

高電力下における傾斜機能型電波吸収体の
電磁場-温度場連成効果と非定常熱応力*高橋 智^{*1}, 菅野良弘^{*2}Coupling Effects and Thermal Stresses of Functionally Graded Type
Electromagnetic Wave Absorbers under High Power InjectionSatoshi TAKAHASHI^{*3} and Yoshihiro SUGANO^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ishinomaki Senshu University,
1 Shinminato, Minamisakai, Ishinomaki-shi, Miyagi, 986-8580 Japan

Functionally graded (FG) type electromagnetic (EM) wave absorbers have been proposed for the improvement in absorption performance and material strength. In this paper, we investigate coupling effects on the performance of the FG type EM wave absorbers for plate under high power injection and transient thermal stresses in the absorption systems. The coupling effects of electromagnetic field and temperature field are analyzed by weak-coupling method based on the iterative use of the analytical solutions for each field. The thermal stress field is also analyzed for a thin plate with arbitrary nonhomogeneous properties and temperature dependences. Numerical calculations are carried out for the FG type EM wave absorbers composed of epoxy resin matrix and conductive titanium oxide particles. The absorption characteristics and the magnitude of temperatures and thermal stresses are quantitatively evaluated. The effects of irradiation power and material composition distribution on the absorption characteristics and temperature distribution are then discussed. The significance of the coupling effects and the thermal stress analysis is revealed. In addition, a possibility of material design on the FG type absorber suitable for the absorption of EM wave and reduction of thermal stress is suggested.

Key Words: Functionally Graded Material, Thermal Stress, Coupling Problem, Material Design, Electromagnetic Wave Absorber

1. 緒 言

電磁ノイズ問題は、電子機器の品質向上や環境問題の一環として重要な課題である。電波吸収体は、高電力下での使用や電磁波の利用環境の多様化に伴い、耐環境性や熱対策、機械的強度が要求されている。電波吸収体が高電力を受ける場合、材料内部の温度は大きく上昇する⁽¹⁾。この熱発生と、実験的に重要性が指摘された電磁気特性の温度依存性⁽²⁾を考慮すると、電波吸収特性の評価や特性変化への対策等には、電磁場と温度場の連成効果の解析が必須である。また、材料内部の温度上昇による熱応力問題が予想されることから、材料設計のためには熱的、力学的負荷に対する強度の検討が重要である。これまで、電波吸収体の熱問題に関しては、1層型電波吸収体や $\lambda/4$ 型電波吸収体の温

度解析^{(3), (4)}が行われているが、熱応力を評価する実験や理論解析は報告されていない。

本論文では、著者らの提案した電磁ノイズ抑制機能を有する傾斜機能平板の電磁場解析^{(5), (6)}をもとに、板厚方向に任意の熱的、電磁氣的不均質性を有する傾斜機能 (FG) 型電波吸収体と金属平板からなる電波吸収システムについて、高電力照射による内部熱発生と周囲媒体温度によって加熱される場合の電磁場と温度場の連成効果と非定常熱応力を解析する。さらに、エポキシ樹脂と導電性酸化チタンを構成材料に想定したFG型電波吸収体について、電場と温度場、熱応力場の大きさを定量的に評価し、照射電力の強さや材料組成分布が電波吸収性能と熱応力分布に及ぼす影響を明らかにする。

2. 電磁場-温度場連成解析と熱応力解析

2.1 連成解析の問題設定と定式化 電波吸収体は、一般的に吸収体に金属を裏打ちした構造で評価される。ここでは、解析対象を平板形状とし、板厚方

* 原稿受付 2008年10月16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

向に任意の不均質性と電磁気特性の温度依存性を有する吸収層を、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 $T_i(z, t)$ の連成解析を行う。第 $n+1$ 層は金属板である。第 0 媒質から平面電磁波が、入射角 θ_0^i で吸収体に入射している場合を設定し、照射電力による材料内部の熱発生 $P_i(z, t)$ と時間変動する周囲媒体温度 $\phi(t)$, $\psi(t)$ によって FG 型電波吸収システム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 は、それぞれ、入射、反射、前進、後退を表し、複素量には記号の上にドットを付す。この場合、媒質 0 と各層 (1~ n) 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。

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \dot{E}_i + \dot{\mu}_i(T) \frac{\partial \dot{H}_i}{\partial t} &= 0 \quad (i=0 \sim n) \\ \nabla \times \dot{H}_i - \dot{\epsilon}_i(T) \frac{\partial \dot{E}_i}{\partial t} - \delta_i(T) \dot{E}_i &= 0 \quad (i=0 \sim n) \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

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

$$\dot{E}_{yn}(z, t) = 0, \dot{H}_{xn}(z, t) = 0 \quad (z = z_n) \dots\dots(3)$$

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、 $\dot{\epsilon}_i$, $\dot{\mu}_i$, δ_i は複素誘電率、複素透磁率、導電率を表す。

