\

**５章３節関連**

ゴムとばねの弾性

**科目融合型コラム（化学）**

　　　　年　　組　　番

名前

**●** 金属ばねもゴムも適度な重さの分銅をつるすと引き伸ばされ，分銅を外すと元の長さに戻る。このような性質を弾性という。ばねとゴムで目に見える挙動は良く似ているが，弾性を引き起こす原子や分子の振る舞いは全く異なる。その違いを考えてみよう。

● 金属ばねとゴムの違い

ばねとゴムに分銅をつるし，ばねとゴムの温度を上げると，ばねは長さがほとんど変わらない（または，わずかに伸長する）のに対し，ゴムは収縮する。この違いは，ばねとゴムの弾性が異なるメカニズムで起きていることを示す。

● 金属ばねの弾性

金属中では原子は規則正しく配列して結晶化している。金属ばねに分銅をつるすと，結晶中で個々の原子の間隔がわずかに広がって，ばねが伸びる。原子間隔が広がった結晶は不安定(＝内部エネルギーが高い状態)なので，分銅を取り除くと再び元の原子間隔(＝内部エネルギーが低い状態)に戻って，ばねの長さも元に戻る。これが，金属ばねが伸縮するときの，原子の様子である。金属ばねのように，内部エネルギーの増減により現れる弾性はエネルギー弾性と呼ばれる。金属結晶を大変形しようとすると壊れるので，金属弾性では小さな伸びしか得られない。コイル状に巻いた形と金属弾性が組み合わされ，大きな伸縮が可能になっている。

● ゴムの弾性

一方，ゴムは鎖状の高分子でできている。外から力が加えられて変形しても，内部の高分子は単結合を軸とした内部回転で形を変えるだけで，内部エネルギーはほとんど変わらない。

1本のゴムの鎖状分子が引き伸ばされて，直線形になって置かれている状態を想像してみよう。液体中の分子が絶えず熱運動して移動しているのと同様に，ゴムの鎖状分子も熱運動して形を変えている。直線形の鎖状分子がでたらめに動き回ったら，適度な大きさの球形に丸まって，鎖状分子の両端が近づいていくことは容易に想像できるであろう。ゴムの弾性は，高分子が引き伸ばされた（特別な）形から，（よくある）球形へと自然に縮まっていく性質によって現れる。特別な状態から，よくある状態へと“乱雑さ”が増えることで起こるゴムの弾性は，エントロピー弾性とよばれる（エントロピー→教科書p．412）。

関連　・物理基礎「様々な力」

・物理「ばね返り係数」

**Q.** 鎖状分子が集まってできた物質は，そのままではゴム弾性をもたない。これは，個々の分子が連動することなく，独立して伸びたり縮んだりしているためである。では，ゴム弾性をもたせるためには，分子にどのような処理をしたらよいか答えさない。

鎖状分子を架橋して3次元的につながったネットワーク構造にする。

補足1：架橋により，物質全体が共有結合でつながった一つの分子になると同時に，もともと別の分子であった部分鎖の間の相対的な位置関係も固定される。このため，弾性をもつようになり，力を加えて変形した後に力を取り除くと，元の形にもどる。

補足2：架橋は，天然ゴムやイソプレン系の合成ゴムであれば，硫黄を加えて加硫する。その他の合成ゴムであれば，それぞれの化学構造に適した方法で架橋する。

**Q.** 引き伸ばされた形よりも，丸まって両端が近づいた形の方がどのくらいエントロピーが高いか，簡単なモデルを使って考えてみよう。長さ1 mの棒10本をならべて，東西に10 mはなれた点をつなぐ方法は一つしかない。では8 mはなれた点をつなぐ方法はいくつあるか計算しなさい。ただし，棒を置く向きは南北と東西だけを考えることとする。

また，つなげる方法の数を*W*とすると，エントロピー*S*は2.3 log10 *W*であらわされることが知られている。8 mと10 mのときのエントロピーの差Δ*S*8 m= 2.3 (log10 *W*8m- log10 *W*10m)を求めなさい。

