

© 1986 ISIJ

製造プロセスにおける鋼材のオンライン 非破壊材質評価



宮 川 一 男*

On Line Non-destructive Evaluation of Steel Quality in Manufacturing Process

Kazuo MIYAGAWA

1. ま え が き

鋼材の品質保証項目の一つである材質保証には、現在、内外規格及びユーザとの契約によつて、成品から一定量の試験片を採取して、これを規格に基づいて精密機械加工し、さらに各種の強度試験機によつて破壊試験を行つて合否の判断を下している機械試験と金属組織試験とがある。しかしこの方法には次に挙げるような問題点がある。

(1) 最新のミルは高速化、大型化されているので、試験結果判明まで日時を要する現在の機械試験法では不良品発生時はその損失が多量であり、結果判明まで成品をストックすることになり次工程に送れない。

(2) 試験片採取、精密機械加工、破壊試験、試料研磨、顕微鏡観察などの作業は多量な設備と人員を必要とする。

(3) 試験費用が高価となる。

(4) 試験片採取による製品の良部の損失が大きい。

(5) ミルの各工程で十分つくり込みが行われており工程保証がされているので、大半の製品は十分規格内に入っている。

(6) ユーザからの要求品質が高級化し、従来のロット単位の保証では不十分で、全数検査及び全長検査により異材や規格外れがユーザに出荷されることを防止する必要がある。

これらの問題を解決するための方策として考えられるのが非破壊検査手法すなわち非破壊材質評価法による代替である。さらに、この方法を発展させて鋼材のオンライン非破壊評価を行えるようにすれば、歩留向上、省工程、省力化が大幅に実現できることになるであろう。このような理由から、圧延鋼材の品質保証にオンライン非破壊評価法の採用が可能かどうかについて検討した結果の概要を報告して、今後の発展を期待することとした。

2. 鋼材の品質保証

鋼材の品質保証は次の項目から成り立っており、従来

製鉄所においては主として検査課の主管事項であつた。

(1) 機械試験 (2) 組織試験 (3) 成分分析

(4) 形状・寸法検査 (5) 欠陥検査

(1) 機械試験 成品のトップ部またはボトム部より採取した試料について、規格に基づいて精密機械加工して作成した試験片を用いて引張試験機、シャルピー衝撃試験機などの各種の試験機によつて強度試験が実施されている。引張強さ、降伏点、伸び、衝撃値、硬度 etc が使用されている。

(2) 組織試験 採取した試料を研磨して顕微鏡観察を行つて結晶粒度、組織、介在物、焼入深さなどを測定している。

(3) 成分分析 化学分析が機器分析に移行して主流を占めている。最近ではオンライン分析が検討されている。

(4) 形状・寸法検査 近年ではラインのオペレータによつて形状・寸法検査が行われている。最近では光学機器 (特にレーザ) の進歩などによつて装置化が進みオンライン計測化が実現されつつある。

(5) 欠陥検査 いわゆる非破壊検査 (nondestructive Inspection) である超音波探傷 (UT)、渦流探傷 (ET)、放射線探傷 (RT)、磁気探傷 (MLFT)、磁粉探傷 (MPT)、浸透探傷 (PT) の各試験装置がライン上に設置され、オンライン検査が実施されている。すなわち鋼材の表面欠陥や内部欠陥を検出するため棒鋼、線材、鋼板、鋼管工場などにおいて、各種の非破壊試験装置が活躍している。しかも1種類の利用ではなく必要に応じて2種類以上の試験方法が、工程ごとに採用されており、品質保証上必須の設備となつている。

機械試験、組織試験ともサンプルの試験結果であり製品そのものの値ではない。厚板を例にとるとトップ部またはボトム部より長さ 300~400 mm×板幅のサンプルを採取しているが、このサンプルが幅 4.5 m 長さ 18 m にも及ぶ面積の広い厚板全体を代表しているかどうかは問題である。またホットコイルにしても同様でトップ部、ミドル部、ボトム部、コイル幅の中央部とエッジ部

