

分子を学ぶ——ゴムはなぜ伸び縮みするのか

大阪大学名誉教授 畑田耕一 税理士法人 For You 税理士 関谷洋子 兵庫県立豊岡高校教諭 渋谷亘

2014年6月28日税理士法人 For You で分子の質量、形と物質の性質・機能のお話しをしました。内容は先日報告した西宮高校での出前授業(1)とあまり変わらないのですが、聴衆が小学校上級の女生徒5人を含めて女性11人に男性2人で西宮高校の時とはずいぶん違いました。今回の授業は、この西宮高校での授業についての畑田の報告を関谷が事務所のスタッフに読んでもらったところ、「こんな授業を受けた生徒さんは幸せですね。私たちの高校の化学の授業は先生が黒板に化学式を書いて、それを覚えるだけの授業だった気がする」と言われ、それを畑田に伝えたところ、「ほんなら事務所でやりましょうか」ということになり、事務所のメンバーだけで授業を受けるのはもったいないので、周辺の方にも声をかけて、実現の運びとなった次第です。

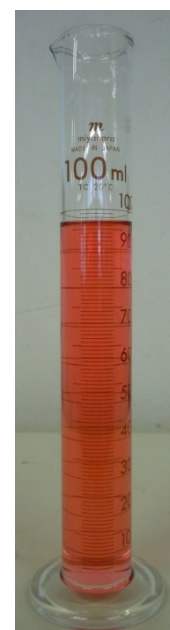
授業は、まず錘をつるした細いゴム紐に熱湯をかけるとどんな変化が起こるか、氷水をかけるとどうか、という実験から始めました。実験の前に皆に尋ねたところ、熱湯ではゴムが縮んで錘が持ち上げられ、氷水をかけるとゴムの力が小さくなってゴムが伸びるという結果を予測した人は僅か2人でした。西宮高校の出前授業では、このゴムの実験をする前に分子の質量、形と物質の性質・機能の関係を1時間ほど話したうえでこのゴムの実験をしたところ、生徒の約半数が正しい結果を予測できました。この結果は、科学の世界で、あるいは日頃の生活で大事な能力の一つである想像力も知識の裏付けなしには役に立たないことを明確に示しております。丸暗記は、いくらしてもかまいません。大事なことはその結果を想像の世界にどう生かすかです。それが創造を生むことになるのです。

ところで、錘をつるしたゴム紐に熱湯をかける実験の結果を正しく予測していただいた上記のお二人のうちのお一人に、「どうしてわかったのか」を尋ねたところ、「家で台所の用事をしていて、シンクに輪ゴムが落ちているところにお湯がこぼれてしまったことがあり、その時輪ゴムが縮れ毛のようになったのを記憶していた」とのことでした。台所仕事の間のほんの些細とも思える出来事を正確に観察していただき、その記憶を私から質問を受けた時に正確に呼び起こして、質問に対する答えの想像に繋いでいただいたことに、筆者畑田は大いに感銘を受けました。ただし、ここで輪ゴムが縮れ毛のようになったことと、錘をつるしたゴム紐に熱湯をかけると錘が持ち上がったこととは直接は繋がらないのですが、これについては後でお話しします。

ゴム紐に熱湯をかける実験で皆さんの度肝を抜いた後、分子の概念をきっちり説明し、物質は多くの分子が集まって出来ていることをお話ししました。その上で、50mlの水と50mlのエタノールを混ぜると100mlにはならず約97mlになることを、実験で確かめてもらいました。人々は、ただ驚くだけではなく、異分子の混合はどのように起こっているのかを自分で考えることが出来るようになりました。この実験はこれまでの出前授業で何回もやっているのですが、今回は参加者の協力で実験方法に少し工夫をしました。すなわち、メスシリンダーに先ず50mlの水を入れ、その上に微量の食紅で赤く着色したエタノールを少しずつ水と混ざらないように加えてアルコールの液面がメスシリンダーの100mlのところにあることを確かめたうえで(写真A)全体をよくかき混ぜて約97mlになる(写真B)ことを確かめたのです。これで、後から入れたアルコールがすこし少なかったのではないかというような疑いを持つ人を無くすとともに、体積の減少が間違いなしに水とアルコールの混合によって起こっていることを理解してもらうことが出来ました。授業中の実験ではその演示の方法



写真A



写真B

にも工夫が必要です。この混合による体積減少は水よりも大きいエタノールの分子同士の隙間に小さな水の分子が入り込むことで起こると考えてよいのですが、この実験を通して密度の大小が分子の質量だけではなく、その集まり方にも影響されていることを参加者の方々に理解してもらうことが出来ました。

