

PC 薄膜を用いた金属平形ガスケットの接触状態の観察*

新田 勇^{*1}, 松崎良男^{*2}, 伊藤 穰^{*3}Observation of Real Contact Area at Gasket Surfaces
using the Thin PC FilmIsami NITTA^{*4}, Yoshio MATSUZAKI and Yutaka ITO^{*4} Department of Mechanical and Production Engineering, Niigata University,
8050 Ikarashi 2-nocho, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

To clarify leakage characteristics of the flat metallic gasket, the leakage rate of a gas and real contact area of the seal surfaces were measured under several closing loads. The static seal used in this study consisted of the ring-shaped copper gasket and the two steel flanges which held the gasket. The contact surfaces of the flanges were finished by the lathe. So far the following two directions on the gasket surface were pointed out as the leakage flow paths. One was the radial direction perpendicular to the lathe turning groove and the other was circumferential direction along the groove. As the closing loads increased, the leakage flow in the radial direction ceased and only the leakage flow in the circumferential direction remained. To determine the closing load, that is the contact pressure, at which the radial leakage flow ceases, the real contact situation on the gasket surface should be observed. In this paper the real contact area between the copper gasket and the steel flange was measured using the thin polymer film of 1 μm in thickness. As a result the contact pressure over which the radial leakage ceased could be predicted from the observation of the thin polymer film. In addition, the cross section of the aperture for the leakage flow in the circumferential direction was evaluated from measured real contact area, and the leakage rate was estimated by the assumption of laminar flow. It agreed well with the measured leakage rate.

Key Words: Tribology, Machine Element, Coupling, Flat Metallic Gasket, Leakage, Thin Polymer Film, Real Contact Area, Surface Roughness, Gas Leak Test

1. 結 言

金属平形ガスケットは、高温や高圧など苛酷な条件下で密封性を確保するために使用される重要な配管要素である。ガスケットの漏れ量は、粗さを有する2表面間の接触が複雑であるために、予め定量的に推測するのはきわめて困難である。すなわち、流体が接触面のどこを通り、漏れとなっているか不明だからである。そのため、現状では経験的にガスケットを選定しているようである。

ガスケットの密封特性についてはこれまでも研究が行われてはいるが、ガスケット座面の接触応力分布を計算で求めるもの⁽¹⁾や、金属接触面間における接面漏洩について理論式を導いたもの^(2,3)などである。ガスケット面の真実接触面積の分布を実験的に測定した

研究は著者らの知る限りない。接触面の一部を観察している例⁽⁴⁾はあるが、シールの場合には接触面全体を一度に観察しなければ意味がない。

本研究では、管フランジを想定したガスケット面の真実接触状態を観察するために高分子薄膜⁽⁵⁾を利用した。具体的には、旋削仕上げしたフランジ面間に銅材の平形ガスケットを挿入し、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い、 10^{-5}Lh 以下の漏れ量となるまでの漏れ状態を調べた。次いで高分子薄膜法により接触状態を求め、それと密封特性を関連付けて考察した。また、観察結果から気体の流路を想定し、漏れ量の近似計算を行って、実験結果とよく一致することを確認した。

2. 実 験

2.1 試験片 密封特性実験で使用した試験片の形状と寸法を図1に示す。金属平形ガスケットとフランジの材質および寸法については、呼び圧力 10Kに対応するものを用いた^{(12),(13)}。しかし、JIS規格値より

* 原稿受付 2004年4月1日。

^{*1} 正員, 新潟大学工学部(☎950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。^{*2} 正員, 石川工業高等専門学校(☎929-0392 石川県河北郡津幡町北中条夕1)。^{*3} 学生員, 新潟大学大学院自然科学研究科(☎950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。

E-mail: nitta@eng.niigata-u.ac.jp

Table 1 Mechanical properties

	Tensile strength σ_B [MPa]	Elongation ϵ [%]	Hardness Hv	Heat treatment
Flange SS400	490	38	234	
Gasket C1100	212	61	46	560°C×1hr Vacuum annealing

