

.....
 論 文

熱間圧延棒鋼の表面欠陥の自動探傷法*

白 岩 俊 男**・広 島 龍 夫***

Automatic Nondestructive Inspection for Surface Defects of Hot Rolled Round Steel Bars

Toshio SHIRAIWA and Tatsuo HIROSHIMA

Synopsis:

The fluorescent magnetic particle method is usually used for inspection of surface defects of hot rolled steel bars. However, in this method, the evaluation is not quantitative and the judgement of harmful defect depends on the skill of inspector, and moreover the inspection rate is very low.

To improve these drawbacks and to develop an automatic inspection in production line, the present authors have studied the eddy current inspection method and a new automatic magnetic inspection method using semi-conductor elements.

Some characteristics of eddy current test coil have been investigated and a high sensitive coil newly designed clearly detects a surface defect whose depth is 0.3 mm.

Eddy current inspection is suitable for detection of surface single or short defects such as shells and roll marks.

An automatic magnetic inspection method has been developed for detection of long defect. In this method Sony magnetodiode (SMD) is used to detect leakage flux from surface defect of bar which is magnetized by a.c. magnetic field.

The inspection system based on this new method is able to detect harmful seam and crack without descaling process. A seam of 0.1 mm depth is easily detected and inspection rate is 30~40 T/H for bars of 50~100 mm diameter.

This system is taking the place of fluorescent magnetic particle inspection method.

The combined method of eddy current inspection and leakage magnetic flux detection is possible to detect all kinds of surface defect in production line automatically.

(Received July 24, 1970)

1. 結 言

熱間圧延棒鋼の表面探傷を黒皮状態のままで行なうものとしては目視検査法、蛍光磁粉探傷法が一般的である。

目視検査はその名の示すごとく作業員の目視により欠陥の検出、判定を行なうものである。また蛍光磁粉探傷は目視では検出困難な黒皮表面の割れ欠陥を、被検材を磁化し疵部に凝集した磁粉に紫外線を照射したとき磁粉のはなつ蛍光により疵判定を容易に行なうようにしたものであつて本質的には目視検査である。

この検査法は簡便であるがつぎのような欠点を有している。

(1) 判定は作業員の熟練度、技量に依存しており、客観的な検査は不可能である。

(2) 表面疵部に凝集した磁粉模様の有無を見るだけであるから疵の深さを知ることは不可能で、定量的判定ができない。

(3) 連続探傷ができず検査速度が遅いため圧延速度に応じた工場検査が不可能である。

(4) 蛍光磁粉探傷は紫外線照射を行なう必要上暗室内で作業を行なわねばならず作業環境が悪い。

最近これらの欠点を改め定量判定を行ない、客観的検査を可能にする連続自動探傷を適用し、検査工程の合理化、省力化を行なうことが望まれており、非破壊検査法の研究開発も進んでいる。

熱間圧延棒鋼を黒皮のまま検査しようとする試みは

* 昭和44年10月本会講演大会にて発表
昭和45年7月24日受付

** 住友金属工業(株)中央技術研究所 理博

*** 住友金属工業(株)中央技術研究所

種々検討されているが、プローブ型渦流探傷による例が米国で見られるのみで他の探傷法、たとえば超音波探傷法などはスケール除去した棒鋼や磨棒鋼を対象としており、黒皮棒鋼を対象とはしていないのが現状である。

著者らは熱間圧延黒皮棒鋼を圧延工場でのオンラインの検査を行なうことを目的として貫通型渦流探傷法の適用に関する研究および半導体磁気検出子を用いた自動磁気探傷法の開発を行なった。

2. 渦流探傷法

渦流探傷法は現在わが国においてはおもに鋼管の検査に実用されており、棒鋼への適用は磨棒鋼を対象とした2, 3の実験報告¹⁾²⁾³⁾があるのみで、黒皮棒鋼の表面疵を対象とした渦流探傷についてはほとんど検討されていない。

著者らは貫通型渦流探傷法の高速度性に注目し、黒皮棒鋼の表面疵探傷への適用を検討した。

渦流探傷法は検査コイルを介して被検材中へ交流磁束を投入し被検材中に生じる渦電流の変化を検査コイルのインピーダンス変化として検出するものである。この方法が他の非破壊検査法に比較してすぐれている点はすべて電気的な信号のみで処理するため高速探傷、自動探傷の適用が容易であることなどである。一方、検査コイルで得られる情報は被検材の透磁率と電気抵抗によつて異なるため、疵以外の被検査材の不連続をも検出するから信号の解析が困難であるという欠点を有している。

一般に市販されている渦流探傷器では位相解析などにより疵信号のみをうるようになっている。

2.1 直流飽和磁界

一般に鋼材の渦流探傷では透磁率の変化による疑似指示を防ぐ目的で直流磁界中に被検材を置き、被検材を磁気飽和させ、透磁率を一定にして探傷する手法が用いられている。

鋼材を磁界 H 中に置いたとき、鋼材中の磁束密度 B の値によつて鋼材の磁化の程度を知ることができる。鋼管を対象とした渦流探傷の場合に比し、棒鋼の場合にはその断面積が大であるため直流飽和磁界の大きさを大きくする必要がある。

飽和磁束密度 B_s は材質により定まるから被検材の寸法、形状により定まる反磁場係数 N がわかれば被検材に与える外部磁界の強さ H_0 は

$$H_0 = H \{1 + N(\mu_s - 1)\} \dots \dots \dots (1)$$

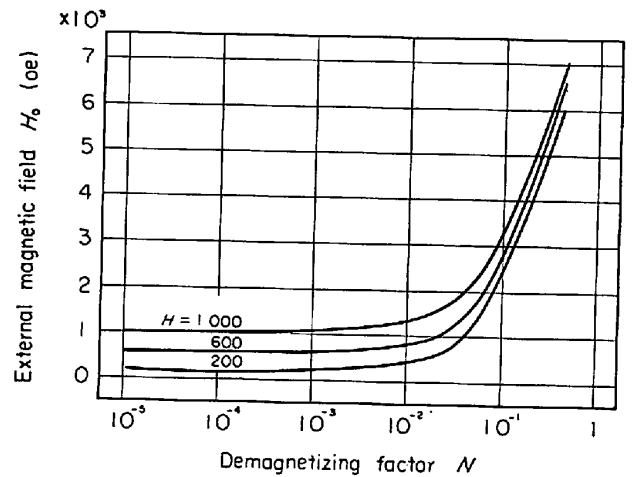


Fig. 1. Calculation results of the relation between demagnetizing factor and magnetic field.

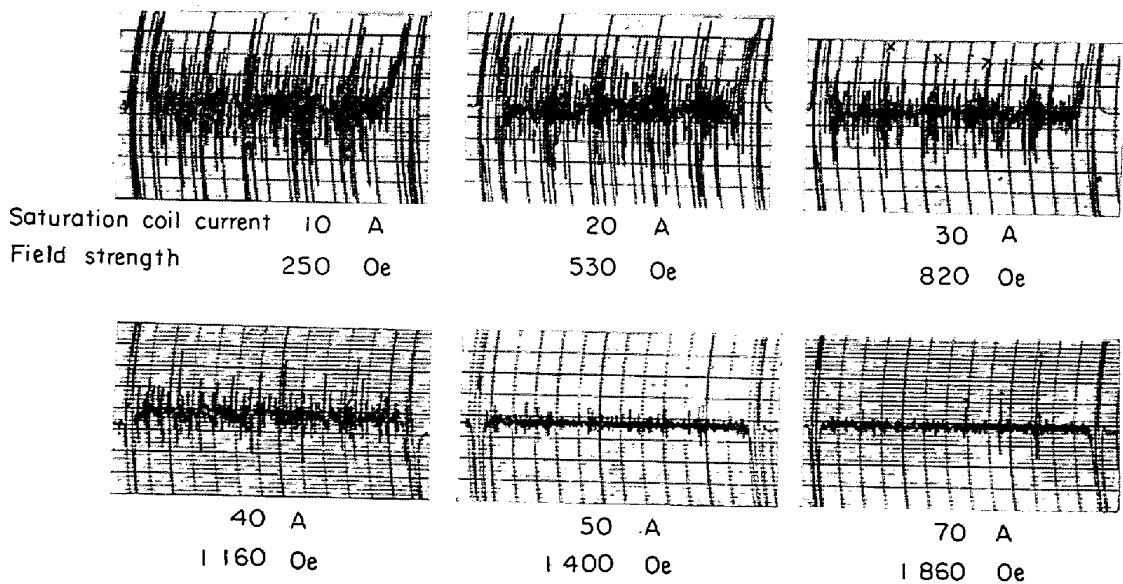


Fig. 2. Artificial flaws are detected clearly when the saturation field strength is 1 860 oe.

