



鉄鋼の非破壊材質評価技術

田辺 英也*・西藤 勝之*²

Nondestructive Characterization Technology of Material Properties in Iron and Steel Industry

Hideya TANABE and Katsuyuki NISHIFUJI

Key words: nondestructive characterization; material property; measurement; quality control; surface analysis; grain size; Lankford-value; ferrite transformation.

1. 緒言

我国の鉄鋼業は益々高度化・多様化するユーザニーズに応えるため、従来型の商品においてはさらなる高品質化や低コスト化を追求し、また新機能商品の開発も精力的に推進している。

このような背景の中、鉄鋼製品の造り込み技術や品質保証技術を確立していくための重要な要素技術の一つとして、非破壊材質評価技術への期待が急速に高まってきた。材質とは、その材料が要求される機能を満足するために備えるべき性質を指し、例えば引張り強さ、伸び、降伏点等の機械的特性等が上げられる。

従来材質の評価はほとんどが材料を破壊して求める破壊試験に頼ってきたが、①全数試験ができない、②試験費用・工数が多大である、③製造プロセスへの迅速なフィードバックができない等の理由から、非破壊での材質評価、特に製造プロセスでのオンライン評価が強く望まれてきた。

オンラインでの材質評価に関する研究開発は近年非常に

活発化し、実用化されている例も少なくない。

そこで本文では鉄鋼における材質評価ニーズを概観し、それらに応える技術開発の現状と特徴的な開発例及び今後の課題について述べてみたい。

2. 材質評価ニーズの動向

Table 1 は非常に多岐にわたる材料の性質を分類別に示したものである¹⁾。材料の引張り強さや成形性等は、結晶粒径、集合組織等の物理的性質等によって決まってくる性質であるが、ここでは物理的性質のような元になる性質と、機械的性質のように結果として備える性質の両方とも材質として位置付けた。Table 2 に鉄鋼における主な非破壊材質評価のニーズを示す。これらのニーズに対する狙いは以下のよう

- (1) 従来の破壊試験による品質保証方法の代替
- (2) 品質を造り込むためのインプロセス評価の実現
- (3) サンプル検査から全数検査への拡大

Table 1. Kinds of material property¹⁾.

Category	Property
Mechanical property	Tensile strength, Elongation, Yield point, Stress Hardness, Creep, Brittleness, Frictional resistance
Plastic property	Drawability
Physical property	Density, Viscosity, Modulus of elasticity, Surface roughness Grain size, Texture, Crystal structure, Composition, Transformation
Optical property	Refractive index, Reflectivity, Transmissivity, Emissivity, Gloss
Thermal property	Thermal conductivity, Expansion coefficient, Specific heat
Electromagnetic property	Dielectric constant, Electric resistivity, Hysteresis curve Iron loss, Magnetic permeability, Electromotive force
Chemical property	Corrosion, Oxidation

平成4年12月3日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Dec. 3, 1992; Accepted on Apr. 9, 1993) (依頼解説)

* NKK基盤技術研究所計測制御研究部Sプロジェクトチーム主査 (S-Project Team, Control Engineering Research Dept., Applied Technology Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

* 2 NKK基盤技術研究所計測制御研究部長 (Control Engineering Research Dept., Applied Technology Research Center, NKK Corporation)

Table 2. Needs of nondestructive characterization of materials for steel production.

Process	Needs of nondestructive Characterization
Plate mill	Residual stress
Hot rolling mill	Ferrite transformation
Cold rolling mill	Hardness, Surface roughness, r-value
Stainless steel sheet	Grain size
Electrical steel sheet	Grain size, Iron loss
Galvanealed steel sheet	Composition of coating layer
Seamless pipe mill	Residual stress
Common needs	Mechanical property (Tensile strength, Elongation, yield point)

