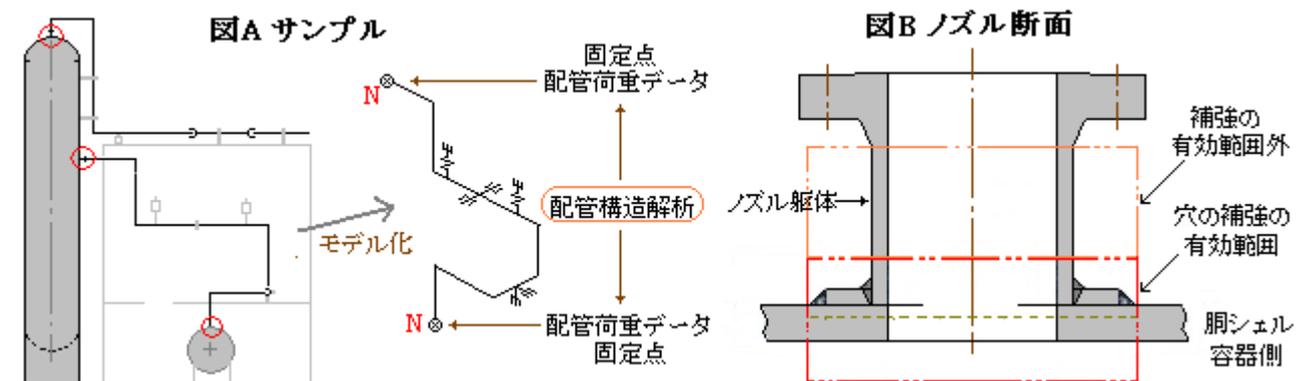


【整番】 SE-16-TM-01	【標題】 容器/塔槽類の配管接続ノズルの強度評価について
分類：構造(ノズル)/種別：技術メモ	作成年月：H24.12/改訂：Ver0.0 (H25.1) 作成者：N.Miyamoto

全 24 枚

- 構成：1. 特定容器並みノズル廻りの強度評価 1.1 応力分類に関する考察、1.2 評価に関する提案  
1.3 強度解析/評価の実際
2. 配管接続ノズルの耐震性能評価 2.1 ノズルの耐震評価方案、2.2 設計指針に関する考察
3. まとめ(総括)

プラント設備では、塔槽/タンク/熱交のノズル(管台)に配管を接続する場合、ノズルそのものは機器と一体化しているため、通常その設計は機器側の所掌になるが、配管側から配管荷重が持ち込まれるため、配管側の配管解析結果にそって設計が進められる。それ自身はルーチン的な作業で機種によっては標準化されていることも多く、そのためごく一般的な構造認識が曖昧になっているケースもある。また逆に、特異な使用条件が発生して特定容器並みの応力解析や疲労解析が要求されることも、あるいは重要度 Ia の耐震性能が要求されることもある。そこでもう一度ノズルの構造強度を考え、実務的な解析・評価方法について考察してみたい。[急ぎの方は 3. まとめ を参照のこと。]



## 1. 特定容器並みノズル廻りの強度評価

### 1.1 応力分類に関する考察

- (1) 強度評価で重要なのは、算定される応力の**タイプ分類**である。FEM や理論解析から得られる応力(成分)は次の5つのタイプに分類される(末尾添付参照)。

一次一般膜応力( $P_m$ )タイプ、一次局部膜応力( $P_L$ )タイプ、一次曲げ応力( $P_b$ )タイプ、  
2次応力( $Q$ )タイプ、ピーク応力( $F$ )タイプ

これらは更に次のグループに集められる(末尾添付参照)。

- ① 一次一般膜応力単独 [ $P_m$ ]グループ、② 一次局部膜応力単独 [ $P_L$ ]グループ  
③ 一次(一般膜+曲げ)応力 [ $P_m+P_b$ ]グループ or 一次(局部膜+曲げ)応力 [ $P_L+P_b$ ]グループ  
④ (一次+2次)応力 [ $P_L+P_b+Q$ ]グループ or (一次+2次)応力 [ $P_L+Q$ ]グループ

応力分類ーグループ化の過程で、解析から得られた応力成分、

$$\sigma_t, \sigma_l, \sigma_r, \tau_{tl}, \tau_{tr}, \tau_{lr}, \tau_{lt}, \tau_{rt}, \tau_{rl} \quad (\text{ここで、} t: \text{周方向、} l: \text{長手方向、} r: \text{半径方向})$$

は、線形化処理によってリセットされる(補1)。そしてグループ毎にリセットされた応力成分を合算し、それらを用いて主応力 [ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ] を算定する。通常のシェル構造では半径方向の  $r$  成分は殆ど無視できることが多いため、主応力は次のようになる(補2)。

$\sigma_1 = (\sigma_t + \sigma_l)/2 + \{(\sigma_t - \sigma_l)^2 + 4\tau^2\}^{0.5}/2$ 、 $\sigma_2 = (\sigma_t + \sigma_l)/2 - \{(\sigma_t - \sigma_l)^2 + 4\tau^2\}^{0.5}/2$ 、 $\sigma_3 = 0$   
 最大せん断応力強さ(通常、応力強さと呼称する)Sは、例えば通常のシェル構造の場合、

$$S = \text{Max.}[|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_1 - \sigma_3|, |\sigma_2 - \sigma_3|]$$

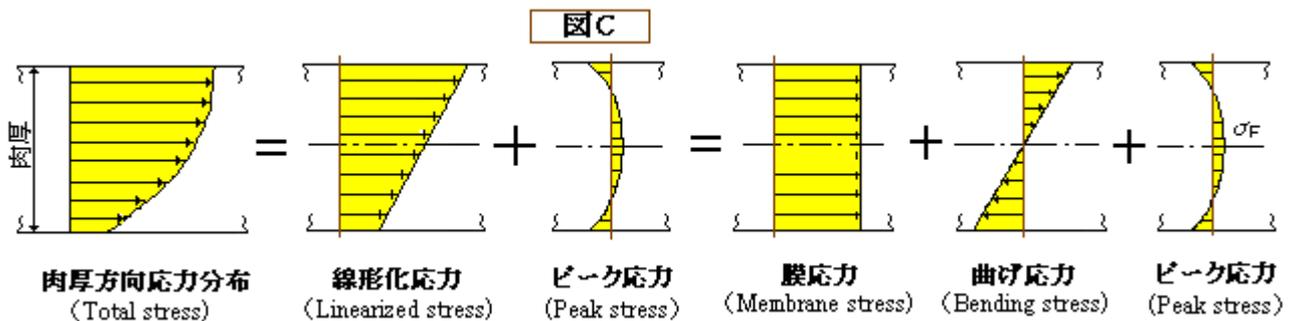
$$= \text{Max.}[|(\sigma_t + \sigma_l)/2 \pm \{(\sigma_t - \sigma_l)^2 + 4\tau^2\}^{0.5}/2|, \{(\sigma_t - \sigma_l)^2 + 4\tau^2\}^{0.5}]$$

①～④の各グループ毎に応力強さ S を計算して、これらを  $P_m$ 、 $P_L$ 、 $P_L + P_b$  or  $P_m + P_b$ 、 $P_L + P_b + Q$  or  $P_L + Q$  の夫々の応力強さにふりあてて評価し次の条件を満たすとき合格になる。

$$P_m > S_m, P_L > 1.5S_m, P_L + P_b \text{ or } P_m + P_b > 1.5S_m, P_L + P_b + Q \text{ or } P_L + Q > 3S_m$$

応力強さ  $P_m$ 、 $P_L$ 、 $P_b$ 、 $Q$  については JISB8266 付属書 8 表 2 に定義されている(末尾添付参照)。ただ、かなり抽象化されている。その内容を平たく云えば、

- ・ 応力と応力強さは異なる。応力は負荷重からストレートに得られる個々の応力成分に過ぎない。応力強さは、応力成分をタイプ別あるいはグループ別に加工して得られる評価対象応力である。
- ・ ( $P_m, P_L, P_b$ ) は延性破断につながる一次応力強さ、 $Q$  は疲労につながる 2 次応力強さである。
- ・ 膜応力強さ( $P_m, P_L$ )と曲げ応力強さ  $P_b$ の違いは、**図 C**による(図の応力→応力強さとみてよい)。膜応力は線形分布した応力(線形化応力)を平均化したもので任意断面の平均応力である。
- ・ 線形化応力(仮称)は膜応力と曲げ応力を併せたもの云々。( $P_L + P_b$ ), ( $P_m + P_b$ ), ( $P_L + Q$ )あるいは( $P_L + P_b + Q$ )は**図 C**の線形化応力(トータル応力からピーク応力を除去したもの)に該当する。
- ・ 一般膜応力強さ  $P_m$ と局部膜応力強さ  $P_L$ の違いは字句の通り、全体に分布するか、局部に分布するかによる(あるいは全体で平均化されるか、局部的な不連続断面で平均化されるか)。
- ・  $Q$  は、膜/曲げを問わない。形としては**図 C**の線形化応力あるいは曲げ応力( $P_b$ )に相当する。



(2) 以上、タイプ別さらにはグループ別の評価対象応力の算出と評価をステップ的に示した。この過程において重要なのは、当初の応力のタイプ分類(=応力分類)である。これがクリアできれば、これに続くグループ化と各評価対象応力(強さ)の導出は機械的にできる(もちろん手順化は必要だが…)。以下、容器ノズル廻りの応力分類について議論する。

特定容器の応力分類の例は JISB8266 付属書 8 の表 1 に示されるが、今考えている容器ノズル廻りに関してピックアップすると表 A のようになる。内容的は「ノズル(管台)」と「ノズルその他開口部付近」に分離しており、さらに前者は、

穴の補強の有効範囲内の部分 / 穴の補強の有効範囲外の部分

に区分される。**図 B**に示すように、有効範囲内はいわゆるノズルネックにほかならないが、補強板やボスは必ずしも必要という訳ではない。単に構造不連続部分(ノズルー胴)を識別したものと思われる。有効範囲外は構造不連続の影響を受けないノズル躯体(管)部分で、接続フランジはむろん含まれない。

表Aでは応力ソースとして内圧／配管荷重／温度勾配の3つを挙げている。配管荷重は、“機械的荷重による云々”と“配管の熱膨張による云々”が然りで、機械的荷重は接続配管の重量や内圧推力等を指し、配管の熱膨張は接続配管の熱膨張拘束を指している。ここでは前者から生じる配管荷重を**機械的配管荷重**と呼び、後者から生じる配管荷重を**熱的配管荷重**と呼ぶものとする。いずれもノズルネック(場合によってはノズルフランジ)の位置で定義され、モーメント(曲げ/振り)及びフォース(軸力/せん断力)としてノズル胴シェル側に伝達される。

表A 代表的事例に対する応力の分類 (JIS B8566 付属書より抜粋)

