軟鋼ワイヤの縦波用多段電磁超音波センサの開発*

山崎 友裕^{*1}, 玉井 進悟^{*2}, 平尾 雅彦^{*1}

Arrayed-Coil EMAT for Longitudinal Wave in Steel Wires

Tomohiro YAMASAKI, Shingo TAMAI and Masahiko HIRAO

Two types of electromagnetic acoustic transducers (EMATs), both for longitudinal wave in steel wire, are developed. In inspection of steel wires throughout a long range, ultrasonic wave will be an effective tool. The EMAT, which consists of a coil surrounding the wire and an electromagnet, enables us to generate and detect the longitudinal wave at an arbitrary position of the wire, and seems to be suitable for this purpose. However, there are two problems to be solved, both can be attributed to the characteristic of the EMAT. First, the magnetostriction of the wire limits the saturation amplitude of the generated wave, though it is required to be high to improve the signal to noise ratio. We develop a multiple EMAT, which effectively amplifies the signal by overlapping the waves excited by some equivalent coils. The other problem is that the EMAT launches the longitudinal wave symmetrically in two directions. To estimate the position of the flaw, the measurement should be done from at least two different locations of the EMAT. We also produce a unidirectional EMAT with two equivalent coils. One of the two directional waves excited by one coil is canceled by antiphase wave from the other coil. Combination of these two techniques is proved to be the solution for the above two intrinsic problems of the EMAT.

Key Words: Ultrasonic Inspection, Iron and Steel, Sensor, Magnetostriction, Wire, Electromagnetic Acoustic Transducer

1. は じ め に

ワイヤは一般に引張荷重を受ける状態で用いられるため、欠陥が存在すると破断の原因となる。ワイヤの探傷を行う場合、長さ方向に伝わる超音波を用いると長い距離にわたる検査が行えると期待され、既設構造物でセンサを全長にわたって走査できない場合でも適用可能であると考えられる。著者ら⁽¹⁾は、軟鋼ワイヤに巻いたコイルと軸方向の静磁場を与える電磁石とから構成される電磁超音波センサ⁽²⁾⁽³⁾を用いると、磁歪効果によってワイヤの長さ方向に伝わる縦波を送受信できることを確認した。ところが電磁超音波センサを用いてワイヤの探傷を行う際、センサ固有の問題点が二つある。

一つは、縦波は伝ばとともに結晶粒界での散乱などに起因する減衰だけではなく音速が周波数成分により異なる分散⁽⁴⁾の影響によりパルス振幅が減少することである。したがって遠距離からの探傷を行う際には S/N 比を向上させるために大きな振幅の信号を発生

させる必要がある。ところが電磁超音波センサは軟鋼の磁歪を利用して縦波を発生させるため、高出力の電気信号を与えたとしても発生できる縦波の振幅には限界がある。

二つめは、欠陥位置の評価は欠陥エコーの到達時刻から行うが、電磁超音波センサはその動作機構からセンサの左右両方向に対称に縦波を発生することである。そのため 1 箇所からの探傷を行っただけでは欠陥とセンサとの距離は求められるが欠陥の位置は決定できない。

本研究ではこれらの問題点を解決する目的で 2 種類の多段センサを開発した。一方は複数の送信コイルを有するセンサを用い、それぞれのコイルにより発生する縦波を重ね合わせることで左右いずれかの方向に伝ばする縦波の振幅を有効に増幅するものである(以下多段型センサと呼ぶ)。もう一方は二つの送信コイルを用い、それぞれのコイルにより位相の逆転した縦波を発生させ、これらの波を重ね合わせることで左右いずれかの方向に伝ばする縦波を相殺するものである(以下一方向型センサと呼ぶ)。ここではそれぞれのセンサの有効性を確認し、これらの原理を組み合わせることにより一方向に振幅の大きい縦波を送信できることを明らかにした。

* 原稿受付 1998 年 8 月 12 日。

^{*1} 正員, 大阪大学大学院基礎工学研究科(☎ 560-8531 豊中市待兼山町 1-3)。^{*2} オムロン(株)(☎ 617-8510 長岡京市下海印寺)。

