

# 渦電流探傷法を用いた CFRP の欠陥検出について

日大生産工 (院)  
日大生産工

○三木 公輔  
小山 潔、星川 洋

## 1. まえがき

近年、炭素繊維強化複合材である CFRP は比剛性かつ比強度に優れるという性質から、航空機をはじめ構造部材など様々な分野で適用されることが多くなっている。しかし、CFRP は外的衝撃等により内部剥離が起り、その剥離部分において強度が著しく低下することが問題であり、その剥離部分の検出が必要である。現在、CFRP の検査手法として主に超音波試験や放射線透過試験が用いられている。しかし、これらの試験法は長時間かかったり、装置が大掛かりになるという問題があり、簡便な検査法の検討が求められている。そこで、CFRP は導電性をもつことから渦電流探傷試験の適用の可能性があると考える。また、渦電流探傷試験は非接触で高速度に省スペースで行えることから他の検査手法にない利点を持つ。しかし、渦電流探傷試験は本来金属の検査に用いられる手法であり、金属のように導電性が大きく、異方性のないものに比べ CFRP に適用するのは難しい。本研究ではリフトオフ雑音小さく SN 比の高い渦電流探傷  $\Theta$  プローブを用いて CFRP の表面欠陥及び内部欠陥について渦電流探傷試験を試みた。

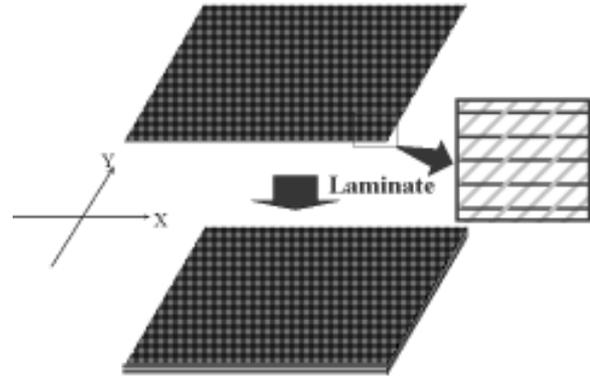


図 1 クロス繊維試験体構造図

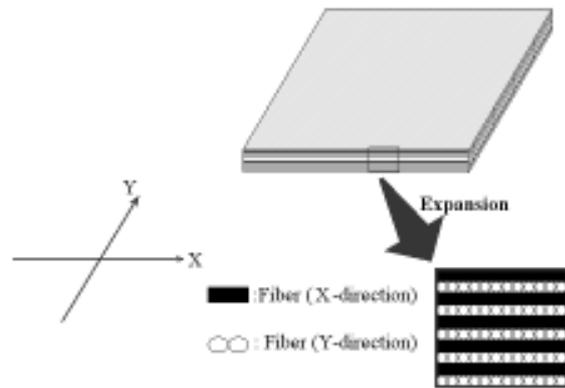


図 2 一方向繊維試験体構造図

## 2. CFRP の構造と導電性

一般的に CFRP は大きく分けて、クロス繊維 CFRP と一方向繊維 CFRP の二種類がある。

クロス繊維 CFRP の構造は図 1 のように X 方向と Y 方向の繊維が編みこまれた一枚 0.2mm の CF シートを積層して作成されたものとなっている。同一 CF シート内では導電性があるが、積層された CF シート間では導電性が極めて小さくなっている。

一方向繊維 CFRP の構造は代表して X 方向だけに編まれた一枚 0.2mm の CF シートと Y 方向だけに編まれた一枚 0.2mm の CF シートを交互に積層した  $[(0^\circ, 90^\circ)_2, \text{sym}]$  のものを図 2 に示した。同一 CF シート内では導電性があるが、積層された CF シート間では導電性が

