

# 配管曲げモーメントを受けるPTFEガスケット付き管フランジ締結体の力学挙動評価

## 1. はじめに

ガスケット付き管フランジ締結体は石油精製プラント、化学プラント、発電プラントなどで広く使われている。日本では、かつては耐熱性、シール性、強度に優れ、取扱いが簡単な上に低価格であった石綿ガスケットが広く使われ、研究も盛んに行われていた<sup>1) - 3)</sup>。しかしながら、人体の健康への影響から2008年に使用が規制された<sup>4)</sup>。

石綿ガスケットは石綿ファイラーのうず巻形ガスケットと石綿ジョイントシートガスケットの2種類に大別される。石綿規制の際、うず巻形ガスケットについては膨張黒鉛ファイラーに置き換えることで大きな問題は生じなかったが、シートガスケットについてはいくつか課題が生じた。ジョイントシートガスケットでは石綿繊維の代わりにアラミド繊維のガスケットが開発されたが、ゴム分を多く配合する必要がある、耐熱性に課題があった。また膨張黒鉛シートガスケットは耐熱性においては問題がなかったが、材料が脆く表面が傷付きやすいという難点があった。そこで、改良されたPTFE (Poly-Tetra-Fluoro-Ethylene) 系ガスケットが広く使用されることとなった。改良されたPTFE系ガスケットは高い耐薬品性と耐熱性を有し、配合や製造方法によって、従来からの課題であるクリープが改善されることで多くの締結部に採用されることとなった<sup>5)</sup>。しかしながら、PTFEガスケット付き管フランジ締結体のガスケット接触応力分布と密封性能、ハブ応力及びボルト軸力変化などの力学的挙動は十分に明らかにされていない。

これまでの筆者らの研究によって常温及び高温環境下のPTFE付き管フランジ締結体の上述の力学的挙動はかなり研究され、石綿ジョイントシートガスケットよりも優れていることが明らかにされている<sup>6), 7)</sup>。

近年の日本では、1995年に兵庫県南部地震、2007年に新潟県中越沖地震、2011年に東北沖地震、2016年に熊本地震と大きな地震が発生している。加えて、南海トラフ大地震発生は、一説では10年以内にも発生すると考えられている。震源地には多くのプラントや建造物があり、甚大な被害も

懸念されている。兵庫県南部地震の際には液状化によって配管曲げが生じたフランジ締結部からLPガスが漏れて7万人に避難勧告が出されたという事例もあり、プラントの地震対策も必要不可欠である。澤らはず巻形ガスケット付きフランジ締結体が配管曲げを受けた場合の力学的挙動について研究を行っている<sup>8) - 10)</sup>。カナダ、モントリオール工科大学のTightness Testing and Research Laboratoryでは延伸PTFE付きフランジ締結体が配管曲げを受けた場合のボルト軸力の挙動について研究し<sup>11)</sup>、Kovesらは配管曲げの影響を等価内圧によって評価する方法を示している<sup>12) - 16)</sup>。

しかしながら、配管曲げと内圧を受けたPTFEガスケット付き管フランジ締結体の研究は行われていない。PTFEガスケットが広く使用されている現在、また、今後も地震などの災害への対応のためにもPTFE付き管フランジ締結体の力学的挙動を評価することが重要である。

本研究では、配管曲げと内圧を受けるPTFE付き管フランジ締結体の力学的挙動をFEM応力解析と実験によって明らかにすることを目的としている。まずはJIS B 2490に基づきガスケットの基礎特性を調べる。有限要素法 (FEM) 応力解析ではボルト軸力、ハブ応力、及びガスケット接触応力分布を算出し、ガスケット接触応力分布とガスケット基礎特性から漏れ量も推測する。FEM応力解析の妥当性確認のため、ボルト軸力とハブ応力について実験結果と比較する。実験では締結体からの漏れ量、ボルト軸力、及びハブ応力を測定する。締結体寸法はASME/ANSI class300 4inchとする。