3. 非破壊材質評価技術開発の現状

3・1 材質評価の要素技術

Table 1 に示すような多岐にわたる材質を非破壊で評価する場合、一般的に種々の物理法則に基づいた間接測定が主体となる。中心となる要素技術として、放射線を利用する方法、電磁気を利用する方法、超音波を利用する方法及び光を利用する方法があり、それぞれの適用可能な材質測定対象をTable 3 に示す¹⁾。

放射線のなかではとくにX線が広く用いられている。X線は波長が0.01~100 Åの電磁波であり、材料に照射されたX線は回折、蛍光といった特有の現象を起こすことから、材料の成分分析や結晶構造の解析等に用いられる。

また電気抵抗率、透磁率、保磁力、バルクハウゼン雑音等の電磁気特性は材質に依存するため、これらを測定することにより、化学成分、硬さ、結晶粒径等の材料特性の情報を得ることができる。

例えば、結晶粒界は磁気反転の芽や核の発生源となり、また磁壁の移動の際の抵抗となる。そのため保磁力と平均

Table 4. Presentation of nondestructive characterization of material properties in the ISIJ meeting from 1985 to 1992 ^{4) ~38)}

Material property		Number of presentation
Category	Measured property	
Mechanical property	Lankford-value	5
	Residual stress	2
	distortion	1
Physical property for surface	Gloss	2
	Roughness	2
	Flatness	3
	Thickness of membrane	2
	Composition of coating layer	3
	Hardening depth	2
	Color	1
Physical property for bulk	Grain size	3
	Retained austenite	1
	Ferrite transformation	3
	Elasticity	2
Electromagnetic property	iron loss	2
	Magnetic permeability	1
Total		35

結晶粒径との間には、逆比例の関係があることが理論的に導かれている²⁾。

超音波は材料の弾性的な特性を得る手段として、非常に有効であり、超音波の散乱、減衰及び伝搬速度等を測定することにより、結晶粒径、結晶方位、応力等の材料内部の情報を得ることができる。

光は振幅、減衰、波長、位相、偏波面といった多様なパラメータを有し、反射、吸収、屈折、分散、散乱、干渉、回折、遅延等の多くの現象を生ずることから、表面粗さ、光沢度、皮膜厚さ等の表面性状の計測手段として、非常に有効である³⁾。

Table 4 に最近10年間の鉄鋼協会講演大会において発表された非破壊材質評価に関するテーマを示すが、材料の機械

Table 3. Seeds technology for measurement of material property¹⁾

Seeds technology		Measured material property
Category	Physical effect	
Radiation method	X-ray diffraction X-ray fluorescence Neutron diffraction Mossbauer effect	Grain size, Stress, Texture Chemical composition, Coating thickness Stress, Texture Volume fraction of phase
Electromagnetic method	Electric resistance Eddy current Magnetic permeability Coercive force Barkhausen effect Magnetostriction	Chemical composition, Sorting Sorting, Hardness Grain size, Stress, Texture, Hardness Grain size, Stress, Texture, Hardness Grain size, Stress, Texture Stress
Ultrasonic method	Attenuation Scattering Velocity Acoustoelasticity	Grain size, Stress, Texture Grain size, Stress, Texture Stress, Texture, Anisotropy Stress
Optical method	Reflection & Scattering Attenuation & Spectrum	Surface roughness, Gloss Coating thickness

的性質に関するものや表面性状に関するものが比較的多いことがわかる^{4)~36)}。

以下に鉄鋼における非破壊材質評価の代表的な開発例を紹介する。

3・2 開発事例

3・2・1 オンライン溶融亜鉛めっき合金化度計³⁹⁾

合金化処理溶融亜鉛めっき鋼板は、鋼板を溶融亜鉛めっきした後、直ちに500~600°Cに保持された加熱炉に導き亜鉛層と鉄地層との間で相互拡散を行わせ、めっき層全体をFe-Zn合金としたものである。耐食性のみならず、塗装性、塗膜密着性に優れ、溶接性も良好であることから、自動車用を中心として、広く使用されている。

