

科学イノベーション挑戦講座第3回  
「化学反応の制御に挑戦する」

2013年8月23日

氏名： \_\_\_\_\_



この糖度を実験の前後で測定すれば、どのくらいの砂糖が消費されたのかを知ることができるのではないかな。試してみよう！

まずは、砂糖水の濃度を決めよう！  
 今回は3つの条件でやってみよう。  
 25%砂糖水(砂糖75.0 g, 水225 g)  
 35%砂糖水(砂糖121 g, 水225 g)  
 45%砂糖水(砂糖184 g, 水225 g)

表1. 試料溶液の測定

試料No.	砂糖水の濃度(%)	反応温度(°C)	糖度			
			反応前	測定時刻	反応後	測定時刻
自分	( )					
	( )					
	( )					
	( )					
	( )					
参考	ブドウ糖					

結果の評価

- 自分でつくった砂糖水の濃度(理論値)と糖度計ではかった砂糖水の濃度(実験値)は同じ値を示した・示さなかった。
- 理想的な値である理論値と実際にはかった実験値は常に同じ値を取る・取らない。
- そう思う理由を考えよう。

メモ欄

2. 酵母を含んだ人工イクラをつくらう

今回の実験では、パン酵母をそのまま入れるんじゃなくて、人工イクラに閉じ込めてみよう。

- ① 200 mLビーカーに、水(50 mL)入れて、アルギン酸ナトリウム(0.5 g)を加えよう。
- ② ①を良くかき混ぜて、半透明の液体になったら、ドライイースト(3 g)を加えて、かき混ぜよう。
- ③ ②を3%塩化カルシウム水溶液に、こまごめピペットで滴下しよう→人工イクラの完成！
- ④ ③をザルにあけた後、軽く水道水で洗おう。→塩化カルシウムを洗い流すよ

実験観察記録

アルギン酸ナトリウムは、どのような物質？

ドライイーストは、どのような物質？

塩化カルシウム水溶液に入れると、どうなった？

### 3. 発酵させよう

いよいよ砂糖水を、酵母を使って発酵させよう。ここでも問題になるのは、予想で考えた「温度」の効果だ。二酸化炭素を沢山生成する、つまり反応を速めるためには、温度をどうすればよいのだろうか？

科学イノベーション挑戦講座第1回で、信号反応の温度による変化を観察した人もいるかもしれない。信号反応では、温度を上げると色が変わるのに掛かる時間は短くなった。ということは、今回も温度を上げれば反応が速くなりそうだという予想が立つね。

では、科学者としての次の疑問はこうだ。

- ・温度は高ければ高いほどいいのだろうか？

はんのうそくどろん  
反応速度論(高校化学で習うよ)では、反応の速度は温度が上がると速くなる。では、どこまでも温度を上げていけば、反応の速度はどこまでも速くなるのだろうか？

ここで忘れてはいけないのは、「酵母」の存在だ。酵母は、そう、生き物だった。生き物は、どこまで高温に耐えられるのだろうか？

#### タンパク質の変性

たとえば、冷蔵庫に入っている生卵を思い出して欲しい。生卵を割って、熱したフライパンの上に落とした。最初は透明だった卵の白身は、熱すると白くなるね。この白くなった白身を冷やしても、元の透明で液体の白身には戻らない。



図27 タンパク質の変性  
図1. タンパク質の変性(化学, 数研出版社)より

タンパク質は、ある一定以上の熱を加えると『変性』という変化をする。科学イノベーション挑戦講座第1回を思い出そう。インジゴカルミンも色が変わったね。色が変わるのは、物質の性質が変わることと同じで、そのときにはインジゴカルミンの分子構造も変わっていた。タンパク質でも同じだ。タンパク質は『変性』によって構造が変わり、その性質も変わってしまう。エビやカニを熱湯に入れると赤くなるのも、肉を熱すると赤から褐色になるのも、すべてこの『変性』なんだ。

