研究論文

大電流パルス印加時の CFRP の抵抗変化および
ジュール加熱特性尾崎良太郎^{*1}, 川又 達也^{*1}, 山崎 良介^{*1}, 黄木 景二^{*2}, 門脇 一則^{*1}

(2016 年 1 月 4 日受付)

Resistance and Thermal Profile of Carbon Fiber Reinforced Plastic after
Applying kA Current PulseRyotaro OZAKI,^{*1} Tatsuya KAWAMATA,^{*1} Ryosuke YAMASAKI,^{*1}
Keiji OGI^{*2} and Kazunori KADOWAKI^{*1}

(Received January 4, 2016)

Abstract: Resistance variation and Joule heating of carbon fiber reinforced plastic after applying a large electric current pulse are investigated. The current has a pulse width of several microseconds and the typical peak value is 2 kA. A double-digit decrease in resistance of a cross-ply laminate is observed after applying the kA current pulse. The decrease in resistance of the cross-ply laminate can be controlled by varying the charge voltage in the pulse generator circuit. In the case of DC current Joule heating, the direction of heat conduction at the surface is parallel to the fiber direction of the cross-ply laminate. However, the kA current pulse locally heats in the vicinity of the electrode and the thermal profile is different from the DC current.

Key words: CFRP, Current pulse, Joule heating, Resistance, Thermal profile

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック複合材料 (carbon fiber reinforced plastic; CFRP) は, 軽量かつ高強度な材料として各種産業で使用されている。CFRP はその優れた機械特性を持つ反面, 機械加工が難しいという問題を抱えている。現在, 製造工程における CFRP の主な加工法として, 切削加工が挙げられるが, レーザー, ウォータージェットなどの加工法も一部適用されている。いずれの加工法においても, 加工品質の向上, 加工時間の短縮化, 低コスト化などが課題となっている。例えばレーザー加工は比較的加工時間が短い, 光の吸収を利用するた

め, 肉厚 CFRP 材への適用は難しい。またウォータージェット加工は湿式であり, 乾燥工程を要する。そこで, 今後 CFRP に対して, 機械的なせん断加工が適用できれば, 既存のパンチ加工装置などを利用できるため低コスト化・時間短縮化が期待できる。しかしながら, 実用化に向けては, 加工品位の確保と工具寿命の長期化という課題をクリアする必要がある。これまで黄木らは CFRP をせん断加工することを目的として, 工具形状および温度・クリアランスなどの加工条件の最適化に関して研究を行ってきた¹⁻³⁾。そのなかで, 最適温度条件下では, 加工に要するせん断応力が低下し, 層間はく離量が低減することが明らかとなっている³⁾。しかしながら, 一般的なヒーターやヒートガンを用いた加熱では, CFRP 被加工物 (以下, ワーク) 全体が加熱されるため, いわゆる熱ダレ変形 (shear drop deformation) の抑制が困難である。これに対する解決法の一つとして, 加工部周辺だけを局所加熱する方法が考えられる。CFRP は比較的高い導電性を有するため, 熱伝導率も高く, ヒーターやヒートガンなどによる外部加熱ではワークの局所加熱が難し

^{*1} 愛媛大学大学院理工学研究科電子情報工学専攻
Department of Electrical and Electronic Engineering
and Computer Science, Graduate School of
Science and Engineering, Ehime University

^{*2} 愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻
Department of Engineering for Production and
Environment, Graduate School of Science and
Engineering, Ehime University

い、そこで著者らは、CFRP 内部に流れる電流を制御することによって、ジュール加熱時の温度制御を行うことを考えた。これまでに CFRP の電気特性に関する研究は数多く行われてきている。特に、一方向強化プリプレグからなる CFRP 積層板の場合、電気的異方性が大きい上に、積層構造であるため、その電気特性は複雑である^{4~7)}。最近では、導電率異方性などの物性面での研究だけでなく、雷撃損傷なども研究されている^{8,9)}。また、ジュール発熱や電気ポテンシャル法を利用した CFRP の損傷検知法が提案されている^{10,11)}。

