

# 基礎講座：材料の強度と破壊

沼倉 宏\*

## 1. はじめに

強度（強さ）は構造材料において最も重要な特性である。材料の強さには弾性的強度、降伏強度、破壊・破断に対する強度、最大（引張）強度、クリープ変形（小さな負荷における経時変化）に対する強度、疲労に対する強度、摩擦・摩耗への耐性など多々あるが、それぞれの特徴に関しても、弾性率のように個々の物質の「物性」と言えるもの、降伏強度などのように同じ物質であっても微細組織により大きく異なる「構造敏感」なものなどまちまちである。本講では金属を中心とした構造材料の強度と破壊の基礎として、その定義、実際のデータ、大きさを決める因子などの基本的なことから整理する。種々の物質のなかで金属にはどのような特徴があるかを把握するために、セラミックスや高分子（ポリマー）と比較して眺めてみることにする。

## 2. 弾性

### (1) 定義

断面積  $A$  の材料に外力  $F$  を一様に加えたとき寸法  $l$  が  $u$  だけ変化したとする。応力  $\sigma = F/A$  とひずみ  $\epsilon = u/l$  はひずみが小さければ比例し、

$$\sigma = M \epsilon \quad (1)$$

と表される。これがフックの法則であり、比例定数  $M$  が弾性率である。通常の固体ではひずみ  $10^{-3}$  程度までの範囲ではこの線形の関係が成り立つ。応力が一軸引張・圧縮、剪断、静水圧（等方的な膨張・圧縮）場合、弾性率はヤング率  $E$ 、剪断弾性率（剛性率ともよばれる） $G$ 、体積弾性率  $K$  であり、フックの法則はそれぞれ次のように書かれる。

$$\sigma = E \epsilon \quad (2a)$$

$$\tau = G \gamma \quad (2b)$$

$$p = -K (\Delta V/V) \quad (2c)$$

式 (2b) の  $\tau$  は剪断応力、 $\gamma$  は剪断ひずみ（寸法  $l$  に対して垂直な剪断変位を  $w$  とすると、 $\gamma = w/l$ ）、 $p$  は静水圧応力、 $V$  は変形前の体積、 $\Delta V$  は体積変化量である。

通常の固体では、単純な引張変形においては引張方向に伸びると同時に垂直な方向に縮み、圧縮においては垂直な方向に伸びる。応力方向のひずみ  $\epsilon_n$  と垂直方向のひずみ  $\epsilon_t$  の大きさの比がポアソン比

$$\nu = -\epsilon_t / \epsilon_n \quad (3)$$

である。 $\nu$  が  $1/2$  であれば体積は変化しないことになるが、実際は  $\nu$  は  $1/2$  より小さく  $1/3$  から  $1/4$  程度である。固体の弾性は以上の四つの定数  $E$ 、 $G$ 、 $K$ 、 $\nu$  で表される。

非晶質固体や配向性のない多結晶材料では弾性的性質は等方的であり、弾性率は二つのラメ (Lamé) 定数  $\lambda$  と  $\mu$  ですべて決まる。

$$E = \mu (3\lambda + 2\mu) / (\lambda + \mu) \quad (4a)$$

$$G = \mu \quad (4b)$$

$$K = \lambda + (2/3)\mu \quad (4c)$$

$$\nu = (1/2) \lambda / (\lambda + \mu) \quad (4d)$$

多くの金属では  $\nu$  は  $1/3$  に近い。このとき式 (4d) より  $\lambda \approx 2\mu$  となり、次の関係が近似的に成り立つ。

$$E \approx K \approx (8/3) G \quad (5)$$

厳密には応力とひずみは 2 階のテンソルであり、それらに関係づける弾性率は 4 階のテンソルとなる。結晶においては 4 階のテンソルは 81 の成分を持つが、応力テンソルおよびひずみテンソルの対称性と弾性エネルギーの性質から独立な成分の数は最大で 21 となる。対称性の高い結晶では独立な成分はさらに少なく、立方晶では 3 になる。しかし等方性物質における独立なパラメタの数 (2) よりは多いので、立方晶結晶においてもヤング率、剪断弾性率やポアソン比は方位によって異なる。

