

【整番】 SE-03-TM-001	【標題】 ASME 系コードにおける代替解析のプロフィール
分類：構造(解析評価)／種別：技術メモ	作成年月：H30.11／改訂：Ver0.0 (H31.2) 作成者：N. Miyamoto

全 25 枚

1. はじめに

周知のごとく圧力容器/圧力配管の設計には「規格による設計(Design by Rule)」と「解析による設計(Design by Analysis)」の2つの流れがあり、いずれもコードルールに組み込まれている。前者の場合は公式運用や設計法がルール化されており設計者の任意性は抑制される。一方、後者の場合はかなり概念的な側面が目立ってくる。特に弾性解析から非弾性解析に踏み込むとこの傾向が強くなる。

コードルールにおける解析は一般に弾性解析である。弾性解析(弾性計算)で得られた応力をコードで定める許容基準で評価し、許容を満たしていないときは設計をリセットする。通常は1~3回のトライで許容基準は満たされることが多く、特に新規設計であれば構造強化や厚肉化で対処できる。然るに例えば運転中にコロージョンやエロージョンによって減肉が進行して許容基準を満たさなくなることも考えられる。その場合、運転を直ちに停止して設備を更新できればよいが、場合によっては是正が困難なことも多い。また激しいコスト競争に曝され薄肉軽量化に向かわざるを得ないこともある。その場合、コードの弾性解析には越すに越せない限界がありこれ以上コストが切れないことも多い。そんなとき ASME 系コードでは次のような代替解析とその評価が利用できる。

- ① 1次応力制限が満たされない時 → 崩壊荷重解析 / 塑性解析
- ② 熱応力ラッチェット/進行性ゆがみ制限が満たされない時 → 塑性解析 / シェークダウン解析
- ③ 「1次+2次」応力制限即ちシェークダウン規定が満たされない時 → 簡易弾塑性解析 / 塑性解析
- ④ ピーク応力範囲が過大で疲労評価が満たされない時 → 修正ポアソン比解析

代替解析には非弾性解析(→弾塑性解析や塑性解析)が含まれる。非弾性解析は概して弾性解析よりも難しく材料依存性/計算機依存性が強くなるために一般の設計者には不向きである。そのためできるだけ弾性解析で対処しそれでもクリアできない時に代替解析をその逃げに使う考えが一般的である。従って設計のルーチンワークとしてはその適用頻度は低いが、設計・製作・運転の様々の局面でいわゆる“限界荷重”あるいは“最小肉厚”(*0)が取り沙汰されることを考えれば、その内容を理解しておくことは決して徒勞ではないと思われる。そこでコードの代替解析部分に焦点をあて関係資料を集めて少し掘り下げてみたい。なおここでは ASME 系の代表コードとして周知の「JIS B 8266 圧力容器の構造—特定規格」付属書 8 (以下付属書 8 と略記)を使用する。

- (*0) プラント設備では、流れ加速腐食やエロージョン・コロージョンなどによる内部の減肉現象がありその許容限界をどこに採るかという問題が常在している。



2. 代替解析の規定内容とその流れ

付属書 8 の代替解析規定をピックアップし添付 A にまとめた。端的に云えば[3.5 塑性解析の適用]の規定はかなり錯綜していて判りにくい。そこでこの規定を手順化してみるとチャート 1 のようになる。このチャートのフローにそって付属書 8 の規定内容を概括的にながめてみる。

- (1) 付属書 8 では”塑性解析の適用”となっているが、実際は 弾性解析結果の許容オーバーすなわち 付属書 8 の 2.3 「基本的な応力強さの許容限界」及び 2.4 「特別な応力の許容限界」からの逸脱に対する救済措置(代替措置)全般を規定したもので、塑性解析の適用だけに限定されない(タイトルとしては誤解を招く?)。非弾性解析による代替の背景には、通常の弾性解析/評価がかなり安全裕度を持っている事実がある。
- (2) 設計手順としてはまず非弾性解析による代替措置に踏み切るか否かの判断がくる。公式化された理論解の運用は限られるので FEM が用いられることが多いが、たとえば馴染みの少ない塑性解析を FEM で適用するとなると通常的设计者には負担になる。一方、簡易弾塑性解析で許容オーバーをし上げる見込みがあれば、弾性解析の結果が流用できるからあまり負担にはならない。また設計変更で容易に対処できる場合もあるから選択肢は決してひとつではない。
- (3) 5つの代替措置はケースバイケースで各許容オーバーに対応しており必ずしも同列ではない。許容オーバーには2つのタイプすなわち 1次荷重(機械荷重)によるもの と 繰返し荷重によるものがある。

前者の場合、機械荷重による一般1次膜応力と(1次局部膜+1次曲げ)応力に関しては崩壊荷重による方法が適用されるが、1次局部膜応力に関しては2次応力的な性格があって派生的に塑性解析による方法も適用することができる(3.2(1)項参照のこと)。

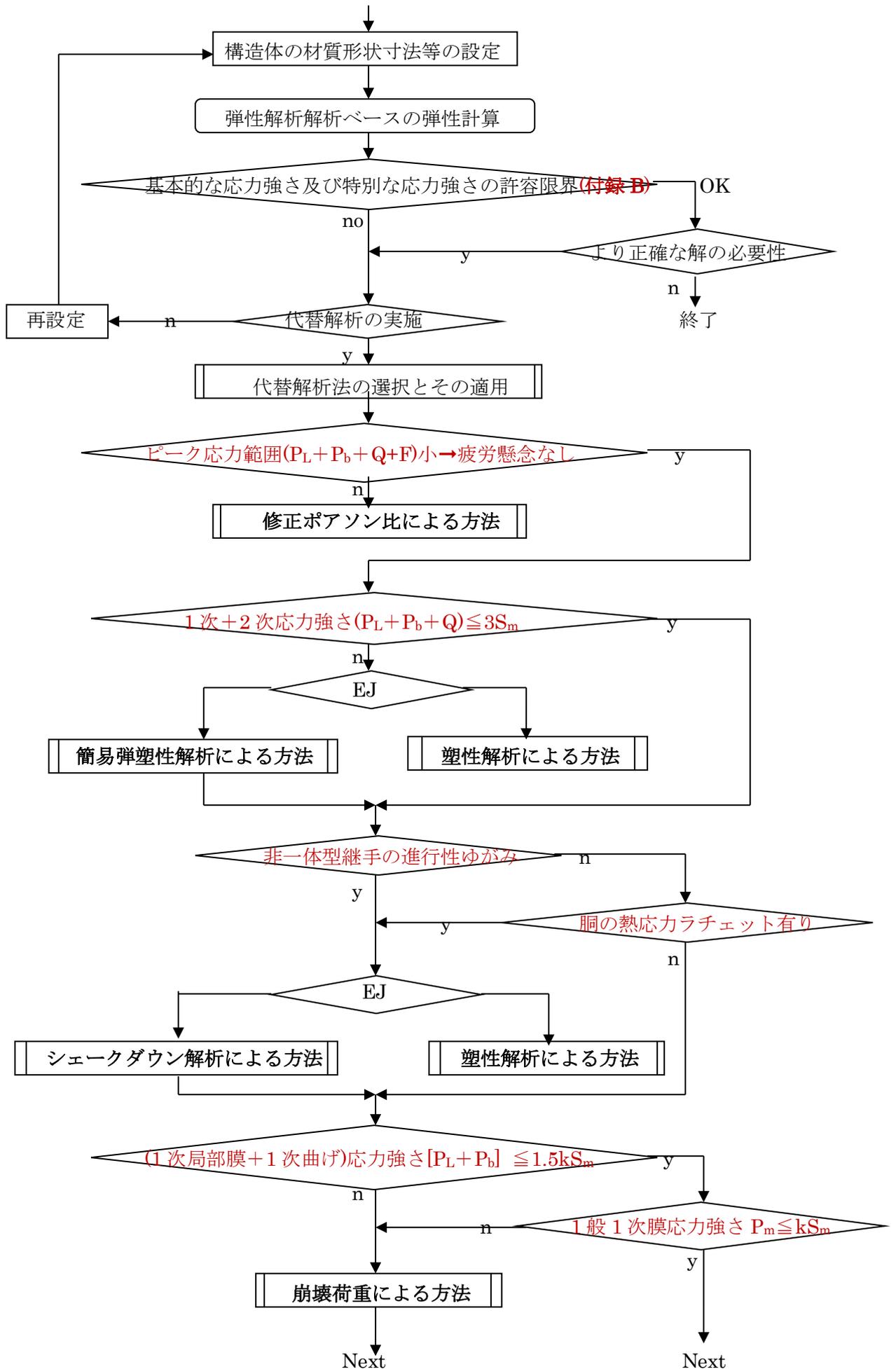
後者の場合、次のように各許容オーバーに対しそれぞれ4つの方法が適用できる。

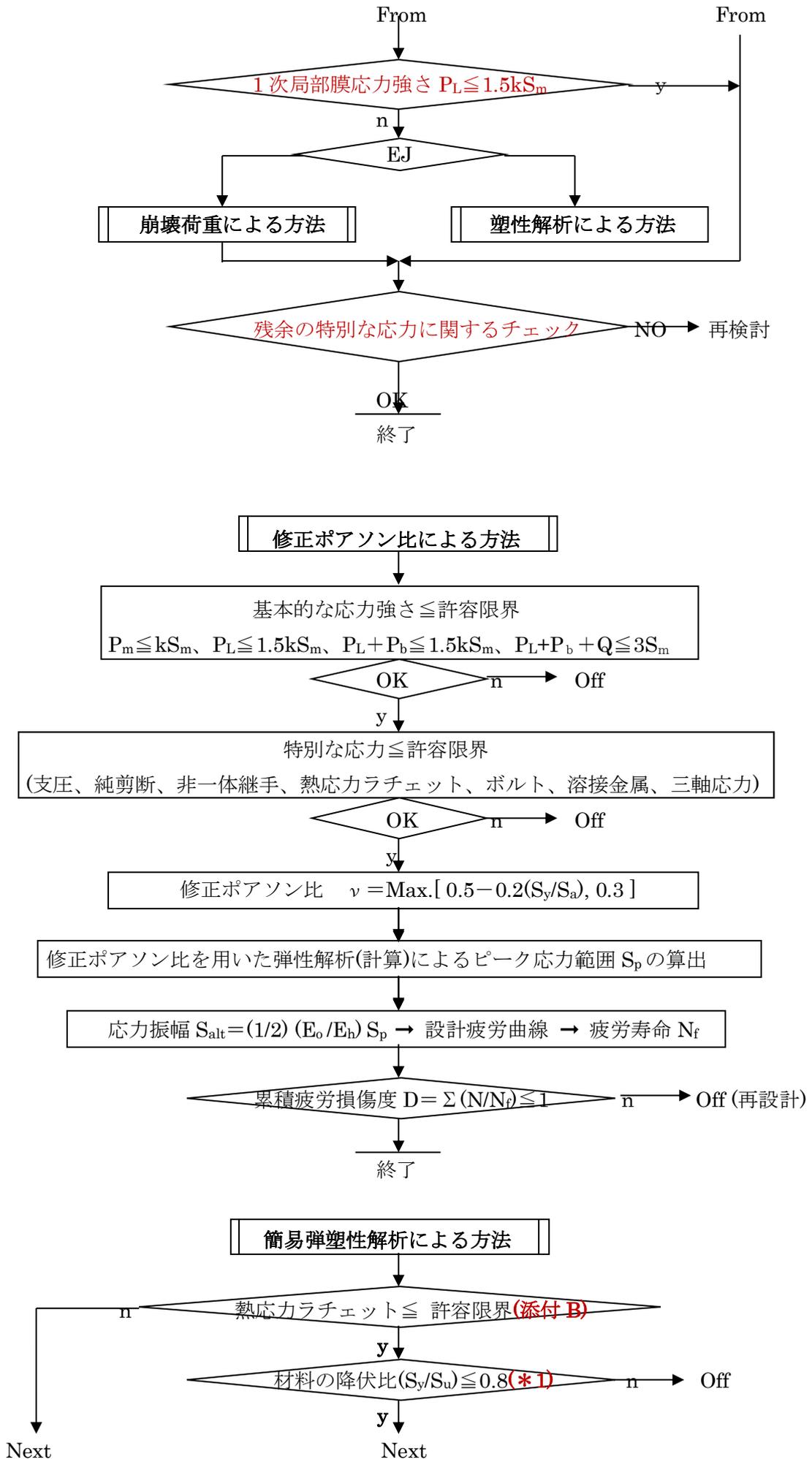
- ① ピーク応力範囲オーバー(疲労の恐れ)→ 修正ポアソン比による方法
 - ② (1次+2次)応力強さオーバー(塑性サイクル化)→ 簡易弾塑性解析 or 塑性解析による方法
 - ③ 非一体継手進行性ゆがみ/熱応力ラチェット→ シェークダウン解析 or 塑性解析による方法
- 方法が2つあってどちらを選択するかはエンジニアリングジャッジ(EJ)に依存している。

