

669.1:620.179.1

解 説

非破壊検査法による鋼材の材質判定法について*

磯 野 英 二**

On the Evaluation of Steel Quality by Non-destructive Testing Technique

Eiji ISONO

ま え が き

材料中に存在する欠陥を検出し、合否を判定することを目的として発展してきた非破壊検査法の、近年における普及発達と各分野での関心の高まりはめざましいものがある。しかし製造現場においてはこのほかに、異材混入の検出あるいは熱処理の適否の判別など、材質に関連したことを迅速簡便に行なう必要性がしばしば発生する。そしてこのような場合、従来は化学分析や硬さ試験あるいは火花試験などの、いわゆる破壊試験に頼らざるを得なかつた。ここにおいて、これらのことを非破壊的に簡便に検出あるいは判別することができれば、その利益は大きく、欠陥検査法と平行して各処でこれら材質の非破壊的な試験方法が検討されていることは、品質管理の遂行上当然のなりゆきであるといえよう。

以下主として鉄鋼の組織に関連した比較的現場的な材質試験の問題を中心に現状を展望してみる。

1. 材質試験について

いわゆる非破壊検査あるいは非破壊試験といつても、内容は種々雑多でその分類も必ずしも明確ではない。一例として表1に試験法を中心にした分類¹⁾と、試験の原理を中心にした分類²⁾を示しておいた。この両者はいずれも非破壊試験の領域を非常に広義に解釈分類しておりこれによるときは、その方法は最新の物理学の知識を必要とする分野にもまたがり大変なことがわかる。一般的にはこの中の特定のものについて取扱われている。

一方一口に材質といつてもその内容は多岐にわたり非常に複雑で明確な定義はないと思われる。そして材質試験という用語も一般的ではないので、これから取上げていく材質試験を表2に示すように分類しておく。すなわち試験の目的あるいは対象を中心にまとめたものであるが、これらも相互に関連するものがあり、明確には区分できないものである。

現在非破壊的な材質試験法もかなり種々の分野でいろいろのことが検討され実用化もされているが、まだこれ

といった決定版はないのが現状である。以下に報告例の多い超音波による方法と、電気磁気的方法によるものとに大別し、比較的新しい文献からの例を述べる。

またここに分類した材質試験と直接関係はないが、材料の疲労現象の研究、応力の解析あるいは弾性率の測定などに、非破壊的な試験法なかならず超音波を利用することがかなり広く採用され、興味のある点も多いがここでは省略する。

2. 超音波による方法

試料中に入射された音波は、材質に特有の音速で試料中を伝播し、底面あるいは端面において反射され、そのエネルギーが消失するまで何回も試料中を往復する。したがって逆にこの減衰の状況を調べたり、音速を測定することによつて材質の判別が可能となることが予測されかなり多くの研究結果が報告されており、数編の解説^{3)~13)}も出されている。

しかしながら超音波減衰を支配する因子は非常に複雑である。このうちもつとも研究されているものに結晶粒度と減衰の関係があげられる。しかし鋼の場合ほとんど組織が複雑でこれらがからみ合つてその解析が容易でないのが現状と思われる。

超音波減衰を組織と直接関係づける以外に、降伏点現象の解明や転位の運動の研究に利用することが MASON, TRUELL, 干潟らによつて早くから行なわれている^{14)~20)}。

鋼の組織と超音波減衰についての研究が開始されたのは 1950 年頃からで、わが国では広根、神垣²¹⁾の Cr-Mo 鋼、自銑と可鍛鑄鉄についての研究と、高沖²²⁾による Ni-Cr-Mo 鋼の報告があり、米国においては TRUELL, 干潟²³⁾らによる Al, Ti, 低炭素鋼などを用いた研究と、PAPADAKIS²⁴⁾²⁵⁾による主として SAE 4150, 3140 鋼を用いた数多くの研究報告が見られる。そして方法としてはほとんどのものが縦波による減衰の周波数依存性を調べ

* 昭和43年11月15日受付(依頼解説)

** 富士製鉄(株)中央研究所

表1 非破壊試験法の分類

[A] 方法を中心とした分類 (LAMBLE¹⁾)

- (1) 放射線法——写真法, 蛍光法, 回折法, X線分光法, 電子顕微鏡, 放射性元素トレーサー透過または散乱線強度測定法
- (2) 弾性的方法——音波法, 超音波法, 減衰能(内部摩擦), 弾性振動法
- (3) 電気および磁気的方法——直流抵抗, 渦流法, 容量, 漏洩磁束, 磁気ヒステリシスおよび鉄損, トランス法, 磁気吸引
- (4) 光学的方法——光弾性, 干渉性, 分光および分光写真法, 遠隔観察, 投影, 反射, 蛍光鏡検, 肉眼および低倍率試験
- (5) 熱的方法——熱電気, 熱塗料, 熱伝導, 熱流
- (6) 機械的方法——硬さ, 機械的計測, 歪ゲージ, 摩擦電気
- (7) 原子および核——常磁性共鳴, 核磁気共鳴, 中性子吸収断面積測定, 放射化, 質量分光法
- (8) 化学的方法——点滴試験, プリント試験, 電気点滴試験, エッチング
- (9) 浸透法——液体, 気体, 圧力試験

[B] 原理を中心とした分類 (MARTIN²⁾)

	原 理	試験パラメーター
機械的振動波	—直接振動効果——	音速, 反射, 共振, インピーダンス, 移相, かたより
	—相互作用——	磁わい, 減衰, 音響放射, 衝撃荷重
	—中性子——	ラジオグラフィー, 放射化
	—熱効果——	走査法, サーモグラフィー, 分極, 干渉
電磁氣的波	—伝導——	表面体積容量
	—誘導——	渦流, 強磁性, 磁場の動揺, 磁気吸収
	—レーザー——	分光法
	—マイクロ波——	反射, 透過
	—光学——	反射, 蛍光
核反 応	—X線, γ 線——	ラジオグラフィー, 回折
	—核磁気共鳴——	
	—常磁性共鳴——	
そ の 他	—メスパワースペクトラム——	
	—表面反応, 表面かたさ, 熱電気効果, 粒子表面浸透——	

表2 材質試験の分類

- A. 組成(化学成分)→異材選別
- B. 組織(熱処理状態)の判別
- C. 応力→加工状態の判別
- D. 表面硬化層の測定(浸炭, 窒化, 焼入れ深さなど)
- E. 表面処理皮膜の測定

ているが, 最近材質による温度依存性が 2, 3 報告²⁶⁾²⁷⁾されている。

鋳鉄, 鋳鋼についての報告は多く^{29)~32)}, 実用化ももつとも進んでおり, この分野では減衰法のほか, 音速や共振周波数を用いた方法など変化にとんでいる。

そのほかにも超音波を用いた新しい材質試験法が 2, 3 報告されているので, 主なものについて補足説明する。

A) 減衰測定法

上述のように減衰と組織などの関係を調べた報告は非

常に多く出されているが, 測定上の問題が多いのか, 試料上の問題なのか, これらの結果は研究者によりかなり異なっており, まだこれといつてよい測定法はないように見受けられる。また減衰の程度を表わす方法としても種々のものが用いられているのが現状である。もつとも簡便なものは通常の超音波探傷器(一般には周波数は 1~10MHz)のブラウン管上に現われた多重反射図形(減衰曲線)から判別する定性的な方法と, 減衰定数を用いる定量的な表示法がある。そして減衰定数には dB/cm, dB/ μ sec, neper/cm の 3 種が使用されており, これらの間には音速を v (m/sec) とすれば,

$$1 \text{ neper/cm} = 8.486 \text{ dB/cm} = 8.486 \times 10^{-6} \cdot v \text{ dB}/\mu \text{ sec}$$

の関係があるが, わが国では dB/cm を使用することが決められている。

測定法としては一般的には超音波探傷器が使用される

散乱領域	提唱者	散乱係数の形数	成立する範囲	研究者
レーリー波範囲 $\lambda \gg \bar{D}$	MASON & McSKIMIN ^{d)}	$\sim \bar{D}^3 f^4$	$\frac{\lambda}{\bar{D}} \geq 3$	MASON & McSKIMIN ^{d)} HIRONE & KAMIGAKI ⁱ⁾ KRAUTKOPF ^{j)} PAPADAKIS ^{k)} MERKULOV ^{b)}
	MERKULOV ^{b)} PEKERIS ^{c)}	$\sim \bar{D}^3 f^4$ $\sim \bar{D}^3 f^4$	$\frac{\lambda}{\bar{D}} \geq 10$	
中間範囲 $\lambda \rightarrow \bar{D}$	HUNTINGTON ^{d)}	$\sim D f^2$	$3 > \frac{\lambda}{\bar{D}} \geq \frac{1}{3}$	PAPADAKIS ^{k)} MASON & McSKIMIN ^{e)} MERKULOV ^{b)}
	MERKULOV ^{b)} NIFSHITS & PARKHOMOVSKI ^{e)f)}	$\sim \bar{D} f^2$	$10 \pm 8 > \frac{\lambda}{\bar{D}} > 4$	
	PEKERIS ³⁾	$\sim D f^2$		
散乱範囲 $\lambda \leq \bar{D}$	MASON & McSKIMIN ^{g)}	$\sim \frac{2\bar{R}}{D}$	$\frac{1}{3} \geq \frac{\lambda}{\bar{D}}$	MASON & McSKIMIN ^{g)} KRAUTKOPF ^{j)} MERKULOV ^{b)} ROTH
	MERKULOV ^{b)}	$\sim \frac{\bar{R}}{D} + A_1 f + A_2 f^2$	$\frac{1}{2} \geq \frac{\lambda}{\bar{D}}$	

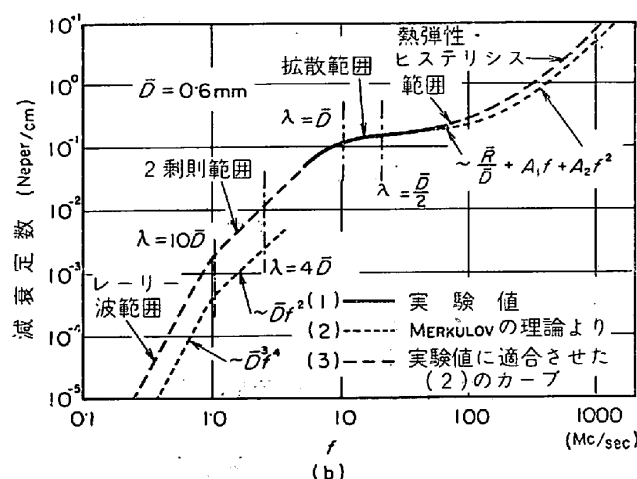
(a)

a) JASA, 19 (1947) p. 464
 b) Soviet Phys., Tech. Phys., 1 (1956) p. 59
 c) Phys. Rev. 71 (1947) p. 268

d) JASA, 22 (1950) p. 362
 e) J. exp. thur. Phys., 20 (1950) p. 175
 f) Rec. Kharkov State Univ.,

