

ハイブリッドシュリンクフィッタを用いた セラミックスと金属の締めばめ* (接触圧力分布の計算)

新 田

勇*¹

Shrink Fit between Ceramic and Metal with the Use of a Hybrid Shrink Fitter (Calculations of Distributions of Contact Pressures)

Isami NITTA

The shrink-fitted assemblies between a ceramic shaft and a metal ring with a hybrid shrink fitter which contains liquid have been analyzed as a two-dimensional elastic problem. Water was used as the liquid contained in the hybrid shrink fitters because its thermal expansion at elevated temperature has already been investigated in detail. Calculations were performed for the temperature range 20°C up to 600°C. Materials were Al_2O_3 and Si_3N_4 for the shafts, SUS403 for the metal ring and SUS304 for the casing of the hybrid shrink fitters. Three different shapes of hybrid shrink fitters were used for the distribution of the contact pressures. The mean contact pressures of the assemblies depended greatly upon the internal pressures of the shrink fitters. The mean contact pressures decreased with temperature from 20°C up to a certain degree of temperature, and at higher temperatures, the mean contact pressures increased with temperature. These calculated results were quantitatively in agreement with the experimental results in a previous paper, although the contained liquids were different from each other. The equivalent stresses of the casing were high when the casing contained only water. Then, an amount of Si_3N_4 powder was mixed with the contained water to decrease the equivalent stresses of the casing. Longevities of the assemblies with the hybrid shrink fitters were discussed.

Key Words: Fixing Element, Ceramic, Shrink Fit, Shrink Fitter, Water, Elevated Temperature, Coefficient of Thermal Expansion, Slit, Hybrid Shrink Fitter

1. 緒 言

シュリンクフィッタの役割は、高温下における接合体の締めしろの減少を防止することである¹⁾²⁾。半径方向に薄いシュリンクフィッタが十分にその機能を発揮するためには、高い熱膨張係数を持ち、しかも高温下においても適度な機械的強度をもつ材料が必要となる¹⁾。それには、材料開発を行うか、機構的に工夫し見かけ上の熱膨張係数を上げなければならない。

著者らが以前に行ったシュリンクフィッタをバイメタル構造にすること³⁾や、シュリンクフィッタに低融点合金を封入すること⁵⁾⁶⁾は、後者の工夫をしたことになる。

バイメタル構造のシュリンクフィッタに対してはすでに理論的考察が行われており、材料の組み合わせを決めれば、どの程度の高温接合強度がえられるかがわかる⁴⁾。しかし、ハイブリッドシュリンクフィッタ、すなわち内部に液体を有するシュリンクフィッタに対しては、まだ理論解析が行われていない。

そこで本論文では、ハイブリッドシュリンクフィッ

タを用いたセラミックスシャフトと金属リングの締めばめ接合体の高温下における接触圧力分布を2次元弾性解析により求めた。シュリンクフィッタ内への封入体としては、高温・高圧下での特性が詳しく研究されている水を用いた。そして、封入した水の量や封入部の寸法が、高温下での接触圧力分布やシュリンクフィッタの内部応力に及ぼす影響を調べた。

論文の中ではハイブリッドシュリンクフィッタのことを単にシュリンクフィッタと呼ぶことにする。

2. 理 論

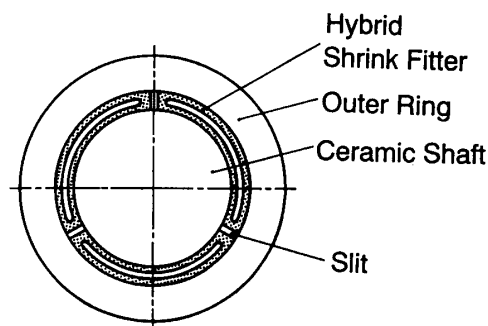


図1 ハイブリッドシュリンクフィッタを用いた締めばめ接合体

* 原稿受付 平成4年3月26日.

*¹ 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050).

図1は、本論文で取り扱う接合体の断面を軸方向よりながめたものである。スリット数は3である。シュリンクフィッタ内部は空洞になっており、ここに水を封入する。水のみではシュリンクフィッタ内部が高温下で膨張しすぎるおそれがあるので、空洞部には水だけでなくSi₃N₄粉末と水の混合物も封入することにした。

水の高温下における温度(℃)、圧力(MPa)および比容積(m³/kg)の間の関係は、1967年に定められた実用国際状態式⁷⁾を用いて計算することができる。この実用式は、温度が0～800℃の範囲で、圧力が0～100MPaの範囲で使用できるものである。

本論文では、解析法としてポイントマッチング法を用いた。ポイントマッチング法とは、たとえば接触領域を2m個に分割した場合、この各部に作用する垂直応力pを未知数として、これらを接触面上の2m個の変位連続条件によって求める方法である²⁾。

