

くさび形メタルシールの基本特性*

松崎良男^{*1}, 新田 勇^{*2}
細川一夫^{*1}, 船橋 鉦一^{*3}

Fundamental Characteristics of a Wedge-Shaped Metal Seal

Yoshio MATSUZAKI^{*4}, Isami NITTA,
Kazuo HOSOKAWA and Koichi FUNABASHI^{*4} Ishikawa National College of Technology, Tsubata-machi, Kahoku-gun, Ishikawa, 929-0392 Japan

The fundamental characteristics of a static metal seal made between an annular wedge-shaped asperity of copper and a smooth seal surface of steel were investigated by varying the surface roughness ($R_y \approx 0.1 \sim 100 \mu\text{m}$) and the semi-angle of wedge ($\alpha = 15 \sim 60^\circ$). The following results were obtained from gas leak tests and calculations of contact pressure on the wedge-shaped asperity. (1) The $P_c/l (= p_m w_c)$ -values of the compressive force per unit length for sealing decreased with a decrease in the R_y - and α -values. The recommended values of R_y and α were in the range of $R_y \leq 20 \mu\text{m}$ and $\alpha = 30^\circ$ respectively, and it was possible to forecast the P_c/l -values corresponding to that range. (2) The p_c -values of the contact pressure for sealing approximately agreed with the calculated values, p_m , obtained from theory of slip-line field of wedge. (3) The w_c -values of the contact width for sealing decreased with a decrease in R_y - and α -values, and were about $50 \sim 100 \mu\text{m}$ in the range $R_y \leq 20 \mu\text{m}$.

Key Words: Fixing Element, Wedge-Shaped Metal Seal, Surface Roughness, Gas Leak Test, Contact Width of Wedge, Contact Pressure, Compressive Force

1. 緒 言

密封流体の高温、高圧あるいは超高真空化に伴い、機械の配管結合部に非金属ガスケットやセミメタリックガスケットを使用して密封性を確保することが困難となり、金属ガスケット⁽¹⁾あるいは金属同士を直接接触させるシール⁽²⁾、すなわちメタルシールを多用するようになった。従来、シールの設計には、ガスケット締付け係数(JIS B 2206)が用いられる。しかし、この係数には、密封性能を左右する重要因子、すなわち密封流体の種類・許容漏れ量・設定条件および接触面の形状・表面性状(表面粗さと方向性)が考慮されておらず、また、係数の概念も抽象的である。この理由から、メタルシールの長期利用、安全性および信頼性を確保するため、上記重要因子を考慮した固体接触面間の密封機構を解明することが重要となっている。過去にお

けるメタルシールの研究は数多くあるが、各種ガスケットのシール装置に関する実用的な報告⁽³⁾⁽⁴⁾が多く、接触面の表面性状を考慮した密封機構に関する研究⁽⁵⁾は少ない。

著者らはすでに、接触面に垂直力が作用するメタルシール⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾および垂直力と接線力が作用するメタルシール⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾について調べ、接触面の表面性状を考慮した密封性能に関する基本特性について報告した。その際、垂直力と接線力が作用するメタルシールについては、基本特性に及ぼす接線力の影響を明らかにした⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。また、垂直力が作用するメタルシールについては、接触幅が狭く硬いくさび形突起が押付け力を低くする密封条件を明らかにし⁽⁶⁾、ナイフエッジシールの最適形状と寸法を提言した⁽⁹⁾。さらに、接触幅が広く軟らかいガスケット(オーバル形ガスケット、平形金属ガスケット)についても基本特性を明らかにした⁽⁷⁾が、この歯形ガスケットを想定した、接触幅が狭く軟らかいメタルシールについていまだ不明であり、研究報告も見当たらない。

本報では、既報⁽⁸⁾⁽⁹⁾とは材料の組合せが逆のメタルシール、すなわち軟らかいくさび形突起と硬い平面との密封機構を調べることを目的とした。最初に、接触面の表面粗さとくさび頂角が密封特性に及ぼす影響を

* 原稿受付 2000年8月21日。

^{*1} 正員, 石川工業高等専門学校(☎929-0392 石川県河北郡津幡町字北中条夕1)。^{*2} 正員, 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番地)。^{*3} 正員, 名古屋工業大学名誉教授(自宅: ☎451-0031 名古屋市西區城西5-17-7)。

E-mail: matsu@ishikawa-nct.ac.jp

実験的に明らかにした。実験結果より、くさび頂角と表面粗さが変化した場合の、密封に必要な最低限の垂直荷重を求めた。一方で、くさび形突起の塑性流動圧力を加工硬化を考慮したすべり線場から計算し、その値と実験で求めたくさび形突起の接触幅を基に、密封に最低限必要な押付け力を予測する方法を示した。その結果、密封機構に深く関与する塑性流動圧力は、硬いくさびの稜線部幅の影響を受けた既報⁽⁸⁾⁽⁹⁾と異なり、くさびの頂角と加工硬化の影響を受けることが明らかとなった。

