原子力プラント機器の健全性評価に関する講習会

新しい設計疲労曲線と疲労解析

2020年12月3日

青山学院大学　　小川 武史

講演内容

本講演では、原子力研究委員会DFC小委員会で策定した新たな設計疲労曲線と疲労解析法について、

- 最適疲労曲線の構築
- 設計係数の見直し
- 新たな平均応力補正法の導入
- 疲労限度設定の考え方
- 大型試験片による検証

等の観点から解説する。

疲労ナレッジプラットフォーム

原子力研究委員会 FQA小委員会 疲労ナレッジプラットフォーム

- はじめに
- 疲労研究小委員会の成果
- 疲労に関するＱ＆Ａ集
- 疲労に関する重要知識

疲労研究小委員会の成果

- AFC小委員会：
  原子炉圧力容器及び配管の疲労強度安全評価に関する試験研究
- P･FCI小委員会：
  高速炉構造材料の高温低サイクル疲労試験方法に関する研究
- FRC小委員会：
  原子炉構造物の強度安全性評価法の合理化に関する研究
- TFC小委員会：
  軽水炉機器疲労強度の実験解析法に関する研究(IV)
- LE小委員会：
  原子炉構造材料の経年変化に関する基礎試験Ⅲ
- EFW小委員会：
  ステンレス鋼溶接継手部の疲労強度評価研究
- EFS小委員会：
  原子力機器用ステンレス鋼の疲労強度評価研究
- FDE小委員会：
  疲労損傷の評価技術に関する研究

疲労研究小委員会の成果

- GCF小委員会：
  原子力機器用構造材の高サイクル疲労評価研究
- GCF2小委員会：
  電力設備材料の疲労強度特性評価研究
- GCF3小委員会：
  超高サイクル疲労(GCF)評価に関する研究(Phase Ⅰ)
- LCF小委員会：
  地震荷重を受けた原子力機器材料の疲労強度特性評価に関する研究
- DFC小委員会：
  設計疲労線図の策定に係る調査
- DFC2小委員会：
  設計疲労線図の策定に係る調査（Phase Ⅱ）
- DFC2小委員会：
  設計疲労線図の策定に係る調査（Phase Ⅱ） 付録4
  電共研「大気中設計疲労線図合理化に関する研究」
  小型及び大型疲労試験 研究成果（小型疲労試験片）
- DFC2小委員会：
  設計疲労線図の策定に係る調査（Phase Ⅱ） 付録4（添付1.1）
  電共研「大気中設計疲労線図合理化に関する研究」
  小型及び大型疲労試験 研究成果（小型疲労試験片）
  「一方向仕上げ直交方向負荷」の疲労強度が低い原因の検討

設計疲労曲線

- Jaske & O'Donnell Curve(1977)
  ステンレス鋼の設計疲労曲線に対し、厳しい側となる曲線の改定を提案(10年以上の議論の末、1990年頃採択)
  10^6サイクルまで:既存のカーブのまま、10^6サイクル以降:新しいカーブを適用
  2009Addenda発行までのASMEの設計疲労曲線

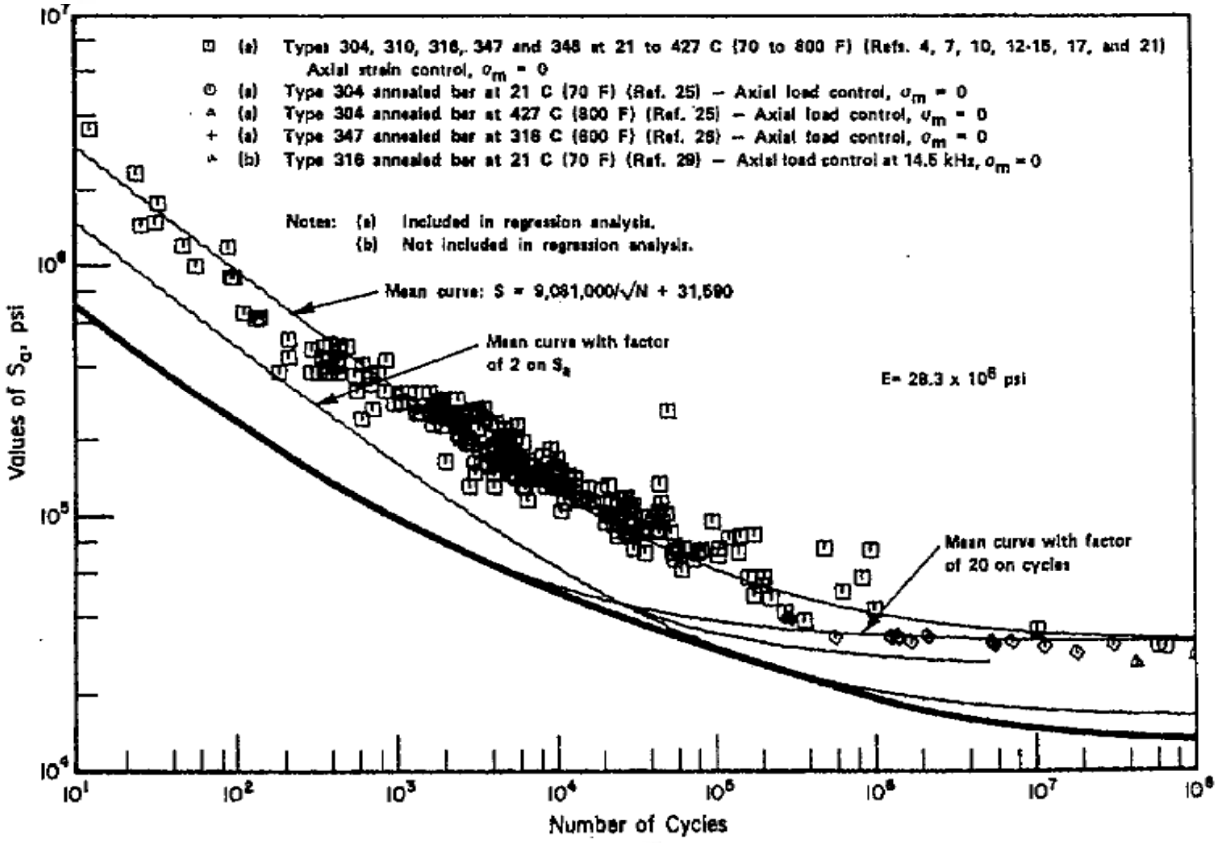


Fig. 3 Fatigue curve for types 304, 310, 316, 347, and 348 austenitic steels

試験片と実機の疲労寿命

Q

試験片の疲労寿命は実機のき裂発生寿命ですか，それとも疲労寿命ですか．

参照 QNo. : FA-16, FA-20, FA-23

A

実際の機械構造物（実機）は，形状と寸法が多様である．公称応力が同じ条件で，圧力容器のような大きな実機の場合は，試験片の疲労寿命を実機のき裂発生寿命と見なすことができるが，小さな実機の場合は，試験片の疲労寿命を実機のき裂発生寿命と見なすことはできない．

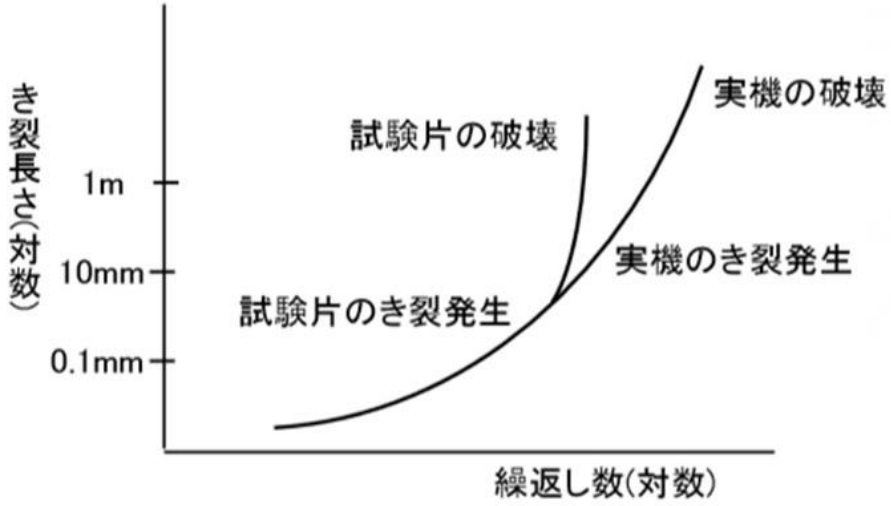


図 1　き裂の発生，進展と寸法の関係

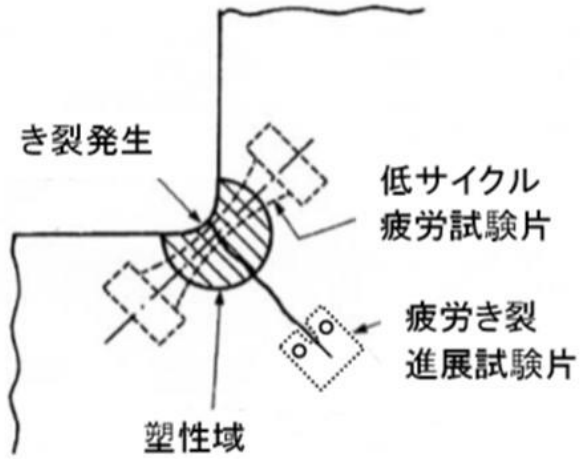


図 2　実機を模擬する試験片

設計疲労曲線の安全率(設計係数)

Q

日本機械学会の設計疲労線図は，安全率を応力に対して 1/2 に，繰返し数に対して 1/20 に設定していますが，その妥当性は何をもって確認しているのでしょうか.

参照 QN0.: FC-07

A

安全率(安全係数，設計係数ともいう)の設定に関しては，種々の考え方がある．また，現在，疲労寿命の統計解析などによって，安全率を見直す機運がある．ここでは，従来の主要な考え方を紹介する.

日本機械学会設計・建設規格[(1)]に記載されている設計疲労線図は，米国機械学会(ASME)規格 Section III を引用しており，ひずみ制御完全両振り疲労試験結果の仮想弾性応力振幅と破壊繰返し数の関係(最適曲線)に，応力振幅に対して 1/2，繰返し数に対して 1/20 の安全率を設定して作成している.

設計疲労曲線の安全率(設計係数)

表１　設計疲労線図の安全率の考え方[5]

	疲労強度に及ぼす影響因子	応力振幅		繰返し数	
		①	③	②	③
1	データ(材料)のばらつき効果	1.15	1.19	2.0	2.11
2	寸法効果	1.15	1.19	2.5	2.11
3	表面粗さ(表面仕上げ)効果	1.15	1.19	4.0	2.11
4	環境効果	1.15	1.19		2.11
5	残留応力効果	1.15	—	—	—
現行規格の安全率(積算)		2.0	2.0	20	19.8

①:Manjoine and Tome の考え方
②:Harvey の考え方
③:Porowski らの考え方

設計疲労曲線

- Jaske & O'Donnell Curve(1977)

  ステンレス鋼の設計疲労曲線に対し、厳しい側となる曲線の改定を提案(10年以上の議論の末、1990年頃採択)

  10^6サイクルまで:既存のカーブのまま、10^6サイクル以降:新しいカーブを適用

  2009Addenda発行までのASMEの設計疲労曲線

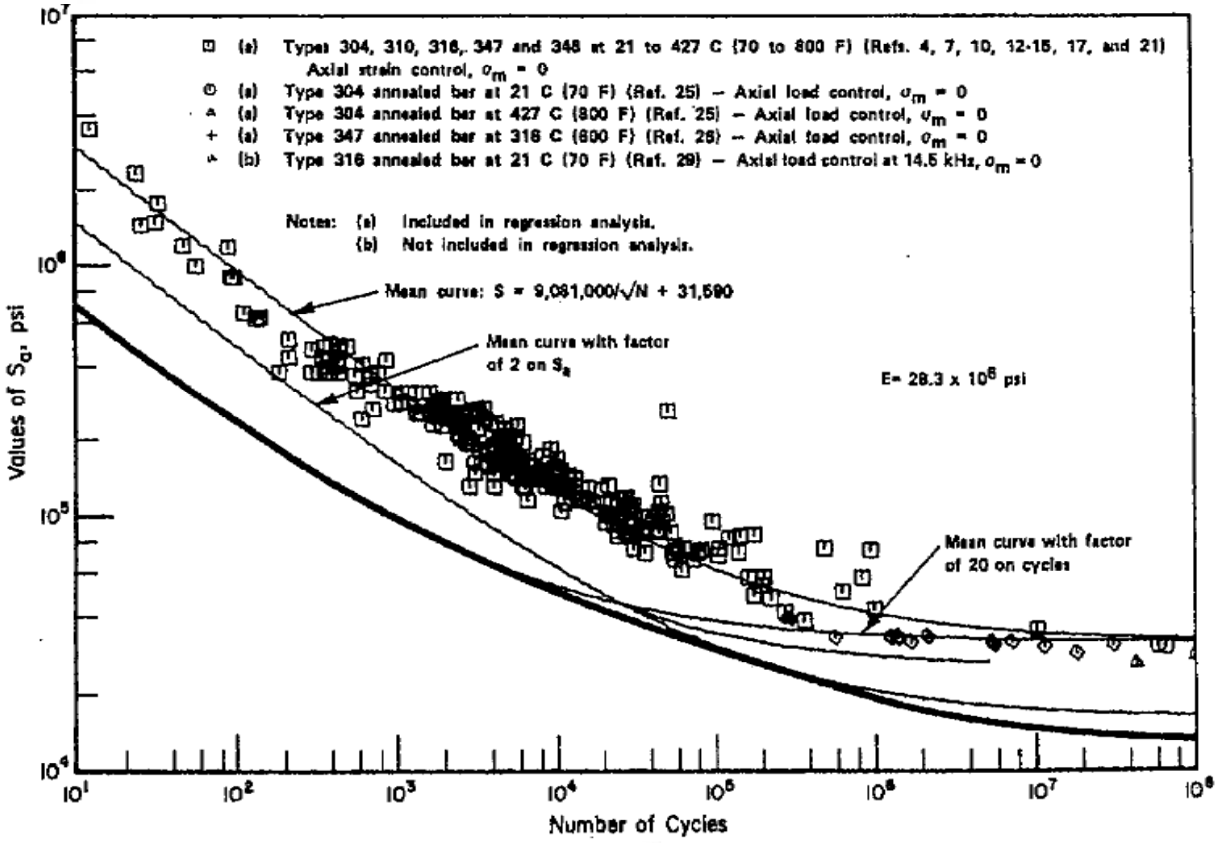


Fig. 3 Fatigue curve for types 304, 310, 316, 347, and 348 austenitic steels

国内シンポジウムの開催

新しい設計疲労曲線と疲労解析に関するシンポジウム

－ 産業を超えた合理的な共通基盤の構築に向けて －

（第５４回　国内シンポジウム）

日時　：　２０１９年６月２７日（木）１０：００ ～ １６：５５

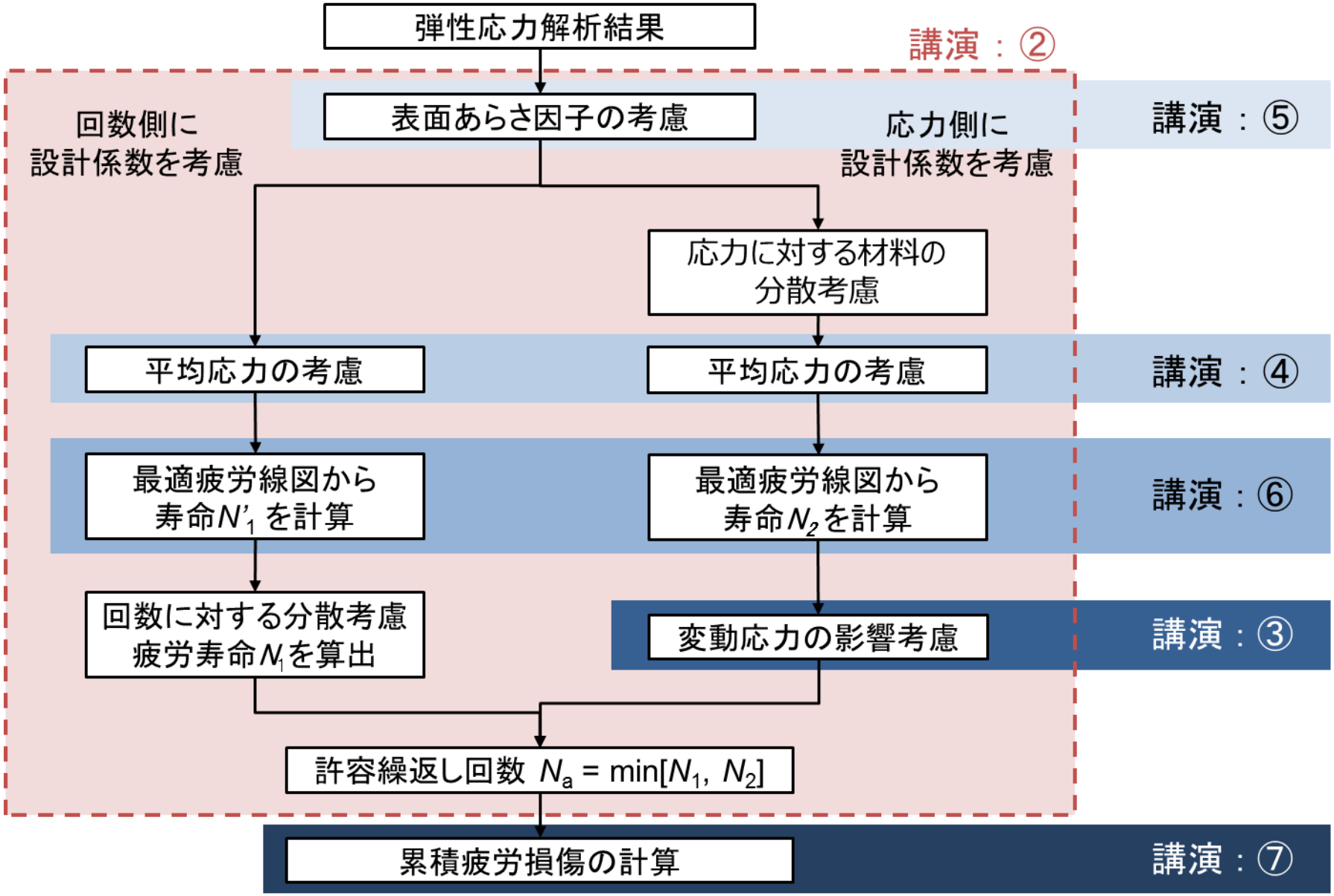
場所　：　溶接会館　２階　ホール

主　　催

一般社団法人日本溶接協会

（企画　：　原子力研究委員会）

新しい疲労解析方法



国内シンポジウムの開催

新しい設計疲労曲線と疲労解析に関するシンポジウム

－ 産業を超えた合理的な共通基盤の構築に向けて －

（第５５回　国内シンポジウム）

日時　：　２０２０年７月１０日（金）１０：００ ～ １７：００

場所　：　新大阪丸ビル別館　２階　２－３号室

〒533-0033 大阪府大阪市東淀川区東中島１丁目１８番２２号

主　　催

一般社団法人日本溶接協会

（企画　：　原子力研究委員会）

Covid-19により2021年に延期：WEB併用で開催予定

新たな産業界への展開

超高圧ガス設備に関する基準 KHKS 0220（2016）

本基準は、超高圧（目安として100MPa超）で使用する高圧ガス設備に関する設計等について規定したものです。

近年普及が進む圧縮水素スタンドでは、超高圧で圧力容器、配管等の設備が使用されています。本基準を適用してこれらの設備の設計を行うことにより、設備の大幅な薄肉化が可能となります。

円筒胴の計算厚さ、疲労解析、破裂前漏洩の評価、き裂進展解析等の様々な計算例及び評価例を掲載しています。

（BK521017　A4判　8,230円）

2020年度版：9/9に改正、10月発行

改訂版発行情報

日本溶接協会のDFC小委員会で検討された結果に基づく最新の疲労関係の知見を踏まえて、疲労解析の規定を改正した。

講演内容

本講演では、原子力研究委員会DFC小委員会で策定した新たな設計疲労曲線と疲労解析法について、

- 最適疲労曲線の構築
- 設計係数の見直し
- 新たな平均応力補正法の導入
- 疲労限度設定の考え方
- 大型試験片による検証

等の観点から解説する。

最適疲労曲線の構築

- 元のデータベース
  - ✓ FADAL：原子力設備材料の疲労データ (1986年)
  - ✓ JNUFAD: FADAL及び1986年以降の疲労データ
- 追加疲労試験データ
  - ✓ NIMS (物質・材料研究機構) データベース
  - ✓ 海外の疲労データ(公開)他
- 一部荷重制御データを含むひずみ制御データ
- 大気中, 温度 ≤ 430ºC, 引張強さ ≤ 1200 MPa
- 他のデータから明らかに傾向が異なるものは対象外
- 炭素鋼・低合金鋼は、約2000 データ(≤ 200ºC)及び約300データ(≥ 200ºC)
- オーステナイト系ステンレス鋼は、約750データ(≤ 200ºC)及び約100データ(≥ 200ºC)

[*8] Kanasaki, H., et al., "Proposal of Fatigue Life Equations for Carbon & Low Alloy Steels and Austenitic Stainless Steels as a Function of Tensile Strength," PVP2013-9777, ASME, 2013.