27 (1948) p. 25
 g) J. appl. Phys., 19 (1948) p. 940
 h) Soviet Phys. Tech. Phys., 2 (1957) p. 953

i) Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ., 10 (1958) p. 276
 j) JASA, 32 (1960) p. 824
 k) JASA, 32 (1960) p. 1628



(b)

(a) 多結晶材の結晶粒界散乱についての理論の比較

(b) 多結晶 Al における縦波の減衰

図1 結晶粒度と超音波減衰の関係についてのまとめ (SMITH⁴⁸⁾)

$\bar{D}$: 結晶粒径, f : 周波数, λ : 波長

が, 精密な測定実験には TRUELLらが開発した Attenuation Comparator (減衰比較測定器) と呼ばれる装置が使用されている^{23)~25)33)~37)}. これは試料からの多重反射図形に, 内臓または別に用意した減衰指数曲線発生装置からの減衰曲線を同一ブラウン管上に指示させて比較し数値表示 (dB/ μ sec) するものであるが, 周波数も 5~1000MHz と高いものが使用され, とくに高周波側のもは物性関係の基礎研究に用いられている. (鉄鋼関係は大体 50MHz まで)

超音波探傷器で減衰定数表示するものとも単純な方法は

探傷器に可変減衰器を付加させ, 多重反射図形中のある次数の波高値間の差を減衰器で読み, この値 (dB) を音波の伝播距離で割って dB/cm として表示すればよい. 厳密には音場の拡散損失および底面と探傷面の反射損失などの補正が必要とされている. KRAUTKRAMER は理論的に求めた AVG-diagram と称する図表より求める簡単な方法²⁸⁾を, その他からも 2, 3 の測定法³⁹⁾⁴⁰⁾が紹介されている.

いずれにしても, 減衰の測定には, 試料の調整 (形状寸法, 平行度, 表面あらさなど) と探触子の接触の方法

が結果に重要な影響を与えるので細心の注意が必要である⁴¹⁾⁴²⁾。

B) 結晶粒度と減衰

超音波減衰の原因については多くの因子があるが、大別すると吸収による減衰と散乱による減衰にわけられる。前者は弾性的および非弾性的内部摩擦であり、後者は結晶粒子の弾性異方性による結晶粒界の散乱損失で、とくに多結晶金属にみられる。

結晶粒による散乱に初めて着目したのは MASON であるが、理論と実験結果の対応など、とくに鉄などの異方性の大きい金属で一致しない場合が生じ、その後多くの研究者により理論的あるいは実験的考察がなされている。

図1(a)は多結晶材の結晶粒界散乱についての理論のおもなものを比較したもの、(b)は結晶粒経0.6mmの多結晶Alについての結果を1つの曲線についてまとめたものである。

結晶粒径(D)と波長(λ)の比により $\lambda \geq \bar{D}$, $\lambda \approx \bar{D}$, $\lambda \leq \bar{D}$ の3つの領域にわけて整理するのがよいようである。ただここで基本となる結晶粒径についても種々議論があり、次に述べる RICHTER は音響的に有効な3次元球状粒径を、研磨写真の2次元粒径から対数垂直分布函数を考慮して決定したとしている。

図2はアームコ鉄および炭素鋼(C15, C40, C60, C80)について得られた減衰と結晶晶粒径および周波数との関係を RICHTER がまとめた結果⁵³⁾である。すなわ

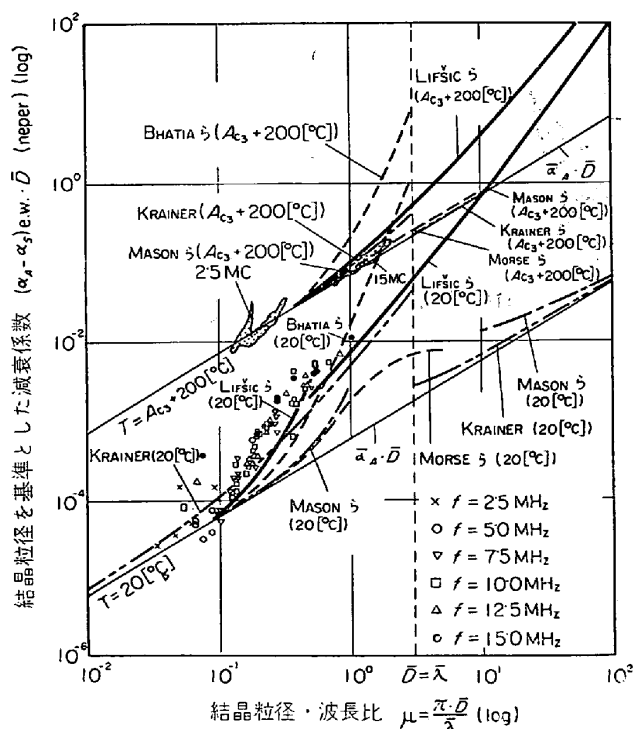


図2 20°C および $Ac_3+200^\circ\text{C}$ でのアームコ鉄および炭素鋼の結晶粒径と減衰定数の関係の実験値と理論値 (RICHTER⁵³⁾)

ち試料を再結晶させていろいろな粒径としたものについて、20°C と $Ac_3+200^\circ\text{C}$ で測定した $\alpha \cdot D$ と $\pi D/\lambda$ との関係を他の研究者の理論曲線と一緒に示してある。
($Ac_3+200^\circ\text{C}$ はグラフ作成の都合上 2.5MHz と 15MHz にかぎり 116 の測定値が面積で示されている) この場合、減衰定数 (α) = 吸収による減衰定数 (α_A) + 散乱による減衰定数 (α_s) であるが、 α_s を単独に測定する方法がないので、他の研究者の式は多くの仮定をして αD と $\pi D/\lambda$ の関係が求まるように整理した式が示されている。この結果いろいろな周波数と粒子径での測定値が1つの曲線上に乗り、 $\pi D/\lambda$ が大きくなるとバラツキが少なくなり、 $\pi D/\lambda > 10^{-1}$ で散乱部分が顕著となること、実験した $\pi D/\lambda$ 範囲では $f \cdot D$ 関係が4乗則で存在することが証明された。また高温実験ではオーステナイト領域の異方性因子が明らかに大きいにもかかわらず散乱部分が無視できるほど小さいのは興味があるとしている。

C) 組織と減衰

前述のように鋼の組織と減衰についての研究の歴史は比較的古い、鋼の組織自体が非常に複雑である一方、超音波減衰を左右する因子も複雑であることから、減衰の絶対値的な評価は困難であると判断される。以下結果の数例について紹介しておく。

写真1は多重反射図形変化から ASTM A 217 鋳鋼 (9%Cr, 1%Mo) 品の熱処理の適否を判別している例³²⁾で、組織により減衰の様子が明りように異なっていることがわかる。この方法はなにも全部の減衰波形を見る必要はなく、同一形状、同一ロットというような限定された範囲内では、ブラウン管上に、ある高さの波の範囲を設定して選別する方法をとれば自動判別も可能となる。またブラウン管上に、ある波高範囲を設定し、これを越える波の数で表示する方法もとられている。

数種の鋼材の減衰を比較するのに、特定の試験片に対して示す例⁵⁴⁾も見られる。

特殊な方法であるがブラウン管に現われる図形からロールの焼入れの深さを測定する方法⁵⁵⁾が、図3に示す原理で紹介されている。すなわち高感度の非常に高い周波数を用いる場合 (30 または 60MHz), 結晶粒界からの散乱エコーが得られるので、この状況を統計的につかんで求めようとするもので、細粒の場合は粗粒のものより散乱エコーは少なく、整粒となっていないときは境界付近でこの散乱エコーの分布状況が異なってくる。図には 30MHz での測定結果とジェミニ試験値とを比較したものが示されている。

図4は鋳鉄の熱処理温度をかえて処理したものの減衰定数の変化が、周波数をパラメーターとして示されている³¹⁾。しかし一般的に圧延材の組織の差を通常の超音波探傷器の 1~10MHz の周波数範囲で区別するのは困難と判断される。

図5は減衰比較測定器を用いて Ck60 鋼 (S 58C 相

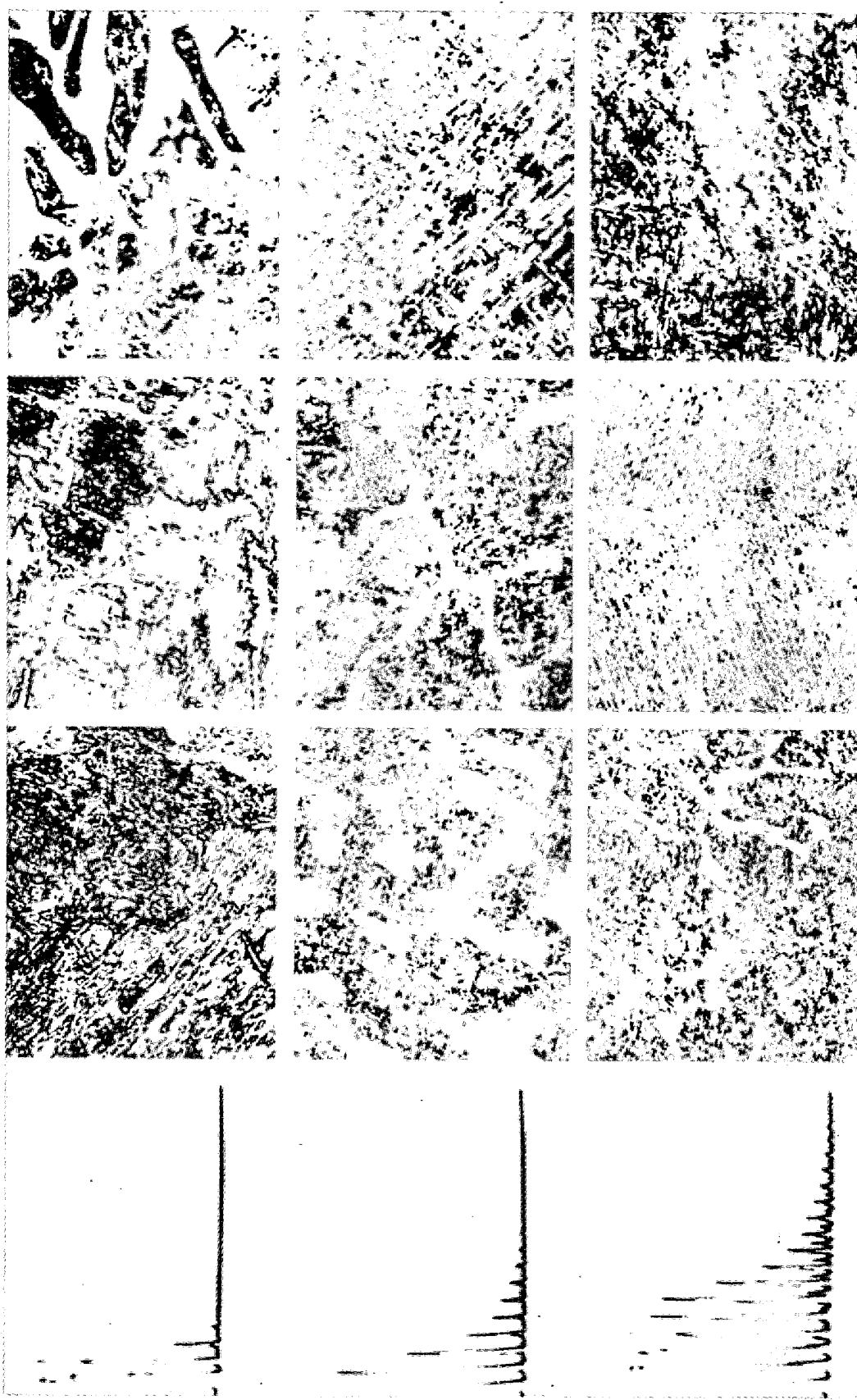
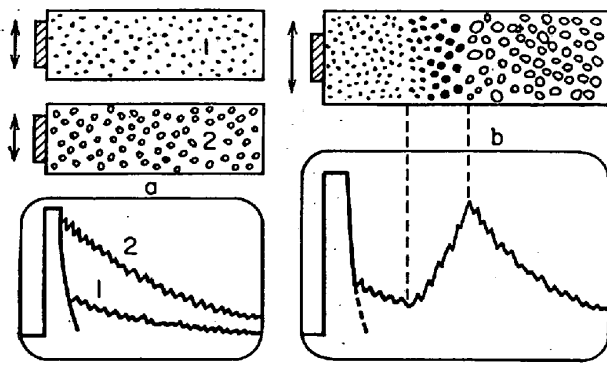