選定した厚さ 12mm のフランジでは塑性変形が生じることが予備実験により判明した。そこで、フランジ厚さを 20 mm まで厚くし、最大荷重を加えてもフランジが塑性変形しないようにした。フランジ座面については、最大高さ粗さが $6.3\sim 25\mu\text{m}$ で放射状のきずがないことが推察されている。そこで、最大高さ粗さが約 $10\mu\text{m}$ となるように、ノーズ半径 1.2mm の超硬合金バイトを用いて、送り 0.27 mm で旋削した。また、ガスケット密封面は、所定の形状に旋削加工した後、工業用研磨布で研磨仕上げし、その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表 1 に示す。フランジおよびガスケットの密封面の表面粗さを図 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 $11.5\mu\text{m}$ と $1.5\mu\text{m}$ であった。

2.2 密封特性実験の実験装置および実験方法

図 3 に実験装置の概略を示す。試験片の配置は上下のフランジでガスケットをはさむ形となっている。実験装置に試験片をセットした後、同じ油圧が作用する 4本の油圧シリンダにより所定の荷重を加えた。図 4 に実験装置の断面を示す。ボルトを模した 4本の段

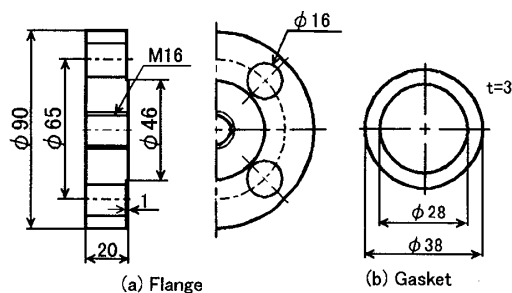


Fig. 1 Shapes and dimensions of the specimens

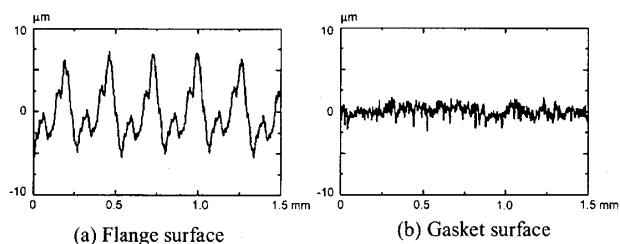


Fig. 2 Surface roughness of the specimens

付き円柱を上フランジの穴に挿入した。油圧シリンダの荷重は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、下フランジには接触しない。下フランジの穴にも同様な段付き円柱が挿入されている。接触面間の密封流体（窒素ガス）の入口圧を 882 kPa (ゲージ圧)、出口圧を 39 kPa (ゲージ圧) として、各接触圧力のところの窒素ガスの漏れ量を測定した。漏れ量の計測はガスクロマトグラフを利用した。その計測方法および窒素ガスの漏れ量の算出方法は既報⁽⁴⁾と同様である。

2.3 高分子薄膜法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挿入して加圧することによって、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(PC)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、PC 薄膜を上側フランジとガスケットの間に挟んだ。接触圧力を加えて 1 分間保持後、上側フランジを外し、PC 薄膜をガスケットより注意深く剥がした。PC 薄膜上の接触痕は光学顕微鏡にて観察し、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。密封特性実験の結果より漏れ量に特徴が現れる接触圧力のところを PC 薄膜法で測定した。