熱湯の中で生きていられる生物はいるけれども、そう多くはない。それは、熱によってタンパク質が『変性』してしまうからなんだ。さて、話を戻そう。酵母は、どこまで高温に耐えられるのだろうか？

反応温度を決めるときに、これは重要な条件じゃないかな？

#### 【予想】～もっとも重要な過程～

- ・酵母が生きていられる温度は( )℃である。

じゃあ、酵母が生きていられる温度の上限があるとして、反応速度が最も高くなるのは、その上限ギリギリなのだろうか、それとも快適な温度があるのだろうか。

- ・酵母がもっとも反応速度を速めるのは、( )くらいの温度である。

実験条件の設定

今回は2つの条件から温度を選ぼう。

45℃と70℃

※同じ濃度の班は、話し合って温度を別々にしよう！

- ① パン酵母入りの人工イクラをペットボトルに入れる。
- ② ①に砂糖水を入れる
- ③ 器具を組み立てる。
- ④ ペットボトルを湯浴に入れる。
- ⑤ 発生する気体をメスシリンダーに水上置換して、3分ごとに発生量を記録する。

発生する二酸化炭素をメスシリンダーに

水上置換して体積を測定する。

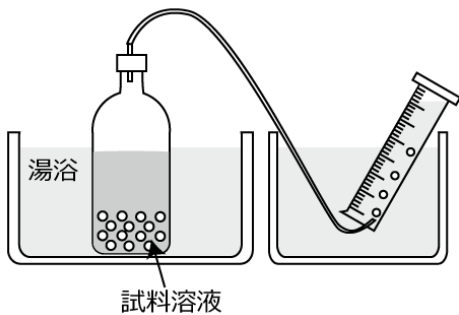


図2. 装置の組み立て方

表2. 二酸化炭素発生量の測定：反応温度( )℃

時間	発生量(mL)	時間	発生量(mL)	時間	発生量(mL)
03分		18分			
06分		21分			
09分		24分			
12分		27分			
15分		30分			

メモ欄

#### 4. 確認

発生した気体は「二酸化炭素」とされている。しかし、科学者であるきみたちは、確認もせずに信じて良いのだろうか？

情報は自分自身の手で確認する。これは科学者にとって大事なことだ。どんなに偉い科学者だって間違えることはある。だから、「偉い科学者が言っていた」とか「〇〇にこう書いてあった」というだけでは、信じるには足りない。ノーベル物理学賞を受賞したファインマンは、学生時代に実際にものすごく偉い科学者の講演を聴いたときに、それらの根拠を次々に問いただした。かれはそれらを「ご冗談でしょうファインマンさん」や「科学は不確かだ」の中でまとめているよ。

発生した気体が二酸化炭素であれば、それを確認しなければならない。

二酸化炭素を確認する方法はいくつかあるね。今回は、石灰水を使おう。なぜ石灰水なのか。そう、この疑問が重要だ。たとえば、二酸化炭素は「火が燃え続けることができない」という特徴もある。どうして、この方法ではなく、石灰水を使うのか。そこが重要だ。

- ① メスシリンダーの口を手で押さえて、水浴から取り出しながらひっくり返そう。



図3の左のように右肩上がりのグラフのときは傾きが一定になったところで読み取ろう。右のように「ある時間」から発生が止まってしまった場合には、最初の傾きの部分を読み取ろう。読み取った傾きは次の頁の表3に書き込もう。

表3. グラフの傾き

試料No.	砂糖水の濃度(%)	反応温度(°C)	傾き (mL/min)
自分	( )		
	( )		
	( )		
	( )		
	( )		

グラフの傾きは、反応速度を表している。傾きが大きいほど、反応が速いということだね。さて、速い反応には何か共通点があるだろうか。そして予想で考えた「反応温度はどこまでも高くできるのか」について答えは得られただろうか。

