

「構造材料信頼性評価技術委員会」報告

岸 輝雄*・大友 暁*²・横井 信*³

Report on Committee of the Evaluation of Structural Materials

Teruo KISHI, Akira OHTOMO and Shin YOKOI

科学技術庁は、昭和 57 年度科学技術振興調整費により「構造材料の信頼性評価技術に関するフィージビリティスタディ」を行つたが、日本鉄鋼協会はその要素技術としての“各種損傷因子の計測技術に関する調査”を委託された。よつて、構造材料信頼性評価技術委員会（委員長、雑賀喜規）を設置し、検討の結果を報告書として提出している。委員会は三つのサブグループよりなり、おのおののグループの報告書の要約が以下、三つの章にまとめられている。1 章には劣化・損傷および欠陥の計測技術の現状がまとめられ、2 章には実験室において使用可能な技術、そして 3 章にはモニタリング技術を中心に、今後の開発が期待される技法がまとめられている。

1. プラントにおける材料の劣化、損傷及び欠陥の計測技術

1.1 火力発電プラント

1.1.1 組織、化学組成、機械的性質の経年変化の計測技術

ボイラ、蒸気タービン、ガス・タービンに使用される構造用鉄鋼材料の劣化、損傷及び欠陥に関する計測技術の現状と今後の課題について調査した。それらの計測技術は、現地で非破壊的にできるものとそうでないものに区分されるが、主に前者について調査した。

クリープ温度領域で使用される火力発電プラント機器の寿命は、巨視き裂の発生を確認した時点とする場合と破壊限界き裂寸法への成長時点で評価する場合があるが、前者により評価されることが多いので、巨視き裂発生寿命の予測、巨視き裂発生までの損傷度を計測する技術が必要とされている。そのために、クリープ損傷と炭化物形態、硬さ、X線回折（半価幅）、細束X線回折（ミスオリエンテーション）、電気抵抗、渦電流特性、超音波特性（音速）などの関係や高温低サイクル疲労損傷と硬さなどの関係について実験室的に検討されてきた。それらのうち、レプリカ法（SUMP）による表面層の組織調査、エコーチップなどの小型硬さ計による硬さ測定な

どが実機に適用されている。例えば、蒸気タービンにおけるロータ外表面のホイール付根R部（ヒート・グループ底）、高中圧タービン・ケーシングの応力集中部、高温用ボルトなどの軟化現象がチェックされている。今後の課題として、結晶粒界への不純物元素の偏析によるCr-Mo-V 鋼などの脆化現象や複雑形状部材に適用できる計測技術の開発などがあげられる。

その他の非破壊検出法として、オーステナイトステンレス鋼ボイラ過熱器管の鋭敏化度の電気化学的測定、ガス・タービンプレードの脱 Cr 層深さの電磁氣的測定などの試行例がある。

1.1.2 局部応力、局部ひずみの経年変化の計測技術
抵抗線ひずみ計、X線回折法などが試用されている。

1.1.3 寸法の経年変化の計測技術

ノギス、キャリパー、マイクロメータ、デプス・ゲージ、リミット・ゲージ、超音波厚み計などが常用される。

ボイラ過熱器管、再熱器管、主蒸気管の外径、厚さの変化、タービン・ケーシング上下の合わせ水平面の変形、弁上蓋の寸法変化などの測定によるクリープ損傷評価が適宜行われている。

1.1.4 割れ（表面割れ、内部割れ、貫通割れ）などの経年変化の計測技術

常用技術として、目視、拡大鏡、超音波探傷法、放射線透過法、浸透探傷法、磁粉探傷法などがある。

電気抵抗法や AE 法によるタービン・ロータのクリープき裂進展モニタリングなどの試行例がある。

粒界破壊型のクリープ損傷の場合には、クリープ・キャビティの測定は有用と考えられており、レプリカ法によるキャビティ形態により低合金鋼配管のクリープ損傷度を評価する方法などが提案されている。

1.1.5 その他の計測技術

振動解析法による運転中異常の検出、放射線透過法による管内スケール堆積の測定、組織調査（レプリカ法）によるメタル温度の推定などが行われている。

昭和 60 年 1 月 22 日受付 (Received Jan. 22, 1985)

* 本委員会第 1 グループ主査 東京大学工学部境界領域研究施設 工博 (Faculty of Engineering, Institute of Interdisciplinary Research, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba Meguro-ku, Tokyo 153)

*² 本委員会第 2 グループ主査 石川島播磨重工業(株) (Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.)

