

# 固定用Oリングの面圧挙動測定によるシール理論解析 および熱劣化のシール性への影響

Analysis of the seal mechanism using the measurement of contact pressure change  
and the influence of heat degradation on the sealing of fixed O-ring

横山 和孝\* 岡崎 雅之\* 小見戸 拓\*  
Kazutaka YOKOYAMA Masayuki OKAZAKI Taku KOMITO

## 要 旨

Oリングの取り付け部構造および流体の圧力によるシール面圧への影響を明確化することにより、Oリングのシール理論解析を実施した。また、Oリング劣化によるシール限界を把握し、これらの結果にて得られた知見より、Oリングのシール信頼性確保のための設計留意点が明らかになった。

## ABSTRACT

Seal theory of O-ring has been analyzed by measurement of O-ring contact pressure change that related assembly structure and fluid pressure. Also, seal limit of O-ring has been determined by degrading reaction of rubber. As a result, important factors in O-ring design to keep seal reliance become clear.

## 1. まえがき

ゴム弾性体を用いたOリングは、1940年代に航空機用規格に採用されて以来、各分野にて気体／液体のシール手法として最も一般的に用いられている<sup>1)</sup>。自動車分野においても、燃料系・潤滑系・冷却系・吸気系等の重要シール部位に適用されている。

Oリングのシール理論については従来より、Oリングの圧縮により発生する反発弾性力から得られるシール面圧とシール対象流体の圧力がOリングに加わり発生するシール面圧によってシール機能を保持しているという報告がなされてきた<sup>2)</sup>。しかし、各報告共にゴム反発弾性力の解析が主体となっており、シール対象流体の圧力によるシール面圧への影響についての詳細な報告はない。

本報告ではOリング面圧挙動に注目し、まずシール対象流体の圧力がシール面圧に与える影響を解析する事によりシールメカニズムを明らかにした。また、材料劣化によるOリングの機能劣化機構についても検証を行い、Oリングの信頼性確保のための設計留意点を提示した。

## 2. シール理論の解析

Oリングは使用部位や使用環境により様々な取り付け構造を有しているが、本報告では、Fig. 1 に示した圧縮固定構造のOリングについて、定量的かつ動的に測定可能な面圧測定法を用い、シール対象流体の圧力を付加した時のシール面圧挙動を実測する事によりOリングのシール理論解析を行った。

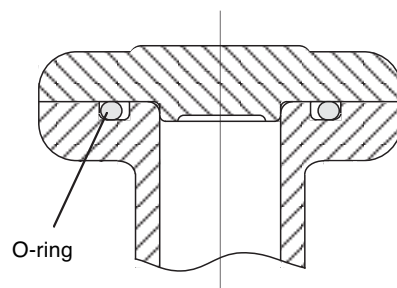


Fig. 1 Example of O-ring Assembly

\* 栃木研究所

## 2. 1. シール対象流体の圧力付加時

### におけるシール面圧挙動

シール面圧挙動測定に用いた測定器は、上下に2枚設置されている電極が圧縮力により接触し、電気抵抗値が変化することにより面圧を検出する構造のものをを用いた<sup>3)</sup>。

