

CFRP の電流分布の解析・実験的検証

山根 拓也*¹, 轟 章*², 藤田 博康*³, 川島 愛*³, 関根 尚之*³

(2014年9月16日受付)

The Analysis and Experimental Inspection of
a Current Distribution of CFRPTakuya YAMANE,*¹ Akira TODOROKI,*² Hiroyasu FUJITA,*³
Ai KAWASHIMA*³ and Naoyuki SEKINE*³

(Received September 16, 2014)

Abstract: One of the authors has already proposed the method to analyze electric current density of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates using the anisotropic electric potential function. The effectiveness of the method was verified by comparisons with FEM analyses. The method is based on the assumption that CFRP laminates are homogeneous orthotropic materials. Actual CFRP laminates are, however, heterogeneous materials: the actual CFRP has resin rich layers and carbon fiber layers. In the present study, an electric conductance is calculated on the assumption that CFRP laminates are homogeneous by using an electric resistance measured by a four-probe method, and the measured values are used for an electric current analysis. To investigate electric current distribution of CFRP laminates experimentally, a newly designed specimen is proposed. The results of an electric current tell us that the analysis method gives us the accurate result of electric current density of actual CFRP laminates. This shows that the assumption that CFRP laminates are homogeneous orthotropic material in case of electric current analysis was verified experimentally.

Key words: Electric current, Analysis, Experiment, Potential flow, Electric conductance

1. 結 言

近年、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は優れた機械的性質により、航空機構造部材への適用が拡大している。しかし CFRP の電气的特性は従来の金属材料と比較して導電率が低くかつ異方性を有しており、適切な耐雷対策がなされていない場合には、雷撃による抵抗加熱により損傷が生じる場合がある。運用中の CFRP 製航空機では雷撃電流の導電経路を確保するため金属箔・金属メッシュ等を構造部材表面に貼付しており安全性が確保されている¹⁾。しかし、雷撃電流のようなインパルス電流はリーク電流や誘導電流を生じるため、CFRP 構造内への完全な電流の流入防止は困難である。模擬雷撃を受けた

CFRP 積層板の損傷に関する研究は実施されており²⁻⁵⁾、航空機構造の雷撃時の安全評価には雷撃時の電流分布を評価することが重要であると提唱されている。しかし、航空機用 CFRP は層間に樹脂リッチ層が存在し⁶⁾一般的な CFRP よりも異方性をより一層強いものとしているため、従来の評価手法では電流分布を評価することが困難である。

轟は、計算コストが問題とならない CFRP の電流解析手法を提案している⁷⁾。この手法は CFRP を均質な異方性材料と仮定し、異方性を考慮した完全流体の速度ポテンシャル解から定常電流を求める手法である。しかし、航空機用の高いじん性が必要な CFRP は樹脂リッチ層があり、厚さ方向には不均質材料である。このため、実際の積層板で厚さ方向を均質導電体と近似した導電率を実験的に検証する必要がある。本研究では、参考文献⁷⁾の解析手法は電流負荷部が点であるため、電流負荷部が線の場合に拡張している。厚さ方向導電率の実験的検証は、一方積層板、直交積層板の2種類の積層構成の梁構

*^{1,2} 東京工業大学機械物理工学専攻 (152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 石川台 1 号館 457)

Tokyo Institute of Technology

*¹ 大学院生 Graduate Student, *² 教授 Professor

*³ 富士重工業 (株) 航空宇宙カンパニー (320-8564 栃木県宇都宮市陽南 1-1-11)

造とした。

2. 解析的検証

2.1 解析手法 (一方向積層板)

繊維方向が一方向のCFRPを電氣的に均質な直交異方性材料と仮定する。繊維方向を x 方向, 厚さ方向を z 方向とする直交座標系を考え, 異方性の電位ポテンシャル関数を ϕ , 各方向導電率を σ_x, σ_z とすると, 各方向電流密度 i_x, i_z は次式で表される⁷⁾。

$$i_x = -\sigma_x \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad i_z = -\sigma_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (1)$$

半無限板の表面に電流負荷点, 接地点が存在する Fig. 1 のモデルを考える。電流負荷点の座標を $(-a, 0)$, 接地点の座標を $(a, 0)$ とし, 負荷電流値を I [A] とした際の電位ポテンシャル関数 ϕ は次式で表される (詳細は参考文献⁷⁾ を参照されたい)。

$$\phi = -\frac{I}{2\pi\sqrt{\sigma_x\sigma_z}} \ln \frac{\frac{(x-a)^2}{\sigma_x} + \frac{z^2}{\sigma_z}}{\frac{(x+a)^2}{\sigma_x} + \frac{z^2}{\sigma_z}} \quad (2)$$

