

鉄鋼の非破壊検査技術

松實 敏幸*

Development of Nondestructive Inspection

Toshiyuki MATSUMI

Key words : nondestructive inspection ; ultrasonic testing ; eddy current testing ; magnetic particle testing ; magnetic leakage flux testing ; flaw ; surface flaw ; internal defect.

1. 緒言

戦後の日本鉄鋼業はその生産量を拡大する中であって、その品質の向上にも多大の投資を行ってきた。その中で、非破壊検査装置は鉄鋼製品の品質向上に大きく寄与しつつ、最新の技術を取り込んで変革をしてきている。

このうち本報では、スラブ・ビレット等の半製品及び厚板、薄板、鋼管並びに棒線などの製品のきず検査について、現在までの技術動向について解説し、今後の技術開発課題について考察する。

2. 表面疵と内部欠陥

2・1 きずの過検出と見逃し

鉄鋼製品の品質は、①表面疵・表層欠陥（以後単に表面疵と記す）、②内部欠陥、③寸法・形状、及び④材質に分けて考えると良い。この内①と②がいわゆる「非破壊検査」分野であるが、表面疵と内部欠陥検査では、きずを検出するという点で共通性が多いが、実用化される段階でかなり異なる一面を有する。この点について本論に入る前に、言葉の定義等を含めて少し言及しておく。

一般に「きず」とは検査の結果、明らかに異常と判断される不連続部のことであって、「表面疵や内部欠陥」とは需

要家や次の生産工程で応力集中の原因となるか及びまたは美観上好ましくないきずであって、有害判断基準を超えると判断されるものである。従って、探傷装置を導入した場合、判定基準を超えないきずも存在するわけで、従来からの検査員による官能検査または手動探傷器との間で、図1に示す関係が生じる。この時検出(率)等は通常式(1)で定義される。

この過検出・見逃しの観点から表面疵及び内部欠陥検査装置の実用化のポイントを整理したものを表1に示す。

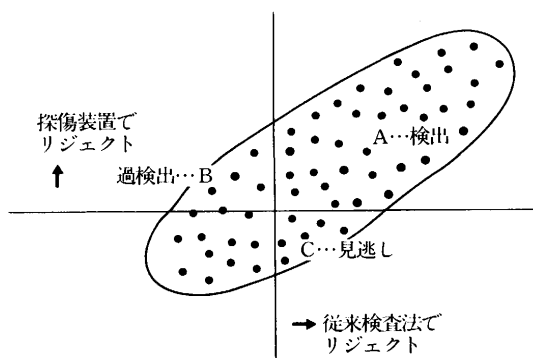


図1 きずの過検出と見逃し

$$\begin{aligned} \text{検出率} &= A / (A + C) \times 100\% \\ \text{過検出率} &= B / (A + C) \times 100\% \\ \text{見逃し率} &= C / (A + C) \times 100\% \end{aligned} \quad \text{.....(1)}$$

表1 表面疵／内部欠陥検出装置の自動化の差異

項目	表面疵検出器	内部欠陥検出器
検査シース	渦流探傷、磁気探傷、漏洩磁束探傷、光学探傷、浸透探傷、超音波探傷 等	放射線検査、超音波探傷 等
見逃しの評価	目視検査で容易にフォロー可能	同種の手動探傷・オンライン探傷でフォロー可能
過検出の評価	表面きずには検出不要のものが比較的多い 検査シース的にも過検出因子が比較的多い	内部きずは検出不要のものが比較的小さい 検査シース的にも過検出因子が比較的小さい
自動化の観点	目視検査の代替の観点から自動化する	同種検査シースの手動探傷を自動化する
作業上の対応	ロールに起因するきず等は実時間の作業アクションが必要、後から造込みにも反映	実時間の作業アクションは少なく、一旦リジェクトして、後から造込みに反映
総 合	過検出率の大小が検査装置の性能評価の鍵	見逃し率の大小が検査装置の性能評価の鍵

平成4年11月4日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Nov. 4, 1992; Accepted on Apr. 9, 1993) (依頼解説)

* 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所設備部部長代理 (Equipment Div., Nagoya Works, Nippon Steel Corp., 5-3 Tokaimachi Tokai 476)

薄板 光学式表面疵探傷方程式 …… (2)

$$\left[\begin{array}{c} \text{＜薄板＞} \\ \text{光学式表面疵} \\ \text{検出器の検出能} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{検出方式} \\ \cdot \text{飛点/飛像式} \\ \cdot \text{複眼/単眼式} \\ \cdot \text{肌変動対策} \\ \cdot \text{チャンネル数} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{疵等級判別能} \\ \cdot \text{検査員補充の有無} \\ \cdot \text{疵名・疵種判別法} \\ \cdot \text{疵名等の学習法} \\ \cdot \text{周期性欠陥の処理} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{鋼板振動抑制} \\ \cdot \text{振動抑制法} \\ \text{(フライトール,} \\ \text{ピンチロール,} \\ \text{ダウロール)} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{過検因子造込み} \\ \cdot \text{水切り性能} \\ \cdot \text{均一塗油性能} \\ \cdot \text{汚れ発生抑制} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{検査速度} \\ \cdot \text{検査速度} \end{array} \right]$$

鋼管・丸棒 内部欠陥超音波探傷方程式 …… (3)

$$\left[\begin{array}{c} \text{＜鋼管・丸棒＞} \\ \text{内部欠陥検出器} \\ \text{の検出能} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{検査対象・方式} \\ \cdot \text{溶接欠陥/2枚板/介在物} \\ \cdot \text{横波/縦波/モード変換波} \\ \cdot \text{超音波ビーム放射方向} \\ \cdot \text{セサ寸法・チャンネル数} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{探傷器} \\ \cdot \text{アナログ/デジタル型} \\ \cdot \text{ゲートトラック法} \\ \cdot \text{手動or自動校正} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{検出端扱い機構} \\ \cdot \text{探触子回転/固定} \\ \cdot \text{サイズ替え機構} \\ \cdot \text{曲り/シム追従法} \\ \cdot \text{端部給水安定性} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{検査速度} \\ \cdot \text{検査速度} \end{array} \right]$$

2.2 探傷方程式

前節で述べた表面疵及び内部欠陥検出装置の特質を踏まえた上で、超音波探傷技術分野でさくらの指示値を定量的に取り扱うために「探傷方程式」なる概念が提唱されているが、これに倣って今回探傷技術分野毎に探傷方程式を提唱してみたい。一例として薄板光学式表面疵検出分野と、鋼管・丸棒鋼内部欠陥検出分野のそれを式(2)、(3)に示す。

以上の例で分かるように、探傷方程式とは探傷装置の検出性能を左右する重要因子を選びだし、積の形で表現したものである。和でなく積の形で表したのはどれかの因子が技術的にクリアできないと、全体装置としては効果を発揮しないということを意味している。なお、探傷方程式で検査速度の項は、従来の目視検査や手動探傷を一種の探傷装置として取り扱うために付加したもので、通常自動探傷装置では無視してよい。一般に方程式中の重要因子は各技術分野毎に、検出方式、探傷装置の信号処理、検出端の扱い機構・サイズ替え機構、そして周辺設備・環境対策等の中から選択されるが、前述のように表面疵検査では過検出抑