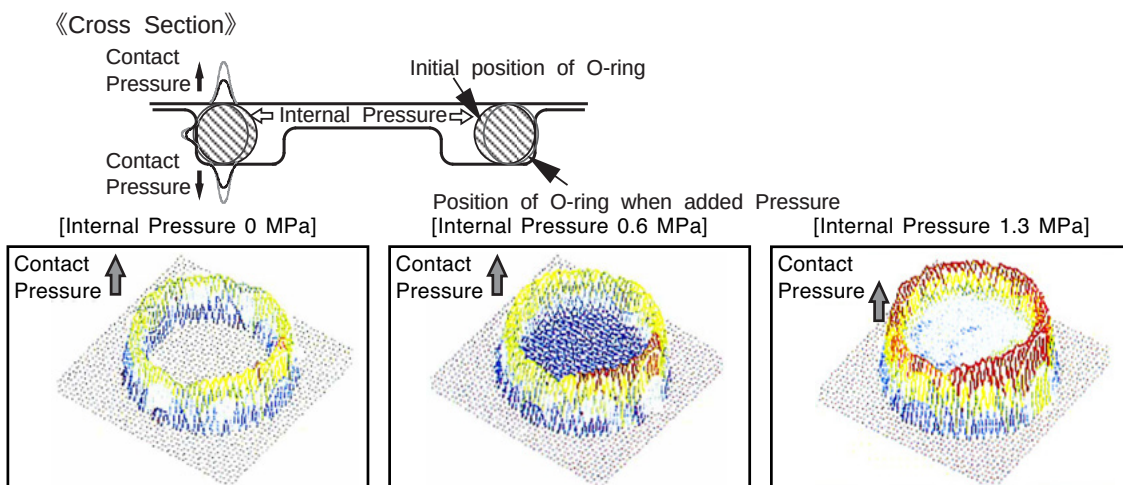
固定用平面Oリングに内圧を付加した時のシール面圧変化を、Oリング取り付け溝の外壁にOリングの外周部が接触している場合と接触していない場合の2種類について測定した結果を Fig. 2 に示す。

内圧付加時にOリングの外周部がOリング取り付け溝の外壁に接触している場合は、内圧の上昇と共にシール面圧が上昇していることが確認された。一方、取り付け溝の外壁にOリング外周部が接触していない場合は、内圧を

付加してもシール面圧の上昇はほとんど認められなかった。また、シール性においても外壁にOリング外周部が接触していない場合は、接触している場合に比べ著しく低い圧力で洩れに至った。

従来よりOリング設計において、内圧シールの場合はOリング取り付け溝の外壁とOリング外径との間に締代を持たせ、外圧シールの場合はOリング取り付け溝の内壁とOリング内径との間に締代を持たせる事が一般的である。この設計手法を守らないと、シール対象流体の圧力によるシール面圧発生がなくゴム材料の反発弾性により発生するシール面圧のみでシール性を確保しなければならないために、Oリングのシール限界圧力および耐久信頼性が著しく低下することがシール面圧挙動を実測する事により確認された。

