

電磁ノイズ抑制機能を有する傾斜機能平板の非定常熱応力*

高橋 智*¹, 菅野 良弘*²Transient Thermal Stresses in Functionally Graded Plates
with a Function of Electromagnetic Noise SuppressionSatoshi TAKAHASHI*³ and Yoshihiro SUGANO*³ Department of Mechanical Engineering, Ishinomaki Senshu University,
1 Shinmito, Minamisakai, Ishinomaki-shi, Miyagi, 986-8580 Japan

In this paper, we discuss on the transient thermal stresses in functionally graded material (FGM) plates with a function of electromagnetic noise suppression, which subjected to the irradiation power and convective heat load from the surrounding medium. The FGM plates are considered as multilayered plates with the distinct homogeneous material properties in each layer. The approximate analytical solutions of electromagnetic and temperature fields in the FGM plates are then derived. The thermal stresses in the FGM plates are also analyzed using the solution developed by Sugano. Numerical calculations are carried out for epoxy resin/titanium oxide FGM plates with a graded composition expressed in the form of power function. The effects of the material composition, irradiated power, and thermal boundary condition on the electromagnetic noise suppression, temperature distribution, and thermal stress distribution are then quantitatively evaluated. In addition, the graded composition suitable for the suppression of electromagnetic noise and reduction of thermal stress are discussed.

Key Words: Functionally Graded Material (FGM), Thermal Stress, Analytical Solution, Material Design, Electromagnetic Noise Suppression

1. 緒 言

ユビキタス社会の構築に向け、電子機器から放射される電磁ノイズ(自由空間を伝搬し、他の機器に電磁的影響を及ぼす電磁波を電磁ノイズと定義する)による電磁波障害が懸念されている。電磁ノイズ対策は、電子機器の能動的な機能に対応していないため、一般にそれほど認知されていない面もあるが、環境問題の一環として重要な課題である^{(1), (2)}。特に、マイクロ波帯やミリ波帯を用いた電子機器や通信手段の発達は目覚ましいものがあり、これらの高周波数帯における電磁ノイズを抑制する材料の開発が求められている。

電磁ノイズ抑制を実現する効果的な方法の一つとして、プラスチックやセラミックスなどの絶縁材料を母材とし、金属粒子などの導電性材料を分散させた複合材料の利用が挙げられる^{(2), (3)}。これは、材料の電磁気特性による電磁エネルギーの熱エネルギーへの変換や、多重干渉を利用して電磁ノイズを抑制するものである。電磁ノイズ抑制を目的とした材料は、高電力下での使

用⁽⁴⁾や電磁波の利用環境の多様化に伴い、耐環境性や熱対策、機械的強度などを検討する必要性がある^{(5)~(7)}。菅野ら⁽⁸⁾は、これら複数の機能を発現する材料として、傾斜機能材料(FGM)の応用に着目し、電磁場論に基づいて傾斜機能平板(FGM 平板)の電磁場と電磁ノイズ抑制効果の数理解析手法を提案した。また、エポキシ樹脂/酸化チタンからなるFGM平板の入射電磁波に対する反射率と透過率の数値計算より、組成分布と板厚が電磁ノイズ抑制効果に及ぼす影響を定量的に明らかにしている。今後、熱や湿熱環境下での使用を目的とした材料設計(テーラリング)を行うためには、電磁ノイズ問題のみならず、材料力学的視点からの熱的、力学的負荷に対する強度を検討することが重要である。

そこで本論文では、電磁波の電磁エネルギーによる内部熱発生と時間変動する周囲媒体温度によって加熱されるFGM平板の、電磁ノイズ抑制効果および非定常熱応力を解析する。さらに、エポキシ樹脂と酸化チタンを構成材料に想定したFGM平板について、傾斜組成分布や電磁エネルギーの強度が、温度分布と熱応力分布に及ぼす影響を定量的に明らかにする。また、どのような材料組成設計が電磁ノイズ抑制と熱応力緩和の双方に有効かという観点からの考察を加える。

* 原稿受付 2007年5月1日。

*¹ 正員, 石巻専修大学理工学部(☎986-8580 石巻市南境新水戸1)。*² 正員, 岩手大学工学部(☎020-8551 盛岡市上田4-3-5)。

E-mail: s-takahashi@isenshu-u.ac.jp

2. FGM 平板の解析

2.1 問題設定と基礎式 板厚方向に任意の不均質性を有する FGM 平板を、図 1 に示すような各層が均質で相異なる n 層からなる多層無限平板として、電場 $\dot{E}_i(\mathbf{r}, t)$ と磁場 $\dot{H}_i(\mathbf{r}, t)$ および温度場 $T_i(z, t)$ と熱応力分布 $\sigma_f(z, t)$ を解析する。第 0 媒質から平面電磁波が、入射角 θ_0^i で FGM 無限平板に入射している場合を設定し、電磁波の暴露による平板内部の熱発生 $P_i(z, t)$ と時間変動する周囲媒体温度 $\phi(t)$ 、 $\psi(t)$ によって FGM 無限平板が加熱されるとする。また、初期時刻 t_0 において、各層内の温度分布は $U_i(z)$ であったとする。平面電磁波には 2 種類の偏波が存在するが、ここでは TE 偏波を入射電磁波として取り扱う。解析モデルの電磁場および伝搬角度に付した上添字 I, R, F, B, T は、それぞれ、入射、反射、前進、後退、透過を表し、複素量には記号の上にドットを付す。この場合、各媒質の電磁場が満足すべき基礎微分方程式、境界条件式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \dot{E}_i(\mathbf{r}, t) + \dot{\mu}_i \frac{\partial \dot{H}_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \times \dot{H}_i(\mathbf{r}, t) - \dot{\epsilon}_i \frac{\partial \dot{E}_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - \dot{\delta}_i \dot{E}_i(\mathbf{r}, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{y_i}(z, t) &= \dot{E}_{y_{i+1}}(z, t) \quad (z = z_i, i = 0 \sim n) \\ \dot{H}_{x_i}(z, t) &= \dot{H}_{x_{i+1}}(z, t) \quad (z = z_i, i = 0 \sim n) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここで、諸量に付した下添字 i は第 i 媒質を示し、 \mathbf{r} は位置ベクトル、 $\dot{\epsilon}_i$ 、 $\dot{\mu}_i$ 、 $\dot{\delta}_i$ は複素誘電率、複素透磁