2. 実験

密封流体の漏れ減少傾向を調べる密封特性実験と、くさび形突起の接触圧力を求める、くさびの押しつぶし・押し込み実験を行った。

2.1 実験材料 密封特性実験で使用した試料の形状と寸法、実験材料の機械的性質および試料接触面の表面粗さをそれぞれ図1、表1および表2に示す。上部試料は焼きなまし銅であるが、材質による密封特性の差異を調べるため、冷間圧縮加工した加工硬化銅(加工度58%)も使用した。上部試料のくさび部の断面形状については、焼きなまし銅のくさび半頂角 α は 15° 、 30° 、 45° 、 60° の4種類、加工硬化銅の α は 30° の1種類で、旋削後、環状くさびの周方向に研磨紙仕上げを施した。環状くさびのうねりを調べるため、上部試料をラップ鏡面に軽く押し当て、接触面間にうねりによるすきまが少ないことを目視確認した。くさび稜線部の表面粗さは、スキッドなしの状態で触針式表面粗さ測定機で計測した。くさび稜線部(稜線部頂点から約 $100\mu\text{m}$)の半径方向の表面粗さ R_y は約 $1.9\mu\text{m}$ である。下部試料の接触面の表面粗さ R_y は $0.1\mu\text{m}$ 以下のラップ鏡面(SKS3)および 3.6 、 8.8 、 14.4 、 44.7 、

$119\mu\text{m}$ (ろ波最大うねり W_{CM} は $R_y=3.6\mu\text{m}$ で小さく $119\mu\text{m}$ で大きい)が、 $W_{CM}=0.5\sim 1.0\mu\text{m}$)の旋削面(SUS304)の6種類である。実験は、各くさび半頂角の上部試料に対して6種類の接触面の下部試料を組合せて実施した。

下部試料が旋削面の場合、上部試料のくさび形突起には、異なった2種類の接触形態が生じる。すなわち、旋削谷部によるくさび押しつぶしと旋削山部による押し込みである(後述図5参照)。そこで、前者を剛体平面へのくさび押しつぶしに置換し、後者を剛体くさび押し込みで置換して、くさびに生じる接触圧力を求める実験を実施した。

くさび押しつぶし実験は、図1、表1および表2に示した環状くさびとラップ鏡面の組合せで実施した。くさび押し込み実験は、図2に示す、平面と環状くさびの組合せで実施した。上部試料は表1に示した銅材で、接触平面に研磨紙仕上げを施し、表面粗さ R_y は約 $0.5\mu\text{m}$ である。下部試料は合金工具鋼(SKD11; $H_V=357$)で、くさび半頂角 θ を 60° に旋削加工した後、研磨紙仕上げを施した。 R_y は約 $1\mu\text{m}$ である。ここで、 θ に 60° を採用した理由を述べる。旋削山部の突起半頂角 θ は、縦横同倍率(500倍)に拡大した断面曲線の記録紙を読取った結果、 $R_y=3.6$ 、 8.8 、 14.4 、 44.7 、 $119\mu\text{m}$ に対して $\theta=85^\circ$ 、 77° 、 72° 、 63° 、 53° であった。 θ が 85° 、 77° と大きい場合、上部試料のくさび

Table 1 Mechanical properties of experimental materials

Note: The σ_B - and ϵ -values of SUS304 are Japanese Industrial Standards

Material	Tensile strength σ_B , MPa	Elongation ϵ , %	Hardness H_V	Heat treatment
Upper specimen				
①C1100	212	64	59	560°C×1hr Annealing
②C1100	—	—	122	Work hardening
Lower specimen				
① SKS3	—	—	858	Oil-quenching (As received)
② SUS304	753*	46*	291	(As received)

Table 2 Numerical values of surface roughness

Note: The α -values are semi-angles of wedge

Material	Surface roughness; R_y , μm	Finishing method
Upper specimen		
①C1100	1.9 ($\alpha=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)	Polishing
②C1100	1.9 ($\alpha=30^\circ$)	
Lower specimen		
① SKS3	Under 0.1	Lapping Turning
② SUS304	3.6, 8.8, 14.4, 44.7, 119	

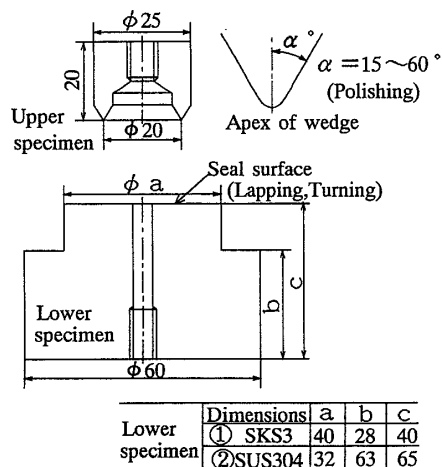


Fig. 1 Shapes and dimensions of the specimens

の接触形態は剛体平面へのくさび押しつぶしに近く、剛体くさび押込みの影響は少ないと考える。そこで剛体くさび押込みの影響がより多く出る θ 値として $\theta=60^\circ$ とした。

