

特殊鋼棒線の高精度探傷技術

吉田 三男*・藤沢 淳一*・富田 一臣*・及川 正弘*・橋口 哲朗*

Development of Advanced Nondestructive Technology for Special Steel Round Bars and Wire Rods

Mitsuo YOSHIDA, Junichi FUJISAWA, Kazuomi TOMITA, Masahiro OIKAWA and Tetsuro HASHIGUCHI

Synopsis : Demand for products manufactured by processing wire rods and round bars, particularly automotive parts, has been remarkably increasing. At the same time, requirements for dimensional accuracy and guarantee of surface and inner quality of such parts have become increasingly diversified and severe.

To meet these requirements, Nippon Steel Corporation has developed and put into practice various advanced inspection equipments and techniques for processing of billets, wire rods and round bars under the policy of "user-in" and "parts-in".

In this paper, newly developed inspection methods for eddy current testing and magnetic leakage flux testing are introduced.

The first is miniaturization of probe, suppression of electro-magnetic noise and self-check by signal observation for eddy current testing. The second is reduction of bar-end dead zone for magnetic leakage flux testing.

These new techniques are put into practice inspection equipments for an "automatic finishing line (AFL) for wire rods" and a "finish production inspection system (FPIS) for round bars".

Key words : nondestructive inspection ; sensor ; automation ; bar and wire rod ; wire.

1. 緒言

特殊鋼棒鋼、線材は自動車や産業機械などの構造用や特殊な用途に使用されることが多い。これらは、鍛造加工、熱処理をされ動力を伝達する駆動装置部品、あるいは直接人命にかかわる保安部品である足廻り部品など最も重要な部分に使用されるため、要求される品質特性、品質保証レベルは他用途と比較して極めて厳しい。このような厳しい品質要求に応えるため、特殊鋼棒鋼、線材の非破壊検査は、鉄鋼各社の激しい品質競争と相まって急速に技術改善がなされ、微小なきずまで検出が可能となり、また、自動化技術も急速に進歩してきた。当社においても、徹底したユーザー・イン、パーツ・インの下、中間素材の鋼片から最終製品までの各製造工程において対応を進めてきている。

本稿では、棒鋼、線材最終製品の品質保証用として適用される渦流探傷法及び漏洩磁束探傷法の当社における最近の改善、開発について、現場的ではあるが、実用上重要と考えられる内容について報告する。

2. 線材検査用渦流探傷技術

線材はコイル状に巻かれるため、最終製品での検査が難しく、鋼片段階で検査と手入れが行われるのが一般的であ

るが、品質厳格材については、伸線設備の中で、回転プローブ型渦流探傷機による検査も行われている。

この場合、厳しいものは、0.05mmの深さのきずを全長保証する必要がある、この探傷精度を満足するために実施した技術改善の内容を以下に記述する。

2・1 検出プローブの小型化によるきず検出精度向上^{1)~3)}

従来、回転プローブ型渦流探傷機のプローブとしては、 $\phi 2$ mmの寸法のもが適用されていたが、最厳格材に対しては検出性能が満足できないことが試験の結果わかった。この原因としては、 $\phi 2$ mmのプローブでは探傷エリアが広いため、きず以外の線材表面からの信号を大きく検出してしまい、このため、所定のS/Nが確保できないことが考えられる。そこで、プローブの探傷エリアを小さくしてプローブの分解能を高め、フィルタ処理効果を向上させてノイズを相対的に小さくする目的で、Fig. 1に示すようなプローブ寸法の小型化に取り組んだ。

プローブの構造を詳細に検討し、巻線用コアの形状変更と機械加工の限界への挑戦及び極細線の巻線方法に工夫を重ねて、 1×2 mmに小さくすることが可能となった。その結果、探傷エリアが従来型に比較して約20%小さくなり、Fig. 2に示すように、0.05mm深さのきずに対して、従来S/N=2であったものをS/N=3にまで1.5倍向上することができた。

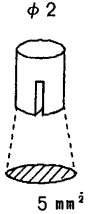
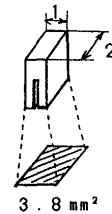
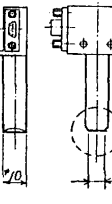
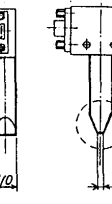
	Conventional	Newly developed
Probe core size	$\phi 2$ mm	1×2 mm
Shape of probe core		
Shape of probe		
Detectability of surface defect	0.07mm at S/N ≥ 3	0.05mm at S/N ≥ 3

Fig. 1. Development of probe. (Downsizing of probe.)

