

# ふっ素樹脂系ガスケット付きボルト締結体のゆるみ挙動評価

## 1. はじめに

2008年の石綿規制を受け、ガスケットにおいても一部を除いて石綿製品が使用出来なくなった。うず巻形ガスケットでは石綿ファイラーに替わって膨張黒鉛ファイラーを用いることで大きな問題はなかったが、シートガスケットではいくつかの課題があった。石綿ジョイントシートガスケットはその高い耐熱性、耐薬品性、強度から非常に広範囲で使用されていたが、代替繊維を用いたノンアスジョイントシートは繊維分が少ないことから強度や耐熱性が大きく低下している。膨張黒鉛のガスケットは高いシール性、耐熱性、耐薬品性を有するが、非常に傷つきやすいことから取り扱い性に課題がある。一方で、ふっ素樹脂は高い耐熱性と耐薬品性、シール性も優れており、従来より課題であったクリープも近年の材料開発によって改善されており、石綿ジョイントシートガスケットの代替として広く使用されるようになった<sup>1~3)</sup>。

しかしながら改善されてはいるものの、ふっ素樹脂系ガスケットのクリープに起因した締結力低下は懸念事項であり、長期使用についての信頼性評価は課題であった。そこで、当社では石綿規制以降、ふっ素樹脂系ガスケット付き締結体の長期特性予測手法の検討を行ってきた。これまでにFEMを用いてガスケットのクリープだけではなく、熱膨張及び収縮、圧縮特性の温度依存性を考慮することで、ふっ素樹脂系ガスケット付き締結体の長期特性を精度良く予測することが可能となっている<sup>4~6)</sup>。

本報では高温環境下のふっ素樹脂系ガスケット付きボルト締結体を対象にガスケットの諸特性及びフランジやボルトの特性が締結体の軸力特性に及ぼす影響を評価する。ここでは、締結体を単純な単一ボルト締結体とし、ガスケットをNo.GF300とする。

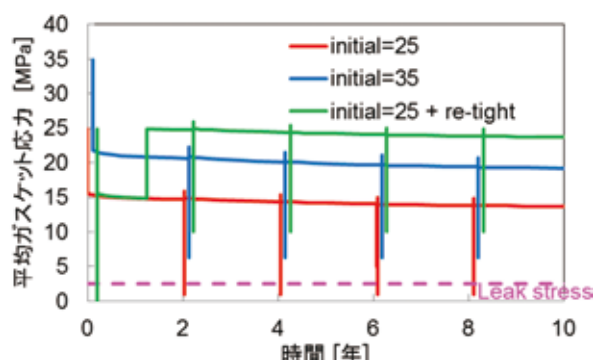


Figure1 ガスケット応力の長期挙動の予測

## 2.FEM条件

Figure2に本研究で用いたFEモデルを示す。単一ボルトの締結体を対象とし、単純な条件での評価を行う。軸対称要素を用いてモデル化しているが、この際、六角形のボルト頭及びナットは面積が等価な円形に簡素化している。フランジ及びボルトは弾性要素、ガスケットは非線形粘弾塑性要素を用いる。本FEMではガスケットのみ粘弾性を考慮し、電熱については非定常問題として評価する。

各部品材料定数をTable1に示す。ガスケットは圧縮特性に強い非線形性とヒステリシスを示している。また、温度が高いほどひずみが大きくなるという温度依存性も見られる。線膨張係数も温度が高いほど増加している。FEMではこれらの特性も考慮する。加えて、Figure5に示される応力依存性を有するガスケットのクリープも考慮する。フランジ及びボルトは各特性を固定値として扱う。

ボルトモデル端部に締付けに相当する圧力を負荷することで締付けを再現し、締結体外縁部に温度変化を与えることで加熱及び冷却を再現する。本FEMではボルト軸力の変化を算出する。

