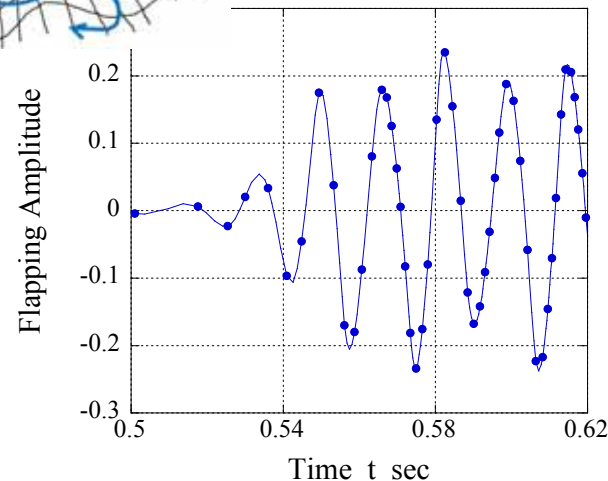
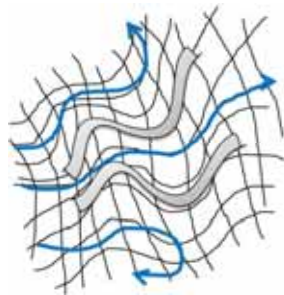


糸の流体励起振動

(引用 J. Zhang, Nature, 408, 2000)

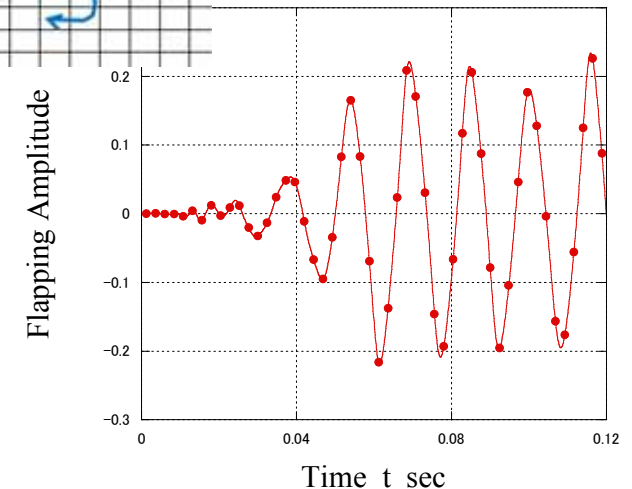
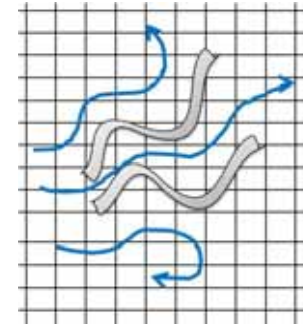


強連成型の移動
ALEメッシュ法

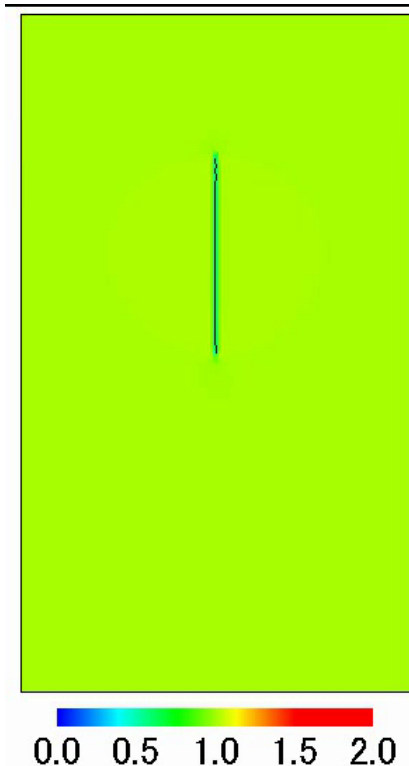


* T. Sawada & T. Hisada,
Comput. Fluids. 36, 136-146,
2007.

Lagrange未定乗数法
& X-FEM



* T. Sawada & A. Tezuka,
Comput. Mech. 48, 319-332,
2011.

