

旋削加工を施行した各種密封材料の漏れ特性

風 卷 恒 司

The materials used in this experiment are copper, aluminum alloy casting and metal impregnated carbon-graphite which were finished by lathing.

As the results of experiment, it was found that the analytical values of equivalent gap obtained by applying the analytical theory of the mechanism of contact between metal surfaces to the surface irregularities of the threads which were worked by lathing are in agreement with the experimental values deviation about 10 %.

1. ま え が き

完全な幾何学的平面を作り出すことは、現在の加工技術をもってしては不可能といわれており、自然界にこれに近い状態を探し求めると、方解石、雲母などの鉱物結晶のへき開面が階段状微視的平面（ $\sim 3 \text{ \AA}$ の平面度）を形成している⁽¹⁾といわれる。しかし、これとても非常に微少の範囲内のことで、巨視的平面（ $\sim 1 \text{ mm}^2$ 以上）はほとんど存在しないと考えられる。したがって、どのような工作条件であっても金属加工表面には必ず表面あらさおとつ（以下、突出部という）が存在することになる。このような金属加工面を相互に圧着する場合にはその間に空隙を生じ、これは圧着力を増大しても皆無とはならず、かつ、一般に迷路とはならないことが知られている。すなわち、接触面を構成する固体表面を境界としてその周囲（内と外側）にある流体は、その接触面間の空隙を通して自由に出入することとなる。一般的にいてその漏れ量は微少の場合が多いが、機器装置の種類によっては重大な問題を引き起こすこともあり、例えば、最近の化学装置、真空装置などでは、この微小漏れが公害の発生およびその基本的性能を決定することになる。

本文は、密封材料として広く採用されているカーボン、銅およびアルミ材に旋削加工を施行した試料

を剛体平面と考えられる基礎盤（ $H \leq 0.3 \mu\text{m}$ 、硬さ $H_v \cong 760$ ）に押し付けた際の接触面間からの漏れ特性について述べる。その結果、試料表面の突出部の接触機構から導かれる相当すきま数値が漏れ実験から導かれる相当すきま数値と比較的によく一致することが確かめられた。

記 号 表

本文で用いている主な記号の意味は、つぎの通りである。

h_c : 突出部(円すい台と仮定)の中央線高さ

h_{co} : 同上 (押付前)

H_{maxo} : 突出部の最大高さ (押付前)

2γ : 突出部の円すい角

s : 突出部の基底面積を、その先端面積で除した値

p_c : 押付面圧

H_{ep} : p_c が作用している際の、接触面間の流体漏れに対する相当すきま

$H_{ep}(E)$: 同上時の、漏れ実験結果から求まる相当すきま

$H_{ep}(C)$: 同上時の、突出部接触機構の計算から求まる相当すきま

σ^* : σ_B または、圧縮強さを指す

σ_B : 引張強さ

χ : 突出部の弾性挙動率

旋削加工を施行した各種密封材料の漏れ特性

表1 実験材料の性質

実験材料		機械的性質			熱処理
種別	材質	縦弾性係数 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	かたさ	
押付材	CuB	1.3×10^4	22.0	H _v 43	市販のまま
	アルミ合金 金 鑄物	7100	26.0	H _v 90	同上
	密封用カーボン材	900	10.0*	H _v 60	同上
基礎盤	SKS2	~	~	H _v 760	油焼入れ

(注) *印は圧縮強さを示す。

(2)各押付材の化学成分はつぎの通り。

CuB		化学成分%							
Cu		Cu	Si	Fe	Mn	Zn	Cr	Mg	A
Cu : 99.96%, P _b : 0.0030%, S : 0.0043%		0.02	0.06	0.20	0.02	0.02	0.25	1.06	残部

密封用カーボン材		化学成分%							
Al		Fe	Mg	シリカ	Ca	Cu	Na	Ti	黒鉛
0.1		0.1	0.1	0.1	痕跡	痕跡	痕跡	痕跡	残部

