

論 文

UDC 620.179.14.088.2 : 669.14

熱間渦流探傷における雑音の解析と疵検出精度の向上*

渡辺 一雄**・武内 晃**・宇津野光朗**・稲森 宏夫***

Analysis of the Noise and Improvement of the Flaw Detecting Ability on the Eddy Current Flaw Detector for Hot Wire Rod

Kazuo WATANABE, Akira TAKENOCHI, Mitsuo UTSUNO, and Hiroo INAMORI

Synopsis:

Recently, various eddy current flaw detectors have been used in the wire rod mill for the quality control, but, in general, these flaw detectors have been unable to detect the flaw below 0.15 mm depth due to the various noises.

In this paper, the analysis of the noise and the improvement of S/N by the phase discrimination are described.

From the result of the frequency analysis of the noise, it was confirmed that the noise was generated mainly due to the vibration of the wire rod in the search coils and such a noise could not be fully decreased by the frequency filter or by the phase discrimination in the case of 40 kHz carrier frequency.

Accordingly, the new flaw detector with 160 kHz carrier frequency which enables decrease the noise by the phase discriminator was developed and could detect the small flaw as 0.1 mm depth.

This flaw detector has been installed and in operation satisfactorily at the Hoshizaki Plant.

1. 緒 言

最近、熱間圧延中の線材あるいは棒鋼の表面疵を検出する熱間渦流探傷機が市販され、品質管理用として、すでに各所において使用されている¹⁾²⁾。従来から、線材圧延の品質管理には、圧延終了直後の線材コイルの端末から採取した試料による抜き取り検査が行なわれているが、熱間渦流探傷機を適用すれば、線材の全長検査ができ、かつ自動的に、迅速に情報を得ることができるので有利である。

一般に鋼材は常温にて磁性を有するため、常温の鋼材に渦流探傷を適用する場合は、鋼材の磁性の部分的な変化が原因とみられる雑音が発生し、あまり高い検出精度が得られない。一方、熱間渦流探傷では、磁性が消滅するキューリー点以上の高温の鋼材を探傷するため、磁性に起因する雑音は全く発生せず、検出精度は良好なはずである。しかし、熱間渦流探傷機の使用時には、雑音がかなり存在し、必ずしも予期されるような高検出精度が得られない。この熱間における雑音の発生原因は鋼材の

肌荒れであるという考えもあるが、特に雑音の発生原因についての詳細な研究はない。

筆者らは、市販単体計器と自社製作部分の組み合わせによる、搬送周波数 40 kHz の熱間渦流探傷機を製作し、当社星崎工場線材圧延工場にて稼動させたが³⁾⁴⁾、検出下限の疵深さは 0.15 mm であった。この探傷機の適用過程において、特に雑音の発生原因について調査し、雑音の主原因が検出コイル中における線材の振動であることをつきとめ、雑音を減少するには位相弁別によらざるをえないとの結論を得た。

次に、最高搬送周波数 160 kHz の探傷機を製作し、同線材工場に適用した結果、5.5 mm 径の線材に対して 160 kHz の搬送周波数を用いることにより、疵信号と雑音の位相差を大きくすることができ、位相弁別により雑音を消去し、0.1 mm 深さの疵まで検出することができた。

2. 探傷機の構成

搬送周波数 160 kHz の探傷機について構成を述べる。

* 昭和 49 年 12 月 5 日受付 (Received Dec. 5, 1974)

** 大同製鋼(株)研究開発本部 (Daido Steel Co., Ltd., 2-30 Daido-cho, Minami-ku, Nogoya 457)

*** 大同製鋼(株)星崎工場 (Daido Steel Co., Ltd.)

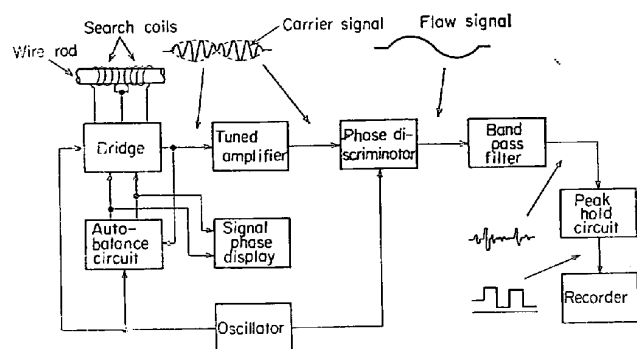
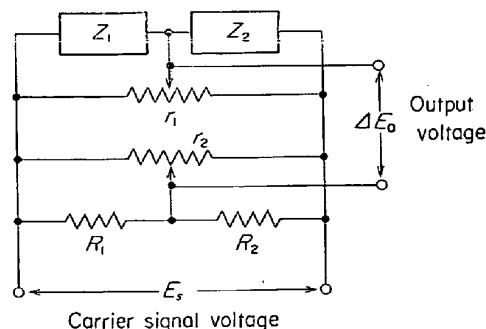


Fig. 1. Block diagram of eddy current flow detector.

ブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。

検出コイルは2個の同形のコイルを逆方向に接続した自己比較型であり、Fig. 2に示すごとく、固定抵抗とともにマクスウェルブリッジを構成している。検出コイルの設計については、検出すべき最小長さの疵信号と線材表面の肌荒れに起因する雑音との分離をよくするという観点からコイル長さを決定する方法が報告されている⁶⁾が、今回、この報告を参考にして、コイル長さは13 mm、コイル間隔は5 mm、コイル全長を31 mmとした。検出感度を高くするため、コイルインピーダンスに比べてリアクタンスを大きくとる必要があるが、今回用いたコイルでは、160 kHz に対してインピーダンスは、30 Ω 、抵抗 0.5 Ω である。また 5.5 mm 径線材に対し充填率は 0.18 である。

使用中におけるブリッジの不平衡を修正するオートバランス機構は、ブリッジ出力電圧をブリッジ電源電圧と同相の成分と 90° 位相の異なった成分に分離し、これらの信号によりサーボモータを駆動し、Fig. 2に示した抵抗 r_1 、 r_2 を変化させる方法である。また、この同相成分と 90° 位相の異なった信号は、それぞれブラウン管の X



Z_1, Z_2 : Coil impedances
 R_1, R_2 : Resistances
 r_1, r_2 : Balancing resistances

Fig. 2. Bridge circuit.

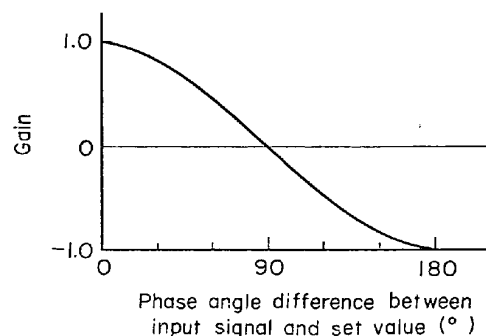


Fig. 3. Gain characteristics of phase discriminator.