容器構成要素	位置	応力の原因	応力の種類	記号
ノズル (管台)	穴の補強の有効 範囲内の部分	圧力	一般膜応力 局部膜応力 曲げ応力 ピーク応力	$P_m$ $P_L$ $Q$ $F$
		機械的荷重による軸力、せん断力、及びねじ(振)りモーメント	板厚に対する膜応力(6) 板厚に対する曲げ応力(6)	$P_m$ $P_b$
		機械的荷重による曲げモーメント	板厚に対する膜応力(6) 板厚に対する曲げ応力(6)	$P_m$ $P_b$
		配管の熱膨張による軸力、せん断力及びねじりモーメント	板厚に対する膜応力(6) 板厚に対する曲げ応力(6)	$P_m$ $P_b$
		配管の熱膨張による曲げモーメント	板厚に対する膜応力(6) 板厚に対する曲げ応力(6)	$P_m$ $P_b$
		温度こう配	膜応力 曲げ応力 ピーク応力	$Q$ $Q$ $F$
穴の補強の有効 範囲外の部分	穴の補強の有効 範囲外の部分	圧力	一般膜応力 局部膜応力 曲げ応力 ピーク応力	$P_m$ $P_L$ $Q$ $F$
		機械的荷重による軸力、せん断力及びねじりモーメント	板厚に対する膜応力(6) 板厚に対する曲げ応力(6)	$P_m$ $P_b$
		機械的荷重による曲げモーメント	板厚に対する膜応力(6) 板厚に対する曲げ応力(6)	$P_m$ $P_b$
		配管の熱膨張による軸力、せん断力及びねじりモーメント	板厚に対する膜応力 板厚に対する曲げ応力	$Q$ $Q$
		配管の熱膨張による曲げモーメント	板厚に対する膜応力 板厚に対する曲げ応力	$Q$ $Q$
		温度こう配	膜応力 曲げ応力 ピーク応力	$Q$ $Q$ $F$
任意の胴又は 鏡板	容器任意断面 又は内圧	外部荷重、モーメント 又は内圧	全断面膜応力 (断面の垂直方向成分)	$P_m$
		外部荷重又はモーメント	全断面曲げ応力 (断面の垂直方向成分)	$P_m$
	ノズルその他 開口部付近	外部荷重、モーメント 又は内圧	局部膜応力 曲げ応力 ピーク応力(すみ肉又は隅角部)	$P_L$ $Q$ $F$
		任意の位置	胴、鏡板間の温度差	膜応力 曲げ応力

注(6) 考察下の板厚平均応力及び板厚内外の等価線形応力の差の 1/2 を意味する。但し**構造の不連続に起因する応力は除く。**

この表を運用する時、配管荷重に係わる応力分類に関して幾つかの疑問が浮かんでくる。即ち、

- ① 補強範囲内(=ノズルネック)で、熱的配管荷重による応力が1次応力に分類されている(?)、
- ② 「ノズルその他開口部付近」はノズルネックと重なっている。然るに、「ノズルその他開口部付近」では、外荷重即ち(機械的+熱的)配管荷重に対して、膜成分→1次、曲げ成分→2次応力に別れ、「ノズル(管台)」の有効範囲内(ノズルネック)では、膜成分/曲げ成分ともに1次応力になっている(?)、
- ③ ノズルの板厚に対する応力が膜/曲げとも同じ1次(ないし2次応力)になっている、また1次の膜応力は全て一般膜になっている(?)。

①について。殆どの場合、熱膨張(差)から生じる応力が2次応力に分類されるのでこれは尋常ではない。ただノズルネックは、より厚肉の胴シェルに小径のノズルが接合する部分なので、配管側から見ればアンカーになる。保守的な考えをとれば、このような剛結部分では配管側の熱膨張変位の逃げ(自己平衡)は殆ど期待できないので、この部分に生じる変位拘束応力(膜+曲げ)を1次応力に格上げしより厳しく制限すべき( $<1.5S_m$ )ということになる。ここではこの保守的な考えが採られているようだ。  
[2次応力は”構造不連続部に生じる自己平衡応力”と定義されるが、変位荷重に対する自己平衡性の度合いとも考えられる。配管ではその方が判り易い。ノズルは配管の一部でもある。]

②について。この場合「ノズルその他開口部付近」の応力が不連続応力にあることに気が付けばよい。「ノズル(管台)の補強範囲内」の応力分類では不連続に起因する応力が除外されているので、決してミスマッチではない。ただ、「ノズル(管台)の補強範囲内」の不連続応力は普通、全て2次応力に分類されるが、ここでは**膜成分→1次、曲げ成分→2次応力**になる。これは、膜成分が弾性域にあって安定的に外力とバランスする必要があるのであるからだと思う。

③について。熱的配管荷重による応力については、①で述べたように保守性を重んじて膜/曲げとも一次応力になっているが、**図D**に示すようにシェル側の変形を考えれば全て1次応力で制限するのは過剰すぎる。おそらく膜成分のみ1次応力として、板厚に生じる曲げ成分は2次応力で扱うのが妥当な所だろう(例えば内圧荷重により板厚に生じる応力はそのように扱われている)。しかし一方では、配管の曲げによる全断面分布の曲げ応力は、板厚に対して、**図D右**のようにその大半が膜成分になるので、すべて表Aのように1次応力で扱うのも決して過剰ではない。多分これが膜/曲げとも1次の理由になっているのだろう)。なお膜成分が、局部膜  $P_L$  ではなく一般膜  $P_m$  になっているのは、表の注記(6)にあるように不連続効果が除外されて  $P_L$  分が含まれていないことによると思う。



(3) 更に応力分類を考えてみる。JIS B8266 付属書 8 表 1(表 A)は、次の規定にそのオリジナルがある。

ASME Sect.VIII Div.2 Appendix 4 Mandatory Design based on Stress Analysis

ノズル廻りについてこの ASME 規定をピックアップすると、表 B のようになる。なお「ノズルその他開口部付近」に相当する部分は JIS と全く同じなので割愛している。

表 B TABLE 4-120.1  
CLASSIFICATION OF STRESSES FOR SOME TYPICAL CASES (CONT'D)

Component	Location	Origin of Stress	Type of Stress	Classification
Nozzle	Cross section perpendicular to nozzle axis	Internal pressure or external load or moment	General membrane (avg. across full section). Stress component perpendicular to section	$P_m$ ; see 4-138
		External load or moment	Bending across nozzle section	$P_m$ ; see 4-138
	Nozzle wall	Internal pressure	General membrane	$P_m$ ; see 4-138
			Local membrane Bending Peak	$P_L$ $Q$ $F$
Differential expansion	Membrane Bending Peak		$Q$ $Q$ $F$	

4-138 Nozzle Piping Transition

(a) The classification of stresses in this paragraph is applicable to the nozzle neck. The evaluation of stresses at other locations shall be according to 4-130.

(b) Within the limits of reinforcement given by AD-540.2 whether or not nozzle reinforcement is provided, the  $P_m$  classification is applicable to stress intensities resulting from pressure induced general membrane stresses as well as stresses, other than discontinuity stresses, due to external loads and moments including those attributable to restrained free end displacements of the attached pipe. Also, within the limits of reinforcement, a  $P_L$  classification shall be applied to local primary membrane stress intensities derived from discontinuity effects plus primary bending stress intensities/due to combined pressure and external loads and moments including those attributable to restrained free end displacements of the attached pipe; and a  $P_L + P_b + Q$  classification shall apply to primary plus secondary stress intensities resulting from a combination of pressure, temperature, and external loads and moments, including those due to restrained free end displacements of the attached pipe.

(c) Beyond the limits of reinforcement, a  $P_m$  classification is applicable to stress intensities resulting from

pressure induced general membrane stresses as well as the average stress across the nozzle thickness due to externally applied nozzle axial, shear, and torsional loads other than those attributable to restrained free end displacement of the attached pipe. Also, outside the limits of reinforcement, a  $P_L + P_b$  classification is applicable to the stress intensities which result from adding those stresses classified as  $P_m$  to those due to externally applied bending moments except those attributable to restrained free end displacement of the pipe. Further, beyond the limits of reinforcement, a  $P_L + P_b + Q$  classification is applicable to stress intensities resulting from all pressure, temperature, and external loads and moments, including those attributable to restrained free end displacements of the attached pipe.

(d) Beyond the limits of reinforcement, the  $S_{PS}$  limit on the range of primary plus secondary stress intensity may be exceeded as provided in 4-136.7, except that in the evaluation of 4-136.7(a) stresses from restrained free end displacements of the attached pipe may also be excluded. The range of membrane plus bending stress intensity attributable solely to the restrained free end displacements of the attached piping shall be  $\leq S_{PS}$ .

内容的には JIS と同じく内圧/配管荷重/温度勾配をあげているが、表 A の内容と少し違っている。

配管荷重に注目して要点を抽出すると、次の表になる。

	<補強の範囲内>	<補強の範囲外>
(a)	熱膨張もその他荷重も区別なく外荷重/モーメントとして扱われている。	熱膨張はその他荷重と区別して、2次応力Qのソースとして扱われている。
(b)	一般膜 $P_m$ には、通常の膜成分(軸力/せん断力/振りモーメントによる)の他に、曲げモーメントによる成分が含まれる。不連続成分はむしろ含まれない。	一般膜 $P_m$ は、通常の膜成分(軸力/せん断力/振りモーメント)による。曲げモーメントによる膜成分(図 D 右)は含まない。
(c)	局部膜 $P_L$ には内圧による膜応力、 <u>曲げモーメントを含めた全配管荷重による1次応力</u> および不連続応力の膜成分が含まれる。	[局部膜+曲げ] $P_L+P_b$ は、上記 $P_m$ に曲げモーメントによる全断面曲げ応力が加算されたもの。
(d)	トータルとして $P_L+P_b+Q$ になる。 $P_b$ は零。	トータルとして $P_L+P_b+Q$ になる。

(a)について。補強の範囲内では熱的配管荷重を機械的配管荷重と同じに扱われるので熱膨張拘束(自由端変位拘束)による応力は1次応力扱いになり、JIS B8266(表 A)にマッチする。

(b)について。一次一般膜応力  $P_m$  は通常、不連続部分のない一様な胴部分に一様に分布する肉厚平均応力を云い補強の範囲外の規定がこれに該当しているが、配管の曲げによって全断面に生じる曲げ応力の膜成分(図 D 右)を補強範囲内に限って一般膜  $P_m$  に含めて、 $P_m \leq S$  とより厳しく制限するのはノズルネックを重視したためと思われる。これに比べ、JIS B8266(表 A)では補強範囲に抛らず配管の曲げによる全断面曲げ応力による膜成分は  $P_m$  に含まれているから、JISの方が厳しくなっている。

(c)について。この部分は相当に難解である。まず補強の範囲内については、

a  $P_L$  classification shall be applied to local primary membrane stress intensities derived from discontinuity effects plus primary bending stress intensities due to combined pressure and external loads and moments including .....

となっている。下線部分を板厚分布の曲げ応力にとると、なぜ主語を  $P_L$  とするのかということになるので、おそらく下線部分は配管曲げによる全断面曲げ応力を云っているのではないかと思う( Table の Type of Stress 欄には Bending across nozzle section と記されている)。これを primary あるいは intensity としている理由はもう一つわからないが、とにかく[不連続効果+全断面曲げ応力強さ]から抽出される1次局部膜応力を  $P_L$  に引き当てていると推測される。その場合、膜成分を取り出した後の曲げ成分はどう扱うか?  $P_L+P_b$  の組み合わせがないので、おそらく全て Q 扱いになる外ない。ただ、機械的配管荷重による板厚の曲げ成分まで2次応力にするのは少し抵抗が残る。“primary”はその辺を喚起しているような気がする。想像ではあるが、JIS B8266(表 A)の場合、まず不連続効果分を外しておいて、残りの primary bending stress intensities( $P_L+P_b$ ) をそのまま膜応力に格上げしているように思う。実際の所、前述のように  $P_b$  はごく軽微であるから有意な差はでない。JIS B8266 の対処は妥当だと思う。

一方、補強の範囲外については次のようなコメントになっている(なお不連続効果は省かれている)。

a  $P_L+P_b$  Classification is applicable to the stress intensities which result from adding those stresses classified as  $P_m$  to those due to externally applied bending moment except ...

