

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
金属の締りばめ接合体の三次元応力解析*新田 勇^{*1}, 堀内 宗典^{*2}3-Dimensional Stress Analysis of a Hybrid Shrink Fitter for a Shrink Fit
between Ceramic and Metal Elements
Isami NITTA and Munenori HORIUCHI

The shrink-fitted assembly between a ceramic shaft and a metal ring with a hybrid shrink fitter which contains liquid has been analyzed as a three-dimensional elastic problem. Water was used as the liquid contained in the hybrid shrink fitter because its thermal expansion at elevated temperatures and under high pressures has been investigated in detail. Contact pressures of the three-dimensional analysis were compared with those of the two-dimensional analysis calculated in a previous paper. An amount of Si_3N_4 powder was mixed with the contained water to reduce the internal pressure of the casing because the internal pressure became fairly high at elevated temperature in the case in which the casing contained only water. Materials used in calculation were Si_3N_4 for the shaft, SUS 403 for the metal ring and SUS 304 for the casing of the hybrid shrink fitter. The contact pressures at central parts of the inner and outer contact interfaces increased with temperature. This tendency of the contact pressure was similar to that of the two-dimensional analysis. The contact pressure at peripheral parts of the contact interface decreased with temperature. The stress of the casing was higher compared with the two-dimensional analysis at the same volume ratios of Si_3N_4 powder to water.

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

1. 緒 言

セラミックスは高温強度や耐摩耗性が良いことが特徴であり、金属では使用不可能な苛酷な環境で実用化が進んでいる。その例としては、セラミックスボールベアリング材¹⁾や動圧軸受材²⁾があげられる。これらの機械要素では回転の心出し精度が要求されるため、その接合方法としては締りばめが用いられる。

一般に、セラミックスと金属では熱膨張係数にかなりの差があり、高温になるにつれて締りばめ部の接合強度が変化する。このことは、締まりばめを適用する上で解決しなければならない問題である。また、レーザープリンター用のポリゴンミラーを支える動圧軸受にはセラミックスが使用されているが、この場合には温度変化による接合強度の変化よりも、ミラー表面の平面度に及ぼす影響が大きい。平面度は約100nm程度であり、非常な精密さを要求される問題である。

著者らは、このような問題に対応できるように、シュリンクフィッタという新しい機械要素を考案し、その有効性を理論と実験の両面から検討してきた^{3)~5)}。シュリンクフィッタは、はめあい面に挿入する機械要素であるので、できるだけ小さいほうが望ましい。その小型化には熱膨張係数の大きい材料を用いればよいが、材料自体の熱膨張には限界がある。

そこで、さらなる小型化を目指し、内部に液体を封入したハイブリッドシュリンクフィッタを開発した。これまでの実験においてハイブリッドシュリンクフィッタの有効性は確認されたが、耐久性に問題が残った⁷⁾。その原因としては過大な内部応力によるケーシング部材の塑性変形が考えられる。したがって、耐久性改善の為にケーシングの内部応力の評価と、それに基づく新たなケーシング材の選定が必要となる。

すでに既報⁸⁾においてケーシングに作用する応力を求めたが、それは2次元弾性解析に基づくものであった。本論文においては、軸方向も考慮した3次元弾性解析によりケーシングの内部応力を求め、その結果を基にケーシング材として使用可能な材料について検討を行った。

封入体として低融点合金を用いれば実験と同じ条件

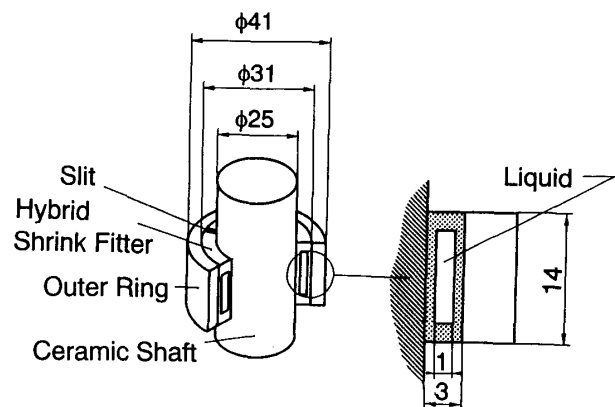


図1 ハイブリッドシュリンクフィッタを用いた接合体

* 原稿受付 平成6年7月11日。

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

^{*2} 学生員, 新潟大学大学院 [現: 石川島播磨重工業(株)]。

になり望ましいが、その高温下での膨張特性等が不明であるため計算ができない。そこで前報⁹⁾の2次元解析同様、高温・高圧下での特性が詳しく研究されている水を封入体として用いた。

