

No.GF300付き24インチ管フランジ締結体の力学的特性とシール性評価

1. はじめに

ガスケットが組み込まれた管フランジ締結体は石油化学プラント、発電プラント、製鉄プラントなどで数多く使用されている。石綿ガスケットは高い耐熱性、シール性、高強度で取扱いやすい上に安価であるので広く使用され、石綿ガスケットに関する研究も行われてきた^{1)~3)}。以前から欧米では進んでいたが、日本でも2000年頃から人体への健康被害が数多く報告されたことで規制が設けられ、2008年より日本では石綿ガスケットは使用出来ない⁴⁾。

石綿ガスケットには石綿ファイラークラス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種類が存在し、うず巻形ガスケットにおいては、膨張黒鉛ファイラを代替することで大きな問題は生じなかった。一方で、石綿ジョイントシートガスケットの代替にはアラミド繊維を配合したノンアスジョイントシートガスケット、膨張黒鉛シートガスケット、PTFE配合シートガスケットが開発検討された⁵⁾。アラミドジョイントシートガスケットはゴム分を多く含むために高温環境下において硬化して割れる、ボルトの増締めが出来ないなどの問題があり、膨張黒鉛シートガスケットは容易に傷つきやすく取扱い性が悪いという課題が生じた。このような背景もあり、日本ではPTFE配合ガスケットが広く使用されるようになった。PTFEは耐熱性、耐薬品性、シール性に優れており、クリープが大きいという課題も配合や製造方法の改良によって大きく改良されている。しかし、これまでは石綿ガスケットにあった実績がPTFE配合ガスケットにはなく、理論的な特性研究データが必要となっている。これまでに、筆者らは当社のPTFE配合ガスケットNo.GF300ガスケットが組み込まれた管フランジ締結体に対し、常温下、高温環境下及び配管曲げ作用下におけるガスケット付き管フランジ締結体の力学的挙動解明に関する研究を進めている^{6)~8)}。

ガスケット付き管フランジ締結体には種々の呼び寸法があり、呼び径が異なるとその特性が変わることが知られている。特に呼び径が大きくなると締結体のシール性が低下するとも

言われている。しかし、費用や時間の問題からこれまでのガスケット付き管フランジ締結体の研究は2~6インチの比較的小口径寸法を対象としたものがほとんどであり、大口径フランジ締結体の特性は不明瞭な点が多いというのが現状である。

Sawaらは20インチ寸法の管フランジ締結体を用いてうず巻形ガスケット付き締結体の特性を明らかにし、小口径管フランジ締結体の特性と異なること及びシール性が劣ることを示している^{9)~13)}。しかし、ASME規格では更に呼び径の大きい24インチフランジ寸法が規定されており、加えて、広く使用されているPTFE配合ガスケットが組み込まれた大口径管フランジ締結体の力学的特性やシール性の研究はなされていないため、このようなガスケットを用いた管フランジ締結体の研究が必要となっている。

本研究では、FEM解析と実験によりNo.GF300付き24インチ管フランジ締結体の力学的特性を評価することを目的としている。まず、JIS B 2490に準拠してNo.GF300ガスケットの基礎特性を調べる¹⁴⁾。これら基礎データをFEM解析に入力し、ボルト軸力変動とガスケット接触応力分布を算出する。加えて、FEM解析から算出したガスケット接触応力分布と実験から得られた漏れ量-ガスケット応力関係を用いて管フランジ締結体からの漏れ量を推定する。FEM解析の妥当性を示すために実験を行い、実験結果とFEM解析結果の比較検討を行う。実験では管フランジ締結体からの漏れ量とボルト軸力変動を測定する。本研究で用いる管フランジ締結体はASME class300 24インチ寸法の締結体としている。

本研究で用いるNo.GF300をはじめとした当社のPTFE配合の高機能シートガスケットは耐熱性、耐薬品性、シール性、取扱い性が優れているので広く使用されている。加えて、ゴム分を一切含まないため、300℃以下の温度や経時では材料劣化は生じず、本研究において精度良く力学的な特性を評価できると考えている。