### (2) 弾性率の大きさ

弾性率の大きさは一定の荷重を加えたときの変位の大きさから求めることができるが、正確な値を求めるには共振振動の振動数  $f$  あるいは音速  $v$  を測定し、そこから算出する（弾性率は  $f^2$  あるいは  $v^2$  と密度  $\rho$  に比例する）。

そのようにして測定された種々の物質のヤング率  $E$  のデータを図 1 に示す。通常の固体の弾性率は  $10^{10}$  から  $10^{12}$  Pa の範囲にあるので (Pa は  $\text{N m}^{-2}$ )、弾性率を表す単位には GPa がよく用いられる。セラミックスと金属では  $10^2$  GPa ( $G$  は  $10^9$ , Pa は  $\text{N m}^{-2}$ ) を中心にその  $\pm 1$  桁の範囲にある。これに対しポリマーでは最も高いものでも 10 GPa で、それよりさらに数桁低いものもある。

### (3) 弾性率は何によって決まるか

弾性率の大きさは融点と相関があることが知られているが、直接的な因子は原子間結合力の強さと原子間距離である。

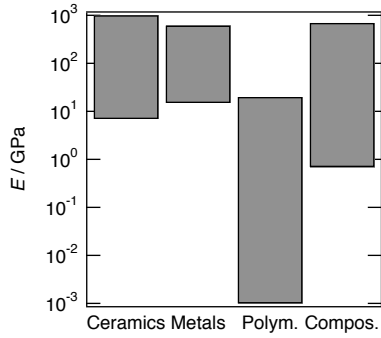


図1 ヤング率  $E$  のデータ. Ceramics はセラミックスと無機ガラス, Metals は金属, Polym. はポリマー (高分子), Compos. は複合材料を示す. 後出の図においても同様.

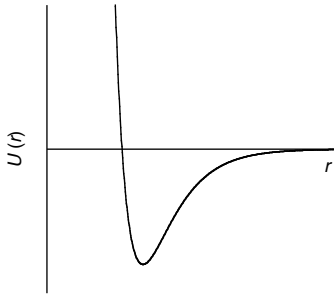


図2 原子間相互作用エネルギー  $U(r)$  の概形.

原子間の相互作用エネルギーと距離の関係はどのような物質でもおおむね図2に示すような形になっているが、結合エネルギーの大きさ(図のポテンシャルエネルギーの極小部分の深さ)と原子間距離(極小をとる位置)は物質によりそれぞれ異なる。原子間にはたらく力  $F$  は相互作用エネルギー  $U$  から

$$F = -dU/dr \quad (6)$$

により決まるが、平衡原子間距離  $r_0$  から  $\Delta r$  だけ変位したときの力の大きさは

$$F(\Delta r) \approx -(dU/dr)_0 - (d^2U/dr^2)_0 \Delta r \quad (7)$$

と表される。添字 0 は  $r_0$  における値を意味する。右辺第一項は、 $r_0$  は  $U(r)$  の極小位置なのでゼロになる。外部応力  $\sigma$  が加えられて変位  $\Delta r$  が生じるとき、このような原子間力の単位面積についての総和が外部応力  $\sigma$  と釣り合うので

$$\sigma = (d^2U/dr^2)_0 \Delta r/r_0^2 \quad (8)$$

が成り立つ ( $1/r_0^2$  は単位面積あたりの結合の数)。これを

$$\sigma = (1/r_0) (d^2U/dr^2)_0 \times (\Delta r/r_0) \quad (9)$$

と書くと、右辺最後の因子  $\Delta r/r_0$  はひずみ  $\epsilon$  なので、この式はフックの法則を示している。よって、弾性率  $M$  は

$$M = (1/r_0) (d^2U/dr^2)_0 \quad (10)$$

と表され、平衡原子間距離とその位置における相互作用エネ

ルギー曲線の曲率により決まることが知られる。一般に融点が高い物質では原子間距離は短く、また結合エネルギーが大きいので相互作用エネルギーの極小点での曲率は大きい。よって、弾性率の値は大きくなる。式(10)が示すように弾性率は原子間結合の性質によって決まる物性値であり、次節以降で扱う塑性変形強度や破壊強度とは異なり微細組織や欠陥の影響はほとんど受けない。