2・2 スリーブの絶縁化による電気ノイズの抑制⁴⁾

Fig. 3 に回転プローブ型渦流探傷機の概要図を示すが、探傷機内部には、線材とプローブとの接触を防止するために金属スリーブが装着されている。このスリーブに線材が接触すると、インパルス状のノイズが発生し、これがきず信号として誤検出されることがあるため、実用上大きな問題であった。この原因は、線材がスリーブに接触すると、線材と探傷機とがスリーブを介して電氣的に導通状態となり、線材の搬送用駆動源または同近傍の電源アースから線材への電氣的ループが形成され、これによって発生する電磁誘

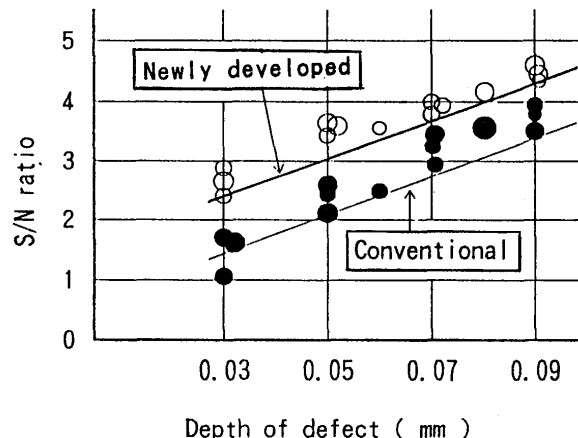


Fig. 2. Detecting capacity of probe.

導現象をプローブが検出するためと考えられる。

このため、Fig. 4 に示すように、線材がスリーブに接触しても導通状態とならないように、スリーブ内に電気絶縁体をはさんでスリーブの電氣的絶縁状態を確保する対策を実施した。この結果、Fig. 5 に示すように、伸線機などの作業設備からの外乱を受けることのない安定した探傷性能を発揮することができた。

2・3 探傷波形モニタリングによる異常検出⁵⁾

探傷精度の高位安定のためには、線材とプローブとのクリアランスをできるだけ小さくする必要があり、通常0.4mm程の小さなクリアランスを維持して実用している。ところが、伸線線材に振動があったり、伸線ダイス用潤滑剤が線材表面に密着して探傷機へ巻き込まれると、プローブを損傷する危険がある。これを防止するために、伸線の振動防止などの機械的な対策は種々行われているが、充分な状態にはない。

このため、探傷機の対策として、探傷信号をモニタリングし、探傷信号の時間的な推移から異常を瞬時に検出する方法を考案し、実用化した。その検出方法の内容をFig. 6 に

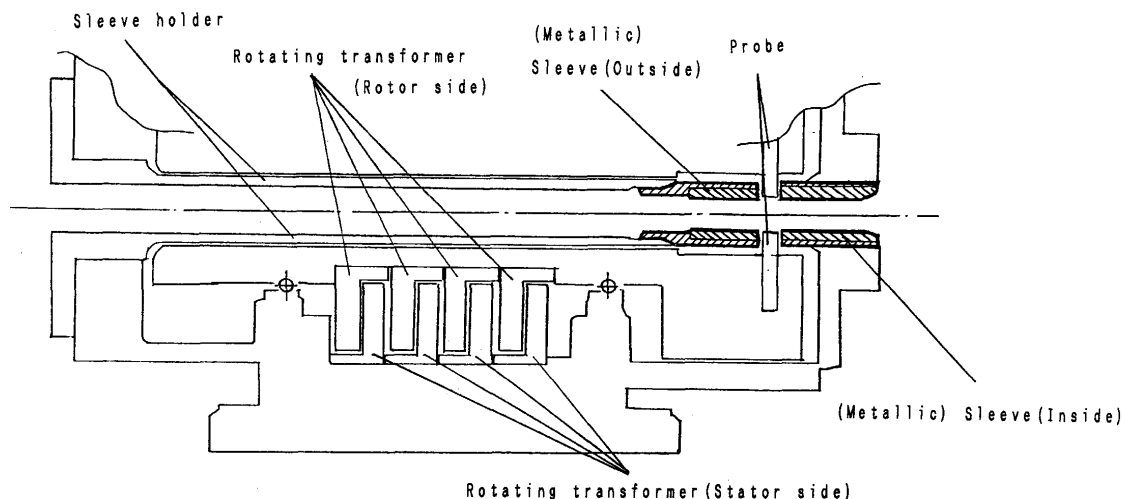


Fig. 3. Configuration of an eddy current tester. (A sectional plan)

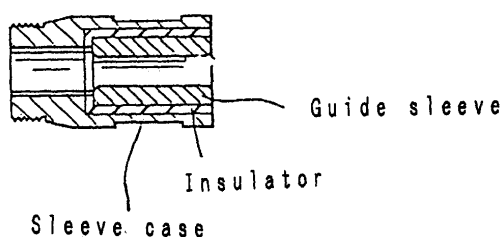


Fig. 4. Configuration of sleeve.



