

# 流れ加速腐食を想定した配管厚さ測定への 電磁超音波探触子の適用について

Measurement of Pipe Wall Thickness using EMAT in Flow-Accelerated Corrosion

神戸大学大学院	小坂 大吾	Daigo KOSAKA	Member
神戸大学大学院	小島 史男	Fumio KOJIMA	Member
神戸大学大学院	梅谷 浩介	Kousuke UMETANI	Nonmember

This paper is concerned with quantitative evaluation of pipe wall thickness Electro Magnetic Acoustic Transducer (EMAT). This pipe wall thinning occurs on a piping internal wide range at an orifice, an elbow, and a reducer downstream. A shape of a pipe wall thinning like Flow-Accelerated Corrosion (FAC) is near arc. And a pipe wall thinning has the surface like scales. Test samples were fabricated to simulate FAC in the series of experiments. A shape of corrosion of the test samples is arc. Other test samples have a surface like scales. The measurement method is using Electro Magnetic Acoustic Resonance. The transducer and method have characteristics of no contact and high resolution measurement.

The pipe wall thinning was able to be measured with precision. The EMAT is able to use to test for the FAC.

**Keywords:** Nondestructive Test, Condition Monitoring, On-line Monitoring, Flow-Accelerated Corrosion, Cavitation

## 1. 緒言

発電プラントには、高温、高圧にさらされる配管があり、減肉が生じる恐れがある[1]。そこで、日本機械学会が定める減肉管理規定[2]に基づき、定期的に配管の肉厚測定を行って配管の健全性を担保している。科学的見地と経験から、オリフィス下流には流れ加速型腐食(以下、FAC)が発生する恐れがあることがわかっており、定期点検時に超音波探触子を用いた厚さ測定を行っている。

今後のプラントのより安全で効率的な運転のために状態監視保全が求められており、定期点検だけではなく、供用期間中の常時監視が可能な測定技術が求められている。そこで、高温環境に強いと言われる、電磁超音波探触子(以下、EMAT)の使用が検討されている。EMATは静磁場を発生させる磁石と、交流磁場を送受信するコイルによって構成されている[3][4][5][6][7]。板厚の評価はもちろん、材質の疲労評価などにも用いられている[8]。カプラントが必要なく、耐高温特性、コスト的な利点から、探触子を断熱材の内側に常時配置することが原理的に可能である。また、共鳴を利用

することで、高い分解能を得ることができる[9][10]。

一方で、これまで報告されている EMAT を用いた研究において、実機に生じる減肉の形状についての考察を行っているものは多くない。そこで本報告では、最初に FAC による減肉の形状を円弧で模擬した試験体を作成し、EMAT を用いて測定を行った。次に、FAC 表面に生じる鱗片模様を模擬した試験体を作成し、測定に与える影響について検討を行った。最後に、実機模擬環境によって作成した FAC 試験体を測定し、超音波法と比較して十分な精度で厚さを測定できることを確認した。

## 2. 実験方法

### 2.1 原理

EMATはコイルと静磁場を作る磁石によって構成される探触子である。本報告では横波垂直型の EMAT を用いた。その構造を Fig. 1 に、装置全体の校正を Fig. 2 に示す。コイルに任意の周波数のバースト波を印加することで、適用する試験体の材質が非磁性体の場合はローレンツ力、強磁性体の場合はローレンス力と磁歪によって試験体表面に任意の周波数の振動を送信することができる。発生した振動は試験体内を超音波として伝播する。受信は送信と逆のプロセスで行い、磁石の作る静磁場と裏面で反射して入射面まで戻ってきた

連絡先:小島史男  
神戸大学大学院 工学研究科 情報知能学専攻  
〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1  
E-mail: koiima@koala.kobe-u.ac.jp

振動により、渦電流が発生、それによる磁束の変化が EMAT のコイルに誘導起電力として現れる。EMAT は超音波の変換に電磁場を用いることから、カプラントを必要としない厚さ測定が可能である。