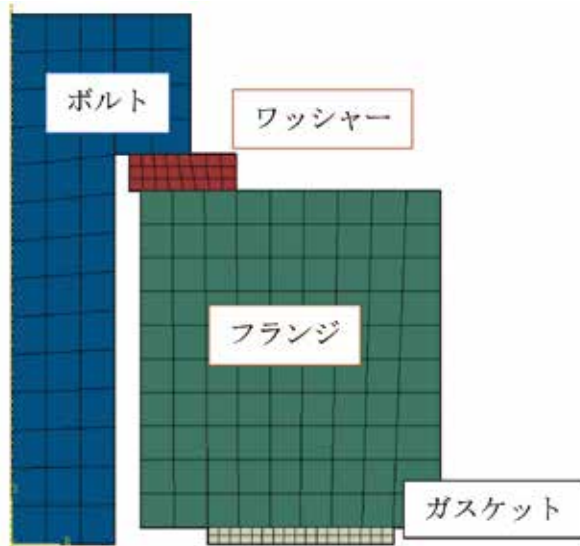


Figure2 FEモデル

Table1 各部品材料定数

	フランジ	ボルト	ガスケット
材料	SUS304	SNB7	No.GF300
ヤング率[GPa]	200	200	Fig.3
ポアソン比	0.3	0.3	0.45
線膨張率[1/K]	$1.12 \times 10^{-5}$	$1.09 \times 10^{-5}$	Fig.4
熱伝導率[W/m・K]	$4.4 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-5}$
比熱[J/kg・K]	500	500	1000
密度(常温)[kg/m <sup>3</sup> ]	7800	7800	2.3
クリープ	なし	なし	Fig.5

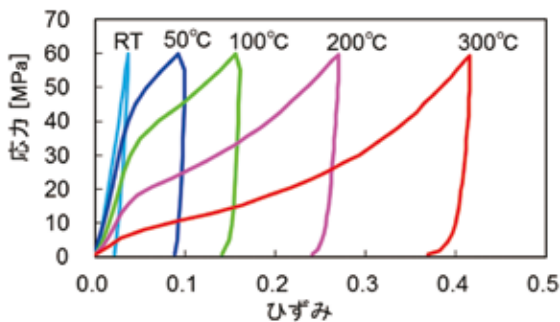


Figure3 ガスケットの応力-ひずみ関係

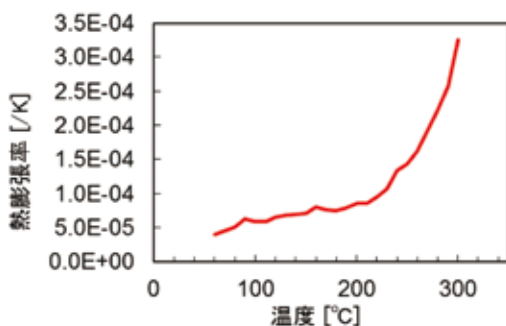


Figure4 ガスケットの線膨張係数

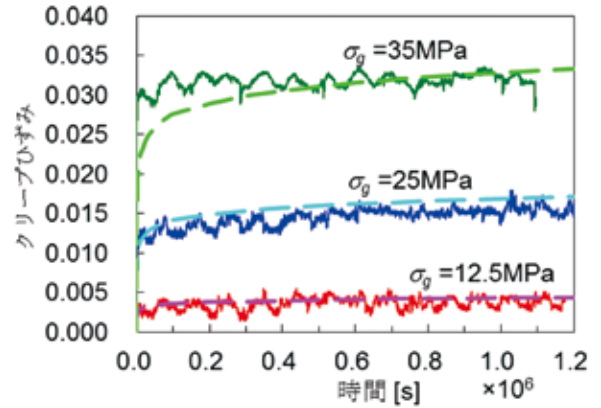


Figure5 ガスケットのクリープ

### 3. FEM妥当性確認のための実験

2項で述べたFEMの妥当性を確認するため、実験結果との比較を行う。

Figure6に実験装置の概要図を示す。主な条件はFEMと同様である。締付けはボルト胴部に張り付けたひずみゲージで計測される軸力を指標に行う。締結体温度はフランジ表面に張り付けた熱電対によって測定される。目標軸力115kN(ガスケット応力35MPa相当)まで素早く締め付け、電気炉で200℃まで加熱する。24時間加熱後に自然冷却する。