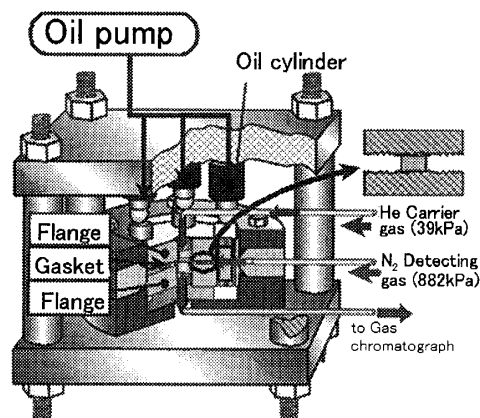


Fig. 3 Experimental apparatus

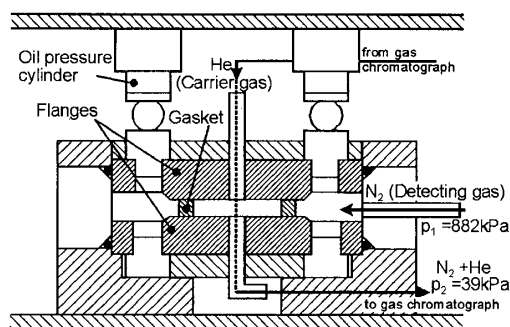


Fig. 4 Cross section of the experimental apparatus

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図5に示す。図5はガスケットの見掛けの接触圧力 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3個のガスケットについて行い、フランジは再使用した。各実験値に多少のばらつきは見られるものの、接触圧力 p の増加に伴い漏れ量 Q_0 はほぼ同様な減少傾向を示した。すなわち、 Q_0 は $p \div$

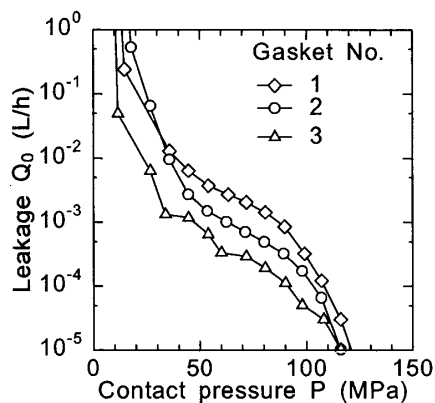


Fig.5 Leakage as a function of contact pressure

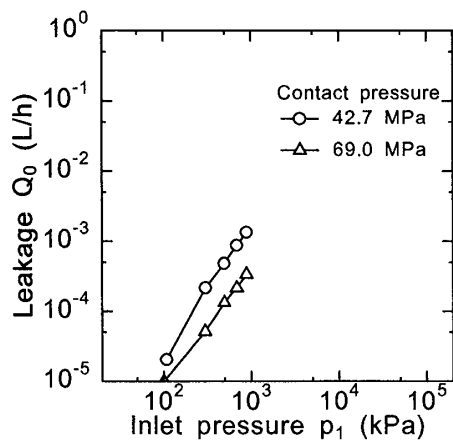


Fig.6 Leakage as a function of inlet pressure

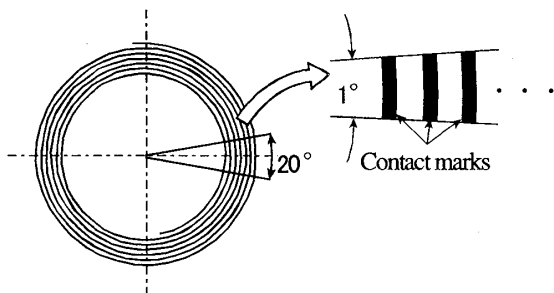


Fig.7 Contact marks on the PC film and how to measure them

40MPa まで急減するが、それ以降は緩やかに減少した。 $p \div 90\text{MPa}$ 以降で Q_0 は再び急減し、 $p \div 120\text{MPa}$ で 10^{-5} L/h 以下となった。したがって、漏れ量が減少する過程において、(I) 漏れ量が急減する領域、(II) 緩やかに減少する領域、(III) 再度急減する領域の3領域に分けることができる。

次に漏れ領域 (II) について、気体の流れ状態を調べる実験を行った。図6はガスケットとフランジの密封面間の入口圧と漏れ量との関係を示す。実験は、図5で示す△印のガスケットについて密封特性実験の途中に行った。すなわち、接触面圧 p を 42.7MPa に保ったまま、入口圧 p_1 を 98kPa から 882kPa まで段階的に増加させて漏れ量 Q_0 の増加傾向を測定した。同様な実験を接触面圧 p が 69.0MPa の時にも行った。図6より、接触圧力 p が 42.7MPa, 69.0MPa における

