

マイクロコイルを用いた材料診断技術の開発に関する研究(第2報)  
パイプ探傷および厚さ測定の為の電磁超音波センサーの試作

問山清和、縄雅典生

Development of new technique for material testing using microcoil (2nd report)

Electromagnetic Acoustic Transducer for Thickness Measurement and Pipeline Inspection

TOIYAMA Kiyokazu , NAWACHI Norio

Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) is one of the most notable technique in nondestructive ultrasonic testing methods because it can transduce electrical signal to ultrasonic wave non-contactively. We developed two types of non-contact sensors using EMAT technique. One is to measure the thickness of metal plates and pipes, and the other is to detect corrosive defects in long pipelines. Feasible tests were performed with these sensors, then very usable results could be obtained.

キーワード：電磁超音波センサ，非破壊検査，探傷，厚さ測定

## 1. 緒言

電磁超音波センサ (ElectroMagnetic Acoustic Transducer: 以下 EMAT とする) は、非接触測定可能な超音波センサとして 1970 年代後半～1980 年代前半にかけ盛んに研究されてきた<sup>1-3)</sup>。

非接触という大きなメリットを持つ EMAT であるが、今まで普及しなかった大きな原因は、その変換効率の悪さである。以前の EMAT は圧電探触子に比べると 40dB 以上も感度が悪く、探傷などの実用的な使い方ができなかった。

近年、信号処理技術の発達、希土類系永久磁石など磁石の性能向上、および微細加工技術 (プリントコイル) の発達によるコイル性能の向上などにより、EMAT の変換効率の改善向上ができるようになった。

超音波センサは、圧電素子を用いた接触タイプのもが多く用いられている。これは超音波の変換効率が良く、構造も簡単なことによるが、センサと物体との音響的結合を確保するため、接触面の研磨処理を行うか、音響結合材を使用する必要がある。また 300 以上の高温では探触子が圧電特性を失うことから、高温体への検査ができないなどの問題がある。

一方 EMAT は従来のように被検体表面にセンサを押し当てて測定する必要がないので、例えば表面に多少の凹凸や錆があっても (その程度にもよるが) 検査が可能で、非常に迅速にできるという実用上のメリットが考えられる。また製造ライ

ンのインプロセスでの連続検査が可能である。

本報では、微細加工技術で平面コイルを作製することによりコイル性能を向上させ、さらに共振現象を応用して効率を上げた厚さ測定センサー、および磁歪と干渉効果を積極的に取り入れたパイプ探傷センサーを開発したので報告する。

## 2. 厚さ測定センサー

### 2-1 センサーの構造

まず始めに、共振現象を応用した厚さセンサの開発例について述べる。図 1 にセンサーのモデル図を、図 2 にセンサーの外観写真を、図 3 に用いた平面コイルの形状を示す。

平面コイルは送信・受信計 2 本の線が並んで渦巻状に巻かれた 2 重渦巻コイルである (図 3) その上に図 1 のように磁極を N S 互い違いに向けた 1 対の強力永久磁石 (住友特殊金属製 NEOMAX) を配置した構造となっている。コイルに高周波電流を印加すると、導体表面上には図 1 のように左右で反対方向を向いた渦電流が発

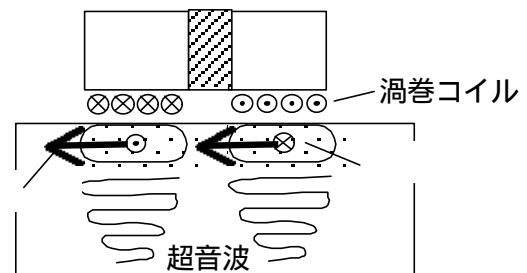


図 1 厚さセンサーのモデル図



表 裏  
図2 厚さセンサの外観写真

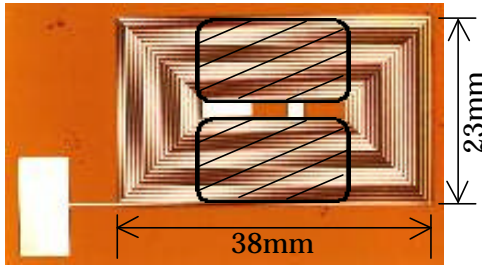


図3 平面コイルの形状  
(斜線部分の上に磁石が配置される)