(a) Signal chart of ECT used conventional sleeve.



(b) Signal chart of ECT used insulator sleeve.

Fig. 5. Effect of insulator sleeve.

基づいて以下に説明する。

①探傷信号のベース値と平均値の組み合わせによる異常検出
全プローブについて探傷信号のベースレベルをチェックし、これが設定したしきい値を下回るときに異常と判断する方法を基本とするが、これだけでは、線材の表面状況が良くノイズベースが小さくなるときなど、探傷機能が正常でも、異常と判断してしまう危険性がある。

このため、さらに、全プローブの信号レベルの平均値をリアルタイムで演算し、平均値以下になったプローブからの信号が異常であるとする判断を組み合わせることにより、最終的な異常判断を行う。

②距離感度補正(Automatic Gain Control)信号の最大、最小値による異常検出

AGC信号についても、設定したレベルを下回るときに機能が動作していないとする方法が異常を判断するための情報源となるが、逆に、AGCが大きくなりすぎるケースもあり、この場合は、異常判断ができない。

これに対しては、AGC信号の最大値についても判定レベルを設定し、この値を上回るときに異常とする判断を組み合わせ、最終判断を行っている。

3. 棒鋼検査用漏洩磁束探傷技術

棒鋼製品の検査は、回転プローブ型漏洩磁束探傷法が多用されている。この場合、棒鋼の先端部とその直後の区域、後端部とその直前の区域に端末効果による検査できない区域(端末不感帯)が発生し、特に先端部の不感帯は大きいため、従来から問題とされていた。この問題に対して、端末不感帯の発生原因を解明し、不感帯を短縮するための技術改善を行ったので、以下内容を記述する。

3・1 端末不感帯の発生状況

Fig. 7 (A)は、ステンレス鋼管径 $\phi 19.0\text{mm}$ の先端から各々30mm毎の間隔に深さ0.5mm、開口径 $\phi 2.0\text{mm}$ のドリル穴を3個(W_{3-1} , W_{3-2} , W_{3-3})加工したステンレス鋼管 M_3 を示しており、Fig. 7 (B), (C), (D)及び(E)は、(A)のステンレス鋼管 M_3 を速度約80m/minで探傷記録した場合の種々の電気信号波形を示している。

Function	Example of working signal
Observation of working minimum signal	
Observation of working average signal	
Observation of AGC minimum signal	
Observation of AGC maximum signal	

Fig. 6. Self-check function of an eddy current tester.

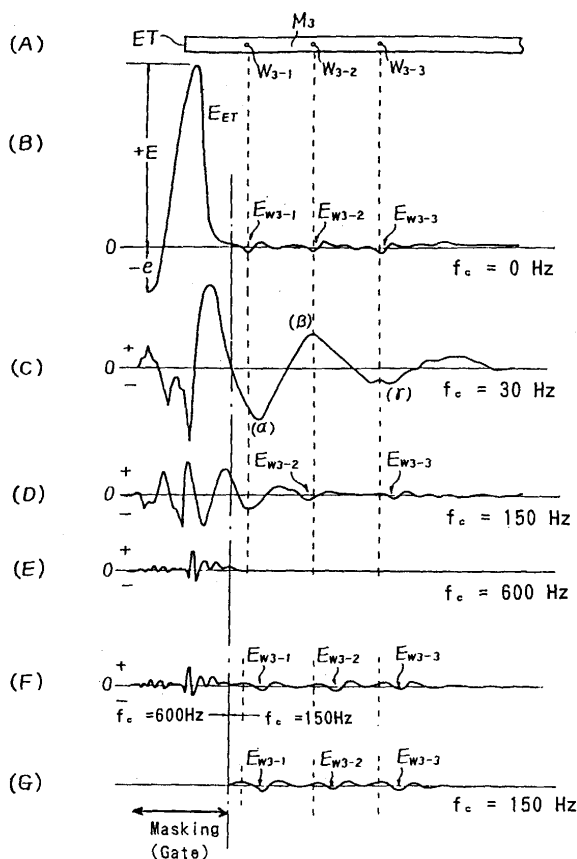


Fig. 7. Detecting signal of bar-end and surface defect.

