

東京大学本郷キャンパス 工学部8号館 84講義室 (地下1階)

FrontISTRの連成解析機能の 開発状況について

新領域創成科学研究科
人間環境学専攻
橋本 学

2017年12月22日
第40回FrontISTR研究会
＜FrontISTR Ver. 5.0プログラムの公開に向けて＞

発表内容

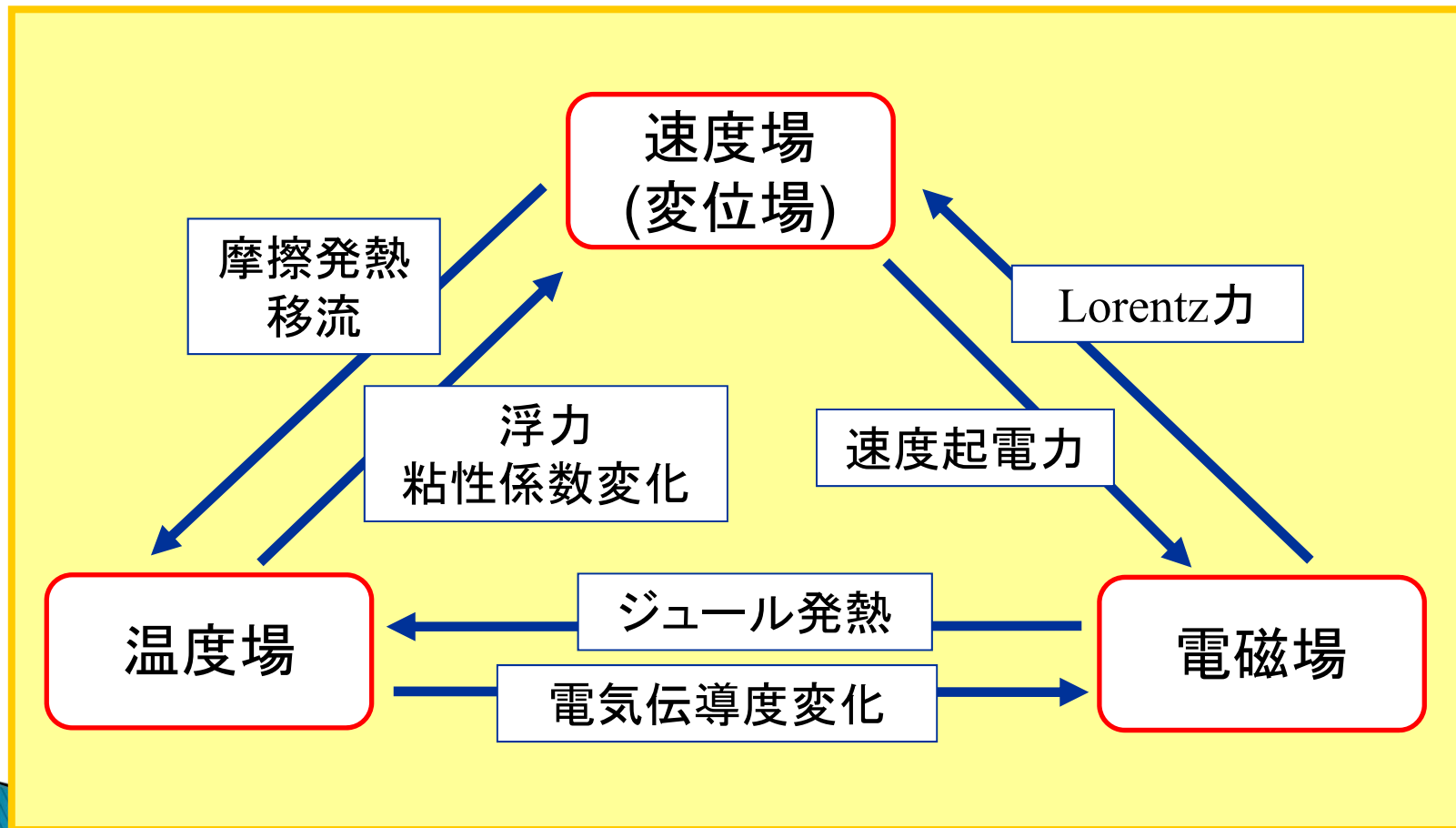
1. マルチフィジックス問題と連成手法
2. 「FrontISTR Ver. 4.6」の連成解析機能の説明
(変位場と温度場の片方向連成解析のみ)
3. 「FrontISTR Ver. 5.0」の双方向連成解析の準備
(PFループの追加, Staggered schemeの実装に向けて)

発表内容

1. マルチフィジックス問題と連成手法
2. 「FrontISTR Ver. 4.6」の連成解析機能の説明
(変位場と温度場の片方向連成解析のみ)
3. 「FrontISTR Ver. 5.0」の双方向連成解析の準備
(PFループの追加, Staggered schemeの実装に向けて)

