



材料の劣化・損傷の検出と評価

磯 野 英 二*

Nondestructive Evaluation of the Deterioration of Materials

Eiji ISONO

1. ま え が き

工業材料は、加工条件や使用環境によつて、強度や靱性の低下、疲労やクリープ、腐食や割れの発生など、各種の劣化・損傷の現象を生じることが、良く知られており、これらはある程度不可避で、それなりの対応が考慮されて設計・使用されている。なかでも、合成化学プラントや石油化学プラントなどの、いわゆる化学プラント設備においては、これらの操業条件（温度、湿度、圧力）及び処理物質が多様であるため、他の工業設備や構造物に比して、材料劣化・損傷が発生しやすくまた複雑で、安全性確保の上から関心が非常に大きい。これに加えて、近年の需要の増加と、生産性の向上のために、プラントは著しく大型化しているが、その中味が、使用後 10 年以上を経過した旧設計のものから、社会的な安全意識の高まりと事故の経験を背景に、最新の設計理念（とくに保守検査を配慮した）で設計されたものまで、各種のプラントが混在して稼動していることは、対応を複雑にしているといえる。

他方、計測・測定技術に関してみると、近年の著しいエレクトロニクス分野の技術進歩は、非破壊評価技術を含め、プラントの安全性確保に寄与しうると考えられる各種技術・機器の開発と適用を容易にしている。したがって、事故またはトラブルを未然に防止するには、経済問題を含めどうあればよいかの哲学（考え方）を確立し、これをシステム化するための努力を行うことに尽きるといつてよい。

2. 材質について

「材質」という用語は恐らく、「材料の性質」を簡略化したものからきたと考えられるが、その内容は極めて多岐にまたがっており、定義も明確でないように見られる。これについてはアメリカにおいて、国からの要請を受けた材料学協会連合会が、関連 16 学協会による専門委員会を設けて整理した表 1¹⁾が参考となろう。すなわち、材料の性質を、機械的・物理的・熱的・電気的

など、考えられるすべての性質に分類し、コード化していることである。

一方、「材料劣化」あるいは「材質劣化」という用語が、近年あちこちで使用されつつあるが、その定義もまた明確とは思われない。本文においては、機械的性質の低下

表 1 材料の性質の分類¹⁾

機械的性質	応力腐食
引張り	爆発衝撃
応力ひずみ曲線	減衰
0.2% オフセットまで	キャビテーション
全曲線	スポーリング
引張性質	物理的性質
最大	密度
降伏	硬度
伸び	磨耗率
断面収縮	蒸気圧
弾性率	粘性
静的引張	気孔性
静的圧縮	浸透性
剛性率	反射性
動的係数	透過性
ポアソン比	光学的特性
圧縮	寸法安定性
応力ひずみ曲線	熱的性質
0.2% オフセットまで	伝導性
0.5% オフセットまで	比熱
圧縮性	膨脹率
降伏	放射性
ベアリング(曲げ)	吸収性
応力変形曲線	融点
ベアリング性	融除率
降伏	燃焼性
最大	電気的性質
せん断	誘電率
最大	ヒステリシス損
ねじりにおけるせん断降伏	導電性
疲れ強さ	原子核的性質
平滑	半減期
切り欠き($K_t=3.0$)	横断面
フレッチング	安定性
回転接触	化学および金属的性質
腐食疲れ	腐食性
クリープ	生態性
0.1%	熱安定性
0.2%	割れ性
0.5%	酸化性
1.0%	加工的性質
破断	溶接性
割れの進展抵抗	機械加工性
切り欠き引張比($K_t=3.0$)	熱処理性
切り欠き破断比($K_t=3.0$)	成形性
K_{Ic}	形状
K_{Ic}	厚板
割れ安定成長	棒
耐衝撃性	押し出し
Vノッチ・シャルピー	鍛造
耐磨耗性	鍛管
摩損	粉末およびP/M部品
耐腐蝕	変質
浸食	冶金的

昭和 58 年 2 月 7 日受付 (Received Feb. 7, 1983) (依頼解説)

* 理学電機(株) 工博 (Rigaku Corporation, 3-9-12 Matsubara-cho Akishima 196)

