

【整番 SE-21-TM-002】	【標題】プラント設備の疲労評価に関する情報 (その 2-配管)	
分類：構造(疲労)/種別：技術メモ	作成年月：H28.3/改訂：Ver.0.0 (H28.03)	作成者：N. Miyamoto

全 35 枚

3. 配管の疲労評価手順

3.1 全 般

(1) 配管は機器に連なってプラント設備を構成する重要な設備であるが、容器/塔槽/熱交といった機器類に比べてその構造はかなり異なっている。機器がシェル&プレート的でその多くが短い円筒構造であるのに比べ、配管は円筒構造ではあるが、3次元的に蛇行する長大な梁構造になる。この構造では自立を保ち振動や地震の揺れに耐えるため多数の支持拘束サポートが必要である。そのため高低温の流体を通す場合、熱膨張・収縮拘束にともなって熱応力(熱膨張応力と仮称)が発生する。もちろんこの種の応力は機器構造でも存在するが、支持脚が単一で本体にくらべて接続配管の剛性が低く拘束の少ない機器構造に比較するとかなり高いものなり、プラントのスタートアップ～シャットダウン操作(発停操作)や運転温度の切替え操作のたびに繰り返されて疲労を累積する。このため、旧来から一般のプラント配管では、

- ① 熱膨張応力を緩和するためのフレキシビリティ設計(→配管引き回し&柔支持)
- ② 熱膨張応力ベースにした(1次+2次)応力制限による疲労防止設計

が行われてきた。特に②に対しては、熱膨張応力を対象にして最も大きな応力範囲をもった発停サイクルに対して十分なサイクル数(推定 1500～7000 回)を付与する形で、(1次+2次)応力制限を行っている。因みに一般の機器には(1次+2次)応力制限はない。

(2) 機器の疲労評価手順でも述べたように、機器設計にはコード 1 とコード 2 の仮称区分が存在するが、配管の場合にも同じように次のような仮称的な区分が存在する。

コード 1 配管→ ASME Sect.III NB 相当配管(クラス 1 配管)

コード 2 配管→ ASME Sect.III NC,ND 相当配管(クラス 2,3 配管)及び 一般プラント配管

コード 2 配管規定は、疲労源としての繰返し荷重を配管の熱膨張拘束によるモーメント/フォースに絞り込んで、これから発生する熱膨張応力 S_E を次のように特有の許容応力で制限するもの。

$$S_E \leq [f(1.25S_c+1.25S_h-S_L) \text{ or } f(1.25S_c+0.25S_h)] \quad (\rightarrow \text{ここでは記号説明は割愛})$$

この場合、 S_E の上限は発生サイクル数 2000～7000 回に対応し、設備寿命としては十分なので、更に疲労設計曲線を用いて限界繰返し回数を確認する必要はない。また各配管部品の評価応力 S_E, S_L は応力増幅係数(→SIF)を用い構造解析結果から容易に算定できる。ただ評価対象は内圧応力/熱膨張応力等に限られるため、それ以外の応力サイクルでは別途、応力計算が必要になる。

[上記の熱膨張応力制限は(1次+2次)応力制限に近い。(1次+2次)応力制限はコード 2 機器規定の方にはなくコード 1 機器規定の方に含まれている。従ってこのコード 2 配管規定は**コード 1 機器規定を熱膨張応力ベースで簡易化したもの**とみられる。]

コード 1 配管規定は、基本的にコード 1 機器規定と同じである。即ちピーク応力強さベースの応力振幅 S_a を用いて疲労設計曲線から許容(限界)繰返し回数 N を求め累積損傷則から疲労評価を行なう。評価の元になるピーク応力強さ算定には応力集中係数(SIF)相当の応力指数を用いたコード式が適用

され、比較的容易に評価応力を得ることができる。ただ評価対象が、内圧応力/熱膨張応力と1部の熱過渡応力に限られているため、もし該当がなければ別途解析が必要になる。

- (3) コード2配管規定もコード1配管規定も 応力指数(=応力係数)を用いており機器に比べてアクセス性がよい(わかり易い)。しかし評価対象は内圧応力/熱膨張応力/一部の熱応力に限られている。然るに実際のプラント配管で発生している疲労損傷例の多くは、温度揺らぎや温度成層化等による熱疲労や流体振動による振動疲労などであって、あいにくこれらはコード規定に含まれていない。熱膨張応力に比べれば熱疲労/振動疲労のもとになる熱応力や振動応力は元来小さく、高サイクル疲労域に入る。また変動応力振幅に類するため評価上の扱いは決して容易ではない。ただ近年は、各種工業分野でこれら疲労現象に関する知見が累積されているので、コード規定外の損傷評価も殆どの場合、可能である。

なお実際の疲労損傷は、幾つかのサイクルパターンが重畳したものであるから、この場合にはコード規定外の疲労損傷度とコード1配管規定に準じた疲労損傷度とを合算した形で累積評価を行なう必要がある。この状況ではコード1配管規定の運用が適している。

3.2 コード2配管の疲労評価⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾⁽¹⁵⁾

- (1) 通常、一般プラント配管はコード2配管として **ASME B31.1/JEAC** あるいは **B31.3/JPI** 等のコードルールに準じ、熱膨張応力制限の形で評価されている。ステップ的に云えば、

- ① まず当該配管系の構造解析を行い付加重量/内圧推力等/熱膨張拘束によるモーメントフォースを算出し、1次応力 S_L 及び熱膨張応力(→2次応力) S_E を求める。
- ② 次いで発停サイクル(全温度変化サイクル)以外の温度変化サイクルの影響で見込んで応力範囲減少係数 f を計算し、基本許容応力範囲を修正する。
- ③ 必要に応じ基本許容範囲を修正し最終許容応力範囲として熱膨張応力 S_E を評価する。

具体的な評価手順をチャート 3-1 に示す。通常、チャートの評価手順は配管構造解析プログラムに組み込まれ自動的に処理されるので、その背景はともかく内容すらも見過ごされていることが多い。背景/内容の見過ごしは何ら差し支えがないが、モデル化や入力データに間違った解釈が使用される恐れもある。添付 A にその内容説明を試みたので参照されたし。

- (2) 上記における③の措置は少しややこしくみえるが、 $f=1$ すなわち発停サイクルのみで見れば

$$(1 \text{ 次} + 2 \text{ 次}) \text{ 応力} \leq 1.25(S_c + S_h) \quad (\text{但しチャートの通常コース})$$

ということになりわかり易くなる。この場合、左辺の制限量は、 $S_c = S_{yc}/1.5$ 、 $S_h = S_{yh}/1.5$ なので

$$1.25(S_c + S_h) = (1/1.2)(S_{yc} + S_{yh}) = 0.833(S_{yc} + S_{yh})$$

となり、フォームとしては次のシェークダウン制限式にかなり近づいた形になる。

$$(1 \text{ 次} + 2 \text{ 次}) \text{ 応力} \leq (S_{yc} + S_{yh})$$

古い文献によれば、この式は配管のセルフスプリング(=シェークダウン)を意識し多少の裕度を持たせて設定されたようである。発停サイクルは最大の温度変化サイクルなので、そのほかの温度変化サイクルも必然的にシェークダウンする。構造物がシェークダウンすれば、負荷による変形は数回の繰返しのおとで弾性挙動に至り、有害な塑性ひずみサイクルは排除される。そして疲労の観点からは数千回の発停サイクルに耐用でき、プラント設備としては十分なレベルをキープする。

一方、右辺の評価応力(1次+2次)応力は配管構造による公称応力である。配管の場合、2次応力(→熱膨張応力)は1次応力に比べ格段に大きくなるので、ここでは簡便のため、(1次+2次)応力→**2次応力単独**として扱って以下の説明を試みる。

通常において、公称応力は次のように定義されている。

局部応力=疲労強度減少係数 x 公称応力 → **公称応力=局部応力/疲労強度減少係数**
 ここで疲労強度減少係数を通念通り 2、公称応力を($i \cdot S_0$)、局部応力を($C \cdot K \cdot S_0$)とすれば、

$$\text{公称応力} = \text{局部応力} / \text{疲労強度減少係数} \rightarrow iS_0 = CKS_0/2 \rightarrow i = CK/2$$

で表される。ここで **i** は**応力増幅係数**であってコードによっては応力係数とか応力集中係数とか呼ばれている。 S_0 は基準応力で、[梁曲げモーメント/管断面係数]→(M/Z)で与えられる。また C と K は [管の全般幾何形状に由る応力集中係数]と [評価部位の局部形状に由る応力集中係数]である。この係数 C, K は応力指数(Stress Index)とも呼ばれコード 1 配管で使用されている。

当然、公称応力(iS_0)は配管の評価対象部位により異なるが、前述の疲労防止の観点に立つなら対象配管の全域で**公称応力 iS_0 を制限量[$1.25(S_c + S_h)$]以下にする必要がある**。具体的にいえば当該配管に生じる最大の公称応力範囲 ($\text{Max. } iS_0$) を制限量以下にすればよい。基準値 S_0 を共通とする配管系では最大の応力増幅係数 i を $[1.25(S_c + S_h)/S_0]$ 以下にすればよいことになる。

今をさる 65~75 年ほど前、コード 2 配管のコードルール作成が行われているが、その際にエルボ、ティ、フランジなどの主要配管部品について一連の膨大な疲労試験が実施され、次で定義されるような応力増幅係数が得られ、コード規定に取り込まれている。

$$i = \text{同一サイクル数で疲労を起こす時の直管の応力に対する当該配管部品の応力の倍率}$$

この係数 i に基準応力 S_0 を乗じれば、当該配管部品に対する直管相当の公称応力が得られるのでこれを制限量[$1.25(S_c + S_h)$]以下に抑えれば、当該配管部品の発停サイクルにおける疲労破損を回避できる。

以上では発停サイクル(全温度変化サイクル)のみを扱った。運転プロセスのニーズなどで、その他の温度変化サイクルが加わると当然、許容応力を切り下げる必要がある。応力範囲減少係数 f はこの調整を行うものである。

- (3) コード 2 配管規定で注目すべきは、**7000 回の発停サイクルを確保する形で(1次+2次)応力範囲を制限(評価)していることである**。何故なら

$$\text{基本許容応力範囲 } 1.25(S_c + S_h) \rightarrow \text{疲労寿命式} \rightarrow \text{許容限界繰返し数 } 7000 \text{ 回}$$

になるからである [添付 A の(2)参照]。実際は基本許容応力範囲に係数 f が乗じられているが、これは発停サイクル以外の温度変化サイクルの付加による疲労損傷度の割増しを考慮して基本許容応力範囲を縮小したもので、許容限界繰返し回数 7000 回をキープするための措置である [添付 A の(4)参照]。発停サイクルを最大 7000 回としたのは、プラントの daily start を想定し

$$20\text{year/life} \times 350\text{day/year} = 7000\text{day/life} \rightarrow 7000 \text{ cycle}$$

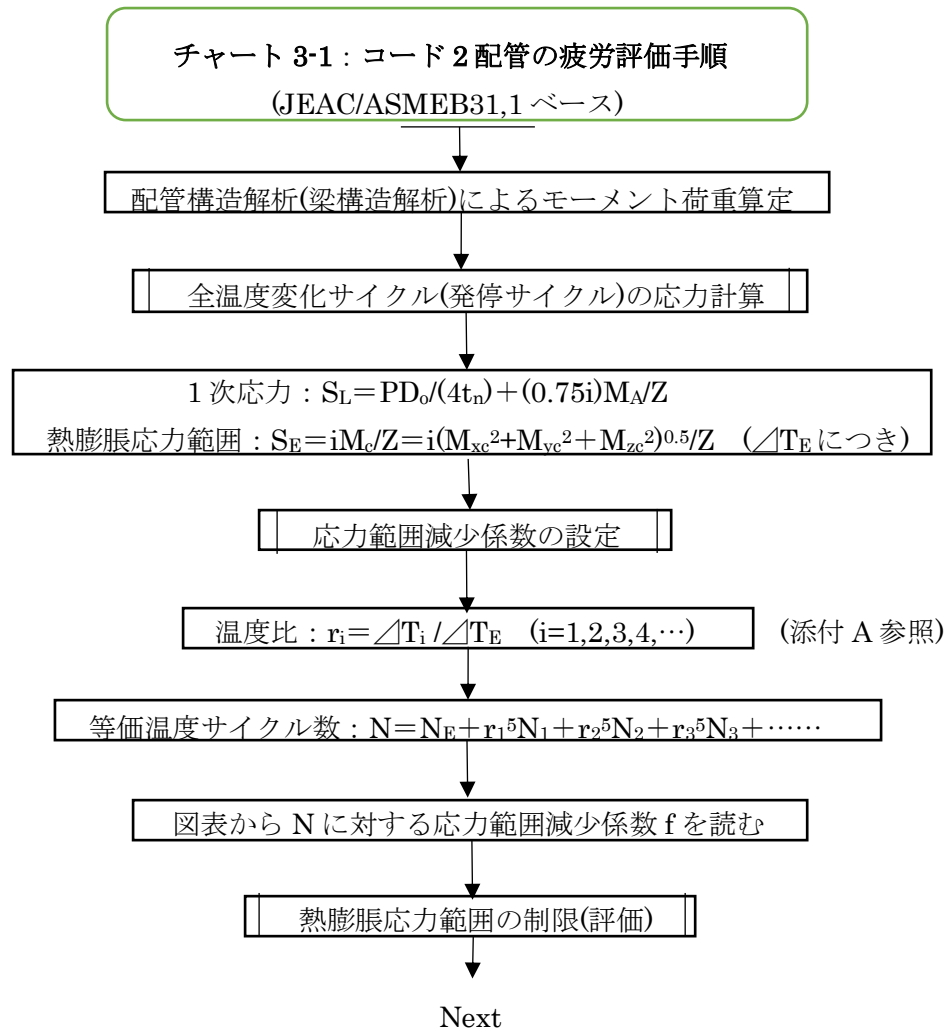
としたものと説明される。この想定はプラント配管の実際からみれば確かに過剰設計ではあるが疲労設計上回避したい“塑性サイクル”を排除する上では程々の選択ではないかと思われる。

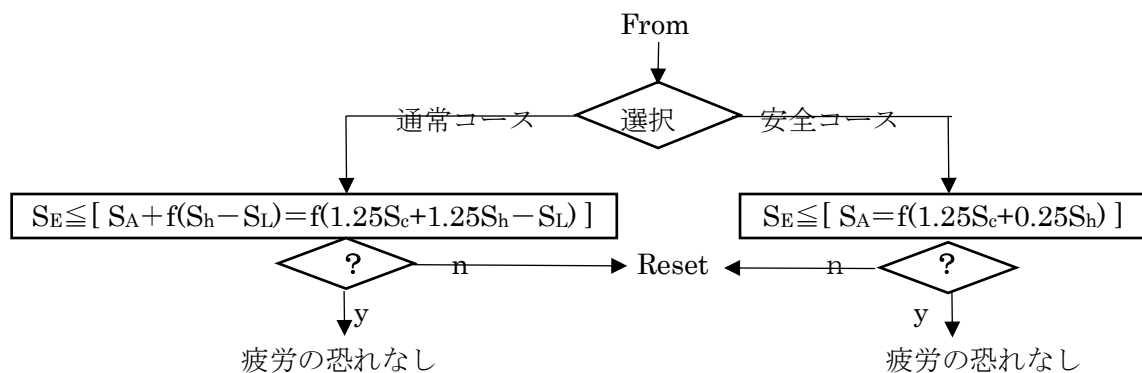
ただコード 2 配管規定は 7000 回の発停サイクルを保証しているわけではない(どこにもそれは書かれていない)。基本許容応力範囲 $1.25(S_c+S_h)$ は、基本的には疲労強度減少係数 2 を有した長手方向公称応力に適用できるが、例えばエルボのように周方向公称応力が長手方向を上回るケースでは明らかに疑問であり、発停サイクル 7000 回は無理で、2000 回程度まで減少すると思われる[添付 A の(3)参照]。

なおここでは、通常の評価コースをとり、(1 次+2 次)応力 $\leq 1.25(S_c+S_h)$ として議論したが安全な評価コースをとり 2 次応力 $\leq (1.25S_c+0.25S_h)$ とすれば、7000 回の発停サイクルが可能である[添付 A の(3)参照]。ただ果たして 7000 回もの発停サイクルが必要であるかについては疑問である。

- (4) コード 2 配管規定では、疲労発生源としての繰返し変動荷重として温度変化サイクルのみを対象にしている。その他の疲労発生源についてはケースバイケースの対応になる。

地震荷重(慣性力+相対変位)は繰返し変動荷重であり疲労源になるが、KHK の耐震設計指針では、地震単独サイクルにつき独自の基準で(1 次+2 次)応力制限を評価し、特に損傷度合いをチェックしてトータルの累積損傷評価を行うことはない。即ち、地震をアクシデントとして扱っている。あるいは、数千回の発停サイクルが持っている裕度の中で十分吸収できると考えているようである。





【 記号説明 】

P =設計圧力(MPa)、 D_o =管の外径(mm)、 t_n =公称肉厚(mm)、 Z =断面係数(mm³)

M_A =自重その他の負荷荷重による断面における合成モーメント(N·mm)、

M_c =熱膨張による合成モーメント範囲(N·mm)、

M_{xc}, M_{yc}, M_{zc} =x,y,z 方向のモーメント成分(分岐管では c=1,2,3)(N·mm)

