

# 疲労寿命予測ソフトウェア fe-safe™ の機能紹介

伊藤忠テクノソリューションズ(株) 津田徹

## 1 はじめに

近年、CO<sub>2</sub> の排出抑制やエコ、省エネが叫ばれ、産業界では軽量でより強い製品設計の要求が高まっている。そのような状況で、多くの企業では、製品設計の高度化のために、機器の設計応力を計算するのに高度な有限要素解析が使用されている。しかしながら、疲労評価においては、依然として、評価点の応力を手作業で拾い出し、スプレッド・シートを用いて行われることが少なくない。ここで、疲労寿命に影響を与える因子として、応力振幅、平均応力、荷重の繰返し数、切欠きなどの応力集中、組み合わせ応力、残留応力、製品の表面状態、部材の物理的な大きさ、環境（腐食や温度）などがある。スプレッド・シートを用いた手作業では、これらの影響を考慮するには手間と時間が非常に掛る。また、き裂が発生する位置をしばしば見逃すことがあり信頼性がない。更に、疲労寿命の評価が一筋縄にいかない理由に、最大応力が発生しているところからき裂が発生するとは限らないこと（図 1.1 参照）。き裂の発生場所は荷重の順序に依存すること。き裂が進展するか停留するかは表面内部の応力の大きさに依存することなどがある。

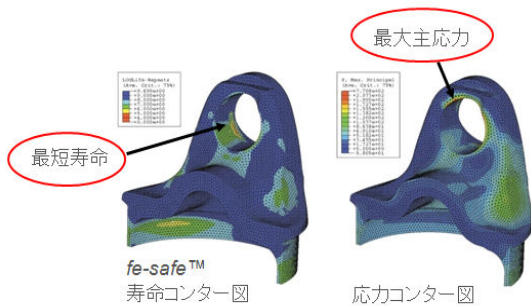


Fig. 1.1 Crack initiation point and maximum stress

そのような状況で、設計と試験計画を効率化し、試作品の試験回数、製品のリコール回数、保証のコストを低減のために、最近、設計プロセスに、疲労評価システムを導入する動きが徐々に出始めた。ここでは、そのようなシステム 1 つであり、先進の研究の成果を取り込んだ疲労寿命予測ソフトウェアである fe-safe™ について紹介する。

## 2 fe-safe の機能紹介

### 2.1 概要

まず、疲労寿命評価システム fe-safe の概要について説明する。fe-safe は、英国のシェフィールドに本拠を構える Safe Technology 社により、1992 年から約 5 年を掛けて開発された疲労評価システムである。他の疲労寿命評価システムと比べると、比較

