

# 材料デザイン学 第4回

## 機械的特性 / 靱性

岸田 逸平

2015年10月6日

### 目次

1	概要	2
2	破壊のメカニズム	2
2.1	紙を破ってみる . . . . .	3
2.2	亀裂のタネはどこにある? . . . . .	3
3	靱性の改善	4
3.1	粒界強化 . . . . .	4
3.1.1	研究紹介: ECAP . . . . .	5
3.1.2	研究紹介: Ni/Cu 多層膜 . . . . .	5
3.2	強化ガラス . . . . .	5
3.3	ZrO <sub>2</sub> における破壊靱性の改善の事例 . . . . .	5
3.3.1	ZrO <sub>2</sub> . . . . .	6
3.3.2	改善のための基本方針 . . . . .	6
3.3.3	部分安定化ジルコニア . . . . .	6
3.4	複合材料 . . . . .	7
4	亀裂進展の積極的利用	7
5	まとめ	8
5.1	小レポート . . . . .	8

# 1 概要

強度と靱性は背反することが多い。もし君の解決すべき課題が靱性のみならば、話は簡単だ。より軟らかい材料を使えば良い。極端な話、ゴムでも使えば靱性が問題になることはほとんどない筈だ。問題は靱性が必要とされる材料は多くの場合同時に一定以上の強度が必要とされることである。たとえば、ゴムでは強度が低すぎて高層建築には使えない。

靱性

- \_\_\_\_\_ : 外力に追従して変形するものの除荷すると形状が元に戻る性質。
- \_\_\_\_\_ : 外力に追従して変形し除荷しても形状が元に戻らない性質。
- \_\_\_\_\_ : 材料が耐えうる応力の強さ。
- \_\_\_\_\_ : 材料の粘りの強さ。破壊に要するエネルギー。

変形の模式図を Fig. 1 に示す。

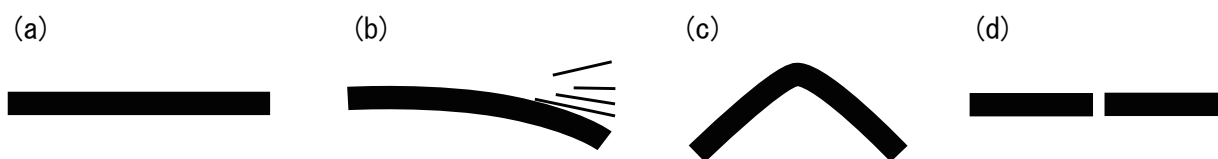


図 1 (fig20131024a) 機械的特性の関係する挙動の模式図。(a) 初期状態。(b) 弾性変形、弾性。(c) 塑性変形、塑性、強度。(d) 破壊、靱性。

応力-歪み線図で表すと Fig. 2 のようになる。

靱性を制御するには、破壊についてよく知らなければならない。

# 2 破壊のメカニズム

材料の破壊とは、材料内部を \_\_\_\_\_ が \_\_\_\_\_ し、貫通すること。(Fig. 3) 構造材料には大小さまざまな応力がかかるが、応力に耐えられない部分では組織が解離する。材料に亀裂など鋭い形状の \_\_\_\_\_ があると、応力負荷時に \_\_\_\_\_ が生じ、その組織が耐えられなくなり解離する。このことにより亀裂の先端は移動し、移動した先でまた同様の現象を生じて亀裂が進展する。