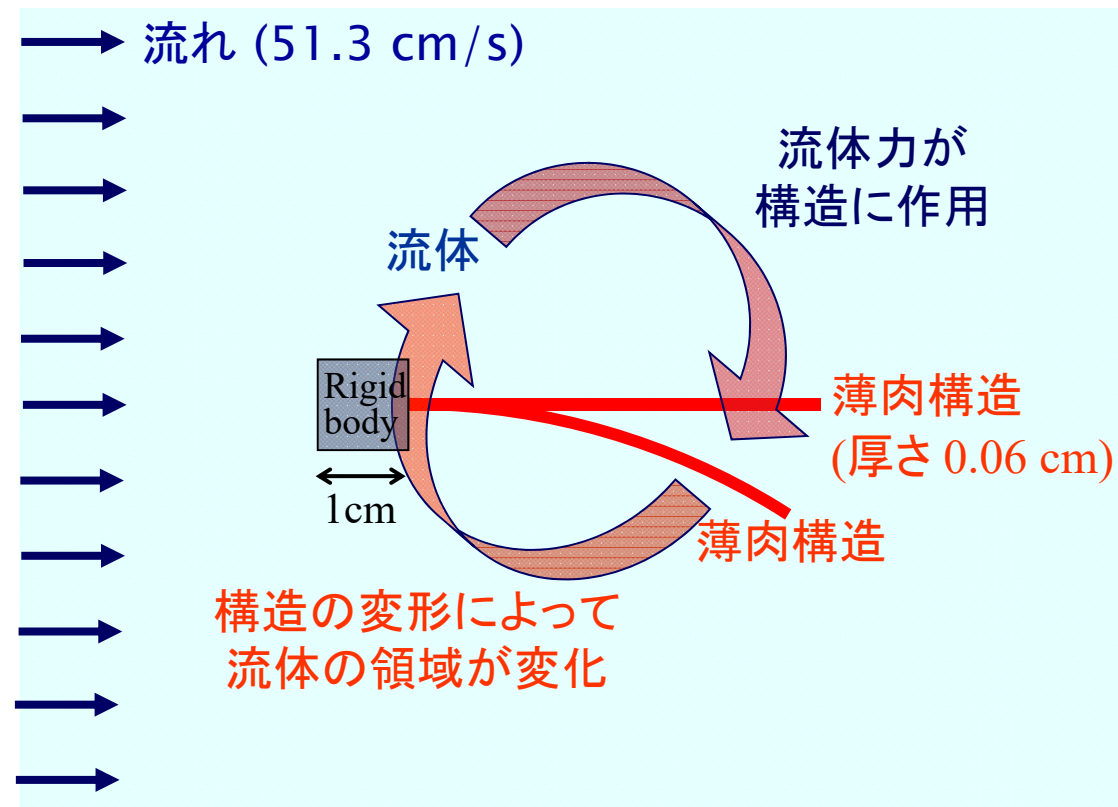
マルチフィジックス問題の例

変位場 (速度場)・温度場・電磁場の連成現象

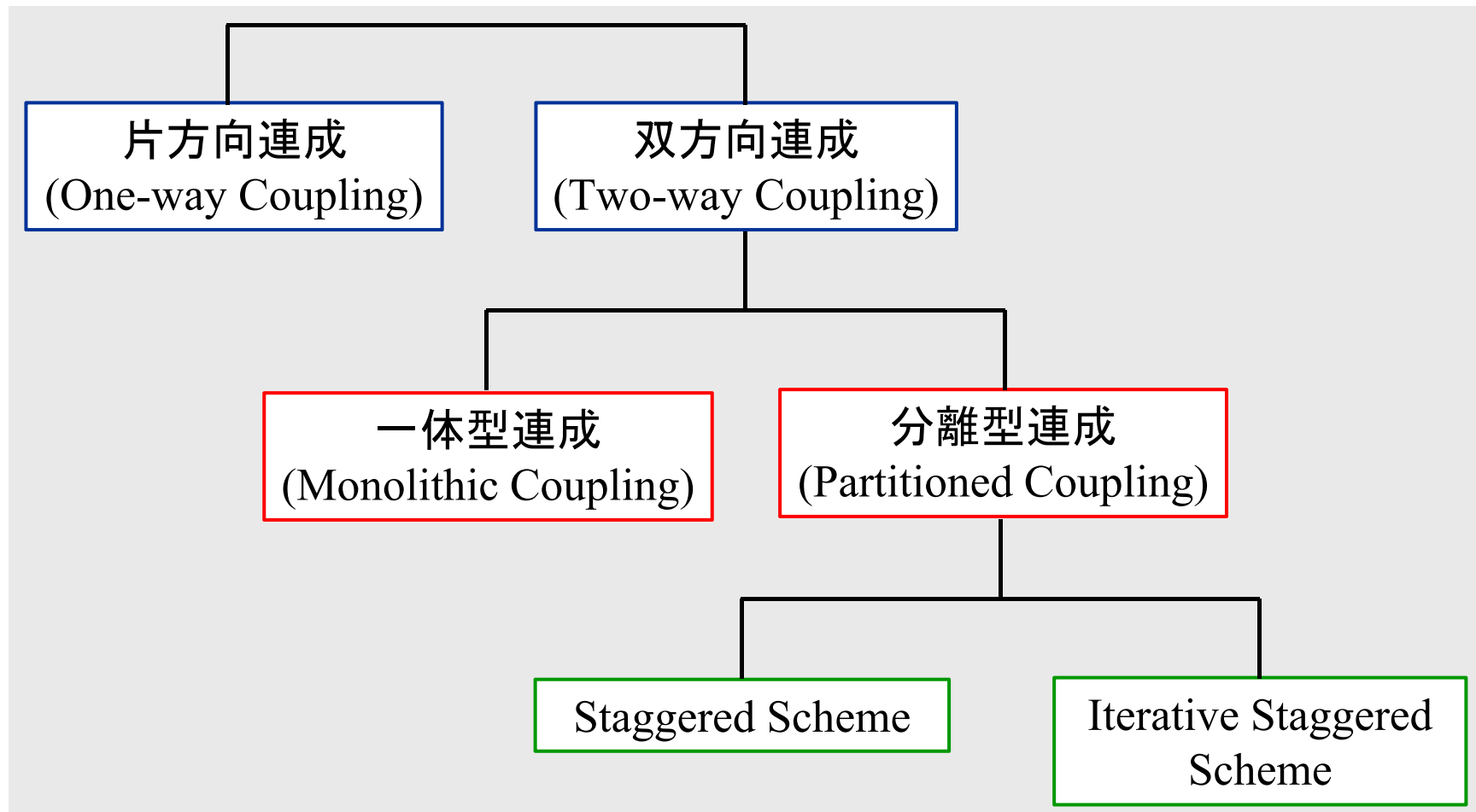


Fluid-Structure Interaction (FSI) 問題

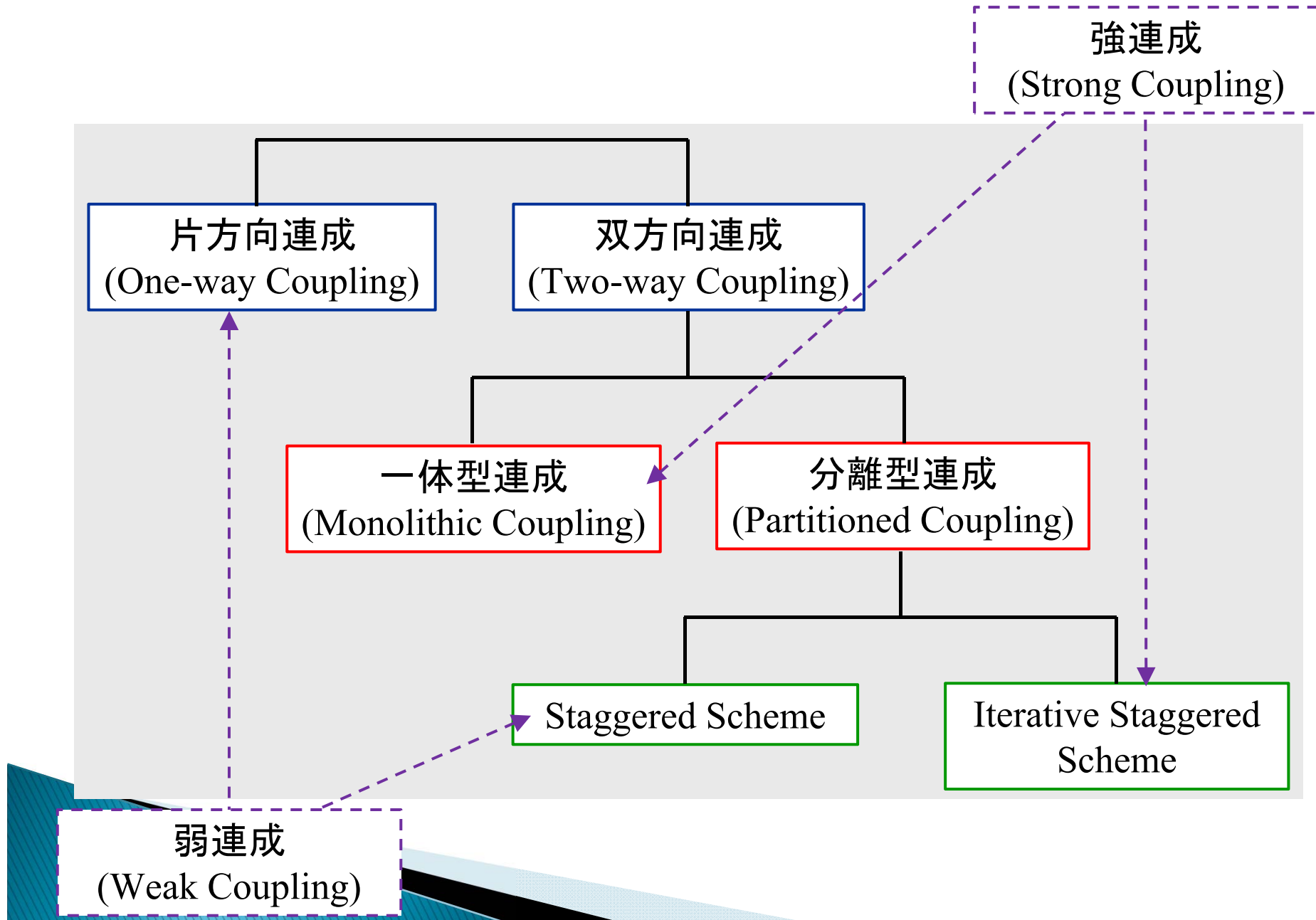
流体の流れは構造を変形，構造の変形はその周囲の流れに影響



連成手法の分類 (1/2)



連成手法の分類 (2/2)



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】

慣性力ベクトル + 内力ベクトル + 相互作用力ベクトル【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】