表 2 鋼材により起こり得る主な劣化²⁾

素 材	加 工 中				使 用 中
	曲 げ		溶 接	熱 処 理	
	冷 間	熱 間			
低合金鋼 (-100°C ~500°C)	○じん性 低下 ○硬化	○じん性 低下 ○軟化 ○強度低 下	○遅れ割 れ ○高温割 れ ○熱影響 部劣化 ○耐食性 低下	○強度低 下 ○じん性 低下 ○SR割 れ ○脱炭	○水素ぜい 性 ○水素浸食 ○焼もどし ぜい性 ○クリープ ぜい性 ○クリープ ○低温ぜい 性 ○疲れ
マルテンサイト・ステンレス鋼 (RT~400°C)	○じん性 低下 ○硬化	○強度低 下 ○じん性 低下	○遅れ割 れ ○熱影響 部劣化	○強度低 下	○水素ぜい 性
フェライト・ステンレス鋼 (RT~600°C)	○じん性 低下 ○硬化	○耐食性 低下	○熱影響 部劣化 ○遅れ割 れ	○σ相析 出ぜい 化	○σ相ぜい 性 ○475ぜい 性
オーステナイト・ステンレス鋼 (-270°C ~900°C)	○硬化	○耐食性 低下	○高温割 れ ○耐食性 低下	○σ相析 出ぜい 化 ○炭化物 析出	○σ相ぜい 性 ○応力腐食 割 れ ○選択腐食 ○クリープ ○浸炭 ○バナジウム 損傷 ○酸化

はもちろんであるが、金属組織の変化、腐食減肉、水素浸食、各種の割れ発生など、材料の元の状態から変化した性質や現象すべてを含めることとする。なお、材質の劣化に関しては、材料関連の書籍で数多く説明されているが、一例として表2に、鋼種によつて起こり得る主な劣化現象の名称とプロセスとの関係²⁾を示しておく。

したがつて、相互に密接な関係があるこれらの性質の中で、材料劣化に関連したどの性質を中心に測定するかによつて、方法や原理は大きく異なつてくることになる。

他方、鉄鋼材料の宿命である非金属介在物は、構造物の大型化と溶接化に伴つて、大きな問題となつてきたラメラテアや水素誘起割れの源泉として、近年とみにその非破壊評価の重要性³⁾が認識され出している。

3. 非破壊評価 (NDE) について

いわゆる非破壊検査 (Nondestructive Inspection, NDI) に関しては、現在最もよく利用されている技術を背景に、世界的なコンセンサスができて上がつていといつてよいが、これらの技術を応用して、欠陥の検出・評価だけでなく、材料の性質などを非破壊的に計測する非破壊試験 (Nondestructive Testing, NDT) になつてくると、国によりまた人によつて抱くイメージがかなり異なつてくる⁴⁾。

アメリカにおいては、これらをすべて統合して、非破壊評価 (Nondestructive Evaluation, NDE) という用語を、10 数年前から使い出している。たとえば、非破壊的な材質試験⁵⁾ といつた場合、どこまでをその技術に

含めるかは大きな問題であろう。そしてアメリカでは、国家の要請で分類されたが、その後の新しい技術進歩を加味して、若干の修正と追加を行つた NASA の分類 (表3)⁶⁾があり、NDE を非常に広い視野でとらえていることがわかる。このことはアメリカ NDT 協会の講演大会や機関誌の内容が裏付けており、イギリスでも同じような傾向が見られる。

これに対しわが国では、専門分野が細分化されすぎている上に、国民性とも関連して、境界領域についての討議の場や、その対応についての努力が余りにもなされていらない現状にあるといえる。とくに材質を論ずる場合に不可欠な「機器分析法」に分類されている技術のかなりのもものが、表3に示されているが、わが国では全く異なる分野であると認識されている。

以下、表3にあげられている方法の中で、材質の評価という目的に利用され、あるいは可能性のある方法を中心に、改めて分類し直し、すでに紹介した方法⁵⁾ はできる限り重複を避けて簡略に記述する。なお、それぞれの方法については、できる限り新しい、そして解説的な文献を1, 2付しておくので、関心のある方法はそれらを参照していただきたい。

