— 論 文 —

炭素繊維強化積層複合材中のき裂検出法に関する研究 (第1報)

電気ポテンシャルの変化を用いた CFRP 積層材中のき裂進展量の測定^{*1}

A Study on Flaw Detection Method for CFRP Composite Laminates (1st Report)

The Measurement of Crack Extension in CFRP Composites by Electrical Potential Method

守 屋 一 政^{*2}・遠 藤 隆^{*3}

Kazumasa MORIYA and Takashi ENDO

Key Words : Composite Materials, CFRP, Crack, Electric Potential Method, DCB Specimen, Electrical Conductivity

Abstract

An in-service flaw detection and estimation method for CFRP composites using electrical potential drop is developed. It involves passing a constant current through composites and measuring the electrical potential, which changes as the crack advances. The resistor network analysis of the random lattice model of CFRP composites shows that even in the plane normal to the fiber direction, CFRP composites can be considered as electrically homogeneous on a gross scale, i. e., on a scale of dimensions dozens of times large compared with the fibre radius. The analysis also shows that the method can detect the small increment of crack growth in CFRP composites with only a fraction of current that is required for metals. The relation between the amount of the crack growth and the potential change is expressed by a broken line composed of two straight lines. The method is applied to the delamination test of the DCB composite laminate specimen and the results are compared with the FEM solutions. The present method can provide accurate and inexpensive means for flaw detection and crack growth measurement in CFRP composite structures.

1. 結 言

一般に複合材は、繊維とマトリックスとからなる基本的に不均質な材料で、内在するき裂、はく離等の欠陥が、航空機構造およびその部材の信頼性設計、品質

管理の際に大きな問題となる。複合材の非破壊検査法¹⁾には電磁波、超音波探傷、AE等が使われるが、なかでもAEは、on line, real timeの検出法として最近急速に普及している²⁾。しかしながら、AEの適用範囲は、欠陥の発生、進展の定性的検出や位置標定に限られ、き裂の大きさや進展量を求めたり、欠陥形状を同定するといった定量的評価ができるまでにはいたっていない。このような目的のためには他の方法を模索する必要がある。

一方、金属材については、電気抵抗法³⁾と総称される非破壊検査法が確立していて、コンパクトテンション試験片を用いた G_{IC} の測定等に日常のroutine workとして使用されている。ところが、複合材では、電気抵抗法はまったく使われない。FRP設計便覧¹⁾を見ても、超音波、誘電率、マイクロ波等多くの非破壊検査法が取りあげられているものの、電気抵抗法に関する記述は見当たらない。複合材はアンテナ等の導電材料に使用されることもあるが、どちらかといえば、エレクトロニクス機器のケーシング、プリント基板等の絶縁材料として使われることのほうが遙かに多いために、材料の導電特性を利用した非破壊検査法が見過ごされてきた感がある。航空機用ACMの主流となっている炭素繊維強化複合材料CFRPは、樹脂は電気の不導体であるが、CFすなわち、炭素繊維は電気の良い導体で、マルチメータを使ってCFRP板の抵抗値を計測すると、数10Ωから数100Ωの手ごろな抵抗値を示す。

筆者らはCFRP板に一定電流を流し、電気ポテンシャルの変化を利用して、き裂の発生、進展を検知し、さらには、き裂の進展量、き裂面積の変化を定量的に評価することを目的とした一連の研究を行って

