

CTOD-FADの 数値的・実験的研究

構造基盤技術系

*小沢 匠、吉成 仁志

- 脆性破壊：
コンテナ船の大型化：極厚板の使用
北極海航路の開発：極低温での使用

➡ 脆性破壊のリスク増大

- 破壊評価基準：
日本：WES 2805によるCTOD(亀裂先端開口変位)設計曲線
英国：BS 7910によるJベースのFAD(破壊評価線図)

➡ 国際的に基準の考え方が不一致

より信頼性が高く、考え方が一致した基準が不可欠



両基準の長所を活かしたCTOD-FADを検討



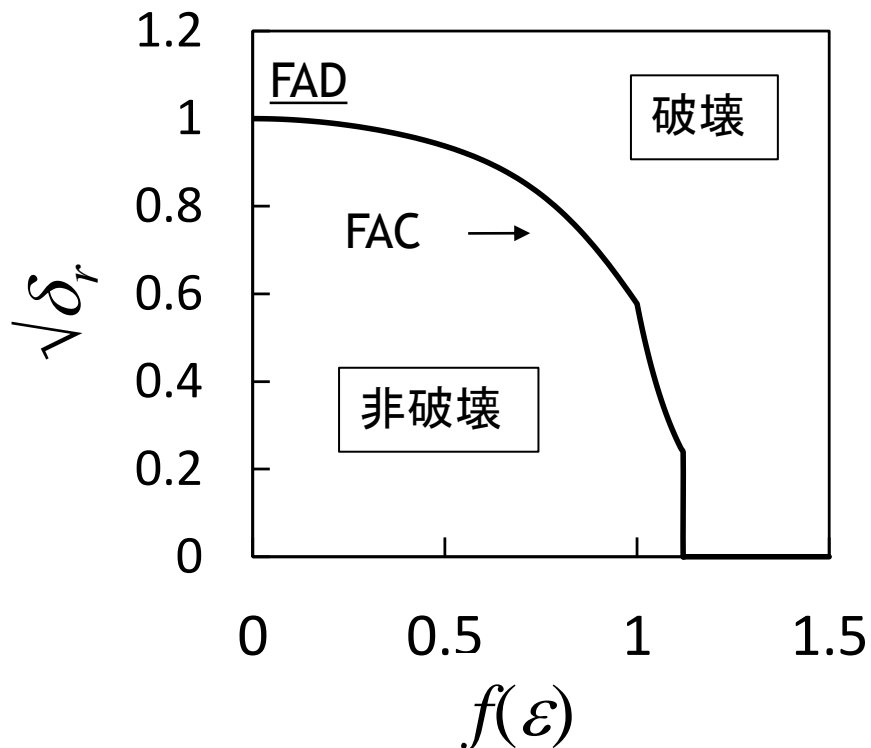
研究目的

- ◆CTOD-FADを有限要素法解析により作成
- ◆実験的にCTOD-FADの有効性を検証

CTOD-FAD概略

CTOD-FAD・・・ひずみ, CTODをパラメータとしたFAD

➔ 高精度で簡便な破壊評価が可能



縦軸: $\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\delta_e / \delta_{ep}}$
横軸: $f(\varepsilon)$ ・・・ひずみの関数