昭和 60 年 8 月 29 日受付 (Received Aug. 29, 1985) (依頼解説)

* 日本大学生産工学部 工博 (College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumi-cho Narashino 275)

表 1 機械試験に要する日数

項 目	所 要 日 数
引 張 強 さ	2
降 伏 点	2
伸 び	2
衝 撃 値	3
再 試 験	7

で、すべてが均一であるかどうか疑わしい。成分分析にしてもレドール分析値1個で数百tの鋼の成分を代表しているが、铸造され長く圧延された鋼材の各位置で完全に均一とは考えられない。より品質保証を確実にするためには長さの長い厚板やホットコイルのトップ部、ミドル部、ボトム部そのものの試験結果が必要である。いわゆる全長検査が求められるゆえんである。この要望を達成するためには是非とも鋼材のオンライン非破壊評価法を完成せねばならない。

筆者は以上述べた5項目ともオンライン化されるべきであり、それによつて品質保証の基本思想である“品質は製造工程中に作り込む”ことが確実に実行されるものとする。

3. 機械試験の現状と問題点

機械試験が非破壊評価法に代替できるものと仮定した場合のメリットについて厚板を例にとつて述べる。

(1) 試験結果の判明の迅速化

機械試験は試験材のサンプリング、機械加工及び機械試験機による試験などの手順を要するため、試験には表1に示すように時間がかかる。

現状のシステムでは情報が非常に遅く工程に対して適格なアクションがとれない。ラインの高速化、大型化が行われた最近のミルでは生産量が大きいので特に不良品発生時はその損失が多である。これにかわつて製造工程の各所で材質の非破壊評価の情報がえられれば、この情報を前後工程にはねかえしてタイミングのよい品質作り込みが可能となる。このため材質のばらつきがなくなり全長保証が可能となり、不合格も減少し歩留りアップとなり、納期短縮と同時に製品保管のための倉庫経費も軽減され、さらに次工程での仕掛り待ちが減少できるなど数々のメリットがある。

(2) 省力化

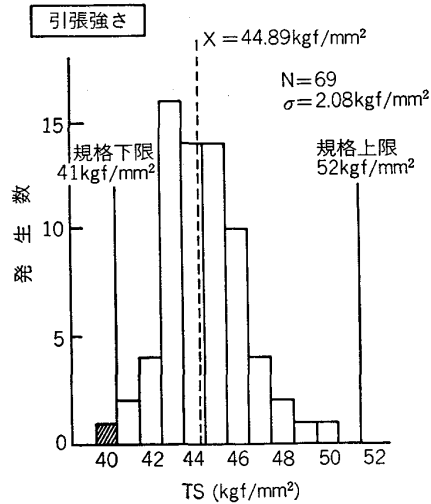
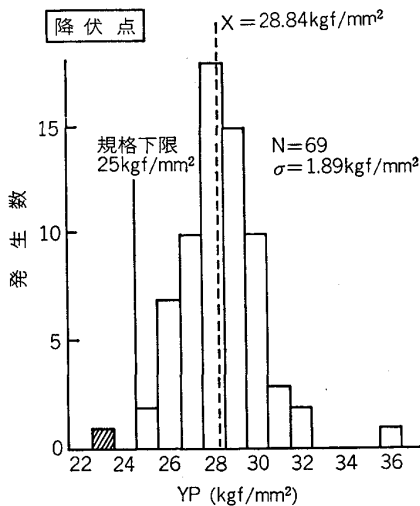
機械試験の業務は試料採取、試験片機械加工及び各種強度試験などで作業内容が複雑かつ非能率であるため多数の人員を必要とする。

このため自動化によつて機械試験の省力化及び高速化をはかる動きも活発¹⁾であり、厚板の試験片採取のための遠隔制御式ガス切断ライン、シャルピー衝撃試験片加工用トランスフェマシンの導入、シャルピー衝撃試験機ハンマ持ち上げ自動化、全自動引張試験機の採用、及びロボットで加工しコンピュータで管理する材料試験システムの完成などがあり、すでに実用化され成果をあげている。しかし機械試験は小ロット作業であるため機械化できる範囲が狭く省力化に限度がある。

