

EMAT を用いた配管減肉寸法計測法

Measurement method of Pipe Wall Thinning Shape by EMAT

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 山口 紘史 Hiroshi Yamaguchi Nonmember

This paper is concerned with quantitative evaluation of corrosion shape on outer surface of Pipe by Electro Magnetic Acoustic Transducer (EMAT). The pipe wall thinning was modeled semi ellipse shape. And FAC has been considered more dangerous. The pipe wall thinning was able to be measured with precision. In general, FAC had a smooth surface wall thinning. EMAT were able to measure the echo in the test piece with wall thinning of smooth enough. The EMAT is able to use to test for the FAC.

Keywords: Nondestructive evaluation, Structural integrity, Inspection, Damage Detection, Sensor technology

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、流れ加速型腐食(以下、FAC)等の減肉が生じる恐れがある[1][2]。そこで、日本機械学会が定める減肉管理規定[3]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。この規定では、科学的見地と経験から、レジャーサ、オリフィス下流、エルボ等において配管直径を基準に検査部位を定めており、減肉が発生している場合、その進展傾向から配管の交換時期を定めている。また規定ではX線や超音波、電位差法、パルス渦電流法による配管減肉寸法計測法が定められている。

発電プラントには多数の配管が存在するため、検査箇所が非常に多い。十分な測定精度を担保しつつ、検査コストの低減が求められている。そこで、電磁超音波(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[4][5][6]。板厚の評価はもちろん、材質の評価などにも用いられている[7][8][9]。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り、現状の、時間を基準とした保全から、供用期間中の常時監視、つまり状態監視保全の適用が期待できる。

一方で、これまで報告されている EMAT を用いた研究では、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、EMAT を用いた、実機に生じる複雑な形状を持つ減肉のモデル化を行うとともに、EMAT による寸法化について検討を行った。

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

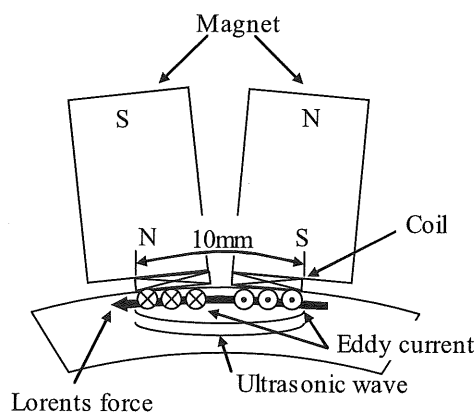


Fig. 1 Principle of EMAT

連絡先:小島史男、〒657-8501 神戸市灘区六甲台町
1-1, 神戸大学、大学院工学研究科、情報知能学専攻、
電話: 078-803-6493、e-mail: kojima@koala.kobe-u.ac.jp

