

水の三態と状態変化について

— 教員養成系学部における化学の授業の在り方 —

谷川直也
岐阜聖徳学園大学教育学部

On three states of water and state change Regarding chemistry at a teacher training university

Naoya TANIKAWA

キーワード：水の三態 水の状態変化 水の状態図 閉鎖系 開放系

I. はじめに

水は私たちの身の回りに存在する身近な物質であり、地球環境下で固体の氷、液体の水、気体の水蒸気として存在する。氷を加熱すると水になり、水を加熱すると水蒸気になることはよく知られており、水の三態変化とよばれる。現行の学習指導要領では水の三態変化は、粒子の領域で小学校第4学年の金属、水、空気と温度、中学校第1学年の状態変化、高等学校化学基礎の物質の探究で取り扱われている。小学校第4学年の内容は「ウ 水は、温度によって水蒸気や氷に変わる。また、水が氷になると体積が増えること」では、水は温度によって液体、気体、または固体に状態が変化するというをとらえるようにする。留意する点として、100℃近くになると沸騰した水の中から出る泡は空気ではなく水が変化したものであることに気づくようにする。見えない水蒸気の存在を温度の変化と関係づけてとらえるようにすることと記されている¹⁾。中学校第1学年の内容は「(2) ウ 状態変化 (ア) 状態変化と熱 物質の状態変化についての観察、実験を行い、状態変化によって物質の体積は変化するが質量は変化しないことを見いだすこと。(イ) 物質の融点と沸点 物質の状態が変化するときの温度の測定を行い、物質は融点や沸点を境に状態が変化することや沸点の違いによって物質の分離ができることを見いだすこと。」では、ウの(ア)については、粒子のモデルと関連付けて扱うこと。その際、粒子の運動にも触れること。ウの(イ)については、純粋な物質の状態変化を中心に扱うことと記されている²⁾。高等学校化学基礎の内容は「(イ) 熱運動と物質の三態 粒子の熱運動と温度及び物質の三態変化との関係について理解すること。」では、粒子の熱運動と粒子間に働く力との関係により、物質の状態変化が起こることを理解させることがねらいであること、温度変化に伴う物質の体積変化の実験を通して、粒子の熱運動と温度及び物質の三態変化との関係を扱う。その際、物理変化と化学変化の違いに触れる。また、粒子の熱運動と関連付けて、気体分子のエネルギーには一定の分布が存在し、温度変化とともにその分布が変化することや、絶対温度の定義にも触れると記されている³⁾。小学校第4学年では物質として水の状態変化を取り上げているが、中学校第1学年、高等学校化学基礎は水以外の物質にも拡張し、物質の状態変化として取り上げていることがわかる。

現行の小学校第4学年の理科の教科書では、6社⁴⁾の中で2社に縦軸に温度、横軸に加熱時間とした「水の三態変化」のグラフが記されている。残りの4社は水から水蒸気になるときのグラフが記されている。

現行の中学校第1学年の理科の教科書では、5社⁵⁾の中で4社に「水の三態変化」と温度の関係を示すグラフが記されている。残りの1社は「物質の三態変化」と温度の関係を示すグラフが記されている。

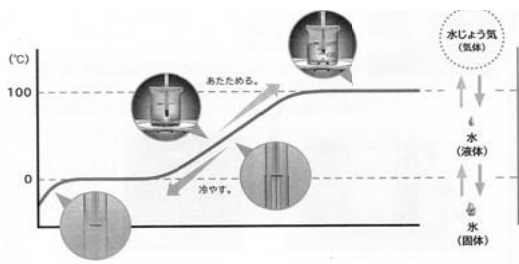


図1 水の三態変化
小学校第4学年理科教科書より

現行の高等学校化学基礎の教科書では、5社⁶⁾の中で4社に「水の三態変化」と温度の関係を示すグラフが記されている。残りの1社は「物質の三態変化」と温度の関係を示すグラフが記されている。

II. 問題の所在

水の三態変化のグラフは縦軸に温度、横軸を加熱時間として記されている(図1、図2、図3)。

図2、図3では、0°Cと100°Cの間は液体の水と明記されている。

身の回りの事象を考えると、0°Cと100°Cの間に水蒸気は存在する。そうでなければ、「洗濯物がなぜ乾くのか、水たまりの水はなぜなくなるのか」という疑問に答えることができない。

