

# 論文の要旨

## 題 目

内圧を受ける金属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に関する研究  
(A Study on the Stress Analysis and the Sealing Performance Evaluation of Bolted Pipe Flange Connections with Metallic Gaskets Subjected to Internal Pressure)

氏 名 近藤 康治

ガスケット付き管フランジ締結体は、各種プラントで多用される接合方法であり、石油精製や化学プラントでは毒性や可燃性を示す危険物質を扱うため、締結体からの漏えい防止技術の確立が望まれている。比較的中低温低圧条件下では、うず巻き形ガスケットなどのソフトガスケットが管フランジ締結体に使用されている。高温高圧条件下の使用では、金属平型ガスケットとリングジョイント（以下、RTJ）ガスケットが使用されている。RTJ ガスケットはオクタゴナル形およびオーバル形ガスケットに大別される。金属平型ガスケットおよび RTJ ガスケット付き管フランジ締結体の基本密封機構についての研究は極めて少なく、金属ガスケット付き締結体の密封性能は他の締結体に比べより良好であるが、この締結体の密封機構および最適な使用条件等は明らかにされておらず経験的に使用されているのが現状である。このため漏えい防止のためのボルト初期締付け力の決定も経験に基づいているため科学的検討が必要である。金属ガスケット付き管フランジ締結体の密封機能および性能解明のためのガスケット接触応力分布、ボルト軸力変動（内力係数）およびハブ応力などの力学特性の研究はなく、漏えい事故防止および合理的設計の観点から力学特性解明が必要とされている。本研究は、有限要素法応力解析と実験の両面から内圧作用および曲げモーメント負荷条件下における金属（平型および RTJ）ガスケット付き管フランジ締結体の力学特性を解明し、密封性能を明らかにすること、およびこれらの成果に基づいて許容漏えい量を満足するボルト初期締付け力の決定法を含めた漏えい防止設計法を検討することを目的としたもので、全7章より成る。

**第1章「緒論」**では、ガスケット付き管フランジ締結体に関する従来の研究を概括し、その成果を要約するとともに問題点を指摘し、本研究の目的意義を明らかにしている。すなわち、金属平型ガスケットおよび RTJ ガスケット付き管フランジ締結体の研究がほとんどなされておらず、その力学特性および密封特性が十分解明されていないこと、さらに漏えい事故防止と合理的設計の観点から金属ガスケット付き締結体の力学特性と密封機構解明の必要性を指摘している。本研究では、金属ガスケット付き管フランジ締結体における、①金属接触による密封性の評価と密封機構の解明、②ボルト初期締付け力のばらつきの影響、③締結体設計方法、締付け管理方法および保守方法の確立を目的としており、その意義は、事故防止への社会的貢献および合理的設計・施工により工業上有益であることを示している。

**第2章「内圧を受ける金属平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」**では、金属間接触による金属平型ガスケット単体におけるガスケット平均接触応力と漏えい量の関係を材料試験機にプラテン装置を組み込み、漏えい量を測定することにより求めている。さらに密封特性に及ぼすガスケット材質（アルミニウム、純銅、クロムモリブデン鋼）、接触幅および表面粗さの影響を明らかにしている。これらの因子が密封性能に及ぼす影響はガスケットの弾性変形域においては認められるが、ガスケットの降伏応力付近の荷重作用下ではガスケットの材質、接触幅および表面粗さに依らず密封性能が顕著に向上することを示している。従来の密封の基本的考えは、接触面での微小変形によるものでガスケット自体の巨視的弾性変形と指摘している。金属平型ガスケット付き管フランジ締結体（呼び径 2 インチ閉止および管フランジ）を対象に有限要素法（FEM）応力解析および漏えい量測定試験を行い、金属間（フランジと平型ガスケット）接触により塑性ひずみが発生する荷重領域においては密封性能が顕著に向上することを示し、締結体のガスケット平均接触応力  $\sigma_{ave}$  とガスケット降伏応力  $\sigma_{yield}$  の比（ $\sigma_{ave}/\sigma_{yield}$ ）が 1 より小さくなることを示している。この値を密封係数と定義し、締結体の必要な最小のボルト軸力を決定する新しい概念の設計方法を提案している。すなわちガスケット接触面での従来の弾性変形から塑性変形領域までガスケット変形が進展すると著しく密封性能が向上することを示している。

