傾斜機能平板の定常熱応力*
(力学的境界条件の影響)小畑良洋^{*1}, 野田直剛^{*2}, 辻 知章^{*2}Steady Thermal Stresses in a Functionally Gradient Material Plate
(Influence of Mechanical Boundary Conditions)

Yoshihiro OBATA, Naotake NODA and Tomoaki TSUJI

A functionally gradient material which decreases thermal stresses has been developed for structural components and/or mechanical elements in fields such as nuclear, aircraft and space engineering. Steady-state thermal stresses in a plate made of the functionally gradient material are discussed. The main theme of this subject is to determine the available temperature region where the minimum factor of safety is one or more, and how to distribute the components of the material in the functionally gradient material to decrease thermal stresses, for different mechanical boundary conditions. We discuss a two-layer laminated plate and functionally gradient material plate whose components are ZrO_2 and Ti-6Al-4V. The optimal functionally gradient material plate, which makes the minimum stress ratio largest, is determined for each mechanical boundary condition.

Key Words: Elasticity, Thermal Stress, Functionally Gradient Material, Plate, Inverse Problem, Optimum Design, Factor of Safety, Steady State

1. 緒 言

航空, 宇宙, 原子力等の分野において, 超高速化, 超高温化に対応した新しい耐熱材料として, 熱応力緩和形傾斜機能材料 (FGM) の開発が進められている。熱応力緩和形傾斜機能材料は高温側にセラミックス, 低温側に金属を配置し, セラミックスから金属への組成を連続的に変化させることにより, 熱応力を緩和ししや熱効果を高めることなどを目的としている。

熱応力緩和形傾斜機能材料の熱応力の研究については, 渡辺ら⁽¹⁾のモリブデン-ジルコニア系傾斜機能材料の円柱において, 熱応力が緩和されることを示した研究, 石川ら⁽²⁾の定常温度場における傾斜機能平板の変形を取扱った研究, または, 強度における気孔の影響について検討した山田ら⁽³⁾の研究など, いくつかの例が見受けられる。著者ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は, 傾斜機能平板の定常熱応力を取扱い, 傾斜機能材料の組成をいかに分布させれば, 熱応力を緩和させることができるかについて研究を進めており, これまでに2層・3層積層板の定

常熱応力を緩和させる基本的な方法について検討を試みた。そして, 理想的な傾斜機能材料の物性値の決定を行い, 現実的な傾斜機能材料として, ZrO_2 と Ti-6Al-4V からなる傾斜機能平板を想定し, その定常熱応力に及ぼす組成の体積分率および気孔率の影響について調査し, かつ最適組成分布および最適気孔率の決定を行っている。

前報⁽⁴⁾では, 力学的境界条件が伸び・曲げとも自由の場合についてのみ検討を試みた。しかしながら, 実際に傾斜機能平板が使用される条件下では力学的な拘束が生じ, 自由境界条件で得られた組成分布や気孔率の最適値が, ほかの境界条件に対しても最適である保証はない。そこで本研究は, 種々の力学的境界条件, すなわち, (a)伸び自由・曲げ自由, (b)伸び自由・曲げ拘束, (c)伸び拘束・曲げ自由, (d)伸び拘束・曲げ拘束の四つの場合について, ZrO_2 と Ti-6Al-4V からなる2層積層板, および気孔を存在させた傾斜機能平板を想定し, 定常熱応力への各境界条件の影響を検討した。まず, 平板全域で安全率が1以上となる適用温度範囲を各境界条件に対して逆問題的に求めた。さらに, その適用温度範囲内で, 定常熱応力を緩和させる最適組成分布と気孔率に及ぼす各力学的境界条件の影響について検討を行った。ここでは, セラミックスの圧縮

* 平成3年10月17日 第69期全国大会講演会において講演, 原稿受付 平成4年2月7日。

^{*1} 正員, 名古屋工業技術試験所 (〒462 名古屋市北区平手町1)。

^{*2} 正員, 静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。

強度が引張強度に比べて優れている点に留意し、安全率の算出において、圧縮熱応力に対しては、材料の圧縮強度を用いた。

2. 解 析

図1に示すように、一様温度(T_0)で無応力状態にある厚さ b の平板の下面が温度 T_a 、上面が温度 T_b に保持された場合の定常熱応力について考える。

熱伝導の基礎方程式は、物性値が位置の関数であるとき

$$\frac{d}{dx} \left[\lambda(x) \frac{dT}{dx} \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 T は温度、 λ は熱伝導率、 $x = X/b$ 、 X は平板下面を原点とし、その面に直角な座標である。