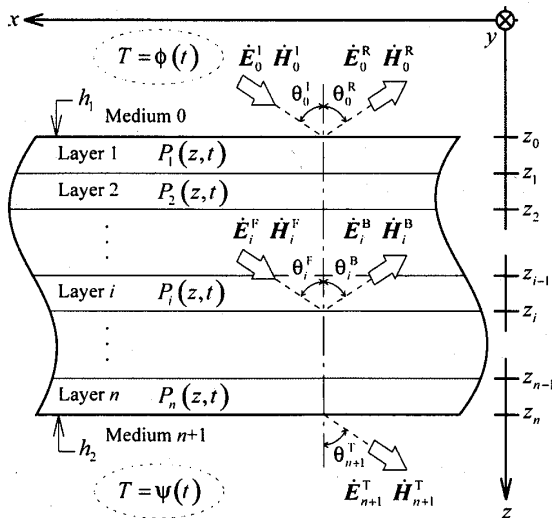


Fig. 1 Analytical model of FGM plate

率、導電率である。なお、式(2)の境界条件式のみでは電磁場は求まらないので、媒質 $n+1$ においては $+z$ 方向の前進波成分しか存在しないという条件を付加する。

一方、第 i 層の温度場が満足すべき非定常熱伝導方程式、初期条件式、境界条件式は次式で表される。

$$\frac{\partial^2 T_i(z, t)}{\partial z^2} + \frac{P_i(z, t)}{\lambda_i} = \frac{1}{\kappa_i} \frac{\partial T_i(z, t)}{\partial t} \quad (i = 1 \sim n) \dots (3)$$

$$(T_i)_{t=t_0} = U_i(z) \quad (i = 1 \sim n) \dots (4)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} - h_1 \{T_i - \phi(t)\} = 0 \quad (z = z_0) \dots (5)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial z} + h_2 \{T_n - \psi(t)\} = 0 \quad (z = z_n) \dots (6)$$

$$T_i = T_{i+1} \quad (z = z_i, i = 1 \sim n-1) \dots (7)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \quad (z = z_i, i = 1 \sim n-1) \dots (8)$$

ここで、 λ_i は熱伝導率、 κ_i は熱拡散率であり、 h_1 、 h_2 は FGM 平板両表面の熱伝達率である。また、電磁エネルギーによる内部熱発生は、電磁場による単位体積あたりの吸収電力⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾として次式で与えられる。

$$P_i = \dot{\delta}_i |\dot{E}_i|^2 + 2\pi f \left(|\dot{E}_i|^2 \epsilon_i'' + |\dot{H}_i|^2 \mu_i'' \right) \dots (9)$$

ここで、 f は作業周波数であり、 ϵ_i'' 、 μ_i'' はそれぞれ複素誘電率と複素透磁率の虚部である。

2.2 電磁解析と電磁ノイズ抑制効果

FGM 平板に入射する平面電磁波は、角周波数 ω で時間的に正弦波振動していると定義する。すると、式(1)、(2)よりヘルムホルツ型の微分方程式が得られる。これを変数分離法で解き、各界面の伝搬角度にスネルの法則を適用することで、各媒質 ($i = 0 \sim n+1$) の電磁場は次式で得られる⁽⁸⁾。

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{y_i} &= \left\{ \dot{A}_i e^{-\dot{\gamma}_i(-x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} + \dot{B}_i e^{-\dot{\gamma}_i(-x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \right\} e^{j\omega t} \\ -\dot{H}_{x_i} &= \frac{\dot{\gamma}_i}{j\omega \dot{\mu}_i} \left\{ \cos \theta_i \dot{A}_i e^{-\dot{\gamma}_i(-x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} \right. \\ &\quad \left. - \cos \theta_i \dot{B}_i e^{-\dot{\gamma}_i(-x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \right\} e^{j\omega t} \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

ただし、 $\dot{B}_{n+1} = 0$ であり、 $\dot{\gamma}_i$ は次式で表される伝搬定数である。

$$\dot{\gamma}_i = \sqrt{(j\omega \dot{\epsilon}_i + \dot{\delta}_i)(j\omega \dot{\mu}_i)} \dots (11)$$

また、未知係数 \dot{A}_i 、 \dot{B}_i は、式(2)により決定される。

従って、電磁ノイズ抑制効果は、入射した平面電磁波に対する反射率 R_r と透過率 T_r として次式で得られる。

$$R_r = \left. \frac{\dot{E}_{y0}^R}{\dot{E}_{y0}^I} \right|_{z=z_0} = \left| \frac{\dot{m}_{21} e^{2\dot{\gamma}_0 z_0 \cos \theta_0}}{\dot{m}_{11}} \right| \dots\dots\dots (12)$$

$$T_r = \left. \frac{\dot{E}_{yn+1}^T}{\dot{E}_{y0}^I} \right|_{z=z_n} = \left| \frac{2^{n+1} e^{-(\dot{\gamma}_{n+1} \cos \theta_{n+1} - \dot{\gamma}_0 \cos \theta_0) z_n}}{\dot{m}_{11}} \right| \dots\dots\dots (13)$$

ここで \dot{m}_{ij} ($i, j=1, 2$) は、式(2)、(10)より得られる次式の特性行列の行列成分である。

$$\prod_{i=0}^n \dot{\mathbf{M}}_i^{\text{TE}} = \begin{bmatrix} \dot{m}_{11} & \dot{m}_{12} \\ \dot{m}_{21} & \dot{m}_{22} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

