

## 211 電気抵抗変化法を用いた CFRP 積層板の無線はく離検出

## Wireless detection of internal delamination cracks for carbon/epoxy composite using electrical resistance method

○準 松崎 亮介 (東工大院)

正 轟 章 (東工大)

Ryosuke MATSUZAKI, Graduate Student of Tokyo Institute of Technology

Akira TODOROKI, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayam, Meguro-ku, Tokyo

For a rotating composite component such as a helicopter blade, delamination of composite laminates causes low reliability. Since it is difficult to detect the delamination of rotating component in-service with a wired system, wireless detecting system is demanded to improve the reliability. In the present study, the wireless system for detecting the delamination is proposed. This method adopts an electrical resistance change method and an oscillating circuit to transmit the information of the delamination. Since this system uses the composite structure itself as a sensor and the oscillating circuit is very small, it is applicable for a rotating component. The electrical resistance change and oscillating frequency change due to the delamination creation is experimentally measured by using carbon/epoxy specimen. As a result, the method can successfully detect the embedded delamination and estimates the size of delamination wirelessly.

**Key words:** Composite Material Delamination, Electric Resistance, Wireless, Oscillating Frequency, Rotor.

## 1. 緒 言

航空宇宙分野をはじめとして、多くの分野で金属よりも優れた比強度、比剛性を持つ CFRP が利用されている。しかし CFRP 積層板は層間強度が弱く、小さな衝撃でも容易にはく離が生じてしまう欠点を有しており、積層板の強度を著しく低下させてしまう。特に CFRP 製のヘリコプターローター<sup>(1)</sup>やローターシャフト<sup>(2)</sup>では、稼動中ははく離発生により強度低下を引き起こすことが問題となっているが、回転機器であるためはく離検知は困難である。

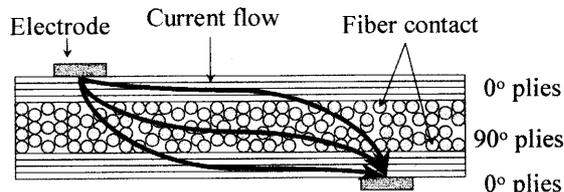
CFRP 積層構造物の信頼性確保のため、層間はく離を稼動中または点検中に検出する知的複合材料の研究が行われている<sup>(3)-(6)</sup>。知的複合材料としては、光ファイバーを構造内部に埋め込み、内部のマトリックス割れや層間はく離を検出する試みを実施されているが<sup>(3)</sup>、埋め込みによる強度低下、成型法、無線送信などの問題がある。

著者らは、層間はく離で生じる CFRP 積層板内部の電気抵抗変化を測定する電気抵抗変化法を用いて、層間はく離位置と寸法を定量的に同定する知的構造開発を実験的に実証した<sup>(4)</sup>。この手法は炭素繊維をセンサとして利用することで、安易にかつ安価に適用可能である。しかし、有線での測定に限られており、実機ローターのはく離検出には、無線通信方法の開発、センサの小型化、環境温度が及ぼす影響が問題となる。これまでに MEMS (microelectromechanical system)<sup>(5)</sup> や SAS (surface-antenna-structure)<sup>(6)</sup>を用いて CFRP のひずみを無線測定する手法が提案されているが、内部のはく離を無線検出する方法については、未だ十分な研究が行われていない。

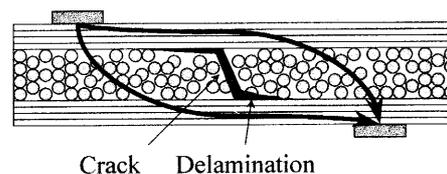
本研究では、はく離による CFRP 構造自体の電気抵抗変化をセラミック発振回路により発振周波数変化に変換し、無線ではく離を検出する手法を提案する。本手法では、はく離検出対象の構造自体を利用し、さらに発振回路も非常に小型であるため、ヘリコプターローター等の回転機器に適している。本研究では CFRP 梁試験片の層間はく離を用いて本手法の有効性を実験的に検討した。さらに実機環境で重要な環境温度が、電気抵抗・発振周波数に及ぼす影響について検討した。