この関数を拡張し, 電流負荷部, 接地部が点ではなく線である場合に有効なポテンシャル関数を求める。これは, 2次元解析において, CFRP 積層板に幅を持つ電流源から電流が流入する場合に対応する。Fig. 2 に原点から $l_1 \sim l_2$ の位置に電流負荷部, 接地部が存在し, 電流 I [A] が負荷されるモデルを示す。負荷部, 接地部の線を点要素の集合と考え, Fig. 2 のモデルのポテンシャル関数は, それぞれの点要素のポテンシャルを重ね合わせて求められる⁸⁾。原点から距離 a 離れた電流負荷部, 接地部の点要素によるポテンシャル関数 ϕ' は, 点要素における負荷電流値 $I/(l_2-l_1)$ [A/m] を使用し, 式(2)より次式で表される。

$$\phi' = -\frac{I}{2\pi(l_2-l_1)\sqrt{\sigma_x\sigma_z}} \ln \frac{\frac{(x-a)^2}{\sigma_x} + \frac{z^2}{\sigma_z}}{\frac{(x+a)^2}{\sigma_x} + \frac{z^2}{\sigma_z}} \quad (3)$$

このポテンシャル関数を, a に関して $l_1 \sim l_2$ の範囲で積分することで, Fig. 2 のモデルにおけるポテンシャル関数 ϕ が次式で表される。

$$\begin{aligned} \phi = \int_{l_1}^{l_2} \phi' da = & -\frac{I}{2\pi(l_2-l_1)\sqrt{\sigma_x\sigma_z}} \left[(x+l_2) \ln \left\{ (x+l_2)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2 \right\} - (x+l_1) \ln \left\{ (x+l_1)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2 \right\} \right. \\ & + (x-l_2) \ln \left\{ (x-l_2)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2 \right\} - (x-l_1) \ln \left\{ (x-l_1)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2 \right\} \\ & \left. + 2\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z}} z^2 \left(\arctan \frac{x+l_2}{\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2}} - \arctan \frac{x+l_1}{\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2}} + \arctan \frac{x-l_2}{\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2}} - \arctan \frac{x-l_1}{\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2}} \right) \right] \quad (4) \end{aligned}$$

(10)

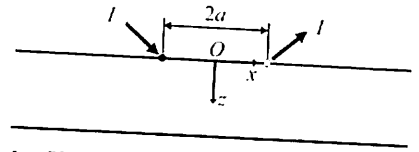


Fig. 1 CFRP plate with an electric current input and output points.

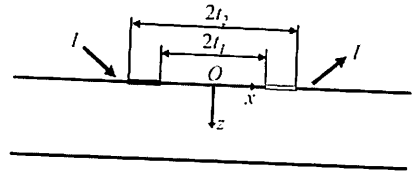


Fig. 2 CFRP plate with an electric current input and output lines.

この関数を各方向に偏微分して求まる各方向の電位差関数は次式となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{I}{2\pi\sqrt{\sigma_x\sigma_z}(l_2-l_1)} \times \ln \frac{\left\{ (l_2+x)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2 \right\} \left\{ (l_2-x)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2 \right\}}{\left\{ (l_1+x)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2 \right\} \left\{ (l_1-x)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2 \right\}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial z} = & -\operatorname{sgn}(z) \frac{I}{\pi(l_2-l_1)\sigma_z} \\ & \times \left(\arctan \frac{x+l_2}{\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2}} - \arctan \frac{x+l_1}{\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2}} \right. \\ & \left. + \arctan \frac{x-l_2}{\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2}} - \arctan \frac{x-l_1}{\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2}} \right) \quad (6) \end{aligned}$$

この関数を式(1)に代入することで電流密度の解析解が求まる。したがって, Fig. 2 において, $x=0$ における x 方向電流密度は次式で表される。

$$i_x = -\frac{I}{\pi(l_2-l_1)\sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z}}} \ln \frac{l_2^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2}{l_1^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} z^2} \quad (7)$$

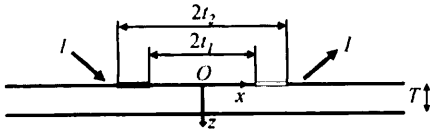


Fig. 3 Finite CFRP plate with an electric current input and output lines.

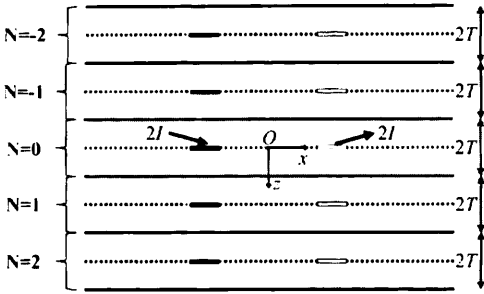


Fig. 4 Schematic representation of image method for electric current of a finite CFRP plate.

