

ヘルスマニタリング技術の建設構造および地下埋設構造物への応用開発に関する研究

電磁誘導非破壊試験による炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の 損傷検出に関する研究

小山 潔 (日大生産工・教授)

星川 洋 (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)

大滝 政博 (テクニカルリンク (株)・取締役社長)

1. はじめに

ヘルスマニタリング技術の建設構造および地下埋設構造物への応用開発に関する研究の一環として、昨年度に引続き炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の損傷検出への電磁誘導非破壊試験の応用開発について研究を進めた。

CFRP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るのみならず、建設構造物の耐震化補強材としても使用されるようになった。しかし、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、非破壊試験が行われている。CFRPに対する非破壊試験法には、超音波探傷試験が適用されている^{1)~3)}が、接触媒体を必要とする。電磁誘導非破壊試験法である渦電流探傷試験(ECT)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つ。

今年度は、クロスポイントプローブ(CPプローブ)^{4)~5)}を用いたCFRP試験体に作製した模擬欠陥の検出結果について報告する。筆者らは、原理的にリフトオフ雑音が発生しないきず検出精度の高いシートプローブ(Θ プローブ)^{6)~7)}によれば、クロスCFRPの損傷欠陥はSN比高く明瞭に検出し、一方向CFRPや擬似等方CFRPの場合にはCFRP特有の導電性の異方性による雑音が発生するものの損傷欠陥を検出できる可能性があることを報告している^{8)~10)}。そこで、CFRPの導電性の異方性に対するCPプローブのきず検出原理を考察して、CFシートの繊維方向に励磁コイルを配置すれ

ば、原理的に雑音を発生せずに一方向CFRPや擬似等方CFRPの損傷欠陥をSN比を向上させて検出できると考えた。実験の結果、クロスCFRPの模擬欠陥だけでなく、一方向CFRPや擬似等方CFRPの模擬欠陥をも今回の条件下においてSN比を向上させて検出できることを確認した。

2. CPプローブによるCFRPの欠陥検出

CFRPの欠陥検出に用いたCPプローブの構造を図1に示す。CPプローブは、矩形縦置の励磁コイルとそれに直交配置した矩形縦置の検出コイルから構成される。励磁コイルによってその巻線方向に渦電流を誘導し、欠陥などによって発生した検出コイル巻線方向の渦電流成分による磁束によって検出コイルに起電力が発生し信号を得る。

図2に示すように欠陥がない場合には、励磁コイル直下には励磁コイル巻線方向に渦電流が誘導され、検出コイル巻線方向の渦電流成分がないので信号は発生しない。CPプローブの励磁コイルを炭素繊維方向と同方向に配置することにより、渦電流は炭素繊維方向に誘導され、検出コイルは、炭素繊維方向と直交配置となるので、検出コイル巻線方向の渦電流成分がないので信号を発生しない。即ち、 Θ プローブで問題であった一方向CFRPの雑音が原理的に発生しない。

図3に示すように欠陥がある場合には、欠陥端部で渦電流の流れが変化し検出コイル巻線方向の渦電流が発生する(図(a))。これにより検出コイルに信号が発生する。なお、CPプローブが欠陥中央部に位置すると検出コイル巻線方向に渦電流は発生するが中央部を中心に流れの向きが逆方向(図(b))であり検出コイルを鎖

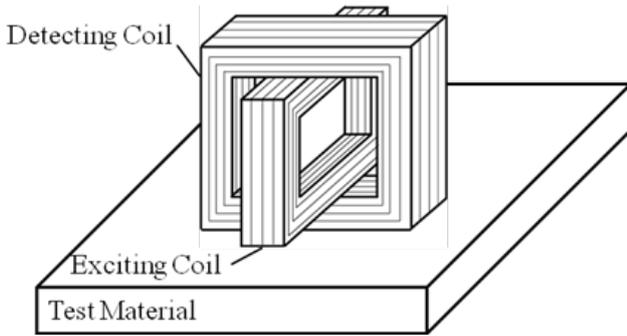
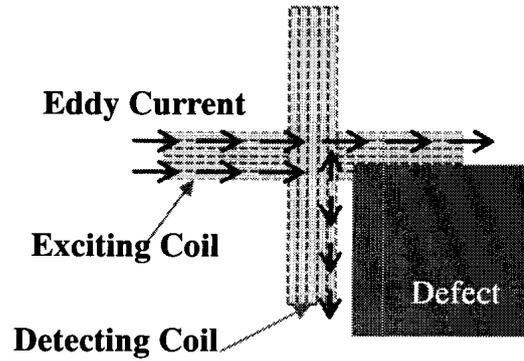


