

2008J6002A

厚生労働科学研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

非石綿ガスケットの高温密封性能の評価と試験方法の開発

平成20年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 辻 裕一

平成21(2009)年 4月

目 次

I. 総括研究報告	
非石綿ガスケットの高温密封性能の評価と試験方法の開発	1
辻 裕一	
II. 分担研究報告	
1. 高温ガスケット密封性能試験法の検討・試験法の規格化	6
辻 裕一	
2. ガスケットの非線形有限要素解析・ガスケット係数の指針化	10
本田 尚	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	15
IV. 研究成果の刊行物・別刷	17

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総括研究報告書

非石綿ガスケットの高温密封性能の評価と試験方法の開発

主任研究者 辻 裕一 東京電機大学工学部教授

研究要旨 本研究は、非石綿ガスケットへの代替化促進のため、プラント運転時の高温における長期間のガスケットの性能・品質に関する信頼性データの収集・提供を目的とする。研究計画最終年度である平成20年度は、開発してきたガスケット高温密封性能試験方法の規格原案を作成し規格制定手続きを進めた。試験方法原案に基づき各種の高温用非石綿シートガスケットの120℃、180℃、260℃における高温密封性能データを系統的に収集した。非石綿ガスケットの寿命予測に関しては、非石綿ガスケットの3次元粘弾性モデルから求めたクリープ特性式を有限要素モデルに適用することにより、ガスケットの寿命を予測できる可能性を示した。また、ガスケットの接面に発生するボイドの成長の観察結果に基づき、パーコレーション理論を接面漏洩特性の評価に適用することによりガスケットの高温寿命を予測できることを示した。

分担研究者氏名・所属機関名及び所属機関における職名

本田 尚・独立行政法人労働安全衛生総合研究所・産業安全研究所上席研究員

A. 研究目的

各種プラントの配管継手や機器フランジに多用されているガスケットは、高温でのアプリケーションに関して代替化が困難との理由から石綿含有製品製造等の禁止の対象から除外されていた。現時点では代替化の可能性や代替可能な時期が特定され、代替製品によるガスケットの完全非石綿化は最終段階にある。非石綿ガスケットは、プラント運転時における高温環境下での性能および品質の評価が統一されておらず、石綿ガスケットの代替化の障害となっていた。非石綿ガスケットへの代替化促進の鍵は、プラント運転時の高温における長期間のガスケットの性能・品質に関する信頼性データの収集・提供である。

本研究では、標準的な高温ガスケット密封性能試験法の開発・規格化を進める。高温密封性能試験結果を利用し、非石綿ガスケットを用いたフランジ継手からの微少漏洩管理を目標に、最適なガスケット係数の

表示方法を非線形有限要素解析に基づき検討する。この成果に基づき、非石綿ガスケットの設計係数の決定、代替品選択のための指針の提供を中立的機関の立場から行う。さらに、統一的試験基準に基づく指針が提供されれば、ガスケットメーカーにとっても性能目標となり、非石綿製品の開発を促す効果が期待される。

B. 研究方法

本研究は3年計画で、東京電機大学、および独立行政法人労働安全衛生総合研究所で実施する。計画の最終年度である平成20年度は、次に示す方法で研究を実施する。

まず東京電機大学では、高温ガスケット密封性能試験方法として、JIS B 2490 ガスケット試験法を高温に拡張した試験方法を開発してきたが、日本高圧力技術協会規格として原案を作成し規格制定手続きを進める。本試験法は、常温における組立て/高温でのガスケットのエージングおよび外乱/シャットダウンという実際のプラント運転状況を想定しているところに特徴がある。昨年度までの研究において、外乱の条件設定に関して検討をおこない、試験シーケンスを確定させている。本試験方法に基づき、

代替化に課題が多く残されているジョイントシートガスケットに関して、ガスケットメーカー各社の代表的な高温用非石綿シートガスケットの試験を数段階の試験ガスケット温度において実施して高温密封性能データを系統的に収集する。

産業安全研究所では、高温下における非石綿ガスケットの寿命予測を目的に、高温クリープ特性を3次元粘弾性モデルにより評価し、その有用性について検討してきた。本年度は非石綿ジョイントシートガスケットの寿命予測を目的として、1) 非石綿ジョイントシートガスケットの常温クリープの評価、2) 非石綿ジョイントシートガスケットの高温接面漏洩特性の評価を行なう。1) に関しては、4 inch フランジを用いて実施するクリープ試験により得られたガスケットのクリープ挙動を3次元粘弾性モデル及び有限要素解析を用いて評価する。さらに、非石綿ガスケットの設計係数を決定するための非線形有限要素解析モデルを作成する。フランジ継手中でガスケットを長時間使用する場合に、ガスケットのクリープリラクゼーションによりボルト軸力が低下し、内部流体漏れにつながることに寿命を評価する。2) に関しては、超音波映像装置(SAT)を使用し、2 inch フランジ試験体におけるガスケットとフランジの接触状態を観察する。180℃の高温環境において、非石綿ガスケット接面に発生するボイドの成長を明らかにし、パーコレーション理論に基づきガスケットの高温寿命の予測方法を提案する。

(倫理面への配慮)

本研究の実施によって、生体及び環境へ影響を及ぼすことは無いので、倫理面への問題は無いと考える。

C. 研究結果

1: 高温ガスケット密封性能試験法の検討・試験法の規格化

開発してきた高温ガスケット試験方法は、日本高圧力技術協会規格 HPIS Z 105「高温における管フランジ用ガスケットの密封特性試験方法」として制定手続きを進めてい

る。

HPIS Z 105 原案のガスケット高温密封性能試験方法に基づき、高温用非石綿シートガスケットの120℃、180℃、260℃における高温密封性能データを系統的に収集した。最高使用温度が260℃以上の高温用非石綿シートガスケットを国内のガスケットメーカー4社の製品から選び、供試ガスケットとした。

ROTTにおける漏洩レベルは標準的な密封性能を示している。規格案に従い2回の繰返し試験により漏洩レベルの再現性も確認している。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では漏れ量には大きな変化が見られず $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 未満のシール性能が保たれている。エージング中及び外乱においても基本漏れ量が石鹸膜流量計の測定限界 $2 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下になる場合があった。post-ROTTでは、漏れ量が全て石鹸膜流量計の測定限界以下となっており、高温でのエージングによる密封性能の劣化は認められない。