## 2. モニタリングシステム

CFRP では、炭素繊維が導電性を有するが、エポキシ樹脂は導電性がない。繊維方向の導電性は、巨視的には炭素繊維の断面積比に比例した導電性があるとみなせる。また、繊維と垂直方向や積層方向も、隣接繊維と接触するネットワーク構造をなすため、繊維方向と比較して小さいが導電性を有する。炭素繊維と垂直方向で接触するネットワークは、マトリックス割れが発生することにより切断される。同様に、炭素繊維が上下層で接触するネットワークは、層間にはく離が発生することによって切断される。そのため積層板の厚さ方向に流れる電流は層間はく離を伴うマトリックス割れにより径路を遮断されるため、電気抵抗は増加する。著者らは航空宇宙機などの薄板シェル構造の内面に適用するため、積層板の片面のみに電極を配置する手法<sup>(4)</sup>を提案しているが、体積含有率が高い積層板の場合、厚さ方向に流れる電流が少なく<sup>(7)</sup>、はく離検知が困難である。そこで厚さ方向に流れる電流を増加させるため、図 1(a)に



(a) Electrical network structures of fiber in CFRP



(b) Breakage of electrical network with a delamination.

Fig. 1 Schema of practical structure of carbon/epoxy composite.

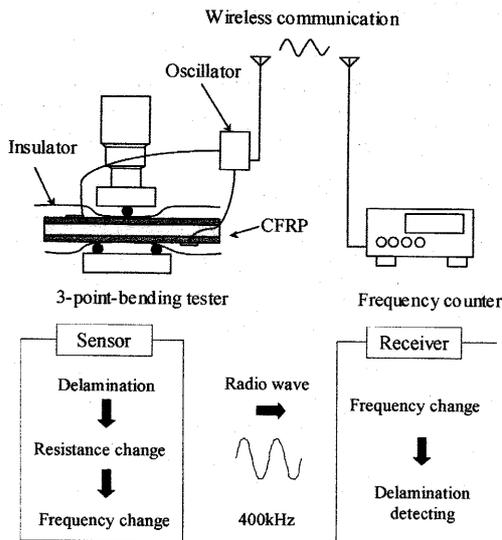


Fig. 2 Schematic representation of wireless delamination-detecting system using electrical resistance change.

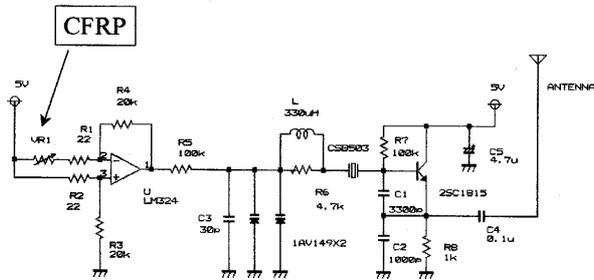


Fig. 3 Circuit diagram of the sensor circuit.

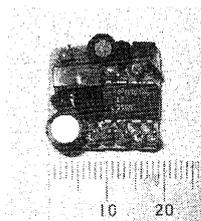


Fig. 4 Appearance of the sensor circuit.

示すように積層板の両面に電極を配置した。はく離が発生した場合、繊維接触のネットワークが切断され電極間の電流経路が減少するため(図1(b)),電極間電気抵抗は増加する。

本研究では、このはく離発生に起因する電極間の電気抵抗変化を利用して、はく離発生の検出を行う。この手法では、CFRP 自体がセンサとなるため、新たにセンサを埋め込む必要がなく、CFRP 自体の剛性低下を引き起こさない。

はく離発生に伴う電気抵抗変化を無線で送信するシステムを図2に示す。システムはCFRP 表面上の電極を発振回路に接続したセンサモジュールと受信アンテナを接続した周波数カウンタから構成される。

本研究で用いたセンサ回路図(図3参照)は差動増幅回路と発振回路部から構成されている。差動増幅回路は二つの入力信号の電位差を増幅する回路であり、出力電圧  $V_0$  は次式となる。