制が、内部欠陥検査では見逃し抑制技術が大きく寄与する。

以下、①半製品の熱間表面疵探傷、②半製品の冷間表面疵及び内部欠陥探傷、③厚板の内部欠陥探傷、④薄板（冷延鋼板、表面処理鋼板、電磁鋼板、ステンレス鋼板を含む。以下単に薄板と記す）の表面疵探傷及び内部欠陥探傷、⑤鋼管の表面疵及び内部欠陥、⑥棒鋼・線材の表面疵及び内部欠陥探傷の分野毎に、具体的に探傷方程式を提示するので、各自非破壊検査設備の他所・他社設備との比較解析や、検査設備の導入可否検討に適用し、今後取り組むべき課題の抽出などに役立てば幸いである。また、各分野の探傷方程式中の重要因子について、現在までの技術達成度及び動向を以下に述べる。

3. 非破壊検査技術の現状

3.1 半製品熱間表面疵検査技術

スラブ、ブルーム及びビレットの熱間表面疵検査は、製造プロセスの直行化・連続化の一環として、また省エネルギー対策として、主に昭和50年以降精力的に各社で開発・

半製品 熱間表面疵探傷方程式 …… (4)

$$\left[\begin{array}{c} \text{＜半製品熱間＞} \\ \text{表面疵検出器} \\ \text{の検出能} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{検出対象・方式} \\ \cdot \text{縦or横割/介在物} \\ \cdot \text{中央部/コナ部} \\ \cdot \text{OT/ECT/UKS/...} \\ \cdot \text{セサ寸法・チャンネル数} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{疵等級判別能} \\ \cdot \text{検査員補充の有無} \\ \cdot \text{疵種判別法} \\ \cdot \text{オレーションマーク印号の抑制} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{前処理方式} \\ \cdot \text{デサ方式} \\ \cdot \text{溶剤方式} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{検出端扱い機構} \\ \cdot \text{鋼片反り・曲り} \\ \cdot \text{振動対策法} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{検査速度} \\ \cdot \text{検査速度} \end{array} \right]$$

表2 半製品 熱間表面疵検査装置の技術変遷

表面疵検査装置Ⅰ Cスラブ時代		表面疵検査装置Ⅱ Cスラブ時代	
・各種疵検査装置が考案され導入された時代 ・後半には画像処理等の技術が実用化		・CCスラブ用に計算機を組み込んだ高度な疵検査装置が開発されたが、 連铸造込みの進歩で限定された用途・使用法で使われつつある時代	
1975	1980	1985	1990
	●広畑 CCスラブ／UKS式実験機 ●福山 ICスラブ／水銀灯+ITV式 ●和歌山 ICスラブ／カーITV式 ●千葉 CCスラブ／赤外線式 ●鹿島 CCスラブ／水銀灯+ITV式 ●室蘭 ICスラブ／写真式 ●大分 CCスラブ／UKS式 ●水島 ビレット／ECT式試験機 ●京浜 CCスラブ／水銀灯+リアビザ式 ●加古川 ICスラブ／CCDカメラ画像処理式 ●八幡 CCスラブ／レーザスキャン式	●和歌山 CCスラブ／水銀灯+CCDカメラ式 ●鹿島 CCスラブ／カーフ+ECT式 ●君津 CCスラブ／ECT式 ●八幡 CCスラブ／ECT式 ●和歌山 CCスラブ／カーフ+ITV式 ●水島 ブルーム／ECT式 ●名古屋 CCスラブ／流れ写真式	

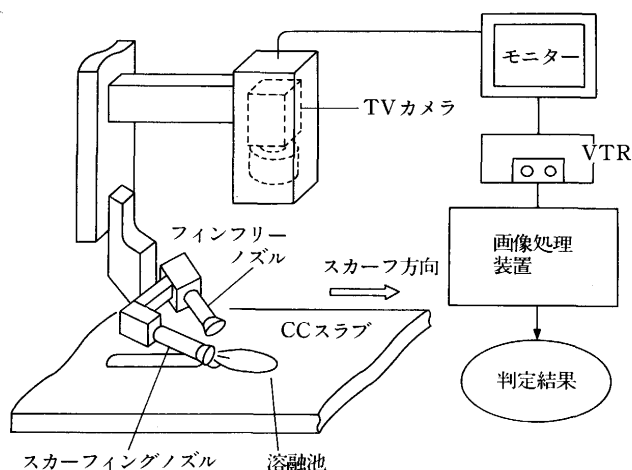


図2 チェックスカーフ式スラブ表面疵検出機

実用化してきている。

この技術分野の探傷方程式を式(4)に示す。特徴的なことは比較的長い縦割れ、微細な横割れ、表層下の割れ及び介在物等検査対象が大きく異なること、表面に発生する酸化スケール及びCCスラブにおけるオシレーションマークという過検出因子が存在することである。その結果、どのきずを検査対象とするかで検査方式も撮像方式、誘導加熱+走査温度計方式、写真撮影方式、渦流式並びにレーザ走査方式等と大きく異なり、検査する部位も多種多様である。

主な表面疵検査装置の技術変遷を表2に示す。検査装置によっては連铸プロセスの製造法の改善により、最近その役目を終えたものも見られ、新設備の導入は停滞しつつあ

るが、図2に示すように、表層介在物の検出技術の開発・導入が新しい動きである。

3・2 半製品冷間表面疵及び内部欠陥検査技術

条鋼製品は航空機や自動車の構造用に使用され、使われ方も過酷なことが多いので、半製品であるビレット工程でも、厳しいきず検査が実施される。

この分野の表面疵検査の探傷方程式を式(5)に示す。ここで特徴的なことは、表面疵検査は以前から疵手入れ装置まで含めた疵検査・疵取システムとして、開発・実用化が図られてきていること、被検査材のサイズはほぼ限定されているが、角ビレットではコーナー部の検査が重要で、この部分の検査方式及び検出機構がポイントとなることである。

主な検査装置の技術変遷を表3に示す。表面疵検査装置は微細な疵検査のために、磁化方法の選択の余地があるものの、従来から蛍光磁粉探傷法を軸にして進歩してきている。磁粉模様の自動画像計測は、図3にみられるような方式で実用化されているが、現在も各社がその信頼性向上に取り組んでいる技術分野である。

また、丸ビレットの表面疵検査はその形状を生かして、鋼管や丸棒鋼分野の回転型漏洩磁束探傷機を適用することによって、昭和50年代後半から自動化が図られてきている。

角ビレットの内部欠陥検査は、初めは垂直探傷法により中心部だけを検査していたが、最近では図4に示すように垂直探触子に加えて斜角探触子や表面波探触子並びに拡散型垂直探触子とを組み合わせて、特にコーナー部の検出能力が改善され、全断面検査するのが定着してきている。

ビレット 冷間表面疵探傷方程式 …… (5)

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{l} \text{ビレット冷間} \\ \text{表面疵検出器} \\ \text{の検出能} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{検査対象・方式} \\ \cdot \text{平坦部/コナ部} \\ \cdot \text{MT/MLFT/ECT/UT} \dots \\ \cdot \text{磁化方向/磁化方法} \\ \cdot \text{センサ法・チャンネル数} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{l} \text{探傷器} \\ \cdot \text{検査員補完有無} \\ \cdot \text{自動疵判定有無} \\ \cdot \text{アナログ/デジタル型} \\ \cdot \text{手動or自動校正} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{l} \text{検出端微い機構} \\ \cdot \text{○/◇形状探傷} \\ \cdot \text{検出端固定/回転} \\ \cdot \text{サイズ替え機構} \\ \cdot \text{コーナー・曲り追従法} \\ \cdot \text{端部不感帯抑制} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{l} \text{前処理方式} \\ \cdot \text{デスグ方式} \\ \cdot \text{磁気飽和条件} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{l} \text{検査速度} \\ \cdot \text{検査速度} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