2: ガスケットの非線形有限要素解析・ガスケット係数の指針化

非石綿ジョイントシートガスケットの常温クリープに関しては、クリープ試験において締付完了後のひずみ0.022は時間の経過に従い増加し90時間後に0.03となった一方で、ガスケット応力は38 MPaから34 MPaに減少した。

上記の結果から得られる非石綿ガスケットのクリープ特性式を有限要素モデルに適用した。解析コードはABAQUSである。試験装置の1/16モデルを8節点6面体要素で、要素数8189、節点数10475に分割した。解析ステップは2段階から成り、最初のステップでは、ボルト荷重としてガスケットが目標締付け圧に到達する荷重を与え、次のステップでは、最初のステップ終了時でボルトの変位を固定し90時間経過させた。3次元粘弾性モデル及び有限要素解析により求められたガスケットのクリープ挙動を比較した。

非石綿ジョイントシートガスケットの高

温接面漏洩特性の評価に関しては、SAT で得られた非石綿ガスケット接面の観察結果より、時間経過に伴い接面が分離していることを示す領域が増加している。すなわちガスケットは高温に曝されることでボイドを形成すると考えられる。また、このボイドはガスケットの外径近傍で多く観察され、ガスケットの内径近傍では少ない。

D. 考察

1：高温ガスケット密封性能試験法の検討・試験法の規格化

本研究で取り上げた試験ガスケットと試験温度の組合せの全条件において、エージング/外乱/post-ROTT において 10^{-4} Pa・m³/s 未満のシール性能が保たれている。これは、実プラントの検査で実施されている気密試験を合格できる性能である。

ガスケットの種類によっては高温試験後のガスケット内外径の変化が非常に大きい。試験後にガスケット厚さが減少しており、エージング中に時間経過に伴いガスケット厚さの減少の進行が認められた。高温ガスケット試験結果からは密封性能の低下は認められなかったが、フランジ継手中で高温環境においてガスケットが長期使用される場合には、ガスケットのクリープ/リラクゼーションによるガスケット締付圧の低下が漏洩事故に結びつく恐れがあるため注意が必要である。

ガスケットメーカー各社の代表的な高温用非石綿シートガスケットの高温密封性能を系統的に収集したが、今後、開発される新しい形式・材質の非石綿ガスケットの高温ガスケット試験を実施するにあたり、ガスケットの高温変形挙動も把握して、高温密封性能のデータベースを充実させていく必要がある。

2：ガスケットの非線形有限要素解析・ガスケット係数の指針化

非石綿ジョイントシートガスケットの常温クリープ試験結果に対し、3次元粘弾性モデルを適用し、体積弾性率 K_g 、ヤング率 E_g 、粘性率 μ_g を決定した。3次元粘弾

性モデルにより求められたガスケットのクリープ挙動と有限要素解析によるものを比較するとよく一致し、試験結果ともよく一致する。3次元粘弾性モデルでガスケットのクリープ挙動を評価することは妥当である。有限要素解析によりガスケット締付圧の挙動を求めたところ、締付圧は時間とともに減少していることから、内部流体の漏洩の可能性が増すと見える。ガスケットの寿命を内部流体の漏洩と定義すれば、締付圧の低下から非石綿ガスケットの寿命予測が可能である。フランジ設計に使用するガスケット係数に、本研究で求めた粘性率のようなクリープ/リラクゼーションを考慮できる粘性係数を加えるのがよい。

ガスケットの漏洩特性の評価にパーコーレーション理論を適用した。漏洩パスの形成は、ボイドの面積分率の最も小さい領域に支配される。ガスケット内径付近の面積分率の増加率から、ボイドの面積分率が二次元の連続系における臨界浸透面積分率 $p_c = 0.42$ に達するまでの時間として推定したガスケットの高温寿命は 575 時間である。

E. 結論

平成20年度の研究により、以下の結論を得た。

JIS ガスケット試験法を拡張した高温ガスケット試験法 (HPIS 高温ガスケット試験法) を開発し、規格原案に基づき規格制定手続きを進めた。ガスケットメーカー各社の代表的な高温用非石綿シートガスケットの高温密封性能試験を数段階の試験ガスケット温度において実施して高温密封性能データを系統的に収集した。

ガスケットの常温クリープ挙動は3次元粘弾性モデルにより、精度よく評価できる。また、3次元粘弾性モデルにより得られたひずみ-時間関係を用いて有限要素解析を行うことで、ガスケットの寿命を予測できる可能性を示した。高温環境下におかれたフランジと非石綿ジョイントシートガスケットの接面には、ボイドが形成されること

が確認された。また、ガスケットの高温寿命が二次元の連続系のパーコレーションにおける臨界浸透面性分率から予測できることを示した。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表

山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一: 非石綿シートガスケットの常温・高温シール性能の評価, 労働安全衛生研究, Vol.1, No.3, 197-203, 2008.

金田 忍, 辻 裕一: フランジ継手への塑性域締結の適用—内圧作用時のボルト軸力の挙動—, 圧力技術, Vol.46, No.6, 370-377, 2008.

金田 忍, 辻 裕一: フランジ継手への塑性域締結の適用によるボルトの小径化, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.742, 909-914, 2008.

辻 裕一: 新規制定された JIS B 2251「フランジ継手締付け方法」, バルブ技報, Vol.23, No.2, 138-145, 2008.

2. 学会発表

H. Tsuji, Y. Terui: Application of Bolted Flange Joint Assembly Guidelines HPIS Z103 TR to ePTFE Sheet Gasket, Proc. ASME PVP 2008 Conference, PVP2008-61328 [1-7], 2008.

S. Kaneda, H. Tsuji: Application of Plastic Region Tightening Bolt to Flange Joint Assembly (Downsizing of Flange Joint and Behavior of Bolt Force under Internal Pressure), Proc. ASME PVP 2008 Conference, PVP2008-61454 [1-7], 2008.

A. Yamaguchi, H. Tsuji: Evaluation of Creep Properties of Nonasbestos Joint

Sheet Gasket at Elevated Temperature by Three-dimensional Viscoelasticity Model, Proc. ASME PVP 2008 Conference, PVP2008-61468 [1-6], 2008.

金田 忍, 辻 裕一: 塑性域締付けされた大口径フランジ継手の挙動, 日本高圧力技術協会, 平成20年度秋季講演会・講演概要集, 22-23, 2008.

萩原正洋, 山口篤志, 辻 裕一, 本田 尚: 非石綿ジョイントシートガスケットの高温寿命評価方法の検討, 山梨講演会講演論文集, No.080-4, 141-142, 2008.