*³ 本委員会第 3 グループ主査 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals)

1.2 化学プラント

1.2.1 組織, 化学組成, 機械的性質の経年変化の計測技術

化学プラントにおける事故原因は, 設備関係では材料の劣化が最も多く, 運転管理関係では指揮命令の不備に次いで点検不良が多い. このことは材料の劣化や欠陥の計測が十分であれば事故の回避に貢献できることを示している. 化学プラントにおける保全思想は事故保全, 予防保全から予知保全への変遷がみられ, それをささえる計測技術開発の重要性, 緊急性はますます強く求められている.

エチレン製造装置の反応管は使用中に管内面から浸炭をうけ, 割れに至る場合がある. 材料は HK 40, HP などの常磁性オーステナイト系耐熱鋳鋼であるが, 浸炭層は多量の Cr_7C_3 炭化物を形成するため, マトリックスが低 Cr 高 Ni の強磁性になる点を利用し, 電磁気法により管外から非破壊的に管内浸炭層の深さが測定される. 問題のある個所については測定点を定め, 経年変化を測定したり, 自走式測定器の応用もはかられている. HP 合金のように管外表面に強磁性スケールが形成する場合には, この方法は適用できないので, 超音波減衰能が浸炭層と非浸炭層で著しく異なることを利用して局部水浸超音波法が試みられている.

Cr-Mo 鋼製圧力容器の使用における不純物元素の粒界偏析による脆化, 破壊靱性の経年変化の測定技術などが今後の課題になつている.

1.2.2 局部応力, 局部ひずみの経年変化の計測技術抵抗線ひずみ計, X線回折, 応力塗料などが試用される.

1.2.3 寸法の経年変化の計測技術

常用技術は火力発電プラントの場合と同じである. 肉厚測定には放射線透過法, 超音波技法も試用されるが, 超音波技法は石炭ガス化パイロットプラント用容器の減肉やパイプラインの管内腐食のモニタリングとしての試行例がある.

1.2.4 割れ (表面割れ, 内部割れ, 貫通割れ) などの経年変化の計測技術

火力発電プラントと同様の計測技術が常用される. 渦流探傷法は熱交換器チューブの欠陥計測に威力を発揮している. すなわち, 常磁性体チューブに対しては多重周波数方式の採用により, チューブ内外面の欠陥の識別, 定量化の精度向上, さらにバッフル・プレートの欠陥検出が可能になつている. 一方, 強磁性体チューブに対しても磁気飽和機能を具備したプローブの開発により, 一部常用化に向かいつつある. AE 法は球形タンク, 圧力容器, 配管などの耐圧試験時あるいは運転中モニタリングとして試用されている.

微小き裂の非破壊検出法として, 反応管のクリープ・フィッシャーや水素侵食によるフェライト系鋼のマイクロクラックに対し超音波技法が試みられているが, 今後の

発展が期待される.

1.2.5 その他の計測技術

腐食モニタリング技術として直接分極法, 電気抵抗法, 重量減法, 透過水素圧法などがあり, それぞれの特徴を生かし試用されている. 配管, 加熱炉管内部のスケール付着状況や塔類内部トレーの詰まりぐあいなどの経年変化は放射線技法により測定される. その他, 熱電対, 赤外線カメラによる温度計測, 振動計測, ボルト締付力の超音波計測などがある.

1.3 橋梁

1.3.1 組織, 化学組成, 機械的性質の経年変化の計測技術

地震, 火災など特別な異常の発生, または大規模な補修, 架け替え工事などの場合以外には調査されることは少ない.

1.3.2 局部応力, 局部ひずみの経年変化の計測技術

橋梁にかかるさまざまな荷重に対する応答挙動と耐荷力を評価する上に, 応力, ひずみおよび変位は, 最も基本的なパラメータである. 抵抗線ひずみ計が広く用いられるが, 橋梁には多数の応力集中部が存在し, しかも, それらが長い距離にわたって分布しているため, すべての局部応力, 局部ひずみを計測することは不可能である. また, 応力測定そのものも高い応力集中のある部分や繰返応力の大きい部分では信頼度を保つことが困難である. 計測技術の信頼性と精度の向上, 計測法の簡易化, システム化の推進が重要な課題になつている.