2. 理 論

図1に示すように、ハイブリッドシュリンクフィッタは内部が空洞になっており、そこに水が封入されるものとする。水のみ封入した場合、高温下で膨張し過ぎるので、水と Si_3N_4 粉末の混合物も封入することにした。室温大気中での空洞部の容積に対する水の容積比率を $\beta(0 \leq \beta \leq 1)$ で与えた。変形の対称性より接合体の1/12を解析対象とし、解法にはFEMとポイントマッチング法を用いた。この解析方法は前報⁹⁾で用いたものと同様であり、2次元解析を3次元解析に拡張したものである。

図2に計算に使用したシュリンクフィッタの形状を示す。ABCDを内側接触面と呼び、EFGHを外側接触面と呼ぶ。内側および外側接触面を、円周方向に30等分に分割し、軸方向には11等分に分割した。

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式(1)のように表せる。

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

また、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において一定であるという条件を用いて式(2)を導入する。

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

式(1),(2)を連立させることにより、室温における接触圧力分布が求められる。式(1),(2)中の変数については既報⁹⁾で詳述しているので、ここでは説明を省略する。

次に温度を上げた場合を考えるために、式(1)を式(3)のように書き直す。

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

温度が ΔT だけ上昇すると式(3),(2)は、それぞれ式(4),(5)のように表現される⁹⁾。

$$\Delta P^A = (M^A + \Delta M^A)^{-1} (\Delta S^A - \Delta M^A P^A) \quad (4)$$

$$(\Delta V + \Delta V_0)/\Delta v - \beta V_0/v_0 = 0 \quad (5)$$

ここで、記号 Δ は温度が ΔT 上昇したときの諸量の増分を表わす。また、シュリンクフィッタ空洞部容積の増分は、熱膨張によるものを ΔV_0 で、 ΔP^A によるものを ΔV で表わす。

式(4),(5)を連立させて 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。

3. 計算条件

図1に接合体の寸法を示す。これらの材料及び寸法は既報⁹⁾のものと同じであり、セラミックスシャフトに Si_3N_4 、アウトターリングにSUS403、ハイブリッドシュリンクフィッタのケーシングにSUS304を用いた。

セラミックスの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依存性があるものとした。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させた。これらの値も全て既報⁹⁾で使用したものと同じとした。

室温における締めしろは、内側接触面、外側接触面共に半径差で $7.5\mu\text{m}$ 、すなわち直径差の合計で $30\mu\text{m}$ とした。また、接触面には摩擦が存在しないものとした。

4. 計算結果

4.1 接触圧力分布 図3(a)-(e)に $\beta=1/8$ のときの内側接触面の接触圧力分布を示す。 β が $1/8$ とは空洞部容積の $1/8$ が水で残りは Si_3N_4 粉末で満たされているということである。温度は 20°C から 400°C までである。図中のA,B,CおよびDはそれぞれ図2の記号に対応する。等高線の間隔は 10MPa であり、網かけで表した部分は液体封入部である。

20°C では液体封入部以外の部分で接触圧力が高く

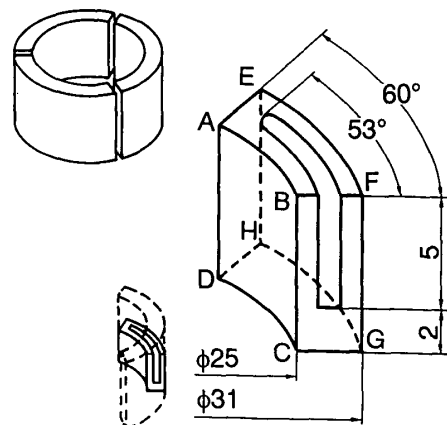
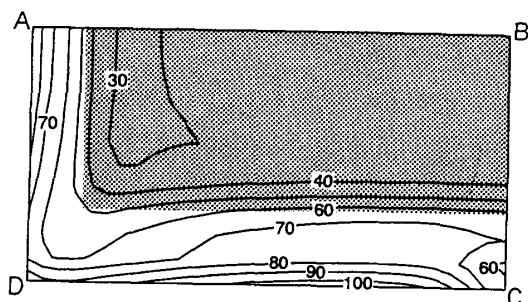
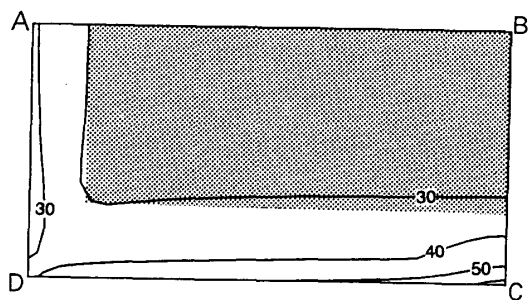


