

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 (手法整備検討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」**

FDF小委員会

(FDF: Low Cycle Fatigue and Ductile Fracture under Cyclic Loading)

【研究題目】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

【研究期間】平成29年6月 ~ 平成31年3月

【研究体制】(所属・役職は研究期間当時)

主査: 岡田裕 東京理科大学教授

副主査: 高橋由紀夫(一財)電力中央研究所研究アドバイザー

手法整備検討WGリーダー: 秋庭義明 横浜国立大学教授

数値解析WGリーダー: 和田義孝 近畿大学教授

幹事: 4機関, 4名

委員: 国内電力会社, 重電・プラントメーカー, 大学, 研究所含む20機関, 34名

本資料は、**FDF小委員会手法整備検討WG**の主要な成果を以下の構成でまとめたものである。

1. 繰返し荷重下の低サイクル疲労，延性破壊に関する文献調査
 - 1.1 J積分に関する既往研究調査
 - 1.2 規格・基準・ハンドブック調査

2. MDF小委員会における実験結果の再検討
 - 2.1 CT試験片に対する試験結果の検討
 - 2.2 中空円筒試験片に対する試験結果の検討
 - 2.3 亀裂進展特性のまとめ

■ 目的及び概要

- MFD小委員会で, 延性破壊に関連する研究を中心に, 複合荷重下での疲労および破壊挙動に関する文献調査を実施。当該調査により, 複合荷重を含めた破壊解析に関する重要な知見を得ることができたものの, 弾塑性状況での亀裂進展に対する破壊力学的パラメータに関してはさらなる情報収集が必要であると判断された。
- 本FDF小委員会で, 実用に際して重要となるJ積分の適用, 簡便評価法に関してさらに検討を進めるため, 小規模降伏条件を逸脱したときの破壊力学的手法, 及びその簡易的手法について論文を24件を調査した。

1. 繰返し荷重下の低サイクル疲労, 延性破壊に関する文献調査

1.1 J積分に関する既往研究調査

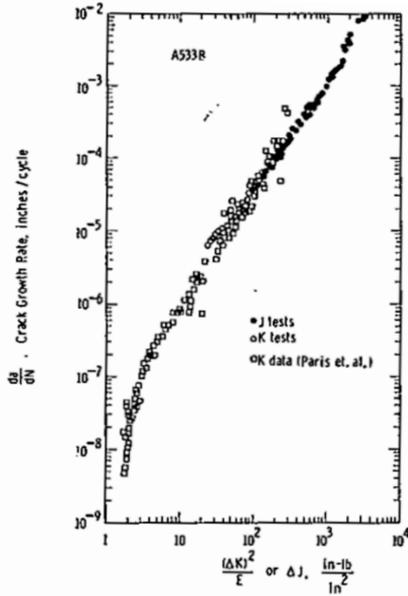
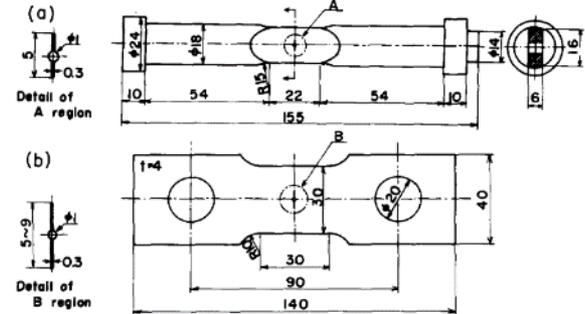
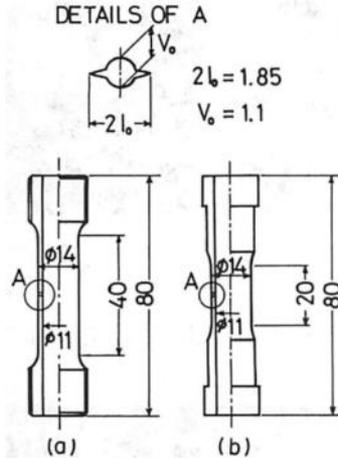
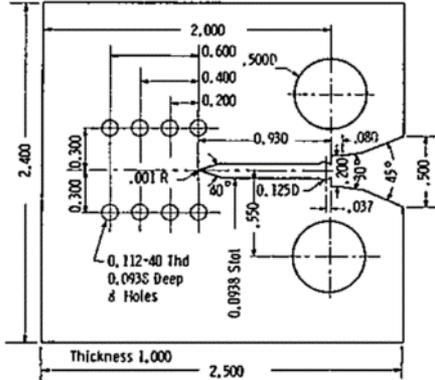
■ ΔJ の適用性に関する主な文献

文献名	著者	出典	概要
(1) Fatigue Crack Growth During Gross Plasticity and the J-Integral	Dowling, N.E. and Begley, J.A	ASTM STP 590:82-103 (1976)	<p><対象> A533B鋼、CT試験片、室温</p> <p><知見> 荷重一変位関係の面積から求められたΔJとda/dNはよい相関を示し、$\Delta K^2/E$との連続性も示した。</p>
(2) Application of J-Integral to High-Temperature Crack Propagation: Part II—Fatigue Crack Propagation	Taira, S., Ohtani, R. Kitamura, T.	Trans. ASME J. Eng. Mater. Technol (1978)	<p><対象> SUS316、中空円筒試験片(切欠き付)、650°C</p> <p><知見> 高周波数で試験されたものについては、荷重一変位関係の面積から求められたΔJとda/dNはよい相関を示した。</p>
(3) Mechanics of Fatigue Crack Propagation by Crack-tip Plastic Blunting	K. Tanaka, T. Hoshide, N. Sakai	Engineering Fracture Mechanics 19 (1984)	<p><対象> OFHC(銅)、0.04%Cr鋼、SUS304、中央亀裂平板試験片(切欠き付)、室温</p> <p><知見> 荷重一変位関係の面積から求められたΔJとda/dNは各材料毎により相関を示した。</p>
(4) 疲労亀裂伝ばの数値シミュレーションによるJ積分範囲 ΔJ の径路積分表示とその意味に関する検討	久保司郎他	日本機械学会論文集(A編) 54 (1988)	<p><対象> 中央亀裂付き平板</p> <p><知見> ΔJの径路積分評価式を導き、亀裂開口荷重基準の値の径路独立性や$\Delta CTOD$との相関を確認</p>
(5) 疲労亀裂伝ばの数値シミュレーションによるJ積分範囲 ΔJ の簡易評価に関する検討	久保司郎他	日本機械学会論文集(A編) 55 (1989)	<p><対象> 中央亀裂付き平板</p> <p><知見> 亀裂開口荷重基準の径路積分値と荷重一変位関係ベースの値の一致を確認</p>
(6) 弾塑性亀裂進展評価法の高精度化(第2報, 亀裂開口比評価式の導出)	高橋由紀夫	日本機械学会論文集(A編) 67 (2001)	<p><対象> 中央亀裂付き平板(SUS304を想定)</p> <p><知見> 非線形移動硬化則を用いた繰返し解析に基づいて、亀裂開口比を平均応力と応力範囲の関数として定式化</p>
(7) 弾塑性亀裂進展評価法の高精度化(第3報, 有効J積分範囲評価法の検討)	高橋由紀夫	日本機械学会論文集(A編) 67 (2001)	<p><対象> 中央亀裂付き平板(SUS304を想定)</p> <p><知見> 参照応力法と上記の亀裂開口比を用いることで有効J積分範囲ΔJ_{eff}を推定可能であることを確認</p>

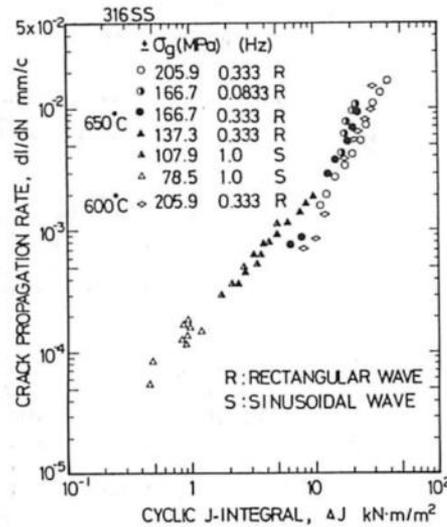
1. 繰返し荷重下の低サイクル疲労, 延性破壊に関する文献調査

1.1 J積分に関する既往研究調査

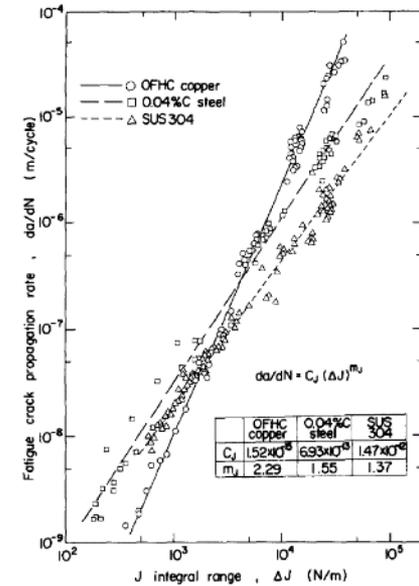
■ ΔJの適用性に関する実験的根拠



文献(1)より

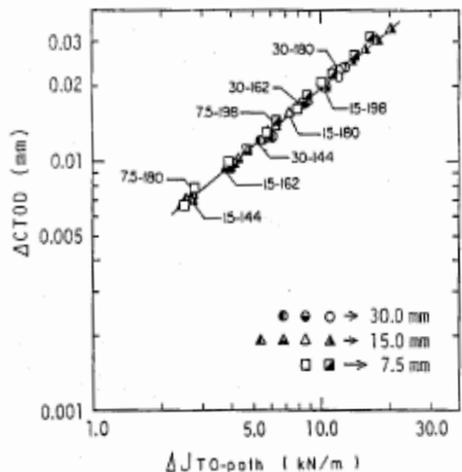


文献(2)より

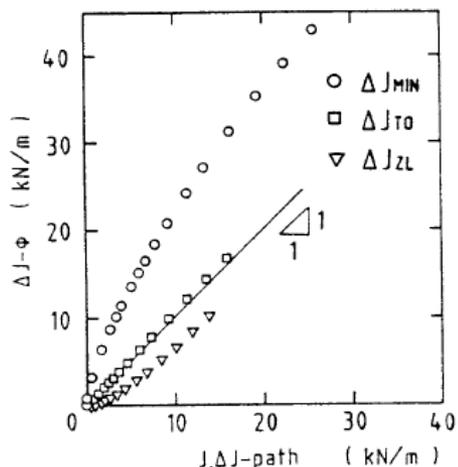


文献(3)より

■ ΔJ の解析的評価法に関する検討例

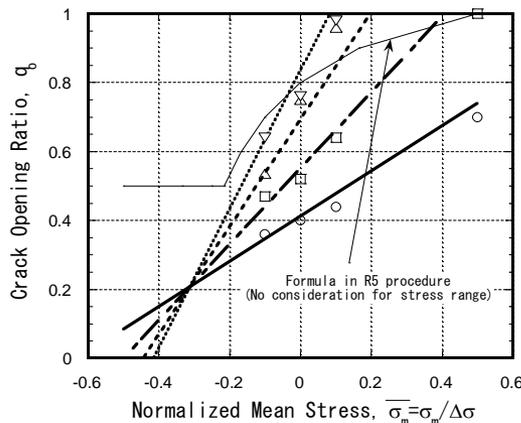


$\Delta CTOD$ と ΔJ の関係 (4)

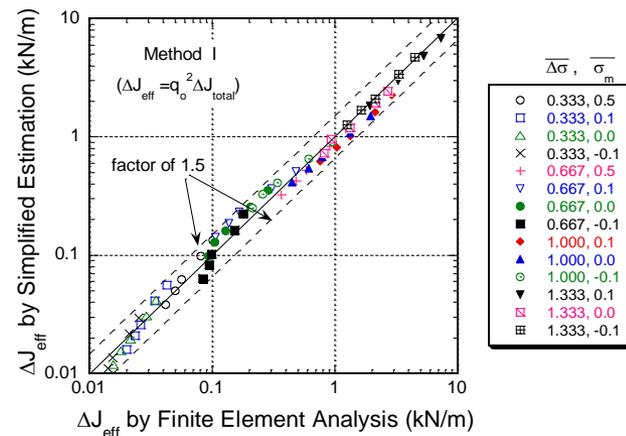


径路積分 ΔJ 値と簡易評価結果の比較 (5)

Normalized Stress Range $\Delta\sigma = \Delta\sigma / 2\sigma_y$	FE Analysis	Estimation by eq. (8)
0.333	○	—————
0.667	□	-----
1.000	△	-----
1.333	▽	-----



平均応力にともなう
亀裂開口比の変化
(平面応力条件) (6)



ΔJ_{eff} のFEM算定値と
簡易評価結果の比較
(平面応力条件) (7)

■ 参照応力法によるJ積分簡易評価の提案 (Ainsworth, 1984*)

GE/EPRIスキーム

(べき乗硬化体を仮定: $\varepsilon / \varepsilon_0 = \sigma / \sigma_0 + \alpha(\sigma / \sigma_0)^n$)

$$J = K^2(a_e) / E' + \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 c h_1 (P / P_0)^{n+1} \quad E' = \begin{cases} E & (\text{平面応力}) \\ E / (1 - \nu^2) & (\text{平面ひずみ}) \end{cases}$$

$$\sigma_{ref} = (P / P_0) \sigma_0 \quad a_e = a + \frac{1}{\beta \pi} \frac{n-1}{n+1} \left(\frac{K}{\sigma_0} \right)^2 \frac{1}{[1 + (P / P_0)^2]}, \quad \beta = \begin{cases} 2 & (\text{平面応力}) \\ 6 & (\text{平面ひずみ}) \end{cases}$$

$$\varepsilon_{ref} / \varepsilon_0 = \sigma_{ref} / \sigma_0 + \alpha (\sigma_{ref} / \sigma_0)^n$$

$$J = K^2(a_e) / E' + c h_1 \sigma_{ref} (\varepsilon_{ref} - \sigma_{ref} \varepsilon_0 / \sigma_0)$$

h_1 の平均化 $\rightarrow \bar{h}_1$ ($n > 5$ では P_0 のとり方によって h_1 をほぼ一定にできる)

$$\mu K^2(a) = c h_1(1) \sigma_{ref}^2 \quad \mu = \begin{cases} 1 & (\text{平面応力}) \\ 0.75 & (\text{平面ひずみ}) \end{cases} \quad \text{線形解}(n=1)\text{の応力拡大係数による表示}$$

$$J = K^2(a_e) / E' + (\mu K^2(a) / E) [\bar{h}_1 / h_1(1)] (E \varepsilon_{ref} / \sigma_{ref} - 1)$$

$\bar{h}_1 = h_1(1)$: さらなる近似

$$J = K^2(a) / E' \left[K^2(a_e) / K^2(a) + (\mu E' / E) (E \varepsilon_{ref} / \sigma_{ref} - 1) \right]$$

その後の簡単化

$$J = (E \varepsilon_{ref} / \sigma_{ref}) K^2(a) / E$$

RSE-Mなど

$$J = \left(\frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{\sigma_{ref}^3}{2 \sigma_0^2 E \varepsilon_{ref}} \right) K^2(a) / E$$

