

# 火力発電プラントにおける配管減肉の測定技術

## Thickness Measuring Technology for Pipes of Thermal Power Plants

山家 信雄

高橋 雅士

阿彦 則雄

■ YAMAGA Nobuo

■ TAKAHASHI Masashi

■ AHIKO Norio

火力発電プラントでは、超音波厚さ計を使って配管の厚さを測定し、減肉を管理することが一般的に行われているが、この手法では、そのつど断熱材を解体したり復旧させる必要があるため、多大な時間とコストを要している。

東芝は、これらの問題を解決するため、電磁超音波素子 (EMAT: Electromagnetic Acoustic Transducer) と光ファイバドップラー (FOD: Fiber-Optic Doppler) センサを組み合わせ、新しい厚さ測定技術を開発した。配管の内面と外面から多重反射した共振超音波信号を解析することで配管の厚さを測定する。このセンサを配管と断熱材の間に埋め込んでおくことにより、オンラインでの厚さ測定やモニタリングが可能となり、プラントの安全性を高めることができる。

In thermal power plants, an ultrasonic thickness meter is generally used to measure the thickness of the main pipes and detect corrosion wastage. However, this conventional technique requires plant outage time and costs to dismantle and reassemble the heat-insulating coats of the pipes.

To solve these problems, Toshiba has developed a new measuring method combining electromagnetic acoustic transducer (EMAT) and fiber-optic Doppler (FOD) sensors. The pipe thickness is measured by analyzing the resonance phenomenon of ultrasonic waves multireflected from both the inner and outer surfaces of the pipe. Since they can be inserted between the pipe and the heat insulator, the sensors allow the thickness of the pipe to be measured and monitored online, thereby contributing to the enhancement of plant safety.

## 1 まえがき

火力発電プラントでは、配管の健全性への影響が大きい流れ加速型腐食やエロージョンなどによって生じる減肉事象を対象として、配管の健全性を維持する運用管理の技術規格が策定されている。事業者は、独自に定めた運用指針が日本機械学会の定める配管減肉管理に関する規格 JSME S CA1-2005に適合していることの確認を行う。この確認のプロセスにおいて事業者の運用指針の位置づけが評価され、国が示している要求機能への適合性も確認されることになる。

一般的に、配管の厚さを測定するには、プラントの定期検査時にいったん設備を停止し、断熱材を取り外した後に超音波検査する方法が用いられることが多い。この方法では、断熱材の取外しや取付け、及び測定自体に多大な時間やコストを要する。設備稼働中に配管の厚さをモニタリングし、必要なときだけ精査するという方法を取ることができれば、省力化できると同時に設備稼働率の向上につながると考えられる。

今回、金属配管中への超音波の入射には電磁超音波素子 (EMAT: Electromagnetic Acoustic Transducers) を、配管中で多重反射した超音波信号の検出には耐熱性に優れる光ファイバドップラー (FOD: Fiber-Optic Doppler) センサを用い、金属中に入射した超音波の共振現象から金属配管の厚さを測定する方法を検討した<sup>(1)</sup>。ここでは、この方法の測定原理と、実際の配管における厚さ測定の有効性について述べる。

## 2 金属の厚さの測定原理

金属に周波数  $f$  の超音波を連続的に入射した場合、超音波は金属内部で反射を繰り返す。また、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。このとき、金属の厚さに対応した一定の  $f$  で入射波と反射波の位相がそろうため、超音波の振幅が増大し共振する<sup>(2)</sup>。このときの共振周波数  $f_n$  は、材料内部での音速を  $c$ 、金属の厚さを  $d$ 、及び  $N$  を整数として(1)式のように示される。

$$f_n = (N \times c) / 2d \quad (1)$$

このように、 $f_n$  と  $d$  は反比例の関係にあり、材料や測定温度ごとの  $c$  がわかれば、 $f_n$  を測定することで  $d$  が求められる。