的新しいものである。fe-safe の特徴として、

- ・処理速度が高速であること
- ・先進の疲労評価手法を採用していること
- ・使用法が非常に簡単であること
- ・多機能であること

などが挙げられる。

図 2.1 に fe-safe の概要図を示す。

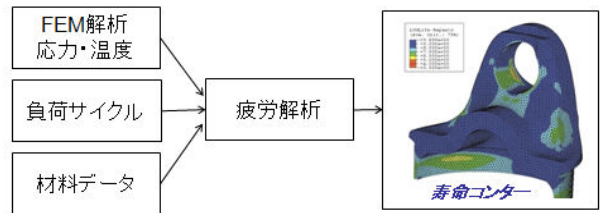


Fig. 2.1 Outline of fe-safe

次に、fe-safe で疲労寿命を計算する場合の操作の手順を示す。

### Step1：FEM 結果の読み込み

まず、別途、FEM 解析で得られている応力、ひずみ、温度などの計算結果を読み込む。

### Step2：荷重履歴の設定

次に、評価対象の構造機器に作用させる荷重の負荷サイクルを定義する。

### Step3：材料データベースの選択

その後、評価対象のモデルの表面の材料を、fe-safe に登録されている材料データベースから選択する。

### Step4：疲労評価手法の選択

次に、疲労評価手法を選択する。ここで、材料に最適な疲労アルゴリズムがデフォルトとして設定されている。

### Step5：解析条件の設定と実行

次に、材料の表面状態、残留応力の有無、出力項目などを設定後、疲労解析を実行する。ここで、疲労解析は無限寿命評価と有限寿命評価を行うことができる。

### Step6：結果の可視化

解析終了後、各節点で計算された寿命などを、描画ツールを用いて、寿命コンター図などを作画して、結果を可視化する。

次節以降、各処理について説明する。

### 2.2 計算手順

fe-safe の疲労評価の計算手順について述べる。fe-safe の多軸状態における疲労寿命解析は下記の 5 段階で行われる。

- 1) 複雑な荷重または二軸の応力状態に対し、ノイバー則による弾塑性の応力とひずみを計算す

- る。
- 2) 小さな応力振幅と大きな応力振幅が相互に作用する荷重サイクルや、温度、平均応力の影響を考慮するための材料データベース（疲労限）を補正する。
  - 3) 材料に最適な疲労アルゴリズムにより、き裂発生寿命を計算する。
  - 4) 多軸疲労問題において、**Critical plane** 探索を行い、き裂の発生箇所とその方向を決定する。
  - 5) Taylor の応力勾配法（**Critical Distance** 法）により、き裂が停留するのか破壊にまで至るのかどうかを評価し、破壊に至るまでの荷重係数を算出する。

### 2.3 FEM 結果の読み込み

疲労寿命を計算する場合、その材料表面での応力振幅と平均応力が必要となる。この応力振幅と平均応力は、通常、FEM 解析により求められる。高サイクル疲労の場合では、単位荷重による静的弾性解析で得られた応力が読み込まれ、低サイクル疲労の場合では、静的弾塑性解析により得られた応力とひずみの履歴を読み込ませることも可能である。また、動的解析結果を利用することも可能であり、定常モード応答解析（周波数応答解析）、モード過渡応答解析、更に、直接過渡応答解析結果を用いて疲労評価を行うことも出来る。高温疲労解析や高温クリープ解析の場合では、非定常の変位-熱連成過渡解析結果を用いる。

次に、現在、fe-safe とのインターフェースが整備されている有限要素法プログラムの結果ファイルを下記に示す。

- ・ ABAQUS(fil,odb)
- ・ NASTRAN(f06,op2)
- ・ ANSYS(rst)
- ・ I-DEAS(unv)
- ・ Pro/M(s01...,d01)

現在、LS-DYNA および MARC についてインターフェースの整備計画がある。なお、FEM 解析結果の fe-safe へのテキスト入力も可能なので、上述のソルバー以外でも対応することが可能である。

### 2.4 荷重の負荷サイクルの設定

疲労寿命の計算は、機器の設計時に想定する運転時の荷重の大きさとその負荷サイクルに対して行われるので、入力情報の一つとして、負荷サイクルを設定する。fe-safe では、荷重の負荷として、単一荷重履歴の入力や複数の荷重履歴の重ね合わせ入力（図 2.2 参照）、また、FEA 結果のシーケンス入力など、色々な条件を簡単に設定することが出来る。また、自動車のピストンの例に見られるような低周波の熱サイクル負荷に高周波の機械荷重が重なるような場合も簡単に設定することが出来る。

