

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、悪性中皮種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た。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箇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」⁵⁾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: 〒350-0394 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

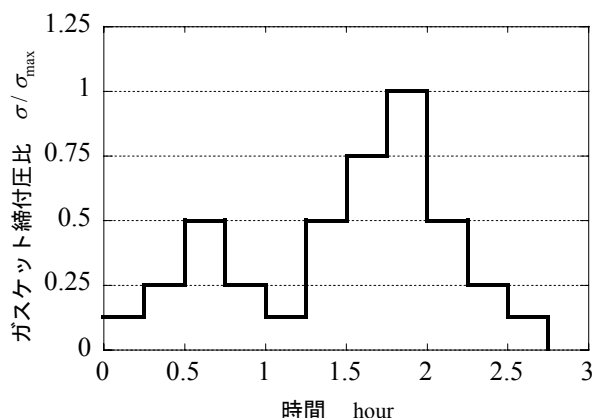


図1 JIS B 2490 管フランジ用ガスケットの基本密封特性試験方法のシーケンス

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_s Pa・m³/s を有効締付圧 σ_e 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 : 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_o : 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_s を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 (ROTT_A) → 高温試験 (HOTT) → 常温試験 B (ROTT_B) 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 ROTT/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イジング及び外乱 → 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時間エイジングし、エイジング後は負荷・除荷過程を行う。常温試験 B はガスケット

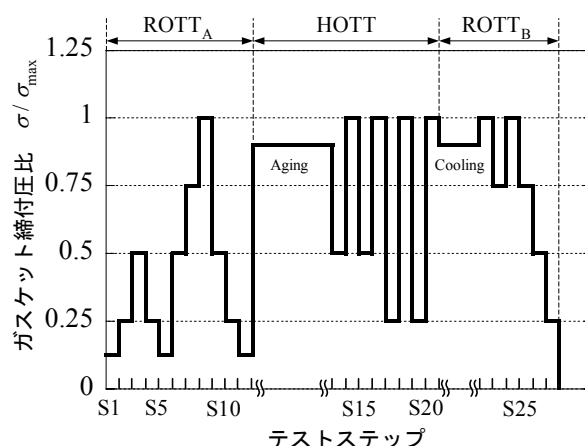


図2 常温・高温下におけるシール性能の評価における試験シーケンス

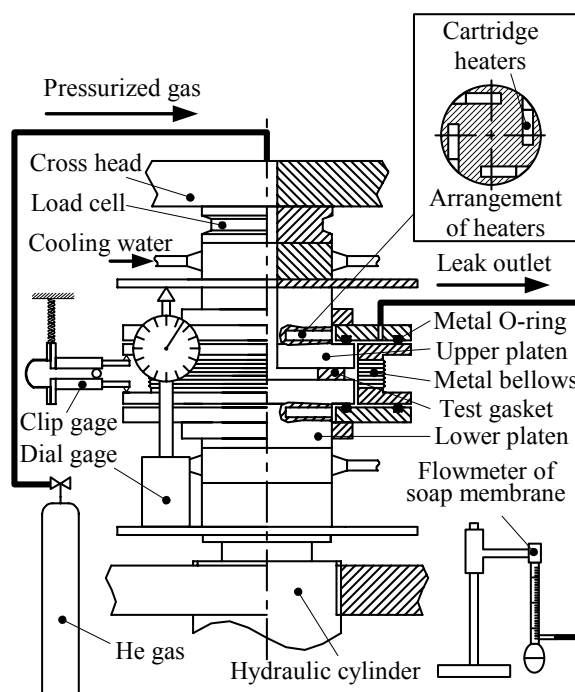


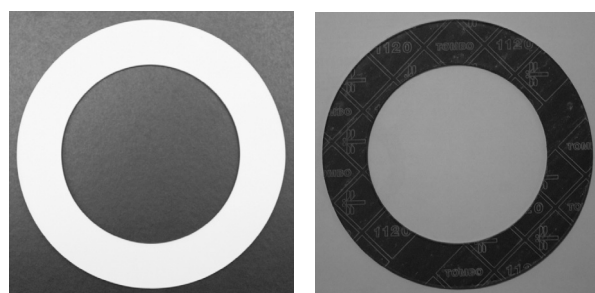
図3 試験装置の構成

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、ガスケットの締付圧は有効締付圧 σ_e として以下の式で与えられる。