## 3 測定試験方法

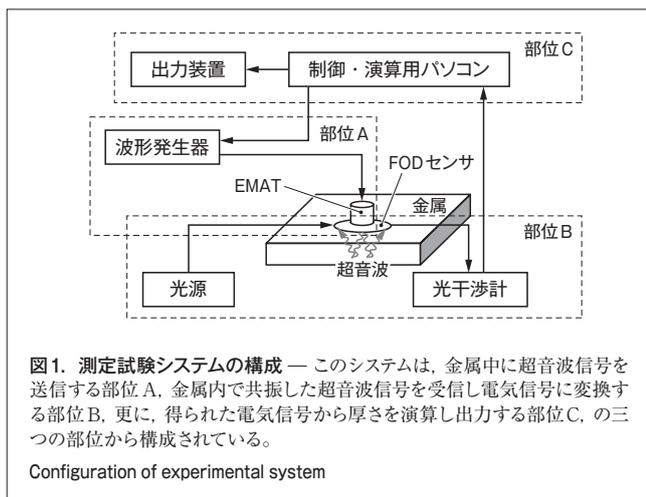
### 3.1 試験サンプル

金属の厚さ測定試験には、金属平板と金属エルボ配管の2種類を用いた。金属平板は、5～23 mmの範囲内で厚さを6段階に変えたステンレス鋼 (SUS304) 製で、平たん部を150×150 mm、表面粗さを最大高さ  $R_{max} 1.6S$  以下に機械加工仕上げしたものである。また、金属エルボ配管は、サイズが150A (外径: 約165 mm) の炭素鋼 (STPT49) 製で、火力発電プラントの給水管として、約160℃の水が流れる中で50,000時間以上にわた

り実使用されたものである。

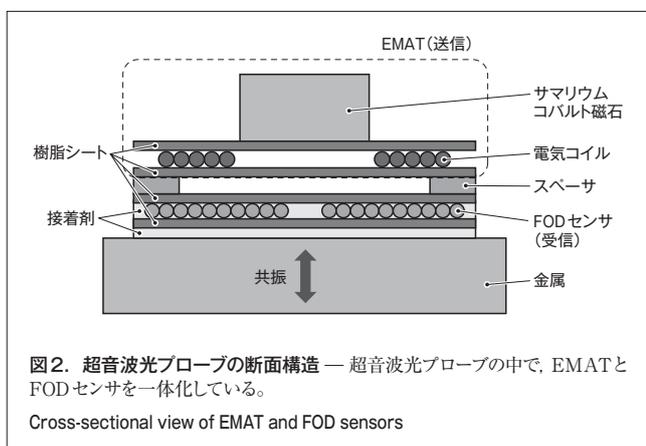
### 3.2 測定試験システム

金属の厚さ測定試験に用いたシステム構成を図1に示す。このシステムは、金属中に超音波信号を送信する部位A、金属内で共振した超音波信号を受信し電気信号に変換する部位B、更に、それら各部位を制御し、得られた電気信号から厚さを演算し出力する部位C、の大別して三つの部位から構成されている。



部位Aは、波形発生器とEMATから成る。波形発生器で $f$ を変えながらEMATのコイルに電流を流すことで、金属中に $f$ を変えながら超音波信号を送信することができる。部位Bは、光源、FODセンサ、及び光干渉計から成り、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 $f$ 変化を検出することで、超音波信号を受信する。光干渉計は光信号を電気信号に変換する。更に、部位Cは、制御・演算用パソコン及び出力装置から成り、得られた電気信号をもとに金属の厚さを算出するとともに、その結果を出力装置に表示する。

EMATとFODセンサを一体化した超音波光プローブの断



面構造を図2に示す。

この超音波光プローブは、厚さ測定が必要な金属表面に接着剤などで固定される。超音波の励起源となるEMATはサマリウムコバルト (Sm-Co) 磁石とコイルで構成されており、磁場と電場を形成して、ローレンツ力又は磁歪 (じわい) で金属内部に超音波信号が送信される機構となっている。

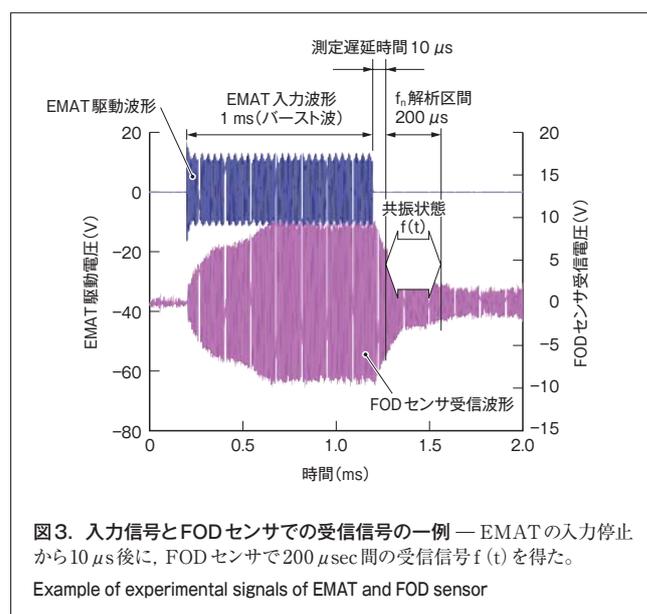
一方、金属の厚さに対応して共振した超音波信号を受信するFODセンサは、金属表面に完全接着されており、光ファイバを渦巻き状に巻いて長くすることで、超音波信号の受信感度を上げている。