対象が有限板である場合、鏡像を適切に設置することにより正解が得られることが報告されている⁹⁾。そこで、Fig. 3のように電流負荷部、接地部が線（幅を有する電極）である有限板の場合にはFig. 4のように鏡像を設置する。適切な鏡像数の評価には、鏡像解を重ね合わせることで有限板内に流れる電流量の負荷電流値に対する割合 δ_i を用いる。すなわち、 δ_i は次式で表される。

$$\delta_i = \frac{1}{I} \int_{-2NT}^{2NT} i_x dz$$

$$= \frac{1}{(l_2 - l_1)\pi} \left\{ \sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z}} NT \ln \frac{(NT)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} l_2^2}{(NT)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} l_1^2} \right. \quad (8)$$

$$\left. + 2 \left(l_2 \arctan \frac{NT}{l_2 \sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z}}} - l_1 \arctan \frac{NT}{l_1 \sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z}}} \right) \right\}$$

よって、印加電流の99%の電流量が有限板内に保証される条件は次式で表される。

$$0.99 \leq \frac{1}{(l_2 - l_1)\pi} \left\{ \sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z}} NT \ln \frac{(NT)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} l_2^2}{(NT)^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} l_1^2} \right. \quad (9)$$

$$\left. + 2 \left(l_2 \arctan \frac{NT}{l_2 \sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z}}} - l_1 \arctan \frac{NT}{l_1 \sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z}}} \right) \right\}$$

式(9)を満たす N の鏡像解を重ね合わせることで、有

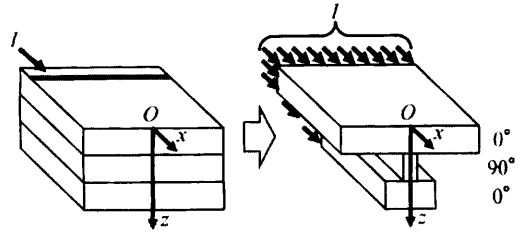


Fig. 5 Schematic representation of cross section of CFRP plate, which shows a concept of equivalent electric conductance.

限板における解析解が得られる。式(5)、(7)より、有限板の際の $x=0$ における x 方向電位差関数、電流密度は次式で表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = - \sum_{n=-N}^{n=N} \frac{I}{\pi \sqrt{\sigma_x \sigma_z} (l_2 - l_1)}$$

$$\times \ln \frac{l_2^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} (z - 2nT)^2}{l_1^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} (z - 2nT)^2} \quad (10)$$

$$i_x = \frac{I}{\pi (l_2 - l_1)} \sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z}}$$

$$\times \sum_{n=-N}^{n=N} \ln \frac{l_2^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} (z - 2nT)^2}{l_1^2 + \frac{\sigma_x}{\sigma_z} (z - 2nT)^2} \quad (11)$$

2.2 直交積層板の等価導電率

参考文献7)においては厚い0°層の多い直交異方性板の電流密度が0°単層の電位分布から解析できることが示されている。しかし、薄板では0°単層の電位分布は直交積層板と異なり、薄板直交積層板の電位分布を与える等価導電率が必要である¹⁰⁾。ここで簡単に等価導電率の求め方を示す。

直交積層板全体の x 方向導電率は、90°層の繊維直交方向導電率の影響により一方向積層板よりも小さくなる。電流を負荷している積層板表面から離れるにつれ電流は流れにくくなる(電位差が減少する)。このため、90°層の積層位置により差異は異なる¹¹⁾。Fig. 3のモデルの $x=0$ の断面図の模式図をFig. 5に示す。Fig. 5の左図のように表面から電流負荷した際の $x=0$ 断面の各層電流量は、右図のように厚さ方向に一樣な x 方向電流を与え(総量 I [A])、表面から離れることと90°層の影響を加味し各層の断面積を減少させた場合の各層電流量と同様に表される。そこで、表面から離れることと、90°層の低導電率による電位差の減少の影響を考慮した積層板全体の x 方向導電率(等価導電率)を求め、直交積層板の電位差

関数を求める。等価導電率 $\bar{\sigma}_x$ は、次式で定義する。

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\sum_{k=1}^N \sigma_x(z_k) \frac{\partial \phi(z_k)}{\partial x}}{\sum_{k=1}^N \frac{\partial \phi(z_k)}{\partial x}} \quad (12)$$

ここで、 N は等価導電率計算に用いる厚さ方向分割数、 z_k は表面からの厚さ方向距離、 $\sigma_x(z_k)$ は z_k での x 方向導電率、 $\partial \phi(z_k)/\partial x$ は z_k の位置における x 方向電位差の値である。以下の手順で等価導電率 $\bar{\sigma}_x$ を求める。

- I. σ_x に繊維方向導電率を、 σ_z に厚さ方向導電率を代入し、一方向積層板として式(10)により x 方向電位差関数 $\partial \phi/\partial x$ を求める。
- II. 求まる $\partial \phi/\partial x$ を用いて式(12)により等価導電率 $\bar{\sigma}_x$ を求める。
- III. σ_x に等価導電率 $\bar{\sigma}_x$ を、 σ_z に厚さ方向導電率を代入し、一方向積層板として式(10)により x 方向電位差関数 $\partial \phi/\partial x$ を求める。
- IV. 求まる $\partial \phi/\partial x$ を用いて式(12)により等価導電率 $\bar{\sigma}_x$ を求める。
- V. III~IVを繰り返し、 $\bar{\sigma}_x$ の差が許容値以下になったら計算終了。

