

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656080

研究課題名(和文)超高温電磁超音波アレイセンサによる金属凝固過程の可視化

研究課題名(英文) Visualization of Solidification Process of Metals by Super High Temperature Electromagnetic Acoustic Transducer Array

研究代表者

高木 敏行 (TAKAGI, Toshiyuki)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：20197065

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：金属の凝固過程は、鋳造、溶接等の様々な金属加工プロセスの信頼性に大きな影響を及ぼすため、その現象の把握と予測が重要であるが、現在までのところ凝固過程を直接可視化する手法は確立していない。本研究では、1000度までの高温環境を目標に、電磁超音波プローブを試作し、これを用いたアレイプローブにより金属の凝固過程を可視化する手法を構築した。具体的には、高温に耐える電磁超音波プローブを試作するために、空芯コイルと高圧パルス電源から構成されるバイアス磁場源を提案し、その検証を行った。さらに、電気炉を用いた高温環境試験を行い、400℃におけるパルスエコー信号を確認した。

研究成果の概要(英文)：Understanding of the metal solidification is a key issue to increase the reliability of the metal processing, and the sensors for monitoring such process at high temperature is highly required. EMAT (Electromagnetic Acoustic Transducer) provides non-contact measurements, and it is suitable for measurements in high temperature. The main factor to limit working temperature of this EMAT is the Curie temperature of iron yoke. In this study we propose to use air-cored coil as the bias magnetic source of EMAT. The pulsed-echo waveforms of an aluminum alloy specimen are measured by the present EMAT in high temperatures and shear wave velocity of the specimen at each temperature is evaluated. Back-echo signals can be identified at the range of temperature from RT to 400 degrees C.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：高温計測 非破壊評価 計測システム プロセス 電磁超音波試験

1. 研究開始当初の背景

鑄造、溶接等の金属プロセスを評価するための、高温用超音波センサの開発が求められている。電磁超音波探触子(EMAT)は非接触での測定が可能であることから、高温環境での試験に適している。EMATはバイアス磁場源およびRFコイルによって構成され、従来のバイアス磁場源には永久磁石が使用されてきた。しかし、これらの使用温度はキュリー点によって、最高で100~300までに制限されている。また、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に留まっている。

2. 研究の目的

本研究では探触子のバイアス磁場源として空芯コイルを用いることで、従来の超音波探触子の最高温度である600を上回る環境に耐えうるEMATを開発することを目的とする。初めに、耐熱材料を用いてRFコイルおよび空芯のバイアス磁場コイルを試作する。次に、電気炉を用いて高温環境下での超音波厚さ試験を行い、得られる信号を評価する。

3. 研究の方法

(1) 常温での EMAT 試験

本研究で開発を目指す空芯パルス電磁石を用いたEMATは、試験体に渦電流を誘電する励磁・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、磁場の発生と同時に、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電し、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が超音波となって試験体を伝搬する。反射波の受信は、超音波とバイアス磁場の相互作用によって励磁・検出コイルに生じる起電力として検出される。

実験装置の概略図を図1に示す。バイアス磁場コイル用の電源には、最大振幅2000Aのパルス電流を発生させることが可能なパルス発生器(ハヤマ社製)を使用し、コイルに電流を供給すると同時にトリガー信号をEMAT用パルサーレシーバー(RPR-4000/RITEC社製)に送信する。この時、励磁コイルへの送信のタイミングが、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。パルサーレシーバーは励磁・検出コイルへ励磁電流を供給する。パルサーレシーバーの中心周波数は3MHzとする。励磁・検出コイルには単層構造のレーストラック型コイルを用いる。導線には直径0.1mmの銅線を使用し、巻数は55回とする。励磁によって発生するローレンツ力の向きは試験片面と平行になるため、垂直方向に横波が発生する。検出信号はプリアン

プによって増幅され、広帯域ディケードフィルター(FV-628B/NF社製)を介した後、オシロスコープ(TDS-3064B/TEKTRONIX社製)を用いて観測される。バイアス磁場源となる空芯コイルは2種類用意した。1つは直径1.0mmの銅線を220回巻いた多層ソレノイドコイルで、内径25mm、外径57mm、長さ30mm、インダクタンスは1156 μ Hである。2つ目は、直径1.0mmのコンスタンタン線(Cu-Ni-Mn合金)を使用した多層ソレノイドコイルで、線材の絶縁および固定のためにセラミック系接着剤(CeramabondTM571)を使用した。コンスタンタン線の融点は1240、接着剤の耐熱上限温度は1760であり、高温環境での使用が可能である。コイルは巻数100、内径25mm、外径59mm、長さ30mmとし、インダクタンスは251 μ Hである。励磁・検出コイルおよび各バイアス磁場用空芯コイルの外観をそれぞれ図2、図3に示す。なお、試験片には厚さ20mmのアルミニウム板を使用する。

