

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

森 川 鐵 朗*・澤 田 和 弘**

(平成16年10月29日受付；平成16年12月6日受理)

要 旨

具象物を A とし、巨視的概念(自然科学で使われる物質、金属、純物質、混合物、酸、塩基など)を B とする。B は A を包含するが、科学教育では、B の理解は抽象的だから難しいといわれている。ここで「A ならば B である」「A は B ではない」などを「記述」とよぶ。本稿では、生徒・学生が一群の「記述」を学習して巨視的概念を形成する方法を明らかにする。授業実践における調査結果は、科学教育における「記述論理」の重要性を強く示唆している。

KEY WORDS

descriptive logic	記述論理	macroscopic concept	巨視的概念	substance	物質
metal	金属	pure substance	純物質	mixture	混合物
identification	同一視	classification	分類	abstract	抽象的
science education	科学教育				

1 はじめに

高等学校学習指導要領解説理科編¹⁾は、日常生活と関連させて(物質などの)「基本的な概念」を(生徒に)理解させる、とくり返し述べている。「物質は形や体積のある具体的な物体から、これらを取り除いた共通のものを抽象するということで、物体より高次の概念²⁾」といわれる。このように日本の学校教育では、物質³⁾や金属などの巨視的な概念⁴⁾は抽象や捨象により生徒に育成されるべきであるとされる。だが、抽象化へと辿るこの道程は生徒にとって険しい。抽象化や捨象という方法はとらえどころがないからである。「化学は物質の学問」とよくいわれるが、化学では抽象的な物質を合成したり分解したりしているのだろうか。本稿では、概念を形成するための(抽象化とは違う)別方法を提示する。この方法のエッセンスは、以下の節で詳しく説明するように、具象物を「同一視する⁵⁾」ことにある。

大学1年生に質問をしてみた。化学でいう「純物質って何ですか」と。学生いわく「(純物質とは)不純物のない物質である」と。では「混合物って何ですか」と。学生いわく「(混合物とは)純物質が混ざっている物質である」と。ここでの回答は、学生が論理的に記述するあるいは説明する方法をほとんど習ってこなかったこと、論理にいかにも無頓着か、をよく示している。本稿では「純物質とは何々である」などのように、概念を記述する際に係る論理⁶⁾を「記述論理」

* 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

とよぶ。この「記述論理」と前出の「同一視」とが、科学における巨視的概念を形成する骨法である。

学習者が科学の学習以前に抱いている概念を「前概念 pre-conception」とよぶことがある。この前概念は、極めて強固であって、科学の学習によっても科学的概念へと転換しにくい⁷⁾とされる。純物質に対する上述の回答では、肝心の物質の説明はなくて、形容する「純」を同義的な「不純物のない」と言い換えている。この記述論理は極めて素朴である。学習者にとって聞いたことがない（あるいは、完全に忘れている）概念や用語であっても、組み立ては論理的でなければならないものだ。科学学習における記述論理にも「前論理 pre-logic」があって、科学的論理へと転換しにくい⁸⁾のかもしれない。以下の調査結果は、この「前論理」の存在を強く示唆している。

科学の学習過程では、科学内容は言語や記号や図などを使って、学習者と教師や教科書との間で、やり取りされる。言語を駆使⁹⁾して、科学を学習し理解し表現する際に、記述論理の重要性は強調するまでもない。具象物から導出される巨視的概念は、実在の自然界を処理する極めて重要な概念だからである。以下で順次検討するように、記述論理は科学学習の過程において、具象物から「科学的概念」を獲得するための基本となる素養でもある。

児童・生徒への教員の影響は、極めて大きく、知識や行動、考え方など多方面にわたる。本稿では自然科学の基本的な概念である「物質」「純物質」「混合物」などを取り上げ、初等中等教員養成系の学生が、論理の展開と説明をきちんとできるか、を調査する。調査では、与えられた授業コマ数が少なく、授業前での試験（プレテスト）を実施できなかった。しかしながら、複数年度にわたる授業の結果、記述論理に関する学生の能力の実態は明らかになってきた、と思われる。