一方、金属層を含む各層 (1~ $n+1$) の温度場が満足すべき基礎微分方程式、初期条件式、境界条件式、連続条件式は次式で表される。

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} + \frac{P_i(z, t)}{\lambda_i} = \frac{1}{\kappa_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (i=1 \sim n+1) \dots\dots(4)$$

$$(T_i)_{t=t_0} = U_i(z) \quad (i=1 \sim n+1) \dots\dots(5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} - h_1 \{T_1 - \phi(t)\} = 0 \quad (z = z_0) \dots\dots(6)$$

$$\lambda_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}}{\partial z} + h_2 \{T_{n+1} - \psi(t)\} = 0 \quad (z = z_{n+1}) \dots\dots(7)$$

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

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \quad (z = z_i, i=1 \sim n) \dots\dots(9)$$

ここで、 λ_i は熱伝導率、 κ_i は熱拡散率であり、 h_1 , h_2 は平板両表面の熱伝達率である。また、照射電力による内部熱発生は、単位体積あたりの吸収電力^{(7), (8)}として次式で与える。

$$P_i = \frac{1}{2} \delta_i(T) |\dot{E}_i|^2 + \frac{1}{2} \omega \left\{ |\dot{E}_i|^2 \epsilon_i''(T) + |\dot{H}_i|^2 \mu_i''(T) \right\} \dots\dots(10)$$

ここで、 ω は作業周波数の角周波数であり、 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 電磁場と温度場の連成解析手法

上記で設定した連成問題において、連成を考慮した厳密解の導出は困難である。ここでは、電磁場と温度場の支配方程式を個別に解き、その解を用いた弱連成手法によって連成解析を行う。図2に弱連成手法のフローチャートを示す。微小時間刻み Δt における収束計算によって、その時刻における電磁場と温度場の値を決定する。このアルゴリズムを計算終了時間 (定常状態) まで繰返すことで、連成効果を考慮した電磁場と温度場の値を得る。

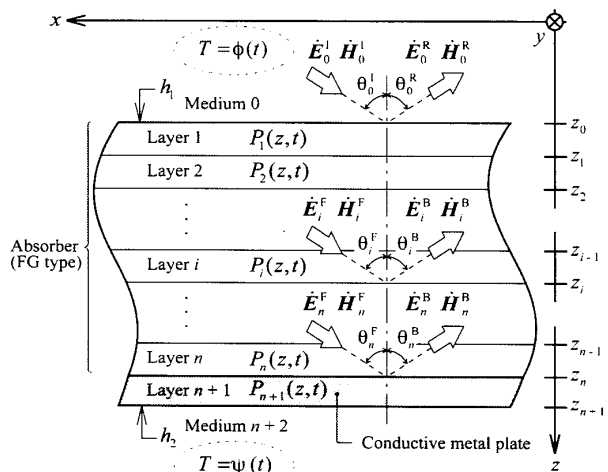


Fig. 1 Analytical model of FG type absorption system

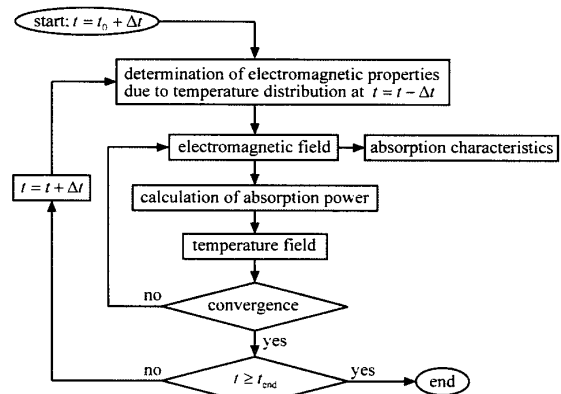


Fig. 2 Flow chart of coupled analysis (weak-coupling)

2・2・1 電磁場の解析と電波吸収特性 電磁場の基礎微分方程式(1)より、電場 \dot{E}_i または磁場 \dot{H}_i に関して次式の微分方程式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \dot{\Phi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{\Phi}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{\Phi}}{\partial z^2} - \dot{\epsilon} \mu \frac{\partial^2 \dot{\Phi}}{\partial t^2} - \dot{\mu} \delta \frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 $\dot{\Phi}$ は電磁場 \dot{E}_i 、 \dot{H}_i の各成分を表したものである。電波吸収体に入射する平面電磁波を角周波数 ω で時間的に正弦波振動していると定義し、フェーザ表示を使用すると、式(11)よりヘルムホルツ型の微分方程式が得られる。この式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により、所要の電磁波は次式のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{y_i} &= \left\{ \dot{A}_i e^{-\dot{\gamma}_i(-x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} + \dot{B}_i e^{-\dot{\gamma}_i(-x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \right\} e^{j\omega t} \\ -\dot{H}_{x_i} &= \frac{\dot{\gamma}_i}{j\omega \dot{\mu}_i} \left\{ \cos \theta_i \dot{A}_i e^{-\dot{\gamma}_i(-x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} - \cos \theta_i \dot{B}_i e^{-\dot{\gamma}_i(-x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \right\} e^{j\omega t} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ただし、 $\dot{\gamma}_i$ は次式で表される伝搬定数である。j は虚数単位である。

