

© 1984 ISI<sup>†</sup>

## 非 破 壊 検 査



松 山 宏\*

## Non-destructive Inspection

Hiroshi MATSUYAMA

## 1. ま え が き

今日の我々の社会は、高層建築・長大橋・高速交通機関などで代表される鋼構造設備から、多くの便益を得ている。しかしこれらの設備が、ひとたび破壊したり、その機能を失うと、経済的、社会的な損失は莫大となることは、既に多くの例が示している。したがって、これらの設備を使用する側に立てば、これらの諸設備が、常に健全に稼働することを要求するのは当然のことであり、これら諸設備の素材に対しても、その品質の保証を強く求めるのも当然である。

鋼製品の品質を保証するためには、原材料・設計・製鋼・圧延など、最終製品に至る各プロセスの管理が大切であることはもちろんであるが、それらの管理の結果は、最終製品の品質のみにより表される。このため、最終製品の品質検査は、品質保証のプログラムの中でも特に重要視されている。

製品の品質検査には、機械的、化学的品質と製品中の欠陥の有無を調べる検査がある。前者は、ひとつのロットの中で変わることはまれであるから抜取り検査によりその目的を達することができよう。しかし後者は、製品の各々によつて異なるのが普通であり、全数検査が必要とされている。そこで後者の検査には非破壊検査が適用される。

## 2. 鋼製品と非破壊検査法

非破壊検査の方法には、放射線透過試験、超音波探傷試験、磁気探傷試験、電磁誘導探傷試験（渦流探傷試験とも呼ばれる）、光学的探傷試験、浸透探傷試験など、種々の方法がある。しかしながら、今日の鋼製品の製造ラインでは、主に超音波探傷試験、渦流探傷試験、磁気探傷試験などの各方法が、単独で、または2種類以上の方法が組み合わされて使用されている。その理由としては、特に重視される欠陥（応力の集中しやすい欠陥）などに対する検出能力が高いこと、自動装置により、製造ラインの速度との適合性が得やすいこと、消耗性部品が

少なく経済性にも優れていることなどをあげることができよう。

これらの探傷方法の外に、最近になつてレーザ光を用いて表面疵を検出する方法も開発されたが、これは欠陥検出能力の高いことという理由もあるが、この外に、他の自動探傷方法と同じ理由によると言えよう。

非破壊検査の場合、その探傷方法により、試験の結果が必ずしも一致しない例がある。すなわちある方法では無欠陥との判定結果が出て、また他の方法で探傷すれば欠陥を検出することができる場合がある。そこで検出しようとする欠陥の性状がよほど明確になつている場合や、他に適当な探傷方法がない場合を除いては、一種類の製品の検査に複数の検査方法が適用されるのが一般的となつている。

## 3. 非破壊検査の自動化

## 3.1 自動化の必要性

初期の非破壊検査は、各方法とも装置の操作や、その結果の観察および試験結果の判断は人手によつて行われていた。このような検査のやり方では、検査の処理能力が低く、生産能力と一致せず、生産上の阻害要因となつていた。このため、より高い検査の処理能力が要求されるようになった。今日要求されている検査の処理能力を仮に人手による試験により満足させようとするれば、厚鋼板のように、形状が比較的簡単なものであつても、約百人の試験要員が必要であり、更に検査員や、これらの人々の技術教育、健康管理などの管理業務に携わる人員と、試験/検査のための場所の環境整備や資産的評価などを勘案すれば、莫大な検査費用が発生し、製品の価格に影響を与えることは容易に推察できるのである。更に鋼管のように複雑な形状で検査の項目も多い（例えば内外表面の欠陥、内質部の欠陥、管肉の厚さ測定など）と、もはや人手による製品の全数検査は不可能と結論づけることができよう。

一方、仮に多くの試験員により試験が行われたとしても、各々の試験員の当日の健康状態をはじめとして、探

昭和 58 年 11 月 14 日受付 (Received Nov. 14, 1983) (依頼解説)

\* 三菱電機(株)鎌倉製作所 (Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corp., 325 Kamimachiya Kamakura 247)

傷装置の校正や、試験結果の判定など、多岐にわたる管理は困難となり、試験/検査の結果に個人差が混入し、これらの結果の信頼性の確保を難しくすると共に、品質保証のプログラム上、不可欠なトレーサビリティ (Traceability) を確保することもできなくなるのである。このような理由の外に、危険の防止、省力化などの理由もあげることができよう。