軸と Y 軸に入力され、ブラウン管上の輝点の位置は、4.2 にて述べるように、コイルインピーダンスを X 軸と一致させた場合のインピーダンス変化分のベクトルを表わす。この表示器は位相角表示器として、位相弁別器の位相設定用モニタに使用される。

位相弁別は、発振器の信号からある位相角だけ移相された矩形波によつて入力信号をゲートし、ゲートした部分のみを平滑にする方法である。特性は Fig. 3 に示すごとく設定位相角と信号位相角の差に対して余弦関数であり、設定位相角付近の位相角を持つた信号のみを通過させるというような急峻な特性ではない。したがって、疵信号の通過率が 1 となるように設定した場合、たとえば、雑音が疵信号位相角より 45° 異なつた位相角である場合、雑音の通過率は 0.7 となる。しかし、雑音の位相角が通過率零の点に合値するよう設定位相角を設定すれば、雑音の通過率が零であるのに対し、疵信号の通過率は 0.7 となり、疵信号と雑音の通過率の比は大きくとれる。実際の使用にあつては、この方法によつた。

位相弁別器の出力は、さらにバンドパスフィルタにより、周波数によつて疵信号が雑音より分離される。

疵信号は数 m sec の信号であり、一般の記録計では応答速度が不十分なので、一定時間ごとのピーク値を保持する回路を設けた。後出の Fig. 11 などに示す探傷チャートは、すべてピーク値保持回路後の信号の記録である。保持時間は 300 m sec である。

検出コイルの外観を Photo. 1 に、探傷機本体の外観を Photo. 2 に示す。

3. 雑音の解析

探傷機の疵検出精度をあげるため、雑音の解析を行ない発生原因を追求した。

雑音の原因としては、材料の電気伝導度や直径などの部分的な変化、肌荒れ、材料の振動などが考えられる。

まず、材料の振動の少ない条件における本探傷機の疵検



Photo. 1. Appearance of search coil.

出精度を知るために、常温にてオーステナイト系ステンレス鋼の圧延線材を 1.5m/sec の低速度で走行させ探傷を行なった。その記録を Fig. 4 に示す。酸洗後やすりがけによる肉眼検査と照合したところ、0.05 mm 深さの疵まで検出していることがわかった。0.05 mm 深さの疵信号より小さい信号も明確に再現性があるところから、これらの信号は電気伝導度や形状の部分的な変化、肌荒れなど材料自体に起因するものであり、材料の振動に起因するものではないと考えられる。

上述のことは、もし圧延線材自体の部分的な変化や肌荒れが雑音の主原因であるとすれば、本探傷機では 0.05 mm 深さの疵まで検出しうることを示している。しかし



Fig. 4. Record of flaw signals for austenitic stainless steel wire rod without vibration.

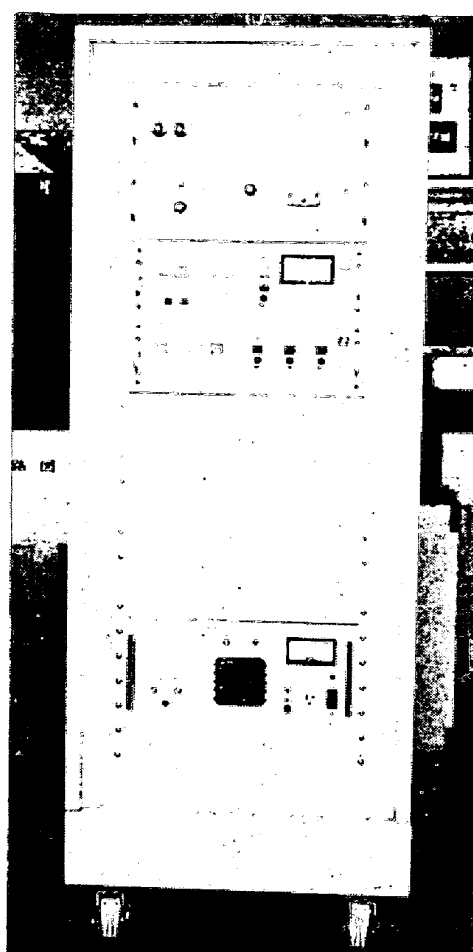


Photo. 2. Eddy current flaw detector.

一方、圧延中の 5.5 mm 径の線材を搬送周波数 40 kHz で探傷した場合、雑音のため 0.15 mm 深さの疵までこそ検出しえなかつたことから、圧延中に発生する雑音源は主として線材の振動にあると考えた。

次に、周波数解析器により、雑音の周波数分布を求め

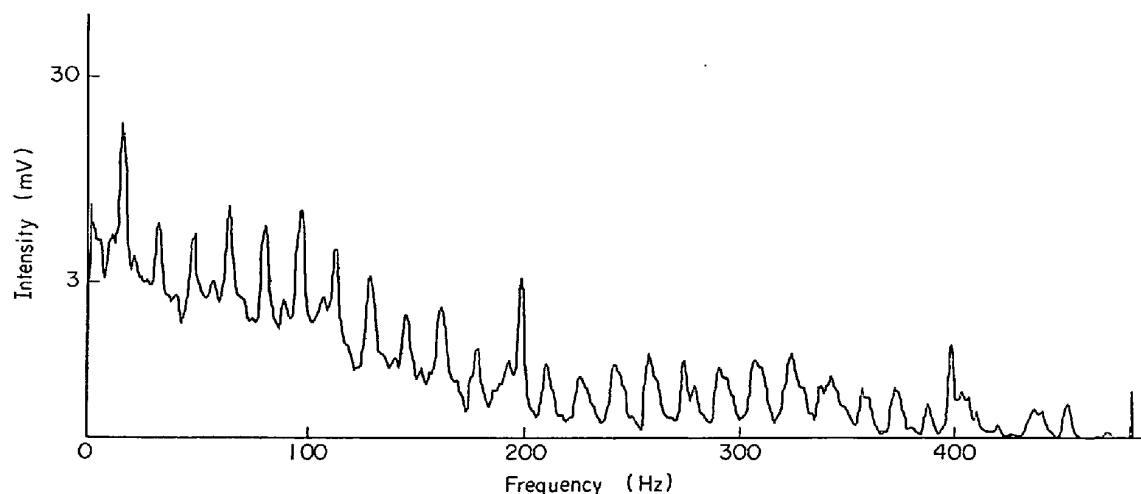


Fig. 5. Frequency spectrum of noise. Peaks appear at 16 Hz and its harmonics.