その製造プロセスにおいて合金化が進行し過ぎると、地鉄とめっき層の界面に Γ 相が発達してくる。この組織は硬くて脆いため、異常に成長するとプレス加工時にめっき層が粉状に破壊する現象を引き起こす。加工性能を維持しながら、上記の優れた特長を得るためには、合金化度（めっき層中のFe%）を最適な値に造り込むことが必要不可欠である。

そこでオンラインでの測定を目的とした単色励起蛍光X線法による合金化度計が開発された。単色励起蛍光X線法の原理をFig. 1に示す。モノクロメータを用いて単一波長化した、波長 λ_1 、 λ_2 のX線をそれぞれ入射角 ϕ_1 、 ϕ_2 で測定対象の試料に照射し、試料から発生するFeK α 蛍光X線及びZnK α 蛍光X線をそれぞれ受光角 ψ_1 、 ψ_2 で検出する。蛍光X線の強度から元素の存在量を求めることができるが、合金化処理溶融亜鉛めっき鋼板はめっき層中にも下地と同じ元素の鉄が含まれているため、1つの測定値からだけでは合金化度は一意に定まらない。そこで2組のX線光学系（低角側と高角側）を用いて測定を行い、Fig. 2に示すように連立方程式を解くことにより、合金化度及びめっき付着量を求めている。

現象を理論的に扱いやすい単一波長化した入射X線を使用することにより、理論的な厳密性が高く、かつ演算時間の短縮化が図られている。合金化度のオンライン精度はFig. 3に示すように、 $\sigma=0.7\%$ が得られている。

3・2・2 オンライン変態率センサ⁵⁾

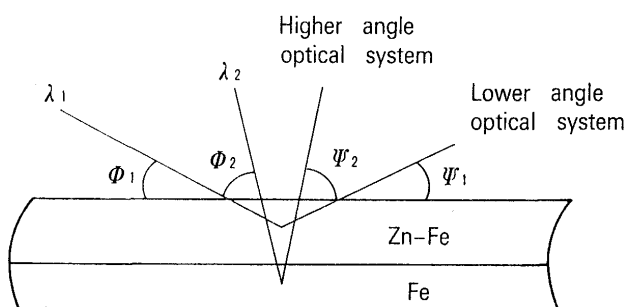


Fig. 1. Principles of the x-ray fluorescence method using monochromatic incident x-rays for Zn-Fe-alloy-coated steel sheets.

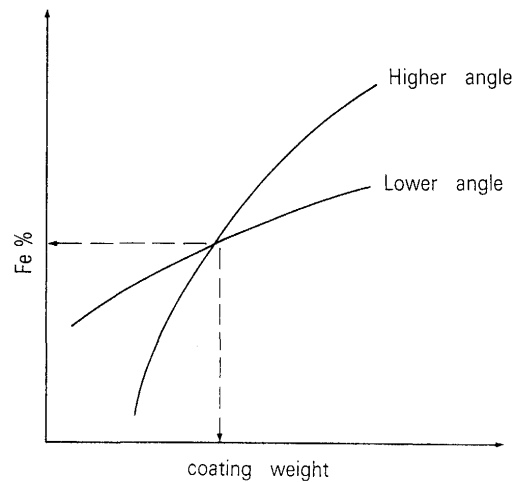


Fig. 2. Calculation of Fe% and coating weight.

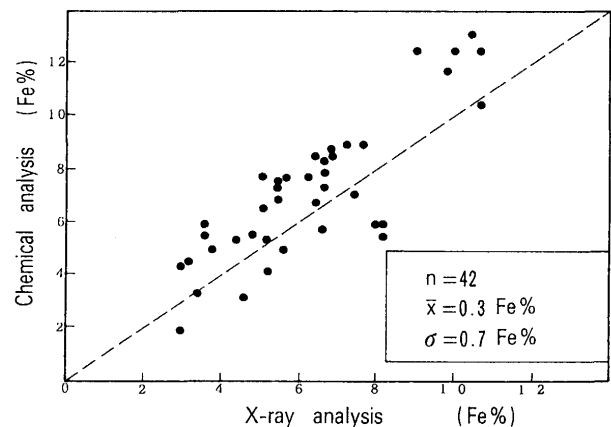


Fig. 3. Results of on-line analysis.

