

# 電磁超音波・渦電流複合センサの開発とその有効性の検証

Development of novel EMAT-ECT multi-sensor and verification of its feasibility

東北大学大学院	鈴木 研一郎	Kenichiro SUZUKI	Non-Member
東北大学流体研	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member
東北大学流体研	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
東北大学流体研	佐藤 武志	Takeshi SATO	Member
フランス国立応用科学院リヨン校(INSA-Lyon)	Philippe Guy	Non Member	
フランス国立応用科学院リヨン校(INSA-Lyon)	Amelie Casse	Non Member	

In this study, we propose a novel EMAT-ECT multi sensor aiming at advanced structural health monitoring. For the purpose, proto-type EMAT-ECT multi-sensor was developed and their functions both as ECT and EMAT prove were evaluated. Experimental results of pulse ECT using the EMAT-ECT multi-sensor showed that the proposed sensor has a capability of detection and sizing of flaws. Experimental results of EMAT evaluation using the EMAT-ECT multi-sensor showed that ultrasonic wave was transmitted by EMAT-ECT multi sensor and flaw echo was observed. These results imply that EMAT-ECT multi sensor is available for pulse ECT and EMAT.

**Keywords:** EMAT, UT, Pulse ECT

## 1. はじめに

日本で原子力発電プラントが運転を開始して 30 年以上が経過し、高経年化に伴ってプラントの保全に対する重要性はますます高まっている。今後プラントの一層の安全性、信頼性の向上を図り、かつ合理的な保全を行うための手段として、状態監視保全が注目されている。これは、機器の状態を監視することにより状態変化を把握し、トラブルに至る前に異常を検出し、保全実施の可否及び時期を評価・判断するというものである。これまでに得られた機器に対する知見と、モニタリングにより得られた情報を併せて診断することで、保全の合理化が可能になると考えられている [1]。

一方、金属構造材の代表的な非破壊検査手法のうち、電磁超音波探触子(EMAT)と渦電流探傷(ECT)は、通常の超音波探傷(UT)に不可欠な接触媒質を必要としない非接触式の探傷法であることや、信号が安定していることから、長期間のモニタリングに適している。また、表 1 に示すように、ECT と UT(EMAT)とは、き裂サイジング精度の高い深さ領域について、互いに補完し合う関係にあることが経験的に知られている。超音波と渦電流を複合させたセンサが実現すれば、幅広い深さ領域におけるき裂を高精度にサイジング可能となると考えられる。さらに、EMAT と ECT では装置構成に類似する点が多い。EMAT と ECT を同時に単独のセンサで行い、それらのデータを融合させるといった研究は今までに無く、また、これを原子力発電プ

ラント配管の損傷状態監視へと適用することで、幅広い深さに存在するき裂に対し高精度なサイジングが可能になる事が期待される。

著者らは、EMAT センサと ECT センサを複合させた EMAT-ECT 複合センサによって超音波信号と渦電流信号を融合させた高信頼性モニタリング手法を提案している。本研究では、複合センサに関する検討の第一段階として、EMAT-ECT 複合センサの試作を行い、ECT プローブ及び EMAT プローブとしての機能評価を実施し、その有効性を検証する。

表 1 ECT と UT の比較

Subjects		ECT	UT	ECT/UT
Surface Defects	Sensing	◎	△	ECT ◎
	Sizing (in depth)	○	△	ECT ○
Surface Layer Defects (Depth < 5mm)	Sensing	○	○	UT / ECT ○
	Sizing	△	△	UT / ECT △
Deep Defects (Depth >= 5mm)	Sensing	×	◎	UT ◎
	Sizing	×	○	UT ○

## 2. 実験と結果

### 2.1. EMAT-ECT 複合センサの概要

センサの動作原理を図 1 に示す。励磁コイルに励磁電流を流し、試験体表面に渦電流を誘起させる。渦電流はき裂の存在により変化するため、励磁コイル内

側に検出コイルを配し、渦電流の時間変化に伴う磁束変化を誘導起電力によって測定することで渦電流探傷が可能である[2]。また、コイル上に永久磁石を配すことで静磁場を作用させ、渦電流との相互作用により検査体表面にローレンツ力を発生させ、これにより試験体内に超音波を送信する。送信された超音波は試験体底面ないしは試験体内部のき裂で反射されるため、送信と逆の過程で超音波を受信し、エコーの時間差を測定することで電磁超音波探傷が可能である[3][4]。製作した EMAT-ECT 複合センサの概要を図 2 に示す。センサは、底面外周の励磁コイル、励磁コイル内側の二つの検出コイル、コイル上に配置されたネオジウム磁石より構成される。