**第3章「内圧と曲げモーメントを受ける金属平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」**では、金属平型ガスケット付き管フランジ締結体（呼び径3インチ）に内圧および曲げモーメントを作用させた時の漏えい量測定試験とFEM応力解析を行い、曲げモーメントが作用することにより引張り側ガスケット接触応力がソフトガスケット付き締結体のそれより大きく低下するため、漏えい量も大きくなることを示している。すなわち金属ガスケット付き締結体は曲げモーメントが密封性能に大きい影響を及ぼすことを指摘している。さらに、内圧および曲げモーメントの作用順番が締結体密封性能に及ぼす影響は、ソフトガスケット付き締結体の場合に比べてより小さいことを示している。金属平型ガスケットに発生する塑性ひずみの領域および第2章で計測したプラテン装置による漏えい量測定試験の結果を用いて、締結体の密封に必要とされるガスケット応力とボルト初期締付け力の値を示している。

**第4章「内圧を受ける金属製リングジョイント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」**では、RTJフランジ締結体（呼び径3および20インチ）について漏えい量測定試験を行い、さらにRTJガスケットと管フランジの平底V形リング溝との接触応力をFEM応力解析により求め、密封機構を検討している。FEM結果より、RTJガスケットの形状（オクタゴナル形およびオーバル形）が密封特性に及ぼす影響を示し、オーバル形を用いる場合にはオクタゴナル形ガスケット付き締結体に比べボルト初期締付け力はより小さくても密封性能が良好であることを示している。さらに呼び径3インチのRTJフランジ締結体をトルク管理法によるボルト締付け軸力のばらつきを実験的に求め、このばらつきが締結体の密封性能に及ぼす影響を調べている。ボルト初期締付け力のばらつきの中で最も小さいボルト軸力で一様に締付けた締結体とばらつきがある締結体の漏えい量の差異は小さいことを示している。すなわち、ボルト初期締め付け力のばらつきが大きいと漏えい量が増加することを明らかにし、最小ボルト初期締付け力を用いて締結体の漏えい量を予測できることを示している。

**第5章「ガスケット付き管フランジ締結体のボルト初期締付け方法に関する検討」**では、RTJガスケット付き管フランジ締結体（呼び径3および20インチ）のボルト締付けステップ毎のボルト初期締付け力の測定を行い、ボルト締付け軸力のばらつきを締付け係数 $\alpha_A$ （最大ボルト軸力と最小ボルト軸力の比）として求め、 $\alpha_A$ が1.9とより大きいため、RTJガスケット付き管フランジ締結体の締付けはボルト軸力管理法の適用を推奨している。また、ソフトガスケット（うず巻き形ガスケットおよびジョイントシートガスケット）を用いた管フランジ締結体のボルト締結をエア駆動の工具（エアインパクトレンチおよびエアトルクレンチ）を用いてボルト軸力の変化を測定した結果、いずれの工具においても締付け係数 $\alpha_A$ が1.5以下であり、適用時間などの締付け条件を規制すれば、従来の研究成果VDI2230に記載されている値（ $\alpha_A=2.5\sim 4.0$ ）より小さい値になることを示し、インパクトレンチの有用性も指摘している。

**第6章「金属ガスケットを用いた管フランジ締結体の設計指針」**では、第2章で提案した密封係数という新しい概念を用い、金属製ガスケットに塑性ひずみを与えるボルト締付け力に着目した今までにない合理的な金属製ガスケット付き管フランジ締結体の初期ボルト締付け力の決定法を提案している。さらに設計フローチャートも示している。さらに、金属平型ガスケット付き管フランジ締結体の設計が従来より経験的に行われていることを勘案し、本研究で得られた科学的知見に基づく設計計算例を示し、本研究で得られた漏えい量測定結果と比較し、本計算法の妥当性を示している。この考え方をRTJガスケット付き管フランジ締結体設計へ発展させ、設計計算例を示すとともいくつかの課題を示している。

**第7章「結論」**では、本研究で得られた成果を要約するとともに、金属ガスケット付き管フランジ締結体からの漏えいを防止し、さらなる安全性の向上のために残された課題について述べている。

これらの研究成果によって、金属ガスケット付き管フランジ締結体の漏えい防止に関する現実問題への取り組みをさらに進めることが可能となるが、さらなる安全性向上のために今後解決すべき研究課題は以下のとおりである。

- 1) 圧力降下法や石けん膜流量計では計測できない微小漏えい領域および高温下における金属ガスケッ

- ト単体および締結体の漏えい量測定法の確立。
- 2) 高温, 内圧および曲げが作用する金属ガスケット付き管フランジ締結体の密封性能のデータ収集および評価。
  - 3) RTJ ガスケット (オーバル形とオクタゴナル形) の保守方法と RTJ ガスケットの選定基準の整備。
  - 4) ボルト締付け方法とその管理方法の詳細検討。

以上