

## 光ファイバドップラーセンサを用いた電磁超音波共鳴法による金属厚さ測定

株式会社 東芝  
株式会社 レーザック  
東京大学大学院工学系研究科

佐々木 恵一、高橋 雅士  
高橋 真、白井 武広、町島 祐一  
影山 和郎

Thickness Measurement of Metal with Electromagnetic Ultrasonic Resonance Technique using  
Fiber-Optic Doppler Sensor

by Keiichi SASAKI, Masashi TAKAHASHI, Shin TAKAHASHI, Takehiro SHIRAI,  
Yuichi MACHIJIMA and Kazuo KAGEYAMA

### 1. はじめに

発電プラントや化学プラント等の高温配管設備において、配管厚さを測定するには設備を停止させ断熱材を取り外した後に超音波検査するのが一般的である。この全面検査に多大な時間とコストがかかるという問題がある。稼働中に配管厚さをモニタリングしておき、必要などきのみ精査するという方法が取れば断熱材の取り付けや取り外しもなく、稼働率向上につながる。

光ファイバセンサは圧電素子を用いた汎用の振動子と比較して耐熱性があり、その他に耐電磁ノイズ性や遠隔モニタリングが可能であるなどの特長を持つ。今回、光ファイバドップラーセンサ (FOD センサ) と電磁超音波センサ (EMAT) を使用し、超音波を金属に入射させた際の共鳴現象から金属の厚さを測定する方法についての基礎的な検討と、高温環境への適用可能性について検討したので報告する。

### 2. 試験方法

#### 2.1 測定原理<sup>1-3)</sup>

音速  $v$ 、厚さ  $d$  の金属板に周波数  $f$  の超音波を連続的に入射した場合の超音波は金属の内部で反射を繰り返すが、入射面では連続して超音波が入射されるため、金属内では入射波と反射波の重ね合わせとなる。この時、入射波と反射波の位相がランダムであれば、入射波と反射波は互いに打ち消しあって金属内での振幅はほぼ 0 になる。しかし、ある周波数  $f_r$  では入射と反射波の位相が揃うため、振幅が増大する (共振する)。ここで、 $v$ 、 $d$ 、 $f_r$  の関係は、 $N$  を整数として以下ようになる。

$$f_r = N \frac{v}{2d} \quad (1)$$

したがって、音速  $v$  が分かっている場合、共鳴する周波数  $f_r$  を測定することで金属板厚さ  $d$  を求めることができる。

#### 2.2 装置構成

測定対象となる SUS304 製金属板上に、超音波の励起源となる EMAT と、超音波信号を受信するための FOD センサを配置した。FOD センサは瞬間接着剤またはエポキシ接着剤で金属板に固定し、EMAT は FOD センサ上に直接設置した。

正弦波をファンクションシンセサイザー (NF WF1956) で合成し、アンプ (NF 4005) で振幅が各周波数で一定 (100V<sub>p-p</sub>) になるよう増幅した後、EMAT へ 200 マイクロ秒間入力した。FOD センサで受振した信号及び EMAT への入力波形、トリガ信号はデジタルオシロスコープ (横河電機 DL-750) で収録した。パソコンを用いて、ファンクションシンセサイザーの制御、オシロスコープからのデータ読み取りおよび得られた波形の解析を行った。

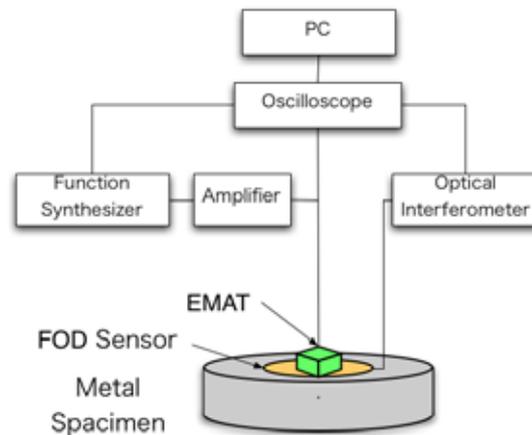


Fig.1 Experimental Setup

### 2.3 FOD センサ

Fig.2 に今回用いた FOD センサを示すが、FOD センサは光ファイバの長さが変化した際のドップラー効果によって生じる光の周波数変化を検出する。光ファイバの長さを  $L$ 、時間を  $t$  とした場合、ファイバ長の時間変化  $dL/dt$  と出力電圧  $V$  には以下のような関係がある。

