GL 製リアクタの外套閉鎖部への FEM 応力解析の適用

FEM Stress Analysis Technology for Jacket Closed Part of Glasslined Reactor



北岡俊男* Toshio Kitaoka



Daisuke Okamoto

高温・高圧条件下で使用される GL 製リアクタのダイヤフラムと呼ばれる下部外套閉鎖部は構造 不連続部であることから,疲労強度上の危険部位となる。非軸対称構造を含む種々のダイヤフラム 構造について,有限要素法(FEM)を用いた応力解析により疲労寿命を予測する手法を述べると ともに,疲労試験による疲労強度減少係数の検証を紹介する。

Glasslined reactor is used under the high-temperature & high-pressure condition, so jacket closed part which is called "diaphragm" will be the dangerous section about fatigue. This report introduces the method to predict the fatigue life about various diaphragm by stress analysis using FEM and Inspection of fatigue strength reduction factor by fatigue test.

Key Words :

GL 製 リ ア ク タ 疲 労 破 壊 有限要素法 (FEM) Glasslined Reactor Fatigue Failure Finite Element Method

【セールスポイント】 GL 製リアクタの疲労評価

まえがき

グラスライニング(以下,GLという)は耐食性 や製品の純度が要求される化学メーカ・医薬・ファ インケミカルなどの広い分野で,鋼とガラスの複合 材料として長年使用されている。なかでもGL製リ アクタは高温・高圧条件下で化学反応を行う場合に は外套で加熱・冷却操作を伴い,機械構造物として 過酷な条件で運転されるケースが多い。

機械構造物は過酷な条件で運転された場合には破 壊に至ることがあるため,設計時に予測・予防策を 講じておくことが機器の信頼性向上のために必要で ある。破壊は延性破壊,脆性破壊,疲労破壊,応力 腐食割れなどの様々な形態があるが,グラスライニ ングの母材として炭素鋼を使うことが多く,疲労破 壊が占める割合がもっとも高い。 本稿では GL 製リアクタを加熱・冷却操作を行い 過酷な条件で運転した場合の疲労強度と、構造によ る強度の差異について有限要素法(FEM)を用い た応力解析と JISB8266に準拠した疲労評価を行う ことにより疲労寿命を予測する手法について述べ る。

2次元軸対称構造の疲労解析

1.1 解析モデル

当社標準の GL 製リアクタの構造を図1に示す。 本体容器内部には内容液を撹拌するための攪拌翼・ バッフルがあり、本体容器外部には加熱・冷却媒体 を流すための外套を有する。外套は上部シーラ、下 部はダイヤフラムと呼ばれる閉鎖部により本体と溶 接されているが、当該部は構造不連続部であり、疲 労強度上の危険部位となるので、これらを疲労評価

Vol. 12 No. 1 (2015 / 9)

部とする。応力を評価する部位は図2に示すとおり シーラについては SCL5,ダイヤフラムについては SCL1~ SCL4とする。

また、本稿では本体容量とダイヤフラムの大きさ が疲労強度に及ぼす影響を考察するため表1に示す 3 m³, 10 m³, 30 m³の3種類の容量で各々ダイヤフ



図1 GL 製リアクタの構造

ラム径が異なる GL 製反応機を応力解析モデルとして用いる。

1.2 温度条件および境界条件

解析に用いる温度条件は、機器の起動から停止ま での応力強さの変動範囲の最大値とするため加熱・ 冷却の温度差⊿Tを重ね合わせることとする。本 稿では一般的な⊿T=180℃の場合とする。境膜伝 熱係数と圧力については、加熱時は外套にスチーム を冷却時は冷却水を通水したときの一般的な数値を 用いて定常状態に達した時の温度分布を用いて熱応 力解析を行う。