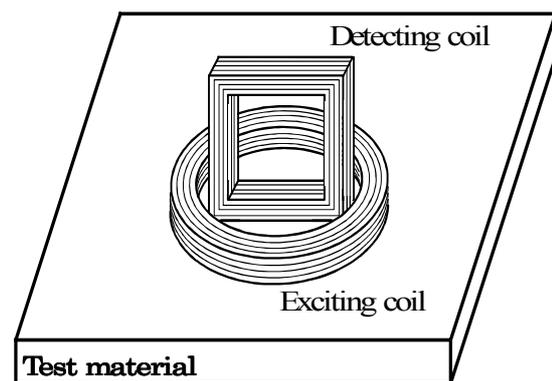


図 3 渦電流探傷  $\Theta$  プローブの構造

極めて小さい。

CFRP の構造は上記のようにになっているため金属に比べ導電性が小さく、主に金属の検査に用いられる渦電流探傷を適用するのは難しい。

### 3. CFRP の欠陥検出原理

渦電流 $\Theta$ プローブの構造を図3に示す。渦電流 $\Theta$ プローブは円形横置の励磁コイルと矩形縦置きを検出コイルから構成されている。励磁コイルは試験体に電磁誘導により渦電流を誘導する。検出コイルは欠陥により変化した渦電流で発生した磁束を検出し、信号を発生する。渦電流は基本的には励磁コイルの巻線方向に流れるが、CFRP は金属と違って、繊維方向にのみ導電性を有するので誘導される渦電流は繊維方向による流れとなる。また、衝撃等による内部剥離は放射状に出来るため、欠陥を円形に表し、欠陥による渦電流の流れ変化を図4~6のように模擬的に示した。

CFRP に欠陥がない場合には励磁コイルの巻線方向とほぼ同方向に渦電流が誘導され、検出コイルの巻線方向には流れず、信号は発生しない。渦電流探傷 $\Theta$ プローブでは原理的にはリフトオフ雑音は発生しない<sup>(1)</sup>が、プローブを走査すると試験体を構成する繊維方向による雑音が発生する。

CFRP の欠陥がある場合の欠陥による渦電流の流れ変化を図4~6に示す。CFRP に欠陥がある場合には、誘導された渦電流が欠陥に沿って流れ、検出コイルの巻線方向と同方向に流れる渦電流を欠陥検出信号として発生する。検出コイルに誘導される渦電流は、欠陥の前後で逆向きとなるので得られる信号また、逆極性となる。従って、プローブが欠陥に近づいてきた時には図4のように Plus Signal が得られ、逆に欠陥から遠ざかる時には図6のように Minus Signal が得られる。また、欠陥とプローブが重なった時には図5のように、信号が出ず No Signal となる。

### 4. 実験条件及び実験方法

実験に用いた渦電流探傷 $\Theta$ 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  $0^\circ$  と  $90^\circ$  方向にクロスに編まれた 0.2mm 厚の CF シートを 50 枚積層した厚さ 10mm で縦 250mm、横 250mm のクロス繊維 CFRP と、 $0^\circ$  方向だけに編まれた 0.2mm 厚の CF シートと  $90^\circ$  方向だけに編まれた

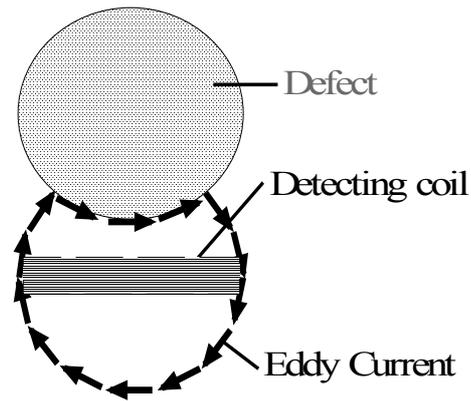


図4 渦電流の流れ変化(Plus Signal)