西の点から東に8 mはなれた点までつなぐ方法を2つに分けて考えることにする。一つは，棒を東向きに9本，西向きに1本置く方法である。10本の中で何本目を西向きにおいても良いので，10通りとなる。もう一つは，東向きに8本，北向きに1本，南向きに1本置く方法である。北向きと南向きに置く棒の選び方も任意なので，10 × 9 ＝ 90通りとなる。そこで，

*W*8 m = 10 + 90 = 100

Δ*S*8 m = 2.3(log10 *W*8 m- log10 *W*10 m) = 2.3(log10 100– log10 1) = 4.6 となる。

補足1：*S*は*S* = loge *W*で定義されるが，ここではloge *x* = 2.3 log10*x* より*S* = 2.3 log *W*とした。

補足2：6 mはなれた点をつなぐ方法は

東向き8本，西向き2本の　　10×9/(2×1) = 45通り

東向き7本，西向き1本，北向き1本，南向き1本の　　10×9×8 = 720通り

東向き6本，北向き2本，南向き2本の　　10×9×8×7/(2×1×2×1) = 1260通り

あることから，

*W*6m = 45 + 720 + 1260 = 2025

Δ*S*8m = (loge *W*6m- loge *W*10m) = (log 2025– log 1) = 7.637 ≒ 7.6　となる。

**Q.** 輪ゴム（できれば幅の広いもの）を用意し，唇にあてて温度を確かめた後で，急激に伸長させ，伸ばしたままの状態で，急いで，唇にあてて温度を調べなさい。また，今度はゆっくりとゴムを伸ばした後，急激に収縮し，温度を確認しなさい。急激に伸ばしたときと，収縮したときで，温度がどのように変化したか答えなさい。（唇を使うのは，温度に敏感なためである）

伸ばしたときは温度が上昇し，収縮したときは温度は低下する。

補足：この実験では，“急激な”伸長や収縮は断熱（熱*ｑ*の出入りがない）変形に，“ゆっくりとした”伸長は等温変形に対応する。

\

**５章３節関連**

ゴムとばねの弾性

**科目融合型コラム（化学）**

　　　　年　　組　　番

名前

**●** 金属ばねもゴムも適度な重さの分銅をつるすと引き伸ばされ，分銅を外すと元の長さに戻る。このような性質を弾性という。ばねとゴムで目に見える挙動は良く似ているが，弾性を引き起こす原子や分子の振る舞いは全く異なる。その違いを考えてみよう。

● 金属ばねとゴムの違い

ばねとゴムに分銅をつるし，ばねとゴムの温度を上げると，ばねは長さがほとんど変わらない（または，わずかに伸長する）のに対し，ゴムは収縮する。この違いは，ばねとゴムの弾性が異なるメカニズムで起きていることを示す。

● 金属ばねの弾性

金属中では原子は規則正しく配列して結晶化している。金属ばねに分銅をつるすと，結晶中で個々の原子の間隔がわずかに広がって，ばねが伸びる。原子間隔が広がった結晶は不安定(＝内部エネルギーが高い状態)なので，分銅を取り除くと再び元の原子間隔(＝内部エネルギーが低い状態)に戻って，ばねの長さも元に戻る。これが，金属ばねが伸縮するときの，原子の様子である。金属ばねのように，内部エネルギーの増減により現れる弾性はエネルギー弾性と呼ばれる。金属結晶を大変形しようとすると壊れるので，金属弾性では小さな伸びしか得られない。コイル状に巻いた形と金属弾性が組み合わされ，大きな伸縮が可能になっている。

● ゴムの弾性

一方，ゴムは鎖状の高分子でできている。外から力が加えられて変形しても，内部の高分子は単結合を軸とした内部回転で形を変えるだけで，内部エネルギーはほとんど変わらない。

