

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

Measurement of Pipe Wall Thinning by Ultra Acoustic Resonance technique using Optical Fiber

株式会社レーザック 白井 武広 Takehiro Shirai Unmember
町島 祐一 Yuichi Machijima Member

This is the novel system for Pipe Wall Thickness measurement which is combined EMAT(Electro Magnetic Acoustic Transducer) and Optical Fiber Sensor. The conventional ultrasonic thickness meter is using in pipe wall thickness measurement. However, it is necessary to remove a heat insulator from pipe line. A characteristic of this novel system is that it is possible to measure without removing a heat insulator and on-line monitoring, because of measurement probe is attached between pipe surface and heat insulator. As a result of measured with this system, we could measure 30mm thickness of carbon and stainless steel at the maximum and pipe specimen of elbow shape. Heat-resistant characteristic confirmed at 200 degrees C until about 7000 hours.

Keywords: Optical Fiber, EMAT, Pipe Wall Thinning, Resonance frequency, Thermal resistance

1. 緒言

火力、原子力発電所や石油、化学プラントなどの設備トラブルの多くは配管部で発生しており、配管肉厚管理は設備維持の為に重要である。今回新しい手法を用いたオンライン計測が可能な金属配管肉厚測定システムの開発を行った。本方式は保温材を除去する必要が無く肉厚の測定が出来、さらにリアルタイムで肉厚の測定が可能な特徴があることから、従来手法では不可能であった連続的な配管状態監視が出来る利点がある。

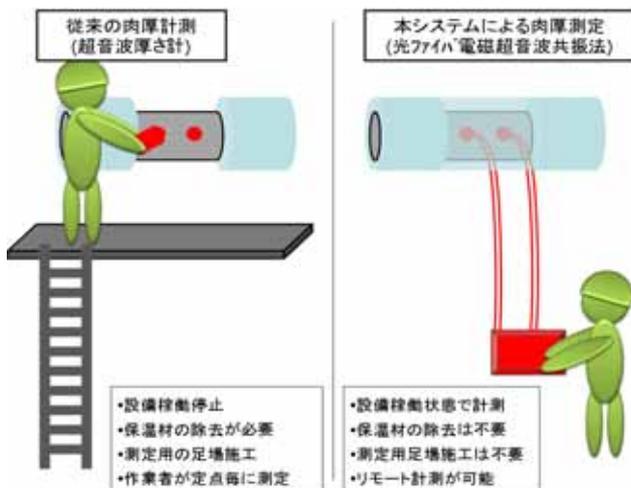


Fig. 1 本測定システムの特徴

2. システムの内容

2-1. 背景

日本機械学会では従来の超音波パルスエコー試験方法に加え、放射線を用いた透過測定や、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、汎用的に用いられている超音波厚さ計は作業者が直接肉厚値を計測することが出来るが、測定毎に保温材の除去、足場施工などが必要となる。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環境に制限がある。一方ガイド波、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データが事前に必要であるため測定現場で簡単に肉厚値を直接測定することが出来ない。

今回開発した金属配管肉厚測定システムは電磁超音波発振子 EMAT(Electro Magnetic Acoustic Transducer)と光ファイバセンサを組み合わせたものであり、EMATにより非接触で直接金属材料中に超音波を励起する電磁超音波共振法を用いたものである。

²⁻⁴⁾ 本システムの特徴は受信側に光ファイバセンサを用いたことであり、EMATと光ファイバセンサを組み合わせることによって従来 EMAT 送受信による肉厚計測よりも高感度で配管肉厚値を直接測定することが出来る。さらに耐熱構造化することで保温材下の高温稼働状態の配管肉厚をオンラインで測定することが出来るため、

リアルタイムで配管状態監視が可能となる特徴がある⁵⁻⁷⁾。この開発したシステムを用いると従来の定期点検毎に肉厚値を測定する方法よりも設備点検コストを低減出来ることが期待できる。

2 - 2 . システムの原理と構成

本システムで用いている電磁超音波共振法とは、永久磁石と電気コイルで構成された超音波発振子 EMAT によって、Fig. 2 に示す静磁場と渦電流から金属などの磁性体中にローレンツ力を誘起させ、間接的に金属材料中に超音波を伝搬させることで超音波の反射波長が板厚の整数倍(n)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。

$$d = \frac{n \cdot v}{2 \cdot f_r} \quad (n: \text{次数}) \quad \text{-----} \quad (1)$$