図1. クロスポイント渦電流探傷プローブ (CPプローブ) の構造



(a) 欠陥端部にCPプローブが位置した場合

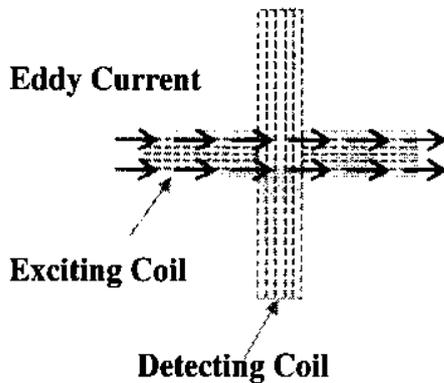
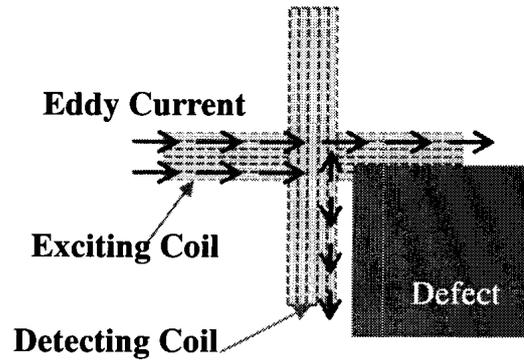


図2. 欠陥がない場合の渦電流の流れ



(b) 欠陥中央部にCPプローブが位置した場合

図3. 欠陥がある場合の渦電流の流れ

交する磁束の総和は零となり起電力は発生せず、信号は得られない。CPプローブでは欠陥端部で信号が発生する。

3. 実験方法

実験に用いた CP プローブの励磁コイルの寸法は、高さ7mm長さ7mm巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ であり、検出コイルの寸法は高さ9mm長さ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、擬似等方CFRP板(東邦テナックス(株)製)を用いた。また、1辺が10mm角で厚みが1.0mmのUDを表面から深さ1mmの位置に挟み込み模擬欠陥とした。模擬欠陥は、積層間で電気的に絶縁されている。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。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。プローブをCFRP板表面上を2次元に走査した。走査の範囲と間隔は、x,y方向に±25mmの0.5mmである。

4. 実験結果

図4には、試験体毎のCPプローブの励磁コイルの正規化インピーダンスの変化を示す。ECTが一般的に

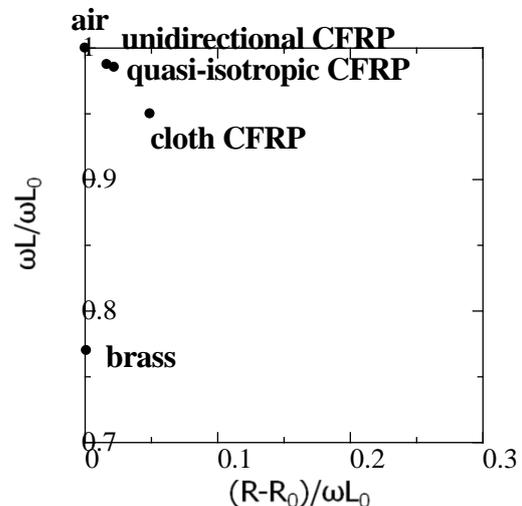
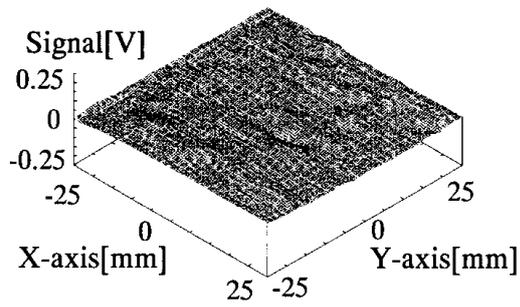
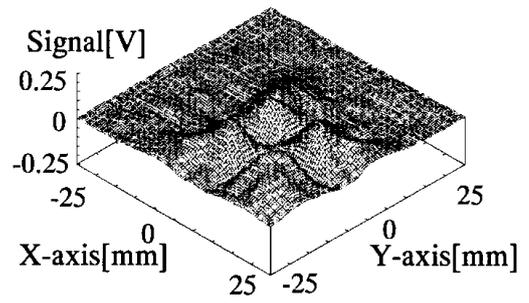