E-mail: yamasaki@me.es.osaka-u.ac.jp

2. 電磁超音波センサ

ここではまず電磁超音波センサの動作原理および多段センサの原理について説明する。

2・1 磁歪による送信原理 強磁性体を磁化すると、磁化方向に磁歪⁽⁵⁾と呼ばれるひずみが発生する。多結晶軟鋼については磁歪は図1に示すような変化を示す。

本研究で用いた電磁超音波センサの構造を図2に示す。このセンサはワイヤの長さ方向に静磁場を与えるための電磁石とワイヤに巻いたコイルとから構成されている。電磁石により静磁場を与えた状態でコイルに高周波電流を流すと、コイル直下のワイヤに働く磁場は静磁場のまわりで変動する。その結果磁歪が変動し、長さ方向に伝ばする縦波がコイルの両側に対称に送信される。ただし、この原理により発生するひずみの振幅は、磁歪曲線の最大値と最小値の差を越えることはない。

ワイヤの透磁率は応力により変化する⁽¹⁾。縦波がコイル部分を通過すると、電磁石による静磁場のもとでの磁束は縦波に伴う応力により変化し、この磁束変化がコイルにより検出される。

2・2 多段型センサの動作原理 一つのコイルを

Fig. 1 Magnetostriction curve (schematic)

Fig. 2 Electromagnetic acoustic transducer

用いたセンサにより発生する縦波の振幅には磁歪特性で決定される限界があり、さらにその限界値を達成するためには高出力のパルスが必要とされる。多段型センサは複数のコイルを用い、それぞれのコイルから発生する縦波を同位相で重ね合わせるによりいづれか一方に伝ばする縦波の振幅を効果的に増幅するものである。同じ仕様の二つのコイルを用いるセンサの原理を図3に示す。コイル1により発生した縦波がコイル2の直下を通過するときにコイル1に与えたものと同じ電気信号をコイル2に入力し、それぞれのコイルから発生した縦波を重ね合わせる。そうすることにより図の右側に伝ばする縦波の振幅は2倍になる。それぞれのコイルで最も効率のよい磁場、すなわち磁歪曲線の傾きが大きい領域で縦波を発生させることにより、入力信号の振幅を2倍にするよりも効果的に振幅を増加させることができる。

2・3 一方向型センサの動作原理 多段型センサが同位相の縦波を重ね合わせるによりどちらか一方に伝ばする縦波の振幅を増加させるのに対し、一方向型センサでは位相の逆転した縦波を重ね合わせるによりどちらか一方に伝ばする縦波を相殺する。

一方向型センサの原理図を図4に示す。コイル2により発生した縦波がコイル1の直下を通過するときにコイル1により逆位相の縦波を発生させ、図の左側に

Fig. 3 Signal overlapping

伝ばする縦波を相殺する。このとき、それぞれのコイルから右側に伝ばする縦波が図4の状態を重ね合わせられるようにコイル間距離を1/4波長に設定することにより、図の右側に伝ばする縦波の振幅を一つのコイルだけを用いる場合よりも増幅することができる。

本研究では入力信号として矩形波を用い、コイル1とコイル2にそれぞれ逆向きに入力信号を与えることにより逆位相の縦波を発生させた。このときコイル直下の磁場は静磁場 H_s からそれぞれ H_d , $-H_d$ だけ変化する。縦波のひずみ振幅は H_d , $-H_d$ による磁歪の変化で与えられるが、これらが等しくなるためには H_s を中心に $\pm H_d$ の範囲で磁歪曲線が対称でなければならない。この条件を満たすために動磁場の大きさ H_d 、ひいては一方向型センサで発生できる縦波の振幅は磁歪特性により制限される。振幅の増幅には多段型センサとの組合せが有効である。

3. 実験方法

図5に測定装置の概略および送受信子位置を示す。

試料として、直径5.6 mm、長さ2 mの軟鋼(SS 400)を用いた。両端面は旋盤により平面に加工した。

直径0.26 mmのポリウレタン銅線を幅8 mmの部分に50巻したコイル二つを中心間距離11 mmで並べ、送信用コイルとした。受信用コイルは直径0.1

Fig. 4 Principle of unidirectional EMAT

mmのポリウレタン銅線を幅13 mmの部分に200巻したものである。静磁場を与えるための電磁石の巻数は送信用、受信用ともに3500であり、実験条件に応じて最適な磁化電流を与えた。