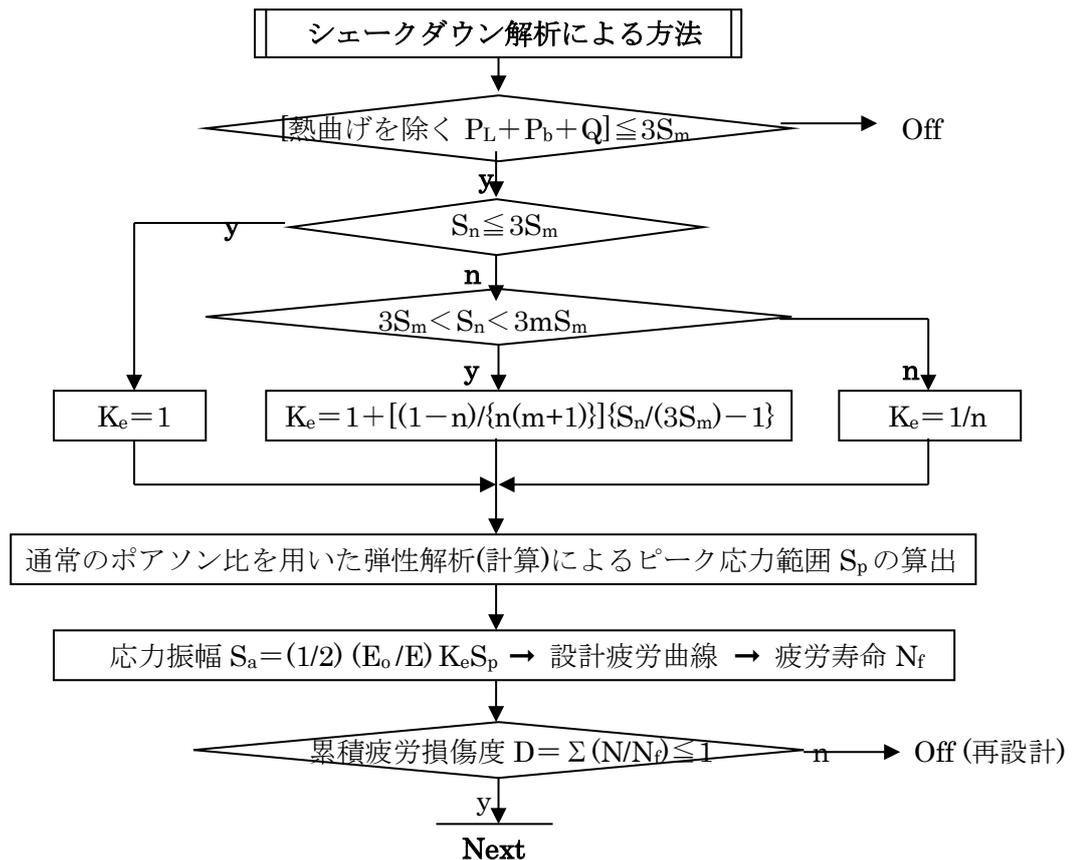
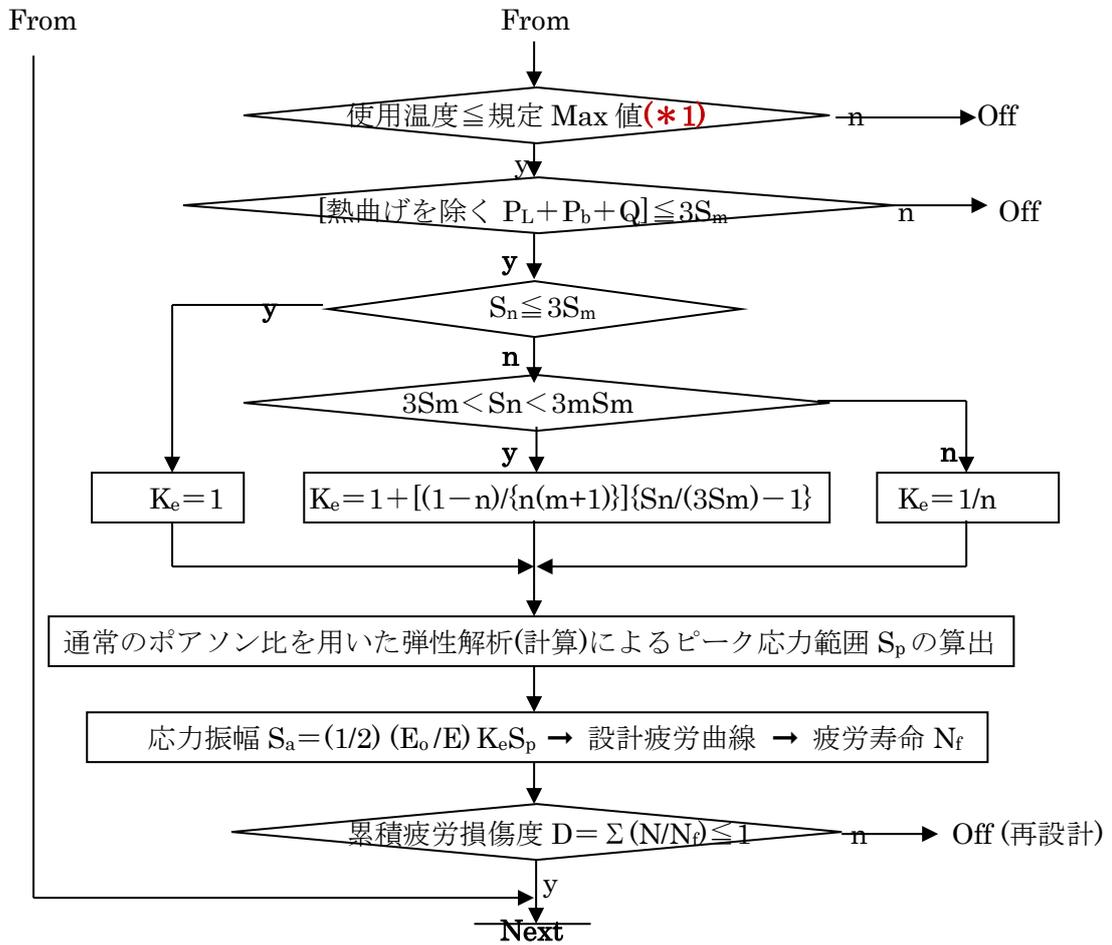
- (4) チャートは、まず繰返し荷重ケース①→②→③、次いで機械荷重ケースの順で各方法の適用を表示している。この流れの中で、繰返し荷重ケースの修正ポアソン比による方法と塑性解析による方法は行き止まりになっているが、これらのルーチンを見ればわかるようにルーチンの中に機械荷重ケースの措置が含まれていてフローとしては完結している。なお、フローの最後で“残余の特別な応力のチェック”を設けたのは、規定のロジックに不明があり漏れ落ちが起きる懸念があるからである。

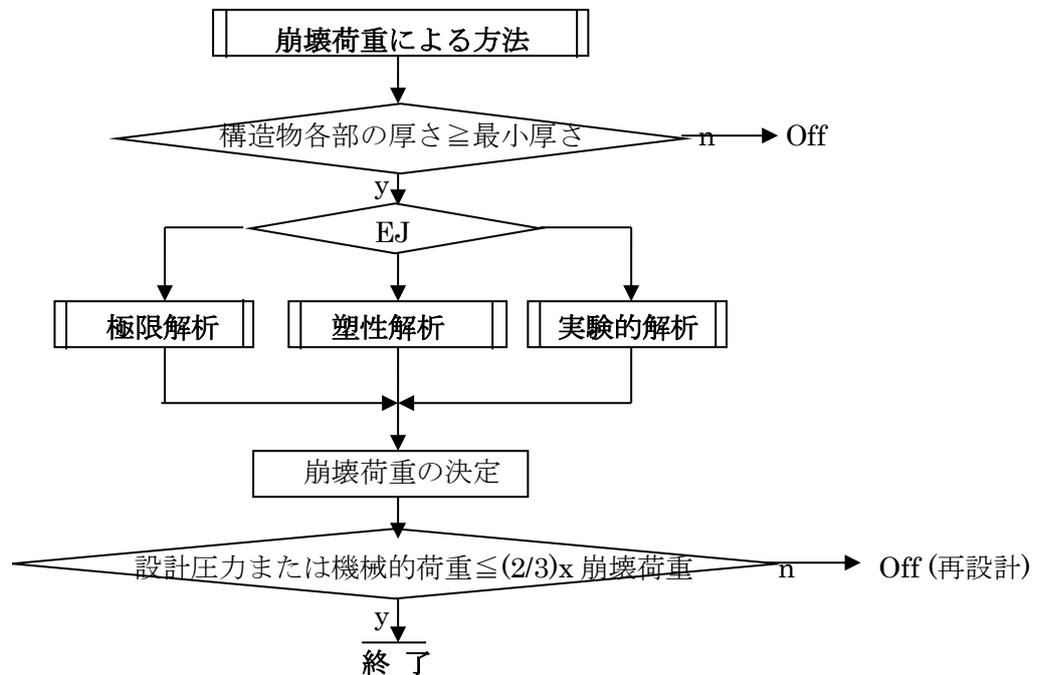
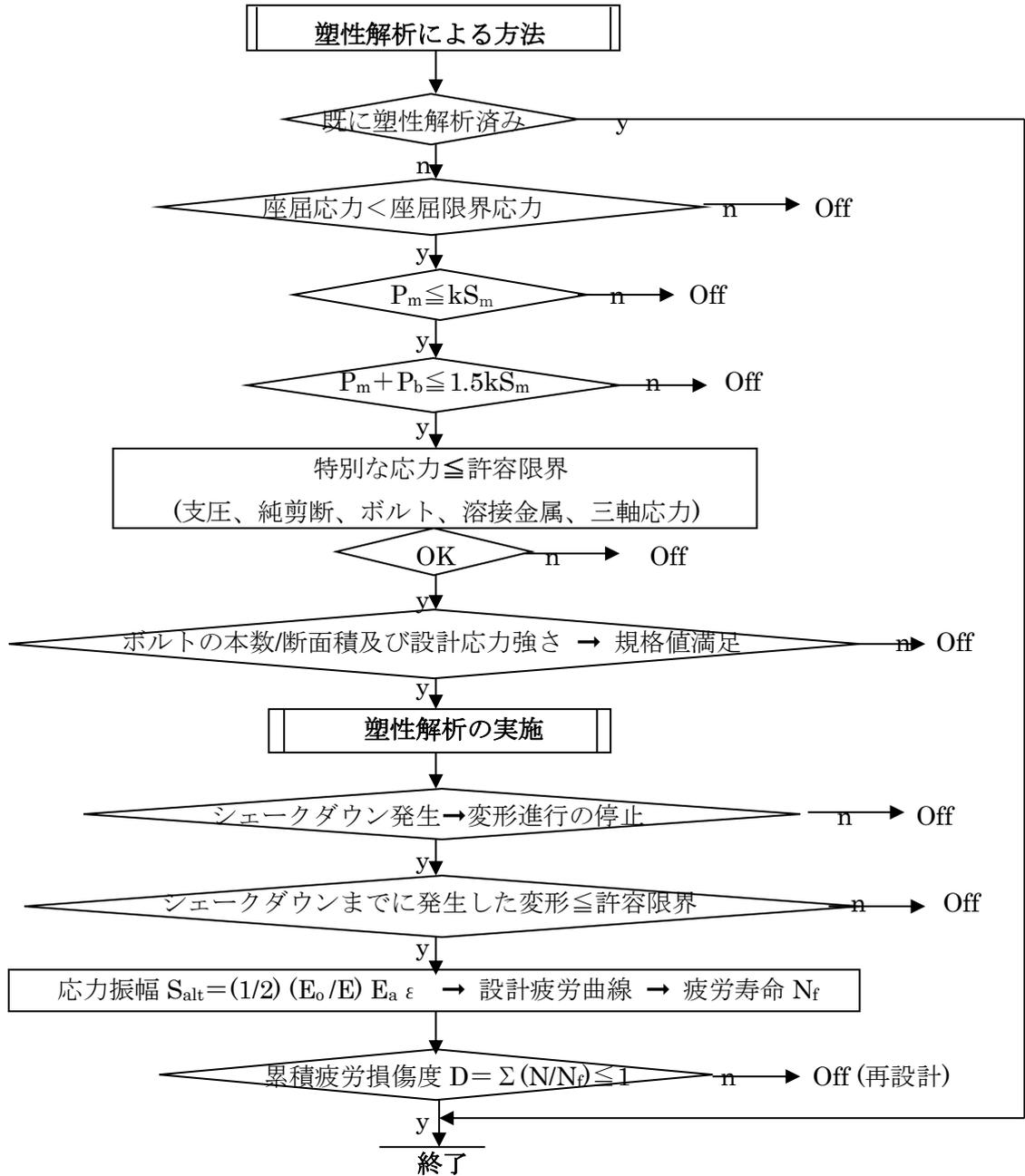
なお、各方法のルーチンについては次の章で詳しく説明する。

チャート1 代替解析の適用手順 (JIS B8266 付属書 8)