ここで、あらためてゴムのお話しに戻りました。ゴムが引っ張ると伸びて手を放すと元の長さに戻ることは、小学校1年生でも知っていますが、それをなぜかと聞かれて答えに困る大人は多いと思います。「それはゴムだからだ」などと応えて子供の科学する心の芽を摘み取らないでください。冒頭に述べたゴムに熱湯や氷水をかける実験の結果はこの問題を解く大きなヒントになります。天然ゴムの分子は水やエタノールのような小さい分子ではなく、長い紐のような分子（高分子）なのです。そして、この長い紐のようなゴムの分子の部分、部分、あるいは各部分（これを高分子のセグメントといいます）が室温で激しく動いている高分子はゴムになる性質を秘めているのです。一度次のような実験を試してみてください。クラスの全員、例えば40人が運動場に出て手をつないで1本の長い高分子のモデルを作ります。そして、運動会の時に使う目印の旗竿を旗台に立てたものを2本用意し、これらを約30m程度の間隔に離して置き、両端の生徒は空いた手でそれぞれの旗竿をしっかりと握ります。この状態で、生徒の各人が前後左右に激しく動くとき旗竿は押し倒されるか引き倒されるかという実験です。各生徒は絶対に手を離さないという条件が守られており、2本の旗竿間の距離があまり短くなければ、大抵の場合、旗は引き倒されます。この実験の結果は、セグメントが激しく動いている高分子は、両端から引っ張られなければ縮んだ状態になることを示しています。冒頭に述べた実験で、錘をぶら下げているゴムに熱湯をかけると錘が持ち上がったのは、室温よりは100°Cに近い方がゴム分子のセグメントがより激しく動いていて、ゴム分子の縮む力が強くなったからです。バネ秤を使って、ゴムの張力を、温度を変えて測定すると、張力は温度の低下とともに小さくなることが分かります。絶対零度とは分子が動かなくなる温度と定義されているので、この温度変化の実験結果を解析して、ゴムの張力が0になる温度を求めれば、それが絶対零度の値（-273.15°C）です。（文献2参照）

天然ゴムはシス-1,4-ポリイソプレンというセグメントが非常に動きやすい高分子からできています。高分子はガラス転移点というそのポリマーに固有の温度指数を持っていて、その温度以上では、全体としては固体であっても分子の各部分はそれぞれかなり激しく動くようになります。天然ゴムはガラス転移点が-70°Cなので、室温では、分子の各部分はそれぞれ激しく動いており、外部から力が加わらない限り、上に述べたように、縮まろうとする傾向が強いのです。しかし、ゴムの木の樹液から取り出したばかりのゴム（生ゴム）を引っ張ってもだらだらと伸びるだけで手を離しても元の長さには戻りません。これは、ゴム分子の実際の長さはきわめて短いので、ゴムを引っ張っても分子の両端を手で持って引っ張ったことにはならず、分子と分子の間でずるずると滑ってしまうためです。われわれが実際に使用するゴムは加硫といって、ゴムの木から取り出したゴムを硫黄と反応させてゴムの分子同志をところどころ硫黄原子でつないであります。この反応は硫黄以外の試剤を用いて行われることもあります。つまり、日常使っているゴムはゴム分子同士がところどころ化学的に橋架けされているのです。ゴムの塊はそれ自身が実に巨大な一つの分子ということも出来ます。こうすることによって外部から加えられた力が直接ゴムの分子にかかるようになり、引っ張れば伸び、手を離せば元の長さに縮むというゴムの性質が出現するわけです。

これらのゴムの話を聞いて「ゴムの分子が熱エネルギーによって活発となり、ゴムの性質である縮む力が増加することは、これはゴム紐に熱湯をかける実験で非常によく理解できました。ところで、物質に熱エネルギーを加えると、物体の分子の動きが活発になり、分子がバラバラに動き出して、物質は膨張するのだと思うのですが、この二つの現象は一体どういう関係にあるのでしょうか。また、熱湯に入れてよく弾むようになったスーパーボールの体積は分子間力の減少で膨張していたのか、それとも熱湯の中でゴム分子のセグメントが激しく動いて分子が縮むというゴムの本性の効果が強く現れて、体積が減少していたのかどちらでしょうか」という質問がありました。私の話をきっちり聞いて、その内容についてよく考え、問題点を整理

して、分かりにくい点をえぐり出し、この質問をしていただいたことに、演者の畑田自身は深い感動を覚えました。

この質問に答えるには、かなりの注意深さが必要です。まず、ゴムを熱湯に入れると、ゴム分子のセグメント運動が激しくなり、ゴム分子の存在する空間が大きくなって膨張すなわちゴムの体積が大きくなるのは間違いありません。これは橋架けしていない生ゴムでも橋架けしたゴムでも同じです。

