(1998年4月23日受付・1998年6月19日受理)

アラミド紙を用いた電子回路基板のねじれと繊維配向

王子製紙(株)新技術研究所 永田紳一

松下電器産業(株)デバイス・エンジニアリング開発センター 川北嘉洋

山形大学工学部 小山清人

Relationship between Fiber Orientation and Twist of
Circuit Board with Aramid Fibers*Shinichi Nagata*^{*1}, *Yoshihiro Kawakita*^{*2}, and *Kiyohito Koyama*^{*3}

^{*1}Advanced Technology Research Laboratory, Oji Paper Co., Ltd., 4-3-1 Jokoji, Amagasaki-shi, Hyogo, 660-8577 Japan

^{*2}Device Engineering Development Center, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., 1006 Kadoma, Kadoma-shi, Osaka, 571-8501 Japan

^{*3}Faculty of Engineering, Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata, 992-8510 Japan

Abstract : The twist for circuit boards containing aramid fibers was investigated from the viewpoint of the thermal shrinkage caused by their fiber orientation. Fiber orientation was measured by microwave method, which is based on the dielectric anisotropy. It was confirmed that the fiber orientation could be estimated from the dielectric anisotropy of samples. The dielectric anisotropy measured by microwave method for uniaxially oriented glass fibers was in good agreement with the law of mixture, which shows the appearance of dielectric anisotropy caused by the shape of island (fiber) in the islands-sea structure. On the other hand, the ratio of coefficient of thermal expansion against the orientation degree by microwave method was studied by thermomechanical analysis. Calculated results by our proposed model for the twist of circuit boards were in good agreement with values measured on Japanese Industrial Standard. In order to minimize the twist of two-ply circuit board, the orientation degrees should be minimum or orientation angles of two ply should be the same.

(Received 23 April, 1998 ; Accepted 19 June, 1998)

1. 緒 言

エレクトロニクス実装技術の高密度化、高速化に対応してプリント回路板の材料革新が起こっている。高度表面実装に用いる基板には、これまでにない高精度、すなわち低膨張、高純度、耐熱、耐湿、高度寸法安定性などの性能が要求される。アラミド繊維を用いた基板もその

1つであり、低熱膨張(負の値)、低誘電率、レーザー加工性、軽量といった特徴を有しており、かつ耐熱性、強度も十分であるため、最近では携帯電話用基板をはじめ種々の用途に使われ出した。

積層板の基板の形態、つまり織物と紙の特質については種々述べられており、強力、モジュラスの縦/横比や寸法安定性は多分に製法に関わるが、一般に紙の方がコ

ントロールしやすいという特徴がある[1]。しかし、紙を抄造する過程において付与される繊維の配向が熱収縮の異方性と密接に関係しているため、積層した場合にそり・ねじれが発生し、基板に部品を実装する際に不都合が生じる場合がある。

紙の繊維配向を測定する方法としては従来から、超音波法[2]、力学的破断強度、水拡散法[3]などが用いられてきている。超音波法は弾性率の異方性に伴う超音波伝搬速度の方向依存性を見ており、アラミドプリプレグの場合は、樹脂を含浸させるために表面が硬くなり、表面の配向状態に依存してしまい内部まで含めた全体の配向を正確に反映しない場合がある。他の2つについては、時間と労力がかかるという現実的な問題がある。

我々は誘電率の異方性に基づくマイクロ波透過強度の角度依存性から、紙・フィルムなどの配向を測定するマイクロ波法[4,5]を用いて、アラミド紙の繊維配向を測定した。たとえ繊維そのものは等方性であっても、その形態によってマクロ的な誘電率の異方性が発現することを表した式[6]がマイクロ波法にも適用できることを、ガラス繊維を一軸配向させた試料を作成して確認した。また、アラミド紙の線膨張係数比と繊維配向度との間に強い相関関係が認められたので、マイクロ波法による繊維配向測定値を用いてねじれ量を表す式を提案した。これによる計算値とJISに基づく実際の回路基板のねじれ量との関係についても検討したので、これらの結果について報告する。

2. 理 論

2.1 マイクロ波法による配向測定原理

図1にマイクロ波空洞共振器の概略を示す。発振器から出たマイクロ波は空洞共振器内に導かれ、試料を透過した後検波器で電圧信号に変換され、コントローラで増幅、A/D変換された後、コンピュータで処理される。試料は空洞共振器内で1回転し、その間のマイクロ波透過

Fig. 1 Block diagram of microwave method for measuring the fiber orientation.