【 記号説明 】

EJ → 工学的判断を指す。構造物の状態などを考慮に入れてアクションを選択する。

P_m = 1次一般膜応力強さ、 P_L = 1次局部膜応力強さ、 P_b = 1次曲げ応力強さ、 Q = 2次応力強さ、 F = ピーク応力強さ、 S_p = ピーク応力範囲、 S_m = 基本設計応力強さ、 k = 割増係数 (≥ 1.0)、 ν = 修正ポアソン比、 S_y = 平均温度における材料降伏点、 S_u = 平均温度における材料引張強さ、 K_e = ひずみ集中係数、 m, n = 材料による定数、 S_a = 予想繰返しサイクルに対する設計曲線上の応力振幅、 S_{alt} = 運転サイクルでの応力振幅、 ϵ = シェークダウン後の最大主ひずみ範囲、 E_o = 設計疲労曲線における縦弾性係数、 E = 平均運転温度における縦弾性係数、 N_f = 疲労限界サイクル数、 N = 運転サイクル数、 D = 累積損傷係数、

- (*1) 降伏比(S_y/S_u) > 0.8 ではひずみ軟化が起きる。また使用温度 > 規定 Max 値すなわち
炭素鋼, 低合金鋼, マルテンサイトステンレス鋼 → 371°C以上
オーステナイト系ステンレス鋼, Ni-Cr-Fe 合金, Ni-Cu 合金 → 427°C以上
ではクリープが起きる。簡易弾塑性解析で扱えない軟化/クリープは除外する。

3. 各代替解析のプロフィール

3.1 崩壊荷重による方法⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

- (1) 崩壊荷重法は専ら、1次応力(1次荷重)制限の代替法として適用される。その場合、次の3つの解析方法の何れかを用いることが付属書8に規定されている。

極限解析、塑性解析 あるいは 実験的解析

前2者は FEM 解析で、極限解析は弾完全塑性体の応力-ひずみ線図 (図 3.1(a)) を用いた弾塑性解析 (*2) である。付属書では応力-ひずみ線図の折点の降伏応力を $1.5S_m$ にとるようになっているが、これは材料試験による応力-ひずみ線図をとると降伏点が高めになると共に材料のばらつきがでてくるのを避けたもので安全措置にほかならない。コード上 $1.5S_m$ は規格最小降伏応力強さ(または 0.2%耐力)に相当し実質材料試験による降伏点よりも小さい(安全側)。また付属書では構造物によっては永久ひずみが機能低下につながることを(例えば噛合せ継手)を考え、永久ひずみの低減(→折点の降伏点低減)を意図してひずみ制限係数を乗じることを規定している(但しケースバイケース)。

一方、塑性解析は線形ひずみ硬化体の応力ひずみ線図(図 3.1(b))を用いた弾塑性解析である。この場合、降伏点の規定はないが、おそらく極限解析と同様に $1.5S_m$ ではないかと思われる。

極限解析/塑性解析いずれもそのアウトプットは荷重-変位(ひずみ)曲線図である。この曲線上に崩壊荷重を設定するが、後述するように極限解析/塑性解析で差異がみられる。

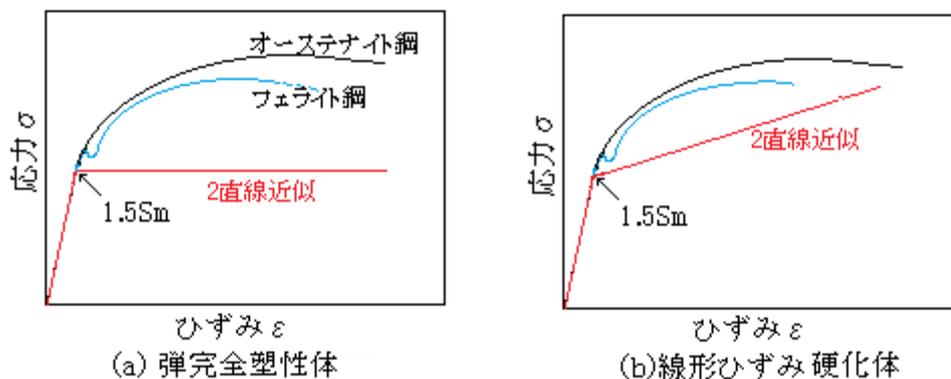


図3.1 構造物モデルの応力-ひずみ曲線

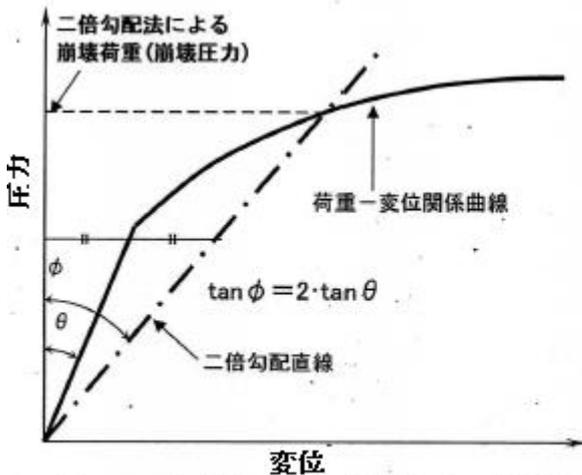


図3.2 2倍勾配法による崩壊荷重の求め方

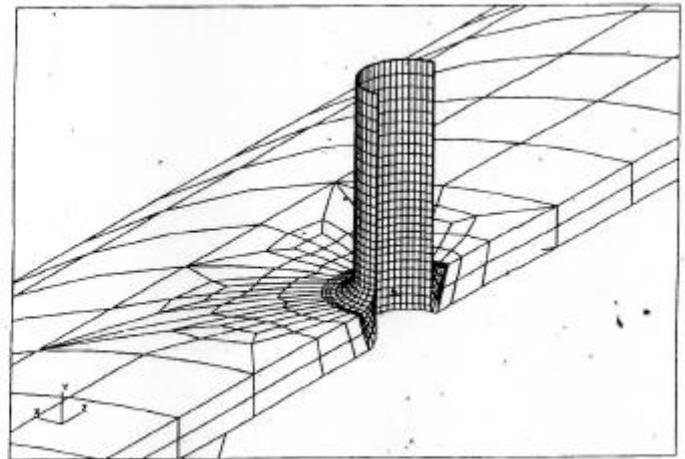


図3.3 解析モデル(メッシュ分割サンプル)

(2) 構造物に生じる1次応力(荷重)の可否は、崩壊荷重(*3)を求めこれと負荷重を比較して判断される。基本的な手順は次のようになる。

- ステップ1: 3つの解析方法の何れかを選択(複数選択も)
- ステップ2: モデル/試験体の作成、負荷条件の設定および変位着目点の選択(複数の着目点も)
- ステップ3: 解析/試験をランして変位着目点の荷重-変位曲線を作成
- ステップ4: 荷重-変位曲線に2倍勾配法(*4)などを適用して崩壊荷重の下限界を設定
- ステップ5: 崩壊荷重の下限界に安全係数2/3を乗じ各運転荷重/試験荷重と比較して評価

ステップ1について。前述の3つの解析方法はイーブンではない。特に前2者は解析に使用する応力-ひずみ関係が異なっているがその違いから解析結果としての崩壊荷重が異なってくる。大雑把に云えば極限解析による崩壊荷重の方が約2/3程度低くなって安全側になる。極限解析/塑性解析を何れをとるかは状況による。付属書10の確性試験法による実験的解析は実サイズの試験でコスト高か

ステップ2について。解析結果は解析モデルの精粗に大きく影響される。解析事例(例えば図3.2)などを参考にメッシュ分割を行う。また崩壊荷重は最大応力発生個所で弾塑性域が拡がりその周辺の弾性域がすべて塑性化して周辺拘束が失われた状態の荷重であるから、基本的には最大応力の消長を反映した撓み変位をキャッチして荷重-変形曲線とする必要がある(付属書では構造物の構造物保持力を示すことができるものと表現している)。そのため変位着目点を予め認識しておくのがよい。解析事例から次の変位着目点が知られている(着目点のデータは比較的多い)。

- 片持ち梁(先端横荷重) → 自由端の横方向
- 両端鏡の円筒殻(内圧) → 鏡板中央頂部の軸方向
- 垂直ノズル付き円筒殻(内圧) → ノズル先端の軸方向

ステップ3について。荷重を変化させて変位をフォロー。変位着目点以外の変化にも留意。

ステップ4について。ASME系コードでは2倍勾配法が用いられている。2倍勾配法は付属書8の図7あるいは付属書10の図38に示される通り(図3.3参照)。なお、付属書8によれば2倍勾配法は塑性解析に対し指定されており極限解析では特に指定されていない。2倍勾配法は崩壊荷重の下限界を比較的lowめに(安全側に)見積もる所にメリットがあるとされているようであるが、前述のように極限解析は弾完塑性体によっており崩壊荷重を低く安全側に見積もるので結果的に過度に安全側になる傾向がある。そのために極限解析は2倍勾配法にこだわっていないように思える。実際の解析では

2倍勾配法のほかに下界漸近法あるいは弾性代償法(*4)などが採られているようだ。下界漸近法は収束性があって実際の崩壊荷重にかなり近いと云われる。

ステップ5について。安全係数2/3は十分に安全側であるが、マルチ荷重(→負荷経路/順序)の場合は決して十分とは言い難いとも云われる。

(3) FEM解析の特性とも云えるが、極限解析も塑性解析も解析モデルのメッシュ分割の粗さによって結果が異なってくる。1次応力(荷重)解析のケースで評価対象になるのは1次応力強さ(P_m, P_L, P_L+P_b)のみで2次応力強さ(Q)及びピーク応力(F)は対象外である。しかし肉厚や形状が変化する部位(いわゆる構造不連続部分や応力集中部分)が含まれそこで発生する2次応力成分やピーク応力成分を分別して排除するのはすこぶる難しい。本来 P_L, P_b には Q 的な所があるが、仮に荷重特性のみで考えれば内圧のような機械荷重によって生じる応力はなべて1次応力と考えれば恐らく構造健全性の上では割り切れる。なお本来の Q 的な応力やピーク応力は、要素分割(メッシュ分割)を粗めにする事で軽減することができる。重要とされる肉厚方向の要素分割は通常、

- ・断面要素の変位関数が線形るとき→4分割以上
- ・断面要素の変位関数が2次関数るとき→2分割以上

とされるが、この場合でも肉厚の1/10以下の要素分割は過度にピーク応力を取り込むことになる。応力集中部でも然りでコーナーアールの1/10以下の要素分割は避けるべきとされる(面的な要素分割にも同じように経験則があると思われる)。要素分割は経験則的な色合いが強いので、先行する解析事例を参考にするのが良いと云われる。

(4) マルチ荷重に対し弾性解析では各荷重の結果を線形加算すればよい。しかし弾塑性解析では変位に非線形があるとともに大撓みも考えられるので線形加算は常に疑問視され、荷重経路(負荷順序)が議論になる。もちろん弾性解析のように荷重の比率配分を保ったまま荷重を増加させてゆく方法もあるようだがおそらくこれは微少撓みケースに限られるような気がする。ひとつの便法として図3.4のように最後に負荷した荷重の荷重-変位曲線の接線と荷重軸の交点を原点にして2倍勾配法を適用するやり方が提案されているようである。解析事例では大撓みの場合を除いて荷重経路の違いが大きく結果に影響するケースは少ないようである。

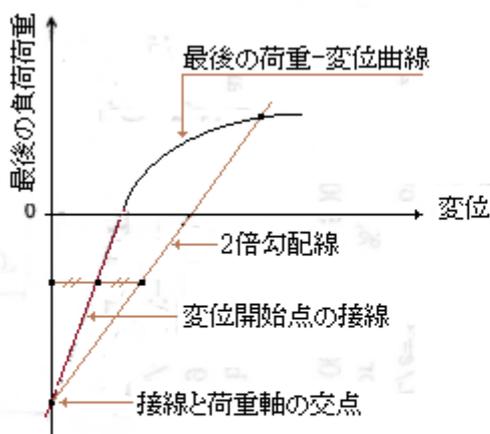


図3.4 複合荷重の場合の崩壊荷重の設定
(文献(4)引用)

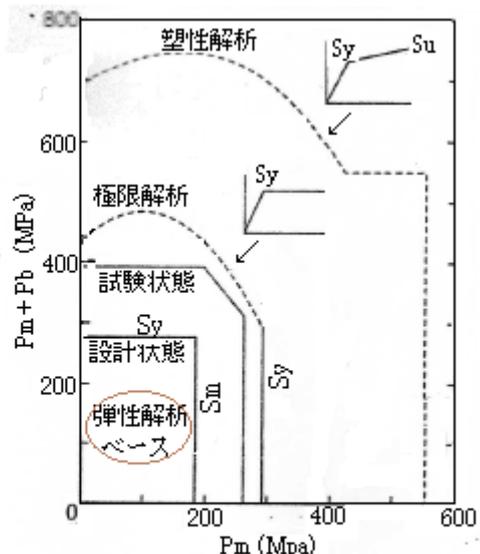


図3.5 弾性解析と2倍勾配法の許容限界比較
(文献(4)引用)