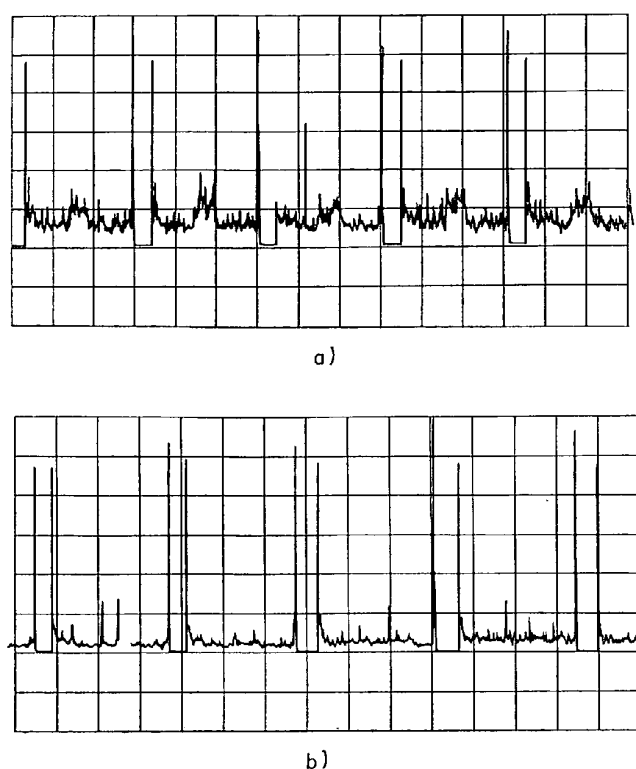


Fig. 6. Change of noise level with mill roll balancing. a) common condition. b) finely ballanced condition.

た. Fig. 5 に周波数分布の 1 例を示した. Fig. 5 によれば, 16 Hz の基本波と高次の高調波が明確に現われており, もとの波形に繰り返し周波数 16 Hz のパルス波を含んでいることがわかる. 圧延機の仕上ロールの回転数は毎秒 16 回転であり, 上記の周波数と全く一致する. このことから, 仕上ロールの 1 回転ごとに生じる衝撃が線材に伝わり, 線材を振動させ, これが雑音となつて検出されるものと推察される.

また, Fig. 6(a) に一般の ロールを使用した場合, Fig. 6(b) に, 特に精密に バランスをとつた ロールを使用した場合の記録を比較して示した. 明らかに精密に バランスをとつたロールの方が雑音が小さく, このことから, 線材の振動が, 雑音の主原因であることがわかる. 雑音の主原因が線材の振動に起因することについては, 他の線材圧延ラインでも経験しており, 本探傷機を適用した圧延機のみで, 特有の問題ではないと考えられる.

なお, 線材の振動により雑音が発生する理由は, 検出コイル中の磁界分布が不均一であり, 検出コイル中の線材の位置によつてコイルインピーダンスが変化するためであると考えられる.

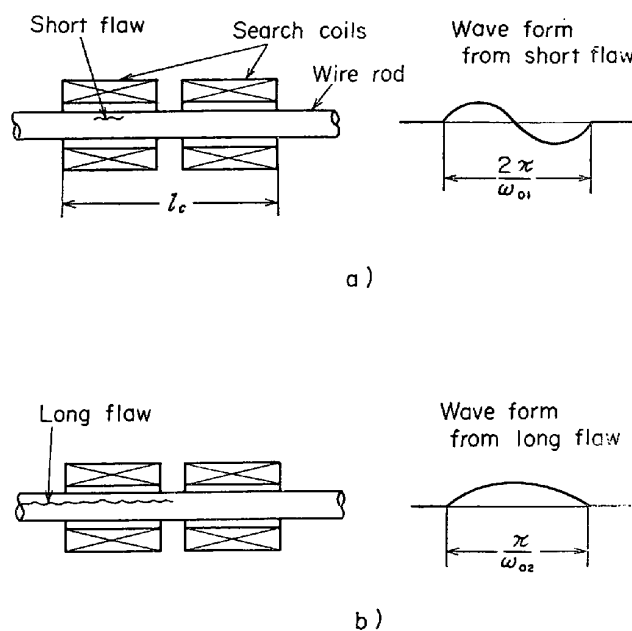


Fig. 7. Wave forms of flaw signals. a) from short flaw and b) from long flaw.

4. 疵信号と雑音との弁別

4.1 周波数弁別

疵信号の周波数分布については, 実際の疵信号から周波数解析器により求めた結果がすでに報告されている⁶⁾. 筆者らは, 圧延中の疵信号の周波数解析を試みたが, 雑音の影響で確実なものが得られなかつたので, 数式により検討した.

コイル長さに比べて長さの短い疵がコイルを通過するときの信号を Fig. 7(a) に示すよう正弦波形の一周期分とみれば, その周波数 f_{01} は

$$f_{01} = v/l_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

である. ただし, v は線材走行速度, l_c はコイル長さである. また, コイル長さに比べて長い一定深さの疵の先端がコイルを通過する場合の疵信号は Fig. 7(b) に示すようであり, これを正弦波形の半周期分とみれば, その周波数 f_{02} は

$$f_{02} = v/2l_c \quad \dots\dots\dots (2)$$

である.

Fig. 7(a) の信号波形を

$$g_1(t) = \begin{cases} \sin \omega_{01} t, & 0 \leq t \leq 2\pi/\omega_{01} \\ 0, & t < 0, t > 2\pi/\omega_{01} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

とすると, 周波数分布 $G_1(\omega)$ は

$$G_1(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{\omega_{01}} \cdot \frac{1}{1 - (\omega/\omega_{01})^2} \sqrt{(1 - \cos 2\pi\omega/\omega_{01})^2 + (\sin 2\pi\omega/\omega_{01})^2}, & \omega \neq \omega_{01}, \\ \pi/\omega_{01}, & \omega = \omega_{01} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

である*. ただし, ω_{01} は角周波数で, $\omega_{01} = 2\pi f_{01}$ である.

また, Fig. 7 b) の信号波形を

$$g_2(t) = \begin{cases} \sin \omega_{02} t, & 0 \leq t \leq \pi/\omega_{02} \\ 0, & t < 0, t > \pi/\omega_{02} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

とすると, 周波数分布 $G_2(\omega)$ は

$$G_2(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{\omega_{02}} \cdot \frac{1}{1 - (\omega/\omega_{02})^2} \sqrt{(1 + \cos \pi \omega/\omega_{02})^2 + (\sin \pi \omega/\omega_{02})^2}, & \omega \approx \omega_{02}, \\ \pi/2\omega_{02}, & \omega \approx \omega_{02} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

である*. ただし, $\omega_{02} = 2\pi f_{02}$ である.

(4) 式と (6) 式を図示したのが, それぞれ Fig. 8 a), b) である. Fig. 8 a), b) をみると, 周波数分布は ω_{01} または ω_{02} を中心として 広く分布していることがわかる.

実際の使用例 $l_c = 31 \text{ mm}$, $v = 16 \text{ m/sec}$ について (1), (2) 式により算出した f_{01} , f_{02} はそれぞれ 520 Hz, 260 Hz である. Fig. 5 によれば雑音の高調波は 400 Hz まで分布しており, 疵信号の周波数帯と雑音の周波

数帯が重なっている範囲がかなりあり, 周波数フィルタによつて疵信号を雑音より十分分離することはできないと考えられる. 実際使用時に, バンドパスフィルタの下限値を上げてゆくと, 200 Hz 程度までは雑音が減衰し, 疵信号検出感度が向上するが, 200 Hz 以上になると雑音はあまり減衰せず, むしろ疵信号の減衰が大きくなり, かえつて疵検出精度が落ちる. このことは, Fig. 7 b) に示すような疵が多いと考えれば, フィルタの下限値を $f_{02} = 260 \text{ Hz}$ 以上にとると, Fig. 8 b) より疵信号が 1/2 に減衰することから推察される.