写真 1 超音波多重反射図形法による鋼の熱処理材管理の例 (HECKLER³²⁾)



a 細粒 (1) および粗粒 (2) の場合の散乱エコー
b 焼入れロールの散乱エコー

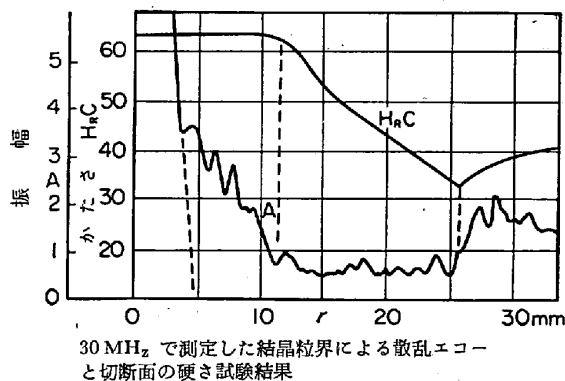


図3 散乱エコーによる焼入れ深さ測定方法 (KOPPELMANN⁵⁵⁾)

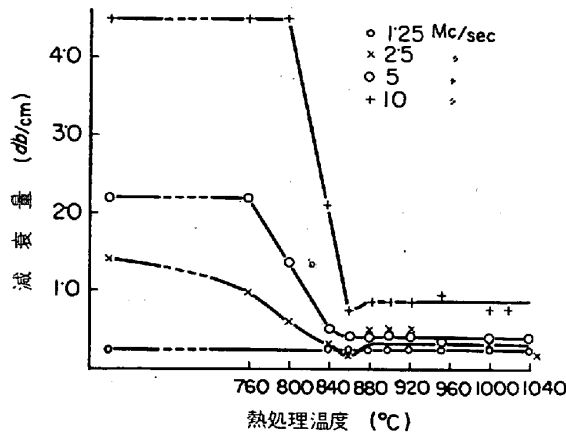


図4 鋳鉄の熱処理温度と周波数による減衰の変化 (MELLOR³¹⁾)

当)の組織の周波数による減衰変化の状況を試験した例³⁵⁾、図6はSAE 4150鋼の同じく組織による減衰の周波数依存性を測定した例²⁵⁾である。ともにマルテンサイト、ベイナイト、フェライトの順に減衰が増加していくことは明らかである。

以上はいずれも熱処理を1つの因子として示してあるが、SERABIAN³⁶⁾は処理温度を T 、時間を t として熱処理パラメーター $P = T (\log t + \text{const.})$ として整理した

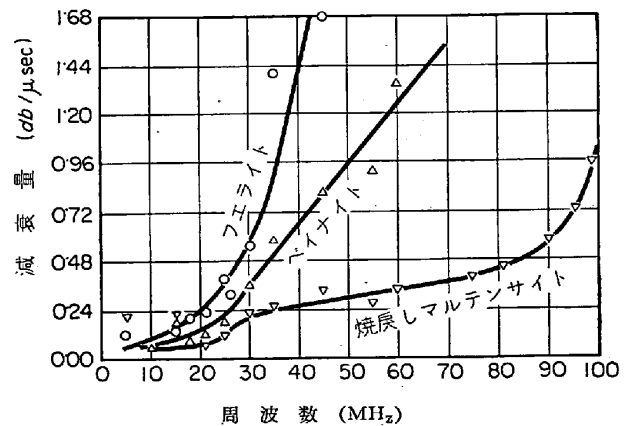


図5 Ck60 鋼の組織による減衰の周波数依存性の例 (ORNER³⁵⁾)

とき、MHz 帯での減衰定数 α との間には一定の関係が成立することを示している。すなわち Ni-Cr-V 合金鋼を $815^{\circ}\sim 1150^{\circ}\text{C}$ 、 $4\sim 30\text{hr}$ で熱処理したときの結果をプロットすると図7のようになり、 α は P とともに増加し f が高いほど大きくなる。 f が一定であれば α を測定することにより熱処理の程度を知ることができる。

そのほか鋼の材質と関連した報告として、鋼板中のサルファーバンドを減衰で級別した報告⁵⁹⁾、溶接部の組織試験として、ステンレス鋼の組織変化を減衰で調べたものと⁶⁰⁾、溶接熱影響部の黒鉛化の程度を減衰および音速で調査した報告⁶¹⁾がみられる。

特殊な例であるが著者ら²⁶⁾は超音波板波法により 600°C くらいまでの薄板の高温の減衰測定法を開発し、 $1\sim 3\text{mm}$ 厚の種々の鋼板を用いて 2.25MHz で測定を行ない、鋼種により温度上昇にともなう減衰変化の状況が異なること、なかんずく軟鋼板において Snoek ピークの測定やひずみ時効性の簡易判別のできることを報告した。図8はその1例を示したものである。(図中 T_N 、 T_C はそれぞれ固溶窒素、固溶炭素に基因するピーク温度、 $A_1, S_2, \dots$ は板波の発生モードを示す)

D) 音速測定

固体中を伝播する音波の波長 (λ) が伝播方向に直角な断面の寸法に比べて十分大であれば、ポアソン比の影響を無視できるので、縦波の速度を v とすると

$$v = \lambda \cdot f = \sqrt{E/\rho}$$

(E : 弾性率, ρ : 密度)

となる。したがって弾性率の測定に超音波音速を使用することがかなり行なわれている。超音波音速を測定する方法も10指に余るものがまとめて紹介⁶²⁾されているがとくに高温での弾性率測定に威力を発揮しているようである。図9に種々の材料についての温度による弾性率の変化を超音波で測定する方法と結果の例⁶³⁾を示した。

実用例としては鋳鉄の黒鉛化の判別などに利用することが多い^{74)~81)}。図10はローラー軸受鋼 (100Cr6) の熱処理時の残留オーステナイトを測定するのに、パルス反

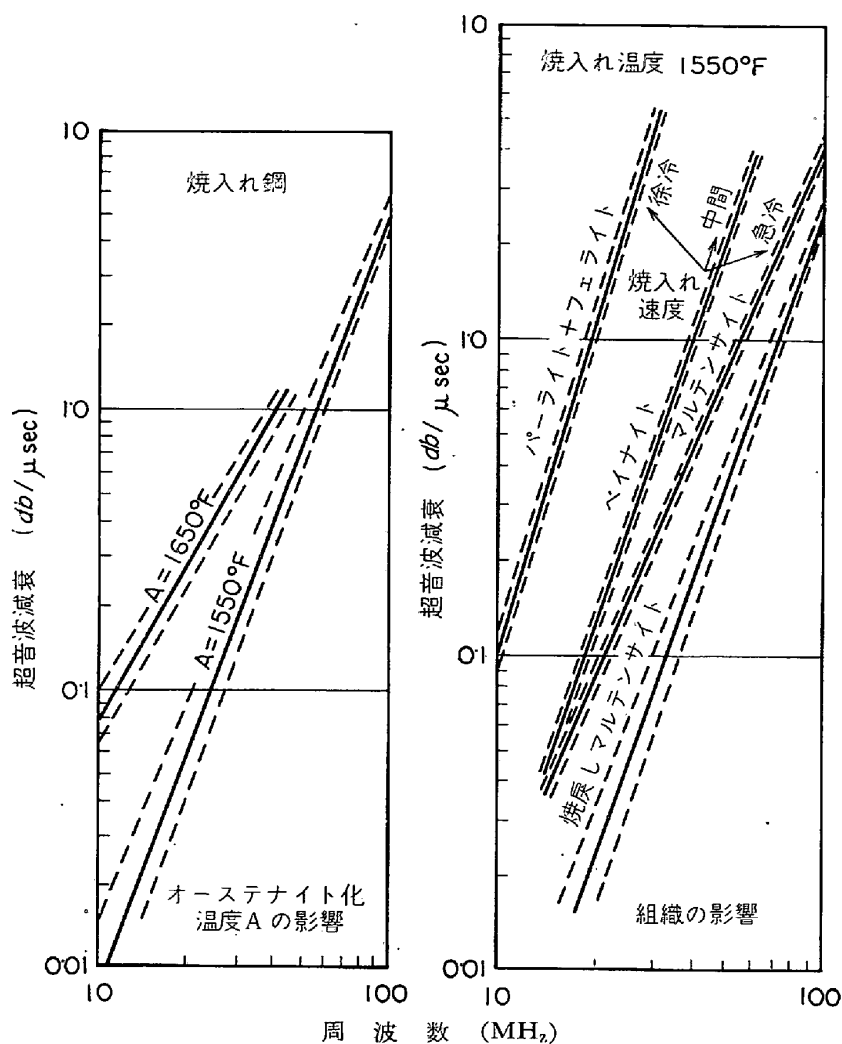


図6 SAE 4150 鋼の焼入れ温度および焼入れ速度が超音波減衰におよぼす影響 (PAPADAKIS²⁵⁾)