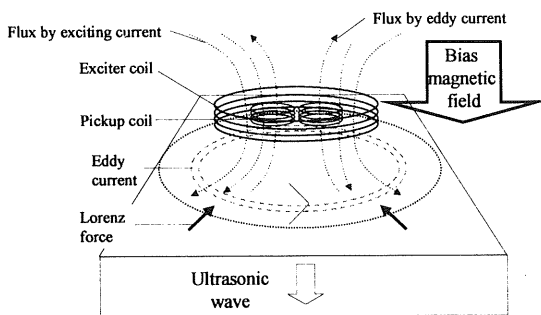


図 1 EMAT-ECT 複合センサの動作原理

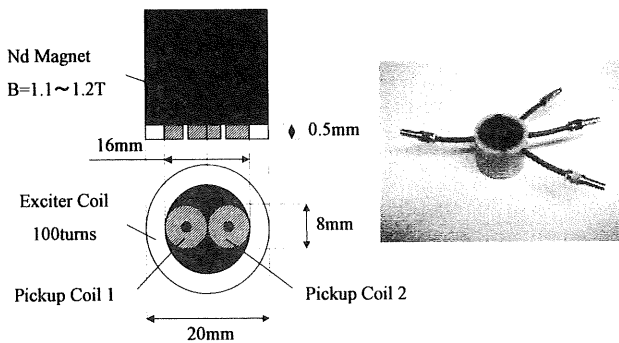


図 2 EMAT-ECT 複合センサ

## 2.2. パルス回路の製作

EMAT は超音波の機械-電気変換効率が低いため、大電流のパルス波を用いて励磁する必要がある[3]。そのため励磁電流源となるパルス回路を製作した。製作した回路の概要を図 3 に示す。高圧電源を用いてコンデンサを充電し、その放電電流である大電流パルスを EMAT-ECT 複合センサに供給する。本回路に EMAT-ECT 複合センサを接続し、充電電圧 1563V において放電した際の電流波形から高周波ノイズを除去すると図 4 に示すような波形が得られた。電流は最大約 50A、振動の周波数は約 840kHz であった。

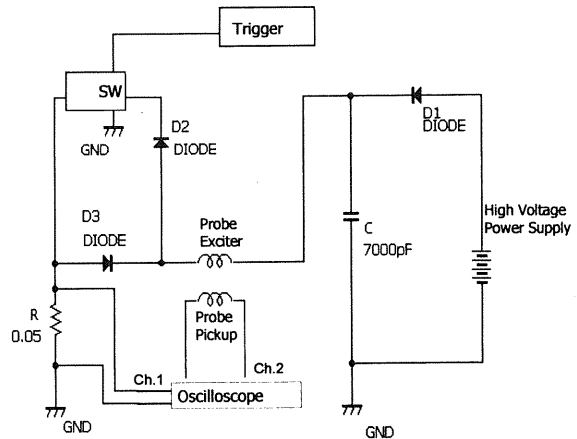


図 3 大電流パルス回路

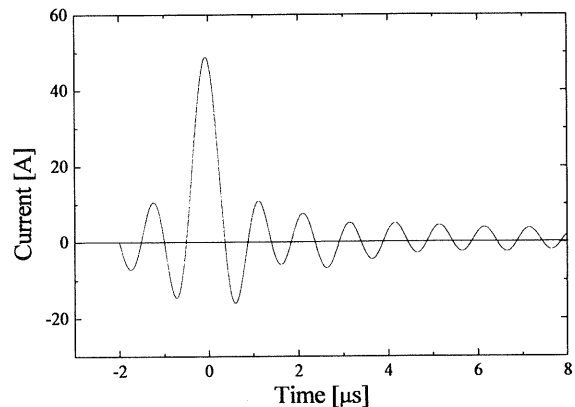


図 4 充電電圧 1563V におけるパルス電流波形

## 2.3. ECT センサとしての機能評価

EMAT-ECT 複合センサは一個の励磁コイルを共通に用いている。励磁がパルス状になることから、ECT は必然的にパルス ECT となる。試作した複合センサの渦電流プローブとしての機能を評価するため、図 3 のパルス回路を励磁電流源としたパルス ECT を行った。使用した試験片を図 5 に示す。縦 200mm、横 220mm、厚さ 20mm の SUS304 ステンレス板に深さの異なる EDM(Electro Discharge Machining)スリットを 4 箇所導入したものである。全ての EDM スリットの長さとは幅はそれぞれ 10mm、1mm であり、深さは 2mm、4mm、8mm、12mm と変化する。