2.2 実験装置および実験方法 密封特性実験としては、図3に示す実験装置本体に試料をセットした後、押付け荷重をねじ押付けにより段階的に加え、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)とした場合の、窒素ガス漏れ量の減少傾向を測定した。接触面からの窒素ガス漏れ量の計測は、測定範囲が $5 \times 10^0 \sim 10^{-5}$ L/h のガスクロマトグラフを利用した。その計測要領および窒素ガス漏れ量の算出要領などは既報⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と同様である。なお、実験は漏れ量が測定範囲以下になる直後まで続けた。

くさびの押しつぶし・押込み実験は、密封装置本体に試料をセットした後、所定の押付け荷重を加え、くさびの変形が十分に落ち着くまでの時間(約6分間)保持した。この際、密封流体の装置への導入および漏

れ量の計測は行わない。

3. シールの基本特性およびその考察

3.1 密封特性 密封特性を調べた実験結果の一例を図4に示す。図4は押付け力 P/l (P は押付け荷重、 l は環状くさび稜線部全周の長さ)と漏れ量 Q_0 (0.101 MPa, 0°C の標準状態量)の関係を示す。なお、 P/l の増し締めにより、 Q_0 が急減して測定範囲以下 ($Q_0 \ll 10^{-5}$ L/h)となった実験値については、(Q_0 が 10^{-5} L/h以下になる直前の実験値)と (P/l =増し締め直後の値、 $Q_0 \approx 10^{-6}$ L/h)を直線で結んだ。図4中に示した漏れ量の減少傾向から、この直線の引き方による誤差は少ないと判断する。漏れ量が比較的に多い $Q_0=10^{-1}$ L/h に対する P/l の値および P/l の増加に対する Q_0 の減少割合について次のことがわかる。図4(a)の焼きなまし銅の場合、 $Q_0=10^{-1}$ L/h において

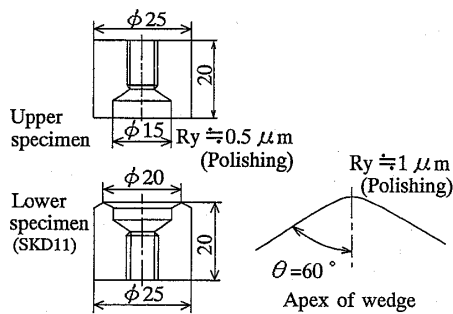


Fig. 2 Shapes and dimensions of the specimens for the penetration test used to measure the contact pressure due to the penetration

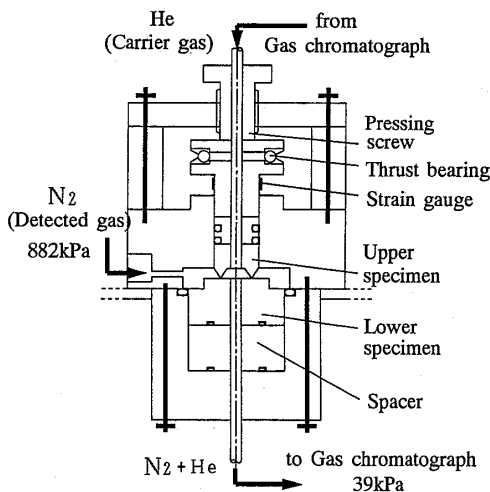
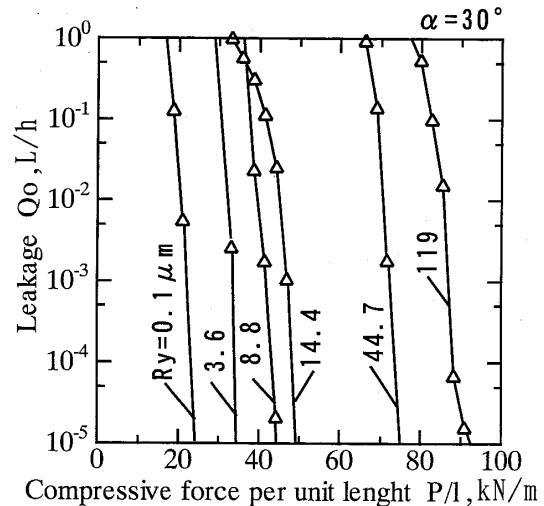
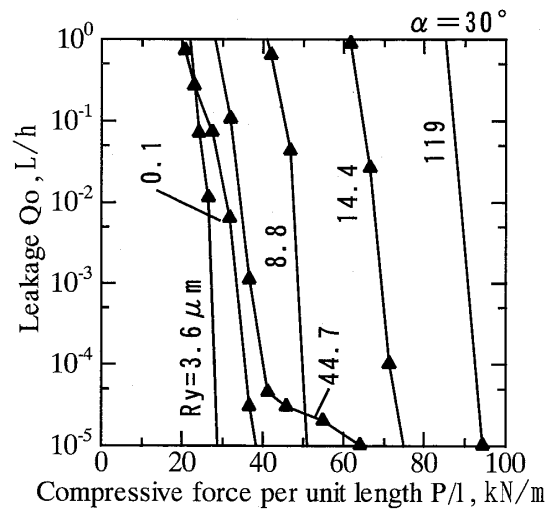


