

# 非破壊評価の現状と今後

岸 輝雄\*

Status and Future of Nondestructive Evaluation  
Teruo Kishi

Synopsis: Recent status and future considerable scope of nondestructive evaluation are summarized in this paper. It is the most important subject to make sure of high reliable materials for engineered application. To understand constituents of fail safe design of such materials, damage detection technique and damage evaluation with respect to fracture mechanism are improved in recent status of nondestructive evaluation. While, in-situ monitoring of damage or defects is performed by "New development of Acoustic Emission (AE) technique" and development of "Smart structural system and its integrity".

Key words: nondestructive evaluation; fracture mechanics; nondestructive inspection; acoustic emission; health monitoring; smart structural system.

## 1. 非破壊評価と破壊の力学

非破壊検査，そしてそれに基づく非破壊評価が重要な技術的分野としてその発展が求められる時期に来ている。Fig. 1を見ていただきたい。これは，破壊力学の簡単な取り扱いである。無限媒体の中に， $2c$ の長さの貫通き裂がある時，無限遠方での応力を  $\sigma$  とすると，応力拡大係数  $K$  は  $K = \sigma\sqrt{\pi c}$  と表示できる。応力拡大係数とは，応力と欠陥の大きさを含む使いやすい材料評価のパラメータといえる。そして，この応力拡大係数がある一定の値（破壊靱性） $K_{IC}$  を越えると材料は破壊する。

$$K = \sigma\sqrt{\pi c} \geq K_{IC} \quad (1)$$

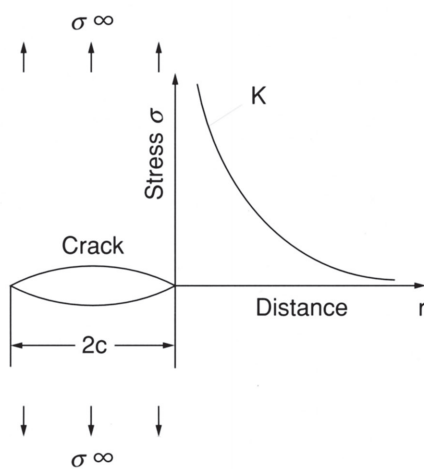


Fig. 1. Stress distribution at the crack tip.

それゆえに，直感的に理解できるように応力が増加したり，欠陥の大きさが大きくなると，材料固有の値である靱性値を越えることになり，破壊が生じる。

重要なことは靱性  $K_{IC}$  を上昇させることにあるが，破壊靱性を2倍に上昇させることは既存の材料では不可能に近い難しい材質変化を伴うことになる。もし欠陥の大きさ  $c$  を  $1/4$  にすると，靱性が2倍になることに対応する。このことは材料の利用にあたっては，欠陥検出能を4倍にすることと，材料の破壊靱性の大きさを2倍にすることが等価であることを意味する。材料の破壊靱性向上技術がほぼ飽和に達した今，材料を使う技術としては定量的な欠陥検出能に負うところが大きい。

欠陥の定量的な検出をQNDE (Quantitative Nondestructive Evaluation) と呼ぶが，今後この技術は大きな発展が期待される領域といえる。

材料を非破壊検査するには，式 (1) の左辺に相当する  $c$  を検出するのを欠陥検出 (Nondestructive Testing) といい，それに対して右辺の  $K_{IC}$  に相当する材質，およびその劣化を検出する技術を材質評価NDC (Nondestructive Characterization) と呼ぶ。欠陥評価に比べて，近年NDCの評価が注目を浴びている。これは原子力の分野における照射脆化，化学プラントの腐食等による脆化が使用年数とともに，大きな課題になっていることに依存している。この所，NDCに関する国際的な活動も活発であり，次年度には第10回NDC国際会議が日本で開催予定であり，現在その開催の準備を進めている状況である。

\* 工業技術院産業技術融合領域研究所所長 東京大学先端科学技術研究センター教授 日本鉄鋼協会会長，工博

## 2. 非破壊検査

欠陥検出においてNDT (Nondestructive Testing) は欠陥を見つける試験, そしてNDI (Nondestructive Inspection) とはある基準を考慮して, 材質の判別までを考慮する手法と考えられてきた。それに対して, 近年NDE (Nondestructive Evaluation) なる用語がよく用いられている。これはFig. 2に示すように, 欠陥を検出 (Detection), 位置標定 (Location), そしてその欠陥の種類, 寸法, 形状, 割れモードなどの特性を評価することにより, かつ破壊機構, 破壊の力学を用いて欠陥の有害度を評価する手法である。この手法により使用不能な状況と継続使用可能な条件を明確にし, 後者の場合には安全率を評価したり寿命を評価することになる。

それゆえ, 非破壊評価は単に欠陥検出技術というよりは, 材料および構造物を総合的に評価する手法と定義づけることができる。もちろん, この場合にも材料の劣化をNDCにより明らかにすることが必要条件といえる。

