

工業技術院大阪工業技術試験所

山中 裕

### 機械的性質にもプロローグを

この拙稿は、一話ずつ読み切りとするために、ガラスの機能性による分類に従ってきた。しかし、そのための不都合や不自由があったことも否めない。今回の機械的性質もその例にもれず、熱的性質、化学的性質と本質的に深い結び付きがある。例えば熱膨脹という現象は、熱応力の発生という形で直接メカニカルな挙動と関連している。その熱膨脹には、線熱膨脹係数だけでなく、熱伝導度、比熱などを始めとする基本的な物性の多くが関与している。ガラス転移温度、結晶化温度は、レオロジー的挙動の変化、材質の変化などによって機械的性質の温度依存性として間接的な影響を及ぼしている。したがって、仕事や研究テーマが機械的性質と関係がないからといって、避けてばかりいることはできない。いずれにせよ、ガラスの性質として機械的性質が云々される場合は、欠点としての脆さが取り上げられることが多いのは事実である。

### 化学結合

機械的性質に入る前におさえておく必要があるのは、原子間の結合様式とその結合力である。化学結合には、金属結合、イオン結合、共有結合、ファンデルワールス結合などがあり、それらの中間的な結合もある。共有結合では結合に方向性があるといったように、それぞれの結合にはそれぞれの特徴がある。ガラス化しやすい代表であるシリカではSi-O結合がおおよそ半分ずつの共有結合性とイオン結合性をもった結合である。話はそれるが、ガラスは原子配列が長範囲において不規則で構造単位がある特定の方向には配向していない。結晶と比較して方向性がない、つまり結合角の分

布が広がるということは、適度な指向性を有する結合から成り立っている物質がガラス化しやすいと表現するのはあまりに独断的だろうか。

### 可逆変形と永久変形

刺激に対する応答という観点からは他の物性と同じであるが、見かけ上大きく異なるのは破壊を伴う場合が多い点であろう。一つの分類の仕方として、応答が可逆変化の場合と回復不能な変化の場合とに分けることができる。可逆変化は弾性論の領域で、ヤング率、剛性率、ポアソン比、光弾性定数、音の伝播速度などの物性がある。これらは機械的性質の中でも、ばらつきが小さくて他の物性と同程度のものが多い。定量的、理論的な取り扱いがしやすいのもこれらの物性である。永久変形を伴うものには、高温で重要となる粘性流動、量的にはわずかではあるが塑性変形、そして亀裂（クラック）の発生と進展などがある。永久変形を伴う場合は化学結合の切断や再配列が起こるわけだが、クラックや摩耗などにおいては他の物質との化学反応の影響も受けやすく、解析の複雑さの原因となっている。

### 試験の種類

何を調べたいかによって試験方法を変えるのはあたり前のことである。荷重にどれだけ持ちこたえられるかをみるには、引っ張り、圧縮、曲げなどの強度試験にかける。永久変形への抵抗の程度を知るには、ピッカーズ、ヌーブ、ロックウェルなどの硬さ試験を行う。周期的な荷重や長時間の荷重に対する振舞いを知りたい時は、疲労試験などの方法がある。衝撃試験、摩耗試験なども、実用面からは重要なデータである。材料の挙動を側面

から観察する手段として、フラクトグラフィー、アコースティック・エミッションなども使われている。統計データとしてではなく、個々の材料として評価するためには、X線や超音波などを用いた非破壊検査法が必要となる。これらのうちガラスへの適用が困難なものもあるが、ガラスはセラミックスの中では取扱いが容易なものといえる。

### 応力と歪

物体の内部で作用する力が応力と呼ばれている。外部からの直接の力あるいは外部刺激で引き起こされる力などによって、歪が生じる。応力と歪が比例する場合は弾性変形で、その比例定数が弾性率である。応力、歪とも3方向の面においてそれぞれ3方向への分解ができるテンソル量なので、弾性定数も行列で表現されるテンソル量となる。(図1) ただし、バルクのガラスのように立方体として扱える材料では、独立した変数は2つとなる。引張試験のモードで引張応力と伸びとの関係を示すヤング率、横のずれを引き起こすせん断応力とその方向の歪との関係を示す剛性率などが代表的な弾性率である。弾性率は原子間の結合ポテンシャルを直接に反映している。つまり、原子間の距離を変化させることは歪につながり、そのために要する力はポテンシャル曲線の傾きで表わされるからである。

### 結合の切断

原子間の結合が切れていくと、巨視的には割れていくことになる。結合を直接引き離そうとすると理論的には大きな力を必要とし、これが理論強度に相当する。新しく作ったガラスファイバーではかなり強い強度を示すが、実際の破壊強度は2桁以上小さい場合も少なくない。表面にきずがあると、切れ目を入れた紙を引っ張るのと同じようにきずの所に力が集中してかかり、結合の切断が起こりやすい。グリフィスは、既存の亀裂の成長に伴う表面エネルギーの増加と解放される弾性エネルギーのつり合いから、破壊に必要な応力を求めた。塑性変形がほとんど生じないうちにクラックが高速で伝播して起こる破壊は脆性破壊と呼ばれ、ガラスは典型的な脆性破壊を起こす(図2)。

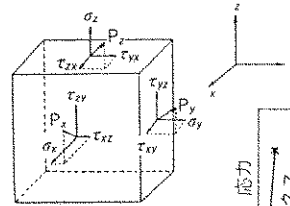


図1. 応力テンソルの成分

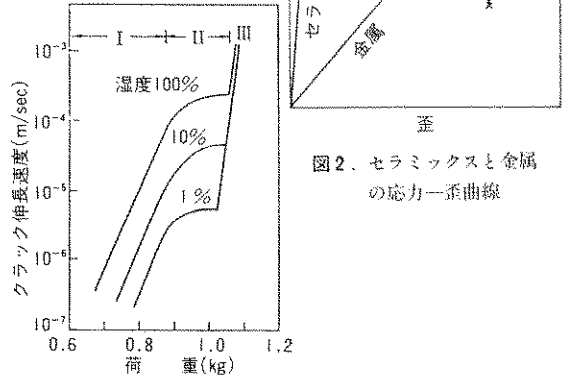


図2. セラミックスと金属の応力-歪曲線

図3. 窓ガラス中のクラック伸長速度と荷重の関係

破壊のもう一方の形式は延性破壊で、塑性変形が充分起こった後に生じ、クラックの伝播速度は遅い。また、ガラスなどでは破壊応力以下でも亀裂が成長することが知られており、スロー・クラック・グロースと呼ばれる。これには水分子との反応が関与しているといわれ、応力腐食速度が律速している段階、亀裂先端への水分の拡散速度が律速している段階、更に材料固有の内因的な要素が加わって急激な変化を示す段階に分けることができる。(図3)

### フラクトグラフィーによるエピローグ

破面を観察すると、破壊発生源を起点として破壊が起こっているのが認められる。その周辺部には平坦な同心円状の部分が広がり、ミラーと呼ばれる。その外側にはやや粗くてミスと呼ばれる部分があり、更にその外側のハックルと呼ばれる粗い部分へと続いていく。このような破断面の観察を行う技術がフラクトグラフィーであり、金属材料で長い歴史がある。どの物性でもいえることだが、特に機械的性質については他の材料のデータの蓄積と比較すると見劣りがする。