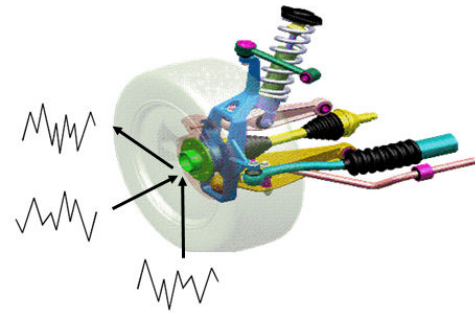


Fig. 2.2 Component with 3 load histories

## 2.5 材料データベース

疲労寿命を計算する場合、構造の着目部位での応力振幅を、対象となる材料の応力寿命曲線（S-N 線図）に当てはめ、繰返し回数などの寿命を算出する。このように、疲労評価には、対象とする材料の応力寿命曲線やひずみ寿命曲線（ $\epsilon$ -N 線図）などの情報が必要となるが、通常、これらは疲労試験により求められる。fe-safe には、幾つかの金属材料に対し、引張試験および疲労試験により得られた、弾性係数やポアソン比、引張強度、疲労限、応力寿命曲線やひずみ寿命曲線、繰返し応力-ひずみ曲線の情報が材料データベースとして登録されている。従って、ユーザは対象となる材料をデータベースから選択するだけで疲労評価を行うことができる。なお、一部の材料では、温度依存のデータが登録されているので、温度依存を考慮することも出来る。また、これらのデータはユーザによって拡張または修正が可能であり、新規に登録することも出来る。現在、データベースには、金属材料として、アルミ材、スチール、鋳鉄、ステンレス、炭素鋼などを中心に約 500 種類のデータが含まれており、現在、ポリマー材とゴム材については各種試験が進められている。

なお、材料データベースに登録されている材料については、グラフ化してその特性を確認することが出来る。ここで、図 2.3 および図 2.4 にある材料におけるひずみ寿命曲線と繰返し応力-ひずみ曲線のグラフ化例を示す。

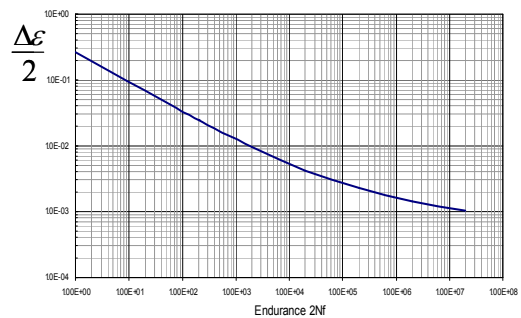


Fig. 2.3 Strain-life curve

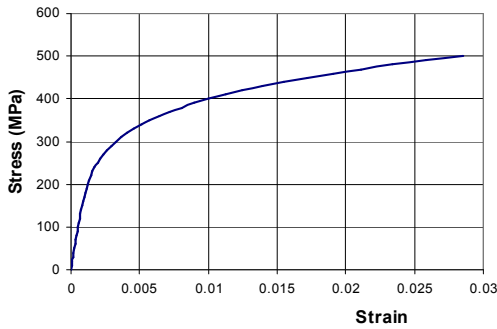


Fig. 2.4 Cyclic stress-strain curve

## 2.6 疲労解析アルゴリズム

fe-safe において、疲労寿命の計算に適用される疲労解析のアルゴリズムは、最新の研究成果により、適用する材料ごとにその材料に最適なアルゴリズムが設定されており、例えば、延性材料ではひずみベースである Brown-Miller 法、脆性材料では主ひずみ基準が設定されている。従って、ユーザは一つ疲労アルゴリズムを選択する必要が無く、手軽に疲労評価を行うことができる。式(2.1)に Brown-Miller の評価式を示す。

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_N}{2} = 1.65 \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + 1.75 \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.1)$$

ここで、 $\Delta\gamma_{\max}$  は最大せん断ひずみ範囲、 $\Delta\varepsilon_N$  は最大せん断ひずみの面に垂直な垂直ひずみ、 $\sigma'_f$  は疲労強度係数、 $\varepsilon'_f$  は疲労延性係数、 $b$  は疲労教祖指数、 $c$  は疲労延性指数、 $N_f$  はき裂発生回の繰返し回数、 $E$  は弾性係数である。なお、この疲労評価手法は変更することが可能で、ひずみベース手法の他に、応力ベース手法や他の方法も選択することができる。

次に、平均応力の補正法について説明する。fe-safe では、平均応力の補正の手法として、ひずみベースの手法では、Morrow、Smith-Topper-Watson (SWT)、応力ベースの手法では、Goddman、Gerber などの手法が用意されている。また、平均応力と応力振幅の関係をテーブル入力によりユーザが定義することも可能である。更に、この平均応力の補正についても、最新の研究成果により、適用する材料ごとにその材料に最適なアルゴリズムが設定されており、例えば、延性材料では Morrow の手法が設定されている。式(2.2)に Morrow の平均応力補正式を示す。