境界条件は、

$$\begin{aligned} x=0 \text{ で } T &= T_a \quad \dots\dots\dots (2) \\ x=1 \text{ で } T &= T_b \end{aligned}$$

この場合の解は次式で与えられる。

$$T(x) = T_a + (T_b - T_a)F(x) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$F(x) = \int_0^x \{1/\lambda(x)\} dx / \int_0^1 \{1/\lambda(x)\} dx$$

次に、熱応力 σ は、平板の下面($x=0$)でのひずみを ϵ_0 、曲率半径を ρ とすれば、

$$\sigma(x) = \frac{E(x)}{1-\nu(x)} \left[\epsilon_0 + \frac{xb}{\rho} - \alpha(x)\{T(x) - T_0\} \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 E は縦弾性係数、 α は線膨張係数、 ν はポアソン比であり、各物性値は位置の関数である。

力学的境界条件として、次の四つの場合を考える。

(a) 伸び自由・曲げ自由

$$\int_0^1 \sigma dx = 0, \quad \int_0^1 x \sigma dx = 0$$

(b) 伸び自由・曲げ拘束

$$\int_0^1 \sigma dx = 0, \quad \rho = \infty$$

(c) 伸び拘束・曲げ自由

$$\epsilon_0 = 0, \quad \int_0^1 x \sigma dx = 0$$

(d) 伸び拘束・曲げ拘束

$$\epsilon_0 = 0, \quad \rho = \infty \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)の条件から、 ϵ_0 、 b/ρ を決定すれば、

(a) 伸び自由・曲げ自由

$$\begin{aligned} \epsilon_0 = & \left\{ \int_0^1 E^*(x)x^2 dx \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)(T - T_0) dx \right. \\ & \left. - \int_0^1 E^*(x)x dx \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)(T - T_0)x dx \right\} / D \end{aligned}$$

$$b/\rho = \left\{ \int_0^1 E^*(x) dx \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)(T - T_0)x dx - \int_0^1 E^*(x) dx \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)(T - T_0) dx \right\} / D$$

(b) 伸び自由・曲げ拘束

$$\begin{aligned} \epsilon_0 = & \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)(T - T_0) dx / \int_0^1 E^*(x) dx \\ b/\rho = & 0 \end{aligned}$$

(c) 伸び拘束・曲げ自由

$$\begin{aligned} \epsilon_0 = & 0 \\ b/\rho = & \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)(T - T_0)x dx / \int_0^1 E^*(x)x^2 dx \end{aligned}$$

(d) 伸び拘束・曲げ拘束

$$\epsilon_0 = 0, \quad b/\rho = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} E^*(x) &= E(x) / \{1 - \nu(x)\} \\ D &= \int_0^1 E^*(x) dx \int_0^1 E^*(x)x^2 dx \\ &\quad - \left\{ \int_0^1 E^*(x)x dx \right\}^2 \end{aligned}$$

また、この熱応力は初期温度からの一様の温度上昇に関する応力 $(T_a - T_0)\sigma_1$ と、上下表面の温度差に関する応力 $(T_b - T_a)\sigma_2$ の和として表される。

$$\sigma = (T_a - T_0)\sigma_1 + (T_b - T_a)\sigma_2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 σ_1 と σ_2 は単位温度変化当りの熱応力を表し、各境界条件に対して以下のように与えられる。

(a) 伸び自由・曲げ自由

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & E^*(x) \left[\left\{ \int_0^1 E^*(x)x^2 dx \int_0^1 E^*(x)\alpha(x) dx \right. \right. \\ & \left. \left. - \int_0^1 E^*(x)x dx \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)x dx \right\} / D \right. \\ & \left. + x \left\{ \int_0^1 E^*(x) dx \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)x dx \right. \right. \\ & \left. \left. - \int_0^1 E^*(x)x dx \int_0^1 E^*(x)\alpha(x) dx \right\} / D - \alpha(x) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_2 = & E^*(x) \left[\left\{ \int_0^1 E^*(x)x^2 dx \right. \right. \\ & \times \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)F(x) dx \\ & \left. \left. - \int_0^1 E^*(x)x dx \int_0^1 E^*(x)\alpha(x)F(x)x dx \right\} / D \right. \end{aligned}$$