「洗濯物がなぜ乾くのか、水たまりの水はなぜなくなるのか」といった身の回りの事象と小学校第4学年の理科、中学校第1学年の理科、高等学校化学基礎の教科書に記されているグラフには矛盾があり、児童生徒が認知葛藤を起こすことが考えられる。

本学着任後の中学校教育実習の研究授業で水の三態変化の単元を扱った実習生の授業後の反省会の場で、「水の三態変化のグラフは0°Cと100°Cの間は液体の水と明記されているが、生徒から洗濯物がなぜ乾くのか、水たまりの水はなぜなくなるのか、という質問が出たとき、どのように回答するか」と尋ねた。実習生は「言われてみればそうですね。今まで考えたこともありませんでした。」と呟いた。

本年度、化学I・化学II・化学IIIの受講者(N=88)を対象に図4の質問紙を与えた。

科学的に正しい回答数は0であった。

回答の一部を次に示す。

- ・水たまりの水は地面の土に吸い込まれるため、無くなる。
- ・改めて言われて「そういえばそうだな」と不思議に思った。
- ・自分が学習したときはそういうものなんだと一方的に受け入れていたが、日常生活と結びつけると謎な点があり、このような謎を教えられるような教員になりたい。
- ・中学理科で0°C~100°Cの間でも水の蒸発が起こることは学習した記憶がある。
- ・全くわからないけれど、化学と日常のつながりがないことを感じます。

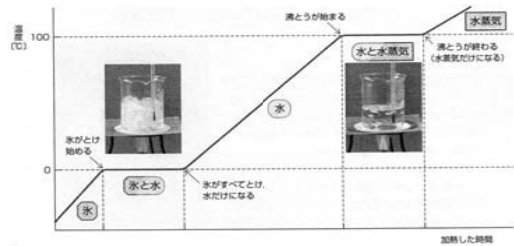


図2 水の三態変化
中学校第1学年理科教科書より

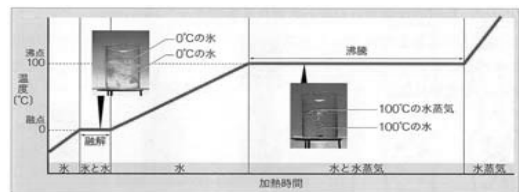


図3 水の三態変化
高等学校化学基礎より

化学I・化学II・化学III 課題【制限時間：10分】
学籍番号() 氏名()

高校3年生のA君とBさんが次のような会話をしています。
傍で理科を専攻する大学生のあなたがその話を聞いていた場合、どのように説明しますか。
※ここでは、説明する前提として、理科教員として加えておくべき知識を回答すること。
A君：中学校の理科の教科書に載っていた水の三態変化のグラフ(図)を覚えていて？
Bさん：ええ。高校の化学の授業でも習ったわね。いくら熱を加えても、融点、沸点は一定になるとか、状態変化、温度変化に要する熱量の計算がややこしいやつね。
A君：不思議に思うことがあるんだ。
Bさん：何が？あのグラフの問題は大学入試では定番の問題で、問われることもほとんど決まっている。この前の模擬試験でも出題されていたけれど、楽勝だったけれど。
A君：図によると、1気圧のときには、0°C~100°Cの範囲は液体の水の状態が存在するとなっているよね。
でも、水たまりの水は、なぜ、なぜ、なくなるんだろう。洗濯物は、なぜ、乾くのだろう。
Bさん：・・・

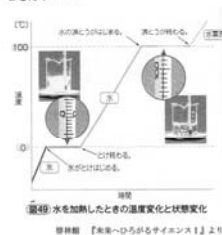


図4 大学生への質問紙

水の三態変化のグラフは理科の教科書では定番のグラフである。入試問題でもよく出題されているが、0℃と100℃の間のH₂Oの状態を問われると、ためらわず液体の水と答えてきたものと思われる。恥ずかしながら、筆者自身もそうであった。