$$V = \frac{1}{S} \frac{dL}{dt}$$

ここで  $S$  は光干渉計の感度定数である。

センサ部は光ファイバを渦巻き状に巻くことにより  $L$  を大きくし、感度を上げている。

この FOD センサは耐熱性に優れており、光ファイバは石英ガラスをコーティングしている材料によってファイバの耐熱性が決まるが、今回はポリイミドコーティングした光ファイバを用いた。

### 2.4 EMAT

EMAT は 2 枚の磁石とコイルから構成させ、金属内部に磁場と電場を形成してローレンツ力または磁歪で金属内部に力を発生させる。コイルにある周波数の電流を流せば、電流の向きにあわせ力の向きも変化するために、電流と同じ周波数の音波が金属内部に発生する。磁石とコイルの位置関係によって、金属中に発生させる超音波の向きを変えることができる。fig.3 は本試験で使用した EMAT を示しており、奥行き方向のローレンツ力を発生させる。

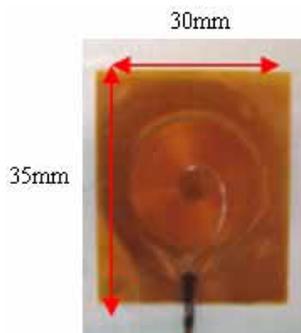


Fig.2 FOD Sensor

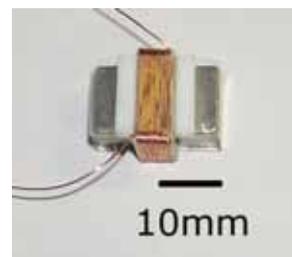


Fig.3 EMAT

### 2.5 データ解析法

発振時間は  $200 \mu\text{sec}$  とした。しかし、この間はいわば強制振動状態であり、いずれの周波数でも超音波が観測されるために共鳴しているかを見極めが難しいこともあり、発振終了後に超音波が速やかに減少する際の超音波振幅を測定することにより共振周波数を求めた。具体的には、各周波数において発振終了後  $20 \mu\text{sec}$  から  $220 \mu\text{sec}$  間の FOD 出力振幅を 2 乗和した値で評価した。横軸に周波数、縦軸に振幅 2 乗和をプロットし、振幅 2 乗和が極大となる点を共鳴周波数とした。

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 板厚

Fig.4 に、入力電圧と FOD で観測された波形の例を示す。この時の試験片は板厚 7.5mm の SUS304 であるが、EMAT で超音波を発生させると、試験片内で共鳴して振幅が徐々に大きくなっていることが分かる。また、EMAT での入力を停止した後も超音波は存在し、ゆっくりと減衰していく様子が見て取れる。振幅 2 乗和を取るのは図中の矢印の区間である。

S/N が約  $10^2$  であり、例として板厚 7.5mm の SUS304 での結果を fig.5 示す。357kHz 近傍に強いピークがあることが分かる。一方、ヤング率と密度から求めた音速  $v=4960$ [m/sec] を用いると、計算上の共振周波数は 331kHz である。

