

傾斜機能材料の熱弾塑性応力解析と最適材料設計*

荒居 善雄^{*1}, 小林 英男^{*2}, 田村 充章^{*3}Elastic-Plastic Thermal Stress Analysis for Optimum Material Design
of Functionally Gradient Material

Yoshio ARAI, Hideo KOBAYASHI and Mitsuaki TAMURA

Equivalent inclusion method was applied to the functionally gradient material (FGM) of ceramic and metal to evaluate the work hardening constants and thermal conductivity. Thermal and stress analyses of FGM were performed by the two-dimensional finite-element method. In order to reduce the sintered residual stresses, thermal stresses at thermal loading and total residual stresses after cooling, the compositional profiles of FGM were analysed. Based on the results, optimum material design of FGM for thermal loading was performed. The results obtained are as follows. (1) The optimum material design conditions under the operation conditions are that (i) the material pair should be ZrO₂ and SUS 304, (ii) FGM should consist of five layers, and (iii) the compositional profile should have a gentle slope on the ZrO₂ side. (2) The tensile residual stresses after cooling are larger than the sintered residual stresses, because the maximum stress at the thermal loading is beyond the yield stress. (3) The optimum material design for the stress for a given operation condition can be determined by the method developed in this study.

Key Words: Residual Stress, Thermal Stress, Material Design, Optimum Design, Functionally Gradient Materials, Finite-Element Method

1. 緒 言

傾斜機能材料は材料設計が容易な材料であり、材料の組合せ、組成傾斜、粒子形状などを使用目的、使用環境に応じて最適に設計することができる^{(1)~(4)}。最適材料設計を行うためには、使用状態における材料の挙動を定量的にシミュレートすることが不可欠であり、力学的性質や熱物性値の評価方法が重要となる。傾斜機能材料の熱応力に関する従来の研究では、材料特性の評価方法として線形複合則を用いた弾性有限要素法による焼結残留応力の解析⁽⁵⁾⁽⁶⁾、平板および円筒の定常熱応力の解析^{(7)~(10)}などが行われている。著者らは、前報において傾斜機能材料を等価介在物法によりモデル化し、弾性有限要素解析により残留応力に及ぼす分割数、組成分布形状の影響を調べ、残留応力を考慮した最適材料設計の概念を提案した⁽¹¹⁾。しかし、最適材料設計に対して、焼結時の残留応力と熱負荷時の熱応力の相互作用を考慮する研究や、材料の拘束条件を考慮する研究は行われていない。

本研究では、傾斜機能材料の定常熱応力、残留応力を弾塑性有限要素解析により求め、焼結残留応力、熱負荷時の応力、冷却後の残留応力の統一的な解析の必要性を示した。さらに、材料組合せ、組成分布形状、材料の拘束条件が応力分布に及ぼす影響を明らかにし、応力に関する最適材料設計の例を示した。

2. 解 析 方 法

2.1 材料特性の評価 傾斜機能材料を粒子分散複合材料と考え、巨視的弾性係数および熱膨張係数を等価介在物法により評価した。評価方法の詳細は前報と同様であり、ここでは省略する⁽¹¹⁾。

田中らによれば、分散強化合金の降伏応力 σ_{ys} 、線形加工硬化係数 H は、分散粒子が球形の場合、分散粒子の体積含有率 ϕ と母相の降伏応力 σ_{ys0} から次式で与えられる^{(12)~(14)}。

$$\sigma_{ys} = \frac{\sigma_{ys0}(1-\phi)}{1-D\phi} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$H = \frac{\phi(1-\phi)EC}{1-D\phi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 E は母相の縦弾性係数である。 C と D は、母相のポアソン比 ν と介在物の縦弾性係数 E' 、ポアソン比 ν' を用いて、次式で表される。

