

電磁超音波共鳴法を用いた配管厚さ寸法計測のための信号処理法

Signal Processing for Pipe Wall Thickness Measurements using Electromagnetic Acoustic Resonance Method

神戸大学大学院システム情報学研究科	小島 史男	Fumio KOJIMA	Member
神戸大学大学院工学研究科	小坂 大吾	Daigo KOSAKA	Member
神戸大学大学院システム情報学研究科	梅谷 浩介	Kosuke UMETANI	Student Member

This paper is concerned with signal processing arising in pipe wall thinning measurements using electromagnetic acoustic transducer (EMAT). First, electromagnetic acoustic resonance method (EMAR) is applied to pipe wall thickness measurement. Secondly, a heuristic method for extracting features of resonance spectrum obtained by testing data is proposed. Finally, the validity and the feasibility of our proposed method are demonstrated through the practical test at the real plant.

Keywords: Condition monitoring, ultra-sound test, signal processing, acoustic resonance

1. 緒言

原子力プラントの高経年化に伴い、PWR2 次系配管の流れ加速型腐食(FAC)等の減肉管理が重要となっている。今後の点検箇所が増大が予想されることを考慮して、本研究では状態監視保全を取り入れた新しい配管減肉診断手法について考察する。電磁超音波探触子(Electromagnetic Acoustic Transducer : EMAT)は、磁石及び励磁コイルにより、ローレンツ力を利用して超音波を発生させ、その超音波の変位と磁場による渦電流の変化を誘導起電力として検出する非破壊検査手法である。非接触で検査ができ、高温環境下で使用可能なため、探傷子を配管を覆う断熱材の内側に常時設置することが原理的に可能であり、状態監視保全への適合性が高いと考えられている。しかし、実機配管の厚さ寸法計測を、電磁超音波共鳴法(EMAR 法)を用いて行う場合、配管の減肉形状によって SN 比が悪く取得信号からの寸法同定が困難な場合が存在する。以下では EMAT の実用性向上のために SN 比の悪い信号からでも配管の寸法同定が可能な信号処理法を開発し、実機配管の厚さ計測を行ったので報告する。

連絡先:小島史男、〒657-5801 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻、電話: 078-803-6493
E-mail: kojima@koala.kobe-u.ac.jp

2. 電磁超音波共鳴法の原理

2.1 EMAT の原理

EMAT は磁石とコイルから構成されている探触子である。コイルに任意の電圧、周波数の交流電流を流すことにより、変動磁場が生じ試験体の表面に渦電流が発生する。磁石とコイルから発生した磁場と渦電流の相互作用により、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ツ力と磁歪によって試験体の表面に振動が生じ、それが超音波として試験体中を伝播する。また、試験体表面の振動による変位と磁場によって試験体表面に渦電流が発生し、それによる磁束の変化によってコイルに誘導電流が生じ、これを電圧変化として検出する。

2.2 共鳴法の原理

EMAT によって、試験体内に超音波を発生させた場合、特定の周波数で共鳴が発生する。共鳴周波数 f_n は以下の式で与えられる。

$$f_n = \frac{nc}{2d}$$

c は音速、 d は試験体の厚み、 n は整数を表している。共鳴周波数は試験体材料固有の音速と試験体の厚みにより決定する。周波数を掃引しながら、個々の周波数の振幅を検出することによって得られる共鳴スペクトルのピーク間隔 Δf より試験体の厚みを検出することができる。Fig.1 に材質 SS400、板厚 8[mm]での共鳴スペクトルのグラフを示す。

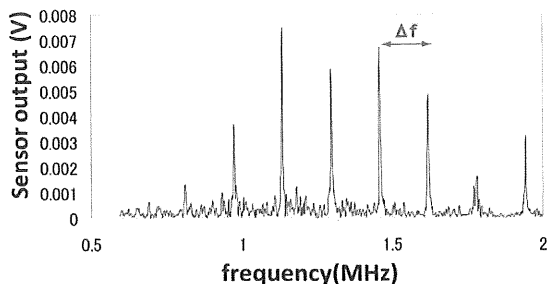


Fig.1 resonance spectrum (SS400 8mm)