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

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。



(a) 延伸 PTFE シート
ガスケット (b) 非石綿ジョイントシート
ガスケット

図 4 試験ガスケット

表 1 試験ガスケットの寸法・ガスケット定数・物性値
(厚さ $t=1.5\text{mm}$)

ガスケット	延伸 PTFE シート	非石綿ジョイント シート
内径 (mm)	90	
外形 (mm)	135	
ガスケット係数 m	2.5	2.75
最小締付圧 y (MPa)	19.6	25.5
密度 (g/cm^3)	1.7	1.53
圧縮率 (%)	23	9
復元率 (%)	38	70
引張強度 (MPa)	74	27.5
応力緩和率 (%)	66	25

3 試験装置及び試験ガスケット

1) 高温ガスケット試験装置

図 3 に試験装置の構成を示す。試験ガスケットは上下のプラテンの間に置かれ、油圧シリンダによって均一に圧縮される。なお、ガスケット締付け圧はロードセルによって測定する。プラテンには 8 個のカートリッジヒータが埋め込まれており 450°C まで昇温が可能である。ガスケットの温度はプラテンに埋め込まれたシース形熱電対により測定しており、PID 制御により $\pm 1^\circ\text{C}$ の精度で制御できる。試験圧力は最大 5.5MPa まで加圧が可能であり、作動流体には He ガスを用いる。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鹼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鹼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。ガスケットの変形量はダイヤルゲージ及びクリップゲージ(分解能 $10\mu\text{m}$)より測定している。

本試験装置はガスケット締付け圧、ガスケット温度、内圧をそれぞれ独立に制御できる点に特徴がある。また、ガスケット温度は、試験中にガスケット応力またはガスケットの変形量を変化させている際にも一定に保たれる。なお、油圧ポンプで調節することにより完全な応力制御

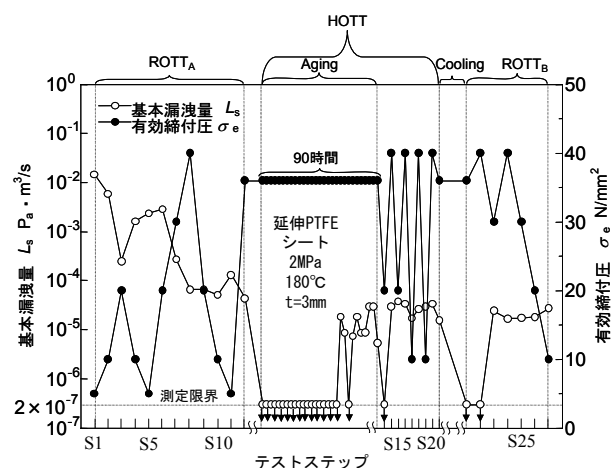


図 5 厚さ 3mm の延伸 PTFE シートガスケットの漏洩量測定結果

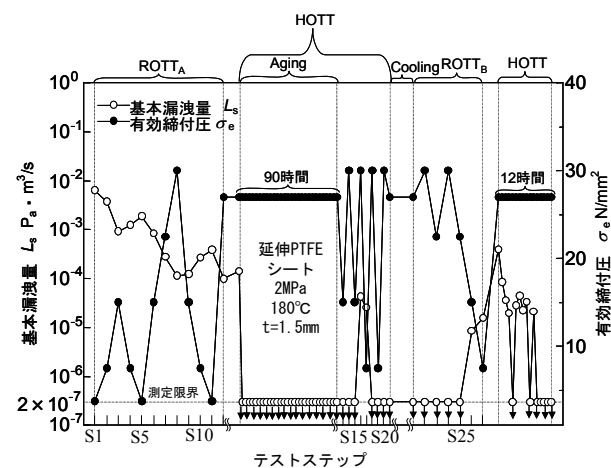
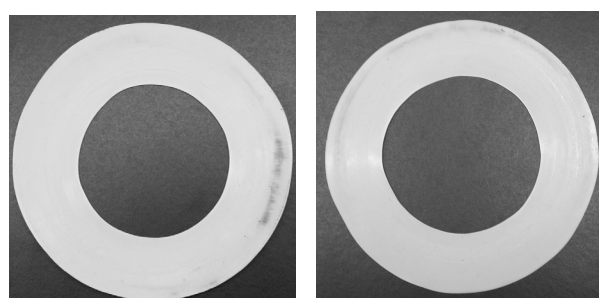