### 結果

- ・もともと反応速度が速かったのは濃度が( )、反応温度が( )°Cのときだった。
- ・反応の温度は(高くなるほど・ある温度までは)高かった。
- ・酵母は生物であるため反応温度の影響が(大きい・小さい)。

### メモ欄

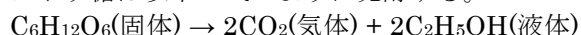
## 7. 反応はどちらに進むのか

発酵反応の速度に関して、実験を行ってきた。では、<sup>りろんてき</sup>理論的に考えると、どうなるのだろうか。科学の持つ強力な能力の1つは、『予言』の力だ。科学者は、やったことのない実験、見たこともない反応について、『何が起こるのか』を『予言』することができる。これは、歴史に名を残す一部の科学者たちと歴史には残らない大勢の科学者たちの努力によって成し遂げられた金字塔だ。

発酵反応がどうして進むのかを通して、科学の『予言』の力について考えよう。これはきみたちがどうして勉強しなくてはいけないのかを教えてくれるはずだ。

発酵反応は砂糖を原料にしていたけど、砂糖はブドウ糖と果糖とからできた二糖類であることは宿題で学んだね。ここでは、話を簡単にするためにブドウ糖を元にして考えよう。

ブドウ糖は以下の式のように発酵する。



### ①安定になりたい

物質は『できるだけ安定になりたい』性質を持っている。金属が錆びるのも、ものが燃えるのも、そして発酵が進むのも同じ原理に従っているはずだ。これについて考えてみよう。

エンタルピーの変化を  $\Delta H$  として、この予想が正しいかどうかを計算で確かめてみよう。

$\Delta H$  は以下の式で求められるぞ。

$$\Delta H = \{2 \times \text{二酸化炭素のエンタルピー変化}\} + \{2 \times \text{エタノールのエンタルピー変化}\} - \{\text{ブドウ糖のエンタルピー変化}\}$$





それぞれの値を入れて計算しよう。

答え： \_\_\_\_\_ J/(K×mol)

まとめ

- ・発酵によるエントロピー変化は、とても大きな(プラス・マイナス)の値であった。
- ・これによって、ブドウ糖 1 分子は(よりバラバラな・より集まった)二酸化炭素 2 分子とエタノール 2 分子になった。

③反応はどちらに進むのか？

エンタルピー変化とエントロピー変化がわかったので、いよいよ反応がどちらに進むのかについて考えよう。反応がどちらに進むのかはギブスの自由エネルギー( $\Delta G$ )で表すことができたね。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

これまで求めた  $\Delta H$  と  $\Delta S$  とを用いて、ブドウ糖の発酵に対する  $\Delta G$  を求めてみよう。そのためには反応温度を決めなくてはいけないね。今は  $40^\circ\text{C}$  としよう。

$$\text{絶対温度} = 40^\circ\text{C} + 273 = 313 \text{ K}$$

これと求めた  $\Delta H$  と  $\Delta S$  とを用いて、ブドウ糖の発酵に対する  $\Delta G$  を求めてみよう。

それぞれの値を入れて計算しよう。

答え： \_\_\_\_\_ J/(K×mol)

まとめ

- ・発酵によるギブスの自由エネルギー変化は、(プラス・マイナス)の値であった。
- ・自由エネルギー変化がマイナスの場合、反応は進むので、酵母によるブドウ糖の発酵反応は、 $40^\circ\text{C}$  において(進む・進まない)。

課題：進む？進まない？

- ・標準状態( $0^\circ\text{C}$ )でこの反応が進行するかどうかを『予言』し、その理由を説明しなさい。
- ・反応温度を何 $^\circ\text{C}$ にすると、反応は進まなくなるかを『予言』し、その理由を説明しなさい。

