

光ファイバを用いた電磁超音波共振法による配管減肉測定システム

Measurement of Pipe Wall Thickness by Optical Fiber and Electromagnetic Acoustic Resonance.

白井武広（株式会社レザック：東京都文京区本郷 3-40-9）

町島祐一（株式会社レザック：同上）

高橋雅士（株式会社東芝 電力社会システム技術開発センター

:神奈川県横浜市鶴見区末広町 2 丁目 4 番地）

山家信雄（株式会社東芝 火力・水力事業部：同上）

概要：光ファイバセンサを受信センサに用いた電磁超音波共振法による配管減肉測定方法。従来の超音波厚さ計試験で必要であった保温材を剥がすことなく配管肉厚をオンラインで測定することが可能となるため、配管点検費用の低コスト化を実現することが出来る。金属平板では 0.1mm 以下精度の板厚測定を確認し、さらに鋼配管においても従来の超音波厚さ計と同等の測定精度であることを確認した。また、200℃までの耐熱特性を確認し稼働状態の高温配管の測定も可能である。

Key words: 配管減肉、EMAT、光ファイバ、超音波共振法、耐熱

1. 緒言

火力・原子力発電所、化学プラント等における配管の保守方法として、従来の超音波試験方法に加え、最近では放射線を用いた透過試験や、配管表面のガイド波、歪み、渦電流などを用いた様々な試験方法等が提案されている[1]。しかしこれら試験方法には長短所があり、超音波試験方法は測定信頼性は十分であるが、保守点検毎に設備を停止、保温材を除去した後作業者が定点毎に測定する必要があるため保守点検コストが大きくなる問題がある。放射線透過試験方法では保温材上から試験が可能であるが、撮影装置を配置する必要があるため試験出来る環境に制限がある。また、ガイド波、歪み、渦電流による試験方法では測定値から肉厚値に変換するための校正が必要であり、さらに測定出来る配管部位に制限があるなどそれぞれ課題がある。

今回報告する光ファイバセンサを用いた電磁超音波共振法は、受信側に光ファイバセンサを用いていることから、従来の電磁超音波共振法よりも高感度であり、さらにセンサプローブ部の小型化が可能であるため金属配管表面に直接貼り付けた後その上から保温材の施工が可能となるため、測定時には保温材を剥がす必要が無く稼働状態で定点部の肉厚値の測定が可能である。またリード線(光ファイバ)を延線することで従来足場等の組立が必要であった高所部、人が立ち入ることが出来ない露悪環境部のリモート測定が可能であることから、配管保守点検コストを大幅に低減することが出来る。

本報では、試験方法の概要と、金属平板、実配管試験体を用いた試験を行い、本測定方法の実証性について確認検討した結果について報告する。

2. 測定方法

2-1. 板厚測定の原理

本試験方法は、超音波発振子として EMAT(Electric Magnetic Acoustic Transducer)を用い、受信側を光ファイバセンサで行う電磁超音波共振法を用いている。電磁超音波共振法とは、静磁場と

渦電流によって生じるロレンツ力を用いて間接的に金属材料に超音波を金属中に励起させ、その超音波の波長が金属表面と裏面側反射波位相の整数倍(N)の時に多重反射により強め合う共振効果を利用したものである。板厚は式(1)に示す式によって得られ、共振振動周波数(f_r [Hz])と金属中の音速(v [m/sec])から金属板厚(d [mm])を求めることができる[2]-[6]。

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

2 - 2 . 光ファイバセンサの原理

受信に用いる光ファイバセンサは、光波のドップラー効果 (Fiber Optical Doppler)を利用して計測を行う原理のセンサである。試験構造物に貼り付けた光ファイバが振動によって伸縮すると光ファイバ内部を伝搬する光速度が変化し、その時に生じる光ドップラー効果による光周波数変化(ドップラー周波数 Δf)を検出する手法である(図 1)。図 2 に光センサの写真を示す。光ファイバセンサは小型、軽量であるため圧電素子を用いた電気センサのような共振点が無く、ひとつの光センサで数 Hz ~ 数 MHz におよぶ非常に広帯域な検出が可能である。従って、測定する板厚が異なり共振周波数が異なっても、全て同一のセンサ構造で板厚を検出することが可能である。