* 原稿受付 平成 4 年 6 月 25 日。

^{*1} 正員、埼玉大学工学部(〒338 浦和市下大久保 255)。^{*2} 正員、東京工業大学工学部(〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。^{*3} 東京工業大学大学院。

$$C = \frac{3E'(7-5\nu)}{2E'(1+\nu)(8-10\nu) + 2E(1+\nu')(7-5\nu)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$D = \frac{15E'(1-\nu^2)}{E'(1+\nu)(8-10\nu) + E(1+\nu')(7-5\nu)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

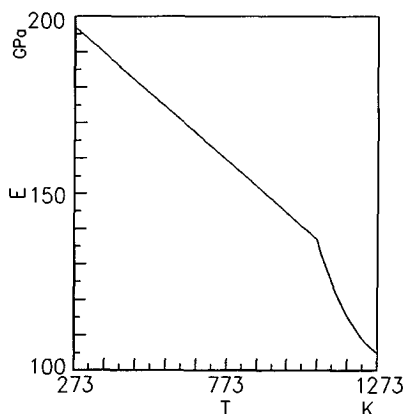
若島らによれば、熱伝導率 λ^m の母相中に、熱伝導率 λ' の球状粒子が存在する場合、巨視的熱伝導率 λ は次式で表される⁽¹⁵⁾。

$$\lambda = \lambda^m + \frac{3\phi(\lambda' - \lambda^m)\lambda^m}{3\lambda^m + (1-\phi)(\lambda' - \lambda^m)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

2.2 有限要素解析 セラミックスと金属の間の組成の傾斜を組成一定の層に分割したモデルについて、有限要素法による熱弾塑性解析を行った。解析は、傾斜機能材料の焼結過程によって生じる残留応力解析、初期状態として残留応力を考慮した熱負荷時の応力解析および除荷時（冷却時）の残留応力解析の三つに分けて行った。焼結過程によって生じる残留応力は冷却時に発生する熱応力として解析し、温度条件は各層間の界面が強度を持ち始める温度を考慮して、800 K から 300 K に一様冷却条件とした。熱負荷としてセラミックス側に 2 000 K、金属側に 300 K の温度条件

表 1 材料特性

| Material | E | ν | α | σ_{ys} | λ |
|--------------------------------|-------|-------|------------------|---------------|----------------|
| | GPa | | 1/K | MPa | cal/(cm sec K) |
| (at 293K) | | | $\times 10^{-6}$ | | |
| SUS304 | 186.2 | 0.3 | 18.0 | 210.7 | 0.04 |
| Si ₃ N ₄ | 274.4 | 0.27 | 3.5 | -- | 0.07 |
| ZrO ₂ | 205.8 | 0.32 | 10.5 | -- | 0.007 |



(a) 縦弾性係数

を与えた。弾性解析と異なり、弾塑性解析では焼結残留応力と熱負荷による熱応力を重ね合わせることで熱負荷時の応力を解析することはできない。

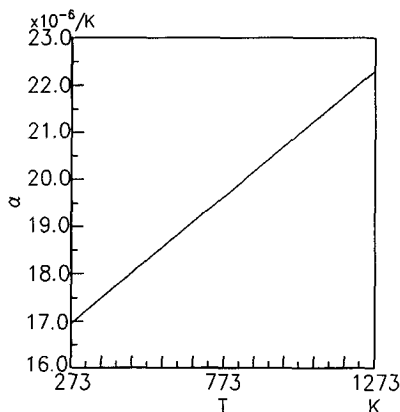
金属としてステンレス鋼 SUS 304 を、セラミックスとして Si₃N₄ と ZrO₂ の 2 種類を想定した。Si₃N₄ は高強度の材料であり、傾斜機能材料に強度が要求される場合に使用されると考えられる。反面、熱伝導率が高いために、遮熱性があまり期待できない。ZrO₂ はセラミックスの中では強度の高い材料ではないが、弾性係数、熱膨張係数が SUS 304 に近い。また熱伝導率が極めて低く、遮熱性が期待できる。

