固体ー流体連成解析システムによる生体力学シミュレーション

野田茂穂、姫野龍太郎 (理化学研究所 情報基盤センター)
岡澤重信　(広島大学)
岡田裕　(鹿児島大学)
玉木剛、川島康弘　(富士通長野システムエンジニアリング)

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

生体力学シミュレーション研究 @ RIKEN

- 1999-2004年、第一期生体力学シミュレーション研究を実施
  - 軟組織／硬組織シミュレーション
  - 循環器系シミュレーション
  - 運動シミュレーション
- 2004年より第二期（5年）の研究をスタート

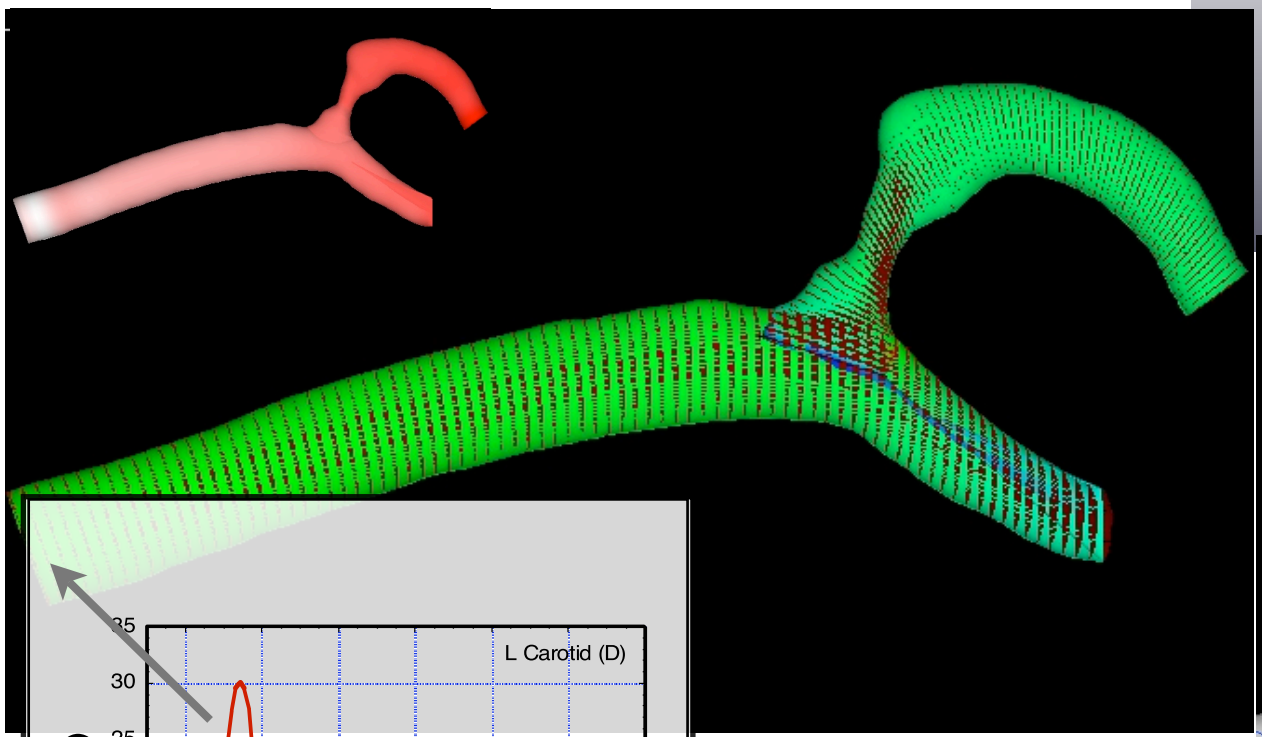
http://www.riken.jp/engn/r-world/research/lab/spunit/comp/index.html

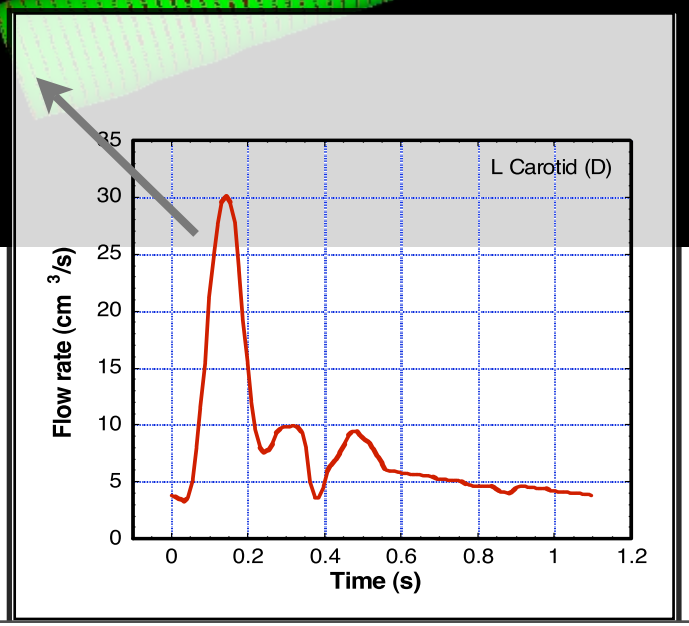
All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

