層内に剛体充てん物を有する突合せ接着継手の 二次元熱応力解析*

中 川 文 人^{*1}, 仲 野 雄 一^{*2}, 沢 俊 行^{*3}

Two-Dimensional Thermal Stress Analysis of Butt Adhesive Joint Having Rigid Fillers in the Adhesive

Fumito NAKAGAWA, Yuichi NAKANO and Toshiyuki SAWA

Thermal stress distribution and thermal strength were examined when butt adhesive joints with rigid fillers in an adhesive were in steady-state temperature distribution. In the analyses, the thermal stress distribution in the adhesive was given using the two-dimensional theory of elasticity in the case where adherends composed of the same size and the rigid material were kept at a constant temperature and the side surfaces of the joint were surrounded with fluid of a different temperature. Numerical calculations showed that the thermal stress was tensile near the end of the interface between the adherend and the adhesive and around the interface where the filler was included underneath, the thermal stress concentrated at the periphery of the filler, and large concentration of thermal stress was generated when the filler size was large. Photoelastic experiments were carried out, and the analytical results were consistent with the experimental ones.

Key Words: Elasticity, Thermal Stress, Thermoelastic Potential, Butt Adhesive Joint, Rigid Filler, Stress Singularity

1. 結 言

構造用接着剤を用いた接着継手は最近の接着剤自体の特性の著しい改良やゴム, アルミナ, 金属などの微粉末を充てん剤として加えることにより, 衝撃, 割裂または高温における強度の向上がはかられ, ボルト・ナットやリベットによる従来の機械的結合法に一部置きかわりつつある。しかし, 接着継手は一般に接着層厚さがきわめて薄く, 被接着材料(被着体)と接着剤の材料定数がかなり異なることなどから接着部からの破壊が発生しやすく, 特に接着界面の強度評価が重要な課題とされている。このため従来より, 主に接着継手強度に関する実験のおよび解析的研究が多数なされてきている^{(1)~(8)}。

一方, 接着継手構造を熱的立場から検討すると, 被着体と接着剤の線膨張係数の比, 熱伝導率の比などの熱物性値の比も通常かなり大きく, 接着剤の凝固収縮時の残留応力や継手周囲の温度変動による熱応力が生じやすいという欠点を持っている。このため接着継手

の熱的強度を明らかにすることも実用上の観点から極めて重要な課題であり, 接着継手の熱応力, 内部応力, 熱疲労強度等に関する研究がなされるようになってきた^{(9)~(13)}。しかし, 接着剤の改質を目的とする充てん物を接着層内に含む接着継手については力学的強度特性が一部明らかにされているが⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾, 熱的強度に関する報告はほとんど見あたらないようである。

そこで, 本研究では接着剤中に円形剛体充てん物を含む接着剤によって突合せ接着された継手が一定の温度場におかれた場合の接着層の熱応力を二次元弾性論(平面応力)を用いて解析する。さらに, 解析結果に基づいて数値計算を行い, 被着体と接着剤の線膨張係数比, 充てん物の大きさや位置などが接着界面, 充てん物周縁の熱応力分布に及ぼす影響を明らかにする。あわせて, 充てん物を含む接着層をエポキシ板でモデル化した突合せ継手を用いて接着層内部の熱応力分布を光弾性実験により求め, 解析結果と比較検討する。

2. 理 論 解 析

図1に多数の充てん物を有する接着層によって, 寸法・形状および材質の等しい二つの被着体が突合せ接着され, 被着体は一定温度 T_1 , 継手側面は一定温度 T_0 の流体中に保持されている場合を示す。なお, 継手側

* 原稿受付 平成4年3月30日。

^{*1} 正員, 東京都立航空工業高等専門学校 (〒116 東京都荒川区南千住 8-53-1)。

^{*2} 正員, 湘南工科大学 (〒251 藤沢市辻堂西海岸 1-1-25)。

^{*3} 正員, 山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田 4-3-11)。

面と流体間の熱伝達率を α とする。接着層を高さ $2h$ 、幅 $2l$ の有限長帯板に置き換え、その縦弾性係数を E 、ポアソン比を ν 、線膨張係数を β および熱伝導率を K とする。なお、本研究ではこれらの定数の温度依存性を考慮せず一定とし、また、紙面に垂直な方向 (Z 軸方向) の温度分布がない二次元問題とし、さらに被着体と充てん物を剛体とみなし接着層について解析を行う。