S_L =長手方向の 1 次応力(N/mm²)、 S_E = ΔT_E に*における熱膨張応力範囲(N/mm²)、

ΔT_E =全温度変化範囲(*1)(°C)、 ΔT_i =各熱サイクルの温度変化範囲(°C)、

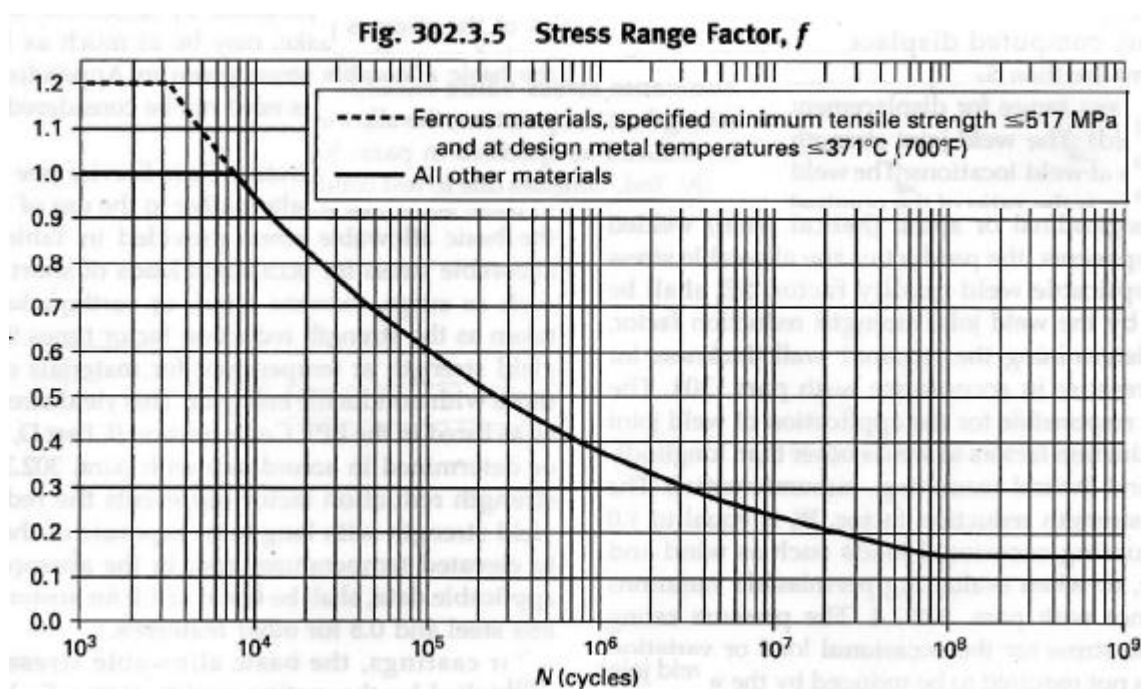
N_E =全温度変化サイクル数(*1)(-)、 N_i =i 番目の温度変化のサイクル数、 r_i =温度比(= $\Delta T_i / \Delta T_E$)、

サフィックス i →温度変化サイクル番号(=1,2,3…)

f =応力範囲減少係数(下図)、 i =応力増幅係数(SIF)、 S_A =熱膨張応力範囲に対する許容応力(N/mm²)

S_c, S_h =停止温度/発動温度における許容応力(N/mm²)、

(*1) 全温度変化範囲と全温度変化サイクルは、(停止温度～最大運転温度)範囲とこの温度範囲を持った発停サイクルと解釈される。



3.3 コード1配管の疲労評価⁽¹⁾⁽²⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

(1) コード2配管ではシェークダウンを前提にした(1次+2次)応力制限を用いて配管の疲労防止設計が行われている。その方法は **Reasonable** であり、多年の実績がその合理性を裏付けている。しかし古い疲労概念によっているため、鋼管以外の管材への運用や塑性域のひずみの扱いあるいは SIF の充実などである種の限界(あるいは保守性)がある。これにくらべコード1配管はコード1機器と同じ疲労設計概念によっており、工学的には正攻法で固定枠がない。おそらくコード2配管よりも精度の高い疲労評価が期待できる。

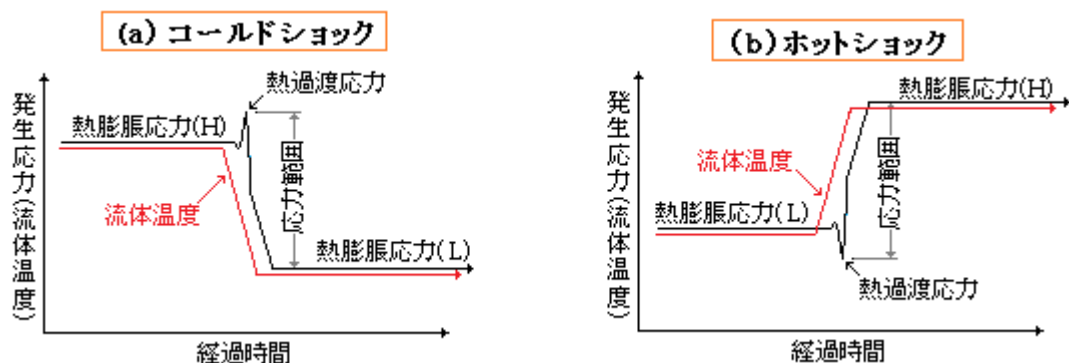
(2) コード1配管規定は **Nuclear** のクラス1配管規定であり、コード1より煩雑な内容になっている。コード1配管の疲労評価手順をまとめると次の4つのステップになる。

- ① まず当該配管系の構造解析を行い、自重/内圧推力/熱膨張拘束/支持点変位によるモーメントを個別に算出する(→評価の用途に応じ組合せる)。
- ② 最大のモーメントの組合せで(1次+2次)応力範囲 S_n を算定しシェークダウンを確認する。 S_n がシェークダウン限界 $3S_m$ を越えないときは④ステップへ。 S_n がシェークダウン越えるときは次のステップへ。
- ③ [強度比の高い材料で伸無し変形が顕著な場合]、[クリープ疲れ損傷が懸念される場合]及び[熱応カラレットが懸念される場合]はこれを排除した上で、肉厚断面の熱曲げ/熱膨張による梁曲げの作用を取り除いた荷重組合せで再度、 S_n をチェックして $3S_m$ 以下であることを確認し次のステップへ。もし再度 $3S_m$ を越えるときは上記と同様に設計をリセット。
- ④ ピーク応力強さ範囲 S_p を計算する。②に由るときはひずみ補正係数 $K_e=1$ 、③に由るときはコード規定に従って K_e 値を計算する。
- ⑤ S_p, K_e の計算結果を用いて応力振幅 S_a を求め当該材料の設計疲労曲線から許容繰返し回数 N を求め当該サイクルの使用係数(疲れ損傷度)をカウントする。
- ⑥ 各応力サイクルについて①~⑤に繰返して合算し累積使用係数(累積損傷度) $D \leq 1$ であることを確認する。 D が1を越えるなら設計をリセットする。

煩雑に見えるが、これはシェークダウン制限($S_n \leq 3S_m$)を満たさない場合の措置に尽きる(コード2機器に同じ)。具体的な評価手順をチャート 3-2 に示す。このチャートは下記の規格に基づいている。

JSME S NC1 発電用原子力設備規格—設計・建設規格<第1編 軽水炉規格>

内容的には ASME Sect. III Div.1 NB Component に同じ。ただひずみ補正係数について、この国内のクラス1配管規定の方が合理化されていると思われる。



(3) コード 2 配管規定は配管系の温度変化による熱膨張応力を疲労源とみなして、その緩和と抑制を図るものである。確かにこの目論見は現実的で一応成功している。コード 1 配管規定は、更に温度変化に際して過渡的に生じる肉厚分布の非定常熱応力(熱過渡応力)を加えることで急激な温度変化(ホットショック/コールドショック)にも対応できるようにコード 2 配管規定を拡張したものと考えられる。この場合、流体温度が急上昇あるいは急降下する場合には上図(a)(b)のように管の内外表面で過渡的な熱応力が加算されて応力範囲が拡張された状態になる。熱衝撃に近い形でこの拡張が起きると疲労損傷の加速は決して無視できなくなる恐れがある。このような温度急変ともなう変動応力のピークはごく初期に起きるので単純に熱膨張応力範囲に加算すれば安全側に評価できる。

なお流体温度の変化は、断面肉厚が変化する部分(例えばテーパ接続部、管-フランジ接続部など)にも熱変位差によって熱過渡応力が発生する。また異材継手があると、定常的に熱応力が発生する。

以上のような熱過渡応力や定常熱応力は温度変化や温度シフトがノーマルであれば、コード 1 配管規定の運用で対処できる。コンピュータによる熱及び熱解析を行ってもよいが、旧来から使用されてきた Mcneil-Brock 法⁽¹²⁾などの簡易計算を使ってよい。

(4) コード 2 配管では応力増幅係数 i (SIF)という疲労試験の基づく仮想的な応力係数を用いて、形状に依存した応力の多寡をカウントして(1次+2次)応力制限に使用している。コード 1 配管では配管部品に生じる全ひずみ(→全応力)をカウントして設計疲労曲線で疲労寿命を求める方法をとるため、係数 i とは異なる次の2つの応力係数を用いているのが目をひく。

C 指数：形状依存の応力係数で少し大きい領域に賦存する応力集中をカウントするもの

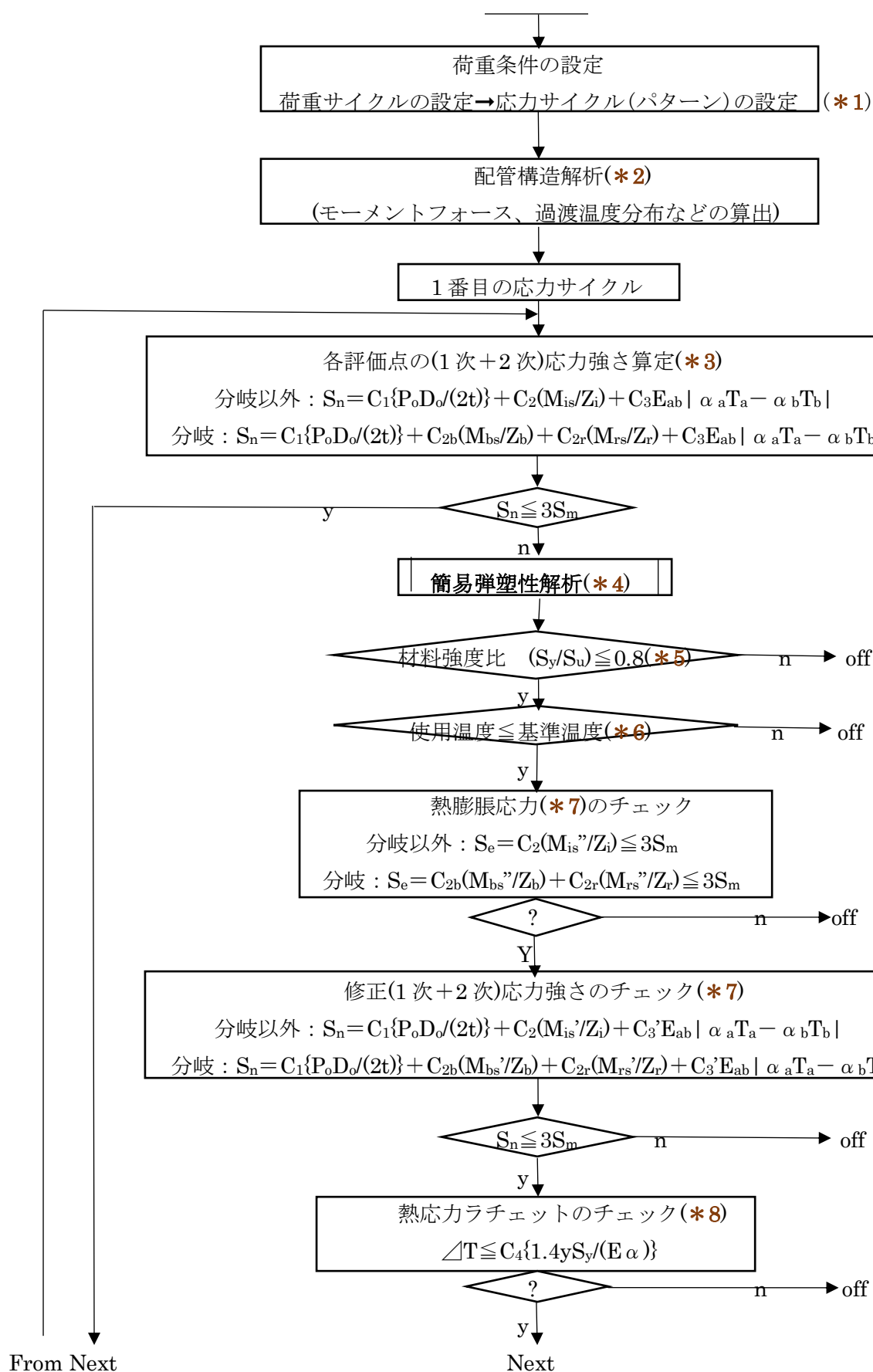
K 指数：溶接部や切欠き基底に生じる局所的な応力集中をカウントするもの

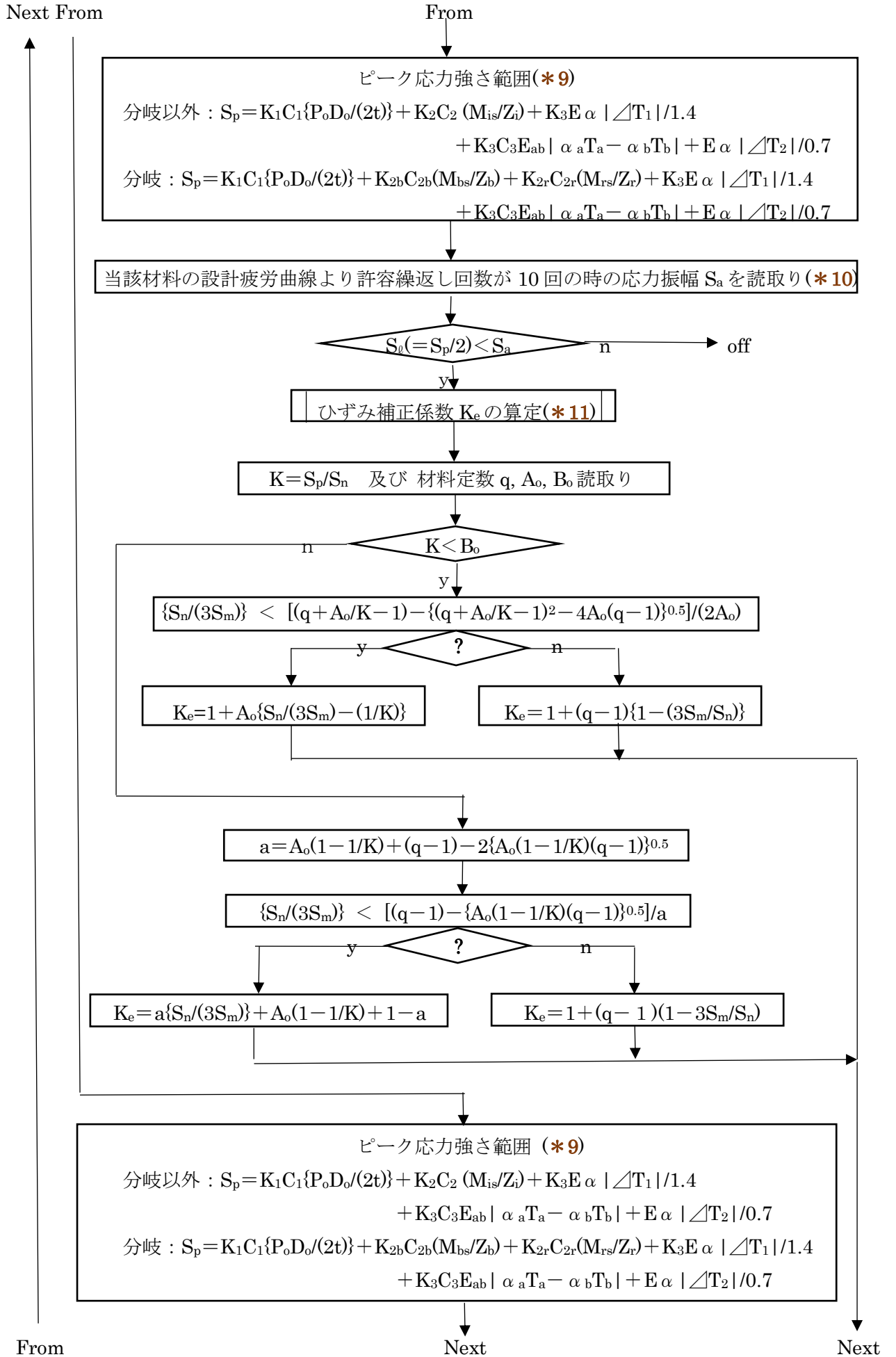
配管部品は標準パターンをもった類型品なので、応力集中係数を用いて容易に局部応力をカウントできる。C 係数はこれを基準応力(例えば M/Z)に乗じることで公称応力を導く。K 係数はこれを公称応力(例えば $C \cdot M/Z$)に乗じることで局部応力(ピーク応力)を導く。