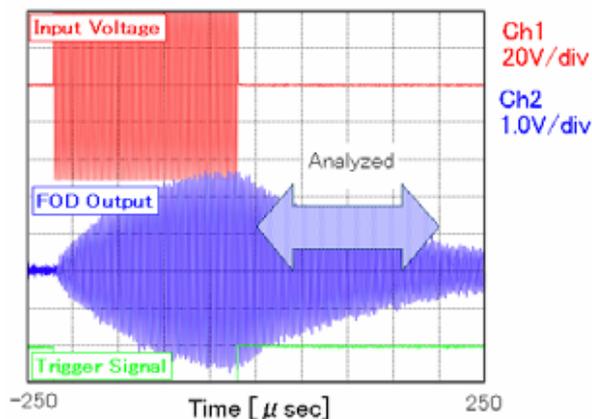


Fig.4 Input Voltage and Ultrasonic Waveform

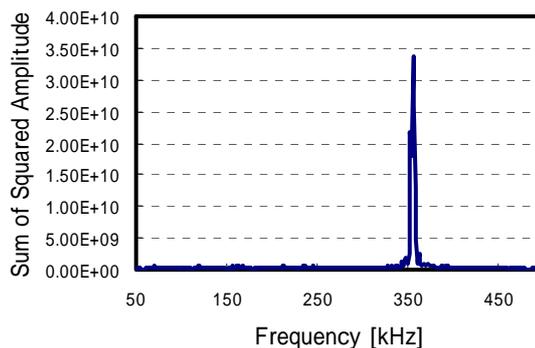


Fig.5 Input Frequency and Sum of Squared Amplitude

#### 3.2 金属厚さ測定

試験片として直径 200mm、厚さ 5、7.5、10、15、20、25、30mm の SUS304 を用い、2.1 で示した原理の検証試験を行った。各試験片において、入力した電流の周波数は 50 から 500kHz であり、各試験片において周波数対振幅 2 乗和の関係を求めた。

Fig.6 の左に板厚と共鳴周波数の関係を示す。式 (1) によると共鳴周波数は板厚の逆数に比例するため、横軸を  $1/\text{板厚}$  に変えたものを Fig.6 の右に示す。図中の直線は最小自乗法により求めたものであり、傾きは 2609[m/sec] であった。これより音速は 5218[m/sec] となり、ヤング率と密度から求めた音速 4960[m/sec] とはやや異なる。正確な板厚測定のためには音速をあらかじめ計測しておく必要がある。

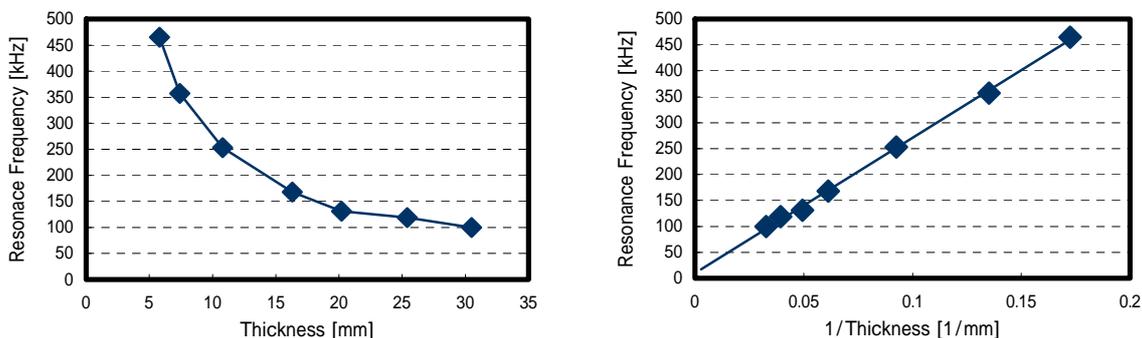


Fig.6 Metal Thickness and Resonance Frequency

#### 3.3 耐熱特性試験

高温環境への適用可能性を探るため、常温から 170 度まで温度を変化させて超音波振幅強度及び共鳴周波数の変化を調べた。Fig.7 に示すように試験片 (sus304、厚さ 7.5mm) の下にシリコンラバーヒーターを設置し、試験片を加熱した。ヒーターは温度調節器に接続してあり、室温及び 50 度から 170 度まで 10 度刻みに変化させる。各温度で 335kHz から 375kHz の超音波を試験片に入射し、共鳴周波数とそのときの振幅 2 乗和

