

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

1. はじめに

近年の実験的研究により、ガスケットを含む管フランジ締結体のシール性や緩和のメカニズムが明らかになりつつある。しかしながら、管フランジ締結体は圧力レート、呼び径、内圧力、温度、フランジ形状、締結体材料など非常に多岐にわたる使用条件があり、それら全てに対して実験アプローチを行うためには莫大な費用と時間が必要になる。そのため、計算アプローチによる管フランジ締結体評価手法が望まれている。特に、プラントの安全操業、環境への影響がますます重要と考えられる近年では、締結体の長期特性を予測する手法を構築することが必要となっている。

本報では、有限要素解析を用いたガスケットを含む管フランジ締結体の長期特性予測手法を紹介する。熱サイクルや増締めなど、非定常な条件を対象に、実験によって取得したガスケットの基礎特性を用いて有限要素解析によって長期的な評価を行う。

2. 長期特性予測概要

Figure1に長期特性予測手法の概要を示す。ガスケットのシール性はガスケット面圧に依存し、一定のガスケット面圧以下になると漏れが生じるという考えに基づき、有限要素解析を用いてガスケット面圧挙動を予測する。ガスケット面圧は内圧力、温度、時間によって低下するが、有限要素解析ではそれらの影響も考慮する。

ここではガスケットをNo.GF300 厚さ3.0mm、流体温度200℃とした場合を例として検討する。No.GF300は耐薬品性、耐熱性が非常に優れており、石綿ガスケットの代替品としてすでに広く使用されている。構成材料の耐熱性が高いことから上限温度300℃以下では材料劣化がなく、短期的な評価から精度の高い長期的な予測が可能であると考えられる。

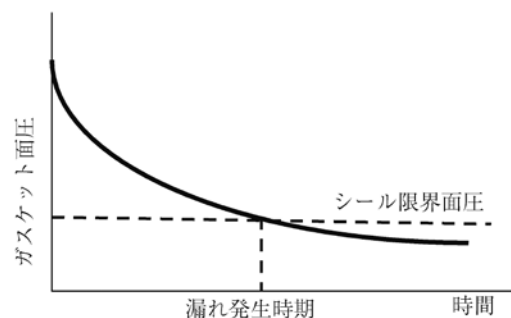


Figure1 長期特性予測概要

3. 有限要素解析

3-1) 解析方法

汎用有限要素解析コードABAQUSを用い、締結体におけるガスケット面圧挙動を予測する。ここではJIS 10K 600A RF管フランジ締結体に200℃、内圧1MPaの流体を作動させた場合の例を示す。Figure2に有限要素モデルを示す。締結体を軸対称体と仮定し、軸方向の対称性も考慮している。ボルトは周方向に連続的に存在するモデルとなり、実機と異なるため、ボルトモデルのヤング率と密度は実機とモデルの断面積の割合から換算した値を用いている。フランジ、ボルトは軸対称4節点伝熱弾塑性要素を用い、線形弾性体としてモデル化した。ガスケットは軸対称4節点伝熱弾塑性要素を用い、応力-ひずみ関係の非線形特性と負荷-除荷曲線のヒステリシス特性、温度依存性、粘性を入力している。用いた材料特性をTable1に示す。ガスケットの圧縮特性はFigure3を用いる。高温時には剛性が低下する温度依存性を考慮している。Figure4に示す線膨張係数も温度依存性を考慮し、Figure5に示すクリープは応力依存性を考慮している。

Figure6の境界条件に示すように、締付け時には呼びガスケット面圧に相当するボルト応力をボルトモデル下端部に与え、締付け完了時には軸方向に拘束する。ここでは軸対称モデルを用いているため、複数のボルトを同時に締付ける条件となる。運転時の内部流体の影響は管内部に内圧と温度

を与えることで再現している。本来、管断面に負荷されるストレス力は管モデル断面に相当する力を負荷して再現している。締付け時には定常問題として扱い、締付け後の運転時には非定常問題とし、運転開始による加熱、時間の影響を考慮した評価を行った。

