

湿熱環境下でのき裂を有する円柱の応力解析と連成効果*

菅 野 良 弘^{*1}, 村 木 剛 尚^{*2}
中 馬 康 晴^{*3}, 奥 田 昭^{*4}Hygrothermal Stresses and Coupling Effects in a Circular Cylinder
with a Crack due to Moisture and TemperatureYoshihiro SUGANO, Takehisa MURAKI,
Yasuharu CHUUMAN and Akira OKUDA

In this paper, an analytical solution is presented for stress intensity factor of a solid circular cylinder with an edge crack subjected to transient hygrothermal loading on the lateral surface. It is assumed that the coupled diffusion problem of temperature and moisture in the cylinder over a short time can be analyzed by neglecting the hygrothermal disturbance near the crack tip. The associated plane-strain hygrothermal stress problem is solved by the use of Tweed and Rooke's solution for a pure elastic problem in a circular cylinder with the same crack. Numerical calculations are carried out for the stress intensity factor at the crack tip in the circular cylinder made of T300/5208 (graphite/epoxy) composite material. The effect of crack length and coupling of temperature and moisture fields on the stress intensity factor are quantitatively estimated under various thermal and hygrometric loading conditions.

Key Words: Hygrothermoelasticity, Crack Problem, Moisture and Temperature, Coupling Effect, Stress Intensity Factor, Circular Cylinder, Composite Material

1. 結 言

比強度, 比剛性の高い軽構造材料としてのCFRP, GFRP など, 樹脂系複合材料の航空・宇宙機, LSI などの電子部品, 自動車への応用は, ますます増加しつつある⁽¹⁾。しかし, これらの複合材料は軽金属材料と比較して, 吸湿性(または吸水性)を有し, 湿度(水分)や熱の影響を受けやすい。すなわち, いわゆる“hot/wet”な環境下に置かれたとき, 材料特性の劣化を招くとともに, 湿熱応力(hygrothermal stress)が生じる。

また, 多孔質材料であるセラミックスも吸湿性を有し, この吸湿性が微小き裂に作用して割れを誘発する要因にもなっている。き裂を有する物体の温度分布下における応力拡大係数の解析はこれまでに数多く報告されているが⁽²⁾⁽³⁾, 湿熱環境下にあるき裂を有する物体の応力拡大係数の解析はほとんど報告されていない。特に, 温度場と湿度場が連成する非定常拡散過程におけるき裂を有する物体の応力拡大係数の解析結果

は全く報告されていない。

そこで, 本研究では, 上述のような吸湿性をもった材料からなる円柱に, 軸方向に一樣な半径方向表面縁き裂が存在し, 非定常湿熱負荷が与えられた場合の湿熱連成非定常湿熱応力問題を解析する。解析は, このようなき裂を有する純弾性問題の Tweed ら⁽⁴⁾ および熱応力問題の松永ら⁽⁵⁾ の解析法を応用して行う。また, 数値解析を行い, 温度場と湿熱場の連成⁽⁶⁾⁽⁷⁾ が, 応力拡大係数に及ぼす影響や, 加湿(除湿), 冷却(加熱)が応力拡大係数に及ぼす影響を定量的に検討する。

2. 解 析

図1のように円筒座標系 (r, θ, z) を設定し, 軸方向に一樣な深さ $a(=R-b)$ の半径方向表面縁き裂を有する無限円柱(半径 R)の一般化された平面ひずみ非

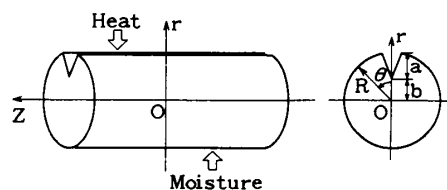


図 1 解析モデル

* 平成5年11月15日 材料力学部門講演会において講演, 原稿受付 平成5年12月17日。

^{*1} 正員, 岩手大学工学部 (〒020 盛岡市上田4-3-5)。

^{*2} 学生員, 大阪府立大学大学院 (〒593 堺市学園町1-1)。

^{*3} 准員, 大阪府立大学大学院 [現: 三菱重工業(株)]。

^{*4} 鶴見製作所 (〒538 大阪市鶴見区鶴見4-16-40)。

定常連成湿熱応力問題 ($\varepsilon_{zz} = \text{一定}$) を解析する。

なお、温度場と湿度場の連成のみ考慮し、これと比較して小さい温度場と変形場の連成⁽⁸⁾は無視する。

2・1 非定常連成湿熱問題 材料の初期湿度、温度を C_0 , T_0 とし、ある時刻 $t = +0$ から円柱側面に C_a , T_a なる湿熱負荷を受け、以後この状態に保持されるものとする。また、湿熱負荷後の短い時間内においてはき裂の存在による湿度場および温度場のじょう乱は無視できるものと仮定する。

一般に熱流束、物質流束、運動量などの複数の輸送現象が同時に起こり、これらが相関関係にあるとき、 i 番めの現象の流束 J_i は、駆動力である熱力学的力 X_i の線形関数として次式のような現象方程式⁽⁹⁾で表される。

$$J_i = \sum_{j=1}^k L_{ij} X_j \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

X_i としては、熱、物質、電荷などの流束と共役関係にある、温度の自然対数のこう配、化学ポテンシャルのこう配、電位のこう配など⁽⁹⁾が考えられ、輸送係数 L_{ij} は Onsager の相反定理により $L_{ij} = L_{ji}$ である。ここでは水分流束と熱流束のみが連成した輸送を考察すると、水分流束ベクトル f を J_1 、熱流束ベクトル q を J_2 とし、連成係数を λ_c , ν_c とすることにより

$$\left. \begin{aligned} f &= -D_m \nabla C - \lambda_c D_h \nabla T \\ \frac{q}{c_p \rho_1} &= -D_h \nabla T - \nu_c D_m \nabla C \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、

$$\lambda_c = \frac{D_m}{D_h} \frac{C}{R_g T^2} Q_h, \quad \nu_c = \frac{D_h}{\lambda} Q_h \quad (3)$$