Fig. 3 The experimental apparatus



(a) Annealed copper



(b) Work-hardened copper

Fig. 4 Experimental results

比べると、接触面の表面粗さ R_y が大きくなるほど P/l は高い値をとる。 P/l の増加による Q_0 の減少割合は R_y に関係なく非常に大きい ($P/l=10$ kN/m の増加に対して $Q_0=1 \rightarrow 10^{-5}$ L/h の減少)。この減少傾向は、密封面の接触条件によって異なる。本実験の場合、くさび稜線部の接触幅が約 $500 \mu\text{m}$ 以下(後述図6参照)と狭いため、急激な減少傾向を示したと考える。なお $\alpha=15^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の場合にも、ほぼ同様の密封傾向を示した。図4(b)の加工硬化銅の場合も図4(a)と同様な密封傾向を示すが、 $Q_0=10^{-5}$ L/h において比べると、旋削面 $R_y=3.6 \mu\text{m}$ の P/l はラップ鏡面 $R_y \leq 0.1 \mu\text{m}$ の値に比べて低い。これは、旋削山部が銅材くさび稜線部にくい込み、くさび稜線部にある放射状傷による漏れ通路を閉塞し Q_0 を抑制する密封効果⁽⁷⁾ によるものである。この密封効果は図4(a)の焼きなまし銅の場合にも起こる可能性がある。

3.2 臨界接触幅について ここでは、許容漏れ量を設定し、接触面間からの漏れ量を設定許容値以下にとどめるのに必要な接触幅を臨界接触幅 w_c と定義する。同様に、単位長さ当たりの押付け力を気密開始点の臨界押付け力 P_c/l と定義する。ただし、 w_c は実験後の接触幅、 P_c は設定許容漏れ量に対する押付け荷重を示す。ここに、設定許容漏れ量 Q_c を $Q_c \leq 10^{-5}$ L/h とした。 P_c/l は3.5節で検討される。

実験後のくさび稜線部接触面の断面曲線と走査型電子顕微鏡(SEM)写真を図5に示す。図5は相手接触面が旋削面の場合で、図5(a)では旋削谷部によるくさび押しつぶしが、図5(b)では旋削山部による押し込みが見受けられる。それぞれの w_c は $66, 114 \mu\text{m}$ で、他種のメタルシール(例えば、オーバル形ガスケットや平形金属ガスケットの場合には、 $w_c \geq 1000 \mu\text{m}$ ⁽⁶⁾⁽⁷⁾) と比べて、狭い。

臨界接触幅と表面粗さの関係を図6に示す。図6中の実験点は環状くさび稜線部における6箇所の平均値を示し、曲線は実験値を最小二乗法で近似した値である。図6(a)より、 R_y および α に対する w_c の変化割合について、次のことがわかる。 R_y については、 w_c は R_y の減少に伴い低くなる傾向にある。 α については、 $R_y=0.1 \sim 14.4 \mu\text{m}$ の範囲において、 $\alpha=60^\circ, 45^\circ$ より $\alpha=30^\circ, 15^\circ$ の w_c が低くなっている。

α の差異については、くさび稜線部に存在する粗さ突起の加工硬化性とくさびの押しつぶし量が起因すると思われる。すなわち、環状くさびを平面(ラップ鏡面や旋削面)で押しつぶした場合、くさび稜線部に存在する粗さ突起群($R_y=1.9 \mu\text{m}$)の加工硬化と塑性変形の突起間干渉のため、接触部全域の粗さ突起群は完全

に押しつぶされず、漏れの原因となる漏れ通路としてすきまが生じる⁽¹⁰⁾。そのため接触面間の密封を確保するためには、くさびをさらに押しつぶす必要がある。その結果として、粗さ突起群がさらに押しつぶされて接触面間のすきまが狭くなることにより、あるいは、くさびの接触幅が広くなることにより、漏れ量が減少する。さらに、くさび先端部は、図7に示すように、丸く研磨紙仕上げされており、その丸み半径 r は $\alpha=60^\circ, 45^\circ$ より $\alpha=30^\circ, 15^\circ$ のほうが小さく鋭い。このことは、 $\alpha=60^\circ, 45^\circ$ より $\alpha=30^\circ, 15^\circ$ のくさびのほうが、同程度の押しつぶし量に対して、狭い臨界接触幅で密封状態になることを示すと考える。

なお、材質については、図6(a)の焼きなまし銅の $\alpha=30^\circ$ と図6(b)の加工硬化銅を比較して、顕著な差は見られなかった。

3.3 接触圧力について 図6で求めた臨界接触幅より接触圧力 $p_c (=P_c/(w_c l))$ を算出した。接触圧力と表面粗さとの関係を図8に示す。相手接触面が旋削仕上げ面 ($R_y=3.6 \sim 119 \mu\text{m}$) のデータに、ばらつきが見られるが、これは w_c に含まれる測定誤差のためである。

