

金属平形ガスケット付き管フランジ締結体の基礎シール特性評価

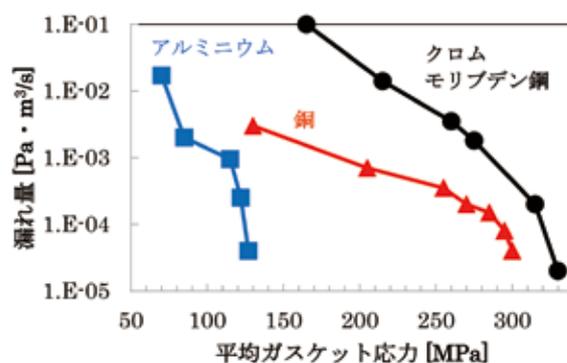
1. はじめに

金属平形ガスケット及びリングジョイントガスケットなどの金属ガスケットは石油精製、石油化学、発電プラントなどの高温高压条件下のフランジ締結体で広く使用されるが、しばしば締結部から内部流体の漏れが生じることが問題となっている。これは締結体の力学特性とボルト締付け法が十分解明されていないためと推測される。ジョイントシートガスケット、PTFEガスケット、うず巻形ガスケットなどのソフトガスケット、セミメタリックガスケット単体及び締結体に用いられた時の特性についてはASME（アメリカ機械学会）、HPI（日本高压力技術協会）、大学やメーカーで多くの研究が行われている。しかしながら、金属ガスケット付きフランジ締結体に関する研究はほとんど行われておらず、その挙動は明確になっていなかった^{1), 2)}。

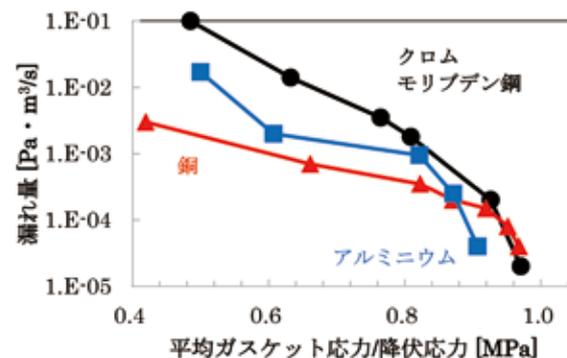
これまで、近藤らの研究によって金属平形ガスケット単体のシール特性はガスケット表面に塑性変形が生じることによってシール性が大きく向上することが明らかになっている³⁾⁻⁷⁾。Figure1 (a)はクロムモリブデン鋼、銅、アルミニウムの金属平形ガスケットの漏れ量と平均ガスケット応力の関係を示す。同じガスケット応力の場合、材料のヤング率及び表面硬度の低い順にシール性が優れていることが分かる。更に、各材料の降伏応力に対する平均応力の割合で整理した場合、Figure1 (b)に示されるようにその値が1.0付近で急激に漏れ量が小さくなっていることがわかる。このように、金属ガスケットのシール性にはガスケット材料の降伏応力が大きく影響していることが明らかにされている。しかしながら、これまでの研究では評価装置の測定能力上、 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ レベルでしか漏れい評価ができていない。

本研究では、金属ガスケットの基礎研究として、金属平形ガスケット単体及び締結体に用いた時の微小漏れい特性 ($1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ レベル)を明らかにすることを目的としている。対象となる材料はアルミニウムと銅の2種類、それぞれ3種類の幅寸法とし、剛プラテンを対象に実験と有限要素解

析によって評価する。加えて、ASME/ANSI class300 2inchフランジ締結体を用いた評価も行う。



(a) 漏れ量—平均ガスケット応力関係



(b) 漏れ量—降伏応力に対する平均ガスケット応力割合関係

Figure1 金属平形ガスケットの漏れ特性

2. 実験方法

Figure2は実験で用いたプラテン試験機を示す。万能圧縮試験機(島津製作所製 AUTO GRAPH 500KND)、試験体の金属平形ガスケットを挟み込むプラテン(SUS304製)、ヘリウムガスボンベ、圧力計、漏れ量計測装置及び変位計測機から構成される。漏れ量計測装置は、石けん膜流量計とヘリウムリークディテクター (ULVAC製)を切り替えられるようになっており、漏れ量がおおよそ $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下