図 6 厚さ 1.5mm の延伸 PTFE シートガスケットの漏洩量測定結果



(a) 厚さ 3.0mm (b) 厚さ 1.5mm

図 7 試験後の延伸 PTFE シートガスケット

表 2 試験後の延伸 PTFE シートガスケットの寸法

ガスケットの厚さ (mm)	3.0	1.5
内径 (mm)	82	82.5
外形 (mm)	148	141
接触面の面積増加率 (%)	51.3	29.1
高温試験中の最大締付圧 (MPa)	29.2	23.4

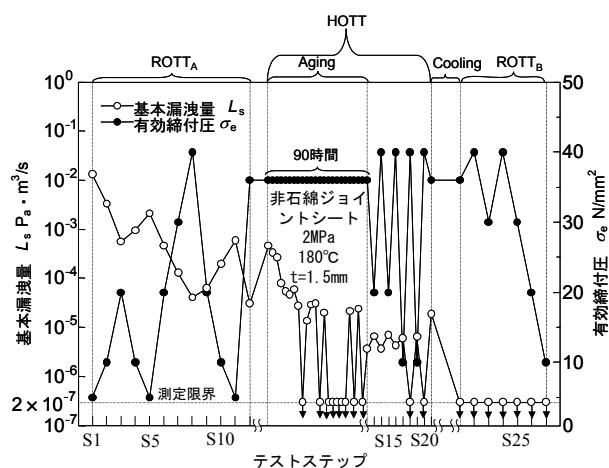


図8 非石綿ジョイントシートガスケットの漏洩量測定結果
(高温時 180°C)

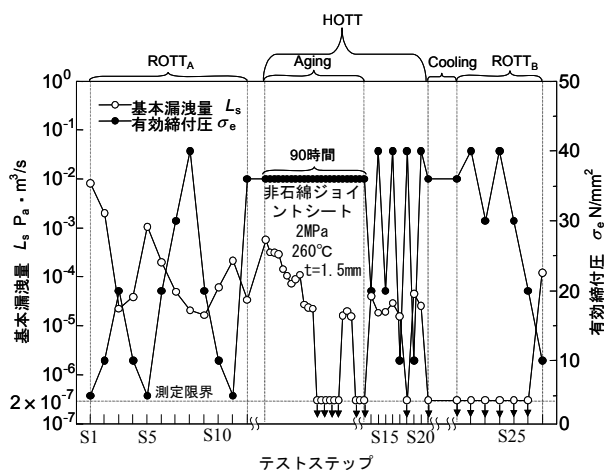


図9 非石綿ジョイントシートガスケットの漏洩量測定結果
(高温時 260°C)

状態またはひずみ制御状態でガスケットに負荷することが可能である。

2) 試験ガスケット

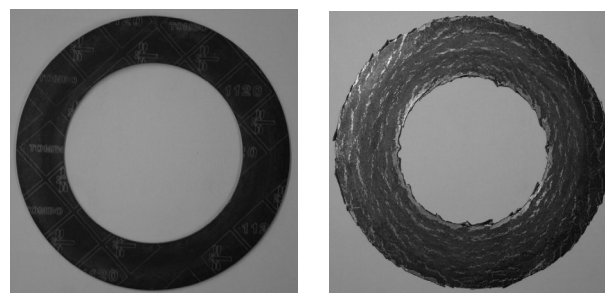
試験ガスケットは延伸 PTFE シートガスケット(厚さ 1.5mm, 3.0mm)と非石綿ジョイントシートガスケット(厚さ 1.5mm)である。

