

# シュリンクフィッターを用いたセラミックスと 金属の締りばめ\*

(種々の熱膨張係数に対する高温結合強度)

新田 勇<sup>\*1</sup>

坂井 勇一郎<sup>\*2</sup>

原 利 昭<sup>\*1</sup>

The Fitting Strengths between Ceramic and Metal using Shrink Fitters  
at Elevated Temperature  
(The Fitting Strengths for Various Coefficients of Thermal Expansion)

Isami NITTA, Yuuichirou SAKAI and Toshiaki HARA

In a previous paper, it was reported that the shrink fitter was able to improve the fitting strength of the shrink fit between a ceramic shaft and a metal ring at elevated temperature. There are two types of the shrink fitters at present, the monolithic type and the bimetal type. In this paper, the fitting strength of the shrink fitted assemblies using the monolithic shrink fitter or the bimetal one was calculated for two ranges of coefficient of thermal expansion,  $0.0\sim 11.7\times 10^{-6}(/^{\circ}\text{C})$  and  $18.8\sim 42.5\times 10^{-6}(/^{\circ}\text{C})$ . For  $18.8\sim 42.5\times 10^{-6}(/^{\circ}\text{C})$ , the assembly using the monolithic shrink fitter was stronger than that using the bimetal shrink fitter when the thickness of the shrink fitter in the radial direction was 4mm. The assembly using the bimetal shrink fitter was, however, stronger over approximately 400°C when the thickness was 1mm. For  $0.0\sim 11.7\times 10^{-6}(/^{\circ}\text{C})$ , the assembly using the bimetal shrink fitter was stronger over approximately 400°C regardless of the thickness.

**Key Words:** Fixing Element, Ceramic, Shrink Fit, Shrink Fitter, Bimetal, Elevated Temperature, High Temperature, Slit, Strength

## 1. 緒言

セラミックスシャフトと金属円筒のこれまでの締りばめの使用限界温度は約200~300°Cであった。そこで、既報においてシュリンクフィッターという新しい機械要素を考案し導入することで、600°Cの高温下でも結合強度が低下しないことを示した<sup>1)~3)</sup>。

モノリシックなシュリンクフィッターを用いた締りばめ締結体を図1に示す。シュリンクフィッターの寸法はできるかぎり小さいことが望ましい。そのためには、シュリンクフィッターを構成する材料の熱膨張係数が高いことが要求される。現在、機械的強度があり熱膨張係数が高い材料としてはSUS304があり、その熱膨張係数は約 $18.8\times 10^{-6}(/^{\circ}\text{C})$ である。しかしこの熱膨張係数の値ではシュリンクフィッターの半径方向の厚さを4mmまたは2mmとすると、高温での結合強度が不十分になる。したがって、より高い熱膨張係数を持つ合金が必要となる。

また、シュリンクフィッターの見かけ上の熱膨張係

数をあげる方法としてシュリンクフィッターをバイメタル構造にする方法がある<sup>3)</sup>。バイメタルタイプのシュリンクフィッターを用いた締りばめ締結体を図2に示す。バイメタルは高熱膨張係数を持つ合金と低熱膨張係数を持つ合金とのクラッド材なので、高温下でのわん曲変形を大きくするためには高熱膨張係数を持つ合金に加えて低熱膨張係数を持つ合金の開発も有効である。熱膨張係数の低い材料としてはSUS403等があり、その熱膨張係数は約 $11.7\times 10^{-6}(/^{\circ}\text{C})$ である。また、インバー合金などの200°C以下の低温域でより低い熱膨張係数を示す合金もあるが、理想的には高温域でも低い熱膨張係数を示しかつ安価で加工し易い合金が必要となる。

ところで、今後材料開発が行われて熱膨張係数が高い材料あるいは低い材料が開発された場合、このような材料を図1に示すモノリシックタイプのシュリンクフィッターとして使用するのが有利かあるいは図2に示すバイメタルタイプとして使用するのが有利かは現在のところ検討されていない。また、検討するための基礎資料さえも示されていない。そこで本研究では、