生ずる。永久磁石により印加されたバイアス磁場の向きは右半分と左半分とは反対方向を向いているので、結果的に導体表面に発生するローレンツ力は全体的に同じ方向に振動する。この表面振動が波源となり、導体の深さ方向に横波(剪断波)が伝播していく。受信時は、この逆過程をたどり、最終的に受信コイルに生じた誘導起電力を検出する。

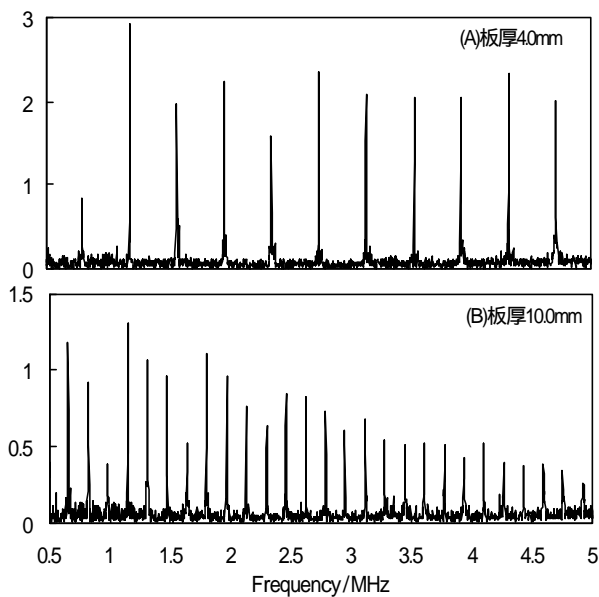


図5 厚さセンサによるアルミ合金板材の共振スペクトル

## 2-2 共振による板厚の測定原理<sup>4),5)</sup>

ここで、厚さ $t$ の板材に対し、周波数 $f$ の超音波を入射させる事を考える。EMATから入射された波は、材料内部でさほど減衰せず板の裏面とおもて面において繰り返し反射される。例えば1サイクルの波を入射した際、観測されるエコー波形は図4-a のようになると考えられる。さらに連続して多数サイクル入射させることを考える。裏面において1回反射された第1エコーと、2回目に反射された第2エコー、さらに3回目の第3エコー・・・は互いに重なり合って干渉をおこす。一般には、各エコー間の位相は一致してないので、それらは破壊的干渉となり振幅は強め合わない(図4-b)しかし周波数を適当に選んで、波の往復距離( $=2t$ )が波長の整数倍に一致するとき、各エコー間の位相は一致し、建設的干渉となり、振幅は非常に大きくなる(図4-c)これが共振状態である。周波数を掃引していくと、ある周期的な周波数群 $f_1, f_2, f_3 \dots f_n$ において共振が観測される。この時 $n$ 次共振周波数 $f_n$ と板厚 $t$ の間には $2t = n \lambda = n(v/f_n)$  という関係があるので、音速 $v$ が既知であればこれにより板厚 $t$ が求められる。

## 2-3 センサーの性能評価

上述の厚さセンサを用いて、アルミ合金板材(厚さ:(A)4mm (B)10mm)の共振スペクトルを測定した。図5にその結果を示す。両者とも板厚が反映された周期的な共振ピークが、明確に観測

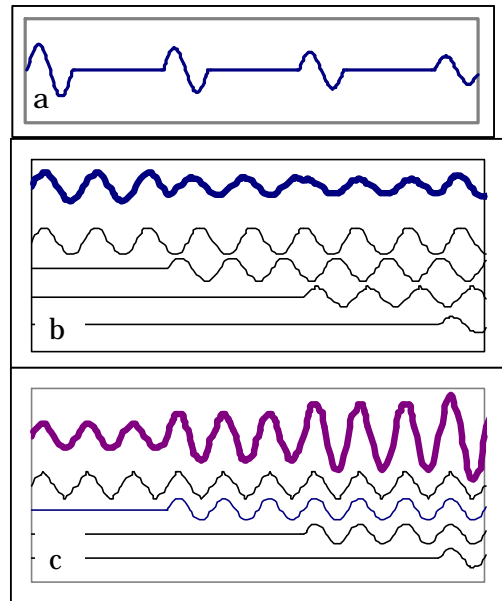


図4 各エコーの重ね合わせ波形  
(a: 1サイクル入射時 b:非共振時 c:共振時)