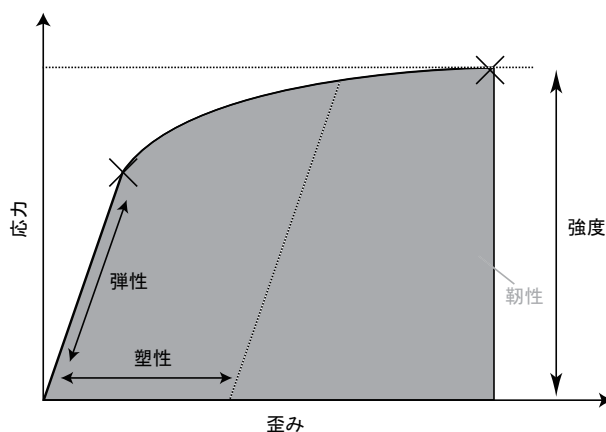


図2 (fig20141030a) 応力-歪み線図。

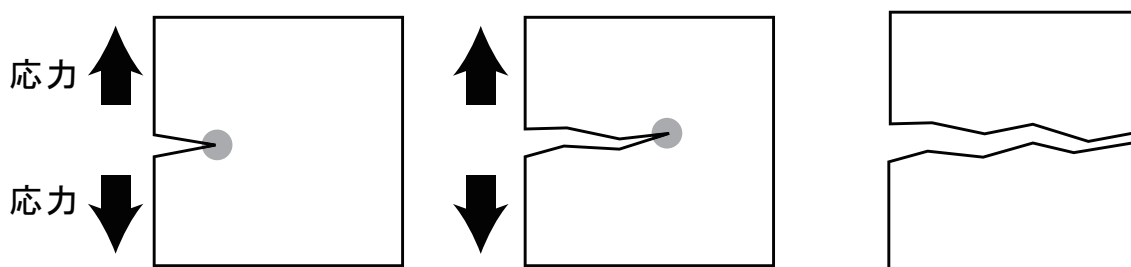


図3 (fig20131024b) 亀裂進展と破壊のメカニズムの模式図。応力集中部を灰色で示してある。

## 2.1 紙を破ってみる

手元にいらぬ紙があれば、これを破って亀裂進展を観察してみよう。(Fig. 4)

## 2.2 亀裂のタネはどこにある？

亀裂進展は元々ある亀裂が進んで破壊箇所が拡大していく現象であり、亀裂がゼロから生じる現象ではない。では、最初の亀裂はどこにあるのだろうか？

紙を破る場面でも Fig. 4(b) のような状態ではかなり大きな力をかけなければ破れなかった筈だ。Fig. 4(c) のように力を集中させて紙を破る場面でも、紙繊維の継ぎ目など、肉眼では見えないスケールの弱い箇所に応力が集中して、これまた肉眼では見えない亀裂が拡大している。亀裂の元になる欠陥は現実の材料には多数含まれている。マクロには傷一つないように見えても、ミクロな傷やポイドが多数含まれている。応力が働くとこれらが亀裂の起点や中継点として働くことになる。

理論的には、亀裂が全くない完全結晶を作ることができれば材料の靱性は極めて高くなると考えら

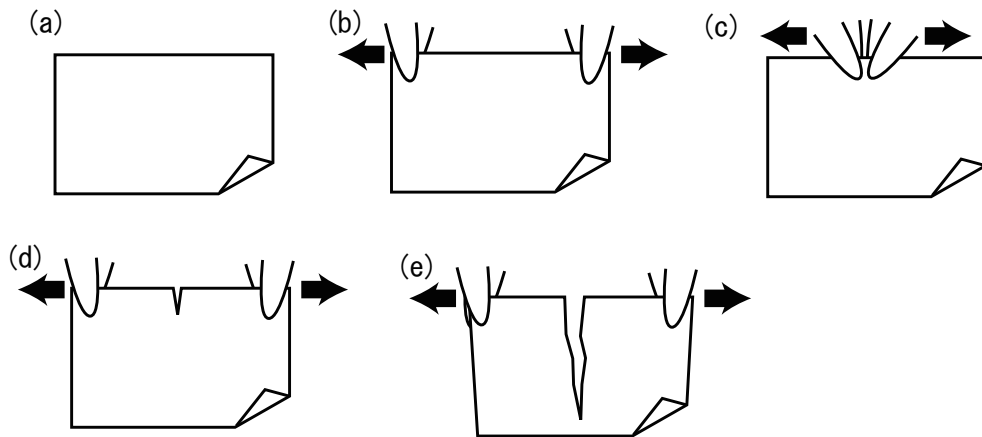


図4 (fig20131024c) 紙をやぶって亀裂進展を確認する。(a) 初期状態。(b) 紙の両端を持って引っぱってもなかなか破れない。(c) 掴む幅を減らして応力集中を起こすと破り易い。剪断方向に応力を働かせるとよりやり易いだろう。(d) 亀裂が生じてしまえば、(b) のように広く持っても勝手に応力集中が働くため容易に亀裂が進展する。(e) こうして材料は破壊される。