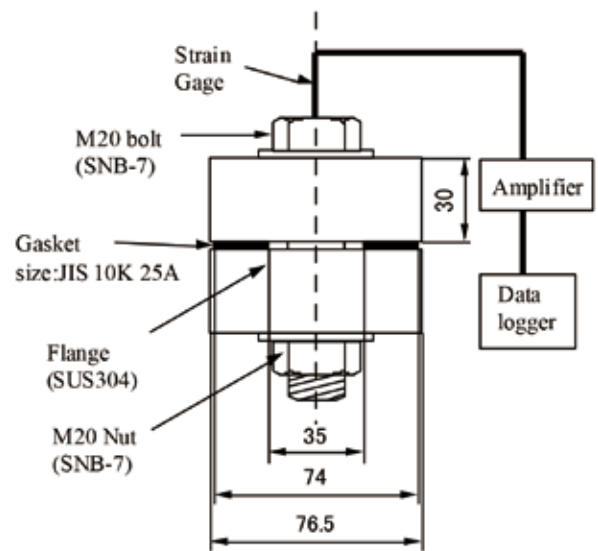


Figure6 実験装置概要

## 4. FEM及び実験結果

Figure7に単一ボルト締結体の軸力変化についてのFEM及び実験結果を示す。縦軸にボルト軸力、横軸に加熱開始時(締付け直後)からの時間を示している。ボルト軸力は昇温中及び降温中に大きく低下し、温度が一定の間は低下が比較的小さいことが分かる。これまでの研究により、それぞれのステップではTable2に示される現象が生じていることが分かっている。被締結体であるガスケットとフランジは熱膨張によってボルト軸力を増加させる。一方でボルトが熱膨張した場合はボルト軸力が低下する。加熱時にはFigure3に表されるようにガスケット剛性が低下し、ガスケットがより圧縮されることで延伸されたボルトが収縮し、軸力は低下する。この剛性変化は温度変化時に生じるもので、高温安定時には生じない。ガスケットクリープは全てのステップで生じている。

FEM結果と実験結果は比較的良好一致しており、本FEM手法の妥当性が確認出来た。

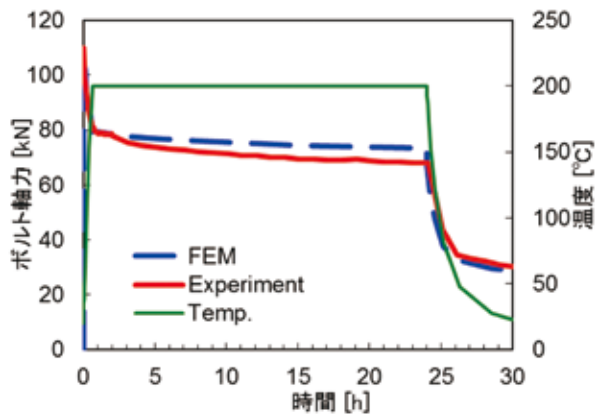


Figure7 FEM 及び実験結果

Table2 各ステップで起きている現象が軸力へ及ぼす影響

	加熱	高温保持	冷却
ガスケット熱膨張	↑		↓
フランジ熱膨張	↑		↓
ボルト熱膨張	↓		↑
ガスケット剛性変化	↓		
ガスケットクリープ	↓	↓	↓
合計	↓	↓	↓

## 5. 各部品の諸特性が締結体ボルト軸力挙動におよぼす影響

ここでは、フランジ、ボルトガスケットの各部品の諸特性が締結体ボルト軸力挙動に及ぼす影響を評価する。現実には実在しないが、任意の特性だけ変更したり、ないものとしてたり出来るのもFEM評価の長所である。

Figure8はボルト軸力挙動に対するフランジ及びボルト材料のヤング率と線膨張係数の影響を評価した結果を示している。フランジ及びボルトのヤング率を1/2とした場合、比較的軸力挙動へ及ぼす影響は小さかった。Figure7の結果からも分かるように、温度変化時に軸力変化が大きく、ヤング率は温度変化への影響が小さいためと考える。フランジの熱膨張率を1/2及びゼロとした場合、加熱時に大きく軸力低下し、冷却時には増加する結果となった。加熱時の被締結体(フランジ+ガスケット)の熱膨張が小さくなり、冷却時の熱収縮の影響が小さくなったためと考える。ボルトの熱膨張を1/2及びゼロとした場合、加熱時及び高温安定時には基準条件と大きな違いはなかったが、冷却時にボルト軸力が大きく低下した。

