



入門講座

計測技術編-2

品質評価のための計測技術

北川 孟

豊橋技術科学大学 工学部 生産システム工学系 教授

Hajime Kitagawa

Measurement Engineering for Quality Evaluation

1 はじめに

素材、部品、装置あるいは設備の信頼性を高めるためには、それらの品質評価は不可欠であり種々の計測技術が適用されている。

品質とは、次の3つの立場から考察される¹⁾。すなわち(1)使用適合性、(2)仕様への合致性、(3)“ability”の品質、である。(1)は、使用の目的や条件によく適合していることを意味しており、当たり前の品質ではなく魅力的品質という積極的内容を含むようになってきている。ニーズの多様化に伴い、少品種大量生産から多品種小量生産へと製造体制の移行が益々促進されている。(2)は、定められた仕様を満足しているかどうか判断する、種々の規格範囲への合致性である。(3)の品質とは、“reliability” (信頼性)、“maintainability” (保全性)、“replaceability” (互換性)等末尾に“ability”がついた品質特性を全体的にまとめたものである。

このように品質は本来非常に広範囲な特性であり、品質評価の対象も素材から設備に至るまで、ほうだいで多岐にわたっている。ここでは鉄鋼材料を主体とする素材に限定し、その品質評価のための計測技術を述べる（この場合部品等とは異なり、上記(3)の比重は相対的に小さくなってくる）。

鉄鋼材料等の素材は構造材料としての用途が主体であり（非鉄材料、複合材料、セラミックスやプラスチック等も同様であるが）、その品質は本質的に昔ながらの「強度と靱性」の立場から評価され、破壊力学による解析がなされている（設備として稼働中の腐食、疲労や応力腐食破壊さらに経年劣化等の特性評価の必要性もこの延長線上にある）。この場合の品質は、均質等方体としての健全性、および(1)、(2)の条件を満足するかどうか、等から評価される。すなわち材料力学では対象を等方体として扱うので、内部や表面に均質性を損なうようなきず（欠陥）がないか、「強度・靱性」に影響を与えるきず以外の品質は、さらに仕様

に合致しているか、等が調べられる。

ここでは(1)強度に関係する均質性評価法としての「きず検査法」について簡単に触れ、(2)「きず」以外の強度に関係する品質（例えば、結晶粒度等）、(3)機能品質（すなわち強度に関係しない品質、ステンレス等付加価値の高い材料の外観特性等もここに位置付ける）の計測法、について述べる。

2 品質評価システム

鉄鋼材料等の素材の品質の評価は直接的には引張試験や衝撃試験等の破壊試験によってなされ、これらの抜き取り試験結果がその品質を代表するとの前提で、上記(2)の仕様への合致性の視点から品質が判定される（この分野にも計算機を組み込んだ試験装置が出現して既に20年以上も経過しており、現在の常識では当然のことながら、計算機はこれらの試験装置の不可欠な構成要素の一つとなっている）。

さらに基礎的立場の研究分野では、このようなマクロな評価試験だけでなく、例えば転位等の格子欠陥レベルのミクロな解析が併せて行われるのが普通である。

ここでは、破壊試験については触れない。

2.1 きず検査法（非破壊検査）

素材や製品を破壊せずにその均質性の評価を行う方法は、「非破壊試験」、「非破壊検査」または「非破壊評価」と呼ばれている。非破壊試験は「非破壊で、きずの有無・その存在位置・大きさ・形状・分布状況等を調べる試験」、非破壊検査は「非破壊試験の結果から、規格等の基準に従って可否を判定する方法」（仕様への合致性）、非破壊評価は「非破壊検査で得られた指示を、試験体の性質または使用性能の面から総合的に解析・評価すること」（使用適合性）、と一応、用語上の区別はなされている²⁾。

非破壊検査では、本来強度等に影響を与えるきず（欠陥）

の検出を目的としており、したがってここでは「きず検査により、均質性の評価を行う手法」として位置づける。

このように定義した非破壊検査によるきず検出方法には、(1) X線等の電磁波、(2)超音波等の弾性波、(3)電磁気、(4)浸透現象、等が利用されている（光学的方法の目的は主として製品の表面品質の評価であり、これを「機能品質」の評価法に分類する）。