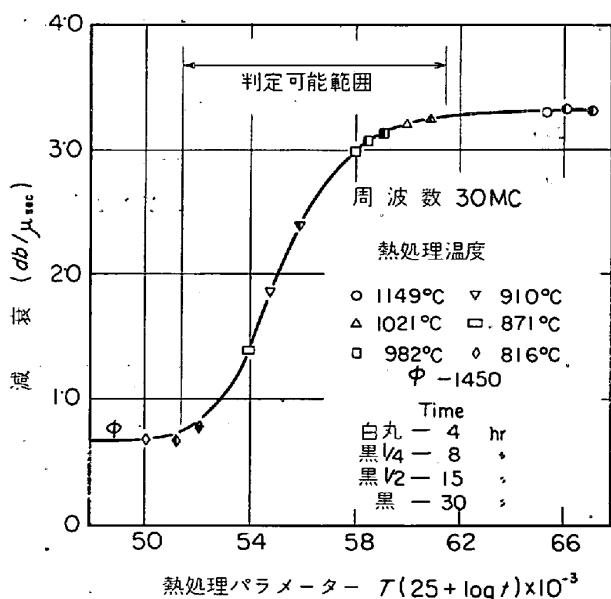


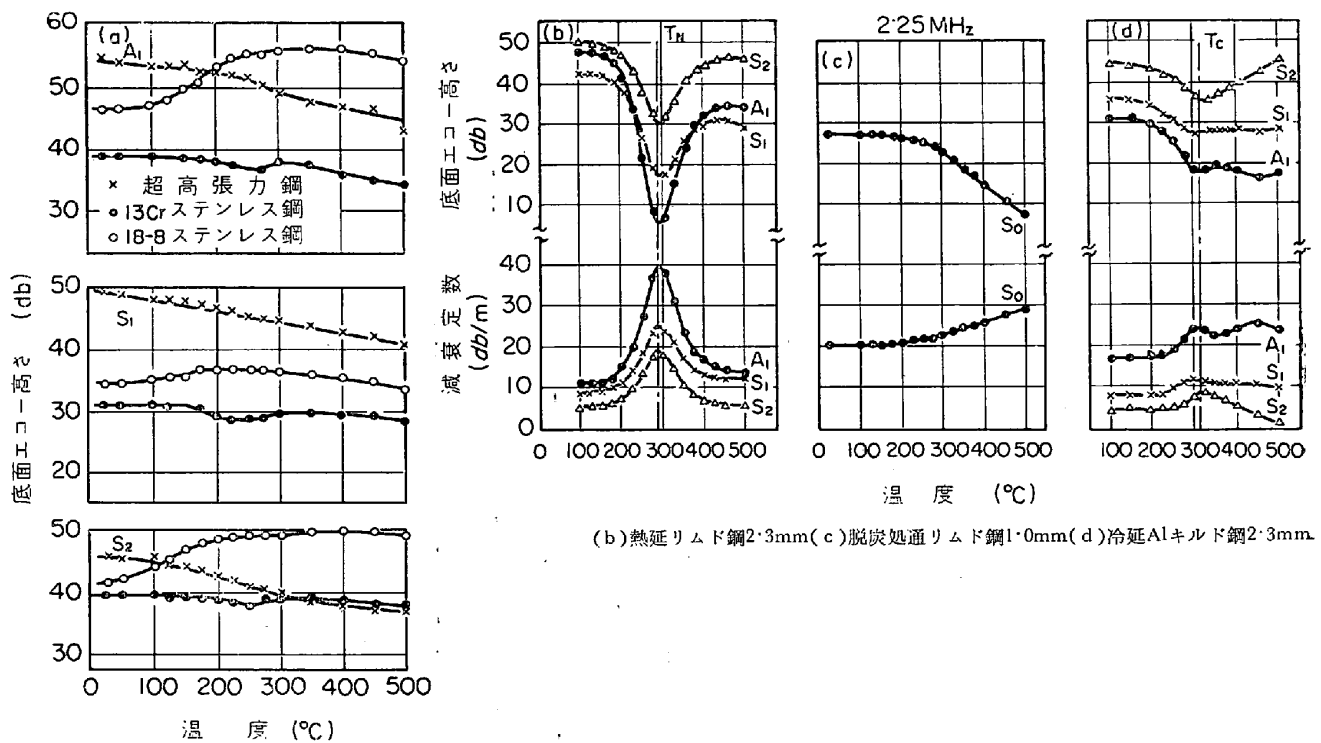
図7 Ni-Cr-Mo 鋼についての熱処理パラメーターと減衰(30MHz) (SERBIAN³⁶⁾)

射縦波 (2.4, 4MHz) で試験した場合の音速と硬さの関係および焼戻し条件をパラメーターとして焼入れ温度との関係を求めた例³⁰⁾である。

一方、従来の音速測定法では周波数 2~3 MHz ぐらいを用いていたが、この場合波長は片状黒鉛の大きさと同程度になるため、伝播速度が黒鉛の影響を受けてバラツキが大きくなるので、共振周波数を測定して黒鉛球状化の程度を測定すること、さらに進めて引張強さと直接結びつけることが、とくに英国において進んでいる^{32)~37) E)}

E) 周波数分析法

上述した縦波の多重エコーの減衰から材質を判定する場合、正しい周波数 (振動子の基本周波数あるいは数次の高調波) で振動子が励振されているかどうか不明で、このため大きな測定誤差が生じるおそれがあり、BRESLOW³³⁾は周波数分析器を併用して、多重エコーの周波数分布を測定しながら実験を行なうのがもつとも合理的であるとしている。そして GERICKE³⁹⁾は振動子の基本振動の周期近辺あるいはそれ以下の周期の単一矩形パルスで振



(b)熱延リムド鋼2.3mm(c)脱炭延通リムド鋼1.0mm(d)冷延A1キルド鋼2.3mm

(a)ステンレス鋼, 超高張力鋼

図8 板波法による薄板の材質による減衰の温度依存性(磯野²⁶⁾)

動子を励振し、生じた反射エコーのうち、 B_1 波を周波数分析器にかけて周波数分布を測定すると、高周波部分の様子が材質によって大きく変化することを見出し報告している。この方法の困難さは広い帯域にわたって均一なビームの分布を示す超音波振動子を得ることにあるとされているが、従来ブラウン管の波高値のみを問題としている方法とは別の研究方法として興味ある分野である。

F) 臨界反射測定

超音波複屈折により残留応力を測定する方法* からさらに材料の異方性の測定に超音波を利用する可能性のあることを報告した ROLLINS^{90)~92)}は、縦波を用いた臨界反射法により、使用縦波と同一波長程度の深さの試験片表面層の材質判別する方法を紹介⁹³⁾している。

3. 電気磁気的方法

金属材料の電気、磁気的性質は、多くの物理的性質の中で構造敏感であるため、材質と結びつけた測定結果が古くから数多く報告されている。一方、近年の非破壊検査機器の進歩発展は、これらの性質を簡便にあるいは精度よく測定する計測器類の開発にも向けられ、それらの使用例や紹介文献が相当な数に達してきている。しかし相互に関連をもつこれらの電気、磁気的性質を、試験方法とかみ合わせてどのように整理分類すればよいかはまだ明確ではない現状である。したがってつぎつぎと発表

されるこの種の試験、測定器のいずれを選択したらよいかはなかなか困難であろう。そこでまずこの分類を表3に示すように、性質を主体としたものと試験方法を主体としたものとにわけてみた。以下おもなものについて順次展望してみる。

A) 電気的性質を利用したもの

電気抵抗と材質との関連については、従来からもっとも多く報告が出ているが、簡便に測定を行なう機器の開発が行なわれている。このうち後述の渦電流を用いて電気伝導度の測定を行なう方法は、とくに非鉄金属の材質試験に幅広く活用されている。

ここでは熱起電力を利用して材質判別を行なう方法について若干ふれておく。この方法は熱電対とまったく同じ原理に基づくもので、熱起電力が実用合金では成分元素とその含有量によって変化することを利用したものであるが、これは同時に組織などによっても変化する。そして比較的古くから用いられていたものが近年また数編の報告^{94)~96)}となつて現われてきているのは、この方法での最大の要点である温度差を常に一定に保つ方法が進んだためと考えられる。温度差は大体 100°C に保持するように考案され、保温液体方式と制御電熱方式とが採用されている。もつとも現場的な用い方としては、従来火花試験で判別していた混合された材料の選別がある。たとえば代表的な 27 鋼種について試験した結果、約82%の鑑別が可能で、後述の渦流法と併用すると約 95% の鑑別が可能であつたとの報告⁹⁷⁾がある。このほかは鋳鉄

* 応力の測定に超音波を利用した報告は20編近く見られる。

表 3 電気, 磁氣的性質とその試験法の分類

〔I〕性質を主体とした分類

A 電氣的性質を利用した方法

- 1) 電気伝導
- 2) 熱起電力
- 3) 摩擦電気

B 磁氣的性質を利用した方法

- 1) 磁気ヒステリシス
保磁力(H_c), 残留磁気(B_r), 透磁率(μ), 鉄損(W_h)
- 2) 磁気吸引
- 3) 漏洩磁束

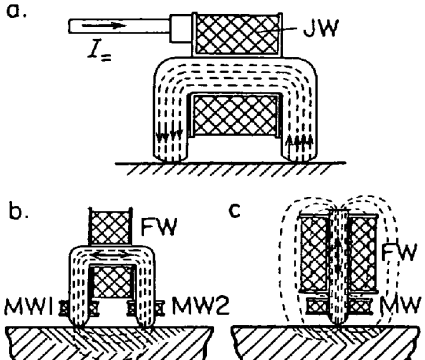
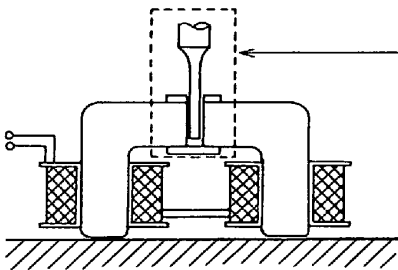
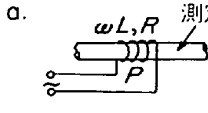
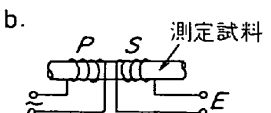
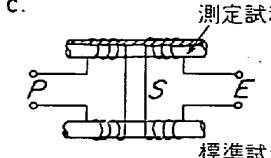
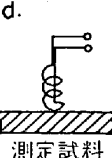
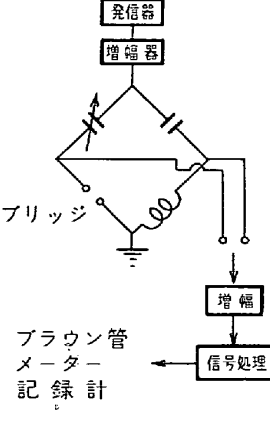
C 電磁誘導による方法

- 1) 電磁誘導(磁気誘導を含む)
- 2) 渦流
- 3) 高調波分析
- 4) 過渡現象(衝撃電圧)

D 磁わい現象を利用した方法

E ホール効果を利用した方法

〔II〕試験方法を主体とした分類

	名 称	磁 化 法	検 出 法
A	残留磁気法	a. 	プローブ 磁束計 フェルスターゾンデ V-R ヘッド 検出コイル (2次コイル)
B	ヨーク法		フラックス・プローブ (ホール素子など)
C	交番磁界法 (電磁誘導法)	a.  b.  c.  d. 	