締結体条件として、フランジ及びボルト材料はSS400、ガスケットはNo.GF300とする。初期ガスケット面圧を35MPaとし、温度200°C、内圧1MPaの流体を作動させる場合を予測する。

運転条件として以下の4種類の場合の挙動を予測した。

- 基本条件
基本条件では締付け後、運転開始による内部流体の加熱と内圧が作用され、温度が一定となった後は外力がない条件
- 増締め条件
運転開始1日後に初期ガスケット面圧に相当する締付けを行う条件
- 運転サイクル条件
1年毎に内部流体による内圧と温度の作用を停止し、1日後に再運転する条件
- 運転サイクル+増締め条件
運転開始1日後に初期ガスケット面圧に相当する締付けを行い、その後1年毎に内部流体による内圧と温度の作用を停止し、1日後に再運転する条件

3-2) 解析の妥当性確認

解析手法の妥当性を確認するため、“ガスケット締結体の

Table1 材料特性

特性	フランジ	ボルト	ガスケット
ヤング率 [GPa]	200	37	Fig.3
ポアソン比	0.3	0.3	0.46
線膨張係数 [$1/^\circ\text{C}$]	11.8×10^{-6}	11.8×10^{-6}	Fig.4
熱伝導率 [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]	5160	5160	25
比熱 [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]	500	500	1000
密度 [kg/m^3]	7800	1923	2500
クリープ			Fig.5

