



# 形ある物、必ず壊れる

渋谷・井上・岸本研究室～機械知能システム学科



渋谷 壽一 教授(中央)  
井上 裕嗣 助教授(左) 岸本 喜久雄 教授(右)

一般に材料関係の研究をしている研究室というと、すぐに思い浮かぶのは2類、3類の学科にある研究室である。しかしながら4類や5類、6類の学科にも材料について研究しているところがある。今回取材した渋谷・井上・岸本研究室は機械知能システム学科に所属しているが、ここでは材料力学と呼ばれる観点から、材料について研究している。材料力学とは、なぜ物が壊れるかという視点を原点に、そこから派生する様々なことを取り扱う学問である。

それでは、これから材料力学が扱う研究の内容について紹介することにしよう。



## 物の壊れる仕組みを知る

まずは材料力学で重要な概念である応力の話しましょう。図1を見てほしい。ここでは、中身が詰まっている(つまり中身が空洞でない)断面積が一様な棒状の物体を、両側から力を加えて引っ張ることを考える。このとき引っ張る力をP、物体の断面積をAとすると、物体断面の単位面積あたりにP/Aの力がかかる。このように物体の中の単位面積当たりにかかる力を「応力」と言い、図

中では で表している。物が壊れるときのことを考えるには、どの部分にどの方向でどれくらいの応力がかかるのかを解析する必要がある。

それでは具体的に、図2のような椅子を作ることを例にして考えてみよう。この場合は椅子の脚部分を床に対して完全に垂直ではなく、少し斜めになるように作りたいとする。実際にこの椅子に人が座ったりして上から力が加わるときには、椅

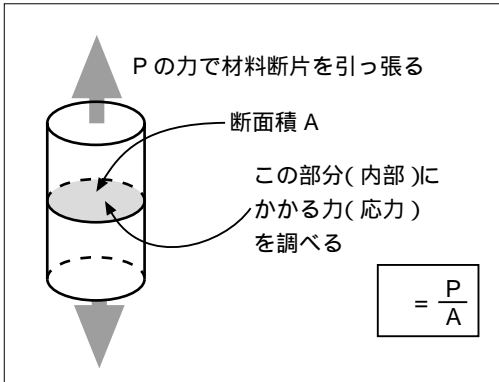


図1 応力の概念

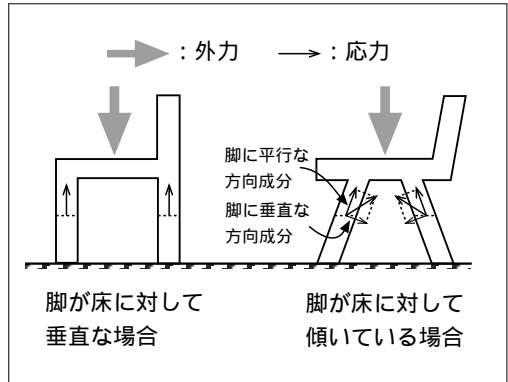


図2 椅子にかかる応力

子の脚には図のような応力が働くと考えられる。この応力の強さに対して足の素材強度が弱いと、椅子の足は折れてしまう。このように応力のかかり具合を調べるのが「応力解析」と呼ばれる分野である。実際に椅子を作る場合は、直感でも強度に問題のない物を作ることができる。なぜなら、椅子の構造は単純なので、脚を折れないように十分に太くして強度を保てば、それほど簡単に壊れるようなものにはならないからだ。しかし、これが飛行機を作る場合となると、簡単にはいかない。飛行機の場合は強度を保つため、単純に壁を厚くしたりすると、重すぎて飛べなくなるからだ。そこで、様々な応力に対して十分強度に余裕があって、且つ飛べるだけの軽さを持つ構造を知るために応力解析が必要なのである。

さて、いま紹介した応力解析の分野は、「理論応力解析」と「実験応力解析」の二つのものに分けることができる。理論応力解析とは、文字通り応力を数式・計算等によって理論的に解析するものである。実際の応力の計算は、図1で紹介したような単純な計算ではなくもっと高度で複雑な数式・計算を要するため、ここでは省略させてもらう。

