

## FDF小委員会

# 繰返し荷重下での低サイクル疲労および延性破壊に対する評価法の整備に関する調査研究 (数値解析検討WG)

この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。

(一社)日本溶接協会原子力研究委員会の50周年以降10年間のまとめ資料  
(2019年):**FDF小委員会「繰返し荷重下での低サイクル疲労および延性破壊  
に対する評価法の整備に関する調査研究」**

本資料は、**FDF小委員会数値解析検討WG**の主要な成果を以下の構成でまとめたものである。

2.1 1TCT試験片によるモードI繰返し負荷試験の  
トレース解析(一部CT試験片の予測解析を含む)

(1)～(9) 各研究機関の結果概要

(10) まとめ

2.2 繰返し負荷条件下の周方向貫通亀裂付配管  
の亀裂進展予測解析

## ■ 目的及び概要

- 低サイクル疲労および延性破壊に対する評価法の整備(構成式, 破壊クライテリア, FE解析モデル, 要素, 亀裂進展手法も含む)のため, 以下のベンチマーク問題を設定した。

対象試験片: 炭素鋼(SGV410鋼)1TCT試験片

繰返し荷重条件:  $R=-1.0$

負荷応力レベル:  $0.7P_{\max}$ ,  $0.5P_{\max}$  ( $P_{\max}=80\text{kN}$ )

破壊力学クライテリア:  $\Delta J$ または他のクライテリア

解析手法: 従来のFEA, 損傷力学等

- オプションとして, 上記CT試験片( $0.6P_{\max}$ 条件も追加)及び繰返し荷重下の周方向非貫通亀裂付配管の亀裂進展予測解析も実施した。
- 各研究機関の次ページに示す。

## 2.1 1TCT試験片によるモードI繰返し負荷試験のトレース解析

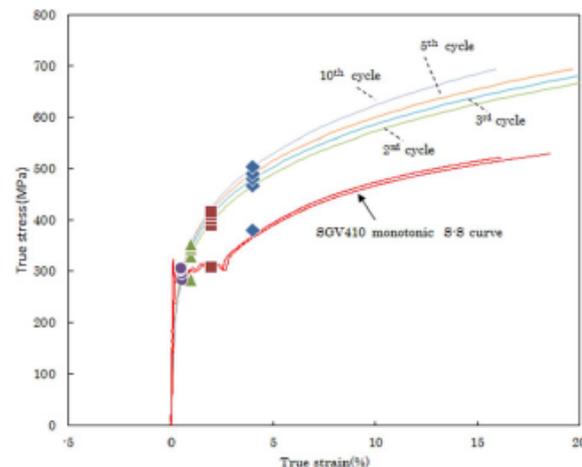
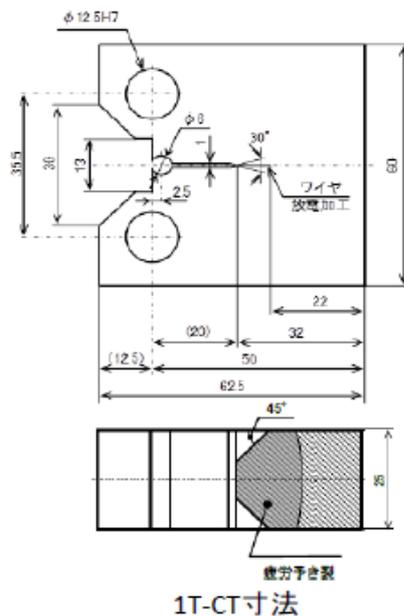
### ■ 目的及び概要

No.	研究機関	Generation Phase			Application Phase	独自破壊パラメータ	研究方針
		材料パラメータ同定	対象 (表記なし1T-CT)	$\Delta J$ 評価			
1	A	複合	0.5, 0.7, 0.8 $P_{max}$ 配管非貫通き裂	○	0.5, 0.6, 0.7, 0.8 $P_{max}$ 配管非貫通き裂	参照応力法	ABAQUS、六面体要素、参照応力法
2	B	複合	0.5, 0.6, 0.7, 0.8 $P_{max}$	○	0.6 $P_{max}$	繰返し荷重 J積分	Marc、六面体要素、サムネイルき裂、繰返し荷重J積分、ピン境界条件
3	C	複合	0.5, 0.7, 0.8 $P_{max}$ 1.5T-CT 0.8 $P_{max}$	○	0.8 $P_{max}$	$A\sigma_{tri} + B\epsilon_{pl}$	ANSYS、四面体要素、サムネイルき裂、 $\Delta J$ 、独自破壊パラメータ
4	D	複合	0.7 $P_{max}$	○	0.6 $P_{max}$	損傷	インハウスコード(GTNモデル[損傷力学])
5	E	等方	単調増加荷重	—	—	局所ルール	インハウスコード(Peridynamics)、粒子間結合力解法、LS-DYNA(6面体要素)
6	F	複合	0.7 $P_{max}$	—	—	—	ABAQUS、六面体要素
7	G	複合	0.7 $P_{max}$	—	—	—	ABAQUS、六面体要素
8	H	複合	0.5, 0.7 $P_{max}$	○	0.6 $P_{max}$	—	Marc、六面体要素
9	I	複合	0.8 $P_{max}$	—	—	—	ANSYS、六面体要素

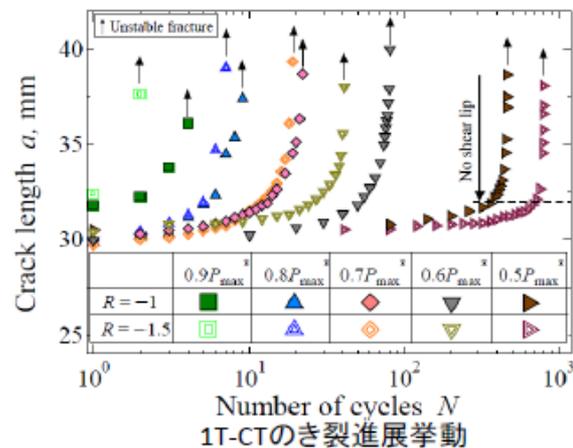
## 目的及び概要

### 各機関共通 1 of 2

- 1T-CT試験片
- 荷重 $0.7P_{max}$ ,  $0.5P_{max}$
- 複合硬化則(移動硬化 Chaboche+等方硬化Voce)



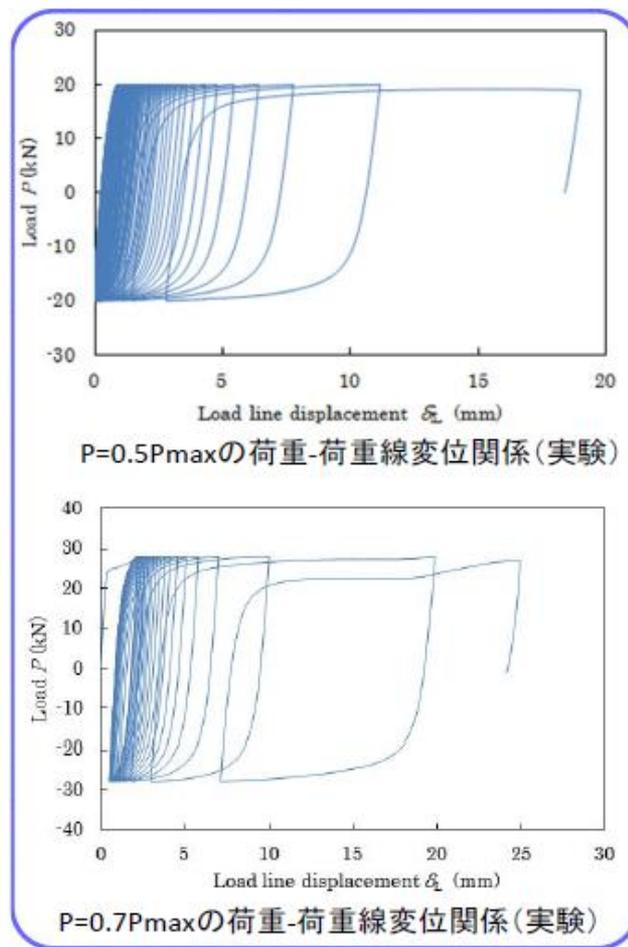
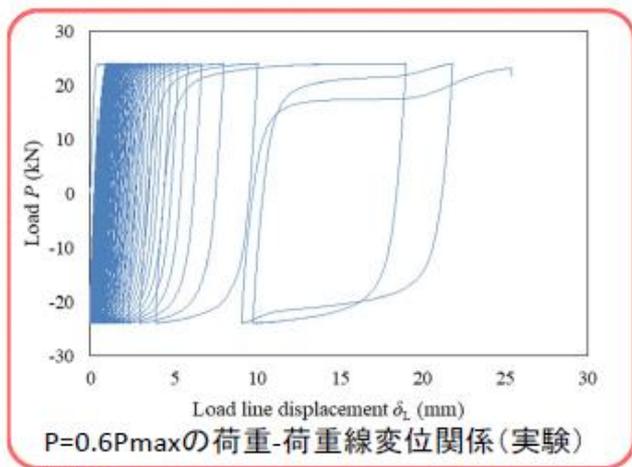
応力-ひずみ曲線(等方硬化則)



## ■ 目的及び概要

### 各機関共通 1 of 1

- 1T-CT試験片
- 荷重0.7Pmax, 0.5Pmax
- 複合硬化則(移動硬化 Chaboche+等方硬化Voce)
- Application phase解析に0.6Pmaxを指定