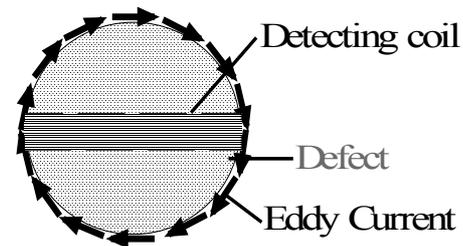


図5 渦電流の流れ変化(No Signal)

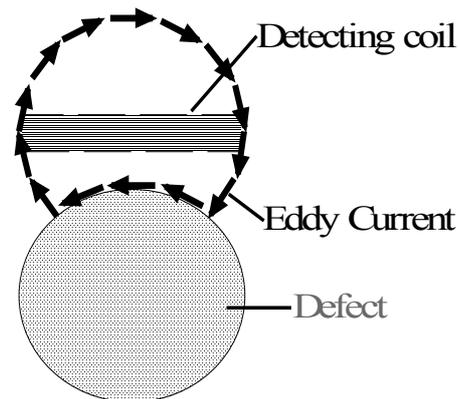


図6 渦電流の流れ変化(Minus Signal)

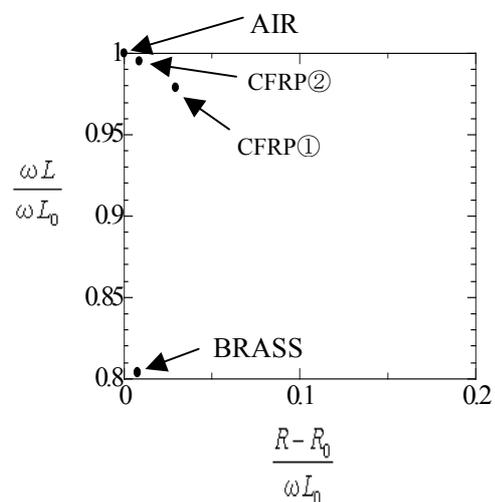


図7 正規化インピーダンス (励磁コイル)

0.2mm厚のCFシートを交互に15枚積層した厚さ3mmで縦160mm、横160mmの一方方向繊維CFRP[(0°,90°)2,sym]を用いた。試験体には直径10mm深さ0.5mmのドリル穴を作成し、表面欠陥及び表面近くの内部欠陥を模擬した。また表面から1mmの位置に厚さ1mmで10mm角の絶縁体をはさんだものを作成し内部剥離を模擬した。

励磁コイルのインピーダンスをAIR、CFRP(クロス繊維)、CFRP(一方方向)、BRASSの四種類についてプローブをそれぞれの板の上に置いて測定した。

CFRPは金属に比べて導電率が小さいことから探傷信号が小さいと予想され、探傷信号を大きくするために、誘導される渦電流を大きくするため試験周波数を500kHzに設定した。表面欠陥及び内部欠陥を中心にx,y方向に±25mmの範囲0.5mm間隔で渦電流探傷 $\Theta$ プローブを二次元に走査し測定を行った。

## 5. 実験結果

### 5.1 導電性の測定結果

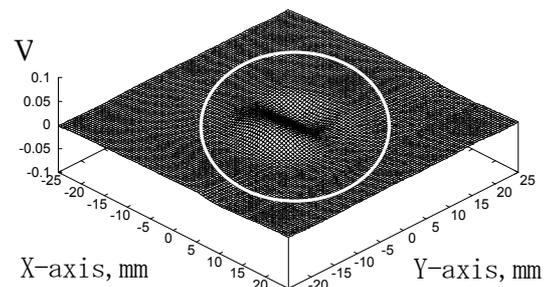
今回使用した試験体とBRASS、AIRの四種類のインピーダンスを測定し、正規化したものを図7に励磁コイルの正規化インピーダンスとして示した。図中では、クロス繊維CFRPをCFRP①、一方方向繊維CFRPをCFRP②と示した。この測定では実験条件と同じにするために試験周波数を500kHzで行った。この図からCFRPはBRASSと比べて、導電性が非常に小さいことが読み取れる。また、CFRPは中空状態での測定値であるAIRに近くCFRPは金属に比べて誘導される渦電流が小さいことがわかる。さらに、繊維方向による導電性についてもCFRP(一方方向)とCFRP(クロス)を見比べると、一方方向繊維CFRPの方がクロス繊維CFRPより導電性が小さいことがわかる。

