

# 電磁誘導非破壊試験による CFRP の損傷検出に関する研究

小山 潔, 星川 洋 (電気電子工学科)

## 1. はじめに

炭素繊維強化複合材 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) は、比剛性と比強度の力学特性が優れていることから航空機や宇宙機構造物などに多用され、その使用用途は拡大の状況にある。CFRP は、薄い炭素繊維シート (CF シート) を積層して作られている。外部から衝撃を受けると積層間で剥離などを生じ、力学強度が低下することが問題であり、非破壊検査が行われている。CFRP に対する非破壊検査法としては、超音波探傷試験が適用され<sup>1)~3)</sup>、その他にも赤外線を利用したサーモグラフィ試験<sup>4)~5)</sup>や電位差法を用いた試験<sup>6)~7)</sup>などが報告されている。

電磁誘導を利用した非破壊検査法である渦電流探傷試験は、試験コイルによって導電性の試験体に渦電流を誘導して、欠陥などによる渦電流の変化を試験コイルで検出して探傷を行う。原理的に非接触で試験を行えるので、CFRP の検査に適用すれば他の試験法にはないメリットを持ち、渦電流探傷試験を CFRP の検査に適用した報告がされている<sup>8)~13)</sup>。

本報告では、炭素繊維を織物状に編んだ CF シートを積層したクロス CFRP や、炭素繊維が一方方向の CF シートを  $0, 90^\circ$  に交互に積層した一方方向 CFRP、 $-45, 0, 45, 90^\circ$  に交互に積層した疑似等方 CFRP に製作した模擬剥離の検出について、従来から平板の検査に多用されている上置プローブよりも SN 比高きず検出性能の高い渦電流探傷 $\Theta$ プローブ<sup>14)</sup> (以下、 $\Theta$ プローブ) による検出実験について述べる。

## 2. CFRP に対する渦電流探傷試験

電磁誘導を利用した非破壊検査法である渦電流探傷試験は、交流電流を流した励磁コイルによって導電性を有する試験体に渦電流を誘導する。導電性の試験体に割れや欠陥などがあると、誘導された渦電流の流れが変化し、渦電流が作る磁束が変化する。この磁束の変化を励磁コイル近傍に配置した検出コイルの起電力変化として検出して導電性の試験体の欠陥などを検出するものである。

CFRP は、炭素を含有することから金属に比較し

て  $10^4$  程低い導電性を有する。この導電性を利用して渦電流探傷試験を適用できると考える。しかし、渦電流探傷試験が一般に適用されている金属に比べ導電率が低いことに加え、導電性の異方性が強いことから、従来の渦電流探傷試験の適用が困難である。筆者は、渦電流探傷試験を CFRP の検査に適用するためには、CFRP の欠陥検出に適した渦電流探傷プローブと得られた検出信号に対する適切な信号処理が必要であると考えている。現在では、きず検出性能の高い様々な渦電流探傷プローブの開発がされている。今回は、従来から平板の試験体に多用されている上置プローブよりきず検出性能の高い $\Theta$ プローブを用いて CFRP の欠陥検出を試みた。CFRP には、炭素繊維を織物状に編んだ CF シートを積層したクロス CFRP や、炭素繊維が一方方向の CF シートを  $0, 90^\circ$  に交互に積層した一方方向 CFRP、 $-45, 0, 45, 90^\circ$  に交互に積層した疑似等方 CFRP など種々の物がある。

ここでは、クロス CFRP に対する渦電流探傷原理について述べる。CFRP に対する渦電流探傷試験に用いた $\Theta$ プローブを図 1 に示す。 $\Theta$ プローブは、円形の励磁コイルと矩形縦置きを検出コイルから構成される。クロス CFRP の場合には、炭素繊維が織物状に編まれているので CF シート面の xy 方向に導電性を有する。従って、CF シート面内では金属程ではないが導電性は等方性にあると考え、円形の励磁コイルによってクロス CFRP に誘導される渦電流は、ほぼ円形に流れると近似的に考える。試験体に欠陥などが無い場合には、渦電流は励磁コイル巻線に沿って流れ励磁コイル中心に位置する検出コイルに鎖交する磁束の総和は零であり検出コイルには起電力を発生しない。即ち、欠陥などが無い場合には、 $\Theta$ プローブは信号を発生しない。一方図 2 に示すように積層間に亘る剥離などの欠陥が有る場合には、渦電流の流れが欠陥によって妨げられ流れが変化し、検出コイルに信号が発生する。図に示すように検出コイルが欠陥の上側と下側に位置するとき検出コイル巻線方向に流れる渦電流の向きが逆となるので、