表3 ビレット冷間表面疵及び内部欠陥検出装置の技術変遷

ビレットきず検査黎明時代	ビレットきず検査革新時代	ビレットきず検査熟成時代
・表面疵検査に軸通電法を主体に磁粉探傷法が確立 ・内部欠陥は開発段階	・走間磁化のためにコイル法が導入、自動検査の開発開始 ・内部欠陥は垂直探傷法が主体で角に不感帯が存在	・磁粉探傷の自動化が実用化し、疵取りまでのシステム化が進行 ・丸ビレットの漏洩磁束探傷法が実用化 ・内部欠陥は垂直探傷法+斜角探傷法等の全断面探傷が確立
1970	1975	1985
'63 ◎大同 BT/軸通+極間 ◎大同 BT/軸通+極間 □君津 BT/12ch-ET ◎君津 BT/デコパック ◎加古川 BT/極間+回転磁界+ITV ◎室蘭 BT/コイル法+極間 ◎製鋼 BT/揺動MLFT	◎小倉 BT/垂直 ◎加古川 BT/垂直 ◎大同 BT/垂直 ◎神戸 BT/垂直+斜角 ◎小倉 BT/垂直+表面波 ◎室蘭 BT/垂直	◎大同 BT/軸通+コイル法 ◎神戸 BT/極間+ITV ◎神戸 BT/コイル法+極間 ◎水島 丸BT/MLFT ◎山特 丸BT/MLFT ◎大同 丸BT/MLFT △愛知 BT/誘導加熱+赤外線
<表面疵> <内部欠陥>		
(注) BT=角ビレット、丸BT=丸ビレット、軸通=軸通電法、極間=極間法、垂直=垂直探傷法、斜角=斜角探傷法		

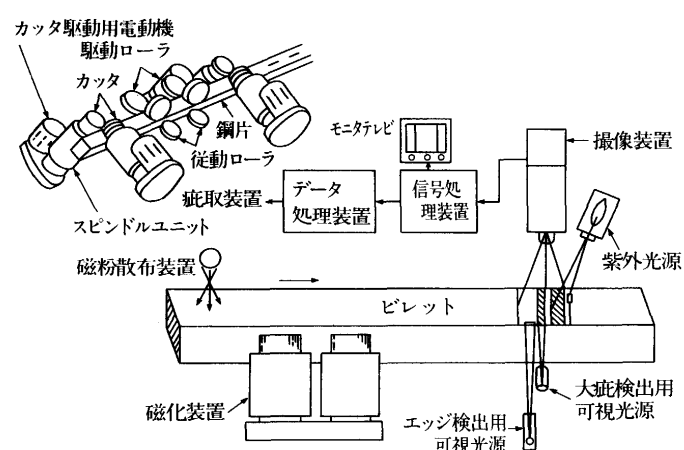


図3 ビレット自動疵検査・疵取装置

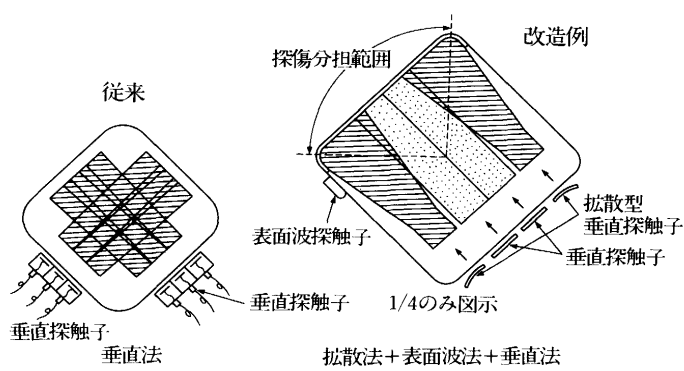


図4 ビレットコーナー部の超音波探傷法の改善

3.3 厚板の内部欠陥検査技術

厚板は压力容器や鋼構造物の基本素材として、非破壊検査が規格で要求されている。そして、連铸で製造するようになって検出すべききずは微小化し、検査基準も厳格化の方向にある。

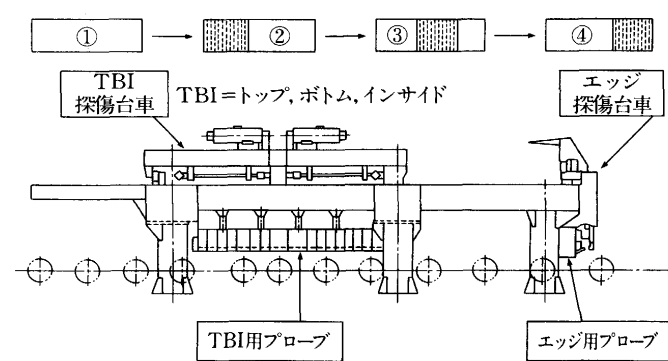


図5 厚板クロスキャン型超音波探傷装置

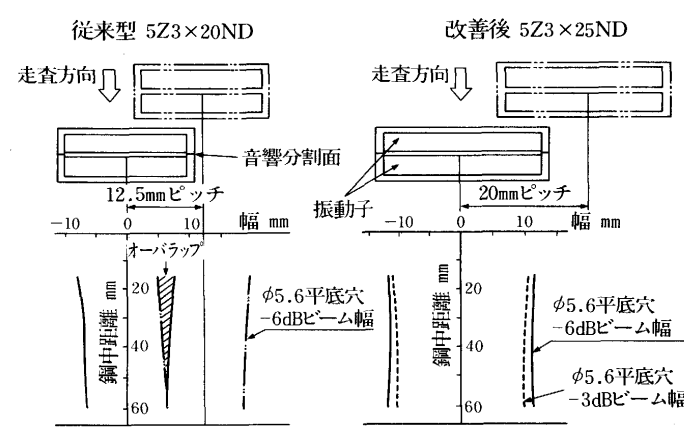


図6 厚板用垂直分割探触子の音場の改善

厚板 内部欠陥超音波探傷方程式 …… (6)

$$\left[\begin{array}{c} \text{＜厚板＞} \\ \text{内部欠陥検出器} \\ \text{の検出能} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{検出方式} \\ \cdot 1 \text{ 探/分割探触子} \\ \cdot \text{全面/部分探傷} \\ \cdot X \text{ 走査/Y 走査} \\ \cdot \text{セサナ法・チャネル数} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{探傷器} \\ \cdot \text{アナログ/デジタル型} \\ \cdot \text{ゲートトラッキング法} \\ \cdot \text{手動or自動校正} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{検出端微い機構} \\ \cdot \text{厚板振動・曲り} \\ \cdot \text{振動対策法} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{検査速度} \\ \cdot \text{検査速度} \end{array} \right]$$

