

# 科学教育における「質量保存」の法則 －「教えられないこと」をめぐって

森川 鐵朗\*・澤田 和弘\*\*

(平成17年10月6日受付；平成17年11月10日受理)

## 要 旨

本稿では「教えられないこと」を見地として、科学教育における「質量保存」の法則をあつかう。まず、教科書・参考書にみられるこの法則を、三種類の数理的な表現に分類した。次に、この分類法による一種(ランドルト型閉鎖系)のみが、実験教材化可能であることを明らかにした。最後に、科学授業の改善のために、保存則にかかわる「教えられないこと」を議論した。

## KEY WORDS

conservation of mass	質量保存	law	法則
change	変化	Landolt's experiment	ランドルトの実験
science teaching	科学授業	what cannot be taught	教えられないこと
play science	科学あそび	science education	科学教育

## 1 はじめに

教育現場では「おもしろ実験」「科学マジック」などが盛んである。煙をだしたり、音をだしたり、驚かす(気を引く)授業を、生徒はテレビの手品ショーのように「興味と関心」をもって受ける。生徒とのやりとりで、正解を含む複数の選択肢を与えれば「科学クイズ」授業となる。回答では「あたった!」「あたらない!」となり、教室は大いに盛り上がる。さて「この物質は何かな」と教師が問うと、教室はさっと白ける。高等学校授業でも「楽しむ科学」でよいのだという教師もいる。これらの実験や授業は『幼児の科学あそび<sup>1)</sup>』にいう「前操作」のように思えてくる。幼児期における「前操作」とは、経験と結びつけての行動を手がかりに事物をとらえるという、認識の発達における第1段階とのこと。自然科学の中等教育課程では「形式的操作」(言語をもって抽象的に考えられる第3段階、11歳以後)は望めないのだろうか?

『習熟度別指導の何が問題か<sup>3)</sup>』も、科学授業の改善についてのヒントをわれわれに与える。生徒は狭くて浅い水準で(少人数で)丁寧に学ぶのでよくわかる。教師と生徒は共に満足する。けれども、結果は共に落ちていく。化学用語「共沈」を借りれば「共足共沈(きょうそくきょうちん)」現象(造語)といえる。前出の「前操作」的授業のいずれにも、やはり「共足共沈」現象がみえる。この「罨」から抜け出るのは容易ではない。

「共足共沈」現象は、学習者の「目線」で教育目標を定めると下がる一方であることを端的

\* 上越教育大学自然系教育講座 〒943-8512 上越市山屋敷町1

\*\* 大阪教育大学実践学校教育講座 〒543-0054 大阪市天王寺区南河堀町4-88

に示している。単発的な事例や経験を蓄積するだけでは、科学の学習とはいえない。科学的な理解あるいは法則的な理解とは、広く成立する条件の理解のことで、学習者は具体的現象から抽象的な理解へと飛躍しなければならないからである。「共足共沈」現象の罫から抜け出るには、どうすればよいのだろうか。われわれは、まずは「教えている（べき）こと」と「教えられないこと」の峻別が必要だ、と考える。「教えられないこと」を明らかにすることによって、本来的に教えるべきことを教えていないことに気付く、と期待できるからである。本稿では「教えていること」と「教えられないこと」を見地として採用する。

「教えない教育が学ぶ力を育てる」という実践も報告<sup>4)</sup>されている。「教えられるから学ぶ」のではなく、「教えられなくても学ぶ」視点を教育現場の中に取り入れる、という。このような「教えないこと」を生かす教育方法は、科学教育にも大きな示唆を与える。しかし「おもしろ実験」はこの「教えないこと」を生かしているのではない。「おもしろ実験」は、体系的な理解の一環として位置づけられていないからだ。科学教育において「教えないこと」を積極的にあつかった実践例の報告はあまりみかけない<sup>5)</sup>ようだ。科学教育においては、学習者が受けた教育水準はそのまま海外のそれと比較されてしまうので、科学教師は、必要なだけ教えたのだろうか、という強迫観念を常に抱かざるを得ないのである。

科学教育において、獲得されるべき（学習者が獲得すべき）目標は、科学の知識のみならず「科学する力」の涵養である。この力は、未知の世界（自然の現象）に出会っても、発達段階においてそれなりに、理解できる（洞察できる）こと、と言い換えてもよい。「教えないこと」はこの「洞察する力」をいかに学ぶかに、かかわってくるのであろう。科学教育における「教えられないこと」は極めて広範囲のテーマに関係する。そこで、議論を精密にするために、自然科学の研究法にならって対象を絞る。本稿では、質量保存の法則をめぐる「教えていること」と「教えられないこと」を考察する。