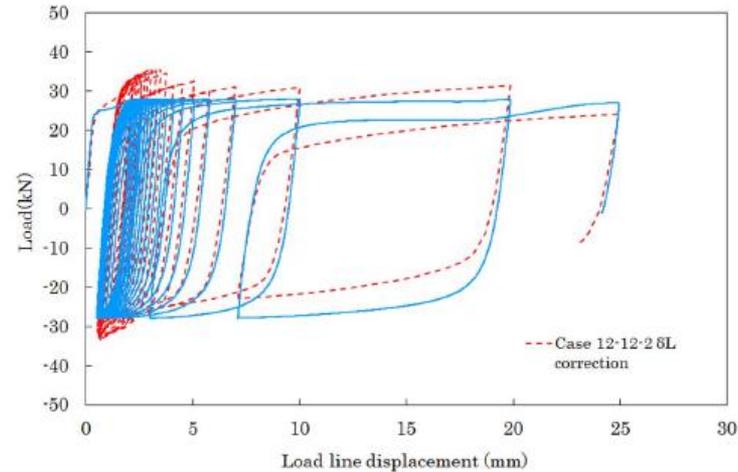


### 研究機関A

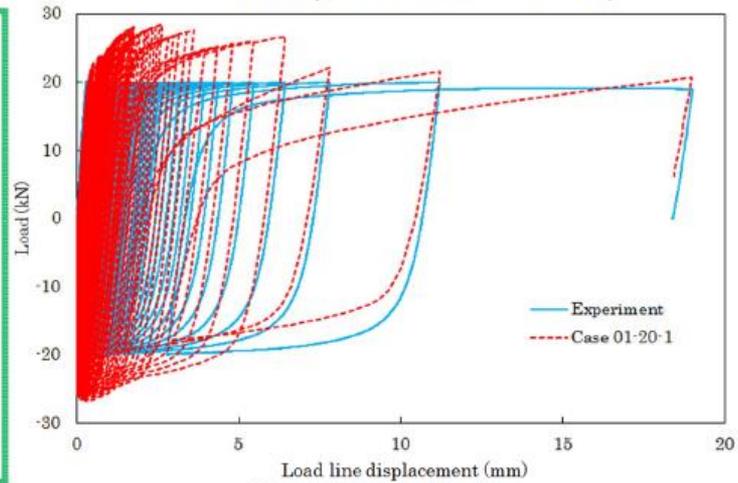
- 汎用FEM Abaqus
- 構成式のパラメータ決定
- 0.7,0.5Pmaxトレース解析
- da/dN-ΔJおよび破断回数予測、JSME等の規格と比較

$$\sigma_0 = \sigma_0| + Q_\infty \{1 - e^{-b\varepsilon_{pl}}\}$$

$\sigma_0|$  : 1サイクル目の降伏点(A点)  
 $Q_\infty$  : 10回目の $\varepsilon_{tot} = 18\%$ での応力 -  $\sigma_0|$ (C点真応力-A点真応力)  
 $\sigma_0$  : 降伏曲面の大きさ(点B)  
 (2回目の $\varepsilon_{tot} = 18\%$ での応力)  
 $b$  : 2サイクル目の $\varepsilon_{tot} = 18\%$ での応力 (点C)と $\sigma_0|$ 、 $Q_\infty$ から算出した材料パラメータ



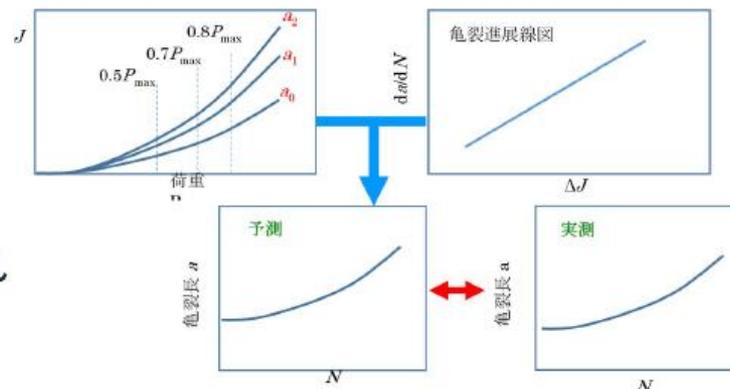
P-δ関係 (繰返し荷重, 0.7Pmax)



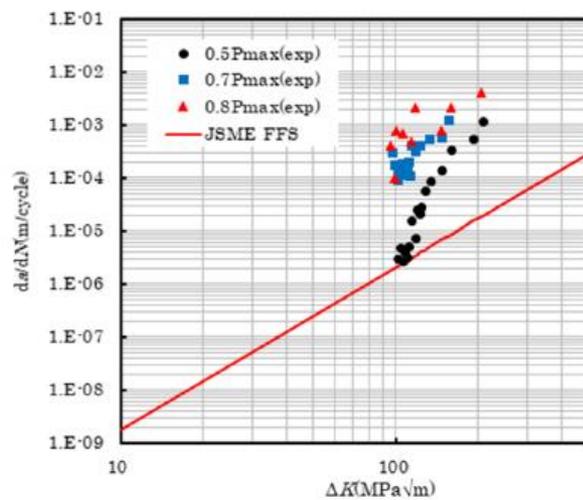
P-δ関係 (繰返し荷重, 0.5Pmax)

### 研究機関A

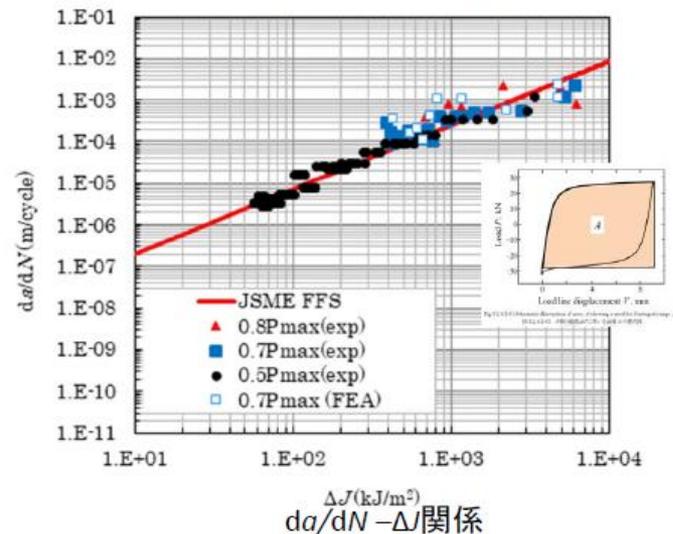
- JSME維持規格との比較
- $\Delta K$ では乖離が大きい
- $\Delta J$ はヒステリシスにより囲まれる面積がよく一致



過大繰返し負荷時の亀裂進展解析フロー



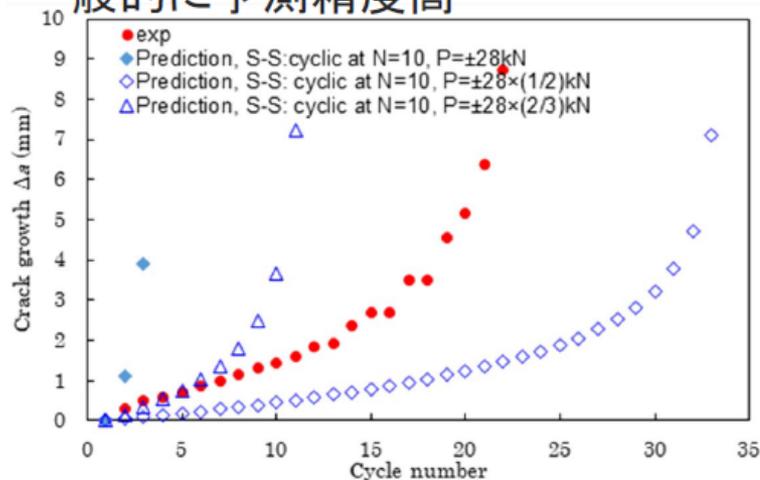
$da/dN - \Delta K$ 関係



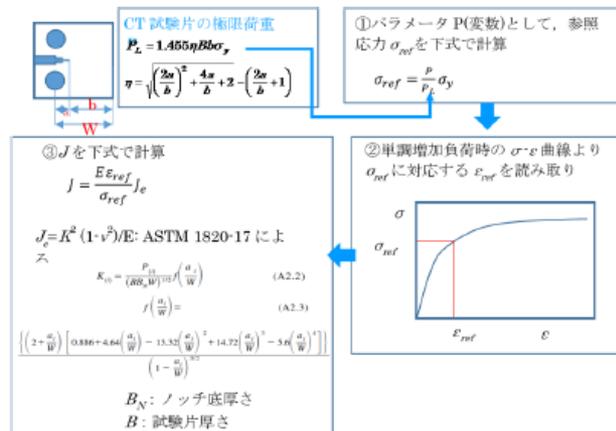
$da/dN - \Delta J$ 関係

# 研究機関A

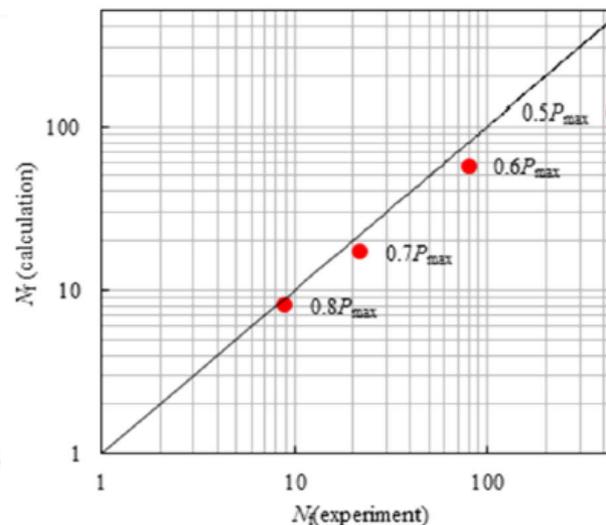
- 0.7, 0.8Pmax、両振り荷重を変動荷重を仮定すると過度に保守的
- Kumarと平面ひずみ条件のTrescaによる極限荷重式が一般的に予測精度高



亀裂進展量Δaと繰返し数N関係(0.7Pmax)



参照応力法によるΔ計算フロー



破壊時繰返し回数の予測

## 研究機関A まとめ

- 0.7Pmax条件の繰返し負荷条件で求めた引張特性データをもとに、構成式のパラメータ決定法を検討
  - 初期塑性ひずみがないときの降伏曲面応力は1サイクル目のひずみ30%のときの応力、降伏曲面の飽和変化量も10サイクル目のひずみ30%の応力から初回のひずみ30%の降伏曲面の応力の差としたものが、実験結果と比較的一致
- 0.7Pmax条件のいずれのケースも、初期サイクルでは試験結果より荷重の絶対値を過大、サイクル数が大きくなると圧縮荷重の絶対値は試験結果より小さい
- 試験データの最大ひずみ18%での応力を使用して決定、パラメータで0.5Pmax条件の繰返し試験のトレース解析を実施、0.7Pmax条件より実験値との不一致
- Abaqusでは $Q_{\infty}$ は、負荷ひずみによらず一定であることが実験結果に一致しない一因、亀裂長が荷重-変位曲線に敏感なことから、亀裂進展量の計測精度の影響

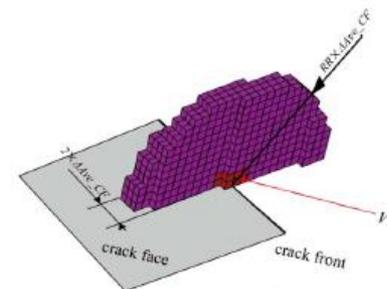
## 研究機関B

- 汎用FEM MSC.Marc
  - サムネイル、ピン境界条件、Chabocheモデル等検討
- 繰返し荷重下のき裂進展解析をSTS410材1TCT試験片、0.5,0.6,0.7 Pmax, R=-1
  - パラメータ同定法確立済