### 3. 塑性

#### (1) 塑性変形挙動

材料の力学的性質を調べるには引張試験をおこなうことが多い。棒あるいは板状の試料を一定速度で引っ張り、伸び(変位)  $u$  と荷重  $F$  の関係を記録する。これを公称応力  $\sigma_n = F/A_0$  と公称ひずみ  $\epsilon_n = u/l_0$  に変換すると ( $A_0$  と  $l_0$  は変形前の断面積と長さ)、金属材料の場合は図3のような曲線となる。

変形の初期は応力とひずみが比例し、グラフの勾配はヤング率  $E$  である。ひずみが0.1%程度の大きになると直線からはずれ、もし変形を中止して荷重をゼロに戻しても永久変形が残るようになる。このような塑性変形が始まる点が降伏点 (yield point) であり、そのときの応力  $\sigma_y$  を降伏強さと言う。面心立方金属では応力-ひずみ曲線状では降伏点が明瞭には認められないことが多く、そのような場合は降伏強度の目安としてひずみがある値(例えば0.1%)に達したときの応力をとる。この応力は0.1%耐力と呼ばれる。

さらに変形を続けると加工硬化により応力は上昇し続けるが、やがて試料の一部がくびれ始めると応力は低下に転じ、くびれが細くなるにつれて見かけの応力はさらに低下して最終的には破断する。くびれが開始した点における応力を引張強さ (tensile strength) または最高引張強さ (ultimate tensile strength, UTS) と呼び、記号  $\sigma_{TS}$  で表す。引張強さが降伏強さよりどれだけ高いかは加工硬化の度合いにより決まる。破断までに生じた塑性ひずみ  $\epsilon_f$  は破断ひずみ (fracture strain) とする。  $\epsilon_f$  は引張変形における延性の指標となる。

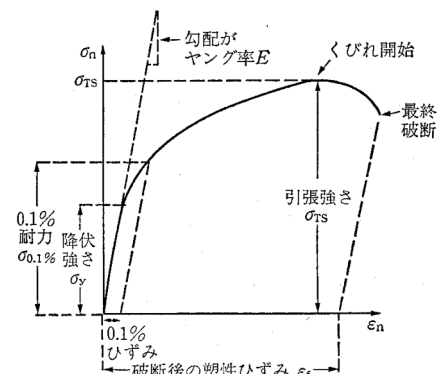


図3 引張試験における公称応力-公称ひずみ曲線.

## (2) 降伏強さのデータ

降伏強さ  $\sigma_y$  のデータを図4に示す。値はヤング率と同様に物質により大きく異なり、6桁の範囲にわたっている。金属材料では同じ物質でも純度によりかなり異なり、通常純度では10から100 MPa程度であるが高純度金属では1桁ほど低くなる。ちなみに10 MPaとは断面積1 mm<sup>2</sup>あたり約1 kgfの荷重を加えたときの応力である。金属のうち最も強いもの(合金鋼やコバルト合金)の降伏強さは10<sup>3</sup> MPaすなわち1 GPaに達し、1 mm<sup>2</sup>のワイヤで100 kgの質量を支えることができる。

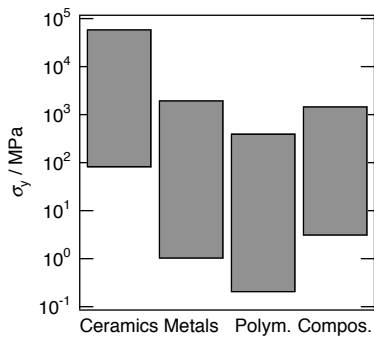


図4 降伏強さ $\sigma_y$ のデータ。

セラミックスの降伏強さは最強の金属材料と同程度あるいはさらに高いが、室温で引張試験をすると多くのセラミックスは降伏する前に破断してしまう。これはセラミックスの破壊靱性(次節に述べる)が低いので、引張試験によってセラミックスの塑性変形挙動を調べることはできず、代わりに圧縮試験のようなある程度破壊を抑える方法によらなければならない。降伏強さを求めるだけであれば圧子を押込んで圧痕の大きさを測る硬さ試験が便利で、実際に図中のセラミックスに関するデータは硬さ試験によるものである。