従来から EMAT を用いた電磁超音波法による板厚測定などについては既に報告されているが²⁻⁴⁾、今回の特徴は受信側に光ファイバセンサを用いたことである。光ファイバセンサを用いることで EMAT のみで送受信を行うよりも高感度の受信信号を得ることが出来、さらに従来では困難であった 1 次共振モード周波数の計測が可能となるため得られ共振周波数から直接板厚値を求められ、さらに効率良く超音波を励起させることが出来ることから金属板の減肉状態を詳細に測定出来ることが期待できる。

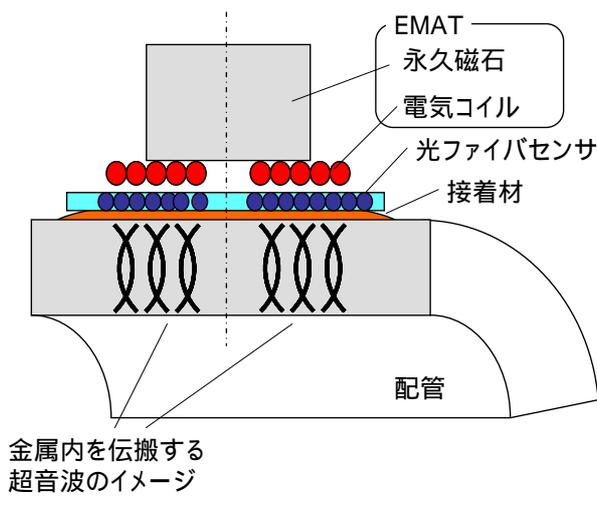


Fig. 2 光ファイバセンサプローブと EMAT の構成

2 - 3 . 光ファイバセンサの構造

Fig.3 に光ファイバセンサ部の外観を示す。光ファイバセンサはポリイミド樹脂を被覆した光ファイバを平面コイル状に巻き取った構造で、このコイル状の光ファイバセンサを測定する金属表面に接着材等で固定して振動計測を行う。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、ひとつの光ファイバセンサで数 Hz ~ 数 MHz におよぶ非常に広帯域な検出が可能であるため、異なる板厚測定において共振周波数が異なっても同一の光ファイバセンサプローブで板厚測定することが可能である。

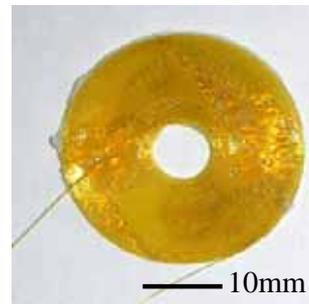


Fig. 3 光ファイバセンサ外観

Fig.4 にシステムの構成を示す。光ファイバセンサ部の振動に伴い光ファイバ中を伝搬する光偏波の状態が変化するため、その光偏波の変化を偏光子を用いて光強度変化に変換し光受光モジュールで振動を検出することが出来る。

Fig. 5 に試作した測定装置を示す。大きさは横 350mm、奥行 370mm、高さ 170mm、重量約 2kg で計測現場においても容易に移動が可能な仕様となっている。

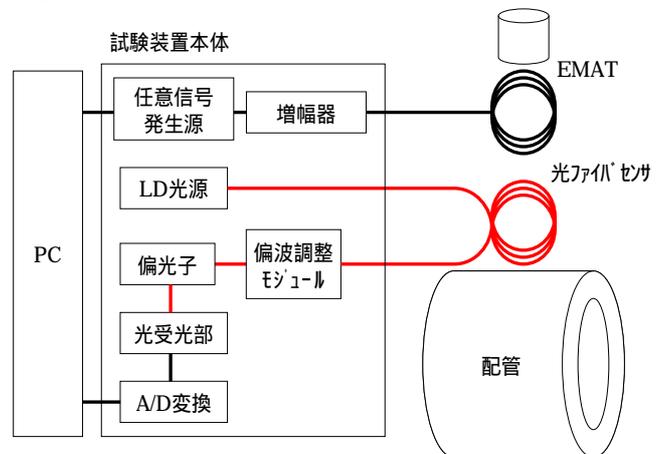


Fig. 4 本計測システムの構成図



Fig. 5 試作した測定装置外観

3. 試験結果

3-1. 試験の方法

光ファイバセンサプローブは Fig.6 に示すように金属配管等の測定対象物に接着材等を用いて直接貼り付けその直上に永久磁石と電気コイルから成る EMAT を配置してプローブ部の施工を行う。

