

金属平形ガスケットの密封特性

——ポリカーボネイト薄膜を用いた接触状態の観察——

原稿受付 2005年10月14日

“トライボロジスト” 第51巻 第4号 (2006) 308~315

松崎良男

石川工業高等専門学校 機械工学科
(〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条夕1)

新田 勇

新潟大学 工学部機械システム工学科
(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)

伊藤 稔

池上 宗利

新潟大学 大学院学生

(同上)

長谷川 聡

石川工業高等専門学校 専攻科学生
(〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条夕1)

Abstract Sealing characteristics of the static metal seal consisted of a ring-shaped copper gasket and two steel flanges were investigated. The gasket width in the radial direction was 2mm, 3mm or 5mm. The contact surfaces of the flanges were finished by lathe. To clarify the leakage flow paths between the copper gaskets and the steel flanges, the real contact situation between them was observed by using thin polycarbonate film, 1μm in thickness. The leakage flow in the radial direction ceased at a contact pressure of about 50 MPa. The leakage flow along the lathe-turned groove remained even over 50 MPa. The leakage flow rates were calculated by the assumption of laminar flow along the turned groove. The calculated flow rates agreed well with the experimental ones obtained from the gas leakage tests. Thus, the contact pressure to reduce the gas leakage rate down to a given range was able to be predicted.

1. 緒言

金属平形ガスケットは、高温・高圧のフランジ継手や圧力容器からの接面漏れ¹⁾を防止する密封要素である。シールの安全性および信頼性の観点から、ガスケットとフランジの接触面間からの漏れ量を予測し抑制する必要がある。そのためには、接触面の接触状態および漏れ流体の流れ状態を把握した密封機構の解明が重要となる。

金属接触面がラップ仕上げのように表面粗さに方向性がない場合、接触面間のすきまを平均すきま、漏れ流体の流れを粘性層流として、漏れ量が計算されるのが一般的である^{2, 3)}。また、研削仕

上げ面のように表面粗さに方向性がある場合には、平均すきまに圧力流れの影響が考慮される⁴⁾。しかし、フランジ旋削面間に金属平形ガスケットを挿入するシールの場合、漏れ流体は旋削溝に沿って流れることが予想されるため、平均すきまの手法を用いることができない。そのため、接触面の接触状態の観察に基づいた漏れ量計算が必要となる。接触面の状態を探るものとしては、ガスケット座面の接触応力分布を計算で求めるもの⁵⁾や接触面の一部を観察する例⁶⁾はあるが、ガスケット全面の真実接触面積を実験的に測定した例は見当たらない。著者らは既報⁷⁾において、ガスケットの幅を一定にした基礎研究を行い、高分子薄膜⁸⁻

Sealing Characteristics of Flat Metallic Gasket

——Observation of Contacting State Using Thin Polycarbonate Film——

By Yoshio MATSUZAKI, Ishikawa National College of Technology (Kitacyujo, Tsubata-machi, Kahoku-gun, Ishikawa 929-0392), Isami NITTA, Department of Mechanical and Production Engineering, Niigata University (8050 Ikarashi 2-nochō, Niigata-shi, Niigata 950-2181), Yutaka ITO, Munetoshi IKEGAMI, Student, Graduate School, Niigata University (ditto), and Satoshi HASEGAWA, Student, Advanced Engineering Course, Ishikawa National College of Technology (Kitacyujo, Tsubata-machi, Kahoku-gun, Ishikawa 929-0392).

Key Words: coupling, flat metallic gasket, thin polycarbonate film, real contact area, surface roughness, gas leakage test, contact pressure, compressive force.

¹²⁾を利用してガスケットの接触状態を調べ、漏れ量計算を行った結果、計算値と実験値が一致することを確認した。

本研究では、ガスケットの幅を変えて密封特性を調べた。具体的には、接触面間からのガス漏れ量を計測する密封特性実験を行った後、高分子薄膜を利用して真実接触面積を測定し、漏れ量の推定計算を行った。その結果、ガスケット全面の接触圧力分布が明らかとなり、気密開始点を示す接触圧力および押付け力を予測できることが分かった。