ではヘリウムリークディテクターを適用する。ガスケットの材質は、アルミニウム (A1050)と銅 (C1020)の2種類、径寸法はφ25×φ20、φ30×φ20、φ40×φ20、の3種類で厚みは全て3mmである。所定の圧縮荷重を負荷した後にヘリウムガス内圧4MPaを負荷し、漏れ量及びガスケット圧縮量変位を計測する。ガスケット圧縮及び復元の試験シーケンスは、アルミニウムではガスケット応力0→180→0MPa、銅ではガスケット応力0→450→0MPaとして段階的に変化させる。

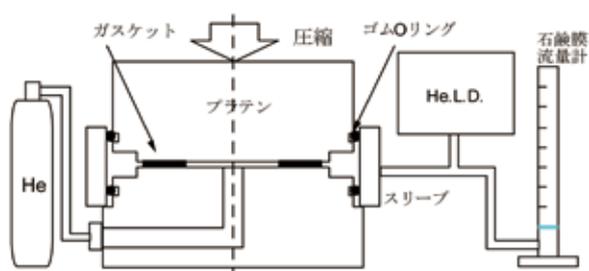


Figure2 プラチン試験装置概要

3. 有限要素解析方法

2項で述べた実験について有限要素解析を用いた評価も行う。有限要素解析には汎用コードABAQUSを用いる。Figure3は有限要素解析で用いた金属平形ガスケット付きプラチン試験装置の三次元モデルである。本来は軸対称モデルでも有効な評価は可能であるが、後述の締結体の場合と同条件にするために三次元モデルとしている。ガスケットは弾塑性要素、フランジは弾性要素でモデリングしている。所定の圧縮力でプラチンを圧縮し、その際のガスケット応力及び圧縮量、相当塑性ひずみを算出する。ここで、相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ は以下のように定義される。

$$\bar{\epsilon}_p = \int \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ (de_{xx}^p)^2 + (de_{yy}^p)^2 + (de_{zz}^p)^2 \right\} + \frac{1}{3} \left\{ (d\gamma_{xy}^p)^2 + (d\gamma_{yz}^p)^2 + (d\gamma_{zx}^p)^2 \right\}}$$

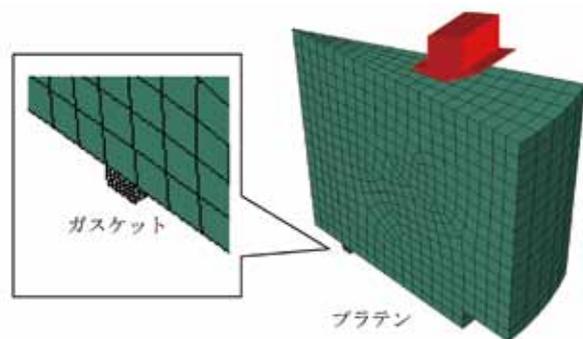


Figure3 プラチン試験に対する有限要素解析モデル

4. 実験及び解析結果

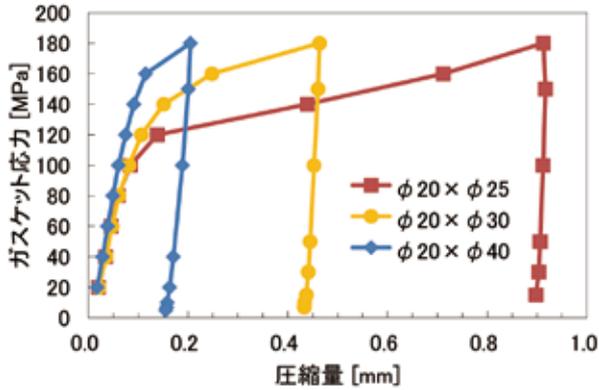
Figure4はプラチン試験から得られたアルミニウム及び銅の平形ガスケットの圧縮試験結果を示す。いずれの材料においても外径が小さいほど(幅が小さいほど)変形量が大きくなる結果となった。これは、ガスケット形状の影響によるものと考ええる。

