

# ガスケットをとりまく社会環境の変化

## 1. はじめに

シールとは、各種プラントの配管や機器、装置において、流体が内部から外部へ、あるいは外部から内部へ流れないようにすること、またはその部材を指す。固定部のシールをガスケット、運動部のシールをパッキンと呼ぶ。ガスケットやパッキンは機械要素の一つであり、一般の認知度は低い、機械装置の重要な部品である。

漏れを防ぐということは、重要な技術であり、古代遺跡からも給配水管の遺構が発見されている。そこでは、アスファルト、タールなどが、コーキング材のように使われていたことが想像される。細い管同士のねじ込み継手を経て、産業革命による紡績産業、製鉄業の発展に伴い、溶接技術とねじ切り旋盤の出現によって、ボルト締めフランジ継手が実用化されるようになり、今日見られるガスケットの原型が整備されるに至った。

石綿ジョイントシートが1887年オーストリアのRichard Klingerによって発明され、うず巻形ガスケットは1912年アメリカのHenry Bohmerによって発明された。さらには、20世紀初頭にドイツでHaber-Bosch法による高温高压下でのアンモニア合成が実用化され、重化学工業の発展によって各種の高圧用金属ガスケットが開発された。

日本では、明治以降、石綿ジョイントシートの高級品を輸入に頼っていたが、国産化が進み、1935年当社において、日本人だけによる純国産品が誕生した。またこれは、120インチという大型シートであり、世界的に見ても画期的な製品であった。

こうした黎明期を経て、戦後は石油化学工業をはじめとする各種産業が発展していったのに伴い、ガスケットもその適用範囲を広げるとともに、多種多様な新材料が使われるようになっていった。しかし、こうした急激な産業の発展は、多くの環境問題も発生させることになった。

## 2. 石綿規制

石綿の健康障害に関する報告が20世紀初頭になされ、その危険性が広く認識されるようになった。石綿の販売、使用の制限が、欧米を中心として進められ、日本でも2004年に、石綿製品について輸入、製造、譲渡、提供、使用が禁止された。しかし、石綿の使用用途のほとんどが建材であり、また実績で石綿に代わるシール材がなかったことから、シール製品、石綿紡織品は対象外であった。2006年には全石綿製品の使用等が禁止されたが、特定分野の部材については、代替品が確立していないとの理由で、規制猶予対照表(ポジティブリスト)が設定され使用が続けられた。ポジティブリストが完全撤廃されたのは、2012年3月のことであった。

このように、シール製品における全面的な非石綿化には長い年月を要したが、これはガスケットの非石綿化に大きな技術的課題が存在していたためであった。

石綿ガスケットの代表的なものとしては、石綿ジョイントシート、及び石綿ファイラーうず巻形ガスケットが挙げられる。しかし、うず巻形ガスケットはシール性や耐薬品性、耐熱性に優れた膨張黒鉛ファイラーやふっ素樹脂ファイラーを用いた高級化がすでになされていた。そのため、非石綿化の際に、無機ファイラーを用いたうず巻形ガスケットも開発されたが、多くはすでに市場で実績のあった膨張黒鉛ファイラーうず巻形ガスケットに代替された。

一方、低温・低圧及びユーティリティ用途として最も汎用性の高い石綿ジョイントシートは、JISなどに示された常態物性試験で石綿ジョイントシートと同等と評価された非石綿ジョイントシートが、フィールドにおいて多くの問題を引き起こした。当社は、石綿ジョイントシートが長年に渡る使用実績があったが、そのため、その物性試験は実績のある製品の、生産工程管理のための品質検査であり、実際に使用するにあたって本当に必要とされる機能を評価するものではなかったということを明らかにした。

石綿ジョイントシートの場合、石綿繊維の配合量は65～85%であったのに比べ、非石綿ジョイントシートの場合、アラミド繊維などの有機繊維、及びロックウール、炭素繊維などの無機繊維は5～25%しか配合されていない。ジョイントシートの材料構成をFigure1に示す。また、石綿繊維は細く長く、繊維同士が強く絡み合い、繊維自身が強度因子となっているため、ゴムが硬化してもガスケットとしての機能が維持できていた。一方、非石綿ジョイントシートは繊維量が少なく、また繊維も太く短く、剛直であるので、アラミド繊維のファイブ