#### 【O-ring supported by the side wall】



#### 【O-ring not supported by the side wall】

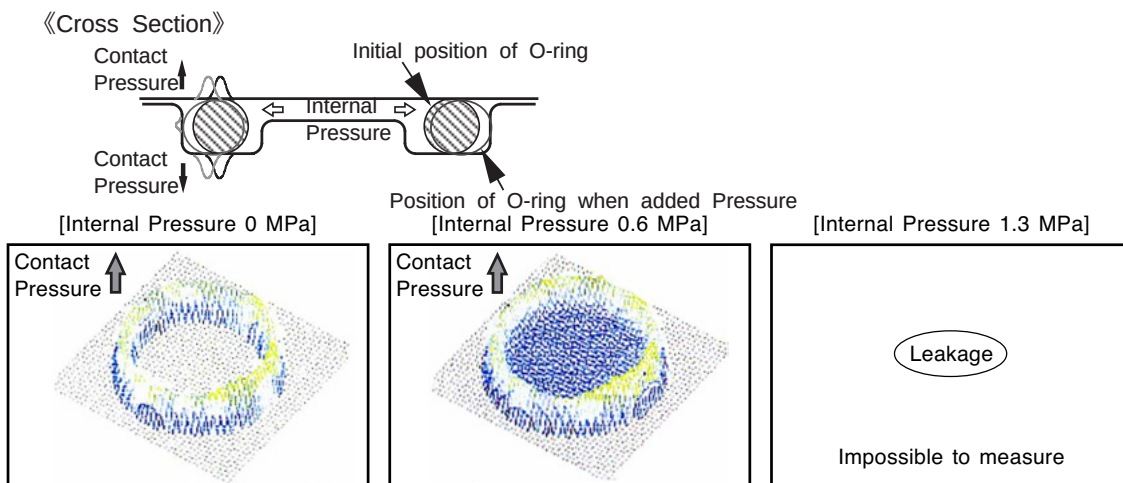


Fig. 2 Contact pressure increased by the internal pressure

## 2. 2. シール対象流体の圧力による

### シール面圧上昇量の推定

シール機能確保に重要な流体圧力によるシール面圧上昇量を推定するため、流体圧力によるシール面圧上昇の計算式を作成し実測による検証をおこなった。

Fig. 3 に流体圧力付加時のシール面圧上昇機構の概略図を示す。シール対象流体の圧力がOリングの流体接触部に付加されると流体の圧力はOリングのゴム弾性体を介してシール面圧に変換される。この面圧上昇機構において、流体圧力にOリングの受圧面積を掛けた力がある変換率でシール面圧に変換される。したがって変換されるシール面圧は近似式 (1) にて表される。

$$\Delta P_f = \alpha \cdot [P_1 (d \pi / 2 - a) / a] \cdots \cdots (1)$$

ここで

$\Delta P_f$  : 流体圧力により発生するシール面圧 (MPa)

$\alpha$  : 圧力変換係数

$P_1$  : 流体圧力 (MPa)

$d$  : Oリング線径 (mm)

$a$  : シール面接触幅 (mm)

式 (1) に基づくシール面圧上昇を実験にて検証した結果を Fig. 4 に示す。この実験には、アクリルゴム (以下 ACM と略す)、フッ素ゴム (以下 FKM と略す)、EPDM ゴムの各ゴム材料を用いた。またゴム硬度は各材料共に 70 度 (JIS A) を用いた。実験の結果、シール面圧上昇はゴム材料および圧縮率が異なっても流体圧力に比例する事が確認され、前記のシール面圧上昇機構が立証された。この検証式に用いた圧力変換係数は、実験にて得られた値  $\alpha = 0.4$  を用いた。今回の検証は、同一のゴム硬度を用いたことにより各ゴム材料の弾性率が近似しているため、圧力変換係数は同一の値を用いることが

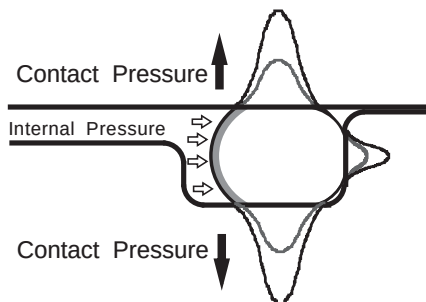


Fig. 3 Increase of contact pressure

可能であった。圧力変換係数は材料の弾性率に関連する値であることが推定されるため、次にゴム硬度を変化させて弾性率との関係について検証を行った。

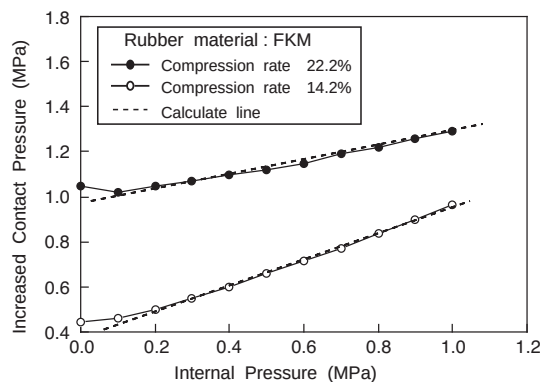
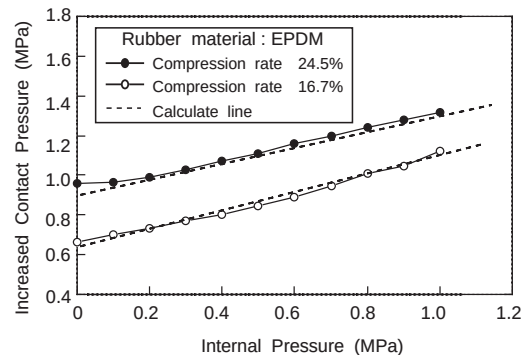
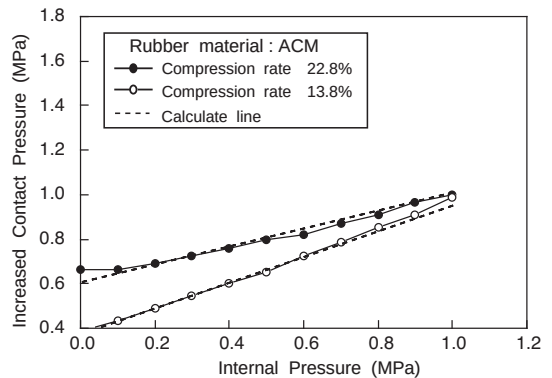