## 2 質量保存則の表現をめぐる

質量保存則<sup>6,7)</sup>は「もの（物質、物体）」の状態変化<sup>8)</sup>に対して、変化の前後で比べて、質量<sup>9)</sup>がどうなるか、をまとめている。質量は「もの」の属性<sup>10)</sup>であり、物質は（原子・分子で構成されているとする）原子・分子説の出発点<sup>11)</sup>である。したがって、初等中等科学教育にとってこの法則は、慎重に検討されるべき重要事項となっている。法則にはいろいろな言い回しが可能だが、結局は次の三種（の和文表現）に整理できる<sup>12)</sup>であろう：

(i)系<sup>13)</sup>の質量は、保存量である ( $d_i m = 0$ ) .

(ii)系<sup>14)</sup>の質量の変化量は、外界から系に出入する質量に等しい ( $d m = d_e m$ ) .

(iii)系<sup>15)</sup>の質量は、外界からの出入りがなければ、一定である ( $d_e m = 0$  のとき、 $d m = 0$ ) .

これらの和文表現はそれぞれ、括弧の中の数式を言葉にしたものである。巨視的（熱力学的）系を取り上げ、その質量  $m$  の変化量（時間経過後と前との差）を  $d m$  と記す。この  $d m$  は一般的に、系内で生成消滅する  $d_i m$  と、系と外界との間で出入する  $d_e m$  との代数和

$$d m = d_i m + d_e m$$

で書けるはずである。したがって、このフレーム ( $d m = d_i m + d_e m$  で書き下せるという) 内

では、独立な表現（言い回し）は高々三種しかない、とわかる。それらが等価であることは、次のように（数式をたどれば容易に）証明できる。まず、(i)を仮定すれば、直ちに(ii)が成立する。同様に、(ii)を仮定すると(iii)が成立し、(iii)を仮定すると(i)が成立する。上述の(i, ii, iii)の系には注意する。和文表現(iii)では「閉じた系（外界との間に物質の出入りがない系）」であり、(ii)では「開いた系（外界と物質のやり取りがある系）」であり、(i)の系は閉じていても開いていてもよい。

系の「質量が一定不変であること」を保存則とよぶ文脈<sup>13,14)</sup>は、誤解を招く。保存則のゆえんは(i)であって、系の質量が増減してもしなくても、質量が系に出入りしてもしなくても、系の内部では質量の「湧き出しと吸い込み、すなわち、生成と消滅」はない、と述べているのであるから、系の質量が、もし増加していれば、それは必ず外界から入ってきているのであり、もし減少しているならば、それは必ず外界に出ていっているのであると、(ii)は述べている。表現(iii)は、閉じた系がいろいろと状態変化してもその質量は一定であると、述べている。いずれの和文表現もごく普通の言い回しであるが、(i)には系の状態変化があらわに書かれていないこと、質量変化があらわに記述される表現は(ii)であること、表現(iii)のみに明示的に条件が付いていること、に気をつけよう。

### 3 質量保存則の教材化実験について

保存則にかかわる典型的な（よくみかける）実験（授業）では、系の状態を次のように変化させる。例えば、食塩の山を分割したり、逆に、合併したり、する。それらの「変化」分割合併の前後で、その質量を天秤で確認し、質量が保存されていることを「証明<sup>15)</sup>」した、とする。計器は本来、感覚の延長上にあるものだから、計器によるこのような「証明法」は、明らかに「論点先取の虚偽<sup>16)</sup>」といえる。初等中等科学教育では、次のように導入するべきであろう。「天秤（はかり）は、私達の感覚を鋭くして、しかも、他の人ともいっしょに納得できるようにし（客観性をもたせ）た、計器である。この計器を使って、質量の変化を調べてみよう。…調べた結果をまとめると、この天秤では変化は認められなかった。もっと精密な（天秤を使って科学者のした）実験でも、やはり、変化の前後で（質量の）変化は認められなかった」と。質量保存に限らず、計器を使う実験では「論点先取」に陥りやすいことに注意しよう。

「ものが燃えると重くなる<sup>17)</sup>」実験では、天秤の上でろうそくを燃焼させ、そのまま発生する気体を集めれば、全質量が増加している、とする。これは、法則(ii)の実験ではない。外界（空気）の質量の増減を測定していない（系と外界とが分離していない）のだから、系の質量は、空気を断れば増加せず供給されれば増加する、ということを書いていなければ、保存則とは無関係になってしまう。この実験では、空気を供給しながら燃焼すると、系全体としては質量が増加すること（空気が移動すること）を示すのみである。質量保存則の実験では、系と外界の区別が決定的に重要であること<sup>12)</sup>がわかる。