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.2)$$

ここで、 $\Delta\varepsilon$  は全ひずみ範囲、 $\sigma_m$  は平均応力である。なお、ユーザ独自の疲労解析アルゴリズムを、新た

に開発された Plug-in 機能によって fe-safe に組み込むことも可能である。(2.8 節参照)。

## 2.7 出力

fe-safe による疲労寿命の計算終了後、最短寿命とその発生箇所の節点番号が画面に表示される。また、モデル全体の疲労寿命などの計算結果がユーザが指定したファイルに保存されるので、それを市販の Viewer (ABAQUS/Viewer, Hypermesh, MSC/PATRAN, FEMAP, FEMVIEW など) で読んで、表示させることができる。

主な出力として、各種コンター図 (疲労寿命、最大応力、最大応力/降伏応力、最大応力/引張強度、平均応力、FOS など)、FRF (Fatigue Reserve Factor)、FOS (Factor of Strength)、Haigh 線図、Smith 線図、Dang Van 線図の他に、ダメージベクトル図、生存保証曲線なども出力可能である。

ここで、出力例として、図 2.5 に ABAQUS/Viewer を用いて表示した疲労寿命コンター図を示す。コンターレベルが小さい領域 (赤い領域) ほど寿命が短いことを表わしている。コンターレベルは疲労寿命回数の対数表示である。このように、寿命のコンター図を表示することにより、き裂の発生点とその発生時期を視覚的に確認することができる。

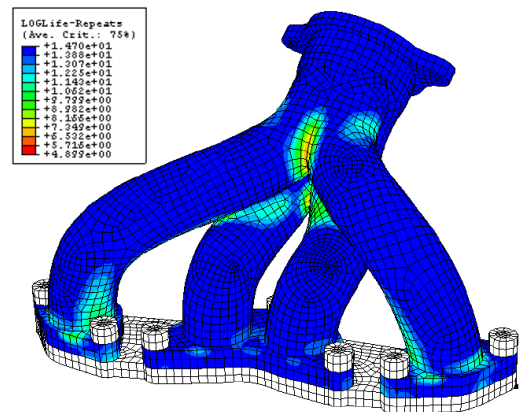


Fig. 2.5 Fatigue life contour plot

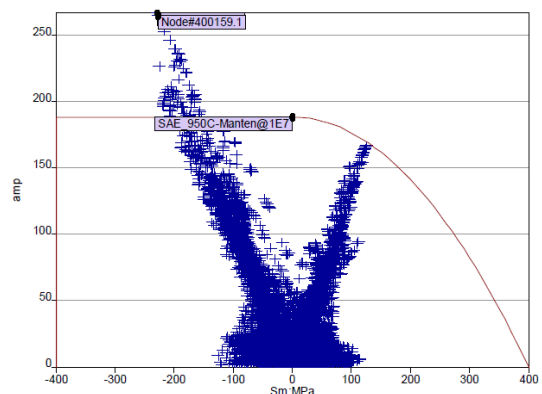


Fig. 2.6 Infinite life envelope and Haigh diagram

また、図 2.6 は無限寿命限度ライン（疲労限）に Haigh 線図を重ねた出力例であり、縦軸は応力振幅、横軸は平均応力を取り、全評価節点についてプロットしたものである。ここで、疲労限ラインの内側にプロットされた節点は無限寿命であることを表わす。また、疲労限ラインの外側にある節点の内、最短期間の節点番号が図に示されている。

## 2.8 その他の機能

fe-safe に用意されているその他の機能として、材料表面の状態の設定として、表面粗さや残留応力の有無とその大きさを設定することが出来る。

また、標準の解析法をテンプレートに保存することが出来るので、僅かな操作だけで使用することが出来る。更に、バッチ処理が可能なので、パラメータを変更して多くのジョブを実行するようなケーススタディーに対しても容易に対処することが可能である。

ここで、2011 年には最新の Version6 がリリースされた。この Version6 の新機能として、Plug-in 機能がある。これは、fe-safe をカスタマイズする機能であり、FORTRAN や C++ によりプログラムを書き、fe-safe の外部ライブラリーとして組込むものである。これにより、ユーザは独自の疲労解析アルゴリズムを fe-safe の機能の一部として利用することが可能になる。