2. 実験

2.1 試験片

実験で使用した試験片の形状と寸法を Fig.1 に示す。フランジの寸法の決定に際しては、呼び圧力 10K の JIS 規格値 ¹³⁾ を参考にした。なお、本研究の目的は JIS 規格化されたフランジの密封性能を解明することではなく、金属平形ガスケットとフランジ旋削面間における密封特性および接触状態を解明することである。そのため、Fig.1 のフランジ寸法および以下に記述する設定条件は JIS と異なる。フランジ座面については、最大高さ粗さが 6.3~25 μm で半径方向のきずがないことが推奨されている。そこで、最大高さ粗さが約 10 μm となるように、ノーズ半径 1.2mm の超硬バイトを用いて、送り 0.27mm で旋削仕上げした。ガスケット ¹⁴⁾ は、接触幅の影響を調べるため、ガスケット幅が 2, 3, 5mm (内径が 28mm で、外径が 32, 34, 38mm) の 3 種類で、厚さ 3mm の平板から所定の形状にワイヤ放電加工した後、真空焼鈍を施した。フランジとガスケット材料の機械的性質を Table 1 に示す。フランジおよびガスケットの接触面の断面曲線を Fig.2 に示す。フランジとガスケットの表面粗さは、最大高さでそれぞれ約 8.5 μm と約 0.3 μm であった。

2.2 密封特性実験の実験装置および実験方法

実験装置の断面を Fig.3 に示す。ガスケットをはさんだフランジを実験装置にセットした後、同じ油圧が作用する 4 本の油圧シリンダにより所定の押付け荷重を加えた。ボルトおよびナットを模

	Tensile Strength σ_B [MPa]	Elongation ϵ [%]	Hardness HV	Heat treatment
Flange SS400	490	38	238	
Gasket C1100	212	61	41	560°C×1h Vacuum Annealing

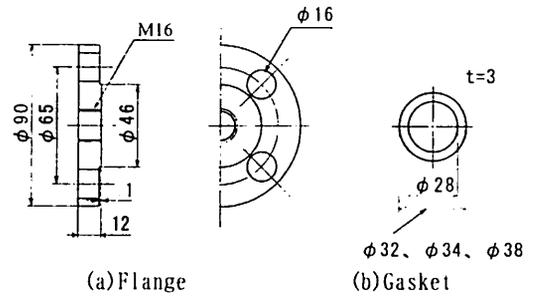
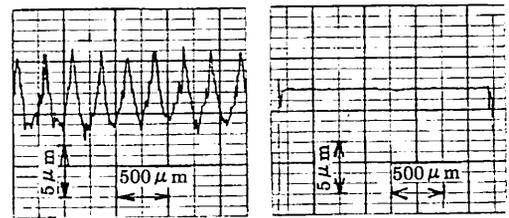


Fig.1 Shapes and dimensions of the specimens



(a) Flange surface (b) Gasket surface
Fig.2 Profile curves of the specimens

した 8 本の段付き円柱を上側フランジおよび下側フランジの穴に挿入した。油圧シリンダの荷重は上側フランジにセットした鋼球を介してこれらの段付き円柱に作用する。これらの段付き円柱は短いので、段付き円柱同士は接触しない。接触面間の密封流体（窒素ガス）の入口圧を 882kPa（ゲージ圧）、出口圧を 39kPa（ゲージ圧）として、窒素ガスの漏れ量を計測した。押付け荷重を加えた直後、漏れ量は減少し始め、約 5 分後に安定する。接触面間からの窒素ガスの漏れ量の計測は約 5 分過ぎに行い、ガスクロマトグラフを利用した。その窒素ガスの漏れ量の算出方法は既報 ⁷⁾ と同様である。

2.3 高分子薄膜による真実接触面積の測定

高分子薄膜法とは、接触面間に高分子の薄膜を

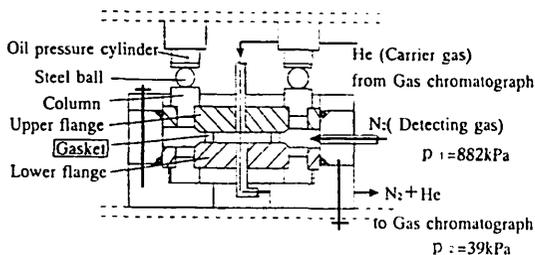


Fig. 3 Cross section of the experimental apparatus

挿入して加圧することにより、薄膜に接触痕を転写させる方法である。接触痕は顕微鏡で黒く観察されるので、画像解析を行って真実接触面積とその分布が測定できる。観察には自作の膜厚 $1\ \mu\text{m}$ のポリカーボネート薄膜を使用した。密封実験の後、ガスケットを新しいものに交換し、ポリカーボネート薄膜を上側フランジとガスケットの間に挟んだ。押付け荷重を加えて1分間保持後、上側フランジを外し、ポリカーボネート薄膜をガスケットより注意深く剥がした。ポリカーボネート薄膜上の接触痕は光学顕微鏡により観察し、画像は画像取込みボードを介してパソコンに取り入れた。