ただし、 D_m , D_h , R_g , Q_h , λ , c_p , ρ_1 はそれぞれ湿度拡散率、熱拡散率、ガス定数、等温状態での水分流束速度に対する熱流束速度の比、熱伝導率、定圧比熱、密度である。材料の湿度拡散率、熱拡散率を D_{m0} , D_{h0} とすると連成を考慮したこれらの値は、 $D_m = D_{m0}(1 - \lambda_c \nu_c)$, $D_h = D_{h0}(1 - \lambda_c \nu_c)$ である。式(2)を物質保存則とエネルギー保存則に代入すると、非定常連成湿熱場の基礎微分方程式は次式のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} D_m \nabla^2 C &= \frac{\partial C}{\partial t} - \lambda_c \frac{\partial T}{\partial t} \\ D_h \nabla^2 T &= \frac{\partial T}{\partial t} - \nu_c \frac{\partial C}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)は C と T の線形結合からなる関数 ϕ_1 , ϕ_2 を導入することにより非連成化される⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そして、 ϕ_1 , ϕ_2 と温度変化 $\Delta T = T - T_0$, 湿度変化 $\Delta C = C - C_0$ は次の関係にある。

$$\left. \begin{aligned} \Delta C &= B_2 [\phi_1 + (A_2) \phi_2] \\ \Delta T &= B_1 [\phi_2 + (A_1) \phi_1] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{1 - \mu_1^2 D_m}{\lambda_c}, \quad A_2 = \frac{1 - \mu_2^2 D_h}{\nu_c} \\ B_1 &= \frac{1 - \mu_1^2 D_h}{D_h (\mu_2^2 - \mu_1^2)}, \quad B_2 = \frac{1 - \mu_2^2 D_m}{D_m (\mu_1^2 - \mu_2^2)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

関数 ϕ_1 , ϕ_2 が満足すべき微分方程式は次式のように与えられる。

$$\frac{1}{\mu_j^2} \nabla^2 \phi_j = \frac{\partial \phi_j}{\partial t} \quad (j=1, 2) \quad (7)$$

ここで、 μ_j^2 は次式で与えられる。

$$\mu_j^2 = \frac{(D_h + D_m) \mp \sqrt{(D_h - D_m)^2 + 4 \lambda_c \nu_c D_m D_h}}{2 D_m D_h} \quad (8)$$

温度、湿度の初期条件および境界条件は次式で与えられるので、

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 \\ C &= C_0 \end{aligned} \right\}, t=0 \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} T &= T_a \\ C &= C_a \end{aligned} \right\}, r=R \quad (10)$$

式(5), (9), (10)より、関数 ϕ_1 , ϕ_2 の初期条件および境界条件は、

$$\phi_j = 0, t=0 \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= (\phi_1)_a = \Delta C_a - A_2 \Delta T_a \\ \phi_2 &= (\phi_2)_a = \Delta T_a - A_1 \Delta C_a \end{aligned} \right\}, r=R \quad (12)$$

ただし、 $\Delta C_a = C_a - C_0$, $\Delta T_a = T_a - T_0$ である。式(7), (11), (12)は通常の非定常熱伝導問題と同様に、ラプラス変換法により解くことができ、その解は

$$\phi_j = (\phi_j)_a \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_0(r_n r)}{r_n R J_1(r_n R)} e^{-r_n^2 t / \mu_j^2} \right) \quad (13)$$

ただし、 r_n は次の超越方程式の n 番めの正根である。

$$J_0(r_n) = 0 \quad (14)$$

式(13)を式(5)に代入して、所要の連成された非定常湿度場、温度場が次式のように得られる。

$$\Delta C = B_2 \left[(\phi_1)_a + A_2 (\phi_2)_a - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_0(r_n r)}{r_n R J_1(r_n R)} \times \{ (\phi_1)_a e^{-r_n^2 t / \mu_1^2} + A_2 (\phi_2)_a e^{-r_n^2 t / \mu_2^2} \} \right] \quad (15)$$

$$\Delta T = B_1 \left[A_1 (\phi_1)_a + (\phi_2)_a - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_0(r_n r)}{r_n R J_1(r_n R)} \times \{ A_1 (\phi_1)_a e^{-r_n^2 t / \mu_1^2} + (\phi_2)_a e^{-r_n^2 t / \mu_2^2} \} \right] \quad (16)$$

2・2 湿熱応力場 円柱表面およびき裂表面に外力の作用しない純湿熱応力問題を考えることにすれば境界条件式は次式となる。

$$\sigma_{rr} = 0, \sigma_{r\theta} = 0, r=R \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta\theta} &= 0, \sigma_{r\theta} = 0, b < r < R \\ u_{\theta} &= 0, \sigma_{r\theta} = 0, 0 < r < b \end{aligned} \right\}, \theta=0 \quad (18)$$

