



構造解析ソフトウェア  
Advance/FrontSTR Ver.3.0  
バージョンアップセミナー

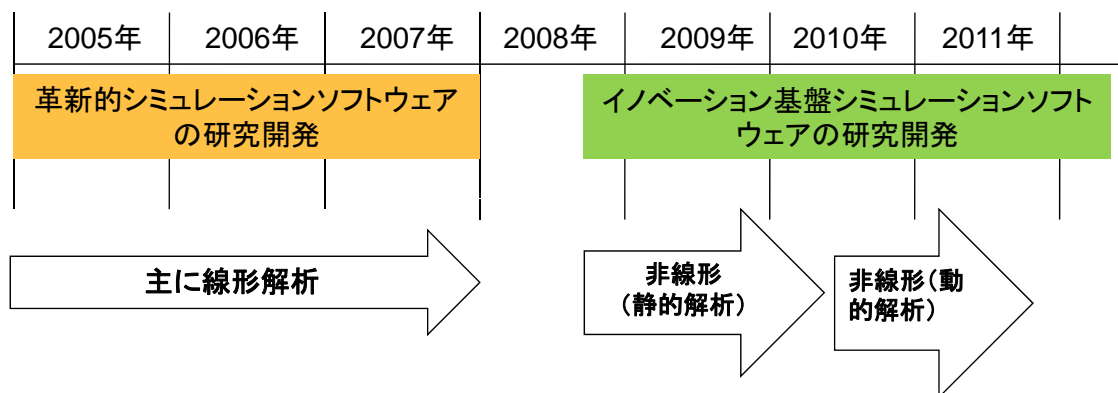
新機能としての非線形解析

アドバンスソフト株式会社  
技術第5部 主事研究員  
袁 熙

3.

Advance/FrontSTR: 現状と計画

■ 現状と計画



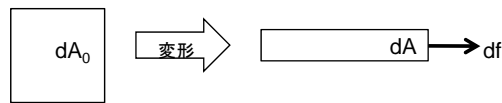
■ 静的非線形解析機能

幾何非線形・材料非線形・境界非線形 (接触)



# 非線形解析機能1: Total & Updated Lagrange法

## ■ 真応力 $\sigma$ と公称応力 $\Pi$



真応力  $\sigma = \frac{df}{dA}$

公称応力  $\Pi = \frac{df}{dA_0} \iff$  (2<sup>nd</sup>) Piola-Kichhoff応力S

変形エネルギー  $W = \sigma_i D_i dA = S_i E_i dA_0$  (D:変形速度テンソル; E:Green-Lagrangeひずみ)

## ■ 構成式

構成式	解法	応用
$S=f(E)$	Total Lagrange法	変形履歴依存性のない材料(e.g.超弾性)
$\sigma=f(D)$	Updated Lagrange法	変形履歴依存性のある材料(e.g.弾塑性)

## ■ 超弾性・弾塑性解析

	FrontSTR2.02	FrontISTR3.0
弾塑性	Total Lagrange法	Update Lagrange法
超弾性	なし	Total Lagrange法

ユーザーはその区別は特別に意識する必要がない

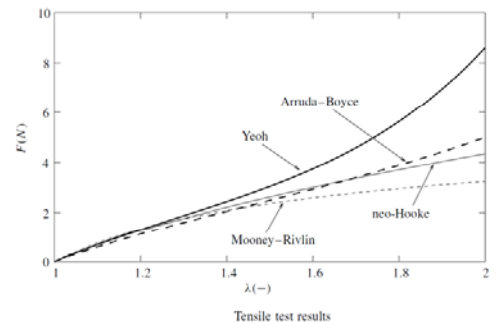


# 非線形解析機能2:超弾性材料

## Total lagrange法を利用

- **Neo-Hooke:**  $\Sigma = B_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2$
- **Mooney-Rivlin:**  $\Sigma = B_{10}(\bar{I}_1 - 3) + B_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2$
- **Arruda-Boyce:**

$$\Sigma = \mu \left[ \frac{1}{2}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2}(\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^4}(\bar{I}_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_m^6}(\bar{I}_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_m^8}(\bar{I}_1^5 - 243) \right] + \frac{1}{D} \left( \frac{(J^{el})^2 - 1}{2} - \ln J^{el} \right), \quad \mu, D \geq 0.$$
- **St. Venant-Kirchhof:** 線形弾性材、幾何非線形解析有効を選択する時



$$\Sigma = \frac{1}{2} \lambda (\text{tr } \mathbf{E})^2 + \mu \mathbf{E} : \mathbf{E}$$



# 非線形解析機能2:弾塑性材料

## Update lagrange法を利用

・基本仮定:  $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p$  弾性変形量は十分小さい!