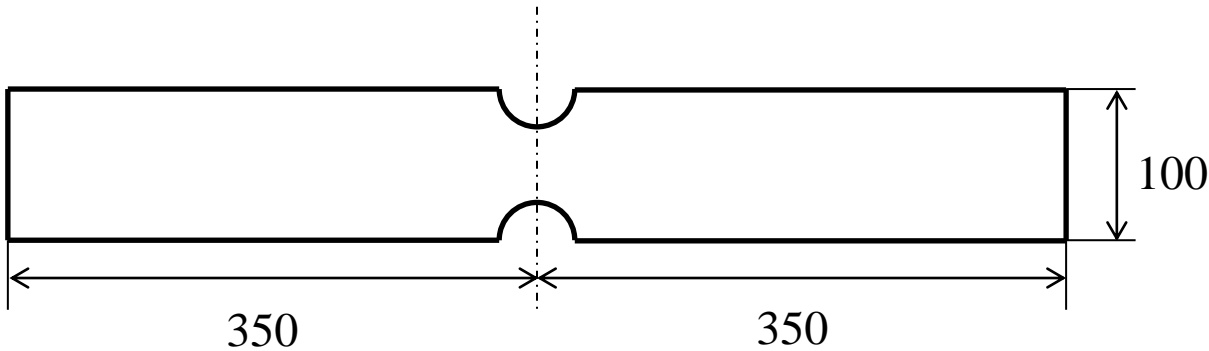
δ_e : CTODの弾性成分
 δ_{ep} : CTODの弾塑性成分

課題

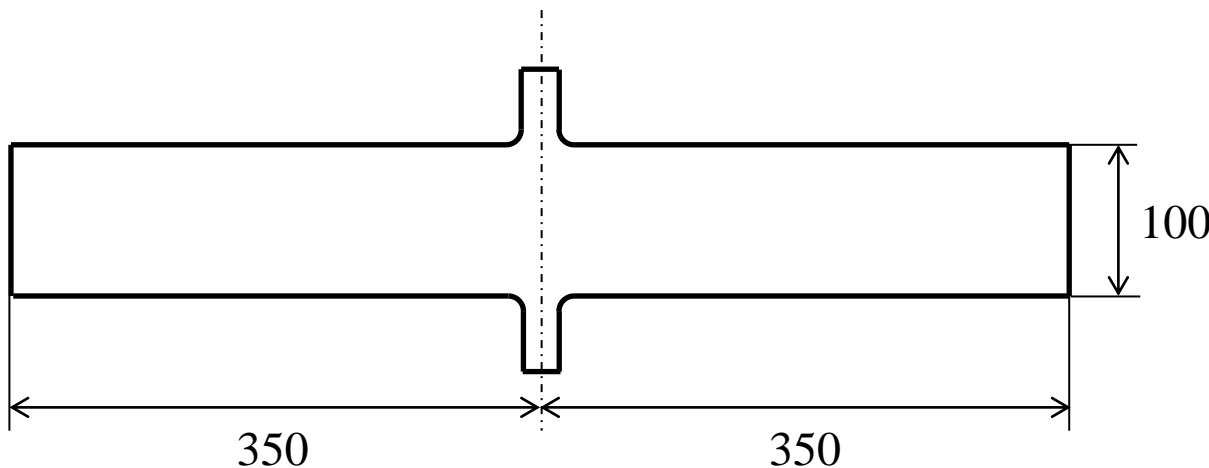
- ✓ 縦軸のパラメータの導出方法
- ✓ 最適なひずみの関数の検討

有限要素モデル

半楕円応力集中部付試験片



張出部付試験片



- 要素
2次元1次シェル要素
- 寸法
 $R_b=12.5, 25, 50$ [mm]
 $a=0.5, 1.5, 3.0$ [mm]
- 応力状態
平面応力, 平面ひずみ

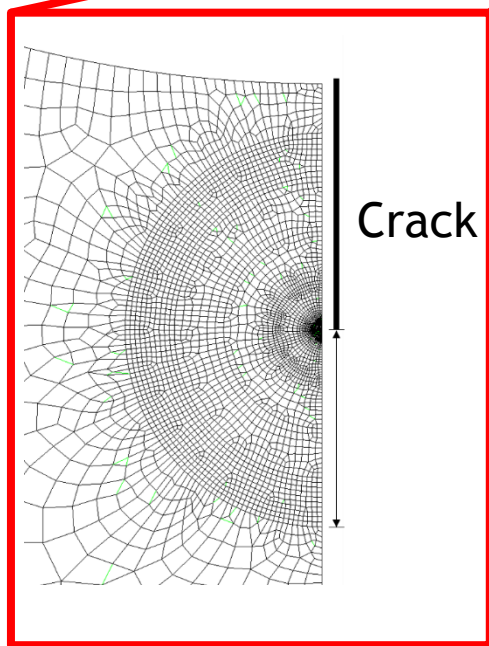
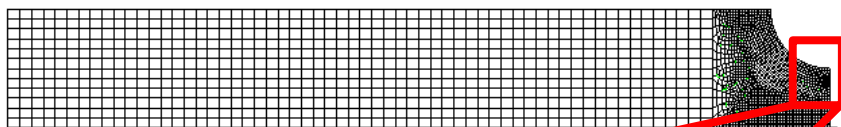
Material Property

	LYR	HYR
E	206 [GPa]	
ν	0.3	
σ_Y	380 [MPa]	
ε_Y	1.84×10^{-3}	
n	0.15	0.08
Y_R	0.60	0.80