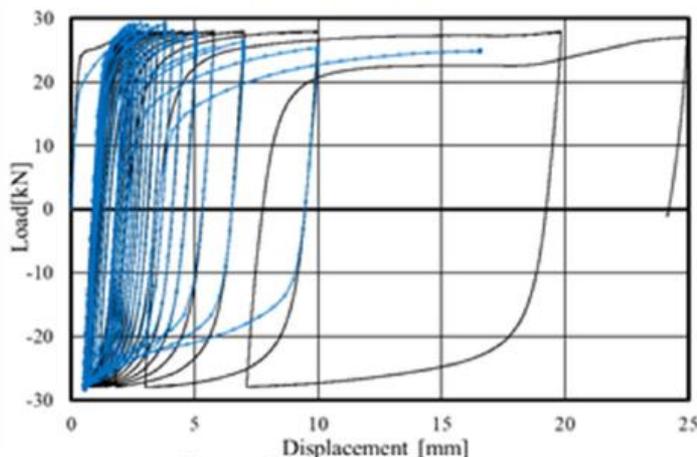
$$J = -\frac{1}{\Delta A} \int_{V_0} \left( W_0 \delta_{ij} - \Pi_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial q(x)}{\partial X_i} dV \quad (1) \text{ 従来}$$

$$J = -\frac{1}{\Delta A} \int_{V_0} \left( W_0 \delta_{ij} - \Pi_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial q(x)}{\partial X_i} dV - \frac{1}{\Delta A} \int_{V-V_0} q(x) \left( \frac{\partial W_0}{\partial X_i} - \Pi_{ij} \frac{\partial^2 u_j}{\partial X_i \partial X_1} \right) dV \quad (2)$$

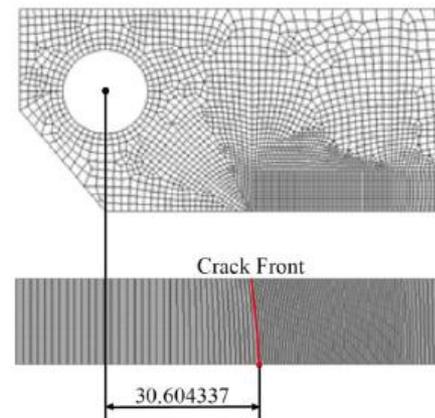
大変形弾塑性問題で第二項必要



領域積分法によるJ積分計算領域(例)



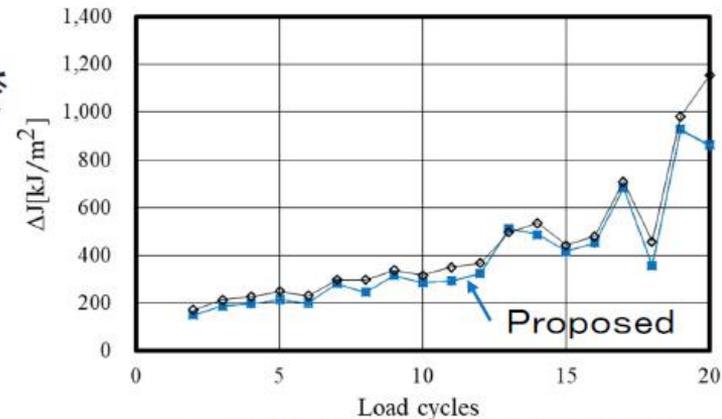
0.7Pmax荷重-荷重線変位(22サイクル)



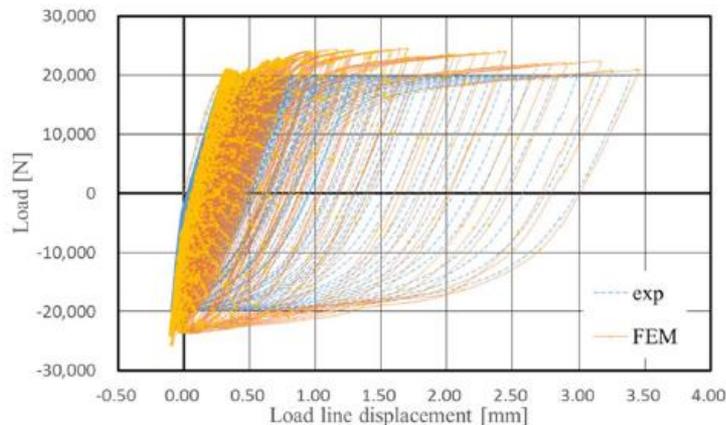
サムネイル形状を模したメッシュ

## 研究機関B

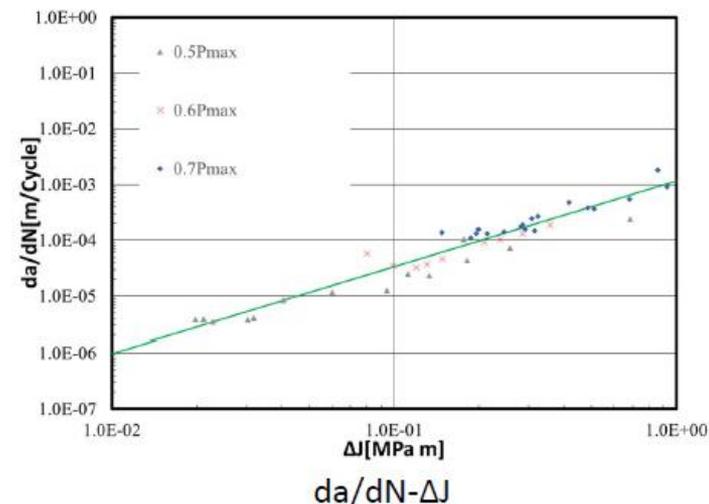
- 0.5Pmaxの最終サイクルまで計算済
- 提案手法による $\Delta J$ は簡易式とも定量的にもよい一致
- 0.5,0.6,0.7Pmaxの $\Delta J$ とき裂進展速度の関係が得られた



$\Delta J$ の比較：提案手法と簡便評価式



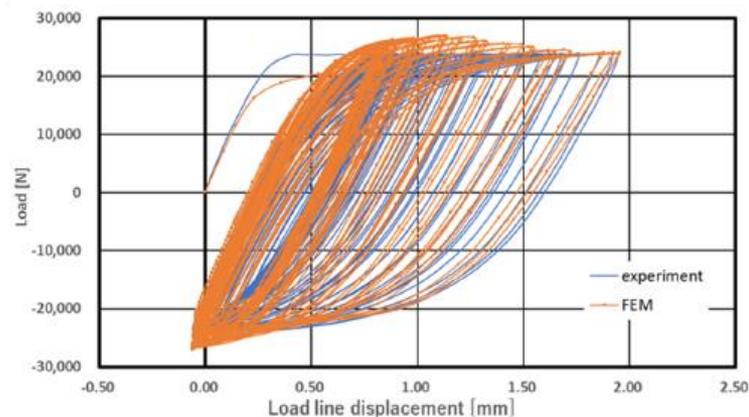
0.5Pmax荷重-荷重線変位(463サイクル)



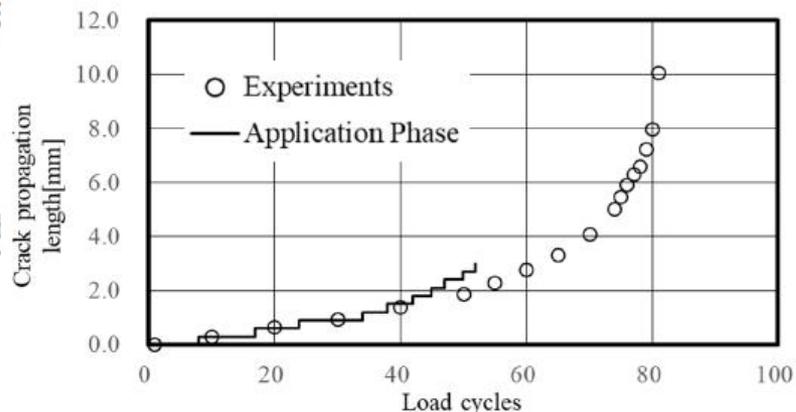
da/dN- $\Delta J$

## 研究機関B

- 0.6Pmaxのapplication phase解析を実施、定量的な一致も部分的に確認
- 三次元領域積分表示の $\Delta J$ で評価を行いトレース解析でまとめた $da/dN-\Delta J$ 関係からき裂進展量決定
- 実験で計測されたき裂長さのデータよりも、やや速いき裂進展
- $\Delta J$ の評価を行うサイクル数の決定やき裂進展を行う荷重サイクル数の決定法には検討の余地



荷重-荷重線変位関係



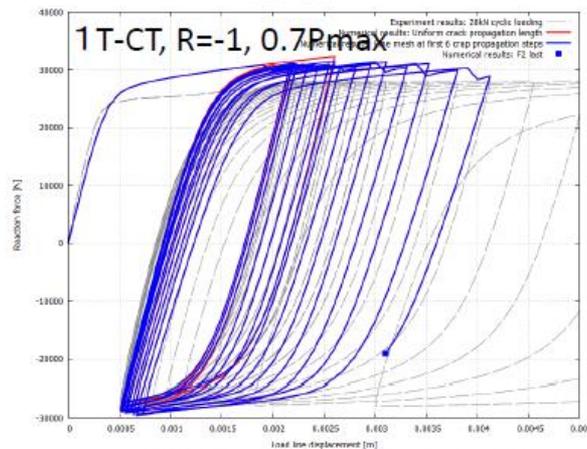
き裂進展量-荷重サイクル

## 研究機関B まとめ

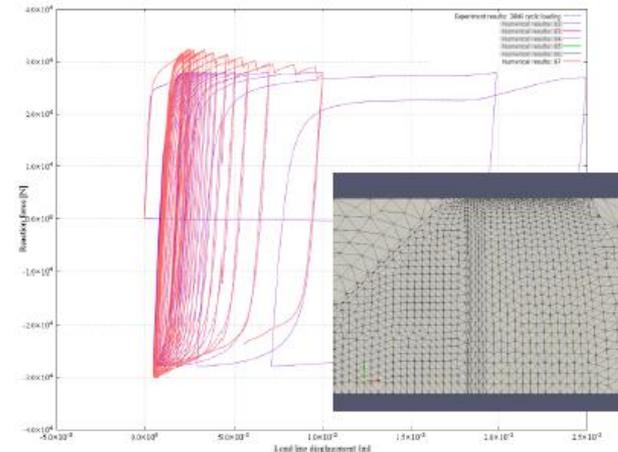
- 荷重 $0.8P_{max}$ 、Chabocheでも荷重振幅を過小評価
- 荷重 $0.7P_{max}$ 、15サイクル目まで有限要素法解析の最大荷重値が実験とほぼ一致、その後実験データよりも小さい
- 圧縮最大荷重は、荷重10サイクル目付近で実験値にほぼ一致、その他のサイクルでは最大圧縮荷重をやや小さめに評価、FEA結果と実験の変位-荷重関係良好に一致
- 境界条件を精密化、引張荷重に対してはピン位置に強制変位、圧縮荷重時には圧縮荷重ジグ位置に強制変位
- 荷重はき裂面の面積に大きく依存
- 荷重1サイクル目では、荷重サイクルの荷重—荷重線変位曲線を用いた面積から計算したものと、三次元領域積分法によるJ積分計算結果に近い値(2サイクル目以降不一致)
- FEAを実施し十分な経路独立性示す
- 新しいJ積分範囲 $\Delta J$ の三次元領域積分表示による $\Delta J$ を用いてき裂進展速度の関係を良好に整理、この結果から $da/dN-\Delta J$ 関係式を推定

