

O-リングの転動トラブル要因と解決法

1. はじめに

エラストマーシールの形状で最も広く使用されているものとしてO-リングがある。O-リングは1940年代初頭、第二次世界大戦中にNBR（ニトリルゴム）製のO-リングが航空機の油圧機器用として使用されたのがきっかけとなり、一般産業に広く普及したとされている。その理由としては、当時から様々な産業機器の動力となっていた作動油への耐性に優れるNBRがゴム材質として開発され、その工業化が成功したことが挙げられる。また、O-リングは断面形状が単純で製造コストが安いことや、両側からの圧力に対し1本でシール出来ること、ゴムの硬度を調節すれば静的シールにも動的シールにも使用出来ることなど、非常に汎用性に富んでいたことも理由として挙げられる。このようにO-リングの例を一つ取ってみても、エラストマーシールにとって使用条件に応じた材質選定と形状設計は、そのシールの価値を左右する非常に重要な要素であるといえる。

これまでの産業発展とそれに伴う産業機器の進化の中で、今日のエラストマーシールの置かれる状況は多種多様なものとなっている。それに応じて求められる機能も様々であり、材質や断面形状にも多くの検討が為されてきた。その過程には、設備設計現場、あるいはその設備を使用する生産現場などで発生する多くのシールトラブルと、それらの解決に向けた度重なる試行錯誤があったことは想像に難くない。

本報では、数あるシールトラブルの中から「転動」という現象に着目し、その発生要因と、解決に向けてのエラストマーシールの発展を取りまとめ報告する。

2. O-リングの転動トラブル要因

2-1) 転動とは

「転動」とは、一般には「回り動くこと」もしくは「転がし動かすこと」と定義されている言葉であるが、シールトラブルにおける「転動」は、シールが溝内で回転し、ねじれることにより機

能不全を起こすことをいう。機能不全の一例としては、シールが溝内で繰り返し転がることによる摺動摩擦やねじ切れによる漏洩が挙げられる。また、半導体製造工程のような環境のクリーン度が高く求められるシチュエーションにおいては、転動による摩耗粉がパーティクルとして問題となるケースも少なくない。



Figure1 転動したゲートシール部O-リング

2-2) 転動トラブルの具体例

2-2-1) ゲートシール

半導体・FPD製造装置における製造プロセスには、チャンバ内の超真空化やガス注入を行う工程があり、各チャンバ毎にゲート弁が設けられている。当社でも当該箇所を使用されるゲートシールを製品化し、市場へ提供している。

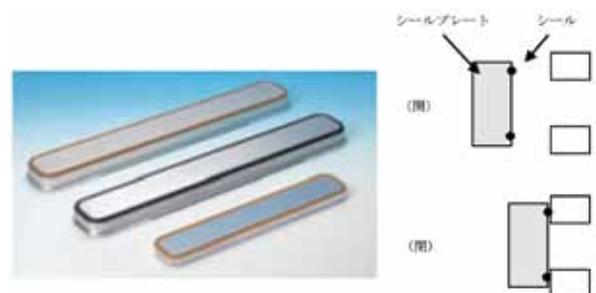


Figure2 ゲートシール製品とゲート動作
(左) VALQUA BONDED GATE SEAL 製品写真 (右) ゲート動作図

このようなゲート部のシールは、各チャンバ内にウエハーを出し入れする際のゲートの開閉によって、シールと相手面が着脱を繰り返すため、転動現象が発生する。ゲートシールにおける転動発生メカニズムをFigure3に示した。

- (a) O-リングを溝へ装着した状態の図である。ゲート弁のシール溝には、主にあり溝と呼ばれる、断面が台形状の溝が使用される。あり溝は溝開口部でシールを挟み込むためシールをしっかりと固定でき、負圧によるシールの脱落が懸念される真空用途で多く使用される溝形状である。
- (b) ゲート閉鎖時には、O-リングは相手プレートに圧縮される。このとき、相手プレートが斜めにO-リングを圧縮するなど、O-リングにスラスト方向の力が加わると、O-リングが溝内で回転し、ねじれが発生する。
- (c) ゲート開放時に相手プレートからO-リングが離脱する。O-リングは、あり溝によって溝開口部で固定されているため、ゲート閉鎖時に発生したねじれが維持される。よって、ゲートの開閉が繰り返されることによってO-リングのねじれが徐々に大きくなり、転動が発生する。

図中では、相手プレートが斜めにO-リングを圧縮し、スラスト方向へ力を加えている場合を図示している。実際には、スラスト方向への荷重はゲート装置自体の動作仕様として発生する場合もあれば、チャンバのひずみなどの影響で偶発的に起こる場合もある。