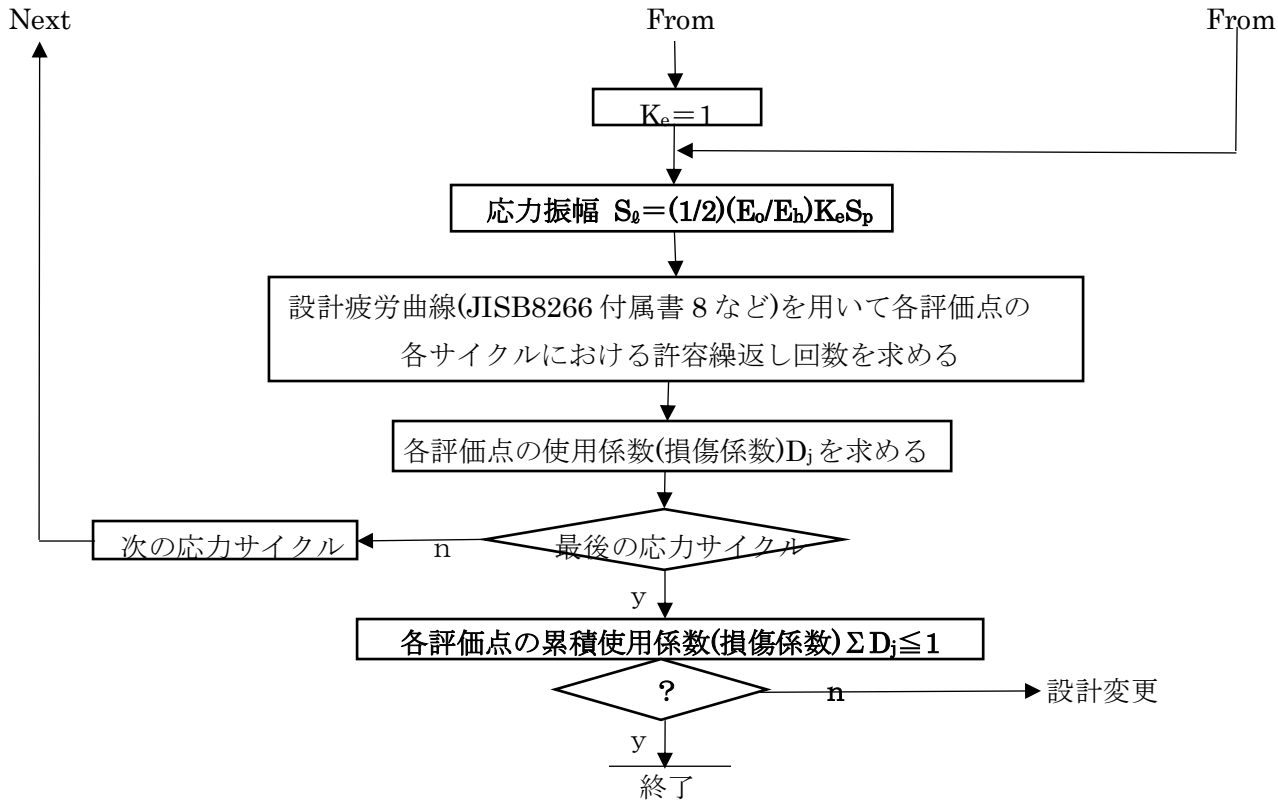
C, K 指数は JSME 規格も ASME 規格も殆ど同じ。添付 B に ASME 規格の内容を示す。

以上の他にも種々議論すべき点がある。チャート 3-1 に補足説明を付けたので参照されたし。

チャート 3-2 : コード 1 配管の疲労評価手順
(JSME S NC1 PPB-3500 ベース)







< 記号説明 >

S_n =(1次+2次)応力強さ範囲(N/mm²)、 S_p =ピーク応力強さ範囲(N/mm²)、 S_i =応力振幅(N/mm²)

S_e =熱膨張応力範囲(N/mm²)、 S_m =設計応力強さ(N/mm²)、

S_y =規格最小降伏点(N/mm²)、 S_u =規格最小引張強さ(N/mm²)、

P_o =当該サイクルにおける運転圧力の範囲(MPa)、

M_{is} =当該サイクルにおいて、管の熱膨張、管の支持点の変位および機械的荷重(自重を除く)により生じる相当モーメントの範囲(N·mm)、

M_{is}' =当該サイクルにおいて、管の支持点の変位(熱によるものを除く)及び機械的荷重(自重を除く)により生じる相当モーメントの範囲(N·mm)

M_{is}'' =当該サイクルにおいて熱による管の支持点の変位および熱膨張により生じる相当モーメントの範囲(N·mm)

M_{bs} =当該サイクルにおいて、管の熱膨張、管の支持点の変位および機械的荷重(自重を除く)により分岐接続の分岐管付根に生じる相当モーメントの範囲(N·mm)、(*13)

M_{bs}' =当該サイクルにおいて、管の支持点の変位(熱によるものを除く)および機械的荷重(自重を除く)により分岐接続の分岐管付け根に生じる相当モーメントの範囲(N·mm)、(*13)

M_{rb}'' =当該サイクルにおいて、熱による管の支持点の変位および熱膨張により分岐接続の分岐管付け根に生じる相当モーメントの範囲(N·mm)、(*13)

M_{rs} =当該サイクルにおいて、管の熱膨張、管の支持点の変位および機械的荷重(自重を除く)により分岐接続の主管付け根に生じる相当モーメントの範囲(N·mm)、(*13)

M_{rs}' =当該サイクルにおいて、管の支持点の変位(熱によるものを除く)および機械的荷重(自重を除く)により分岐接続の主管付け根に生じる相当モーメントの範囲(N·mm)、(*13)

M_{rs}'' =当該サイクルにおいて、熱による管の支持点の変位および熱膨張により分岐接続の主管付け根に生じる相当モーメントの範囲(N·mm)、(*13)

t =管の厚さ(mm)、 D_o =管の外径(mm)、 Z_i =分岐以外の管の断面係数(mm³)、→(*12)
 Z_b =分岐管付根の断面係数(mm³)、 Z_r =分岐部の主管の断面係数(mm³)、

C_1 =内圧に関する2次応力指数(-)、 C_2 =モーメント荷重に関する2次応力指数(-)、
 C_{2b} =分岐部(分岐管側)の分岐部 C_2 指数(-)、 C_{2r} =分岐部(主管側)の C_2 指数(-)、
 C_3 =熱荷重に関する(膜+曲げ)2次応力指数(-)、 C_3' =熱荷重に関する曲げ2次応力指数(-)、
 K_1 =内圧に関する局部応力指数(-)、 K_2 =モーメント荷重に関する局部応力指数(-)、
 K_{2b} =分岐部(分岐管側)の K_2 指数(-)、 K_{2r} =分岐部(主管側)の K_2 指数(-)、
 K_3 =熱荷重に関する局部応力指数(-)、 K_e =ひずみ補正係数(-)、

【以上 C,K 指数については(*14)および添付 A を参照のこと】

E =室温における縦弾性係数(N/mm²)、 α =室温における熱膨張係数(°C⁻¹)
 E_{ab} =構造物の不連続部のうち応力集中度が最も高い推定された点を境とする夫々の側の室温に
 における縦弾性係数の平均値(N/mm²)
 E_o =疲労設計曲線の基準縦弾性係数(N/mm²)、 E_h =評価温度における縦弾性係数(N/mm²)
 α_a, α_b =構造上の不連続部のうち応力集中度が最も高いと推定された点を境とする夫々の側に
 における室温における熱膨張係数(°C⁻¹)、
 T_a, T_b =構造物の不連続部のうち応力集中度が最も高い推定された点または材質を異にする夫々の
 側における次の計算式から計算した範囲 l_a 及び l_b 内の平均温度(°C)

$$l_a = (d_a t_a)^{0.5}, \quad l_b = (d_b t_b)^{0.5}$$

ここで d_a, d_b =夫々の側における管の内径(mm)、 t_a, t_b =夫々の側の平均肉厚(mm)

【以上、 E_{ab} 、 α_a, α_b 、 T_a, T_b については(*15)を参照のこと】

ΔT_1 =厚さ方向の線形近似の内外面温度差(°C)、 ΔT_2 =非線形温度分布における温度差(°C)
 【これら温度差については(*16)を参照のこと】

$q, A_o, B_o = K_e$ の算定に使用する材料定数(下記)、 D_j =各サイクル(j)の使用係数(損傷係数)(-)

表 PVB-3315-1 q, A_o および B_o の値

材 料 の 種 類	q	A_o	B_o
低 合 金 鋼	3.1	1.0	1.25
マルテンサイト系ステンレス鋼	3.1	1.0	1.25
炭 素 鋼	3.1	0.66	2.59
オーステナイト系ステンレス鋼	3.1	0.7	2.15
高ニッケル合金	3.1	0.7	2.15

ΔT =厚さ方向の線形近似の内外温度差(≡ ΔT_1) (°C)、 y =係数(下記の表による)、
 C_4 =係数(フェライト系材料に対し 1.1、オーステナイト系材料に対し 1.3)

x	0.3	0.5	0.7	0.9
y	3.33	2.00	1.20	0.80

x =係数[= $\{P_o' D_o / (2t)\} / S_y^*$]、 S_y^* =流体温度における設計降伏応力(MPa)、
 P_o' =運転状態での最大圧力(MPa)、 E, α, D_o, t →前記に同じ

＜ 補足説明 ＞

(*0) ASME B31.1, B31.3 など動力/化学プラント系配管のコードルールでは、特に疲労設計が要求されることはないが、Nuclear のクラス 1 配管の設計では、コードルールの中に疲労強度の確認手順が含まれているので、配管の疲労強度をチェックする必要があるときは、このルールを準用すればよい。ここでは、国内原発のクラス 1 配管に適用される下記の規格をもとに設計チャートにしてみた。

JSME S NC1 発電用原子力設備規格—設計・建設規格<第 1 編 軽水炉規格>

この規格は内容的には ASME Sect. III NB Component の Class 1 配管規定とほぼ同じである。すなわち、簡便な応力係数(→Stress index 即ち応力指数)値を基準応力に乗じて公称応力、更に局部応力の繰返し範囲を求めこれを設計疲労曲線と照合して疲労損傷度の評価を行う。なおこのチャートの中には原子力特有のプラント状態の扱いは含まれていないので、特にこだわりなく一般のプラント配管に適用できるはずである。

(*1) [SE-02-IG-001 配管系荷重のパターン分類]にも示されるように、配管に作用する荷重には種々のものがあるが、一般的には内圧/自重/地震/熱伸縮拘束/ノズル変位/熱荷重の単独ないし組合せの負荷になり、これらの負荷の繰返しによって疲労が蓄積される。この場合、単独負荷や組合せ負荷から生じる応力サイクル/サイクルパターン/回数見積りが重要になる。通常、予想されるサイクルパターンには、発停サイクル/定常運転サイクル/過渡運転サイクル、地震サイクルなどあり、これらのパターンについてまず、変動する質量/圧力/温度/外力を把握し設定する必要がある。更に必要に応じてイベント的に発生するパターンあるいは振動パターンについても定量的に設定する必要がある。単独パターンによって疲労が進行する場合も多いが、基本的には当該配管に想定される複数パターンの重畳によって疲労が進行するので、荷重条件の設定に際して、安易な見切りはさけるべきである。

(*2) 配管の管壁に生じる応力は、次の 2 タイプに分かれる。

①梁の引張圧縮/曲げ/捩りによる梁応力、②管壁の変形によるリング/シェル応力

このチャートで使用する応力式は全て規格から引用したもので、これらの式で扱われる荷重は圧力荷重(P)、モーメント荷重(M)、熱荷重(T, ΔT)の 3 種類であり、次の対応がある。

モーメント荷重→梁応力/シェル応力、 圧力荷重/熱荷重→リング/シェル応力

この場合、梁の曲げ捩れはモーメント荷重として発生応力がカウントできるが、梁の引張圧縮による応力はモーメント荷重でカウントできない。また圧力荷重/熱荷重の中にも規格の応力式ではカウントできないものもある。規格で対象にする熱荷重は管断面に均一な流体温度の変化に伴う過渡的応力であって、例えば流体の温度揺らぎや熱的成層流による熱応力はカウントできない。

ただ梁の引張/圧縮力による応力は、モーメントによる応力に比べればかなり小さく無視できることが多い。また温度揺らぎや熱的成層流による熱応力はかなり特異な部類に属する。仮にこれらの応力が無視できない場合は、解析あるいは理論式を用いて発生応力をカウントし、応力サイクルパターンに応じて、単独で扱うかあるいは他の荷重との組合せで扱えばよい。

以上の議論でもわかるように規格の応力式は全てをカバーするわけではない。しかし熱膨脹拘束、ノズル変位、地震動あるいは水撃/脈動から生じる不平衡力から生じるモーメント荷重の影響は大きい。また運転操作に伴う流体温度の変化の頻度も高い。そこで、前者については配管構造解析(梁解析)、後者については熱解析を実施し、疲労評価に先立ってこれら荷重変化の範囲を定量化しておく必要がある。

- (*3) (1次+2次)応力強さ範囲 S_n は、荷重変化の範囲から生じるものであって、局部の応力集中を含まない、云わば公称的な応力(→公称応力)の変化範囲をいう。この場合、応力強さ範囲はチャート1に云う、**極値1と極値2の最大主応力差(→応力強さ範囲)**に該当していることを認識しておくべきである。分岐部と分岐部以外に別けて応力式を示しているが、本質的にはいずれも

圧力によるリング応力+モーメントによる梁曲げ応力+熱によるシェル応力

である。熱によるシェル応力は構造不連続部分に限られるので注意。

この(1次+2次)応力強さ範囲は疲労評価の対象ではない。疲労評価が対象とする応力はあくまで局部応力である。それでは何故、全体に分布する公称応力を問題にするのだろうか？

これは、通常の疲労評価では**構造物全体の弾性挙動が前提になっている**からである。一般に疲労評価の対象になる構造物の応力集中部分にある局部応力は、降伏点を十分に上回り塑性域にあることが多いが、構造物全体が骨格的に弾性挙動するのであれば、公称応力に応力集中係数(SCF)を乗じることで、等価な弾性応力範囲(応力振幅)をカウントして評価することができる。

構造物の骨格的な弾性挙動は**シェークダウン挙動**と呼ばれ構造物の設計の指標になっている。即ちリスクの多い塑性域での設計を回避するには、公称応力(S_n)を $2x$ 降伏応力(→ $3S_m$)以下にしなければならない。然るに、何らかの理由で対象構造物がシェークダウンせず部分的にもしろ非弾性的な挙動をとるのであれば、骨格部分で生じる塑性ひずみ増分(→塑性ひずみサイクル)を考慮して公称応力を割増しておく必要がある(単に $SCF \times S_n$ では疲労評価できない!)。

このような場合、**簡易弾塑性解析**という手法が用いられる(ここでも然り)。手順としては公称応力範囲即ち(1次+2次)応力強さ範囲 S_n をカウントしてこれが弾性挙動範囲にはいるか否かを判定し、もし $S_n > 3S_m$ であれば、簡易弾塑性解析を行ってひずみ補正係数 K_e を求め応力振幅の割増しを行う。実際には、この手順は単純ではなく幾つかの簡易解析の成立条件がついている。簡易弾塑性解析の成立が困難であれば非弾性挙動域での塑性サイクルを解析することになる。

- (*4) 簡易弾塑性解析は、端的に云えば、ひずみ補正係数 K_e を求めることである。長い間、この係数には Tagart の方法をベースに Langer による上限を設けたものが使用されており、今でも JIS B8266 付属書 8 などに活着している。しかしこの Tagart-Langer の係数⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾は、

S_n が $3S_m$ を越えた辺りでやや危険側になること/ S_n が大きくなると過度に安全側になることから、国内 Nuclear 関連で長年見直しが行われ、ここで示すような形に補正されている。なおオリジナルの係数には幾つかの成立条件(*5)~(*8)が付いているが係数補正後も活着している。

- (*5) 降伏点と破断点(引張強さ)が漸近していることは、塑性域にはいって十分な変形(加工硬化)が

得られないことを意味する。Langar モデルは延性材料を前提にしているため、高張力鋼のように伸び無しで破断する材料を排除したものと思われる。なお上限を 0.8 においたのは 0.8 以上であれば繰返し負荷によってひずみ軟化が起こる恐れがあるからである。

- (*6) クリープが顕著になるとクリープ-疲れの相乗効果によって常温ベースの疲労条件が崩れてくるためとこの条件がもうけられている。規準温度(クリープ遷移温度)の通り。
- ① 低合金鋼、マルテンサイト系ステンレス鋼及び炭素鋼 → 370°C
 - ② オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金 → 430°C
- (*7) コードでは、もともと構造物においてシェークダウン挙動は絶対そうあらねばならないといったものではなく、融通の範囲内で扱えると考えているようである。すなわち
- ① 過渡状態で肉厚断面に生じる温度勾配による熱曲げ応力は構造物の変形への寄与が希薄である所から S_n から除外してかまわない、また
 - ② 配管では熱曲げ応力以外は全て膜応力成分になるが、それは延性材料使用という観点からはシェークダウン限界の $3S_m$ の 2 倍程度まで認められる、ただ
 - ③ この場合、熱膨張応力のように構造物の変形を大きく支配する膜応力成分については $3S_m$ 以内にセーブしておく必要がある
- という考えが基底にあるような気がする(→いずれも TS 作成者の推測)。①は修正(1次+2次)応力強さのチェックに、③は熱膨張応力のチェックに対応しており、①+③ $<2 \times 3S_m$ であるため、結果として②の対応になる。前述のようにオリジナルの簡易弾塑性解析は JIS B8266 の付属書 8 に活かしているが、その中のノズル-配管接続部に関する規定(3.6 項)が①の修正(1次+2次)応力強さのチェックおよび②の熱膨張応力のチェックに相当する。
- なお①②に関連して、修正(1次+2次)応力強さの場合、モーメント範囲(M_{bs} , M_{rs})には熱による支持点の変位と熱膨張によるものが取り除かれているので注意のこと。また熱応力項にかかる応力指数が $C_3 \rightarrow C_3'$ になっているので注意する(因みに C_3 は[膜+曲げ]、 C_3' は膜だけになっている)。
- (*8) 熱応力ラチェットは通常の配管設計では耳慣れない言葉であるが、高圧設備の定義によれば、「静的な応力(→長期1次応力)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重畳されて負荷されるとき、それらの方向や大きさに依存してある特定の方向に進行性のある非弾性変形が蓄積される現象。内圧を受ける円管の管壁が加熱冷却の繰返しを受ける場合などにこの現象が問題となることがある。」とされている。詳しい説明は別途にするが、この進行性の非弾性変形の影響は、通常の評価法でカウントできないため、このような熱応力ラチェットの制限規定が設けられているようである。
- (*9) さて公称応力 S_n の如何によらず、ピーク応力強さ範囲の計算式は同じ。基本的には局部応力指数 K_j を公称応力 S_n に乗じ、熱過渡(非定常伝熱)などで加算される熱応力すなわち
- $$K_3 E \alpha \left| \Delta T_1 \right| / 1.4 + E \alpha \left| \Delta T_2 \right| / 0.7 \quad (\text{分母 } 1.4, 0.7 \rightarrow 2(1-\nu), (1-\nu))$$
- が加算される。
- (*10) これは、設計疲労曲線が許容繰返し回数 10 回以下の極低サイクル疲労に対し有効性がない