2. 実験方法

Figure1はボルト軸力変動及び漏れ量を測定するためのNo.GF300ガスケット付き管フランジ締結体装置を示す。管フランジ締結体寸法はASME class300 24インチ、材料はSUS304製である¹⁵⁾。管の有無によって締結部の特性が大きく変わることが知られており、本装置は実機と同様に長い管を有するものとしている。ガスケットの寸法もASME class300 24インチ、厚さ3.0mmとし、ボルト呼び径はM39である。

24本全てのボルトの軸部にはひずみゲージが貼り付けられており、ひずみ計と繋ぐことでボルト軸力を計測及び記録出来る。なお全てのひずみゲージは予め校正されている。締結体からの漏れ量は圧力降下法を用いて、以下の式(1)によって計測する。

$$L = \frac{MV}{tRT_1} \left(P_1 - \frac{T_2}{T_1} P_2 \right) \quad (1)$$

ここで、 L :漏れ量、 M :モル質量、 V :装置の内容積、 t :測定時間、 R :ガス定数、 T_1 :測定開始時の温度、 T_2 :測

定終了時の温度、 P_1 :測定開始時の内圧力、 P_2 :測定終了時の内圧力。

初期内圧力 P_1 は2MPaとし、実験は常温環境下で行われる。締付けは平均ガスケット応力10、20、30、及び40MPaに相当する34.2、68.5、102.7、及び136.9kNの初期ボルト軸力を負荷する。締付け後にボンベよりヘリウムガスを流入し、漏れ量を測定する。

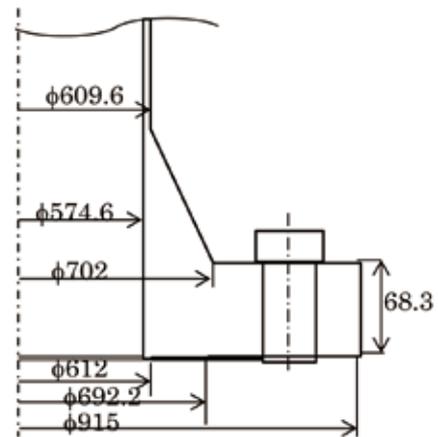


Figure2 24インチ管フランジ締結体の寸法



Figure1 24インチ管フランジ締結体の実験装置

3. ガスケット特性

No.GF300ガスケットの圧縮特性及び漏れ量-ガスケット応力関係を予め実験により測定し、測定値をFEM解析に用いる。

3-1) 圧縮特性

Figure3に示す実験装置を用いて、まず常温下におけるNo.GF300ガスケットの圧縮特性を測定する。圧縮用のプラテンはJIS 10K50A寸法の平面座を有している。一對のプラテンの間にガスケットを挟み込み、材料試験機によって圧縮し、その際の圧縮量を測定する。Figure4は材料試験によ