- (5) 崩壊荷重による一次荷重評価の大きなメリットは、許容限界が高くなって例えば弾性解析による評価では不可とされる構造が救済されることである。例えば高流速の内部流れに由って減肉し耐圧強度が規格を満たさなくなったティ管を更新することなく使用を延長できる。これは崩壊荷重設定のベースとしての極限解析/塑性解析が弾性域を超えて塑性領域に踏み込んだためである。図 3.5 に弾性解析による許容限界と 2 倍勾配法による許容限界の比較を示す。
- (6) 以上 弾塑性解析の情報を主に紹介してきたが TS 作成者の乏しい見聞ではこれ以上踏み込めない。括りとして弾塑性解析はむしろ弾性解析よりも容易であるという議論を紹介しておく。

弾性解析は通常、弾性解析→応力評価ライン設定(破断面想定)→応力分類→応力評価/運転状態の流れをとる。単純な 1 次元や 2 次元構造では応力評価ライン設定/応力分類は比較的簡単であるが、3 次元的な実構造では困難が多い。即ち応力評価ラインは多重化し曲面形状になり応力分類は 1 次-2 次-ピークの分離が難しくなって応力評価の確実さが失われる (TS 作成者も厚肉フランジの局部膜応力の導出に手こずった経験がある)。一方、弾塑性解析では塑性領域に位置する崩壊荷重が解析的に導かれるので、評価ライン設定-応力分類抜きで直接的に実荷重の可否が評価できる。従って解析モデルが適正化でき複合荷重の扱いなどが平準化できるのであれば、単純構造以外は弾塑性解析で扱うのが得策ではないか…

3.2 塑性解析による方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

- (1) 前節の崩壊荷重による方法は固定された 1 次荷重に関する制限を意図したものであるが、この塑性荷重による方法は変動し繰返される荷重に関する制限を意図したものがある。この場合、繰返し荷重に対する要件は次の 2 つになる。

- ① 進行性の変形が生じないこと、 ② 疲労破壊が生じないこと

前章でも述べたように①の進行性の変形が生じないなら、(1 次+2 次)応力制限、熱応力ラチェット防止および非一体継手の進行性のゆがみ防止は不要になる。ただ、塑性変形の進行停止すなわち塑性シェークダウンによってひずみ増分のない閉じられた塑性サイクル(図 3.6)が形成されても、それが疲労サイクルであることには変わらないので②の疲労評価の実施は必須である。

なお前章では 1 次局部膜応力強さ制限($P_L \leq 1.5kS_m$)も派生的に代替できるとしたが、その背景については明らかでない。しかし付属書 8 の 3.2 の定義にもある通り、 P_L は不連続部分などに発生して過度のゆがみを生じるような 2 次応力的な性格を持っているから、予め 1 次 1 般膜応力 P_m 及びその曲げ応力との和($P_m + P_b$)の制限によって 1 次応力オーバー(→延性破断)が抑制されているならば、当該局部膜応力を含むサイクルが塑性シェークダウン(あるいは弾性シェークダウン)していることを解析的に確認することで、1 次局部膜応力強さ制限($P_L \leq 1.5kS_m$)は割愛できると考えられる。

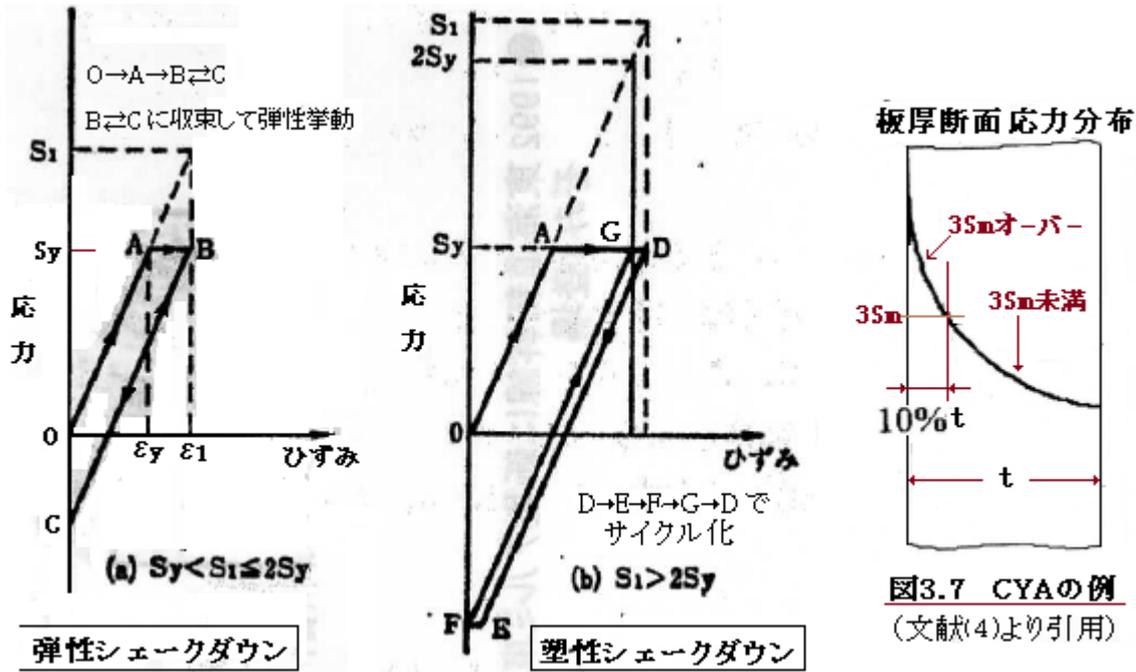


図3.6 シェークダウンのモード (テキスト(3)より引用)

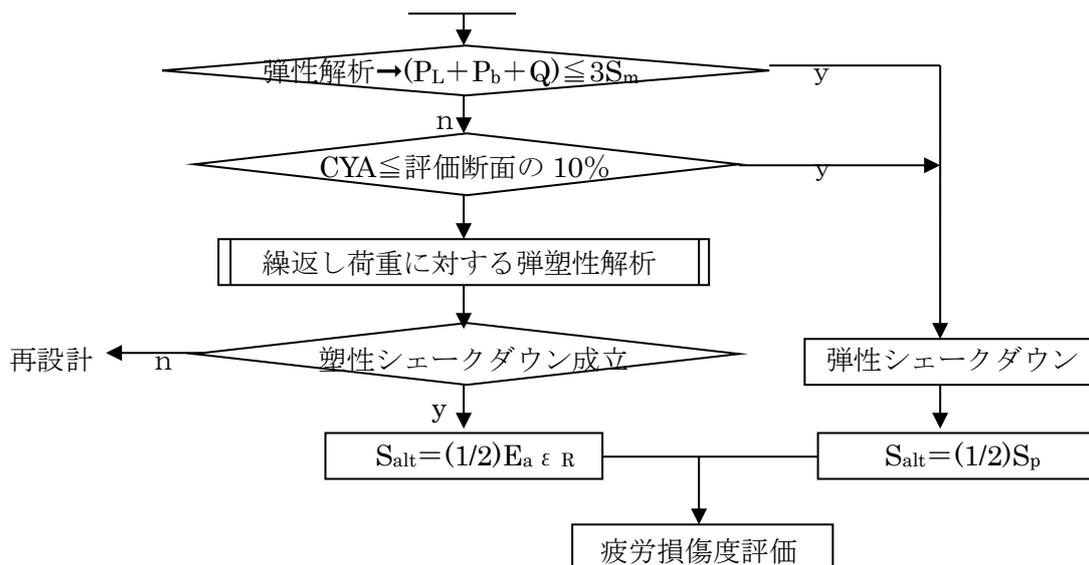
図3.7 CYAの例 (文献(4)より引用)

(2) 塑性シェークダウンは FEM による弾塑性解析によるが、その判定基準には次の 2 つがある。

- ① 荷重の繰返し毎のひずみ増分が減少傾向を示し 10^{-4} 以下になるとき
- ② 要素ごとの塑性ひずみが $[\epsilon_{eq}/(2\epsilon_y) \leq 1.0]$ になり弾性核(*6)が形成されたとき

弾性核の形成はひずみ増分零に等価とされている。解析事例では①による判定が難しく②の判定で塑性シェークダウンを確認していることが多いようだ。なお塑性シェークダウンまでかなりサイクル数が費やされることが多いようなので、付属書 8 にもある通り、蓄積される変形に歯止めを設けて不測のイベント(?) に備える必要がある。

(3) 付属書 8 によれば、弾性解析における $P_L + P_b + Q$ が $3S_m$ を越えるとすぐに塑性シェークダウンの確認というアクションになるが、実際は繰返し降伏域範囲(CYA)によるシェークダウン判定が存在している。この CYA 判定は、要素毎の最大応力強さ(ピーク応力)をモデル断面にプロットしてピーク応力範囲が $3S_m$ を越える部分が断面 10% 以内データであるとき(図 3.7) は 弾性シェークダウンが生じているものとみなし塑性シェークダウンの確認は不要とするものである。この CYA 判定を組み込んだ手順を以下に示す。



(注) E_a = 平均温度での縦弾性係数、 ϵ_R = 最大主ひずみ範囲

実際的には CYA は応力集中箇所(構造/材質不連続部/コーナーアール部)に適用されている。因みに CYA 判定は Sect.VIII系のコードには見あたらず(?), 原子力分野の解析で採られる手法と思われる。

3.3 簡易弾塑性解析による方法⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

(1) 簡易弾塑性解析による方法は、前項の塑性解析による方法と同じく繰返し荷重に関する代替制限である。両者の違いは、後者が弾性解析に殆ど依存することなく塑性解析によってシェークダウン(塑性シェークダウン)を確認し塑性ひずみを求めて疲労評価するというプロセスをとるのに対して、前者の簡易弾塑性解析は弾性解析から得られた弾性ひずみ(実際は弾性応力)を塑性ひずみ相当に補正して疲労評価する点にある。以前は塑性解析(実質弾塑性解析)は難解でコードの要求通り疲労評価を行なえるのか疑問視されており、設計現場では簡便な簡易弾塑性解析に流れてしまうことが多かった。近年の解析技術やスキルの進歩で弾塑性解析による疲労評価は相当進化しているような気がするが、それでも簡易弾塑性解析への依存は大きいように思う。以下、少し掘り下げてこの手法を議論してみたい。

(2) コード規定の背景に弾性ひずみ不変という概念がある。即ち弾性領域を少しはみでている場合、弾性応力 σ は仮想的であって σ' と明らかに違っているが、弾性ひずみ ϵ は弾塑性ひずみ ϵ' とさほど差異がなく良い近似になっていると考えである(図 3.8 参照)。この考えは $S_n \leq 3S_m$ で弾性シェークダウンしているときは適用できるが、弾性シェークダウンせず塑性サイクルに入ると適用できないと云われる。何故弾性シェークダウンの可否で別れるのか? これは、弾性シェークダウンでは構造物の全体が弾性挙動して骨格的な塑性流動化や塑性ひずみ再配分が現れず、応力集中部のひずみが弾性的なひずみ集中で近似できるためではないかと思われる。しかし $S_n > 3S_m$ では構造物全体で弾塑性挙動が起きてひずみの近似性が失われるので局部ひずみの補正が必要になる(*7)。下記で定義されるひずみ補正係数 K_e がこの補正を表わしものである。

$$K_e = \epsilon_t / \epsilon_e \rightarrow S_{alt} = (1/2)E \epsilon_t = (1/2)E \epsilon_e (\epsilon_t / \epsilon_e) = (1/2)K_e E \epsilon_e = (1/2)K_e S_p$$

ここで ϵ_t = 局部における弾塑性ひずみ範囲(= $\epsilon_y + \epsilon_p$)、 ϵ_e = 局部における弾性ひずみ範囲
 ϵ_y = 降伏ひずみ(範囲)、 ϵ_p = 塑性ひずみ(範囲)、 E = 縦弾性係数、 S_p = ピーク応力範囲
 (なお ϵ_e は弾性解析から得られた局部応力範囲に相当するひずみ範囲である)

疲労評価は、上記のように弾性解析から得られた応力振幅 $(1/2)S_p$ に K_e を乗じて修正された応力振幅 S_{alt} を用いて実施される。

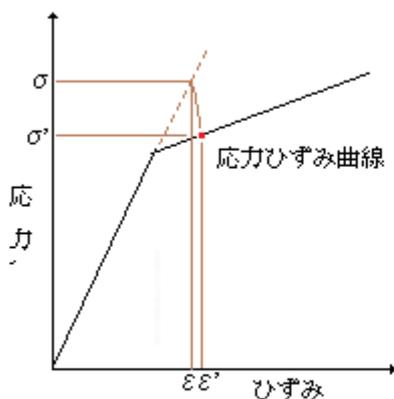


図3.8 弾性不変概念

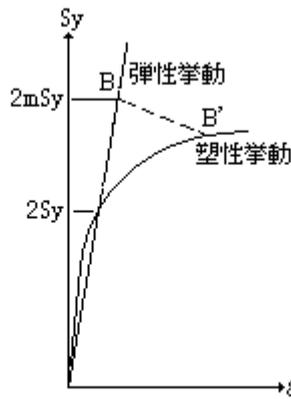


図3.9 応力/ひずみ範囲 [テキスト(2)号用]