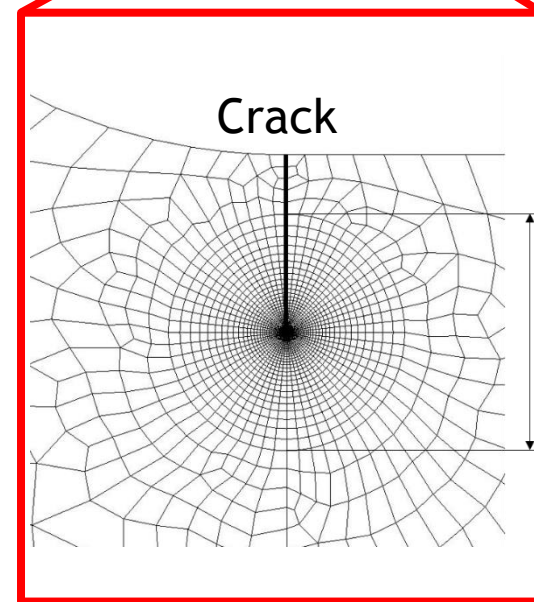
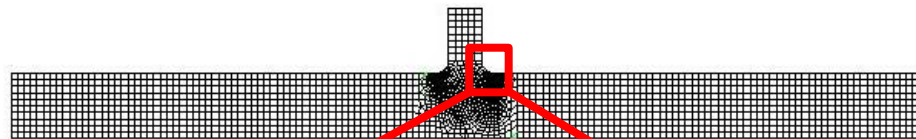
計48通り

メッシュ図

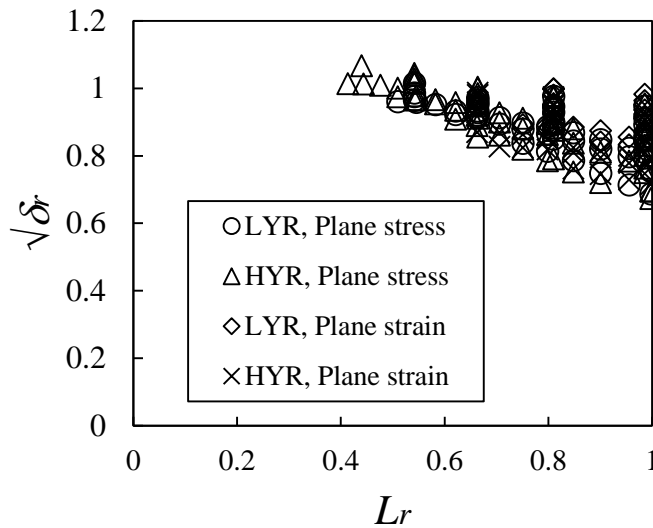
半楕円応力集中部付試験片



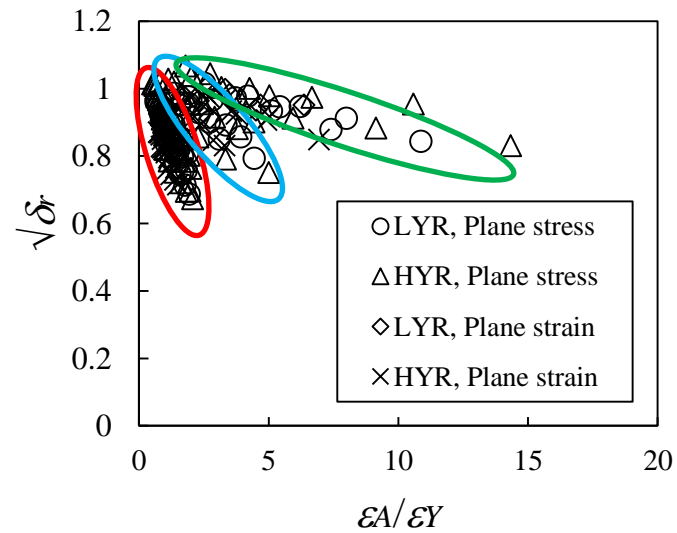
張出部付試験片



既存の横軸によるCTOD-FADの結果



BS type



WES type

- $R_a/R_b=1$
($K_t=1.7$)
- $R_a/R_b=2$
($K_t=2.9$)
- $R_a/R_b=4$
($K_t=12.3$)

- BSの横軸では破壊推定困難
- 構造形状を固定した場合, WESのパラメータで推定可能



WESのパラメータをベースにし,
構造形状のパラメータで補正

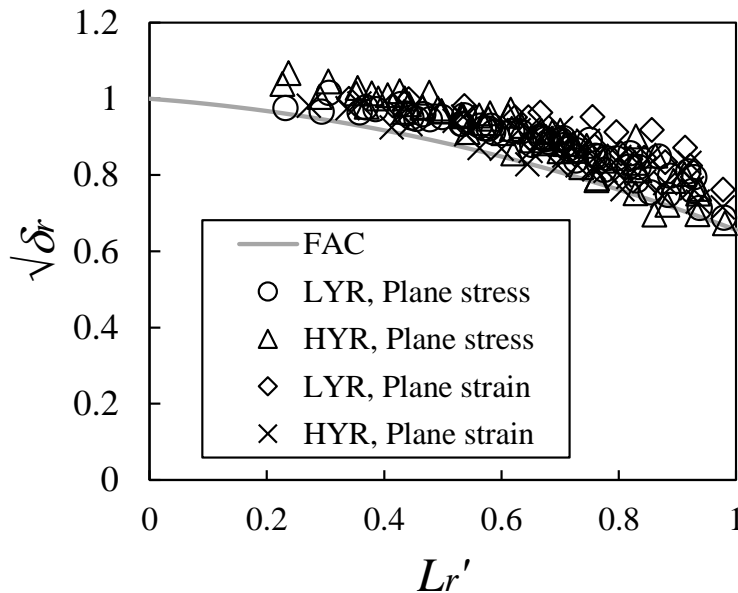
有限要素解析によるCTOD-FAD

新定義の横軸 L_r'