ただし、

$$\dot{\mathbf{M}}_i^{\text{TE}} = \begin{bmatrix} (1 + \dot{u}_{i+1}/\dot{u}_i) e^{(\dot{v}_i - \dot{v}_{i+1})z_i} & (1 - \dot{u}_{i+1}/\dot{u}_i) e^{(\dot{v}_i + \dot{v}_{i+1})z_i} \\ (1 - \dot{u}_{i+1}/\dot{u}_i) e^{-(\dot{v}_i + \dot{v}_{i+1})z_i} & (1 + \dot{u}_{i+1}/\dot{u}_i) e^{-(\dot{v}_i - \dot{v}_{i+1})z_i} \end{bmatrix}$$

$$\dot{u}_i = \frac{\dot{\gamma}_i}{j\omega\dot{\mu}_i} \cos \theta_i, \quad \dot{v}_i = \dot{\gamma}_i \cos \theta_i, \dots\dots\dots (15)$$

2.3 内部熱発生を考慮した温度解析 FGM 平板の温度解析では、Vodicka⁽¹¹⁾の方法を応用した一種の積分変換法を用いて解析解を導出する。式(3)~(8)の解を次のように分離する。

$$T_i(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} Q_m(t) R_{im}(z) + \sum_{j=1}^2 L_{ij}(z) F_j(t) \dots\dots\dots (16)$$

ただし、 $F_1(t) = -\phi(t)$ 、 $F_2(t) = \psi(t)$ である。ここで、 $L_{ij}(z)$ は次式の解である。

$$\frac{d^2 L_{ij}}{dz^2} = 0 \dots\dots\dots (17)$$

また、 $R_{im}(z)$ は次式の固有値問題の解である。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 R_{im}}{dz^2} + \frac{\gamma_m^2}{\kappa_i} R_{im} &= 0 \quad (i=1 \sim n) \\ \lambda_1 \frac{dR_{1m}}{dz} - h_1 R_{1m} &= 0 \quad (z=z_0) \\ \lambda_n \frac{dR_{nm}}{dz} + h_2 R_{nm} &= 0 \quad (z=z_n) \\ R_{im} &= R_{i+1m} \quad (z=z_i, i=1 \sim n-1) \\ \lambda_i \frac{dR_{im}}{dz} &= \lambda_{i+1} \frac{dR_{i+1m}}{dz} \quad (z=z_i, i=1 \sim n-1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

$L_{ij}(z)$ 、 $R_{im}(z)$ の解はそれぞれ次式で与えられる。

$$L_{ij}(z) = A_{ij}^* z + B_{ij}^* \dots\dots\dots (19)$$

$$R_{im}(z) = A_{im} \cos(d_{im} z) + B_{im} \sin(d_{im} z) \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 $d_{im} = \gamma_m / \sqrt{\kappa_i}$ である。未知係数 A_{ij}^* 、 B_{ij}^* は、式(16)を式(5)~(8)に代入して得られる $L_{ij}(z)$ に関する境界条件式より決定される。また、未知係数 A_{im} 、 B_{im} は、式(18)における境界条件式より決定される。固有値 γ_m は、次の超越方程式を満足する第 m 番目の正根であり、式(16)は無数個の正根について総和をとる。

$$C_n \cdot G_{n-1} \cdot G_{n-2} \cdots G_2 \cdot G_1 \cdot \begin{bmatrix} A_{1m} \\ B_{1m} \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (21)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} C_n &= [c_{1n} \quad c_{2n}] \\ c_{1n} &= -\lambda_n d_{nm} \sin(d_{nm} z_n) + h_2 \cos(d_{nm} z_n) \\ c_{2n} &= \lambda_n d_{nm} \cos(d_{nm} z_n) + h_2 \sin(d_{nm} z_n) \\ G_i &= \begin{bmatrix} g_{11i} & g_{12i} \\ g_{21i} & g_{22i} \end{bmatrix} \\ g_{11i} &= X_{im} \cos(\alpha_{im} z_i) + Y_{im} \cos(\beta_{im} z_i) \\ g_{12i} &= X_{im} \sin(\alpha_{im} z_i) - Y_{im} \sin(\beta_{im} z_i) \\ g_{21i} &= X_{im} \sin(\alpha_{im} z_i) + Y_{im} \sin(\beta_{im} z_i) \\ g_{22i} &= -X_{im} \cos(\alpha_{im} z_i) + Y_{im} \cos(\beta_{im} z_i) \\ X_{im} &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\lambda_i d_{im}}{\lambda_{i+1} d_{i+1m}} \right), \quad Y_{im} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_i d_{im}}{\lambda_{i+1} d_{i+1m}} \right) \\ \alpha_{im} &= d_{i+1m} + d_{im}, \quad \beta_{im} = d_{i+1m} - d_{im} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

さて、式(18)、(20)で与えられる固有関数 $R_{im}(z)$ は、不連続な重み関数に対して次式の直交関係を有する。

$$\sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{\lambda_i}{\kappa_i} R_{im}(z) R_{ik}(z) dz = \begin{cases} \text{const.} & (m=k) \\ 0 & (m \neq k) \end{cases} \dots\dots\dots (23)$$

式(23)の直交関係を用いて、 $P_i(z, t)$ 、 $U_i(z)$ 、 $L_{ij}(z)$ を次式のように級数展開する。

$$P_i(z, t) \frac{\kappa_i}{\lambda_i} = \sum_{m=1}^{\infty} p_m(t) R_{im}(z) \dots\dots\dots (24)$$

$$U_i(z) = \sum_{m=1}^{\infty} u_m R_{im}(z) \dots\dots\dots (25)$$

$$L_{ij}(z) = \sum_{m=1}^{\infty} l_{mj} R_{im}(z) \dots\dots\dots (26)$$

ただし、

$$p_m(t) = M_m^{-1} \sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} P_i(z, t) R_{im}(z) dz \dots\dots\dots (27)$$

$$u_m = M_m^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\kappa_i} \int_{z_{i-1}}^{z_i} U_i(z) R_{im}(z) dz \dots\dots\dots (28)$$

$$l_{mj} = M_m^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\kappa_i} \int_{z_{i-1}}^{z_i} L_{ij}(z) R_{im}(z) dz \dots\dots\dots (29)$$

$$M_m = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\kappa_i} \int_{z_{i-1}}^{z_i} \{R_{im}(z)\}^2 dz \dots\dots\dots (30)$$