最適疲労曲線の構築

- 構築した疲労データベース ⇒ Langer の疲労寿命式による回帰分析
  (引張強さをパラメータとした式を開発)

炭素鋼，低合金鋼

約 2000 個の疲労データ (≦ 200℃)

↓

縦弾性係数を ε_a に乗じて S_a に換算

↓

引張強さ100MPa毎に9グループに分割

↓

各グループで S_a を引張強さで補正

例： $S_{a350} = S_{aTS} \dfrac{f_1(350){N_f}^{-0.58} + f_2(350)}{f_1(TS){N_f}^{-0.58} + f_2(TS)}$

↓

各グループに対して疲労寿命式を設定

$S_a = A{N_f}^{-B} + C$

↓

係数A, BおよびCを設定
(係数A, Cは引張強さの関数)

オーステナイト系ステンレス鋼

約 750 個の疲労データ (≦ 200℃)

↓

引張強さにより10グループに分割

↓

各グループに対して疲労寿命式を設定

$\varepsilon_a = A{N_f}^{-B} + C$

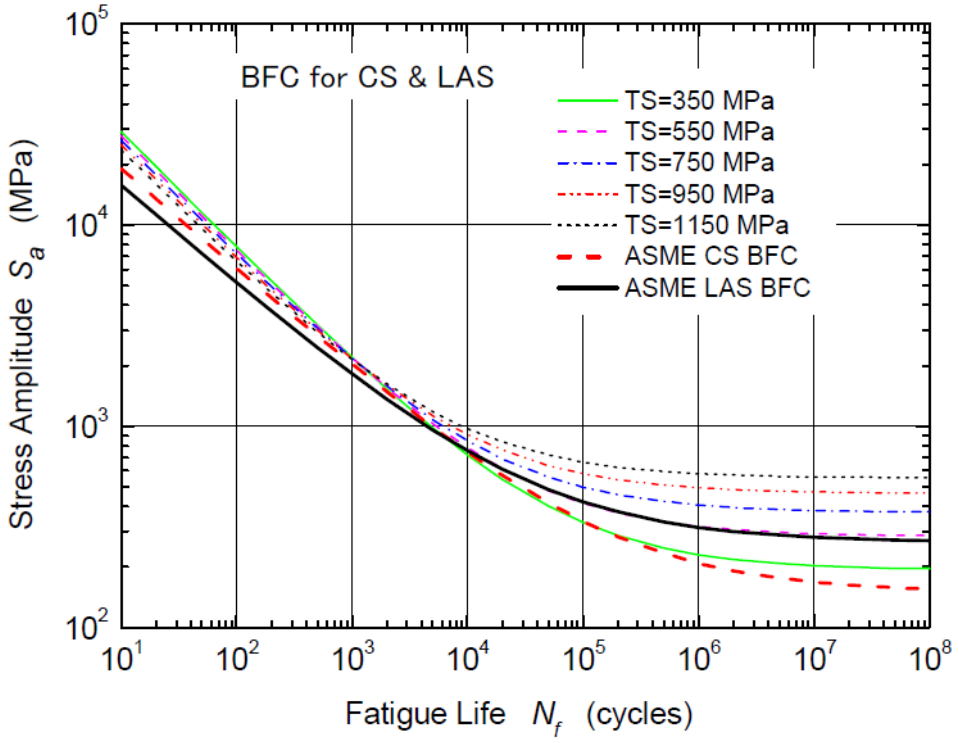
↓

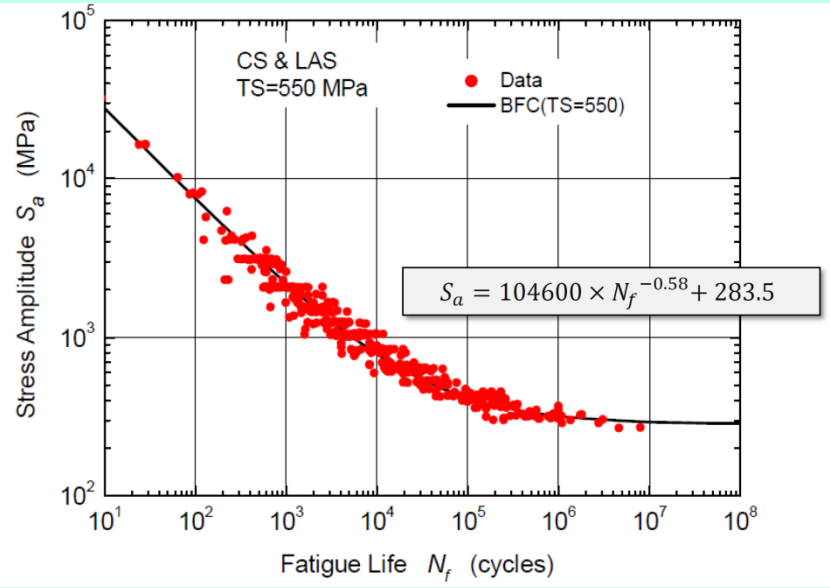
係数A, BおよびCを設定
(係数Cは引張強さの関数)

最適疲労曲線の構築

- **炭素鋼、低合金鋼の最適疲労曲線** (≦200℃)

$$S_a = (1.2\times10^5 - 28\sigma_u)N_f^{-0.58} + 0.45\sigma_u + 36 \quad \text{[MPa]}$$



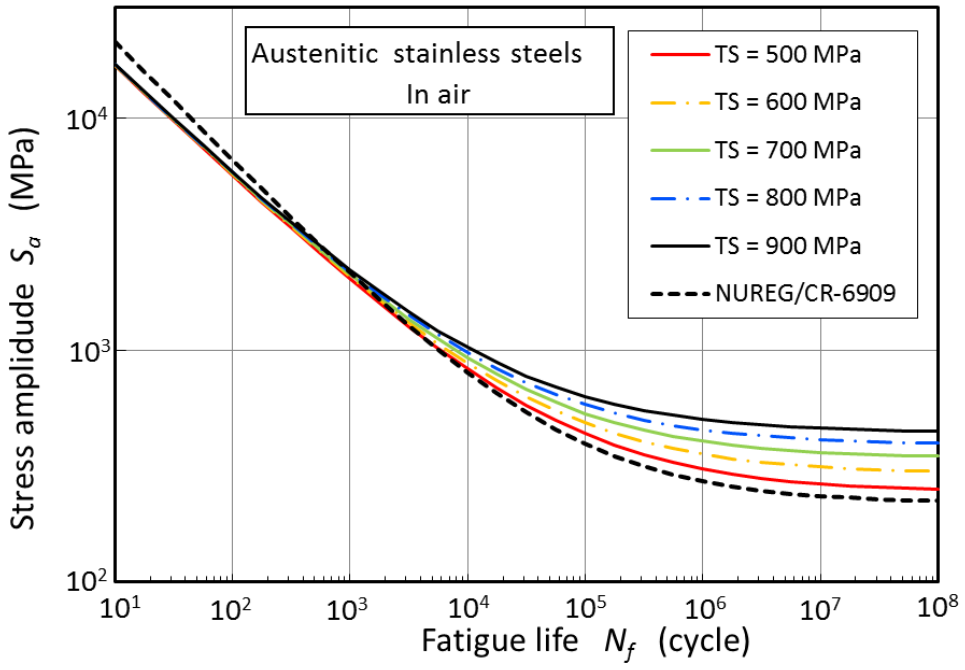


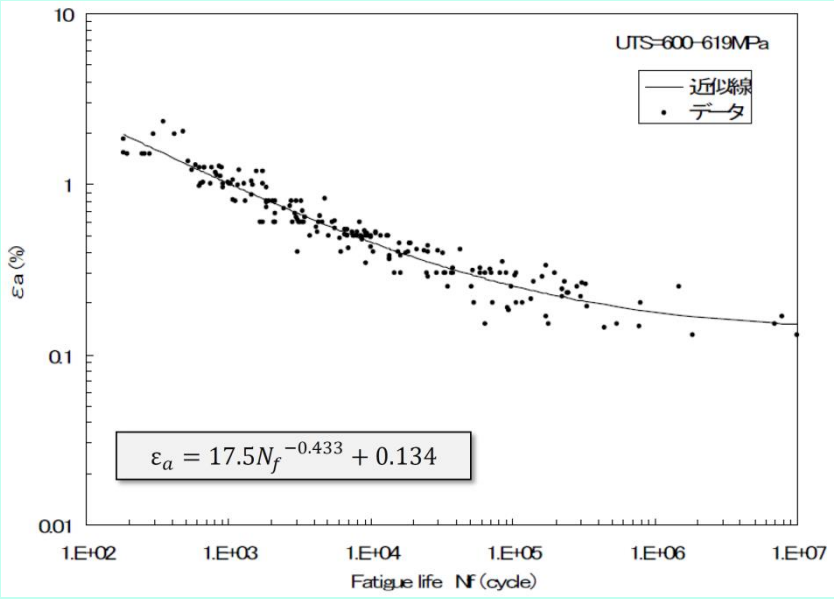
例：グループσ_u：500～600 MPa

最適疲労曲線の構築

- **オーステナイト系ステンレス鋼の最適疲労曲線** (≦200℃)

$$S_a = 5.09\times10^4 N_f^{-0.485} + 0.488\sigma_u \qquad \text{[MPa]}$$

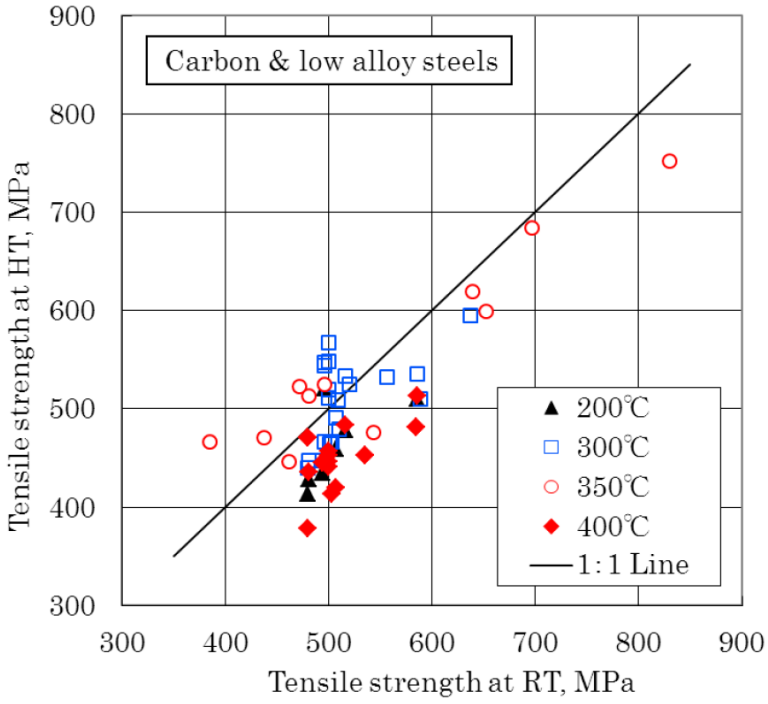


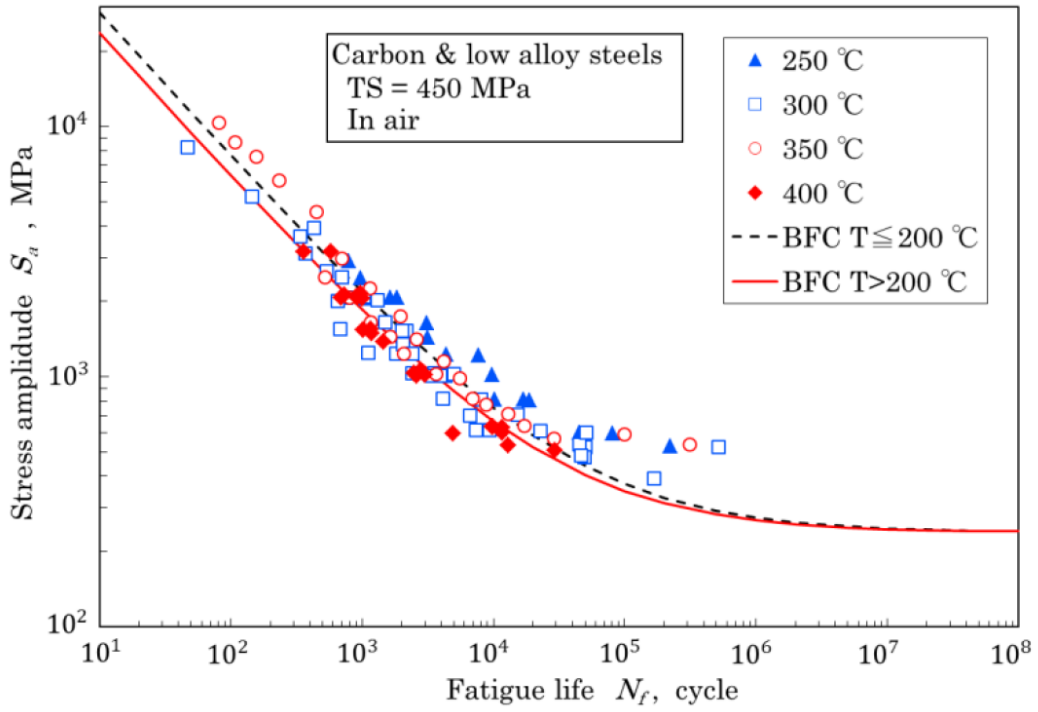


例：グループ σ_u ：600～619 MPa

高温での最適疲労曲線

- **炭素鋼、低合金鋼**
  - ✓ 青熱脆性の影響で高温での引張強さに変動有り
    ⇒ 疲労寿命にも影響





高温での最適疲労曲線

- **高温での疲労寿命式**

  ✓炭素鋼，低合金鋼

  200℃を超える場合には次式を適用（動的ひずみ時効等の影響で疲労挙動に及ぼす温度の影響は複雑であり、**疲労寿命が下がるデータを対象に係数(0.721)を考慮する**。

$$S_a = (1.2 \times 10^5 - 28\sigma_u)\left(N_f / 0.721\right)^{-0.58} + 0.45\sigma_u + 36 \quad \text{[MPa]}$$

  ✓オーステナイト系ステンレス鋼

  200℃以下のデータで策定した疲労寿命式に**高温の引張強さを適用**

- **その他材料の疲労寿命式**

  ✓二相ステンレス鋼　オーステナイト系ステンレス鋼の疲労寿命式を適用可

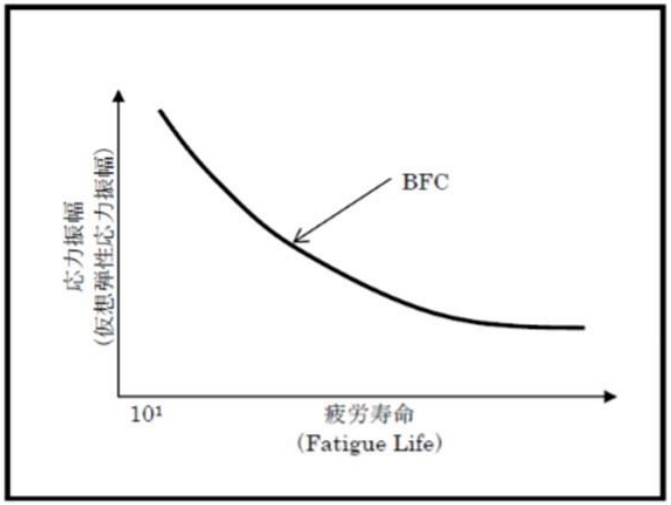
  ✓SUS630　KHK規格の疲労寿命式を適用可

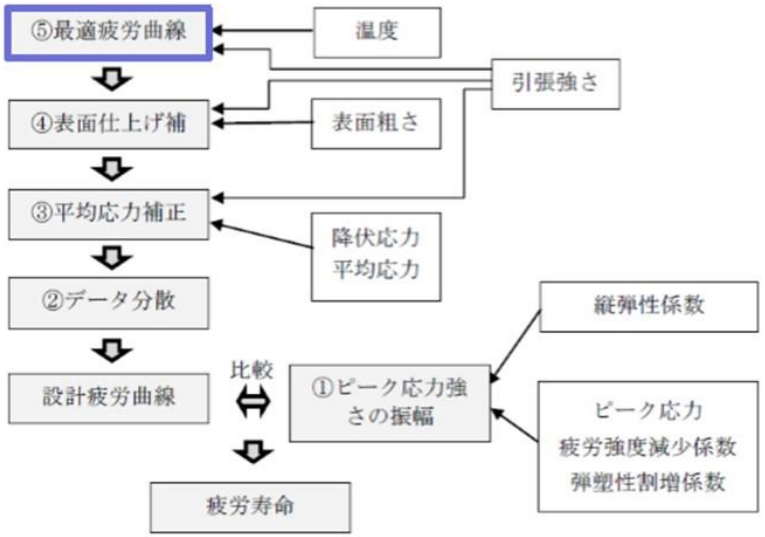
  ✓SUH660　炭素鋼，低合金鋼の疲労寿命式を適用可

  ✓高ニッケル合金　炭素鋼，低合金鋼の疲労寿命式を適用可

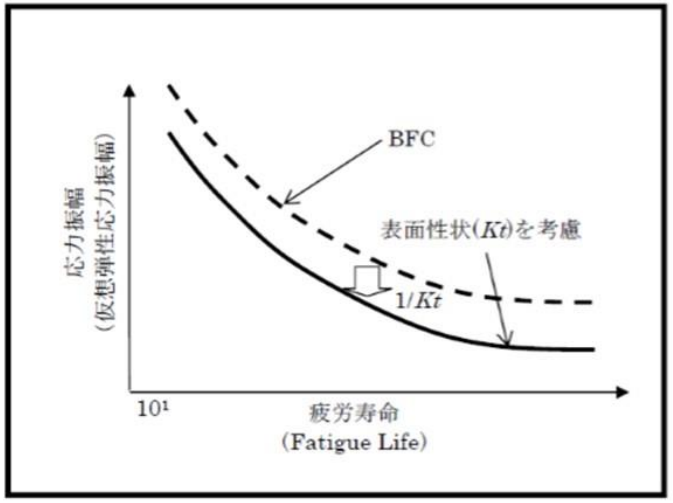
設計疲労曲線の策定手順

【Step 1】最適疲労曲線の設定





【Step 2】BFC(Step1)に必要に応じて表面性状の影響を考慮



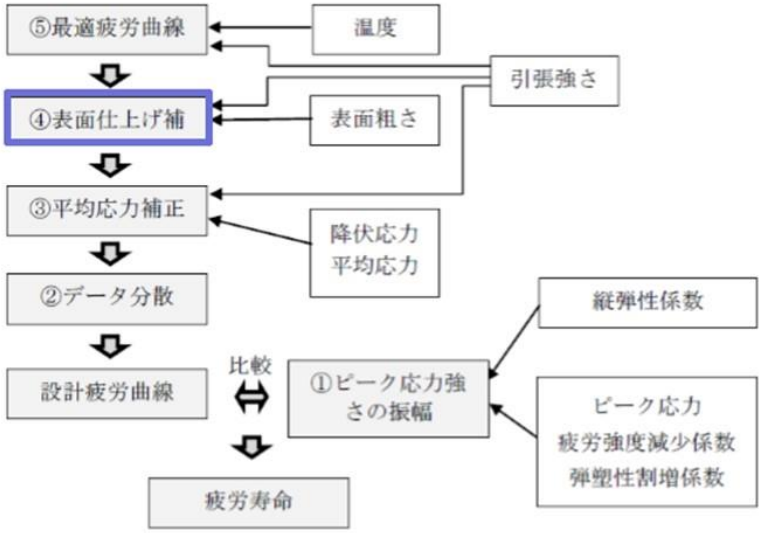
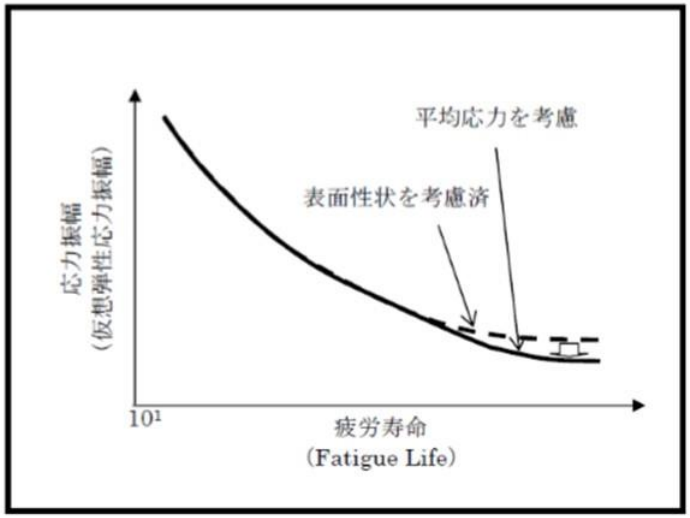