上式の境界条件を満足するき裂を有する円柱の非定常

湿熱応力 σ_{ij} を次の二つの問題 (i), (ii) の和で求める。

(i) 2・1 節の非定常連成湿熱場を受けるき裂のない円柱に生じる湿熱応力 σ_{ij1} を次式の境界条件のもとで解析する。

$$\sigma_{rr1}=0, \sigma_{r\theta1}=0; r=R \quad \dots\dots\dots (19)$$

(ii) 問題 (i) の解としてき裂表面上に生じる湿熱応力を打消し、式 (18) の境界条件を満足させるため、次の境界条件をもつ等湿、等温弾性問題の解を σ_{ij2} とする。

$$\sigma_{rr2}=0, \sigma_{r\theta2}=0; r=R \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta\theta2} &= -\sigma_{\theta\theta1}, \sigma_{r\theta2}=0, b < r < R \\ u_{\theta2} &= 0, \sigma_{r\theta2}=0, 0 < r < b \end{aligned} \right\}, \theta=0 \quad \dots\dots (21)$$

以上により所要の湿熱応力 σ_{ij} は次式で与えられる。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij1} + \sigma_{ij2} \quad \dots\dots\dots (22)$$

まず、問題 (i) の解である軸対称湿熱応力は、次式に式 (15), (16) の ΔC , ΔT を代入することにより得られる。

$$\begin{aligned} \sigma_{rr1} &= \frac{E}{1-\nu} \left\{ -\frac{1}{r^2} \int_0^r (\alpha \Delta T + \beta \Delta C) r dr \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{R^2} \int_0^R (\alpha \Delta T + \beta \Delta C) r dr \right\} \quad \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta1} &= \frac{E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{r^2} \int_0^r (\alpha \Delta T + \beta \Delta C) r dr \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{R^2} \int_0^R (\alpha \Delta T + \beta \Delta C) r dr - (\alpha \Delta T + \beta \Delta C) \right\} \\ &\quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

ここで、 α , β , E , ν はそれぞれ線熱膨張係数、湿膨張係数、ヤング率、ポアソン比である。問題 (i) の解である軸対称湿熱応力のうちで式 (21) に関連する $\sigma_{\theta\theta1}$ のみ示すと、

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta1} &= \frac{E}{1-\nu} \left\{ A(\psi_1)_a \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-r_n^2 t / \mu^2} \right. \\ &\quad \left. + B(\psi_2)_a \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-r_n^2 t / \mu^2} \right\} = f(r) \quad \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} A &= \alpha A_1 \cdot B_1 + \beta B_2, B = \alpha B_1 + \beta A_2 \cdot B_2 \\ C_n &= \frac{2}{R^2 r_n^2 J_1(r_n R)} \\ &\quad \times \left\{ -\frac{R}{r} J_1(r_n r) - J_1(r_n R) + R r_n J_0(r_n r) \right\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (26)$$

このとき、問題 (ii) の半径方向表面縁き裂を有する円柱の応力拡大係数 K は次式で与えられる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$K = \left(\frac{2}{1-b_1} \right)^{1/2} P(b_1) \quad \dots\dots\dots (27)$$

ただし、 $b_1 = b/R$ 、また、 $P(b_1)$ は次式の第二種フレドホルム積分方程式の解である。

$$P(\xi) - \int_{b_1}^1 \frac{P(\eta) M(\xi, \eta)}{[(1-\eta)(\eta-b_1)]^{1/2}} d\eta = S(\xi) \quad \dots (28)$$

ここで、

$$S(\xi) = \frac{1-\xi}{\pi} \int_{b_1}^1 \left(\frac{\eta-b_1}{1-\eta} \right)^{1/2} \frac{f(\eta)}{\eta-\xi} d\eta, f(\eta) = \sigma_{\theta\theta1} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$\begin{aligned} M(\xi, \eta) &= \frac{1-\xi}{\pi} \left[\frac{(\eta^2-1)^2(1-b_1)}{2(1-\xi\eta)(1-\eta)^{3/2}(1-b_1\eta)^{1/2}} \right. \\ &\quad \times \left\{ \frac{1}{(1-\xi\eta)(1-b_1\eta)^{1/2}} + \frac{4-(1+3b_1)\eta}{4(1-\eta)(1-b_1\eta)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\eta^2}{(\eta^2-1)} \right\} + \frac{(1-b_1\eta)^{1/2}}{(1-\xi\eta)(1-\eta)^{1/2}} \left\{ \frac{\eta(\eta^2-1)}{(1-\xi\eta)} - \eta \right\} \\ &\quad \left. + \frac{(\eta^2-1)}{\eta} \left\{ \frac{(\eta^2-1)(1-b_1\eta)^{1/2}}{(1-\xi\eta)^3(1-\eta)^{1/2}} + 1 \right\} \right] \quad \dots\dots (30) \end{aligned}$$

3. 数値計算結果と考察

湿熱負荷としては応力緩和が期待される二つの場合 (1) 冷却と加湿, (2) 乾燥と加熱を取扱った。また、材料は比較的吸湿性に富み、主流の複合材料の一つとして広範囲に利用されている T 300/5208 (グラファイト/エポキシ) 複合材料とする。この材料の各材料定数は次のように与えられる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

$$\begin{aligned} E &= 64.30 \text{ GPa}, \alpha = 31.3 \times 10^{-6} \text{ cm/cm} \cdot \text{K} \\ \beta &= 2.68 \times 10^{-3} \text{ cm/cm. wt. \% H}_2\text{O}, \nu = 0.33 \\ D_{m0} &= 9.20 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{h}, D_{h0} = 9.20 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{h} \\ \lambda_c &= 0.122 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{K}, \nu_2 = 2.053 \text{ m}^3 \cdot \text{K/kg} \end{aligned}$$

また、材料の吸収できる最大水分量 C_∞ [% dry wt.] を次のように与えた⁽¹⁰⁾。

$$C_\infty [\% \text{ dry wt.}] = \begin{cases} d \cdot (RH)^h & (\text{蒸気中}) \\ c & (\text{液中}) \end{cases}$$

