

FrontISTRによる 弾塑性解析

東京大学
新領域創成科学研究科
人間環境学専攻
橋本 学

2015年1月16日

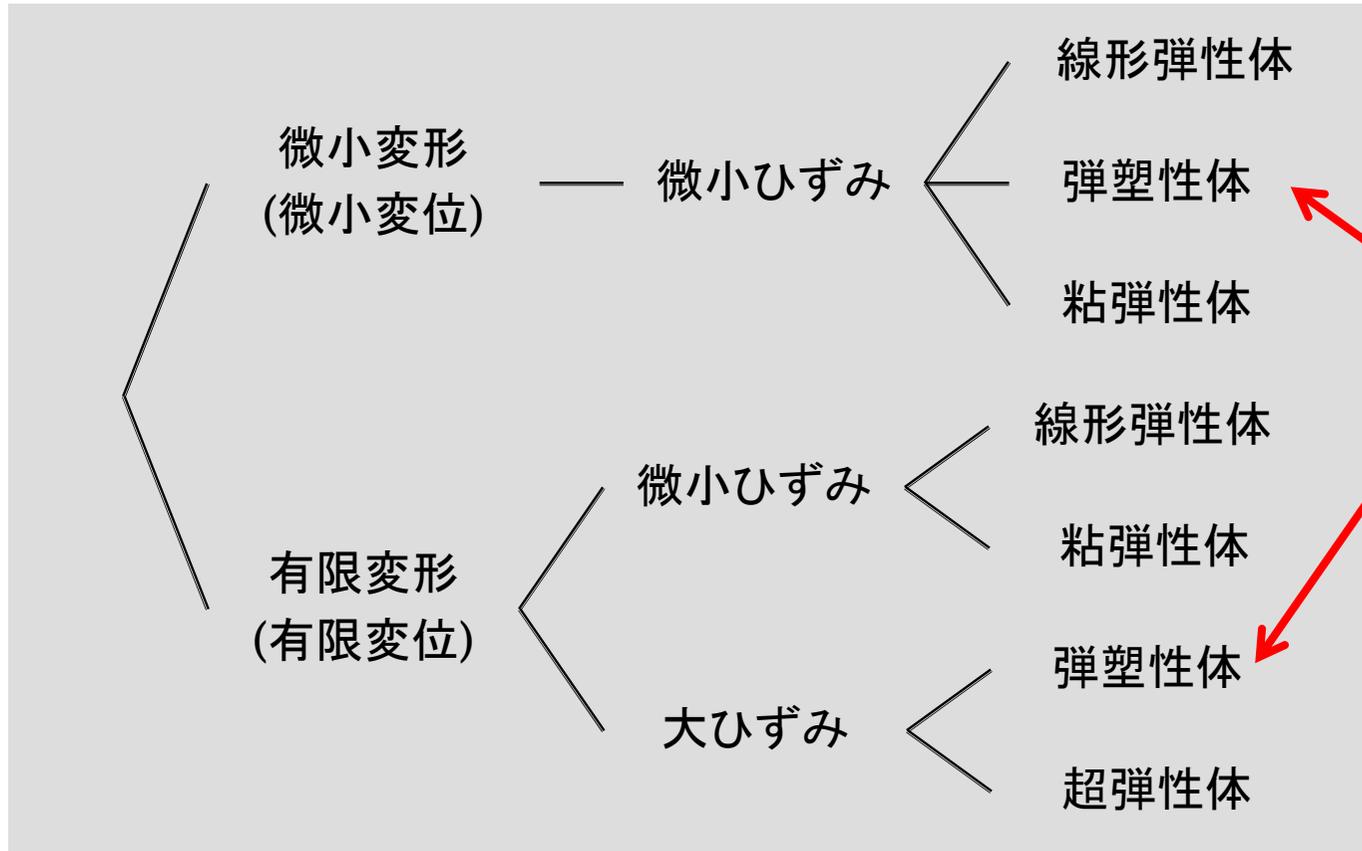
第16回FrontISTR研究会

<機能・例題・定式化・プログラム解説編「弾塑性解析」>

この講演では

- 『FrontISTRに実装されている定式化を十分に理解し、解きたい問題に対してソースコードを自由にカスタマイズ (要素タイプを追加, 材料の種類を追加, ユーザサブルーチンを追加) できるようになること』を最終目標とします
- 第3回・第7回・第10回の研究会では等方弾性体, 第11回の研究会では直交異方弾性体, 第15回の研究会では熱応力解析の定式化やソースコードの関連するサブルーチンについて紹介しました
 - 第3回FrontISTR研究会 プログラミング編, 2013/5/22開催
 - 第7回FrontISTR研究会 産業応用事例, 有限変形定式化, ユーザーの声への対応編, 2013/12/3開催
 - 第10回FrontISTR研究会 有限変形定式化と実装, Ver.4.3公開編, 2014/2/21開催
 - 第11回FrontISTR研究会 機能・例題・定式化・プログラム解説編 (直交異方弾性体を中心に), 2014/7/30開催
 - 第15回FrontISTR研究会 機能・例題・定式化・プログラム解説編 (熱応力解析／弾塑性解析), 2014/10/31開催
- 今回は, FrontISTRに実装されている弾塑性解析に焦点を当てます

静応力解析の分類



講演では、
FrontISTRに
実装されている
弾塑性解析機能を
説明します
(前回と重複する
部分もあります)

有限変形

$${}^t\mathbf{E} = \frac{1}{2} \left\{ ({}^0\nabla \otimes {}^t\mathbf{u}) + ({}^0\nabla \otimes {}^t\mathbf{u})^T + ({}^0\nabla \otimes {}^t\mathbf{u}) \cdot ({}^0\nabla \otimes {}^t\mathbf{u})^T \right\}$$

ひずみ

変位こう配の2次項がある

大ひずみ

$${}^t\mathbf{S} = f({}^0\mathbf{E}, {}^t\mathbf{E} \cdot {}^t\mathbf{E}, \dots)$$

応力 ひずみの2次以上の項がある

記号の説明

t	時刻 [s]
N	次元 (3次元: $N = 3$)
Ω	有界領域 [m^N]
Γ	境界 [m^{N-1}]
\mathbf{x}	物質点の位置ベクトル [m]
∇	ナブラ [1/m]
\mathbf{u}	変位 [m]
\mathbf{t}	トラクション [Pa]
\mathbf{b}	単位質量当たりの体積力 [N/kg]
ρ	密度 [kg/m^3]
\mathbf{n}	外向き単位法線ベクトル [-]

時刻 t の物理量

$${}^t_0 \mathbf{E} = \frac{1}{2} \left\{ ({}^0 \nabla \otimes {}^t \mathbf{u}) + ({}^0 \nabla \otimes {}^t \mathbf{u})^T + ({}^0 \nabla \otimes {}^t \mathbf{u}) \cdot ({}^0 \nabla \otimes {}^t \mathbf{u})^T \right\}$$

基準となる時刻が時刻0の意味

a, b	スカラー
\mathbf{a}, \mathbf{b}	ベクトル
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{a} \otimes \mathbf{b}$	2階のテンソル
$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_i b_i$	
$\mathbf{A} : \mathbf{B} = A_{ij} B_{ij}$	

FrontISTRによる弾塑性解析

目次

「解析機能／サンプル例題／定式化／プログラム」

0. 基礎知識

1. 解析機能とユーザマニュアル該当箇所

2. サンプル例題 (チュートリアル例題5)

3. 有限要素法定式化

4. プログラム解説

FrontISTRによる弾塑性解析

目次

「解析機能／サンプル例題／定式化／プログラム」

0. 基礎知識

1. 解析機能とユーザマニュアル該当箇所
2. サンプル例題 (チュートリアル例題5)
3. 有限要素法定式化
4. プログラム解説

単軸方向引張試験 (1)

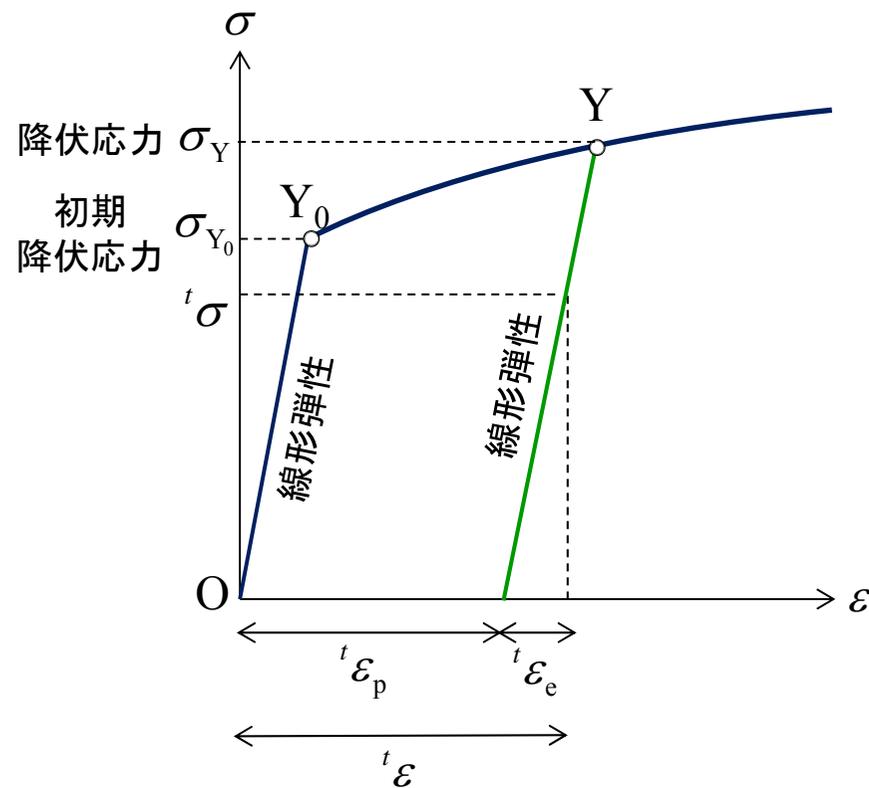


Fig. Uniaxial stress-strain curve

Y_0 : 初期降伏点

Y : 後続降伏点

$Y_0 \rightarrow Y$: 降伏応力の増加 (硬化)

仮定

- 比例限度と弾性限度は降伏応力に一致させる (Y_0 点)
- 後続降伏応力は除荷開始点の応力に一致させる (Y点)
- 塑性変形は結晶のすべりによって生じるから、塑性変形によって物体の体積は変化しない

単軸方向引張試験 (2)

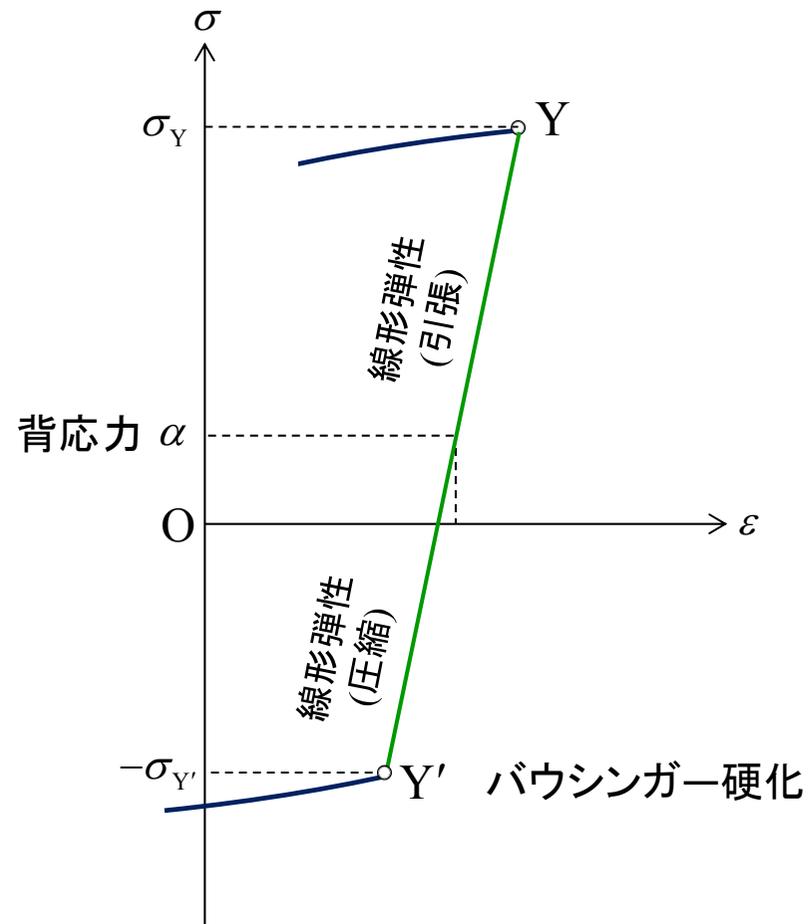


Fig. Uniaxial stress-strain curve

弾塑性構成則モデル

- 弾塑性ひずみ分解 (加算分解できると仮定)

全ひずみテンソル [-]

$${}^t\boldsymbol{\varepsilon} = \underline{{}^t\boldsymbol{\varepsilon}_e} + \underline{{}^t\boldsymbol{\varepsilon}_p} \quad \dots(1)$$