解析に使用する材料特性を表 1 に示す。材料特性の温度依存性は、SUS 304 の縦弾性係数と熱膨張係数のみ考慮した。SUS 304 の縦弾性係数の温度依存性を図 1 (a) に、熱膨張係数の温度依存性を図 1 (b) に示す。

傾斜機能材料を 2 層（直接接合）、3 層、4 層、5 層、6 層、8 層に分割した場合を解析した。それぞれの解析における各層のセラミックス粒子の体積分率の組合

表 2 セラミックス粒子の体積分率の組合せ

| 2 div. | 100% | | 0% | | | |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3 div. | 100% | | 50.0% | | 0% | |
| 4 div. | 100% | | 65.0% | | 35.0% | |
| 5 div. | 100% | | 75.0% | | 50.0% | |
| 6 div. | 100% | | 80.0% | | 60.0% | |
| 8 div. | 100% | | 85.3% | | 71.4% | |
| Case 1 | 100% | 60.0% | 40.0% | 25.0% | 15.0% | 8.0% |
| Case 2 | 100% | 97.0% | 92.0% | 85.0% | 75.0% | 60.0% |
| Case 3 | 100% | 95.0% | 85.0% | 70.0% | 30.0% | 15.0% |
| Case 4 | 100% | 75.0% | 60.0% | 52.0% | 48.0% | 40.0% |



(b) 熱膨張係数

図 1 材料特性の温度依存性 (SUS 304)