ただし、 RH は蒸気の相対湿度、T 300/5208 については、 $d=0.015$, $h=1$, $c=1.5$ である。

数値計算に際して次の無次元量が採用されている。

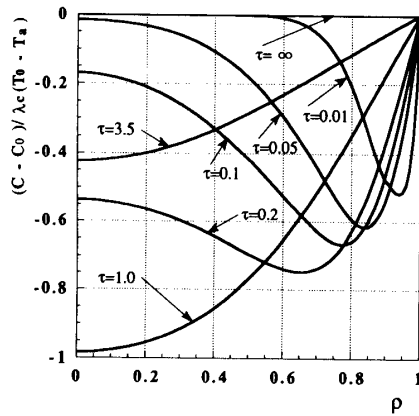
$$\begin{aligned} \rho &= r/R, \tau = D_h t / R^2, a_1 = a/R \\ \bar{K} &= \frac{(1-\nu)K}{E\alpha(T_0 - T_a)\sqrt{a}} \quad (\text{冷却と加湿の場合}) \\ \bar{K} &= \frac{(1-\nu)K}{E\beta(C_0 - C_a)\sqrt{a}} \quad (\text{乾燥と加熱の場合}) \end{aligned}$$

図 2 (a), (b) は、境界湿度を一定に保持し、 $t = +0$ の瞬間に円柱側面を $\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$ に冷却した場合の湿度分布と温度分布を示す。湿度場と温度場の連成を考慮しない場合は、境界に温度変化 $\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$ を与えても初期の湿度分布 (一様に零) から変動しないが、連成を考慮すると境界を冷却することにより初期状態より乾燥されることがわかる。すなわち、連成効果 (Soret 効果) は顕著に湿度分布に影響する。一方、温度場に及ぼす連成の影響 (Dufour 効果) は極端に小さく、無視しうる程度である。

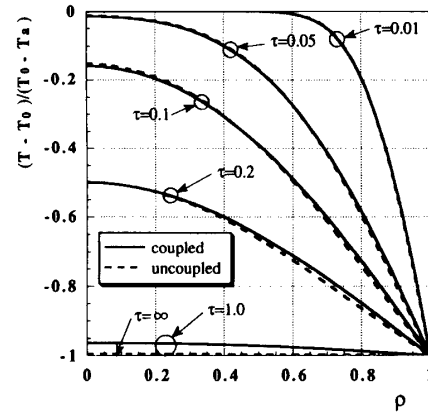
図 3 (a), (b)は, 図 2 の冷却 $\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$ に加えて, それぞれ $\Delta C_a = 0.02\%$, 0.06% の加湿を荷負した場合の湿度分布を示したものである。点線は非連成の場合の, また実線は連成を考慮した場合の湿度分布である。同図(b)より連成を考慮したときは, 0.06% の加湿を与えても湿度分布にとっては $\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$

の冷却による乾燥が支配的であり, 円柱の中心部は $\tau = 1.0$ まで乾燥が進行し, この時刻より徐々に乾燥の度合いが小さくなる。そして定常状態において連成の効果は零となり円柱の全域で荷負した $\Delta C_a = 0.06\%$ だけ加湿されている。

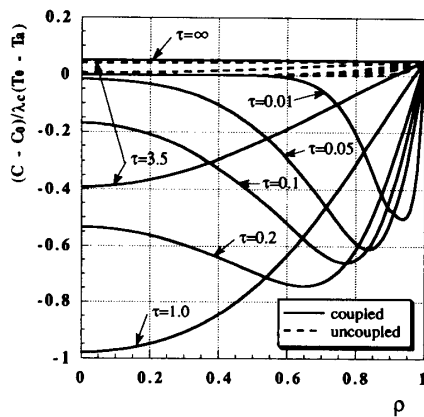
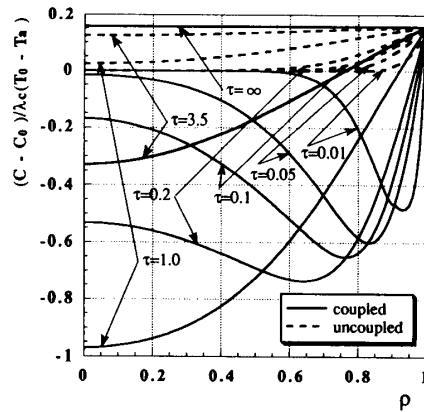
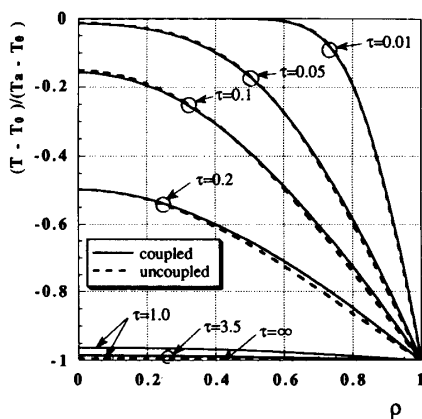
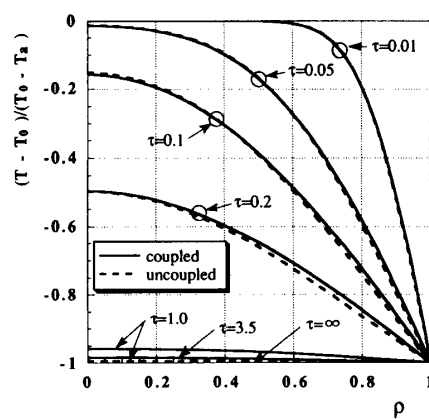
図 4 (a), (b)は, それぞれ図 3 (a), (b)と同様