このようにして求まる $\bar{\sigma}_x$ を使用し、式(10)により最終的な x 方向電位差関数を求める。この電位差関数を用いることで、式(1)により電流密度分布の解析解が求まる(式(1)における σ_x は各層の x 方向導電率を代入)。

2.3 各方向導電率の測定

本研究で用いた CFRP 積層板の積層構成は一方向積

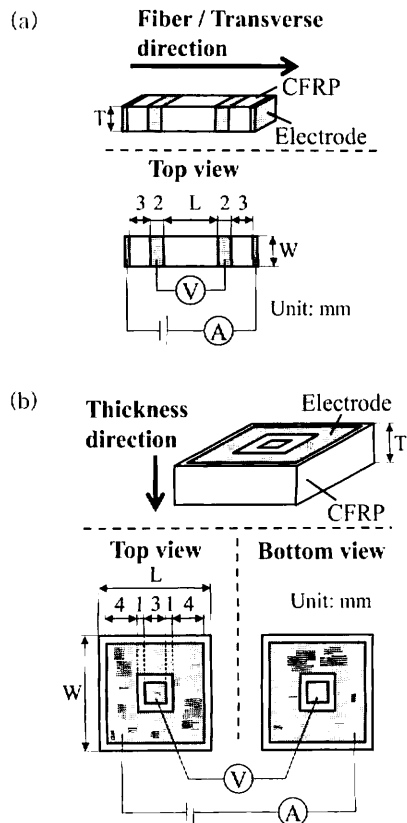


Fig. 6 Schematic representation of the specimen for measuring electric conductance by four probes methods, (a) fiber and transverse direction and (b) thickness direction.

Table 1 Size of the specimens and measured electric conductance (P2352W-19).

	Length, L	Width, W	Thickness, T	Electric conductance
Fiber direction # 1	10.93 [mm]	3.57 [mm]	4.97 [mm]	4.94×10^4 [S/m]
Fiber direction # 2	9.86 [mm]	3.40 [mm]	6.46 [mm]	5.36×10^4 [S/m]
Fiber direction # 3	9.73 [mm]	3.37 [mm]	5.70 [mm]	4.50×10^4 [S/m]
Transverse direction # 1	7.34 [mm]	3.94 [mm]	6.47 [mm]	6.55 [S/m]
Transverse direction # 2	7.33 [mm]	3.70 [mm]	6.42 [mm]	6.41 [S/m]
Transverse direction # 3	7.28 [mm]	3.83 [mm]	6.44 [mm]	6.65 [S/m]
Thickness direction UD # 1	14.84 [mm]	14.72 [mm]	3.81 [mm]	3.78×10^{-3} [S/m]
Thickness direction UD # 2	14.83 [mm]	14.83 [mm]	3.80 [mm]	4.00×10^{-3} [S/m]
Thickness direction UD # 3	15.90 [mm]	14.82 [mm]	3.79 [mm]	4.57×10^{-3} [S/m]
Thickness direction UD # 4	15.37 [mm]	14.64 [mm]	4.96 [mm]	3.38×10^{-3} [S/m]
Thickness direction UD # 5	15.45 [mm]	15.26 [mm]	4.99 [mm]	2.44×10^{-3} [S/m]
Thickness direction CP # 1	15.40 [mm]	16.35 [mm]	1.48 [mm]	1.19×10^{-1} [S/m]
Thickness direction CP # 2	15.40 [mm]	16.35 [mm]	1.47 [mm]	4.01×10^{-2} [S/m]
Thickness direction CP # 3	16.21 [mm]	15.52 [mm]	1.47 [mm]	6.06×10^{-2} [S/m]
Thickness direction CP # 4	16.52 [mm]	15.63 [mm]	1.45 [mm]	6.31×10^{-2} [S/m]
Thickness direction CP # 5	15.73 [mm]	15.67 [mm]	1.46 [mm]	8.03×10^{-2} [S/m]

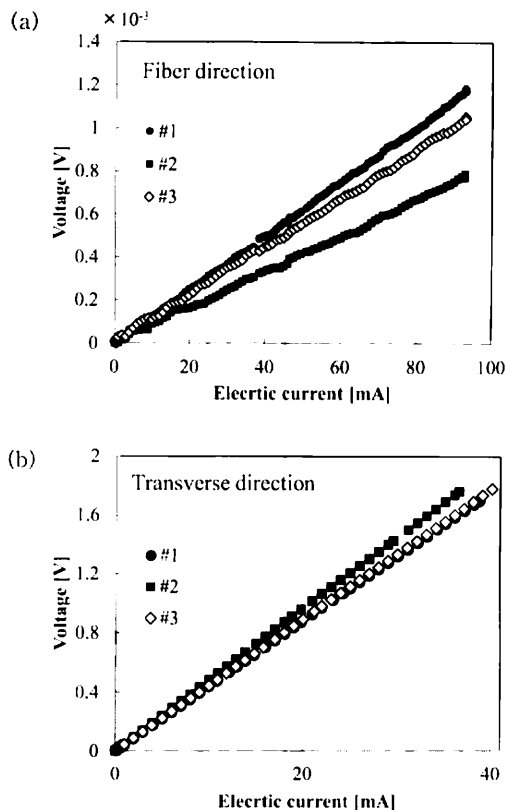


Fig. 7 Current-voltage characteristics in (a) fiber direction and (b) transverse direction of CFRP.