金属は破断ひずみが0.1から0.5と大きく、延性に富んでいる。必要な形状に加工できるためには延性が高いことは大きな長所である。また構造材料においては信頼性・安全性の観点からは破断しにくいこと(靱性が高いこと)が強さとならなくて必要とされる。理想の構造材料は高い強度と優れた延性を併せ持つ材料であるが、一般に強度と延性は相反し、合金化や組織制御などによって強度を上げると延性は下がる傾向がある。セラミックスは強いが延性に乏しいのを改善するのは原理的に難しいので、現実の構造材料はほとんどが延性をなるべく落とさないような方法で強度を高めた金属材料である。

## (3) 塑性変形の微視的機構

金属結晶は特定の結晶面に沿ってすべるように剪断変形する。この現象が発見された当時(20世紀初頭)、完全結晶に剪断応力を加えたときにどの程度の大きさですべりがおこるかが理論的に計算され、その大きさ(結晶の理想強度)

は $G/10$ のオーダーと見積もられたが、これは実験で観測された降伏応力よりも何桁も大きかった。図5は降伏強さ $\sigma_y$ をヤング率 $E$ で規格化したデータである。引張試験では引張軸に対してある角度をもってすべり変形がおこるが、すべり面の法線と応力軸のなす角度を $\theta$ とすると、すべり面にかかる剪断応力は $\tau = \sigma \cos\theta$ であるから $\theta$ が45°のときに最大になる。この角度で降伏がおこるとすると、降伏剪断応力は $\tau_y = \sigma_y/2$ となる。ここで等方弾性体に関する近似式 $G \approx (3/8)E$ をあわせて用いると

$$\tau_y/G \approx (\sigma_y/2)(3/8)E \approx \sigma_y/E \quad (11)$$

であるから、図5の縦軸は $\tau_y/G$ と読み替えてよい。理論的な見積もりによれば $\tau_y/G \approx 10$ であり、 $\sigma_y/E$ も同じ程度の大きさと予想される。

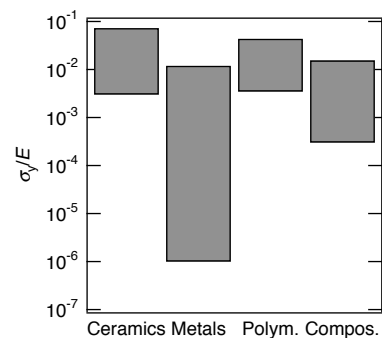


図5 ヤング率で規格化された降伏強さ $\sigma_y/E$ のデータ。縦軸は剪断弾性率で規格化された剪断降伏強さ $\tau_y/G$ とほぼ等しい。

図5を見ると、実際にはセラミックスではいくつか予想に近いものもあるがそれよりかなり低いものは多く、金属ではおしなべて1桁から5桁低くなっている。この理論と実験の不一致の理由は、結晶のすべりは理論的に考えたように結晶面全体が一様にずれておこるわけではないためである。塑性変形は結晶転位という格子欠陥の動きによって、すなわち結晶面の部分的なずれが徐々に移動してゆくことによっておこることが20世紀半ばに明らかになり、転位を動かすのに必要な剪断応力の臨界値(パイエルス応力)は理論的に見積もられた $\tau_y$ よりもはるかに小さいことが現在では知られている。

パイエルス応力とは直線的な転位を熱エネルギーの助けなしにすべり面に沿ってすべり方向へ1周期動かすのに必要な剪断応力であり、その大きさは

$$\tau_p = G \exp[-(2\pi d/b)] \quad (12)$$

と表される。 $d$ はすべり面の面間隔、 $b$ は転位のもつ変位(バーガース・ベクトル $\mathbf{b}$ )の大きさである。 $\tau_p$ は剪断弾性率に比例するので融点の高い物質では大きくなるが、指数関数の引数である $d$ と $b$ の大きさにより強く依存する。一般にすべり最も密な原子面に沿って最近接原子方向に沿っておこ

るが、これらはそれぞれ  $d$  が大きく  $b$  が小さいことに対応し、式 (12) によれば  $\tau_p$  の値が小さい、すなわち転位が動きやすいことを意味する。このように式 (12) は定性的に結晶のすべりの幾何学が構造とどのように関係するかを説明している。