Fig. 4 Calculation and measurement of contact pressure increase (Rubber hardness 70°)

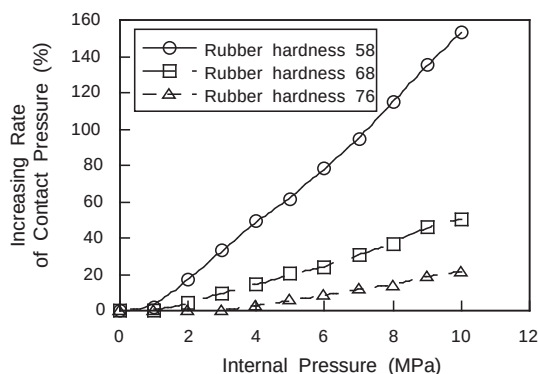


Fig. 5 Influence of Rubber Hardness on the increasing rate of contact pressure

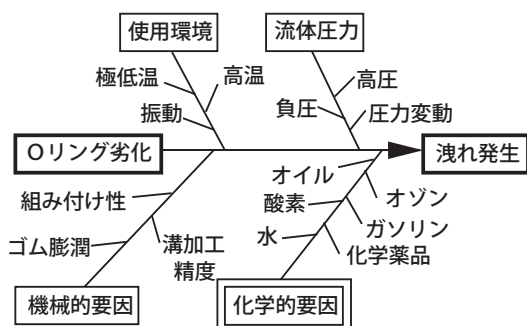
### 2. 3. 面圧上昇に及ぼすOリング材料硬度の影響

Oリングのゴム硬度違いによる面圧上昇率測定結果をFig. 5に示す

この結果より、Oリングに用いるゴム硬度が低いほどシール対象流体の圧力をOリングシール面圧に変換する効率が良く、シール能力は優れる事が判明した。ただし、ゴム硬度が低いと高圧領域において、Oリング取付け溝とカバーの隙間へゴムのはみ出し現象が発生しやすくなるため、ゴム硬度選定には、ゴムのはみ出し現象の有無も考慮する必要がある。

## 3. Oリングの熱劣化によるシール性への影響

Oリングの使用における劣化は、下記要因図にて示される。このうち自動車分野で特に問題となるのはオイル、ガソリン、酸素（熱劣化）などの化学的要因である。本報告では単純な酸化劣化（熱劣化）を代表として、Oリングの熱劣化によるシール性に与える影響を検討した。



### 3. 1. Oリング形状の圧縮永久ひずみへの影響

Oリング形状の熱劣化に対する影響を、劣化度合いを表す物理量として圧縮永久ひずみ値を用いて検討した。Oリングの圧縮永久ひずみは、式（2）にて表される。

圧縮永久ひずみ

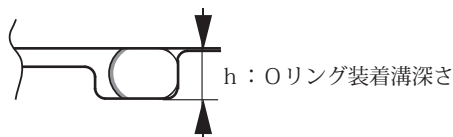
$$\text{Compression Set (\%)} = \frac{d_0 - d_1}{d_0 - h} \times 100 \quad \dots\dots (2)$$

ここで

$d_0$  : 初期Oリング線径 (mm)

$d_1$  : 劣化後Oリング線径 (mm)

$h$  : Oリング装着溝深さ (mm)