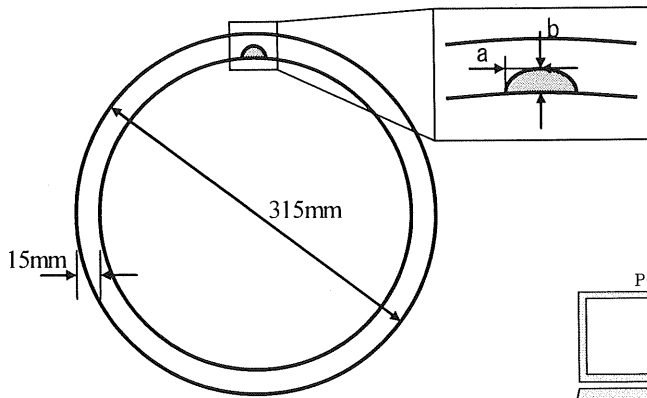


Fig. 2 Test piece of semi ellipse

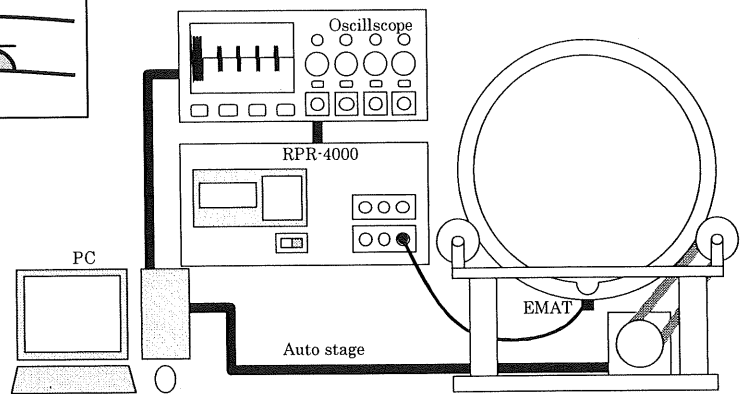


Fig. 3 Experimental setup

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超音波の変換効率に優れている。本報告では、超音波のエコー間隔から減肉の形状評価に用いる。また、試験体の材質は非磁性体としたことから、超音波はローレンツ力によって発生する。

2. 2 試験体

本報告では、配管に生じる LDI や FAC を半楕円で模擬した。用いた試験体を Fig. 2 に示す。外径 315mm、厚さ 15mm、軸方向長さ 100mm、材質 SUS304 の配管に、半楕円の減肉をワイヤ放電加工で加工した。これを半楕円減肉試験体とする。加工した減肉の形状は、減肉半径 $a=4, 10, 15, 40\text{mm}$ 、減肉高さ $b=3, 5\text{mm}$ の組み合わせとした。さらに、より FAC に近い減肉として、配管内面の 120° に渡り円弧状減肉を加工した試験体を製作した。これを模擬 FAC 試験体とする。残肉厚を 3, 5, 10, 15mm とする 4 体の試験体を製作した。

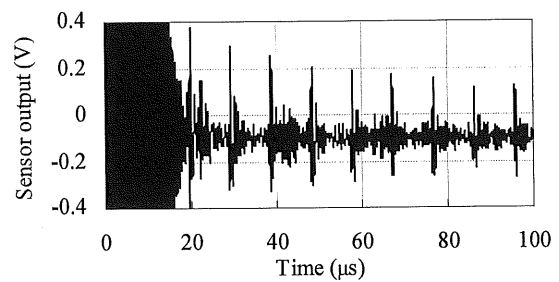
2. 3 実験システム

日本機械学会における配管減肉管理規格では配管の径に応じて周方向に 4 点ないし 8 点で測定することを求めている。しかしここでは、EMAT を減肉に対して移動させ、減肉との相対位置を変化させたときの信号を測定した。これは必ずしも EMAT の真下に減肉の最も進んだ箇所が発生するとは限らないことと、EMAT と減肉の相対位置による、測定信号の変化を測定する事を想定した。EMAT の移動には PC により制御可能で、十分な繰り返し位置決め精度を持つ自動テーブルを製作した。実験装置を Fig. 3 に示す。試験体と EMAT を任意の相対角度に設定することができる。今回は試験体と EMAT の相対位置を 1mm ピッチで変化させながら測定を行った。

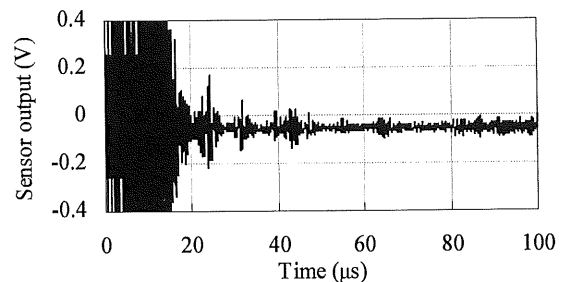
3. 実験結果

3. 1 半楕円減肉試験体

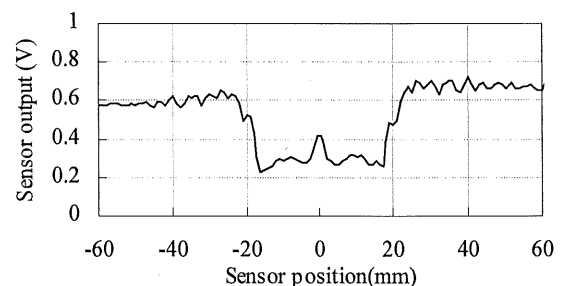
減肉半径 $a=15\text{mm}$ 、減肉高さ $b=3\text{mm}$ の検出信号を Fig. 4 に示す。入射面、反射面が曲面であるが、Fig. 4(a)



