

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560173

研究課題名(和文)非石綿ガスケットの高温特性評価とフランジ締結体の寿命予測

研究課題名(英文)Characteristics of non-asbestos gaskets at elevated temperatures and the estimation of the life of flange connections

研究代表者

小林 隆志(KOBAYASHI, Takashi)

沼津工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：10161994

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円、(間接経費) 750,000円

研究成果の概要(和文)：石綿材料の全面的な使用禁止後に、ガスケット付きフランジ締結体に用いられている四つっ
化エチレン(PTFE)などの非石綿ガスケットの高温時の変形特性を実験により明らかにした。また、非石綿ガスケットを
使用したフランジ締結体の高温時のボルト軸力低下特性を実験により明らかにするとともに、ボルト軸力低下を推定す
る方法を開発した。これにより、増し締めが必要の有無を判断でき、フランジ締結体を安全に管理するための管理指
針策定のための基礎資料が得られた。

研究成果の概要(英文)：After the prohibition of the use of asbestos materials, PTFE-based gaskets are oft
en employed in bolted flanged connections. The behavior of bolt force changes under thermal loading was ex
perimentally examined. It is found that the bolt forces reduce at the first thermal loading due to the ga
sket flow. Once the gasket is settled, the bolt force changes depend on the difference of the thermal coe
fficients of flanges, bolts and gaskets.

An analytical model of a bolted flanged connection, in which the flanges, the bolts and the gasket are rep
resented by spring constants, is proposed. The residual bolt forces can be estimated based on the analyti
cal model of the bolted flanged connection and the deformation characteristic of the gasket. The results
can be applied to ensure the integrity of flanged connections.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素 ガスケット フランジ締結体 高温 変形特性 ボルト軸力 密封特性 寿命

1. 研究開始当初の背景

平成18年9月に石綿材料の使用が全面的に禁止され、これ以降、ガスケット付きフランジ締結体には、主として四ふっ化エチレン(P TFE)や膨張黒鉛などの材料を主成分とする非石綿ガスケットが用いられている。石綿ガスケットは長い使用実績があったが、使用実績の短いこれらの非石綿ガスケットの高温特性は十分に把握されておらず、化学プラントなどで用いられるガスケット付きフランジ締結体の高温下における漏えい事故などのトラブルが報告されていた。このような背景から、ガスケットの安全な使用のために、ガスケットの高温特性を明らかにするとともに、フランジ締結体の健全性を評価する方法が必要とされていた。さらに、寿命を評価する方法も必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究では、次の点を明らかにすることにより、フランジ締結体の安全性・信頼性向上に寄与することを研究目的としている。

- (1)高温におけるガスケット特性(変形特性、線膨張係数、密封特性)を解明する。
- (2)ボルト軸力の低下の観点からのフランジ締結体の寿命予測方法を確立する。

3. 研究の方法

(1) ガスケットの高温変形特性測定

図1に試験に用いた装置を示す。常温におけるガスケットの密封特性試験(JIS B 2490)で使用されるプラテン部分にヒーターを差し込み、プラテンを加熱した。ガスケット近傍の温度は熱電対を用いて測定し、ヒーター制御盤にて温度制御した。この昇温試験装置では最高温度 140 程度まで試験可能である。試験には、延伸 PTFE ガスケットを使用した。ガスケットの呼び径は50A、厚さ3mmである。試験条件としては、ガスケット面圧一定で温度を変動させる温度変動試験を行った。まず、常温でガスケット面圧を負荷し、その後、プラテンの温度を 140 まで上昇させ、ガスケットの変形量を測定した。

また、高温条件下でのガスケットのクリー

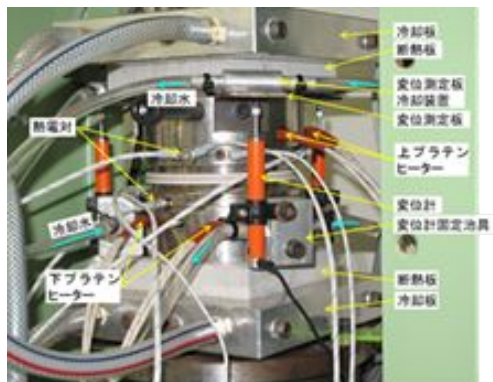


図1 高温ガスケット試験装置

プ変形についても測定するために、140 で6時間ガスケットの変形量を測定した。試験ガスケット面圧は10MPa、20MPa、30MPa、40MPaの4通りとした。この実験により、温度上昇にともなうガスケットの初期変形量は、最高ガスケット面圧と最高温度に支配されることが明らかになった。また、この試験では、ガスケットの線膨張係数の測定も可能である。

