

[シール編] 解説

シール部品設計の基礎

寺子屋 萩本 光広*

*はぎもと みつひろ：代表

1988年明治大学大学院修士課程終了後、ゴム部品メーカーへ入社、防振設計を3年間経験後、CAE担当として30年間ゴム部品（自動車・家電・住宅用など幅広い部品の解析）に携わり、2016年にCAE解隊から寺子屋として独立、ゴム製品の材料定義から解析を中心として開発のサポートを行い、現在に至る。

はじめに

シール開発との出会いは、CAE担当の設計サポートで自動車部品メーカーの開発者との打合せに参加したことからであり、その後、家電メーカーのプリンタ開発など、さまざまな製品にかかわってきた。設計・開発担当がかかえている問題をコンピュータシミュレーションにより解決していく、それが主たる役割であった。しかし、1つ問題を解決すると開発担当以上に新たな課題が見えてきて、設計・開発に非常に詳しく携わってきた。

面圧について

シールというものは、液体、気体を逃さないために、いかに圧力（面圧）を大きくするかと考えがちであるが、基本的な考え方は分布になる。図1のように油面角 $\theta 1$ （＜シール角 $\theta 2$ ）の勾配が重要で、大きさではないことが経験上で判明している。

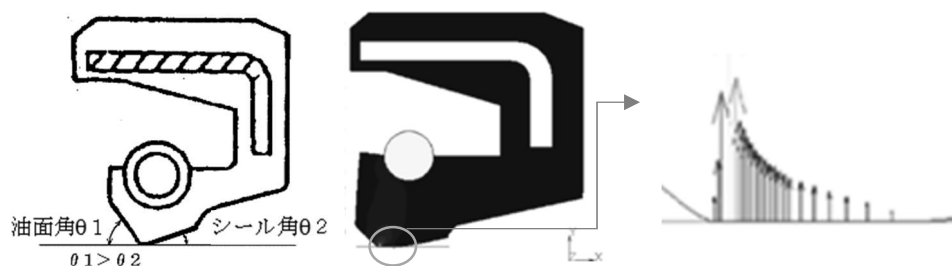


図1 シールの基本設計：面圧よりも圧力勾配が重要

顧客との実験で、システムの中のシールと接するシャフトを徐々に削っていき、細くしながら面圧を徐々に減らしていく。その際、偏芯に注意しながら面圧を減らしていく。そこで面圧が非常に小さくなっても漏れの発生がないことを経験した。面圧勾配が逆になると面圧を上げても簡単に漏れが発生することを経験してきた。貴重な体験ができた。

では、図1のようなものではなく、Oリングや角型シールではどうであろうか。単純に無負荷時のシール面圧を考えると、対称形状のため勾配が油面角とシール角が同じように考えられるが、シールが機能する際に圧力が流体側から発生するため、自然に油面角の圧力勾

配が高くなる（図 2）。

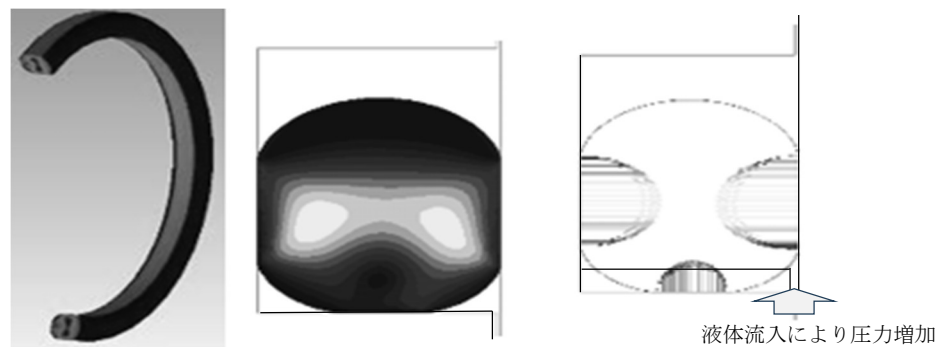


図2 Oリングの圧力分布

シールというとガスケットなどピストンシールを含めて金属や樹脂のものも存在するが、ゴムシールは非常に柔軟性を持ち、さらにゴム材質によっては耐薬品性や耐熱性を持つものがあるため、それらの性質からゴムシールはあらゆる方面に応用、使用されている。

これら面圧分布は FEM 解析を行うと簡単に確認できる。図 1 および図 2 はその FEM 解析の結果であるが、一般的には実験での面圧確認が難しいものが多かった。

解析により確認することができるようになったが、よく失敗をすることがある。それは、解析時に面圧測定用に使用した感圧紙を考慮していないこと、軸対称要素での解析で下記のようなコの字タイプのシールがコケるのを見逃してしまうことである。CAE/FEM 解析の欠点もしっかりと把握したうえで解析を行う必要がある。FEM 解析、CAE を用いるには導入費用や運用費（年間保守費用）など多大なコストが必要となるが、工業試験場などの公共機関などを利用することで十分に費用を抑えることができる。