Figure5は径寸法φ20×φ40のアルミニウム平形ガスケットの試験後のガスケット及びプラチン表面の様子を示す。ガスケット表面とフランジ表面の両方に内径側と外径側に変色が見られる。これは、アルミニウムの微細な粉末が残っていたためであり、圧縮によってガスケットがボアソン効果で内外径へ変形し、フランジと擦れたことに起因すると考える。

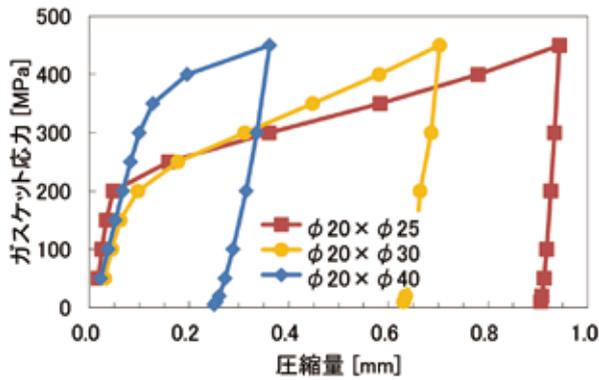
Figure6はプラチン試験から得られた漏れ量と平均ガスケット応力との関係を示す。ヘリウムリークディテクターを用いることによって $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ レベルまでの微小漏れ量測定が可能となっている。アルミニウム及び銅のガスケットのいずれの結果においても、高い平均ガスケット応力を負荷することで漏れ量は減少し、平均ガスケット応力を小さくすることによって漏れ量は増加している。また、アルミニウムでは120MPa程度、銅においては250MPa程度で漏れ量の減少が緩やかになっている。

漏れ量と平均ガスケット応力の関係はガスケット幅が変わっても同様であることから、金属平形ガスケットのシール性は平均ガスケット応力で整理できると言える。除荷過程において、アルミニウムガスケットでは約30MPa、銅ガスケットでは約50MPaで漏れ量が急激に増加している。これは、圧縮過程で得られたフランジ面とガスケット面のなじみが失われたものと考ええる。

Figure7はプラチン試験を再現した有限要素解析の結果である。ガスケット材料はアルミニウム、寸法はφ20×φ25とした場合のガスケット応力分布及び相当塑性ひずみ分布のコンター図を示している。平均ガスケット応力が100MPaから120MPaに増加した際に相当塑性ひずみが急増していることがわかる。この時にガスケットが大きく塑性変形し、フランジ面の微小な凹凸を大きく埋め、シール性が向上していると考ええる。このことから、メタルガスケットが高いシール性を発揮するにはガスケット表面の塑性ひずみが必要と言える。