で与えられる⁽⁴⁾。炭素鋼 (S35C) について $B-H$ 曲線から μ_s を求め種々の H の値に対する H_0 を求めると Fig. 1 のようになる。通常の炭素鋼では H が 200 (oe) 程度になるとほぼ飽和に達するから $N=10^{-1}$ 程度と考えれば H_0 は 2000 (oe) を要し、大型の磁化コイルが必要となる。

実験の結果では 22mm ϕ 棒鋼で 1300 (oe), 32 mm で 1800 (oe), 38 mm ϕ では 2000 (oe) を要することがわかった。

一例として、32mm ϕ 棒鋼について飽和磁界強度を変化させた場合の人工疵検出状況を Fig. 2 に示した。図からわかるように飽和コイル電流が少ない場合すなわち磁界強度の小さい場合には雑音がきわめて多く疵検出は不能である。飽和磁界強度が 1860 (oe) の場合には 0.3 mm, 0.5 mm, 0.7 mm 深さの人工疵が明りように検出できており磁気飽和が十分であることを示している。

2.2 検査コイル寸法と疵検出能

一般に渦流探傷を適用するにさいし検査コイルの選定は探傷を決定するきわめて重要な問題である。

コイル選定には通常つぎのことに留意する必要がある。

- (1) コイルの寸法……径 (平均巻径), コイル長さ, コイル間隔
- (2) コイルの特性……自己インダクタンス, 直流抵抗, 巻数

このうち (2) 項の電気的特性に関するものは検査装置たとえば高周波発振器, ブリッジなどによつてだいたいの値が定まる場合が多い。(1) 項にあげたコイル寸法は被検査材と検査コイルの結合の程度, 疵検出能, 疵分解能などを左右するものであるが従来あまり考慮が払われていなかった。

著者らは熱間圧延黒皮棒鋼を対象とした場合, 被検査材の表面粗さ, 変形などに起因する雑音を除き疵信号のみを取り出す目的で従来用いられている位相解析に加え疵信号周波数の解析を行なうこととしコイル長さ欠陥検出の関係を検査した。

2.2.1 コイル寸法と疵検出能

検査コイルのコイル長さは疵信号周波数および疵検出限界を決定する大きな要素である。このうち疵信号周波数は被検査材の移動速度および疵長さからコイル長さにより定まるものであるが, 疵検出限界はコイル長さのみで決定されるものである。

人工疵を用いて種々の長さのコイルによる疵検出限界を調査した。使用した人工疵は種々の長さのスリットで 0.2 mm 厚の銀タングステン電極を用い放電加工により

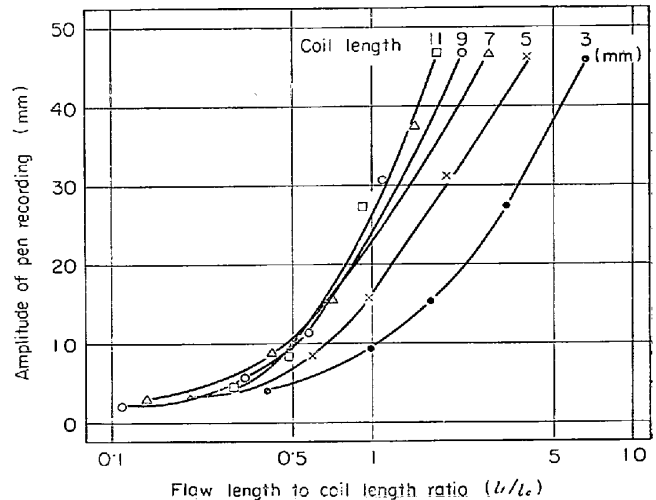


Fig. 3. Relationship between coil length and flaw detection.

製作した。コイル長さを 3 mm~15 mm まで変化させた場合の疵検出状況をペン書きレコーダで記録した。

結果は Fig. 3 に示すごとくで検査コイル長さが短いほど微小欠陥検出が容易であることがわかる。疵長さ l_f とコイル長さ l_c の相対比 l_f/l_c が 0.6 以上になると疵検出指示が大きくなり, l_f/l_c が 0.6 以下では検出困難であり, コイル長さが 10 mm の場合, 長さ 5 mm 以下の疵は検出困難で 2 mm 以下の疵はほとんど検出できないことになる。

実際の黒皮棒鋼の疵探傷では深さ 0.3 mm 以上, 長さ 10 mm 以上の疵を検出する必要がある。今コイル長さを 11 mm とすると検出すべき疵についての l_f/l_c は 0.91, 長さが 2 mm 程度の表面粗さについては l_f/l_c が 0.18 になり, Fig. 3 から S/N を推定すると 5 程度になる。

上の結果を人工疵を用いて確かめるため, 検査周波数を 2 kHz, 検査速度 60 m/min で 10 mm 長さ放電加工ノッチを付けた黒皮棒鋼の探傷を行なつた結果を Fig. 4

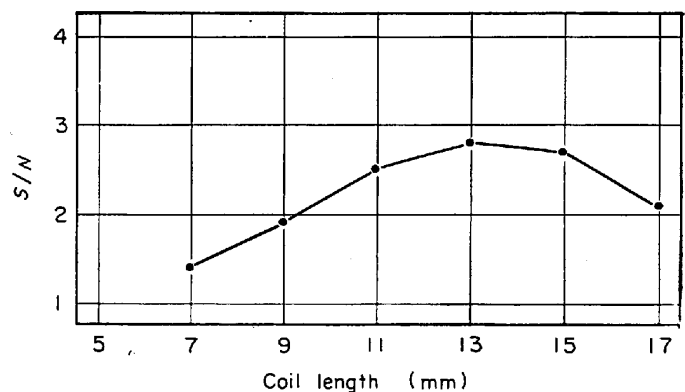


Fig. 4. Relationship between coil length and S/N for EDM notch 0.3 mm in depth.

に示した。この結果ではコイル長さが 13 mm のとき疵信号 S/N が最良であった。

貫通型渦流探傷で疵検出を行なう場合、通常用いる自己比較型検査コイルでは 2 個のコイルの両方にまたがる長い疵では 2 個のコイル間のインピーダンスの差がわずかであるため疵検出が明りようにできないから、11 mm ~ 13 mm の長さのコイルではコイル間隔を 5 mm とすると長さが 30 mm 以上の疵は疵の両端のみしか検出できないことになる。

疵分解能についてはコイル間隔も考慮する必要があるが、実験の結果からコイル長さが 10 mm 以上になるとコイル間隔が 3 mm ~ 7 mm まで変わっても分解能にはほとんど影響を与えないことがわかった⁵⁾。

2.2.3 黒皮棒鋼探傷用検査コイル

黒皮棒鋼の表面疵検出を目的とした検査コイルを設計するにあたってはつぎの点を考慮した。

- (1) 0.3 mm 深さ以上の疵が検出できること。
- (2) 黒皮棒鋼の表面粗さなどに対しては感度の低いこと。
- (3) 被検材の曲がり、変形などによりコイルが損傷を受けないようにすること。

このうち (1) 項と (2) 項は相反するようであるが、Fig. 3 に示したように検出すべき疵長さを 10 mm 以上として考えればコイル長さを 11 mm にすると 2 mm 程度の長さの疵はほとんど検出しなくなり、表面粗さによる信号を大幅に抑制できる。(3) 項の問題はコイル内径を大きくすることで解決できるが充填率が低くなり検出能の低下が予想される。この充填率の低下を補うため励振用発振器の出力を大きくするとともに増幅器の利得を高くすることが必要である。

これらを考慮し Table 1 にあげた検査コイルを製作した。

2.3 欠陥信号の周波数解析

検査コイルでえられる欠陥信号は励振周波数の搬送波がコイル長さ l_c 、疵長さ l_f 、コイルと疵の相対速度 v により定まる欠陥信号周波数 f の欠陥信号波により振幅変調を受けたものである。これを検波して欠陥信号のみを

Table 1. Eddy current test coils.

