

解説:『カスタマー・ソリューションと評価技術』

1. はじめに

当社の基幹をなすシール製品、機能樹脂製品開発の歴史は、顧客ニーズに対するソリューション提案の歴史でもある。顧客におけるトラブル事例を観察し、その原因を評価、分析を重ねて、設計に反映する。そしてそのデータの積み上げの中から学習し、体系的にまとめる不断の取り組みがソリューションの源泉となっている。当社が顧客ニーズを理解するための手段の一つに技術相談がある。技術相談にはクレームも含まれているが、時代のニーズの鏡だと考え、貴重な財産となっている。一例として、日本高圧協会による漏洩に関する原因調査統計¹⁾と当社の技術相談の内容の分類をFigure1に示した。業界のニーズとよく一致していることが見て取れる。この内容をより詳細に分析すると、様々な課題を見出すことができるが、その考察は別の機会としたい。

ここではシール製品において、ソリューションの基となる当社の評価技術について紹介する。シール製品は主に静的



Figure1 漏洩原因調査統計例

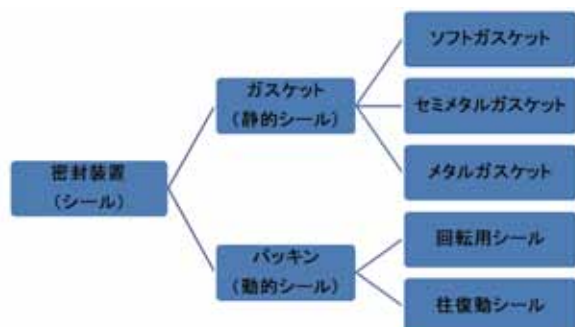


Figure2 シールの分類

シールとしてのガスケットと動的シールとしてのパッキンに分類され(Figure2)、それぞれについて主要な評価技術を解説する。現象の観察から始まる評価技術には、様々な要素技術を複合的に理解することが求められ、かつ用途も多岐にわたるので、製品に対する評価の考え方を中心に述べる。

2. ガスケット評価技術

ガスケットは配管などの接合面のシールであり、一般にフランジとボルトとガスケットの設計により構成される。ガスケットの種類により温度-圧力レート(Figure3)と、漏れ量(Figure4)