(3) コスト低減

機械試験には多数の人員と設備が必要であり試験費用が高価である。さらに再試験などのため残材の保管管理が必要である。

(4) 省資源化



非破壊材質判定の精度	$2\sigma = \pm 1\text{kgf/mm}^2$	$2\sigma = \pm 2\text{kgf/mm}^2$
非破壊材質判定のみですむもの	93.3%	83.4%

非破壊材質判定の精度	$2\sigma = \pm 1\text{kgf/mm}^2$	$2\sigma = \pm 2\text{kgf/mm}^2$
非破壊材質判定のみですむもの	91.6%	81.2%

図 1 40 kgf/mm² 熱延鋼板の引張試験値と規格値との関係

表 2 オンライン非破壊評価法のメリットと背景

メリット	ニ ー ズ	背 景
歩留向上	不合格発生時の対処迅速化による不良品発生量及び無駄な作業の低減、検査のための試験片採取による歩留低下の減少	プロセスの大型化、高速化、連続化
クレーム低減	材質のばらつきをなくし全長保証を強化	ユーザの品質保証要求の高級化
省力化	材質検査の簡略合理化による省力	人件費、設備費の上昇による検査費用の増加
納期保証	検査迅速化による納期の保証短縮、製品マードの合理化	ユーザへの納期確保の必要、製品フローのボトルネックによる倉庫管理の無駄
材質向上	迅速適確な情報のフィードバック、フィードフォワードによるプロセスの最適化	製品の多称化、複雑化、高級化

機械試験は必ず製品の良材の一部分から試料をサンプリングして行われる。内外規格及びユーザとの契約によって行われる試験は 5~50t 当たり 1 件とその試験量にはかなり幅があるが平均すると全生産量の約 2% にも相当する材料損失となつている。

(5) 規格との対応

図 2 は 40 kgf/mm² 級熱延鋼板の引張試験値の一例を示したものであるが、大部分のものが規格値を満足していることがわかる。もしも非破壊材質評価により $2\sigma = \pm 1 \text{ kgf/mm}^2$ 及び $2\sigma = \pm 2 \text{ kgf/mm}^2$ の精度が期待できるならば、全機械試験のそれぞれ約 90% 及び 80% に相当する量については完全に非破壊評価のみで代行することになる。すなわち本当に機械試験を必要とするものは全体の約 10% 及び 20% だけでよいことになる。

また機械試験値は詳細な絶対値でなくある幅をもつた代表値でもよいことがわかる。

(6) メリットと背景

これまでに述べた機械試験システムを非破壊評価システムに代替した場合のメリットと背景を表 2 に示す。

4. 鋼材のオンライン非破壊評価法

これまで鋼材の性質と非破壊計測値との関係に関する

表 3 非破壊材質判定法

方法		得られる情報
超 音 波	パルスエコー法	相異なる組織の厚さなど
	○減衰	結晶粒度、組織、介在物など
	○音速 ○表面波発生角 共振周波数	弾性率、ポアソン比、密度組織の方向性など
磁 気	散乱ノイズレベル	結晶粒度、組織、介在物など
	音響放射 (AE)	
電 気	○保磁力 鉄損 飽和磁気 残留磁気 ○透磁率	化学成分、結晶粒度、組織 特に保磁力は、硬度との相関が高い
	○バルクハウゼン効果	結晶粒度
	磁歪現象	化学成分、応力
放 射 線	衝撃波の過渡現象	化学成分
	○電気抵抗 熱起電力	化学成分
	格子間隔	化学成分、応力