著名なランドルトの実験<sup>17)</sup>では、系を閉じておいて両液を混合し（化学変化させ）質量を測定する。すなわち、和文表現(iii)にかかわる実験である。他方、外界との間で出入りする質量を測定したとする実験授業<sup>18)</sup>（以下「装置Ⅰ+装置Ⅱ実験」）が報告されている。つまり、和文表現(ii)を直接的に示したというのである。この試行は化学教育として優れた着眼だと思われるので、和文表現(ii)を「真に」演示実験しているのか、刮目すべきである。装置Ⅰはポリエ

チレン製の袋で、塩酸と炭酸カルシウムとを分離して入れておく。装置Ⅱもポリエチレン製の袋で、水酸化ナトリウム水溶液が入っている。まず、最初のステップとして（S1）装置それぞれの質量を測定する。次に（S2）二つの装置をゴム管でつなぐ。ただし、二つの装置の間はピンチコックでとめられている。次に（S3）装置Ⅰ中で反応させ気体を発生させる。次に（S4）ピンチコックを開き、発生した気体を装置Ⅱに吸収させる。次に（S5）装置Ⅰと装置Ⅱとを切り離し、それぞれの質量を測定する。最後に（S6）二つの装置それぞれの質量の増減を確かめ、比較する。

ステップ（S3）の終了までは、各装置は密閉容器だから、もしもここで、装置全体の質量測定をすれば、和文表現 (iii) の実験そのものとなる。ステップ（S4）では、それまでの変化（気体の発生）とは無関係の装置Ⅱを接続し、さらに別の化学変化（吸収）を起す。ステップ（S5）では、一つの系（装置Ⅰ+装置Ⅱ）を二つに分離する。装置Ⅱを新たに系とみなし、装置Ⅰを外界とみなす（装置Ⅰ以外は装置Ⅱに影響しない）と、この外界から移した質量（気体の）は、系（装置Ⅱ）の質量の増分に等しい、を演示する。しかしながら、一連の操作は、二つの装置を一つの系の二つの部分系とみなせば、一つの系内で二つの化学反応を起こす実験であり、要するに、和文表現 (iii) をくり返していることになる。結局は、一方の部分系（装置Ⅰ）から他方の部分系（装置Ⅱ）に物質（気体）を移動させているにすぎないのである。したがって、この実験の方法では、鋭い生徒が、質量の増減がキャンセルするのは「（物質を）移したのだから当然だ」といっても反論できないであろう。

上記の「装置Ⅰ+装置Ⅱ実験」では、化学変化の前後で質量を測定した。そこで、次のような物理的な変化（水の移動）では、装置Ⅰと装置Ⅱを運転する上記実験の本質がより鮮明になる。試験管Ⅰには水が入れてあり、試験管Ⅱは空であるとする。それぞれの質量を測定する。試験管ⅠからⅡに水を移す。（両試験管をゴム栓とゴム管でつないで、水を移動すれば、さらにもっともらくなる。）試験管それぞれの質量を再び測定する。試験管Ⅰと試験管Ⅱとの質量の増減の代数和は消える。和文表現 (ii) の実験では、外界から系に物質を移動させて、系と外界それぞれの質量変化を測定しなければならない。だが、外界は膨大だから、外界の質量をそのまま（完全に）測定できない。そこで、外界の一部（小部分）を切り取ることになる。この疑似的な外界と元の系とを新しい系とみなせば、やはり、系ひとつをあつかっていることになってしまう。もしも、装置Ⅰが疑似的な外界で装置Ⅱが系である（すなわち、型 (ii) の実験）とみなしてよいならば、ランドルトの実験も（左右の両液を系と疑似的な外界とみなして）やはり、型 (ii) となってしまう。教師<sup>18)</sup>は「装置Ⅰ+装置Ⅱ実験」で、実験 (ii) 型を教えているつもりなのだが、実際にはその実験は (iii) 型なのであった。要するに、法則 (ii) を直接的に演示する実験は不可能なのである。外界（のつもり、あるいは、疑似的な外界でも）の質量を測定したら、それは「系」の質量を測定したことになるからだ。

質量保存則は閉じた系に対して成立するという説明<sup>13,19)</sup>をみかけるが、それは誤解を招く。和文表現 (i) では、系が開いていてもよい（質量が入り出ていてもよい）ことに注意しよう。保存則のゆえん (i) は、系の状態変化の過程で質量が（系内に）湧き出しも吸い込みもない、と理解することにある。食塩を水に溶かし、次に、水を蒸発させる現象を、幼児に見せたとしよう。そのときの幼児の感想を大人の言葉でいえば、吸い込みと湧き出しであろう。幼児が見た現象（溶解と析出）は、食塩が水に溶けると見えなくなってしまう、水が蒸発すると現れてくる<sup>2)</sup>からである。空中からウサギを取り出せば、それはマジックであって、もともとはそこ

