

# 557 フランジ継手用ガスケットの常温・高温下における漏洩量評価 (延伸 PTFE ガスケットの J-EHOT 試験)

## Evaluation of Leakage of Gasket for Flanged Joint under Room Temperature and Elevated Temperature (J-EHOT Test of Expanded PTFE Gaskets)

○学 長谷川 聡 (東電大・院) 正 山口 篤志 (東電大・院)  
正 辻 裕一 (東電大・工)

Satoshi HASEGAWA, Atsushi YAMAGUCHI

Hirokazu TSUJI, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama

Key Words: Gasket, Flanged joint, Leakage test, HOTT, ROTT, EHOT, Tightness,

### 1. 緒言

環境問題の視点から工業プラントからの有害物質微量漏洩の排出規制が強化されつつある。プラントの配管部や圧力容器の接続部に多用されているガスケット付フランジ継手は内部流体の漏洩がもっとも発生しやすい部分である。高温高圧用としてうず巻形ガスケットが使われている。それよりも低温低圧では非石綿シートガスケットが用いられるが、プラント運転状況下でシール性能が明確にはわかっていない。

前報<sup>(1)</sup>では、HPIS ガスケット試験法を高温に拡張したシール特性試験法 J-EHOT を提案した。300℃で J-EHOT 試験を実施し、うず巻形非石綿ガスケットの高温シール特性を評価した。

本研究では、J-EHOT 試験により、シートガスケットである延伸 PTFE ガスケットの 180℃における高温シール特性を評価する。

### 2. HPIS ガスケット試験法

HPIS ガスケット試験法<sup>(2)</sup>では、ガスケット寸法に依存しないものとして定義された基本漏洩量  $L_s$  ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ) を有効締付圧  $\sigma_c$  ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) と圧縮変形量  $\delta_s$  (mm) で評価する。 $L_s$  は次式で表される。

$$L_s = \frac{L}{k} \quad (1)$$

ここで、漏洩量  $L$  ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ )、ガスケット形状係数  $k$  である。基本漏洩量を用いることにより試験・実用面での汎用性が増す。 $k$  は次式で表される。

$$k = \frac{1}{d_o/d_i - 1} \quad (2)$$

図 1 に示すガスケット締付圧の負荷シーケンスの前半の ROTT は、HPIS ガスケット試験法のシーケンスに相当する。なお、HPIS ガスケット試験法では非金属ガスケットの最大締付圧は  $40 \text{ (N}/\text{mm}^2)$  であるが、今回は  $30 \text{ (N}/\text{mm}^2)$  で行った。延伸 PTFE ガスケットの推奨締付圧は  $mP+y$  で表される。ここで、ガスケット係数  $m$ 、内圧  $P$  (MPa)、最小締付圧力  $y$  である。試験ガスケットは  $m=2.5$ 、 $y=19.6$  (MPa) であり、最大使用圧力は  $3$  (MPa) であるので、推奨締付圧は  $27.1 \text{ (N}/\text{mm}^2)$  となり、最大締付圧を  $30 \text{ (N}/\text{mm}^2)$  とした。

### 3. 試験装置及び試験ガスケット

図 2 に試験装置の構成を示す。試験ガスケットは油圧シリンダによって均一に圧縮される。プラテンには計 8 個のカートリッジヒータが埋め込まれており 450℃まで昇温が可能である。温度はプラテンに埋め込まれたサーズ形熱伝

対により測定している。冷却装置によりロードセル、油圧シリンダは熱による影響を受けない。作動流体は He ガスを使用する。試験ガスケット・プラテン周りはメタルベローズとメタル中空 O リングにより密封されており、漏洩した He ガスはメタルチューブを通り石鹸膜流量計へと導かれる。この流量計はガラス体積管内の所定距離内を石鹸膜が移動する時間から He ガスの漏洩量を測定するものである。ガスケットひずみの測定にはダイヤルゲージ及び高温用クリップゲージにて測定する。