層 [0]_s と直交積層 [(0/90)₂]_s の 2 種類である。解析に必要な繊維方向、繊維直交方向、厚さ方向の導電率は同一の繊維配向の試験片の測定結果を用いる（材料：東レ P2352W-19）。この材料は航空機構造に使用される CFRP であり、高じん性化のための樹脂リッチ層が層間に存在する（成形後の 1 層の厚さは平均 0.19 [mm]）。繊維方向の導電率は繊維体積含有率に依存するため、繊維直径の数倍程度の寸法であれば均質と見なせる。繊維直交方向の導電率は繊維接触に依存するが、繊維バンドル程度ですでに多数接触するため、繊維直径の数倍程度の寸法であれば均質と見なせる。厚さ方向の導電率は繊維接触に依存し、樹脂リッチ層の影響を受けるため不均質である。

Fig. 6(a) に繊維方向、繊維直交方向の導電率測定用試験片の概略図を、Fig. 6(b) に積層板厚さ方向の導電率測定用試験片の概略図を示す。白い部分が CFRP、灰色の部分銅めっきで作製された電極である。試験片寸法は

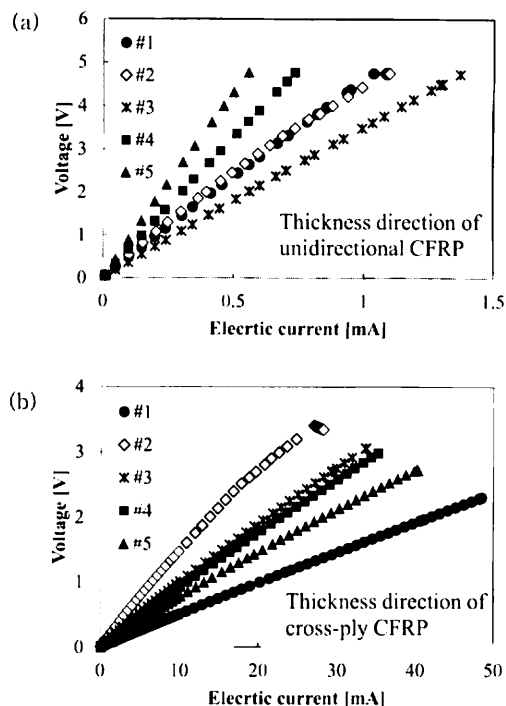


Fig. 8 Current-voltage characteristics in thickness direction, (a) unidirectional CFRP and (b) cross-ply CFRP.

Table 1 に示す。Table 1 の UD は一方向積層板 (unidirectional CFRP)、CP は直交積層板 (cross-ply CFRP) を示す。本研究では電極部の接触抵抗を小さくするため、銅めっきにより電極を作製している¹²⁾。測定には Fig. 6 に示す 4 端子法を用いた。

Fig. 6(b) では、電流負荷用電極と電位差測定用電極が同一面内に存在しているが、航空機用 CFRP では面内方向導電率と比較し厚さ方向導電率が極めて小さいため²⁾ 面内方向は等電位と見なせ、電位差測定用電極により正確な電位差が測定可能である。繊維方向、繊維直交方向は、層間の樹脂リッチ層の影響を受けず導電率のばらつきは小さいため試験片本数は 3 本とした。厚さ方向導電率はばらつきを考慮し試験片本数は 5 本とした。測定には LCR メータ (ハイテスタ 3522: 日置電機) を使用し、電流-電圧特性を得た後導電率を算出する。Fig. 7 と 8 に測定結果を示す。横軸が負荷電流値 [mA]、縦軸が電圧 [V] である。算出された各試験片の導電率は Table 1 に示す。Fig. 7(a) の繊維方向測定結果は、負荷電流値が小さい部分で大きく変動しているが、これは試験片の繊維方向の電気抵抗値が小さくこの部分では出力電圧が非常

Table 2 Electric conductance of CFRP laminates (P2352W-19).