## 2.9 動作環境

fe-safe は、Windows, Linux, Unix 環境の PC, HP, Sun, IBM-AIX, SGI などで使用することが出来る。また、ライセンス形態は、ノードロックとネットワークに対応している。更に、マルチプロセッサにも対応しているので、大規模な問題でも非常に短時間で演算することが出来る。

## 3 fe-safe のオプション・モジュール

fe-safe には、下記に示す幾つかのオプション・モジュールがあり、様々な疲労の問題に対応することが可能である。下記に fe-safe のオプション・モジュールについて、その概要を紹介する。

### 3.1 fe-safe/Verity

fe-safe<sup>TM</sup>/Verity®は、継手やスポット溶接などの溶接構造物の疲労寿命解析ツールで、等価構造応力を使用することにより、溶接継手の形式、荷重形態、母材の材質や板厚に関係なく、一つのマスターS-N 線図だけで疲労寿命を評価することができ大きな特徴である。また、これは、米国の Battelle 研究所の Dr. Pingsha Dong によって開発された、FEM のメッシュに依存しない革新的な構造解析手法を取り入れたモジュールであり、ASME の Section VIII, Division 2, Part 5 に採用されている。この手法の詳細については、改めて第 4 節で詳しく述べる。

### 3.2 fe-safe/TMF

fe-safe/TMF は、ピストンやエグゾーストマニフ

ールド、シリンダーヘッドなどの高温環境下に晒される機器において、材料の温度依存およびひずみ速度、応力緩和、ひずみによる劣化の影響を考慮することができる完全熱・機械疲労解析プログラムである。また、非定常弾性 FEM 解析結果で得られた応力および温度履歴を読み込み、応力履歴と温度履歴のフェーズの依存性を考慮し、時間依存の疲労寿命の計算法により疲労ダメージを計算する。

### 3.3 fe-safe/TIRBOLife

fe-safe/TURBOLife は、高温環境下でのクリープ損傷と疲労損傷の相互作用を評価するツールで、米国の Serco Assurance 社と共同で開発された。クリープ損傷、疲労損傷およびクリープと疲労の相互作用を評価するためのクリープ疲労アルゴリズムを利用して、原子力発電所コンポーネント、発電所ボイラー、ガスタービンプレード、自動推進の排気コンポーネントおよびターボチャージャー等の高温環境下に疲労寿命予測に適用することができる。クリープ損傷の評価では、クリープ延性消耗則またはひずみ範囲分割法により計算される。

### 3.4 fe-safe/Rotate

fe-safe/Rotate は、自動車のホイールやベアリング、シャフトなどの軸対象の回転構造に対し、軸対象の利点を活かして回転体の製品の疲労評価のスピードアップを図ることができる。FEM 解析は、回転問題に対し、荷重の載荷位置を対称角より小さな角度だけずらした幾つかの単一の静的解析を行なう。fe-safe は、あたかも異なる方向のシーケンスを通じてモデルが回転したかのように、追加の応力結果のシーケンスを自動生成する。

### 3.5 fe-safe/Composite

近年、飛行機をはじめ複合材を使用した製品が多くなり、複合材 (Composite) の疲労解析の需要が増している。fe-safe/Composite は、そのような背景から、新たに開発された複合材の疲労解析モジュールであり、米国の Firehole Technologies 社からライセンス供与されているものである。

fe-safe/Composite は、1 方向に積層した複合構造に対して適用することができ、各層の積分点ごとに寿命を計算する。このとき、材料特性は、静的な複合積層特性と多重連続体理論によって基づいて設定され、2 方向の破壊モードを特徴づけるために 2 つの S-N 線図が使用される。また、応力は多重連続体理論を用いて、FEA モデルの各積分点での平均層応力から計算され、等価疲労応力に変換されて疲労寿命が計算される。

## 4 溶接継手の疲労評価法

溶接継手の疲労寿命を予測する手法として、JSSC の疲労設計指針に基づき、溶接継手の形式や荷重モードごとに分類された疲労曲線と公称応力を用い

る手法がある。また、公称応力が定義できないような複雑な構造継手に対しては、溶接のビード部近傍の母材の応力から外挿により求めるホットスポット応力が使用される。しかし、このホットスポット応力は FEM のメッシュに依存することが指摘されており、使用には注意が必要である。それに対し、局所的な応力集中を含まず、構造に起因して生じる構造応力が提案され、FEM のメッシュに依存しない手法として近年注目されている。