試験ガスケットは 3 インチ延伸 PTFE ガスケット (GORE-TEX SGM ガスケット、厚さ 1.5mm、3.0mm) である。

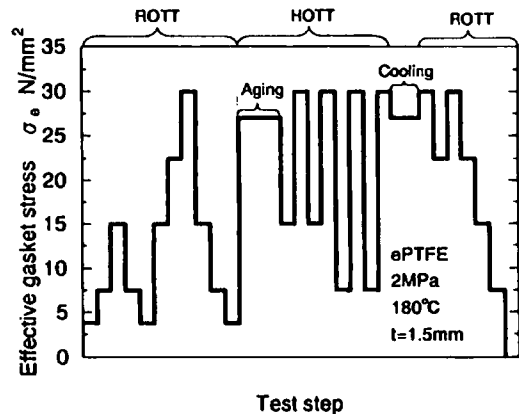


Fig.1 Loading sequence for an expanded PTFE gasket

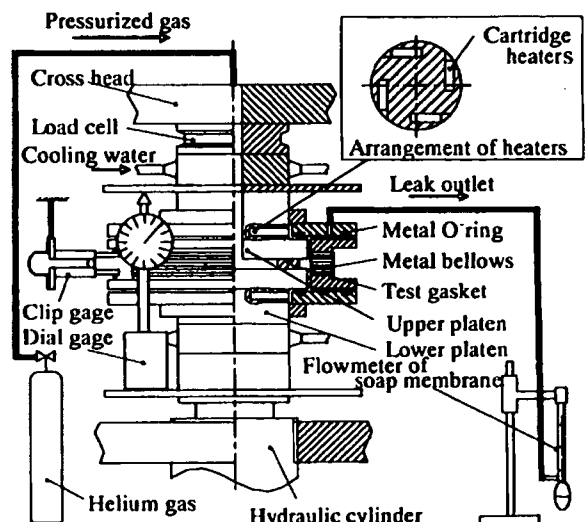


Fig.2 Testing apparatus

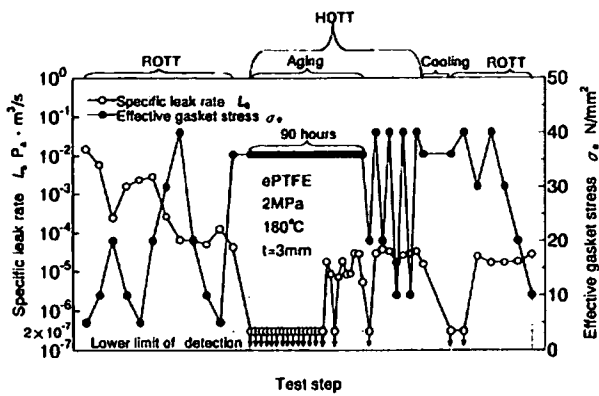


Fig.3 Result of J-EHOT for 3.0mm in thickness

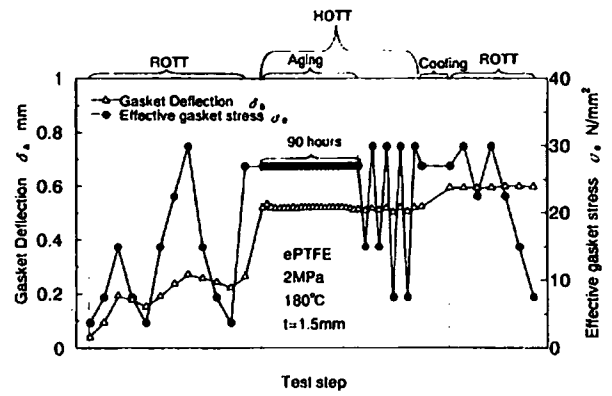


Fig.6 Relation between test step, gasket deflection and effective gasket stress

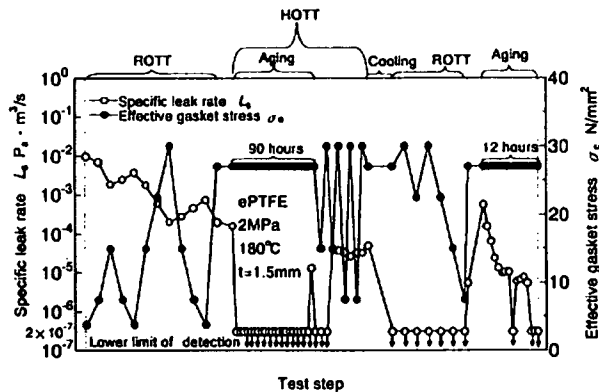


Fig.4 Result of J-EHOT for 1.5mm in thickness (Type I)

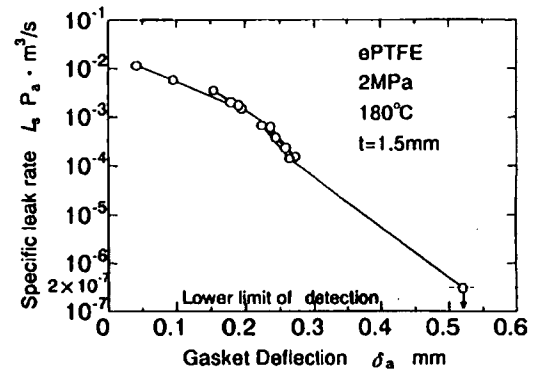


Fig.7 Relation between gasket deflection and specific leak rate

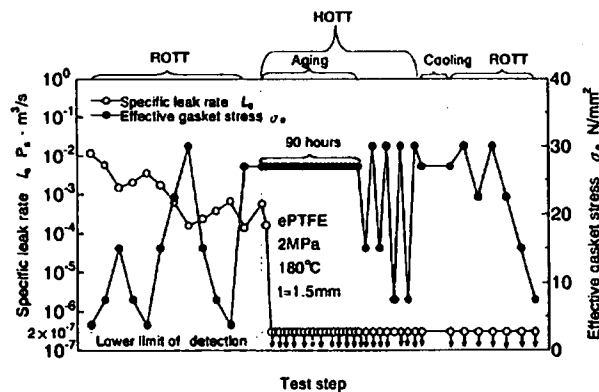


Fig.5 Result of J-EHOT for 1.5mm in thickness (Type II)

#### 4. 試験結果

図3に厚さ3.0mm, 図4及び図5に厚さ1.5mmを用いたJ-EHOT試験の結果を基本漏洩量を対数とし, 横軸に時間経過(Test step)として示す。

ROTT試験では厚さ1.5mm, 3.0mm共に漏洩レベルがほぼ一定であった。厚さ1.5mm type I と type II を比較すると漏洩レベルの再現性が確認できる。HOTT試験では厚さ3.0mmはエージング後半において漏洩が発生した。これは, クリブによりガスケット面積が約1.5倍に増加しガスケット応力が減少したためであると考えられる。プラント運転時の外乱を想定したガスケット応力の除荷過程を50(N/mm²)及び25(N/mm²)の応力で各2回行ったが漏洩量はあまり変化が見られず厚さ3.0mm及び厚さ1.5mm共に約 $10^{-4}$ (Pa·m³/s)で一定のシール性能が保たれている。また, 厚さ1.5mmでは外乱で漏洩量が測定限界以下になるものもあった。厚さ1.5mm Type I ではJ-EHOT試験終了後, 再

度エージングを行った。昇温直後は漏洩量は大きい時間経過に従い漏洩量が減少する。

図6に厚さ1.5mmを用いたJ-EHOT試験の結果を横軸を時間経過とし, ガスケット変形量との関係を示す。昇温時のガスケット変位の変化が最も大きく, その後のエージング中のクリープの進行が見られない。図7に厚さ1.5mmのガスケット変形量と基本漏洩量の関係を示す。変位と漏洩量の関係は直線で表せられる。延伸PTFEガスケットでは高温においても漏洩量をガスケット変位で整理が可能である。