2 科学における論理と記述法について

「循環論法 circular argument」とは、前提 A と結論 B とが相互に依存し合う論証（堂々めぐり）をいう。つまり、A を理解するには B を知らねばならない、そして、B を理解するには A を知らねばならない、とする論理の流れである。例えば、原子説の導入のためにある現象を使っているのに、いつのまにやら、物質が原子で構成されていることを前提としている、の類（たぐい）である。また「モル（単位）は…の物質質量」と「物質質量は…モルで表される（量）」と並列する説明も、循環論法に陥って⁹⁾いる。このような循環をどう断ち切るかは、科学教育における難しい課題の一つである。「論点先取 beg the question¹⁰⁾」は論証における典型的な誤謬¹¹⁾である。B なる結果をみて、A なる原因を探す方法（結論からの遡上）は、科学でよく使われるが、論点先取とは違う。実験事実を積み重ねて法則性を推察すること（実験ではどうも正しいらしいことまでわかる）で、つまり、ある原因 A に対してある結果 B が必ず生じることを記述すると自然法則となる。法則性があるとはこの「因果律 causality」のことである。この因果律においては、A が真の作用因か否かの判断が重要である。化学反応系は時間とともに平衡状態に近づくが、この時間は作用因でない。一方、以下で詳説する記述に係る論理においては、A と B との包含関係が要点となる。記述の真偽は「包含関係」によって表されるからである。この記述論理は、科学の学習過程において科学的概念を獲得する仕方でもあることを、以下で順に説明する。

数学は抽象的なものを扱う典型とされる。その数学の本質は、抽象化ではなくて「同一視」である¹²⁾という。大きな集合をある基準に従って、小集合に分ける操作を分類とよぶ。この小集合では、複数の対象が同一視されて(同一のものとみなされて)いる。この小集合を「類 class (るい, より正確には、同値類)」とよび、その要素を取り出して「代表」とよぶ。複数の対象を似ているとみなすことで、それらに共通する深い本質が露にされる。この同一視が、記述における「包含関係」をつくり上げる方法である。

児童・生徒は「同一視」という方法を(言葉は知らなくとも)日常的に体験している。子どもは空を飛ぶツバメをみたとき、あれは「鳥だよ、ツバメ、羽根があるだろう」と教えられる。遥かな高所を飛んでいるものを「とり?」と聞くと、いや「あれは鳥ではなくて飛行機だ」と訂正される。ベランダにチュンチュンとやってきたとき、あれは何と聞くと「スズメだよ、鳥、二本足だ」と教えられる。こうした学習過程では、複数の記述「ツバメは鳥(の仲間)である」「スズメは鳥(の仲間)である」「飛行機は鳥ではない」などの例示を積み重ねている。それらの記述を数式風にまとめて描くと次のようになる。

$$\{\text{ツバメ, スズメ, …}\} / \{\text{羽根, 二本足, …}\} = \text{鳥}$$

左辺の中括弧には具体物が集められ、同じ左辺に条件(性質や特徴など)が記述されている。他方、右辺は形成された概念である類(の名称)である。「鳥が空を飛んでいる」というが、実際に飛んでいる具体物は「ツバメ」とか「スズメ」であるという意味では、「鳥」は抽象的な概念といえる。

上の集合の記法では数学のそれを真似ている。数学では例えば、整数全体を2で割り、その余りが0か1か(同値関係の一つ)で、偶数と奇数とよぶ二つの同値類に分ける。数学ではこのことを、 $\{\text{整数の全体}\} / (\text{条件式})$ のように書く。数学教育では、義務教育段階から同値関係の導入(言葉は教えなくとも)により、複数の対象を同一視する方法を教えている。この方法のよい点は、操作が生徒に具体的に見えることである。以下では、物質や金属などの巨視的概念をそれぞれ固有の条件により分別された類とみなすのである。