4. 材質の非破壊評価法

4.1 目視法

人間が直接、肉眼または補助器具を用いて、現象を直視することは、最も簡便で信頼がおける非破壊評価法であり、昔から引き続き活用されている。そして劣化の場合も、対象物の表面に現れる現象、例えば腐食やブリストアの発生、割れの有無などであれば、判定は簡単であるが、一般的には困難で、通常は金属組織を調べることが行われる。顕微鏡観察は、材質の判定には最も信頼のおける方法で、光学顕微鏡から電子顕微鏡、さらには光音響顕微鏡など各種のものに発展しているが、いずれも破壊試験となる。そこで「スンプ法^{†)}」と呼ばれる簡便法⁷⁾が、現場で重要な技術となつている。この方法は、局部を研磨・エッチングして、金属組織を現出させ、フィルムに転写 (レプリカ) して、これを顕微鏡で観察する非破壊的な方法で、研磨・エッチングには通常、電解法が使用され専用の装置も市販されている。

4.2 機器分析法

金属材料の成分決定の基本技術としては化学分析が長い歴史をもつているが、部材の一部を試料として採取する必要があり、時間も要する。そこで分析の分野では「機器分析法」と呼ばれる技術が発達普及⁸⁾してきた。機器分析装置は、試料に電磁波エネルギー (主として放射線と光) を与えて、表面の物性を調べるもので、非常に多くの方法があり、進歩も著しい⁹⁾。表3の中でも、これに属するものが10指をこえている。装置は一般に大

† Suzukis' Universal Micro Print Method

表 3 NASA分類による非破壊評価技術

基本分類			
機械的-光学的手法	Mechanical-optical	○超音波共振法	Resonance Ultrasonics
○目視-光学的方法	Visual-Optical ←スンプ法	○超音波表面波法	Surface-Wave Ultrasonics
ホログラフ式干渉法	Holographic Interferometry	○超音波臨界面角法	Critical-Angle Ultrasonics
○光弾性皮膜法	Photoelastic Coating	熱的方法	Thermal
○応力塗料	Brittle Coating	接触测温	Contact Thermometry
○ストレーンゲージ	Strain Gage	○熱起電力法	Thermoelectric Probe
○微小硬度	Microhardness →超音波硬さ計	○赤外線放射測定	Infrared Radiometry
液体浸透法	Liquid Penetrant	○液晶法	Thermochromic
揮発液法	Volatile Liquid	エレクトロサーマル法	Electrothermal
フィルター粒子法	Filtered Particle	化学-分析技法	Chemical-analytical
漏洩検出	Leak Detection	化学スポットテスト	Chemical Spot Test
透過放射線技法	Penetrating radiation	○電解プローブ法	Electrolytic Probe
○X線透過試験法	X-Radiography	○レーザープローブ法	Laser Probe→光音響分光法
○γ線ラジオグラフィ	Gamma Radiography	イオンスキャッター法	Ion Scatter
○中性子ラジオグラフィ	Neutron Radiography	イオンプローブ法	Ion Probe
○透過放射線測定法	Penetrating Radiometry	○オージェ分析法	Auger Analysis
後方散乱放射線法	Backscatter Radiometry	○蛍光X線法	X-ray Fluorescence
オートラジオグラフィ	Autoradiography	○X線回折法	X-ray Diffraction
放射化ガス浸透法	Radioactive Gas Penetrant	中性子放射化法	Neutron Activation
○陽電子消滅法	Positron Annihilation	荷電粒子放射化法	Charged-Particle Activation
電磁気的一電気的手法	Electromagnetic-electronic	○メスbauer分析法	Mössbauer Analysis
静磁場法	Static Magnetic Field	補助分類	
磁粉探傷法	Magnetic Particle	映像作成技法	Image generation
○核磁気共鳴法	Nuclear Magnetic Resonance	写真映像法	Photoimaging
○バルクハウゼン効果	Barkhausen Effect ←磁気弾性的 AE法	フィルムラジオグラフィ	Film Radiography
○渦流法	Eddy Current	ゼロラジオグラフィ	Xeroradiography
○電気抵抗法	Electric Current	トラックエッチラジオグラフィ	Track-Etch Radiography
帯電粉末法	Electrified Particle	透視法	Fluoroscopy
コロナ放電法	Corona Discharge	ビデオラジオグラフィ	Video Radiography
誘電法	Dielectric	超音波水浸法	Immersion Ultrasonics
○自然電子放射	Exo-Electron Emission	超音波映像法	Ultrasonic Videography
マイクロウェーブ放射	Microwave Radiation	超音波ホログラフィ	Ultrasonic Holography
音響-超音波技法	Sonic-ultrasonic	○ビデオサーモグラフィ	Video Thermography
○音響衝撃法	Acoustic-Impact	信号-映像解析法	Signal-image analysis
○音響振動法	Sonic Vibration ←内部摩擦法	写真抽出法	Photographic Extraction
渦流音響振動法	Eddy Sonic Vibration	レーザーフィルター法	Laser Filtering
○アコースティックエミッション法	Acoustic Emission	映像走査デジタル化法	Image Scan Digitation
○超音波パルス反射法	Pulse-Echo Ultrasonics	ビデオエンハンスメント	Video Enhancement
○超音波透過法	Transmission Ultrasonics	○超音波周波数分析法	Ultrasonic Spectroscopy
		○音響信号解析法	Sonic Signature Analysis→AE