図2は、上述の試験によって得られた温度上昇にともなうガスケットの初期変形に関して、ガスケット変形量に与える温度とガスケット面圧の影響を、グラフ描画ソフトを用いて等高線図に整理したものである。例えば、常温でガスケット面圧30MPaを負荷するとガスケット変形量は約0.4mmとなることがわかる。続けて温度を140まで上昇させるとガスケットの変形量は約0.9mmとなることがわかる。このように、温度とガスケット面圧を考慮してガスケットの変形量を把握することが可能となった。

(2) フランジ締結体のボルト軸力変化

図3は実験に用いた閉止フランジ締結体を示す。試験ガスケットを閉止フランジ(呼び圧力10K、呼び径50A、材質SUS304)間に挿入し、4本のボルト(呼び寸法M16、材質SNB7)により締め付けた。ボルト軸中心には軸力測定用のひずみゲージを埋め込んだ。締結ボルト用ひずみゲージの温度変動の影響を除去するために、ダミーボルトを用いて、締結用ボルトの熱ひずみを補正した。

図4はボルト軸力の変化とフランジ温度の関係を示す。初期締め付け後、常温で2時間放置する間にボルト軸力が低下し、その後、フランジ温度の上昇とともにボルト軸力が大きく低下している。これは温度上昇によりガスケットが軟化し、フランジ面間を流動してガスケット厚さが薄くなったことによると考えられる。

一方、フランジ温度が低下する場合に注目すると、フランジ温度の低下とともに、ボルト

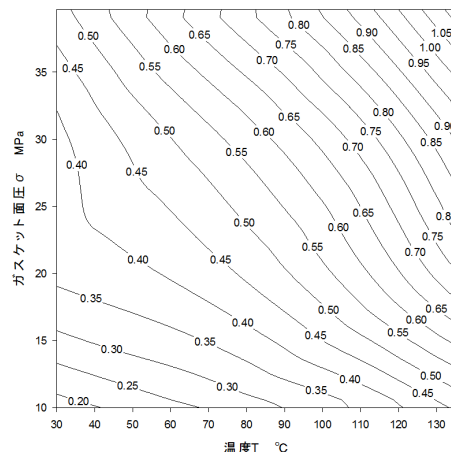


図2 ガスケット変形特性に与える温度とガスケット面圧の影響

ト軸力は直線的に低下している。その後、2サイクル目以降で温度上昇と降下を繰り返すと、ボルト軸力はほぼ直線的に上昇と低下を繰り返している。この際、2サイクル目、3サイクル目で軸力がやや低下している。これは熱サイクルの繰り返しにより、ガスケットに追加の圧縮変形が生じているためであると考えられる。しかし、3サイクル目以降はガスケットがほぼ安定した状態となったといえる。

この1サイクル目の降温時及び2サイクル目以降の温度上昇時及び温度降下時の直線部分の傾きは、主としてボルトと締結体であるフランジとガスケットの熱膨張差によって生じているものと考えられる。ガスケットの厚さはボルトの長さに比べれば薄く縦弾性係数も小さいが、ボルト材の線膨張係数に比べて、10倍以上大きいために、熱膨張によりボルト軸力が変動しているものと考えられる。

温度変動を受けるフランジ締結体では、最初の昇温によりガスケットがフランジ面になじんでほぼ安定し、その後はフランジ、ボルト及びガスケットの熱膨張差によりボルト軸力が変動することが明らかとなった。

ボルト軸力変動に直接影響を与える昇温時のガスケットの厚さ変化をレーザー変位計により測定する実験も試みた。レーザー変位計ではフランジに直接接触することなく、フランジ間の変位（ガスケット厚さの変化）

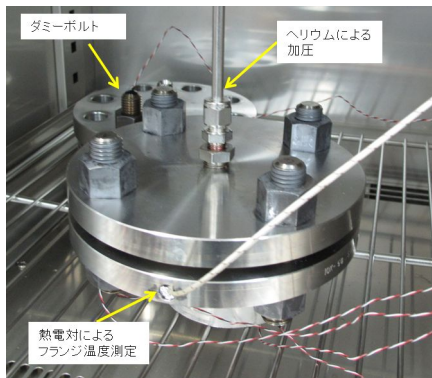


図3 フランジ締結体の昇温試験

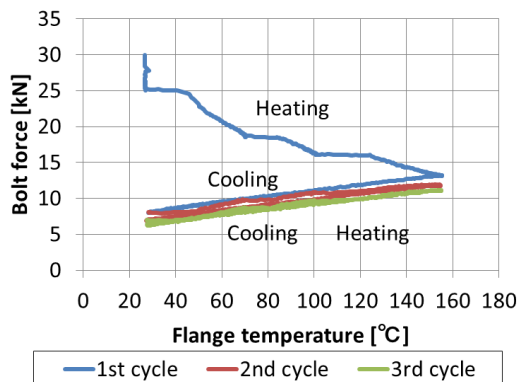


図4 ボルト軸力の変動に与える温度の影響

を測定できると考えたが、実際には安定した測定ができなかった。この理由は、レーザーセンサの設置位置に制約があり、フランジに測定板を接着して、この測定板の間の変位を測定したことによる。この測定板の熱変形の影響により、精度の高い測定ができなかったと考えられる。フランジ間変位の直接測定は今後の課題である。