これら各種の非破壊検査方法の比較は、山口によって「表1」のようにまとめられている³⁾（分類の都合上、光学的探傷試験の欄は削除）。これらの検査方法の中で放射線（X線）と超音波を利用した方法は表面および内部のきず検出が可能で、比較的広く用いられている。

材料を等方体として扱うので、超音波探傷試験においても幾何光学的な仮定のもとにきず位置が推定される。したがって音響特性が等方でない場合は、この仮定は適用できない。圧延のままで低温靱性と溶接性が優れた鋼材（TMCP鋼）において、斜め方向から超音波を入射させてきず検査を行った際に、音響異方性（入射方向によって超音波の伝播速度が異なる特性）の影響で特定方向の感度が大きく低下するという問題が生じた。この原因は結晶方位の偏りによるもので、このような材料では等方体としての暗黙の前提は成立しない。この問題は、検査規格を修正することで解決したようである⁴⁾。本来非破壊検査は等方体としての健全性を評価する方法で、この前提が成立しない場合は検査方法に何らかの修正を要する、という実例の一つとして触れておく。

不均質性評価法としての非破壊検査では、DI加工の際の

介在物検査のように、より一層微細な欠陥の検出が要求されてきている。今後この傾向は益々促進されるであろう。

2.2 強度に関係する「きず」以外の品質の評価システム

きず（欠陥）のような局部的な不均質以外に強度に影響を与える主たる特性として、結晶粒度（結晶粒の大きさ）があり、これと強度とは以下の式で関係づけられる⁵⁾。

$$M = M_0 + M_1 D^{-1/2} \quad (1)$$

ここで M は例えば引張り強度で、 M_0 、 M_1 は定数である。 D は平均結晶粒度で、理想的には全結晶粒が平均値からのばらつきが小さく、かつ方位がランダム（特定の集合組織をもたない）でなければならない。（*結晶に固定した座標系（例えば、立方晶では〔001〕、〔010〕と〔100〕の直交3軸）と試料に固定した座標系（例えば、板状試料では圧延方向、圧延面内でこれと直交する方向と圧延面の法線方向の直交3軸）との角度関係が結晶方位を与える。実用材料は多結晶であるので、統計的に見てある方位に結晶の向きが揃っている場合に、その方位の集合組織をもつ、と言う。）

強度に関係するこのほかの品質に相分率がある。複数の相からなる材料の強度はそれぞれの相の体積分率から予測されるので、その体積分率を計測するためのシステムがいくつか提唱されている。混合相の場合でも各相の成分は材料内部では均一に分布すべきであり、前提として均質性は保持されねばならない。

また深絞り加工性の指標として用いられている r 値は、集合組織に依存する。加工性も機械的性質という意味で、広義の強度として分類するならば、 r 値は積極的に異方性

表1 非破壊検査法³⁾

	放射線透過試験	超音波探傷試験	磁粉探傷試験	漏洩磁束探傷試験	渦流探傷試験	透過探傷試験
探傷方法						
物理現象	電磁波	弾性波	磁気吸引	電磁気	電磁誘導	浸透（毛細管現象）
探傷上の留意点	- 写真濃度 - コントラスト - X線装置の焦点寸法 - 線源と被写体、フィルムとの距離 - 透過性	- 波動（縦波・横波・表面波・板波） - 波長 - 指向性（探触子の音場） - 減衰 - 垂直・斜角探傷 - 直接接触・局部水浸	- 磁粉の選択 - 磁粉液濃度 - 磁粉の散布 - 磁化方法 - 磁粉模様の観察	- 磁化方法（交流・直流他） - コイル寸法 - 励磁周波数 - リフトオフ - 雑音	- 貫通・ブローブ・内挿方式 - 自己比較・相互比較 - コイル寸法 - 励磁周波数 - リフトオフ - 雑音	- 被検査材の表面状況 - 浸透・洗浄・現像作業 - 指示模様の観察
探傷可能な材料	金属・非金属材料	金属・非金属材料	強磁性体	強磁性体	導電材料	金属・非金属材料
検出可能なきず	表面・内部	表面・内部	表面・表面直下	表面・表面直下	表面・表面直下	表面（開口傷）