このような状況において、この構造応力を等価構造応力に発展させた手法が、米国の Battelle 社によって開発され、英国の Safe Technology 社の疲労寿命評価ツール fe-safe/Verity として製品化された。この等価構造応力を用いれば、継手の形式、荷重形態、母材の板厚や材質などに関係なく、溶接継手の疲労寿命曲線を 1 本のマスター S-N 線図だけで表わされる利点がある。次節以降で、この等価構造応力を用いた手法について、算出法や特徴および利点などについて紹介する。

#### 4.1 溶接止端部における応力分布

構造応力法は、図 4.1 に示す溶接止端部のような疲労破壊が発生し易い場所の応力集中を解析するために使用される。

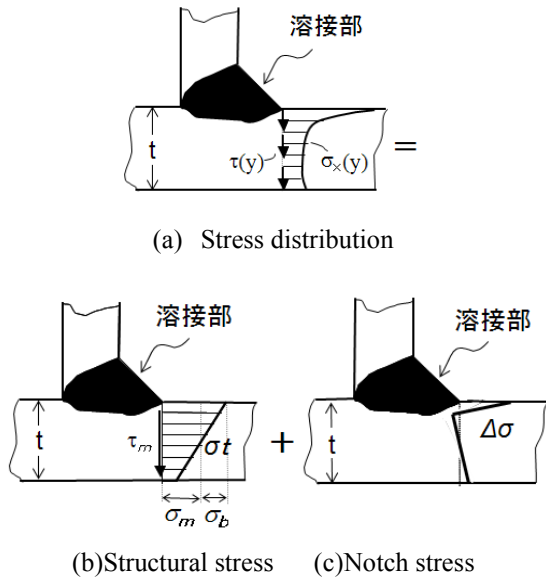


Fig. 4.1 Definition of the structural stress

まず、図 4.1 に示すように、溶接止端部における板厚内の応力分布(a)は、構造応力(b)とノッチ応力(c)の和を取って、 $\sigma = \sigma_t + \Delta\sigma$  と表わされると仮定する。ここで、(b)の構造応力は、破壊力学における等価遠方場応力に相当する平衡-相当応力状態を表わし、同じ場所での一般的な公称応力を表わす。一方(c)のノッチ応力は、溶接止端部の応力状態が、微小なき裂が存在した場合の応力状態と同等であると

想定すると、ノッチ効果に起因する自己平衡応力と呼ばれるき裂面に生じる表面力と等価である。

#### 4.2 構造応力の算出法

まず、構造応力の算出法について説明する。変位に基づく有限要素法において、各要素の節点力やモーメントは、各節点位置での釣り合いを満足している。従って、構造応力(平衡-相当応力)を膜成分と曲げ成分の和の形で表わすと、着目位置での節点力とモーメントを用いて計算することが出来る。

式(4.1)に構造応力  $\sigma_s$  の計算式を示す。

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_{y'}}{t} + \frac{6m_{x'}}{t^2} \quad (4.1)$$

ここで、 $\sigma_m$  は膜応力、 $\sigma_b$  は曲げ応力、 $t$  は母材の板厚、 $f_{y'}$  と  $m_{x'}$  は溶接止端部に沿った局所系(図 4.2 参照)におけるラインフォースとラインモーメントである。

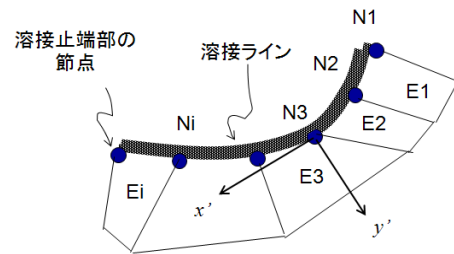


Fig. 4.2 Resolved nodal forces

このラインフォースは、シェル/プレート要素の場合、式(4.2)のマトリックスを解いて求められる。

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{l_1}{6} & \frac{l_1+l_2}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{l_2+l_3}{3} & \frac{l_3}{6} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{l_n}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