弾性ひずみテンソル [-] 塑性ひずみ (永久ひずみ) テンソル[-]

- 速度形弾塑性構成則

$$\begin{aligned} {}^t\dot{\boldsymbol{\sigma}} &= \mathbf{C}_e : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_e \\ &= \underline{\mathbf{C}_{ep}} : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad \dots(2) \end{aligned}$$

→ 塑性変形の情報から弾塑性係数を定める

- 降伏関数 (降伏する条件)
- 塑性流れ則 (塑性ひずみの発展)
- 硬化則 (降伏応力の発展)

多軸応力状態の降伏条件を
単軸応力状態の降伏条件で近似します

速度形弾塑性構成則 (1)

応力速度 [Pa/s] 弾性ひずみ速度 [1/s]

$$\begin{aligned} {}^t\dot{\boldsymbol{\sigma}} &= \mathbf{C}_e : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_e \\ &= \mathbf{C}_e : ({}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p) \\ &= \underline{{}^t\mathbf{C}_{ep}} : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad \dots(3) \end{aligned}$$

弾塑性係数 [Pa]

弾性定数 [Pa]

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_e &= (C_e)_{ijkl} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j \otimes \mathbf{e}_k \otimes \mathbf{e}_l \\ &= \left\{ \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right\} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j \otimes \mathbf{e}_k \otimes \mathbf{e}_l \quad \dots(4) \end{aligned}$$

Lamé定数 [Pa]

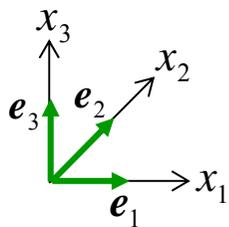


Fig. Cartesian coordinates

$${}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2} \left\{ {}^t\nabla \otimes {}^t\dot{\mathbf{u}} + ({}^t\nabla \otimes {}^t\dot{\mathbf{u}})^T \right\} \quad \dots(5)$$

全ひずみ速度

降伏関数 (1) : 降伏する条件

$$F({}^t\sigma, \sigma_Y) \leq 0 \quad \dots(6)$$

降伏関数

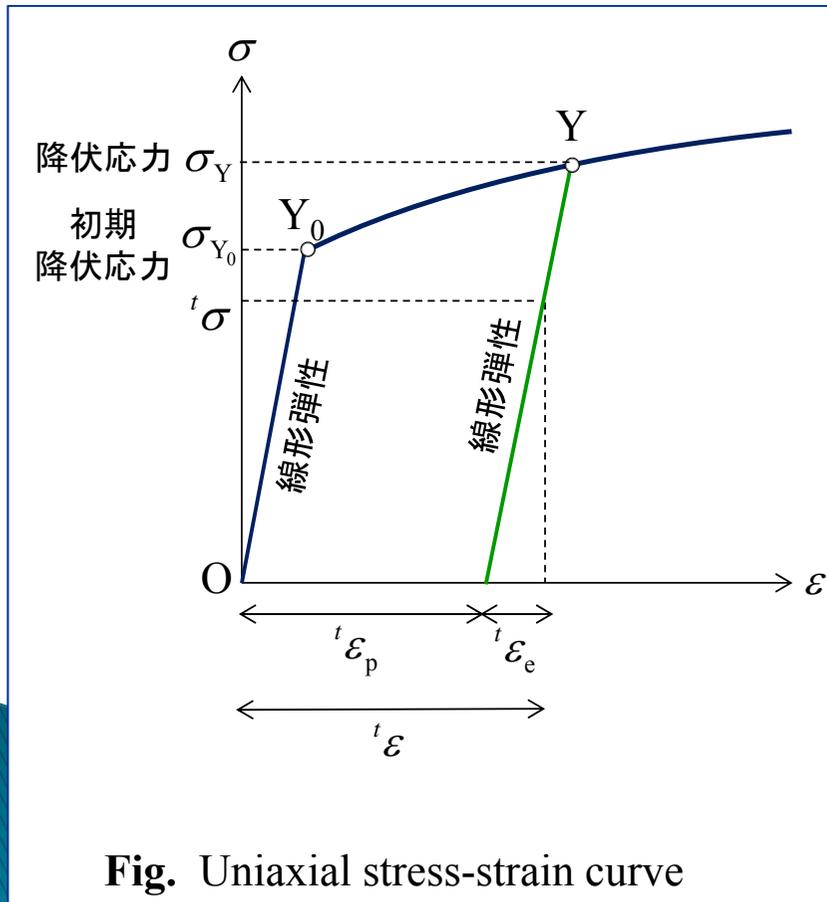


Fig. Uniaxial stress-strain curve

弾性域

$$F({}^t\sigma, \sigma_Y) < 0 \quad \dots(7.a)$$

$$\dot{\epsilon}_p = \mathbf{0} \quad \dots(7.b)$$

弾性域の境界 (Y点)

$$F({}^t\sigma, \sigma_Y) = 0 \quad \dots(8.a)$$

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_p = \mathbf{0} & \text{(弾性除荷)} \\ \dot{\epsilon}_p \neq \mathbf{0} & \text{(塑性負荷)} \end{cases} \quad \dots(8.b)$$

降伏関数 (2) : von Misesの降伏関数

Mises応力が降伏応力に達すると塑性変形が始まる

$$F({}^t\boldsymbol{\sigma}, \sigma_Y) = {}^t\sigma_{\text{Mises}} - \sigma_Y \leq 0 \quad \dots(9)$$

Mises応力

$$\begin{aligned} {}^t\sigma_{\text{Mises}} &= \sqrt{3 J_2({}^t\boldsymbol{\sigma})} \\ &= \sqrt{-3 I_2({}^t\boldsymbol{\sigma}')} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \curvearrowright J_2({}^t\boldsymbol{\sigma}) = -I_2({}^t\boldsymbol{\sigma}') \quad \dots(11) \\ \leftarrow \end{array}$$

\dots(10)

偏差応力の第2不変量

$$\begin{aligned} I_2({}^t\boldsymbol{\sigma}') &= \frac{1}{2} \left\{ (\text{tr } {}^t\boldsymbol{\sigma}')^2 - \text{tr}({}^t\boldsymbol{\sigma}' \cdot {}^t\boldsymbol{\sigma}') \right\} \\ &= -\frac{1}{2} \text{tr}({}^t\boldsymbol{\sigma}' \cdot {}^t\boldsymbol{\sigma}') \quad \dots(12) \end{aligned}$$

(※) FrontISTRでは3種類の降伏関数 (Mises, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager) を使用できます

降伏関数 (3) : Mohr-Coulombの降伏関数

巨視的な塑性現象は材料を構成する粒子間の摩擦に起因することを示している、Coulombの摩擦則を一般化したもの

$$F({}^t\boldsymbol{\sigma}, \sigma_Y) = {}^t\sigma_1 - {}^t\sigma_3 + ({}^t\sigma_1 + {}^t\sigma_3) \sin \phi - 2c \cos \phi \leq 0 \quad \dots(13)$$

ϕ 内部摩擦角

c 粘着力

(※) FrontISTRでは3種類の降伏関数 (Mises, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager) を使用できます

降伏関数 (4) : Drucker-Pragerの降伏関数

Mohr-Coulombの降伏面を滑らかな曲面で近似したものであり、
偏差応力の第2不変量と静水圧の組み合わせが臨界状態に至るときに
塑性変形が始まる

$$F({}^t\boldsymbol{\sigma}, {}^t\kappa) = \sqrt{J_2({}^t\boldsymbol{\sigma})} + \frac{\eta(\phi)}{3} \text{tr } {}^t\boldsymbol{\sigma} - {}^t c \xi(\phi) \leq 0 \quad \cdots(14)$$

$$\xi(\phi) = \frac{6 \cos \phi}{\sqrt{3} (3 + \sin \phi)}$$

$$\eta(\phi) = \frac{6 \sin \phi}{\sqrt{3} (3 + \sin \phi)}$$

Mohr-Coulombの降伏面の
内側の稜線に一致させた場合

ϕ 内部摩擦角

${}^t c$ 粘着力 $c({}^t\bar{\varepsilon}_p) = c_0 + \kappa({}^t\bar{\varepsilon}_p)$

(※) FrontISTRでは3種類の降伏関数を使用できます

塑性流れ則 (1): 塑性ひずみの発展

塑性流れ則

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p = \dot{\gamma} \boldsymbol{m}$$

流れベクトル[-]

$$= \dot{\gamma} \frac{\partial \Theta}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$$

塑性ポテンシャル [-] $\cdots(15)$

$$\dot{\gamma} \geq 0 \quad \cdots(16)$$

塑性乗数 [1/s]

$$\dot{\gamma} F(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_Y) = 0 \quad \cdots(17)$$

相補性条件

$$\begin{cases} F(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_Y) < 0 \Rightarrow \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p = 0 \Rightarrow \dot{\gamma} = 0 \\ \dot{\gamma} > 0 \Rightarrow \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p \neq 0 \Rightarrow F(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_Y) = 0 \end{cases}$$

$\cdots(18)$

$$\begin{cases} F(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_Y) \leq 0 \\ \dot{\gamma} \geq 0 \\ \dot{\gamma} F(\boldsymbol{\sigma}, \sigma_Y) = 0 \end{cases}$$

塑性流れ則 (2): 関連流れ則

塑性ポテンシャル Θ と
降伏関数 F が一致すると仮定
(関連流れ則)

$${}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p = {}^t\dot{\gamma} \frac{\partial F}{\partial {}^t\boldsymbol{\sigma}} \quad \dots(19)$$

$$\begin{aligned} {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p : d^t\boldsymbol{\sigma}^* &= \left({}^t\dot{\gamma} \frac{\partial F}{\partial {}^t\boldsymbol{\sigma}} \right) : d^t\boldsymbol{\sigma}^* \\ &= {}^t\dot{\gamma} \left(\frac{\partial F}{\partial {}^t\boldsymbol{\sigma}} : d^t\boldsymbol{\sigma}^* \right) \\ &= \underline{{}^t\dot{\gamma} dF^* = 0} \quad \dots(20) \end{aligned}$$