本研究に用いる評価ガスケットはNo.GF300を用いている。No.GF300はゴム分を一切含まず、熱や時間による化学劣化などがないため、精度の良い力学評価が可能と考えられる。

## 2. 実験方法

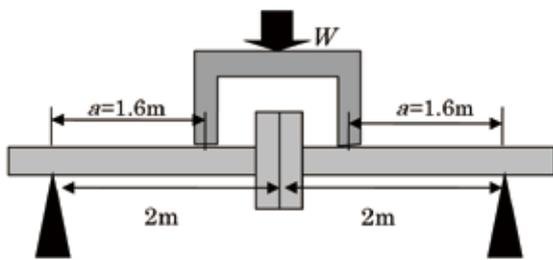
Figure1 (a)は管フランジ締結体配管曲げ実験装置の写真、Figure1 (b)は概要図を示している。四点曲げ方式によって配管曲げモーメントを負荷し、連結したヘリウムガスボ

ンベによって内圧も負荷できる。締結体の寸法はASME/ANSI class300 4inchで、フランジ及び管の材料はSUS304である<sup>17)</sup>。各管の長さは2m、両方を合わせて約4mの装置である。ガスケットの径寸法も締結体に合わせてASME/ANSI class300 4inchとし、厚さは1.5mmとしている。

フランジハブ応力、ボルト軸力はひずみゲージを用いて測定し、漏れ量はヘリウムリークディテクターを用いてスニファーマ法によって測定する。また、初期のボルト締付けはJIS B 2251 “フランジ継手締付け方法”に基づいて行う<sup>18)</sup>。ボルト締付け後に四点曲げモーメントと内圧を負荷し、フランジハブ応力、ボルト軸力、及び漏れ量を測定する。作用曲げモーメント $M$ は $M=W/2 \times a$ で求められる。なお、 $a$ は有効管長さ(=1.6m)である。ボルト初期締付け力は平均ガスケット応力が10MPaになるように一本あたり11.1kNとし、作用内圧は2MPaとしている。



(a) 装置写真



(b) 装置概要

Figure1 四点曲げモーメントが作用する管フランジ締結体の力学挙動測定実験装置

### 3. ガスケット特性

FEM応力解析に用いるため、ガスケットの圧縮特性及びシール特性を評価する。

#### 3-1) 圧縮特性

室温におけるガスケットの応力-ひずみ特性を評価する。Figure2は評価のための実験装置概要を示している<sup>19)</sup>。フランジの平面座はJIS 10K 50A相当の寸法とし、圧縮試験機によって圧縮される。Figure3は実験から得られたNo.GF300ガスケットの応力-ひずみ関係である。ひずみの値は3つの

変位計の平均値から得られた圧縮量を初期厚さで除したものである。

#### 3-2) シール性

ガスケットのシール性はFigure2に示す装置を用いてJIS B 2490に基づいて評価した。ポンペから供給されるヘリウムガスを2MPaまで加圧し、スリーブで回収したガスケットからの漏れ量を石鹼膜流量計によって測定する。Figure4は実験から得られた漏れ量とガスケット接触応力の関係を示している。ガスケット接触応力は約40MPaまで負荷したが、20MPa以上では漏れ量が過小で測定ができなかったためにデータが示されていない。