一方、近年、電気エネルギーの新たな利用方法として、電力を極わずかな時間に集中させて投入するパルスパワー技術が注目されている^{12~16)}。パルス化された電力（パルスパワー）を極めて短い時間に物質に印加することにより、従来の交流や直流などで同じ電力を印加した場合では得られなかった物理状態が実現できる。例えば、電気穿孔（エレクトロポレーション）法では、パルスパワーを生物や植物などの細胞に印加することにより、細胞膜に小孔を開けることができる¹³⁾。これらの手法は、薬品や遺伝子を直接細胞に導入できるため、医療・バイオへの応用が期待されている。また、パルス化された電圧は、窒素酸化物（NO_x）や揮発性有機化合物（VOC）などの分解にも有効であることが示されている^{14~16)}。

本研究では、CFRP ワークの温度を局所的に加熱する方法を確立するために、大電流パルス通電法の適用可能性を調べた。初めに繰り返しパルス印加による CFRP の電気抵抗変化を測定した。次に、パルス通電による CFRP の損傷状態を観察した。最後に、大電流パルス印加と直流電流印加による加熱プロファイルの差異を議論した。

2. 実験方法

2.1 試験片

180°C硬化型炭素繊維強化エポキシ複合材料（T700SC/2592R、東レ）からなるクロスプライ積層板をホットプレス法により作製した。試料の繊維体積含有率は 60%（カタログ値）である。試験片の積層構成は [0/90]_s、寸法は 60 mm×60 mm×0.6 mm である。

2.2 電流パルス発生装置

本実験では Fig. 1(a) に示す RLC 直列回路を用いて、CFRP に電流パルスを印加した。CFRP は、ステンレス製の球電極（φ10 mm）で挟んで回路に組み込んだ。Fig. 1(b) は、実際に回路に取り付けられた CFRP を示している。電流パルスは、容量 0.5 μF（許容差 ±10%）の高

Fig. 1 (a) Circuit for generating kA current pulse.
(b) Electrode configuration.

電圧用コンデンサ（31150, General Atomic）を直流高圧電源（HAR-6R200, 松定プレジジョン）で充電し、サイリスタスイッチ（HTS320-800-SCR, BEHLKE）によって放電させることにより発生させた。サイリスタスイッチは高速な繰り返し動作が特徴であり、本実験では CFRP に 10 pps（pulse per second）で電流パルスを印加した。電流パルス発生の手順の詳細は、以下の通りである。

はじめにスイッチを開いた状態で、直流電源で容量 0.5 μF のコンデンサを充電する。このとき、コンデンサが完全に充電されるまで回路に電流が流れるが、充電が完了すると、それ以降はスイッチを閉じるまで回路に電流（充電電流）は流れない。なお、この充電電流の値は、500 kΩ の R₁ があるため小さい。次に、コンデンサが充電された状態でスイッチを閉じると、コンデンサに溜まった電荷が一気に回路に流れる。このとき、コンデンサから流れる電流は CFRP と R₂ で消費されジュール熱となる。ここで、R₃ は CFRP 試験片が脱落した場合にも閉回路を保つための保護抵抗である。

放電時の回路方程式は、コンデンサの容量を C、コンデンサの電荷を $q(t)$ 、CFRP と高電圧用抵抗 R₂ の合成抵抗を R、回路に存在するインダクタンス成分を L とすると、

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0 \quad (1)$$

と書ける。ここで、電流 $i(t)$ と $q(t)$ には、 $i(t) = \frac{dq}{dt}$ の関係が成り立っている。この式の解は各素子の値によって、過減衰 ($R^2 > 4L/C$)、臨界減衰 ($R^2 = 4L/C$)、不足減衰 ($R^2 < 4L/C$) の3つの場合に分けられる。不足減衰の場合、初期条件を $q(0) = CV$, $i(0) = 0$ とすると、 $t > 0$ において、Fig. 1(a) の矢印の方向に流れる電流 $i(t)$ は、

$$i(t) = CV \frac{\alpha^2 + \gamma^2}{\gamma} e^{-\alpha t} \sin \gamma t = 0 \quad (2)$$