#### 5. 結言

延伸PTFEガスケットにJ-EHOT試験を行った。以下に得られた成果を示す。

- (1) 延伸PTFEガスケットの高温時の漏洩特性を求め, 常温時と比シール性能が向上していることを示した。
- (2) 延伸PTFEガスケットの基本漏洩量と変形量との関係を求め, 高温においても漏洩量をガスケット変位で整理できることを示した。

#### 謝辞

ガスケットの提供をいただきましたジャパングアテックス(株)の関係各位に感謝致します。

#### 参考文献

- (1) 長谷川, 辻: フランジ継手用ガスケットの常温・高温下における漏洩量評価, 日本機械学会山梨講演会講演論文集 No.060-4, (2006)
- (2) 日本高圧力技術協会, 管フランジ用ガスケットの基本密封特性試験方法 HPIS Z104, 1-15, (2005)

# ガスケット非石綿化に対応するための フランジ継手設計法の検討

圧力設備のシーリング技術研究(STOP)委員会

委員長 澤 俊行 (広島大学)

○ 副委員長 辻 裕一 (東京電機大学)

## 1. はじめに

アスベスト全面禁止に係る労働安全衛生法施行令の改正が行われ、平成 18 年 9 月 1 日から施行され、石綿製品の製造、使用等が禁止された。ただし、特定の条件で用いられるガスケット、パッキンなどのシール製品は、例外的に禁止が猶予されている。これらの製品についても平成 20 年までに全面禁止を達成することが求められている。石綿製品の代替困難性の分類によれば、石綿ジョイントシートの代替品を始め多くのガスケットはレベル II の実証試験段階の製品と判断されている。表 1 にレベル II 製品の実証試験方法の方針を示す。実証試験では、実使用条件下における健全性の評価と漏洩等のリスクの把握を行う。同時に、非石綿製品の施工、フランジ継手のトルク管理等の適切な使用方法の検討も挙げられている。

ここでは、ガスケットの石綿代替化の動向を踏まえて、HPIS として発行されたガスケット密封特性試験法、フランジ継手締付け指針の概要及び検討中の課題について、さらに開発中のフランジ継手設計法について述べる。

## 2. ガスケットの基本密封特性試験方法

石綿代替化に対応するため、新しい材質や形式のガスケットが開発されつつある。ここで、ガスケット係数 ( $m, y$ ) の測定方法が明確でないため、新材料、新形式のガスケットに対し根拠のある係数の決定ができないという問題が生じている。そこで、独自の試験方法として HPIS Z 104「管フランジ用ガスケットの基本密封特性試験方法」を規格化した。ここでは、次式で表されるガスケット寸法に依存しない基本漏洩量  $L_s$  を用いる。 $k$  はガスケットの内外径比による形状係数である。

$$L_s = \frac{L}{k} \quad (\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}), \quad k = \frac{1}{d_o/d_i - 1}$$

各試験ステップにおける  $L_s$  をガスケット応力ではなく、圧縮変形量で整理すると、 $L_s$  が一義的に直線関係で表示でき、漏洩量に及ぼす締付圧の履歴の影響を無くせる。

表 1 レベル II 製品の実証試験の方針

|      |  |
|------|--|
| 目的   | 非アスベスト製品を実機に導入したときの長期間の使用による漏れ、耐久性及びトルク管理等の取扱い方を検証し、安全性を評価する。  |
| 評価項目 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 取り付け時の設置方法、適切なトルク管理の検証</li> <li>○ 運転中の漏えいの有無及び漏えい量の許容範囲</li> <li>○ 取り外し時の圧力染みの浸透度、変形、痩せ等による耐久性評価</li> </ul> |
| 試験方法 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 実機又は実規模大モックアップ設備を用いて漏えい量等の技術データを取得する。</li> <li>○ 得られたデータ等に基づく分析、要求仕様に照らし合わせた評価を実施する。</li> </ul>             |

常温試験である HPIS Z 104 の高温への拡張を検討している。常温における組立て／高温でのガスケットのエイジングおよび外乱／シャットダウンを考慮できる試験方法の確立を目指し、常温試験／高温試験／高温後常温試験の試験ステップ

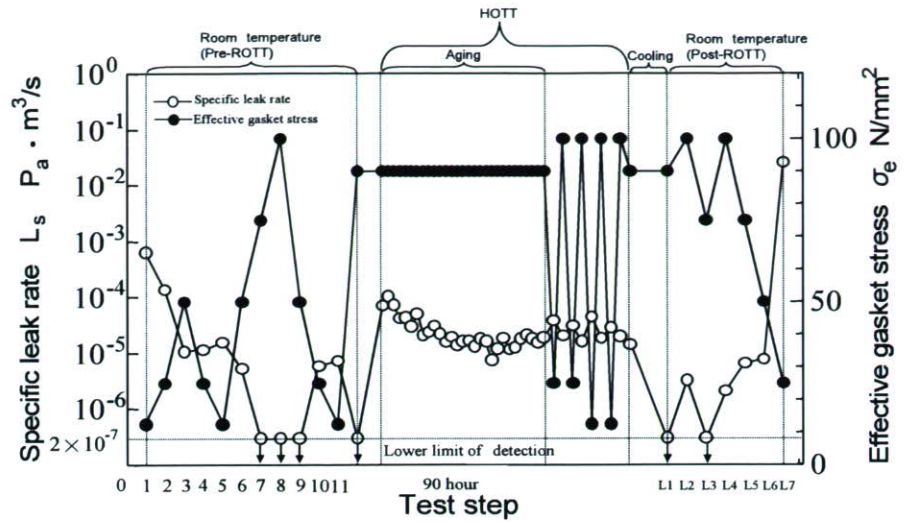


図1 J-EHOT 試験結果 (SWG: Class 300, NPS 3, 300°C)

からなる J-EHOT 試験の HPIS 化を準備中である。図1に J-EHOT 試験で得られたガスケットの基本密封特性を示す。

### 3. フランジ継手締付け指針

HPIS Z 103 TR「フランジ継手締付け指針」及び上記の HPIS Z 104 は JIS 化の手続きを進めている。

本指針の課題として、適用ガスケットがジョイントシートガスケット及びうず巻形ガスケットに限られているため、適用範囲の拡大を検討している。延伸 PTFE ガスケットについては確認試験を済ませている。今後、要望の多いリングジョイントガスケットへの適用範囲拡大を図る。