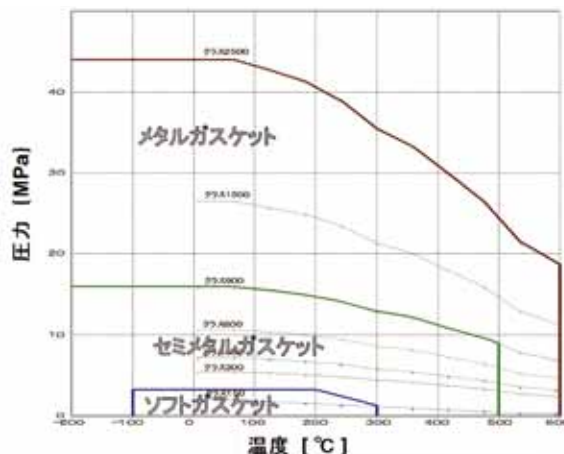


Figure3 ガスケットの種類と温度-圧力レート

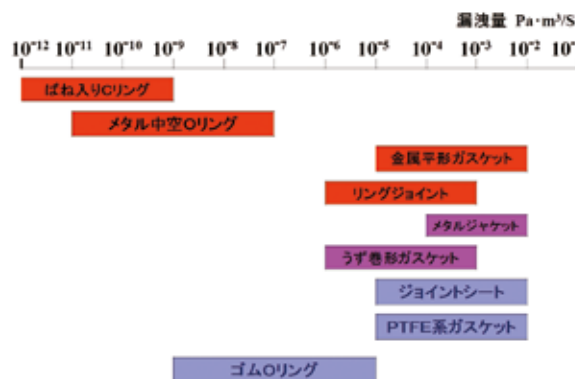


Figure4 ガスケットの種類と漏洩量

が目安として示されている。シール理論と設計についてはここでは割愛するので、成書²⁾及びシール講座³⁾を参照されたい。

いずれも十分に設計された定常状態を取り扱っているが、ここでは、非定常状態を評価する方法について記載する。もちろん、定常状態を理解して初めて非定常状態が認識されるので、定常状態を便宜的に『設計の範囲内で使用された場合』と定義する。一般に、ガスケットからの漏れは、フランジ面とガスケットの接面からの漏れとガスケット内部からの透過漏れの総和であり、許容漏れ量を設定した場合、ガスケットをフランジで締付けていく過程での「シール開始面圧」と、締付圧が緩和されていく過程での「密封限界ガスケット面圧」が特性として把握される(Figure5)。これは一般的に用いられる製品特性の評価である。使用温度、流体環境により、設定した使用期間の間にこの状態が維持出来れば、各要素を計算し安全率を載せて設計が完了する。問題は、材料が環境により経時変化することにより、設計時に想定した挙動から外れた場合に、過大な漏れとして現れることにある。

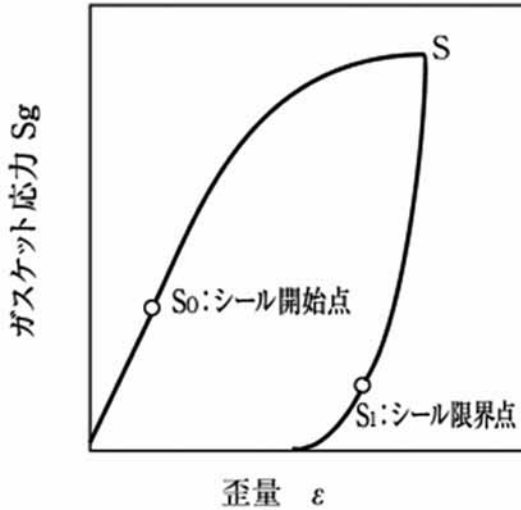


Figure5 ガスケット特性曲線

2-1) シートガスケットのシール性寿命評価

当社のガスケット寿命評価技術は、非石綿化に伴い実績の無い新製品の信頼性を調べるために発達してきた。シートガスケットのシール寿命とは、漏れ量が規定値を超えるに至る時間を推定することである。イレギュラー要因も寿命の一つと捉える事が出来る。その推定には、寿命に至る劣化要因の特定が求められる。

熱、酸化などにより生じる化学反応を伴う劣化速度は、Arrhenius則を適用することが可能であることが知られている(Figure6)。材料の熱分解以下の範囲で成立するこの式

Arrhenius 式

温度変動による反応速度の変化を表した近似式

$$\frac{d \ln k}{dt} = E / RT^2$$

$$\Rightarrow \ln k = -E / RT + \ln A$$

$$\Rightarrow k = A \exp(-E / RT)$$

- k 反応速度定数
- T 温度
- E 活性化エネルギー
- R 気体定数
- A 頻度因子

使用温度と寿命の関係

反応速度 $r_d = -dC_A / dt$
 反応速度式 $r = k C_A^{\alpha} C_B^{\beta} \dots$

劣化反応が一次反応とすると
 $r = dC_A / dt = -k C_A$
 $\Rightarrow \ln C_A - \ln C_{A0} = -kt$
 濃度 C_A に対応した特性値を P とすると
 $\ln P - \ln P_0 = -kt$
 寿命にいたる時間を t_e 、
 限界特性値を P_e とすると
 $\ln P_e - \ln P_0 = -kt_e$