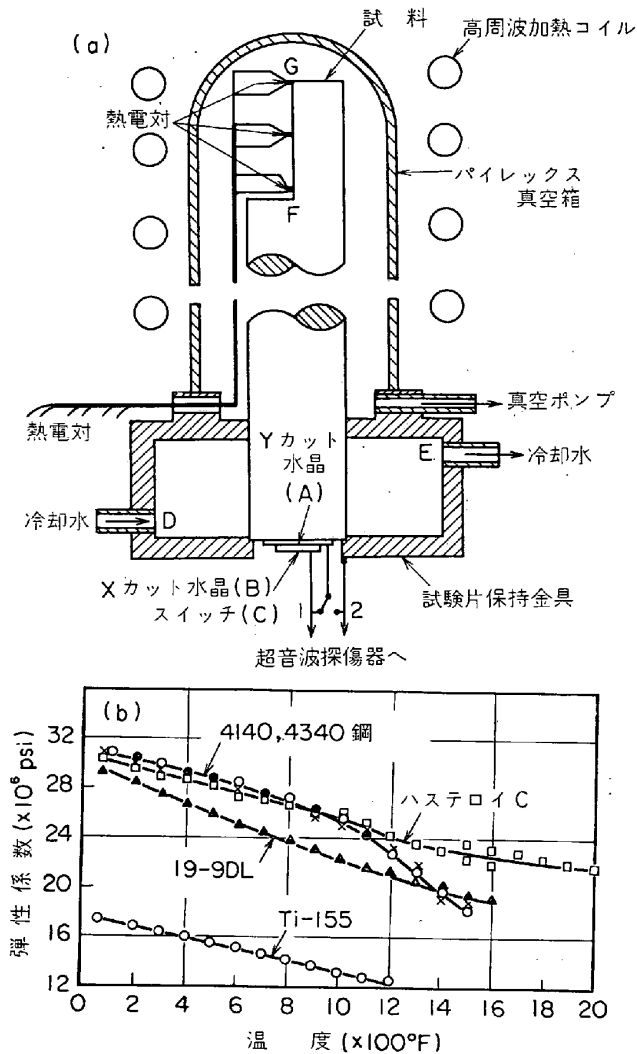


図9 超音波音速測定法による弾性係数と温度 (LEVITT⁵⁸⁾)

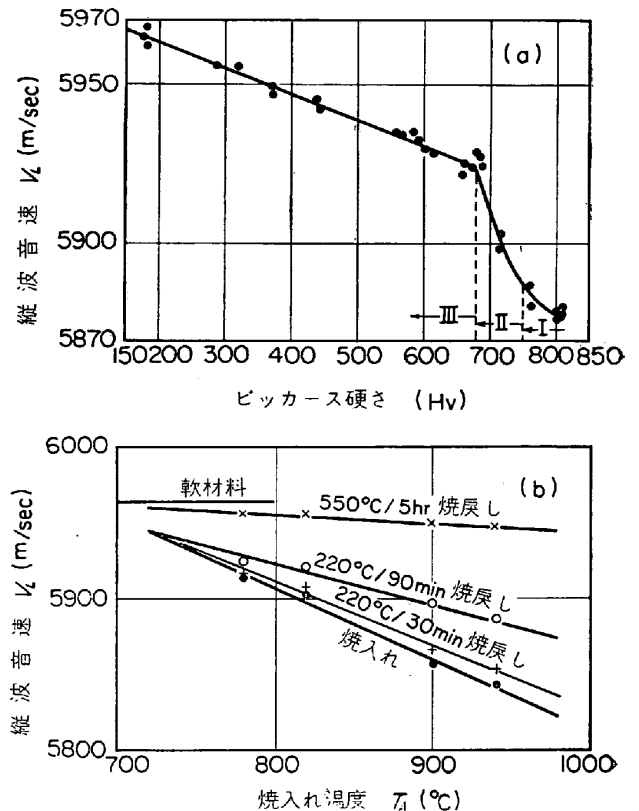
(a) 高温音速測定装置, (b) 温度による弾性率の変化

中の Si 含有量測定例が多く, EGEN²⁾ によれば 冶金履歴, 第3元素 (Mn) などが影響するが, これらの点に注意すれば通常の化学分析法の精度, すなわち Si 含有量 2% 程度で $\pm 0.05\%$ で簡便に測定できると述べている。

B) 磁気的性質を利用したもの

つぎに述べる電磁誘導との区別を明確にしえないが, ここでは一応静的な方法すなわち磁気ヒステリシス曲線を頭に描いたものとして取り扱っておく。

ヒステリシス曲線から得られる情報としては, 図11に示すように, 残留磁化 (B_r), 保磁力 (H_c), 透磁率 (μ), 飽和磁化 (B_s), 鉄損 (W_h) などがあり, 装置, 方法としてもこれらの全部あるいはこのうちの特定の値のみを測定するものなど種々のものが考案使用され, それらの結果が報告されている^{9)~33)}。(とくにソ連での報告例が多いが, 内容が不明のため省略した文献が多い) 例として図12に工具鋼¹⁰⁾および炭素鋼¹¹⁾について, 熱処理が磁気



(a) 硬さおよび焼戻しステップ I, II, III を函数として示した縦波速度
(b) 種々の焼戻し条件に対し焼入れ温度 T_A を函数として示した縦波速度

図10 音速測定による軸受鋼の残留オーステナイト測定例 (FENKNER⁸⁰⁾)

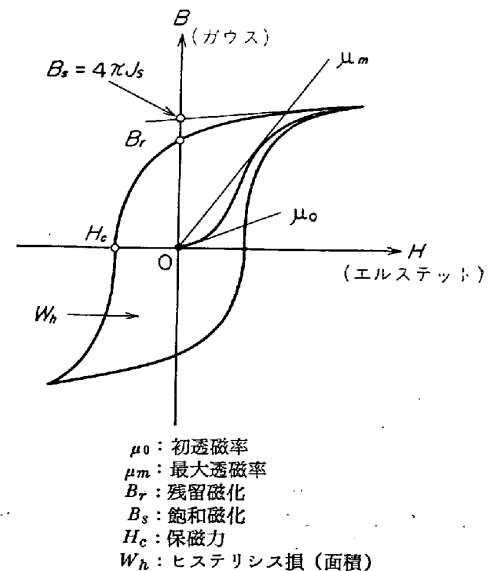
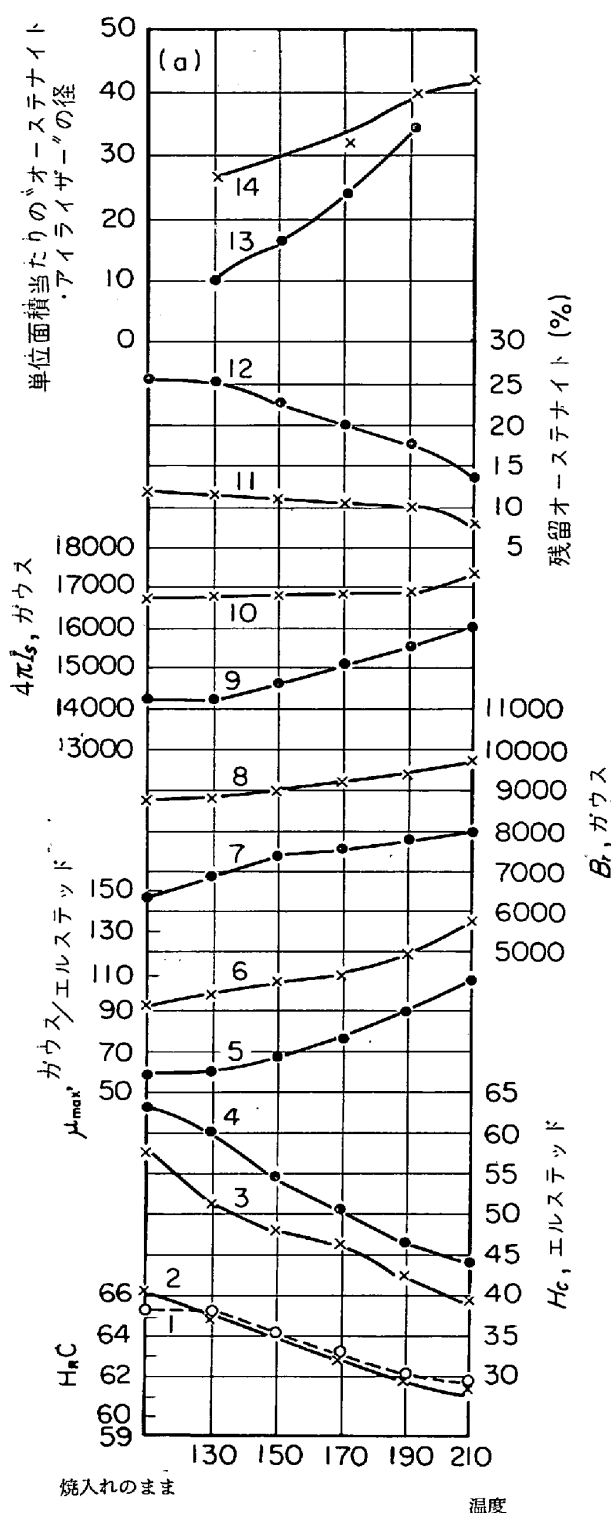


図11 磁気ヒステリシス曲線から得られる情報

特性におよぼす影響についての結果を示した。

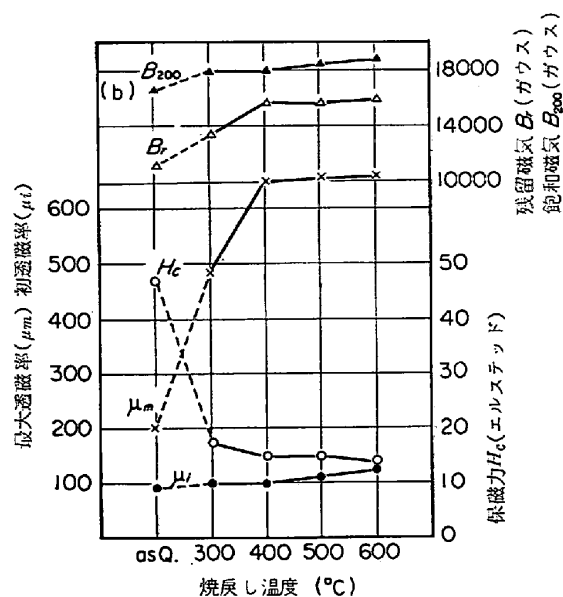
保磁力は従来の押込みかたさとの対応がよいため「磁気かたさ」とも呼ばれ, 焼入れ焼戻し, 表面硬化処理などのかたさ管理に広く使用されているほか, 炭素量の管理 (図12参照) にも使用されている^{28)~33)}。その他の