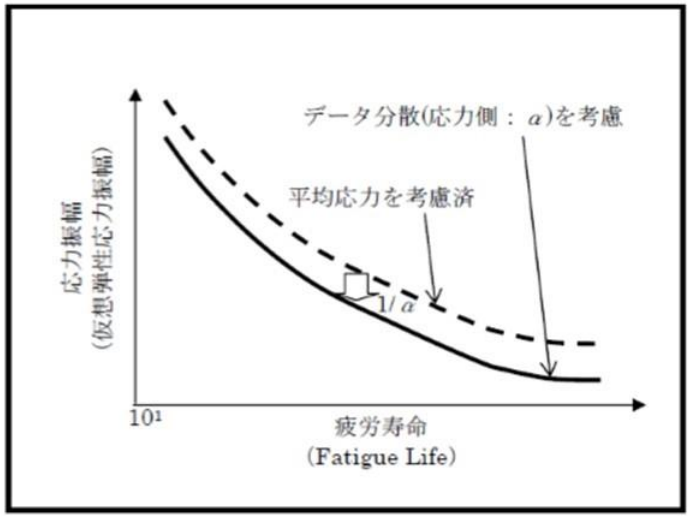
図　設計疲労曲線の策定手順

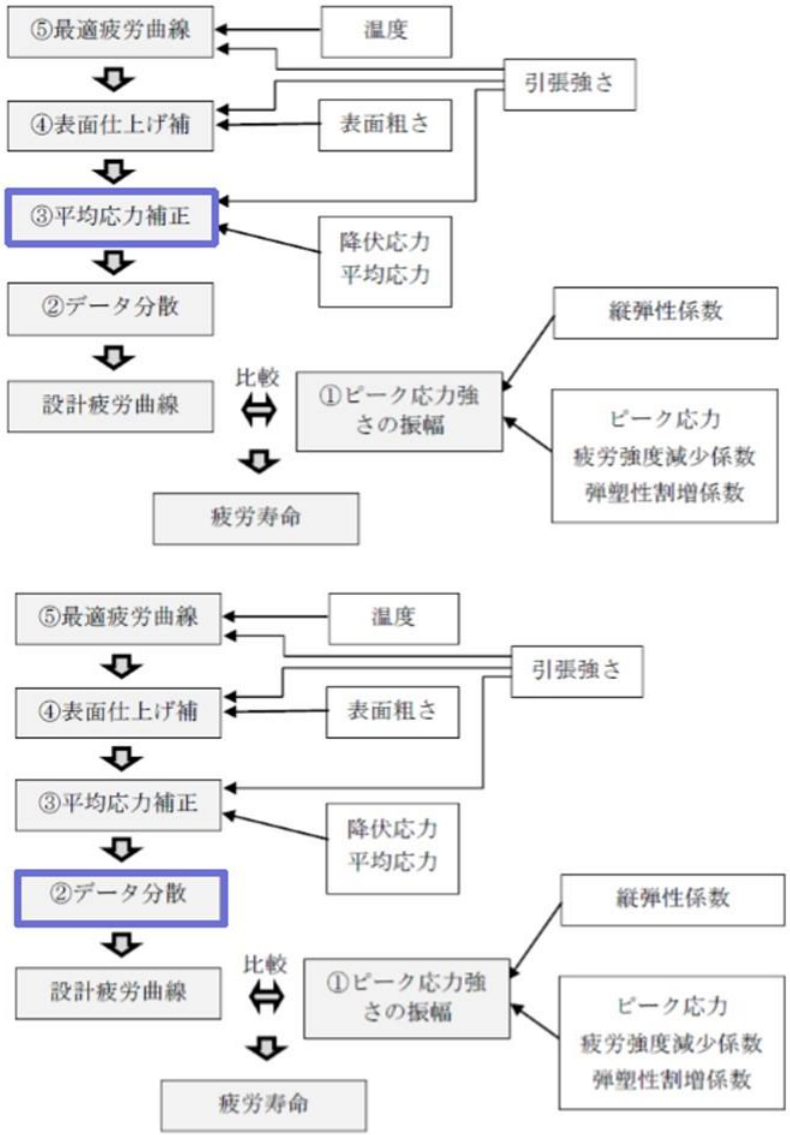
設計疲労曲線の策定手順

【Step3】表面性状を考慮した線図(Step2)に必要に応じて平均応力の影響を考慮



【Step4-1】平均応力を考慮した線図(Step3)にデータ分散を応力側に考慮





Welding Engine

図　設計疲労曲線の策定手順

講演内容

本講演では、原子力研究委員会DFC小委員会で策定した新たな設計疲労曲線と疲労解析法について、

- 最適疲労曲線の構築
- 設計係数の見直し
- 新たな平均応力補正法の導入
- 疲労限度設定の考え方
- 大型試験片による検証

等の観点から解説する。

表面仕上げ効果による設計係数

- **表面仕上げ効果とは**

設計疲労曲線の策定に当たって、設計係数として考慮すべき要素の一つとして、材料の表面仕上げによる効果がある。一般的には、表面粗さが大きくなるほど応力集中の影響により疲労寿命は短くなる傾向がある。また、引張強さが高い材料ほど、表面粗さに関する疲労寿命への感度が高くなる傾向にある。

- **表面仕上げ効果係数**

表面仕上げによる効果を疲労評価に適用するにあたり、疲労強度低下係数 K_{sf} を導入し、ピーク応力に乗じることにより、疲労強度低下の影響を考慮する。K_{sf} は文献データに基づき次式を開発し、試験でも確認した。

$$K_{sf} = \{1.0 \times 10^{-4}(\sigma_u - 800) + 0.21\} \times Log(R_z) + 0.90 \quad (\sigma_u < 800\ \mathrm{MPa})$$

$$K_{sf} = 0.21 \times Log(R_z) + 0.90 \quad (\sigma_u \geq 800\ \mathrm{MPa})$$

(R_z：最大高さ粗さ (μm) [JIS B 0601-2013])

疲労データの収集/分析

- 表面性状に対する設計係数の策定にあたり、国内外から約40シリーズのデータを収集。収集データの範囲は以下の通り。

疲労強度	疲労強度 @ N=10^3,10^4,10^5,10^6 回、 疲労限度
温度	RT, 288℃, 300℃, 400℃, 593℃
荷重条件	軸力引張圧縮、回転曲げ、曲げ
環境	大気中
引張強さ	$250 \leq \sigma_u \leq 2130$ MPa
表面仕上げ	バフ、電解研磨、グラインダ、旋盤、黒皮付、研磨

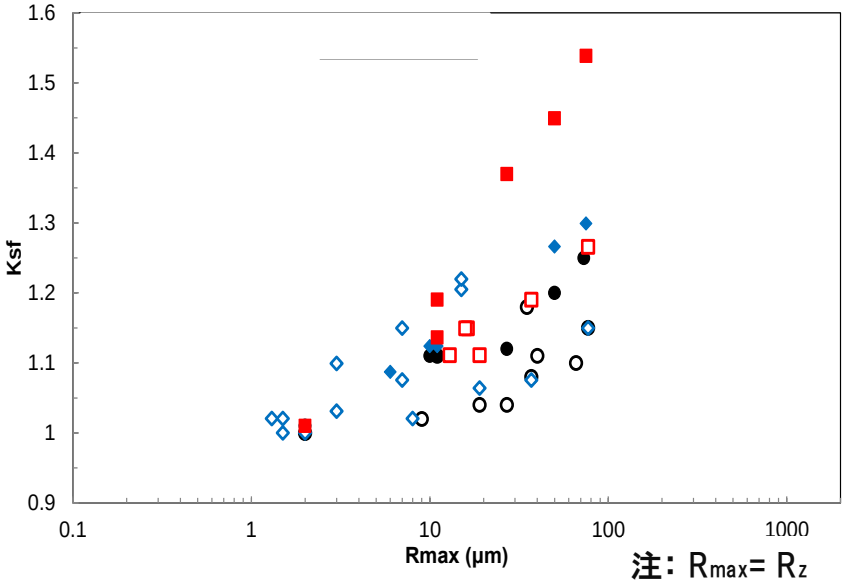
- 収集データを以下の条件でスクリーニング
  - 基準疲労強度が電解研磨のデータ(電解研磨により加工層が除去され通常のペーパ仕上げ材よりも疲労強度より低下しているため)
  - 黒皮付など特殊な表面性状のデータ
  - 試験温度が430℃を超えるデータ
  - 他と明らかに傾向が異なるデータ

スクリーニング後の疲労データ（1）

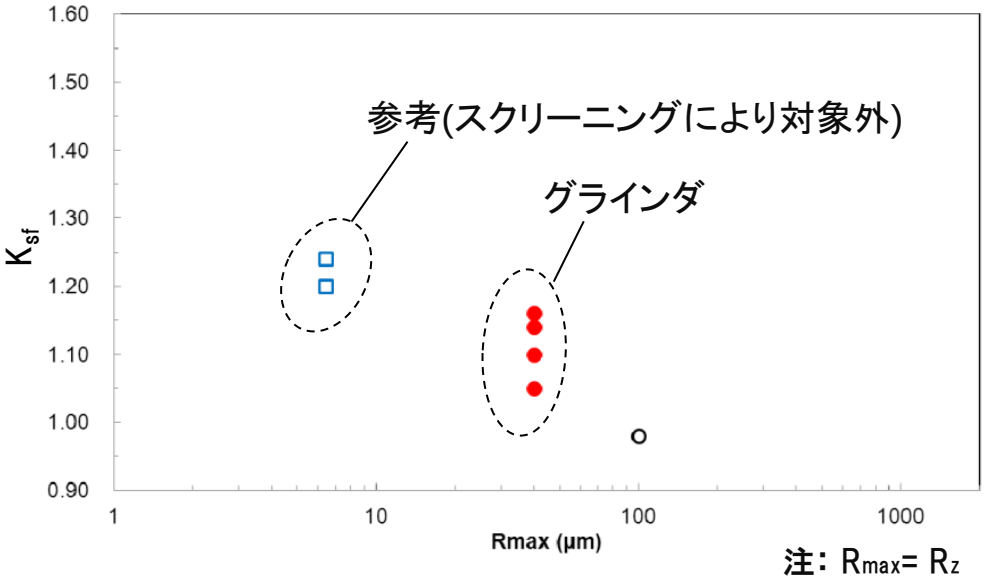
- スクリーニング後のデータ(繰返し数は10^5回以上)を、基準疲労強度σ_{w0}と表面性状の疲労強度σ_{sf}の比

$$K_{sf} = \sigma_{w0} / \sigma_{sf}$$ （K_{sf}を「**表面仕上げ効果係数**」という）

と最大粗さR_zで整理



炭素鋼・低合金鋼（スクリーニング後）

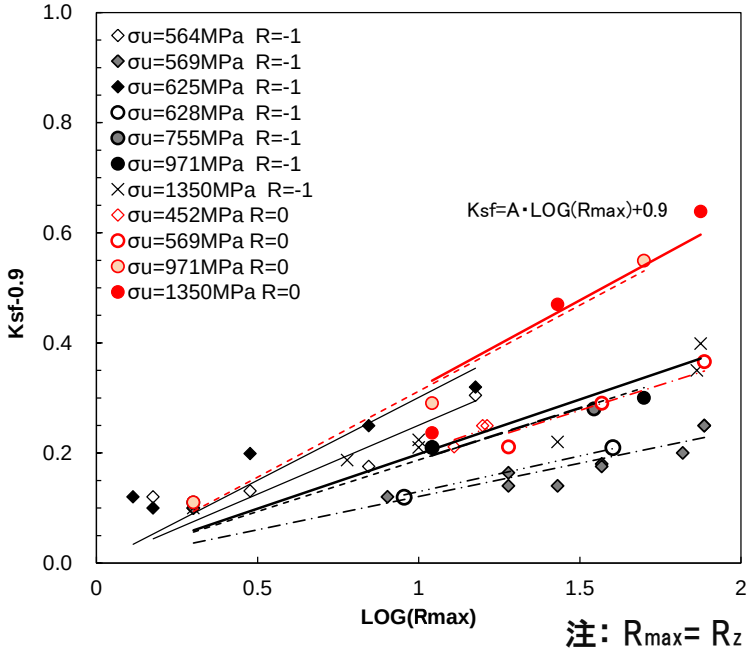


ステンレス鋼（スクリーニング後）

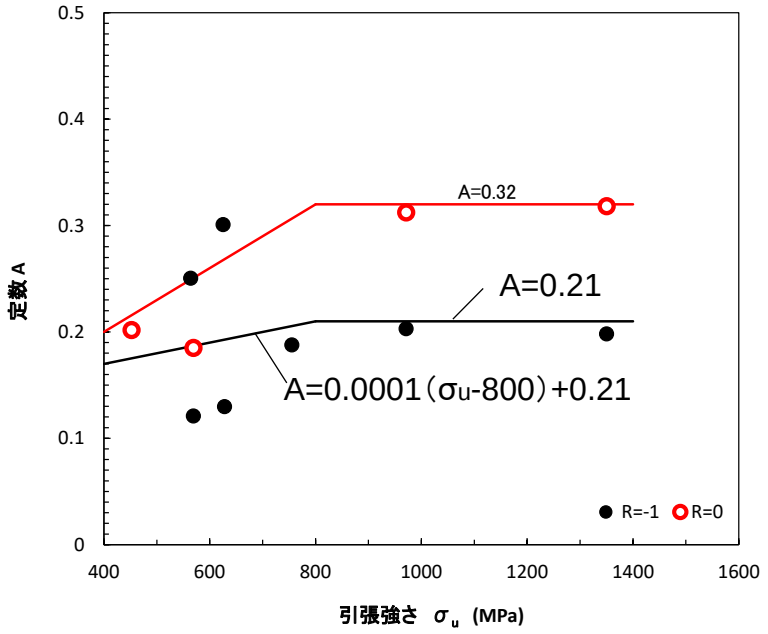
- ステンレス鋼は特殊な加工（グラインダなど）を除くと1に近い

スクリーニング後の疲労データ(2)

- 炭素鋼・低合金鋼のデータはK_{sf}＝0.9に収斂する傾向。縦軸をK_{sf} - 0.9とし、試験シリーズ毎に再整理。
- これを K_{sf} -0.9= A×log (R_z) で表現した場合のAと引張強さの関係を導出
- R=0は平均応力効果で考慮することとし、σ_u=600MPa付近でややデータのばらつきはあるもののR=-1のAとσ_uの関係を採用してK_{sf}を定式化



(Ksf - 0.9)とlog(Rz)の関係



定数Aと引張強さの関係

新たに定式化した表面仕上げ効果係数

■ 表面仕上げ効果係数K_{sf}

➢ ステンレス鋼

$K_{sf} = 1.0$

➢ 炭素鋼・低合金鋼（σ_u(MPa)）

$K_{sf} = \{1.0\times10^{-4}(\sigma_u-800)+0.21\}\times\log(R_z)+0.90$　（$\sigma_u < 800$）

$K_{sf} = 0.21\times\log(R_z)+0.90$　（$\sigma_u \geqq 800$）

ただし、$K_{sf} \geqq 1$

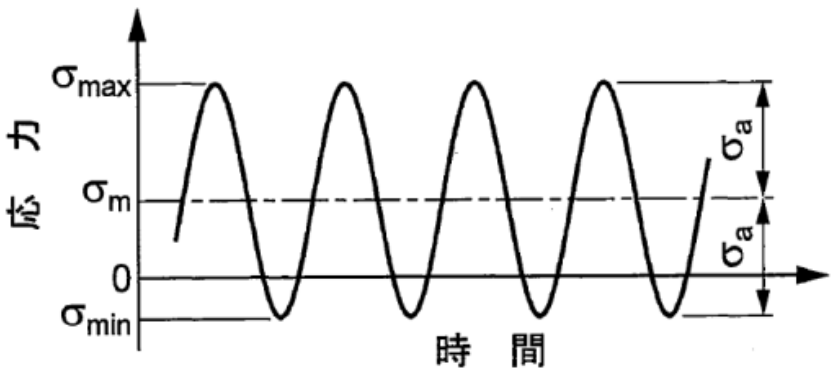
講演内容

本講演では、原子力研究委員会DFC小委員会で策定した新たな設計疲労曲線と疲労解析法について、

- 最適疲労曲線の構築
- 設計係数の見直し
- 新たな平均応力補正法の導入
- 疲労限度設定の考え方
- 大型試験片による検証

等の観点から解説する。

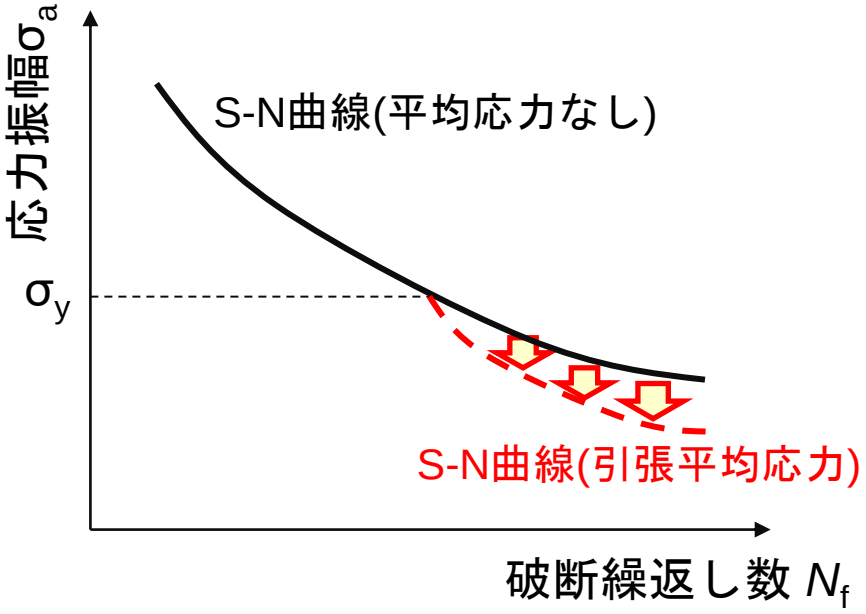
平均応力の影響に関する一般的知見



応力比 $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

平均応力 $\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} = \frac{(1-R)\sigma_{max}}{2}$

平均応力σ_mの定義



引張の平均応力σ_mが作用したときの
S-N曲線の変化（イメージ）

- 多くの疲労試験データ：平均応力σ_m=0 (応力比R=-1)
- 実際の機械・構造物：平均応力が作用 (内圧による応力、残留応力など)
- 引張の平均応力 (σ_m>0)：疲労強度を低下させる

平均応力の影響に関する一般的知見

- ガーバー (Gerber)線

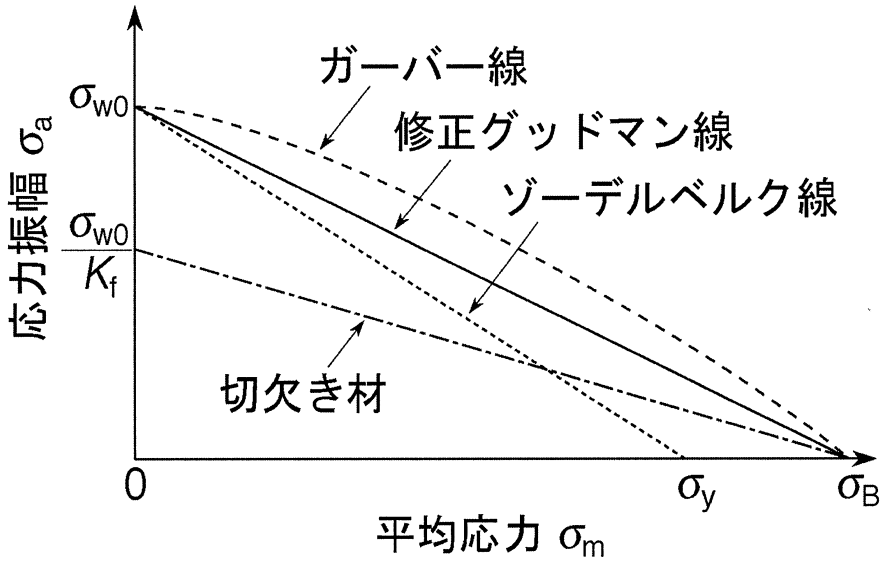
$$\sigma_w = \sigma_{w0}\left\{1-\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)^2\right\}$$