### 3.2 自動探傷装置の具備すべき性能

上述のように、経済性、生産性、品質保証上の問題などの点から自動化された探傷装置の開発が促進された。しかし初期の頃の自動探傷装置は、従来からある人手で操作するための装置かそれを若干改良した探傷器と、検出器 (トランスジューサとも呼ぶ) を被検査材へ自動的に接材したり、また離材し、自動的に被検査材を搬送するなどの、自動的に制御される機械装置との組み合わせであった。このような自動探傷装置でも、人手による検査の処理能力と比較すれば、格段の改善は見られはしたものの、装置の校正、探傷条件の設定、探傷データの処理、保守などに人手を要したため、装置の規模が大きくなると共に、多くの人員が必要となり、前述のような人手による探傷試験と同様の問題が生じたり、この自動探傷装置の操作員に大きな負荷を与えることになった。このため、自ずから装置の規模は制限された。また自動探傷装置が使用される場所では、クレーンや搬送設備なども稼働しており、これらの設備から発生する電気雑音により、誤動作や、誤判定を起こすこともまれではなかったため、探傷/検査に関する信頼性は十分とは言えない状況であった。

このような能力の自動探傷装置では、製品の品質保証用としての役割をはたすに至らず、工場内の品質管理用として活用されるに止まった。

その後、生産技術の進歩により、製品中の欠陥存在確率が低下し、探傷装置 (手段を含む) の健全性を、欠陥を検出することにより証明することは、ほぼ不可能となり、自動的に自己を点検する機能に関する考察がおこった。また製品のラインを流れる速さも早くなり、人手の探傷の場合と比較して、検出器の走査速度で十倍から百倍に、一方探傷試験の結果を判断するために許される時間は百分の一から千分の一となつたため、単位時間内に自動探傷装置が得られる探傷情報は、従来の人手の探傷と比較して一万分の一以下となつた。しかも人手による探傷と異なり、探傷は普通一回のみである。このような条件で人手による探傷と同じか、またはそれ以上の高い信頼性を有する検査結果を得るためには、従来の人手による探傷装置の流用ではなく、自動探傷装置専用の機能を有する探傷器が必要であると考えられるようになった。

このような考察により、従来人手により使用されていた探傷装置とは内容を全く異にする自動探傷装置専用の

探傷器の開発が始められ、探傷技術の進歩と、電子回路・部品技術や電子計算機の利用技術の進歩に支えられて、今日の自動探傷装置は育つた。

このような装置では、デジタル技術が各部分にとり入れられ、信号処理用にランダム雑音を大幅に軽減できる A/D 変換器や、水晶発振器による信号周波数やゲート回路の制御方法が開発された。また外部から供給される純電子の信号により、探傷条件などを自由に制御できる機能が開発されたため、生産ライン制御用のコンピュータとの結合も容易となり、非破壊検査のオンライン化が名実共に実現するようになった。