(a) 湿度分布(Soret 効果)

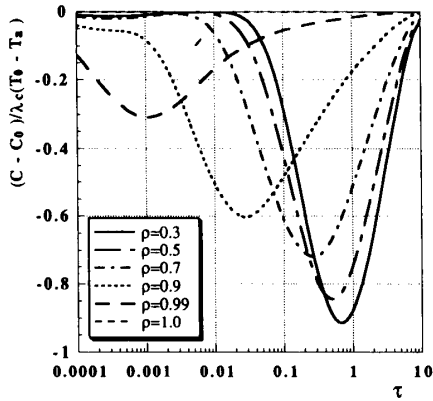


(b) 温度分布

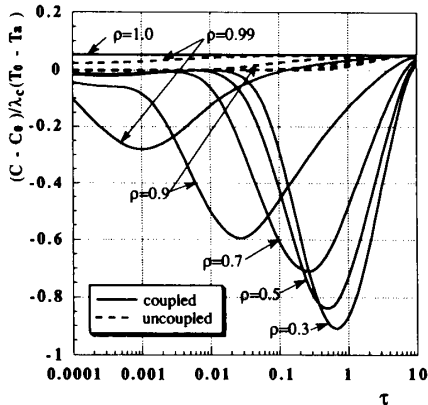
図 2 非定常連成湿熱分布 ($\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$)(a) $\Delta C_a = 0.02\%$ (b) $\Delta C_a = 0.06\%$ 図 3 非定常湿度分布 ($\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$)(a) $\Delta C_a = 0.02\%$ (b) $\Delta C_a = 0.06\%$ 図 4 非定常温度分布 ($\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$)

の湿熱負荷を受けた場合の温度分布を示したものである。側面に近い $\rho=0.6\sim 0.8$ において破線の非連成の温度より実線の連成のそれがわずかながら高くなっているのは、Dufour 効果により加湿による温度上昇があるためと考えられる。

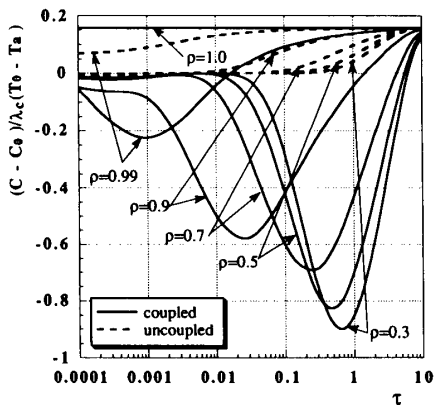
図 5 (a), (b), (c) は、 $\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$ に、それぞれ $\Delta C_a = 0\%$, 0.02% , 0.06% の加湿を負荷した場合の各半径位置の湿度の時間変化を示す。同図 (a) で非連成



(a) $\Delta C_a = 0\%$ (Soret 効果)



(b) $\Delta C_a = 0.02\%$



(c) $\Delta C_a = 0.06\%$

図 5 湿度の時間変化 ($\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$)

の場合は湿度はつねに零である。これらの図より各半径位置の Soret 効果による乾燥がピークに到達する時間は円柱の中心に近いところほど遅く、またピーク値は円柱の中心に近いところほど大きいことがわかる。き裂先端近傍の湿度分布が応力拡大係数に及ぼす影響を考慮するため、 $\rho=0.99$ の湿度の時間変化も図中に示した。図 5 の (a) と (c) の $\rho=0.99$ の分布を比較すると、加湿の効果が (c) のほうがはるかに乾燥度が低くなっていることがわかる。

次に、図 6 は無次元き裂深さ a_1 が 0.01 で、側面に冷却 $\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$ と $\Delta C_a = 0, 0.02, 0.04, 0.06\%$ の加湿を受ける場合のき裂先端の無次元応力拡大係数 \bar{K} の時間変化を示したものである。

湿熱連成を考慮した場合の応力拡大係数の値は、非連成の場合のその値より非常に大きく、Soret 効果が応力拡大係数に及ぼす影響は重要である。この原因としては、 $\rho=1-a_1=0.99$ における湿度分布の相違が考えられる。連成を考慮した場合、温度はほとんど変化しない (Dufour 効果は小さい) が、図 5 (a) のように湿度は $\rho=0.99$ において大きく乾燥側に進むため、大きな応力拡大係数を生じたものと考えられる。そして、図 5 (b), (c) のように、加湿の効果で $\rho=0.99$ の乾燥が抑えられると、応力拡大係数は極端に小さくなる。また、連成を考慮した場合の \bar{K} のピーク値は $\tau=0.0006\sim 0.0007$ のとき生じるが、非連成で $\Delta C_a \leq 0.02\%$ の場合はこれより遅れてピーク値が生じている。

図 7 (a), (b) は冷却と加湿条件を図 6 と同一にし、き裂深さ a_1 を $a_1=0.005, 0.05$ と変化させた場合の応力拡大係数の時間変化を示す。図 6 と図 7 (a) の比較により、き裂の深さが浅くなると、応力拡大係数は小さくなり、そのピーク値は早い時間に生じる。また、加

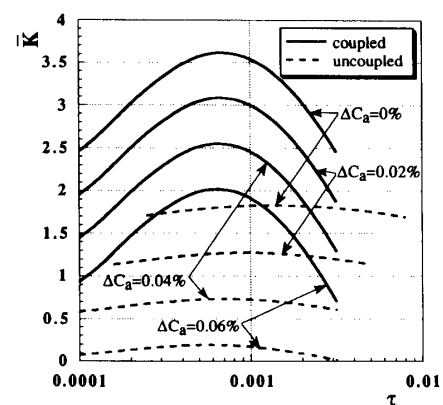


図 6 無次元応力拡大係数の時間変化 ($a_1=0.01, \Delta T_a = -50^\circ\text{C}$)