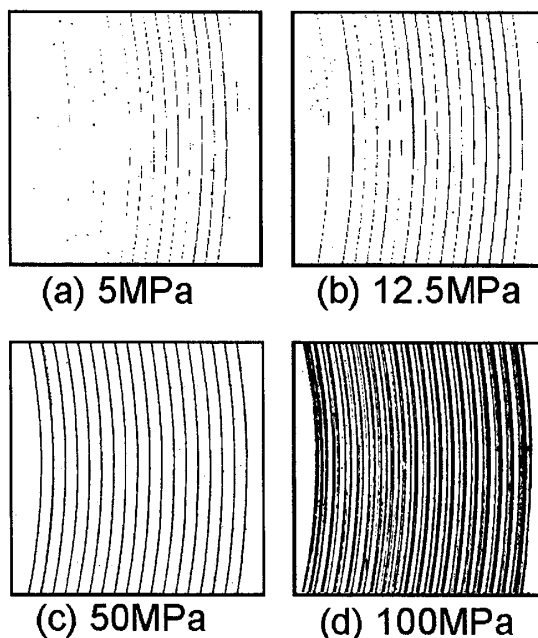


Fig.8 Measured contact marks

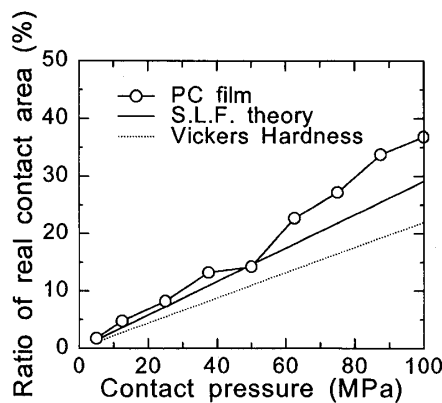


Fig.9 Measured real contact area as a function of contact pressure

実験値の傾きは、それぞれ 2.0, 1.8 となり、 Q_0 は入口圧 p_1 の約 2 乗に比例して増加していることがわかる。すなわち、領域 (II) における漏れ気体の流れは、渦巻き状の旋削溝通路に沿った粘性層流が支配的であると考える。

3.2 高分子薄膜法による真実接触面積の測定

高分子薄膜法で見か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であることが確認された。一部を拡大し観察したところ比較的に明瞭に接触痕が転写されていることがわかった。

そこで、真実接触面積は図 7 に示すように中心角で約 20° の領域にわたり観察することにした。また、接触面積を計測するときには中心角で 1° ごとに領域を分けて行った。図 8 の黒い部分が真実接触面積である。それぞれ見かけの接触圧力は 5MPa, 12.5MPa, 50MPa および 100MPa である。フランジの接触面の仕上げが旋削であることから、きれいな線状(らせんの一部)の真実接触面積の分布が予測されるが、接触圧力が 5MPa の場合は接触が少なく、12.5MPa の場合でもまばらな接触となった。そのため、この接触ではらせんに沿って気体は流れるほかに、それと直角方向の半径方向にも気体は流れることが推測できる。接触圧力が 50MPa になるときれいならせん状の真実接触面積の分布が得られた。さらに、接触圧力が大きくなって 100MPa になると 2 重のらせんとなることがわかる。図 2 のフランジの表面形状を見ると高さが $0.4 \mu\text{m}$ のところに低い山が存在するが、これが接触に参加して 2 重らせんになったものである。

図 9 には高分子薄膜法で測定された見かけの接触面積に対する真実接触面積の割合を示した。また、ガスケットのビッカース硬さより計算したものと、加工硬化を考慮したすべり線場理論により求めた塑性流動圧力から計算したのも示した。ビッカース硬さより求めた真実接触面積は高分子薄膜法やすべり線場で求めたものよりも小さくなった。したがって、この不