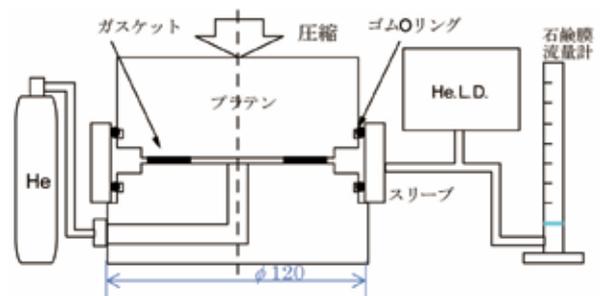


Figure2 ガスケット特性評価試験装置概要

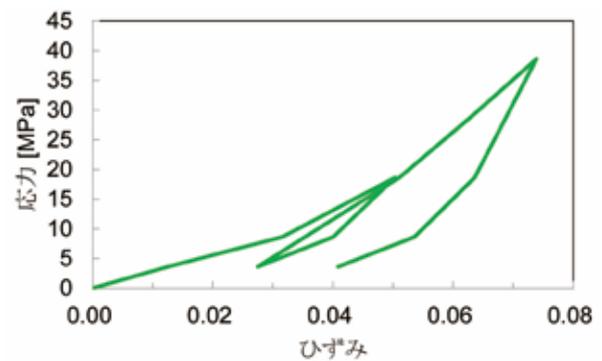


Figure3 No.GF300ガスケットの応力-ひずみ特性

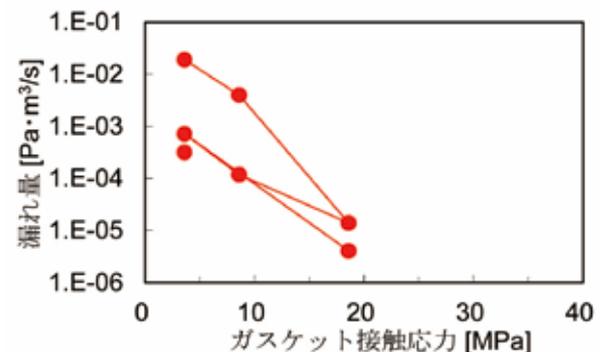


Figure4 漏れ量-ガスケット接触応力関係

## 4. 有限要素法 (FEM) 応力解析

Figure5はFigure1に示す四点曲げ及び内圧を受けるガスケット付き管フランジ締結体のFEMモデルである。対称性を考慮し、1/4 (軸方向に1/2、周方向に1/2)モデルとなっている。ボルト・ナット部のねじは省略し、ナットも六角形から同じ断面積の円に簡略化している。Figure6はFEM応力解析の境界条件を示している。各対称面を拘束し、ボルト締付けは各ボルトに軸力に相当する引張を与えることで再現している。四点曲げは配管端部を拘束した上でフランジ付近のジグに  $W/2$  の荷重を負荷している。内圧の影響は管フランジ容器内側に圧力を負荷する。フランジ及びボルトは弾塑性要素、ガスケットはABAQUSガスケット要素によってモデリングする。FEM解析では、ボルト軸力、フランジハブ応力、ガスケット接触応力分布を算出する。