^{*1} 昭和62年7月16日、第29回構造強度に関する講演会にて一部講演。昭和62年8月7日原稿受理

^{*2} 防衛大学校航空工学教室

^{*3} 防衛大学校教務課

る。本報では、基本的に不均質なCFRP材の導電特性を、確率的な離散モデルに基づく回路解析、および、均質モデルによる有限要素解析によって明らかにし、導電繊維の直径の数十倍の長さを単位とするスケールでは、CFRP材は電気的に均質体として取り扱うことができることを示す。さらに、き裂の進展に伴う電気ポテンシャルの変化を、離散モデルと均質モデルの双方についてシミュレートし、き裂の進展面積とポテンシャルとの間には2本の直線領域とその中間の遷移領域とからなる折れ線で表される関係があり、金属材の電気抵抗法に使われる接触子のような針状の点電極の代りに、繊維の直径の数十倍の幅を有する面電極を用いれば、電気ポテンシャルの変化をCFRP材の非破壊検査に利用できることを示す。次に、CFRP積層材の層間破壊靱性試験として最近とみに使われ始めたDouble Cantilevered Beam (DCB) 試験片⁴⁾を用いたピーリング試験を行い、電気ポテンシャルの変化によってき裂の進展面積が正しく求められることを実証する。CFRP材のDCB試験では、目視によって側辺におけるき裂長さを計測し、き裂面積の変化を算出しているが、き裂前縁に凹凸を生じる場合には、正しい評価ができない。また、各種の雰囲気中でき裂の進展試験を行う際には、目視によってき裂長さを読み取ることが困難な場合が多い。このようなときに、本報に示す方法を用いれば、容易かつ正確にCFRP材中のき裂の発生、進展を検出し、その面積を評価することができる。

2. 測定方法

2.1 CFRPの導電特性 CFRPの構成要素のうち、マトリックス樹脂は通常絶縁体であるが、強化繊維であるCFは導電性を有する。繊維方向については明らかに電気的に均質体とみなしうるので、繊維と直角方向の導電特性のみを考察する。実際のCFRP材では炭素繊維はマトリックス中にランダムに分布し、繊維間の距離もまちまちであるが、ここでは第1図のような配列の正方形格子の中にマトリックスもしくは

第1図 CFRP単層板の離散モデル

マトリックスに囲まれた繊維が入るものとする^{5,6)}。繊維は、格子の一边の長さを直径とする円形断面を有し、格子の四辺すべてに接する。また、マトリックスは完全な不導体で、繊維と直角方向の導通は互いに隣接する繊維間の交絡によってのみ生じるとする。厚さ方向に t^* 個、幅方向に w^* 個の2次元格子を作り、乱数発生ルーチン⁷⁾を用いて繊維の配列を決定すると、第1図のような離散モデルが得られる。離散モデルの板幅、板厚はそれぞれ w^* 、 t^* のごとく繊維の直径で無次元化して表す。繊維体積含有率 V_f の複合材をモデル化するには $t^* \times w^* \times R_f$ 個の格子に繊維を収める。ここに R_f は繊維を含む格子の割合で $R_f = V_f \times (4/\pi)$ となる。相隣り合う二つの格子がともに繊維を含めば、格子間に電流が流れるが、一方あるいは両方の格子がマトリックスのみの場合には格子間の導通はない。隣接格子間のコンダクタンスを前者の場合 g 、後者では0とする。上下面にはそれぞれ板幅全体にわたって電極を取り付け、電極と繊維を含む隣接格子との間のコンダクタンスを $2g$ とする。こうして得られ

第2図 CFRP単層板の等価回路

第3図 板厚と導電率との関係

第4図 板幅と導電率との関係

た離散モデルについて第2図のような等価回路を作り、回路解析を行えば、節点電位、電極間電位差、導電率等が求められる。 $V_f=60\%$ ($R_f=76\%$)、 $w^*=300$ のCFRP板の板厚 t^* を1から100まで変化させたときの上下電極間の導電率を10通りのランダムモデルによって計算し、平均値 G を g で無次元化して第3図に示す。 $G^*=G/g$ は $t^*=1$ では R_f に等しく、 t^* の増加とともに急減し、 $t^*>20$ では一定値0.34に収束する。繊維の直径を $7\mu\text{m}$ とすると、板厚がその20倍、 0.14mm 以上あれば、板厚や積層数が導電率に及ぼす影響は小さい。第3章の実験に使用したCFRP材では繊維の直径が $7\mu\text{m}$ 、単層の厚さが 0.14mm 、したがって、単層板の無次元化した板厚は、 $t^*=0.14\times 10^3/7=20$ である。板厚をこの値に保ち、板幅 w^* を1から200まで変化させたときの導電率の計算結果を第4図に示す。導電率は板幅の増加とともに急増するが、板幅が20以上では一定値0.34を示す。 $V_f=60\%$ のCFRP材は、繊維の直径の20倍以上の長さを単位とするスケールでは、電気的に均質体として取り扱うことができることがわかる。