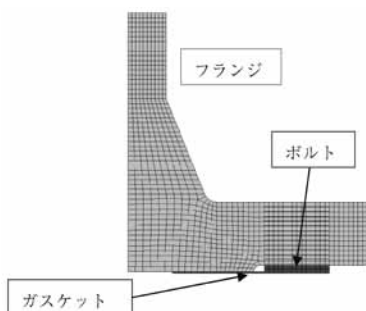


Figure2 有限要素モデル

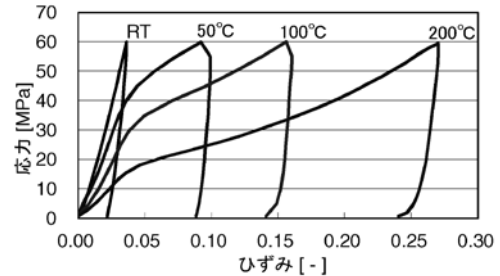


Figure3 ガスケットの応力-ひずみ関係

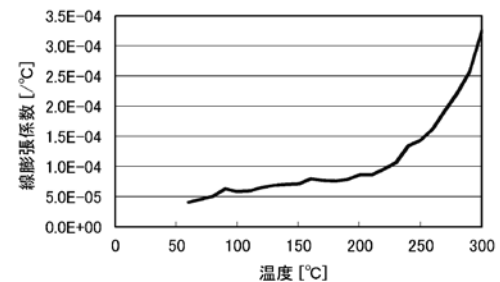


Figure4 ガスケットの線膨張係数

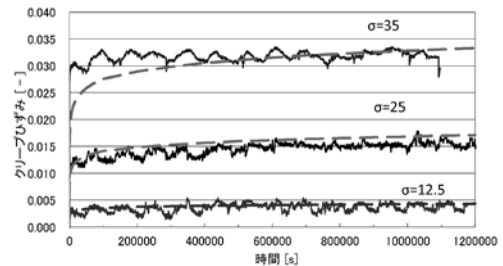


Figure5 ガスケットのクリープ特性

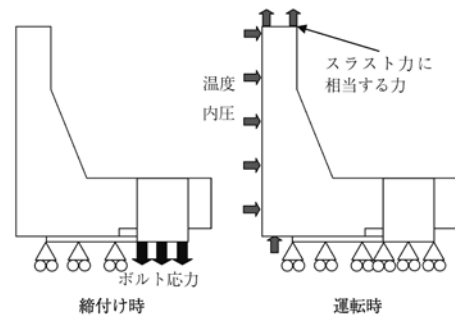


Figure6 境界条件

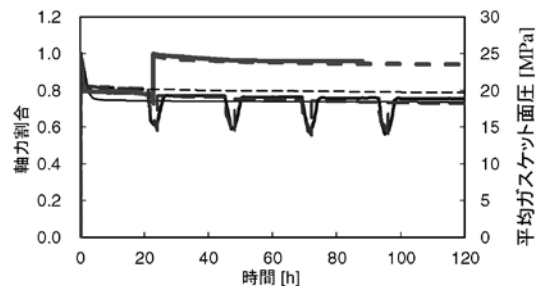


Figure7 解析手法の妥当性確認

面圧挙動と増締めの効果”(本誌7～10ページ記載)の実験値と比較した結果をFigure7に示す。ボルト締付け完了後に

加熱、熱サイクル、ホットボルト条件としている。全ての条件において、実験結果と解析結果は比較的良好に一致しており、本解析手法の妥当性が確認できている。

4. 長期特性予測

Figure8に有限要素解析から得られたガスケット面圧挙動を示す。また、同図にはシール限界面圧も併記している。この値を下回った場合に漏れが発生する。なお、各条件データは見やすくするためにデータを0.03年ずつ横軸方向にずらして記載している。

基本条件、増締め条件ではガスケット面圧は十分な大きさを維持するが、運転サイクル条件では運転停止時にガスケット面圧が大きく低下することがわかる。加えて、サイクルを重ねるごとに面圧も低下している。これは、ガスケット交換を行わない場合でも定修を繰り返すことで漏れのリスクが高くなることを示す。それに対し、運転サイクル条件でも増締めを行った場合は運転停止時にも大きなガスケット応力を維持している。運転サイクル条件における漏れのリスクに対し、増締めが有効であることがわかる。

基本条件の場合、初期に35MPaから約23MPaまで面圧は大きく低下し、その後は緩やかに低下していることがわかる。解析結果から考察した結果、初期の大きな面圧低下は運転開始直後の温度変化(昇温)時に生じたものとわかった。初期(ガスケット面圧が高い条件)にガスケットクリープが顕著であることに加え、温度変化時には各部位の熱膨張、ガスケットの剛性低下の影響がある。特にふっ素樹脂ガスケットでは剛性低下によって、ガスケット厚さは小さくなり面圧は大きく低下する。ガスケットひずみが大きくなることでボルト締結力が低下する現象をFigure9の締結線図に示す。ガスケットひずみ δ_g が増加することで、延伸されていたボルトが収縮(δ_b の減少)し、締結力が低下する。ガスケットクリープによる締結力低下も同様の現象である。温度安定後はガスケットクリープによる影響だけとなり、面圧低下は緩やかになる。

増締め条件の場合、増締め後の面圧低下勾配は基本条件に比べて若干大きいものの、基本条件よりも大きな面圧を保持し続ける。増締め後は温度変化がなく、ガスケットクリープだけの影響を受けるため、初期締付時のような大きな面圧低下がない。基本条件に比べて低下勾配が大きいのはガスケットクリープに応力依存性があり、応力が大きいほうがクリープは顕著であるためである。

運転サイクル条件の場合、運転停止-再運転時に面圧が大きく低下していることがわかる。運転停止時に温度が低下

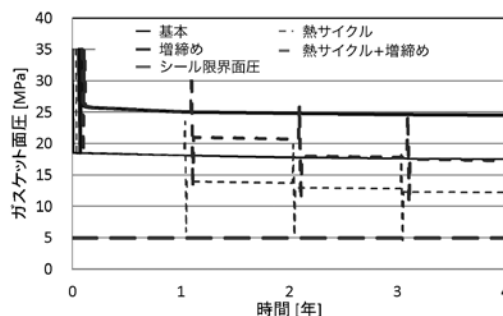


Figure8 長期特性予測

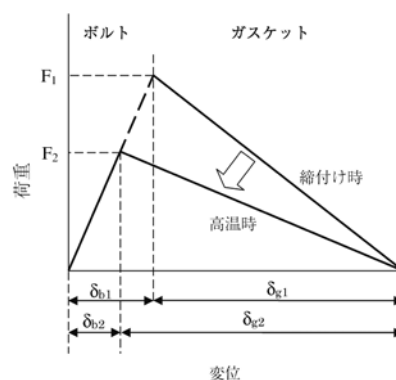


Figure9 ボルトとガスケットの荷重とひずみ

することで各部位が熱収縮を起こす。ガスケットは高温時の剛性低下によって大きく圧縮塑性変形している上に更に熱収縮する。その際に、延伸されていたボルトは収縮するため締結力が低下し、ガスケット面圧も大きく低下する。再運転時、再び加熱されることで各部位は膨張し、運転停止前よりも小さい値で面圧挙動は安定する。またFigure8より、サイクル毎に面圧も低下していることもわかる。