(a) アルミニウム平形ガスケットの圧縮特性

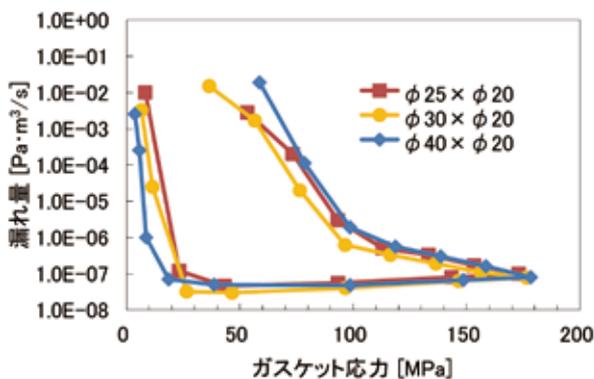


(b) 銅平形ガスケットの圧縮特性

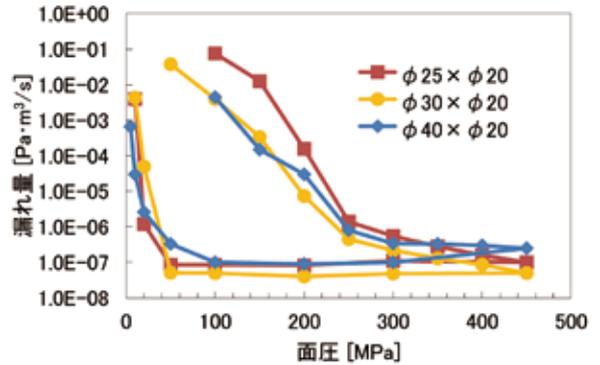
Figure4 金属平形ガスケットの圧縮特性



Figure5 圧縮試験後のガスケットとフランジ面



(a) アルミ平形ガスケットの漏れ量-ガスケット応力関係



(b) 銅平形ガスケットの漏れ量-ガスケット応力関係

Figure6 各寸法における漏れ量とガスケット応力関係

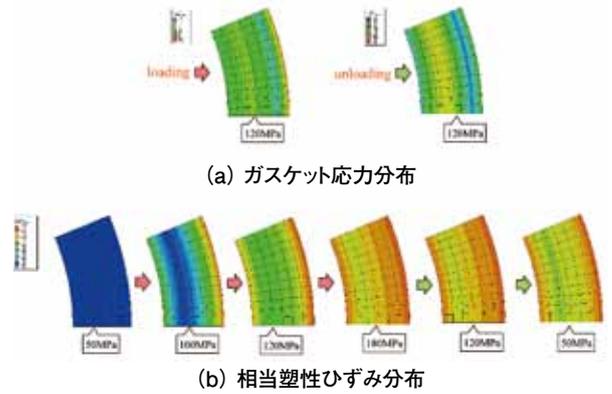


Figure7 有限要素解析から得られた各ステップにおけるガスケット応力と相当塑性ひずみ分布図

5. 金属ガスケット付き 管フランジ締結体の特性評価

ここまでは理想的に均一な圧縮が可能なプラテンを用いた評価を行ってきたが、以降は実際の管フランジ締結体での特性評価を行う。

Figure8は管フランジ締結体試験装置の概略図である。Figure9はその有限要素解析モデルを示す。寸法はASME/ANSI class300 2inchとし、ボルトはM16の8本である。有限要素解析では対称性を考慮して軸方向に1/2、周方向に1/16分割し、全体では1/32モデルとしている。ボルトのz軸対称面に締付けに相当する圧力を与え、ボルト締付けを再現している。実験ではボルト締付けはボルトに貼り付けたひずみゲージによって測定された軸力を指標に行う。連結したポンベより4MPaのヘリウムを封入し、圧力降下法によって漏れ量を測定する。

Figure10はアルミニウム平形ガスケットφ65×φ55を対象とし、プラテン装置及び管フランジ締結体に組込んだ場合の漏れ量とガスケット応力の関係を示している。管フランジ締結体

では圧力降下法を用いているために微小な漏れ量が測定出来ていないが、おおよそプラテン試験の結果と一致している。ガスケット応力100MPaを負荷した際に著しく漏れ量が小さくなっていることが分かる。この時のガスケット応力及び相当塑性ひずみを、有限要素解析を用いて計算した結果をFigure11に示す。Figure11より、ガスケット応力90MPaでは軽微であった相当塑性ひずみが、100MPaの場合に急激に大きくなっていることが分かる。一様な圧縮ではない管フランジ締結体においても、ガスケットの相当塑性ひずみが増加することで、シール性が著しく向上することが分かった。

これまでの研究では、基準漏れ量を $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ とした場合に式(1)を用いた初期ボルト軸力の決定方法検討を行っている⁸⁾。

$$F_{\text{imin}} = b \times \sigma_{\text{yield}} \times \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) / (N \times 1000) \quad (1)$$

ここで、 F_{imin} :最低限必要な初期ボルト軸力[N]、 b :金属ガスケットの塑性変形発生に関する係数、 d_2 :ガスケット接触外径[mm]、 d_1 :ガスケット接触内径[mm]、 N :ボルト数[本]とする。

基準漏れ量を $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ とした場合の管フランジ締結体の初期ボルト軸力を検討する。Figure12は上記のASME/ANSI class300 2inch管フランジ締結体における3種類の寸法のアルミニウム平形ガスケットと銅平形ガスケットの漏れ量-ボルト軸力関係である。実線は実験データ、○、△、□のマークは式1から算出した値を示している。式(1)から得られた値はおおよそ実験データ挙動の延長にあり、式(1)の妥当性が確認できる。このことより、式(1)を用いることによって、適切な初期ボルト軸力の検討が可能と考える。