（非定常項, 対流項） （圧力項, 拡散項） （圧力項, 拡散項）

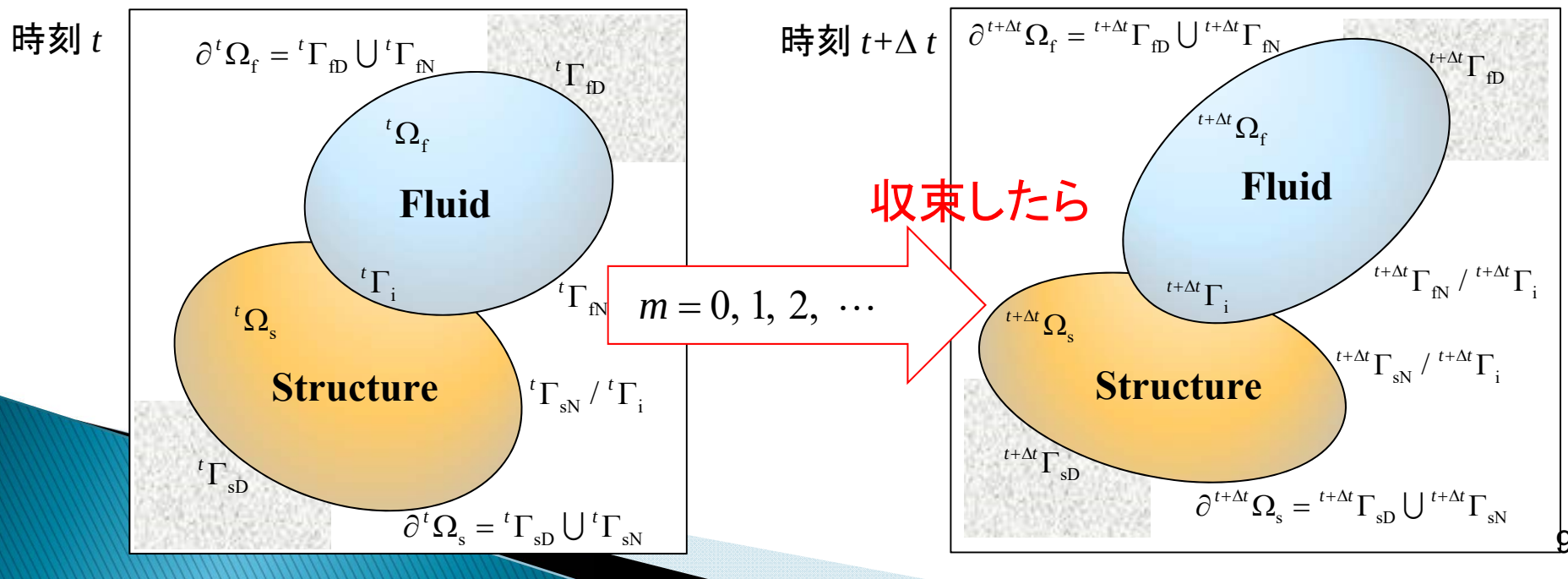
一体型連成

線形化した流体と構造の離散化式を繋ぐ

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

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

Newton-Raphson反復



分離型連成 (1/2)

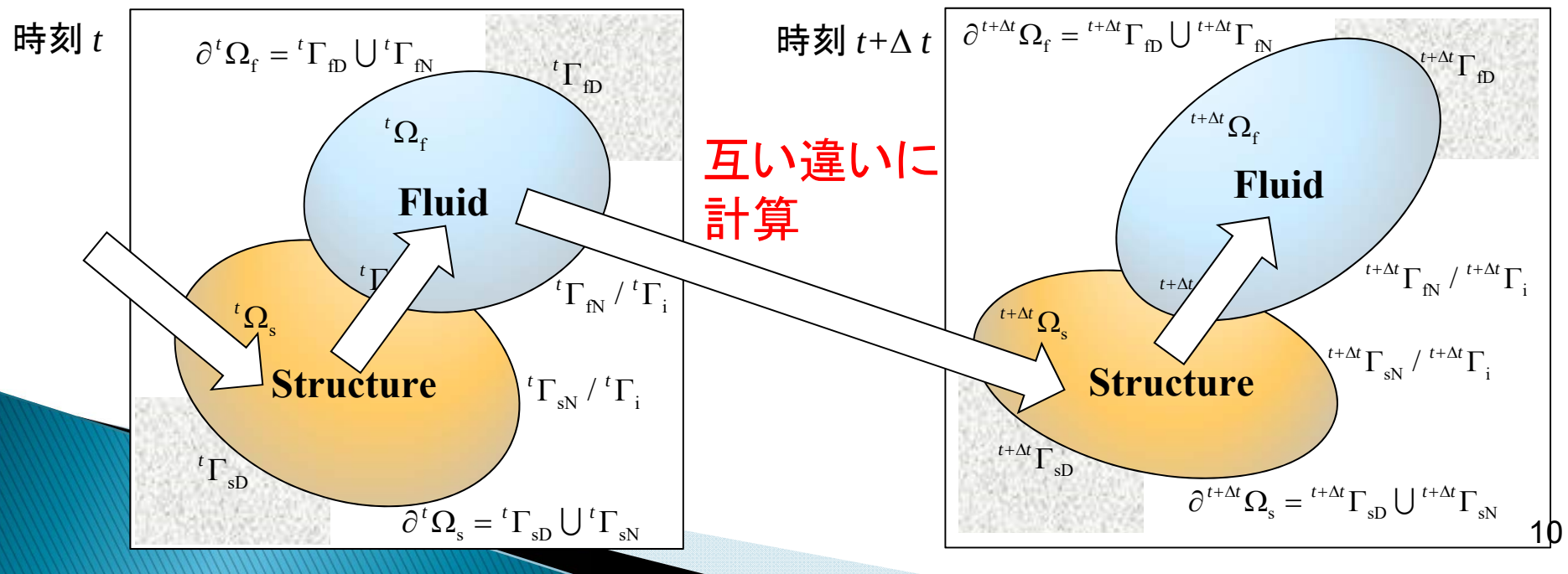
Staggered Scheme

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

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)

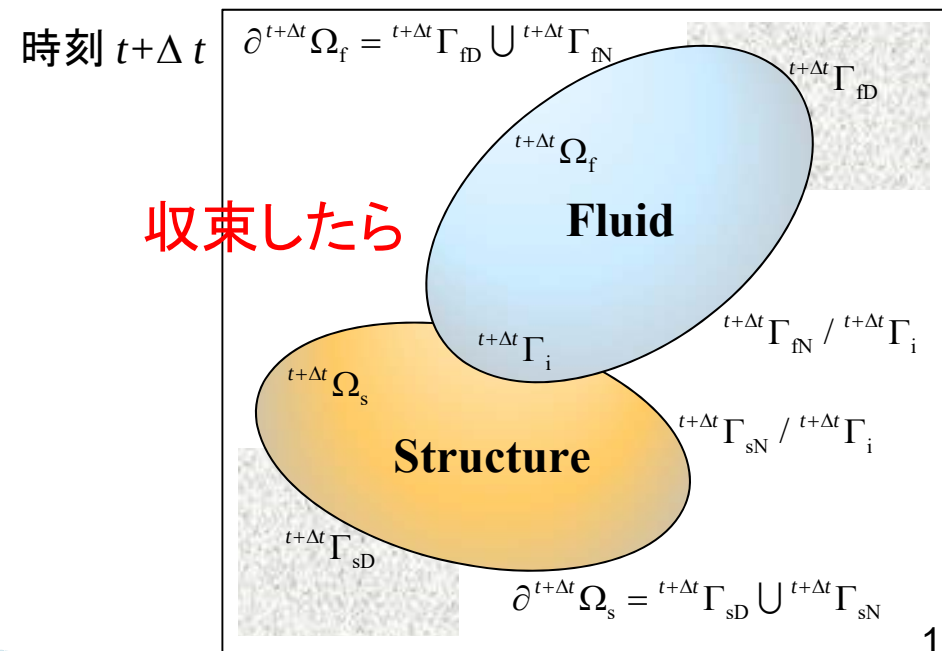
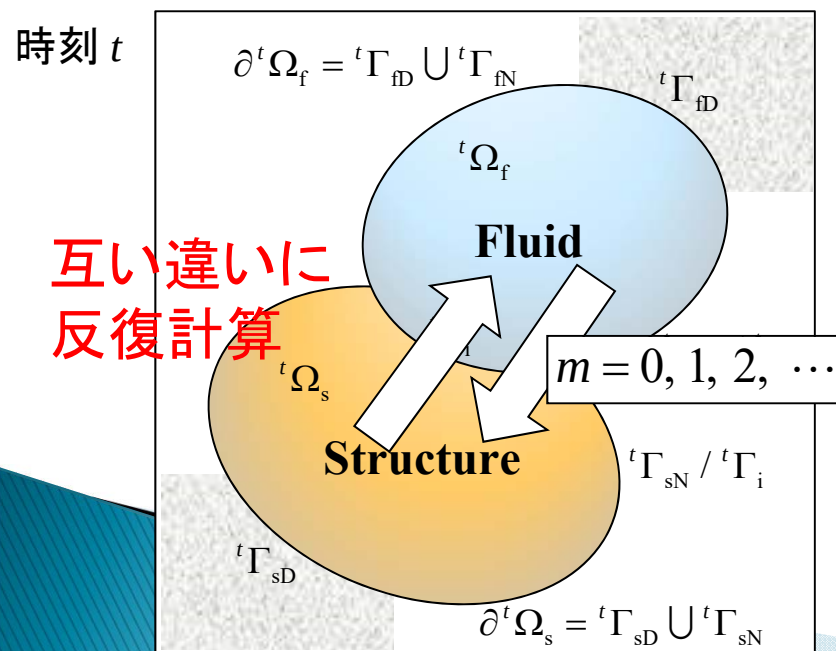
$$\mathbf{q}_s \left({}^{(m)}\mathbf{x}_s, {}^{(m-1)}\mathbf{x}_f \right) = {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_s$$