長谷川 聡, 山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一: 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 (非石綿シートガスケットの J-EHOT 試験), 山梨講演会講演論文集, No.080-4, 143-144, 2008.

渡辺将広, 山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一: フランジ継手用ガスケットの高温粘弾性特性の評価 (常温におけるボルト軸力を考慮した場合), 山梨講演会講演論文集, No.080-4, 145-146, 2008.

清水良保, 金田 忍, 辻 裕一: フランジ継手への塑性域締結の適用 (大口径フランジ継手の締付け), 山梨講演会講演論文集, No.080-4, 153-154, 2008.

永田 聡, 金田 忍, 辻 裕一, 澤 俊行: 管フランジ継手用ボルトの塑性域締結シミュレーション, 山梨講演会講演論文集, No.080-4, 155-156, 2008.

照井雄貴, 辻 裕一: JIS フランジ継手締付け方法の適用範囲拡大 (延伸 PTFE ガスケットへの適用), M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集 (CD-ROM), No.08-06, OS0503, 2008.

金田 忍, 清水良保, 辻 裕一: フランジ継手への塑性域締結の適用—大口径フランジ継手の場合, M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集 (CD-ROM), No.08-06, OS0504, 2008.

山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一: 3次元粘弾性モデルによるガスケットのクリープ/リラクゼーション特性の評価, M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集 (CD-ROM), No.08-06, OS0505, 2008.

辻 裕一, 萩原正洋, 山口篤志, 本田 尚: パーコレーション理論によるガスケットの高温接面漏洩特性の評価, M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集 (CD-ROM), No.08-06, OS0506, 2008.

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

高温ガスケット密封性能試験法の検討・試験法の規格化

主任研究者 辻 裕一 東京電機大学工学部教授

研究要旨 本研究では、高温ガスケット密封性能試験方法として、JIS ガスケット試験法を高温に拡張した試験方法を開発し、HPIS 規格原案を作成し規格制定手続きを進めている。常温における組立て/高温でのガスケットのエージングおよび外乱/シャットダウンという実際のプラント運転状況を想定しているところに特徴がある。HPIS 高温ガスケット密封性能試験方法に基づき各種の非石綿シートガスケットの高温密封性能のデータベース化を進めた。

A. 研究目的

各種プラントの配管継手や機器フランジに多用されているガスケットは、高温でのアプリケーションに関して代替化が困難との理由から石綿含有製品製造等の禁止の対象から除外されていた。現時点では代替化の可能性や代替可能な時期が特定され、代替製品によるガスケットの完全非石綿化は最終段階にある。非石綿ガスケットは、プラント運転時における高温環境下での性能および品質の評価が統一されておらず、石綿ガスケットの代替化の障害となっていた。非石綿ガスケットへの代替化促進の鍵は、プラント運転時の高温における長期間のガスケットの性能・品質に関する信頼性データの収集・提供である。

本研究では、標準的な高温ガスケット密封性能試験法の開発・規格化を進めることを目的とする。統一的試験基準に基づく指針が提供されることは、ガスケットメーカーにとっても性能目標となり、非石綿製品の開発を促す効果が期待される。

B. 研究方法

常温のガスケット密封性能試験である JIS B 2490 ガスケット試験法では、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れ量 L_0 (Pa・m³/s)

をガスケット有効締付圧 σ_a (N/mm²) と圧縮変形量 δ_a (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、 L (Pa・m³/s) は漏れ量、 k はガスケット形状係数であり、次式で表される。

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

本研究では、JIS ガスケット試験法を高温に拡張した高温ガスケット試験方法を開発し、日本高圧力技術協会規格 HPIS Z 105 「高温における管フランジ用ガスケットの密封特性試験方法」として制定手続きを進めている。高温ガスケット試験では、常温特性を ROTT (pre-ROTT)、高温特性を HOTT により評価し、その後、常温に戻し

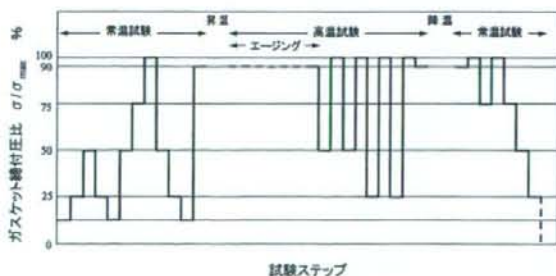


図1 ガスケットの負荷シーケンス

表1 試験ガスケットと試験温度の一覧

ガスケット型式/メーカー	材質	試験ガスケット温度		
		120℃	180℃	260℃
シートガスケット (A社製)	主に黒鉛とPTFEからなり、耐熱性・耐薬品性に優れる	◎	◎	◎
ジョイントシートガスケット (B社製)	膨張黒鉛を主材料にアラミド繊維で補強	◎	◎	◎
ジョイントシートガスケット (C社製)	膨張黒鉛を主体にアラミド繊維で補強バインダーに耐油性合成ゴムを使用	◎	◎	◎
シートガスケット (D社製)	延伸PTFE、強度と柔軟性に優れる	—	◎	—

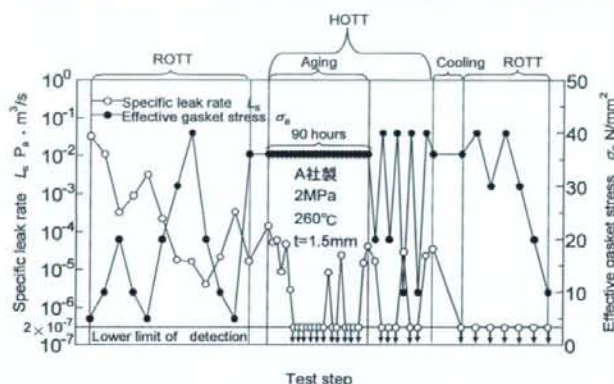


図2 試験ステップ - 基本漏れ量 L_s , 有効締付圧 σ_e 。
(A社製シートガスケット, 260℃,)

再度 ROTT (post-ROTT) を行う。図1に昨年度までの研究に基づき確定した高温ガスケット試験方法のガスケット締付圧の負荷シーケンスを示す。負荷シーケンスの前半の pre-ROTT は、HPIS ガスケット試験法のシーケンスに相当する。ガスケットを常温状態で Pre-ROTT に従って負荷する。その後、ガスケットを試験温度まで昇温させ、試験内圧一定で90時間以上放置(エージング)する。エージング終了後、高温のまま外乱に相当する50%及び25%の2段階のガスケット締付圧比の除荷・負荷過程を各2回繰り返す。最後にガスケット温度を常温に戻し、除荷過程 Post-ROTT を行う。