3. EMAR 法による測定信号の処理法

3.1 測定データの補正

実機配管を EMAR 法によって測定を行った場合、配管内部の減肉形状によって得られる共鳴スペクトルが Fig.2 のように SN 比が悪く、ピークがはっきりしない場合がある。このように人間が肉眼で見ても共鳴周波数が判断しにくいデータから Δf を求めることが可能な補正法を開発した。以下にその手順を示す。

Fig.2 の減肉前の配管の厚み d を 12mm、測定音速 c を 3195.993m/s、掃引周波数範囲 601~1600kHz、周波数単位 1kHz、サンプル数 1000 と設定する。ここで共鳴スペクトルデータを

$A(f)$ ($601 \leq f \leq 1600$) と定義する。まず減肉前の配管の厚み d と測定音速 c より共鳴周波数間隔 Δf を求める。

$$\Delta f = \frac{c}{2d}$$

次に測定した元データの単純移動平均 $SMA(f)$ (前後について Δf の範囲)、全体平均 Avg を求める (Fig.3)。

$$SMA(f) = \frac{\sum_{k=f-\Delta f}^{f+\Delta f} A(k)}{2\Delta f + 1}$$

$$Avg = \frac{\sum_{k=601}^{1600} A(k)}{1000}$$

元データに全体平均をかけ、単純移動平均で割ることにより補正 1: $Rev1(f)$ を求める (Fig.4)。これによって得られる信号が小さい周波数帯域の共鳴スペクトルのピークを際立たせることができる。

$$Rev1(f) = \frac{A(f)Avg}{SMA(f)}$$

配管の底面に凹凸がある場合、複数の箇所でも共鳴が発生し、共鳴スペクトルのピークが複数に分かれる場合が存在する。この場合の補正法を示す。補正 1 の加重移動平均(前後について $\Delta f/8$ の範囲)を求め補正 2: $Rev2(f)$ とする (Fig.5)。これによって複数に分かれていたピークを 1 つにまとめることができる。

$$Rev2(f) = \frac{\sum_{k=f-\Delta f/8}^{f+\Delta f/8} Rev1(k) \left(\frac{\Delta f}{8} - |f-k| + 1\right)}{\sum_{k=f-\Delta f/8}^{f+\Delta f/8} \left(\frac{\Delta f}{8} - |f-k| + 1\right)}$$

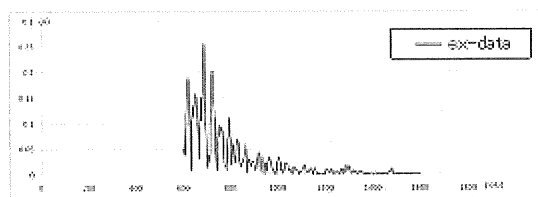


Fig.2 Ex-data of the resonance spectrum

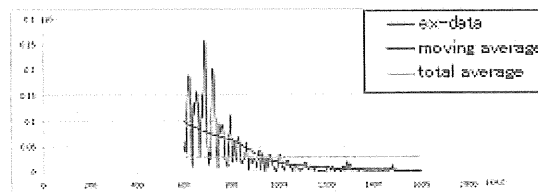


Fig.3 Simple moving average and Total moving average of the resonance spectrum

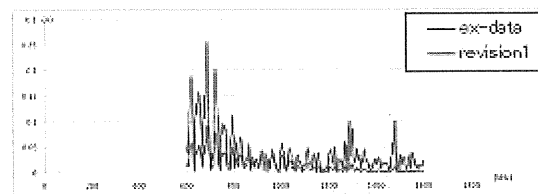


Fig.4 Revision1 of the resonance spectrum

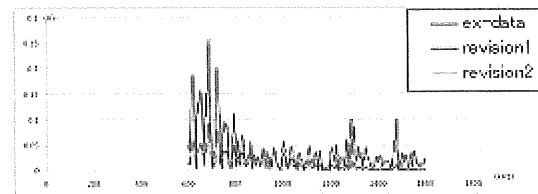


Fig.5 Revision2 of the resonance spectrum

3.2 評価値の計算

補正 2 のデータから評価値の計算を行い、 Δf を求める。共鳴周波数 $f_n = \frac{nc}{2d}$ は式の通り、 n の整数倍となっているため、配管の元の厚さから求められ