2.2 CFRP材中のき裂進展の計測法 本節では、電気ポテンシャルの変化を利用したCFRP材中のき裂進展量の測定方法および進展量とポテンシャル変化との関係を示す。CFRP平板の上下面に2組の面電極を取り付け、1組を電流電極、他方を電圧電極とする。両電極とも、上下の電極を結ぶ直線が、それぞれ、き裂面をよぎるような配置が好ましい。直流定電流源を用いて電流電極間に一定電流を流す。複合材の場合、電極は、従来の電気抵抗法で用いられている接触子のような針状の点電極では、電極がマトリックスに接する場合、繊維に接する場合、あるいは、繊維とマトリックスの界面上にある場合とで接触抵抗が異なり、測定値がばらつき正確な測定ができない。電極には、少なくとも繊維の直径の20倍以上の幅を有する面電極を用いる。新たにき裂が発生したり、すでに存在するき裂が進展すれば、電流経路が変わり、電圧電

第5図 き裂を有する単層板の離散モデル

極の電気ポテンシャルも変化する。この電気ポテンシャルの変化を検出すれば、逆にき裂の生成、成長、大きさが推定できる。いま、 90° 単層板の上下面に電流電極および電圧電極を配し、電流電極に一定電流を流す。中央面内を繊維と直角方向にき裂が進展する場合の電圧電極に現れる電気ポテンシャルの変化を第5図のような離散モデルを使ってシミュレートする。モデルの板厚を $t^*=40$ 、板幅を $w^*=200$ とし、幅 $d_1^*=5$ の電流電極を上面、下面とも左端から20の位置に、同じく幅 $d_2^*=5$ の電圧電極を2組、左端から50（電極A）、70（電極B）の位置に配置する。前節同様、アステリスクは、繊維の直径で無次元化した量を表す。本モデルの板幅 w は、第3章の試験片（第10図）では長手方向の長さ L に相当することに注意されたい。き裂は左端から入り、中央面上を長手方向に板の4分の3、すなわち繊維の直径で無次元化したき裂長さ a^* が150になるまで進展するものとする。定電流源から電流電極間に単位（1A）の直流を流した場合のき裂進展に伴う各電圧電極間の電位差変化を第6図のような等価回路を用いて計算する。中央面を挟んで隣接する格子間の電流路はき裂の進展とともに切断される。一様乱数発生ルーチンによって、繊維体積含有率 $V_f=65\%$ 、繊維配列の異なる50種類の離散モデルを

第6図 CFRP き裂板の等価回路

第7図 き裂進展に伴うポテンシャル変化（電極A）

第8図 き裂進展に伴うポテンシャル変化 (電極B)

作成する。そのうちの4種類のモデルのき裂進展に伴う電極間電圧の変化を、丸、三角、十字等の記号を用いて、A電極については第7図、B電極については第8図に示す。き裂が0から進展するに従い、電気ポテンシャルは進展量に比例して増加し(低勾配線形領域)、き裂先端が電圧電極を通過する際に勾配が徐々に大きくなり(遷移領域)、先端が電圧電極を完全に通過した後は再びポテンシャル変化がき裂の進展量に比例する(高勾配線形領域)。A電極よりもB電極のほうが電流電極から離れているが、AB両電極での二つの線形領域の傾きはそれぞれ等しく、線形領域においては、き裂の進展量に対するポテンシャル変化の割合が電圧電極の位置によらず一定であることがわかる。A電極でのポテンシャル変化はB電極のポテンシャル変化に比べて、電極間の距離だけ左にずれている。すなわち、同じき裂長さでは、A電極のほうがB電極よりもポテンシャルの変化が大きい。これは、電流、電圧電極がそれぞれき裂面を挟むような配置の場合、電圧電極が電流電極に近いほうが高い感度が得られることを示している。また、遷移領域はB電極の場合のほうがA電極の場合よりも大きく、電圧電極が電流電極から離れるほど遷移領域は大きくなる。なお、繊維体積含有率 V_f が増せば、導電率も増加し、電極間電位差が減少してグラフは下にずれる。第3章の実験に用いたCFRP材にあてはめると、板厚 T が約0.3mm、長さ L (本節では板幅 w) が1.4mmのCFRP板の中央面をき裂が0から約1mm進展することに相当する。このように、繊維の直径の100倍程度のき裂進展を問題にする場合でも、進展量と電気ポテンシャルの変化量との間には三つの領域からなる折れ線で表される良好な比例関係が存在する。

