

# 渦電流探傷によるCFRPの非破壊試験に関する研究

星川 洋 (日大生産工・教授)

小山 潔 (日大生産工・教授)

横田 理 (日大工・教授)

上田 政人 (日大理工・専任講師)

## 1 はじめに

CFRP (炭素繊維強化プラスチック) は軽量で強度と剛性が高いため初期には宇宙ロケットや航空機の構造部材などに適用されてきたが、現在では自動車などを初めとして広い分野で利用されるようになってきている。CFRPの問題点は、外的衝撃によって剥離などの損傷を受けると強度が著しく低下することである。損傷の検出には放射線透過試験や超音波探傷試験などが適用されているが<sup>1)</sup>、CFRPの全面に渡って探傷するためには試験コストの面などから短時間に非破壊検査を行う方法の開発が求められている。

渦電流探傷は閉ループを成して誘導される渦電流を利用しており、導電性の高い金属に適用されている非破壊検査法である。CFRPは導電性を有する炭素繊維を編み込んで構成されているから、渦電流探傷を適用できる可能性がある。しかし、炭素繊維は金属に比べると導電性が低い上に、繊維と垂直方向の導電性は繊維方向の導電性に比べると桁違いに低い。このため炭素繊維の組成に依存してCFRPは不均一で異方性の導電性を持つことになる。以上のような特性のために、CFRPに渦電流探傷を適用することは導電性の不均一によって発生する雑音などの影響のために容易なことではない。

筆者らは、リフトオフ雑音の小さな渦電流探傷プローブである $\Theta$ プローブを適用することを考えた<sup>2)</sup>。その結果、クロスCFRPに対して渦電流探傷を適用することにより、損傷検出の可能性を見出したので報告する。

## 2 クロスCFRP

図1は今回の渦電流探傷試験の対象としたクロスCFRPを示す。クロスCFRPはX軸方向の炭素繊維とY軸方向の炭素繊維とを織物状に編み込み、樹脂を浸透させてシート状のプリプレグとし、プリプレグを積層して高温下で加圧・硬化して作られている。クロスCFRPは同一プリプレグ内では概略的に等方の導電性を持つと考えることができるが、一方、積層間の導電性は非常に低いという問題がある。

渦電流探傷は閉ループを成す渦電流の変化を検出することによって探傷を行う方法であるから、CFRPの低い導電性とその異方性、さらには積層間の低導電性により渦電流の強度と方向の変化が雑音が発生する要因となるものと予測されるから、渦電流探傷は容易なことではないと考えられる。

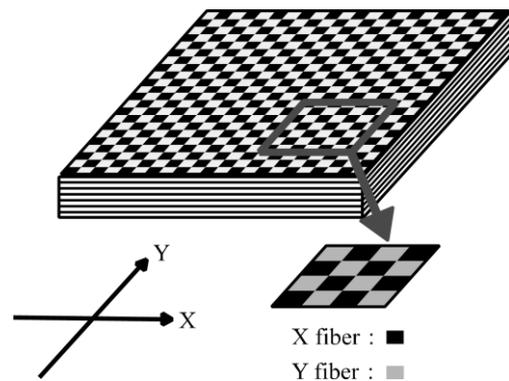


図1 クロスCFRP

### 3 渦電流探傷 $\Theta$ プローブ

図2は励磁コイルと検出コイルとが互い垂直方向に配置された渦電流探傷 $\Theta$ プローブの巻線構造を示す。横置ききの円形励磁コイルは試験体の表面に対して垂直方向に交流磁束を発生し、試験体内に閉ループを成す渦電流を誘導する。一方、縦置ききの矩形検出コイルはコイル自体の面に対して垂直方向に貫く交流磁束を検出して探傷信号を発生する。