る最少の共鳴周波数から 0.1kHz 刻みで掃引範囲内の f_n の補正 2 の値から補正 2 の全体平均値を引いた値を足し合わせ、評価値 $EV(f)$ として求める (Fig.5)。

$$s = \frac{\min(1600 > f_n > 601)}{f}$$

$$b = \frac{\max(1600 > f_n > 601)}{f}$$

$$R2Avg = \frac{\sum_{k=601}^{1600} Rev2(k)}{1000}$$

$$EV(f) = \sum_{k=b}^s Rev2(kf) - R2Avg$$

評価値が最大となる f から配管の厚みを計算する。評価値から周波数の共鳴しているポイントを示したグラフを Fig.7 に示す。

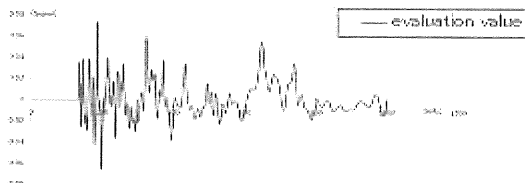


Fig.6 Evaluation value of the resonance spectrum

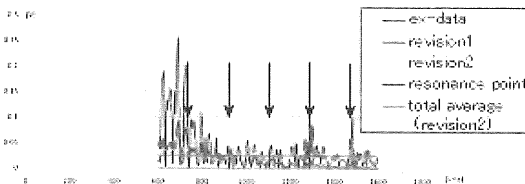


Fig.7 Resonance point and the resonance spectrum

4. 実地試験による検証

関西電力(株)火力センターにおいて、実際に使用されたオリフィス下流部の直配管に周方向 8 分割、軸方向 7 分割し、周方向は 1、2、3、4、5、6、7、8、軸方向は Y、イ、ロ、ハ、ニ、ホ、へ (Y、I、Ro、Ha、Ni、Ho、He) と名前をつけ、計 56 箇所の点について EMAT を用い EMAR 法を使用して測定を行った。オリフィス下流部の模式図を Fig.8 に示す。さらに UT を用いて測定したデータと比較を行う。測定したデータの掃引周波数範囲は 601~1600kHz であり、周波数単位は 1kHz、サンプル数は 1000 である。測定データの解析を行う際、測定プログラムにおいて減肉前の配管の厚みを 12.0mm、音速を 3195.993m/s と設定した。EMAT と UT の測定結果を Table 1 に、EMAT と UT の測定結果の差を Table 2 に示す。最大誤差 0.28mm、平均誤差 0.08mm、誤差の中央値 0.07mm となり、オリフィス下流部の直配管に関してはほぼ全ての箇所ですべて正確に測定すること

に成功した。EMAT によって得た測定データ全て (56 点) をグラフにしたものを Fig.9 に、軸方向 1 列 (Y1、イ 1、ロ 1、ハ 1、ニ 1、ホ 1、へ 1) について EMAT と UT を用いて測定したデータの比較グラフを Fig.10 に示す。これらのグラフから今回の計測箇所では Y、イ、ロの位置で FAC によって 2mm 程度の減肉が発生していることが確認できる。また周方向に関してはほぼ偏りなく、同じ量の減肉が発生していることが確認できる。さらに Fig.10 に示されている減肉量の多い Y1、イ 1、ロ 1 の箇所について、EMAR 法によって得た共鳴スペクトルとその信号処理結果を Fig.11、Fig.12、Fig.13、Fig.14、Fig.15、Fig.16 に示す。これらのデータから複数の箇所ですべて補正法が上手く機能して、厚み測定に効果を発揮することが確認できる。