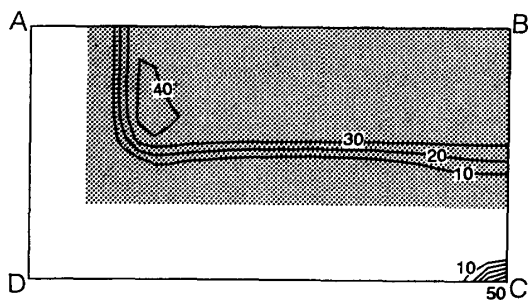
図2 ハイブリッドシュリンクフィッタの解析モデル



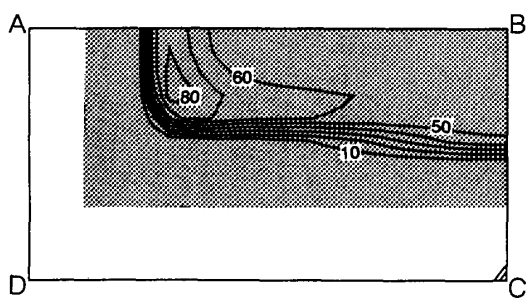
(a) 温度 20°C



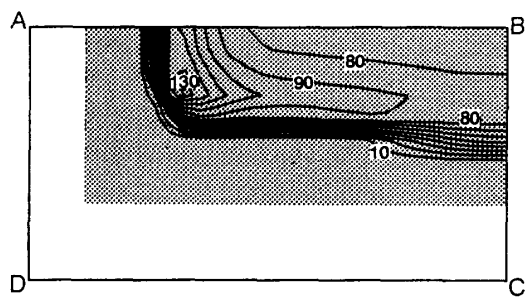
(b) 温度 100°C



(c) 温度 200°C

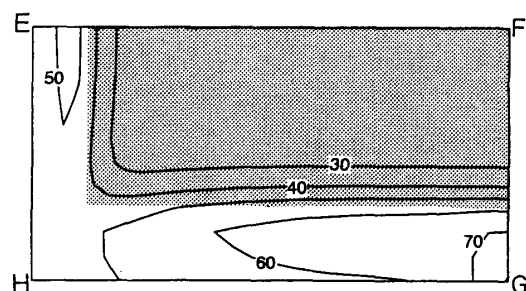


(d) 温度 300°C

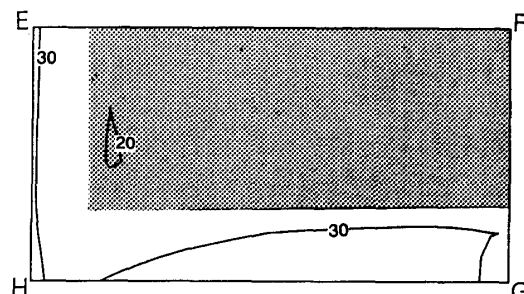


(e) 温度 400°C

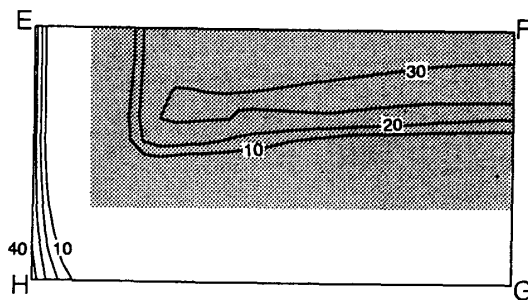
図3 内側接触面の接触圧力分布



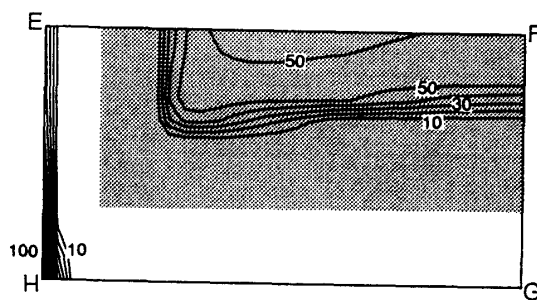
(a) 温度 20°C



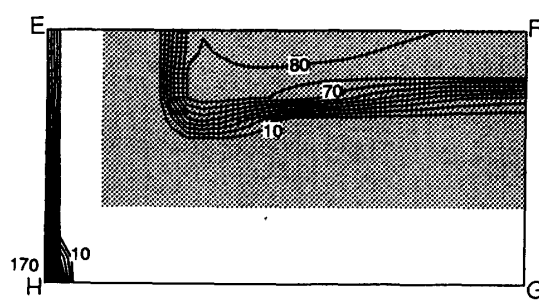
(b) 温度 100°C



(c) 温度 200°C



(d) 温度 300°C



(e) 温度 400°C

図4 外側接触面の接触圧力分布

なった。100°Cでは接触面全体がほぼ均一な圧力分布となった。200°Cになると接触しなくなる部分が存在するようになり、20°Cのときとは逆に液体封入部において高い接触圧力を示した。接触圧力が0となるのは等高線10MPaのすぐ近くである。300°Cではさらに接触する部分が減少し、液体封入部以外で接触しているのはC点の近傍のみであった。400°Cでは接触領域は300°Cとほとんど変わらないものの接触圧力は高くなった。