表2 試料に対する旋削加工条件

試料の種類	旋削加工条件	
	最初の表面加工	最後の仕上加工
CuB	バイト形式: 25°, -19°, -1, -, -, 24mm. 主軸回転数: 76R.P.M. 送り: 0.08mm 切込み: 0.04mm	バイト形式: 18°, 3°, 21°, 15°, 54°, 34°, -. 主軸回転数: 76R.P.M. 送り: 0.25mm 切込み: 0.02mm
アルミ合金 鑄物	バイト形式: CuB材と同 主軸回転数: 76R.P.M. 送り: 0.11mm 切込み: 0.03mm	バイト形式: CuB材と同 主軸回転数: 76R.P.M. 送り: 0.25mm 切込み: 0.02mm
密封用炭素材	バイト形式: 12°, -11°, -1, -, -, 102mm. 主軸回転数: 76R.P.M. 送り: 0.04mm 切込み: 0.01mm	バイト形式: CuB材と同 主軸回転数: 76R.P.M. 送り: 0.25mm 切込み: 0.02mm

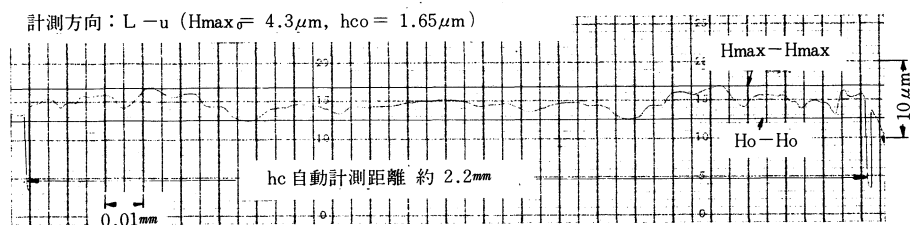
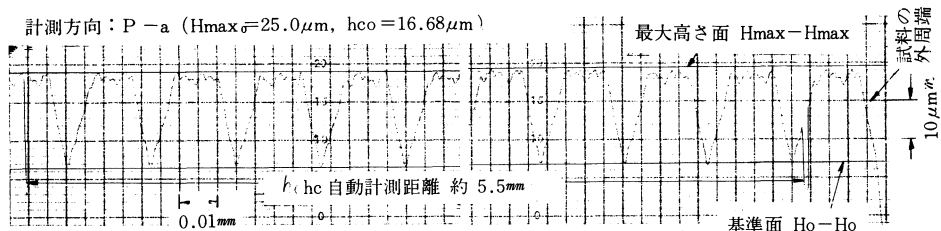
表3 表面あらさ数値 (押付前)

数値単位: μm

表面あらさの種類		中央線高さ hco						最大高さ Hmax ₀						
種別	材質	表面あらさの計測方向						表面あらさの計測方向						
		P 方向			R 方向			P 方向			R 方向			
		a	b	c	l	m	n	a	b	c	l	m	n	
		L 方向						L 方向						
		p	q	r	u	v	w	p	q	r	u	v	w	
押付材	CuB	16.68	16.97	17.10	-	-	-	16.92	25.0	25.0	25.0	-	-	-
	アルミ合金 鑄物	1.43	1.41	1.18	1.65	1.39	1.53	1.43	4.8	3.1	2.8	4.3	3.8	4.2
	密封用炭素材	17.56	16.80	17.37	-	-	-	17.24	26.0	26.0	26.4	-	-	-
基礎盤	SKS2	1.61	1.79	1.52	1.65	1.70	1.82	1.68	3.0	3.2	2.8	3.8	2.8	3.1
	SKS2	14.60	15.56	14.63	-	-	-	14.93	22.0	22.5	21.5	-	-	-
		3.24	3.97	3.82	2.90	3.26	3.65	3.47	4.4	5.3	5.3	4.6	4.5	5.5
		Hmax < 0.3												