図4. 各種試験体に対する正規化インピーダンス

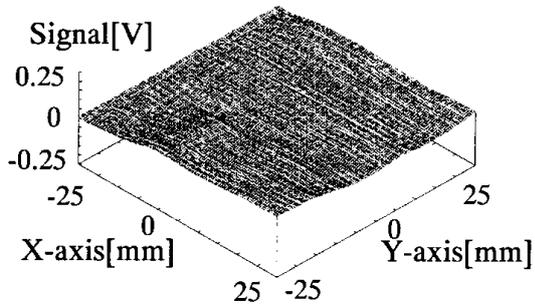


(a) CFRP に欠陥がない場合

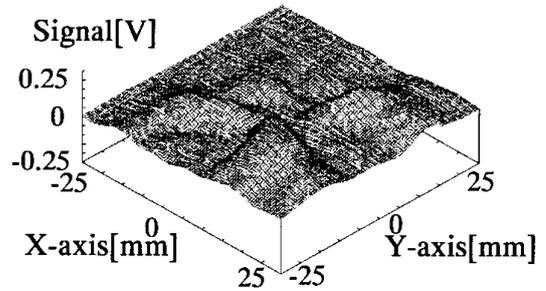


(b) CFRP に模擬欠陥がある場合

図5. CPプローブによるクロスCFRPの探傷信号の鳥瞰図表示

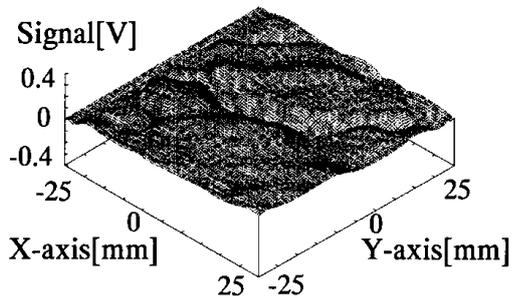


(a) CFRP に欠陥がない場合

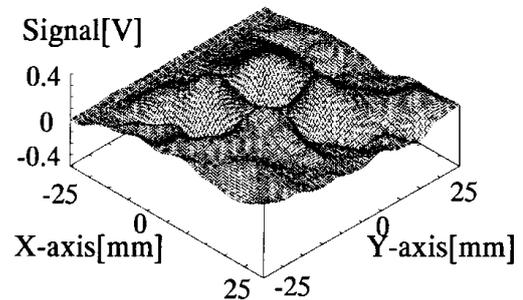


(b) CFRP に模擬欠陥がある場合

図6. CFシートの繊維方向にCPプローブ配置した場合の一方向CFRPの探傷信号の鳥瞰図表示



(a) CFRP に欠陥がない場合



(b) CFRP に模擬欠陥がある場合

図7. CFシートの繊維方向にCPプローブ配置した場合の擬似等方CFRPの探傷信号の鳥瞰図表示

適用される金属（図中の Brass）に比べ、CFRP では正規化インピーダンスが非常に大きい。これは、金属に比べ CFRP は渦電流強度が小さいことを示す。また、クロス CFRP に比べ、一方向 CFRP や擬似等方 CFRP では更に正規化インピーダンスが大きい。一方向にしか導電性を持たない一方向 CFRP や擬似等方 CFRP は、xy 方向に導電性を持つクロス CFRP に比べ渦電流がさらに流れ難いためである。

図 5 には、クロス CFRP の検出結果を示す。ECT では、検出コイル信号は励磁電流に対する同相成分と 90° 進相成分で得られるが、図では信号振幅を示す。図(a)の欠陥がない場合には、雑音が殆ど発生していない、一方、図(b)の欠陥がある場合には、欠陥部に明瞭な信号が得られている。図 6 には、一方向 CFRP の検出結果を示す。 Θ プローブの場合に発生していた雑音（文献 8）～(10)を参照）が発生せずに、クロス CFRP と同等に欠陥部に明瞭な信号が得られている。図 7 には、擬似等方 CFRP の検出結果を示す。クロス CFRP や一方向 CFRP に比べて欠陥がない場合にも雑音が発生しているが、 Θ プローブに比べて雑音が小さく、模擬欠陥を検出できていることがわかる。擬似等方 CFRP の場合に雑音が発生しているのは、CF シートが $-45, 0, 45, 90^\circ$ に交互に積層されており、CP プローブの励磁コイル巻線が $\pm 45^\circ$ の配置となるためである。

5. まとめ

電磁誘導を利用した非破壊試験法である ECT による CFRP の損傷検出について検討を行った。CFRP の導電性の異方性と CP プローブのきず検出原理を考察して、CP プローブの励磁コイルの巻線方向を CF シートの繊維方向と同方向に配置すれば、雑音小さく SN 比を向上させて検出できることを示した。クロス CFRP と一方向 CFRP の模擬欠陥を雑音小さく明瞭に検出できることがわかった。また、擬似等方 CFRP の場合には雑音を発生するものの模擬欠陥を SN 比を向上させて検出できることがわかった。今後は、擬似等方 CFRP の雑音を抑えるための渦電流探傷プローブの工夫や信号処理法の検討を行う予定である。また、成型法の新技術である VaRTM（バータム）で製作された CFRP の損傷検出の検討などを行う予定である。

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) K.Krzywosz : Latest Eddy Current Applications in the Nuclear Industry, Proceedings of the 13th International Conference on NDE, pp.61-65 (1995)
- 5) D.Bouden and I. Lemahieu : Use of Blind De-convolution to Restore Eddy Current Data from Non-destructive Testing of Defects in Welds, Review progress of QNDE 18, pp.743-750 (1998)
- 6) 星川洋、小山潔、柄澤英之：リフトオフ雑音の発生しない渦電流探傷新型上置プローブに関する研究、非破壊検査、50(11)、pp.736-742 (2001)
- 7) 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)
- 8) 小山潔、星川洋：渦電流探傷試験法による CFRP の欠陥検出の試み、日本非破壊検査協会第 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.31-34 (2007)
- 9) 小山潔、星川洋、三木公輔：渦電流探傷非破壊試験法による CFRP の欠陥検出について、日本複合材料学会 2008 年度研究発表講演会予稿集、pp.53-54 (2008)
- 10) K.Koyama, K.Miki and H.Hoshikawa : Eddy Current Non-Destructive Testing for CFRP, The US-Japan Conference on Composite Materials 2008, SHM-11, pp.1-6 (2008)