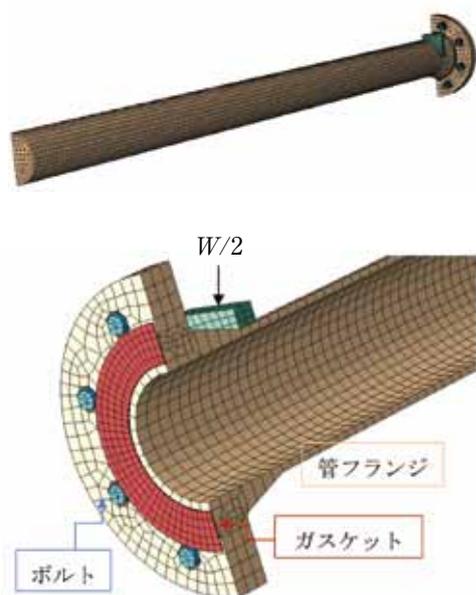


Figure5 管フランジ締結体のFEMモデル

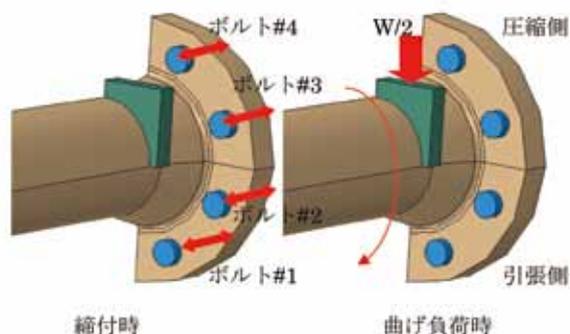


Figure6 FEM応力解析の境界条件

## 5. FEM応力解析結果と実験結果

### 5-1) ボルト軸力

Figure7はFigure6に示す4本の各ボルトの軸力変化をFEM応力解析及び実験から得られた値を示している。横軸に曲げモーメント  $M$ 、縦軸にボルト軸力、実線は実験結果、破線はFEM応力解析結果を示している。#1と#2のボルトは曲げモーメントが増加するにつれて軸力が増加するのに対し、#3と#4は低下している。配管曲げによって#1、#2側はフランジ接触面が口開きすることによってボルトが引張を受けて軸力増加しているためである。一方、#3、#4側は配管曲げによってフランジ接触面が閉じることによってボルトが収縮して軸力低下する。FEM解析結果と実験結果はよく一致しており、FEM応力解析の妥当性が示されている。

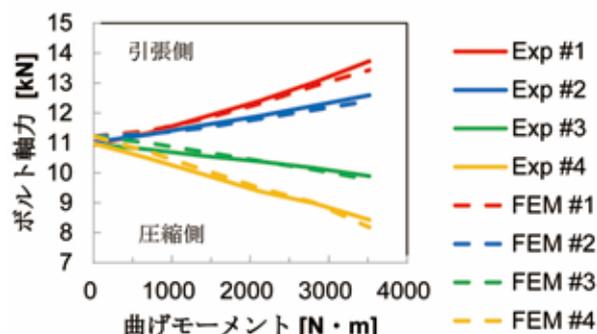


Figure7 FEM応力解析と実験から得られた配管曲げを受けた場合のボルト軸力の変化

### 5-2) ガスケット接触応力分布

Figure8はFEM応力解析から得られた初期締付け時、 $3500\text{N}\cdot\text{m}$ の配管曲げ負荷時、及び $3500\text{N}\cdot\text{m}$ の配管曲げ+内圧負荷時におけるガスケット接触応力分布のコンター図である。ガスケット外縁部が接触応力ゼロなのは、平面座の外側でフランジと接触していないためである。初期締付け時のガスケット接触応力分布を見ると、フランジローテーションに起因して外径側ほど接触応力がより高くなっていることがわかる。また、周方向の接触応力勾配はほとんどない。 $3500\text{N}\cdot\text{m}$ の曲げモーメントを負荷した場合、一部(図では左側)のガスケット接触応力が著しく低下しており、内圧を負荷した際にはさらにガスケット接触応力が低下している。

Figure9は各ステップの接触最外径部 ( $r=46.05\text{mm}$ ) 周方向のガスケット接触応力分布を示している。曲げモーメント負荷によってフランジ接触面が口開きし、接触応力分布が大きく変化していることが分かる。

ここで、このFEM応力解析から得られたガスケット接触応力分布とFigure4に示すシール特性の関係からガスケット漏

れ量を推定する<sup>20)-21)</sup>。Figure10は推測した漏れ量と実験で測定された漏れ量の値を示している。曲げモーメントが増加するにつれ徐々に漏れ量は増加し、曲げモーメントが約3000N・mを超えた際に漏れ量が著しく増加している。これは、Figure8に示すように、曲げモーメントによって一部のガスケット接触応力がゼロになったためだと考える。漏れ量の推測値は実験値とよく一致しており、FEM解析及び漏れ量推測方法の妥当性が示されている。

