材料の非破壊評価とスマートマテリアル*

岸 輝 雄**

1. はじめに

破壊機構を理解し、それに基づき高靱性材料などを開発するにあたり、最終破壊に先行する材料内のマイクロクラックの定量評価が重要となる。本稿では、著者らの開発したアコースティック・エミッション(AE)の逆問題解析によるモーメントテンソル(マイクロメカニクスアイゲンストレイン)の導出法とそのマイクロクラック評価への適用例を示す。その延長として非破壊評価と異常部位(欠陥など)の修復・回復を兼ね備えたスマート(インテリジェント)材料・構造物の複合材料への適用の現状をとりまとめる。

2. 非破壊評価

(1) 破壊の理解⁽¹⁾

セラミックスは、小さな欠陥を起点として脆性破壊を呈する。また、図1に示すように巨視的には脆性破壊でも、金属の場合は転位が可動しその応力集中により塑性域内に⁽²⁾、セラミックスの場合はプロセスゾーン内にマイクロクラック(ミクロン程度の大きさ)が生成し、それらが合体して破壊に至る場合も多い。一方、複合材料では⁽³⁾母材、強化材、そして母材と強化材の界面が微視破壊し、層間はく離なども伴い複雑に合体進展し、最終破壊に至る。破壊を理解するには現状の検査手法では検出不可能なマイクロクラックの検出手法を確立することが必要となる。

一方、破壊は微視的にはせん断(shear)分離と引張り(tensile)分離に分けられる。また、巨視き裂が進展する場合には、マイクロクラックが三次元的に合体するが⁽⁴⁾、この合体プロセスもせん断型か、引張り型かにより破壊抵抗(靱性)が変化する。要するに、微視、巨視破壊を問わずせん断と引張

りを分類する必要がある。また、マイクロクラックの生成速度も延性・脆性の一つの評価パラメータになる⁽⁵⁾。

マクロに破壊を理解するには、材料組織に関連した主き裂進展を定義しなければならない。この場合、主き裂が不均一に進む場合が多く、不均一き裂進展に対応した大きさを定義する必要がある。普通、この不均一き裂進展の大きさ X_0 は characteristic distance (特性距離) と呼ばれる⁽⁶⁾。

延性・脆性破壊に拘らず、破壊靱性には壊れ方を示すパラメータ(この場合は特性距離 X_0)が含まれ、この X_0 はマイクロクラックに支配されることに注目すべきであり、この X_0 を非破壊的に検出する手法も必要となる。

図1 破壊靱性試験における先行マイクロクラックの発生と巨視き裂進展。

* 2003年3月27日、千葉大学西千葉キャンパスにおける第132回本会春期大会において講演

** 独立行政法人 物質・材料研究機構理事長；東京大学名誉教授(〒305-0047 つくば市千現1-2-1) Nondestructive Evaluation and Smart Materials; Teruo Kishi (President, National Institute for Materials Science, Tsukuba; Emeritus Professor, The University of Tokyo)

Keywords: micro crack, acoustic emission, smart materials, fail safe materials, moment tensor, inverse analysis

2003年1月14日受理

図2 マイクロクラックの発生による破壊靱性の向上—Fail Safe な材料を求めて—

(2) 破壊靱性の向上

(a) Fail Safe Materials—脆性材料の靱性向上—

低靱性材料の応力緩和機構は、マイクロクラック、相変態、枝分れ、架橋そして一部塑性変形である⁽³⁾⁽⁷⁾。それゆえ、応力緩和機構としてのマイクロクラックの生成は破壊抵抗の上昇を導くこともあり、micro crack toughening と呼ばれる。これに関連して図2に示すように最終破壊以前に多くのマイクロクラックが生ずると破壊靱性が向上するという興味ある現象を著者らは見いだしている。これは、小さく壊して全体の破損を防ぐという点で、“Fail Safe Materials” と呼べる。

(b) 複合材料の破壊・界面力学特性の定量評価と shear 型 debonding の有効性⁽⁸⁾

分散粒子、ウィスカーなど短繊維複合材料では、粒子とマトリックスの界面特性、そして長繊維複合材料では、繊維・マトリックスの界面特性が力学的性質を支配する。それには、まず、界面はく離の検出、そして破壊モード(引張りか、せん断か)、およびはく離の長さなどを定量的に検出評価する必要がある。一方向繊維強化複合材料の破壊抵抗は、debonding が shear 型から tensile 型に移行する所で最大の値が発現する興味深い結果も得られており、モードを特定する重要性が示された。