1.3.3 寸法の経年変化の計測技術

橋梁において基礎の不等沈下, 橋台, 橋脚, 橋桁などの相対変位, 支承と沓座のすべり, 橋桁の変形とたわみなどがすべて安全性とのつながりで重要な点検項目となつている. それらを測定する技術として目視, ノギス, 折尺, テープ, 下げ振り, 水準器, 測量器械, レーザ光線技法, 写真測量法などがあり, それぞれ目的にそつて用いられている.

1.3.4 割れ (表面割れ, 内部割れ, 貫通割れ) などの経年変化の計測技術

鋼橋製作において行われている非破壊試験法として放射線透過法, 浸透探傷法, 磁粉探傷法, 超音波探傷法があげられる. それらのうち, 多くのものは工場内試験として行われるが, 経年変化を調べるには, 橋体でのその部位で行えなければならない. 従つて, 各点検部位にどのようにして近づくか (アクセス) が第一の重要な問題となる. 現在のところ, 遠隔操作に頼れる非破壊計測技術は十分に開発されていない.

1.3.5 その他の計測技術

橋梁の安全性維持にとつては, 塗覆膜の劣化, コンクリート中鉄筋の腐食の検出, コンクリートそのものについての割れ, 劣化の計測も極めて重要である.

(大友 暁)

2. 実験室における材料の劣化、損傷及び欠陥の計測技術

2.1 調査の目的

各種プラントにおける構造材料の劣化、損傷及び欠陥を調べるために、現在、実際に使われている現場の計測技術に関する前章の調査に対応して、実験室や試験室において、構造材料の寿命・余寿命に係る劣化、損傷及び欠陥を検出、評価するために、どのような計測手法が使われているか、また、それら計測機器による損傷などの検出限界はどの程度か、などの現状と問題点（研究課題）を明らかにするために、本調査は行われた。

2.2 調査の項目と結果

調査は、次に示すように、試験中の試験片に対するその場計測技術と、試験片を手にとつて破壊的に、あるいは非破壊的に検査し得る場合の二つに大別して行つた。

2.2.1 材料試験中に試験片に生ずる各種損傷などに対するその場計測技術

実験室などで行われている構造材料の寿命評価に最も関係の深い試験として、高温破壊（クリープ、高温疲れ、クリープ疲れ、熱疲れ、高温腐食、特殊環境下の高温破壊）、疲れ破壊（疲れ、腐食疲れ、特殊環境下の疲れ破壊）、応力腐食割れ（水素誘起割れ、水素侵食割れなどを含む）、腐食試験（全面腐食、局部腐食、腐食割れなど）、及び破壊靱性試験（ K_{Ic} 、 J_{Ic} 、CTOD、 K_{Id} など）の各試験を取り上げ、これらの材料試験中に試験片に生ずる種々の損傷などの発生、進行過程を、その場計測する

表 1 疲れ試験中の計測法

現象	測定法
金属表面変化	光学顕微鏡 電子顕微鏡 X線回折半価幅 X線残留応力 エキソエレクトロン 光学ホログラフィー
疲れき裂長さ進展	読取顕微鏡法 クラックゲージ法 コンプライアンス法 直流ポテンシャル法 交流ポテンシャル法 超音波法
疲れき裂開口挙動	コンプライアンス法 光干渉法 超音波法
き裂先端塑性域	ストレンゲージ法 電子チャンネルリング法
その他	AE法 温度上昇 電気抵抗

表 2 キーワード的に調査対象として設定した計測装置など

肉眼	電位差（電気抵抗）測定装置
カメラ	熱波顕微鏡
光学顕微鏡	放射線探傷装置
電子顕微鏡（透過、回折）	X線CT
超高分解能電子顕微鏡	X線応力測定装置
走査型電子顕微鏡	レーザー+超音波探傷装置
X線分析電子顕微鏡	レーザー+電子顕微鏡
電子線（X線） マイクロアナライザー	レーザー+AE
オージェ電子分光分析器	走査型電子顕微鏡 +非分散元素分析装置
エキソ電子顕微鏡	走査型電子顕微鏡 +電子チャンネルリングパターン
メスバウアー分光装置	メスバウアー分光装置 +円筒鏡型電子 エネルギー分析器
X線回折装置	密度測定装置
超音波探傷装置	硬さ測定装置
超音波CT	粗さ計
電磁超音波探傷装置	クリップゲージ（変位計）
超音波顕微鏡	精密伸び測定装置
光音響顕微鏡	画像処理装置
磁気探傷装置	材料試験装置（JIS一般）
渦電流探傷装置	化学分析装置（JIS一般）
アコースティック・ エミッション（AE） 計測装置	状態分析装置
レーザー表面検査装置	その他
赤外線利用欠陥等計測装置	