Fiber direction	Transverse direction	Thickness direction	
		Unidirectional CFRP	Cross ply CFRP
4.93×10^4 [S/m]	6.54 [S/m]	3.63×10^{-3} [S/m]	7.25×10^{-2} [S/m]

に小さくなりノイズの影響を大きく受けるためである。そこで、負荷電流値 10 [mA] 以降の導電率を平均化した値を、解析に使用する繊維方向導電率とする。Fig. 7(b) では、負荷電流値 0.3 [mA] 以降の導電率を平均化した値を、解析に使用する繊維直交方向導電率とする。

Fig. 8(a) の一方向積層板の測定結果、Fig. 8(b) の直交積層板の測定結果は、炭素繊維束、樹脂リッチ層の不均質性の影響により、層間の樹脂リッチ層が巨視的に絶縁層でないことを示している。本研究では、測定された電気抵抗値は厚さ方向に関して均一であると仮定し、平均値を厚さ方向導電率とする。Table 1 に示すこの値は各試験片で大きくばらつき、特に直交積層板において顕著であることが確認できる。これは、先述の不均質性の影響により、層間の電流経路が不均質となり、層間毎に電気抵抗値が異なることに起因している。測定結果を平均化して求まる各方向導電率を Table 2 に示す。この表より電気的異方性が非常に強いことが確認できる。また、一方向積層板と直交積層板の厚さ方向導電率で約 20 倍の差異がある。

3. 実験的検証

3.1 実験手法の検討

本研究では Fig. 9 に示すモデルにおいて各層を流れる電流を測定する。このためには、Fig. 10 のように 2 つの積層板を使用し、積層板端部の層間を分離し各層をリード線接続する。リード線接続により各層の電流をリード線に集中させ、この電流を測定することで各層を流れる電流が測定可能となる。この試験片において、リード線部、層間分離部は厚さ方向へ電気的に絶縁される。この部分は電流負荷部、接地部の中間部である。リード線や層間分離が存在しない Fig. 9 のモデルにおいてもこの部分の電流成分は長手方向 (x 方向) 成分のみであり、板厚方向電流密度はほぼゼロである。よって、リード線、層間分離の寸法を適切に設定することで、Fig. 9 のモデルの電流分布と同様の電流分布を Fig. 10 のモデルにおいても実現できる。

表面近傍の部分である 1 層目と 2 層目の層間部分 ($z=0.19$ [mm]) と、2 層目と 3 層目の層間部分 ($z=0.38$

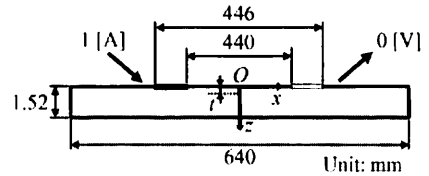


Fig. 9 Electric current analysis model of a finite CFRP plate with an electric current input and output lines.

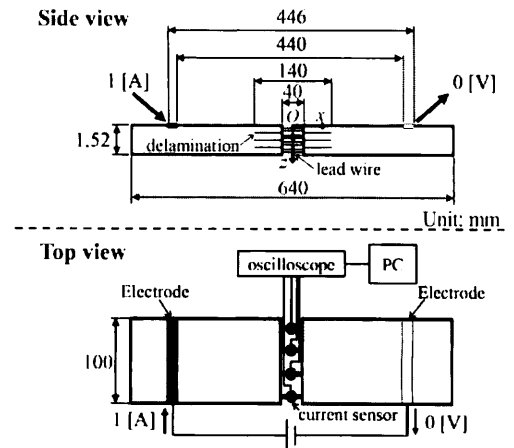


Fig. 10 Schematic representation of the experimental model for electric current of CFRP laminates.

[mm]) における、 z 方向へ流れる電流量を解析により定量的に評価する。そのため Fig. 9 に示す積層板において、表面から距離 l 離れた部分の点線部における z 方向電流密度 i_z の x 方向分布を解析的に求める。解析には式(1)、(6)を使用し、鏡像解を重ね合わせて解を得た。 $z=0.19$ [mm], 0.38 [mm] における x 方向電流密度 i_x の代表値 i_{x0} を使用し、 i_z を規格化したグラフを Fig. 11 に示す。ここで、 i_{x0} は i_x を電極直下から試験片中央部 ($x=-220$ [mm] から $x=0$) まで平均化した値とし、Fig. 11 に示している。横軸が x 座標 [mm]、縦軸が i_z で規格化された i_z である。黒の実線が $z=0.19$ [mm] における分布、黒の破線が $z=0.38$ [mm] における分布を示している。Fig. 11 の縦軸は 10^{-6} であることから、 i_z が

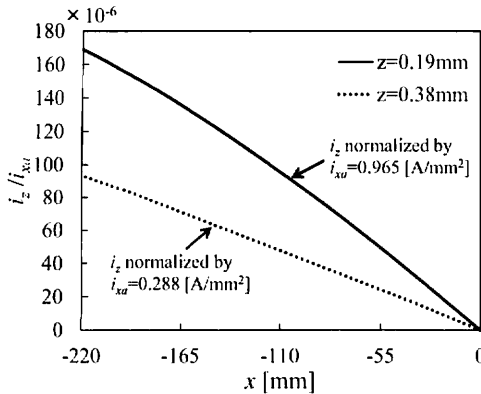


Fig. 11 i_z normalized by i_{x0} at $z=0.19$ [mm] and $z=0.38$ [mm].

Table 3 Electric current which flows through the analysis target area from $x=-70$ [mm] to $x=0$.