また、応力を理論的に求めるとはいても、複雑な構造をしたものの応力を求めるのは困難を極める。例えば図3のように板に穴があいただけのものでも、図の斜線部分の応力を理論的に計算で求めるのは難しい。なぜなら応力を求める部分の断面積が均一でないからだ。そこで、その応力を求めるため図1と同様に板を引っ張って調べる必要がある。このように実験から応力を求めるのが、実験応力解析である。実験のための応力測定方法も材料力学における研究テーマの一つで、渋谷・

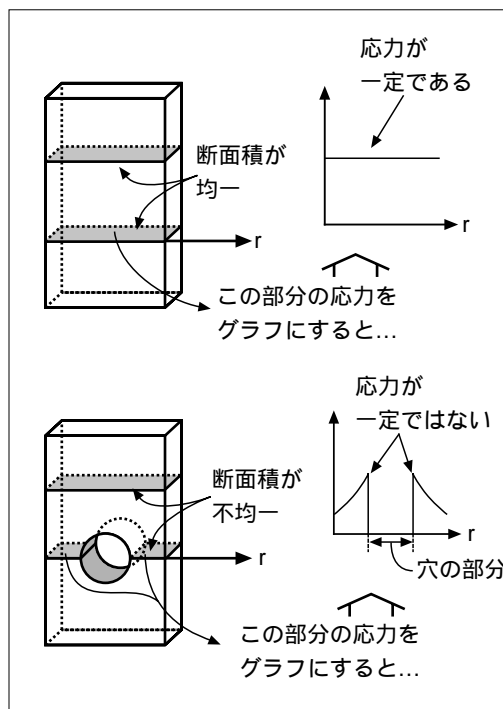


図3 断面積が不均一な物体の応力解析

井上・岸本研究室では赤外線カメラを使用する方法を研究している。具体的には、材料を引っ張った時の温度変化を赤外線カメラで測定することで、応力を求める。その原理は、断熱膨張における固体の物理的な性質を利用するものである。気体と同様に固体(材料)も断熱膨張すると温度が下がり、断熱圧縮すると温度が上がる。応力が大きいと温度の変化も大きいので、温度を測定することで応力を調べることができる。しかし、単純に赤外線カメラで撮ったデータでは使いものにはならない。どのように解析すれば使えるデータになるのかを、ここでは研究しているのである。

さらに材料力学には、材料の強度を評価する分野もある。物を作るときにはあらかじめ種々の材料の強度を知っていなければ、その部分に見合う強度の材料を使用することが出来ない。そこで材料の強度を調べるため、とりあえず様々な材料を図1のようにして引っ張ってみる。材料の元々の長さを  $L$ 、引っ張って伸びた長さを  $L'$  とすると、 $L'/L$  を歪みと言い、 $\epsilon$  で表す。この歪みと応力  $\sigma$  の関係を調べるとおおよそ図4のようになる。ほとんどの材料で応力  $\sigma$  と歪み  $\epsilon$  の関係は初めは比

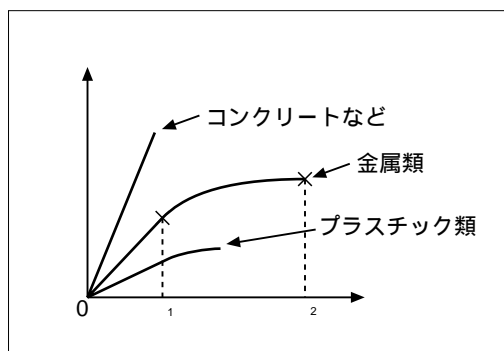


図4 材料に働く応力 と歪み の関係

例関係にある(0 ~ 1)が、ある程度 が大きくなると比例関係ではなくなり(1 ~ 2)、最後はち切れてしまう(2)。実際に材料を使う場合は、それらの材料のPと の関係を、具体的な数値で知る必要がある。そのために材料の強度を調べるのが「材料強度の評価」の分野なのである。

その他に「材料の非破壊検査」という研究分野もある。これは実際に運用している物に使われている材料の強度を、超音波などを使用して検査するものである。検査の対象となる物は、飛行機や建築物など大きな物もあるので、単純に超音波を