記述「ツバメは鳥である」は正しいが、無論、右から左への記述「鳥はツバメである」は間違っている。このときの包含関係を一般的に述べてみよう。日常語では「AならばBである」は、より簡略化された「AはBである」や「AはB」とも使う。「AはB」「A'はB」「A''はB」などとして、小集合Bを合成してきた。「AはB」が、もし正しいならば、AはBという小集合の中の一つの要素であるし、もし正しくないならばAはBに含まれない。もしもBがAしか含まないならば、この記述は自明である。この自明な記述を以下では「換言記述」(本稿の造語)とよぶ。「つばくろはツバメ」や学生の回答「(純物質とは)不純物のない物質」は典型的な「換言記述」である。多くの学生は「ツバメは鳥である」と聞くと当たり前だという表情を浮かべる。しかし、純物質に対する学生の回答からみると、かれらは「AはBである」における(包含関係の)論理に無自覚のようだ。「AはBである」においては、AとB(との概念)を全く知らなくても、論理構造として、AはBの中に含まれていると心得ていることが重要である。もう一段、記述「BならばCである」を加えてみる。これら2段の記述が正しいならば、三段論法の結果「AならばCである」の包含関係は正しい。

上述の「同一視」は、具象物から導出される概念の形成の仕方において、科学教育に強い示

唆を与える。子どもは「鳥」という概念を「ツバメは鳥の仲間」「スズメは鳥の仲間」と学習していく（記述をくり返して記憶する）と遂には、初見の「ウミネコ」でも（左辺の）鳥の特徴を基に「あれは鳥（だろう）」と（察する，推定する）飛躍を起す。人間の脳の働きのすばらしさで、コンピュータの記憶との違いである。具体物が集められて科学的概念が（類として）獲得されるのだから、生徒に科学的概念を形成するためには、概念の要素である事例を記述として彼らに数多く与える（学習させる）ことが必須となる。後述のように、金属というものは実際には存在しない。われわれが手にとれる物体は、銅線とかステンレスの包丁とかであり「金属」という具体物はどこにもない。いくつかの性質（電気をよく通すとか、光沢があるとか）をもつ具体物を集めて、その類を金属とよぶのである。したがって、生徒が金属という概念（類の名称）を身につけるには、「鳥」を学習したときと同じようにすれば、銅線（具象物）と金属（概念）をうまく扱えるようになっていくと、期待できる。このように、具体物と具体物の類との区別は、科学学習において極めて大切である。

学習者に科学的概念が獲得されたか否かを知るためには、概念形成とは逆方向に質問をすればよい。前節「はじめに」のように、科学概念の説明では「純物質って何ですか」に回答してもらうことになる。回答「（純物質とは）不純物のない物質である」では完全に無理解状態だとわかる。「鳥」の説明で「（鳥とは）ツバメやスズメなどです」と回答すれば、「ツバメは鳥」「スズメは鳥」と例示する段階であり、概念形成の初期をなぞっている（コンピュータの記憶）にすぎない。科学概念の場合でも、概念獲得の過程の逆を思い出す。要するに、ツバメやスズメを「鳥」の枠の中に入れた所以（条件や性質など）の説明が必要であって、問題の科学的概念に係る条件（や性質）をどこまで理解しているかによる。この条件の説明が欠落している回答は、問題の科学的概念を全く理解していないといえる。

3 「物質」をめぐる調査分析と「記述論理」について

いずれの学問分野の教育においても基礎概念は無論、定義を与えればすむものではなくて、その学問の教育過程で学生にくり返し提示し使ってみせて、形成がはかられるべきものである。教員養成系では特に、学生は基本となる事項を確実に理解しておく必要がある。学校教育の現場でそれらを児童・生徒を相手にして使わなければならない^{13,14)}からである。自然科学におけるもっとも基礎的な用語¹⁵⁾で、しかも相互に関連している概念は「物質」とそれに関係する「金属」「純物質」「混合物」「塩（えん）」などであろう。本節では、それらの学習過程にみる学生の論理形成を検討する。