摺動シールとしてのコの字タイプのシールは、図 3 に示すように断面形状をしっかりと考えないと、圧力により回転、コケるという現象が発生する。しかし、これは軸対称要素での解析で見逃してしまうこともあるので、確認のために 1/4 程度のモデルでの確認は必要となるが、若干の工夫も必要になる。注意喚起のみとし、詳細の説明は省略する。

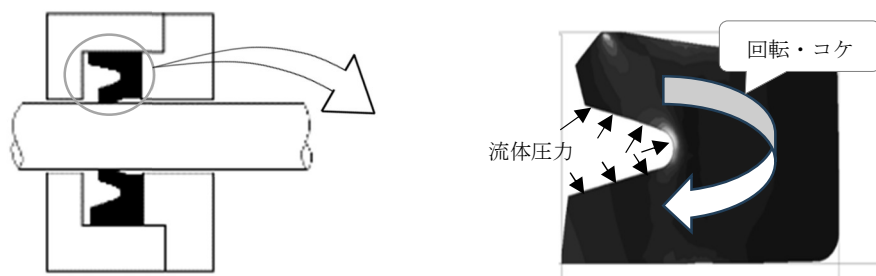


図3 コの字シールの組付け状態/FEM 解析結果

金型設計について

CAE による形状検討で設計に役立てることができるが検証も難しく、さらに難しいのは金型設計である。特に、O リングや角型シールであればゴム材料の収縮率を一律にかけてす

法を計算できるので、金型形状の予測は簡単である。しかし、金具付きリップシール (図 4) の金型設計は非常に難しい。ゴムの熱収縮率は $1.2 \sim 1.8 \times 10^{-4}/K$ で、線熱膨張係数は金属の 10 倍程度の 1.5×10^{-5} 前後のオーダーであり、金型からの取出し時に不均一な変形となる。

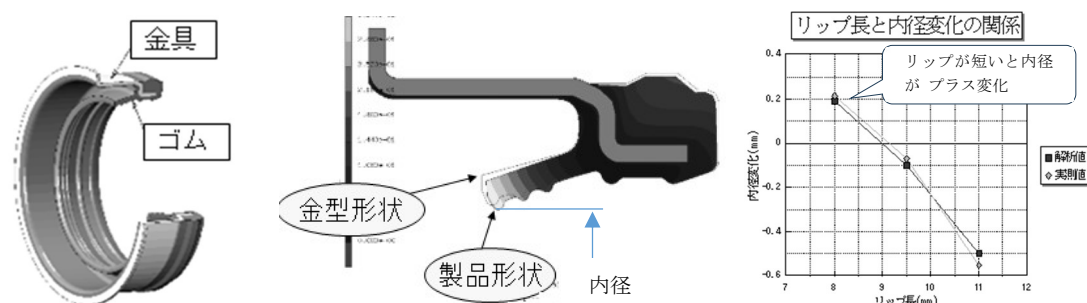


図 4 金具付きリップシール金型設計例

ゴムのリップ部長さが短いと金具に引き寄せられ、ゴムの収縮で金型形状以上に内径が大きくなる。一般的には、金型形状の方が大きいのが当たり前と考えるが、金型内でゴムおよび金属の温度が $150 \sim 180^{\circ}\text{C}$ となるので、金型から取り出して室温に戻ると熱収縮により内径も小さくなるのであるが、逆に金型の内径以上に製品の内径が大きくなる現象が認められるのである。ゴムシールに限らず、防振ゴムやほかのゴム製品は同様に熱収縮の影響で製品の特性にも変化を及ぼし、疲労寿命・耐久性にも大きな影響を及ぼすことになる。

材料選定について

少しゴムシール設計の基本に戻すと、ゴムシールはほかのゴム製品、特に大量にゴム材料を使用するような防振ゴムなどと異なり、性能に影響するゴム材料の選定が重要になってくる。ゴムシールは高温で使用される場合のシリコンゴムや、耐薬品用に使用されるフッ素ゴム、耐オイル用としてのニトリルゴムなどが使われる。

ニトリルゴムやタイヤなどに使われるスチレンゴムは、それぞれゴムの基礎分子構造であるイソプレンに官能基といわれるニトリル基やスチレン基などがついているのであるが、フッ素、シリコンなどはその基本構造から違う。それらの材料は非常に高価になり、ロケットや医療関係などの非常に高価な開発に使用される。

摩擦について

シール設計の難しさはほかにもある。摺動シールとして機能させるためには、摩擦のコントロールも必要になる。皆さんが雨天時に車に乗るとき必要となるワイパー、これも水を払拭するためのシールとしての機能もある。また、その機能を保つために特殊なつくり方、製造工程があるので紹介する。

これは摩擦のコントロールにもつながる。図 5 に断面での面圧解析を行った例を示す。結果としてワイパーの払拭時の面圧は 200 気圧以上で、かつ $10 \mu\text{m}$ 程度の接触幅であり、その際、摩耗によるワイパーの破損や寿命低下が発生する。それを避け、摩擦を低減させる

ために製造工程での工夫がある。まず、ワイパー1本そのまま成形するのではなく、タンデム構造として2本一緒に成形する。基本的にコンプレッション成形として上型と下型で圧縮し、かつ熱を加えて成形する。

