

# グラスライニング製反応器の疲労評価

## Fatigue Evaluation of Glass-Lined Reactors



(化)技術部 技術課  
榎本 正  
Tedashi Enomoto  
鳥生 眞 吾  
Shingo Toriu

One of the most frequent causes of machinery fracture stems from fatigue phenomena, repeated stress produces the initiation of crack, followed by its growth, resulting in fatigue fracture. It is important for fatigue evaluation to estimate the life of fracture and prevent the fracture.

In the case of pressure vessels, repeated thermal stress under cyclic operation may cause fatigue fracture in structural discontinuity.

This paper describes the thermal stress and fatigue evaluation in accordance with CODE JIS B 8250, and the influence of operating condition and manufacturing condition on fatigue strength of glass lined equipment.

### まえがき

機械構造物の破壊は疲労に起因するものが多く、応力が繰返し負荷されれば亀裂が発生し、それが進展すると疲労破壊につながる。疲労による破損の防止や破損寿命の予測は機械構造物において重要である。

圧力容器は、稼働中に加熱、冷却による熱サイクル、すなわち繰返し熱応力を受ける。熱応力による疲労が問題となるのはシーラ、ダイヤフラムおよびノズル付根等の構造不連続部であるが、当該部位の応力算定には法規の簡易計算式が適用できない場合が多く有限要素法 (FEM) による解析が有力な手段となる。

本稿では外套付グラスライニング製反応器 (以下GL機器という) を対象として、JIS B 8250による熱応力を含めた疲労評価を行い、運転条件や製造施工条件が疲労寿命にどのように影響するかをのべる。

### 1. 解析例

本例は当社の標準型10 M<sup>3</sup>および3 M<sup>3</sup>GL機器 (第1図) の運転荷重条件下で発生する応力を定常温度状態で算定したものである。温度条件は加熱時と冷却時の2ケースが考えられるが、一般に本体温度と外套温度の温度差はスチームによる加熱のケースの方が大きいため、本稿では加熱時の解析を行う。

GL機器においては使用条件が厳しい場合にはシーラ、ダイヤフラムカラーに疲労亀裂が発生することがある。これらGL本体への直接溶接取付部の破損は補修が困難であるため、再焼成を余儀なくされる。一方、ダイヤフラム接合部 (第1図、A部) も疲労強度上弱い箇所であるが、溶接補修が可能であるためここではシーラとダイヤフラムカラーの疲労評価を行う。

解析手法は、まず外套にスチームを送入したときの熱伝導解析を行い温度分布を求める。次にその温度分布による熱荷重と缶内圧による荷重を重ね合わせた条件下で応力解析を行い、その結果を用いて評価を行う。

### 1.1 熱伝導解析

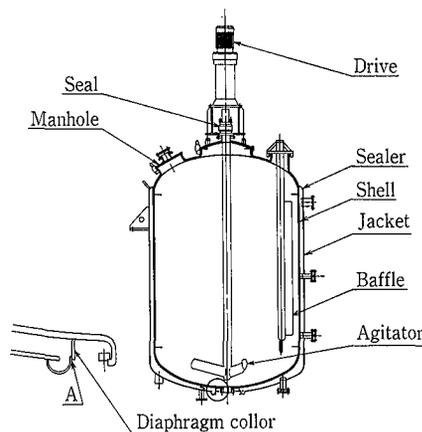
解析モデルは第2図に示すとおり軸対称モデルである。本体および外套は腐れ代をそれぞれ1 mm 除いた板厚で、また、GL層は1.5 mmの厚みでモデル化した。解析に用いた境界条件および物性定数は第1表および第2表に示す。ここでは缶体内容物温度293 °K、外套スチーム温度423 °Kの温度差  $\Delta T = 130$  °Kでの使用条件とする。

上記条件下で算出された温度分布コンタを第3図に示す。この図は外套部に送入されたスチームにより本体及び外套が加熱され、定常状態に達したときの温度分布を示したものである。