この装置は次のような特徴を有している。

(1) 校正、バランス、探傷条件の設定、探傷データの処理が完全に自動化されていて、人為的誤差の混入がない。

(2) 外来電気雑音による誤動作防止のための積極的対策が採られるようになり、外来電気雑音の心配がほとんどない。

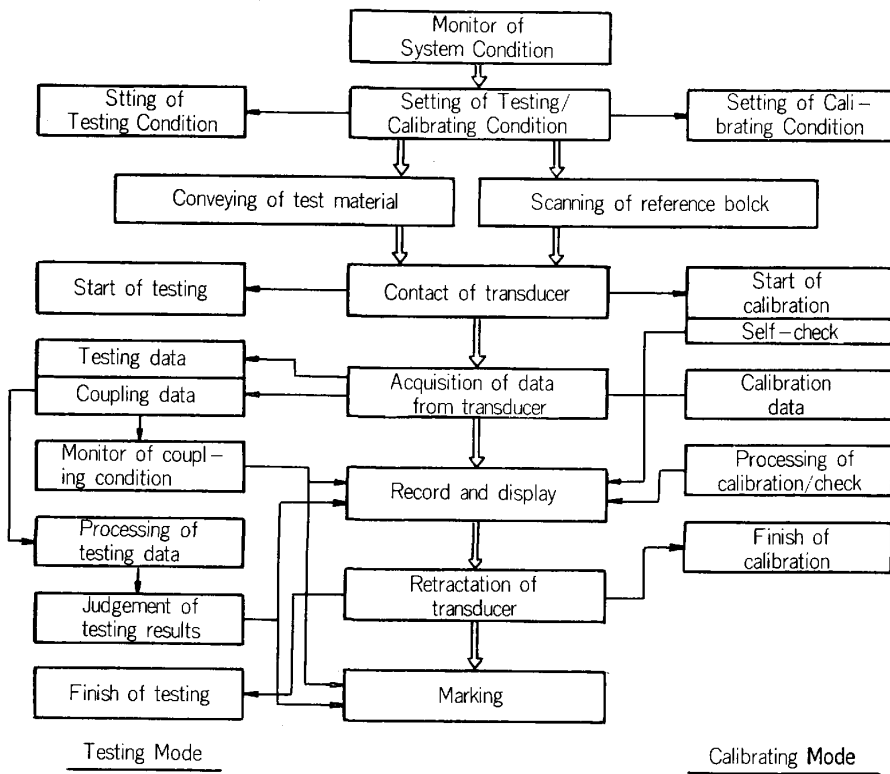
(3) 擬似信号などによる自動自己点検機能が具備されたので、仮に装置内部に故障が発生しても、自動的に、その個所や理由が表示される。この機能のため探傷装置が不健全状態のままでも試験を続行することがなくなると共に、大規模装置では保守が容易となり、稼働率が向上する。

(4) 被検査材の搬送制御と探傷装置の動作制御が密接に連携して、安全性の高い探傷システムが構成されている。

(5) 探傷結果や校正結果の記録や、被検査材へのマーキングが完全に自動化されている。

以上述べた特徴を考慮しつつ、自動探傷装置の動作の流れを示せば Fig. 1 のようになる。

これらの機能を自動探傷装置が具備した結果、非破壊検査の結果の信頼性を低下させる要因が取り除かれたことと、検査結果にトレーサビリティが得られるようになったために、製品の品質保証用として広く使用されるようになった。またこれらの装置は原則として、一人の運転者で運転でき、自動自己点検機能とあいまつて、装置の大形化を阻害する要因がなくなつたため、高速・大規模化が近年特に顕著となつてきた。中径鋼管用の探触子回転式自動超音波探傷装置では、探触子 (またはトランスジューサと呼ぶ) の被検査材の表面での走査速度は 8 m/s 以上となり、この速度は超音波が被検査材中を伝播する時間や、探傷データの処理時間を考慮すれば、限界に近い速度と言えよう。また鋼板用の渦流探傷装置や超音波探傷装置では、数百個のトランスジューサと、これらと組み合わせられる送信器、発振器、受信増幅器などが同数使用されており、一基の装置で数万個の IC が使用されるようになった。このような装置では、運用上の信頼性の観点から限界に近い大規模な装置と言えよう。



(電気学会雑誌, 100 (1980), p. 584 より)  
 Fig. 1. Operation flow of fully automatic non-destructive testing system.