図4(a)~(e)に、図3に対応する外側接触面の接触圧力分布を示す。図中のE,F,GおよびHは図2の記号に対応する。内側接触面の場合と同じ方向から見ていることになる。全体的な傾向は図3の内側接触面と同じになるが、200°C以上では、内側接触面とは異なりEHのスリット端部においても高い接触圧力を示した。

内側および外側接触面の接触圧力分布より、高温下ではハイブリッドシュリンクフィッタが内部より膨張しつつ、その曲率半径が大きくなるように変形している様子がうかがえる。また、 $\beta=1/1$ 、 $\beta=1/3$ においても計算を行ったが、値は異なるものの同じような傾向の接触圧力分布となった。

既報で行った2次元解析結果と比較するために、図5には内側接触面のab上の接触圧力分布を示した。横軸の角度0°は点bに対応し、60°は点aに対応する。20°Cにおいては液体封入部、すなわち0°から53°において接触圧力はほぼ一定の値を示し、スリット端部において高くなった。100°Cでは、一部圧力が高いところもある

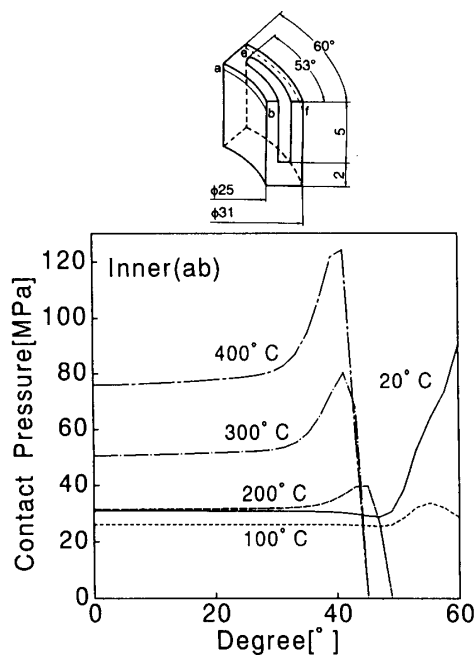


図5 内側接触面の中央部の接触圧力分布

が、0°~60°までほぼ一定の圧力を示した。また、20°Cのときよりも接触圧力は全体的に低下した。200°C以上では、温度の上昇とともに液体封入部における接触圧力が大きくなった。また接触していない領域もスリット端部近傍に見られた。

2次元解析でも同様な傾向がみられたが、高温下において接触しなくなる部分は3次元解析の方が多かった。

4.2 平均接触圧力と温度の関係 接合体の強度を考えるときには、接触圧力分布よりは平均接触圧力で考えたほうが都合がよい。なぜなら、平均接触圧力に摩擦係数をかけた値が単位面積当りの平均せん断強度になるからである。そこで、図6に内側接触面および外側接触面の温度と平均接触圧力の関係を示した。内