となる。ここで、 V は充電電圧の大きさ、 $\alpha = \frac{R}{2L}$, $\gamma = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ である。本実験では、サイリスタスイッチに逆方向の大きな電流が流れることを防ぐために、不足減衰の条件で電流パルスが発生させた。また、サイリスタスイッチと並列に接続されている還流ダイオード (FDA240-300, BEHLKE) は、予期せず大きな電流が逆方向に流れた際に、スイッチを守る役割を果たす。

2.3 抵抗値の測定

電流パルス印加による CFRP の抵抗値の変化を測定するために、デジタルマルチメーター (DMM4050, Tektronix) を用いた。パルス印加前後において、デジタルマルチメーターのリード線を球電極に接続して抵抗値を2端子法で測定した。本測定系では、CFRP の抵抗以外に、接触抵抗やリード線の内部抵抗なども抵抗値として含まれる。そのため、CFRP を測定系に取り付ける前に、球電極と球電極を接触させた状態での抵抗値を測定し、その値を接触抵抗およびリード線の内部抵抗の和とみなした。抵抗の実測値から接触抵抗と内部抵抗の和を差し引いた値を CFRP の抵抗値と定義した。また、抵抗値は球電極の接触状況にも影響されるため、圧力がかからないように電極を接触させた後は試験終了まで電極を動かさず、パルス印加前後で電極位置による抵抗値のバラつきや接触抵抗の変化などの影響がないように注意した。

3. 実験結果と考察

3.1 電流パルス

充電電圧 5 kV の電流パルス波形を Fig. 2 に示す。実線は実験値を示しており、破線は(2)式でフィッティングした結果である。それぞれの素子の値を $R = 2.3 \Omega$, $L = 1.15 \mu\text{H}$, $C = 0.48 \mu\text{F}$ としたとき、計算結果は実験結果と良い一致を示した。 R は $R_2 (1 \Omega)$ と CFRP の抵抗値の直列接続であることから、このときの CFRP の抵抗は 1.3Ω と見積もられる。この抵抗値については、次節で議論する。実際、電流パルスの立ち上がり時間は $0.6 \mu\text{s}$ 、パ

Fig. 2 Measured and calculated kA current pulses.

(a)

(b)

Fig. 3 Resistances of cross-ply specimens versus number of applied pulse for various charge voltages during (a) 10 cycles and (b) 1,000 cycles.

ルス幅は $1.8 \mu\text{s}$ であり、数マイクロ秒という非常に短い時間に、CFRP に大電流が流れている。一方、(2)式からもわかるように、電流パルスの最大値は充電電圧 V を変えることにより調整できる。

3.2 抵抗値の変化

CFRP に電流パルスを印加したときの抵抗変化を調

べるために、充電電圧と印加回数を変えながら CFRP の抵抗値を測定した。Fig. 3 に電流パルス印加に伴い変化する CFRP の抵抗値を示す。まず、Fig. 3(a) をみると、電圧印加前は、平均で約 380Ω であった抵抗値が、1 回の電流パルスの印加によって、1 桁から 2 桁下がっていることがわかる。なお、本実験では桁が変わるほどの大きな抵抗値の変化がみられるため、2 端子法でも十分な精度をもっている。また、2.3 節でも記述したように、CFRP に取り付けた電極位置は固定しており、電極位置による抵抗変化の影響は無視できるため、データの再現性が確認されている。

Fig. 3(a) より、CFRP の抵抗値は充電電圧の大きさに依存して小さくなっていることがわかる。例えば、充電電圧 5 kV での電流パルスの印加では、 1.56Ω まで抵抗値が下がっている。この抵抗値の低下は、1 回目の電流パルス印加により CFRP のマトリクスである絶縁体の樹脂が炭化し、樹脂部の導電性が増したためであると推測される。なお、この抵抗値は、3.1 節の電流パルスの波形から見積もった抵抗値とほぼ一致している。