(注) ○印及び→印は本文中で触れた方法を示す。

型高級で、特殊技術を要する精密試験で、一部を除いて研究室向きである。しかし最近、可搬式のX線応力測定装置や、γ線を利用した蛍光X線分析器など、現場的な装置が市販されてきているので、他の方法についても、相互の歩み寄り、今後の展開を期待したい。

4.3 超音波エネルギー利用法

超音波エネルギーを試料中に入射させると、材質に固有の音速で伝搬して、そのまま消滅するか、試料中を往復して消滅する。また超音波が欠陥などの不連続部に垂直に近い角度で当たったとき、そこで反射・透過あるいは回折する。そして超音波は、伝搬の様式(モード)が、縦波・横波・表面波・板波などいろいろとあつて、それぞれに特有の性質をもっているため、これらを生かした利用ができる。なお超音波を利用して材料の性質を調べる分野の一部は、「超音波物性」とも呼ばれてきたが、近年探傷以外への利用が、しだいに多方面から注目

を集めつつある¹⁰⁾¹¹⁾。

1) 音速法

音波は材質に固有の速度で伝搬するので、逆に音速を測定して、材質特性を知ることができる。また音速は、応力によっても変化するので、応力の測定や異方性を調べることに利用できる。

測定法として最も簡便なのは、超音波探傷器の時間軸の読みと、試料の厚さから求めることであるが、材質判別などの目的に必要な、1%以下の測定精度を得ることは難しい。ASTM規格¹²⁾には10指に余る方法が記述されているが、エレクトロニクス技術の進歩により、その分解能は、シングラウンド法で1/10⁷、パルス重量法で1/10⁸といわれているので、目的に適合した方法を選択することが大切である。

適用報告は数多く見られるが、とくに鋳鉄関連に多い。それ以外では、Ti板の結晶構造、ステンレス鋼の

表 4 多結晶体の超音波減衰と機構¹⁰⁾

波長と粒径範囲	減衰の機構	減衰定数
独立	真の吸収	$\alpha_a = C_a f$
$\lambda \gg \bar{D}$	レーリイ散乱	$\alpha_r = C_r \bar{D}^3 f^4$
$\lambda \sim \bar{D}$	確率散乱(位相散乱)	$\alpha_p = C_p \bar{D} f^2$
$\lambda \ll \bar{D}$	拡散散乱	$\alpha_d = C_d / \bar{D}$

\bar{D} : 公称結晶粒度, λ : 波長, f : 周波数, α : 減衰定数
 C: 実験定数

加工度との関係、快削鋼中の MnS の性状と縦波速度あるいは音速の周波数依存性を利用した定量化の可能性などの報告がある。他方、ボルト締めトルク測定に音速が利用でき、その専用装置も紹介されている。

2) 減衰法

多結晶金属での超音波減衰は、試料状態と測定条件を除けば、吸収と散乱であるが、MHz の周波数領域では、ヒステリシス損失を伴った散乱損失であり、これまでの多くの研究によつて、平均粒径 \bar{D} と、波長 λ との関係はたとえば表 4¹⁰⁾に見られるように整理できている。

3) 散乱法

上述のように、減衰を支配するのは散乱によるもので、底面多重反射図形から解析するのが減衰法であるが、この際、測定感度を高めていくと、結晶粒界などからの反射が、反射波として数多く現れてくる。そして従来は、測定に支障をきたすノイズ(林状エコーと呼ばれる)として邪魔物扱いにされてきたが、これらを積極的に活用するのが散乱法である。

