

PTFE系ガスケット付きボルトフランジ 締結体の高温・長期特性評価

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高温及び長期条件で使用されることが多い。日本ではその高い耐熱性、シール性、強度、取扱性、低コスト性から、2008年の規制まで多くの石綿ガスケットが使用されていた。これまでに石綿ガスケットに関する研究^{1)~5)}は多くなされ、石綿ガスケット付き締結体の密封性能などの特性が明らかにされている。日本では2008年からの石綿製品の使用の禁止に基づき非石綿製品の使用が義務づけられ⁶⁾、これに伴い非石綿ガスケット製品の開発改良が進んでいる。

従来の石綿ガスケットは大別すると、石綿ファイラーを含むうず巻形ガスケット、石綿ジョイントシートガスケットの2種類であった。石綿代替においては、うず巻形ガスケットでは膨張黒鉛に置き換えることにより大きな問題は生じなかったが、石綿ジョイントシートガスケットでは非石綿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とPTFE系シートガスケットの改良が進められた。⁷⁾ アラミド繊維を含んだジョイントシートガスケットは多くのゴム成分を含有するために耐熱性がより低く、膨張黒鉛シートガスケットは傷がつきやすいという課題が残されていた。そこで、日本ではPTFE系ガスケットが新しく改良され、広く使用されている。新しく開発されたPTFE系ガスケットは、課題であったクリープ特性が大きく改善されたと認識されているが、ガスケットの応力-ひずみ線図、基本漏れ特性(文献、JIS B 2490)及びクリープ特性などの機械的特性の詳細は明らかにされていない。更に従来の石綿ガスケット付き締結体の密封性能に対してこのPTFE系ガスケット付き締結体の密封性能が良好なのかどうかも十分示されていない。

これまでの研究で常温におけるPTFE系ガスケット付き締結体の密封性能、フランジのハブ応力、ボルト軸力変動(内力係数)及びガスケット接触応力分布などの力学的特性は研究され、石綿ジョイントシートガスケット付き締結体に比べて

密封性能がかなり優れていることが示されている⁸⁾が、しかし高温下における特性は不明瞭な部分が多い。⁸⁾そのため、高温下におけるクリープ及び密封性能などの締結体の力学的特性の研究が必要とされている。

本報では、実験とFEM解析によって高温下におけるPTFE系ガスケット付き管フランジ締結体のクリープ特性とその影響を含むボルト軸力挙動及び密封性能などの力学的特性を評価することを目的としている。まずはPTFE系ガスケットの応力-ひずみ特性、線膨張率及び基本漏れ特性などの基礎特性を測定し、高温下のクリープ特性も測定する。有限要素(FEM)解析では、PTFE系ガスケット付きフランジ締結体のボルト軸力変動、フランジハブ応力及びガスケット接触応力分布を算出し、各温度における漏れ量をガスケット接触応力分布及び基本漏れ特性を用いて推測する。実験から得られたボルト軸力、フランジハブ応力及び漏れ量と比較も行うことによりFEM解析の妥当性も確認する。

実験ではPTFE系ガスケット付き締結体の密封特性、ハブ応力及びボルト軸力の変化を測定する。

本研究では、評価ガスケットを当社製品No.GF300とする。No.GF300は耐熱性が高くゴム分を一切含まないために熱や時間の劣化がなく、力学的な検討では精度良い評価が可能である。

2. 実験装置

Figure1は締結体試験装置を示し、この試験装置を用いて締結体からのヘリウムガスの漏れ量、ボルト軸力及びフランジハブ応力を測定する。SUS304製のフランジで、寸法はASME/ANSI class300 2inchとしている。締結体にはヒーターが埋め込まれており、3℃/minの速度で加熱される。熱電対を用いて温度を測定及び制御し、ひずみゲージによってフランジハブ応力を測定する。各ボルトにもひずみゲージが貼り付けられており、ボルト軸力の測定を行う。ボルト締付けは“JIS B 2251-2008 フランジ継手締付け方法”に準拠して行っ