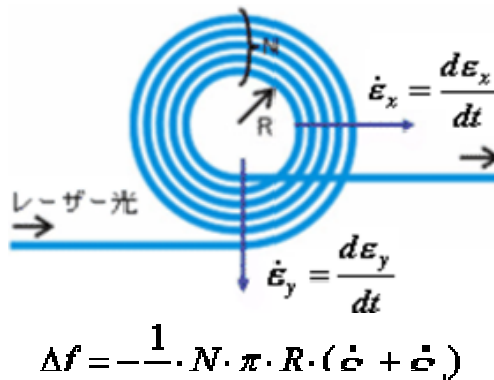


Fig.1 The principle of the FOD sensor [7]

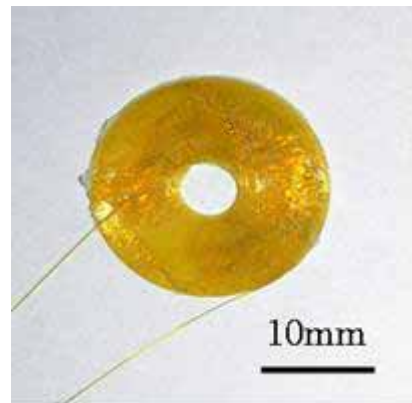


Fig.2 Photograph of optical fiber sensor.

2 - 3 . 測定方法

図 3 に試験システム概要を示す。本システムは試験体に取り付ける EMAT と光センサから成る(1)センサ部、電磁超音波を発生する(2)送信側、共振振動を受信する(3)受信側に大別される。送信側は任意周波数発生器、増幅器で構成され、受信側は発振波長 1550nm のレーザー光源、光/電気変換部、検波回路、信号処理部(パソコン)から構成されている。任意波形発生器でパルス波を発生させ増幅器で数 100V に増幅した信号を EMAT に入力する。この入力信号の周波数を一定数波数間隔で掃引を行い、各々の周波数における振動波形を光ファイバセンサで測定し、その波形振幅値から振動強度を求める。

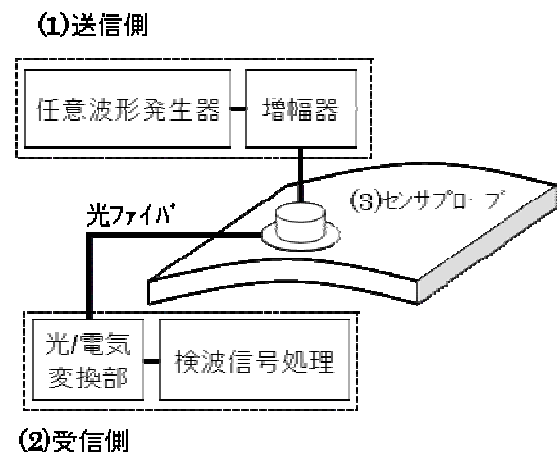
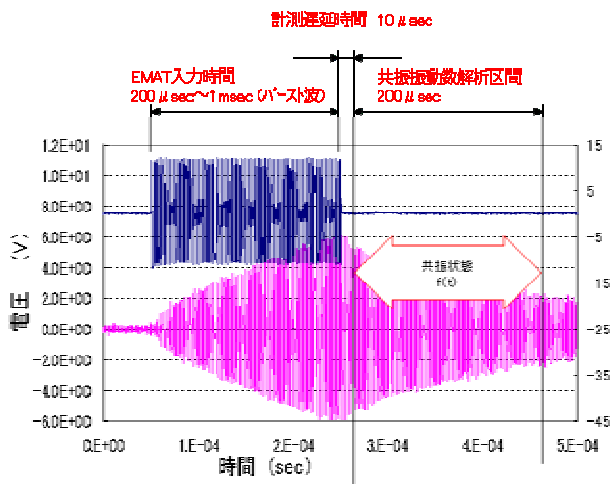