固定

時間増分ステップ内で
反復計算

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

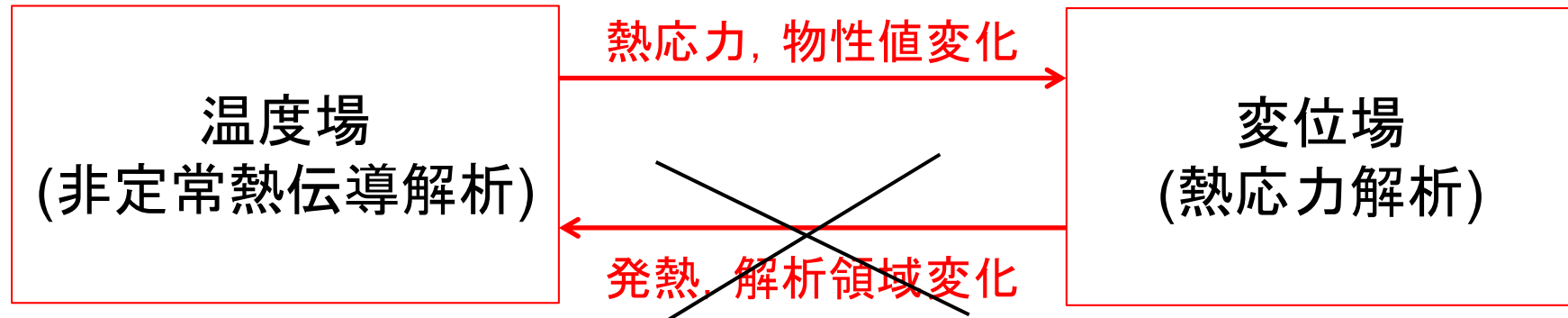
固定



発表内容

1. マルチフィジックス問題と連成手法
2. 「FrontISTR Ver. 4.6」の連成解析機能の説明
(変位場と温度場の片方向連成解析のみ)
3. 「FrontISTR Ver. 5.0」の双方向連成解析の準備
(PFループの追加, Staggered schemeの実装に向けて)

温度場と変位場の片方向連成解析 (1/3)



① 熱伝導解析

② 熱伝導解析の結果ファイルの温度データを読み込み, 熱応力解析

➤ 熱応力解析の全体制御ファイル (hecmw_ctrl.dat)