パルス ECT の実験体系を図 6 に示す。試験片のき裂上に EMAT-ECT 複合センサを配置し、パルス回路からの充電電圧 1562V での放電電流を励磁電流とした。瞬間最大電流は約 50A である。ピックアップコイルに生じた電圧をオシロスコープで観測した。得られた検出信号の高周波ノイズ成分を 1MHz ローパスフィルタで除去し、励磁電流の振幅で規格化すると図 7 に示される波形の信号が得られた。信号を解

析するために  $\Delta t_{12}$  と Peak to Peak の二つのパラメータをそれぞれのスリットの波形信号から抽出した。ここで、 $\Delta t_{12}$  は 図 7 中に示す二つのゼロクロス時間  $t_1, t_2$  間の時間、Peak to Peak は  $t_1, t_2$  間の 1 波長の波の最大値と最小値との差を示す。各々の EDM スリットについてこれら二つのパラメータに関して整理したものを 図 8 に示す。 $\Delta t_{12}$  の値によりスリットの有無が判別でき、またスリットが深いほど Peak to Peak 振幅が減少する傾向が確認できた。以上より、EMAT-ECT 複合センサを用いたパルス ECT によりき裂の検出とサイジングが可能と考えられ、複合センサの ECT プロブとしての機能が確認された。

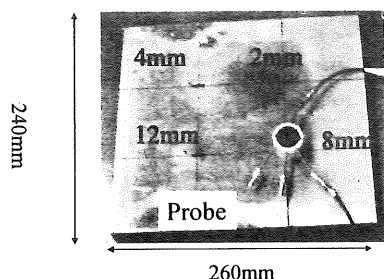


図 5 SUS304 試験片

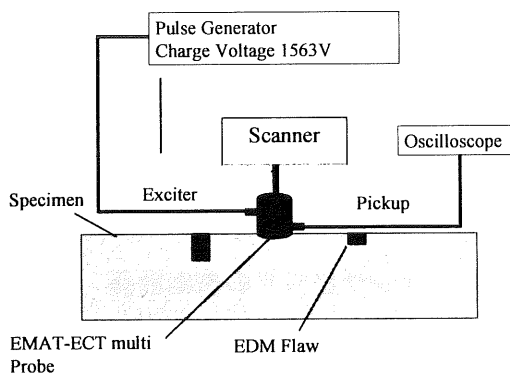


図 6 パルス ECT 実験体系

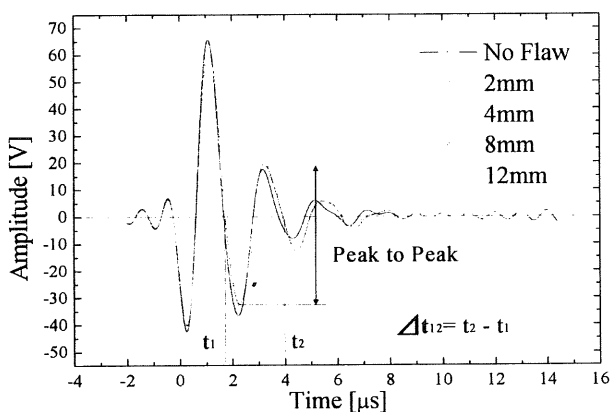


図 7 ピックアップコイルからの信号

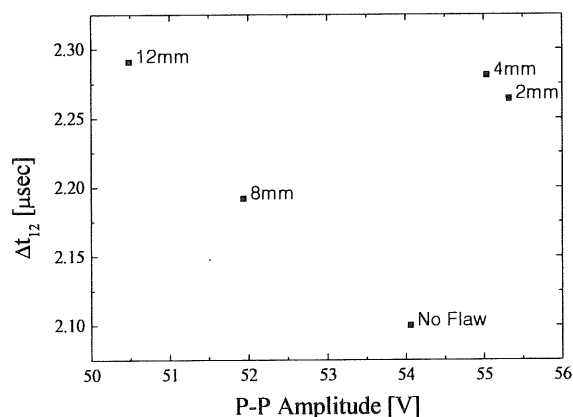


図 8 Peak to Peak 振幅 -  $\Delta t_{12}$  プロット

## 2.4. EMAT センサとしての機能評価

複合センサの EMAT プロブとしての機能を評価するため、図 3 に示されるパルス回路を励磁電流源として超音波探傷を行った。実験体系を図 9 に示す。試験片は 2.3 節で用いたものと同じ試験片を用いた。試験片の深さ 12mm のスリットの裏面から超音波を入射し、その反射波を観測した。超音波の送信には EMAT-ECT 複合センサの励磁コイルを用い、パルス回路からの充電電圧 1875V、最大電流約 60A の放電電流を励磁電流とした。受信には複合センサに近接させて設置した超音波プロブを用いた。超音波プロブは縦波用(10MHz)と横波用(2MHz)の二種類を用いた。超音波プロブからの信号はパルサーレシーバー (Panametrics 社製 5800PR) を通した後、オシロスコープにて観測した。