Arrhenius式を導入し展開すると

$$\ln t_e = A + E / RT$$

Figure6 Arrhenius則

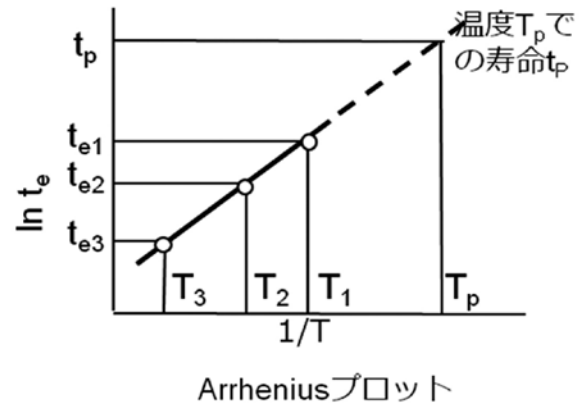


Figure7 Arrheniusプロットによる寿命推定

は、劣化促進試験結果から、常用温度における寿命を外挿で求める方法である(Figure7)。使用環境から想定される劣化要因での環境下で条件を変えて測定するのだが、その評価に用いる特性値は、シールの材料構成やシールに求められる特性を考慮する必要がある。実際のガスケットは複合材料や複合構成体となっている場合が多いので、実機評価の結果と整合する劣化の支配因子を特定していく評価となる。複雑な構成体の評価の一例として、うず巻形ガスケットの酸化劣化評価を、酸素の透過と充填材の酸化劣化が逐次反応で起こり、シール限界がどの時点で起こるのかを明らかにしたことが挙げられる。⁴⁾

劣化が無い場合でも、温度などの影響による製品の寸法変化や弾性率の変化も、シール面圧の変化として漏れ量に影響する。ボルトによる締結下では、ガスケットの厚さが薄くなると、また弾性が低下するとシール面圧が低下する。ガスケットの物性の評価については、エラストマーガスケットの項で解説する。

ガスケット表面とフランジ表面との「なじみ」の評価も重要な因子の一つである。「なじんでいる」とは、フランジの表面粗さ

やうねりの隙間をガスケット材料で埋めて吸収できた状態を指す。「なじみ」が最も問題となるメタルシールの評価例としては、衝撃落下時のシール性評価を報告している。

これまで述べてきたように、シール寿命に及ぼす因子は多岐にわたるが、それらと実機試験での結果を比較分析し、寿命に及ぼす影響を解析するなどの多くの蓄積が求められる。これらを総合的に可視化した評価がFEA (FINITE ELEMENT ANALYSIS)である。FEAは構造物に外力が加わって変形する場合にどのような応力や変形が生じるのかを解析する手法の一つである。弾性材料には一般的に用いられる手法だが、粘弾性体に適用した事例は稀であった。そこで数年にわたり解析手法の開発を行い、ガスケットへの適用技術を構築した。FEAの導入により、解析精度が向上し、複雑な因子が可視化できるので顧客の理解も飛躍的に得られるようになった。ガスケット締結体のFEA解析例をFigure8に示す。

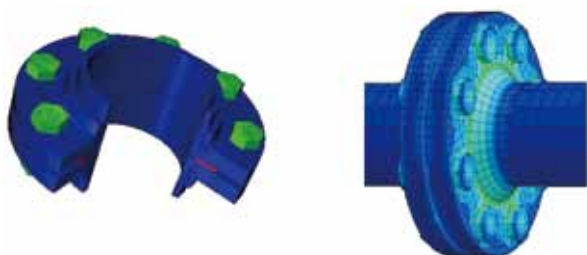


Figure8 締結体のFEA解析例

こうした評価の蓄積により、何がイレギュラーとなる可能性があるのかを分析することになる。実使用においては、流体の脈動、圧力変化、配管内挙動によりフランジ面間を広げる力が働いたり、配管の温度変化による膨張、収縮なども起こり得る。表面的に現れる寿命が、どのような要因によるものなのかを、データに基づき推定し、解決策を顧客と共に導き出すことが重要となる。

2-2) エラストマーガスケットのシール寿命評価

エラストマーガスケットは、簡便に広範囲に用いられるシールであり、その最も標準的な形状はOリングである。

Oリングの一般的な寿命評価は、圧縮永久ひずみである。圧縮永久ひずみとは、一定のすき間で圧縮されたOリングを、様々な雰囲気下で放置した後、すき間以上に回復する弾性を保っているかどうかの指標となる。全く回復しない場合は100%ひずみとし、完全回復すれば0%の永久ひずみとなる。Oリングを25%圧縮して使用する設計が一般的に用いられており、使用環境にもよるが、永久ひずみ80%となる時点が寿命の目安となる。