ために設けられた条件である。 $S_n > 3S_m$ の場合の局部応力範囲 S_p 値の限界を与える。

(* 11) このひずみ補正係数は国内 Nuclear 関連で長年見直しが行われ補正されたものである。

$$K_e = 1 + A_0 \{ S_n / (3S_m) - (1/K) \} \rightarrow \text{旧 Miti 501 号の式を踏襲するもの}$$

$$K_e = 1 + (q - 1) \{ 1 - (3S_m / S_n) \} \rightarrow \text{Tagart-Langer 式を弾塑性解析で見直したもの}$$

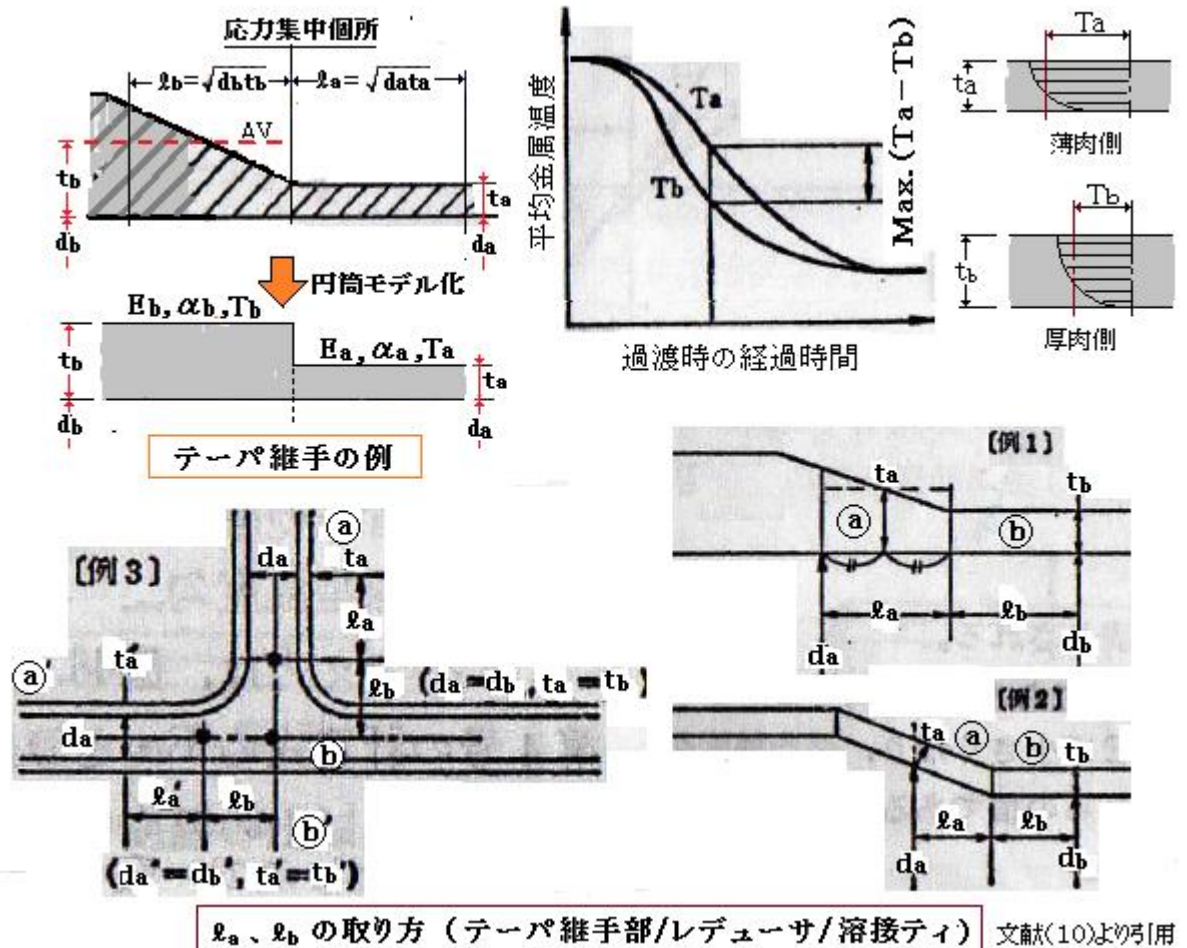
大きな SP に対しては更に Targart-Langer 式の欠点を考えて補正が加えられている(ようだ)。

(* 12) $D_{o,t}$ については平均的な減肉を考慮し、断面 2 次モーメントについては公称肉厚/公称径でいいのではないかとと思われる。

(* 13) 分岐構造のモーメント荷重 ($M_{bs}, M_{rs} \dots$) については、構造解析から得られたものを加工する必要がある。詳細は ASME NB 3650 の記号定義(d)を参照のこと。

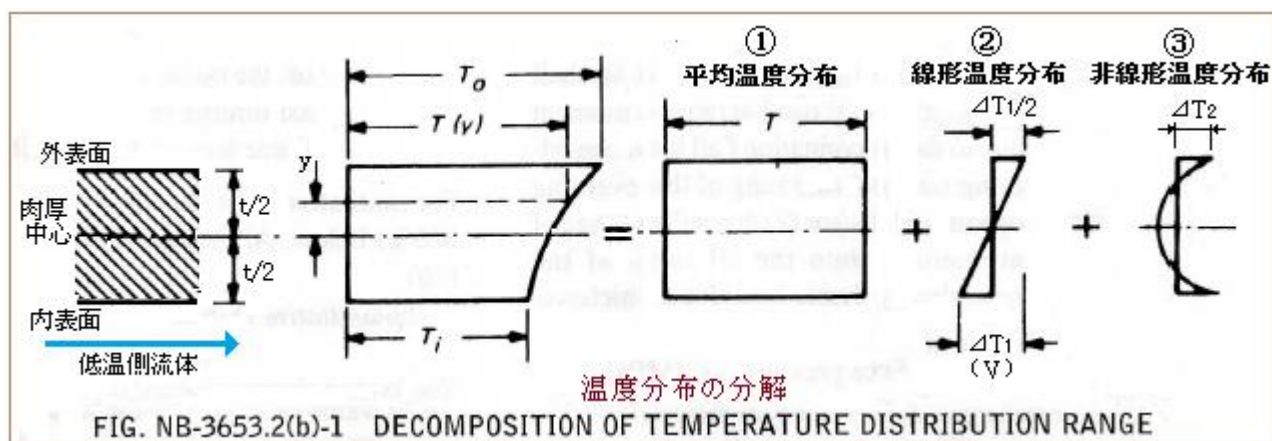
(* 14) C 指数は、形状依存の応力係数で少し大きい領域に賦存する応力集中をカウントするもの(ホットスポット応力に近い)。K 指数は溶接部や切欠き基底に生じる局所的な応力集中をカウントする。エルボやティ部分はモーメント荷重によって周廻りに著しく変形するので大きな C 指数が与えられる。C, K 指数は JSME S NC1 で与えられているが、その多くは ASME Sect. III NB3650 に由来する(末尾添付 A 参照)

(* 15) 構造不連続部に定義されるパラメータ [$E_a, E_b (\rightarrow E_{ab}), \alpha_a, \alpha_b, T_a, T_b$] は下図の例による。



テーパ継手の例からわかるように、肉厚移行部分(応力集中部)の両側 l_a, l_b 区間の等価肉厚を求めて段差を持った円筒にモデル化して、両側の円筒の温度差による変位差によるシェル応力を求めている(→ C_3, C_3' 指数はこの円筒モデルのシェル解析から得られたものと考えられる)。この場合、両側の平均金属温度は、流体温度が高から低あるいは低から高に変化するに際して過渡的に変化し、ある時間に最大の温度差になるので、このときの両側の平均金属温度 T_a, T_b を計算に使用する。 T_a, T_b は非定常熱解析によってもいいが、Mcneil-Brock 法などの簡易計算でも算出できる(なお両側の円筒を個別に扱うので温度差が大きくなり安全側になる)。McNeil-Brock 法については[HE-02-TM-007 熱過渡における肉厚断面の非定常温度分布の算定]を参照のこと。

- (*16) $\Delta T_1, \Delta T_2$ は下図のように壁厚に分布する温度勾配をモデル化するもの。ASME Sect. IIIの NB3600 に詳しく定義されている(下図参照)。温度変化に際して生じる過渡的な Max 温度で、これも上述の Mcneil-Brock 法で計算することができる。



3.4 その他配管関連の疲労評価

以上、コード規定に準じたコード 2 配管及びコード 1 配管の疲労解析・評価について述べてきた。しかしコード規定には限界があり、例えば、

- ① 応力係数を用いて応力がカウントできないような配管部品が含まれる場合
- ② 規格の応力算定式では扱えない繰返し荷重がある場合
- ③ 寸法や材料あるいは使用環境などが通常の配管イメージを越える場合

次のようなケースでは扱いが難しくなる。ここではこれらオフケースの疲労評価法を議論する。

3.4.1 応力係数で扱えない配管部品の疲労評価

- (1) コード 1,2 配管は、配管構造解析を前提にしておりモデル化のテクニックによってその配管に発生するモーメント・フォースは計算できるし、更に応力係数(SIF や指数)が入力される限り発生する変位/各種応力/応力範囲を計算し評価することができる。ところが配管コードで与えられる応力係数(あるいは文献等で認知された応力係数)は、典型的な管構造(直管/曲管/分岐管など)に限られており、例えば下記のようなものは、別途応力計算が必要になる。

配管部品類(バルブ、ベローズ継手、クランプなど特殊継手、ストレーナ、ポット類など)
 一体化支持金具(サドル、シュー、トラニオンなど)、組込み計器(温度計、圧力計、流量計など)

- (2) このような配管構成部品については製作者に評価を委ねるのがいいが、もしそれが不可であれば

- ① 応力係数が既知の配管部品に類似した構造であれば、その係数を安全側に転用
- ② テキスト/公式集/便覧等から適切な応力式/疲労強度減少係数/集中係数/疲労曲線を引用
- ③ 機器規格/部品規格類/Code-Case などで与えられる応力式/応力係数/評価法を適用
- ④ 理論/FEM/実験/公開データなどに基づく正攻法的なアプローチ

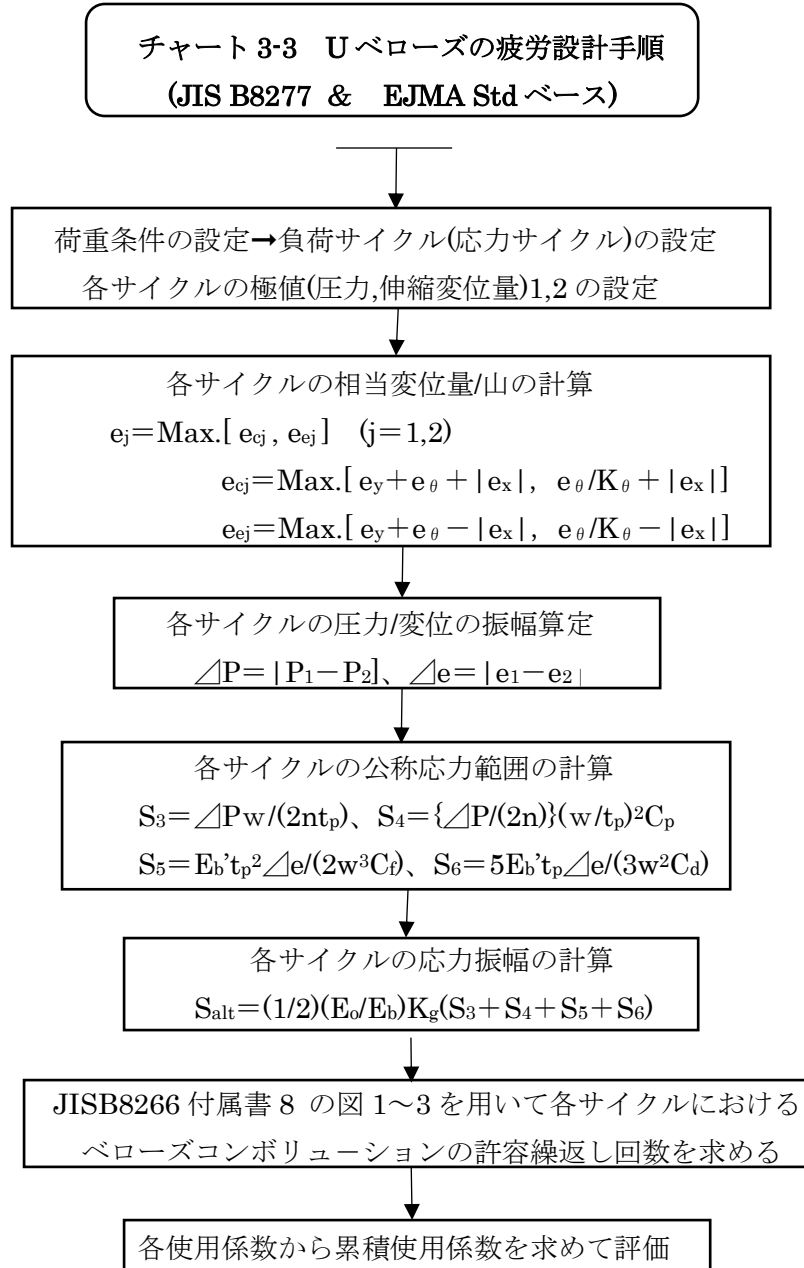
③に関しては次のついでには次のようなものがある。

- バルブ類→ ASME Sect.III Div. 1 NB-3500 Valve Design、
 JSME S NC1 VVB-3000 クラス 1 弁の設計、VVB-3370 弁箱の疲労解析
- ベローズ→ EJMA Standards of Expansion Joint
 ASME Sect.VIII Div.2 M.Appendix 26 P.V & H.E Expansion Joint
 JIS B8277 圧力容器の伸縮継手
 ASME B31.3 Appendix X Metallic Bellows Expansion Joint
 JPI 7S-77 付属書 H 金属製ベローズ型伸縮継手
- シュー→ ASME Code Case N318 Procedure for Evaluation the Design of
 Rectangular Cross Section Attachment
- トラニオン→ ASME Code Case N392 Procedure for Evaluation of the Design of
 Hollow Circular Cross Section Welded Attachment

材料によっては該当する設計疲労曲線がコードにないこともある。この場合は部品メーカーや文献類のデータを引用するか、新たに疲労試験を行い疲労曲線を作成する必要がある。その場合最適化された 曲線に対し適当な安全裕度を持たせて設計曲線を作り使用すべきである。

- (3) サンプルとして U ベローズ継手の疲労評価手順をチャート 3-3 に示す。繰返し荷重としての変位

データとしては、ベローズ継手モデルを含む配管モデル解析から得られた結果を用いる。



【 記号説明 】

P=圧力(MPa)、e=相当変位/1 山(mm)、e_c=相当圧縮変位/1 山[mm]、e_e=相当引張変位/1 山(mm)
 e_θ=角回転から生じる軸方向変位(mm)、e_x=軸方向移動から生じる軸方向変位/1 山(mm)、
 e_y=軸直移動から生じる軸方向変位/1 山(mm)、ΔP=圧力振幅(MPa)、Δe=変位振幅(mm)、
 K_θ=角回転に対する内圧効果係数、K_g=ベローズに対する応力集中係数、w=山高さ(mm)、
 n=ベローズ層数、t_p=修正厚さ(mm)、C_p=圧力-モーメント係数、C_f=撓み-荷重係数、
 C_d=撓み-モーメント係数、E_b'=ベローズ材の常温の縦弾性係数、E_b=ベローズ材の設計温度の
 縦弾性係数(N/mm²)、E_o=設計疲労曲線の基準としての縦弾性係数(N/mm²)、

【 補足説明 】

全般に JIS B8277 によるが、相当変位計算については EJMA の Std. の C-1 Movements, Forces and and Moment -Circular Expansion Joint の(C-1)~(C-6)式による。

3.4.1 コードでは対処できない繰返し荷重に対する疲労評価⁽⁷⁾⁽⁸⁾

(1) 周知の通り、コードの評価応力式で扱われる荷重は内圧/内圧推力/自重/熱膨張/境界変位などで、評価対象は内圧応力/熱膨張応力/一部の熱応力に限られている。然るに冒頭でも述べたように実際のプラント配管では温度揺らぎや温度成層化等による熱疲労や流体振動に由来する振動疲労による損傷が過半を占めている。これらはいわゆる高サイクル疲労に分類される現象で旧くから知られてはいたが設計的には事前の疲労評価までに至ることは少なく、安全措置が優先したように思う。然るに Nuclear 関連トラブルを機に知見が深まり、次の JSME 規格が発行され設計で使用されている。

①JSME S-012 配管内円柱状構造物の流力振動評価指針 (日本機械学会)

②JSME S-017 「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」(日本機械学会)