報告^{2)~9)}は多数あるが、強度試験値との関係についての報告は少ない。例えば超音波減衰と結晶粒度・金属組織、超音波音速と硬度、電気的方法による異材判別、磁

表 4 試験材の明細

試験材符号	鋼種 (規格)	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)											サンプル数
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	V	T. Al	
A-1	SS41	10.0	0.22	0.05	0.79	0.018	0.017	0.02	0.02	0.04			0.002	1
A-2	"	14.0	0.22	0.05	0.89	0.017	0.013	0.01	0.02	0.02			0.002	1
A-3	"	12.0	0.15	0.25	0.61	0.012	0.013	0.01	0.02	0.01			0.027	1
A-4	"	19.0	0.17	0.27	0.70	0.017	0.015	0.01	0.01	0.01			0.027	1
A-5	SM50A	9.0	0.16	0.44	1.36	0.019	0.013	0.01	0.02	0.02		0.004	0.030	1
A-6	"	19.0	0.18	0.36	1.39	0.015	0.010	0.01	0.02	0.02		0.034	0.028	1
A-7	"	16.0	0.15	0.37	1.39	0.017	0.011	0.01	0.01	0.02		0.036	0.024	1
A-8	X-52	12.7	0.11	0.24	1.16	0.016	0.008	0.01	0.02	0.02	0.017	0.001	0.020	2
A-9	"	16.0	0.12	0.26	1.22	0.023	0.010	0.01	0.02	0.02	0.033	0.003	0.024	2
A-10	X-60	9.5	0.14	0.26	1.25	0.018	0.009	0.01	0.01	0.01	0.030	0.003	0.029	4
A-11	X-65	19.5	0.11	0.26	1.32	0.020	0.003	0.01	0.25	0.02	0.042	0.060	0.033	3
B-1	X-60	15.9	0.13	0.25	1.29	0.019	0.010				0.037	0.041	0.029	7
B-2	"	"	0.13	0.25	1.23	0.019	0.012				0.038	0.037	0.027	7

気測定値と硬度・熱処理温度との関係など種々報告²⁾³⁾されている。しかしこれらはすべて機械試験と同様に試験片を採取した試料を機械加工し非破壊計測がしやすいように調製しており、しかも実験用の装置を使用して机上で時間をかけて測定した結果である。筆者が提唱するオンライン非破壊評価法は各種の基礎実験結果をベースにして鋼材の強度と最も関係の深い非破壊計測値を探索し、その測定装置を製造ラインに設置して直接に流れている鋼材について測定評価する方法である。このため厚板であれば製品寸法のそのままの姿でどの位置でも計測できる装置であり、さらに測定時間もできるだけ短時間であり材料の流れを阻害しないことが必要条件である。このため材料と検出端との関係は非接触状態が最善であるが不可能な場合は短時間(秒単位)の接触状態で測定できる方法であることが大切である。

過去の文献^{2)~6)}を参考にして非破壊計測方法と得られる情報との関係を表3に示す。なお表中丸印を付した項目は筆者ら⁷⁾が種々実験して検討した項目である。さらにそのとき使用した試験材の明細を表4に示す。その実験結果の一例を以下に示す。

(1) 引張強さと非破壊計測値との関係

引張強さと保磁力との関係を図2、引張強さと初透磁率との関係を図3、引張強さと表面波発生角との関係を図4に示す。保磁力、初透磁率及び表面波発生角による引張強さの推定精度はそれぞれ標準偏差 0.92, 0.52 及び 0.81 kgf/mm² であり極めて高度の相関関係が存在している。