に（見えなかったけれども）あったのだ、と（大人が）考えるのは、湧き出しも吸い込みもないと、認めているのである。系内における生成消滅を確かめるには、状態変化の前後において生成消滅する物質を区別できなくてはならない。上の装置 I で考える。化学反応の結果、塩酸と炭酸カルシウムとが吸い込まれて、気体が（発生したので）湧き出したようにも解釈できる。しかしながら、人間は保存則を、消えた（元の）質量と生まれた（新しい）質量とは等しい、とはしなかった。なぜならば、化学変化は物質を構成する原子の組み替えだ、との認識を背景にもつからだ。そこで、法則の表現を「質量の保存 ( $dm = 0$ )」としたのである。変化  $dm$  の実験は（生成消滅する原子をそれぞれ区別できないので）直接的に確かめられないのである。系の質量を測定するには系を閉じることになり、それは結局は (iii) 型の実験となってしまうのだから。保存則にかかわっては結局は、和文表現 (iii) 型の実験のみが実施可能となるのである。

#### 4 質量保存則に関する「教えられないこと」について

質量保存則のより根源的な法則（以下、前提法則）はしばしば、見逃されたり、質量保存則そのものと混同されたりする。この前提法則では、例えば「すべてのものには質量がある」といい、逆に「質量があれば、ものである<sup>20,21)</sup>」という。この「もの」という用語は、科学の学習者が自らの経験によって獲得<sup>10)</sup>しながら拡大していく。触って感じる目の前の「もの」から、溶けると見えなくなる砂糖のような「もの」へ、目には見えない「空気」のようなもの、さらに、化学反応による物質の変化へ、と科学学習は進む。気体にも質量があることを示す（教科書の）実験は、児童に「ものには質量がある」ことを体験させる学習課程の一例である。科学学習者にとって前提法則は、自然的世界を認識するための、根源的な法則といえる。

上述の「ものには質量がある」は、質量がものの存在（存在量<sup>22)</sup>）を示していて、このままでは、質量と「もの」はほとんど同義語である。すなわち「質量とはものの存在をしめす」と述べて<sup>14)</sup>も、質量の説明としては不十分である。質量保存則の教育には、質量概念の（深い）理解が必須だが、質量そのものは（日本の初等中等教育では「重さ」から「質量」にいつのまにか移ってしまう）教えない典型例<sup>9)</sup>である。科学的概念はどれも、初等中等高等教育課程全体において、長期的な見通しのもとに教えるべきなのに、そのようには教えられてこなかったのである。前提法則が質量保存則と結びつくと、「もの」は湧き出さないし消滅しない、だから、もの（物質）が現れればどこからか移動してきたはず、という理解につながる。ここで「物質は無から生まれぬし、消滅しない」という主張は「物質不滅の法則」とよばれることもある。この「不滅」という用語も誤解を招きやすい。ここでいう物質（巨視的）は、化学変化する（原子は不滅だが）からである。

自然科学のいずれの法則も広く事象に関係するのだから、一つの事象において、実験して「確認」してもそれは法則の証明<sup>15)</sup>ではない。そして、誰でもすべての事象を確かめることはできない。したがって、学習課題として「化学反応において、質量保存則が成立することを確かめる」のは正しくない。「法則を導く実験」も誤解を招く。一つの実験（一事例）は（その実験対象でも）法則が破れていないことを確かめているだけなのであるから。人間の経験の積み重ねによって確立した（帰納的）法則（質量保存則など）は「教えられない」のである。少数の事例（実験や体験など）を基に、注目する法則が広く成立することを生徒に「納得」「確信」させるのである。このように、法則のつくられ方をみることは、科学教育において特に重要で

ある。なぜならば、学習者が(経験法則の)天下り的な記憶をさける唯一の方法だからである。「化学反応の前後において、質量の変化がどうなるか、…を例に調べてみよう」として、その結果、このような実験を(多数の人たちが)数多く試みて、広く成立するので、それを「質量保存則」とよぶ、とするのである。少ない事例を基にして、法則が広く成立することを「類推」する(学習者に類推させる)のが、科学教育である。科学の授業における「類推」の重要性について、もう一度くり返す。「ものにはすべて質量があり、保存される」を到達目標としたとする。この目標を掲げるならば、少数事例実験を基にして、広く一般の「もの」に成立すると、類推をうながすのが授業における一つの流れである。もう一つの流れは素直に「…が変化したときに質量はどうなるか」という事例を体験して行って、これらは広く成り立っていると「保存則」に向けて類推をうながす。学習者にとって典型的な教材とは、それによって類推をうながされるもの、のこただ。上の意味(別の法則から導かれることはないし、実験では証明できない)での「教えられない」法則の学習には、類推を積極的にうながす(類推で解決する)のである。

