

セラミックスと金属の縮りばめ部結合強度に  
\*  
及ぼす表面あらさと寸法の影響

※		**	
	新田 勇		下田 茂
		***	
	加藤 康司		椎谷 佳弘

The Effects of Surface Roughness and Size on Fitting Strength of Shrink Fit  
between Ceramic and Metal

by Isami NITTA, Shigeru SHIMODA, Kohji KATO and Yoshihiro SHIYA

Ceramic is a better material than metal to use in the corrosive environment or at an elevated temperature. But ceramic is very brittle. Therefore the combined use of ceramic and metal is needed. A simple and sufficiently strong joining technique between ceramic and metal is essential in that case. We thought that shrink fit is one of the most available techniques, compared with welding, diffusion bonding brazing. In the previous work, we made clear that the existence of surface roughness reduced the strength of the shrink fit experimentally and theoretically. But we didn't change the sizes of the specimens in that work. It is thought that the degrees of the reduction of the strength will vary with the size of the outer diameter of the shaft, although the surface roughnesses are the same.

In this paper, the experiments were carried out to obtain the strengths of the shrink fits of various sizes of specimens. And we investigated how the strengths of the shrink fits were reduced by the relationship between the surface roughness and the sizes of the specimens, experimentally and theoretically.

Key Words: Machine Element, Fixing Element, Ceramic, Shrink Fit, Surface Roughness, Strength, Stainless Steel, Size Effect

## 1 緒言

近年、高温及び腐食環境下で使用される機械が多くなってきており、それに伴い機械構造材の性能向上が望まれている。セラミックスは、耐熱性、耐蝕性及び熱膨張係数が小さい等の優れた特性を持っているため、過酷な環境下における機械構造部材としては有望である。しかし一方で、その脆性と機械加工の困難さは機械構造材料として用いられるための大きな欠点になっている。従ってセラミックスの長所を活かし欠点を補って機械構造材料として用いるためには、金属とセラミックスの複合構造が必要になってくる。その際、強度と寿命及び精度を保証した簡便なセラミックスと金属の結合方式を確立することが最大の技術的課題の一つになる。著者らはこの条件を満たす結合方式として金属同士の結合において広く用いられている『縮りばめ』に着目した。そして、縮りばめ部結合強度を予測する計算式を表面あらさを有する個体

表面の接触機構の知識を導入して求め、実験と良い一致を見ることを明らかにした。しかし、縮りばめ部結合強度に及ぼす縮りばめ部の寸法の影響については未だ明らかにされていない。

そこで本論文では寸法の異なる3種類の窒化珪素セラミックスシャフトとSUS304金属リングの対の縮りばめ部結合強度を測定し、縮りばめ部の寸法を変えた時に表面あらさとの関連で縮りばめ部結合強度がどのように変化するかを調べた。

## 2 理論

平面応力問題としてのシャフトとリングの縮りばめの締めしろ $R_s$ と締め付け圧力 $P$ の関係は、弾性限度内では(1)式で与えられる。

$$R_s = C D_1 P \quad (1)$$

ここで

$$C = (1 - \nu_1) / E_1 + \{ (D_0^2 + D_1^2) / (D_0^2 - D_1^2) + \nu_2 \} / E_2$$

$E_1, E_2$ : シャフト及びリングの弾性係数

$\nu_1, \nu_2$ : シャフト及びリングのポアソン比

\* 昭和61年4月3日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年8月12日。

\*\* 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

\*\*\* 正員、東北大学工学部(〒980 仙台市荒巻字青葉)。

\*\*\*\* 学生員、新潟大学工学部。

$D_0$  : リング外径

$D_1$  : リング内径

更に締めしろと締め部とのせん断強度の関係は次式で与えられるものとする。

$$\tau = \mu P \quad (2)$$

$\mu$  : シャフトとリング間の摩擦係数

(1)式で示される関係は表面あらさがないと仮定した時の幾何学的な円筒面の接触に対してのものである。

しかし、現実には機械加工を行った際に表面微小突起及びうねりが形成され締めしろとせん断強度の関係に大きく影響するものと考えられる。従って表面突起の変形<sup>(2)</sup>を考慮しなければ、締め部とのせん断強度は正確に予測することができない。SUS304の旋盤仕上げ面の表面突起による荷重と変位の関係について著者らは以下の様な実験式を得ている<sup>(3)</sup>。尚この実験式の適用範囲は見かけの接触圧力 $0.35\text{MPa} \sim 100\text{MPa}$ の範囲である。