(注) 1.表面あらさの計測方向の記号、P、R およびLの意味は、文献(5)を参照されたい。

2.各試料に対して、上段の数値はP方向、下段の数値はL方向、をそれぞれ示している。



(その1) 材質: CuB

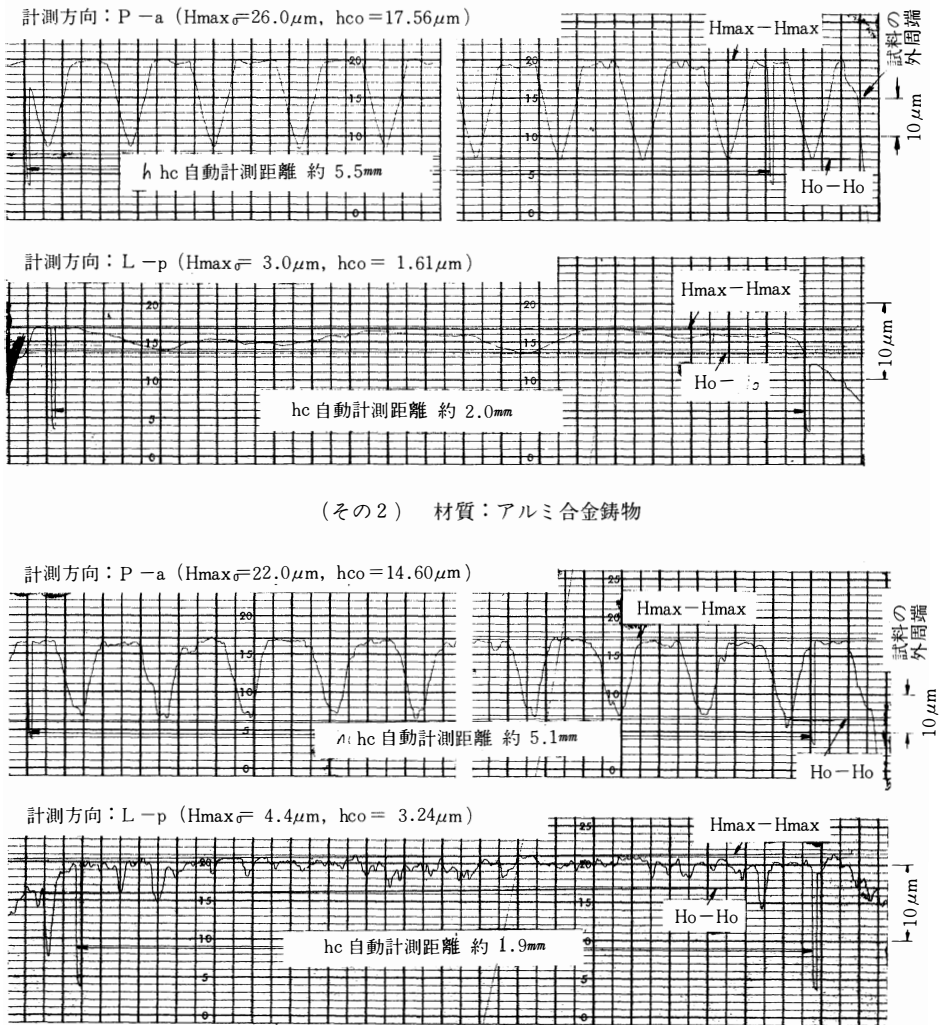


図1 試料の表面あらさ状態 (押付前)
(加工方法：旋削)

2. 実験装置、実験材料

実験装置、試料の形状および実験要領は別報⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾と同様であり、実験材料の性質、旋削加工条件、表面あらさ数値および表面あらさ状態の一例を表1,2,3および図1に示す。ここで、図1中に記載してある「hc自動計測距離」は、触針式表面検機(タリサーフ4型)にデジタル積分計(タケダ理研製、型式TR-2215A)と著者の考案になる変換装置とを組合