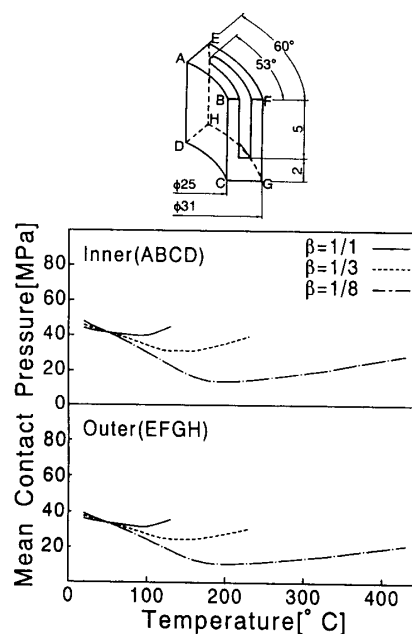


図6 内側および外側接触面の平均接触圧力と温度の関係

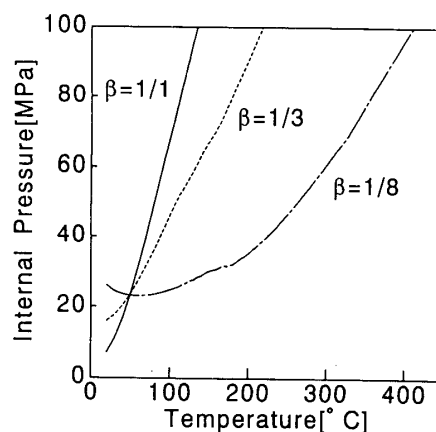


図7 空洞部内部圧力と温度の関係

側および外側接触面の半径方向の力が釣り合っている
ので、同一温度で比べると外側接触面の平均接触圧力は
面積に逆比例して小さくなるのが分かる。

さて、この図より β の値によらず、温度が上昇するに
つれて平均接触圧力は一旦低下し、その後徐々に上昇
することが分かる。また室温においては、 β の値が小さい
方が平均接触圧力が高く、高温においては逆に β の値
が大きい方が平均接触圧力は大きくなった。

β の値により到達温度が異なるのは次に示すように内
部圧力が高くなり過ぎ計算不可能となったことによる。

4.3 温度と液体封入部の圧力の関係 図7は空
洞部、すなわち液体の入っている部分の圧力と温度の
関係を示したものである。 $\beta=1/1$ と $1/3$ では、傾きは異
なるものの温度の上昇につれ内部圧力は単調に増加し
た。 $\beta=1/8$ では室温から100°C付近までは内部圧力が一
旦低下した後上昇した。これは、水の量が少ないた
め、100°C以下では十分な膨張量が得られないため
である。蒸気の実用状態式の圧力範囲は100MPaまで
であり、それを越えると適用できなくなる。その温度は
 $\beta=1/1, 1/3, 1/8$ に対してそれぞれ136°C, 220°C, 420°Cで