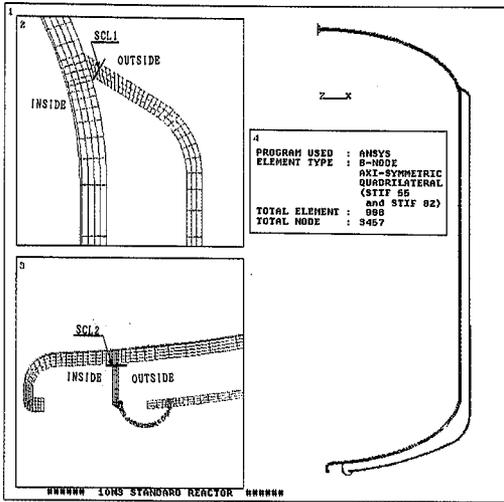
### 1.2 応力解析

応力解析は熱伝導解析により求められた各節点の温度を用いて熱膨張により発生する熱応力を求めるもので、外套圧の476 kPaもこのとき同時に作用している。

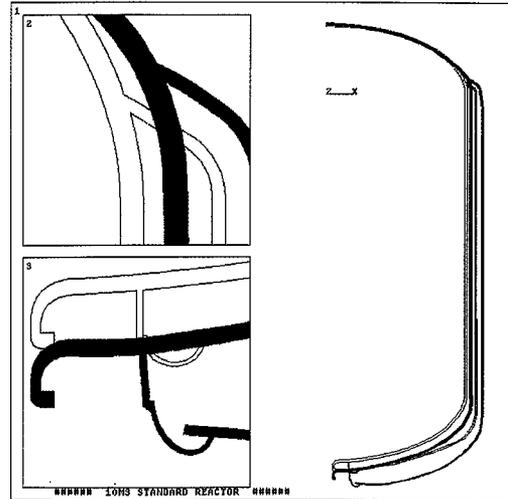
第4図に熱応力および外套圧を負荷させたときの変形図



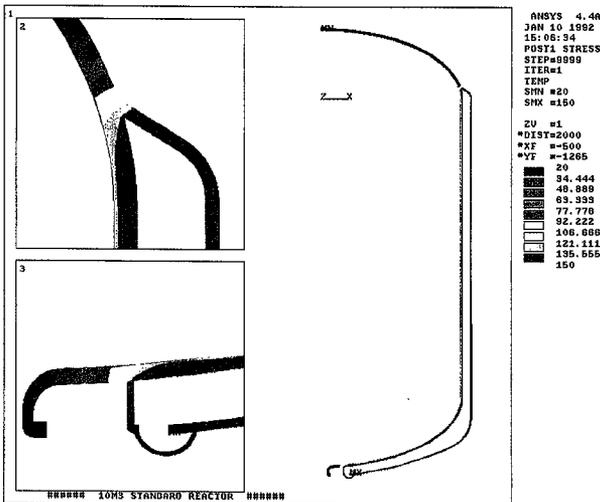
第1図 GL製反応器  
Fig. 1 Glass-lined reactor



第2図 解析モデル  
Fig. 2 An analytical model



第4図 変形図  
Fig. 4 Drawing of deformation



第3図 温度分布コンタ  
Fig. 3 Temperature distribution contour

第1表 解析に用いた境界条件  
Table 1 Boundary conditions for analysis

	Bulk temperature	Heat transfer coef.	Pressure
Vessel	$T_p = 293 \text{ }^\circ\text{K}$	$h_p = 841 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$P_p = \text{ATM}$
Jacket	$T_j = 423 \text{ }^\circ\text{K}$	$h_j = 11\,600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$P_j = 476 \text{ kPa}$
Outside	$T_o = 293 \text{ }^\circ\text{K}$	$h_o = 11.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$P_o = \text{ATM}$

第2表 構造部材の物性定数  
Table 2 Physical constants of construction material

	Carbon steel	GL
Young's modulus	$192 \times 10^3 \text{ MPa}$	$78.4 \times 10^3 \text{ MPa}$
Poisson's ratio	0.3	0.24
Thermal conductivity	$53.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$872 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Coefficient of liner expansion	$10.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$6.56 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

を示す。ここで、変形前の形状は白ぬきで、変形後の形状は紺色で示し、変形量は実際よりも拡大して示している。

### 1. 3 評価方法

本体取付部材すなわちシーラ及びダイヤフラムカラー付根は構造不連続部であり、繰返し応力による影響を最も受け易い。この2点の評価はJIS B 8250圧力容器の構造(特定規格)4.11「応力解析による設計」及び4.12「疲労解析による設計」に従って行う。

## 2. 評価

### 2. 1 応力評価 (JIS B 8250 4.11)

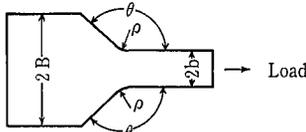
JIS B 8250では一次+二次応力強さ( $SI = P_L + P_b + Q$ )の設計限界は、Shake-down限界を基準として定めているため、 $2 \cdot \sigma_y$ となる。また、設計応力強さ $S_m$ は $2/3 \sigma_y$ と規定されているため、一次+二次応力の設計応力強さは弾性計算において $3 \cdot S_m$ となる<sup>2)</sup>。すなわち、疲労評価を