一方、ゴムを熱湯に入れると、ゴム分子のセグメント運動が激しくなって分子が縮むというのは、ゴム分子の両末端間の距離が縮むということであって、分子全体の体積が小さくなるということではありません。分子の体積は両末端間方向の距離が縮むことで、その方向に垂直の方向には大きくなるのです。このことは、上記のクラス全員が手を繋ぐモデル実験の記述を注意深くお読みいただければ、お分かりいただけると思います。ここまでの話は、橋架けしていないゴム1分子についての話ですが、状況はゴム分子が橋架けされても殆ど変わりません。

スーパーボールも輪ゴムも熱湯に入れれば体積は大きくなります。この辺りのことは、もう少し注意深くお話しするべきだったかもしれません。あるいは、後で誰かに質問していただく方が、却って効果があるという考えも成り立つかもしれません。

冒頭に記した台所のシンクに落ちていた輪ゴムに熱湯がかかったら縮れ毛のようになったというのは、通常は起こらないことで、多分、ゴムがかなり古いものであったことが一因と思われますが、現品が存在しないので、詳細は不明です。いくつかの要因が複雑に絡み合った結果かもしれません。

さて、天然に産するポリイソプレンには、ゴムの他にグッタペルカと呼ばれる樹脂があります。化学名はトランス-1,4-ポリイソプレンで、天然ゴムのポリイソプレンに比べてガラス転移点、融点が高く、室温では樹脂状でゴムの性質は示しません。熱湯に浸すと分子運動が激しくなってゴムに変身し、伸び縮みするようになります。ゴム状態で引っ張ったものを室温まで冷却すると、そのままの形で固化しますが、これを再度湯につけると直ちに元の形に戻ります。高分子間の橋架け反応で分子集合体の形が記憶されていて、いわゆる形状記憶性を示すわけです。高分子主鎖の形が違うだけで高分子物質の性質が大きく変わることが分かっていただけだと思います。シス-1,4-ポリイソプレンとトランス-1,4-ポリイソプレンは高分子のセグメントの形が少し違うだけなのですが、その違いが高分子鎖の動きやすさに大きな影響を与え、物質の性質に影響を与えるのです。

ゴムの性質の温度変化に関係して「温度とは何か」という質問が出ました。これは大変良い質問です。広辞苑には、「温度とは熱平衡にある系に特有の物理量で、分子の運動エネルギーの平均値に比例する量」と書いてあります。一般の人には分かりにくい説明です。「ゴムに熱湯をかけるとゴムの温度が上がってゴム分子のセグメント運動が激しくなる」という表現は、実は、誤りです。温度が上がったのは、ゴムが熱湯から熱エネルギーを供給されてゴム分子のセグメント運動が激しくなった結果なのです。熱湯から供給された熱エネルギーがゴム分子の運動エネルギーに変わったわけです。簡単に言えば、温度とは分子運動の激しさあるいは速さの尺度です。少し幅の広い輪ゴムを急に強く引き伸ばして唇で触れると温度の上がっているのがよく分かります。これは外部から加えられた機械的エネルギーでゴム分子の持つ運動エネルギーが大きくなった結果なのです。この実験が温度とは何かを理解していただく一番の近道かもしれませんね。この道を通っていただければ、広辞苑に書いてある「二つの系が接触すると、高温の系から低温の系に熱エネルギーが移動して、やがて両者の温度は等しくなる」という一般の人には若干馴染みにくい文章の本当の意味も読み取っていただけるものと思います。

この授業の翌日、参加者のお一人で最近まで石油会社にお勤めであったという方から、次のようなメールをいただきました。

「家に帰って、本棚にあった高分子化学通論（藤井光雄著）を引き出し、無定形固体の力学及びレオロジーの章にゴム弾性に関する記載があるのを通読し、今日の授業での物性原理を可視的に表現した実験を思い起こし納得した次第です。我々は、普段の生活環境において、化学とは縁を断つことはできませんが、そのことに対する関心は全くと言って良いほどに無知であっても、生活を継続することができるために「化学」への関心度合いが貧弱になりがちのところに、あのような実験を目の当たりに致しましたことは、老若男女を問わず、参加者の化学への関心度を高揚させたことと思います。因みに、一緒に来た孫も「化学も面白そう」と話しかけてきており、今後少しでも化学に興味を持って貰えればと念じています」。化学を専門にしてこられた方から、このような評価をいただいたことは、筆者畑田の授業が、単に高分子のことを専門外の人にも分かりやすくお話しできたというだけでなく、それを通して高分子あるいは高分子科学に対する一般の方々の関心のある程度高める効果を発揮することができたものと喜んでいる次第である。