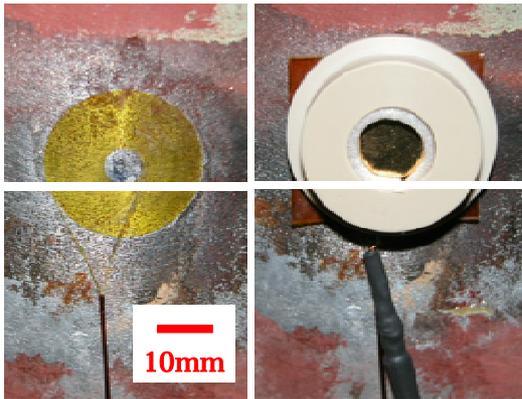


Fig. 6 光ファイバセンサとEMATの施工状態

測定方法は、まず EMAT で一定周波数のバースト波を励起させ励起停止後の光ファイバセンサの振動振幅の計測を行う。その後、励起周波数を測定する板厚測定精度に応じた周波数間隔変化させ再びにバースト波を励起、測定を行いこれを繰り返し行う。測定によって得られた波形を Fig.7 に示す。この結果は板厚 15mm の炭素鋼試験体を用いた結果であり、Fig.7 a)は励起周波数 183.5kHz、Fig.7 b)は 184.5kHz の EMAT 励起信号と光ファイバセンサ受信波形を示している。Fig.7 の a)と b)を比較すると光ファイバセンサの受信波形に大きな相違があり Fig.7a)では EMAT の励起有無にかかわらず光ファイバセンサの受信波形振幅に変化は無いが、Fig.7b)では EMAT の励起中に光ファイバセンサの受信波形振幅は徐々に大きくなり、EMAT 励起停止後

も振動が継続している状態、つまり共振状態となっていることが分かる。これら各励起周波数毎に EMAT 励起停止後の光ファイバセンサ受信波形の振幅を振動強度として励起周波数と振動強度の関係を示した共振周波数スペクトルを Fig. 8 に示す。Fig. 8 より測定する板厚値に相当する共振周波数において単一ピークのスペクトルを得ることが出来ることから、本手法による測定で金属板厚測定が可能である。

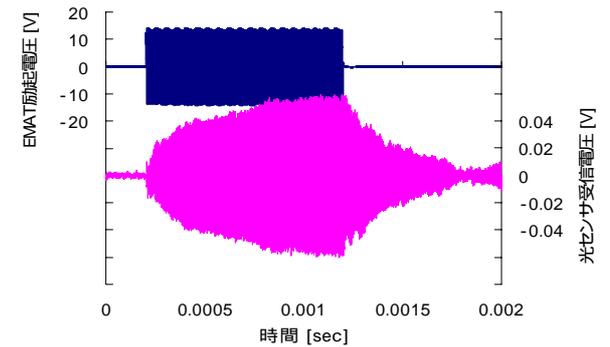
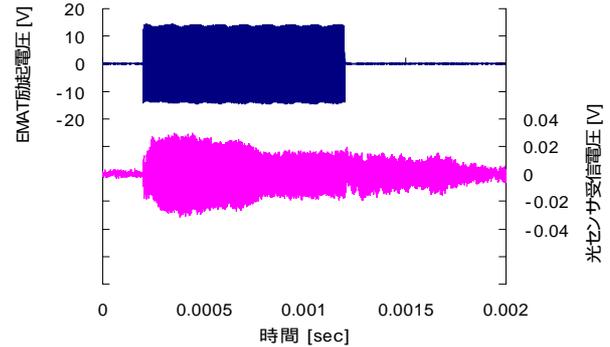