行う以前に評価部位の応力強さが $3 \cdot S_m$ 以下であることが必要である。

本体取付部材すなわちシーラ及びダイヤフラムカラーの評価ライン SCL (Stress Consideration Line) を第2図に示すとおり各々SCL1・SCL2とし、評価ライン内面および外面での応力強さを求める。応力強さは最大剪断応力説に基づいた主応力差の絶対値の最大値である。FEM解析の結果はピーク応力Fを含んであり、応力評価では応力の線形化によりピーク応力Fを除いた一次+二次応力強さを算出する。

第3表に示す各々の評価ラインでの一次+二次応力強さは $10 \text{ M}^3$ ,  $3 \text{ M}^3$ 共に $3 \cdot S_m$ 以下であり、安全基準を満たしている。

ここに、 $\sigma_y$ : 降伏応力 [MPa]  
 $P_L$ : 一次局部膜応力 [MPa]  
 $P_b$ : 一次曲げ応力 [MPa]  
 $Q$ : 二次応力(膜応力+曲げ応力) [MPa]



第5図 フィレット形状  
Fig. 5 Form of fillet

第3表 応力評価 (温度差  $\Delta T=130^\circ\text{K}$ , 外套圧 476 kPa)

Table 3		Stress evaluation (Temp. difference: $\Delta T=130^\circ\text{K}$ steam press.: $P_j=476\text{ kPa}$ )			
L. C.	S. C. L.	I/O	SI (MPa)	$3 \cdot S_m$ (MPa)	
10 M <sup>3</sup>	1	Inside	208	<	382
		Outside	271	<	
	2	Inside	231	<	
		Outside	152	<	
3 M <sup>3</sup>	1	Inside	157	<	
		Outside	215	<	
	2	Inside	332	<	
		Outside	225	<	

F : ピーク応力 [MPa]  
S<sub>m</sub> : 設計応力強さ [MPa]

## 2.2 疲労評価 (J I S B 8250 4.12)

疲労評価は切欠き効果を考慮した繰返し応力強さの振幅 Salt を求め、設計疲労曲線 (S/N 線図) により許容繰返し回数 N を求める。

ここで用いる切欠き効果は理論的に求められる応力集中係数 ( $\alpha$ ) で評価する。すなわち、シーラ付根及びダイヤフラムカラー付根の形状を溶接肉盛を考慮し、第5図に示す「両側にフィレットを持つ帯板」にモデル化する。この形状の応力集中係数は次の示す式で表される<sup>3)</sup>。

$$\alpha_\theta = 1 + \frac{1 - \exp[-0.9\sqrt{B/b} \cdot 2(\pi - \theta)]}{1 - \exp[-0.9\sqrt{B/b} \cdot 2\pi]} \cdot (\alpha_{\theta=\pi/2} - 1) \quad (1)$$

$$\alpha_{\theta=\pi/2} = 1 + \left[ \frac{1}{2.8 \cdot B/b - 2} \cdot \frac{h}{\rho} \right]^{0.65} \quad (2)$$

ここで  $\rho$  は溶接施工ごとに異なる値となるが、安全をみて 1 mm とする。

第4表と第5表に 10 M<sup>3</sup>標準缶と 3 M<sup>3</sup>標準缶の疲労評価を示す。表より、温度差  $\Delta T=130^\circ\text{K}$  で使用した場合、疲労強度の低い部位は 10 M<sup>3</sup> 缶ではシーラ付根内面 (SCL 1) でその許容繰返し回数は 11 100 回で、また、3 M<sup>3</sup> 缶ではダイヤフラムカラー付根内面 (SCL 2) で 7 080 回である。これは一日 2 バッチで年間 300 日運転した場合、10 M<sup>3</sup> 缶で約 18.5 年、3 M<sup>3</sup> 缶で約 11.8 年の疲労寿命となる。

第4表 疲労評価 (10 M<sup>3</sup>標準缶)

Table 4 Fatigue evaluation (10 M<sup>3</sup> standard reactor)