①は温度センサとして配管に挿入されるサーモウエルの渦振動に関する設計指針で、②は温度が異なる流体が混合する合流配管でおきる熱疲労に関する設計指針である。

ほかにもコードの評価対象から外れる熱疲労や振動疲労は多数存在する。それらに関する情報は別途、関連 TS で扱うものとし、ここではとりあえず、上記の2つの指針の内容を紹介したい。

(2) サーモウエルの渦振動に関する疲労評価について。内容は多岐に及ぶため、ここではそのサマリーを **チャート 3-4** に示す。手順としては、まずサーモウエルの固有振動と流体のカルマン渦振動が共振しないように、あるいは共振域に近づいても十分減衰するように振動数を離隔し、次いで流れの揺動から生じる強制振動による応力範囲を疲労限界応力以下に抑える。共振状態を回避するが、評価の前提になっているが、実際には共振下でも疲労限界に達しなければよい訳であるから多少安全措置に走っている印象もある。

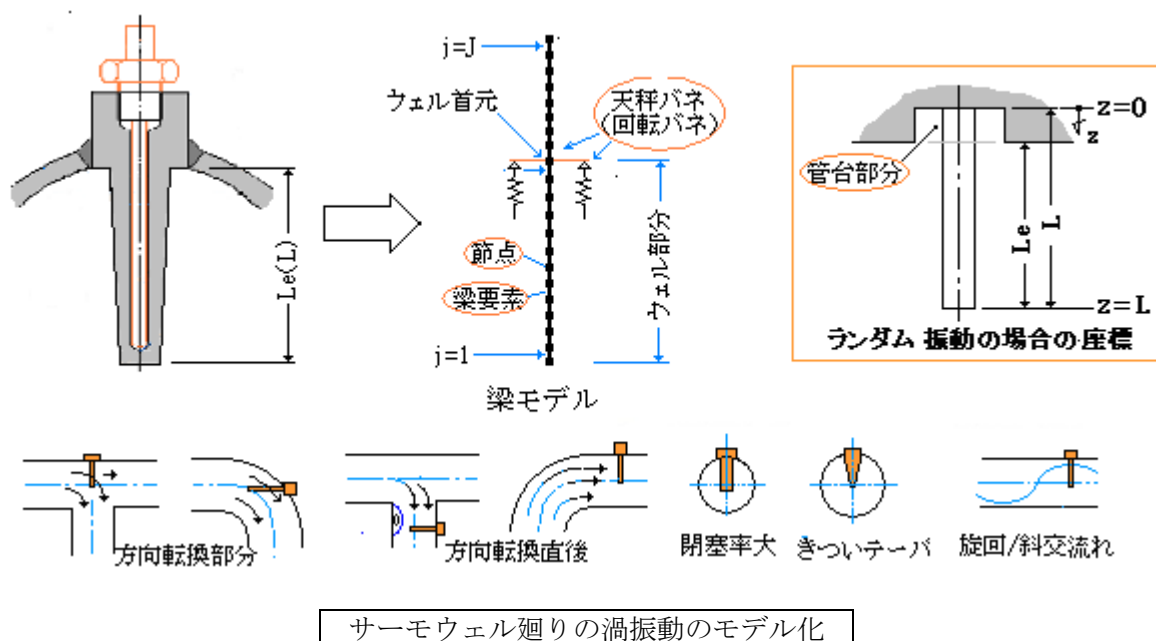
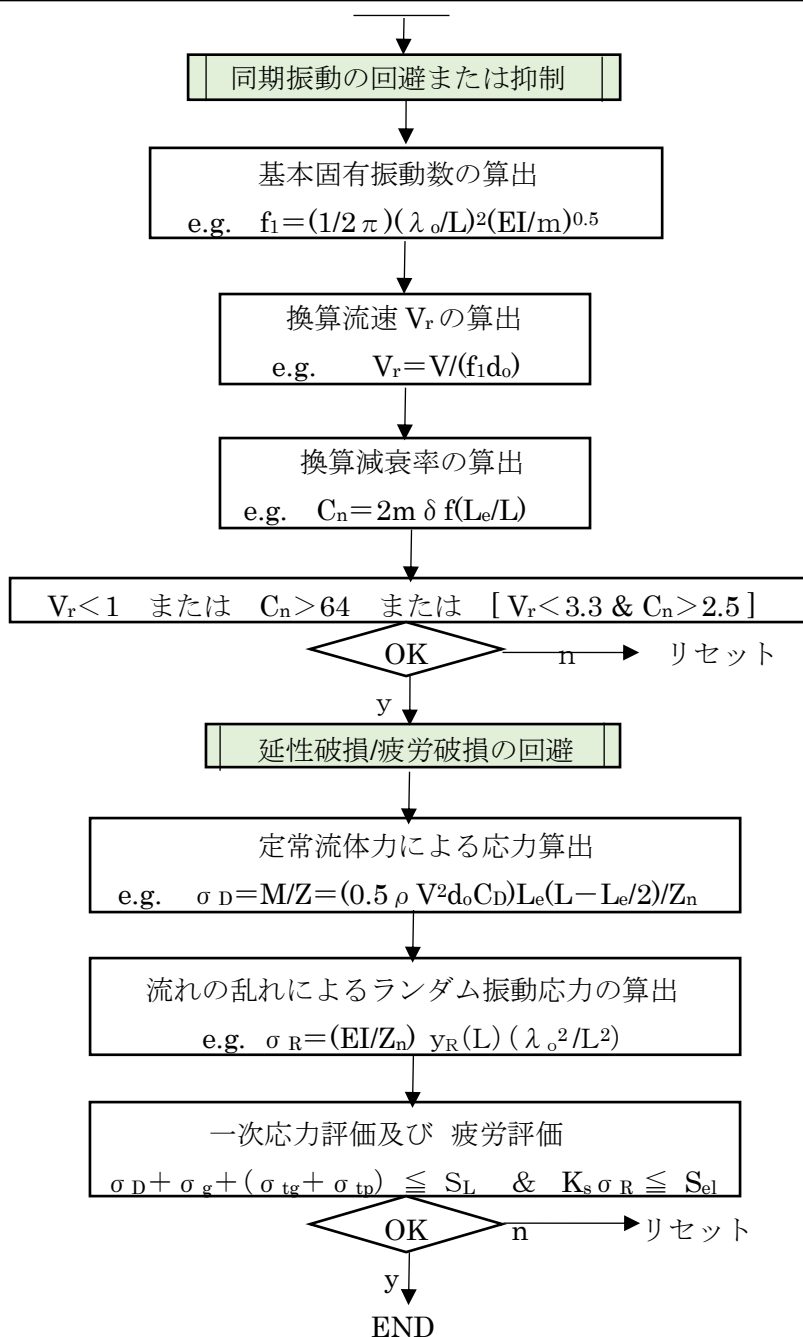


チャート 3-4 サーモウエルの渦振動による疲労評価手順 (Summary)
(JSME S-012 配管内円柱構造物の流力振動評価指針)

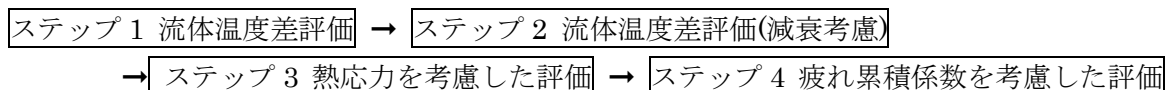


【 記号説明】

V = 流速、 V_r = 換算流速、 C_n = 換算減衰率、 σ_D = 抗力による応力(Pa)、 σ_R = ランダム振動応力(Pa)
 d_o = ウェルの外径(m)、 L = ウェル首下長さ(m)、 L_e = ウェルの有効長さ(m)、
 Z_n = ウェルネック断面係数(m³)、 E = ウェルの縦弾性係数(Pa)、 I = ウェルの断面 2 次モーメント(m⁴)
 m = ウェルの単長当たりの質量(kg/m)、 K_s = ウェルネックの応力集中係数、 δ = 構造対数減衰率、
 f_1 = ウェルの 1 次固有振動数、 λ_o = 基本振動数係数、 C_D = 抗力係数、 ρ = 流体密度(N/m³)、
 $f(L_o/L)$ = 補正係数 $y_R(L)$ = ウェル先端のランダム振動に由るピーク変位振幅(m)
 σ_{tp} , σ_{tg} = 配管側の圧力、自重による一次応力(Pa)、 σ_g = ウェル自重による応力(Pa)、

S_{el} = 疲労限界応力 (Pa)

- (3) 合流管の熱疲労に関する評価について。高温流体と低温流体の合流による温度揺らぎから起きる熱疲労の評価については、JSME S-017 で非常にわかり易く手順化されているので、特にチャートにするまでもないが、クイックレファレンスとして敢えてチャート 3-5 に JSME S-017 の流れをまとめてみた。内容的には次の 4 つのステップを踏んでいる。



評価の”本丸” はステップ 4 であるが、データベースの煩雑な計算になるので、ステップ 1~3 の間でプレ評価を行って掃き出しを行うとともに予めパラメータを計算しておくという非常に丁寧な手順が採られている。なおステップ 4 では、実験に基づいて解析して整理したレインフロー法に基づくデータが用いられており容易に[温度揺らぎ幅 vs 発生頻度]の分布が得られるようになっている。難を云えばまだデータが十分でないのかも知れないが、安全側に運用すればいいと思う。

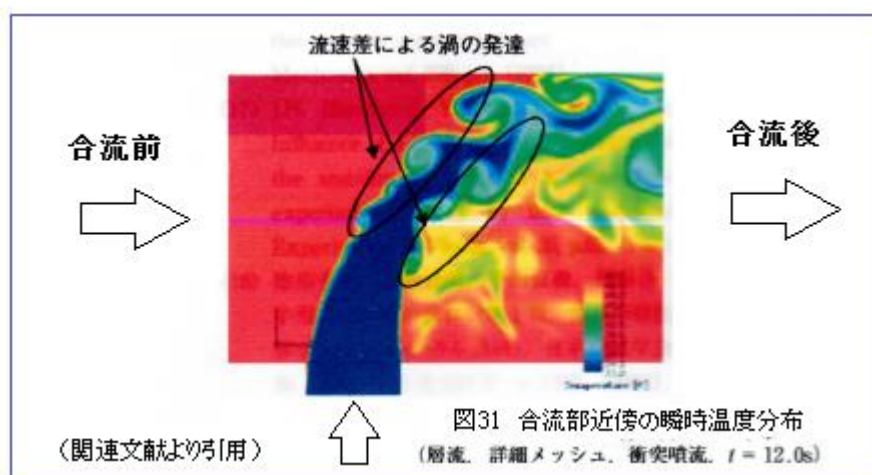
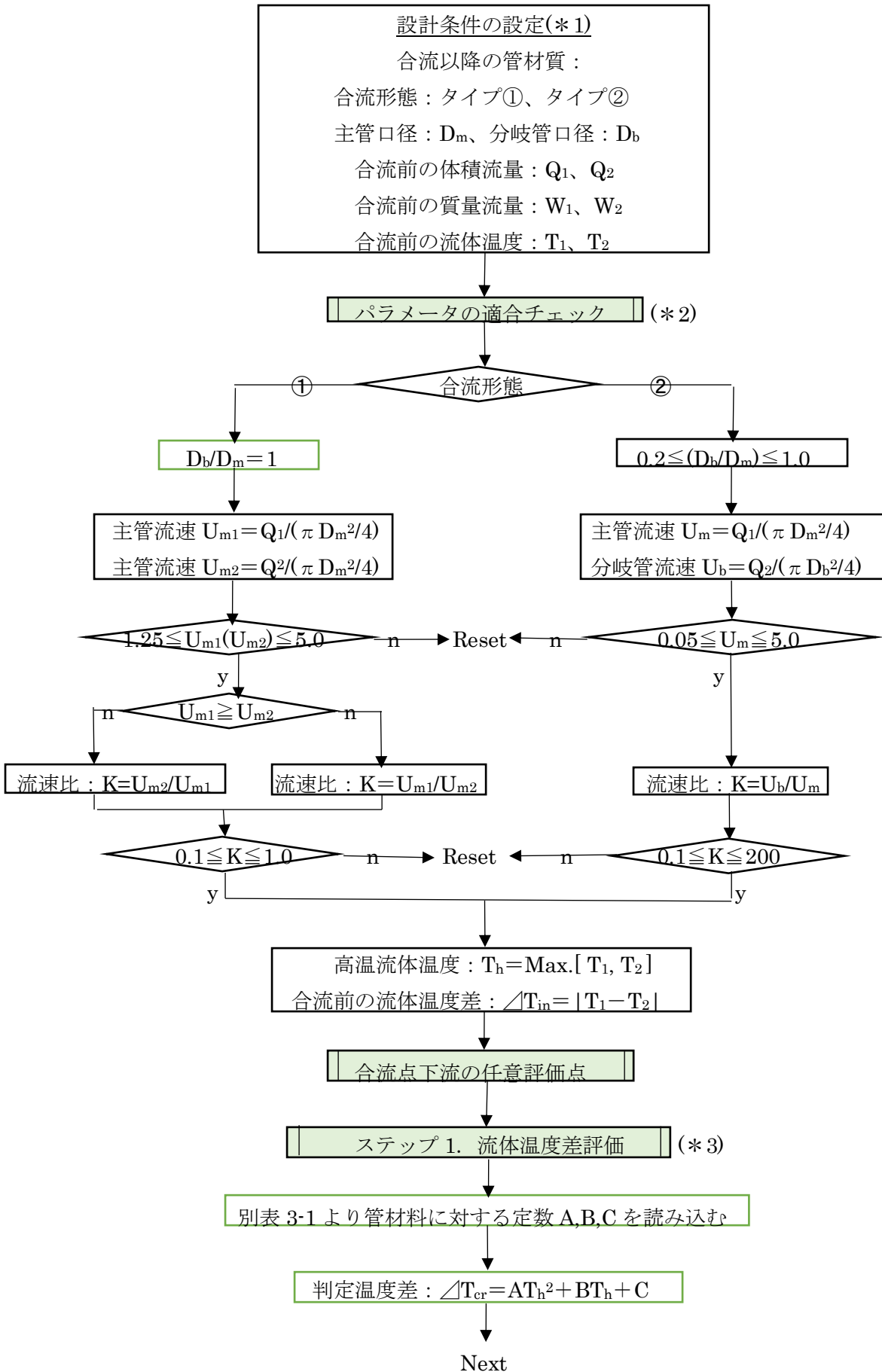
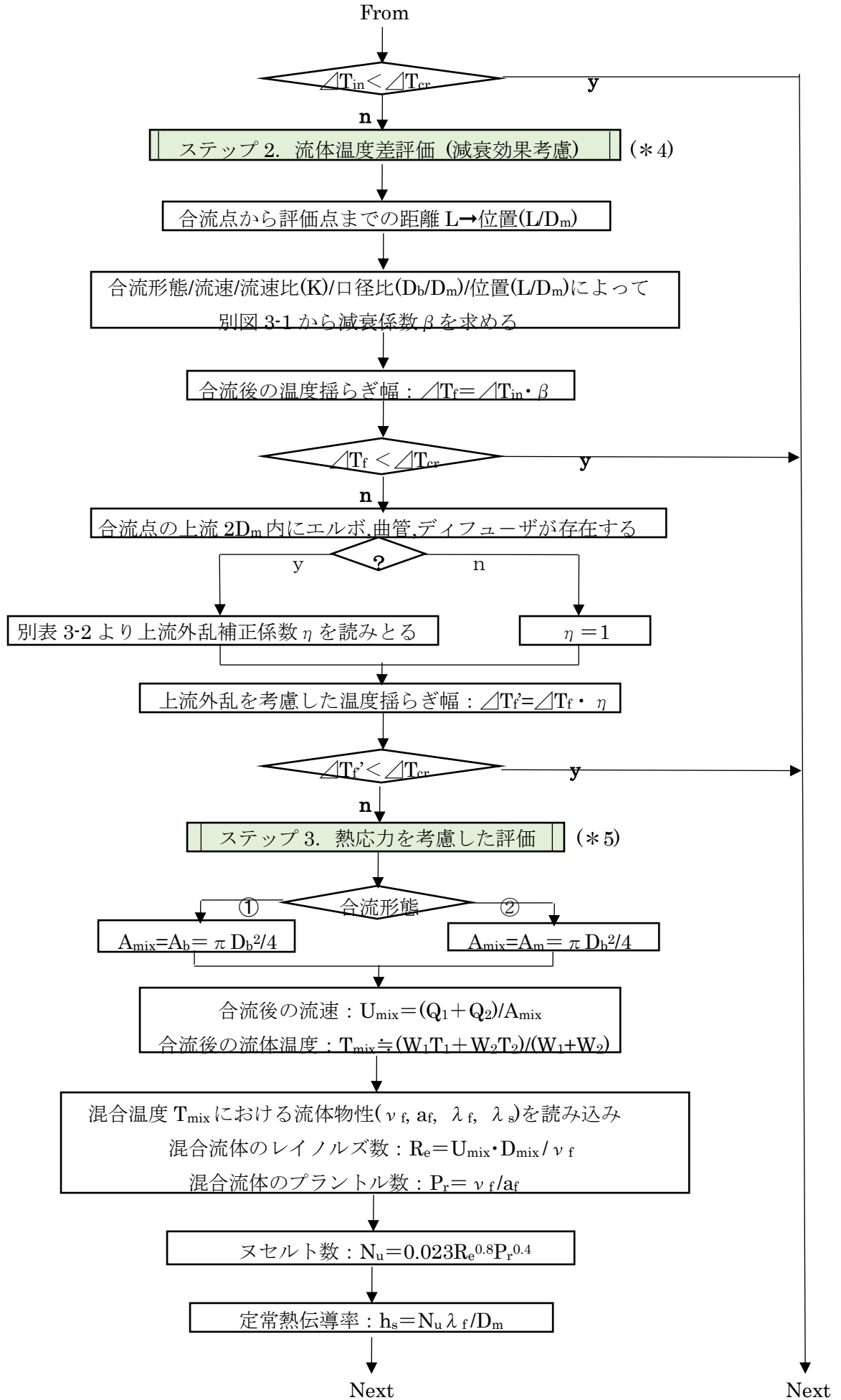
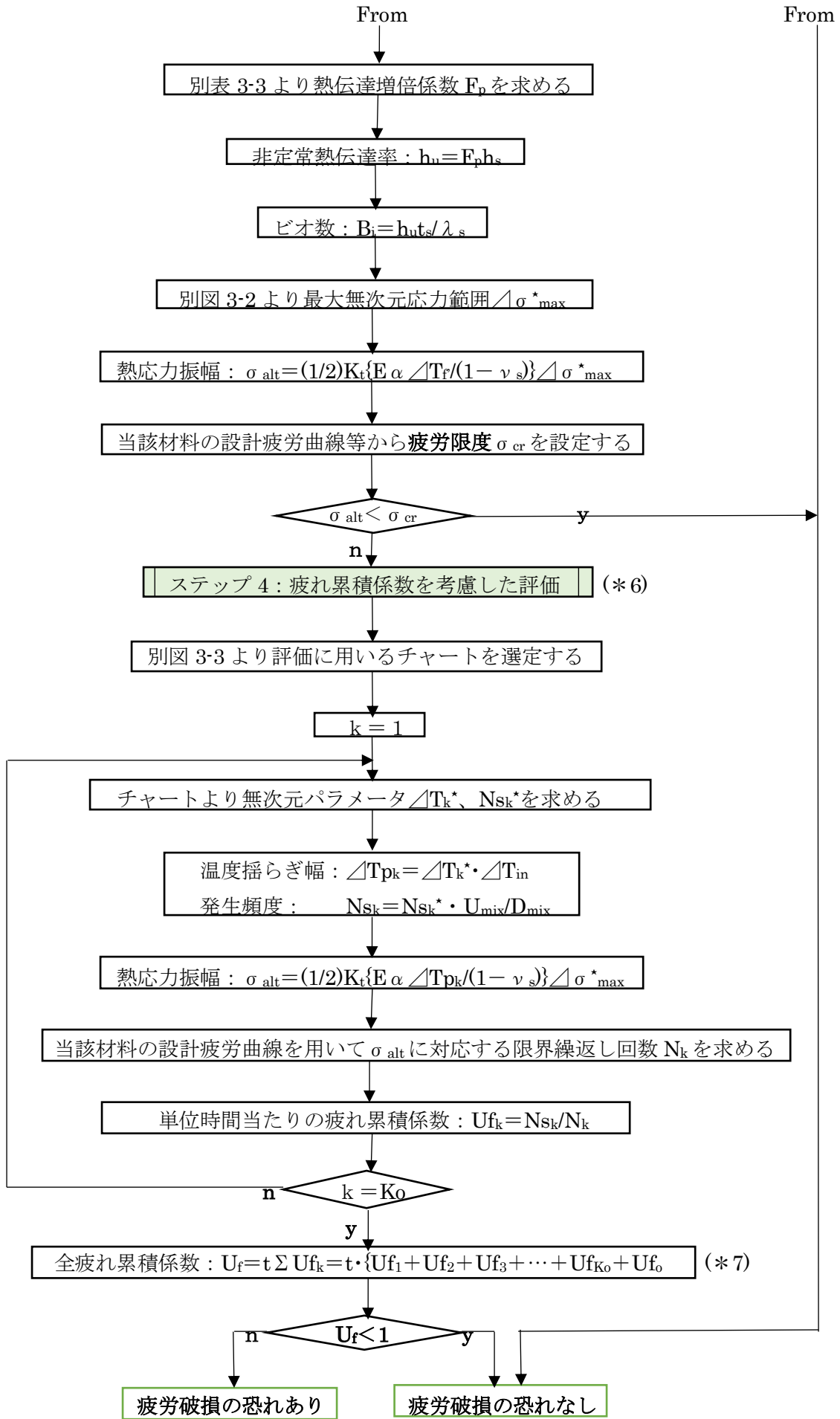