3. 実験結果

3.1 密封特性実験

密封特性を調べた実験結果を Fig. 4 に示す。Figure 4 はガスケットの接触圧力 p と漏れ量 Q_0 (0.101MPa , 0°C の標準状態量) の関係である。実験は各ガスケット幅ごとに3個のガスケットについて行い、フランジは再利用した。

Figure 4 において、ガスケット幅が 2mm の Q_0 値はばらついている。例えば、 p が約 80MPa で比較すれば、二つの実験値 Q_0 (図中破線で示す値) は約 $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-3}\text{L/h}$ と、他の実験値 Q_0 の約 10^{-4}L/h より多く、 p が増加しても Q_0 は少なくなならない。この理由を次のように考える。ガスケット表面上に取扱い時に付きずがある場合、フランジ旋削面との押付けでは、旋削山突起がガスケットにくい込み、きずによる漏れ通路を閉塞し Q_0 を抑制する。しかし、Fig. 5 で示すように、ガスケットの内側から外側まで繋がる半径方向の深いきず (深さ約 $5\ \mu\text{m}$) が存在する場合、フランジ

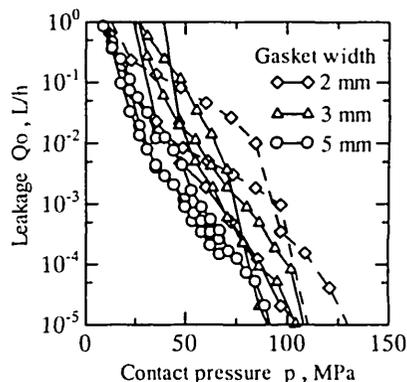
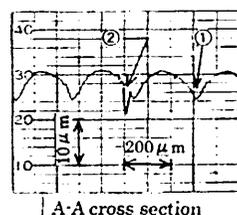


Fig. 4 Leakage as a function of contact pressure



Note : ① : the hollow due to the peak-to-peak asperities of the flange
② : the radial scratch of the gasket

Fig. 5 The scratch which causes the leakage

の旋削山突起がガスケットにくい込んでもこのきずは残り、きずによる漏れ通路は閉塞されにくいと考える。Figure 5 で示すきずは、 Q_0 が多いガスケット幅 2mm の2個のガスケットだけに見られ、他のガスケットには見られなかった。

Figure 4 より、ガスケット幅が 2mm で Q_0 が多い二つの実験値を除けば、ガスケット幅ごとにほぼ同程度の漏れ減少傾向を示している。たとえばガスケット幅が 5mm の場合、 Q_0 は $p = 40\text{MPa}$ まで急減するが、それ以降は緩やかに減少し、 $p = 90\text{MPa}$ で 10^{-5}L/h 以下となる。ガスケット幅が $2, 3\text{mm}$ の場合も同様な減少傾向を示す。全体的には、漏れ量が減少する過程において、(1) 漏れ量が急

減する領域と(Ⅱ)漏れ量が穏やかに減少する領域に分ることができる。

3.2 高分子薄膜法による真実接触面積の測定

高分子薄膜法で見掛けの接触面全体にわたり接触痕を観察したところ、全体にほぼ均一な接触状態であることが確認された。ガスケット幅が5mmの2値化処理した画像をFig.6に示す。黒い部分が真実接触面積であり、白い部分が漏れ通路となるすきまである。フランジの接触面は旋削仕上げであるため、旋削山稜線部をうねりやむしれがない状態に加工することは困難である。そのため、25MPaの低い接触圧力では、フランジの旋削山稜線がガスケット平面に接触していない個所も見られる。この接触状態におけるガス流れは、旋削痕に沿った円周流れと半径方向の流れとの混合流れとなり、漏れ量は多いことが予測される。接触圧力が50MPaと高くなれば、フランジの旋削山稜線全体がガスケット平面に接触するようになり、ガス流れは円周流れが支配的となる。75MPaの高い接触圧力では真実接触面積の増加が見られ、漏れ量の減少が予測される。接触幅が2mmおよび3mmの場合も同様な真実接触面積が観察された。