### 5.2 クロス繊維CFRPの探傷信号

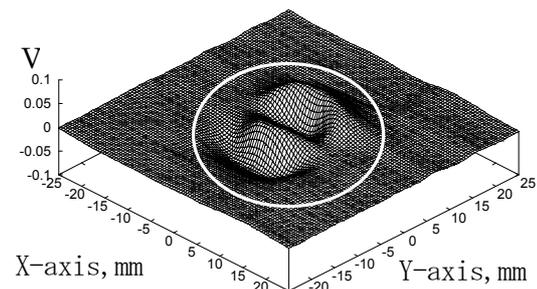
図8にクロス繊維CFRPの欠陥深さ0.5mmであるドリル穴表面欠陥の検出信号を示した。(a)には実数成分(b)には虚数成分の信号を示した。白線で囲んだ部分に欠陥検出信号があらわれていることがわかる。

図9にクロス繊維CFRPの剥離厚さ1.0mmで10mm角である内部欠陥の検出信号を示した。(a)には実数成分(b)には虚数成分の信号を示した。内部剥離においても白線で囲んだ部分に欠陥検出信号があらわれていることがわかる。

クロス繊維CFRPでは表面欠陥と内部欠陥

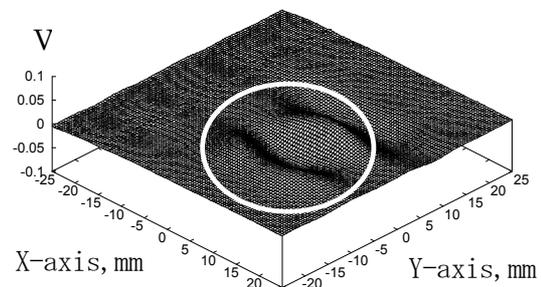


(a) In-phase component

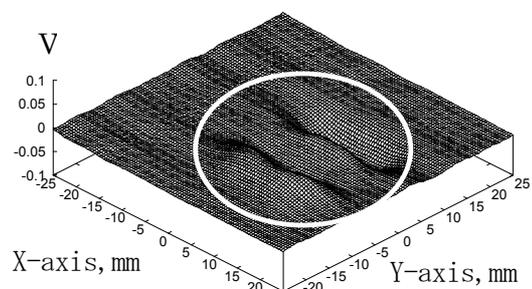


(b) Quadrature component

図8 クロス繊維CFRPの探傷信号  
(表面欠陥)



(a) In-phase component



(b) Quadrature component

図9 クロス繊維CFRPの探傷信号  
(内部欠陥)

の両方とも探傷信号は明確なことがわかる。

### 5.3 一方向繊維 CFRP の探傷信号

図 10 に一方向繊維 CFRP の欠陥深さ 0.5mm であるドリル穴表面欠陥の検出信号を示した。(a) には実数成分(b)には虚数成分の信号を示した。一方向繊維 CFRP の表面欠陥では白線で囲んだ部分に欠陥検出信号があらわれていることがわかるが非常に信号が小さく分かりにくい。また、信号が小さいだけでなく、繊維方向による雑音が非常に大きい。

図 11 に一方向繊維 CFRP の剥離厚さ 1.0mm で 10mm 角である内部欠陥の検出信号を示した。(a) には実数成分(b)には虚数成分の信号を示した。虚数成分の白線で囲んだ部分に小さいが欠陥検出信号が現れていることがわかる。