曲げモーメント以外の機械的配管荷重(軸力/せん断力/振りモーメント)と内圧による応力の大半は膜成分として既に  $P_m$  に仕分けられているので、これに曲げモーメントから生じる全断面応力を加算すればよい。加算される全断面応力は板厚分布では  $[P_L+P_b]$  になるので、グルーピング後の膜成分の  $[P_m+P_L]$  を  $P_L$  成分と言い換えれば、後処理後の応力強さは  $[P_L+P_b]$  ということになる。実質的には JIS B8266(表 A)と殆ど同じであろう。

(d)について。いずれのケースも 2 次応力  $Q$  の内容は明記されていないが、補強範囲内では“全配管荷重から生じる板厚分布の曲げ応力”、また補強範囲外では“熱的配管荷重から生じる膜/曲げ応力”ということになる。

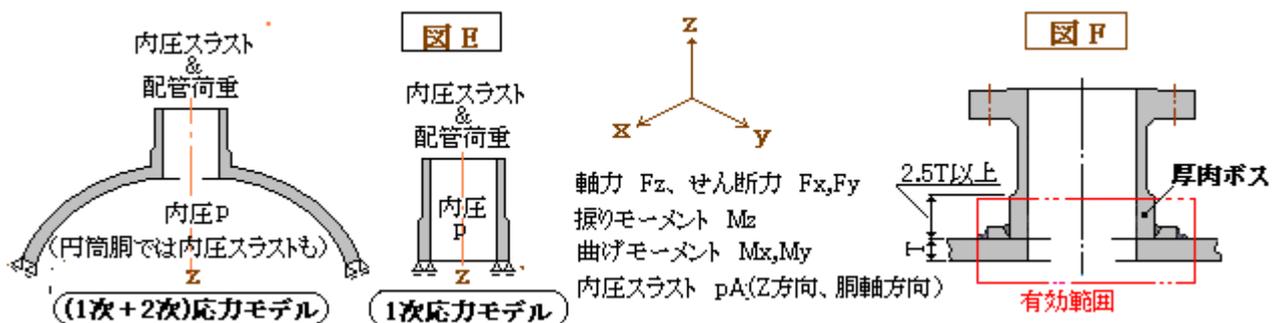
## 1.2 評価に関する提案

(1) 以上、JISB8266 特定容器規定 と ASME Sect.VIII Div.2 規定の内容を巨細に見てみた。当然ながら両者の規定は類似しているものの、以下の点で食い違いが見られる。

- ① 補強範囲外の一次一般膜応力強さ  $P_m$  について、JIS の方は機械的荷重の曲げモーメントによる膜成分も  $P_m$  タイプとしているが、ASME では  $P_m$  タイプから外し  $P_L$  タイプにしている。(なお補強範囲内については JIS/ASME とともに配管曲げによる膜成分を  $P_m$  タイプにしている。)
- ② 補強範囲内で、JIS の方は熱的配管荷重による板厚分布の膜および曲げ成分を 1 次応力に分類しているが、ASME では膜成分のみを 1 次応力タイプにして、曲げ成分は 2 次応力タイプに分類している(但し TS 作成者の推定)。
- ③ ノズルネックの不連続効果による応力は、ASME の場合、膜成分は  $P_L$  タイプ、曲げ成分は  $Q$  タイプになるが、JIS の方は不明。

①については、曲げモーメントによる応力を  $P_m$  に分類するのは多分過剰なので ASME の方が妥当。  
②については、実質的に差異がない。安全側に JIS に合わせる。③については ASME によるのがよい。

(2) 応力分類については概ね確認したので、次に具体的な解析評価(案)について検討する。FEM 解析モデルとして下図のような 2 つのモデルを考える(\*)。



1 次応力モデルを用いた解析は、次の 3 つ。

- ① 内圧&内圧スラスト+機械的配管荷重(軸力  $F_z$ /せん断力  $F_x, F_y$ /振りモーメント  $M_z$ )  
→ 応力算定 → 平均化による膜成分抽出 → 補強範囲外の  $[P_m]$
- ② 内圧&内圧スラスト+機械的配管荷重(上記成分+曲げモーメント  $M_x, M_y$ )  
→ 応力算定 → 線形化处理 → 補強範囲外の  $[P_L+P_b]$
- ③ 内圧&内圧スラスト+(熱的+機械的)配管荷重(全ての成分 -  $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ )

→応力算定 →線形化处理 →膜補強範囲内の管部分の  $P_m$  及び  $[P_m + P_b]$

内圧については曲げ応力は2次応力であるが、安全側に1次応力扱いにする。ただ薄肉のときは、誤差は少ないが、厚肉では誤差が大きくなるので、内圧単独で解析し①～③に足せばよい。

(1次+2次)応力モデルを用いた解析は、

④ 内圧&内圧スラスト+(熱的+機械的)配管荷重(全ての成分- $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ )

→応力算定 →線形化处理 →補強範囲外の  $[P_L + P_b + Q]$  及び

補強範囲内の接合部分廻りの  $[P_L]$  及び  $[P_L + Q]$

なお1次応力モデルは実質、パイプモデルとも言える。テーパ部分がないならFEMは不要で、パイプとして通常の材力公式を用い応力計算すればよい。

以上の解析評価(案)では、**温度勾配**を割愛した。ノズル箇所では流れの急拡や縮流あるいは停頓によって過渡状態で温度勾配がしやすい。その場合は(1次+2次)応力モデルで、熱解析→熱応力解析を行い、その結果を上記④に合算させて  $[P_L + P_b + Q]$ ないし  $[P_L + Q]$ を算出する。

(\*) なお(胴シェル+躯体ノズル)即ち(1次+2次)応力モデルだけで評価することも可である。ここでは、少ない出力データで済むように1次応力モデルを分離している。

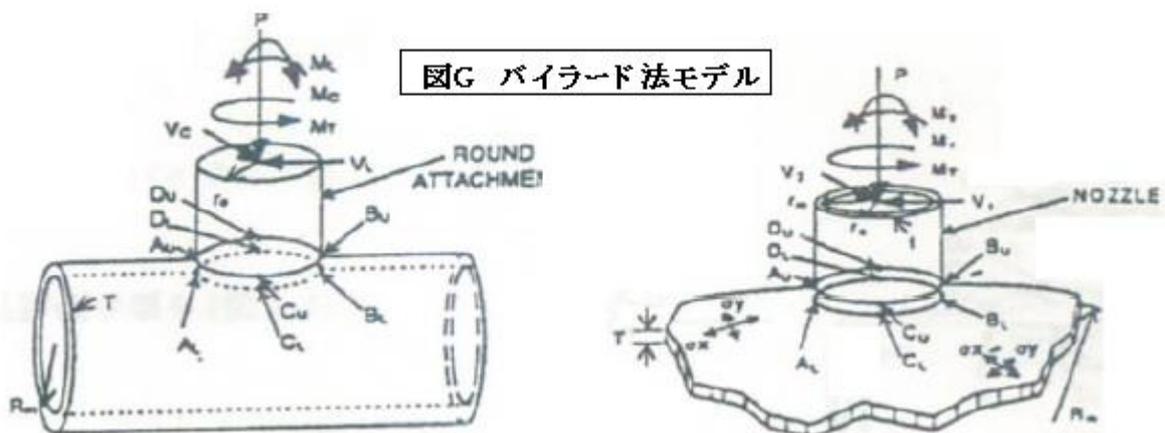
(6) 図EのFEMモデル解析の結果、厳しくなるポイントはやはり補強範囲内で、③における  $[P_m + P_b]$  ないし⑤における  $[P_L + Q]$ が然り。

前者については必要に応じて、ノズルを図Fのように厚肉のボスタイプにして補強の有効範囲内で一次応力強さ  $[P_m + P_b]$ が  $1.5S_m$ (~降伏応力)を上回らないようにする必要がある。

後者についてはノズルー胴シェル接合部分がMaxになるので、ボスタイプのノズルにして外径をアップしたり補強板(補強パッド)の厚さをアップして接合部の負担を減じる必要がある。

### 1.3 強度解析/評価の実際

(1) FEM解析は便利であるが、不馴れだと煩雑で時間がかかる。これに替わる手法としてバイラード法の計算がある。これは理論解析であるが、よく知られているようにWRC107及びWRC297で設計資料されている。この資料ではノズルー胴シェル接合部分についてグラフから無次元パラメータを読み取り接合部8ポイントの応力強さが読み取れるようになっている。ポイントのいずれかにノズルネックの(1次+2次)応力の最大値に近い応力強さが存在する。



従って、図 E の(1次+2次)応力モデルの FEM 解析の代わりに、バイラード法計算を採用すれば、前項(5)のケース④の応力 $[P_L+Q]$ をかなり容易に得ることができる。 $[P_L+Q]$ は不連続部分の応力なので圧倒的に大きくノズルネックの形状はその評価で決まる。他方、補強範囲外の $[P_m]$ 、 $[P_L+P_b]$ 、 $[P_L+P_b+Q]$ および補強範囲内の応力強さ $P_m(P_L)$ 、 $[P_m(P_L)+P_b]$ は、前述のようにパイプとして応力が算定できる。仮にノズル壁にテーパが付いていても既存の応力指数データを用いれば容易に不連続応力を見積もることができる(テーパ部分は不連続部分だが、応力増加は2割に満たないだろう)。

特に、特定容器並みの応力解析の要求がなければ、既に配管側の強度解析で強度確認にされているので、補強範囲外は全く省略できると思う。但し、補強範囲内の管部分については、パイプ扱いとし、熱膨張拘束分の配管荷重を機械的配管荷重(自重/内圧推力など)と同じく1次応力源として、内圧と全配管荷重について材力計算を行い $P_m$ 及び $[P_m+P_b]$ をチェックする必要がある。例えば、

$$S = \text{Max.} [ (\sigma_t + \sigma_l) / 2 \pm \{ (\sigma_t - \sigma_l)^2 + 4 \tau^2 \}^{0.5} / 2, \{ (\sigma_t - \sigma_l)^2 + 4 \tau^2 \}^{0.5} ] \leq 1.5 S_m \rightarrow \text{OK}$$

$$\sigma_t = PD / (2t), \quad \sigma_l = \{ PD / (4t) + F_z / A \pm (M_x^2 + M_y^2)^{0.5} / Z_p, \quad \tau = |M_z / (2Z_p)| + (F_x^2 + F_y^2)^{0.5} / A_p$$

ここで  $S$  = 一次応力強さ $[P_m+P_b]$ 、 $S_m$  = 基本許容応力強さ、 $\sigma_t, \sigma_l$  = 周方向、長手方向応力、  
 $\tau$  = せん断応力、 $P$  = 内圧  $G(>0)$ 、 $D$  = ノズル外径(小径側)、 $t$  = 減肉後肉厚(小径側)、  
 $M_x, M_y, M_z = x, y, z$  軸周りモーメント(図 E)、 $F_x, F_y, F_z = x, y, z$  軸フォース(図 E, 符号に注意)、  
 $Z_p$  = ノズル断面2次モーメント、 $A_p$  = ノズル断面積、