手法（装置、手段、方法）について調べた。

調査結果の一例として、最も多くの試みがなされていると思われる疲れ試験におけるその場計測技術を表1に示す。

2.2.2 試験片に存在する各種損傷などに対する計測技術

試験片に既に内在する種々の損傷などを、破壊的に、あるいは非破壊的に検出、評価する計測手法を調べた。調査は、対象とする試験片をまず位置的に、表面、表面近傍、及び内部に分け、損傷などの形状、寸法、分布、並びにそれらが化学組成、金属組織、機械的性質に及ぼす影響などに関する情報をもたらず手法について調べる

表 3 代表的機器分析装置と性能

名 称	略語	プローブ粒子	測定粒子	情 報	面積分解能	深さ分解能	応 用
走査型電子顕微鏡 Scanning electron microscopy	SEM	電 子	二次電子	物質表面の凸凹形状	数mmφ	数nm	材料破面観察 表面生成物観察
オージェ電子分光分析 Auger electron spectroscopy	AES	電 子	オージェ電子	表面元素 (Li 以上) の分析	数μmφ (走査型で数十nm)	数 nm	表面数十Å の組 成分析, 粒界偏析
エレクトロンプローブ マイクロアナライザー Electron probe micro analysis	EPMA	電 子	X 線	表面微小部の元素分析 (Be 以上)	1~数μmφ	0.5~数nm	マイクロ元素分析 定量分析
イオンマイクロプローブ マスマナライザー Ion microprobe mass analysis	IMMA (SIMS)	イオン	二次イオン	表面微小部の深さ方向の 元素分析, 高感度分析	1~数μmφ	1~数nm	酸化膜組成分析 微量元素分析
低速イオン散乱分光 Ion scattering spectroscopy	ISS	イオン	散乱イオン	表面外層の元素組成分析	数mmφ	0.1~1 nm	表面吸着, 表面 層元素分析
X 線回折法 X-ray diffractometry	XRD	X 線	回折 X 線	結晶構造解析, 同定	0.1~数十mmφ	数十μm	表面生成物同定
蛍光 X 線分光分析法 X-ray fluorescence spectroscopy	FX	X 線	蛍光 X 線	元素組成分析	数~数十mmφ	数十μm	材料, 分析 めつき厚分析
X 線光電子分光分析法 X-ray photoelectron spectroscopy	XPS (ESCA)	X 線	光電子	表面の元素組成, 結合状 態の分析	数mmφ	数nm	表面結合状態 分析
レーザーマイクロ分析法 Laser micro analysis	LMA	光 子	光スペクトル	表面元素組成	10~数百μmφ	~100μm	大気中分析可能 非可電粒子利用
発光分光分析法 Photoelectric emission spectroscopy	QV	放 電	発光スペクトル	元素組成	数~10mmφ	~数百μm	材 料 分 析
グリムグロー放電 Grimm glow discharge	GDS	イオン	発光スペクトル	元素組成 (深さ方向の 分析も可能)	数~10mmφ	~数μm	ミクロンオーダー の深さ方向分析

とともに, さらに, 最も典型的な損傷であるポイド及び割れについて特に注目し, その破壊的, 非破壊的計測技術について調べた。

計測装置などとしては, 表 2 に示す各装置などをキーワード的に設定し, 各種損傷などの検出, 評価に対し, これら装置などの適用性, 適用限界及び問題点などを検討した。

本調査において, 多くの担当者間に共通の材質劣化, 損傷などの検出手法は, 走査型電子顕微鏡をはじめとする最新の機器分析装置であった。その一例を表 3 に示す。また調査結果の一例として, 試験片表面近傍の材質劣化, 損傷, 及び欠陥の計測装置とその適用性, 適用限界及び問題点などに関する一覧表を表 4 に示す。

このように, 材料の寿命に係る損傷などを検出し, 評価するための実験室的な手法について, 多くの調査結果が示されたが, 実機への適用については, 損傷などを非

破壊的に計測し, 余寿命を推定する手法の確立が望まれている。

2.3 結 言

実機使用材や使用前の構造材料についての実験室などにおける各種試験や検査に適用されている計測技術の現状と問題点について調べた。この結果, 材料の種類や損傷などの種類 (例えば損傷モード) に対する最適な計測技術やその適用限界 (検出限界) など, 多くの情報を整理することができた。 (横井 信)

