

CFRP の渦電流探傷試験における傷信号と渦電流分布の検討

日大生産工 (院) ○平野 拓也
日大生産工 小山 潔、星川 洋

1.はじめに

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) は、炭素繊維を用いた複合材料の一種で、軽量かつ高強度・高剛性であることから、アルミなどの金属に代わり、幅広い分野で適用されている。しかし、CFRP は外部から衝撃を受けることにより、CFRP 内部に剥離などの欠陥が生じ、強度低下が起こるといった問題があり、非破壊検査が必要である。現在、CFRP に対する非破壊検査法として、超音波探傷試験や放射線透過試験が適用されている。これらの試験は正確な探傷が行えるが、試験に長時間要す、試験装置が大掛かりになるといった問題があり、高速かつ簡易的な試験が求められている。

CFRP は金属に比べ低い導電性を持っており、金属に適用される渦電流探傷試験が有効であると考えられる。渦電流探傷試験は原理的に非接触で探傷可能なので、高速かつ簡易な検査ができる。そこで、CFRP に対する渦電流探傷試験の検討が行われている*1。

今回試験対象としたクロスプライ CFRP(0°/90°) は、積層構造になっており、各層での導電性に異方性があり、誘導される渦電流分布が明らかになっていない。そこで本研究では、原理的にリフトオフ雑音が発生しないクロスポイントプローブを用いた、クロスプライ CFRP(0°/90°)欠陥検出における渦電流分布を明らかにすることを目的とし、有限要素法を用いた電磁界解析を行い、欠陥の有無による渦電流分布の変化と信号について検討を行った。

2.CFRP の構造と導電性

CFRP は炭素繊維を厚さ 0.2mm ほどのシート状にした CF プリプレグを積層したものである。炭素繊維の方向、CF プリプレグの積層方法によって種類が分けられている。

図 1 に本研究で用いたクロスプライ CFRP(0°/90°)の構造を示す。クロスプライ CFRP(0°/90°) は、炭素繊維を 0° 方向に編み込んだ CF プリプレグ (以下、0° 層)、90° 方向に編み込んだ CF プリプレグ (以下、90° 層) を交互に積層して作成されたものである。クロスプライ CFRP(0°/90°)は、同一 CF プリプレグ内では繊維方向に導電性を持ち、繊維方向に対し直交方向の導電性は極めて小さくなっている。また、積層された CF プリプレグ間でも導電性は極めて小さくなっている。このような特性からクロスプライ CFRP(0°/90°)の各層に誘導される渦電流は繊維方向に強く流れると考えられる。

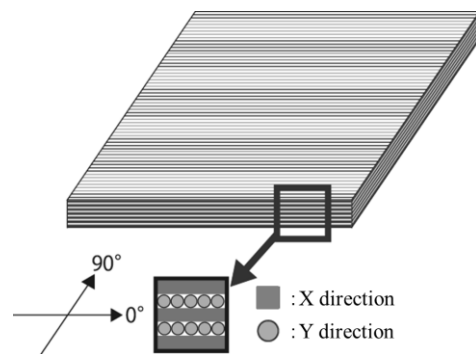


図 1 クロスプライ CFRP(0°/90°)の構造

Study on Flow Signal and Eddy Current Distribution in Eddy Current Testing of CFRP

Takuya HIRANO, Kiyoshi KOYAMA, Hiroshi HOSHIKAWA

3.渦電流探傷クロスポイントプローブ

図 2 にクロスポイントプローブの構造を示す。構造は矩形縦置ききの励磁コイルと検出コイルを直交した構成となっている。励磁コイルは試験体に、励磁コイルの巻線方向と同方向の渦電流を誘導する。検出コイルは巻線方向に流れる渦電流から発生する磁束によって起電力が誘導される。

図 3 に欠陥検出原理を示す。図 3(a)の試験体に欠陥がない場合には、検出コイルの巻線方向の渦電流がないため、検出コイルに起電力は発生しない。図 3(b)に示すように欠陥の中央をプローブが通過する場合は、励磁コイルによって誘導される渦電流は欠陥を避け、検出コイルの巻線方向に分かれて流れる。これらの渦電流が作る磁束による検出コイルの起電力は、互いに打ち消しあうため発生しない。図 3(c)に示すように欠陥の端をプローブが通過する場合には、励磁コイルによって誘導される渦電流は、欠陥部分を避けて流れ、その一部が検出コイルの巻線方向に流れるため、検出コイルに起電力が発生する。

