

# 〔連載講座〕子供では分からない優しい科学

## 第3回 「強い」と「弱い」(2)

前回、「応力」と「歪み」を定義しました。極めて学問的です。しかし、基礎の基礎ですから、「応力」とは加えられた力を作用する断面積で割ることにより標準化した、作用する力の方向を含めた単位、「歪み」とは、それによる変形の程度と知っておくことは重要です。

このことを知ると、次に重要で実用的なのは、加えられた力とそれにより生じる歪みとはどのような関係にあるか、です。同じような力を加えても、簡単に”ぐにやり”と曲がるものもあれば、ビクともしないものもあるのは日常経験する通りです。この違いが何処にあるのかを知ることは、物を利用する上では極めて重要です。

### 2.3 フックの法則

フックの法則（この法則を発見した英の物理学者ロバート・フックの名前に由来する）とは、「歪みが小さい場合には多くの材料について、生じる歪みはほぼ加えられた応力に比例する」という経験則（理論的に導かれた物ではなく、経験上で見出された法則）です。たとえば、引張歪は引張応力に比例し、単純引張では、

$$\sigma = E \varepsilon_n \quad (7)$$

と表すことができます。Eは弾性定数と呼ばれる応力と歪みとの間の比例係数で、(7)式の場合には(縦)弾性係数またはヤング率と呼ばれています。

同じ関係は単純圧縮や静水圧などでも成立します。その時の比例係数の記号や呼び名はそれぞれの場合で異なりますが、中身は同じです。必要な場合に調べればよいのですが、是非とも覚えておく必要があるのは、「歪みが小さい場合には、応力と歪みは比例関係にあり、その比例係数を弾性係数という。この関係をフックの法則という」ということです。単純引張りの場合にはその係数をヤング率（英の科学者トマス・ヤングに由来する）といいますが、この用語はしばしば登場しますのでこれも知っておくべきです。

さて、こうした応力と歪みの比例関係は、様々な構造物や物体に力が加わったとき、どのように歪むかを知るには非常に便利です。ただ、重要な注意事項は、多くの場合、固体はごく僅かな歪みの範囲内（歪み 0.001 程度、(2)式の歪みに関する定義式から分かるように、歪みは歪んだ量を元の量で割った値ですから、分子と分母で長さの単位が消滅し、

単位のないただの数字だけになります。数学的にはこれを無銘数といいます。すなわち、歪みの率にして 0.1%程度までの範囲でのみ比例関係にあるということに十分注意しておく必要があります。こうした状態にある様子を、弾性定数を比例係数とした比例関係にあることから「弾性的」であるといいます。

弾性的な範囲内では、もちろん、力を除去すれば歪みも元に戻ります。弾性的な範囲を超えると、違った様相が現れてきます。ある場合にはその材料が壊れてしまいます（破壊といいます）。ある場合には、力を除去しても形が元には戻らない変形（塑性変形といいます）が現れてきます。これらは、応力と歪みの関係が比例範囲を超えたときに起こる別の現象に起因するものですが、これは後の話です。

ゴムは歪み 4 あるいは 5 程度まで弾性変形をします（元の長さの 4 ~ 5 倍程度までは、力を除けば元に戻ります）。しかし、歪みが 0.01 程度を越えると、応力と歪みの関係は比例しくなくなります。すなわち、フックの法則は成り立たないのです。たとえば、輪ゴムの両端を持って引き延ばすと、最初のうちは簡単に伸びていきますが、途中からは中々伸びなくなります。日常容易に経験できるフックの法則の成り立たない弾性現象です。

力を加えられた物体がどのように形を変えるか（変形するか）は、材料によって様相が相当に異なります。そして、実用上も大きな意味を持っています。詳しくは後述しますが、高層ビル建築の基礎となる鉄骨は、弾性範囲の変形に留まるように設計されます。そうしないとビルが徐々に歪んで、ついには倒れてしまうからです。自動車のバンパーのような安全装備には、大きな力が加わると壊れてしまうような設計も必要になります。壊れることによって衝撃を吸収し、乗っている人間を保護するからです。大きな振動や騒音を抑えるのにゴムのような軟らかい材料を間に挟んだりした下に敷いたりすることがよくあります。変形に伴って起きる現象を巧みに利用し、振動や騒音を違った形に変えて静寂さを保つのに役立っているのです。力を加えたときに何がどのように起きるか、それは物を作ったり利用したりするときの最も重要な基礎の一つです。