表4 厚板内部欠陥探傷装置の技術変遷

厚板超音波探傷機黎明時代		厚板超音波探傷機大型化時代		厚板超音波探傷機成熟時代	
・厚板半自動超音波探傷法の基礎確立 ・数十チャンネル程度のオフライン探傷でスタート		・多チャンネル化のために計算機大幅導入 ・オンライン高速自動探傷法が確立 ・全自動感度校正法が確立、信頼性向上		・検出端の改善、四角部の不感帯減少及び各種探傷モードなど性能が一段と向上 ・極厚材やクワッド材等特殊材の自動化が進展	
1970	1975	1980	1985	1990	
○京浜 27ch/分割 ○八幡 40ch/透過 ○和歌山 24ch/透過 ○京浜 60ch ○福山 56ch/分割 ○広畑・名古屋・君津 19, 21, 16ch/分割・揺動 ○鹿島 31ch/分割 ○君津 54ch/分割・透過 ○千葉 39ch/分割 ○加古川 48ch/分割	○水島 64ch/分割 ○大分 280ch/分割・全面 ○大分 65ch/分割・X走査 ○京浜 130ch/分割・全面 ○和歌山 45ch/分割 ○名古屋 238ch/分割・全面 ○京浜 88ch/分割・全面 ○君津 238ch/分割・全面 ○鹿島 62ch/分割・全面 ○鹿島 24ch/分割	○千葉 78ch/分割 ○水島 96ch/分割・4ch/1探(特殊材) ○福山 264ch/分割・全面 ○八幡 1ch/分割・1探(特殊材) ○鹿島 120ch/分割・全面・X, Y走査 ○大分 248ch/分割・全面 ○加古川 130ch/分割 ○日鋼 1ch/分割(特殊材)	(注) 分割=分割探触子、透過=透過型探触子、全面=全面探傷、揺動=探触子揺動方式、1探=垂直探触子		

前半に、機器校正の自動化を含む完全自動超音波探傷技術がほぼ確立したことである。その後は検出能を改善するために、図5に示した主圧延方向と探触子の音響分割面とが平行なX走査型の探傷装置が導入されたり、図6に示したような超音波ビーム特性を改善されたものに順次更新されつつある。

また、対象量が少ない等の理由で、従来手探傷していた極厚鋼板やクラッド厚鋼板などの特殊材料向けの自動超音波探傷装置も、昭和60年以降に導入されてきている。

3・4 薄板の表面疵及び内部欠陥検査技術

薄板表面疵の目視検査を自動化する試みは、ラインの高速化や過酷な労働条件改善等の目的で昭和40年代前半から始まり、今日もなお開発が行なわれている。

この分野の探傷方程式は前述の式(2)であり、主に技術変遷を表5に示す。ここでのポイントはライン側で如何にして表面疵検査での過検出因子を出さないようにするか、また検査装置側でもどう対処するかである。

検出部はきず部分で光が異常反射・吸収するのを光電子で検出しているが、最近では図7に示すように正反射光を受光するだけでなく、散乱光も積極的に受光するいわゆる「複眼方式」や「マルチ・マスク方式」が開発・実用化されつつある。加えて鋼板表面の肌の変動を解析して検出閾値を実時間でかえてゆく自動地肌補正機能やニューラルネット応用閾値法なども開発され、表面疵検査装置の適用範囲の拡大に貢献している。

他方信号処理部では、自己相関法を応用した高感度な周期性欠陥検出技術が実用化されている。また、表面疵名を認識して過検出の補正を行なうために、図8に示すようなニューラルネットを適用した装置の開発や、疵名・疵グレードの学習システムの開発に、各社が凌ぎを削っている。

薄板の内部欠陥検出の中にあつては、缶用素材に対する

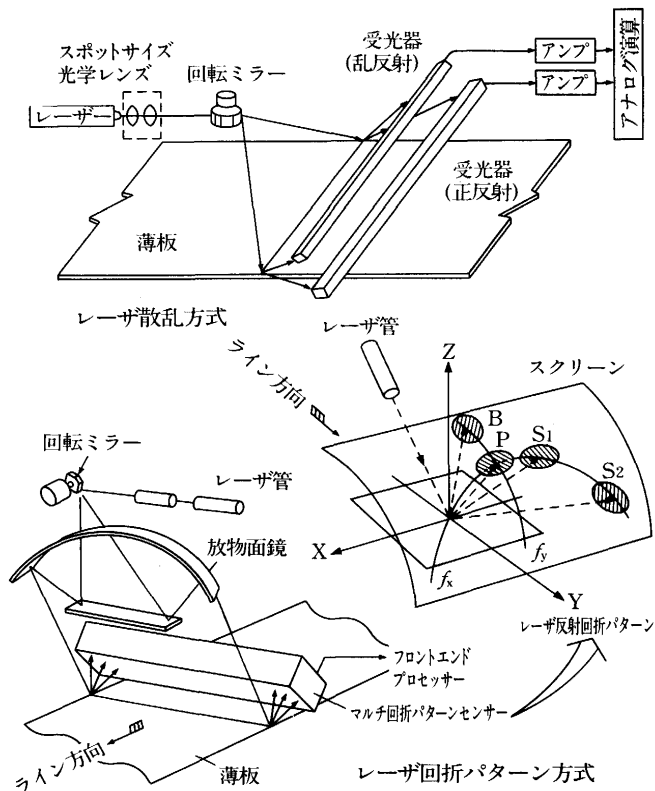


図7 薄板光学式表面疵検出器(複数センサタイプ)

非金属介在物検査の要求がレベル的に厳しく、従来抜き取り検査による磁粉探傷試験が適用されてきていた。これをオンライン連続探傷化するために、図9に示した漏洩磁束探傷機が開発・実用化されてきている。ここでは高感度の漏洩磁束検出センサーを開発し、検出端微い機構に、検出部エア浮上方式やセンサーのロール内蔵方式を開発して、鋼板とのギャップを極力小さくかつ安定化させて、実用化に至っている。

表5 薄板光学式表面疵及び介在物検査装置の技術変遷

表面疵検出揺籃時代	表面疵検出高度化時代	表面疵検出多様化時代
- 各種疵検査装置が考案され導入開始 - 疵検実用化のための課題が明確化(点状疵の見逃し、油斑等の過検出) - 後半には冷延鋼板分野で実用化	- 疵検出能改善(マスク切換、マルチセナー、地肌追従AGC、周期性欠陥信号処理、鋼板振動抑制法)が実用化 - 計算機導入による各種疵種・疵名判別技術の実用化 - 時代後半には百台余/業界の疵検査装置が稼働	- 疵検出能改善や過検出抑制にニューラルネットなど新技術導入で高度化中 - 簡易型疵検の導入、亜鉛めっき鋼板や酸洗材など適用先を拡大中
1970	1975	1980
○広畑 電磁/飛像式 ○千葉 メッキ/飛点式 ○八幡 メッキ/飛点式 ○広畑 メッキ/飛点飛像式 ○和歌山 メッキ/飛点式 ○下松 メッキ/飛点式(マスク式) <薄板表面疵検出> ○千葉 冷薄/飛点式×4	○名古屋・堺 熱薄/ストローク+ITV式 ○大分 熱薄 リニアセナ式 ○下松 メッキ/複眼セナー ○八幡 メッキ/マスクライン交換 ○光 ステルス/疵種判別 ○名古屋 メッキ/複眼セナー/疵種判別 ○八幡 メッキ/自製疵検 ○福山 メッキ/疵種判別 ○君津 冷薄/ニューロ閾値法 ○水島 メッキ/データ解析システム	○和歌山 電磁/簡易型疵検 ○福山 酸洗/マスク式 ○千葉 冷薄/静止画像 ○福山 亜鉛メッキ/マスク式 ○千葉 熱薄/ビデオ録画式 ○名古屋 メッキ/複眼セナー/疵種判別 ○八幡 メッキ/自製疵検 ○福山 メッキ/疵種判別 ○君津 冷薄/ニューロ閾値法 ○水島 メッキ/データ解析システム
1985	1990	
(注)電磁=電磁鋼板、メッキ=表面処理鋼板、冷薄=冷延鋼板、熱薄=熱延鋼板(捲取前)、酸洗=熱延鋼板(酸洗後)、亜鉛メッキ=亜鉛めっき鋼板、ステルス=ステルス鋼板 <缶用素材=ライン介在物検出>	○名古屋 冷薄/均一塗油・疵種判別 ○阪神 電磁/疵種判別 ○水島 冷薄/疵種判別 ○下松 シャーライン/SMD素子 ○福山 シャーライン/磁気検出素子 ○名古屋 コイル準備ライン/センシングコイル ○八幡 コイル準備ライン/改造SMD素子 ○福山 シャーライン / (MGS+α) センサー	