2.1 温度分布 熱応力を解析するに当たり、最初に接着層内の定常温度分布を計算する。

図1に示すように接着層中心を原点とする x - y 座標を用いると、定常状態における二次元熱伝導問題の基礎式は、温度分布を $T(x, y)$ とすると次のように表される。

$$\nabla^2 T(x, y) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、境界条件は接着界面における温度、継手側面の流出入エネルギー一定の関係から次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} T(x, y) &= T_0 & (y = \pm h) \\ -K \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} &= \pm \alpha \{T(x, y) - T_0\} & (x = \pm l) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

基礎式(1)の変数分離解を用い、式(2)の境界条件を考慮して接着層の温度分布 $T(x, y)$ を次のようにおく。

$$\begin{aligned} T(x, y) &= \sum_{s=1}^{\infty} \frac{A_s}{\cosh(\lambda'_s h)} \cosh(\lambda'_s y) \cos(\lambda'_s x) \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{\cosh(a'_n l)} \cosh(a'_n x) \cos(a'_n y) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、

図1 定常温度場での充てん物を有する突合せ接着継手モデル

$$\alpha'_n = \frac{2n-1}{2h} \pi, \lambda'_s = \frac{2s-1}{2l} \pi \quad (n, s = 1, 2, 3, \dots)$$

である。また、式(3)に含まれる未定係数 A_s, B_n ($n, s = 1, 2, 3, \dots$) は、式(2)の境界条件から決定される。

ただし、以上の温度分布の解析においては、解析の簡単化のため充てん物の存在を考慮せずに行っている。

2.2 熱応力 図1に示した接着継手に対して外部から荷重が作用しない場合、また、ここでは被着体と充てん物が剛体と仮定していることから、応力および変位に関する境界条件は接着層境界においては式(4・a)、充てん物境界においては式(4・b)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x = \tau_{xy} &= 0 & (x = \pm l) \\ U_x = \partial V_y / \partial x &= 0 & (y = \pm h) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4 \cdot a)$$

$$U_r = V_\theta = 0 \quad (r = a) \quad \dots\dots\dots (4 \cdot b)$$

なお、ここで U_x, V_y, U_r および V_θ は各々 x, y, r および θ 方向の熱変位、 a は充てん物の半径を表す。

接着層の熱応力を解析するために熱弾性ポテンシャル $\Omega(x, y)$ を用いると、 $\Omega(x, y)$ は式(5)のように表され、さらに $\Omega(x, y)$ による熱応力 ($\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \tau_{xy0}$) と熱変位 (U_{x0}, V_{y0}) は、添字 0 を用いて各々式(6)のように表される⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

$$\begin{aligned} \Omega(x, y) &= \sum_{s=1}^{\infty} \frac{A_s y}{2\lambda'_s \cosh(\lambda'_s h)} \sinh(\lambda'_s y) \\ &\times \cos(\lambda'_s x) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n x}{2a'_n \cosh(a'_n l)} \\ &\times \sinh(a'_n x) \cos(a'_n y) \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

(a)

(b)

図2 解析方法の説明

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x0} &= -E\beta \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2}, \quad \sigma_{y0} = -E\beta \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2}, \\ \tau_{xy0} &= E\beta \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x \partial y}, \\ 2GU_{x0} &= E\beta \frac{\partial \Omega}{\partial x}, \quad 2GV_{y0} = E\beta \frac{\partial \Omega}{\partial y} \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

ここで、 G は接着剤の横弾性係数である。

しかし、一般にこれらの解だけでは式(4)で示した接着層の応力および変位の境界条件を満足しない。そこで、これらの境界条件を満足する解を得るために文献(18)の方法で解析を行う。すなわち、

手順1: $\Omega(x, y)$ により境界 ($x = \pm l, y = \pm h$) に生ずる応力 σ_{x0}, τ_{xy0} と変位 U_{x0} および $\partial V_{y0}/\partial x$ を打ち消し境界条件式(4・a)を満足するために、これらの応力、変位と符号が反対の応力、変位を境界条件とする充てん物のない有限長帯板 (幅 $2l$, 高さ $2h$) の解析を行う [図2(a)]。このとき、文献(18)に示した直角座標表示のエアリの応力関数 χ を用いる。同時に、応力関数 χ による充てん物周縁 ($r = a$) に相当する位置の変位 U_r, V_θ を計算する。