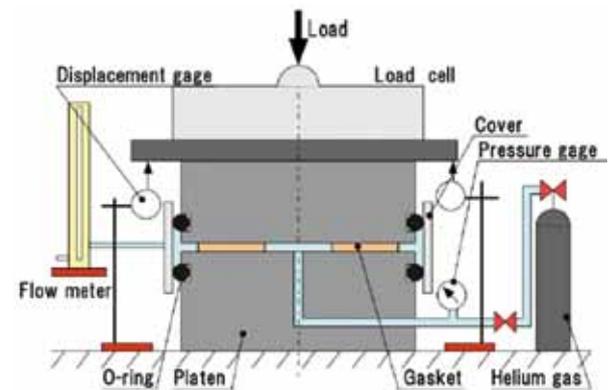


Figure3 ガスケット特性測定装置

て得られた応力-圧縮量関係(圧縮特性)を示す。圧縮及び復元カーブには非線形性とヒステリシス性が見られる。FEM解析にはこれら挙動も考慮し、計算する。

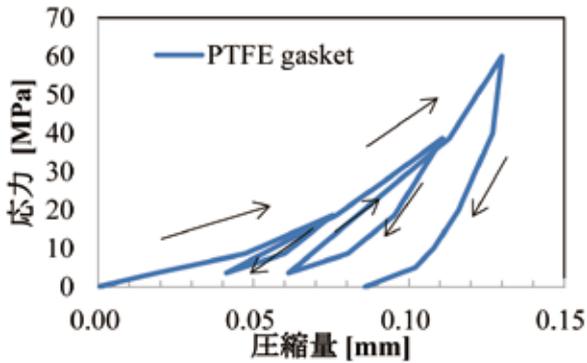


Figure4 ガasketの圧縮特性

3-2) シール性

圧縮特性と同様にFigure3に示すプラテン装置を用い、JIS B 2490に準拠してガスケットの漏れ量-ガスケット応力関係を測定する。材料試験機によって段階的に圧縮し、ヘリウムガス2MPaを負荷した場合の漏れ量を測定する。ガスケット部から漏れ出たガスはゴムOリングとスリーブによって回収され、石鹼膜流量計を用いて測定される。Figure5は測定された漏れ量-ガスケット応力関係である。縦軸は漏れ量の対数表示、横軸はガスケット応力を示している。ガスケット応力が大きくなるほど漏れ量は小さくなること分かる。ガスケット応力が30MPa以上では、漏れ量が微小で測定出来なかったため、データが示されていない。

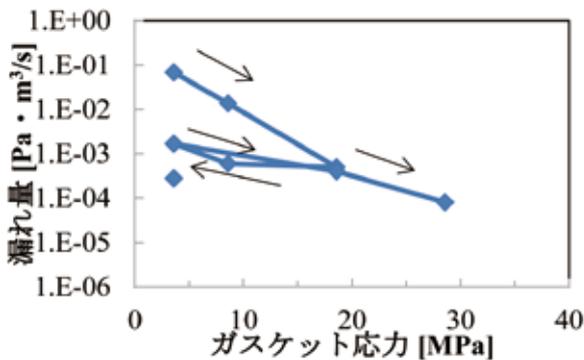


Figure5 ガasketの漏れ量-応力関係

4. FEM解析

Figure6は24インチ寸法のガスケット付き管フランジ締結体のFEM解析モデルである。解析には汎用コードABAQUSを用い、要素数は2695、節点数は4408である。締結体の対称性を考慮し、1/96モデル(周方向に1/48、軸

方向に1/2)としている。本モデルでは、簡易化のために六角形状のナットを断面積が等価の円形とし、ねじも省略している。Figure7はFEM解析における境界条件を示している。全ての要素は対称境界面で各方向に拘束されている。ボルトモデルに軸方向の荷重を負荷することで初期締付力を与え、内圧負荷時には拘束する。内圧力はフランジ及び管内面に圧力を作用させている。

フランジ及びボルトのモデルには弾性要素を用い、ガスケットにはABAQUSガスケット要素を用いている。このABAQUSガスケット要素は非線形性とヒステリシス特性を考慮することが可能である。FEM解析では、ボルト軸力の変動とガスケット接触応力分布を算出する。



