

理科教育における実験と理論

濱 田 圭 之 助*

(昭和61年10月31日 受理)

Experiment and Theory in Education of Science

Keinosuke HAMADA

(Received Oct. 31, 1986)

1. はじめに

理科教育に関する多様な問題が論議の対象になっているが、不思議なことに、理論的に解決されていない実験結果、あるいは逆に実験で立証できない法則等について、公の場で論議されたことを聞かない。このため、理科教育が著しく阻害されていることは否定できない。これらの象徴的な事例を挙げ問題提起の一石としたい。

2. 物質は加熱すると化合するのか分解するのか

中学校の参観授業の折、生徒から「本日の実験では、マグネシウムを加熱すると酸化マグネシウムができることが分かったが、先日の実験では、酸化銀を加熱すると銀と酸素に分解した。加熱するとある場合には酸化物を生じ、ある場合には酸化物が分解するが、一体加熱することは化合物を作ることなのか、化合物を分解することなのか」という質問がなされたが、結局時間切れのため、この問題は「物質によって違う」ということで、うやむやになってしまったということが述べられていた¹⁾。

筆者達の仲間内でもかつて「加熱すると化合する場合もあれば分解する場合もある。これを理論的にはどう説明すればよいか」ということが問題になったことがある。しかし行きつくところは、ギブスの自由エネルギー G の減少の方向 ($\Delta G < 0$) に反応は進むということである¹⁾。

しかし如何なる本を見ても、 G が減少する方向に何故反応が進むのか、という科学的根拠は全く示されていないのである。事実 G の減少で説明しようとする問題点が至るところに噴出してくるのである。たとえば $G = H - TS$ であるが、 ΔG の値をどうやって求めるのか、あるいはまた熱力学第二法則では反応は S の増大の方向であると言っているが、一体反応は $\Delta G < 0$ の方向に進むのか、 $\Delta S > 0$ の方向に進むのかといった点である。しかし教科書や参考書に書かれ、多くの人々に長年に亘って慣れ親しまれてきた事項に、

*長崎大学教育学部化学教室

問題点ないしは誤りがあるはずがないという気持ちと、多くの先輩科学者が考えて解決したことに、今更我々如きが考えても仕方がないという気持ちから、その疑問を晴らすことに積極的にはなれなかったというのが、いつわらざる心境であった。

3. 古典力学的自然観に基づく説明

(1) 古典力学的自然観

ニュートンは、物体のいまある状態を変える作用をするものとして力を考えた。つまりリングが木から落ちるのは、地球の引力により引っぱられるからであり、落下の方向はポテンシャルエネルギーの減少の方向であるということである。このように実験を含めて森羅万象これすべて、ニュートン力学に基づいて説明されなければならない。

実は先の事例が説明できなかつた伏兵はここにあったのである。エントロピー S にしてもギブスの自由エネルギー G にしても、ニュートン力学と何の関係もないのである。このような S や G を用いて自然現象が説明できるわけがないのである。

次にエントロピー増大の法則と言われる熱力学第二法則を、ニュートン力学を基にして説明してみよう。

(2) ニュートン力学と熱力学第二法則

熱力学第二法則によると、「自発変化あるいは自発反応は、エントロピー S が増大する方向に進む」と言われている。熱力学第二法則の言うところであるので、誰しも信じて疑わず、「自発変化・反応は $\Delta S > 0$ の方向に起る」と念佛のように唱えている。しからばエントロピーとは何ぞやと問うと、不規則性あるいは乱雑さを示す量であると答える。それでは何故不規則性を増す方向に自発変化・反応が起るのかと問うと、図のように容器Aに

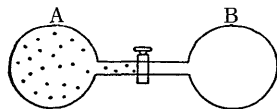


図1 気体の自由膨脹

気体を詰めた後コックを開くと、容器Aの気体が真空容器Bに流れ込み、気体は容器A中にあるより、より広い範囲に拡がるので乱雑になる。つまり容器A中の気体は、コックを開いてやると、より乱雑な状態になるよう真空容器Bに流れ込むのではないかという。それでは、気体の密度が小さい状態がより乱雑ということになり、極限の真空状態が最も乱雑な状態ということになる。そうすると乱雑さの最も大きい状態Bに気体が入り込むことになり、熱力学第二法則に反することになるのではないかと問うと、熱力学第二法則が間違いであるはずがない。それに矛盾する事実が現われれば、そのような現象はエントロピーの法則に合わない例外的現象であると言う。しかしながら、自然科学においては法則に例外はないのである。実験結果に反するところがあれば、熱力学第二法則といえども疑ってみなければならない。気体の自由膨脹は、ニュートン力学に基づいて次のように説明できる。