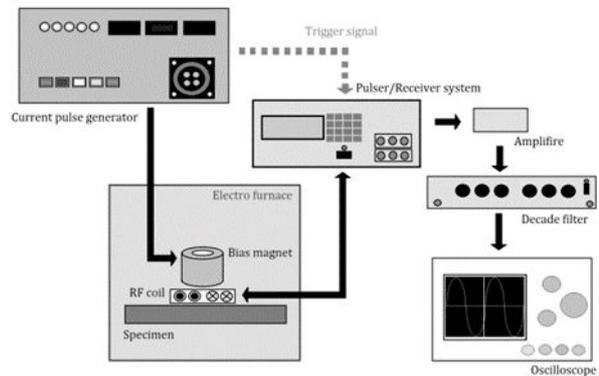


図1 高温用電磁超音波試験システム

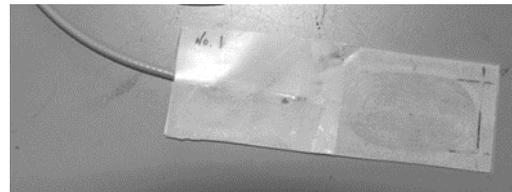


図2 実験に用いたRFコイル

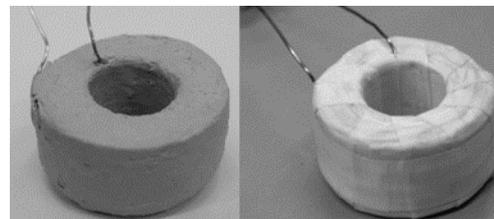


図3 バイアス磁場用電磁石(左:コンスタンタン線を用いたコイル、右:銅線を用いたコイル)

(2) 高温での EMAT 試験

常温の実験において、銅線を用いた空芯パルス電磁石によって明確なエコー信号を観測できたことから、ここでは銅線コイルをセラミックス接着剤で被覆し、耐熱性をもたせたものを高温での EMAT 試験のバイアス磁場として使用する。コイルの巻数は 100 回とし、内径 25mm、外径 53mm、長さ 25mm、インダクタンスは 290 μH である。ここで、バイアス磁場がピーク値を示す時間帯の電流波形がより平坦となるように、常温で使用した銅線コイルを直列に接続することで、インダクタンスを増加させた。その結果パルス幅が約 1ms 増加したが、電流のピーク値は約 200A 減少した。そこで、この不足分を補うために供給電圧を 1000V に増加して実験を行った。この時コイルの発生する最大磁場は 372mT となる。励磁・検出コイルには直径 0.1mm のポリイミドアミド被覆銅線を 0.1mm の間隔を空けながら合計 30 回巻いたレーストラック型コイルを用いる。高温実験では、試験片、励磁・検出コイル、バイアス磁場コイルをすべて電気炉内部に設置して実験を行う。初めに常温でエコーを観測し、その後は炉内温度を 100 から 40 刻みで増加させ、各温度において観測を行う。また、ノイズを減らすために、8 回のパルス送信によって得られたエコー波形の平均をとる。

4. 研究成果

(1) 常温での EMAT 試験

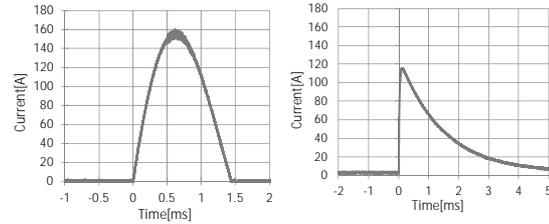
銅線コイルを用いた測定ではパルス発生器の出力電圧を 500V とした。コイルの電流波形を図 4(a)に示す。この時コイルに流れる電流のピーク値は 156A であり、Biot-Savart の法則を用いた有限ソレノイドコイルの磁場計算式を用いると、コイル表面の中心磁場は 539mT である。コンスタンタン線コイルを用いた測定では電源電圧を 1000V として超音波厚さ試験を行った。コイルの電流波形を図 4(b)に示す。このときコイルが発生する最大磁場は 204mT である。パルス電源の電圧に対して各コイルが発生する磁場を図 5 のグラフに示す。この図より、コンスタンタン線コイルの発生する磁場は銅線コイルと比較して極めて小さくなる。この原因として、今回使用したコンスタンタン線が被覆されていないため間隔を空けて巻かねばならず、その結果巻数が少なくなったこと、また、コンスタンタンの電気抵抗率が銅に対して大きいことが考えられる。