授業科目「理科」において、授業（2000年10月30日）をした後、問題「次の用語を説明せよ：化学物質，純物質，混合物，口過，蒸溜，再結晶」を解答（試験日11月20日）させた。受講生（2000年4月入学生159人）には化学の問題であるとわかっている。ここでは、大学生がどれほどの論理的な思考能力を保持しているか、普遍的な一般的な説明と例示的な特殊な説明を使い分け駆使しているか、を分析する。

まず、解答例を列举する。「化学物質」に対しては、化学変化をする物質／人工的につくられた物質／化学式で表わせる物質／化学反応により生成される物質／mol で表わせる物質／化学エネルギーをもつ物質／化学的性質をもつ物質／化学的に合成された物質／原子で構成されているもの／化学記号で表わされる物質／化学実験で用いられる物質／など。「純物質」に対し

ては、ひとつの物質だけでできている／不純物のない物質／純物質以外の物質／何も手を加えていない物質／ただひとつの元素で構成された物質／ひとつの単体またはひとつの化合物からできている物質／化学反応を起こさないでできた物質／100 % その物質本来のもの／など。「混合物」の解答例では、純物質が混ざっている物質／異なる物質により構成されている物質／ふたつ以上の元素によって構成された物質／ふたつ以上の化合物からできている物質／化学物質と純物質の混ざった物質／純物質が混じりあったもの／など。

「化学物質」と「純物質」の正解（後述）はいずれも 4 % くらいであった。解答例は学生の苦心を感じさせるが、多くは「物質」を形容する「化学」と「純」にとらわれていて、要の用語「物質」の説明がない。「純物質」と「混合物」との連関は循環論法に陥りやすい例で、解答例にみえる。また「純物質」を「純粋な物質」「混じり気のない物質」と説明しても、その記述論理は、前節で述べた「言い換え」にすぎず、科学用語の説明ではない。「換言記述」の使用は既に論じたように、かれらに科学的概念が全く形成されていないことを示している。「純物質」と「混合物」とを正確（後述）に記述した学生はわずかであった。

正解率が「口過」と「蒸溜」（10 % 近い）では高く、「再結晶」（1 % 程度）で低いのは、高校の授業の結果と思われる。分離操作では、原理と器具と操作とを別々に説明することが重要である。これら三種類の分離法の解答には、原理つまり「一般的記述」が欠けている。口過では、液体と固体の混合物から両者を濾し分けるし、蒸溜では、沸点の違いを利用して溶液（液体と液体の混合物）から一方の液体を気化し、他方を残し分離する。多くの学生の説明は、特殊な器具、例えば、ビーカー、ロート、ろ紙、と具体的な操作に片寄っていて、蒸溜の対象として水だけを考えているようだ。なお、元素を「原素」と書く間違いが散見されたのは気になる。

第 2 年度では 2001 年 11 月 12 日に授業をし、11 月 26 日に試験（183 名）をした。問題は「化学における物質とは何か、混合物や分離操作などと関連させながら説明せよ」とした。

化学物質の説明「物体の形、サイズ、状態の違いを同一視すること」は、どの受講者も高校では学習したことがなかったであろう。この説明と用語「形、サイズ、同一視」は高校理科教科書にはほとんどみあたらない^{16,17)}ので、授業を受けなかった学生には解答不可能だったはずである。講義で繰り返したこれらの用語がみられる答案は、46 % であった。

授業における物質の説明では、構成要素としての原子・分子を使わなかった。物体でも原子・分子で構成されているので、物質の必然的な説明にならないからである。物質は、肉眼でもみえる身近なものから出発できて、それらの巨視的な性質のみを利用して定められるものでもあるから。純物質を、一種類の単体あるいは化合物からなるものをいう、とも説明しなかった。この説明も順序が逆であり、純物質を基に単体と化合物が出てくるのであるから。物質を単体や化合物や元素を使って説明した答案は、本授業とは無関係であるが、約 1 割あった。