(3) 非破壊評価

(a) 信頼性確保の手法⁽⁸⁾

材料の信頼性向上のためには、材料の開発と同時に欠陥材の除去(スクリーニング)を含めた品質評価技術の確立が必要となる。ここで、品質評価とは安全係数、損傷確率、寿命などを定量的に評価することであり、その基礎になる評価パラメータは、材料のばらつきの度合いを示すワイブル係数 m に加えて、破壊力学に基づいた破壊靱性 K_{Ic} (衝撃負荷では K_{Id})、そして静疲労、動疲労など時間依存型の破壊ではき裂進展速度指数 n などである。一般には m, n, K_{Ic} の値と欠

図3 信頼性評価手法の流れ図。

陥の特性を用いて信頼性が評価される。破壊力学の立場から破壊靱性 K_{Ic} を向上させることと欠陥検出能を向上させることは同じ意味を持つことを認識すべきである。

(b) 非破壊検査と非破壊評価⁽⁹⁾

品質保証を目的にした非破壊評価の流れ図を図3に示す。①材料内の欠陥の有無を検出し、②その位置を明らかにし、③各欠陥の種類を分類し、④個々の欠陥の大きさ、形状、割れモードなどの特性を明らかにする。次に⑥負荷、環境条件を考慮した破壊の様式を特定し、破壊の力学的取扱を用いて欠陥の有害の度合いを決定する。⑦その結果を用いて最終的に合否の決定、すなわち材料のスクリーニングを行う。さらに合格した材料については、⑧安全率と寿命の評価などを行うのが非破壊評価法である。ここで、欠陥を検出する①～⑤が非破壊試験、検査のカテゴリーであり、非破壊評価とは⑥～⑧の領域を含んだものである。したがって、この非破壊評価を適用するに当たっては、欠陥検出技術である非破壊検査技術の精度の向上とともに、(1)検出不能欠陥、(2)検出した欠陥寸法と破壊起源となった寸法の対応、(3)破壊モデル(微視欠陥の生成、成長、合体プロセス)、(4) K_{Ic}, n, m 値の不確定要素(試験法による値の相異)などを考慮しつつ進めなければならない。欠陥許容の概念の確立、材料の寿命延伸などのキーワードが非破壊評価法の延長にある。いずれにせよ、低靱性材料では小さな欠陥の評価技術がキーとなる。

(c) マイクロクラックの非破壊評価⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

非破壊評価を行うには先行するマイクロクラックの検出が欠かせない。マイクロクラックの検出法としてX線、超音波、電磁気的手法を発展させたマイクロフォーカスX線、高周波超音波、そして超音波顕微鏡などの開発が進められているが、未だに内部欠陥などでは数10 μm の欠陥の検出が壁になっており、一方割れモードなどの評価手法は皆無といえる。この状況下で著者らの開発した手法を以下に述べる。

3. アコースティック・エミッション(AE)の逆問題解析によるマイクロクラックの定量評価

マイクロクラックの検出法として電気抵抗、超音波、AE

図4 マイクロクラックの特性を示すパラメータ.

などの手法が用いられるが、これらの計測法で用いたセンサ一信号は、その信号の媒体内の伝播特性や計測系の応答特性により変化することに注意する必要がある。それゆえ、計測信号から信号の伝播特性、計測系の特性を取り除いた割れの特性を逆演算により導出しなくてはならない⁽¹²⁾。以下に破壊に関するAEの逆問題解析(得られた結果をAE原波形と呼ぶ)を示す⁽¹³⁾。

(1) マイクロクラックの定量化(モーメントテンソル)

個々のマイクロクラックを理解するには図4に示すように①発生位置、②大きさ、③割れモード、④割れ面の傾き、⑤形状、⑥割れ生成速度、などを定量的に求める必要がある。

しかし、これらの内容を包含する概念、そして表示するパラメータは未だにはっきりと認識されていない。

一般に、クラックは転位で置き換えることが可能であり、この性質を与えるものとしてマイクロクラックメカニクス⁽¹⁴⁾の分野ではアイゲンストレイン(eigen strain)が、また同じ内容は地震学⁽¹⁵⁾ではサイズミック・モーメントテンソル(seismic moment tensor)なる概念が与えられている。媒体内にマイクロクラックが生ずると、 C_{jklm} を弾性定数、 ΔA_m をくいちがいの面積、 ϕ_l をくいちがいの大きさとする、このサイズミック・モーメントテンソルは、

$$D_{jk} = C_{jklm} \phi_l \Delta A_m \quad (1)$$

で与えられる。

図5に示すモードIの引張り開口型の割れの場合、上の D_{jk} は、

$$D_{33} = (\lambda + 2\mu) \Delta A_3 \phi_3 \quad (2)$$

で与えられ、 D_{33} が求まると割れ体積 $\Delta A_3 \phi_3$ が直接求まる。ここで、 λ, μ はラーメの定数である。また、破壊力学の取り扱いにより割れの寸法が定量的に決められる。

$$a = \left(\frac{3(1-2\nu)D_{33}}{16(1-\nu)\alpha\sigma_y} \right)^{1/3} \quad (3)$$