3. モニタリング技術の新しい展開と新技術

3.1 超音波探傷法

3.1.1 超音波信号の変化による損傷のモニタリング

(1) 超音波の減衰, 音速変化

超音波の減衰には, 拡散減衰, 散乱減衰, 粘性減衰, 転位の運動による減衰がある。引張試験では降伏点付近

表 4 試験片表面近傍の材質劣化、損傷及び欠陥の計測装置の適用性、問題点等一覧表

計測装置	適用性			適用限界や問題点など
	最適	適	有望	
肉眼		○		表面よりの観察には欠くことができない。腐食、高温酸化等では判断可能事例多い。
カメラ		○		記録として最適。画像処理のためのデータとしても必要。
光学顕微鏡		○		肉眼と共に判別能力は大。組織観察としても必要。
電子顕微鏡(透過、回折)		○		表面近傍の如き連続した変化の存在する場合のサンプルの調整は困難。抽出物に適用。
超高分解能電子顕微鏡		○		電子顕微鏡としての適用。格子像等による判断は未開発。
走査型電子顕微鏡	○			表面状況、マイクロ組成等必須観察手段である。EPMA 機能付が最適。
X線分析電子顕微鏡	○			電子線回折による同定と元素分析を同時に行うために必要。
電子線(X線) マイクロアナライザー	○			多くの場合微小部元素分析による判断にて目的が達せられる。SEM 機能付が最適。
オージェ電子分光分析器		○		表面微小部元素分析として活用。感度は低いが粒界偏析・表面拡散等に活用。
エキソ電子顕微鏡			○	疲労起点等への活用例はあるが、時間的、環境的影響が大。応用は開発途上。
メスバウアー分光装置			○	Fe, Sn 等特定の対象のみに使用可能。通常は X 線回折等で同定が可能。
X線回折装置	○			結晶構造より同定。元素分析と併用により同定。析出物、腐食生成物には必須。
超音波探傷装置			○	割れ、組織変化に活用の可能性あり。
超音波 CT			○	内部のマイクロ組織同定が可能な程度に分解能が上がる要あり。
超音波顕微鏡			○	深さ方向の非破壊測定技術として将来の発展に期待表面状況の影響大。
光音響顕微鏡			○	表面の光吸収スペクトル差を検知。物質同定に適用の可能性大。
電位差(電気抵抗)測定装置		○		不動態被膜の形成状況の連続、静止測定に適用。対象に一般性が少ない。
X線 CT			○	現在の技術は鉄鋼対象となっていないが原理的に極めて有望。
X線応力測定装置	○			応力については実用装置となっている。深さ方向については化学研究を併用できる。
硬さ測定装置	○			マイクロビッカースが常用される。浸炭・窒化の元素との対応等による対応性も良好。
画像処理装置	○			光学的、元素分布情報の定量化に最適。将来は必須となる見込み。
状態分析装置	○			別表に示したごとく重要なものが多い。用法に習熟を要す。

で最大の減衰を示し、疲労試験では応力繰返し数の増加とともに増加する。またクリープ試験では第1期クリープが最大の減衰を示し、第2期クリープでは減少し続け、第3期クリープで急増することが示されている。

一方、キャビティタイプのクリープ損傷においては密度の減少率と音速の減少率とは比例関係にあることが報告されている。

(2) 波形解析による損傷およびき裂のモニタリング
欠陥の形状が異なると反射波の波形も種々変化する。これは欠陥の伝達システム、すなわち欠陥のインパルス応答に依存する。

マイクロき裂およびそれらの集合、材質劣化損傷においても、それらを通ずる超音波波形は健全な材料中のものより変化があり、同様に伝達システムとして考えることができる。キャビティタイプのクリープ損傷では損傷により周波数応答曲線のパターンに変化が認められてい

る。

3.1.2 手動超音波探傷技術

(1) き裂寸法の精密探傷

き裂など、面状欠陥の寸法測定法に端部エコー法がある。表面開口欠陥では表面波を用いて探傷することができ、表面波は開口き裂面をも伝播し、このエコー間隔からき裂深さ l が求められる。