循環器系シミュレーション

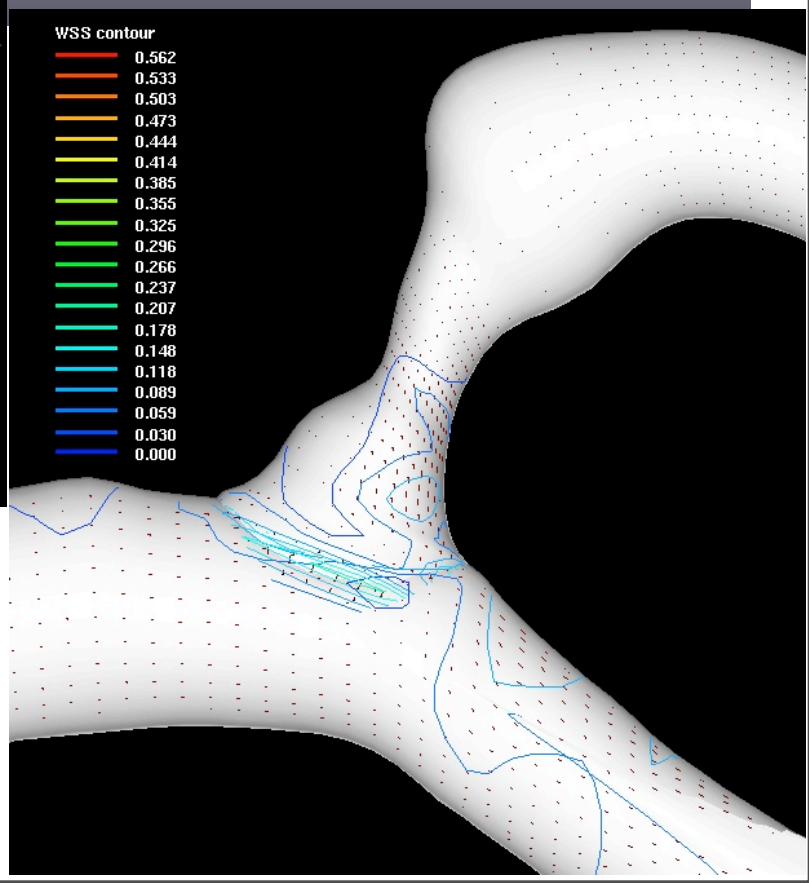
@ RIKEN 生体力学シミュレーション

Qpeak = 80 cm3/s
D = 0.8 cm
Remax= 1000
St = 0.012
Womersley number=8.1





Wall share stress

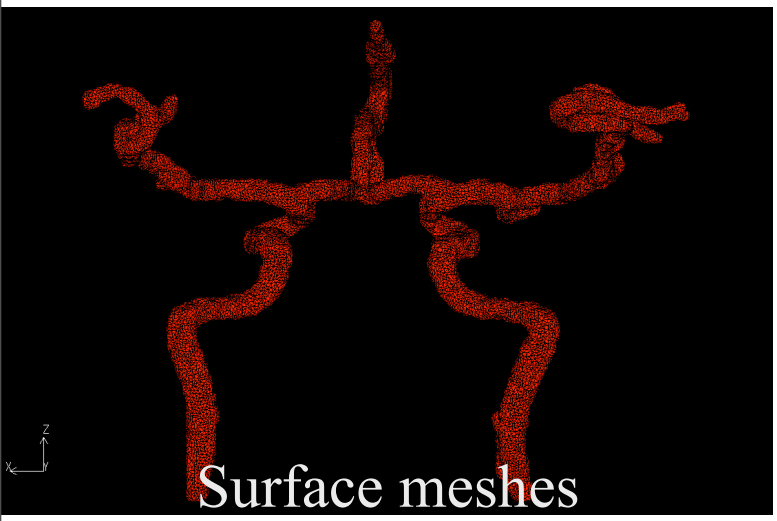


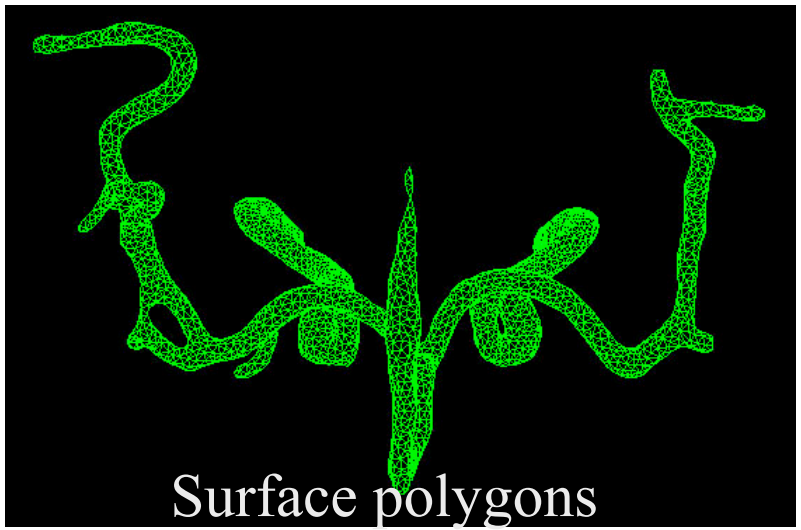
血流解析でのモデル作成

MRI Image

Extracted Arteries

smoothing surface





All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

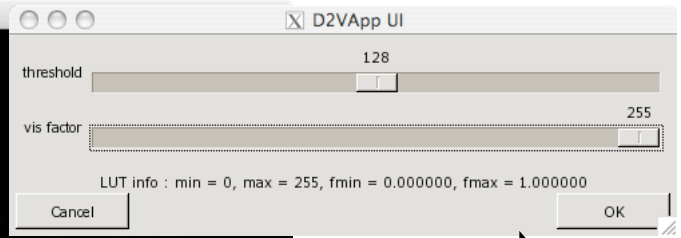
医療現場への適用

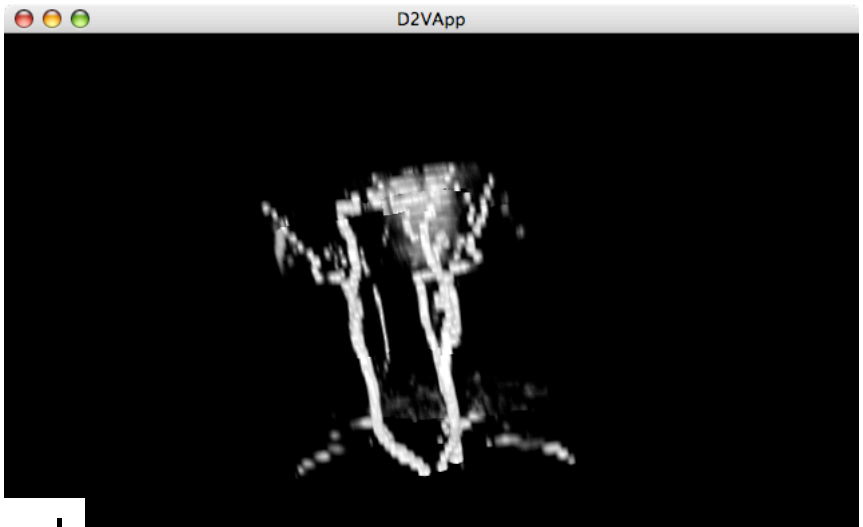
- 簡便で素早く利用出来る事
- 特別な知識を必要としない事 (e.g. Mesh, CFD, CAD...)
- 同じ医療データから誰でも同じ答えが得られる事

ボクセルモデルに基づく医療画像からの直接シミュレーション

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

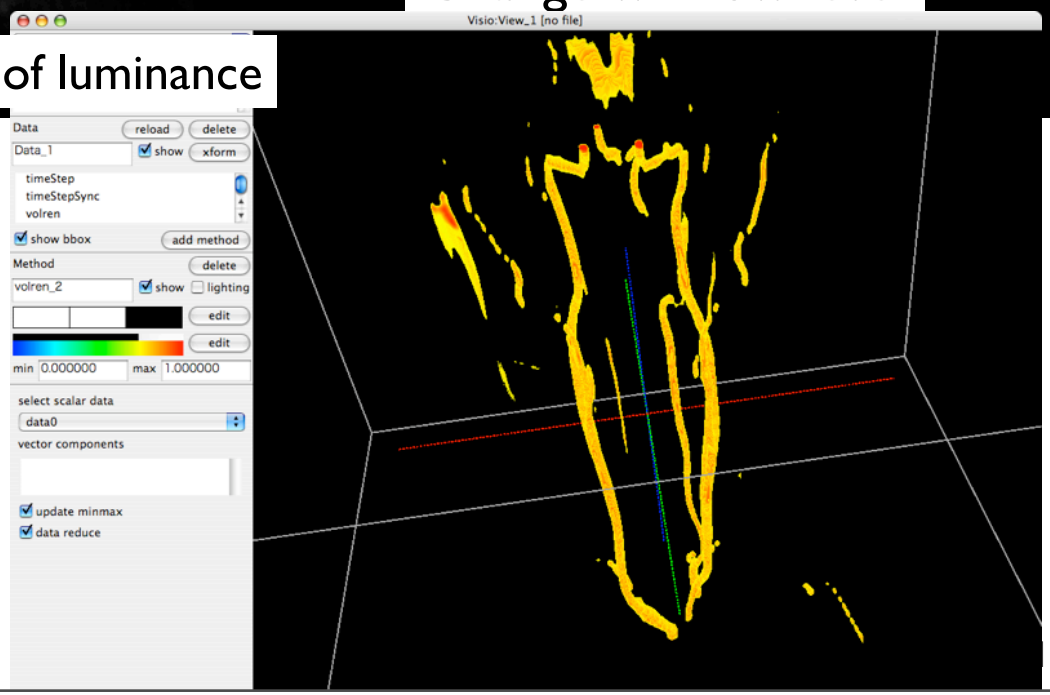
Extract blood vessel

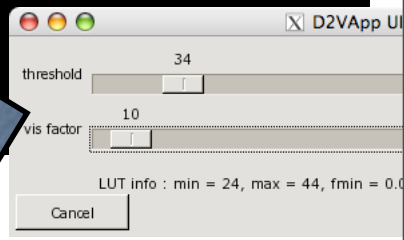




Change window level

Volume rendering of luminance





Tri-liner filter for VOF, AOF

Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

Blood Flow Solver

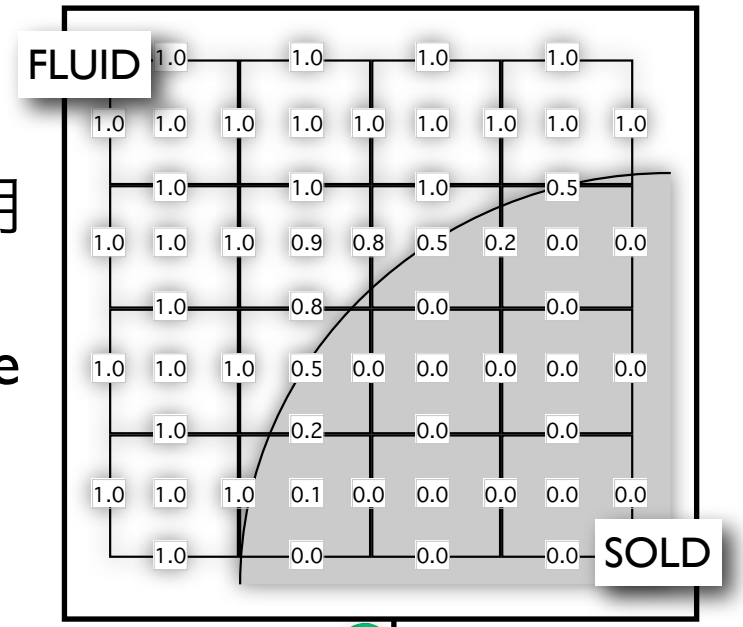
- 非定常非圧縮NS方程式
- 時間項：Adams-Bashforth法
- 移流項：QUICK法
- 圧力項／拡散項：中心差分法
- システム全体：HSMAC法
- VOXEL modeling (without mesh generation)

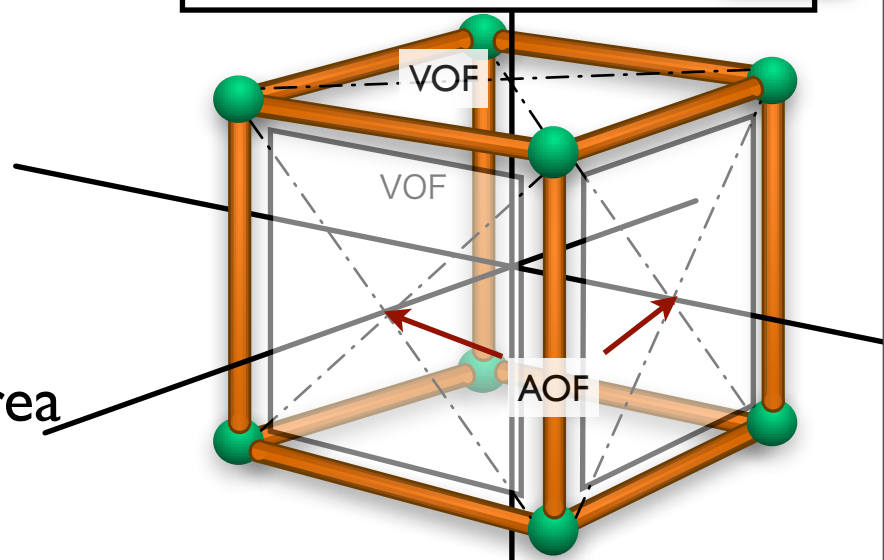
All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

VOF modeling

- 形状表現として二つのパラメータを使用
  - VOF : Ratio of fluid at the VOXEL volume
    VOF = Fluid Volume / VOXEL Volume

