

## セラミックスと金属の接合における熱応力解析

森 慎之助・梅本 実\*・岡根 功\*

(愛媛大学教育学部技術研究室)

(平成6年4月28日受理)

### Analysis of Thermal Stresses in the Bonding of Ceramics to Metal

Shinnosuke MORI, Minoru UMEMOTO\* and Isao OKANE\*

*Department of Technology, Faculty of Education,*

*Ehime University, Bunkyo-cho, Matsuyama 790*

(Received April 28, 1994)

The thermal stress is estimated by using FEM when the bonding body is cooled down from 1000°C to room temperature. The combination of insert metals, the thickness of insert metal and the figure of bonding body to minimize the thermal stress have been investigated.

The results are summarized as follows:

- (1) When the insert metal is applied a single layer, the following metals are useful for relaxing the thermal stress: (1) the soften metal closely similar to the thermal expansion coefficient of ceramics, and (2) the metal with the low coefficient of thermal expansion which has a low Young's modulus.
- (2) When the insert metal is applied as multi-layer, thermal stress can be reduced by the combination of a soften metal and the metal with the low coefficient of thermal expansion which has a high Young's modulus. The most effective combination is Ni/Kovar/Mo.
- (3) The relation between thermal stress and bonding area is recognized.

## 1. 緒 言

セラミックスはぜい性的かつ多孔質材料であるので、構造物をオールセラミックスとするこ

---

\*豊橋技術科学大学

(Department of Production System Engineering, Toyogashi University of Technology, Hibarigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi 440)

とは形成加工性や機械的性質等の面で信頼性、生産性を同時に得られないため、その適用範囲はいまだに著しく限定されている。これを補うために物性そのものの改良が種々の角度から行われているが未解決の点が多い。そこで金属材料と組み合わせた複合材料としての適用の拡大が期待されている。そのためには、金属との信頼性の高い接合技術が必要となる。その手段として固相接合法が中心となってきた。

しかしながら、このような異種材料の接合は、素材の物性値の違いから生じる多くの問題を抱えている。とくに、熱膨張差で加熱冷却時に熱応力が発生し、接合後の冷却過程では、残留応力が生じることが接合強度に著しく影響する<sup>(1) - (5)</sup>。この熱応力を緩和する方法として、(1)セラミックスに近い熱膨張係数を持つ材料を中間層として用いる、(2)軟質金属の変形により応力の緩和を行う、(3)なるべく低温での接合を行う、等があげられる。

本研究では、有限要素法を用いたシミュレーションによるセラミックスと鋼材の接合実験を行い、最適と思われる材料の組み合わせや形状を残留熱応力の値から検討した。また、シミュレーション実験を行うことにより、従来よりも効率的に熱応力を緩和させる接合方法を導き出し、信頼性の高い接合技術を確立することを目的とした。

## 2. 熱応力解析方法

熱応力解析は有限要素法を用いて行った。解析モデルはセラミックス  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $\phi 19 \times 5 \text{ mm}$ ) と鉄基合金 SNCM 鋼 ( $\phi 12 \times 5 \text{ mm}$ ) を固相接合した場合を想定した。また、インサート材はニッケル：Ni、コバルト：Ko およびモリブデン：Mo の3種類を用いた。表1に各材料の物性値を示す<sup>(6) (7)</sup>。接合体モデルは、軸対称体とみなされるため、解析には3角形リング要素を用いた。同要素による接合体基本モデルの要素分割図は図1に示すとおりである。また、インサート材の部分の要素分割はインサート材の厚さによって種々変化させ、形状によってそれぞれ異なった分割図を用いた。さらに、本解析では増分理論に基づいた弾塑性有限要素法を用いて解析を行った。すなわち、1000℃から室温までの25℃で発生する熱応力を、温度降下幅を25℃とした計39回のステップで解析した。ただし、増分型（線形問題）の有限要素法ではこの増分値（温度降下幅）は細分化するほど精度の良い解が得られるが、本解析では材料の物性値の温度依存性の配慮および解析時間等の問題からこの値を用いることにした。冷却は炉冷と仮定したため、部材内では温度勾配は生じないものとした。接合中の加圧力は固相接合の場合には必要となるが、本研究では発生熱応力のみ注目しているため無加圧とした。ヤング率、熱膨張係数、降伏応力等に代表される物性値の温度依存性は、この種の熱を利用した加工におけ

表1 各材料の機械的特性

		熱膨張係数 $\times 10^{-6} / (\text{k})$	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)
鋼 材	SNCM	5.4	206	0.29	470
	Ni	13.3	196	0.31	167
インサート材	Ko	5.8	137	0.30	412
	Mo	5.1	323	0.32	676
セラミックス	$\text{Si}_3\text{N}_4$	3.2	274	0.25	—