Fig.3 Schematic of measurement system

図4は共振状態における測定波形の例であり、EMATでパルス波による励起の状態、金属の共振振動を光ファイバセンサで受信している状態を表している。EMATにて1msec間励起、10usecの計測遅延時間後、200usec間の振動波形振幅データを取得し、その振幅二乗和を“振動強度(S)”として定義した(式2)。図5は掃引周波数と振動強度(S)の関係を示した共振周波数スペクトルである。この結果より、板厚に相当する共振周波数では振動強度(S)が最大となることから、このピーク周波数から板厚値を求めることが可能となる。板厚測定の精度は掃引する周波数間隔の値で決まり、例えば0.1mm測定精度を得るためには板厚20mmの場合約0.7kHz、板厚30mmの場合は約0.3kHz間隔で掃引を行う。また板厚計算に用いる金属中の音速値は、金属材料毎の一般的な値を適用するか、もしくは同一材料で製作した校正用試験体を用いて共振周波数値と板厚実測値から音速を求める必要がある。さらに温度変化による音速変化を考慮した補正を行う必要がある。この音速値は金属材料固有の値であるため、同一材料種であれば厚さが異なっても同じ音速値を用いることが出来るため、試験部位毎に補正を行う必要は無い。



$$\text{振動強度}(S) = \sum f(t)^2 \dots (2)$$

Fig.4 Measurement signal in EMAT and FOD sensor.

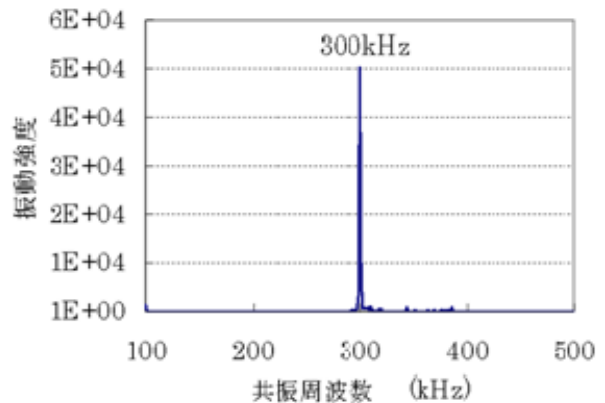


Fig.5 Typical resonance frequency spectrum. (t=9mm)

2 - 3 . センサローブ構造と施工方法

図6にセンサローブ構造を示す。センサローブは永久磁石と電気コイルを組み合わせたEMATと、光ファイバセンサで構成されており、それぞれの構造中心が同一軸になるように、光ファイバセンサは試験体に接着材等で直接貼り付け、その上にEMATがFODセンサと接触しないように配置する。EMATが接触すると、超音波の伝搬が試験体内部だけでなくEMATの永久磁石とも結合してしまうため正確な共振周波数を得ることが出来ない問題が発生する。

試験に用いたセンサローブの大きさは直径30mm、高さ10mmと小型であり、配管上に設置後で保温材の施工に問題は無い大きさである。図7にセンサローブの配管への施工例を示す。センサローブ単体でも配管の任意位置に取り付け可能であるが連結部品を用いることでマトリクス状にセンサローブを多点配置することも可能であり広範囲の点検が可能である。

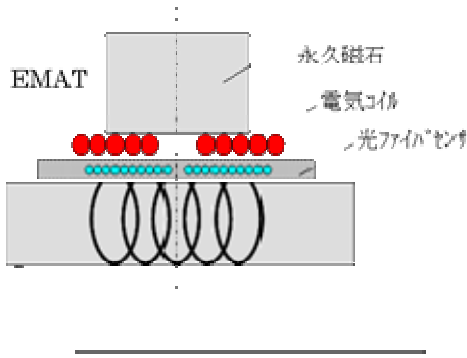


Fig.5 Schematic of Sensor Probe (EMAT and FOD sensor)

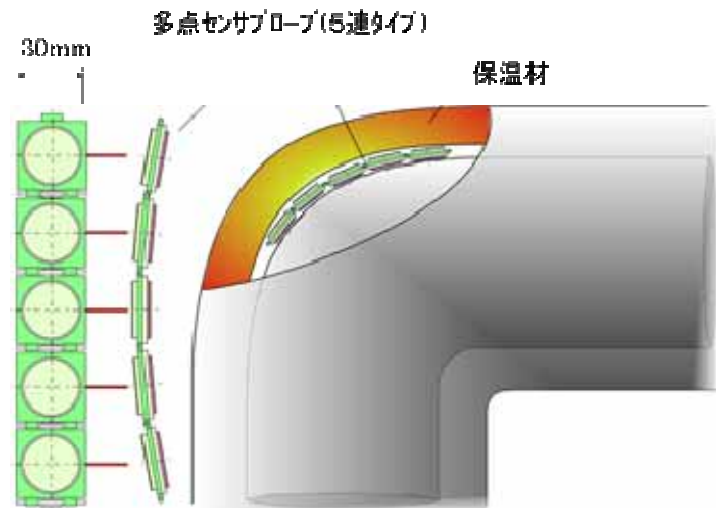


Fig.6 Schematic of multi channel sensor probe.