    VOF=1.0 : Fluid VOXEL
    VOF=0.0 : Solid VOXEL
    0.0 < VOF < 1.0 : Boundary VOXEL
  - AOF : Ratio of fluid at the VOXEL boundary surface area
    AOF = Fluid-face Area / Cell-face Area





All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

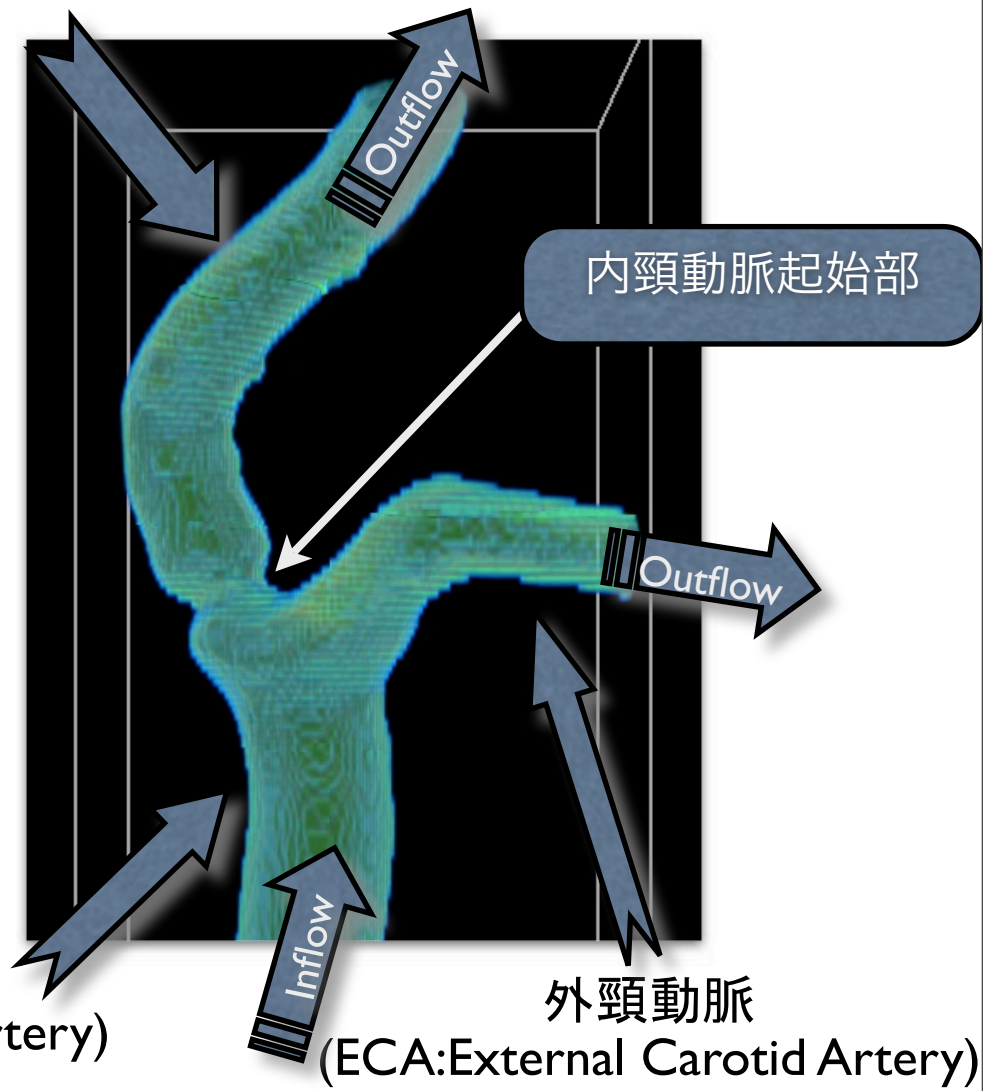
頸動脈狭窄症

- 内頸動脈起始部は狭窄症の好発生部位
- 血管内膜と中膜の間に粥腫が蓄積
- 発生すると。。。
  脳血流の低下
  デブリが脳血管を詰まらせる
- 予防処置を行い発症頻度を下げる。

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

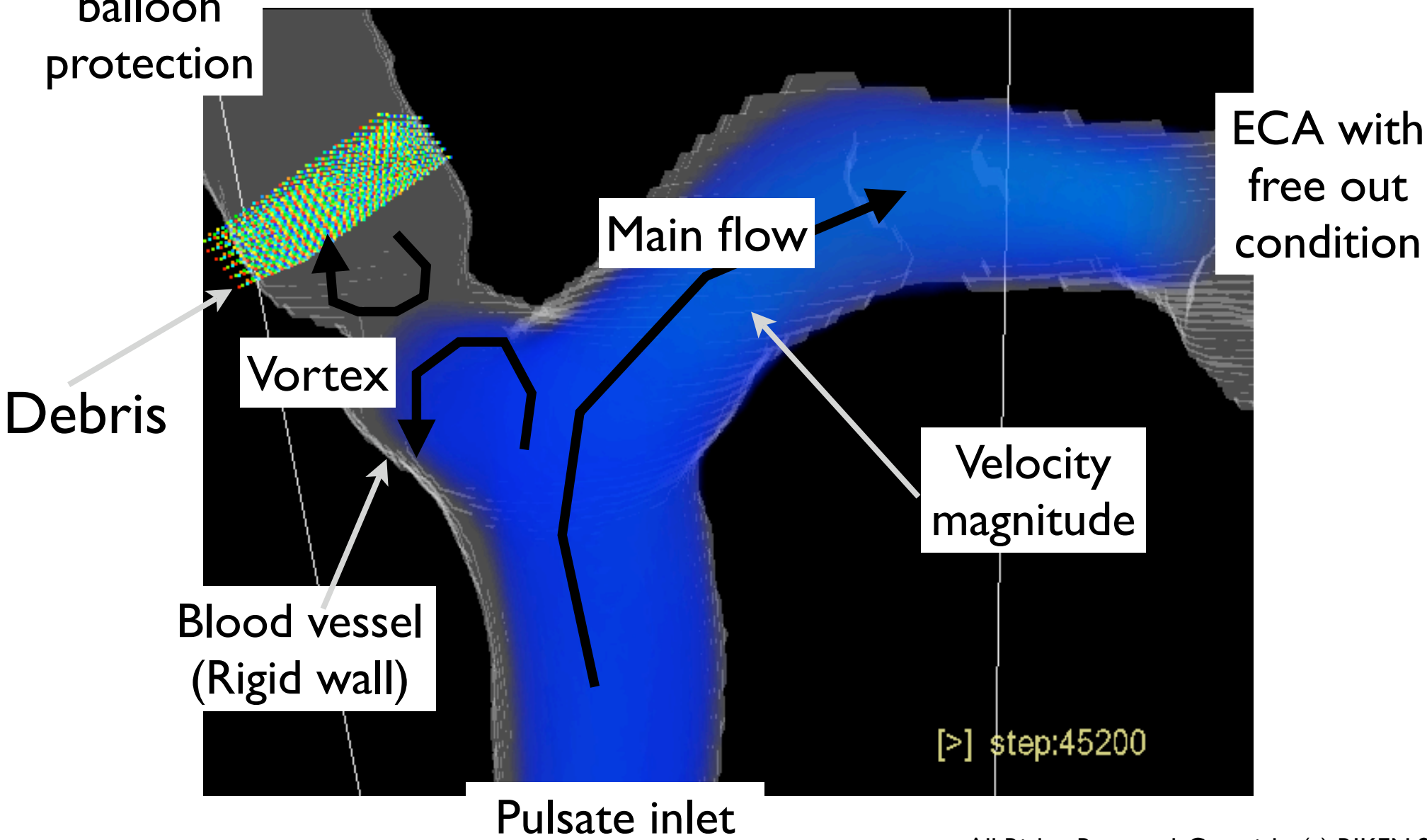
頸動脈狭窄症

- 内頸動脈起始部は狭窄症の好発生部位
- 血管内膜と中膜の間に粥腫が蓄積
- 発生すると。。。
  脳血流の低下
  デブリが脳血管を詰まらせる
- 予防処置を行い発症頻度を下げる。



All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

Result



All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

血管は固い？

- 血圧変化

  160mmHg-106mmHg=734kg/m^2=0.7kg/cm^2
- 外圧による変化
- 大きく変形する

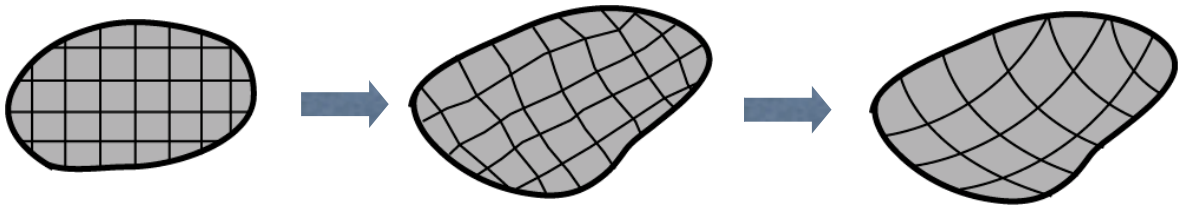
  →非線形固体解析との連成

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

Lagrangian解法の欠点

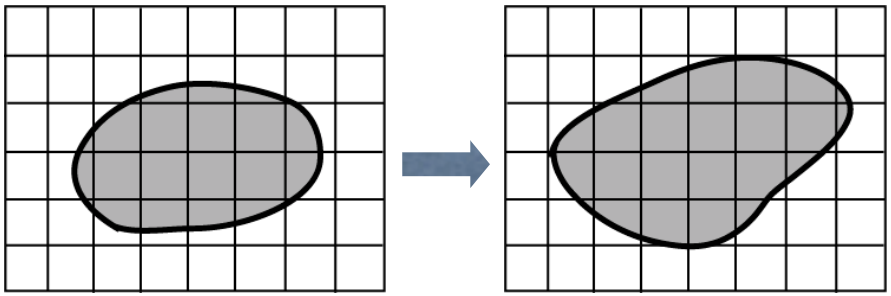
極端な大変形を扱うことができない

ALE解法



自由境界面の生成が困難 (破断, 亀裂進展など)