R6など

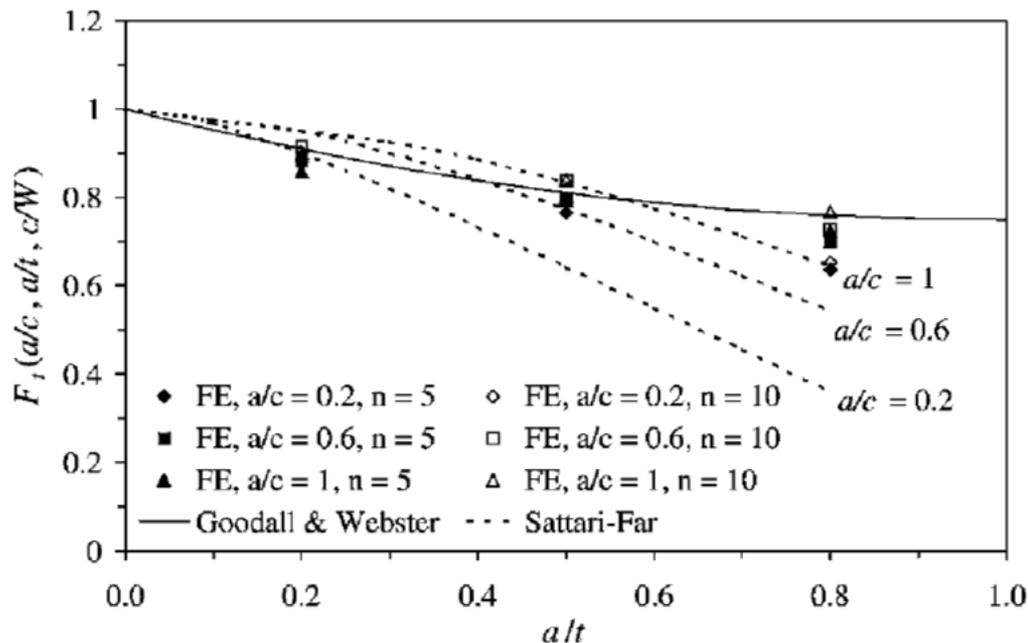
*: R. A. Ainsworth "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Material, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19 (1984)

■ 参照応力評価に関係する主な文献

文献名	著者	出典	概要
(1) J-integral and Limit Load Analysis of Semi-elliptical Surface Cracks in Plates under Tension	Y. Lei	International Journal of Pressure Vessels & Piping 81 (2004)	<p><対象>引張を受ける半楕円亀裂付き平板</p> <p><知見>参照応力を用いたJ積分評価の有効性を検討し、Goodall&Websterのグローバル極限荷重式を用いれば、表面近傍を除いて妥当な評価が可能であることを確認</p>
(2) Relevance of Plastic Limit Loads to Reference Stress Approach for Surface Cracked Cylinder Problems	Y.-J. Kim, D.-J. Shim	International Journal of Pressure Vessels & Piping 82 (2005)	<p><対象>曲げモーメント、内圧を受ける配管(周方向&軸方向内表面亀裂)</p> <p><知見>ローカルな極限荷重式:J積分を過大評価 グローバルな極限荷重式:J積分を過小評価の場合あり</p>
(3) Evaluation of J-integral for Surface Cracked Plates Under Biaxial Loading Using Extended Reference Stress Method	N. Miura, Y. Takahashi	International Journal of Pressure Vessels & Piping 87 (2010)	<p><対象>縦横両方向から引張圧縮荷重を受ける平板(貫通亀裂付き)</p> <p><知見>参照応力に対してMisesの降伏条件を考慮することで2軸応力状態でのJ積分を高精度で評価可能</p>
(4) Reference Loads for Plates with Semi-elliptical Surface Cracks subjected to Tension and Bending for Application within R6 Type Flaw Assessment	U. Zerbst, Y. Kiyak, M. Madia, A. Burgold, G. Riedel	Engineering Fracture Mechanics 99 (2013)	<p><対象>引張と曲げを受ける半楕円亀裂付き平板</p> <p><知見>J積分の数値解析結果から、参照荷重を求めて、無次元亀裂深さ、亀裂幅の関数として定式化</p>
(5) Global Limit Load Solutions for Plates with Surface Cracks Under Combined Biaxial Force and Cross-thickness Bending	Y. Lei, P. Budden	International Journal of Pressure Vessels & Piping 132 (2015)	<p><対象>引張/曲げ及び亀裂閉口引張を受ける半楕円亀裂付き平板</p> <p><知見>引張の場合にはMiura&Takahashiの解が妥当であるが、曲げの場合には低精度</p>
(6) Improvement of J Estimation Schemes Based on Reference Stress for Linear Hardening Behavior	P. Gilles	ASME 2018 PVP Conference	<p><対象>引張と曲げを受ける半楕円亀裂付き平板</p> <p><知見>線形移動硬化材料に対する参照応力法の適用性を検討。極限荷重に達する前に非線形性が現れる曲げ荷重下では修正が必要</p>

■ 未貫通亀裂付き平板に対するJ積分評価精度の検討例 (文献1)

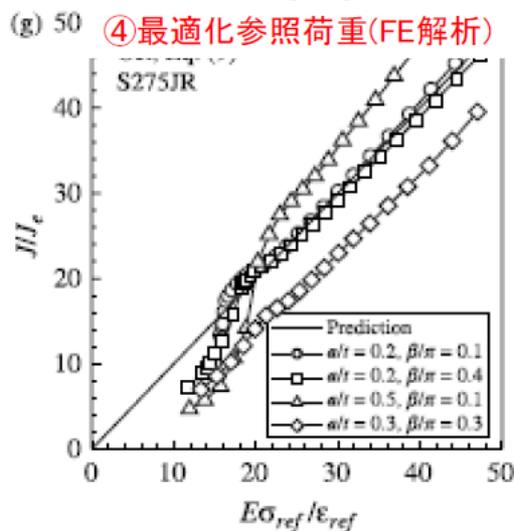
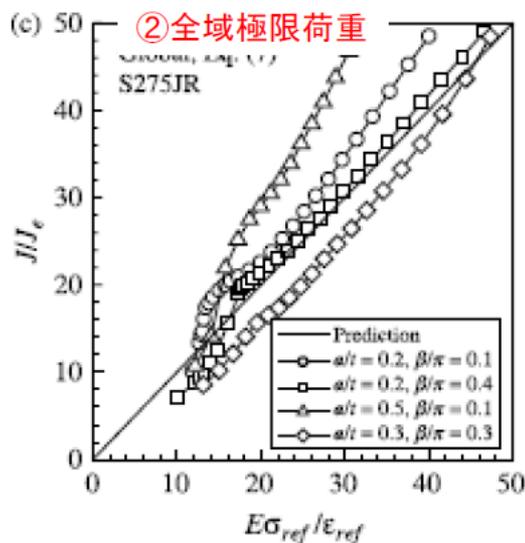
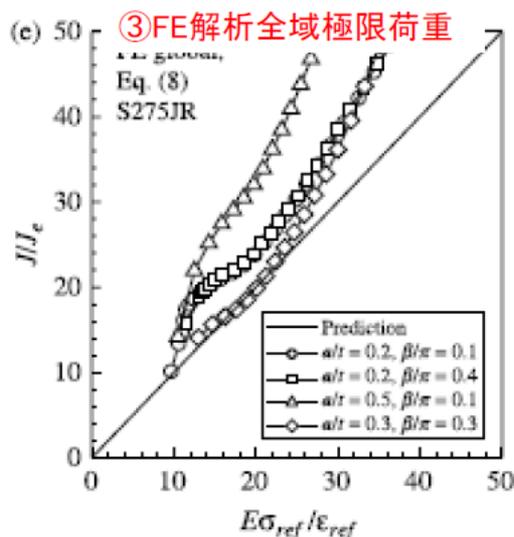
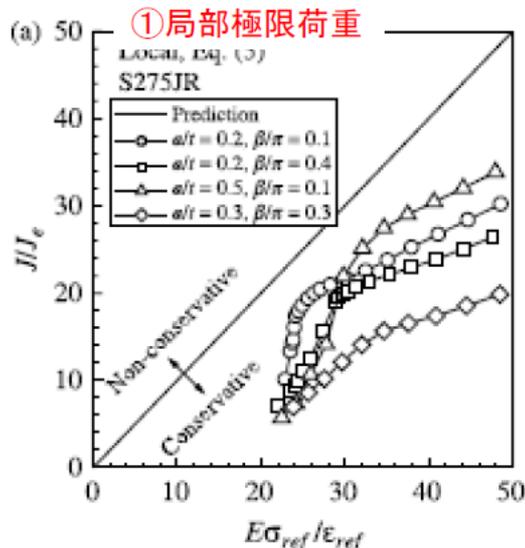
極限荷重



(a) From the lower bound of the scatter band

極限荷重データはGoodall & Websterによるグローバル極限荷重式によって良く予測することができる。Sattari-Far式は深いき裂に対して精度が低く、過度に保守的である。

■周方向未貫通亀裂付き円筒に対するJ積分評価精度の検討例(文献2)



①局所極限荷重: JおよびC*とともに保守的

②全域極限荷重: 条件によってはJおよびC*ともに危険側

③FE解析全域極限荷重: JおよびC*ともに危険側

④最適化参照荷重: JおよびC*ともに、他の手法と比較して最適

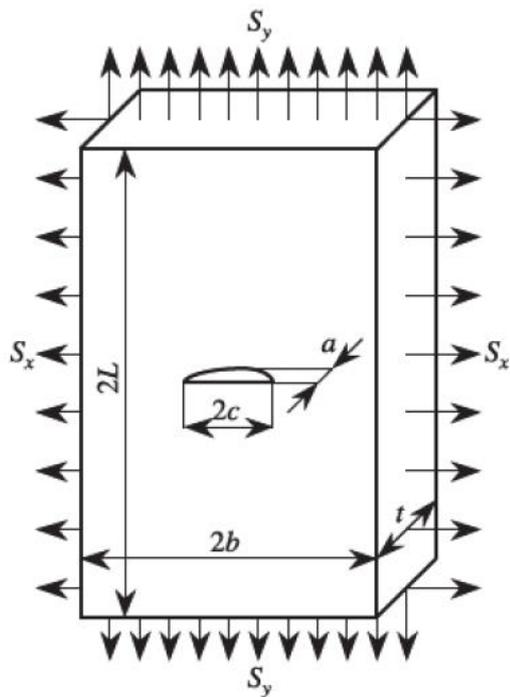
$$\frac{M}{\sigma_{ref}^{OR}} = 4R_m^2 t \left[\cos\left(\frac{\beta}{2} \frac{a}{t}\right) - \frac{a}{2t} \sin\beta \right] \gamma$$

$$\gamma = \theta_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + \theta_2 \left(\frac{a}{t}\right) + 1.04,$$

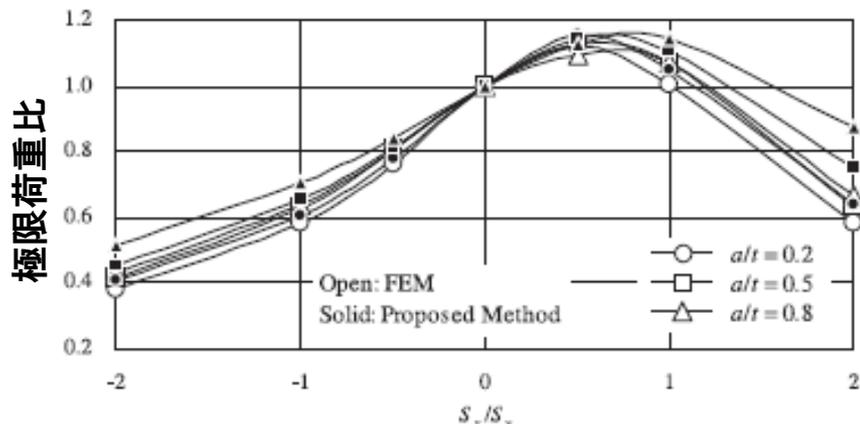
$$\theta_1 = 4.26 \left(\frac{\beta}{\pi}\right)^2 - 1.35 \left(\frac{\beta}{\pi}\right) + 0.80,$$

$$\theta_2 = -2.30 \left(\frac{\beta}{\pi}\right)^2 + 1.57 \left(\frac{\beta}{\pi}\right) - 0.77$$

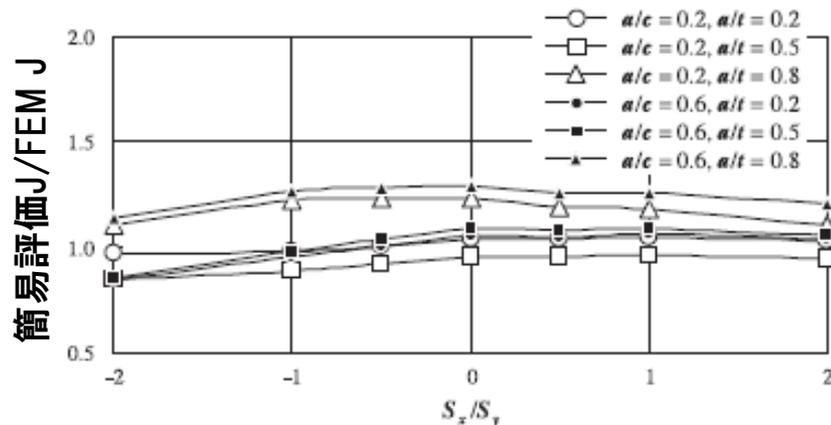
■ 多軸応力下での未貫通亀裂付き平板に対する検討例(文献3)



弾完全塑性体, ステンレス鋼を想定
したひずみ硬化弾塑性体を解析



極限荷重推定結果(a/c=0.2)

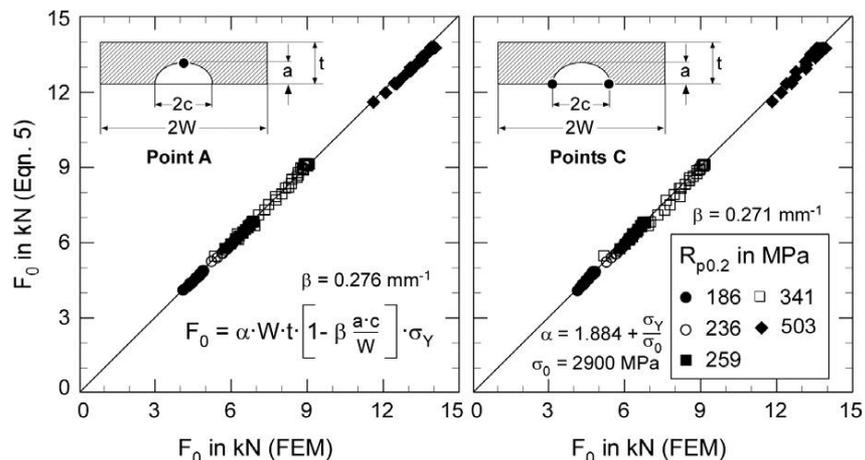


J積分推定結果(亀裂最深部)

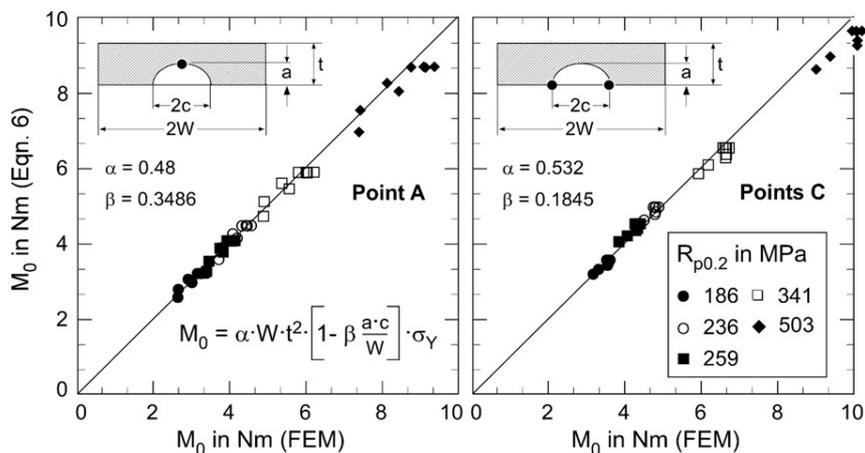
1. 繰返し荷重下の低サイクル疲労, 延性破壊に関する文献調査

1.1 J積分に関する既往研究調査

■ J積分解析に基づく極限荷重評価式の整備 (文献4)