1本のゴムの鎖状分子が引き伸ばされて，直線形になって置かれている状態を想像してみよう。液体中の分子が絶えず熱運動して移動しているのと同様に，ゴムの鎖状分子も熱運動して形を変えている。直線形の鎖状分子がでたらめに動き回ったら，適度な大きさの球形に丸まって，鎖状分子の両端が近づいていくことは容易に想像できるであろう。ゴムの弾性は，高分子が引き伸ばされた（特別な）形から，（よくある）球形へと自然に縮まっていく性質によって現れる。特別な状態から，よくある状態へと“乱雑さ”が増えることで起こるゴムの弾性は，エントロピー弾性とよばれる（エントロピー→教科書p．412）。

関連　・物理基礎「様々な力」

・物理「ばね返り係数」

**Q.** 鎖状分子が集まってできた物質は，そのままではゴム弾性をもたない。これは，個々の分子が連動することなく，独立して伸びたり縮んだりしているためである。では，ゴム弾性をもたせるためには，分子にどのような処理をしたらよいか答えさない。

鎖状分子を架橋して3次元的につながったネットワーク構造にする。

補足1：架橋により，物質全体が共有結合でつながった一つの分子になると同時に，もともと別の分子であった部分鎖の間の相対的な位置関係も固定される。このため，弾性をもつようになり，力を加えて変形した後に力を取り除くと，元の形にもどる。

補足2：架橋は，天然ゴムやイソプレン系の合成ゴムであれば，硫黄を加えて加硫する。その他の合成ゴムであれば，それぞれの化学構造に適した方法で架橋する。

**Q.** 引き伸ばされた形よりも，丸まって両端が近づいた形の方がどのくらいエントロピーが高いか，簡単なモデルを使って考えてみよう。長さ1 mの棒10本をならべて，東西に10 mはなれた点をつなぐ方法は一つしかない。では8 mはなれた点をつなぐ方法はいくつあるか計算しなさい。ただし，棒を置く向きは南北と東西だけを考えることとする。

また，つなげる方法の数を*W*とすると，エントロピー*S*は2.3 log10 *W*であらわされることが知られている。8 mと10 mのときのエントロピーの差Δ*S*8 m= 2.3 (log10 *W*8m- log10 *W*10m)を求めなさい。

西の点から東に8 mはなれた点までつなぐ方法を2つに分けて考えることにする。一つは，棒を東向きに9本，西向きに1本置く方法である。10本の中で何本目を西向きにおいても良いので，10通りとなる。もう一つは，東向きに8本，北向きに1本，南向きに1本置く方法である。北向きと南向きに置く棒の選び方も任意なので，10 × 9 ＝ 90通りとなる。そこで，

*W*8 m = 10 + 90 = 100

Δ*S*8 m = 2.3(log10 *W*8 m- log10 *W*10 m) = 2.3(log10 100– log10 1) = 4.6 となる。

補足1：*S*は*S* = loge *W*で定義されるが，ここではloge *x* = 2.3 log10*x* より*S* = 2.3 log *W*とした。

補足2：6 mはなれた点をつなぐ方法は

東向き8本，西向き2本の　　10×9/(2×1) = 45通り

東向き7本，西向き1本，北向き1本，南向き1本の　　10×9×8 = 720通り

東向き6本，北向き2本，南向き2本の　　10×9×8×7/(2×1×2×1) = 1260通り

あることから，

*W*6m = 45 + 720 + 1260 = 2025

Δ*S*8m = (loge *W*6m- loge *W*10m) = (log 2025– log 1) = 7.637 ≒ 7.6　となる。

**Q.** 輪ゴム（できれば幅の広いもの）を用意し，唇にあてて温度を確かめた後で，急激に伸長させ，伸ばしたままの状態で，急いで，唇にあてて温度を調べなさい。また，今度はゆっくりとゴムを伸ばした後，急激に収縮し，温度を確認しなさい。急激に伸ばしたときと，収縮したときで，温度がどのように変化したか答えなさい。（唇を使うのは，温度に敏感なためである）