る熱応力解析で得られる結果に大きな影響をおよぼす。したがって、本研究においては、有限要素解析を行うにあたり各材料の各種物性値および塑性変形特性を考慮した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 インサート材を単層で用いた場合の影響

インサート材に軟質金属としてニッケル、低熱膨張金属としてコバルトおよびモリブデンを単層として用いた場合のインサート層厚さとセラミックス内の最大応力の関係を図2に示す。コバルトを単層で用いた場合が一番熱応力を緩和しているのがわかる。これは、コバルトは低熱膨張金属であり、ヤング率が低く、降伏点が高い。つまり弾性域のひずみが大きいので弾性域でかなりの熱応力の緩和が行われたと思われる。ニッケルを用いた場合、厚さが0.6 mmを越えると熱応力の減少傾向が穏やかになり、それ以上厚さを増加させても熱応力があまり低減されていないのがわかる。ニッケルは冷却中に発生する熱応力により塑性変形する。これによりセラミックス中の熱応力を緩和する。ニッケルを厚くするとセラミックスとの熱膨張差によるニッケル自身の収縮によりセラミックス内の熱応力を緩和しきれなくなると思われる。

また、モリブデンを単層で使用した場合、厚さを増加させてもほとんど熱応力が緩和されていないことがわかる。モリブデンは熱膨張係数は低いがヤング率および降伏応力が高いため、弾性域および塑性域においても熱応力の緩和が行われなかったと思われる。

以上のことからセラミックスと鋼材の接合においてインサート材を単層で用いる場合、軟質金属であれば熱膨張係数の小さな材料を、硬質金属の場合には低熱膨張金属であればヤング率の小さい材料を用いると応力緩衝の効果が大きいことがわかった。

#### 3-2 インサート材を多層構造にしたときの影響

インサート材を多層構造にした場合のセラミックス内の熱応力に与える影響について解析を行った。図3に中間層を2層および3層にした場合のニッケル厚さとセラミックス内の最大主応力の関係を示す。コバルトおよびモリブデンの厚さは0.5 mmとした。Ni/Ko および