垂直性の条件

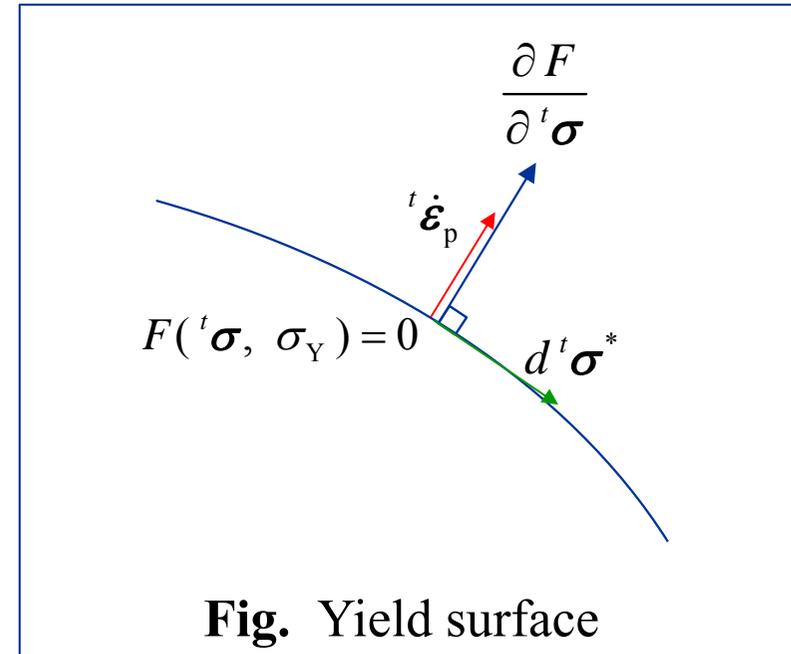


Fig. Yield surface

降伏局面が塑性ひずみ速度と
垂直になる

(※) FrontISTRには、関連流れ則が実装されています
非関連流れ則は使用できません

硬化則：降伏応力の発展

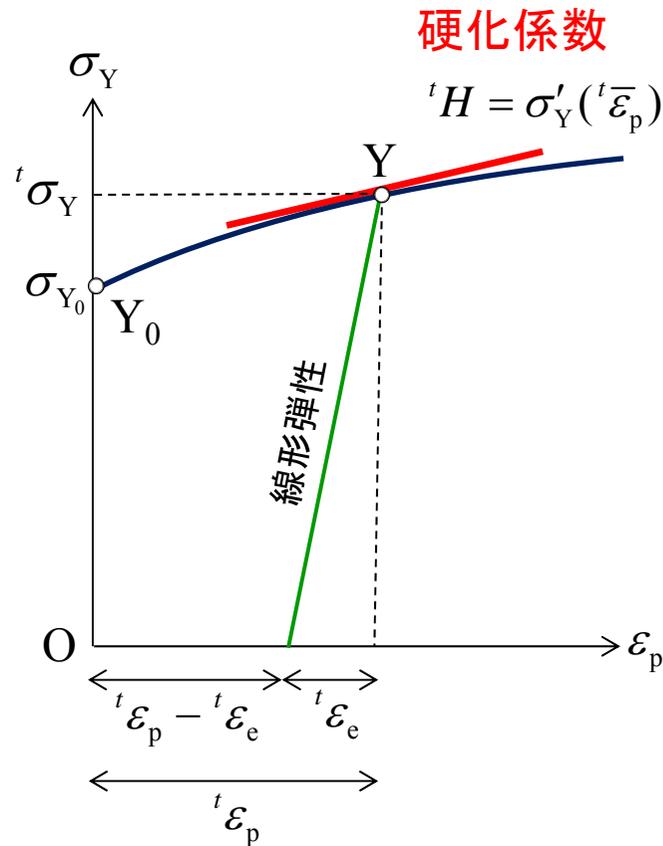
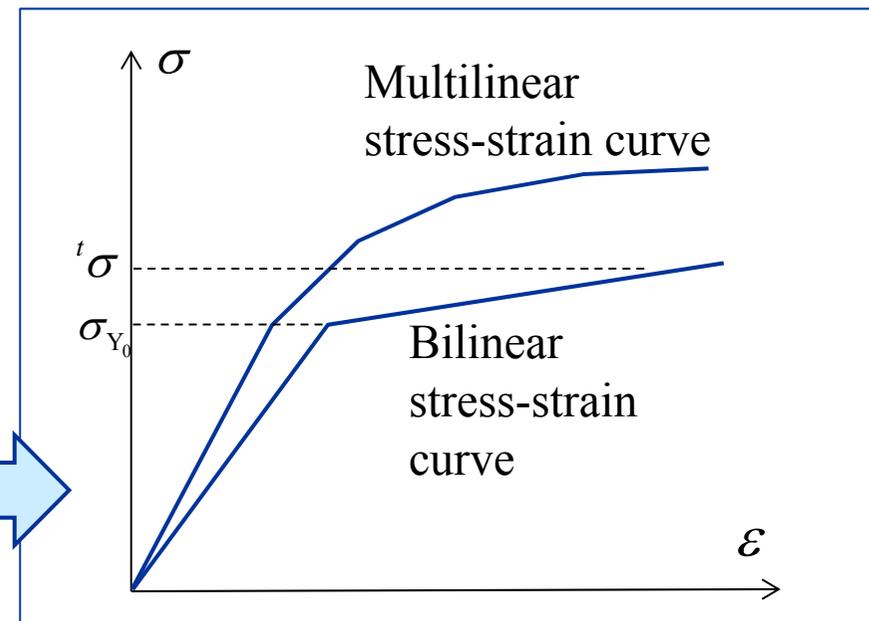


Fig. Uniaxial stress-strain curve

$${}^t\sigma_Y = \sigma_Y({}^t\bar{\varepsilon}_p) \quad \dots(21)$$

軸方向累積塑性ひずみ

$${}^t\dot{\varepsilon}_p = {}^t\dot{\gamma} \quad \dots(22)$$



(※) FrontISTRでは、4種類の硬化則 (Bilinear, Multilinear, Swift, Ramberg-Osgood) を使用できます

速度形弾塑性構成則 (2)

$$\dot{F} = \frac{\partial F}{\partial {}^t\boldsymbol{\sigma}} : {}^t\dot{\boldsymbol{\sigma}} + \frac{\partial F}{\partial {}^t\sigma_Y} {}^t\dot{\sigma}_Y$$

$$= {}^t\mathbf{A} : \left\{ \mathbf{C}_e : ({}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p) \right\} - {}^t\dot{\gamma} {}^t b$$

$$= {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : ({}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - {}^t\dot{\gamma} {}^t\mathbf{A}) - {}^t\dot{\gamma} {}^t b = 0$$

$${}^t\mathbf{A} = \frac{\partial F}{\partial {}^t\boldsymbol{\sigma}} \quad \dots(24)$$

$${}^t b = -\frac{\partial F}{\partial {}^t\sigma_Y} \frac{{}^t\dot{\sigma}_Y}{{}^t\dot{\gamma}}$$

$$= -\frac{\partial F}{\partial {}^t\sigma_Y} {}^t H \frac{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p}{{}^t\dot{\gamma}}$$

$${}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - {}^t\dot{\gamma} {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A} = {}^t\dot{\gamma} {}^t b$$

$$\therefore {}^t\dot{\gamma} = \frac{{}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{{}^t b + {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A}} \quad \dots(23)$$

$$= -\frac{\partial F}{\partial {}^t\sigma_Y} {}^t H \quad \dots(25)$$

速度形弾塑性構成則 (3)

$$\begin{aligned}
 {}^t\dot{\sigma} &= \mathbf{C}_e : ({}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p) \\
 &= \mathbf{C}_e : ({}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - {}^t\dot{\gamma} {}^t\mathbf{A}) \\
 &= \mathbf{C}_e : \left({}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \frac{{}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{{}^tb + {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A}} {}^t\mathbf{A} \right) \quad \leftarrow {}^t\dot{\gamma} = \frac{{}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{{}^tb + {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A}} \quad \dots(27) \\
 &= \mathbf{C}_e : \left({}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \frac{{}^t\mathbf{A} \otimes {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{{}^tb + {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A}} \right) \\
 &= \mathbf{C}_e : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \frac{\mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A} \otimes {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e}{{}^tb + {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A}} : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \\
 &= \left(\mathbf{C}_e - \frac{\mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A} \otimes {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e}{{}^tb + {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A}} \right) : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad \leftarrow {}^t\mathbf{C}_{ep} = \mathbf{C}_e - \frac{\mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A} \otimes {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e}{{}^tb + {}^t\mathbf{A} : \mathbf{C}_e : {}^t\mathbf{A}} \quad \dots(28) \\
 &= \mathbf{C}_{ep} : {}^t\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad \dots(26)
 \end{aligned}$$

FrontISTRによる弾塑性解析

目次

「解析機能／サンプル例題／定式化／プログラム」

0. 基礎知識

1. 解析機能とユーザマニュアル該当箇所

2. サンプル例題 (チュートリアル例題5)

3. 有限要素法定式化

4. プログラム解説

ユーザマニュアル該当箇所について

- FrontISTRの解析機能を確認するため、FrontISTRのユーザマニュアル (ファイル名「[FrontISTR_user_manual_Ver35.pdf](#)」) の該当箇所を見ます
- FrontISTRソースコード「FrontISTR_V43_p1.tar.gz」を解凍すると、ディレクトリ「FrontISTR_V43」ができます
FrontISTRのユーザマニュアルはディレクトリ「[FrontISTR_V43/doc](#)」内にあります
- FrontISTRのユーザマニュアルの[121ページ～123ページ](#)に弾塑性解析の記述があります

解析機能とユーザマニュアル該当箇所

(4) IPLASTIC (2-2-2)

塑性材料の定義

パラメータ

YIELD = MISES (Default 値)、Mohr-Coulomb、DRUCKER-PRAGER、USER

HARDEN = BILINEAR (Default 値)、MULTILINEAR、SWIFT、RAMBERG-OSGOOD、
KINEMATIC、COMBINED

DEPENDENCIES = 0 (Default 値) / 1

2 行目以降

・ YIELD = MISES の場合 (Default 値)

* HARDEN = BILINEAR (Default 値) の場合

(2 行目) YIELD0, H

* HARDEN = MULTILINEAR の場合

(2 行目) YIELD, PSTRAIN, Temperature

(3 行目) YIELD, PSTRAIN, Temperature

...続く

* HARDEN = SWIFT の場合

(2 行目) ϵ_0 , K, n

* HARDEN = RAMBERG-OSGOOD の場合

(2 行目) ϵ_0 , D, n

* HARDEN = KINEMATIC の場合

(2 行目) YIELD0, C

* HARDEN = COMBINED の場合

(2 行目) YIELD0, H, C

・ YIELD = Mohr-Coulomb または Drucker-Prager の場合

* HARDEN = BILINEAR, (Default 値) の場合

(2 行目) c, FAI, H

* HARDEN = MULTILINEAR の場合

(2 行目) FAI

(3 行目) PSTRAIN, c

(4 行目) PSTRAIN, c

...続く

HARDEN = 他は無視され、Default 値 (BILINEAR) になる。

変数名	属性	内容
YIELD0	R	初期降伏応力
H	R	硬化係数
PSTRAIN	R	塑性ひずみ
YIELD	R	降伏応力
ϵ_0 , K, n	R	$\bar{\sigma} = k(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n$ Swift
ϵ_0 , D, n	R	$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_0 \left(\frac{\sigma}{D}\right)^n$ Ramberg-Osgood
FAI	R	内部摩擦角
c	R	粘着力
C	R	線形移動硬化係数
Temperature	R	温度 (DEPENDENCIES=1 の時に必要)
v1, v2...v10	R	材料定数

・ YIELD= USER の場合

(2 行目以降) v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9, v10

メッシュファイルと解析制御ファイルの設定方法・注意点

使用例

!PLASTIC, YIELD=MISES, HARDEN=MULTILINEAR, DEPENDENCIES=1

276.0, 0.0, 20.	425.0, 0.0571, 100.
296.0, 0.0018, 20.	445.0, 0.0669, 100.
299.0, 0.0053, 20.	450.0, 0.0767, 100.
303.0, 0.008, 20.	460.0, 0.0867, 100.
338.0, 0.0173, 20.	471.0, 0.0967, 100.
372.0, 0.0271, 20.	128.0, 0.0, 400.
400.0, 0.037, 20.	208.0, 0.0018, 400.
419.0, 0.0471, 20.	243.0, 0.0053, 400.
437.0, 0.0571, 20.	259.0, 0.008, 400.
450.0, 0.0669, 20.	309.0, 0.0173, 400.
460.0, 0.0767, 20.	340.0, 0.0271, 400.
469.0, 0.0867, 20.	366.0, 0.037, 400.
477.0, 0.0967, 20.	382.0, 0.0471, 400.
276.0, 0.0, 100.	396.0, 0.0571, 400.
276.0, 0.0018, 100.	409.0, 0.0669, 400.
282.0, 0.0053, 100.	417.0, 0.0767, 400.
295.0, 0.008, 100.	423.0, 0.0867, 400.
330.0, 0.0173, 100.	429.0, 0.0967, 400.
370.0, 0.0271, 100.	
392.0, 0.037, 100.	
410.0, 0.0471, 100.	

指定の温度また塑性ひずみに関する上記の入力データから内挿して、加工硬化係数を計算することになる。各温度値に対して、同じ PSTRAIN 配列を入力することが必要になる。

FrontISTRによる弾塑性解析

目次

「解析機能／サンプル例題／定式化／プログラム」

0. 基礎知識

1. 解析機能とユーザマニュアル該当箇所

2. サンプル例題 (チュートリアル例題5)

3. 有限要素法定式化

4. プログラム解説

チュートリアル例題5 (1): 解析モデル

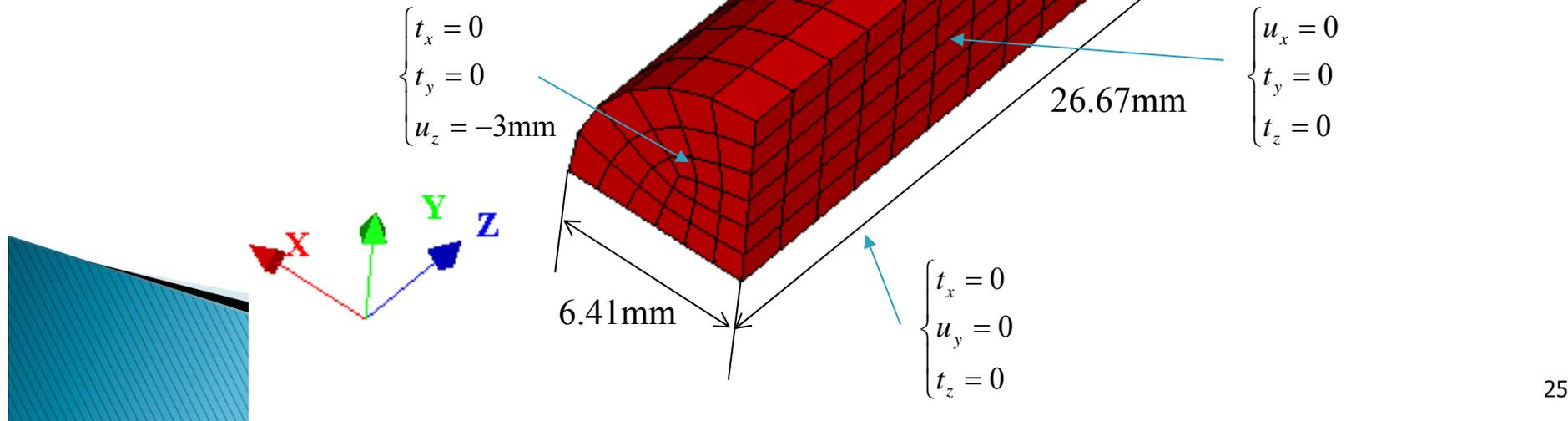
降伏関数: Mises
硬化則: Multilinearモデル

1/4円柱モデル
(z軸方向にx, y座標値が少しずらしてあるため, 厳密には円柱ではない)

