

## 新破壊力学に基づく機能性材料の強度設計

Strength Design of Functional Material Based on New Fracture Mechanics

研究代表者 九州大学工学部助教授 里野 口 博 司  
Associate Professor, Kyushu University, Faculty of Engineering  
Hiroshi NOGUCHI

共同研究者 九州工業大学情報工学部助教授 陳 代 行  
Associate Professor, Kyushu Institute of Technology  
Dai-Heng CHEN

九州大学工学部助手 尾田 安 司  
Research Associate, Kyushu University, Faculty of Engineering  
Yasuji ODA

Functional material means composite materials with many different laminate materials. Therefore a singular stress occurs near an interface between each material. Ordinary mechanics of materials is not useful for such materials. We has proposed a new evaluation method for strength of functional materials in this paper: this new method corresponds to Linear Fracture Mechanics as an evaluation method for strength of cracked structures. The character of the singular fields near an interface is clarified and a versatile numerical method for obtaining the intensity factor of the singular field is developed. Moreover strength of adhesive joint is estimated with this new fracture mechanics.

### 研究目的

機能性材料は今日、種々多様なものが開発されており、将来もますます開発されるであろう。それらはいままでの材料にない魅力ある機能をもっているが、それらは一般に形状が小さいものしかできず、また高価である。そこで、電子デバイスなど形あるものを工業的に大量生産するためには、種々の物性値をもつ材料を組み合わせてパーツを構成せざるを得ない。それらの構成材料は線膨張係数、縦弾性係数やポアソン比がお互いに著しく異なるため、成形時や使用時の熱応力や使用時の外力によりその界面近傍に著しく厳しい弾性特異応力場を生じる。これにより局部的に破損（破壊）し、本来の機能を果たすことができなくなり（例えば誤動作をするなど）、構造全体が致命的破壊にいたらなくても、人類に計りしれない人的・知的

被害を及ぼす。現在・将来の機械は無数の軽薄短小の機能性材料の集合体であるとの面ももちあわせるので、将来このことを考慮しなくてはならない事象は急激に多くなってくる。

そこで本研究では、機能性材料で構成したパーツの強度設計を材料力学的に検討するための理論体系を確立することを目的とする。そのため、従来のき裂を持つ部材の強度設計に用いられている破壊力学に対して、機能性材料の強度評価のために必要な理論体系を新破壊力学とよび、それを確立することを本研究の目的とする。

### 研究経過

以下に研究経過を述べる。

#### 1. 機能性材料の界面近傍の特異性特性の解明

図1に示す種々の組合せの接合体角部近傍の応

力場は、二次元問題（平面応力条件及び平面ひずみ条件）においては固有関数展開によって、式（1）のように表される。

$$\sigma_{ij} \propto \frac{1}{r^{1-p}} = \frac{1}{r^\lambda} \quad (1)$$

この特異性の指数 $\lambda$ 及びそれに対応する特異応力場の型の解析を種々の条件で行い、その特性を明らかにした。その一例を図2に示す。

さらに、図3に示す界面き裂についても、同様にき裂先端近傍の応力場は式（2）のようになる。

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{K_I^* + iK_{II}^*}{\sqrt{2\pi r}} r^{\epsilon} \quad (2)$$