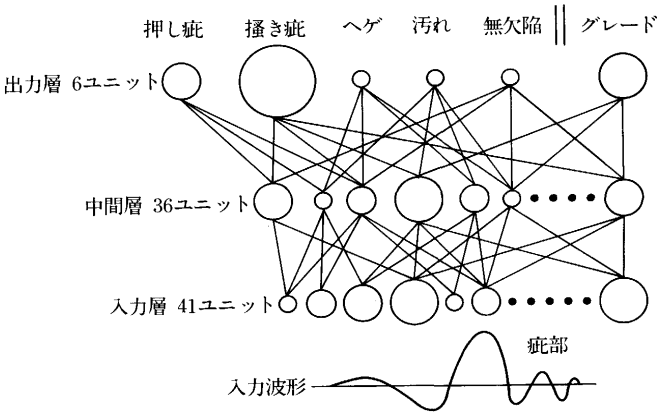


図8 表面疵名称判別へのニューラルネットワーク適用例

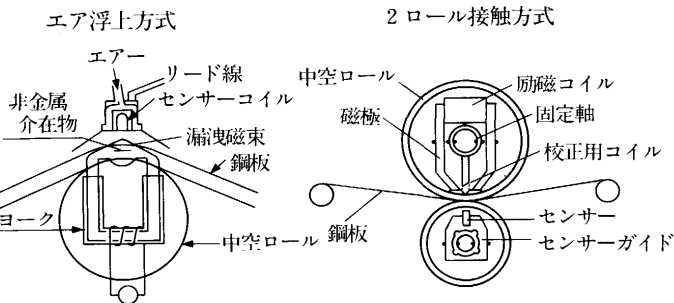


図9 薄板漏洩磁束探傷式内部欠陥検出器

鋼管・丸棒鋼の表面検出探傷方程式 …… (7)

<鋼管・丸棒鋼>
表面疵検出器
の検出能

=

検査対象・方式
・製鋼疵/圧延疵/焼割れ
・中央部/端部
・MLFT/ECT/UT/MT/…
・センサ寸法・チャンネル数

×

探傷器
・検査員補完有無
・アナログ/デジタル型
・手動or自動校正

×

検出端扱い機構
・検出端回転/固定
・サイズ替え機構
・曲り追従法
・端部不感帯抑制

×

検査速度
検査速度

表6 中小径管及び丸棒超音波探傷装置

超音波探傷黎明時代		新ミル技術革新時代		革新技術のフォロー及び新技術探索時代	
・アナログ型超音波探傷技術の確立 ・ロータリ超音波探傷技術の確立 ・棒鋼で垂直探傷技術が確立		・各社新ミル建設時に新技術導入 ・デジタル超音波探傷及び自動感度校正技術の確立した時代 ・丸棒でロータリ超音波探傷法確立		・先の技術革新で取り残された管端の自動化や、溶接線検出・追従や、旧設備のリフレッシュの時代 ・丸棒で斜角・垂直型ロータリ超音波探傷が定着した時代 ・アルファローブやパルス圧縮探傷法など新技術探索時代	
1970	1975	1980	1985	1990	
<鋼管> □君津 ERW/R-UT □知多 ERW/ラミ-UT ○知多 SML/UT □光 ERW/ラミ-UT		○八幡 SML/R-UT×3 □和歌山 ERW/R-UT×3 □名古屋 ERW/R-UT×2 □君津 ERW/R-UT □光 ERW/UT ○京浜 SML/R-UT ○八幡 SML/UT ○京浜 SML/R-UT ○光 SML/R-UT ○八幡 SML/UT ○知多 SML/UT ○八幡 SML/UT ○京浜 SML/UT ○八幡 SML/UT ○和歌山 SML/R-UT ○京浜 SML/R-UT ○和歌山 SML/UT ○知多 SML/UT, R-UT □光 ERW/ラミ-UT □知多 ERW/R-UT		□京浜 ERW/R-UT, UT×2(電磁超音波式シーム検出器) □名古屋 ERW/UT×4(光学式, 蛍光ペン式, 電磁超音波式シーム検出器) □知多 ERW/UT(赤外線式シーム検出器) ○和歌山 SML/R-UT □光 ERW/ラミ-1探UT改 ○知多 SML/アルイUT試験機	
<丸棒> ○水島 垂直 ○大同 垂直		○室蘭 垂直+斜角 ○神戸 R-斜角 ○大同 垂直 ○山特 R-垂直+斜角 ○水島 垂直		○小倉 R-垂直+斜角 ○水島 垂直+斜角 ○室蘭 R-垂直+斜角 ○大同 R-垂直+斜角 ○山特 R-垂直+斜角×3	

(注) ERW=電縫鋼管, SML=継目無鋼管
R=探触子回転型探傷機, ラミ=ラミネーション検査

表7 鋼管及び棒鋼・綿材表面疵検出技術の変遷

表面疵検査技術黎明時代	表面疵検出技術確立時代	表面疵検査新技術探索時代
・棒鋼で磁粉探傷法が確立 ・線材で熱間貫通型渦流探傷法が確立 ・鋼管で漏洩磁束探傷がほぼ確立	・丸棒と鋼管で回転型漏洩磁束探傷機及び渦流探傷機の技術確立し、適用限界調査の時代 ・線材で回転型渦流探傷機が確立	・磁粉探傷・漏洩磁束探傷・渦流探傷のフルリ確定時代 ・温度計式・熱間マル渦流探傷法など新技術探索時代
1970	1975	1980
○東京 SML/MLFT	○八幡 SML/MLFT	○八幡 SML/MLFT
	○京浜 SML/MLFT	○八幡 SML/MLFT
	○和歌山 SML/MLFT	○名古屋 ERW/MLFT
	○八幡 SML/MLFT	○京浜 SML/MLFT
	○和歌山 SML/MLFT	○八幡 SML/MLFT
	○知多 SML/MLFT	○鋼管 SML/MLFT (複合磁場)
	○京浜 SML/MLFT	○京浜 SML/MLFT (HF)
	○和歌山 SML/R-ET	○和歌山 SML/R-ET×2
	○和歌山 SML/R-ET×2	○和歌山 SML/R-ET×3
	○和歌山 SML/R-ET×3	
	○製鋼 丸/MLFT	○山特 丸/MLFT (HF)
	○愛知 軸通	○愛知 丸/MLFT
	○水島 軸通	○大同 平鋼/熱間ET
	○小倉 丸/MLFT	○神戶 丸/MLFT
	○室蘭 丸/MLFT (HF)	○小倉 丸/MLFT
	○君津 極間+BMG	○山特 丸/MLFT (HF)
	○神戶 丸/MLFT (HF)	○山特 丸/R-ET
	○室蘭・水島 軸通	○大同 丸/MLFT
	○大同 丸/R-ET×2	○愛知 丸/MLFT
	○山特 丸/MLFT (HF)	○愛知 丸/MLFT×2
	○愛知 丸/MLFT	○大同 丸/R-ET
	○製鋼 丸/MLFT	○大同 丸/MLFT
	○製鋼 丸/MLFT	○大同 丸/R-ET×2
	○大同 丸/R-ET	○室蘭 丸/MLFT
	○大同 R-ET×2	▲水島 赤外温度計式
	○小倉 R-ET	○小倉 R-ET
	○小倉 R-ET	○室蘭 R-ET
	○君津 熱間-ET (12ch位相)	○山特 R-ET
	○大同 R-ET	○神戶 R-ET
	○神戶 R-ET	○小倉 熱間 R-ET
	○山特 R-ET	○山特 R-ET×2