### 4. フランジ継手設計法

図2に開発中のフランジ継手設計手順を示す。設計手順の特徴として、内圧および曲げモーメントなどの外力に対する内力係数の考慮、ガスケットの基本密封特性の反映、課題として、内部流体が気体と液体の場合の設計法の違い、高温ガスケット試験の利用方法が挙げられる。

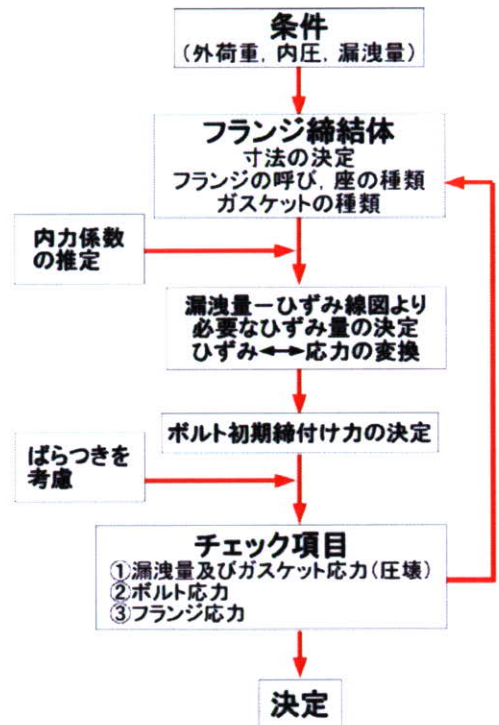


図2 フランジ継手設計手順

非石綿ガスケット選択の根拠となる資料として、HPIホームページにおいて、ガスケット情報のデータベースを公開している([http://wwwsoc.nii.ac.jp/hpi/sealing\\_tech.html](http://wwwsoc.nii.ac.jp/hpi/sealing_tech.html))。)

### 5. まとめ

漏洩を起こさないフランジ設計を行うための設計手順について検討すると共に、基礎データとなるガスケット定数またはフランジ漏洩の許容クライテリアをWGにおいて検討していく計画である。高温密封特性評価に関しては、実機フランジにおける高温漏洩問題との関連、および高温寿命評価が課題である。

# 503 ミスアライメントを有するフランジ締結体のボルト締付けのFEM解析 (HPISフランジ締付け指針による場合)

FEM Analysis on Bolt Tightening of Flange Joints with Misalignment

(In the case of HPIS Flange Assembly Guidelines)

○学 近内 孝 (東電大・院)

正 本田 尚 (労衛研)

正 辻 裕一 (東電大・工)

正 正司 康雅 (千代田アドバンスソリューションズ)

Takashi KONNAI, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hikigun, Saitama

Takashi HONDA, National Institute of Occupational Safety and Health, Umeen 1-4-6, Kiyose-shi, Tokyo

Hirokazu TSUII, Tokyo Denki University

Yasumasa SHOJI, Chiyoda Advanced Solutions, Technowave 100 Bldg, 1-25 Shin-rashima-cho 1-chome, Kanagawa-ku, Yokohama

Key words: Gasket, Flange joint, Finite element method, Bolt tightening procedure, Gasket stress, Misalignment

## 1. 緒言

フランジ締結体の締付け方法として代表的なものに HPIS フランジ締付け指針<sup>(1)</sup>がある。HPIS フランジ締付け指針はボルト締付け順序を時計回りとしている。片締めによる締付け軸力の不均一が懸念されていたが、これは発生しないことが証明されている。

本研究では、有限要素法解析を用いてフランジ締結体の配管がミスアライメントを有する場合の応力・変位解析シミュレーションを行っている<sup>(2)</sup>。本報では HPIS フランジ締付け指針による締付け法において、配管に存在するミスアライメントがガスケット応力とガスケットひずみの均一性に及ぼす影響について締付け開始ボルトを変えて検討を行った。

## 2. 解析モデル・解析方法

図 1 に本研究で使用する解析モデルを示す。解析対象とするフランジは JPI class 150 突合せ溶接型、呼び径 100A (4 インチ)、ボルトは呼び径 M16、本数 8 本、ナットは 10 割ナットを使用する。ガスケットはジョイントシートガスケット、配管部は内径 102.3 mm、外径 114.3 mm、長さ 1 m とした。モデルはフランジ、ボルト、ナット、ガスケット、配管から構成される 2 分の 1 モデルである。フランジ、ボルト、ナット及び配管のヤング率を 206 GPa、ポアソン比を 0.3 とし、ガスケットには図 2 に示す圧縮応力-圧縮ひずみ特性を与えた<sup>(3)</sup>。ボルト・ナットは一体で作成しているが、ボルト・ナット間のねじ接触を考慮し、はめあいねじ部のヤング率を低く与えている。

解析はミスアライメントに対して図 3 に示すボルト位置からそれぞれ締付けを開始する Type-1 と Type-2、そしてミスアライメントのない Type-0 の合計 3 タイプで行った。ミスアライメントのモデル化をするため、管の自由端に 2kN の荷重を与え、フランジ側管端部に約 20MPa の曲げ応力を発生させている。表 1 に解析ステップを示す。

## 3. 解析結果および考察

図 4、図 5、図 6 にそれぞれ Type-0、Type-1、Type-2 の締付け 1 周終了毎のガスケット変位を示す。ガスケット変位の評価点は対角にあるボルトの中心同士を結んだ直線とガスケットの半径方向の二等分線との交点としている。

ミスアライメントのない Type-0 では、本締付け 1 周目

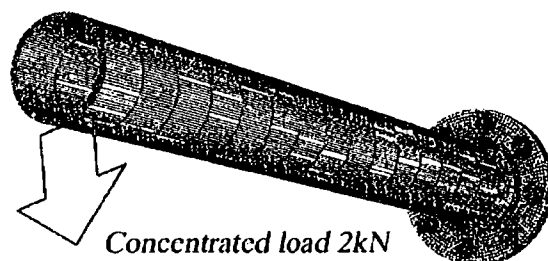


Fig.1 FEM model of flange joint.