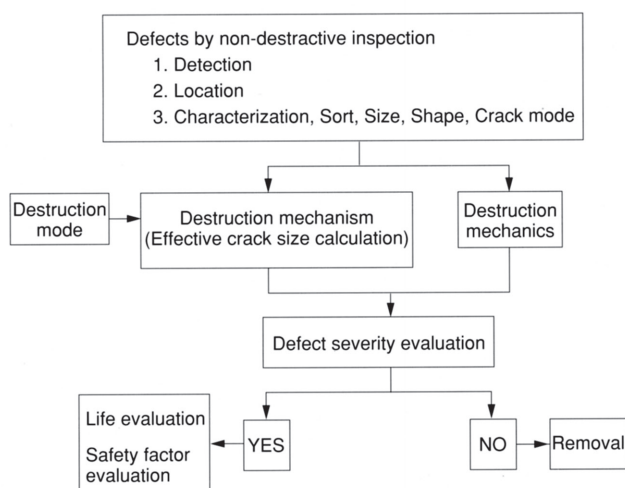


Fig. 2. Flowchart of nondestructive evaluation method.

## 3. 非破壊検査の重要性

従来も非破壊検査の重要性は充分認識されてきた。しかしながら, 近年材料を取りまく環境が変化し, その取り扱いの範囲も多岐にわたるようになってきている。

まず, 1つには公共的な構造物の多くの建設に伴い, その修理費が年々増加し, 2025年には新しい公共物を建てることは, 現在の予算規模では修理費の増大により不可能になると考えられている。それゆえ, 検査を的確に行うことにより, 建造物の寿命を延伸したり, 古い構造物の安全性, 信頼性を的確に評価する需要が一段と増している。

一方, セラミックス, 金属間化合物, 半導体, そして複合材料等の開発が今後とも進むと考えられるが, これらの

Table 1. A permissible critical crack size  $2a_c$  in the case of 50% loading of bending fracture strength.

|   | $K_{IC}$ (MN · m <sup>-3/2</sup> ) | $\sigma_B$ (MPa) | $2a_c$ (mm) |
|---|------------------------------------|------------------|-------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 4.0                                | 500              | 0.17        |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>                  | 4.8                                | 1000             | 0.06        |
| ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.0                                | 600              | 0.27        |
| SiC   | 3.0                                | 600              | 0.06        |
| Titanium alloy                                  | 50                                 | 1200             | 4.6         |
| Aluminum alloy                                  | 35                                 | 500              | 13.0        |
| Maraging Steel                                  | 90                                 | 2000             | 5.4         |
| Cast iron                                       | 20                                 | 500              | 4.2         |

材料は金属系と異なり, すべて脆性材料といっても過言ではない。Table 1にセラミックスの許容欠陥の大きさを金属材料と比較して記載してある。この図から明らかのように, 金属材料ではミリメートル単位の欠陥が許容されるが, セラミックスでは一桁~二桁小さな数10  $\mu$  mの欠陥を内蔵すると, 負荷状態で即時破断を生じることになる。このことより新素材, 新材料開発は, 微小欠陥検出技術なくしてはその発展が難しい状況になっている。

また, このことにも関連するが, 欠陥を含まない製造技術を確認するために, 製造過程のモニタリング技術が注目されている。製造過程をモニタリングにより非破壊的に管理することにより, 標準以上の欠陥を含まない材料製造法, 材料加工法の開発が強く望まれている。

この延長の更なる発展として, 現在ヘルスマニタリングなる用語が注目されている。これは材料使用中の構造物の状況を連続的に監視し, 材料構造物の健全の度合いを評価する手法である。非破壊検査の領域では, オンライン・モニタリング, またはオンストリーム・モニタリングに相当する用語である。ヘルスマニタリングを行い, 悪い部分を修復することを含めて, これらの材料を知的材料と呼ぶ。究極の構造材料, または構造機能と制御機能を融合したシステムとして, 今後ともこのような材料・構造物の開発が期待されるが, 我が国においても平成10年より通商産業省・工業技術院・産業技術研究開発プロジェクトとして「知的材料・構造システム」なるプロジェクトが発足している。

## 4. 非破壊検査の手法

Fig. 3に非破壊検査の手法をまとめて示す。欠陥を扱う場合には, 内部欠陥と表面欠陥に分けて検出することが重要となる。また, 先程のヘルスマニタリング等に関係する連続監視の手法として, アコースティック・エミッション (AE) の重要性は一段と高まっている。相変わらず重要な欠陥検出法は, 超音波および放射線を用いた手法であるが, 近年超音波の音速・減衰および波形解析等を用いることに



|                            |                             | Material R&D          | Product inspection                   |                                 |   |   |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Non-destructive inspection | After cracking              | Inner defect          | Ultrasonic test                      | Acoustic velocity • Attenuation | ◎ | ○ |
|                            |                             |                       | Waveform analysis                    | ○                               | △ |   |
|                            |                             |                       | 3-dimensions imaging                 | ◎                               | ◎ |   |
|                            |                             | Radiation test        | Laser scanning ultrasonic microscope | ◎                               | △ |   |
|                            |                             |                       | Micro focus X-ray                    | ◎                               | ◎ |   |
|                            |                             |                       | X-ray $\gamma$ -ray CT               | ○                               | △ |   |
|                            | Surface defect              | Dye Penetrant test    | Induction colouring X-ray method     | ○                               | ○ |   |
|                            |                             |                       | Radiation test                       | ○                               | ○ |   |
|                            |                             | Ultrasonic inspection | Surface wave method                  | ◎                               | △ |   |
|                            | Ultrasonic microscope       |                       | ○                                    | ×                               |   |   |
|                            | Optical acoustic microscope |                       | ○                                    | ×                               |   |   |
|                            | During cracking             | acoustic emission     | Laser scanning                       | ○                               | △ |   |
|                            |                             |                       | AE source waveform analysis          | ◎                               | △ |   |
|                            |                             |                       | AE waveform analysis                 | ○                               | ○ |   |

◎ practical, ○ practicable, △ particular application, × difficult

Fig. 3. Capability of advanced nondestructive inspection method for detection of microdefects with different thickness and shape in various materials, for example, in the case of thickness with 10mm and a spherical inclusion with 50  $\mu$ m.