この試験法は、常温における組立て/高温でのガスケットのエージングおよび外乱

ノシャットダウンという実際のプラント運転状況を想定しているところに特徴がある。高温でのエージング前後のシール特性の変化を常温試験結果の比較により確認できる。

C. 研究結果

平成18年当時に石綿代替化が困難と判断されポジティブリストに掲載された製品の内、使用箇所が最も多い製品は、100℃を超えて使用されている石綿ジョイントシートガスケットである。様々なタイプの非石綿ジョイントシートガスケットが開発されているが、使用実績が十分でないことと、100℃を超えての使用は1年以内の交換が推奨されているなど現時点でも完全に代替化が可能とはいえない状況である。

そこで HPIS Z 105 原案のガスケット高温密封性能試験方法に基づき、ガスケットメーカー各社の代表的な高温用非石綿シートガスケットの試験を数段階の試験ガスケット温度において実施して高温密封性能データを系統的に収集する。最高使用温度が260℃以上の高温用非石綿シートガスケットを国内のガスケットメーカー4社の製品から選び、供試ガスケットとした。表1に試験ガスケットと試験温度の一覧を示す。D社のガスケットのみ最高使用温度が214℃である。試験ガスケットは呼び径がJPI 80Aクラス150用であり、厚さ1.5mmである。試験媒体はヘリウムガスである。

図2にA社製シートガスケットを用いたHPIS高温ガスケット試験の結果を縦軸に基本漏れ量を対数として、横軸に時間経過(Test step)として示す。ROTTにおける漏洩レベルは標準的な密封性能を示している。規格案に従い2回の繰返し試験により漏洩

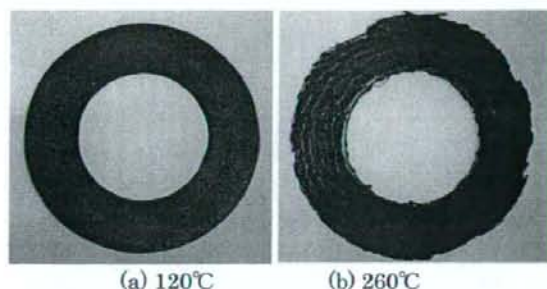


図3 試験後のシートガスケット (C社製)

レベルの再現性も確認している。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では漏れ量には大きな変化が見られず $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 未満のシール性能が保たれている。エージング中及び外乱において漏れ量が石鹸膜流量計の測定限界以下になる場合があった。測定限界は基本漏れ量 $2 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ に相当する。post-ROTTでは、漏れ量が全て石鹸膜流量計の測定限界以下となっており、高温でのエージングによる密封性能の劣化は認められない。

D. 考察

本研究で取り上げた試験ガスケットと試験温度の組合せの全条件において、エージング/外乱/post-ROTTにおいて $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 未満のシール性能が保たれている。これは、実プラントの検査で実施されている気密試験を合格できる性能である。

図3にC社製非石綿ジョイントシートガスケットの120°Cおよび260°Cにおける高温ガスケット試験後のガスケットの写真を示す。260°C試験後のガスケット内外径の変化が非常に大きい。試験後にガスケット厚さが減少しており、エージング中にも時間経過に伴いガスケット厚さの減少が進行している。高温ガスケット試験結果からは密封性能の低下は認められなかったが、フランジ継手中で高温環境においてガスケットが長期使用される場合には、ガスケットのクリープ/リラクゼーションによるガスケット締付け圧の低下が漏洩事故に結びつく恐れがあるため注意が必要である。

今後、開発される新しい形式・材質の非石綿ガスケットの高温ガスケット試験を実施するにあたり、ガスケットの高温変形挙動も把握して、高温密封性能のデータベースを充実させていく必要がある。

E. 結論

フランジ継手用ガスケットの高温密封性能試験方法を開発し規格化を進めると共に、系統的に高温ガスケット試験を実施した。以下に得られた成果を示す。

- (1) JIS ガスケット試験法を拡張した高温ガスケット試験法 (HPIS 高温ガスケット試験法) を開発し、規格原案に基づき規格制定手続きを進めた。
- (2) ガスケットメーカ各社の代表的な高温用非石綿シートガスケットの高温密封性能試験を数段階の試験ガスケット温度において実施して高温密封性能データを系統的に収集した。

F. 研究発表

1. 論文発表

山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一: 非石綿シートガスケットの常温・高温シール性能の評価, 労働安全衛生研究, Vol.1, No.3, 197-203, 2008.

金田 忍, 辻 裕一: フランジ継手への塑性域締結の適用 一内圧作用時のボルト軸力の挙動一, 圧力技術, Vol.46, No.6, 370-377, 2008.

金田 忍, 辻 裕一: フランジ継手への塑性域締結の適用によるボルトの小径化, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.742, 909-914, 2008.

辻 裕一: 新規制定された JIS B 2251 「フランジ継手締付け方法」, パルプ技報, Vol.23, No.2, 138-145, 2008.

2. 学会発表

H. Tsuji, Y. Terui: Application of Bolted Flange Joint Assembly Guidelines HPIS

Z103 TR to ePTFE Sheet Gasket, Proc. ASME PVP 2008 Conference, PVP2008-61328 [1-7], 2008.

S. Kaneda, H. Tsuji: Application of Plastic Region Tightening Bolt to Flange Joint Assembly (Downsizing of Flange Joint and Behavior of Bolt Force under Internal Pressure), Proc. ASME PVP 2008 Conference, PVP2008-61454 [1-7], 2008.

A. Yamaguchi, H. Tsuji: Evaluation of Creep Properties of Nonasbestos Joint Sheet Gasket at Elevated Temperature by Three-dimensional Viscoelasticity Model, Proc. ASME PVP 2008 Conference, PVP2008-61468 [1-6], 2008.

金田 忍, 辻 裕一: 塑性域締付けされた大口径フランジ継手の挙動, 日本高圧力技術協会, 平成20年度秋季講演会・講演概要集, 22-23, 2008.

長谷川 聡, 山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一: 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 (非石綿シートガスケットの J-EHOT 試験), 山梨講演会講演論文集, No.080-4, 143-144, 2008.

清水良保, 金田 忍, 辻 裕一: フランジ継手への塑性域締結の適用 (大口径フランジ継手の締付け), 山梨講演会講演論文集, No.080-4, 153-154, 2008.