- 修正グッドマン (Goodman)線

$$\sigma_w = \sigma_{w0}\left(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)$$

- ゾーデルベルク (Soderberg)線

$$\sigma_w = \sigma_{w0}\left(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right)$$



疲労限度線図

ここで、σ_w ：平均応力が作用したときの疲労限度
σ_{w0} ：平均応力が無い(σ_m=0)ときの疲労限度
σ_m ：平均応力
σ_B ：材料の引張強さ
σ_y ：材料の降伏応力

様々な平均応力補正法

- 修正Goodman法
  (ASME Section III及びVIIIで使用)

$$S_{eq} = \frac{S_u S_a}{S_u - S_{mean}}$$

- Peterson法
  (ASME Section III及びVIIIの高張力ボルト材で使用)

$$S_{eq} = \frac{7S_a}{8 - \left(1 + \frac{S_{mean}}{S_u}\right)^3}$$

- Gerber法

$$S_{eq} = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_{mean}}{S_u}\right)^2}$$

- Smith-Watson-Topper法 (SWT法)
  (引張強さに依存しない)

$$S_{eq} = \sqrt{S_a S_{max}}$$

S_{eq}：平均応力補正による等価応力振幅
S_a：応力振幅
S_u：引張強さ
S_y：降伏応力
S^*_{mean}：弾性計算における平均応力
S_{mean}：弾完全塑性に基づいた平均応力
S_{max}：最大応力 (= S_a+S_{mean})

シェークダウンにより、
・S_a+S^*_{mean}>S_yかつS_a<S_yのときはS_{mean}=S_y−S_a
・S_a≧S_yのときはS_{mean}=0
となる

また、S_{mean}=S_y−S_aとしたとき、
平均応力の補正は最大となる

ステンレス鋼への各種平均応力補正法の適用性

①仮想弾性応力振幅$S_a=E\times\varepsilon_a$
を算出

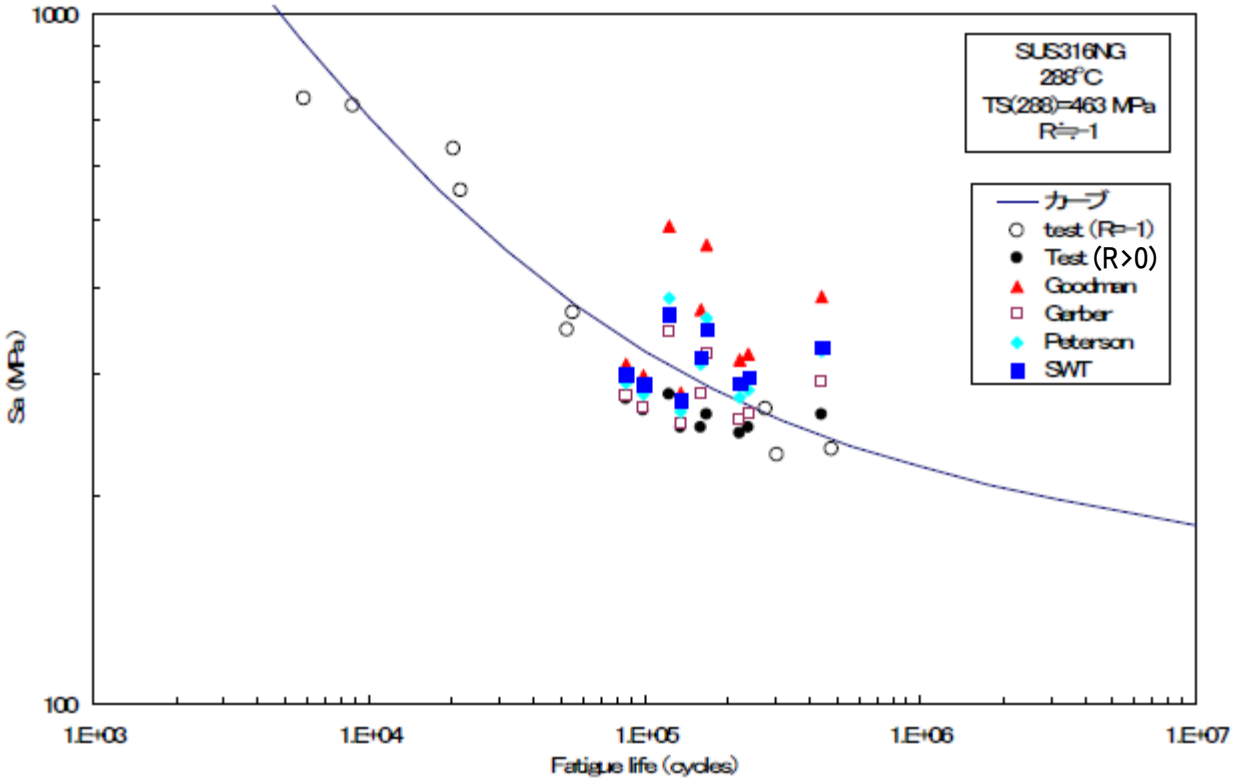
↓

②各補正法により等価応力
振幅S_{eq}を算出

↓

③S_{eq}を最適疲労寿命曲線
と比較

平均応力補正法の比較手順

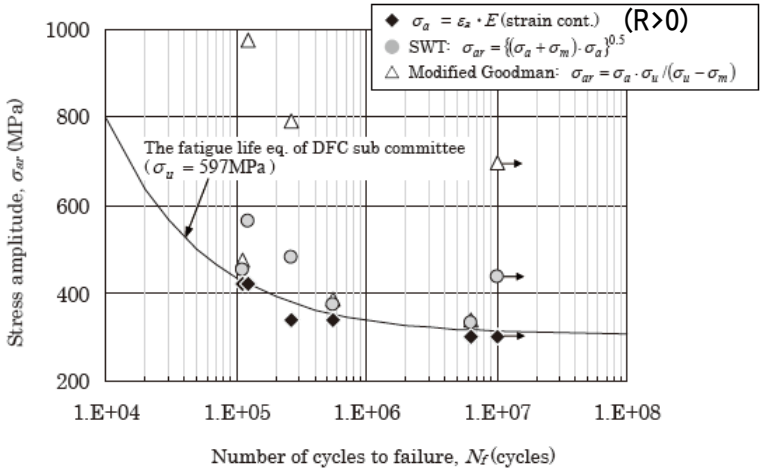


平均応力補正法の比較

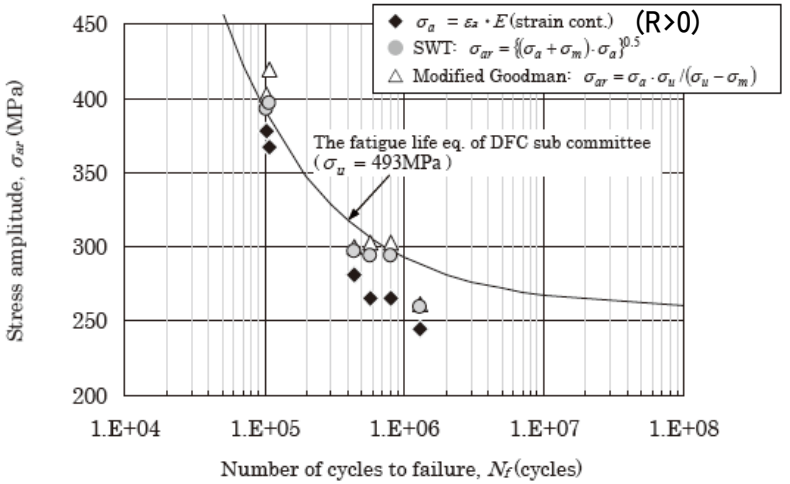
- 修正Goodman法は過度に安全側の補正となる場合が多い
- その他の補正法に関しては、優劣の判断は困難

SWT法の適用性確認（炭素鋼・低合金鋼）

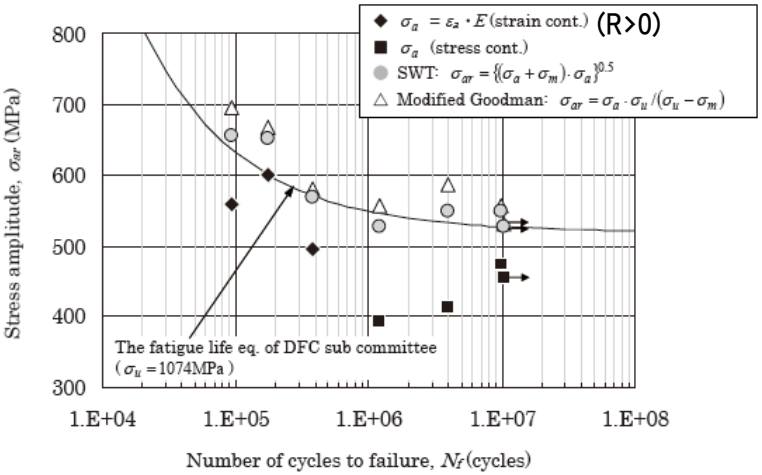
- 電共研「大気中設計疲労線図合理化に関する研究」にて小型試験片を用いたひずみ制御疲労試験を実施
- 文献データより選定されたSWT法の適用性を確認



低合金鋼SQV2A



炭素鋼STPT370



低合金鋼SCM435H

- 修正Goodman法は高サイクル領域で過度に安全側
- SWT法は全体的に最適曲線と良くあっており、妥当な補正であると評価

切欠き材の平均応力補正

- 切欠き材の平均応力補正を行う場合、「疲労強度減少係数の考慮」と「平均応力補正」のどちらを先に行うべきか？

平均応力補正法	①疲労強度減少係数→ ②平均応力補正の場合		①平均応力補正→ ②疲労強度減少係数の場合
修正Goodman法	$S_{eq}=\dfrac{S_u\cdot\alpha S_a}{S_u-\alpha S_{mean}}$	一致しない	$S_{eq}=\alpha\dfrac{S_u\cdot S_a}{S_u-S_{mean}}$
SWT法	$S_{eq}=\sqrt{\alpha S_a\cdot\alpha S_{\max}}$	一致	$S_{eq}=\alpha\sqrt{S_a\cdot S_{\max}}$

- 修正Goodman法の場合、補正の順序によって等価応力振幅が異なる
- SWT法の場合は、補正順序の影響は無くなると考えられる
  (SWT法適用によるメリットの1つ)

- 切欠き材の平均応力疲労試験データに基づいた検証については、(一社)日本溶接協会 DFC3小委員会にて継続検討中である

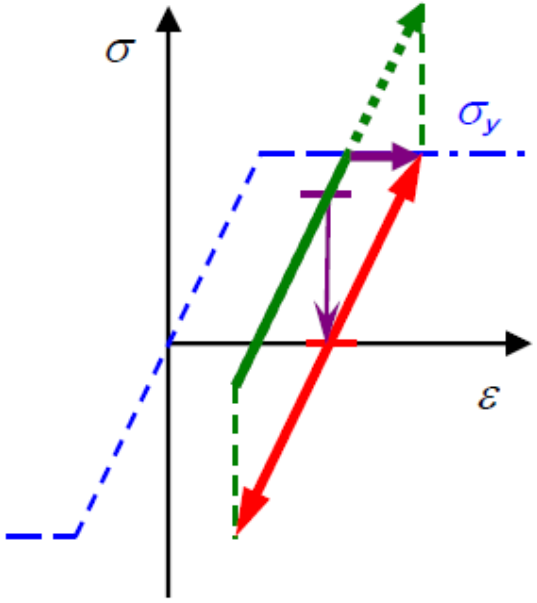
平均応力補正法の調査のまとめ

- 4種類の平均応力補正法（修正Goodman法、Peterson法、Gerber法、SWT法）を対象に、炭素鋼・低合金鋼及びステンレス鋼への適用性を調査した
- SWT法は引張強さに依存しない簡便な補正法である
- 疲労限度の最大の補正量は、修正Goodman ＞ SWT ＞ Peterson ＞ Gerber
- 炭素鋼・低合金鋼における各補正法の適用性調査の結果、SWT法が最も適切な補正法と判断された。修正Goodman法は過度に安全側の補正となる場合が多く、Gerber法は非安全側の補正となる場合が見られた
- ステンレス鋼における各補正法の適用性調査の結果、修正Goodman法は過度に安全側の補正となる場合が多く、他の補正法に関しては優劣の判断が困難であった
- 以上の検討の結果、簡便な補正法であることに加え、最も適切な補正となることから、炭素鋼・低合金鋼における平均応力補正法としてSWT法を選定した。ただし、圧縮の平均応力に対しては非安全側の補正となるため、SWT法の適用は引張の平均応力の場合に限る

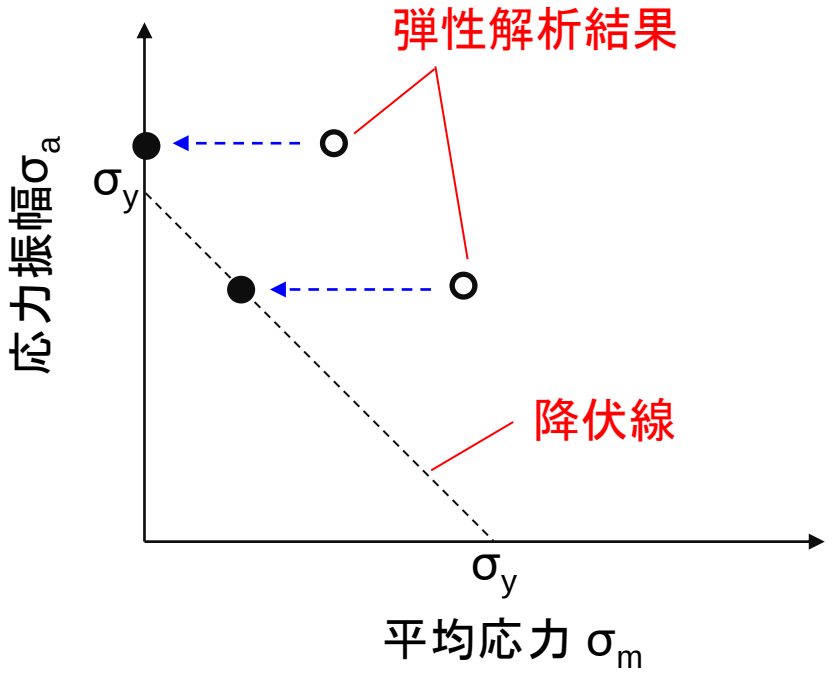
平均応力補正とシェークダウン条件

- 疲労解析では弾完全塑性体を仮定するため、最大応力が降伏応力を超える場合はシェークダウンが生じる

- 応力振幅－平均応力線図において弾性解析結果が降伏線より上にくる場合は平均応力ゼロもしくは降伏線まで戻して平均応力補正を行う必要がある



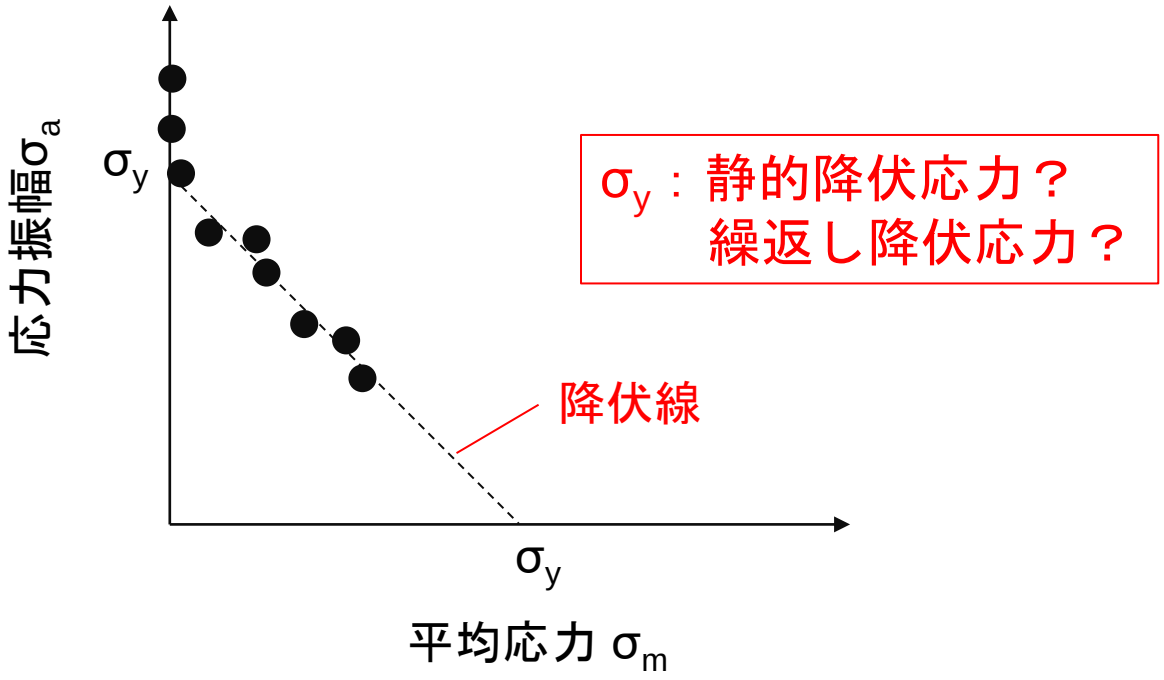
シェークダウン



シェークダウンによる評価点の変化

平均応力補正に用いる降伏応力の検討

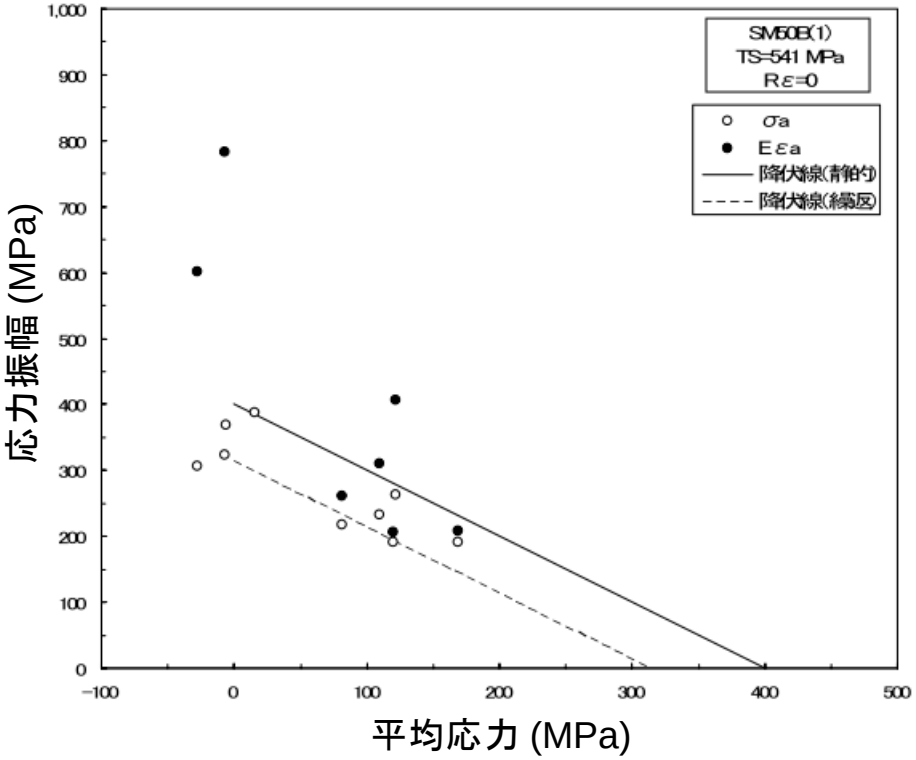
- 炭素鋼・低合金鋼の平均ひずみを付与した疲労試験データに基づき、応力振幅と平均応力の関係を評価
- いずれの降伏応力を用いるのが妥当か検討を実施