熱間圧延後の冷却過程で生ずる鋼のオーステナイトからフェライトへの変態挙動をオンラインで測定できれば、熱延製品の材質制御の高精度化及び品質管理の強化を図る上で非常に有効である。そこで熱延工程の冷却ゾーン内の測定を目的として電磁気を利用した非接触の変態率センサが開発された。本センサはFig. 4に示すように、励磁コイルと2つの検出コイルからなる電磁誘導方式のセンサであり、励磁コイルから発せられる交番磁束により検出コイルに誘起される電圧を測定することによって、磁界内に存在する被測定鋼の γ/α 変態に伴う比透磁率及び電気抵抗率の変化を検出する。走行中の被測定鋼の振動等によるセンサと被測定鋼間の距離変化による電圧変動は、2つの検出コイルの距離依存性の違いを利用して補償される。

本センサを熱延仕上げ圧延機後面のランナウトテーブル内に設置し、SS41熱延鋼帯の冷却過程における変態率変化を測定した結果がFig. 5である。熱延鋼帯の長手方向において加熱炉スキッドパターンに対応して、変態率が変化する様子が認められる。

3・2・3 鋼板結晶粒度測定装置¹⁵⁾

焼鈍材の機械的特性は結晶粒度と相関を有することが知

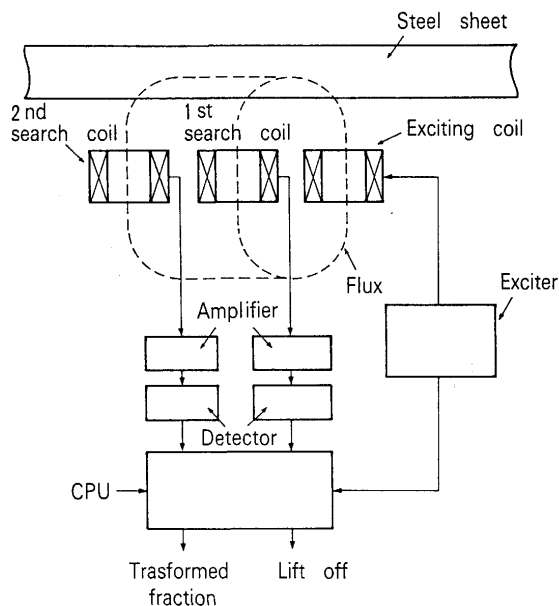


Fig. 4. Block diagram of the sensor for transformation measurement.

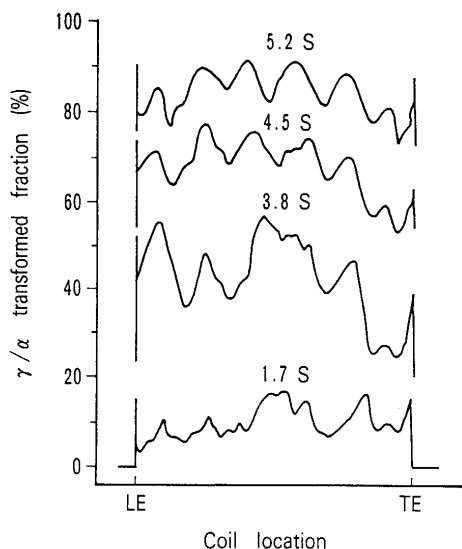


Fig. 5. Example of transformed fraction of SS41 on runout table of hot strip mill measured by on line transformation sensor.