図1の接合体ではそれぞれシャフトーシュリンクフィッタ間、シュリンクフィッターアウターリング間に接触面が存在する。本論文では、前者を内側接触面、後者を外側接触面と呼ぶ。摩擦は存在しないものとする。また、接触面上の表面あらかさも存在しないものと仮定する⁸⁾。スリット数3の接合体を解析する場合は、変形の対称性より全円周の1/6を解析すればよいことがわかる。図2に示すように、内側接触面と外側接触面をそれぞれm個に分割する。これらの接触面各部の半径方向の変位の連続条件は、シュリンクフィッタの半径方向の剛体変位も含めて次のように表

せる。

$$\begin{bmatrix} M_S - M_I + M_R & \cos u^i & \cos u^o & 0 & 0 \\ A_1 \cos \bar{s} & -A_2 \cos \bar{s} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^i \\ p^o \\ r \\ p_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^i \\ s^o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、

M_S : シャフトの影響係数マトリックス

M_I : シュリンクフィッタの影響係数マトリックス

M_R : アウターリングの影響係数マトリックス

p^i : 内側接触面の垂直応力ベクトル

p^o : 外側接触面の垂直応力ベクトル

p_f : シュリンクフィッタ空洞部の圧力

u^i : p^i による内側接触面各部の影響係数ベクトル

u^o : p^o による外側接触面各部の影響係数ベクトル

s^i : 内側接触面の締めしろのベクトル

s^o : 外側接触面の締めしろのベクトル

r : シュリンクフィッタのr軸方向剛体変位(図2)

\cos : 接触面各部における $\cos\theta_i$ の値のベクトル

A_1 : 内側接触面の1つの分割部分の接触面積(図2)

A_2 : 外側接触面の1つの分割部分の接触面積(図2)

u^i と u^o および p_f 以外の値の定義は既報²⁾でも行っている。この式は、 $2m+2$ 個の未知数(p^i :m個, p^o :m個, r :1個, p_f :1個)を含むが、式は $2m+1$ 本しかなく、このままでは解がえられない。そこで、シュリンクフィッタに封入されている水の質量は締めばめの前後で一定であるという条件を用いる。その式は、以下のようになる。

$$(V + \beta V_0)/v - \beta V_0/v_0 = 0 \quad (2)$$

ここで、

V_0 : 室温大気中でのシュリンクフィッタ内部の容積

v_0 : 室温大気中での比容積

β : 室温大気中での V_0 に対する水の容積比率

$$(0 \leq \beta \leq 1)$$

V : 締めばめた後のシュリンクフィッタ内部の容積の V_0 からの変化量

v : 締めばめた後の比容積

これらを連立して解けば室温での接触圧力分布が求まる。

接触問題では接触状況(接触面性質)として、1)接触

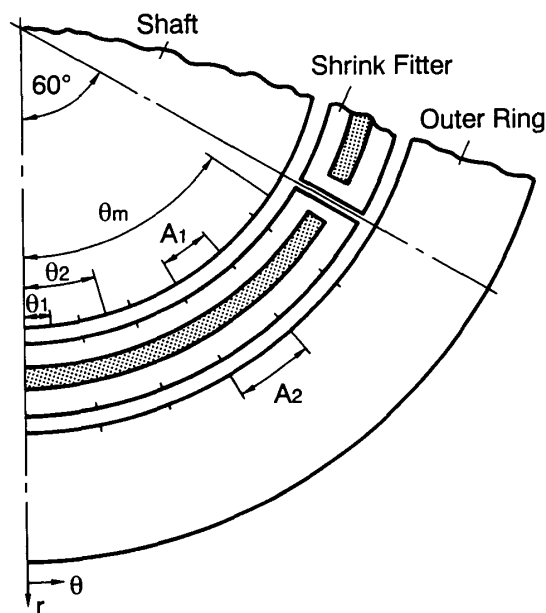


図2 計算のための分割幅についての説明図

していない(口開き)と2)すべりを伴わない接触および3)すべりを伴う接触の3つが考えられる²⁾。ここでは摩擦は存在しないとして解析しているので、接触面各部の接触面性質としては口開きかまたは接触かの2つになる。

最初に接触面性質を仮定して計算を行い、接触圧力分布および p_t を求める。求めた接触圧力分布が最初に仮定した接触面性質を満足していれば、解は収束したとみなす。

次に、温度を上げた場合の接触圧力分布を解析することを考える。式(1)を次のように書き直す。

$$M^A P^A = S^A \quad (3)$$

室温で式(3)が満足されていたとする。温度が ΔT だけ上昇すると式(3)は次式のようになる。

$$(M^A + \Delta M^A)(P^A + \Delta P^A) = S^A + \Delta S^A \quad (4)$$

ここで、 ΔM^A 、 ΔP^A 、 ΔS^A は温度が ΔT だけ上昇したための変化分である。式(4)を変形すると次式になる。

$$\Delta P^A = (M^A + \Delta M^A)^{-1} (\Delta S^A - \Delta M^A P^A) \quad (5)$$

また、式(2)は温度が ΔT だけ上昇すると、次式のようになる。

$$(V + \Delta V + \beta V_0 + \Delta V_0)/(\nu + \Delta \nu) - \beta V_0/\nu_0 = 0 \quad (6)$$