わせて、表面あらさ曲線の記録と同時に曲線の描く面積を自動記録させることによってhc値を迅速に求めるようにしたもので、その詳細は別報⁽⁴⁾に記述してある。

旋削加工を施行した各種密封材料の漏れ特性

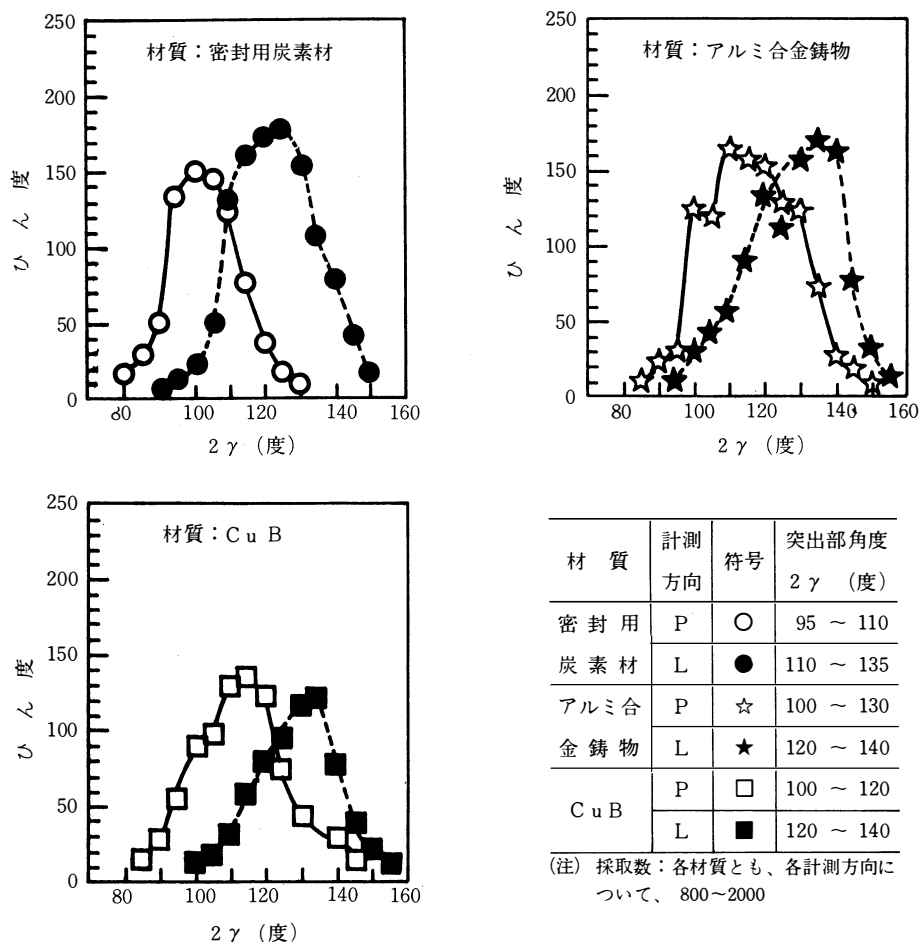


図2 突出部角度の分布特性
(加工方法：旋削仕上)

3. 実験結果および考察

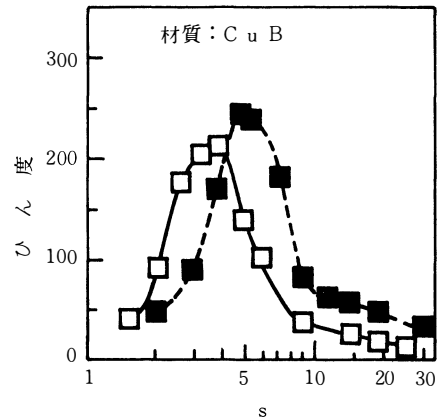
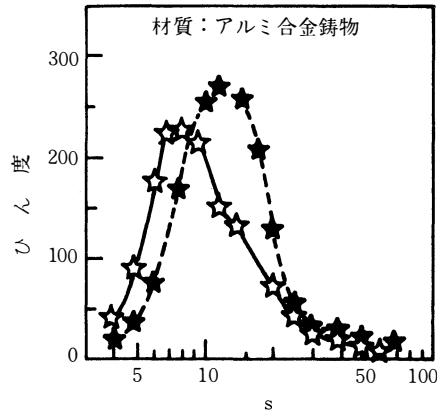
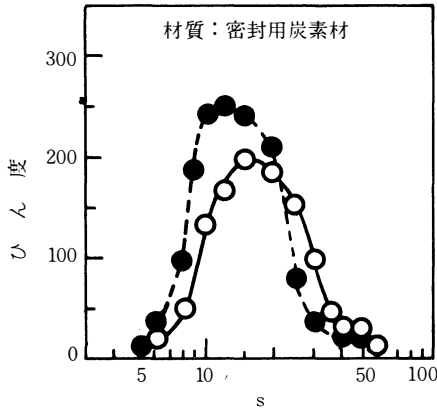
3.1 γ値 各材質に対するγ値の分布特性を図2に示す。ここで、計測方向の記号P,Lの意味は、それぞれ、試料表面の半径方向(旋削溝に対してほぼ垂直)、旋削溝に対して接線方向を表わしている。各材質とも、γ値の分布特性は計測方向によってある程度の差異のあることが認められる。

すなわち、L方向のγ値範囲はP方向のそれと比較して20~25° 角度の大きな方へ移行している。この計測結果に基づいて、旋削面に対して採用するγ値については下記のように考える。旋削面を表面あらさ≒0の面に押し付けた際の接触面間からの流体の漏れ状態には、扇形状流れと旋削溝に沿ってのう

ず状流れ(ただし、外観上)との二形式があることが解っている⁽⁵⁾が、本試料の場合には、すべて後者の流れであることが確かめられている^(注1)。この結果、本実験における接触面間の漏れ現象に関しては、旋削面の山の領域に重点を置かなければならないので、L方向の値を採用して表4のようにとった。