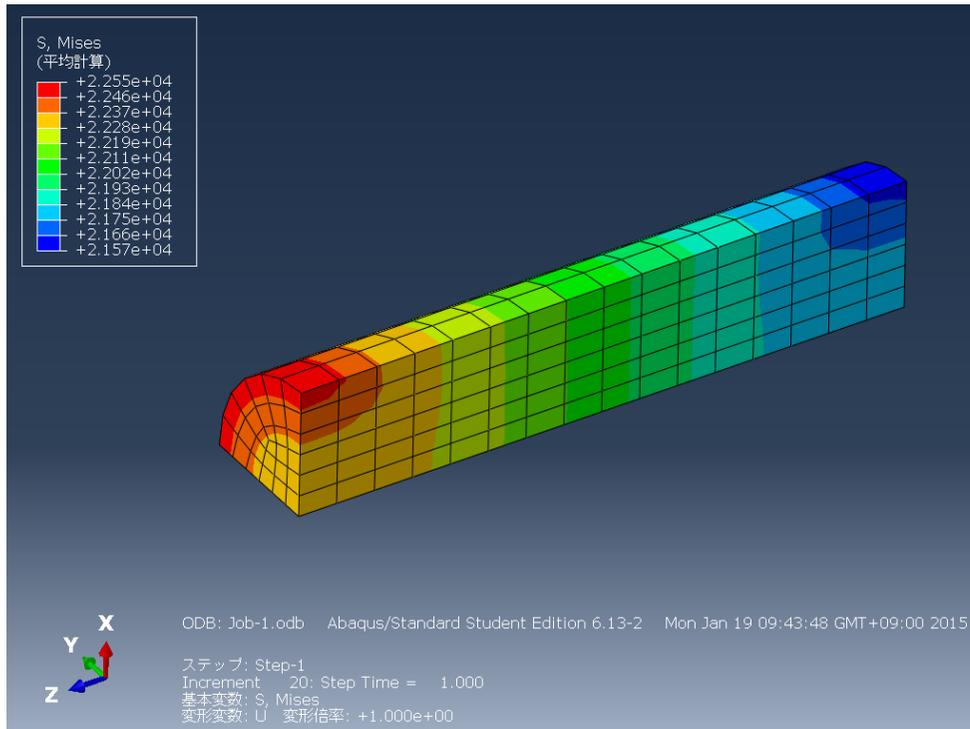
$$\begin{cases} E = 2.069 \times 10^5 \text{ MPa} \\ \nu = 0.29 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_{Y_0} = 450 \text{ MPa}, \bar{\varepsilon}_p = 0.0 \\ \sigma_{Y_1} = 608 \text{ MPa}, \bar{\varepsilon}_p = 0.05 \\ \sigma_{Y_2} = 679 \text{ MPa}, \bar{\varepsilon}_p = 0.1 \\ \sigma_{Y_3} = 732 \text{ MPa}, \bar{\varepsilon}_p = 0.2 \\ \sigma_{Y_4} = 752 \text{ MPa}, \bar{\varepsilon}_p = 0.3 \\ \sigma_{Y_5} = 766 \text{ MPa}, \bar{\varepsilon}_p = 0.4 \\ \sigma_{Y_6} = 780 \text{ MPa}, \bar{\varepsilon}_p = 0.5 \end{cases}$$

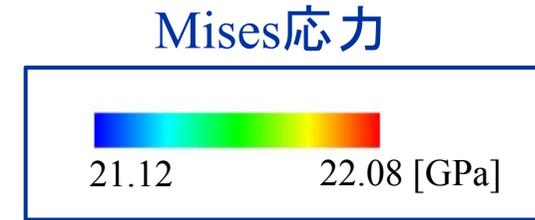
有限変形理論
時間増分一定
全荷重ステップ20



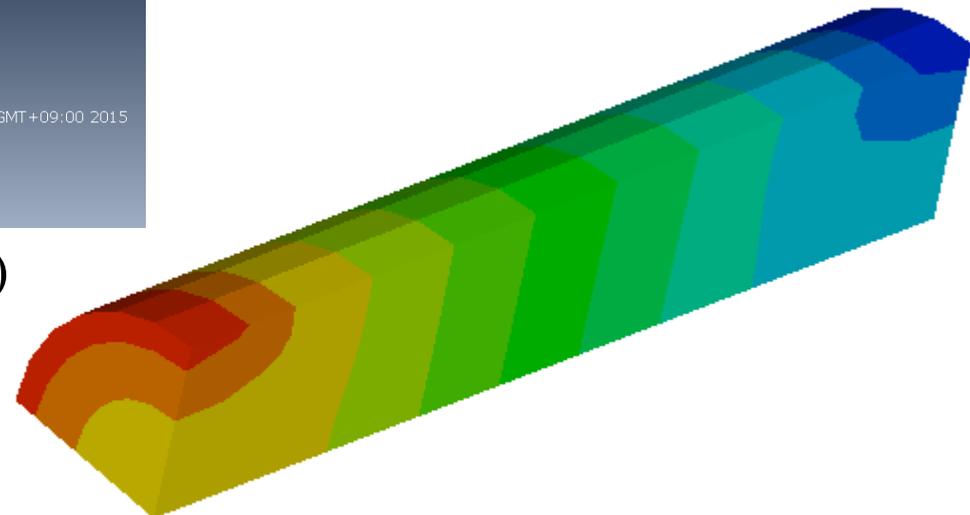
チュートリアル例題5 (2): 弾性解析



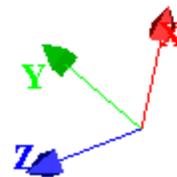
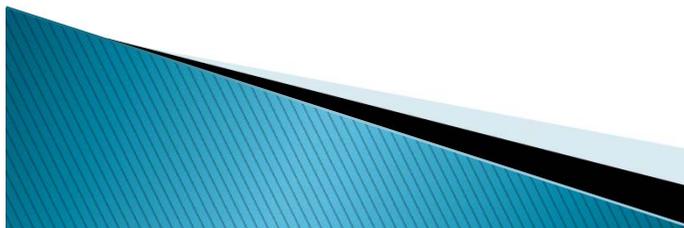
Abaqusによる計算結果 (F-bar要素)



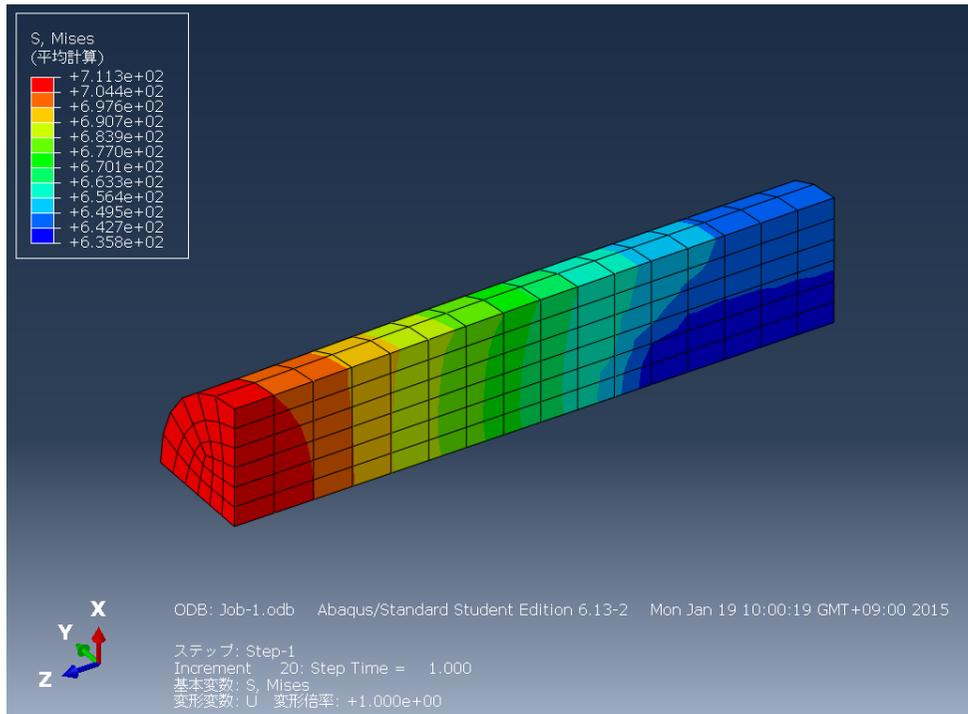
Abaqus
最大値: 22.55GPa
最小値: 21.57GPa



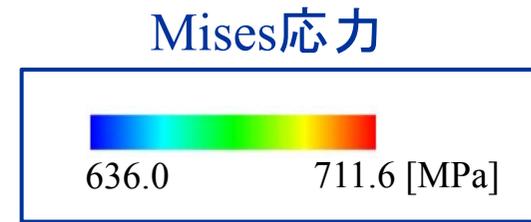
FrontISTRによる計算結果 (B-bar要素)



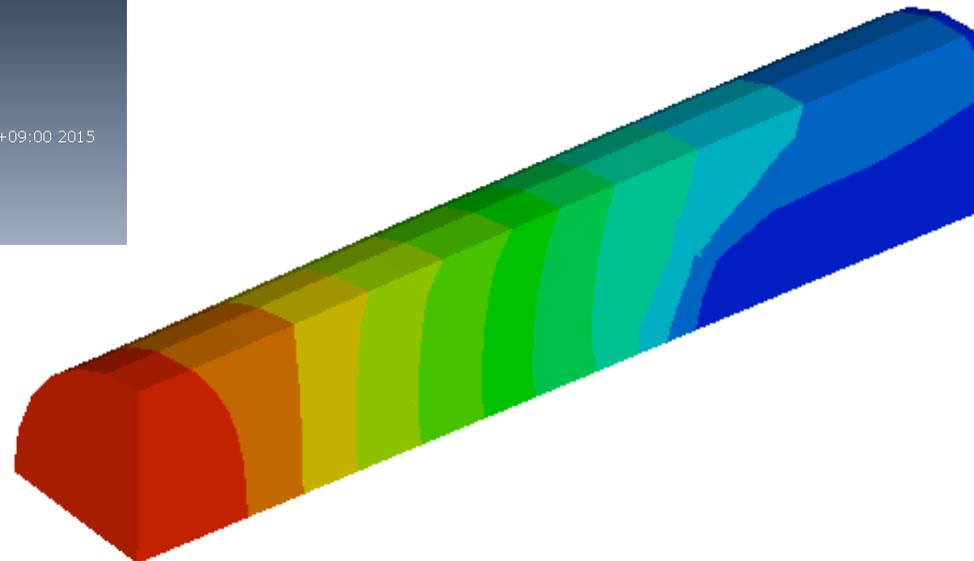
チュートリアル例題5 (3): 弾塑性解析



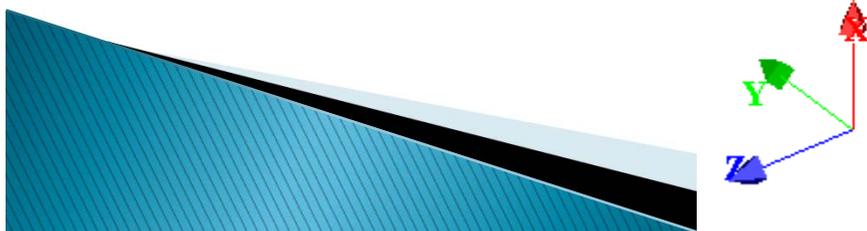
Abaqusによる計算結果 (F-bar要素)



Abaqus
最大値: 711.3MPa
最小値: 635.8MPa



FrontISTRによる計算結果 (B-bar要素)



FrontISTRによる弾塑性解析

目次

「解析機能／サンプル例題／定式化／プログラム」

0. 基礎知識

1. 解析機能とユーザマニュアル該当箇所

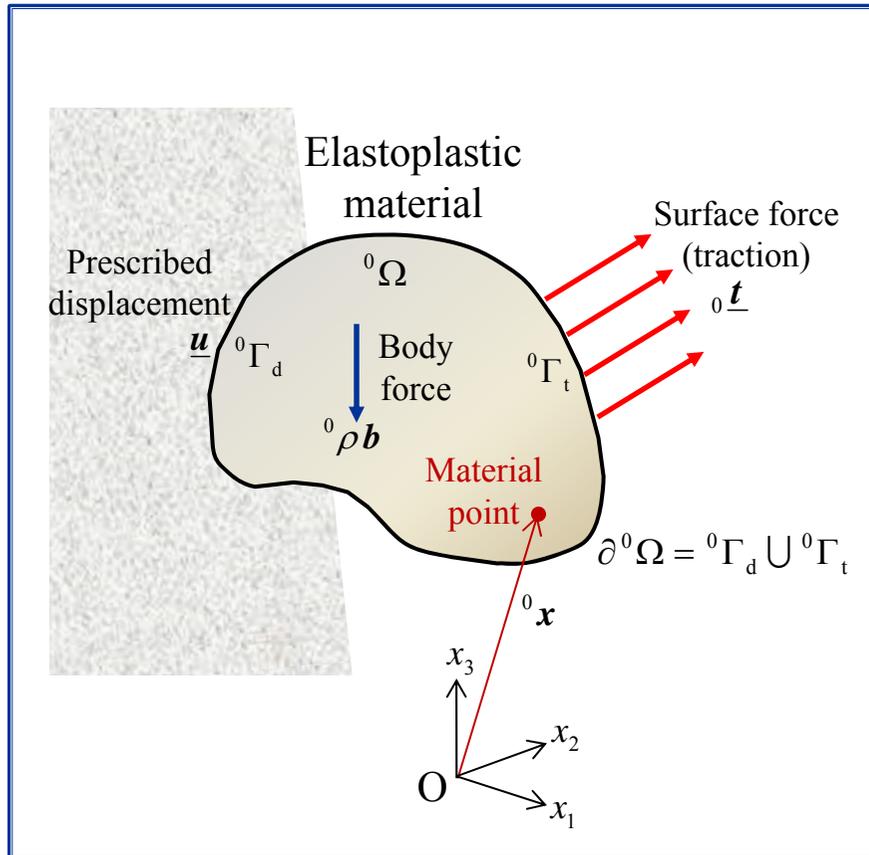
2. サンプル例題 (チュートリアル例題5)