ここで、 ΔV 、 ΔV_0 、 $\Delta \nu$ は温度が ΔT だけ上昇したための変化分である。すなわち、 ΔV は ΔP^A による V の変化分である。 ΔV_0 は、 Si_3N_4 粉末とシュリンクフィッタの熱膨張差による水の入っている部分の容積の変化分である。これを式(2)を使って整理すると次式になる。

$$(\Delta V + \Delta V_0)/\Delta \nu - \beta V_0/\nu_0 = 0 \quad (7)$$

したがって、式(5)、(7)を連立して ΔP^A を求めれば、温度が ΔT 上昇したときの接触圧力は $P^A + \Delta P^A$ となる。もしも ΔP^A が接触面性質を満足しなければ、接触面性質を仮定しなおして計算を繰り返す。上記方程式の解法にはニュートン・ラプソン法を用いた。

3. 計算条件

シャフト材料として Al_2O_3 と Si_3N_4 を、シュリンクフィッタのケーシング材料としてSUS304を、アウターリング材料としてSUS403を用いた。 Si_3N_4 のヤング率とポアソン比および熱膨張係数のカタログデータを表1に示す。表1の下半分に示した熱膨張係数と温度の関係は実測した値より求めたものである。他の材料の材料特性値は既報²⁾のものと同一である。セラミックスの場合はヤング率とポアソン比は温度によらず一定とし、熱膨張係数のみ温度により変化するものとした。金属の場合はポアソン比は温度によらず一定とし、ヤング率と熱膨張係数は温度により変化するものとした。

寸法は前報⁶⁾の試験片と同じにするためにシャフト外径を25mm、シュリンクフィッタの内外径をそれぞれ25mmと31mmとした。また、アウターリングの内外径はそれぞれ31mmと41mmとした。

内側および外側接触面の分割数 m は25とした。シュリンクフィッタの影響係数マトリックス M_i は四辺形一

表1 Si_3N_4 の材料特性値

	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Coeff. of Thermal Expansion α (/°C)
Si_3N_4	3.04×10^5	0.27	3.0×10^{-6}

$\alpha = A_0 + A_1 T^1 + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4 + A_5 T^5 + A_6 T^6 + A_7 T^7$ (°C)					
A_0	0.19135288E-05	A_1	0.24760452E-07	A_2	-0.41457256E-09
A_3	0.31531181E-11	A_4	-0.12316305E-13	A_5	0.26004293E-16
A_6	-0.28260792E-19	A_7	0.12403844E-22		

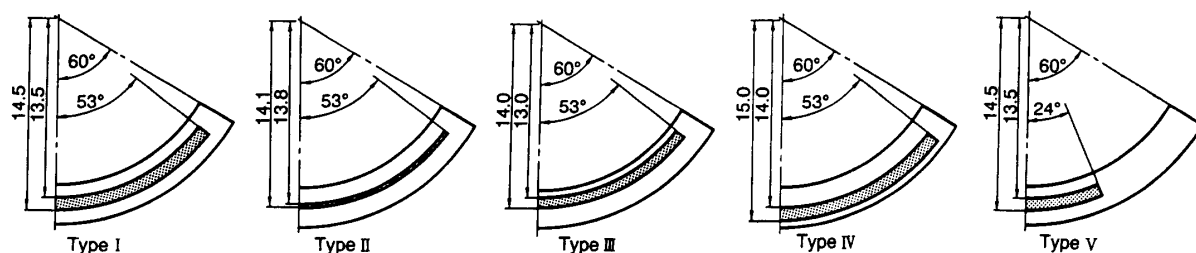


図3 種々のシュリンクフィッタのモデル

次要素の有限要素法により求めた。その際、半径方向に20等分、円周方向に50等分とした。シャフトとアウターリングの影響係数の求め方は既報²⁾に示す通りである。

シュリンクフィッタの空洞部の寸法を5種類に変化させた。それぞれの形状と寸法を図3に示す。この空洞部に水または Si_3N_4 粉末と水の混合物をすきまなく入れたものとして接触圧力を計算した。

すべての接合体の室温における締めしろは、内側接触面と外側接触面ともに半径差で $7.5\mu\text{m}$ ずつとした。したがって、直径差で $30\mu\text{m}$ の締めしろである。

4. 計算結果

4.1 接触圧力分布 図4, 5には接触圧力分布の代表例としてType Iのシュリンクフィッタを用いた接合体の内側接触面と外側接触面の圧力分布を示す。ここで、シャフトは Al_2O_3 である。そのときのシュリンクフィッタの空洞部の圧力、つまり水の入っている部分の圧力を図6に示した。図の実線は、シュリンクフィッタの空洞部がすべて水で満たされていたときの計算値、すなわち $\beta=1$ の計算値である。図の破線は Si_3N_4 粉末+水のときの計算値である。このときの室温