「何を同一視する」かの「何」の記述がない答案が、67 % あった。A から B へとの操作において、A の指定がないのである。学校現場の授業で、このような話し方を受ける生徒には、その授業内容は極めて理解しにくいと思われる。「何」を物体と指定した答案は 15 % あった。物質に対して「形・サイズを同一視する」答案は 18 % であり、そのときの例文「化学における物質とは、物質の形、サイズを同一視して残るもの」がある。具体的に操作できる対象物は物体しかないのだから、物質あるいは化学物質の「形・サイズを区別できない」のではない。物質に対しては、もう「形・サイズ」を考えなくてよいのである。「形・サイズ」の違いはあくまで、

物体に対してであり、答案の言い回しは正しくない。銅という物質は、銅線や銅板をくくったものであり、その集合の要素は、銅という物質に変わったのではなくて、あくまで銅線であり銅板である。銅線と銅板は形が違うだけであるので、同じ集合に入れる。このように「形・サイズ」は物体の判定条件なのである。

小さな知識体系でも、全体にわたる理解のためには、その体系の階層性を論理的に把握する力が学習者自身に必要である。教師はどの授業でも当然のことながら、学習内容（目標）の全体を階層的に組み立てて、授業時間全体の中で提示する。例えば、質量をもつ物体は、形やサイズや用途などで区別される。この物質に対して、さらに同値関係（分離操作）を導入し、同一視する段階が「混合物」である。字面の「混合しているもの」は後からつけられた用語であり、この段階では単なる符丁（混合しているもの、という意味はまだない）にすぎない。この「混合物」から分離操作を経て得られるものが「純物質」で、化学ではこれを「物質」とよぶこともある。試験結果は、学生の理解における階層性の欠除をよく示している。論理の駆使は、現代の学生にとって極めて不得意なものであろうが、知識を体系的に学習するためには不可欠のものである。

4 「物質」に関する巨視的概念の形成について

われわれの身の回りにある様々な「もの」を思い浮かべて、一つの集合を作る。この集合を、質量を持つものと持たないものはそれぞれ同等である、という同値関係（同一視）で分類する。こうして、問題の集合から光や音などが除かれる。このときの質量は、天秤で測れる程度から、自然科学の学習が進むにつれて太陽のように大きくしていく。こうして得られる質量をもつ類は、用途やサイズや形などのある「物体」の集合である。「目の前にある物体の中に物質を意識することこそ物質を理解する第一歩^{16,18)}」であるが、本稿では「物体」の集合から出発する。

化学の世界は、誰もがそう考えるように、極めて変化に富んでいる。その変化の源は、人間の周囲に実在する「物体」の多様性にある。そのような物体の世界を扱う方法は、分析と抽出である。まず、複数の「対象物 objects」を一つの集合として注目する。次に、集合の中の対象物を個々に分析分解する。さらに、どの対象物にも共通する特徴を抽出する。最後に、抽出された特徴をその集合の特性とみなすのである。この分析抽出法は、実在世界を扱う化学における典型的な手法である。化学におけるそれらの実際は、例えば、元素分析法とか溶媒抽出法とかよばれている。

イギリスの辞書¹⁹⁾では「substance」という項目で「Water, ice and snow are the same substance in different forms」と述べている。このセンテンスは化学における「物質 substance」の用法をよく伝えている。日常生活の中で、水といえば、例えば、コップ一杯の液体の水を指す。また、氷は固体であり、蒸気は気体である。しかし、化学においては、それら三者は同一の化学物質であり、一つの言葉で「水」とよぶ。すなわち、水が固体から液体や気体、液体から気体へ変化しても、それらの逆変化も、化学的な変化とは認めないのである。数学の記号風に書けば、次のようになる。「鳥」を導いた記述論理との類似性に注目しよう。