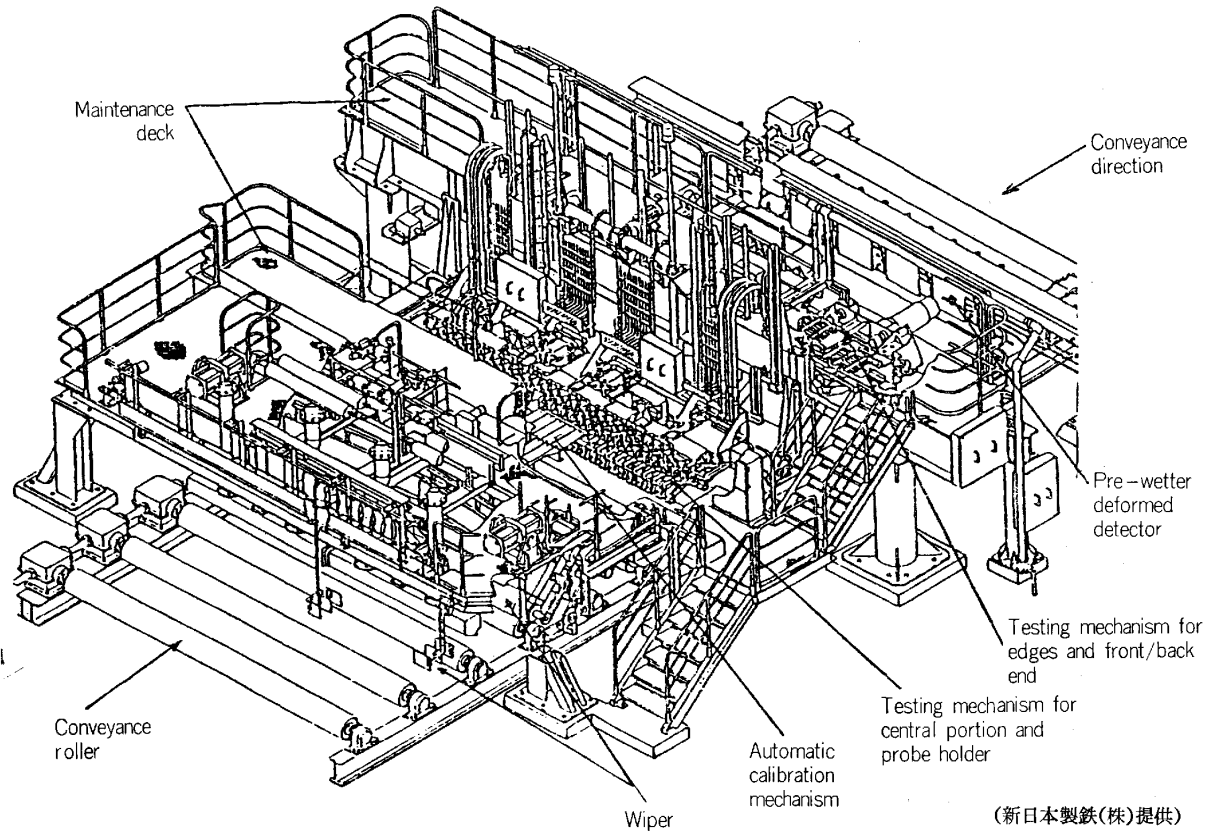


Fig. 2. Illustration of automatic ultrasonic testing mechanism for heavy plate.

#### 4. 自動探傷装置の実例

製鋼分野では、比較的規模の大きい自動探傷装置が多く使用されている。これらの装置は、それぞれの探傷技術はもちろんのこと、機械、油圧/空圧制御、サーボ制御、電子技術、コンピュータなどの技術が駆使しており、正に現代の総合技術の上に成り立っていると見えよう。また、同じ種類の被検査材であっても、製造ラインの構成や顧客側の要求内容によつて自動探傷装置の設置場所、探傷方法、装置の構成、データ処理の内容などが異なる。従つて、これらの実例をすべて紹介することは紙面の都合で不可能である。各探傷方法について代表的な例についてのみ紹介する。

##### 4.1 超音波自動探傷装置

製鋼法に連続鋳造法が採用される以前は、鋼製品中の欠陥は比較的寸法の大きいラミネーションやパイプなどであった。しかし連続鋳造法が採用されてからは、製品中の欠陥が微細となり、しかも散在するようになったため、超音波探傷法で被検査材の内部を全面的に検査する必要が生じた。また内部の検査は超音波探傷法だけが可能であるため、ほとんどの鋼製品は、超音波自動探傷装置で検査されている。

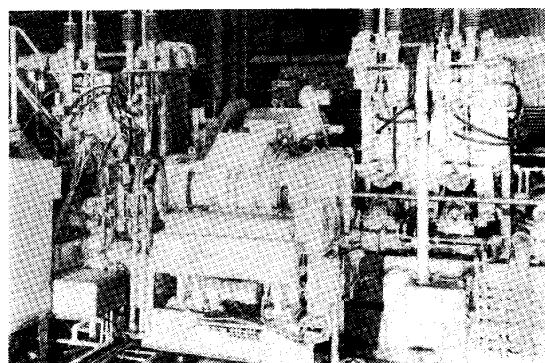
##### 4.1.1 厚鋼板用超音波自動探傷装置<sup>1)</sup>

厚鋼板は、各種の鋼構・建造物に使用される代表的な鋼製品であり、各国の工業規格により、非破壊検査による品質検査の方法が規定されている。上述したように、連続鋳造法が採用されてからは、微小欠陥の検出能力をあげるために、従来から使用されてきた透過式超音波探傷法の代わりに、送・受用に独立した探触子を設けた、二分垂直探触子を用いたパルスエコー方式が採用されるようになった。製品の幅が広いことと微少な欠陥の検出を目的としているため探触子の数が多く、今日最も多い装置では約 250 個の探触子が設けられている。また探傷速度は 60 m/min であり、この速度で約 10 mm<sup>2</sup> 相当の欠陥を検出している。この装置の機構部の説明図を Fig. 2 に示す。