Figure9はガスケット材料の熱膨張、クリープ、剛性変化のそれぞれの各特性だけを有する場合の軸力挙動を表している。なお、フランジ及びボルトは通常条件とする。熱膨張は軸力を増加、クリープと剛性変化は軸力を減少させるということが分かる。しかしながら、加熱時及び高温安定時の現実の結果は剛性変化だけの結果と酷似している。このことから各特性の影響の単純な和が総合的な結果となっていないことが分かる。これは、剛性変化やクリープは応力依存性があり、それぞれの特性の結果が相互作用する複雑な現象であるためである。

これまでの軸力挙動結果は各部品の寸法形状にも影響を受けるものであり、全てのボルト締結体に適用出来るものではない。

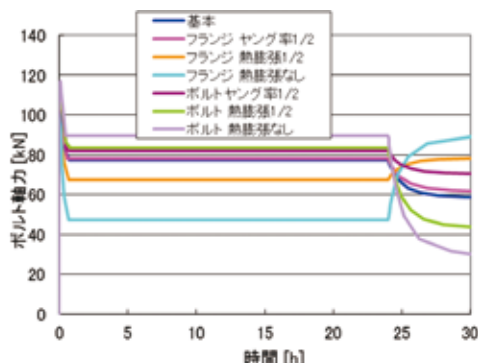


Figure8 フランジ及びボルトの材料特性が締結体ボルト軸力挙動に及ぼす影響

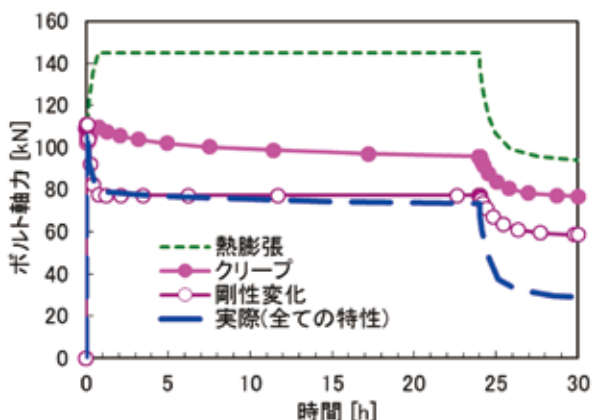


Figure9 ガasket特性が締結体ボルト軸力挙動に及ぼす影響

## 6. おわりに

本報ではFEMを用いて高温環境下のふっ素樹脂系ガスケット付き単一ボルト締結体を対象にガスケットの諸特性及びフランジやボルトの特性が締結体の軸力挙動に及ぼす影響を評価し、紹介した。ここでの評価は多岐にわたるボルト締結体条件の極一部に限られる。無限とも言える締結体条件をすべて考慮する評価は現状ではFEMを用いることが現実的と考える。様々な締結体条件に対応するため、引き続きガスケット締結体の評価手法を検討する。



**佐藤 広嗣**  
 研究開発本部  
 商品開発部  
 ガasket・グランドパッキンチーム

## 7. 参考文献

- 1) 黒河真也, “高機能ノンアスベストシートガスケット「ブラックハイパーNo.GF300」”, Valqua Technology News, Vol.9, p5-11, (2004)
- 2) 小池真二, “圧延成形による充填剤入りふっ素樹脂シートガスケット バルカロン®シリーズとNo.GF300シリーズ”, Valqua Technology News, Vol.22, p17-22, (2012)
- 3) 株式会社バルカー: “ガスケット”, CATALOGUE No.YC08, (2020)
- 4) 佐藤広嗣, 野々垣肇, 黒河真也, 出口聡美, “有限要素解析を用いたガスケット締結体の長期特性予測手法の構築”, Valqua Technology News, Vol.17, p2-8, (2009)
- 5) 佐藤広嗣, “有限要素解析を用いたふっ素樹脂ガスケットの長期特性予測”, Valqua Technology News, Vol.29, p11-14, (2015)
- 6) 佐藤広嗣, 澤俊行, 小林隆志, “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”, Valqua Technology News, Vol.32, p33-38, (2017)