を利用した強度特性であり、この場合は非等方特性を示す。
ここでは、これらの計測技術を述べる。

2.2.1 結晶粒度の計測

結晶粒度は破壊検査では光学顕微鏡によって測定されるが、非破壊的にはX線、超音波、電磁気等の方法で計測される。

(1) X線を利用した計測

X線回折によって得られるデバイ・シェラー環は、回折に寄与する結晶粒の斑点によって形成される。したがって、デバイ・シェラー環の斑点の数とX線の有効照射体積から結晶粒度が推定できるとされている⁶⁾。この原理に基づいて作成された測定装置の1例を図1に示す。これにより図2のような良好な測定結果が得られている⁷⁾。

(2) 超音波を利用した計測

多結晶体を伝播中の超音波は結晶粒界によって散乱し、減衰する。したがって減衰定数を測定することにより、結晶粒度を推定することができる^{8),9)}。図3は、このようにして測定した結晶粒度から(1)式によって降伏応力を算出し実測値と比較したものである。両者には、良い相関関係が見られる。

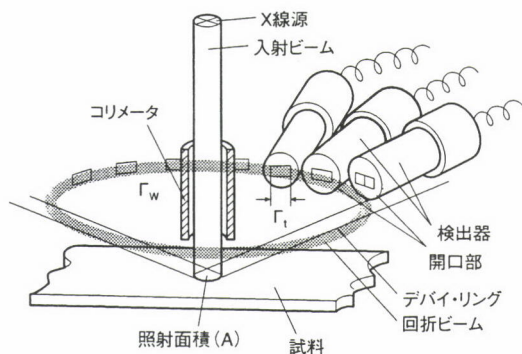


図1 X線回折法を利用した結晶粒度の計測システム⁶⁾

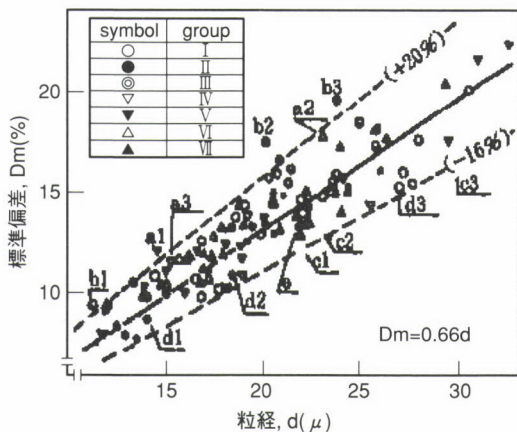


図2 結晶粒度と標準偏差⁶⁾

(3) 電磁気を利用した計測

この方法では、保磁力を測定する方法と磁壁の移動時に発生する不連続雑音（バルクハウゼンノイズ）を測定する方法、がある。前者は、粒界面積が大きい（結晶粒が小さい）ほど磁壁の面積が増え磁化の反転に要するエネルギーが大きくなり、保磁力が大きくなることを原理的に利用している。後者も、磁壁の易動度が結晶粒界に依存するという事実を測定原理としている。図4に、バルクハウゼンノイズの振幅から推定した結晶粒度と破壊試験（光学顕微鏡観察）によって得られた結果との関係を示す¹⁰⁾。