(注)丸=丸棒鋼

HF=高周波励磁タイプ

R=検出端回転型探傷機

○大同 端末/MT

■神戶 熱間-ET

○君津 端末/MT

<線材>

○神戶 端末/MT

■光 熱間-ET

■大同 熱間-ET

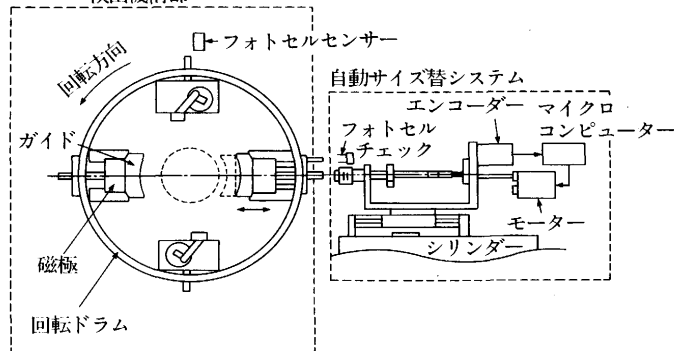
回転漏洩磁束探傷機
検出機構部

図10 漏洩磁束探傷機の自動サイズ替え機構

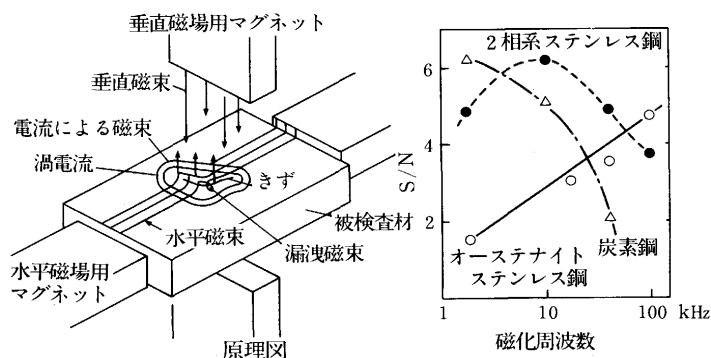


図11 複合磁場探傷法の原理と磁化の高周波化

ステンレス鋼管等への適用や、微細な表面疵の検出能が向上した。

管端部の厳格な検査が要求される継目無鋼管では、図12に示す2組のコイルに三相交流を、貫通型コイルに直流を流して立体的な回転磁場を形成させ、1回の磁化で管軸及び管周方向そして端面のラミネーションを一挙に探傷する管端部磁粉探傷装置の開発・実用化が報告されている。

また、最近では継目無鋼管の内面欠陥を検出するために、図13に示すような配列形探触子（アレイプローブ）による探傷装置も開発され、超音波ビームの制御による新しい探傷法が確立されようとしている。

電縫管の分野では、溶接部自動検査のポイントとなる溶接線検出において、設置する場所の条件を生かして電磁超音波方式、赤外線検出方式、撮像装置+画像処理方法並びに、(蛍光)ペイントマーク+再読取方式などが開発・実用化され、溶接管の特質を生かした探傷法が確立してきている。

3・6 棒鋼・線材の表面疵及び内部欠陥検査技術

棒鋼・線材は半製品の項でも述べたように過酷な使われ方をすることが多いので、製品検査では厳しいレベルが要求される。

この分野の探傷方程式は鋼管のそれとほぼ同じであり、主な技術変遷を鋼管と合わせて表6、7に示す。ここでのポイントは形状が類似の鋼管分野の非破壊検査技術を、被

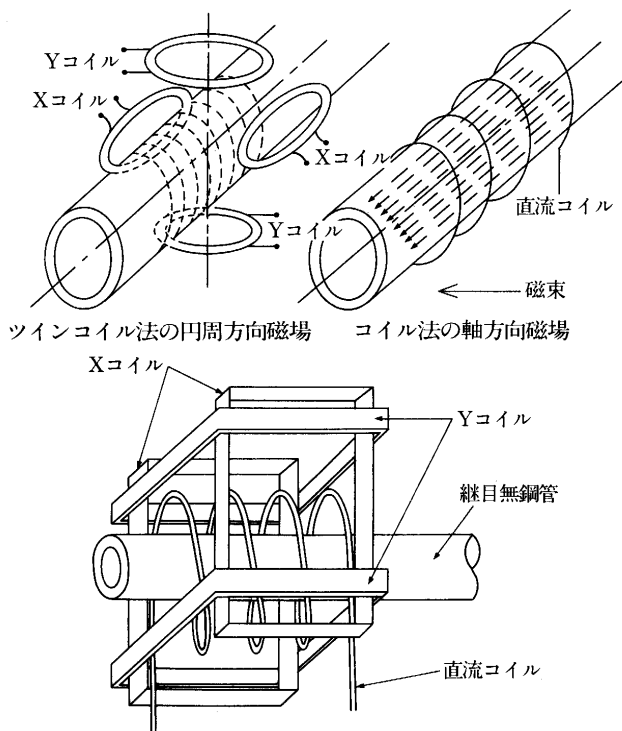


図12 継目無鋼管管端用全方向磁粉探傷装置

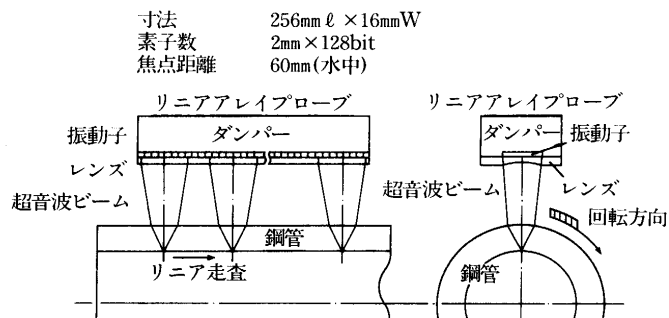


図13 アレイプローブによる鋼管内面超音波探傷原理

検査材の肌の違いと中実な形状を考慮していかに適用するかということである。

丸棒鋼表面疵の自動探傷は、継目無鋼管とほぼ同時期に漏洩磁束探傷機が導入され、その後回転型渦流探傷機も設置されたが最小検出可能きず深さが0.30mmとされ、需要家の厳しい要求に応えるため、0.15mm程度まで検出できる漏洩磁束探傷機が定着してきた。しかし、厳格材においてはまた蛍光磁粉探傷法で対応せざるを得ず、図14に示すような蛍光磁粉模様のカメラ画像を自動処理する装置の開発・実用化が行なわれてきている。