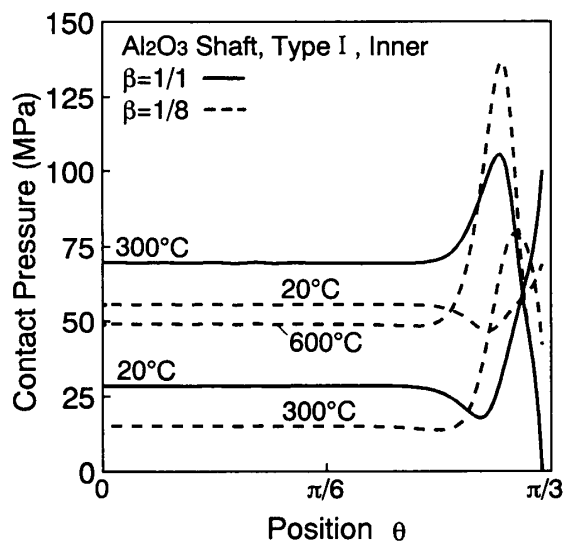


図4 内側接触面の接触圧力分布(Al_2O_3 , Type I)

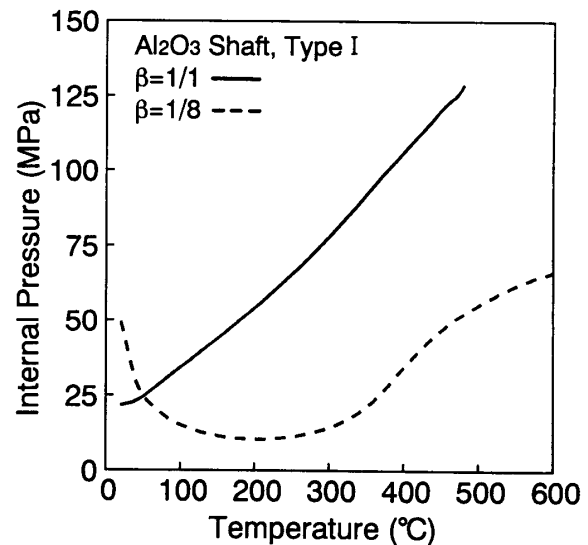


図6 シュリンクフィッタ内部圧力と温度の関係(Al_2O_3 , Type I)

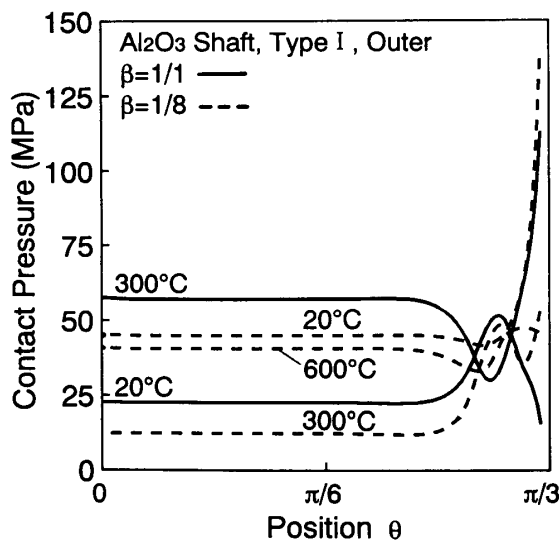


図5 外側接触面の接触圧力分布(Al_2O_3 , Type I)

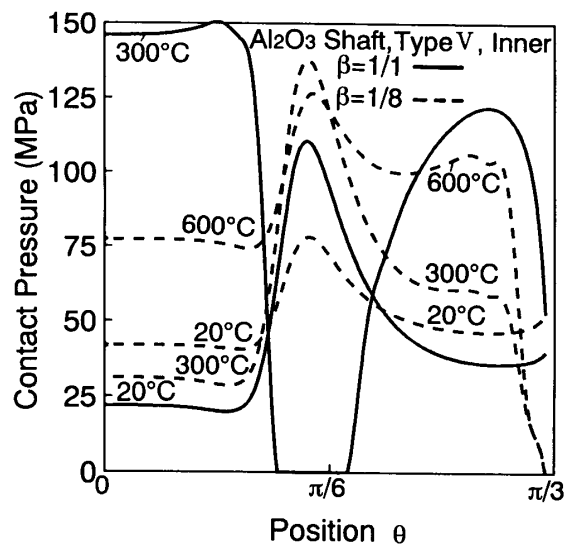


図7 内側接触面の接触圧力分布(Al_2O_3 , Type V)

でのシュリンクフィッタ空洞部に対する水の体積割合 β は $1/8$ である。

図4の内側接触面の接触圧力分布を見ると、どの温度またはどの β の値でもシュリンクフィッタの空洞部に対応する位置では接触圧力はほぼ一定になっていることがわかる。スリット端 ($\theta=60^\circ$) では室温においては接触圧力が高いが、温度が上昇するにつれて低下してくる。高温下では、シュリンクフィッタ空洞部の端部 ($\theta=53^\circ$) で接触圧力が高くなった。