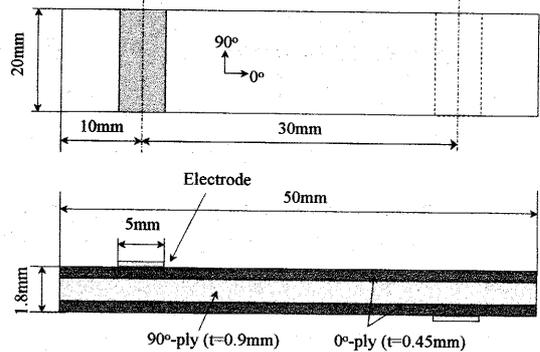


Fig.5 Specimen configuration

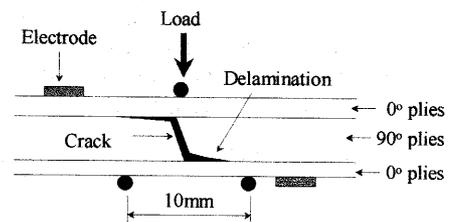


Fig. 6 Generation of a delamination crack by 3-point-bending test.

$$V_o = \frac{R_4}{R_1} (V_{s2} - V_{s1}) \quad (1)$$

ここで  $R_1$ ,  $R_4$  は図3中の抵抗素子  $R_1$ ,  $R_4$  の抵抗値であり、 $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  はそれぞれ抵抗  $R_1$ ,  $R_2$  への入力信号電圧を示す。差動増幅回路では  $R_1=R_2$ ,  $R_3=R_4$  となり、本研究では  $R_1=R_2=24 \Omega$ ,  $R_3=R_4=200 \text{ k}\Omega$  を使用し、電位差 ( $V_{s1}-V_{s2}$ ) を約 833 倍に増幅する。

CFRP は差動増幅入力の前直前(図3中  $VR_1$ )に取り付け、CFRP の電気抵抗変化による電圧変化を差動増幅回路に入力し増幅させる。CFRP (抵抗値  $R_{C1}$ ) を接続したときの  $V_0$  は次式となる。

$$V_o = \frac{5R_4R_{C1}}{(R_1 + R_4)(R_1 + R_{C1})} \quad (2)$$

ここで  $R_1$ ,  $R_4$  は定数であり、CFRP の抵抗値  $R_{C1}$  の増加に伴い出力電圧  $V_0$  は増加する。

発振回路はセラミック振動子を利用したコルピッツ型発振回路である。この回路は可変容量ダイオードの電気容量の増加に伴い発振周波数は減少する。一方、可変容量ダイオードの電気容量は負荷電圧増加に伴い減少する。つまりCFRP はく離により電気抵抗が増加すると、差動増幅回路の出力電圧は増加、可変容量ダイオードの電気容量値は減少するため、発振周波数は増加する。

セラミック発振回路はCR, LC 発振回路と比較して安定した発振周波数が得られることが可能であり、調整不要・安価である。また、使用したセラミック発振回路はIC回路を用いず、主にトランジスタ1つとセラミック発振子1つで構成されセンサ自体では演算処理を持たずに、電気抵抗変化を発振周波数に変換しアナログデータのまま無線送信するためセンサの小型化が可能である。実際のセンサ形状

(図4)は長さ20mm,幅15mm,高さ10mm,重量4gと小型・軽量であり、既存構造への設置にも大きな影響を及ぼさない。

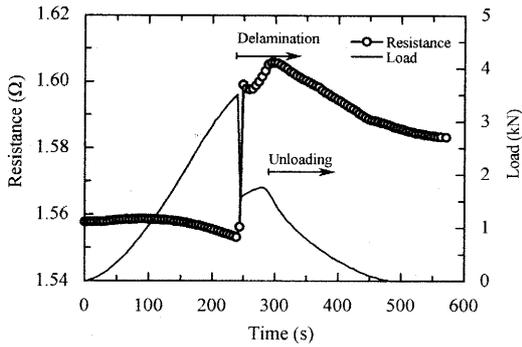


Fig. 7 Measured resistance change with the generation of a delamination crack.