化学的反応は、反応物質同士の接触により開始するためOリングにおいても、劣化因子の接触部より劣化が進行する。平面固定用Oリングは上下に圧縮されて使用されることから、劣化因子の接触部はOリング全表面ではなく全体の一部分となり、この接触部より劣化が開始されOリング内部に劣化がすすむ。このことから、Oリングの寸法および取り付け形状による劣化への影響を明らかにするため、式（3）で表されるOリングの形状係数  $k$ （以下  $k$  と略す）を設定し劣化推進について解析を行った。

$$k = \frac{\text{劣化因子接触部面積}}{\text{Oリング全体体積}} = \frac{4 \times (\pi d - 2a) \times \pi (D + d)}{\pi d^2 \times \pi (D + d)} = \frac{4(\pi d - 2a)}{\pi d^2} \quad \dots\dots (3)$$

ここで

$D$  : Oリング内径 (mm)

式（3）より、Oリング線径が大きくなるほど  $k$  値が小さくなり、また圧縮率が大きいほどシール面接触幅が大きくなり  $k$  値は小さくなる。  $k$  値が小さくなるということは、劣化因子接触部面積がOリング体積に比べ相対的に小さくなるため、劣化が少なくなることが予測される。

Fig. 6にNBRゴム材料を用いたOリングの空気中における線径違いの圧縮永久ひずみ特性を示す。この結果より、Oリング線径が大きいほど劣化が少なくなり、 $k$  値による予測と一致することが確認された。

Fig. 7にOリングの圧縮率と圧縮永久ひずみの比較検証結果を示すが、この結果もまた $k$  値における予測結果と一致し、圧縮率が高いほど劣化が少なくなった。

以上の検証結果より、形状係数 $k$  値を用いることにより劣化度合いを予測することが可能であることが確認された。

Fig. 8に $k$  値と圧縮永久ひずみの関係を示す。JIS K 6301に規定されているゴム材料の圧縮永久ひずみ試験法で測定した値とOリング製品で測定した値との違いが発生するが、この原因も $k$  値によるものと判断される。 $k$  値は幾何学的に計算可能であり、 $k$  値と劣化の関係が明確化されたことにより、JIS試験法より求めたテストピースの圧縮永久ひずみ値から各種形状における製品の劣化レベルを予測することが可能である。

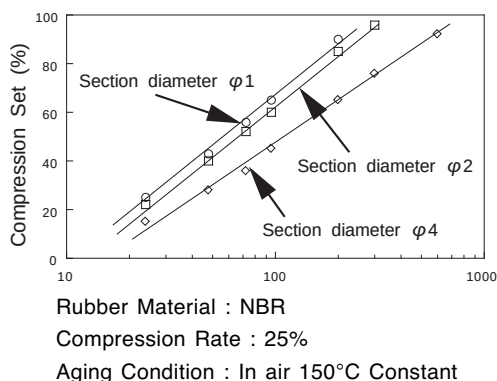


Fig. 6 Relation between O-ring section diameter and Compression Set

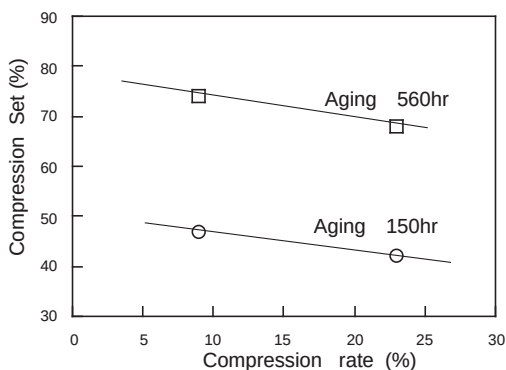


Fig. 7 Relation between O-ring Compression Set and Compression rate

### 3. 2. 各種ゴム材料による熱劣化後のシール特性

Oリングのシール限界を把握するため、ゴム材料としてNBRとACMを用い、洩れ発生に至るまでの長期熱劣化試験を実施した。この結果をFig. 9に示す。異なるゴム材料および試験温度にもかかわらず、圧縮永久ひずみが80%に達した時点で洩れ発生に至った。この結果より、Oリングの圧縮永久ひずみ80%がシール限界の目安として使用出来ることが確認された。