Eulerian解法

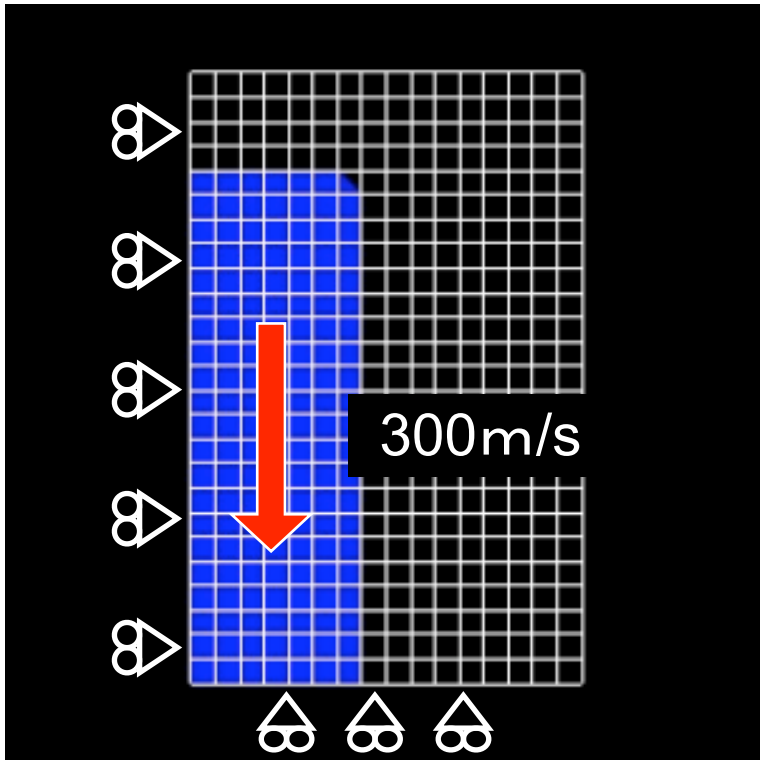


All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

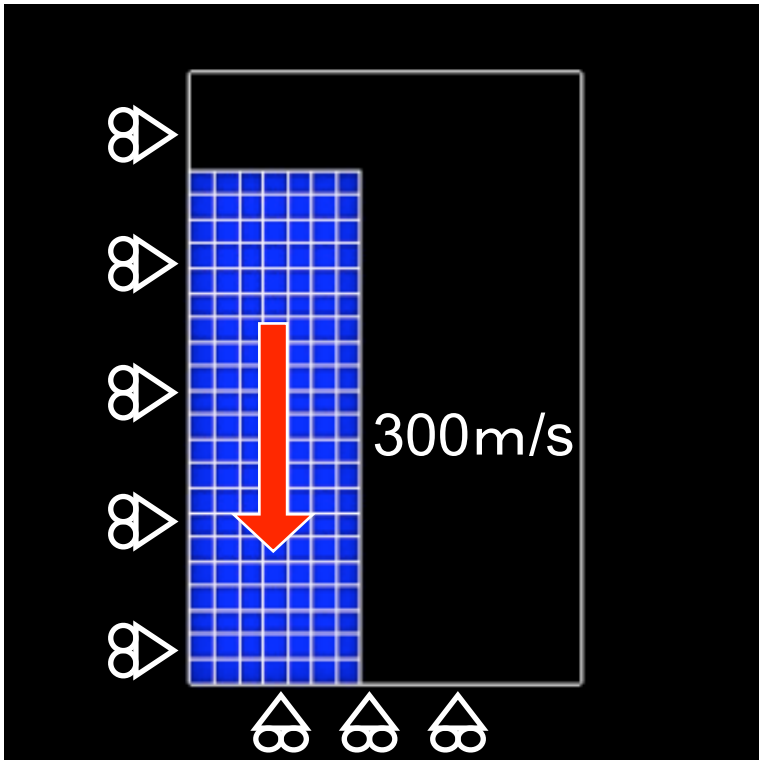
オイラー型有限要素法

- メッシュは空間に固定され，歪むことがない
- 物体はメッシュを越えて移動

オイラー型FEM



ラグランジェ型FEM



All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

Split 法

Eulerian 方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \boldsymbol{v} \cdot (\nabla \phi) = f$$

split

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \phi}{\partial t} = f & \text{非移流 ステップ} \\ \dfrac{\partial \phi}{\partial t} + \boldsymbol{v} \cdot (\nabla \phi) = 0 & \text{移流ステップ} \end{cases}$$

φ：質量、速度、応力、ひずみ

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

Operator Split 法

非移流ラグランジェ
ステップ
（一般的な固体解析）

動的陽解法

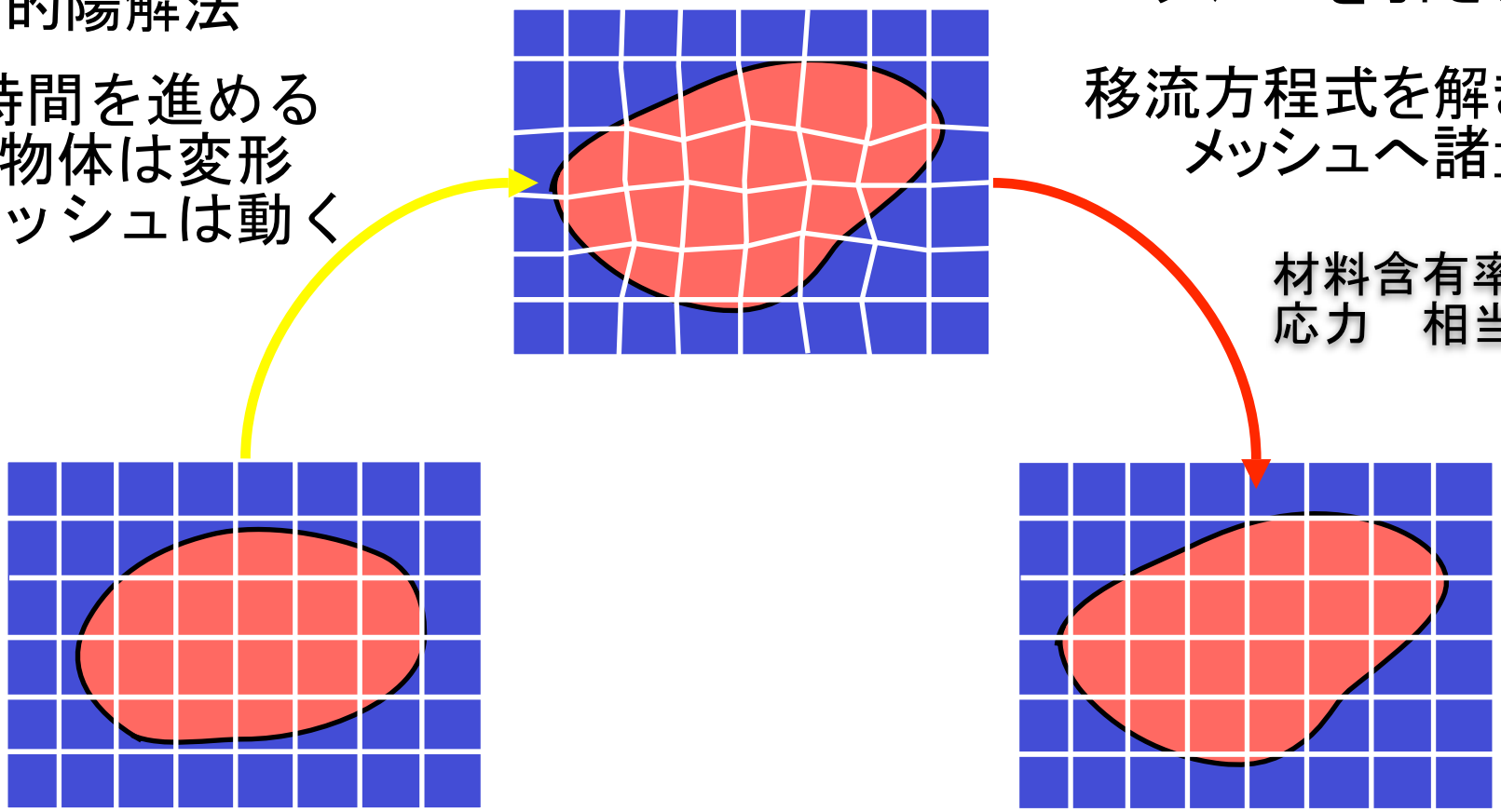
時間を進める
物体は変形
メッシュは動く

移流オイラーステップ

時間を止める
メッシュを引き戻す

移流方程式を解き，戻した
メッシュへ諸量を投影

材料含有率　節点速度
応力　相当塑性ひずみ



All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

Advective Scheme for Solid

- 解が振動するような移流スキームを用いることはできない.
- TVD条件を満たさなければならない.