Position	$z=0.19$ mm	$z=0.38$ mm
Electric current [mA]	2.15	0.32

i_{x0} と比較して全体として非常に小さい数値であるが、特に中央付近 ($x=0$) では小さいために中央付近の厚さ方向電流は無視できることがわかる。そこで、中央付近の $x=-70$ [mm] から $x=0$ にかけて1層目と2層目の層間、2層目と3層目の層間を流れる電流値を求めるために、 z 方向電流密度 i_z の解析結果を x 方向に積分する。その結果、この部分を厚さ方向に流れる電流量はTable 3となる。1層目と2層目の層間を流れる電流でも負荷電流値の約0.2%しかない。このため、この部分を層間分離しても電流分布に与える影響はほぼないということがわかる。以上から、 $x=-70$ [mm] から $x=0$ にかけて層間分離し、リード線接続を行う。

リード線長さは40 [mm]とし、層間分離部の長さは各積層板で50 [mm]とした。積層板端部では銅めっき・リード線一体電極を作製した¹²⁾。試験片の積層構成は一方積層 $[0]_s$ と直交積層 $[(0/90)_2]_s$ の2種類である。一方積層板では各層を層間分離したものと、2層1束として層間分離したものの2種類を使用し、直交積層板では2層1束として層間分離したものの1種類を使用する。直交積層板において1層1束で層間分離しないのは、強度上の問題により90°層を1層ずつ分離するのが困難なためである。2層1束として層間分離する場合、積層板端部のリード線接続部は2層が等電位となる。しかし、Fig. 11に示す z 方向電流密度の解析結果よりこの部分

で厚さ方向への電流成分は存在せず電位差が存在しないため、電流分布への影響は小さい。

Fig. 10に試験片の上面図を示す。繊維方向、繊維直交方向の導電率は均質と見なせるためサンプルサイズの影響を受けない。厚さ方向の導電率は実際には不均質であるが、2層以上であれば電気抵抗値が厚さ方向に関して均一であると仮定し実験的に求めている。そこで、試験片全体の寸法は図に示す通り $L 640 \times W 100 \times T 1.52$ [mm] (8層)とした。銅の導電率はCFRPの繊維方向導電率の約 10^3 倍である。そのため、積層板表面に電流負荷用の銅めっき電極をFig. 10のように幅方向全体に作製することで、CFRP内の電流成分は長手方向成分と厚さ方向成分のみを持つ。電流測定にはホール効果を利用する非接触型電流センサ (MCS-SD2537: GRID Inc., HDCC-30mA-D1, HDCC-3mA-D1: 豊光社) を使用し、リード線部に適用する。ホール効果の利用により電流センサは電流分布に影響を与えない。電流センサはオシロスコープ (Picoscope4424: Pico Technology) に接続し、PCに接続することでデータを取得する。負荷電流値は直流1 [A]とし、安定化電源 (PW18-1.3AT: KENWOOD) より負荷する。

3.2 実験結果および解析結果との比較・考察

一方積層板における実験結果をFig. 12と13に、直交積層板における実験結果をFig. 14に示す。Fig. 12では各層を分離した計8層の場合、Fig. 13と14では2層1束として分離した計4つの束の場合としている。横軸は分離した層の束の番号を示し、表面層を含む束を1としている。縦軸は各層の束を流れる電流値 [mA] を示す。図中、Experimentが実験結果を、Analysisが解析結果を示している。数値はTable 4にまとめて記載している。

Fig. 12より、各層を分離した場合の各層を流れる電流値の実験値と解析値は非常に一致を示している。2.4で示したように、積層板厚さ方向導電率はばらつきが大きいいため、測定結果にばらつきがある。また、各層分離することの影響が非常に小さいことが正しい考察であると判断できる。

Fig. 13より、2層1束として分離した際の各束を流れる電流値の実験値と解析値は非常に一致を示している。1層1束として分離した実験結果を2層ずつ足し合わせた値は、2層1束として分離した結果とほぼ等しい。したがって、2層1束として分離することの電流分布へ与える影響は非常に小さいことがわかる。

Fig. 14より、直交積層板においても2層1束として分

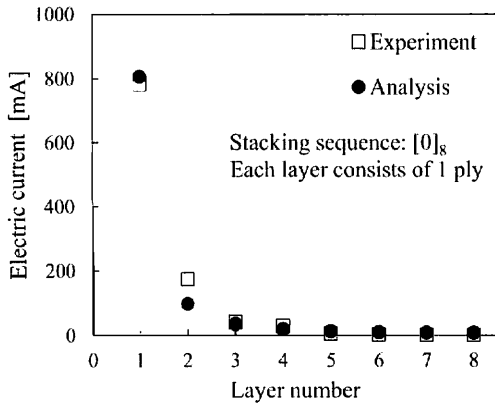


Fig. 12 Comparison of experiment and analysis results of electric current flowing at each separated ply which consists of one ply of unidirectional CFRP $[0]_8$.