3 . 実証試験結果

3 - 1 . 平板による試験結果

板厚の異なる複数の平面試験体を用いて、本システムにおける板厚測定精度の試験検証を行った。試験に用いた試験体は、材質 SUS304、大きさ $150 \times 150\text{mm}$ 、厚さ 5,13,15,19,23mm の 5 サイズの試験体中央部にセンサプローブを配置して共振周波数の測定を行い板厚値を求めた。金属中の音速は厚さ 23mm 試験体を用いて校正した 5520m/sec を用いた。図 8 にそれぞれの厚さ試験体で得られた試験板厚値とマイクロメータで測定した公称厚さとの関係を示す。この結果より、いずれの厚さにおいても公称厚さとの差は 0.1mm 以下であり非常に良く一致しており、さらに両者の直線相関性は $R^2 = 1.00$ と良好な結果が得られた。

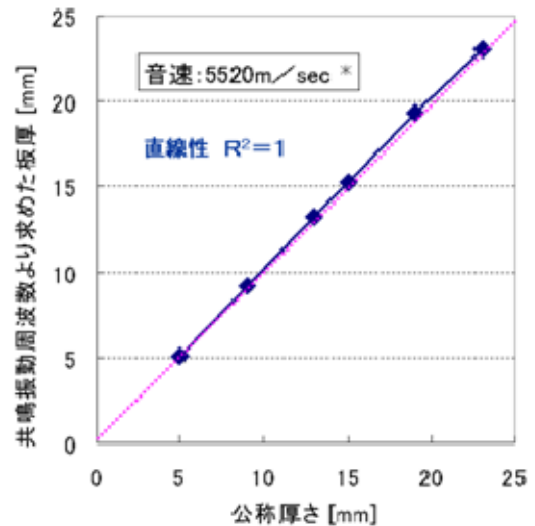


Fig.8 Comparison with result by micrometer and Electromagnetic Ultrasonic resonance

3 - 2 . 実配管試験体による試験結果

実際に稼働していた配管からの切り出しサンプルを用いて、板厚測定精度の試験検証を行った。試験に用いた試験体は、材質 STPT49、150A IL[®] 配管(板厚 約 20mm)、このサンプルの半円周方向の 5 箇所センサプローブを配置して試験を行った。金属中音速は、同じ炭素鋼である JIS G0801 RB-E 試験体を用いて校正した 5631m/sec を用いた。図 9 に配管各部の測定結果と、同一部を超音波厚さ計、マイクロメータで測定した値との比較結果を示す。超音波厚さ計はセンサプローブ測定範囲内(直径 25mm)を 5 点測定した最小値、マイクロメータの測定値は同様に 9 点測定した最小値を棒グラフで示し、最大-最小間をエラー線で示した。この結果より、IL[®] 配管の外側内側で板厚値の異なる傾向が、超音波厚さ計、マイクロメータの値と一致していることから、IL[®] 配管のような曲率を有する形状においても良好な計測結果が得ることが確認出来た。