この方法は、散乱エコーを利用して、圧延ロールの焼入れ深さを求め得るとい報告(1967年)に端を発し、引き続きドイツで熱心に理論と応用の検討が続けられている。応用面としては、偏析・非金属介在物・微小割れの判定、溶接部への適用などがあるが、結晶粒度の測定とくに有効のようである¹³⁾。

装置は、散乱波の振幅と傾斜を利用するため、SN比をよくする必要があり、このための平均化処理のコンピュータや、適合した周波数と探触子の選択が必要とされる。

4) 振動法

試験体に、音波・電磁気あるいは機械的方法によつて、一定の振動を与えた後の、周波数の変化や共振状態あるいは減衰能(damping capacity)を計測する方法で、それぞれ「音響衝撃法」、「共振法」、「減衰法」(内部摩擦法)などと呼ばれている。

この方法は通常、同一形状・寸法の間で行う相対値の比較となるが、報告として多いのは同じく鉄鉄に関してである。「超音波厚さ計」と呼ばれる装置は、共振を利用して押し込み硬さを測定するもので、硬さがデジタル表示されるようになってきている。

内部摩擦測定は、固溶CまたはNを分析できる唯一の方法として、早くから重用されてきているが、最近、エレクトロニクス技術の進歩を取り入れた、取り扱いやすく精度の高い装置として再注目されてきている。応用面としても、配管部劣化の識別法として取り上げられている。

5) 周波数分析法

最初の報告(1964年)は、結晶粒度の異なつた3種類の鋼を、周波数分析器で解析したところ、周波数分布の状況から、定性的な判別が可能であるとしたものであつた。そして、従来の超音波探傷法が長い間、時間領域における反射波の振幅値のみで議論され、欠陥の種類や方向性などの解析が限界にきていることから、周波数領域で考え直す必要性が認識されてきている。今のところ決定打はないように見受けられるが、今後の発展が期待される¹⁵⁾。

6) 臨界角反射法

固体と液体との境界に斜め入射した超音波の反射振幅は、入射角がレイリー臨界角に等しいときに急激に減少するが、この臨界角が試験材の超音波物性に左右されることを利用するものである。そして、冷間加工や残留応力あるいは結晶粒度を調べることなどが報告されている。

4.4 放射線エネルギー利用法

放射線の歴史は非常に古く、数多くの方法が紹介されているが、表3は放射線の性質で分類するのが理解しやすいと思われる。

1) 放射線の吸収

ラジオグラフィと呼ばれ、主として欠陥検査に利用される「X線透過法」、「 γ 線透過法」、「中性子透過法」がこれに属するが、元素による吸収の差を利用して、合金中の偏析状態などを調べる「ラジオメトリ法」もある。

2) 放射線の回折

通常、「X線回折法」と呼ばれているもので、物質の格子常数を測定して、合金の同定や応力測定を行うのに早くから活用されている。

3) 放射線と物質の相互作用

放射線による励起を利用するもので、「電子分光法」ともいわれ、「蛍光X線分析法」「オージェ電子分析法」などがこれに属する。他方、近年NDT関連雑誌にも報告が見られる「陽電子消滅法」は、陽電子ビームによる金属中のイオンとの相互作用を利用するもので、規則-不規則変態、マルテンサイト変態などの研究、機械的な損傷としての塑性変形したTi合金や、金属の水素脆化度の判定などへの利用が報告されている¹⁶⁾。

4) メスbauer法

Mössbauerによつて、1957年に見出された新しい方法¹⁷⁾であるが、工業材料の主力である鉄がその対象にな

り得たことは幸運であつたといえよう。エネルギー源として γ 線 (^{57}Fe など) を用い、ドップラー効果を利用した共鳴吸収によつて、原子核の磁気能率や、化合物の磁性に対する知見が得られる。材質に関連ある報告¹⁸⁾としては、表面応力の測定、ステンレス鋼の炭化物の観察、マルテンサイト量の測定や相の決定、窒化層の厚さ測定 (max 30 μ) などがある。そして後述の、オーステナイト中のフェライト量の測定に期待が寄せられている。

4.5 電気・磁気・電磁気エネルギー利用法

金属材料の電気・磁氣的性質は、多くの物理的性質の中でも、成分や組織に最も敏感であることから、特定の方法は古くから使用され、材質の評価に寄与してきた。そして方法や装置の一部は規格化¹⁹⁾もされている。