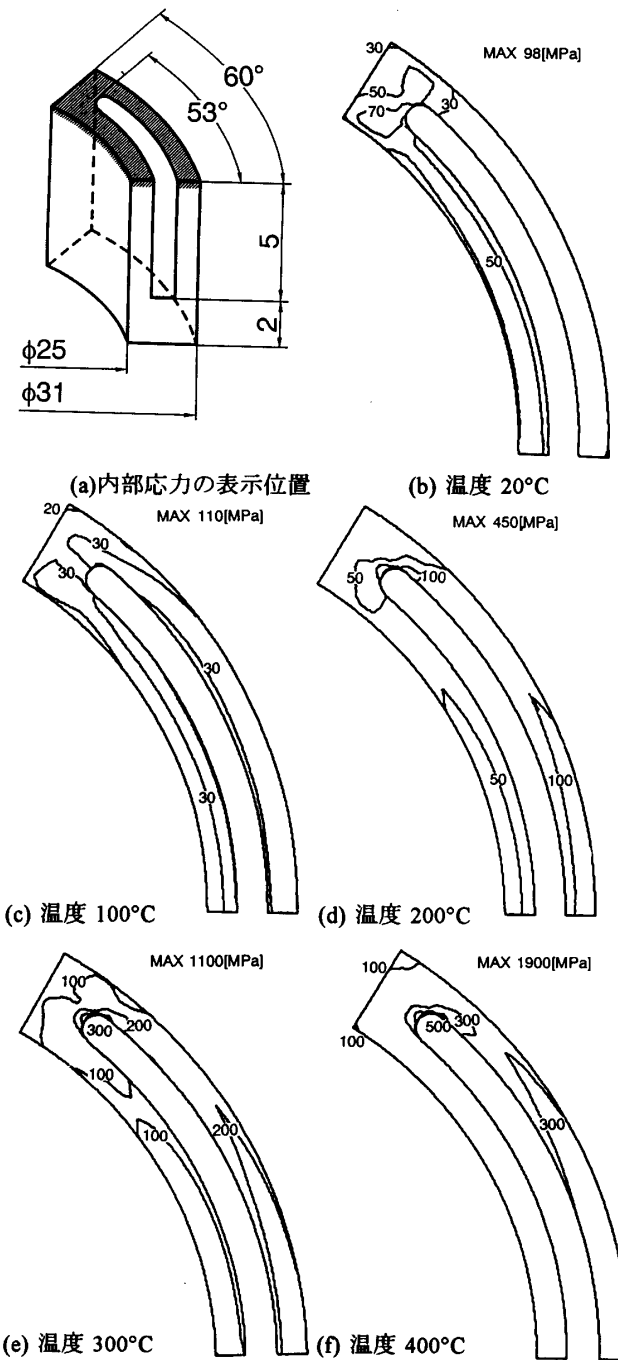


図8 シュリンクフィッタケーシングの内部応力

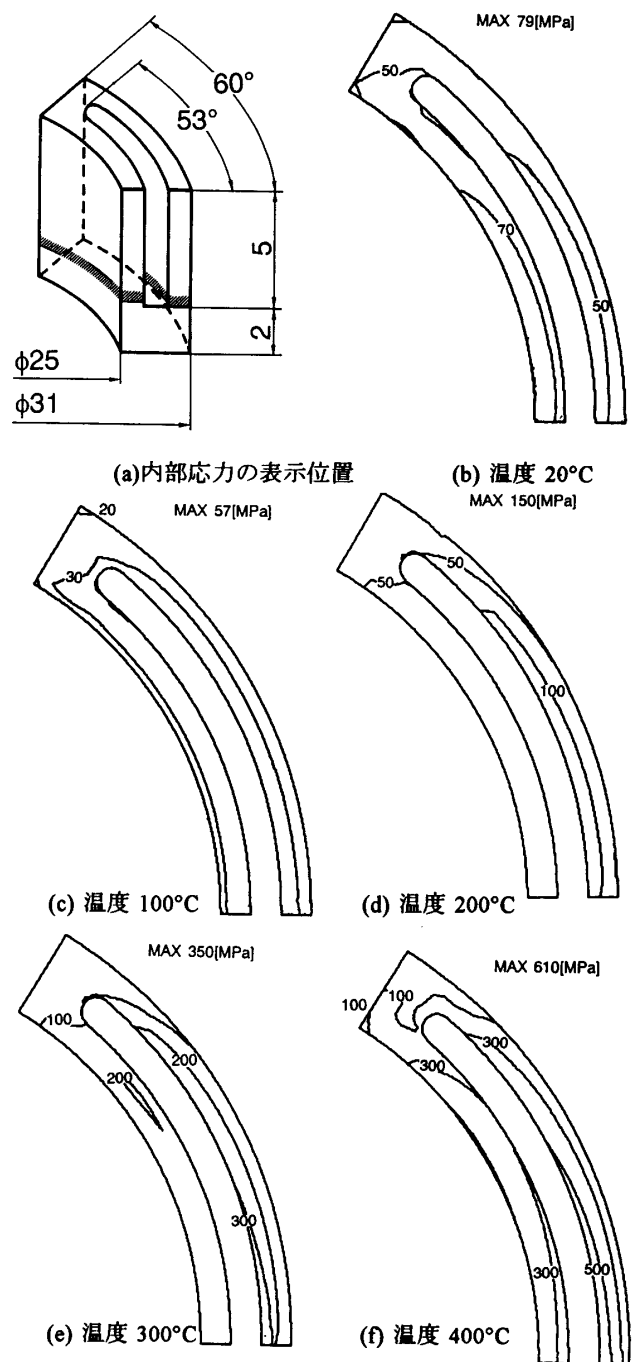


図9 シュリンクフィッタケーシングの内部応力

あった。

4.4 応力分布 図8.9は、シュリンクフィッタ内部に作用する応力をミゼスの相当応力として表したものである。どちらも混合比 $\beta=1/8$ である。図に示したMAX値は各温度のその断面内の最大応力である。また高温において急激に応力の値が大きくなるため、等高線の間隔は温度により変えている。すなわち、20°Cで20MPa、100°Cで10MPa、200°Cで50MPa、300°Cで100MPa、400°Cにおいては200MPaとした。