$$L_r' = \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_Y} \\ \varepsilon_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_M \end{pmatrix}$$

ε_R : 曲げを考慮しない場合は σ_R/E
 σ_R : 実断面平均応力
 ε_M : 仮想亀裂上の最大ひずみ
 ε_A : WES 2805の面積平均ひずみ

$\varepsilon_R/\varepsilon_M$: 応力集中部が亀裂先端に与える影響の大きさを表す変数



構造形状, 材料物性, 応力状態
によらず高精度な破壊推定が可能

平均値から 2σ 下限をとりFAC作成

➡ $\sqrt{\delta_r} = -0.228L_r'^2 - 0.116L_r' + 1.00$

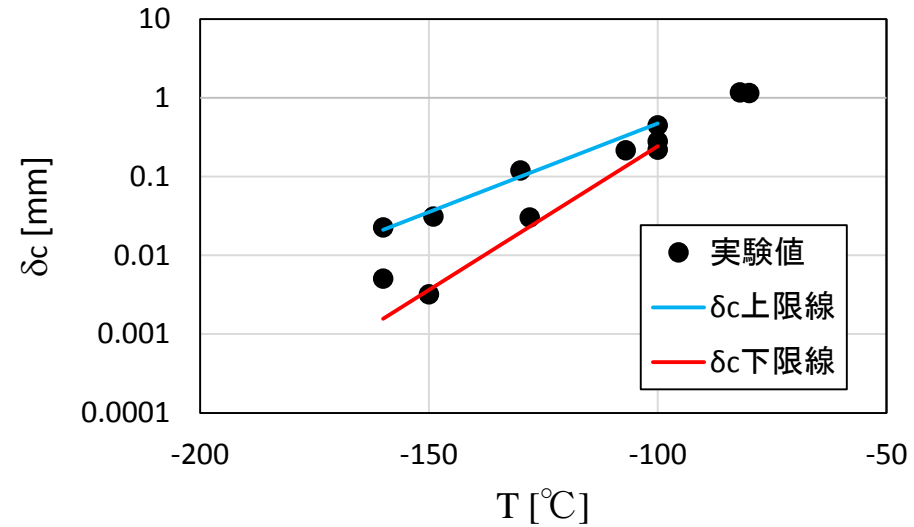
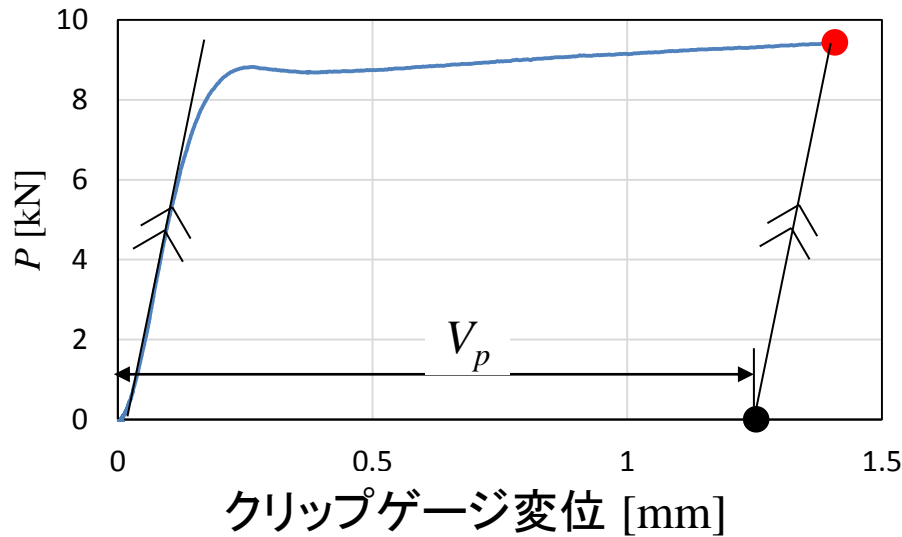
目的