湿による \bar{K} の緩和の効果も顕著になり、連成考慮による \bar{K} の増大の効果は小さくなることわかる。

逆に、図 7 (b) のようにき裂の深さが深くなると、 \bar{K} のピーク値が生じる時間が遅くなり、加湿による \bar{K} の緩和効果は小さく、連成考慮による \bar{K} の増大は極端に大きくなる。

次に、図 8 (a), (b) は側面の温度を初期温度に保持し ($\Delta T_a = 0$)、急激に $\Delta C_a = -0.75\%$ を負荷した場合の湿度分布と温度分布を示す。同図 (a) から連成を考慮した場合、Soret 効果が湿度(水分)拡散を抑制する方向に働き、連成を考慮しない場合と比較して乾燥の度合は小さくなっている。同図 (b) において、非連

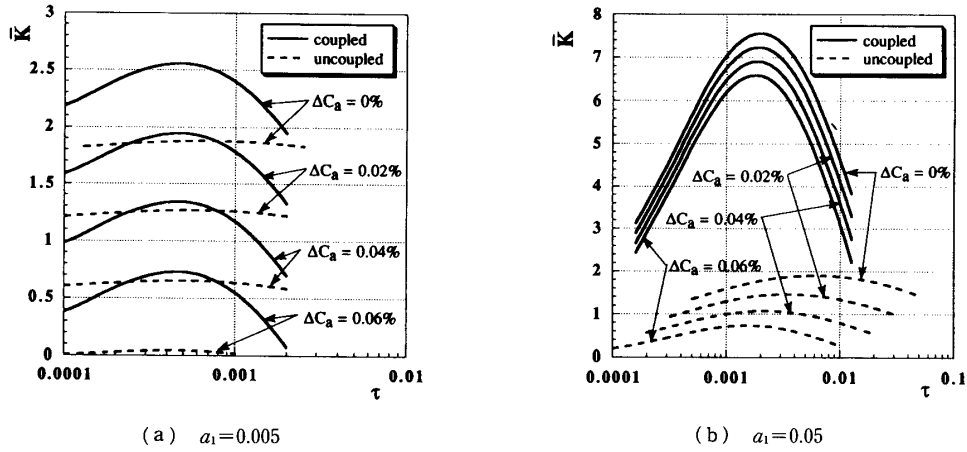


図 7 無次元応力拡大係数の時間変化 ($\Delta T_a = -50^\circ\text{C}$)

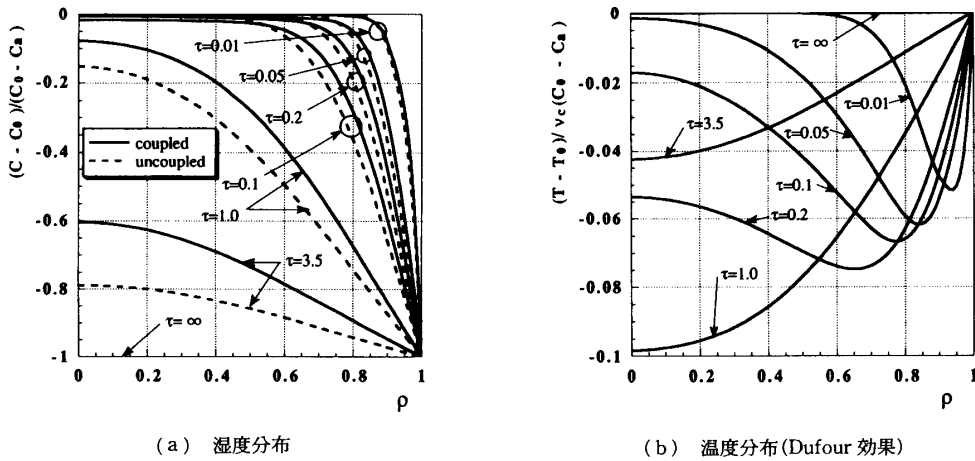


図 8 非定常連成湿熱分布 ($\Delta C_a = -0.75\%$)

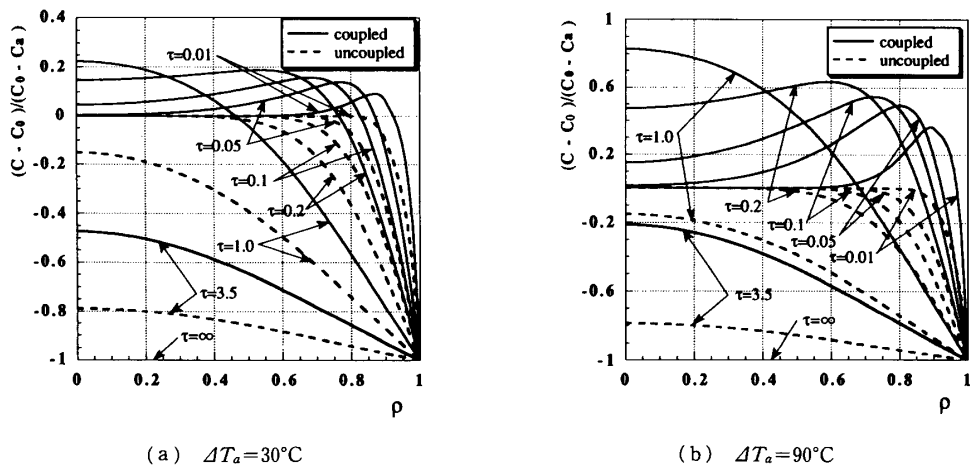


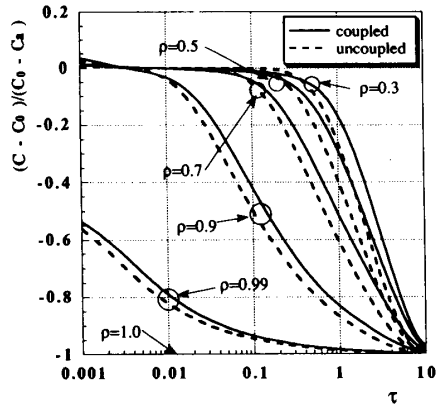
図 9 非定常湿度分布 ($\Delta C_a = -0.75\%$)