(B)は、位相検波出力波形を示しており、(C)、(D)及び(E)は、高域通過フィルタの出力波形を、その遮断周波数 f_c を変えた場合についてそれぞれ示している。

(B)の波形において、ステンレス鋼管 M_3 の先端ETが差動コイルの直下を通過したときに末端効果信号(以下末端信号) E_{ET} は、振幅が非常に大きな単極性のパルス状信号となり、一方、きず信号は、 E_{W3-1} 、 E_{W3-2} 、 E_{W3-3} に示すように、両極性の1サイクルの信号となる。Fig. 8に、これら末端信号 E_{ET} ときず信号(E_{W3-1} 、 E_{W3-2} 、 E_{W3-3})の周波数エネルギースペクトルを示すが、末端信号は直流を含む連続スペクトルであるのに対して、きず信号はその周波数エネルギースペクトルに直流成分を含んでいないことがわかる。

Fig. 7 (B)に示す末端信号 E_{ET} には、直流成分が含まれるため、バンドパスフィルタを構成する高域通過フィルタを通過すると、その高域通過フィルタの遮断周波数で過渡振動現象が発生する。Fig. 7 (C)の $f_c = 30\text{Hz}$ では、末端信号の過渡振動現象 α 、 β 、 γ のため、きず信号は全く消失している。また、(D)の $f_c = 150\text{Hz}$ では、末端信号の振幅は小さく、過渡現象周期も短くなるため、きず信号 E_{W3-2} 、 E_{W3-3} が認められる。しかし、きず信号 E_{W3-1} は、末端信号の減衰振動継続期間内に吸収隠蔽されるため検出できない。

更に、(E)の $f_c = 600\text{Hz}$ では、末端信号の振幅は非常に小さくなり、過渡現象による振動継続期間も小さくなるが、きず信号 E_{W3-1} 、 E_{W3-2} 、 E_{W3-3} のいずれも消失してしまう。

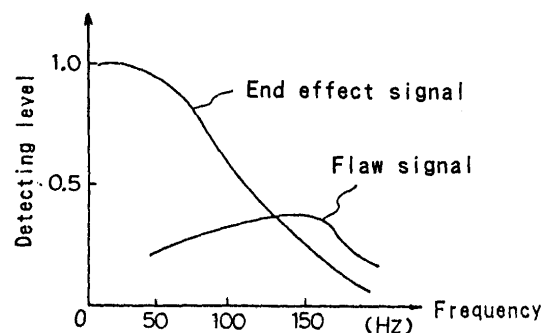


Fig. 8. Power spectrum of bar-end signal and defect signal.

このように、末端信号の振幅相対値がきず信号に比べて大きいこと及びエネルギー分布に共通重複部が存在するために、末端信号ときず信号を周波数弁別することには無理があり、従って、きず信号の検出感度を低下させずに末端不感帯の長さを短縮することは困難であった。

3・2 末端不感帯短縮方法の原理

このような問題を解決する方法として、周波数フィルタ切り替え方法に着目した。これは、非探傷領域である不感帯では、きず信号も含めて減衰させるような高域通過フィルタを用い、探傷領域では、きず信号の弁別に最適な高域通過フィルタを用いたものである。

つまり、Fig. 7 (A)から(E)に示す前述の現象をふまえて、Fig. 7 (F)の合成波形に示すように、末端信号検出時には、高域通過フィルタの遮断周波数を高く($f_c = 600\text{Hz}$)して末端信号をマスキングし、きず信号処理時には低く($f_c = 150\text{Hz}$)することにより、Fig. 7 (G)に示すように、末端不感帯の長さを短縮して、しかもきず信号の感度を上げることができる。

なお、高域フィルタの切り替えは、探傷領域を示す信号である探傷ゲートで行い、また、このような目的の高域通過フィルタは、信号処理の前段である位相検波直後に配置するのが効果が高い。

3・3 可変高域通過フィルタ技術の実用

Fig. 9は、前述の方法を回転プローブ型漏洩磁束探傷機に実用した信号処理回路のブロック図を示す。

プローブで検出された信号は、増幅された後、位相検波器により位相検波され、位相検波器の出力は、可変高域通過フィルタに入力される。可変高域通過フィルタは、探傷ゲート発生出力回路からのゲート信号によって、可変高域通過フィルタ内の遮断周波数及び遮断特性が切り替わるように構成される。

次に、非探傷中と探傷中の各々の遮断周波数は以下のよう決定した。

Fig.10は、棒鋼径 $\phi 19.0\text{mm}$ 、軸方向に放電加工された人工きず寸法が深さ 0.15mm 、開口幅 0.1mm を用いて探傷し、高域通過フィルタの遮断周波数を変えたときの信号振幅 S と

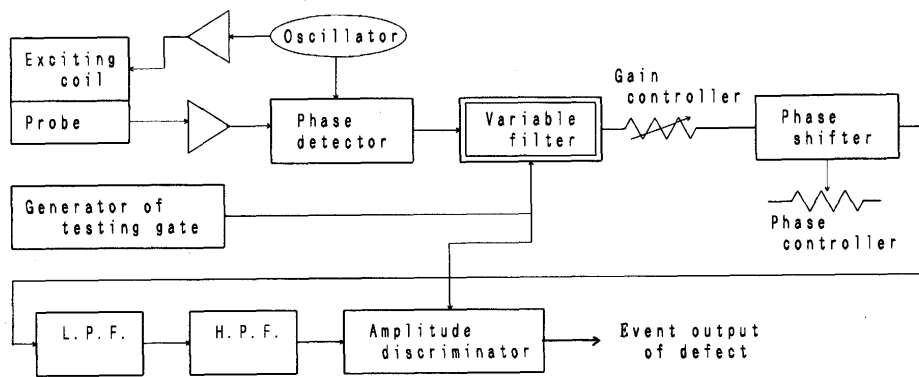


Fig. 9. Block diagram of signal detecting circuit.