ただし、Oリングの圧縮永久ひずみ値は、初期面圧や流体圧力に関係なく決定される値であり、この特性値だけでOリングのシール性が決定される事は、シール面圧

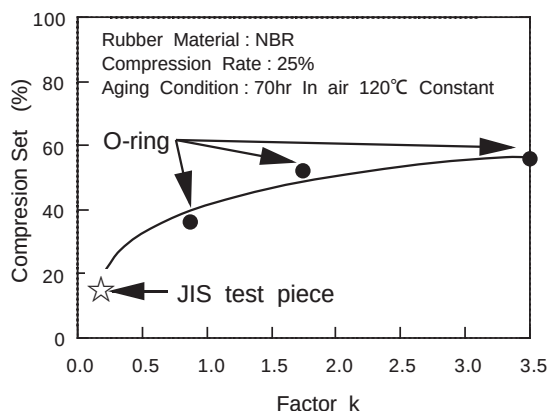


Fig. 8 Relation between Compression Set and Factor  $k$

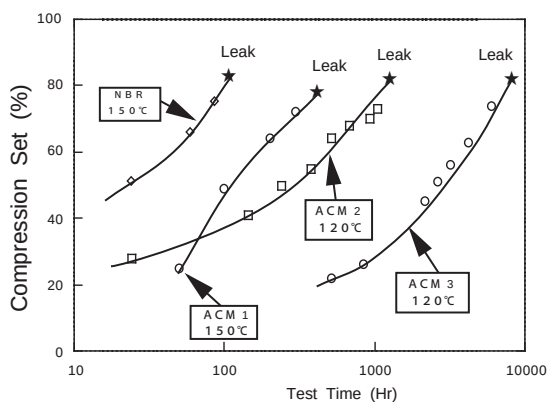


Fig. 9 Long-term Degradation Test Results

を用いたシール理論と矛盾するため圧縮永久ひずみとOリング弾性と相関のあるゴム硬度との関係を検討した。この結果をFig. 10に示す。NBR材料、ACM材料共にほぼゴム硬度85度と圧縮永久ひずみ80%が相関することが確認された。

Fig. 10の結果と前項2. 3. にて述べたゴム硬度による面圧上昇への影響と合わせて考察すると、Oリングのシール限界は、ゴム材料が硬化し流体圧力による圧力変換係数が低下しセルフシーリング機能が失われるためと考えられる。

以上のことより、Oリングのゴム硬度は劣化を考慮する必要がない場合においても85度以下に設定しないと、セルフシーリング機能によるシール面圧は得られず、ゴム反発弾性によるシール面圧のみでシールするため、高圧シール性および耐久信頼性の低下を招くこととなる。

## 4. Oリング設計への応用

今まで述べてきた各種検討結果に基づき、Oリングシール理論・劣化機構およびシール限界より得られる設計留意点についてまとめた。

### 4. 1. Oリングゴム材料の選定

Oリング用ゴム材料の選定は、第一にシール対象流体に対するゴム材料の適合性を最重要項目として選定する。

次に、環境温度頻度より得られる劣化条件下においてもゴム硬度が85度以上にならず、かつ圧縮永久ひずみ特性の優れたゴム材料配合を選定する。但し、JIS規格のテストピースにて測定した圧縮永久ひずみ値とOリング製品における圧縮永久ひずみ値は異なるので形状係数(k値)による判断が必要である。

### 4. 2. Oリング外周／内周締代の設定

Oリングのシール理論は、内部シール対象流体の圧力がシール面圧に変換されることより確保されるセルフシーリング機構であることが、本研究にて定性的かつ定量的にとらえることができ、以下に示す従来の設計常識が裏付けられた。