れる。<sup>\*1</sup>しかし、これは現実には無理な話である。空孔が存在しない結晶を作ることが現実的には不可能であることと同じである。

欠陥のない材料を作るとは諦めよう。結局、靱性の高い材料を作るとは、亀裂が進展しにくい材料を作ることと同義である。

### 3 靱性の改善

靱性を向上させるには、破壊に要するエネルギー量を増やすということ。さて、どのような方法があるだろうか。

#### 3.1 粒界強化

一般に材料の強度と靱性はトレードオフの関係にある。材料の4つの強化機構のうち、固溶強化、析出強化、加工硬化は強度を向上させるものの靱性を低下させる。\_\_\_\_\_のみが靱性と強度を同時に向上させうる。

何故、粒界強化が効果的なのだろうか？亀裂先端が粒界に達したとき、亀裂は粒界に沿って進むとする。これによって亀裂は真っ直ぐ進むことができず、余分なエネルギーを消費させられる。(Fig. 5)これが粒界による靱性向上のメカニズムである。では、どのようにして粒界強化を施すことができるだろうか。

<sup>\*1</sup> 完全結晶だとしても、劈開という現象がある。

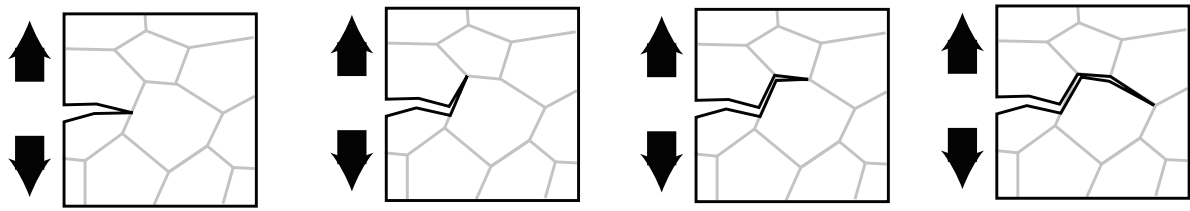


図5 (fig20131024d) 粒界強化による亀裂進展の抑制。灰色の線で粒界を示している。Fig. 3 と比較せよ。

### 3.1.1 研究紹介: ECAP

- ECAP
- 加工硬化
- 結晶粒微細化
- 形状保存
- 疲労変形による軟化挙動
- 疲労試験
- SEM
- TEM

ECAP では理論的には粒の数自体は変化しない。しかし個々の粒は扁平に潰れるため、粒界の面積は増える。このため粒界強化の効果もあると考えられる。

### 3.1.2 研究紹介: Ni/Cu 多層膜

結晶粒は必ずしももの粒の形状をしている必要はない。薄膜でもその界面が粒界として機能しうる。その観点での研究が進められている。<sup>\*2</sup>

## 3.2 強化ガラス

熱処理や化学処理によって、表面付近に圧縮応力が残留するように作製されたガラス。

### 3.3 ZrO<sub>2</sub> における破壊靱性の改善の事例

セラミックスは一般に靱性が低い。瀬戸物が欠け易いことは普段の生活でも実感したことがあるだろう。しかし靱性を大幅に改善した材料がある。ジルコニア (ZrO<sub>2</sub>) だ。これはファインセラミックスとして包丁やハサミなどにも利用されている。