## 2.4 「強さ」を測る

既に述べたように、全ての物質は応力を加えると歪みを生じます。フックの法則で示されるように、最初のうちは応力を除くと歪みもなくなります。フックの法則は経験則ですが、歪みを小さな範囲に限定すれば科学的真実です。こうした変化を弾性変形といいます。逆にいえば、全ての物質はそれを越えると何かが起きる弾性限があることになります。弾性限を越えると突発的に、あるいは徐々に破断する場合があります、この種の挙動を示す場合を脆性的（塑性的に対応する用語で、相対的なものです）であるといいます。しかし、大部

分の材料はこれとは異なる塑性的な挙動を示します。すなわち、弾性限を越えても、破断が起きる前に永久的な形状変化を生じるのです。すなわち、加重を除去しても完全には元の戻らず、永久的に曲がったり伸びたりするのです。これを塑性変形といいます。

ここに出てくる用語は覚えておく必要があります。詳細はさらに細かな解説を要しますが、こうした用語は基礎の基礎として広く何気なく使われているからです。また、材料や構造物を安全かつ信頼性高く使用するためには、材料によって異なるこうした基本的性質を知ることが非常に大切だからでもあります。

### 2.4.1 弾性変形

まず、弾性変形とはどのようなものかを簡単に示しておきます。図4 (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) ) に示すように、たとえばある材料を上下に引っ張ったときには、縦軸に引っ張る力(前述のように、普通は断面積で割って標準化した応力を採ります)を、横軸には変形の程度、すなわち歪みを取れば、最初のうちは原点を通る直線的な変化をします。加えられた力に比例して歪みが生じ、力を除くと元に戻るのです。これが弾性変形です。

フックの法則の関係式(7式)から、この直線の勾配は弾性率を表します。図4では、三角形に斜線が引かれていますが、ある範囲での直線が囲む面積はそうした力が加わったとき、あるいは、歪みが与えられたときに、その材料の中に蓄えられるエネルギーの大きさを表すのですが、ここでは説明を省略しておきます。

図4は直線的に変化する弾性(故に、線形弾性といいます)ですが、上述したゴムのよ

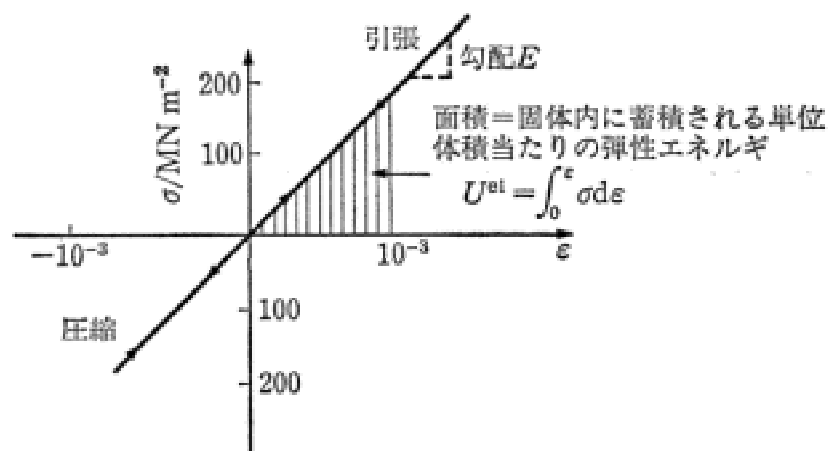


図4 線形弾性の模式図

うにちょっと違った弾性もあります。ゴムは図5のような変化をします。力と歪みの関係が比例していないのです。したがって非線形弾性といいますが、それでも、力を除くと完全に元に戻ります。これも弾性の一種です。弾性の定義は、「力と歪みの関係が、原点を通る可逆的な変化をする変形」ということなのです。