$$\dot{\gamma}_i = \sqrt{(j\omega \dot{\epsilon}_i + \delta_i)(j\omega \dot{\mu}_i)} \quad \dots\dots\dots(13)$$

また、未知係数 \dot{A}_i 、 \dot{B}_i は、式(2)、(3)の境界条件式より決定される。

電波吸収特性は、界面 $z = z_0$ における電磁波の反射率をデシベル値で表した次式を用いて評価する⁽⁵⁾。

$$R^{TE} = -20 \log_{10} \left| \frac{\dot{E}_{y0}^R}{\dot{E}_{y0}^I} \right|_{z=z_0} \quad \dots\dots\dots(14)$$

2・2・2 温度場の解析 温度解析は Vodicka の方法を応用した一種の積分変換法^{(9),(10)}により解析解を導出する。式(4)～(9)の解を次のように分離する。

$$T_i(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} Q_m(t) R_{im}(z) + \sum_{j=1}^2 L_{ij}(z) F_j(t) \quad \dots\dots\dots(15)$$

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。

$$\frac{d^2 L_{ij}}{dz^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(16)$$

また、 $R_{im}(z)$ は式(4)～(9)の非定常熱伝導問題から得られる固有値問題の解であり、 $L_{ij}(z)$ 、 $R_{im}(z)$ の解はそれぞれ次式で与えられる。

$$L_{ij}(z) = A_{ij}^* z + B_{ij}^* \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$R_{im}(z) = A_{im} \cos(d_{im} z) + B_{im} \sin(d_{im} z) \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここで、 $d_{im} = \gamma_m / \sqrt{\kappa_i}$ である。未知係数 A_{ij}^* 、 B_{ij}^* 、 A_{im} 、 B_{im} は、式(6)～(9)の境界条件式と連続条件式および固有値問題のそれらより決定される。固有値 γ_m は、超越方程式を満足する第 m 番目の正根であり、式(15)は、無限個の根について総和をとる。式(18)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。

$$\sum_{i=1}^{n+1} \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{\lambda_i}{\kappa_i} R_{im}(z) R_{ik}(z) dz = \begin{cases} \text{const.} & (m = k) \\ 0 & (m \neq k) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(19)$$

上記の修正された変数分離と固有関数の直交関係を用いて、最終的に、各層の非定常温度場は次式のように得られる。

$$T_i(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} Q_m(t) \{ A_{im} \cos(d_{im} z) + B_{im} \sin(d_{im} z) \} + \sum_{j=1}^2 (A_{ij}^* z + B_{ij}^*) F_j(t) \quad \dots\dots\dots(20)$$

ただし、 $Q_m(t)$ は次式のように表される。

$$Q_m(t) = e^{-\gamma_m^2(t-t_0)} \left\{ u_m - \sum_{j=1}^2 l_{mj} F_j(t_0) \right\} + e^{-\gamma_m^2 t} \int_{t_0}^t e^{\gamma_m^2 t'} \left\{ p_m(t') - \sum_{j=1}^2 l_{mj} \frac{dF_j(t')}{dt'} \right\} dt' \quad \dots\dots\dots(21)$$

ここで、 u_m 、 l_{mj} 、 p_m はそれぞれ $U_i(z)$ 、 $L_{ij}(z)$ 、 $P_i(z, t)$ の固有関数による展開係数である。

2・3 非定常熱応力解析 電波吸収体に用いられる母材の多くは、温度と時間に依存性を有する粘弾性材料であるが、本論文では板厚方向に不均質特性を有する弾性材料として取扱う。平板が平面応力状態で、両表面に外力が作用していない場合を考える。この場合、平板の応力成分は次式で表される。

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_f(z, t), \quad \sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{zy} = \sigma_{xy} = 0 \quad (22)$$

この条件において、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菅野⁽¹¹⁾により得られている。本論文では、この熱応力式を熱弾性特性の温度依存性を有する場合に拡張し次式を得た。

$$\sigma_f(z, t) = \frac{E(z, T)}{1 - \nu(z, T)} \left[- \int_{T(z, t_0)}^{T(z, t)} \alpha(z, T) dT + \frac{(I_{E2} z - I_{E3}) I_{T1} + (I_{E2} - I_{E1} z) I_{T2}}{I_{E2}^2 - I_{E1} I_{E3}} \right] \quad \dots\dots\dots(23)$$