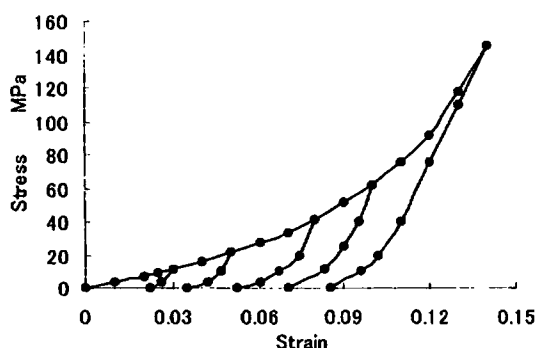


Fig.2 Stress-strain curve of compressed sheet gasket

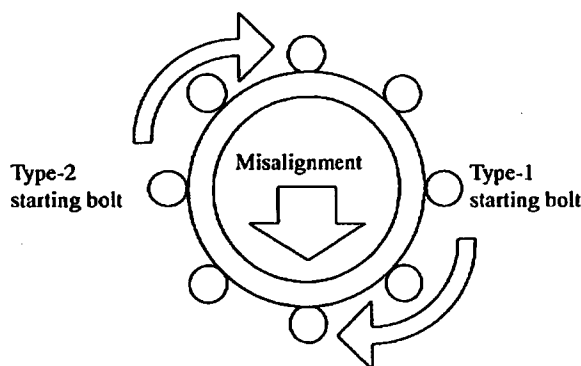


Fig.3 Configurations of starting bolt for Type-1 and Type-2.

Table 1 Sequence of analysis step.

| Step                     | Loading  |
|--------------------------|--|
| Install                  | Loading 8kN to all bolts at the same time.                                 |
| Bending for misalignment | Loading 2kN to pipe end.   |
| Tightening               | Loading 88kN to each bolt for 4 passes on a rotational clockwise sequence. |

終了後 (Pass 1 後) の評価点ごとのガスケット変位分布が大きく異なっている。これは Pass 1 最後の 8 番ボルト締付け時の弾性相互作用によって隣合うボルトの軸力が低下し、それによってボルトと対応する評価点のガスケット変位も減少したからである。このガスケット変位の不均一性は周回を重ねるごとに収束する。

Type-1 では Pass 1, Pass 4 後のガスケット変位の不均一性が Type-0 より大きくなっている。これはミスアライメントによって生じたガスケット変位の不均一性が Pass 1 で生じるものと同様の分布をしていたため、Pass 1 で生じる不均一性が拡大されたからである。そして変位の不均一性が拡大された分、周回を重ねてもその不均一性が吸収され切れないまま締付けステップは終了した。

Type-2 では、Pass 1, Pass 4 後のガスケット変位の不均一性が Type-0 より若干小さくなっている。これは、Type-1 と

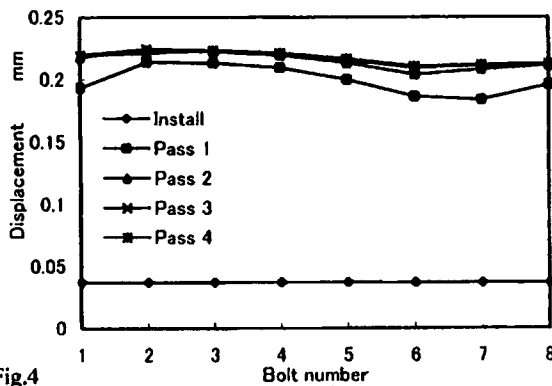


Fig.4 Distribution of gasket displacement (Type-0).

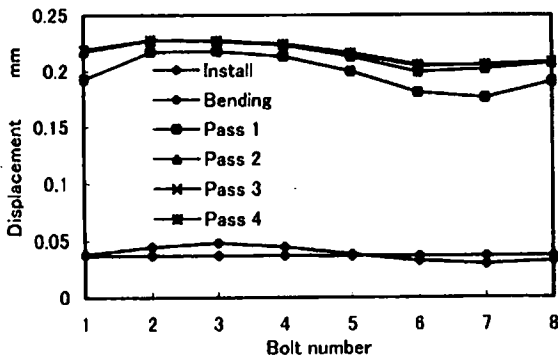


Fig.5 Distribution of gasket displacement (Type-1).

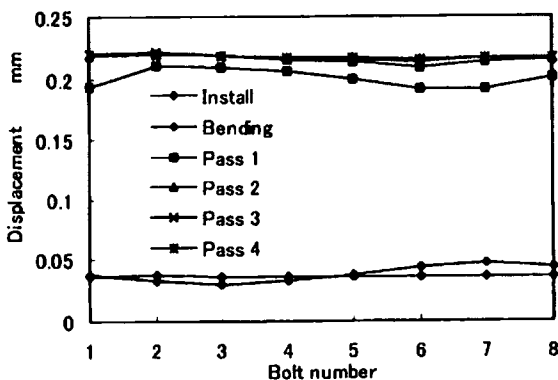


Fig.6 Distribution of gasket displacement (Type-2).

