静的シールの設定圧着応力に及ぼす表面粗さの影響*

(第2報, 金属ガスケットとしてのシール特性)

松崎 良男^{*1}, 風巻 恒司^{*2}

Effect of Surface Roughness on Compressive Stress of Static Seals (2nd Report, Sealing Characteristics of Metallic Gaskets)

Yoshio MATSUZAKI and Tsuneji KAZAMAKI

In this paper, the effect of surface roughness appearing on a turned sealing surface on compressive stress and compressive force of copper gaskets (a flat gasket, a ring joint gasket and a copper wire gasket) was studied. The results obtained can be summarized as follows: (1) In the case of a flat gasket or a ring joint gasket, in order to ignore both the surface roughness appearing on a turned sealing surface and the cross section of gasket, the compressive stress for sealing had to be nearly equal to 1.3 times the tensile strength of the copper gasket. (2) In the case of a ring joint gasket or a copper wire gasket, the values of maximum height roughness, in which the minimum compressive force for sealing applied, were found in the region between $2\text{ }\mu\text{m}$ and $20\text{ }\mu\text{m}$ or not less than $110\text{ }\mu\text{m}$ respectively.

Key Words: Fixing Element, Copper Gasket, Surface Roughness, Turned Surface, Compressive Stress, Compressive Force

1. ま え が き

近年の化学機器や真空装置⁽¹⁾⁽²⁾は高温、高圧、極低温、超真空など過酷な条件で使用されることが多いため、金属同士を直接に、あるいは金属ガスケットを挿入して圧着する静的シールの採用が重要となってきた。

前報⁽³⁾では、ガスケットを装着しないで金属同士を圧着する基礎実験を行った結果、漏れ量を許容値以内に制限するのに必要な設定圧着応力は、材質の組合せや表面粗さ(ただし、 $R_{\text{max}} < 50\text{ }\mu\text{m}$ で旋削仕上げ)に関係なく、ほぼ軟質材の引張強さより小さくなることを述べた。

本報では、ガスケットの種類(平形、リングジョイント、銅線ガスケット)とシール面の加工方法(ラッピング、旋削)および表面粗さ($R_{\text{max}} \approx 0.3 \sim 220\text{ }\mu\text{m}$)を変化させ、それぞれに対する漏れ特性を調べ、設定圧着応力と表面粗さとの関係について検討する。なお本文

では、実用上よく用いられる設定圧着力についても検討を加える。

2. 実 験

2・1 実験装置 実験装置本体を図1に示す。なお窒素ガス流れに対する装置上の注意、ガスクロマトグラフによる漏れ計測要領、漏れ窒素ガス量の算出要領などは前報と同様である。ただ今回の実験では、ガス

図1 実験装置本体

* 昭和62年4月3日 第64期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年9月22日。

^{*1} 正員、石川工業高等専門学校(〒929-03 石川県河北郡津幡町字北中条)。

^{*2} 正員、元富山大学工学部(自宅: 〒419-01 静岡県田方郡函南町平井字南谷下1740-1908)。

ケットを上下試料の平行平面間に挿入してサンドイッチ形式に圧着する点が前報と異なる。

2・2 実験材料 実験材料の性質、実験材料の諸元、実験材料の表面粗さの一例を表1～3にそれぞれ示す。平形ガスケット、リングジョイントガスケット(形状はオーバル形で以下オーバル形ガスケットという)は旋削加工後、塗料付ナイロンタワシで研磨したもので、 $R_{\max} < 1.5 \mu\text{m}$ である。銅線ガスケットは線径1 mm、純度99.90%以上の極軟質材で、その特徴はシール箇所の寸法に合わせて容易に自作できる簡便性を主眼としており、線材を適当な長さに切断して成形する一種のOリング(ただし耳が付く)であって、その成形方法は表2の注を参照されたい。それぞれのガスケット内径は20 mmである。試料はラッピングおよび旋削仕上げで、旋削の加工条件は前報と同じである。

3. 結果と考察

3・1 漏れ実験結果 上下試料の粗さが同じ組合せに対する漏れ実験を数回行ったものもある(表3参照)が、それらはほぼ同一の漏れ特性を示した。結果の一例を図2に示す。図は圧着力 P/l (P は押付荷重, l