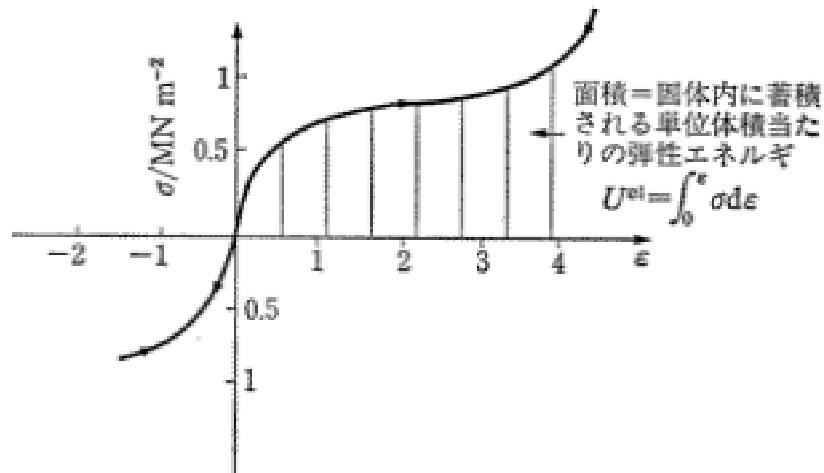


図5 非線形弾性の模式図

弾性の定義を上記のようにすると、図6のような弾性もあることとなります。すなわち、行きと帰りでループを描くような場合です。力を除けば完全に元に戻るのですが、図4で示したように、ある変化によって蓄えられるエネルギーはその変化の下側の面積に相当しますから、図6の場合には、行きと帰りでその材料中のエネルギーが異なることとなります。力を除いていった場合の方が内部のエネルギーが小さいのです。エネルギーのことについては後日改めて述べますが、熱力学の第一法則「エネルギー保存の法則」としてよく知られるように、外部とのエネルギーの遣り取りがなければエネ

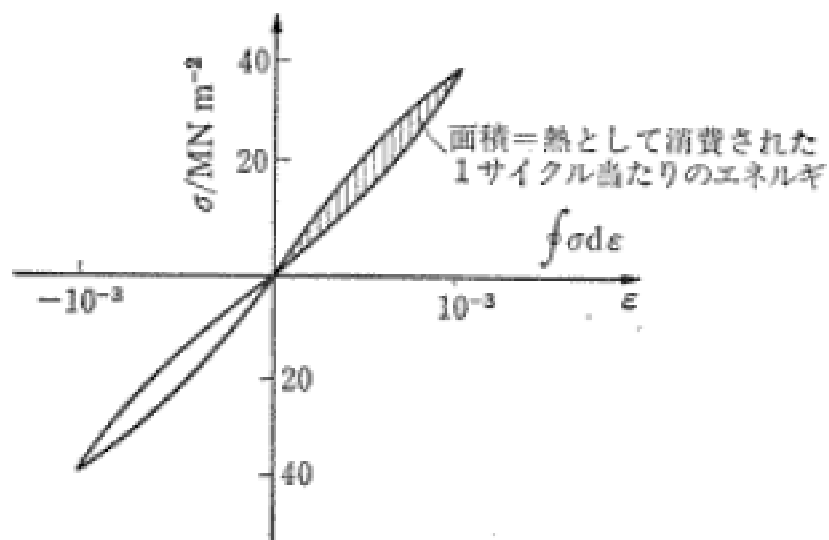


図6 擬弾性の模式図

ルギーは一定に保たれるはずですが、図6では力を加えていくときに蓄えられたエネルギーの一部は力を除いても材料中に留まっていることになります(図の斜線部分)。この留まったエネルギーは通常、熱エネルギーとして消費されます。材料が少し暖まることになるのです。単なる伸び縮みだけでなく、エネルギー消費を伴っていますので、こうした挙動を擬弾性と呼んでいます。

擬弾性は実用上重要な性質の一つです。擬弾性は力が加わったり除かれたりするたびに、一部のエネルギーが違った形で消費されてしまうので、繰り返される力の発現の一つである振動や騒音が、こうした擬弾性材料を利用することで、熱として消費されたり、より低い、あるいは、より小さな振動や音に変化したりするからです。振動や騒音のひどい機械の下に、ゴムやプラスチック、ある種のセラミックス、あるいは、鉛のような柔らかい金属を敷いて、防音、防振を図ることがよくあるのは、こうした材料が擬弾性を示すからです。

なお、自動車等の空気バネや、オーディオ装置のインスレーターなどに使われる空気を利用した制振装置は、振動のエネルギーを空気に伝えてその圧縮力として消費させようとするもので、擬弾性を利用したものではありませんが、違ったエネルギーとして消費させることで繰り返される力のエネルギーを弱めようとする点で、原理的には共通しています。