<sup>\*2</sup> 材料機能工学研究室、兼子先生。



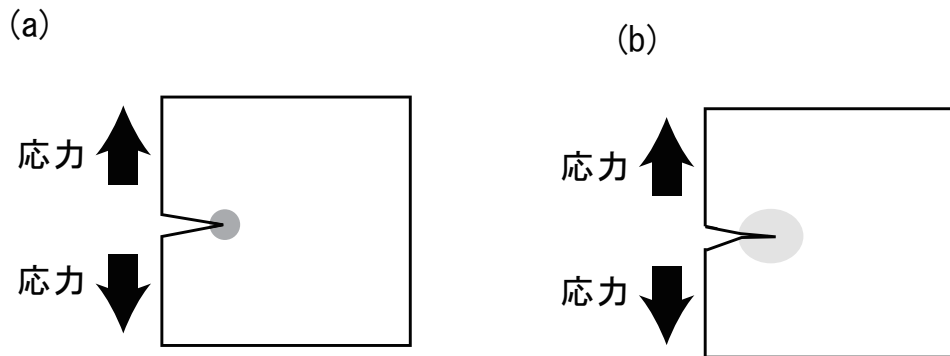


図 6 (fig20131024e) 部分安定化ジルコニアによる靱性向上メカニズム。(a) 亀裂先端に応力集中が生じたところ。(b) 応力に誘起された相変態が生じたところ。

### 3.4 複合材料

複数の材料の長所を組み合わせることで靱性の向上を図ることができる。\_\_\_\_\_ や \_\_\_\_\_ がその代表例である。母材の亀裂の進展をより強靱な繊維で保持している。複合材料の材料デザインについては次回、より詳しく扱う。

(Fig. 7)

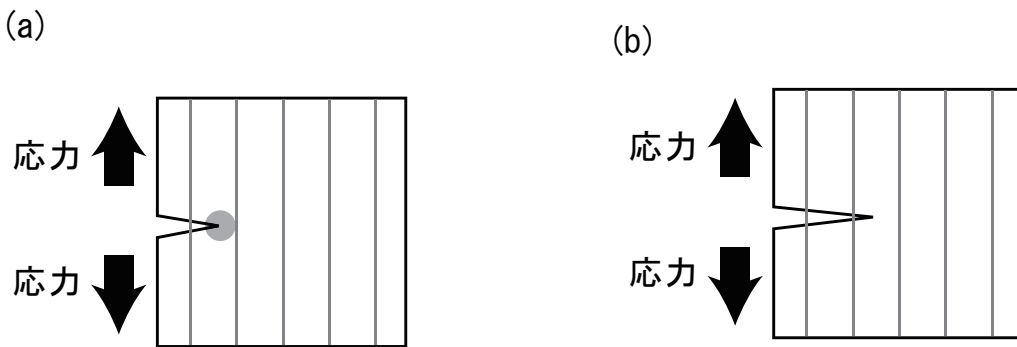


図 7 (fig20131024f) 繊維強化複合材料の靱性向上。母材の亀裂進展を、より強度に優れた繊維材料が抑制している。

## 4 亀裂進展の積極的利用

食品などの包装材 逆に、破壊（亀裂の進展）を積極的に使う部材もある。食料品の袋など、消費者に届いた後には鋏などの道具を使わずとも便利に取り出せるようにする工夫である。

快削鋼 強度や靱性を積極的に低下させる応用として、ほかに快削鋼が挙げられる。設計製作実習の授業で鉄鋼よりも真鍮の方が加工性が良いことが実感として得られていることだろう。加工性の悪い鉄鋼材料であっても、それほど強靱性が必要のない部材においては強靱性を犠牲にしても加工性を上げることが優先されることがある。快削鋼は Pb や S などの元素を添加することで被削性を向上させ、切削バイトに加わる抵抗を低減、バイトの長寿命化、仕上面の美しさなどの向上を狙った鉄鋼材料である。

## 5 まとめ

- 材料の破壊
- 亀裂進展のメカニズム
- 粒界強化
- 部分安定化ジルコニアの相変態
- 複合材料
- 亀裂進展の積極的利用

### 5.1 小レポート

部分安定化ジルコニアは単斜晶と正方晶の混合体であり、応力によって相変態が生じるものであった。このジルコニアに、さらに MgO 添加量を増やすと結晶全体が完全に正方晶になり、少々の応力では単斜晶に相変態しないようになる。このとき、相変態応力が破壊応力より高くなる。さて、部分安定化ジルコニアと完全安定化ジルコニアではどちらが靱性が高いか？その理由について考察し、論述せよ。