きず以外の雑音信号振幅 N 及び両者の比 S/N について試験した結果である。高域通過フィルタの遮断周波数が 50Hz のとき、 $S/N \approx 3$ で遮断周波数の上昇と共に S/N が向上することが示されている。

一方、Fig.11は、低域通過フィルタの遮断周波数を変えたときの S/N の変化の試験結果であり、この場合には、周波数を高めても S/N が向上しないことが示されている。従って、Fig.10, Fig.11から、高域通過フィルタの遮断周波数は、 $100\text{Hz} \sim 200\text{Hz}$ の範囲内、低域通過フィルタの遮断周波数の

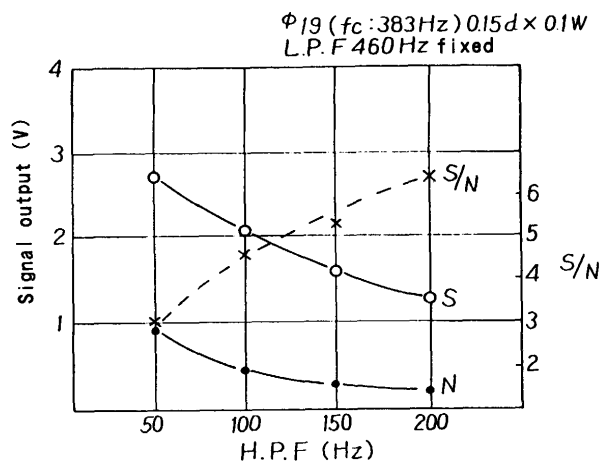


Fig. 10. Relations between signal output and H.P.F.

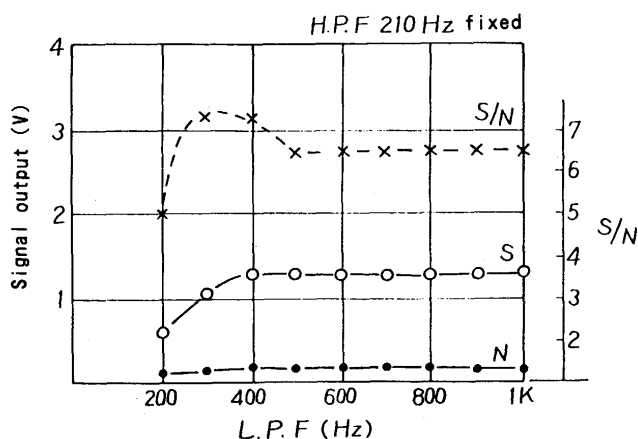


Fig. 11. Relations between signal output and L.P.F.

上限は、 $400\text{Hz} \sim 600\text{Hz}$ 程度の範囲内が良く、且つ、Fig. 8に示す末端信号のエネルギースペクトル分布はきず信号に比べて高域成分が少ないことを考え合わせて、次のことがいえる。

①末端信号の低周波成分は、きず信号の S/N 向上や低下の傾向から類推して、 $400\text{Hz} \sim 600\text{Hz}$ 以下を高域通過フィルタで遮断すれば、きず信号も含めて減衰させられる。

②きず信号を忠実に且つ S/N を良く通過させるための高域通過フィルタの遮断周波数は $100\text{Hz} \sim 200\text{Hz}$ 程度とすれば良い。

このことから、非探傷中は、末端信号、きず信号とも通過させないように、その遮断周波数を 10000Hz 以上とし、探傷中の遮断周波数は 150Hz とした。

3・4 端末不感帯の短縮効果

高域通過フィルタの遮断周波数切り替え方法による端末不感帯の短縮効果を以下に示す。

Fig.12は、従来の検出波形を示す。

Fig.12において(A)は先端ET及び後端EBを有し且つ先端ET近くに人工きず W_3 を有する棒鋼 M_3 を、(B)は位相検波

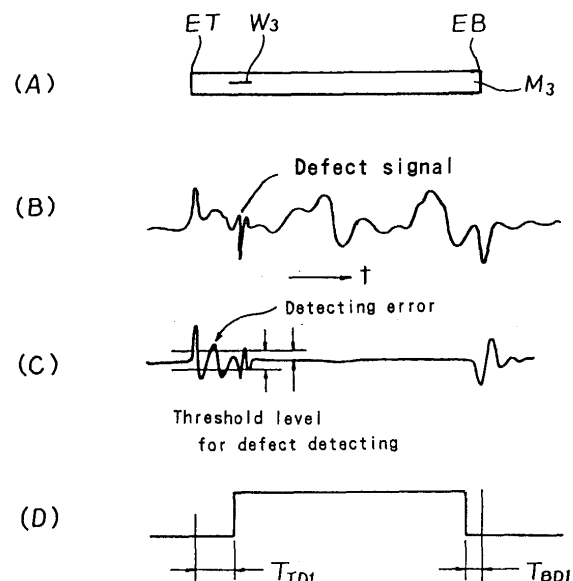


Fig. 12. Signal detecting by conventional method.