(a) Sensor position: 60mm



(b) Sensor position: 0mm



(c) Sensor position profile

Fig. 4 Measurement results ($a=15\text{mm}$, $b=3\text{mm}$)

の健全部においては、特に大きな減衰もなく、エコーが観測できている。健全部の管厚は 15mm であり、エコー間隔は $9.46\mu\text{s}$ であるから音速は次の式で求められ

Table 1. Test piece of half ellipse wall thinning

		True value	Measurement result
①	Thickness(mm)	17	-
	Width (mm)	10	15.0
②	Thickness(mm)	17	-
	Width (mm)	20	27.0
③	Thickness(mm)	17	16.2
	Width (mm)	30	36.0
④	Thickness(mm)	17	16.2
	Width (mm)	80	91.0

る。

$$c = \frac{15\text{mm} \times 2}{9.46\mu\text{s}} = 3.17 \times 10^4 \text{ m/s}$$

Fig. 4(b)は減肉中央の検出信号であるが、エコーを検出できており、その間隔は7.68 μs である。よって厚さは次の式で求められる。

$$t = \frac{3.17 \times 10^4 \text{ m/s} \times 7.68\mu\text{s}}{2} = 12.2\text{mm}$$

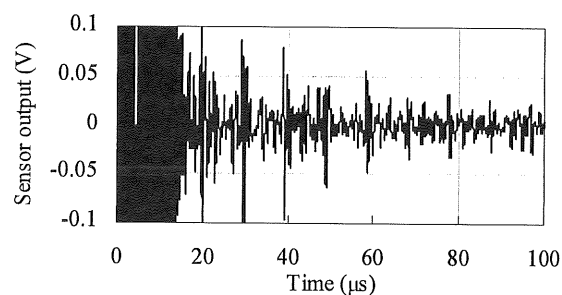
中央部の減肉高さ b は 3mm であるから、肉厚 12mm を評価できている。次に減肉幅の測定のため、検出信号の B2 付近におけるセンサ位置プロファイルを測定した。結果を Fig. 4(c)に示す。減肉端部において急激な減衰が見られた。測定結果からエコー間隔、エコー振幅の減衰傾向から、寸法化を行った結果を Table 1 に示す。

3. 2 模擬 FAC 減肉

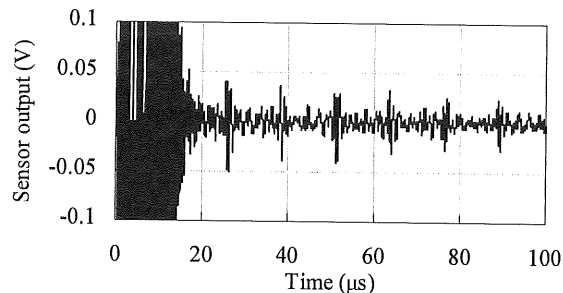
FAC の様なアスペクト比(減肉高さ/減肉半径)の低い減肉は定量的な減肉評価が可能であるとの知見が得られた。そこで、より問題となりやすい周方向の広い領域に発生した、模擬 FAC 試験体において測定を行った。この試験体は周方向 120° に渡って円弧状の減肉を加工している。円弧であるから、半楕円減肉試験体と比較して減肉端がより滑らかになっている。半楕円減肉の場合は減肉端が 90 度になっているため、減肉端におけるエコーの減衰が検出しやすいと考えられるが、減肉端の配管肉厚が滑らかに変化するこの試験体は減肉端におけるエコーの急激な減衰は半楕円減肉ほど期待できないと思われる。半楕円減肉試験体と比較して、