使えばいいといっても、効率よく行わなければ検査だけで膨大な時間がかかってしまう。それでは困るので、どうすれば効率よく検査を行うことができるのか等を研究するのが、この「材料の非破壊検査」の分野である。

このように材料力学は様々なことを取り扱っており、ここ渋谷・井上・岸本研究室も例外ではない。それらの具体的な研究内容を全て紹介することは出来ないので、今回は最近もっとも材料技術の進歩のめざましい、ノートパソコンの筐体きょうたいと中身の材料技術について紹介していこう。

## 「安くて強い」材料を目指して

数年前までは、ノートパソコンの筐体にはABS樹脂が使われていた。このABS樹脂という材料は知っている人も多いだろう。最近では、ほとんどの家庭電化製品の筐体にABS樹脂が使われている。ABS樹脂はアクリロニトリルとスチレンの重合体であるAS樹脂に、ブタジエンゴムを混ぜて作った樹脂である。AS樹脂は強いのだが、それだけではある程度力を加えるとパキッと割れてしまう脆もろさも持った樹脂である。だが、それに直径数μmのブタジエンゴム粒子を加えると、力を加えても簡単には割れにくい靱性じんせい(注)とAS樹脂と同程度の強さを併せ持ったABS樹脂が出来上がる。ABS樹脂の強度はAS樹脂とブタジエンゴム粒子の混合割合で変わってくるが、ではなぜAS樹脂にブタジエンゴム粒子を加えるだけで割れにくくなるのだろうか。図5を見てほしい。これはABS樹脂の顕微鏡写真を概形的に描いたものである。一般にプラスチック素材中には小さな亀裂

(クレーズ)が入っていて、そのクレーズが一つに繋がるとパキッと割れてしまう。普通のプラスチック素材の場合は、クレーズが比較的容易に大きくなりやすい。そのために素早くクレーズが繋がって割れやすくなる。しかし、ここでゴムの粒を入れると、小さなクレーズが出来易くなる。一見これでも割れ易いように思えるが、たくさんの小さなクレーズが出来ると、それらが衝撃を吸収して大きな亀裂には発展せず、その結果割れにくくなる。つまり、ABS樹脂は細かい傷がたくさん出来るから割れにくくなるのであって、混合したゴムの柔軟性によって割れにくくなるのではない。また、どのプラスチック素材でもゴムの粒子を入れれば良いというわけではない。この二つの材料は相性が良かったので、AS樹脂とブタジエンが結合して樹脂とゴム粒子とが剥がれにくいようになっている。またAS樹脂もブタジエンゴムも、価格が比較的安い。そのためABS樹脂は安くて強い素材となり、多くの場で使われる地位を得たのである。このように、なぜABS樹脂が靱性と強度を併せ持っているのかを調べるのも、材料力学の研究分野である。

また、近年ではABS樹脂にポリカーボネートを混合したPC/ABS樹脂という素材が登場している。ポリカーボネートは耐衝撃性に優れていて、バイクのヘルメットのシールドや機動隊の盾などに使用されているが、価格が非常に高く全ての家電製品の筐体などに使用することはできない。そこで二種類の材料を混合したPC/ABS樹脂を用いれば、ABS樹脂よりもさらに衝撃に強く、ポリカーボネ

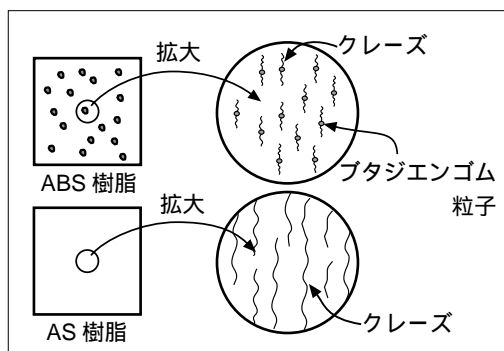


図5 ABS樹脂、AS樹脂の拡大図

ートよりも価格が安くできる。二種類の樹脂を上手く混ぜ合わせると互いの長所を兼ね備えた樹脂が出来る。そういった材料において、最高の強度を得るための最適な混合割合を研究したり、実際に製品に使える価格になるように強度と混合割合のバランスを研究したりするのも材料力学の重要なテーマである。