クロスポイントプローブは欠陥に沿って走査したとき、欠陥の両端できず信号を得る。またこれらの信号は逆極性となる。

4.解析方法および解析モデル

クロスプライ CFRP(0° 90°)に対し有限要素法による三次元電磁界解析を行った。その際、試験体とプローブのモデルを別々に作成し、練成解析を行った。

図 4 に試験体であるクロスプライ CFRP(0° 90°)のモデルを示す。クロスプライ CFRP(0° 90°)の形状は、縦 160mm、横 160mm、厚さ 0.2mm の 0° 層と 90° 層を交互に合計 15 層積層し、全体の厚さが 3mm となるようにした。この 15 層のうち奇数の層は 0° 層、偶数の層は 90° 層となっている。また、0° 層の導電率は、X 軸方向に $7.7 \times 10^3 \text{S/m}$ 、Y 軸方向に $4.8 \times 10^1 \text{S/m}$ 、とし、導電性は X 軸方向が強くなっている。90° 層は、X 軸方向に $4.8 \times 10^1 \text{S/m}$ 、Y 軸方向に $7.7 \times 10^3 \text{S/m}$ とし、導電性は Y 軸方向が強くなっている。0° 層、90° 層ともに Z 軸方向の導電率は $4.8 \times 10^1 \text{S/m}$ 一定と

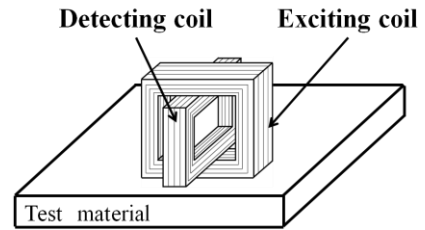
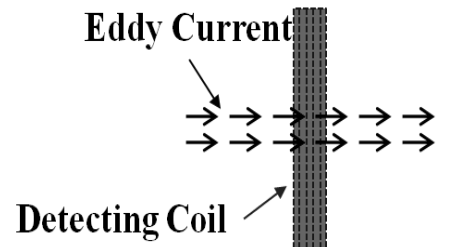
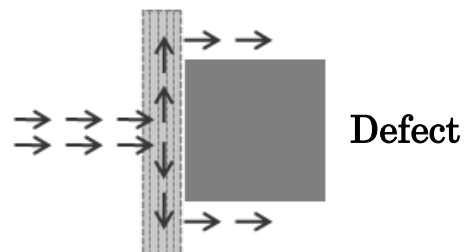


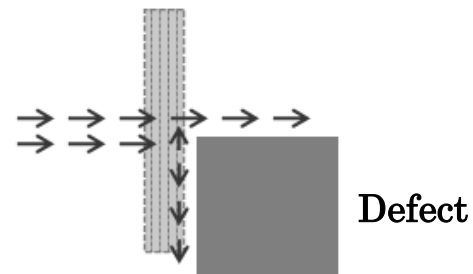
図 2 クロスポイントプローブの構造



(a)欠陥がない場合



(b)欠陥の中央を通過する場合



(c)欠陥の端を通過する場合

図 3 クロスポイントプローブの欠陥検出原理

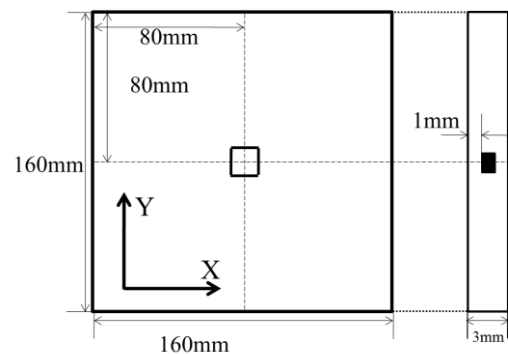


図 4 解析モデル

した。クロスプライ CFRP(0° 90°)の比透磁率は 1 とした。表面から深さ 1mm の部分に、縦 10mm、横 10mm、厚さ 1mm の欠陥を配置した。よって欠陥は表層から数えて 6~10 層に存在する。

励磁コイルは矩形縦置きで、長さ 7mm、高さ 9mm 巻線断面積 1mm^2 とし、周波数は 1MHz とした。検出コイルは縦 7mm、横 7mm の矩形断面とし、この矩形断面を貫く磁束から起電力を計算した。