られており、鋼板の品質管理を目的として、オンライン結晶粒度測定装置が開発された。

本装置の構成をFig. 6に示す。鋼板を磁化したときに発生するバルクハウゼン雑音及び鋼板透過磁束を測定することにより、結晶粒度が求まる。バルクハウゼン雑音は磁壁の不連続移動に起因し、結晶粒度番号との相関は、Fig. 7に示すように磁化レベルと磁化周波数により変化する。オンラインで高速測定するためには未飽和交流磁化で測定すればよい。

一方鋼板透過磁束は鋼板の透磁率の逆数に比例し、粒度番号とはFig. 8に示すような相関を示す。

バルクハウゼン雑音及び鋼板透過磁束の両方の信号を同

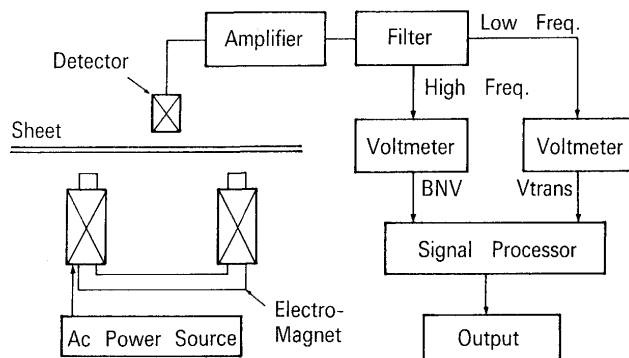


Fig. 6. Block diagram of apparatus.

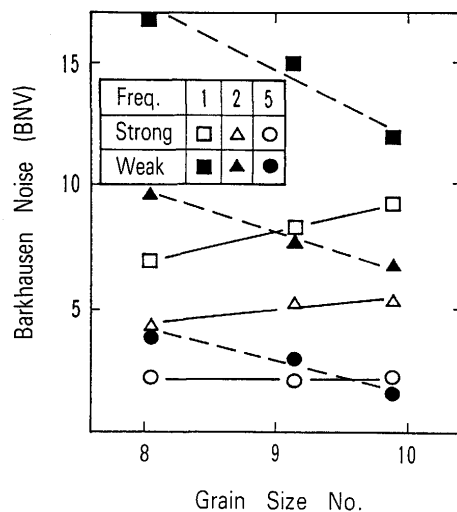


Fig. 7. Grain size No. vs BNV in various magnetizing conditions.

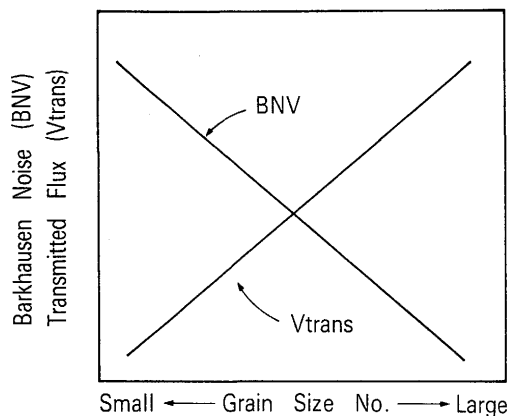


Fig. 8. Schematic relation.

時に検出し、演算する方法を採用した結果、鋼板結晶粒度の測定精度はFig. 9に示すように粒度番号対応で ± 0.5 が得られている。

3・2・4 電磁超音波法による冷延鋼板のF値測定²⁸⁾

ランクフォード値は材料の幅方向の対数ひずみと板厚方向の対数ひずみとの比であり、冷延鋼板の深絞り性の評価指標として用いられている。このランクフォード値の面内

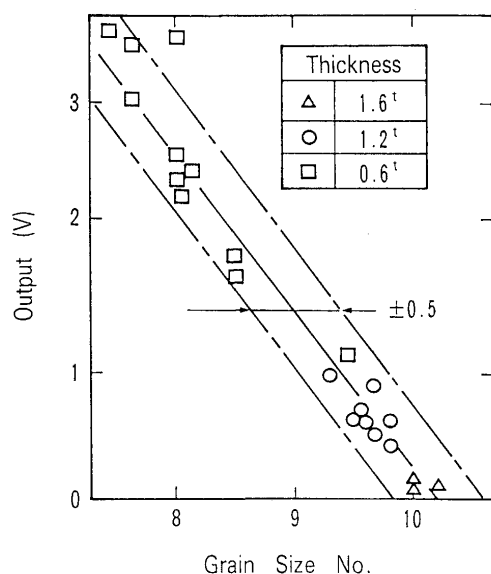


Fig. 9. Result of measurement.