チャート 3-5 配管合流部の熱疲労の評価手順
 (JSME S-017 「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」)





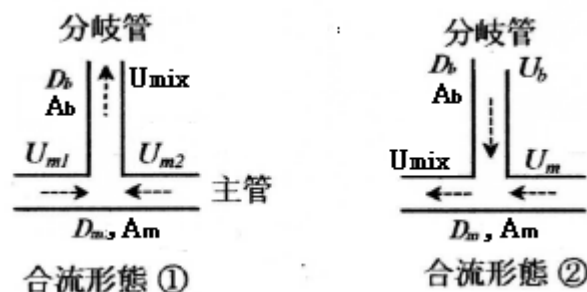


【 記号説明 】

D =直径(m)、 A =流体断面積(m^2)、 t_s =管肉厚(m)、 L =合流点～評価点の距離(m)、
 Q =体積流量(m^3/s)、 W =質量流量(kg/s)、 U =流速(m/s)、 T =流体温度($^{\circ}C$)、 t =全運転時間(sec.)
 ΔT =流体温度差/温度揺らぎ幅($^{\circ}C$)、 K =流速比(-)、 β =減衰係数(-)、 η =上流外乱補正係数(-)、
 Re =レイノルズ数(-)、 Pr =プラントル数(-)、 Nu =ヌセルト数(-)、 Bi =ビオ数(-)
 h_s =定常熱伝達率($Kcal/m^2hr^{\circ}C$)、 h_u =非定常熱伝達率($Kcal/m^2hr^{\circ}C$)、 ν_f =流体動粘度(m^2/s)、
 α_f =温度伝導率(m^2/s)、 λ_f =流体熱伝導率($Kcal/mhr^{\circ}C$)、 λ_s =金属の熱伝導率($Kcal/mhr^{\circ}C$)
 σ_{alt} =熱応力振幅(N/mm^2)、 σ_{cr} =疲労限度(耐力限)(N/mm^2)、 $\Delta\sigma_{*max}$ =最大無次元応力範囲(-)
 K_t =温度割増し係数(-)、 F_p =熱伝達率増倍係数(-)、
 E =温度 T_{mix} における縦弾性係数(N/mm^2)、 α =温度 T_{mix} における瞬間線膨脹係数($^{\circ}C^{-1}$)
 ν_s =ポアソン比(-)、 N =許容限界繰返し数(回)、 N_s =単位時間当たりの発生回数
 U_f =疲れ累積係数(-)、 U_{f0} =熱応力振幅以外の応力振幅による疲れ累積係数(-)
 サフィックス： b →分岐管側、 m →主管側、 f →流体、 s →金属/定常、 cr →限界、 u →非定常
 k →次数(レインフローデータ番号)、 in →合流前、 mix →合流後(混合後)

【 補足説明 】

- (*1) 本評価法が適用できる材質はオーステナイトステンレス鋼、炭素鋼及び低合金鋼とされる。ただステップ 3,4 のような詳細評価では特にこれにこだわる必要はないと思われる。
- (*2) 合流形態には下図のように 2 つのタイプがある。①は双方向の主管流れが合流して分岐管から流出するパターンで、②は主管流れに分岐管流れが合流して主管流れとして流出するもの。下図を参照のこと。この場合、実験データの範囲で温度揺らぎの見積りが可能になっている。従って実験データには限りがあり有効範囲が定まっているので、予め設計条件がデータに適合しているか、口径比/主管流速/流速比についてチェックが必要である。もちろん有効な範囲に入らなければリセットになるが、それほどシビアとは思えないので適宜判断でよいと思う。



- (*3) このステップでは、合流前の流体温度差がそのまま金属温度差になるというやや厳しい仮定のもとで、材料の疲労限度から得られた温度差 ΔT_{cr} と比較する。プレ的に掃出しチェックを行い手数を省く。判定温度差 ΔT_{cr} は別表 3-1 に添付された判定図によってもよい。
- (*4) このステップでは、合流点以降の流体の混合による温度揺らぎの減衰効果を考慮して掃出しチェックを行う。減衰効果としては距離的な減衰と上流からの擾乱効果を考える。別図 3-1 にはかなり広範なデータが収納されているが、別表 3-2 は口径比 0.2 に限られる。いずれにせよ、安全側に運用すべき。
- (*5) このステップでは、実測データから割り出された流体－金属間の非定常熱伝達係数を用いて

金属内の温度揺らぎによる熱応力を求めそれが疲労限度(Endurance Limit)内にあるかどうかで掃き出しチェックを行う。熱伝達係数は混合後の流体を対象にするので、混合流体の温度を求める必要がある。この場合、比熱が大きく変わらなければ $T_{mix} = (W_1T_1 + W_2T_2)/(W_1 + W_2)$ で求めてもよいが、変化が大きければ、次式から得られる 2 次式から T_{mix} を計算する。

$$C_1W_1T_1 + C_2W_2T_2 = C_{mix}(W_1 + W_2)T_{mix} \quad (T_1 > T_2)$$

$$C_{mix} = C_1 - \{(T_1 - T_{mix}) / (T_1 - T_2)\} (C_1 - C_2) \quad \text{ここで } C = \text{比熱(Kcal/kg}^\circ\text{C)}$$

(*6) 前ステップでは、混合後の流下に伴って温度が拡散してゆく事実を無視している、また最低許容応力の疲労限度以下に熱応力を抑え込んでいるのでかなり厳しく評価している。そこでこのステップではまず、各温度揺らぎ成分ごとに、混合後の温度拡散を考慮した実験データを用いて熱応力をカウントした上で、その時の限界繰返し回数を求め、実際の繰返し回数と限界繰返し回数の比(疲れ累積係数)をとる。次いで、それら疲れ累積係数の総和をとり、ほかの応力サイクルに由来する疲れ累積係数と併せて全疲れ累積数が 1 を越えるか否かをみて疲労の可否を判断する。なお使用する実験データはサイクルカウント法で最もよく使われるレインフロー法を用いて整理されておりすぐ運用できるようにしてある。

温度揺らぎのデータ【チャート】の例

無次元温度 揺らぎ幅 ΔT_k	無次元発生頻度 (Nsk*)													
	-1.0Dm	-0.5Dm	0.0Dm	0.3Dm	0.4Dm	0.5Dm	1.0Dm	1.5Dm	2.0Dm	2.5Dm	3.0Dm	4.0Dm	5.0Dm	7.0Dm
0.02	2.64E-01	2.77E-01	2.63E-01	4.04E-02	4.35E-02	3.55E-02	5.06E-02	6.73E-02	8.06E-02	6.63E-02	7.31E-02	8.56E-02	1.22E-01	9.91E-02
0.04				2.57E-02	2.90E-02	3.06E-02	3.80E-02	4.82E-02	6.04E-02	3.18E-02	3.15E-02	3.55E-02	5.70E-02	2.87E-02
0.06				1.88E-02	2.08E-02	2.33E-02	2.55E-02	3.18E-02	3.08E-02	1.94E-02	1.65E-02	1.99E-02	3.02E-02	1.62E-02
0.08				1.37E-02	1.58E-02	2.20E-02	2.12E-02	2.53E-02	2.14E-02	1.50E-02	1.54E-02	1.61E-02	1.94E-02	1.27E-02
0.10				1.20E-02	1.13E-02	1.88E-02	1.82E-02	1.92E-02	1.47E-02	1.26E-02	1.26E-02	1.22E-02	9.57E-03	6.92E-03
0.12				8.87E-03	1.09E-02	1.50E-02	1.45E-02	1.49E-02	1.22E-02	1.19E-02	1.11E-02	1.23E-02	8.54E-03	2.95E-03
0.14				8.13E-03	8.33E-03	1.39E-02	1.09E-02	1.12E-02	9.23E-03	1.09E-02	1.04E-02	8.29E-03	2.38E-03	1.88E-04
0.16				7.72E-03	6.92E-03	1.04E-02	8.87E-03	9.91E-03	7.25E-03	8.50E-03	7.48E-03	5.00E-03	8.40E-04	
0.18				5.17E-03	6.38E-03	1.14E-02	8.56E-03	7.09E-03	5.84E-03	7.09E-03	5.64E-03	1.48E-03	1.01E-04	
0.20				4.70E-03	6.18E-03	9.40E-03	7.82E-03	5.94E-03	4.03E-03	3.96E-03	2.82E-03	3.38E-04		
0.22				5.71E-03	4.84E-03	8.63E-03	6.25E-03	5.37E-03	2.39E-03	2.28E-03	4.70E-04			
0.24				3.83E-03	6.04E-03	7.89E-03	5.34E-03	4.08E-03	1.75E-03	4.70E-04	1.68E-04			
0.26				4.63E-03	2.22E-03	6.35E-03	5.21E-03	3.09E-03	1.54E-03	1.34E-04				
0.28				4.10E-03	4.70E-03	6.88E-03	3.63E-03	2.38E-03	5.37E-04					
0.30				3.63E-03	3.38E-03	5.27E-03	3.29E-03	1.31E-03	3.02E-04					
0.32				3.83E-03	3.16E-03	5.78E-03	2.69E-03	8.40E-04	1.34E-04					
0.34				2.69E-03	2.98E-03	4.23E-03	1.65E-03	6.04E-04						
0.36				3.18E-03	2.75E-03	3.59E-03	1.38E-03	1.51E-04						
0.38				3.38E-03	2.01E-03	3.29E-03	8.40E-04	8.40E-05						
0.40				3.18E-03	2.08E-03	3.16E-03	4.70E-04	5.04E-05						
0.42				2.28E-03	1.75E-03	2.28E-03	4.03E-04							
0.44				2.42E-03	1.75E-03	1.78E-03	2.01E-04							
0.46				2.18E-03	1.48E-03	1.65E-03	1.01E-04							
0.48				2.01E-03	1.54E-03	8.73E-04	3.36E-05							
0.50				1.48E-03	7.39E-04	6.38E-04								
0.52				1.61E-03	8.73E-04	5.53E-04								
0.54				1.68E-03	4.70E-04	4.03E-04								
0.56				9.40E-04	4.70E-04	4.70E-04								
0.58				8.08E-04	9.37E-04									
0.60				6.04E-04	3.39E-04	1.68E-04								
0.62				4.70E-04	1.34E-04	5.04E-05								
0.64				5.37E-04	2.69E-04	3.39E-05								
0.66				2.69E-04	1.01E-04									
0.68				1.34E-04	6.72E-05									
0.70				1.01E-04	3.38E-05									
0.72				6.72E-05	3.39E-05									
0.74				3.38E-05	3.38E-05									
0.76				3.38E-05										
0.78														
0.80														

管径タイプ	管径
口径比 Dh/Dm [-]	0.2
実管口径 Dm [mm]	102.3
試験口径 Db [mm]	21.4
流速比 K [-]	0.6
主線流速 Vm [m/s]	4.97
試験流速 Ub [m/s]	2.91

【 添付 A コード 2 配管の(1次+2次)応力制限に関する補足説明⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹⁵⁾ 】

(1) コード 2 配管では熱膨張応力を疲労の主要パラメータとみなして次のいずれかで制限する。

① $S_E \leq f(1.25S_c + 1.25S_h - S_L)$ 、② $S_E \leq f(1.25S_c + 0.25S_h)$ -----(a)

①, ②のいずれを選択するかは、機械荷重から生じる 1 次応力 S_L を基本許容応力 S_h で制限する際に生じる余剰分(お釣りの) $[S_h - S_L]$ をどう使うかで別れる。①は $[S_h - S_L]$ を S_E に回して有効利用するもので、合理性があるのでよく使用されている(ただ後述するように、限界発停サイクル数即ち運転寿命を減じるので注意を要す)。一方②は余剰分があってもこれを零とみなすもので、 S_E の制限量が小さくなるため安全側になる。①②のどれを採用かは設計者の判断による。ここでは説明を簡単にするために、合理的と思われる①の制限式を用いて説明する。

①②の右辺についてはいろいろ議論があるが、ここでは左辺の評価応力 S_E の実質を見てみる。

評価応力： $S_E = i(M_c/Z)$ (M_c = 熱膨張拘束によるモーメント)

において、 (M_c/Z) はモーメント M による直応力をカウントするもので一種の基準応力。一方 i は応力増幅係数(→SIF)と呼ばれるもので、次式で定義できる。

$i = \text{同一サイクル数で疲労を起こす時の} [直管の基準応力 \div \text{当該配管部品の基準応力}]$

エルボのように断面性能 Z が直管と同じであれば基準応力は作用モーメントは置き換えられる。

この場合、 i は疲労ベースで決まっているので、 S_E は仮想的な応力である。ただ部品ごとの応力倍率である係数 i が容易に得ることができれば、 $i(M_c/Z) \leq f(1.25S_c + 1.25S_h - S_L)$ によって当該配管部品の疲労評価できる(応力を制限できる)。そこでコード 2 規定の制定当初(1945~1952年)、Tube Turn 社の Markl らの手で一連の膨大な配管部品(エルボ、ティ、フランジなど)の疲労試験⁽¹⁵⁾ が実施され、その試験結果から応力増幅係数 i が確定される共にこれに基づく i 値の簡易計算式が開発された。下図に疲労試験のデータ例を示す。一点鎖線は直管の疲労曲線で、実線が部品の疲労曲線を示している。 i 値は各曲線上の同一繰返し回数における応力範囲の比で与えられる。これらの結果は設計用途に整理され、コード 2 系配管規格の Appendix としてまとめられている。