(2) 降伏点と非破壊計測値との関係

降伏点と保磁力との関係を図5、降伏点と初透磁率との関係を図6に示す。

(3) 結晶粒度と非破壊計測値との関係

フェライト結晶粒度番号とバルクハウゼン効果発生パルス総数との関係を図7、フェライト結晶粒度番号と横

波減衰係数との関係を図8に示す。

(4) 破面遷移温度と非破壊計測値との関係

破面遷移温度と超音波散乱減衰係数との関係を図9、破面遷移温度とバルクハウゼン効果発生パルス総数との

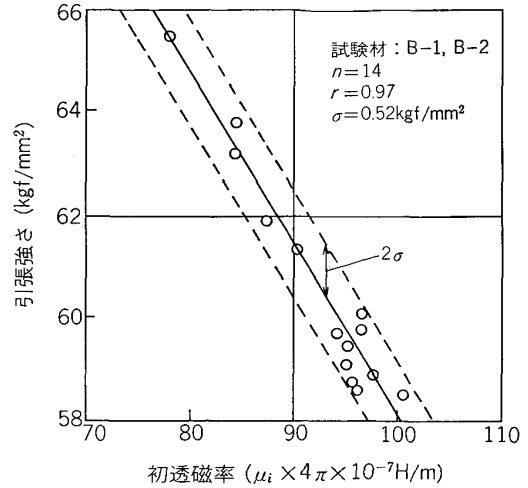


図 3 引張強さと初透磁率との関係

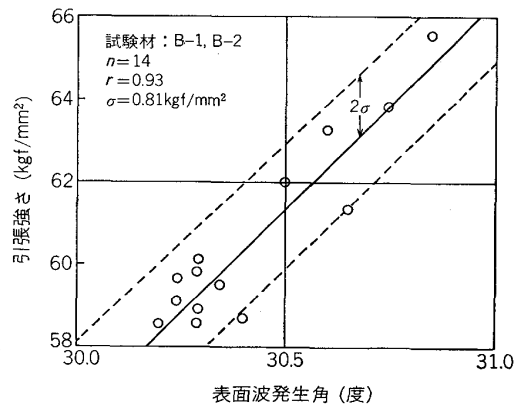


図 4 引張強さと表面波発生角との関係

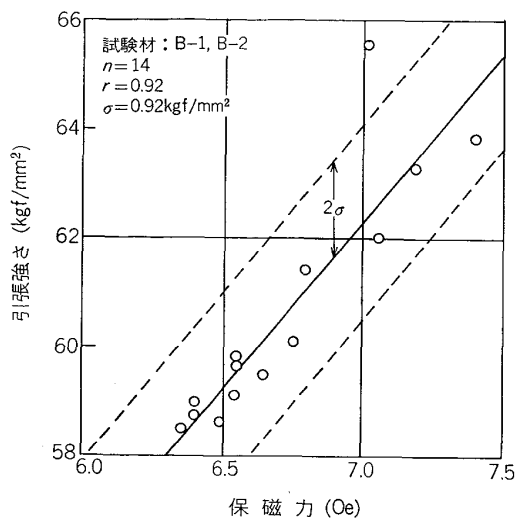


図 2 引張強さと保磁力との関係

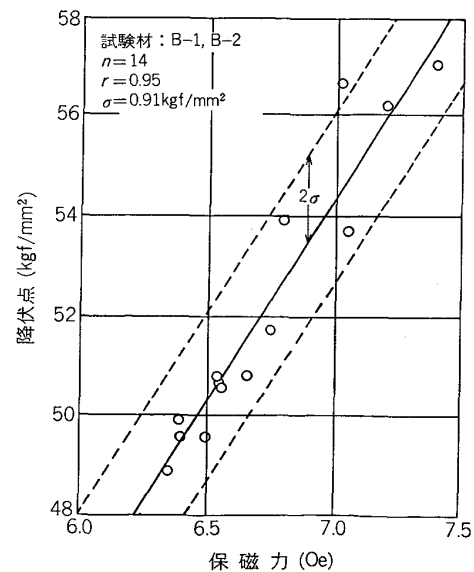


図 5 降伏点と保磁力との関係

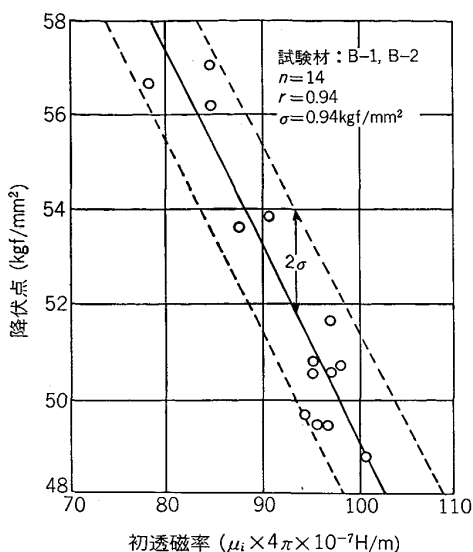


図 6 降伏点と初透磁率との関係

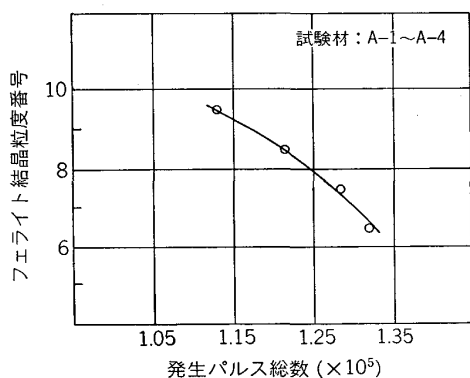


図 7 フェライト結晶粒度番号とバルクハウゼン効果発生パルス総数との関係

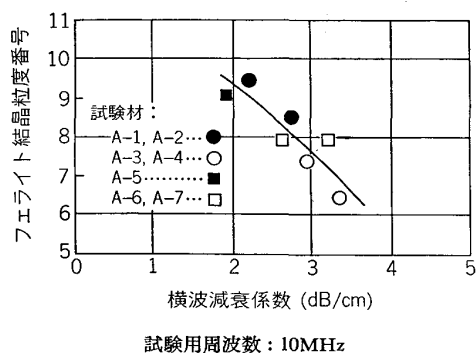