図5に示した外側接触面では、図4とは反対に温度が高くなるとスリット端部の接触圧力が高くなった。また、シュリンクフィッタ空洞部の端部近くで接触圧力が低くなった。

図6より $\beta=1$ のときは、約 380°C で水の圧力が 100MPa を越えてしまい、それ以上の温度では実用式の適用範囲を越えてしまうことがわかる。また、 $\beta=1/1$ のときは温度の上昇につれて内部圧力が単調に増加するが、 $\beta=1/8$ のときは室温から 100°C までは内部圧力が減少し、 100°C から 300°C まではほぼ一定の値をとる傾向がみられた。このように封入されている水の量が少ないと、温度に対する内部圧力の上昇率が低下することがわかる。

Type V のシュリンクフィッタを用いた場合は、接触圧力分布はもう少し複雑になった。図7は、Type V の

シュリンクフィッタを用いた場合の内側接触面の圧力分布を示したものである。一般にシュリンクフィッタ空洞部の端部 ($\theta=24^\circ$) より少しスリット端側の所で接触圧力が高くなる。しかし、 $\beta=1$ の 300°C のときのように空洞部に対応する位置での接触圧力があまり高くなると、空洞部の端部近くで接触圧力が 0 になる部分が生じた。

以上は Al_2O_3 シャフトを用いた計算結果であるが、 Si_3N_4 シャフトを用いても同じような接触圧力分布がえられた。ただし、 Al_2O_3 シャフトに比べて Si_3N_4 シャフトは熱膨張係数が小さいので、 β の値は $1/3$ と Al_2O_3 シャフトの場合の $1/8$ より大きめの値が必要であった。

4.2 内側接触面の平均接触圧力と温度の関係

図8～12は、 Si_3N_4 シャフトを用いたときの内側接触面の平均接触圧力と温度の関係およびシュリンクフィッタの内部圧力と温度の関係を示したものである。それぞれ図3のType I～Type Vに対応している。ここで平均接触圧力とは、求めた接触圧力分布を接触面積の範囲 ($0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$) で積分した後接触面積で割った値である。水の実用式の圧力の適用範囲は 100MPa までであるが、計算できるものについては 120MPa の値まで計算した。

まず内部圧力と温度の関係をみると、一般に、 β の

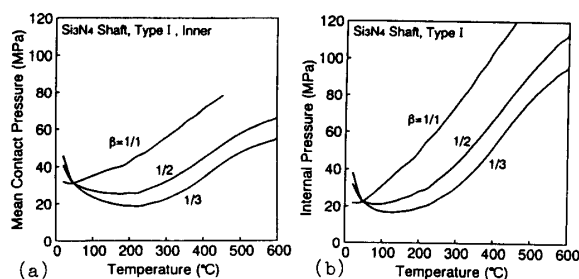


図8(a)内側接触面の平均接触圧力と温度の関係、
(b)内部圧力と温度の関係(Si_3N_4 , Type I)

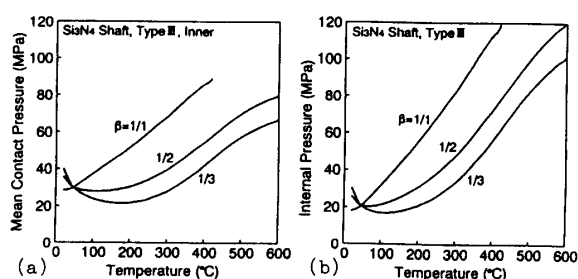


図10(a)内側接触面の平均接触圧力と温度の関係、
(b)内部圧力と温度の関係(Si_3N_4 , Type III)

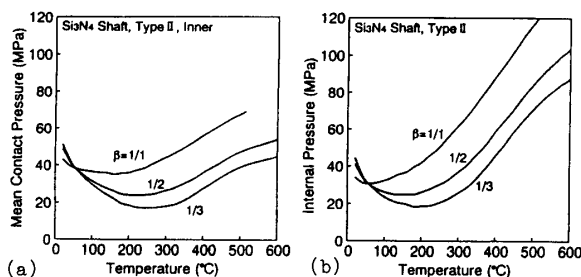


図9(a)内側接触面の平均接触圧力と温度の関係、
(b)内部圧力と温度の関係(Si_3N_4 , Type II)

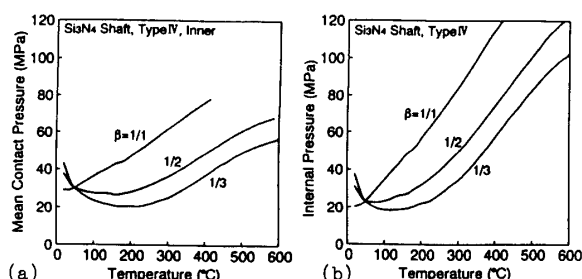


図11(a)内側接触面の平均接触圧力と温度の関係、
(b)内部圧力と温度の関係(Si_3N_4 , Type IV)