有限要素法により作成したCTOD-FADの実証実験

材料物性値(実験温度)、構造形状を変えた上で有効性検証

- 引張試験・・・4本
➡ 引張強度、降伏応力の温度依存性
- CTOD試験・・・12本
➡ δ_c の温度依存性
- 破壊試験・・・6本
➡ 応力集中部と亀裂を設けた試験片の破壊荷重

CTOD試験実験結果



$$\delta_c = \delta_e + \delta_p = \frac{K^2(1-\nu^2)}{m_{WES}\sigma_Y E} + f_p \frac{r_p(W-a_0)}{r_p(W-a_0)+a_0+z} V_p$$

$$K = \frac{P}{B \cdot W^{1/2}} Y$$

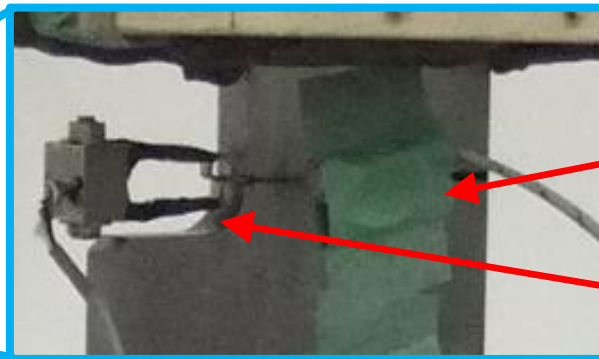
$$Y = 4 \left\{ 2.9 \left(\frac{a_0}{W} \right)^{1/2} - 4.6 \left(\frac{a_0}{W} \right)^{3/2} + 21.8 \left(\frac{a_0}{W} \right)^{5/2} - 37.6 \left(\frac{a_0}{W} \right)^{7/2} + 38.7 \left(\frac{a_0}{W} \right)^{9/2} \right\}$$

$$f_p = (-1.54Y_R^2 + 2.97Y_R - 0.47) [0.9 + 0.1 \cdot \exp\{-0.028(B-50)\}]$$

V_p : CODの塑性成分量
 Y : 応力拡大係数の補正係数
 f_p : CTOD塑性項の補正係数

低温側の δ_c にばらつきが存在

破壊試験

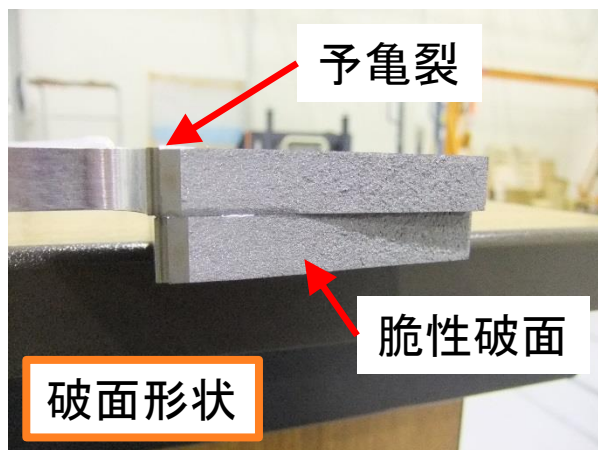


熱電対

クリップゲージ
(東京測器 PA-10L)

木製冷却槽

試験機(島津製作所 UH-500kNI)



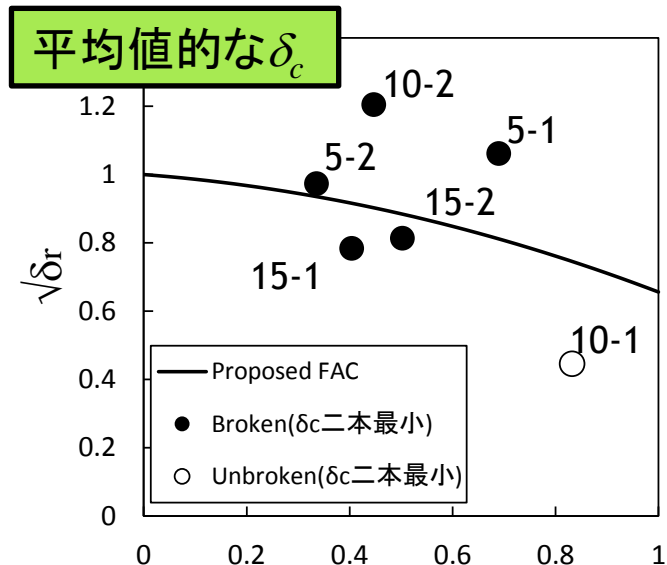
- 試験片の両端に冷却槽を取り付け温度管理
- 予亀裂付近に熱電対を取り付け温度測定
- 予亀裂にクリップゲージを取り付けCOD測定