Fig. 3(a) と 3(b) にみられるように、電流パルスを 1 回印加した後に、繰り返し印加すると、充電電圧が 1 kV より高い場合は、わずかに抵抗が下がったが、充電電圧が 1 kV 程度では、繰り返し印加による抵抗変化はほとんど観測されなかった。これは、以下のように推測される：まず 1 回目のパルス印加により、CFRP の樹脂部が炭化し、抵抗が大きく下がる。次に、2 回目以降の電流パルス印加では、電流は抵抗が低いところを流れる性質があるため、1 回目のパルス印加で抵抗が下がった部分に電流が集中して流れる。その結果、CFRP のさらに広い領域の樹脂が炭化することはない。つまり、1 回目の

電流パルス印加により、CFRP に導通パスが形成され、2 回目以降の電流パルスは、1 回目に形成された導通パスに沿って優先的に流れる。

一方、電流パルスによって低下された CFRP の抵抗値の充電電圧依存性を Fig. 4 に示す。図中のプロットは、パルスを 1,000 回印加した時点での CFRP の抵抗値である。破線は -1 の傾きを示しており、CFRP の抵抗値は充電電圧に反比例して低下する。これは、充電電圧を変えることによって CFRP の抵抗を任意に変えることができることを示している。

3.3 損傷の観察

CFRP にパルス印加した後の、表面および断面の損傷状態をそれぞれ、実体顕微鏡 (SZX9, OLYMPAS)、光学顕微鏡 (BX60M, OLYMPAS) を用いて観察した。充電電圧 1 kV および 5 kV の電流パルスを 1 回印加した後の損傷の様子を調べた。

Fig. 5(a) は、充電電圧 1 kV で電流パルスを 1 回印加した後の表面の様子である。画像の中央部が球電極を設置した箇所であり、黒く焦げたような痕跡がみられる。この位置の断面を Fig. 5(b) に示す。CFRP の内部まで損傷している様子はみられなかった。一方、Fig. 5(c) は、充電電圧 5 kV で電流パルスを 1 回印加した後の表面の様子である。明らかに、充電電圧が 1 kV の場合よりも、損傷が大きい。ここで注目すべき点は、表面の損傷が、CFRP の表面層の繊維方向ではなく、繊維に対して垂直な方向に広がっていることである。電流パルスを印加した際、CFRP に流れる電流は繊維方向に流れる。つまり、この表面の損傷は、CFRP 中を流れる電流が大きくなったために発生した訳ではない。この損傷の原因は、電極と CFRP の電位差により生じた放電である。上部電極に $+1 \text{ kV}$ 、下部電極に -1 kV 印加したときの CFRP の電位分布を計算した結果を Fig. 6 に示す。計算モデルの寸法は実験と同様に $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ とした。電位分布はラプラス方程式を差分法で解くことにより求めた。差分計算におけるメッシュサイズは、 $\Delta x = \Delta y = 0.5 \text{ mm}$ および $\Delta z = 0.01 \text{ mm}$ である。また、繊維方向、繊維直交方向および厚さ方向の抵抗率はそれぞれ $1.1 \times 10^{-4} \Omega \text{m}$ 、 $1.2 \times 10^{-1} \Omega \text{m}$ 、および $1.6 \Omega \text{m}$ とした。計算結果からわかるように CFRP の繊維方向は導電性が高いため、中心の電極位置 a 点から繊維方向には向かって電位は緩やかに低下する。そのため電極位置 a 点と繊維方向に沿って離れた点 b との電位差 V_{ab} は小さい。しかしながら、繊維直交方向は導電性が低く、CFRP の表面の電位は急激に小さくなる。そのため、電極位置 a 点

Fig. 4 Charge voltage dependence of resistance of cross-ply specimen after 1,000 cycles.

Fig. 5 Surface and cross-section of cross-ply specimen after one current pulse applied. Charge voltage is 1 kV in (a) and (b). Charge voltage is 5 kV in (c) and (d).

Fig. 6 Calculated potential profile of the top surface of cross-ply specimen.