Diameter of bar (mm)	Inner dia. of coil (mm)	Coil length (mm)	Self inductance of second coil (mH)	Fill factor (%)
22	25	11	2.76	57.6
26	30	11	2.92	58.5
28	32	11	3.13	60.5
32	36	11	3.27	64.0
38	42	11	3.32	71.2

取り出すのであるが、欠陥信号周波数 f に注目し周波数解析を行なうことにより被検材が黒皮材であることに起因する種々の雑音や疑似信号が弁別可能となる。

欠陥信号周波数は一般に

$$F = 2f = v / (l_c + l_f) \dots \dots \dots (2)$$

と表わされるが、コイル長さ、欠陥長さは有効長さで考える必要がある。コイル長さ、欠陥信号周波数の関係を求める目的で Fig. 5 に示すような方法で欠陥信号波形の測定を行なった。実験に使用した試験材は外径 32 mm のものでコイルでえられた信号はブリッジを介して電磁オシログラフに記録した。記録の一例は Fig. 6 に示すごとくでこの波形から欠陥信号周波数 f を求めた。種々の長さの人工欠陥 (放電加工ノッチ) についての結果を Fig. 7 に示す。この結果を用いて、コイルの有効長さ、疵の実効長さを考えてみた。今コイルの有効長さ L_c 、疵の実効長さ L_f を

$$L_c = l_c + \Delta l_c \dots \dots \dots (3)$$

$$L_f = l_f + \Delta l_f \dots \dots \dots (4)$$

とすると、Fig. 6 で観測される波形から求めた欠陥信号周波数が

$$2f = v / (L_c + L_f / 2 + d / 2) \dots \dots \dots (5)$$

で表わされると考える。ここに d はコイル間隔である。

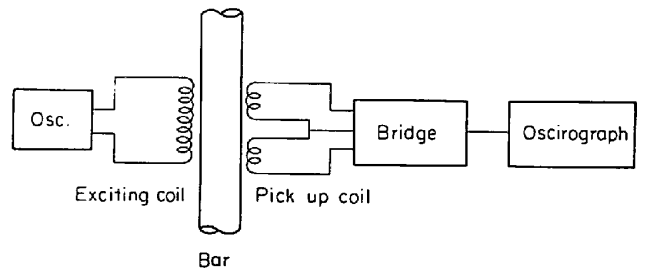


Fig. 5. Measuring circuit of signal frequency.

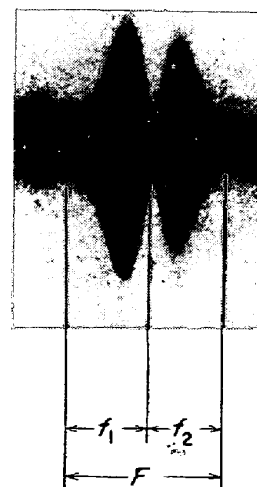


Fig. 6. Recording chart of flaw signal for frequency measurement.

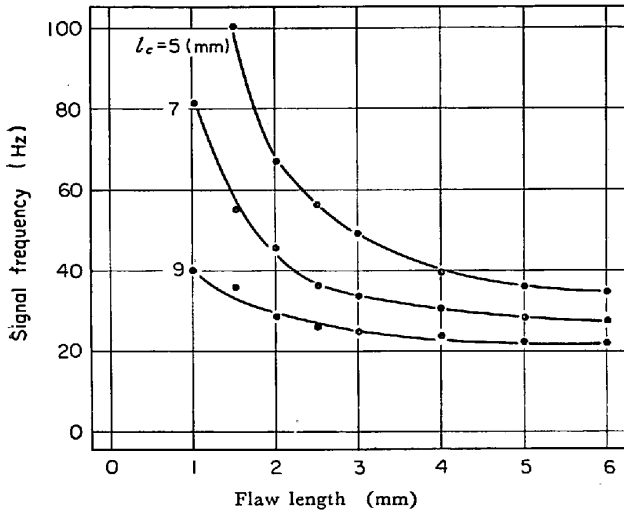


Fig. 7. Relationship between flaw length and signal frequency.

今、欠陥を $l_f=10$ (mm) として Δl_f が、1.0, 1.5, 2.0 mm の場合について周波数から L_c を求めると Table 2 のようになった。この結果から Δl_c はコイル長さ l_c が長くなると 0 に近づき $l_c \approx L_c$ となる。また Δl_f については疵深さにより異なり疵深さによつて信号周波数が変わることもわかつた。疵深さによる疵信号周波数の変化の様子を Fig. 8 に示した。

これらの結果から欠陥長さが長くなると信号周波数は

Table 2. Experimental results of effective coil length.

Coil length	Signal frequency F (Hz)	Effective coil length L_c (mm)		
		$\Delta l_f=1$	$\Delta l_f=1.5$	$\Delta l_f=2$
5	42	6.86	6.61	6.36
7	39	8.12	7.87	7.62
9	36	9.17	8.92	8.67
11	32	11.19	10.94	10.69
13	28	13.79	13.54	13.29
15	25	16.28	16.03	15.78

$v=35$ m/min, $l_f=10$ mm

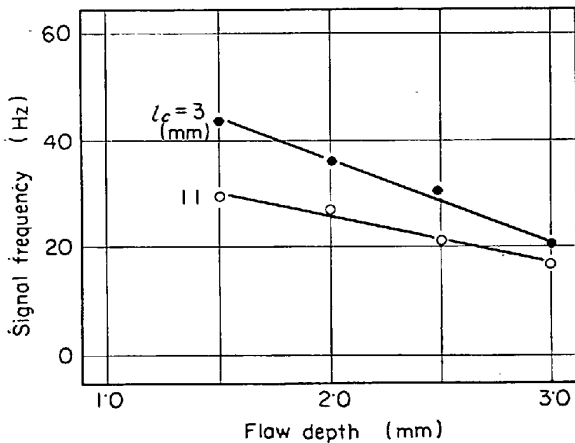


Fig. 8. Relationship between flaw depth and signal frequency.

コイル長さによりほぼ一定の値になり、欠陥長さが短いものについてはコイルの長さを適当に選ぶことにより信号周波数解析を行なうことができることがわかる。またコイル長さがある程度長くなるとコイルの有効長さがコイル長さとはほぼ同じになるため、実際の欠陥に対してはコイル有効長さ分 Δl_c の考慮を要しないでコイル長さを定められる。

黒皮棒鋼を対象とした場合表面粗さなどに起因する信号の周波数は表面粗さが疵に比しその長さが短いため、疵信号周波数よりも高くなると考えられるが先に述べたようにコイル長さを長くした場合疵長さの短いものはほとんど検出されないから疵信号周波数のみに注目すればよい。

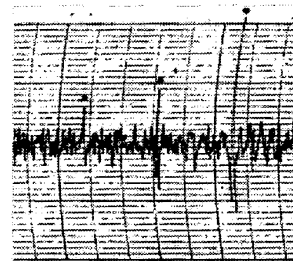
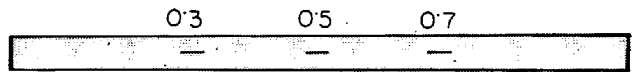
以上のことから黒皮棒鋼の表面疵を対象とした場合には表面粗さの影響を除くためコイル長さを長くすることが必要である。

2.4 欠陥検出能

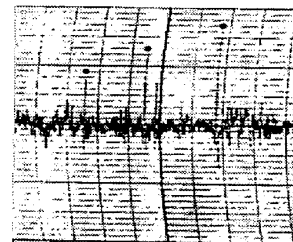
2.4.1 人工欠陥検出能

人工欠陥を用いて、検出能を調査した。試験材は 26 mm ϕ , 32mm ϕ , 38mm ϕ の黒皮棒鋼で、0.3 mm, 0.5 mm, 0.7 mm 深さの軸方向スリットを放電加工により付けた。

探傷結果は Fig. 9 に示すごとくで 0.3 mm 深さの人



Recording chart of STD notch-32#



Recording chart of STD notch-38#

Fig. 9. Recording chart of artificial EDM notch.