手順2: 手順1で生じた充てん物周縁の変位 U_r, V_θ を打ち消し境界条件式(4・b)を満足するために、これらの変位と符号が反対の変位を境界条件とする充てん物を有する無限板の解析を行う [図2(b)]。このとき、同じく文献(18)に示した極座標表示のエアリの応力関数 ψ_1 を用いる。さらに、この応力関数 ψ_1 による接着層各境界 ($x = \pm l, y = \pm h$) に相当する位置の各応力 σ_x, τ_{xy} と変位 $U_x, \partial V_y/\partial x$ を再び計算する。なお、接着層内に充てん物が2個以上ある場合は手順2において、応力関数 ψ_1 で第1の充てん物周縁の変位を最初に打ち消し、次に第2の充てん物に対する応力関数 ψ_2 を用いて、第2の充てん物周縁の初めの変位と ψ_1 によって新たに生ずる変位とを加え合わせた変位を打ち消す。以下、同様の手順ですべての充てん物の応力を打ち消し同時にこれらの応力関数 $\psi_1, \psi_2, \dots$ による接着層境界の応力 σ_x, τ_{xy} と変位 $U_x, \partial V_y/\partial x$ を計算する。

以下、境界条件式(4)を十分に満足するまで手順1および2の繰返し計算を行うことにより、最終的に接着層内部の応力と変位分布が求められる。

本研究においては、図3に示すようにいずれも直径 $2a$ の充てん物が、(a)接着層の中心に1個ある場合、(b) X 軸上に3個、 Y 軸に対称の位置にある場合 (接着層中心からの距離 x_0) および(c) Y 軸上に2個、 X 軸に対称の位置にある場合 (接着層中心からの距離 y_0) の三つの接着継手モデルについて解析を行う。

3. 実験方法

図4は光弾性実験に用いた接着継手の寸法・形状を示す。上下被着体に設けた直径8mmの貫通孔に棒状ヒータ (100 V, 300 W) を挿入し加熱、継手の両側面は空气中に放熱 (室温約 25°C) して継手に温度分布を与える。なお、被着体の温度分布は周囲に埋め込んだ熱電対により測定した。接着層は図3(a), (b)に対応し中央に1個および X 軸方向に3個の直径5mm、長

(a) 1 充てん物が接着層中心にある場合

(b) 3 充てん物が X 軸上にかつ対称の位置にある場合

(c) 2 充てん物が Y 軸上にかつ対称の位置にある場合

図3 解析モデル

さ 6 mm の丸棒（充てん物）をエポキシ系接着剤で埋め込んだ高さ 20 mm, 幅 80 mm, 厚さ 6 mm の 2 種類のエポキシ板でモデル化し, これを被着体に突合せ接着した（図 4 は 1 個の充てん物が接着層の中心にある場合を示す）。被着体と充てん物は炭素鋼（S45C）を使用し, 鋼の縦弾性係数（206 GPa）はエポキシ板（3.3 GPa）の約 60 倍であり, 相対的にほぼ剛体とみなした⁽¹⁹⁾。また, エポキシ板の線膨張係数 β , 熱伝導率 K およびポアソン比 ν については実測結果から各々 $67 \times 10^{-6}/K$, 0.28 kcal/mhK および 0.38 とした⁽¹²⁾。なお, エポキシ板の周囲および充てん物を埋め込むための円孔は, 加工時の残留応力の発生をできるだけ少なくするためウォータージェット加工を行った。また, 接着後の凝固収縮時に発生する内部応力を含めこれらの影響を試験片作成後, 常温に保持した状態で等色線縞を観察した結果, 上に述べたヒータを用いて温度分布を与えた場合に発生する縞と比較して継手試験片作成時の残留応力は無視できる程度であることを確認している。

4. 結果と考察

接着層に充てん物を有する接着継手の熱応力に対する強度と破壊位置を予測するため, 充てん物周縁および接着界面の最大主応力分布を数値計算により求めた。なお, 継手は被着体が $T_f = 50^\circ\text{C} (= 323 \text{ K})$ 一定に, 継手側面は $T_o = 0^\circ\text{C} (= 273 \text{ K})$ の空气中に置かれているものとし, 継手側面と空気間の熱伝達率 α は, 文献 (20) を参考にして $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ として計算を行った。以下の数値計算においては, 2 章の理論解析においてエアリの応力関数 χ , ψ_1 および ψ_2 を決定する際に得ら