配管厚さの測定には共鳴法を用いた。パースト波の周波数を掃引すると、厚さに対してユニークな周波数間隔で Fig. 3(a)のような共鳴が起こる。共鳴状態でないセンサ出力を Fig. 3(b)に示す。周波数間隔  $\Delta f$  から厚さ  $T$  を得るには、配管材料の音速  $v$  から、以下の式で求めることができる。

$$T = \frac{v}{2\Delta f} \quad (1)$$

共鳴状態の判定は、同期検波法によって定量的に評価した。本装置を用いた平板の実験では、分解能が 0.1mm 以下であることを確認した。

## 2.2 試験体

Fig. 3(a) は FAC のマクロ的な形状を模擬した試験

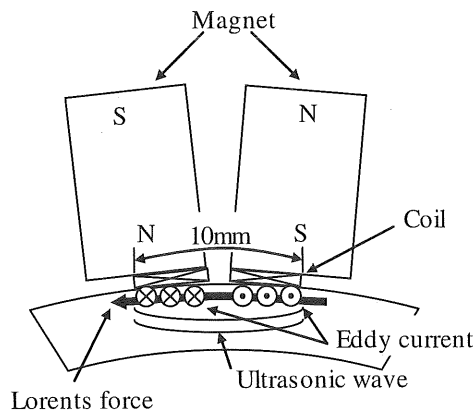
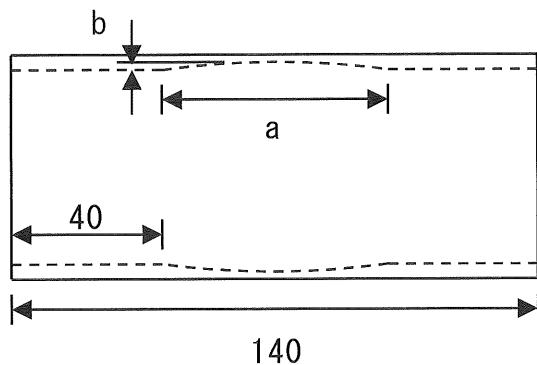


Fig. 1 Principle of EMAT



(a) Arc test sample

体である。これは、オリフィス下流に生じる FAC を模擬している。旋盤を用いて配管内側を切削し、配管と同軸の減肉を加工した。FAC の減肉カーブを軸方向の円弧で模擬している。この試験体を円弧減肉試験体と呼ぶ。材質は SS400、配管呼び径は 2B で、健全部の配管厚さは 5mm である。円弧のパラメータは  $a=60\text{mm}$ 、 $b=0.5, 1.0\text{mm}$  である。

Fig. 3(b) は FAC のミクロ的な形状を模擬した試験体である。これは、減肉面に生じる鱗片模様を模擬している。平板にボールエンドミルで隙間なく半球状の窪みを加工した。この試験体を模擬鱗片試験体と呼ぶ。材質は SS400、健全部の厚さは 10mm で、使用したエンドミルは半径 1.50mm、切削深さ 1mm である。したがって、減肉部の最小厚さは 9mm である。

また、実機環境を模擬した減肉環境において作成した試験体の測定を行った。この試験体はオリフィスを持っており、オリフィス下流に FAC が存在している。この試験体を FAC 試験体と呼ぶ。