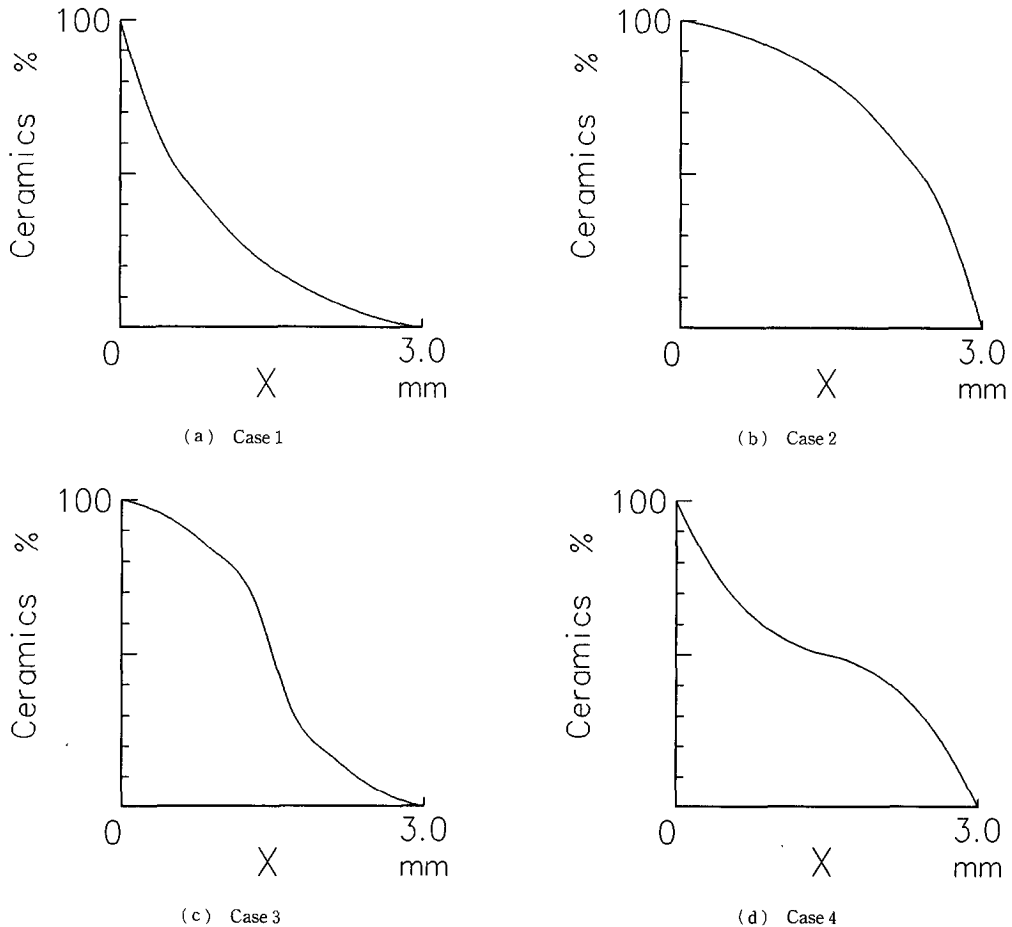


図 2 組成分布形状

せを表 2 に示す。層はセラミックス 100%側を 1 層めと定義する。分割数による影響を解析する場合、組成分布形状はすべて線形組成分布形状を採用した(表 2 中の 2 div.~8 div.)。組成分布形状の影響を解析する場合、分割数を 8 分割とした(表 2 中の Case 1~Case 4)。組成分布形状の詳細を図 2 に示す。図 2 (a) (Case 1) は、セラミックス側の組成傾斜を大きく、金属側の組成傾斜を小さくした場合であり、図 2 (b) (Case 2) は Case 1 の逆の組成分布形状である。図 2 (c) (Case 3) は、厚さ方向中央部の組成傾斜を大きく、セラミックス側と金属側の組成傾斜を小さくした場合であり、図 2 (d) (Case 4) は Case 3 の逆の組成分布形状である。

図 3 を参照して、金属材料の主構造 (SUS 304) と高温環境 (2 000 K) の間に熱遮蔽材料として傾斜機能材料を設置する状況を想定する。傾斜機能材料の SUS 304 側を主構造材に完全接着しない場合(曲げを拘束しない条件)と完全接着する場合(曲げを拘束する条

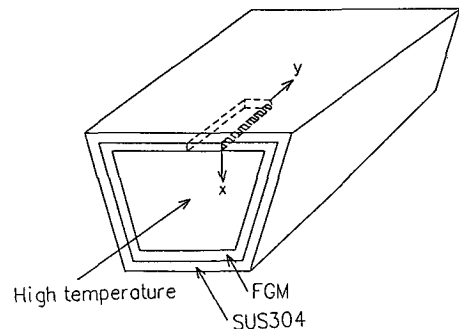


図 3 解析モデルの概念

件)の2種類を解析した。傾斜機能材料の定常温度分布と応力を、図 3 の斜線で示した断面の二次元モデルに置き換えて解析した。要素分割の例を図 4 に示す。厚さ 3 mm、長さ 15 mm の傾斜機能材料を、対称性を考慮して長手方向の 2 分の 1 のみ解析した。要素は 8 節点アイソパラメトリック二次元平面歪要素を用い、

図に示すように応力集中が生じる自由端 ($y=0$) と各層間の界面近傍に向かって要素を細かく分割した。以下では応力として、傾斜機能材料の破壊の大きな原因の一つである層間はく離の原因となる、自由端 ($y=0$) における x 方向の界面垂直方向応力 σ_x を中心に取り上げる。

3. 解析結果

3.1 熱負荷時の応力の評価 Si_3N_4 と SUS 304 および ZrO_2 と SUS 304 の材料組合せにおける熱負荷時の応力を比較して図 5 に示す。組成分布形状は Case 3、装着条件は曲げを許す場合である。 Si_3N_4 と SUS 304 の場合、板厚中心部において大きな引張応力が発生するが、 ZrO_2 と SUS 304 の場合、板厚全体にわた