・降伏関数: Von Mises  $f(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma^{dev})} - \sigma_Y$   
 Mohr-Coulomb  $f(\tau) = \sigma_1 - \sigma_3 + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - 2c \cos \phi = 0$   
 Drucker-Prager  $f = \sqrt{\tau} + \tan \beta \sigma_1 - Y = 0$

・流れ則: 連合流れ則

・硬化則:

	等方硬化	移動硬化	複合硬化
Von Mises	○	○	○
Mohr-Coulomb	○		
Drucker-Prager	○		

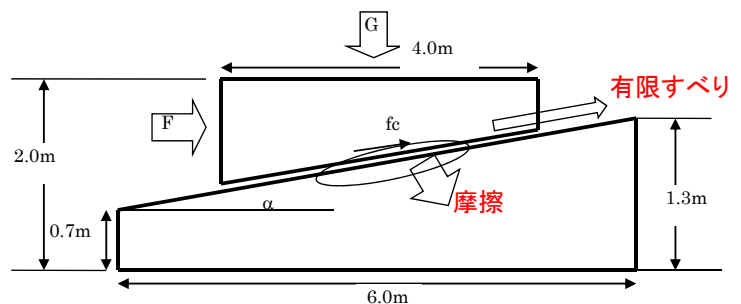
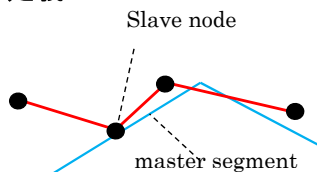
等方硬化: 線形硬化、多直線硬化、Swift, Ramberg-Osgood  
 移動硬化: Prager's rule



# 非線形解析機能3:接触

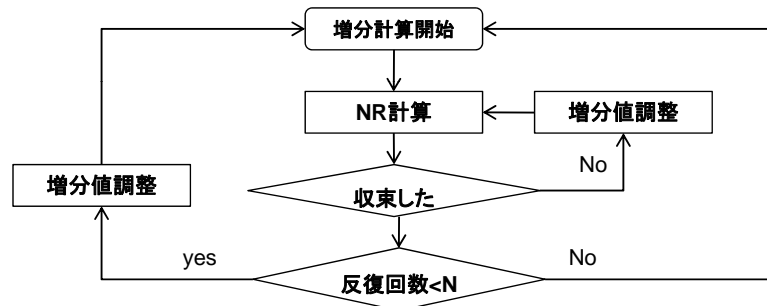
Lagrange法	Penalty法	○拡張Lagrange乗数法	○自由度消去法
接触力 $F=\lambda$ $\lambda$ : Lagrange未定係数	接触力 $F=P*g$ $P$ : Penalty常数	接触力 $F^{k+1}=(\lambda^k+P*g^k)$ $\lambda^k$ : 常数とみなす	$(u^s - u^m) \cdot n - g = 0$
・厳密な接触状態 ・変数追加	・変数増えない ・近似的な接触状態 ・方程式の条件数が悪くなる	・乗数増えないが、更新計算が必要 ・近似的であるが、コントロール可能	・厳密な接触状態 ・変数増えない ・利用範囲限定的

## 接触面の定義



## 非線形解析機能4:収束計算

- Newton-Raphson法+計算増分自動調整



- 収束判定 
$$P = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} |f_i|}{N_p} < \text{CONVCRIT} * \frac{1}{\sum_{e=1}^E \sum_{n_1=1}^{N_{n_1}} \left( \sum_{n_2=1}^{N_{n_2}} \sum_{l=1}^{N_{n_l}} |q_l| \right)}$$
- 孤長法など導入する予定



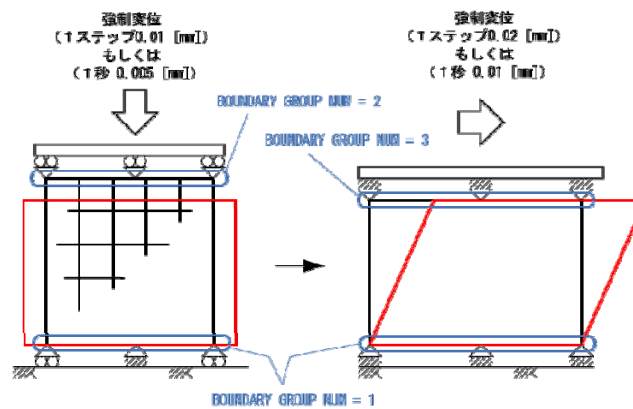
## 非線形解析機能5:接触の収束計算

- 接触条件の収束条件
  - 変形体間の干渉量  $< g_{ncr}$
  - 変形体間の滑り増分  $< g_{tcr}$
  - 接触の状態変化(接触→非接触、非接触→接触)
- 接触計算パラメータ
  - $\lambda^k + P * g^k$ : ペナルティ係数Pの指定
- 接触並列計算が未対応