\* 原稿受付 平成2年6月22日。

<sup>\*1</sup> 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

<sup>\*2</sup> 正員、北陸ガス(株)(〒951 新潟市附船町1の4401)。

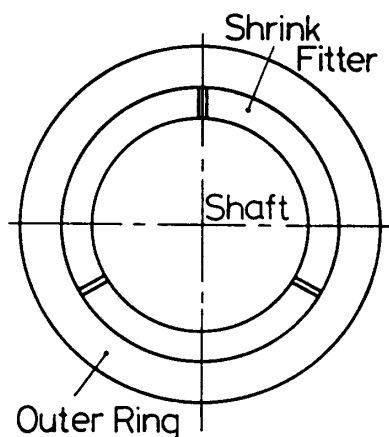


図1 モノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた締め付け締結体

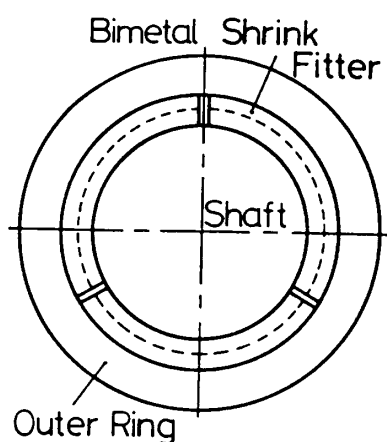


図2 バイメタルタイプのシュリンクフィッターを用いた締め付け締結体

上記の問題を検討するための基礎資料を提供することを目的に、高熱膨張係数を持つ合金が開発された場合あるいは低熱膨張係数を持つ合金が開発された場合の2つの場合について、モノリシックタイプのシュリンクフィッター方式の接合体強度と、バイメタルタイプのシュリンクフィッター方式の接合体強度を数値計算により求め、それぞれの強度を比較した。計算においてはシャフト径を25mmとした。

## 2. 締め付け締結体

計算の対象とした締め付け接合体のモデルは図1と図2に示すようにシュリンクフィッターにスリットが3つ入っているものである。本研究ではSUS304の熱膨張係数の値からアルミ合金の2倍の熱膨張係数の値までの熱膨張係数を持つ合金を使用した場合（高熱膨張合金使用と呼ぶ）と、SUS403の熱膨張係数の値以下の熱膨張係数の値を持つ合金を使用した場合（低熱膨張合金使用と呼ぶ）の2つの場合に分けて検討を行った。

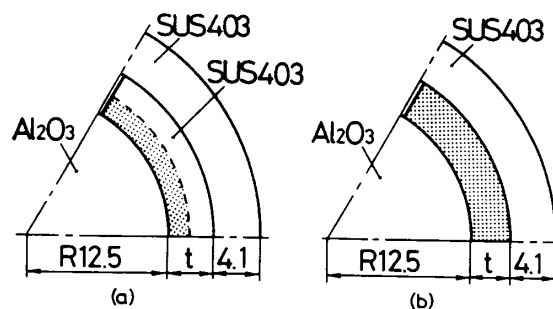


図3 高熱膨張合金使用の場合の締結体  
(a) バイメタルタイプ (b) モノリシックタイプ

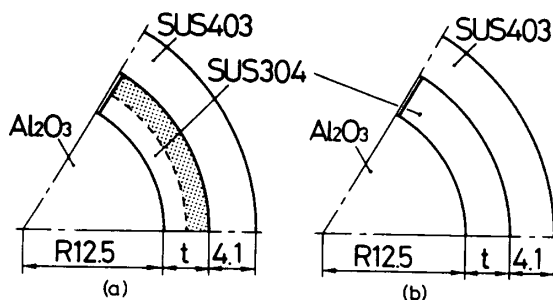


図4 低熱膨張合金使用の場合の締結体  
(a) バイメタルタイプ (b) モノリシックタイプ (SUS304)