次に、見掛けの接触面積に対する真実接触面積の割合について測定した。Figure 7に示すように、計測は中心角1°ごとに領域を分けて行い、測定範囲は中心角約20°である。測定は、Fig.1(a)のフランジの水平方向およびそこから45°傾いたボルト穴中心上を通る半径方向について行った。測定箇所は接触面全体で8箇所である。なお、ボルト穴近傍の接触面圧分布とボルト穴間近傍の接触面圧分布が異なる報告⁵⁾があるが、高分子薄膜を使った測定では、顕著な差は見られなかった。Figure 8には見掛けの接触面全体についての測定結果を示した。図中には、ガスケットのピッカース硬さより計算したもの(図中、Vickers Hardness)と、加工硬化を考慮したすべり線場理論^{15, 16)}より求めた塑性流動圧力から計算したものの(図中、S.L.F. theory)を示した。Figure 8において、既報⁷⁾同様、高分子薄膜法で求めた実験値はピッカース硬さより求めた計算値よりもすべり線場理論より求めた計算値に近くなった。また、実験値とすべり線場理論より求めた計算値の差は、

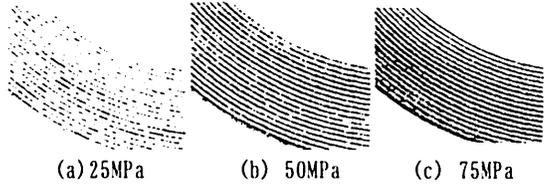


Fig.6 Measured contact marks (gasket width: 5mm)

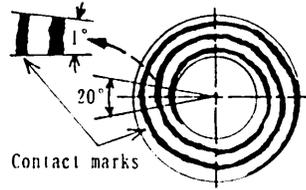


Fig.7 Contact marks on the PC film and how to measure them

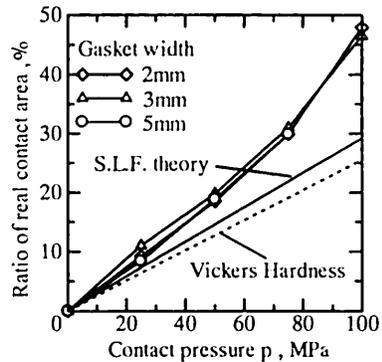


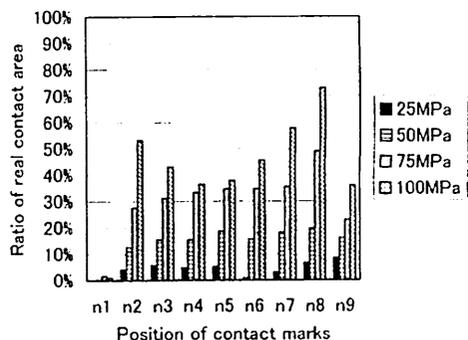
Fig.8 Measured real contact area as a function of contact pressure

接触圧力 p が 75MPa までは約 30%以内であるが、 p の増加に伴い差が多くなる傾向にあり、 p が 100MPa では約 50%と大きい。この差の原因を次のように考える。高分子薄膜法は真実接触面積を間接的に測定する方法である。高分子薄膜を接触面に挟んでいるために、フランジとガスケットのすきまが完全にゼロとならなくても高分子薄膜に永久変形を起こさせるだけのすきまに近づけば、真実接触したと判断される。接触圧力が高くなるとフランジとガスケットのすきまが狭くなり、間接測定法である高分子薄膜法では真実接触面積を過大に評価することになる。