## 発展課題：どのくらい原料が使われたの？

科学者は、発生した二酸化炭素の量から、どのくらいの砂糖が使われたのかを計算することができるぞ。大まかに次の5段階で計算するんだ。

- ① 発生した二酸化炭素の量を読み取ろう。
- ② 量を分子の個数に変換する
- ③ 砂糖1分子から二酸化炭素が何分子できるのかを調べる
- ④ ②と③から砂糖何分子が使われたのか計算する
- ⑤ 砂糖1分子の質量と④から使われた砂糖の量を計算する

## 実際にやってみよう！

- ① 45°C, 30分間で発生した二酸化炭素は260 mLだった。
- ② 体積を個数に変換しなくてははいけない。ここで重要な法則がふたつある。

### ア. アボガドロの法則

**「0°C, 1気圧における $6.02 \times 10^{23}$ 個の気体の体積は、気体の種類によらず、22.4 Lである」**

液体が気体になると、とても体積が大きくなる。気体と液体、同じ個数の分子からなっているのだとすれば、液体が気体になると、同じ体積の中にある分子の個数はとても少なくなるはずだね。

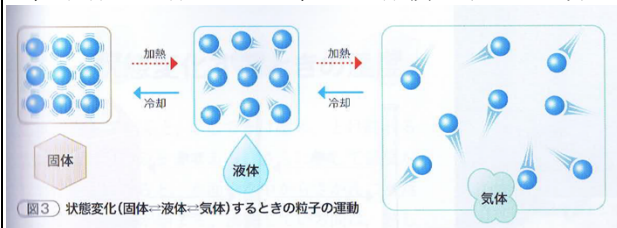


図4. 物質の状態変化(東京書籍より)

図4は見やすくなるように、液体と気体の差が小さく表示されているけど、実際には液体と気体の差はとても大きい。だって、アボガドロの法則にしたがうとコップ1/10くらいの水が蒸発したら22.4 Lにもなるんだ。とても大きくなるのがわかるだろう(こういうことは他にもあるよ。たとえば日本地図の北海道は実際のサイズだと日本地図に収まらないので2/3に縮尺されているらしいぞ！)。

そして、こんなに大きく広がると、粒子(分子)ひとつひとつの大きさは無視できるんだ。きみたちで考えてみよう。実験室に50人の生徒がいるとしよう。これは中々窮屈だし、もしこれが相撲取りだったら、50人では身動きが取れないかもしれないね。でも、大きさをもっと広げて松山市だったらどうだろう。同じようにきみたち50人と相撲取り50人がいたとして、一人当たりが使える広さは変わるだろうか。日本全体だったらどうだろう。そう、ここまで大きな範囲に広がれば、ひとり一人の大きさは問題にならないね。同じことが分子の世界でも言えるんだ。

「よし！これで二酸化炭素の個数がわかるぞ」と思うのは、まだ早い。良く条件を見てみよう。『0°C, 1気圧』と書いてある。1気圧は、私たちが生活する、この空間の気圧だから問題ないとして、0°Cはどうだろう。これは困ったね。なにしろ私たちの知りたいのは『45°C』のときの二酸化炭素の体積だ。しかし、与えられたのは『0°C』のときの体積だ。気体は暖めると体積が大きくなるというのは小学校4年生「金属、水、空気と温度」で習ったはずだ。『45°C』と『0°C』では二酸化炭素の数は同じでも体積が異なるはずだ。なんということだ！このままでは計算できない！と慌てる必要は無い。次の重要な法則で、その問題は解決するからだ。

### イ. シャルルの法則

**「圧力が一定のとき、気体の体積は、温度を1°C上昇させると、体積が1/273ずつ増加する」**

気体を暖めると増える体積の量には、一定の法則があるんだ。これを使って計算してみよう。これを式で表すと以下のようなになる。

$$V = V_0(1 + t/273) \quad \dots(a)$$

Vは体積,  $V_0$ は元の体積, tは温度(°C)だよ。実際に計算してみよう。

$$V = 22.4(\text{L}) \times (1 + 45(\text{°C})/273) \approx 26 \text{ L}$$

アとイより、

『45°C, 1気圧における $6.02 \times 10^{23}$ 個の気体の体積は、気体の種類によらず、26 Lである』ことがわかった。

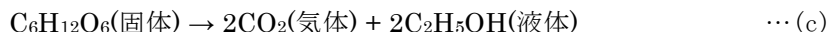
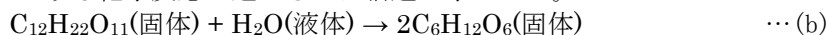
これで、二酸化炭素の個数が出せるぞ。今二酸化炭素は260 mLなので、以下のように計算できる。