表4 計算に用いるγ, k 値

材質	γ (度)	k
CuB	135	2.20
アルミ合金鋳物	135	2.20
密封用炭素材	125	2.15



注) 1. 図中の各符号の意味は、
図2と同一である。
2. 採取数: 各符号について
800~2000

図3 s 値分布特性
(加工方法: 旋削仕上)

3.2 s 値 図3にその分布特性を示す。s 値は、 γ 値と同様に統計的性質をもっているため、ある数値範囲に分布することとなり、また、旋削面のようにその表面あらさに方向性を生ずる加工条件の場合には、その計測方向によって数値の分布範囲が異なってくる。図に示すように、金属材料の場合はP方向のs値分布範囲^(注2)がL方向のそれにより小さな数値の方へ分布しているが、炭素材の場合は逆となっている。その理由については不明であるが、旋削バイトなどを含めた工作条件が影響しているように思われる。実験結果に基づいて、各試料に対するs値としては表5に示すようになる。ここで、計算に用いるs値は、 γ 値の場合と同様な理由でL方向の値を採用した。

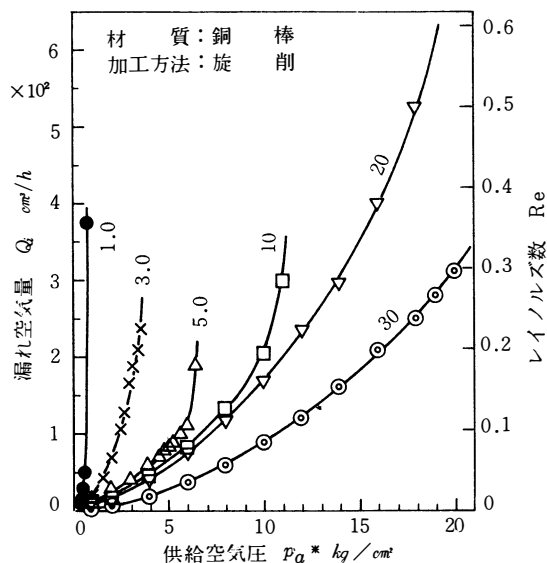
表5 s 値

材 質	s 値 範 囲		計算に用 いるs 値
	計 測 方 向		
	P	L	
C u B	2~10 (3~5)	3~15 (4~8)	5
アルミ合 金 鋳 物	5~25 (6~15)	6~25 (8~18)	7
密 封 用 炭 素 材	9~35 (10~25)	8~25 (9~20)	12

注) () 内数値は、ひん度の高い範囲を示す。

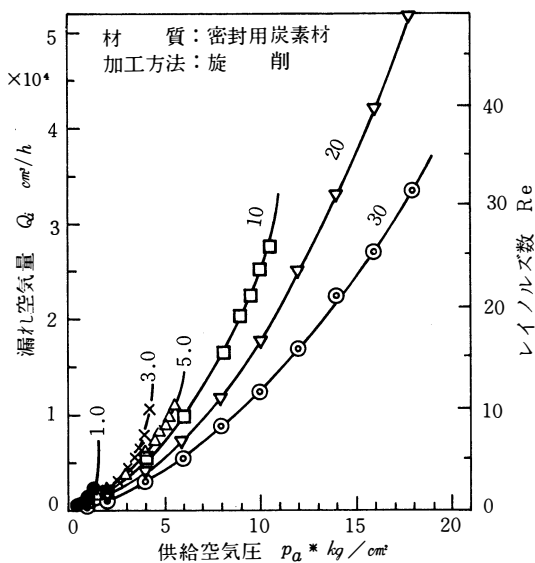
3.3 漏れ空気量 押付面圧 $p_c=1.0\sim30 \text{ kg/cm}^2$ の間で6段階に分けて、それぞれ p_c を一定に保って供給空気圧を低い状態から順次に高くなった際の漏れ実験結果を図4(その1~3)に示す。図から解るように、漏れ量はCuB材が最も少く、ついでアルミ材で、炭素材が最も多い。なお、接触面の漏れ出口(6φmm穴)におけるレイノズル数は、漏れ量の最大の炭素材の場合でも $Re < 50$ で、したがって、実験範囲における接触面間の空気漏れ現象は乱流発生限界範囲以下の粘性層流と考えられる。