は逆に、ミスアライメントによって生じたガスケット変位の不均一性が Pass 1 で生じるものと逆の分布をしており、結果、Pass 1 で生じる不均一性が打消されたからである。

図7に各タイプの Pass 1 後と Pass 4 後のガスケット応力分布を示す。ガスケット変位分布の不均一性と同様の不均一がガスケット応力分布でも確認できる。

#### 4. 結言

フランジにミスアライメントがある場合のフランジ締付け過程を HPIS フランジ締付け指針に従った締付け法でシミュレーションした。

ミスアライメントの方向に対して締付け開始ボルトを変えることによる、締付け終了後のガスケット変位、ガスケット応力分布の違いを解析で示した。配管に 20MPa の大きな曲げ応力が発生するミスアライメントが存在する場合にも、締付け開始位置によってガスケット応力とガスケットひずみの均一性を得ることが可能であることを示した。

#### 5. 参考文献

- (1) 日本高圧力技術協会規格：フランジ継手締付け指針, HPIS Z 103 TR 2004, (2004)
- (2) 前田, 辻：ミスアライメントを有するフランジ締結体のボルト締付けの FEM 解析, 山梨講演会講演論文集 No.040-4, (2004)
- (3) 日本バルブ工業会：フランジ計算基準及びガスケットの性能評価方法の標準化に関する調査研究成果報告書, (2006)

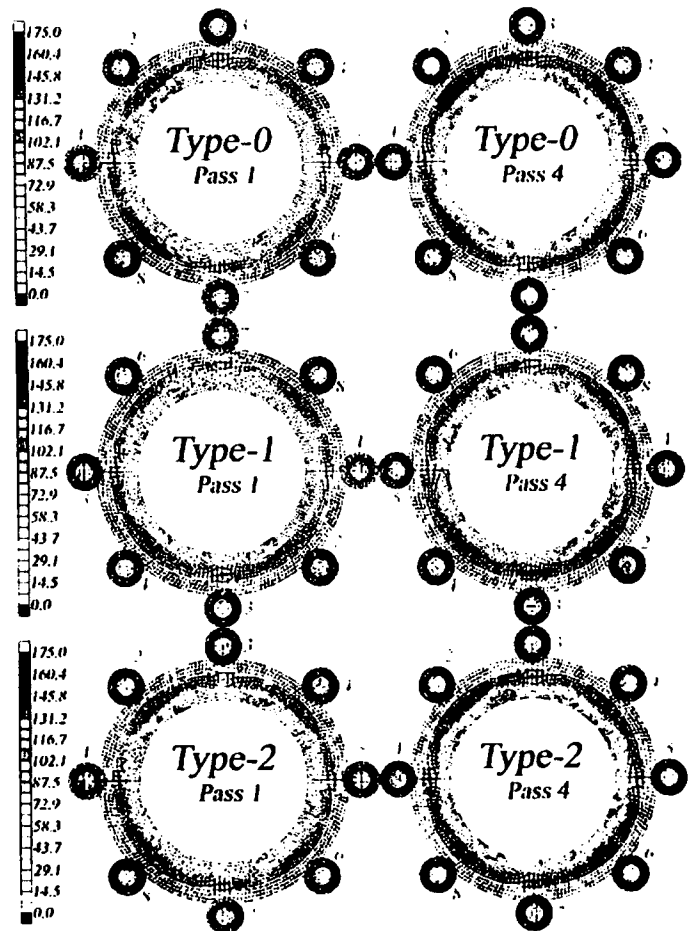


Fig.7 Stress distributions of after Pass 1 and Pass 4.

### 3 次元粘弾性モデルによるフランジ継手用ガスケットの高温クリープ特性の評価

東京電機大学大学院 先端科学技術研究科

○山口篤志

独立行政法人 労働安全衛生総合研究所

本田尚

東京電機大学

辻裕一, 南雲克也

### Evaluation of Elevated Temperature Creep Properties of Gaskets for Flanged Joint by 3-D Viscoelasticity model

Atsushi Yamaguchi

Graduate School of Advanced Science and Technology, Tokyo Denki University

Takashi Honda

National Institute of Occupational Safety and Health

Hirokazu Tsuji, Katsuya Nagumo

Tokyo Denki University

キーワード：ガスケット，フランジ継手，クリープ特性，3次元粘弾性

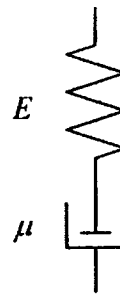
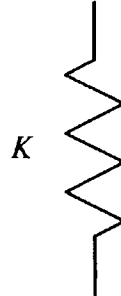
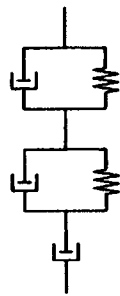
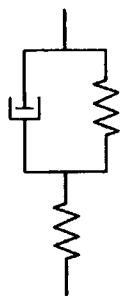
Keywords : Gaskets, Flanged joint, Creep Properties, 3-D Viscoelasticity

#### 1. 緒言

フランジ継手用ガスケットを長時間使用すると、ガスケットはクリープ/リラクゼーションを起こすことはよく知られている。これによりガスケット締付け圧は低下し、内部流体が漏洩する危険性がある。そこで、近年、単軸の粘弾性モデルにより常温におけるガスケットのクリープ特性の評価が行われているが<sup>(1)(2)</sup>、それら単軸の粘弾性モデルは、実際のクリープ現象よりひずみが早く収束したり、時間の経過とともにひずみが増加し続けたりと、ガスケットのクリープ特性を評価するには困難なモデルであると考えられる。また、ガスケットは主に高温下で用いられているが、高温下におけるガスケットのクリープ特性に関する研究はほとんど行われていない<sup>(3)</sup>。高温下においてはガスケットクリープが顕著に現れることから、ガスケットの高温クリープ特性の解明は急務といえる。そこで非石綿ガスケットの高温クリープ特性を3次元粘弾性モデルにより評価し、実験結果と比較することで、その有用性について検討した。

#### 2. 3次元粘弾性

これまで、ガスケットのクリープ特性は図1に示すような単軸の粘弾性モデルで評価されてきた<sup>(1)(2)</sup>。しかし、図1(a)のモデルではいずれひずみが一定の値に収束してしまい、一方、図1(b)のようなモデルではひずみが収束しないことから、ガスケットのクリープ特性の評価は困難であった。また、ガスケットはガスケットとフランジ間の摩擦により半径方向および円周方向に拘束され、圧縮方向以外の応力が発生するが、従来の粘弾性モデルは単軸モデルであるため、圧縮方向以外の応力によるクリープを考慮できない。そこで、本研究ではガスケットのクリープ特性に3軸応力状態を評価できる3次元粘弾性モデル<sup>(4)</sup>を適用した。3次元粘弾性モデルは、図2に示すように3軸応力状態を静水圧成分と偏差