TVD (Total Variation Diminishing) 条件

移流スキームの単調性を維持し，なおかつ安定的に解を得るための条件

$$TV(\phi^n) = \sum_j |(\phi^n_{j+1} - \phi^n_j)|$$

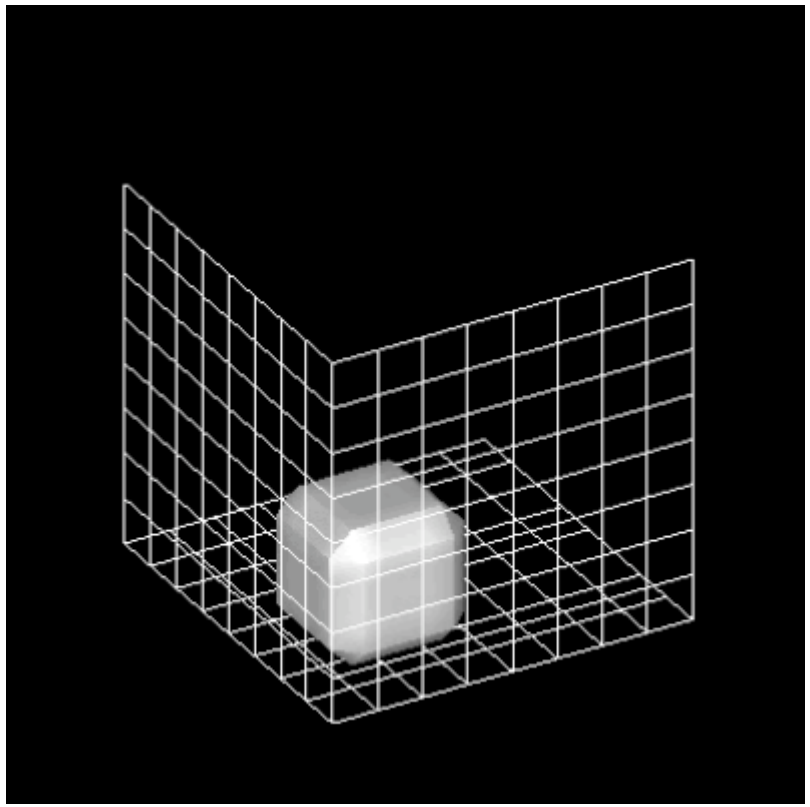
$$TV(\phi^{n+1}) < TV(\phi^n)$$

変数の全変動(Total Variation)が増加しないという条件

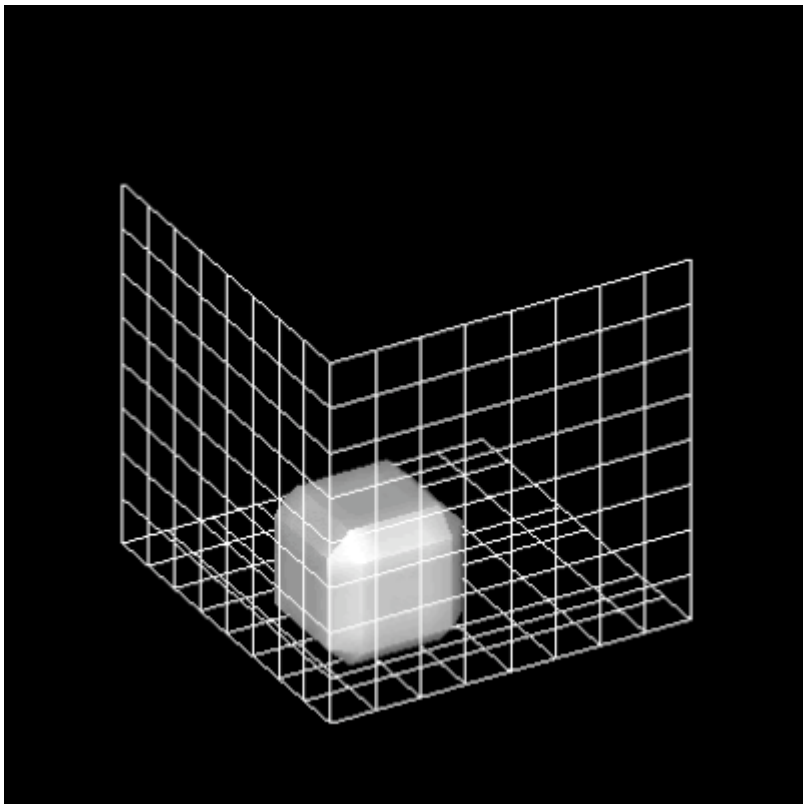
All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