図1において、シャフトーシュリンクフィッター界面を内側接触面と呼び、シュリンクフィッターーアウターリング界面を外側接触面と呼ぶことにする。また、図2のバイメタルタイプのシュリンクフィッターで、シャフト側の材料をバイメタルS材 (ShaftのS) と呼び、アウターリング側の材料をバイメタルO材 (Outer RingのO) と呼ぶ。ここで用いるバイメタルは常にバイメタルS材の熱膨張係数がバイメタルO材の熱膨張係数よりも大きくなるように設定した。したがって、バイメタルは高温になるにつれて曲率半径が大きくなるようにわん曲変形する。

シャフト材料に  $Al_2O_3$  セラミックスを、アウターリング材料にSUS403ステンレス鋼を用いることにした。それぞれの材料特性値は表1に示す通りである。

高熱膨張合金使用の場合を図3に示す。図では全円周の1/6の部分のみを示す。図3(a)では高熱膨張合金をバイメタルS材として用い、バイメタルO材としてはSUS403を用いている。図3(b)では高熱膨張合金をモノリシックタイプのシュリンクフィッターとして用いている。高熱膨張合金の熱膨張係数の範囲として、 $18.8 \times 10^{-6} \sim 42.5 \times 10^{-6} (/^{\circ}C)$ とした(表2)。

低熱膨張合金使用の場合を図4に示す。図4(a)では低熱膨張合金をバイメタルO材として用い、バイメタルS材としてはSUS304を用いている。図4(b)ではSUS304をモノリシックタイプのシュリンクフィッター

表1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SUS304, SUS403の材料特性値

	Young's Modulus E (MPa, 20°C)	Poisson's Ratio $\nu$ (20°C)	Coeff. of Thermal Expansion $\alpha$ (0-648°C)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$3.14 \times 10^5$	0.235	$7.6 \times 10^{-6}$
SUS304	$1.93 \times 10^5$	0.30	$18.8 \times 10^{-6}$
SUS403	$2.00 \times 10^5$	0.30	$11.7 \times 10^{-6}$

表2 高熱膨張合金および低熱膨張合金の材料特性値

	E (MPa)	$\nu$	Range of $\alpha$ (1/°C)
High $\alpha$	$0.72 \times 10^5$	0.3	$18.8 \sim 42.5 \times 10^{-6}$
Low $\alpha$	$2.00 \times 10^5$	0.3	$0.0 \sim 11.7 \times 10^{-6}$

E: Young's Modulus,  $\nu$ : Poisson's Ratio  
 $\alpha$ : Coefficient of Thermal Expansion

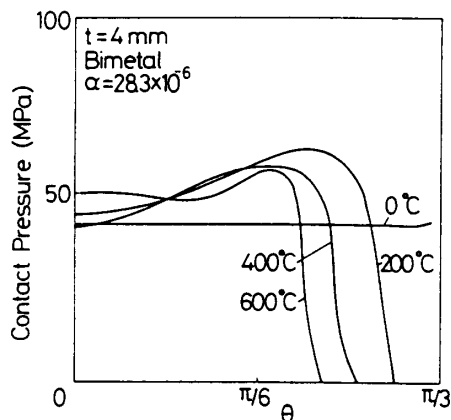


図5 内側接触面の接触圧力と円周方向の位置の関係 (高熱膨張合金使用  $\alpha=28.3 \times 10^{-6}$ , バイメタルタイプ,  $t=4\text{mm}$ )

として用いている。低熱膨張合金の熱膨張係数の範囲として、 $0.0 \times 10^{-6} \sim 11.7 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ とした(表2)。

高熱膨張合金のヤング率はアルミ合金の値を参考にし、低熱膨張合金のヤング率は、SUS304とインパー合金の値を参考にした。各々の材料特性値を表2に示す。

### 3. 計算

計算方法については既報に示す通りであり、塑性変形はしないものと仮定している。変形の対称性より全円周の1/6の部分のみを解析対象とすればよいことがわかる。

計算に際して接触面の摩擦係数は0とした。締めしろは、内側接触面および外側接触面共に半径差で7.5  $\mu\text{m}$ ずつ、直径差で30  $\mu\text{m}$ の締めしろとした。シュリンクフィッターのスリット幅は0mmとした。バイメタルS材とバイメタルO材の半径方向の寸法比は1:1とした。接合体の寸法を表3に示す。