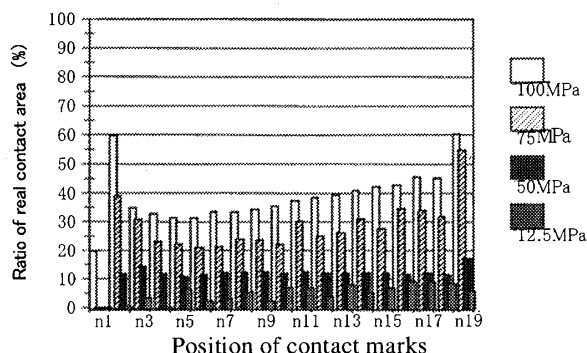


Fig.10 Real contact area at each contact mark

一致は硬さ測定時に対面角 136° のビッカース圧子が与えるひずみが、フランジの表面突起で与えられるひずみより大きいために引き起こされたと考えられる。高分子薄膜法による結果は常にビッカース硬さによる値より大きくなっており、両者の間には約 60%程度の差が見られた。しかし、フランジの旋削痕突起角度を考慮したすべり線場理論による結果と比較したところ約 20%程度の差となっていた。今回の高分子薄膜法では、厚さが約 $1 \mu\text{m}$ のものを使用しているため、原理的には真実接触面積を過大に評価することになる。したがって、図 9 は高分子薄膜法の妥当性を示しているものと考えられる。

図 10 に高分子薄膜法で求めた真実接触面積と見か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表している。n1 とは、内周側の 1 本目の接触痕であることを表わす。また、n19 は内周側から数えて 19 本目の接触痕であることを表わす。ガスケットの半径方向の寸法が 5mm で、フランジの旋削加工の送り量が 0.27mm であるので、18 本から 19 本の接触痕が生じるはずである。接触圧力が 12.5MPa の時には内周側で接触しない領域が多いことが分かる。接触圧力 50MPa の時には、内周から外周にわたりほぼ均一な真実接触面積となった。また、接触圧力 100MPa の時には、内周側と外周端で真実接触面積が大きくなるが、内周から外周にかけてほぼ単調に増加した。

図 11 は、有限要素法により弾性解析した接触圧力分布である。解析では接触面に存在する表面粗さは無視し、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。一つの接触圧力について 2 つの接触圧力分布を示したが、破線はボルト穴とボルト穴の真ん中の半径方向の接触圧力分布である。すなわち、図 1 のフラン

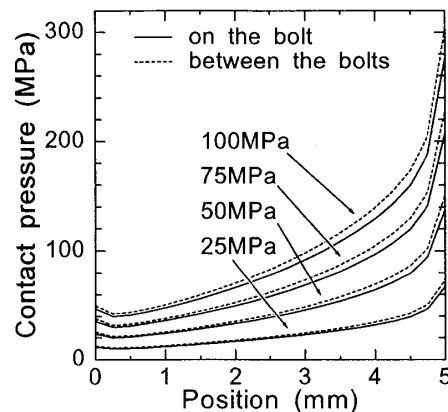


Fig.11 Contact pressure calculated by FEM

ジの水平方向の中心線上の接触圧力分布である。また、実線はそこから中心角で 45° 傾いた、ボルト穴中心上を通る半径方向の接触圧力分布である。横軸はガスケット内周と外周に対応する。ここで、図 10 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、図 10 と図 11 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。図 10 の測定値には多少のばらつきは見られるものの、接触圧力が 75MPa と 100MPa のときの真実接触面積の変化の様子は、図 11 の接触圧力の変化と同じ傾向であることがわかる。

表面粗さを有する面では、表面粗さすなわち表面微小突起の変形が接触圧力分布に影響を及ぼす。多くの場合は、表面微小突起の変形は、接触圧力分布を平坦化する作用をもつ。しかし、接触圧力が高くなり表面微小突起の変形が飽和すると、接触圧力は、表面粗さの変形を考慮しない解析的な値に近づく。本実験でもこのことが現れているものと考えられる。図 10 の接触圧力が 50MPa の時には、接触圧力分布が全体的に均一となり、解析的に求めた値と異なることがわかる。したがって、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となった。