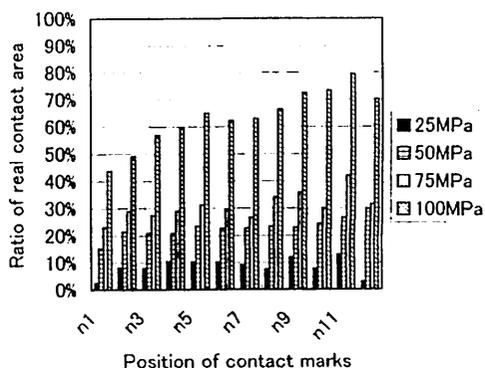
Figure 9 は高分子薄膜法で求めた真実接触面積と見掛けの接触面積の比率をガスケットの半径方向の位置に対して示す。横軸は接触痕の位置であり、ガスケットの内周側からの順番である。ガスケット幅が 2mm の Fig. 9(a) の場合、n1 は内周側の 1 本目の接触痕を表し、n9 は内周側から数えて 9 本目の接触痕を表す。ガスケットの加工精度を考慮すれば、ガスケット幅が約 2mm で、フランジの旋削加工の送り量が 0.27mm であるから、9 本程度の接触痕が生ずる。ガスケット幅が 3mm および 5mm の Fig. 9(b) および(c) の場合では、それぞれ 12 本および 19 本程度の接触痕が生ずる。

Figure 9 は、接触はガスケット幅全域で見られ、接触圧力の増加に伴い接触割合が高くなり、ガスケット外周部において、その増加割合が高くなることを示す。

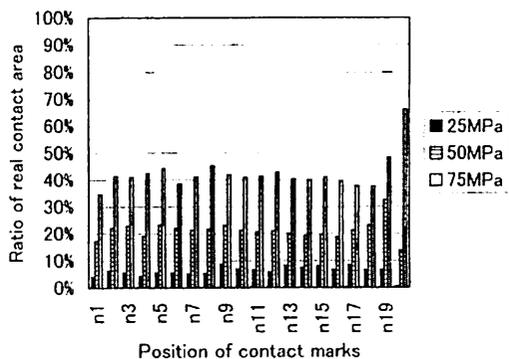
Figure 10 に有限要素法により弾性解析した接触圧力分布を示す。解析では接触面に存在する表面粗さを無視し、摩擦係数も 0 と仮定した。フランジのボルト穴周辺に所定の荷重を加えることで種々の接触圧力を与えた。計算は、ボルト穴中心を通る半径方向の接触圧力分布およびボルト穴間の半径方向の圧力分布の 2 種類について行ったが、二つの計算結果には大差がなかった。横軸はガスケット内周と外周に対応する。ここで、Fig. 9 は真実接触面積を求めたものであるが、それに塑性流動圧力をかけることにより接触力に換算できる。したがって、Fig. 9 と Fig. 10 の縦軸の単位は異なるが、それらの変化の様子は比較することができる。ガスケット幅が 2mm の場合、Fig. 9(a) の測定値には多少のばらつきは見られるものの、Fig. 9(a) の接触圧力が 50MPa まではほぼ均一な真実接触面積分布となっている。接触圧力が 100MPa となるとガスケット中央部から外周部にかけて真実接触面積が大きくなる傾向となる。この変化の様子は、Fig. 10(a) の接触圧力の変化と同じ傾向にある。しかし、ガスケット幅が 3mm および 5mm の場合、Fig. 9(b) および Fig. 9(c) の真実接触面積はガスケット幅全域で観察されるが、Fig. 10(b) および Fig. 10(c) では、接触圧力がガスケット幅全域で生じない。特に、Fig. 10(c) では、接触圧力はガスケット内周から中央部の広い領域で生じていな



(a) Gasket width : 2mm



(b) Gasket width : 3mm



(c) Gasket width : 5mm

Fig. 9 Real contact area at each contact mark

い。

なお、Fig. 10(b) と(c)において、接触圧力が 0 になるところで接触圧力分布が乱れているが、これは有限要素法の節点が接触境界に一致していないためである。本研究では、接触圧力分布に及ぼす表面粗さの影響を大まかに調べるために有限要

素計算を行った。接触境界での圧力分布の連続性が多少不十分でも、これが他の部分の接触圧力分布に及ぼす影響は小さいので、表面粗さの影響を調べる目的には、この圧力分布の不連続性は問題とならないと考えた。

表面粗さを有する面では、表面粗さすなわち表面の微小突起の塑性変形が接触圧力分布に影響を及ぼす。多くの場合は、表面微小突起の塑性変形は、接触圧力分布を平坦化する作用をもつ。接触圧力が生じない非接触箇所は計算 (Fig. 10) では見られるが、測定 (Fig. 9) では見られない。特に、この差異はガスケット接触幅が 5mm と広い場合に顕著であった。このことより、表面粗さを考慮しない弾性解析では、実際の接触圧力分布を推定することができない場合があることが明らかである。