れる無限連立一次方程式の級数の項数を 80 とし, また, 手順 1 および 2 の繰返し回数は以下に示す計算条件では 5 回で前回の各応力値との差が 1% 以下になり, 実用上十分収束したものとみなした。しかし, アスペクト比, 互いの充てん物の接近量や偏心量によっては実用上十分な精度を得るために最大 8 回程度の繰返し数を必要とする場合がある。

4.1 接着層中央に 1 個の充てん物がある場合

図 5 に 1 個の充てん物が接着層中央に含まれる場合について, 充てん物の大きさを変えて数値計算を行い, 熱応力に与える影響を検討した結果を示す。(a) は接着界面 ($y = \pm h$) の熱応力分布を最大主応力で表したもので, 縦軸は最大主応力 σ_1 を ($E\beta\Delta T$) で除し, また, 界面の位置を示す横軸も被着体の半幅 l で除し各々無次元化表示している (ΔT は被着体と継手側面の流体の温度差)。なお, この場合応力および変位は左右対称となるので同図には片側の接着界面の最大主応力を示す。(b) は充てん物周縁 ($r = a$) の無次元化した最大主応力で同じく対称性から半分の周縁について

(a) 接着界面の最大主応力分布 ($y = \pm h$)

(b) 充てん物周縁の最大主応力分布 ($r = a$)

図 4 試験片の寸法・形状

図 5 1 充てん物が接着層中心にある場合の最大主応力分布

($T_f = 50^\circ\text{C} (= 323 \text{ K})$, $T_o = 0^\circ\text{C} (= 273 \text{ K})$, $\alpha = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h/l = 0.1$, $E = 3.3 \text{ GPa}$, $\nu = 0.38$, $\beta = 67 \times 10^{-6}/K$)

示している。

この結果、剛体とみなした被着体の温度が継手側面の流体の温度よりも高い場合、接着界面では端部に近づくにつれ、無次元化した最大主応力(引張応力)の急激な増加がみられる。なお、この端部付近では接着層のアスペクト比(接着層厚さと被着体幅の比 h/l)が小さいため接着層中央の充てん物の影響が小さく、無次元化した最大主応力はいずれの充てん物直径の場合も端部近傍($x=\pm l$ の98%)で $\sigma_1/(E\beta\Delta T)=1.8$ となる。また、充てん物真上付近の界面も引張応力となり、ここでは充てん物直径が大きくなるにつれ、最大主応力値も大きくなることわかる。一方、充てん物周縁では $\theta=\pm 90^\circ$ の点(Y 軸上)の応力が引張りの最大主応力となる、また、充てん物直径が大きくなるほど無次元化した最大主応力値も0.8から1.0と大きくなることわかる。

(a) 接着界面の最大主応力分布 ($y=\pm h$)

(b) 充てん物周縁の最大主応力値 ($r=a$)

図6 アスペクト比が最大主応力分布に及ぼす影響
(1 充てん物が接着層中心にある場合)

図6はアスペクト比 h/l が接着界面の主応力分布および充てん物周縁の最大主応力に与える影響を示す。(a)は充てん物直径と接着層厚さの比 a/h を0.25一定とした場合の界面の主応力分布で、アスペクト比が大きい場合は界面全体にわたって引張りの主応力が大きくなるが、界面端部付近ではアスペクト比が小さくなるほど、引張応力の増加率が大きくなることわかる。(b)は横軸に充てん物の大きさを無次元化表示した a/l をとり、縦軸に充てん物周囲の同じく無次元化した最大主応力を示す。いずれのアスペクト比においても、充てん物が大きくなるにつれ $\theta=\pm 90^\circ$ の点における最大主応力値の最大値が急激に増加することから、この部分の熱的強度が低下することがわかる。

以上の結果から、ここに示した計算例では接着界面端部付近の応力が最も大きく、ここから熱応力による継手の破壊開始が予想される。ただし、界面端部での応力の特異性を考慮すると単純に比較はできないが、充てん物が大きく、特にアスペクト比が大きい場合は充てん物周縁における応力集中も無視できなくなる。