$$\delta_1(P) = R_{\max}(0.18P^{0.17} - 0.12) \quad (3)$$

$R_{\max}$  : 最大あらさ

従って表面微小突起の変形を考慮した場合に締め付け圧力 $P$ を得るためには

$$H = R_0 + 2\delta_1(P) \quad (4)$$

の締めしろ $H$ が必要となる。

### 3 実験方法

試験片の寸法と形状を図1に示す。リング内径の $\phi 25 - \Delta$ は25mm付近の寸法であることを示す。本論文では便宜上これらの試験片をまとめて呼ぶ時はリング内径25mmの試験片と呼ぶことにする。他の内径のリング試験片についても同様に呼ぶことにする。シャフト、リングの材料はそれぞれ窒化珪素セラミックス $\text{Si}_3\text{N}_4$ とオーステナイト系ステンレス鋼SUS304である。

$\text{Si}_3\text{N}_4$ シャフトの外周は研削されており、SUS304リングの内面は旋盤により加工されて、種々の内径が与えられている。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ シャフトの外径及びSUS304リングの内径ともに三次元測定器(三豊製作所製)により測定した。測定位置はSUS304リングの場合リング端

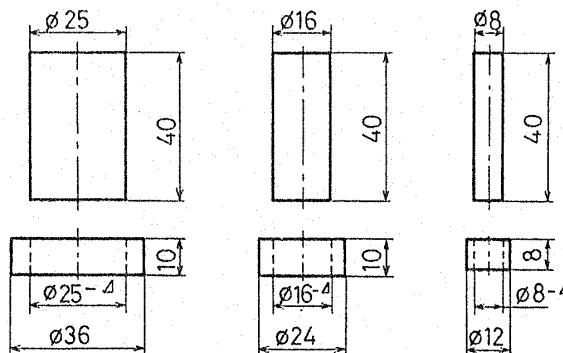


図1 試験片

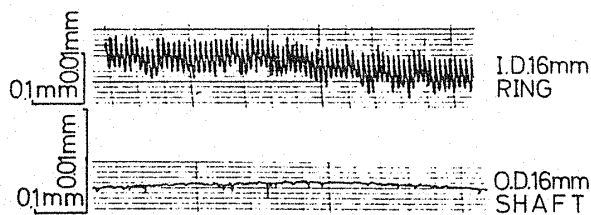


図2 断面曲線

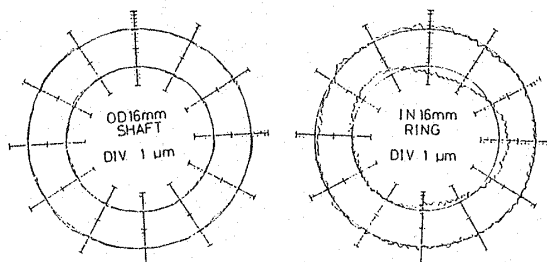


図3 真円度

表1 材料特性値及び最大あらさ

	Young's Modulus (MPa)	Poisson's ratio	Rmax ( $\mu\text{m}$ )		
			$\phi 8$	$\phi 16$	$\phi 25$
$\text{Si}_3\text{N}_4$ SHAFT	$3.04 \times 10^5$	0.27	1~2	1~2	2~4
SUS304 RING	$1.94 \times 10^5$	0.30	13~15	6~10	14~17