と繊維直交方向に沿って離れたc点との電位差 V_{ac} は非常に大きい。以上の結果、電極とCFRP間の放電は繊維直交方向に生じたと推測できる。この繊維直交方向の損傷は、後述する針-平板電極を用いた場合にも同様に観測されている。また、パルス印加回数が1回であるにも関わらず、電極位置から繊維直交方向に両側に広がって見えるのは、1回のパルス印加中に複数回の放電が生じたためである。Fig. 2の電流波形に複数回の放電電流が観測されない理由は、電極が導体であるCFRPに接しているため、電極からCFRPに直接流れる電流が放電電流と

比較して非常に大きいためであると考えられる。

3.4 ジュール加熱

3.2節の結果より、CFRPへの電流パルス印加によって、電極間のCFRPの抵抗値が低下することが明らかとなった。次に、電流パルスとCFRPで発生したジュール熱分布を調べるために、サーモグラフ (Testo875i, Testo) でCFRPの温度分布の時間変化を測定した。サーモグラフの測定範囲は0~350°C (精度 $\pm 2^\circ\text{C}$) であり、画素数は320 $\times$ 240ピクセル、フレームレート33 Hzである。Fig. 7(a)は、10 ppsで電流パルスを繰り返し10秒間印加したときに撮影したサーモグラムの測定例であり、電極直下が最も温度が高い。Fig. 7(b)は、電流パルス印加開始から10秒後のサーモグラムにおいて、最高温度と室温の差を横軸に充電電圧を取りプロットしたものである。CFRPの温度が、充電電圧にほぼ比例して上昇している。

充電電圧の増加にともない温度が上昇することは、当然の結果であるが、ここでは特徴的な点である電流パルス印加時の温度の広がり方について議論する。電流パルスによる加熱は、以下に示す通り、一般的な電流を加える場合と異なる。これまでの実験で用いた球-球電極では電極直下の温度が観測できない。そこで次の実験では、温度分布をより明瞭に観測するために針-平板電極を用いた。Fig. 8(a)は、CFRPに直流電源をつなぎ、6 Vの

Fig. 7 (a) Thermogram of cross-ply specimen with application of kA current pulses after 10 seconds. (b) Charge voltage dependence of temperature rise.

直流電圧を 10 秒間印加したときのサーモグラムである。ジュール熱が CFRP の繊維方向に広がっていることが確認できる。一方, Fig. 8(b) は, 充電電圧 2.5 kV として 10 pps で電流パルス を 10 秒間繰り返し印加したときのサーモグラムである。いずれの結果も, 針電極付近の温度は 100°C であるが, 温度の広がり方が異なる。すなわち, Fig. 8(a) の直流電圧を印加した場合は, CFRP の繊維方向に沿うような形で温度が上昇するが, Fig. 8(b) の電流パルスの場合は, 繊維方向にはあまり広がらず, 電極近傍での温度上昇が観測される。これらのサーモグラムから電極位置をゼロ点として, 繊維方向の温度プロファイルを抽出したものを Fig. 9 に示す。この図からも直流電流とパルス電流ではジュール加熱の広がりが異なることが確認できる。この理由として, 電流パルス印加によって電極付近の CFRP の樹脂部が炭化し, 導電特性および熱伝導特性が変化したのではないかと推察した。そこで, 温度分布の変化が, 印加電流の波形による違いではなく, CFRP の物性変化に起因することを検証するために, 電流パルス印加後の CFRP を電源につなぎ 6 V の直流電圧を加える実験を行った。この実験によって得

Fig. 8 Thermograms of cross-ply specimens with application of different type of current after 10 seconds: (a) DC current of 1.05 A, (b) kA current pulse, and (c) DC current of 1.05 A after kA current pulse was applied.

Fig. 9 Surface temperature profiles for the fiber direction on the needle electrode.