## 研究機関C

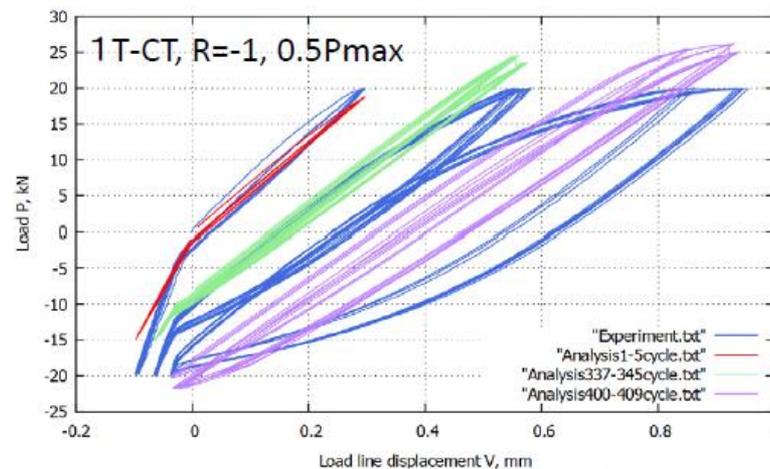
- 汎用FEM ANSYS
- モデリングの自由度の観点から四面体二次要素
- 構成則の検討、静的解析・疲労き裂進展解析を実施
- 0.5, 0.7Pmax, 1.5T-CT  
0.8Pmaxを解析



初期き裂進展縮小モデル



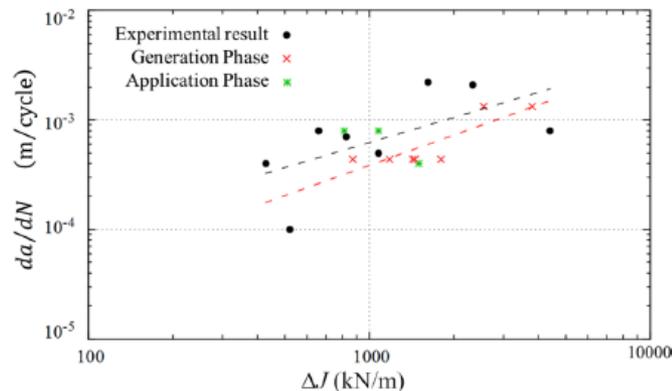
同定された荷重-荷重線変位



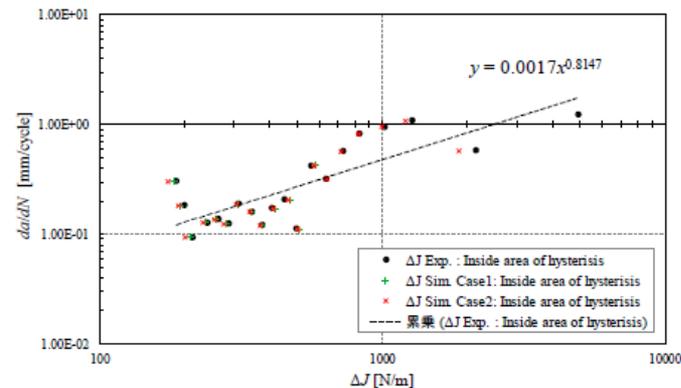
サイクルジャンプを実施した結果

# 研究機関C

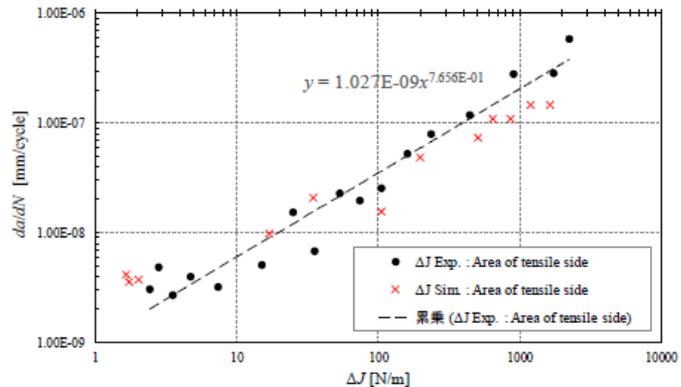
- 汎用FEM ANSYS
- モデリングの自由度の観点から四面体二次要素
- 構成則の検討、静的解析・疲労き裂進展解析を実施
- 0.5, 0.7Pmax, 1.5T-CT  
0.8Pmaxを解析



Application phase解析結果

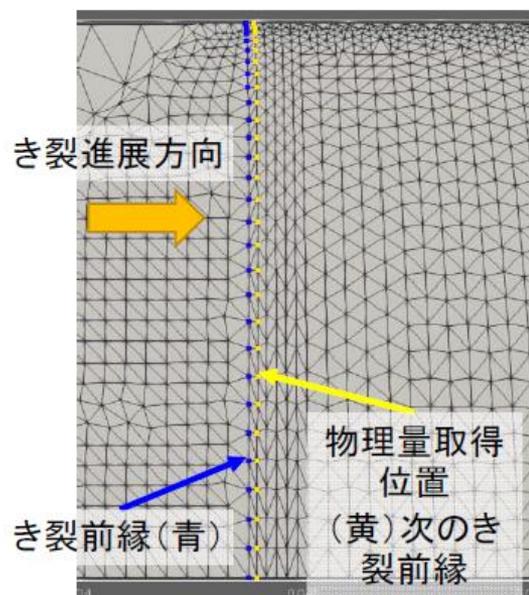


トレース解析に用いた1/4モデル

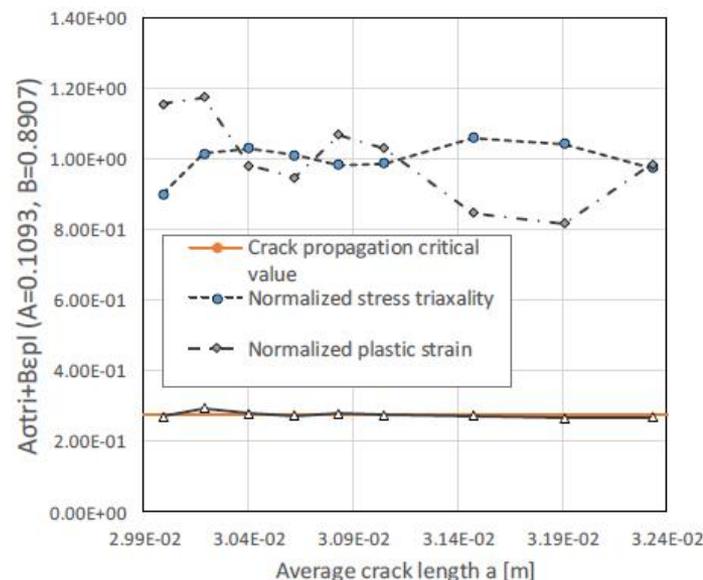


荷重線変位-解析ステップ関係(節点解放)

## 研究機関C



青(き裂前縁)、黄色(応力三軸度、相当塑性ひずみ計測位置)



応力三軸度と相当塑性ひずみの分布  
混合基準  $A\sigma_{tri} + B\varepsilon_{plastic} = 1$  の分布

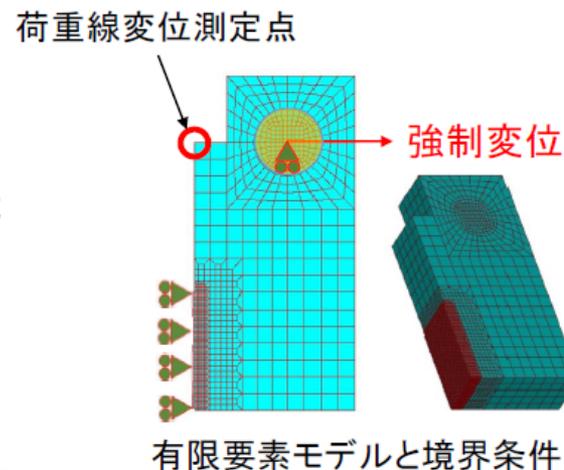
き裂先端近傍節点の応力三軸度および相当塑性ひずみの分布から  $A\sigma_{tri} + B\varepsilon_{plastic}$  ( $A+B=1$ ) として最小二乗法により最も直線に近くなる  $A$  を決定、この条件でき裂進展

## 研究機関C まとめ

- 四面体によるモデリングの自由度の高さ
- 解析の安定性に関する検討
  - 要素サイズの縮小化(特にき裂進展初期): 解析が途中で不安定となるためより形状に配慮したメッシュ分割
- き裂長さは荷重-変位曲線に対し感度大
- 荷重-荷重線変位は概ね実験結果を再現
- $da/dN-\Delta J$ によるデータの整理
- $0.8P_{max}$ によるapplication phase解析
  - $da/dN-\Delta J$ の傾向は一致
- $A\sigma_{tri} + B\varepsilon_{plastic} = 1$ による破壊クライテリアの可能性示唆、  
き裂先端位置による補正は今後の課題

## 研究機関D

- GTNモデル: 損傷力学解析を実施することで、延性的な亀裂進展を数値解析上で再現
- パラメータ決定のための試行計算  $f_c, f_F, k_\omega, B$



$$\Phi = \frac{\overset{\text{偏差応力}}{3 \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}}{\underset{\text{相当応力}}{2 \bar{\sigma}_m^2}} + \overset{\text{ポイド率}}{2 f^* q_1} \cosh \left( \overset{\text{定数 } q_2 = 1.0}{\frac{q_2 \sigma_{kk}}{2 \bar{\sigma}_m}} \right) - (1 + q_1^2 f^{*2}) = 0$$

定数  $q_1 = 1.5$

臨界ポイド率の更新

$$f^* = f_c + \frac{\overset{\text{パラメータ}}{1/q_1 - f_c}}{\underset{\text{パラメータ}}{f_F - f_c}} (f - f_c)$$

$$\dot{f} = \dot{f}_{nucleation} + \dot{f}_{growth}$$

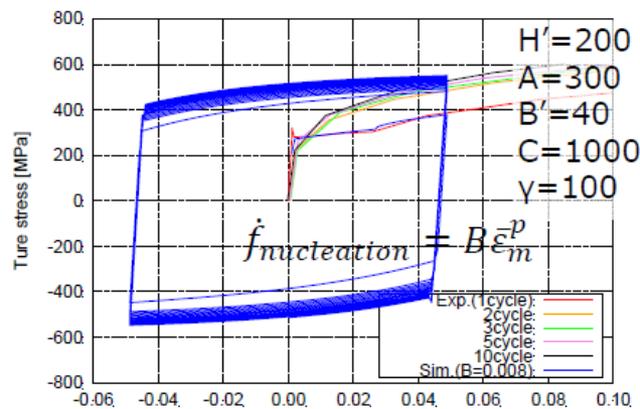
$$\dot{f}_{nucleation} = B \hat{\epsilon}_m^p$$