Table 2. Test piece of FAC wall thinning

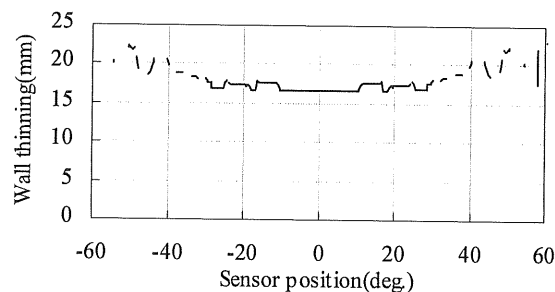
		True value	Measurement result
①	Thickness(mm)	17	16.9
	Width (°)	120	125
②	Thickness(mm)	15	14.9
	Width (°)	120	115
③	Thickness(mm)	10	11.2
	Width (°)	120	119
④	Thickness(mm)	5	5.84
	Width (°)	120	124



(a) Sensor position: 60°



(b) Sensor position: 0°



(c) Sensor position profile

Fig. 5 Measurement results (FAC $b=3\text{mm}$)

より FAC に近い模擬減肉試験体であると考え。検出信号の一部を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a)は減肉端とセンサ

中央が重なったときの検出信号である。半楕円減肉においては、エコー振幅の減衰が見られたが、ここでは健全部と比較して大きな減衰は見られなかった。Fig. 5(b)は減肉中央の検出信号である。エコーが確認できる。ここではFig. 5(a),(b)しか図示しないが、模擬FAC試験体(b=3mm)では、若干のエコー振幅の変化は見られたが、減肉全周に渡ってエコーを測定可能であり、それぞれのセンサ位置において肉厚を評価することができた。エコー間隔から肉厚を評価した結果をFig. 5(c)に示す。減肉高さが小さい、初期のFACに近い減肉試験体においては、エコー間隔から肉厚の評価は十分可能であり、減肉領域の評価はエコー間隔や振幅の変化からも十分可能であると言える。一方で減肉が進行して減肉深さが大きくなっていくと、減肉端部からエコー間隔の測定はできなくなっていく。

周方向領域については最大4%程誤差が見られるが概ね一致しており、肉厚についてはさらに良く一致している。したがって、より反射面の急な半楕円減肉試験体と比較して、反射面がなだらかな減肉(例えば初期のFAC)では精度良く、減肉のサイジングが可能であることを確認した。他の試験体の測定結果をTable 2に示す。

4. 結言

減肉領域が広く、減肉深さが浅い初期のFACについては、EMATで対応できる可能性が得られた。つまり、十分に減肉面がなだらかな曲面を持つ減肉(例えば初期のFAC)であれば、TOFから肉厚の測定が可能である。一方で管周方向の4または8点で定点監視を行う場合、実際の減肉の形状は環境によって異なること、また基本的にEMATと減肉の相対位置がどこになるかわからず、EMATの直下が減肉部の最も角度の大きい場所になる場合があり、現実の減肉形状に合わせた検討が必要である。また配管減肉管理規定においては減肉率の算出が不可欠である。減肉率を算出するためには最低でも時系列で2点の測定が必要であり、早期に減肉率を算出するためには肉厚測定において高い分解能が求められる。また元々の肉厚が薄い管の場合も高い分解能が必要である。

よって、FACの形状についての調査、EMATの肉厚測定における高精度化、さらにEMATの個数と配置に関する検討を行っていく必要がある。

謝辞

本研究は経済産業省原子力安全・保安院の「平成20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。関係各位に感謝申し上げる。

参考文献

- [1] 磯本良則, 宮田寛和, "液滴衝突エロージョン現象と実用材料の寿命予測", 材料と環境, Vol.57, No.3, 2008, pp.146-152
- [2] 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
- [3] 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
- [4] R. Thompson, "Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers", W.P. Mason, (ed.), Physical Acoustics, Vol.19, Academic Press, New York, , 1990, pp. 157-200
- [5] 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
- [6] KAWASHIMA K, "Very High Frequency EMAT for Resonant Measurement", Proc IEEE Ultrasonic Symp, Vol. 1994, No. 2, 1994, pp.1111-1119
- [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] BOETTGER W, SCHNEIDER H, WEINGARTEN W, "Prototype EMAT system for tube inspection with guided ultrasonic waves", Nucl Eng Des, Vol.102, No.3, pp.369-376, 1987
- [9] 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