より、材質の評価（NDC）への適用も推進されている。また超音波関連では、小さな欠陥を見つけるために高周波の超音波を用いて、10  $\mu$ m, 20  $\mu$ mという微小欠陥検出への挑戦がなされている。現在は100MHz位がその減衰により最大の周波数であるが、今後ともに映像法の発展により、3次元的な微小欠陥システムの発達も期待される。放射線関連ではもちろんX線が主流となるが、X線CT法による3次元的なき裂検出法に加えてマイクロビームを用いて微小欠陥の検出が試みられ、先端技術として注目されている。一方、超音波技術の延長上ともいえるが、各種超音波顕微鏡が開発されている。

### 5. 最近の材質評価（NDC）

材質評価手法として種々の手法が適用され、定量的に材質を評価することが徐々に可能な状況に到達している。Fig. 4 (a) は陽電子消滅の原理を示したものである。欠陥の存在により、その陽電子消滅を計測することにより、Fig. 4 (b) のように疲労き裂進展以前の疲労損傷の蓄積を評価することが可能になり、今後の実機へ適用が期待されている。

また、SQUIDも材料の特性を評価する新しい手法として注目されている。Fig. 5には、破壊靱性とCoercive Forceの関係を表示したものであるが、SQUIDにより靱性値が定量的に評価される可能性が示されたといえる。

バルクハウゼンノイズ法も材料内の磁区の変化を評価する手法として長年注目されてきたが、Fig. 6に示すようにCharpy値とのよい相関が得られるようになってきた。

また、Eddy Current法により、Fig. 7に示すように延性-靱性、遷移温度とEddy Currentの相関が得られている。

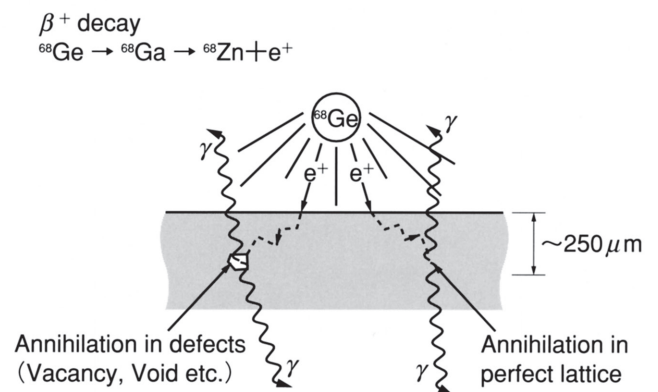


Fig. 4 (a). Principal of positron phenomena.

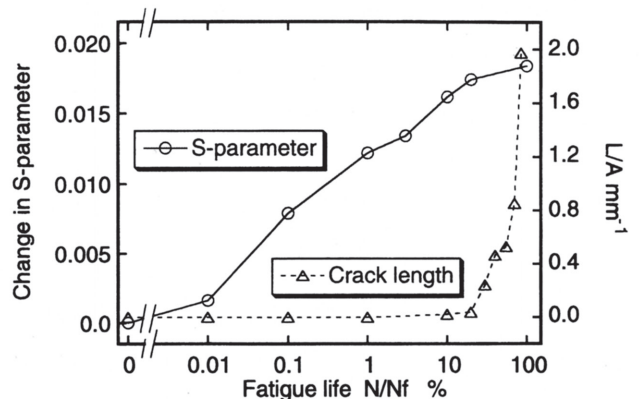
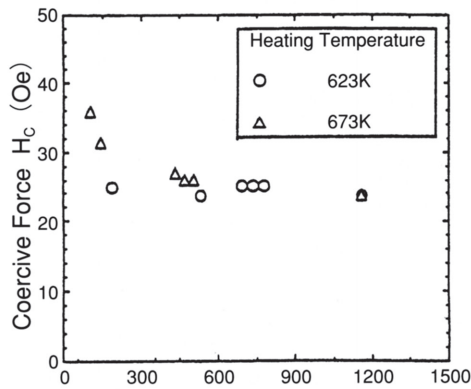


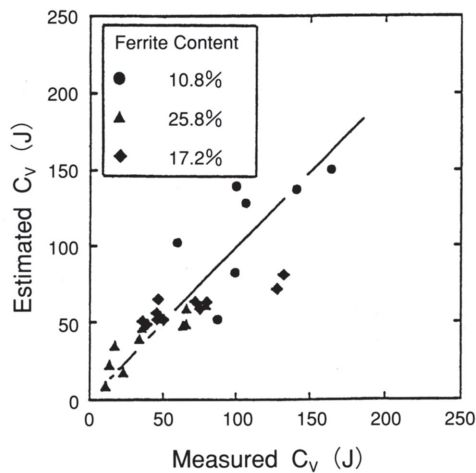
Fig. 4 (b). A logarithmic plot of S-parameter and crack length.