なお、バイラード法で求めた応力と FEM 解析で求めた応力には差異がある。全般には FEM 解析の方が応力が低い。バイラード法ではノズルは胴シェルに対して剛な挿入物として扱われるので、接合面には高い応力がカウントされる。一方、FEM 解析はノズルを円筒シェルで扱っているため、その微小な変形によって応力が緩和される。その反面、ノズル側の応力は高くなっている(TS 作成者の解析経験でも然り)。いずれにしても[FEM 解析の結果<バイラードの結果]であるから、バイラード法の適用は概ね安全側になると予想される。

[バイラード法計算は、複雑な曲げ変形が含まれるため士の符合がややこしい。WRC107 はこれを整理しているので手計算もできるが、グラフ読み取りなどの煩雑さがある。市販ソフトを利用すればよい。ただ内容は検証する必要がある。]

(2) ノズル強度解析では、配管側の構造解析の影響が大きい。この場合、最も大きな影響は、

#### ノズル取り付け部分の胴シェル側の剛性(バネ定数)

から派生する(図 D 参照)。この部分の剛性(stiffness)を無限にして(即ち完全アンカとして)、配管系を解析するとノズルネックの反力(→配管荷重)が非常に大きくなる。然るに[単位荷重の負荷→胴シェルの変形量]によって得られるバネ定数をアンカ点であるノズルネックに入力すると、配管反力はかなりダウンする。配管構造解析では完全アンカの回転バネは  $10^{15} \text{ kgf}\cdot\text{mm}$  で設定されているが、実際の胴シェル側のバネ定数は  $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{ kgf}\cdot\text{mm}$  と、大きく設定を下回るからである。

一般にノズル部分の損傷は機器側のみならず配管側にも致命的である。配管荷重には不確定要素が多いので、多少のマージンを持たせる必要があるが、完全アンカのマージンは大きすぎる。

ノズルー胴シェルのバネ定数の考慮によって設計は合理化される。ノズル側の補強パッド厚みを

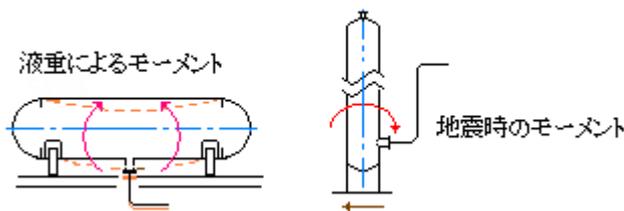
増やすとか、配管の引き回しやサポートを増やすといった措置は最小限に抑えることができる。

【ノズル-胴シェルのバネ定数の計算についての情報は多く、計算ソフトもある。いずれ、これらの情報をまとめてTS化したい。】

- (3) ノズルネックでは熱的配管荷重が機械的配管荷重と同じく1次応力源になるので、応力強さが許容値( $1.5S_m$ )をオーバーしてしまう恐れがある。対処法として、前1.2(6)項で述べたようにノズルネックの肉厚を増やすか、配管の引き回しを増やして熱膨張拘束を緩和すればよい。ただこの場合、管台フランジ継手部からの漏洩について考える必要がある。配管応力(ASME B31.3)が  $10 \text{ kg f/mm}^2$  辺りを大きく越えるとフランジ接面から漏洩しなかなかな止まらないこともある。これを考えれば、ノズルネックを強化するよりも、配管の引き廻しで漏洩の主因になる配管の曲げモーメントを低減した方が合理的である。

【フランジ継手の漏洩防止のためのモーメント制限は ASME NC3600 に含まれる。いずれ、その背景も含めてTS化する積もりである。】

- (4) 表Aの「ノズルその他開口部付近」即ち胴シェル側では、“外部荷重、モーメントまたは内圧”が応力ソースとされている。この場合、“外部荷重、モーメント”の意味が鮮明でなく、これを配管荷重に解釈すると、下図のような自重、流体力あるいは慣性力によって塔槽類自身に発生するノズル廻りの応力が無視されてしまう恐れがある。これらの応力成分はパイラード法計算外であるから、その取り込みは難儀である。もしパイラード計算ソフトにダミー的に処理する機能があれば幸いであるがもしなければ、応力成分を出力して、応力強さ  $P_L, (P_L+Q)$  を算定する前にこれら追加応力成分を繰り入れて  $P_L, (P_L+Q)$  を手計算することになる。もしそれも無理ならこれら追加応力成分の  $P_L, (P_L+Q)$  を求めパイラード法計算の結果  $[P_L, (P_L+Q)]$  に足しこむほかない(この処置は安全側になる)。



## 2. 配管接続ノズルの耐震性能評価

### 2.1 ノズルの耐震評価方案

- (1) プラントの高圧ガス設備は高圧ガス設備等耐震設計指針(KHK E012-1,2)によって、システム全体から機器/配管/基礎/架構の詳細構造まで、細かく規制され指導されている。例えば、レベル1地震動に対する塔槽/配管の耐震性能評価規定の要点は次のようになる。

- ① 地震荷重としては基本的に、地震慣性力と地震相対変位の2つを考慮する。
- ② 地震時の許容応力  $S$  を、長期許容応力の $\sim 1.5$ 倍とする(降伏応力  $S_y$  ないしその90%ベース)。
- ③ 運転状態をベースとした長期1次応力と地震慣性力による短期1次応力の和を、 $P_m$ について  $S$  以下、 $P_L$  or  $(P_L+P_b)$  or  $(P_m+P_b)$  について  $1.5S$  以下に制限する。
- ④ 地震サイクルについて、地震慣性力+相対変位に由る(1次+2次)応力強さ範囲を  $2S_y$  以下に制限する。

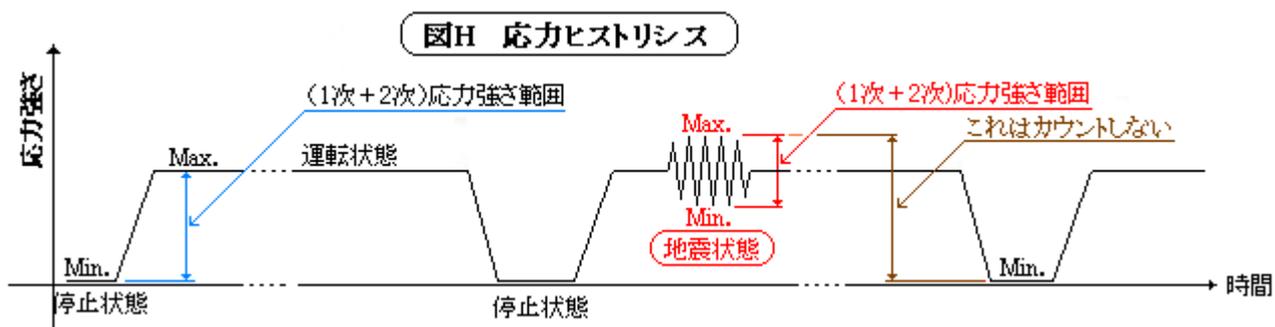
まず①について。地震慣性力は質量  $\times$  地震加速度による力で周期性があり、決してかかりっ放しの荷重ではないが、通常、機械的荷重に分類され1次応力源になる。

一方、地震相対変位は地震の持つ振動特性に由るもので、配管を別個に保持する構造物間の揺れ方の違いから派生する。例えば配管のアンカーである機器(ノズル)と配管を支持する架構の地震時の相対的な変位差が然り。変位荷重であるので2次応力源になる。

また②③については通常概念どおりである。1次(膜+曲げ)をギリギリの $1.5S_y$ に抑える。

次に④について。これについては”サイクル”について説明しておく必要がある。前1項では長期荷重から生じる応力現象について述べた。この場合の(1次+2次)応力強さは普通、**発停サイクル**を前提としている。即ち設備の停止状態では自重以外の荷重は零近くになり応力状態はMin.になっているが、スタートアップして運転状態に達すると、液重/内圧/熱膨張などが負荷されて応力状態はMax.になる。このMin.-Max.即ち Peak to Peak が、(1次+2次応力)即ち**全応力強さ範囲**にあたる( 図 H 参照 )。 (1次+2次)応力強さ範囲が大きいと塑性変化がプラントのスタートアップ～シャットダウン毎に繰り返されて疲労原因になるので、これを $2S_y$ 以下に抑えて**シェークダウン**させる必要がある(補3)。これが前1項における(1次+2次)強さ制限の目的である。なお自重応力は固定していることが多く、応力強さ範囲から省いてもよいが、安全側に範囲に含めることが多い(前1項ではそう扱っている)。

さて運転状態で地震が起きるとどうなるか？ 地震応力は運転状態の応力の廻りで揺れ動き、図 H に示すように発停サイクルの上に地震サイクルが重なる。この時、発停サイクルの谷と地震サイクルの山の間で大きな応力強さ範囲ができるが、プラント設備中のレベル1地震動の頻度は数回であるからその損傷は殆ど無視できる。むしろ、地震揺動の累積回数は100回以上になることが考えられること、また場合により地震相対変位の影響が大きくなることなどから、地震サイクルにおけるPeak to Peak即ち(1次+2次)応力強さ範囲をチェックしなければならない。これが④の制限の趣旨である。なお、ここでカウントされる応力は当然、**全地震荷重(地震慣性力+相対変位)**に由る全応力になる。



(2) 地震荷重が負荷されても、許容応力が変わるだけで強度評価の考えは変わらない。前1.2項の考えを耐震性能評価に転用すると、下表のようになる。

対象部分	荷重条件	強度評価
① 補強範囲外	内圧&機械的配管荷重(長期)+地震慣性力による配管荷重(短期)	配管として耐震強度を満足する。
② 補強範囲内 (管部分)	内圧&全配管荷重(長期)+地震慣性力による配管荷重(短期)	一般膜 $[P_m] \leq S$ 及び 局部膜+曲げ $[P_m + P_b] \leq 1.5S$
③ 補強範囲内 (ノズルネック廻り)	内圧&全配管荷重(長期)+地震慣性力 &相対変位(片振幅)による配管荷重	局部膜 $[P_L] \leq 1.5S$
	地震慣性力&地震相対変位による 配管荷重範囲(全振幅)	膜+曲げ $[P_L + Q] \leq 2S_y$

①では、配管熱膨張の扱いが配管と同じ2次応力源なので、配管側の耐震解析で評価する。

②では、配管熱膨張の扱いが1次応力源なので熱膨張分を含む長期の全配管荷重+内圧荷重に地震慣性力による短期の配管荷重を足し合わせたものを用いて  $P_m$  及び  $(P_m + P_b)$  を算定して評価する。なおこの部分はパイプなので材力公式で簡易的に応力強さを求めればよい。

③では、バイラード法を用いて応力を算定する。ノズル胴シェル接合廻りの応力は不連続応力で膜成分を  $P_L$ 、曲げ成分を  $Q$  とするので、1次応力強さと(1次+2次)応力強さの評価を行う必要がある。