検出される信号の極性は逆となる。検出コイルが欠陥の中央に位置する場合には検出コイル巻線方向に流れる渦電流の大きさが等しく逆向きであるので、信号は発生しない。⊙プローブを走査すると8字の信号パターンを描く。探傷原理からクロスCFRPの場合には、剥離などの欠陥を雑音小さく検出するものと期待できる。一方、一方向CFRPや擬似等方CFRPの場合には導電性が繊維方向の一方向に強いので渦電流探傷原理が少々異なると考えている。

### 3. 実験方法

実験に用いた⊙プローブの励磁コイルの寸法は、外径9mm巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ であり、検出コイルの寸法は幅7mm高さ7mm巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ である。試験体には厚さ0.2mmのCFシートを15枚積層した厚さ3mmのクロスCFRP板、一方向CFRP板、疑似等方CFRP板（東邦テナックス（株）製作）を用いた。例としてクロスCFRP板を図3に示す。織物状の表面模様が観察できる。試験体には、図4に示すように1辺が20mm,10mm,5mm角で厚みが

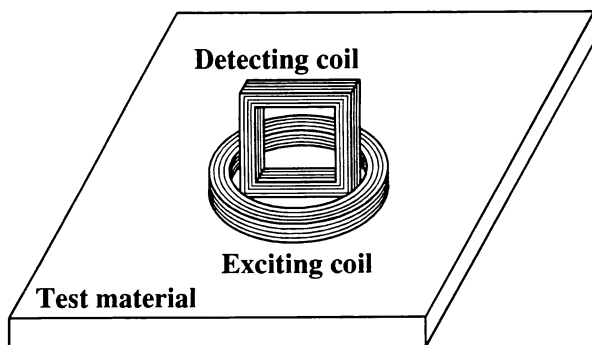


図1 渦電流探傷⊙プローブの構造

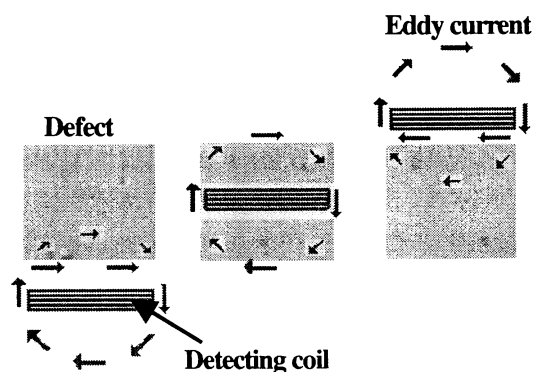


図2 ⊙プローブによるCFRP欠陥の検出原理

1.0mmのUDを表面から深さ1mmの位置に挟み込み模擬剥離とした。模擬剥離は、積層間で電氣的に絶縁されている。CFRP板の導電率は、繊維方向に $7.7 \times 10^3 \text{S/m}$ 程で、積層方向に $4.8 \times 10^1 \text{S/m}$ 程である。黄銅（真鍮）板の導電率が約 $1.3 \times 10^7 \text{S/m}$ であるから、 $10^4$ 程度導電率が小さく、積層方向には導電率が極めて小さい。電磁誘導により導電性の試験体に誘導される渦電流は、試験体の電磁気特性（導電率と透磁率）と試験周波数の積でその大きさが決まる。渦電流探傷試験をCFRPに適用する場合には、CFRPの導電率が低いので誘導される渦電流を強くすることを考え、試験周波数を2MHzとした。模擬剥離の検出実験では、プローブをCFRP板表面上を2次元に走査した。走査範囲は、模擬剥離中央部を原点としてx,y方向に $\pm 25 \text{mm}$ とした。走査間隔は0.5mmである。