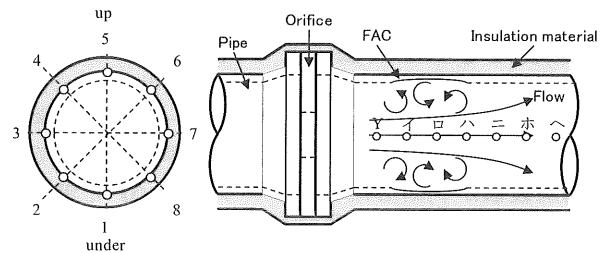


Fig.8 The view showing a frame format of downstream region of orifice

Table 1 The list of measurement data of downstream region of orifice

		1	2	3	4	5	6	7	8
Y	EMAR	8.78	8.70	8.58	8.50	8.61	8.83	8.75	8.90
	UT	8.80	8.70	8.60	8.60	8.70	8.80	8.80	8.90
イ	EMAR	8.45	8.64	8.63	8.83	8.68	8.68	8.68	8.74
	UT	8.60	8.70	8.50	8.80	8.70	8.50	8.70	8.80
ロ	EMAR	8.41	8.73	8.66	8.77	8.76	8.76	8.66	8.70
	UT	8.50	8.80	8.70	8.80	8.90	8.80	8.70	8.80
ハ	EMAR	10.98	10.87	10.79	10.95	10.79	10.82	10.80	11.05
	UT	11.00	11.00	10.90	11.00	10.70	10.90	10.90	11.10
ニ	EMAR	10.83	10.81	10.86	10.98	10.92	10.92	10.82	10.88
	UT	10.90	10.90	10.90	11.00	11.10	11.00	10.90	11.00
ホ	EMAR	10.84	10.79	10.95	11.02	11.21	10.97	10.69	11.08
	UT	10.70	10.90	11.00	11.10	11.40	11.00	10.90	11.00
へ	EMAR	10.72	10.83	10.98	11.04	11.01	10.85	10.68	10.92
	UT	11.00	11.00	11.00	11.10	11.10	10.90	10.80	11.00

Table 2 The difference of measurement result of EMAT and UT

	1	2	3	4	5	6	7	8
Y	0.02	0.00	0.02	0.10	0.09	0.03	0.05	0.08
イ	0.15	0.06	0.13	0.03	0.02	0.18	0.02	0.08
ロ	0.09	0.07	0.04	0.03	0.14	0.02	0.04	0.10
ハ	0.02	0.13	0.11	0.05	0.09	0.08	0.10	0.05
ニ	0.07	0.09	0.04	0.02	0.18	0.08	0.08	0.02
ホ	0.06	0.11	0.05	0.08	0.19	0.03	0.21	0.08
へ	0.28	0.17	0.02	0.06	0.09	0.05	0.12	0.08

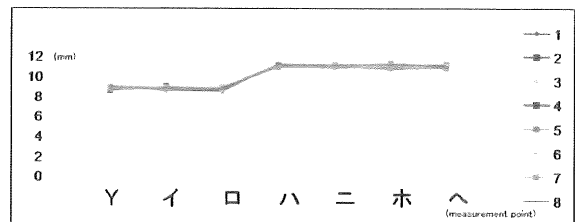


Fig.9 The graph of the measurement result (EMAR all points)

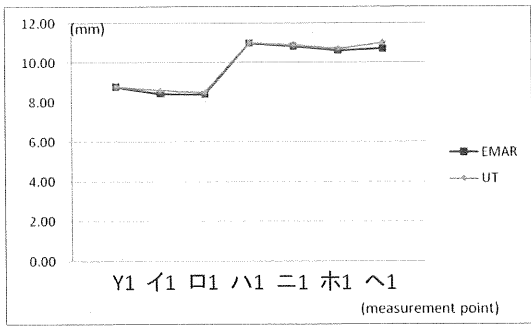


Fig 10.The graph of the measurement result of EMAR and UT (Y1 I1 Ro1 Ha1 Ni1 Ho1 He1)