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 数値計算条件 数値計算に際し次式の無次元量を導入する。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \kappa_1 t / z_{n+1}^2, \zeta_n = z_n / \lambda_f, \bar{z} = z / z_n, \\ b &= z_{n+1} / z_n, \beta_1 = h_1 z_{n+1} / \lambda_1, \beta_2 = h_2 z_{n+1} / \lambda_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(24)$$

ここで、 λ_f は作業周波数の波長、 β_1 と β_2 はビオ数である。数値計算例として、エポキシ樹脂 (EP) の母材と導電性酸化チタン (TiO₂) の分散粒子からなる FG 型電波吸収体について、電波吸収特性および温度場と熱応力場の数値計算を行う。裏打ちした金属板は一般的なステンレス鋼 (SUS) とした。図3は、吸収層内の分散粒子の傾斜分布を示したものである。樹脂 100g に対する粒子の重量 (PHR) を最大 60 PHR、分割数を 10 層として、Rich, Linear, Poor の 3 タイプを設定した。表1に構成材料の熱的、機械的物性値を示す。エポキシ樹脂の縦弾性係数と線膨張係数は、ガラス転移温度 ($T_g = 368 \text{ K}$) 領域において顕著な温度依存性を示す^{(12),(13)}。本数値計算では、中村らの実験値⁽¹²⁾を参考にして温度範囲を3つの領域にわけ、エポキシ樹脂に対する温度依存性を次式で与えた。

$$\left. \begin{aligned} (298 \text{ K} \leq T \leq 368 \text{ K}) \\ E &= -7.143 \times 10^{-3} T + 4.629 \text{ GPa} \\ \alpha &= 2.143 \times 10^{-7} T - 8.857 \times 10^{-6} / \text{K} \\ (368 \text{ K} < T < 383 \text{ K}) \\ E &= -1.30 \times 10^{-1} T + 4.984 \times 10 \text{ GPa} \\ \alpha &= 5.333 \times 10^{-6} T - 1.893 \times 10^{-3} / \text{K} \\ (383 \text{ K} \leq T) \\ E &= 0.05 \text{ GPa}, \alpha = 150.0 \times 10^{-6} / \text{K} \end{aligned} \right\} \dots\dots(25)$$

各層の熱伝導率、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⁽¹⁴⁾より算出した。比熱、密度、ポアソン比は線形複合則より算出した。また、想定した吸収層は誘電性材料であるため複素比透磁率 $\hat{\mu}_r = 1$ 、導電率 $\delta = 0$ とし複素比誘電率は実験式等^{(2),(15),(16)}を参考にして次式のよう

$$\left. \begin{aligned} \hat{\epsilon}_r &= 4.0 + 0.4g^{1.02} + (0.6 \times 10^{-3}g + 2.0 \times 10^3)(T - 298) \\ &- j \{ 0.05 + 0.12g^{1.12} + (0.8 \times 10^{-3}g + 0.5 \times 10^3)(T - 298) \} \end{aligned} \right\} \dots\dots(26)$$

図4は、複素比誘電率の温度依存性を表したものである。分散粒子の含有量が多いほど温度依存性が大きい傾向を示す。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 とし、平板に垂直入射 ($\theta_0^i = 0^\circ$) するとした。なお、媒質0および $n+2$ は自由空間とした。また、平板厚さと初期温度、周囲媒体温度による加熱条件に関しては、以下の数値計算諸元を採用した。

$$\left. \begin{aligned} b &= 1.2, U_i = 298 \text{ K} \quad (i=1 \sim n+1) \\ \phi(t) &= \psi(t) = 298 \text{ K}, \beta_1 = \beta_2 = 0.05 \end{aligned} \right\} \dots\dots(27)$$

弱連成の収束判定は、各場の相対誤差 (現繰返しステップと1つ前のステップとの差) 0.1%以下で収束とした。無次元時間刻みは、 $\Delta\tau = 0.01$ とした。

Table 1 Thermal and mechanical properties

	EP	TiO ₂	SUS
Thermal conductivity λ [W/(m·K)]	0.19	6.69	16.3
Specific heat c [KJ/(Kg·K)]	1.05	0.71	0.5
Density ρ [Kg/m ³]	1750	3500	7930
Young's modulus E [GPa]	Eq.(25)	265	193
Coefficient of linear thermal expansion α [$\times 10^{-6}$ /K]	Eq.(25)	8.0	17.3
Poisson's ratio	0.34	0.28	0.3