図1 傾斜機能平板

$$+x\left\{\int_0^1 E^*(x)dx \int_0^1 E^*(x)a(x)F(x)xdx - \int_0^1 E^*(x)xdx \int_0^1 E^*(x)a(x)F(x)dx\right\}/D - a(x)F(x)]$$

(b) 伸び自由・曲げ拘束

$$\sigma_1 = E^*(x)\left\{\int_0^1 E^*(x)a(x)dx / \int_0^1 E^*(x)dx - a(x)\right\}$$

$$\sigma_2 = E^*(x)\left\{\int_0^1 E^*(x)a(x)F(x)dx / \int_0^1 E^*(x)dx - a(x)F(x)\right\}$$

(c) 伸び拘束・曲げ自由

$$\sigma_1 = E^*(x)\left\{x \int_0^1 E^*(x)a(x)xdx / \int_0^1 E^*(x)x^2dx - a(x)\right\}$$

$$\sigma_2 = E^*(x)\left\{x \int_0^1 E^*(x)a(x)F(x)xdx / \int_0^1 E^*(x)x^2dx - a(x)F(x)\right\}$$

(d) 伸び拘束・曲げ拘束

$$\sigma_1 = -E^*(x)a(x), \quad \sigma_2 = -E^*(x)a(x)F(x)$$

.....(8)

3. 数値計算結果と考察

3.1 物性値 耐熱・断熱材料として優れているジルコニアセラミックス(ZrO_2)と、軽量・高強度のTi-6Al-4Vからなる2層積層板と傾斜機能平板を考える。室温におけるこれらの材料の物性値を表1に示す。 ZrO_2 の圧縮強度は引張強度の約21倍、Ti-6Al-4Vと比べてもその強度の3倍以上の大きさを持つ。

2層積層板は、下面側をTi-6Al-4V上面側を ZrO_2 とし、 ZrO_2 層の厚さを b_1 とする。また、傾斜機能平板については、下面をTi-6Al-4V上面を ZrO_2 とし、その間の組成を傾斜的に配置し、かつ気孔を存在させる。その時の金属の体積分率 V_m 、および気孔率 P は

次式で表されとする。

$$V_m = (1-x)^m \text{.....(9)}$$

$$P = Ax(1-x), \quad (0 \leq A < 4) \text{.....(10)}$$

上式は、平板両表面では、100%金属および100%セラミックスとなり、かつ、気孔が存在しない状態を表している。さらに、後述の最適組成探索が容易となるよう、それぞれ一つのパラメータ、 m と A で、さまざまな V_m と P を表す⁽⁴⁾。また、本傾斜機能材料の物性値として、混合組成の物性値について提案されている種々の式の中から、以下の式⁽⁶⁾⁽⁷⁾を採用する。

$$\lambda = [(1-P^{1/3})/\lambda_0 + P^{1/3}/\{(1-P^{2/3})\lambda_0 + P^{2/3}\lambda_a\}]^{-1}$$

$$E = E_0(1-P)/[1 + P(5+8\nu_0)(37-8\nu_0)/\{8(1+\nu_0)(23+8\nu_0)\}] \text{.....(11)}$$

$$\alpha = \alpha_0, \quad \nu = \nu_0,$$

$$\sigma_{Bt} = \sigma_{Bt0}(1-P), \quad \sigma_{Bc} = \sigma_{Bc0}(1-P)$$

ただし、 λ_a は空気の熱伝導率、かつ

$$\lambda_0 = \lambda_c + 3\lambda_c(\lambda_m - \lambda_c)V_m / \{3\lambda_c + (\lambda_m - \lambda_c)(1-V_m)\}$$

$$E_0 = E_c\{E_c + (E_m - E_c)V_m^{2/3}\} / \{E_c + (E_m - E_c)(V_m^{2/3} - V_m)\}$$

$$\alpha_0 = \{\alpha_m K_m V_m + \alpha_c K_c(1-V_m)\} / \{K_m V_m + K_c(1-V_m)\}$$

$$\nu_0 = \nu_m V_m + \nu_c(1-V_m)$$

$$\sigma_{Bt0} = \sigma_{Btm} V_m + \sigma_{Btc}(1-V_m)$$

$$\sigma_{Bc0} = \sigma_{Bcm} V_m + \sigma_{Bcc}(1-V_m)$$

$$K_m = E_m / \{2(1-\nu_m)\}, \quad K_c = E_c / \{2(1-\nu_c)\}$$

.....(12)