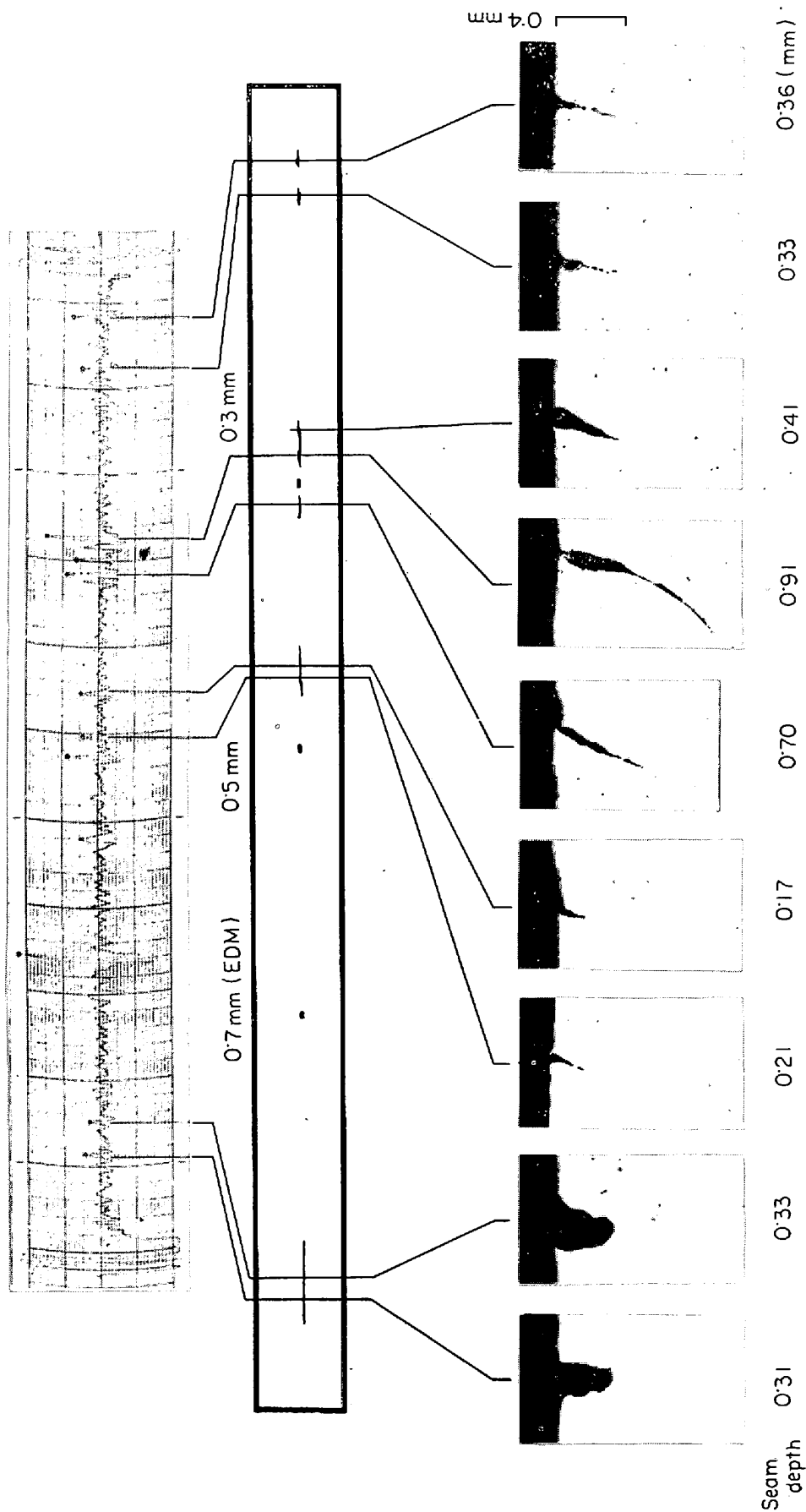


Fig. 10. Recording chart of natural flaw.

工疵も明りように検出できている。

記録紙上に表われるバックグラウンドノイズは 0.3 mm 深さの疵信号 S/N が2以上得られる程度に低くコイル設計、フィルタの効果が良好であることを示している。

2.4.2 自然疵検出能

自然疵の検出能について圧延工場精整ライン中で探傷実験を行なった。自己比較法で探傷を行なう場合、2個のコイルに同時に入るような疵は両端しか検出しえないし、被検材の全長におよぶような長い疵については疵深さの変化が 0.3 mm 近くないとまったく検出できない。

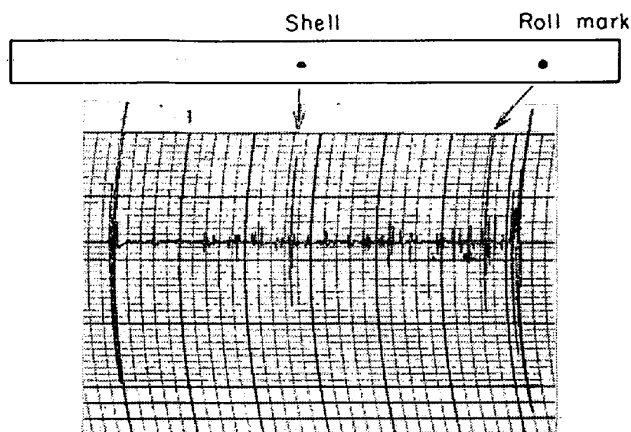


Fig. 11(a). Recording chart of natural flaw.

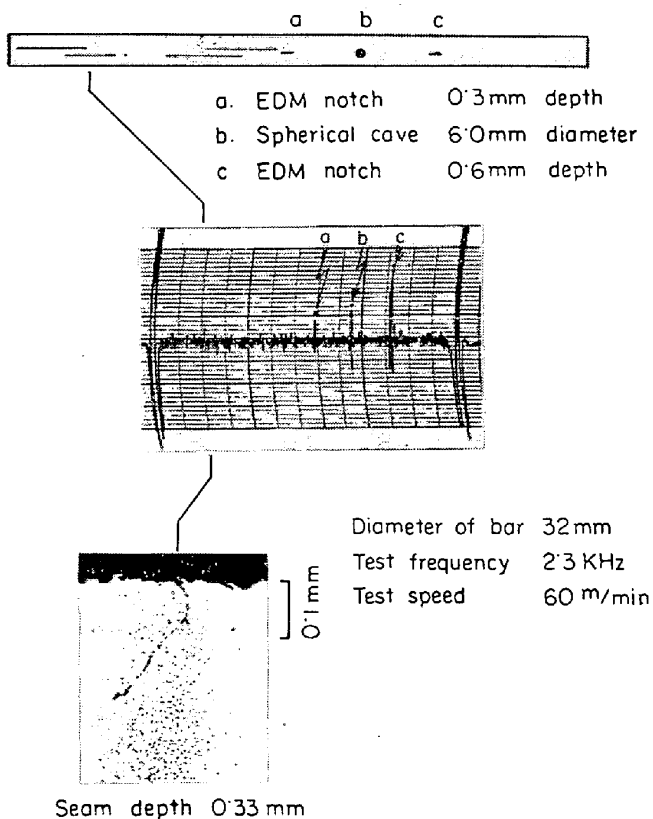


Fig. 11(b). Recording chart of natural seams.