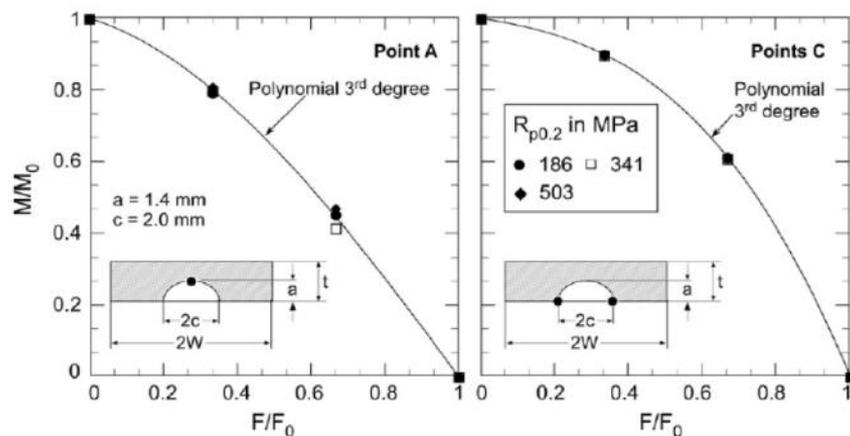
引張荷重条件下での極限荷重の比較



曲げ荷重条件下での極限荷重の比較

基礎式

$$\frac{J}{K^2/E} = J/J_e = [f(L_r = 1)]^{-2} \quad f(L_r) = \left[\frac{E \cdot \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{L_r^2 \cdot \sigma_{ref}}{2E\epsilon_{ref}} \right]^{-1/2}$$



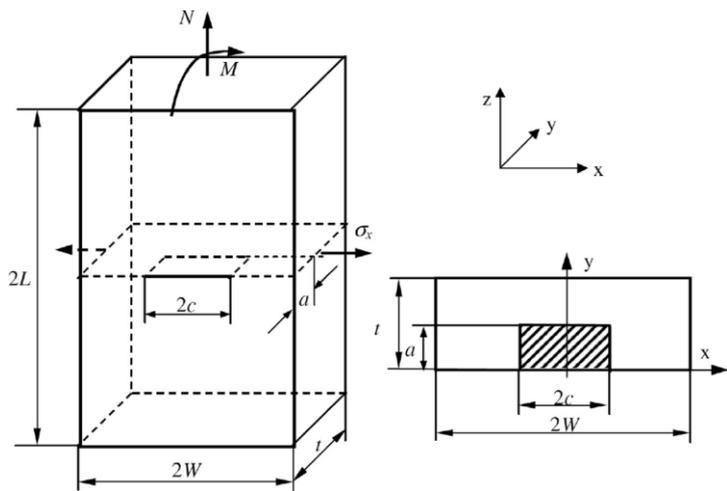
引張/曲げ重畳条件下での極限荷重の比較

$$M_A/M_{0A} = \sum_{i=0}^3 A_i \cdot (F/F_{0A})^i \quad \text{and} \quad M_C/M_{0C} = \sum_{i=0}^3 C_i \cdot (F/F_{0C})^i$$

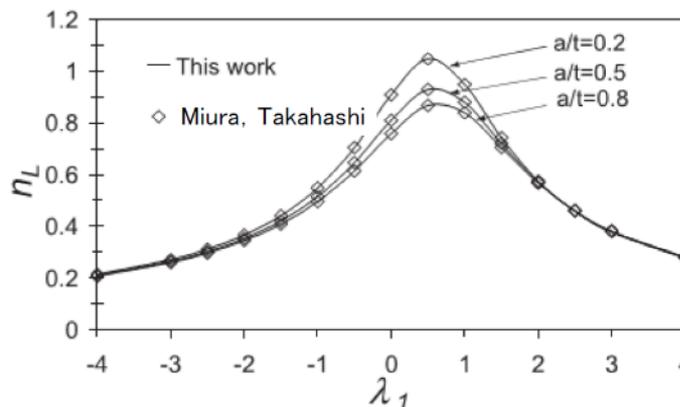
$$F_0 = \alpha \cdot W \cdot t \cdot \left[1 - \beta \frac{a \cdot c}{W} \right] \sigma_Y \quad M_0 = \alpha \cdot W \cdot t^2 \cdot \left[1 - \beta \frac{a \cdot c}{W} \right] \sigma_Y$$

それぞれの位置に対して三次多項式で近似可能

■ 複合荷重を受ける矩形表面亀裂付き平板に対する参照応力 (文献5)



き裂面に垂直な引張とき裂面に平行な引張/圧縮の組み合わせ



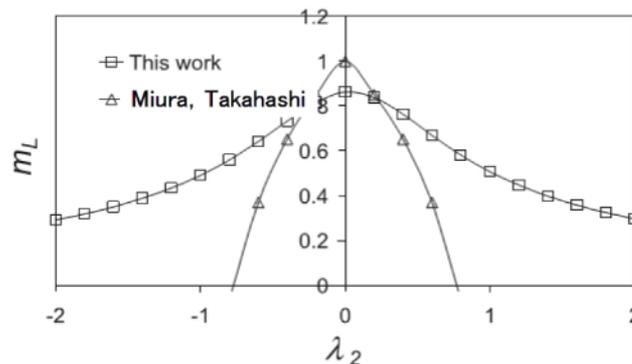
本論文の極限荷重はMiura, Takahashiの結果と良く一致

$$\lambda_1 = \frac{\sigma_x}{\sigma_m} = \frac{n_{xL}}{n_L}$$

$$\sigma_m = \frac{N}{2Wt}, \quad \sigma_b = \frac{3M}{Wt^2}$$

$$n_L = \frac{N_L}{2Wt\sigma_y}, \quad m_L = \frac{2M_L}{Wt^2\sigma_y}, \quad n_{xL} = \frac{\sigma_{xL}}{\sigma_y}$$

き裂面に平行な応力と曲げの組み合わせ ($\lambda = \infty$)

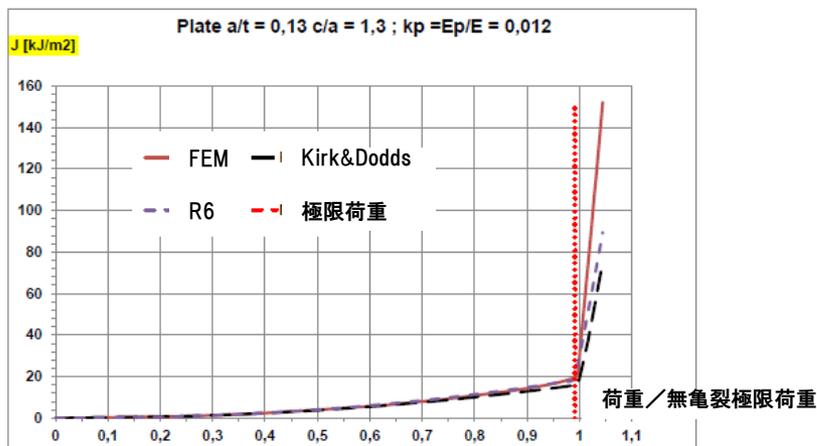


$|\lambda_2| < 0.2$ でMiuraとTakahashiの値が大きい

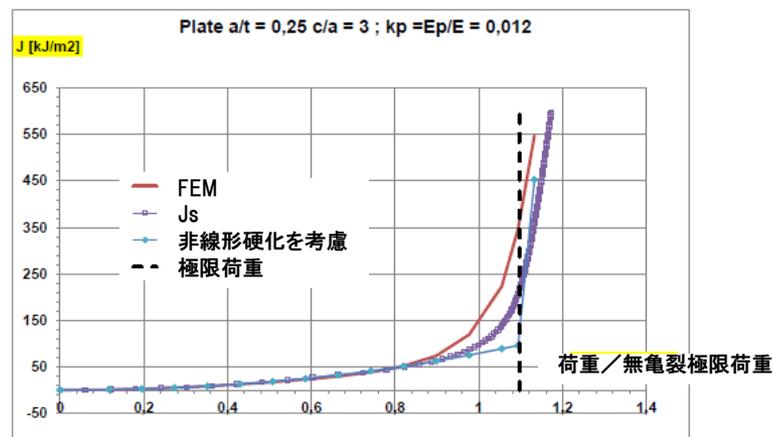
$$\lambda_2 = \frac{\sigma_x}{\sigma_b} = \frac{2}{3} \frac{n_{xL}}{m_L}$$

評価対象とパラメータ

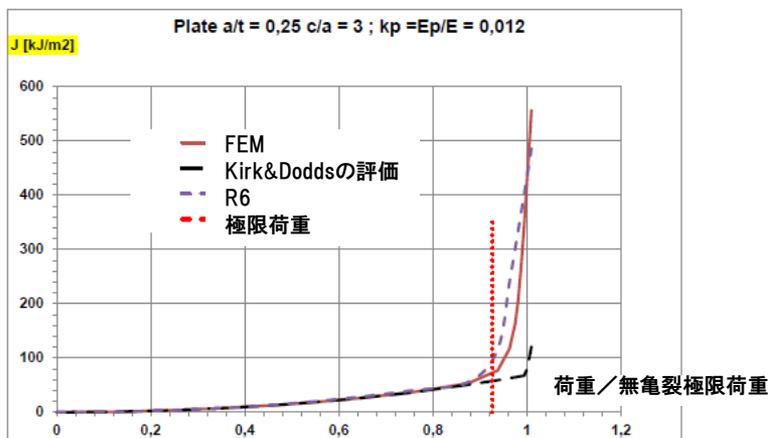
■ 線形硬化材料の平板に対する参照応力適用性の検討(文献6)



引張荷重($a/t=0.13$)



曲げ荷重($a/t=0.25$)



引張荷重($a/t=0.25$)

- ・ 亀裂の存在による極限荷重の低下を考慮しなかったKirk&Doddsの評価に比べて、R6法は比較的良い精度を示す。
- ・ 曲げ荷重下では、徐々に降伏域が広がる効果を取り込まないと十分な精度が確保できない。

■まとめ

ΔJ の適用性に関して

- ・J積分を繰返し負荷に拡張した ΔJ は、大規模降伏状態での疲労亀裂進展の評価に適用可能である。
- ・ ΔJ の径路積分式も整備されており、数値解析によって評価可能である。

J積分の簡易評価に関して

- ・J積分は、各種構造の極限荷重解を用いて求められる参照応力を用いて、比較的良い精度で簡易的に推定可能（ ΔJ にも拡張可能）。
- ・評価精度の観点から、J積分解析結果を活用するなど、参照応力評価法について、様々な検討が行われている。

■ 目的及び概要

・実際の設計・保全・維持管理に際しては，関連の規格・基準に沿った検討が行われるため，それぞれの規格・基準における破壊力学パラメータの取扱について調査する必要がある。このため，関連するハンドブックを含めて各種規格・基準について調査した。

—調査対象：構造健全性評価ハンドブック，JSME維持規格，HPIS Z 101，WES 2805，ASME Section XI，API 579-1，R6，RSE-M，FITNET MK8，ASME Sec.VIII (Div.3)，BS 7910

—調査項目：応力拡大係数解，疲労亀裂進展速度，J積分，極限荷重／参照応力解，破壊評価線図等について調査した。

・さらに、J積分、 ΔJ 評価にとって重要な参照応力評価式については、詳細な調査と試算結果の比較を行った。

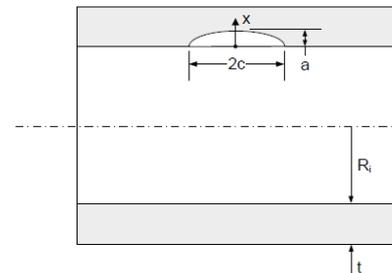
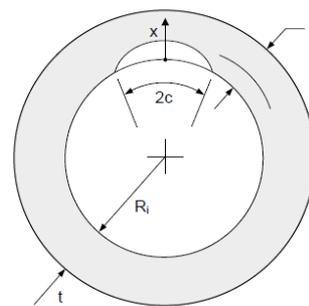
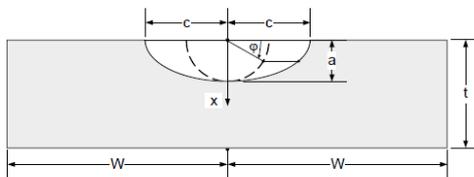
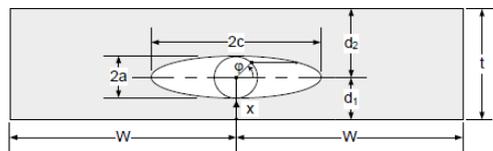
調査結果の例

機械学会維持規格における応力拡大係数解

構造形状	亀裂方向	亀裂位置	亀裂形状	応力分布
平板	—	内部	楕円	板厚内4次分布 線形(膜+曲げ)
	—	表面	半楕円	板厚内3次分布 線形(膜+曲げ)
円筒	周方向	内表面 外表面	半楕円	板厚内3次分布+管曲げ (内表面亀裂は内圧も考慮可) 線形(膜+曲げ)+管曲げ (内表面亀裂は内圧も考慮可)
				板厚内3次分布 (内表面亀裂は内圧も考慮可) 線形(膜+曲げ) (内表面亀裂は内圧も考慮可)
	軸方向	内表面 外表面	半楕円	板厚内4次分布+管曲げ (内表面亀裂は内圧も考慮可) 線形(膜+曲げ)+管曲げ (内表面亀裂は内圧も考慮可)
				板厚内4次分布 (内表面亀裂は内圧も考慮可) 線形(膜+曲げ) (内表面亀裂は内圧も考慮可)
周方向	内表面 外表面	全周	板厚内4次分布+管曲げ (内表面亀裂は内圧も考慮可) 線形(膜+曲げ)+管曲げ (内表面亀裂は内圧も考慮可)	
			板厚内4次分布 (内表面亀裂は内圧も考慮可) 線形(膜+曲げ) (内表面亀裂は内圧も考慮可)	
軸方向	内表面 外表面	無限長	板厚内4次分布 (内表面亀裂は内圧も考慮可) 線形(膜+曲げ) (内表面亀裂は内圧も考慮可)	

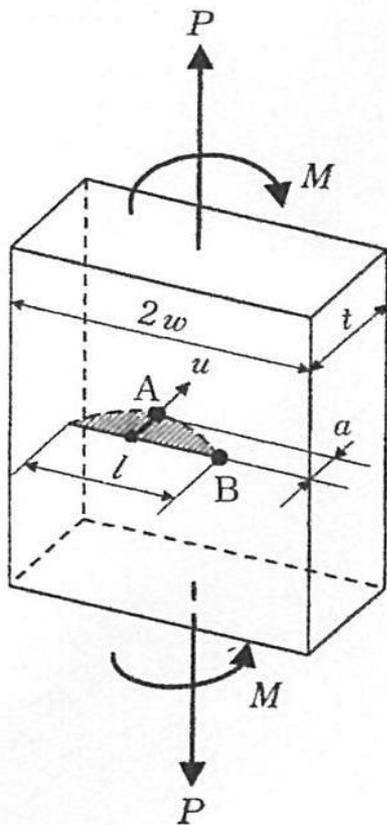
HPIS Z101における参照応力解

部材形状	欠陥の位置	欠陥形状
平板	—	貫通欠陥
	表面	半楕円欠陥
	内部	楕円欠陥
円筒	内面	軸方向半楕円表面欠陥
		周方向半楕円表面欠陥
	外面	軸方向半楕円表面欠陥
		周方向半楕円表面欠陥
球殻	内部	軸方向楕円欠陥
	表面	周方向楕円欠陥
	内部	半楕円表面欠陥