理科の教科書の中で定番と思われる水の状態変化のグラフに日常生活で経験する事象との間に乖離があるのでは、実感を伴った理解はほど遠いと言える。

本学の学生が将来、小・中・高等学校の教員になったとき、水の三態変化のグラフを科学的に理解し、説明できることは、次期学習指導要領で叫ばれている「深まりのある学習」を実践する上で重要であると考える。

Ⅲ. 化学Ⅱの授業実践の概要

本学の2年生対象の化学Ⅱでは、物質の状態を柱とする講義を行っている。物質の状態とは固体、液体、気体のことである。講義では図5の問題を解かせることから始めるようにしている。問題は大学入試用問題集⁷⁾の例題から引用したものである。高校化学から大学化学への橋渡しとしての役割を担う教材として位置づけ、毎回の講義のねらいを明確にするために最初に解かすようにしている。

(1)の液体だけが存在するグラフ中の区間についてはほとんどの学生がC～Dの正解を書く。

次に、Ⅱ.問題の所在に記した、0℃と100℃の間は液体の水が正解であるが、「洗濯物がなぜ乾くのか、水たまりの水はなぜなくなるのか」と問いかける。

教室全体は静まり返る。そこで、水の三態変化のグラフは実験によって導かれたものなのか、理論から導かれたものなのかと問いかける。このとき、気体の法則で出てくるボイルの法則、シャルルの法則のグラフは実験によって求められたものだと助言することになっている。

ほとんどの学生たちは教科書のグラフが、実験から導かれたものなのか、理論から導かれたものなのかという視点での説明をこれまで受けていないので、戸惑いの表情を浮かべる。

現行の高等学校化学基礎、化学の教科書には水の状態図(図6⁸⁾)が掲載されている。

改めて、物質の状態を決める物理量は何かと問いかける。気体の状態方程式 $PV=nRT$ を板書し、考えやすくするため、気体1 molとすると、 $PV=RT$ となる。

Rは気体定数 $8.31 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{L} / (\text{mol} \cdot \text{K})$ である。

つまり、気体の状態を決めている物理量は、圧力P [Pa]、体積V [L]、T [K]だとわかる。

物質の状態を決める物理量も圧力P [Pa]、体積V [L]、T [K]だと説明する。

そして、一成分系の状態図(P-V-T図)(図7⁹⁾)を提示する。

三次元の状態図は見にくい。P-V-Tの三次元図を二次元平面に投影したものにはP-T、P-V、T-Vの三つの図が考えられるが、高校・大学教育段階ではP-T図がわかりやすい。図7を白抜き矢印の方向から眺めて、P-T平面に投影すると図6のようになると説明するようにしている。

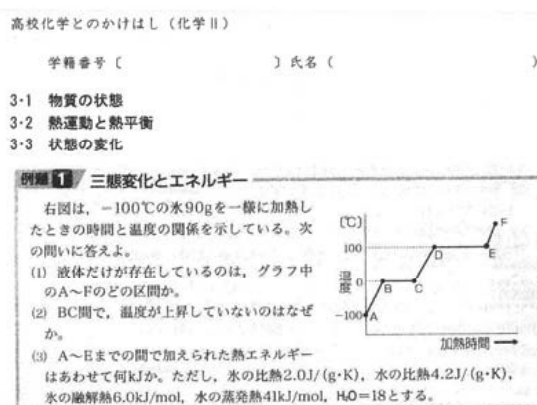
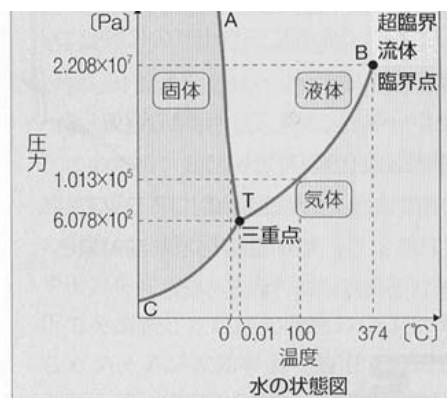


図5 高校化学からの橋渡し



BT: 液体と気体を区切る曲線を蒸気圧曲線
 AT: 固体と液体を区切る曲線を融解曲線
 CT: 固体と気体を区切る曲線を昇華圧曲線
 といひ、これらの曲線上では両側の状態が共存する。

図6 水の状態図(P-T図)