{氷片, 氷山, …}/{形やサイズ} = 水

{コップの水, 氷, 気体の水, …}/{用途やサイズや三態など} = 水

前段落の方法をより一般的に述べてみる。諸々の物体は、用途やサイズや形など様々である。ここで、用途やサイズや形が違っていても同一視する。同類とみなす条件として、どれを採用するかは個々に考えていく。象徴的に書くと、次のようになる。化学でいう物質とは結局は、物体を同一視する条件として「用途やサイズや形や三態変化など」を採用して得られた、類⁵⁾のことである。

{物体}/(用途, サイズ, 形, 三態変化など) = 化学における物質

同一視の説明として、試薬ビンにラベルを貼る例を採用するとよい。銅線、銅釘、銅板のどれも物体である。それらのかけらを試薬ビンに入れて「銅」とラベルするとき、これは意識としては（化学における）物質と考えていることになる。サイズ、形、用途などの違う試料を同一視して、一枚のラベルですませる。つまり、この試薬ビンの中に銅線を入れているときは、銅という物質（の類）の代表として銅線を扱っているのである。すると、実験室の棚の試薬ビンのセットは物質の代表系（代表の集合）と考えられる。このように、同一視とは「くくる」あるいは「分類する」操作の原理であり、くだいていえば、用途、サイズ、形などが違うものを同じものだと思うことなのである。このような、具象物を（集めて）同一視する方法は、鳥の例でみたように極めて優れていて、化学には限らない。似ているものを「くくる」操作は、何をしているか思い浮かべられるので、抽象や捨象よりもはるかに考えやすい⁶⁾と思われる。

「化学物質とは何か」と問われて、「塩化ナトリウムや硫酸のことである」と答えたとする。学生のこのような回答には、化学で扱う物質（のみ）が「化学物質である」と考えている節が感じられる。この回答は「塩化ナトリウムは化学物質である」などと記述を例示する段階であり、概念を獲得する初期段階を復習している。しかし「鳥」の説明でも述べたように、具体物を広く覆う条件（集合全体に共通する条件）を駆使できる水準に至らなければ、科学（の法則・用語など）を理解したとはいえない。法則的な理解とは、経験や個別事象を総括する、より高度な自然科学の理解なのだから。物質概念を獲得し、それを基に説明する能力には、どのような条件を基に同一視したかの把握が欠かせないのである。

ここまでが全ての物質に共通の基礎であり、さらに、物質を小集合に類別するために物体の特性を利用することになる。物質としてのガラスと鉄とを考える。このとき、ガラスは窓ガラスの板、ガラスのコップ、ガラスの破片などの物体からの類を指し、鉄は鉄塊、鉄片、鉄鍋などの物体からの類である。ここで、物質としての鉄とガラスは（具体物ではないので）直接比較はできない。両者の相違は、現実にある物体、例えば、鉄片とガラスの破片、の特性の違いによって確かめられる。このように、意識としては類と考えながら、現実の物体を使う点が科学の初学者には難しいのかもしれない。

日常語でガラスというと、窓ガラス（板）やガラスのコップやガラスの破片などをさす。このときのガラスという言葉は、物質としてのガラスではなくて、省略語である。そこで「ガラスは物質ですか」と生徒に質問しても正解は出てこない。このように化学で使われる用語が日常生活での用法とは異なる点は、科学教育で留意しておく必要がある。また、多くの化学用語に見られること¹⁹⁾だが、前述のように、水という名称が物質の水にも液体の水にも気体分子にも使われていて、化学者は無論使いわけているけれども、初学者には混乱のはじまりであることも注意されるべきである。

金属も化学における物質と同様に考えてよい。金属は、いろいろな物体である、鉄釘、銅線、銀鎖などから同値関係により同一視された、類とみなせる。あるいは、鉄や銅や銀などの化学における物質（の類）から誘導される別の類とみなしてもよい。つまり、次のように書ける。金属とはある固有の性質（複数）を有する一群の物質（の総称あるいは類）である。したがって、金属の学習で大事な点は、金属光沢や電気伝導性などを他の物質と関連させて学習することにある。酸や塩基などの巨視的概念もやはり、類とみなせる。ここまででは数学の記法 $\{...\}/(....)$ を使った（商集合）が、同一視の導入に必要不可欠というわけではない。いま、どのような条件を学んでいるのかが、生徒に意識されていればよいのである。