ここで、式(26)を式(16)に代入し、その結果と式(24)、(25)を式(3)、(4)に代入して、式(17)、(18)を考慮すれば $Q_m(t)$ に関する微分方程式と初期条件式が得られ、最終的に、非定常温度場は次式のように得られる。

$$T_i(z,t) = \sum_{m=1}^{\infty} Q_m(t) \{A_{im} \cos(d_{im}z) + B_{im} \sin(d_{im}z)\} + \sum_{j=1}^2 (A_{ij}^* z + B_{ij}^*) F_j(t) \dots\dots\dots (31)$$

ここで、 $Q_m(t)$ は次式のように表される。

$$Q_m(t) = e^{-\gamma_m^2(t-t_0)} \left\{ u_m - \sum_{j=1}^2 l_{mj} F_j(t_0) \right\} + e^{-\gamma_m^2 t} \int_0^t e^{\gamma_m^2 t'} \left\{ p_m(t') - \sum_{j=1}^2 l_{mj} \frac{dF_j(t')}{dt'} \right\} dt' \dots\dots\dots (32)$$

2・4 熱応力解析 前節で求めた温度解における FGM 平板の非定常熱応力解を求める。FGM 平板が平面応力状態であり、平板の端部において合応力、合モーメントが 0 である場合、板厚方向に任意の不均質特性を持つ不均質平板の熱応力式は、次式のように得られる⁽¹²⁾。

$$\sigma_f(z,t) = \frac{E(z)}{1-\nu(z)} [-\alpha(z)\{T(z,t) - T(z,t_0)\} + \frac{(I_{E2}z - I_{E3})I_{T1} + (I_{E2} - I_{E1}z)I_{T2}}{I_{E2}^2 - I_{E1}I_{E3}}] \dots\dots\dots (33)$$

ここで、 E 、 α 、 ν はそれぞれ縦弾性係数、線膨張係数、ポアソン比である。また I_{E1} 、 I_{E2} 、 I_{E3} は弾性ひずみに関する定積分であり、 I_{T1} 、 I_{T2} は熱膨張ひずみに関する定積分である。

3. 数値計算および考察

3・1 数値計算諸元 数値計算例として、エポキシ樹脂 (EP) の母材と酸化チタン (TiO₂) の分散粒子からなる FGM 平板について、電磁ノイズ抑制効果および温度分布と熱応力分布の数値計算を行う。表 1 に構成材料の熱的、機械的物性値^{(13)、(14)}を示す。まず、数値計算に際し次式の無次元量を導入する。

$$\left. \begin{aligned} \zeta_n &= z_n/\lambda_f, \quad \bar{z} = z/z_n, \quad \tau = \kappa_1 t/z_n^2, \quad \bar{E}_i = |\dot{E}_i|/A_0 \\ \bar{P}_i^E &= P_i z_n/S, \quad \bar{P}_i^T = P_i z_n^2/(\lambda_i T_a), \quad \bar{U}_i = U_i/T_a \\ \bar{\phi} &= \phi/T_a, \quad \bar{\psi} = \psi/T_a, \quad \beta_1 = h_1 z_n/\lambda_1, \quad \beta_2 = h_2 z_n/\lambda_n \\ \bar{T}_i &= T_i/T_a, \quad \bar{\sigma}_f = \sigma_f(1-\nu_n)/(E_n \alpha_n T_a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (34)$$

ここで、 λ_f は作業周波数の波長、 S は照射電力、 A_0 は入射平面電磁波の電界強度 ($A_0 = \sqrt{120\pi S}$)、 β_1 と β_2 はビオ数、 T_a は $\bar{z} = 0$ 側周囲媒体の定常温度である。傾斜組成分布としてべき乗形組成分布を採用し、酸化チタンの PHR (樹脂 100g に対する粒子の重量) 分布を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} g(\bar{z}) &= g_{\max} \cdot \{1 - (1 - \bar{z})^\eta\} \quad (\eta \geq 1.0) \\ g(\bar{z}) &= g_{\max} \cdot \bar{z}^{1/\eta} \quad (\eta \leq 1.0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (35)$$

ここで、 g_{\max} は $\bar{z} = 1.0$ における酸化チタンの PHR である。 η は分布パラメータであり、 $\eta = 1.0$ で線形分布を示す。図 2 に本数値計算で用いる酸化チタンの PHR 分布を示す。層数 n は、これまでの熱応力緩和型 FGM の製造方法を考慮し 10 層とした。従って、FGM 平板を 10 層の相異なる均質層で近似するため、図 2 の点線

Table 1 Thermal and mechanical properties of EP and TiO₂

	EP	TiO ₂
Thermal Conductivity λ [W/(m·K)]	0.19	6.69
Specific Heat c [KJ/(Kg·K)]	1.05	0.71
Density ρ [Kg/m ³]	1600	3500
Young's Modulus E [GPa]	3.26	282.7
Coefficient of Linear Thermal Expansion α [$\times 10^{-6}$ /K]	55	8.0
Poisson's Ratio ν [-]	0.34	0.28

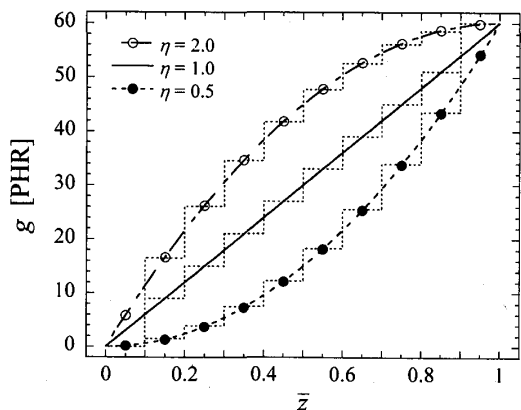


Fig. 2 Compositional distributions of TiO₂ particle

で示した分布を計算に使用する. なお, 各層の複素比誘電率($\hat{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$)は宗らの実験式^{(15), (16)}を参考に次式を用いて算出した.