丸棒鋼の内部欠陥は当初垂直探傷だけであったが、ピレットと同様、図15に示すように垂直探傷＋両方向斜角探傷によって全断面検査する回転型超音波探傷機が昭和50年代後半以降採用され定着してきている。

線材では、従来から熱間貫通型渦流探傷器により大形疵を検出し、伸線材等の厳格材ではその肌の良さを生かして

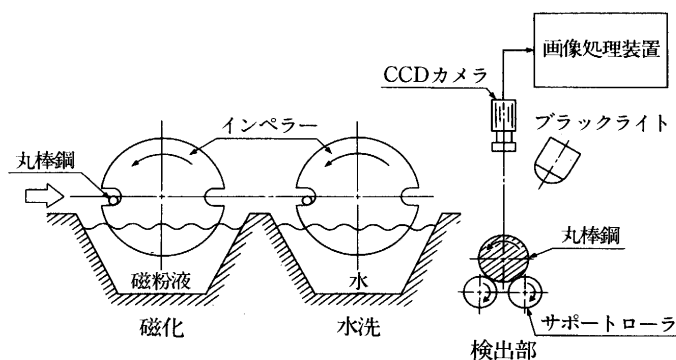


図14 棒鋼自動蛍光磁粉探傷装置

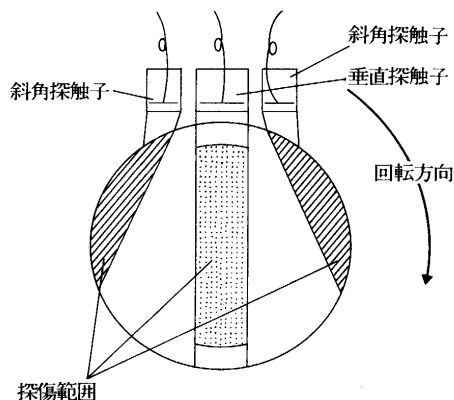


図15 探触子回転型全断面超音波探傷法の原理

回転型渦流探傷機が、昭和50年代後半から採用されてきている。

4. 結言

以上、製鉄業における現状の非破壊検査技術の技術動向を探傷方程式の観点から述べてきた。業界で非破壊検査設備を導入し始めてから今日までの約30年間の技術進歩の方向を一言で表現すれば、「非破壊検査設備からのきず信号の信頼性(再現性)の確保」であったと言える。すなわち、技術は探傷方程式の各因子の内、第1ステップとして①きずの方向・位置等を考慮して検出シーズを選定し、次に②検査対象の寸法形状等に基づき検出端微い機構を開発して、次の段階で③きず信号の再現性の向上及び自動化のために自動感度校正システムの確立を図る。その後断面形状が板材より複雑な管材等は更に、④サイズ替え機構の自動化に取り組む。そして以上の①～④の技術開発は新シーズやニーズの厳格化に伴ってスパイラルアップ的に進歩してきた。

これに対して、今後は現在までの開発で達成できていない例えば、今日もなお目視に頼っている磁粉模様の観察の自動化等の開発を推進することに加えて、「鉄鋼製造工程において、狙った品質の製品を狙った歩留で製造するために、非破壊検査設備からの情報で品質管理・保証は勿論、リアルタイムの物流コントロールや操業造込みアクションが行

えるまでの検査設備の信頼性向上・きず情報の一元管理化」という観点が付加されてゆくと推察する。紙面の都合で割愛した大径管や形鋼分野も含めて今後の技術課題を具体的に列挙すると以下に集約される。

①検出能の改善／適用範囲の拡大

- ・光学式表面疵検査装置の検出能向上・適用範囲拡大
- ・冷延鋼板及び表面処理鋼板の非金属介在物検出 他

②自動化・省力化による検査の信頼性向上

- ・磁粉探傷試験における磁粉模様の自動疵判定
- ・X線透過試験における濃淡画像の自動欠陥判定
- ・端部の非破壊検査機器の自動化及び不感帯減少
- ・手探傷に頼っている特殊材・厳格材の自動化 他

③新技術・新素材の実ラインへの適用及びその評価

- ・配列形探触子(アレープローブ)
- ・赤外線温度計測法(誘導加熱直後, 水冷帯直後)
- ・リモートフィールド内挿型渦流探傷法
- ・貫通型マルチプローブ渦流探傷法(ハイパワー相互誘導渦流法)
- ・パルス圧縮超音波探傷法
- ・ニューラルネットによるきず識別技術 他

④適切なシーズ技術がない分野のブレイクスルー

- ・電縫管の冷接欠陥
- ・熱間探傷法(線材シーム疵, 熱延鋼板) 他

⑤きず情報の一元管理化・総合化

- ・次工程(含む需要家)へのきず情報提示及びその活用
- ・前工程へのきず情報フィードバック及びその活用

最後に、本解説が今後更に高度化してゆく需要家のニーズ、及び製造プロセスの発展に合わせて、品質管理・保証レベルを向上させてゆく際に寄与すれば幸いである。

略号の説明

八幡＝新日本製鉄(株)八幡製鉄所
 室蘭＝新日本製鉄(株)室蘭製鉄所
 広畑＝新日本製鉄(株)広畑製鉄所
 光＝新日本製鉄(株)光製鉄所
 名古屋＝新日本製鉄(株)名古屋製鉄所
 堺＝新日本製鉄(株)堺製鉄所
 君津＝新日本製鉄(株)君津製鉄所
 大分＝新日本製鉄(株)大分製鉄所
 京浜＝NKK京浜製鉄所
 福山＝NKK福山製鉄所
 知多＝川崎製鉄(株)知多製造所
 千葉＝川崎製鉄(株)千葉製鉄所
 製鋼＝住友金属業(株)製鋼所
 鋼管＝住友金属工業(株)鋼管製造所
 和歌山＝住友金属工業(株)和歌山製鉄所
 小倉＝住友金属工業(株)小倉製鉄所
 鹿島＝住友金属工業(株)鹿島製鉄所

加古川＝(株)神戸製鋼所加古川製鉄所

神戸＝(株)神戸製鋼所神戸製鉄所

下松＝東洋鋼板(株)下松工場

大同＝大同特殊鋼(株)

愛知＝愛知製鋼(株)

山特＝山陽特殊製鋼(株)