結晶粒度は強度と直接関連する主要な特性であり、非破壊的測定が強く望まれている。そこで最近、各鉄鋼メーカーと大学等の研究機関が共同でこのテーマについて総合的調

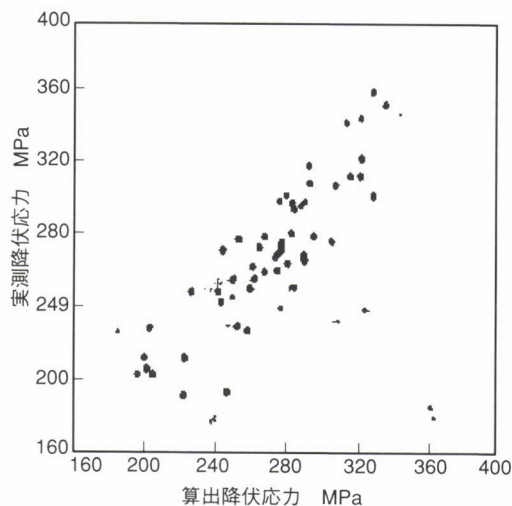


図3 超音波の減衰定数から算出した降伏応力と実測値との比較⁸⁾（標準誤差：19.6MPa）

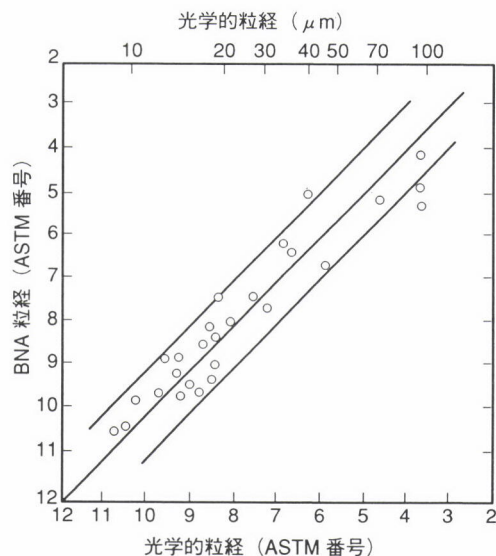


図4 バルクハウゼンノイズ振幅（BNA）から推定した結晶粒度と光学顕微鏡観察より求めた値との関係¹⁰⁾

査、研究を行い、(1)から(3)を含めた内容が詳細な報告書としてまとめられている¹¹⁾。

2.2.2 相定量

非破壊的な相定量計測法には、X線や電磁気等が利用される。

(1) X線を利用した計測

X線の回折強度はそれに寄与した体積の比例するので、この原理を用いて相定量を行うことができる。例えばオーステナイト相とフェライト相からなるステンレス鋼やフェライト相とマルテンサイト相からなる冷延デュアルフェーズ鋼板等を対象に、望ましい強度特性とコイル全長にわたる一様性を評価する目的でオンライン測定装置が開発されている^{12),13)}。デュアルフェーズ鋼の場合、フェライト相とマルテンサイト相の回折強度は区別しにくいので、マルテンサイト変態直前の M_s 点でのフェライト相とオーステナイ

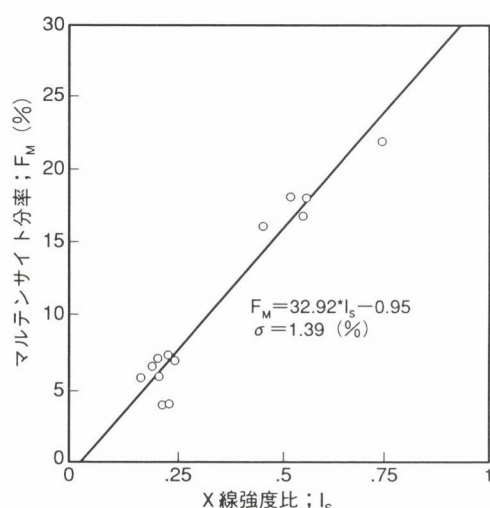


図5 X線回折強度比とマルテンサイト量¹³⁾

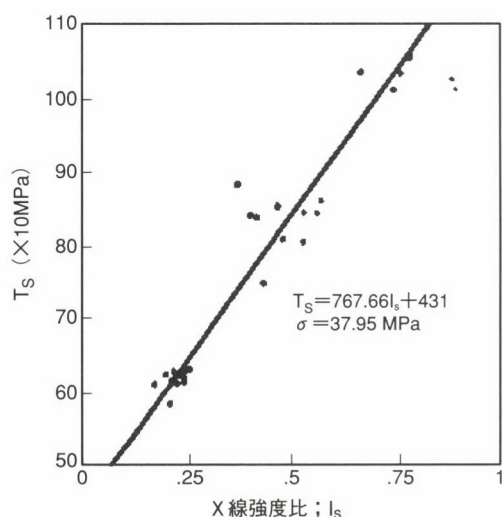


図6 X線回折強度比と引張強度¹³⁾

ト相の相定量を行っている。この方法で得られたX線回折強度比と製品中のマルテンサイト量の関係を図5に、X線回折強度比と引張強度の関係を図6に示す。この装置は、鋼板製造中の連続焼鈍ラインで測定することにより、製品中のフェライト相とマルテンサイト相の比をコイル全長にわたり所望の値に一定に管理することを目的としている。