一次の風上差分法とMUSCL法

一次の風上差分法



MUSCL法

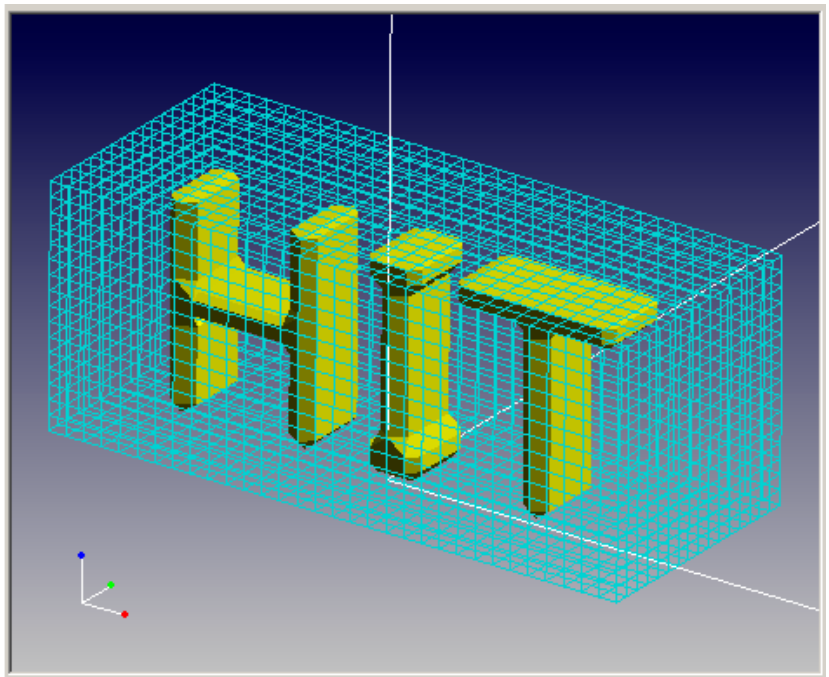


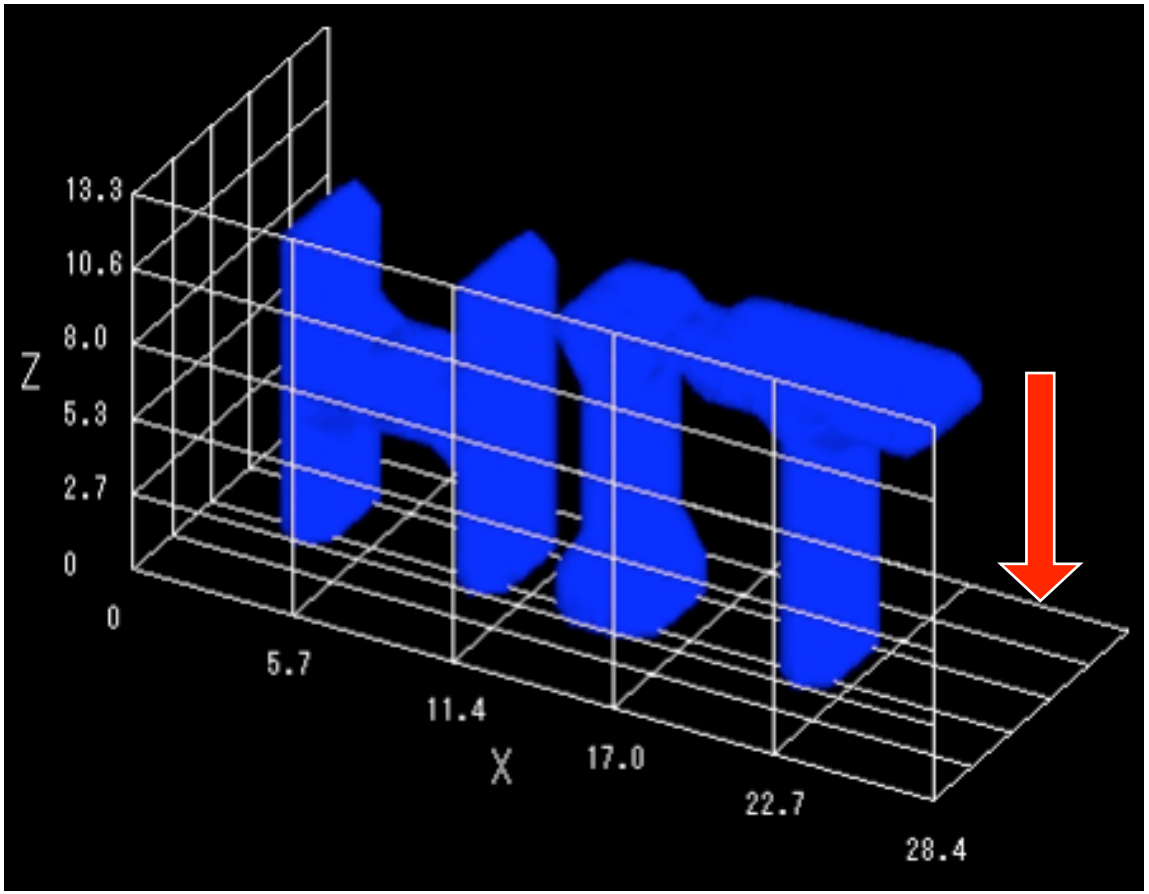
8×8×8 cm ^{3}　　8×8×8 =512要素

速度　Vx=2.5 m/s　Vy=2.5 m/s　　Vz=2.5 m/s

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

解析条件・衝突解析



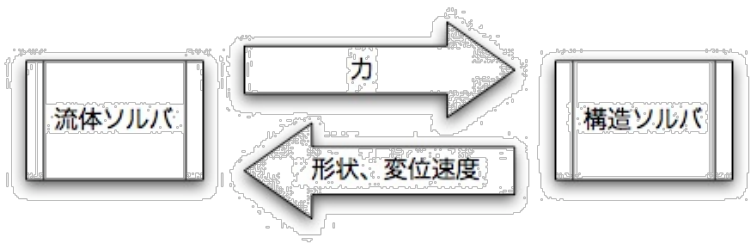


0～150μs

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

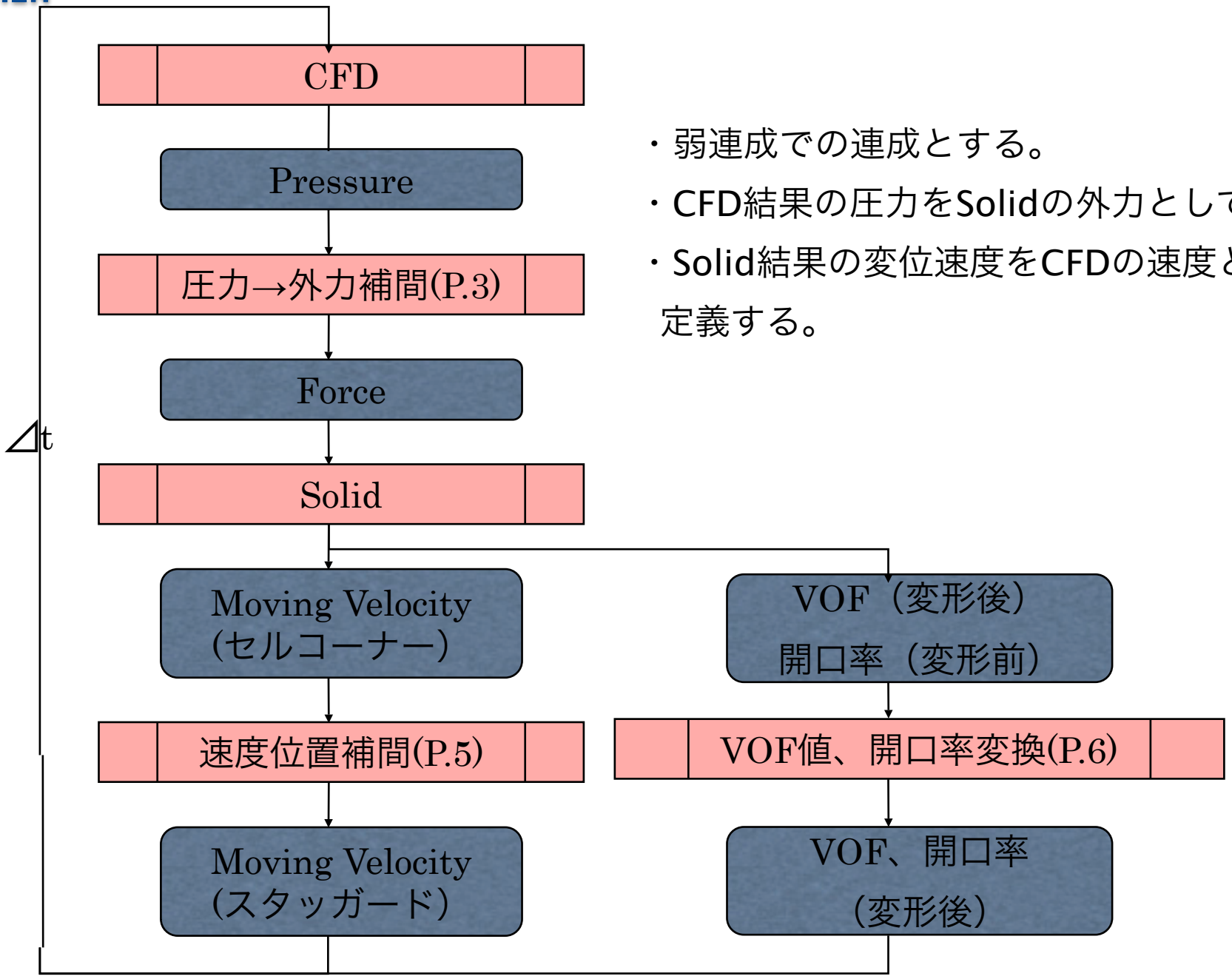
固体流体連成

- 固体ソルバー
  ボクセルを用いた非線形大変形構造解析プログラム
  - ボクセル格子内での固体が占める割合を使用
- 流体ソルバー
  ボクセルを用いた非定常非圧縮流体解析プログラム
  - ボクセル格子内での流体が占める割合を使用
- 連成手法
  - 流体ソルバーから力を構造ソルバーへ
  - 構造ソルバーから変位後の形状と変位速度を流体ソルバーへ
  - 弱連成を使用
- プログラム構成
  - 領域分割型並列化
  - 異機種（スカラー／ベクトル）での連成実施
    例：構造ソルバをスカラ計算機で、流体ソルバをベクトル計算機で実行し連成を行う



All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

連成解析の流れ



・弱連成での連成とする。

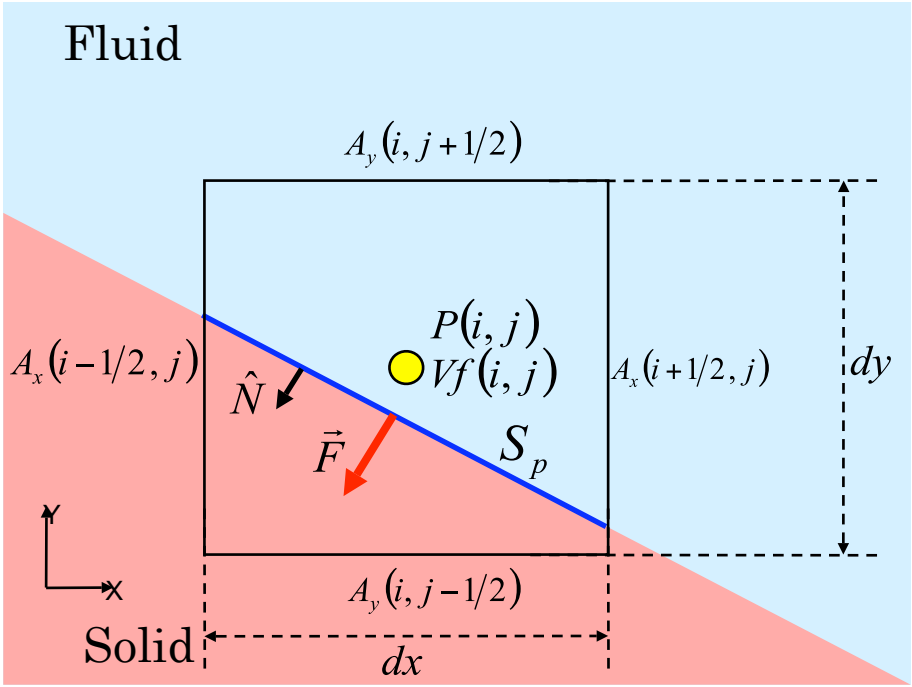
・CFD結果の圧力をSolidの外力として定義する。

・Solid結果の変位速度をCFDの速度として定義する。

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

流体圧力→固体外力の補間（その１）

流体圧力を補間し固体外力を得る



$$if\ \ threshold < Vf(i,j) < 1.0$$

$$\vec{F}(i,j) = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \hat{N} \times P \times S_p$$

$$\vec{N} = \begin{pmatrix} dy\left(\left(1 - A_x(i+1/2, j)\right) - \left(1 - A_x(i-1/2, j)\right)\right) \\ dx\left(\left(1 - A_y(i, j+1/2)\right) - \left(1 - A_y(i, j-1/2)\right)\right) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} dy\left(A_x(i-1/2, j) - A_x(i+1/2, j)\right) \\ dx\left(A_y(i, j-1/2) - A_y(i, j+1/2)\right) \end{pmatrix}$$

P：圧力（有次元）

Vf：流体のVOF値(流体=1)