Fig. 2 (a) Shift of resonance curve based on the dielectric constant.

(b) Shift of resonance curve can be detected as change of transmitted microwave intensity.

(c) Angular dependence of transmitted microwave intensity is shown as orientation pattern by plotting on R- θ coordinates.

強度の回転角度依存性から、図2(c)のような配向パターンが得られる。空洞共振器においては、式(1)に示すように摂動理論が成立する〔7〕。

$$\frac{\omega - \omega_a}{\omega_a} \approx \frac{1}{4W} \int_{vol} \left[\left(P + \frac{J}{j\omega_a} \right) \cdot E_a^* + \mu_0 M \cdot H_a^* \right] dV \quad (1)$$

$$\text{ただし、} W = \frac{1}{2} \int_V \epsilon |E_a|^2 dV \quad (2)$$

ここで、 ω_a ：ブランク時の固有角周波数、 ω ：試料挿入時の固有角周波数、 E_a ：電界振幅、 H_a ：磁界振幅、 W ：空洞内蓄積エネルギー、 ΔV ：試料の容積、 V ：空洞共振器の容積、 P ：固体試料の電気分極、 M ：磁化、 J ：導電電流密度である。

これは厚さが均一であれば、試料の誘電率に対応して共振周波数が低周波数側へシフトすることを意味する。本方式では偏波を用いているため、電界ベクトルが試料面に平行にかつ図中での上下方向にのみ存在するので面方向の誘電率に依存した共振カーブが得られることになる。もし試料に面内誘電率の異方性があれば、1回転中に共振カーブは図2(a)のようにシフトする。マイクロ波の周波数を共振カーブのピークレベルの1/2になる高周波側の点(図のf1)で固定して試料を1回転すれば、共振カーブのシフトは、図2(b)のように透過強度の変化としてとらえることができる。その結果、図2(c)のような透過強度の角度依存性(配向パターン)が得られることになる。もちろん、誘電損失率の異方性が大きい場合は、試料の1回転中に共振カーブの形が変化し、その分だけ配向パターンに誤差となって現れる場合があるが、共振カーブの形が変化せず、かつ共振カーブの右肩(高周波側でかつピークレベルの1/2付近)が直線であれば、配向パターンは誘電率の異方性を忠実に反映させたものに成り得る。ここで、配向パターンの短軸方向が誘電率最大の方向を示すことになり、その楕円の程度(長軸と短軸の比)が配向度を示す。つまり無配向では周波数シフトが無いため、配向パターンは円になり、配向度が増すにつれて楕円がくびれてくる。たとえば図3のように繊維の配向状態に対応した配向パターンが得られ、これから配向度を表すMOR(Microwave Orientation Ratio)が長軸/短軸として計算される。なお、配向パターンは同一の配向度であっても厚みに影響されるため、実用上は厚み補正を行い、所望の厚みに換算したMOR-cを用いている。MOR-cを用いれば、厚みが異なる試料でも配向度を比較することが可能となる。MOR-cは、厚さがゼロではMORは必ず1となるため、この点と測定した点を直線で結び比例配分を行うことにより、近似的に式(3)により求められる。

$$\text{MOR-c} = \{t_c(\text{MOR}-1)/t_s\} + 1 \quad (3)$$

ここで、 t_s は試料の厚さ、 t_c は補正したい厚みを表す。

Fig. 3 The relation between the orientation pattern and the degree of fiber orientation. Orientation degree is expressed in terms of MOR-c, which is calculated as the ratio of major axis to minor axis of orientation pattern.

また、式(1)(2)から複素誘電率を求める式(4)(5)が導かれる〔8〕。

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon' = 1 + \frac{A}{t} \cdot \frac{\omega_a - \omega}{\omega_a} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon'' = \frac{B}{t} \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_a} \right) \end{array} \right. \quad (5)$$

ここで、 ϵ' ：誘電率、 ϵ'' ：誘電損失率、 A ：装置定数、 B ：装置定数、 t ：厚み、 Q ：試料挿入時のQ値(共振の鋭さ)、 Q_a ：ブランク時のQ値(共振の鋭さ)を表す。

試料を一定の角度だけ回転させる毎に共振角周波数 ω を測定すれば、試料面方向の誘電率の異方性が測定できることになり、その最大方向が繊維の長軸方向を示すことになる。