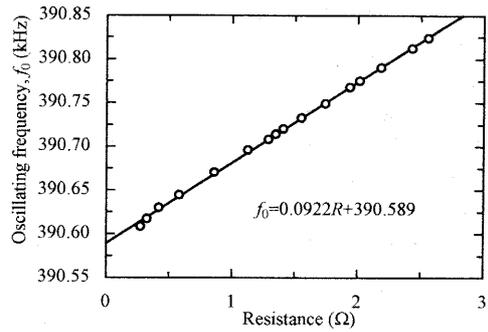


Fig. 10 Measured relationship between oscillating frequency and resistance.

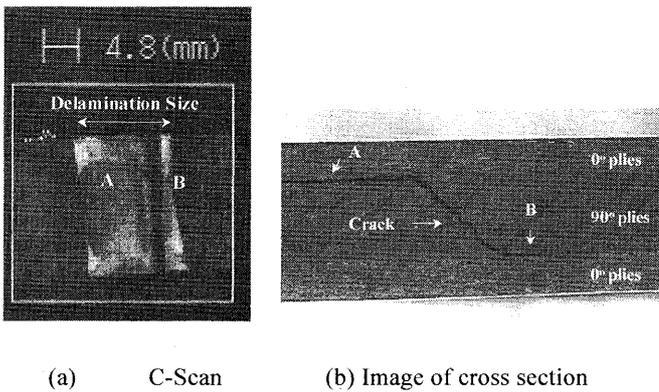


Fig. 8 Delamination image

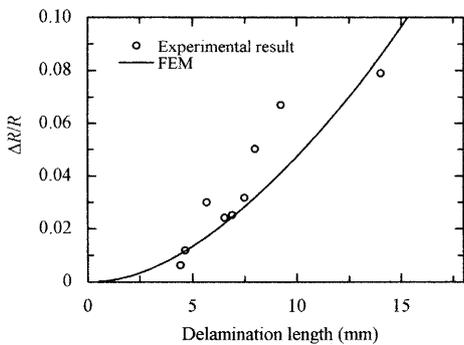


Fig.9 Relationship between resistance change ratio,  $\Delta R/R$ , and delamination length.

### 3. 試験片および実験方法

**3-1 試験片** はく離試験に用いる CFRP 試験片形状を図 5 に示す. 試験片は三菱レイヨン製一方向 CFRP プリプレグ PYROFIL #380 により成形した  $[0_2/90_2]_8$  積層板から, 長さ 50 mm, 幅 20 mm の短冊状に切り出して作成した. 板厚は 1.8 mm である. 積層板は電気炉, 真空ポンプ, プレス型治具を用い, 130 °C, 0.7 MPa の成形条件を 90 分間一定に保ち成形した.

図 5 に示すように, 試験片の上下表面に銀ペースト (日新 EM 製シルベスト P-255) をそれぞれ幅 5 mm で塗布し, 電気抵抗測定用電極とした. 銀ペーストと炭素繊維間の導電性を向上させるため, CFRP 表面の電極部分を研磨した. また, 電極部はリード線接着後, 常温硬化型エポキシで保護した. 使用した試験片の繊維体積含有率は 61% である.

**3-2 はく離作成方法** 作成した試験片にスパン長 10 mm の 3 点曲げせん断荷重試験を実施し, 層間にはく離を作

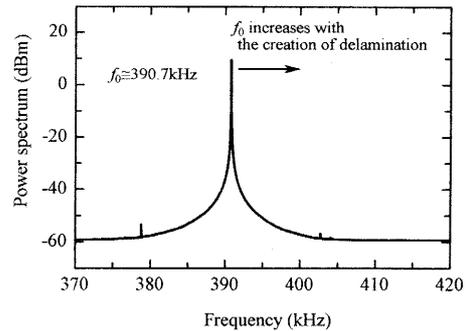


Fig. 11 Measured power spectrum of oscillation

成する (図 6). 荷重負荷は引張圧縮試験機 (島津製オートグラフ AG-1) を用いてクロスヘッドスピード 0.1 mm/min で実施した.

**3-3 電気抵抗変化の測定** まず, CFRP 電極間の電気抵抗値, インピーダンス位相角の周波数応答を, LCR メータ (日置電機製 HIOKI3522 LCR HITESTER) を用いて測定した. さらに, CFRP 試験片を用いて 3 点曲げ試験を実施し, はく離発生前後の電気抵抗変化を, LCR メータを用いて測定周波数 100 kHz で測定した. また, はく離作成後に超音波探査映像装置 (日立建機製 AT5000) を用いて試験片内部のはく離形状を観察した.