1) 電気抵抗法

最も多く活用されているが、直流法あるいは電位差法のいずれも、電極と試料との接触の良否が、結果を左右するポイントとなる。これに対し後述の渦流法は、プローブを試料に軽く接触させることによつて、電気伝導度を簡便に測定することができ、とくに非磁性材料分野で、組成や冶金的状态の判定などに早くから有効に活用²⁰⁾されている。

2) ヒステリシス・ループ法

強磁性体に磁化 (H) を加えていつたときの磁束密度 (B) の変化は、 $B-H$ 曲線として知られており、これら得られる情報としては、透磁率 (B/H)、飽和磁気、残留磁気、保磁力、ヒステリシス損がある。この中のどれが最もよく材質特性を示すかは、対象物と目的によつてさまざまであるが、保磁力が硬さと最もよく対応することもあつて、「磁気硬さ」と呼ばれることもある。

特殊な目的として、オーステナイト中のフェライト量を測定するのに、一端の永久磁石と他端の試験体との磁気吸引力を比較する方法が開発されたが、精度をあげるのに、レバーにスプリングを用いる方法 (Magne ゲージ) に変わり、さらに渦流法 (フェライトメータ) に移行した経過も報告されている。

3) バルクハウゼン・ノイズ解析法

強磁性体を磁場の中に入れると磁壁が移動し、磁区の磁化の向きに変化を生じるが、このときに発生する雑音は Barkhausen noise (BN) として早くから知られていた。このノイズを解析することによつて、結晶粒度の測定や、粒度が一定ならば、試料の異方性、パーライト分布状態など、とくに残留応力の測定もできる²¹⁾。他方、BN の強さは磁界の強さのほか、負荷応力によつても変化することを利用する方法 (磁気弾性的 AE と名付けている) も新しく紹介²²⁾されている。

4) 渦流法

試験体にうず電流を発生させたときの反応 (インピーダンス変化) を利用して、種々の測定を行う方法で、励

起される渦電流は、欠陥の存在や形状・寸法の変化はもちろんであるが、材料の電導度や透磁率の影響を受ける。また渦電流には表皮効果があるので、その浸透深さの変化を利用して、浸炭や窒化などの表面硬化層の厚さや、皮膜厚さの測定に威力を発揮し、材質関連の報告も非常に多い。

4.6 熱、光エネルギー利用法

物質の熱的性質として、比熱・熱伝導率・熱膨脹率などが知られているし、装置や反応物質の温度を知ることが極めて重要で、多くの種類の温度計が活用されている。

1) 熱分析法

温度を定速で昇降温させながら、試料の物性を連続的に測定する方法で、機器分析法の一分野を形成している。一般に精密破壊試験で、NDE との直接関係はないが、物性測定には不可欠である。

2) 熱起電力法

熱起電力が、合金の成分元素とその含有量あるいは組織によつて変化することを利用して、材質判別を行う方法で、比較的早くから、とくに鑄鉄分野で利用されている。この方法は、試料形状に制約を受けず、現場的という特長をもっているが、表面状態に敏感であり、相対評価となるので、差が小さいもの同志での適用は困難である。

3) サーモグラフィ法

加熱された対象物表面からの熱放射を、赤外線検出器を走査させながら検出し、熱分布画像を組み立てて解析する方法で、単に試験体が放熱している状態で見ると、加熱したときの反応を見る方法とがある。

プラントなどにおいて、腐食減肉や埋積物があつたり、剝離現象が生じていると、熱放射の状態が異なるので、操業状態でのモニタとして非常に重要な技術である。

4) 光音響分光法

試料にレーザを照射すると、表面での光吸収と反射に対応した光音響信号の変化 (光学的)、光吸収により発生する熱伝達 (熱的)、熱膨脹により発生する弾性波の伝搬 (音響的) の三種の物理現象を反映した像を得ることができ、これは photoacoustic spectroscopy (PAS) と呼ばれ²³⁾、新しい技術として注目されている。

5. 劣化のモニタリング

従来の NDI あるいは NDT は、すでに発生・形成されてしまった過去の欠陥の有無や程度、あるいは材質の変化を調べる「静的試験」ともいえる方法であつた。しかし、すべての欠陥や劣化は、それぞれのプロセスを経て、ある時間が経過して生成されたものであり、この過程の中で、大なり小なり何らかの情報が出されているはずである。したがつて、この現在の状態を継続的にあ