永田 聡, 金田 忍, 辻 裕一, 澤 俊行: 管フランジ継手用ボルトの塑性域締結シミュレーション, 山梨講演会講演論文集, No.080-4, 155-156, 2008.

照井雄貴, 辻 裕一: JIS フランジ継手締付け方法の適用範囲拡大 (延伸 PTFE ガスケットへの適用), M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集, No.08-06, OS0503, 2008.

金田 忍, 清水良保, 辻 裕一: フランジ継手への塑性域締結の適用 - 大口径フランジ継手の場合, M&M2008 材料力学カンファ

レンス講演論文集, No.08-06, OS0504, 2008.

G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
分担研究報告書

ガスケットの非線形有限要素解析・ガスケット係数の指針化

分担研究者 本田 尚

独立行政法人労働安全衛生総合研究所・産業安全研究所上席研究員

研究要旨 非石綿ガスケットの寿命をガスケットのクリープ特性から予測できる可能性がある。そこで、長時間にわたるガスケットの常温クリープ特性を実験的に明らかにし、提案する3次元粘弾性モデル及び有限要素解析からガスケットの寿命予測方法について検討している。高温下におけるガスケットの寿命の評価においてはガスケットとフランジの接触面を可視化し、ガスケットの漏洩確率及び高温寿命を予測した。

A. 研究目的

既存化学工業施設の設備の配管継手には石綿ガスケットが多用されてきたが、2006年9月に改正された労働安全衛生法の施行により、石綿を0.1%を超えて含有する製品の製造/使用は全面禁止となった。これを受け、非石綿ガスケットがここ数年で多数生産されてきているが、高温下における使用寿命の評価方法や寿命予測方法が確立されておらず、ガスケットユーザが経験的に交換作業を行っているのが現状である。そこで本研究では、非石綿ジョイントシートガスケットの寿命予測を目的に、1) 非石綿ジョイントシートガスケットの常温クリープの評価、2) 非石綿ジョイントシートガスケットの高温接面漏洩特性の評価を行なった。

B. 研究方法

1) 非石綿ガスケットの常温クリープの評価
クリープ試験は、図1に示すような試験装置を用いて行う。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、ガスケットは外径 180mm、内径 116mm、厚さ 3mm の非石綿ジョイントシートガスケットを用いる。試験開始から 90 時間までのガスケットの変位及びボル

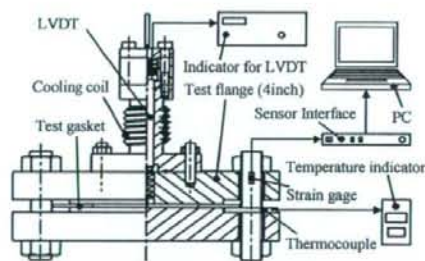


図1 クリープ試験装置

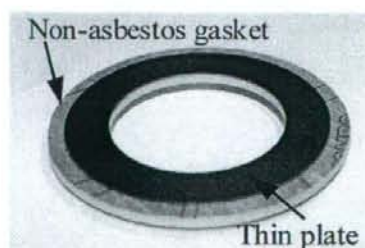


図2 非石綿ガスケット/薄板試験片

ト軸力を測定する。クリープ試験により得られたガスケットのクリープ挙動を3次元粘弾性モデル及び有限要素解析を用いて評価する。

2) 非石棉ジョイントシートガスケットの高温接合面漏洩特性の評価

超音波映像装置（以下、SAT）を使用し、ガスケットとフランジの接触状態を観察した。図2に示すように非石棉ガスケットをSPCC薄板で挟み、さらに、2 inch フランジに挟んで締付圧 40MPa を与える。その後、フランジ試験体を 180℃まで加熱し、時間経過における非石棉ガスケット/薄板の接触面を SAT により観察する。

C. 研究結果

1) 非石棉ジョイントシートガスケットの常温クリープ試験結果

図3に非石棉ジョイントシートガスケットの圧縮クリープ試験の結果を示す。締付完了後のひずみは 0.022 であった。その後、ひずみは時間の経過とともに増加しており、試験終了時のひずみは 0.03 であった。また、ガスケット応力は、試験開始から 90 時間で約 34MPa まで減少した。

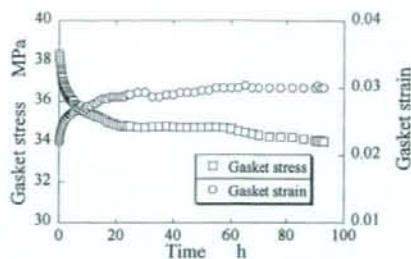


図3 常温クリープ試験結果

2) 非石棉ジョイントシートガスケットの高温接合面漏洩特性の観察結果

図4にSATで得られた非石棉ガスケット/薄板の接触面を示す。時間経過に伴い、黒い領域が増えている。この黒い領域は非石棉ガスケットと SPCC 薄板が分離していることを示していることから、ガスケットは高温に曝されることでポイドを形成すると考えられる。また、このポイドはガスケットの外径近傍で多く観察され、ガスケットの内径近傍ではほとんど観察されない。

D. 考察

1) 3次元粘弾性モデル及び有限要素解析による常温クリープの評価

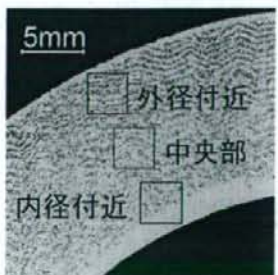
図5に本研究で使用した3次元粘弾性モデルを示す。図中の K_g , E_g , μ_g は、それぞれ体積弾性率、ヤング率、粘性率である。ガスケットのヤング率 E_g を測定したところ、 $E_g=1.19$ GPa であった。ポアソン比 ν_g を 0.33 として K_g を求めたところ、 $K_g=1.17$ GPa であり、粘性率 μ_g は実験結果の収束する時間と合わせたところ、 $\mu_g=5.8$ GPa·h と



(a) 24 時間後



(b) 48 時間後



(c) 96 時間後

図4 非石棉ガスケット/薄板の境界面の観察結果

なった。ここで図3に示すガスケット応力を最小二乗近似しところ、以下の式となった。

$$\sigma_g = -34.37 - 3.86 \exp(-0.113 \cdot t) \quad (1)$$

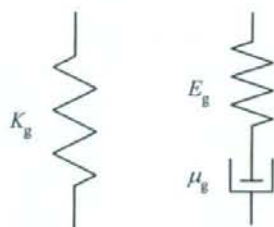
K , μ , E 及び式(1)で求められた値を以下の式に代入することで、非石綿ガスケットのクリーブ特性を表すことができる。

$$\varepsilon_g = \frac{-\sigma_g}{K} \left[1 - \frac{2}{3K E + 2} \exp\left(\frac{-3K}{3K(\mu E) + 2\mu} t\right) \right] \quad (2)$$