Figure6 管フランジ締結体のFEM解析モデル

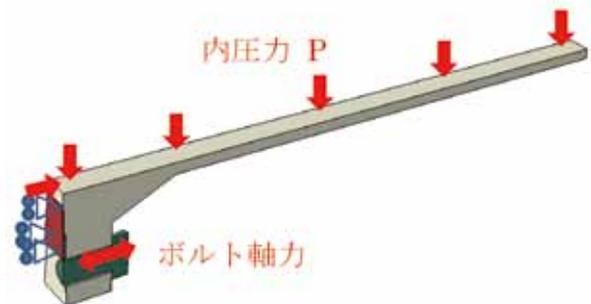


Figure7 FEM解析の境界条件

5. 実験及びFEM解析結果

5-1) ボルト軸力

Figure8は実験とFEM解析から得られた内圧作用時のボルト軸力変動の結果を示す。横軸は内圧力、縦軸はボルト軸力とし、実線は実験結果、破線はFEM結果を示している。実験結果のボルト軸力は、24本のボルトの平均値としている。初期締付けはガスケット接触応力10、20、30、及び40MPaに相当するボルト軸力34.2、68.5、102.7、及び136.9kNとする。全ての条件において、内圧力が大きくなるほどボルト軸力は低下した。これは、内圧力によってフランジローテーションが増大し、ボルト軸が収縮することによるものと

考えられる。実験結果とFEM解析結果はかなりよく一致しており、FEM解析の妥当性が示されている。

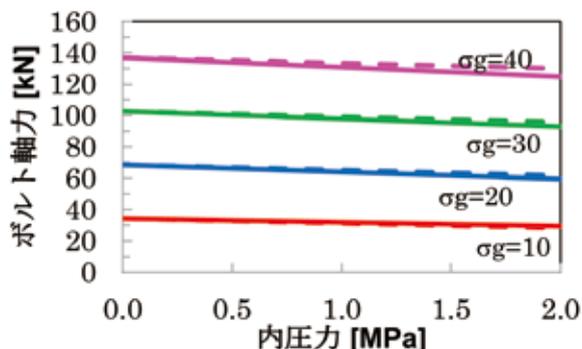


Figure8 内圧作用時のボルト軸力変動

5-2) ガasket接触応力と漏れ量

Figure9はFEM解析から得られた締付時及び内圧2MPa作用時におけるガスケット接触応力分布を示す。初期締付けにおける平均ガスケット接触応力は10、20、30及び40MPaである。得られた全てのコンター図において、ガスケット外径部はフランジ平面座から外れてフランジとは接触しておらず、接触応力がゼロであることが分かる。初期締付時のデータを見ると、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大きくなっている。また、平均ガスケット接触応力が大きい場合でも、内径側のガスケット接触応力がゼロであることが分かる。これはフランジローテーションによってガスケット内径側がフランジと分離し、非接触になっているからである。加えて、ガスケット接触応力の周方向の分布の変化は極めて小さいことも分かった。内圧作用時、軸方向のスラスト力によってガスケット接触応力の総和は減少する。

ここで、FEM解析から得られたガスケット接触応力分布及び実験から得られたFigure4にも示されている漏れ量-ガスケット応力関係から、締結体からの漏れ量を推定する^{11), 12)}。Figure10は実験で測定した漏れ量と推定した漏れ量の比較を示す。縦軸は総漏れ量をガスケット接触外周長さで除することにより単位長さ当たりの漏れ量としている。ガスケット接触応力が大きくなるほど、漏れ量は小さくなる事が分かる。また、推定した漏れ量と実験結果はかなりよく一致しており、漏れ量推定の方法およびFEM解析の妥当性が示されている。