成の場合は τ にかかわらずつねに全域で温度変化は零であるが、連成を考慮すると、Dufour 効果でわずかながら初期温度より温度は低下する。

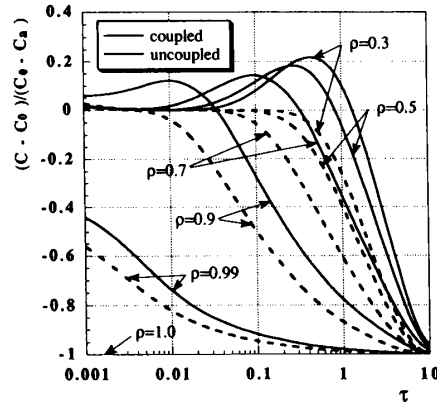
図 9 (a), (b) は $\Delta C_a = -0.75\%$ に、それぞれ $\Delta T_a = 30^\circ\text{C}$, 90°C の加熱を負荷した場合の湿度分布を示す。同図(a)より、連成を考慮した場合、加熱すると $\tau = 1.0$ までは、ほぼ $\rho < 0.5$ のところで Soret 効果によって加湿状態になるが、この時刻以後は Soret 効果が

小さくなり、 $\Delta C_a = -0.75\%$ の影響で乾燥状態になる。同図(b)の $\Delta T_a = 90^\circ\text{C}$ の場合は、より加熱による Soret 効果(加湿)が顕著になり、点線の $\tau = 1.0$ と実線の $\tau = 3.5$ より明らかなように連成の影響で $\Delta C_a = -0.75\%$ による乾燥の進行が大きく抑制されている。

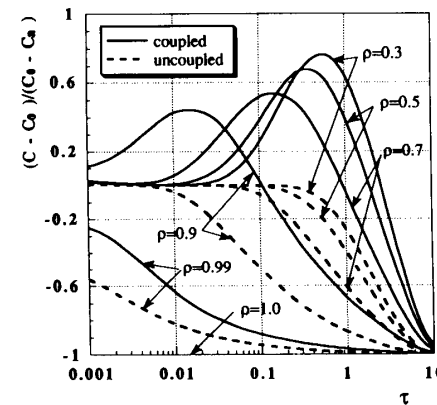
図 10(a), (b), (c) は、図 8 (a), 図 9 (a), (b) の湿熱負荷のもとでの湿度の時間変化を、各半径位置 ρ をパラメータにして示したものである。同図(a)に比べて(b), (c)では、連成考慮の場合、 $\Delta C_a =$



(a) $\Delta T_a = 0^\circ\text{C}$



(b) $\Delta T_a = 30^\circ\text{C}$



(c) $\Delta T_a = 90^\circ\text{C}$

図 10 湿度の時間変化 ($\Delta C_a = -0.75\%$)

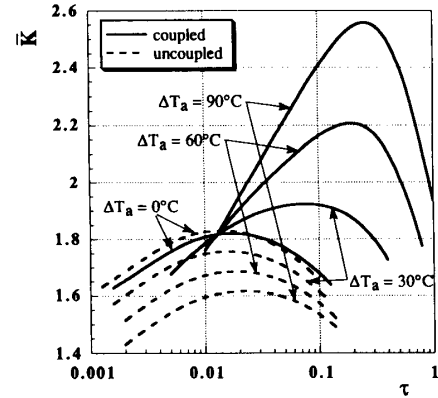
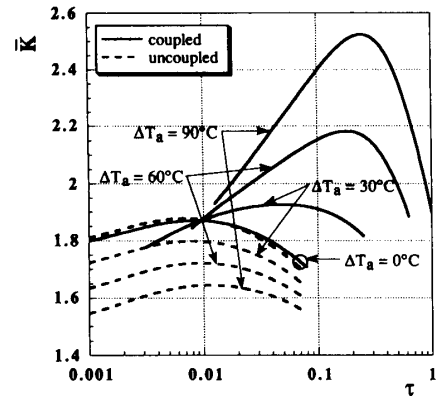
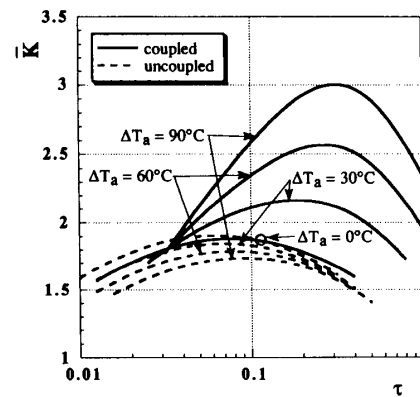


図 11 無次元応力拡大係数の時間変化 ($a_1 = 0.01$, $\Delta C_a = -0.75\%$)



(a) $a_1 = 0.005$



(b) $a_1 = 0.05$

図 12 無次元応力拡大係数の時間変化 ($\Delta C_a = -0.75\%$)