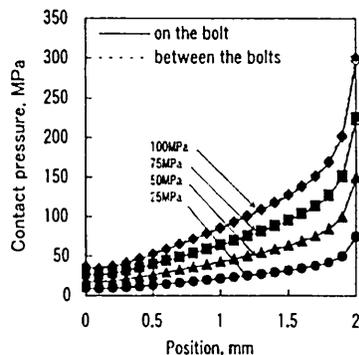
さて、これまでの観察結果より、接触状態を密封特性実験結果と関連付けて考える。接触圧力 p が低い領域 (ガスケット幅により多少異なるが $p \approx 50\text{MPa}$ 以下) では、フランジの旋削山稜線がガスケット平面に局所的に接触している。このため、接触面間のガス流れは、旋削痕に沿った円周流れのほかに半径方向の流れが関与するため、漏れ量は多い。それ以上の接触圧力になると、旋削山稜線がガスケット平面に途切れることなく接触するようになる。このために、半径方向の流れはなくなり、円周流れだけとなり、接触圧力の増加に伴い漏れ量は穏やかに減少すると考える。

4. 考察

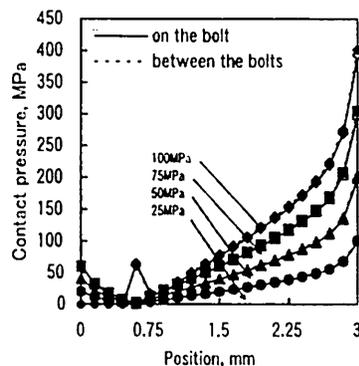
金属平形ガスケットを使用したシールを実用面から考えると、漏れが許容値以内になるまでの微小漏れ領域における密封状態の解明が重要となる。そこで、第 3.1 節で示した漏れ領域 (II) について吟味することにした。

4.1 漏れ量の推定計算

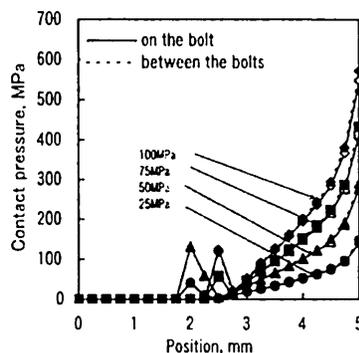
高分子薄膜法による真実接触面積の観察結果より、接触圧力が約 50MPa 以上になると、フランジの旋削山稜線部がすべてガスケット平面に接触するようになり、漏れは旋削痕に沿ったものであり、半径方向の漏れはないことが分かった。そこで、旋削痕に沿った漏れ量を計算するため、Fig. 11(a)



(a) Gasket width : 2mm



(b) Gasket width : 3mm



(c) Gasket width : 5mm

Fig.10 Contact pressure calculated by FEM

に示すうず巻き状の流路断面を Fig. 11(b) に示す矩形断面の直管に置換して漏れ量計算を行った。 w および h の算出は Fig. 12 に示す表面凹凸形状の幾何モデルにより求めた。すなわち、アボット負荷曲線をフランジ旋削痕 1 ピッチ当たりの平均化された負荷曲線と仮定し、

$$A = wh = w_0 h_1 - A_0 \quad (1)$$

より、 w および h を求めた。ここで、 A_0 : アボット負荷曲線全体の積分値、 A : 矩形流路断面積、 w_0 : 旋削痕のピッチ、 w_1 : 旋削痕の真実接触幅、 w : 流路幅、 h_0 : 旋削痕の最大高さ、 h_1 : ガasket平面とフランジ旋削痕谷部との最大すきま、 h : 流路高さである。なお、アボット負荷曲線は粗さ曲線から導出することが一般的とされるが、本研究では、断面曲線より求めた。また、 w_1 は加工硬化を考慮したすべり線場理論^{15, 16)}より求めた塑性流動圧力を基にして求めた。