それぞれの送信用コイルを多段パルサ(Ritec MDP 8)からの適当な遅延時間を与えた矩形波(時間幅4 μ s)で駆動することにより縦波を送信し、受信波形を広帯域レシーバ(Ritec BR 640)で増幅した後ディジタルオシロスコープ(LeCroy 9310 L)で256回の平均化処理をしてパーソナルコンピュータに取り込んだ。

4. 実験結果および検討

4.1 多段型センサの効果 多段型センサの送信コイル一つを駆動して得られた波形を図6に、コイル三つを駆動して得られた波形を図7に示す。矩形波の電圧は100 Vとした。それぞれの図で200 μ s付近に現れているのが図5の右方向に送信され送受信子間の1 mを伝ばして受信された信号、300 μ s付近に現れているのが左方向に送信された後に端面で反射して受信された信号(伝ば距離1.5 m)、500 μ s付近に現れてい

Fig. 5 Experimental setup

Fig. 6 Signal generated by single coil EMAT

るのが右方向に送信され端面で反射した後に受信された信号(伝ば距離 2.5 m)である。端面は自由端であるため、反射波は位相が反転している。

図 7 の信号のうち右方向に送信された波形はいずれも図 6 の信号の 3 倍の振幅を示しており、多段型センサが送信振幅を有効に増幅していることがわかる。ところが左方向に送信された波形は時間遅れを持つ三つの信号として受信されており、多段型センサをワイヤの探傷に用いる際はこの信号の影響を除く必要がある。

軟鋼の磁歪特性は応力により変化する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。応力の影響は磁壁移動により磁化が進行する領域、すなわち磁歪曲線の傾きが正の領域で顕著に現れ、回転磁化の領域では磁歪曲線の変化は小さい。本研究では送信振幅が最大となる領域、すなわち回転磁化の領域で磁場を変動させており、しかも縦波に伴う応力は小さい。したがって磁歪曲線の傾きは無応力時と等しいとみなせ、縦波がコイル直下を通過しているときの送信振幅は無応力時の送信振幅とほぼ等しいと考えられる。三

段の多段型センサで右側に送信された信号の振幅が 3 倍に増幅されたことはこの推測を支持している。

図 8 に送信コイル一つを時間幅 4 μ s の矩形波で駆動した場合の駆動電圧と受信信号振幅との関係を示す。図 8 からわかるように振幅は駆動電圧に比例せず、300 V の矩形波を用いても得られる振幅は 100 V の場合の 2 倍程度である。磁歪曲線の形状を考慮すると図 8 の曲線の傾きは駆動電圧の増加とともに減少し、ある飽和値に収束すると考えられる。このことから多段型センサの有効性が確認される。

4.2 一方向型センサの効果 図 9 に一方向型センサの波形を示す。図 9 は上からコイル 2 だけを駆動した場合、コイル 1 だけを駆動した場合、二つのコイルを駆動した場合の波形を示している。矩形波の電圧は 70 V である。

図 9 より、センサから左方向に送信された互いに逆位相の信号が相殺していることがわかる。相殺されずにわずかに残っている信号は右方向に送信された信号

Fig. 7 Signal generated by multiple-driver EMAT

Fig. 8 Dependence of signal amplitude on excitation signal

Fig. 9 Signals of unidirectional EMAT

と比較して小さい。欠陥エコーの振幅が欠陥の断面積に比例する⁽¹⁾ことを考慮すると、残留信号は軸方向に垂直な断面をもつ断面積比3%程度の欠陥からのエコーに相当する。この相対振幅は多段型センサと組み合わせるとさらに小さくできると考えられる。

図9における200 μs 付近の拡大図を図10に示す。右方向に送信された信号も図4に示した状態で重ね合わせられることにより増幅されている。本研究で用いたセンサは4 μs の矩形波で駆動したにもかかわらず中心周波数は約0.08 MHzであった。このことから、実際に観測される波形から送信コイル間距離を設定する必要があるといえる。