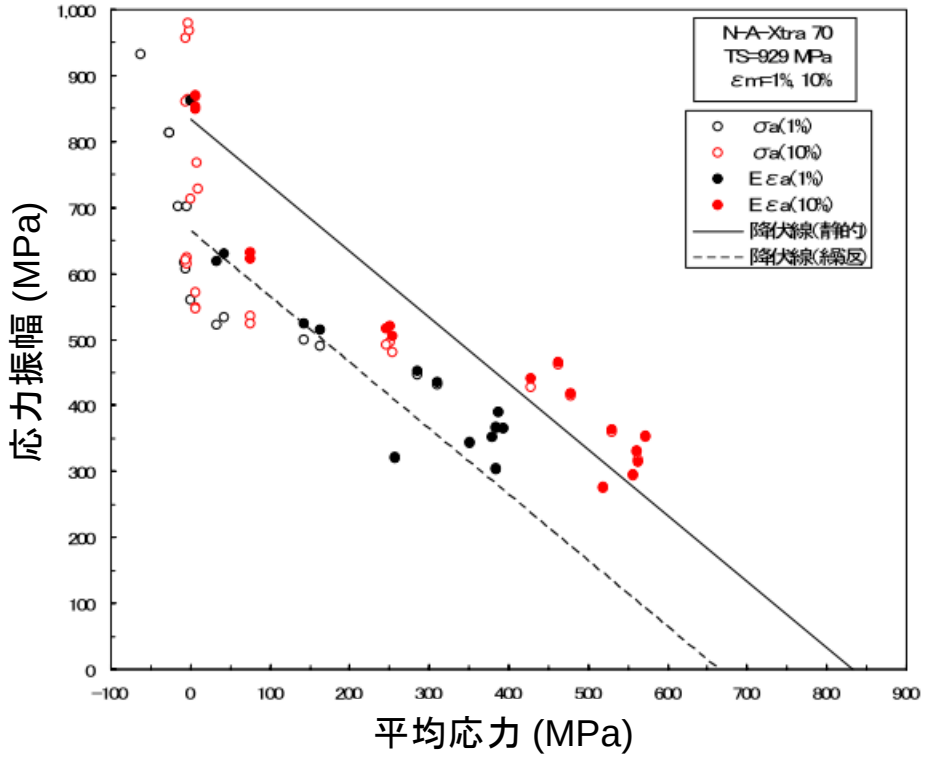
平均ひずみ付与試験データと降伏線の関係のイメージ

平均応力補正に用いる降伏応力の検討（炭素鋼・低合金鋼）

検討結果の一例



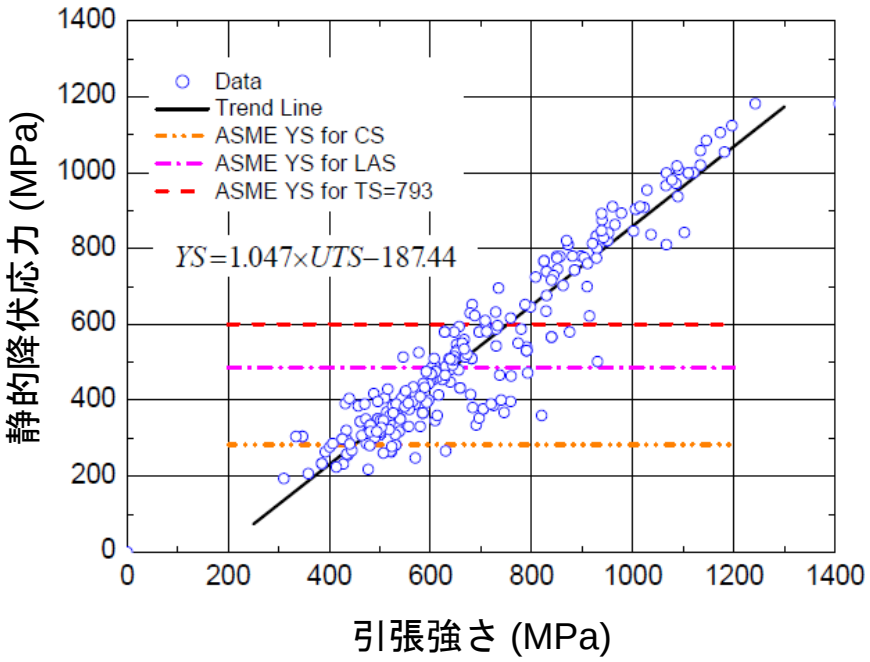
SM50B, R=0, σ_u=541MPa



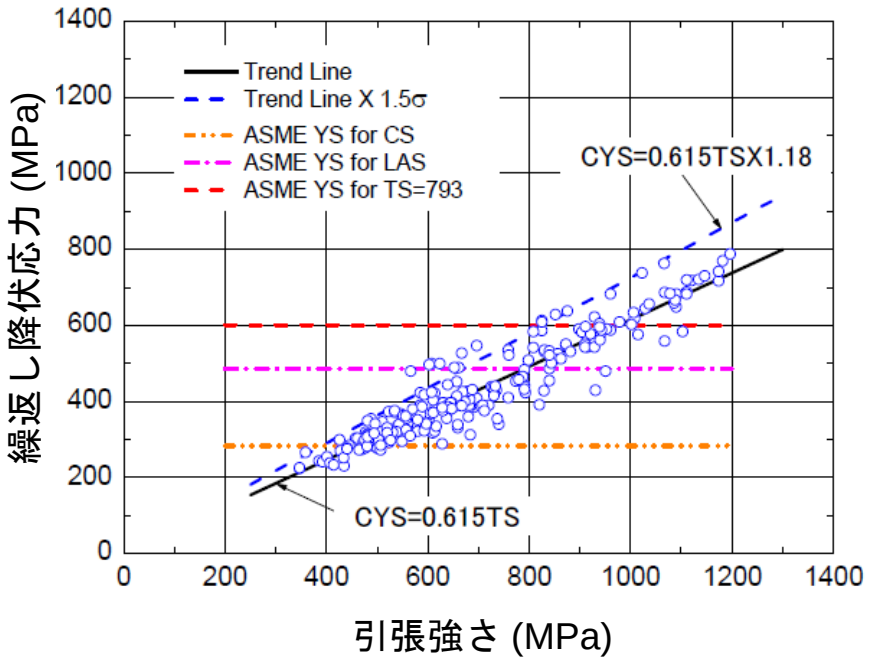
N-A-Xtra70, ε_m=1% or 10%, σ_u=929MPa

- 平均応力補正に用いる降伏応力は、繰返し降伏応力の方が適正と判断

静的／繰返し降伏応力と引張強さの関係（炭素鋼・低合金鋼）



静的降伏応力と引張強さの関係(常温)



繰返し降伏応力と引張強さの関係(常温)

$\sigma_{y,CYS} = 0.615\sigma_u$ (Best-fit)

$\sigma_{y,CYS} = 0.726\sigma_u$ (+1.5σ線, 設計用)

- 炭素鋼・低合金鋼を対象に、引張強さから繰返し降伏応力を予測する式を構築

疲労解析手法における平均応力補正

- ピーク応力強さの振幅に対してSWT法により平均応力補正を行う

$$S_{eq} = [S_{alt}\,(S_{alt} + S_{mean})]^{0.5}$$

- 補正は引張平均応力の場合に限る
- 最大の平均応力補正となるように、$S_{mean}=S_y'-S_{alt}$ としてもよい
- 平均応力補正に用いる降伏応力S_y'は、評価温度におけるσ_y(設計時はS_y)と、下式から求まる$\sigma_{y,CYS}$のうち大きい方とする

  炭素鋼・低合金鋼
  $\sigma_{y,CYS} = 0.615\sigma_u$ (Best-fit)
  $\sigma_{y,CYS} = 0.726\sigma_u$ (+1.5σ線, 設計用)

- ステンレス鋼においては平均応力補正は考慮しない

講演内容

本講演では、原子力研究委員会DFC小委員会で策定した新たな設計疲労曲線と疲労解析法について、

- 最適疲労曲線の構築
- 設計係数の見直し
- 新たな平均応力補正法の導入
- 疲労限度設定の考え方
- 大型試験片による検証

等の観点から解説する。

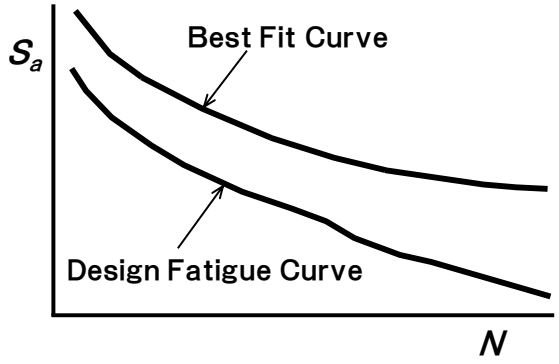
高サイクル域の設計疲労曲線の構築

■ 最適疲労曲線（Best Fit Curve）

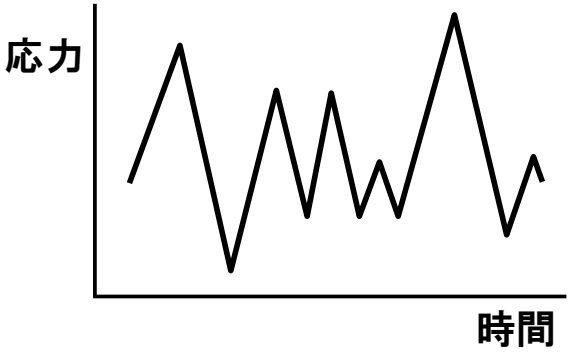
- 表面粗さ
- 平均応力
- ばらつき
- 温度
- 変動応力

一定応力条件の疲労限度

変動応力条件の疲労限度



BFC⇒DFC 概念図



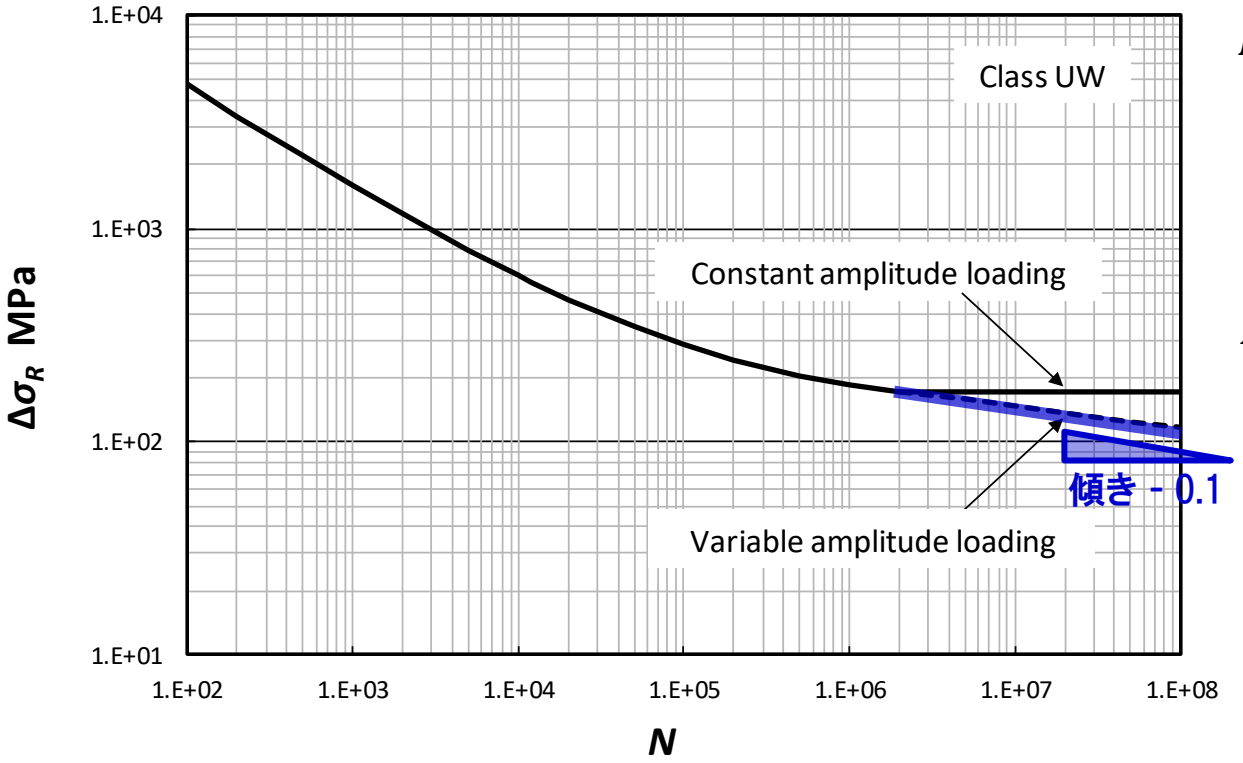
変動応力の概念図

■ 設計疲労曲線（Design Fatigue Curve）

変動応力の取扱いの検討

■ EN規格 EN13445−3：2009

Simplified assessment fatigue life, 非溶接部



$$N \leq 2 \times 10^6 \text{ cycles}$$

$$\Delta\sigma_R = \frac{46000}{\sqrt{N}} + 140$$

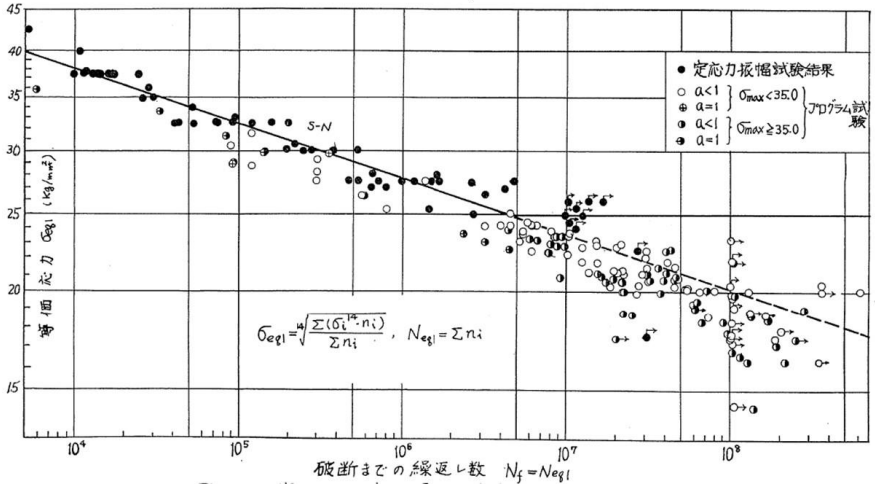
$$N \geq 2 \times 10^6 \text{ cycles}$$

$$\Delta\sigma_R = \left(\frac{C_3}{N}\right)^{\frac{1}{10}}$$

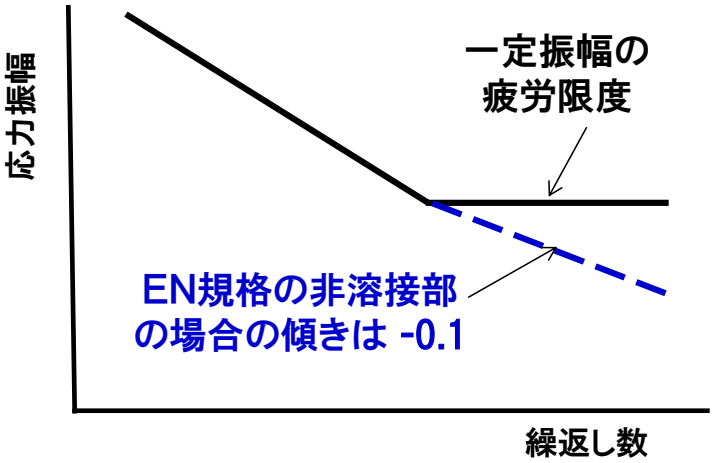
- 変動応力条件の曲線の傾き -0.1 について、EN規格は明確な根拠を示していない
- N≦2×10⁶の曲線と2×10⁶回で滑らかに接続する条件で求めた指数項：0.106
  - ← N≧2×10⁶の指数項1/10とほぼ一致
  - ⇒変動応力の曲線はN≦2×10⁶の曲線に基づいて設定されたと推定

変動応力の取扱いの検討

疲労限度以上の応力振幅を含む場合に、一定応力振幅の疲労限度よりも小さい応力振幅が寿命に影響する



変動応力振幅試験結果(S25C)*1



- 試験結果の傾き -1/14= -0.07 はEN規格の傾きに近い
- EN規格の傾きは保守側

EN規格を参考に、以下の条件をベース案として検討

強度低下開始繰返し数：2×10^6 回

傾き：① 強度低下開始時の傾き, ② -0.1

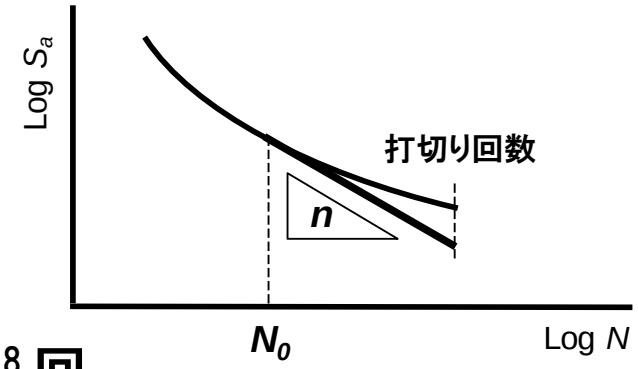
*1の文献： 日本機械学会LF委員会, 機械学会関西支部シンポジウム(1972)
日本材料学会編, 疲労設計便覧, 養賢堂(1995)

変動応力を考慮した疲労限度の設定方法のまとめ

変動応力を考慮した設計疲労曲線を定めたEN規格の方法を参照するとともに、

実機の応力条件を参考にした仮想的な応力頻度分布で試算を行って、

以下のように定めた。



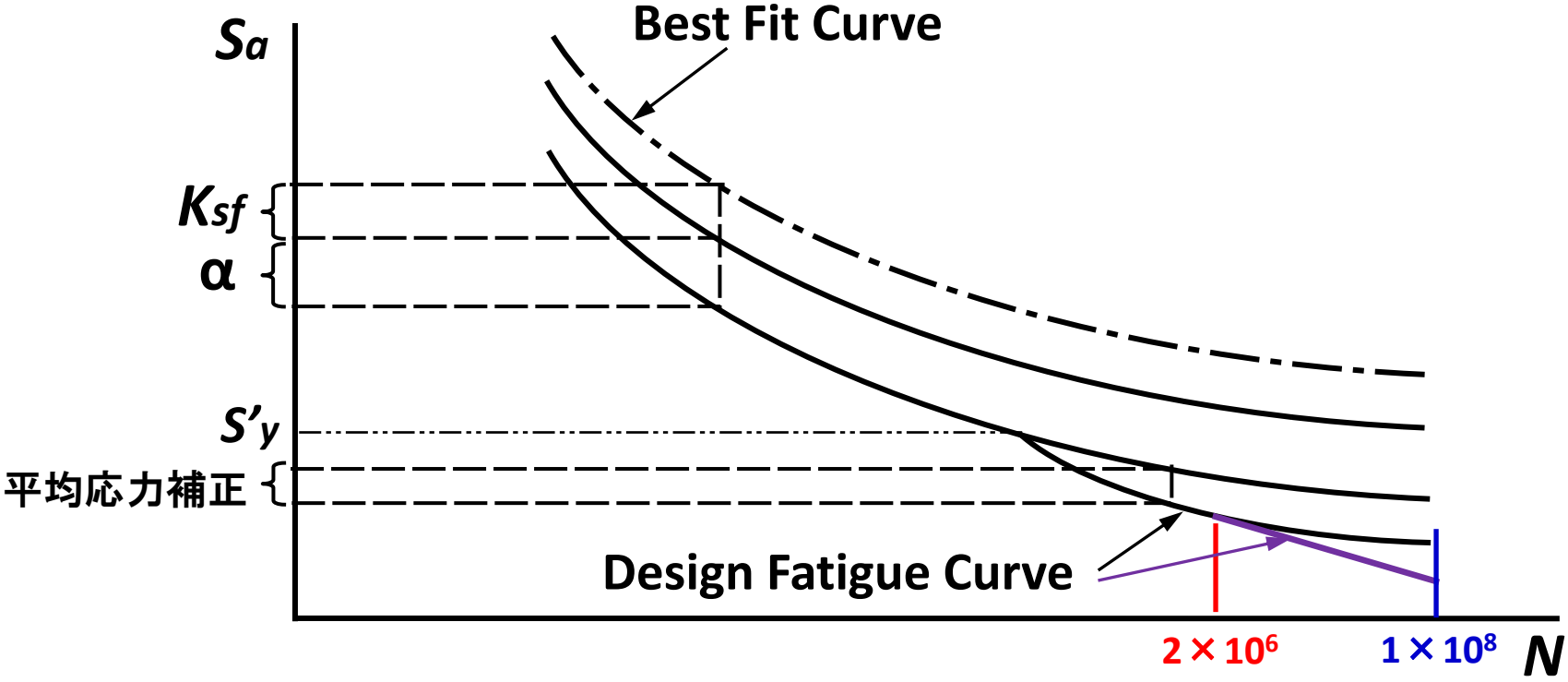
- 強度低下開始時の回数 N_0：2×10^6 回
- 強度低下開始以降の傾き n：-0.1
- 打切り回数(曲線を設定する最大の回数)：1×10^8 回