Fracture Toughness  $J_0$  ( $N/mm^{3/2}$ ) at 598K

Relation between Fracture Toughness and Coercive Force

Fig. 5. Measurement of thermal embrittlement of the duplex phase stainless steel (Ferrite content: 25.8%) by SQUID method.



Estimation Equation of  $C_v$  using BHN,  $H_c$ , R obtained by Nondestructive test

$$\log(C_v) = \log(938000) - 3.518\log(FN) + 0.0803\log(BHN) - 1.891\log(H_c) + 22.56\log(R)$$

$C_v$  ; Charpy Absorption Energy  
(at Room Temperature) (J)

FN ; Ferrite Content (%)

BHN ; Barkhausen Noise Signal Ratio

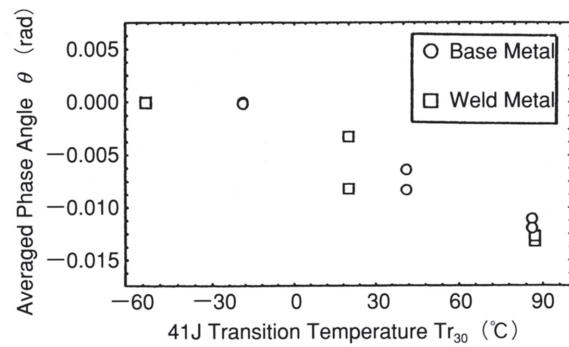
$H_c$  ; Coercive Force Ratio

R ; Electric Resistance Ratio

Fig. 6. Estimation of thermal embrittlement of the duplex stainless steel by Barkhausen noise method.

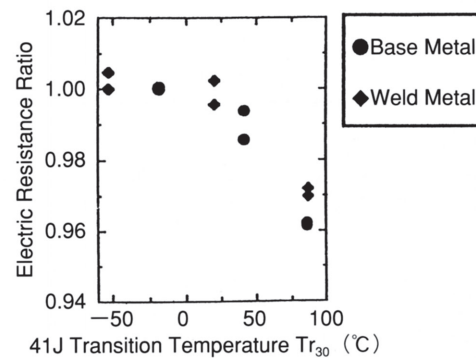
一方、Fig. 8に遷移温度と電気抵抗の関係にも明確な相関が得られるようになり、これらの手法により劣化の度合いを非破壊的に評価できる可能性が強い。

また、高温クリープのポイド形成をCCDカメラにより測



Relation between Averaged Phase Angle and 41J Transition Temperature

Fig. 7. Measurement of irradiation embrittlement on low alloy steel by Eddy Current method.



Relation between Electric Resistance Ratio and 41J Transition Temperature

Fig. 8. Measurement of irradiation embrittlement in low alloy steel by electric resistance method.

定することにより、かなりの精度で危険な状況にあるクリープポイドの定量的な把握が可能になった状態になってきた。

以上、単なる物性測定手法とされていた幾つかの手法を用いることにより、新たな非破壊計測の手法が徐々に確立しつつあり、今後これらの適用により劣化損傷をあらかじめ評価できる可能性が強くなったと結論できる。

## 6. 最新の欠陥検出技術

先に超音波、X線を用いた欠陥検出技術について論じたが、ここでは最近の超音波顕微鏡に関する進歩に触れておきたい。機械走査型超音波顕微鏡はFig. 9に見るごとく100MHz~1GHzの超音波が、試料表面層から反射散乱されるのを検出解析することにより、表面およびその近傍の10  $\mu m$ に迫る微小欠陥の分解能が得られている。この手法は、超高周波ゆえに減衰が大きいので、表面直下の欠陥検出のみに有効で有り、また複雑形状部品の検査に今の所適用しがたい面がある。Fig. 10は光音響映像法(PAS)である。これは数MHzのレーザーを試料平面上に収束させ、そのスポットを走査させる。レーザー光の吸収による加熱が生じた応力波をマイクロホン、圧電素子、レーザーを用いて検出する。この手法により、試料表面の欠陥はもとより、内



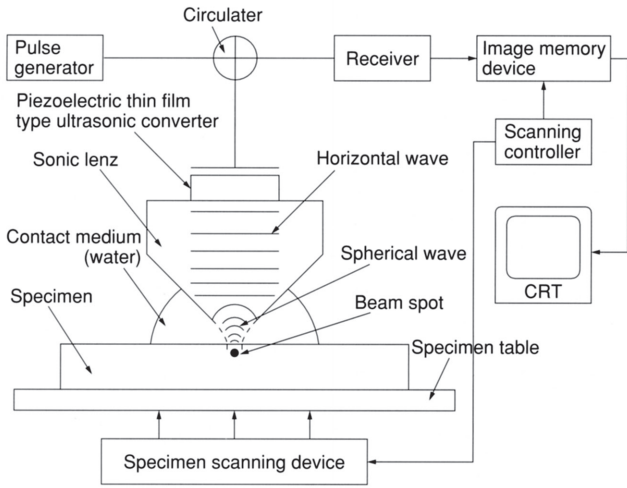


Fig. 9. Principal of scanning mechanical acoustic microscope.