た。

漏れ量は圧力降下法を用いて測定し、式(1)を用いて算出する。

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

ここで、 L :漏れ率 [$\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$]、 M :モル質量[kg]、 V :装置内容積 [mm^3]、 t :測定時間[s]、 R :気体定数 [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]、 T_1 :測定開始時温度 [$^{\circ}\text{C}$]、 T_2 :測定時間後温度 [$^{\circ}\text{C}$]、 P_1 :測定開始時内圧[MPa]、 P_2 :測定時間後内圧[MPa]としている。

ガスケット寸法はASME/ANSI class300 2inchに準拠し、厚さは1.5mmとしている。作用内圧は2MPa、管温度が常温、100 $^{\circ}\text{C}$ 及び200 $^{\circ}\text{C}$ としている。ボルト初期締付けは平均ガスケット応力35MPaに相当するボルト軸力が一様に16.4kNになるように締付け作業を行っている。

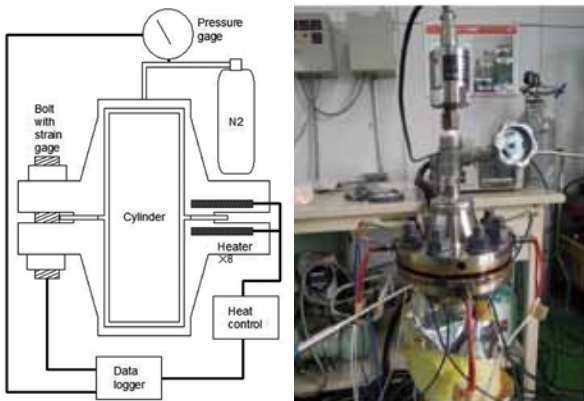


Figure1 締結体試験装置

3.ガスケット特性測定

FEM解析に用いるガスケット圧縮特性、基本漏れ特性、線膨張係率、及びクリープ特性を測定する。

3-1) ガスケット応力-ひずみ特性

Figure2に示す装置を用いて常温、50 $^{\circ}\text{C}$ 、100 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ 及び300 $^{\circ}\text{C}$ におけるガスケット応力-ひずみ関係を測定する。装置はJIS 10K50Aに基づいた寸法とし、フランジに埋め込まれたヒーターにより管内壁(Figure1)を加熱する。

Figure3は各温度におけるガスケット接触応力とひずみの測定結果を示している。温度がより高いほどひずみが大きくなっており、温度依存性が示されている。これは、高温にな

ることによりガスケット材料が軟化したためだと考える。

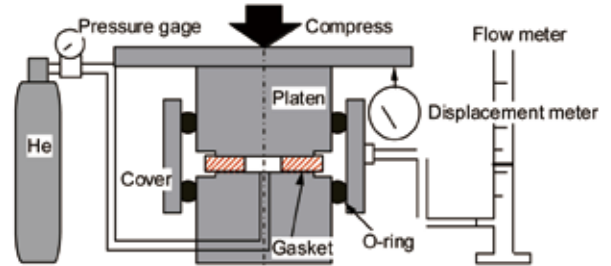


Figure2 プラテンによるガスケットの漏れ量測定装置、JIS B 2490)

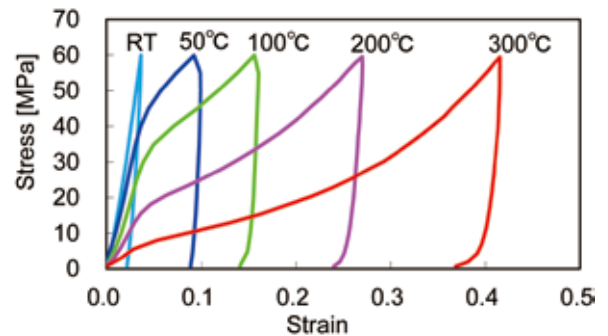


Figure3 測定されたガスケットの応力-ひずみ関係

3-2) 密封特性

JIS B 2490¹¹⁾に準拠した常温漏れ量測定と、200 $^{\circ}\text{C}$ における除荷過程での漏れ量測定を行う。試験装置は圧縮試験同様にFigure2に示すものを用い、試験ガスは2MPaのヘリウムガスとしている。