容器Aに気体が詰まり容器Bは真空であるという状態は、天然には存在しないのであって、真空ポンプを使用してはじめて可能である。つまり容器Aは気体分子が詰めこまれ反撥のポテンシャルエネルギーの高い状態である。したがってコックを開き容器AとBを通じせしめると、気体はポテンシャルの高いAからポテンシャルの低いBに流れるのであって、エントロピーの増減とは関係ない。

(3) 加熱することは反応を促進することである

ニュートン力学では物質が落下するという現象は、物質が地球の引力によってポテンシャルエネルギーの減少の方向に引っぱられるということである。化学反応も同様に、活性化エネルギー以上のエネルギーが与えられたとき解離した原子が、互いの引力によって結合しポテンシャルエネルギーの小さい分子になる現象である。この反応前後のポテンシャルエネルギーの差が反応熱となるわけである。つまり反応の方向はポテンシャルエネルギーの減少の方向であって、 $\Delta G < 0$ の方向とか $\Delta S > 0$ の方向とかではないのである。

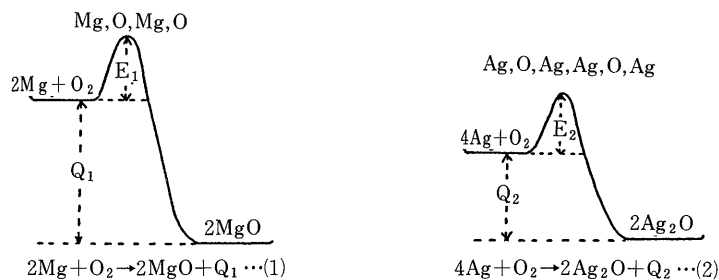


図2 化合および分解のエネルギー関係

上図は定性的に各反応のエネルギー関係を示したものである。 E_1 と E_2 はそれぞれの反応の活性化エネルギーで、 Q_1 と Q_2 はそれぞれの反応の反応熱である。また $(E_1 + Q_1)$ と $(E_2 + Q_2)$ はそれぞれの逆反応の活性化エネルギーとなる。

反応が生ずるためには、反応物質(分子)の運動エネルギーが活性化エネルギーを越えなければならない。したがって、何れの反応も加熱すればする程反応が起りやすくなる。つまり加熱すると化合物を作るということである。すなわちMgあるいはAgを空気中で加熱すると、MgOあるいはAg₂Oを生ずる。逆にMgOあるいはAg₂Oを加熱して、それぞれに $(E_1 + Q_1)$ あるいは $(E_2 + Q_2)$ 以上のエネルギーが与えられると分解をはじめると。つまり加熱すると分解するということでもあるのである。ただMgOの分解の活性化エネルギー $(E_1 + Q_1)$ がAg₂Oのそれ $(E_2 + Q_2)$ より大きいため、Ag₂Oの分解温度ではMgOは分解しないだけである。更に高温にすればMgOも分解する。つまり加熱することにより、化合もすれば分解もするということである。

4. 理科教育への教訓

(1) 実験と理論は車の両輪である

自然科学(理科)の法則は実験結果より帰納されたものである。理科教育において実験が重要であることは当然である。しかも生徒側からすれば、実験の意義が何であろうと実験は面白いから好きなのである。その結果、実験を多く採り入れることが、理科教育により適しているとすら風潮が生まれるのである。しかしながら実験の表面的観察に終始し、その現象の生ずる理由、あるいはその現象から求められる規則性の追求がなされない場合、実験が単なるショーに終るおそれもあるのである。逆に、実験で確認されていない法則が、一般に正しいものと信じ込まれているため、理科教育を著しく阻害している例もある。熱力学第二法則の盲信がこれである。要するに実験はやり放しではなく、何故このような現象が現われるのか考えさせなければならない。また腑に落ちない法則は、実験

によって確かめなければならない。

(2) 原理・法則にはあやまりもある

加熱による化合・分解あるいは物質の落下現象を、通説となっているエントロピーあるいはギブスの自由エネルギーを用いることなしに、自然科学の原点に帰ってニュートン力学に基づいて説明した。しかしこのことは、熱力学第二法則の否定につながり、ありうべからざることにように思える。しかし筆者はかつて、化学教育誌で次の記事を拝見したことがある²⁾。「講義準備の前日に、何年も繰り返し教えてきた内容に、突然と疑問が生じ解決できぬことがある。その結果講義の際には、それに触れないように努めた経験もある。大抵の場合には何等かの方法で解決できたが、時には現在の通説的解釈が誤りと判り、びっくりする場合もあった」。このように、現在正しいものとしてまかり通っている自然科学上の通説が、間違いである可能性もあるわけである。