1次応力強さ評価では、②の荷重に地震相対変位による配管荷重を加算してバイラード法の計算を行い、その結果から膜成分を抽出して評価する(市販の計算ソフトは膜抽出ができる)。

(1次+2次)応力強さ評価では、地震サイクルを扱うので荷重の扱いに注意する。**配管構造解析において地震水平加速度&相対変位を両振り**で入力して得られる**配管荷重範囲**(=プラス方向地震入力から得られる配管荷重+マイナス方向地震入力から得られる配管荷重)を用いてバイラード法計算を行いその結果をそのまま  $[P_L + Q]$  として評価する。結局、③ではバイラード法計算は2通りになる。

## 2.2 設計指針に関する考察

(1) 塔槽類ノズルについては、設計指針のレベル1耐震性性能評価(配管系)編(KHK E012-2-1997)の

第2章 2.7 塔槽類ノズルの耐震性性能評価 / 第3章 5. 塔槽類ノズル

第3章は評価例で、評価指針は第2章 2.7 で与えられる。2.7 は次の3つのサブからなっている。

### 2.7.1 耐震性能評価手順、 2.7.2 応力強さの算定、 2.7.3 耐震設計用許容応力強さ

2.7.1 では、図 2.9 に評価手順のチャートが示されている。その流れは次のようになる。

- ・まず接続配管モデルの地震応答解析からノズルに加わる短期配管荷重を求め、
- ・これを長期荷重と組合わせバイラード法計算などを用いノズル廻りの応力を求める。
- ・得られた応力を用いて地震状態の1次応力と(1次+2次)応力範囲を評価する。

2.7.2 では、バイラード法を用いて配管荷重からノズル胴シェル接合面に生じる最大応力と検定用の応力強さを算定する方法が示されている(便利な応力計算テーブルが付けられている)。

2.7.3 は、2.7.1 に対応して許容応力が示されている。

2.7.2 は主にバイラード法計算の紹介になっているので割愛し、2.7.1 と 2.7.3 を抜粋して本項の末尾に示す。第3章の評価例も含めその内容を前 2.1(2)項の表と比較して気付くのは、(1次+2次)応力

強さの算定/評価に殆ど問題はなく、1次応力の算定/評価にかなりの疑問が残ることである。即ち

- ・ 1次応力算定に係わる配管荷重に長期荷重が(正しく)含まれていない、また
- ・ ノズルネック廻りだけがチェック対象でノズル躯体は対象になっていない。

である。図 2.9 では 1 次応力 $[P_L+P_b]$ が、もっぱら設計地震力に由る配管荷重から導かれたようなイメージになっている。ただ第 3 章の評価例には配管外力条件として [内圧、熱を除く配管荷重及び慣性力を含む荷重] となっているので 長期荷重は除外されていないようである。しかし熱膨張分の配管荷重は除外されているので、補強範囲外はそれでいいとして、補強範囲内の管部分は JIS B8266 付属書 8 と異なる扱いになってしまう。

また、図 2.9 にもその気配があるが、第 3 章の評価例でもノズルネック廻り(ノズル-胴シェル接合部分)の膜成分(1 次局部膜応力強さ  $P_L$ )のみが算定/評価され、ノズル躯体の 1 次応力強さ評価は割愛されている。さらにこれに関連して疑問なのは、

ノズルネック廻りの  $P_L$  が(機械的荷重+地震慣性力)による配管荷重から得られていること

である。ノズルネックの不連続効果による応力は、熱膨張分を含む全配管荷重と内圧から生じ、その膜成分は 1 次局部膜応力  $P_L$  に分類されるのは前述の通りである。無論、全配管荷重には地震慣性力も相対変位に由る配管荷重も含まれる。

おそらくノズルに関する耐震設計指針は JIS B8266 付属書 8 の表 1 を無視しているようだ。本来、付属書 8 表 1 は例示的なもので Mandatory ではないので、法規への運用は随意である。配管の熱膨張拘束に由来する応力は、たとえ膜成分であっても 2 次応力  $Q$  であって、 $P_L$  に振り向ける必要はないという解釈があるのではないかと思う。もしそうであれば、補強範囲云々は意味がない。ノズル躯体部分は接続配管と同様に熱膨張拘束分を 2 次応力として扱えるので、ノズルが接続配管と同等以上の肉厚を持つ限り、ノズルの 1 次応力を検証する必要はないということになる。

(2) 結局、JIS B8266 付属書 8 の表 1 とノズルに関する耐震設計指針の違いは、配管熱膨張拘束による配管荷重を 1 次応力源とみるか 2 次応力源とみるかに由来しているようである。即ちアンカ点の応力の自己平衡性の有無に帰結する。配管の構造解析では 殆どの場合、アンカ点に生じる応力を 1 次応力にすることはないので、このエンジニアリングジャッジは道理に合うのかも知れない。またこのアンカ点は胴シェル上に搭載され 胴シェルの弾性変形によって自己平衡性を保つのでは熱膨張拘束から派生する応力は 2 次応力的と云えるのかも知れない。

しかし、接合部分が不安定化して逸走が起こるなら、(1 次+2 次応力)の形で制限しても意味がないとも考えられる。ノズル-胴シェル接合部分に生じる全応力の膜成分を 1.5S に制限して塑性流動を控えめに抑える方が効果的な気がする。これを踏まえた TS 作成者の評価案は以下の通り。

- ①ノズル躯体部分： 配管解析モデルの一部として配管構造解析で次の評価を行う。  
(長期+短期)1 次応力制限 & 地震サイクルの(1 次+2 次)応力範囲制限

- ②ノズルネック廻り：全ての長期荷重&地震慣性力/相対変位に由る膜応力強さ $[P_L] \leq 1.5S$   
地震慣性力/相対変位(両振幅)に由る(膜+曲げ)応力強さ範囲 $[P_L+Q] \leq 2S_y$

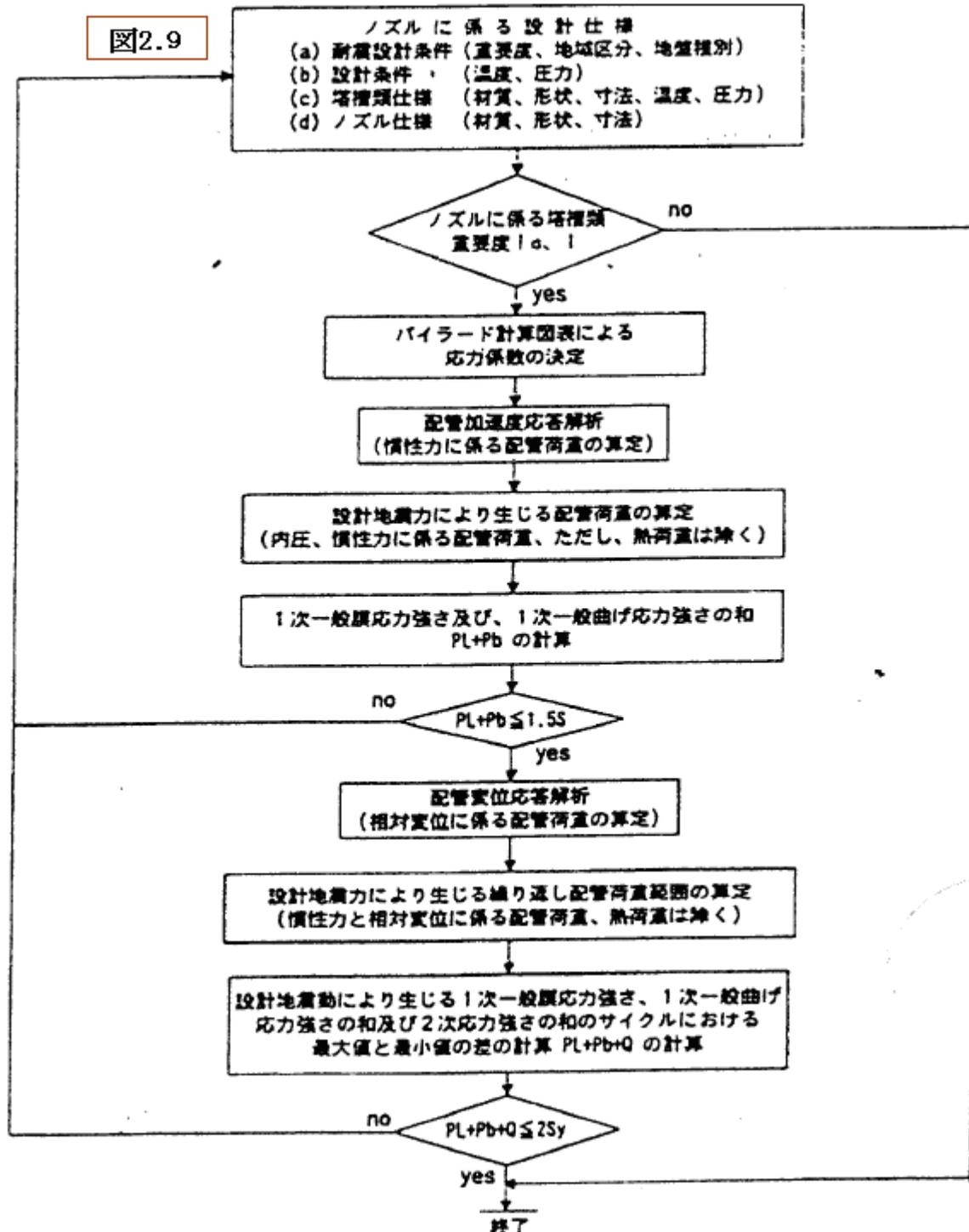
なおノズルネック廻りの応力には、容器/塔槽類自身に生じる各種モーメント・フォースによってノズル廻りの胴シェルに生じる応力も含まれなければならない[1.3 項の(4)を参照]。

## 2.7 塔槽類ノズルの耐震性能評価

KHK E012-2-1997の塔槽類ノズル関係規定

## 2.7.1 耐震性能評価手順

- (1) 重要度 Ia 及び I の配管系に接続される塔槽類ノズルについては、配管の設計水平地震力、設計鉛直地震力及び配管支持点の移動に係る荷重に基づき応力強さを計算する。
- (2) 圧力容器に関する強度検討は薄肉シェル理論に基づいた(表 2.4) に示す簡易手法(パイラード法)、あるいは、有限要素法 (FEM) による詳細解析等によるものとする。
- (3) パイラード法に基づいた簡易手法による場合について塔槽類ノズルの耐震性能評価手順を(図 2.9) に示す。有限要素法による詳細解析等による場合も同様の手順によるものとする。
- (4) 塔槽類のノズルの耐震性能評価は、1次局部応力の強さ及び1次応力と2次応力の強さの和のサイクルにおける最大値と最小値の差が、夫々耐震設計用許容応力の強さ以下であることを確認することによる。



### 2.7.3 耐震設計用許容応力強さ

塔槽類ノズルの耐震設計用許容応力強さは、告示第16条第2号の2ホにより、応力の種類に応じ次のとおりとする。

〔表 16.8〕 塔槽類ノズルの耐震設計用許容応力強さ

応力強さの種類	耐震設計用許容応力強さ
1次一般膜応力強さ	$S$
1次局部膜応力強さ、及び1次曲げ応力強さ	$1.5S$
設計地震動により生じる1次局部膜応力強さ、1次曲げ応力強さ、1次曲げ応力強さ及び2次応力強さの和のサイクルにおける最大値と最小値との差	$2S_y$