Figure4は実験から得られた常温基本漏れ率(単位時間あたりの漏れ率、 $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)を示している。ガスケット接触応力が20MPa以上の場合は漏れ率が定測下限値 $5\times 10^{-5} \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以下であったため測定できなかった。

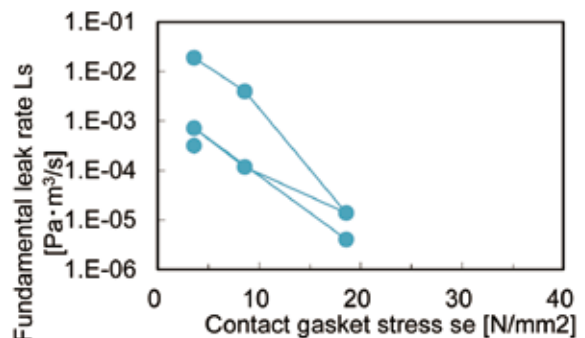


Figure4 プラテン試験による常温下の漏れ率-ガスケット接触応力関係

Figure5は初期ガスケット接触応力を198、25.5及び35.0MPaとした場合の200℃における除荷時の基本漏れ率を示している。結果より、高温の場合のほうが密封特性は高いことが分かる。これは、高温時にガスケット材料が軟化することにより、フランジの微小隙間をより密に埋められたからだと推測される。

3-3) 線膨張率

Figure6にTMA (Thermal Mechanical Analysis)を用いて測定して線膨張率を示す。温度が高くなるほど線膨張率は高くなることわかる。

3-4) クリープ特性

長期使用を想定し、Figure7に示す装置を用いてガスケットのクリープ特性を測定する。ガスケット寸法はφ22-φ58とし、ガスケット応力は12.5、25.0及び35.0MPa、温度は200℃としている。Figure8は測定されたガスケットのクリープひずみを示している。横軸は測定時間、縦軸はクリープひずみを表している。時間経過とともにクリープひずみが増加していることが示されている。また、ガスケット応力がより高いほどクリープひずみが大きくなり、応力依存性も確認できた。これらの実験結果を式(2)で同定し、有限要素(FEM)解析に入力する。

$$\dot{\epsilon}_c = a \cdot \sigma^n \cdot t^j \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_c$:クリープひずみ速度[1/s]、 σ :応力[MPa]、 t :測定時間[s]、 a 、 n 、 j 実験から得られる定数 $a = 1.61 \times 10^{-5}$ [1/MPa]、 $n = 1.25$ 、 $j = -0.915$ 。