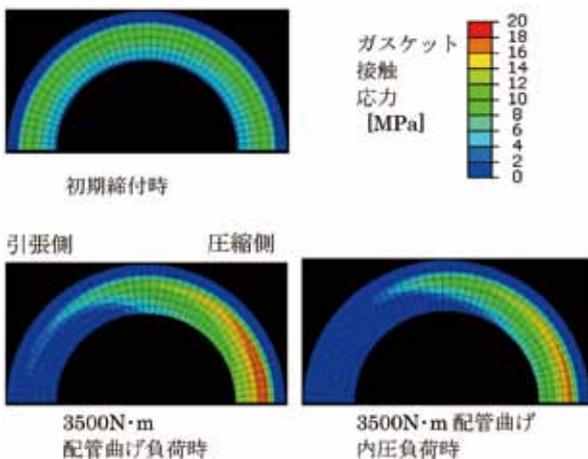


Figure8 FEM応力解析から得られたガスケット接触応力分布

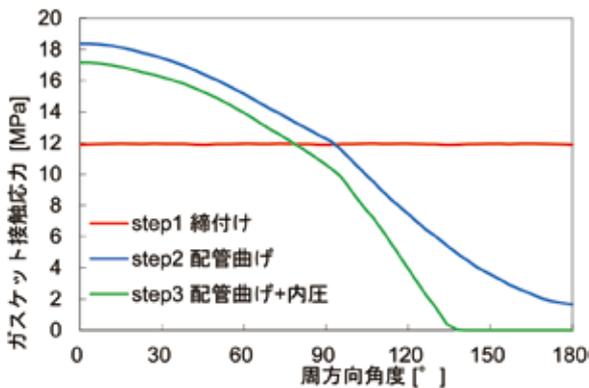


Figure9 各ステップの接触応力分布

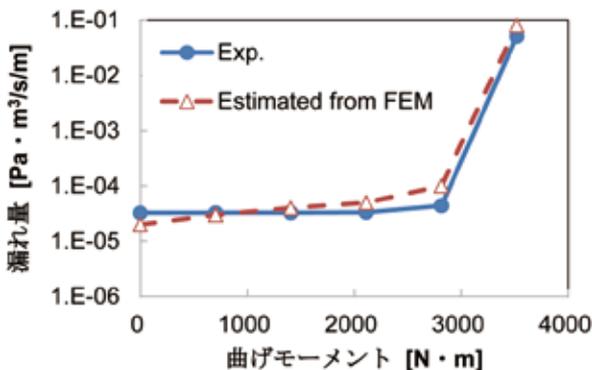


Figure10 配管曲げ作用下の締結体の漏れ量の比較

### 5-3) フランジハブ応力

Figure11はフランジハブに発生する軸方向の最大主応力と曲げモーメントの関係を示している。同図にはASMEで提案される方法で計算した値も併記している(ただし、ASMEの値は曲げモーメントがゼロの場合)<sup>22)</sup>。曲げモーメントが増加するにつれて、実験及びFEM応力解析から得られたハブ応力の値は増加していることが分かる。実験結果とFEM応力解析結果はよく一致しており、本解析の妥当性が確認できる。