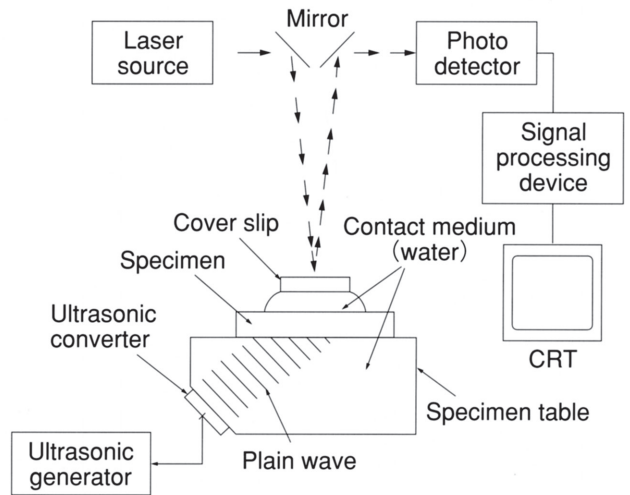


Fig. 11. Principal of laser scanning acoustic microscope.

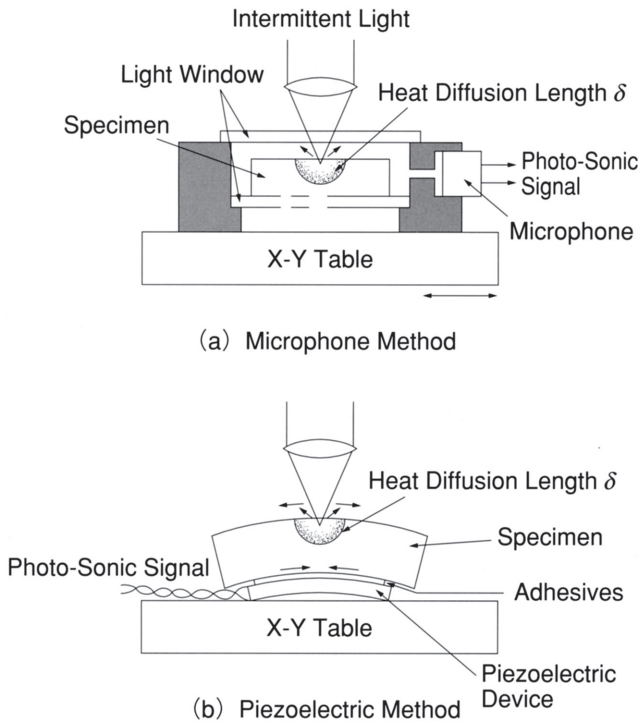


Fig. 10. Principal of photo acoustical microscope.

部の不均一部分も光音響像として観測され、 $10\ \mu\text{m}$ 以下の小さな欠陥検出に成功している。

Fig. 11にレーザー走査型顕微鏡の原理を示す。非接触センサーとしてレーザーにより入射、伝播してきた超音波の情報を可視情報に変換する新しいタイプの顕微鏡である。現在、常用周波数は $100\text{MHz}$ であり $10\ \mu\text{m}$ 前後の小さな欠陥を検出する分解能を有している。

このように超音波を用いる技術として高周波を用いる超音波顕微鏡は、微小欠陥検出法として大きな期待が持たれている。今後は、実用材への応用を鑑みた機器の開発が強

く望まれるところである。

### 7. アコースティック・エミッションによる新しい欠陥評価の展開 → DCM (ダイナミッククラックモニター) の開発

Fig. 12に示すように割れが生じて、それに伴い発生する弾性波（超音波）を検出するのがアコースティック・エミッション（AE）技法である。この手法により、多数のセンサーを用いることにより、3次元的に割れの位置が決められるとともに、検出したAE波の振幅および周波数を解析することにより、欠陥の大きさ等の推測に成功している。

しかしながら、近年我々はFig. 13に示すように、検出したAE波形から検出系の特性（計測系の応答関数）および媒体内の波の伝播（動的グリーン関数）を用いることにより、材料内のマイクロクラックの特性、すなわちモーメントテンソルの導出に成功している。この演算を自動的に行うために開発された装置が、Fig. 14に示すダイナミック・クラックモニター（DCM）である。この装置を用いることにより、Fig. 15のような流れに沿ってマイクロクラックの3次元位置標定に加えその大きさの定量的な評価および割

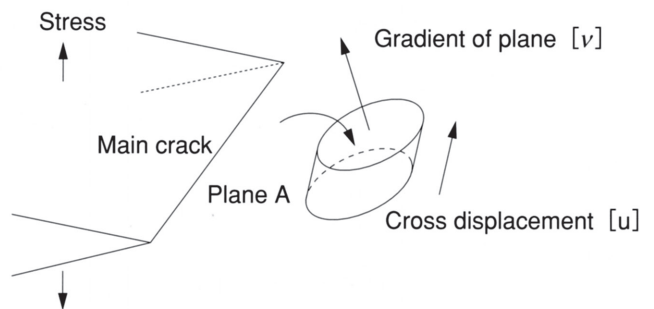


Fig. 12. A schematic model of microcrack.