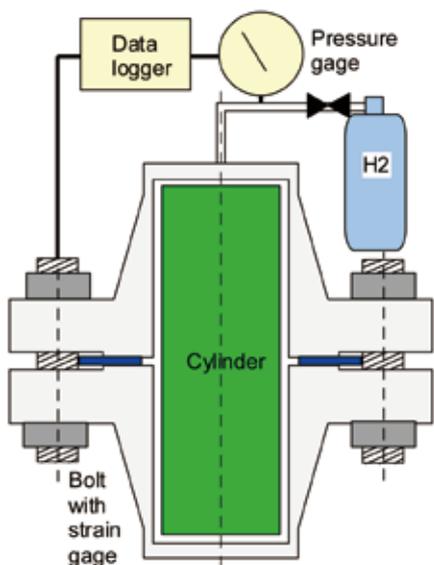


Figure8 管フランジ締結体装置概略図

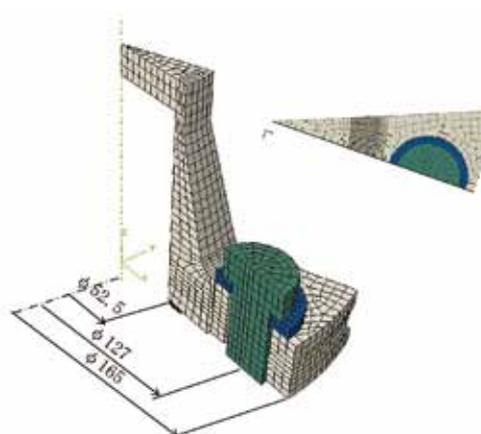


Figure9 金属ガスケット付き管フランジ締結体の有限要素解析モデル

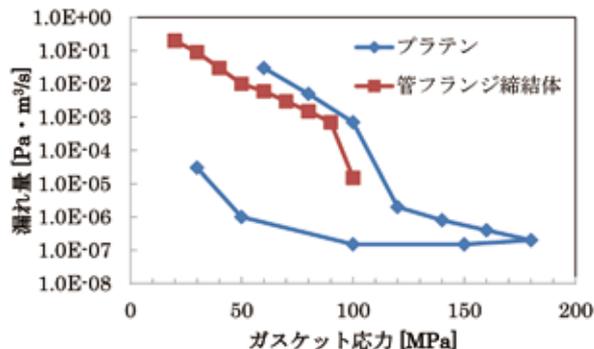


Figure10 プラテン試験結果と管フランジ締結体試験結果の漏れ量の比較

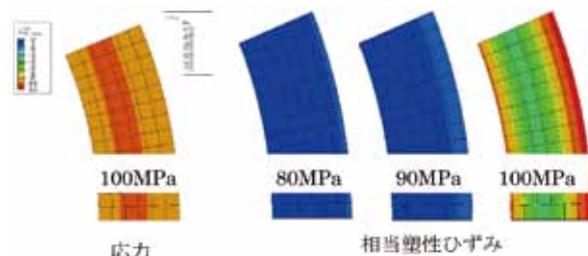
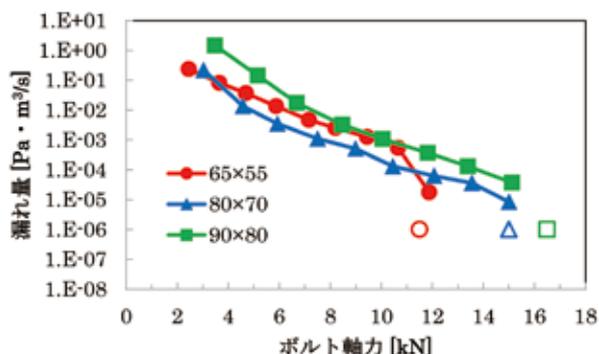
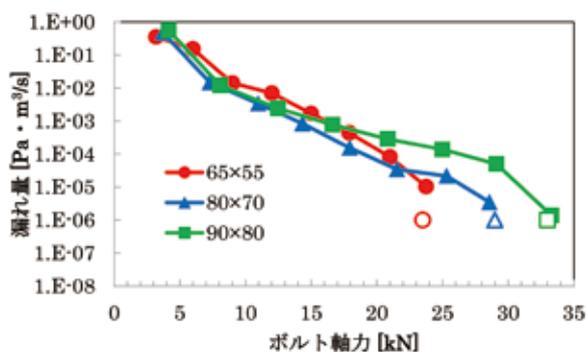