2.2 ねじれの理論式

図4のように、基準方向Xに対する上層(α)、下層(β)の繊維配向角度がそれぞれ θ_1 、 θ_2 とすると、熱収縮の方向と大きさが各層で異なるために、面内カップリング効果により起こるせん断ひずみが接着作用によって消え、面内せん断応力が働く。このため、各層には大きさが等しく方向反対の層間応力 τ_{xy} を生じるので、積層板の側面には一様なトルク

$$M_{xy} = t^2 \tau_{xy} \quad (6)$$

を受けることになり、ねじれが生じる〔9〕。

熱収縮の大きさの比は、後述するように繊維配向度に関係し、層間応力は2層の配向角度の差の正弦として分解されるため、層間応力が配向度に比例すると仮定する

Fig. 4 Twist of two-ply circuit board caused by interlaminar shear stress. T is twist, α and β are orientation degrees, θ_1 and θ_2 are orientation angles and k is constant.

と、JISのC-5012により測定されるねじれ量 X は(7)式として表されることがえられる。

$$X = k \alpha \beta \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (7)$$

ここで、 k は比例定数、 α および β は上層および下層の繊維配向度、 θ_1 および θ_2 は上層および下層の配向角度を表す。

Table 1 Twist for Two Ply Circuit Board

Sample code	Orientation Degree		Orientation Angle (°)		Twist		
	α	β	θ_1	θ_2	Calculated $\alpha\beta\sin(\theta_1 - \theta_2)$	Measured ^{a)} (1/mm) Before Reflow	After Reflow
S1	1.05	1.057	0	0	0.000	0.000292	0.000361
S2	1.077	1.082	8	-9	0.341	0.000167	0.000439
S3	1.05	1.053	17	-15	0.586	0.000622	0.000922
S4	1.149	1.157	13	-15	0.624	0.00045	0.000772
S5	1.079	1.077	32	-28	1.006	0.001086	0.001311
S6	1.021	1.022	38	-46	1.038	0.000417	0.001061

^{a)} These values were described after being divided by sample area (=3600mm²).

3. 実験

3.1 配向度と線膨張係数

帝人テクノーラを用いた王子製紙製アラミド紙(大きさ100×100mm, 厚さ100μm)50枚を、マイクロ波法による王子計測機器製MOA-2001SA(測定周波数: 4.0GHz)を用いて繊維配向を測定し、その中から比較的配向度の差のある試料を6点選んだ。これを繊維の配向方向(長軸方向と呼ぶ)とこれと直角方向(短軸方向と呼ぶ)にそれぞれ4×20mmの大きさに切り出し、セイコー電子工業製TMA/SSI50Cにかけて線膨張係数を測定した。図5に示したTMA温度プロファイルに従い、温度勾配5°C/minで50°Cから100°Cにおける寸法変化率を温度幅50°Cで除し、線膨張係数を求めた。

Fig. 5 Change of temperature for thermomechanical analysis to measure the coefficient of linear thermal expansion for prepreg containing aramid fibers.

3.2 ねじれと繊維配向

樹脂量54.9wt%(FR 5 相当の耐熱性エポキシ樹脂)のプリプレグを用いて、このシートから24×24cmでサンプル

を切り出し、マイクロ波法により配向を測定した。適当な配向角および配向度のサンプル6点を選び、表1に記載した組み合わせで2ply成形を行い、基板を作成した。成形は銅箔で2枚のプリプレグを挟み、200°C・1時間、圧力4.9MPaで行った。また、成形後、6×6cmに加工して銅箔を塩化鉄水溶液で全面エッチオフした。最後にこの成型品を120°C・30min.乾燥し、これを初期サンプルとした。初期サンプルのねじれ量をJIS-C5012(プリント配線板試験方法)に基づき測定した。次に温度履歴をかけるためにリフロー処理を260°C・10sec.の条件下で行った。これを同様の方法でねじれ量を測定した。なお、ねじれ量は基板面積に比例するため、JISに基づく測定値を試料面積3600mm²で除した値を採用した。

3.3 ガラス繊維1軸試料の作成と配向測定

繊維配向が誘電率の異方性から測定できることを確認するために、日本硝子繊維製の誘電率6.1(12GHz)のCガラス棒状繊維(直径160μm~220μm)を用いて、図6のように1軸配向ガラス繊維の試料を作成した。本数を変えることにより体積分率を0.123から0.780まで変えた5点を、マイクロ波法(測定周波数12.5GHz)により20度毎の誘電率を測定し、誘電率の複合則に基づく理論値と比較した。

Fig. 6 Uniaxially oriented glass fibers for measurement by microwave method to confirm the dielectric anisotropy changed by the volume fraction.