$$\hat{\epsilon}_r = 4.0 + 0.40g^{1.02} - j(0.05 + 0.12g^{1.12}) \dots\dots (36)$$

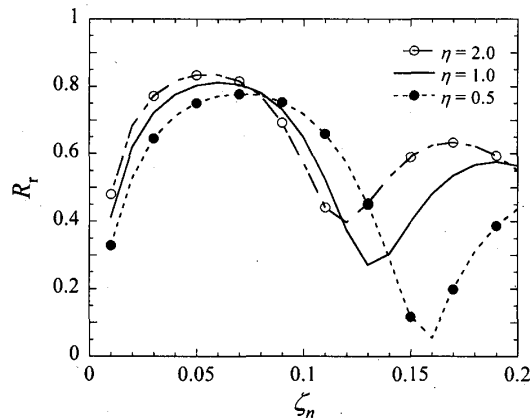
また, 熱伝導率, 縦弾性係数, 線膨張係数は, 母相に球状粒子を分散した場合の Mori-Tanaka の平均場の理論^{(17), (18)}により, 比熱, 密度, ポアソン比は線形複合則により算出した. 本数値計算の作業周波数は, 代表例としてレーダ周波数帯の中心周波数である 10 GHz とする. なお, 媒質0 および $n+1$ は自由空間とする.

3.2 電磁ノイズ抑制効果と吸収電力分布 図3は, 分布パラメータが $\eta = 2.0, 1.0, 0.5$ の FGM 平板において, 無次元板厚が $\zeta_n = 0.01 \sim 0.2$ の場合の電磁ノイズ抑制効果を示したものである. ここでは, 平面電磁波が垂直に入射($\theta_0^i = 0$)した場合の結果を示す. 図3(a)は入射電磁波に対する反射率 R_r , 図3(b)は透過率 T_t であり, とともに値の低いほうが電磁ノイズ抑制に効果的である. 電磁ノイズ抑制を支配する主なメカニズムは, 媒質内部でのエネルギー変換による電磁波の減衰, 自由空間と平板の境界でのインピーダンスの不整合による電磁波の初期反射, 平板内を伝搬する電磁波の多重干渉である. 計算結果から, 反射率は, 傾斜組成分布形態および周波数帯と板厚の選択により, 上記のメカニズムの影響を顕著に受けることが確認できる. 一方, 透過率は反射率ほど分布パラメータによる大きな違いは見られない. これは, 多重干渉の影響が反射率より小さいためと考えられる. 本研究では, 反射または透過ノイズ抑制効果を90%以上発揮した上で, もう一方の電磁ノイズ抑制効果を50%以上発揮することを一つの設計目標⁽⁸⁾とする. 従って, $\eta = 0.5$, $\zeta = 0.16$ において反射率0.05, 透過率0.5と設計目標に近い性能を示しており, 電磁ノイズ抑制効果に関して一定の成果が得られた.

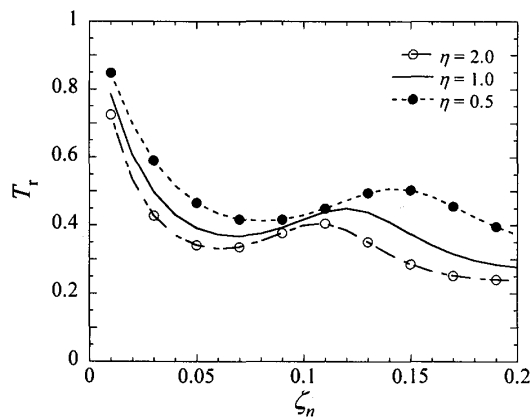
図4は, η と ζ_n の各組合せにおいて, 反射率が最も低い場合の FGM 平板内の吸収電力分布 \bar{P}_i^E を示したものである. 反射率が高い場合の例として, $\eta = 0.5$, $\zeta = 0.1$ の結果も同図に示した. 全ての分布において, $\bar{z} = 0$ 側の吸収電力が最も小さく, 逆に $\bar{z} = 1.0$ 側で最も大きいことがわかる. これは, 式(9)からも推測できるように, $\bar{z} = 1.0$ 側の方が分散粒子の含有量が多く, 複素誘電率虚部の値が大きくなるからである. また, 反射率が低い場合の吸収電力は, 反射率が高い場合に比べ全体的に大きいことがわかった. 特に, FGM 平板内部 $\bar{z} = 0.1 \sim 0.7$ での吸収電力が大きいことがわかる. このように, 吸収電力分布を定量的に明らかにするとともに, 電磁エネルギーの熱エネルギーへの変換が, 電磁

ノイズ抑制効果に重要な影響を与えることを確認できた.