旋削加工を施行した各種密封材料の漏れ特性



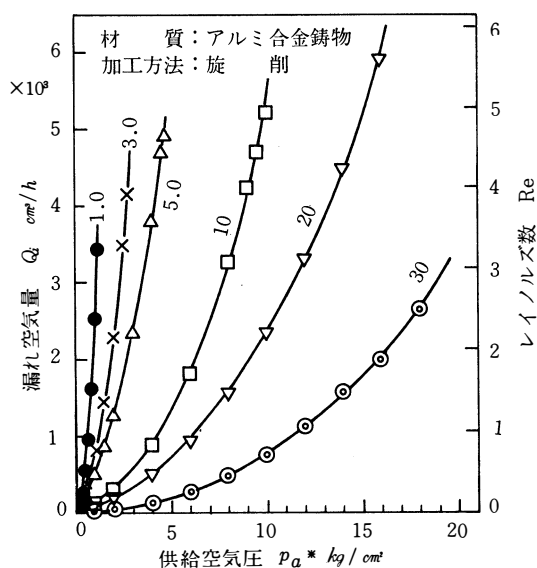
(注：曲線に対する数字は p_c kg/cm^2 を示す)

図4 (その1) 漏れ実験曲線



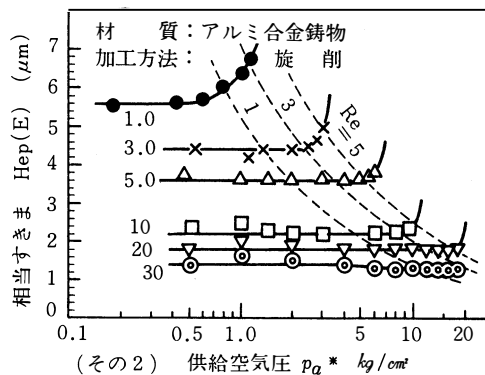
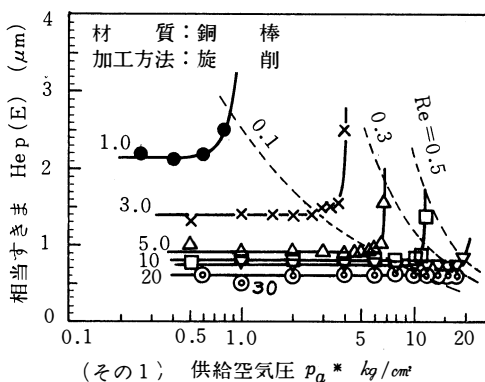
(注：曲線に対する数字は p_c kg/cm^2 を示す)

図4 (その3) 漏れ実験曲線



(注：曲線に対する数字は p_c kg/cm^2 を示す)

図4 (その2) 漏れ実験曲線



注) 1. 曲線に対する数字は p_c kg/cm^2 を示す。
2. 破線はレイノルズ数を示す。

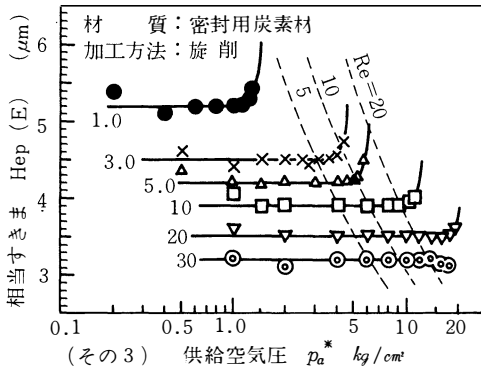


図5 Hep(E) と p_a^* との関係曲線

3.4 実験から求まる相当すきま $Hep(E)$ と供給空気圧 p_a^* との関係 固体接触面間の流体漏れについて流体工学の立場から導かれるすきまの式(文献(2)中の式(26))を図4に適用して求めた関係曲線を図5(その1~3)に示す。図から、 p_c と供給空気圧との平衡条件に達するまでは、各 p_c における $Hep(E)$ はほぼ一定であることを知る。