エラストマーは高分子を架橋することによりゴム弾性を発現させているので、圧縮永久ひずみとは、その材料の弾性変形と塑性変形の総和と理解される。エラストマー材料の弾性領域の評価には、動的粘弾性測定を用いている。測定例をFigure9に示す。この測定により微小変形領域における貯蔵弾性率と損失弾性率の温度依存性を理解することが出来る。変位量と周波数を変動させると、温度—時間重ね合わせの定理を適用することでマスターカーブを得ることも可能である。シールとして用いられる温度域は、その材料の弾性領域であり、そこから外れた場合にはシール性能は極端に悪化する。特に、低温域での適用には注意が必要⁵⁾であり、TR試験 (:Temperature Retraction Test: ASTM D1329)などの評価を併用することにより、その温度域でシールに必要な弾性が保たれているかどうかを確認している。

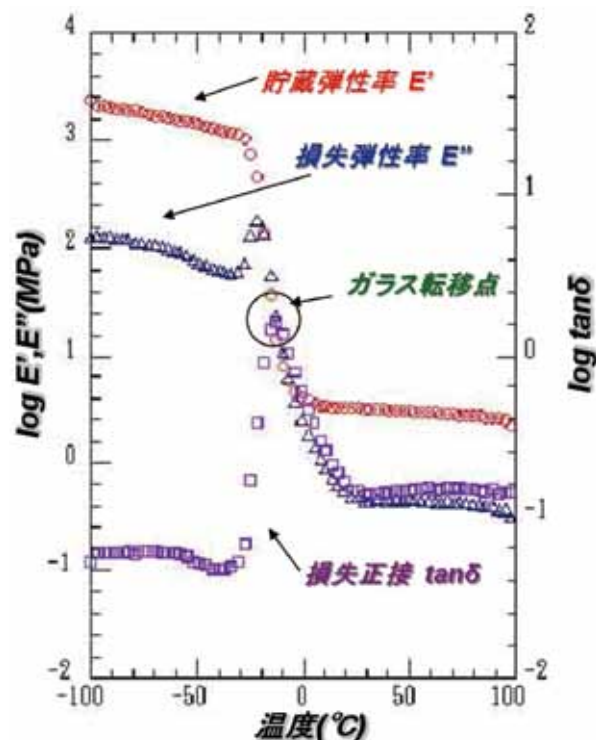


Figure9 動的粘弾性測定例

エラストマー材料のガスケットとしての寿命に至る劣化要因が何であるか、を特定することが評価の主眼となる。シートガスケットの項で述べた内容と同様に、化学反応を伴う劣化の場合にはArrhenius則を適用することが可能である。シールとしての性能は、エラストマーを構成するポリマーの劣化と架橋部位の劣化に支配されるので、その把握が重要となる。エラストマーの場合には、温度と流体の複合劣化となる場合が多いので、流体への浸漬試験と熱劣化試験を行うことにより、どの因子が寿命を支配しているのかを特定することが一般

的評価となる。

半導体DRYプロセス向けエラストマーガスケットの場合には、ラジカルによる攻撃を受けることにより、永久ひずみの寿命以前にシール寿命に至る場合が多いので、ラジカルの照射評価を行っている(Figure10)。照射による材料の重量減少、パーティクル発生量、シール性への影響を評価している。⁶⁾照射方法にノウハウがあり、顧客からの信頼もいただいている。

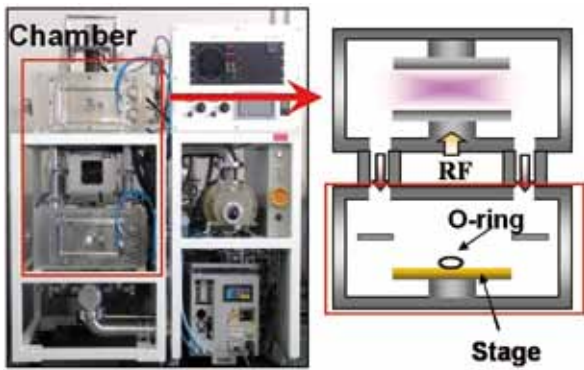


Figure10 ラジカル照射装置例

エラストマーシール特有の現象としては、溝へのシール装着時のねじれ、繰り返し使用時の固着や転動、膨潤・収縮による寸法変化などもあり、使用環境に合わせた評価を行っている。シートガスケットの項でも述べたが、材料特性と劣化挙動など様々な材料挙動を考慮したとしてはFEAが有効である。そのデータにより、材料の最適化だけでなく、シール形状の開発や溝設計の最適化を含めたトータルソリューション提案へとつなげている。FEAを用いた形状設計の例として、はみ出し防止設計の解析例をFigure11に示した。