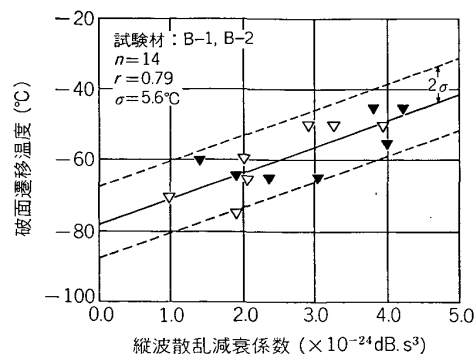


図 8 フェライト結晶粒度番号と横波減衰係数との関係

関係を図 10 に示す。

以上に示したように引張強さ、降伏点、結晶粒度、破面遷移温度などと非破壊計測値との間には高度の相関関係が存在することが判明した。なお非破壊計測値を2つ以上組み合わせて機械試験値を推定すると1つの非破壊計測値のみで推定する場合より高精度で評価しうることもわかっている。さらに化学成分がすでに判明している



試験用周波数: 15MHz 及び 25MHz

図 9 破面遷移温度と超音波散乱減衰係数との関係

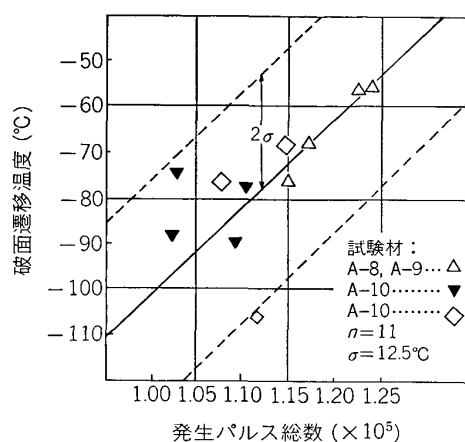


図 10 破面遷移温度とバルクハウゼン効果発生パルス総数との関係

場合にはそれを併用することによってより高精度の推定が可能である。

5. 今後の方向

先にも述べたように基礎実験を幅広く実施して基礎データがえられたら、その最善と考えられる非破壊計測方法について製品鋼材のあり姿のまま短時間で測定可能な試験装置及び方法の開発が必要である。

(1) 保磁力の測定

従来保磁力の測定は透磁率計を用い小寸法の短冊試験片により測定しているが、オンラインの鋼材に応用する場合には寸法の影響をうけない装置の開発が必要である。筆者らはすでに組合せヨーク法保持力測定装置を開発し、これを厚板の上に設置して約 15 秒で保磁力が測定できることを確認している。これによってL方向、C方向の保磁力の測定が可能となった。