Figure11 管フランジ締結体でのアルミニウム平形ガスケットの応力と相当塑性ひずみ分布図



(a) アルミ平形ガスケット



(b) 銅平形ガスケット

Figure12 管フランジ締結体における漏れ量測定結果と推定結果

6. おわりに

本研究では実験と有限要素解析によってプラテン及び管フランジ締結体におけるアルミニウム及び銅の平形ガスケットの漏れ特性評価を行い、以下の結論を得た。

- (1) ガスケットからの漏れをスリーブで回収し、ヘリウムリークディテクターを用いてプラテン試験における金属平形ガスケットの $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ レベルの漏れ特性評価を行った。
- (2) プラテン試験において、金属ガスケットの表面が降伏し、塑性変形が生じるためシール性が著しく向上した。更に漏れ量が $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下になると、シール性向上は緩やかになることを明らかにした。この挙動はガスケット幅が変わっても同様であることも示された。
- (3) ASME/ANSI class300 2inch 管フランジ締結体においても、ガスケット接触面の一部が降伏するとシール性が著しく向上することを明らかにした。
- (4) 基準漏れ量 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ とした場合の締結体のシールに必要なボルト初期締付け軸力の計算法を示し、実験結果との比較により妥当性があることを確認した。

7. 参考文献

- 1) SAWA, T., HIGURASHI, N., AKAGAWA, H. "Stress Analysis of Pipe Flange Connections", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.113, No.4, pp.497-503 (1991.11)
- 2) 福田忠生, 尾崎公一, 加治屋純, 早川悌二, "内圧を受ける配管フランジ構造部の構造挙動と漏れ特性(金属平形ガスケットによる検討)", 日本機械学会論文集, 75巻, 756号, pp51-56 (2009)
- 3) 近藤康治, 椿翔太, 澤俊行, 大宮祐也, "内圧作用下における金属平型ガスケット付きフランジ締結体の密封特性", 圧力技術, Vol. 52, No.1, pp. 4-15 (2014)
- 4) 近藤康治, 椿翔太, 澤俊行, 大宮祐也, "内圧を受けるリングジョイントガスケット付き管フランジ締結体の有限要素法応力解析と密封性能評価", 日本機械学会論文集, 80巻, 816号, pp.1-13 (2014)
- 5) Kondo, K., Sawa, T., Sato, K., T., Kikuchi, and Tsubaki, S., "The sealing characteristics of bolted flange connection with metal gasket", ASME Pressure Vessels and piping Conference, PVP2012-78413 (2012)
- 6) Kondo, K., Tsubaki, S., Sawa, T., Sato, K., and Omiya, Y., "Sealing performance evaluation in bolted flange connections with ring joint gasket subjected to internal pressure", ASME Pressure Vessels and piping Conference, PVP2013-97173 (2013)
- 7) Kondo, K., Tsubaki, S., Sawa, T., Omiya, Y., and Sato, K., "FEM stress analysis and the sealing performance evaluation of bolted flange connections with metal flat gaskets", ASME Pressure Vessels and piping Conference, PVP2013-97828 (2013)
- 8) Kondo, K., and Sawa, T., "A Determination method of bolt preload for bolted pipe flange connections with metal gaskets under internal pressure", ASME Pressure Vessels and piping Conference, PVP2015-45163 (2015)



佐藤 広嗣

研究開発本部 開発部

近藤 康治 新興プランテック株式会社

澤 俊行 広島大学名誉教授

高橋 聡美 研究開発本部