2.3 均質モデルによるポテンシャル変化の計算
本節では、2.2節の計算に用いた板厚 $t^*=40$ 、板幅

第9図 き裂進展シミュレーションのための均質(有限要素)モデルの一例

$w^*=200$ の 90° 単層板の中央面内を繊維と直角方向にき裂が進展する場合のポテンシャル変化を均質モデルによって解析する。第5図のような繊維に直交する断面内では、等方性の2次元静電場問題として取り扱うことができるが⁸⁾、次章で述べるDCB試験片によるピーリング試験では、繊維に平行な断面内の導電特性をも考慮する必要があるため、一般的な直交異方性問題として定式化する。支配方程式は準調和方程式となり、式(1)で与えられる。

$$\begin{aligned} & (\partial/\partial x)(x_x \partial \phi / \partial x) \\ & + (\partial/\partial y)(x_y \partial \phi / \partial y) = 0 \end{aligned} \quad @S \quad (1)$$

境界条件は

$$x_x (\partial \phi / \partial x) + x_y (\partial \phi / \partial y) = i_s \quad @ \partial S_1 \quad (2.a)$$

$$\phi = \phi_s \quad @ \partial S_2 \quad (2.b)$$

となる。ここに ϕ はポテンシャル、 i_s および ϕ_s は境界上で規定された入力電流密度とポテンシャル、 x_x 、 x_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の電気伝導度、 S は領域、 ∂S_1 は i_s の与えられた境界、 ∂S_2 は ϕ_s の与えられた境界を表す。

式(1)、(2)に対する汎関数を有限要素法的に書けば

$$\begin{aligned} \Pi = \sum_{n=1}^N \left[(1/2) \iint_S \{ x_x (\partial \phi / \partial x)^2 \right. \\ \left. + x_y (\partial \phi / \partial y)^2 \} dS \right. \\ \left. - \int_{\partial S_1} \phi i_s ds \right] \end{aligned} \quad (3)$$

となる。付帯条件は式(2.b)である。

汎関数 Π の停留条件 $\delta \Pi = 0$ から有限要素方程式

$$K \phi = Q \quad (4)$$

が得られる。ここに、 K は全体電気伝導マトリックス、 ϕ は節点電気ポテンシャルベクトル、 Q は入力電流ベクトルを表す。

式(4)を解けば、すべての節点でのポテンシャル値が求められる。有限要素モデル(均質モデル)の1例を第9図に示す。

2.2節の離散モデルでき裂が存在しない $a^*=0$ の場合の導電率の平均値を計算すると、 $G=0.506$ となる。厚さ方向に4分割、長手方向に40分割の要素分割を

用いて, $x_x = x_y = 0.506$ とし, き裂の伝播経路上の節点を次々と切り離すことによってき裂進展をシミュレートする. 有限要素解析結果を第7図, 第8図に実線で示す. 離散モデルによる解析結果ときわめてよく一致し, 均質モデルによる計算結果をそのまま用いて CFRP 材中のき裂の進展量を推定することができる. なお, 正方形格子の代りに六角形格子を用いた離散モデルについても同様の計算を行い, 均質モデルによる FEM 計算結果と一致する結果を得ている. また, 90° 層のみの薄肉材の中央面内を繊維と直角方向にき裂が進展する場合, き裂長さが大きくなると, き裂を挟む上下層のそれぞれにパーコレーション^{9,10)}を生じて上下面の電流電極間に導通がなくなる. しかし, 通常の場合, 90° 層は 0° あるいは 45° といった長手方向にはるかに高い導電率を有する層と組み合わせて使われる. したがって, 90° 層のき裂表面近傍で繊維と直角方向の電流路が途切れても他の配向角をもつ隣接層を介して電流路が形成されるため, 90° 層を均質な導電体として取り扱うことができる.