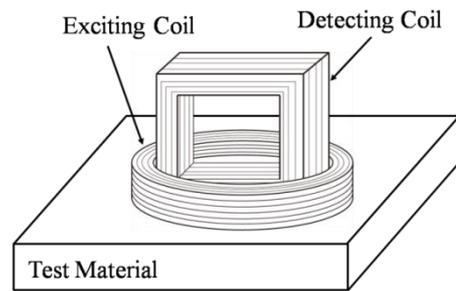
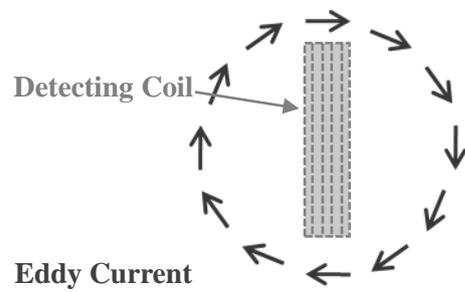
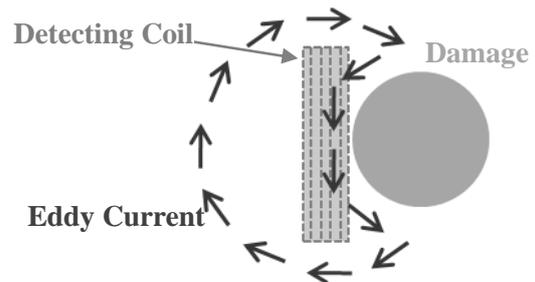


図2  $\Theta$ プローブ

図3は $\Theta$ プローブの探傷原理を示す。同図(a)に示すように試験体に傷が無いときには、渦電流は円形励磁コイルの巻線に沿って同軸状に一樣に誘導される。この場合には渦電流もまた試験体の表面に対して垂直方向の交流磁束を発生して励磁コイルによる交流磁束を打消して小さくするが、検出コイルの面を貫く磁束を発生することは無い。したがって、傷が無いときには検出コイルが信号を発生しないことはない。また、 $\Theta$ プローブと試験体との距離であるリフトオフが変化しても、検出コイルの面に垂直な磁束が無い限り検出コイルは信号を発生しないから、原理的にリフトオフ雑音は発生しない。すなわち、 $\Theta$ プローブは雑音が非常に小さいという特徴がある。同図(b)に示すように試験体に損傷があると、導電性の不連続のために渦電流の流れが変化する。その結果として、検出コイルの巻線方向に平行な方向に渦電流が流れると、検出コイルの面を貫く磁束が発生するから、検出コイルには探傷信号が発生する。



(a) Without damage



(b) With damage

図3  $\Theta$ プローブの探傷原理

### 4 実験の条件と方法

試験体としては厚さが3mmで160mm×160mmの平板状クロスCFRPを用いた。このクロスCFRPに対して先端の直径約1.0mmのドリルを試験体の上に配置し、重さ1.0kgの鉄球を高さ0.25m、0.50m、0.75m、1.0mからそれぞれ垂直落下させて衝突させて、CFRPに損傷を与えた。落下の際に鉄球に生じるエネルギーが0.25J、0.5J、0.75J、1.0Jとなるため、以下で衝撃によって生じた損傷を0.25J損傷、0.5J損傷、0.75J損傷、1.0J損傷と呼ぶことに

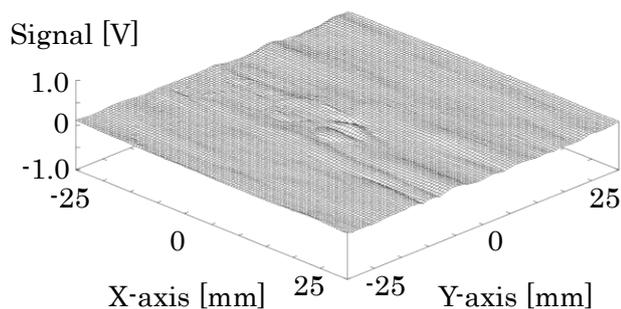
する。渦電流探傷 $\Theta$ プローブの寸法は以下の通りである。励磁コイルの寸法は内径7mm、外径9mm、巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ とした。また、検出コイルは長さ7mm、高さ7mm、巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ である。