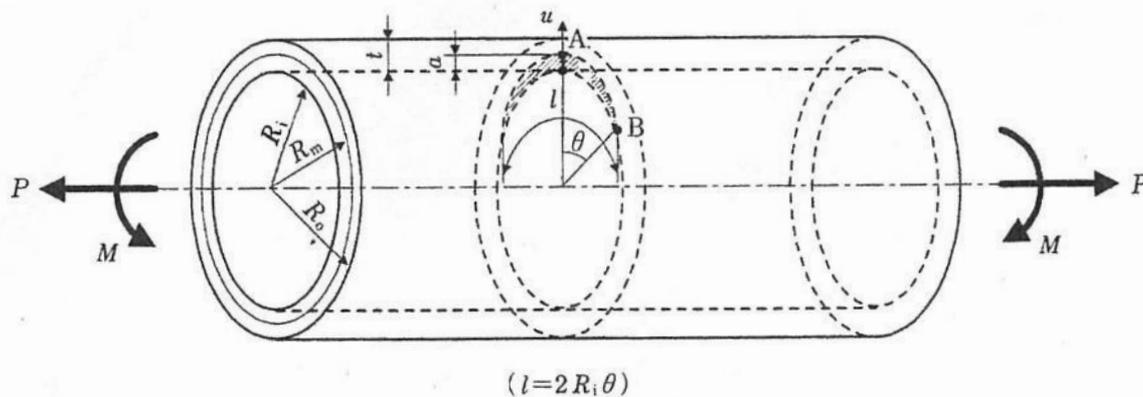


他の規格類についても同様

■ 参照応力試験評価の対象



未貫通亀裂付き平板

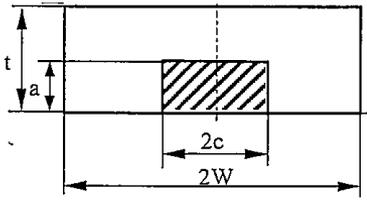


周方向未貫通亀裂付き円筒

■ 平板に対する参照応力評価式 (ローカル極限荷重ベース)

規格・基準 類名称	形状パラメータ	参照応力評価式
構造健全性 評価ハンド ブック	$\alpha = \frac{a}{t}$ for $W \geq c+t$	$\sigma_{ref} = \frac{(1-\alpha)^{1.38} \sigma_b + \left[(1-\alpha)^{3.16} \sigma_b^2 + 9\sigma_m^2 (1-\alpha)^{3.14} \right]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2}$
API579-1 (曲げ変形拘 束有り)	$\alpha = \left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{c}{W}\right)$ for $W < c+t$	$\sigma_{ref} = \frac{g\sigma_b + \left[(g\sigma_b)^2 + 9\sigma_m^2 (1-\alpha)^2 \right]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2} \quad g = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c}\right)^{0.75} \alpha^3$
BS7910 (曲げ変形拘 束有り)	t : 板厚 W : 半板幅	$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_b + \left[\sigma_b^2 + 9\sigma_m^2 (1-\alpha)^2 \right]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2}$
API579-1 & BS7910 (曲げ変形拘 束無し)	a : 亀裂深さ c : 亀裂半長	$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_b + 3\sigma_m \alpha + \left[(\sigma_b + 3\sigma_m \alpha)^2 + 9\sigma_m^2 (1-\alpha)^2 \right]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2}$
HPIS Z-101 (曲げ変形拘 束有り)	$\alpha = \frac{a}{t}$ for $W \geq c+t$	$\sigma_{ref} = \frac{g\sigma_b + \left[(g\sigma_b)^2 + 9\sigma_m^2 (1-\alpha)^2 \right]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2} \quad g = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c}\right)^{0.75} \alpha^3$
HPIS Z-101 (曲げ変形拘 束無し)	$\alpha = \frac{\pi}{4} \left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{c}{W}\right)$ for $W < c+t$	$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_b + 3\sigma_m \alpha + \left[(\sigma_b + 3\sigma_m \alpha)^2 + 9\sigma_m^2 (1-\alpha)^2 \right]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2}$

■ 平板に対する参照応力評価式 (グローバル極限荷重ベース)

規格・基準 類名称	形状パラメータ	参照応力評価式
<p>R6評価式1</p> <p>$W \geq t + c$</p> <p>(評価領域として $d = t + c$ を想定)</p>	<p>$\alpha = a/t, \psi = c/t,$ $\beta = c/W$</p> <p>t : 板厚または管厚 W: 半板幅 a: 亀裂深さ c: 亀裂半長</p>	$\sigma_{ref} / \sigma_m = \begin{cases} \frac{2\lambda + \chi + \sqrt{(2\lambda + \chi)^2 + d_1}}{d_1} & \text{for } \alpha \leq \alpha_{01} \\ \frac{2\lambda + \psi(1-\alpha) + \sqrt{(2\lambda + \psi(1-\alpha))^2 + (1+\psi)d_2}}{d_2} & \text{for } \alpha > \alpha_{01} \end{cases}$ $\alpha_{01} = -\left(\lambda - \frac{1}{2}\right) + \sqrt{\left(\lambda - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2(1+\psi)\lambda}{2+\psi}}, \quad \lambda = \frac{\sigma_b}{6\sigma_m}$ $\chi = \frac{\alpha\psi}{1+\psi}, \quad d_1 = (1-\chi^2) + \frac{2\chi^2}{\psi}, \quad d_2 = (1-\chi)(1-\psi + \alpha\psi) + 2\chi(1-\alpha)$
<p>R6評価式2</p> <p>$W \geq t - a + c$</p> <p>(評価領域として $d = t - a + c$ を想定)</p>		$\sigma_{ref} / \sigma_m = \begin{cases} \frac{2\lambda + \chi + \sqrt{(2\lambda + \chi)^2 + d_3}}{d_3} & \text{for } \alpha \leq \alpha_{02} \\ \frac{2\lambda + \psi + \sqrt{(2\lambda + \psi)^2 + (1 + \frac{\psi}{1-\alpha})d_4}}{d_4} & \text{for } \alpha > \alpha_{02} \end{cases}$ $\alpha_{02} = \text{Min} \left\{ 1, -\left(\lambda - \frac{1}{2} - \frac{\psi}{4}\right) + \sqrt{\left(\lambda - \frac{1}{2} - \frac{\psi}{4}\right)^2 + \lambda(1+\psi)} \right\}, \quad \lambda = \frac{\sigma_b}{6\sigma_m}$ $\chi = \frac{\alpha\psi}{1-\alpha+\psi}, \quad d_3 = (1-\chi)^2 + \frac{2(1-\alpha)\chi^2}{\psi}, \quad d_4 = (1-\psi)(1-\chi) + 2(1-\alpha)\chi$

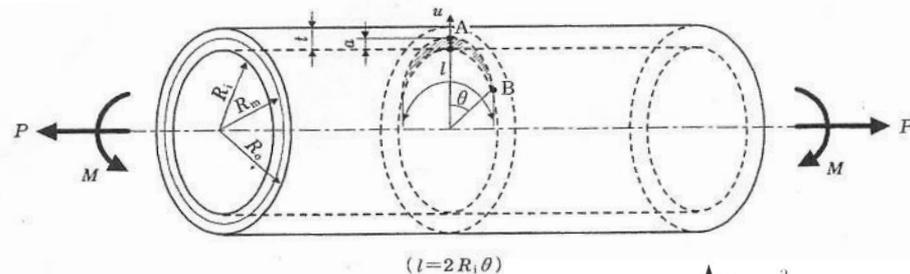
■周方向未貫通亀裂付き円筒に対する参照応力(解析的評価式)

公称膜応力 $\sigma_m = \frac{P}{2\pi R_m t}$

応力比

公称曲げ応力 $\sigma_{gb} = \frac{2+\eta^2}{2+\eta} \frac{M}{\pi R_m^2 t}$

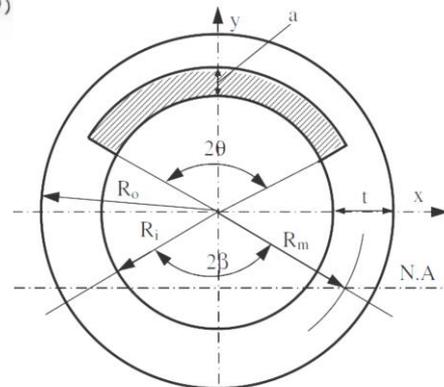
$$\lambda = \frac{(1+\frac{\eta^2}{2}) \sigma_{gb}}{2(1+\frac{\eta}{2}) \sigma_m}$$



形状パラメータ

$$\alpha = a/t, \quad \eta = t/R_m$$

$$f_0 = 1 + \eta^2/12, \quad f_a = 1 - \eta/2 + \alpha\eta/2, \quad f_c = (1 - \eta + \eta^2/4 + \alpha\eta - \alpha\eta^2/2 + \alpha^2\eta^2/3) / f_0$$



β : 中立軸の位置
を表す角度

連立方程式
(Iterationが必要)

$\sigma_{gb} = 0$ の場合	$\sigma_{gb} > 0$ の場合	
	亀裂面が接触しない場合	亀裂面が接触する場合
$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{f_c \alpha \sin \theta}{2} \right)$	$\beta = \frac{\pi}{2} \left(1 - f_a \alpha \frac{\theta}{\pi} - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ref}} \right)$	$\beta = \frac{\pi}{2} \left[2 - \frac{\theta}{\pi} + \frac{\frac{\theta}{\pi} - 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ref}}}{1 - f_a \alpha} \right]$
$\sigma_{ref} = \frac{\pi}{\pi - f_a \alpha \theta - 2\beta} \sigma_m$	$\sigma_{ref} = \frac{\pi \lambda}{f_0 (2 \sin \beta - f_c \alpha \sin \theta)} \sigma_m$	$\sigma_{ref} = \frac{\pi \lambda}{[2(1 - f_c \alpha) \sin \beta + f_c \alpha \sin \theta] f_0} \sigma_m$

$f_0 = f_a = f_c = 1 \rightarrow$ 薄肉円筒の解

■周方向未貫通亀裂付き円筒に対する参照応力評価式のまとめ

規格名	負荷条件	円筒の仮定	亀裂形状	導出方法
構造健全性評価 ハンドブック タイプI	軸力のみ	厚肉	半楕円 (θ を $\pi\theta/4$ で置き換え)	解析的評価
構造健全性評価 ハンドブック タイプII	軸力+曲げモーメント	薄肉	扇型	解析的評価
API579-1 タイプI	軸力+管厚内曲げ応力	厚肉	半楕円 (θ を $\pi\theta/4$ で置き換え)	平板式の補正
API579-1 タイプII	軸力+曲げモーメント+ 管厚内曲げ応力	薄肉	半楕円 (θ を $\pi\theta/4$ で置き換え)	解析的評価 +平板式
R6	軸力+曲げモーメント	厚肉	扇型	解析的評価
HPIS Z-101	軸力+曲げモーメント	厚肉	扇型	不明
BS7910	軸力+管厚内曲げ応力 (曲げモーメントはこれ らに換算)	- (平板解を 準用)	扇型	不明
RSE-M	内圧+軸力+曲げモーメ ント+振りモーメント	薄肉	半楕円	不明

未貫通亀裂付き平板

解析ケース

ケース番号	負荷条件
1	軸力のみ($\sigma_b=0$)
2	曲げモーメントのみ ($\sigma_m=0$)
3	軸力と曲げモーメント複合 ($\sigma_b=\sigma_m$)

適用した評価式

規格・基準類名称	記号	概要
構造健全性評価 ハンドブック	SIH	曲げ拘束有り
API579-1	API-1	曲げ拘束有り
	API-2	曲げ拘束無し
R6	R6-1	評価領域を広くとった式 ($d=c+t$)
	R6-2	評価領域を狭くとった式 ($d=c+t-a$)
BS7910	BS-1	曲げ拘束有り
	BS-2	曲げ拘束無し
HPIS Z-101	HPIS-1	曲げ拘束有り
	HPIS-2	曲げ拘束無し

周方向未貫通亀裂付き円筒

解析ケース

ケース番号	Rm/t	負荷条件
1	10	軸力のみ($\sigma_{gb}=0$)
2		曲げモーメントのみ ($\sigma_m=0$)
3		軸力と曲げモーメント複合 ($\sigma_{gb}=\sigma_m$)

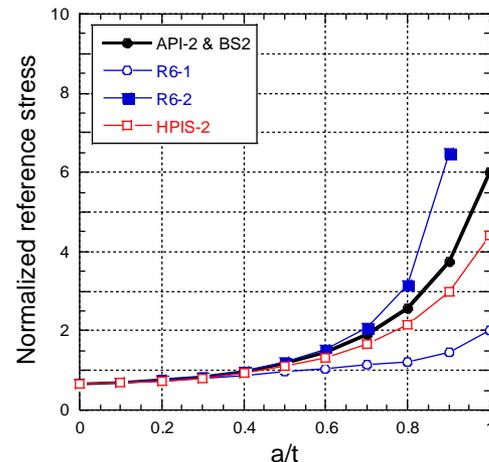
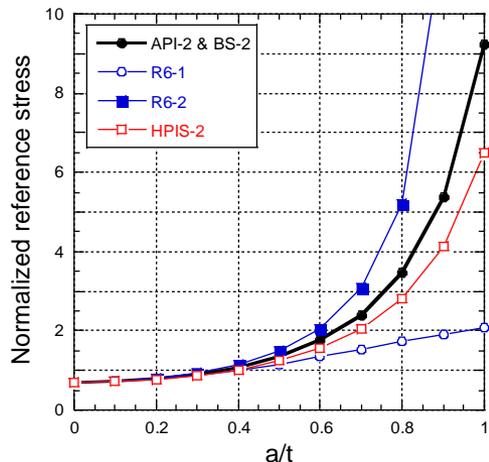
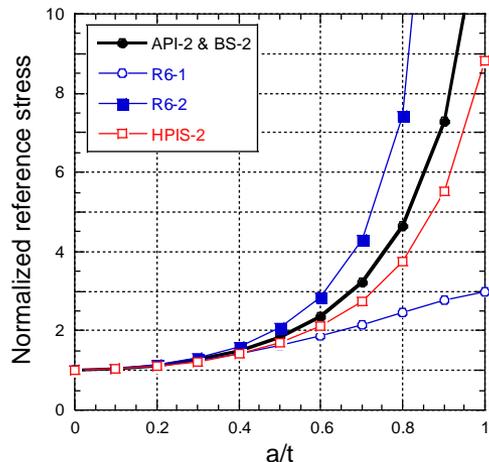
適用した評価式

規格・基準類名称	記号
構造健全性評価ハンドブック	SIH
API579-1	API
RSE-M	RSE-M
R6	R6
BS7910	BS
HPIS Z-101	HPIS

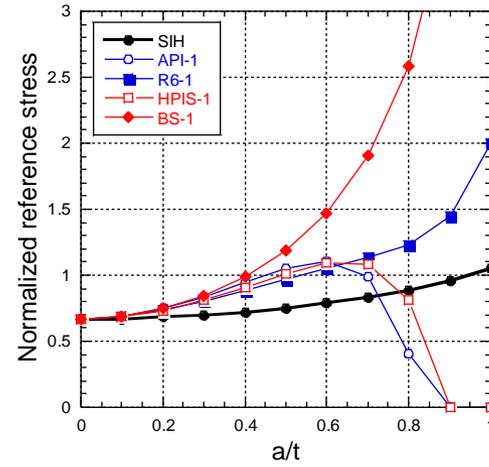
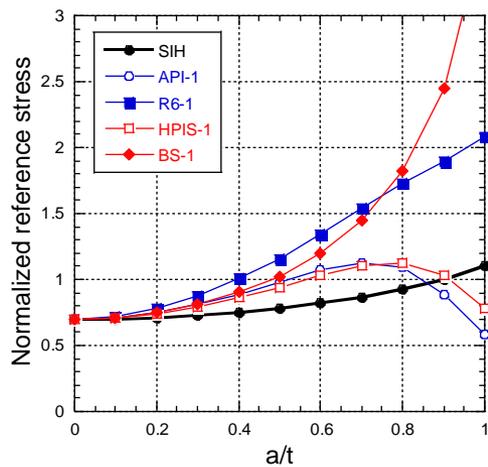
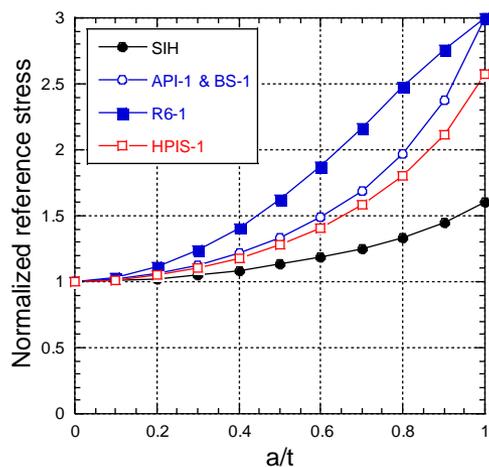
1. 繰返し荷重下の低サイクル疲労, 延性破壊に関する文献調査