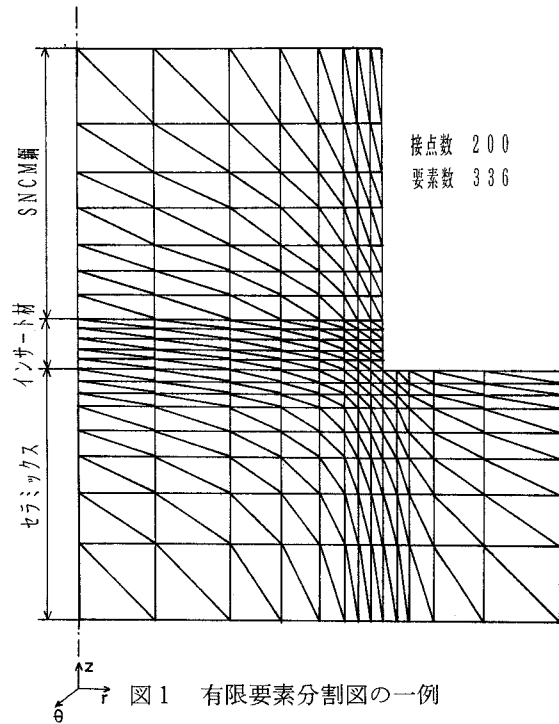


図1 有限要素分割図の一例

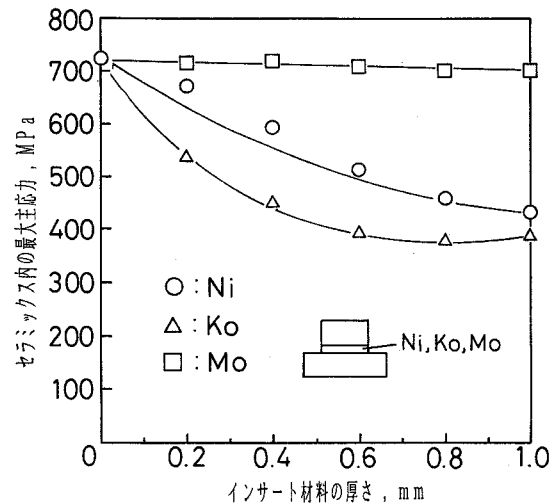


図2 インサート材の厚さと主応力の関係

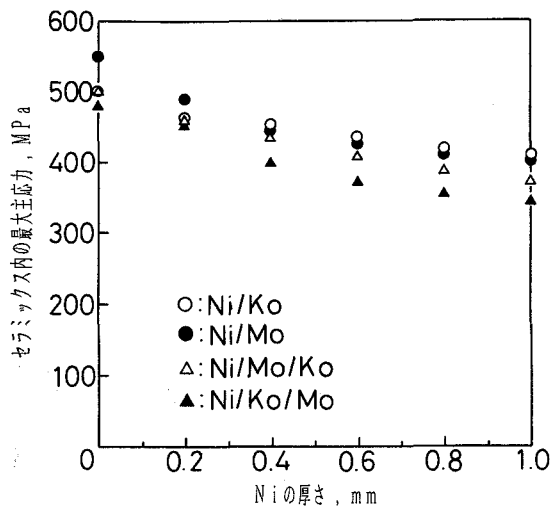


図3 インサート材を多層にしたときのNi厚さと主応力の関係

Ni/Moともニッケル厚さが0.8 mm付近まで減少傾向を見せるがそれ以上ではニッケル厚さの影響は見られない。Ni/Koの組み合わせの場合、ヤング率の小さい低熱膨張金属のコバルトと熱膨張係数の大きい軟質金属のニッケルとの組み合わせはインサート材として積層する効果があまりないと思われる。これはニッケルの熱収縮にともないコバルトも収縮してしまうためと考えられる。Ni/Moについてはモリブデンをインサート材として単層で使用した場合はほとんど熱応力の緩和が行われなかったが、ニッケルをヤング率の大きいセラミックスおよびモリブデンで挟むことによりニッケルの収縮力が分散されたため、セラミックス内の熱応力が大幅に緩和されたと考えられる。

つぎに中間層を3層にした場合について考察した。Ni/Ko/Moの積層順序の方がNi/Mo/Koの積層順序より熱応力の緩和が優れていることがわかる。これも2層の場合と同様に収縮率の大きい材料をヤング率の大きい材料で挟むことにより熱応力の緩和能が大きくなるためと思われる。セラミックス内の熱応力も単層よりも2層、2層よりも3層と多層化するにつれて緩衝効果が大きくなっている。しかし、層が増えるほど高度な接合技術を要するため、少ない層で最大の効果を得られる組み合わせの選択が重要であると思われる。

実際にこれらの材料を用いて接合体を作製し、せん断強度実験を行った。その結果を図4に示す。全体的に低いせん断強度ではあるがインサート材を単層で用いるより多層にして用いる方が高い接合強度が得られた。また、インサート材の組合せとしてNi/Ko/Moが最高の接合強度を示した。これは熱応力解析で行ったインサート材の最適の組合せと一致した。

### 3-3 熱応力に対する接合体形状の影響

接合金属の寸法および形状を変化させた場合に発生する熱応力について検討した。セラミックスの寸法をφ19×5 mmとしてSNCM鋼の厚さを5 mmで直径の寸法をφ4 mmからφ19 mmまで変化させた場合のセラミックス内で発生する最大主応力を図5に示す。直径がφ4 mmから大きくなるにつれて熱応力は大きくなるがφ12 mm付近でピークとなりそれ以後は減少傾向を示している。鋼の直径が小さい場合は鋼の収縮によるSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>への影響が比較的低いため、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>で発生する熱応力も小さく