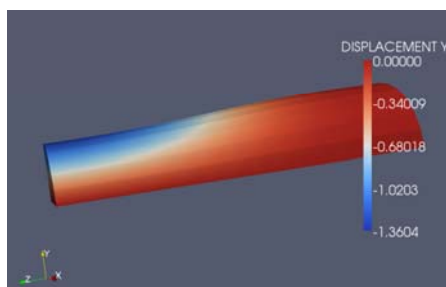
# 非線形解析機能6:その他1

## ■ マルチステップの対応

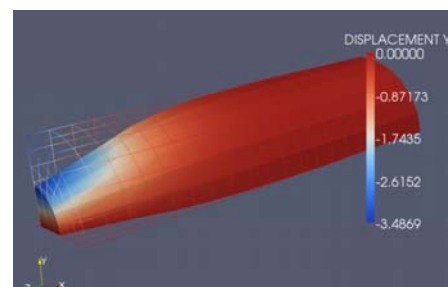


# 非線形解析機能6:その他2

## ■ 選択低減積分要素(SRI)の開発



全積分要素  $\delta=1.38$

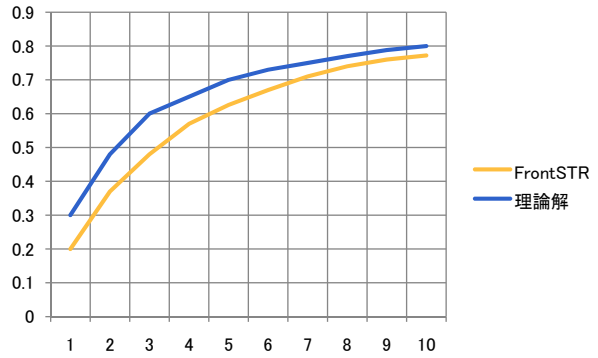
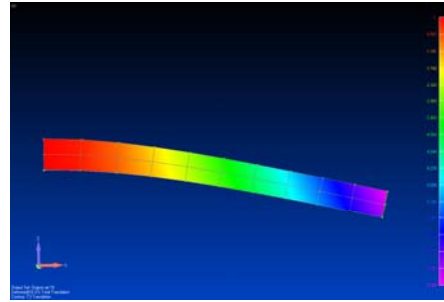
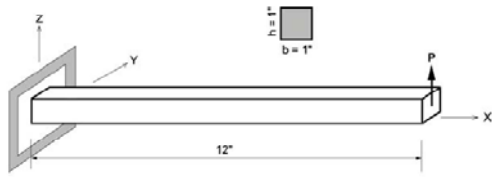


SRI要素  $\delta=3.55$

ref  $\delta=3.5$



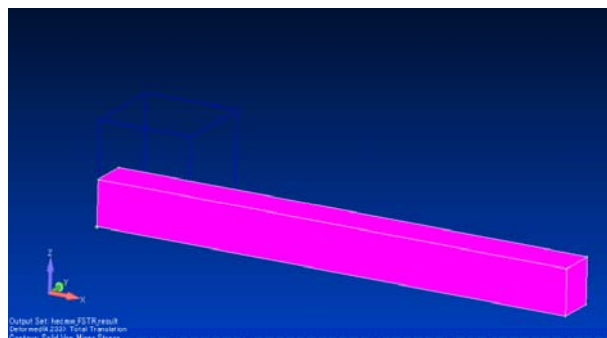
# 検証1: 非線形



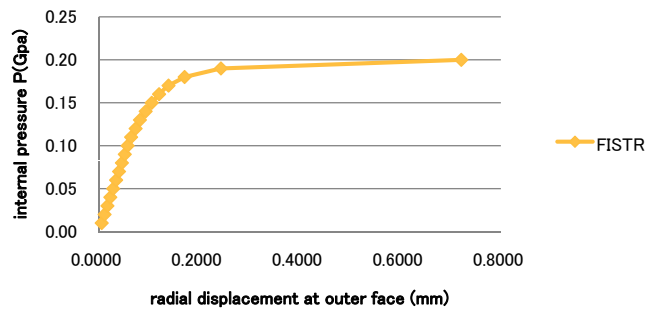
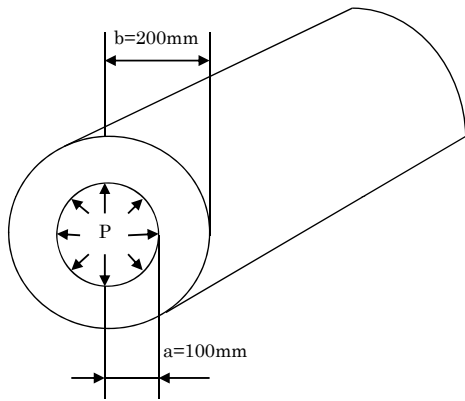
# 検証2: 超弾性