和文表現 (iii) は(状態変化の前後の)ある条件下で一定( $dm = 0$ )と述べている。一般的に、ある物理量が(ある条件下で)一定でも、それを自然科学では保存量<sup>23)</sup>とよんではならない。例えば、物体の速さが一定のとき、速さが保存されているのではない。自然科学では、保存性は示量性物理量に対してのみ、問題となるのである。示量性物理量の変化は、移動と生成または消滅とが原因であるから、ある物理量が一定ということは保存量であることとは別の意味なのに、和文表現 (iii) 型の実験事例において「質量が保存されることをどうして確かめたことになるのか?」という疑問はほとんどみかけない。「質量は保存量である」という和文表現 (i) を意識していない(保存と一定とが区別できていない)からであろう。法則の証明手続で示したように、三種の和文表現 (i, ii, iii) はいずれも欠くことができない。そして、実験(や経験など)によって、和文表現 (iii) を「納得」すれば、次には論証の結果、和文表現 (i) すなわち「質量保存則」の「保存」のゆえんに到達できる(和文表現は互いに等しいとなる)のである。

初等中等科学教育では、保存則としてどの表現を採用するべきであろうか。まず (i) を言い換えてみる。「区切られた空間の質量は、新しく生まれえないし、消えてなくなることもない<sup>18)</sup>」と。ここでの「区切られた空間」とは系のことであり、系の「質量は生成しない・消滅しない」が、質量が保存量であるといわれる、法則の核心であった。質量は新しく生まれえないし消えてなくなるのだから、和文表現 (ii) は「質量の、増えた分はどこからか入ってきた分で、減った分はどこかに出ていった分」と、いえる。生徒は、和文表現 (iii) に対して「区切られた空間の質量は、外から出入りがなければ、変化しない」のは「当たり前だ」というかもしれない。しかしながら、この「当たり前だ」は理解がまだ浅い、といえる。系が状態変化していて、その系に(質量の)出入りが無いのに一定であること (iii) を認めることは、系の内部では生成も消滅もしないこと (i) を認めることに(論証によってのみ)つながり、この (i)こそが法則の核心なのだから。

自然科学のどの法則も成立する条件を、科学教育においては(学習者に)きちんと伝えなくてはならない。上述の (i, ii, iii) から知れるように、質量保存則では「系」とその「状態変化」が鍵語である。この法則の適用できる「状態変化」は極めて多様であるがすべて、 $dm$  の変化量  $d$  で表されている。ここでの「状態変化」として実験では、物体を分割したり合併したりすることや、物質を液体に溶解すること(主に、物理的变化)や、さらに化学変化もあてはめる。ここに、記号表現の特徴(コンパクト性)が現れている。前述のように、帰納的な法則は学習

者にとって、少しの経験をもとにすべての場合を「納得」するのであるが、それはいろいろな変化を  $dm$  と「納得」して置けるかどうかにかかっている。学習者がその背景（「納得」する）をもたなければ、単なる記号処理におわってしまう。

前出の（質量保存則の独立な）和文表現は、三種であった。この（三種類だという）証明は、和文表現からだけでは難しいのではないだろうか。その証明をたどることは前出のフレーム（ $dm$  は  $d_i m$  と  $d_e m$  との代数和に等しい）を使えば、やさしい。しかしながら、学習者にとってもっとも理解が難しい内容は、このフレームそのものではないだろうか。系を外界と分けて、系の中で生成消滅する分と外界から出入りする分との代数和で書けるということは、問題の物理量が示量性ということを前提としている。質量の示量性は、中等科学教育課程で、質量の加法性（例えば、天秤で風袋こみで物体の質量を測定するなど）として、学習済み<sup>19)</sup>である。示量性の物理量を一般的に、 $X$  とおく。すると、系の状態変化の結果は、

$$dX = d_i X + d_e X$$

と書ける。科学教育では、質量保存則（質量  $m$  に対して、 $d_i m = 0$ ）とエネルギー保存則（内部エネルギー  $U$  に対して、 $d_i U = 0$ ）を類似の表現にしておくことよい。保存則の由来  $d_i X = 0$  は、ほとんどの学習者にとって、教えられなければ、気がつかない表現であろう。系の内部から「湧き出る（保存されない）」物理量としては、大学教育段階に至ってエントロピー  $S$ （不可逆過程では  $d_i S > 0$ ）をあつかう。質量保存則の学習は小学校段階から大学教育まで、ものの性質「前操作」（と質量）から記号処理（フレーム表現による保存量一般）の「形式的操作」まで、理解が深まって完成するのである。