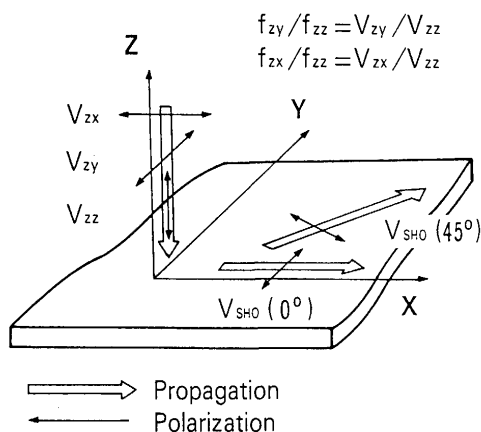
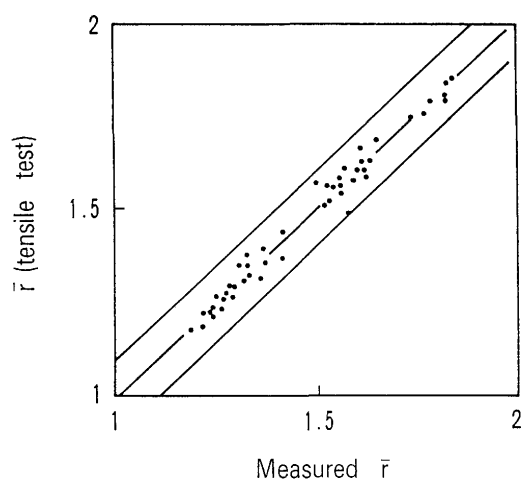


Fig. 10. Ultrasonic waves in cold rolled steel sheet.

Fig. 11. Correlation between $\bar{r}$ (tensile test) and measured $\bar{r}$.

平均 ($\bar{r}$) を共振型電磁超音波トランスデューサにより測定する方法が開発された。

Fig.10に示す3種類の超音波の共振周波数の測定値(f_{zx} , f_{zy} , f_{zz}), 鉄単結晶の3個の弾性係数(C_{11}^0 , C_{12}^0 , C_{44}^0)及び予め一定の値に設定した2種類のSH₀板波超音波の伝搬時間比 K_3 から, 下式によりヤング率 E 及び $\bar{r}$ 値が算出できる。

$$E = \text{func}(K_1, K_2, K_3, C_{11}^0, C_{12}^0, C_{44}^0) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{r} = \text{func}(E) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$K_1 = f_{zy}/f_{zz}, K_2 = f_{zx}/f_{zz} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$K_3 = T_0/T_{45} = (\text{一定値に設定}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

T_0, T_{45} : SH₀板波の同一距離伝搬時間

静止状態の平板での実験では, 引張り試験による $\bar{r}$ 値との比較試験に置いて, Fig.11に示すように測定精度 $\sigma = 0.05$ 以下が得られており, また走行速度 2 m/秒のオンラインシミュレーションにおいても静止状態と同様のS/Nが得られている。

4. 今後の課題

4・1 非破壊材質評価技術の課題¹⁾

非破壊材質評価技術の研究開発は近年非常に活発化しているが, 鉄鋼製品の造り込みや品質保証のための重要な要素技術として, さらに広く活用されていくためには, もう一段のブレイクスルーが必要である。