ここで、 $S$  及び  $S_y$  は告示第16条第1号の規定による。

## 3. まとめ (総括)

(1) 容器/塔槽類の配管接続ノズルの強度評価方法として、次の規格の関連規定を考察した。

- ①主に長期荷重(運転状態)に対し：**JIS B8266 付属書 8 と ASME Sect.VIII Div.2 Appendix 4**
- ②短期荷重(地震状態)に対し：**KHK E012-2-1997 高圧ガス設備等耐震設計指針—配管系**  
何れの場合も、配管荷重による応力の扱いに関して議論が残る。

(2) ①の場合、JIS, ASME とも穴補強の有効範囲内と有効範囲外に別けて応力分類の考えを例示している。特徴的なのは穴補強の範囲内で、何れも**接続配管の熱膨張拘束によってノズルに伝わる配管荷重(熱的配管荷重)**から生じる応力を**1次応力**に分類していることである。

配管的な感覚の延長でノズル応力を見れば、配管の場合と同じく2次応力に他ならないからこれは尋常ではない。その背景ははっきりしないが、ノズル位置における熱膨張変位の完全拘束を想定して1次応力に格上げして、延性破壊防止の対象にしているように思える。因みに補強の有効範囲外では何れも熱的配管荷重から生じる応力は2次応力に分類されている。この熱的配管荷重に関する①②の扱いは保守的である。配管系の構造解析計算でも通常、余程剛な拘束でない限りアンカ点廻りの熱膨張応力を1次応力として評価することはない。確かに機器側胴シェルの肉厚は厚く、剛結合と云えば云えないこともないが、それでもシェル変形によって熱膨張の逃げは期待できるはずだ。

(3) また①の場合、JIS は ASME をベースにしているため①と②の内容的は殆ど変わらない。たまさかバージョンのズレがあるせいか、補強の有効範囲内の膜成分の扱いについて次のような違いがある。

- ・ JIS の場合：本来局部的な接続配管の曲げモーメントに由る応力を一般膜  $P_m$  タイプに分類
  - ・ ASME の場合：通念どおり接続配管の曲げモーメントに由る応力を局部膜  $P_L$  タイプに分類
- JIS 規定は過剰で、ASME 規定で十分と思われる。

(4) 下記に TS 作成者の長期荷重(運転状態)に対する応力分類(案)を示す。JIS B8266 付属書 8 の応力分類(表)は本来、例示的なもので、Mandatory ではないようなので、この案は使えると思う。

要素	位置	応力の原因	応力の種類	記号
ノズル(管台) 廻り	全 域	内 圧	一般膜応力 / 局部膜応力 曲げ応力/ピーク応力	$P_m / P_L$ $Q / F$
		温度勾配	膜応力/曲げ応力 ピーク応力	$Q / Q$ $F$
	穴補強の範囲内 (管部分)	全配管荷重 (熱的&機械的)	一般膜応力 曲げ応力	$P_m$ $P_b$
	補強の有効範囲内 (ノズルネック廻り)	全配管荷重 (熱的&機械的)	膜応力 曲げ応力	$P_L$ $Q$
	補強の有効範囲外	機械的配管荷重 ( 曲げモーメント除く )	一般膜応力	$P_m$
		機械的配管荷重 ( 曲げモーメント含む )	局部膜応力 曲げ応力	$P_L$ $P_b$
		熱的配管荷重	膜応力 曲げ応力	$Q$ $Q$

(注記) 上記の応力は全て、ノズル/胴シェルの肉厚分布の応力成分とする(管断面分布ではない)。

以上の評価案では、熱的配管荷重による応力に関して前述(2)のような議論もあるが、ここではノズルの重要度を斟酌して JIS 及び ASME の規定どおり、補強範囲内で 1 次応力扱いとした。また補強範囲内の膜成分については前述(3)の通り ASME 規定を採った。

なお、不連続応力が支配的なノズルネック廻りについては膜成分を 1 次応力、曲げ成分を 2 次応力とした。これは実質的に JIS 及び ASME の規定と同じである。

なお上記に準じた具体的な解析モデル/解析処理は次の通り(制限値は JIS ないし ASME 通り)。

解析モデル/ケース	対象荷重	処 理
1 次応力モデル ケース①	内圧&内圧スラスト +機械的配管荷重(曲げモーメント除外)	応力算定→平均化による膜成分抽出 →補強範囲外の $[P_m]$
1 次応力モデル ケース②	内圧&内圧スラスト +機械的配管荷重(曲げモーメントも含む)	応力算定 →線形化処理 →補強範囲外 の $[P_L+P_b]$
1 次応力モデル ケース③	内圧&内圧スラスト +全配管荷重(熱的+機械的)	応力算定 →線形化処理 →補強範囲内 の管部分の $P_m$ 及び $[P_m+P_b]$
1 次+2 次応力モデル ケース④	内圧&内圧スラスト +全配管荷重(熱的+機械的)	応力算定→線形化処理→補強範囲外 の $[P_L+P_b+Q]$ および 補強範囲内の接合 部分廻りの $[P_L]$ 及び $[P_L+Q]$

線形化処理は、計算応力からピーク応力(F)成分を取り除き応力分布を線形化するとともに、膜成分と曲げ成分に分離するもの。解析モデルは図 E 参照のこと。

- (5) 実際の解析評価で最も厳しくなるのは、補強範囲内の管部分の $[P_m+P_b]$ と補強範囲内の $[P_L+Q]$ である。前者においてストレスオーバーになる時は、配管を引き回して熱的配管荷重を低減するか、ノズル躯体部分を厚肉のボスにする必要がある。厚肉ボスは端的な効果があるが、配管荷重が減った訳ではないので、ノズルフランジ継手の漏洩ポテンシャルを残すことになる。可燃性液化ガスや毒性

ガスの配管ではむしろ、接続配管の引き回しを採った方が賢明な気がする。

このノズルネック管部分の $[P_m + P_b]$ に関連するが、設計の合理化を狙うならノズル廻りの剛性係数(バネ定数)を用いて配管構造解析を行うのがよい。かなり配管荷重は減少し設計は楽になると思う。

(6) 以上、長期荷重(運転状態)について述べた。基本的には②の短期荷重(地震状態)も①の延長にあるとみていいが、特に**耐震設計指針の考え**は次のようになっている。

- (a) 地震荷重としては基本的に、地震慣性力(1次応力源)と相対変位(2次応力源)の2つを考慮する。
- (b) 地震時の許容応力  $S$  は略々、長期許容応力の 1.5 倍程度に割り増しする。
- (c) (長期+短期)1次応力を  $P_m$  につき  $S$  以下に、 $P_L$ ,  $(P_L + P_b)$  及び  $(P_m + P_b)$  につき  $1.5S$  以下にする。
- (d) 地震サイクルでの(地震慣性力+相対変位)に由る(1次+2次)応力強さ範囲を  $2S_y$  以下にする。

(c)は一般的な長短期1次応力の制限と同じ。(d)は長期荷重(運転状態)における(1次+2次)応力強さの制限と同じ趣旨(→シェークダウン規定)になる。この場合、長期荷重の影響(即ち平均荷重の影響)は考慮する必要はなく、**地震時の両振幅の揺れによる配管荷重の変動量(幅)だけ**を考えればよい。

(7) 配管接続ノズルの場合、問題は上記(c)の(長期+短期1次)応力強さの制限にある。配管接続ノズルに関する耐震評価の扱いを、第3章の例題から推定すると、

- (イ) 補強範囲外のノズル躯体については評価を省略
- (ロ) 補強範囲内(ノズルネック)の管部分についても評価を省略
- (ハ) ノズルネック(ノズル-胴シェル接合部廻り)の、長期の機械的配管荷重+短期の機械的配管荷重(=地震慣性力)に由る膜成分  $P_L$  を  $1.5S$  以下に制限

(イ)(ロ)についてはおそらく配管側で耐震チェックを行えばよいと考えているようだ。(ハ)については何故か熱膨張拘束による長期荷重と地震相対変位による短期荷重が外されている。

結局、耐震設計指針の配管接続ノズル関連規定では、熱膨張拘束あるいは地震相対変位といった**変位荷重**(ここで云う熱的配管荷重に相当)から生じる応力は**通念どおり2次応力に分類して、JIS B 8266 付属書 8 表 1**のように、ノズルネックに限定して1次応力に分類することはないようである。

(8) JIS B8266 付属書 8 表 1(あるいは ASME Appendix 5 の Table 4-120.1)の応力分類は、例示の形をとっている。その場合、KHK のような別規格で変位荷重を通念どおり2次応力源と解釈しても差し支えないようだ。故に **KHK E 012 - 2 の第 3 章の例題に準じて設計すればよい**。

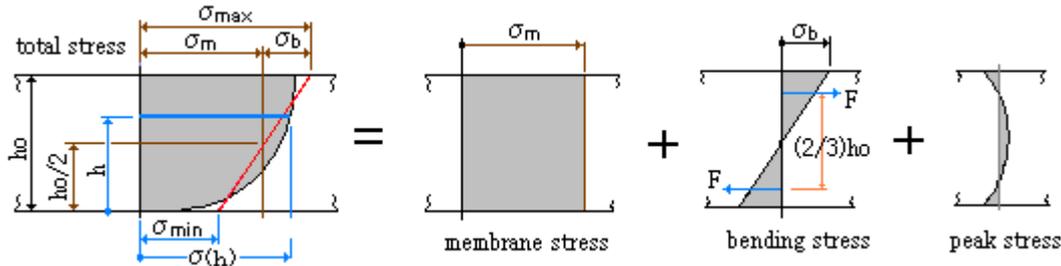
しかしノズルネックの膜応力(平均応力)は構造上のバランスに関係しており、地震時、接合部分が過度に塑性流動して不安定になりバランスを崩すなら、変形を抑えるために単に(1次+2次応力)の形で制限しただけでは十分でないように思える。下記に耐震強度評価方案(私案)を示しておく。

対象部分	荷重条件	強度評価
ノズル躯体部分	内圧&機械的荷重(長期)+地震慣性力(短期/片振幅)	配管構造解析による評価 $\sigma_L \leq S$
	地震慣性力&地震相対変位(両振幅)	配管構造解析による評価 $\sigma_E \leq 2S_y$
ノズル接合部分 (ノズルネック廻り)	内圧&全配管荷重(長期)+地震慣性力&相対変位による配管荷重(短期/片振幅)	局部膜 $[P_L] \leq 1.5S$
	地震慣性力&地震相対変位による配管荷重範囲(全振幅)	膜+曲げ $[P_L+Q] \leq 2S_y$

(注記)ノズル位置の配管荷重の算出方法は、耐震設計指針(配管系)の第Ⅲ章 1.1,1.2 の例に拠る。

## 【 補足説明 】

【補 1】肉厚に分布する応力は、薄肉シェルなどでは自ずと線形分布になっているが、肉厚が増すと曲線分布になってくることが多い。この場合、下図の朱線のように、トータル応力  $\sigma(h)$  を線形に均して線形化応力 ( $\sigma_{max}$ ) とし、更にこれを膜成分 ( $\sigma_m$ ) と曲げ成分 ( $\sigma_b$ ) に分解する。しかし  $\sigma_{max}$  をいきなり得るのは難しいので、 $\sigma(h)$  を平均化して膜成分 ( $\sigma_m$ ) を求めるとともに、 $\sigma(h)$  分布を等価な線形曲げで等値して曲げ成分 ( $\sigma_b$ ) を求める。



