

誘電体に対する電磁誘導試験のき裂の検出原理の解明

Principle of crack detection for dielectrics using electromagnetic induction testing

京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻 助教 松永航

Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University, Wataru Matsunaga

要旨

本研究では、有限要素法解析及び実験により、誘電体のき裂の検出に対する電磁誘導探傷法の探傷原理を解明した。有限要素解析を用いて、き裂を導入した導電体と誘電体の渦電流及び変位電流の経路を計算した。解析結果より、それぞれの材料に誘導される渦電流及び変位電流のき裂周りにおける電流経路が異なるため、探傷原理が異なることを示した。実験では、き裂を有する導電体と誘電体の探傷を行った。実験結果より、導電体ではき裂部から離れても電磁界が大きく変化したが、誘電体ではき裂の極周辺部のみ電磁界が変化することを示した。したがって、EITを導電体と誘電体に適用した場合で探傷原理が異なるため、結果として探傷結果も異なることを示した。

1. はじめに

渦電流探傷試験 (Eddy current testing, ECT) は、交流電圧を印加したコイルを試験体に近づけることで試験体表面近傍に渦電流を励磁し、欠陥ないしは物性変化による渦電流の乱れを検出する非破壊検査手法の一種である。ECT は非接触で高速に探傷可能であり、製造工程における試験や保守検査等に適用されている [1-5]。何れの用途でも、従来の ECT はコイルに励磁する周波数として数 kHz から数百 kHz 程度の交流電圧を用い、測定条件として試験対象が導電体であることが要求されてきた。

一方、従来の ECT と比較して比較的高周波の交流電圧をコイルに印可することで、導電率の低い炭素繊維強化樹脂 (Carbon fiber reinforced plastics, CFRPs) の様な材料にも ECT が適用可能となる [6]。また、CFRP の様な導電率の低い材料に適用する周波数よりもさらに高い周波数を用いることで、誘電体にも適

用可能となることが報告されている [7-9]。Mizukami らは、10 MHz の交流電圧を用いた本手法を適用することでガラス繊維強化樹脂 (Glass fiber reinforced plastics, GFRPs) のスリット及び減肉を検出可能であることを報告している [8]。Gäbler らは、6 MHz の交流電圧を用いた本手法を適用することでアクリル樹脂の減肉を検出している [9]。以上より、ECT はコイルに印加する交流電圧の周波数を増大させることで、従来適用できないと言われてきた誘電体にも適用可能となる。誘電体に適用した場合には渦電流の電磁界の変化を検出しているわけではないため、本研究では ECT を電磁誘導試験 (Electromagnetic induction testing, EIT) と呼称する。

先行研究により、EIT が誘電体に適用可能であることは報告されているものの、その検出原理について詳細に検討されていない。そのため、本稿では、誘電体のき裂を対象として、

EIT によるき裂の検出原理を解明することを目的とする。そのために、有限要素解析により、き裂を有する導電体及び誘電体の、き裂周りにおける渦電流及び変位電流の電流経路の形成方法の差異を調査し、これにより、導電体と誘電体の間でき裂の検出原理が異なることを示した。実験では、導電体である炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic, CFRTP) と誘電体である GFRP のき裂の検出を行い、渦電流と変位電流のき裂周りでの電流経路の形成の差異が探傷結果に与える影響を議論した。

2. 有限要素解析

2.1. 解析方法

解析モデルを以下の図 1 に示す。本解析では、70 mm × 150 mm × 2 mm の試験片上中央部に片側貫通き裂を導入し、図 1 では、リフトオフが 1 mm としてコイルの中心軸がき裂と平行になる様に矩形形状の励磁コイルを配置し、励磁コイルに 0.1 A/m² の交流電流を印加した。励磁コイルを図 1 の様な配置にすることで、Ampère の法則により、励磁コイルからの磁界は図 1 の y 軸方向に誘導され、この磁界を打ち消す様に Faraday の電磁誘導の法則により、き裂に対して電流は垂直に流れるため、き裂周りの電流の振る舞いを単純化できる。

図 1 に示すモデルについて、試験体を導電体及び誘電体として解析を行った。導電体に対して解析を行う場合には、等方性材料を仮定し、導電体の導電率を一般的な金属材料と同程度の 1.0×10^6 S/m、励磁周波数を 1.0 kHz とした。また、誘電体に対して解析を行う場合には、誘電体として一般的な等方性の樹脂材

