

# 高温機器モニタリングを目指した高温用電磁超音波 プローブの開発と評価

## Development and Evaluation of High Temperature EMAT Aiming at Monitoring of High Temperature Components

東北大学	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member
東北大学	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
東北大学	尾形 翔平	Shohei OGATA	
Saarland University		Gerd Dobmann	

**Abstract:** An electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design using an air-cored solenoid coil as a pulsed electromagnet is proposed for high-temperature non-contact monitoring, and prototype probe is evaluated through performance test in the range from room temperature to 700°C. The coil generates a biasing magnetic field that enables the device to overcome the Curie temperature limitations of conventional EMATs. Pulsed echo measurements of carbon steel are performed at high temperatures, and verify EMAT operation at higher temperatures.

**Keywords:** High temperature monitoring, EMAT, Ultrasound velocity, Pulsed electromagnet,

### 1. 緒言

高速増殖炉や高温ガス炉をはじめとする新型炉においては、500°Cを越える高温環境で稼働する機器や配管が多数存在しており、これらの状態を計測するための高温センサが求められている。電磁超音波探触子 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT) は非接触での測定が可能のため、高温での試験に適している。EMAT はバイアス磁場源および励磁・検出コイルによって構成されており、従来の EMAT のバイアス磁場源には小型で大きな磁場が得られることから、ネオジム磁石やサマリウムコバルト磁石のような永久磁石が使用されている。しかし、これらの使用温度はキュリー温度によって制限されており、最高でも 100°C~300°C までとなっている[1]。また、バイアス磁場源としてヨーク付きの電磁石を用いる方法も試みられているが、ヨークのキュリー点による限界から、最高温度は 600°C に留まっている[2]。

本研究ではバイアス磁場源として空芯のパルス電磁石を使用することで、従来の超音波探触子の使用最高温度を上回る高温環境に耐えうる EMAT を開発する。耐熱材料を用いて空芯のバイアス磁場コイルおよび励磁・料を用いて空芯のバイアス磁場コイルおよび励磁・検出コイルを試作し、炭素鋼の試験体に対しての高温における

超音波厚さ試験を行い、プローブの性能を評価する。

### 2. 空芯パルス電磁石を用いた EMAT

本研究で開発を目指す EMAT は、試験体に渦電流を誘導し、受信信号を検出する励磁・検出コイルと、バイアス磁場源となる空芯ソレノイドコイルから構成される。空芯コイルにパルス電流を印加することでバイアス磁場を発生させ、同時に、電磁石と試験体の間に置かれた励磁・検出コイルへ高周波電流を通电することで試験体内部に渦電流を発生させる。磁場と渦電流の相互作用によって発生したローレンツ力により超音波が発生し、試験体を伝播する。

本研究において試作した EMAT を図 1 に示す。バイアス磁場源には多層ソレノイドコイルを用いる。巻線には直径 1.0mm の銅線を使用し、巻き数は 156 とした。バイアス磁場コイルの下に取り付けられた励磁・検出コイルには単層の円形コイルを用いる。巻線には直径 0.2mm 銅線を使用し、巻き数は 23 とした。各コイルの線材は一定の間隔を空けながら巻くことで絶縁し、耐熱性セラミック系接着材を用いて固定する。

### 3. 実験方法

バイアス磁場コイルに電流を供給する電源には、最大振幅 2000A のパルス電流発生装置を使用した。コイルが磁場を発生すると同時に、励磁・検出コイルへ高周波電流を通电させるためのトリガー信号を EMAT 用パルサー

連絡先: 内一哲哉、〒980-8577 仙台市青葉区片平  
2-1-1、東北大学流体科学研究所、  
E-mail: uchimoto@ifs.tohoku.ac.jp

レーザーに送信する。この時、EMAT の送受信のタイミングが、電磁石の磁場が最大となる時間領域に極力近くなるようにトリガー信号の送信時間を調節する。発生するローレンツ力の方向から本プローブにより横波が送信される。受信信号については、プリアンプにより増幅して測定する。試験片には厚さ 10mm の炭素鋼板(SS400)を使用し、EMAT および温度計測用の熱電対とともに電気炉内部に固定して実験を行った。最初に常温でエコーを観測した後、炉内温度を 50℃刻みで増加させ、各温度において観測を行った。