3.3 温度分布と熱応力分布 前節で示した吸収電力分布が, 時刻 $t = +0$ において FGM 平板の内部熱発生として与えられるとし温度分布を計算する. ここでは, 熱的境界条件として2種類の場合について検討を行う. まずはケース1として, 周囲媒体に自然対流



(a) Reflectance of FGM plates



(b) Transmittance of FGM plates

Fig. 3 Effects of electromagnetic noise suppression of FGM plates ($\theta_0^i = 0$)

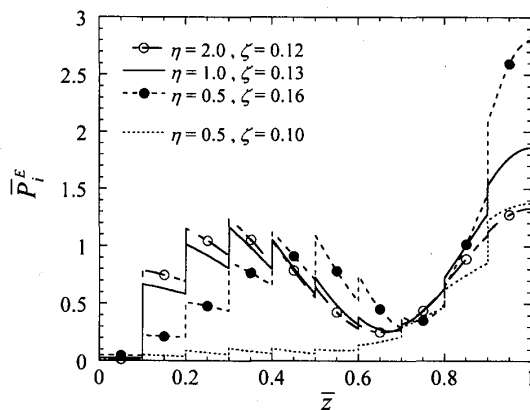
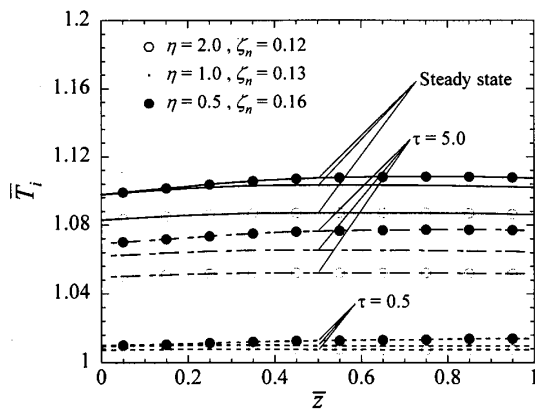


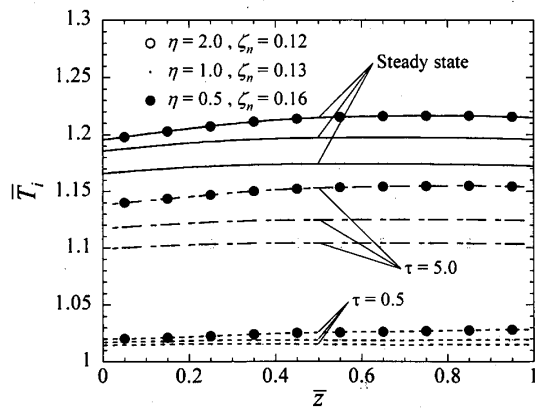
Fig. 4 Absorbed power distributions in FGM plates

状態の空気 ($h_1, h_2 = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) を想定し、周囲媒体温度が $\bar{\phi}(\tau), \bar{\psi}(\tau) = 1.0$ に保持されるとした。また、初期温度分布は $\bar{U}_i(\bar{z}) = 1.0$ とし、入射電磁波の照射電力として $S = 500 \text{ W}/\text{m}^2, 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ を設定⁽⁶⁾した。図 5(a) は、照射電力 $S = 500 \text{ W}/\text{m}^2$ における FGM 平板内の温度分布 \bar{T}_i を示したものである。 $\tau = 0.5$ における温度分布は、パラメータによって大きく相違しないが、 $\eta = 0.5$ においては、他の傾斜組成分布に比べ $\bar{z} = 1.0$ 側に近づくにつれ温度が高くなっていることがわかる。これは、図 4 から明らかのように、 $\bar{z} = 1.0$ 側における吸収電力の大きさに起因するものであり、時間が経過すると、この吸収電力が熱として FGM 平板全体に伝導することがわかる。図 5(b) は、照射電力 $S = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ における FGM 平板内の温度分布 \bar{T}_i を示したものである。図 5(a) と同様に、 $\eta = 0.5$ における温度分布が他の傾斜組成分布より高いことがわかる。その温度差は、照射電力が大きくなるほど大きくなっている。ここで、周囲媒体の定常温度 \bar{T}_a が 298 K (25°C) とすると、FGM 平板内の最高温度は $500 \text{ W}/\text{m}^2$ では約 330 K (57°C)、 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ では約 363 K (90°C) に上

昇する。図 6 は各パラメータにおいて、図 5(b) の温度分布を有する FGM 平板の熱応力分布 $\bar{\sigma}_i$ を示したものである。図 6(a) の $\eta = 2.0$ では、定常状態に近づくにつれて、FGM 平板の両表面付近と中央付近で発生している圧縮熱応力と引張熱応力は大きくなっている。逆に、図 6(b), (c) の傾斜組成分布では、両表面付近は引張熱応力、中央付近は圧縮熱応力が発生しているこ

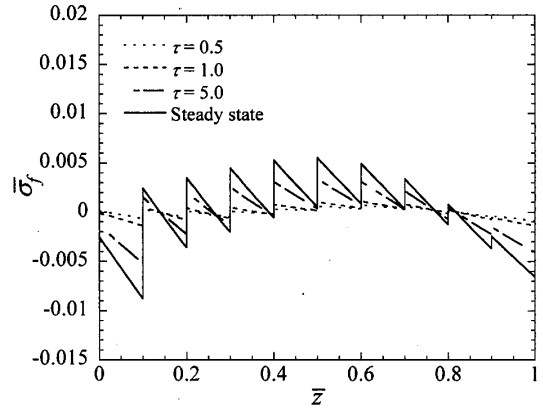


(a) $S = 500 \text{ W}/\text{m}^2$

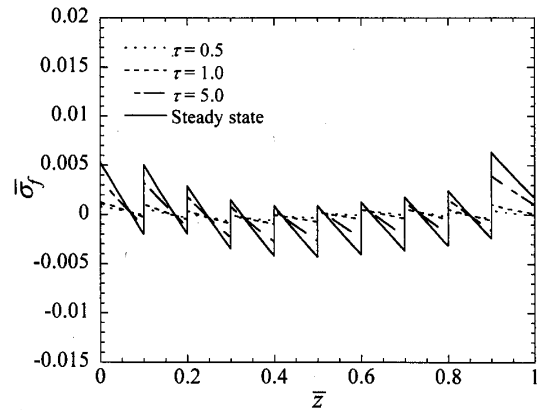


(b) $S = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$

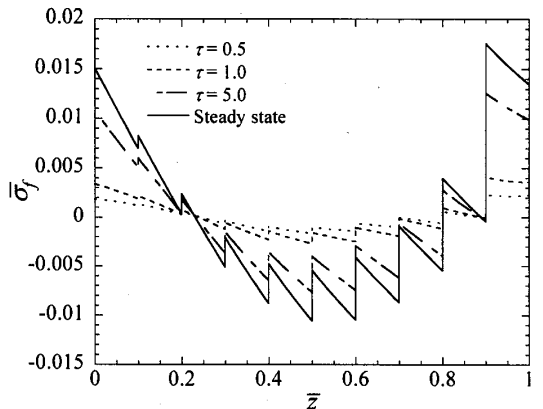
Fig. 5 Temperature distributions in FGM plates for thermal boundary condition of case 1