ここで、添字 c, m は、それぞれセラミックスと金属を表す。

3.2 安全率 平板内の応力 σ に対する応力比 f を、引張・圧縮応力に対して次式で定義する。

$$f = \{\sigma_{Bt}(x)/\sigma(x)\} \quad (\sigma(x) > 0) \text{.....(13)}$$

$$= \{\sigma_{Bc}(x)/|\sigma(x)|\} \quad (\sigma(x) < 0)$$

ここで、 σ_{Bt}, σ_{Bc} はそれぞれ材料の引張強度、圧縮強度であり、平板内に生じる応力が強度を越える。すなわち、 $f < 1$ のとき材料が破壊するとすれば、応力比は安全率を表している。

3.3 適用温度範囲 平板全域で破壊を生じない、

表1 材料物性値

	λ W/(mK)	E GPa	α 1/K	ν	σ_{Bt} MPa	σ_{Bc} MPa
ZrO ₂	2.09	151.0	10.0×10^{-6}	1/3	146	3136
Ti-6Al-4V	7.50	116.7	9.5	1/3	921	921

λ :Heat Conductivity, E:Young's Modulus

α :Coefficient of Linear Thermal Expansion, ν :Poisson's Ratio

σ_{Bt} :Tensile Strength, σ_{Bc} :Compressive Strength

すなわち、安全率 $f \geq 1$ となる厚さ $x_{f=1}$ (以下、健全厚さと称する) を 1 とする、表面温度 T_a と T_b の適用範囲を求める逆問題を考える。制約条件は、

$$T_b = 300 \text{ K}, \quad 300 \text{ K} \leq T_a \leq 2000 \text{ K}$$

$$300 \text{ K} \leq T_b \leq 2500 \text{ K}$$

$$0 < b_1/b < 1 \quad (2 \text{ 層積層板})$$

$$0.1 \leq m \leq 30, \quad 0 \leq A < 4 \quad (\text{傾斜機能平板})$$

ここでは、ある温度条件下で $x_{f=1}=1$ となる b_1/b または m と A の組合せが一つでもあれば適用温度とする。したがって、低温側から温度条件をまず 100 K 刻みで上げて適用温度境界を求め、以下境界領域で、10 K、1 K 刻みで境界を求めていく。また、本報告では適用温度範囲に与える境界条件の影響の検討に主眼を置くため、物性値の温度依存性、および材料の融点は考慮しない。

3.3.1 2 層積層板 2 層積層板に対して、求められた適用温度範囲を図 2 に示す。境界条件が、(a) 伸び自由・曲げ自由の場合、 ZrO_2 層の厚さ b_1 を適切に選択することにより、図中のどの温度の組合せでも、健全厚さを 1 にすることができる。ほかの境界条件では、境界条件に応じて適用温度範囲が異なり、伸びと曲げの拘束は、それぞれ金属側表面温度 T_a とセラミックス側表面温度 T_b を規定する。

次に、四つの力学的境界条件に共通の適用温度として、次の温度条件を考える。

$$T_a = 1680 \text{ K}, \quad T_b = 770 \text{ K}, \quad T_0 = 300 \text{ K} \cdots (14)$$

この温度は、後述の傾斜機能平板において、各境界条件に共通に適用できる最高温度であり、図 2 中では◇印で示される。図 3 に、この温度条件下で、健全厚さに

及ぼす ZrO_2 層の厚さ b_1 の影響を示す。平板全域で破壊が生じない、すなわち $x_{f=1}=1$ となる ZrO_2 層の厚さ b_1 は、境界条件(a)、(b)、(c)に対しては、それほど厳しい温度設定ではないにもかかわらず、各境界条件に対してそれぞれ異なる狭い範囲に限定され、同時に $x_{f=1}=1$ を満足する適切な厚さは存在しない。

3.3.2 傾斜機能平板 傾斜機能平板に対して求めた適用温度範囲を図 4 に示す。この図は 2 層積層板と同様の傾向を示すが、 T_b の高温側では適用温度範囲が若干狭くなっている。また、境界条件が(c)伸び拘束・曲げ自由において、 T_b の低温側で T_a 温度範囲が広がっている点が、2 層積層板の結果と異なる。