(a) 3 elements model (b) 5 elements model  
Fig1. Viscoelasticity model of one-dimensional

(a) Hydrostatic pressure component (b) Deviation component

Fig2. 3-D viscoelasticity model

成分に分け、静水圧成分には弾性、偏差成分にはMaxwellモデルを適用することで、体積変化と無関係に粘弾性特性を評価できる。

一般に、粘弾性モデルはKelvinモデルとMaxwellモデルの組合せで与えられるが、直列・並列に関わらず、いかなる組合せとして単軸における応力とひずみの関係は次の微分方程式で表せる<sup>(4)</sup>。

$$\sum_{k=0}^m a_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = \sum_{k=0}^n b_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k} \quad (1)$$

ここで、 $a$  および  $b$  は粘弾性モデルにおけるばね定数および粘性率からなる係数である。式(1)を図2に示した静水圧成分と偏差成分について適用すれば以下の式が成り立つ。

$$A\sigma_m = B\varepsilon_m \quad (2)$$

$$A'\sigma'_{ij} = B'\varepsilon'_{ij} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_m$ ：平均垂直応力、 $\varepsilon_m$ ：平均垂直ひずみ、 $\sigma'_{ij}$ ：応力偏差テンソル、 $\varepsilon'_{ij}$ ：ひずみ偏差テンソル、 $A, B, A', B'$ ：微分演算子である。ガスケットの応力状態を考慮し、静水圧成分、偏差成分について応力とひずみの関係を求め、ラプラス変換を施せば以下に示すような3軸応力状態を考慮した圧縮方向のクリープ式が得られる。

$$\bar{\varepsilon}_{::} = \frac{3AA'}{2AB' + BA'} \bar{\sigma}_{::} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}_{::}$ ：ラプラス変換した圧縮方向のひずみ、 $\bar{\sigma}_{::}$ ：ラプラス変換した圧縮応力である。

式(4)を用いてガスケットのクリープ特性を評価するためには、 $\bar{\sigma}_{::}$ および微分演算子を定義しなければならない。そこで $\bar{\sigma}_{::}$ をステップ荷重とすれば、

$$\bar{\sigma}_{::} = \sigma_s / s \quad (5)$$

である。なお、 $\sigma_s$ ：ガスケット応力、 $s$ ：ラプラス変数である。

次に、静水圧成分、偏差成分についてそれぞれ応力とひずみの関係を微分方程式で表し、ラプラス変換を行えば以下の式が成り立つ。

$$\bar{\sigma}_m = K \cdot 3\bar{\varepsilon}_m \quad (6)$$

$$\left(1 + \frac{\mu}{E} \cdot s\right) \bar{\sigma}'_{ij} = \mu \cdot s \cdot \bar{\varepsilon}'_{ij} \quad (7)$$

ここで、 $K$ ：体積弾性率、 $\mu$ ：粘性率、 $E$ ：ヤング率である。式(6)、(7)と式(2)、(3)を比較することで、微分演算子を求めることができるので、式(5)とともに式(4)へ代入し、さらにラプラス逆変換をすると、3次元粘弾性モデルにより求めた圧縮方向のクリープ特性 $\varepsilon_s$ は以