$$260(\text{mL}) \div 1000 = 0.26 \text{ L}$$
$$0.26 \text{ (L)} \div 26 \text{ (L)} = \underline{\underline{0.01 \text{ mol}}}$$

molというのはダースとかカートンとかと同じで、あるまとまった数のよび名だ。この場合は、 $6.02 \times 10^{23}$ 個を1 mol(モル)とよんでいる。

二酸化炭素は0.01 mol使われた。もしくは $0.01 \times 6.02 \times 10^{23}$ 個使われた。…⑦

③ 酵母発酵でどのような化学反応が起こるかは宿題で学んだね。



④ 砂糖( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ )1分子から、ブドウ糖と果糖が1分子ずつできて、ブドウ糖もしくは果糖1分子から2分子の二酸化炭素ができるんだから、**砂糖1分子からは4分子の二酸化炭素ができる。** …④

⑤ どのくらいの砂糖分子が使われたのかを計算しよう。

⑦より、二酸化炭素は0.01 mol使われた。

④より、使われた砂糖の量は二酸化炭素の1/4だ。

合わせると、使われた砂糖の個数は、以下ようになる。

$$0.01(\text{mol}) \times 1/4 = 0.0025 \text{ mol} \text{ もしくは } 0.0025 \times 6.02 \times 10^{23} \text{ 個}$$

砂糖分子 $6.02 \times 10^{23}$ 個の質量は、342 gなので、使われた砂糖の質量は以下のように求められる。

$$0.0025 \text{ (mol)} \times 342(\text{g/mol}) \doteq 0.86 \text{ g}$$

つまり、砂糖は**0.86 g**使われた。

## 結果の評価

これで、「できた！」と思っ**て**はいけないぞ。なぜなら、これは**実験値から求めた推論**であって、これが『ほんとうである』という**確証**があるわけじゃない。じゃあ、どうすれば『ほんとうである』と言えるのだろうか。それには、**この推論を裏付けてくれるデータが必要だ**。鋭い人はピンときたかもしれない。推論を裏付けるために必要なデータを、すでにきみたちは持っている。どうして今回の実験ではふたつの方法で確かめたのか、の答えがこれなんだ。

ここで**糖度**が必要になるんだ。なぜなら、**最初に測った糖度と終了後にはかった糖度を比較すれば、どの程度砂糖が減っているのか評価できるじゃないか！**

• どのくらい糖度は下がるのだろうか？

推論を確かめよう。砂糖は40.0 gだったとしよう。すると最初の段階での糖度は以下ようになる。

$$40.0(\text{g}) \div \{225(\text{g}) + 40(\text{g})\} \times 100 = 15 \text{ Brix\%}$$

30分後に0.86 gの砂糖が使われたはずなので、30分後の砂糖の量は以下のように減っているはずだ。

$$40.0(\text{g}) - 0.86(\text{g}) \doteq 39.1 \text{ g}$$

このときの糖度は理論(理想的な数値)上、以下ようになる。

$$39.1(\text{g}) \div \{225(\text{g}) + 39.1(\text{g})\} \times 100 = \underline{\underline{14.8 \text{ Brix\%}}}$$

これが二酸化炭素の発生量から求められた理論的な(計算上の)糖度だ。きみたちが実際に求めた**実験値**としての糖度と、計算によって求められた糖度が**一定の範囲で**一致すれば、きみたちの推論は『ほんとうである』ということになる。