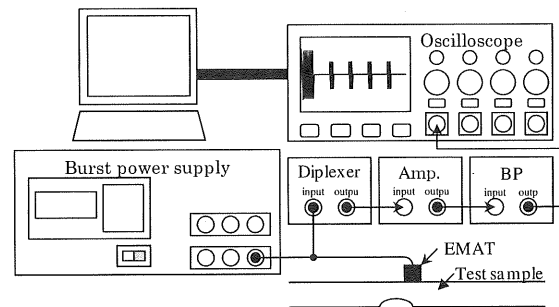
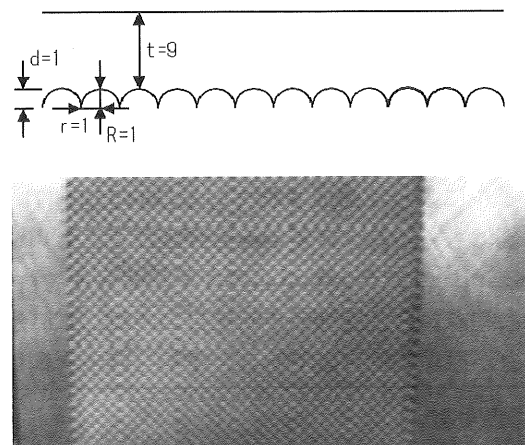


Fig. 2 Experimental setup



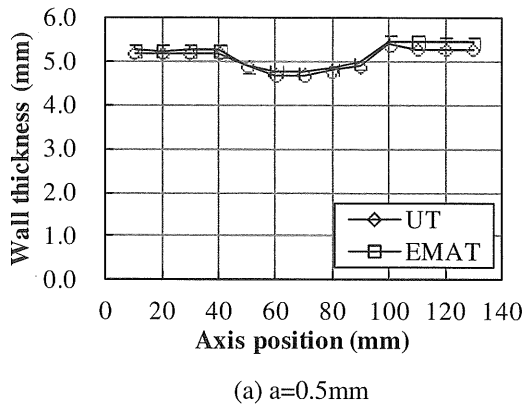
(b) Test sample with Surface like scales

Fig. 3 Test samples of mock FAC

### 3. 実験結果

#### 3.1 円弧試験体

健全部と減肉部の差が“b”である。試験体の測定結果を Fig. 4 に示す。配管軸方向に 13 点測定した。減肉は配管と同軸に加工しているため、測定点を周方向に動かした時の厚さ同一である。横軸は軸方向位置、縦軸は共鳴周波数と音速から求めた配管の厚さである。減肉部はグラフの中央に存在している。グラフの両端は健全部である。超音波の反射が困難になる、軸方向 50mm において、十分な SN 比で共鳴周波数を測定することができた。b=0.5, 1.0mm とともに、全領域において“b”を正確に評価できている。また超音波を用いた測定結果とよく一致している。同じ減肉形状でも、小口径管になるほど減肉面が急になり、測定が困難になると考えられるが、今回用いた 2B 配管で十分な SN 比で UT と同様の測定結果が得られたことから、2B 配管以上で同様な結果が得られることが期待できる。



#### 3.2 模擬鱗片試験体

模擬鱗片試験体の減肉面は球状の加工面を持ち、球の径を R、加工面直上から見たときの加工穴の半径を r、加工穴の最も深い位置の板厚を t とした。実際の鱗片は r=1mm 程度である。

測定結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) に示す通り、t09R01r01 は厚さが明確に確認できる一方、Fig. 5(b) に示す t09R50r10 では確認できない。t09R50r10 のように全体にわたって傾きが緩やかな場合は、厚さの異なる位置で、広い周波数帯で超音波が入射面まで戻っており、共鳴しにくい状態になっていることが予想される。一方で、t09R01r01 が厚さを明確に確認できるのは、減肉の凸部以外では超音波は散乱するので、凸部のみの共鳴を得られるからだと考えられる。このことから、鱗片模様においては、超音波がより反射しやすい減肉の凸部、すなわち配管厚さの最薄部の厚さを得られる。厚さの評価結果は 9.0mm であり、最薄部の厚さ 9.0mm と一致した。