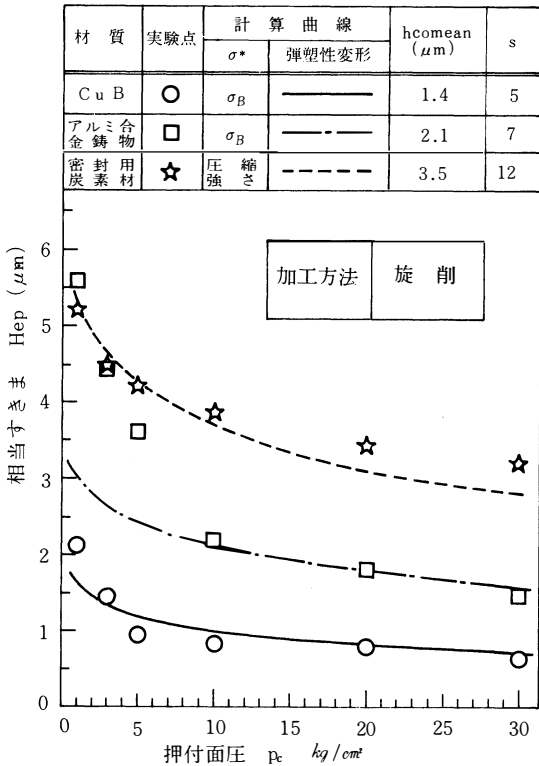


図6 押付面圧に対する $Hep(E)$ と $Hep(C)$ との関係

3.5 押付面圧 p_c と相当すきま Hep との関係

図5から求まる各 p_c に対応する $Hep(E)$ と p_c との関係をプロットして図6に示した。

3.5.1 固体接触機構の理論解析から求まる相当すきま $Hep(C)$ 図6中に計算曲線を描いてあるが、これは突出部の変形を弾塑性的と仮定した際の接触機構の理論解析から導かれる式(別報(文献3)中の式(14))を用いて求まるものである。その際の $\Theta(\beta)$ およびその変換関数 $I(\beta)$ を表6に示す。

表6 $\Theta(\beta) = \{\Psi(\beta)/\chi\} - K(\beta)$

材質：密封用炭素材

機械的性質	E = 900 kg/mm ²		2γ = 125°	
	圧縮強さ = 10.0 kg/mm ²		k = 2.15	
s	5	10	15	50
$\beta \backslash \sigma^*$	圧縮強さ			
0.2	46.549	20.843	14.078	5.020
0.4	32.479	14.612	9.910	3.615
0.6	21.566	9.742	6.630	2.464
0.8	13.560	6.146	4.195	1.583
1.0	8.040	3.655	2.501	0.956
1.2	4.476	2.039	1.398	0.539
1.4	2.333	1.065	0.731	0.284
1.6	1.143	0.523	0.360	0.141
1.8	0.523	0.239	0.165	0.065
2.0	0.223	0.102	0.071	0.028

$$I(\beta) = \left\{ \frac{k\sigma^*}{E} \frac{(\sqrt{s-1})^2}{\sqrt{s}} \right\}^{-a} \exp(-b\beta^2)$$

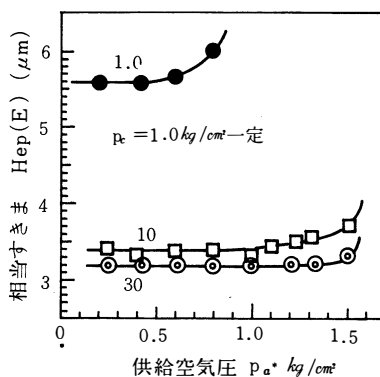
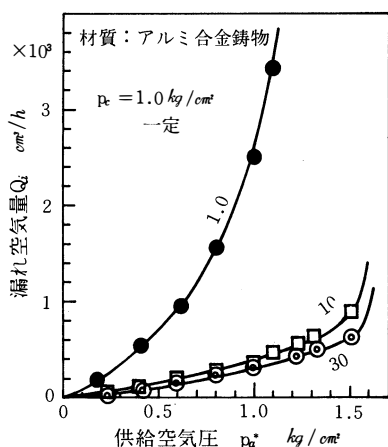
a	0.839		0.793	
	1.373		1.372	
b	1.373		1.372	
s	5	10	15	50
$\beta \backslash \sigma^*$	圧縮強さ			
0.2	31.767	14.507	9.731	3.786
0.4	26.941	12.050	8.255	3.213
0.6	20.472	9.158	6.275	2.445
0.8	13.938	6.237	4.275	1.667
1.0	8.502	3.806	2.610	1.016
1.2	4.647	2.081	1.428	0.559
1.4	2.276	1.020	0.700	0.274
1.6	0.998	0.448	0.307	0.121
1.8	0.393	0.176	0.121	0.048
2.0	0.138	0.062	0.043	0.017