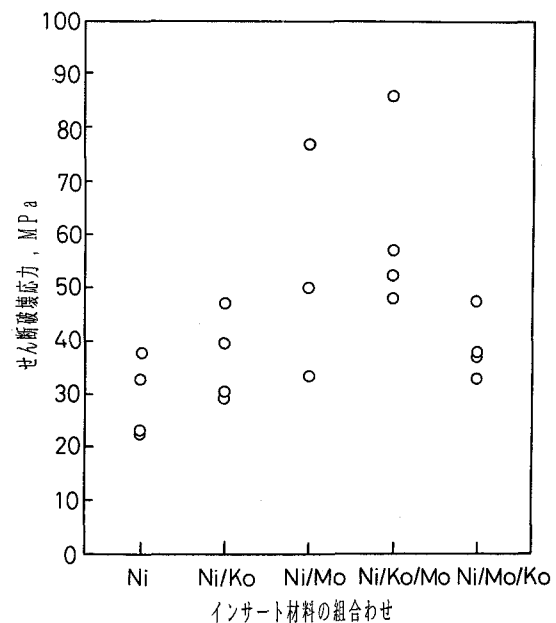


図4 接合強度に対するインサート材の組合せ

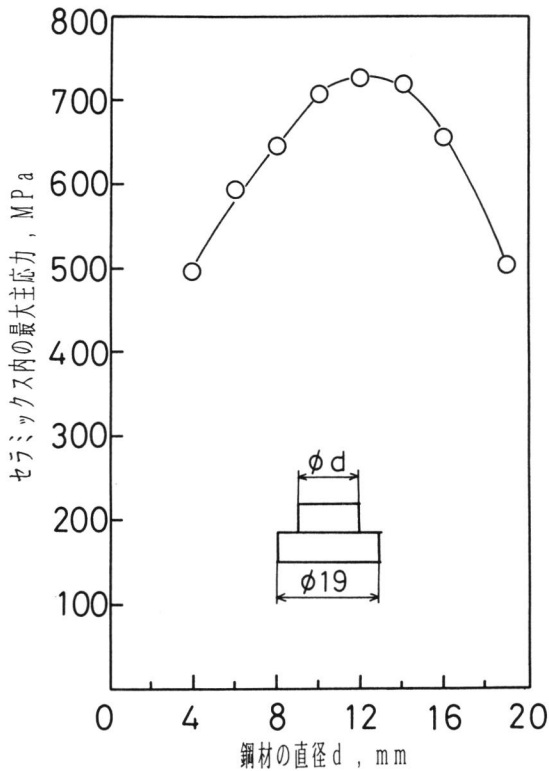


図5 鋼材の直径と主応力の関係

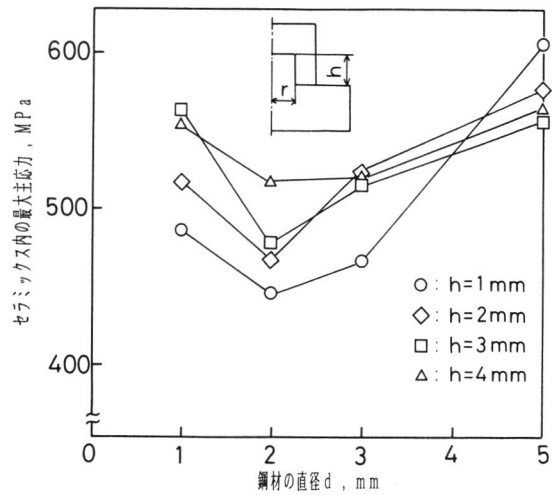


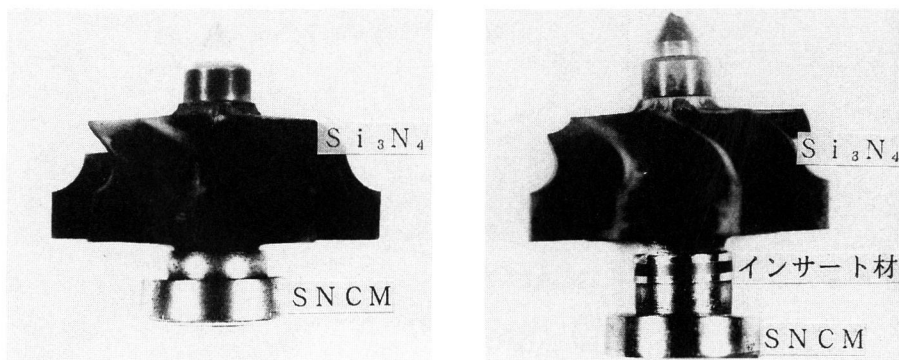
図6 界面形状と主応力の関係

なっている．直径が増大するにつれて  $\text{Si}_3\text{N}_4$  へ与える鋼の収縮力の影響も増大し、寸法効果により発生する熱応力も大きくなる．接合体が円柱形になる  $\phi 19 \text{ mm}$  に値が近づくとき切欠き効果が小さくなるため、最大主応力も小さくなっている．以上のことから切欠きによる影響を受け

にくい形状にすることより熱応力を低減することができると思われる．

つぎに本解析を実際の接合体設計に用いる場合、接合界面形状を凹凸のついたものについて検討した．接合界面における強度の向上および焼きばめの効果を考慮してセラミックスの接合界面を凸状にしたものを用いた<sup>(8)</sup>．突起部の高さおよび底面の半径を変化させた解析結果を図6に示す．これによると本実験においては  $r = 2 \text{ mm}$  において最大主応力は最小のピークを示し、 $h = 1 \text{ mm}$ 、 $r = 2 \text{ mm}$  のとき最大主応力の最小値が得られた．セラミックスの突起部分は鋼材に囲まれており圧縮応力が働く．セラミックス内で最大主応力が発生するのは界面近傍の外周部分であった．この結果を参考にし、試作したターボチャージャーローターを図7に示す．