(a) $\eta = 2.0, \zeta_n = 0.12$



(b) $\eta = 1.0, \zeta_n = 0.13$



(c) $\eta = 0.5, \zeta_n = 0.16$

Fig. 6 Thermal stress distributions in FGM plates for thermal boundary condition of case 1 ($S = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$)

とがわかる。材料組成設計において材料内部に生じる最大引張熱応力を緩和するという観点からは、 $\eta = 2.0$ が最も優れた材料組成分布と考えられる。反射ノイズ抑制に最も有効であった $\eta = 0.5$ の熱応力分布は、他の傾斜組成分布と比べ最も大きな値を示した。

次に、ケース 2 の熱的境界条件として、 $\bar{z} = 0$ 側のみが高い加熱を受け、FGM 平板内部に温度差が生じるような場合を考える。周囲媒体の温度関数 $\bar{\phi}(\tau)$ 、 $\bar{\psi}(\tau)$ を図 7 のように設定し、ビオ数 $\beta_1, \beta_2 = \infty$ の表面温度差とした。また、初期温度分布は $\bar{U}_i(\bar{z}) = 0.8$ とした。図 8 は、ケース 2 の熱的境界条件と照射電力 $S = 100 \text{ W/m}^2$ における FGM 平板内の温度分布 \bar{T}_i を示したものである。この結果から、傾斜組成分布の違いが温度分布にあまり影響を及ぼさないことがわかる。図 9 は、各パラメータにおいて、図 8 の温度分布を有する FGM 平板の熱応力分布 $\bar{\sigma}_t$ を示したものである。全ての傾斜組成分布において、FGM 平板の両表面付近は圧縮熱応力、中央付近は引張熱応力が発生していることがわかる。材料内部に生じる最大熱応力を緩和するという観点からは、 $\eta = 0.5$ が最も優れた材料組成分

布である。 $\eta = 0.5$ は、電磁ノイズ抑制にも効果的であることから、ケース 2 のような表面温度差を与えた場合には、電磁ノイズ抑制と熱応力緩和の双方を考慮した材料組成設計が可能であると考えられる。

4. 結 言

電磁ノイズ抑制機能を有する FGM 平板の温度分布と熱応力分布を明らかにするために、FGM 平板を各層

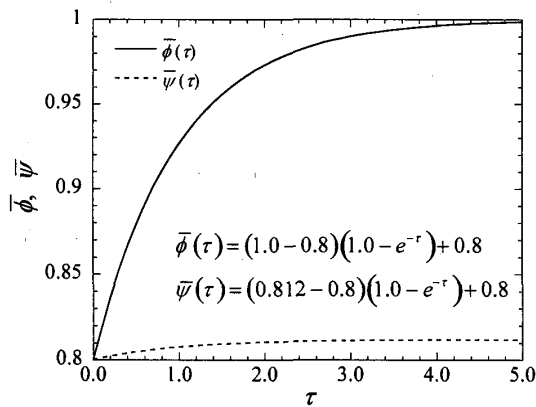


Fig.7 Temperature functions for thermal boundary condition of case 2

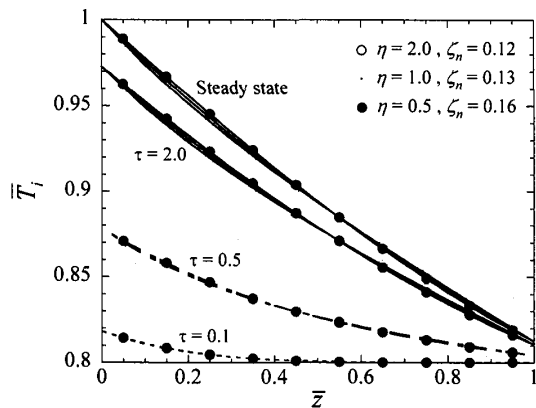
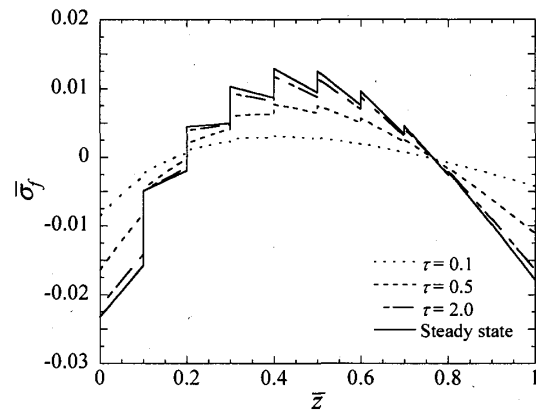
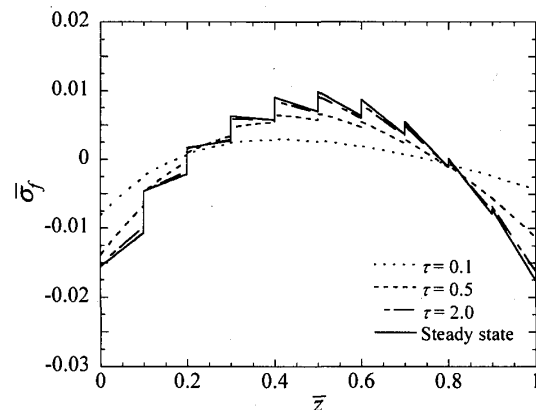