化(毛羽立ち)による繊維同士の絡み合いを利用して非石綿ジョイントシートは開発されたが、石綿繊維の絡み合いに比べて弱く、ゴムバインダーが強度因子のかなりの部分を担う形になっている。そのため、ゴムバインダーが高温にさらされ硬化した場合、配管応力や増締めなどの外部応力が負荷されると、ガスケットに割れが生じる事故が多発した。

こうした非石綿ジョイントシートの割れの問題は、ゴムバインダーによることがほぼ確実であると見られたが、市場にある非石綿繊維では、石綿繊維の様な補強効果は期待できないことが明らかになった。そのため、当社はいち早くゴムを使わないシートガスケットの開発に着手した。

バルカロン<sup>®</sup>のような充填材入りふっ素樹脂シートは、非石綿化以前から耐薬品性の求められる化学プラントに多く使用されており、非石綿化の初期にはジョイントシートに代えて使用されることもあった。しかし、ふっ素樹脂特有のフローにより、高温時の締付力低下が大きく、耐熱性については、石綿ジョイントシートを完全に代替することはできなかった。

ふっ素樹脂のフローを改善するには、その流動性を抑制するために多量な充填材が必要となるため、相対的にふっ素樹脂の含有量が少なくなり、その少ないふっ素樹脂含有量で充填材の間の空隙を埋めて、適正なシール性が維持できるよう、配合と加工方法を検討する必要がある。その開発は困難を極めたが、ついには石綿ジョイントシートと同等以上のクリープ緩和特性とシール性を有する高機能シートガスケット“No.GF300”を開発した。こうした、低クリープ緩和仕様のシートガスケットは他社にはないものであり、このNo.GF300、及びそれに続くNo.SF300、No.MF300、No.UF300といった高機能シートガスケットによって、石綿ジョイントシートの代替は完成した。