図8より、加工硬化銅の p_c (図8中では▽印) は約

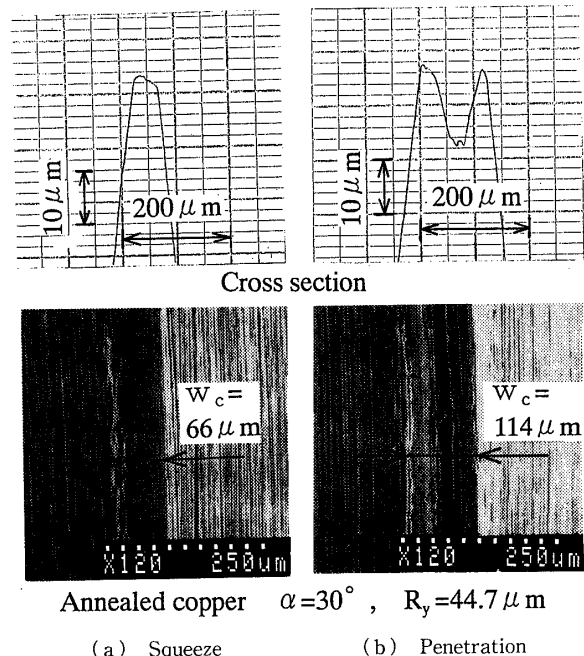


Fig. 5 The contact appearance of the wedge-shaped asperity after the test (SEM micrographs). Figure (a) shows the flat surface squeezed by the valley-to-valley portion on the mating turned surface, while Fig.(b) shows the hollow indented by the peak-to-peak asperity on the mating turned surface

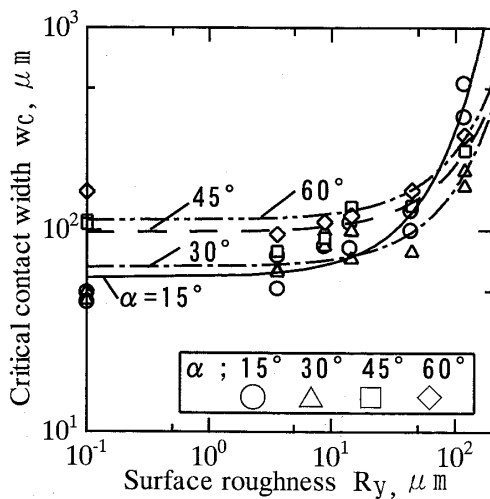
700 MPa, 焼きなまし銅の p_c は 500 MPa 近傍の値を示すことがわかる. この値は, 既報⁽⁶⁾⁽⁷⁾で調べたオーバル形や平形金属ガスケットの $p_c \approx 200$ MPa (材料の引張強さ) と比べて高い. この点が, くさび形メタルシールの特徴である.

また, 接触圧力は平面の表面粗さにかかわらず一定値をとることがわかる. すなわち, 接触圧力は表面粗さ等の2次の要素の影響を受けにくいことを示しており, くさび形状を考慮したすべり線場などで第1近似的に予測することが可能であることを示唆している.

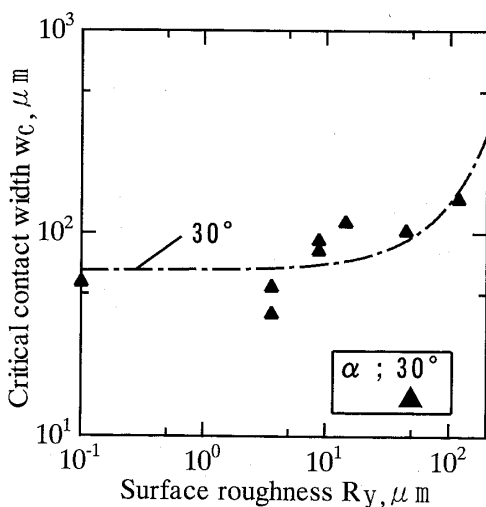
3.4 くさびの接触圧力について 3.5節では臨界押付け力 P_c/l を接触圧力 p_c と接触幅 w_c の積として求める. 現在のところ接触幅 w_c は, 表面粗さの影響

を受けるために実験で求める以外方法はない. しかし, 接触圧力 p_c はすべり線場で求まる可能性があるので, 接触圧力をもう少し吟味することにした.

3.4.1 押しつぶし・押し込み実験 下部試料が旋削面の場合, 上部試料のくさび形突起には異なった2種類の接触形態が生じることを2章の実験のところで述べた. 図5に示した, 旋削谷部によるくさび押しつぶしと旋削山部による押し込みである. 図9(a)は突起の押しつぶしの結果で, 図9(b)は突起の押し込みの結果である. 図9(a)の焼きなまし銅では, 図7で示した, くさび先端部の丸みの影響が現れているため, $P/l \geq 20$ kN/m の範囲において考察する. 焼きなまし銅の結果を見ると, どちらも p_c は約 500 MPa となっている. また, 加工硬化銅の結果も図9(a)の押しつぶしの場合の値約 710 MPa と図8の p_c の値である約 700 MPa は非常によい一致を示している. したがって, 環状くさび形メタルシールの接触圧力 p_c を計算する場合, 押しつぶしによる接触圧力 p_m で評価して