Fig. 10 に自然欠陥検出例を人工疵の検出と比較して示した。割れ欠陥では長さの短いものは検出できている。

へげ、虫くいなどの独立欠陥の検出に適していることを確かめるため、へげ、ロール疵のある黒皮棒鋼について探傷した結果の一例を Fig. 11(a) に示した。長さの短い独立欠陥については良好に検出できており、従来行なわれている目視検査に十分替わりうるものと考えられる。また Fig. 11(b) には比較的長い疵の検出状況を示したが、長い疵に対してはほとんど検出できないことがわかる。

2.5 結論

熱間圧延黒皮棒鋼の表面疵探傷に貫通型渦流探傷を適用することを目的とし検査コイル、周波数解析の実用性の検討を行なった。検査コイル長さを従来一般に用いられているものよりも長くすることで表面粗さの影響を除いて、疵信号のみを S/N 良好に検出することが可能となった。また、位相解析に加え、周波数解析を行なうことにより 0.3 mm 深さ以上の人工疵を $S/N > 2$ で検出できた。

実際の探傷でもへげ、カブレ、虫くい、ロール疵などの独立欠陥の検出に効果があり、従来の目視検査に十分替わりうると思われる。

3. 自動磁気探傷法

熱間圧延黒皮棒鋼に通常用いられている磁粉探傷法の自動化が最近 2, 3 試みられている。欠陥部に凝集した磁粉に紫外線を照射したとき磁粉の発する蛍光を光電変換器により検出する方法⁶⁾や、角棒、角ピレットを通電磁化し疵部から生じる磁束を磁気テープに記録した後電気信号として検出する方法⁷⁾がそれである。前者の方法は比較的適用が容易であるという利点があるが、磁粉の凝集度による光の強度のみが情報であるためパターンの判別が行なえる目視判定の精度がえられないという欠点を有する上定量的な疵判定ができないという磁粉探傷の本質的な欠点が改められていない。また後者の方法では被検材の表面状況の影響を受けやすいためショットブラストなどのデスクレーンを行なわないときには検出精度がきわめて悪い上テープの接触条件、摩耗などの問題も多い。

筆者らは黒皮棒鋼を対象として、被検材を磁化したとき疵部から生ずる欠陥漏洩磁束を半導体磁気検出子を用いて検出する自動磁気探傷法を開発した。

3.1 欠陥漏洩磁束

割れなどの欠陥を有する鋼材に割れと直角の方向の磁

束が通るように磁化すると Fig. 12 のごとく欠陥から磁束が漏洩することが知られている。この漏洩磁束を半導体磁気検出子を用いて検出し、欠陥の自動検出を目的とした欠陥と漏洩磁束の関係を調査した。

Fig. 13 に磁気検出子に感磁性ダイオード Sony Magnetodiode (SMD) を用い、リフトオフ (検出子と被検材間の空隙) 0.5 mm で欠陥漏洩磁束の法線成分を測定して得た欠陥漏洩磁束のプロファイルの一例を示した。Fig. 13 から明かなように、通常の圧延材の割れから生じる漏洩磁束量はきわめて微小であると同時に、非常に尖鋭なピークを持つている。

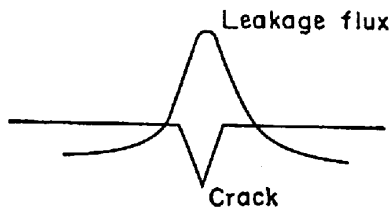


Fig. 12. Leakage flux from surface crack.

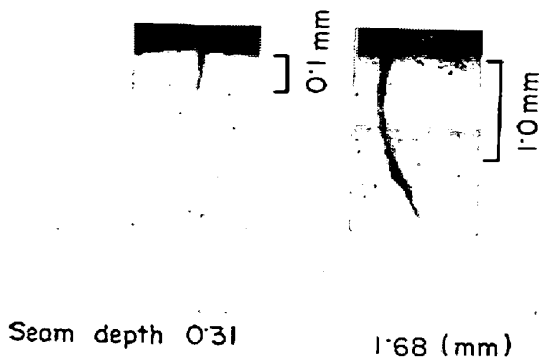
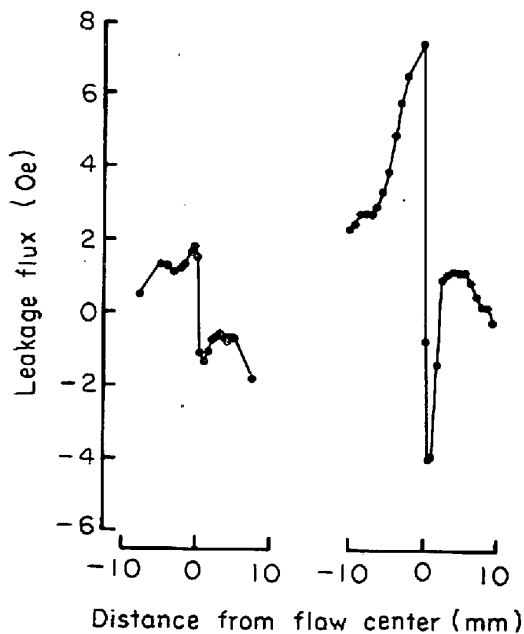


Fig. 13. Leakage flux profile of seams.

種々の深さの割れ欠陥について欠陥漏洩磁束を測定してみると Fig. 14 に示すごとくになり、欠陥漏洩磁束の法線成分と割れ深さとはほぼ比例関係を示した。

また、割れの被検材表面での幅 (欠陥幅) の欠陥漏洩磁束におよぼす影響を見てみると通常の割れのごとく欠陥幅が高々 100 μ 程度までのものでは顕著な影響は見られなかった。これは漏洩磁束の測定を欠陥面上 0.5 mm の点で行なったため、欠陥幅の影響があまり表われなかったものと考えられる。

3.2 検出子

上に述べたごとく欠陥漏洩磁束量は微小であるから、検出子は磁気感度が高く、低磁場での特性のよいことが必要である。また漏洩磁束プロファイルは尖鋭なピークを有するため寸法の小さい素子を用いることが微小欠陥検出を精度よく行なう上に重要である。

一般に磁束を検出する方法としては古くから用いられているサーチコイルを用いる方法をはじめ磁気テープを用いる方法や半導体磁気検出子を用いる方法がある。このうち半導体検出子を用いるものは検出子の磁気感度が比較的高い。寸法が小さいなどが他に比してすぐれているばかりか、使用法が容易である上安定した測定ができるので自動磁気探傷の検出子としてきわめてすぐれたものである。

半導体磁気検出子にはホール素子、磁気抵抗効果素子感磁性ダイオードなどがある。磁気抵抗効果素子は低磁場域における磁気特性に直線性がないこと、微小磁場変化の検出には不適であることから自動磁気探傷の検出子には向かない。ホール素子、感磁性ダイオードは共に自動磁気探傷の検出子として十分使用できるもので、とくに感磁性ダイオード SMD (Sony Magnetodiode) はその感度がきわめて高いことから現在最もすぐれた検出素子であると考えられる。

ホール素子は Fig. 15 の半導体の X 方向に電流を流し、Z 方向に磁束を通すと Y 方向の端子間に電圧を生ずるもので、素子により決まる定数を R_H とすれば出力電

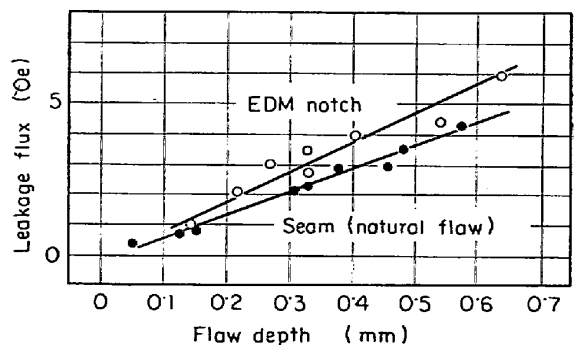


Fig. 14. Leakage flux from surface flaw.

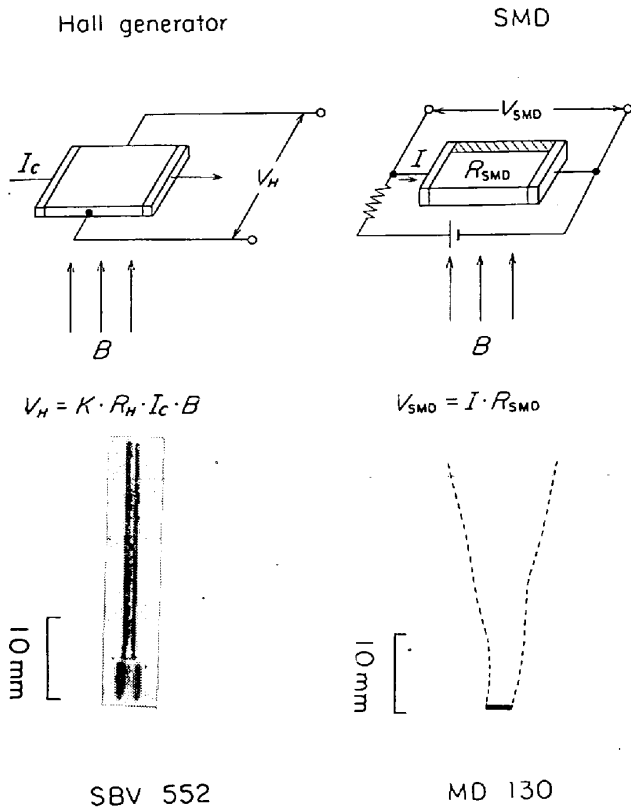


Fig. 15. Hall generator and SMD.