いっぽう定量的には、たとえば金属結晶を想定して式 (12) において  $d/b \approx 1$  とすると  $\tau_p \approx 2 \times 10^{-3} G$  となるが、これは純金属結晶の室温での降伏強さよりも依然としてはるかに大きい。実験との食い違いの一つの原因は温度の効果である。多くの体心立方金属やいくつかの六方最密遷移金属（チタン、ジルコニウムなど）では室温から温度を下げてゆくとつれて降伏強さは指数関数的に上昇し、極低温ではこの計算値と同程度になる。ある程度の温度では転位は直線的なまま移動するのではなく、熱エネルギーの揺らぎに助けられて転位線の一部が隣接位置へ張り出し、その部分が広がってゆくことによって全体が移動する。このような熱活性化過程は温度  $T$  が高くなるにつれて  $\exp[-Q/(kT)]$  という形で小さくなるので、式 (12) から得られる値よりはずっと小さくなる。

面心立方金属と最密六方単純金属（マグネシウム、亜鉛、カドミウムなど）では降伏強さが一般に低く、また低温においてもほとんど変わらない。これらの金属では転位がより小さなバーガース・ベクトルの 2 本の転位（部分転位という）に分解し、個々の転位のパイエルス応力が著しく小さいためもともと動きやすく、熱エネルギーの効果も小さい。

以上のように、転位の動きやすさは転位のもつ変位の大きさと転位芯における原子配列（ひずみの広がりかた）によって大きく異なる。面心立方金属では転位芯が平面的にすべり面に沿って広がった構造をとっているが、体心立方金属ではそうはなっていないので転位が本質的に動きにくく、そのために降伏強さが高く、低温でさらに上昇するものと理解されている。

#### (4) 金属の強化法

金属結晶の塑性変形強度を高めるには転位を動きにくくすればよい。転位は周期的な原子配列の中の一条の線状欠陥であり、周囲の原子配列が完全結晶に近ければ本来の動きやすさですべり運動するが、他の欠陥あるいは介在物などがあると動きが妨げられ、その結果塑性変形に対する強さが高くなる。実用金属材料は望ましい強さになるように適度に障害物を置くことによって転位の動きを押さえている。具体的には以下のような方法がある。

- ・加工硬化（ひずみ強化）：変形により導入された転位どうしが互いの運動を妨げる。
- ・結晶粒微細化：結晶粒界をはさむ結晶粒の方位は互いに異なり転位は粒界を自由に通り抜けることはできないので、結晶粒が小さくなり粒界の密度が高くなれば転位は総体的に動きにくくなる。
- ・固溶強化：溶質原子は周期的な原子配列を乱すので、すべり面上に溶質原子があるとそこで転位は動きにくく

なる。一般に置換型原子よりも侵入型溶質原子のほうが周囲に作るひずみが大きいので転位との相互作用が強く、強化効果は大きい。

- ・析出強化、分散強化：適当な熱処理によって第二相を析出させるか、あるいは酸化物や硫化物などの安定な異物を材料を製造するときから混入させておき、母相の中に粒子状の障害物を散在させる。

以上のように、転位の動きやすさは材料の微視的な不均一（微細組織、格子欠陥）に強く依存する。このために結晶の強さと延性はいわゆる構造敏感な性質の典型となっている。

## 4. 破壊と靱性

### (1) 破壊現象

金属材料の強さは試片の寸法にほとんどよらない。これに対し、セラミックスやガラスを引張試験すると、破断強度は試料が太いほど低くなる。すなわち、より小さなひずみで破断してしまう。これは、これらの脆い材料は試片の表面あるいは内部に潜在する小さな割れによって確率的に破断することを示している。材料中あるいは表面にはいろいろな過程で生じた傷や割れなどの欠陥が数多く存在するが、ある面積あるいはある体積あたり一定の数の欠陥があるとすると、総面積あるいは体積が大きいほど欠陥の総数は多くなる。それらの中のどれか一つが負荷によって成長したときに急速な破壊がおこるものとする、欠陥の総数が多いほど破壊しやすくなると考えられる。