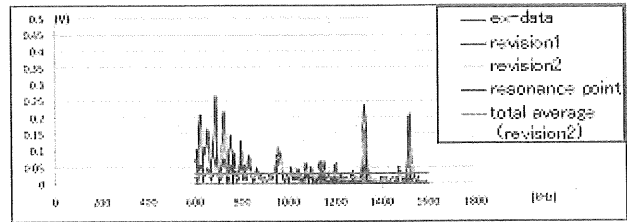


Fig 16.The signal processing result of the resonance spectrum in the Ro1

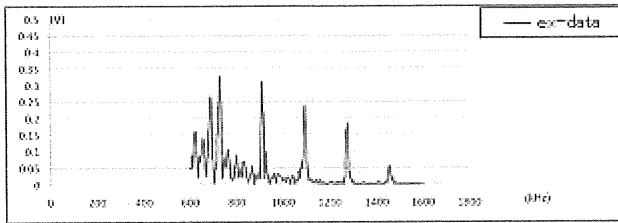


Fig 11.The resonance spectrum in the Y1

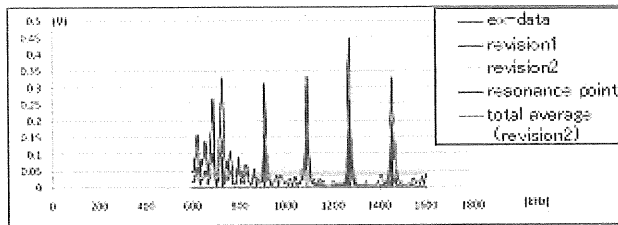


Fig 12.The signal processing result of the resonance spectrum in the Y1

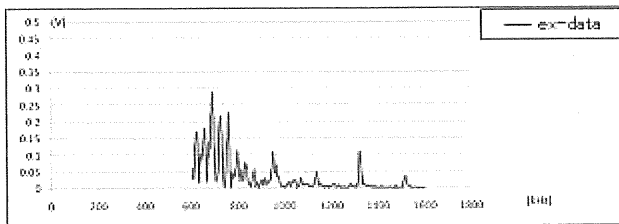


Fig 13.The resonance spectrum in the I1

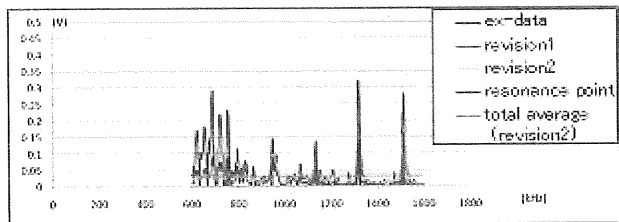


Fig 14.The signal processing result of the resonance spectrum in the I1

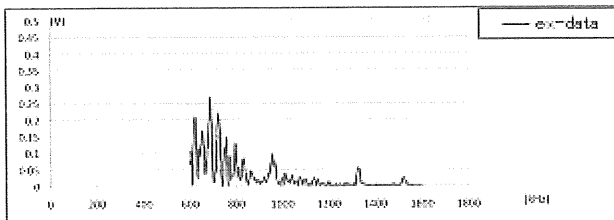


Fig 15.The resonance spectrum in the Ro1

5. 結言

今回の実地試験によって配管の厚さ寸法計測に関して EMAT によって UT と同程度の定量的な評価が可能であることを確認した。また上記の信号処理法を用い処理を自動化することで、短時間での厚さ測定が可能となる。今後はエルボウ、レデューサ等のより複雑な構造を有する配管や、口径や減肉量の異なる配管について実地試験を行い、EMAT の実機適用が可能となる範囲について検討する必要がある。

謝辞

本研究は経済産業省原子力安全・保安院の「平成 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ことを示し、関係各位に深甚の謝意を表します。また EMAT による減肉定点監視の実機適用試験を実施するにあたり、関西電力㈱火力センター殿および INSS 殿のご協力を得られたことを記し、ここに深甚の謝意を表します。

参考文献

- [1] 日本機械学会, "配管減肉に関する技術的知見の現状," 日本機械学会, (2005)
- [2] 村山理一, "電磁超音波検査の基礎," 非破壊検査, 51[2], 62-67(2002)
- [3] 藤澤和夫, "鉄鋼・非鉄分野における電磁超音波法の応用," 非破壊検査, 51[2], 68-72(2002)
- [4] M. Hirao, H. Ogi, and H. Fukuoka, "Resonance EMAT system for acoustoelastic stress measurement in sheet metals," *Rev.Sci.Instrum*, 64[11], 3198-3205(1993)
- [5] H. Ogi, M. Hirao, and T. Honda, "Ultrasonic attenuation and grain-size evaluation using electromagnetic acoustic resonance," *J.Acoust.Soc.Am*, 98[1], 458-464(1995)