って圧縮応力が発生し、その絶対値は Si_3N_4 と SUS 304 の場合よりも小さい。

熱負荷時の応力に及ぼす分割数の影響を図 6 に示す。材料組合せは ZrO_2 と SUS 304 であり、装着条件は曲げを許す場合である。熱負荷時の応力は、いずれの分割数でも圧縮応力であり、最大圧縮応力の大きさは、分割数の増加に伴い減少する。熱負荷時の応力に及ぼす組成分布形状の影響を図 7 に示す。材料組合せは ZrO_2 と SUS 304 であり、装着条件は曲げを許す場合である。図 7 (a) は組成分布形状が図 2 の Case 1 と Case 2 の場合、図 7 (b) は図 2 の Case 3 と Case 4 の

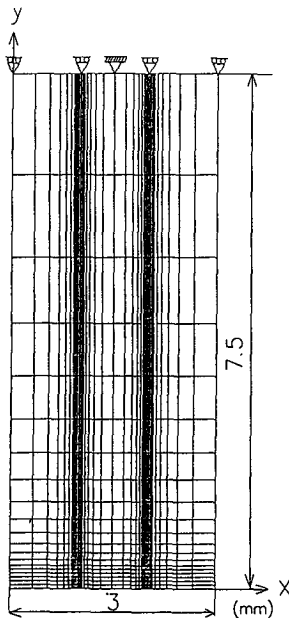


図 4 要素分割の例

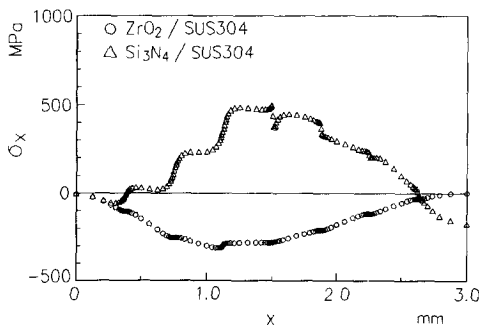


図 5 材料組合せによる熱負荷時の応力の比較

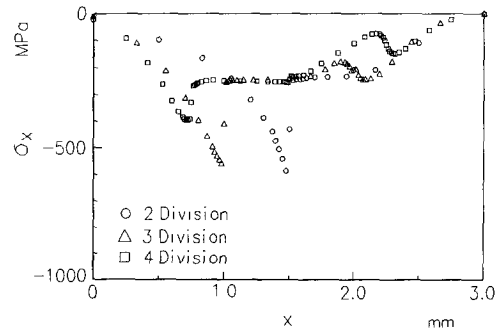
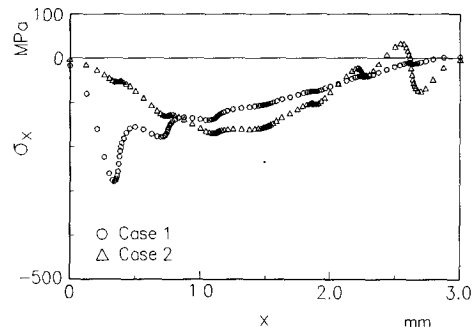
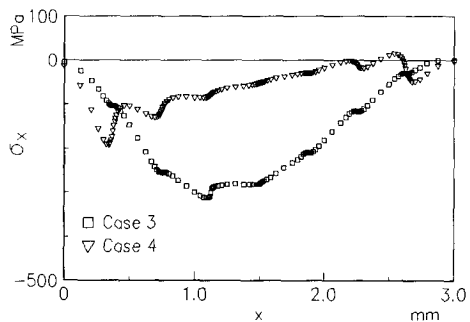


図 6 熱負荷時の応力に及ぼす分割数の影響



(a) Case 1, Case 2



(b) Case 3, Case 4

図 7 熱負荷時の応力に及ぼす組成分布形状の影響

場合である。熱負荷時の応力はいずれの組成分布形状でも圧縮応力が主であり、 ZrO_2 側の組成傾斜を小さくした場合 (Case 2) が最も応力を軽減する。

熱負荷時の応力に及ぼす装着条件の影響を図 8 に示す。材料組合せは ZrO_2 と SUS 304 であり、組成分布形状は Case 3 である。曲げを拘束する場合、接着部近傍で大きな熱負荷時の応力が発生する。