伸ばしたときは温度が上昇し，収縮したときは温度は低下する。

補足：この実験では，“急激な”伸長や収縮は断熱（熱*ｑ*の出入りがない）変形に，“ゆっくりとした”伸長は等温変形に対応する。

《 指 導 用 補 充 解 説 》

エネルギー弾性とエントロピー弾性

●一般的な固体の弾性　　金属結晶では，原子間に凝集力が働き，原子が規則正しく詰め込まれている。このときの原子間隔が安定状態であり，原子同士がこれより近づくと反発力が，遠ざかると引力が働く。結晶に外力が働くと，原子間隔が広がったり狭まったりして変形するが，外力を取り除くと元に戻る(生徒用の本文では広がることだけを記述したが，狭まることもある)。これがエネルギー弾性である。イオン結晶，分子結晶の場合や，結晶をもたないガラスの場合でも，イオン・原子・分子の間に凝集力が働き，同様の機構で弾性変形する。高分子の場合でも，ガラス状態や結晶部分はエネルギー弾性を示すことが知られている。エントロピー弾性はガラス転移温度が室温以下の柔らかい架橋高分子の特性である。

●エントロピー弾性の別の描像　　ここでは本文とQの1問目，２問目を踏まえて，もう一度エントロピー弾性を別のモデルに例えて説明する。広場で子供たち100人が手をつないでいる様子を考える。両端の子供を150 m離れて立つよう指示すると，子供たち全員が手を拡げて直線状に並ばなくてはならない。一方，両端の子供の間の距離を20 mにすると，子供たちは手をつないだままでも，ある程度，動き回ることができるようになる。前者は子供たちにとって位置の選択肢が一つしかないエントロピーの低い状態，後者は多数の選択誌があるエントロピーの高い状態である。

もう一度，両端の子供を150 m離れて立たせ，できるだけその場に留まるように指示したところで，他の子供たちはでたらめに動くように指示したとしよう。この動きにより両端の子供たちは中央の方向に引っ張られることであろう。高分子両端の子供が架橋点を，他の子供たちが架橋点と別の架橋点の間の鎖状分子部分を表すと考えると，伸ばされたたゴムが熱運動(でたらめな動き)でエントロピーの大きい状態に移ることにより縮むエントロピー弾性が理解できる。

●ゴム弾性の熱力学　　教授用指導書てびき・解説編p.336で，気体の内部エネルギー変化Δ*U*，外から与えられた熱*q*，外から与えられた仕事*w*が以下の式で与えられることを説明した。

Δ*U* = *q* + *w*, 　*q* = *T*Δ*S*, 　*w =* - *P*Δ*V*

ここで，*T*は温度，*P*は圧力，*V*は体積である。伸長したゴムの場合には，“引っ張る”という仕事*f*Δ*l*（*f*は張力，Δ*l*はゴムの長さの変化）も加えられている。一方で，ゴムは伸長してもほとんど体積が変わらないため，*P*Δ*V*=0 である。

そこで，内部エネルギー変化はΔ*U* = *T*Δ*S* + *f*Δ*l*となる。この式を変形しとすると，張力*f*がエネルギー弾性に対応するΔ*U*/Δ*l*と，エントロピー弾性に対応するΔ*S*/Δ*l*の和であることがわかる。本文でも述べたように，ゴムのような高分子の変形は単結合を軸とした内部回転でおこるため，Δ*U* ≈ 0と考えられる。実際，詳細な実験により，ゴム弾性はほとんどエントロピー弾性，つまり*f* ≈ - TΔ*S/*Δ*l*であることが確かめられている。

●Gough-Joule効果　　本文の冒頭に書いた分銅をつるして引き伸ばしたゴムを温めると収縮し，冷やすと元の長さに戻ること及び，Qの3問目で確かめたゴムを急激に伸長すると発熱し，急激に縮めると冷えることは，1805年にGoughが発見した。その後，Goodyearが加硫を発明(1830年代)し，Joule(1859年)が加硫ゴムをつかってGoughの実験を再検討しことから，これらの現象はGough-Joule効果とよばれている。Gough-Joule効果は，その後も多くの人により詳しく調べられ，例えば，天然ゴムを急激に5～6倍まで伸長すると温度が約10 ℃ 上昇することが明らかになっている。