Figure2にガスケットの変遷についてまとめた。

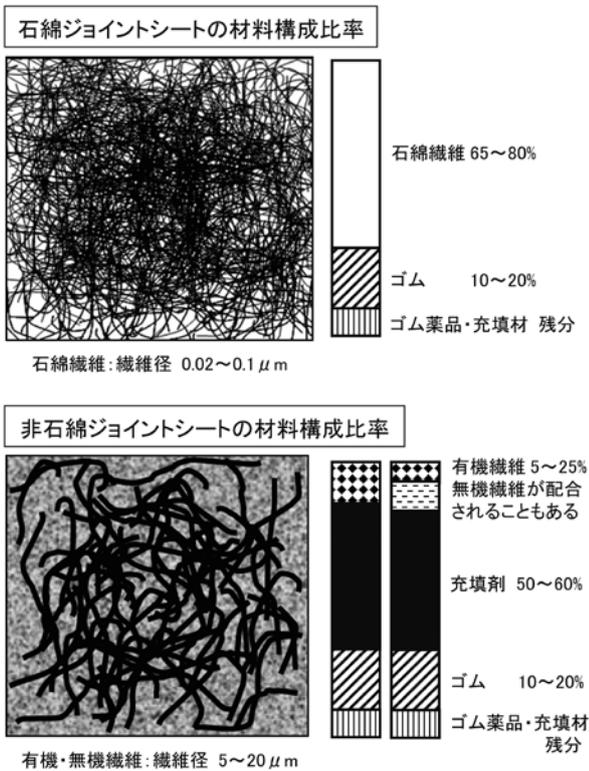


Figure1 ジョイントシートの材料構成イメージ

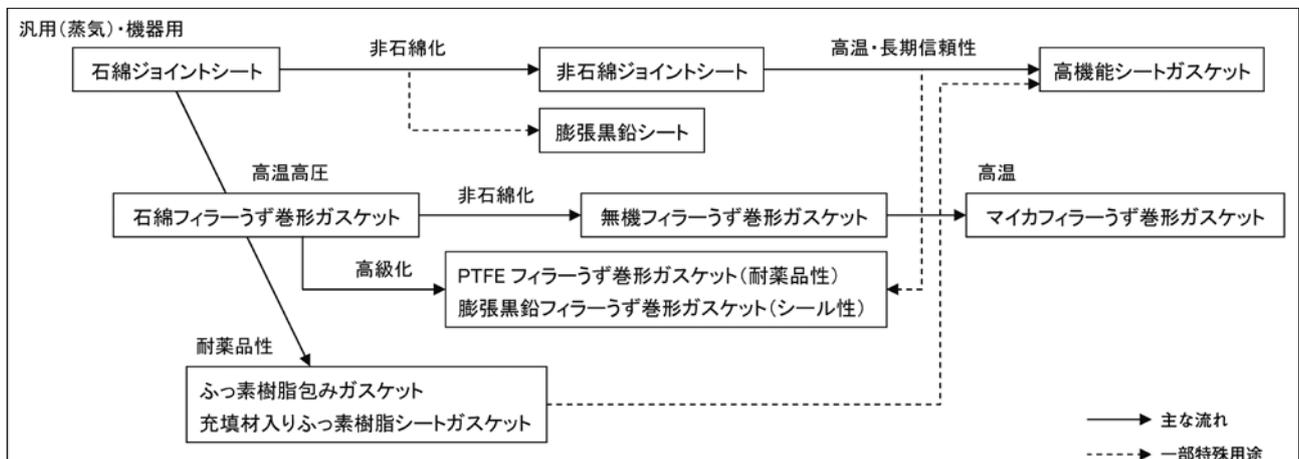


Figure2 ガスケットの変遷

### 3. 信頼性評価技術

また、同時に当社は、実績に代わる新たな信頼性評価技術の開発にも着手した。非石綿製品の実績は乏しく、長期使用に対する信頼性を得るには、ユーザー個々の使用条件における実証試験を行うとともに、長期性能を理論的に評価推定する技術が必要であると考えたからである。

ガスケットの長期信頼性評価のための寿命推定方法は、使用済み核燃料輸送貯蔵容器(キャスク)用ガスケットの開発を契機として検討が始められた<sup>1)3)</sup>。その方法は使用環境におけるガスケット応力の経時変化を応力緩和線より予測し、ガスケット残留応力が密封限界点に達する時点寿命とするものである。ただ、こうした試みは、締切型フランジにおけるメタルガスケットについての事例であり、非石綿ガスケットに適用するには、より一般的な締込型フランジにおけるガスケット残留応力について考慮する必要がある。

締込型フランジにおける寿命評価についても、ガスケット残留応力が密封限界応力に達する時点寿命とするという、基本的な考え方は同じである。ただし、ガスケット残留応力については、ガスケットだけではなく、フランジ継手の応力変化をも考慮する必要がある。最近では、こうした締込型フランジにおけるガスケット応力の経時変化については、ガスケットを粘弾性体とした有限要素解析(Finite Element Analysis:FEA)による研究<sup>4)7)</sup>が進められている。特に、常温で締付け、温度サイクル下で使用するという、非定常かつ長期運転条件を考慮に入れ、ガスケット圧縮特性の温度依存性、非線形性、ヒステリシス特性、熱膨張などを考慮して有限要素解析を行うことによって、より現実的なガスケット応力の経時変化の推定が可能となった。

ガスケットの材料劣化による寿命評価への取り組みとしては、非石綿化のための緊急プロジェクトである2006年NEDO開発支援事業において、膨張黒鉛の酸化減量にArrhenius式を適用することを検討した。ライン入りマイカファイラーうず巻形ガスケット(No.M596L)について、膨張黒鉛ファイラー酸化の活性化エネルギーから寿命予測が可能であることを確認した<sup>8)</sup>。さらに、膨張黒鉛ファイラーうず巻形ガスケット(No.6596)については、熱減量後の圧縮復元線から、ガスケット残留応力を求める手法<sup>9)</sup>も提案した。

高圧力技術協会(HPI)のSTOP委員会では、従来のASME codeに代わるフランジ継手設計の検討がなされ、非石綿ガスケットを評価するために高圧力技術協会規格HPIS Z108“ボルト締めフランジ締結体用ガスケットの分類及び特性評価指針(2014)”が新たに制定された。この規格では、ガ

スケットの新たな分類体系、及び非石綿ガスケットの試験温度などの評価基準が明確にされた。この成果はJIS B 0116“パッキン及びガスケット用語(2015)”の改正にも引き継がれ、ガスケットの分類体系、及び非石綿ガスケットの関連用語が新たに登録された。これにより非石綿ガスケットの中でのNo.GF300の位置が明確になった。