次に、図 4 の結果を考察するために、式(7)の σ_1 と

図 3 2 層積層板の健全厚さに及ぼす ZrO_2 層の影響

図 2 2 層積層板の適用温度範囲 ($T_0=300\text{K}$)

図 4 傾斜機能平板の適用温度範囲 ($T_0=300\text{K}$)

σ_2 を各境界条件に対して求め図5に示す。この場合、金属の体積分率と気孔率を次式のとおりとした。

$$V_m = (1-x)^{0.75}, \quad P=0 \quad (15)$$

なお、図5において、境界条件(a)の σ_1 の値は微小で、 x 座標とほぼ重なるため図示を省略してある。

図5より、伸びの拘束は σ_1 、曲げの拘束は σ_2 に大きく影響することがわかる。表1より次の強度の関係

$$\sigma_{Bcc} > \sigma_{Btm} = \sigma_{Bcm} > \sigma_{Btc} \quad (16)$$

があることを念頭において、各境界条件について考察すると、まず、境界条件(b)では σ_2 が支配的であり、 $(T_b - T_a)$ が制限される。 $T_b > T_a$ の温度域では、金属表面での引張強度により $(T_b - T_a)$ の最大値が規定され、逆に、 $T_b < T_a$ の温度域では、セラミックス側の σ_2 による応力が引張になるため、セラミックスの引張強度により $(T_b - T_a)$ の最小値が規定される。

次に、境界条件(c)の場合、 σ_1 が支配的である。この σ_1 はセラミックス表面では引張応力として働くが、逆に $x=1$ で σ_2 は圧縮であり、 $(T_b - T_a)$ が十分大きい温度領域では σ_2 と σ_1 は打消し合い、大きな引張応力が生じない。その結果、金属表面の σ_1 と金属の圧縮強度で $(T_a - T_b)$ の最大値が規定される。 $x=0$ での σ_1

は、式(8)より内部の組成分布によらず一定のため、 T_b 一定の場合 T_a の最大値が一定の値として与えられる。逆に $(T_b - T_a)$ が小さくなると、セラミックス表面で引張強度が大きくなるため、セラミックスの引張強度により温度範囲は規定される。図4で約1000 K以下で再び T_a 温度域が広がるのは、気孔の存在によるが、その詳細については省略する。

境界条件(d)の場合、 $x=0$ および $x=1$ での σ_1, σ_2 は式(8)よりそれぞれ内部の組成分布によらず一定の値となる。また、 $x=1$ では $\sigma_1 = \sigma_2$ であり、式(7)より T_a の値に関係なく $(T_b - T_b)$ の最大値がセラミックス表面で規定される。 $x=0$ では $\sigma_2=0$ であり、金属側表面で σ_1 に關与する $(T_a - T_b)$ の最大値が規定される。したがって、 T_b 一定の条件では T_b, T_a の最大値が一定値として規定される。 σ_2 については、境界条件(b)と同様に $T_b < T_a$ の温度域では、セラミックス側表面で引張応力に転じるが、 σ_1 が圧縮応力のため打消し合い、境界条件(b)のような $(T_b - T_a)$ の最小値は現れない。

以上の考察より、各力学的境界条件に対し図4に示すような適用温度範囲になると考えられる。ほかの金属とセラミックスを組合せた傾斜機能材料でも、強度に関して式(16)の関係は一般的に成り立つから、本報告で得られた適用温度範囲の境界条件による相違は、ほかの傾斜機能材料に対しても成り立つと考えられる。

図4中◇印で示される、各力学的境界条件に共通の適用温度、式(14)を考える。この温度条件で気孔が無い場合の、パラメータ m が健全厚さに及ぼす影響を図6に示す。ここで、 $m=1$ のとき金属とセラミックスの量は50%ずつであり、 m が大きくなるとセラミックス量が増え、逆に小さくなると金属量が増える。 $x_{fz1}=1$ となる組成領域は、各境界条件に対し2層積層板と同様の傾向を示すが、その範囲が広がっており、

図5 傾斜機能平板における単位温度変化当りの熱応力

図6 傾斜機能平板の健全厚さに及ぼす m の影響

$m=0.7\sim 1$ の範囲で、四つの境界条件に対して同時に $x_{f=1}=1$ を満足する組成が存在する。

3・4 最適組成 式(14)の温度条件下で、傾斜機能平板に生じる最小応力比 $f_{\min}$ を、最大にするような体積分率 V_m と気孔率 P のそれぞれのパラメータ m , A を決定する定常熱応力逆問題を考える。この問題は次の最適化問題に帰着され、シンプレックス法により求めていく⁽⁸⁾。