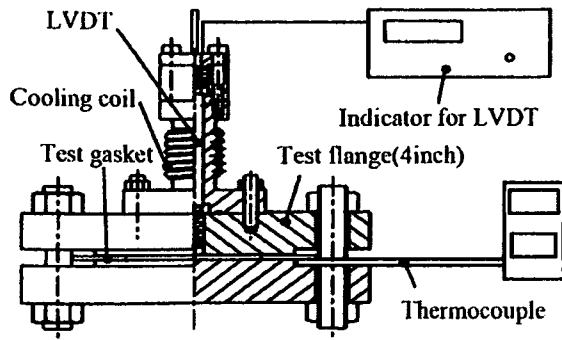


Fig. 3. The configuration of test machine

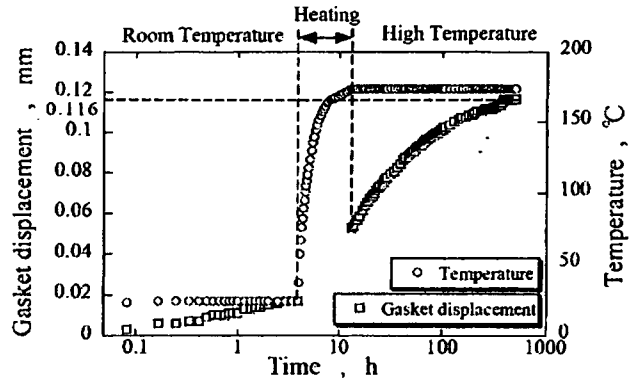


Fig. 4. Result of compression creep test

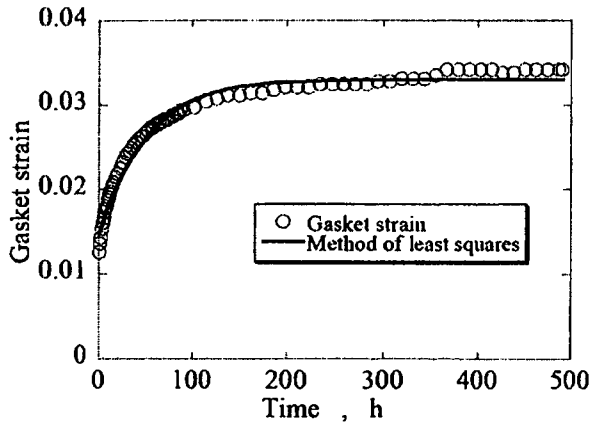


Fig. 5. Creep curves in elevated temperature

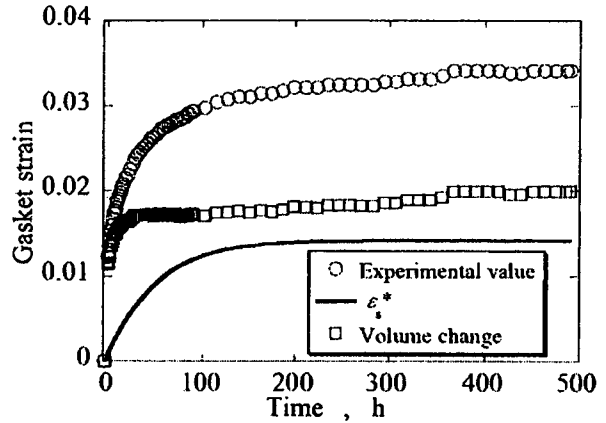


Fig. 6. Behavior of  $\varepsilon^*$ , and volume change

下の式で表せる。

$$\varepsilon_s = \frac{-\sigma_s}{K} \left[ 1 - \frac{2}{3K/E + 2} \exp\left( \frac{-3K}{3K(\mu/E) + 2\mu} t \right) \right] \quad (8)$$

### 3. 試験方法および試験結果

図 3 に高温クリープ試験のためのフランジ試験体を示す。フランジは平面座 Class 600 ブラインド型 4 inch フランジを使用している。ガスケットの温度はフランジとガスケットの間にある熱電対によって、ガスケットの変位は LVDT により計測する。

試験ガスケットには外径 180mm、内径 116mm、厚さ 3mm の非石綿ジョイントシートガスケット (No.6502 日本バルカー工業社製) を用いた。

非石綿ガスケットのクリープ特性は、次の方法で評価した。

試験体のフランジ部に試験ガスケットを挟み、締付け圧  $\sigma_s = 40\text{MPa}$  まで 8 本のボルトで締め付ける。常温におけるガスケットの変位を 4 時間測定した後、 $180^\circ\text{C}$  まで昇温する。温度が安定した後、クリープ試験開始から 500 時間までガスケットの変位を測定する。

図 4 にガスケットの圧縮クリープ試験の試験結果を示す。常温におけるガスケットの変位は 3 時間で安定し、その値は 0.017mm である。昇温開始から 14 時間でフランジ内部の温度は  $174^\circ\text{C}$  で一定となる。温度が安定した後、ガスケットの変位は徐々に増加しており、常温と比較するとはるかに大きい変位が生じている。なお、高温におけるガスケットの変位は 500 時間で約 0.116mm に達している。

図 5 に高温におけるガスケットひずみ-時間線図を示す。横軸は 174℃で一定となった時間を開始時間とした。ひずみは時間の経過とともに増加しているが、その増加量は時間とともに減少し、試験終了時のひずみは約 0.034 であった。

#### 4. 考察

3次元粘弾性モデルを構成する要素の値は、ガスケットのクリープ特性を最小二乗近似し、式(7)と係数を照らし合わせることで求めることができる。K,  $\mu$ , E の値を求めたところ、 $K=1210[\text{MPa}]$ ,  $\mu=48.7[\text{MPa}\cdot\text{h}]$ ,  $E=2263[\text{MPa}]$ であった。ここで、K と E の関係からポアソン比を求めたところ $\nu=0.18$ となり、ガスケットのポアソン比は 0.33 以上であると考えられることからこれは妥当ではないといえる。そこで、 $\nu=0.33$  としてヤング率を求めたところ  $E=1234[\text{MPa}]$ となった。これは試験ガスケットの圧縮復元特性から得られた除荷時のヤング率 1244[MPa]とよく一致する。

高温時におけるひずみを評価するためには、高温試験開始時までには生じたひずみ  $\varepsilon_{s0}$  を除けばよいから、高温時のひずみを  $\varepsilon^*$  とすれば、

$$\varepsilon^* = \varepsilon_t - \varepsilon_{s0} \quad (9)$$

となる。 $\varepsilon^*$  を図 6 に示すが、 $\varepsilon^*$  は体積変化とは無関係な粘弾性成分であり、これをガスケットクリープひずみから引けば体積変化を表すことができる。このようにガスケットのクリープ特性を 3次元粘弾性モデルで評価すると、一定のひずみに収束する粘弾性成分と時間の経過とともに増加する体積変化成分に分離することができる。

ガスケットの寿命は、ガスケットが劣化し、内部流体が漏洩するまでの期間を指す<sup>(5)</sup>が、漏洩はガスケットのクリープにより引き起こされるため、時間の経過とともに増加するガスケットひずみの体積変化成分でガスケットの劣化を評価できれば、ガスケットの寿命を推定できると考えられる。

このように、非石綿ガスケットの高温クリープ特性の評価に 3次元粘弾性モデルを適用した場合、従来のモデルに比べ、簡素なモデルでクリープ特性をよく評価できるうえ、ガスケットひずみを粘弾性成分と体積変化成分に分けて評価できることから、単軸粘弾性モデルに比べ 3次元粘弾性モデルの方がガスケットのクリープ特性の評価に対して有用性があるといえる。

#### 5. 結言

- (1) フランジ継手用ガスケットの高温クリープ特性を 3次元粘弾性モデルで評価したところ、従来使用されてきた単軸の粘弾性モデルに比べ、簡素なモデルでクリープ特性をよく表すことができた。
- (2) 実験値との比較から、3次元粘弾性モデルではガスケットのクリープ特性を一定のひずみに収束する粘弾性成分と体積変化成分に分けて評価することができる。

#### 参考文献

- (1) 小林・川守, 山梨講演会講演論文集, (2002), 71-72
- (2) 高木・他 3 名, 日本機械学会論文集, 73-728, C(2007), 289-296
- (3) 山中・西田, バルカー技術誌, Summer 2005-10, 8-11, 日本バルカー工業(株)
- (4) W. フリュージェ, 粘弾性学, (1973), 106-123, 培風館
- (5) 重留, 日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス, (2007), 29-31