### (2) 急速破壊の条件と靱性の定義

実際の材料には破断のもととなる割れはすでに存在しているのが普通である。外部応力が小さいときは割れはその大きさととどまるが、応力がある大きさを超えると急速に進展する。その臨界応力はエネルギーの釣り合いから決まる。厚さが  $t$  の材料の中で長さが  $a$  の割れが  $\delta a$  だけ成長したとすると、割れ単位面積あたりのエネルギーを  $G_c$  とし、 $G_c t \delta a$  だけのエネルギーが割れの先端で吸収されたことになる。いっぽう割れが成長すると弾性ひずみエネルギーが解放されるが、その量を  $\delta U_e$  とする ( $\delta U_e$  は負)。外力による仕事  $\delta W$  が  $\delta U_e$  と  $G_c t \delta a$  との和を超えて

$$\delta W \geq \delta U_e + G_c t \delta a \quad (13)$$

となれば割れは成長する。 $G_c$  は材料により決まる特性値で、靱性あるいは臨界ひずみエネルギー解放率と呼ばれる。靱性が高いとは割れが伝播しにくいことを意味する。

具体例として、図 6 のように厚さが  $t$  で一端に長さ  $a$  の小さな割れをもつ板状の試片が引張応力がかかった状態で保持されているとしよう。両端が固定されていれば外力による仕事はゼロなので、急速破壊の臨界条件は

$$0 = \delta U_e + G_c t \delta a \quad (14)$$

となる。解放されるひずみエネルギーの大きさは、図 7 に示す割れの周囲の応力状態の変化を考えることにより求めら

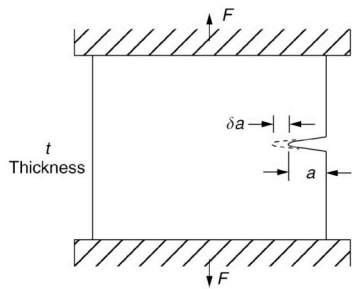


図6 固定された板材の長さ  $a$  の割れの進展.

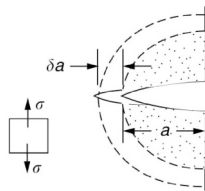


図7 割れの成長に伴うひずみエネルギーの解放.

れる。割れから遠い領域では一様な引張応力  $\sigma$  がかかっている。単位体積あたりひずみエネルギー  $\sigma^2/(2E)$  がたくわえられている。このエネルギーが割れの直上と直下の半円形の領域では緩和されている。その領域の応力を近似的にゼロとし、ひずみエネルギーは完全に解放されているものとしよう。その大きさは、割れの長さが  $a$  のときは次式で与えられる。

$$U_c = -[\sigma^2/(2E)] (\pi a^2 t)/2 \quad (15)$$

しかしここでおいた仮定は単純化しすぎており、このエネルギーの見積もりは小さすぎることが知られている。より適切な取り扱いによれば、ひずみエネルギーはこの2倍となる。

$$U_c = -(\sigma^2/E) (\pi a^2 t)/2 \quad (16)$$

この式を用いると、割れの長さが  $a + \delta a$  になったときの解放エネルギーの変化分は

$$\delta U_c = (dU_c/da) \delta a = -(\sigma^2/E) \pi a t \delta a \quad (17)$$

と求められる。これを臨界条件の式 (14) に代入すると、急速破壊がおこる条件は

$$\sigma(\pi a)^{1/2} = (EG_c)^{1/2} \quad (18)$$

と表される。左辺は大きさ  $a$  の割れがある材料に応力  $\sigma$  が加えられているという条件、右辺は材料の特性であり、両者が等しくなったときに割れが進展することをこの式は述べている。左辺は応力拡大係数と呼ばれ、記号  $K$  で表される。単位は  $\text{N m}^{-3/2}$  である。その臨界値  $K_c$  である右辺は破壊靱性と呼ばれる。

### (3) 靱性と破壊靱性のデータ

破壊靱性  $K_c$  の値は、長さ  $a$  の割れを入れた試片に荷重を加えて急速破壊がおこる応力を測定して求められる。靱性  $G_c$  の値は  $K_c$  の実験値とヤング率  $E$  から  $K_c = (EG_c)^{1/2}$  によって算出される。図8と図9に靱性と破壊靱性のデータを示す。