⇩

- 1×10^8 回における疲労強度が変動応力を考慮した疲労限度
- 1×10^8 回における疲労強度より小さい応力振幅は UF にカウントしない

変動応力の取扱いの検討

応力に対する設計係数を各々設定した場合の設計疲労曲線



- 強度低下開始繰返し数　2×10^6
- 強度低下開始以降の傾き　-0.1
- 打切り回数　1×10^8

講演内容

本講演では、原子力研究委員会DFC小委員会で策定した新たな設計疲労曲線と疲労解析法について、

- 最適疲労曲線の構築
- 設計係数の見直し
- 新たな平均応力補正法の導入
- 疲労限度設定の考え方
- 大型試験片による検証

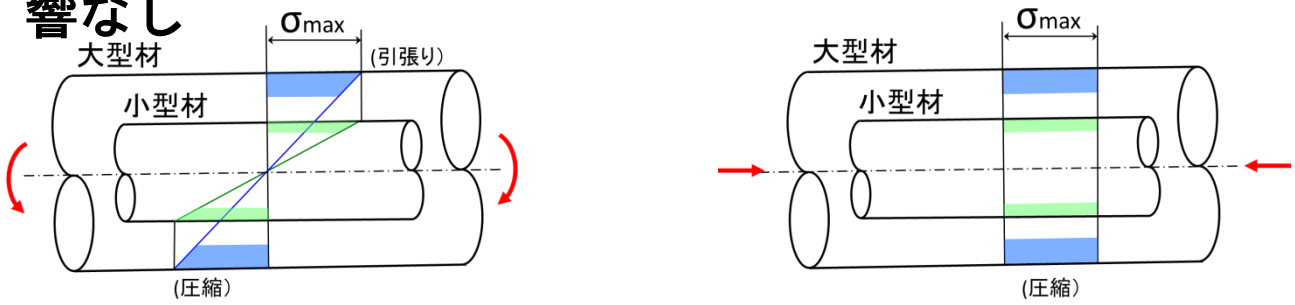
等の観点から解説する。

新しい疲労解析方法：寸法効果

- **寸法効果の一般的な原因**

①応力勾配の変化

→ 曲げの繰り返し荷重で影響大、軸方向引張圧縮の繰り返し荷重で影響なし



②危険にさらされる部分の強度や材質の統計的なばらつきの増大

→ 荷重形態によらず、き裂の発生など局所的な現象で影響あり

※ただし、②よりも①の影響が大きい

- **設計疲労曲線作成における寸法効果**

新しい設計疲労曲線向けのベストフィットカーブは、平滑材の軸方向引張圧縮荷重による試験データを用いるため、寸法効果は小さいと判断される

⇒ *小型試験片と実機・大型構造物の疲労試験結果を比較し、寸法効果は無視できることを検証*

1.疲労破壊における寸法効果とは

2.大型疲労試験

2.1　炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

2.2　オーステナイト系ステンレス鋼配管大型疲労試験

3.まとめ

炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

供試材

炭素鋼　機械構造用炭素鋼 **S45C**, 板厚 100mm, 焼ならし材

低合金鋼　圧力容器用調質型マンガンモリブデンニッケル鋼鋼板 **SQV2A**,
板厚 161mm, 焼入れ焼戻し材 880℃ × 310 min., 615℃ × 45h.

Chemical compositions of SQV2A

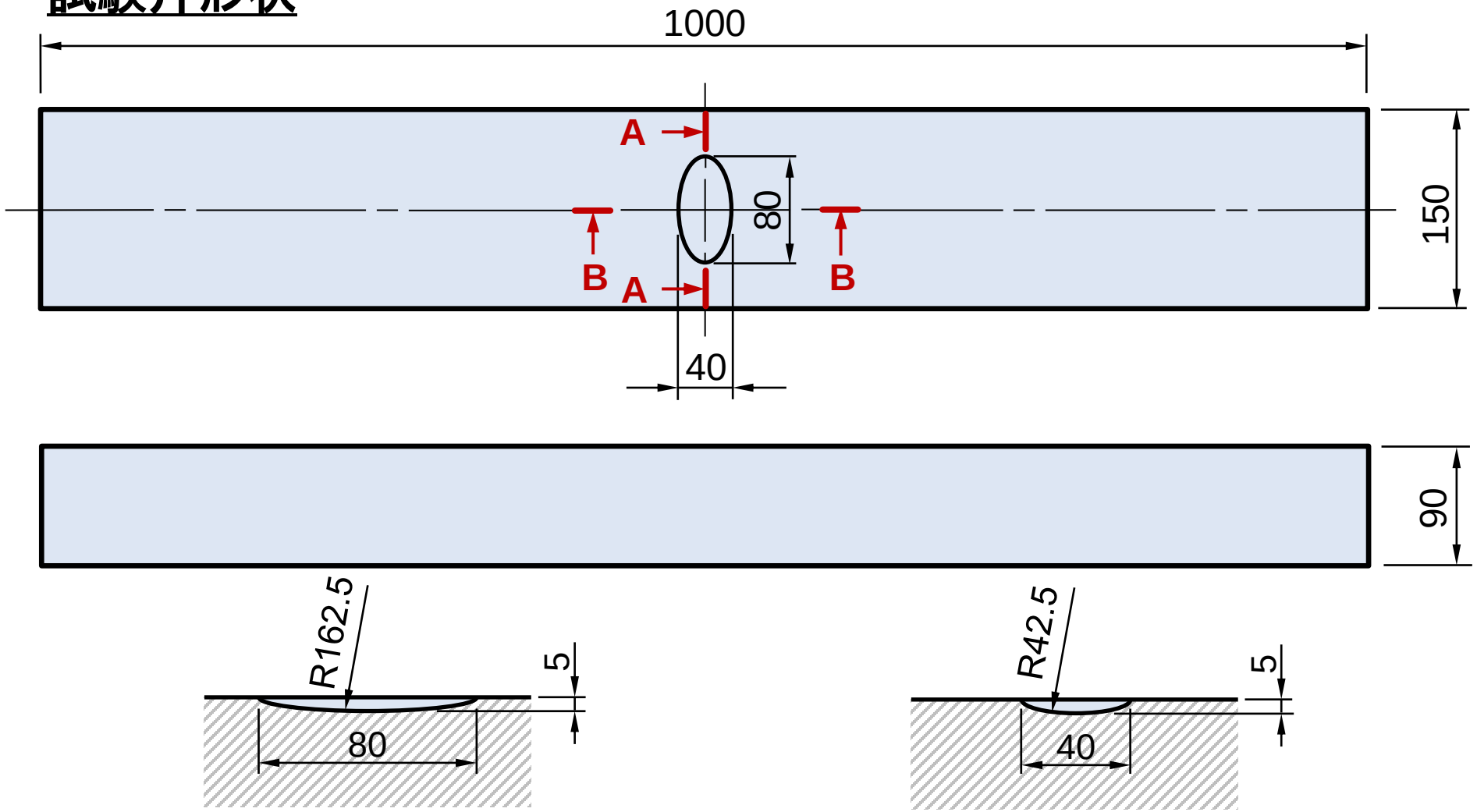
C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cu	Cr	V	Nb	Ti
0.18	0.24	1.43	0.005	0.002	0.66	0.52	0.02	0.11	0.001	0.001	0.001

Mechanical properties

Material	0.2% proof stress (MPa)	Ult. tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
S45C	487	637	24	68
SQV2A	448	597	26	77

炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

試験片形状

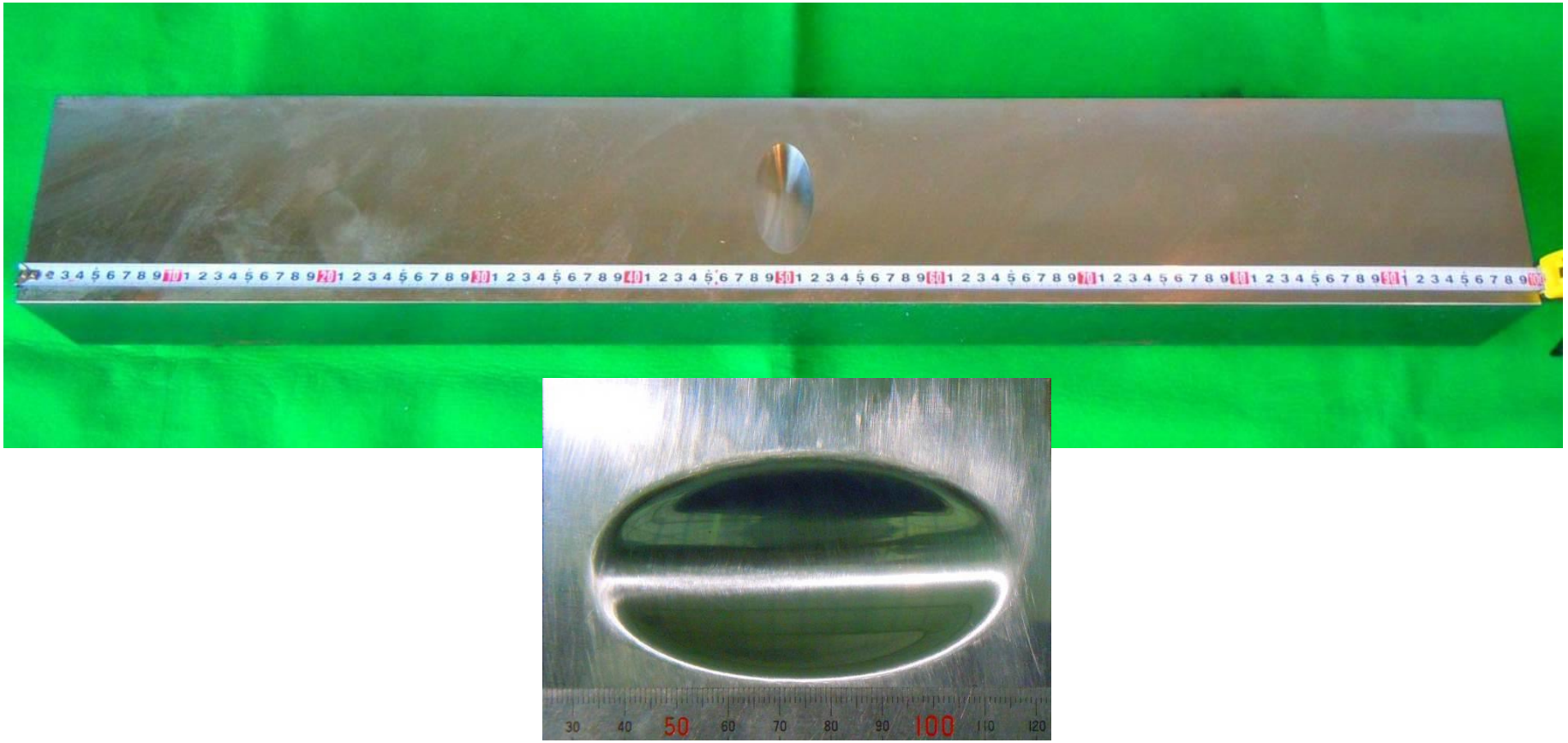


A - A Section

B - B Section

炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

試験片形状

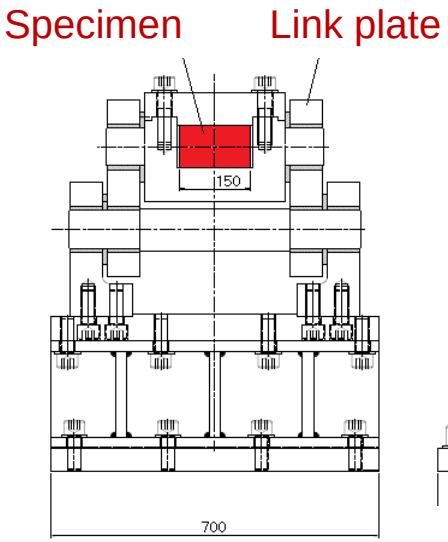


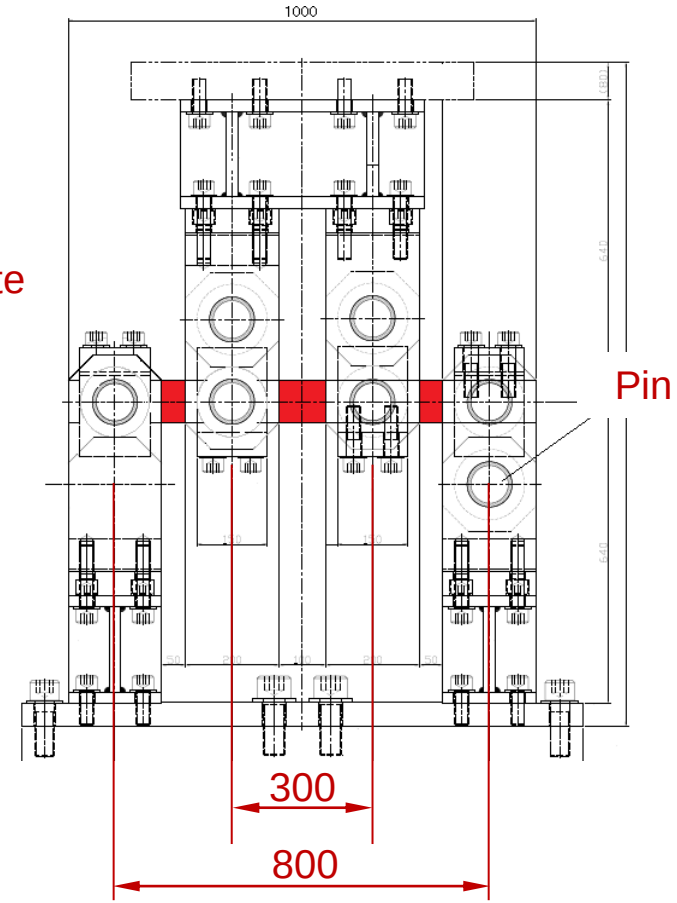
- 機械加工にて Ra = 3.2 μm 仕上げ
- 小型試験と同様に、エメリー紙により、#200, #400, #600, #800, #1000 の順に研磨仕上げ

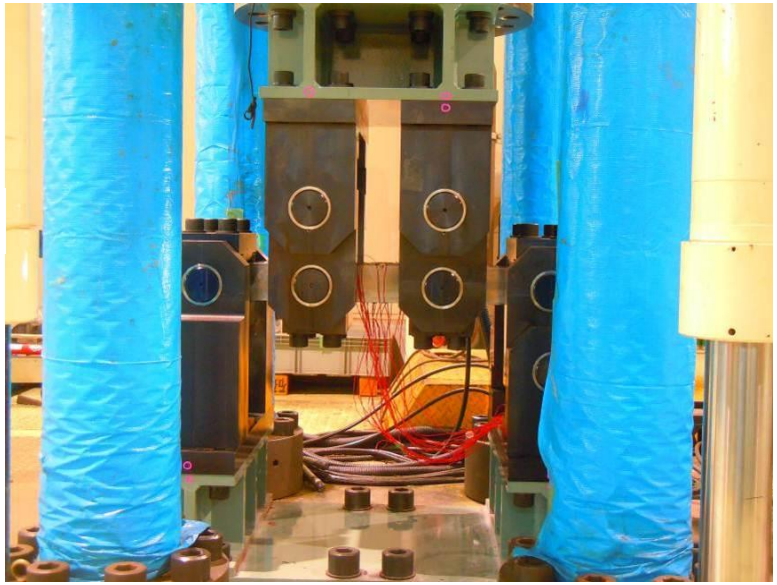
炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

試験装置

- 試験装置　　電気油圧サーボ式疲労試験機(容量 ±2MN)
- 負荷方式　　4点曲げ (内スパン　300mm, 外スパン 800mm)



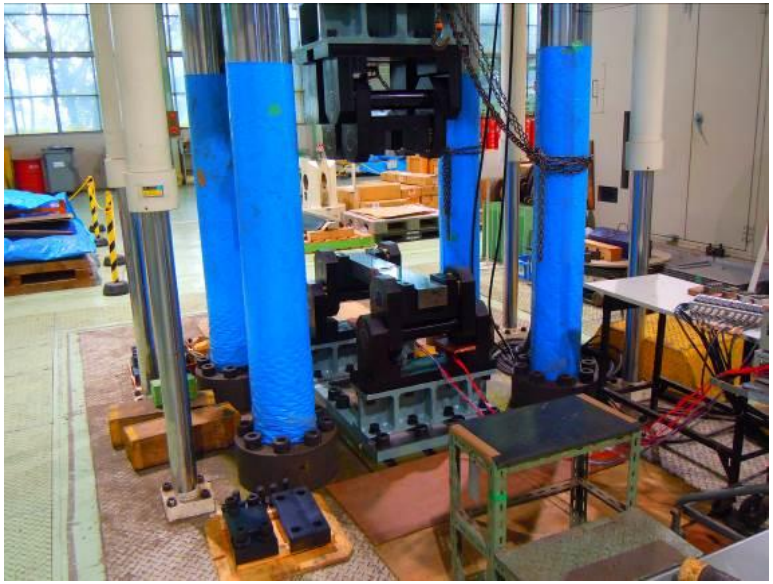




炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

試験状況

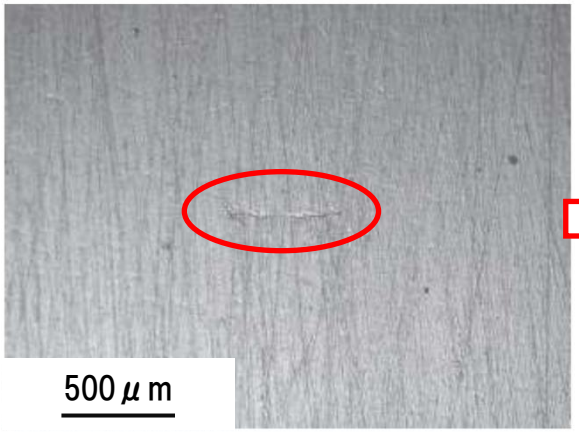
疲労試験前



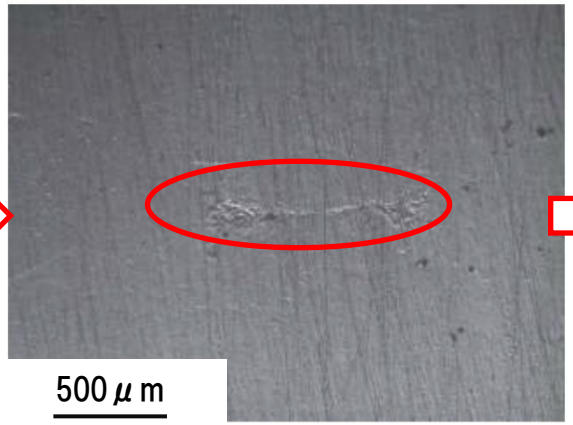
疲労中

炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

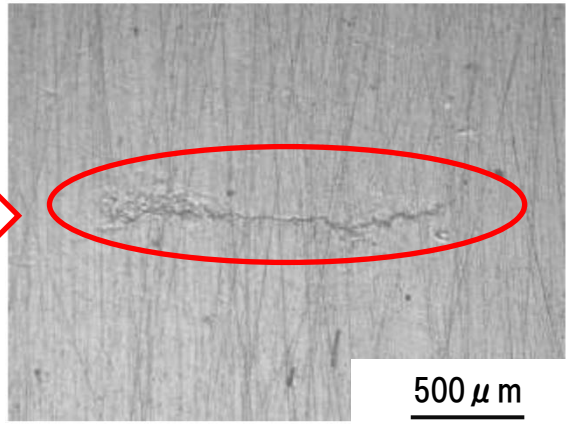
試亀裂進展状況（LAS1, ε_a = 0.22%, N_f = 1.25×10^5）