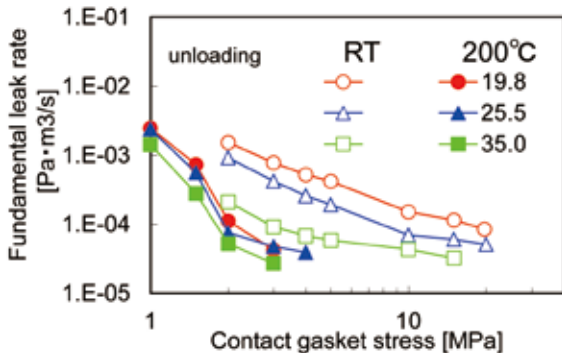


Figure5 プラテン試験による常温と200℃下の除荷過程におけるガスケット接触応力が漏れ率に及ぼす影響

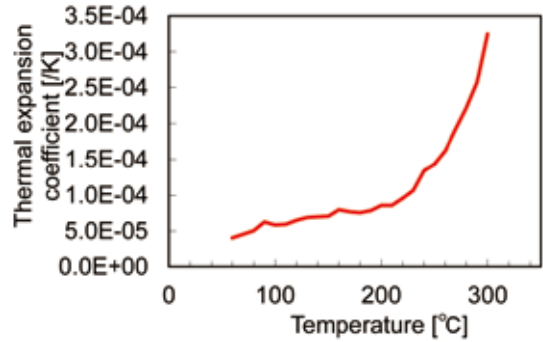


Figure6 ガスケットの線膨張率

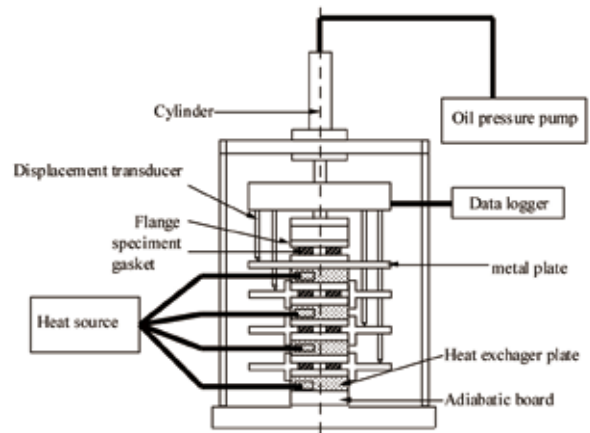


Figure7 ガスケットのクリープ試験装置

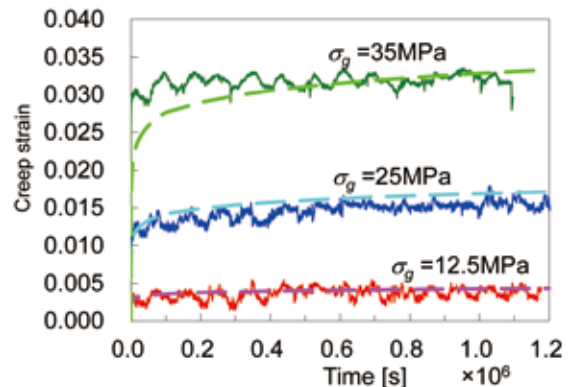


Figure8 測定されたガスケットのクリープひずみ

4. 有限要素 (FEM) 解析

有限要素(FEM)解析は汎用コードABAQUS(Ver.6.13.4)を用いる。Figure9はFEM解析モデルを示す。対称性を考慮し、軸方向に1/2、周方向に1/16としている。ボルトとナットは一体とし、ねじは省略している。また、ナットは六角形から円形に簡略化している。

Figure10は境界条件を示している。ボルトの対称面に各

ボルト応力を負荷している。Step2では容器内側に温度と内圧を作用させている。フランジ及びボルト・ナットは弾性-伝熱要素、ガスケットは弾塑性-伝熱-粘性要素でモデリングしている。Table1は各材料の材料定数を示している。

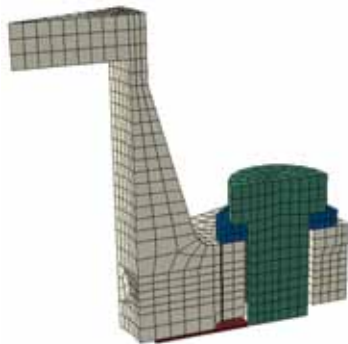


Figure9 FEM解析モデル

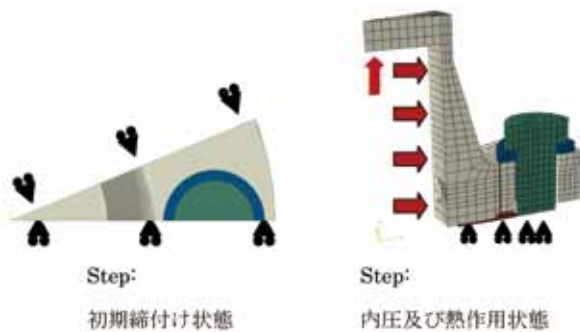


Figure10 境界条件

Table1 各部材の材料定数

	フランジ	ボルト	ガスケット
縦弾性係数[GPa]	200	200	Fig.3
ポアソン比	0.3	0.3	0.45
線膨張率[1/K]	1.12 E-05	1.09 E-05	Fig.6
熱伝導率[W/m・K]	4.4 E-02	1.1 E-02	2.5 E-05
比熱[J/kg・K]	500	500	1000
密度(常温)[kg/m ³]	7800	7800	2.3