### 3.3 試験条件

EMATとFODセンサを一体化した超音波光プローブにおいて、EMATはサマリウムコバルト磁石の外径を10 mm、コイルの外径を15 mmとした。また、FODセンサの渦巻き状光ファイバは外径を15 mm、ファイバの長さを1,000 mmとした。

EMATへの入力信号とFODセンサでの受信信号の一例を図3に示す。波形発生器では、EMATへの駆動波形を、測定が必要な金属の厚さに応じて $f$ を100から600 kHzまで変化させ、掃引間隔は1 kHz一定で入力した。EMAT駆動電圧は $\pm 15$  V、入力時間は1 msを標準条件とした。EMATへの入力停止後、金属の厚さに対応して特定の $f$ で共振する共振超音波信号をFODセンサを用いて検出した。具体的には、EMATの入力停止から10  $\mu$ s後に、FODセンサで200  $\mu$ s間の受信信号 $f(t)$ を得た。このとき、超音波信号の振動強度 $S$ を(2)式に示すように定義し、 $S$ が最大となる $f$ を $f_n$ として、この $f_n$ を用いて $d$ を(1)式から算出した。

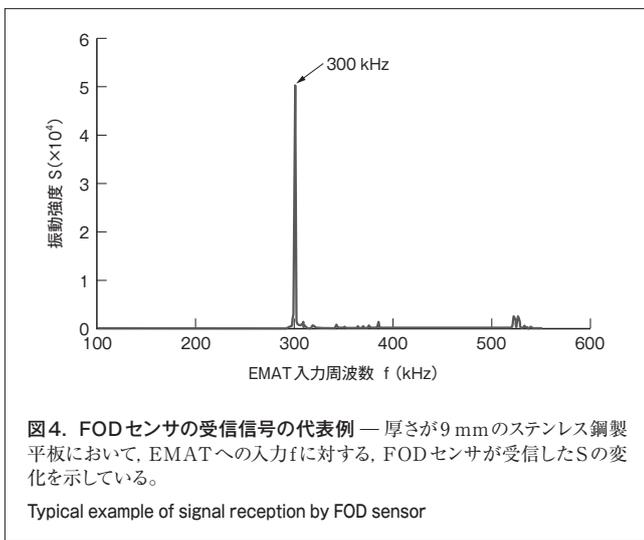
$$S = \sum_{t=0(\mu s)}^{200} f(t)^2 \quad (2)$$



## 4 測定試験結果

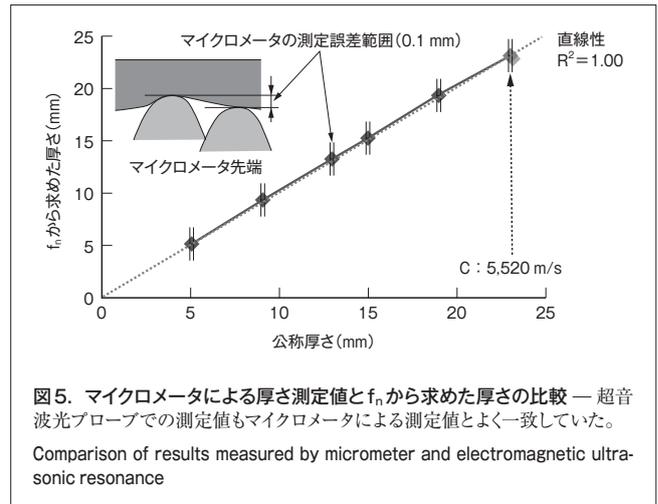
### 4.1 金属平板の厚さ測定結果

FODセンサでの受信信号の代表例として、厚さが9 mmのステンレス鋼製平板において、EMATへの入力 $f$ に対してFODセンサが受信した $S$ の変化を図4に示す。ここでは、 $f$ を100から600 kHzまで変化させているが、 $S$ は300 kHz近傍で明らかに急激に大きくなっている。 $f$ が300 kHz以外では、得られた $S$ は非常に小さかった。これは、EMATで発信した超音波信号が、金属平板中で厚さに対応して共振したものと考えられる。したがって、このように $S$ が急激に大きくなるときの $f$ を $f_n$ とした。