値が小さくなると、温度上昇につれて一旦内部圧力が下がる傾向を示す。内部圧力が最低になる温度はTypeにより異なるが $\beta=1/3$ では概ね200℃以内にはどのTypeでも内部圧力が最低になっている。しかし、それ以上の温度では内部圧力が上昇し、約300℃以上からは内部圧力が急激に上昇する。Type別に比べると、Type Vでは他のどのTypeのものよりもはやく内部圧力が上昇する傾向があった。シュリンクフィッタの空洞部容積が同じType I、ⅢおよびⅣを比較すると、空洞部が内側接触面か外側接触面に片寄っているTypeⅢとⅣはそうでないType I に比べて、約100℃以上での内部圧力が高くなることからわかる。また、Type I に比べて空洞部容積が少ないType II の内部圧力はおおよそ200℃以上ではType I のものより小さくなることからわかる。

平均接触圧力と温度の関係をみると、Type I、ⅢおよびⅣを同一の β の値で比較した場合TypeⅢの平均接触圧力が一番高いことがわかる。その次に、TypeⅣ、

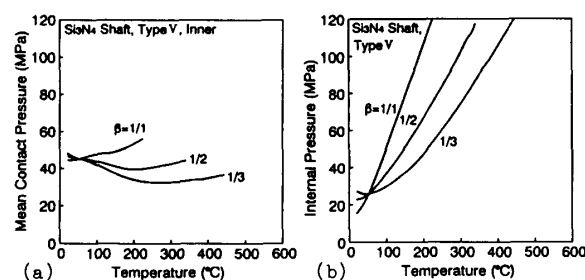


図12(a)内側接触面の平均接触圧力と温度の関係、
(b)内部圧力と温度の関係(Si₃N₄, Type V)

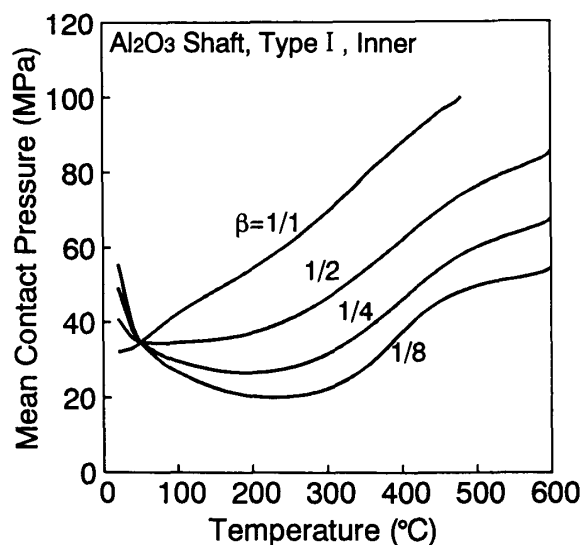


図13 内側接触面の平均接触圧力と温度の関係
(Al₂O₃, Type I)

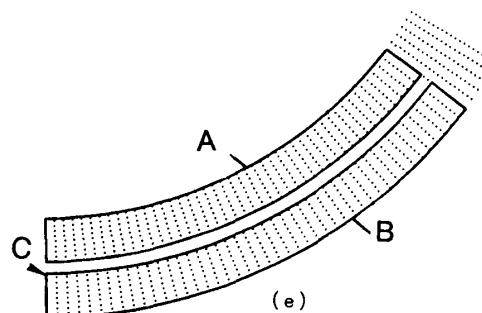
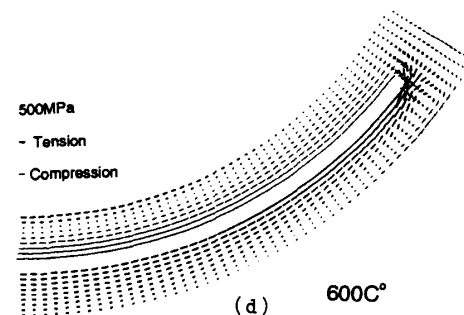
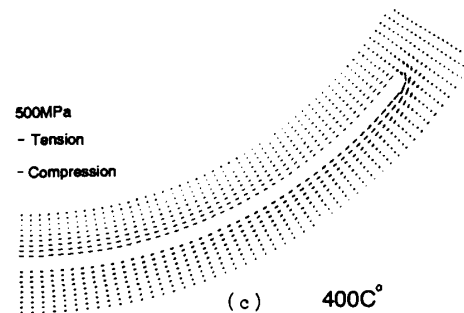
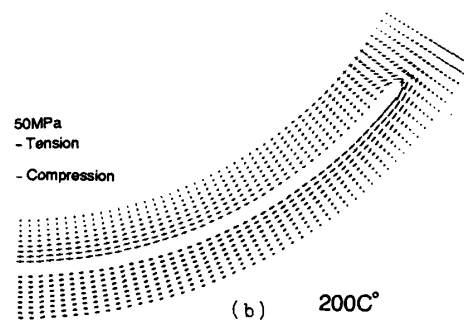
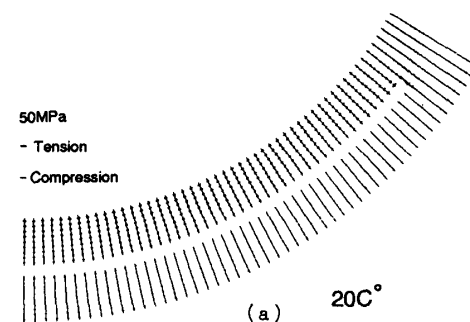