旋削痕に沿って流れるガス流れ状態については、既報⁷⁾の密封特性実験において調べ、 $Q_0 \cong 10^{-3} \sim 10^{-5} L/h$ の範囲内で粘性層流と仮定した。フランジとガスケットの最大高さ粗さは、既報と多少異なる(既報では $11.5 \mu m$ と $1.5 \mu m$ 、本報では $8.5 \mu m$ と $0.3 \mu m$)。しかし、この程度の差異がガス流れ状態に及ぼす影響は少ないと考え、本研究においても、ガス流れ状態を粘性層流と仮定する。ちなみに、 $Q_0 \cong 10^{-3} \sim 10^{-5} L/h$ における矩形断面直管を流れる流体のレイノルズ数は 0.1 以下である。そこで、漏れ通路をフランジ表面の旋削痕と理想平面によって挟まれる流路を想定し、流路断面積と等しい断面積を持つ矩形直管の粘性層流に近似して流量計算を行った。漏れはガスケット両面で生じる。まず、ガスケット片面の漏れ量 Q_2 を次式¹⁷⁾で別々に求め、次に、ガスケット両面の漏れ量を標準状態 ($0.10 MPa$, $0^\circ C$) の漏れ量 Q_0 に換算する。

$$Q_2 = \frac{wh^3}{24\mu p_2 L} (p_1^2 - p_2^2) \quad (2)$$

ここで、 μ : 粘性係数 (N_2 ガス)、 L : 流路長さ、 p_1 : 入口圧 (高圧側ガス圧)、 p_2 : 出口圧 (低圧側ガス圧) である。

Figure 13 に接触圧力と漏れ量の関係を示す。黒塗り印は計算値、白抜き印は実験値である (ガスケット幅が $2 mm$ で、半径方向のきず (Fig. 5 参照) の影響により、漏れ量が多い実験値を除く)。 $Q_0 \cong 10^{-3} \sim 10^{-5} L/h$ の範囲において、計算値は実験値の漏れ減少傾向を表している。ガスケット接触幅の増加に伴い Q_0 は僅かに低くなる。これは式 (2) 中の L の影響と考える。接触圧力が同じ

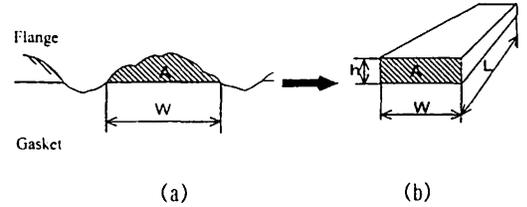


Fig. 11 Channel form for leakage calculation

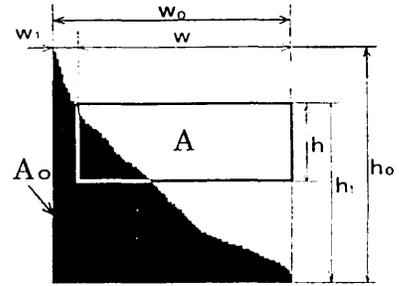


Fig. 12 Geometrical Model of Surface Roughness Profiles

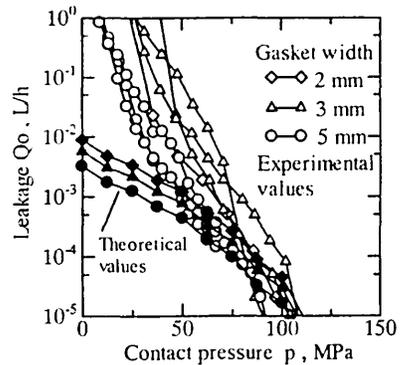


Fig. 13 Evaluation of leakage rates

であれば、矩形断面の w と h は同じであるが、ガスケット幅の増加に伴い L は長くなり、 Q_2 から求まる Q_0 は低くなる。

さて、シールの実用性に注目すれば、気密開始点を示す押付け力を予測することが重要となる。そこで、Fig. 13 を再整理し、単位長さ当りの押付け力と漏れ量の関係として Fig. 14 に示す。ここで、 P : 押付け荷重、 ℓ : ガスケット中心円の長さである。また、 Q_c : 気密開始点を示す許容漏れ量で $10^{-5} L/h$ 、 P_c : Q_c に対する押付け荷重とし、 P_c/ℓ を臨界押付け力と定義する。Fig. 14 より、