解析に用いた境界条件を表2に,各材質の設計応 力強さを表3に示す。

1.3 疲労評価

標準的な小径ダイヤフラムの各評価部位の許容繰 返回数を図3に,特殊なケースの大径ダイヤフラム の各評価部位の許容繰返回数を図4に示す。

小径ダイヤフラムの場合,各容量で許容繰返回数 がもっとも短い部位が変化するのに対して,大径ダ イヤフラムの場合は常に SCL1の許容繰返回数が もっとも短くなる傾向が見られる。また,小径の場 合は3m³,大径の場合は30m³の許容繰返回数がもっ とも短くなり容量と許容繰返回数の相関関係は逆の 傾向となった。

そこで,6ケースのデータを基に作成した3種類の容量についての⊿Tv.s.許容繰返回数の線図を図 5(小径ダイヤフラム)および図6(大径ダイヤフ



図2 応力評価部位

容量 [m ³]	ダ イ ヤ フラム径	本 体			ジャケット		ダイヤフラムカラー		ダイヤフラムリング					
		内 [mm]	胴板厚 [mm]	鏡板厚 [mm]	内 径 [mm]	胴板厚 [mm]	鏡板厚 [mm]	外 径 [mm]	板 厚 [mm]	外 径 [mm]	中心径 [mm]	リング板厚 [mm]	内側カラー [mm]	外側カラー [mm]
3	小 径 大 径	1 500 ↓	12 ↓	14 ↓	1 650 ↓	9 ↓	9 ↓	364 1 000	6 6	520 1 154	444 1 078	6 7	6	6
10	小 径 大 径	2 200 ↓	19 ↓	19 ↓	2 350 ↓	12 ↓	12 ↓	364 1 200	9 9	520 1 354	444 1 278	6 7	6	6
30	小 径 大 径	3 200 ↓	25 ↓	25 ↓	3 350 ↓	14 ↓	16 ↓	364 1 400	12 12	520 1 556	444 1 480	6 7	6	6

表1 GL 製リアクタ (3 m³, 10 m³, 30 m³) 寸法表 (解析用)

表2 境界条件

			温度 [℃]	境膜伝熱係数 [kcal/m ² hr℃]	圧力 [MPa]
標準	加熱時 (スチーム)	本体 外套	30 130	1 000 5 000	0.2 0.2
	冷却時 (冷却水)	本体 外套	120 40	1 000 1 500	0.1 0.2

備考. 気相部は保温施工部3kcal/m²hr ℃, 保温未施工部10 kcal/m²hr ℃とし, 大気温度は25℃とした。

表3 設計応力強さ

	Sm:設計応力強さ [kg/mm ²]	$3 \mathrm{Sm}$ [kg/mm ²]
SS400	13.67	41
SM490B	16.67	50

備考. 解析による応力強さの変動範囲が3Smを超えたものに ついて, SM490Bを使用することによる許容繰返数の増加を調 べた。



図3 小径ダイヤフラムの各評価部位の許容繰返数



図4 大径ダイヤフラムの各評価部位の許容繰返数



 図5 小径ダイヤフラム SCL1 (ダイヤフラムカラー-本 体鏡溶接部)の許容繰返数 (3 m³, 10 m³, 30 m³)



 図6 大径ダイヤフラム SCL1 (ダイヤフラムカラー-本 体鏡溶接部)の許容繰返数 (3 m³, 10 m³, 30 m³)



同芯仮想モデル (軸対称)

〔単位:mm〕

		ダイヤフラム径 d	偏芯量 ℓ	缶芯~ダイヤフラム r
$3 \mathrm{m}^3$	同芯仮想モデル	1 000	0	500
	偏芯型ダイヤフラム	645	185	140~500
10 m ³	同芯仮想モデル	1 200	0	600
	偏芯型ダイヤフラム	860	175	260~600
30 m^3	同芯仮想モデル	1 400	0	700
	偏芯型ダイヤフラム	1 010	200	305~700

図7 3次元モデルと2次元仮想モデルの比較

ラム)にまとめてみた。これらの線図により同芯ダ イヤフラムを有する3~30 m³のGL 製リアクタの SCL1について⊿Tに対する許容繰返回数が推定可 能になる。