ここで $\epsilon$ は材料の組合せで決まる材料定数である。

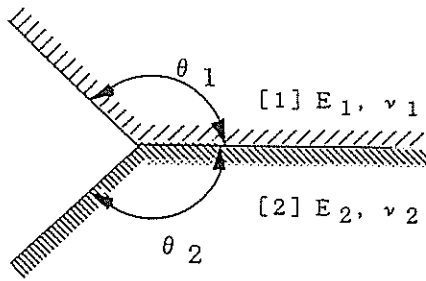


図1 機能性材料中の界面形状

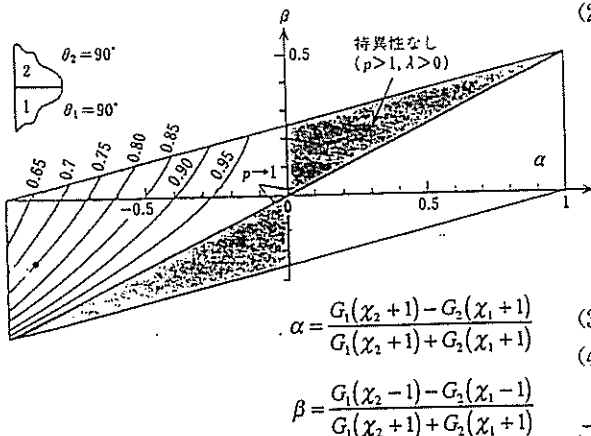


図2 界面角部の特異性指数の例

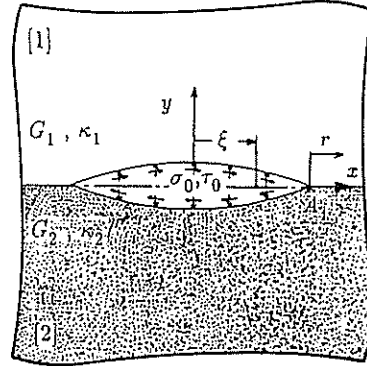


図3 機能性材料中の界面き裂

## 2. 特異性強さパラメータの解析プログラムの開発

式（1）及び（2）に現れる比例定数 $K$ が、特異応力場の強さの大小を表すものであり、これが界面の力学的厳しさを表す。そこで試験片から構造物にいたるまであらゆる形状・条件の接合体角部の特異応力場の強さ及び界面き裂の特異応力場（振動解）の強さが簡単かつ高精度に得られる汎用プログラムの開発した。

その汎用プログラムは、境界要素法的一种である体積力法に基づくものであり、以下の様な特徴をもっている。

- (1) 図4に示すように、境界部分のみを要素分割すればよいので、インプットデータが少なくて済む。
  - (2) (a) 界面及び界面き裂近傍の特異性特性を考慮して体積力密度を仮定している、  
(b) 境界条件を合力で合わせているのでサンブナンの原理が有効に作用する、  
(c) 基本解としてBentenyiの解を用いているので、界面は厳密な境界条件の下に存在する、理由により、数値解析結果の精度が極めて良い。
  - (3) 計算時間が短い。
  - (4) 解析に必要なメモリーが少ないので、パソコンでも数値解析が可能である。
- この汎用プログラムによる解析結果の一例を図5、6に示す。

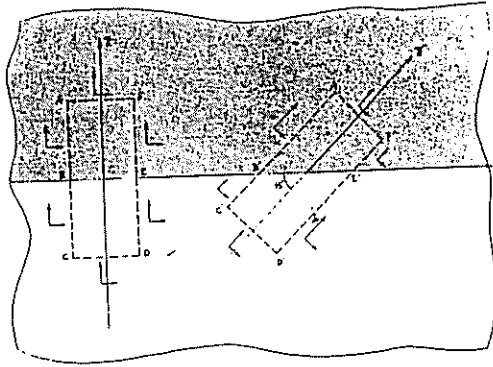


図4 境界分割の例

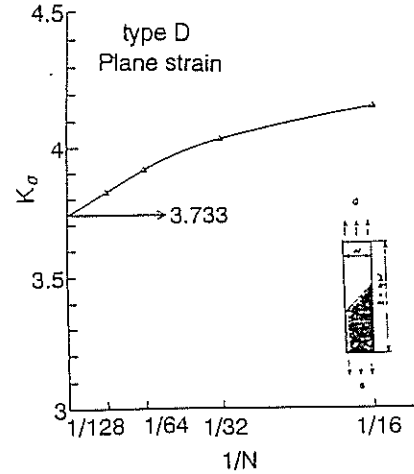


図6 角部特異性パラメータの解析例

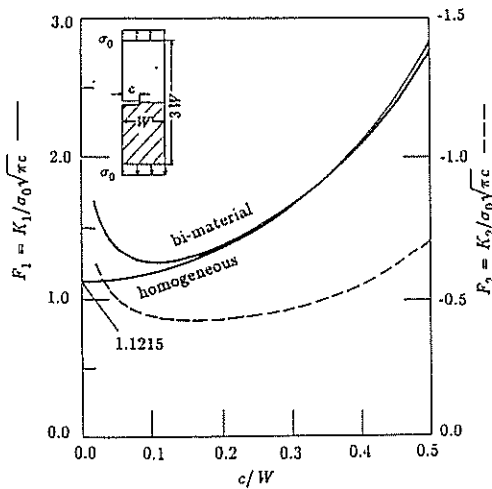


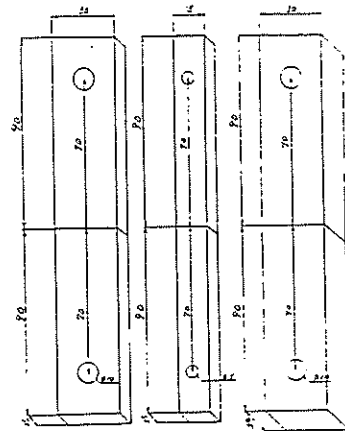
図5 振動応力拡大係数の解析例

### 3. 本強度予測法の接着継手への応用

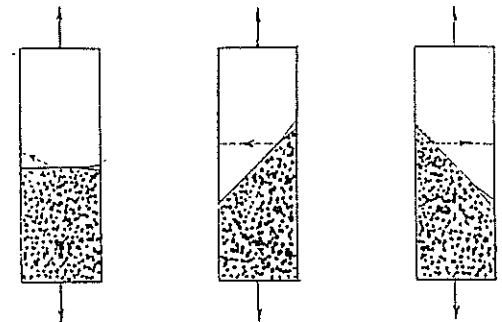
実験に用いた接合体としては、図7に示す様な残留応力がなく、接着第三相のない二相のみの接合体を理想材料として用いた。実際の接着継ぎ手の強度予測については後で議論する。