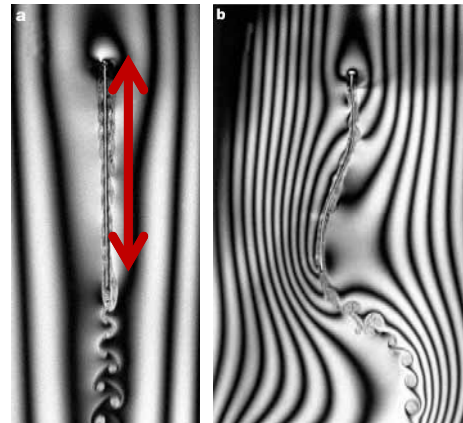


二本での検証

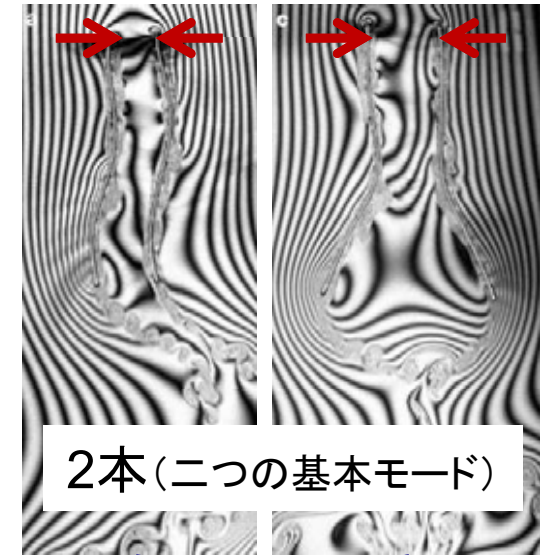
糸の流体励起振動

(引用 J. Zhang, Nature, 408, 2000)

- 実験とシミュレーションの条件は同一
- 振幅、周波数、振動の分岐条件がほぼ一致

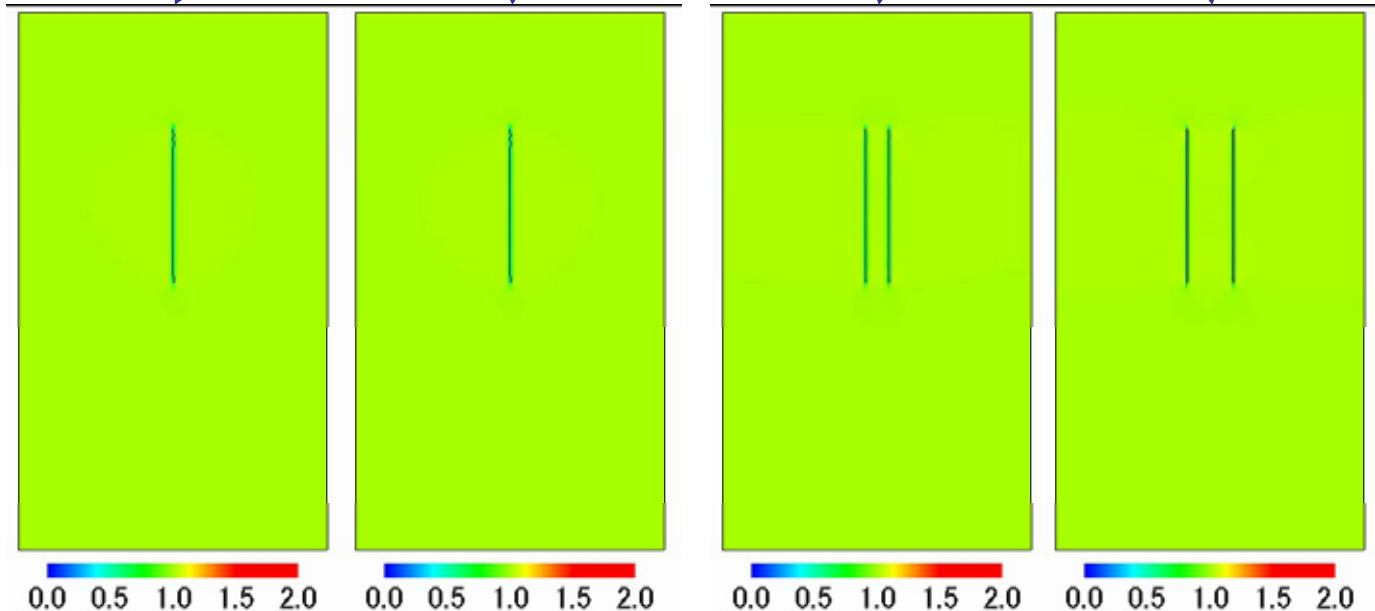


1本(一つの基本モード)



2本(二つの基本モード)

実験: $d/L = 0.14 - 0.21$
シミュ: $d/L = 0.15 - 0.20$



C_{AE} を CA_E へ

を合言葉に、
受入実施の学生さんと共に
体系化を検討

現在は、
学生さんがめでたく卒業して
しまったため、協力者募集中。

拡張有限要素法(X-FEM)による境界適合メッシュを 必要としない流体解析システムの開発

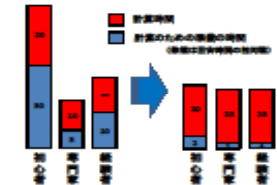
佐々木研究室

長濱 俊

産業界のコメント(産総研での研究活動にて)

- ・本当にやりたいのはエンジニアリング。
しかし、なかなかそこに辿りつけない。
- ・今のシミュレーションは、数値が高い。
- ・解析を行うには専門の技術者が必要。
- ・シミュレーションは実質的に役に立たない。
(実験の方が早い。)