その後、表面の塩素処理などを行い、最後にカットして製造する。そのため、カット面の摩擦係数は大きく、初めに処理した処理面は摩擦係数が小さくなる。この製造方法では摩擦の大きなエッジに引っかかり、戻り時に反転する。逆の工程で、これをカットしてから処理すると反転せずに、そのままの形状で元に戻ろうとするからおもしろい。

さらには、詳細は省略するが、ゴムでは、摩擦は小さな凸凹にも柔軟に反応し、溝への落ち込みなどで摩擦係数が大きくなるが、それらを検討する際にマクロ的に考えるのか、ミクロ的に考えるのかで、分ける必要も出てくる。

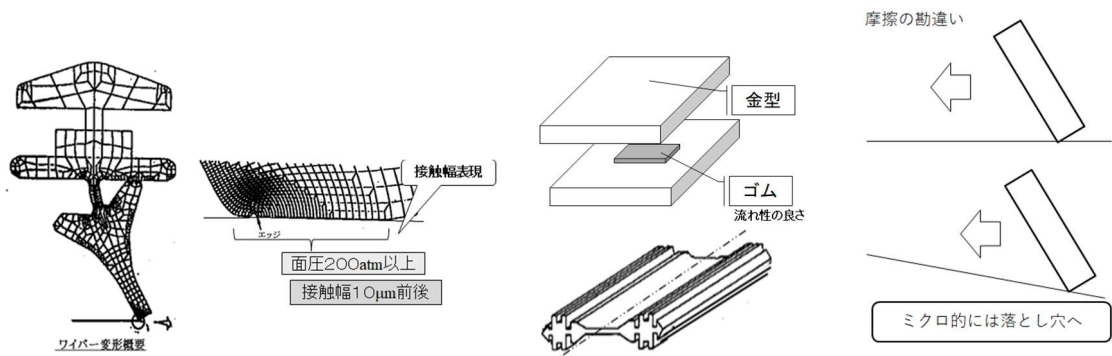


図5 ワイパー断面の解析、製造工程概要、摩擦に関する注意点

摩擦は摺動シールには大きな影響を与える。ピストンシールのような摺動シールは圧力による変形、その後の圧力を抜いたときの戻り、これらの解析は非常に難しく、粘弾性（緩和）の解析が必要だが、それ以前に摩擦は機能に大きな影響を与える。

まず、圧力をかけていくと徐々に変形をして、ピストンの隙間などへ入り込む。そこから緩和した後に、変形前の状態に戻ろうとするが、摩擦の大小で戻り量が異なる（図6）。

これが摩擦の影響であり、ほかのゴム部品（防振ゴムなど）に比べて摩擦の影響を大きく受けるのがゴムシールである。



図6 ピストンシールの変形状態

シール部品としての機能

シール部品としての機能は直接のシール部品というものだけではなく、ブーツも台形側および小径側にグリス封入のためのシール機能を有する。大手自動車メーカーとは、このバンド固定を自動化するプロジェクトに参加したが、現在の形状ではなく弾性を柔らかくする形状への変更が求められた。ボールジョイントも同様に変形時にシャフトとゴムの間に隙間ができないようにする必要があり、回転機能を持つブッシュなども同様のシール機能が必要となる（図 7）。

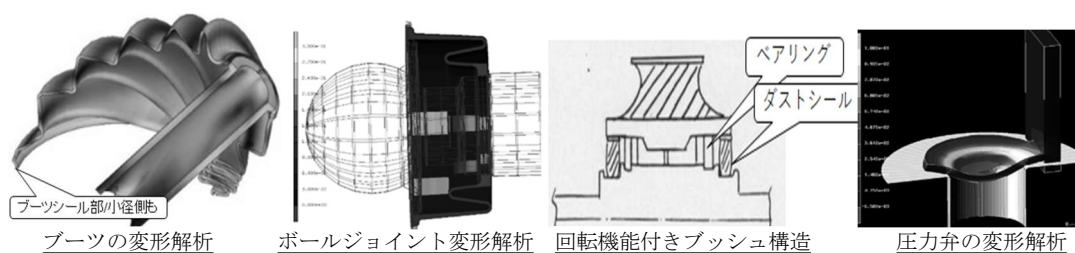


図 7 各部品のシール機能

シール設計は高压化、水素などの低分子量化、高温・低温での使用状況など、また、振動装置への装着も考慮した動的な振動への対応を含めて多様化して難しくなっている。耐薬品、耐熱など材料も多岐にわたると、これまで難しいとされていた EP 材料への接着など克服してきたが、今後も新材料でのこのような問題の発生も考えられ、環境問題にしても脱鉛化もシール製品含めて接着剤問題を克服してきている。

おわりに

現在対応できていない課題について、シミュレーションを活かした効率的開発も重要になる。そういう意味では設計と同様に解析技術もより一般的に理解できるマニュアルの重要性も考えなければならず、寺子屋として広く、誰でも手軽に活用できる情報を可能な限り発信していく。Web での打合せが手軽にできる時代、気軽にお問い合わせいただきたい。