延伸 PTFE シートガスケットの推奨使用範囲は、内圧が 3MPa まで、温度が 214°C までである。

一般に、シートガスケットの最大締付圧 $\sigma_{\max}$ は 40 MPa であるが、延伸 PTFE シートガスケットの締付圧は一般のシートガスケットに比べ低く設定されている。そこで、厚さ 1.5mm の延伸 PTFE シートガスケットにおいては $\sigma_{\max}$ を 30 MPa とする。

非石綿ジョイントシートガスケットは、膨張黒鉛を主成分にアラミド繊維で補強したガスケットを使用する。推奨使用範囲は、内圧が 1MPa まで、温度が 260°C までである。なお、非石綿ジョイントシートガスケットの $\sigma_{\max}$ は 40 MPa である。

図 4 に試験ガスケットを、表 1 に各ガスケットのガスケット定数及び物性値を示す。



(a) 試験温度 180°C

(b) 試験温度 260°C

図 10 試験後の非石綿ジョイントシートガスケット

表 4 試験後の非石綿ジョイントシートガスケットの寸法

高温時の試験温度 (°C)	180	260
内径 (mm)	89.8	80.6
外形 (mm)	136.5	146.5
接触面の面積増加率 (%)	4.38	47.8
高温試験中の最大締付圧 (MPa)	36.23	27.27

4 試験結果

1) 延伸 PTFE シートガスケットの高温シール性能

図 5 にガスケットの厚さ 3mm の漏洩量測定結果を示す。常温試験である ROTTA では締付け工程が進むごとに漏洩量の低下率も大きくなっており、最大締付圧後の漏洩量が 10^{-4} Pa·m³/s 以下である。JIS B 2490 では 1.69×10^{-4} Pa·m³/s 程度を包含すれば管フランジガスケットとして実用上要求される漏れレベルを満足できていることから、ROTTA における最大締付後の漏洩量は“漏れがないとみなせるレベル”である。HOTT、外乱、ROTTB においても漏洩量は 2×10^{-5} Pa·m³/s 程度の一定のシール性能を示している。

図 6 にガスケットの厚さ 1.5mm の漏洩量測定結果を示す。ROTTA では厚さ 3mm のガスケット同様、最大締付圧後の漏洩量が無視できる程度となっている。エージング中は、測定限界(2×10^{-7} Pa·m³/s 以下)であり、外乱及び ROTTB においてもほとんど漏洩は見られなかった。ROTTB 終了後、再び昇温し、ガスケットを交換せずに使い続けた場合の漏洩量を評価した。昇温直後の漏洩量を除けば問題ない程度の漏洩であり、測定限界に達するまでは約 10 時間である。このことから、一度高温下にさらされたガスケットを再び使用することは可能であると言える。

2) 非石綿ジョイントシートガスケットのシール性能

図 8 に高温時の試験温度 180°C、図 9 に高温時の試験温度 260°C の漏洩量測定結果を示す。ROTTA の試験温度は常温であり、図 8、9 において大きな差が見られないことから基本漏洩量と有効締付圧の関係に再現性があることが確認できる。HOTT においては高温時の試験温度が異なるにもかかわらず、高温シール性能は“漏れがないとみなせるレベル”である。外乱では試験温度 260°C の漏洩量が 180°C に比べ多い。これは図 10 及び

表 4 に示すように、試験温度 260℃ のガスケット面積が著しく増加したため、外乱においては十分な締付圧が得られなかったといえる。HOTT おいて漏洩量に差がなかったのは、ガスケットの幅が増したことで漏洩しにくくなったものと考えられる。ROTT_B では図 8 においては漏洩が見られないが、図 9 では最後のステップで漏洩が確認された。これもガスケットの面積が増加したことにより漏洩を防ぐ十分な締付圧が得られなかったことが原因といえる。

本研究において非石綿ジョイントシートは使用可能範囲外のシール性能を調査したが、内圧 2MPa においても使用可能であることが分かる。

3) 延伸 PTFE シートガスケットと非石綿ジョイントシートガスケットの比較

図 6, 8 のガスケット厚さ 1.5mm, 高温時の試験温度 180℃ におけるガスケットの漏洩量を比較すると、ROTT_A においては漏洩量にそれほど差は見られなかった。しかし延伸 PTFE シートガスケットの方が締付圧が小さいことから、延伸 PTFE シートガスケットの方がシール性能がよいといえる。HOTT においても延伸 PTFE シートガスケットの方がシール性能が高く、一般的な見解と一致している。外乱においては、どちらのガスケットの漏洩量も無視できるレベルだが、非石綿ジョイントシートの方が漏洩量が少ない。これはプラテンとの接触面積が非石綿ジョイントシートの方が小さく、ほとんど変形しなかったため十分な締付力が保たれていたためと考えられる。以上のように本研究において 2 つのガスケットの特性の違いが明らかになったと言える。