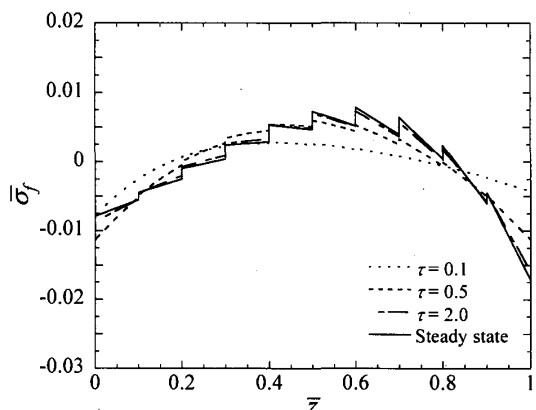
Fig. 8 Temperature distributions in FGM plates for thermal boundary condition of case 2



(a) $\eta = 2.0, \zeta_n = 0.12$



(b) $\eta = 1.0, \zeta_n = 0.13$



(c) $\eta = 0.5, \zeta_n = 0.16$

Fig. 9 Thermal stress distributions in FGM plates for thermal boundary condition of case 2

が均質で相異なる材料特性を持つ多層無限平板に分割し、電磁ノイズ抑制効果および温度場と熱応力場の解析解を示した。得られた解析解を用いて、エポキシ樹脂と酸化チタンを構成材料に想定した FGM 平板について、電磁ノイズ抑制効果および温度分布と熱応力分布を数値計算した。その結果、電磁ノイズ抑制効果は、傾斜組成分布形態および周波数帯と板厚の影響を大きく受けることを定量的に確認した。また、電磁エネルギーの熱エネルギーへの変換が、電磁ノイズ抑制効果に重要な影響を与えることを定量的に観察できた。さらに、高電力を有した電磁波を照射した場合の FGM 平板内の温度分布と熱応力分布を定量的に明らかにした。熱応力緩和に適した傾斜組成分布は、熱的境界条件に影響し、FGM 平板内の温度が一樣に上昇する場合には、電磁ノイズ抑制効果に有効な傾斜組成分布と一致しないことがわかった。しかし、FGM 平板の片面に強い太陽光を受ける場合などの、表面温度落差を与えるような非対称加熱では、電磁ノイズ抑制と熱応力緩和に良好な傾斜組成分布が一致した。

今後は、電磁気特性が温度依存性を示すことが実験的に確認されていることから、電磁場が温度場に及ぼす影響と温度場が電磁場に及ぼす影響を互いに考慮した連成解析が必要であると考えている。

文 献

- (1) Hondou, T., A Remake on the Public Exposure to Mobile Phones (Review), *Butsuri*, Vol.58, No.6 (2003), pp.430-434.
- (2) Sugimoto, S., Recent Trends in the Development of Microwave Absorption Materials (Review), *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol.27, No.8 (2003), pp.862-869.
- (3) Shimizu, Y. et al. *Denjiha no Kyusyu to Syahei (in Japanese)*, (1989), p.88, 222, 443, Nikkei Gijyutu Tosyo, Tokyo.
- (4) Watanabe, S. et al., Temperature Distribution Analysis of $\lambda/4$ Type Wave Absorber Using Resistive Film Considering Air Convection, *The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series B*, Vol.J88-B, No.11 (2005), pp.2296-2305.
- (5) Mizutani, S. et al., A Realization on One-Layered Wave Absorber Using Porous Ceramic, *The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series B*, Vol.J89-B, No.5 (2006), pp.798-800.
- (6) Kato, M. et al., Analytical Study on Variation of Temperature and Absorption Characteristics of Single-Layer Radiowave Absorber by Irradiation Electric Power, *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol.41, No.1 (2004), pp.3-5.
- (7) Pinho, M. S. et al., Aging effect on the reflectivity measurements of polychloroprene matrices containing carbon black and carbonyl-iron powder, *Polymer degradation and stability*, Vol.73 No.1 (2001), pp.1-5.
- (8) Sugano, Y. and Takahashi, S., Material Design of Functionally Graded Plates with Function of Electromagnetic Noise Suppression, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.72, No.722 (2006) pp.1585-1592.
- (9) Watanabe, S. et al., Temperature Distribution Analysis of Heated Material Put in Microwave Oven using FDTD-HTE Method, *The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series B*, Vol.J84-B, No.6 (2001), pp.1103-1106.
- (10) Saito, A. et al., Effects of Aspect Ratio of Soft Magnetic Metal Powder on The Properties of Flexible Electromagnetic Wave Absorber Rubber Sheet, *Electric Furnace steel*, Vol.69, No.3 (1998), pp.195-200.
- (11) Vodicka, V., one-dimensional heat conduction in layered body (in German), *Mathematische Nachrichten*, Vol.14, No.1 (1955) pp.47-55.
- (12) Sugano, Y., An expression for transient thermal stress in a nonhomogeneous plate with temperature variation through thickness, *Ingenieur-Archiv* Vol.57, No.2 (1987), pp.147-156.
- (13) Japanese Standards Association, *Nonmetal Material Handbook (in Japanese)*, (1985), p.9, 35, Japanese Standards Association.
- (14) Shackelford, J. F. and Alexander, W., *The CRC Materials Science and Engineering Handbook*, (2000), p.341, 437, 532, 539, CRC Press.
- (15) Soh, T. et al., A Study on Relationship between Applied Frequency and Thickness of Single Layer Absorber Using Epoxy Resin Including Titanium Oxide and Carbon Particles, *The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series B*, Vol.J84-B, No.10 (2001), pp.1901-1904.
- (16) Soh, T. and Hashimoto, O., A Study on Millimeter-wave Absorber Coating for V Band and W band, *The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series B*, Vol.J84-B, No.8 (2001), pp.1523-1528.
- (17) Mori, T. and Tanaka, K., Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metallurgica*, Vol.21, Issue 5, (1973), pp.571-574.
- (18) Tanaka, K. et al., An improved solution to thermo-elastic material design in functionally graded materials., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.109, Issues 3-4 (1993), pp.377-389.