どの材料もポアソン比は温度によらず一定の値をと

表3 縮りばめ締結体の寸法

	Shaft - Shrink Fitter - Outer Ring		
$t=4\text{mm}$	$\phi 25$	$\phi 33$	$\phi 41.2$
$t=2\text{mm}$	$\phi 25$	$\phi 29$	$\phi 37.2$
$t=1\text{mm}$	$\phi 25$	$\phi 27$	$\phi 35.2$

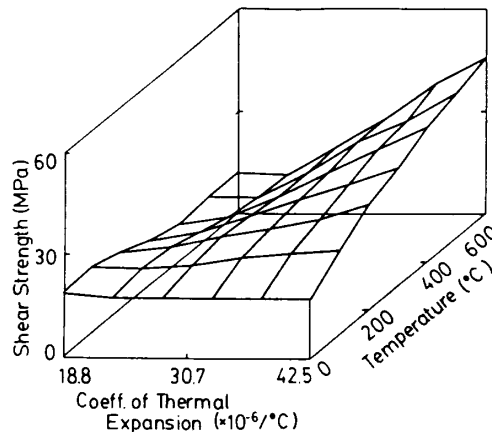


図6 せん断強度に及ぼす熱膨張係数と温度の影響 (高熱膨張合金使用, バイメタルタイプ,  $t=4\text{mm}$ )

るものとした。SUS304とSUS403のヤング率と熱膨張係数は温度の関数とした<sup>2)</sup>。それ以外の材料のヤング率と熱膨張係数は原則的には温度によらず一定とした。

この条件のもとで内側接触面の接触圧力分布を求めた。そして、内側接触面の平均接触圧力に摩擦係数0.4をかけた値をせん断強度と定義し、この値により結合強度を評価した。

### 4. 計算結果

4-1 高熱膨張合金使用の場合 図5は、高熱膨張合金使用の場合の内側接触面の接触圧力分布である。シュリンクフィッターはバイメタルタイプで、半径方向の厚さは4mm、バイメタルS材の熱膨張係数は $\alpha=28.3 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ である。ここで横軸は円周方向の位置を表し、 $\theta=\pi/3$ はスリット端部に、 $\theta=0$ は一片のシュリンクフィッターの中央部に対応する。この図より、温度が上昇するにつれてスリット端部のところから接触圧力が0になる、つまり接触しなくなることがわかる。温度および熱膨張係数がせん断強度に及ぼす影響を表すために図6のように三次元グラフで表示することにした。この図の縦軸はせん断強度、横軸は熱膨張係数、奥行き方向の軸は温度を示す。熱膨張係数 $\alpha$ が約 $23.5 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ を境にしてそれより小さなところでは温度が上昇してもせん断強度はほぼ一定であるが、それより大きなところでは温度の上昇と

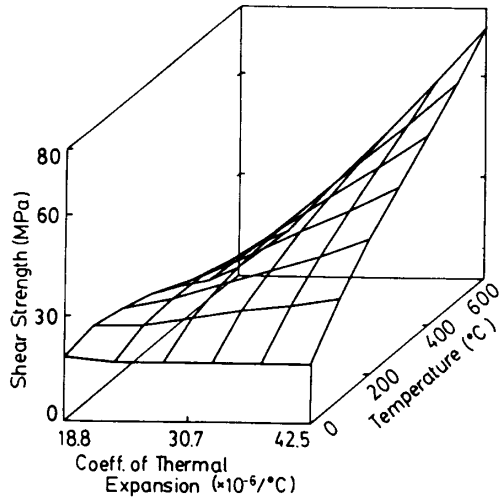


図7 せん断強度に及ぼす熱膨張係数と温度の影響  
(高熱膨張合金使用, モノリシックタイプ,  $t=4\text{mm}$ )