##### 4.1.2 鋼管用超音波自動探傷装置<sup>2)</sup>

鋼管は、各種の配管などと共に機械部品の素材など、広い分野で用いられ、厳しい品質保証が要求されている鋼製品である。検査の規格も JIS, BS, DIN, API および各顧客の個別規格など多岐にわたっており、それぞれの規格のいずれをも満足するような装置の設計は容易ではない。鋼管の場合、径の太いものでは、ラミネーション、内外表面の欠陥が検出の対象となるが、径の細いものでは、上述の検査対象の外に、偏肉や外径の測定も加えられることが多くなった。

被検査材の全長、全断面の検査が理想とされるが、検査の処理能力上、この要求を満たすと製品の生産効率の低下を招く恐れがある。被検査材の寸法・性状が適当であ



(川崎製鉄(株)提供)

Photo. 1. Automatic ultrasonic testing mechanism for steel tube.

れば検査の速度も高く、搬送装置も比較的簡単な鋼管直進、探触子回転式の装置が賞用されるので、これを紹介する。今日、一本の生産ラインで多種の鋼管を生産するのが一般的となつてきているので、品種変更ごとに長時間の調整や校正は許されず、自動感度校正機能、自動探傷条件設定機能が必須の機能となつている。この外に超音波の入射角を調整しないで済ませる方法なども開発され、鋼管の寸法(管の直径)変更の場合でも、事前に準備が整つていれば、30 min 以内に、次の被検査材を検査できる状態になるまで短縮されている。Photo. 1 には、この超音波自動探傷装置の機構部の外観を示す。この装置のように探触子が回転していると、回転している探触子と固定している送受信器との間に、電気的に結合させる装置が必要である。送信時には、おおよそ数 kW の電力が伝送可能であり、受信時には、数 mV の電圧の探傷信号の伝達が、良好な信号対雑音比で行える結合装置でなければならない。従来は銀-銀グラファイトを用いたスリップリングとブラッシュの組み合わせが用いられていた。しかしこの方法では高速回転時のチャタリングや接触抵抗の変化などがそのまま雑音となつて信号に混入するため、頻ばんに保守すると共に探触子の回転数を制限しなければならなかつた。しかし今日では電磁的に能率よく結合させる非接触方式が開発され、探触子の回転数は探傷装置が許容する最高回転数一多くの場合、超音波の被検査材中の伝搬時間とデータ処理時間により制限される一まで高められるようになったのである。

この方式の外に探触子を固定して被検査材の方をスパイラル搬送する方式もあるが、搬送速度が前者と比較して遅く、搬送ラインの機材も複雑となるので、被検査材の曲がりや形状が複雑なものに限つて用いられている。なおここで述べた両方式とも丸鋼棒の超音波探傷にも用いられている。

##### 4.2 電磁誘導(渦流)自動探傷装置<sup>3)~5)</sup>

渦流探傷法は原理的に検出器が超音波探傷法のように被検査材に接触しなくても探傷できるため、かなり古くから生産ラインにおいて自動化された探傷装置として用

いられてきた。探傷の方法は、コイルの中を被検査材が貫通する貫通コイル法と、コイルを被検査材の表面の近くに設けるプローブ形コイル法とに大別される。従来は前者が用いられていたが、欠陥検出能力が優れ、また被検査材の軸方向と平行な欠陥の検出が可能なプローブ形コイル法が多く用いられるようになった。

#### 4.2.1 鋼管用渦流探傷装置

貫通コイル法とプローブ形コイル法の両方法が併用されている例が多い。前者は被検査材の軸方向に直交する欠陥検出用で、後者は軸方向と同じ方向の欠陥検出用である。被検査材の寸法としては、肉厚さ 25 mm 以下、直径で 180 mm 以下が適用とされている。プローブ形コイル法では検出器が被検査材の周囲を回軸する回転プローブ式と、検出器が固定していて、被検査材がスパイラル搬送される方法がある。貫通コイル法では可動部分がないことと、被検査材の軸に直交する欠陥が円周上のどの位置にあつても検出可能であるため、欠陥検出能力はやや劣るものの重大欠陥の見逃しを防ぐ目的で多くの生産ラインで使用されている。回転プローブ形コイルを用いる探傷装置では、同種の超音波探傷装置と同様に、回転する検出器と固定側装置との間に電気的結合が必要とされるが、今日ではスリップリングに代わつて回転トランスが用いられるものが出現している。