3. 実 験

CFRP 複合材の DCB 試験⁴⁾を行い, き裂の進展に伴う電気ポテンシャルの変化を計測する. 試験片 (第10図) は幅 $W=20$ mm, 長さ $L=200$ mm でハンドレイアップ時に厚さ 0.05 mm のテフロンフィルムを挿

第10図 実験に用いた DCB 試験片の幾何学的形状

第11図 一定電流 (0.4 A) を流したときの試験片温度と抵抗率の変化

入して長さ $a_0=50$ mm の初期き裂がいてある. 使用したプリプレグは有沢製作所製 (1 プライ 0.17 mm) で 130°C 1 時間でホットプレス成形し, 同じく 130°C 1 時間のアフターキュアを施した. できあがった積層材の V_f は燃焼法による測定の結果 65% であった. 一方向積層板からは DCB 試験片とは別に, 繊維に直角方向の導電率を計測するための試験片を切り出した. また, 繊維方向の導電率の計測については, 6 層や 8 層の DCB 試験片用平板では板厚が薄すぎて端面に十分な電極面積がとれないために, 新たに 36 層の一方向積層板を作成した. DCB 試験片には 11 組の電極 (幅 $d=5$ mm) を第10図のように取り付け, 1 組 (No. 0) を電流入力電極, 残り (No. 1~10) を電圧検出電極とした. 電流電極 No. 0 と電圧電極 No. 1 との間隔は $b=30$ mm, 10 組の電圧電極どうしの間隔は $c=10$ mm である. 試験片の端部の上下両面にベークライト製の絶縁ブロックを接着し, コンパクト試験片用治具を介して試験機 (MTS 810, 容量 5 トン) に取

第12図 DCB 試験片 $((0)_a)_s$ のき裂進展に伴うポテンシャル変化 (実測値)

第13図 DCB 試験片 $((0)_z/(90)_z)_s$ のき裂進展に伴うポテンシャル変化 (実測値)

り付けた。第11図は試験片に0.4 Aの電流を流して放置した際の試験片温度および抵抗値の変化を熱電対および抵抗計によって測定した結果で、温度、導電率とも電流を流し始めてから5分後には安定することがわかる。き裂長さは試験片の側面に修正液を塗り、3次元トラバース装置に取り付けた望遠鏡によってき裂先端と試験片の終端の座標を読み取って直接測定した。開口変位はZimmer非接触変位計、き裂の進展はAE計測装置(Pac 3000/3004)にてとらえ、すべてのデータはデータ収録装置(YHP-3054)に取り込んで処理した。第12図、第13図にそれぞれ $((0)_s)_s$ 、 $((0)_z/(90)_z)_s$ における電圧電極1, 3, 5, 7, 9でのポテンシャル変化を示す。横軸はき裂長さ(単位mm)、縦軸はポテンシャル変化(単位V)を表す。図中、コントローラーROMの不調によってデータ収録装置がオーバーレンジ(OL)を示し、測定値が得られなかった点が数カ所ある。 $((0)_s)_s$ 試験片ではき裂は中央面上を進むが、 $((0)_z/(90)_z)_s$ では、中央面(90°層間)上に挿入した初期き裂は負荷を加えると同時に