を求めた。

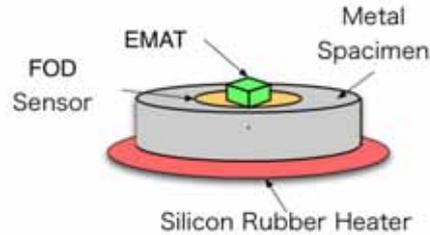


Fig.7 High-Temperature Experiment Setup

170 度の環境下であっても共鳴現象が観測され、共鳴周波数を求めることができた。しかし温度上昇に伴い、振幅 2 乗和の値が減少した (Fig.8 左)。この原因として EMAT に使用している磁石の磁力が低下し出力が減少したと、FOD と試験片との接着状態が変化し超音波の伝達が悪くなったことが原因と推測される。

また、Fig.8 右には温度と共鳴周波数の関係を示す。共鳴周波数は温度に対し線形で変化しているが、これは温度によって試験片が膨張し、板厚  $d$  が増加したためである。式 ( 1 ) より、板厚と共鳴周波数の間には

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad ( 2 )$$

の関係がある。SUS304 の線膨張係数  $18.7 \times 10^{-6}$  より、20 度と 170 度での板厚の比  $d_{170}/d_{20}$  は 1.0028 となる。これらの共鳴周波数は 356kHz と 348kHz であるから  $356/348=1.0023$  となり近い値が得られた。

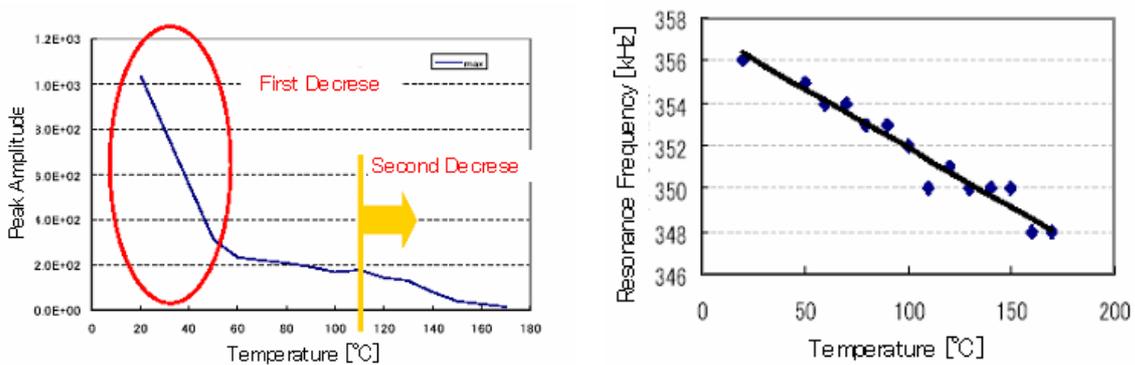


Fig.8 Temperature v.s. Peak Amplitude (Left) and Resonance Frequency (Right)

#### 4 . まとめ

今回の試験により、EMAT と FOD センサを組み合わせる超音波の共鳴現象を使った肉厚測定が可能であることを確認した。肉厚が 5 から 30mm の範囲で理論式によく当てはまるが、共鳴周波数から正確に肉厚を求めるにはあらかじめ材料の音速を実測しておく必要がある。

また、170 度までの温度範囲でも測定が可能であり、温度による 1% 以下の膨張も検出できた。光ファイバの耐熱性から考えて、さらに高い温度領域への適用も可能であると思われるが、その際には対象物への接着方法などが課題となる。

#### 参考文献

- 1) M.Hirao, H.Ogi: Electromagnetic Acoustic Resonance and Materials Characterization, Ultrasonics 35(1997), 413-421
- 2) D.I.Blef, J.G.Miller: High-frequency Continuous Wave Ultrasonics, Physical Acoustics, vol.8(1971), 95
- 3) K.Kawashima, O.B.Wright: Resonant Electromagnetic Excitation and Detection of Ultrasonic Waves in Thin Sheets, J.Appl.Phys. 72(10)(1992), 4830