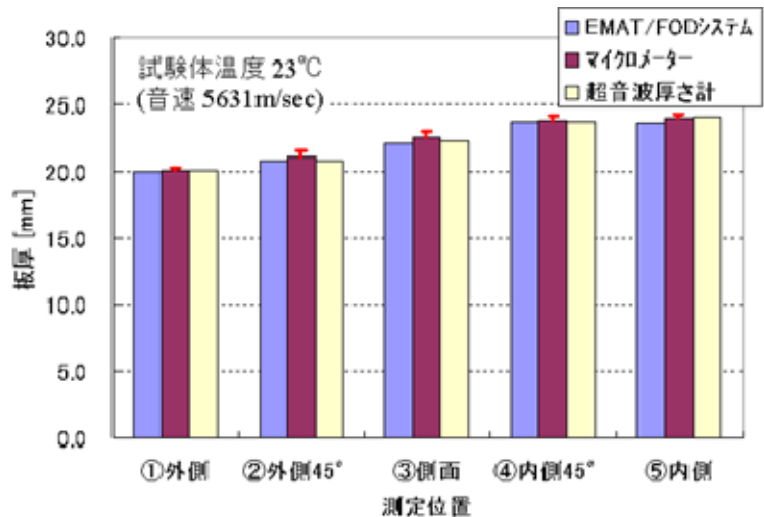
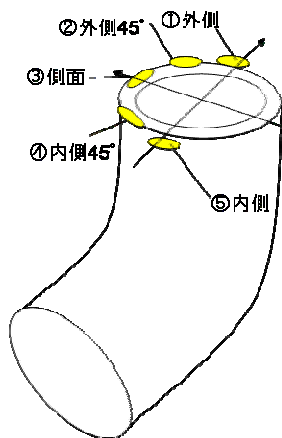


Fig.9 Result of measurement thickness in 150A pipe wall.

3 - 3 . 耐熱性試験結果

実稼働配管は高温状態となるため、センサローブの耐熱特性について試験を行った。図 10 にその結果を示す。センサローブ製作固定に用いた接着材はポリミド系の接着材を用い、試験体温度を室温から 200 まで変化させた時の共振状態の振動強度変化の測定を行った。この結果より、室温から 200 まで加熱した時に振動強度は約 90%に低下するが、200 から室温に降温させると振動強度は初期の値が得られていることから、200 高温状態においても接着材の物性変化(粘度)、劣化などは無く 200 まででは可逆的に使用出来ることが確認できた。

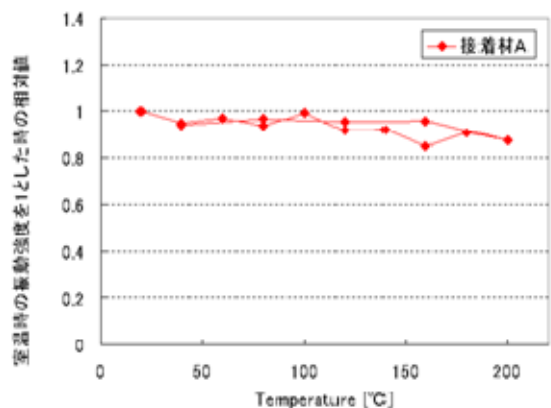


Fig.10 Temperature dependence of sensitivity in sensor probe.

6 . 結論

光ファイバセンサと EMAT を用いた電磁超音波共振法により配管肉厚値を正確に測定できることを確認した。本手法に必要なパラメータは、従来の超音波厚さ計と同様に測定属材料の音速のみであり、その値は一般的な材料であれば汎用値を用いて測定が可能であるため、厳密な補正データを必要とする他手法とは異なり長期間継続的に安定した試験を行うことが可能である。

今後は、耐熱特性の向上、実稼働配管での実証試験等について検討を進める予定である。

参考文献

- [1] 日本機学会 発電用火力設備規格 火力設備配管減肉管理技術規格(2006年版) JSME S TB1-2006
- [2] M.Hirao, H.Ogi: Electromagnetic Acoustic Resonance and Materials Characterization, Ultrasonics 35(1997), p.413-421
- [3] D.I.Blef, J.G.Miller: High-frequency Continuous Wave Ultrasonics, Physical Acoustics, vol.8 (1971), p.95
- [4] K.Kawashima, O.B.Wright: Resonant Electromagnetic Excitation and Detection of Ultrasonic Waves in Thin Sheets, J.Appl.Phys. 72(10) (1992), p.4830
- [5] 佐々木恵一、高橋雅士 ; 光ファイバドップラセン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、2006 年 11 月、p.677
- [6] 高橋雅士、他 ; 光ファイバドップラを利用した電磁超音波共振法による金属配管厚さ測定、日本保全学会「検査・評価・保全に関する連携講演会(1)」論文集、2008 年 1 月、p.147
- [7] K.Kageyama et.al ; Doppler Effect in Flexible and Expandable Light Waveguide and Development of New Fiber-Optic Vibration/Acoustic Sensor, J.Lightwave Tech., 2006,vol.24, No.4,