圧 (ホール電圧) V_H は

$$V_H = R_H \cdot B \cdot I_c \text{ (V)} \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる。ここに B は磁束密度 (gauss), I_c は素子に流す電流 (A) である。

また, SMD は新しいタイプの磁気抵抗素子の一種で, 素子を通る磁束により素子の抵抗 $R_{SMD}(\Omega)$ が変化し, 素子に $I(\text{A})$ の電流を通じたとき素子の端子電圧 $V_{SMD}(\text{V})$ が変化することを利用するもので, 磁束量は

$$V_{SMD} = I \cdot R_{SMD} \text{ (V)} \dots\dots\dots (7)$$

で測定される³⁾。

Table 3 に市販されているホール素子, SMD の諸元を示した。ホール素子と SMD の感度の比較を Fig. 16

Table 3. Specification of SMD and Hall generator.

	Maker and type	Dimension (mm)	Sensitivity for rated current (mV/oe)
SMD	Sony, MD-130	0.4 × 0.6 × 3	2.00
Hall generator	Westinghouse 803-53	0.5 × 9 × 17	0.15
	F. W. BELL BH-206	0.8 × 5.5 × 19	0.06
	BH-204	2.5 φ × 27	0.011
	Siemens FA-22e	0.8 × 3 × 7	0.01
	SBV525	0.3 × 2 × 25	0.01
	SBV552	3.7 φ × 48.5	0.004
Primo	HC-11A	1 × 9.5 × 14.5	0.035
	HC-12A	1 × 8 × 11	0.018

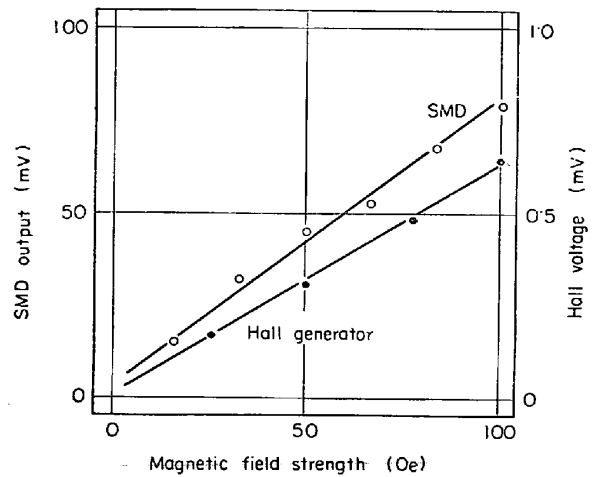


Fig. 16. Output voltage of Hall generator and SMD.

に示したが, SMD はホール素子の 100 倍以上の感度を有していることがわかる。これら半導体検出素子を使用するにあたって注意すべきことは半導体素子の温度特性である。ホール素子では 60°C, SMD では 40°C 以下で使用する必要がある, 素子の冷却を考慮せねばならない。

当社で開発した自動磁気探傷装置には初期にホール素子を用いていたが, 1968 年ソニー株式会社より感磁性ダイオード SMD が発表されて以来 SMD を検出子に用いている。

3.3 自動磁気探傷法

熱間圧延黒皮棒鋼の自動磁気探傷原理は Fig. 17 に示すようなもので, 被検査材に径方向磁化を行ない軸方向割れなどから漏洩する磁束を 2 個の検出子を差動に用いて検出するものである。被検査材を磁化用交流マグネット磁極間で回転させながら移動させ, 被検査材表面を検出子がスパイラル走査するようにする。

被検査材は黒皮状態であるから表面粗さ, 曲がり, 変形などのため, 被検査材と磁極間の空隙が変化すること

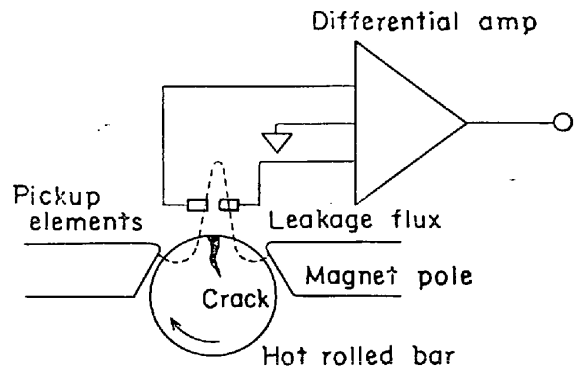


Fig. 17. Principle of automatic detection of leakage flux.

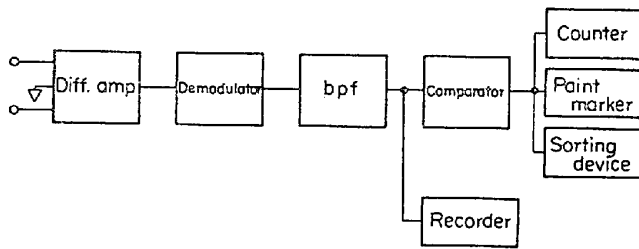


Fig. 18. Block diagram of electronic circuit.

などで磁極間の浮遊磁束が変化する。この浮遊磁束変化は検出子に検出されバックグラウンドノイズとなり疵検出 S/N を低下させる原因となる。開発した自動磁気探傷法では検出素子に2個の半導体磁気検出子を差動に用いることで浮遊磁束変化を相殺するようにした⁹⁾。

検出素子にて検出された疵信号は励磁電流周波数を搬送波とし、素子の寸法、疵の形状、寸法、被検査材の周速度で定まる信号周波数で振幅変調されたものであるから、これを検波し、疵信号のみを取り出し、さらにフィルターを用いて S/N の向上を得ている。疵信号はペン書き記録器により記録されるばかりでなく、あらかじめ設定した疵深さ以上の深さを持つ疵を検出した場合、被検査材表面の疵位置にペイントマーキングするようになっている。また疵の個数を計数するカウンタ、手入材、不良材のラック仕分けなどが検出信号により自動的に行なえるため、被検査材の搬入、検査、判定、マーキング搬出、仕分けの全工程が完全自動で行なえる。

Fig. 18 に自動探傷回路のブロックダイアグラムを示した。

3.4 SAM Bar Inspection System

当社で開発した自動磁気探傷装置は Sumitomo Automatic Magnetic Inspection System と名付けられており、幅広い応用分野が考えられるが黒皮棒鋼を対象とした SAM Bar Inspection System (SAMBIS) についてその概略を説明する。

自動磁気探傷を実用化するさいとくに考慮を要する点はつぎの2点である。

(1) 被検材と検出子、励磁マグネットとの空隙などの位置的關係を許容範囲に保持すること。

(2) 被検材の圧延速度に応じた探傷速度が得られること。

第1の問題については励磁マグネット、検出子の被検材への機械的追従機構の開発を行ない、被検材の曲がり、偏心に起因する回転時の振れの影響なく疵検出が行なえるようにしている。追従機構により黒皮材の曲がり は 2 mm/m まで許容できる。第2の問題については多検出スタンドを用いることにより、1本当たりの検査時

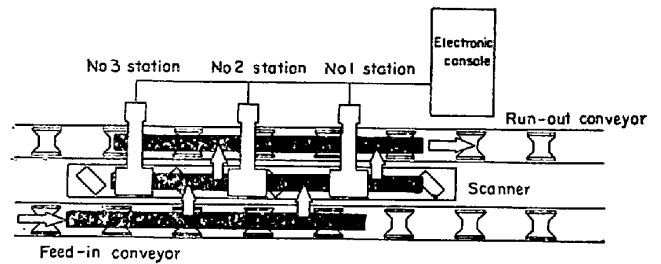


Fig. 19. Schematic diagram of SAM bar inspection system.