運転サイクル+増締め条件の場合、運転停止時でも面圧は約10MPaとなっており、増締めによってガスケット面圧保持が改善できている。

以上の結果より、運転開始直後や運転サイクル時の温度変化時に締結体におけるガスケット面圧の変動が大きいことがわかった。また、増締めによってガスケット面圧を増加させ、漏れのリスクを改善できることがわかった。

5. 長期特性予測を使って

上記の長期特性予測手法を用い、Figure10に示すアプローチによって適切な施工条件の検討ができる。使用条件を入力し、次回定修までの漏れ有無の予測が可能となる。仮に、漏れが生じると予測された場合でも、増締めや初期締付力の改善案も検討できることがこの予測手法の長所であ

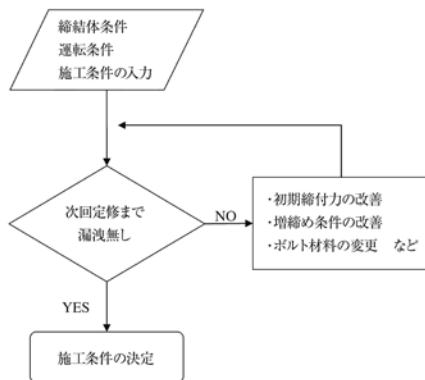


Figure10 施工条件の検討アプローチ

る。

また、ガスケットの使用条件はTable2に示すように多数あり、ユーザー、使用箇所によって非常に多岐にわたる。このような条件に対して、実験による対応では膨大な費用と時間が必要となる。しかしながら、有限要素解析では基礎データさえあれば、コンピューターへの入力条件を変更することで比較的簡便に対応ができる。加えて、高温や極低温、高圧、大口径、長期間など、実験では再現困難な条件でも有限要素解析では対応可能であり、非常に有用であると言える。

Table2 使用条件

締結体条件	フランジ寸法・形状・材料
	ボルト寸法・形状・材料・数
	ガスケット寸法・材料
運転条件	流体温度
	流体圧力
	使用期間
施工条件	初期締付力
	増締め条件

6. おわりに

実績に代わる信頼性評価方法として、当社独自の取り組みであるFEM解析技術を用いた管フランジ締結体の長期特性評価手法を紹介した。ここではNo.GF300ガスケットを使用した場合を例として紹介したが、他のふっ素樹脂ガスケットにも適用が可能である。この手法によって、次回定修までの漏れ有無の評価、その場合の改善の検討が可能になる。これまで不明瞭であった数年後の予測を行うことで、プラントの安全安心操業のための有効なデータとなる。弊社では高機能なシール製品を提供すると共に、このような技術アプローチも行うことで、総合的にシールを提供していきたいと考える。

(Abstract)

This paper introduced a long-term characteristic evaluation method of pipe flange joints using FEM simulation technology as reliable evaluation method to replace the experience based evaluation. To evaluate the possibility of leakage from gasket part before maintenance or to propose solution or improvement to prevent potential leakage are possible by this technology. Comparing with previous unclear method using track record, new method provides effective data for safety and security operations of the plant.

Keywords:

pipe flange joints, FEM, gasket

(摘要)

介绍一种替代实绩的可靠性评价方法-FEM（有限元）解析技术用于管法兰连接体的长期可靠性评价。应用此法可以检测定期修理前垫片部位的有无泄漏，以及可以进行泄漏后的改善对策探讨。使几年后的预测工作明瞭化，并可取得化工装置安全安心作业的有效数据。

关键词:

FEM（有限元），法兰连接体，垫片



佐藤 広嗣

研究開発本部
開発部 開発グループ