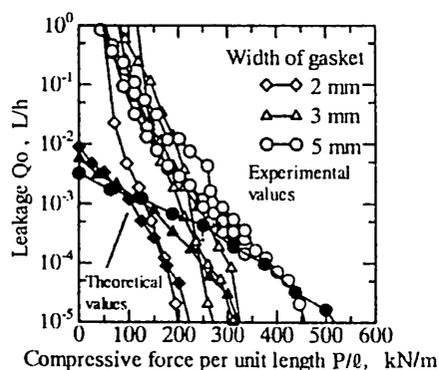


Fig.14 Relationship between leakage rate and compressive force per unit length

$Q_0 \approx 5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ L/h}$ の範囲内において、計算値と実験値はよく一致している。特に、 P_c/l 値は計算により予測されることがわかる。 P_c/l はガスケット接触幅の減少に伴い低くなる。言い換えれば、ガスケット幅が狭い方が密封性能は良いことを示す。

5. 結 言

金属平形ガスケットの密封特性を調べるため、高分子薄膜を用いてガスケット平面とフランジ旋削面の接触状態を調べ、漏れ量を推定した。その結果、次の結論が得られた。

(1) 接触圧力が低い時は、フランジの旋削山稜線がガスケット平面に接触していない場所がある。そのため、ガス流れは半径方向の流れと旋削痕に沿った円周方向の流れの混合流れとなる。接触圧力が高くなると、フランジの旋削山稜線がガスケット平面に食い込み、ガス流れは円周方向の流れのみとなる。

(2) 高分子薄膜による真実接触面積の測定結果より、漏れが円周方向のみになる接触圧力を求めることができた。円周方向の流れを仮定して漏れ量の計算を行った結果、計算値は実験値とほぼ同様の値となり、気密開始点を示す接触圧力および押付け力を予測することができた。

(3) 今回の実験範囲内では、気密開始点を示す押付け力は、ガスケット幅の減少に伴い低くなり、気密性が良くなる。

文 献

- 1) (社)日本トライボロジー学会編：トライボロジーハンドブック，A. 設計編 (2001) 274.
- 2) 築添 正・久門輝正・中原耕作：金属接触面の気体漏れ機構に関する研究，機論，32，239 (1966) 1083.
- 3) 風巻恒司：接触面の流体漏れ論，機論，35，269 (1969) 59.
- 4) 船橋鉀一・中村 隆・村井智哉・馬淵英二：金属接触面間の密封性 (第1報) あらさの方向性の影響，潤滑，33，10 (1988) 776.
- 5) 福岡俊道・高木知弘：管フランジ締結体の三次元有限要素解析 (金属平形ガスケットの影響)，機論 (A編)，66，644 (2000) 651.
- 6) J. Fréne, L. Boccaletto, Y. Delaunay & A. Pyre: Study of Leakage in Static Gasket for Cryogenic or High Temperature Conditions, 4th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion", 3-6 December 2002-Liege (Belgium) 1.
- 7) 新田 勇・松崎良男・伊藤 稔：PC 薄膜を用いた金属平形ガスケットの接触状態の観察，機論 (C編)，71，701 (2005) 265.
- 8) 新田 勇・如澤 健：PET 薄膜を用いた研削表面間の接触圧力分布測定，機論 (C編)，60，579 (1994) 3970.
- 9) I. Nitta: Measurements of Real Contact Areas using PET Films (Thickness, 0.9 μm), Wear, 181-183 (1995) 844.
- 10) 新田 勇・塩原 浩・岩渕 明：ガラス繊維強化材複合材料の接触面剛性，低温工学，33，5 (1998) 290.
- 11) 新田 勇・諸橋 明・大谷 親：PET 薄膜を用いた真実接触面積の分布の測定，トライボロジスト，44，2 (1999) 128.
- 12) 新田 勇・安藤弘一・大橋 修：高分子薄膜を用いた真実接触面積の測定，機論 (C編)，67，662 (2001) 3283.
- 13) 日本工業規格 JIS B2220 (2004) 鋼製管フランジ.
- 14) バルカーハンドブック 技術編，日本バルカー工業株式会社 (2000) 194.
- 15) I. Nitta, K. Kato, T. Kayaba & S. Umezawa: The Effects of Work-hardening on the Contact Pressure and the Deflection of Asperity in Contact, Wear, 146 (1991) 325.
- 16) 松崎良男・新田 勇・細川一夫・船橋鉀一：くさび形メタルシールの基本特性，機論 (C編)，67，659 (2001) 2344.
- 17) 田中章浩・山下 巖：往復動ロッドシールにおける無潤滑状態でのガスの漏れおよび摩耗特性，潤滑，31，12 (1986) 869.