式(2)により求められたクリーブ特性を図6に示すような有限要素モデルに適用した。解析コードはABAQUSである。試験装置の1/16モデルを8節点6面体要素で、要素数8189、節点数10475に分割した。フランジ、ボルト、ナットのヤング率は200GPa、ポアソン比は0.33とした。ガスケットのヤング率及びポアソン比は、3次元粘弾性モデルと同様の値を使用した。ナットとボルトの接触面はねじ部を考慮したねじ結合として与えている。ナット-フランジの接触面及びフランジ-ガスケットの接触面は $\mu_b=1.0$ とした。解析ステップは2段階に分けている。最初のステップはボルト荷重としてガスケットが目標締付け圧に到達する荷重を与える。次のステップでは、最初のステップ終了時でボルトの変位を固定し、90時間経過させた。

図7に3次元粘弾性モデル及び有限要素解析により求められたガスケットのクリーブ挙動を示す。いずれのクリーブ挙動も試験結果とよく一致する。このことから、3次元粘弾性モデルでガスケットのクリーブを評価することは妥当性がある。

図8に有限要素解析により求められたガスケットの締付け圧の挙動を示す。締付け圧は時間とともに減少していることから、内部流体の漏洩の可能性が上がっているといえる。一般的にガスケットの寿命は内部流体の漏洩が確認された時点とされていることから、締付け圧の低下から非石綿ガスケットの寿命予測が可能であると言える。なお、ガスケットは軸力が低下することから新ガスケットの係数の決定にはリラク

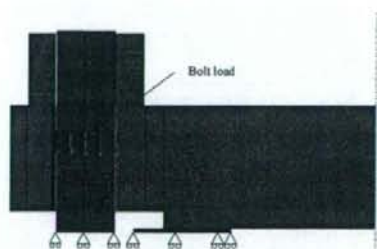


(a) 静水圧成分 (b) 偏差成分

図5 3次元粘弾性モデル



(a) 試験装置の1/16モデル



(b) 変位境界条件

図6 有限要素モデル

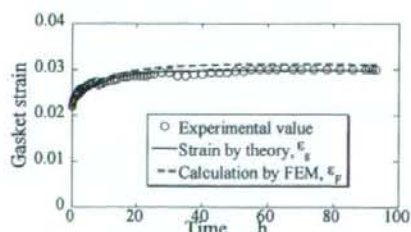


図7 ガスケットのクリーブ挙動

ゼーションを考慮して行う必要がある。

2) 非石綿ジョイントシートガスケットの高温接面漏洩特性の評価

つながりに支配される物理現象に適用されるパーコレーション理論をガスケットの漏洩特性の評価に適用する。二次元の連続系における臨界浸透面積分率は $p_c = 0.42$ とされている。すなわち、ガスケットの接面漏洩を連続系のパーコレーションと見なすと、ボイドがランダムに生じる場合に、ボイドの存在する面積の割合が 42% に達するとボイドが無限に大きなクラスターを形成し、漏洩パスが形成される。この状態をガスケットの寿命と考えることができる。そこで、ガスケットの外径近傍、ガスケットの内径と外径の中央部、ガスケットの外径近傍に対して、8 連結以上の画素のボイドの面積分率を求めた。

図 9 にボイドの面積分率と時間の関係を示す。各領域において、時間経過に応じてボイドの面積分率が増加している。ボイドの面積分率の増加率が最も大きい領域は、ガスケットの外径近傍で、増加率は 0.196%/hr である。また、最も小さい領域は、ガスケットの内径近傍で、増加率は 0.073%/hr である。パーコレーションモデルから予測される漏洩パスの形成には、ボイドの面積分率の最も小さい領域を配慮すればよい。ガスケットの内径付近部を考慮すると試験ガスケットの高温寿命は、外挿してボイドの面積分率が 42% に達するまでの時間となり、575 時間である。

E. 結論

- (1) 常温におけるガスケットクリープは 3 次元粘弾性モデルにより、精度よく評価できる。また、3 次元粘弾性モデルにより得られたひずみ-時間関係を用いて有限要素解析を行うことで、ガスケットの寿命を予測できる可能性を示した。
- (2) 高温環境下におかれたフランジと非石綿ジョイントシートガスケットの接面には、ボイドが形成されることが確認された。ガスケットの高温寿命が二次元

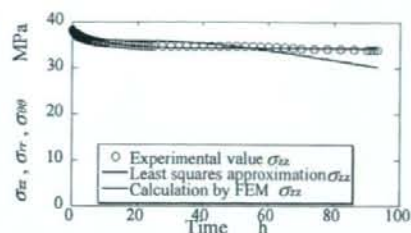


図 8 ガスケットの締付圧

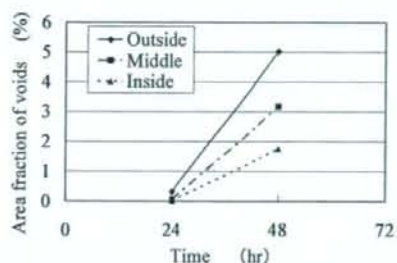


図 9 ボイドの面積率と高温曝露時間の関係

の連続系のパーコレーションにおける臨界浸透面積分率から予測できることを示した。

F. 研究発表

1. 論文発表
なし
2. 学会発表

山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一: 3 次元粘弾性モデルによるガスケットのクリープ/リラクゼーション特性の評価, M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集 (CD-ROM), No.08-06, OS0505, 2008.

辻 裕一, 萩原正洋, 山口篤志, 本田 尚: パーコレーション理論によるガスケットの高温接面漏洩特性の評価, M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集 (CD-ROM), No.08-06, OS0506, 2008.

萩原正洋, 山口篤志, 辻 裕一, 本田 尚: 非石綿ジョイントシートガスケットの高温

寿命評価方法の検討，山梨講演会講演論文集，No.080-4，141-142，2008.

渡辺将広，山口篤志，本田 尚，辻 裕一：
フランジ継手用ガスケットの高温粘弾性特性の評価（常温におけるボルト軸力を考慮した場合），山梨講演会講演論文集，No.080-4，145-146，2008.