5. 実験及びFEM解析結果

5-1) ボルト軸力変化

Figure11及び12はFEM解析から得られた100℃及び200℃条件下におけるボルト軸力変化を示す。実線はFEM解析結果、破線は実験結果を表している。なお、同図にはフランジ温度も示している。初期ボルト軸力は16.4kNである。フランジを100℃まで加熱し24時間保持、その後24時間毎に室温まで冷却する熱サイクルを4回行っている。

Figure11及び12より、ボルト軸力は締結体の温度に大きく影響を受けていることが分かる。初期の加熱時には、ガスケットの剛性低下により、ガスケットひずみの増加、すなわちガスケット厚さが減少することによりボルト軸力が比較的大きく低下している。熱サイクルの温度増減とともにボルト軸力も増減するのは、各部材の熱膨張の差によるものである。ボルト軸力の変化については、加熱温度が100℃の場合よりも200℃の場合の方が大きいことから温度の影響が大きいことが分かる。200℃の場合、ガスケット接触応力が4.3MPaに相当する2kNまでボルト軸力が低下したが、漏れは確認されなかった。

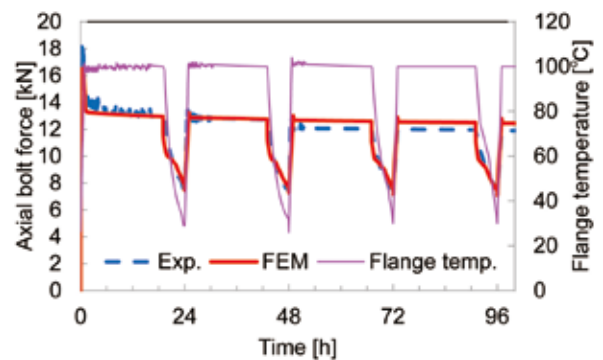


Figure11 100℃での締結体のボルト軸力変化の比較

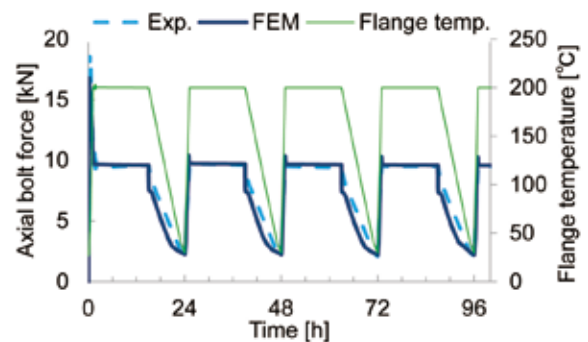


Figure12 200℃での締結体のボルト軸力変化の比較

5-2) フランジハブ応力

Figure13は初期ボルト締付け時及び、その後加熱した時のフランジハブ応力の値を示している。同図にはASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division 1¹⁴⁾に基づいて計算した結果も併記している。フランジハブ応力の値についても、実験結果と解析結果はかなり良く一致しており、FEM解析の妥当性が示されている。

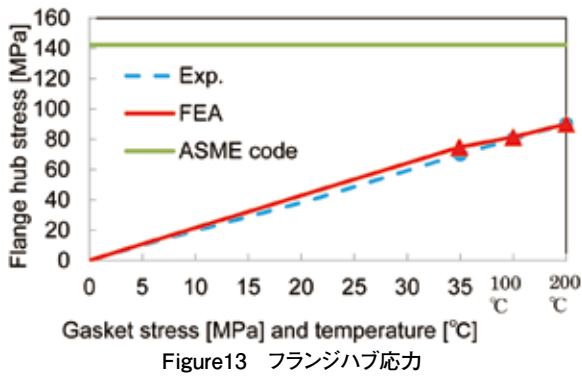


Figure13 フランジハブ応力

5-3) ガスケット接触応力分布と漏れ率

Figure14は初期ボルト締付け時、100℃加熱時及び200℃加熱時の締結体中のガスケット接触応力分布を表したコンター図である。外径側はフランジ座と接触していないために接触応力はゼロである。接触部においては、フランジローテーションに起因して外径側になるほどガスケット接触応力が大きく、円周方向においては分布がかなり小さいことが確認できる。加熱時にはボルトとの接触で外径側の一部が変形していることも認められる。