Temperature difference	S. C. L.	I/O	SI (MPa)	$\alpha$	Salt* (MPa)	N
$\Delta T=130^\circ\text{K}$	1 (Sealer)	Inside	208	2.19	246	11 100
		Outside	271	1.50	220	15 800
	2 (Diaphragm)	Inside	231	1.80	225	15 000
		Outside	152	1.80	148	66 300
$\Delta T=115^\circ\text{K}$	1 (Sealer)	Inside	132	2.19	156	54 000
		Outside	177	1.50	144	74 200
	2 (Diaphragm)	Inside	222	1.80	216	16 600
		Outside	164	1.80	160	48 100
$\Delta T=107.5^\circ\text{K}$	1 (Sealer)	Inside	102	2.19	121	160 000
		Outside	147	1.50	119	169 000
	2 (Diaphragm)	Inside	215	1.80	209	18 100
		Outside	166	1.80	161	46 700
$\Delta T=100^\circ\text{K}$	1 (Sealer)	Inside	77	2.19	91	743 000
		Outside	123	1.50	100	425 000
	2 (Diaphragm)	Inside	205	1.80	200	20 400
		Outside	164	1.80	160	48 400

\*Salt =  $1/2 \times \alpha \times r \times SI$  E ; Young's modulus of design curve  
r = E/E' E' ; Young's modulus of construction material

第5表 疲労評価 (3 M<sup>3</sup>標準缶)

Table 5 Fatigue evaluation (3M<sup>3</sup> standard reactor)

Temperature difference	S. C. L.	I/O	SI (MPa)	$\alpha$	Salt* (MPa)	N
$\Delta T=130^\circ\text{K}$	1 (Sealer)	Inside	157	2.04	173	35 500
		Outside	215	1.50	174	34 200
	2 (Diaphragm)	Inside	332	1.61	289	7 080
		Outside	225	1.61	196	22 000
$\Delta T=115^\circ\text{K}$	1 (Sealer)	Inside	99	2.04	110	266 000
		Outside	148	1.50	120	163 000
	2 (Diaphragm)	Inside	306	1.61	266	8 840
		Outside	228	1.61	198	21 000
$\Delta T=107.5^\circ\text{K}$	1 (Sealer)	Inside	77	2.04	85	1 000 000
		Outside	127	1.50	103	362 000
	2 (Diaphragm)	Inside	291	1.61	253	10 200
		Outside	224	1.61	195	22 200
$\Delta T=100^\circ\text{K}$	1 (Sealer)	Inside	58	2.04	64	1 000 000
		Outside	108	1.50	87	977 000
	2 (Diaphragm)	Inside	274	1.61	239	12 300
		Outside	218	1.61	190	24 500

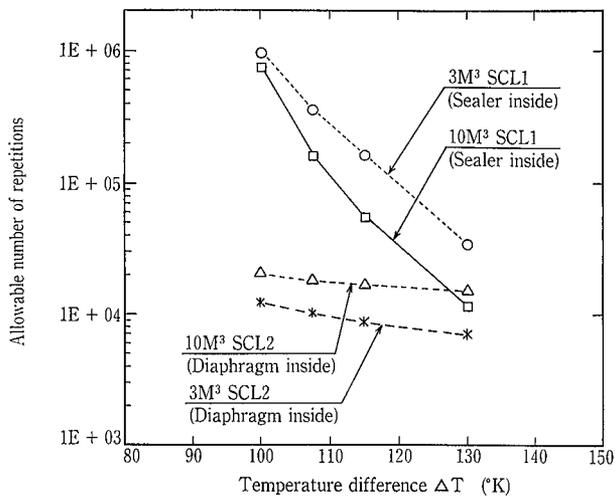
\*Salt =  $1/2 \times \alpha \times r \times SI$  E ; Young's modulus of design curve  
r = E/E' E' ; Young's modulus of construction material

## 3. 運転条件と疲労寿命

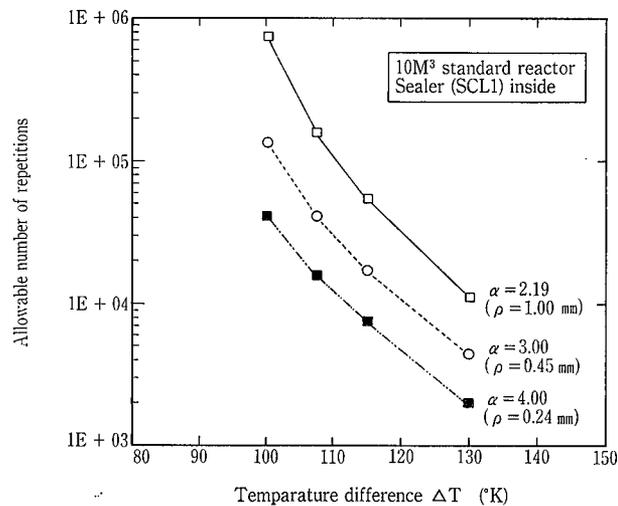
GL 機器は設計温度、設計圧力の範囲内でプロセスに応じた様々な運転条件で使用されているため、個々の機器について疲労寿命は異なる値となり、疲労強度上の危険部位も異なってくる。