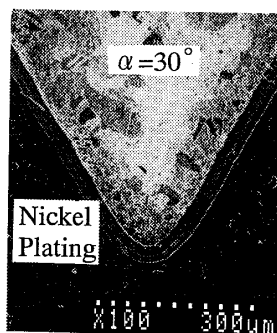


(a) Annealed copper



(b) Work-hardened copper

Fig. 6 The relationship between critical contact width required for sealing w_c , and surface roughness, R_y , on the mating surface



α	$r, \mu\text{m}$
15°	38
30°	40
45°	87
60°	95

Fig. 7 The cross-section of the apex of the wedge-shaped asperity (SEM micrograph). The r -values show the radius of the apex of the wedge-shaped asperity

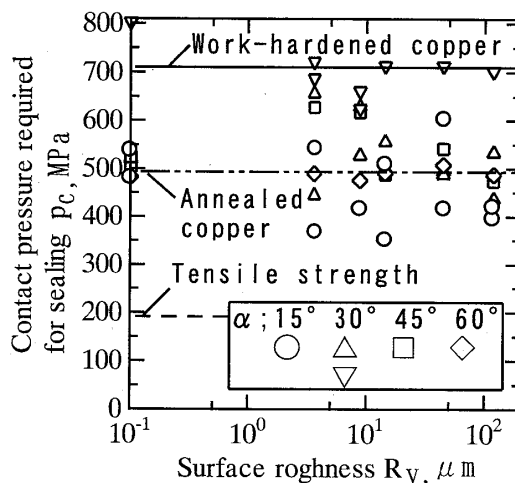


Fig. 8 The relationship between contact pressure required for sealing, p_c , and surface roughness, R_y , on the mating surface

よいことになる。

3.4.2 押しつぶしにおける接触圧力の計算 くさび形突起の押しつぶしを取扱ったすべり線場理論がある。図10に、解析に使用したすべり線場を示す。このモデルは、くさびの半頂角 α が約 $14^\circ \sim 90^\circ$ まで使用することができる。

$$P_m = 2k(1 + \phi) \dots\dots\dots (1)$$

$$\tan \alpha = \frac{\tan \phi (2 \sin \phi + 1)^2}{4(\sin \phi + 1) \sin \phi} \dots\dots\dots (2)$$

$$k = \sigma / \sqrt{3} \dots\dots\dots (3)$$

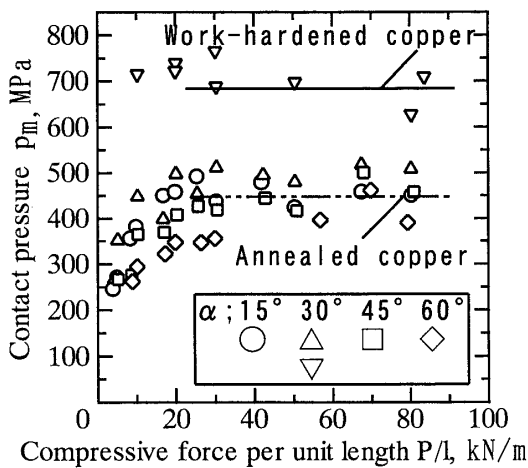
まず最初に、式(2)を用いてくさび半頂角 α より、扇形すべり線場の角度 ϕ を求める。角度 ϕ を式(1)に代入することで、塑性流動圧力すなわち接触圧力 p_m が求まる。ここで、 k は降伏せん断圧力であるが、 σ を単軸の圧縮降伏応力として式(3)より求まる。しかし、以上の解析では、くさび半頂角 α が接触圧力 p_m に及ぼす影響のみしか考慮できない。

次に、材料の加工硬化を考慮するために、すべり線場内の平均ひずみ ϵ を次式より求める⁽¹²⁾。

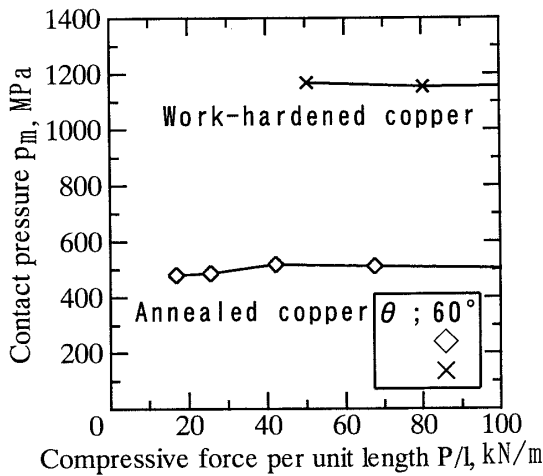
$$\epsilon = \frac{2(1 + \phi) \cos \phi}{(3 + 2\phi)(1 + 2 \sin \phi)} \dots\dots\dots (4)$$