0°/90°層間に飛び移り、0°/90°層間面上を進展する。第12図、第13図ともに第2章の0.3 mm×1.4 mmの2次元モデルで得られたポテンシャル変化と同じ傾向を示す。すなわち、き裂の進展量と電気ポテンシャルとの間には二つの直線領域とそれに挟まれた遷移領域とからなる折れ線で表される関係があり、直線領域の傾きは電圧電極の位置によらず一定である。また、き裂先端から離れた電圧電極ほど遷移領域が大きい。当然のことながら、90°層を含む試験片による結果のほうが、長手方向(繊維方向)に高い導電性をもつ9°層のみの場合よりも直線領域の勾配が大きい。いずれの場合も0.4 Aの入力電流で0.1 Vオーダーのポテンシャル変化が得られている。30~60 Aの大電流、しかも0.1 μVオーダーのきわめて高い検出感度が必要な金属材に比べると、CFRP材では桁違いに小さな入力電流(mAオーダー)で桁違いに大きなポテンシャル変化(mVオーダー)が得られることがわかる。第14図、第15図にそれぞれのDCB試験片を厚さ方向に4分割、長手方向に40分割のメッシュを用いて有

第14図 DCB試験片 $((0)_s)_s$ のき裂進展に伴うポテンシャル変化(計算値)

第15図 DCB試験片 $((0)_z/(90)_z)_s$ のき裂進展に伴うポテンシャル変化(計算値)

第16図 DCB試験片 $((0)_s)_s$ のポテンシャル分布(実測値)

第17図 DCB試験片 $((0)_z/(90)_z)_s$ のポテンシャル分布(実測値)

有限要素解析した結果を示す。第12図、第13図の実験結果とほとんど重なり、有限要素解析によって、較正曲線が容易に求められることがわかる。もっとも、DCB試験では電流電極と初期き裂の前縁との間に電圧電極を設ければ、き裂の進展面積と電気ポテンシャルの変化とは高勾配領域のみのリニアな関係を保ち、有限要素法のような数値解析によって較正曲線を求めなくても、初期き裂状態および最終き裂状態のき裂面積とポテンシャル値から直線補間によって、き裂の進展面積を算定することができる。き裂長さ a が 51, 79, 101, 121, 150 mm のときの $((0)_s)_s$ 試験片のポテンシャル分布の実測結果を第16図に、 $((0)_2/(90)_2)_s$ 試験片において、 $a=51, 79, 100, 123, 155$ mm のときのポテンシャル分布の実測値を第17図に示す。また、き裂長さが $a=50, 80, 100, 120, 150$ mm のときの有限要素解析結果を、それぞれの試験片について、第18図、第19図に示す。第18図の $((0)_s)_s$ 試験片については、き裂の存在しない $a=0$ の場合

のポテンシャル分布も示した。き裂の進展とともに全体のポテンシャルレベルが上昇し、き裂先端を挟んで電流電極から離れた電圧電極ほど感度が減少する。1方向材、クロスプライ材いずれの試験片についても、実験結果と有限要素解析結果との一致は良好で、積層構成とポテンシャル分布から逆に、き裂面積、形状等を推定できる可能性のあることがわかる。また、従来の複合材のDCB試験では、試験片の側辺に修正液等を塗布して、目視によって側辺におけるき裂長さを測定し、これに試験片の板幅を掛けて、き裂面積の変化ないしき裂の進展量を算出している。これは、き裂前縁がき裂の進展中、つねに側辺に対して直角かつ直線を保つ場合は問題ないが、このようなケースはきわめてまれで、一般には前縁に凹凸を生じるために、き裂面積の正しい評価ができない。本章に示す方法を用いれば、容易かつ正確にき裂の進展面積を評価することができる。

4. 結 論

CFRP 積層複合材中のき裂の発生と進展量の電気ポテンシャル法による検出可能性を示すとともに、DCB試験片を用いた層間剝離試験に適用してその妥当性を実証した。本研究で得られた知見を要約すると以下のとおりである。

(1) CFRP 積層材は、各層ごとに電氣的に均質な異方性体と見なすことができる。

(2) CFRP 材は不導体のマトリックス相に導電繊維が分散する不均質体であるため接触子のような針状の点電極は適当でない。正電極—繊維—負電極間に十分な電流路を形成するために少なくとも繊維数十本分の幅を有する面状の電極を用いる必要がある。

