〔連載講座〕子供では分からない優しい科学

第2回　「強い」と「弱い」（1）

私たちが何かを作ろうとするとき、必要に応じて強く固い材料を選んだり、弱く柔らかい材料を選択したりします。この「強い」「固い」「弱い」「柔らかい」というのは形容詞で、他の材料と比較したときの相対的表現であり、学問的基準があるわけではありません。我々が住まう一般住宅ならば木造で十分「強い」のですが、これで高層ビルは建たないのです。必要な「強さ」を算定する基準が必要です。ある材料の持つ「強い」とか「弱い」とか云う性質を「機械的性質」と呼びます（他に、物理的性質と化学的性質があります）。機械的性質の基本は「強さ」または「強度」と呼ばれるものです。「弱さ」の基準はありません。弱いとは強くないことなのです。先ず、「強さ」の話しからです。

2.1　力と応力

「強い」とは、ある物体に「力（パワーまたはフォース）」が加わったとき、その物体が「変形」し難いことを云います。どんな物体でも力が加えられると変形します。程度の差があるだけです。これは是非、覚えておく必要があります。

次に、「力」とは物体に加えられる「荷重（重さ：ウェイト）」のことですが、荷重が加えられたときにそれを支えるものがなければ、重力と荷重とによってその物体は動いてしまい、結局のところその物体に力の加わることはありません。動かずにじっとしていて、それにある荷重が加わっているとは、その荷重を支えている何かが存在すると云うことです。たとえば、机の上に物が乗せてあり、それに荷重を加えても、机がその全体を支えている、ということです。このとき、物の存在にのみ注目して机の存在を無視してしまうと、机から、上に乗った物の重さと加えられた荷重に見合うだけの「力」が、荷重の掛かっている方向とは反対方向に加わっていると見なすことができます。ある物に外部から加えられる力を「外力」、外力によって物体内部に生じた動かないように支えている反対方向の力を「反力」と云います（机の存在は無視しています）。外力と反力が釣り合っているので、そのものは動かないのです。これを「応力状態」にあるといいます。

応力状態にあるというのは極めて重要です。たとえば、車を動かすとします。エンジンを始動した状態は車に外力が加わった状態です。すぐに動かないのは、ブレーキがそれを止めているか、車輪に伝わった外力をタイヤと道路の摩擦が支えているからです。ブレーキや道路から車に加わる力が反力で、方向はエンジンの力とは反対です。エンジンの出力

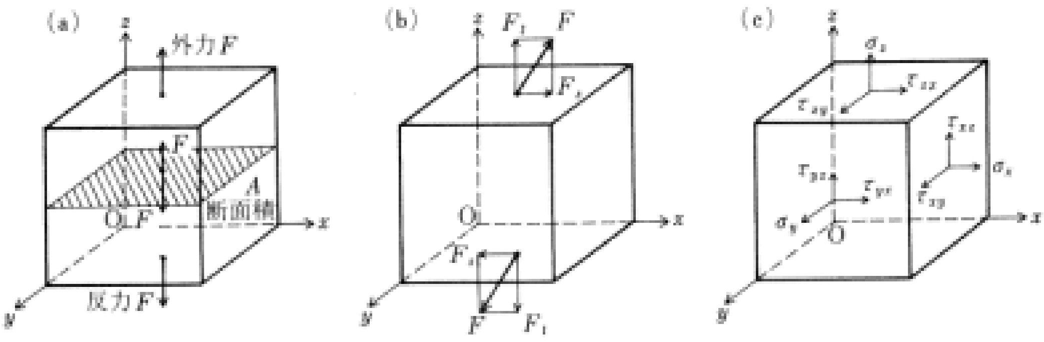
が勝ると車は前に、道路は後ろに動くのです。飛行機は空気を強力に後ろに排出し、その反力で空を飛ぶのです。したがって、反力がなければ物は動きません。宇宙空間では、飛行士がいくら一生懸命宇宙船を押しても、宇宙船はびくともしません。なぜなら、宇宙船を押そうとした飛行士にはそれに見合う反力が宇宙船から加わり、その反力を支える物が飛行士にはないからです。結局、反力を支えるものがない故に（この場合だと、反力の反力になりますが）、外力も加えることはできないと云うことになるのです。ただし、自殺を覚悟すれば話は別です。無理に押せばその反動で飛行士は宇宙空間に飛び去ってしまいます。宇宙船は飛行士と宇宙船の重さの比に依存してゆっくりと反対方向に動きます。これは、外力と反力と云うより、エネルギーの問題です。