図11に示す真応力-真ひずみ曲線より、求めた平均ひずみ ϵ に対応する真応力 σ を得ることができる。加工硬化銅については、式(4)で求まるひずみに初期のひずみ87%を加えた上で真応力を求めた。式(3)で真応力 σ を降伏せん断圧力 k に変換して式(1)に代入すれば、加工硬化を考慮した接触圧力 p_m を求めることができる。

加工硬化銅と焼きなまし銅について、以上の計算により求めた接触圧力 p_m とくさび半頂角 α の関係および図9(a)より求めた実験値($P/l \geq 20 \text{ kN/m}$ における平均値)を図12に示す。図12中の◇印は、文献(11)図7から求まる実験値を示す。加工硬化銅では半頂角 α が大きくなるほど接触圧力は大きくなった。これは、半頂角が大きいほど押しつぶしに対する抵抗力が高いことを示している。これに反して、焼きなまし銅の場合は、くさび半頂角が大きくなると接触圧力は横ばいか減少傾向を示した。これは、くさび半頂角



(a) Squeeze



(b) Penetration

Fig. 9 The relationship between contact pressure, p_m , on the wedge-shaped asperity and compressive force P/l

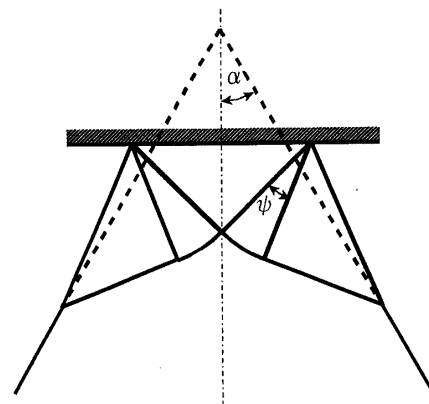


Fig. 10 Slip line field of a wedge flattening

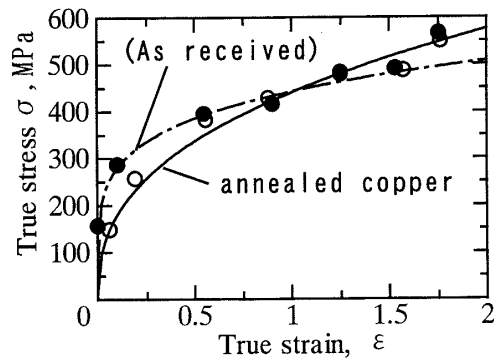


Fig. 11 True stress-true strain diagram obtained from compression test

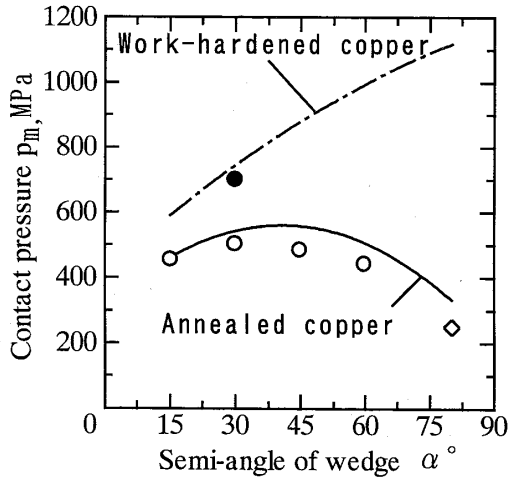


Fig. 12 The relationship between contact pressure, p_m , and semi-angle, α , of wedge for squeeze. The value of \diamond mark was obtained from reference (11)

α が大きくなるほど平均ひずみが小さくなるので、降伏せん断応力が上昇しないことが原因である⁽¹³⁾。

3.5 臨界押付け力について ここでは、気密開始点の臨界押付け力 P_c/l (3.2 節で定義) と接触面の表面粗さ R_y との関係について検討する。図 4 から求めた P_c/l に対して R_y との関係を図 13 に示す。図中の曲線は、図 6 で示した近似値 w_c と図 12 で示した計算値 p_m を接触圧力 p_c と見なして計算した P_c/l の値である。すなわち P_c/l は

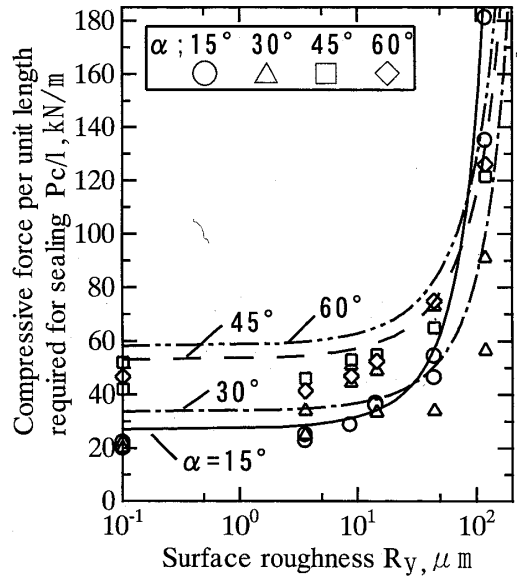
$$P_c/l = p_c w_c \approx p_m w_c \dots\dots\dots (5)$$