まず、膜成分については、

$$\sigma_m = (1/h_0) \int \sigma(h) dh \quad [0-h_0 \text{ 積分}] \quad \text{----- (i)}$$

次に曲げ成分については、

$$\text{実際モーメント} : M = \int (h - h_0/2) \sigma(h) dh \quad [0-h_0 \text{ 間を積分}]$$

$$\text{等価モーメント} : M_0 = Fx(2/3)h_0 = \{(1/2)(h_0/2) \sigma_b\} x(2/3)h_0 = (h_0^2/6) \sigma_b$$

$M = M_0$  であるから(\*)、

$$\sigma_b = (6/h_0^2) \int (h - h_0/2) \sigma(h) dh \quad [0-h_0 \text{ 積分}] \quad \text{----- (ii)}$$

線形化応力 ( $\sigma_{max}$ ) は

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_b = (1/h_0) \int \sigma(h) dh + (6/h_0^2) \int (h - h_0/2) \sigma(h) dh \quad [0-h_0 \text{ 積分}] \quad \text{----- (iii)}$$

線形化応力はピーク成分を均して取り除いたもので、膜+曲げであるから  $[P_L + P_b]$ 、 $[P_L + Q]$  ないし  $[P_L + P_b + Q]$  に該当する。取り除かれたピーク成分はいわゆる応力集中分で、疲労評価で復活し、元のトータル応力に組み込まれる(トータル応力が疲労評価対象)。

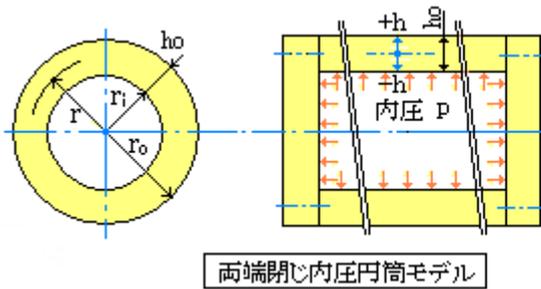
(i)~(iii)式を使えば線形化応力/膜応力/曲げ応力を得ることが出来る。即ち、線形化处理(仮称)できる。実際には FEM 解析が多く(i)~(iii)式によることは少ない。ただ FEM 解析結果の処理も、(i)~(iii)式と同質になるはずである。

線形化处理のタイミングは FEM 解析の後処理の中でいうことになる。荷重ソースによって膜/曲げの扱いあるいは 1 次/2 次が異なる場合は荷重ソース毎に計算しこれを合算処理する必要がでてくる。

$$\begin{aligned} (*) M &= \int (h - h_0/2) \sigma(h) dh = \int (h - h_0/2) \{ \sigma_m + \sigma_b(h) \} dh = \sigma_m \int (h - h_0/2) dh + \int (h - h_0/2) \sigma_b(h) dh \\ &= \sigma_m [h^2/2 - hh_0/2]_0^{h_0} + \int (h - h_0/2) \sigma_b(h) dh = 0 + \int (h - h_0/2) \sigma_b(h) dh \end{aligned}$$

ここで  $\sigma_b(h)$  は  $h_0/2$  を中立線にした分布曲線を表わす。等価モーメント  $M_0$  も同じ  $h_0/2$  を中立線にした直線分布曲線から得られるから、 $M = M_0$  になる。

ここで、サンプルとして、下図の両端閉じの内圧円筒モデルを考える(4)。



- (a) 周方向応力:  $\sigma_t(r) = p((r_o/r)^2 + 1)/(Y^2 - 1)$
  - (b) 長手方向応力:  $\sigma_l(r) = p/(Y^2 - 1)$
  - (c) 半径方向応力:  $\sigma_r(r) = -p((r_o/r) - 1)/(Y^2 - 1)$
- なお、せん断応力は無し  
ここで Y=内外径比 (=r\_o/r\_i)

各応力成分は上記の(a)(b)(c)で与えられる。膜応力成分  $\sigma_m$  は、

$$\begin{aligned} \sigma_{mt} &= \{1/(r_o - r_i)\} \int_{r_i}^{r_o} \sigma_t(r) dr = p/(Y - 1) = pr_i/h_o \quad \text{-----(d)} \\ \sigma_{ml} &= p \{1/(Y^2 - 1)\} \quad \text{-----(e) (b)式と同じ} \\ \sigma_{mr} &= \{1/(r_o - r_i)\} \int_{r_i}^{r_o} \sigma_r(r) dr = -p/(Y + 1) = -pr_i/(r_o + r_i) \quad \text{-----(f)} \end{aligned}$$

また曲げ応力は、 $\sigma_b = (6/h_o^2) \int (h - h_o/2) \sigma(h) dh$  になるが、非常に複雑な式になってしまう。然るに上図と違って、肉厚が薄くなると  $r_i \gg h_o$  になるので、 $h_o/r_i \rightarrow 0$ 、 $r_i \doteq r_o$  として (a)~(c)式を、ストレートに線形化できる。

まず、パラメータ  $\{1/(Y^2 - 1)\}$  について。この場合、

$$\{1/(Y^2 - 1)\} = \{1/(Y - 1)\} \{1/(Y + 1)\} = (r_i/h_o) \{1/(Y + 1)\}$$

ここで、 $\delta = Y - 1 = (r_o - r_i)/r_i = h_o/r_i \ll 1.0$  (十分小さい)。この  $\delta$  を用いると

$$1/(Y + 1) = 1/(2 + \delta) = (2 + \delta)^{-1}$$

級数の公式によれば  $(a - bx)^{-1} = (1/a)(1 + bx/a + b^2x^2/a^2 + b^3x^3/a^3 + \dots)$ 、その場合、 $(2 + \delta)^{-1}$  は  $a=2$ 、 $b=-1$ 、 $x=\delta$  に該当するので、 $(2 + \delta)^{-1} = (1/2)(1 - \delta/2 + \delta^2/4 - \delta^3/8 + \dots)$  になる。 $\delta^2$  以上の項は無視できるので、 $(2 + \delta)^{-1} = (1/2)(1 - \delta/2) = (1/2)\{1 - h_o/(2r_i)\}$  となる。よって

$$\{1/(Y^2 - 1)\} = \{r_i/(2h_o)\} \{1 - h_o/(2r_i)\} \quad \text{-----(e)}$$

また、パラメータ  $(r_o/r)^2$  について。この場合、

$$(r_o/r)^2 = (r/r_o)^{-2} = \{r_i + h_o - (h_o/2 - h)\}/(r_i + h_o)^{-2} = [1 - (h_o/2 - h)/(r_i + h_o)]^{-2}$$

級数の公式によれば、 $(a + b)^n = a^n + na^{n-1}b + \{n(n-1)/2!\}a^{n-2}b^2 + \dots$ 。その場合、上式は、 $a=1$ 、 $n=-2$  であるから、 $(a + b)^{-2} = 1^{-2} - 2x1^{-3}x b + \{2x3/2\}x1^{-4}xb^2 + \dots$

$b$  は  $-(h_o/2 - h)/(r_i + h_o)$  であり、微少項なので  $b^2$  以上の項は無視できるので、

$$(r_o/r)^2 = (a + b)^{-2} = 1^{-2} - 2x1^{-3}x b = 1 - 2b = 1 - 2(h - h_o/2)/(r_i + h_o) = 1 - 2(h - h_o/2)/r_i \quad \text{-----(f)}$$

(e)(f)を(a)式に代入すると、 $\sigma_t = \{p/(Y^2 - 1)\} \{(r_o/r)^2 + 1\} = \{pr_i/(2h_o)\} \{2 - 2(h - h_o/2)/r_i\}$   
 $h_o/r_i \doteq 0$  なので、 $\sigma_t = \{pr_i/(2h_o)\} \times 1 \times 2(r_i - h)/r_i = (p/h_o)(r_i - h)$ となる。同様に  $\sigma_l, \sigma_r$  も変形できる。

$$\sigma_t = (p/h_o)(r_i - h) \quad \text{-----(g)}$$

$$\sigma_l = pr_i/(2h_o) \quad \text{-----(h)}$$

$$\sigma_r = (p/h_o)(h - h_o/2) \quad \text{-----(i)}$$

周方向応力と半径方向応力は、変数  $h(-h_o/2 \sim +h_o/2)$  の1次形で、 $y = ax + b$  の形をとるので、最大/最小値は次のようになる。

$$\text{内表面 } (h = -h_o/2) : \sigma_{tmax} = pr_i/h_o + p/2, \sigma_{rmin} = -p$$

$$\text{外表面 } (h = +h_o/2) : \sigma_{tmin} = pr_i/h_o - p/2, \sigma_{rmax} = 0$$

長手方向応力は厚さ方向で一定であるから、曲げ応力は零であり  $\sigma_{lb} = \pm 0$  である。周方向及び半径

方向については、最大値/最小値から膜応力(d)(f)を差し引くことで曲げ応力が得られる。即ち

周方向応力) 内表面  $\sigma_{tb} = pr_i/h_o + p/2 - pr_i/h_o = p/2$ 、外表面  $\sigma_{tb} = pr_i/h_o - p/2 - pr_i/h_o = -p/2$

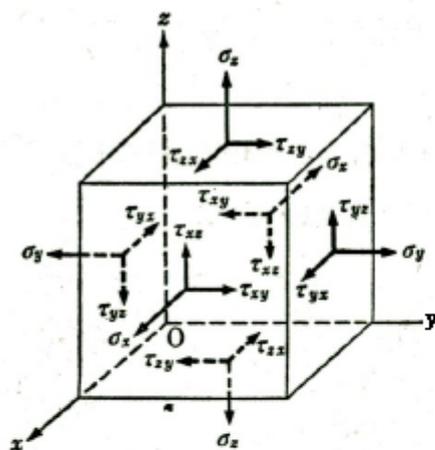
半径方向応力) 内表面  $\sigma_{rb} = -p + p/2 = -p/2$ 、外表面  $\sigma_{rb} = 0 + p/2 = +p/2$

なお、半径方向の膜応力は  $\sigma_{rm} = -pr_i/(r_o+r_i) = -p/2$  ( $\because r_i \cong r_o$ )としている。

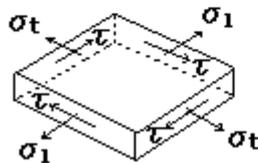
以上をまとめると以下のようなになる。

	周方向	長手方向	半径方向
線形化応力(max)	$\sigma_{tmax} = pr_i/h_o + p/2$	$\sigma_{lmax} = pr_i/(2h_o)$	$\sigma_{rmin} = -p$
同上 (min)	$\sigma_{tmin} = pr_i/h_o - p/2$	$\sigma_{lmin} = pr_i/(2h_o)$	$\sigma_{rmax} = 0$
膜応力	$\sigma_{tm} = pr_i/h_o$	$\sigma_{lm} = pr_i/(2h_o)$	$\sigma_{rm} = -p/2$
曲げ応力	$\sigma_{tb} = \pm p/2$	$\sigma_{lb} = \pm 0$	$\sigma_{rb} = \mp p/2$