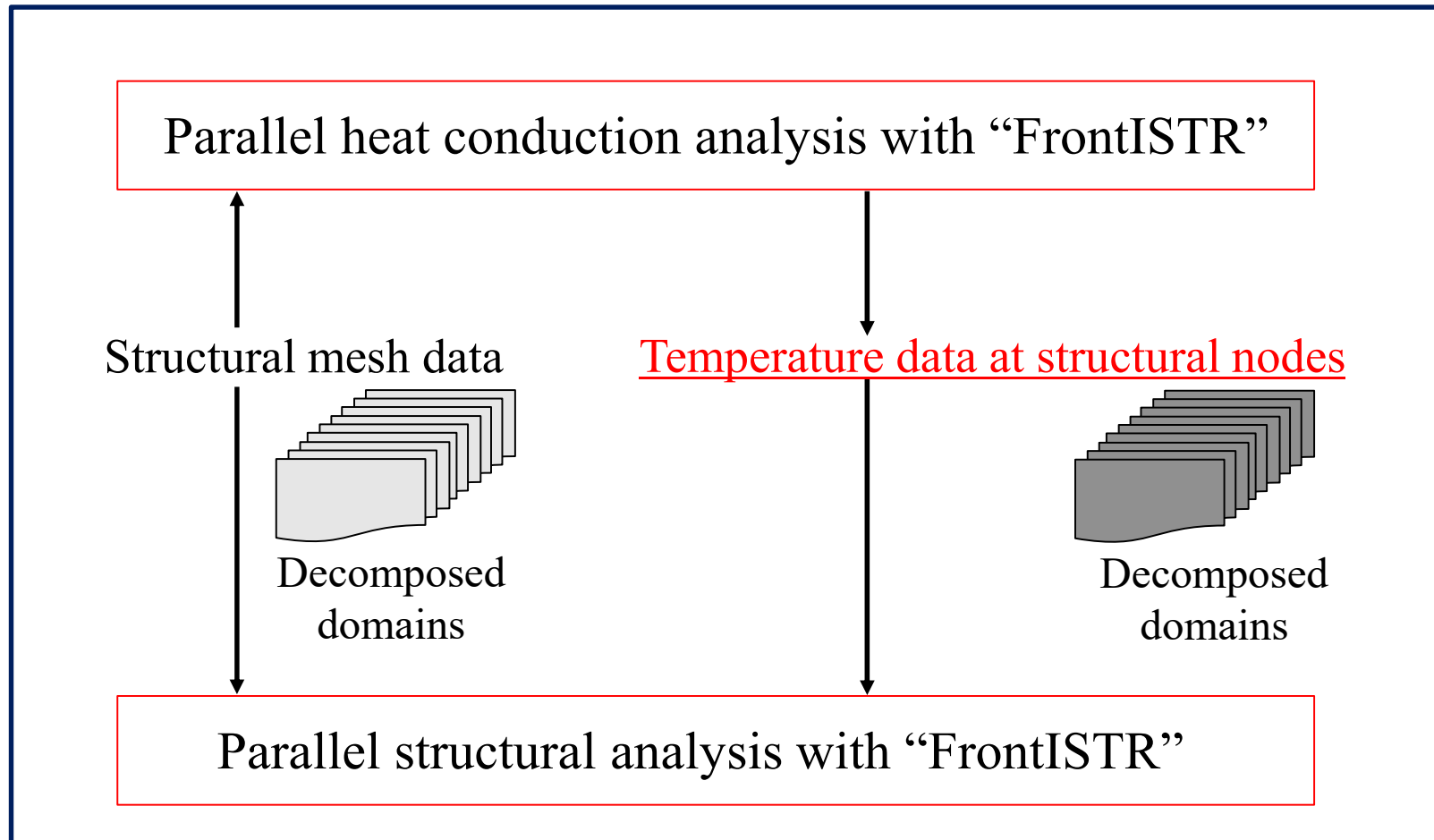
!RESULT, NAME=fstrTEMP, IO=IN

**.res (熱伝導解析の結果ファイル名)
を指定

➤ 熱応力解析の解析制御ファイル (*.cnt)

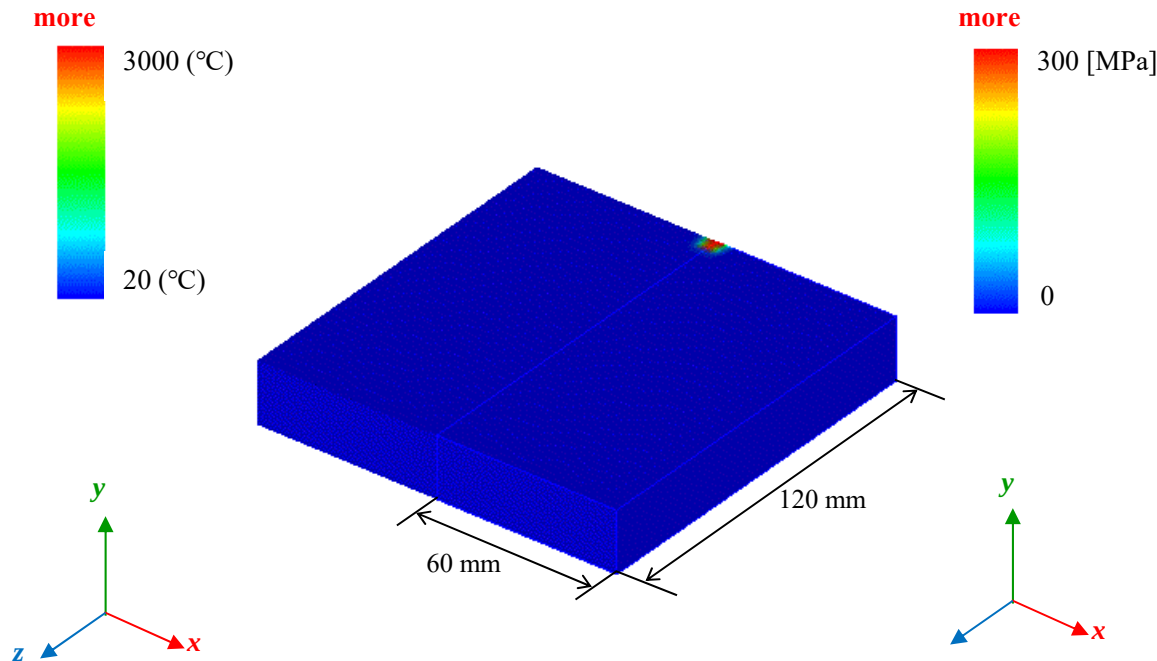
!TEMPERATURE, SSTEP=0, READRESULT=□, INTERVAL=△
を指定

温度場と変位場の片方向連成解析 (2/3)

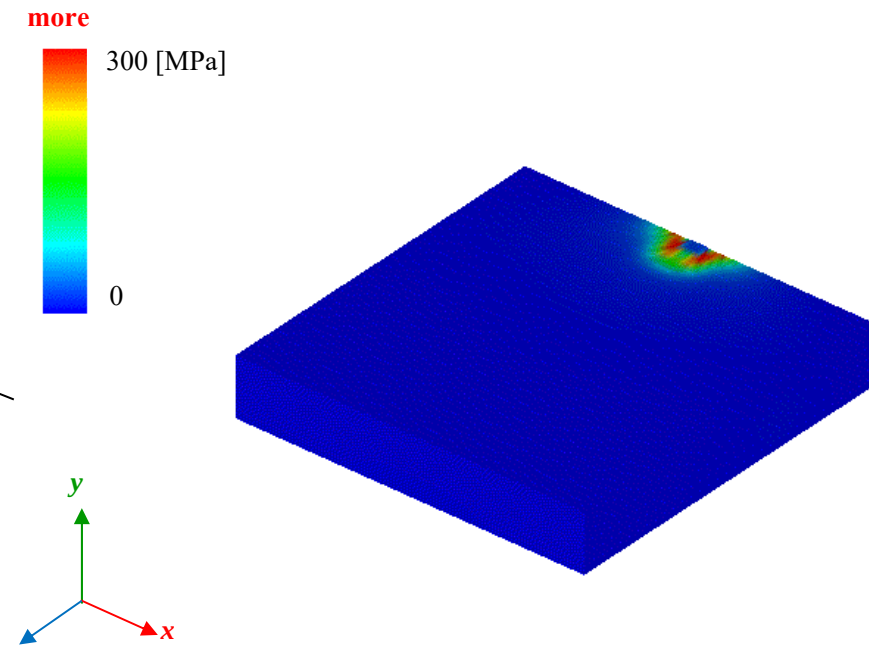


Thermal stress analysis strategy of FrontISTR.