4.2 X 軸上に対称に3個の充てん物がある場合

図7は接着層内に同じ大きさの3個の充てん物がX軸上で中心($x=0$)と $x=\pm x_0$ の位置にある場合の各充てん物周縁の無次元化した最大主応力値と同じく無次元化した充てん物間距離 x_0/l の関係を示す。実線は接着層中心の充てん物の最大主応力で、この場合は距離 x_0/l が0.05と小さく充てん物同士が近接している状態では最大主応力は小さく、 x_0/l が大きくなるにつれ最大主応力値は増加し最大値を示すようになるが、さらに x_0/l が大きく0.2以上になると充てん物相互の影響が少なくなり、ほぼ一定の最大主応力値になる

図7 X 軸上に3充てん物がある場合の充てん物位置と充てん物周縁の最大主応力
($h/l=0.1$, $a/h=0.2$)

ことがわかる。また、図中、破線で示す接着層中心から離れた充てん物の最大主応力は、 x_0/l が 0.5 までは接着層中心の充てん物周縁の最大主応力値（実線）とほぼ同程度であるが、さらに x_0/l が増加し接着端側に近づくにつれ、最大主応力は急激に増加することがわかる。なお、接着層中心にある充てん物の場合は接着厚さ方向 ($\theta = \pm 90^\circ$)、中心から離れた充てん物では距離 x_0/l によって異なり、接着厚さ方向からわずかにずれた位置 ($\theta = \pm 75^\circ \sim 90^\circ$) で各々最大主応力の値が最大になる。

4.3 Y 軸上に対称に 2 個の充てん物がある場合

図 8 は 2 個の充てん物が Y 軸上で接着層中心から等距離 ($y = \pm y_0$) の位置にある場合の充てん物周縁の無次元化した最大主応力値と同じく無次元化した充てん物位置 y_0/h の関係を示す。この結果から y_0/h が大きく、接着界面に近づくにつれ最大主応力の最大値が増加することがわかる。なお、この場合の最大主応力は接着厚さ方向でかつ接着界面に近い側の充てん物周縁で最大になる。

4.4 充てん物の剛体変位と剛体回転 図 1 に示した接着層内に充てん物がある接着継手では、剛体充てん物が接着層中心 ($x=y=0$) にある場合を除き、剛体変位および剛体回転のいずれかまたは両方が生じ、その量は充てん物の位置により異なる。そこで、これらの変位が大きいと考えられる、剛体充てん物が接着層中心から大きく偏心した位置 ($x_0=0.9l, y_0=0.7h$) での剛体変位と剛体回転 ($\omega_z = \{\partial U_x/\partial y - \partial V_y/\partial x\}/2$) を計算により求めた結果、図 5 に示した今回の計算条件では各々 0.00034h, 0.0012 程度となるが今回はこれらの影響を考慮せず行った。また、図 3 の解析モデル

図 8 Y 軸上に 2 充てん物がある場合の充てん物位置と充てん物周縁の最大主応力 ($h/l=0.1, a/h=0.2$)

(a) 中心に 1 個の充てん物の場合

(b) X 軸上に 3 個の充てん物の場合

図 9 等色線縞の測定例

(a) 中心に 1 個の充てん物の場合

(b) X 軸上に 3 個の充てん物の場合

図 10 主応力差の解析結果

図 11 差分法によるエポキシ板内部および表面の温度分布

ルでは対称性から回転成分は0, 剛体変位も図3(1)では0, (2)の場合も充てん物が接着層端部に接近した場合を除き, 上記の剛体変位の値よりさらに小さい値となる。

4・5 実験結果 図9に光弾性実験結果を示す。(a)は中心に1個, (b)は3個の充てん物を含む接着層をモデル化したエポキシ板に生じた等色線縞で, いずれの場合も充てん物の周囲と上下の接着界面端部に応力集中が生じていることがわかる。なお, この場合の被着体の温度と継手側面の空気の温度差は平均50 Kである。

図10は図9(a), (b)に示した光弾性実験の各場合についてエポキシ板内部の主応力差を, 測定した温度を境界条件として数値計算より求めた結果を示す。この結果, 両図の比較によりいずれの場合も光弾性実験結果は数値計算結果とかなりよく一致することがわかる。