パラメータ

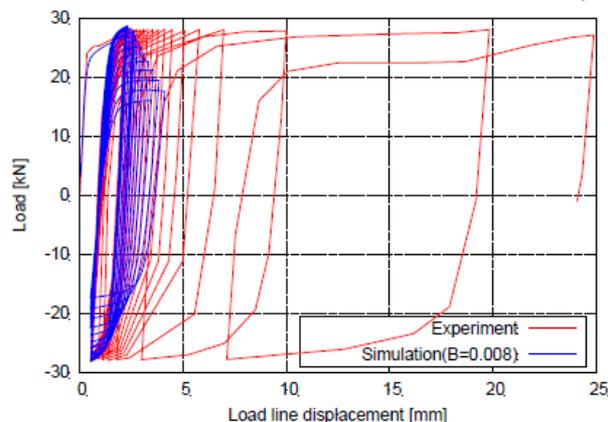
$$\dot{f}_{growth} = (1 - f) \dot{\epsilon}_{kk}^p + \cancel{k_\omega f \omega(\sigma) \frac{\sigma'_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p}{\bar{\sigma}_m}}$$

せん断項は含めない

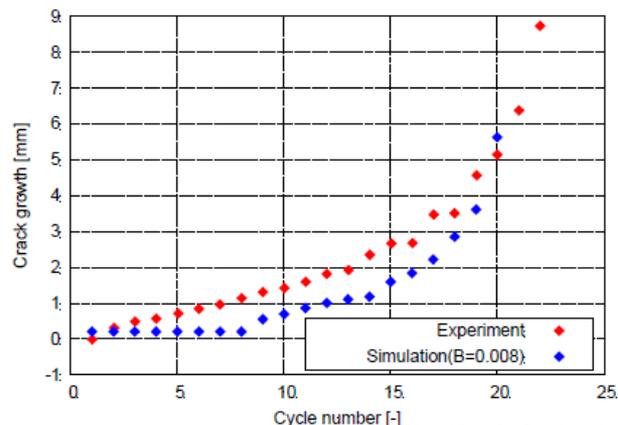
# 研究機関D



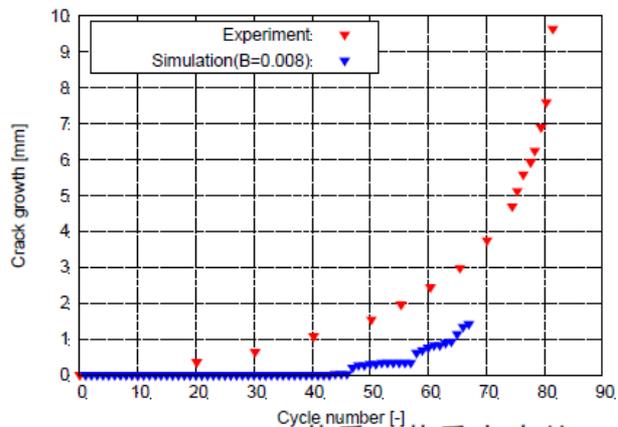
応力ひずみ関係 (AFおよび等方硬化)



Generation phase 荷重-荷重点変位



Generation phase き裂長さ-荷重点変位



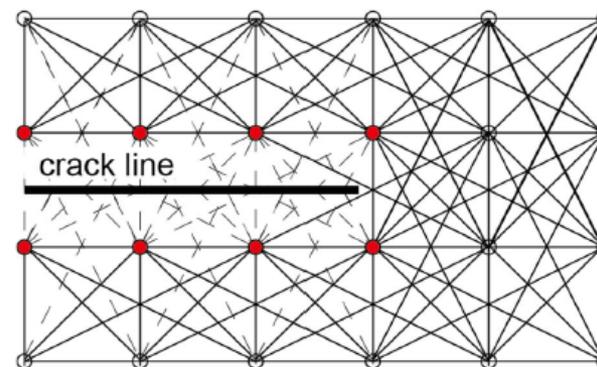
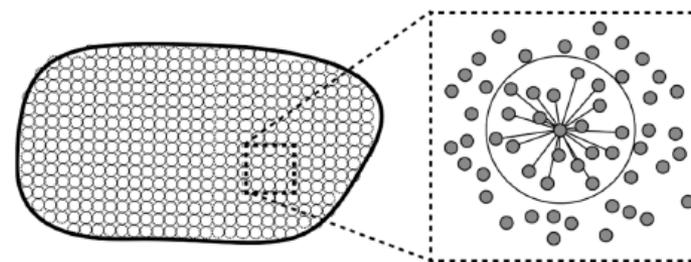
Application phase 荷重-荷重点変位

## 研究機関D まとめ

- Gursonモデルを繰返し荷重問題に拡張
- 複合効果則: 等方硬化にVoce則、移動硬化にArmstrong-Frederick則
  - ボイド率の減少するモデルが良好な一致
  - き裂の長さおよびき裂の形状も定性的に一致
  - $\Delta J$ はJSMEのFFSと比較し定性的傾向一致
- $0.6P_{max}$ の繰返し負荷試験を対象にapplication phase解析を実施
  - 荷重-荷重線変位は実験よりも大きな値
  - 繰返し荷重における変位量も大きくなるため、荷重の変化やき裂長さの変化に注目が必要
  - $da/dN-\Delta J$ でJSMEのFFSが与える結果と近い結果

## 研究機関E

- Peridynamics: 分動力学の連続体バージョン
- FEM 等の弱形式とは全く異なる定式化
  - NOSB-PD 材料構成則
  - OSB-PD 相互作用力
- 粒子間の相互作用力(結合力)により運動を表す
- 離散点のみでモデル化(粒子法ひとつ)

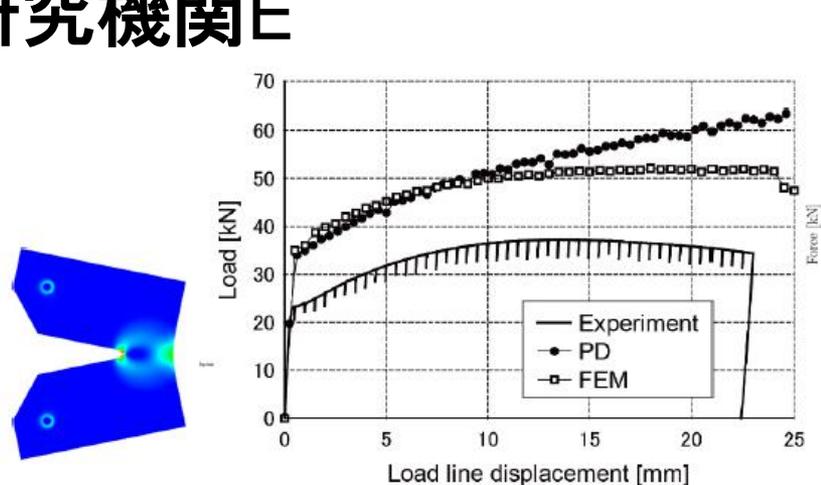


$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \int_{\mathcal{H}_x} (\mathbf{T} - \mathbf{T}') dV + \mathbf{b}$$

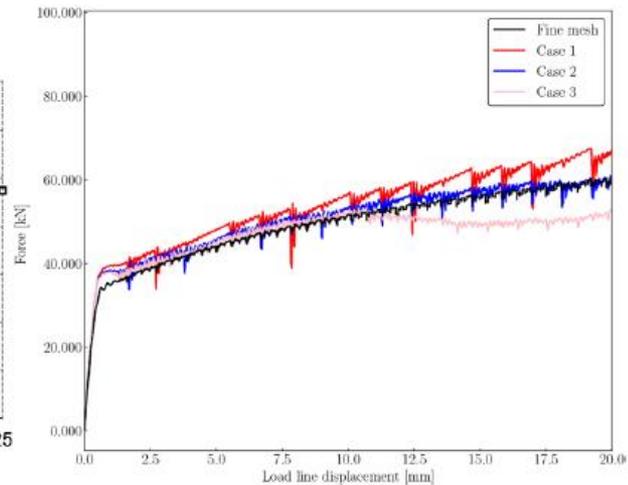
き裂の定義

- 粒子間の結合力の削除
- 厳密なき裂先端位置は数%の誤差

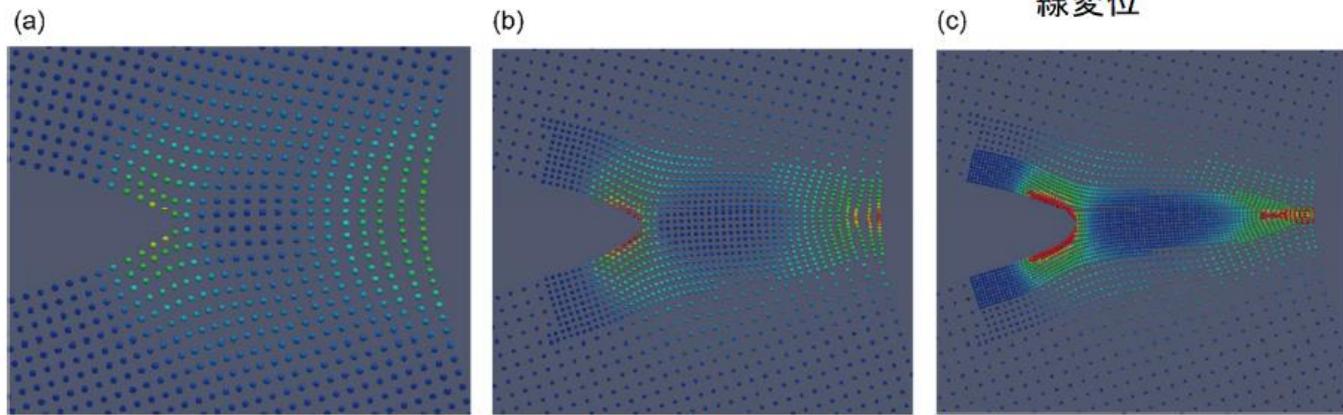
# 研究機関E



2次元解析結果(相当塑性ひずみ・荷重-荷重線変位)