ここで、水の状態図の読み方を次のように説明することになっている。水の状態図（図8¹⁰⁾）の縦軸の圧力 $P=1$ 気圧の下で、温度を上げていく（ $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ ）と、固体、液体、気体の状態に変化することが分かる。

B点の温度が融点（ 0°C ）、D点の温度が沸点（ 100°C ）となる。

この変化は水の状態変化のグラフ（図9¹¹⁾）と対応していることがわかる。

つまり、水の状態変化のグラフは水の状態図（ $P-T$ 図）から導かれるものだということが理解できる。

IV. 考察

図10¹²⁾ は、図8の水の状態図のA~Eの状態を図解したものである。つまり、水の状態図は水のみが純物質として閉鎖系に存在するときの状態変化を示していることがわかる。

日常生活において体験する水の状態変化は、大気中という開放系における水の状態変化だという点が誤解を生む原因になっているのではないかと考える。

そう考えると、図9はビーカーの中の H_2O の状態変化の実験系であるため、開放系における水の状態変化ということになってしまい、図8の閉鎖系と矛盾する。

そこで、図9は大気中の実験系であるが、大気という蓋のある閉鎖系の実験系であると考えすることはできないだろうか。

このように考えると、水の状態図と水の状態変化の関係に矛盾がなくなるのではないかと推測できる。

しかし、図9には蒸発という現象が含まれないことが課題として残る。

蒸発は、液体表面で起こる。これは、大きな運動エネルギーをもつ分子が、他の分子間の相互作用を断ち切り、液体から飛び出しやすいためである。ここで、大きな運動エネルギーをもつ分子が、液体表面に多く集まるという意味ではない。角砂糖1個を水に溶解させると、濃度は均一となる。これは、水分子が絶えず動き回っていることの証拠である。つまり、各水分子はさまざまな運動エネルギーをもつ。水分子同士が衝突すると、エネルギーが一つの水分子から他の水分子へ移動する。もし、水面にある水分子が、空気中に飛び出そうと、下から上がってきた大きな運動エネルギーをもった分子と衝突すると、水面の水分子が液体の