(3) フランジ締結体のモデル化

フランジ締結体の軸力変動に関しては、ガスケットの特性に加えて、フランジ及びボルトのばね定数なども影響を与えるので、これらの影響を検討するためにフランジ締結体を適切にモデル化して解析することが必要である。

図6はガスケット付きフランジ締結体を示す。この締結体内の力の流れを考えると、図7に示すような、ばねモデルで置き換えることができる。すなわち、ボルトの座面間に含まれる座金、フランジ、ガスケットの変形が関与する。これらの変形量がボルトの変形量と等しいという条件から、ガスケットが δ_{gc} だけ変形した状態でのボルト軸力の減少を計算できる。さらに、このモデル内の力の関係は図8の締付け線図で表すことができる。図7及び8の検討から、ガスケットに変形量 δ_{gc} が発生したときのボルト軸力低下 F_{btr} は

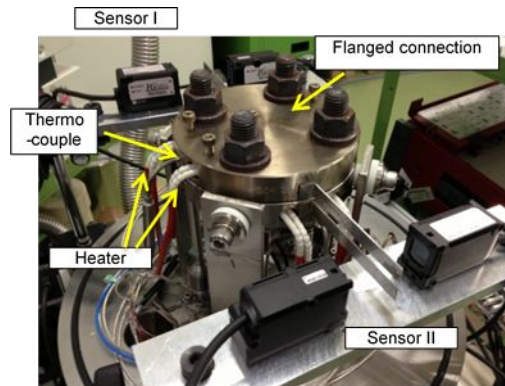


図5 レーザー変位計によるフランジ間変位の測定実験

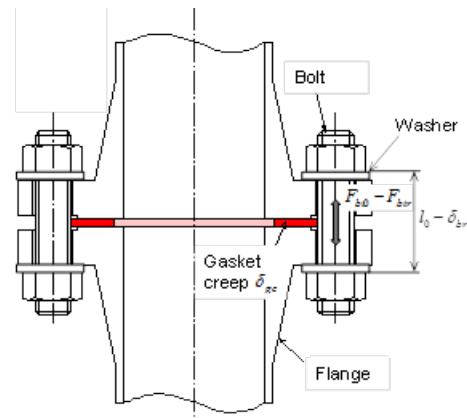


図6 ガスケット付きフランジ締結体

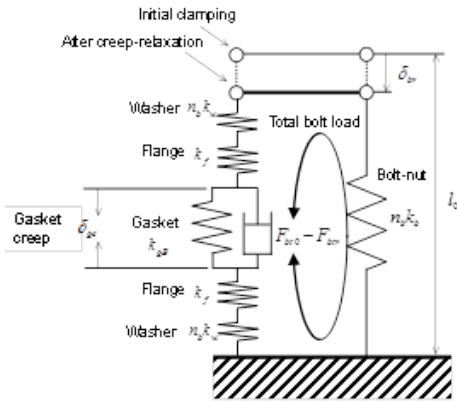


図7 ガスケット付きフランジ締結体のばねモデル

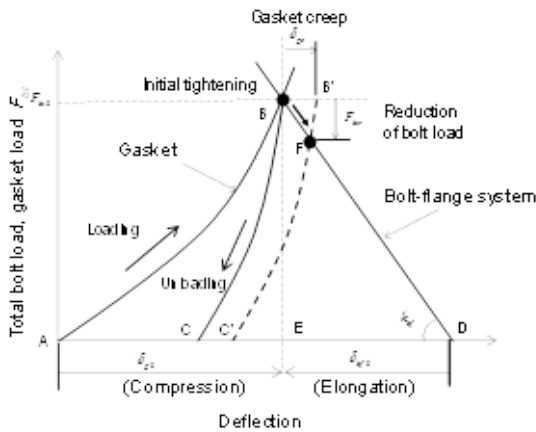


図8 締付け線図

次式で表すことができることを示した。

$$F_{btr} = \frac{\delta_{gc}}{\frac{1}{k_{bf}} + \frac{1}{k_{gB}}} \dots \dots (1)$$

すなわち、ボルト軸力低下 F_{btr} には式(1)の分母にあるフランジ - ボルト系のばね定数及びガスケットのばね定数が関係していることが示された。

図9は、式(1)とガスケットのクリープ特性を考慮して、ガスケット付きフランジ締結体のボルト軸力の低下を推定した結果を示す。図中の実験値と推定値を比較すると、ボルト軸力の低下がかなりよく推定できていることがわかる。