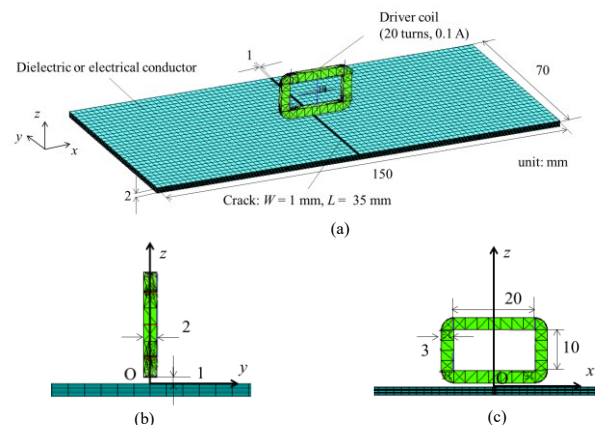


図 1 解析モデル. (a) 全体図, (b) $y-z$ 平面図, (c) $x-z$ 平面図.

料を仮定し、比誘電率を 4、導電率を 1.0×10^{-3} S/m、励磁周波数を 10 MHz とした。誘電体に対する EIT の励磁周波数は先行研究で適用されている値を適用した [8]。これに伴い、樹脂の導電率には周波数依存性があるが、先行研究でエポキシ樹脂において 10 MHz 検討されている値を適用した [10]。

解析には Ansys Mechanical APDL R18.2 (ANSYS, Inc., USA) を用いた。解析要素には 3次元 20 節点の六面体要素 (Solid 236 in ANSYS) を用いた。メッシュ密度について、健全部は $x/40 \times y/28 \times z/10$ 、き裂部は $x/5 \times y/14 \times z/10$ とした。解析結果には、試験体表面の渦電流密度ベクトルもしくは変位電流密度ベクトルを出力した。

2.2. 解析結果

解析で算出した渦電流と変位電流の経路を図 2-3 に示す。図 2 が導電体、図 3 が誘電体の結果を示している。図 2-3 において、(a) が試験体表面の $x-y$ 平面における解析結果、(b) が (a) における赤線のき裂左端部上 (A-A') の $x-y$

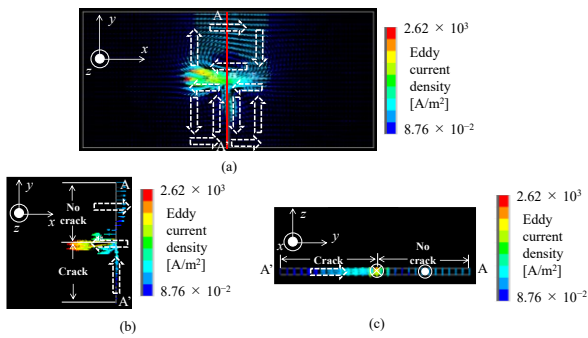


図 2 導電体のき裂周りにおける渦電流の経路. (a) 全体図, (b) き裂左端部 (A-A')の x - y 平面図, (c) き裂左端部(A-A')の y - z 断面図.

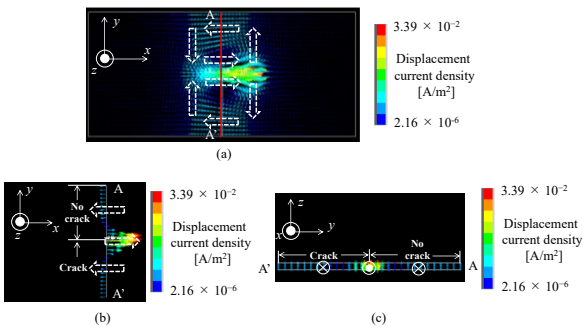


図 3 誘電体のき裂周りにおける変位電流の経路. (a) 全体図, (b) き裂左端部 (A-A')の x - y 平面図, (c) き裂左端部(A-A')の y - z 断面図.

平面における解析結果, (c)が(a), (b)における A-A'の y - z 断面の解析結果, すなわち, 試験体内部の渦電流及び変位電流の経路を示している. 図 2-3 おける有色の小さいベクトルが解析により得られた結果であり, その色はベクトルの大きさを示している. また, 白い点線の矢印は, 解析結果中の有色のベクトルを基に描画しており, 該当部での渦電流もしくは変位電流のおよその向きである. 導電体について, 図 2(a)より, 試験体表面の渦電流はき裂がない試験体上部とき裂がある試験体下部で異