さて、ある物体に力を加えたとき、その物体に現れる影響の程度は、たとえばその物体の大きさによって異なります。外力や反力はその物体全体に加わった力を意味しますが、その影響の程度を表すには「応力（ストレス）」というものを定義する必要があります。「応力」は、加えられた外力をその物質の断面積で割った値で定義します。こうすることで、ある範囲に加わった力の影響として、その程度を明確にすることができるからです。ある大きさの物体にある力が加わったとき、その影響は２倍の大きさのものに２倍の力が加わったときと全く同じ、というように比較できるようになります。数学的に表すと**(1)**式のようです。

$$\sigma = \frac{\boldsymbol{F}}{\boldsymbol{A}} \qquad (1)$$

A が物体の断面積、F が加えられた外力、σ（シグマ）が応力です。こうして、加えた「力」と、その影響の程度「応力」が決まります。

上記の関係を図に示したのが**図１**です。図１(a)は、断面積 A の物体に F なる外力が垂直方向に働いた場合を示しています。外力はどの断面にも等しく働き、全体に伝わって反力 F を生みます。ただし、この物体は全体が均質なものであると考えるのが大前提です。また、我々が住む世界は三次元世界ですから、直交する３軸 x、y、z で表すのも基本です（別のやり方をしても結果は同じです）。図１(b)は外力が傾いて働く場合です（x と z 軸に対して傾いており、y 軸には直交している場合）。中学の理科で習ったはずです。「力の合成と分解」の問題で、F は Fs と Ft の２つの成分に分けることができ、x 軸の方向に Fs という外力が､z 軸の方向に Ft と云う外力が同時に働いていると考えることができます。図１(c)は一般化した応力（F を A で割っている）の状態を表しています。任意の方向に外力が働いた場合には、x、y、z の３方向に力（応力）を分解できますから、σx、σy、σz、



（a） 引張応力 $\sigma=F/A$　（b） 引張応力 $\sigma=F_t/A$ 剪断応力 $\tau=F_s/A$　（c） 任意方向の応力成分は９つよりなる．ただし，$\tau_{ij}=\tau_{ji}$．

図１　力と応力の関係

τxy、τxz、τyx、τyz、τzx、τzy という合計９つの成分に分解できます。このうち、σx、σy、σz は図１(a)(b)の延長線で分かりやすいでしょう。この立方体の各面を垂直に押したり引っ張ったりする応力です。この立方体が動かないとするとそれぞれに同じ大きさの反力があり、釣り合っています。残りの６つはやや異なります。たとえば、上面に働いているτxy という応力は、この立方体の上面を *y* 方向に押して、菱形につぶそうとしています。下面には反対方向の反力（τyx）が生じているはずですから、押しつぶすだけでなく回転させようとする力も働きます。これを「回転偶力」といいますが、回転してはマズイので、回転しようとする力を無くすにはτxy＝τyx でなければなりません。同様にτxz＝τzx、τyz＝τzy です。結局３つは省略でき、都合６つの成分で全ての応力状態を表すことができます。

なお、σ*x*、σy、σz は作用する面に垂直な力で、引っ張ったり圧縮したりする力です。前者を「引張り応力」、後者を「圧縮応力」といいます。記号としてはσを使うのが一般的で、これに方向を表すサフィックスを付けます（働く方向と平行な軸記号を付けます。残りの２軸とは直交しています）。残りの３つは、菱形に押しつぶそうとします。重ねた紙をずらすような感じです。これを「剪断」と云います。記号はτ（タウ）を使います。サフィックスはずらそうとする面方向を付けるのが普通です（当然ですが x、y、z のうちの２つが必要です）。σもτも、働き方は違いますが、ともに応力です。