面より2mm離れた所の2箇所であり、これらの値を平均してリング内径とした。測定の結果テーブルのはだしい試験片は取り除いた。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ シャフト外径の測定もSUS304リングと同様であり、その測定位置はリングとはめあわせた時にリングの測定位置とほぼ一致する所とした。図2には $\text{Si}_3\text{N}_4$ シャフト外径SUS304リング内径の軸方向に測定した断面曲線の一例を示す。又図3には $\text{Si}_3\text{N}_4$ シャフト外周SUS304リング内周の真円度を測定した結果の一例を示す。この真円度の測定位置も寸法測定位置とほぼ一致する所とした。

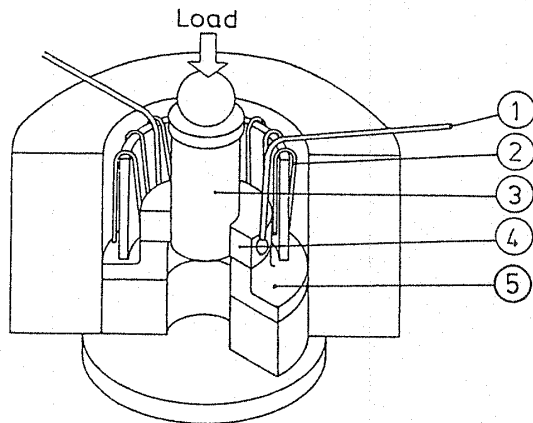


図4 実験装置

SUS304リングについて、内径8mmの試験片は旋削の際のバイトの剛性が不十分で他の内径のものに比較して真円度が劣る傾向にあった。 $Si_3N_4$ シャフトの真円度はSUS304リングのものに比べて良好であった。 $Si_3N_4$ シャフト、SUS304リングのヤング率、ポアソン比、及び各寸法の試験片の最大あらさ $R_{max}$ を表1に示す。

図4に試験装置の概略を示す。装置は石英ガラス管にニクロム線⑤を巻いた加熱装置とリング④下のリング受け台③及びそのまわりの断熱材より構成されている。この装置全体を万能試験機のベッドにセットした。実験の前に $Si_3N_4$ シャフト、SUS304リング共にアセトン中で超音波洗浄を行った。SUS304リングをリング受け台にセットした後ニクロム線により加熱し、 $Si_3N_4$ シャフトがその自重で挿入されるまでリングを加熱した。リングにシャフトを挿入した状態で室温まで冷却した。この後、万能試験機により徐々に軸方向に荷重を加えてゆき、締めばめ部にすべりが生じる時の荷重すなわち最大荷重を測定した。尚本実験ではこの最大荷重を締めばめ部の見かけの接触面積(リング内面の面積)で割った値を、その締めばめのせん断強度と呼ぶことにする。

#### 4 実験結果

リング内径25mm, 16mm及び8mmに対しての締めばめ部せん断強度と締めしろの関係を図5, 6及び図7に示す。図中の白丸が実験値である。図5中 $R_{max}=0.016mm$ とは理論計算を行う場合に用いた最大あらさを表している。計算においては、 $Si_3N_4$ シャフトの表面あらさがSUS304リングのものに比べて小さいこと、又硬さも高いことなどの理由によりシャフトの表面突起の変形は無視した。図中に示した摩擦係数は前回の