セラミックスとガラスは靱性が際立って低い。ポリマーは靱性はさほど低くないが弾性率が低いので破壊靱性は低い。金属は一般に靱性が高く、最も靱性・破壊靱性が高いのはいずれも純金属である。金属材料の靱性は室温では最も低いものでも  $10 \text{ kJ m}^{-2}$  程度だが、低温で降伏強さが高くなる体心立方金属と六方最密遷移金属では低温においては  $1 \text{ kJ m}^{-2}$  ほどに低下する。

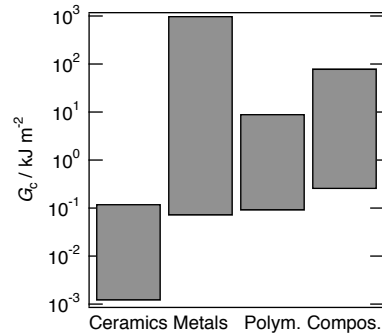


図8 靱性  $G_c$  のデータ (室温).

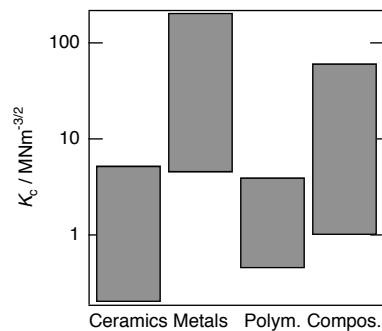


図9 破壊靱性  $K_c$  のデータ (室温).

### (4) 割れが進展する微視的機構

セラミックスやガラスのような靱性の低い材料の破面を観察すると平坦で、塑性変形がおこった痕跡はほとんど見られない。塑性変形がおこらずに割れが進展する機構を理解するには、割れ前方の局所的な応力上昇を考える必要がある。連続体弾性論による詳しい解析によれば、鋭い割れの先端付近では応力集中がおこり、局所的な応力は

$$\sigma_{\text{Local}} = \sigma \{1 + [a/(2r)]^{1/2}\} \quad (19)$$

となることが知られている。ここで  $\sigma$  は試片全体にかかる平均引張応力、 $a$  は割れの長さ、 $r$  は割れ先端からの距離である。その模式図を図10に示す。 $\sigma_{\text{Local}}$  は割れ先端に近いところでは急激に上昇するが、セラミックスやガラスでは降伏強さが高く塑性変形が容易にはおこらないので、割れのごく近傍で応力が理想強度を超え原子間結合を断ち切ってしまう。この原子間結合の切断が次々におこると材料は劈開する。この過程において吸収されるエネルギー量は小さいので靱性  $G_c$  は小さい。

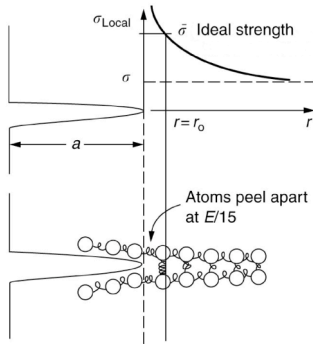


図 10 劈開による割れの進展.

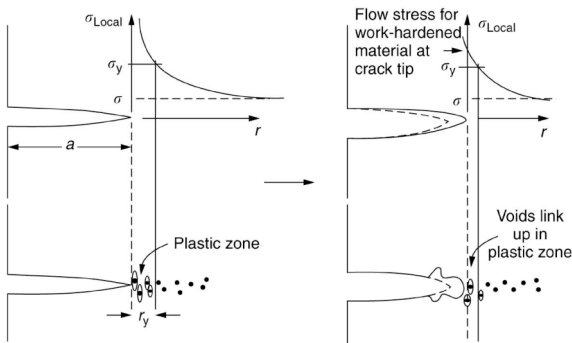


図 11 延性引き裂きによる割れの進展.