CFRPは金属に比べると導電率が桁違いに低いことを考慮して、探傷周波数は金属に対する渦電流探傷の場合に比べると高い1MHzとした。励磁コイルには5V一定の交流電圧を印加して実験を行った。CFRPの探傷範囲は、損傷のほぼ中心を原点としXY軸方向ともに±25mm、0.5mm間隔でプローブを走査した。

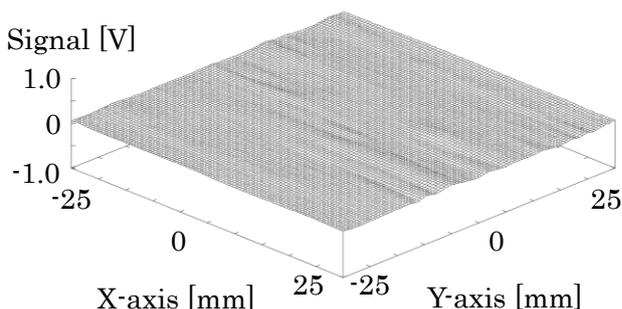
### 5 実験結果

図4はクロスCFRPの各試験体に対する渦電流探傷信号の振幅を示す。同図(a)は試験体に損傷が無い場合の結果を示しており、クロスCFRPの繊維方向に依存すると見られる小さな雑音が発生していることがわかる。同図(b)は0.25J損傷を有する試験体の探傷信号を示す。損傷部分に傷信号が現れており、SN比を求めたところ1.2程度であったが、傷信号は明確に確認することができた。同図(c)は0.5J損傷を有

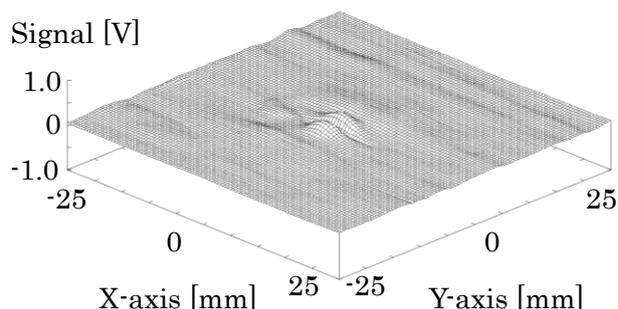
する試験体の探傷信号を示す。この傷信号についてSN比を求めたところ3.1であり、損傷は明確に指示されていることがわかる。さらに同図(d)と同図(e)はそれぞれ0.75J損傷と1.0J損傷を有する試験体の探傷信号を示す。これら傷信号はSN比高く明確に現れていることが確認できる。図4の各図を対比すると、損傷の衝撃力に対応して傷信号の発生領域が拡大することも確認できる。