#### 2.4.2 塑性変形

ある物質に力を加えていったと煮に起きる変化で、もう一つ重要なもの、そして、実用的には非常に大切な挙動は、塑性変形です。ゴムのように高い歪みまで可逆的あるいはほとんど可逆的に振る舞う材料は例外で、ほとんど全ての材料は 0.001 ( 0.1% ) 程度以上の

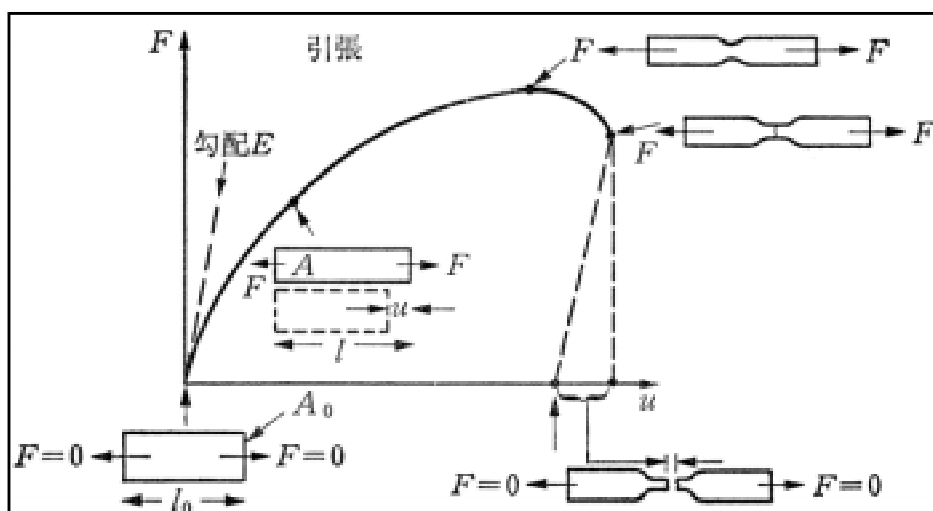


図7 延性のある材料の加重 - 伸び曲線

歪みで不可逆的な挙動をします。すなわち、塑性変形して永久的にその形状を変えるのです。永久的に形を変える変形を塑性変形といい、そうした挙動の見られる場合を延性があるといいます。

こうした延性のある材料を引張ると、図7のような荷重 - 伸び曲線（力と歪みの関係）が得られます。最初は弾性変形しますが、弾性限を越えると塑性変形し、荷重を除いても永久的に伸びててしまうのです。どれだけ伸びるかは、図7のF点からの破線で示されます。力を加えた状態ではF点から垂線を下ろした分だけ、力を除けば弾性変形分だけ元に戻るのですが、F点から斜めに下ろした破線分だけ伸びています。

最初の弾性部分は歪みの小さい範囲だけで、その変化の勾配は弾性率に相当します。力を除いたときに戻る変化の勾配はこの弾性変形の勾配と同じです（F点でなくても何処でも同じです）。すなわち、F点からの斜めの破線は勾配Eと平行になります。弾性限を超えると、荷重 - 伸び曲線は次第に勾配が緩やかになり、頂点Fに達した後は逆に低下してきます。頂点Fでは「くびれ」と称される現象が起き、材料の一部だけが極端に断面積を減らしていくのですが（だから、元の断面積で割って標準化した応力値が逆に低下してくる）、詳細は省略です。

くびれが生じると一部の断面だけが選択的に変形し、ついには荷重に耐えきれなくなつて全体の破断に至ります。

図7に示したような比較的大きな組成変形を示す材料は金属に多いのですが、それは変形のための特別な機構が働くためです。その詳細は後に述べますが、程度の差はあってもあらゆる材料はある程度の弾性変形と塑性変形を起こします。知っておかねばならない基礎事項です。

なお、引張応力ではなく圧縮応力を掛けた場合には、微少な歪み部分では引張曲線を反転したものと同一曲線になりますが、大きな歪みになると曲線の形状が異なってきます。その違いは、圧縮によって偏平になるにつれ、荷重が増大し、くびれが現れないのです。押さえつけているために一部だけが選択的に変形することがないからです。それ以外は基本的に同じです。

(2007.3.5)