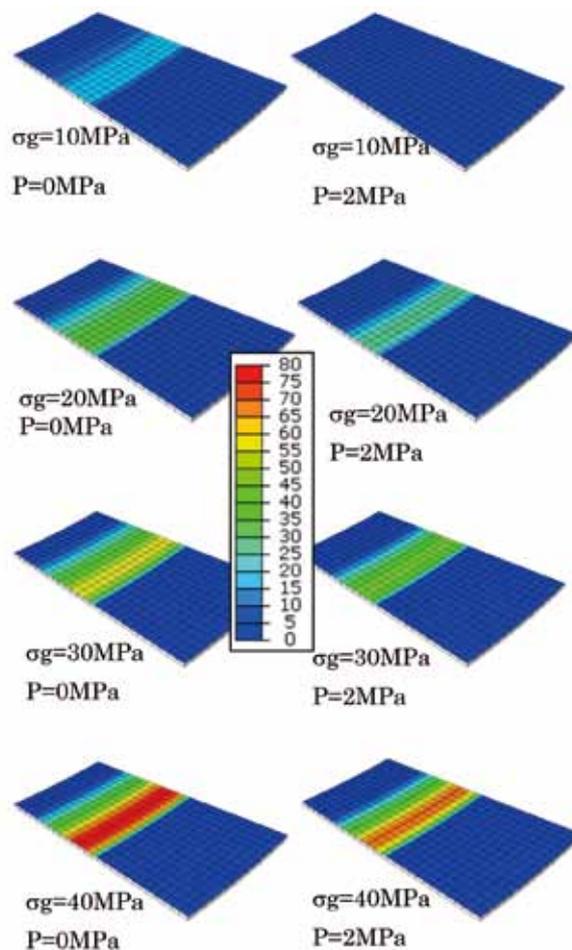


Figure9 FEM解析から得られたガスケット接触応力分布

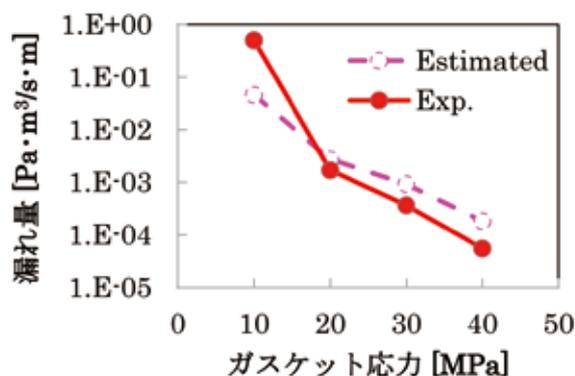


Figure10 ガスケットからの漏れ量の測定値と推定値の比較

6. 考察

6-1) 管フランジ締結体の呼び径がボルト軸力変動に及ぼす影響

Figure11はFEM解析から算出したNo.GF300ガスケットを組み込んだ2、4、8、12、16、20、及び24インチの管フランジ締結体に内圧を作用させた場合の内力係数の値を示し

ている。目標ガスケット接触応力の平均値を20MPa、内圧は2MPaとしている。縦軸に示される内力係数は外力(この場合は内圧力)を受けた場合のボルト軸力の増分割合であり、正の値はボルト軸力が増加、負の値は軸力が減少することを表している。管フランジ呼び径が大きくなるほど内力係数は小さくなる傾向であることが分かった。これは、管フランジ呼び径が大きいくほどフランジリングの曲げ剛性が小さくなり、内圧作用時にフランジローテーションが助長されやすく、その結果ボルトが収縮しやすくなるためである。Figure12は各管フランジ呼び径寸法におけるガスケット接触応力分布を示している。横軸はガスケット幅に対する割合とし、無次元化している。いずれの寸法条件においても内圧作用時にガスケット接触応力は低下しているが、これは呼び径が大きくなるほど顕著であった。呼び径が大きくなるほど内圧力の受圧面積が大きくなり、スラスト力が大きくなること、及び内力係数の値が負になるため、ガスケット接触応力が失われる割合が大きくなるのが原因と考えられる。

Figure13は、2~24インチ管フランジ締結体を対象にFigure10の結果と同様の方法で推定した漏れ量を表している。目標ガスケット接触応力の平均値を30MPaとし、漏れ量は総漏れ量をガスケット接触外周長さで除して単位長さ当た