なお, 2章で述べたように, 接着層の温度分布の解析においては充てん物の存在を考慮せず, また, z 方向接着層表面からの熱放散がない二次元問題としている。そこでこれらの影響を考慮し, 光弾性実験における充てん物を含むエポキシ板の温度分布を差分法を用いて求め⁽²¹⁾, これと2・1節の式(3)による温度分布の計算結果との比較を図11に示す。同図は図9(b)に示す, X 軸上に3個の充てん物($x_0=0, \pm 20$ mm)を有するエポキシ板が被着体温度75°C, 周囲の空気の温度を25°C, エポキシ板と空気間の熱伝達率を10 W/m²kとした場合の X 軸方向温度分布を表す(対称性を考慮し, エポキシ板の半幅)。図中, 実線は差分法によるエポキシ板内部($z=0$), 破線は同じくエポキシ板表面($z=3$ mm)の温度分布, また, 一点鎖線は式(3)による温度分布を表す。この場合, 充てん物は炭素鋼としているためその熱伝導率(40 kcal/mhk)はエポキシ板の熱伝導率(0.28 kcal/mhk)と比較して著しく大きく, このため充てん物周囲のエポキシ板の温度は充てん物の存在を考慮しない場合の温度より約5°C低下し, 本実験の温度条件からこの差は, 局所的に最大約7%の熱応力の変化に相当すると推定される。一方, エポキシ板の内部と表面の温度を比較すると表面の熱放散により表面の温度が内部のそれより約2°C低下する。この結果, 充てん物と接着層の熱伝導率の比が大きくなると, 厳密には充てん物を考慮した接着層内の温度分布の解析が必要となる。一方, 接着層表面と空気との間の熱伝達率が今回のように小さい場合は表面と内部の温度差は小さく二次元問題としてほぼ近似で

きるものと思われる。

5. 結 言

本研究では, 層内に剛体充てん物を有する突合せ接着継手が一定の温度環境にある場合, 生じる熱応力分布を解析し, あわせて光弾性実験を行い解析結果と比較検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 接着層内に剛体充てん物を有する継手が, 一定の温度環境にある場合の熱応力分布を二次元弾性論に基づいて解析する方法を示した。

(2) (1)の解析に基づいて数値計算を行った結果, 被着体が高温, 継手側面が低温の場合, 界面上ではその端部付近と充てん物の上部付近, 充てん物周縁では接着厚さ方向の熱応力は引張応力になり, 接着界面の端部では応力の特異性を示すことがわかった。

(3) 充てん物の大きさが大きいほど充てん物周縁の応力集中は増大する。

(4) 3個の充てん物が X 軸上で等間隔にある場合, 間隔が小さく密の状態では充てん物周縁に生ずる最大主応力は小さく, 間隔が大きくなると接着端側の充てん物の最大主応力は増大する。また, 2個の充てん物が Y 軸上で等間隔にある場合, 間隔が大きくなるほど接着界面に近い充てん物周縁で最大主応力が増大する。

(5) (1)の解析結果を確かめるために光弾性実験を行い, 両者はかなりよく一致することが確かめられた。

文 献

- (1) Erdogan, F., Ratwani, M., *J. Composite Material*, 5 (1971), 378.
- (2) 池上, 機論, 50-457, A(1984), 1557.
- (3) 鈴木, 機論, 53-487, A(1987), 514.
- (4) 服部・ほか3名, 機論, 54-499, A(1988), 597.
- (5) 京極・ほか2名, 機論, 54-503, A(1988), 1397.
- (6) 沢・ほか3名, 機論, 55-509, A(1989), 73.
- (7) 今中・ほか3名, 材料, 38-434(1989), 1282.
- (8) Adams, R. D., *J. Adhesion*, 30(1989), 219.
- (9) 小野・池上, 機論, 55-510, A(1989), 171.
- (10) 佐藤・ほか2名, 機論, 55-514, A(1989), 1437.
- (11) 尾田・木元, 機論, 54-497, A(1988), 119.
- (12) 仲野・ほか2名, 機論, 57-537, A(1991), 1184.
- (13) 干・ほか2名, 機論, 57-541, A(1991), 2030.
- (14) 大摩・ほか2名, 機論, 57-540, A(1991), 1782.
- (15) Jakusik, R., ほか2名, *J. Adhesion*, 32(1990), 245.
- (16) 中原, 応用弾性学, (1977), 166, 実教出版.
- (17) 竹内, 熱応力, (1981), 67, 日新出版.
- (18) 仲野・ほか2名, 機論, 53-496, A(1987), 2349.
- (19) 沢・ほか2名, 機論, 53-492, A(1987), 1685.
- (20) 甲藤, 伝熱概論, (1974), 23, 養賢堂.
- (21) 伝熱工学資料, (1976), 165, 日本機械学会.