銅線コイルを用いた超音波厚さ試験によって得られたエコー波形を図 6(a)に示す。第 2 底面エコーの振幅を測定すると 2.85V であり、明確な底面エコーが確認できた。コンスタンタン線コイルを用いた超音波厚さ試験によって得られたエコー波形を図 6(b)に示す。第 2 底面エコーの振幅は 0.25V であり、銅線を巻いたコイルでの振幅と比較すると、およそ 1/10 の強度であることが分かった。

ここで、エコー間の時差を t 、音速を c とすると、試験片の厚さ L は以下の式(1)によって求められる。

$$L = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

図 6 より、どちらのコイルを使用した場合においても、第 2 底面エコーと第 3 底面エコーの時間間隔は 12.8 μs であり、アルミニウムの横波の音速が 3080m/s であることから、式(1)より試験片の厚さは 19.7mm と算出され、実際の厚さ 20mm とほぼ一致する。したがって、検出されたエコーは横波による底面反射エコーであることが確認された。



(a)銅線 (b)コンスタンタン線
図 4 電流波形

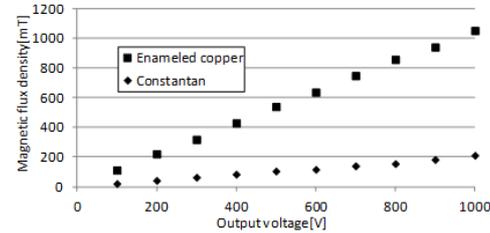
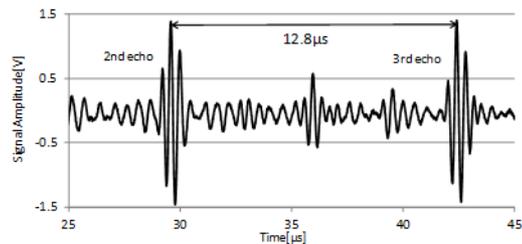
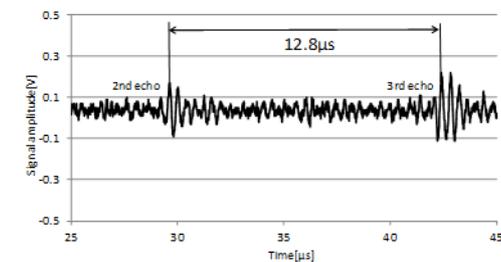


図 5 発生磁場の比較



(a)銅線



(b)コンスタン線

図 6 EMAT のパルス エコー波形

(2) 高温での EMAT 試験

得られたエコー波形を図 7 に示す。炉内温度が室温 (18)から 300 までのときには明確な底面エコーを観測することができた。温度上昇に伴ってパルサーレーザの出力電圧が低下したため振幅が減少したが、この値を一定に保つことによって 340 から