さて、これまでの観察結果より、接触状況を密封特性実験結果と関連付けて考える。接触圧力が 40MPa 以下ではフランジ面の旋削により形成された突起頂点が局所的に接触しているために、旋削痕に沿った流れのほかに半径方向の流れが漏れに寄与していると考えられる。それ以上の接触圧力になると、旋削痕がガスケット表面と途切れることなく接触するようになるために、半径方向の流れはなくなり、渦巻状の流路が形成される。そのために、漏れ量の減少は緩やかになる。さらに接触圧力が増加すると谷部の突起が接触するようになるので徐々に流路が狭められる。接触圧力 100MPa 前後でそれらの突起も全体的に接触し、特に、内・外周側でその接触が増加するため、漏

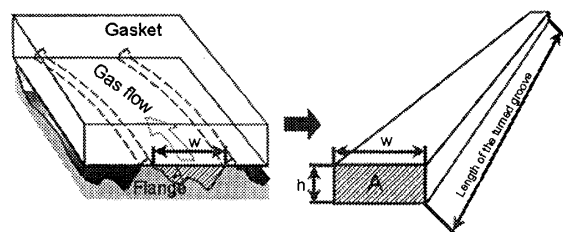


Fig.12 Channel form for the leakage calculation

れはさらに狭い流路の流れとなり、漏れ量が急減するものと考えられる。

4. 考 察

4.1 漏れ量の推定計算 真実接触面積の分布の測定結果より、接触圧力が 40MPa 以上になると、漏れは旋削痕に沿うものだけであり、半径方向の漏れはないことが分かった。そこで、図 12 に示すような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た。図中の流路幅 w は、高分子薄膜法により測定された値を用いた。したがって、理想平面がフランジ面に接触幅 w になるまで近づくと想定している。図中のハッチングされた面積 A が流路断面積となる。この面積は、図 2 のフランジ表面の断面曲線を基にして求めた。漏れ量を計算するために、これ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。矩形直管の幅は w とし、高さは断面積 A を w で割った値 h とした。計算式を以下に示す⁴⁾。

$$Q_0 = \frac{wh^3}{24\mu p_2 L} (p_1^2 - p_2^2) \quad (1)$$

ここで、 w : 流路幅、 h : 流路高さ、 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。

計算結果を図 13 に記号「PC film」で示す。図中の 3 本の破線は実験結果を示している。計算結果は、接触圧力が 100MPa までであるが、これ以上の接触圧力では高分子薄膜が破れてしまい、接触幅が測定できなかったためである。接触圧力が 40MPa 付近から 100MPa までは、計算結果は実験値とよく一致することがわかる。接触圧力が約 40MPa 以下では、計算結果が実験値を下回っているが、これは計算値では半径

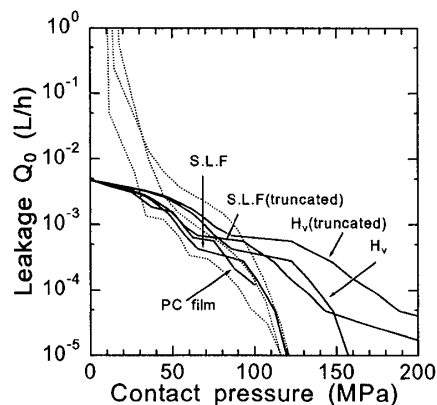


Fig.13 Evaluation of leakage rates

方向の漏れを考慮していないためである。

また、ビッカース硬さを基に漏れ量を計算した。塑性流動圧力はビッカース硬さに等しいと仮定して接触幅 w を求めた。流路高さ h は流路断面積 A を流路幅 w で除した値とした。図中の「Hv(truncated)」が上述のようにして計算した値である。また、フランジ面の表面突起で押しのけられたガスケット材料が流路断面積を狭めることが考えられるので、それを考慮した場合の計算値を「Hv」として図中に示した。すなわち、フランジ面の表面突起がガスケット面に食い込んだ分の面積を流路断面積 A より引いた。いずれの場合でも、ビッカース硬さを基にして求めた漏れ量は、接触圧力が 100MPa を超えたところから、実験値を上回るようになった。これは、ビッカース硬さは流路断面積を過大に評価していることを示している。