**科学とは常に証拠を求めているのだ！**

• 実験は、理論値と『絶対に一致しない』！

『一定の範囲で』一致すればというのはどういった意味だろう？

ここで重要なのは、計算した数値と実験で求めた値がぴったり一致することは絶対にないということだ。

むしろ、このふたつの数値は『理論上』絶対に一致しないはずだ。

理論値と実験値とが一致すれば『ほんとう』なのに、『絶対に一致しない』というのは矛盾していると思うかな。そうじゃない。実際の環境は『とても複雑』なんだ。砂糖を使ったパン酵母の発酵は、今まで考えた通りに進むと仮定したとしても、実際に実験を行った場合には、「温度の微妙なズレ」「発生する二酸化炭素が水に溶ける」「活性化エネルギーが不足して反応が進まない」「砂糖全体では活性化エネルギーが不足しているのに、数分子だけ元気で活性化エネルギー以上のエネルギーをもっている」などいろいろな要素が影響する。だから、実験で得られた数値は、計算で求めた値と『絶対に一致しない』。これを科学者は『誤差』とよんでいる。どんなに正確に実験をして、どんなに正確に測定をしても、必ず『誤差』は含まれる。一番基本的なところでは、「質量」だ。きみたちは砂糖や酵母、水の量を、電子天秤ではかったはずだ。しかし、電子天秤ではかった値にも『誤差』が含まれているとしたら？

**実験においては、常に『誤差』について考えなければならないんだ。**だから、科学者は、誤差、つまり数値の取り扱いに神経を使う。

#### ・どうすれば『誤差』を少なくできるのか？

じゃあ、どうすれば『誤差』を小さくできるのだろうか。これも『なぜそうなるのか』という疑問だね。いま、きみたちは実験を行った。でも、得られた値が『ほんとうか』『そうでないか』について悩んでいる。どうすれば、この値が『ほんとうである』と確かめることができるだろうか。

答えは簡単、もう一度やってみれば良い。もう一度同じ実験を同じように行って、同じ値が得られれば、少なくとも得られた値は『ほんとうである』ということができるだろう。ここに重要な答えがある。

**科学というのは再現可能(何度でも繰り返してできること)な問題を対象にしているということだ。**

だから、もう一度やってみるといのは、科学における基本的なやり方だ。では、きみたちは、もう一度同じ実験をやってみたとしよう。得られた値は、『ほとんど』同じだった。でも、『全く同じ』ではない。これはどうだろう。そう、これは『誤差』の問題だ。

表7.

	実験から得られた糖度	計算から求められた糖度
1回目	14.4 Brix%	14.3 Brix%
2回目	14.8 Brix%	

1回目の実験も2回目の実験も同じように『誤差』を含んでいる。じゃあ、どちらが『ほんとう』なのだろう。計算によって求めた理論的な値に近い方？いやいや、もしかしたら理論が間違っているかもしれないだろう？ どうして、そちらが『ほんとう』だと言えるんだい？

つまり、この問題を解決するためには実験は『2回では足りない』ということだ。3回やってみればどうだろう。1回目と2回目は値が違ったけど、1回目と3回目は同じ値が得られた。

表8.

	実験から得られた糖度
1回目	14.4 Brix%
2回目	14.8 Brix%
3回目	14.3 Brix%

こうなると、1, 3回目の値が『ほんとう』に見えてくるね。では、10回やったらどうなるだろう。

表9.