なる電流経路を形成していることが分かる. すなわち図 2 (b)より, 試験体下部 (き裂部)では渦電流が $+y$ 方向に流れているのに対して, 試験体上部 (健全部)では渦電流が $+x$ 方向に流れていることが分かる. また, 内部の渦電流について示した図 2(c)でも同様のことが言える. 一方, 誘電体について, 図 3(a)より, 試験体の表面の変位電流はき裂がない試験体上部とき裂がある試験体下部で同様の電流経路を形成していることが分かる. すなわち, 図 3 (b)より, 試験体下部 (き裂部)では変位電流が $-x$ 方向に流れ, 試験体上部 (健全部)でも渦電流が $-x$ 方向に流れていることが分かる. また, 内部の変位電流について示した図 3 (c)でも同様のことが言える. 以上より, 渦電流はき裂を迂回して電流経路を形成するのに対して, 変位電流はき裂が存在してもき裂を迂回することなく, き裂部を流れて電流経路を形成する.

誘電体におけるき裂部は, 空気と誘電体の界面である. 本研究で適用している周波数が 10 MHz であるため誘電分散により界面分極が発生していると想定される. つまり, き裂界面近傍では, 界面分極により分極電荷が誘導されていると考えられる. このき裂界面の分極電荷に加えて, 励磁コイルに存在する真電荷が Gauss の法則から電束密度を生み出し, この電束密度の時間変化がき裂部で変位電流を誘導していると考えられる. つまり, EIT を誘電体に適用した場合には, き裂部及び健全部で発生する変位電流の電磁界の差異を検出することで, き裂を検出していると言える.

3. 実験

3.1. 実験方法

導電体である CFRTP (Tepex, Bond-Laminates GmbH, Germany)と誘電体である GFRP (エポキシガラス板, 村上電業株式会社, 日本)に導入したき裂の探傷試験を行った. 試験片を図 4 に示す. 図 4 (a-1), (a-2)が厚さ 1 mm の CFRTP で, 図 4 (b-1), (b-2)が厚さ 2 mm の GFRP である. 図 4 (a-1), (b-1)が健全材であり, 図 4 (a-2), (b-2)がき裂を有する材料である. CFRTP 試験片は, 母材がポリフェニレンサルファイドの綾織の織物材で繊維含有率は 45%である. 本試験片は, 厚さ 0.25 mm の CFRTP を 4 層積層し, ダブルベルトプレスにて成形した試験片である. GFRP 試験片は, 繊維が E-ガラス, 母材がエポキシ樹脂から成る平織の織物材で, 繊維含有率は 52.3%である. 何れの試験片も織物材料であるため面内で等方性の電気特性を有する. き裂を有する試験片は, 試験片の中央部にバンドソー (K-100 HOZAN TOOL IND.CO., LTD., Japan)を用いて幅 1 mm, 長さ 35 mm 以上のスリットを挿入した.

実験装置を図 5 に示す. 渦電流および変位電流の検出には, 先行研究で GFRP に導入したスリットの探傷に適用可能であった Tall Transmitter Differential Receiver (TTDR)プローブを用いた [8]. 波形発生器 (PXI 5421, National Instruments Corp., USA)を用いて, 1 V, 16 bit の交流電圧を励磁コイルに印可した. このとき, 試験体が CFRP の場合, 励磁周波数を 1 MHz とし, GFRP の場合, 励磁周波数を 6 MHz とした. GFRP に適用する励磁周波数は, 励磁コイルの共振周波数が約 7 MHz であり, それを超えないように選定した. 渦電流もしくは変位電流からの電磁界の変化をリフトオ

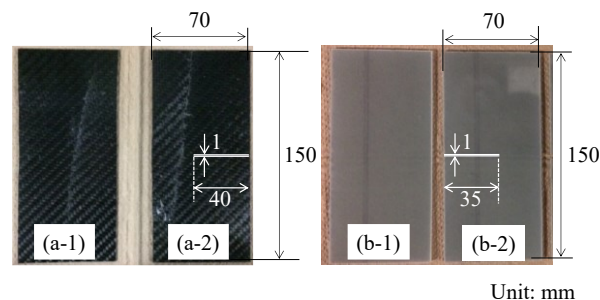


図 4 試験片. (a-1) CFRTP (き裂なし), (a-2) CFRTP (き裂あり), (b-1) GFRP (き裂なし), (a-2) GFRP (き裂あり).