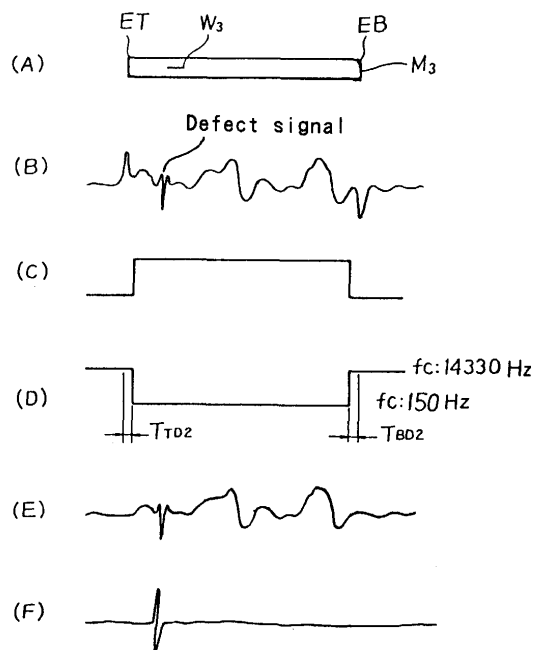


Fig. 13. Signal detecting by newly developed method.

後の出力波形を、(C)は振幅弁別器の入力波形を、(D)は探傷ゲート発生信号を示す。(B)の位相検波出力波形の先端末端信号には、低周波、特に直流信号を含んでいるため、これが高域通過フィルタを通過するときに生ずる過渡現象(リングング)によって(C)に示す波形のように、振幅弁別器の入力波形には、先端末端信号の直後に誤動作要因の振動波形が見られる。この擬似波形を回避するためには、(D)に示すように探傷ゲートの発生信号を遅らせる(T_{DD1} の時間を長く設定)必要があり、端末不感帯を小さくすることができなかった。

これに対し、Fig.13は、可変高域通過フィルタを備えたときの検出波形を示す。Fig.13(A)、(B)はFig.12(A)、(B)と同様、被検査材と位相検波器の出力波形を示す。Fig.13(C)は探傷ゲート発生出力回路からの探傷ゲート信号の波形を、(D)は可変高域通過フィルタの遮断周波数の切り替えを、(E)は可変高域通過フィルタの出力波形を、(F)は低域通過フィルタ及び高域通過フィルタを通した振幅弁別器への入力波形を各々示す。

Fig.13(C)に示す探傷ゲートと同期して機能する可変高域

Table 1. Main specifications of Automatic finishing line and an eddy current tester.

Item	Specification
Automatic finishing line	
• Rod size (mm)	$\phi 5.5 \sim \phi 12.0$
• Coil weight (ton)	2.5
• Finishing speed (m/min)	130
• Number of lines installed	2
• Finishing capacity (t/month)	2,000
Eddy current tester	
• Rod size (mm)	$\phi 5.0 \sim \phi 25.0$
• Inspection speed (m/min)	Max. 160
• Detectability of surface defect (mm)	0.05
• Rotating speed of probes (rpm)	8,000
• Number of probe	8
• Control function of shaving system	• Conditioning longitudinal and circumferential position of flaws • Conditioning length and depth of flaws

通過フィルタの遮断周波数を、(D)に示すように非探傷中は $f_c = 14,330\text{Hz}$ 、探傷中は $f_c = 150\text{Hz}$ に切り替えることにより、(B)の位相検波出力波形の先端末端信号は抑制されて、(E)に示す波形出力が得られる。この信号には、先端末端の直流信号が含まれないため、どのような高域通過フィルタ通過後でも過渡現象を生じることがない。この結果、探傷ゲート発生信号の遅延時間を小さく($T_{DD2} < T_{DD1}$)でき、従来より端末不感帯を短縮して且つ(F)に示すバンドパスフィルタ後のS/Nの良い波形を検出することが可能となる。

実績としては、端末不感帯を従来の約3分の1に減少することができた。

4. 棒線探傷設備の実用化

4・1 設備の内容

当社で実用化した「線材用品質保証設備」⁶⁾⁷⁾及び「棒鋼用品質保証設備」^{8)~10)}の設備内容について紹介する。

「線材用品質保証設備」のレイアウトと主仕様をFig.14とTable 1に示す。回転プローブ型渦流探傷機は、手入れ装置と共に、2つの伸線用ダイス間に設置され、130m/minの高速伸線中に検査と手入れが行われる。

また、「棒鋼用品質保証設備」のレイアウトと主仕様をFig.