ここに、 ν はポアソン比、 σ_y は降伏応力、 α は $\alpha=1\sim 2$ なる定数である。

モーメントテンソルの大きさは図5に示すように時間の関数として与えられるので割れ生成時間 Δt が求まると、平均割れ生成速度が次式で与えられる。

$$v = 2a/\Delta t \quad (4)$$

この割れ速度は、個々のマイクロクラックの延性-脆性割れの度合いを示すパラメータとなる。

図5 引張り開口型(モードI)のマイクロクラック生成に伴うモーメントテンソルとその時間関数.

この他に D_{jk} は個々のマイクロクラックの割れ面の傾き角、および割れモードに関する情報を与える。

(2) AE原波形の一般理論と導出法⁽¹⁶⁾

(a) 定式化

弾性体内の領域にアイゲンストレインが存在するときの変位場は、次のようにかける

$$u_i(x', t) = \int_V C_{jkmn} \varepsilon_{mn}^*(x, t) * G_{ij,k}(x', x, t) dV(x) \quad (5)$$

ここで $G_{ij,k}(x', x, t)$ は第2種のグリーン関数である。 $*$ は時間に関するたたみ込み積分を表す。アイゲンストレイン $\varepsilon_{mn}^*(x, t)$ が存在する領域 Ω の範囲が、 $|x-x'|$ に比べて十分小さい場合には式(5)は次のように示される

$$u_i(x', t) = G_{ij,k}(x', x, t) * D_{jk}(x, t) \quad (6)$$

計測系全体で線形応答が成立する場合は、計測系の応答関数を $S_i(x', t)$ とおくと、 $D_{jk}(x, t)$ が発生したときの出力 $V(x', t)$ は

$$V(x', t) = S_i(x', t) * G_{ij,k}(x', x, t) * D_{jk}(x, t) \quad (7)$$

と表される。

(b) 逆演算によるモーメントテンソル(AE原波形)の導出式(7)により、 S_i および $G_{ij,k}$ が求められると逆たたみ込み演算により、 D_{jk} が求まる。図6(a), (b)にAE原波形解析の概念図を示す。

①まず、複数変換子のAE波の到達時間差を求めて三次元位置評定を行う。②擬似音源を用いて、計測系の応答関数を導出する⁽¹⁷⁾。③主き裂を含む有限媒体の動的グリーン関数の解析解は存在しない。それゆえ、音源に9つのモーメント成分を入力し、三次元差分法などにより $G_{ij,k}$ を求める⁽¹⁸⁾。

④6~8個の変換子で検出したAE波形をウェーブメモリーに集録し、多次元逆たたみ込み演算により D_{jk} を求める。⑤ D_{jk} より個々のマイクロクラックの大きさ、割れモード、割

図6 逆問題解析によるモーメントテンソルの導出。
(a) AE 信号の逆問題解析の概念図, (b)モーメントテンソルの導出フロー図。

$$D_{jk}(t) = \bar{D} \begin{pmatrix} 0.41 & 0.04 & -0.22 \\ & 0.17 & 0.01 \\ \text{Sym.} & & 1 \end{pmatrix} T(t)$$

$$\bar{D} = 5.02 \times 10^{-4} \text{ Nm}$$

図7 A470 鋼(Cr-Mo 鋼)の破壊靱性試験における擬へき開ファセットによるモーメントテンソル。

図8 モーメントテンソルより求めたマイクロクラックの割れ面の傾き(\$q\$), 割れモード \$\cos^{-1}([u] \cdot n)\$, および割れの大きさ \$2a\$.