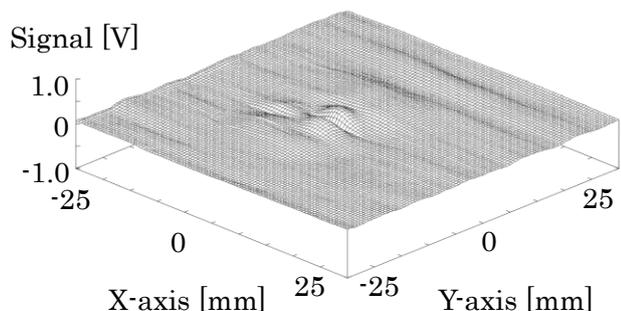
(a) no damage



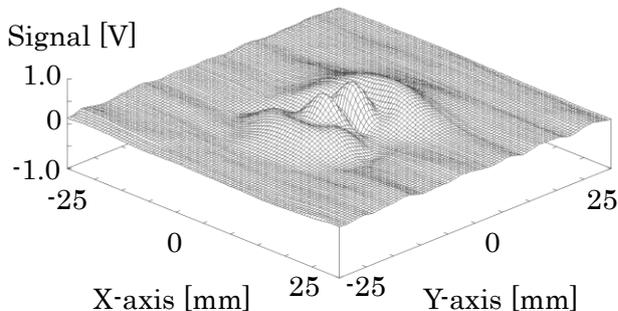
(b) 0.25 J damage



(c) 0.5 J damage



(d) 0.75 J damage



(e) 1.0 J damage

図4 クロスCFRPの渦電流探傷信号

図5は各損傷の真上を渦電流探傷プローブで走査させたときに得られた探傷信号のパターンを示す。これらの結果に基づいて損傷の衝撃力と探傷信号の振幅との相関を調べたが、それらには明確な相関を見出すことは出来なかった。一方、同図に示された信号パターンの傾きから傷信号の位相を算出することができるので、損傷の衝撃力と傷信号の位相との相関を求めた。

図6は損傷の各衝撃力に対する信号位相を求めた結果を示す。衝撃力が0.25Jの場合には雑音の影響で信号位相を算出することはできなかったが、衝撃力が0.5J以上の場合には、衝撃力と傷信号位相とに相関が見られた。金属の渦電流探傷の場合には、表面傷の深さと傷信号位相とに相関があり、一般に傷信号の位相に基づいて表面傷の評価が行われている。このように、CFRPの損傷に関しても傷信号の位相に基づいて損傷の程度を評価できる可能性があるものと考えられる。

## 6 おわりに

クロスCFRPの損傷についてリフトオフ雑音が小さい $\Theta$ プローブを適用して渦電流探傷の実験を行った。その結果、損傷の大きさに対応した損傷信号が得られ、衝撃力に対応して信号発生の広がりも大きくなることを確認した。さらに損傷を発生させた衝撃力が大きい場合には、傷信号の位相に基づいて損傷の程度を評価できる可能性があることが判明した。

今後は、数多くの試験体について損傷に対する信号の振幅と位相と損傷の関係を明らかにするとともに、クロスCFRP以外のCFRPについても損傷と渦電流探傷信号との関係や損傷評価の可能性に関して検討する必要があると考える。

最後にCFRP試験体の製作並びにその他のご支援を賜った本学機械工学科の邊吾一教授に謝意を表す。

## 7 参考文献

- 1) 松島正道, CFRPの変遷, 第17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, (2009) pp. 121-124
- 2) 星川洋, 小山潔, 柄澤英之, リフトオフ雑音の発生しない新型渦電流探傷上置プローブに関する研究, 非破壊検査, 50巻11号, (2001), pp. 736-742

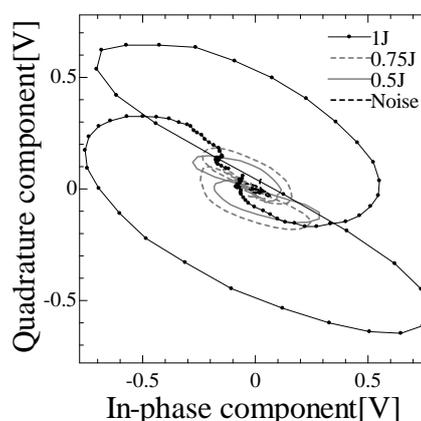


図5 傷信号パターン

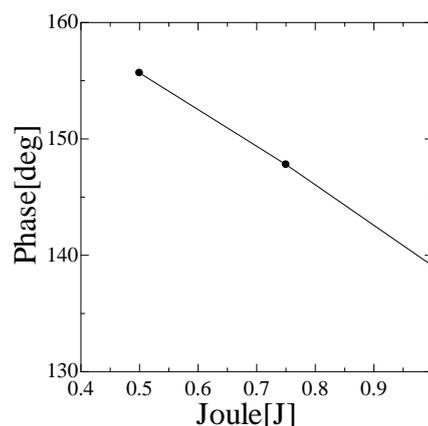


図6 損傷の衝撃力と傷信号の位相