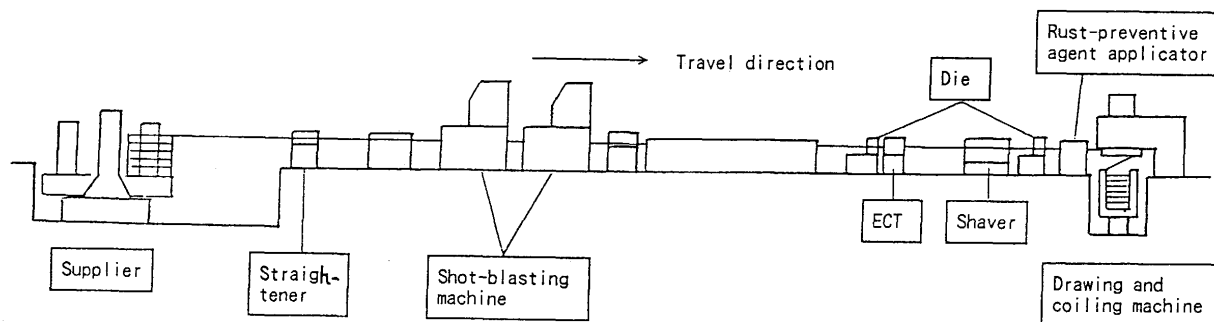


Fig. 14. Layout of automatic finishing line.

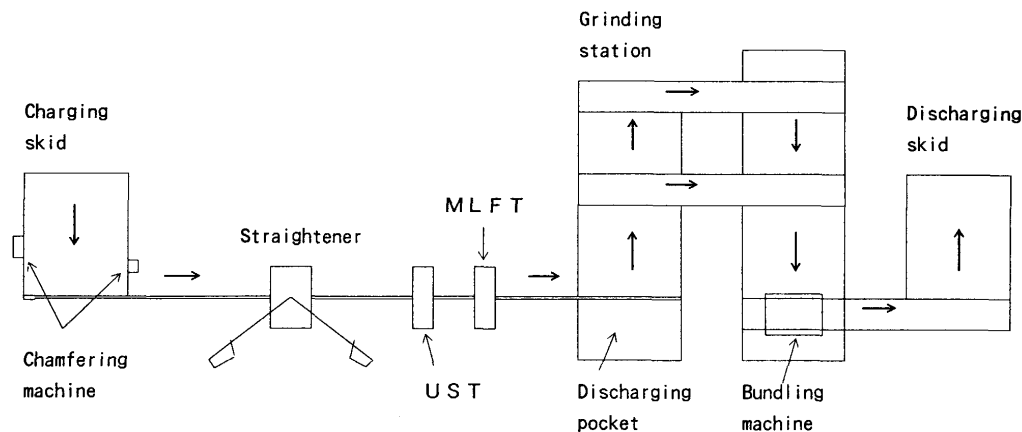


Fig. 15. Layout of finish product inspection system.

Table 2. Main specifications of Finish product inspection system, a magnetic leakage flux tester and a ultrasonic tester.

Item	Specification
Finish product inspection system	
• Steel round bars	
Rod size (mm)	$\phi 19.0 \sim \phi 80.0$
Rod length (m)	3.5 ~ 8.0
Rod bend	$\leq 1\text{mm/m}$, $\leq 3\text{mm}$ /total length
Surface	As straightener
Temperature (°C)	≤ 60
• Transfer speed (m/min)	Max. 80
• Capacity (t/month)	13,000
Magnetic leakage flux tester	
• Rod size (mm)	$\phi 19.0 \sim \phi 80.0$
• Inspection speed (m/min)	Max. 80
• Detectability of surface defect (mm)	0.2
• Rotating speed of probes (rpm)	Max. 925
• Number of probe (channel)	9ch/head $\times$ 2 head = 18
• Inspection frequency (KHz)	8
• Paint marking (channel)	16
Ultrasonic tester	
• Round bar size (mm)	$\phi 19.0 \sim \phi 80.0$
• Inspection speed (m/min)	Max. 80
• Detectability of inner defect (mm)	$\phi 0.3$
• Rotating speed of probes (rpm)	Max. 2,000
• Number of probe (channel)	Normal probe 5, Angular probe 10
• Inspection frequency (MHz)	Normal probe 7, Angular probe 5