非破壊材質評価を実用化する上での最大の問題点は, 測定に影響を与える因子が非常に多いことである。超音波の減衰定数の測定を例にとると, 結晶粒径, 結晶粒径の分布, 結晶粒の形状, 結晶構造, 化学成分, 内質欠陥の有無, 相状態, 析出, 内部応力等の材料自体が有する影響因子と, 探触子の特性, 使用周波数, 超音波のモード, 発生電気ノイズ, 探触子と被測定材との音響結合状態等の超音波測定系が有する影響因子の両方を考慮した評価が必要である。ある影響因子に着目し, その他の影響因子を固定して測定値との相関を得ることは比較的容易であるが, 実際の測定においては多数の因子が測定に影響を与えるため, 材質を精度よく評価することはそれほど容易ではない。また材質は一般的に材料中均一ではないため, 測定値が評価すべき測定部位を代表しているかどうかを見極める必要がある。

4・2 課題解決の展望

4・2・1 実用化技術の開発展開

非破壊材質評価は原理的に可能であっても, 前項に述べたような課題を有することから, それぞれのニーズに応じた実用化技術を個々に確立していくことが必要である。以下にその方策を示す。

(1) 材質測定に用いるシーズ技術によって, 測定可能な材料の部位が限定されるため, まず測定の目的にかない, 測定方法の特徴を生かせる最適な手法を被測定対象毎に確立する。

(2) 多岐にわたる因子の影響度合を事前に定量的に把握

しておく。

(3) 複合計測により、情報量を増やす。例えば結晶粒径は超音波だけでなく、X線や電磁気によっても評価が可能であり、これらを複合的に活用することにより、材質評価の精度向上を図っていく。

(4) 被測定材の製鋼から圧延、熱処理にいたるまでの製造履歴を的確に把握し、トラッキングすることにより、影響因子の解析のための有効な情報とする。

また実用化の拡大を図る上で、今後期待したい開発テーマを以下に示す。

(1) 悪環境の鉄鋼プロセスにおいて、測定系の安定性及び再現性が確保でき、かつ小型、高精度、低コストを実現するセンサ技術及びエンジニアリング技術の開発

- ・超音波：非接触超音波センサ（レーザ超音波）、送信波形制御技術等

- ・X線：オンライン短時間高精度計測技術等

- ・電磁気：電磁気的な外乱要因防止技術

(2) 測定結果から、真に必要なとする情報のみをオンラインリアルタイムで抽出する高速信号処理技術の開発

4.2.2 開発体制

非破壊材質評価技術の開発に当たっては、材料技術と計測技術の融合が不可欠である。またシーズ技術の基礎研究だけでなく、実用化のための応用研究が重要な鍵となる。

そのため材料技術者と計測技術者が一体となった研究開発体制及びシーズ技術の研究開発者と実用化を担う技術者の相互協力体制の構築が開発を成功させるための必要条件であると考える。

5. 結言

鉄鋼における非破壊材質評価のニーズと、それらに応える技術開発の現状及び今後の課題について概観した。

非破壊評価技術の研究開発は近年非常に活発化してきているが、鉄鋼製品の造り込み技術や品質保証のための重要な要素技術として、さらなる拡大を図っていくためには、実験室レベルからオンライン化レベルへのもう一段の飛躍が必要である。