## 電子回路の強度問題

次にノートパソコンの中身である、基盤やLSI・ICなどの電子部品の材料強度の研究について見てみよう。

現在、工業的に基盤へLSI・IC等の部品をハンダ付けさせる方法は、部品を基盤の表面でハンダ付けする「表面実装」と呼ばれる方式が採られている。表面実装はプリント基盤と部品の間にボール状のハンダを接着させておいて、ハンダの融点(200~250)まで全体を加熱して部品のハンダ付けを行う方法である。この方法は主に生産効率が高いという利点があるため、工業生産の現場で使われているが、一つの大きな欠点を持っている。それはハンダ付け(加熱)の後で冷却するときに、材料の膨張率の違いから部品やハンダに無理な力がかかって壊れてしまう危険性があることだ。最近の材料研究ではこれら電子部品に関する研究が盛んで、ここ渋谷・井上・岸本研究室でも次に紹介する封止樹脂(LSI・ICなど、集積回路のシリコン部分を保護するための外装に使われている樹脂)とハンダに関する研究が行われている。

封止樹脂はエポキシ樹脂とシリカ(二酸化ケイ素)を、約3:7の割合で混ぜた材料で作られて

(注)「靱性(toughness)」は、「ねばり強さ」の尺度であり、「強度(strength)」とは違う。

ABS樹脂もAS樹脂も強度は大きいですが、ABS樹脂は靱性が大きいのに対してAS樹脂は靱性が小さい。

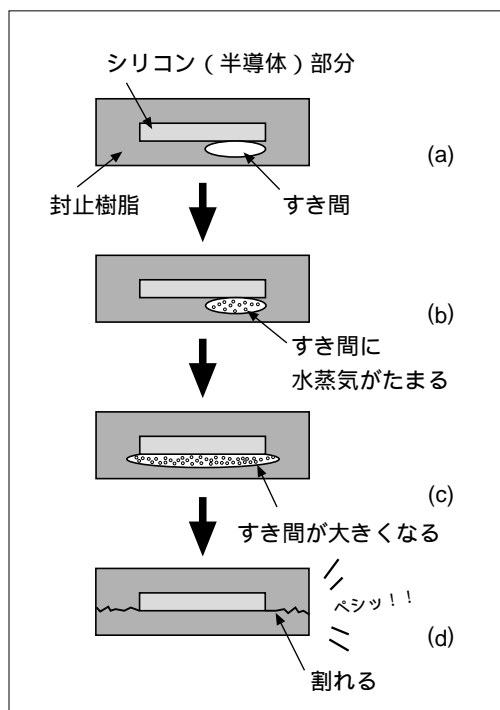


図6 封止樹脂が破壊される様子

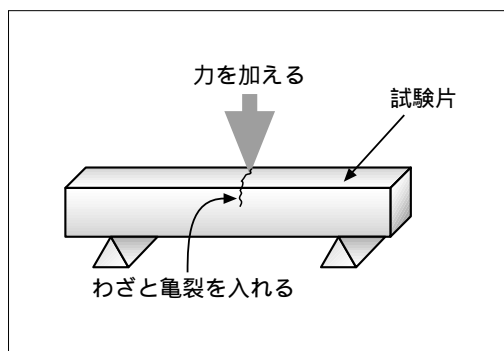


図7 封止樹脂に関する実験

いる。エポキシ樹脂はプラスチック素材なので熱による膨張率大きい。シリカを使わずにエポキシ樹脂だけで封止すると、実装行程時の温度の変化で膨張率の違いで中のシリコン(集積回路)部分と外のエポキシ部分が剥がれてしまう。それを防ぐために、熱膨張の小さいシリカとエポキシ樹脂を混合した材料で作られている。このようにして熱膨張を少なくしてある封止樹脂だが、それでも実装行程時に問題が生じている。それはエポキシ樹脂が、水を吸収しやすい材料であることから生じる。仮に図6-(a)のように部品の中に小さな隙間があったとすると、液体として吸収されて