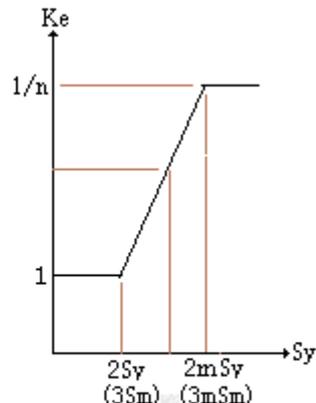


図3.10 K_e 式導入 [テキスト(2)号用]

(3) ひずみ補正係数 K_e は ASME 系コードでは下記のように規定されている。

$$S_n \leq 3S_m \text{ のとき : } K_e = 1$$

$$3S_m < S_n < 3mS_m \text{ のとき : } K_e = 1 + \frac{(1-n)}{n(m+1)} \{ S_n / (3S_m) - 1 \}$$

$$S_n \geq 3mS_m \text{ のとき : } K_e = 1/n$$

これは Langer、Target のスタディから導かれている。即ち Langer のテーパ付平板の弾塑性解から $S_n \geq 3mS_m$ において $K_e = 1/n$ をセットし、 $S_n \leq 3S_m$ における $K_e = 1$ の間を線形補間したものが上記の規定である(図 3.9 及び図 3.10 参照のこと)。

(4) ひずみ補正係数の弱点は、 S_n が $3S_m$ を少し越えた所で安全裕度が低下し、 S_n が $3mS_m$ に近づくとつれて安全裕度が過大になることである。これを是正するために新たなひずみ補正係数が提案されて JSME の原発関係規格に取り込まれている(SE-21-TM-002 参照)。ここでは Langer が行ったようなひずみ集中部分の弾塑性解析をコンピュータで行って実際に近い K_e 値を設定する方法(Kalnins の 2Y 法)を紹介しておく。併せて図 3.11 を参照のこと。

応力-ひずみ曲線上で $\epsilon_e = \sigma/E$ 、 $\epsilon_p = \epsilon_t - \epsilon_e$ とし、 $\sigma = A \epsilon^n$ とすれば

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p = \epsilon_e (1 + \epsilon_p / \epsilon_e) = \epsilon_e (\epsilon_t / \epsilon_e)$$

降伏点では $\epsilon_e = \sigma_y/E = \epsilon_y$ なので 上式は $\epsilon_t = (\sigma_y/E) (\epsilon_t / \epsilon_y)$ と書ける。ここで $\epsilon_y = (\sigma_y/A)^{1/n}$ また $\epsilon_t = (\sigma/A)^{1/n}$ なので、更に上式は $\epsilon_t = (\sigma_y/E) (\sigma / \sigma_y)^{1/n}$ と書ける。そして

塑性サイクル 1 回はハーフサイクル(0 → σ_y → σ) x2 回なので、塑性サイクルの応力ひずみ関係は

$$\epsilon_t = (2\sigma_y/E) (\sigma / 2\sigma_y)^{1/n} = (3S_m/E) (\sigma / 3S_m)^{1/n}$$

で与えることができる。この関係を用い負荷される荷重差を与えて応力集中部の弾塑性解析を行なえば応力範囲 σ に対応して塑性サイクルにおける全ひずみ(弾塑性ひずみ) ϵ_t が得られる。熱荷重の場合は予め最大応力範囲を与える温度分布を弾性解析で求めておいて その温度分布を用いて弾塑性解析して弾塑性ひずみ ϵ_t が得られる。ひずみ補正係数は $K_e = \epsilon_t / \epsilon_e$ で表されるのでこれを用いて全体の簡易弾塑性解析を行って疲労評価する。

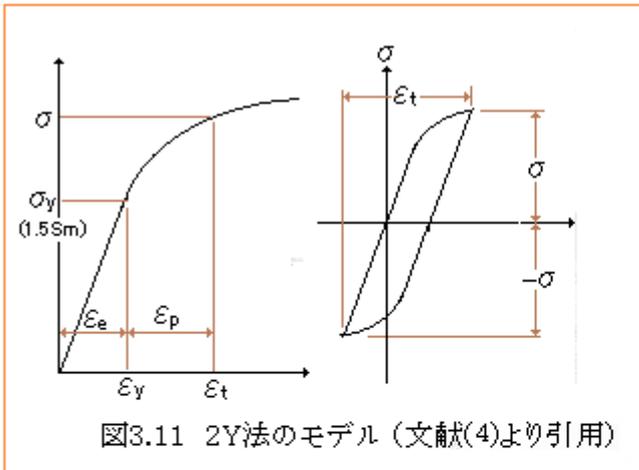


図3.11 2Y法のモデル (文献(4)より引用)

- E: 弾性領域
- S1, S2: シェークダウン領域
- P: 塑性サイクル領域
- R1, R2: ラatchet領域

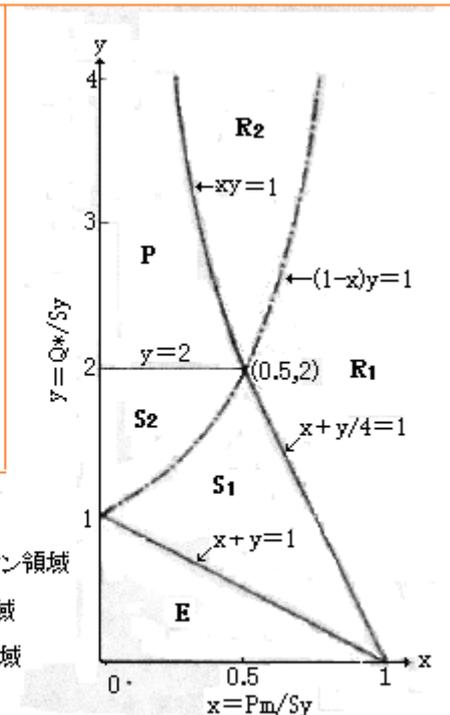


図3.12 Miller & Bree 熱応力ラatchet図 (テキスト(2)より引用)

(5) 簡易弾塑性解析による方法は1次+2次応力 $P_L + P_b + Q > 3S_m$ すなわち弾性シェークダウンしない場合の代替規定であって1次応力制限や特別な応力の制限の代替規定ではないので、この代替規定が法が成立するには弾性解析による1次応力の制限や特別な応力の制限が満足されなければならない(チャート1において塑性解析による方法がそのまま終了しているのに簡易弾塑性解析法はさらに下流の1次応力及び特別な応力の制限へ繋がっているのはこのためである)。

また、付属書8ではこの簡易弾塑性解析法的前提条件として次の4つの項目が挙げられている。

- ① 材料の降伏比(S_y/S_u) ≤ 0.8 ② 使用温度 \leq 規定 Max 値 ③ 熱応力ラチェット(*8)制限充足
④ 熱曲げを除く($P_L + P_b + Q$) $\leq 3S_m$

①はひずみ軟化を排除したもの、②はクリープの影響を回避したもの、③は塑性シェークダウンと同様の趣旨で進行性のひずみ(→ラチェッティング)を抑えるものである。また

④は前(2)項で述べた過大な塑性ひずみ再配分が起きて弾性解析から見積もられた塑性ひずみを大きく上回るひずみが派生するのを防ぐために、ひずみ再配分には影響しない熱曲げ応力(*9)を取り除いたうえで骨格的なシェークダウンの可否を確認するものである。この場合の熱曲げ応力とは肉厚方向の温度勾配による曲げ応力を指すものと思われる。文献(3)によれば、熱曲げ応力の外にも

容器の場合→接続される配管の熱膨張反力によるノズル付け根の局部応力

配管の場合→熱膨張による応力

も評価応力から排除できる。配管の場合の熱膨張応力の排除について疑問も残るが、通常熱膨張応力は配管(梁)の曲げ応力の形で発生するのでこれをグロスな熱曲げ応力と見ているように思える。

3.4 シェークダウン解析による方法

(1) シェークダウン解析による方法は繰返し荷重による進行性のゆがみに関する代替制限であり、非一体継手の進行性ゆがみ 及び 熱応力ラチェットを対象にしている。内容的には 材料の降伏比(S_y/S_u) ≤ 0.8 及び 使用温度 \leq 規定 Max 値 という2つの要件の充足を除けば、前節の簡易弾塑性解析による方法と全く同じ規定になっている。そこでチャート1では簡易弾塑性解析ルーチンの入口で熱応力ラチェットの有無をチェックして、もしもラチェッティングがあれば、その後のシェークダウン解析ルーチンで評価できるようにしている。

(2) この方法は、非一体継手の進行性ゆがみおよび熱応力ラチェットが許容限界を越えていても

熱曲げを除く($P_L + P_b + Q$) $\leq 3S_m$ → 疲労損傷評価

をクリアできれば、当該繰返し荷重は許容できるという判断を与える。熱応力ラチェットも進行性ゆがみであることを考えれば、何故、 $(P_L + P_b + Q) \leq 3S_m$ に対する代替制限が進行性ゆがみ(変形)にも有効であるか? という問題は帰着する。

熱応力ラチェットについては付属書8の3.4(4)項に規定があるが、これはよく知られた Miller & Bree の線図(図 3.12)で表すことができる。この線図では、

横軸→(1次1般膜応力/降伏応力)比、縦軸→(表面熱応力範囲/降伏応力)比

になるが、表面熱応力を壁厚さで均して平均熱応力範囲(熱膜応力範囲) Q_m に置き換えたうえで、 $P_m + P_b \rightarrow 1.5S_m$ 、 $P_m \rightarrow S_m$ で扱えば、グラフの曲線($x + y/4 = 1$)はほぼ $(P_L + P_b + Q_m) = 3S_m$ 即ち熱曲げを除く $(P_L + P_b + Q) = 3S_m$ と見做される。図 3.12 中の領域 S_1, S_2 はシェークダウン領域を示しており、熱曲げを除く $(P_L + P_b + Q)$ が $3S_m$ 以下であればラチェット領域 R_1, R_2 にあつて熱応力ラチェットから免れていることがわかる。その後はひずみ補正係数 K_e を用いて疲労損傷評価を行なえばよい。ここでは熱応力ラチェットを引き合いにしたが、多分、非一体継手の進行性ゆがみについても同じこと

が云えると思う。s

3.5 修正ポアソン比による方法

(1) 修正ポアソン比による方法は、1次応力制限、(1次+2次)応力制限および特別な応力の制限がクリアになっているにも拘らず応力振幅に対する疲労評価が満足されない場合の代替措置である。従って代替措置の前提として、まず当初の弾性解析から得られる基本的な応力強さ及び特別な応力が許容限界内に入っていることを確認してから、規定の修正ポアソン比を用いて弾性解析して得られたピーク応力範囲を用いて疲労解析を行うように規定されている。

(2) 残念ながら筆者はこの方法の背景を知らない。修正ポアソン比は以下のように定義されている。

$$\nu = \text{Max.} [0.5 - 0.2(S_y/S_a), 0.3]$$

ここで S_y =降伏応力、 S_a =当該サイクル数 n に対する設計疲労曲線上の許容応力振幅

この式では $S_a \leq S_y$ のときポアソン比は $\nu = 0.3$ になる。一方、 $S_a > S_y$ のときポアソン比は $\nu > 0.3$ になる。前者の場合、図 3.13(a)(b) からわかるように弾性シェークダウン領域にあって構造物局部は弾性挙動を示す。故に弾性挙動に対し ν は通常通り 0.3 が採られていることがわかる。一方後者では図 3.11(a)(c) からわかるように塑性シェークダウン領域に入り構造物局部は塑性挙動を示す。故に塑性挙動に対し ν は 0.3 以上、最大 0.5 が採られていることがわかる。式の形から $\nu = 0.3 \sim 0.5$ は明らかに線形補間されている。 $\nu = 0.3$ は負荷方向(縦方向)の伸縮が横方向の伸縮にくらべてかなり大きいことを意味する。 $\nu > 0.5$ は多分、塑性流動化によって横方向に伸縮しやすくなっていることを意味する。最大 0.5 では流動化によって体積不変になる(*10)。このように修正ポアソン比は塑性領域に対し負荷方向ひずみを低く見積もるので、必然的に構造物局部即ち応力集中部分のピーク応力範囲($P_L + P_b + Q + F$)を小さく見積もることになる。すなわち当初の疲労評価でアウトになった構造物がこの代替措置によって救済される可能性がでてくる。