はガスケット全長で平形とオーバル形ガスケットでは69 mm, 銅線ガスケットでは80 mm) と漏れ量 Q_0 (101 kPa, 0°Cの標準状態量)との関係を示す。図より、比較的漏れ量の多い $Q_0 \approx 10^{-1} \text{ L/h}$ に対する P/l 値および P/l の増加に対する漏れ減少割合について次のことがわかる。

(a) 平形ガスケットの場合: $Q_0 \approx 10^{-1} \text{ L/h}$ に対する P/l は試料の $R_{\max}$ が大きくなるほど高い値をとり、また漏れ減少割合も急激に大きくなる傾向にある。このことは前報の基礎実験グループI(銅材をエメリー紙研磨仕上げ、相手面を旋削仕上げの組合せ)の Q_0 の減少傾向と類似している。

(b) オーバル形ガスケットの場合: Q_0 は $R_{\max} \approx 0.3 \mu\text{m}$ よりも $R_{\max} \approx 2 \sim 20 \mu\text{m}$ のほうがわずかに少なく(ただし $R_{\max} \approx 20 \mu\text{m}$ の場合、 Q_0 は約 10^{-4} L/h 以下の微小漏れ量で $R_{\max} \approx 0.3 \mu\text{m}$ よりも少ない)、 $R_{\max} > 20 \mu\text{m}$ では $R_{\max}$ が大きくなるほど多くなる傾向にある。

(c) 銅線ガスケットの場合: 上述の二例とは逆に、全体的には $Q_0 \approx 10^{-1} \text{ L/h}$ に対する P/l は $R_{\max}$ が大きくなると低い値をとり、漏れ減少割合は急激に大きくなる。

実験後のオーバル形ガスケットおよび銅線ガスケット合わせ部の圧着面を図3に示す。試料の旋削山突起がガスケットにくい込んで、漏れ通路となるオーバル形ガスケットの放射状の傷および銅線ガスケット合わせ部の溝がふさがれている箇所が見受けられる。

走査電子顕微鏡(SEM)によるガスケット圧着面の観察結果から、上述した(a)～(c)の Q_0 の減少傾向の差については次のように考える。

(a)の場合には、シールメカニズムは前報の基礎実験グループIの結果とほぼ同じであると思われる。すなわち圧着初期段階で、試料の旋削山突起がガスケッ

表1 実験材料の性質

Material		Mechanical properties			Heat treatment
		Tensile strength	Elongation	Hardness	
		σ_b MPa	ϵ %	Hv	
Gasket	C1220P	248	36	63	500°Cx1hr Annealing
	C1220W	246	38	80	
Specimen	SUS304	above 519*	above 40*	389	(Goods on market)
	SKS3	～	～	858	Oil-quenching

注) SUS 304 の σ_b , ϵ は JIS 規格値を、その他は計測値を示す。

表2 実験材料の諸元

Item	Gasket		Specimen
Material	C1220P	C1220W	SUS304 SKS3
Form	Flat	Oval	Copper wire*
Shape and Dimension			Plane

注) 銅線ガスケットの成形方法: 銅線を $\phi 20$ の丸棒(ジグ)に巻き付けて合わせ部を手で半ひねりし、厚さが線径と同程度になるようにプレスする。

表3 実験材料の表面粗さ(旋削)の一例

Surface roughness $R_{\max}, \mu\text{m}$			Number of experiments		
Range	Upper specimen	Lower specimen	Flat	Oval	Copper wire
0.3	under 0.3 (Lapping)		2	3	1
2	2.2	1.9	1	2	0
4	3.8	4.1	1	2	0
6	6.0	6.8	1	3	2
10	12.7	14.3	2	2	1
20	21.2	22.5	1	1	1
40	43.3	43.7	1	1	0
80	76.7	75.7	1	2	1
110	103	112	2	1	1
170	159	176	2	0	1
220	224	208	2	0	1

トにくい込み、接触面におけるガスケット材の半径方向への移動を防げる。さらに P/l を増加すれば、ガスケットは全体的に塑性変形して太鼓形となり、ガスケット表面上の傷 (深さ $1.5 \sim 5 \mu\text{m}$) および試料の旋削谷部とガスケットとのすきまの漏れ通路はガスケット内外周部で急にふさがれる。その結果、 R_{max} が大きくなるほど漏れ減少割合も急激に大きくなると思われる。