1.2 規格・基準・ハンドブック調査

■ 未貫通亀裂付き平板に対する参照応力評価式の比較結果 (a/c=0.5)



曲げ拘束
無し



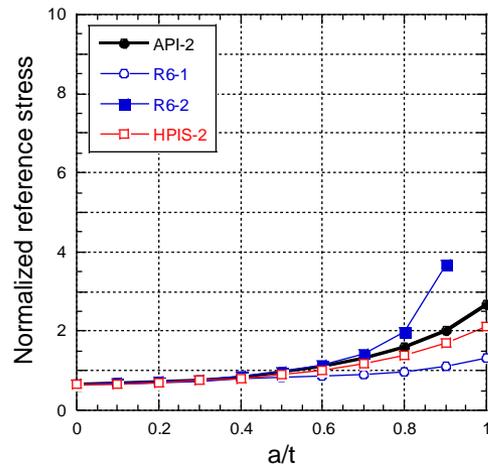
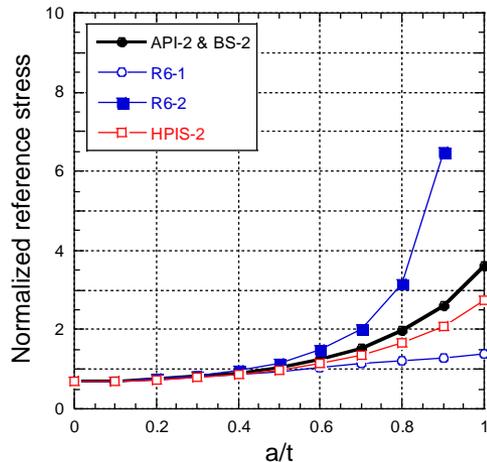
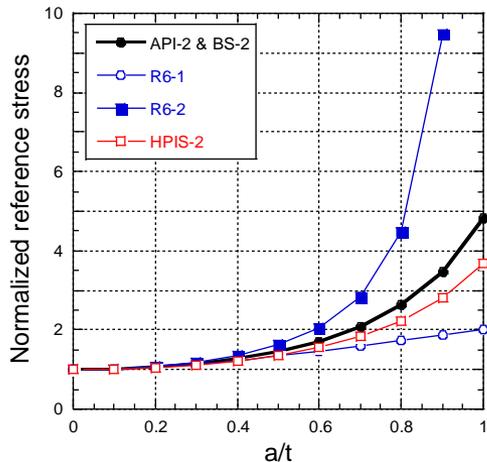
曲げ拘束
有り

軸力のみ ($\sigma_{gb}=0$)

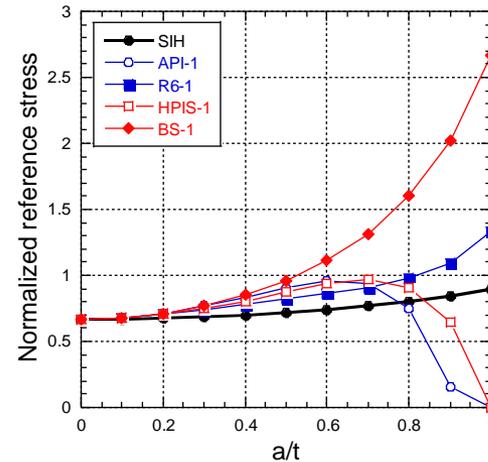
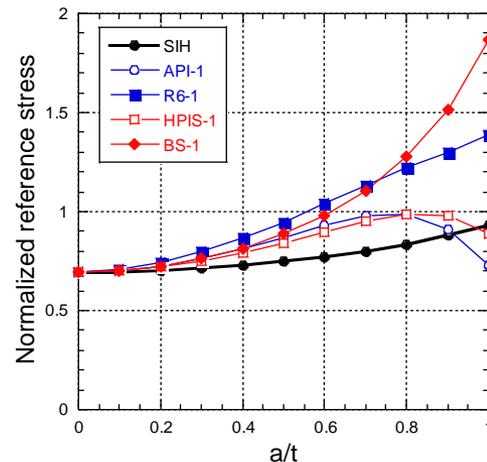
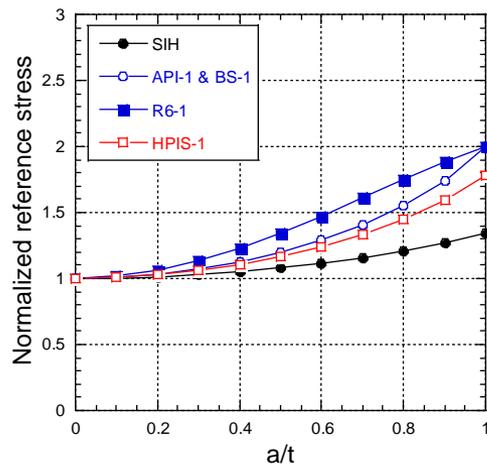
軸力+曲げモーメント ($\sigma_m = \sigma_{gb}$)

曲げモーメントのみ ($\sigma_m=0$)

■ 未貫通亀裂付き平板に対する参照応力評価式の比較結果 (a/c=1.0)



曲げ拘束
無し



曲げ拘束
有り

軸力のみ ($\sigma_{gb}=0$)

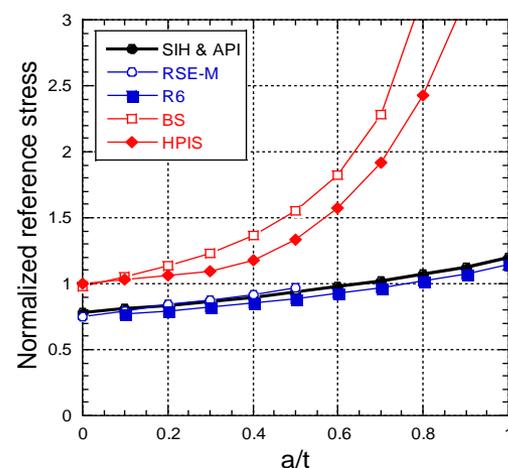
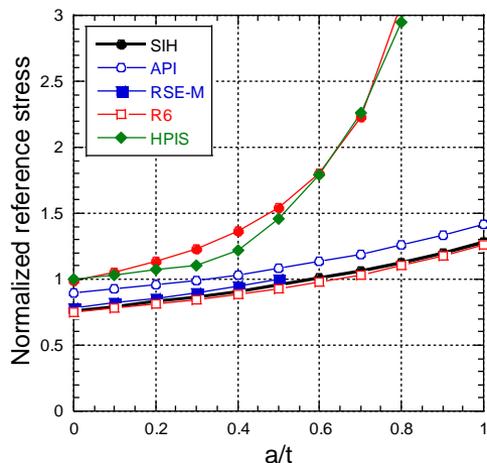
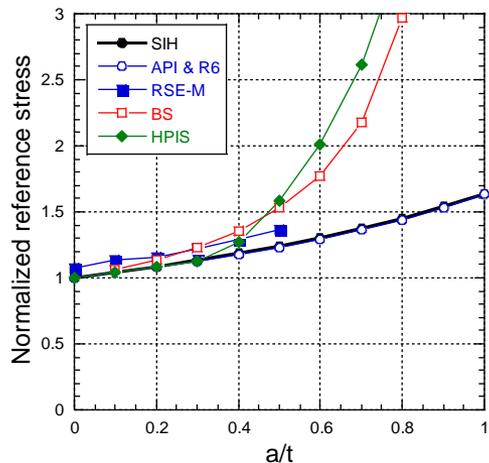
軸力+曲げモーメント ($\sigma_m = \sigma_{gb}$)

曲げモーメントのみ ($\sigma_m=0$)

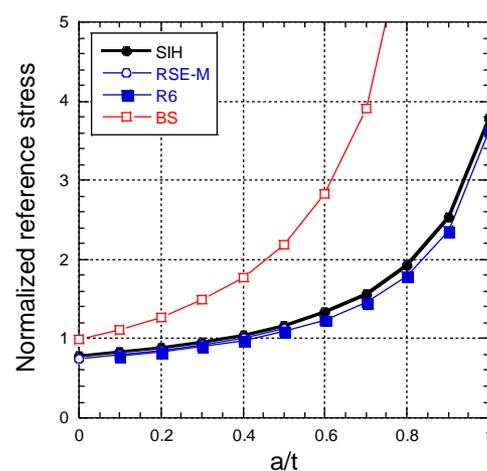
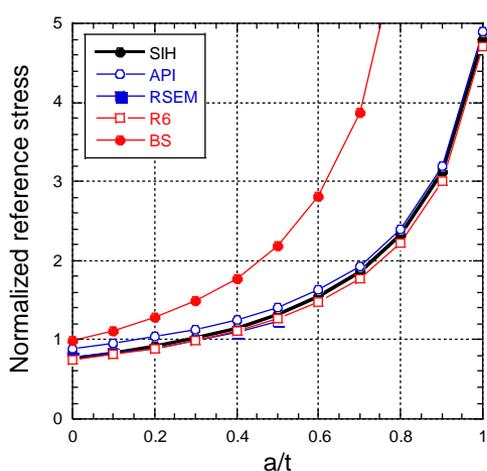
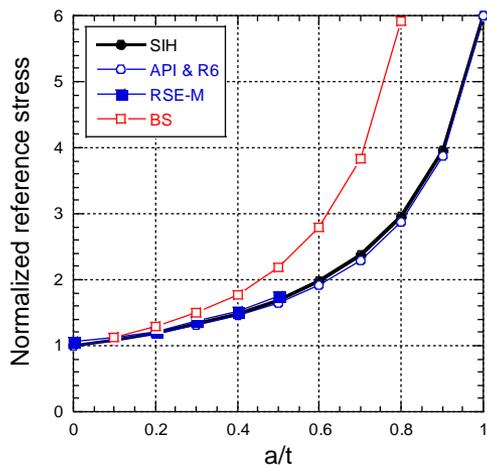
1. 繰返し荷重下の低サイクル疲労, 延性破壊に関する文献調査

1.2 規格・基準・ハンドブック調査

■ 周方向未貫通亀裂付き円筒に対する参照応力評価式の比較結果



$\theta / \pi = 0.2$
($2\theta = 72^\circ$)



$\theta / \pi = 0.5$
($2\theta = 180^\circ$)

軸力のみ ($\sigma_{gb} = 0$)

軸力+曲げモーメント ($\sigma_m = \sigma_{gb}$)

曲げモーメントのみ ($\sigma_m = 0$)

■ 各種規格類における参照応力評価式の比較結果のまとめ

- 平板、円筒とも、規格によって様々な式が採用されており、評価結果間にかんがりの差異が認められた。
- 平板の場合には、片側亀裂付き2次元平板の解を補正した式（ローカル極限荷重）が多く採用されているが、それにも複数のバージョンが存在し、特に亀裂が深く、曲げ応力が大きいときには、その差はかなり大きい。曲げ変形に対する拘束の有無で結果は大きく変動する。さらに矩形亀裂に対する応力分布評価から導かれた式（グローバル極限荷重）も存在し、これもかなり異なった評価を与える。
- 円筒の場合には、いくつかの規格では異なったタイプの式も採用されており、これらを用いた場合には大きな差も生じるものの、多くの規格で下限極限荷重に基づく同タイプの評価式が用いられており、平板に比べるとバラエティは小さいことが確認された。主に熱応力によって生じるものと推定される管厚内曲げ応力の影響については、別途検討する必要があるものと考えられる。
- 今後は、これらを用いたJ積分評価の精度も考慮した検討が必要と考えられる。

■ 目的及び概要

日本溶接協会において、繰返し複合荷重下における軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究として、MF(Multi-axial Fatigue)委員会, MF-II (Multi-axial Fatigue II)委員会, MF-III(Multi-axial Fatigue III)委員会, MDF(Multi-axial Ductile Fracture)小委員会, MFD(Multi-axial Fatigue and Ductile Fracture)小委員会を実施した。

ここでは、静的単調負荷および100回程度以下で破壊するような極低繰返し数での繰返し荷重を対象としたMDF小委員会の亀裂進展データをあらためて見直し、特にモードIの場合のみに着目して、小規模降伏条件を逸脱した場合の破壊力学的手法としてのJ積分の有用性、およびその簡易的手法について検討した。

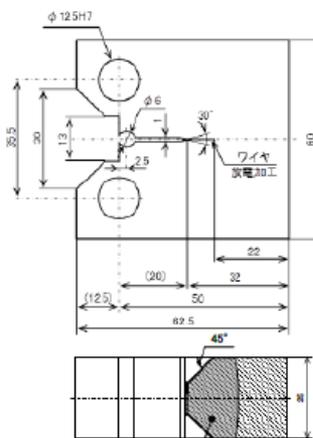
2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.1 CT試験片に対する試験結果の検討

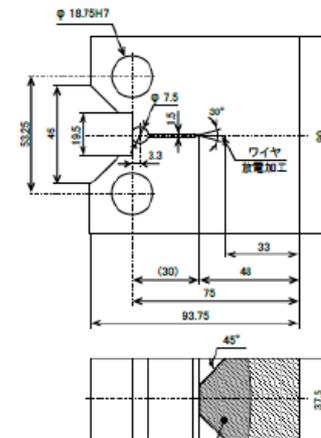
■ CT試験片形状及び試験条件

試験片: 1CT、1.5CT、2CT

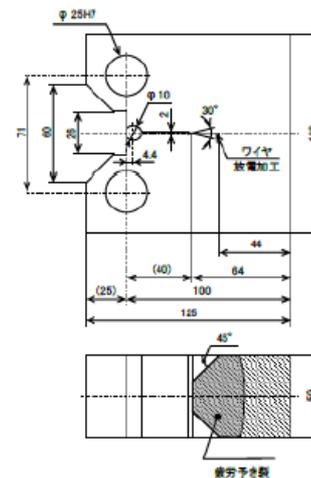
単調負荷・繰返し破壊試験データの
J積分再評価



(a) 1 CT specimen
(a) 1 CT 試験片



(b) 1.5 CT specimen
(b) 1.5 CT 試験片



(c) 2 CT specimen
(c) 2 CT 試験片

試験本数

単調		繰返し	
CS	SS	CS	SS
11	9	11	7

CS: 炭素鋼(SGV410)

SS: ステンレス鋼(SUS316)

2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.1 CT試験片に対する試験結果の検討

■ CT試験片におけるJ積分の簡易評価

単調負荷

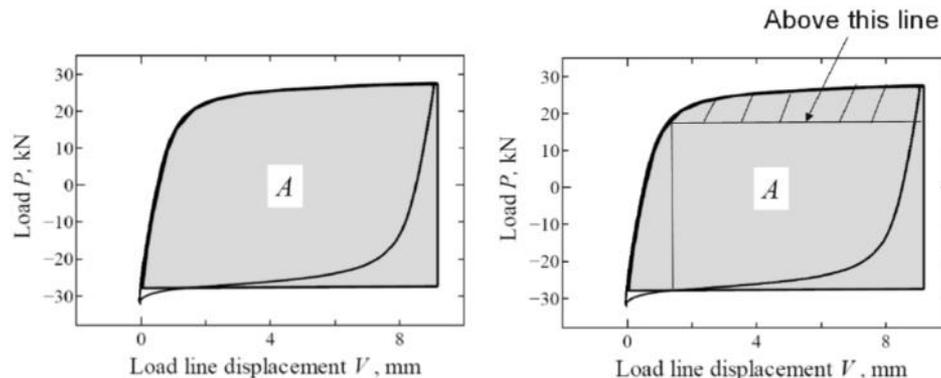
$$J = f(a/w) \frac{\int_0^{\delta_{\max}} P d\delta}{WB}$$

$$f(a/w) = \frac{2 + 0.522(1 - a/w)}{1 - a/w}$$

P : 荷重
 δ : 荷重線変位
 a : き裂長さ
 w : 板幅
 B : 板厚

繰返し負荷

$$J = f(a/w) \frac{\int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} (P - P_{\min}) d\delta}{WB}$$