X線回折強度は結晶配向にも依存するので、この方法では、計測対象が全く等方であるか集合組織があってもそれが一定であることが前提となる。上記の適用例の場合¹³⁾集合組織はあまり顕著ではなくかつ実用上コイル内で一定である。

(2) 電磁気を利用した計測

特に高純度の場合を除き鉄の磁気変態温度と A_{r3} ($\alpha-\gamma$)変態温度は一致する。マルテンサイト相やフェライト相は強磁性体でオーステナイト相は常磁性体であるので、透磁率はその比率に依存する。透磁率を電磁気的方法で計測することにより、オーステナイト・フェライト2相ステンレス鋼や熱延製品の品質向上を目的とした利用法がある。後者の場合、熱間圧延工程で高温中に図7に示す原理で測定される¹⁴⁾。

2.2.3 r値の計測

機械的性質と直接関係する代表的な非等方特性として、r値がある。

r値とは、板状引張試験片に引張変形を与えたときの幅方向と厚さ方向の歪みの比であり、プレス成形特性を与える指標である。これは元来破壊試験によって測定されるが、

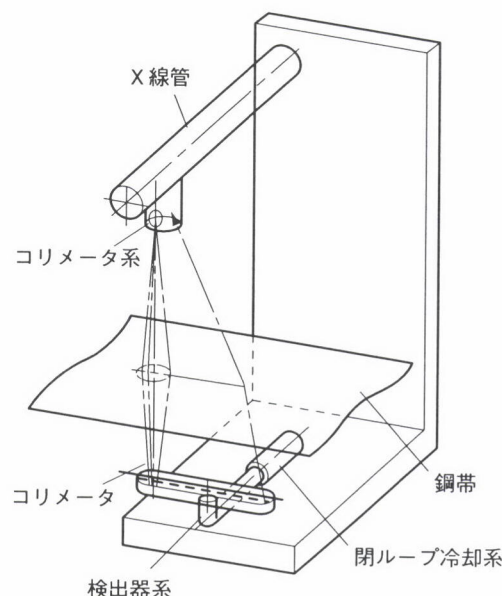


図7 渦電流計測法による変態率センサー¹⁴⁾

r 値と集合組織との関係が明らかにされて以後は非破壊的に製造工程中でオンラインで評価する試みがなされている。すなわち r 値は板面法線方向の $\langle 111 \rangle$ 結晶軸密度と比例することから、X 線や超音波を用いて集合組織を測定し成形特性が評価されている。

(1) X 線を利用した計測

エネルギー分散 X 線回折法は、高い S/N 比を得るために適当な積算処理を要することがあるにしても、同時に複数の回折強度が測定できるので即応性に優れている。この方法を用いてオンライン測定用に開発された装置の原理図を図 8 に示す¹⁵⁾。これにより $\langle 111 \rangle$ を含め 20 個の結晶方向の回折強度を求め r 値を最も精度よく予測するアルゴリズムを適用して算出した値は、実測した r 値と極めてよく一致している。

(2) 超音波を利用した計測

超音波の伝播速度が結晶方位に依存することから、この値を測定することにより r 値が推定される。結晶の対称性を考慮すると集合組織の 3 次元結晶方位分布関数¹⁶⁾の展開係数*の中の特殊なもので弾性特性が表される。超音波を用いて測定したこれらの値と r 値とはよい相関関係にあることが示されている¹⁷⁾。一例を、図 9 に示す。最近では、板厚が 1 mm 以下の薄板の音速をバースト状超音波の多重反射波の干渉を利用して、伝播速度を精度よく迅速に測定する方法が開発されている¹⁸⁾ (図 10)。