#### 4.2.2 熱間スラブ用自動渦流探傷装置

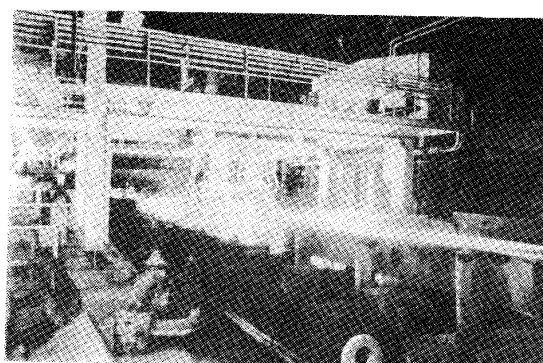
この探傷法は、先に述べたように原理的に非接触で探傷できること、検出器がコイルであり冷却が比較的容易であること、キュリー点以上ではすべての鋼材が保磁力を失うことなどのために、熱間探傷の手段として用いられている。最も早くから使用されているのが線材であり、操業条件としては、被検査材の直径が 6~30 mm、温度は約 1000°C、試験周波数は約 100 kHz で貫通コイル法である。

今日では、省エネルギーの手段として、連続鋳造設備で生産されたスラブを高温のまま次工程に送り、従来方式にみられる再加熱工程を省く方法が考えられている。特に高級製品にもこの方式を適用する場合には、スラブ表面のひびやクラックを検出し除去しなければならない。この目的でプローブ形コイルの熱間スラブ渦流探傷装置が開発され、実用の域に達している。Photo. 2 にこの装置の機構部を示す。

#### 4.3 磁気自動探傷装置<sup>6)</sup>

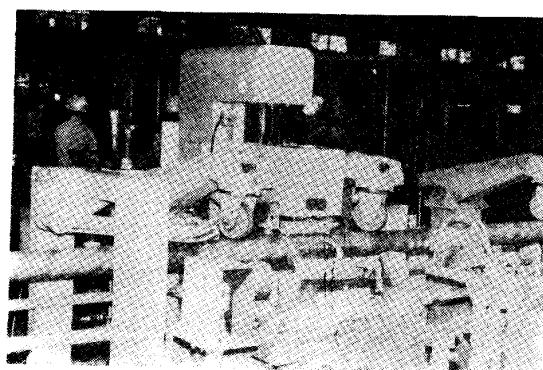
磁性体を磁化し、表面の欠陥部分から外部へ漏れる磁気を検出することにより、表面または表面近傍の欠陥を検出する方法である。

欠陥部からの磁束の漏洩は、なだらかな凹みのような形状の欠陥からの量に比べ、鋭い形状の欠陥からの方が多い。このため、比較的粗い表面を持つ被検査材の表面検査についても適用できる。この点では渦流探傷法よりすぐれているとも言えよう。またホール素子やソニー



(住友金属工業(株)/原電子(株)提供)

Photo. 2. Automatic eddy current testing mechanism for hot slabs.



住友金属工業(株)提供)

Photo. 3. Automatic magnetic testing mechanism for billets.

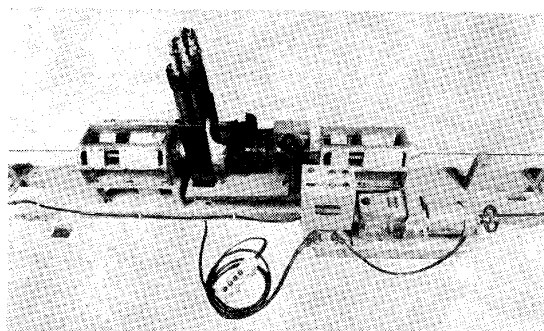


Photo. 4. Automatic laser (circularly scanning method) testing mechanism for surface inspection.