Figure15はガスケット接触応力の半径方向の平均値とFigure4及び5に示す密封特性を用いて漏れ量を推測した結果を示している。縦軸は漏れ率を接触外径で除した単位長さ当たりの漏れ率、横軸はガスケット接触応力としている。FEM解析結果と実験結果はかなり良く一致しており、FEM解析を用いた漏れ率推測の妥当性が示されている。

5-4) 締結体の高温・長期特性予測

ガスケット締結体は高温・長期条件で使用されるため、高温・長期条件で密封性能を評価することが必要である。Figure16はFEM解析を用いて推測した10年間のガスケット接触応力挙動を示している。同図には密封限界応力($1.7 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以上の漏れ率が生じる応力)も記載しており、ガスケット接触応力がこの値を下回ると漏れが生じるとする。締結体条件はこれまでの評価と同様で寸法はASME/ANSI class 300 2inch、流体(管内壁)温度は200℃としている。2年毎にシャットダウンがあり、FEM解析でも考慮している。初期ガスケット応力が25MPaの場合、シャットダウンの際にシール限界面圧を下回り、漏れが生じるおそれがあるという結果となった。それに対し、初期ガスケット応力を35MPaとした場合、ガスケット面圧は密封限界応力以上を保持し、シール性も保持されることが考えられる。増締めを行った場合も同様で、密封特性の保持が可能である。