- 1) 内部圧力シール構造：Oリング外周締代を公差下限においても確保する。
- 2) 外部圧力シール構造：Oリング内周締代を公差下限においても確保する。

上記留意点が確保されない場合、Oリングが本来持っているセルフシーリング機構が十分に発揮されずゴム反発弾性によって生じる面圧のみに依存することになり、耐久信頼性の低下につながる。

### 4. 3. Oリング用ゴム材料硬度の選定

シールメカニズム解析に基づくゴム硬度の影響調査の結果、内部流体圧力のシール面圧への変換係数はゴム硬

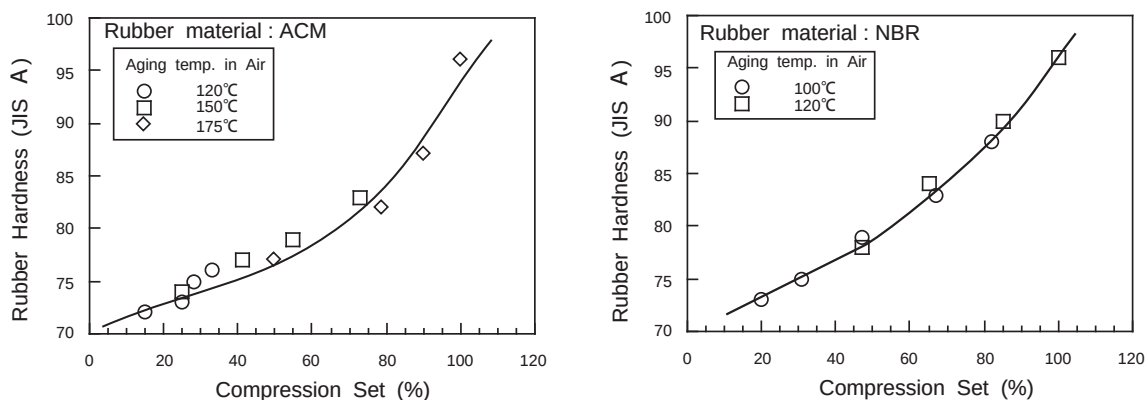


Fig. 10 Relation between Rubber Hardness and Compression Set

度が低い程大きいことが確認された。但し、シール対象流体の圧力によるOリングはみ出し現象の発生について十分確認する必要がある。また、ゴム硬度の上限としては85度を越えてはならない、85度以上の硬度では内部流体圧力のシール面圧への変換が十分行われず、反発弾性による面圧のみに依存することになる。

#### 4. 4. Oリング線径の設定

劣化係数  $k$  値に基づく圧縮永久ひずみ特性値の検証結果より、設計時の線径をレイアウトの許す限り大きくすることにより同一ゴム材料においても耐久信頼性を向上することが可能となる。

#### 4. 5. Oリング圧縮率の設計

Oリングの圧縮率は、従来の設計指針として25%前後を一般的に推奨している<sup>4)</sup>。今回の検討結果、Oリングの圧縮率を大きくするほど劣化係数  $k$  値は小さくなることから耐久信頼性確保には有利となる。また、圧縮率を大きくすることは初期シール面圧を高くすることになりシール性能は向上する。ただし、Oリング取付け溝への充填率設定は寸法公差を考慮しても100%以下に設計する必要がある。更に使用時に振動や熱収縮等によるOリング取付け溝体積の変動が生じる場合は取付け溝の寸法設定に留意が必要であり今後の解析課題である。

#### 参考文献

- 1) 上羽 勝邦：Oリング  
設計工学 Vol.28、No.9 (1993)
- 2) 津田 総雄：製品設計講座 Oリング  
日本ゴム協会誌 Vol.67、No.5 (1994)
- 3) 横山和孝他：高精度面圧測定技術の開発とそれを用いたシリンダヘッドガスケットシール性評価法  
HONDA R&D Technical Review Vol. 6 (1994)
- 4) J I S 規格：JIS B 2406

#### ■ 著 者 ■



横 山 和 孝



岡 崎 雅 之



小 見 戸 拓