低温を維持した状態で温度, CODおよび荷重を
観測しながら試験機により破壊するまで負荷

CTOD-FADの実験結果

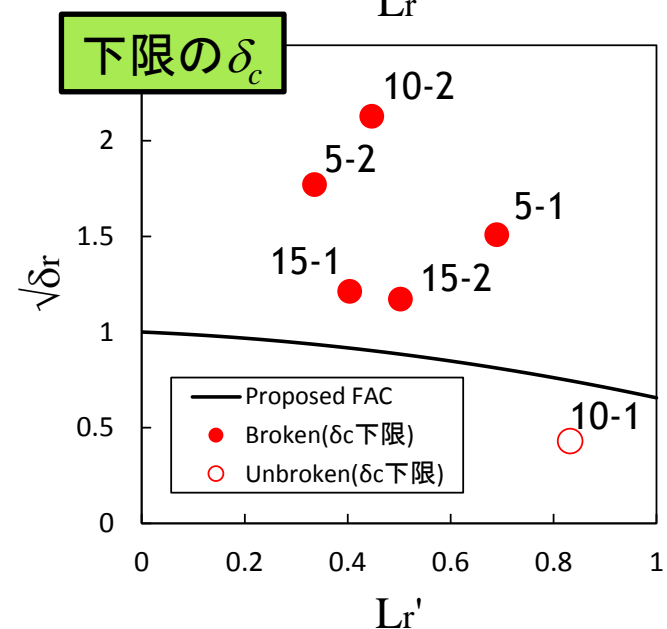
番号	R [mm]	T [°C]	L_r'	δ_c [μm]	$\sqrt{\delta_r}$
5-1	5	-140	0.69	17	1.06
5-2	5	-157	0.34	6.7	0.97
10-1	10	-110	0.83	96	0.45
10-2	10	-155	0.45	7.4	1.20
15-1	15	-146	0.40	12	0.78
15-2	15	-141	0.50	16	0.81