以上のように, 疵信号と線材の振動に起因する雑音の周波数弁別には限界があると考えた.

4.2 位相角表示器

本装置の位相表示器上にコイルインピーダンス変化がどのように表示されるかについて述べる.

ブリッジが平衡している場合, Fig. 2 に示すごとく, 2 個の検出コイルのインピーダンスを Z_1 , Z_2 , ブリッジの対辺の抵抗を R_1 , R_2 とする. いま, 一方のコイルインピーダンス Z_1 が $Z_1 + \Delta Z_1$ に変化したとき, ブリッジの出力電圧 ΔE_0 は

* 本文の Fig. 7 a) の信号波形を, Fig. A1 a), b) に示した 2 つの波形の差と考え, ラプラス変換表示にて表わせば,

$$G_1(s) = \frac{\omega_{01}}{s^2 + \omega_{01}^2} - \frac{\omega_{01}}{s^2 + \omega_{01}^2} e^{-s2\pi/\omega_{01}} \\ = \frac{\omega_{01}}{s^2 + \omega_{01}^2} (1 - e^{-s2\pi/\omega_{01}}) \quad \dots\dots\dots (A1)$$

となる. (A1) 式の s を $j\omega$ におきかえ絶対値をとれば周波数分布が求まる. すなわち, $|G_1(j\omega)| = G_1(\omega)$ と表わせば, $e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$ の関係から

$$G_1(\omega) = \frac{1}{\omega_{01}} \cdot \frac{1}{1 - (\omega/\omega_{01})^2} \sqrt{(1 - \cos 2\pi \omega/\omega_{01})^2 + (\sin 2\pi \omega/\omega_{01})^2} \quad \dots\dots\dots (A2)$$

となる. (A2) 式は $\omega = \omega_{01}$ で不定となるので, 三角関数を 2π の付近でテーラ展開し, かつ, $\sin 2\pi \omega/\omega_{01} = \sin 2\pi (1 - \omega/\omega_{01})$ から,

$$\lim_{\omega \rightarrow \omega_{01}} G_1(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow \omega_{01}} \frac{1}{\omega_{01}} \cdot \frac{2\pi}{(1 + \omega/\omega_{01})} = \frac{\pi}{\omega_{01}} \quad \dots\dots\dots (A3)$$

と求められる.

本文の Fig. 7 b) の波形も同様に, Fig. A2 に示した 2 つの波形の和と考え, ラプラス変換表示にて表わせば,

$$G_2(s) = \frac{\omega_{02}}{s^2 + \omega_{02}^2} (1 + e^{-s\pi/\omega_{02}}) \quad \dots\dots\dots (A3)$$

となる. 以下, Fig. 7 a) の波形と同様な方法で (6) 式が導かれる.

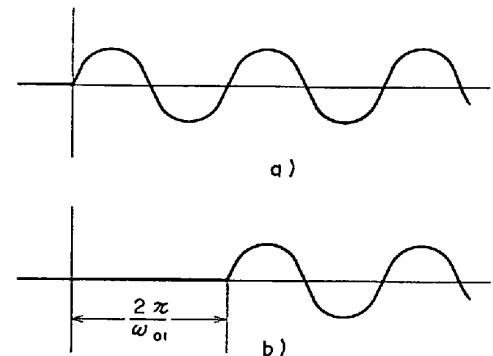


Fig. A1 a) Sine wave function starting at $t=0$ and b) sine wave function starting at $t=2\pi/\omega_{01}$. Wave form in Fig. 7 a) is the difference of a) and b).

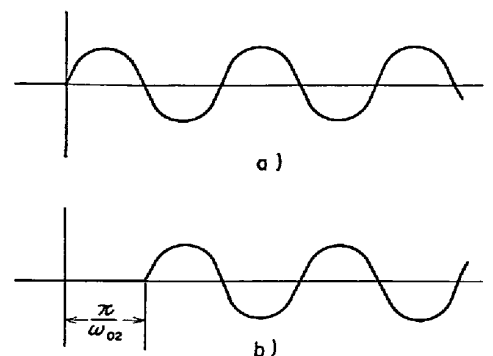


Fig. A2 a) Sine wave function starting at $t=0$ and b) sine wave function starting at $t=\pi/\omega_{02}$. Wave form in Fig. 7 b) is the sum of a) and b).

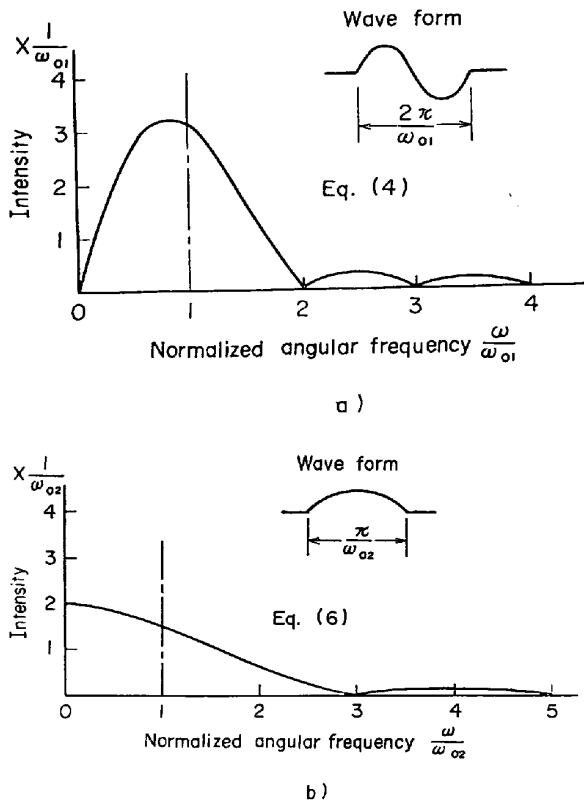


Fig. 8. Calculated frequency spectra of flow signals a) from short flaw and b) from long flaw.

$$\Delta E_0 = E_s \left(\frac{Z_1 + \Delta Z_1}{Z_1 + \Delta Z_1 + Z_2} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) \quad (7)$$

である。ここで、 E_s はブリッジ電源電圧である。一般に、検出する最小の疵によるインピーダンスの変化割合 $\Delta Z_1/Z_1$ は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ であるので (7) 式の括弧内の第1項を展開し、 $\Delta Z_1/(Z_1 + Z_2)$ の1次の項まで採ると (7) 式は

$$\Delta E_0 = E_s \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (8)$$

となる。2個のコイルは同形のものを使用しているから (8) 式において $Z_1 = Z_2$ とすると、(8) 式は

$$\frac{\Delta E_0}{E_s} = \frac{1}{4} \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \quad (9)$$