### 4. 大気濃度規制

大気汚染物質の大気中への排出を規制すべく、米国は1963年に大気浄化法(Clean Air Act:CAA)を制定した。その後、数度の改正を経て、1990年改正大気浄化法(Clean Air Act Amendment of 1990:CAAA)が公布された。このCAAAでは、酸性雨対策、自動車排ガス規制の強化、毒性化学物質の排出規制の強化、オゾン層破壊の抑制を目的とし、189種類の有害大気汚染物質(VHAP)が指定された。これらは工業プラントからの揮発性有機化合物(VOC)の微少漏れ(Low Emission)を規制するものである。漏れの規制値としては、大気濃度500ppmが規定され、大気汚染の深刻なカリフォルニア州では、1997年州規制により100ppmに規制強化されている。

微少漏れの規制は、ドイツにおいても1986年に大気浄化法(Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft:TA-Luft)として制定され、イギリスでも1990年にEnvironmental Protection Act of 1990が施行されるなど、環境規制が拡大している。

プラントでの漏れの管理は、基本的には閾境界での環境濃度と、各プラントでの物質収支を基にした排出総量で管理してきたが、環境規制ではガスケットからの微小漏れを直接管理するために、フランジ継手周辺環境濃度を測定することを要求した。このことはガスケットを選定する上での重要な評価基準となりつつある。すなわち、継手からの漏れは、従来の漏れるか漏れないかの定性的な検査ではなく、定量的な漏れ量としてとらえる必要が高まってきた。

一般に、“漏れが無い”という状況は存在せず、微少な漏れは必ず存在する。すなわち、“漏れが無い”というのは、漏れ試験の検出感度を越える漏れが無いということであり、それを設計上“漏れが無い”状態として許容しているにすぎない。

各種ガスケットの漏れ量をFigure 3に示す。

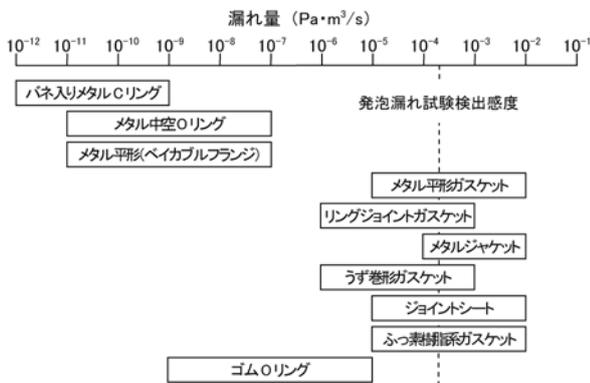


Figure3 ガスケットの漏れ量

石油化学プラントやその周辺機器では、通常は発泡漏れ試験によって漏れの有無が検査されるが、発泡漏れ試験の検出感度は、 $3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度であるとされている。

日本におけるこうした目視での検査は、世界的に見ても厳しい基準のもとに行われているが、漏れを数値化して環境への影響度を評価しようという動きに対しては、数値化された漏れ量でない限り評価の対象にはならない。

なお、CAAAで規定された管理値である500ppm及び100ppmが、どの程度の漏れ量に相当するのか、その換算を示した公的なものはないが、当社では、同一条件で行った環境濃度測定結果とガスケット漏れ試験結果を比較し、500ppmに相当する漏れ量は $2 \sim 4 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であり、より厳しい100ppmでも、 $3 \sim 6 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度で、発泡漏れ試験によって検知できる漏れとほぼ同程度であることを示した<sup>10, 11)</sup>。

また、漏れ量を考慮したフランジ継手のシール設計が検討されている。これらはいずれも気体の漏れを基準としたものである。これは、液体の微小漏れは定量測定が困難であるということと、液体漏れ量は気体漏れ量に対して極めて少ないと考えられていたためである。それに対して、当社で液体の微小漏れ量を測定し、同様の条件で測定した気体漏れ量を比較したところ、両者の体積漏れ量には $1 \times 10^8$ 倍の差がみられたが、質量漏れ量はほぼ同じオーダーであることを見出した<sup>12)</sup>。これは、質量漏れ量を基準とすることで、気液ともに合理的なシール設計ができる可能性を示している。