注) 1. σ^* は、表題の式中に対して圧縮強さを用いる。
2. $I(\beta)$ の数値について、その太線に囲まれた範囲は $\Theta(\beta)$ に対して誤差6%以内に収まっている。

旋削加工を施行した各種密封材料の漏れ特性

3. 5. 2 各試料における p_c と Hep との関係
CuB材の場合は、 $Hep(C)$ は $Hep(E)$ とよく一致している。アルミ材の場合は、 $p_c < \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ で $Hep(C) \ll Hep(E)$ となっているが、その理由は p_c の低い状態では旋削面の山の領域が均一に接触しないために、接触面間の漏れがうず状流れではなく、放射状流れとなっていたためと考えられる。しかし、 $p_c \geq \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ では $Hep(C)$ と $Hep(E)$ とはよく一致している。炭素材の場合は、 $p_c \geq \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ では $Hep(C)$ と $Hep(E)$ とはよく一致しているが、これを越えると $Hep(C) \ll Hep(E)$ となる。このことは、炭素材の突出部が弾塑性的というよりも弾性的変形を行なう傾向をもってしているためのように考えられるが、この点については今後さらに研究を続けてゆく考えである。今回の実験範囲では両者の偏差は約10%となっている。

3.6 弾性挙動率、 α 押付面圧を増加した後で、再び元の低い p_c に戻した際に漏れ量がどのようになるかは実用的見地から興味のある問題と思われるので、その実験結果の一例を図7に示す。これから導かれる $Hep(E)$ 値を文献(2)中の式(27)に導いて突出部の弾性挙動率 α を求めれば表7のようになる。炭素材は、他の材質と比較して α 値が大きく、その突出部は多分に弾性的変形を行なうように考えられるが、その表面あらかさが p_c によってあらかなくなる事実も認められているので、必ずしもそのように断定することはできない。今後さらに調査してゆきたい。



注) 図中の数字は、増加した $p_c \text{ kg/cm}^2$ を示す。

図7 p_c を増加した後の一定面圧における漏れ実験

表7 密封材料の弾性挙動率(旋削加工)

押付面圧 p_c kg/cm^2	弾性挙動率 α % ($p_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 基準)		
	材 質		
	CuB	アルミ合金鋳物	密封用炭素材
1.0	3.8	3.5	8.0
3.0	4.0	4.3	7.5

4. む す び

供試材として、従来から一般に密封材料として使用されている銅、アルミ合金鋳物および炭素材を用い、かつ、突出部の分布に方向性のある旋削加工を施行し、これらの試料を表面あらかさ ≈ 0 の剛体と仮定した平面に押し付けた際の接触面からの漏れ実験を行なって検討した結果、つぎの結論を得た。

(1) 良好な旋削加工面を用いた接触面からの流体漏れは旋削溝に沿ってのうず状流れ(外観上)となることは既に認められているが、その際の $Hep(E)$ と $Hep(C)$ とは比較的によく一致する。今回の実験範囲では偏差約10%以内に収まった。ただ、炭素材の場合、 p_c の増加について $Hep(E)$ の減少割合が小さくなり、 $Hep(E) > Hep(C)$ となる傾向については今後共研究を続けてその原因をつきとめたいと考えている。

(2) 固体接触機構から導かれる $Hep(C)$ 値に対する関数 $I(\beta)$ を求めるための係数 a 、 b は、文献(3)中の曲線がそのまま適用される。

(3) 押付面圧が $\sim 30 \text{ kg/cm}^2$ と低い状態では、銅およびアルミ材の旋削面の突出部は比較的に塑性的変形を行なうことが認められる。炭素材に関しては、見掛け上は弾性的のように思われるが、その点については表面あらさの変化状態とともにさらに検討してゆきたい。

注

注1) 文献(5)を参照されたい。

注2) s値範囲について：その最大ひん度を示す数値を s と、その両側において最大ひん度の10～20%のひん度を示す数値を s_1 と s_2 とする。また、“ひん度の高い範囲”とは、最大ひん度の約50%以上のひん度を示す s 値の範囲をいう。

文 献

- (1) 高橋、日本機械学会誌、75-641(昭47-6)、896。
- (2) 風巻、日本機械学会論文集、35-269(昭44-1)、59。
- (3) 風巻、日本機械学会論文集、38-309(昭47-5)、1087。
- (4) 風巻、日本機械学会論文集、40-330(昭49-2)、546。
- (5) 風巻、日本機械学会講演論文集、No.733-3(昭48-3)、135。

受付 昭和48年11月10日