(2) 初透磁率と電気抵抗率の測定

初透磁率と電気抵抗率の測定はいずれも小寸法の短冊試験片を用いているが、これらの非破壊計測法としては2周波数渦流法⁸⁾が有効であると考えられる。この方法は試験材の寸法の影響がなく大寸法の鋼材の測定にも十

分適用可能であるが、原理的に渦流法は表層部の情報しかえられないため、表層部と内部とで材質に差があるような場合には適用が困難である。

(3) バルクハウゼン効果の測定

バルクハウゼン効果を求めるための測定装置⁷⁾はもともと大寸法の鋼材の測定にも十分適用可能に考えたものであるが、基礎試験の精度を高めるため表面を機械加工で仕上げた小寸法の試験片を用いたので、表面加工をしていない大寸法の試験片で再試験する必要がある。

(4) 表面波発生角及び超音波減衰の測定

表面波発生角及び縦波超音波減衰の測定は圧電素子トランスジューサを用い水浸法または油などの接触媒質を介した直接接触法で行っているが、これらの方法を高温で適用することは不可能であり、かつ試験材の表面状態によっても大きな制限がある。表面波の伝播速度、縦波及び横波モード超音波減衰の非破壊計測法としては、電磁超音波トランスジューサを用いる方法⁹⁾¹⁰⁾が適用可能である。この方法は試験材が高温の場合にも可能であり、かつ試験材の表面状態の影響も極めて少ないという特長がある。

(5) 鋼材組織の方向性の測定

降伏比は鋼材組織の方向性と関係が深いので(1)で述べた保磁力測定装置をL方向とC方向とに設置して、それぞれの降伏点を求め両者の比を算出する方法が可能である。

また非接触で適用できる電磁超音波トランスジューサを用い、横波の伝播速度を利用して鋼材組織の方向性を測定する方法については筆者らの報告¹¹⁾がある。

6. ま と め

鋼材の品質保証のあり方について検討すると共に機械試験の現状と問題点について述べ、製造プロセスにおける鋼材のオンライン非破壊評価が可能とした場合のメリ

ットについて述べた。

さらに実験装置による基礎試験によつて磁気特性、超音波特性などと機械試験値または結晶粒度との関係について検討し、機械試験値または金属組織と非破壊計測値との間には高度の相関関係が存在することを確認した。さらにそのオンライン化の今後の方向についても考察して、鋼材のオンライン非破壊評価の可能性が十分あることがわかった。

この方法の最大の特長は、現在のように多大な人手と経費と材料損失のある機械試験を極力少なくすることにより品質情報の伝達がより一層迅速になることにある。したがつて今後機械試験及び組織試験をオンライン非破壊評価に移行させるための研究が組織的に大規模に行われることは極めて有意義であると考えられる。

文 献

- 1) 白浜 浩: 第 16 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1971), p. 117
- 2) 磯野英二: 非破壊検査, 17 (1968), p. 442
- 3) 磯野英二: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 916
- 4) 小田邦男, 神田喜美雄: 非破壊検査, 15 (1966), p. 45, p. 351
- 5) 宮川一男, 佐々木幸人, 河村皓二, 松田直也: 非破壊検査, 22 (1973), p. 118
- 6) 宮川一男, 佐々木幸人, 松田直也: 非破壊検査, 27 (1978), p. 644
- 7) 宮川一男, 佐々木幸人, 松田直也: 非破壊検査, 31 (1982), p. 11
- 8) 川島捷宏, 土門 齊: 非破壊検査, 21 (1972), p. 578
- 9) 宮川一男, 佐々木幸人, 木村新一郎, 河村皓二, 松田直也, 佐藤修一: 非破壊検査, 28 (1979), p. 604
- 10) 宮川一男, 佐々木幸人, 河村皓二, 佐藤修一: 非破壊検査, 29 (1980), p. 150
- 11) 宮川一男, 佐々木幸人, 松田直也, 佐藤修一: 非破壊検査, 28 (1979), p. 110