(b) の場合には、 Q_0 が $R_{\text{max}} \approx 2 \sim 20 \mu\text{m}$ で少なくなっている理由を次のように考える。まず $R_{\text{max}} \leq 20 \mu\text{m}$ では、ガスケット表面上の傷が問題となる。すなわちガスケット表面上には同心円状の仕上研磨傷 (深さ約 $1.5 \mu\text{m}$) と取扱い時につく放射状の傷 (深さ約 $2 \sim 5$

μm) がある。ラップ鏡面との圧着では、ガスケット接触面が平らに塑性変形されてもこれらの傷は残り、傷による漏れ通路はふさがれにくい。しかし旋削面との圧着では、図 3 (a) に示したように、試料の旋削山突起がガスケットにくい込み放射状の傷の漏れ通路をふさぎ Q_0 を抑制する。このため $R_{\text{max}} \approx 2 \sim 20 \mu\text{m}$ の Q_0 は $R_{\text{max}} \approx 0.3 \mu\text{m}$ よりも少なくなる。一方 $R_{\text{max}} > 20 \mu\text{m}$ では、ガスケットと試料の旋削谷部とのすきまからの漏れが支配的となる。ガスケットは P/l の増加に伴って塑性変形し旋削谷部を埋める、すなわちガスケットのなじみ性によって漏れ通路がふさがれる。このふさぎに必要な P/l は、 R_{max} の増加につれて高くなるため、 Q_0 も多くなると考える。

(c) の場合には、接触面間からの漏れには、銅線ガスケット線部と試料の旋削谷部とのすきまからの漏れと銅線ガスケット合わせ部の溝からの漏れとがある。 P/l を加えると線部のすきまが早くふさがれ溝部のふさがりが遅れる。溝部は図 3 (b) に示したように試料の旋削山部によってふさがれるが、このふさぎに必要な P/l は、試料の R_{max} が溝部 (実験前の溝寸法は深さが約 $100 \mu\text{m}$ 、幅が約 $200 \mu\text{m}$) の深さ寸法と同程度かそれ以上では低いが、 R_{max} が小さくなれば高くなる。この溝部のふさぎ効果のため、 Q_0 は R_{max} が大きいほど少なくなると考える。

3.2 設定圧着力および設定圧着応力 ここでは、接触面間からの漏れ量を許容値以内に制限するのに必要な圧着力を設定圧着力 P_c/l と、また圧着応力を設定圧着応力 p_c と定義する。ここに、漏れ許容値 Q_c を前報と同じく、 $Q_c \leq 10^{-5} \text{ L/h}$ とした。

(a) 平形ガスケット

(b) オーバル形ガスケット

(c) 銅線ガスケット

図 2 漏れ実験結果の一例

注) ①は試料の旋削山突起によるくぼみ, ②はガスケット表面の放射状の傷, ③は半ひねり成形による合わせ部の溝を示す。
 図3 ガスケット圧着面の試料の旋削山突起によるふさぎ効果

図2の実験結果から求まる P_c/l に対して R_{max} との関係を図4に示す。平形ガスケットの P_c/l は, $R_{max} \geq 80 \mu\text{m}$ では R_{max} の増加につれてやや高くなる傾向にあるが, 全体として R_{max} に関係なく $P_c/l \approx 530 \text{ kN/m}$ でほぼ一定値を示す。オーバル形ガスケットの場合, $R_{max} \approx 2 \sim 20 \mu\text{m}$ で $P_c/l \approx 210 \text{ kN/m}$ と最も低くなっており, それより R_{max} が小さくなくても大きくなっても P_c/l は高くなる傾向にある。このことは, 前節で述べたガスケット表面の傷のふさぎ効果とガスケットのなじみ性の影響が表われている。ちなみに, 中空Oリングガスケットの研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾でも似た結果が報告されている。銅線ガスケットの P_c/l は, R_{max} が大きくなると低くなり, $R_{max} \geq 110 \mu\text{m}$ で $P_c/l \approx 360 \text{ kN/m}$ とほぼ一定値を示し, 前節で述べた合わせ部の溝のふさぎ効果の影響が現れていると思われる。

p_c と R_{max} との関係を図5に示す。なお図中には無次元数 $K_c = p_c/\sigma_B$ を縦軸に記載してある。ここで $p_c = P_c/A_c$ で A_c は実験後の圧着面積, σ_B はガスケット材の引張強さである。平形, オーバル形ガスケットの p_c は, R_{max} に関係なく, それぞれ約 250, 300 MPa でほ