いた水分が加熱(実装行程)時に気体となって膨張する(b)。そして行き場のない水蒸気が、この隙間に入り込む(c)。そこに力がかかり、一気に樹脂が剥がれて壊れてしまう(d)。この封止樹脂にどのように亀裂が入って壊れるのかを、渋谷・井上・岸本研究室では図7のように人工的に亀裂を入れて調べている。このとき、初めに入れた亀裂がどのように進むかで靱性が分かる。したがって、試験片を様々に変えて実験を繰り返して、最適な材料の混合割合などについて調査する。また最近では、集積回路の小型化がより一層進んでいる。そのために封止樹脂も薄くなる必要があり、現在の半導体産業ではより高性能な封止樹脂が求められているのである。

さて、最後にハンダに関する強度の研究についてみてみよう。封止樹脂と同様にハンダも、実装行程時の温度変化で各材料の膨張率の違いから、基盤や部品から剥がれてしまうことがある。このような破壊がどのような過程を経て起こるのか。それを渋谷・井上・岸本研究室では図8のような試験片をハンダ付けして、せん断したり引っ張ったりすることで強度を調査したり、更には破壊面を顕微鏡で観察したりしている。具体的な例を挙げると、試験片を金メッキした後ハンダ付けしたものや時間を経過させたものなどで、先ほど例に挙

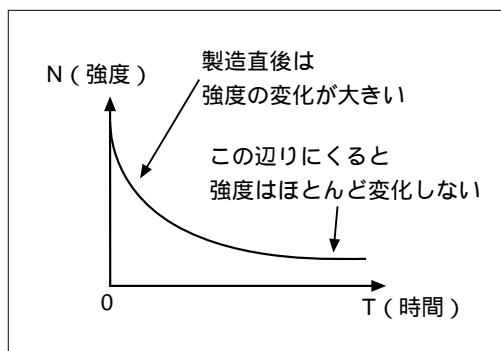


図9 材料の強度変化

材料研究は実に様々なことを取り上げているため、紙面の都合で紹介することのできない事もたくさんありました。一つの研究室ですら、それほどたくさんの事を扱っている材料研究というものに、物を作ることの根本を改めて感じさせられま

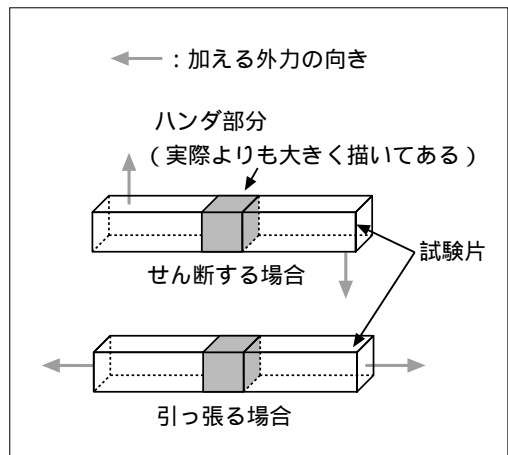


図8 ハンダに関する実験

げたような強度試験をして、様々な調査を行っている。これまでの実験により、ハンダ付け部分を金メッキしたものは、強度が増すことは分かった。しかし部品を実装するときには、何でもかんでもメッキすればよいかというとそうではない。メッキするという行程があると、それだけ余計にコストがかかるからだ。メッキをした場合にどれくらい強度が増すのかということ进行调查しておくことで、構造上必要な部分だけメッキをして製造コストを押さえることが実現できるのである。

同様に、時間経過に伴う強度の変化を調べるのも、実際に商品を作るときに関わってくる問題である。それはハンダに限らず、あらゆる材料に言えることで、一般に材料の強度と製造されてからの時間の関係は図9のようになる。材料の強度は製造直後が一番大きい。だが、その強度だけを参考にして物を作ると、時間が少し経つだけですぐに壊れてしまう。それでは何の役にも立たない。また、実際に製品を作る企業側の立場では商品の保証問題まで考えなくてはならないから、ハンダや封止樹脂に限らず、時間経過と材料強度を調べるのは重要なことである。

した。

最後になりましたが、お忙しい中多数で押し掛けした我々に、丁寧に應對して下さいました井上先生に感謝の意を表しつつ、筆を置きたいと思ひます。

(伊佐地 瑞基)