460 までの底面エコーの観測にも成功した。
 340 以上での測定結果を図8に示す。

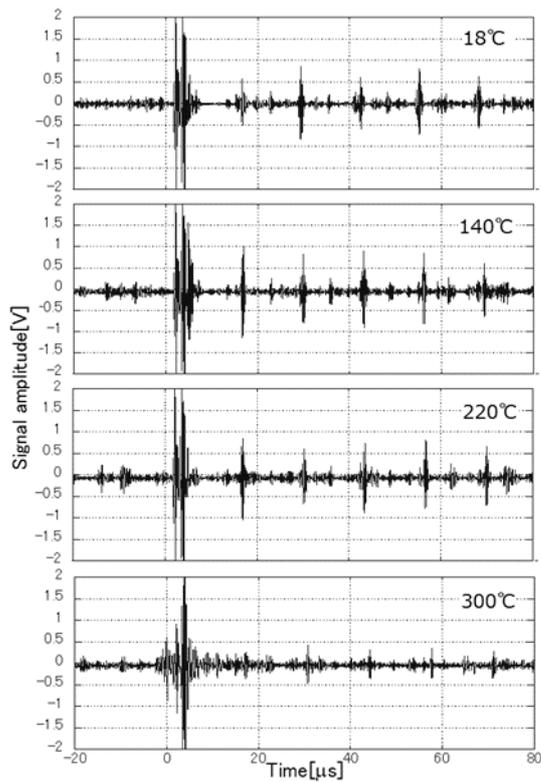


図7 室温から300 までの
 パルス エコー波形

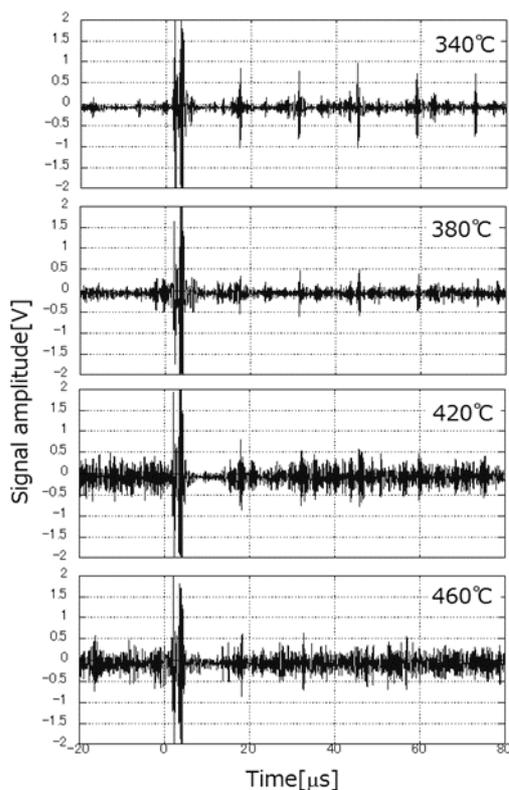


図8 340 から460 までの
 パルス エコー波形

(3) 音速の温度依存性の評価

次に, EMAT 試験で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. 各温度における試験片の厚さは, 熱膨張を考慮し, 以下の式(2)を用いて求める.

$$L = L_0[1 + \alpha(T)(T - T_0)] \quad (2)$$

ここで, L_0 は室温における試験片の厚さ(20mm), $\alpha(T)$ はアルミの線膨張率($23.1 \times 10^{-6}/K$), $T - T_0$ は室温からの温度変化を表す. 横波音速の計算結果を図9に示す. この図から, 温度上昇に伴って音速が減少していることが分かる. 一般的に, 弾性係数は温度上昇に伴って減少する傾向があり, それによって音速も減少すると考えられる. したがって図9は, 温度上昇に伴う試験片の弾性係数の変化を反映しているといえる. このことから, 高温においても正確な底面エコーを観測できたといえる.

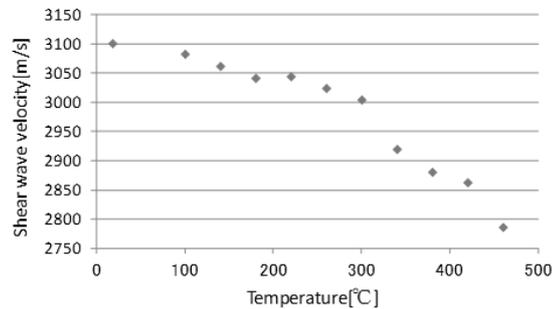


図9 横波音速の温度依存性の評価

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Ryoichi Urayama, Toshiyuki Takagi,
Tetsuya Uchimoto, Shigeru Kanemoto,
 Online Monitoring of Pipe Wall
 Thinning by Electromagnetic Acoustic
 Resonance Method, E-Journal of
 Advanced Maintenance, 査読有、5巻、
 2013年、155-164

[http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.5No.3/
 AA/AA68/68.html](http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.5No.3/AA/AA68/68.html)

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の
 オンラインモニタリング, 保全学, 査読
 有、11巻、2013年、83-89

[学会発表](計5件)

尾形 翔平, 内一 哲哉, 高木 敏行,
 Gerd Dobmann, 金属加工プロセスのモニ
 タリングのための高温用電磁超音波探触
 子の開発, 安全・安心な社会を築く先進

材料・非破壊計測技術 次世代高温環境
センサ研究会 合同シンポジウム、
2014年3月10日、東京
Shohei Ogata, Tetsuya Uchimoto,
Toshiyuki Takagi, Toshiaki Ichihara,
Gerd Dobmann、Development of High
Temperature Electromagnetic Acoustic
Transducer for Monitoring of Metal
Processing、Tenth International
Conference on Flow Dynamics、
2013年11月26日、宮城
尾形 翔平、内一 哲哉、高木 敏行、市原
敏晶、金属加工プロセスのモニタリング
のための高温用電磁超音波探触子の開発、
日本保全学会 第10回 学術講演会、
2013年7月25日、大阪
内一 哲哉、高温環境電磁超音波探触子
の開発、平成24年度第2回 次世代高温
環境センサ研究会、2013年03月26日、
宮城
尾形 翔平、市原 敏晶、内一 哲哉、高木
敏行、金属加工プロセスのモニタリング
のための高温用電磁超音波探触子の開発、
日本機械学会 東北学生会 第43回学生
員卒業研究発表講演会、2013年03月11
日、岩手

〔図書〕(計 0件)

特になし

〔産業財産権〕

特になし

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 敏行 (TAKAGI, Toshiyuki)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：20197065

(2) 研究分担者

内一 哲哉 (UCHIMOTO, Tetsuya)
東北大学・流体科学研究所・准教授
研究者番号：70313038

三木 寛之 (MIKI, Hiroyuki)
東北大学・学際科学フロンティア研究所・
准教授
研究者番号：80325943