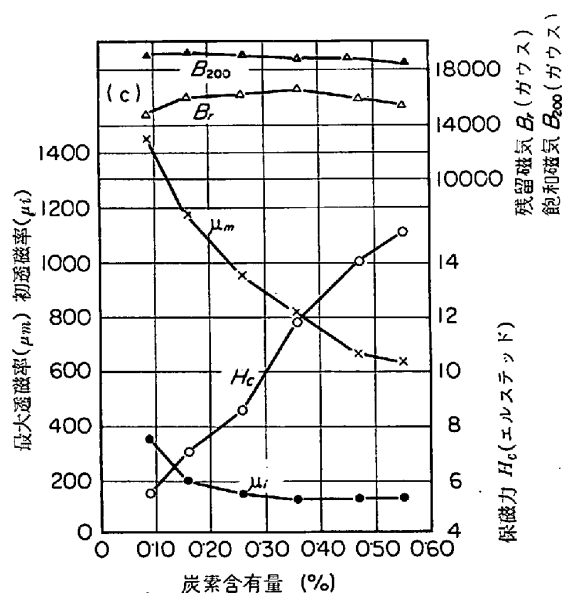
(a) U11KhV 鋼の磁気特性に及ぼす焼戻し温度の影響
1, 4, 5, 7, 9, 12, 13—860°C からソルトバス焼入れ
2, 3, 6, 8, 10, 11, 14—825°C から水焼入れ

図12 磁気的性質におよぼす熱処理および炭素量の影響 (KUPOLOVA¹⁰⁾, 加藤¹¹⁾)

使用例としては、オーステナイト鋼中のフェライト量の測定を透磁率で行なったもの^{21)~23)}、鋼の残留オーステナイトの測定に飽和磁化を用いたもの²⁶⁾、高速度鋼の焼戻し処理の析出機構を残留磁化と保磁力で検討した報告¹⁶⁾などいろいろの目的に使用されている。1例として



(b) S45C 鋼の焼入後焼戻し温度による磁性の変化



(c) 炭素鋼の焼入焼戻し後の磁性に及ぼす炭素含有量の影響

図13 にオーステナイトステンレス鋼および耐熱鋼中のδフェライト量を“Ferrotest”と呼ぶ測定器で求めた結果²³⁾を示したが、顕微鏡的に決定したδフェライト量に対し、±2%の精度で測定できるとしている。

一方、静的とはいえないが、帯鋼などの焼なまし状態

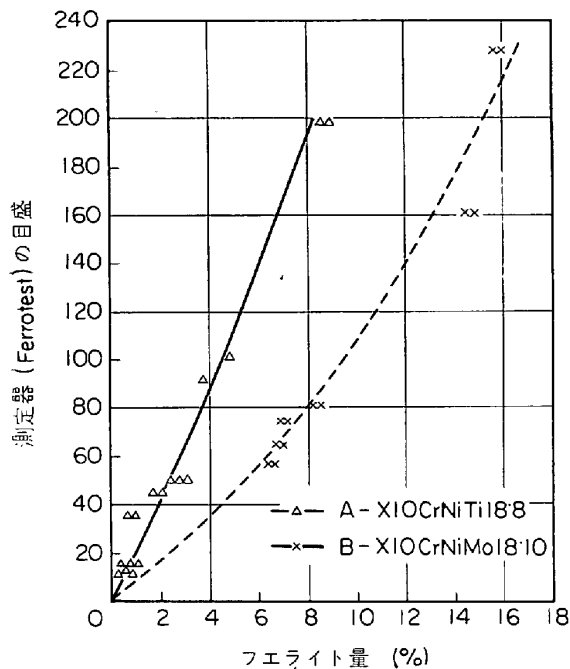


図13 オーステナイト鋼のフェライト量を透磁率測定
の原理を用いて測定した例
(SPIEGELBERG²²⁾)

の管理を、圧延作業中またはコイルに巻取つた直後に、磁気的方法で行なう装置が数カ所で開発され稼動している^{34)~40)}。

C) 電磁誘導法によるもの

コイルを貫通する磁束が変化すると、コイルに起電力を生じる現象は電磁誘導作用と呼ばれており、この現象を利用して試験する方法を一応電磁誘導法と呼んでいるが、一般的には渦電流で代表されている。

この方法は表3のII C中の図でも示されているように、試験材を試験コイルの中を通すコイル法（貫通法）と、試験材の上に試験コイルを置くプローブ法とがあるが、ともにコイルに交流を流して材質により変化するコイルの電磁気的応答（コイルインピーダンスの変化）を見るものであるが、得られる情報の解析が非常に複雑でこの方法適用の困難さがあるのが現状である。しかし各所で種々の検討が行なわれており今後の発展が期待できる。発表されている報告も相当数あるが、ほとんど先駆者としての Förster 研究所で開発された装置または同等のものによる結果が占めている。対象としては原理が表皮効果を利用しているので、浸炭窒化などによる表面硬化層あるいは脱炭層の厚さの測定管理への使用例が多い^{41)~50)}。

図14にこの方法のもつとも基本的な例としてFörster研究所の材質判別器（商品名 Magnatest Q）を示した。原理は図にも示したように被測定材をコイルに入れ、同じくコイルに入れられた標準試験片と比較して、ブラウン管上での偏りから相互の材質の差を見る方法（比較法）で結果の一例も示した。すなわち同一条件で処理され

た試料についてあらかじめそのバラツキの範囲を調べて管理限界を求めておくことにより、この限界からはずれものの選別が容易に行ないうる。装置は大別すると材質の情報をピックアップする検出コイルと、コイルインピーダンスを処理する回路から成り立っているが、コイルの巻き方、結線方法、ブリッジの構成法、移相法など多種多様な方法が現在考案されている。

この渦流法は試験速度が他の非破壊試験法に比しきわめて大きく、記録なども容易で自動化には最適であり、軸受用鋼球の自動選別やかたさの管理には早くから利用されている。そのほか鋳鉄⁵¹⁾⁵²⁾、ボイラー管⁵³⁾⁵⁴⁾の材質試験、工具鋼の残留オーステナイトとステンレス鋼の δ 鉄の測定⁵⁵⁾、オーステナイト鋼の鑑別の例⁵⁶⁾などが見られる。

また渦流法と磁気的方法を同一の試料で比較した結果も報告^{60)~62)}されているが、それぞれ一長一短があるので対象に応じてその方法を選択することが必要である。

コイルインピーダンスと電気伝導度との間には密接な関係があることを利用して、電気伝導度を渦流（プローブ法）で簡便に測定できる装置が開発され、材質と電気伝導度とがきわめて密接な関係をもつ非鉄金属、とくに Cu, Al 関係の分野で広く活用されている。たとえばこれら合金の判別や時効硬化の判定、あるいは鋳塊の酸素その他不純物の含有量の測定などがある。変わった用途として、渦電流を用いてウラン圧延板の異方性を測定する方法⁶³⁾、ステンレス鋼の粒界腐食の測定例⁶⁴⁾などが報告されている。

上述の渦流法は正弦波状渦電流法であるが、最近パルス波を与えてその過渡現象波形を解析して材質を判別する方法が2, 3紹介されている^{65)~68)}。

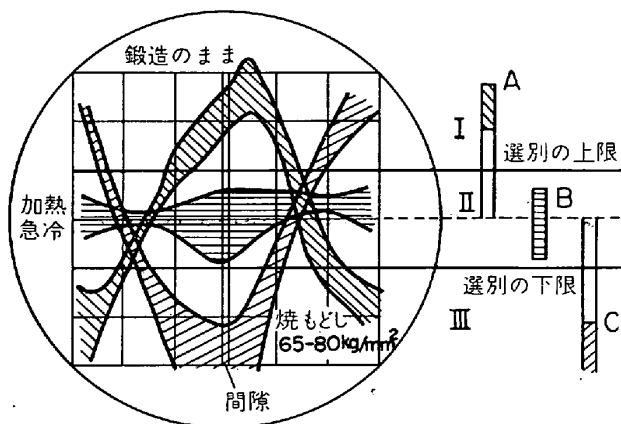
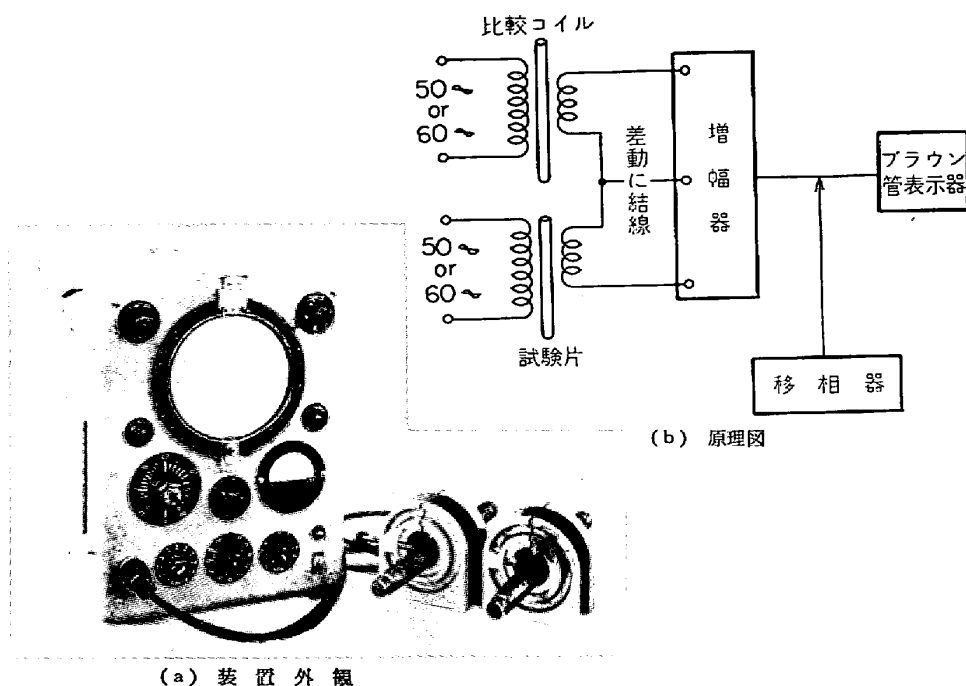
またコイル中に強磁性体を入れた場合、2次電圧に高調波ひずみを生じることを利用して、浸炭深さを測定したり炭素含有量を区別する試みが行なわれている⁶⁹⁾⁷⁰⁾。