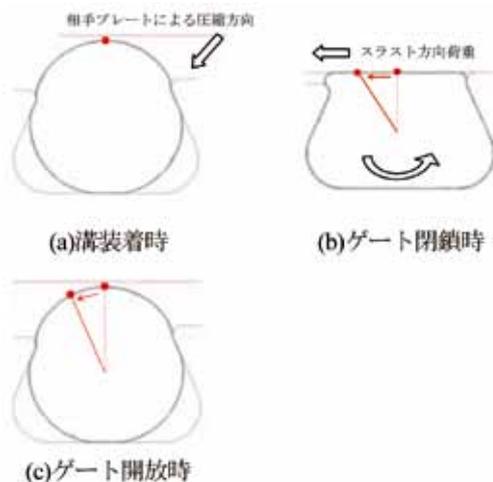


Figure3 ゲート開閉時の転動発生メカニズム

2-2-2) 圧力設備

高圧容器や配管のような圧力設備に使用されるO-リングにも転動の起こるリスクがある。特に大きな圧力変動を伴う脈動が発生する場合には注意が必要である。

このようなシチュエーションでは、O-リングは圧力負荷時に溝側面に押さえつけられ、無負荷時には元の位置に戻ろうと

する。よって、この動きが圧力変動によって繰り返されると溝内でO-リングが転がり、転動が起こる場合がある。転動が発生すると、O-リングは溝底部と摺動し、その摩擦によって漏洩が生じる。

また、負荷する圧力が高圧であり、バックアップリングの使用がない場合は、O-リングが溝エッジにかみ込み、その状態で圧力変動が繰り返し発生することによって、転動によるむしろを招き漏洩が発生する場合もある。

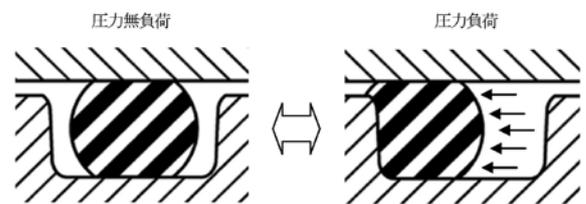


Figure4 圧力変動に伴うO-リングの挙動



Figure5 高圧容器用O-リングの転動によるむしれ

2-3) O-リングにおける転動の発生要因

前述の具体例より、転動現象の発生要因の一つは、O-リングに対して強いスラスト方向の力が加わり、かつ断続的に負荷されることにある。また、あり溝などでO-リングのねじれが固定される場合はより顕著となる。しかし、これらは全て設備仕様側の要因であり、シールにはこれらの仕様を満足させることが求められる。

転動現象におけるシール側の発生要因としては、O-リングの「円」という断面形状によるところが大きい。

平面上に置いた円筒の剛体を転がそうとする際の力のつりあいを考えると、断面が円形状では、回転軸となる地面との接点が常に重心の真下にくるため、転がそうとする力Fが回転方向のモーメントとして働くのに対して、重力mgが反回転方向へのモーメントとして働かず、転がりを阻害しないため容易に転がる。一方、直方体を転がそうとした場合は、平面との摩擦係数が十分に高くすべりが起きないことを前提にすると、回転軸が底面の角部となり、重力mgが反回転方向のモーメントとして働くため、力Fによる回転方向のモーメントが、反回転方向のモーメントを上回るまでは回転しない。

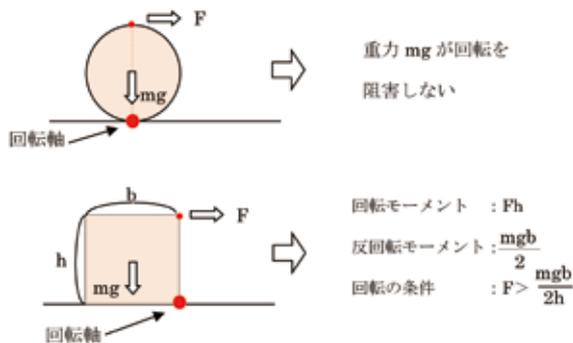


Figure6 回転における力のつり合い

このように簡単な力のつり合いを見るだけでも、円形状の断面をもつシールがいかにか転動しやすいかがわかる。

よって、ゲートによる圧縮や流体圧などでO-リングにスラスト荷重が負荷される場合には、その形状の理由から転動発生のリスクがある。

また、O-リングの転動は全体が回転することではなく、ねじれが生じている。よって、ねじれ易さも転動に影響する重要な要因といえる。一般にねじれは、ねじれのせん断ひずみ、せん断応力の関係から、線径が細いほど、また周長が長いほど生じやすく、これらを選べればねじれを抑えることは可能であろう。しかし、実際には、シールのサイズは設備側の設計に依存しており、転動防止のためだけに設備設計を変更することは現実的でないケースがほとんどである。