ここで、 $F_i$  は溶接止端部上の節点  $i$  の局所系  $y'$  方向の節点力、 $l_i$  は要素  $E_i$  の辺長、 $f_i$  は溶接止端部に沿った局所系  $y'$  方向のラインフォースである。なお、ラインモーメントも式(4.2)と同様な手法で求めることができる。このように求められた構造応力は、FEM 解析で得られた着目点の節点力から求められるため、FEM で直接求められた応力やひずみと異なり、メッシュの依存性が低いことが特徴である。

#### 4.3 等価構造応力の算出

次に、等価構造応力の算出法について説明する。

fe-safe/Verity においては、溶接部における疲労寿命をき裂発生寿命とき裂進展寿命の和として考える。ここで、溶接止端部に微小なき裂が存在し、遠方場応力（公称応力）として構造応力が作用している溶接部のき裂進展寿命を考える。

図 4.1 に示した応力分布について、遠方場応力の応力拡大係数  $Kn(\sigma)$  およびノッチ応力による応力拡大係数  $Ks(\Delta\sigma)$  とき裂長さ  $a$  の関係を無次元化すると図 4.3 のような分布となる。ここで、この構造応力における応力拡大係数とノッチ応力における応力拡大係数の比を応力拡大係数の倍率係数として、 $Mkn = Ks(\Delta\sigma) / Kn(\sigma)$  と定義する。

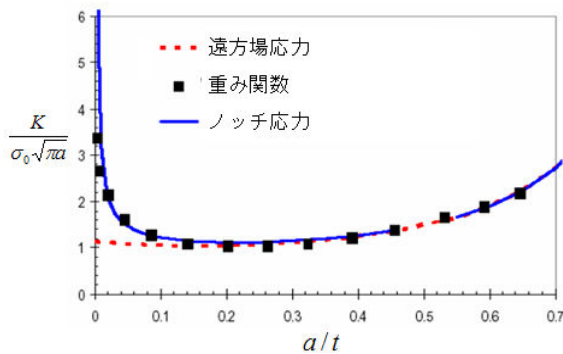


Fig. 4.3 Specimen compliance

次に、この  $Mkn$  をパリズ則に導入すると式(4.3)となる。

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (M_{kn})^n \cdot (\Delta K_n)^m \quad (4.3)$$

ここで、式(4.3)は修正パリズ則と呼び、 $C$  は材料定数、 $m$  はパリズ指数であり 3.6、 $n$  は短いき裂成長速度と長いき裂成長を統合するもので 2 と設定される。また、遠方場応力拡大係数は、構造応力を用いて次式で表わされる。

$$\Delta K_n = \sqrt{t} \cdot \Delta\sigma_s \cdot [f_m(a/t) - r(f_m(a/t) - f_b(a/t))] \quad (4.4)$$

ここで、 $f$  はコンプライアンス関数、 $r$  は荷重比であり、 $r = \sigma_b / (\sigma_m + \sigma_b) = \sigma_b / \sigma_s$  と表わされる。式(4.3)をき裂長さ  $a$  で積分し、式(4.4)を考慮すると、最終破壊に至る寿命は次式で求められる。

$$N = \int_{a/t=0}^{a/t=1} \frac{t \cdot d(a/t)}{C \cdot (M_{kn})^n \cdot (\Delta K_n)^m} = \frac{1}{C} \cdot t^{\frac{1-m}{2}} \cdot (\Delta\sigma_s)^{-m} \cdot I(r) \quad (4.5)$$

上式を整理すると、

$$\Delta\sigma_s = C^{\frac{1}{m}} \cdot t^{\frac{2-m}{2m}} \cdot I(r)^{\frac{1}{m}} \cdot N^{-\frac{1}{m}} \quad (4.6)$$