しかし、一方向繊維 CFRP の内部欠陥では欠陥検出信号が見分けるのが困難であることがわかる。特に、一方向繊維 CFRP において、実数成分、虚数成分ともに表面欠陥より内部欠陥の方が信号が小さく、雑音も大きい。これは、CFRP の繊維方向の導電性に対して、積層方向の導電性の方が小さいためと考えられる。

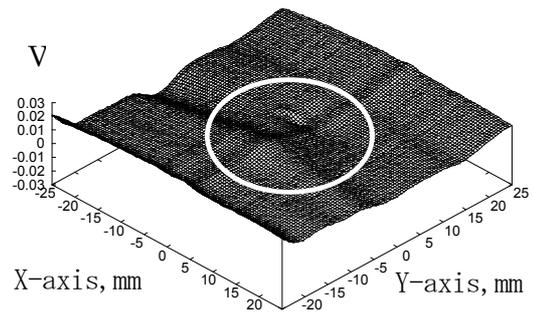
## 6. まとめ

本研究では、渦電流探傷  $\Theta$  プローブを用いてクロス繊維 CFRP と一方向繊維 CFRP に対する表面欠陥及び内部欠陥の検出を試みた。実験の結果、クロス繊維 CFRP の表面欠陥と内部欠陥において探傷信号は明確であった。しかし、一方向繊維 CFRP においては、表面欠陥と内部欠陥の両方において、雑音が大きく探傷信号を見分けるのが容易ではないことがわかった。

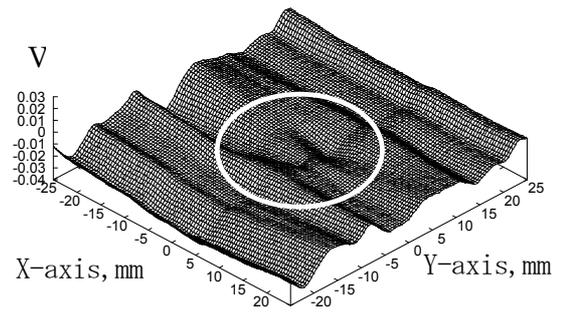
今後は探傷信号を識別する信号処理について検討が必要である。また、実験条件についても、試験周波数や、プローブの種類について検討が必要である。さらに、衝撃損傷についての実験を試みる予定である。

## 7. 参考文献

(1) 星川洋、小山潔、柄澤英之:リフトオフ雑音が発生しない渦電流探傷用新型上置プローブに関する研究、非破壊検査、第 50 巻 11 号 pp.736-742(2001)

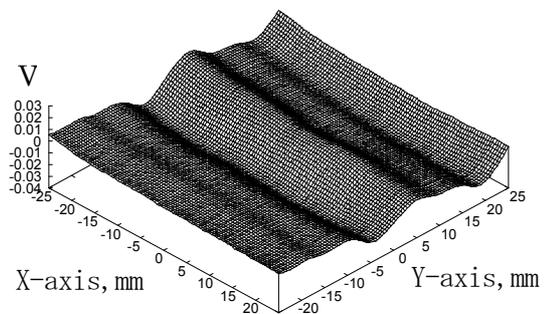


(a) In-phase component

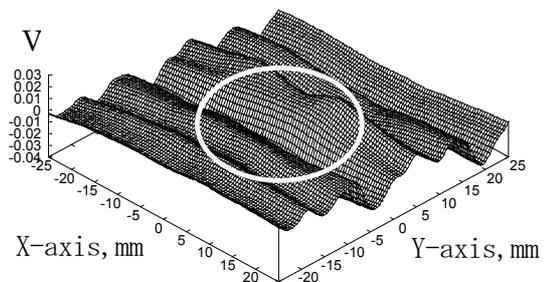


(b) Quadrature component

図 10 一方向繊維 CFRP の探傷信号 (表面欠陥)



(a) In-phase component



(b) Quadrature component

図 11 一方向繊維 CFRP の探傷信号 (内部欠陥)