3. 転動への対策

前述で述べたように、O-リングの転動要因は「円」という断面形状が、剛体として考えた場合、回転運動時に反回転方向のモーメントを生じない形状であることと述べた。そこで、転動の防止を達成する形状としてFigure7のような形状設計を検討した。

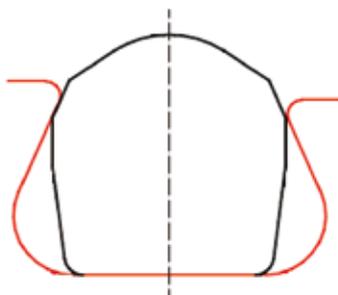


Figure7 転動防止シール

本シールは、シール面にO-リングのようなラウンドを持たせつつ溝底部に面を作り、前述の直方体のような回転しにくい形状設計が為されている。また、溝底部の面は広ければ広

いほど、大きな反回転方向のモーメントを発生させ、回転を抑制出来ると考えられるが、本シールは溝内で圧縮された際の占有率や装着のしやすさを考慮して最適な面幅が設定されている。

上記設計の有効性をFEA (Finite Element analysis、有限要素解析)によって検証した結果を、Figure8に示した。解析は平面ひずみモデルを用い、上部フランジの摩擦係数を0.3、溝の摩擦係数を0.1としている。

上部フランジでメタルタッチするまでシールを圧縮させた後に、水平方向へ7.5 mm 移動させると、O-リングはシール頂点が88度回転したのに対し、転動防止シールは10度の回転に留まり、転動防止に対する有効性が確認出来る。

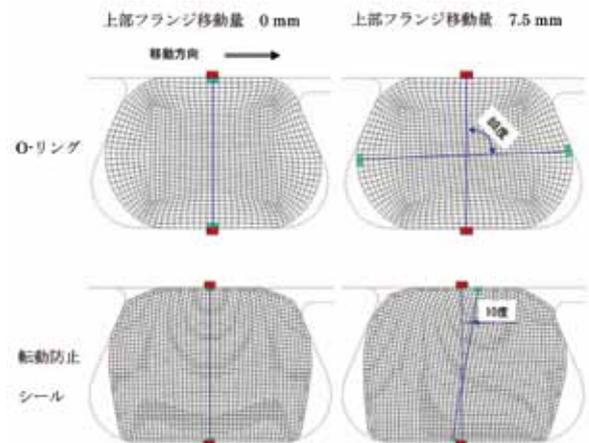


Figure8 転動防止シールFEM解析結果

また、材質面での対策として、シールのねじれやすさを軽減するために硬度やモジュラスの高い材料選定をすることが挙げられる。しかし、過度な転動が懸念される場合においては、前述のような断面形状の変更が有効である。

4. 更なる発展

第3項で転動に対する基本的な対策を述べたが、エラストマーシールが使用される環境は日々変化し、求められる機能も多様化している。当社では、そうした市場変化に応じたソリューションを提案すべく開発を行っており、その一例を紹介したい。

半導体・FPD 製造工程の真空装置などに設けられるゲート部やLID部のシールには、長期にわたるシール性は勿論のこと、歩留まり低減につながる低発塵性が強く求められる。当該箇所のシールには、通常O-リングをあり溝で使用する場合が多いが、装置の大型化や歩留まり要求レベルの高まりに伴い、次のような課題が生じていた。

- ① O-リングの溝エッジへの干渉による摩耗
- ② シールプレートの溝へのメタルタッチによるパーティクル発生
- ③ 転動による発塵や断裂

あり溝は溝エッジが突出しており、圧縮されて外側へ膨れたシールが溝エッジに引っ掛かると、その部分に局所的に過大な応力が発生し、シールの摩耗や欠落を生じやすい。また、その摩耗粉がパーティクルとなり問題視される。

加えて、大口径化したゲートバルブでは、高い位置精度でシールプレートを駆動させることが難しくなり、装着箇所によって、シールへの面圧が変動し、また装着箇所へのプレートの接触タイミングにわずかなずれが発生しやすくなる。このような状態で使用すると、プレートの溝へのメタルタッチやシールの転動を引き起こし、パーティクルの発生やシールの早期漏れが発生する。