図 10 に受信に縦波プロブを用いた際の信号を、図 11 に横波プロブを用いた際の信号を示す。SUS304 において、縦波音速は 5.8km/s、横波音速は 3.1km/s である[4]。図 10 について、図中に示すピーク a とピーク b の間隔は  $7.0 \mu\text{s}$  であり、音速から求めた伝播距離が 40.6mm であることから、試験片の厚みが 20mm であることから、これは底面エコーと考えられる。き裂によるエコーを観測することはできなかった。図 11 について、ピーク b とピーク c の間隔が  $12.9 \mu\text{s}$  であることから、伝播距離は 40.0mm であり、試験片厚さが 20mm なので、これは底面エコーと考えられる。また、ピーク a とピーク b の間隔が  $7.73 \mu\text{s}$  であり、これから求められる距離が 23.96mm であることから、入射面からピーク a までの伝播距離が 16.04mm となるため、ピーク a はスリットによるエコーと考えられる。以上より、受信に横波超音波プロブを用いることで、EMAT による超音波探傷が実現できることがわかり、EMAT-ECT 複合センサの EMAT プロブとしての機能が確認された。

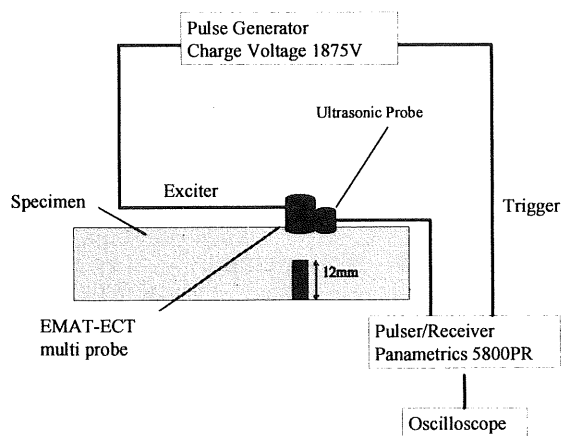


図 9 EMAT 実験体系

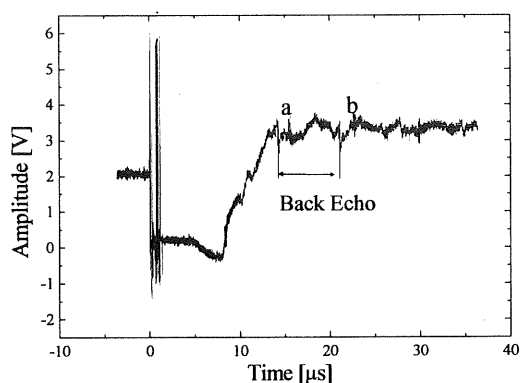


図 10 縦波超音波プローブによるエコー波形

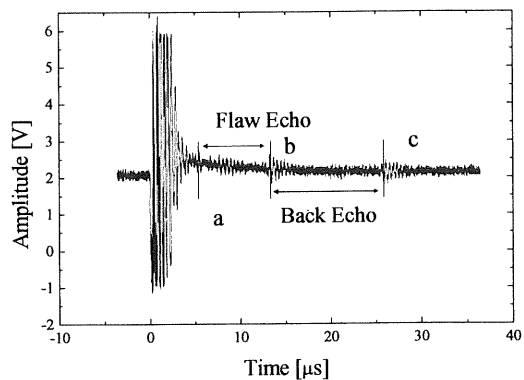


図 11 横波超音波プローブによるエコー波形

### 3. まとめ

本研究では EMAT-ECT 複合センサを提案した。試作した EMAT-ECT 複合センサとパルス回路を用いてパルス渦電流探傷を行い、ECT センサとしての機能を確認した。また、EMAT-ECT 複合センサと超音波プローブを用いて超音波の送受信を行い、EMAT センサとしての機能を確認した。

#### 参考文献

- [1] RC177 軽水型原子力発電所保全研究分科会(フェーズ2)研究報告書, 日本機械学会, 2002.
- [2] 非破壊検査技術シリーズ 渦電流探傷試験Ⅲ, 日本非破壊検査協会, 1990.
- [3] 村山理一. 電磁超音波センサの基礎. 非破壊検査. 51, 2, 2002, pp. 62-67.
- [4] 非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験Ⅲ, 日本非破壊検査協会, 1989.