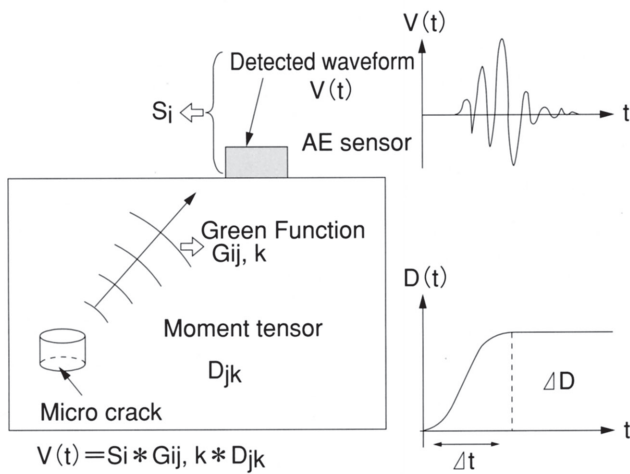


Fig. 13. A model of AE generation, propagation and detection.

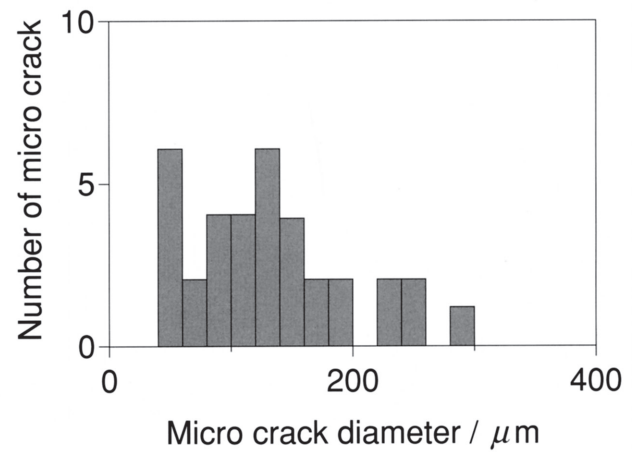


Fig. 16. Distribution of microcrack size.

これはアルミナのき裂が進展するとき、その前方に生じた微視割れの大きさを示したものである。100  $\mu\text{m}$ 以下の小さな欠陥の3次元的な表示、特に材料内の欠陥表示は今のところ他の手法では不可能である。

この図から明らかなように、10~20  $\mu\text{m}$ サイズのマイクロクラックが定量的に表示される状況にある。

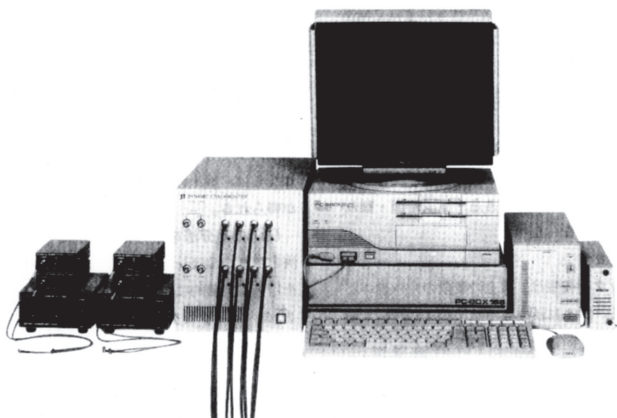


Fig. 14. A system for dynamic crack monitoring.

### 8. 検査しやすい材料

以上、材質評価、欠陥評価、特に後者においては最近の新しい動向およびAEでの初めての試み等を示した。今後の一つのこの分野での研究は、検査しやすい材料の溶接法の開発にある。Fig. 17に示すように、マグネティック・フィールドを用いて溶接を行うことにより、溶接部およびHAZ部の結晶粒の粗大化を阻止し、かつ均一な結晶粒を得

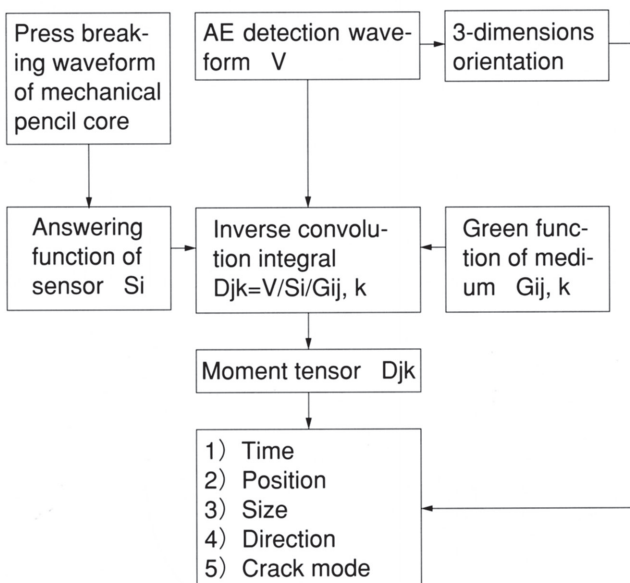
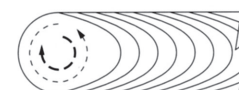
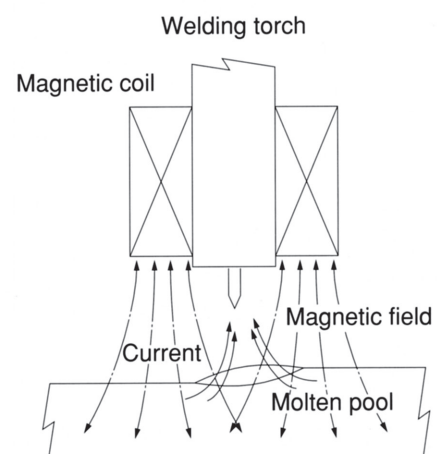


Fig. 15. Flow of source analysis of acoustic emission.