### 4. 実験結果

図5には、模擬剥離が無い場合の検出信号を示す。図(a)にはクロスCFRPの場合、図(b)には一方向CFRP

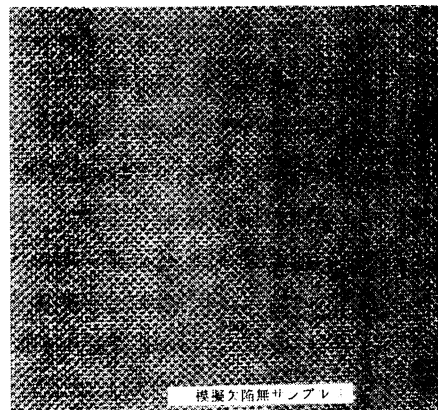


図3 クロスCFRP試験板

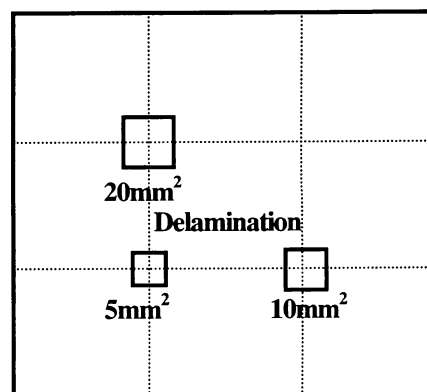
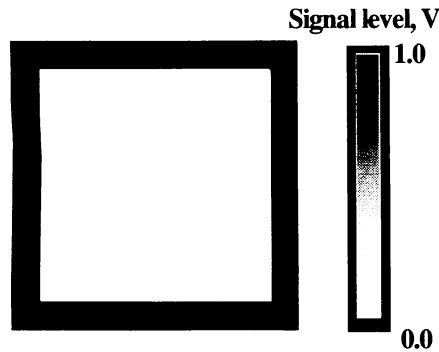
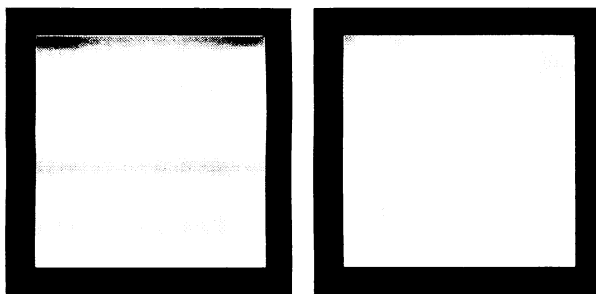


図4 試験体に製作した模擬剥離

の場合、図(c)には疑似等方 CFRP の場合を示す。渦電流探傷試験での検出信号は、励磁電流と同相の



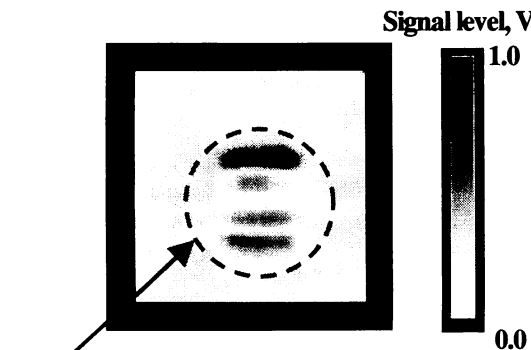
(a) クロス CFRP



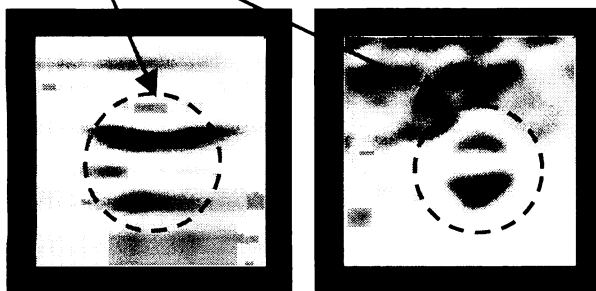
(b) 一方向 CFRP

(c) 疑似等方 CFRP

図5 欠陥の無いときの検出信号の画像表示



(a) クロス CFRP



(b) 一方向 CFRP

(c) 疑似等方 CFRP

図6 10mm 角厚さ 1mm の模擬剥離検出信号の画像表示

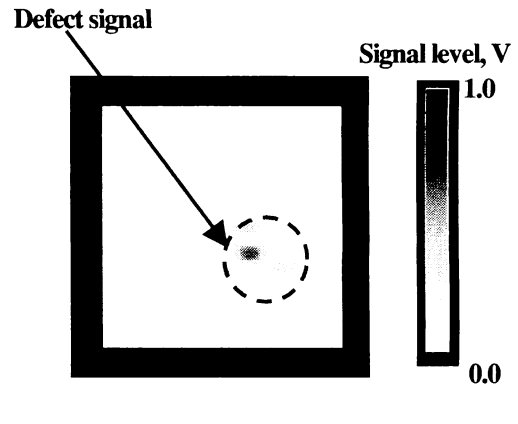


図7 クロス CFRP における 5mm 角厚さ 1mm の模擬剥離検出信号の画像表示

In-phase component と  $90^\circ$  進相の Quadrature component との複素信号で得られるが、図では検出信号振幅の画像表示を示す。クロス CFRP では小さな波を打つ信号が観測されるが、雑音が非常に小さい。クロス CFRP では、板面方向 (x,y 方向) に導電性を有するので渦電流が板面方向 (x,y 方向) に円形に近く流れ検出コイル巻線方向に流れる渦電流の大きさは左右で大凡等しく逆向きであるので、雑音が小さいと考えている。一方、一方向 CFRP や疑似等方 CFRP では雑音が多い。一方向 CFRP や疑似等方 CFRP では、繊維方向に導電性を有するので渦電流は繊維方向の一方向に強く流れ、検出コイル巻線方向に流れる渦電流の大きさが左右で等しくなくなるので雑音が多いと考えている。