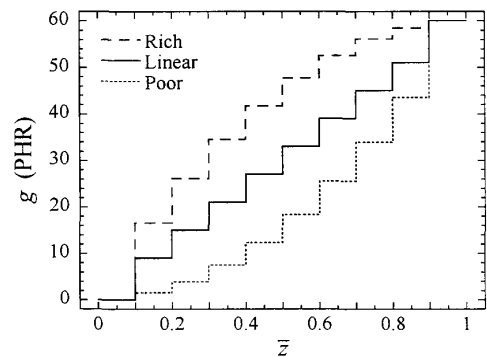


Fig. 3 Compositional distributions of TiO₂ in absorber

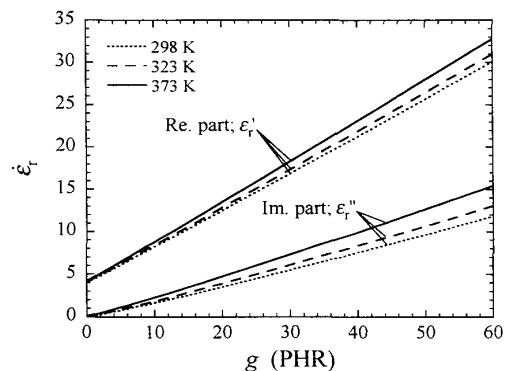


Fig. 4 Temperature-dependency of relative permittivity

3.2 電波吸収特性の評価 図5は、傾斜組成分布が Rich, Linear, Poor の FG 型電波吸収システムにおいて、吸収層の無次元板厚が $\zeta_n = 0.001 \sim 0.2$ の場合の電波吸収特性を示したものである。ここで、吸収層内の温度分布は 298 K の均一である。Linear タイプの傾斜組成分布において無次元板厚 $\zeta_n = 0.072 \sim 0.08$ を選択した場合、14 dB 以上の電波吸収性能が得られる。この値は、電波吸収体によって入射電磁波の強度を 80% 以上低減させる性能を示す。本数値計算では、電波吸収性能を最大にするような材料設計は行っていないが、傾斜組成分布と板厚の制御により、効果的な電波吸収性能を発揮することが可能と考えられる。図6は、連成効果による FG 型電波吸収システムの電波吸収特性の変化を示したものである。代表例として Linear タイプの傾斜組成分布の結果を示す。照射電力の強度は $S = 1.0 \text{ kW/m}^2$ である。時間経過とともに電波吸収性能が変化していることがわかる。初期時刻にピーク値を示した領域の代表値として、無次元板厚 $\zeta_n = 0.08$ の値に注目すると、定常状態では約 11 dB (72% の低減) と、初期時刻から約 10% 程度、電波吸収性能が低下したことがわかる。この性能低下は、電磁気特性の温度依存性により、材料内部における電磁エネルギーの熱エネルギー変換や多重干渉など、電波吸収特性を支配するメカニズムが変化したこと起因する。

3.3 温度場と熱応力場の評価 図7は、図6と同じ数値計算条件において、無次元板厚 $\zeta_n = 0.08$ における FG 型電波吸収システムの温度分布と熱応力分布を示したものである。図7(a)の温度分布から、吸収層内における吸収電力が熱として平板全体に伝導し、時間の経過とともに平板内部の温度が上昇していることがわかる。平板の両端においては周囲媒体への放熱により、中央付近に比べて温度上昇は小さい。吸収層の熱伝導率が低いことから、内部で発生した熱が吸収層中央付近にこもり、最大温度は 357 K を示した。図

7(b)は、図7(a)の温度分布を有する FG 型電波吸収システムの熱応力分布を示したものである。定常状態に近づくにつれて、吸収層の両端に発生している引張熱応力と圧縮熱応力は大きくなり、吸収層内の最大熱応力は 59 MPa を示した。金属層側にも大きな熱応力が発生している。金属層の拘束により、界面付近で大きな熱応力が発生していることがわかる。弾性解析による結果ではあるが、発生した熱応力は、材料の変形または