#### 4. 実験結果

パルサーレーザーの中心周波数は 2MHz および 3MHz に設定し、それぞれの周波数でエコー観測を行った。中心周波数を 2MHz としたときに得られたパルスエコー波形を図 2 に示す。温度上昇とともにエコー高さは低下するものの、700℃でもエコーを確認することができた。磁性体である炭素鋼はローレンツ力に加え、磁歪効果が超音波の発生に寄与しており、その分受信感度は高くなる。しかし、材料がキュリー温度(炭素鋼の場合、770℃)に近づくにつれ強磁性の性質を失うため、高温においては感度が低下すると考えられる。周波数を 3MHz とした場合には、減衰のため 700℃ではエコーを確認できなかった。

次に、得られた底面エコーの時間間隔と試験片厚さを用いて、各温度における横波音速を評価した。尚、各温度における試験片厚さについては、熱膨張を考慮した。評価した横波音速の温度依存性を図 3 に示す。この図から、温度上昇に伴って音速が単調減少していることが分かる。過去に行われた導波棒を用いた弾性係数の温度依存性評価から換算した結果とほぼ結果は一致しており、高温においても本プローブは機能していたことを裏付けている。

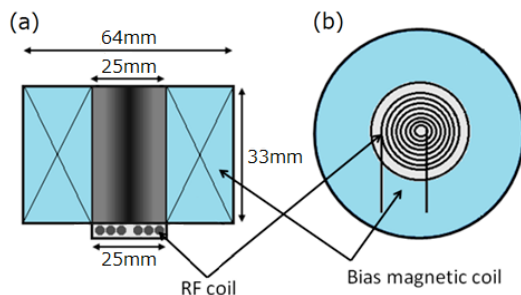


Fig.1 Schematic diagram of air-cored pulsed EMAT  
(a) Side view (b) Bottom view

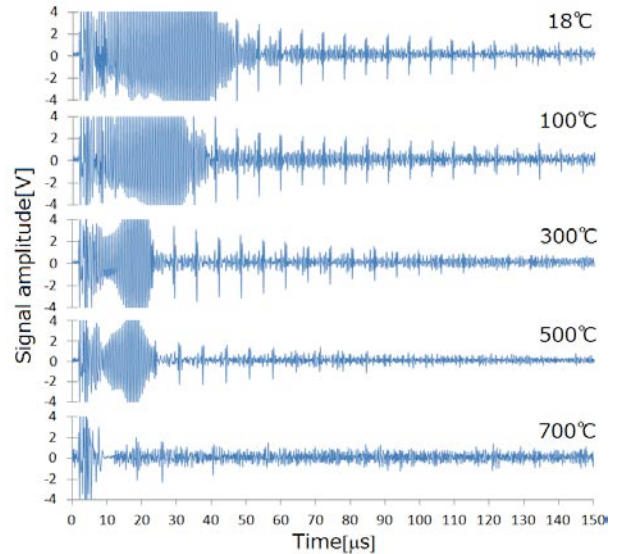


Fig.2 Back-wall echo signals at elevated temperature (SS400).

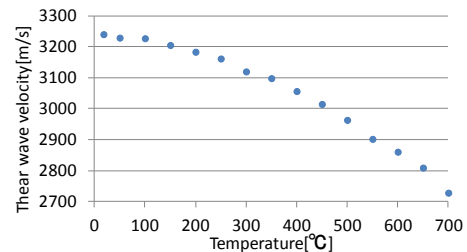


Fig.3 Shear wave velocity of carbon steel at a range of temperatures from RT to 700°C

#### 5. 結言

本研究では高温で使用可能な EMAT を開発するために、空芯ソレノイドコイルをバイアス磁場源とした EMAT を試作し、高温での超音波厚さ試験を行った。実験の結果、炭素鋼試験片では 700℃までの底面エコーの測定に成功した。エコーから求められた試験片の音速の温度依存性から、試作したプローブが高温において正しく機能していることが確認できた。

#### 謝辞

本研究は科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究) 24656080 および研究拠点形成事業(A.先端拠点形成型「省エネルギーのための知的層材料・層構造国際研究拠点」)の助成を得たものである。また、本研究を進めるにあたり市原敏晶様にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

- [1] 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 兼本茂: 電磁超音波共鳴法による配管減肉オンラインモニタリング, 保全学, Vol.11, pp.83-89(2013)
- [2] F Hernandez-Valle, S Dixon: Pulsed electromagnet EMAT for ultrasonics measurements at elevated temperatures, Insight, Vol.53, No.2, pp.96-99(2011).
- [3] 竹内洋一郎, 他: 各種特殊鋼およびアルミニウム合金の弾性係数の温度依存性の実験式, 材料, 第 26 巻, pp. 210-214 (1977).