端部エコー法と表面波法を合わせたような欠陥寸法測定としてモード変換表面波法がある。

(2) 欠陥形状寸法測定

斜角探触子の屈折角を種々変化させて欠陥を種々の方向から探傷する断層探傷法がある。

3.1.3 自動超音波探傷法

最近では B スコープ表示(断面表示)、C スコープ(平面表示)はもちろん、B、C スコープにエコー高さの情報を加えた複二次元表示、立体表示、さらには扇形走査+

移動走査の複合走査 B スコープ表示も登場した。

3.1.4 超音波映像法

(1) フェーズドアレイ

微小寸法の振動子群を電子的に位相をずらしてスイッチングし、前方で任意の音場を造ることを目的とし、探触子を固定したままで広範囲な領域を高速で探傷でき、B スコープ、C スコープ像の高速映像化が期待できる。

(2) 超音波ホログラフイー

超音波探触子を被検体表面上で走査し、走査面上で欠陥からの反射波位相分布 (ホログラム) を作成し、欠陥像を等高線表示するもので、等高線の数から欠陥の深さを等高線の長さから欠陥の幅が測定できる。

(3) 開口合成法

一個の探触子が広い指向角で超音波ビームの発信、受信を繰り返しながら移動する。そのとき得られたエコーの距離情報と探触子の位置情報から円弧を描き、円弧の交差の度合から像再生を行う。

(4) 超音波 CT 法

送信探触子と受信探触子の間に被検体を挿入し、そのときの音速変化または減衰変化を用いて被検体断面内の音速変化領域または減衰変化領域を断層像として表示する。

(5) 音響顕微鏡

試料内に超高周波の超音波ビームを入射し、試料の弾性的性質の相違によつて生じる超音波散乱などの変化をレーザー光または超音波レンズで検出し、二次元画像表示させる。

3.1.5 非接触探触子

非接触で超音波の送受信が可能な方法がある。一つは電磁超音波であり、他の一つはレーザー超音波である。前者は試料に直流磁場をかけ、コイルに高周波インパルス電流を流すと試料内にうず電流が流れ、ローレンツ力により高周波応力を生じて超音波となる。受信はこの逆である。後者については高出力のパルスレーザー光の熱衝撃で材料に超音波を発生させ、かつその受信もレーザー光を利用する。

3.1.6 その他

オーステナイト系鋳鋼および溶接部の超音波探傷は結晶粒の粗大化による弾性異方性が顕著に現れ困難となる。現在、集束探触子、二振動子探触子の使用、縦波斜角探触子の使用、広帯域探触子および広帯域送受信器の使用などが良いといわれているが、十分な精度を持つ探傷技術はまだ確立されていない。

3.2 磁気探傷法

3.2.1 磁気探傷法による欠陥のモニタリング

(1) 磁粉探傷法: 欠陥部の磁粉の付着を利用する。

(2) 欠陥漏洩磁束測定法: ホール素子など感磁センサーを用いて欠陥部の漏洩磁束を検出する。

(3) 録磁探傷法: 磁気テープを用い、欠陥を検知す

る。

3.2.2 磁気的方法による材質変化のモニタリング

鉄鋼材料の磁気的性質、すなわち透磁率、保磁力、ヒステリシスなどは化学組成、熱処理、折出などによつて影響を受ける。これらの磁気応用の材質試験方法を表 5 に示す。

3.3 過流探傷試験

3.3.1 表面欠陥のモニタリング

平面状の被検体ではプローブコイルが用いられ、熱交換器など配管の定期検査では管内に試験コイルを挿入する挿入式過流探傷が使用される。

表 5 磁気的方法による材質の試験方法

方法	方法の内容	対 象
磁気吸引力 ○	磁石との間に働く力を測定	透磁率(磁化)の比較 δ フェライトなど強磁性相の推定
漏洩磁束 ○	磁化を与え磁束を感磁センサーで測定、または残留磁束の測定	透磁率、δ フェライト量などの測定 (精度はよい)
保磁力測定 ○	直流磁化を正負方向に行い、保磁力を求める	焼入れ層深さなどの測定 (校正曲線による)
バルクハウゼン効果利用	直流磁化におけるバルクハウゼン雑音の分析	残留応力、結晶粒度
磁気歪み効果利用	磁束(ウィーデマン効果等)透磁率変化の測定	残留応力 材質変化(疲労等) 磁気異方性