図9で200 μs と500 μs の波形を比較するとわかるように、広帯域パルス波を用いる場合、縦波音速の分散性のために高周波数成分は伝ばとともに低周波数成

分に対して時間遅れを生じ、波形が変化する。本研究では隣接したコイルにより縦波を発生させるため、コイル間を伝ばする間の分散の影響は無視できる。

ここでは矩形波の電圧を70 Vとしたが、それ以上の電圧ではそれぞれのコイルから左方向に送信される逆位相の信号の重ね合わせが十分ではなかった。これは送信電圧70 V以上では有効な磁場が磁歪曲線の対称な領域をはずれることによる。このように一方向型センサでは送信信号の振幅は磁歪特性により制限される。この欠点を解消する手法として多段型センサとの組み合わせが考えられる。

Fig. 10 Overlapping of antiphase signals

Fig. 11 Signal of multiple unidirectional EMAT

Fig. 12 Locations of EMATs and flaw

Fig. 13 Comparison of four kinds of EMATs

図 11 に一方向型センサのコイルを二組用い、それぞれから送信される右方向への縦波を多段型センサの原理で重ね合わせて得られた波形を示す。図 9 と比較して右方向に送信された信号の振幅が約 2 倍になっており、多段型センサは一方向型センサの振幅を有効に増幅できることが明らかになった。それぞれの一方向型センサから相殺されずに左方向に送信された信号は時間遅れを持って重ね合わされるため、振幅は図 9 の場合とほぼ等しく、右方向に送信された信号との相対振幅は 1/2 になっている。多段一方向型センサとすることにより信号の指向性をより高めることができるといえる。

4・3 探傷波形 直径 5.6 mm、長さ 100 m のワイヤに直径 3 mm のエンドミルで深さ 0.88 mm の人工欠陥を加工し、図 12 に示す送受信子位置で探傷した波形を図 13 に示す。ワイヤ断面積に対する欠陥投影面積の比は約 10% である。上から順に、一つのコイルだけを駆動すなわち単段センサとした場合、一方向型センサとした場合、二段の多段型センサとした場合、一方向型センサを二段にした場合の波形である。

単段センサを用いる場合には左右に対称に縦波が送信されるため、送受信子間を伝ばした波および端面エコーが大きく現れる。これら二つの信号(以下、不要信号と呼ぶ)の振幅と欠陥エコー振幅の比は断面積比とほぼ一致している。欠陥エコーが不要信号と重なり合った場合は欠陥エコーの検出は困難であるため、探傷可能な範囲は限定される。一方向型センサとした場合には不要信号の振幅が低下しており、ここで用いた程度の欠陥については欠陥エコーと不要エコーが重なり合った場合にも検出可能と考えられる。多段型センサの場合は不要信号に対して欠陥エコー振幅が増加するが、不要信号の時間幅が増加するため探傷不能領域

は増加する。多段一方向型センサを用いた場合には、一方向型の場合と比較して不要信号の振幅はほぼ等しく、欠陥エコー振幅が約 2 倍であり、欠陥検出能が向上することがわかる。

5. 結 論

ワイヤの縦波用电磁超音波センサを探傷に用いる際のセンサ固有の二つの問題点、すなわち送信できる縦波振幅に限界があることおよびセンサの左右両方向に対称に縦波を送信することを解決するために 2 種類の多段センサを開発した。得られた結果を以下に示す。

(1) 一つのコイルを用いるセンサでは送信電圧の増加とともに効率が低下するが、多段型センサを用いるとコイル数にほぼ比例した出力が得られる。

(2) 互いに逆位相の縦波を重ね合わせることでより一方向だけに縦波を送信する一方向型センサは、コイル間距離を適当に設定することにより信号の振幅を増幅できる。

(3) 一方向型センサを多段にした多段一方向型センサを用いると、一方向だけに振幅の大きい縦波を送信することができる。

文 献

- (1) 山崎友裕・玉井進悟・平尾雅彦, 機論投稿中。
- (2) Tzannes, N. S., *IEEE Trans. on Sonics and Ultrason.*, 13-2 (1966), 33-41.
- (3) Kwun, H. and Teller, C. M., *J. Acoust. Soc. Am.*, 96-2 (1994), 1202-1204.
- (4) Kolsky, H., *Stress Waves in Solids*, (1963), 54, Dover, New York.
- (5) 近角聰信, 強磁性体の物理(下), (1984), 1, 裳華房。
- (6) 山崎友裕・山本真史・平尾雅彦・福岡秀和, 機論, 62-594, A (1996), 408-413.
- (7) 山崎友裕・山本真史・平尾雅彦, 機論, 63-611, A (1997), 1489-1494.