第6図に 10 M<sup>3</sup>および 3 M<sup>3</sup>標準缶におけるスチームと缶内内容物との温度差  $\Delta T$  と許容繰返し回数 N の関係を示す。この図から分かることは次のとおりである。

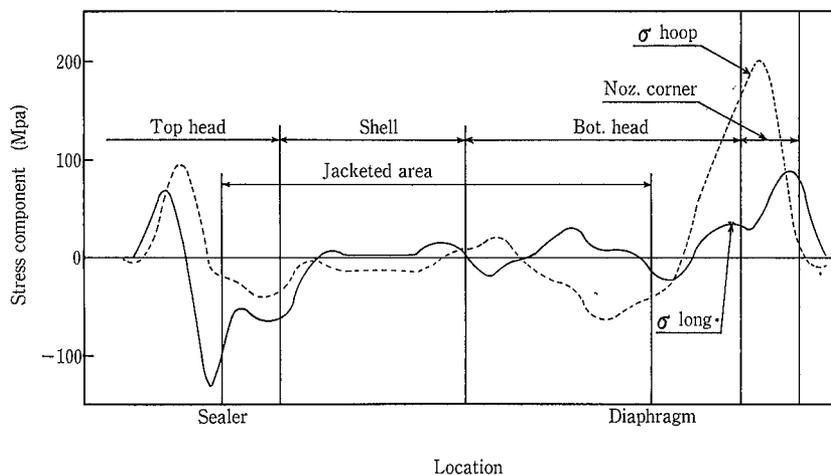
- (1) 3 M<sup>3</sup> 缶ではダイヤフラム部の疲労寿命が支配的であるが、その温度差依存性は小さい。
- (2) 10 M<sup>3</sup> 缶では温度差  $\Delta T=130^\circ\text{K}$  を境にして疲労支配部位が異なっている。すなわち、 $\Delta T < 130^\circ\text{K}$  ではダイヤフラム部の疲労強度が缶全体を支配し、 $\Delta T > 130^\circ\text{K}$  ではシーラ部の疲労強度が支配的となる。



第6図 温度差 ( $\Delta T$ ) と許容繰返し回数との関係  
Fig. 6 Temperature difference vs. number of repetitions



第7図 温度差 ( $\Delta T$ ) と許容繰返し回数との関係  
Fig. 7 Temperature difference vs. number of repetitions



第8図 GL境界面母材応力成分値  
Fig. 8 Stress distribution along the shell

(3) ダイアフラムカラー付根よりもシーラ付根の方が  $\Delta T$  の依存性が高く、熱応力の影響を受け易い。

よって温度差  $\Delta T$  が  $100^\circ\text{K}$  での使用条件ではダイアフラム部が最も許容繰返し回数が低くなり、温度差  $\Delta T$  が  $130^\circ\text{K}$  の使用条件ではシーラ部が最も低くなる場合がある。また、年間運転バッチ数が異なれば疲労寿命年数も当然異なってくる。

#### 4. 溶接施工条件と疲労寿命

シーラなどの溶接部は構造不連続部で応力が最も集中しやすい部位であり、溶接施工条件によって溶接部の形状が変わり、応力集中係数に影響を及ぼす。応力集中係数が大きくなると許容繰返し回数は減少するため、溶接施工条件は疲労評価を行う際に重要な因子となる。

そこで第7図に  $10\text{M}^3$  標準缶のシーラ付根部内面における許容繰返し回数と温度差の関係を形状係数 ( $\alpha$ ) をパラメータとして示す。 $\alpha$  は(1)式および(2)式で算出した値であり、溶接止端部の半径  $\rho$  (第5図参照) によって変化する。

図中  $\alpha=4.00$  は J I S B 8250 に示されている隅肉溶接に採用される疲労強度減少係数である。当該部の溶接止端部の形状を製造上コントロールすることは實際上困難な問題である。当社標準作業形状においては経験上  $\alpha=1.80 \sim 2.19$  の範囲であり、今回の計算例のような加熱使用の場合の疲労寿命は温度差  $\Delta T=130^\circ\text{K}$  であっても10000回程度を確保している。