**3-4 発振周波数変化の測定** 電気抵抗変化の測定と同様に, CFRP 試験片を用いて 3 点曲げ試験を実施し, はく離発生前後の発振周波数変化を周波数カウンタ (ADVANTEST 製 TR5822) を用いてゲート時間 10 秒で測定した.

### 4. 実験結果と考察

**4-1 電気抵抗変化** CFRP 試験片を用いて 3 点曲げ試験を実施し, 電極間電気抵抗を測定した結果を図 7 に示す. 横軸は荷重負荷からの経過時間, 縦軸は電気抵抗値と荷重を示している. 荷重負荷に伴い抵抗は減少するが, はく離の発生 (測定開始より 250 秒後) により電流経路が減少し電気抵抗は急増する. また除荷後 (300 秒後以降) は開いていたはく離が閉じるため炭素繊維の接触が一部回復し, 抵抗値は減少するが, 完全に接触が回復することなく, 残留抵抗として存在する.

超音波探傷映像装置 (SAM) で撮影した層間にはく離を図 8(a) に示す. 図中 A, B で示した白い部分がはく離である. なお A, B で示したはく離位置を確認するため, 超音波探傷を 0° 層と 90° 層の層間に設定した. 図 8(b) に示すように 90° 層マトリックス割れを通じて別の層間にはく離が生じて

全体としてZ型のはく離となることが確認できる。同様の三点曲げ試験を9回実施し、得られたCFRP試験片の初期抵抗は $1.78 \Omega$ であり、はく離の発生前後における電気抵抗変化率 $\Delta R/R$ は3.36%である。

はく離寸法(図8(a)参照)に対する電気抵抗変化率を数値解析結果と共に図9に示す。横軸ははく離寸法、縦軸は電気抵抗変化率 $\Delta R/R$ である。数値解析は汎用有限要素法ソフトANSYSを用いて、要素には積層方向 $0.0625 \text{ mm}$ 、 $0^\circ$ 方向 $0.25 \text{ mm}$ の四角形4節点要素によりメッシュ分割(節点数約3444, 要素数約3200)を行った。はく離は、はく離位置の接点を二重に定義し接点の連結をはずし作成した<sup>(8)</sup>。また簡単のため、微視的に不均一な複合材料をFEMでは均一異方性材料としてモデル化した。また導電率は実験との整合性を持たせるため、実験結果と解析結果との誤差平方和を最小にする等価な繊維直交( $90^\circ$ )方向導電率 $\sigma_{90}$ 、繊維( $0^\circ$ )方向導電率 $\sigma_0$ 、厚さ方向導電率 $\sigma_1$ を算出( $\sigma_{90}/\sigma_0 = 5.0 \times 10^{-3}$ ,  $\sigma_1/\sigma_0 = 1.8 \times 10^{-4}$ )しFEMモデルの導電率として使用した。図9より、はく離寸法の増大に伴い $\Delta R/R$ は増加し、FEM解析結果に一致する。

以上から、はく離発生によりCFRP積層板の電気抵抗値は急増するため、はく離の検出が可能であり、さらにはく離発生前後の電気抵抗変化率よりはく離寸法を測定可能であることを明らかにした。

**4・2 発振周波数変化** 実際のCFRP積層板をセンサ回路に接続する前に、純粋な抵抗素子を用いて、電気抵抗の変化に対する、発振周波数の変化を測定した結果を図10に示す。図の横軸は電気抵抗値、縦軸は発振回路の出力する発振周波数である。電気抵抗値 $R$ と発振周波数 $f_0$ の間にはほぼ比例関係が成立し、線形近似をすると次式となる。

$$f_0 = 0.0922R + 390.589 \quad (3)$$

CFRP試験片をセンサ回路に接続した時のセンサ送信波形のFFT結果を図11に示す。横軸は周波数、縦軸はパワースペクトルである。パワースペクトルは周波数 $390 \text{ kHz}$ でピークを示しており、電気抵抗としてCFRP積層板を用いたときでも十分に発振する。