圧縮側のカーブでの屈曲点での荷重と等しい荷重

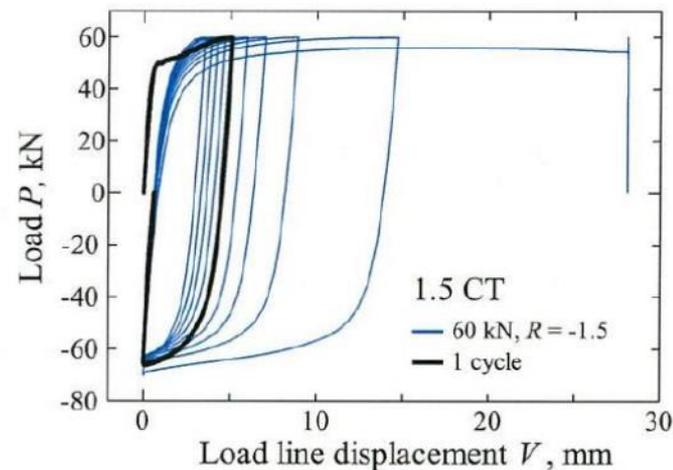
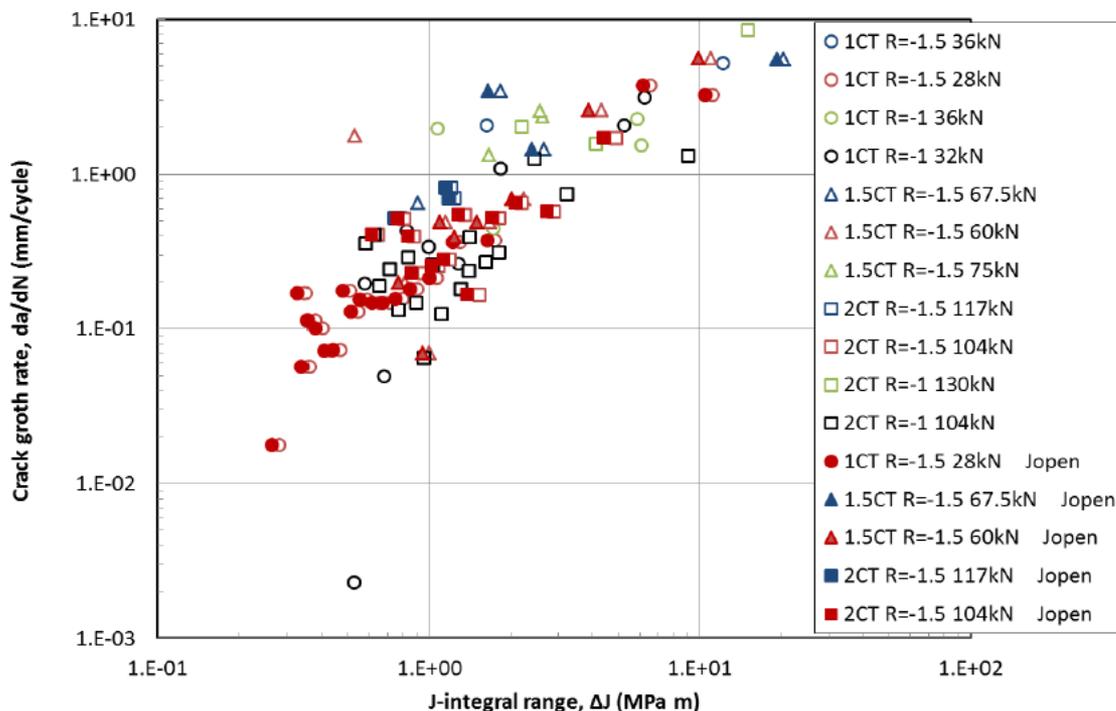
屈曲点での変位と等しい変位の点をき裂開口点とする

繰返し負荷の場合の面積のとり方

2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.1 CT試験片に対する試験結果の検討

■ CT試験片における ΔJ —亀裂進展速度の関係 (SGV410)



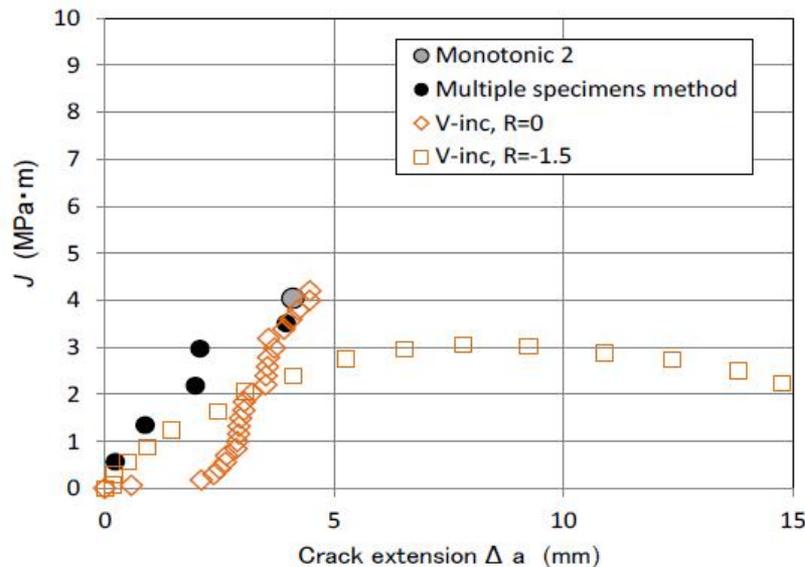
・ $R = -1$ ではき裂閉口が生じないため、 J 積分範囲に相違は生じない。

・ $R = -1.5$ では、繰返しの末期にき裂閉口が生じるが、最小荷重到達の直前にき裂が閉口するため、いずれの方法を用いても ΔJ の値に大差はない

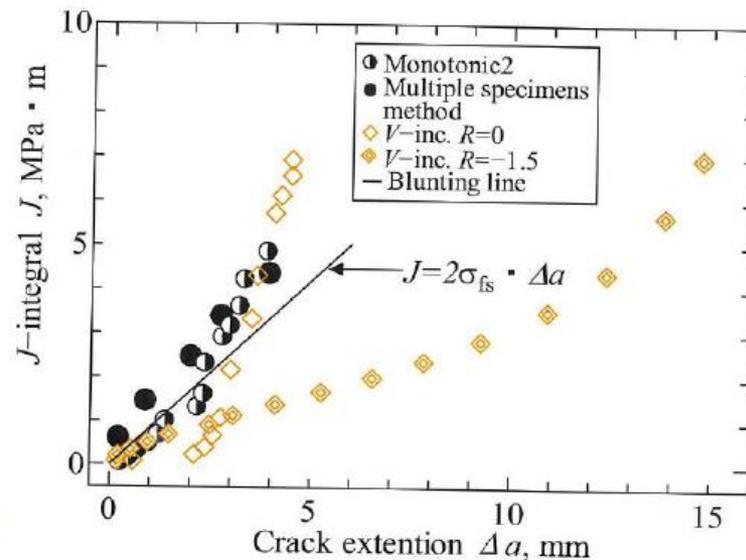
2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.1 CT試験片に対する試験結果の検討

■ 亀裂進展量とJ積分の関係 (SUS316:CT試験片)



再評価



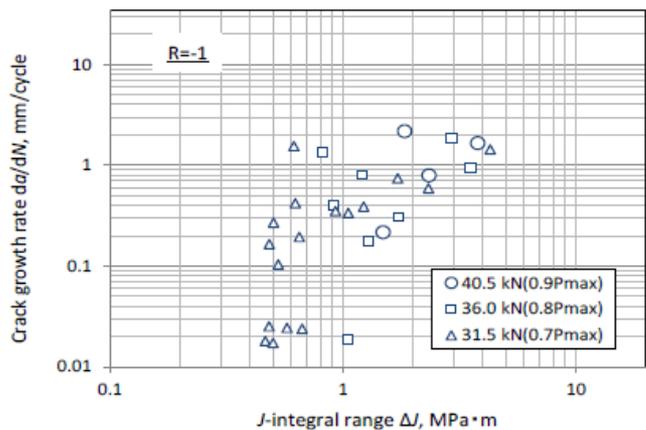
MDF

- ・再評価したJ積分は全体的にMDFの結果よりも小さい
- ・ V-inc(R= -1.5)についてはき裂閉口の影響のため、J積分が最大でも3MPa·m程度であるのに対し、MDFの結果では、荷重-変位曲線の圧縮側の面積を含めているため、再評価結果よりもJ積分の値が高い

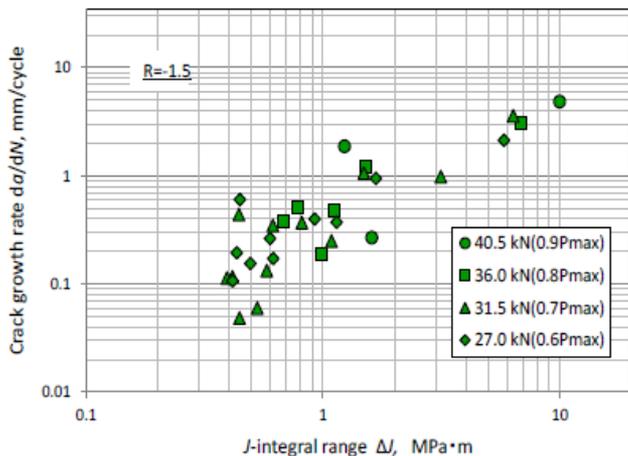
2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.1 CT試験片に対する試験結果の検討

■ ΔJ と亀裂進展速度の関係(SUS316:CT試験片)



$R=-1$



$R=-1.5$

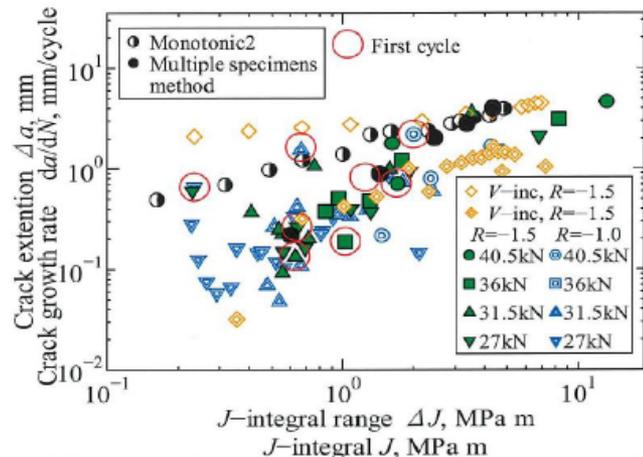


Fig. 3.2.4.2-22 Fatigue crack growth rates and monotonic resistance curve of SUS316, where ΔJ values were calculated by tension and compression loads.

図 3.2.4.2-22 SUS316 における疲労き裂進展特性(ΔJ は圧縮側を含む)と静的 R 曲線

MDF

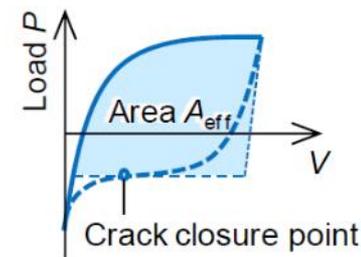
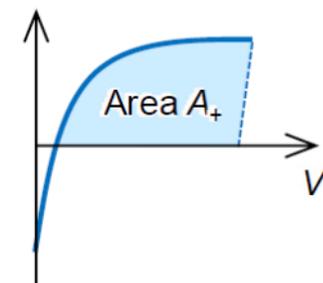
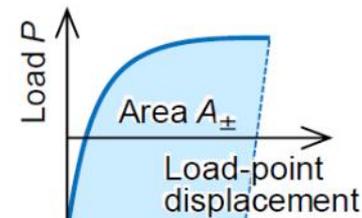
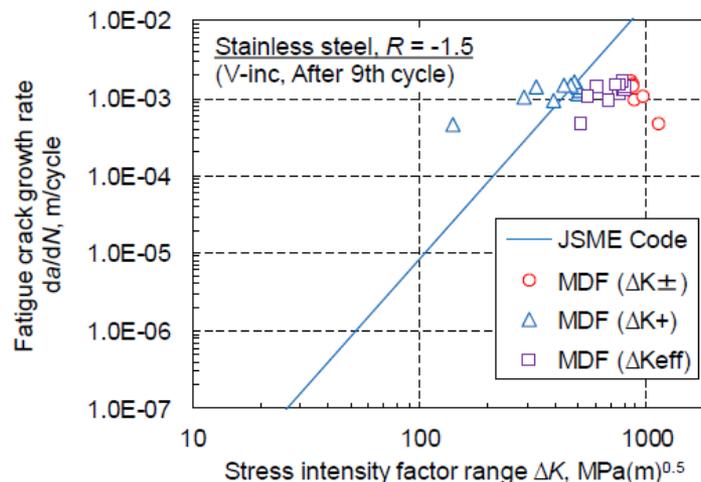
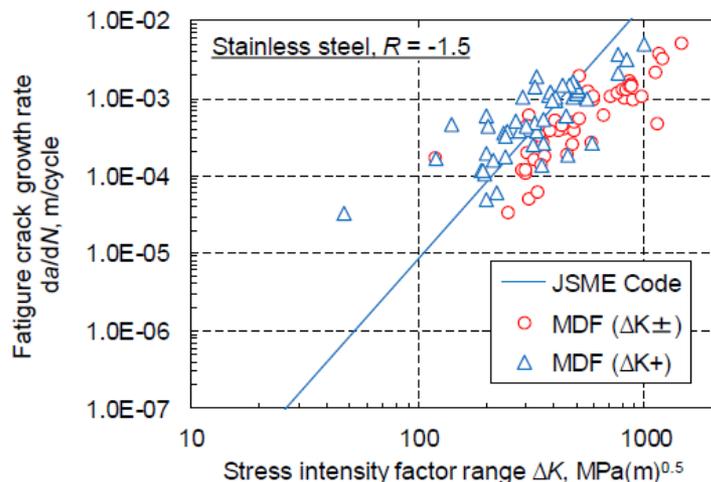
・再評価J積分の値がMDFよりも小さいため、き裂進展速度は、MDFよりもやや加速側