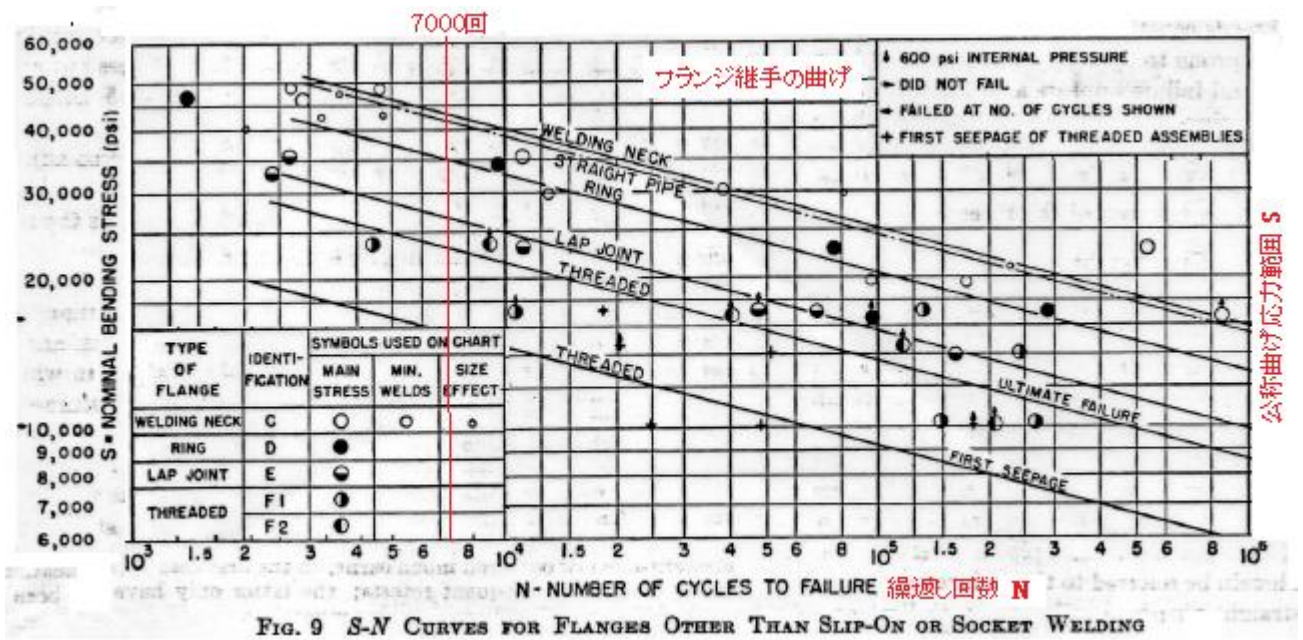
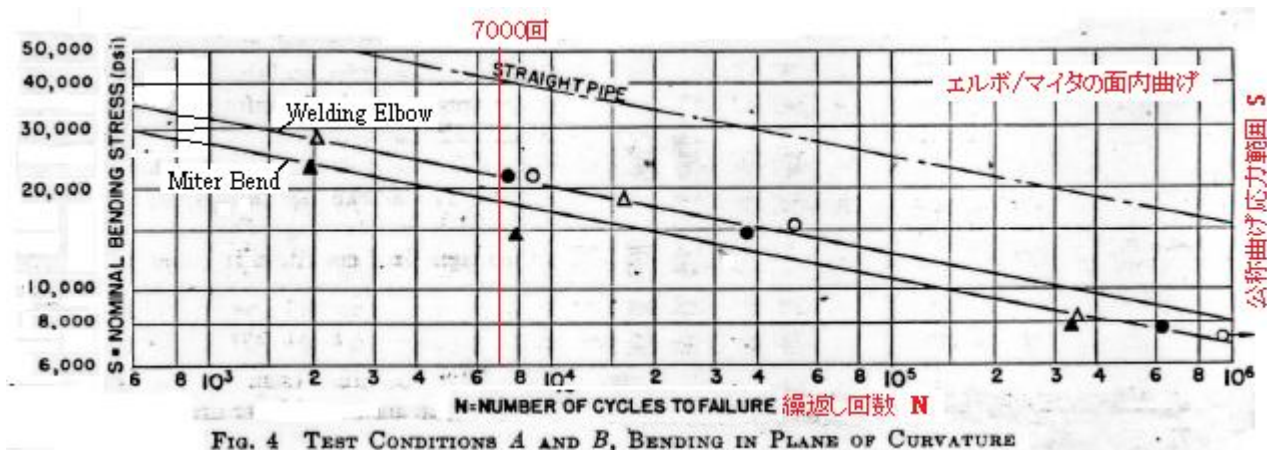


FIG. 9 S-N CURVES FOR FLANGES OTHER THAN SLIP-ON OR SOCKET WELDING



- (2) 本文で述べたように、コード2配管における疲労防止は、(1次+2次)応力をシェークダウンの観点から制限し塑性ひずみによる不安定な疲労の進行を緩和するものではないかと思われる。その場合、(1次+2次)応力を、基本許容応力範囲 $1.25(S_c + S_h)$ 一杯にとったとき、いくらの限界繰返し回数(疲労寿命)になるかは重要なチェックポイントになる。以下これを検討してみる。なお検討では繰返しの1次応力も含めて議論すると非常に煩雑になるので、本文でも採用したように1次応力を軽少とみなして、(1次+2次応力)→2次応力単独という仮定を用いる。

コード2配管にフィットする疲労寿命式は次式で与えられる。

$$SN^{0.2} = C \quad \text{------(b)}$$

ここで S = 局部応力範囲、 N = 限界繰返し回数、 C = 材料定数(psi 単位に対し 490000)

S は本文の 3.2 の(2)で述べたように $S = CKS_0 = 2iS_0$ である。ここでは簡便のため直管の場合を考えると $i=1$ なので、 $S = 2S_0$ になる。この右辺の 2 は疲労強度減少係数であるから、基準応力 S_0 は公称応力範囲であって、その最大値は基本許容応力範囲 $1.25(S_c + S_h)$ になる。(b)式を変形すると

$$N = (C/S)^5 = \{C/(2S_0)\}^5 = \{(C/2)/S_0\}^5 = [C^*/\{1.25(S_c + S_h)\}]^5 \quad \text{------(c)}$$

ここで C^* は 245000/psi 単位になるが、これを MPa 単位に直すと 1688 になる。また炭素鋼鋼管 250°C 辺りを基準にとると、 $S_0 = 1.25(115 + 115) = 288\text{MPa}$ になる。従って

$$N = [C^*/\{1.25(S_c + S_h)\}]^5 = [1688/288]^5 = 6920 \rightarrow \text{約 7000 回}$$

念の為、JISB8266 付属書 8 の疲労設計曲線(図 1)でチェックしてみると、

$$\text{縦軸 } S_a = (1/2) \times 2S_0 = S_0 = 288\text{MPa} \quad \text{に対し} \quad \text{横軸 } N = \sim 7000 \text{ 回}$$

になる。鋼種/温度によってバラツクはあるが、一般に云われる[発停サイクル Max.7000 回]はほぼ妥当な所であろう。以上は直管でチェックしたが、たとえエルボであっても $2S_0$ が $2iS_0$ になっても公称応力 iS_0 の上限はあくまで $[1.25(S_c + S_h)]$ であるから N 値に変化はない。

発停サイクル 7000 回は本文でも述べたように、通常のプラント設備の運転からみれば過剰である。せいぜい 200 回止まりではないかと思われる。

- (3) しかし上記で得られた[発停サイクル Max.7000 回]には疑問がある。いずれの配管部品でも公称応力は iS_0 とは限らないからである。

前述のごとく、局部応力は $S = CKS_0 = 2iS_0$ であるが、通常、局部応力指数 K は強度減少係数 2 に近いはずであるから $CS_0 \doteq iS_0$ となり公称応力は iS_0 になる。そして公称応力 $\leq [1.25(S_c + S_h)]$ であるから弾性域内にシェークダウンする(これは本文で述べた通り)。然るに成形エルボや成形ティ

では $K=1$ であるから、 $CS_o \doteq 2iS_o$ になる。即ちこれら有力部品の公称応力は iS_o ではなく $2iS_o$ になる。この場合、局部応力に変化はなく疲労寿命 7000 回に異動はないが、公称応力は

$$2x\{1.25(S_c + S_h)\} = 2.5(S_c + S_h) \geq [(S_{yc} + S_{yh}) = 1.5(S_c + S_h)]$$

となり、シェークダウン制限を越えてしまう。

シェークダウンしないからといって直ちに不可と云うわけではない。弾性域を越えるなら、ひずみ補正を行って疲労評価すればよい。ひずみ補正係数は

$$K_e = 1.0 + \{(1-n)/n/(m-1)\}\{S_h/(3S_m) - 1\} = 1 + 2x(576/370 - 1) = 2.1$$

しかし成形エルボ/ティに切欠きはないので $K_e = 1.4$ 程度が妥当と思われる。即ち塑性サイクルによるひずみの上増しは 40% 程度になり、限界繰返し回数は 1500 回程度まで低下するようだ。

以上は(1次+2次)応力の制限式(a)式において①を選択した場合である。安全側に②を選択すると、 S_E は最大 $(1.25S_c + 0.25S_h)$ なので、公称応力は $2x(1.25S_c + 0.25S_h) = 2.5S_c + 0.5S_h$ になり、 $S_c \doteq S_h$ では $[3S_c]$ になる。一方、シェークダウン制限量は $S_c \doteq S_h$ で丁度 $[3S_c]$ になるのでギリギリでシェークダウンする。シェークダウンすれば、限界繰返し数 7000 回は成立する。

かなり粗雑ではあるが、結論としては、

$$S_E \leq f(1.25S_c + 1.25S_h - S_L) \text{ を採るとき } \text{発停サイクル} \sim 1500 \text{ 回}$$

$$S_E \leq f(1.25S_c + 0.25S_h) \text{] を採るとき } \text{発停サイクル} \sim 7000 \text{ 回}$$

になる。設計としていずれをとるか？ 発停サイクル 7000 回は Daily Start の設備でない限り裕度がありすぎる。おそらく発停サイクル 1500 回で十分な気がする。

- (4) 応力範囲減少係数 f は、発停サイクル(全温度変化サイクル)以外の温度化サイクルの影響で見込んで基本許容応力範囲を修正するものである。以下その導入過程を記す。

Markle の疲労試験から得られる疲労寿命式 $SN^{0.2} = C$ を用いて

$$S/S^* = (N^*/N)^{0.2} = (7000/N)^{0.2} = 6N^{-0.2}$$

ここで N = 任意の運転サイクル数、 $S = N$ に対する許容応力範囲、 $N^*, S^* = N, S$ の基準値
上記では N^* を発停サイクル数 7000 回としている。基準の S^* を S_A にとり、 $f = 6N^{-0.2}$ とすれば、

$$S = f S^* = f S_A \quad [\text{ここで } S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h) \text{ or } f\{1.25(S_h + S_c) - S_L\}]$$

すなわち 7000 回をベースにした任意の運転サイクルに対する許容変位応力範囲が得られる。なお複数の応力サイクルが併存するときは線形累積損傷則を考える必要がある。

$$N_1/N_{1f} + N_2/N_{2f} + N_3/N_{3f} + \dots + N_i/N_{if} = 1 \rightarrow \text{破損} \quad (\text{但し各分母の } N_{if} \text{ は疲労寿命回数})$$

ここで最大計算応力範囲 S_E に対するサイクル数 $N_E (= 7000 \text{ 回})$ をベースにこの損傷則を用いると

$$N/N_{Ef} = N_E/N_{Ef} + \sum (N_i/N_{if}) \rightarrow N = N_E + \sum (N_{Ef}/N_{if}) N_i$$

$SN^{0.2} = C$ の関係を用いて、 $(N_{Ef}/N_{if}) = (C/S_E)^5 / (C/S_i)^5 = (S_i/S_E)^5$ であるから

$$N = N_E + \sum (S_i/S_E)^5 N_i \rightarrow \boxed{N = N_E + \sum (r_i^5 N_i)}$$

N は応力範囲 S_E を含む等価運転サイクル数であって、 S_E 単独の時の疲労寿命回数 N_{Ef} をその下限界としている。等価運転サイクル数 N を $f = 6N^{-0.2}$ に代入して応力範囲減少係数が得られる。

【 添付 B コード 1 配管に使用される応力指数についての補足説明⁽¹⁾ 】

Table NB-3681(a)-1 NB3650の式に適用される応力指数

配管部品および継手	C,K指数の場合 $Do/t \leq 100$ 、E指数の場合 $Do/t \leq 50$ に適用									注記
	内圧 [注(1)]			モーメント荷重 [注(1)]			熱荷重			
	B ₁	C ₁ [注(3)]	K ₁ [注(3)]	B ₂	C ₂ [注(3)]	K ₂ [注(3)]	C ₃	C ₃ '	K ₃ [注(3)]	
直管 (溶接部または他の不連続部から離れた)	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	...	1.0	(4)
直管の長手突合せ溶接部 (a) フラッシュ(flush weld) (b) 溶接のまま $t \geq 5$ mm (c) 溶接のまま $t \leq 5$ mm	0.5 0.5 0.5	1.0 1.1 1.4	1.1 1.2 2.5	1.0 1.0 1.0	1.0 1.2 1.2	1.1 1.3 1.3	1.0 1.0 1.0	...	1.1 1.2 1.2	(5) (5) (5)
同一肉厚部品間の周突合せ溶接部 (a) フラッシュ(flush weld) (b) 溶接のまま	0.5 0.5	1.0 1.0	1.1 1.2	1.0 1.0	1.0 ...	1.1 1.8	0.60 0.60	0.50 0.50	1.1 1.7	(6) (6)
ソケット溶接のフィッティング及び弁 あるいは差し込みまたはソケット溶接 フランジの周隅肉溶接	...	...	3.0	...	...	2.0	2.0	1.0	3.0	(7)
NB-4250 トランジション継手 (a) フラッシュ(flush weld) (b) 溶接のまま	0.5 0.5	...	1.1 1.2	1.0 1.0	...	1.1 1.8	...	1.0 1.0	1.1 1.7	(8) (8)
1:3スロープ囲い内のトランジション継手 (a) フラッシュ(flush weld) (b) 溶接のまま	0.5 0.5	...	1.2 1.2	1.0 1.0	...	1.1 1.8	...	0.60 0.60	1.1 1.7	(9) (9)
ASME B16.9 or MSS SP-87 突合せ溶接レデューサ	...	...	..	1.0	...	...	1.0	0.5	1.0	(10)
曲管または突合せ溶接エルボ	...	...	1.0	...	...	1.0	1.0	0.5	1.0	(11)
NB-3643分岐コネクション	0.5	...	2.0	...	...	...	1.8	1.0	1.7	(12)
突合せ溶接ティ	0.5	1.5	4.0	...	...	...	1.0	0.5	1.0	(13)

< 注 記 >

注(1) 式(9)~(13)に関する圧力、モーメント荷重及び特記の計算については NB-3683.1(d)を参照のこと。

注(2) 定義、適用性及び特別な制限については NB-3683 を参照のこと。

注(3) 溶接部品、交叉溶接部、近接部品あるいは楕円化部品に対する上記指数の運用に関する特記は NB-3683.2 を参照のこと。

注(4) NB-3683.3 溶接部から離れた直管部分

表に示される応力指数は溶接部や不連続部分から離れた直管部分に適用する(但し NB-3683.2 で補正される場合を除く)。

注(5) NB-3683.4 溶接部 (a) 長手突合せ溶接部

表に示される応力指数は直管の長手突合せ溶接部に適用できる(但し NB-3683.2 で補正される

場合を除く)。

注(6) NB-3683.4 溶接部 (b) 周突合せ溶接部

表に示される応力指数は、本項及びNB-3683.2で補正される場合を除いて、溶接端から軸方向距離 $(D_0t)^{0.5}$ について $0.875t \sim 1.1t$ の肉厚を有する隣接部品につながる周突合せ溶接部に適用できる。周溶接部は冷却時の溶着金属の縮みによる径の減少があってもよい。但し $\Delta/t \geq 0.25$ 以上ならこの応力指数は適用できない(なお $\Delta \rightarrow$ 外表面から測った半径方向収縮量)。

公称肉厚 $t \leq 6\text{mm}$ の部品を接続する周突合せ溶接(as-weld)についての C_2 指数は次の通り。

$$C_2 = 1.0 + 2.4/t \quad \text{但し } 2.1 \text{ 以下}$$

注(7) NB-3683.4 溶接部 (c) 周隅肉溶接部

表に示される応力指数は、NB-3683.1及び下記(1)(2)で追加あるいは補正される場合を除きソケット溶接フィッティングないしバルブあるいは差し込みないしソケット溶接フランジを取付けるために用いられる周隅肉溶接に適用できる。

(1) 1次応力指数： $B_1 = 0.75(t_n/C_x) \geq 0.5$ 、 $B_2 = 1.5(t_n/C_x) \geq 1.0$

ここで $C_x, t_n \rightarrow$ Fig.4427-1(c),(d)で定義。Fig.4427-1(c)では C_x は X_{\min} 及び $C_x \geq 1.25t_n$ とする。Fig.4427-1(d)では $C_x \geq 0.75t_n$ 。不等脚の時は短い脚を C_x とする。

(2) 1次+2次応力指数： $C_1 = 1.8(t_n/C_x) \geq 1.4$ 、 $C_2 = 2.1(t_n/C_x) \geq 1.3$

注(8) NB-3683.5 溶接トランジション (a) NB-4250によるトランジション(テーパ状の継手)