変位場と温度場の片方向連成解析 (3/3)



(a) Temperature distribution



(b) Mises stress distribution

Thermo-elastoplastic analysis of a test specimen

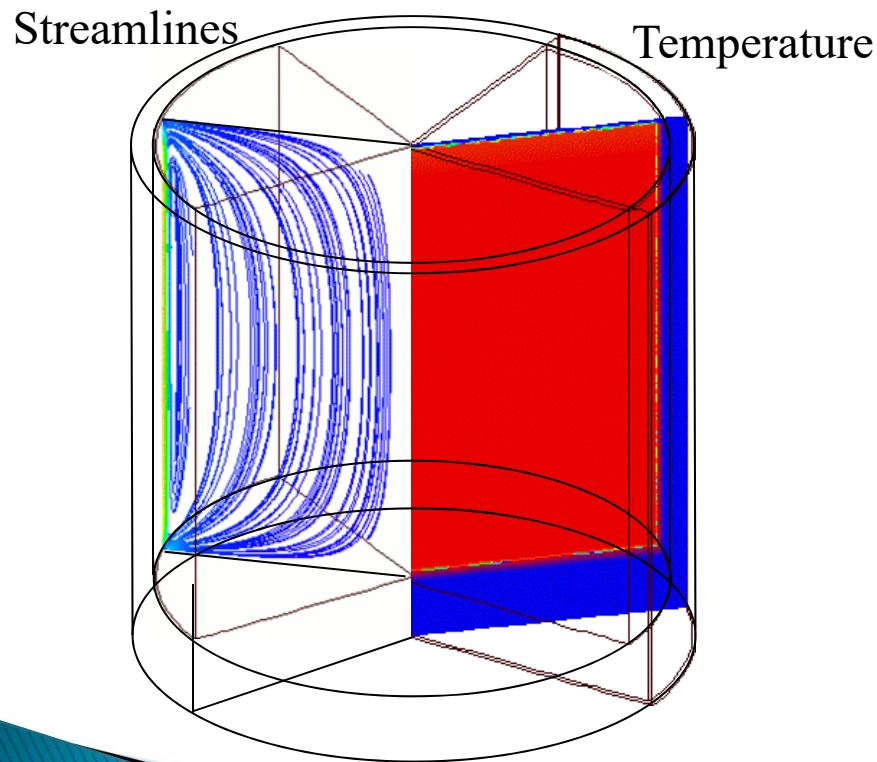


発表内容

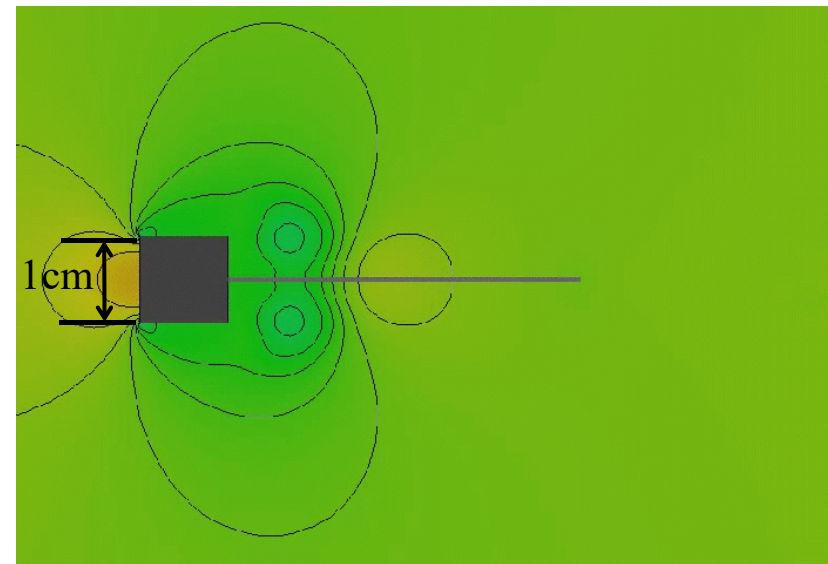
1. マルチフィジックス問題と連成手法
2. 「FrontISTR Ver. 4.6」の連成解析機能の説明
(変位場と温度場の片方向連成解析のみ)
3. 「FrontISTR Ver. 5.0」の双方向連成解析の準備
(PFループの追加, Staggered schemeの実装に向けて)

機能開発の目的

解析対象とする現象が複雑になっている背景から,
「FrontISTR Ver. 5.0」より熱・流体・構造連成解析の機能を
充実させる



対流伝熱が影響する
高温構造の熱変形



Pressure contours at $Re = 332$ until $t = 6.0$ s

流体トラクションによる
薄肉構造の大変形

「FrontISTR Ver. 4.6」での流体解析機能

- 非圧縮性流れの有限要素定式化として, SUPG/PSPG^{[1][2]}を採用
要素剛性マトリックスの作成, 全体剛性マトリックスの作成,
連立一次方程式の求解というFrontISTRプログラムへの実装が容易
- 境界条件は, 流速既定, 圧力規定, トラクションフリー
- 体積力として, 重力を与えることも可能