2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.1 CT試験片に対する試験結果の検討

■ 等価応力拡大係数範囲と亀裂進展速度の関係 (SUS316:CT試験片)

$$\Delta K = \sqrt{\frac{E\Delta J}{1-\nu^2}}$$



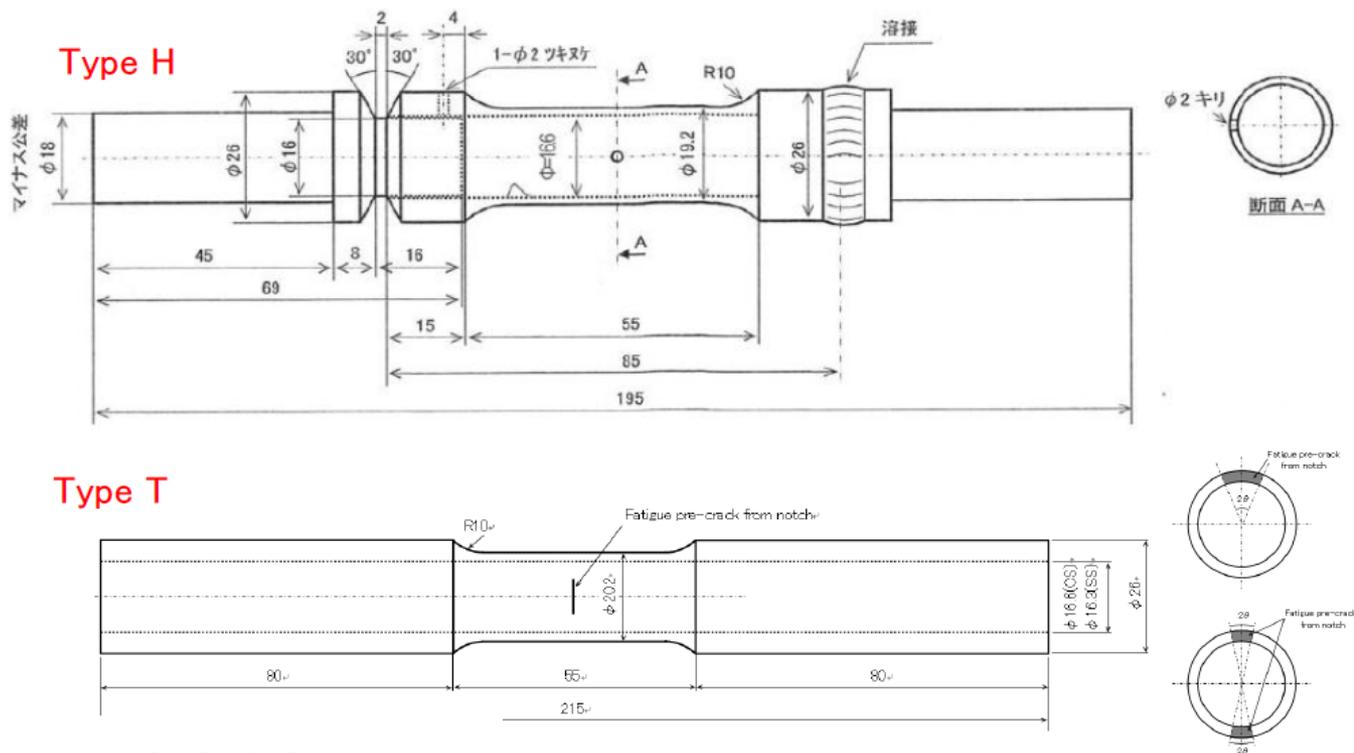
- ASME Section XIIに示される疲労亀裂進展速度は95%信頼曲線から決定されているため、 ΔK_{+} は過小評価となっている。
- ΔK の算出には、荷重が負となる範囲も考慮する必要がある

- 亀裂閉口を考慮した ΔK_{eff} を用いた場合に、亀裂進展速度の傾向がJSME維持規格の疲労亀裂進展速度とほぼ一致するこのため、疲労亀裂進展評価に用いる ΔJ は、荷重が負となる範囲および亀裂開閉口を考慮して算出することが適切

2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.2 中空円筒試験片に対する試験結果の検討

■ 中空円筒試験片形状及び試験条件



試験本数

単調		繰返し	
CS	SS	CS	SS
3	5	7	3

CS:炭素鋼(STPT410)

SS:ステンレス鋼(SUS316)

2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.2 中空円筒試験片に対する試験結果の検討

■ 貫通亀裂付き中空円筒試験片に対する極限荷重と η ファクターに基づくJ積分評価式

$$P_{L1} = 2R_m t (\pi - \theta) \sigma_0$$

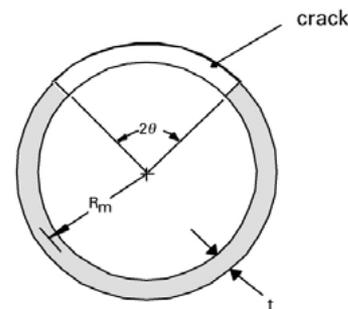
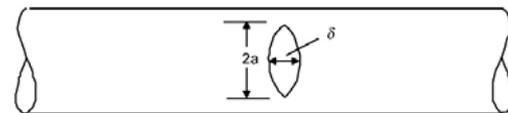
$$P_{L2} = 2R_m t \left\{ \pi - \theta - 2 \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{2} \right) \right\} \sigma_0$$

$$P_{L3} = \left(0.87 + 0.78 \frac{\theta}{\pi} \right) 2R_m t \left\{ \pi - \theta - 2 \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{2} \right) \right\} \sigma_0$$

$$J_{P1} = \frac{1}{R_m t (\pi - \theta)} \left(\int_0^\Delta P d\Delta - \frac{P\Delta}{2} \right)$$

$$J_{P2} = \frac{\left[1 + \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 - (\sin \theta / 2)^2}} \right] \left(\int_0^\Delta P d\Delta - \frac{P\Delta}{2} \right)}{R_m t \left\{ \pi - \theta - 2 \sin^{-1} (\sin \theta / 2) \right\}}$$

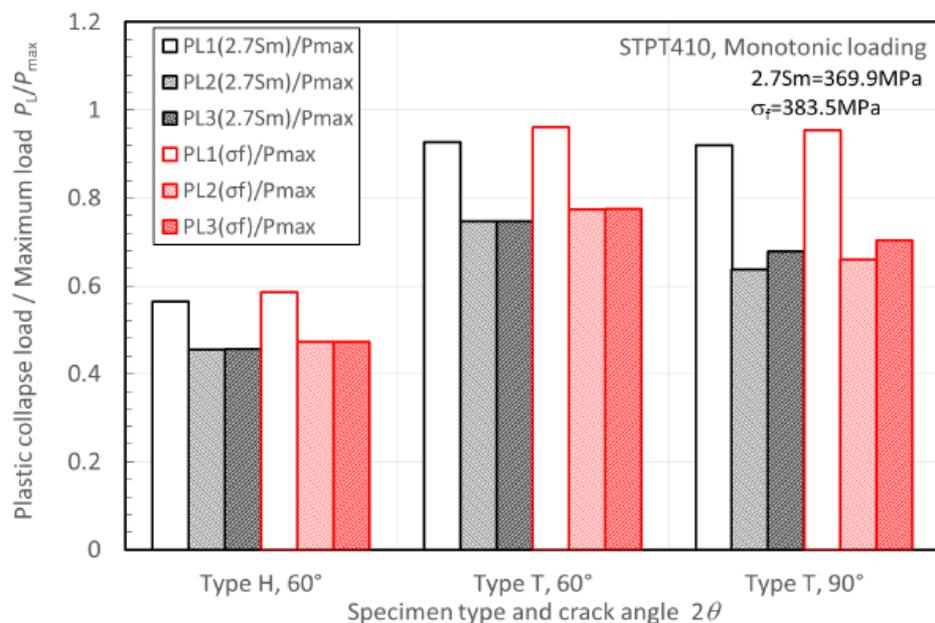
$$J_{P3} = \frac{\left(0.87 + 0.78 \frac{\theta}{\pi} \right) \left\{ 1 + \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - (\sin \alpha / 2)^2}} \right\} - \frac{0.78}{\pi} \left\{ \pi - \alpha - 2 \sin^{-1} (\sin \alpha / 2) \right\}}{R_m t \left(0.87 + 0.78 \frac{\theta}{\pi} \right) \left\{ \pi - \alpha - 2 \sin^{-1} (\sin \alpha / 2) \right\}} \left(\int_0^\delta P d\Delta - \frac{P\Delta}{2} \right)$$



2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.2 中空円筒試験片に対する試験結果の検討

■ 単調荷重試験における最大荷重と推定塑性崩壊荷重の比較 (STPT410)



・いずれの極限荷重式と流動応力の組合せも試験の最大荷重を低めに評価し、Type H試験片 ($2\theta=60^\circ$) でその差が大きい

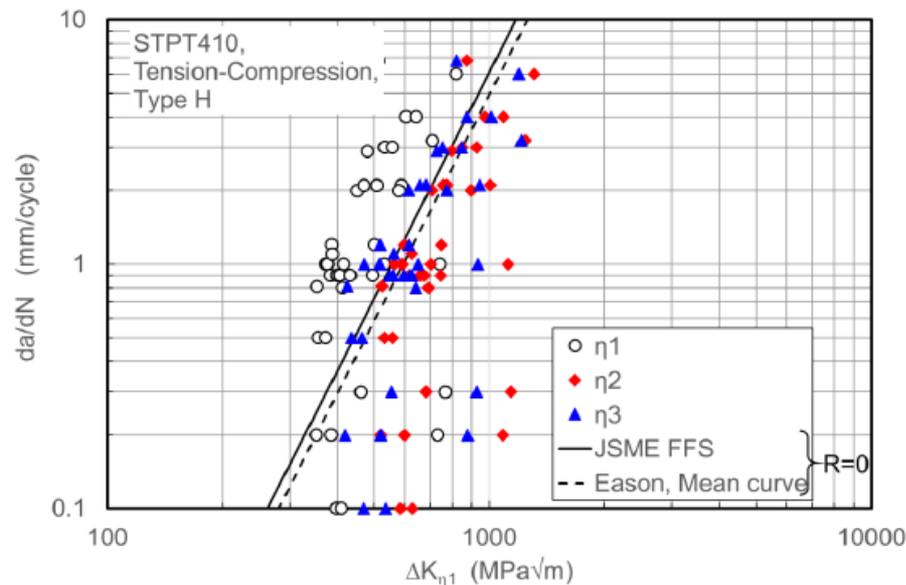
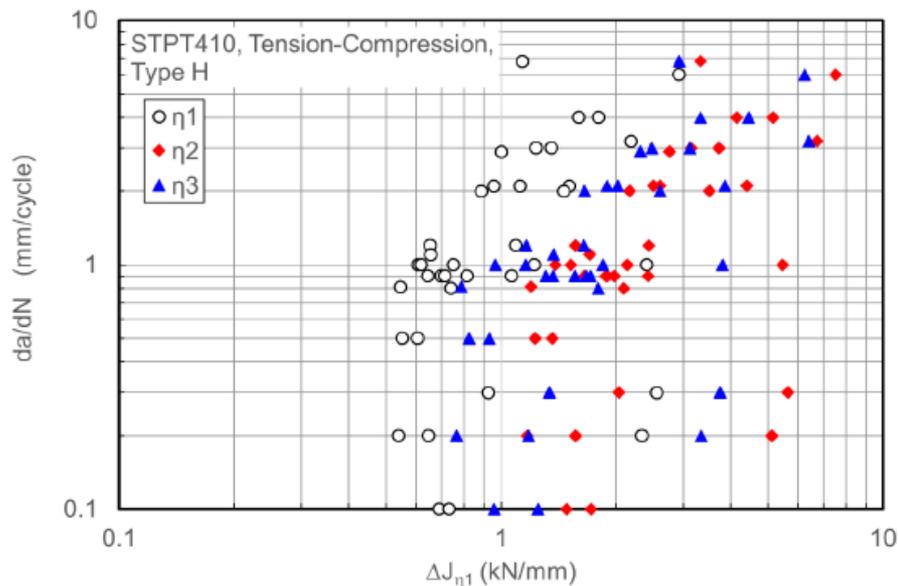
・PL1が最も1に近い

・ $2.7Sm$ と σ_f の差は小さいため、流動応力の定義の影響は小さい

2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.2 中空円筒試験片に対する試験結果の検討

■ 繰返し荷重試験における $\Delta J / \Delta K$ と亀裂進展速度の関係 (STPT410)

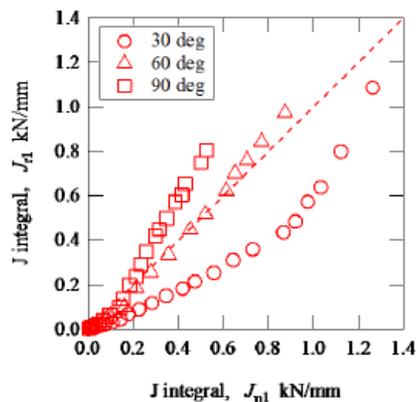
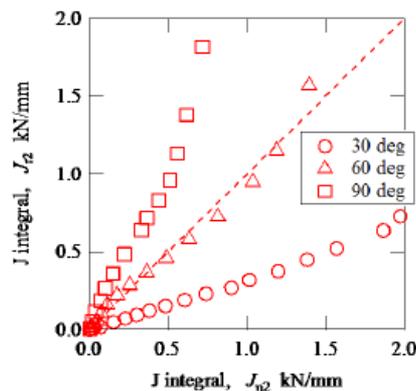
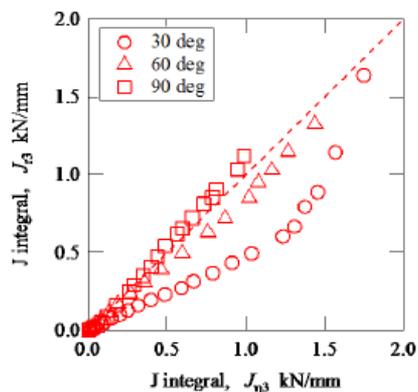
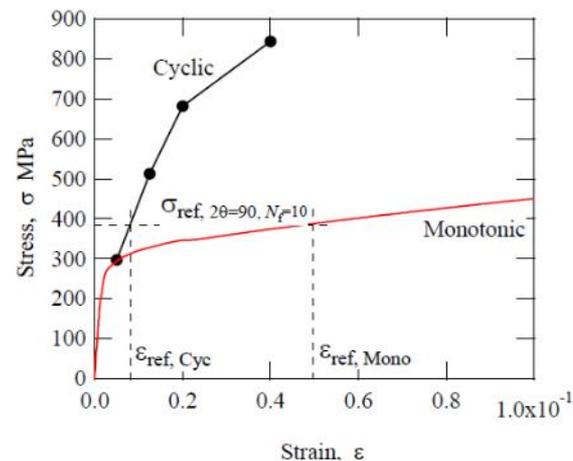


単調J積分の場合と異なり、 η_1 を用いた場合が亀裂進展量を最も大きく評価し、次いで η_3 , η_2 の順となり、 η_2 と η_3 については差は小さい

2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.2 中空円筒試験片に対する試験結果の検討

■ 単調負荷試験における参照応力法と η ファクター法によるJ積分の比較(SUS316)


 $J_{\eta 1}$

 $J_{\eta 2}$

 $J_{\eta 3}$


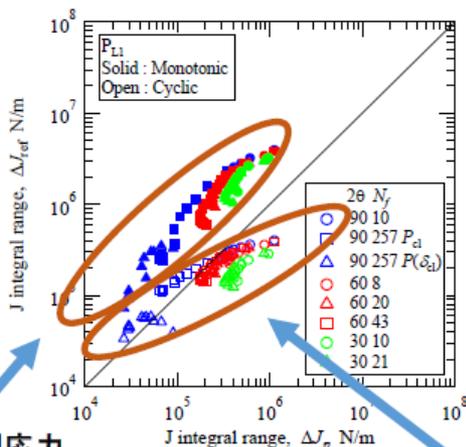
参照応力法のための応力ひずみ関係

- ・き裂長さが短いほど J_{η} が大きい
- ・ $J_{\eta 3}$ の相関が最も良い

2. MDF小委員会における実験結果の再検討

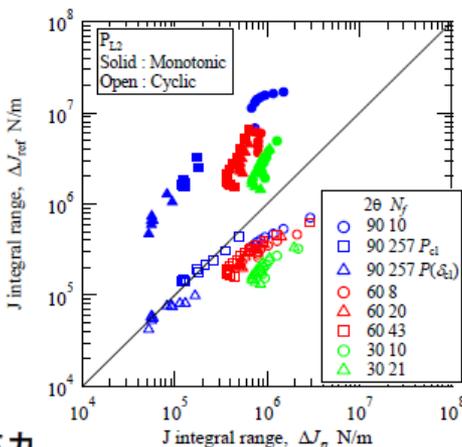
2.2 中空円筒試験片に対する試験結果の検討

■ 繰返し負荷試験における参照応力法と η ファクター法による ΔJ の比較(SUS316)