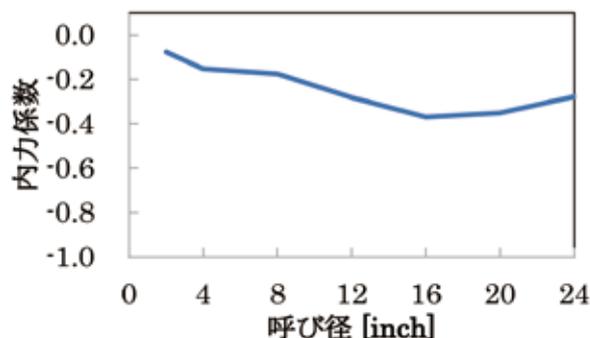


Figure11 管フランジ呼び径が内力係数に及ぼす影響

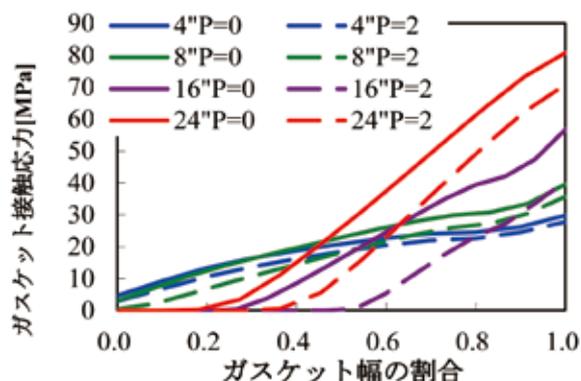


Figure12 各管フランジ呼び径の締結体における半径方向のガスケット接触応力分布

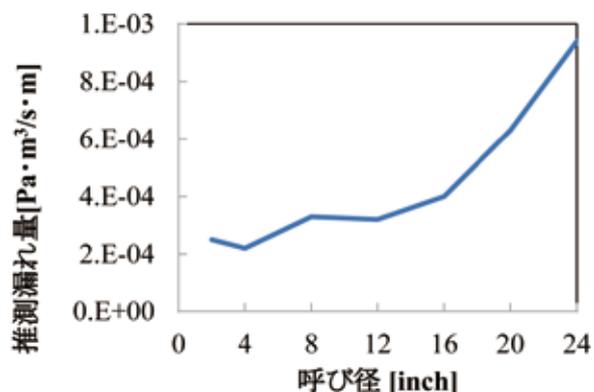


Figure13 管フランジ呼び径が単位長さ当たり漏れ量に及ぼす影響

りの漏れ量としている。管フランジ呼び径が大きくなるほど単位長さあたりの漏れ量は増加するが、縦軸は対数表示ではなく線形表示であり、実際には差異はさほど大きくはない。

6-2) No.GF300と膨張黒鉛フィラーガスケットNo.6596Vを用いた各管フランジ締結体のシール性の比較

Figure14はNo.GF300と膨張黒鉛フィラーガスケットNo.6596Vを用いた管フランジ締結体の単位長さあたりの漏れ量とガスケット接触応力の関係を示す。これまでと同様に管フランジ締結体寸法はASME class300 24インチ、内圧は2MPaである。No.6596Vを用いた管フランジ締結体に対してもFEM解析と実験を比較し、FEM解析手法の妥当性を確認している。ガスケット接触応力がより小さい場合は漏れ量が比較的大きいものの、ガスケット接触応力がより大きい場合はNo.6596Vを用いた管フランジ締結体よりもNo.GF300を用いた管フランジ締結体の方がシール性は優れていることが分かった。No.6596Vのフィラー材料の膨張黒鉛を用いた締結体は比較的小さい応力でも良好なシール性を発揮する。一方で、No.GF300はより小さい応力ではフランジ面との馴染みが得られないが、ガスケット接触応力が大きくなった場合に