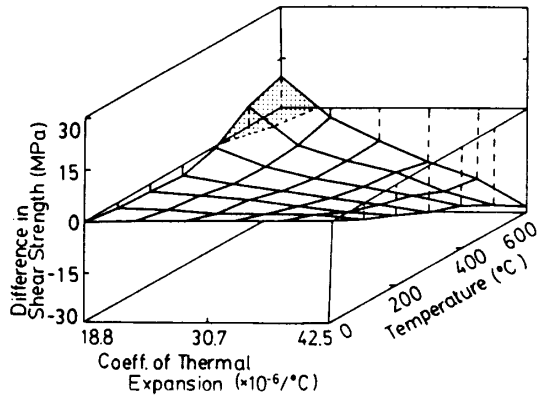


図8 バイメタルタイプとモノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた場合のせん断強度の差  
(高熱膨張合金使用,  $t=4\text{mm}$ )

ともにせん断強度が増加することがわかる。

図7は、モノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた場合の計算結果を示している。

次に、バイメタルタイプとモノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた場合に、せん断強度の点からみてどちらのシュリンクフィッターが有効であるかを示すために図8のようなグラフにまとめた。ここで、縦軸はバイメタルタイプのシュリンクフィッターとモノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた場合のせん断強度の差を表す。縦軸の値が正のときはバイメタルタイプのせん断強度が優れており、縦軸の値が負のときはモノリシックタイプの方が優れていることを示す。スクリーントーンで強調しているところが縦軸が正のところである。この図より $\alpha$ が約 $22.4 \times 10^{-6}$  ( $1/^\circ\text{C}$ )以上であれば、どの温度においてもモノリシックタイプの方がせん断強度が高いことがわかる。

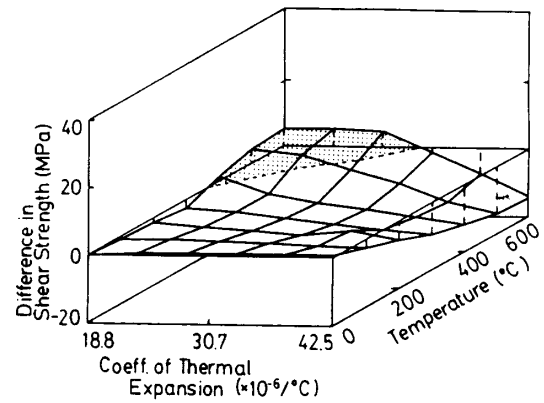


図9 バイメタルタイプとモノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた場合のせん断強度の差  
(高熱膨張合金使用,  $t=2\text{mm}$ )

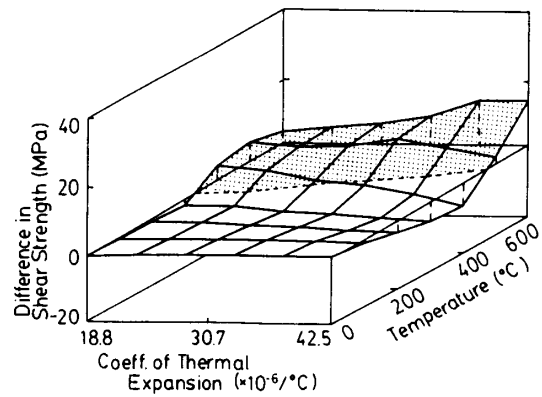


図10 バイメタルタイプとモノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた場合のせん断強度の差  
(高熱膨張合金使用,  $t=1\text{mm}$ )

また、この差は $\alpha$ が大きくなるほどそして高温になるほど大きくなる。したがって、シュリンクフィッターの半径方向の厚さが $4\text{mm}$ の場合にはバイメタルタイプよりはモノリシックタイプの方がせん断強度としては有利である。