ただし,実際の使用環境では,スチームドレンの 溜りによりダイヤフラムリングが腐食し,減肉が生 じたり,腐食ピット部で応力集中が生じることによ り,リング近傍が破損することが多い。この場合, リング切替工事による補修が可能であるが,GLを 施工した本体に直接溶接しているダイヤフラムカ ラーは,GL施工後の切替が不可能であることから, SCL1の疲労評価が重要となる。

2. 3次元モデルと2次元仮想モデルの比較 2.1 偏芯ダイヤフラムの疲労解析

ダイヤフラムが偏芯で取付けられた構造の場合, 解析負荷低減のため,ダイヤフラムの最大偏芯部を ダイヤフラム径とした同芯2次元軸対称の仮想モデ ルを用いて解析するケースがあるが,実際の構造と は異なる影響により,解析結果と実際の破損事例と 差異があった。そこで,3次元ソリッドモデルを作 成し2次元軸対称の仮想モデルと3次元モデルの相 違の検証を実施した。3次元モデルと2次元仮想モ デルの比較を図7に示す。

仮想と3次元の結果を比較するため境界条件は仮

想モデルと同一とした。もっとも危険な部位は鏡と ダイヤフラムカラーの溶接部となり、容量30 m³の 応力振幅値を1例として図8に示す。

同芯仮想モデルと比較すると3次元モデルの最大 発生応力はいずれの容量においても増幅しており, 従来の同芯仮想モデルによる解析結果は実際よりも 過小評価していることになる。したがって,今後3 次元モデルで解析実施または同芯仮想モデルの解析 結果に容量に応じた係数を乗じて評価する必要があ る。

また、鏡ナックルにもっとも近い部位に最大応力



図8 3次元モデルと2次元仮想モデルの応力振幅の比較



	SI (kg/mm ²)	Ке (-)	α (-)	Sn (kg/mm ²)
155° 180° 比	55.74 54.24 1.028	1.72 1.65 1.042	2.5 2.5	119.77 11.59 1.073

が発生するとの予測に反して全ての容量において約 25°ずれた方位に最大応力が発生する結果となっ た。この差異について考察する。

図8の応力振幅 *Sn* は FEM 解析により求めた応 力強さ *SI* に下式により求めた弾塑性解析の係数 *Ke* を乗じた値になる。

 $Sn = SI \times Ke \times a$ (a: 疲労強度現象係数) 3Sm < SI/2 < 3Smの場合, $Ke = 1.0 + (1-n) / \{n(m-1)\} \{SI/(3Sm) - 1\}$

したがって, FEM 解析により求められた応力強さ SIの差は表4に示すとおり2.8%となる。この差は 以下の様に考えられる。

鏡に内圧または外圧が作用した時に鏡に発生する 応力強さを図9に示す。これより半楕円鏡の外面の 発生応力はナックルR部からクラウンR部にかけ て一旦低下し、その後鏡中心に近づくにつれて増加 していく。3次元モデルの155°,180°の方位に相 当する部分の発生応力を表5に示す。

表5のとおり、ダイヤフラムカラー方位がもっと もナックルRに近い方位からずれた部位に最大応 力が生じることは考えられる。但し、鏡の強度のみ で評価した場合鏡中心にもっとも近い部位に最大応 力が発生することになるが、以下のパラメータの影 響により最大応力の発生方位が異なってくると考え られる。

- ・内外でのカラー長さの相違による発生モーメントの大小
- ・鏡部温度勾配の違いによる鏡変形量の違い
- ・各部断面における溶接面積の違い
- 2.2 花弁型ダイヤフラムの疲労解析

GL 製リアクタの底鏡に複数のノズルを配置する 場合, 伝熱面積減少を最小限にするため花弁のよう に複数のダイヤフラムを設けることがある(図10参 照)。本構造の場合も2次元軸対称でモデル化する ことは不可能なため3次元ソリッドモデルにて検証 を行った。