3・2 除荷時の残留応力の評価 大きな熱負荷状態から室温まで除荷すると、弾性解析の場合には、焼結残留応力に一致する。しかし、弾塑性解析の場合には、焼結時、熱負荷時に材料が塑性変形しているために、除荷しても焼結残留応力に一致しない。強い塑性拘束によって焼結残留応力以上の残留応力が発生していると考えられる。実際に、傾斜機能材料の熱負荷試験において熱負荷時に破壊しなかった材料が冷却途中に破壊したとの報告もある⁽¹⁶⁾。除荷時の残留応力を解析することは材料の設計上不可欠である。

除荷時の残留応力を焼結残留応力および熱負荷時の応力と比較して図 9 に示す。材料組合せは ZrO_2 と SUS 304 であり、組成分布形状は Case 3、装着条件は曲げを許す場合である。熱負荷時の応力が圧縮降伏応力を超えるために、熱負荷後の引張残留応力は焼結残留応力に比較して大きい。

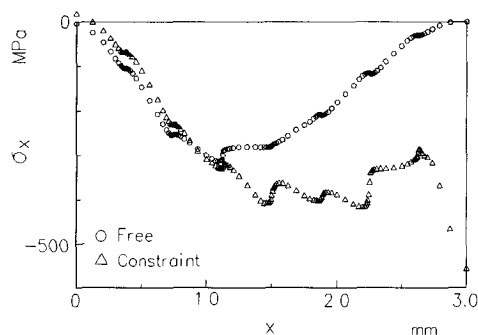


図 8 熱負荷時の応力に及ぼす装着条件の影響

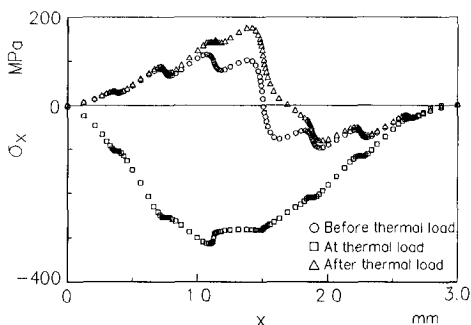


図 9 除荷時と焼結時および熱負荷時の応力の比較

3・3 界面平行方向応力の評価 傾斜機能材料の熱負荷試験における冷却途中の破壊では、界面に垂直な厚さ方向の割れによる破壊も発生している⁽¹⁶⁾。界面平行方向残留応力増加の顕著な例として、 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS 304}$ 傾斜機能材料の除荷時の長手方向中央断面 ($y=7.5$) における y 方向応力 (σ_y) の x 方向分布を図 10 に示す。 σ_y は各層の界面で大きな引張応力であり、各層の界面から厚さ方向の割れが発生しやすいと考えられる。

4. 応力に関する最適材料設計

以上の結果を用いて傾斜機能材料の応力に関する最適材料設計について考察する。本研究で開発した傾斜機能材料の応力に関する最適材料設計手法を流れ図として図 11 に示す。応力に関する最適化は、焼結残留応力解析結果、熱負荷時の熱応力解析結果、除荷時の残留応力解析結果について、それぞれ行う。応力に関する最適化において、前述した解析結果に基づき設計パラメータの変更順位付けを行った。以下に、流れ図の各段階に関する詳細を述べる。