さらに、加工硬化を考慮したすべり線場理論^{(14), (15)}より求めた塑性流動圧力を基に計算した漏れ量を図中に「S.L.F(truncated)」と「S.L.F」で示す。この場合は、フランジ面の表面突起で押しのけられて流路断面積が狭まることも考慮すると、計算値は実験値とよく一致することがわかる。これは、すべり線場理論で塑性流動圧力が精度よく推定できたからと考えられる。

高分子薄膜法で求めた流路幅は、フランジ面の表面突起でガスケット材料が側面に押しのけられる効果も含めて接触幅を測定していると考えられる。その接触幅を用いて理想平面(ガスケット面)の食い込みを断面曲線上で評価した場合は、実際の食い込み量よりもより深い値として評価することになる。すなわち、流路断面積を狭く評価することになる。そのために、高分子薄膜法に基づく計算では、ガスケット材料が側方へ押しのけられて流路断面積を狭める影響はあえて考慮しなかった。

5. 結 言

金属平形ガスケットの漏れ特性と接触状態の関係性を調べるために、高分子薄膜法を用いて接触痕を測定した。その結果、これまで明確にできなかった半径方向流れと円周方向流れの漏れの経路と接触圧力との関係が明らかになった。以下に本研究で得られた主な結果をまとめる。

(1) 接触圧力が小さい時には、フランジの旋削突起とガスケット表面は接触していない場所があり、半径方向の流れが漏れ量に影響を及ぼしている。しかし、接触圧力がある値を超えると、旋削痕に沿った円周方向の流れのみとなる。

(2) 高分子薄膜法による真実接触面積の測定結果を基に漏れ量の計算を行なった。接触圧力が 40MPa 以上、すなわち漏れが旋削痕に沿った円周方向の流れのみと考えられる領域では、計算値は実験値とほぼ同様の値となった。

(3) フランジとガスケットの接触圧力分布は表面粗さの影響を受けるために、弾性解析より求められた接触圧力分布とは異なる値を示す。このことは、ガスケットのような静的シールの性能を議論するときには、表面粗さを考慮しない弾性解析で求めた接触圧力分布に基づく評価は不十分であることを示す。

文 献

- (1) 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, 66-644, A(2000-4), 651-657.
- (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(第2部), 32-239, (1966), 1083-1090.
- (3) 風巻恒司, 機論(第3部), 接触面の流体漏れ論(第4報, カーボン・アルミ材の加工方法による影響), 40-336, (1974), 2369-2380.
- (4) 田中章浩・山下徹, 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擦特性, 潤滑, 31-12, (1986), 869-875.
- (5) 船橋鉦一・中村隆・村井智哉・馬淵英二, 金属接触面間の密封特性(第1報) あらさの方向性の影響, 潤滑, 33-10, (1988), 776-782.
- (6) Jean Frêne, Luca Boccaletto, Yannick Delaunay and Alain Pyre, Study of leakage in static gasket for cryogenic or high temperature conditions, 4 th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion", 3-6 December 2002-Liege (Belgium), 1-9.
- (7) 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, 60-579, C (1994), 3970-3977.
- (8) Isami NITTA, Measurements of Real Contact Areas using PET Films (Thickness, 0.9 μ m), Wear, Vol.181-183, (1995), 844-849.
- (9) 新田勇・塩原浩・岩淵明, 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), 290-299.

- (10) 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 - 134.
- (11) 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, 67 - 662, C(2001), 3283 - 3290.
- (12) JIS B2238 (1996) 鋼製管フランジ通則, 日本工業規格.
- (13) 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.
- (14) 松崎良男・新田勇・細川一夫・船橋鉦一, くさび形メタルシールの基本特性, 機論, 67 - 659, C(2001), 2344 - 2351.
- (15) Isami NITTA, Koji KATO, Takao KAYABA and Shigeo UMEZAWA, The Effects of Work-hardening on the Contact Pressure and the Deflection of Asperity in Contact, Wear, Vol.146,(1991), 325-335.
-