(3) き裂の進展量と電気ポテンシャル変化との間には二つの直線領域と、それに挟まれた遷移領域とからなる折れ線で表される関係があり、き裂前縁が電圧電極の直下をよぎる際に勾配が急増する。

(4) 30 A から 60 A の大電流を流し、 $0.1 \mu\text{V}$ オーダーの微小電位差を検出しなければならない金属材の場合と異なり、CFRP 材では mA オーダーの入力電流で十分な検出感度 (mV オーダー) が得られる。

(5) 90° 層のみの薄肉板中を繊維と直角方向にき裂が進展する場合、き裂を挟む上下層のそれぞれにパーコレーションを生じて電流電極間に導通がなくなる可能性がある。しかし、通常 90° 層は他の配向角をもつ導電率の高い層と組み合わせて使われ、それらの隣接層を介して電流路が形成されるため、 90° 層を電氣的に均質体として扱うことができる。

(6) 較正曲線を均質モデルによる有限要素法等の

第18図 DCB試験片 $((0)_s)_s$ のポテンシャル分布 (計算値)

第19図 DCB試験片 $((0)_2/(90)_2)_s$ のポテンシャル分布 (計算値)

数値解析によって求めることができる。

(7) DCB 試験では電流電極と初期き裂の前縁との間に電圧電極を設ければ、き裂の進展面積と電気ポテンシャルの変化は、1本の直線で表されるリニアな関係を示し、数値解析によって較正曲線を求めなくても、初期き裂状態および最終き裂状態のき裂面積とポテンシャル値から線形補間によってき裂の進展面積を求めることができる。また、き裂前縁に凹凸を生じる場合でも、き裂の進展面積を正しく評価することができる。

本報で示した電気ポテンシャルの変化を利用したCFRP材中のき裂検出法は、目視による計測が困難な内部き裂、非直線き裂、各種雰囲気下でのき裂面積の測定にとくに威力を発揮するものと思われる。

実験等に多大の努力を払われた本校研究科市川武彦、本科前田丈典、岩沢努各学生およびホットプレス成形についてご教示を賜った工業技術院製品科学研究所主任研究員吉田均氏に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 植村益次：FRP設計便覧，強化プラスチック協会，1984，pp. 156-159.
- 2) 中村 明，志波光晴，諸橋徹二：AEによるFRPの非破壊検査法（上，下），強化プラスチック，**31**（1985），pp. 381-390，423-432.
- 3) 日本非破壊検査協会：非破壊検査便覧新版，日刊工業，1978，pp. 777-796.
- 4) Keary, P. E., Ilcewicz, L. B., Shaar, C. and Trostle, J.: Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Composites Using Slender Double Cantilevered Beam Specimens, *J. Compos. Mater.*, **19** (1985), pp. 154-177.
- 5) Adams, D. F. and Tsai, S. W.: The Influence of Random Filament Packing on the Transverse Stiffness of Unidirectional Composites, *J. Compos. Mater.*, **3** (1969), pp. 368-381.
- 6) Joy, T. and Strieder, W.: Percolation in a Thin Ply of Unidirectional Composite, *J. Compos. Mater.*, **13** (1979), pp. 72-79.
- 7) たとえば，津田孝夫：モンテカルロ法とシミュレーション，培風館，1977.
- 8) Ritchie, R. O. and Bathe, K. J.: On the Calibration of the Electrical Potential Technique for Monitoring Crack Growth Using Finite Element Methods, *Int. J. Fracture*, **15** (1979), pp. 47-55.
- 9) Kirkpatrick, S.: Percolation and Conduction, *Reviews of Modern Physics*, **45** (1973), pp. 574-588.
- 10) Nakamura, M.: Random Sequential Packing in Square Cellular Structures, *J. Phys. A*, **19** (1986), pp. 2345-2351.

1) 植村益次：FRP設計便覧，強化プラスチック協会，1984，