図8は、解析対象の一番上の部分、すなわちシュリンクフィッタの軸方向の中央部である。20°Cでは、内側接触面よりの部分の方が応力は高くなった。また最大応力は封入部の端で生じ、その値は98MPaであった。この断面内であれば、最大応力が生じる位置は温度にかかわらずいつもこの封入部の端であった。100°Cでは、応力はほぼ一様なものとなった。200°Cになると20°Cのときとは逆に外側接触面よりの部分が大きくなった。200°CにおけるSUS304の0.2%耐力は、150~400MPa程度である。封入部の端では最大応力である450MPaの応力値を示すので、ここでは塑性変形が生じ始めると考えられる。400°Cではほぼすべての部分が100MPa以上の応力値であり、外側接触面よりの部分ではほとんどが300MPaの応力値になっている。この温度におけるSUS304の0.2%耐力は100~300MPa程度なので、この断面内全体で塑性変形していると考えられる。

図9は封入部の一番下の部分、すなわち軸方向の封入部の端部である。図8に比べるとどの温度でも最大応力はこちらの方が小さくなった。

20°Cでは、内側接触面に近い方が応力は大きく、図8の場合とは異なり最大応力は封入部の端ではなく、内側接触面よりのところであった。100°Cではほぼ均一な応力分布となった。200°Cになると外側接触面よりの部分の方が応力の値が大きくなった。200°C以上の同じ温度で比べた場合、断面内のほぼ全域で図8よりも応力値は高くなるのがわかる。したがって、この断面でも400°Cになるとほとんどの部分でSUS304のケーシングは塑性変形することになると考えられる。

5. 考 察

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付け接合体の接触圧力分布は、内側および外側接触面共に100°C前後では均一な値を示した。しかし、それ以上高温になると接触圧力は大きく変化した。このような接触圧力分布のために、内部応力分布も200°C以上では不均一になり応力集中が生じ

た。400°Cにおいては応力値がほとんどの部分で300MPaを越え、SUS304を塑性変形させるのに十分な大きさとなった。したがって、ケーシングの塑性変形を防ぐためには高温強度のより優れたケーシング材を使用する必要がある。

例えば、インコネル718は高温強度が非常に高い材料である。いまこれを用いた場合を考える。インコネル718の400°Cでの0.2%耐力は、1GPa程度である。その熱膨張係数、ヤング率、ポアソン比がSUS304とは全く同じではないので、ここで計算した値とは単純には比較できないが、極端に応力値が異なるとも考えられない。計算より求めた応力は400°Cにおいてほとんどの部分で600MPaを越えることはなく、封入部の端のごくわずかな部分で1GPaを越えるのみであった。したがって、その部分でしか塑性変形が起こらないことになる。また、塑性変形が起こったとしても、そのわずかな部分においてのみ一旦塑性変形が起こるだけで、応力が緩和されれば弾性変形になり、複数回の加熱・冷却サイクルにおいても安定した状態になると考えられる。

6. 結 言

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付け接合体の接触圧力分布および内部応力を3次元弾性解析により求めた。その結果、封入体の内部圧力は2次元解析結果よりも低い混合比 β でかつ低い温度で計算範囲を越えるほど上昇することがわかった。また、軸方向の圧力と内部応力の分布を明らかにした。

これらの結果をもとにハイブリッドシュリンクフィッタの耐久性を検討して、ケーシング材としてインコネル718のような高温強度のある材料を用いれば、耐久性の向上は可能であるという見通しを得た。

文 献

- (1)吉岡・藤田・竹林・唯根, トライボロジスト, 38-12, (1993), 1077.
- (2)紺野, 第30回レーザー熱加工研究会論文集, (1993-7), 221.
- (3)新田・木越・加藤, 機論, 55-510, C(1989), 417.
- (4)新田・原, 機論, 55-520, C(1989), 3062.
- (5)新田・中静・原, 機論, 56-525, C(1990), 1289.
- (6)新田・坂井・原, 機論, 57-535, C(1991), 985.
- (7)新田・草間・原, 機論, 58-555, C(1992), 3326.
- (8)新田, 機論, 59-559, C(1993), 260.
- (9)日本機械学会 蒸気表 1980 SI, 第4版(1981).