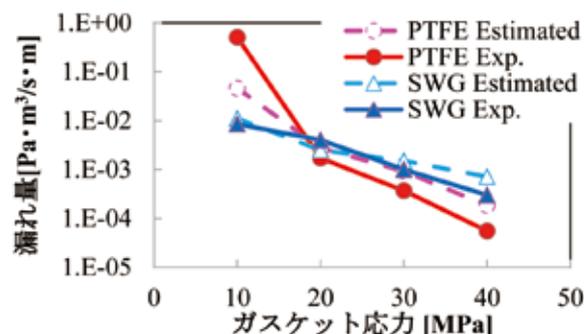


Figure14 No.GF300とNo.6596Vを用いた各管フランジ締結体のシール性の比較

はフランジ面との馴染みが得られ、また、圧縮による高密度化によってより高いシール性を発揮したと考えられる。強度計算上、うず巻形ガスケットが適用出来ない管フランジ締結体にNo.GF300を用いてもうず巻形ガスケットを用いた場合と同等以上のシール性を得ることが分かった。

7. おわりに

本研究では、No.GF300付きASME class300 24インチ管フランジ締結体を対象に、実験およびFEM解析により力学特性を調べ、以下の結論が得られた。

- (1) JIS B 2490に準拠し、No.GF300の圧縮特性、漏れ量-ガスケット接触応力関係を測定した。
- (2) 上記のガスケット特性とFEM解析から得られたガスケット接触応力分布結果により、管フランジ締結体からの漏れ量を推定した。加えて、実験と比較し両結果はかなりよく一致することを示し、その推定手法の妥当性を示した。
- (3) FEM解析及び実験によって、No.GF300付き24インチ管フランジ締結体に内圧が作用した場合にフランジローテーションによりボルト軸力が低下することを明らかにした。また、FEM解析結果は実験結果とかなりよく一致していることを示した。
- (4) FEM解析とガスケット基礎データを用いて、管フランジ呼び径が大きくなるほど、内力係数は小さく、漏れ量は大きくなる傾向にあることを明らかにした。
- (5) No.GF300は推奨面圧35MPaを負荷した場合、膨張黒鉛フィラーうず巻形ガスケットを用いた管フランジ締結体に比べて高いシール性を発揮することを明らかにした。強度計算上、うず巻形ガスケットが適用できない管フランジ締結体においても、No.GF300を用いた場合でもうず巻形ガスケットを用いた場合と同等以上のシール性を得ることが分かった。

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) K. SATO, T. SAWA, R. MORIMOTO, T. KOBAYASHI, "FEM Stress Analysis and Mechanical Characteristics of Bolted Pipe Flange Connections with PTFE Blended Gaskets Subjected to External Bending Moments and Internal Pressure", PVP2017-65332, Proceeding of ASME PVP 2017 Conference, (2017).
- 9) Y. TAKAGI, T. SAWA, H. TORII, Y. OMIYA, "Effects of Scatter in Bolt Preload on the Sealing Performance of Pipe Flange Connections Under Internal Pressure (Case Where the Nominal Diameter of Pipe Flange Connection is 20")", PVP PVP2010-25499, Proceeding of ASME PVP2010 Conference, (2010).
- 10) Y. TAKAGI, T. SAWA, H. TORII, Y. OMIYA, "Effects of Scatter in Bolt Preload on the Sealing Performance of Pipe Flange Connections Under Internal Pressure (Case Where the Nominal Diameter of Pipe Flange Connection is 20")", PVP2010-25499, Proceeding of ASME PVP2010 Conference, (2010).
- 11) 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) .

- 12) 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) .
- 13) A. MURAMATSU, K. SATO, M. U. KHAN, T.

SAWA, “FEM Stress Analysis and the Sealing Performance evaluation of Bolted Pipe Flange Connections with Large Nominal Diameter Subjected to Internal Pressure”, PVP2016-63407, Proceeding of ASME PVP 2016 Conference, (2016).

- 14) Japanese Industrial Standards. JIS B 2490 “Test method for sealing behavior of gaskets for pipe flanges”, (2008) .
- 15) ANSI/ASME B 16.5, “Pipe Flanges and Flanged Fittings”, (1996) .



佐藤 広嗣
研究開発本部
第1商品開発部



鄭 興
中国総合研究所
シールエンジ開発チーム



澤 俊行
広島大学 名誉教授