4. 結果と考察

4.1 線膨張係数と繊維配向

アラミド紙50点の配向をマイクロ波法で測定し、その中から比較的配向度の異なる6点について、配向度(MOR)に対する線膨張係数の変化を図7に示す。繊維の長軸方

向の線膨張係数は-5ppm/°C前後で大きな変化は見られないが、短軸方向のそれは配向度が増すにつれて線膨張係数の絶対値は小さくなっている。アラミド繊維は負の線膨張係数(-6ppm/°C)を示すため、バインダが含まれていることを考慮すると理想的には配向度が大きくなるにつれて長軸方向では線膨張係数が負に大きくなり、短軸方向では負に小さくなると考えられる。今回のデータではMORの増加に伴う長軸方向の線膨張係数の下がり方が小さいが、ほぼそれに近い傾向を示している。理想の形から少し外れているのは、非常に小さな値を議論していることによる測定上のばらつき等が考えられ、配向度の差がさらに大きなもので実験すれば、もう少し傾向がはっきり出るものと思われる。また、長軸方向の線膨張

Fig. 7 Coefficient of linear thermal expansion plotted against MOR for prepreg containing aramid fibers.

Fig. 8 Ratio of coefficient of linear thermal expansion plotted against MOR for prepreg containing aramid fibers.

係数と短軸方向のそれとの比と繊維の配向度との関係を図8に示す。この図からMORが大きいほど線膨張係数比が大きくなることがわかる。つまり、異方性が大きいほど収縮率の縦横比も大きく、MORが収縮比を代用できることを示している。

4.2 繊維配向と誘電率の異方性

マイクロ波法による配向測定は誘電率の異方性を見ているが、紙のような繊維の集合体においては、繊維つまりセルロース自体の持つ誘電率の異方性にプラスして、その形態(並び方)による誘電率の異方性も検出していることになる。つまり、ガラスのように誘電的等方性物質でも、例えば図9のように細長くして平行に列べると、全体としては誘電率の異方性が出現する[10]。この場合、繊維の長軸方向で誘電率が最大となり、短軸方向で最小となる。この現象は電磁気学的に説明され、Bilboulの報告[6]を元に、二重楕円体を海島構造に置き換えて式を展開していくと以下の式が導かれる。すなわち、図9に示したように、島に相当する繊維を細長い回転楕円体と仮定し、長軸方向の誘電率を ϵ_a 、短軸方向を ϵ_b とすると、それぞれ式(8)(9)のように表される[11]。

$$\epsilon_a = \epsilon_m \left[\frac{\epsilon_f - \epsilon_m}{\epsilon_f + \epsilon_m} \left\{ Vf + (1 - Vf) Aa \right\} + \epsilon_m \right] \quad (8)$$

$$\epsilon_b = \epsilon_m \left[\frac{\epsilon_f - \epsilon_m}{\epsilon_f + \epsilon_m} \left\{ Vf + (1 - Vf) Ab \right\} + \epsilon_m \right] \quad (9)$$

$$Aa = \frac{(e^2 - 1) / 2e^2 \{ 2 + (1/e) \ln \{ (1 - e) / (1 + e) \} \}}{(1 + e)} \quad (10)$$

$$Ab = \frac{(1 / 2e^2) \{ 1 + \{ (1 - e^2) / 2e \} \ln \{ (1 - e) / (1 + e) \} \}}{(1 + e)} \quad (11)$$

$$e = (1 - (b/a)^2)^{1/2} \quad (12)$$

ただし、 ϵ_m はマトリックスの誘電率、 ϵ_f は繊維の誘電率、 Vf は繊維の体積分率、 e は楕円の離心率、 a は繊維を楕円体とした場合の長軸の長さ、 b は短軸の長さを表す。

上式により、マトリックスおよび繊維共に誘電的には等方性であっても、繊維の形状が円でなければ、その離心率に対応してマクロ的にみた誘電率に異方性が発現することがわかる。繊維のアスペクト比が100程度になると、上式での離心率 e を1と近似でき、その場合は式(8)(9)は、式(13)(14)のように簡単な形で表される。

$$\epsilon_a = \epsilon_m (1 - Vf) + \epsilon_f \cdot Vf \quad (13)$$

$$\epsilon_b = \epsilon_m \{ \epsilon_m (1 - Vf) + \epsilon_f (1 + Vf) \} / \{ \epsilon_m (1 + Vf) + \epsilon_f (1 - Vf) \} \quad (14)$$