5 ガスケット変形量による整理

1) 延伸 PTFE シートガスケット

図 11 に厚さ 1.5mm の延伸 PTFE シートガスケットのガスケット変位を示す。ROTT_A では当然のように締付圧に比例して、ガスケットの変形量は大きくなる。締付け工程が進むに従い、同等の締付圧においてガスケットの変形量が大きくなっている。これは締付圧の負荷履歴が影響していると考えられる。また、ガスケットは昇温中に大きく変形しており、エージング中のクリープは見られない。これは高温において化学変化など生じないためである。なお、厚さ 3mm の延伸 PTFE シートガスケットは図 11 と同様の傾向を示したことから省略している。

JIS B 2490 は、ROTT における基本漏洩量を圧縮変形量で整理することに特徴があり、欧米の評価方法に比べて優れていることが報告されている⁷⁾。そこで、本研究では ROTT だけでなく昇温後の基本漏洩量と圧縮変形量を調査した。図 12 に延伸 PTFE シートガスケットにおける基本漏洩量と圧縮変形量の関係を示す。ROTT_A における基本漏洩量と圧縮変形量の関係は JIS B 2490 で示されるように直線関係で表すことができる。ここで HOTT 開始時における基本漏洩量と圧縮変形量の関係を加えたところ ROTT_A の延長線上に値がくるこ

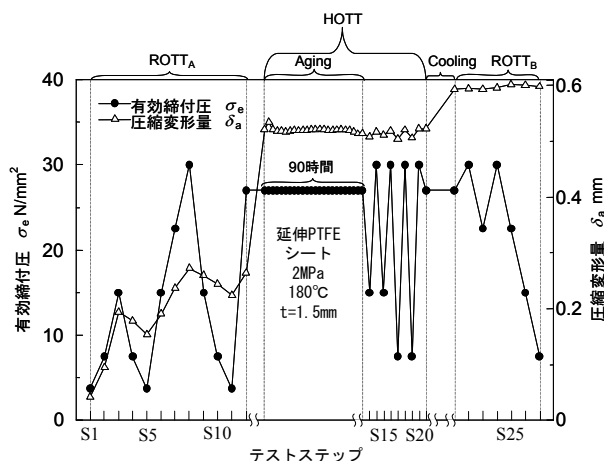


図 11 厚さ 1.5mm の延伸 PTFE シートガスケットの圧縮変形量

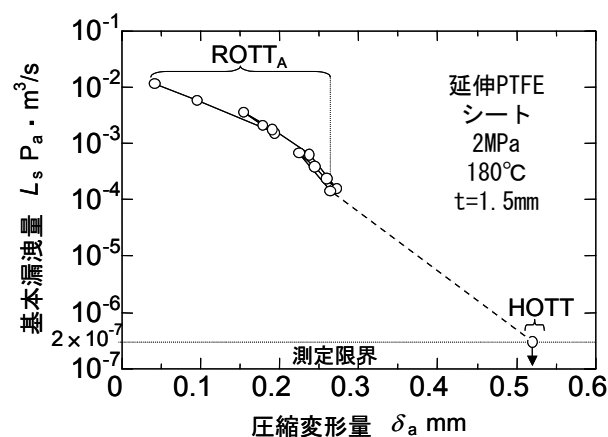


図 12 延伸 PTFE シートガスケットにおける基本漏洩量と圧縮変形量の関係

とから、試験温度に関わらずガスケットのシール性能は圧縮変形量により一義的に表示できる。

2) 非石綿ジョイントシートガスケット

図 13 に非石綿ジョイントシートガスケットのガスケット変位を示す。図 13(a), (b) の ROTT_A では延伸 PTFE シートガスケット同様、締付け工程が進むに従い、同等の締付圧においてガスケットの圧縮変形量が大きくなっている。これは延伸 PTFE シートガスケット同様、締付圧の負荷履歴の影響といえる。また、昇温中のガスケットの圧縮変形量は著しく、HOTT ではエージング中にガスケットがクリープを起こしていることがわかる。特に試験温度 260℃ におけるクリープは著しく、エージング中はクリープが進行し続けている。これは高温においてガスケットを構成するゴムまたはバインダが熱減量⁸⁾を起こしているためと考えられる。