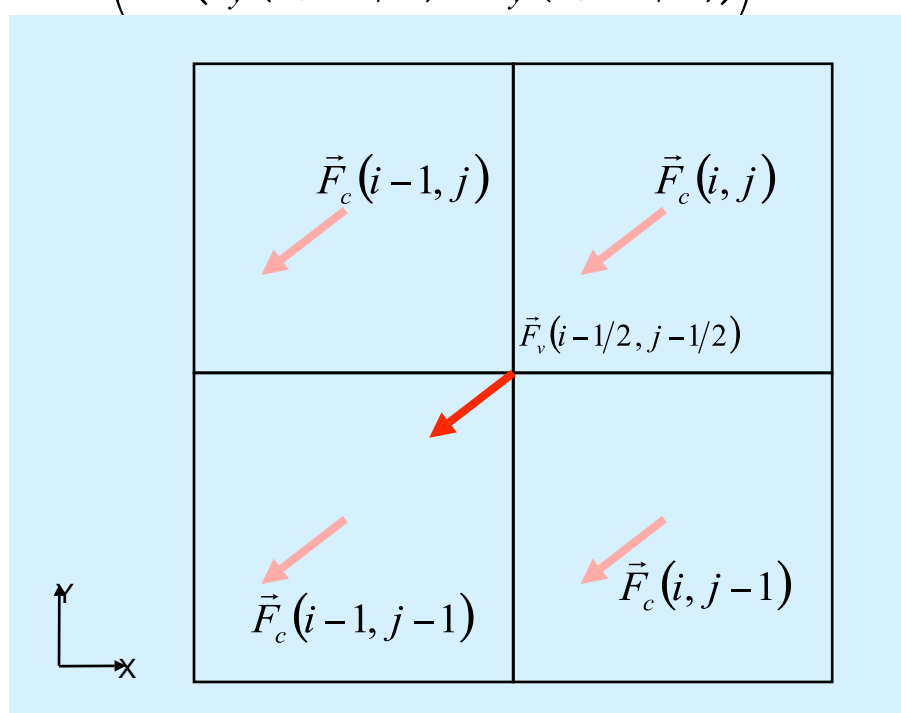
A_x,A_y：セル面の開口率(流体=1)

dx,dy：セル長さ

S_p：圧力を受ける固体面の面積

N：圧力を受ける固体面の法線方向

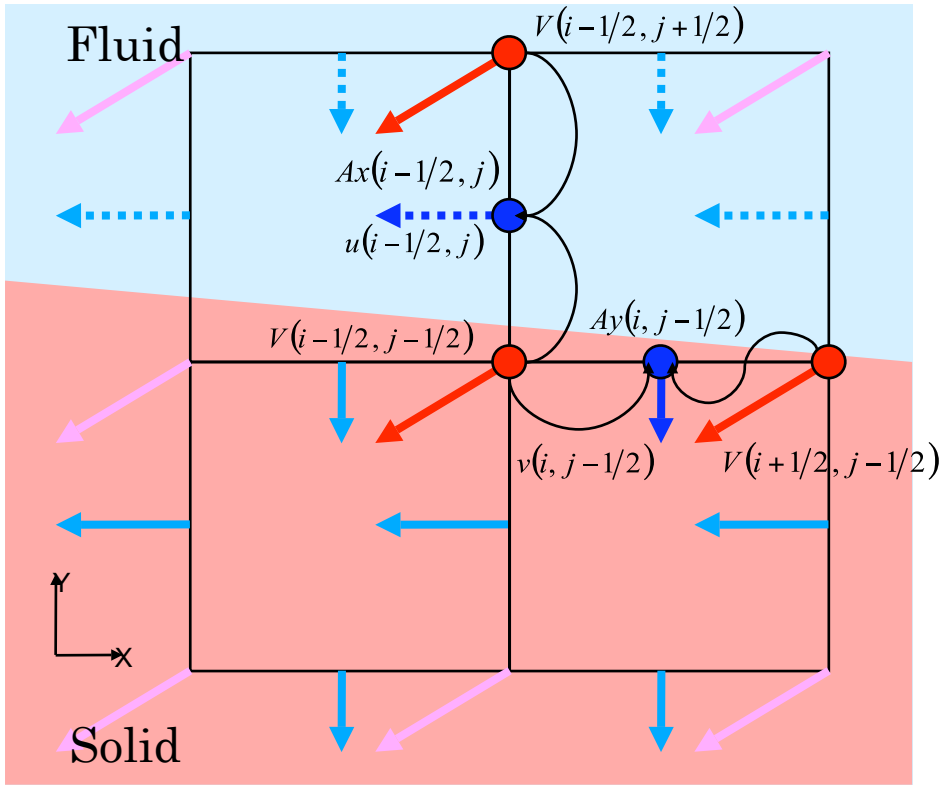
F：セルにかかる外力(=Sp・P)



固体変位速度→流体速度の補間

固体の変位速度をセルコーナーからスタッガード位置に保管し、流体の速度として定義

・開口率でマスクを作成し、Ax(Ay)=0（完全に固体面）のセル面に対してのみ速度を定義する



$$m_u(i-1/2, j) = \begin{cases} Ax(i-1/2, j) = 0 & :1 \\ not & :0 \end{cases}$$

$$m_v(i, j-1/2) = \begin{cases} Ay(i, j-1/2) = 0 & :1 \\ not & :0 \end{cases}$$

$$V(i, j) = \begin{pmatrix} V_x(i, j) \\ V_y(i, j) \end{pmatrix}$$

$$u(i-1/2, j) = m_u(i, j-1/2) \times \frac{V_x(i-1/2, j-1/2) + V_x(i-1/2, j+1/2)}{2}$$

$$v(i, j-1/2) = m_v(i, j-1/2) \times \frac{V_y(i-1/2, j-1/2) + V_y(i+1/2, j-1/2)}{2}$$