異なる粒子配置を用いた荷重-荷重線変位

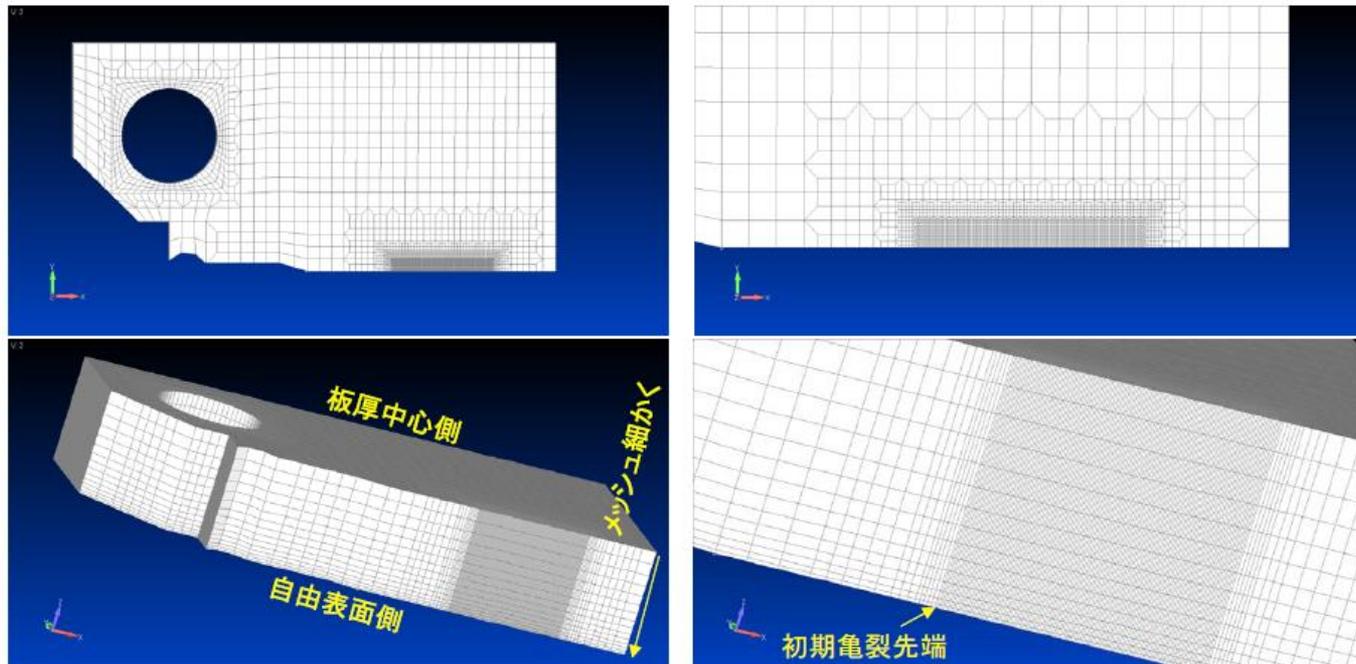


Dual horizon peridynamics モデル(Case1),(Case2),(Case3)

## 研究機関E まとめ

- Dual horizon peridynamics モデルにより解析精度の向上
- 三次元peridynamics解析を実施
- OSB-PD
  - DHPDを適用することにより、計算コストの低減を図り、少ない粒子数で解析を行うことが可能
  - 特に3次元解析では、粒子数1,295,875から122,400となり、現実的な計算コスト
- NOSB-PD
  - NOSB-PDを用いてき裂進展解析を行った。ゼロエネルギーコントロールを行わない例では、挙動が大きく異なり、ゼロエネルギーコントロール必要
  - いくつかの係数 $C^{ZE}$ を用いて解析を行ったが、未だ解析の不安定性

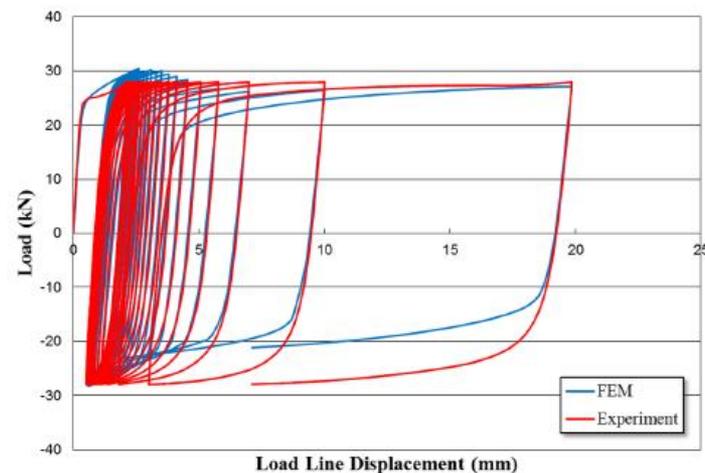
## 研究機関F



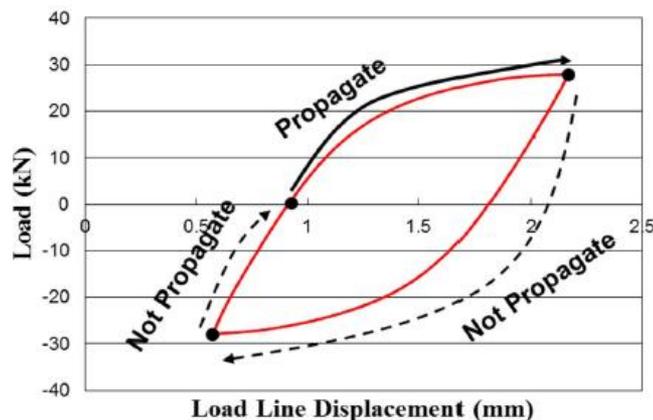
- ¼モデル
- 節点数: 約63000
- 最小メッシュサイズ: 0.1mm X 0.1mm X 0.1mm

## 研究機関F

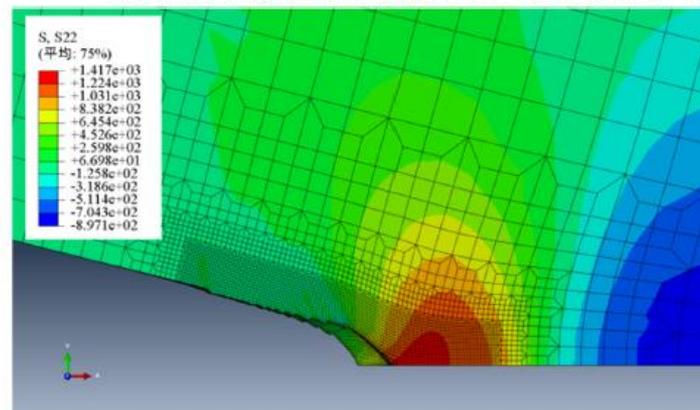
- 応力ひずみ関係の同定
- 0.7Pmaxの解析を実施
- 良好な荷重の一致
- き裂進展タイミングの妥当性確認



荷重-荷重線変位曲線, 20サイクル目まで



き裂進展タイミングの仮定



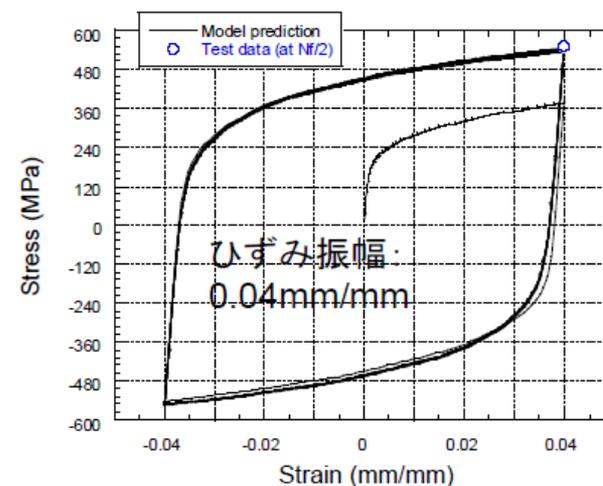
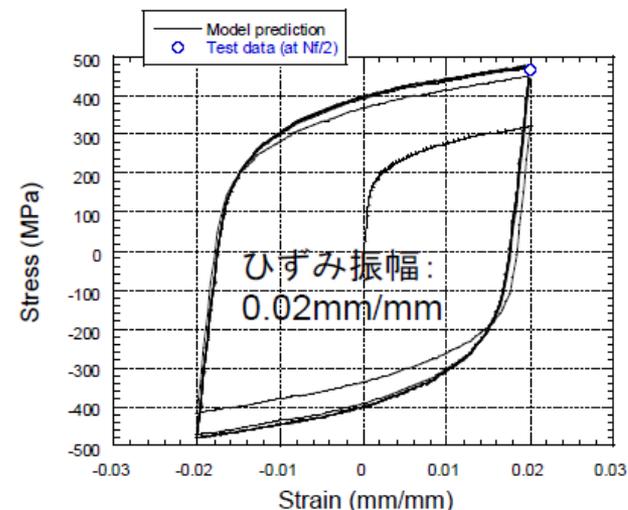
正最大応力分布(ミーゼス応力)

## 研究機関F まとめ

- 一定比分配法と繰返し硬化挙動模擬手法の2種類の複合構成則合わせこみ手法提案
- 高ひずみでの繰返し硬化挙動は繰返し硬化挙動模擬手法の方が高精度に予測可、低ひずみでの繰返し硬化挙動は一定比分配法の方が高精度に予測
- 広範囲なひずみ領域で繰返し硬化挙動を実験結果と一致させるためには、本研究で提案した手法では不十分
- ある1サイクルにおいて、ゼロ荷重から正のピーク荷重に至る過程でのみき裂進展が生じると仮定
- 実験結果を概ね精度良く再現可
  - 初期のサイクルにおいては、正のピーク荷重が実験結果より僅かに大きく、負のピーク荷重は実験結果と良く一致
  - 終期のサイクルになるにつれて、正のピーク荷重が実験と良く一致し、負のピーク荷重が実験結果よりも大きくなる傾向

## 研究機関G

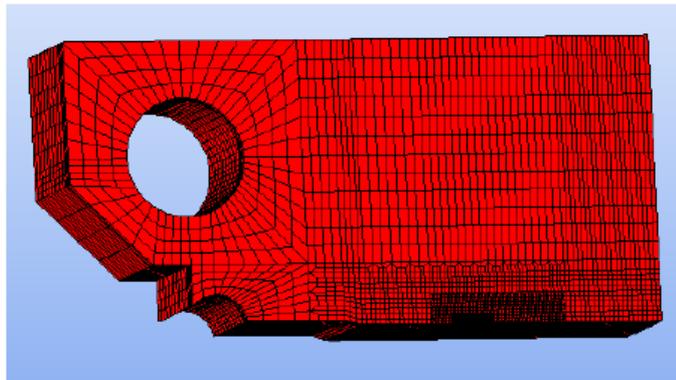
- 汎用FEM ABAQUS(UMAT利用)
- 時間非依存弾塑性構成則
  - Misesの降伏条件と関連流れ則
  - 等方硬化(降伏応力の増大) + 移動硬化
  - 移動硬化: Ohno-Wangモデル (基本的に多直線近似)
- STPT410用モデルを修正し、今回の解析対象材料にフィッティング