いっぽう靱性が高い金属材料においても荷重が十分に大きければ急速破壊は起こる。しかし破壊した金属材料の破面は平坦ではなく、かなりの塑性変形がおこったことを示す凹凸が観察される。金属の場合も割れの前方では式 (19) で表される応力集中が生じるが、セラミックスやガラスとは違って降伏強さが低いので、図 11 に示すように先端からある距離  $r_y$  で局所応力が降伏強さと等しくなっているとすると、その範囲では塑性変形がおこる。その結果、割れの先端の形状が鈍って応力集中の度合いは弱くなり、急激な進展はおこりにくくなる。それでも塑性域における転位の運動は続き、ついには割れの先端に空隙状の欠陥が累積して徐々にではあるが割れは進展する。このような機構は延性引き裂きと呼ばれる。この機構では塑性変形によって多くのエネルギーを吸収するので靱性  $G_c$  が大きく、破壊靱性  $K_{Ic}$  も大きくなる。

上の説明からわかるように、一般に降伏強さが高いと破壊靱性は低くなる。体心立方金属や最密六方遷移金属は低温では降伏強さが高くなり塑性変形しにくくなるので、上の機構に照らして考えると、そのような場合は塑性域が狭くなって延性引き裂きから劈開へと変わってゆくことになる。これが延性—脆性遷移と呼ばれる現象である。高強度材料は低温でいっそう脆くなる傾向があるが、遷移温度が室温付近になることもあるので使用温度に注意しなければならない。

### (5) 疲労破壊

荷重が常に変動したり周期的に加えられ続けたりすると、応力拡大係数が破壊靱性を超えなくても割れは徐々に進展

する。その機構は、引張応力が加わったときにわずかに割れの先端部分が開き、応力が除かれたとき（あるいは逆に圧縮応力が加えられたとき）に折り畳まれて割れの長さがわずかに増す。一回の成長距離はたとえナノメートル程度であっても、何千回あるいは何万回も繰り返されれば破壊の起点となる大きさになりうる。

最初から割れがある材料ではその進展の速さが問題になる。応力の条件は一定でも、割れが臨界条件を満たす大きさになると破壊がおこる。最初は割れない材料でも、負荷が多数回繰り返されると表面の小さな傷や応力が集中しやすい形状の部位から局所的に塑性変形がおこる。そこに転位によるすべり変形が集中してすべり帯ができると、表面に生ずる段差から割れが生じる。これらはいずれも応力の振幅が大きいほど速くなる。割れない材料では、応力振幅が降伏強さよりも小さいときは  $10^4$  サイクル以上耐久する。これを低ひずみ高サイクル疲労と呼ぶ。応力振幅が降伏強さよりも大きいときは、 $10^4$  サイクル未満で破壊する確率が高い。これは高ひずみ低サイクル疲労と呼ばれる。これらの現象にはそれぞれに経験則があり（バスキン則、コフィン—マンソン則）、疲労寿命の予測に役立つ。いっぽう割れがある材料においては割れの進展の速さに関する経験則（パリスの式）があり、応力振幅の大きさから寿命を予測することができる。

## 5. おわりに

強度と破壊に関しては本講で扱ったことから以外に高温材料の特性として重要なクリープ変形・クリープ破壊、あるいは機械工学で特に重要な摩擦・摩耗がある。それらも材料の「強さ」の重要な特性であるが、今回は構造用金属材料の常温での力学特性に絞ったので割愛した。それらに関しては下に挙げた専門書などを参考にさせていただきたい。

### 参考書

- [1] J.E. ゴードン (土井恒成訳)：「強さの秘密 —なぜあなたは床を突き抜けて落ちないか」, 丸善 (1999). (一般人向けの平易な解説)
- [2] 木村 宏:「材料強度の考え方」改訂版, アグネ技術センター (2002). (材料科学者のための専門書)
- [3] M.F. アシュビー, D.R.H. ジョーンズ (堀内, 大塚, 金子 共訳)：「材料工学入門—正しい材料選択のために—」増訂版, 内田老鶴圃 (1999). (工学者一般のための力学特性に関する入門書)
- [4] M.F. アシュビー, D.R.H. ジョーンズ (堀内, 金子, 大塚 共訳)：「材料工学—材料の理解と活用のために—」, 内田老鶴圃 (1989). (材料組織・特性・設計の入門的教科書)

\* 大阪府立大学教授, 大学院工学研究科 (〒599-8531 堺市中区学園町 1 番 1 号)