	糖度		糖度
1回目	14.4 Brix%	6回目	14.3 Brix%
2回目	14.8 Brix%	7回目	14.3 Brix%
3回目	14.3 Brix%	8回目	14.4 Brix%
4回目	14.2 Brix%	9回目	14.3 Brix%
5回目	14.4 Brix%	10回目	14.3 Brix%

10回やってみると、どうやら2回目がズレているだけで、あとは一定の範囲の値が得られたことがわかる。すると2回目には、何か操作上の問題があったのだろうか。それとも他の理由があって、発酵が進まなかった

のだろうか。という推論が立つね。どうだろう。『誤差』を小さくするためのヒントが得られただろうか。科学は再現可能な問題を対象にしているので、何度も繰り返してみるのが『誤差』を小さくするために必要な第一歩だ。つまり、科学は『統計』の学問とも言える。

しかし、何度も同じ実験をやるのは大変だし、時間が掛かる。もっとも時間を少なくできるのは何回なのだろうか。1回ではわからない。2回ではどちらが『ほんとう』なのかわからない。しかし、3回やれば、1回目と2回目、どちらかの値が『ほんとう』であることがわかるね。だから、科学者は、実験を最低3回繰り返すんだ。おもしろ理科教室第1回を思い出して欲しい。きみたちは液体が蒸発する速度をはかったけど、あのワークシートにも3回分、時間を書く場所があったね。あれは、こういった理由があったからなんだよ。

#### ・糖度と二酸化炭素はグラフからも求められるぞ！

「糖度を終了後にはかったのは終わって随分後だったし、二酸化炭素の発生量と糖度の数値が一致しないよ」と思うなら、なぜグラフを描いたのかを考えよう。ある時間の二酸化炭素の発生量を知りたければ、さきほどのグラフから導き出すことができるはずだ。

逆に、糖度のグラフを描いてもいい。糖度は直線的に減っているはずだから、ふたつの点を直線で結んで、必要な時間を割り出せば良い。そして、必要な時間の糖度が決まれば、最初の時間の糖度から差し引いて、約0.2 Brix%の値が出れば、この推論は裏付けられた。ということになる。

0.2 Brix%とは大幅にズレているなら、この推論のどこかに間違いがあるはずだ。それは単純な計算ミスかもしれないし、二酸化炭素の発生量の見積もりが間違えているのかもしれない(たとえば二酸化炭素が水に沢山溶けていたら?)。温度の読み取りが、ズレているのかもしれない。しかし、計算した数値と実験で求めた値が大幅にズレてはダメだということは絶対でない。推論のどこかに問題があるのなら、それを次の実験で確かめれば良い。そして、改良することによって推論が確かめられるかもしれないし、もしかしたら全く別の新しいことが見つかるかもしれない。だから、結果がどうであれ、<sup>あきら</sup>諦める必要などどこにもないんだ。

#### ・科学は証拠の後について行く

科学はこのようにして常に証拠の後について行く。だから、大声で自分の『正しさ』をアピールすることには意味がない(残念ながら、科学にもそうしたことが重要だった時代があったけどね)。科学者が評価するのは『証拠』だ。科学者にとって、年齢や性別や国籍は重要ではない。誰であろうと、『推論』とそれを証明する『証拠』があれば、それでいい。科学においてもっとも大事なことは、データを示し、データによって証明される結論を示すことだ。そのためには、予想を立て、実験し、結果を整理し、考察することが、とても重要なんだ。何がわかって、何がわからなかったのかを考え、どうすれば『知りたいことを知ることができるのか』を考える。これが科学なんだ。

#### 参考文献

- ・科学は不確かだ！ ファインマン著 大貫昌子訳 岩波新書
- ・科学は歴史をどう変えたのか マイケル・モーブリー&ジョン・リンチ著、久芳清彦訳 東京書籍
- ・実感する化学(上・下) A Project of the American Chemical Society 訳：廣瀬千秋 NTS 出版
- ・科学の方法 中谷宇吉郎 岩波新書
- ・Chemistry American Chemical Society 監訳：田丸讓二、翻訳：廣瀬千秋 NTS 出版
- ・科学は冒険！ ピエール＝ジル・ド・ジェンヌ、ジャック・バドス著 西成勝好、大江秀房訳 ブルーボックス
- ・ガリレオの指—現代科学を動かす10大理論 ピーター アトキンス著、齊藤 隆央訳、早川書房