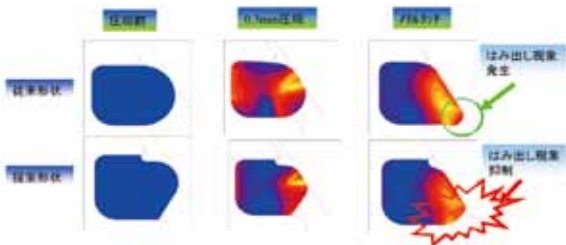


Figure11 FEA解析を用いた形状設計例

3. パッキン（動的シール）の評価技術

パッキンには、一般にエラストマー系複合材料や、グランドパッキンなどの繊維編組体に固体潤滑剤複合材料が用いられるが、ここではエラストマー系材料に絞って説明する。

パッキンは、ガスケットと比較してシール性能に影響する因子が多く、解析はより複雑となる。摺動が加わることにより、

摩擦摩耗、潤滑作用、振動や衝撃の吸収、及び二次的に発生する摺動発熱などを考慮することとなる。各因子の基礎評価がソリューションへの基となる⁷⁾

材料の摩擦摩耗特性評価には、すべり摩耗とアブレーション摩耗の評価があり、それぞれの試験機を揃えている。使用後のパッキンの状態例をFigure12に示す。使用後の表面状態によりどの形態の摩耗となっているのかを評価する。エラストマー及び樹脂材料の摩擦摩耗については、以前に特集しているので参照されたい⁸⁾

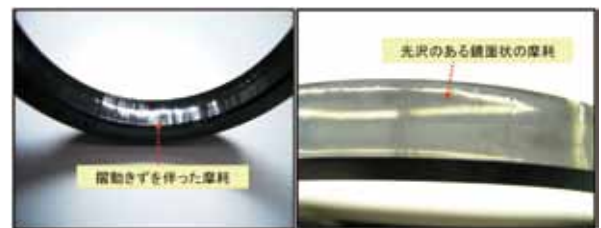


Figure12 使用後パッキン鏡面のしゅう動痕観察例

パッキンにおいては、材料特性の他に形状設計が重要な要素となる。一般に潤滑状態は、Stribeck曲線(Figure13)を示し、摺動速度と流体の粘性から、境界潤滑、混合潤滑、流体潤滑の形態を推移する。形状設計により如何に潤滑状態を制御するかがポイントとなる場合が多い。⁹⁾流体潤滑においては逆問題¹⁰⁾が提出され、設計が大幅に進化してきた。シール寿命は、起動時などに起こる境界潤滑から混合潤滑での性能に左右され、実機を模した装置で評価し、結果を解析することになる。

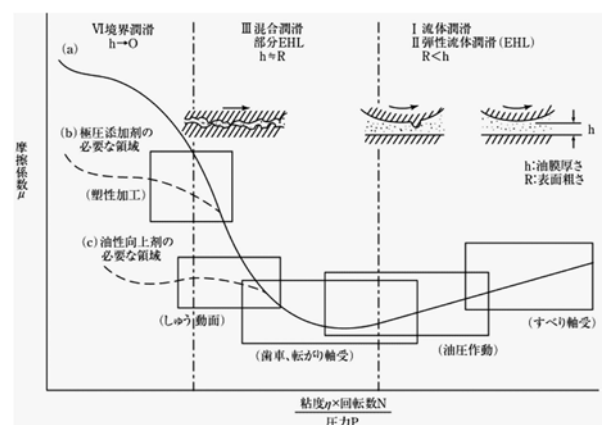


Figure13 Stribeck曲線⁹⁾

評価後のパッキンに起こる現象としては、はみ出し、破損・クラック、摩耗、劣化、変形、かじり付きなどとして現れ、作動中には漏れ、鳴きなどとして現れる、それぞれに対して原因と対策をたてることになる¹¹⁾。ここでもFEAによる解析が有効に用いられている。パッキンのFEA解析例をFigure14、15に示した。