次に、厚さが5, 13, 15, 19, 23 mmのステンレス鋼製平板において同様の測定を行い、 $S$ が最大となる $f_n$ を求めた。まず、 $c$ については、厚さが23 mmの場合において $S$ が最大となる $f_n$ を求め、(1)式を用いて $d$ が23 mmとなる $c$ を求めた。その結果、 $c=5,520$  m/sを得た。次に、それぞれの厚さの平板で $f_n$ を測定し、 $f_n$ と $c (=5,520$  m/s)から $d$ を算出した。得られた結果を図5にまとめて示す。

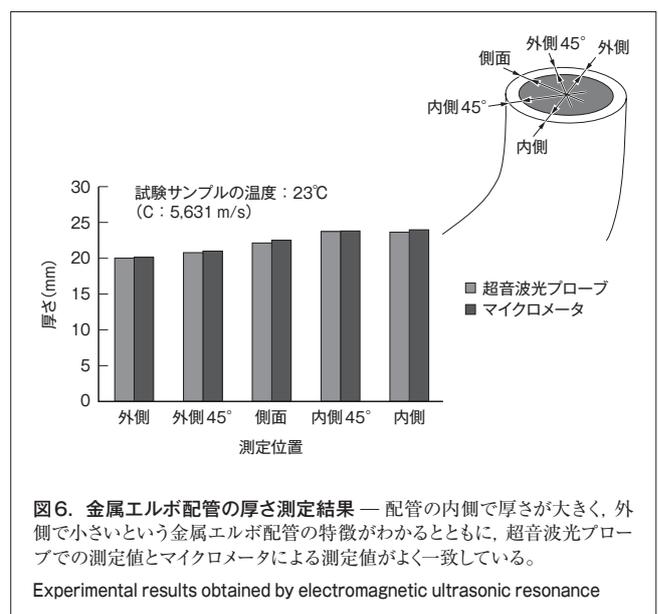
図5では、マイクロメータによる厚さ測定値(5点)と比較している。どの厚さの平板でも、マイクロメータによる測定値は±0.1 mmの範囲で公称の厚さに一致しているのに対し、超音波光プローブでの測定値もマイクロメータによる測定値とよく一致していた。また、今回得られた測定値を用いて直線性を示すパラメータ $R^2$ を評価すると、 $R^2=1.00$ であることがわかった。すなわち、マイクロメータでは先端曲率0.5 mmに対応した測定領域ではあるが、平板のような平たんな面では全体にわたって厚さがほぼ一定であるために、比較的測定領域が広い超音波光プローブでも、ほぼ同様の測定値が得られたものと考えられる。



### 4.2 金属エルボ配管の厚さ測定結果

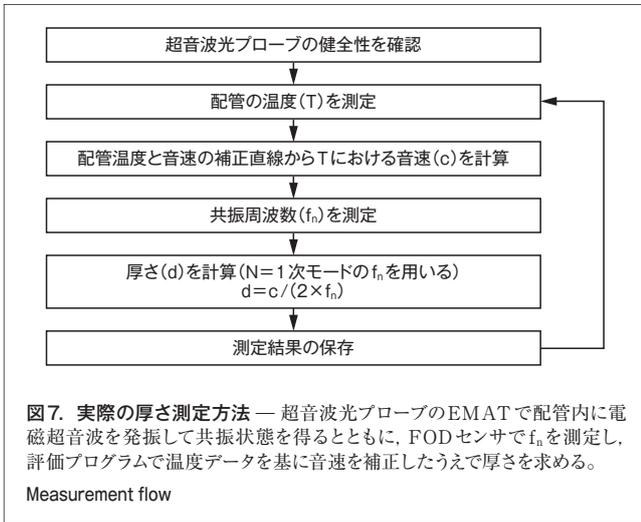
火力発電プラントの給水管として実使用された炭素鋼製のエルボ配管を用い、超音波光プローブにより厚さを測定した。測定部位は、外側、外側45°、側面、内側45°、内側の5か所とした。このとき、あらかじめJIS G0801の炭素鋼(SS400)製RB-E標準試験片を用いて $c=5,631$  m/sを得た。それぞれの部位の厚さ測定結果を図6に示す。ここでは、マイクロメータによる測定結果も示している。この結果から、配管の内側で厚さが大きく、外側で小さいという金属エルボ配管の特徴がわかるとともに、超音波光プローブでの測定値とマイクロメータによる測定値がよく一致している。