今後、ガスケットクリープ変形の部分に、ボルト、フランジ、ガスケットの熱膨張差も考慮することにより、温度変動時のボルト軸力変動を推定することが可能である。

(4) フランジ締結体の寿命予測法の確立

当初の計画では、ボルト軸力の観点からフランジ締結体の寿命を予測することを目標の一つとして挙げた。

高温時のガスケットの変形特性が明らかになったこと、また、ガスケットの変形にもなるボルト軸力低下の推定方法が確立で

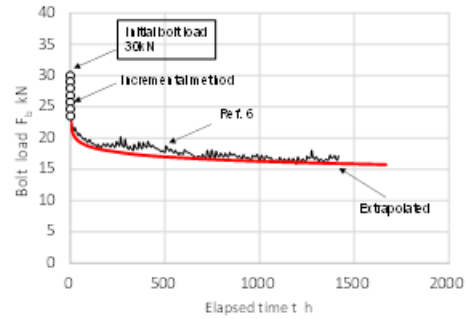


図9 ガスケットのクリープによるボルト軸力低下の推定

きたことから、種々の温度条件下でフランジ締結体の機能を維持できなくなる程度までボルト軸力が低下するかどうかを判断することが可能となった。これにより、漏えい事故に至る前に、必要であれば増し締め（コールドボルティング、ホットボルティング）を実施して、軸力を回復させる対応をとることができ、実用上有益な成果が得られた。フランジ締結体の安全な保守管理指針の策定は今後の課題である。

4. 研究成果

本研究の成果は以下の通りである。

(1) 高温でのガスケットの変形特性測定により、PTFE系ガスケットは温度が上昇すると軟化して荷重支持能力が低下し、フランジ面間を流動すること、また、この流動によるガスケットの厚さ変化はガスケットに作用する最高ガスケット面圧と最高温度に支配されることを明らかにした。ガスケットの変形量（厚さ変化）と温度及びガスケット面圧との関係を等高線表示する方法を示した。ガスケットの線膨張係数の測定方法を示した。

(2) 温度変動時のフランジ締結体のボルト軸力変化挙動を明らかにした。初めて温度上昇を受けるフランジ締結体ではガスケットの初期流動のためにボルト軸力は低下する。フランジ締結体が過去に受けた最高温度を超えない範囲内では、温度サイクルを受けても、継続的なボルト軸力低下はみられず、フランジ、ボルト及びガスケットの熱膨張差によってボルト軸力変動が生じる。

(3) フランジ、ボルト及びガスケットを等価なばねに置き換えたフランジ締結体モデルを提案し、ガスケットの変形特性及び熱膨張を考慮して、温度変動時の残留ボルト軸力を推定する方法を示した。これにより、フランジ締結体の施工条件（ボルトの初期締付け力）及び運転条件（最高使用温度、温度変動条件）を考慮して残留ボルト軸力を予測することが可能となり、フランジ締結体を安全に運用できるか否かを判断することができる。

(4) 本研究成果の規格化、フランジ締結体の安全な保守管理指針の策定は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計8件)

KOBAYASHI Takashi, Study on the Deflection of Gaskets and its Effects on Residual Bolt Forces and Tightness of Bolted Flanged Connections, ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Division Conference, 査読有, 2014年7月発表確定

小林隆志、佐藤広嗣、鈴木洋輔、辻裕一、高温におけるフランジ締結体のガスケット変形量の測定、日本機械学会 山梨講演会、2013年10月発表

小林隆志、石田裕哉、糸井克豊、平塚雅章、西浦謙剛、森本吏一、温度変動下でのフランジ締結体のボルト軸力変化、日本機械学会 山梨講演会、2013年10月発表

KOBAYASHI Takashi, NISHIURA Kengou, HIRATSUKA Masaaki, ITOI Katsutoyo, Deflection of Gaskets and its Effect on Tightness of Flanged Connections in Long Term, ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Division Conference, 査読有, 2013年7月発表

HIRATSUKA Masaaki, KOBAYASHI Takashi, NISHIURA Kengou, ITOI Katsutoyo, Deflection of Gaskets and its Effect on Tightness of Flanged Connections in Long Term, ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Division Conference, 査読有, 2013年7月発表

小林隆志、羽切大生、内山和明、西浦謙剛、平塚雅章、昇温時のPTFE系ガスケットの変形特性の測定と評価、日本機械学会 山梨講演会、2011年10月発表

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 隆志 (KOBAYASHI Takashi)
沼津工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号：10161994

(2)研究分担者

辻 裕一 (TSUJI Hirokazu)
東京電機大学・工学部・教授
研究者番号：10163841