3. 有限要素法定式化

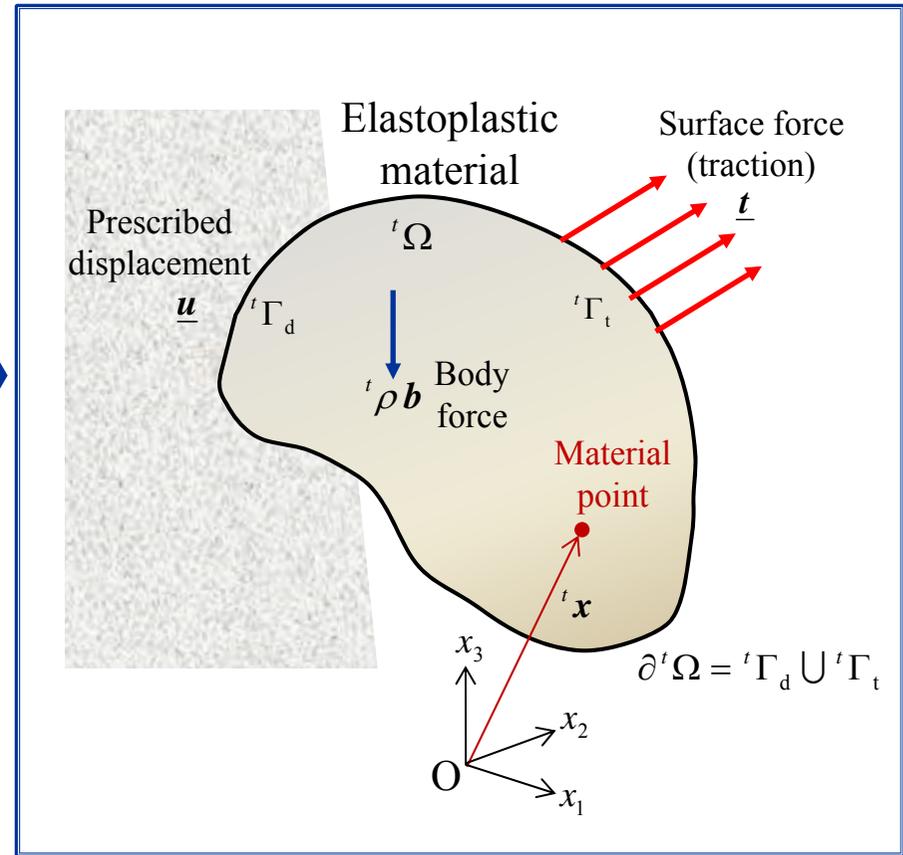
4. プログラム解説

弾塑性体の境界値問題

変形前の状態 (時刻 0)



変形後の状態 (時刻 t)



変位

$${}^t\mathbf{u} = {}^t\mathbf{x} - {}^0\mathbf{x}$$

現配置での支配方程式系

[B2] 以下を満たすような変位 ${}^t\mathbf{u} \in V$ を求めよ

$$V = \{ \mathbf{w} \mid \mathbf{w} \in H^1({}^t\Omega)^N, \mathbf{w} = \underline{\mathbf{u}} \text{ on } {}^t\Gamma_d \}$$

(平衡方程式)

$${}^t\nabla \cdot \underline{\mathbf{T}} + {}^t\rho \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad \text{in } {}^t\Omega \quad \dots (29a)$$

Cauchy応力テンソル

(境界条件)

$${}^t\mathbf{u} = \underline{\mathbf{u}} \quad \text{on } {}^t\Gamma_d \quad \dots (29b)$$

$${}^t\mathbf{t} = {}^t\mathbf{n} \cdot \underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{t}} \quad \text{on } {}^t\Gamma_t \quad \dots (29c)$$

現配置の仮想仕事の原理と接線剛性マトリックス

[V2] 以下を満たすような変位 ${}^t\mathbf{u} \in V$ を求めよ

$$V = \{ {}^t\mathbf{w} \mid {}^t\mathbf{w} \in H^1({}^t\Omega)^N, {}^t\mathbf{w} = \underline{\mathbf{u}} \text{ on } {}^t\Gamma_d \}$$

$$M = \{ \delta {}^t\mathbf{u} \mid \delta {}^t\mathbf{u} \in H^1({}^t\Omega)^N, \delta {}^t\mathbf{u} = \mathbf{0} \text{ on } {}^t\Gamma_d \}$$

(仮想仕事の原理)

$$\underbrace{\int_{{}^t\Omega} {}^t\mathbf{T} : \delta {}^t\mathbf{A}_{(L)} d {}^t\Omega}_{\text{内力部分}} = \underbrace{\int_{{}^t\Gamma_t} \underline{\mathbf{t}} \cdot \delta {}^t\mathbf{u} d {}^t\Gamma + \int_{{}^t\Omega} {}^t\rho \mathbf{b} \cdot \delta {}^t\mathbf{u} d {}^t\Omega}_{\text{外力部分}} \quad \forall \delta {}^t\mathbf{u} \in M \quad \dots (30)$$

Updated Lagrange法で使用される式

仮想仕事の原理における左辺 (内力部分) を物質時間微分します

$$\left(\int_{{}^t\Omega} {}^t\mathbf{T} : \delta {}^t\mathbf{A}_{(L)} d {}^t\Omega \right)' = \int_{{}^t\Omega} \underline{{}^t\dot{\mathbf{S}}} : \delta {}^t\mathbf{A}_{(L)} d {}^t\Omega + \int_{{}^t\Omega} \underline{{}^t\mathbf{T}} : \left\{ (\delta {}^t\mathbf{F})^T \cdot {}^t\mathbf{L}^T \right\} d {}^t\Omega$$

速度形 Truesdellの応力速度テンソル ... (31a)

構成方程式が必要となります

Updated Lagrange法で
使用される
接線剛性マトリックス

$$\delta {}^t\mathbf{F} = ({}^t\nabla \otimes \delta {}^t\mathbf{u})^T \quad \dots (31b)$$

$${}^t\mathbf{L} = {}^t\nabla \otimes {}^t\dot{\mathbf{u}} \quad \dots (31c)$$

Newton-Raphson法

$$\underbrace{\mathbf{q}(^{t+\Delta t}\mathbf{u})}_{\text{Internal force}} = \underbrace{^{t+\Delta t}\mathbf{f}}_{\text{External force}}$$



$$\underbrace{^{t+\Delta t}\mathbf{u}}_{\text{Solution}} = \underbrace{^t\mathbf{u}}_{\text{Initial value}} + \underbrace{\Delta\mathbf{u}}_{\text{Increment}}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(^t\mathbf{u}) + \sum_j \left. \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial u_j} \right|_{\mathbf{u}=^t\mathbf{u}} \Delta u_j + \dots \\ = \mathbf{q}(^t\mathbf{u}) + \underbrace{\mathbf{K}(^t\mathbf{u})}_{\text{Tangent stiffness matrix}} \Delta\mathbf{u} + \dots \end{aligned}$$

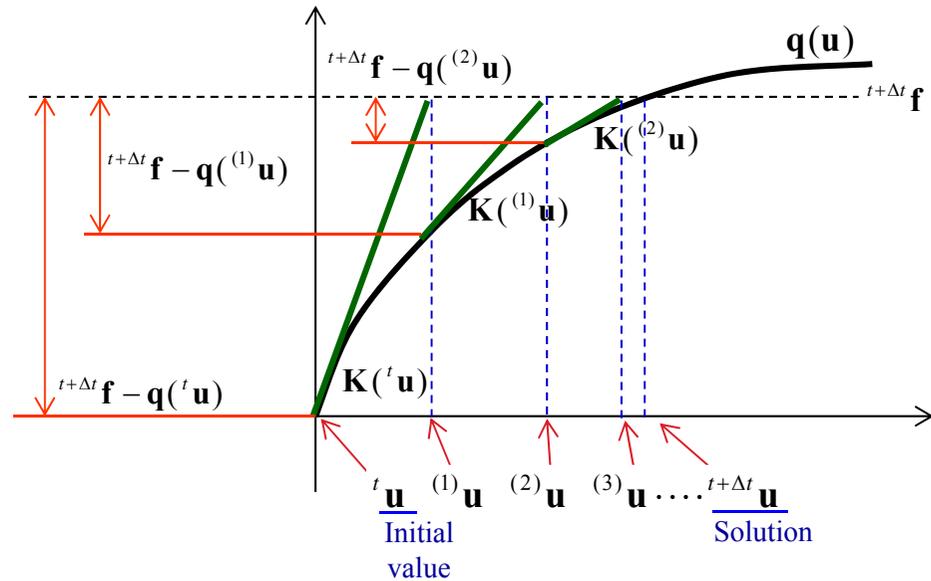


Fig. Schematic drawing of Newton-Raphson method

$m = 1$

$$\mathbf{r}(^t\mathbf{u}) = ^{t+\Delta t}\mathbf{f} - \mathbf{q}(^t\mathbf{u})$$

$$\mathbf{K}(^t\mathbf{u}) \Delta\mathbf{u} = \mathbf{r}(^t\mathbf{u})$$

$$^{\text{(1)}}\mathbf{u} = ^t\mathbf{u} + \Delta\mathbf{u}$$

$m > 1$

$$\mathbf{r}(^{(m-1)}\mathbf{u}) = ^{t+\Delta t}\mathbf{f} - \mathbf{q}(^{(m-1)}\mathbf{u})$$

$$\mathbf{K}(^{(m-1)}\mathbf{u}) \Delta\mathbf{u} = \mathbf{r}(^{(m-1)}\mathbf{u})$$

$$^{(m)}\mathbf{u} = ^{(m-1)}\mathbf{u} + \Delta\mathbf{u}$$

$$\frac{^{(m)}\Delta\mathbf{u}^T \ ^{(m)}\Delta\mathbf{u}}{^{(1)}\Delta\mathbf{u}^T \ ^{(1)}\Delta\mathbf{u}} < \epsilon_d$$

$$\frac{\mathbf{r}^T(^{(m-1)}\mathbf{u}) \ \mathbf{r}(^{(m-1)}\mathbf{u})}{\mathbf{r}^T(^n\mathbf{u}) \ \mathbf{r}(^n\mathbf{u})} < \epsilon_r$$

$$\frac{^{(m)}\Delta\mathbf{u}^T \ \mathbf{r}(^{(m-1)}\mathbf{u})}{^{(1)}\Delta\mathbf{u}^T \ \mathbf{r}(^n\mathbf{u})} < \epsilon_{dr}$$

Yes

Convergence

$$^{(m)}\mathbf{u} = ^{t+\Delta t}\mathbf{u}$$

No

Updated Lagrange法で使用される弾塑性体の構成方程式

有限変形弾塑性解析では、応力速度テンソルと全ひずみ速度テンソルの関係を相対Kirchhoff応力テンソルのJaumann速度と変形速度テンソルの関係と考えます

$$\underline{\overset{\circ}{T}}_{(J)} = {}^t C_{ep} : {}^t D \quad \dots (32a)$$

相対Kirchhoff応力テンソルのJaumann速度

$$\underline{D} = \frac{1}{2}({}^t L + {}^t L^T) = \frac{1}{2}\{ {}^t \nabla \otimes {}^t \dot{\mathbf{u}} + ({}^t \nabla \otimes {}^t \dot{\mathbf{u}})^T \} \quad \dots (32b)$$

変形速度テンソル

$$\begin{aligned} \underline{\overset{\circ}{S}} &= \underline{\overset{\circ}{T}}_{(J)} - {}^t D \cdot {}^t T - {}^t T \cdot {}^t D \\ \text{Truesdellの} &= {}^t C_{ep} : {}^t D - {}^t D \cdot {}^t T - {}^t T \cdot {}^t D \\ \text{応力速度テンソル} & \quad \dots (33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{S}_{ij} &= {}^t C_{epijkl} {}^t D_{kl} - {}^t D_{ik} {}^t T_{kj} - {}^t T_{ik} {}^t D_{kj} \\ &= {}^t C_{epijkl} {}^t D_{kl} - \delta_{il} {}^t D_{lk} {}^t T_{jk} - \delta_{jl} {}^t T_{ik} {}^t D_{kl} \\ &= ({}^t C_{epijkl} - \delta_{il} {}^t T_{jk} - {}^t T_{ik} \delta_{jl}) {}^t D_{kl} \\ &= \left\{ {}^t C_{epijkl} - \frac{1}{2}(\delta_{il} {}^t T_{jk} + \delta_{ik} {}^t T_{jl}) - \frac{1}{2}({}^t T_{ik} \delta_{jl} + {}^t T_{il} \delta_{jk}) \right\} {}^t D_{kl} \\ & \quad \dots (34) \end{aligned}$$