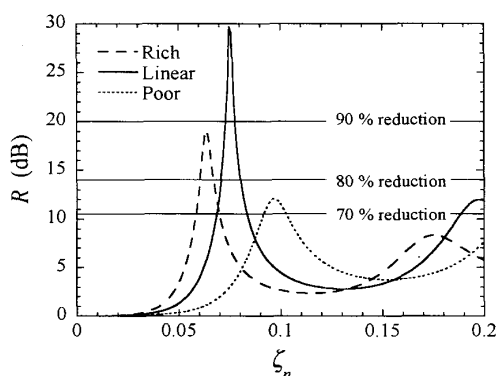


Fig. 5 Absorption characteristics of FG type absorbers

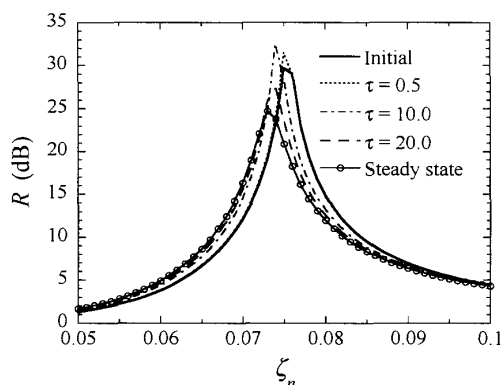
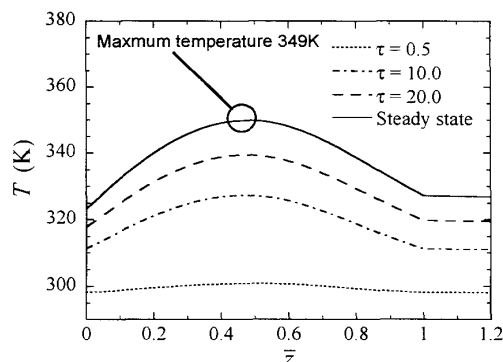
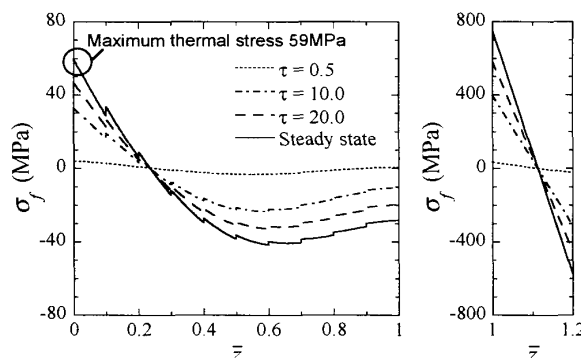


Fig. 6 Absorption characteristics of FG type absorber by coupling effect (Linear, $S = 1.0 \text{ kW/m}^2$)



(a) Temperature distributions ($\zeta_n = 0.08$)



(b) Thermal stress distributions ($\zeta_n = 0.08$)

Fig. 7 Temperature and thermal stress distributions in FG type absorption system by coupling effect (Linear, $S = 1.0 \text{ kW/m}^2$)

破壊の原因となることが予測できる。これらの結果は、連成効果と熱応力評価の重要性を示している。

3.4 照射電力の影響 図8は、照射電力の強さが電波吸収特性に及ぼす影響を示したものである。傾斜組成分布は Linear タイプ、無次元板厚 $\zeta_n = 0.08$ である。照射電力が高いほど、電波吸収特性の性能低下が大きいことがわかる。図9は、定常状態における FG 型電波吸収システムの温度分布と熱応力分布を示したものである。図9(a)より、照射電力の高いほうが、吸収層内の吸収電力も大きくなり、平板内部の温度が全体的に高くなることがわかる。照射電力 $S = 1.5 \text{ kW/m}^2$ では、吸収層中央部分の温度がエポキシ樹脂のガラス転移温度を越える。さらに、照射電力 $S = 2.0 \text{ kW/m}^2$ では、吸収層の大部分の箇所がガラス転移温度を越えた。図9(b)は、図9(a)の温度分布を有する FG 型電波吸収システムの熱応力分布を示したものである。吸収層の表面側では引張熱応力、金属平板側では圧縮熱応力が発生している。また、照射電力 $S = 2.0 \text{ kW/m}^2$ において、ガラス転移温度を越えた無次元板厚座標 $\bar{z} = 0.2, 0.85$ 近傍で熱応力が変化していることがわかる。これは、式(25)の温度依存性によって、ガラス転移温度以下の部分とガラス転移温度以上の部分との縦弾性係数と線膨張係数の差が大きくなった結果である。吸収層内の温度が高いほど吸収層の縦弾性係数は小さく、線膨張係数が大きくなる。従って、照射電力が高く吸収層内がガラス転移温度以上になる場合、熱応力は特殊な挙動を示す。これらの結果から、より高い電力下において、連成問題と熱応力問題はさらに重要になることがわかる。一般に高出力レーダ等の評価など、高電力下における照射電力量は、 0.5 kW/m^2 から最大値で 10.0 kW/m^2 と報告⁽¹⁾されている。本数値計算条件以上の高電力を想定した場合には、電波吸収体システムの放熱対策または構成材料選択の検討が必要である。

3.5 傾斜組成分布の影響 図10は、傾斜組成分布が電波吸収特性の変化に及ぼす影響を示す。各傾斜組成分布タイプの無次元板厚 ζ_n は、図5において $10 \text{ dB} \sim 15 \text{ dB}$ の電波吸収特性を示した値を使用した。照射電力は $S = 1.5 \text{ kW/m}^2$ である。Linear タイプに比べ Rich タイプと Poor タイプのほうが、電波吸収特性の変化が小さいことがわかる。このことから、連成効果による電波吸収特性の変化量を小さくする材料設計が可能であることがわかる。図11は、各傾斜組成分布タイプの定常状態における温度分布と熱応力分布を示したものである。図11(a)より、Rich タイプが他のタイプに比べて温度上昇が小さいことがわかる。また、吸