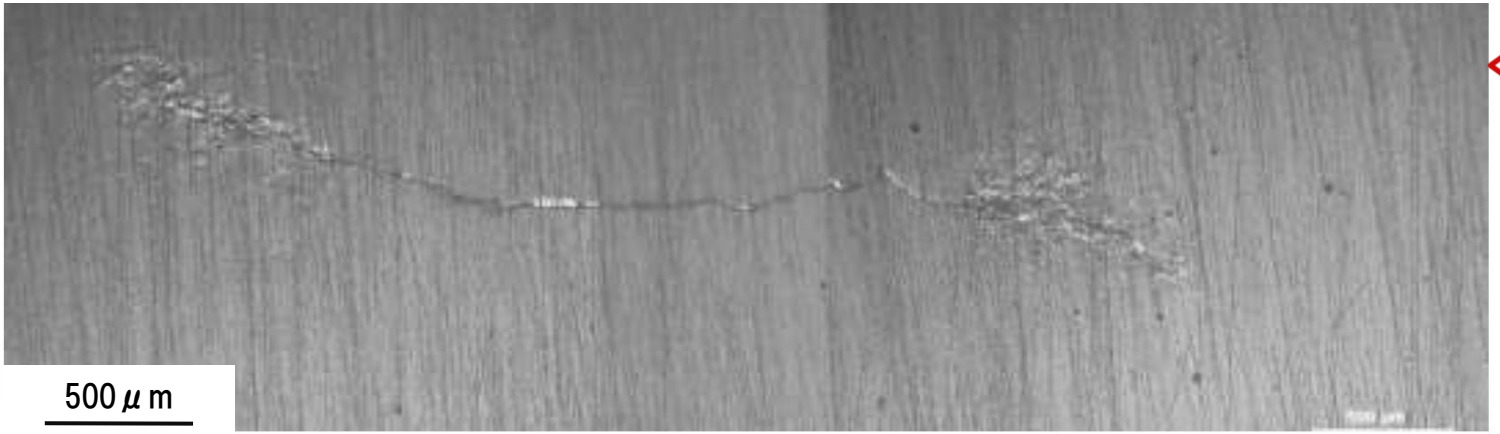
4.0 × 10^4 サイクル



5.0 × 10^4 サイクル



5.5 × 10^4 サイクル

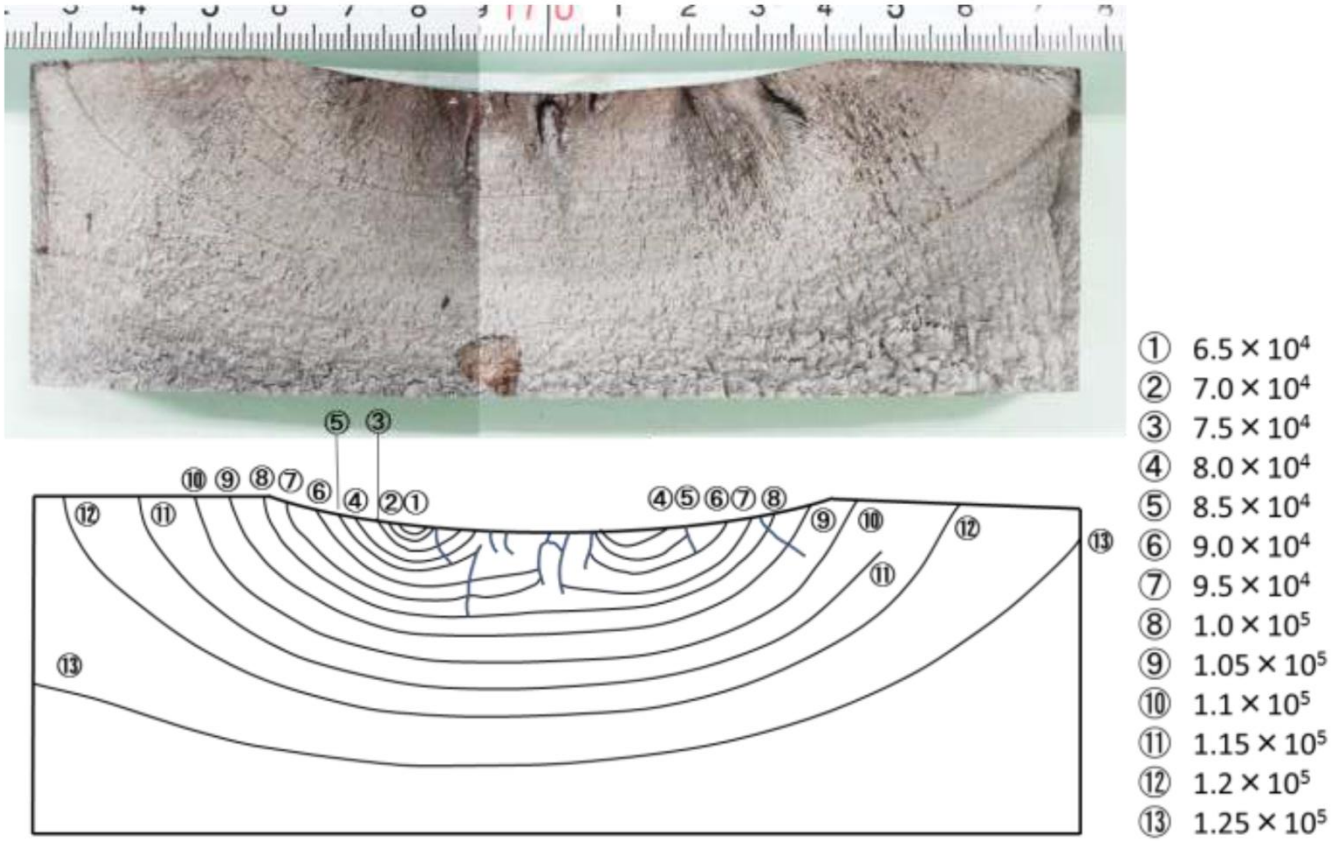


6.5 × 10^4 サイクル

ビーチマーク導入

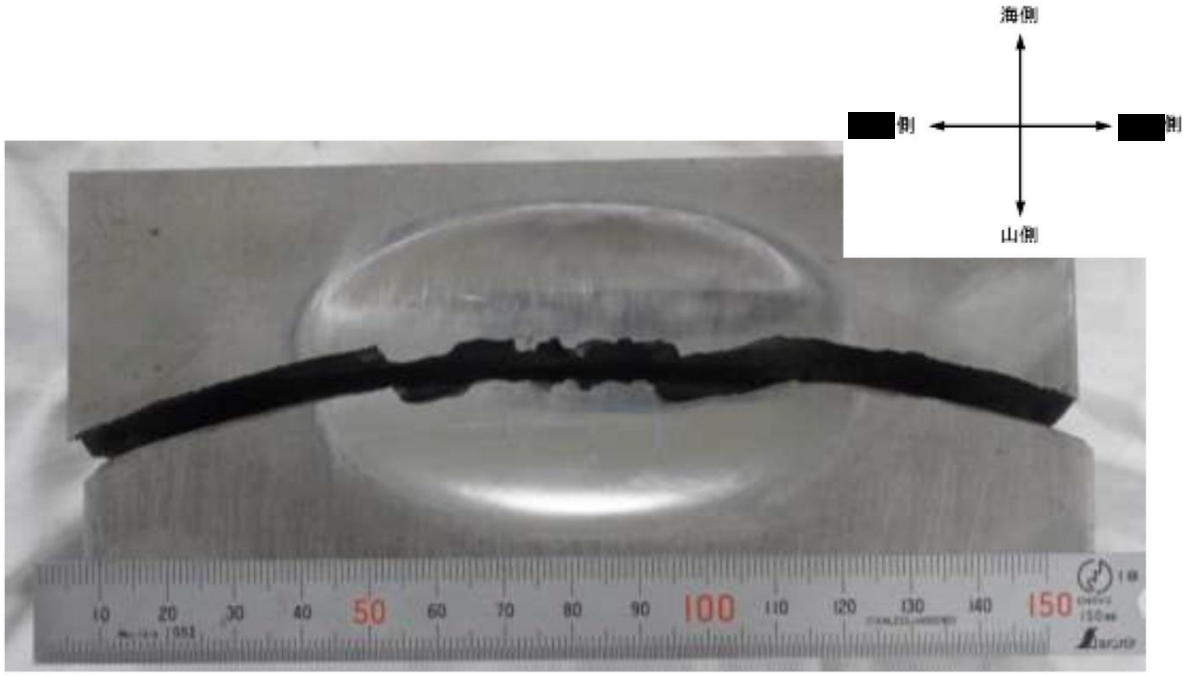
炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

ビーチマーク導入結果（LAS1, ε_a = 0.22%, N_f = 1.25×10^5）



炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

ビーチマーク導入結果（LAS1, ε_a = 0.22%, N_f = 1.25×10^5）



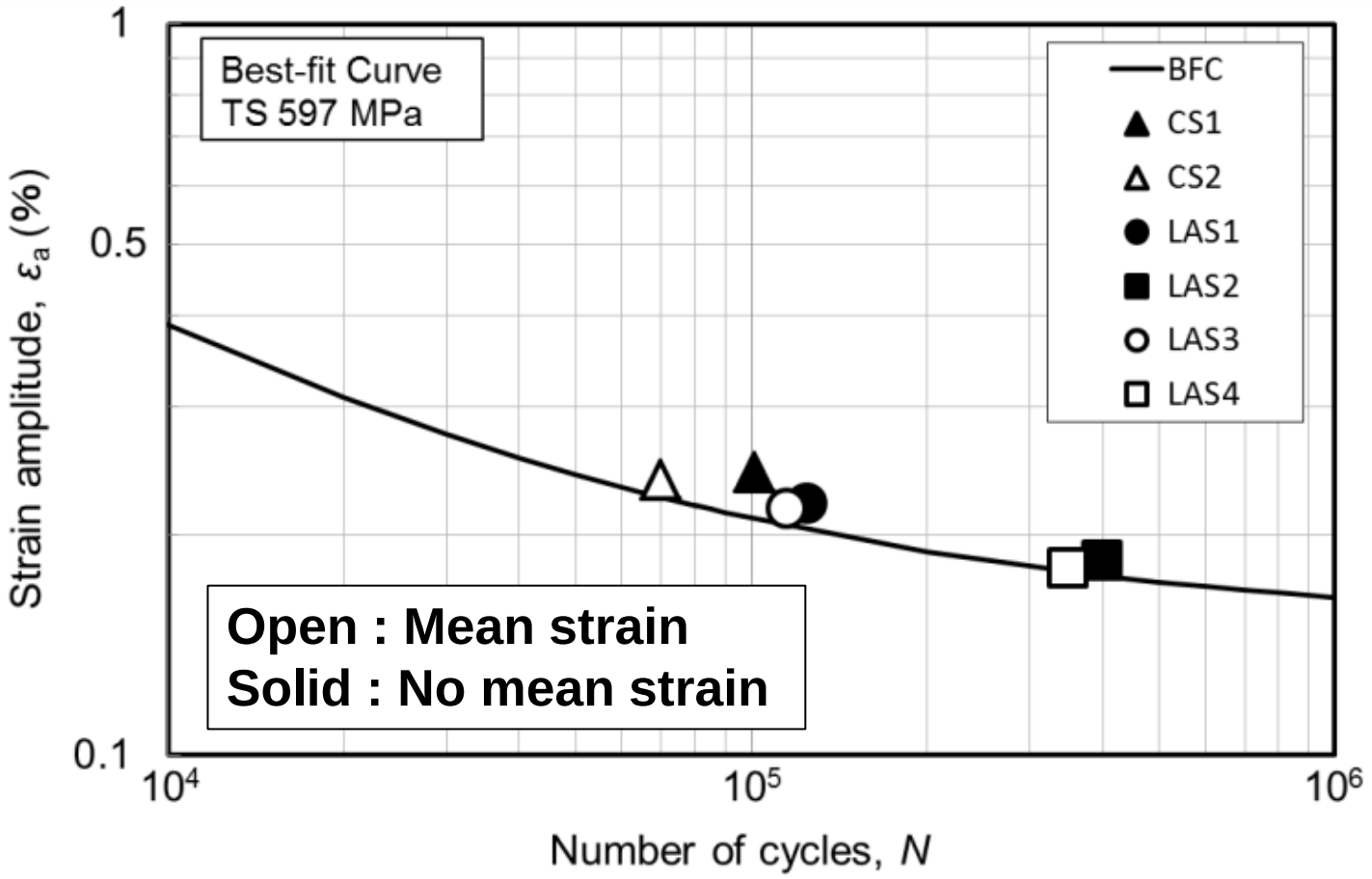
(a) 切欠き面

切欠き底に生じていた複数の亀裂が合体し破断

破面に大きな段差が発生

疲労試験結果

ひずみ振幅と破断寿命の関係



破断寿命の定義：亀裂深さ ≧ 板厚の半分

1.疲労破壊における寸法効果とは

2.大型疲労試験

2.1　炭素鋼及び低合金鋼平板大型疲労試験

2.2　オーステナイト系ステンレス鋼配管大型疲労試験

3.まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼配管大型疲労試験

材料情報

SUS316LTP

8BSch160配管（長さ:3000mm, 外径:216.3mm, 板厚:23.0mm）

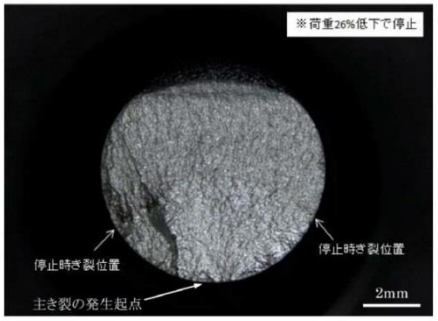
	化学成分(wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
規格値	≤ 0.030	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.045	≤ 0.030	16.00 -18.00	12.00 -1600	2.00 -3.00
分析値	0.012	0.44	1.79	0.025	0.001	17.35	14.56	2.61

	機械特性		
	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
規格値	≥ 175	≥ 480	≥ 30
分析値	238	542	60

オーステナイト系ステンレス鋼配管大型疲労試験

小型疲労試験条件

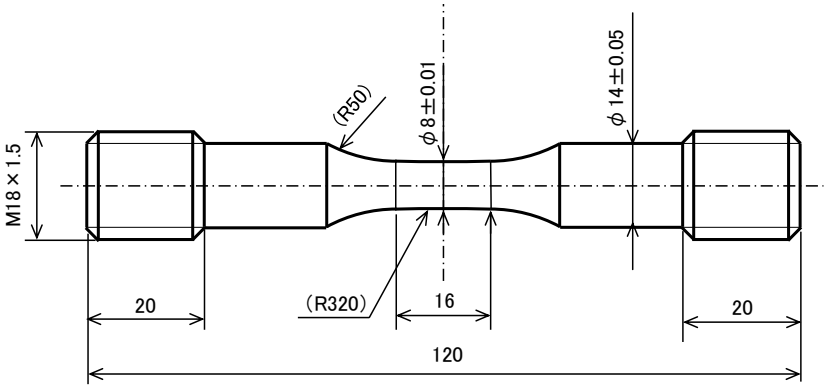
材料　　:SUS316LTP(大型配管と同じ)
環境　　:室温大気中
制御　　:ひずみ制御
周波数　:0.02～5Hz
制御　　:完全両振り-軸荷重
寿命定義:疲労寿命N_{25}
（引張側応力が1/2N_fの値から25%低下した時の繰返し数）又は破断



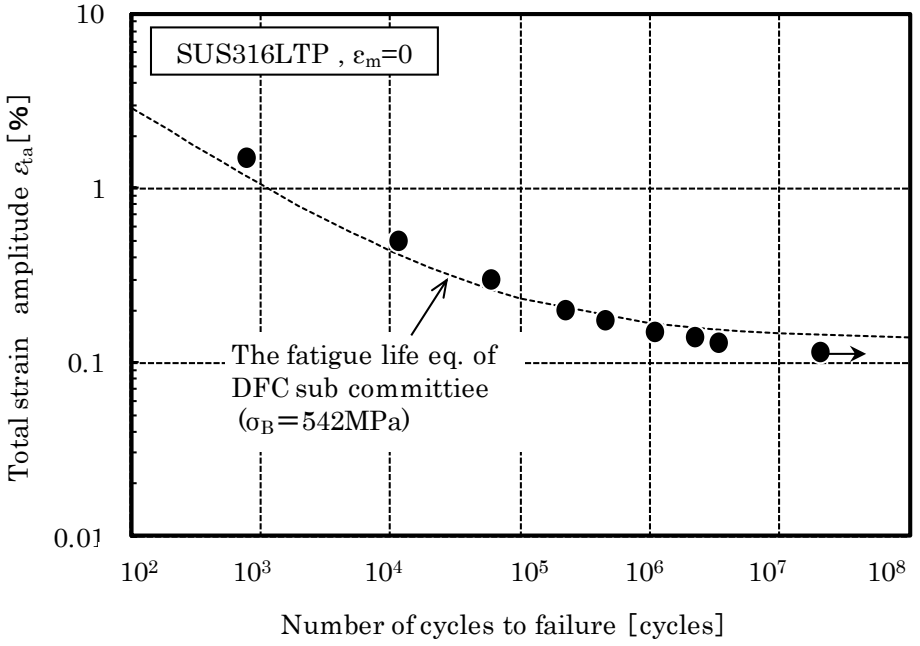
(a) $\Delta\varepsilon_t$=3.0%, N_{25}=762 cycles

疲労寿命到達時の亀裂長さは約3mm程度

疲労試験終了時の破面例



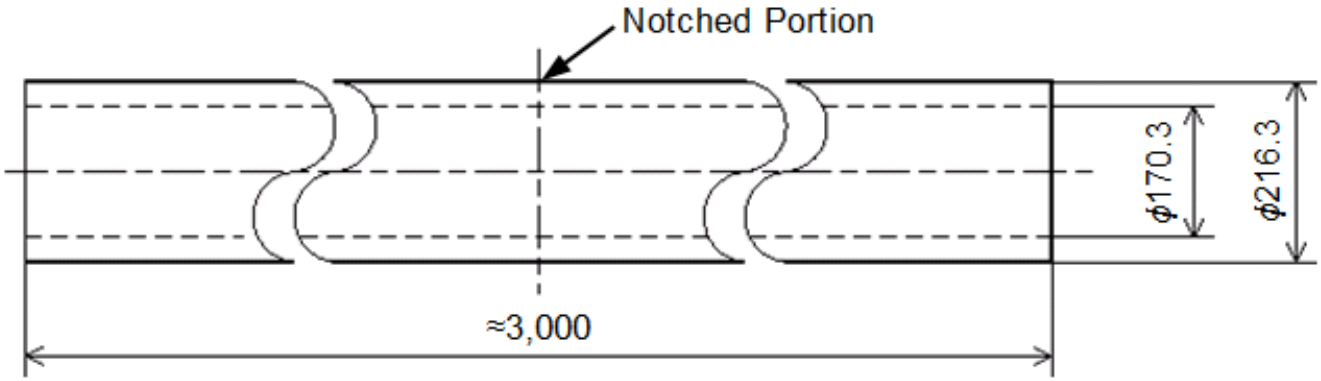
丸棒疲労試験片(GL=12.5mm)

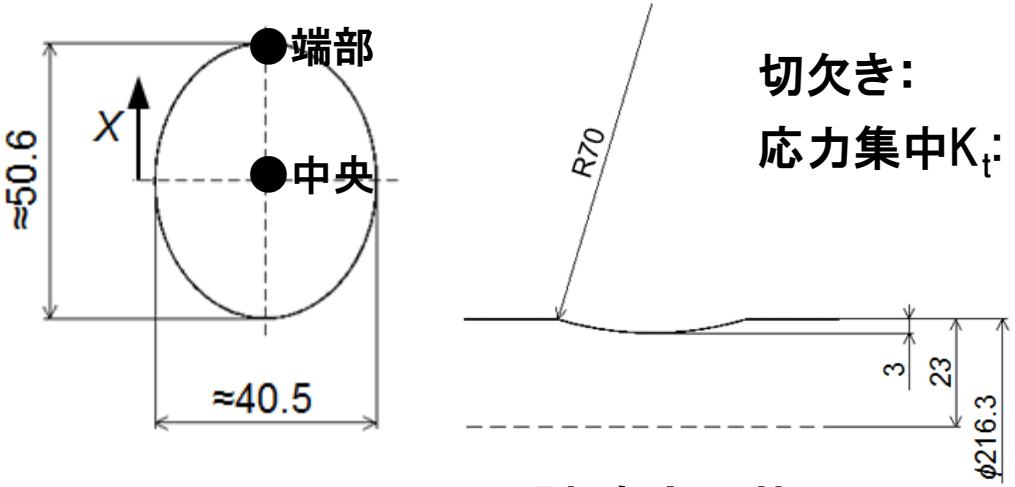


S-N線図(SUS316LTP)

配管大型試験体情報

表面状態: エメリー紙(#200→#400→#600→#800→#1000)
最終的に軸方向(長手方向)研磨





切欠き: 半径70 mm、深さ3 mm
応力集中K_t: 中央1.39、端部1.14
(FEM解析より)