れ面の傾きおよび割れ速度などを求める。

(3) モーメントテンソルの導出例

(a) A470 鋼⁽¹⁹⁾

A470 鋼のコンパクトテンション試験片(CT)を用いた \$D_{jk}\$ の一例を図7に示す。まず、三次元位置標定よりマイクロクラックがき裂前縁塑性域内に生じたことが明らかとなった。また、時間関数よりこの割れが、0.2~0.3 \$\mu s\$ で生成したことが理解される。図8に示すようにモーメントテンソルの結果を解析することにより、割れ面は主き裂面に対して15°傾いており、割れモード(58°)は引張り、せん断混合モードであり、割れ半径は30 \$\mu m\$ であった。

(b) ガラスマトリックス SiC 粒子強化材料への応用⁽²⁰⁾

図9はガラス基複合材料へ適用した例である。モーメントテンソルの導出より、割れ面の傾きおよび平均割れの半径が求められた。また、割れ面の傾きは90°方向に集積しており、せん断的な割れであることが理解される。このような割

図9 粒子分散ガラス基複合材料のマイクロクラックの平均半径および割れモード。

れ大きさおよび割れモードの解析により、はく離、マトリックス割れ、粒子割れなどの破壊形態の分別が可能となった。

この他、近年複合材料、コーティング材のマイクロクラック評価に興味ある結果が見られ、レーザーを用いた計測系も

注目されている。

4. スマートマテリアルと構造物

(1) スマートマテリアル

人工構造物の材料・構造体に生体と同じような知覚、判断、応答と言った機能を持たせる「知的材料・構造システム」(Smart Materials and Structural Systems)は、構造物の信頼性の確保や高性能・高効率化によるコストの低減、省資源・省エネルギーを可能とし、期待を集めている。これは非破壊評価に修復機能を持たせる概念であり、非破壊評価の延長上にある技術といえよう。

(2) 知的材料・構造システムとは⁽²¹⁾

「知的材料・構造システム」とは材料自体にセンサー、アクチュエータなどを内蔵し、材料と構造を一体化(融合化)することにより、①ひずみや損傷の発生、劣化などを自己評価し、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、③必要に応じて損傷などの進展を自己制御、修復する、といった機能を材料・構造に付与する概念である。図10に一つ概念図を示す。母構造で強度を支え、光ファイバーセンサー、圧電セラミックス(AE)で異常(欠陥など)を検出し、形状記憶合金や圧電センサーで異常を修復しようとするものである。センサーで検出した信号を判断し、指令を出すのが電子制御回路となる。

わが国においては、NEDOの大学連携型産業科学技術研究開発制度の第1号として、著者がプロジェクトリーダーとして「知的材料・構造システムの研究開発」の取り組みが行われた。本報告では複合材料に適用した例を示す。

(a) ヘルスモニタリング技術の開発⁽²²⁾

欠陥や振動などの異常を常時監視することが必要になる。そのために光ファイバー、圧電素子(AE)、電気抵抗などの計測手法の確立が期待されている。そのなかで光ファイバーは材料の強度を下げることなくモニター可能な手法として開発が進められている。

直径40 μm の細径ファイバー(従来は125 μm)を新たに製造し、強度を落とすことなく、複合材料の中への埋め込みに成功した。FBG(Fiber Bragg Grating)センサーとして、透過、反射光の光強度を解析することにより、トランスバースクラックはもとより層間はく離の検出にも有効なことが証明された。図11に、FBGセンサーの原理を示すが、光強度の大きさと波長スペクトラムの分布の変化を検出するものである。このFBGセンサーを複数個用いことにより、衝撃荷重の位置標定も可能となった。BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)センサーは、光ファイバーセンサーに沿ってひずみ分布の計測が可能となる後方散乱光を用いた手法であり、繰り返し荷重時への適用が可能となりつつある。またFRPに導電性をもたせ、電気的特性変化より、粒子分散FRPの最大損傷を記憶する可能性が見いだされた。AE計測に関しては、衝撃荷重の位置標定を目的に、実用化を視野に入れてデモンストレーターへの取り付けの研究が進められた。

図10 知的材料・構造システムの概念。

I: 光強度 λ : 波長 d : グレーティング間隔

図11 FBGセンサーの原理。

(b) スマートマニュファクチャリング技術の開発⁽²³⁾

知的・構造システムではセンサー、アクチュエータを複合材料の中に埋め込み、その機能を十分に発揮することが求められる。本研究では図12に示すようにFRPおよびモールド中にセンサーを埋め込み、成形プロセスをモニタリングすることを目的としている。特に埋め込んだセンサーシステムおよびアクチュエータが成形後に機能することの確認が重要となる。

(c) アクティブ・アダプティブ構造技術の開発⁽²⁴⁾

本研究は母構造に組み込まれた集中型、分散型センサー/アクチュエータにより、材料を最適形状に変化させたり、振動や騒音を低減する構造システムを作ることである。形状記憶合金(SMA)による技術としては、複合材料に予ひずみを与えたSMAワイヤを用いて、大きな振動の減衰が得られた。また大型複雑構造要素では圧電素子を用いて振動、騒音制御を行い、減衰係数20%、騒音の音響パワー30%低減を得ている。