(*展開係数の値は X 線回折によっても求まる。X 線回折法と超音波法はそれぞれに一長一短の特徴があるが、X 線回折によって得られる情報が試料表面近傍に限定されるのに対し、一般的に超音波計測ではより内部の測定が可能である。)

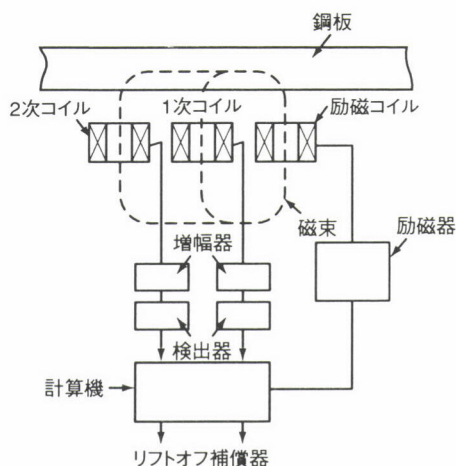


図8 エネルギー分散型X線回折法を利用したオンライン r 値測定装置¹⁵⁾

2.3 機能品質評価のための計測技術

鉄は、経済性が抜群に優れた強磁性材料である。電動機や変圧器の鉄心材料としての用途は、この機能を活用したものである。ここでは磁性材料としての特性と強度以外の特性としての表面品質、等の評価に関連した計測技術の例を紹介する。

(1) 磁気特性評価のための超音波利用計測

一方向に磁気特性が優れた方向性珪素鋼板は変圧器の鉄心材料として重要な材料であり、その特性はゴス方位といわれる $[001]\langle 110 \rangle$ 結晶方位に支配される。通常、磁気特性の評価は各種の磁気試験や X 線回折による結晶方位測定によりなされているが、これらはいずれも製品から切りだされた試験片を対象として行われる。最近上記の超音波干渉法¹⁸⁾を用いてインラインで結晶方位の連続測定が可能な方法が開発されている。得られた結果からは、方向性珪素鋼板とランダム組織（集合組織をもたない状態）の試料間で反射波の最大振幅を与える周波数に明瞭な相違がみられる (図 11)^{18),19)}。この方法は表面皮膜を除去することなし