図6には、1辺が 10mm 角の模擬剥離の検出信号を示す。実験では、製作図面上での模擬剥離の中央部を原点として 2次元に走査しているが、結果では模擬剥離の検出信号の表示位置が中心よりズレている。これは、CFRP を積層して製作するので模擬剥離の位置が設計位置よりもズレたことによる。クロス CFRP では、雑音小さく明瞭に模擬剥離を検出できている。一方向 CFRP と疑似等方 CFRP でも、雑音は大きいものの模擬剥離部において信号が得られている。

図7には、雑音が小さかったクロス CFRP における 1辺が 5mm 角の模擬剥離の検出結果を示す。1辺 5mm 角の模擬剥離まで良好に検出できていることがわかる。

## 5. まとめ

渦電流探傷のプローブによる CFRP の欠陥検出について検討を行った。実験の結果、クロス CFRP 試験体においては、雑音が小さく 1 辺 5mm 角の 1.0mm 厚さの模擬剥離までを良好に検出できることを確認した。一方向 CFRP と疑似等方 CFRP 試験体においては、雑音は大きいものの 1 辺 10mm 角の 1.0mm 厚さの模擬剥離を検出できた。クロス CFRP の場合には、導電性を板平面方向 (x,y 方向) に有するので、励磁コイルによって CFRP に誘導される渦電流は近似的に円形に流れる。一方、一方向 CFRP や疑似等方 CFRP の場合には、導電性は繊維方向に有するので、励磁コイルによって誘導される渦電流は、繊維方向の一方向に強く発生することとなり、複雑な電流経路となる。クロス CFRP 試験体に比べ、一方向 CFRP や疑似等方 CFRP では、雑音が大きく SN 比が低下し欠陥検出がより難しい。CFRP の欠陥検出に適した更なる渦電流探傷プローブの開発と検出信号に対する適切な信号処理の適用を行って、渦電流探傷試験の検出性能を高める必要がある。

## 参考文献

- 1) 松島正道: CFRP の超音波探傷評価, 第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集, pp.23-26, (2007)
- 2) 川嶋紘一郎, 安藤之人, 高橋雅和, 星野秀和, 小倉幸夫: 水浸超音波画像と空気伝搬超音波法による複合材の非破壊評価, 第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集, pp.27-30, (2007)
- 3) 長瀬尚樹, 西川康博, 福島清: 超音波による CFRP の欠陥評価, 第 10 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集, pp.1-4, (2007)
- 4) 西川康博: 赤外線応力画像法を用いた平織炭素繊維強化複合材料の疲労損傷の検出, 第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集, pp.19-22, (2007)
- 5) 青木卓哉, 岡洋平, 松島正道, 杉本直, 八田博志: パルスサーモグラフィ法による C/C 複合材料の非破壊検査, 第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集, pp.57-60, (2007)
- 6) 小島隆: 平織り繊維強化 C/C コンポジットに生じる衝撃損傷の特徴と電位差法による探傷, 非破壊検査, 50-3, pp.170-178 (2001)
- 7) 上田政人, 轟章, 島村桂延伸, 小林英男: 電位差法を用いた CFRP 積層板はく離モニタリング, 日本複合材料学会誌, 30-4, pp.149-156 (2004)
- 8) A.R Valleau: Eddy current nondestructive testing of graphite composite material, Materials Evaluation, 48-2, p.230- (1990)
- 9) M. Gvishi, A.H.Kahn and M.L.Master: Eddy current testing of carbon-carbon composite, Review of Progress in QNDE, Plenum Press, 11, P.289- (1992)
- 10) M.PDE Goeje and K.E.D. Wapenaar: Non-destructive inspection of carbon fiber-reinforced plastics using eddy current methods, COMPOSITES, 23-3, pp.147-157 (1992)
- 11) Kei Urabe, Akira Saeki and Masanobu Kawakami: Eddy Current Inspection of Fiber Fracture in CFRP, Proc. 3rd Japan International SAMPE Symposium, pp.2147-2152 (1993)
- 12) R.Lange and G.Mook: Structural analysis of CFRP using eddy current methods, NDT&E International, 27-5, p.241- (1994)
- 13) X.E.Gros and W.Lowden: Electromagnetic testing of composite materials, INSIGHT, 37-4, pp.290-293 (1995)
- 14) H.Hoshikawa and K.Koyama: A New Eddy Current Probe with Minimal Liftoff Noise and Phase Information on Discontinuity Depth, Materials Evaluation, 61-3, pp.423-427 (2003)