

高圧水素による繰り返し負荷で生じる O リング表面の損傷に関する研究

Surface Damage of O-rings Caused by Repeated Loading with High-Pressure Hydrogen

NOK (正) *村上 渉 (正) 青柳 彩子

Wataru Murakami*, Ayako Aoyagi*

*NOK Corporation

1. はじめに

水素ステーション(HRS)のランニングコスト低下を狙い、ディスペンサーで使用されるゴム製 O リングの耐久性向上を検討している。HRS では充填速度や充填量確保のため、国内の常用圧力は 82 MPa と高圧である。また、車載用タンク部材の耐熱温度は 85℃であるため、-40℃まで水素をプレクールする必要がある。これらの実使用環境で耐久性のある水素シールが求められている。これまでの耐久試験では水素の加圧と減圧のサイクルにゴム製 O リングが曝露され、損傷が生じることは確認されている¹⁾が、これら損傷が発生しやすい O リングの使用条件は分かっていない。本報では、損傷現象の解明に繋がる要因の探索を目的とし、高圧水素サイクル試験に供した O リングの観察・分析から損傷の発生傾向やメカニズムの解明に寄与するため試験を行ったので報告する。

2. 実験

2.1 高圧水素サイクル試験

高圧水素サイクル負荷による O リングシール試験は図 1 に示す治具で実施した。平面取付した O リングの内径側から水素を曝露し、外径側への漏れの有無を圧力センサーで検出した。水素の曝露は図 2 に示す圧力波形にて 90 MPa の加減圧を-40℃環境下で 3 万回繰返した。O リングは高圧水素用材料としても用いられるシリコンゴムを使用して線径φ3.3 mm、内径φ12.4 mm に成形した。O リングの使用条件に関し表 1 に示す 3 条件に着目して、装着条件の差による損傷への影響を検証した。

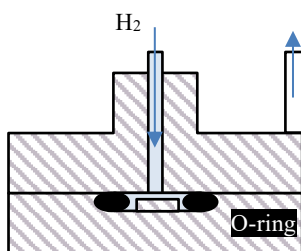


Fig. 1 O-ring groove jig

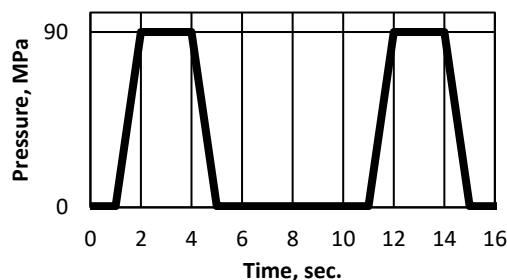


Fig. 2 Pressure wave

Table 1 O-ring installation	
Compression, %	20, 30
Groove roughness Ra, %	0.8, 1.6, 3.2
Lubrication	Dry, Greased

2.2 損傷評価

O リング表面の摩耗状態は光学顕微鏡により観察した。同サンプルを用いて、X 線 CT (Bruker SKYSCAN2214) によりブリスタの観察を行った。O リングの中心から内径を見た方向を撮像方向とした。画像解析ソフト CTAN を用いブリスタの数量や座標情報を定量化することで、条件毎に比較評価を実施した。分解能は 1.5 μm であった。ブリスタに関しては、既報²⁾に対して、n 増しにより効果の有無を再検証した。考察のため、有限要素法解析 (Marc.menta.23.3) により、圧力サイクル中の溝内での O リングの挙動を軸対称モデルで再現し、O リングに負荷される応力分布の比較を実施した。

3. 結果・考察

図 3 に O リングの外観を示す。水素曝露面である内径側に白い斑点状のブリスタが観察される。さらにその外径側では摩耗が発生している。摩耗が生じる範囲は、潤滑状態によって異なり、ドライの場合、シール面の内径側の端のみで発生するが、グリースを塗布すると O リングの接触部全体が摩耗した。これは、グリースを塗布することで、水素の高圧により O リング全体がしゅう動していることを示唆している。O リングの密封機構は圧縮による反力と流体圧力による生ずる面圧によりものとされる³⁾。グリースを塗布すると反力を付与する O リング頂点周辺で摩耗が進行する。そのため、O リング表面の粗さと高圧水素の密封性について、今後整理が必要であると考え。また、サンプルごとに磨耗痕の幅が異なることから、条件によりしゅう動距離が異なることが示唆され、これは O リングの変形が異なるためと推察する。

図4にX線CTによりブリスタを撮影し、二値化によりブリスタ部のみを着色した画像を示す。観察結果よりグリースを塗布することで、ブリスタを低減できることが確認された。発生したブリスタの数について、試験条件毎に図5にまとめた。圧縮率や溝粗さを変化させた場合にも同様なグリースの効果を観察され、およそ50~70%の低減効果が確認された。加えて、圧縮率の異なるサンプルでブリスタ数を比較すると、圧縮率の高い方が、よりブリスタが発生しやすい傾向が明らかとなった。ブリスタ破壊の起点については、ゴム組織中の低密度領域(低強度領域)であると報告されている⁴⁾。この領域は高圧水素の繰返し負荷により、破壊が進行しやすいことが予想される。この破壊現象にOリングの内部応力が影響し、その内部応力に潤滑状態による摩擦力の差やつぶしによる反力の差が影響すると仮定し、FEM解析を実施した。