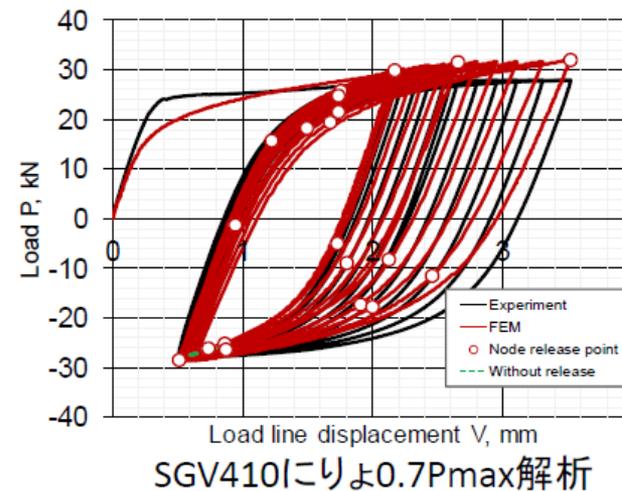
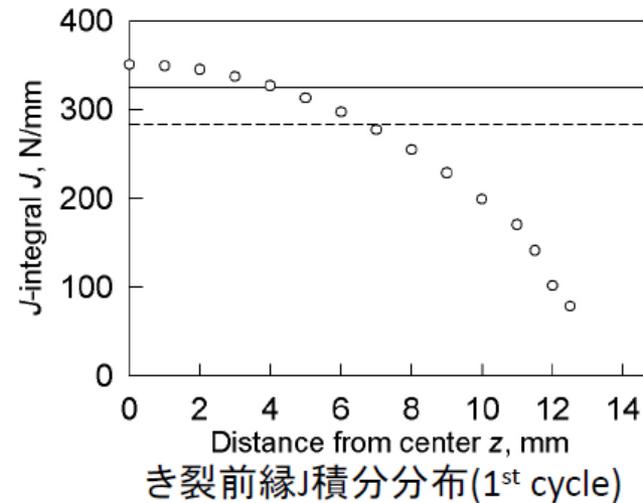
)

## 研究機関G

- 構成式のパラメータ同定実施
  - その他ひずみ振幅0.01および0.005にても実施
- 0.7Pmax解析実施
- J積分値のき裂前縁分布、簡易評価式と比較



節点数:41550、要素数:36610、  
最小メッシュ長さ:0.1mm



## 研究機関G まとめ

- 1TCT試験片、最大荷重 $0.7P_{max}=28\text{kN}$ 、応力比 $R=-1$ の繰返し試験のトレース解析を実施
- 時間非依存弾塑性構成則(Ohno-Wangモデル)を利用
- ばらつきはあるものの、有限要素解析によって、試験の荷重-荷重線変位の関係を良好に予測
- 簡易評価より求めたJ積分値は、おおよそ1/4板厚部の経路積分値に対応

# 研究機関H

降伏関数

$$f = \bar{\sigma} - (R+k)$$

$$\bar{\sigma} = \left( \frac{3S_{ij}S_{ij}}{2} \right)^{0.5}$$

$$S_{ij} = \sigma'_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma'_{kk}$$

$$\sigma' = \sigma - X$$

等方硬化

$$\dot{R} = b(R_{\infty} - R)\dot{\lambda}$$

移動硬化

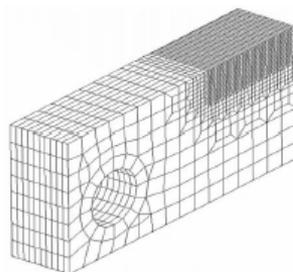
$$\dot{X} = \left[ \frac{C}{R+k} (\sigma - X) - \gamma X \right] \dot{\lambda}$$

$f$ : 降伏関数     $\bar{\sigma}$ : ミーゼス応力  
 $X$ : 背応力     $\sigma'$ : 有効応力  
 $\sigma$ : 応力     $S$ : 偏差応力

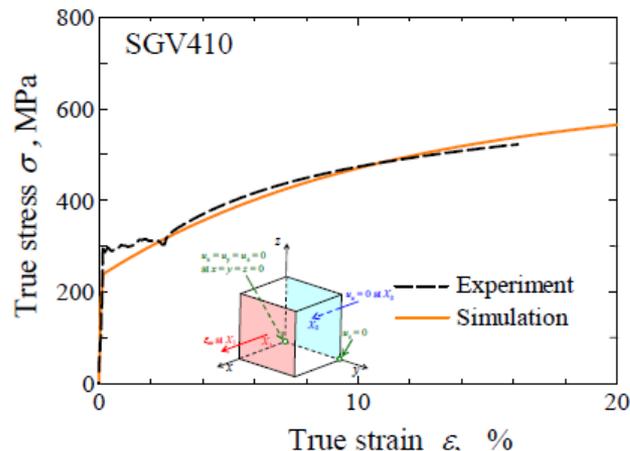
材料定数:

$k$	$R_0$	$R_{\infty}$	$C$	$\gamma$	$b$
230	0	150	3500	10.5	1.5

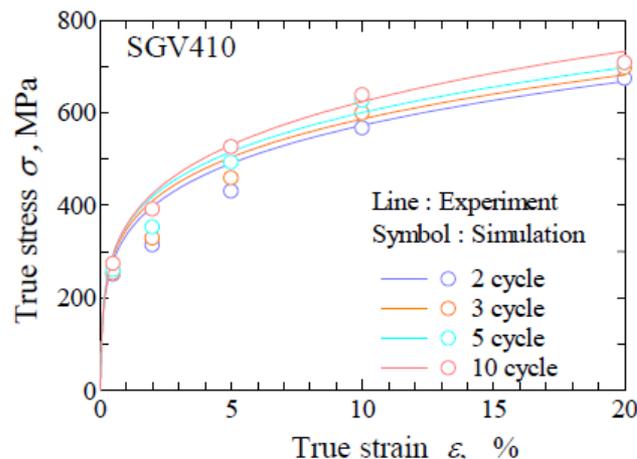
- 単調引張: おおむね一致
- 繰返し応力ひずみ関係: 低ひずみ範囲のときやや低応力側、おおむね一致



メッシュ分割



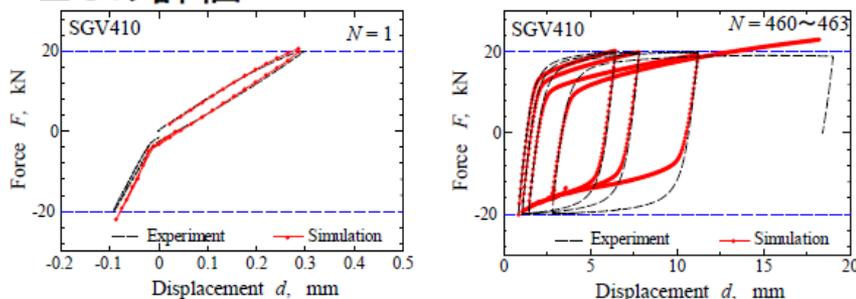
$\Delta\varepsilon = 40\%$  の1サイクル目応力-ひずみ関係



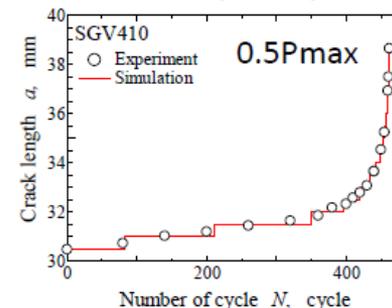
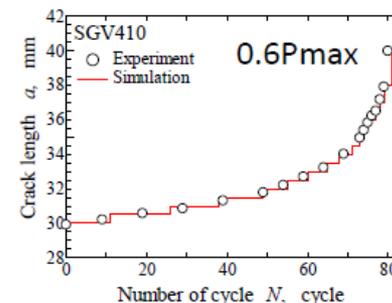
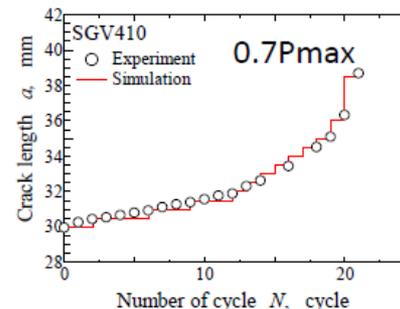
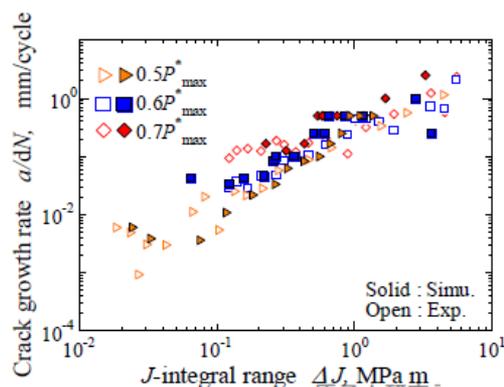
各サイクルの最大応力-ひずみ振幅関係

## 研究機関H

- 0.5,0.6,0.7Pmaxトレース解析を実施
- 良好なき裂長さと荷重を再現
- ひずみ大のとき圧縮側荷重評価が過大
- $\Delta J$ の評価



0.5Pmaxの荷重-荷重線変位関係



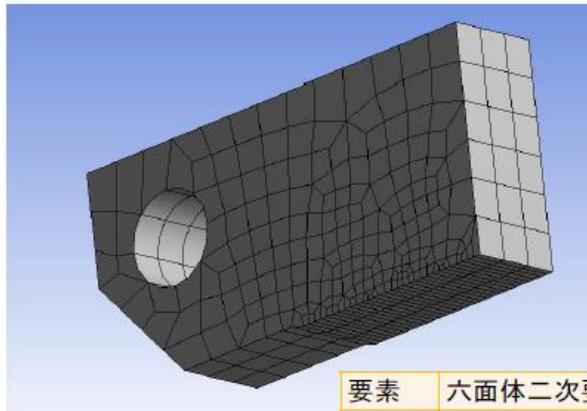
き裂長さ-荷重サイクル

## 研究機関H まとめ

- $P_{max}^*$ の0.5倍および0.7倍の解析実施
  - 実験結果と解析結果はほぼ一致
- $d/W$ が0.08以下であれば要素サイズは解析結果にほぼ影響なし,  $d'/W$ が0.076以下であれば要素サイズは解析結果にほぼ影響なし
- $P_{max}^*$ の0.6倍の解析を行った結果, 実験と解析はよく一致
  - $da/dN - \Delta J$ の関係は荷重によらず一致
  - 実験結果と解析結果は一致
  - 本研究で用いたモデルを用いることでき裂進展解析が可能