ここで、 $\Delta\sigma_s$  を等価構造応力と呼び、 $\Delta\sigma_s = C^{\frac{1}{m}} \cdot N^{-\frac{1}{m}}$  と置き、上式を整理すると、最終的に、等価構造応力は次式から求めることができる。

$$\Delta\sigma_s = \frac{\Delta\sigma_s}{t^{\frac{2-m}{2m}} \cdot I(r)^{\frac{1}{m}}} \quad (4.7)$$

ここで、 $I(r)$  は荷重比  $r$  の無次元関数であり、継手に作用する負荷モードの効果を表わす。式(4.8)に  $I(r)$  の計算式を、図 4.4 に  $I(r)$  と  $r$  の関係グラフを示す。

$$I(r) = \int_{a/t=0}^{a/t=1} \frac{d(a/t)}{(M_{kn})^n \cdot [f_m(a/t) - r(f_m(a/t) - f_b(a/t))]^m} \quad (4.8)$$

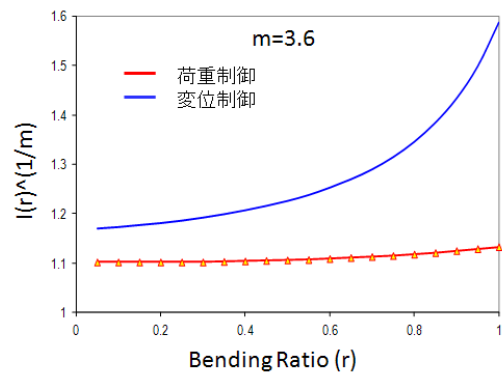


Fig. 4.4 I(r) distribution

#### 4.4 マスター-S-N 線図

図 4.5 は、継手タイプ、荷重モード、母材の板厚が異なる様々な試験タイプの疲労試験結果を、公称応力範囲で整理したものである。これより、公称応力で整理した場合、S-N 線図のバラツキが大きいことが判る。

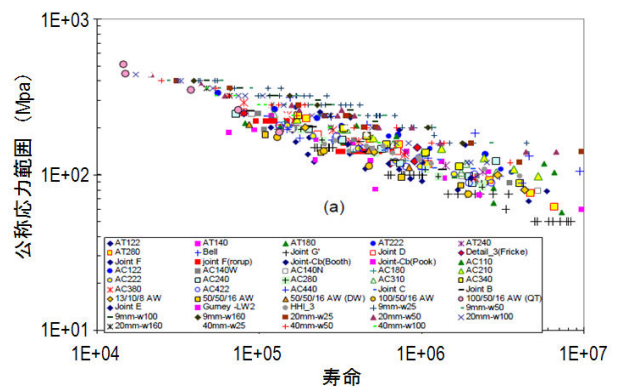


Fig. 4.5 Nominal stress

一方、図 4.6 は、同じ試験結果を、式(4.7)で示される等価構造応力で整理したものであり、S-N 線図

のバンド幅が図 4.5 より狭くなっていることが判る。

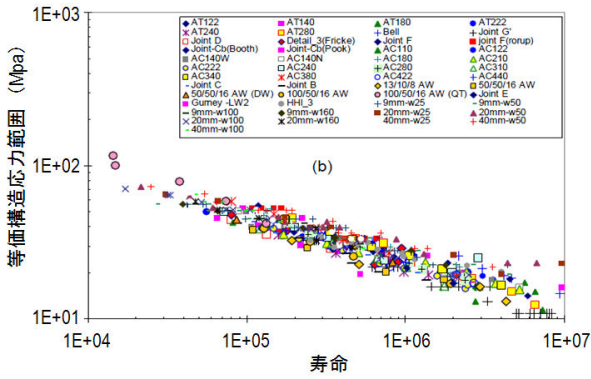


Fig. 4.6 Equivalent structural stress

これより、この等価構造応力を用いれば、継手の形式、荷重形態、母材の板厚や材質などに関係なく、溶接継手の疲労寿命を 1 本のマスター S-N 線図だけで評価できる。なお、これは 800 を超す材料試験によって検証されており信頼性が高い。

### 参考文献

- (1) John Draper : Modern Metal Fatigue Analysis, EMAS Publishing, ISBN:0947817794
- (2) 日本材料学会 疲労部門委員会 : 初心者のための疲労設計法