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む。）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

研究成果の刊行に関する一覧表

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一	非石棉シートガスケットの常温・高温シール性能の評価	労働安全衛生研究	Vol.1, No.3	197-203	2008
金田 忍, 辻 裕一	フランジ継手への塑性域締結の適用 —内圧作用時のボルト軸力の挙動—	圧力技術	Vol.46, No.6	370-377	2008
金田 忍, 辻 裕一	フランジ継手への塑性域締結の適用によるボルトの小径化	日本機械学会 論文集A編	Vol.74, No.742	909-914	2008
辻 裕一	新規制定された JIS B 2251「フランジ継手締付け方法」	バルブ技報	Vol.23, No.2	138-145	2008
H. Tsuji, Y. Terui	Application of Bolted Flange Joint Assembly Guidelines HPIS Z103 TR to ePTFE Sheet Gasket	Proc. ASME PVP 2008 Conference	PVP2008- 61328	1-7	2008
S. Kaneda, H. Tsuji	Application of Plastic Region Tightening Bolt to Flange Joint Assembly (Downsizing of Flange Joint and Behavior of Bolt Force under Internal Pressure)	Proc. ASME PVP 2008 Conference	PVP2008- 61454	1-7	2008
A. Yamaguchi, H. Tsuji	Evaluation of Creep Properties of Nonasbestos Joint Sheet Gasket at Elevated Temperature by Three-dimensional Viscoelasticity Model	Proc. ASME PVP 2008 Conference	PVP2008- 61468	1-6	2008
金田 忍, 辻 裕一	塑性域締付けされた大口径フランジ継手の挙動	日本高圧力技術協会,平成20年度秋季講演会・講演概要集		22-23	2008
萩原正洋, 山口篤志, 辻 裕一, 本田 尚	非石棉ジョイントシートの高温寿命評価方法の検討	山梨講演会講演論文集	No.080-4	141-142	2008
長谷川 聡, 山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一	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(非石棉シートガスケットのJ-EHOT試験)	山梨講演会講演論文集	No.080-4	143-144	2008

渡辺将広, 山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一	フランジ継手用ガスケットの高温粘弾性特性の評価(常温におけるボルト軸力低下を考慮した場合)	山梨講演会講演論文集	No.080-4	145-146	2008
清水良保, 金田 忍, 辻 裕一	フランジ継手への塑性域締結の適用(大口径フランジ継手の締付け),	山梨講演会講演論文集	No.080-4	153-154	2008
永田 聡, 金田 忍, 辻 裕一, 澤 俊行	管フランジ継手用ボルトの塑性域締結シミュレーション	山梨講演会講演論文集	No.080-4	155-156	2008
照井雄貴, 辻 裕一	JIS フランジ継手締付け方法の適用範囲拡大(延伸PTFE ガスケットへの適用)	M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集	No.08-06	OS0503	2008
金田 忍, 清水良保, 辻 裕一	フランジ継手への塑性域締結の適用-大口径フランジ継手の場合	M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集	No.08-06	OS0504	2008
山口篤志, 本田 尚, 辻 裕一	3次元粘弾性モデルによるガスケットのクリープ/リラクゼーション特性の評価	M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集	No.08-06	OS0505	2008
辻 裕一, 萩原正洋, 山口篤志, 本田 尚	パーコレーション理論によるガスケットの高温接面漏洩特性の評価	M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集	No.08-06	OS0506	2008

非石綿シートガスケットの常温・高温シール性能の評価†

山口 篤志¹ 本田 尚² 辻 裕一³

プラントの配管や圧力容器の接続部に使用されているフランジ継手用ガスケットには、従来石綿製品が多用されてきたが、2006年に施行された労働安全衛生法の改正により石綿を0.1%超える製品の製造及び使用が禁止となった。ここで、主に高温で用いられるガスケットをはじめとした一部のシール製品は代替が困難として2009年まで継続的に使用することが認められている。これら継続して使用が認められているシール製品の代替化において重要なのは、高温におけるシール製品の特性値の解明である。近年、さまざまな非石綿ガスケットが製造されているが、高温下における非石綿ガスケットの特性値はあまり解明されていない。本研究では、常温におけるガスケットの漏洩試験であるJIS B 2490を高温に拡張すること、及び100℃以上のアプリケーションにおける石綿ジョイントシートガスケットの代替化を目的に、プラントの運転時を想定した非石綿シートガスケットのシール性能の評価を行った。その結果、両ガスケットにおける高温シール性能の違いを明らかにするとともに、高温に拡張したシール性能試験の有効性を示した。100℃以上の高温下における両ガスケットの高温シール性能は“漏れがないとみなせるレベル”であった。

キーワード: 非石綿ガスケット, フランジ継手, 漏洩試験, 労働安全衛生法, JIS B 2490

1 緒言

各種プラントの配管継手や機器フランジにはガスケット付フランジ継手が多用され、古くから多くの規格がある。従来ガスケットには、耐熱性、耐摩耗性、耐腐食性、耐薬品性などに優れていることから石綿が多用されてきたが、悪性中皮腫を引き起こすことから、その使用規制が厳しくなっている。

日本では、1995年に労働安全衛生法等により、青石綿・茶石綿の製造・使用等を禁止し¹⁾²⁾、その後、いくつかの改正を繰り返し、様々な石綿の規制を行ってきている。中でも2006年9月1日に改正された労働安全衛生法の施行により石綿に関する規制はさらに厳しくなり、代替が困難な一部の製品等を除き、石綿を0.1%超えて含有するすべての製品の製造等は全面禁止としている²⁾。ここで、代替が困難なガスケットをはじめとした一部のシール製品はポジティブリストとしてまとめられており、主に使用条件が過酷なものに対して適用されている。しかし、ポジティブリスト内のシール製品も2009年までに石綿の全面禁止が目標とされていることからシール製品の早急な非石綿化が求められている。

日本工業規格においても、石綿使用禁止の流れを受け、「石綿」という言葉だけを除外し、非石綿ガスケットの使用について対応している³⁾⁴⁾。しかし、フランジの設計係数であるガスケット係数 m 、 y は石綿ガスケットについて規定されたものであるため、値だけがそのまま残されていることに懸念が出ている。

一方、環境問題を背景に、工業プラント等からの内部流体の漏洩の排出規制が強化されつつある。プラントの配管や圧力容器の継手部は内部流体の漏洩に対して最も重要な個所として挙げられる⁴⁾。今後、漏洩量を管理できる設計係数が必要と考えられるが、現行のガスケット係数 m 、 y は漏洩量という概念がない⁵⁾。ガスケット付フランジ継手からの漏洩量を継手の設計段階において考慮することが求められる中、現行のガスケット係数 m 、 y に代わる新しいガスケット係数の導入は重要である。