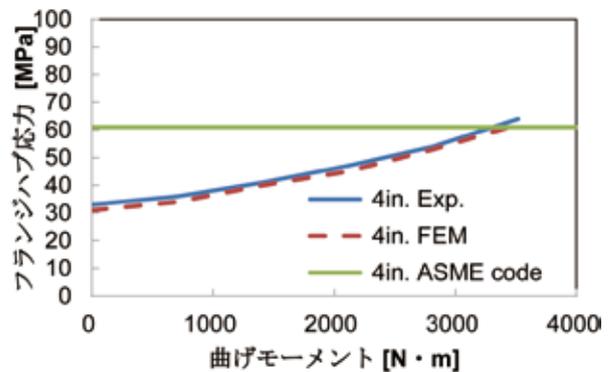


Figure11 曲げモーメントがハブ応力に及ぼす影響

## 6. 考察

### 6-1) 締結体呼び径がボルト軸力挙動に及ぼす影響

FEM応力解析を用いて締結体のボルト軸力挙動に対する呼び径の影響を調べる。Figure12はNo.GF300ガスケットを組込んだ管フランジ締結体に曲げモーメントを荷した際の最も増加したものと、最も減少したボルト軸力の変化を表している。呼び径は4、8、12、16、20、24inchとし、内圧は負荷しない条件とする。縦軸は初期ボルト締結時のボルト軸力比、横軸はボルト1本あたりに荷される曲げモーメントとしている。締結時のガスケット接触応力は10MPa、荷される最大曲げモーメント $M$ は3500N・mとし、つまり、呼び径が大きい場合はボルト数 $N$ が大きくなるため、 $M/N$ の最大値は小さくなる。曲げモーメントによって引張を受けるボルトのデータは実線、圧縮(収縮)を受けるボルトのデータは破線で表している。Figure12より、呼び径が小さいほどボルト軸力は曲げモーメントの影響を大きく受けていることが分かる。仮に同等の曲げモーメントが荷された場合、呼び径が大きい程シール性については安全であると言える。

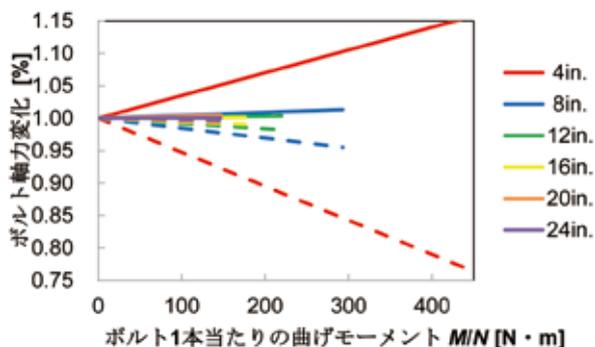


Figure 12 曲げモーメントを受ける管フランジ締結体のボルト軸力挙動に及ぼす呼び径の影響

### 6-2) 曲げモーメントと内圧の負荷順序の影響

Figure 13は漏れ量に及ぼす曲げモーメントと内圧の負荷順序の影響を示す。step1: 締め付け、step2: 曲げモーメント負荷、step3: 内圧負荷という順序(赤実線)、step1: 締め付け、step2: 内圧負荷、step3: 曲げモーメント負荷という順序(青実線)の2種類の順序で漏れ実験を行った結果をFigure 13に示す。縦軸に漏れ量、横軸に負荷される曲げモーメントを表している。曲げモーメントが3000N・m以上の場合にstep2: 内圧負荷、step3: 曲げモーメント負荷という順序の場合の方がわずかに漏れ量は大きい、ほぼ誤差レベル程度で漏れ量の差異は小さく、本実験では漏れ量に対しては曲げモーメントと内圧の負荷順序の顕著な影響は見られなかった。

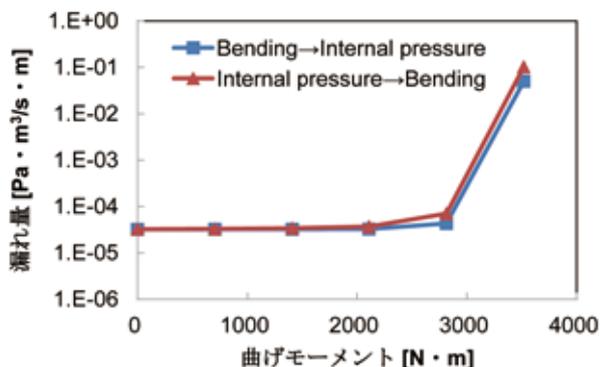


Figure 13 シール性に及ぼす曲げモーメントと内圧の負荷順序の影響

### 6-3) 曲げモーメントの作用位置の影響

Figure 14に示すようにボルト配置に対して異なる位置に曲げモーメントを負荷した場合を検討する。Figure 14 (a)は一般的に使用される垂直方向に対してボルトが対象に位置された条件である(パターンA)。Figure 14 (b)は垂直位置にボルトを位置した条件である(パターンB)。Figure 15はそれぞれのパターンの漏れ量と曲げモーメントの関係図である。