Fig. 7 測定波形 (厚さ 15mm炭素鋼試験体)

a)上図: 励起周波数 183.5kHz、b)下図: 184.5kHz

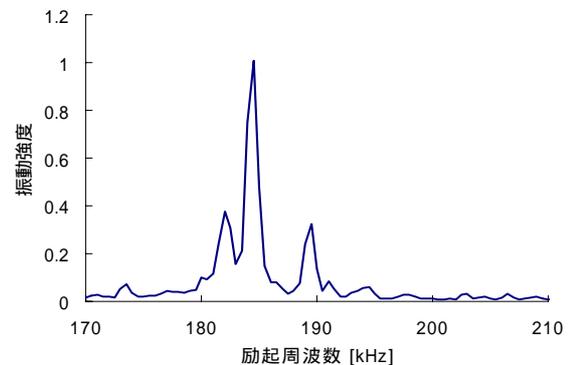


Fig. 8 共振周波数スペクトル (厚さ 15mm 炭素鋼試験体)

3 - 2 . 平板による試験結果

板厚測定精度の確認を行うために厚さの異なる平面試験体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 Fig.9 に示す階段状試験体で材質 SUS304、各厚さの大きさ 150×150mm、この中から厚さ 5,13,15,19,23mm の 5 サイズ部の中央部に光ファイバセンサ、EMAT を配置して共振周波数の測定を行い板厚値を求めた。Fig.10 にそれぞれの厚さ試験体で得られた試験板厚値とノギスを用いて実測した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 $R^2 = 0.9998$ と良好な結果が得られた。



Fig. 9 板厚測定試験用試験体

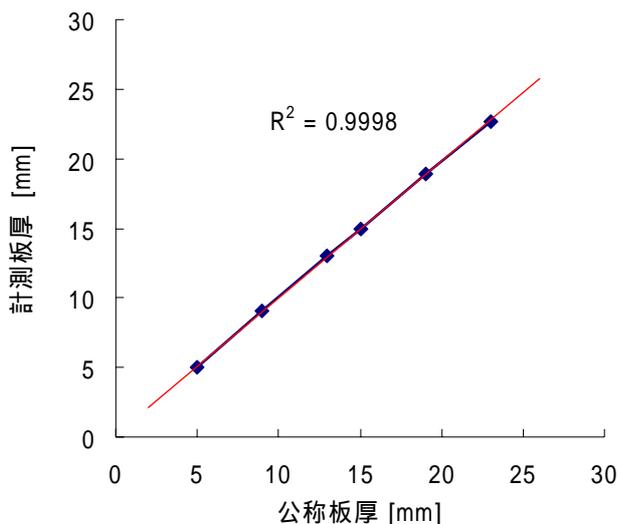


Fig. 10 平板試験体板厚測定結果

3 - 3 . 配管形状サンプルによる試験結果

実際の配管形状での肉厚測定検証のためエルボ配管試験体を用いて肉厚測定を行った。試験に用いた試験体は Fig.11 に示す材質 STPT49、250A エルボ配管と、材質 SGP、100A エルボ配管の 2 種類を用いた。光ファイバセン/EMAT プローブはそれぞれの配管の端部分に、250A 配管は半円周方向 90° 間隔で 3 箇所、100A 配管は背側（外側）と側面の 2 箇所に配置して試験を行った。Fig.12、13 にそれぞれの配管で測定した結果を示す。250A 配管は同一部を超音波厚さ計、マイクロメーターで測定した値との比較結果を示し、100A 配管についてはマイクロメーター測定値と比較した。この結果より、肉厚約 13mm の 250A 配管、肉厚約 6mm の 100A 配管エルボの両方において本手法を用いて測定した肉厚値は、超音波厚さ計、またはマイクロメーターの値と一致していることから、配管エルボのような曲率を有する形状においても肉厚計測が可能であることを確認した。



Fig. 11 試験に用いた配管エルボサンプル (奥側:250A、手前側:100A)