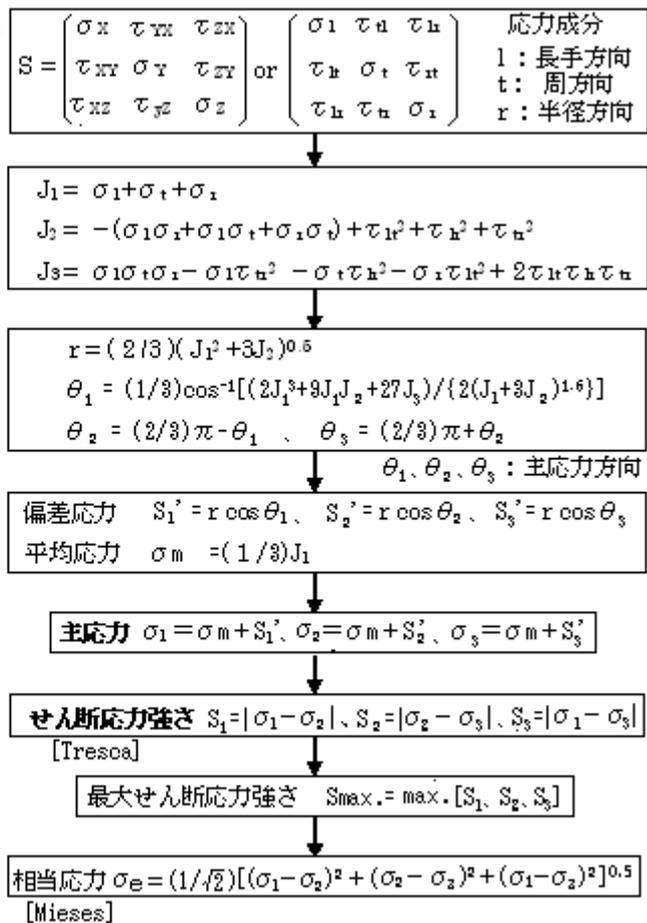
【補2】 評価用応力は 応力成分→主応力→せん断応力強さと手順を追って導かれる。下記に3次元微小要素に発生する9つの応力成分から、最大せん断応力(Tresca 応力)を求める方法を示す。



3次元微小要素



2次元微小要素



胴シェルのような板要素では内圧(p)が余り高くないと  $\sigma_r \ll \sigma_l < \sigma_t$  となるので2次元微小要素で扱える。z方向成分がカットされ一率のτになるため、 $S_{max}$ は次のような簡単な式で与えられる。

$$S_{max} = \text{Max.}[ |(\sigma_t + \sigma_l)/2 \pm \{(\sigma_t - \sigma_l)^2 + 4\tau^2\}^{0.5}/2|, \{(\sigma_t - \sigma_l)^2 + 4\tau^2\}^{0.5} ]$$

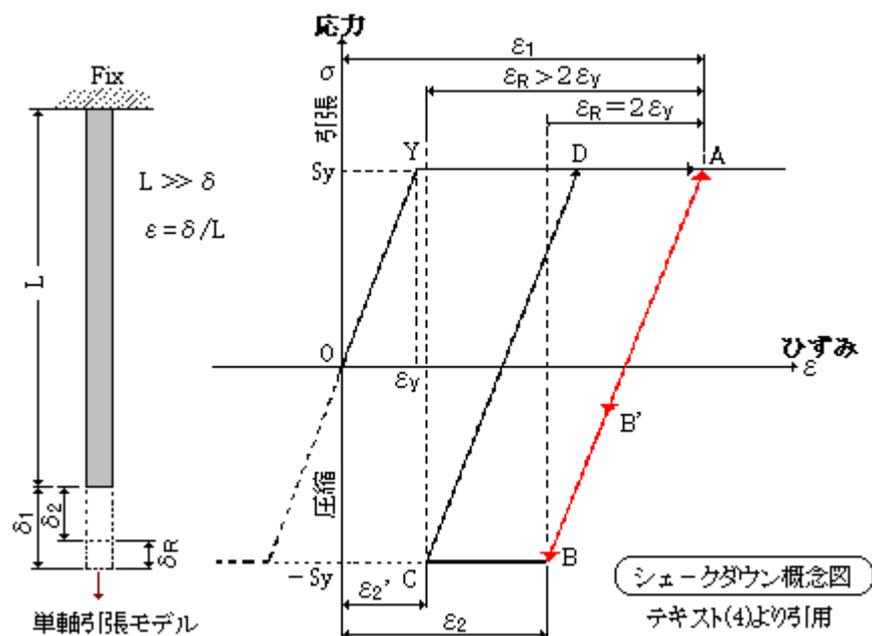
【補3】 シェークダウンとは、ガラス瓶に砂糖の塊をいれて振ると、かさばりがとれて落ち着く現象を云い、構造物が数度の負荷変動によってある状態に落ち着く様子を指している。例えば長さLの棒が引っ張られてδだけ伸びると、ひずみε(=δ/L)と応力σが生じる。下図はこの様子を模式化したもので、左図は棒の伸縮を、右図はその場合の棒に生じる応力-ひずみ関係を示している。

いま棒が  $\delta_1$  だけ伸び、その後  $\delta_R$  だけ緩んで  $\delta_2$  の伸びに戻る過程をみてる。はじめ棒が引張られて伸びると、直線的に応力が増加しやがて降伏応力  $S_y$  に達すると、弾性域から塑性域に移行する。これ以上、応力は増加することはない、伸びだけが進み伸び量が  $\delta_1$  に至って止まる。そして引張力が緩んで伸びが  $\delta_R$  だけ戻ると応力は減少し、戻り量が多いときには負の圧縮応力が生じる。右図の  $0 \rightarrow Y \rightarrow A \rightarrow B$  (or  $B'$ ) がこれを示している。

問題は戻り量  $\delta_R$  である。戻り量が小さくて B 点までの範囲内に留まるなら (ひずみの戻り分が  $\epsilon_R \leq 2\epsilon_y$  に留まるなら再度、降伏 ( $-S_y$ ) することはない。即ち、負荷の変動によって  $\delta_R$  の範囲で伸び縮みが繰り返されたとしても A~B の範囲内 即ち  $2\epsilon_y$  のひずみ範囲(あるいは  $2S_y$  の応力範囲)にひずみ変化(応力変化)は留まり、図からわかる通り、降伏点 ( $\pm \epsilon_y$ ) を越えて塑性域に入ることはなく弾性挙動を繰り返すことになる。然るに  $\delta_R$  が大きくなって繰り返しひずみ範囲が  $2\epsilon_y$  を越えると、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$  の閉サイクル(弾塑性サイクル)ができ塑性変形が反復して起きる。

構造物のくり返し変形が弾性域に留まるなら、材料の組織変化は少なく、欠陥があっても拡大することはない。然るに塑性変形が繰り返されるなら、組織変も変化し欠陥も助長されて疲労損傷が進行する。故にくり返しひずみ範囲は  $\epsilon_R \leq 2\epsilon_y$  (あるいはくり返し応力範囲は  $\sigma_R \leq 2S_y$ ) の範囲に留めるのが望ましい。ただ実際に  $A \rightarrow B \rightarrow A$  のように安定した閉サイクルに落ち着くには、数回、負荷をくり返す必要がある。これがシェークダウンのいわれになっている。

シェークダウン現象のミソは、荷重のくり返しによって構造物の挙動が、自ずと引張側の降伏と圧縮側の降伏の間に収まることである。この場合、弾性領域はフルに活用される。



## 【 末尾添付：JIS B8266 付属書 8 表 2 】

応力分類	一次応力			二次応力 膜応力+曲げ応力	ピーク応力
	一般膜応力	局部膜応力	曲げ応力		
代表的事例を表 に示す。	断面における一次 応力の平均値。構 造不連続及び応力 集中を除く。機械 的荷重によって生 じるものだけをと る。	任意の断面におけ る応力の平均値。 構造不連続は考慮 するか応力集中は 除く。機械的荷重 によって生じるも のだけをとる。	断面の図心からの 距離に比例する一 次応力の成分。構 造不連続及び応力 集中を除く。機械 的荷重によって生 じるものだけをと る。	構造の連続性を保 つために生じる自 己平衡応力で構造 不連続部に生じ る。機械的荷重及 び熱膨張差によ って生じるものを とり、局部的応力 集中を除く。	(1) 応力集中によっ て一次又は二次応 力に付加される増 加分(例えば、切欠 きのような場合)  (2) 疲労のおそれあ るが容器のゆがみ を生じるおそれが ない熱応力。
記号 (12)	$P_m$	$P_L$	$P_b$	$Q$ (10)	$F$ (10)
応力成分の組合 せ及び応力強さ の許容限界	<p>— 設計荷重使用 ----- 運転荷重使用</p>				

注(9) この制限は応力強さの全変動範囲に適用する。許容限界として用いる $S_m$ 値は二次応力が温度変動によるときは、変動する金属温度の最高・最低温度に対する $S_m$ 値の平均値とし、二次応力の一部又は全部が機械的な荷重によるときは、変動する金属温度の最高温度に対する $S_m$ 値とする。

(10) 分類 $Q$ の応力は、温度こう配や構造不連続などによる応力の合計から同じ位置の一次応力を除いたものである。しかし、詳細解析による応力はしばしば(一次応力+二次応力)を直接に示すことがあり、その場合は、 $Q$ だけでなく $P_m$ (又は $P_L$ )+ $P_b$ + $Q$ の合計応力を表す。同様に分類 $F$ の応力が応力集中によるもの場合には、 $F$ は公称応力以上の付加応力を指す。例えば、その部分が公称応力 $S$ 及び応力集中係数 $K$ である場合には、 $P_m=S$ 、 $P_b=0$ 、 $Q=0$ 、 $F=P_m(K-1)$ となり、ピーク応力は $P_m+P_m(K-1)=KP_m$ となる。

(11)  $S_0$ は繰返し応力強さの振幅(変動範囲の $\frac{1}{2}$ )に対する許容限界であり、設計疲労曲線、図1-7から求められる。したがって、全変動範囲に対する許容限界は $2S_0$ である。

(12) 記号 $P_m$ 、 $P_L$ 、 $P_b$ 、 $Q$ 及び $F$ は単一応力値を表すのではなく、それぞれ6個の応力成分 $\sigma_n$ 、 $\sigma_b$ 、 $\sigma_m$ 、 $\tau_{ts}$ 、 $\tau_r$ 及び $\tau_m$ の組合せからなる応力量を表す。

(13) 係数 $k$ は表3による。

TS 作成者注記)

なお、構造不連続以外の部分(一般膜部分)については、運用上、 $[P_L+P_b] \leq 1.5 k S_m$ ではなく  
 $[P_m+P_b] \leq 1.5 k S_m$ で1次応力を制限しているケースが多い。

引用規格/テキスト)

- (1) JIS B8266 圧力容器の構造－特定容器 付属書 8 圧力容器の応力解析及び疲労解析
- (2) ASME Sect.VIII Div.2 Appendix 4 Mandatory Design based on Stress Analysis
- (3) KHK E 012-2-1997 高圧ガス設備等耐震設計指針 レベル 1 耐震性能評価(配管系)編
- (4) 安藤,岡林「原子力プラントの構造設計」東大出版会(1977) 2.3 応力分類