となる。

ブラウン管のX軸、Y軸への入力、ブリッジ電源電圧位相角を基準としているから、ブラウン管上に現われるベクトルは $\Delta E_0/E_s$ であり、これは (9) 式により、 $\Delta Z_1/Z_2$ である。すなわち、ブラウン管上に現われるベクトルのX軸となす角は、インピーダンス Z_1 の位相角とインピーダンス変化分 ΔZ_1 の位相角の差である。また、ベクトルの絶対値は、インピーダンスの変化割合 $\Delta Z_1/Z_1$ に比例した値である。この関係を Fig. 9 a),

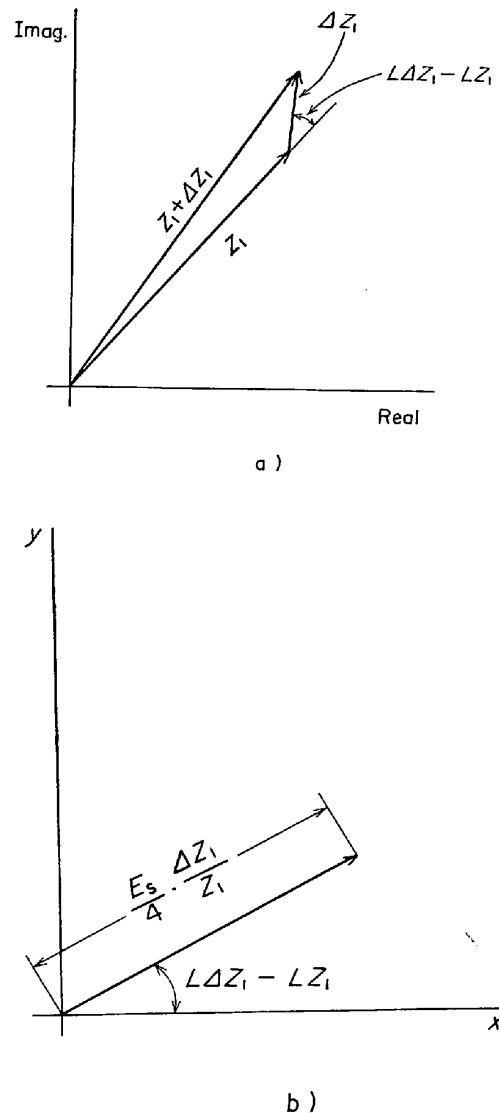


Fig. 9. a) Vector diagram of search coil impedance and its deviation, and b) impedance deviation appeared on signal phase display.

b) に図示した。

4.3 位相弁別

位相弁別の対象となるものとして、疵信号と材料径の変化によつて、信号の位相角が異なること、疵の開口度により位相角が異なることがすでに F. FÖRSTER によつて論じられている⁷⁾。また、材料径の変化によるコイルインピーダンスの変化、および電気伝導度の変化によるコイルインピーダンスの変化についての解析解が F. FÖRSTER によつて求められている⁸⁾。同様のことが R. HOCHSCHILD によつてもまとめられており、R. HOCHSCHILD は両者の信号を位相弁別するために位相角の差を大にするには

$$g \cdot a = \sqrt{\omega_c \sigma \mu} \cdot a \geq 3 \quad (10)$$

のように搬送周波数を選ぶことが必要であると述べてい

る⁹⁾。 ω_c は搬送波の角周波数、 σ は電気伝導度である。 μ は透磁率であり、 キューリー点以上の温度では、 真空の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ にほとんど等しい。 また、 a は材料半径である。

しかし、 ここで問題となつてゐるのは疵信号と線材の振動に起因する雑音との位相弁別であるが、 これを解析的に求めることは困難である。 このため、 (10) 式の条件が、 疵信号と線材の振動に起因する雑音の位相弁別にもおよそあてはまると想定し、 搬送周波数を決定した。

本探傷機を適用した圧延機では、 5.5 mm 径の線材の圧延が多く行なわれるため、 5.5 mm 径に対する搬送周波数を求める。 5.5 mm 径とは直径 5.5 mm から 5.9 mm までを指しており、 $a = 2.75 \times 10^{-3} \text{ m} \sim 2.95 \times 10^{-3} \text{ m}$ であり、 $\sigma_{900^\circ\text{C}} = 0.854 \times 10^6 \text{ g/m}$ であるから、 最初製作した探傷機で採用した搬送周波数 40 kHz の場合は、 $g \cdot a = 1.43 \sim 1.53$ となる。 160 kHz を使用する場合は、 $g \cdot a = 2.85 \sim 3.06$ となり、 (10) 式の条件を満足している。 よつて新しく製作する探傷機では最高搬送周波数を 160 kHz とした。 R. HOCHSCHILD によれば、 $g \cdot a$ を 3

より大きい値にとつても位相差はあまり増加せず、 むしろ高い周波数を採用することによる装置製作上の問題が起きるので、 あえて 160 kHz 以上の周波数を採用する必要はない。

搬送周波数に 40 kHz を使用した探傷機と 160 kHz を使用した探傷機について、 圧延中における疵信号と雑音との位相角の差を比較した。 Fig. 10 a), b) は、 5.5 mm 径の線材に対して、 それぞれ搬送周波数が 40 kHz および 160 kHz の場合についての位相角表示器に表われた疵ならびに雑音のベクトル軌跡である。 これはオンラインデータをいつたんだータレコードに収録し、 疵信号のある付近を選んで再現したものである。 Fig. 10 a), b) にみられるように、 線材の振動による雑音のベクトルの方向はあらゆる方向を持つてゐるが、 ある方向 (Fig. 10 の N) でベクトルの大きさは最大値を示している。 この最大値の位相角と疵信号の位相角の差は、 搬送周波数が 40 kHz の場合が 25° 、 160 kHz の場合が 45° であり、 160 kHz の場合の方が位相弁別にとつて有利であることがわかる。

Fig. 10 a), b) の場合は、 2 で述べた検出コイルを使用しているが、 周波数弁別の効果をあげる目的で疵周波数すなわち (1), (2) 式における f_{01} , f_{02} を小さくするように $l_c = 10 \text{ mm}$ の検出コイルを用いて実験を行なつた。 しかし、 特に周波数弁別の効果はあがらず、 また、 160 kHz の搬送周波数を用いても、 疵信号と雑音の位相差は大きくならず、 位相弁別の効果はなかつた。

また、 常温にてオーステナイト系ステンレス鋼の材料を検出コイル中にて位置を変え、 位相の変化を調査した。 材料の中心軸が検出コイルの中心軸と平行を保つようにして材料を移動したところ、 位相はある一定値を示し、 材料をコイルの中心軸に対し傾斜させた場合、 傾斜角度に対して位相は異なつた値を示した。 Fig. 10 a), b) に示したように雑音が種々の位相を有し、 かつ、 一定位相角にて最大値を示していることは、 線材が検出コイル軸に対して、 平行な振動と傾斜する振動を含んでおり、 平行な振動が雑音として大きく現われているものと推察される。