図8と同じ計算をシュリンクフィッターの半径方向の厚さが $2\text{mm}$ と $1\text{mm}$ のそれぞれの場合について行った。その結果が図9と図10である。これより、シュリンクフィッターの半径方向の厚みが小さくなると温度が高いところでバイメタルタイプの方がせん断強度が高くなるのがわかる。特に厚さが $1\text{mm}$ の時には約 $450^\circ\text{C}$ 以上で高熱膨張合金の熱膨張係数にかかわらずバイメタルタイプの方がせん断強度が高い。

4-2 低熱膨張合金使用の場合 図11は低熱膨張合金をバイメタル0材として用いたときの計算値である。バイメタル0材の熱膨張係数が $11.7 \times 10^{-6}$  ( $1/^\circ\text{C}$ )でかつ温度が $400^\circ\text{C}$ のときにせん断強度が低くなるのがわかる。ここで、シュリンクフィッターの半

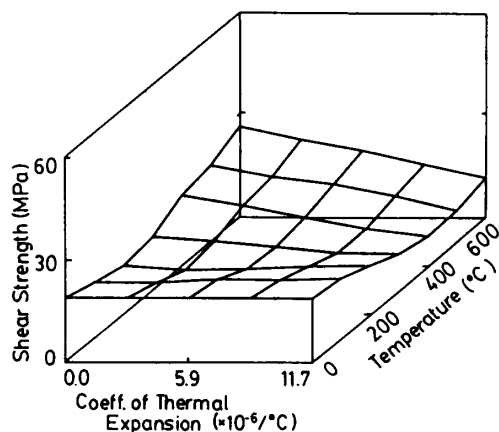


図11 せん断強度に及ぼす熱膨張係数と温度の影響  
(低熱膨張合金使用, バイメタルタイプ,  $t=4\text{mm}$ )

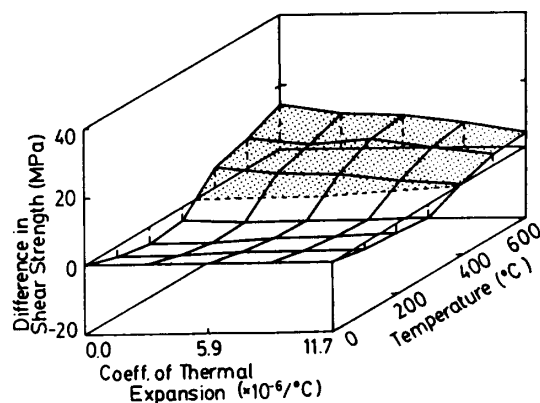


図13 バイメタルタイプとモノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた場合のせん断強度の差  
(低熱膨張合金使用,  $t=2\text{mm}$ )

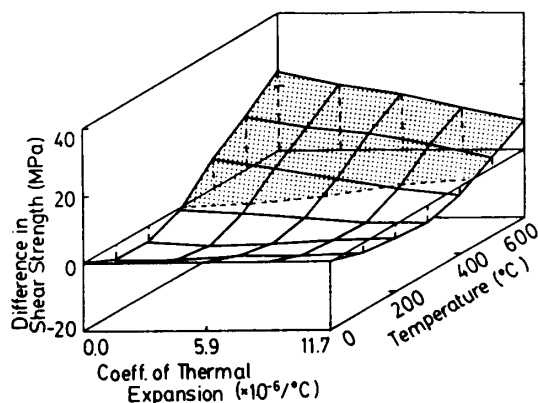


図12 バイメタルタイプとモノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた場合のせん断強度の差  
(低熱膨張合金使用,  $t=4\text{mm}$ )

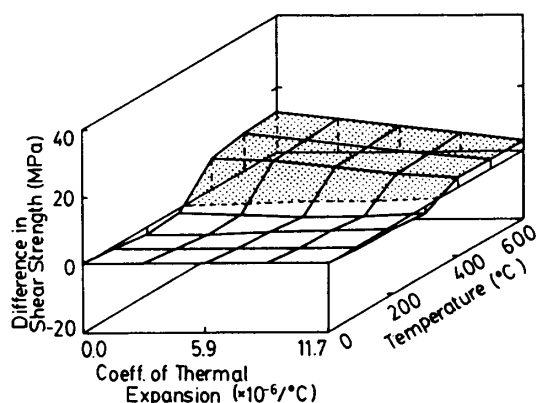


図14 バイメタルタイプとモノリシックタイプのシュリンクフィッターを用いた場合のせん断強度の差  
(低熱膨張合金使用,  $t=1\text{mm}$ )