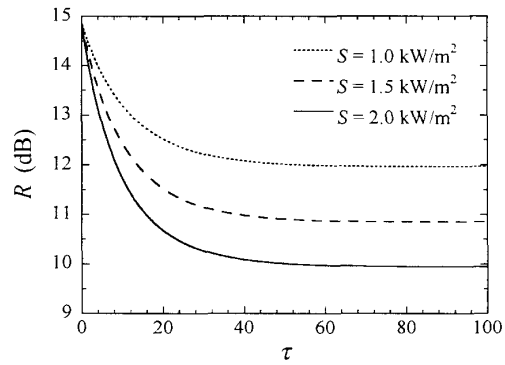
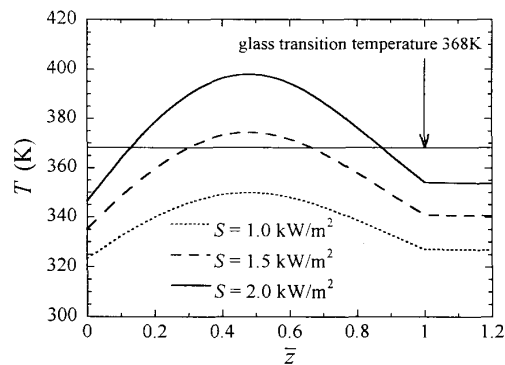
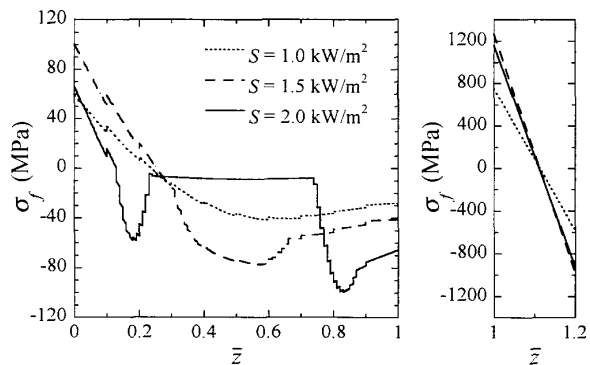


Fig. 8 Absorption characteristics of FG type absorber due to variation in irradiation power (Linear, $\zeta_n = 0.08$)



(a) Temperature distributions



(b) Thermal stress distributions

Fig. 9 Temperature and thermal stress distributions in FG type absorption system at steady state due to variation in irradiation power (Linear, $\zeta_n = 0.08$)

収層内における分散粒子の含有量が少なくなる傾斜組成分布タイプの方が、最大温度を示す箇所が平板の中央付近に移動していることがわかる。図11(b)は、各傾斜組成分布タイプにおいて図11(a)の温度分布を有する FG 型電波吸収システムの熱応力分布を示したものである。Poor タイプにおいて、無次元板厚座標 $\bar{z} = 0.2, 0.85$ 近傍の熱応力が変化しているのは、図9(b)と同様に温

度依存性による材料の不均質性が顕著に現れた結果である。Rich タイプは温度上昇が小さく、他のタイプに比べて吸収層内と金属層内の熱応力も小さいことがわかる。これらの結果は、Rich タイプの傾斜組成分布により、吸収層内の熱伝導が良好になったことと、傾斜化による若干の熱応力緩和が得られたためと考えられる。本数値計算では、複合材料に対する電磁気特性のデータ不足の関係から、分散粒子の最大含有量を 60 PHR に制限している。電磁エネルギーを熱エネルギーへ変換する電波吸収原理や、これまで報告されている多くの傾斜化による熱応力緩和機能から考察すると、分散粒子の増加による材料組成の傾斜化で、より優れた電波吸収機能と熱応力緩和機能の両立が得られると推測できる。

4. 結 言

高電力を受ける FG 型電波吸収体について、電磁場と温度場の連成効果が電波吸収特性に及ぼす影響と、熱応力分布を明らかにするために、FG 型電波吸収体と金属平板からなる電波吸収システムの連成解析と非定常熱応力解析の数値解析手法を提案した。また、数値計算例として、エポキシ樹脂と導電性酸化チタンからなる FG 型電波吸収体の電波吸収特性、温度分布、熱応力分布の数値計算を行い、電波吸収体における連成効果と熱応力評価の重要性を定量的に明らかにした。さらに、照射電力の強さと傾斜組成分布が電波吸収特性と温度分布、熱応力分布に及ぼす影響を考察した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- ・電磁場と温度場の連成効果により、電波吸収特性が大きく変化することを定量的に確認した。
- ・照射電力によって吸収層内部の温度が上昇し、吸収層の両端付近と金属層に大きな熱応力が発生する。
- ・照射電力の高い方が吸収層内の温度は高くなり、大きな熱応力が発生する。ガラス転移温度を越えると急激に熱応力が変化する。
- ・高電力を想定した場合には、電波吸収体システムの放熱対策または構成材料選択の必要性がある。
- ・傾斜組成分布の選択により、電波吸収特性の変化量を小さくする設計が可能である。また、吸収層の熱伝導を良くすることで温度上昇を抑制し、熱応力を緩和することが可能である。