により算出される。図 13(a) 中の $\alpha=60^\circ, 45^\circ$ の計算値は実験値よりわずかに高い。これは、 p_m の値として実験値よりわずかに高い計算値(図 12 参照)を採用したためである。また、図 13(b) 中の実験値は計算値と比べて、ばらつきが見られるが、全体的には、図 13 中の実験値と計算結果はほぼ一致している。図 13 より、 R_y に関しては、 P_c/l は R_y の減少に伴って減少し、 $R_y \leq 20 \mu\text{m}$ (ラップ鏡面と旋削面) の P_c/l は $R_y = 100 \mu\text{m}$ の値と比べて約 50% 以下となっている。また、 α に関しては、 P_c/l は α の減少に伴って減少する。 $R_y \leq 50 \mu\text{m}$ の範囲では、 $\alpha=30^\circ, 15^\circ$ の P_c/l は $\alpha=60^\circ, 45^\circ$ の値と比べて低く、 $R_y = 0.1 \sim 120 \mu\text{m}$ の範囲では、 $\alpha=30^\circ$ の P_c/l が全体的に低い。

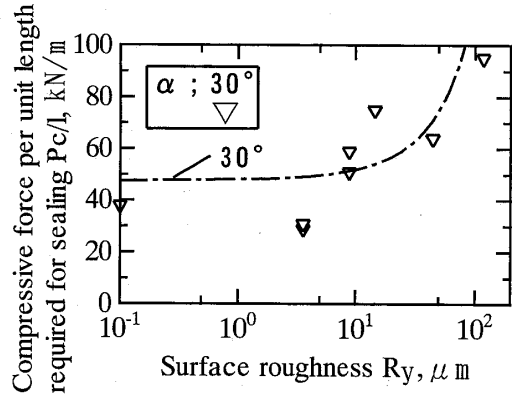
最後に、 P_c/l を低くする R_y と α の値として、 $R_y \leq 20 \mu\text{m}$ (ラップ鏡面と旋削面)、くさび稜線部の加工精度を考慮して $\alpha=30^\circ$ の値を推奨する。

4. 結 言

くさび形メタルシールの基本特性について、接触面



(a) Annealed copper



(b) Work-hardened copper

Fig. 13 The relationship between compressive force per unit length required for sealing, P_c/l , and surface roughness, R_y , on the mating surface

の表面粗さ(ラップ鏡面仕上げで $R_y \leq 0.1 \mu\text{m}$, 旋削仕上げで $R_y = 3.6 \sim 119 \mu\text{m}$)およびくさび半頂角 ($\alpha = 15 \sim 60^\circ$) を変えて実験的に調べた。さらに、くさび形突起の接触圧力を計算で求め、臨界押付け力を予測した結果、次のような結論が得られた。

- (1) 臨界押付け力 P_c/l は R_y と α の減少に伴って減少する傾向にある。 P_c/l を低くする R_y と α の推奨値は、 $R_y \leq 20 \mu\text{m}$ (ラップ鏡面と旋削面)、 $\alpha = 30^\circ$ である。
- (2) 臨界接触幅 w_c は、相手面の表面粗さ R_y やくさび稜線部の加工精度により影響を受け、 R_y および α の減少に伴って減少する。 w_c の値は、 $R_y \leq 20 \mu\text{m}$ において約 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ であった。
- (3) 臨界押付け力 P_c/l は、接触圧力 p_c と接触幅 w_c の積で求めることができる。 p_c は材料の加工硬化

を考慮したすべり線場より求めることができ、 w_c は相手面の影響を受けるため実験的にしか求めることはできなかった。

(4) くさび形メタルシールの接触圧力 p_c は、一般に使用するガスケットの p_c 値(ガスケット材料の引張強さ)より約2倍と高い。

文 献

- (1) 石油工業用リングジョイントガスケットおよびみぞ, JPI-7 S-23, (1983).
- (2) 液圧用ホースアセンブリ継手金具および付属金属, JIS B 8363, (1994).
- (3) Roth, A., *Vacuum Sealing Techniques*, (1966), 410, Pergamon Press.
- (4) 野田尚昭・ほか3名, 機論, **66**-643, C(2000), 966.
- (5) 船橋鉦一・中村 隆・馬淵英二, 潤滑, **33**-10(1988), 783.
- (6) 松崎良男・風巻恒司, 機論, **53**-489, C(1987), 1091.
- (7) 松崎良男・風巻恒司, 機論, **53**-491, C(1987), 1482.
- (8) 松崎良男・風巻恒司, 機論, **55**-515, C(1989), 1729.
- (9) 松崎良男・細川一夫・船橋鉦一, 機論, **57**-537, C(1991), 1723.
- (10) 松崎良男・船橋鉦一・細川一夫, 機論, **57**-543, C(1991), 3669.
- (11) 松崎良男・船橋鉦一・細川一夫, 機論, **58**-551, C(1992), 2186.
- (12) 進藤明夫, 機論, **27**-176, (1961), 447.
- (13) Nitta, I・ほか3名, *Wear*, **146**(1991), 325.