応力に関する最適材料設計を行う場合、応力解析を弾性範囲で行うか、弾塑性範囲まで拡張するかが問題となる。弾性解析、弾塑性解析の得失をまとめて表 3 に示す。

焼結残留応力に関しては、使用するセラミックスの種類によらず、分割数の増加に伴い残留応力は低下する。また、分割数を 4 分割以上にすると、材料に降伏がほとんどみられない。したがって、始めに焼結残留応力に及ぼす分割数の影響を弾塑性解析によって調べ、降伏がほとんど生じない分割数を用いて、その他の因子に関する焼結残留応力解析を行う場合、弾性解析を用いれば十分である。分割数の増加は製造工程を複雑にするため、焼結残留応力のみを考えれば、本研究の使用条件の場合、材料の降伏がほとんどみられない 4

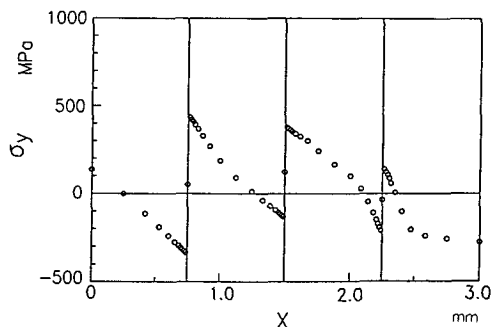


図 10 中央断面における界面平行方向垂直応力の分布

分割で良いと考えられる。

熱負荷時の応力に関しては、装着方法、材料組合せの違いにより応力分布に顕著な違いがみられる。SUS 304 側を主構造に完全接着し、曲げを拘束すると、接着面において非常に大きな圧縮応力が発生する。接着面で材料が破壊することは明白であり、完全接着は採用せず、曲げを許容する装着方法の採用が推奨される。曲げを許容する装着方法でも、熱負荷が非常に大きいため、材料は広範囲にわたり降伏する。そのため

に、熱負荷時の応力解析には弾塑性解析が必要である。

$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS 304}$ 傾斜機能材料の場合、熱負荷時の応力は主に引張応力となる。また、分割数を増加しても引張応力は 500 MPa 以下に低下せず、材料の降伏がみられる。このように大きな熱負荷がかかる環境には $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS 304}$ 傾斜機能材料は適当ではないと考えられる。

$\text{ZrO}_2/\text{SUS 304}$ 傾斜機能材料の場合、熱負荷時の応力は主に圧縮応力となる。また、5 分割以上の場合は、組成分布形状によっては材料が降伏しない場合がある。製造工程とのかねあいより 5 分割が適当であると考えられる。また、組成分布形状を適当に選択することによりさらに応力が軽減できる。 ZrO_2 側の組成傾斜を小さくした場合が最も応力を軽減する。

以上より熱負荷時の応力を軽減するには、 $\text{ZrO}_2/\text{SUS 304}$ 傾斜機能材料を用い、5 分割にし、 ZrO_2 側の組成傾斜を小さくすることが最適材料設計条件であると考えられる。また、これは焼結残留応力を軽減する条件も満足している。

熱負荷時に破壊しなくても、熱負荷時の材料の降伏による塑性拘束によって大きな残留応力が材料に発生し、除荷時に破壊することが考えられ、除荷時の残留応力の解析は重要である。上述の最適材料設計条件(材料組合せ： $\text{ZrO}_2/\text{SUS 304}$ ，分割数：5 分割，組成分布形状： ZrO_2 側の組成傾斜が小)においては、除荷時の残留応力と焼結残留応力の間に違いはほとんどみられず、除荷時の破壊の恐れはないと考えられる。この後、再び同じ熱負荷が繰返し与えられても、残留応力分布は変化することはない。