## 註 と 文 献

- 1) 小林 実『幼児の科学あそび』（国土社、1973）第1章を参照のこと。この章の議論は次のピアジェを参照のこと。
- 2) J. ピアジェ・B. インヘルダー；滝沢武久・銀林 浩訳『量の発達心理学』（国土社 1965）第1部など。
- 3) 佐藤 学『習熟度別指導の何が問題か』（岩波書店、2004）岩波ブックレット No. 612。
- 4) 平井雷太『見えない学校 教えない教育 どんな子にも学ぶ力が備わっている』（日本評論社、1997）や「教えない教育（が）学ぶ力（を）育てる」（日本経済新聞、1999年9月19日、朝刊）では次のように説く。「教えない教育」とは、生徒は教えなければ、何事もわかるわけがないという固定観念を疑うこと、と。
- 5) 多くの科学実験では学習者に、必要なすべての器具を与え、すべての操作を示し、プログラム化して、徹底して「教える（与える）」授業である。実験授業における「教えること」と「教えないこと」とは、一例として次のように設定できる。課題「 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  の 1 モル濃度溶液をつくれ」を学習者に与えたとする。モル濃度はもちろん、既習とする。多くの授業では、天秤とメスフラスコ（受け用）を使って、実験操作をさっさと教えて、次のステップに進むであろう。ここで教師側としては、なぜメスフラスコか、を考えておいてもらいたいのだが、学習者側は教えられた通りそのまま実験しようとする。一方「教え

ない」授業では実験器具として、10 mL ピペットとかビーカーとか（のみで、メスフラスコはなし）を実験台上に揃えておく。すると、メスフラスコを貸してという学習者や、水和物のモル質量（= 287 g/mol）から（ピペットの体積程度の溶液中の所要）質量を計算する学習者が現れる。あるいは、必要な器具を学習者自らが選び出す（手持の器具一式から取り出す）ようにしておくのもよい。「教えない」授業はあえて失敗させて、学習者に「洞察する力」が養成されることを期待するのである。

- 6) 武藤 伸「質量保存の法則は発見されたのか - Lavoisierは何をしたか」(化学教育, 34 (5), 404-408, 1986)によれば、多くの教科書では「質量保存の法則はラボアジェによる」と説明されるが、彼の時代には質量あるいは物質の保存を法則として述べる思想はなかった、という。
- 7) 気体の水素と酸素とからの水の合成で質量保存則を確かめるには、E. W. Morley, "On the Atomic Weight of Oxygen. Synthesis of Weighted Quantities of Water from Weighted Quantities of Hydrogen and Oxygen," *American Chemical Journal*, 17, 267-275 (1895)を参照する。
- 8) 原子核反応（変化）に関する質量保存については、R. S. Treptow, "Conservation of Mass: Its Proper Place," *Journal of Chemical Education*, 63 (12) 1052 (1986)を参照のこと。
- 9) 科学用語の導入時期（どの学習段階で導入するか、日常語をいつ置き換えるか、など）の検討は、科学教育における重要なテーマである。日本の初等科学教育では、質量のかわりに「重さ」を使ってきた。この用語が学校教育のどの段階で「質量」に切り替わるかははっきりしない。日本の理科教師は、力学（関連）を学習していない段階（中学1年くらい）で「質量パーセント濃度」を導入すると、抵抗を（「質量」に対して）感じるであろう。日本の科学教育では、科学的概念はかなりきちんと定義できる（学習者に理解できる）段階で導入するべきだ、とされてきたようだ。科学的概念の学習は、初期に（概念を指定する）用語そのものを（概念はあいまいに）導入し、学習が進むにつれて段々と概念が（順次分離され、それぞれが）精密になっていく、そのように教育されるべきだ、という立場があってもよいのだが、例えば「質量」概念の形成でいうと、小学校段階で、ものには「しつりょう」があるし、「しつりょう」があれば「もの」である、と用語「しつりょう」を導入する。小学校から中学校へ、さらに高等学校へと学年があがるにつれて、段々と精密に、厳密な科学的概念「質量」が形成されていく。つまり、ベン図で表現すれば、低学年の「しつりょう」概念は、高学年の「質量」概念を内に含む。こうすれば、大学卒業者でも質量ではなくて、しばしば「重さ」を使う現状が改善されるだろう。蛇足だが、教科書にみえる「質量パーセント濃度」はおかしな用語である。一つの用語（概念）に「率」と「度」が入っている。化学用語で、モル分率とモル濃度を混ぜているようなものである。「質量百分率」あるいは「質量濃度」のいずれかでよいはずだ。
- 10) 科学的概念（巨視的）を形成する方法については、森川鐵朗・澤田和弘「科学教育における『記述論理』と物質に関する『巨視的概念』の形成について」（上越教育大学研究紀要, 24 (2), 459-469, 2005)で論じた。
- 11) 原子・分子説（物質のつぶつぶ論）と質量保存則との議論は、森川鐵朗「初等化学教育における原子・分子説についての一考察 - その導入時の問題点」（上越教育大学研究紀要, 7 (3), 93-99, 1988)を参照のこと。
- 12) 示量性物理量の変化を系の内外（internal と external）に分ける表記法は、熱力学ではよく知られている。I. Prigogine, *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*,