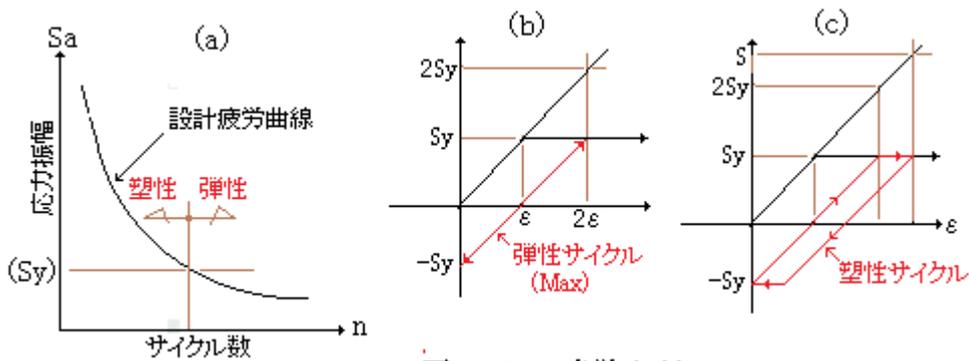
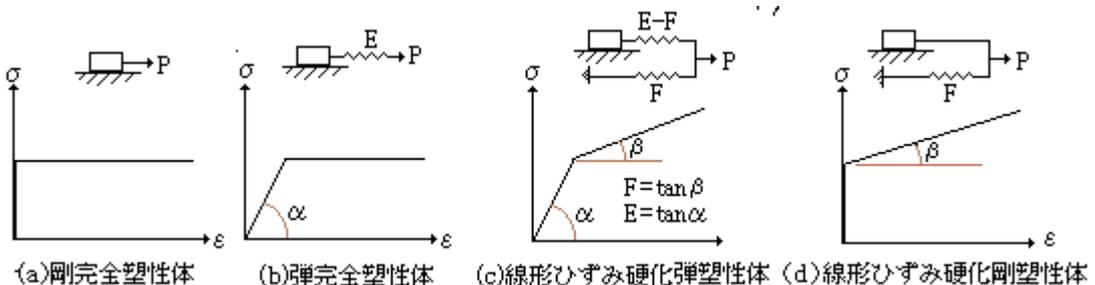


図3.13 疲労サイクル

<3章の補足説明>

(*2) 周知のように弾塑性解析は弾性と塑性の性質を併せもった材料から構成される構造物に負荷をかけて力学的な応答をみるもの。その場合、材料の性質は次のような応力ひずみ曲線で近似される。



なお(c)(d)については塑性部分を折れ線で近似することもある。

(*3) 崩壊荷重について。Gerdeen の論文によれば、崩壊荷重に関連して次の3つの荷重がある。

①限界荷重 ②塑性崩壊荷重 ③塑性不安定荷重

①の限界荷重は構造物全体に塑性域が広がった時の荷重で次の要件を満たした構造物の解析モデルに対する最大荷重の解である(即ち数値解析から得られる仮想的な荷重である)。

- ・ 微小変形理論に基づくひずみ-変形関係であること
- ・ 材料の応答が剛塑性あるいは弾完塑性であって明確な降伏点があること
- ・ 内部の応力と作用力が変形に由る形状変化に関係なく釣合関係にあること

②の塑性崩壊荷重は、塑性荷重ないし崩壊荷重とも云う。ひずみ硬化材料で構成される実際の構造物や圧力容器に起きる塑性崩壊に適用され、大変形による形状変化の影響も含んでいるが、微小変形にとどまるときは限界荷重と同レベルとみていい。

③の塑性不安定荷重には材料不安定型と構造不安定型の2つがあるが、前者は引張試験で見られるネッキングのような極限荷重に限られるので、後者の方がマッチしている。通常は塑性崩壊荷重と同レベルみていいが、構造形状によってはそれより低くなることもある。

以上の議論によれば ASME 系コード(付属書 8)でいう崩壊荷重は次の何れかのルートを通して得られることになる(即ち**付属書 8**では**崩壊荷重は限界荷重に等価**と考えられる)。

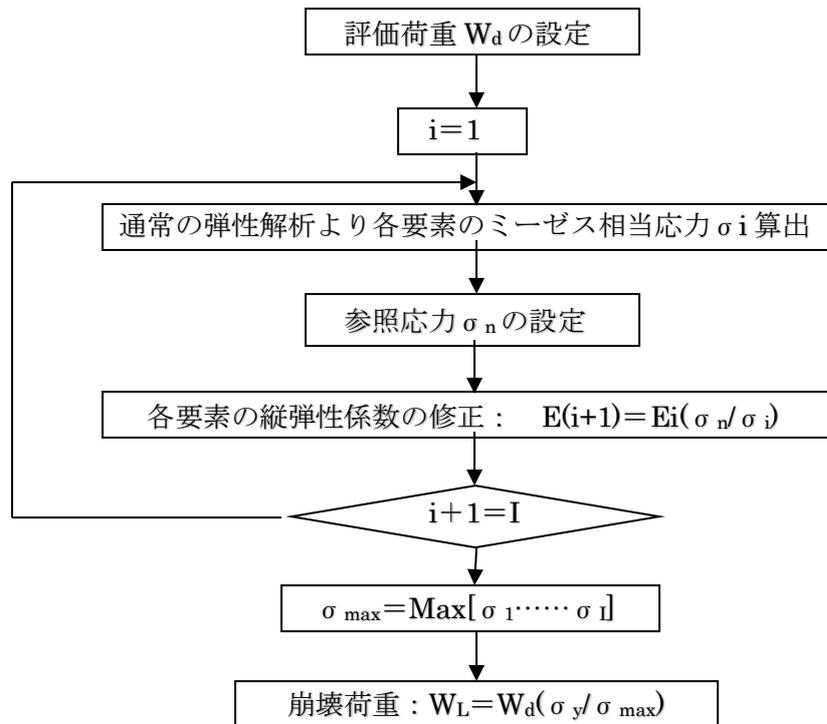
- ① 弾完全塑性体モデル → 極限解析 → 下界近似法など → 限界荷重=崩壊荷重、
- ② 線形ひずみ硬化弾塑性体 → 塑性解析 → 2倍勾配法 → 崩壊荷重

この場合、問題は極限解析と塑性解析のいずれをとって崩壊荷重を定めるか?という選択にある。一般に極限解析は塑性解析より低い崩壊荷重を与えるので、設計荷重(→長期荷重)に関する健全性の確認に適しているような気がする。一方塑性解析は高い崩壊荷重を与えるので、緊急荷重(短期荷重)に関する健全性の確認に適しているのかもしれない。また構造不安定型の塑性不安定荷重が微小変形のまま低レベルで起きる場合は極限解析でも安全ではない。エンジニアジャッジ(EJ)が難しくなる。

(*4) 2倍勾配法以外にも崩壊荷重の見積り方法はあるが ASME は早くから 2倍勾配法を採っている。その背景は定かでないが、微小変形の範囲で設計的に適切な崩壊荷重が得られるからと思われる。因みに崩壊荷重の下限界は微小変形の範囲内で特定されている。この方法は解析ソフトのロジックに左右されないメリットがある。

(*5) 下界漸近法は解析の収束性をみながら荷重を増加してゆき荷重増分が十分少なくなったところで解析を停止する方法。解析ソフトによる十分な結果が得られると云われる。

弾性代償法は古典的な極限解析による静的許容応力の計算を FEM に定式化した解析手法。即ち外力との釣合を保てる可能な限り一様な内力の分布を求めこのときの応力と降伏点との比較から崩壊荷重を求める。具体的には弾性解の結果に基づいて縦弾性係数を修正し計算を繰り返すという比較的簡単な計算によるため計算時間は短い。原理的に解は崩壊荷重の下界にあり安全側になる。



ここで E = 縦弾性係数、 σ_y = 設計荷重に対しセットされた降伏点 (= S_m)、 S_m = 設計応力強さ
 σ_{\max} = FEM による最大ミーゼス相当応力、 i = 計算回数 (= 1, 2, 3, ...)

(*6) 弾性核とはその要素内の塑性ひずみ ε_{eq} が降伏ひずみ ε_y の 2 倍以下になる中核要素を云う。

$$K_s = \varepsilon_{eq} / \varepsilon_y \leq 1.0 \quad (\rightarrow \text{弾性核の存在})$$

(*7) $S_n > 3S_m (2S_y)$ になると次の 2 つの効果によってひずみが増加傾向になると云われる⁽²⁾。

① ピーク塑性ひずみ集中の効果 :

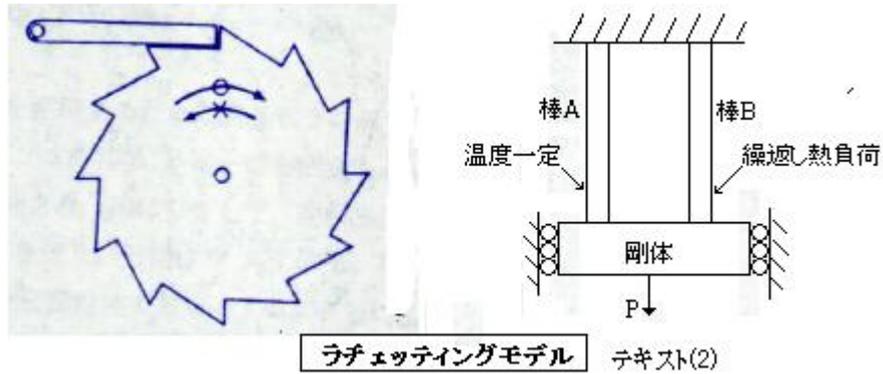
構造上の不連続効果がある場合にピーク応力が降伏点を越えていると弾性理論に基づくひずみ集中係数よりも弾塑性解析によって求めたひずみ集中係数が大きくなる効果

② 公称ひずみの塑性再配分の効果

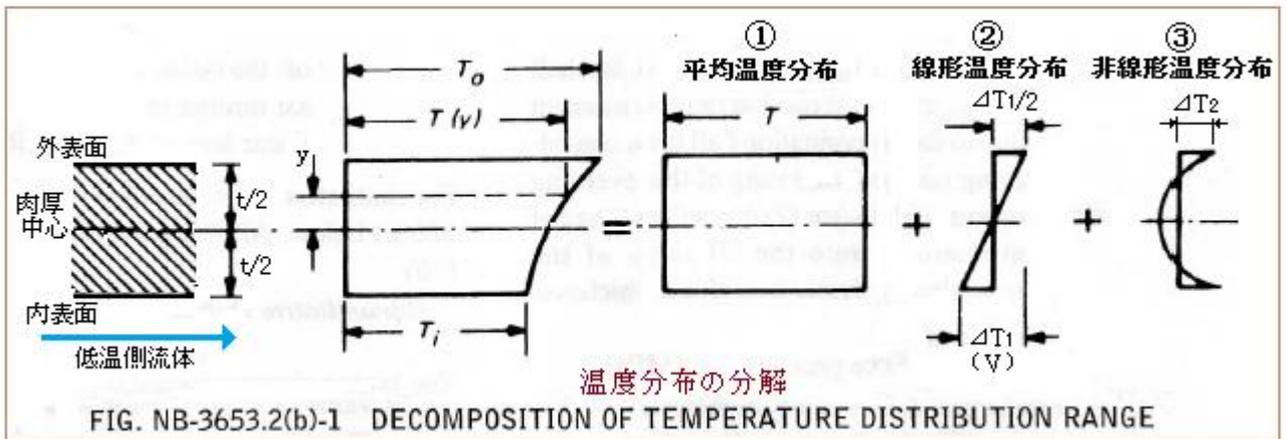
公称応力(平均応力)が降伏点を越えた部分に増々ひずみが集中し弾性解析によるひずみの分布より、弾塑性解析によるひずみの分布が異なる効果

①は明らかに増加傾向と思うが、②は必ずしも増加傾向とは言い難いと思う。Tagart はこれらを掛合わせているが、ASME は Langer の $K_e = 1/n (\text{Max.})$ を K_e 値のベースにしている。

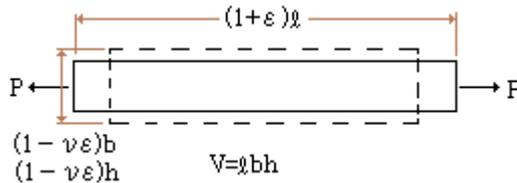
(*8) 熱応力ラチェットは、機械的負荷(機械荷重)によって静的な応力を受けている部材に塑性変形を伴う大きな熱応力サイクルが負荷されるとき、荷重の規模や向きに依存してある特定方向に進行性の非弾性ひずみ/変形が蓄積される現象。内圧を受ける円管が繰返し加熱-冷却される場合が然り。付属書 2.4(4)に許容基準が与えられている。



(*9) 基本的には、下図のような胴肉厚断面に生じる温度分布の線形温度分布成分から肉厚断面の曲げ応力あるいはこれに類する熱応力を指していると思われる。



(*10) 縦方向伸縮倍率→(1+ε)、横/高さ方向倍率→それぞれ(1-νε)、このときの体積変化率は、
 $\Delta V = (1 + \epsilon)(1 - \nu \epsilon)^2 - 1 \approx -2\nu \epsilon + \epsilon$ (高次微少項を無視)
 ν=0.5 のとき ΔV=0 即ち体積変化率 0 で体積一定になる。