C_{AE} を CA_E へ

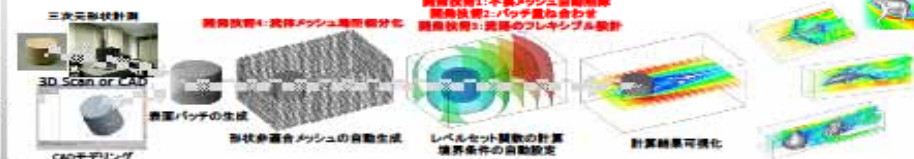


今回開発したエンジニアリング支援型流体解析システム

開発コンセプト



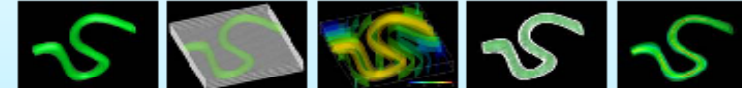
本システムによる解析の流れ



システムのUser-friendly性を向上させるために開発した技術

① 計算コスト削減のための不要メッシュ自動削除
物体内部流れへの適用 (開発技術1)

適用例: 5字管内部の流れ解析



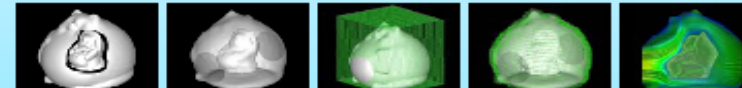
② パッチの自由配置・自由活用 (開発技術2)

適用例: バイパス配置解析



③ パッチを利用した流路のフレキシブル設計 (開発技術3)

適用例: タヌキ in タヌキ



単なる均一メッシュではなく、アダプティブなメッシュにしたい。

現在研究中の技術

④ 自動流体メッシュ局所細分化 (応用技術4)

初期メッシュ

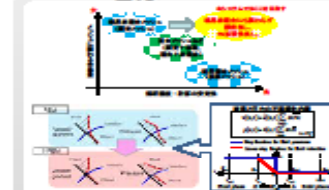
局所細分化メッシュ

三次元・複雑形状でも対応可能

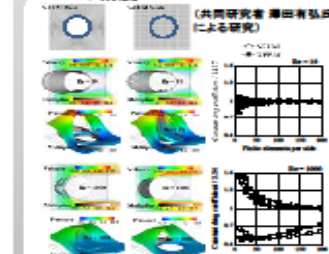


更なるユーザーフレンドリーさ、拡張性を追求していく。

X-FEMとは



X-FEMの精度



空間収束性能は、FEMとほぼ同等
(X-FEM&CFDは学術的にも最先端)

その他のFUTURE WORKS

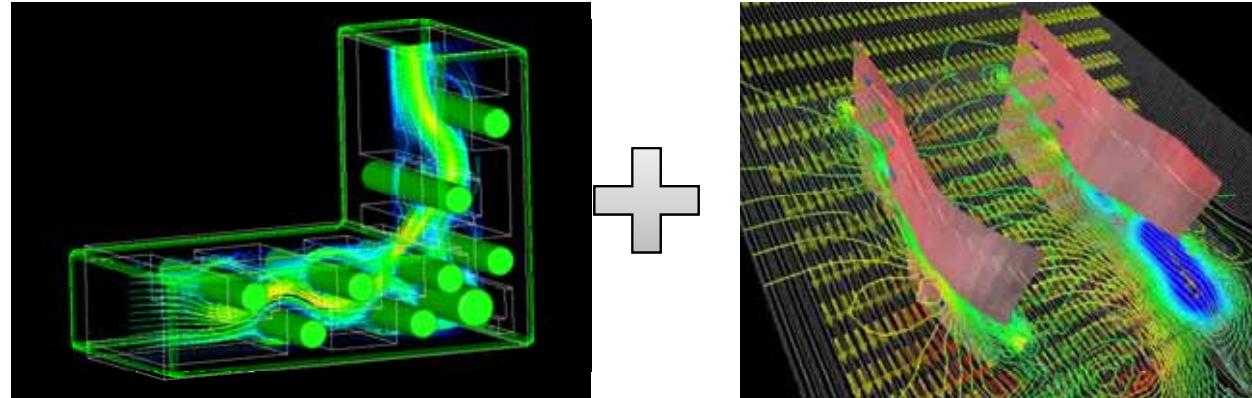
- ・ユーザーインターフェイス開発
- ・レベルセット関数高精度・高速化
- ・乱流への対応
- ・FSI拡張 など

外部発表
国内学会: 第14回計算工学会(2009.3.12-14)
第15回計算工学会(2010.3.26-28)(予定)
国際学会: FEF09(2009.4.1-3)
WCCM/APCOM2010(2009.7.19-23)(予定)

まとめ

境界非適合メッシュ型の有限要素解析手法の可能性

- 先進技術で築くメッシュから解放されたCAE -



- 問題意識:

- 期待・ニーズの一方、計算力学がものづくりに中々役立たない
- ①守備範囲狭い、②利用や活用が難、③産学のかい離

- 目標:

- ハブや橋渡しとなれるような研究活動、研究課題の設定
- 人依存のSimulation Technique (in-house) から、
科学技術としてのSimulation Technology (out-of-house) へ

- 手段、手法、提案:

- 流体構造連成を技術水準ベンチとしたテクノロジー化手法の研究と
- そのCAD/CAE統合化システムへの展開

✓流体基盤OK
✓構造基盤OK
✓連成基盤OK
✓設計解析統合への展開OK
(将来的に拡張性の高い
枠組みを社会に提供できる
のでは)

どうもありがとうございました。