以下の式が得られます

$$\overset{\circ}{S} = \tilde{C}_{ep} : D \quad \dots (35a)$$

$$\tilde{C}_{epijkl} = {}^t C_{epijkl} - \frac{1}{2}(\delta_{il} {}^t T_{jk} + \delta_{ik} {}^t T_{jl}) - \frac{1}{2}({}^t T_{ik} \delta_{jl} + {}^t T_{il} \delta_{jk}) \quad \dots (35b)$$

応力の時間積分

$$\begin{aligned}
 \underline{{}^{t+\Delta t}\mathbf{T}} &= {}^t\mathbf{T} + \int_t^{t+\Delta t} {}^\tau\dot{\mathbf{T}} d\tau \\
 &= {}^t\mathbf{T} + \int_t^{t+\Delta t} ({}^\tau\overset{\circ}{\mathbf{T}}_{(J)} - {}^\tau\mathbf{W} \cdot {}^\tau\mathbf{T} - {}^\tau\mathbf{T} \cdot {}^\tau\mathbf{W}^\top) d\tau \\
 &= {}^t\mathbf{T} + \int_t^{t+\Delta t} ({}^\tau\mathbf{C}_{\text{ep}} : {}^\tau\mathbf{D} - {}^\tau\mathbf{W} \cdot {}^\tau\mathbf{T} - {}^\tau\mathbf{T} \cdot {}^\tau\mathbf{W}^\top - {}^\tau\mathbf{T} \text{ tr } {}^\tau\mathbf{D}) d\tau \\
 &\dots \quad (36a)
 \end{aligned}$$

$$\underline{{}^t\mathbf{W}} = \frac{1}{2}({}^t\mathbf{L} - {}^t\mathbf{L}^\top) = \frac{1}{2}\{ {}^t\nabla \otimes {}^t\dot{\mathbf{u}} - ({}^t\nabla \otimes {}^t\dot{\mathbf{u}})^\top \} \quad \dots \quad (36b)$$

スピントテンソル

後退Euler積分ならば

$$\underline{{}^{t+\Delta t}\mathbf{T}} \simeq {}^t\mathbf{T} + ({}^{t+\Delta t}\mathbf{C}_{\text{ep}} : {}^{t+\Delta t}\mathbf{D} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{W} \cdot {}^{t+\Delta t}\mathbf{T} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{T} \cdot {}^{t+\Delta t}\mathbf{W}^\top - {}^{t+\Delta t}\mathbf{T} \text{ tr } {}^{t+\Delta t}\mathbf{D}) \Delta t \quad \dots \quad (37)$$

現バージョンのFrontISTRの応力更新には、式 (37) が使用されています

増分間のスピンの一定であると仮定した場合の応力の時間積分法

時刻 t から物質点の剛体回転と同量だけ回転する観測者から見た応力テンソル

$${}^{\tau}T^* = {}^{\tau}R^{\top} \cdot {}^{\tau}T \cdot {}^{\tau}R \quad \dots (38)$$

$$\begin{aligned} {}^{\tau}\dot{T}^* &= {}^{\tau}\dot{R}^{\top} \cdot {}^{\tau}T \cdot {}^{\tau}R + {}^{\tau}R^{\top} \cdot {}^{\tau}\dot{T} \cdot {}^{\tau}R + {}^{\tau}R^{\top} \cdot {}^{\tau}T \cdot {}^{\tau}\dot{R} \\ &= {}^{\tau}R^{\top} \cdot {}^{\tau}R \cdot {}^{\tau}\dot{R}^{\top} \cdot {}^{\tau}T \cdot {}^{\tau}R + {}^{\tau}R^{\top} \cdot {}^{\tau}\dot{T} \cdot {}^{\tau}R + {}^{\tau}R^{\top} \cdot {}^{\tau}T \cdot {}^{\tau}\dot{R} \cdot {}^{\tau}R^{\top} \cdot {}^{\tau}R \\ &= {}^{\tau}R^{\top} \cdot ({}^{\tau}R \cdot {}^{\tau}\dot{R}^{\top} \cdot {}^{\tau}T + {}^{\tau}\dot{T} + {}^{\tau}T \cdot {}^{\tau}\dot{R} \cdot {}^{\tau}R^{\top}) \cdot {}^{\tau}R \\ &= {}^{\tau}R^{\top} \cdot ({}^{\tau}\dot{\Omega} \cdot {}^{\tau}T + {}^{\tau}\dot{T} - {}^{\tau}T \cdot {}^{\tau}\dot{\Omega}) \cdot {}^{\tau}R \\ &\simeq {}^{\tau}R^{\top} \cdot ({}^{\tau}W \cdot {}^{\tau}T + {}^{\tau}\dot{T} - {}^{\tau}T \cdot {}^{\tau}W) \cdot {}^{\tau}R \quad \left. \begin{array}{l} \text{増分間では、剛体スピンとスピンは同じと近似} \end{array} \right\} \\ &= {}^{\tau}R^{\top} \cdot \overset{\circ}{T}_{(J)} \cdot {}^{\tau}R \quad \dots (39) \end{aligned}$$

後退Euler積分ならば

$$\begin{aligned} \underline{{}^{t+\Delta t}T^*} &= {}^tT^* + \int_t^{t+\Delta t} {}^{\tau}\dot{T}^* d\tau \\ &= {}^tT + \int_t^{t+\Delta t} {}^{\tau}R^{\top} \cdot \overset{\circ}{T}_{(J)} \cdot {}^{\tau}R d\tau \\ &= {}^tT + \int_t^{t+\Delta t} {}^{\tau}R^{\top} \cdot (C_{ep} : {}^{\tau}D - {}^{\tau}T \operatorname{tr} {}^{\tau}D) \cdot {}^{\tau}R d\tau \\ &\simeq {}^tT + {}^{t+\Delta t}R^{\top} \cdot (C_{ep} : {}^{t+\Delta t}D - {}^{t+\Delta t}T \operatorname{tr} {}^{t+\Delta t}D) \cdot {}^{t+\Delta t}R \Delta t \quad \dots (40) \end{aligned}$$

$$\underline{{}^{t+\Delta t}T} \simeq {}^{t+\Delta t}R \cdot {}^tT \cdot {}^{t+\Delta t}R^{\top} + (C_{ep} : {}^{t+\Delta t}D - {}^{t+\Delta t}T \operatorname{tr} {}^{t+\Delta t}D) \Delta t \quad \dots (41)$$

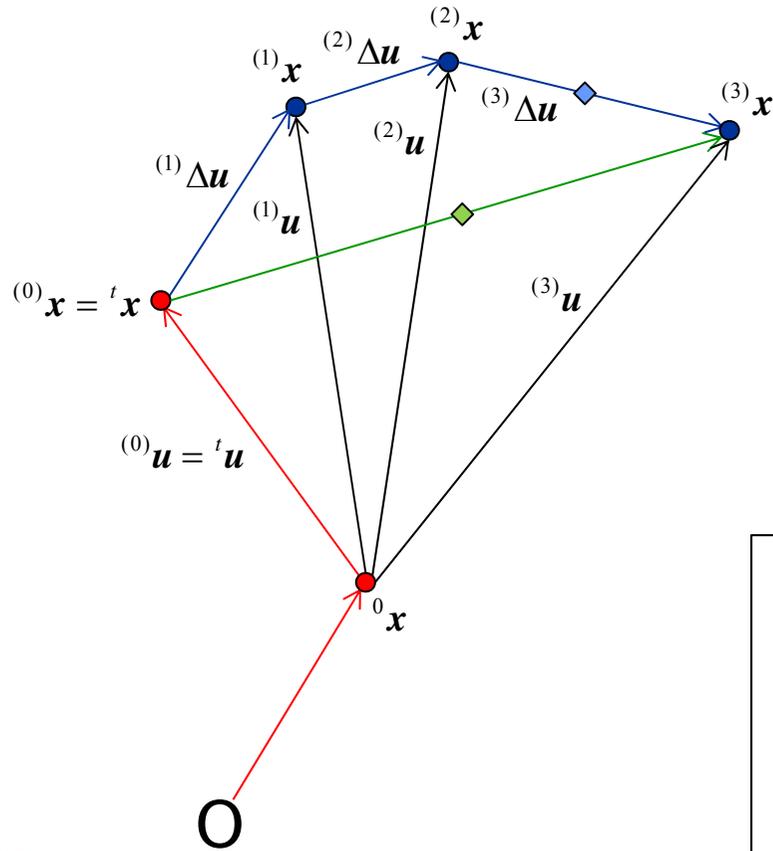
応力の積分経路

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{T} = {}^t\mathbf{T} + \int_t^{t+\Delta t} {}^t\dot{\mathbf{T}} d\tau$$

Newton-Raphson法

$${}^{(3)}\Delta\mathbf{u} \longrightarrow {}^{(3)}\mathbf{T}$$

既知



$${}^{(3)}\mathbf{T} = {}^{(2)}\mathbf{T} + \diamond\dot{\mathbf{T}} \Delta t$$

収束点を利用していない

$${}^{(3)}\mathbf{T} = {}^t\mathbf{T} + \diamond\dot{\mathbf{T}} \Delta t$$

収束点を利用する

$${}^{(3)}\mathbf{T} = {}^{t+\Delta t}_t \mathbf{R}(\diamond\mathbf{W})^T \cdot {}^{(2)}\mathbf{T} \cdot {}^{t+\Delta t}_t \mathbf{R}(\diamond\mathbf{W}) + \diamond\dot{\mathbf{T}}_{(J)} \Delta t$$

収束点を利用していない

$${}^{(3)}\mathbf{T} = {}^{t+\Delta t}_t \mathbf{R}(\diamond\mathbf{W})^T \cdot {}^t\mathbf{T} \cdot {}^{t+\Delta t}_t \mathbf{R}(\diamond\mathbf{W}) + \diamond\dot{\mathbf{T}}_{(J)} \Delta t$$

収束点を利用する

FrontISTRの応力更新では、収束点を利用しています

FrontISTRによる弾塑性解析

目次

「解析機能／サンプル例題／定式化／プログラム」

0. 基礎知識

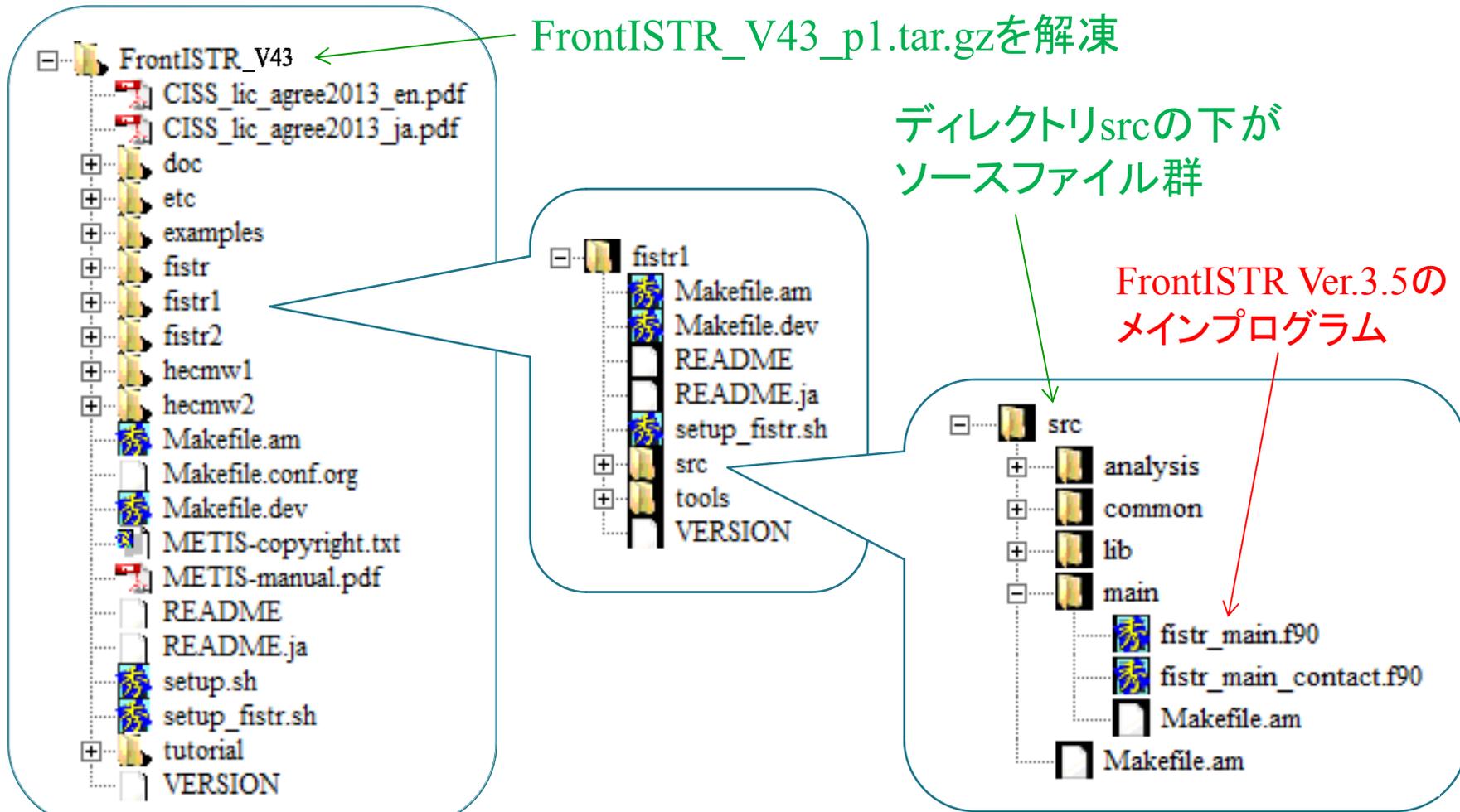
1. 解析機能とユーザマニュアル該当箇所

2. サンプル例題 (チュートリアル例題5)