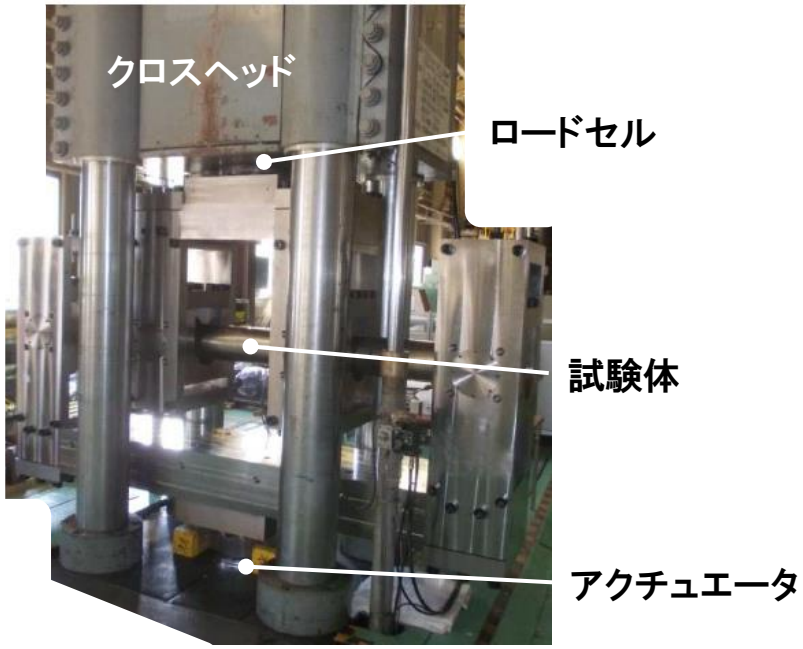
単位(mm)

試験片形状

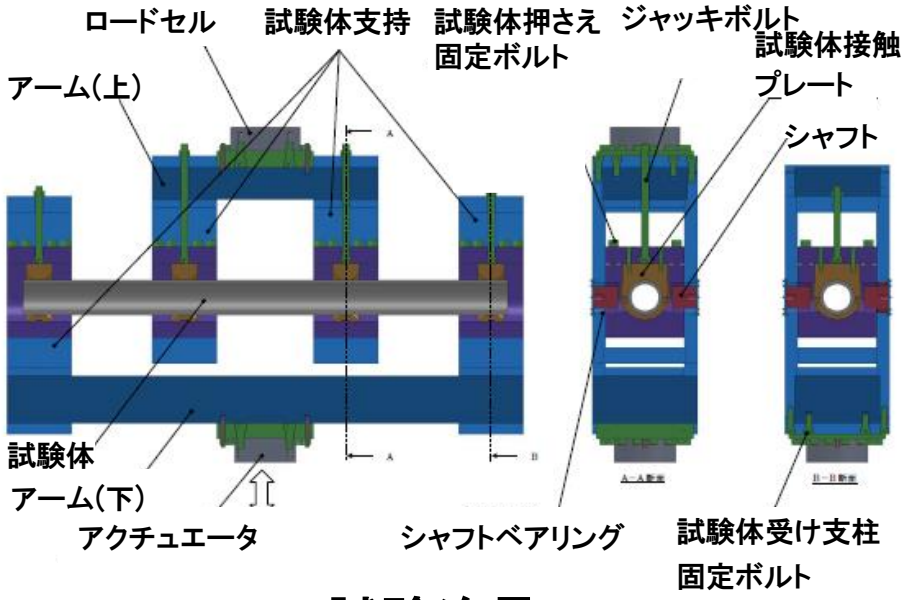
オーステナイト系ステンレス鋼配管大型疲労試験

試験装置

メーカー	MTS社
荷重容量	±10 MN(静的)　±　5 MN(動的)
試験速度	最大1.5Hz （ただし変位量に依存）
アクチュエータ変位	±150 mm
クロスヘッド移動量	3000 mm



試験装置外観



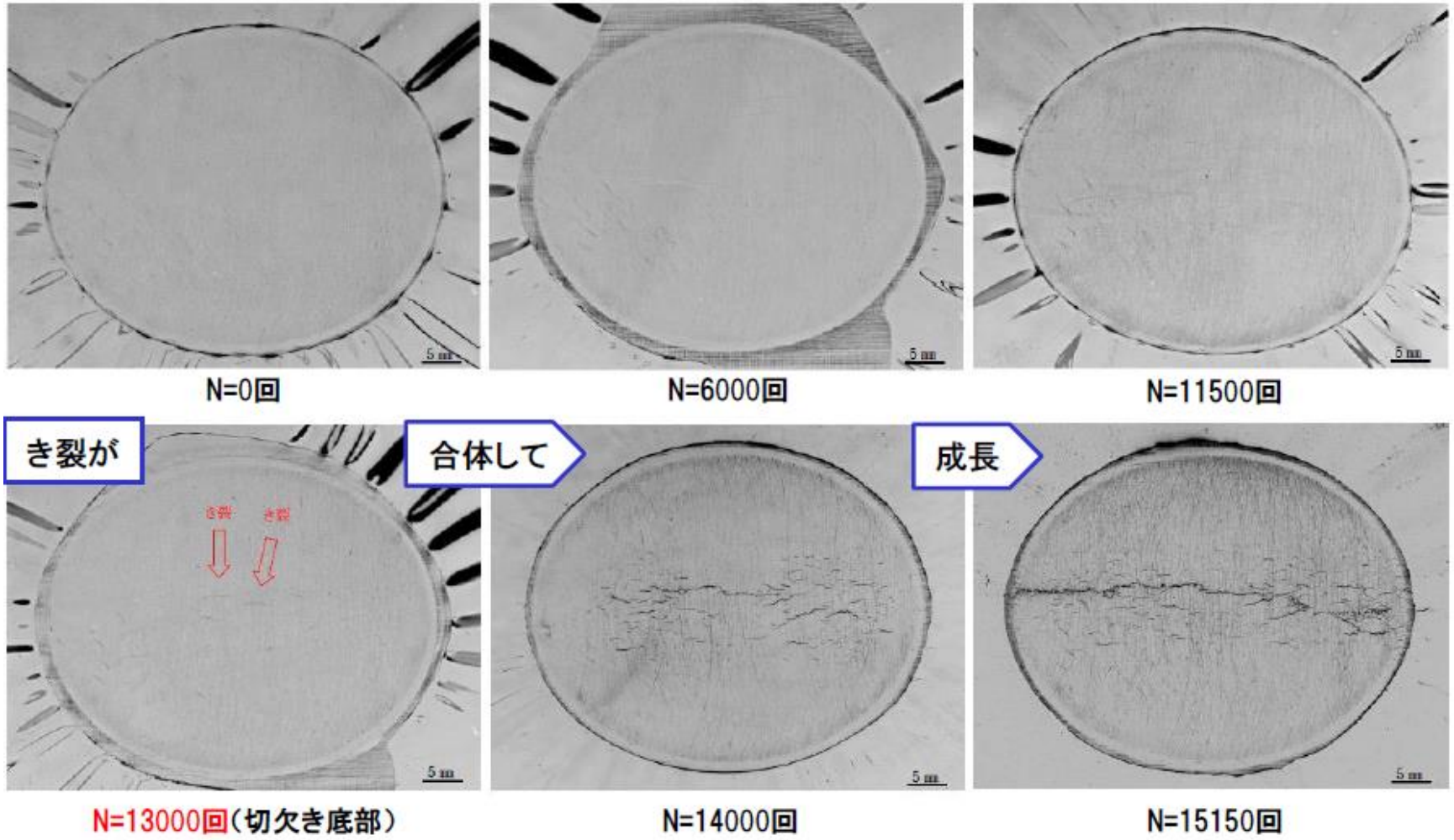
試験治具

オーステナイト系ステンレス鋼配管大型疲労試験

レプリカ観察結果

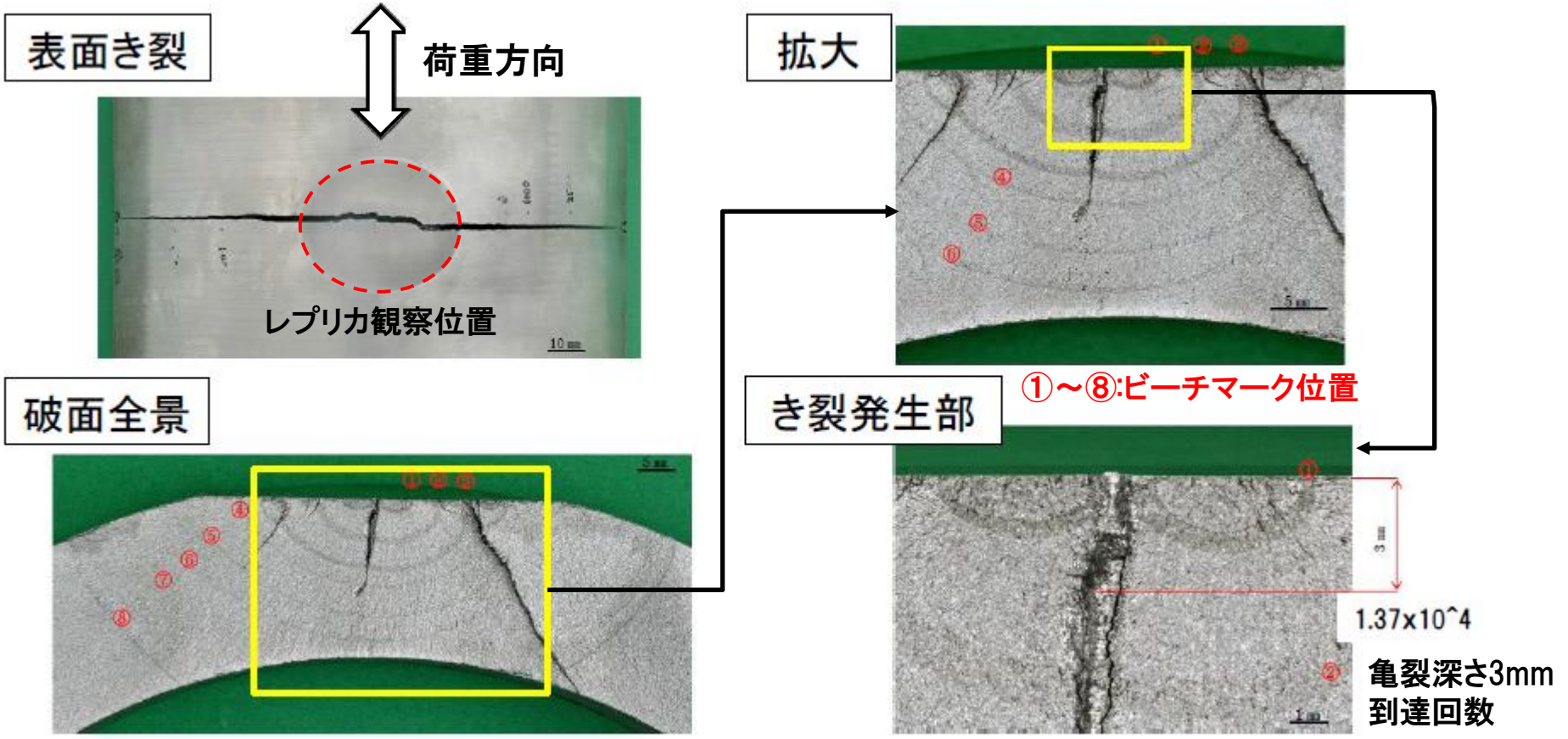
試験B(平均ひずみ0% ひずみ振幅±0.44%)

全体で44回レプリカ観察



ビーチマーク観察結果

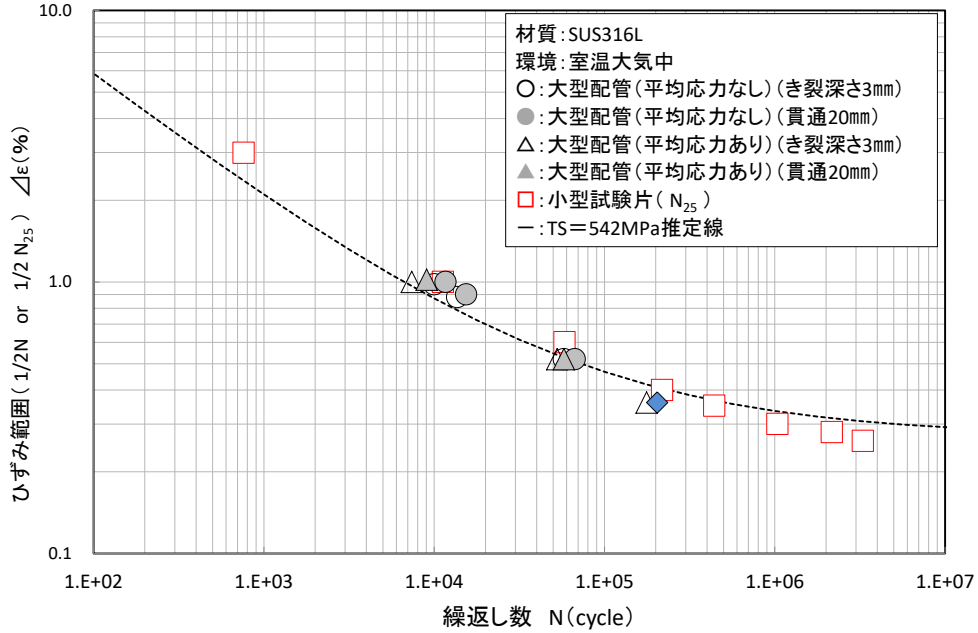
試験B(平均ひずみ0% ひずみ振幅±0.44%) ビーチマーク8本導入



- ビーチマーク付与条件に応じた模様が合計8本確認された。

オーステナイト系ステンレス鋼配管大型疲労試験

大型試験体疲労試験結果



疲労試験結果比較

試験F（◆）の20mm貫通繰返し数は板厚貫通まで試験を実施していないため、試験A～Eの3mm到達繰返し数と20mm貫通繰返し数の寿命比(0.868)を用いて2.04×10^5回と推定。

試験Aは試験前に+2.5%の予ひずみ履歴あり。

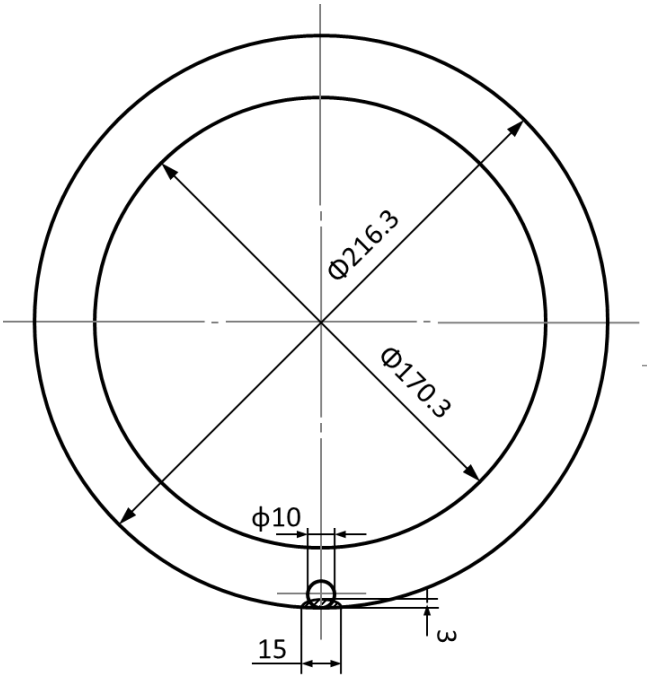
疲労寿命N_{25}:

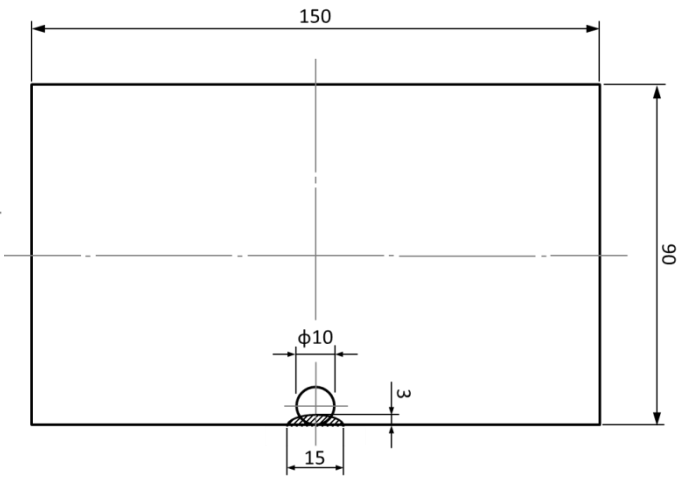
ある繰返し数での引張側の荷重が、この繰返し数の1/2の時の引張側の荷重から25%以上低下した繰返し数に相当する疲労寿命

- 大型配管の亀裂深さ3mm到達繰返し数と、小型試験片の疲労寿命N_{25}(φ10mm試験片に対する亀裂深さ:約3mm相当)を比較するとほぼ同等であり、明確な寸法効果は認められない。
- 亀裂深さ3mm到達繰返し数と20mm貫通繰返し数を、平均応力の有無で比較すると、平均応力有の方が若干疲労強度が短いがほぼ同等であり、明確な平均応力効果は認められない。

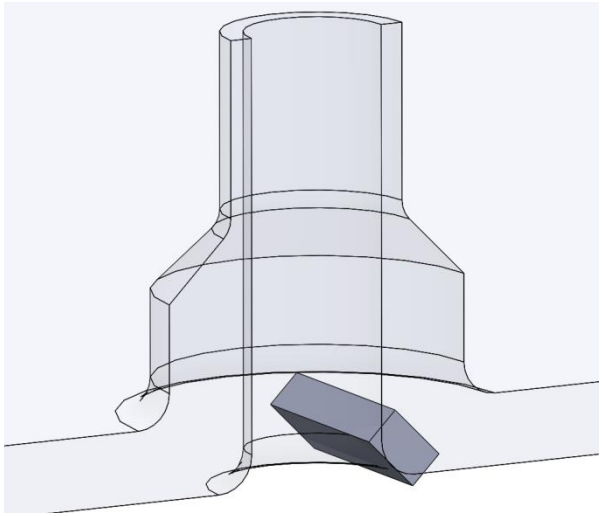
寸法効果のまとめ

疲労試験のばらつきを考慮すると、小型試験の破断寿命は大型試験体における深さ3mm程度の亀裂発生寿命に相当する。
試験片寸法が大きく異なっても、亀裂面に生じる応力分布がほぼ同じであれば、疲労き裂発生に対する寸法効果はほとんどない。





○:ϕ10mm小型試験片寸法



大型配管　　大型平板　　ノズルコーナ部

小型試験片、大型試験片及び実機寸法と発生亀裂の比較

寸法効果のまとめ

- 小型試験片の破断寿命と大型試験体における深さ約3-4mm程度の亀裂発生寿命が等しいことから、大型構造物(Ex.圧力容器や配管)の設計には、寸法効果を考慮する必要はない。

- この理由は、実機においては部材寸法が大きく、応力勾配が緩やかであるためである。

- 試験片寸法が大きく異なっても亀裂面に生じる応力分布がほぼ同じであれば寸法効果はほとんどなく、大型の実構造物でも同様の結論が得られる。

講演内容

本講演では、原子力研究委員会DFC小委員会で策定した新たな設計疲労曲線と疲労解析法について、

- 最適疲労曲線の構築
- 設計係数の見直し
- 新たな平均応力補正法の導入
- 疲労限度設定の考え方
- 大型試験片による検証

等の観点から解説する。

今後の取組み

- 高圧ガス保安協会KHKS-0220の改訂完了→高圧ガス分野で利用開始
- DFC3小委員会:2021年3月に終了
- 日本機械学会 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 疲労評価分科会:規格改定を検討中

DFC3小委員会

DFC/DFC2小委員会では新しい考え方の設計疲労線図を開発し，その中で設計係数等について検討を行い，有益な情報が得られた。とくに表面粗さおよび引張強さをパラメータとした表面仕上げ効果係数の場合には，低～中強度域におけるばらつきが大きく，データの拡充が必要であることがわかった。また、疲労強度減少係数と平均応力補正の関係については，これらの考慮する順番を確認する必要があることがわかった。

そこでDFC3 小委員会(2019年4月～2021年3月)を設置し，以下について検討する。

(1)疲労強度に対する表面仕上げ効果の評価手法の精緻化

(2)疲労強度に対する疲労強度減少係数と平均応力補正の考慮の順番の影響

日本機械学会発電用設備規格委員会他の規格化活動

DFC/DFC2小委員会で開発した大気中設計疲労曲線をベースとして新しい疲労解析手法の規格化を進めており、状況は以下の通り。

(1) 日本機械学会　発電用設備規格委員会

原子力専門委員会にて環境疲労評価手法への新しい疲労解析手法の取り込みについて審議中

(2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Committee

BPV Committe on Construction of Nuclear Facility Components (III) のWorking Group on Fatigue Strengthにて、新しい疲労解析手法のCode Caseを審議中