そのためには材料技術と計測技術、ならびに基礎シーズ技術と実用化応用技術を一体化させた開発体制の構築が不可欠であると考えられる。

文 献

- 市川文彦：第140回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編），（1991），p. 137
- A. Mager：Ann. Phys., 11 (1952) 1, p. 15
- 田辺英也：日本鉄鋼協会計測制御部会第100回記念大会講演集，（1989），p. 39
- 塩住基仁，浅野有一郎，相沢 均：鉄と鋼，71 (1985)，S392
- 森田正彦，橋口耕一，岡野 忍，橋本 修，西田 稔：鉄と鋼，71 (1985)，S1089
- 松井健一，橋 秀文：鉄と鋼，72 (1986)，S399
- 八角忠明，下山雄二，大西建男，秋月敏夫，柳本隆之，浅野有一郎：鉄と鋼，72 (1986)，S1162
- 山本章生，橋 秀文，高橋秀之，波床尚規，山口耕毅，松井健一：鉄と鋼，72 (1986)，S1164
- 八田雅明，川島捷宏，末広正芳，矢田 浩，遠藤貴秀，大坪 誠：鉄と鋼，72 (1986)，S1165
- 八田雅明，川島捷宏，末広正芳，矢田 浩，遠藤貴秀，大坪 誠：鉄と鋼，72 (1986)，S1166
- 森田正彦，橋口耕一，岡野 忍：鉄と鋼，72 (1986)，S1167
- 石原道章，和智真行，中西 功，砂原 徹：鉄と鋼，73 (1987)，S1077
- 本田達郎，酒井俊彦，山本章生，平山憲雄，吉田松夫：材料とプロセス，1 (1988)，p. 584
- 松尾次郎，松實敏幸，村松 匠，川上耕有，北村公一：材料とプロセス，1 (1988)，p. 1581
- 石原道章，南 英樹，勝新一郎，田谷耕一：材料とプロセス，2 (1989)，p. 501
- 藤沢和夫，村山理一，米原貞夫：材料とプロセス，2 (1989)，p. 504
- 内田洋之，虎尾 彰，市川文彦，八角忠明：材料とプロセス，2 (1989)，p. 508
- 横張 明，吉野正人，鈴木勝也，田辺英也，新田浩一：材料とプロセス，2 (1989)，p. 1454
- 藤沢和夫，村山理一，福岡秀和，平尾雅彦：材料とプロセス，3 (1990)，p. 428
- 本田昭芳，原田修一，田口 昇，山内賢志，加藤宏晴，西藤勝之：材料とプロセス，3 (1990)，p. 1284
- 河合壮三郎，鈴木政幸，境 禎明：材料とプロセス，3 (1990)，p. 1286
- 前田孝三，竹腰篤志，竹中正樹，今岡幹士，川田 孝：材料とプロセス，3 (1990)，p. 1276
- 矢追臣知，石原道章，寺園勝憲，永井秋男，三田伸介：材料とプロセス，4 (1991)，p. 319
- 本郷宏通，升田博之，住吉英志，門馬義雄：材料とプロセス，4 (1991)，p. 324
- 遠藤敏夫，八木富一，高田健一：材料とプロセス，4 (1991)，p. 325
- 伊達賢治，服部敏幸，貞国克巳：材料とプロセス，4 (1991)，p. 359
- 藤沢敏夫，福岡秀和，南 康司，村山理一，平尾雅彦，齊田文弘：材料とプロセス，4 (1991)，p. 1363
- 俵口隆雄，赤木俊夫，川島捷宏：材料とプロセス，4 (1991)，p. 1364
- 井原郁夫，相澤龍彦，木原諄二，大平克己：材料とプロセス，4 (1991)，p. 1365
- 中窪 淳，大河内敏博，藤吉佐敏，片山賀彦，三宮静悦：材料とプロセス，4 (1991)，p. 1380
- 東 洵，出島勝郎，岡本好平，植山通孝：材料とプロセス，5 (1992)，p. 367
- 本蔵義信，藤井秀樹，荒川英男，鷺見和正：材料とプロセス，5 (1992)，p. 370
- 村山理一，山本英美夫，田谷耕一，齊田文弘，平沢浩一，藤沢和夫：材料とプロセス，5 (1992)，p. 374
- 俵口隆雄，赤木俊夫，川島捷宏，吉原 敦，村田峰生，縄田康隆：材料とプロセス，5 (1992)，p. 375
- 井原郁夫，相澤龍彦，木原諄二，中曽教尊：材料とプロセス，5 (1992)，p. 376
- 古屋泰文，中居則彦：材料とプロセス，5 (1992)，p. 449
- 守屋 進，虎尾 彰，市川文彦，牧野義和，武智真一，塩川 隆：材料とプロセス，5 (1992)，p. 1408
- 小平小治郎，大屋敷富幸，武捨義則，木野裕敏：材料とプロセス，5 (1992)，p. 1420
- 西藤勝之，田辺英也，今井清隆，加藤宏晴，本田昭芳：日本金属学会会報，30 (1991)，p. 307