-0.75%に加えて負荷された加熱 $\Delta T_a = 30^\circ\text{C}$, 90°C による Soret 効果の影響で加湿されるため, $\rho \leq 0.9$ において初期状態 ($\Delta C = 0$) より高い湿度状態になっている時間域がある。円柱側面近傍のき裂先端 $\rho = 0.99$ では, 同図(c)の $\Delta T_a = 90^\circ\text{C}$ の場合, 連成考慮による加湿により大きく乾燥が緩和されているが, つねに乾燥状態にある。

図 11 は, $\Delta C_a = -0.75\%$ に加え $\Delta T_a = 0^\circ\text{C}$, 30°C , 60°C , 90°C の加熱を負荷した場合のき裂先端の応力拡大係数 \bar{K} の時間変化を示す。 $\Delta T_a = 0^\circ\text{C}$ では, 連成を考慮しても図 10(a) のように, 湿度分布の変化は小さいので, \bar{K} に及ぼす湿熱連成の影響も非常に小さい。しかし, $\Delta T_a = 30^\circ\text{C}$, 60°C , 90°C と加熱すると, 非連成の場合は \bar{K} が小さくなるのに対して, 連成の場合は \bar{K} が極端に大きくなり, 結果として連成, 非連成の差は極端に増大している。これは連成考慮の場合, 加熱温度が高いほど (ΔT_a が大きいほど), Soret 効果による加湿量は大きくなるので, 最終的な乾燥状態 $\Delta C_a = -0.75\%$ に向けてそれだけ余分に乾燥されることになり, 大きな \bar{K} が生じるものと考えられる。

また, \bar{K} の値がピーク値に到達する時間は, 連成を考慮し ΔT_a を大きくした場合のほうがはるかに遅くなる傾向になる。これは図 10(c) より, 連成を考慮し, ΔT_a を大きくするほど, 最終的な乾燥状態に到達する時間が遅くなるためである。

最後に, 図 12(a), (b) は, 無次元き裂深さを図 11 の $a_1 = 0.01$ から, それぞれ 0.005, 0.05 と変化させた場合の無次元応力拡大係数の時間変化を示す。連成と非連成の \bar{K} のピーク値の生じる時刻 τ , 加熱温度 ΔT_a の \bar{K} への影響は図 11 と同一の傾向にある。き裂深さが図 11 の $a_1 = 0.01$ より深くなると, 図 12(b) のように \bar{K} のピーク値が大きくなり, それが生じる時刻は遅くなる。逆に浅くなると図 12(a) のように早くなることがわかる。き裂深さの変化による連成考慮の \bar{K} の変化は冷却と加湿の図 6, 7 の場合よりはるかに小さい。

4. 結 言

吸湿性を有する円柱に, 軸方向に一樣な半径方向表面縁き裂が存在し, この円柱が非定常湿熱負荷を受け

た場合の, 湿度場と温度場の連成された非定常湿熱応力を解析する手法を示した。解析結果を用い, T 300/5208 複合材料からなるき裂を有する円柱が, (1) 冷却と加湿, (2) 乾燥と加熱を受ける場合を計算し, き裂先端の無次元応力拡大係数 \bar{K} について次の結論を得た。

(1) 冷却と加湿の場合, 湿熱連成を考慮した場合の \bar{K} は, 非連成の場合のそれより極端に大きく, 応力拡大係数の解析には非定常時の湿度場と温度場の連成効果(特に Soret 効果)は無視できない。冷却状態にある円柱を加湿することにより, 連成, 非連成の場合, ともに \bar{K} は大きく緩和される。また, き裂の深さを深くすると連成の \bar{K} のピーク値は極端に大きくなり, その時間変化も大きくなる。

(2) 乾燥と加熱の場合, 乾燥のみの場合の連成と非連成の \bar{K} の差は非常に小さいが, これをさらに加熱することにより, 加熱温度の増加とともに連成の \bar{K} は極端に大きくなり, 非連成の \bar{K} は少しずつ緩和される。また, き裂の深さを深くしても, 連成, 非連成とも \bar{K} の大きな変化はない。

本論文をまとめるにあたり, 岩手大学工学部・今川龍生氏の協力を得たことを記し, ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 佐藤・鈴木・ほか 3 名, 耐熱・絶縁材料, (1992), 68, 共立出版。
- (2) 日本機械学会編, 熱応力と設計に関する研究分科会 (P-SC 56) 成果報告書, No. 337 (1985-4), 181。
- (3) Nied, H. F. and Erdogan, F., *J. Thermal Stresses*, 6-1 (1983), 1。
- (4) Tweed, J. and Rooke, D. P., *Int. J. Eng. Sci.*, 11 (1973), 65。
- (5) 松永・入交・野田, 機論, 55-511, A (1989), 504。
- (6) 菅野・中馬, 機論, 59-564, A (1993), 1956。
- (7) Hartranft, R. J. and Sih, G. C., *J. Polymer Mech.*, 1 (1980), 53。
- (8) 菅野・中馬, 第 71 期全国大会講演論文集, No. 930-63, B (1993-10), 604。
- (9) Reid, C. E. (石井・ほか 8 名訳), 化学熱力学, マグロウヒル (1991), 152; Forland, K. S., Forland, T. and Ratkje, S. K. (伊藤監訳), 非平衡熱力学, (1992), 14, オーム社。
- (10) Shirrell, C. D., *Adv. Compos. Mater. Environmental Effects, ASTM STP*, 658 (1978), 21。
- (11) Loos, A. C. and Springer, G. S., *J. Compos. Mater.*, 13 (1979), 131。