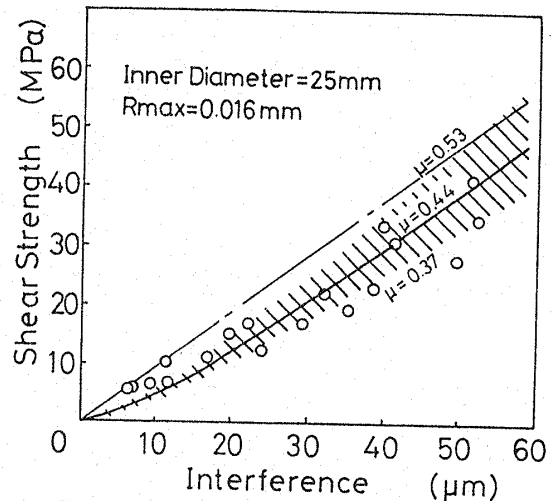


図5 せん断強度と締めしろの関係

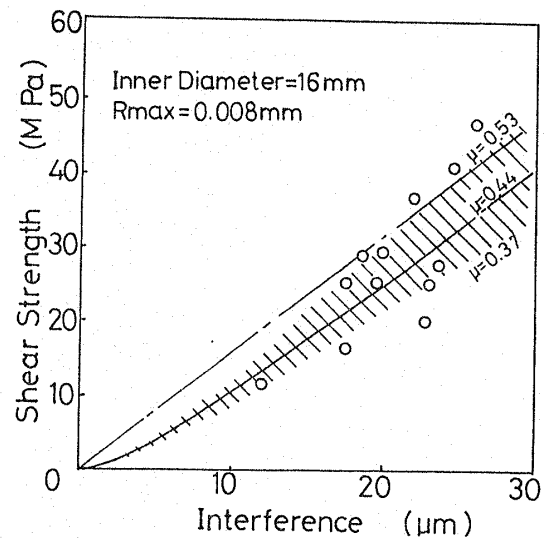


図6 せん断強度と締めしろの関係

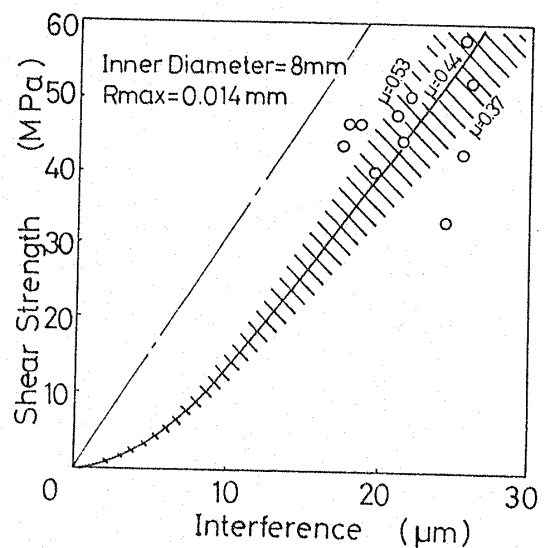


図7 せん断強度と締めしろの関係

実験<sup>(1)</sup>で求めたもので、その範囲は0.53~0.37、その平均は0.44であった。この摩擦係数に対応する表面突起の変形を考慮したせん断強度の計算値をハッチングで示した。締めしろが小さい所を除いてこの計算値は実験値とよく一致しているのが分る。図中の一点鎖線は $\mu=0.44$ として表面突起の変形を考慮していない(1),(2)式により計算したものである。この様に計算されたせん断強度は実験値より高い傾向にあることが分る。図5,6のリング内径16mm,8mmに対しての結果を見ても、実験値に多少のバラツキはあるものの表面突起の変形を考慮した計算値で締めしろ部の強度が予測できることが分る。

## 5 考察

締めしろ部のせん断強度 $\tau$ は、種々の寸法の試験片に対して表面微小突起の変形を考慮することにより予測できることが分った。しかし、表面微小突起がせん断強度に及ぼす影響の程度は、締めしろ及び試験片の寸法によって変化する。そこでこの変化の様子を調べるために、せん断強度の誤差率を $(\tau_c - \tau) / \tau_c$ と定義して、この誤差率とリング内径により正規化された締めしろの関係を計算し、リング内径により正規化された $R_{max}$ をパラメータにして図8に示した。ここで、 $\tau_c$ は表面微小突起の変形を無視して(1),(2)式から計算したせん断強度である。また、 $\tau$ は表面微小突起の変形を考慮して計算したせん断強度である。計算に際しては $R_{max}=0.012\text{mm}$ 一定とし、リング内径2.5mm,16mm及び8mmでリングの内径と外径の比を25/36一定とした。この様にリングの内径と外径の比を一定にすることにより、正規化された締めしろが同じであれば表面微小突起の変形を考慮しない締めしろ部せん断強度の計算値は試験片の寸法によらず同じになる。この図より、正規化された締めしろが大きくなるに従って表面微小突起によるせん断強度低下の割合が小さくなることが分る。これは、締めしろが大きくなると(4)式中の $\delta_r(P)$ すなわち表面微小突起による変形量が $R_e$ に比べて相対的に小さくなるためである。また $R_{max}$ を一定にして同一の正規化された締めしろの所で比較した場合、内径が小さくなる程、表面微小突起の変形によるせん断強度低下の程度は大きくなること分る。