授業を受けてくれた小学校5年生と6年生の児童には、話の内容は少々難しかったようです。でも、「多少難しくても、見たことを記憶していたなら、きっと高校生になり分子の勉強をしたときに、あー！あの時の実験はこういうことだったのか、と思う時がくると思います」という参加者の中におられた彼等の祖父母の感想を、自分の子供の時の経験も踏まえて、素直に信じたいと思います。

最後に、参加者から科学と道徳の話が出ました。これは5分や10分で議論のできるテーマではないので、この次の機会に2時間ほどの時間をかけて話し合おうということにしたのですが、私、畑田の考え方の根本を簡単に述べさせていただきました。道徳的能力の基本は、どのような状況の中でも、人間が他の人々や動植物を含む自然環境に対して、どのような態度を取るべきかを適切に判断する能力です。そのような判断を下すには、人以外の動植物やものとのコミュニケーションが出来なければなりません。人以外の動植物やものは人間の言葉をしゃべらないので、それらとのコミュニケーションは想像力に頼るしかありません。また、社会人として真つ当に生きていくためには、過去に学び、未来を予測することが必要です。そのためには、既に亡くなった人やこれから生まれてくるであろう人との想像力を駆使したコミュニケーションも要求されることとなります。言葉による対話の可能な人との相互理解にも、想像力を働かさねばならないことがあります。さらに、自分以外の人や動植物を含む自然環境には、当然、自国以外の国について配慮しなければならないことも含まれています。このように考えれば、道徳的能力を発揮するための根源の力は想像力であるということになります。生きる力の根源は想像力であるともいえます。

道徳的能力のもととなる想像力は、また、創造力の根源でもあります。新しく物を創るとき、新しい概念を創り出すときにも、想像力が必要です。まず、問題とする新しいものや概念にいたる道を、想像で考え、それを基にして実験したり、他人の意見を聞き、議論したりしながら、新しい物や概念を創り出そうとします。うまくいかねば、また想像力を働かせて別の道を探ります。この過程での優れた思いつきや直感も想像力に起因するものです。このようにして、想像を実行に移しその成果を検証するという過程を繰り返して、目的を達成し、新しい物や概念を創り出したとき、その人の想像力の集積結果が創造力として評価されるのです。このように考えると、想像力の豊かな人が、善悪の判断基準を正しく持って事に当たれば、道徳的能力も高く、創造力も発揮できる人間という評価を受けることとなります。能力の高い科学者は、善悪の判断基準さえ正しければ、高い道徳的能力を持つことになるのです。（文献3参照）

自然科学の分野では、科学者・技術者の創造力の成果として、新しく生み出されたものや概念は、本来、地球環境を含めて世界の人々の幸せと平和のためにのみ使用されるべきものです。ところが、核兵器のように、一部の国の利益のためのみに利用され、多くの人々を不幸に陥れるものもあります。このようなことが起こるのを防ぐには、善悪の判断基準をしっかりと持つ、道徳的能力の高い国民の養成のための、たゆまざる努力が不可欠となるのです。

核兵器に限らず、兵器を作る技術は、科学技術と呼ばれるべきものではありません。兵器を作る技術など世の中に存在すべきではないのです。

「今の世の中、物欲、金銭欲、名誉欲など、欲を追いかけている人が多すぎます。これは科学者を含めてです。最近、理化学研究所で起こった STAP 細胞 (Stimulus-triggered acquisition of pluripotency cells) 事件もその一つではないかという気がしてなりません。欲にかられた科学者は本当の科学者ではありません。真の科学者は真理の探究のみを行う人だと私は思います。今の地球を守るのは科学者の使命である、といっても過言ではありません。科学者の皆さま、この大切な地球、そして人類の平和を守ることに全力を注ぐ科学者でいて下さい」という言葉を本稿の結びとしたいと思います。

参考文献

- (1) 畑田耕一 市立西宮高校での出前授業「聞いて見て触るおもしろ化学」国際ロータリー第 2660 地区ホームページ青少年奉仕活動および職業奉仕活動のカテゴリー参照
- (2) 畑田 耕一「ゴムの面白さ―絶対零度の値を求めよう (2007.10.27 公開)」
<http://culture-h.jp/hatadake-katsuyo/fun%20of%20rubber.pdf>
- (3) 畑田耕一、林 義久、澁谷 亘「道徳的能力と想像力」(2009 年 2 月 5 日公開)
<http://culture-h.jp/hatadake-katsuyo/dohtoku-sohzoh.pdf>

謝辞

本稿の執筆にいろいろな面からご支援・ご協力いただいた椿井久、三宅久恵、梶田定子の諸氏ならびに授業中の実験にご協力いただいた矢野富美子氏に心より厚く御礼申し上げます。