径方向の厚さは4mmである。

次に図11の結果とモノリシックタイプのシュリンクフィッター (SUS304) を用いた場合のせん断強度 (すなわち図7の  $\alpha=18.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) の比較を行った。図12の縦軸は図8と同じようにバイメタルタイプのシュリンクフィッターを用いた場合とモノリシックタイプのもの (SUS304) を用いた場合のせん断強度の差を表している。約350°Cを境にしてそれより温度が高いとバイメタルタイプの方がせん断強度が高く、それよりも温度が低いとSUS304モノリシックタイプの方がせん断強度が高い。約350°C以上では温度が高くしかも低熱膨張合金の熱膨張係数が低い方がバイメタルタイプのせん断強度は高くなる。

図13と図14は半径方向の厚さが2mmと1mmのシュリンクフィッターに対する計算値である。半径方向の厚さが小さくなるに従い、温度や低熱膨張合金の熱膨張係数にかかわらずバイメタルタイプとモノリシックタイプのせん断強度の差が小さくなることわかる。

しかし、バイメタルタイプとモノリシックタイプの強度が逆転する温度は依然として約350°Cである。

4-3 インバー合金使用の場合 図15の実線は、シュリンクフィッターの半径方向の厚さが4mmの場合の低熱膨張合金使用の場合のせん断強度と温度の関係である。ここで、バイメタルS材にSUS304をバイメタルO材にインバー合金を用い、それぞれのヤング率<sup>4)</sup>と熱膨張係数<sup>5)</sup>は温度の関数とした。また、セラミックスシャフトに外径33.3mmのインバー合金のリングを従来方式で締めばめた場合の計算値を図の破線で示す。これより約480°Cまでは破線の方がせん断強度が高いが、それ以上の温度になるとバイメタルタイプの方がせん断強度が高くなる。また、温度の変化により破線の場合はせん断強度が大きく変化するがバイメタルタイプの場合はわずかに単調減少するのみである。これらのことからインバー合金を用いる場合はバイメタルタイプにした方が約480°C以上のところでも安定したせん断強度が得られることがわかる。

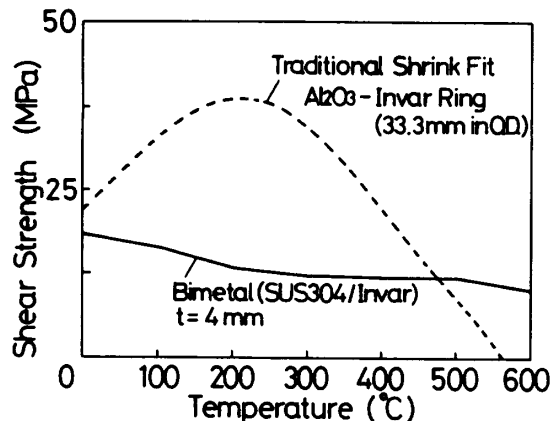


図15 せん断強度と温度の関係  
(インバー合金を用いた従来方式の場合とバイメタルO材にインバー合金を用いた場合、 $t=4\text{mm}$ )

## 5. 考察

わん曲変形を大きくするためにはバイメタルS材とバイメタルO材の熱膨張係数の差を大きくすればよいがその場合には次の2つの問題が生じる可能性がある。

1. バイメタルS材とバイメタルO材の接合界面がはく離してわん曲変形量が低下する。
2. 局部的なきびしい接触のためセラミックスの割れやバイメタルおよびアウトリングが塑性変形して高温結合強度が低下する。

シュリンクフィッターの半径方向の厚さを $4\text{mm}$ とし、バイメタルS材とバイメタルO材の接合界面から $0.25\text{mm}$ 半径方向に離れたところの主応力を求めた。