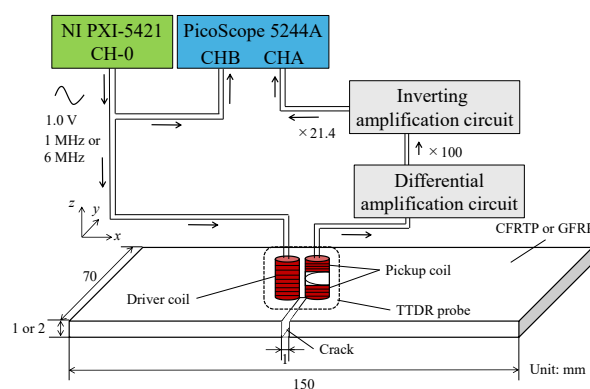


図 5 実験装置.

フ 1 mm として検出コイルにより検出し, これを市販のオペアンプ (LM7171, Texas Instruments Inc., USA)で作製した差動増幅回路 (増幅倍率: 100)及び反転増幅回路 (増幅倍率: 21.4)を介して, オシロスコープ (PicoScope 5244a, Pico Technology Co., Ltd., UK)によりサンプルレート 125 MS/s, 空間分解能 15 bit で取得した. また, 検出コイルの出力だけではなく, 励磁コイルに印可した入力電圧も測定した. 取得したデータはグラフィカルプログラミングソフト (LabVIEW 2018, National Instruments Corp., USA)を用いて整理した.

3.2. 実験結果

図 6 に CFRTP と GFRP の探傷結果を示す.

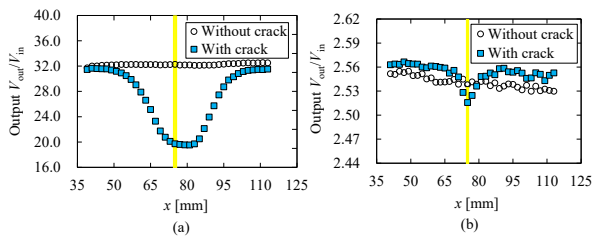


図 6 実験結果. (a) CFRTP, (b) GFRP.

図 6(a)が CFRTP の探傷結果であり，図 6(b)が GFRP の探傷結果である．出力電圧 V_{out} を入力電圧 V_{in} で除した出力であり，横軸は測定箇所 x 座標であり，試験片のき裂を導入した部分を黄色で示している．図 6(a)より，導電体である CFRTP の場合，き裂部を中心に出力が大きく変化している．これは，図 2 で示したように，渦電流がき裂周りで電流経路が乱されることでき裂から離れたところでも電磁界が大きく変化するためである．一方，図 6(b)より，誘電体である GFRP の場合，き裂部及びその極周辺でのみ出力が変化している．これは，図 3 で示したように，き裂部が存在していても変位電流の電流経路が乱されないためである．このことから，EIT を導電体と誘電体のき裂の検出に適用した場合，それぞれにおいて渦電流と変位電流の電流経路が異なるため，これにより探傷原理が異なり，その結果として探傷結果も大きく異なる．

4. まとめ

本研究では，誘電体のき裂の検出に対する EIT の理論を構築するために，有限要素解析及び実験を行い，導電体に対する EIT (= ECT) との違いを明らかにした．き裂を有する導電体及び誘電体に対して有限要素解析を行うこと

で，渦電流は，き裂を迂回するように電流経路を形成するのに対して，変位電流はき裂部を流れて電流経路を形成することを示した．また，EIT により，面内等方性の導電体である CFRTP，同じく面内等方性の誘電体である GFRP のき裂を検出することで，探傷結果が大きく異なることを示した．これは，き裂周りでの渦電流と変位電流の電流経路の差異によるものと結論付けた．したがって，EIT を導電体と誘電体に適用した場合において探傷原理が異なることを示した．

謝辞

本研究を援助していただいた公益財団法人京都技術科学センターに感謝致します．

参考文献

- [1] Z. Qu *et al.* *Microelectron Eng* **108**, 66 (2013).
- [2] M. R. Nabavi and S. Nihtianov, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **58**, 4414 (2011).
- [3] J. García-Martín *et al.* *Sensors* **11**, 2525 (2011).
- [4] J. Xin *et al.* *NDT and E International* **54**, 45 (2013).
- [5] H. Tesfalem *et al.* *NDT and E International* **100**, 1 (2018).
- [6] H. Heuer *et al.* *Compos B Eng* **77**, 494 (2015).
- [7] S. Hillmann *et al.* in *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation*, edited by N. Ida and N. Meyendorf, 1st ed. (Springer International Publishing, 2019), pp. 729–756.
- [8] K. Mizukami *et al.* *NDT and E International* **74**, 24 (2015).
- [9] S. Gäbler *et al.* *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **64**, 2227 (2015).
- [10] L. R. Grace, *Compos Struct* **128**, 305 (2015).