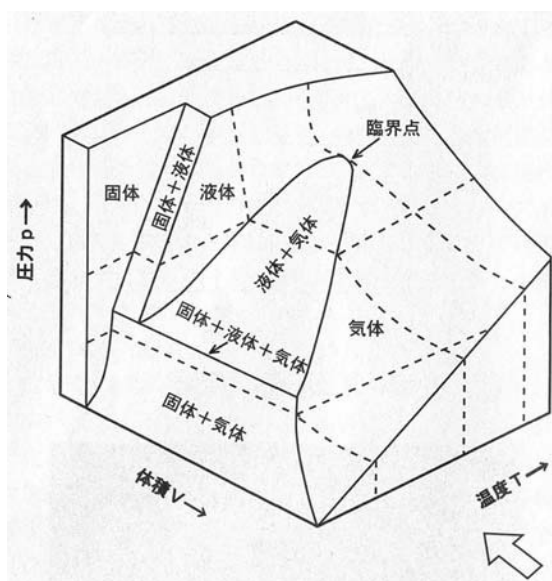


図7 一成分系の状態図（ $P-V-T$ 図）

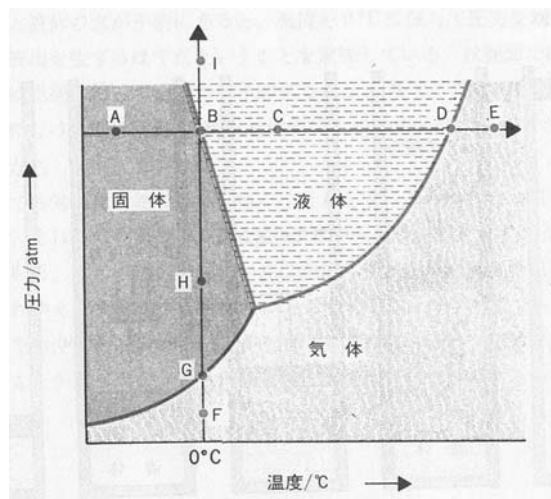


図8 水の状態図の読み方

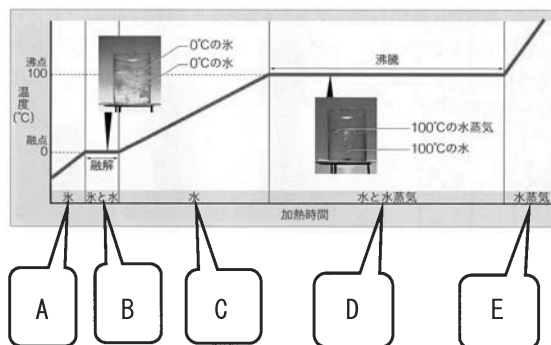


図9 水の状態図と水の三態変化のグラフの関係

水から飛び出すのに必要なエネルギーを衝突によって獲得することも起こる。

水の入ったビーカーに蓋をした状態（閉鎖系とよぶ）では、蒸発する分子数と凝縮する分子数が等しくなる。この平衡状態を気液平衡とよぶ。



気液平衡のとき、蒸気（液体と共存する気体のこと）の示す圧力を飽和蒸気圧とよぶ。

特に、水の場合、蒸気＝水蒸気、飽和蒸気圧＝飽和水蒸気圧とする。

水を例として、飽和蒸気圧がどのようにして決まるのかを以下に記す。

$$K = \frac{[\text{H}_2\text{O}(\text{気})]}{[\text{H}_2\text{O}(\text{液})]} \quad K: \text{平衡定数} \quad [] \text{はモル濃度を示す}$$

水の密度を ρ [g/cm³]、質量を W [g]、分子量を M 、物質量を n [mol] とすると、水の体積 V [cm³] は、次のように表せる。

$$V = \frac{W}{\rho} \quad n = \frac{W}{M} \quad \therefore [\text{H}_2\text{O}(\text{液})] = \frac{n}{V} = \frac{W/M}{W/\rho} = \frac{\rho}{M}$$

つまり、水のモル濃度は水の質量 W に無関係に一定となる。

平衡定数 K と $[\text{H}_2\text{O}(\text{液})]$ の積を新しく平衡定数 K_c とする。

$K_c = K[\text{H}_2\text{O}(\text{液})] = [\text{H}_2\text{O}(\text{気})]$ が成り立つ。この平衡定数 K_c は水蒸気 $\text{H}_2\text{O}(\text{気})$ のモル濃度のみを含む。

水 $\text{H}_2\text{O}(\text{液})$ の蒸気圧を P として理想気体の状態方程式 $PV = nRT$ に代入すると、次の関係式が得られる。この式から、一定温度では飽和蒸気圧は一定で、水の量には無関係とわかる。

$$[\text{H}_2\text{O}(\text{気})] = \frac{n}{V} = \frac{P}{RT} \quad \therefore K_c = \frac{P}{RT}$$

飽和蒸気圧は、閉鎖系（密閉容器）で、液体から気体に状態変化するときを考える化学概念である。開放系（蓋のない容器）のとき、液体に接している空間の体積は無限大であるため、雨でも降っていない限り大気は飽和蒸気圧に達していないから、液体はすべて蒸発する。蒸発は、閉鎖系で考える液体から気体への状態変化で、図6の蒸気圧曲線上に蒸気の圧力として示されている。

蒸発と沸騰はともに液体から気体への状態変化であるが、大気中の水蒸気の分圧が飽和（湿度が 100%）でなければ、低温でも水蒸気になる。これが、蒸発である。原因は図11¹³⁾にある（液体分子のもつ運動エネルギー分布）。

瞬間的に起こる沸騰とは区別して考えなければならない。

V. まとめと課題

水の三態は私たちの身の回りに日常的に存在し、私たちの生活に密接に結びついている。しかし、密接に結びついているからこそ、理解したつもりになっていることも多い。水の三態変化は化学熱力学的観点から解釈することができる。