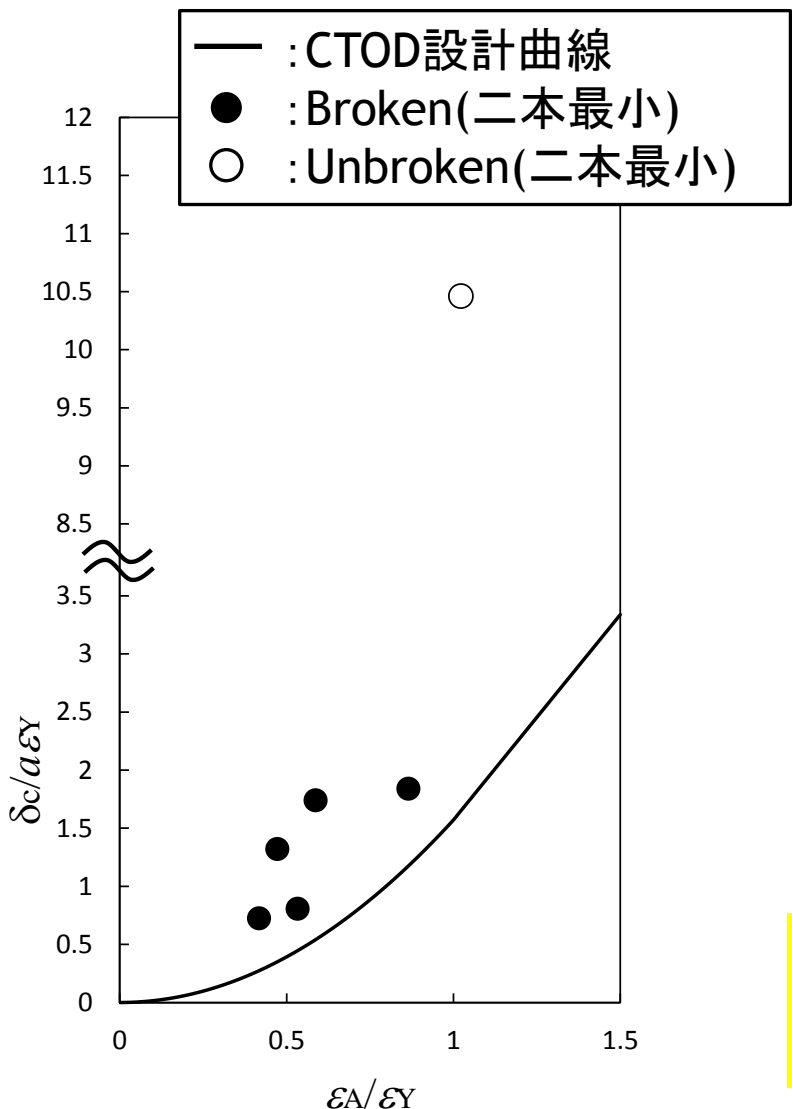
実験結果がFAC付近にプロット



提案したCTOD-FADで
破壊をほぼ予測できる



日本規格との比較 ・ WES2805:2011



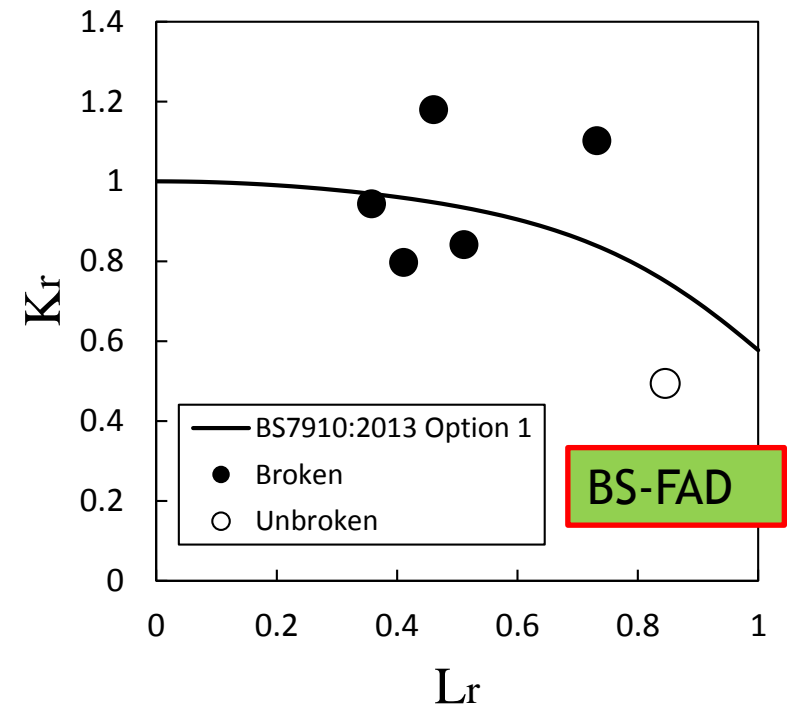
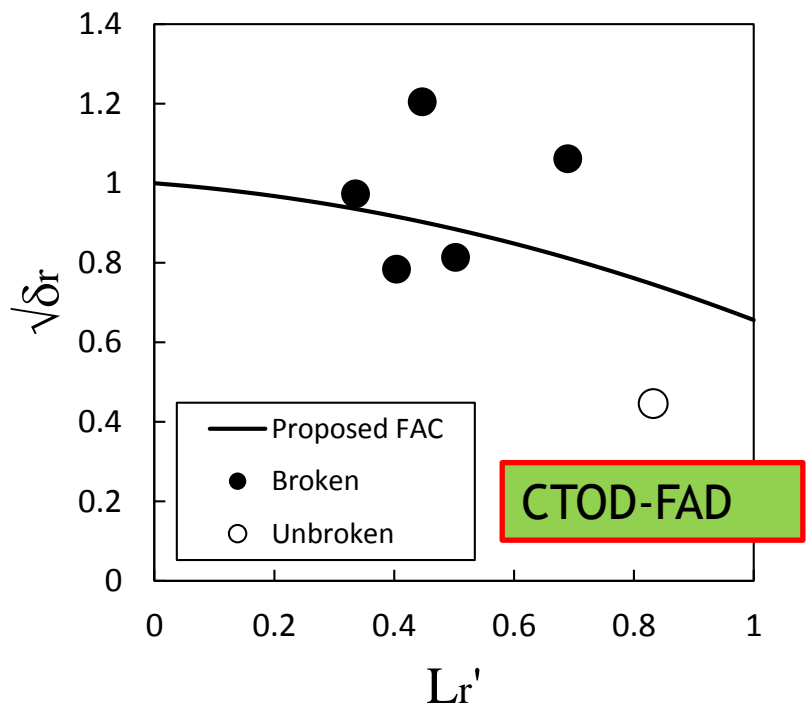
番号	δ [μm]	δc [μm]
5-1	11	17
5-2	2.5	6.7
10-1	(15)	96
10-2	4.1	7.4
15-1	3.2	12
15-2	5.0	16