図4 P_c/l と R_{max} の関係

図5 p_c と R_{max} および K_c と R_{max} の関係

ぼ一定値を示す。一方銅線ガスケットの p_c は $R_{max} \approx 0.3 \sim 20 \mu\text{m}$ よりも $R_{max} \geq 110 \mu\text{m}$ で低く, それぞれほぼ一定値を示す。これは前節で述べた合わせ部の溝のふさぎ効果のためと考えるが, 半ひねり成形された合わせ部は線部よりも硬いので, 合わせ部による深さ約 $60 \mu\text{m}$ 以下のくぼみが $R_{max} < 80 \mu\text{m}$ のステンレス圧着面に生じた。この変形はシール面の再利用性という観点から避けるべきであり, 銅線ガスケットの有効な p_c は $R_{max} \geq 110 \mu\text{m}$ で約 350 MPa を示すと考える。

したがって本実験の粗さ範囲内での有効な K_c 値は, 前述の理由から, 約 0.8~1.5 を示すと考える。なお平形ガスケットの K_c は基礎実験値と同じく $K_c \approx 1$ である。ここで特殊な半ひねり成形の銅線ガスケットの値を除けば, 一体形のガスケットでは R_{max} およびガスケット断面形状に関係なくほぼ $K_c \leq 1.3$ となっている。

なお図5の平形ガスケットの p_c 値はオーバル形ガスケットより低く, 図4の P_c/l 値の大小関係と逆になっている。この理由として, SEM 観察より圧着面の接触面積の差が考えられる。実験後の平形ガスケット

は圧着面の中央部で試料の旋削谷部と接触してない箇所が見受けられるが、オーバル形ガスケットは圧着面全域でほぼ接触状態にある。ところが p_c は P_c を実際に接触してない面積も含めた見かけ上の接触面積 A_c で割った値であるから、平形ガスケットの p_c はオーバル形ガスケットより低くなると考える。

4. む す び

前報に続いて静的シールの基本性能を得ることを目的として、今回は金属ガスケット装着時の漏れ特性について実験を行った結果、次の結論を得た。

(1) 一体形(平形, オーバル形)ガスケットの設定圧着応力(無次元数 K_c 値)は表面粗さおよびガスケット断面形状に関係なくそれぞれ一定値を示し, $K_c \leq 1.3$ である。

(2) 平形ガスケットの場合, 前報の基礎実験(銅材をエメリー紙研磨仕上げ, 相手面を旋削仕上げの組合せ)の結果と同じく, 表面粗さに関係なく $K_c \approx 1$ と大略一定値を示すと考えてよい。

(3) 銅線ガスケットの場合, K_c は $R_{\max}$ が大きく

なると低くなり, 有効な K_c は $R_{\max} \geq 110 \mu\text{m}$ で $K_c \approx 1.5$ となる。この理由は合わせ部の溝のふさぎ効果のためと思われる。

(4) オーバル形ガスケットの場合, $R_{\max} \approx 2 \sim 20 \mu\text{m}$ で $P_c/l \approx 210 \text{ kN/m}$ と最小となる。この理由はガスケット表面の傷のふさぎ効果とガスケットのなじみ性のためと思われる。

終わりに、ガスケットをご提供いただいた日本バルカー工業(株)に、心からお礼を申し上げる。また、終始暖かいご激励をいただいた石川高専 細川一夫教授ならびに表面粗さ計測にご協力いただいた石川県工業試験場機械電子部の大浦利夫氏に深く感謝する。

文 献

- (1) Roth, A., *Vacuum Sealing Techniques*, (1966), 306, Pergamon Press.
- (2) 堀越, 真空技術, (昭58), 183, 東京出版会.
- (3) 松崎・風巻, 機論, 53-489, C (昭62), 1091.
- (4) 久呉, 真空, 24-6 (昭56), 341.
- (5) 酒井・ほか3名, 真空, 24-7 (昭56), 408.