文 献

- (1) Watanabe, S. et al., Temperature Distribution of an One-Layer EM-Absorber Using Lossy Dielectric Material under Electric Power Injection, *The*

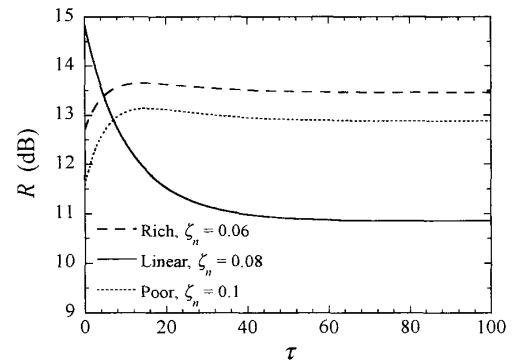
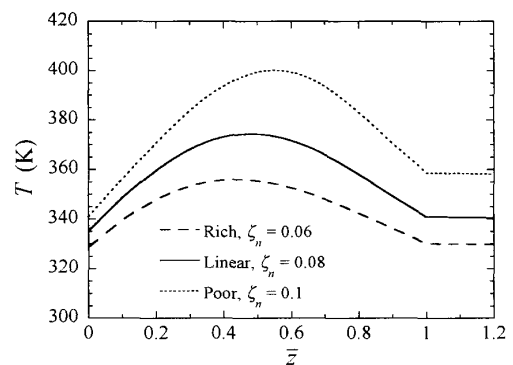
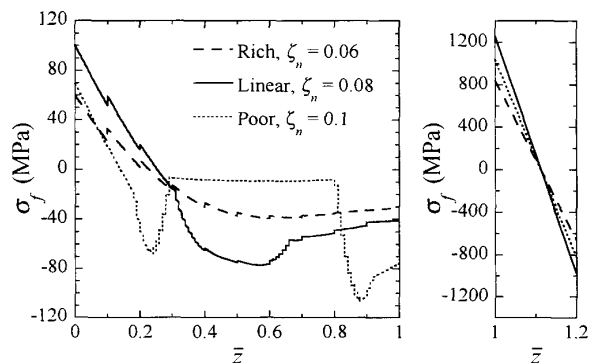


Fig. 10 Absorption characteristics of FG type absorbers due to variation in material composition distribution ($S = 1.5 \text{ kW/m}^2$)



(a) Temperature distributions



(b) Thermal stress distributions

Fig. 11 Temperature and thermal stress distributions in FG type absorption systems due to variation in material composition distribution ($S = 1.5 \text{ kW/m}^2$)

Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series C, Vol. J90-C, No.3 (2007), pp.223- 234.

- (2) 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.

- (3) Suga, Y. and Hashimoto, O., Temperature Analysis of FRP Type Wave Absorber, *The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series B*, Vol.J88-B, No.4 (2005), pp.824-826.
- (4) Watanabe, S. et al., Examination about the Temperature Distribution of a $\lambda/4$ Type Wave Absorber under High Power Injection Using a Coupled Analysis Method for Electromagnetics and Heat Transmissions, *The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series B*, Vol.J89-B, No.12 (2006), pp.1054-1065.
- (5) 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.
- (6) Takahashi, S. and Sugano, Y., Transient Thermal Stresses in Functionally Graded Plates with a Function of Electromagnetic Noise Suppression, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.73, No.733 (2007) pp.1071-1078.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Vodicka, V., One-dimensional heat conduction in layered body (in German), *Mathematische Nachrichten*, Vol.14, No.1 (1955) pp.47-55.
- (10) Sugano, Y. et al., An Analytical Solution for Transient Thermal Stress in a Functionally Gradient Plate with Arbitrary Nonhomogeneities and Thermal Boundary Conditions, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.59, No.567 (1993) pp.2666-2673.
- (11) 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.
- (12) Nakamura, S. et al., Expedient Evaluation Method of Warp Deformation Behavior for Viscoelastic Laminated Beam Consisted of Epoxy Resin and Steel, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.57, No.5 (2008), pp.495-501.
- (13) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME Mechanical Engineers' Handbook, Design, β 2: Engineering Materials: Data and Guide for Mechanical Engineers*, (2006), pp.139-141, The Japan Society of Mechanical Engineers.
- (14) Tanaka, K. et al., An improved solution to thermoelastic material design in functionally graded materials., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.109, Issues 3-4 (1993), pp.377-389.
- (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.