まず試験中のOリングの溝内での挙動を把握するために、摩耗状態に着目した。前述の通り、摩耗範囲は潤滑状態によって異なるため、Oリングと溝の摩擦係数を変えることで、Oリング全体がしゅう動する挙動を再現した。図6に示す通り結果としては、摩擦力の差には内部の相当応力およびしゅう動距離に顕著な差は生じなかった。そのため、別のメカニズムに基づく検証が必要になると考えられる。水素中では摩擦係数が異なる報告もあることから⁵⁾、それが影響している可能性がある。一方、圧縮率を変えた場合には、応力状態は顕著な差が生じるため、破壊状態に影響を与える可能性が残された。ゴムを高圧水素に暴露し急減圧すると、溶解した水素の気化により、体積膨張が生じる。今後はこれら水素中特有の現象も踏まえた検証が必要になる。

4. まとめ

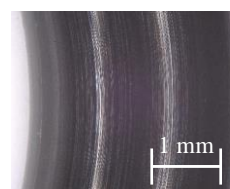
耐久性向上のために、Oリングを種々の条件で高圧水素サイクル試験に供したところ次の結果を得た。Oリングの使用条件は、摩耗やブリスタの発生に影響を与え、圧縮率と潤滑状態の影響が特に顕著であった。FEM解析結果からの考察では摩耗についても水素中特有の現象を考慮する必要性が示唆された。ブリスタに対しては圧縮率の差が内部応力に影響する結果が得られたが、潤滑状態の影響に関してはそれ以外のメカニズムが関与していることが示唆されたため検証が必要である。

5. 謝辞

この成果は、NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)の委託業務(JPNP23004)の結果得られたものです。

6. 参考文献

- 1) 古賀, 西村: 高圧水素ガスによるゴムOリングの破壊現象の原因と対策, トライボロジスト, 60, 10, 664 (2015)
- 2) 村上, 青柳: 高圧水素による繰返し負荷で生じるOリング表面の損傷に関する研究, トライボロジー会議 2024 秋名護予稿集 (2017)
- 3) 岩浪, 近森: パッキン技術便覧(第2版), 産業図書(1973)
- 4) 山辺, 中尾, 藤原, 西村: シール用ゴム材料のガス吸収による体積増加と引張特性に及ぼす高圧水素ガス曝露の影響, Journal of the Society of Materials Science, 60, 1, 63-69(2011)
- 5) H. Tanaka, A. Aoyagi, H. Hashimoto, Y. Sawae & J. Sugimura: Friction and wear properties of several rubber materials for high pressure O-ring, Proceedings of 22nd ISC (2024) 369.



(a) Before testing

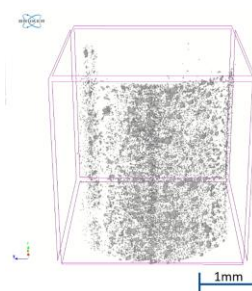


(b) After testing in dry

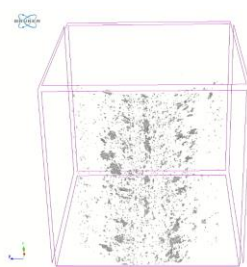


(c) After testing with grease

Fig. 3 O-ring Appearance



(a) Dry



(b) Greased

Fig. 4 X-ray CT images of blisters

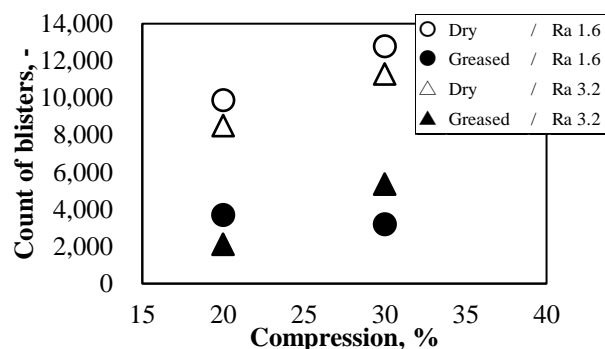


Fig. 5 Count of blisters

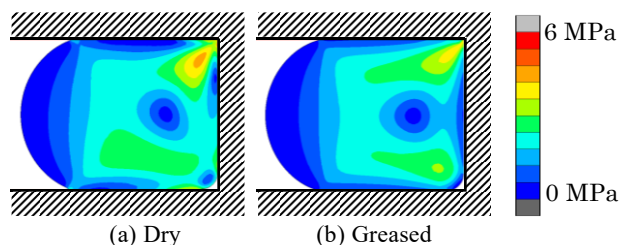


Fig. 6 Equivalent stress at starting decompression