パターンAはパターンBよりも漏れ量が小さい結果となった。最も口開きが顕著な位置にボルトを位置することで面圧低下を軽減しシール性低下も軽減すると思われたが一般的に使われるパターンAの方がシール性は高かった。これは、パターンAでは4本のボルトが口開きに抵抗するのにに対し、パターンBでは3本のボルトが抵抗するため、総合してパターンBの方が口開きが大きかったためと考える。

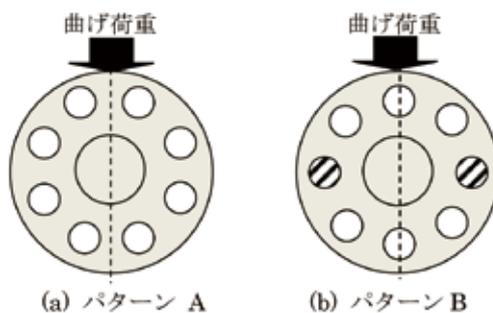


Figure 14 曲げモーメント作用位置

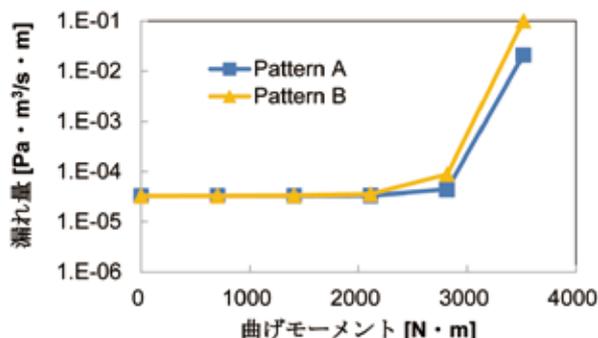


Figure 15 シール性に対する曲げモーメント作用位置の影響

## 7. おわりに

本報では、配管曲げを受けるPTFEガスケット付き管フランジ締結体のボルト軸力、ハブ応力、シール性などの力学的挙動を実験及びFEM応力解析を用いて検討し、以下の結論を得た。

- (1) FEM応力解析を用いて配管曲げと内圧を受けた4inch管フランジ締結体のガスケット接触応力を算出した。配管曲げを負荷した場合に接触面の一部のガスケット接触応力が低下し、約3500N・mに達した際に接触応力がゼロとなり、漏れ量が急激に大きくなることを示した。
- (2) 曲げモーメントを受けた際の締結ボルト軸力を実験とFEM応力解析で評価し、FEM応力解析結果が実験結果とかなり良く一致していることを示した。加えて、ボルト1本当当たりの曲げモーメント $M/N$ で整理した場合、

呼び径が大きいほど、配管曲げに耐性が高くなることを明らかにした。

- (3) FEM応力解析から得られたガスケット接触応力分布と実験から得られたガスケットの漏れ量-接触応力分布から漏れ量を予測した。実験値と比較的良く一致しており、FEM応力解析手法及び漏れ量予測手法の妥当性を示した。
- (4) 曲げモーメントと内圧の負荷順序がシール性に及ぼす影響を調べ、負荷順序が漏れ量には大きな影響を及ぼさないことが分かった。
- (5) シール性に及ぼす曲げモーメント作用位置の影響を調べ、一般的なボルト位置(パターンA)のほうが垂直位置にボルトが在る位置(パターンB)よりも配管曲げの耐性がより大きいことを明らかにした。