Reaction Force			
Node ID=l	x	y	z
FrontSTR	-1.0000E+05	2.8291E-08	2.8297E-08
ABAQUS	-9.9998E+04	9.6272E+00	9.6272E+00

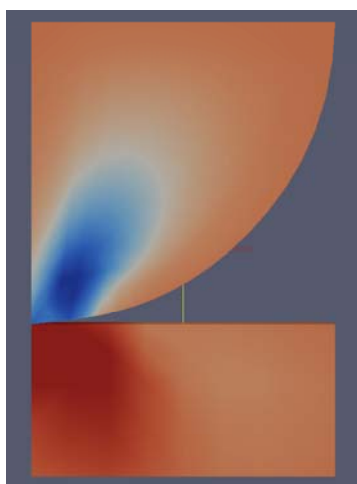
Displacement			
Node ID=7	x	y	z
FrontSTR	4.1598E+00	-5.5869E-01	-5.5869E-01
ref	4.1598E+00	-5.5869E-01	-5.5869E-01



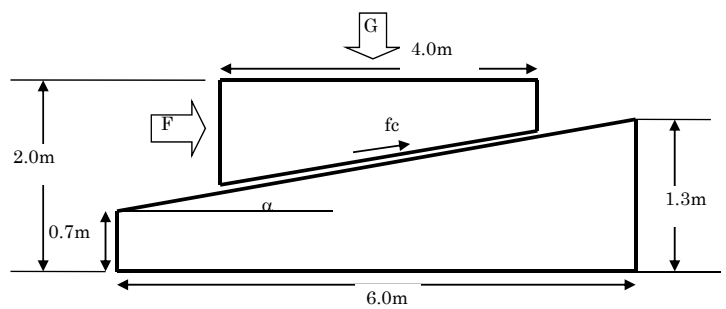
# 検証3: 弾塑性



# 検証4: 接触



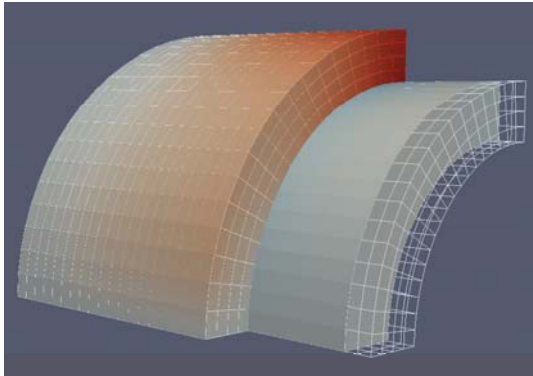
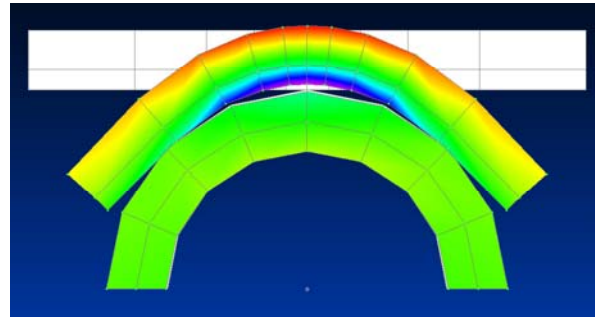
せん断応力分布 (理論最大値=15.6、計算=14.2)



$\mu$	F/G理論解	F/G計算結果
0.0	0.1	0.1
0.1	0.202	0.202
0.2	0.306	0.306
0.3	0.412	0.412



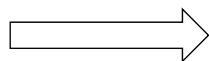
## 検証5: 接触



15

## まとめ

- Total Lagrange法およびUpdated Lagrange法の導入より,基本的な解析手法を備えた。
- 非線形材料の計算手法の確立  
未完成機能: 粘弾性、粘塑性、歪弾性
- 接触解析の導入  
未完成機能: 剛体-変形体接触、並列計算対応
- 未完成機能: 非線形動的解析



基本的な解析ツールが揃える



16

# まとめ



**Advance/FrontSTR  
は100%の国産ソフトで  
あり、迅速および細か  
い対応は強みである。**