#### 5. GLの評価

前章までに記述した解析結果はシーラ、ダイアフラムカラーについての疲労評価である。前述したような熱応力が発生した場合、缶本体GL部がどのような影響を受けるかを検討する必要がある。GLの破損はGL機器本体ならびにプロセス全体に重大な影響を及ぼすことは言うまでもない。

GLは脆性材料であるため剥離は母材の降伏によるひずみの増加に起因する。よって、GLの評価はGL境界面の母材金属が降伏応力以下であることが基準となる。第8図

は10 M<sup>3</sup> 標準缶のスチーム送入による熱応力とスチーム圧による応力を重ね合わせた場合のGL境界面母材の応力成分値をプロットしたものである。この図からシエラ、ダイヤフラム取付部の応力は比較的小さい。最大応力を示すのは底ノズルコーナー部で周方向の引張り応力が約200 MPaであることがわかる。第9図は底ノズル近傍における周方向応力のコンター図を示す。

母材は S S 400 材を使用しており、降伏応力は約 235 MPa である。よって、GL境界面の母材の応力成分値は降伏応力を超えない。また、降伏応力以下であれば疲労破壊が生じるまでの繰返し回数は十分大きく、よってGLの破損は考えられない。なお、3 M<sup>3</sup>缶についても同等のレベルである。

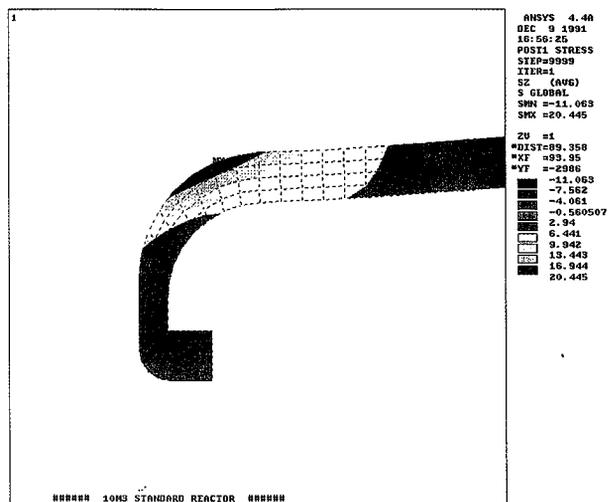
GL機器は耐熱衝撃性を考慮した場合、缶内と外套の許容温度差は  $\Delta T = 150^{\circ}\text{K}$  近傍までとされている<sup>4)</sup>。しかし、そのような過酷な条件では疲労寿命が極端に短くなるため注意を要する。

### む す び

熱応力による疲労評価を行うには機器の幾何学的形状、運転条件、溶接施工条件などを正確に捕らえる必要がある。手計算により算出することは困難である。また、構造不連続部の熱応力は簡易計算式が適用できない場合が多く、測定も困難であるため、FEM解析により熱応力を算出し、疲労評価を行った。

GL機器の許容繰返し回数は機器の運転条件、すなわち内容物温度と加熱媒体のスチーム温度との温度差  $\Delta T$  および、溶接部の応力集中係数に対する依存度が高い。GL機器の疲労破壊を防止するには熱応力を考慮した運転条件で使用する必要がある。

また、疲労評価は個々の機器で異なった結果となるため、一品一葉の計算が必要となる。ただし、過去の運転経験等から疲労解析が不要である場合は免除することができ



第9図 周方向応力コンター  
Fig. 9 Hoop stress contour

る。新機種の場合は使用条件、形状を正確にとらえ、また、どのケースがもっとも厳しいかをとらえる必要がある。

本稿はGL機器を加熱するケースで疲労評価を行ったが、運転条件によっては冷却するケースのほうが厳しい場合もある。疲労による寿命を予測するには設計荷重ではなく運転荷重で各境界条件を決定し、圧力荷重と温度荷重を重ね合わせた応力状態で評価を行うため、個々の機器においてそれぞれ最もきびしいケースが異なってくる。

### 〔参考文献〕

- 1) 河本實ほか：金属の疲れと設計 コロナ社 (1972)
- 2) 松下昭武：压力容器の解析による設計 圧力技術の現状と将来、日本高圧力技術協会 (1989) p. 111
- 3) 西田正考：応力集中 森北出版 (1973)
- 4) 神鋼パンテックカタログ：GLASSLINED REACTOR CATALOG NO. 114E