WESの予測では全てが $\delta < \delta_c$ となり、「破壊しない」と評価された



今回の実験では
6本の試験の内、5本で破壊した

英国規格との比較 ・ ・ BS7910:2013(実験結果)



$$L_r = P / P_Y$$

$$K_r = K / K_c$$

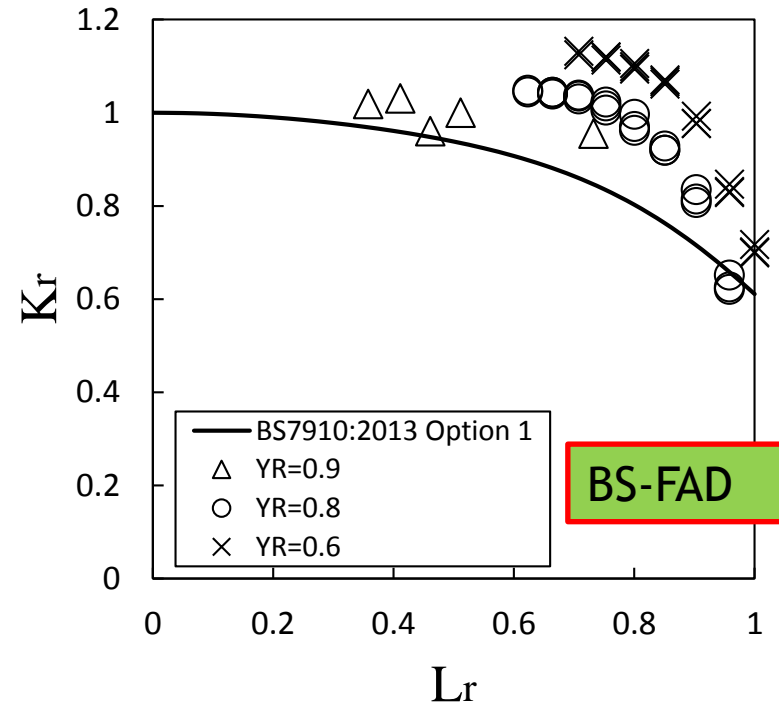
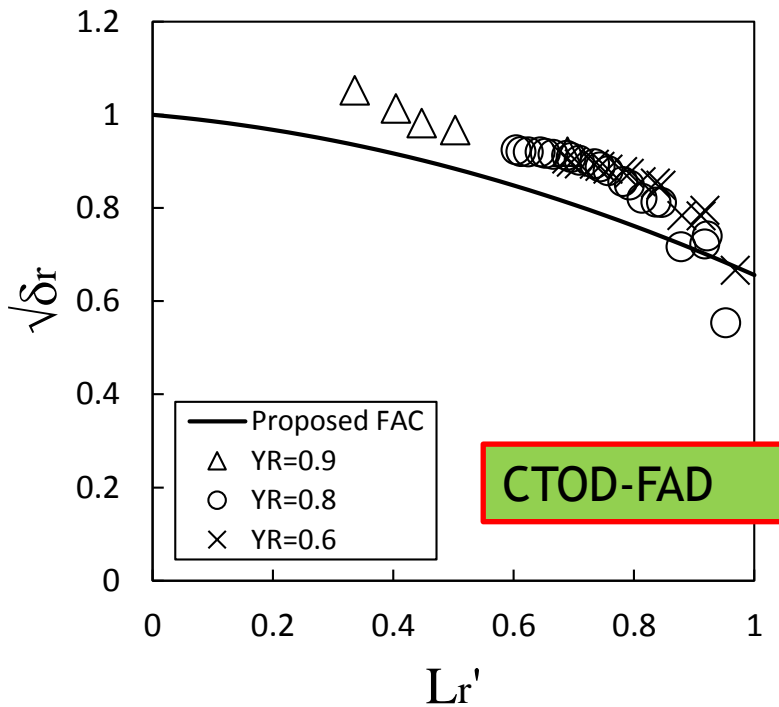
$$K_c = \sqrt{\frac{m_{BS} \sigma_Y \delta_c E}{1 - \nu^2}}$$

δ_I : BSでのCTOD弾性成分
 σ_{max} : 最大引張荷重

$$m_{BS} = 1.517 Y_R^{-0.3188} \quad \text{for } 0.3 < Y_R < 0.98$$

実験結果はCTOD-FAD, BS-FAD
 に大きな差はなし

英国規格との比較 ・ ・ BS7910:2013(FEM)



同一の形状で降伏比(Y_R)を変えた上でFEM解析
➡ CTOD-FAD: いずれの Y_R でもFACが高精度に予測
BS-FAD: 本実験に近い $Y_R=0.9$ ではFACに近いが,
 Y_R が低くなると予測から外れる

Y_R が低下するとBS-FADは精度悪化

結 言

- ◆有限要素解析により, 様々なケースで妥当な評価が可能なCTOD-FADおよびFACを提案した
- ◆破壊モデル試験を行い, CTOD-FADの有効性を検証した
- ◆現行のWES(2011)およびBS(2013)の規格と比較した結果, 実用的な精度で破壊強度評価が行えることを確認した

今後の予定

- ◆CTOD-FADの実用化に向け残留応力, 三次元亀裂の影響を明らかにする