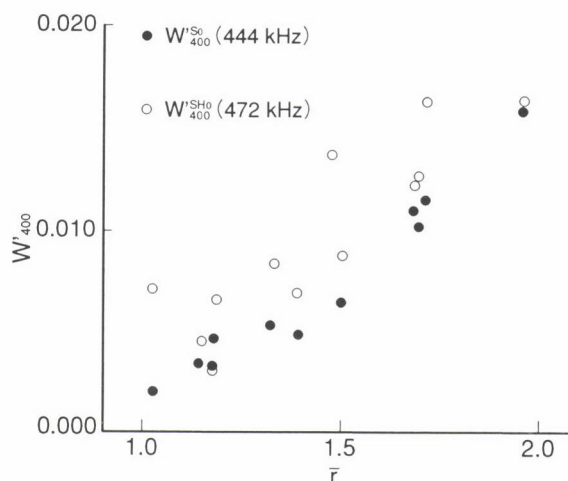


図9 超音波法で測定された3次元結晶方位分布関数の展開係数 (W'_{400}) と平均 r 値との関係¹⁷⁾

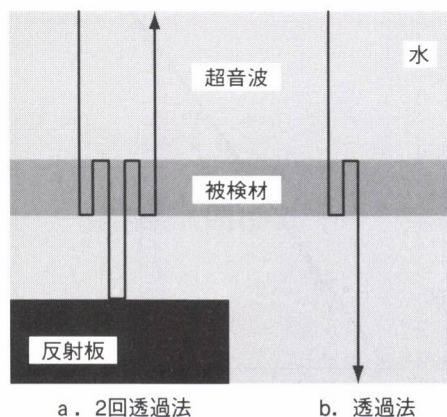


図10 多重反射波の測定方法¹⁸⁾

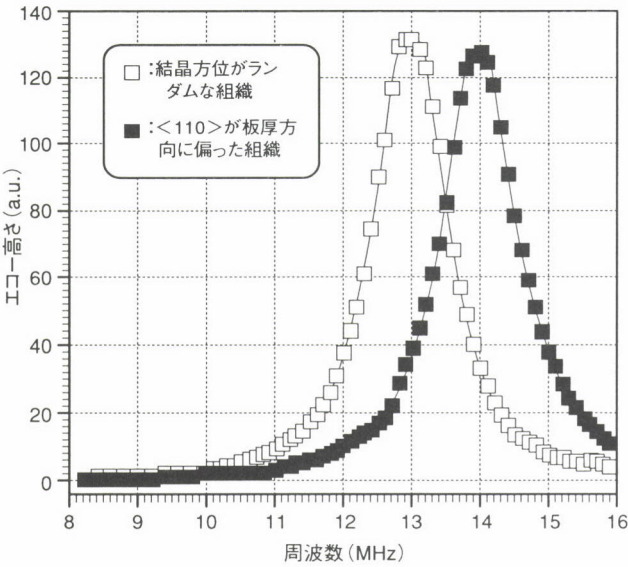


図11 多重反射波の振幅とパースト波超音波の周波数¹⁹⁾

表2 光応用計測の原理と計測対象品質²⁰⁾

原 理	計測対象の品質
干 渉	鋼板表面凹凸形状（三次元計測）
反射・吸収	鋼板表面の薄膜厚さ、粗さ、光沢
回折・散乱	冷延鋼板表面疵検査、微粉粒径分布
偏 光	メッキ鋼板上酸化膜・塗油等の膜厚屈折率
分 光	カラー鋼板等の色差

に測定が可能で、探触子を走査して結晶方位の二次元分布図が容易に得られる。

(2) 表面品質評価のための計測技術

強度には直接影響を与えないが商品価値を低下させる表面きずや微視的な表面凹凸形状を含めた表面品質には、数多くの種類がある。これらは主として光学的方法によって計測され、基本原理と代表的な応用例は「表2」のように対応付けられる²⁰⁾。

冷延鋼板とりわけステンレス鋼板や表面处理鋼板のような付加価値の高い製品では表面品質の評価は重要であり、現在も各種計測技術の開発が積極的に進められている（日本鉄鋼協会・計測制御システム工学部会においても、本年度から「鋼板表面の光学的特性モデリング」研究会が発足する）。

本章では鉄鋼材料を中心に品質評価システムの概要を述べたが、これらに関連する内容は鉄鋼協会の「第140回西山記念技術講座 最近の非破壊検査技術の進歩（平成3年）」、「第150回西山記念技術講座 鉄鋼業における最新の計測・制御技術（平成5年）」および「第32回白石記念講座 これからの品質保証（平成8年）」等の講習会テキストの中でも触れられているので、併せて参照されたい。

3 信号処理技術の重要性

信号から出来るだけ多くの情報を抽出するための研究は、良質な信号を得ることと同様に重要である。最近計算機ハードおよびソフトウェアの利用が容易になったこともあり、

新しい信号処理方法の研究が活発に行われている。それらはウェーブレット変換、ウィグナー分布やフラクタル解析等であり、これらの解析によって新しい貴重な情報が得られるようになってきた。この分野へ適用した例として、超音波信号の時間一周波数解析により欠陥分類を行ったもの^{21),22)}、フラクタル解析によりステンレス鋼板の表面性状を評価したもの^{23),24)}等があり、今後このような研究はますます増えるものと考えられる。

4 おわりに

鉄鋼材料の品質を強度（または機械的）特性と機能特性に分けて述べた。さらに強度特性を等方特性と非等方特性に分類した。前者については非破壊検査で明らかにされるきず等による不均質性と欠陥以外の強度に関係する品質に分け、非等方特性としてはr値を例に、それぞれの評価方法を説明した。機能特性としては、磁気特性等の本来の機能特性に強度と関係がなくより付加価値の高い表面品質を含め、その計測方法を紹介した。