れの方法、そしてせん断型、引張型等の割れのモードの定量評価が可能となってきた。結果の一例をFig. 16に示す。



Lorenz force

Fig. 17. Principal of magnetic stirring welding.



ることにより、超音波探傷での信号の大きさを飛躍的に拡大することに成功している。

このことは検査しやすい構造物作りに加えて、超音波探傷等検査がやりやすい材質開発ということが大きな課題と言える。

当然、構造物に関しては自動探傷のための微小ロボットの開発は一つの大きな課題といえる。近年我が国においては、アイリスと呼ばれるシステムを開発し、Fig. 18に示すように微小な従来のロボットに比べてオーダーが一つ小さい高性能なロボット検出機器の開発に成功している。

### 9. 知的材料・構造システム

以上は、検査技術の重要性とその進歩に焦点を当てて記述してきた。今後の大きな方向は知的材料・構造システムにある。この手法はFig. 19に示すように複合材料自体の中にセンサー、形状記憶合金などのアクチュエーター等を組み込み、材料と構造を一体化することにより、

- ①ひずみや損傷の発生、劣化等を自己判断し、(ヘルスマニタリング)
  - ②振動・騒音を自己制御し、
  - ③状態に応じて形状を自ら変化させ、
  - ④必要に応じて損傷等の進展を自己制御、修復する
- といった知的機能を材料・構造に付与するという、従来の概念とは異なるアプローチの革新的技術である。

知能材料というよりは、どちらかというところ検査、制御、修復機能を融合した構造システムは、非破壊検査の一つの到達点にあると言える。前述した通産省・工業技術院の「大学連携型産業技術研究開発プロジェクト」の第1号としてのこのプロジェクト推進の状況をまとめたのがFig. 20である。今後数年は、この機能を有する積層構造物を製造し、

モニタリングおよびアクチュエータを働かすことにより、軽量かつ高強度の複合材料システムの開発を推進する基盤を形づくることを目的としている。

### 10. 終わりに

超音波、X線を中心にした非破壊検査も破壊力学と結びつき非破壊評価へと、そして材質評価 (NDC) を導入することにより、劣化損傷を導入した寿命評価へと大きく発展してきている。今後は、モニタリング技術とアクチュエータ機能を兼ね備えることにより、欠陥検出の修復を行う知的構造システムが発展するものと言える。

構造物に関するものは時間はかかるが、こうして一步一步進展することが期待される。特に、材料の製造過程および製造中の材質評価もこのところ大きな発展を見せており、全てを統合化した非破壊評価技術と言うものを一つの学問体形として構築する時期に来ていると言えよう。

### 文 献

- 1) 岸 輝雄：“新素材の非破壊検査と信頼性の確保”，日本機械学会誌 第90巻第821号，1987年4月，pp85-89.
- 2) 岸 輝雄，志波 光晴：“新素材の非破壊評価”，日本機械学会第688回講習会教材，1988年11月17～18日，東京，流体機械における新素材適用の現状と将来，pp37-44.
- 3) 岸 輝雄，増野 茂美：“ダイナミック・クラック・モニタの開発”，日本工業教育協会誌，第41巻第3号，1993年5月，pp. 39-43.
- 4) T. Kishi：“Research Work in Japan on Advanced Integrity Analysis Using Damage Mechanics”，MPA-Seminar，Oct. 7-9，1998.
- 5) T. Kishi：“Japanese Point of View on the Contribution of NDE for Reactor Safety”，MPA-Seminar，Oct. 7-9，1998.

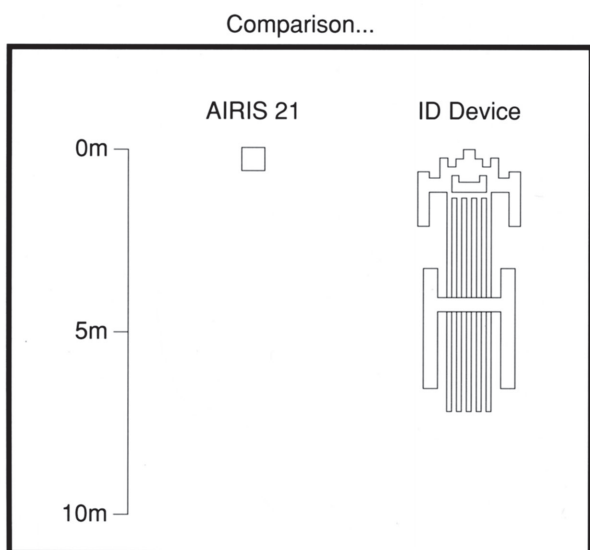


Fig. 18. Inspection robot.