されている様子が見て取れる。実用面を考えて、プロファイルフィッティング処理を省略した簡便なデータ処理においても、共振周波数の相対誤差 ( $f/f$ )は $10^{-3}$ 未満である。これは例えば求める板厚が 10mm の場合、その測定誤差が 0.01mm 未満であることに相当する(ただし既知の音速は正確であるとした) 時間をかけてプロファイルフィッティング処理を施せば、誤差はさらに小さくなる。

### 3. パイプ探傷センサー

#### 3-1 センサーの構造

次に、パイプ探傷センサーの開発事例について述べる。

このセンサーは、前章のようにローレンツ力を超音波の駆動源とするのではなく、磁歪効果を用いたタイプのものである<sup>6)</sup>。図6にセンサーのモデル図を示す。パイプ上には Co, Ni などの強磁性材料(磁歪を示す材料)がコーティングされ、その上に導線が巻き付けられた構造となっている。導線に高周波電流が付与されると、直下の強磁性材料に振動磁場が侵入し、磁歪効果により強磁性層内にパイプ長手方向の振動変位が生じる。これが波源となってパイプ材長手方向に超音波(この場合は縦波)が伝搬する(図7)。

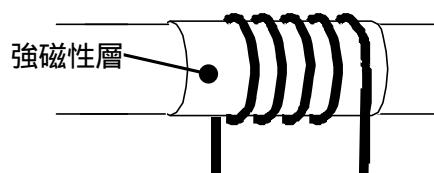


図6 パイプ探傷センサーの構造モデル

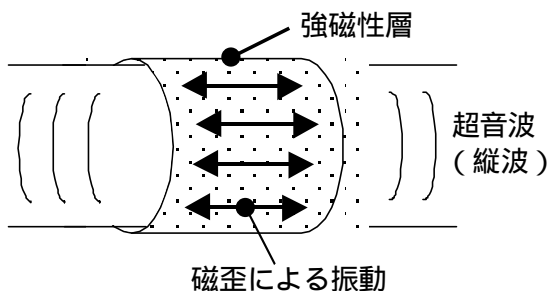


図7 探傷センサーの超音波発生原理

受信時は磁歪材料の振動により、逆磁歪効果でコイル周辺に振動磁場が形成されるので、これをコイルにより検出する。

この探傷センサーには、振動源となる磁歪材料(強磁性材料)の存在が不可欠である。そのコーティングには密着性の優れたメッキ法が適しているが、簡易的に強磁性体の薄板をエポキシ系接着剤等で貼り付けても良い。

#### 3-2 実際の探傷センサーと測定結果

図8に、実際探傷に用いたセンサーと平面コイルの外観写真を示す。

実際のセンサーではコイル線を巻き付けるかわりに、図8-(a)のように平面コイルでパイプを包んだ形になっており、これで導線を巻き付けたのと同じ効果を持たせている。

強磁性層として、厚さ 200  $\mu\text{m}$  の Ni めっきを施している。コイル直下の強磁性層では図9のように、間隔 L だけ離れた 2 つの領域で互いに逆方向に振動し、それぞれの領域から位相がだけずれた超音波が発生している。ここで間隔 L が超音波波長の半分となるよう周波数を選ぶと、それぞれの波は干渉効果によって強め合い、センサーの変換効率を向上させる。



(a)センサー外観 (b)平面コイル部

図8 パイプ探傷センサーの外観写真

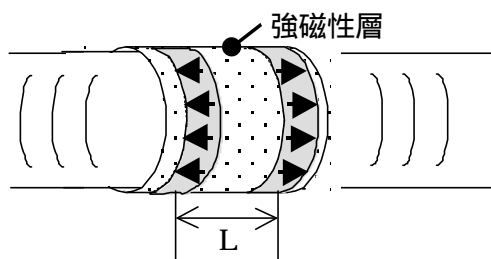


図9 強磁性層における振動モード

探傷実験に用いたパイプは、材質 SUS304、外径 12.6mm、肉厚は1mm である。図 10 に示すように、2mm の貫通穴 1ヶと、深さが 0.15mm,0.3mm の異なる2ヶのノッチを設けている。探傷実験の結果を図 11 に示す。