(d) アクチュエータ材料・素子の開発⁽²⁵⁾

スマートの概念を実現するにあたり、重要な開発課題は高性能アクチュエータ材料・素子の開発であり、スマート概念の実用化の最大の課題はこの点にある。損傷修復に必要なアクチュエータ材料としての圧電素子や形状記憶合金は、現状ではひずみ、パワーが不足している。ホットプレスとマイクロウェーブ加熱を組み合わせたハイブリッド焼結プロセスを用いることにより、PNN-PZTの圧電係数 d_{31} を36%向上させることに成功している。また、形状記憶合金としては、さ

図12 成形プロセスのモニタリング。

図13 高温型形状記憶合金。

らなる高温型 SMA の開発を視野に入れ、図13に示すように急冷凝固法を用いて高温で使える素子の開発にも成功している。

(e) 実証試験としての航空機胴体デモンストレーター

上述した4要素技術の開発成果を統合し、構造システム全体としての機能を実証するために、統合実構造物要素モデル(今回は航空機の胴体構造)を試作し、それぞれの研究項目における目標の達成度を検証した。図14に示すような直径1.5 m、長さ3.0 mの複合材料構造材を製作し、スマート材料・構造の7項目の要素技術を検証しようとするものである。スマートマニファクチャリング法でのパネルの製作に成功し、損傷の検出、衝撃荷重の評価、そして損傷の抑制と騒音の低減が確認された。

5. 結 言

マイクロクラックの役割とその検出評価の重要性が示され、その一例として AE 信号の逆問題解析によりマイクロクラックのモーメントテンソルを求めることにより、定量的にサイズ、割れモード、割れ面の傾き、割れ生成速度の導出の例が示された。また、これら非破壊評価手法の発展型として材料・構造物の修復機能を備えたスマート(インテリジェン

図14 総合実構造物要素モデル。

ス)材料の取り組みと実構造物への適用の実例が示された。

今後の材料開発のキーワードとして、多機能(たとえば、スマート)、そして材料・構造物(またはデバイス)の一体化などが重要な方向といえる。

文 献

- (1) 横堀武夫：材料強度学，岩波全書，(1974)。
- (2) A. Nozue and T. Kishi: J. Acoustic Emission, **1**(1981), 1.
- (3) 香川 豊，八田博史：セラミックス基複合材料，アグネ承風社，(1990)。
- (4) 金 炳男，岸 輝雄：日本金属学会誌，**57**(1993)，998。
- (5) 志波光晴，岸 輝雄：日本複合材料学会誌，**20**(1994)，99。
- (6) R. O. Ritchie, J. F. Knott and R. W. Rice: J. Mech. Phys. Solid, **2**(1973)，395。
- (7) 志波光晴，岸 輝雄：日本金属学会会報，**27**(1988)，644。
- (8) 岸 輝雄：第37回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集，(1992)，30。
- (9) 岸 輝雄：日本機械学会誌，**90**(1986)，463。
- (10) 岸 輝雄：セラミックス，**27**(1992)，311。
- (11) 岸 輝雄：機械の研究，**40**(1988)，89。
- (12) 久保司郎：逆問題，培風館，(1992)。
- (13) T. Kishi and T. Ohira: Trans. JIM, **24**(1983)，255。
- (14) T. Mura: *Micromechanics of Defects in Solids*, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, (1982)。
- (15) K. Aki and P. G. Richards: *Quantitative Seismology*², W. H. Freeman and Company, San Francisco, (1980)。
- (16) M. Enoki and T. Kishi: Inter. J. Frac., **38**(1988)，295。
- (17) T. Ohira, T. Kishi, H. Miyashita, Y. Kagawa and E. Nakata: Trans. JIM, **27**(1986)，484。
- (18) Y. Fukunaga, M. Enoki, T. Kishi and J. Kihara: J. Vibration and Acoustics, **112**(1990)，200。
- (19) 岸 輝雄，榎 学：日本機械学会講演論文集，**860**(1986)，303。
- (20) 藤山健介：東京大学博士論文，(1995)。
- (21) 第3回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集，(2002)。
- (22) Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka and N. Takeda: Smart Mater. Struct., **9**(2000)，832。
- (23) K. Osaka, T. Kosaka, Y. Kawasaki and T. Fukuda: Advanced Composite Materials, **2**(2001)，169。
- (24) Y. Matsuzaki, K. Funami and H. Naito: Proc. SPIE **4699**(2002)，355。
- (25) 第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集，(2001)。