4. 弾塑性解析の実際

崩壊荷重による方法と塑性解析による方法では弾塑性解析が用いられているが、弾性解析に較べ適用頻度は少なくなじみが薄い。そこで実際の運用について多少触れておきたい。

(1) 解析のベースになる応力-ひずみ関係(SS 関係と仮称)について検討してみる。ここでは SB480 材について次の 3 ケースの SS 関係を調べてみる。

- ① 弾完全塑性体(→極限解析用)、② 2 直線近似の弾塑性体(→塑性解析用)、③ 実弾塑性体

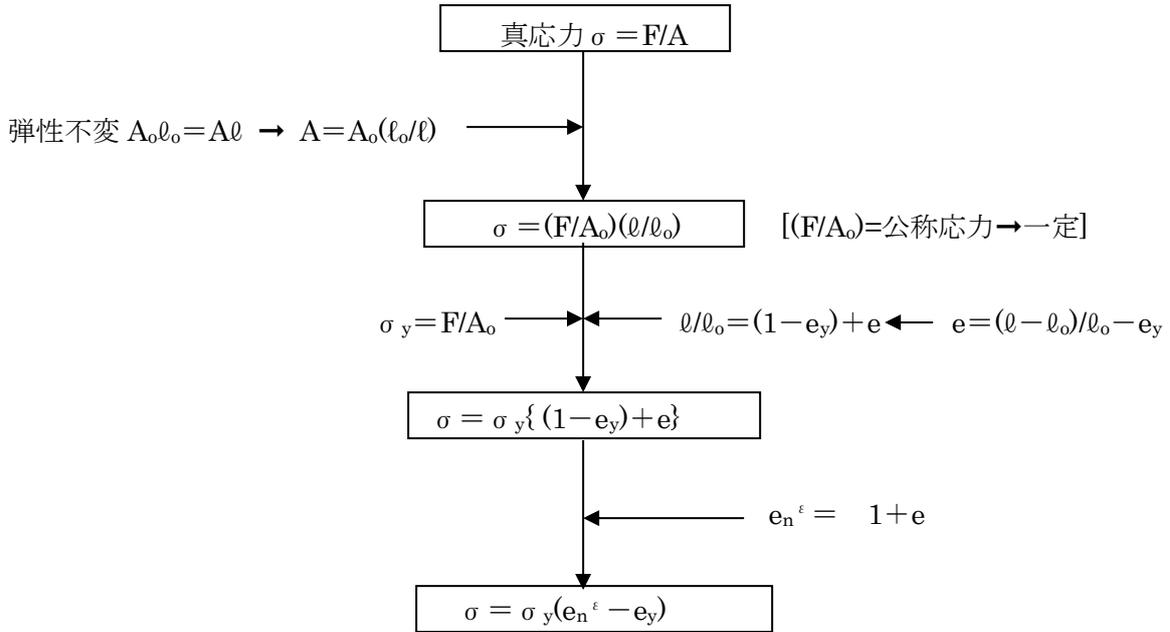
なお、SB480 の材料物性(230℃)は次の通り。

縦弾性係数 E=187800 MPa、降伏応力 σ_y=219 MPa、引張強さ σ_u=421 MPa、

まず①の完全弾塑性体については、次の 2 様がある。

- A. 公称応力-ひずみ関係をもって弾完全塑性とする場合
- B. 真応力-ひずみ関係をもって弾完全塑性とする場合

A の場合は以下の流れから SS 関係式が得られる。



ここで F =軸力、 A_0 =降伏点の断面積、 σ =真応力、 σ_y =降伏応力、
 A =塑性変形後の断面積、 e =公称ひずみ、 e_n =自然対数の底、 e_y =降伏ひずみ
 ϵ =真ひずみ(対数ひずみ)、 l_0 =オリジナルの長さ、 l =変形後の長さ

$\sigma_y=219$ 、 $e_y = \sigma_y/E = 219/87800 = 0.001166$ であるから、この場合の真応力-真ひずみ関係は
 $\sigma = 219(2.7183^\epsilon - 0.001166)$ MPa

B の場合は $\sigma = \sigma_y = 219$ MPa (一定)

次いで②の場合について。ひずみ硬化応力のフォームを $\sigma = A \epsilon^n$ とすれば、

$$\sigma / \sigma_y = (\epsilon / \epsilon_y)^n = [\epsilon / (\sigma_y/E)]^n \rightarrow \sigma = \sigma_y [\epsilon / (\sigma_y/E)]^n = 219 [\epsilon / (219/187800)]^{0.2} = 845.5 \epsilon^{0.2}$$

ネッキング手前の最大荷重点ひずみは $\epsilon = 0.15$ 程度なので 最大荷重点応力は

$$\sigma_{max} = 845.5(0.15)^{0.2} = 579 \text{ MPa}$$

従って $\sigma = 219 + (579 - 219)(\epsilon - 0.001165)/(0.15 - 0.001165) = 219 + 360\{(\epsilon - 0.001165)/0.14884$

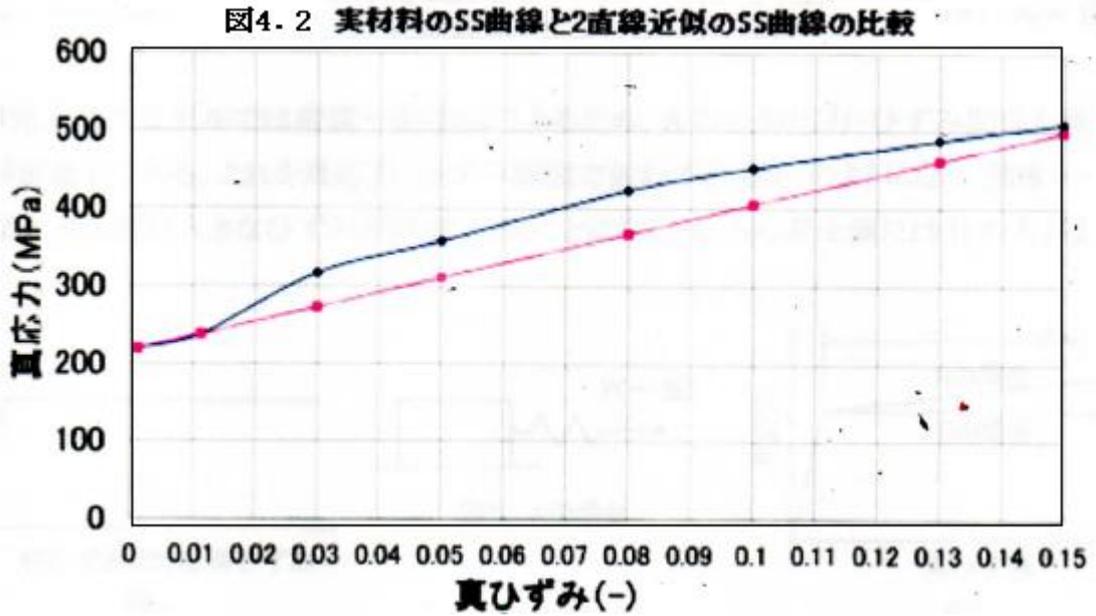
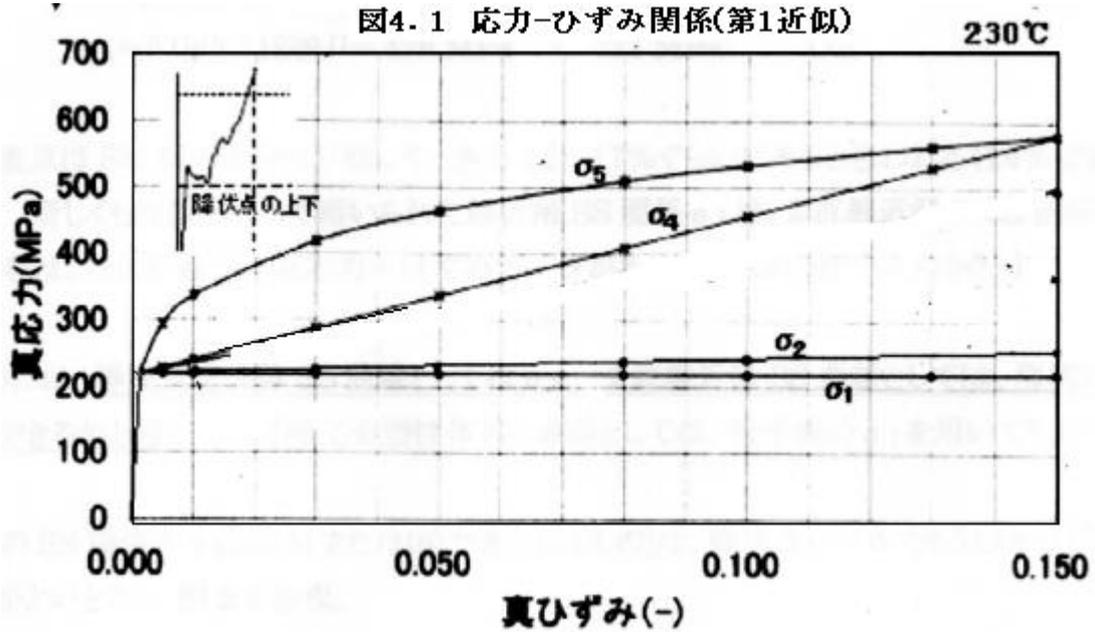
③の場合は、上記の通り $\sigma = 845.5 \epsilon^{0.2}$

これらをプロットすると下図(a)のようになる。この結果の難点は引張強さ σ_u が合わないことである。最大荷重点応力(≒ σ_u)は真応力なのでこれを $\sigma = \sigma_n(1 + e) = \sigma_n e_n^\epsilon$ (ここで σ_n =公称応力) の関係を用いて公称応力に換算すると $\sigma_n = \sigma_u = \sigma / e_n^\epsilon = 579 / 2.7183^{0.15} = 498 \text{ MPa}$ になる。この場合、引張強さは $\sigma_u = 421 \text{ MPa}$ であるから合わない(高くなっており非安全)。

以上の不一致の理由は、主に降伏ひずみが上下 2 か所にあり、 σ_y と σ_u の関係がずれるためである。そこで実材料のデータを用いると $\sigma = 890 \epsilon^{0.3} = 890 \times 0.15^{0.3} = 503 \text{ MPa}$ 従って

$$\sigma = 219 + (503 - 219)(\epsilon - 0.001165) / (0.15 - 0.001165) = 219 + 284\{(\epsilon - 0.001165) / 0.14884\}$$

この場合、引張強さは $\sigma_u = \sigma / e_n^\epsilon = 503 / 2.7183^{0.15} = 432 \text{ MPa}$ となり、421MPa にかなり漸近している(崩壊荷重は極限荷重をかなり下回るので問題はない)。



【添付 A：塑性解析適用に関する JIS B8266 規定】

2.5 塑性解析の適用 弾性解析によって求めた応力が2.3又は2.4の許容限界を超える場合には、次の塑性解析を適用することができる。

(a) ポアソン比の修正値を用いる方法

- (1) $P_m, PL, PL+P_b, PL+P_b+Q$ は弾性ポアソン比の値を用いる弾性計算によって求め、それぞれの許容限界を超えないこと。
- (2) $PL+P_b+Q+F$ は、次の修正ポアソン比を用いた弾性計算によって求め、3.の疲労解析を行う。
 $\nu=0.5-0.2(S_y/S_a)$ 、ただし、0.3以上とする。
 ここに、 S_y ：サイクル中の温度の平均値に対する材料の降伏点 (N/mm²) {kgf/mm²}
 S_a ：考えている運転サイクルの予想繰返し回数に対して該当する設計疲労曲線から得られる許容応力振幅 (N/mm²) {kgf/mm²}

(b) 塑性解析による方法 次に掲げる条件(1)及び(2)を満足する場合には $PL, PL+P_b+Q$ 、胴の熱応力ラチェット及び非一体形継手の進行性のゆがみに対する許容限界は超えてもよい。

- (1) 2.1 (d)、2.3 (a)、2.3 (c) (ただし、 P_m+P_b に適用する。)、2.4 (a)、2.4 (g)、及び2.7に対して弾性計算を行い、各項に示された許容限界が満足されている場合。
- (2) 塑性解析によって次の事項を検証する場合。
 - 2.1) シェークダウンが生じて変形の進行が停止する。
 - 2.2) シェークダウンが起こるまでに生じる変形が指定の限界を超えない。
 - 2.3) シェークダウン後に繰り返される応力が疲労に対する許容限界内にある。ただし、この場合の疲労解析に用いる応力振幅は、シェークダウン後の最大主ひずみ範囲の $\frac{1}{2}$ にサイクル中の平均温度における材料の弾性係数を掛けた値とする。

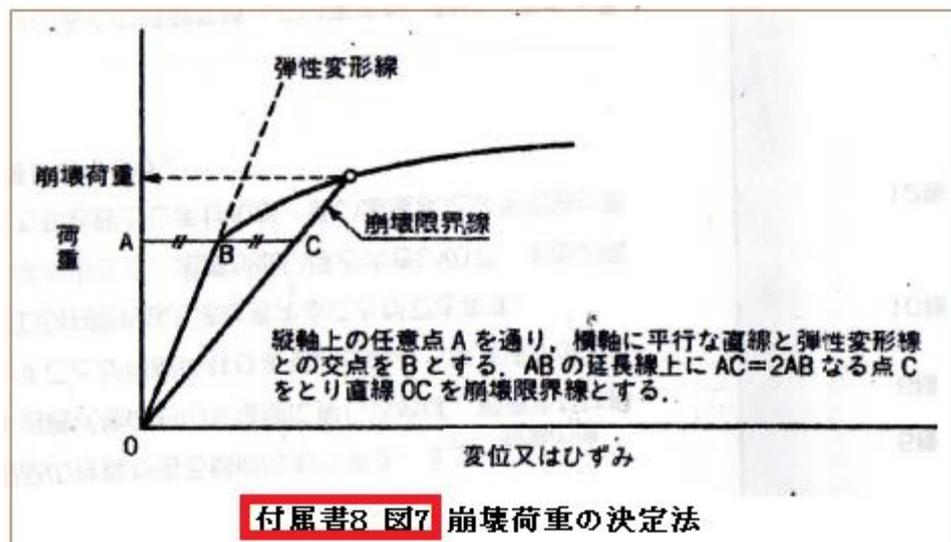
(c) 崩壊荷重による方法 設計圧力及び他の機械的荷重が、次の(1)～(3)のいずれかの解析法で定められた崩壊荷重の $\frac{2}{3}$ を超えない場合には、 $P_m, PL, PL+P_b$ の応力強さに対する検討はしなくてもよい。ただし、構造物の各部分の厚さは、最小厚さ以上なければならない。