バイメタルS材としてSUS304、バイメタルO材としてSUS403を用いたとき  $600^\circ\text{C}$  では、バイメタルS材とバイメタルO材にはそれぞれ約 $230\text{MPa}$ の圧縮応力と約 $250\text{MPa}$ の引張応力が円周方向に作用した。

また、バイメタルS材にSUS304をバイメタルO材に $\alpha=0.0\times 10^{-6}(/^\circ\text{C})$ の合金を用いたとすると、バイメタルS材とバイメタルO材には約 $700\text{MPa}$ の圧縮応力と約 $800\text{MPa}$ の引張応力が円周方向に作用した。

したがって、後者の組み合わせの場合は上記問題点が発生する可能性が高くなると考えられる。

本研究では低熱膨張合金を使用する場合には、バイメタルO材として用いた。しかし、セラミックスシャフトと同程度の低熱膨張係数を持つ安価で加工し易い合金が開発された場合は、従来方式の締りばめを用いた方がよいと考える。ここでは、一例としてインバー合金を取り上げて従来方式の締りばめの高温結合強度を調べたが、 $600^\circ\text{C}$  まで結合強度を保つまでにはいたらなかった。したがって、インバー合金を使用すると

きはバイメタルタイプのシュリンクフィッターの構成部材として使用の方がインバー合金の使用量が少なくすみコスト的にも有利と考えられる。

## 6. 結言

セラミックスシャフトとシュリンクフィッター界面のせん断強度の数値計算を行い、モノリシックタイプのシュリンクフィッターがよいかバイメタルタイプのシュリンクフィッターがよいか検討した。ここでは、熱膨張係数の範囲が $18.8\times 10^{-6}\sim 42.5\times 10^{-6}(/^\circ\text{C})$ の高熱膨張合金を使用した場合と、その範囲が $0.0\times 10^{-6}\sim 11.7\times 10^{-6}(/^\circ\text{C})$ の低熱膨張合金を使用した場合の2つの場合に分けて考え、シャフト径 $25\text{mm}$ とし、シュリンクフィッターの半径方向の厚さは $4\text{mm}$ 、 $2\text{mm}$ 、 $1\text{mm}$ の3種類とした。その結果、高熱膨張合金を使用する場合はモノリシックタイプのシュリンクフィッターが有利で、低熱膨張合金を使用する場合はバイメタルタイプのシュリンクフィッターが有利であることがわかった。

計算で得られた主な結果は以下の通りである。

### (1) 高熱膨張合金を使用した場合

厚さ $4\text{mm}$ のときは約 $22.4\times 10^{-6}(/^\circ\text{C})$ 以上の熱膨張係数の材料を使用すれば $0\sim 600^\circ\text{C}$ のすべての温度範囲でモノリシックタイプのシュリンクフィッターの方が高い結合強度を示した。しかし、厚さが $1\text{mm}$ になると $350\sim 450^\circ\text{C}$ 以上のところでバイメタルタイプのものが高い結合強度を示した。

### (2) 低熱膨張合金を使用した場合

シュリンクフィッターの厚さにほとんど関係なく約 $400^\circ\text{C}$ 以上の高温下ではバイメタルタイプのものが高い結合強度を示した。

### (3) インバー合金使用の場合

実在する低熱膨張合金としてインバー合金を使用した。シュリンクフィッターを用いない従来方式の締りばめとバイメタルタイプのシュリンクフィッターを用いた締りばめの比較を行った結果、約 $480^\circ\text{C}$ 以上ではバイメタルタイプのものが高い結合強度を示した。

## 文 献

- (1) 新田ら, 機論, 55-510, C(1989), 417.
- (2) 新田ら, 機論, 55-520, C(1989), 3062.
- (3) 新田ら, 機論, 56-525, C(1990), 1289.
- (4) 竹内, 熱応力, 日新出版.
- (5) 菅井ら, 金属, (1985-5), 34.