これを受け、2008年3月にJIS B 2490「管フランジ用ガスケットの密封特性試験方法」⁶⁾が制定されている。この試験法は、ガスケットの系統的な密封特性データを得るために規定されている。この試験法が規定されたことにより、今後多くのガスケットの密封特性に関するデータが収集できるため、漏洩を起こさないフランジの設計を行うための常温におけるガスケット特性値を検討する足がかりになると期待されている。しかし、ガスケットは主に高温のアプリケーションで使用されており、高温下における非石綿ガスケットの特性値が解明されていないことが積極的なガスケットの代替化の妨げとなっている。ポジティブリストに最も多く該当するシール製品は、100℃を超えて使用されている石綿ジョイントシートガスケットである。代替品としての非石綿シートガスケットはいくつか開発されているが、使用実績が不十分であり、国内の機器等の規格等において代替品として安全であるか確認されていないためポジティブリストに挙げられている。

そこで本研究では、管フランジ用ガスケットの基本密封特性試験方法を高温に拡張すること、及び100℃以上のアプリケーションにおける石綿ジョイントシートガスケットの代替化を目的に、常温・高温下における非石綿シートガスケットのシール性能の評価を行ったので報告する。

† 原稿受付 2008年08月07日

† 原稿受理 2008年10月08日

*1 東京電機大学大学院 先端科学技術研究科 機械システム工学専攻

*2 労働安全衛生総合研究所機械システム安全研究グループ

*3 東京電機大学 工学部 機械工学科

連絡先: 〒350-0894 埼玉県比企郡鳩山町石坂

東京電機大学大学院機械システム工学専攻 山口篤志¹

E-mail: yamaguchi@tsujilab.n.dendai.ac.jp

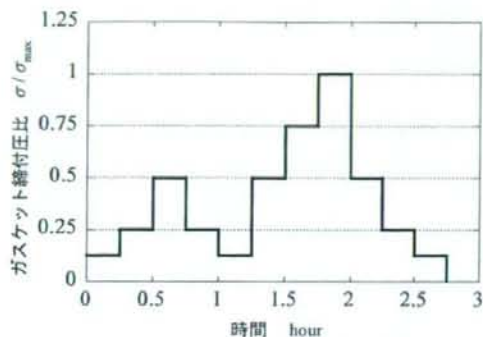


図1 JIS B 2490 管フランジ用ガスケットの基本密封特性試験方法のシーケンス

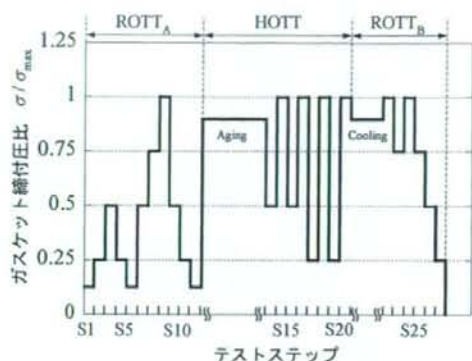


図2 常温・高温下におけるシール性能の評価における試験シーケンス

2 ガスケットのシール性能評価方法

1) 常温のガスケットシール性能評価

常温のガスケットシール性能試験である JIS ガスケット基本密封特性試験法⁵⁾では、ガスケット寸法に依存しない基本漏洩量 L_0 Pa・m³/s を有効締付圧 σ_0 N/mm² と圧縮変形量 δ_0 mm で評価する。 L_0 は次式で表される。

$$L_0 = \frac{L}{k} \quad (1)$$

ここで、 L : 漏洩量、 k : ガスケット形状係数であり、 k は次式で表される。

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

ここで、 d_0 : ガスケットの内径、 d_i : ガスケットの外径である。JIS B 2490 では、基本漏洩量を用いることにより、異なる寸法のガスケットの漏洩量が予測できるといった特徴がある。 L_0 を圧縮変形量で整理すると、 L_0 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することができる⁵⁾⁶⁾。

図1にガスケット締付け圧のシーケンスを示す。各ガスケット締付け圧に到達したら15分間その状態を保持してから漏洩量を測定する。JIS ガスケット試験法では試験手順の簡略化及び試験時間の短縮が達成されている。

2) 常温・高温下におけるシール性能評価

図2に常温・高温下におけるシール性能の評価における試験シーケンスを示す。常温試験 A (ROTTA) → 高温試験 (HOTT) → 常温試験 B (ROTTB) の順で行い、各試験ステップにおけるガスケットのシール性能を評価する。これは、PVRC の ROTTA/HOTT/EHOT の各試験に対応しており、プラントにおけるガスケット付フランジ継手の組立 → 高温下におけるガスケットのエージング及び外乱 → シャットダウンによる負荷履歴を模擬している。

常温試験 A は、JIS B 2490 である。高温試験は昇温後、試験内圧一定で90時間エージングし、エージング後は負荷・除荷過程を行う。常温試験 B はガスケット

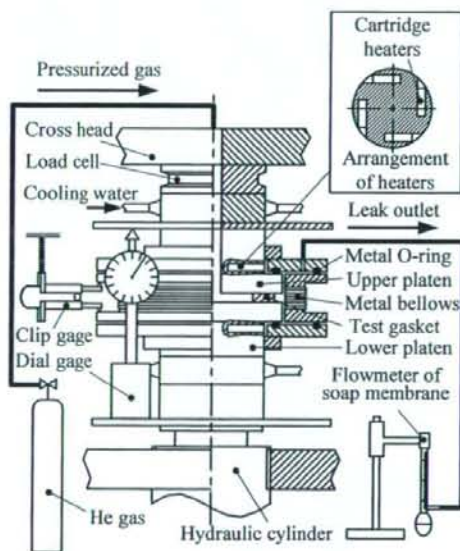


図3 試験装置の構成

締付け圧一定でガスケット温度を室温まで冷却し、除荷過程を行う。

なお、ガスケットの締付け圧は有効締付圧 σ_0 として以下の式で与えられる。

$$\sigma_0 = \frac{W - \pi d_i^2 P / 4}{A_g} \quad (3)$$

ここで、 W : 圧縮荷重、 d_i : ガスケットの接触面の内径、 P : 試験内圧、 A_g : ガスケットの接触面積である。JIS ガスケット基本密封特性試験法では、ガスケットの最大締付圧 σ_{max} はガスケットの種類により設定されている。試験内圧は2MPa、高温時の試験温度は180℃及び260℃とする。