図14 シュリンクフィッタ内部の主応力分布
(Si₃N₄, Type II)

Type I の順になる。したがって、空洞部容積が同じであれば、空洞部が内側接触面に近いType IIIが内側接触面の平均接触圧力が一番高くなることがわかる。内部圧力と平均接触圧力の図を比べると、Type V以外は内部圧力の上昇に比例するように平均接触圧力が上昇することがわかる。また、平均接触圧力と温度の関係はほとんどの場合U字型カーブになったがこの傾向は前報⁶⁾のせん断強度と温度の関係に定性的によく一致することがわかる。

Type II は、600℃においても平均接触圧力はそれほど大きくならず望ましいタイプといえる。その原因としては、封入される水の量が少ないことがあげられる。また、シュリンクフィッタのケーシングに厚みがあるので内部圧力による膨張に対しての拘束が強いことも一つの原因と考えられる。

Al₂O₃シャフトを使用した場合でも、同様なことは言えるが、Si₃N₄シャフトと比べて熱膨張係数が高いため同程度の接触圧力を得るためのβの値は小さくてよい。一例としてType I の場合の平均接触圧力と温度の関係を図13に示す。

4・3 主応力分布 図14は、Type II のシュリンクフィッタ内部の主応力状態を示したものである。シャフト材はSi₃N₄でβ=1/3である。図14-(e)に示すように便宜上内側接触面と空洞部にはさまれた領域をA部と呼び、外側接触面と空洞部にはさまれた領域をB部と呼ぶことにする。温度はそれぞれ、図14-(a)から同図(d)まで順に20℃、200℃、400℃、600℃である。図中の太い線は引張応力で、細い線は圧縮応力を示している。同図(a)、(b)と同図(c)、(d)では応力のスケールが10倍異なっている。

図14-(a)の20℃の場合は、A部で円周方向に引張応力が発生するのを除けば全体的に半径方向に一樣に圧縮応力が発生している。200℃になるとA部の空洞部側以外では円周方向の引張応力が小さくなるかあるいは圧縮応力が作用し、B部ではほぼ全域にわたって円周方向の引張応力が作用するようになる。600℃になると、A部では内側接触面近傍以外では円周方向応力は圧縮となる。一方、B部では円周方向の引張応力が相当地に大きくなる。

図14より主応力は空洞部端のB部よりで最大の値をとることがわかる。これは、シュリンクフィッタ膨張に際してこの部分に大きな曲げモーメントが作用するためであると考えられる。また、解析に用いた形状のこの部分がエッジになっており応力集中をおこしやすいことも影響していると考えられる。

図15は、式(8)で計算した最大主応力発生部分の相当応力と温度の関係をType I、II および III について示したものである。Type IV についてはType III とほぼ同じ結果であったので省略した。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (8)$$