るいは定期的に、計測し解析すること（モニタリング）によつて、従来は不明であつたことも明確になることは、容易に考えられ、AE法がこれを推進させる原動力となつたといつてよい。以下に、劣化現象の代表として、疲労と腐食を選んで、前述しなかつた方法を補足することにする。

5.1 疲労

疲労による材料の劣化及び破壊は、構造物破損の基本として、古くからそして今に至るまで、引き続き莫大な研究と、実例の蓄積が行われている。疲労現象の研究に、超音波減衰法が導入されたのは1950年頃であり、後10指に近い方法や、渦流法を中心とした電磁気的方法など、相当な数の報告が出されているが、AE技術の進歩は、研究の流れを大きく変えたといえよう。つぎにパンプ法（受身法）のみを記す。

1) アコースティック・エミッション (AE)法

放出エネルギーの一つである音波を利用するものであり、非常に多くの解説と研究報告が続出しているため、ここでは省略するが、構造物の安全性監視や設備診断、溶接や加工のモニタなど、これまでの概念をかえた、大局的なそして「動的試験」の武器として期待が大きい。

2) 赤外線放射測定法

引張試験片の破断時の発熱現象はよく知られており、これら熱放射を検出解析する方法であるが、近年の目覚ましい進歩は、温度分解能 1/1000°C という計測システムの製品を提供しているため、適用²⁴⁾は進むと思われる。

3) エキソエレクトロン (EE) 法

金属内の電子が外部に飛び出す現象として、熱電子放射・光電子放射・2次電子放射などが知られていたが、摩擦・塑性変形・疲労など、機械的刺戟を受けた金属表面からも、自然に電子が放射されていることがわかり、この現象はEE（和訳としては自然電子放射）と名付けられた。EE放射は、金属表面の欠陥やひずみの大きさ、酸化の程度に敏感であるが、放出を刺激するために、光（紫外線）照射や真空系で測定が行われるので、パンプ法ではあるが制約が多い欠点がある。

工学的な応用例²⁵⁾としては、ベアリングボールの疲労試験方法と装置、Alの曲げ試験や0.4%炭素鋼のねじり試験があり、EE放射顕微鏡も作られている。

5.2 腐食

化学プラントにおける損傷の大半は腐食によるもので、その半分近くが応力腐食割れに起因するといわれている。したがって、破壊事故に到るまでに、これを予知できることは重要であり、近年、腐食のモニタリングに関する報告²⁶⁾が非常に多くなつてきている。

1) 厚さ測定

腐食による材料の残存板厚を設置の状態を知ることは、劣化の程度を推定する上で極めて重要である。方法

表 5 残留応力の非破壊測定法

原 理	方 法
[A] 表面の直接利用	(1) 抵抗線ひずみ計法 (2) 応力塗料法 (3) 光弾性皮膜法 (4) 赤外線放射測定法 (偏電子消滅法)
[B] 応力による物理的性質の変化測定	(5) 超音波法—音速法, 横波複屈折法, 臨界角反射法, 位相コントラスト映像法 (6) 磁氣的性質測定法—磁気ひずみ法, 残留磁気法, 磁場回転法 (7) パルクハウゼン・ノイズ解析法 (8) 磁気弾性的AE法
[C] 結晶格子面からの回折現象	(9) X線回折法 (X線応力測定法)
[D] 核超微細効果	(10) 核磁気共鳴法—電磁気法, 強磁性法 (FNR), 音響法 (ANR), 4極子法 (AQR) (11) メスパワー法

としては、ラジオグラフィ法、超音波法、磁気的方法などがあるが、取り扱いの簡便さから、孔食の判定など一部に欠点をもっているとはいえ、超音波厚さ計の普及は著しい。しかし現在の方式は、人間によるスポット的な測定で記録性がなく、とくに石油タンク底板など、広大な面積をもつ対象物には、信頼性と測定速度の面から、問題が多いといわざるを得ず、今後の展開を期待したい。

2) 応力測定

残留応力は、応力腐食割れ・遅れ破壊あるいは疲労などに対して、大きな影響力をもっているため、この応力レベルを知ることは、損傷防止あるいは事故解析の上からも非常に重要である。