D) その他

前述の分類に属さない方法が今後開発されてくると思われるが、表3では磁わい現象を利用したものとホール効果を利用したものとを掲げておいた。前者は強磁性体の磁化が、加えられる応力によつて変化する現象のあること、そしてこれが材料の成分や組織に敏感であることを利用して材質試験を行なう方法^{71)~72)}で、炭素量の差により、また加工度により磁わい変化の程度が大きく異なることが示されている。ホール効果を材質と直接結びつけたものとしては、鋳鉄中の Si の定量例⁷³⁾があるがホール素子そのものは上述の装置の検出機構の中には多く利用されている。

ま と め

非破壊的に材質を試験する試みを、超音波による方法と電磁気的方法によるものとに大別し、文献上からさら



(c) ブラウン管面に現われた鍛造品のバラツキ帯とグループA, B, Cの間隙値

図14 渦流探傷法による材質判別法 (Förster 研究所 Magnatest Q)

にこれらを整理分類して、主要なものについて簡単に展望してみたが、このほかにも新しい方法が種々試験されている現状であり、現場の材料の品質の測定、管理のほかにも材料の研究手段としても有効な測定法でもあるので今後ますます研究が進み実用化されてくることが期待される。

文 献

A. 超音波による方法

- 1) J. H. LAMBLE(ed): Principles and Practice of Non-destructive Testing (1962) Heywood
- 2) G. MARTIN: Brit. J. of N.D.T., 9(1967) 2, p. 27~60
- 3) W. P. MASON: Physical Acoustics and the Properties of Solids (1958) van Nostrand
- 4) W. P. MASON(ed.): Physical Acoustics-Principle and Methods, Vol. 1A~4B (1964~1968) Academic Press

- 5) A. B. BHATIA: Ultrasonic Absorption (1967) Oxford
- 6) R. TRUELL: Mech. Eng., 77 (1955), p. 585~587
- 7) 能本: 超音波による物性研究 超音波技術便覧 (1966), p. 937~963, 日刊工業
- 8) 井形: 超音波減衰測定 of 金属学への応用について 電子工業, 12 (1963) 2, p. 37~43
- 9) 神垣: 金属組織と超音波減衰 学振 133 委 (内部摩擦) 資料, 1963 11 月, p. 16
- 10) H. A. ELION: Proc. National Electronics Conf., 13 (1957), p. 787~797
- 11) W. RORANSKI, S. MADEJ: Hutnik (Poland), 24 (1957) Nov, p. 452~457
- 12) L. G. MERKULOV: Zhur. Tekn. Fiz., 27(1957) 6, p. 1386~1391
- 13) L. MAKINNON: Contemporary Phys., 4(1962), p. 124~138

- 14) W. P. MASON: The Bell System Tech. J, 34 (1955) 5, p. 903~942
- 15) A. GRANATO and K. LÜCKE: J. Appl. Phys., 27 (1956) 7, p. 789~805
- 16) HIKATA, R. TRUELL, A. GRANATO, B. CHICK and K. LUCKE: J. Appl. Phys., 27(1956), p. 396~404
- 17) R. TRUELL and HIKATA: WAL-143, (1956) Apr., p. 14~47
ASTM Special Tech. Pub. 213(1957), p. 63~70
J. Appl. Phys., 28(1957)5, p. 522~523
- 18) W. J. BRATINA and P. MILLS: Acta Met., 10 (1962)4, p. 419~422
- 19) R. E. GREEN: Trans. AIME, 230 (1964) Oct. p. 1383~1389, p. 1390~1394
- 20) W. F. CHIAO and R. B. GORDON: Trans. AIME, 233 (1965) June, p. 1164~1172, 236 (1966) Aug., p. 1185~1193
- 21) 広根, 神垣: 日本金属学会誌, 18 (1954), p.185~188, 18 (1954), p. 545~548
- 22) 高沖: 日本金属学会誌, 21 (1957), p. 14~18
- 23) HIKATA and R. TRUELL: WAL 1431, (1958) Jan., p. 14~51 その他
- 24) E. P. PAPADAKIS, P. F. SULLIVAN and D. J. WALTMAN: WAL-TR 143/37, (1961) Dec., p. 88
- 25) E. P. PAPADAKIS: PB-142424 (1959) Apr., p. 93, WAL-TR 143/31
J. Appl. Phys., 34 (1963) 2, p. 265~269
J. Appl. Phys., 35 (1964) 5, p. 1474~1482
Mat. Evaln., 23 (1965) 3, p. 136~139
- 26) 磯野, 上野, 宇田川: 日本金属学会誌, 30(1966) 9, p. 801~805, 32 (1963) 10, p. 976~981
- 27) G. S. DARBARI, R. P. SINGH and G. S. VERMA: J. Appl. Phys., 39 (1968) 5, p.2238~2245
- 28) R. GERSTNER: Berg und Hüttenmän Mona, 105 (1960) 3/4, p. 52~60
- 29) R. MITSCHKE: ibid, 105 (1960) 3/4, p. 52~60
- 30) G. BIERWIRTH: Giesserei, 47 (1960) 4, p. 94~98
- 31) N. F. MELLOR and R. M. PILGRIM: Foundry Trade J. 117 (1966), p. 289~293
- 32) N. B. HECKLER and B. USTOFKY: Mat. Eval., 24 (1966) 8, p. 417~421
Metal Prog., 89 (1966) 2, p. 96~98
- 33) R. L. RODERICK and R. TRUELL: J. Apply. Phys., 23 (1952) 2, p. 267~279
- 34) J. K. WHITE, R. W. MCKLUNG and J. W. ALLEN: ORNL-2651, (1959) Apr., p. 17
- 35) J. W. ORNER: 3rd Int. Conf. NDT (1960) p. 32~1~18
- 36) S. SERABIAN: Mat. Evaln., 16 (1968) 3, p. 41~44
- 37) W. F. CHIAO: Trans. A.I.M.E., 242 (1968) Aug., p. 1543~1551
- 38) J. KRAUTKRÄMER: Arch. Eisenhüttenw. 30 (1959) 11, p. 693~703
Brit. J. Apply. Phys., 10 (1959) 6, p. 240~245
- 39) R. FRIELINGHAUS and J. KOPPELMANN: Materialprüf., 10 (1964) 10, p. 337~342
- 40) C. E. FITCH: J.A.S.A., 40(1966)5, p. 989~997
- 41) 木村: 内部摩擦研究会資料 学振133(内部摩擦)委資料, (1963) 11月, p. 6
- 42) M. REDWOOD: Ultrasonics, 2 (1964) 4, p. 174~178
- 43) N. GROSSMAN: Iron Age, 176(1953), p.338~342
- 44) 広根, 神垣: 日本金属学会誌, 18(1954), p. 483~486
- 45) 西原, 中野, 横岡: 鉄と鋼, 45(1959)8, p.799~803
- 46) E. P. PAPADAKIS: J.A.S.A., 33(1961)11, p.1616~1621
WAL-TR 830.4/1(1961)Feb. (PB-171472) p. 18
- 47) 樺本, 寺石, 明石, 藤井: 材料試験, 12(1963) 122, p. 817~821
- 48) R. T. SMITH: Appl. Mat. Research, 2 (1963), p. 200~206
- 49) H. L. DUNEGAN: Mat. Evaln., 22(1964) 8, p. 353~359
- 50) BEECHAM: Ultrasonics, 4 (1966) 2, p. 67~76
- 51) J. B. BARBER and R. A. GILBERT: Metallurgia 74 (1966) 446, p. 279~283
- 52) J. PIRS: Arch. Eisenhüttenw., 38 (1967) 12, p. 939~942
- 53) H. U. RICHTER: Neue Hütte, 12 (1967) 7, p. 430~433
- 54) C. J. ADAMS: SNT, 19 (1961) 6, p. 393~401
- 55) Von J. KOPPELMANN: Materialprüf., 9(1967) 11, p. 401~405
- 56) P. MIDECKE: Matrialprüf., 3 (1961) 1, p.1~4
- 57) E. KRAINER: Materialprüf., 4 (1962) 12, p. 463~469
- 58) Von J. PIRS: Materialprüf., 10 (1968) 2, p. 43~49
- 59) 川口, 金沢, 本山: 非破壊検査, 10 (1961) 2, p. 60~64
- 60) E. HOLMES and D. BEASLEY: J. Iron Steel Inst., 200 (1962) 4, p. 283~290
- 61) 金沢, 上田: 非破壊検査, 9 (1960) 5, p. 235~241
金沢, 本山, 潮田, 田中: 非破壊検査, 15(1966) 5, p. 179~185
- 62) G. FREYER and H. D. TIETZ: Feingerate Technik, 15 (1966) 9, p. 417~426
- 63) M. B. REYNOLDS: Trans ASM, 45 (1953), p. 839~861
- 64) H. J. McSKIMIN: IRE, (1956), p. 25~43
J.A.S.A., 31 (1959) 3, p. 287~295
33 (1961) 5, p. 606~615