- Interscience, New York (第3版, 1967) の pp. 7, 9, 16 など、例えば,  $dS = d_iS + d_eS$ , とある。物理量の3種の性質(示量性, 保存量, 状態量)については, 森川鉄朗・下村博志「エネルギーの物理化学的諸性質と導入時の問題点」(上越教育大学研究紀要, 17 (2), 855-865, 1998) とその引用文献を参照のこと。初等化学授業(質量保存)での「系」の重要性については, 以下の大竹・松井『物質の学習』第3章(註18)で指摘されている。
- 13) 新良宏一郎「質量不変の法則」(化学教育, 15 (1), 34-37, 1967) では「質量不変の法則は孤立した系(密閉器内)について成立する」とあり, 不変であることと保存則とを取り違えている。
  - 14) 左巻健男編著『新しい科学教科書—現代人のための中学校理科』第1分野 化学・物理編(文一総合出版, 2004) では, 「質量とは…物そのものの量 (p. 20)」という。また「化学反応にかかわった物質全体の質量は反応の前後で変化せず, 保存される (p. 132)」という。「変化しない」ことと「保存される」こととを混用している。
  - 15) 初等中等教育では, 自然法則を「証明」したり「導出」したりしたとする実践報告が多々見受けられる。例えば, 小嶋秀一『「質量保存の法則」の学習における個別化の工夫」(化学と教育, 45 (10), 556-557, 1997) は, 法則を導き出すとする, 極めてあやうい学習指導法である。質量保存則のような経験法則はわずかな実験によって証明されるのではない。少数の確認実験(検証実験ではない)は, 生徒に(より広くあるいはより一般的に)成り立つだろうと類推をうながすためと位置づけられるべきである。島原健三「1. はじめに—ウソの生まれる土台」(同誌, 34 (4), 313-317, 1986) は「質量保存の法則のような, すべての反応に当てはまる大規模法則を「実験によって」証明するには, 多種類の龐大な数の実験が必要であろう」という。
  - 16) 銀林 浩『量の世界—構造主義的分析』(むぎ書房, 1975) 第1章 (p. 14) によれば「人間の感覚から導きだされた計器を, 事前に (a priori) 仮定するという点で, 根本的に論点先取の誤り (beg the question, petitio principii) つまり, 結論として導かれるはずのものを仮定するという誤りを犯している」という。質量の加法性の指導で例えば, 物体を分割しても質量は変わらないことを秤上で演示したり, あるいは, 100 g の水に 10 g の塩を溶かすと, 110 g になると秤で示す。
  - 17) ランドルトの実験(和文説明)については, 板倉聖宣・三井澄雄・永田英治・松井吉之助編著『理科教育史資料』(第5巻, とうほう, 1987) の口絵と pp. 502-520 など, 抄録は, 東京化学会誌「化学反応にあずかる物質の総重量の変化について」14, 141-142 (1893) と同誌「化学変化により物質の総量に変化ありや否やの研究」27, 996-1000 (1906) にある。この口絵の「ものが燃えると重くなる」実験(亀高の教科書の図)は「質量保存の法則 (i, ii, iii)」の演示ではないことに注意しよう。なお, ランドルトの実験の検討については, R. E. Oesper, "Hans Landolt (1831-1910)," *Journal of Chemical Education*, 22 (2), 158-162 (1945) の引用 10) をたどる。
  - 18) この実験の説明は, 大竹三郎・松井吉之助『物質の学習—理科授業の新しい試み』シリーズ科学教育1 (明治図書出版, 1970) 第3章と, 三井澄雄『化学教育入門—教材の基礎と授業の方法』(新生出版, 1987) 第1章による。著者ら(三井, p. 37 など)は「系から物質の一部がでたり, また外から入ってくる中で, こちらで減った分だけ, あちらで増えているというように質量保存の法則をとらえること」を「ロモノソフ的」とよぶ。つまり, 質量保存則の「ロモノソフ的」見解とは, 本稿でいう和文表現(ii)に相当する。なお, 最近の多くの化学実験図ではピンチコック(モール型)が, ゴム管を通してゴム管を挟んで