部材に働く応力を、非破壊的に測定する方法としては非常に多くのものが報告されているため、表5に、これらを原理と方法に分類して示しておく。

3) 電気化学的方法

現在、腐食モニタリングの主流をなしているもの²⁷⁾で、分極抵抗法、腐食電位測定法などがあり、もちろん装置も市販されている。

6. ま と め

材料の劣化・損傷の非破壊的な評価方法を、NASAの非破壊評価 (NDE) 技法を基に、再分類して概説したが、いずれにしても、劣化の判定のような目的でNDEを適用するには、設備や装置類が稼動に入る前の初期状態でよく測定しておいて、連続的にか定期的に、同じ方法で追跡していくのが正しい方法である。

しかしながら、これら種々の方法はまだ発展途上の技術であり、実装置上で信頼して活用できるまでには、専門分野の異なつた技術者・研究者の相互の交流と努力が不可欠であると考えられる。

文 献

- 1) Federation of Material Soc., "Conservation in Materials Utilization", Mater. Eval., Apr. (1973), 23R
- 2) 渡辺竹春: 材料の劣化 (NDI 協会パネル討論会資料) (1982 年 8 月) 筆者一部修正追加
- 3) 磯野英二: 非破壊検査, 27 (1978) 6, p. 350
- 4) 磯野英二: 非破壊検査, 30 (1981) 12, p. 989
- 5) 磯野英二: 第 46, 47 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1977); 非破壊検査, 17 (1968) 10, p. 442; 鉄と鋼, 55 (1969) 10, p. 916
- 6) A. VARY: Nondestructive Evaluation Technique Guide, NASA SP-3079 (1973), p. 105
- 7) 例えば, 保守検査便覧 (1980), p. 203 [日刊工業新聞社]
- 8) 例えば, 日本鉄鋼業における分析技術 (日本鉄鋼協会編) (1982) [日本鉄鋼協会]
- 9) 特集「新しい表面物性測定技術とその応用」日本金属学会会報, 20 (1981) 7
- 10) 例えば A. VARY: Ultrasonic Measurement of Material Properties, Research Tech. in NDT (Vol. IV) (1980), p. 159 [Academic Press]
- 11) Ultrasonic Testing-Non-conventional testing technique, ed. by SZILARD (1982), p. 648 [John Wiley & Sons Ltd.]
- 12) ASTM E494-75 (1980) Rec. Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials.
- 13) K. GOEBBELS: Structure Analysis by Scattered Ultrasonic Radiation, Research Tech. in NDT (Vol. IV) (1980), p. 89
- 14) 例えば E. M. UYGUR: Nondestructive dynamic testing, Research Tech in NDT (Vol. IV) (1980), p. 205
- 15) 例えば A. F. BROWN: Ultrasonic spectroscopy, 11) の Ultrasonic Testing, p. 167 [John Wiley & Sons Ltd]
- 16) 例えば, C. F. COLEMAN: Positron annihilation-A potential new ndt technique, NDT Int, 10 (1977) 5, p. 227 p. 235
- 17) 佐藤博敏: メスバウアー分光学概論 (1972) [講談社]
- 18) G. LONGWORTH: The use of Mossbauer spectroscopy in NDT, NDT Int, 10 (1977) 5, p. 241
- 19) ASTM E566-76 Rec. Practice for Electromagnetic (Eddy-current) Sorting of Ferrous Metals. ASTM E703-79 Rec. Practice for Electromagnetic (Eddy-current) Sorting of Nonferrous Metals.
- 20) 例えば, 磯野英二: 非破壊検査, 7 (1958) 4, p. 161
- 21) O. SUNDSTROM and K. TERRONEN: The use of Barkhausen noise analysis in NDT. Mat. Eval., 37 (1979) 3, p. 51
- 22) M. SHIBATA and K. ONO: Magnetomechanical acoustic emission-a new method for nondestructive stress measurement, NDT Int, 14 (1981) 5, p. 227
- 23) 光音響分光法とその応用-PAS (沢田編) (1982) [学会出版センター]
- 24) 例えば, Y. HUANG, J. XU, and C. H., SHIH: "Application of infrared technique to research on tensile test" Mat Eval, 39 (1980) 12, p. 76
- 25) 駒井謙治郎: 日本金属学会会報, 18 (1979) 5, p. 342
- 26) 例えば, 配管技術特集号 23 (1981) 1, あるいは T. P. HOBIN: Survey of corrosion monitoring and the requirements. Brit. J of NDT, 20 (1978) 6, p. 284
- 27) 朝倉祝治, 美田邦彦: 日本金属学会会報, 21 (1982) 1, p. 3