応力には身近で重要なもう一つのものがあります。水の中で感じるような、周りから押されるような応力で、「静水圧応力」と云います。周りから等しい力を受ける状態です。水中だとなぜ周りから（上下だけでなく、左右前後からも）力を受けるかと云えば、液体はそれを構成する原子または分子の集合体ですが、ある原子や分子が受けた力は、その周

りにある全ての原子や分子に等しく伝える性質を持っているからです。それ故、液体の中にある物体には周りから等しい力が働くのです。空気のような気体中でも基本的には同様なのですが（気体と液体を併せ、自由に形状を変えられる物を「流体」と云います）、原子や分子の集まり方が液体に比べて圧倒的に希薄なので、加えた力に比べて周りからの力が非常に弱く、目立たないだけなのです。

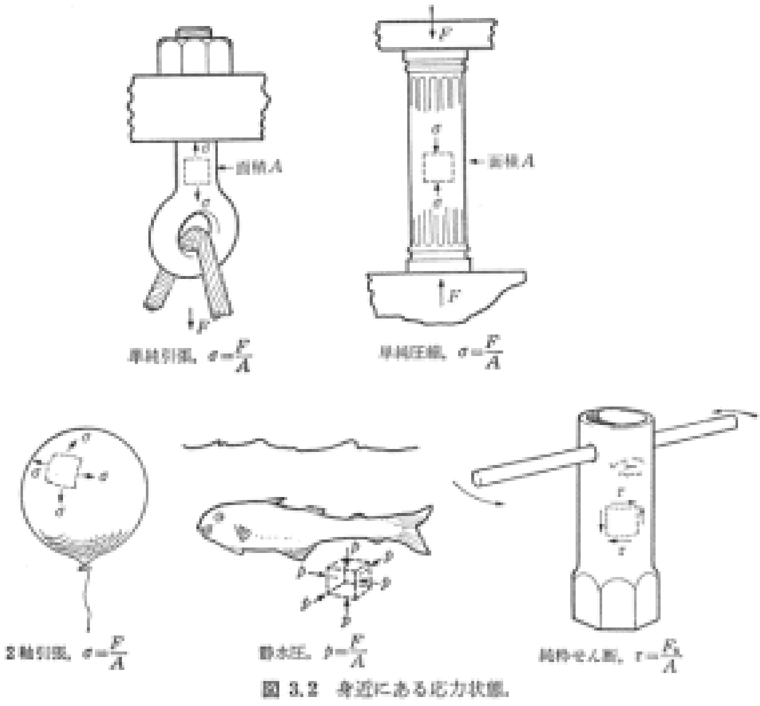


図２　身近にある応力状態

我々の身近で出会う代表的な応力状態を図２に模式化して示します（M. F. Ashby and D. R. H. Jones : Engineering Materials、Pergamon Press、(1980)。（材料工学入門：堀内　良、金子純一、大塚正久訳、内田老鶴圃、(1985)。）による）。フックに紐をかけて荷重をぶら下げるような場合、１方向に引っ張るだけですから１つのσ応力成分しか出てきません。「単純引張」です。断面積は支えるフックの断面積です。柱に重しのかかる場合は「単純圧縮」になります。風船を膨らませたような場合は、風船の厚みを無視すると、薄い表面に二次元の均等な応力σが働きます。「２軸引張」です。断面積は風船の表面積になります。ただし、吹き口を縛ってあるような不均一さは無視しています。水の中にいる魚などには周りから同じ圧力、静水圧がかかっています。σ成分だけがあり、τ成分はありません。ネジをレンチでねじるような場合、均等なねじり成分だけが存在します。τ１成分だけで、断面積はネジの断面積になります（純粋剪断または単純剪断といいます）。これらは特別に単純な状態ですが、複雑な状態もこれらの単純な応力の組み合わせに過ぎません。そう思えば、怖がることはありません。