5. 圧延時における位相弁別の効果

160 kHz の搬送周波数を使用したことによる位相弁別の効果を確認するため、 搬送周波数 40 kHz の探傷機と 160 kHz の探傷機を使用して、 同一線材について同時探傷を行なつた。 探傷記録を Fig. 11 a), b) に示す。 線材径は 5.5 mm である。 また、 Fig. 11 c) に目視検査の結果を示す。 疵深さの測定は酸洗後、 疵が消失する

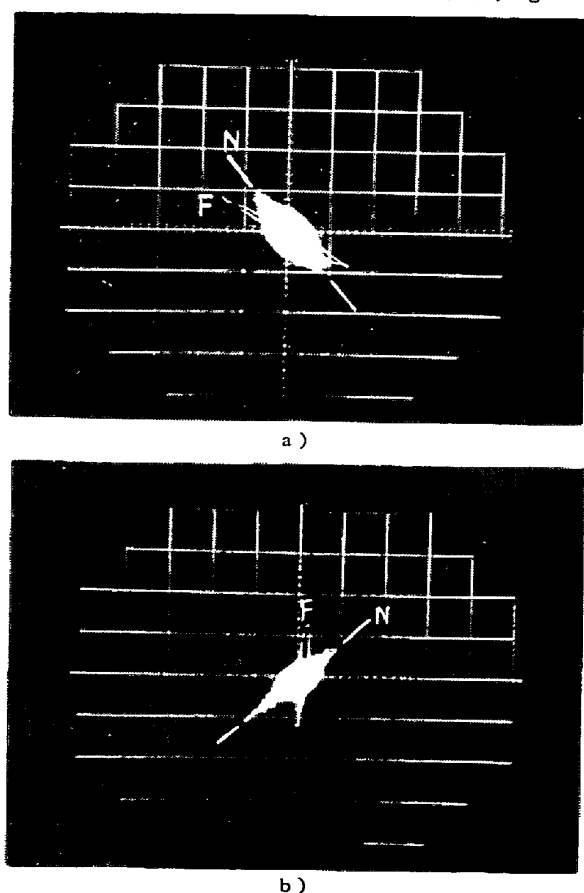
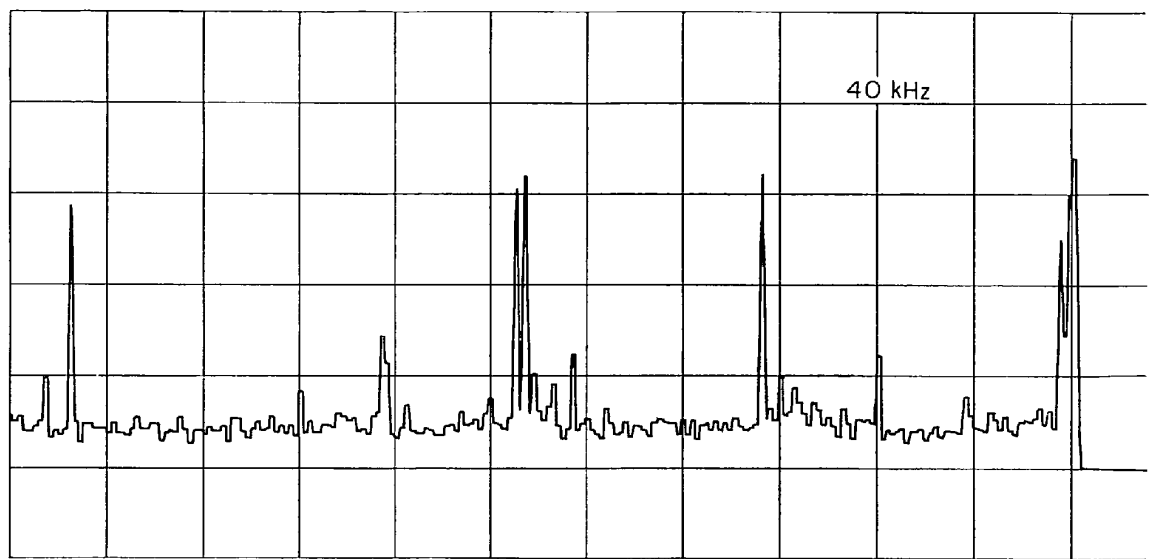
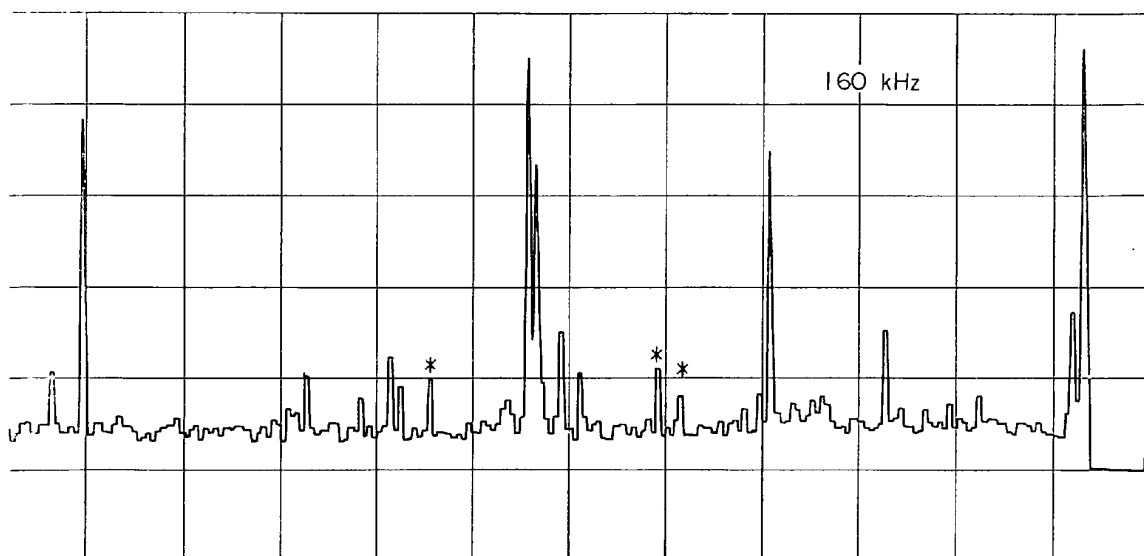