## 5. おわりに

石綿規制に対して、当社は独自技術による取り組みを進め、石綿ジョイントシートを代替しうる、No.GF300をはじめとする高機能シートガスケットを開発した。更に、信頼性評価

技術と併せ、非石綿化に貢献できたものと自負する。

また、フロンや環境ホルモン(外因性内分泌攪乱物質)、及び一部のふっ素樹脂の製造に使用される助剤であるPFOA(パーフルオロオクタン酸及びその塩類を含む化合物の総称)などの環境負荷物質への対応として、シール材料の配合変更など、その安全性について不断の検証を続けている。

大気濃度規制に伴う漏れ量の管理や、漏れ量を前提とする合理的なフランジ継手設計など、今後起こるであろう様々な環境変化に対しても真摯に取り組み、シールにかかわる全ての人々に貢献するべく努力する所存である。

## 6. 参考文献

- 1) Nishida T., Sealability of Spring-Energized Elastic Metal Gaskets, SAE Technical Paper Series 870004, Proc. '87 SAE International Congress and Exposition Detroit, Michigan, Feb (1987), pp23-27
- 2) 掘井賢二、トライパックの長期性能評価、バルカーレビュー、vol.35、No.3、pp.7-13 (1991) .
- 3) 野々垣、肇 大断面径トライパックの長期性能評価、バルカー技術誌、No.6、pp.1-5 (2003) .
- 4) 高木知弘、名護典寛、佐藤広嗣、山中幸、ガスケットの粘弾塑性挙動を考慮したボルト締結体の力学的特性の評価、日本機械学会論文集C編、vol.73、No.728、pp.1245-1252 (2007) .
- 5) 名護典宏、高木知弘、佐藤広嗣、ガスケットの粘弾塑性特性とボルト締結体の軸力緩和予測、バルカー技術誌、Vol.16、pp.11-19 (2009) .
- 6) 渡辺将広、山口篤志、本田尚、辻裕一、フランジ継手用ガスケットの高温粘弾性特性の評価、日本機械学会山梨講演会講演論文集、pp.145-146 (2008) .
- 7) 佐藤広嗣、黒河真也、高木知弘、ガスケットを用いた締結体の長期漏洩特性の予測手法の検討、日本機械学会山梨講演会講演論文集、pp.139-140 (2008) .
- 8) NEDO平成18年度成果報告書、緊急アスベスト削減実用化基盤技術開発プロジェクト、シール材の非石綿代替製品に関する寿命推定実証技術の研究開発、2007年3月
- 9) Asahina, M., Nishida, T. and Yamanaka, Y., Gasket Performance of SWG in ROTT and Short Term Estimation at Elevated Temperature, ASME PVP, Vol.326, (1996) , pp47-59
- 10) 宮本悟、地球環境に対応のバルブ(ペローズバルブ)、バ

ルカーレビュー、Vol.43、No.2、pp.7-12 (1998) .  
11) 山中幸、赤松淑子、黒河真也、ガスケットの環境規制に関する技術動向、トライボロジスト、Vol.56、No.2、pp.87-92 (2011) .

12) 赤松淑子、佐藤広嗣、野々垣肇、西田隆仁、液体漏洩量の実測と気体漏洩量との比較、日本機械学会論文集 A 編、Vol.77、No.777、pp.749-753 (2011) .

(Abstract)

VALQUA reviewed the impact of gasket on the social environment. In particular, with respect to Asbestos regulations, we have taken steps ahead of the competitors, developed high-performance sheet including No.GF300 and we also started long-term reliability assessment considering long service life of asbestos products. Moreover, the necessity of leakage amount management for atmospheric concentration regulation and the measurement of liquid micro-leakage were also mentioned.

**Keywords:**

Asbestos regulations, long-term reliability assessment, atmospheric concentrations regulation, liquid micro-leakage

(摘要)

简单介绍了对社会环境变化公司在密封垫片方面开展的工作。特别是在石棉规制方面，先于其它公司开发了以No.GF300为代表的高机能板材，并且在取代石棉产品的实绩，建立长期可靠性评价方面也开展了一些工作。另介绍了大气浓度规制背景下泄漏量管理的重要性以及液体微小泄漏的测定。

**关键词:**

石棉规制、长期可靠性评价、大气浓度规制、液体微小泄漏



**野々垣 肇**

シール営業本部  
テクニカルソリューショングループ