すなわち、金属エルボ配管のように曲率を持った対象物に対して、更に、局所的な厚さの変化が比較的小さい実使用配管に対しても、超音波光プローブでの厚さ測定ができることを確認できた。



## 5 実際の厚さ測定方法と結果

実プラントでの厚さ測定方法を図7に示す。



この方法では、選定された測定対象部位に超音波光プローブを取り付け、取付け後及び測定前にFODセンサの取付け状態の健全性を確認する。その方法は、EMATで配管内に確認用の電磁超音波を発振し、所定の振動強度が得られることで確認する。

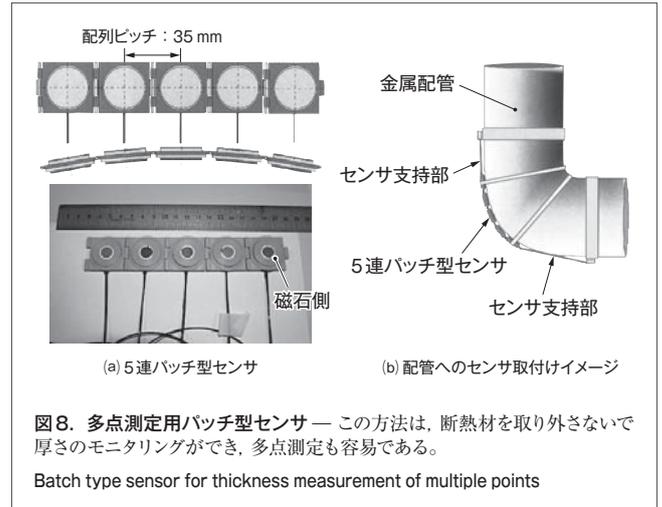
測定は超音波光プローブのEMATで配管内に電磁超音波を発振し、共振状態を得るとともにFODセンサで共振周波数を測定する。センサ類は厚さ測定システムに接続され、プラント停止時及び運転状態において配管の共振周波数を測定し、評価プログラムで温度データを基に音速を補正したうえで厚さを求める。出力装置では得られた厚さ測定結果とともに測定日、測定場所、 $f_n$ 、温度、及び $c$ をひとまとめにして出力する。

超音波光プローブと温度センサをいったん設置完了した後は、保温板金を復旧し、高所や離れた所からでも配線類の延長により運転中の測定が可能である。

得られた結果は、次のとおりである。

- (1) ステンレス鋼製の平板の測定では、5 mmから23 mmまでの厚さに対応して共振した大きなピークが得られ、精度よく厚さを測定できる。
- (2) 実使用後の金属エルボ配管の測定でも、マイクロメータでの測定値とはほぼ一致し、有効である。
- (3) この装置の適用で以下のことが可能である。
  - (a) 連続した減肉の監視
  - (b) 定点測定
  - (c) 断熱材を取り外さないでの測定

この方法は、断熱材を取り外さないで厚さのモニタリングができ、図8に示すように多点測定も容易である。



## 6 あとがき

今回、EMATとFODセンサを組み合わせた超音波光プローブを用い、超音波の共振現象を使って金属の厚さを測定できることを確認した。今後、250℃程度の高温耐熱性、起動停止に伴う温度変化に長期的に耐えられる接着方法、及び測定装置の小型化などが課題である。

## 文献

- (1) 佐々木恵一, ほか. “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”. 溶接構造シンポジウム2006講演論文集. 大阪, 2006-11, 溶接学会. 2006, p.675-680.
- (2) 高橋雅士, ほか. “光ファイバドップラーを利用した電磁超音波共振法による金属配管厚さ測定”. 第1回 検査・評価・保全に関する連携講演会 2008 講演論文集. 東京, 2008-01, 日本保全学会. 2008, p.147-150.



山家 信雄 YAMAGA Nobuo

電力システム社 火力・水力事業部 火力改良保全技術部参事。  
火力発電所タービンプラントの改良保全エンジニアリング業務に従事。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



高橋 雅士 TAKAHASHI Masashi, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部長, 工博. 重電機器の材料技術開発に従事。  
溶接学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



阿彦 則雄 AHIKO Norio

電力システム社 京浜事業所 タービン機器部主査。  
火力発電所タービンシステムの配管設計業務に従事。

Keihin Product Operations