られた結果が、Fig. 8(c) に示すサーモグラムである。Fig. 8(a) と同じ直流電圧を印加しているにも関わらず、Fig. 8(a) と同じ温度分布とはならず、Fig. 8(b) と似たジュール熱の広がり方を示した。これらの結果から、印加電流の波形ではなく、大電流パルス印加による電極近傍のCFRPの樹脂部の炭化がジュール加熱のプロファイルに大きく寄与していることが確認された。このような加熱プロファイルの変化は、コンデンサに蓄えられた電荷を微弱な電流として長時間かけて流しても得ることはできない。すなわち、コンデンサに蓄えられたエネルギーを極めて短い時間に電流パルスとしてCFRPに印加するパルスパワー技術によってはじめて実現できる。以上の結果は、直流や交流であればCFRPの繊維方向に広がるジュール加熱分布を、大電流パルス印加により抑制できることを示唆している。

4. 結 言

CFRPに大電流パルスを印加したときの抵抗値の変化およびジュール加熱特性について調べることで、以下の知見が得られた：

- 1) 大電流パルスをCFRPに印加することによって、CFRPの抵抗値は1桁から2桁低下する。
- 2) 電極間の抵抗値はパルスを発生させるためのコンデンサの充電電圧によって制御できる。パルス印加後の抵抗値は充電電圧に反比例する。
- 3) 大電流パルスをCFRPに印加すると、CFRP表面に繊維直交方向に広がる損傷が発生する。
- 4) 大電流パルスを用いてCFRPを加熱すると充電電圧に比例して温度上昇させることができる。
- 5) ジュール加熱する際、直流電流は繊維方向に加熱されるが、大電流パルスでは電極近傍が加熱される。また、パルス印加後に直流電流で加熱すると、電流パルス印加時のプロファイルと似た結果が得られ、繊維方向への熱の広がり方は抑制される。

今後、以上の知見を発展させて、繊維配向に依存しないCFRPの局所加熱技術を開発したい。

本研究の一部は、工作機械技術振興財団第35次試験研究助成A「パルス大電流を用いたCFRPの高速・低損傷せん断切断技術の開発研究」の支援を受けて実施された。

参 考 文 献

- 1) N. Nakamura, K. Ogi, A. Ota, S. Nakata & K. Suma : *Key Engineering Materials*, **656-657** (2015), 347-352.
- 2) 松田伸也, 黄木景二, 矢代茂樹 : 日本複合材料学会誌, **41** (2016), 13-22.
- 3) K. Ogi, S. Yashiro, N. Nakamura, S. Nakata & K. Suma : *Proceedings of ICCM-20* (2015), 4301-3.
- 4) 黄木景二, 高雄善裕 : 日本複合材料学会誌, **26** (2002), 228-234.
- 5) K. Ogi & Y. Takao : *Compos. Sci. Technol.*, **65** (2005), 231-239.
- 6) 轟 章 : 日本航空宇宙学会論文集, **59** (2011), 132-139.
- 7) 轟 章 : 日本航空宇宙学会論文集, **59** (2011), 252-257.
- 8) 平野義鎮, 勝俣慎吾, 岩堀 豊, 轟 章 : 日本複合材料学会誌, **35** (2009), 165-174.
- 9) 野呂田竜史, 平野義鎮, 松崎亮介, 小笠原俊夫 : 日本複合材料学会誌, **41** (2015), 149-158.
- 10) 轟 章, 鈴木洋之, 小林英男, 中村春夫, 島村佳伸 : 日本機械学会論文集A編, **64** (1998), 1654-1659.
- 11) 高橋航圭, 轟 章, 松崎亮介 : 日本機械学会論文集A編, **74** (2008), 1565-1572.
- 12) H. Akiyama, T. Sakugawa, T. Namihira, K. Takaki, Y. Minamitani & N. Shimomura : *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **14** (2007), 1051-1064.
- 13) S. Katsuki, N. Nomura, H. Koga, H. Akiyama, I. Uchida & S. Abe : *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **14** (2007), 663-668.
- 14) 門脇一則, 木谷 勇 : 電気学会論文誌A, **130** (2010), 871-878.
- 15) K. Kadowaki, Y. Suzuki, H. Ihori & I. Kitani : *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, **127** (2007), 553-559.
- 16) 門脇一則, 森 侑司, 尾崎良太郎 : 電気学会論文誌A, **135** (2015), 473-480.