試験体に対する励磁コイルの向きは、励磁コイルの巻線方向が X 軸になるようにし、励磁コイルと試験体のリフトオフは 0.2mm とした。コイルの位置を試験体の中央と、 $(x,y)=(5,-12)\sim(5,-12)$ 上 1mm 間隔に設定し、電磁界解析を行った。

5.結果

励磁コイルの巻線方向に強い導電性を持つ 0° 層では、検出コイルの巻線方向である Y 軸方向の渦電流がほとんどない。よってこれら奇数の層の渦電流はきず信号への影響が小さく無視できるので、以下に 90° 層である偶数の層の渦電流分布を示す。この 90° 層の渦電流は検出コイルの巻線方向である Y 軸方向に強く流れ、直交する X、Z 軸方向にはほとんど流れない。また、欠陥の有無による差異を明らかにするために、図 5~7 には 6 層目の渦電流分布を示す。図中の太い破線は検出コイルの位置を示す。

図 5 に欠陥がない場合の渦電流分布を示す。検出コイル近傍での渦電流は検出コイルを中心に上下対称に分布している。これらの渦電流は逆極性のため検出コイルに発生する起電力は極めて小さい。

図 6 は欠陥がある場合で、コイルが $(x,y)=(5,0)$ に位置している時の渦電流分布を示す。検出コイル近傍の渦電流は欠陥部を避けて分布しているが、検出コイル中心に対し上下対称に分布しており、これらの渦電流は逆極性のため、検出コイルの起電力は打ち消しあう。

図 7 にはコイルが $(x,y)=(5,5)$ に位置するときの渦電流分布を示す。検出コイル近傍の渦電流は、欠陥を避け分布し、検出コイルに対し対称性が失われている。このことから検出コイルに起電力が発生する。