日鋼＝(株)日本製鋼所室蘭製鉄所

UT＝超音波探傷法

ET, ECT＝渦流探傷法

MLFT＝漏洩磁束探傷法

MT＝漏洩磁束探傷法

OT＝光学式探傷法

UKS＝誘導加熱探傷法

参 考 文 献

- 1) (株)日本製鋼所(私信) 1992年9月
- 2) NKK(私信) 1992年9月
- 3) 奥村 精, 近藤廣章: 鉄と鋼, 78 (1992), T213
- 4) 堀澤輝雄, 椎野和博, 村越俊之, 岩永賢一, 陶山恒夫: 材料とプロセス, 5 (1992), p.1603
- 5) 福高善己, 望月 栄: 材料とプロセス, 5 (1992), p.1416
- 6) 熊坂 清, 西野 憲, 馬場信次, 高橋昭夫, 石本晴一, 谷 初次, 古川恭之, 森 健: 材料とプロセス, 5 (1992), p.1415
- 7) 和高修三, 永塚 勉, 三須幸一郎, 木村友則, 小池光裕: 材料とプロセス, 5 (1992), p.1361
- 8) 川崎製鉄(株)(私信) 1992年3月
- 9) 山口久雄: 第140回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編), (1991), p.1
- 10) 村田全弘: 第140回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編), (1991), p.35
- 11) 水野正志: 第140回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編), (1991), p.67
- 12) 中野哲男, 堀籠秀和: 第140回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編), (1991), p.91
- 13) 坂本俊夫, 金堂秀範, 山中栄輔, 井野清治, 西島真也: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1522
- 14) 弦田 登, 豊島 貢, 前田一郎, 前田政和, 今関敏夫, 武者昌雄: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1378
- 15) 中山益盛, 水野正志, 香田 浩, 中村 薫, 市岡雄二: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1368
- 16) 牧 宏, 岩永賢一, 稲葉 護, 竹腰篤尚, 安藤静吾, 保久光男: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1367
- 17) 小崎巧三, 吉田三男, 藤沢淳一, 橋口哲朗: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1366
- 18) 池内正樹, 実川正治, 社領 武, 岩永賢一, 広瀬和博, 木原幹人: 材料とプロセス, 4 (1991), p.538
- 19) 陶山恒夫, 岩永賢一, 竹中正樹, 島田雅良, 森岡義久, 佐藤弘夫: 材料とプロセス, 4 (1991), p.352
- 20) 福谷和彦, 中野公明, 田中宏幸: 材料とプロセス, 4 (1991), p.351
- 21) 縄田康隆, 池田元樹, 吉田紀幸, 岩永祐人, 曾根至朗: 材料とプロセス, 4 (1991), p.350
- 22) 新日本製鉄(株)(私信) 1991年4月
- 23) 中野公明, 福谷和彦, 瀬野 聡, 白川芳幸, 田中宏幸: 電学論D, 111 (1991), p.29
- 24) 日鉄テクノス(株)(私信) 1991年3月
- 25) 鉄鋼製品の漏洩磁束探傷法(日本鉄鋼協会共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会編), (1990)
- 26) 鉄鋼製品の磁粉探傷法(日本鉄鋼協会共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会編), (1990)
- 27) 鉄鋼製品の渦流探傷法(日本鉄鋼協会共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会編), (1990)
- 28) 松本 満: 電気学会 第2回シンポジウム講演論文集, (1990)
- 29) 小林 高: 特開報平2-163645

- 30) 太田智之, 福高善己, 吉原敬久, 手柴東光, 古川九州男: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1530
- 31) 梨本勝宣, 大庭哲哉, 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
- 32) 福高善己, 望月 栄, 西邑誠吉, 深沢千秋: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1268
- 33) 田中 茂, 高田 隆, 川崎 弘, 山本章生, 梅田成二: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1267
- 34) 三宅秀和, 増野登彦, 女鹿節男, 貝原利一, 古川九州男, 銭場 敬, 吉田 守: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1266
- 35) 村山 章, 田中 恵, 中野哲男, 小宮善興, 山田郁生, 上村勝二, 沼口満千雄, 相村英行: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1260
- 36) 石原道章, 中尾善之, 兵藤繁俊: 材料とプロセス, **3** (1990), p.426
- 37) 熊坂 清, 三田伸介, 高橋昭夫, 西村豊秋: 材料とプロセス, **3** (1990), p.425
- 38) 島田雅良, 森岡義久: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1330
- 39) 粕谷 治, 兼貞靖行, 亀井英明, 多田隆良, 油谷憲治: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1326
- 40) 中尾善之, 兵藤繁俊, 坂本隆秀, 古川恭之: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1322
- 41) 奥村 精, 新玉幹夫: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1318
- 42) 鎌田憲幸, 内藤修治, 國永 学, 大田敏隆, 妹尾聖一: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1310
- 43) 竹中正樹, 岩永賢一, 保久光男, 古川高人, 安藤静吾: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1314
- 44) 岩永賢一, 保久光男: NKK技報, (1990), p.114
- 45) 川崎製鉄(株), 他(私信) 1990年3月
- 46) 深沢千秋: 特開報平1-152344
- 47) 浦本太郎, 三城賢吾, 河合和男, 高橋昭夫, 野尻俊哉: 材料とプロセス, **2** (1989), p.1445
- 48) 深沢千秋, 渡部利克, 相沢健治: 東芝レビュー, **44** (1989), p.413
- 49) 石原道章, 西峯 保: 材料とプロセス, **1** (1988), p.1595
- 50) 越野 勝, 川崎 弘, 杉本峰雄, 安達裕司, 福田多一郎, 川口清彦: 材料とプロセス, **1** (1988), p.1584
- 51) 中野 盛, 三宮静悦, 宮田重久, 島田 清: 材料とプロセス, **1** (1988), p.586
- 52) 松居 進, 永倉義之, 細川孝信, 片山二郎: 川崎製鉄技報, **20** (1988), p.34
- 53) 溶接鋼管の超音波探傷法(日本鉄鋼協会共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会編), (1988)
- 54) 鋼板の超音波探傷法(日本鉄鋼協会共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会編), (1988)
- 55) 継目無鋼管の超音波探傷法(日本鉄鋼協会共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会編), (1988)
- 56) 加藤義治, 江藤卓郎, 宮川 隆: 鉄と鋼, **73** (1987), S301
- 57) 片野征夫, 松下登志雄, 小笠原達, 佐藤善兼, 藤田正和: 鉄と鋼, **72** (1986), S1338
- 58) 大橋兼広, 船生 豊, 近藤広章, 新玉幹夫, 銭場 敬, 日和佐淳: 鉄と鋼, **71** (1985), S407
- 59) 酒井俊彦, 松井健一, 大垣一朗, 松本修二, 尾崎孝三郎, 小山朝良: 鉄と鋼, **71** (1985), S398
- 60) 中居義之, 池尻宗男: 鉄と鋼, **71** (1985), S393
- 61) 上村繁憲, 川野孝良, 桑田一義, 緒方貴玄: 鉄と鋼, **70** (1984), S1159
- 62) 児玉賢治, 福高善己, 宇野義雄, 西邑誠吉: 鉄と鋼, **70** (1984), S414
- 63) 新村鉄三郎, 岩崎全良, 津田五郎, 木邑信夫, 結城 滋, 牛尾敬二: 鉄と鋼, **70** (1984), p.1216
- 64) 中野哲男, 小峰 勇, 斉藤森生: 鉄と鋼, **70** (1984), S401
- 65) 福山 隆, 瀬濤康徳, 森 智明, 渡辺俊治, 松本定一, 長尾幸男: 鉄と鋼, **68** (1982), S405
- 66) 御園生一長, 藤井昭明, 福元亮一, 田中 裕, 中島 厚, 西村康夫: 非破壊検査, **30** (1981), p.734
- 67) 御園生一長, 藤井昭明, 田中 裕, 西村康夫: 非破壊検査, **30** (1981), p.154
- 68) 河原 孝, 益子羊了, 片野征夫, 平野真之助, 大村保弘, 小崎義忠: 鉄と鋼, **68** (1982), S407
- 69) 山口富士夫, 坂上武夫, 松田 修, 阿久津昭司, 古川幸夫, 増野登彦: 鉄と鋼, **65** (1979), S249
- 70) 島田勝彦, 小峰 勇, 角崎周市, 山田正義, 田辺英也: 鉄と鋼, **65** (1979), S248
- 71) 渡辺一雄, 遠藤敏夫, 小島勝洋, 稲垣 肇, 金子昇司, 近藤次男: 鉄と鋼, **63** (1977), S683
- 72) 新日本製鉄(株)(私信) 1974年4月