この形は、よく知られている弾性率の複合則[12]と一致する。

ϵ_m を1.0、 ϵ_f を6.1として Vf を0から1まで変化させた場合の ϵ_a および ϵ_b を式(13)(14)を用いて計算した結果を

Fig.10 Dielectric constants in the direction of major axis and minor axis of glass fibers plotted against the volume fraction for uniaxially oriented glass fiber sheet. Both calculated values and measured values are plotted.

Fig. 9 Composite materials with islands-sea structure present macroscopic anisotropy of dielectric constant because of the shape of islands, even if the islands and sea are dielectrically isotropic themselves.

図10に示す。また、配向度を表す $\Delta\epsilon' (= \epsilon_a - \epsilon_b)$ と V_f との関係を図11に示す。この場合は、体積分率が65.3%の時に異方性が最大($\Delta\epsilon' = 1.563$)となることがわかる。

この確認のために、体積分率の異なるガラス繊維1軸配向試料5点について、マイクロ波法で長軸方向の誘電率 ϵ_a と短軸方向の誘電率 ϵ_b を測定した。その結果を表2に示す。また、この5点の測定結果を図10および図11に“Measured”として追加プロットした。ほぼ理論カーブに載っており、繊維が等方性であってもその並び方で誘電的異方性が現れることが、マイクロ波法によって確認された。さらに、同様のガラス繊維1軸配向試料について、誘電率の方位角方向分布を、理論値と実測値について比較を行った結果、両者は良く一致した。試料“nag5”について、両者の比較結果を図12に示す。理論値について

Table 2 Dielectric Constant Measured by Microwave Method for Uniaxially Oriented Glass Fiber Sheet

Sample code	Number ^{a)}	Diameter (mm)	V_f	$\epsilon_a^{b)}$	$\epsilon_b^{c)}$	$\epsilon_a - \epsilon_b$
nag1	22	0.20	0.123	1.697	1.188	0.510
nag2	32	0.20	0.180	1.828	1.218	0.610
nag3	50	0.20	0.281	2.383	1.370	1.013
nag4	79	0.18	0.399	2.901	1.556	1.345
nag5	139	0.20	0.780	5.004	3.371	1.633

^{a)}Number of Fibers in 28mm Length.

^{b)}Dielectric Constant in the Direction of Major Axis.

^{c)}Dielectric Constant in the Direction of Minor Axis.

Fig.11 Dielectric anisotropy ($=\Delta\epsilon'$) plotted against the volume fraction for uniaxially oriented glass fiber sheet. Both calculated values and measured values are plotted.

Fig.12 Comparison between calculated value and measured value for angular dependence of dielectric constant of uniaxially oriented glass fiber sheet “nag5”.

では、 $\epsilon_a = 4.978$, $\epsilon_b = 3.548$ を用いて誘電率楕円体として計算した。実測値については、マイクロ波法による20度毎の測定値を用いた。これにより、誘電率の異方性を測定することにより、繊維配向の評価ができることが確認された。つまり、誘電率の最大方向が平均的な繊維配向主軸方向であり、 $\Delta\epsilon'$ あるいはMOR-cでその配向度が評価できることがわかった。また、繊維配向度を比較する場合、繊維の体積分率を同一にする必要があることも確認された。

なお、このような形状に基づく異方性が発現するかどうかは繊維のサイズや測定部分の面積にも関連するが、今回のアラミド繊維の場合は直径 $12\mu\text{m}$ 、長さ3mm、それに対して測定面積は $67\text{mm}\phi$ (4GHzの場合)または $18\text{mm}\phi$ (12GHzの場合)となっており、どちらの周波数帯で測定しても、十分にマクロ的な異方性の発現が測定できる大きさであった。

テクノラ繊維の場合は繊維自身も大きな誘電率の異方性がある(長軸方向が最大になる)ので、全体としての誘電率の異方性は同条件のガラス繊維に比べてさらに大きくなることは容易に推定できるが、理論的・定量的な解析については今後さらに検討して行きたい。