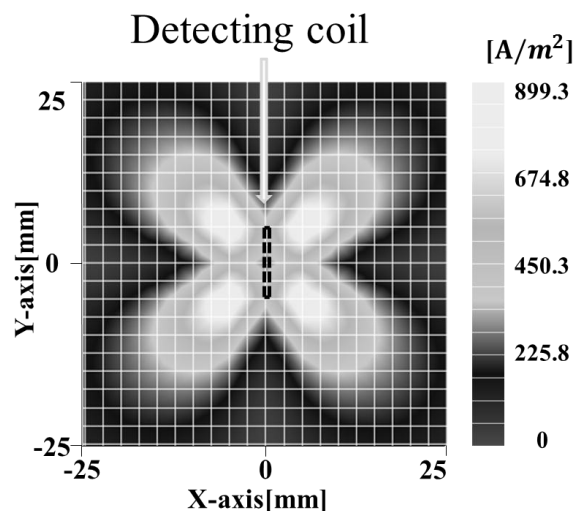


図 5 欠陥がない場合の渦電流分布

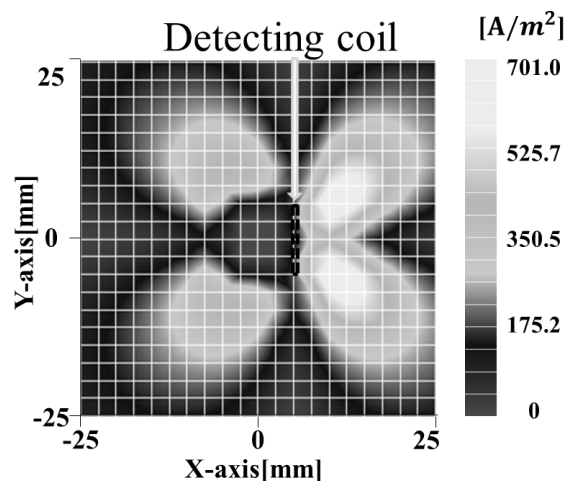


図 6 コイル位置 $(x,y)=(5,0)$ の場合の渦電流分布

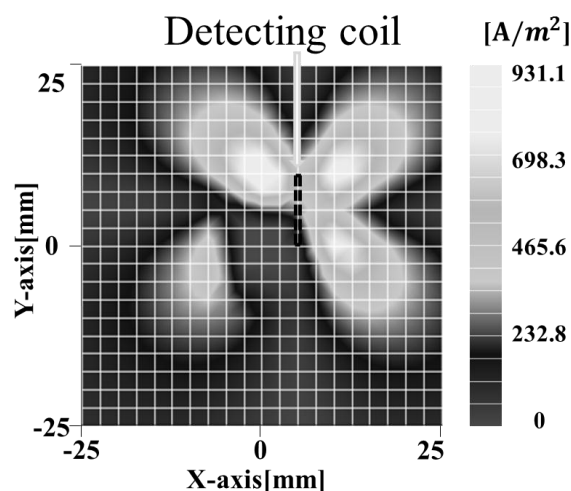


図 7 コイル位置 $(x,y)=(5,5)$ の場合の渦電流分布

次に欠陥がある場合にプローブを(x,y)=(5,-12)~(5, 12)の範囲で走査したときの、6層目の検出コイルの巻線方向の渦電流の変化を観測した。図8はプローブの走査位置に対する渦電流の同相成分を示しており、図9は走査位置毎の渦電流値を示す。検出コイルが欠陥端部付近に位置するときに、渦電流値は最大になっている。

次にプローブを(x,y)=(5,-12)~(5, 12)の範囲で走査したときの検出コイルのきず信号を図10(a)に解析結果、図10(b)に実験結果として示す。検出コイルのきず信号はコイル近傍を流れる渦電流に対し位相が90°遅れていることが確認できる。また、解析結果と実験結果のパターンが一致していることがわかる。

6.まとめ

クロスポイントプローブを用いたときのクロスプライ CFRP(0° /90°)に誘導される渦電流分布を、有限要素法を用いた電磁界解析により求めた。

欠陥の有無による渦電流分布の変化と、検出コイルのきず信号との関連を明らかにした。その結果解析結果と実験結果のきず信号パターンが一致していることが確認できた。

今後は欠陥の深さ変化に対する、きず信号と渦電流分布の関係について検討を行う予定である。

7.参考文献

- 1) 小山潔、星川洋、小島剛基：「CFRP 損傷検出への渦電流探傷試験の適用について」 新素材の非破壊評価特別研究委員会ミニシンポジウム、pp7-12(2009)

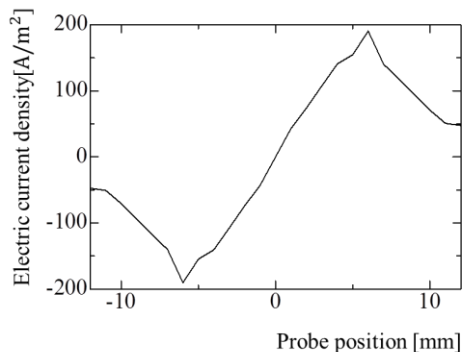


図8 コイル近傍を流れる渦電流

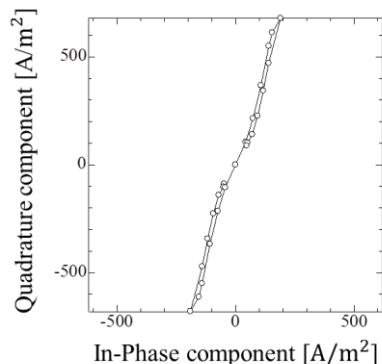
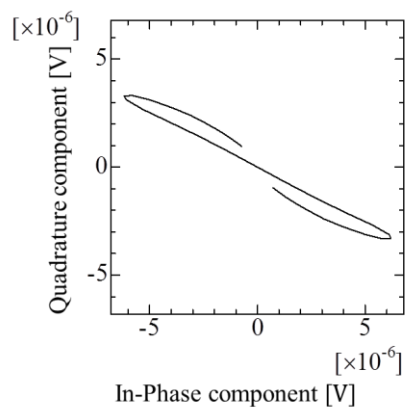
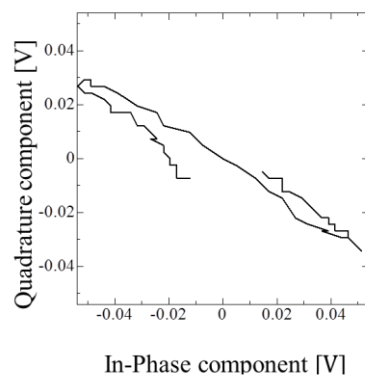


図9 コイル近傍を流れる渦電流値



(a)解析結果



(b)実験結果

図10 検出コイルのきず信号パターン