3. 有限要素法定式化

4. プログラム解説

FrontISTRのディレクトリ構成 (1)



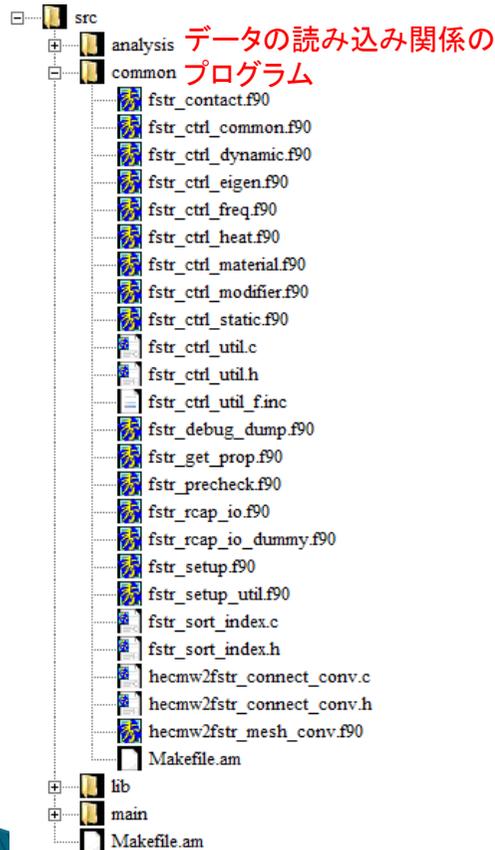
FrontISTR_V43_p1.tar.gzを解凍

ディレクトリsrcの下が
ソースファイル群

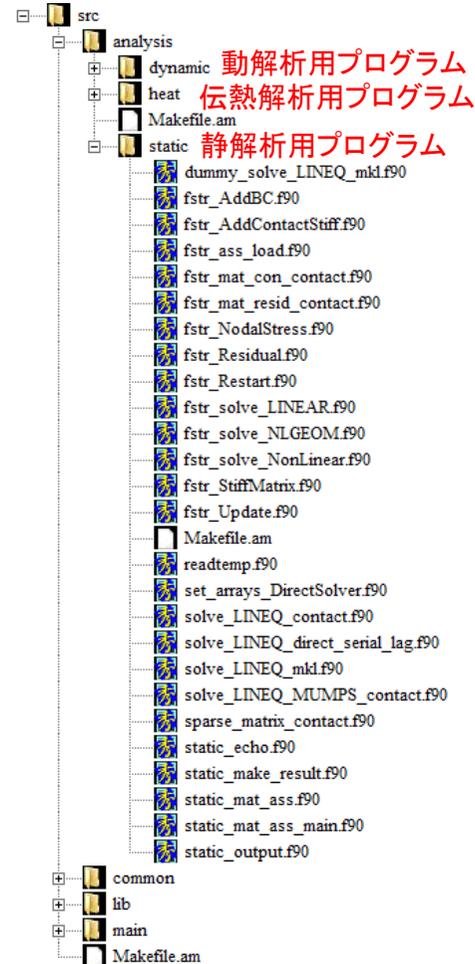
FrontISTR Ver.3.5の
メインプログラム

四つのディレクトリ「main」、
「common」、「analysis」、「lib」

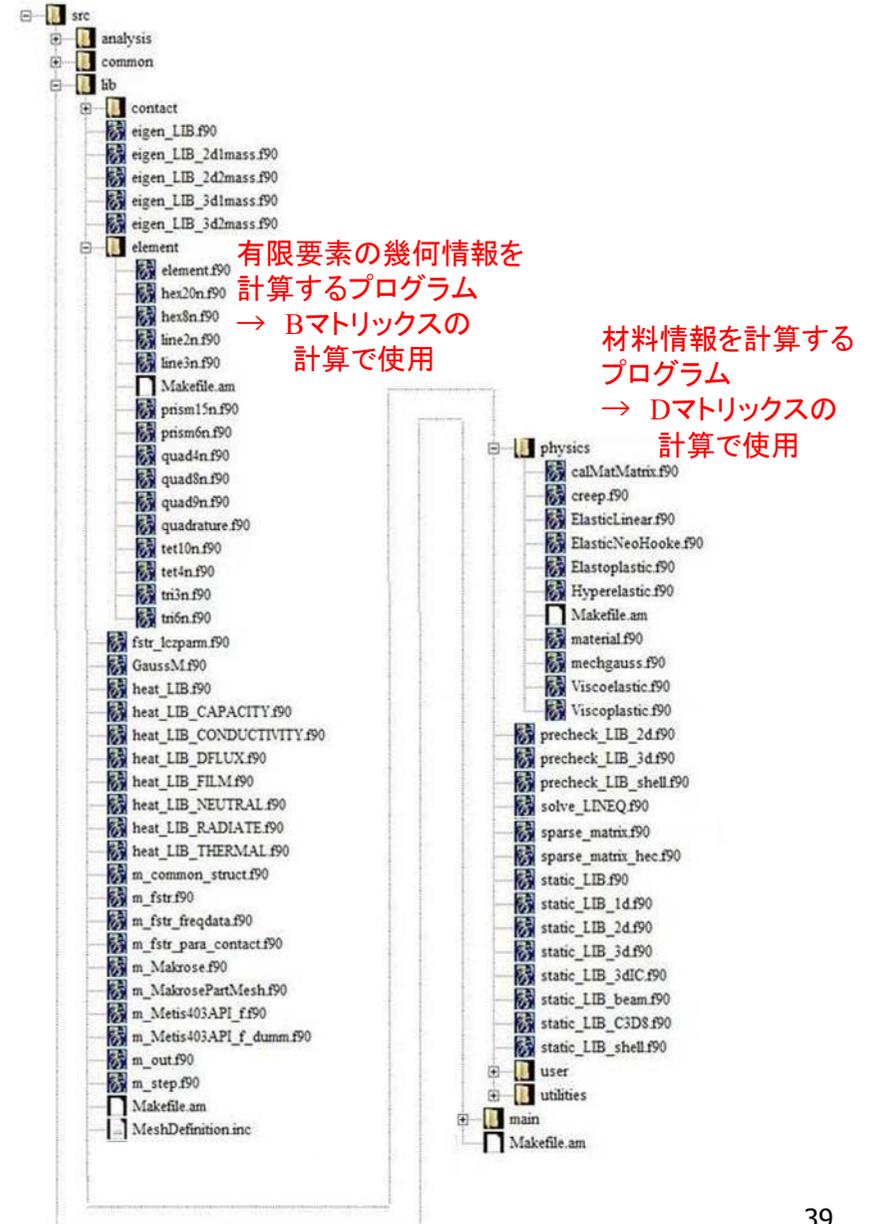
FrontISTRのディレクトリ構成 (2)



データの読み込み関係のプログラム



動解析用プログラム
 伝熱解析用プログラム
 静解析用プログラム



有限要素の幾何情報を
 計算するプログラム
 → Bマトリックスの
 計算で使用

材料情報を計算する
 プログラム
 → Dマトリックスの
 計算で使用

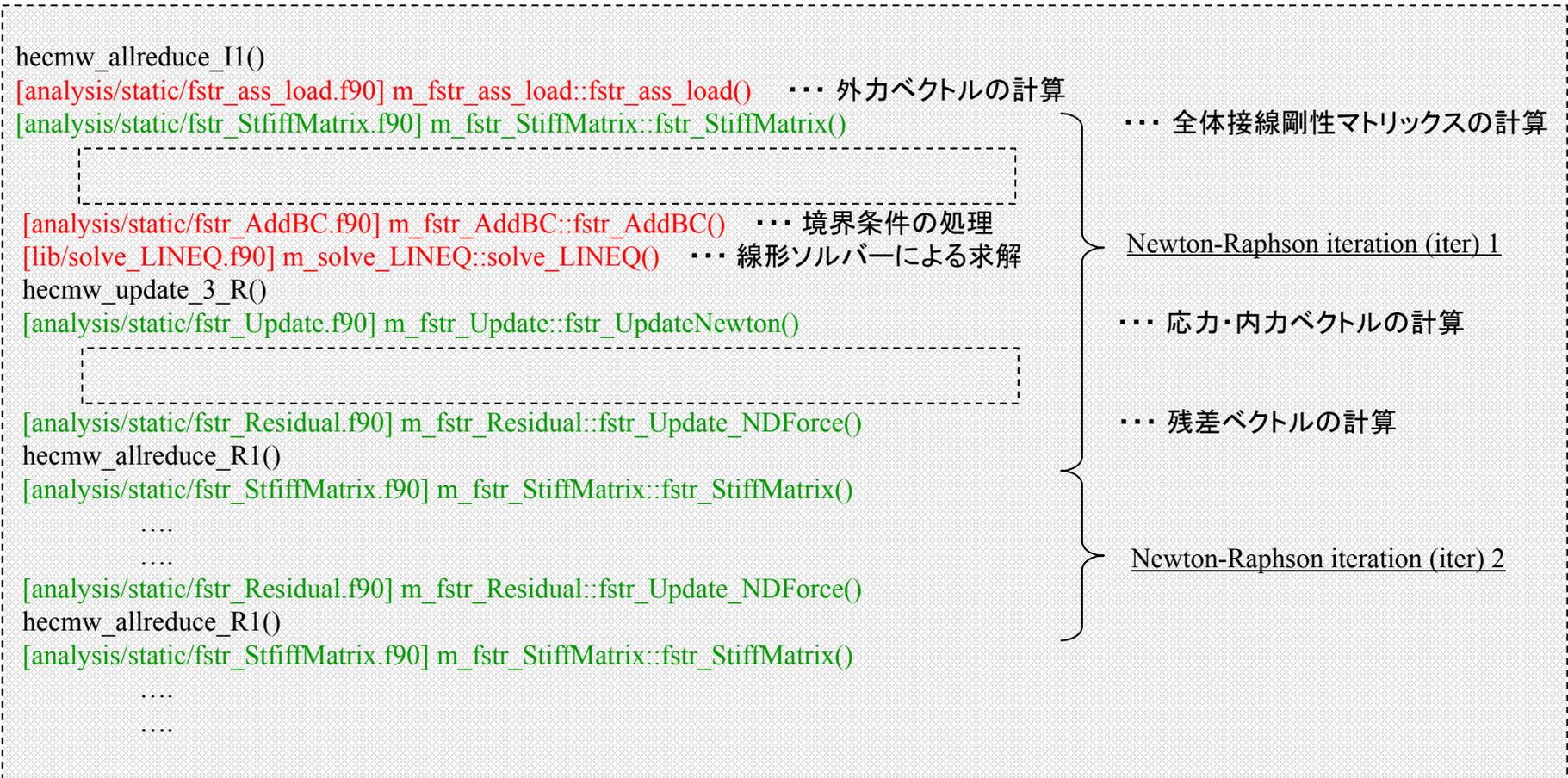
有限変形弾塑性静解析の流れ (1)

```
[main/fistr_main.f90] PROGRAM fstr_main      ... メインプログラム
  hecmw_init()
  hecmw_get_mesh()
  [main/fistr_main.f90] fstr_init()          ... 変数初期化・入力データ読み込み
    hecmw_nullify_matrix ()
    hecmw_nullify_result_data ()
    [main/fistr_main.f90] fstr_init_file()
    hecmw_mat_con ()
    [main/fistr_main.f90] fstr_condition()
      hecmw_ctrl_get_control_file ()
  [main/fistr_main.f90] fstr_nonlinear_static_analysis() ... 非線形静解析用のルーチンへ
    [analysis/static/fstr_solve_NLGEOM.f90] m_fstr_solve_NLGEOM::fstr_solve_nlgeom() ... 時間増分 (BC分割) のループ
    [analysis/static/fstr_solve_Nonlinear.f90] m_fstr_NonLinearMethod::fstr_Newton()
    {
      [analysis/static/fstr_solve_Nonlinear.f90] m_fstr_NonLinearMethod::fstr_Newton()
    }
    {
      [analysis/static/fstr_solve_Nonlinear.f90] m_fstr_NonLinearMethod::fstr_Newton()
    }
    ...
    [analysis/static/static_output.f90] m_static_output::fstr_static_Output() ... 計算結果の出力
    [analysis/static/static_make_result.f90] m_static_make_result::fstr_write_static_result()
  [main/fistr_main.f90] fstr_finalize()      ... 変数の削除
  hecmw_finalize ()
```

[ディレクトリ/ファイル名] モジュール名::サブルーチン名()を意味しています

有限変形弾塑性静解析の流れ (2)