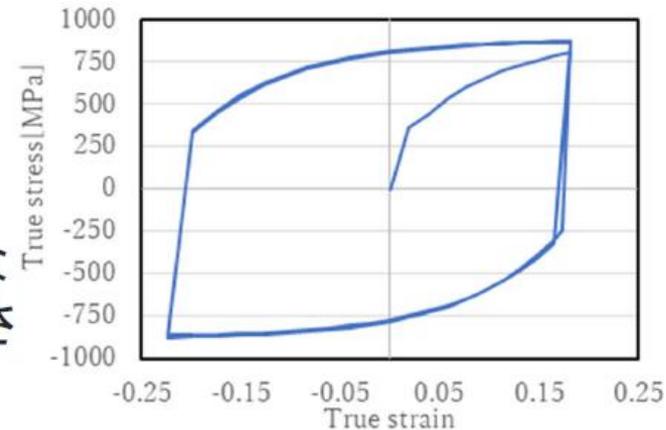
## 研究機関I

- 汎用FEM ANSYS 16.2
- 繰返し荷重下における1TCT試験片の解析をおこない、荷重点の反力とき裂長さの関係を実験値と比較

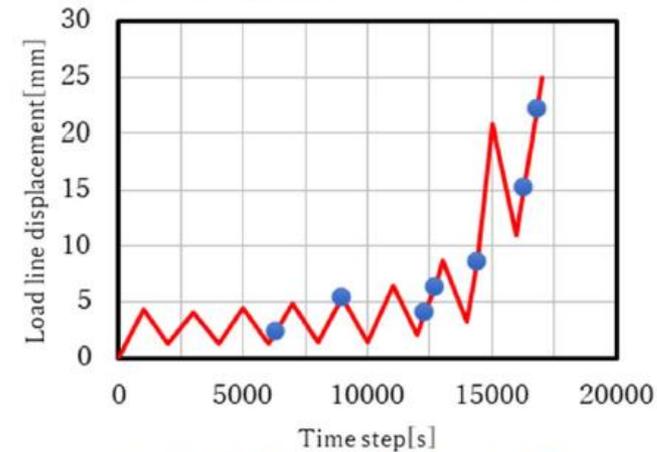


要素	六面体二次要素
要素数	612
節点数	3445

メッシュおよび境界条件



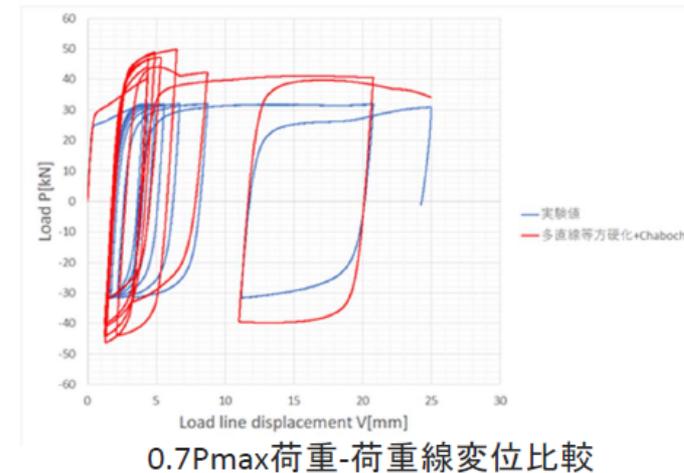
同定した応力ひずみヒステリシス



荷重点変位と時間ステップ(●き裂解法タイミング)

## 研究機関I まとめ

- 単調増加負荷試験のトレース解析において、き裂進展が起こる前の荷重は過大である可能性
- 等方硬化則は、実験より荷重を過大評価
- き裂進展解析において荷重の負荷の方法で解析結果に影響を及ぼすことがある
- き裂を進展させる際に節点解放をおこなう箇所は荷重を引っ張り荷重の終了時が望ましい
- 丸棒の引張試験のデータのみで複合硬化則のパラメータ設定法は、現状手段がなく、実験データを解析により予測する上で今後の大きな課題



1. Chaboche則および等方硬化則を用いた複合硬化則のパラメータの決定方法を提案、ひずみ範囲によりパラメータを再設定必要
2. 初期サイクルでは荷重の絶対値を過大評価、き裂長さが十分に成長すると荷重の絶対値を過少評価
3. GTNモデルで複合硬化則を利用、ボイド率の減少を考慮すれば実験と一致、き裂前縁形状も定性的な一致
4. 試験データの最大ひずみ18%で構成則パラメータを決定、0.5Pmaxのトレース解析結果は0.7 Pmaxより大きく乖離
5. 0.5 Pmaxの解析では計算コストの観点からサイクルジャンプを取り入れた計算必要、接触を考慮必要
6. き裂長が荷重に敏感なことから、き裂前縁形状とき裂位置の規定方法の策定必要
  - き裂進展初期において細かなき裂進展を行い初期の荷重過大評価は緩和
  - 荷重はき裂面の面積に大きく依存、特にき裂進展初期の状態は荷重へ影響
  - 要素サイズdと試験片幅Wが $d/W \leq 0.08$ のとき解析にほぼ影響なし

## 7. $\Delta J$ の計算において実験を再現可能

- $\Delta J$ の評価は負の値も計算対象とする1サイクルが妥当
- 大きな塑性域をともなう繰返し荷重負荷条件でのき裂進展では、 $\Delta J$ で整理すると荷重レベルの影響ほぼ消失し、1本の進展曲線で表現可
- 参照応力法による $\Delta J$ の評価では、多くで保守側に試験結果を予測、非保守側のなった例においても2倍未満
- 日本機械学会維持規格と参照応力法の比較において、 $0.5P_{max}$ は保守側、 $0.7P_{max}$ ,  $0.8P_{max}$ は非保守側の予測

## 8. $0.6P_{max}$ のapplication phaseによるき裂進展挙動予測実施

- 数値計算による予測はおおむね良い一致
- 参照応力法による予測は平面ひずみ条件のTresca式が実測値と一致

## 9. 三次元J積分は繰返し荷重下においても良好な経路独立性、物理的意味について検討必要

## 10. $\Delta J$ の評価を行うサイクル数の決定やき裂進展を行う荷重サイクル数の決定について検討の余地

## 11. $\Delta J$ および損傷力学に基づく破壊条件は同様の破壊傾向

## ■ 目的及び概要

- CT試験片に対し、参照応力法による $\Delta J$ 、及びJSME維持規格の大気中フェライト鋼の疲労亀裂進展線図を用いることにより亀裂進展挙動がある程度予測できることがわかったため、実構造物として配管を対象とし、繰返し荷重条件下における亀裂進展挙動を予測。
- 対象とした配管破壊試験は、電力中央研究所で実施した、周方向貫通亀裂付配管の繰返し負荷による破壊試験<sup>(1)</sup>

- 解析対象

材料: STS410母材

温度: 室温

亀裂形状: 周方向角度 $2\theta=30^\circ$  及び $60^\circ$

荷重条件: 両振り( $R=1$ )

配管形状: 外径OD: 114.3mm, 内径ID: 97.1mm, 厚さ $t$ : 8.6mm

外側スパン全 $L_2$ : 960mm, 内側全スパン $L_1$ : 300mm

応力-ひずみ特性:

$$\alpha=6.2223+1.2661\log(d\varepsilon/dt)=2.547$$

$$n=7.3055-0.3454\log(d\varepsilon/dt)=8.308$$

$$\sigma_0=\sigma_y=385.6+26.3\log(d\varepsilon/dt)=309.2\text{MPa}$$

$$\varepsilon_0=\sigma_0/E=0.00161$$

### ■ 目的及び概要

- 解析対象

J-R曲線:  $J=1.06\Delta a^{0.475}$

J-計算式: API 579-1(2016ed)<sup>(2)</sup>に記載された*K*及び参照応力式を使用

$$J=(E\varepsilon_{\text{ref}}/\sigma_{\text{ref}})J_e$$

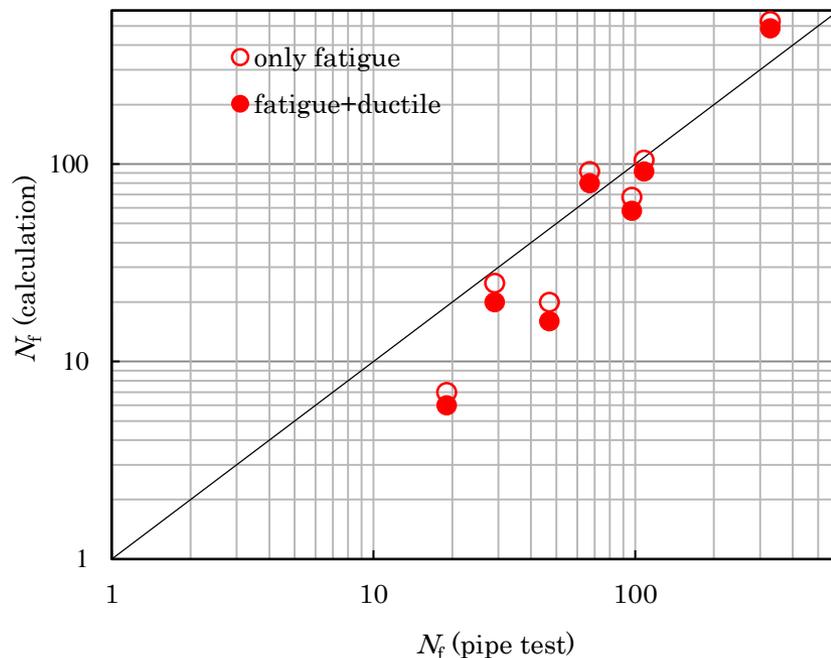
- (1) 三浦, 藤岡, 鹿島, 宮崎, 菅野及び石渡, き裂を有する配管の動的破壊評価法の開発, 電力中央研究所報告, 総合報告:T47, 平成9年4月.
- (2) Fitness-For-Service API 579-1/ASME FFS-1, The American Society of Mechanical Engineers and the American Petroleum Institute, June, 2016.

## ■ 解析結果と試験結果の比較

表2.2-1 周方向貫通亀裂付配管の4点曲げ繰返し負荷試験の破壊回数<sup>(1)</sup>

Test No.	Material	Temperature	Total flaw angle	Total load amplitude 2P (kN)	#Cycles to failure		
					Test	Calculation	
						Fatigue	Fatigue +ductile
C-1	STS410 Base metal	RT	30°	±180	29	25	20
C-2				±161	67	92	80
C-4			60°	±158	19	7	6
C-5				±142	47	20	16
C-6				±127	97	68	58
C-7				±122	108	105	92
C-8				±103	328	529	488

## ■ 解析結果と試験結果の比較



- 2ケースで計算結果が非保守側, その他は疲労亀裂のみの計算でも保守的予測。
- 延性亀裂の効果を取り入れると若干回数は小さくなるが, あまり大きな違いはない。
- 荷重レベルが低いケースで差が大きく, CT試験片と異なる傾向。
- これを除いては, 概ね試験結果と一致。
- 非保守側予測となった2例も2倍の範囲内にあり, 追加の裕度を見込むことにより, 計算による予測が可能。

図2.2-1 破壊繰返し数の試験と計算の比較