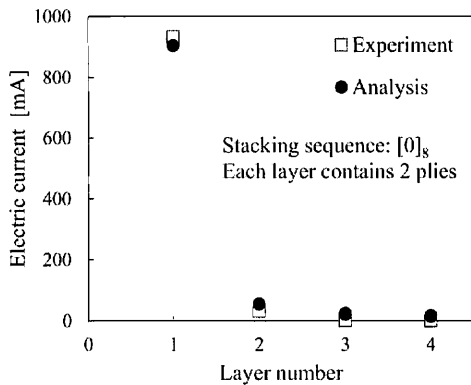


Fig. 13 Comparison of experiment and analysis results of electric current flowing at each separated ply which consists of two plies of unidirectional CFRP $[0]_8$.

離した際の各束を流れる電流値の実験値と解析値がよい一致を示している。この結果から、電位差の減少を加味した等価導電率を導入した直交積層板における電流分布解析手法は、実際のCFRPにおいても有効であると言える。

以上の結果の比較を通して電流解析手法は、厚さ方向に不均質性のあるCFRP積層板に対しても有効であるということが実験的に示された。よって、電流解析においてCFRPを均質な直交異方性材料とする仮定は正しいということが実験的に示された。

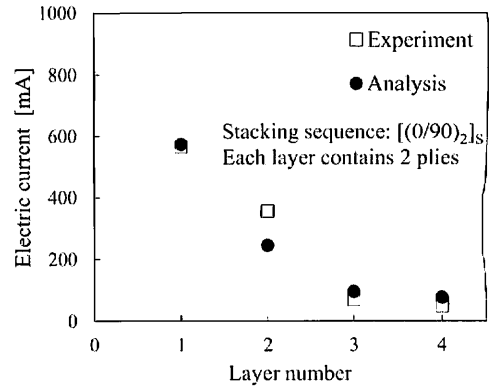


Fig. 14 Comparison of experiment and analysis results of electric current flowing at each separated ply which consists of two plies of cross-ply CFRP $[(0/90)_2]_s$.

Table 4. Comparison of experiment and analysis results of electric current flowing at each separated layer.

Stacking sequence	Layer number	Experiment [mA]	Analysis [mA]
1 $[0]_8$	1	782.11	806.93
	2	174.00	97.45
	3	41.31	35.29
	4	29.22	19.06
	5	5.07	12.63
	6	2.23	9.58
	7	0.50	8.06
	8	0.37	7.41
2 $[0]_s$	1	932.12	904.38
	2	31.47	54.35
	3	0.53	22.21
	4	0.04	15.46
3 $[(0/90)_2]_s$	1	564.63	573.26
	2	355.16	243.94
	3	69.39	94.80
	4	47.72	76.54

4. 結 言

板厚方向の導電率が不均質性を有するCFRPに対して、均質な直交異方性材料と仮定し導かれた電流解析手法の有効性を実験にて検証を行った。ただし、実験条件と解析条件を一致させるために解析手法を電流負荷部・接地部が線である場合にも有効な手法へと拡張した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 電流負荷部・接地部が線の場合、ポテンシャル関数を線にわたって積分することで電流分布関数を提案した。
- (2) 電流分布へ与える影響が小さく、各層を流れる電流量を実験的に求める試験片・実験手法を提案した。
- (3) 厚さ方向不均一なCFRP積層板に対して、均一異方性材料として扱う方法は少なくとも2層以上の積層板に関しては正しい仮定であることが実験的に示された。

参 考 文 献

- 1) M. Gagne & D. Therriault : *Progress in Aerospace*, 64 (2014), 1-16.
- 2) 平野義鎮, 勝俣慎吾, 岩堀 豊, 轟 章 : 日本複合材料学会誌, 35, 4 (2009), 165-174.
- 3) P. Feraboli & M. Miller : *Composites: Part A*, 40 (2009), 954-967.
- 4) T. Ogasawara, Y. Hirano & A. Yoshimura : *Composites: Part A*, 41 (2010), 973-981.
- 5) G. Abdelal & A. Murphy : *Compos. Struct.*, 109 (2014), 268-278.
- 6) I. Taketa, T. Okabe & A. Kitano : *Composites: Part A*, 40 (2009), 1174-1178.
- 7) 轟 章 : 日本航空宇宙学会論文集, 59, 688 (2011), 132-139.
- 8) J. Katz & A. Plotkin : *Low-Speed Aerodynamics from Wing Theory to Panel Methods*, Cambridge University Press, Singapore (1991).
- 9) 轟 章, 荒井政大 : 日本複合材料学会誌, 39, 3 (2013), 106-112.
- 10) A. Todoroki : *Adv. Compos. Mater.*, published online on 06 Dec. 2014.
- 11) 轟 章 : 日本航空宇宙学会論文集, 59, 692 (2011), 252-257.
- 12) A. Todoroki, Y. Samejima, Y. Hirano, R. Matsuzaki & Y. Mizutani : *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 4, 1 (2010), 1-11.