[analysis/static/fstr_solve_Nonlinear.f90] m_fstr_NonLinearMethod::fstr_Newton() ...Newton-Raphson反復



有限変形弾塑性静解析の流れ (3)

[analysis/static/fstr_StiffMatrix.f90] m_fstr_StiffMatrix::fstr_StiffMatrix()

... 全体接線剛性マトリックスの計算

```
hecmw_mat_clear()
[lib/static_LIB_C3D8.f90] m_static_LIB_C3D8::STF_C3D8Bbar()
[lib/element/element.f90] elementInfo::getNodalNaturalCoord()
[lib/element/element.f90] elementInfo::getShapeDeriv()
[lib/element/element.f90] elementInfo::getQuadPoint()
[lib/element/element.f90] elementInfo::getShapeFunc()
[lib/element/element.f90] elementInfo::getShapeDeriv()
[lib/physics/calMatMatrix.f90] m_MatMatrix::MatlMatrix()
[lib/physics/Elastoplastic.f90] m_ElastoPlastic::calElastoPlastic()
[lib/physics/Elastoplastic.f90] m_ElastoPlastic::getYieldFunction()
[lib/physics/Elastoplastic.f90] m_ElastoPlastic::calKinematicHarden()
[lib/physics/ElasticLinear.f90] m_ElasticLinear::calElasticLinear()
[lib/physics/ElastoPlastic.f90] m_ElastoPlastic::calHardenCoeff()
hecmw_mat_ass_elem()
```

... 六面体1次ソリッド要素
... 形状関数の微分値
... Gaussの積分点数
... 形状関数の値
... 形状関数の微分値
... Dマトリックス
... 弾塑性体の場合
... 降伏関数
... 移動加工硬化係数
... 弾性成分
... 加工硬化係数
... 要素接線剛性マトリックスをassemble

[analysis/static/fstr_Update.f90] m_fstr_Update::fstr_UpdateNewton()

... 応力・内カベクトルの計算

```
[lib/static_LIB_C3D8.f90] m_static_LIB_C3D8::Update_C3D8Bbar()
[lib/element/element.f90] elementInfo::getQuadPoint()
[lib/physics/calMatMatrix.f90] m_MatMatrix::MatlMatrix()
[lib/physics/Elastoplastic.f90] m_ElastoPlastic::calElastoPlastic()
[lib/physics/Elastoplastic.f90] m_ElastoPlastic::getYieldFunction()
[lib/physics/Elastoplastic.f90] m_ElastoPlastic::calKinematicHarden()
[lib/physics/ElasticLinear.f90] m_ElasticLinear::calLinearElastic()
[lib/physics/ElastoPlastic.f90] m_ElastoPlastic::calHardenCoeff()
[lib/physics/Elastoplastic.f90] m_ElastoPlastic::BackwardEuler()
hecmw_update_3_R()
```

... 六面体一次ソリッド要素
... Gaussの積分点数
... Dマトリックス
... 弾塑性体の場合
... 降伏関数
... 移動加工硬化係数
... 弾性成分
... 加工硬化係数
... 後退Euler法 (Return Mapping)

[ディレクトリ/ファイル名] モジュール名::サブルーチン名()を意味しています

[lib/physics/Elastoplastic.f90]の内容

モジュール名 : m_ElastoPlastic
弾塑性体のDマトリックスを計算するモジュール

使用する他のモジュール

- ・ `lib/physics/material.f90` `mMaterial`
材料物性の情報を管理するモジュール
- ・ `lib/physics/ElasticLinear.f90` `m_ElasticLinear`
線形弾性体のDマトリックスを計算するモジュール

メンバ変数

- ・ 整数型 `kreal`
実数型の種別値

メンバ関数

- ・ サブルーチン `calElastoPlasticMatrix()`
弾塑性体のDマトリックスを計算するサブルーチン
- ・ 関数 `cal_equivalent_stress()`
相当応力を計算する関数
- ・ 関数 `cal_mises_strain()`
相当ひずみを計算する関数
- ・ 関数 `calHardenCoeff()`
硬化係数を計算する関数
- ・ 関数 `calKinematicHarden()`
移動硬化における硬化係数を計算する関数
- ・ 関数 `calCurrKinematic()`
移動硬化における状態を計算する関数
- ・ 関数 `calCurrYield()`
降伏応力を計算する関数
- ・ 関数 `calYieldFunc()`
降伏状態を計算する関数
- ・ サブルーチン `BackwardEuler()`
後退Euler法の計算を行うサブルーチン
- ・ サブルーチン `updateEPState()`
弾塑性状態を計算するサブルーチン

[lib/physics/Elastoplastic.f90]

m_ElastoPlastic::calElastoPlasticMatrix() の内容

サブルーチン名: `calElastoPlasticMatrix()`
弾塑性体のDマトリックスを計算するサブルーチン

引数

- ・構造体(tMaterial) `matl`
材料に関連するデータ
- ・整数型 `sectType`
問題の種類 (3次元問題/平面ひずみ/平面応力問題/軸対称問題)
- ・実数型 `stress(6)`
応力成分
- ・実数型 `extval(:)`
塑性ひずみ
- ・整数型 `istat`
塑性状態
- ・実数型 `D(:, :)`
Dマトリックスの成分
- ・実数型 `temperature` (省略可能)
温度

上位

- ・サブルーチン [lib/physics/calMatMatrix.f90] `m_MatMatrix::MatlMatrix()`

下位

- ・関数 [lib/physics/Elastoplastic.f90] `m_ElastoPlastic :: getYieldFunction()`
- ・サブルーチン [lib/user/uyield.f90] `uElastoPlasticMatrix()`
- ・関数 [lib/physics/Elastoplastic.f90] `m_ElastoPlastic :: calKinematicHarden()`
- ・関数 [lib/physics/Elastoplastic.f90] `m_ElastoPlastic :: calHardenCoeff()`
- ・サブルーチン [lib/physics/ElasticLinear.f90] `m_ElasticLinear :: calElasticMatrix()`

[lib/physics/ElasticLinear.f90]の内容

モジュール名 : m_ElasticLinear
線形弾性体のDマトリックスを計算するモジュール

使用する他のモジュール

- ・ `[lib/physics/material.f90]` `mMaterial`
材料物性の情報を管理するモジュール

メンバ変数

- ・ 整数型 `kreal`
実数型の種別値

メンバ関数

- ・ サブルーチン `calElasticMatrix()`
3次元問題, 平面ひずみ問題, 平面応力問題, 軸対称問題のDマトリックスを計算するサブルーチン
- ・ サブルーチン `calElasticMatrix_ortho()`
直交異方性がある場合, 3次元問題のDマトリックスを計算するサブルーチン
- ・ サブルーチン `LinearElastic_Shell()`
シェル要素を使用する場合, 埋め込み座標系成分のDマトリックスを計算するサブルーチン

[lib/physics/ElasticLinear.f90]

m_ElasticLinear :: calElasticMatrix() の内容

サブルーチン名: `calElasticMatrix()`

3次元問題, 平面ひずみ問題, 平面応力問題, 軸対称問題のDマトリックスを
計算するサブルーチン

引数

- ・構造体(tMaterial) `matl`
材料に関連するデータ
- ・整数型 `sectType`
問題の種類 (3次元問題/平面ひずみ/平面応力問題/軸対称問題)
- ・実数型 `D(:, :)`
Dマトリックスの成分
- ・実数型 `temp` (省略可能)
温度

上位

- ・サブルーチン [lib/physics/calMatMatrix.f90] `m_MatMatrix::MatlMatrix()`
- ・サブルーチン [lib/physics/creep.f90] `m_Creep::iso_creep()`
- ・サブルーチン [lib/physics/Elastoplastic.f90] `m_ElastoPlastic::calElastoPlasticMatrix()`
- ・サブルーチン [lib/physics/Viscoelastic.f90] `m_ViscoElastic::calViscoelasticMatrix()`

下位

- ・サブルーチン [lib/utilities/talbe.f90] `m_table::fetch_TableData()`

[lib/physics/calMatMatrix.f90]の内容

モジュール名 : m_MatMatrix

各材料のDマトリックスを計算するサブルーチンと呼ぶモジュール

使用する他のモジュール

- `lib/physics/material.f90` `mMaterial`
材料物性の情報を管理するモジュール
- `lib/physics/mechgauss.f90` `mMechGauss`
Gauss積分点の情報を管理するモジュール
- `lib/physics/ElasticLinear.f90` `m_ElasticLinear`
線形弾性体のDマトリックスを計算するモジュール
- `lib/physics/Hyperelastic.f90` `mHyperElastic`
超弾性体の4階の弾性テンソルを計算するモジュール
- `lib/physics/Elastoplastic.f90` `m_ElastoPlastic`
弾塑性体のDマトリックスを計算するモジュール
- `lib/physics/Viscoelastic.f90` `mViscoElastic`
粘弾性体のDマトリックスを計算するモジュール
- `lib/physics/creep.f90` `mCreep`
クリープを考慮した剛性マトリックスを計算するためのモジュール
- `lib/user/uelastic.f90` `mUElastic`
ユーザ定義の弾性体のDマトリックスを計算するモジュール
- `lib/user/umat.f90` `mUmat`
ユーザ定義の材料のDマトリックスを計算するモジュール

メンバ変数

- 整数型 `kreal`
実数型の種別値

メンバ関数

- サブルーチン `getNlgeomFlag()`
未使用のサブルーチン
- サブルーチン `MatlMatrix()`
各材料のDマトリックスを計算するサブルーチンと呼ぶサブルーチン
- サブルーチン `StressUpdate()`
各材料の応力とひずみを計算するサブルーチンと呼ぶサブルーチン
- サブルーチン `mat_c2d()`
材料が超弾性体の場合、4階の弾性テンソルを問題の種類 (3次元問題/平面ひずみ/平面応力問題/軸対称問題) に応じた Dマトリックスに変換するサブルーチン
- サブルーチン `MatlMatrix_Shell()`
シェル要素を使用する場合、各材料 (現バージョンでは、線形弾性体のみ)の応力とひずみを計算するサブルーチンと呼ぶサブルーチン
- サブルーチン `mat_c2d_Shell()`
シェル要素を使用する場合、4階の弾性テンソルをDマトリックスに変換するサブルーチン

[lib/physics/calMatMatrix.f90]

m_MatMatrix::MatlMatrix()の内容

サブルーチン名: **MatlMatrix()**

各材料のDマトリックスを計算するサブルーチンを呼ぶサブルーチン

引数

- ・構造体(tGaussStatus) gauss
Gauss積分点に関連するデータ
- ・整数型 sectType
問題の種類 (3次元問題/平面ひずみ/平面応力問題/軸対称問題)
- ・実数型 matrix(:, :)
Dマトリックスの成分
- ・実数型 dt
時間増分
- ・実数型 cdsys(3, 3)
直交異方性がある場合に使用する座標系
- ・実数型 temperature 省略可能
温度

上位

- ・サブルーチン [lib/static_LIB_2d.f90] m_static_LIB_2d::STF_C2()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_2d.f90] m_static_LIB_2d::UPDATE_C2()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_2d.f90] m_static_LIB_2d::UpdateST_C2()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_3d.f90] m_static_LIB_3d::STF_C3()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_3d.f90] m_static_LIB_3d::TLOAD_C3()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_3d.f90] m_static_LIB_3d::UPDATE_C3()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_3d.f90] m_static_LIB_3d::UpdateST_C3()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_3dIC.f90] m_static_LIB_3dIC::STF_C3D8IC()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_3dIC.f90] m_static_LIB_3dIC::UpdateST_C3D8IC()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_3dC3D8.f90] m_static_LIB_C3D8::STF_C3D8Bbar()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_3dC3D8.f90] m_static_LIB_C3D8::Update_C3D8Bbar()
- ・サブルーチン [lib/static_LIB_3dC3D8.f90] m_static_LIB_C3D8::TLOAD_C3D8Bbar()

下位

- ・サブルーチン [lib/physics/calMatMatrix.f90] m_MatMatrix::mat_c2d()
- ・サブルーチン [lib/user/uelastic.f90] mUElastic::uElasticMatrix()
- ・サブルーチン [lib/physics/Viscoelastic.f90] mViscoElastic::calViscoelasticMatrix()
- ・サブルーチン [lib/physics/ElasticLinear.f90] m_ElasticLinear::calElasticMatrix()
- ・サブルーチン [lib/physics/ElasticLinear.f90] m_ElasticLinear::calElasticMatrix_ortho()
- ・サブルーチン [lib/physics/Hyperelastic.f90] mHyperElastic::calElasticMooneyRivlin()
- ・サブルーチン [lib/physics/Hyperelastic.f90] mHyperElastic::calElasticArrudaBoyce()
- ・サブルーチン [lib/physics/Elastoplastoc.f90] m_ElastoPlastic::calElastoPlasticMatrix()
- ・サブルーチン [lib/user/umat.f90] mUmat::uMatlMatrix()
- ・サブルーチン [lib/user/creep.f90] mCreep::iso_creep()

今後の予定

- 定式化の理解を深められる例題を増やしていく予定です
- 次回のFrontISTR研究会では、今年度の最終目標である「FrontISTRのカスタマイズ (Element／Material追加およびユーザサブルーチン使用)」の解説を行う予定です