## 8. 参考文献

- 1) T. TAKAKI, K. SATO, Y. YAMANAKA, T. FUKUOKA, "Effects of Flange Rotation on the Sealing Performance of Pipe Flange Connections", ASME PVP Vol.478, (2004), pp.121-128.
- 2) T. SAWA, N. OGATA, T. NISHIDA, "Stress Analysis and Determination of Bolted Preload in Pipe Flange Connections with Gasket under Internal pressure", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.124, (2002), pp.22-27.
- 3) T. KOBAYASHI, T. NISHIDA, Y. YAMANAKA, "Effect of Creep-Relaxation Characteristics of Gaskets on the Bolt Loads of Gasketed Joints", ASME PVP Vol.457, (2003), pp.111-118.
- 4) 厚生労働省“労働安全衛生法施行令等の一部を改正する法令”, 政令第349号, (2008).
- 5) 日本バルカー工業株式会社, “ガスケット”, カタログNo. YC08, (2016).
- 6) K. SATO, A. MURAMATSU, T. KOBAYASHI, T. SAWA, "FEM Stress Analysis and Sealing Performance of Bolted Flanged Connections using PTFE Blended Gaskets under Internal Pressure", PVP2015-45268, Proceeding of ASME PVP 2015 Conference, (2015).
- 7) K. SATO, T. SAWA, T. KOBAYASHI, "FEM STRESS ANALYSIS of Long-term Sealing Performance for Bolted Pipe Flange Connections with PTFE Blended Gaskets under Elevated Temperature", PVP2016-63372, Proceeding of ASME PVP 2016 Conference, (2016).
- 8) T. SAWA, Y. TAKAGI, K. SATO, Y. OMIYA, H. DOI, "Effects of scattered bolt preload on the sealing performance of pipe flange connection with gaskets under external bending moment and internal pressure", PVP2012-78411, Proceeding of ASME PVP 2012 Conference, (2012).
- 9) Y. Takagi, H. Torii, T. Sawa, K. Funada, "Evaluation of Sealing Performance of Pipe Flange Connection Subjected to External Bending Moments", PVP2009-77494, Proceeding of ASME PVP 2009 Conference, (2009).
- 10) F. Ando, T. Sawa, M. Ikeda, and T. Furuya, "Assessing Leakage of Bolted Flanged Joints under Internal Pressure and External Bending Moment", Proceeding of ASME PVP 1998 Conference, 376, pp.39-44, (1998).
- 11) TTRL Tightness Testing and Research Laboratory, "Room temperature external bending moment tightness test (ROBT) on the selco seal 4" cl 150 lb 316SS/GORE-TEX gasket style", 1996.
- 12) W. J. Koves, "Analysis of Flange Joints Under External loads", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.118, pp59-63, (1996).
- 13) W. J. Koves, "Design for Leakage in Flange Joints under External Loads" PVP2005-71254, Proceeding of ASME PVP 2005 Conference, (2005).
- 14) E. C. Rodabaugh, S. E. Moore, "Evaluation of the Bolting and Flanges of ANSI B16.5 Flanged Joints - ASME Part A Design Rules", (1976).
- 15) C. J. Dekker, H. J. Brink, "External flange loads and 'Koves' -method", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.79, pp145-155, (2002).
- 16) W. Brown, "Improved Analysis of External Loads on Flanged Joints" PVP2013-97814, Proceeding of ASME PVP 2013 Conference, (2013).
- 17) ANSI/ASME B 16.5, "Pipe Flanges and Flanged Fittings", (1996).
- 18) 日本工業規格 JIS B 2251 “フランジ継手締付け方法”, (2008).

- 19) Japanese Industrial Standards. JIS B 2490 "Test method for sealing behavior of gaskets for pipe flanges", (2008).
- 20) Y. OMIYA, T. SAWA, Y. TAKAGI, "Stress Analysis and Design of Bolted Flange Connections under Internal Pressure", PVP2014-28606, Proceeding of ASME PVP 2014 Conference, (2014).
- 21) Y. OMIYA, T. SAWA, "Stress Analysis and Sealing

- Performance Evaluation of Bolted Pipe Flange Connections with Smaller and Larger Nominal Diameter under Repeated Temperature Changes", PVP2014-28730, Proceeding of ASME PVP 2014 Conference, (2014).
- 22) ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division 1 "Rules for construction of Pressure Vessels" App.2, (2004).



佐藤 広嗣  
研究開発本部  
第1商品開発部

澤 俊行 広島大学  
森本 吏一 三菱ケミカル株式会社  
小林 隆志 沼津工業高等専門学校  
元野 雄太 研究開発本部 第1商品開発部