図 14 に非石綿ジョイントシートガスケットにおける基本漏洩量と圧縮変形量の関係を示す。ROTT_A における基本漏洩量と圧縮変形量の関係は延伸 PTFE シートガスケットと同様に直線で一義的に表示でき、再現性も確認される。また、試験温度 180℃ において、HOTT

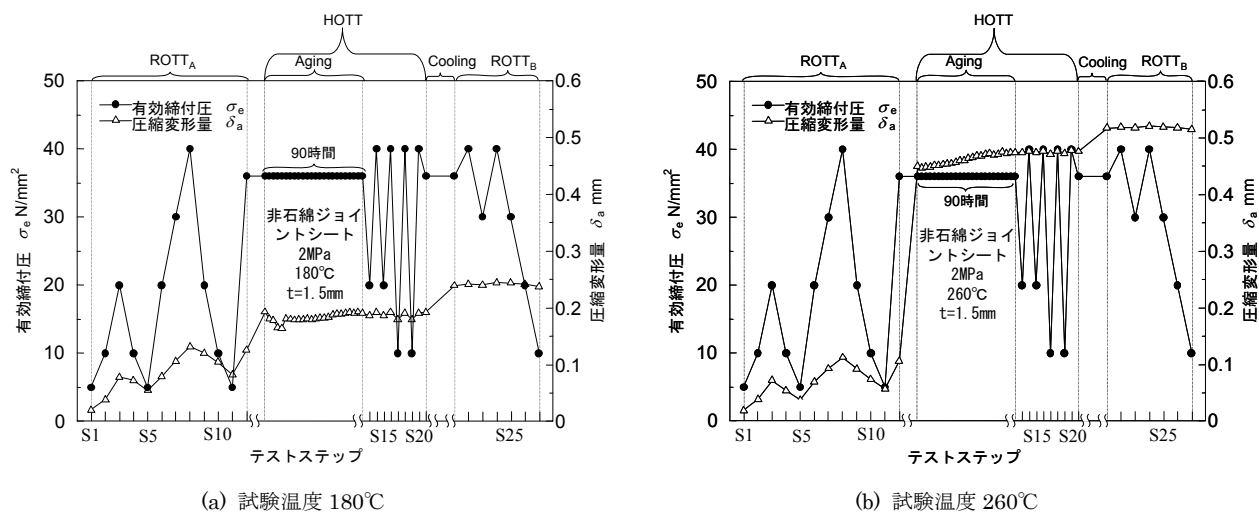


図 13 非石綿ジョイントシートガスケットの圧縮変形量

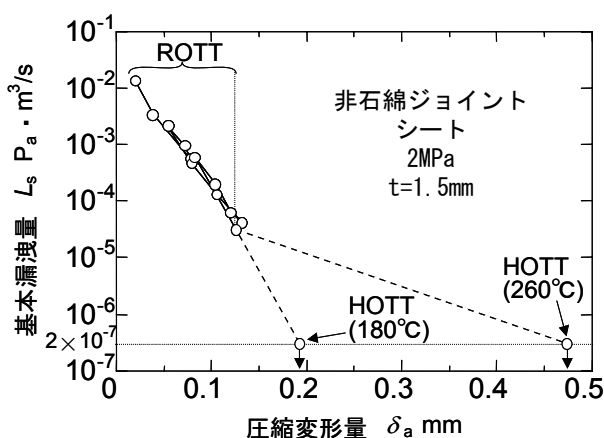


図 14 非石綿ジョイントシートガスケットの基本漏洩量と圧縮変形量の関係

開始時における基本漏洩量と圧縮変形量の関係を加えたところ ROTTA の延長線上に値がくる。しかし、試験温度 260°C では、変形量が大きいため HOTT を含めて直線で表すことが出来ない。