5. 結 言

傾斜機能材料の熱応力、残留応力を弾塑性有限要素解析により求め、焼結残留応力、熱負荷時の応力、冷

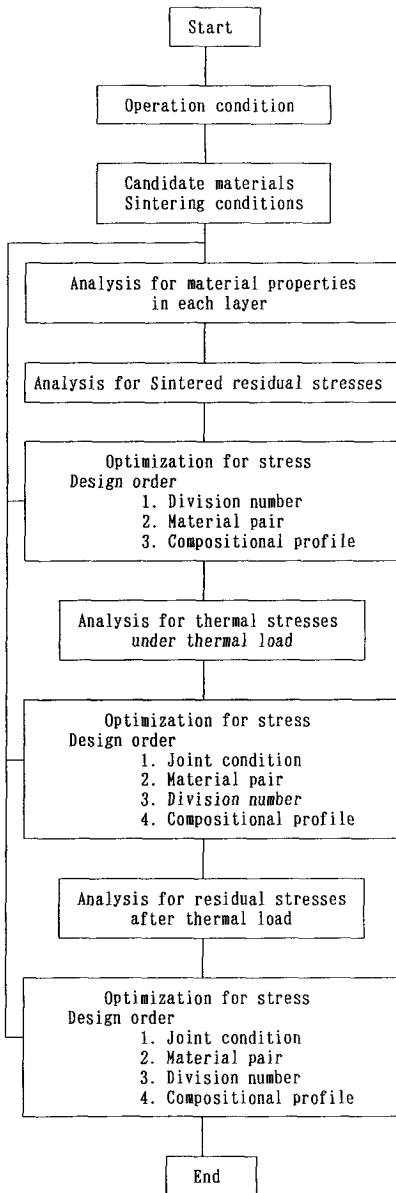


図 11 傾斜機能材料の応力に関する最適材料設計の手順

表 3 弾性解析と弾塑性解析の損失

| | Elastic | Elastic-Plastic |
|---------|---|--|
| Merit | Anisotropy Void Short calculation time | Yield at thermal loading Change residual stress |
| Demerit | Large thermal stress Same stress after unloading | Isotropy No void Long calculation time |

却後の残留応力の統一的な解析の必要性を示した。さらに、材料組合せ、組成分布形状、材料の拘束条件が応力分布に及ぼす影響を明らかにし、応力に関する最適材料設計の例を示した。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

(1) 今回設定した使用条件に対する最適材料設計条件は、 $ZrO_2/SUS 304$ 傾斜機能材料を用い、分割数を 5 分割、 ZrO_2 側の組成傾斜を小さくした組成分布形状を採用することである。

(2) 熱負荷時の応力が圧縮降伏応力を超える場合、除荷後の引張残留応力は焼結残留応力に比較して大きくなる。

(3) 本研究で開発した傾斜機能材料の応力に関する最適材料設計手法により、与えられた使用条件に対して応力に関する最適材料設計条件を求めることが可能であることを、具体的な例題で明らかにした。

文 献

- (1) 新野・平井・渡辺, 日本複合材料学会誌, 13-6 (1987), 257.
- (2) 新野, 工業材料, 35-14 (1987), 101.
- (3) 小泉・浦部, 鉄と鋼, 75-6 (1989), 887.
- (4) 平野・山田・寺木, FGM '91 講演論文集, (1991-10), 199.
- (5) 川崎・渡辺, 日本金属学会誌, 51-6 (1987), 525.
- (6) 山田・児島・大中・近藤, 材料, 40-455 (1991), 1029.
- (7) 畑, 機論, 51-467, A (1985), 1789.
- (8) 野田・辻, 機論, 57-533, A (1991), 98.
- (9) 野田・辻, 機論, 57-535, A (1991), 625.
- (10) 福井・山中・若島, 機論, 58-546, A (1992), 257.
- (11) 荒居・小林・田村, 文献(9)の 620 ページ.
- (12) Tanaka, K. and Mori, T., *Acta Met.* 18 (1970), 931.
- (13) 村・森, マイクロメカニクス—転位と介在物, (1976), 155, 培風館.
- (14) Lin, S. C., Mura, T., Shibata, M. and Mori, T., *Acta Met.*, 21 (1973), 505.
- (15) Wakashima, K. and Tsukamoto, H., *Proc. of FGM '90*, (1990), 19.
- (16) 橋田・高橋・宮脇, 粉体および粉体冶金, 37-2 (1990), 307.