しかし、第3項の転動防止シールでは、シールの溝への占有率が高く溝エッジへの干渉は防げない。また、負圧による強い横加重を受けた場合は溝底部でシールがスライドし、発塵する懸念があった。

そこで、上記課題3点を解消するため、当該箇所における最適シールを新たに設計・開発した。断面形状をFigure 9に示した。

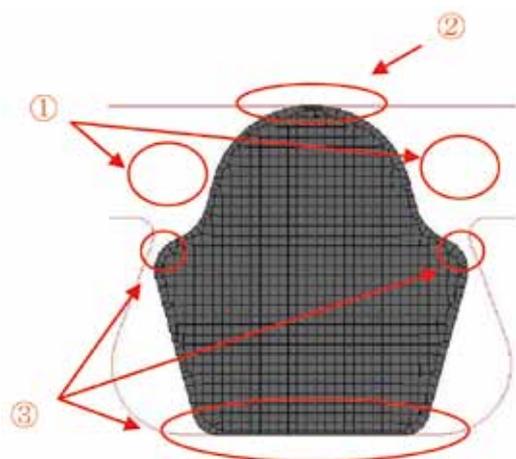


Figure9 転動防止用新型シール

新型シールのポイントは下記である。

- ① 溝エッジ部に空間をもたせ、干渉を防止
- ② シール突起部に高さを設け、耐荷重性をもたせることでメタルタッチを防止
- ③ 張り出した肩部を溝上部に配置し、底面もフラットにすることで横加重への安定性をもたせ、転動を防止

Figure10にFEAによる新型シール圧縮時の断面図を

示した。

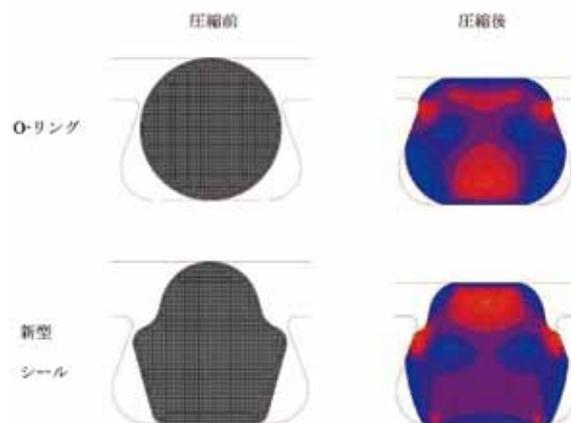


Figure10 転動防止用新型シールの圧縮図

新型シールは、圧縮時にも溝エッジ部に空間を持ち干渉を抑制していることがわかる。また、突起部に高さがあることで、シールプレートと溝部とのメタルタッチを防いでいる。加えて、溝内での姿勢を溝底部と溝側面の3点で支持することによって、転動が生じない形状としている。

上記のように開発された新型シールは、通常のO-リングでは実現できなかったシール部材の長寿命化や、プロセスのクリーン度改善による製品歩留まり、信頼性の向上が期待出来るとして顧客からの好評を得た。

5. おわりに

本報では、各シチュエーションにおけるO-リングの転動発生メカニズムを述べた。また、転動の発生要因がO-リングの円という断面の形状的理由によるところが大きいことを述べ、そこから導き出された対策とその発展について紹介した。

シールトラブルは、産業発展と、それによる設備の進化に伴って必ず付きまとう問題であり、シールメーカーはその問題に対し常に解を出し、顧客設備の安心・安全な稼働を支え続けていく責務がある。

今後も変化の激しい市場環境とニーズに対し、独創的な技術をもって応え続けたい。

6. 参考文献

- 1)阿武 芳郎：油漏れ防止技術データブック. 485 (1981)
- 2)辻 和明：バルカー技術誌. No. 11, 2-6 (2006)
- 3)半導体産業用製品カタログ. 10 (2008)
- 4)バルカーハンドブック 技術編. 235 (2011)
- 5)上田ほか共著：蟻溝用シール材. 特開2003-014126(2003)

(Abstract)

“Distortion” is defined as twisting of O-ring due to rotation inside the seal groove. This causes different kind of troubles e.g. sliding abrasion, fracture etc. which may cause leak trouble. This report will introduce failure examples with reasons and solutions caused by distortion.

Keywords:

distortion, abrasion, leak

(摘要)

「滚动」主要是指O型圈在密封沟槽内发生旋转并扭曲，从而造成功能不良。例如，密封圈在沟槽里反复转动引起滑动磨损或扭断，从而造成泄漏。

本文对滚动引起的故障的内容、主要原因及对策进行介绍。

关键词:

滚动、磨损、泄漏



西 亮輔

研究開発本部 開発部