表5 2:1半楕円鏡外面の応力強さ

〔単位·kg/mm 〕					
	内圧	外圧			
155 ° 180 °	0.989 0.968	1.979 1.936			
比	1.022	1.022			



図10 花弁型ダイヤフラムのモデル



応力解析の結果,コンター図(図11参照)に示す とおり,最大応力強さはダイヤフラムリングの内側 に発生している。しかし,ダイヤフラムリング内側 は平坦であるため疲労強度減少係数を1とすること とができるので危険断面は当該部ではなく,カラー と鏡の溶接止端部,とカラーとリングの溶接止端部 を危険断面として評価することとする。

図12は鏡中心側を0°とし下鏡外面から見て時計 回りに360°の応力強さをプロットした。リングの 外側をOUT, ジャケット側を IN と定義し3次元モ デルと2次元仮想モデルを比較した。また, リング の板厚をアップさせた時の影響を確認するため板厚 を 6 mm → 9 mm としたときのケーススタディも 行った。

応力強さ分布図から,2次元仮想モデルでは求め ることが出来ない周方向での応力強さの変化が再現



図11 花弁型ダイヤフラム断面の応力強さコンター図



図13 疲労試験片の形状



写真1 疲労試験状況



されており OUT 側の応力が最大となる76°が割れ 発生の起点になり割れが進展していく可能性が高い ことが考察できる。

3. 疲労試験による疲労強度減少係数検証

応力解析により求められた繰返し応力強さの振幅 値を用いて許容繰返回数を導く疲労評価を行う場合 の疲労強度減少係数は理論的に求められた応力集中 係数を用いるのが一般的である。

そこで,実際の疲労評価を行う際の条件と近い条 件での疲労試験を行い,応力集中係数を用いること の妥当性を検証する。

3.1 試験条件

疲労試験に用いる試験片は図13に示すとおり,実際の板厚と同じ6mmのSS400製の板を用いて,母材,溶接(ASWELD),溶接止端部R仕上げの3種類を各6本の計18本とした。試験方法は試験片片側を固定し,他端に荷重を10Hz前後で繰返し負荷する加速試験とした。(試験状況は写真1参照)

3.2 試験結果

図14に試験結果のグラフを示す。実線はJISB 8266の設計線図, 点線は設計線図から安全率を除外 した最適線図を示しこれらに重ねて試験による破断 時の回数と応力振幅値をプロットした。

試験結果より, 300, 250, 200 MPa の 3 通りの応 力での試験において, *R* 仕上げが AS WELD より寿 命が長くなる傾向はみられる。300 MPa の結果から 繰返し回数として2~3倍,応力比としては AS WELD に対して R 仕上げを施した場合1.33となり, 理論的に算出した応力集中係数の1.3~1.56と近い値 になり,妥当性を確認できた。

むすび

本稿では、GL 製リアクタを加熱・冷却操作を行う過酷な条件で運転した場合の疲労強度について、 有限要素法(FEM)とJISB8266に準拠し疲労寿命 を予測する手法について紹介した。比較的モデル作 成が容易な2次元軸対称モデルについは加熱・冷却 による温度差 / Tと許容繰返回数との関係を、2 次元軸対称モデルで再現性が難しいものについて は、3次元モデルによる解析により挙動を明確にし た。

また疲労試験の結果は,理論的に算出した。応力 集中係数と近い値となり理論値の適用の妥当性を確 認した。

GL 製リアクタは広い分野で使用されており、その使用条件・環境も多種多様であり、外套内部の局部腐食を初めとする種々の条件全てを FEM 上で再現することは困難であるが、今後は、本資料・手法を活用し疲労寿命を事前に予測し疲労破壊を予防する対策を講じた設計を行うことで、GL 製リアクタの品質を向上させ生産性・安全性向上に貢献したい。