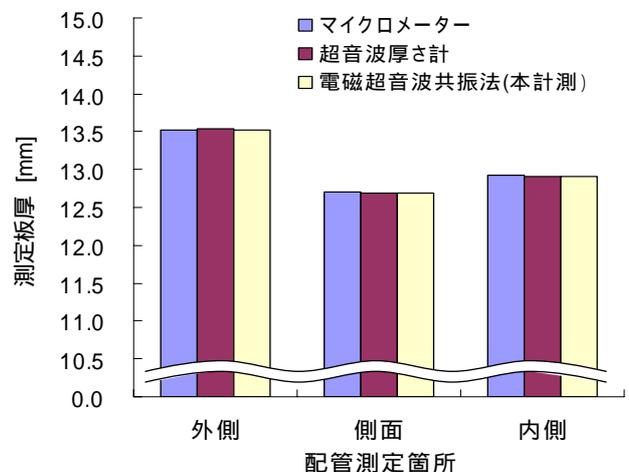


Fig. 12 250A エルボ配管の肉厚測定結果

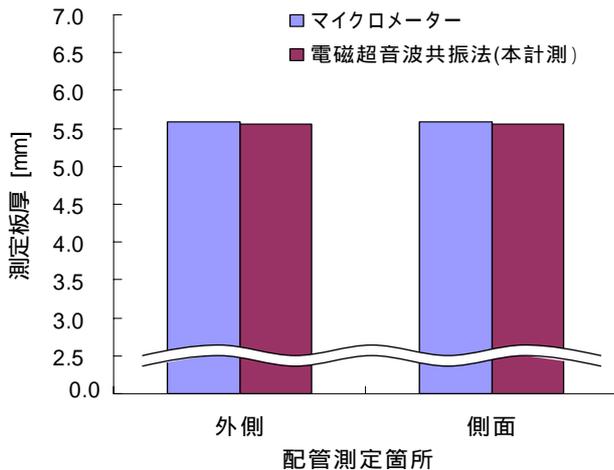


Fig. 13 100A エルボ配管の肉厚測定結果

4 . 耐熱特性

光ファイバセンサの耐熱試験の結果を Fig. 14 に示す。炭素鋼試験体(SS400)に耐熱接着材を用いて光ファイバセンサを接着し、試験体を 200 に加熱した状態で光ファイバセンサの受信感度を測定した。試験体が高温状態であるため感度確認時の励起源は鉄球を落下させその衝撃波の初動波を測定した。この結果より、約7,000時間経過した段階で感度の劣化は約30%程度であることから長期間の高温環境においても十分な感度を維持していることを確認した。

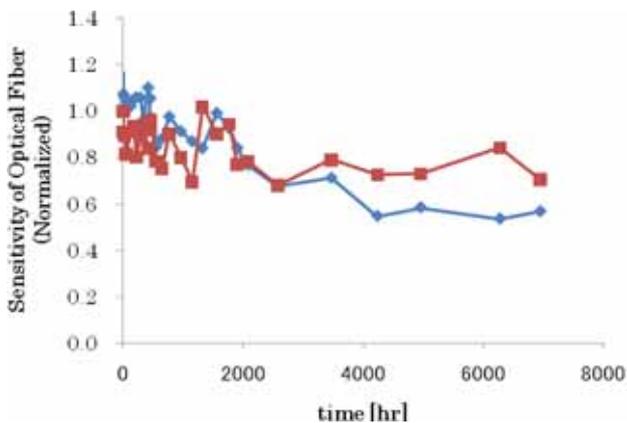


Fig.14 光ファイバセンサ長期耐熱試験結果(200)

5 . 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金属材料の肉厚を従来手法の超音波厚さ計と変わらない0.1mm精度で正確にエルボ形状の配管肉厚

の測定ができることを確認した。今後は、さらに検出精度、安定性を向上したシステムの改良とセンサプローブの耐熱構造の検討を進め、実際に稼働しているプラントの配管を用いた配管肉厚測定の実証性について確認を行う予定である。

謝辞

本研究は株式会社東芝 電力社会システム社との共同による研究成果である。

参考文献

- [1] 日本機化学会 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, pp.413-421,(1997).
- [3] D.I.Blef, J.G.Miller: High-frequency Continuous Wave Ultrasonics, Physical Acoustics, vol.8, pp.95, (1971).
- [4] K.Kawashima, O.B.Wright: Resonant Electromagnetic Excitation and Detection of Ultrasonic Waves in Thin Sheets, J.Appl.Phys. 72(10), pp.4830, (1992).
- [5] 佐々木恵一、高橋雅士;光ファイバドップラ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,pp.677, (2006)
- [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、p.147, (2008)
- [7] 白井武広 他: 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、日本非破壊検査協会表面探傷・保守検査合同シンポジウム, (2008).