リングが木から落ちるのは地球の引力によるのであるから、束ねたカードも同様に引力により落下するはずであるのに、熱力学第二法則によるとエントロピーの増大の方向に落下するという。熱力学第二法則といえども、これでは間違いと言わざるを得ない。

5. おわりに

筆者は自発変化・反応をエントロピーや自由エネルギーを用いることなしに、ニュートン力学に基づいて説明した。講義もこの線に沿って行っており、学生も「自発変化・反応は、 $\Delta S > 0$ や $\Delta G < 0$ の方向ではなくポテンシャルの減少の方向である」ということを当然のこととして受け入れてくれている。しかしながら困ったことに、このことはまだ公式に認められていない。したがって講義のあとで、教員や公務員などの採用試験では、「リングが木から落ちるのはポテンシャル減少の方向に落下するが、リング以外の物質はエントロピー増大の方向に落下する」と書くようにと、冗談にしても付け加えなければならない。科学的に何の根拠もない問題を提出し、意味も分らずに解答させたのでは、採用試験の意義も何もあったものではない。

自然科学にはなお解決しなければならない多くの問題がある。たとえばル・シャトリエの原理は、気体平衡の場合定容で温度を上げると圧力も上がるので、実験で確認できないはずである。事実筆者の溶液平衡の実験では、温度が高い程平衡は発熱反応の方向に移動し、ル・シャトリエの原理に反する結果を得ている³⁾。あるいはまた、ネルンスト式を用いて電池の起電力が計算できるなら、標準水素電極を用いて実験的に、相対電位を測定する必要はないではないか等である⁴⁻⁷⁾。

一般に、これまでの法則あるいは通説があやまっていると思われるも、これを正すことはおろか俎上に載せることすらなかった。これらの早急な解決なくして、正しい理科教育が行なわれるとは思われない。

(附) エントロピー

カルノー熱機関は、等温 (T_1 °K) 膨脹 (A→B)・等温 (T_2 °K) 圧縮 (C→D) および断熱膨脹 (B→C)・断熱圧縮 (D→A) を組み合わせた、熱損失の全くない理想的な熱機関である。熱機関は A→B→C→D の行程を繰り返すのであるから、本来の仕事 (A→B, B→C) のた

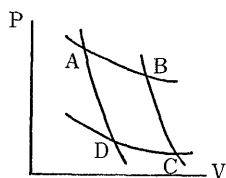


図2 カルノー熱機関

めのエネルギー Q_1 以外に、たとえばピストンを元に戻す ($C \rightarrow D$, $D \rightarrow A$) ためのエネルギー Q_2 を必要とする。この Q_2 は仕事にはならないが、熱機関を動かすためにはどうしても必要なものである。擬熱損失とすることができる。この Q_2 は等温 ($T_2^\circ\text{K}$) 圧縮 ($C \rightarrow D$) の

とき、圧縮熱として外部に捨てられる熱量である。カルノー熱機関では $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$ となるので、この比を S とおいてエントロピーと名付けた。このようにエントロピーに「乱雑さ」を表わす何物もないし、ましてやエントロピーの増大の方向に、自発変化・反応が進むという科学的根拠は何もないのである⁷⁾。ダムの水は地球の引力によりポテンシャルの減少の方向に流れ、その差が水力電気になり、自発反応は化学力によりポテンシャルの減少の方向に進み、その差が反応熱（火力電気）になるのである⁷⁾。

エントロピー S とは、 $Q_2 = ST_2$ より「擬熱損失の容量因子」の意味を持つだけのものである。仕事をする熱エネルギーについては、 $Q = RT$ すなわち R が強度因子となる^{7,8)}。

- 1) 伊藤 武, 理科の教育, **34**, 651 (1985)
- 2) 広田鋼蔵, 化学教育, **30**, 121 (1982)
- 3) K. Hamada, *Bull. Chem. Soc. Japan*, **34**, 596 (1961)
- 4) 濱田圭之助, 「化学教科書の問題点 (I)」化学教科書研究会 (1981)
- 5) 濱田圭之助, 「化学教科書の問題点 (II)」化学教科書研究会 (1983)
- 6) 濱田圭之助, 「化学教科書の問題点 (III)」化学教科書研究会 (1984)
- 7) 濱田圭之助, 「新熱力学による化学反応論—エントロピー神話の崩壊—」化学教科書研究会 (1986)
- 8) 佐藤 弦, 化学教育, **33**, 409 (1985)