(a)はセラミックスと鋼材の直接接合であり、(b)はインサート材 (Ko/Ni/Mo/Ni/Ko) を用い



(a) 直接接合の場合

(b) インサート材を使用した場合

図7 ターボチャージャー接合体の一例

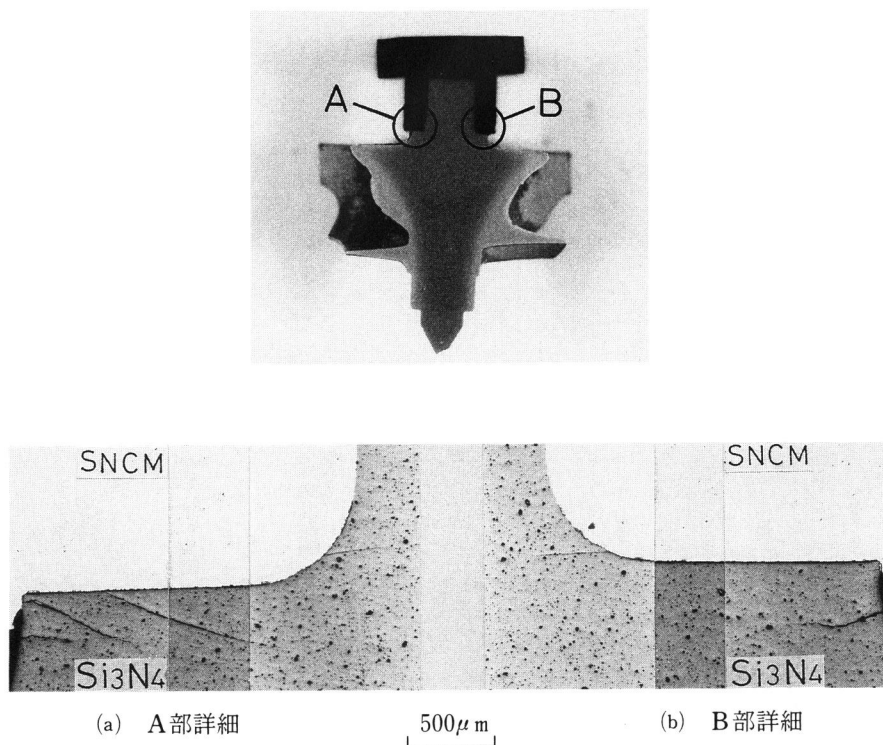


図8 セラミックス界面でのき裂

て接合した場合である。また、図8にセラミックス内のき裂の様子を示す。き裂の発生した位置は、セラミックスの外周部分および切欠き部であり、解析により応力集中が見られた部分と一致する。接合界面を凸にした場合、接合面積の増大により熱応力は大きくなり直接接合ではき裂の発生により健全な接合体は得られなかった。また、インサート材を用いた接合体でも微細なき裂の発生があった。

#### 4. 結 言

有限要素法によりセラミックス—SNCM 鋼の固相接合における熱応力解析を行い、発生する熱応力におよぼすインサート材および接合体形状の影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

1. インサート材を単層で用いる場合、軟質金属であればセラミックスの熱膨張係数に近い材料を、また、低熱膨張金属であればヤング率の小さい材料を用いると熱応力の緩衝効果が大きい。
2. インサート材を多層にして用いる場合、軟質金属とヤング率の大きい低熱膨張金属を組み合わせると軟質金属が有効に働き、熱応力の緩和効果が大きい。
3. 本研究で得られたインサート材の組み合わせとして、セラミックス側からニッケル／コバルト／モリブデンの順に組み合わせるのが最も高い熱応力緩和能を示す。
4. 接合面積と熱応力には相関関係が認められた。また、切欠き効果による応力集中も重要な因子である。

参 考 文 献

- (1) 菅沼ら, 日本金属学会春期大会一般講演概要, 1986, P 124
- (2) 山田ら, 日本金属学会春期大会一般講演概要, 1986, P 125
- (3) 田中ら, 日本金属学会春期大会一般講演概要, 1988, P 527
- (4) 平野ら, 溶接学会全国大会講演概要第43集, 1988, P 188
- (5) 中尾ら, 溶接学会全国大会講演概要第39集, 1986, P 104
- (6) 新版機械設計便覧, 丸善, 1973
- (7) 工業材料別冊, 第35巻第4号, 1986
- (8) 井関, 機械の研究, 第39巻第11号, 1987, P 29