- 65) *M. F. MARKHAM*: Physics of NDT, (1957) s. 56~63
 - 66) *R. P. ESPINOLA and P. C. WATERMAN*: J. Appl. Phys., 29 (1958) 4, p. 718~721
 - 67) *N. H. FAHEY*: PB-161514, (1960) Apr. p. 14
 - 68) *A. T. LEVITT and A. G. MARTIN*: SNT. 18 (1960) 5, p. 333~336
 - 69) *J. ORS*: ANO, 14 (1961) 78, p. 887~898
 - 70) *G. BECKMANN and K. SPIEGELBERG*: Technik, 12(1962)2, p. 81~88, 17(1962)7, p. 509
 - 71) *J. WEHR, P. AZOU and P. BASTIEN*: Memo. Sci. Rev. Met., 59(1962)5, p. 379~385
 - 72) *D. E. ARMSTRONG and J. M. DICKINSON*: Rev. Sci. Inst., 36(1965)12, p. 1719~1721
 - 73) 佐藤, 宮園: 日本機械学会誌, 69 (1966) 572, p. 26~34
 - 74) *A. G. FULLER*: B.C.I.R.A. Journal, 10(1962) 3, p. 339~365
 - 75) *R. FRILINGHAUS, J. KOPPELMANN and H. GOOSSENS*: Giesserei Tech Wiss Beih, 16 (1964) 2, p. 99~110
 - 76) *E. PLENARD*: Mod. Casting, 41 (1962) 5, p. 144~151; Fonderie, (1962) 201, p. 389~403
 - 77) *H. WIEGAND and H. HENTZE*: Metall, 13(1959) 12, p. 1110~1113
 - 78) *W. GRABENDORFER*: Berg-hüttenmann Monatsh 105 (1960), p. 42~46
 - 79) *R. ZIEGLER*: ibid, p. 46~49
 - 80) *M. FENKNER*: Materialprüf., 8 (1966) 11, p. 397~404; Mat. Evaln. 27 (1969) 1, p. 11~15, 22
 - 81) *J. D. LAVENDER and A. G. FULLER*: Brit. Foundryman, 58 (1965) 2, p. 54~65
 - 82) *W. A. FELIX*: Metal Prog., 86 (1963) 2, p. 91~95
 - 83) *C. W. MOSS*: B.C.I.R.A. Journal, 12 (1964) 2, p. 141~148
 - 84) *A. G. FULLER and P. J. B.C.I.R.A. Journal*, 11 (1963) 3, p. 358~375, Mod. Casting, 45 (1964) 6, p. 98~100
 - 85) 島津, 麻布, 波多野, 大久保: 鋳物, 39(1967)4, p. 364~365
 - 86) 木村, 生越, 加来: 島津評論, 24 (1967) 4, p. 189~196
 - 87) *MOROOKA, SUGIYAMA, ITO and NAKAMURA*: Mod. Casting, 55 (1968) 3, p. 90~96
 - 88) *D. H. BRESLOW*: WAL 143/14-48 (1956) Aug. p. 70
 - 89) *O. R. GERICKE*: Mat. Research & Std. (1965) Jan. p. 23~30
Tech. Rep. AMRA-TR 64-44(1964)
Tech. Rep. AMRA-TR 66-38(1966) p. 10
J. Metals, 18 (1966) 8, p. 932~937
 - 90) *F. R. ROLLINS*: WADC TR 59-561(1959) Dec. p. 41
WADD TR-61-42 Part I (1961)
 - 91) *F. R. ROLINS, D. R. KOBETT and J. I. JONES*: WADD TR-61-42 Part II (1963) Jan. p. 31 AD 299017
 - 92) *F. R. ROLLINS and P. WALDOW*: WADD TR-61-42 Part III (1963) May, AD 40504
 - 93) *F. R. ROLLINS*: Mat. Evaln., 24 (1966) 12, p. 683~689
- B. 電気・磁気の方法
- 1) *G. BIERWIRTH*: Giesserei, 45 (1958) 19, p. 546~549
 - 2) *H. W. EGEN*: Giesserei, 49 (1962) 26, p. 849~855
 - 3) *P. J. EMERSON*: Brit. Foundryman, 63 (1965) 4, p. 137~143
 - 4) *ZHETVIN, FRID and GANKEVICH*: Ind. Lab., 31 (1965) 7, p. 1031
 - 5) *GINIYATELLIN, KORGH and SOKOLOV*: Ind. Lab., 32 (1966) 1, p. 144
 - 6) *ARKHIPOVA, et al.*: Zab. Lab., 32 (1966) 6, p. 719~720
 - 7) 栗原: NDI 資料, 3298 (1968) 1 月, p. 8
 - 8) 小笠原: NDI 資料, 3307 (1968) 5 月, p. 17
 - 9) 大山: 非破壊検査, 8 (1959) 4, p. 181~185
 - 10) *I. K. KUPOLOVA*: Fiz Metalloved, 14 (1952) 4, p. 524~534
 - 11) 加藤: 金属材料, 6 (1966) 8, p. 56~60
 - 12) *H. DIETRICH*: Giesserei Tech Wiss Beih, 14 (1962)2, p. 79~91, 15(1963)1, p. 45~58, 15 (1963) 2, p. 59~73
 - 13) *C. ANTONIONE and A. FERRO*: la metal italiana 6 (1962) p. 205~211
 - 14) *M. H. MUKHEEV and B. M. MOROZOF*: Fiz metal metalloved, 15 (1963) 3, p. 343~346
 - 15) *A. STRYKA and A. FEILL*: Prace Inst Hutn, 16 (1964) 2, p. 101~110
 - 16) *H. FRINKEN*: Harterei-Techn Mitt., 19(1964)2, p. 83~87
 - 17) *C. MASCRE*: Rev. Elec., 75 (1966) 1, p. 137~139
 - 18) *H. SPRINGER*: Härterei-tech. Mitt., 20 (1965) p. 98~103
 - 19) 宮副, 本田: 九大工学集報, (1968)2, p. 86~90
 - 20) 吉田, 土方: 非破壊検査, 10 (1961) 2, p. 45~46
 - 21) *D. SCHULTEN*: Schw. u. Schneiden, 17 (1965) 17, p. 158~159
 - 22) *K. SPIEGELBERG and G. BECKMANN*: Neue Hütte, 7 (1962) 3, p. 167~174
 - 28) *K. SPIEGELBERG and H. HAUPT*: Neue Hütte, 10 (1965) 8, p. 480~484
 - 24) *A. SZOMBATFALVY*: Kohaszati Lapok, 98(1965) 7, p. 312~314
 - 25) *E. PIETSCH*: Fertigungstech Betrieb, 16(1966)7, p. 437~440
 - 26) *S. MULLER and R. KOHLHASS*: Arch. Eisenhü-

- tten, 34 (1963) 10, p. 755~759
- 27) W. J. JACKSON: J. Iron Steel Inst., 198 (1960) 1, p. 29~36
 - 28) G. HOFFMAN and F. TURNER: J. Appl. Phys., 34 (1963) 9, p. 2078~2715
 - 29) 牧野: 非破壊検査, 9 (1960) 2, p. 107~113, 14 (1965) 10, p. 429~437
 - 30) N. I. NOSKOVA: ZavLdskaya Lab., 29(1963)7, p. 819~821
 - 31) A. A. SAGONOVA: Fiz metal metalloved, 19 (1965) 5, p. 774~776
 - 32) M. SWISS (Morozova, M., Mikheev, M.N.): Iron Steel(U.K.), 37 (1964) 1, p. 13~14
 - 33) 小野, 神田: 非破壊検査, 15 (1966) 2, p. 45~50, 15 (1966) 9, p. 351~356
 - 34) BISRA: Process Control & Automation, (1963) Mar. p. 104~105
 - 35) H. J. HANSEN: Iron Age, 192 (1963) 21, p. 73~75
J. Metals, 18 (1966) 10, p. 1131~1136
 - 36) ANON: Iron Steel Eng., 41 (1964) 1, p. 131~132
 - 37) 竹本, 藤井: 鉄と鋼, 51 (1965) 5, p. 962~964
 - 39) H. J. KOPINECK: Stahl u. Eisen, 86 (1966) 12, p. 720~725
 - 39) W. FRINGIS and G. HLUCHNIK: Z. Angew. Physik, 21 (1966) 21, p. 418~422
 - 40) G. SYKE and I. MURRAY: ISI Pub. 105 (1967) p. 109~125
 - 41) H. HEPTNER: Neue Hütte, 9 (1964) 8, p. 484~488
Fertigungstech u. Betrieb, 16 (1966) 6, p. 362~364
 - 42) F. MICHALSKI and E. KEMENESY: Materialprüf., 4 (1962) 12, p. 469~472
Cent. Doc. siderung Circ Inform tech, 20 (1963), p. 2509~2519
 - 43) W. SCHÜTZE and H. HEPTNER: Neue Hütte, 9 (1964) 8, p. 480~483
 - 44) A. ZAVARELLA: Metal Prog., 89 (1966) 6, p. 60~62
 - 45) W. LAUBE and R. LINDOW: Fertigungstech u. Betrieb, 16 (1966) 6, p. 365~368
 - 46) K. H. BLOMEIER: ibid., 14 (1964) 14, p. 226~227
 - 47) R. LINDOW: ibid., 14 (1964) 4, p. 225~226
 - 48) W. SCHÜTZE: Technik, 19 (1964) 5, p. 335~338
Fertigungstech u. Betrieb, 16 (1966) 7, p. 435~437
 - 49) K. KEGEL and B. LACMANN: Intern Z Elektro-waerme, 24 (1966) 12, p. 419~424
 - 50) J. A. BETTS and J. P. NEWSOME: Proc. Inst. elec. Eng., 109 (1962) (Suppl 3), p. 7~13
 - 51) A. LINDGREN, J. KAGAY, J. MOODY and G. MACCASLAND: Trans. Am. Found. Soc., 73 (1965), p. 514~534
 - 52) L. G. WRIGHT: Foundry, 66 (1966) Oct. p. 116~123
Auto Engr., 56 (1966) 10, p. 406~412
 - 53) F. FANDRICH: Fertigungstech u. Betrieb, 14 (1964) 4, p. 228~229
 - 54) J. R. JETER: Mater Protect, 5 (1966) 11, p. 53~56
 - 55) J. SALOKANGAS: Valtion Tek Tutkimus., Julka-
isu Fin, 98 (1965), p. 1~21
 - 56) G. HECHT and W. LEWERENZ: Neue Hütte, 10 (1965) 9, p. 564~566
 - 57) E. EUL: Metal Treating, 17 (1966) 4, p. 7~8
 - 58) L. KLEMM: Fertigungstech Betrieb, 16 (1966) 7, p. 430~434
 - 59) W. FRIESS: Elektrotechnik, 47(1964)1, p. 4~6
 - 60) F. KREIBICH: Technik, 18(1963)5, p. 339~345
 - 61) T. JÄKEL: Materialprüf., 7(1965)7, p. 243~250
7(1965)8, p. 289~299
 - 62) 磯野, 小島: NDI資料, 3299 (1968) 1月, p. 6
 - 63) R. L. BROWN and H. L. LIBBY: SNT, 20 (1962) 5, p. 339~342
 - 64) 石原, 伊藤, 清水, 安藤: 金材技研研究報告, 8 (1965) 3, p. 50~56
 - 65) 魚住: 非破壊検査, 10 (1961) 5, p. 235~238,
4th Int. Conf. on NDT(1963), p. 206~214
 - 66) RENKEN: Mat. Evaln., 23 (1965) 12, p. 622~627
 - 67) A. T. NIKOLAYENKO: NASA Transl, (1965), p. 147~151
 - 68) A. V. PUZANCHIKOV: Ind. Lab., 32 (1967) 9, p. 1412
 - 69) 山口, 遠藤, 神村: NDI 資料, 3303 (1968) p. 9
 - 70) K. A. FOWLER and H. P. HATCH: Mat. Evaln., 24 (1966) 3, p. 145~149
 - 71) 安積: 非破壊検査, 9 (1960) 5, p. 242~245,
3rd Int. Conf. on NDT (1960) p. 704~708
 - 72) E. SCHMIDTMANN, H. W. GRASSHOFF and H. SCHENCK: Arch. Eisenhütt., 36 (1965) 1, p. 53~63
 - 73) A. KRAJINA and J. DOLEZAL: Collection Czed-
Chem. Commun, 30 (1965) 9, p. 3197~3202