目的関数：最小応力比 $f_{\min}$ を最大にすること

制約条件： $0.1 \leq m \leq 30$, $0 \leq A < 4$

制御パラメータ： m, A

ただし、境界条件(d)の場合、図7に示されるようにパラメータ m, A の広い範囲で $f_{\min}$ が一定値となるために、この場合 $f_{\max}$ を最大とする組成を最適値とする。

表2に各境界条件に対して求めた最適組成パラメータを示す。図6において、4つの境界条件に対して同時に $x_{f=1}=1$ を満足する組成があることが、傾斜機能化の特性であることを示したが、この表は傾斜機能材料の特性を最大に引き出すためには、材料設計の段階から力学的境界条件を考慮する必要性を示唆している。

図8は最適体積分率と最適気孔率の分布を示す。境界条件(a), (b)に対しては、セラミックス表面に金属を薄くコーティングし、その間を急激に傾斜機能化

した分布になっている。また、境界条件(d)に対する最適平板は、板厚中心ではほとんど気孔となっている。

図9, 図10に最適物性値と、そのときの温度、熱応力および応力比の分布例として、境界条件(d)に対する

図8 最適傾斜機能平板の体積分率と気孔率の分布

図9 最適傾斜機能平板の物性値の分布

表2 最適組成パラメータ

Boundary Condition	Temperature		Optimum Parameter	
	T_b, K	T_a, K	m	A
(a) EfBf*	1680	770	30.0	0
(b) EfBc	1680	770	0.78	0
(c) EcBf	1680	770	0.72	0
(d) EcBc	1680	770	30.0	3.99

(*) E: Elongation, B: Bending
f: Free, c: Clamped

図7 傾斜機能平板の最小安全率に及ぼす m, A の影響

図10 最適傾斜機能平板の温度、熱応力、応力比の分布

る結果を示す。中心の気孔の存在は、図 10 の温度分布に示されるように熱効果を高めている。しかしながら、多量の気孔の存在は、図 9 に示すように強度などの物性値の値を下げる。熱応力の緩和のみを考えた場合、気孔は多く存在するほうが望ましいが、ほかの外力の影響を考慮すると気孔量は制限される。この場合、図 7 からわかるように、気孔量を減らし最低強度を上げ、健全厚さを 1 とする材料設計は可能である。

4. 結 論

ZrO₂ と Ti-6Al-4V から作られた傾斜機能平板の定常熱応力に及ぼす力学的境界条件の影響を取扱い、次の結論を得た。

(1) 平板全体において破壊を生じないで使用できる上下表面温度の適用範囲は、力学的境界条件により異なる。したがって、境界条件に応じて使用温度を設定する。あるいは、使用温度に応じて平板の取付方法を考える必要がある。

(2) 2 層積層板と傾斜機能平板とは同様の適用温度範囲を示し、数値計算が容易な 2 層積層板の結果から、傾斜機能平板の適用温度範囲を類推することが可

能である。

(3) 上下表面温度が $T_a=1680\text{ K}$, $T_b=770\text{ K}$ の場合、全域で破壊を生じない平板を作製するには、2 層積層板では、境界条件ごとに板厚比を変える必要があるが、傾斜機能化すると、一つの組成分布で各境界条件に対し、同時に健全厚さを 1 とすることが可能である。

(4) 力学的境界条件に応じて傾斜機能材料の最適組成分布も異なり、材料設計の段階から平板の取付方法を考慮していく必要がある。

文 献

- (1) 渡辺・川崎・村橋, 素材物性学雑誌, 1-1(1989), 36.
- (2) 石川・新野, 第 3 回傾斜機能材料シンポジウム講演集, (1989-9), 101.
- (3) 石川・寺木・小倉・平野, 文献(2), 91.
- (4) 野田・辻, 機論, 57-533, A(1991), 98.
- (5) 野田・辻, 機論, 57-535, A(1991), 626.
- (6) Kingery・ほか 2 名共著 (小松・ほか 4 名共訳), セラミックス材料科学入門応用編, (1989), 614, 内田老鶴圃出版.
- (7) 近藤, 多孔材料, (1986), 169, 177, 技報堂.
- (8) 今野・山下, 非線形計画法, (1988), 284, 日科技連出版社.