間を短縮すると同時に被検査材の搬入、搬出などの時間を短縮できるような機構をとり入れ解決している。

Fig. 19 は当社製鋼所に設置されている中径 ($50\text{ mm}\phi$ ~ $100\text{ mm}\phi$) の黒皮棒鋼を対象とした SAMBIS の一例である。

棒鋼は圧延機から冷却床を経て曲がり矯正機で矯正された後搬入ローラーコンベアに入る。コンベアで所定の位置まで運ばれると並列している検査ラインに送られる。

検査ライン上に棒鋼が入ると検出ヘッドが下降し、検出子が被検材表面にステンレスのシューを介し接触する。

検出ヘッドが下降すると棒鋼はスパイラルの回転移動を開始する。検出ヘッドは3基の検出ステーションに1個ずつ付けられており、3個のヘッドで棒鋼を軸方向に3分割して探傷する。すなわち被検材は全長の1/3の長さだけスパイラル送りされるのみで全長、全面の検査が実現できる。

検査速度を高めるにはスパイラル送りのピッチを大きくすればよいが、短い疵の検出が不能となる。このため1個の検出ヘッドに素子を 20 mm 間隔で6組置き、最小検出欠陥長さが 20 mm であるにもかかわらずスパイラル走査ピッチは 120 mm と大きくなり高速検査が可能となる。

検査が終了すると検出ヘッドは上昇し、棒鋼は搬出口

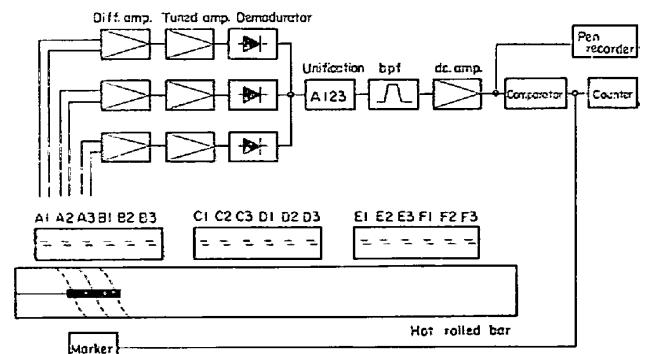
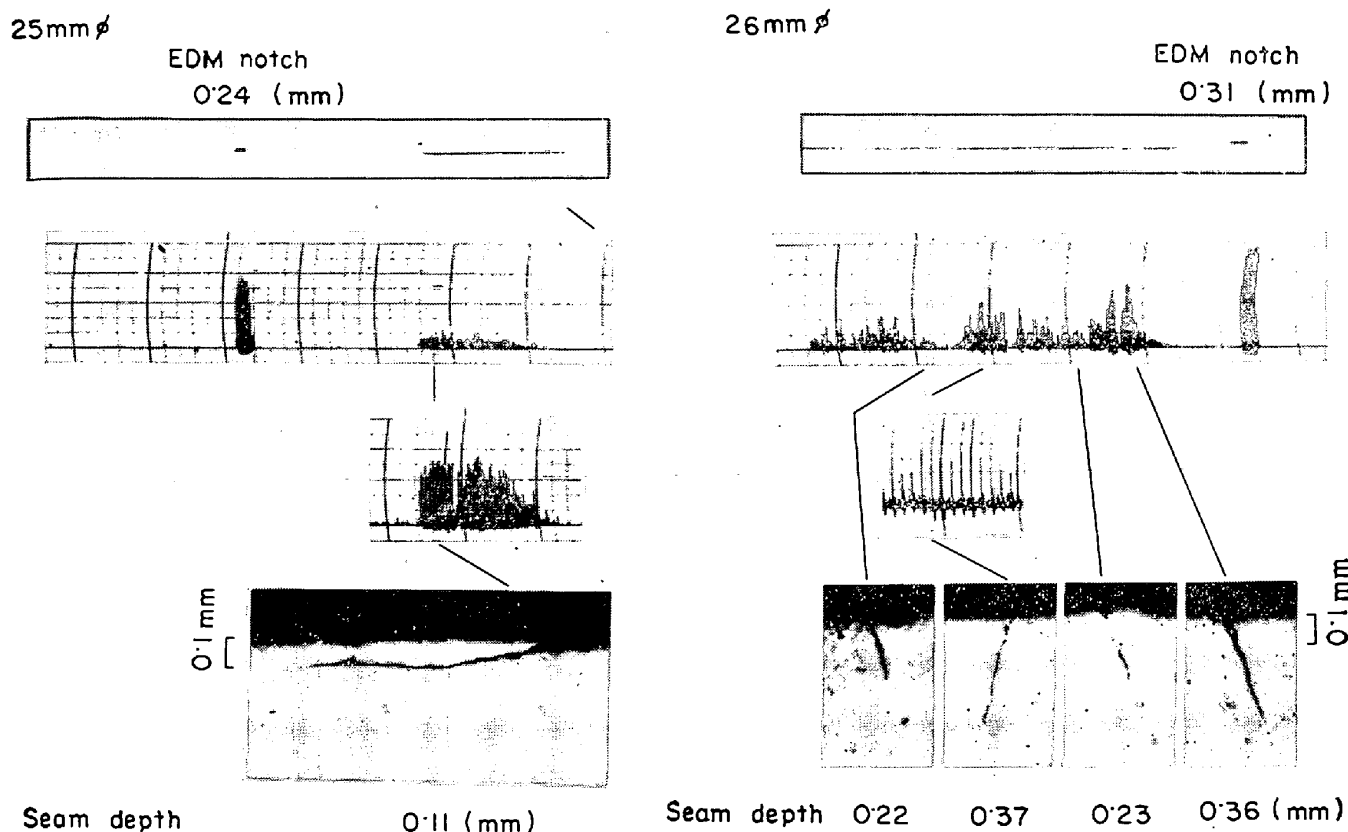


Fig. 20. Electronic system of SAMBIS.



ラテーブルに送られる。このときつぎに検査を受ける被検査材が同時に搬入ラインから検査テーブルに送られるようになってから、搬入、搬出に要する時間が大幅に短縮される。

検出ヘッドはさきに述べた追従機構を有しており、励磁マグネットと被検査材間の空隙検出子のリフトオフを一定に保つようになっている。

Fig. 20 にはこのシステムの電気回路のブロックダイアグラムを示した。1個の検出ヘッドの6組の素子出力は3組ずつ統合された後信号処理される。この信号統合回路は3組の検出子で得られた疵信号のうち最も大きい信号のみを取り出すものである。このため信号処理回路は簡易化され6チャンネルでよい。

3.5 検出能および処理能力

SAMBIS による黒皮棒鋼の探傷結果の一例を Fig. 21 に示す。疵検出は良好に行なわれており、疵信号の記録紙上での信号対雑音比はきわめて高い。雑音は感度を上げて得た部分記録により認められる程度で通常の探傷感度ではほとんど雑音は見られない。Fig. 21 には磁粉探傷の指示

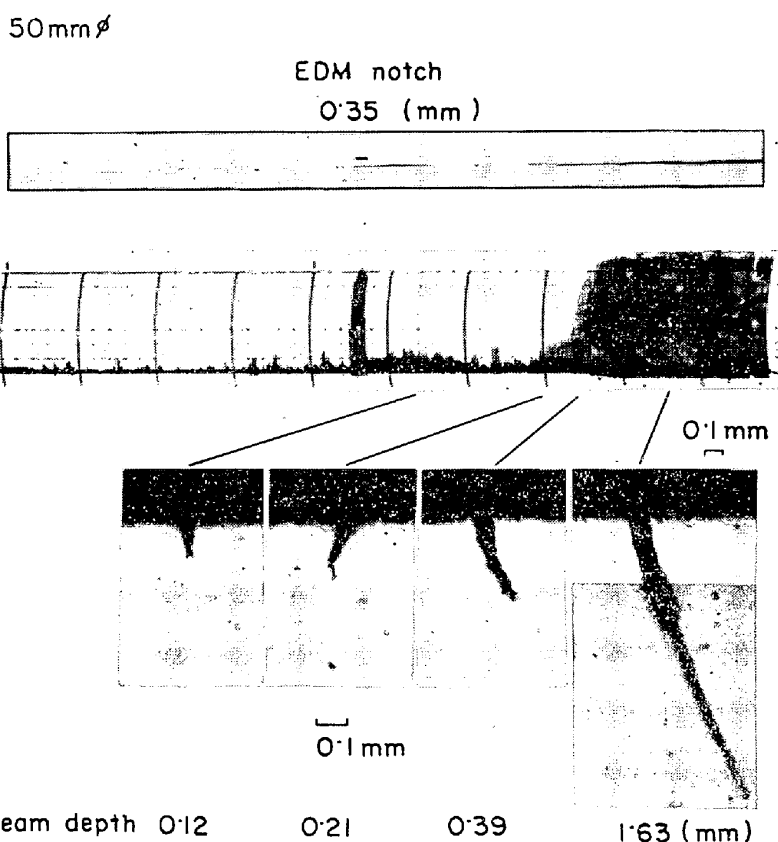


Fig. 21. Recording chart of natural flaws. 模様、疵の断面マイクロ写真も合わせて示してあるが、これを見ると 0.1 mm 深さ以上の疵が S/N よく検出でき、