ここで、 σ_1, σ_2 は主応力

これより、相当応力は200℃まではあまり上昇しないがそれ以上の温度では急激に高くなることがわかる。この相当応力の上昇は、内部圧力が急激に上昇す

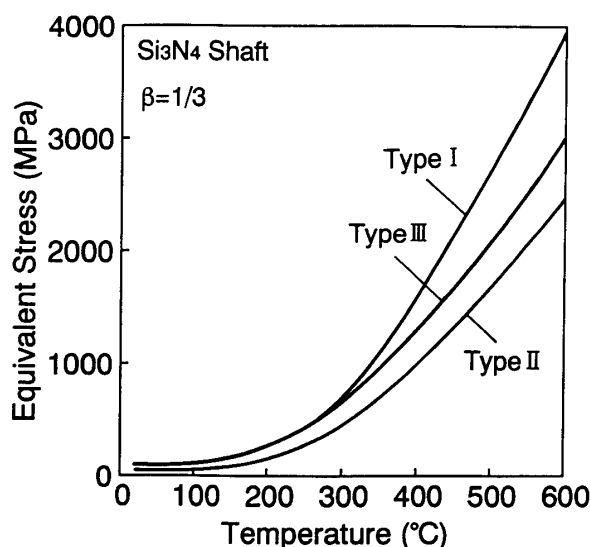


図15 最大相当応力と温度の関係

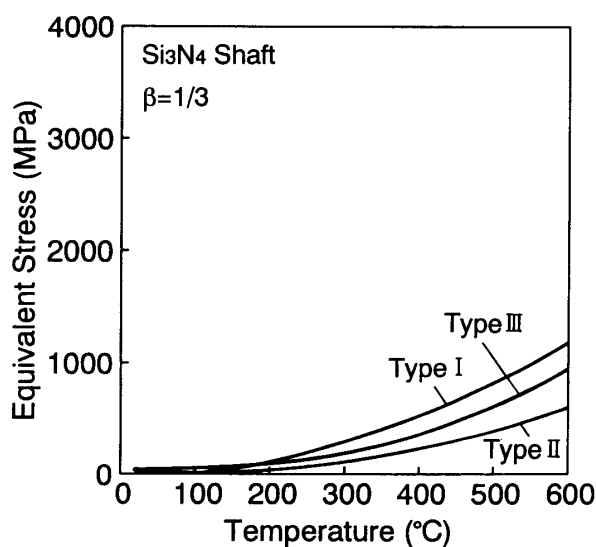


図16 C点の相当応力と温度の関係

るために起きていると考えられる。図15は、シュリンクフィッタの最大の相当応力と温度の関係であったが、シュリンクフィッタの多くの場所ではそれよりも低い相当応力を示す。代表的な値として、図16に図14-(e)のC点に対応するところの相当応力と温度の関係を示す。これらの図よりやはりType IIの相当応力が他のTypeのものに比べて低くなることがわかる。

いずれにしても、高温下では応力が非常に高くなり、SUS304製のシュリンクフィッタでは塑性変形やクリープ変形を経験するのはまちがいないと考えられる。このことは、前報⁶⁾で行った実験結果でもシュリンクフィッタは塑性変形することが確認されている。

5. 考 察

計算の結果、高温下ではシュリンクフィッタの内部応力が高くなるという結果がえられた。したがって、高温下ではシュリンクフィッタのケーシングが塑性変形やクリープ変形する可能性がきわめて高いことがわかる。もしも、シュリンクフィッタが円周方向や軸方向に塑性変形により伸びてしまえば、その分だけ空洞部体積が増加することになる。その結果、内部に封入された液体によって引き起こされるシュリンクフィッタの半径方向への熱膨張は減少すると考えられる。したがって、そのような状態になれば前報⁶⁾の実験結果が示すように高温下ではシュリンクフィッタを用いた締りばめ接合体の強度すなわち寿命が短くなる。

これらのことより、シュリンクフィッタを用いた接合体の高温下での寿命を延ばすためにはシュリンクフィッタの塑性変形やクリープ変形を防ぐことが重要となる。

そこで、高温下でのシュリンクフィッタの塑性変形あるいはクリープ変形の防止策として以下の3つが考えられる。

- ①シュリンクフィッタのケーシング材の選択
- ②シュリンクフィッタの封入体の選択
- ③シュリンクフィッタの形状の選択

①は、構造材の強度を上げるという考え方で、高温下でも強度低下の少ない耐熱合金を使うということである。

また、②は、シュリンクフィッタの中に入れる封入体として、熱膨張特性が高温下であり大きくならないようなものを選ぶことである。今回計算に用いた水は $\beta=1/3$ としても約300℃を過ぎたあたりから急激に圧力が上昇する傾向を示した。それが原因で、シュリン

クフィッタの内部応力も約300℃以上で急激に大きくなった。したがって、熱膨張特性が高温下でも穏やかなものを使えば、高温下でのシュリンクフィッタの内部応力もあまり上昇しないですむと考えられる。

③はシュリンクフィッタの形状を高温下でも応力集中が少ないものにすることである。

①、②および③の対策が適切に取られればハイブリッドシュリンクフィッタの高温下での寿命を延ばすことが可能になると考えられる。

6. 結 言

水を封入したハイブリッドシュリンクフィッタを考案し、それを用いたセラミックスシャフトと金属リングの締りばめ接合体の高温下における接触圧力分布を2次元弾性解析により求めた。そして、封入した水の量や封入部の寸法が、高温下での接触圧力分布やシュリンクフィッタの内部応力に及ぼす影響を調べた結果、以下のような結論が得られた。

- (1)平均接触圧力は、Type Vを除いて内部圧力に比例して変化した。
- (2)平均接触圧力は空洞部が内側接触面に近いType IIIが一番高くなった。
- (3)平均接触圧力は空洞部が半径方向に薄いType IIの方が小さくなった。
- (4)封入する水の量が少ないほど内部圧力は小さくなった。
- (5)シュリンクフィッタ内部の相当応力は、約200℃以上で急激に大きくなり始めた。これは、内部圧力の急激な上昇が原因である。

シュリンクフィッタの一連の研究にご協力頂いている日本ファインセラミックス(株)に対しまして深く感謝致します。本研究の一部は平成3年度の文部省科学研究費補助金奨励研究(A)の援助を受けて行われた。記して謝意を表します。

文 献

- (1)新田・木越・加藤, 機論, 55-510, C(1989), 417.
- (2)新田・原, 機論, 55-520, C(1989), 3062.
- (3)新田・中静・原, 機論, 56-525, C(1990), 1289.
- (4)新田・坂井・原, 機論, 57-535, C(1991), 985.
- (5)新田・草間・原, 機論, No. 910-6, (1991), 304.
- (6)新田・草間・原, 機論, 58-555, C(1992), 3326.
- (7)日本機械学会蒸気表 1980 SI, 第4版, (1981).
- (8)新田・加藤, トライボロジー-会議予稿集(1991-5), 469.