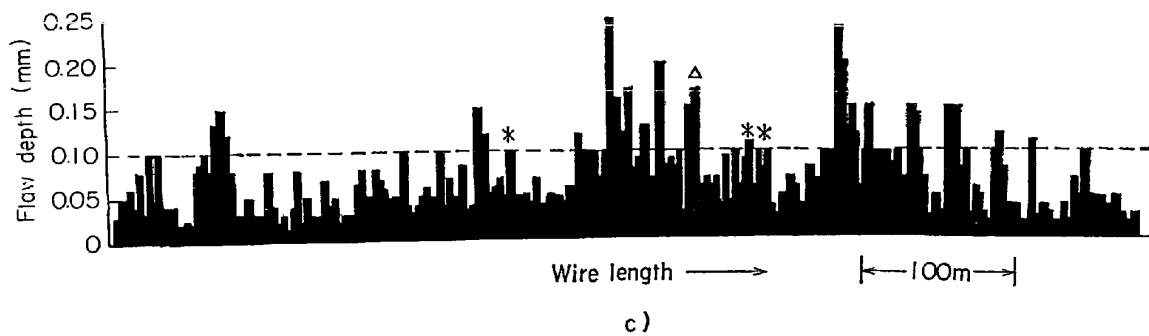
Fig. 10. Change of phase difference between flaw vector F and noise vector N with carrier frequency. a) Phase difference is 25° in the case of 40kHz carrier frequency and b) 45° in the case of 160kHz.



a)



b)



c)

Fig. 11. Detecting records for 5.5 mm dia. wire rod by two kinds of flaw detectors : a) Carrier frequency is 40kHz and b) 160kHz. c) Result of human inspection. Flaws with * mark are detected only by flaw detector with 160kHz carrier frequency. Flaw with Δ mark is long seam and cannot be detected by both flaw detectors.

までやすりがけし、削り代を測定する方法である。線材を3 mごとに区分し、各区分の中で最も深い疵の値を代表値として示した。探傷機で検出した疵は目視検査の結果とほとんど一致している。図中*印で示した0.1 mm深さの疵は160 kHzでは明らかに検出されているが、40 kHzでは雑音レベル以下となり、まったく検出されていない。また、160 kHzの方が全般的に疵信号レベルが高く、S/Nがよいことがわかる。なお、Fig. 11 a)とb)は、両者の雑音レベルが同一になるようにゲイン調整して記録した。△印で示した疵は両探傷機とも検出していないが、この疵は2 mにわたって深さがゆるやかに変化している線状疵であり、自己比較型のコイルを使用しているため原理的に、このような疵は検出しにくい。その他の疵はヘゲ疵またはオレコミである。

以上のごとく、5.5 mm 径の線材に対しては160 kHzの搬送周波数を使用して位相弁別を行なうことが疵検出精度向上に有効であることがわかった。

6. 疵 の 検 出 例

160 kHzの探傷機により検出した疵の例を述べる。Photo. 3 a), b) はヘゲ疵の例である。深さは0.1 mmである。Photo. 4 はオレ疵の例で深さ0.6 mmである。この疵のある線材コイルの全長の探傷記録および目視検査結果は、Fig. 12 a), b) に示すごとくであり、0.1 mm深さの疵まで検出している。Photo. 4の疵はFig. 12 b) に*印で示したものである。また、Photo. 5 は

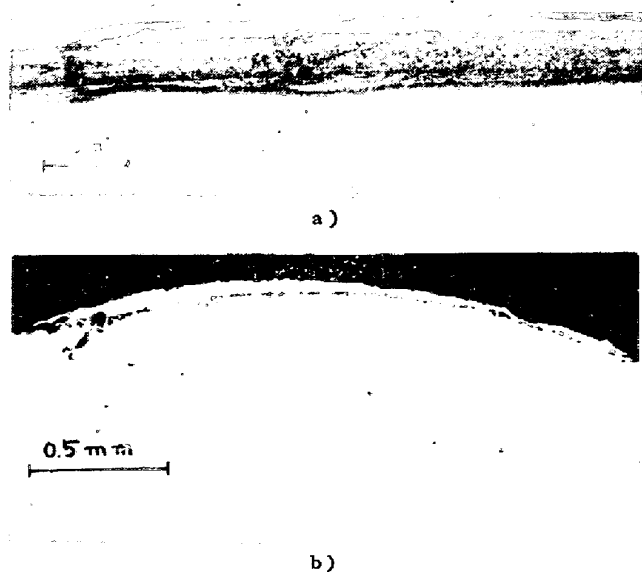


Photo. 3. Microscopic photograph of scab. a) appearance and b) cross section.

直径1 mm程度の酸化物をかみ込んだものである。このようなコイル長に比して短い欠陥でもよく検出している。Photo. 6は線材中心部に発生したワレ状の欠陥である。この欠陥は従来の目視検査では発見できないものである。Fig. 13に探傷記録を示したごとく確実に検出し

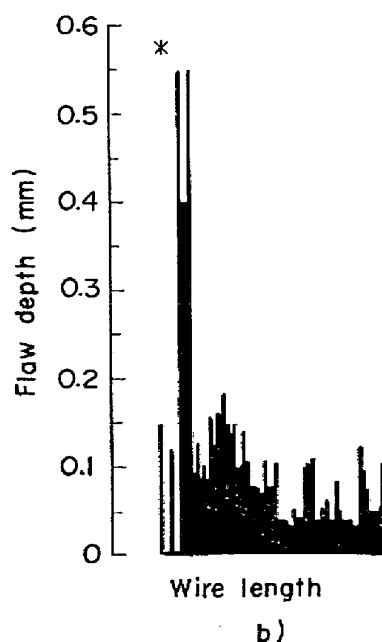
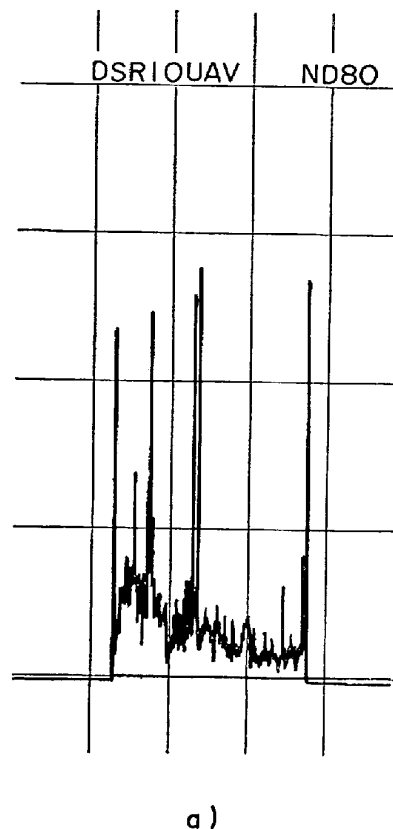


Fig. 12. One example of a) detecting record and b) human inspection.