表面微小突起は締めしろ部のせん断強度を低下させるため、従来より表面を滑らかに仕上げる努力がなされてきた<sup>(4)</sup>。しかし、これは表面微小突起の変形を考慮していなかった為であり、この変形が正しく評価されれば締めしろにおいて必ずしも表面を滑らかに

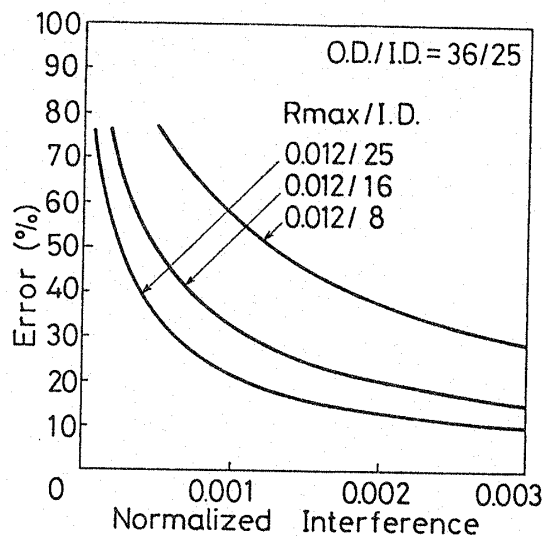


図8 誤差率と正規化された締めしろの関係

仕上げる必要は無くなる。即ち、(4)式の様に表面微小突起の変形を加えた形で締めしろを設計すればはめあい面は荒い仕上げでも良いことになる。はめあい面を荒く仕上げても良いことになれば、かなりの生産工程の簡略化と生産能率の向上が計られると考えられる。

## 6 結言

- (1)セラミックスと金属の締めしろ部結合強度は種々の内径に対して、表面微小突起の変形を考慮することにより予想することが出来た。
- (2)最大あらさ $R_{max}$ を一定にした場合、内径が小さくなる程表面微小突起の変形による結合強度の低下する割合は大きくなる。

### 謝辞

試験片製作については、機械工場の白井健司技官に負うところが多く感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) K.KATO, T.KAYABA, S.SHIMODA AND I.NITTA  
A.S.M.E. 投稿中
- (2) R.CONNOLLY, R.E.SCHOFIELD AND R.H.THORNLEY  
8th International M.T.D.R. Conference(1967)
- (3) T.KAYABA, K.KATO AND I.NITTA  
The Technology Report of the Tohoku Univ.  
49-1 (1984) pp.1-15
- (4) たとえば 岡根 機械の研究 37-1 (1985)  
pp. 15-18

## 討 論

〔質問〕 小泉忠由〔東京工業大学〕

図8において誤差率という言葉を用いているが、一般的に考えられる数学的な意味と少し異なるように思う。ここで用いている誤差率の物理的意味を説明願いたい。

〔回答〕 ご指摘のように図8で用いた誤差率とは数学的な意味の誤差率とは異なる。従来、しまりばめ部の強度計算を行う際に表面微小突起による変形を考慮したものは非常に少なく、ほとんどがシャフト、リ

ングの弾性変形のみを考慮して行われてきている。しかし現実には、固体表現には表面微小突起が存在するので、従来のシャフト、リングの弾性変形のみを考慮して計算したしまりばめ部の結合強度は実際の結合強度よりは高くなる。そこで本論文中では、表面微小突起による変形を考慮した場合の結合強度 $\tau$ と考慮しない場合の結合強度 $\tau_e$ の差を表すために $(\tau_e - \tau)/\tau_e$ を誤差率と定義して用いた。