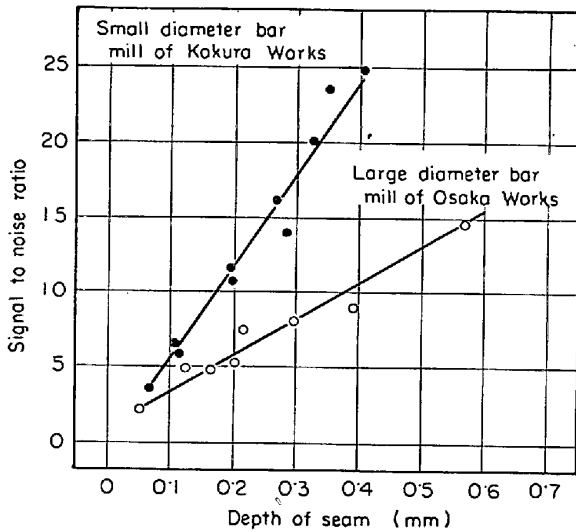


Fig. 22. Signal to noise ratio of seam detection.

Table 4. Capacity of SAMBIS.

Material	Hot rolled round bars		
Diameter	40~100 (mm)		
Inspection			
Diameter (mm)	40~48	50~75	80~100
rpm	200	100	50
Feeding speed (m/min)	24	12	6
Testing speed (m/min)	72	36	18
T/H capacity	22	27	37
Detectable seam depth	Min. 0.10 (mm)		
Detectable seam length	Min. 20 (mm)		

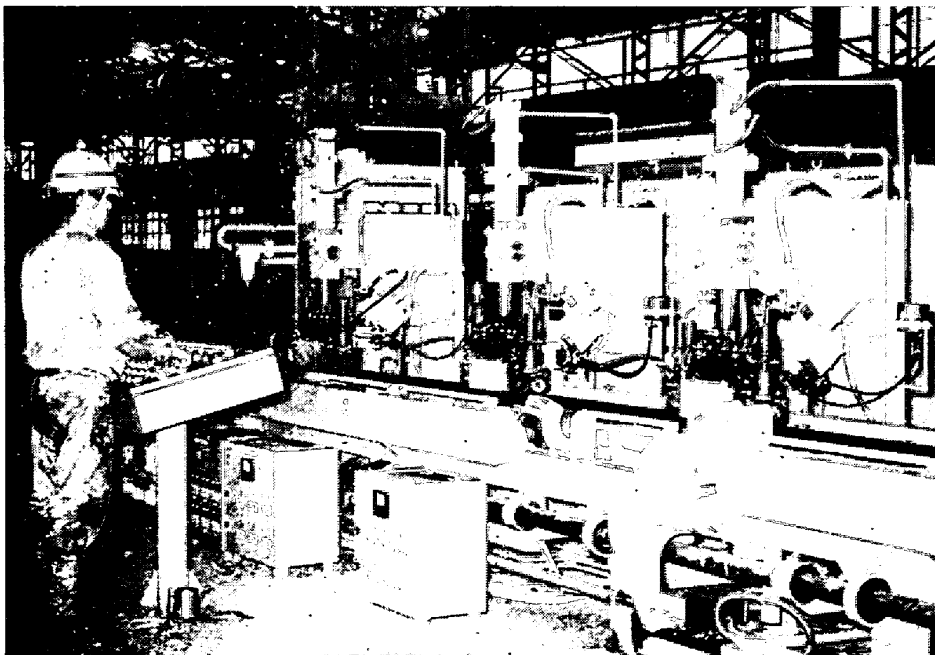


Photo. 1. General view of SAMBIS.

磁粉探傷結果ともよく対応している。疵深さと検出指示の対応もよく、通常磁粉探傷では検出困難な折れ込み疵も明りように検出できることがわかる。探傷記録から疵深さに対する指示の S/N を求めると Fig. 22 に示すようになり、0.1 mm 深さの疵では $S/N \geq 5$ 、0.3 mm 深さの疵については $S/N \geq 9$ がえられる。

処理能力は被検査材寸法により異なるが、平均 $30T/H$ が得られる。Table 4 に SAMBIS の諸元の一覧を、Photo. 1 にはその概観を示した。

3.6 緒論

黒皮棒鋼を対象とし、ホール素子、SMD などの半導体磁気検出子を用いた自動磁気探傷機を開発、製造現場に設置した。

0.1 mm 深さ以上の割れ疵を $S/N \geq 5$ で検出でき、処理能力も平均 $30T/H$ が得られる。軸方向の割れ疵、折れ込み疵の検出が黒皮状態のままでも可能であり、従来の螢光磁粉探傷に十分置き換えうるものである。

4. 結 言

熱間圧延棒鋼の表面疵を黒皮状態で検査する方法を研究、開発した。貫通型渦流探傷では黒皮材の表面粗さに起因する雑音を除去することが重要で、検査コイルを適当に選ぶと同時に信号の周波数解析を位相解析に加えて行なうことにより 0.3 mm 深さの人工欠陥を $S/N \geq 2$ で検出できる。またヘゲ、カブサリ、虫くい、ロール疵などの独立欠陥に有効で従来の目視検査に十分替わりうる。

割れ、折れ込みなどの比較的長い疵の検出を目的とし

て新たに半導体磁気検出子を用いた自動磁気探傷法を開発した。黒皮棒鋼の表面粗さ、曲がり、変形、被検材の転送時の振動などの影響は素子の差動結線、検出ヘッドの追従機構により取り除かれ、0.1 mm 深さの割れ疵を $S/N \geq 5$ 、0.3 mm 深さの割れを $S/N \geq 9$ で検出できる。処理能力は検出すべき最小疵長さや検出子の数（検出ヘッドの数）などで定まる走査ピッチにより変わるが、50 mmφ~100 mmφ を対象として $30T/H$ 程度は容易に得られる。この方法は従来の螢光磁粉探傷に十分替わりうるものである。

この結果から貫通型渦流探傷

法と SAMBIS を併用することにより、独立欠陥および長い割れ欠陥の両方が検出でき、従来行なわれていた目視、磁粉探傷を廃して完全自動検査が行なえ、検査工程の自動化、省力化が実現できる。

文 献

- 1) 渡辺将臣: NDI 資料, No 3241
- 2) 水馬克久: NDI 資料, No 3240
- 3) 渡辺将臣: NDI 資料, No 3270
- 4) 白岩俊男, 広島龍夫: 住友金属, 20 (1968) 3, p. 1~8
- 5) 白岩俊男, 小野通夫, 広島龍夫: 昭和 41 年 NDI

春季大会予稿 II-3

- 6) 加藤之彦, 江口 勇, 野崎善蔵: 鉄と鋼, 52 (1966) 4, p. 162~164
- 7) F. Förster: Förster Report, No 3 (1964)
- 8) 山田敏之: 電気学会雑誌, 89 (1969) 4, 967, p. 13~16
- 9) 白岩俊男, 広島龍夫: 昭和 45 年 NDI 春季大会予稿 III-5
Toshio SHIRAIWA and Tatsuo HIROSHIMA: Proceedings of 6th International Conference on Non-destructive Testing, June, 1970 (Hanover), F-12