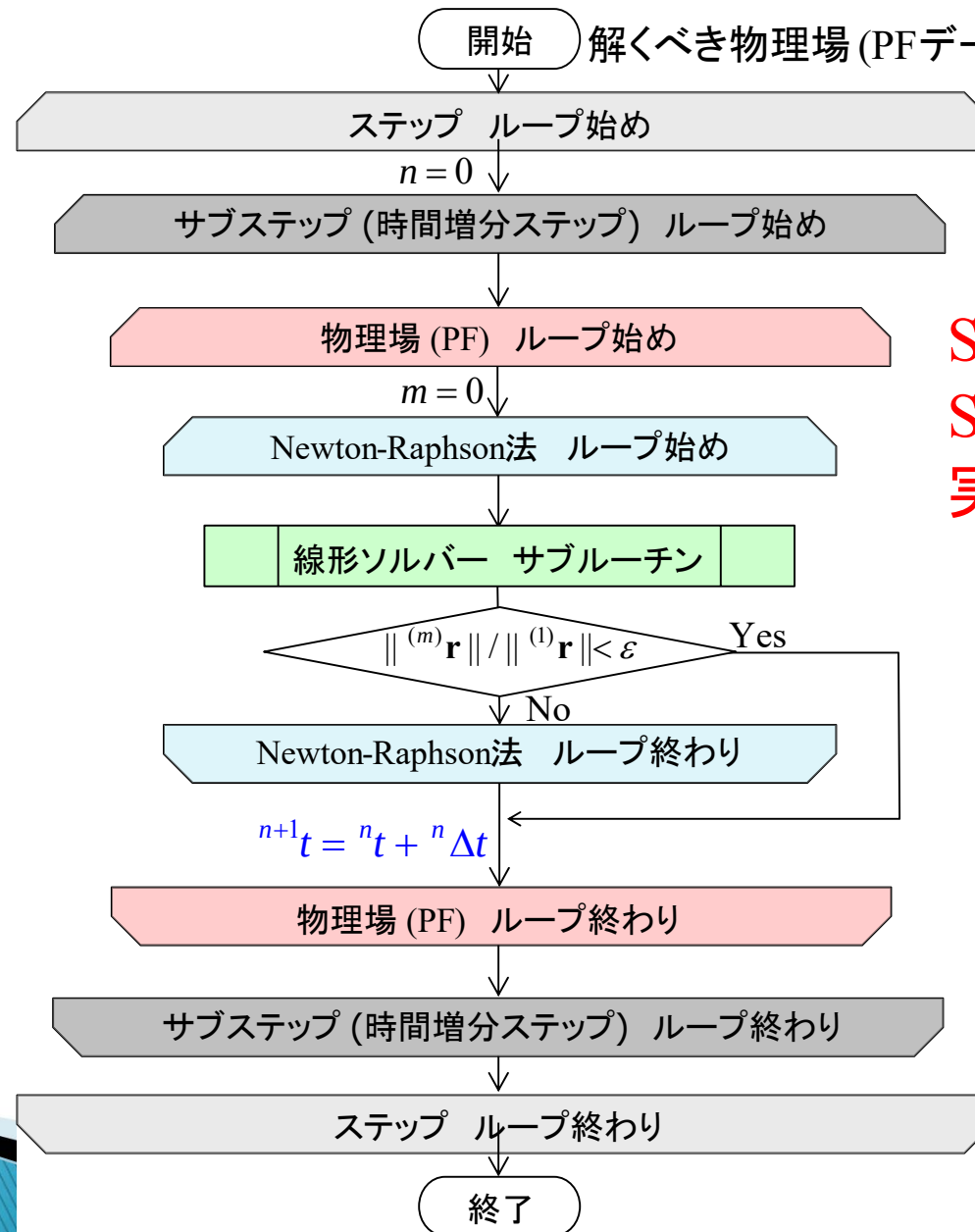
※ 未対応の機能

温度の移流拡散方程式 (熱エネルギー方程式), 自然対流,
気液二相流, Fluid-Structure Interaction, 乱流, 非Newton流体など

[1] Tezduyar, T.E. *Advanced in Applied Mechanics*, Vol.28, pp.1-44, 1991.

[2] Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.95, pp.221-242, 1992.

「FrontISTR Ver. 5.0」での双方向連成解析の準備 (1/3)



Staggered
Schemeから
実装していく

「FrontISTR Ver. 5.0」での双方向連成解析の準備 (2/3)

例1) Staggered Schemeによる熱弾塑性解析

解析制御ファイルで

```
!SOLUTION, TYPE=STATIC, NONLINEAR
```

```
!PF
```

```
DISPLACEMENT
```

```
TEMPERATURE
```

```
!OUTPUT_RES
```

```
DISPLACEMENT, ON
```

```
TEMPERATURE, ON
```

```
:
```

```
!OUTPUT_VIS
```

```
DISPLACEMENT, ON
```

```
TEMPERATURE, ON
```

```
:
```

DISPLACEMENTは
つり合い方程式

TEMPERATUREは
非定常熱伝導方程式

「FrontISTR Ver. 5.0」での双方向連成解析の準備 (3/3)

例2) 気液二相流と構造の連成解析

解析制御ファイルで

```
!SOLUTION, TYPE=DYNAMIC, NONLINEAR
```

```
!PF
```

```
DISPLACEMENT
```

```
LEVELSET
```

```
!OUTPUT_RES
```

```
DISPLACEMENT, ON
```

```
VELOCITY, ON
```

```
PRESSURE, ON
```

```
LEVELSET, ON
```

```
:
```

```
!OUTPUT_VIS
```

```
DISPLACEMENT, ON
```

```
VELOCITY, ON
```

```
PRESSURE, ON
```

```
LEVELSET, ON
```

```
:
```

要素タイプと材料タイプで
構造と流体が定義されていると
DISPLACEMENTは
流体構造一体型連成式

LEVELSETは

- レベルセットの移流方程式
- レベルセットの最初期化式
- 体積補正式

を含む

今後の展開

気液二相流, 熱対流, Fluid-Structure Interaction, マルチフィジックスへ