2.2　歪み

「応力」とは様々な状態を互いに比較するために断面積で割るという手法で規格化したもので、単純には働く力と思って差し支えありません。力が働くとあらゆる物質は必ずゆがみます（学問的に云えば、例外はありません）。このゆがみを「歪み」（単に「歪」と

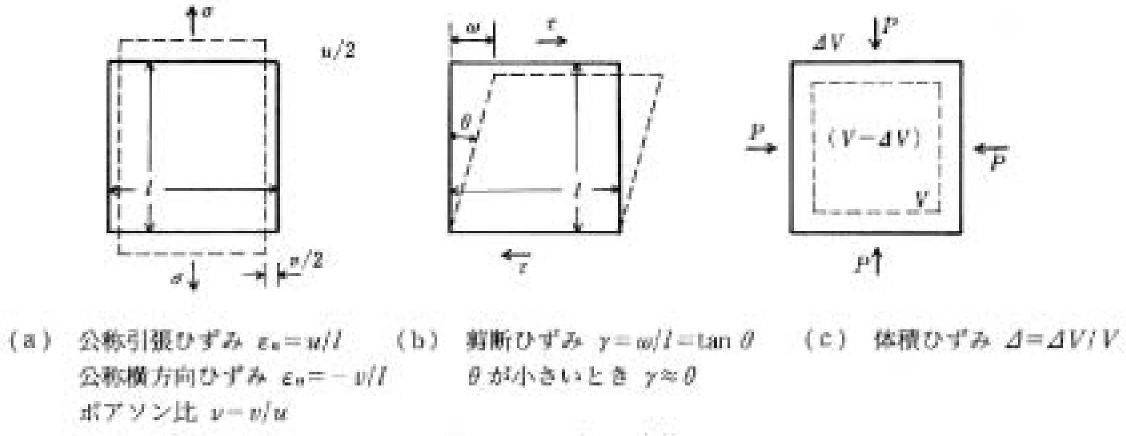


図３　歪みの定義

書くこともあります）といいます。図で描くと図３のようです。たとえば、図３(a)の実線で表された立方体に単純引張応力σが働き、*u* だけ伸びて破線のようになったとします。このときの「歪み」はε（イプシロン）で表し、

$$\varepsilon_n = -\frac{u}{l} \qquad (2)$$

と定義されます。縦が伸びれば横は縮むはずです。その縮みを *v* とすると、横方向では

$$\varepsilon_n = -\frac{v}{l} \qquad (3)$$

の歪みが生じます。±の符号は歪む方向の違いです。また、図では歪みをε*n* と記していますが、この *n* は normal（公称）の略で、付けなくてもかまいません。縦が伸びれば横は縮みます。その比をポアソンと呼び、ν（ニュー）で表します。

$$\nu = -\frac{(\text{横方向歪})}{(\text{引張歪})} \qquad (4)$$

ポアソン比は縦方向の伸びに対する横方向の縮みの比ですから、変形しても体積は変わらないとすると、ν＝0.47 程度になります。ところが実際には、たとえば多くの金属体では、ν＝0.3 程度なのです。このことは、横方向の縮みは思ったほどには縮まない、すなわち、僅かながら体積が増えることになるのです。ちょっと気付かない面白い性質です。最も、物質によってかなり変わります。

図３(b)は剪断応力が働いたときの歪みです。剪断応力によって横にωだけづれたとすると、歪みγは

$$\gamma = \frac{\omega}{l} = \tan\theta \qquad (5)$$

となります。γ（ガンマ）を剪断歪み、θ（シータ）を剪断角と云います。歪みが小さければ、γ＝θです（数学的に近似できるのです）。静水圧の場合には体積歪と呼ばれる体積変化を生じます。物体の体積を V、体積変化量を ΔV とすると、体積歪 Δ（デルタ）は、

$$\Delta = \frac{\Delta V}{V} \qquad (6)$$

です。

（2007.2.5）