- (1) 極限解析 極限解析によって定める崩壊荷重の下界。この場合、降伏点の代わりに $1.5S_m$ を使うものとする。ただし、この際に生じる塑性ひずみが許容できない場合には **本体の表6.1** (高合金鋼、ニッケル及び高ニッケル合金の永久ひずみ量を制限するのに用いる係数) に示すひずみ制限係数に応じて、解析で用いる降伏点の値を低減するものとする。また塑性ヒンジが形成されるような局所的な部分では、塑性ひずみ集中が疲労挙動、ラチェット挙動又は座屈挙動に及ぼす影響を考慮しなければならない。
 - (2) 塑性解析 塑性変形量が弾性変形量に等しくなる限界の荷重、すなわち、塑性解析によって求めた荷重-変位図又は荷重-ひずみ図を用いて **付属書8図7** に示す作図によって定める崩壊荷重。ただし、用いる変位又はひずみは、構造物の荷重保持力を示すことができるものを選ぶ。
 - (3) 実験的解析 6.に述べる基準に従い、実験によって定める崩壊荷重。
- (d) 簡易弾塑性解析による方法 一次応力と二次応力の和の応力強さ (P_L+P_b+Q) の変動範囲は、次の条件(1)～(5)を満足する場合には、2.3 (d) の許容限界 $3S_m$ を超えてもよい。
- (1) (P_L+P_b+Q) から熱による曲げ応力を除いた応力強さの変動範囲は、 $3S_m$ 以下である。
 - (2) 弾性計算で求めた繰返し応力強さの振幅に、次の係数 K_e を乗じた値を用いて 3によって疲労解析を行う。ただし、弾性計算をするとき、(a)(2)の修正ポアソン比を用いなくてもよい。
 ここに、 $S_n \leq 3S_m$ の場合、 $K_e=1.0$
 $3S_m < S_n < 3mS_m$ の場合、 $K_e=1.0 + \frac{(1-n)}{n(m-1)} \left(\frac{S_n}{3S_m} - 1 \right)$
 $S_n \geq 3mS_m$ の場合、 $K_e=\frac{1}{n} < m$ 、 n ：材料による定数で、表4による。
 S_n ：一次応力と二次応力の和の応力強さの変動範囲 (N/mm²) {kgf/mm²}
 - (3) 熱応力ラチェットに対する要求2.4 (d)を満足する。
 - (4) 温度は各材料について表4の最高値を超えない。
 - (5) 材料の規定最小降伏点又は0.2%耐力と、規定最小引張強さの比は0.8以下である。
- (e) シェークダウン解析による方法 d)1)及びd)2)を満足する場合には、2.4 (c) 及び2.4 (d) に対する許容限界を超えてもよい。

表 6.1 高合金鋼、ニッケル及び高ニッケル合金の永久ひずみ量を制限するのに用いる係数

制限する永久ひずみ量 %	係数
0.10	0.90
0.09	0.89
0.08	0.88
0.07	0.86
0.06	0.83
0.05	0.80
0.04	0.77
0.03	0.73
0.02	0.69
0.01	0.63

(d) 付表2.1及び付表2.2に掲げる基本許容応力値の中に、オーステナイト系ステンレス鋼鋼材及び非鉄金属材料の幾つかに設計温度における0.2%耐力の $\frac{1}{1.5}$ を超え90%に達するものがあるが、これは0.1%の永久ひずみを生じる応力に相当する。この変形量を容認できない場合、容認できる変形量とするために基本許容応力を下げるべきである。永久ひずみ量を制限する必要がある場合の基本許容応力は、表6.1に示す係数を乗じた値とする。ただし、付表5.2～5.5に示す0.2%耐力にこの係数を乗じた値が付表2.1及び付表2.2に掲げる基本許容応力値より小さい場合は、小さい方の値を用いなければならない。



<付属書 10 材料の確性試験試験方法>

6.2 崩壊荷重決定のための実験

6.2.1 実験方法 崩壊荷重を決定するための実験の方法は6.2.3の変形測定試験又はひずみ測定試験とする。

6.2.2 測定の範囲 崩壊荷重を決定する場合には、最小崩壊荷重を示す可能性をもつすべての範囲を測定しなければならない。

6.2.3 変形測定又はひずみ測定の実験方法

(a) 測定すべき変形又はひずみ

- (1) 崩壊荷重を決定するために、ひずみゲージを使うときには、測定するひずみ（膜ひずみ、曲げひずみ又はこれらの組合せ）は、構造物の耐荷重能力を実際に表すものでなければならない。
- (2) 変形測定用器具を使うときは、構造物の崩壊の傾向を表す直径又は長さの変化、はり（梁）や板のたわみのような重要な寸法の変化を測定しなければならない。

(b) 模型 崩壊荷重試験の場合、使用する比例法則の妥当性を証明することができない場合には、実寸模型を使用しなければならない。

(c) 荷重の負荷法

- (1) 崩壊荷重を決定するための試験においては、線形な弾性領域で、すべてのゲージから統計的解析に十分なデータが得られるように、十分小さい増分で荷重を負荷しなければならない。
なお、線形な弾性領域以上でのすべてのゲージの特性を調べておくこと。
- (2) 弾性領域で最適な直線を得るために最小二乗法（回帰法）による解析を行い、信頼区間をひずみゲージその他の測定装置採否の設定値と比較しなければならない。不採用となった測定装置は取り換え、取り換えたものについて再試験しなければならない。
- (3) 試験はすべての測定装置が使用可能となってから、ひずみ制御又は変位制御で行うのが望ましい。荷重の増減は各荷重での材料の流動が完了するよう適当な時間をもって行わなければならない。

6.2.4 崩壊荷重決定法 崩壊荷重の決定手順を、次に示す。

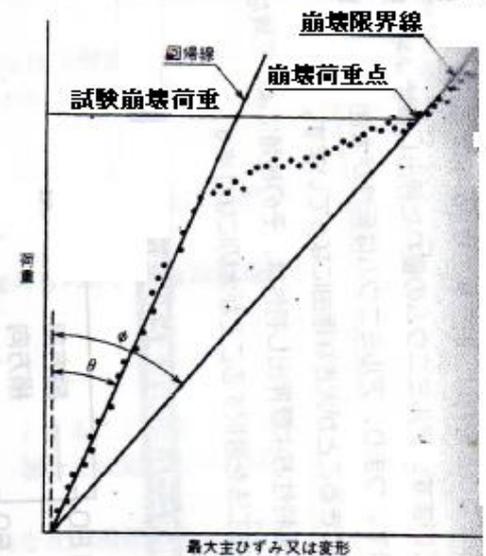
変形測定試験の場合には、荷重を縦軸に、測定した変形を横軸にとる。ひずみ測定試験の場合には、荷重を縦軸に、表面での最大主ひずみを横軸にとる（付属書8図38参照）。

まず、線形な弾性領域での測定点から最小二乗法によって弾性直線を引く。この回帰直線が縦軸となす角度を θ とする。

次に、この回帰直線と横軸との交点を通り、縦軸に対して $\phi = \tan^{-1}(2 \tan \theta)$ の角度をなす直線を引く。これを崩壊限界線と呼ぶ。試験崩壊荷重は、連続する測定点が崩壊限界線を最初に横切る直前の測定点（崩壊荷重点）と同じ最大主ひずみ又は変形をもつ崩壊限界線上の点の荷重として決定する。

設計又は評価の目的に使用する崩壊荷重は、この試験崩壊荷重に、使用材料の設計温度での降伏強さと試験材料の試験温度における降伏強さの比を乗じることによって求める。試験模型で得られた崩壊荷重と設計の実物構造物に対する崩壊荷重を関連づけるには、組み立てた試験模型の実寸法に適切な考慮を払うように注意すること。

付属書8図38 2.4による崩壊荷重決定方法



【 添付 B 弾性解析による応力制限規定(サマリー) 】

3.3 基本的な応力の許容限界

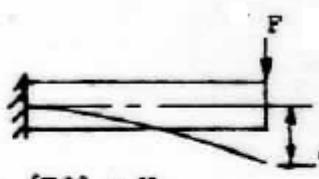
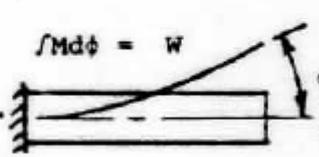
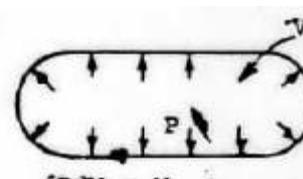
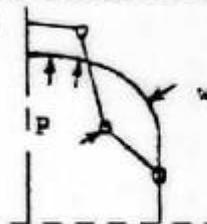
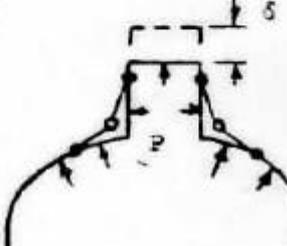
- ① 1次一般膜応力強さ $P_m \leq k S_m$
- ② 1次局部膜応力強さ $P_L \leq 1.5 k S_m$
- ③ 1次(局部膜+曲げ)応力強さ $[P_L + P_b] \leq 1.5 k S_m$
- ④ (1次+2次)応力強さ $[P_L + P_b + Q] \leq 3 S_m$
- ⑤ (1次+2次+ピーク)応力強さ $[P_L + P_b + Q + F] \rightarrow S_{alt} \rightarrow$ 疲労評価

3.4 特別な応力の許容限界

- ① 支圧荷重：平均支圧応力 $\leq S_y, 1.5 S_y$ 、自由せん断応力 $\leq 0.6 S_m$...
クラッド鋼せん断応力 $\leq \dots$ 、ピン支圧応力 $\leq S_y, 1.5 S_y$
- ② 純剪断[キー、シャー、ネジ...] 1次剪断応力 $\leq 0.6 S_m, 0.8 S_m$
- ③ 非一体継手の進行性ゆがみ $P_L + P_b + Q \leq S_y$

- ④ 容器胴の熱応力ラチェット：繰返し熱応力範囲 $\leq y \rightarrow$ 下記
 直線温度分布 $0 < x \leq 0.5 : y = 1/x, 0.5 < x \leq 1 : y = 4(1-x)$
 放物線温度分布 $0.615 < x \leq 1 : y = 5.2(1-x), x \leq 0.615$: 付表
- ⑤ ボルト最大使用応力 $\leq 2S_m, 3S_m$
- ⑥ 溶接金属の設計応力強さ $\leq 0.5S_a, 0.75S_a$
- ⑦ 3軸応力 $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \leq 4S_m$

付録C 変位着目点の推奨例 [文献(5)引用]

Loading Case (負荷ケース)	Load Parameter Q (縦軸)	Deformation Parameter, q (横軸)
A. Cantilever Bending 	Load F	Deflection δ (Proper)
	$\int Fd\delta = W$	先端撓みに着目
B. Moment Loading 	Moment M	Rotation ϕ (Proper)
	$\int Md\phi = W$	先端角変形に着目
C. Pressure Loading in Cylinder 	Pressure P	Radial deflection w (Proper)
	$2\pi RL / Pd_w = W$	半径方向変位に着目
D. Pressure in Closed Vessel 	Pressure P	Volume of Pressurized fluid, V (Proper)
	$\int PdV = W$	加圧流体体積に着目
E. Pressure in Pressure Vessel Head 	Pressure P	Deflection of knuckle w (acceptable)
		ナックル部の変位に着目
F. Pressure in A Nozzle 	Pressure P	Axial deflection of nozzle, δ (acceptable)
		ノズル軸方向変位に着目

引用文献)

- (1) JIS B8266 「圧力容器の構造—特定規格」 附属書 8 圧力容器の応力解析及び疲労解析
- (2) 「原子力プラントの構造設計」 安藤、岡林 (東大出版会)
- (3) 「解説—原子力設備の技術基準」 通産省資源エネルギー庁(電力新報社)
- (4) EPD(弾塑性解析活用設計)規準検討会成果報告書(火力原子力発電技術協会)
- (5) “Limit Analysis and Plasticity” by J. C. Gerdeen (ASME Published)
- (6) ”Plastic Load Criterion for Inelastic Design by Analysis” by D. Macenzie et al
(University of Strathclyde)