CFRP試験片を用いて三点曲げ試験を実施し、発振周波数を測定した結果を図12に示す。負荷の増加に伴い、発振周波数は減少するが、はく離の発生に伴って発振周波数が急増している。除荷後は、発振周波数はやや減少するが、完全除荷した後も負荷前の周波数までは戻らず、図7の電気抵抗変化率の変化結果と一致する。同様の試験を12回実施し、負荷前、はく離発生前後、除荷後の平均発振周波数結果を発振周波数より変換した電気抵抗変化率 $\Delta R/R$ は2.32%であり、電気抵抗実測した場合の3.36%より低い値となったが、実際のはく離検出には十分であるため大きな影響はないと考える。

はく離寸法に対する発振周波数変化率 $\Delta f/f$ を図13に示す。図よりはく離寸法の増大に伴い発振周波数は増大する。以上より、CFRPのはく離発生時の電気抵抗変化とセラミック発振回路による発振周波数変化率を用いることで、CFRPはく離検出と寸法の無線測定が可能であることを明らかにした。

## 5. 結 言

はく離発生に伴うCFRP積層板の電気抵抗値をセラミック発振回路の発振周波数値に変換し、無線ではく離発生を検出するシステムを提案し、CFRP[ $0_2/90_2$ ]積層梁に対して適用した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

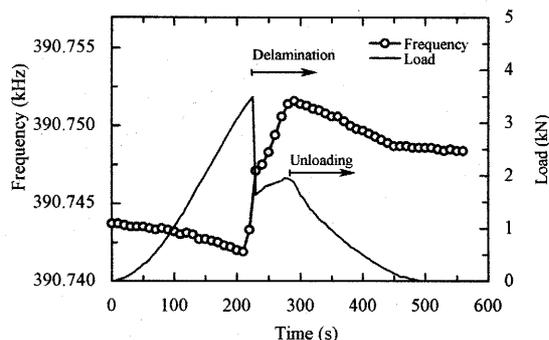


Fig. 12 Measured frequency change with the generation of a delamination crack.

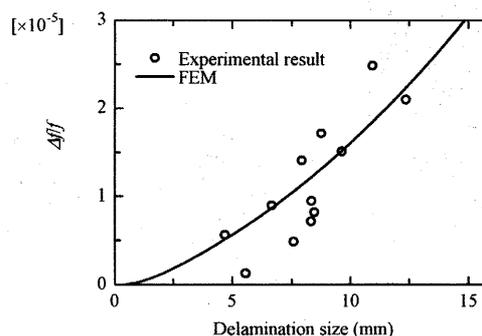


Fig. 13 Relationship between frequency change ratio,  $\Delta f/f$ , and delamination size.

- (1) はく離発生に伴う電気抵抗変化とセラミック発振回路を用いて、簡便にCFRPはく離発生を無線で検出するシステムを提案した。さらにはく離試験をCFRP積層梁に対して実施し、有効性を実証した。
- (2) はく離発生に伴う発振周波数変化率よりはく離寸法を無線で測定可能であることを実験的に示した。

## 参考文献

- (1) Prashant M. Pawar and Ranjan Ganguli, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 192 (2003) 2031-2057.
- (2) Wlodzimierz Kurnik and Piotr M. Przybylowicz, *Int. J. Solids Struct.*, 40 (2003) 5063-5079.
- (3) S. Takeda, Y. Okabe, T. Yamamoto and N. Takeda, *Compos. Sci. Technol.*, 63 (2003) 1885-1894.
- (4) A. Todoroki, Y. Tanaka and Y. Shimamura, *Compos. Sci. Technol.*, 62 (2002) 1151-1160.
- (5) V. K. Varadan and V. V. Varadan, *Smart Mater. Struct.*, 9 (2000) 953-972.
- (6) J. H. Jeon, W. Hwang, H. Park and W. Park, *Compos. Struct.*, 63 (2004) 427-437.
- (7) A. Todoroki, M. Tanaka, Y. Shimamura, *Compos. Sci. Technol.*, 62 (2002) 619-628.
- (8) A. Todoroki, *Compos. Sci. Technol.*, 61 (2001) 1871-1880.