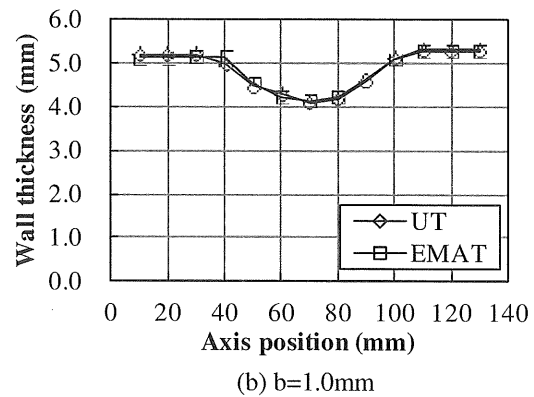


Fig. 4 Results of arc test samples

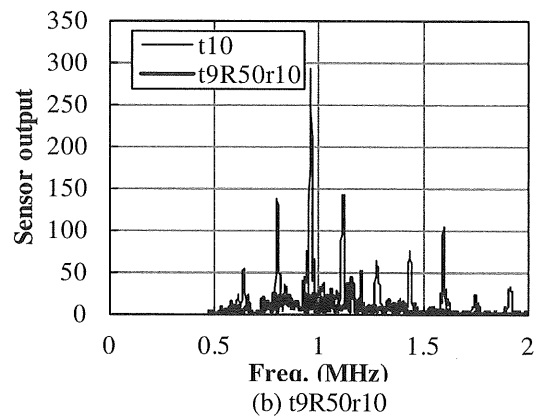
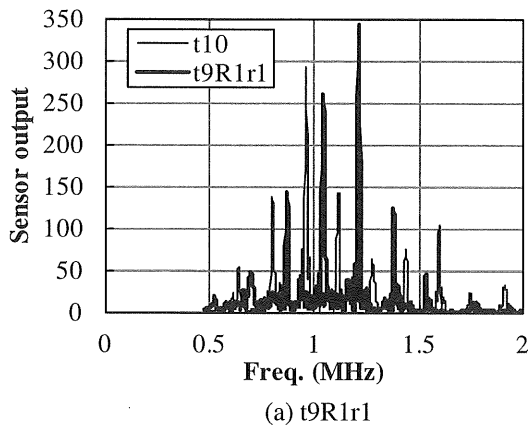