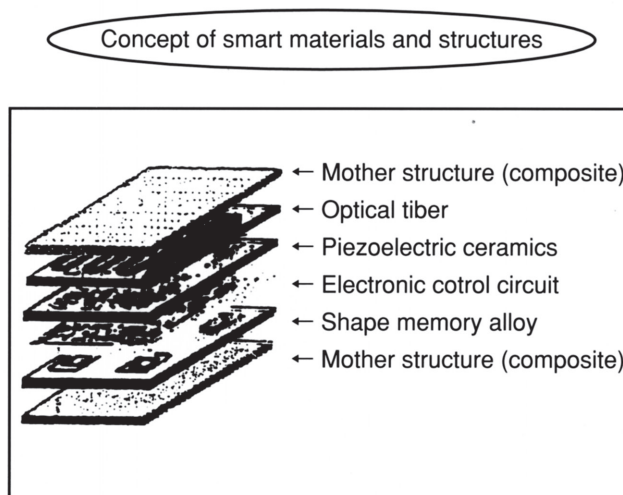


Fig. 19. Research concept of "R & D of Smart materials and Structures".

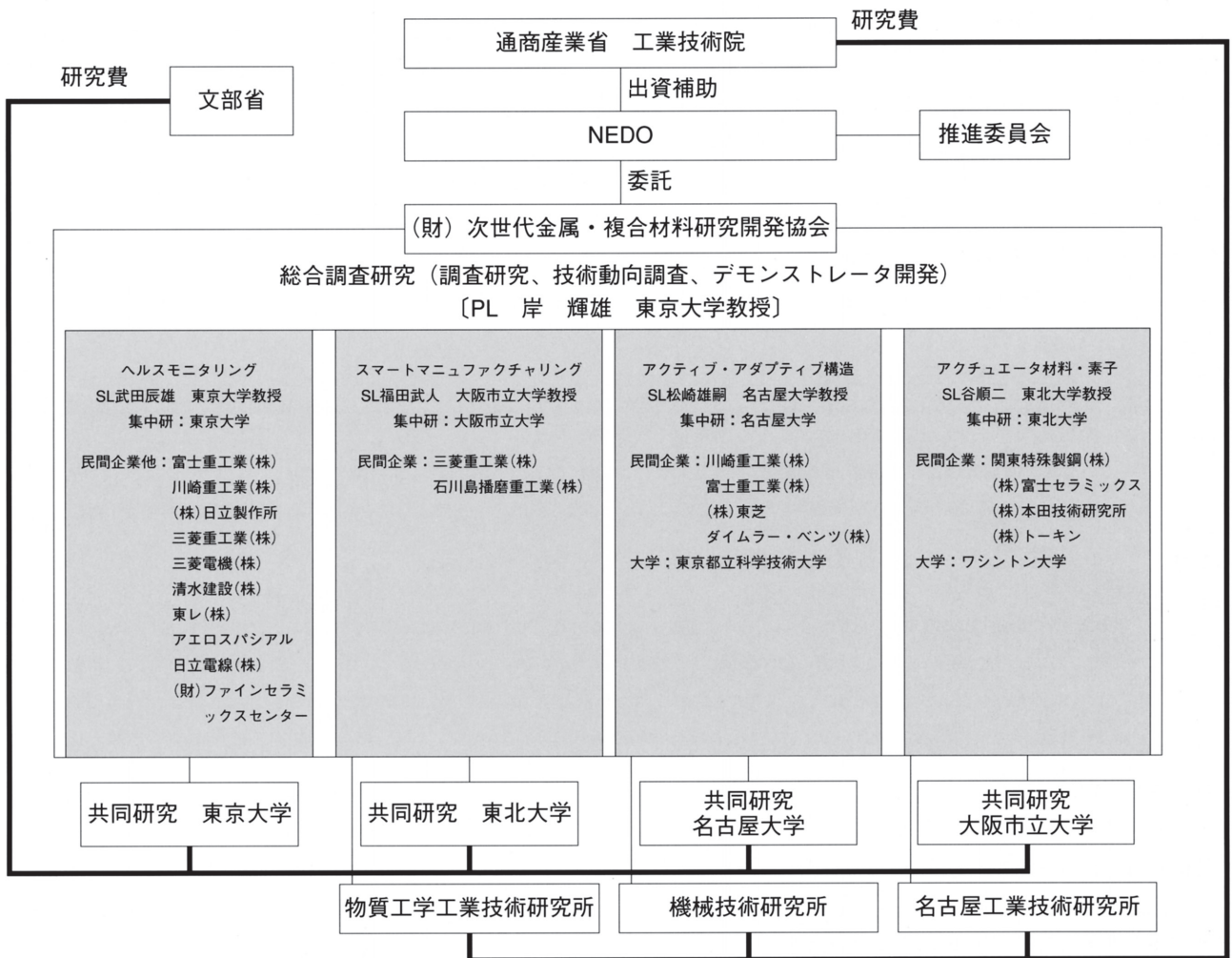


Fig. 20. Research and development organization for "R & D of Smart materials and Structures".