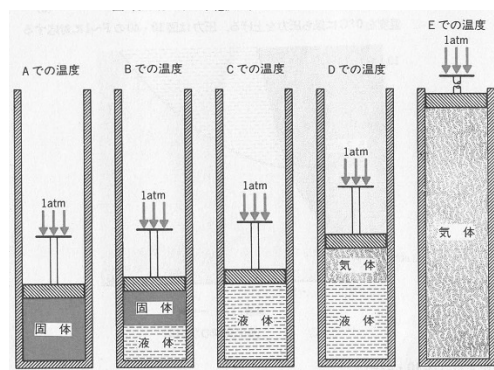


図10 水の状態図のA～Eのモデル

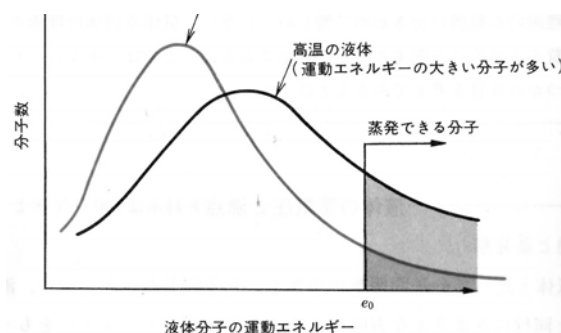


図11 液体分子のもつ運動エネルギー分布

筆者は、水の状態変化は水の状態図から導かれたものとして捉えさせ、大気という蓋のある閉鎖系として、融解、沸騰を説明し、蒸発は分けて説明するのが生徒の認知葛藤を軽減すると考える。

課題は、化学熱力学的には開放系における挙動である沸騰を大気の蓋という考え方で閉鎖系の挙動として扱うことが科学的に許されるかどうかという点である。

注・文献

- 1) 文部科学省：小学校学習指導要領解説理科編（2008），35.
- 2) 文部科学省：中学校学習指導要領解説理科編（2008），32-33.
- 3) 文部科学省：高等学校学習指導要領解説理科編 理数編（2009），52-53.
- 4) 毛利 衛・黒田玲子ほか32名（2015）：「新編新しい理科4年」，東京書籍，108-133.
霜田光一・森本信也ほか34名（2015）：「みんなと学ぶ小学校理科4年」，学校図書，90-113.
石浦章一・鎌田正裕ほか52名（2015）：「わくわく理科4年」，啓林館，144-171.
有馬朗人ほか43名（2015）：「新版たのしい理科4年」，大日本図書，146-173.
養老孟司・角屋重樹ほか27名（2015）：「未来をひらく小学理科4」，教育出版，162-193.
癸生川武次（2015）：「楽しい理科4年」，信州教育出版社，96-101，134-139，162-175.
- 5) 細谷治夫・養老孟司・丸山茂徳ほか27名（2016）：「自然の探究 中学校理科1」，教育出版，49-67.
岡村定矩・藤島昭ほか49名（2016）：「新編新しい科学1」，東京書籍，114-137.
有馬朗人ほか62名（2016）：「新版理科の世界1」，大日本図書，96-113.
塚田捷・大矢禎一・江口太郎・鈴木盛久ほか58名（2016）：「未来へひろがるサイエンス1」，啓林館，156-175.
霜田光一・森本信也ほか29名（2016）：「中学校科学1」，学校図書，26-43.
- 6) 竹内敬人ほか17名（2016）：「化学基礎」，東京書籍，32-38.
野村裕次郎・辰巳敬ほか6名（2016）：「高等学校化学基礎」，数研出版，28-30.
齋藤烈・藤島昭・山本隆一他19名（2016）：「化学基礎」，啓林館，33-36.
山内薫ほか18名（2016）：「高等学校化学基礎」，第一学習社，29-31.
木下實・大野公一ほか17名：「化学基礎新訂版」，実教出版，29-31.
- 7) 東京書籍（2008）：「ニューグローバル化学I+II」，東京書籍，205.
- 8) 東京書籍（2014）：「化学」，東京書籍，17.
- 9) 田村定義（2008）：「三態変化と状態図」，化学と教育56巻12号，日本化学会，626-629.
- 10) J. E. BRADY・G. E. HUMISTON（2001）：「ブラディー一般化学（上）」，東京化学同人，411.
- 11) 東京書籍（2018）：「改訂化学基礎」，東京書籍，33（筆者が加筆）
- 12) J. E. BRADY・G. E. HUMISTON（2001）：「ブラディー一般化学（上）」，東京化学同人，411.
- 13) 藤谷正一・木野邑恭三・石原武司（1995）：「絵とき化学入門」，オーム社，184.