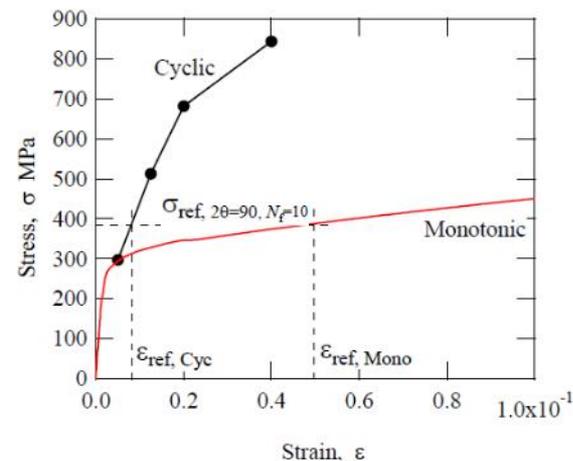
単調応力
ひずみ関係

$J_{\eta 1}$

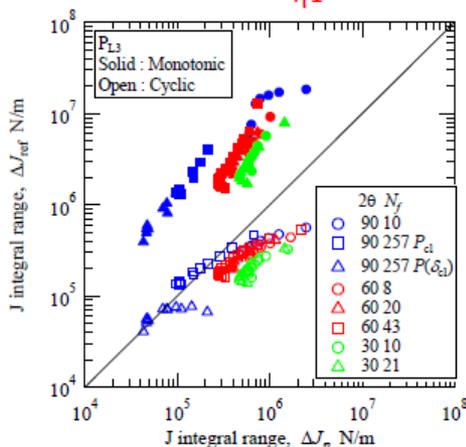


繰返し応力
ひずみ関係

$J_{\eta 2}$



参照応力法のための応力ひずみ関係



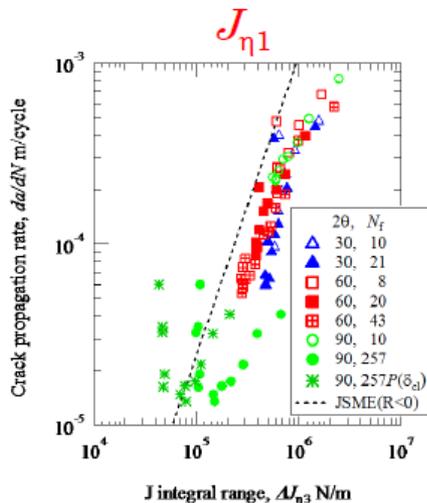
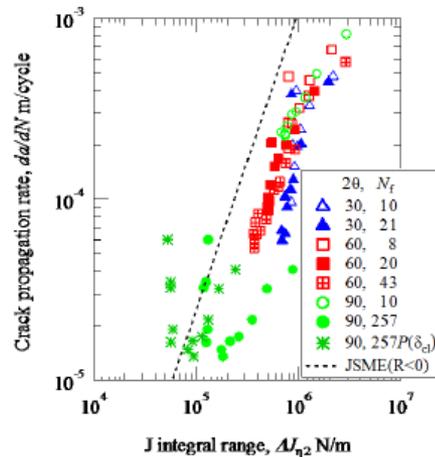
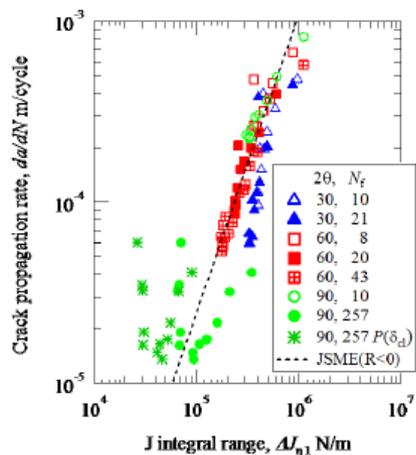
$J_{\eta 3}$

- ・繰返し応力ひずみ関係の方が ΔJ_{η} に近い
- ・き裂長さが短いほど ΔJ_{η} が大きい(単調負荷と同様)
- ・ $N_f=257$ について, 荷重基準, 変位基準の差は小さい
- ・単調負荷では $\Delta J_{\eta 3}$ で両者がよく一致したが、繰返し・負荷では $\Delta J_{\eta 1}$ とが参照応力法によく対応する

2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.2 中空円筒試験片に対する試験結果の検討

■ 繰返し負荷試験における η ファクター法による ΔJ と亀裂進展速度の関係 (SUS316)



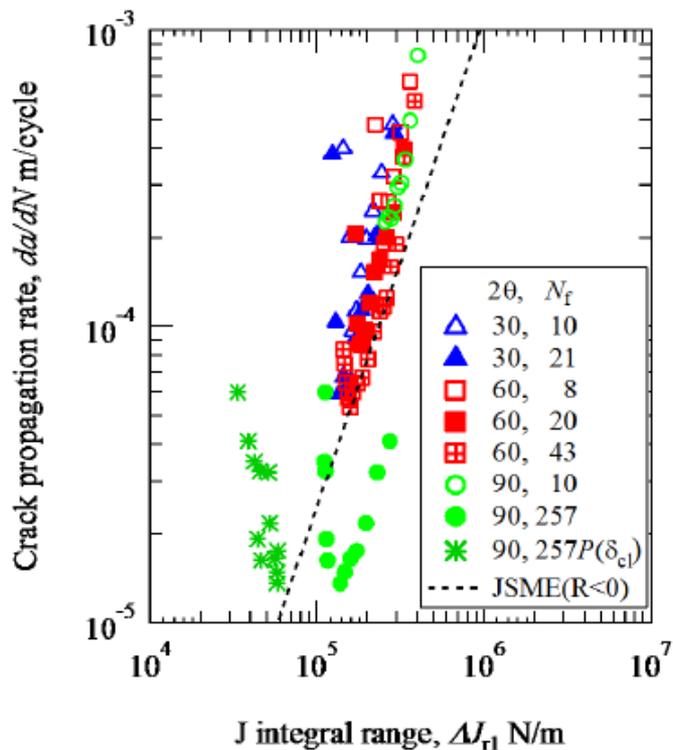
$J_{\eta 3}$

- ばらつき範囲は、 $\Delta J_{\eta 1}$ 、 $\Delta J_{\eta 2}$ 、 $\Delta J_{\eta 3}$ の間に大差ない
- JSME ($R \leq 0$) との比較では $\Delta J_{\eta 1}$ の結果が最も近く、 $\Delta J_{\eta 2}$ が最も大きく右にずれる
- $N_f=257$ の加速域は、変位基準の DJ_h の方が他のデータの延長線上に近い

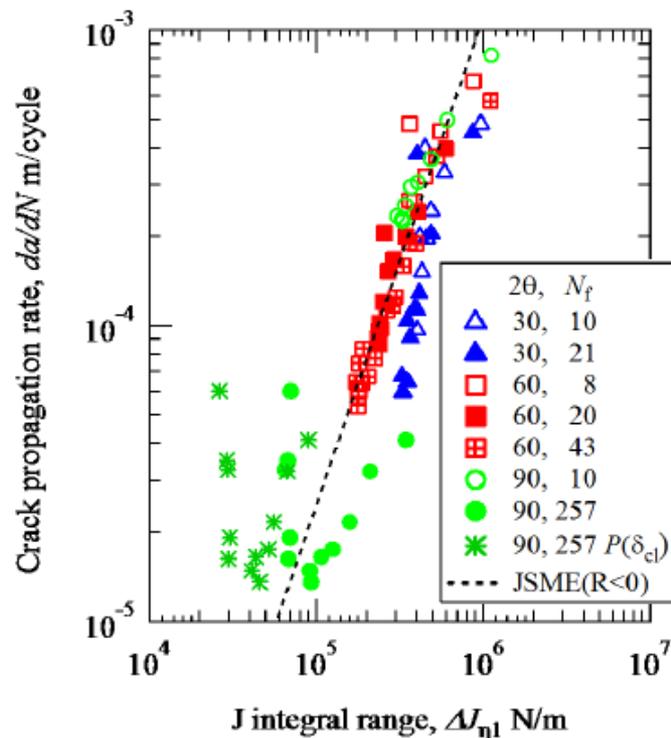
2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.2 中空円筒試験片に対する試験結果の検討

■ ΔJ と亀裂進展速度の関係(SUS316)



参照応力法



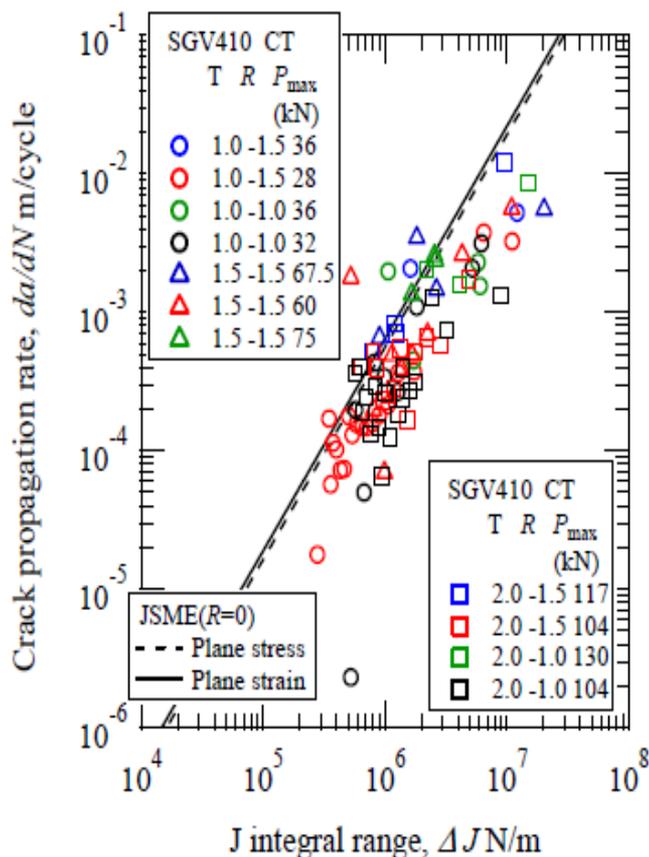
η ファクター法

参照応力法の ΔJ_r では、高伝ば速度で加速側に評価する

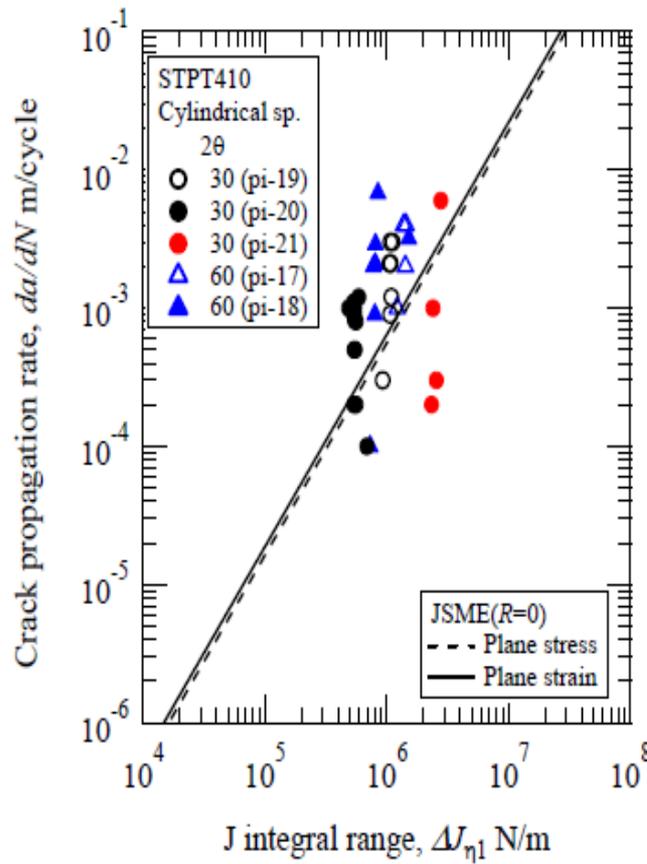
2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.3 き裂進展特性のまとめ

■ ΔJ -亀裂進展速度関係のまとめ(炭素鋼)



(a) 炭素鋼 CT 試験片

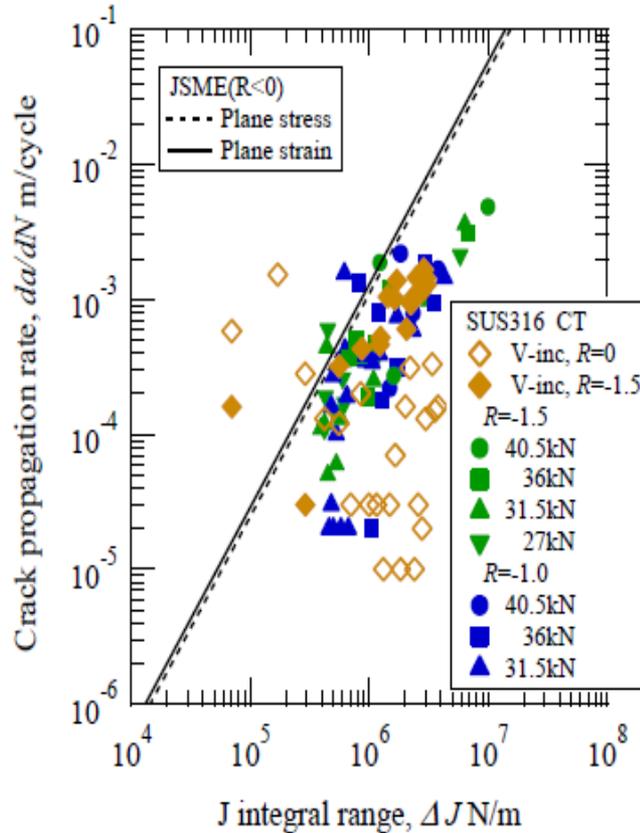


(b) 炭素鋼 円筒試験片

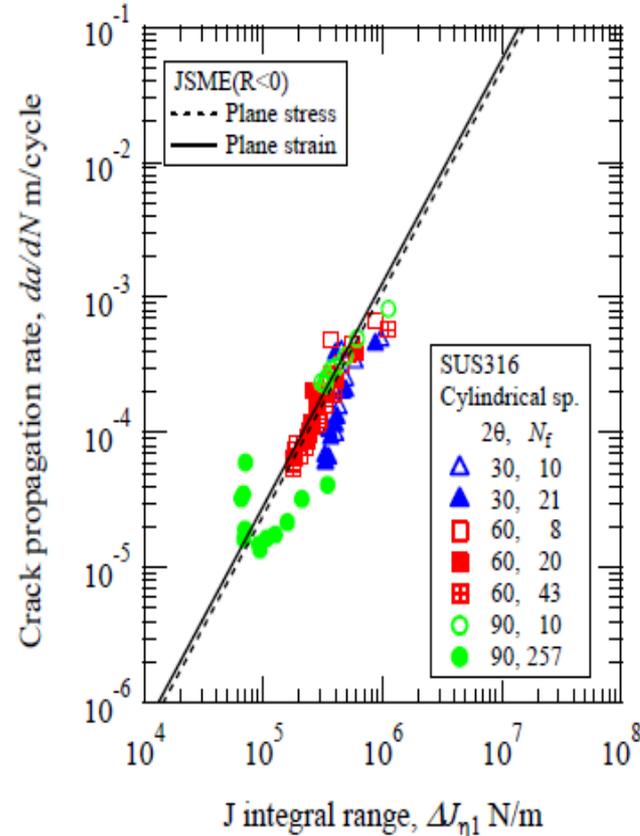
2. MDF小委員会における実験結果の再検討

2.3 き裂進展特性のまとめ

■ ΔJ -亀裂進展速度関係のまとめ (SUS316)



(c) SUS CT 試験片



(d) SUS 円筒試験片

■ まとめ

- CT試験片では、炭素鋼、ステンレス鋼いずれの場合も、 ΔJ より換算した平均的な $\Delta K-da/dN$ 関係はJSMEの関係よりもやや低速側。
- 円筒試験片ではJSMEの関係におおよそ一致。亀裂閉口が生じる場合には、それを考慮したデータ整理が必要であるが、亀裂閉口点の荷重基準、もしくは変位基準のどちらを開口点とするかについては、さらなる検討が必要。
- 円筒試験片に対する参照応力法による ΔJ の値は η ファクター法による値と比較的良く一致するが、高応力側で過小評価の傾向。