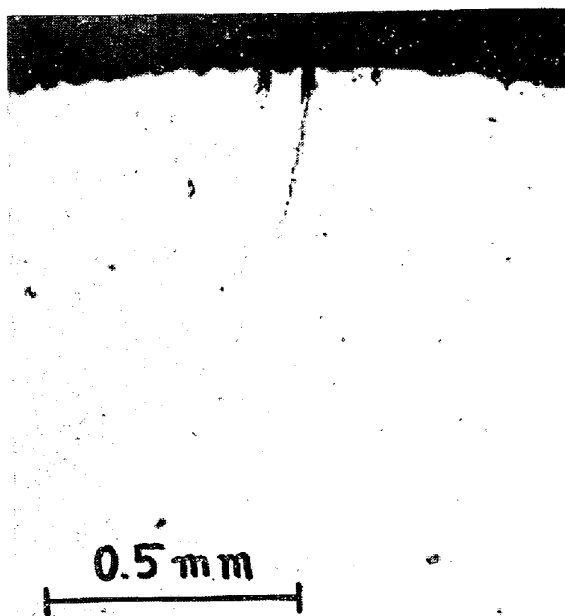


Photo. 4. Microscopic photograph of crack shown in Fig. 12 by *.

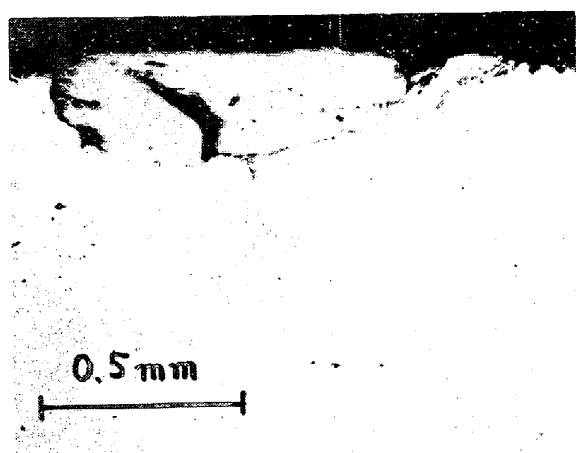


Photo. 5. Microscopic photograph of inclusion.

ている。

7. 結 言

熱間渦流探傷機の雑音の解析を行ない、以下に述べるよう、疵検出精度を向上させた装置を開発した。

1) 雑音は主として線材の振動に起因するものでありこの振動は圧延ロールの振動が伝わったものであることを確認した。

2) また雑音はパルス状波を含んでおり、周波数分布はかなり高い周波数までにおよんでいる。一方、疵信号の周波数分布は低域までにおよぶ広い範囲に分布しているので周波数弁別のみで疵検出精度を向上させることには限界があることがわかった。

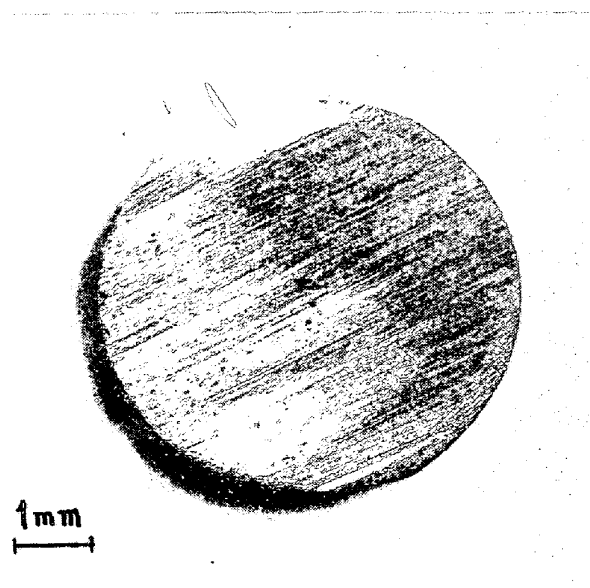


Photo. 6. Cross section of pipe.

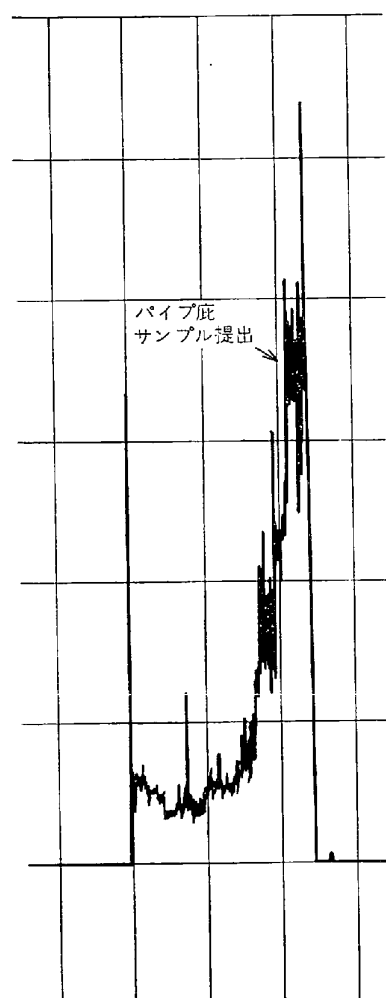


Fig. 13. Detecting record of pipe shown in Photo. 6.

3) 次に, 5.5 mm 径の線材に対しては, 搬送周波数 160 kHz にて疵信号と線材の振動に起因する雑音の位相差が大となり位相弁別に効果のあることがわかった. この条件は, 材料径の変化による信号と電気伝導度の変化による信号を十分位相弁別できる条件, $\sqrt{\omega_c \sigma \mu} \cdot a = 3$ と同じ条件である.

4) 搬送周波数 160 kHz と 40 kHz の探傷機 2 台にて, 圧延中の線材の同時探傷を行なった結果, 搬送周波数 40 kHz の探傷機では 0.15 mm 深さの疵までこそ検出しなかったのに対して, 160 kHz の探傷機では 0.10 mm 深さの疵まで検出した.

本装置は現在, 当社星崎工場線材圧延工場にて順調に稼動を続けており, 従来の端末試料検査と並用して, 特に圧延中に疵の発生しやすいステンレス鋼の品質管理に効果をあげている.

筆を置くにあたり, 本研究の推進にご尽力いただいた大同製鋼(株)取締役研究開発本部長藤原達雄氏および星

崎工場圧延課の諸氏, また理論面でご指導いただいた名古屋大学教授丸勢進氏に厚くお礼申し上げます.

文 献

- 1) O. MIKI: Met. Prog., 100(1971)6, p. 70
- 2) H. HAMAMATSU: Wire J., 6(1973)12, p. 52
- 3) 渡辺, 武内, 稲森: 鉄と鋼, 58(1972)11, S 570
- 4) 渡辺, 武内, 宇津野, 志水, 稲森: 電気製鋼, 44(1973)2, p. 132
- 5) 白岩, 広島: 鉄と鋼, 57(1971)3, p. 601
- 6) 尾上, 高木, 山手, 稲田: 非破壊検査, 20(1971)8, p. 344
- 7) F. FÖRSTER H. BREITFELD: Z. Metallk., 45(1954)4, p. 188
- 8) F. FÖRSTER and K. STAMBKE: Z. Metallk., 45(1954)4, p. 166
- 9) R. HOCHSCHILD: Progress in Non-destructive Testing, 1(1958), p. 59
[Heywood & Company Ltd.]