○ 実用装置のあるもの

表 6 渦流法による材質の試験方法

方法	内 容	対 象
導電率変化 ○	コイルインピーダンスまたは誘起電圧の検出	非磁性金属の導電率測定、材質判別、アルミ合金溶接部の品質管理
透磁率測定 ○	同 上	鉄鋼材料の材質判別 熱処理、硬度の管理
ヒステリシス ○ (磁化曲線)	低周波で磁化し、誘起電圧の波形により試験	同 上 (主として棒、機械部品に適用)
高調波検出法	低周波磁化により生じる高調波を検出	鉄鋼材料の材質判別 焼入れ深さ等の推定
磁気歪利用 ¹⁸⁾	磁歪による透磁率変化を渦流法で検出	残留応力、疲れ等による損傷の検出等
磁気異方性 ¹⁹⁾ センサー利用	磁気異方性の検出	焼入れ深さ、残留応力等

○ 実用装置のあるもの

進んだ方法として多重周波数を用いる方法が開発され周波数の違いによる指示のパターン情報が追加され、より定量的探傷システムへと進んでいる。

3.3.2 材質変化のモニタリング

導電率、透磁率に影響を与える材質変化を検出することができる。表6は渦流法による材質試験法の例を示したものである。

3.3.3 パルス波による肉厚などのモニタリング

パルス波はエネルギー集中が大きいからピンホールなど微小欠陥の検出が可能となり、超音波では探傷困難な耐熱鋳造合金の内厚測定が行われ、注目されている。

3.4 AE 技法

3.4.1 AE 信号による損傷のモニター

破壊靱性試験中の AE モニターでは荷重増加に対して累積事象数、事象発生率で示され、巨視的き裂発生でそれらは急増することが知られている。

AE の振幅値と事象数の関係を破壊機構と関連づけた研究がある。低振幅 AE は塑性変形と微小割れ、高振幅 AE は微小割れの合体、水素誘起割れ、大きな介在物の割れ、へき開割れに分類している。

一方、従来の AE 技法は変換子(探触子)から出力された信号(検出波形)のみを解析の対象としていたため検出された現象の大きさ、持続時間、速度などを物理的、力学的に定量化できないこと、変換子、媒体が異なる場合比較できないという問題点を有していた。そこで音源そのものの原波形を解析する手法が開発された。それは検出波形は原波形と変換子と媒体との一括した応答関数とのコンボリューション(たたみ込み積分)で与えられるから、逆に応答関数が分かればデコンボリューション(逆たたみ込み積分)により原波形が求められる。解析的に応答関数を求めた報告もあるが適用範囲が限られてしまう。一方、擬似 AE 源を用いて応答関数を実験的に求める手法が開発され良好な結果を得ている。

3.4.2 劣化、損傷および欠陥の評価法

SCC に伴い生成する AE の発生要因はき裂進展に伴う AE 以外に水素のバブリング、酸化皮膜の割れが考えられ、特に水素のバブリングによる AE は腐食進行のモニターの可能性を示す。一般に活性径路割れに伴う AE の発生エネルギーは小さいが、水素脆性によるき裂進展は AE 法によつて確実に捕えられている。

水素による遅れ破壊のモニターは可能で、き裂先端への水素拡散の潜伏期を正確にモニターし、AE が段階的に発生していることが示されている。

疲労は破壊に時間因子が加わつた動的な現象で、AE の動的特性および連続監視が可能なる点において他の計測法にない長所をもつている AE 法は今後の安全性評価法の一翼を担う。

3.5 レーザー技法

よく使われているのはレーザーホログラフィーであり、変形前後の各ホログラムを干渉させ、干渉じまとして像再生させ、変位、変形量を得る。これの応用としては前述の超音波顕微鏡、レーザー超音波がある。一方、金属表面などの粗面にレーザー光を照射すると、スペックルパターンを含んだ回折パターンが観察される。塑性ひずみの計測が可能となり、塑性変形の計測から疲労のき裂発生の予知、およびき裂近傍のひずみ分布の計測から疲労損傷の定量化も可能となる。

3.6 赤外線技法

被検体に熱流が存在し、欠陥部で生じる熱的特性の変化を表面温度変化、温度勾配の変化として赤外線検出器で検出することにより、欠陥の存在、大きさを予測するものである。被検体上に小さな面積スポットで加熱走査し、その変化から欠陥検出している。この応用としては飛行機の疲労クラック、接合部材の接合欠陥の検出などがある。

3.7 エキソエレクトロン技法

材料表面から放出されるエキソ電子を検出し、その放射位置、強度、分布、経時変化の挙動からき裂の発生、成長を知る。損傷によつて生じた新生面の時間的経過が分かり、損傷の新しさを評価することが可能な技法として期待される。