材料としては、

- (1) エポキシ鋼接合体
  - (2) エポキシアルミ接合体
  - (3) 界面き裂を有するエポキシ鋼接合体
  - (4) 界面き裂を有するエポキシアルミ接合体
- の4種類を用いた。



(a)接合体



(b)界面き裂を有する接合体

図7 接着試験片の形状

(1), (2)の破壊・疲労破壊現象における最終破壊までのき裂発生, き裂伝ばのCCDスコープによる連続その場観察により, 本材料では破壊または疲労破壊強度を予想するうえで, き裂発生がとき裂伝ばより重要であることがわかった。そこで, 接合体角部の特異応力場の強さが破壊に対する駆動力である。き裂伝ばが主であれば, 界面き裂の特異応力場(振動解)の強さを破壊に対する駆動力であるので, (3), (4)の実験も行った。

図8にエポキシ鋼に界面き裂の強度を振動応力拡大係数で整理した結果を示す。き裂長さや板幅に拘らず, その破壊抵抗は, 材料で決まる唯一の曲線を形成しているの, 振動応力拡大係数の有効性が確認された。

図9にエポキシ鋼接合体及びエポキシアルミ接合体の強度を角部の特異性パラメータで整理した結果を示す。板幅に拘らず, その破壊抵抗は, 材料で決まる唯一の曲線を形成しているの, 角部の特異性パラメータの有効性が確認された。

以上は, 接着相が無限に厚い場合に相当する二相接合体の場合である。実際的な接着相が有限の厚さの接着継手の強度は, 図8, 9等に示した破壊抵抗曲線の使用と三相接合体の特異性パラメータ解析を行うことにより予測可能と推定される。

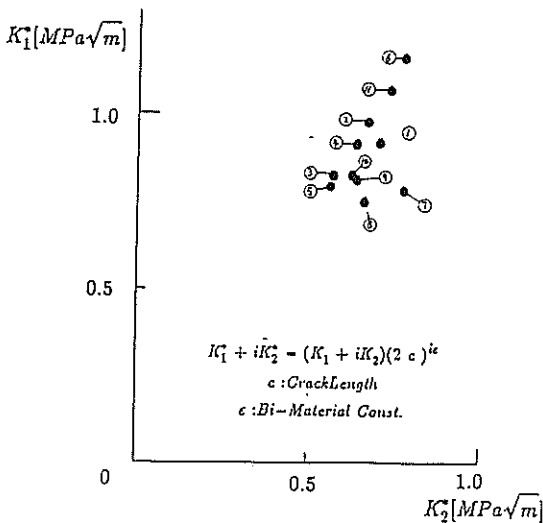


図8 エポキシ鋼の界面き裂の強度特性

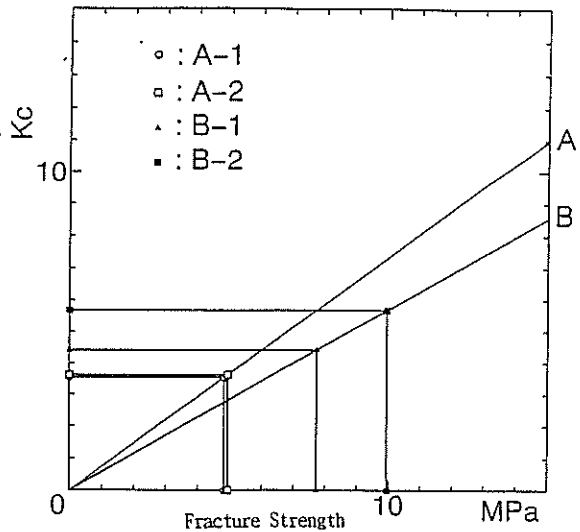


図9 エポキシ鋼の接合体の強度特性

## 研究成果

実材料の破壊挙動と上記の特異性パラメータが一価関数の関係が確認されたので, 機能性材料で構成したパーツの強度設計を材料力学的に検討するための理論体系(=新破壊力学)がほぼ確立された。

## 今後の課題と発展

上記二種類の弾性力学での特異応力場の強さが弾塑性状態の破壊の駆動力として有効であるためには小規模降伏条件である必要があるが, その定量的評価が早急の解決すべき問題である。さらに本方法では板厚の効果が予測することができないので, 三次元解析を行うことにより, この効果を予測する方法を開発する予定である。

## 発表論文リスト

- (1)機械学会論文集A編, 板状接合試験片における特異性の強さ, 第59巻第 567編, 平成5年11月
- (2)Engineering Fracture Mechanics, Effect of Elastic Constants on Stress in Multi-Phase Under Plane Deformation, 1994, Vol. 48-3.