4.3 ねじれと繊維配向

樹脂を含浸させたプリプレグ貼り合わせ基板のねじれの原因としては、次の3点が考えられる。第1に、成形温度以上の熱歪みの解放。第2に繊維の熱収縮。第3に含浸樹脂の硬化収縮。その内でも第3の原因が支配的であり、含浸樹脂の硬化収縮が繊維配向により異方性をも

つことによると考えられる。これを裏付けるデータとして、200℃成型品および230℃成型品のTMAを260℃までの条件で測定したところ、200℃品において不可逆な収縮が大きくなるという結果を得た。一方、230℃品では、その収縮は200℃品に比べ、かなり小さいことも確認した。つまり、200℃品と230℃品の収縮量の差が大きいことから、200℃成形では樹脂の完全硬化まで至っておらず、リフローを通すことにより硬化が進むと考えられる。その次に来る要因として、繊維の収縮等があると考えられる。

マイクロ波方式で測定した配向度と配向角度を用いて、式(7)により計算したねじれ量とJISに基づく実測値を表1に示す。また、計算値と実測値との関係を図13に示す。リフロー前の相関係数は0.641であるが、リフロー後のそれは0.935であり、強い相関があることがわかった。この結果から、樹脂を含浸させたプリプレグ貼り合わせ基板のねじれは、繊維の配向度と配向角度に大きく依存し、式(7)によりその大きさが推定できることが分かった。逆に、ねじれを小さくするには、配向度をできるだけ小さくするか、または両層の配向角度をできるだけ同一にして貼り合わせることが必要であることが確認できた。

Fig.13 Measured value vs. calculated value for the twist of two-ply circuit board. The former was obtained by dividing the measured value according to JIS by sample area (=3600mm²). The latter is calculated by proposed equation.

5. 結 言

(1) 繊維が等方性であっても、その並び方により全体として誘電率の異方性が発現する現象を表す理論式と、マイクロ波法による誘電率の測定結果が一致することをガラス繊維1軸配向シートを作成して確認した。この結果より、誘電率の異方性を見ているマイクロ波法は、繊維

配向を評価するのに有効な方法であることが確認された。つまり、誘電率の最大方向が平均的に見た繊維配向方向であり、繊維の体積分率が同一であるならば、 $\Delta\epsilon' (= \epsilon'_{\max} - \epsilon'_{\min})$ あるいはMOR-cで繊維配向度が評価できる。

(2) アラミド紙を用いたプリプレグの線膨張係数の長軸方向と短軸方向の比と、マイクロ波法による繊維配向度を表すMORには強い相関関係があり、熱収縮比はMORで推定できることがわかった。

(3) 2層貼り合わせ積層回路基板の熱によるねじれは、繊維配向に支配された熱収縮率の異方性が各層で異なるために生じる層間応力によって発生することから、両層の配向度(MOR)と配向角度の関数としてねじれ量を表わす式を提案し、この式を用いて計算した結果とJISに基づく実測値との間には強い相関関係があることがわかった。逆に、ねじれのない積層基板を作るためには、配向度をできるだけ小さくするか、または両層の配向角度をできるだけ同一にして貼り合わせることが必要であることが分かった。

謝 辞

本研究を行うにあたりガラス繊維を提供していただいた日本硝子繊維㈱開発部の佐藤典明氏に深謝申し上げる。

参考文献

1. 平川 薫, 「電子材料」, 工業調査会, 28[10], p.61 (1989).
2. J. K. Craver and D. L. Taylor, *Tappi*, 48[3], 142 (1965).
3. 加藤靖典, 栗山富夫, 永田 誠(山陽国策パルプ), 特開昭61-142464.
4. 和田英樹, 「実用プラスチック成形加工事典」, 産業調査会, p.379(1997).
5. 大崎茂芳, 永田紳一, 酒井清和, 藤井良彦, 電子通信学会(MW84-66), p.7(1984).
6. R. R. Bilboul, *Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D)*, Ser. 2, 2, 921(1969).
7. 藤澤和男, 岡本尚道, 「マイクロ波回路例題演習」, コロナ社, p.157(1975).
8. S. Osaki, *J. Appl. Polym. Sci.*, 37, 527(1989).
9. 赤坂 隆, 「複合材料工学」, 林 毅編, 日科技連出版社, p.540(1971).
10. 安部康明, 第41回日本学術会議材料研究連合講演会予稿集, p.353(1997), および, 材料, 印刷中.
11. 永田紳一, 小山清人, 繊維学会予稿集, 1997, F-112.
12. D. ハル著, 宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲共訳, 「複合材料入門」, 培風館, p.74(1984).