寸法計測は品質に直接関係ないので、触れなかった。製造中の製品温度は品質を決定する重要な要因であるが、「温度計測」は別稿で予定されている。

高品質の製品を一層安価で製造することが強いられている昨今、ここで述べた非破壊的材質評価法はますます重要になってくる。市川も指摘しているように²⁵⁾破壊試験で得られる特性値をオンラインで非破壊的に評価するには多くの困難が伴うが、現状ではより信頼性の高い手法の開発にあえて挑戦せざるを得ない状況に置かれているようだ。

構造材料としての需要は今後共続くことは間違いないが、供給面では第2次大戦後の鉄鋼製造の主体がアメリカから日本等へさらに発展途上国へと急速に移行している現在、超伝導材料や形状記憶合金等のレベルとは行かないまでも、強度と靱性の次元を超越した、付加価値の高い、機能特性を活用した分野へと展開すべきであろう。今後このような機能品質の評価に役立つような計測技術の比重が高まることを期待したい。

引用文献

- 1) 朝香鐵一, 石川馨, 山口襄: 新版品質管理便覧第2版, (1990), p.25
- 2) JIS Z2300「非破壊検査用語」
- 3) 山口久雄: 第140回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, p.6
- 4) JIS Z3060「音響異方性鋼材の探傷方法」
- 5) E.O. Hall: Yield point phenomena in metals and alloys (1970) [Plenum press, New York]
- 6) B.E. Warren: J. Appl. Phys., 31 (1960), 12, p.2237
- 7) 星野和夫, 伊東健次郎, 藤岡外喜夫, 円山弘, 荒木宏侑, 熊沢昭二: 鉄と鋼, 64 (1978), p.621
- 8) R. Klinmann and E.T. Stephenson: Materials Evaluation, 39 (1981), 12, p.1116
- 9) A. Hecht, R. Thiel, E. Neuman and E. Mundry: Materials Evaluation, 39 (1981), 10, P.934
- 10) O. Sundstrom and K. Torronen: Materials Evaluation, 37 (1979), 3, p.51
- 11) 日本鉄鋼協会基礎研究会マイクロ組織センサー研究部会: ミクロ組織の非破壊計測技術に関する最近の研究
- 12) H.Kitagawa and T.Soumura: Trans. Iron Steel Inst. Jpn, 23 (1983), p.543
- 13) 市川文彦, 北川孟: 材料試験技術, 32(1987), 4, p.295
- 14) 森田正彦, 橋口耕二, 岡野忍, 橋本修, 西田稔: 鉄と鋼, 71 (1985), S1089
- 15) H.J. Kopineck: 3rd Int. sympo. on Nondestructive Characterization of Materials (1989), p.753
- 16) R.J. Roe: J. Appl. Phys., 37 (1966), p.2069
- 17) 藤沢和夫, 村山理一, 福岡秀和, 平尾雅彦: 非破壊検査, 38 (1990), 2, p.141
- 18) 高田一, 浅野一哉, 市川文彦: 日本非破壊検査協会平成5年度秋季大会講演概要集 (1993), p.55
- 19) 高田一, 定広健一, 市川文彦: 材料とプロセス, 9 (1996), p.283
- 20) 虎尾彰, 柳本隆之, 内田洋之, 市川文彦, 片岡健二: 川崎製鉄技報, 21 (1989), 3, p.255
- 21) 福田義徳, 北川孟, 前田栄作: 日本機械学会第73期通常総会講演会講演論文集 (I) (1996), p.418
- 22) 福田義徳, 北川孟: 日本機械学会第74期通常総会講演会演論文集 (II) (1997), p.201
- 23) R.E. Green Jr, J.K. Krzysztow and C.O. Ruud(eds.): Nondestructive Characterization of Materials VI (1994) [Plenum Press, New York and London], p.585
- 24) A.L. Bartos, R.E. Green Jr, and C.O. Ruud(eds.): Nondestructive Characterization of Materials VII (1995) [Trastec Publications], p.365
- 25) 市川文彦: 第140回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, p.159

(1997年3月6日受付)