3.8 電位差法(電気抵抗法)

3.8.1 表面き裂の検出と深さ測定

非破壊検査として現場で使用されているき裂深度計では一般に深さに対して十分な長さ(5~6倍以上)を有する mm オーダー以上のき裂が対象である。単純なき裂として CT 試験片のき裂またはき裂状スリットからのき裂進展については各種試験中その監視法として用いられることも多い。

3.8.2 電位差法による腐食の検出

腐食速度は溶解電流により、腐食抵抗は酸化膜の電気抵抗によつてモニターできる。

3.9 放射線透過試験法

X線、 γ 線、中性子線などを使う放射線透過試験は装置の小形軽量化、X線画像処理技術の飛躍的な進歩に支えられ、今後この分野でも重要な役割を担つていくと考えられる。

3.9.1 X線装置の小形、軽量化

板厚 50 mm 程度の検査には携帯式 X線装置が使われる。最近ではセラミック式 X線管が開発され、高周波パルス式の高電圧トランス化が図られるなど著しい進歩をみせている。ライナックも屋外で移動できる可搬形のものが実用化されている。これらはいつそうの小形化、軽量化が課題である。

3.9.2 デジタル、ラジオグラフィ

X線画像を A/D 変換した後、各種の画像処理を行つ

て高品質の画像を作り出す方法で、複数の異なつた条件で得られた透視画像を演算し必要な情報だけ抽出するもの、特殊な高感度、高階調のイメージセンサーを使用するものなどがある。配管内の腐食やスケールなどの精密検査などへの応用が期待される。

3-9-3 X線 CT

被検体を中心にX線管とX線検出器を配置し、被検体の周りを1回転させながら数万点の投影X線データを収集し、コンピュータで被検体断層各部のX線吸収係数を算出して断層画像を造りだすものである。欠陥検査はもちろん、異種金属、プラスチック、液体などの様態を鮮明な画像で観察でき、将来は組成や組織の解析にまで応用が進むと考えられる。

3-10 X線回折法

3-10-1 X線応力測定法

特性X線により結晶格子ひずみをX線回折によつて求め、材料表面の応力を測定する技法である。部材表面の残留応力測定法としてすでに確立した技術であるが、内部の応力分布は測定できない。

3-10-2 結晶組織観察法

情報としてはデバイ環半径方向の広がり(半価幅)で表される微視的内部ひずみと接線方向の広がり(ミスオリエンテーション)で表される結晶粒の曲折である。室温の高サイクル疲労については半価幅対損傷比の関係が数多くの鋼種について実験的に求められた。しかし、疲労過程の大半をしめる第2段階での半価幅変化が少なく、定量的な損傷推定には精度的な課題がある。また、ミスオリエンテーションによるクリープひずみの検出を行つた報告がある。細束X線法は測定時間が長いことが欠点である。

3-11 熱波顕微鏡

周期性の電子ビームを物体表面に照射すると、電子ビ

ームの周期と同一周期の熱波が発生し、さらに音波に変換される。この熱波の欠陥など異相による散乱、反射に起因する音波の強度変化をとらえ画像化する。材料表面のマイクロ欠陥の検出に期待されている。

3-12 振動モニタリングによる異常予測

振動は異常を生ずると表面に現れるパラメータとして、機械の保守管理に広く用いられている。近年、ミニコンやマイコンの素子が安価に入手できるようになり、異常診断能力をもつた異常監視システムへの展開が計られてつある。

単能的な計器として次のものが適用されている。

- (1) 振動計による振動値のモニタ
- (2) 振動シビアリティメータのモニタ
- (3) ベクトルフィルタにより不つりあい量のモニタ
- (4) ころがり軸受振動検出による損傷のモニタ
- (5) 高サイクル域の振動検出によるロータ接触のモニタ
- (6) (1)~(5)の振動スペクトルのモニタ

3-13 硬さ計測

熱疲労、熱衝撃による明らかな損傷を受けたものについてはいうまでもなく、その過程において材質変化は生じており、それが硬さ計測によつて検出されるのであれば劣化、損傷のモニタリング手法として本法は適用可能であり、実際に硬さ計測によるクリープや疲労の損傷が検討されている。今後は特に検出子の細長化が望まれる。(岸 輝雄)

なお最後に、本委員会を指導された石川島播磨重工業(株)雑賀喜規氏、ならびに、第3章をまとめるに当たりご協力いただいた金属材料技術研究所福原熙明氏に深く感謝いたします。