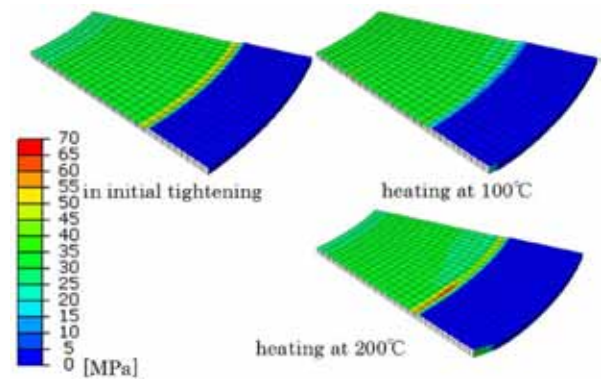


Figure14 FEM解析によるガスケット接触応力分布

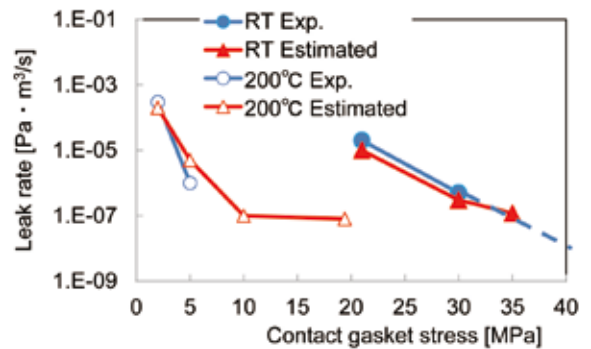


Figure15 実験から得られた締結体の漏れ率とFEM解析から推測された漏れ率の比較

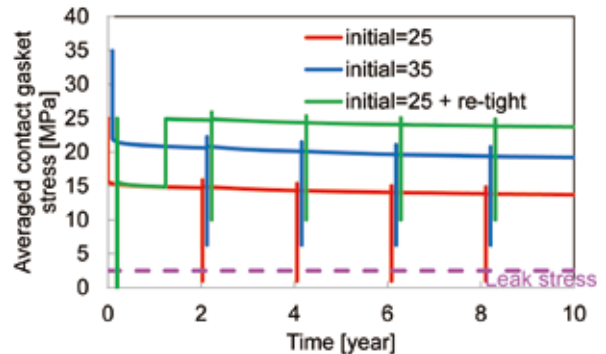


Figure16 FEM解析から推測した10年間の締結体のガスケット接触応力挙動

6. おわりに

本研究では実験とFEM解析を用いてPTFE系ガスケット(No.GF300)付き2インチフランジ締結体の高温・長期特性を評価し、締結体の常温及び200℃での長期健全性に関して良好な性能を示すことを明らかにした。得られた結論は以下の通りである。

- (1) PTFE系ガスケット(No.GF300)の圧縮特性や基本密封特性における温度依存性、クリープ特性の応力依存性など示した。その結果、常温では本PTFE系ガスケット付

き締結体の密封性能が良好であることを示した。

- (2) PTFE系ガスケット付き締結体におけるボルト軸力が熱サイクルに大きな影響を受けることを示し、更に200℃における締結体の密封性能も良好であることを示した。なお、ハブ応力はASME Codeの計算値よりも小さいことを確認した。
- (3) FEM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率-ガスケット接触応力関係を用いて締結体からの漏れ率を予測した。また、その予測値が実験値と比較することで漏れ量予測手法の妥当性を確認した。常温では密封限界応力が10MPa程度、200℃では35MPa程度まで良好な密封特性が得られることを示した。
- (4) PTFE系ガスケット(No.GF300)付きボルトフランジ締結体の高温・長期条件の挙動を予測する手法を提案した。その結果、本研究の場合には初期ガスケット接触応力が35MPaとすれば10年間の長期にわたり健全性が確保できることを示し、増締めを行えば更に健全性が良好となることを示した。

7. 参考文献

- 1) TAKAKI, T., SATOU, K., YAMANAKA, Y., FUKUOKA T., "Effects of Flange Rotation on the Sealing Performance of Pipe Flange Connections", ASME PVP Vol.478, (2004), pp.121-128.
- 2) 高木知弘, 福岡俊道, 山中幸, "FEMによる管フランジのボルト締付けシミュレーション", Valqua Technology News, No.2, (2002), pp5-13
- 3) 澤俊行, 尾方尚文, 西田隆仁, "内圧を受ける渦巻き型ガスケット付き管フランジ締結体の応力解析と密封性能評価", 日本機械学会論文集(A編), 68巻671号(2002), pp.1120-1128.
- 4) KOBAYASHI, T., NISHIDA, T., YAMANAKA, Y., "Effect of Creep-Relaxation Characteristics of Gaskets on the Bolt Loads of Gasketed Joints", ASME PVP Vol.457, (2003), pp.111-118.
- 5) KOBAYASHI, T., NISHIDA, T., YAMANAKA, Y., "Consideration on the Representations of Sealing Behavior of Gaskets: Effects of the Internal Pressure and the Gasket Width", ASME PVP Vol.457, (2003), pp.133-138.
- 6) 労働安全衛生法令第318号(2008)
- 7) 日本バルカー工業株式会社, "ノンiasガスケット", カタログ No.ZY03, (2011).
- 8) SATO, K., MURAMATSU, A., KOBAYASHI, T., SAWA, T., "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, m (2015).
- 9) ANSI/ASME B 16.5, "Pipe Flanges and Flanged Fittings", (1996).
- 10) 日本工業規格. JIS B 2251 "フランジ継手締付け方法", (2008).
- 11) 日本工業規格. JIS B 2490 "管フランジ用ガスケットの密封特性試験方法", (2008).
- 12) OMIYA, Y., SAWA, T., TAKAGI, Y., "Stress Analysis and Design of Bolted Flange Connections under Internal Pressure", PVP2014-28606, Proceeding of ASME PVP 2014 Conference, (2014).
- 13) OMIYA, Y., SAWA, T., "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).
- 14) 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 開発部