超音波の周波数は 165kHz とした。2mm の貫通穴、深さ 0.3mm,0.15mm の2つのノッチ、いずれからも反射エコーが検出されており、十分な探傷性能が確認された。またノッチ N1,N2 からのエコー振幅と、ノッチ深さとの間には正の相関が見られる。さらにセンサーの変換効率を向上することにより、欠陥の大きさや形状に関する定量評価ができるものと期待される。

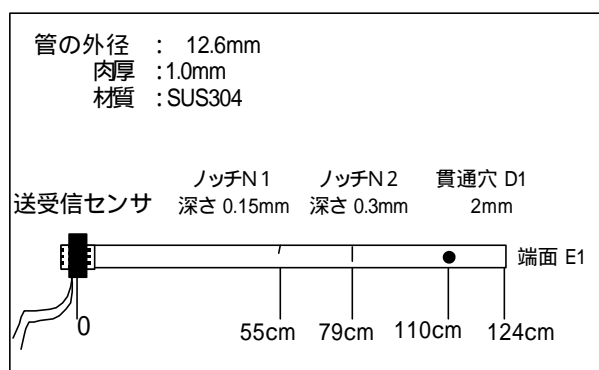


図 10 実験系(傷, 穴, センサ)の配置図

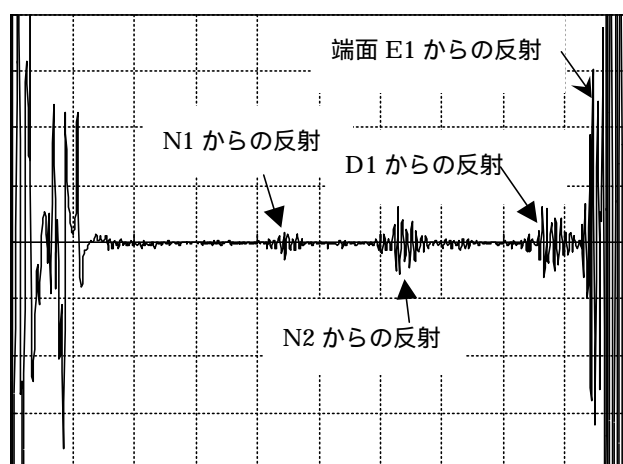


図 11 パイプ探傷センサによる測定データの例  
(周波数は 165kHz, 横軸のフルスケールは 500  $\mu$ sec である)

## 4.まとめ

電磁超音波を応用した厚さセンサ、パイプ探傷センサの開発を行い、次のような成果が得られた。

共振現象を応用した厚さセンサーについては、実用的な信号強度が得られ、アルミ合金板材に対して明瞭な共振スペクトルが観測された。

求める板厚測定精度は、簡易的なデータ処理においても、厚さ 10mm に対して誤差 0.01mm 未満であった。

磁歪効果を利用したパイプ探傷センサについては、干渉効果による変換効率の向上が図られ、ステンレスパイプ上にある、深さ 0.15mm までの微細な傷および 2mm の貫通穴が検知された。

さらに深さの異なる欠陥からの反射信号の振幅比を検討した結果、ある程度欠陥の大きさの推定が可能であることが見出された。

## 参考文献

- 1) R.B.Thompson ; IEEE Trans. On Sonics and Ultrason. , SU-25 ,pp 7-15 (1978)
- 2) I.V. Il'in and A.V. Kharitonov ; Sov. J. Nondestr. Test, 16, pp549-554 (1980)
- 3) B.W.Maxfield and C.M.Fortunko ; Mater. Eval. , 41 ,pp1399-1408 (1983)
- 4) 荻博次他;機械の研究,50(2) , pp25-30,(1996)
- 5) 平尾雅彦他;超音波 TECHNO;96.8, pp 14-18(1996)
- 6) H.Kwun et al ; Nondestructive Evalation of Utilities and Pipelines , International Society for Optical Engineering(SPIE),SPIE Vol. 3400,pp326-337(1998)