いる。気体の流通を完全に止めるには、そう（ゴム管を通すの）ではなくて、ゴム管を二つに折って、折った部分をピンチコックで挟む。こうすると、ピンチコックを外すと、ゴム管は装置をつなぐ元の状態に戻る。

- 19) 石戸 勲・湯上一郎「マグネシウムの燃焼における質量保存の法則の演示実験法」(化学教育, 24 (5), 425-427, 1976) や河淵計明「化学反応における物質の量的関係－質量保存の法則と反応モル数の関係」(同誌, 26 (2), 190-191, 1978) では、生徒の誤解を解くために、各反応物と各生成物ごとに質量を測定する、という。このような実験方法が(授業で)必要ならば、生徒の学習が保存則にかかわる化学実験をする段階にはまだ至っていないことを示している。反応系を閉じておく保存則の実験では、質量の加法性(二種類の物質の質量をいっしょに測定すれば、個別測定の和になっていること)が前提になっているからである。
- 20) 庄司和晃『科学的思考とは何か』(明治図書出版, 1978) 第2部第3章では、「科学の教育にとって、もっとも基礎的な素材…重さ(質量)についての原理的な法則」として「すべての物には重さがある」とことと「ふえたりへったりしなければ物の形や形状が変わってもその物の重さは変わらない」という。保存則の前提法則と保存則そのものを区別している。
- 21) 板倉聖宣・上廻 昭編著『仮説実験授業入門』(明治図書出版, 1980) 第2章第4節では「重さ(質量)…物質の量」「すべてのものに重さがある」「もののみかけの変化によってはそのものの重さがかかわることなく」という。
- 22) 前掲(註16)の銀林『量の世界』では、「重さは…物質の多さ, 存在量(abundance)…重さ(質量)という量のむづかしさは直接目に見えない点…そこで(天秤の傾きやバネの伸びで)視覚へ転換する(pp. 66-67)」という。物体の三次元的な「広がり」という属性は体積という物理量で、物体の慣性という属性は質量という物理量で、把握される。このように、属性と物理量とは区別しなければならない。
- 23) 天岩静子「Piaget における保存の概念に関する研究」(教育心理学研究, 21 (1), 1-11, 1973) では、まず、赤と青の粘土玉, 白い水と青い水, 青と白のおはじき, 赤と青の粘土玉, 30 cm の角棒と 6 cm の角棒 5 本, などを用意する。最初の赤と青の粘土玉に対して「同じ粘土が入っている」と被験者に確認してから、青の粘土玉の形を変形し、赤と青の粘土玉の「どちらがたくさんか」あるいは「同じか」と問う。おはじきに対しては、広げたりまとめたりして「どちらの方が数は多いか」と問う。材料の順番に、粘土量, 液量, 数, 重さ, 長さ, の「保存」を調査している、という。この心理学的調査では、変形による物体の属性の「不変性」を、共通の用語として「保存」とよんでいるようだ。最初の「粘土量」が「物質」のこたらしいのだが、この「物質」が自然科学的には何を意味するのかははっきりしない。次は、物体の属性をそれぞれ、体積, 個数, 質量, 長さの順で質問しているらしい。

麻柄啓一「内包量に関する学習者の誤概念」(科学教育研究, 25 (5), 295-303, 2001) では、Piaget の「保存問題」はすべて、重さや体積や面積などの外延量(示量性の量)であったが、速さや密度などの内包量(示強性の量)にまで調査を広げたという。保存性は移動や生成・消滅によって増減する物理量(示量性)に対してのみ、問題となるのであるから、示強性の物理量に対する保存性(があるとの理解)は、明らかに誤用である。この研究論文「学習者の誤概念」では、物理量にかかわる示量性と示強性との「基本的な性質を理解していない」ことになる。

# The Law of Conservation of Mass in Science Education - What Can Not Be Taught

Tetsuo MORIKAWA\* and Kazuhiro SAWADA\*\*

(Received October 6, 2005; accepted November 10, 2005)

## ABSTRACT

This note deals with the law of conservation of mass in science education; the key aspect is "what can not to be taught." All expressions for this law in science textbooks are classified into three mathematical forms. It is possible to do experimental materialization for only one (Landolt's type in a closed system) of the forms. We discuss "what can not be taught" for the law to improve science teaching.

---

\* Department of Chemistry, Joetsu University of Education, Joetsu 943-8512, Japan

\*\* Practical School Education, Osaka Kyoiku University, Osaka 543-0054, Japan