V：固体変位速度、u,v：流体速度

Ax,Ay：開口率（流体=1）

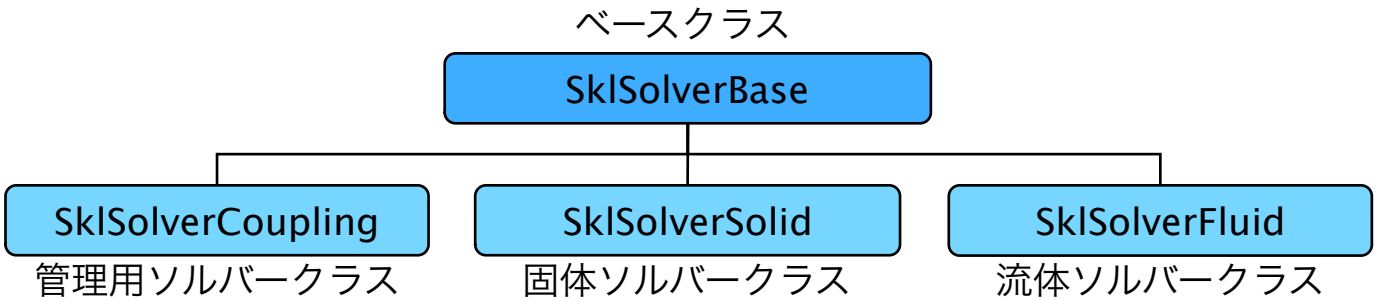
m_u,m_v：開口率マスク（開口率と同じ位置）

※破線部分は速度を発生させない（流体計算で求める）

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

システム構成

・固体、流体ソルバークラスとは別に連成管理用のソルバークラスを作成

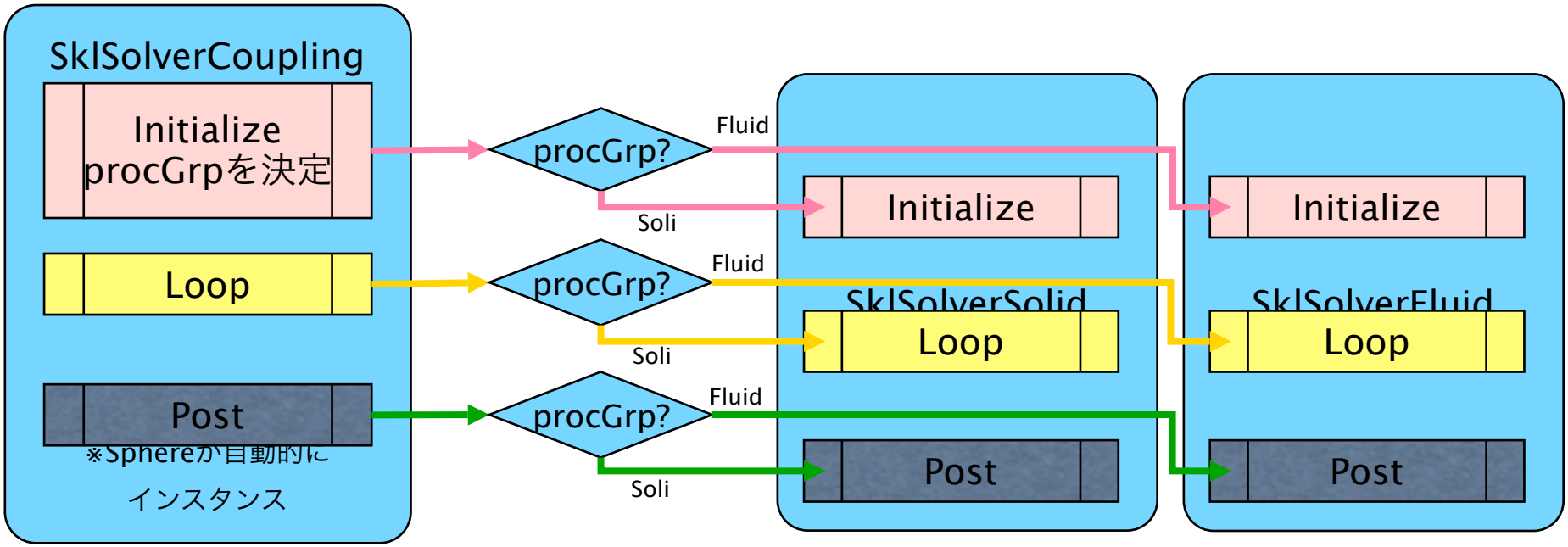


・Sphereが自動的にインスタンスするソルバークラスは連成管理用ソルバークラス

・管理用ソルバークラスのInitialize処理で、固体、流体用のプロセスグループを作成

・自身が属するプロセスグループによって、インスタンスするソルバークラスを決定

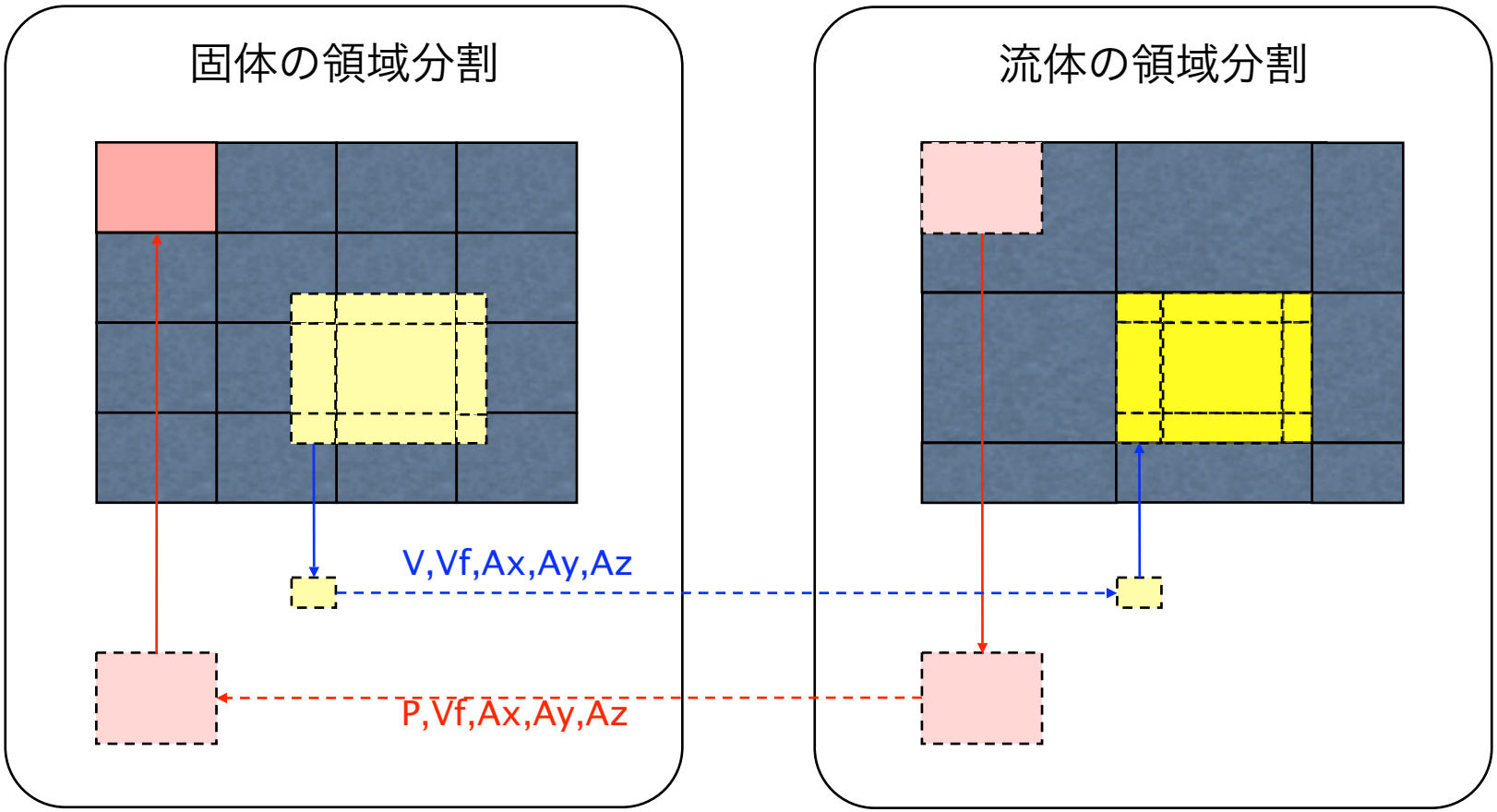
・Initialize、Loop、Postはインスタンスされているソルバークラスの処理を呼び出す



All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

ソルバークラス間の通信について

・固体、流体解析用のソルバークラス間でデータの受け渡しは通信で行う
・Initialize処理で、自身の分割領域範囲と相手の分割領域範囲の対応を取得し、
通信用パック領域を確保
・連成のタイミングで対応するノード間で通信
・通信した領域範囲内で、自身に対応するボクセル範囲を実領域にコピーする



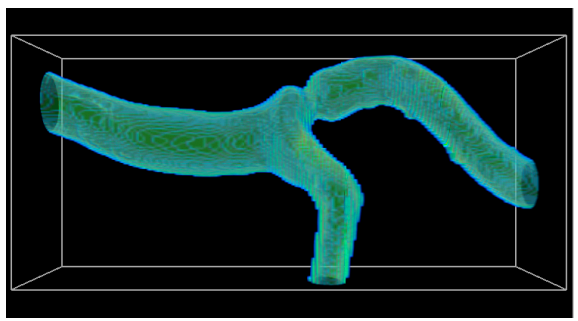
All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

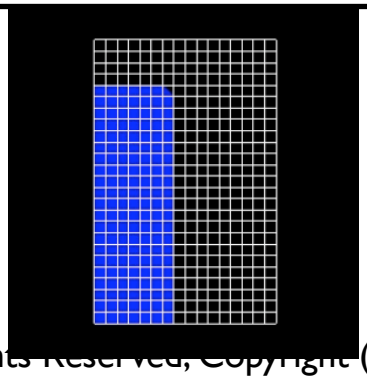
計測結果(単体)

単体	Fluid(146*91*158) (Solv/Comm)	Solid (146*91*158) (Solv/Comm)	Sold2 (30*30*50) (Solv/Comm)
SX-6i	27.6255	-	36.774
P4 2.2GHz	134.1025	-	15.725
P4 2.2GHz*2 +GbE	88.7295 (67.8845/11.845)	-	8.036 (7.99/0.043)
P4 2.2GHz*4 +GbE	88.6275 (42.872/45.7555)	186.074 (184.276/1.7985)	4.174 (4.12/0.056)
P4 2.2GHz*8 +GbE	53.844 (22.589/31.255)	96.1625 (93.6255/2.537)	2.260 (2.16/0.097)

himenoBMT[s]
SX-6i : P4 = 4.83 : 1

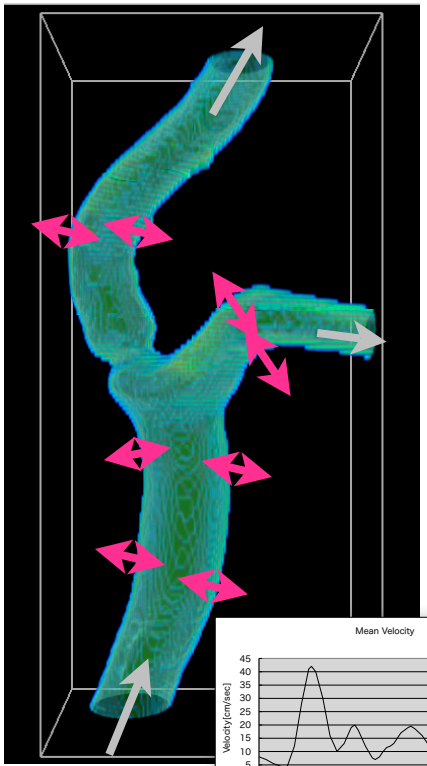
Fluid
SX-6i : P4 = 4.85 : 1

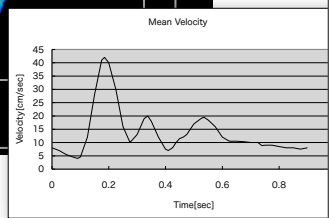




All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

Test Case





- 頸動脈狭窄症血管：直径6[mm]
- 血流：0.5[m/s]
- 音速[m/s]

  骨:4080、血液:1570、軟部組織平均:1540 (水:1480)

- Voxel:(149*91*458),0.15*0.15*0.3[mm]
- CFL : Fluid = $3*10^{-4}$、Solid = $1*10^{-7}$

$\Delta t = \Delta L / U$

- gridmpi -np 9 -machinefile mfile solver

```
-np 8 -c mpi/mpiconf.cluster  -rsh rsh -rh pcnode
-np 1 -c mpi/mpiconf.sx  -rsh rsh -rh vecnode
```

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

計測結果（連成）

	Total[s]	Fluid[s]	Solid[s]
Case 1 F:PCC*4, S:PCC*4	470.044	181.481	424.477
	1.712	89.41	6.867
Case 2 F:SX,S:PCC*8	273.8	49.898	203.324
	36.361	-	5.146
Case 3 F : SX, S:PCC*4	452.789	50.448	386.486
	31.487	-	5.68

NIC:GbE

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

Fluid 1dt = 25sec

単体	Solid (146*91*158) (Solv/Comm)	Cells	Sold2 (30*30*50) (Solv/Comm)	Cells
P4 2.2GHz	-	2,099,188	15.725	45,000
P4 2.2GHz*2 +GbE	-		8.036 (7.99/0.043)	22,500
P4 2.2GHz*4 +GbE	186.074 (184.276/1.7985)	524,797	4.174 (4.12/0.056)	11,250
P4 2.2GHz*8 +GbE	96.1625 (93.6255/2.537)	262,399	2.260 (2.16/0.097)	5,625
P4 *32 +GbE	25	65,600		

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007

まとめ

- ボクセルベース固体ー流体連成システムを実現
- 流体コードはベクトル計算機、固体コードは並列計算機との親和性が高い
- 固体コードの計算時間が支配的
  高速化必須（Prg高速化、高並列化。。。）

All Rights Reserved, Copyright (c) RIKEN 2007