6 結言

本研究では、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評価試験を実施した。得られた成果を以下に示す。

1. 延伸 PTFE シートガスケット及び非石綿ジョイントシートガスケットの高温シール性能を調査し、両ガスケットのシール性能の違いを明らかにした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。
2. 各非石綿シートガスケットの高温シール性能を調査したところ、延伸 PTFE シートガスケットではガスケットの厚さにかかわらず高温シール性能は“漏れがないとみなせるレベル”であった。一方、非石綿ジョイントシートガスケットでは使用可能範囲外である試験内圧 2MPa で試験を行ったが、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。

3. 各非石綿シートガスケットの圧縮変形量について調査したところ、延伸 PTFE シートガスケットではエージング中にクリープは生じていない。これは高温において化学変化など生じないためである。一方、非石綿ジョイントシートガスケットではクリープが生じている。これは高温においてガスケットを構成するゴムまたはバインダが熱減量を起こしているためと考えられる。
4. 試験温度 180°C においてはどちらの非石綿シートガスケットにおいても、シール性能を圧縮変形量で評価すると一義的に表せることから、この評価方法はフランジ設計に対して有益である。

謝 辞

本研究は平成 18 年度から 20 年度までの 3 年間で実施された厚生労働科学研究費補助金によって実施したものであり、ここに記して謝意を表す。また、東京電機大学大学院 知能機械工学専攻の長谷川聡君には実験に協力いただいたことに感謝する。

文 献

- 1) 厚生労働省. 石綿製品の全面禁止に向けた石綿代替等検討会報告書. 2006.
- 2) 厚生労働省. 石綿等の全面禁止に係る適用除外製品等の代替等検討会報告書. 2008.
- 3) 澤俊行, 辻裕一. アスベスト代替製品化検討会の結果と今後について. 配管技術. 2006 ; 48-13 : 1-16.
- 4) 辻裕一. フランジ継手の設計・施工法の最適化とガスケットの石綿代替の取組み. 配管技術. 2007 ; 49-8 : 53-59.
- 5) 日本工業規格. 管フランジ用ガスケットの密封特性試験方法. 2008 ; JIS B 2490.
- 6) 小林隆志. ガスケットの密封特性試験方法と欧米の動向. 第 6 回圧力機器および配管におけるガスケットフランジ締結体のシーリングテクノロジー. 2007 ; 89-112.

- 7) Takashi Kobayashi, Takahito Nishida, Masakazu Suzuki, Yuki Yamanaka. Leak Tightness Evaluation of Gaskets Based on Compressive Strain. Analysis of Bolted Joints. 2000; 405: 23-27.
- 8) American Society of Testing and Materials, Standard Test Method for Weight Loss of Gasket Materials Upon Exposure to Elevated Temperatures, 2007; F495-99a.

Sealing Performance Evaluation of Non-asbestos Sheet Gaskets at Room Temperature and Elevated Temperatures

by

Atsushi YAMAGUCHI^{*1}, Takashi HONDA^{*2} and Hirokazu TSUJI^{*3}

The use of asbestos gaskets will be prohibited within one year. A variety of non-asbestos sheet gaskets have been developed, but the properties of non-asbestos gaskets at elevated temperatures have not yet been adequately described. In this study, a test method is proposed in which the existing JIS B 2490 “Test method for sealing behavior of gaskets for pipe flanges” is extended to include elevated temperatures. The sealing performance of two kinds of non-asbestos sheet gasket, i.e. the expanded PTFE sheet gasket and the non-asbestos compressed fiber sheet gasket, was evaluated using this new test method and the sealing performance of each non-asbestos sheet gasket at elevated temperatures was clarified. The proposed method proved effective in evaluating the sealing performance of non-asbestos sheet gaskets by testing for leaks at temperatures of over 100°C.

Key Words: non-asbestos gaskets, flange joint, leak test, industrial safety and health law, JIS B 2490

*1 Mechanical System Engineering, Advanced Science and Technology, Graduate School of Tokyo Denki University

*2 Mechanical Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan

*3 Department of Mechanical Engineering, Tokyo Denki University