表に示される応力指数は、本項やNB-3683.2で補正される場合を除き、溶接端から軸方向 $(D_0t)^{0.5}$ について $0.875t \sim 1.1t$ の肉厚を有する部品と、その溶接端がFig.NB-4250の囲い内にある同じ方向に傾斜しない内外表面を持った隣接部品の間にある周突合せ溶接部に適用できる。以上の規定に合致するトランジション継手について

$$C_1 = 0.5 + 0.33(D_0/t)^{0.3} + 1.2/t \quad (\text{但し } 1.8 \text{ 以下})$$

$$C_2 = 1.7 + 2.4/t \quad (\text{但し } 2.1 \text{ 以下})、C_3 = 1.0 + 0.03(D_0/t) \quad (\text{但し } 2.0 \text{ 以下})$$

$t > 6\text{mm}$ の部品の間のフラッシュ溶接部及びAs weld溶接部については

$$C_1 = 0.5 + 0.33(D_0/t)^{0.3} (\text{但し } 1.8 \text{ 以下})、C_2 = 1.7$$

注(9) NB-3683.5 溶接トランジション (b) 1:3スロープ内のトランジション

表に示される応力指数は、本項やNB-3683.2で補正される場合を除き、溶接端から軸方向距離 $(D_0t)^{0.5}$ について $0.875t \sim 1.1t$ の肉厚を有する部品と、その溶接端が軸方向距離 $(D_0t)^{0.5}$ に対して内表面/外表面/内外表面が1:3スロープで定義される囲い部分内にある、同じ方向に傾斜のない内外表面を持った隣接部品の間にある周突合せ溶接部に適用できる。以上の規定に合致するトランジション継手について

$$C_1 = 0.5 + 1.2/t \quad (\text{但し } 1.8 \text{ 以下})、$$

$$C_2 = t_{\max}/t + 2.4/t \quad \text{但し } \text{Min.} \{ [1.33 + 0.04(D_0/t)^{0.5} + 2.4/t] \text{ or } 2.1 \} \text{ 以下}$$

$$C_3 = 0.35(t_{\max}/t) + 0.25 \quad (\text{但し } 2.0 \text{ 以下})$$

ここで t_{\max} =トランジション内の最大肉厚。もし $(t_{\max}/t) \leq 1.1$ ならばNB-3683.4(b)で与えられる周溶接の応力指数を用いてよい。

$t > 6\text{mm}$ 以上の部品の間にあるフラッシュ溶接継手やAs-weld継手については

$$C_1 = 1.0、C_2 = t_{\max}/t \quad (\text{但し } \text{Min.} \{ [1.33 + 0.04(D_0/t)^{0.5}] \text{ or } 2.1 \} \text{ 以下})$$

注(10) NB-3683.6 同心および偏心レデューサ

表に示される応力指数は、Fig.NB-3683.6-1 で定義される円錐角 α が 60 度を越えず、また t_{2m} 以上の肉厚を持った小径端の円筒に連なる部分以外のレデューサ躯体部分の肉厚が t_{1m} 以上であるならば、本項や NB-3683.2 で補正される場合を除いて ANSI B16.9 または MSS SP-87 の規定に従う突合せ溶接レデューサに適用できる。ここで、 t_{m1} 及び t_{m2} は大口径端及び小口径端にて設計圧力 P に耐えうるに必要な最小肉厚(NB-3641.1(1)式による)である。偏心レデューサでは、Fig.NB-3683.6-1 の寸法は、 α が最大になる円周位置で取られるべき。

(a) 1 次応力指数：下記の(1)(2)で与えられる B_1 指数は円錐角 α に拠る。

(1) $B_1=0.5$ ($\alpha \leq 30$ 度の場合)、 (2) $B_1=1.0$ ($30 \text{ 度} \leq \alpha \leq 60$ 度の場合)

(b) 1 次+2 次応力指数：下記の(1)(2)で与えられる C_1, C_2 指数は遷移半径 r_1, r_2 寸法に拠る。

(1) $r_1, r_2 \geq 0.1D_1$ の時： $C_1=1+0.0058 \alpha (D_n/t_n)^{0.5}$ 、 $C_2=1.0+0.36 \alpha^{0.4}(D_n/t_n)^{0.4}(D_2/D_1)^{-0.5}$

(2) $r_1, r_2 < 0.1D_1$ の時： $C_1=1+0.00465 \alpha^{1.285}(D_n/t_n)^{0.39}$ 、 $C_2=1.0+0.0185 \alpha (D_n/t_n)^{0.5}$

但し $D_n/t_n = \text{Max.}[D_1/t_1 \text{ or } D_2/t_2]$

(c) ピーク応力指数：下記の(1)(2)(3)で与えられる K_1, K_2 指数は接続溶接タイプ、肉厚に拠る。

(1) フラッシュ周突合せ溶接で管に接続されるレデューサ

$$K_1 = 1.1 - 0.1L_m / (D_m t_m)^{0.5} \quad \text{但し } 1 \text{ 以上}$$

$$K_2 = 1.1 - 0.1L_m / (D_m t_m)^{0.5} \quad \text{但し } 1 \text{ 以上}$$

(2) As weld 周突合せ溶接で管に接続されるレデューサ(但し t_1 or $t_2 > 5$ mm)

$$K_1 = 1.2 - 0.2L_m / (D_m t_m)^{0.5} \quad \text{但し } 1 \text{ 以上}$$

$$K_2 = 1.8 - 0.8L_m / (D_m t_m)^{0.5} \quad \text{但し } 1 \text{ 以上}$$

(3) As weld 周突合せ溶接で管に接続されるレデューサ(但し t_1 or $t_2 \leq 5$ mm)

$$K_1 = 1.2 - 0.2L_m / (D_m t_m)^{0.5} \quad \text{但し } 1 \text{ 以上}$$

$$K_2 = 2.5 - 1.5L_m / (D_m t_m)^{0.5} \quad \text{但し } 1 \text{ 以上}$$

ここで $L_m / (D_m t_m)^{0.5} = \text{Min.}[L_1 / (D_1 t_1)^{0.5} \text{ or } L_2 / (D_2 t_2)^{0.5}]$

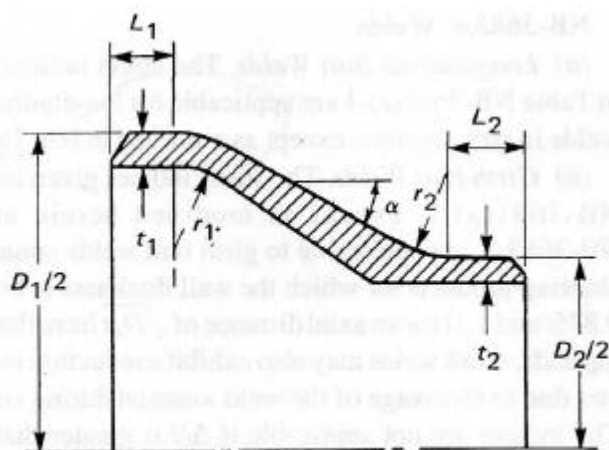


FIG. NB-3683.6-1

注(11) NB-3683.7 曲管または突合せ溶接エルボ

表に示される応力指数は本項や NB-3683.2 で補正される場合を除き、曲管または ANSIB16.9、ANSIB16.28 または MSS SP-87 の規定に従って製造された突合せ溶接エルボに適用できる。

(a) 1次応力指数：下記による。

$$B_1 = -0.1 + 0.4h \quad (\text{但し } 0 \sim 0.5), \quad B_2 = 1.30/h^{2/3} \quad (\text{但し } 1 \text{ 以上})$$

(b) 1次+2次応力指数：下記による。

$$C_1 = (2R - r_m) / \{2(R - r_m)\}, \quad C_2 = 1.95/h^{2/3} \quad (\text{但し } 1.5 \text{ 以上}) \quad \text{ここで } h = tR/r_m^2$$

注(12) NB-3683.8 NB-3643 による分岐コネクション

表に示される応力指数は、本項や NB-3683.2 で補正される場合を除き、NB-3643 の一般要求事項、NB-3683.8(a)の付加的な要求事項に合致する補強ないし補強なし分岐コネクションに適用できる。記号は NB-3683.1 および NB-3643.3 に定義される。

(a) 適用性。その応力指数は、次の制限が満たされる場合、適用できる。

- (1) 分岐コネクションが直管部分にある、
- (2) 管について分岐コネクションに対して、主管の外表面に沿って隣接する分岐中心で計測された弧の距離が、長手方向に2つの隣接する分岐の内半径の和の3倍以上あるいは主管の周方向に2つの隣接する分岐の半径の和の2倍以上である、
- (3) 分岐コネクションの軸が主管表面に直交する、
- (4) 主管の半径/肉厚比(R_m/T_r)が50未満、分岐-主管半径比(r'_m/R_m)が0.5未満である、
- (5) 分岐-主管隅肉半径 r_2 が Max. $[T_b/2, T_r/2 \text{ or } (T'_b + y)/2]$ (Fig.NB-3643.3(a)-1(c)参照) 以上ならば K_{2b} 指数は2から1に減少する。

(b) 1次応力指数：下記

$$B_{2b} = 0.5C_{2b} \quad (\text{但し } 1.0 \text{ 以上}), \quad B_{2r} = 0.75C_{2r} \quad (\text{但し } 1.0 \text{ 以上})$$

(c) 1次+2次応力指数：下記、NB-3683.1(d)参照。

$$C_1 = 1.4(D_m/T_r)^{0.182}(d_m/D_m)^{0.367}(T_r/t_n)^{0.382}(t_n/r_2)^{0.148}$$

もし $(r_2/t_n) > 12$ なら、 $(r_2/t_n) = 12$ を用いて C_1 を計算せよ。

$$C_{2b} = 1.5(R_m/T_r)^{2/3}(r'_m/R_m)^{1/2}(T'_b/T_r)(r'_m/r_p) \quad \text{但し } 1.5 \text{ 以上}$$

$$C_{2r} = 1.15(r'_m/t_n)^{1/4} \quad \text{但し } 1.5 \text{ 以上}$$

ここで、Fig.NB-3643.3(a)-1 の(a)(b)の場合：

$$t_n = T_b \quad (L_1 \geq 0.5(d_m T_b)^{0.5} \text{ の時}), \quad t_n = T'_b \quad (L_1 < 0.5(d_m T_b)^{0.5} \text{ の時})$$

Fig.NB-3643.3(a)-1 の(c)の場合：

$$t_n = T'_b + (2/3)y \quad (\theta \leq 30^\circ \text{ の時}), \quad t_n = T'_b + 0.385L_1 \quad (\theta > 30^\circ \text{ の時})$$

Fig.NB-3643.3(d)の場合： $t_n = T'_b = T_b$

(d) ピーク応力指数：モーメント荷重に対して $K_{2b} = 2.0$ 、 $K_{2r} = 1.75$

ただし $K_{2r} \cdot C_{2r} \geq 2.65$ であること。

(e) NB-3661.3 による隅肉溶接あるいは部分溶込み溶接で作られた分岐コネクションは本表及び本項(NB-3683.8)で与えられる応力指数を次のように割増して適用のこと。

- (1) B_1, B_2 指数は1.5倍に割増す、
- (2) C_1, C_{2b}, C_{2r} 指数には2を乗じる、
- (3) K_1, K_{2b}, K_3 指数には3を乗じる、
- (4) K_{2r} 指数には2を乗じる、
- (5) $C_{2b} \cdot K_{2b}$ は6.0以上とする、
- (6) $C_2 \cdot K_{2r}$ は4.2以上とする。

隅肉溶接や部分溶接に対する応力指数を計算する時は、Fig.NB-3643.3(a)-1 で

r_2 に限り t_n としてもよい。

注(13) NB-3683.9 突合せ溶接ティ

表に示される応力指数は、本項やNB-3683.2で補正される場合を除き、ANSIB16.9またはMSS SP-87の規定に従って製造された突合せ溶接ティに適用できる。

(a) 1次応力指数： $B_{2b}=0.4(R_m/T_r)^{2/3}$ 、 $B_{2r}=0.5(R_m/T_r)^{2/3}$ (どちらも1以上)

(b) 1次+2次応力指数： $C_{2b}=0.67(R_m/T_r)^{2/3}$ 、 $C_{2r}=0.67(R_m/T_r)^{2/3}$ (どちらも2以上)

(c) ピーク応力指数： $K_{2b}=1.0$ 、 $K_{2r}=1.0$

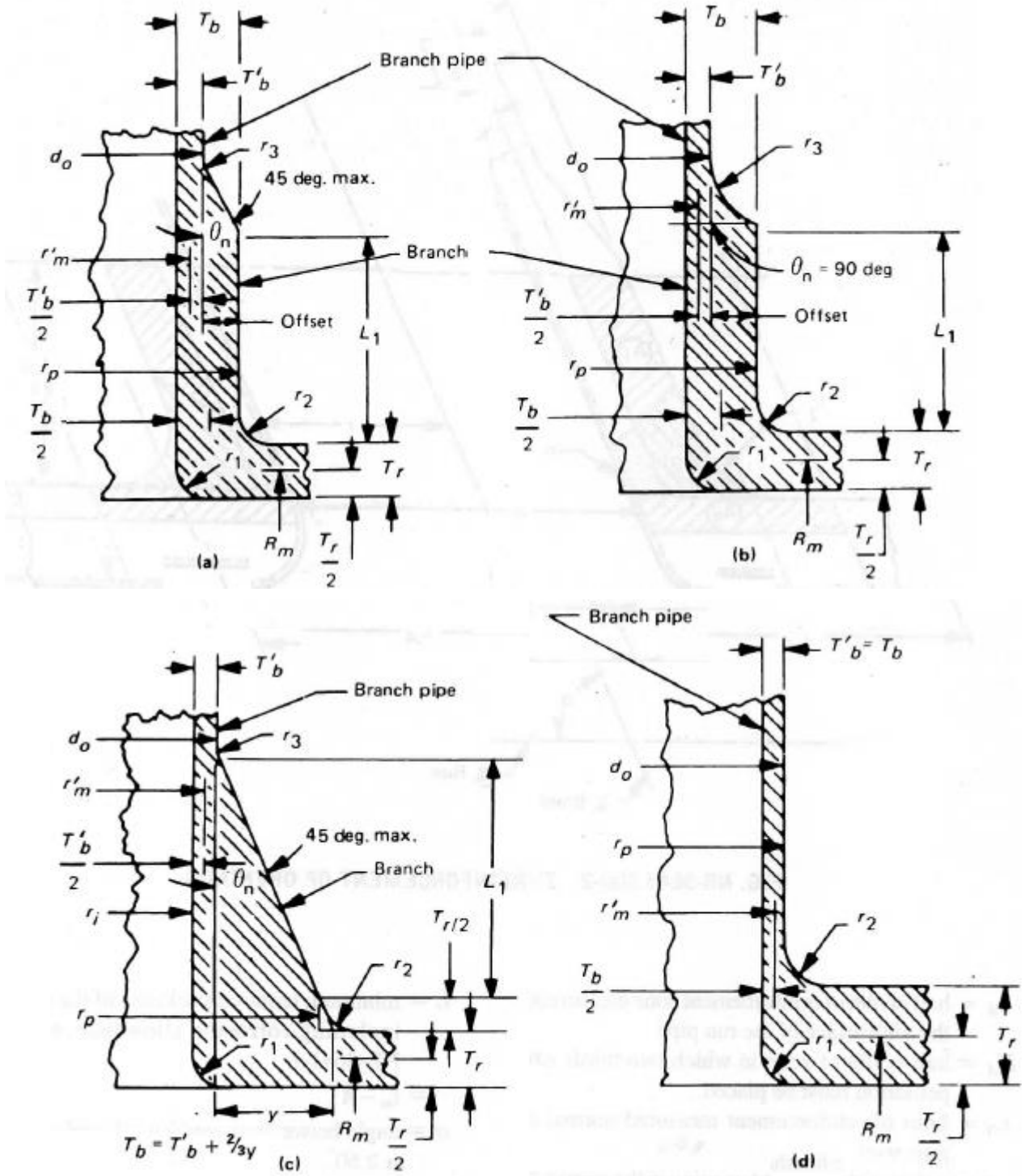


FIG. NB-3643.3(a)-1 BRANCH CONNECTION NOMENCLATURE

引用 規格/テキスト/文献)

- (1) ASME Sect. III Subsection NB Class 1 Component
NB-3600 Piping Designs, NB-3500 Valve Design
- (2) JSME S NC1 発電用原子力設備規格—設計・建設規格<第1編 軽水炉規格> PPB-3500
- (3) ASME Sect. III Subsection NC(ND) Class 2(Class3) Component
NC-3650 analysis of Piping Designs
- (4) ASME B31.3 Process Piping (2012年), あるいは JPI 7S-77 石油工業用プラントの配管基準
- (5) ASME B31.1 Power Piping, あるいは JEAC 3706 圧力配管及び弁類規定
- (6) JIS B8277 圧力容器の伸縮継手 及び EJMA Standards of Expansion Joint
- (7) JSME S-012 「配管内円柱構造物の流力振動評価指針」
- (8) JSME S-017 「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」
- (9) JIS B8266 付属書 8 「圧力容器の応力解析及び疲労解析」 3.疲労解析 あるいは
ASME Sect. VIII div.2 Mandatory Appendix 5 “Design based on Fatigue Analysis”
- (10) 解説 原子力設備の技術基準 旧告示 501号 (電力新報社)
- (11) 安藤,岡林 「原子力プラントの構造設計」 (東大出版会 1977)
- (12) Engineering Data File—Charts for transient temperatures in pipes
by D. R. McNeill and J. E. Brock (Heating, Piping & Air Conditioning, Nov. 1971)
- (13) S.W.Tagart "Plastic Fatigue Analysis of Pressure Component" (ASME Paper 68-PVP-3)
- (14) B.F.Langer “Design Stress Basis for Pressure Vessels”(William M.Murray Lecture.1970)
- (15) A.R.C.Markle 「Fatigue Test of Piping Component」, 「Fatigue Test on Flanged Assemblies」
「Fatigue Test of Welding Elbow and …」 and etc. (Transaction the ASME, 1947~1952)