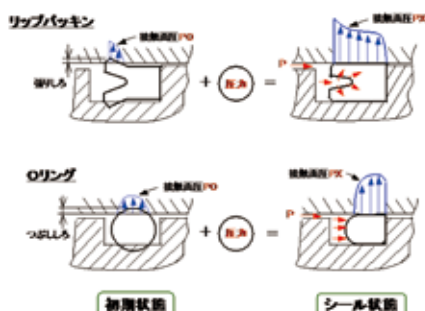


Figure14 パッキンの接触面圧分布解析例

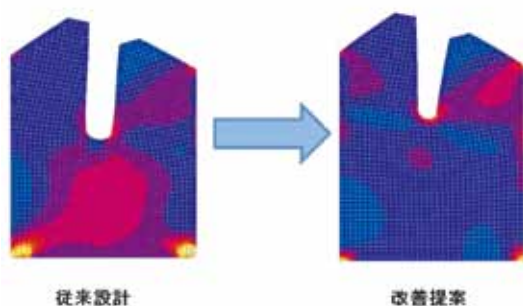


Figure15 FEAを用いたパッキン設計例

4. おわりに

今回は材料の分析・評価技術については割愛したが、別の機会に紹介したい。

現象を観察し、原因を体系化する過程で、様々な開発のヒントが発見される。体系化を支える開発、体系の前提を変

える開発など、技術者の感性が問われているといえよう。こうした取り組みに挑戦している技術者こそが当社の財産であると考えている。その目的は、時代に適合した顧客ニーズに向き合うことであり、現在は製品開発のみならず、ソフトを組み合わせたソリューションの提案に取り組んでいる。当社の技術が読者諸兄の一助になれば幸いである。

5. 参考文献

- 1) 高压ガス保安協会統計資料
- 2) 西田 隆仁：現代ガスケット概論
- 3) 「シール講座」, バルカーレビュー, Vol.30 - 31(1986-1987)
- 4) 西田 隆仁, 朝比奈 稔, 山中 幸：バルカーレビュー, Vol.40, No.12, 1(1996)
- 5) 川村 敏雄, 金山 信之, 原島 登：バルカーレビュー, Vol.23, No.12, 1(1979)
- 6) 大住 直樹：バルカー技術誌, No.30, 30(2016)
- 7) 赤井 英夫：バルカーレビュー, Vol.31, No.11, 1(1987)
- 8) 内山 吉隆：バルカーレビュー, Vol.32, No.6, 1 & No.12, 1(1988)
- 9) 似内 昭夫：バルカーレビュー, Vol.44, No.7, 1(2000)
- 10) 平野 富士夫, 兼田 禎宏：潤滑, Vol.16, No.1, 69(1971)
- 11) 山下 純一：バルカー技術誌, No.30, 3(2016)

(Abstract)

Seal products that form our backbone, feature the history of the resin product development is also the history of the solutions proposed to customer needs. Failure samples of customers are observed, evaluations are carried out to find the reason, these efforts are reflected in our product design, learn from the accumulated data, tireless efforts to bring together in a systematic manner has become a source of solutions.

Evaluation technology of our company of seal product is introduced. Major evaluation techniques for gasket as a static seal and for packing as a dynamic seal are introduced. Service life evaluation of our product is also discussed.

Keywords:

evaluation technology, gasket, packing, service life

(摘要)

密封件和机能树脂作为本公司的主打产品，其开发的历史即针对顾客需求提出解决方案的历史。对顾客方产生的故障案例进行观察，并对其原因进行分析与评价，再反映到设计中。而在数据的积累中不断学习，系统的归纳总结及不断的努力是解决方案的源泉。

在此将对本公司的评价技术进行介绍，它是密封件产品解决方案的根据。主要以静态密封件垫片及动态密封密封圈的主要评价技术以及产品的寿命评价为中心进行解说。

关键词：

评价技术、垫片、密封圈、寿命



池田 隆治 博士(工学)

研究開発本部
開発部 部長