Fig. 5 Results of test sample with Surface like scales

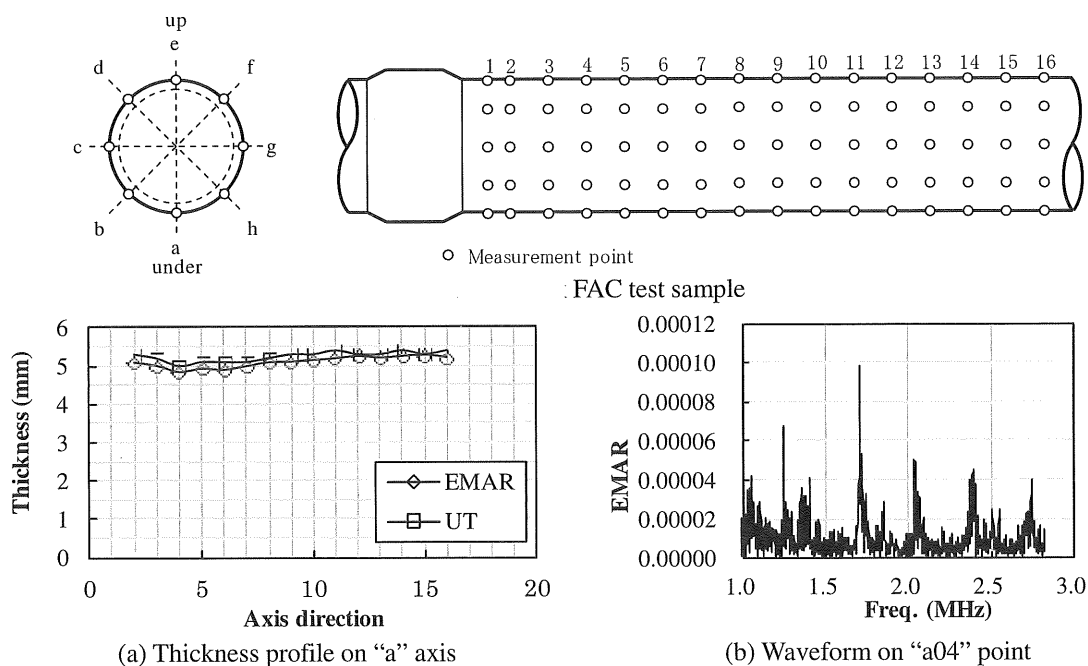


Fig. 7 Results of mock FAC test sample

### 3. 3 FAC 試験体

試験体の測定位置を Fig. 6 に、測定結果を Fig. 7 に示す。通常小口径管は周方向に 4 点の測定であるが、本報告では、より多くのデータを得るため、周方向に 8 点測定した。Fig. 7(a) の a 軸 3-9 付近に減肉が確認できる。減肉部においては減全部と比較すると SN 比が悪化するが、この試験体においては Fig. 7(b) のように、十分な SN 比で厚さを評価することができた。また UT の測定結果とよく一致している。

## 4. 結言

FAC を模擬した円弧状の減肉において、EMAT による測定は UT と同様の測定結果を得られた。鱗片を模擬した  $r=1\text{mm}$  の試験体において、最薄部の厚さを精度よく得ることができた。また、実機模擬環境において作成した FAC 試験体において、UT と同等の測定結果を得ることができた。

以上のことから EMAT は FAC を対象にした測定において、UT と同等の性能を持っており、UT で測定が困難である測定箇所への補完(例えば常時監視システムのセンサ等)として、検討に値する手法だといえる。

今回の FAC 試験体においては測定可能であったが、減肉部において信号の減衰がみられることから、今後は FAC における鱗片状の凹凸と測定信号との関係や、

実機への適用を見据えた、複数のセンサの配置および信号処理方法について検討を行う。

## 謝辞

本研究は経済産業省原子力安全・保安院の「平成 21 年度高経年化対策強化基盤整備事業」において実施した研究である。FAC 試験体は東京電力(株)様に提供いただいた。関係各位に感謝申し上げる。

## 参考文献

- [1] 宮澤正純：「化学プラントでのエロージョン・コロージョン事例」, 材料と環境, Vol.57, No.3, 2008, pp.118-121
- [2] 日本機械学会, 「発電用設備配管減肉管理に関する規格」, 日本機械学会, 2005
- [3] B.W. Maxfield and C.M. Fortunko, The design and use of electromagnetic acoustic wave transducers, in: Material Evaluation, Vol.41, 1983, pp. 1399-1408.
- [4] R.B. Thompson, Physical principles of measurements with EMAT transducers, in: Physical Acoustics, Vol.19, Academic Press, New York, 1990, pp. 157-200
- [5] K. Mirkhani et al. Optimal design of EMAT transmitters, in: NDT&E International, Vol. 37, 2004, pp. 181-193.
- [6] 山崎友祐, 河部大輔, 大谷俊博, 平尾雅彦, 「電磁超音波センサを用いた最適波形法による鋼管の減肉検査」, 日本機械学会論文誌(A 編), Vol. 67, No. 659, 2001, pp. 169-174
- [7] Smith, B.J., Martin, R. and Holt, R.P., "The use of EMATs for wall thickness measurements on corroded pipes" Proc 6th Int Conf on NDT Methods, Strasbourg, p. 49, 1986
- [8] 平尾雅彦, 萩博次, 「電磁超音波共鳴による疲労過程の非接触モニタリング」, 非破壊検査, Vol. 51, No. 2, pp. 79-82, 2002
- [9] K. Kawashima, Very high frequency EMAT for resonant measurement, in: Proc IEEE Ultrasonic Symposium, No. 2, 1994, pp.1111-1119.
- [10] H. Ogi, "Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves", J. Appl. Phys. 82 (8), 15, pp. 3940-3949, 1997