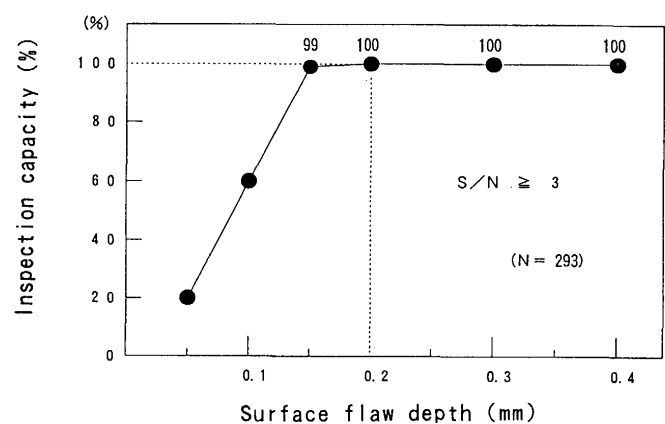


Fig. 16. Inspection capacity of surface defect by MLFT.

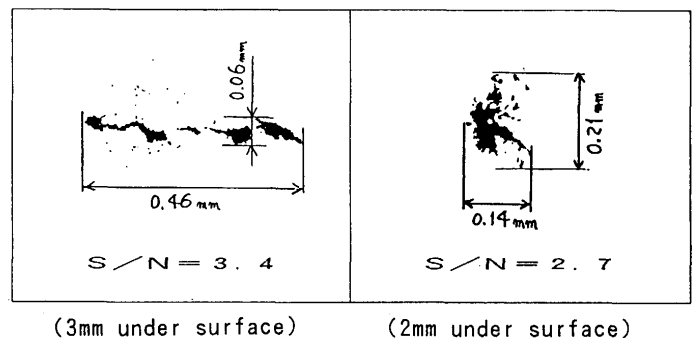


Fig. 17. Detecting example of inner defect by UST.

15とTable 2に示す。本設備では、棒鋼は端面処理と矯正された後、回転プローブ型漏洩磁束探傷機と超音波探傷機により表面と内質が検査される。検出性能は、Fig.16とFig.17に示すように、表面きずは0.2mm深さ以上を $S/N \geq 3$ で100%、内質欠陥はC断面で $0.15 \times 0.2\text{mm}$ クラスの微小な欠陥まで検出している。

4・2 設備の特徴

「線材用品質保証設備」の回転プローブ型渦流探傷機については、前述のプローブ小型化によって S/N を向上させる一方で、プローブ小型化による処理能力低下をプローブの高速回転と円周上に多数(8プローブ)配置した新設計の回転機構として改善し、高速伸線ラインに適応する装置としている。

また、「棒鋼用品質保証設備」の回転プローブ型漏洩磁束探傷機については、棒鋼の進行に伴って、縦に並んだプローブの各信号系統毎に探傷ゲートを制御する従来技術に加えて、前述の可変高域通過フィルタの実用により、端部不感帯を大幅に短縮化している。

さらに、下記システム設計を両設備に反映して、自動化設備として実用性の高いものとしている。

①各種データ集約機能の充実による検査結果の速やかな製造工程へのフィードバック

②ピーストラッキングによる異材混入の防止

5. まとめ

特殊棒線に対する探傷技術の最近の開発の一例を述べた。当社は、棒線の品質保証技術の研究開発に広く取り組んでおり、着実に成果を生み出している。今後、益々多様化、高度化する品質要求ニーズに対して、中間素材から製品への一貫製造工程の中で最適解を見いだしていくことが重要である。今後も、加工メーカ、最終製品ユーザーとの連携も密にして、より一層の開発推進を図っていきたい。

文 献

- 1) 小崎巧三, 吉田三男, 富田一臣, 及川正弘, 大山 修, 伴野俊夫, 阿閉信雄: 材料とプロセス, 3(1990), p.1262
- 2) 新日本製鉄(株)(私信)1991年4月
- 3) 富田一臣, 小崎巧三, 吉田三男, 及川正弘, 伴野俊夫: 鉄と鋼, 78(1992), T53
- 4) 実願平1-93796
- 5) 実願平3-21046
- 6) 三浦展義, 梨本勝宣, 及川正弘, 吉田三男, 福間博道, 三木武司, 片山 昌, 館山道昭, 橋村雅之, 落合征雄: 新日鉄技報, (1992)343, p.48
- 7) 梨本勝宣, 大庭哲也, 及川正弘, 伴野俊夫, 吉田三男, 川畑輝夫, 上田登侑: 材料とプロセス, 3(1990), p.1440
- 8) 新日本製鉄(株)(私信)1991年9月
- 9) 藤沢淳一, 小崎巧三, 吉田三男, 橋口哲朗: 平成3年電気学会産業応用部門全国大会, (1991)
- 10) 新日本製鉄(株)(私信)1991年10月