マグネットダイオードなどのすぐれた感度を持つ感磁素子が開発されたこともあつて微少な欠陥まで検出できるようになった。今日では、ビレット、丸棒鋼、鋼管などの表面疵の検査用として、多くの検査ラインでこの装置が稼働しており、特に粗い表面や不整形の被検査材にも威力を発揮している。

また Photo. 3 には、稼働中のビレットの表面検査用の磁気自動探傷装置の機構部を示す。

#### 4.4 レーザ走査形表面疵検査装置<sup>8)</sup>

近年、光センシングやパターン認識の技術の進歩により、被検査材表面の微細な疵の検出用として、レーザ走査形の表面疵検査装置が開発された。この装置はレーザ光で被検査材の表面を走査し、表面疵の乱反射光を検出

する方法を用いている。主に表面が平滑な被検査材に適用されているが、他の探傷法と比較して、微小欠陥に対する検出能力が高く、保磁力、導電性などに関係なく、あらゆる材料に適用でき、また検査速度がはやいことなどの特徴をもつ。Photo. 4 には、この装置の機構部を示す。

5. ま と め

自動探傷装置による非破壊検査は、我が国の鋼製品の生産性や品質の向上に大きく貢献していると言えよう。8年前と今日の超音波探傷装置の平均的な規模を比較すると、およそ3倍になっており、この傾向は今後も続くものと思われる。

この大形化の理由としては、次の事柄が考えられる。

- (1) 生産速度に適合した探傷速度を得るため。
- (2) 探傷カバ率 100% の実現を計るため。
- (3) 微小欠陥の検出率の向上を計るため。
- (4) 大規模な探傷装置でも高い信頼性で稼働するようになるため。

今後は単に疵や欠陥の検出や簡単な判断に止まらず、

破壊力学との関係における欠陥情報の提供が、非破壊検査の各方法に求められるであろう。今日種々な方法が試行されている。近い将来この要求に応じられる方法や装置が開発されることであろう。

終わりに、本稿のために貴重な資料・写真などを賜った諸氏に対し、お礼を申し上げる。

文 献

- 1) 2) 松山 宏: 最近の超音波探傷技術-自動探傷-
- 3) 石橋泰雄: 第2回総合非破壊試験技術講習会テキスト (1982年9月) [日本非破壊検査協会]
- 4) 土門 齋: 同上
- 5) 佐伯 朗: 同上
- 6) T. SHIRAIWA, T. HIROSHIMA, T. HIROTA, S. MITSUNARI, Y. FUJII and A. TAKAHASHI: SAM Inspection System for Round Billets (Reprinted from The Sumitomo Search) No. 12 (1974) Nov.
- 7) T. SHIRAIWA, T. HIROSHIMA and S. MORISHIMA: An Automatic Magnetic Inspection Method Using Magnetoresistive Elements and It's Application (MATERIALS EVALUATION) Vol. XXXI (1973) May
- 8) 三菱電機(株)技術資料 (1983年10月)

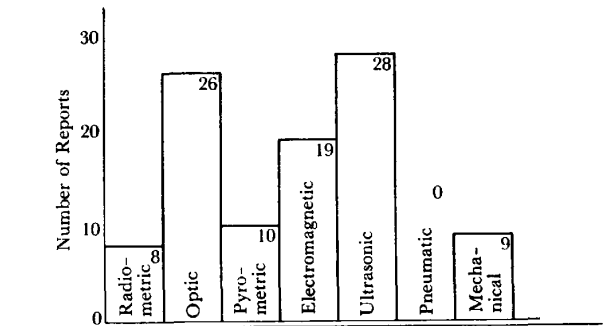
統 計

EC における計測の研究・開発

EC 鉄鋼業を対象とした研究開発プログラムでは、1965年以來、1981年までに約100件のプロジェクトが採用されてきた。その対象はスラブから薄板・条鋼までにおよび、そのほぼ半数が内外面の欠陥検出であり、次いで寸法・形状計測となっている。用いられた計測手段は図のように、超音波、光学のおよび電磁気的手法が優位を占めている。

特に近年は非接触測定ならびに連続測定化の傾向が強い。今後の見通しとしては、新たな基礎的なアイデアに基づく研究開発が中核となろうと予測されている。

(日本鋼管(株)中央研究所 岡戸 克)



(出典: EC 委員会 “圧延, 計測, 試験技術情報交流会” 1981-9-2~3, EUR 8040, p. 459)

計測手段の適用比率 (1965-1981)