$\{\text{鉄, 銅, 銀, ...}\}/(\text{光沢や電気伝導性など}) = \text{金属}$

さて、化学における物質からさらに「純物質」と「混合物」を類別する。純物質は化学の中心概念 (central idea) である。純物質とは混じり気のないもの、では換言記述にすぎないと既に述べた。純物質については、堀内の定義²⁰⁾が優れている。要約すると、純物質とは、ある種の分離操作の一群を約束し、それらの操作をくりかえした後、得られる物質をいう。分離操作として、口過、蒸溜、再結晶、溶媒抽出、クロマトグラフィーなどを選ぶ。これらの操作も同値関係と考えてよい。分離操作をつづけると、対象としている物質の示強性 (intensive) 物理量、例えば、融点とか密度とか、が一定値²¹⁾に近づく。そこで、分離操作群ごとに、さらに、操作の回数ごとに、純物質があることになる。つまり、純物質は依然として混合物である。ここで注意すべきは、示量性 (extensive) の物理量は物質を類別するのに役立たないことである。

普通の教科書的な分類法によれば、物質を混合物と純物質に分け、物質の下位に混合物と純物質を並列して置く。この並列的な分類では、学習者にはどこかに純物質が存在するように思われてしまうだろう。この並列的な分類が、例えば学生の回答「混合物とは純物質でないもの」「純物質とは混合物でないもの」の生まれる原因になっているのかもしれない。純物質は特別な混合物であると考ええるならば、次のように、直列に並べるとよい。自然界の物質は混合物と考えてよいから、混合物から純物質を取り出す操作をイメージさせるためである。この直列の左側を A とし、右側を B とすれば、記述「A ならば B である」は正しい包含関係にある。

純物質——混合物——物質

純物質 \subset 混合物 \subset 物質

註 と 文 献

- 1) 文部省『高等学校学習指導要領解説』理科編・理数編，昭和54年（1979）と平成11年（1999）による。
- 2) 井出耕一郎「物質概念とその育成の方策」（理科の教育，33(2)，85-89，1984）による。
- 3) 科学用語は（特に自国の）科学の発展にしたがって、表現は無論のこと、含意も絶えず磨かれていかなくてはならないものだ。和訳では「matter と substance」はいずれも「物質」というので、区別できない。そこで本稿では、次のように扱う。身の回りの物体あるいは単に「物体」は「concrete object」を指す。一方、精神に対する「matter」の意味は扱わ

ない。また「substance」は「化学における物質」であり、「pure form of substance」つまり純粹の「substance」の意味を含むならば「純物質」とも訳する。物質はこの「純物質」を含んで使うこともある。純物質と混合物 (mixture) の対比も落ち着かないが、混合物を「混物質」(造語) と改める手もあるかもしれない。単体 (simple substance) と化合物 (compound) では通常、構成要素である元素の種類の数で決めている。本稿では、化学物質の構成要素としての元素などには触れない。

- 4) 本稿でいう巨視的概念とは、物質、金属、純物質、混合物、塩、酸、塩基、電解質など、物質に関する巨視的(熱力学的)系を指す。さらに「長さ」や「単位」などの物理量にも、本稿の「記述論理」は適用できる。例えば、長さは、机の幅や身長など具象物の物理量としての「長さ」そのものであり、さらにそれらを集めた類の名称(自然科学では次元という)でもあるから、物質量をその単位であるモル付きでしか扱わない(扱えない)のは、鳥で例えると、個々のツバメやスズメしか扱えないのと同じである。単位付き物理量は具象物の物理量だから、物理量である物質量を n (単位なし) と置くことを、物理量の単位からの独立性という。この独立性は例えてみれば、鳥という概念を扱うことに似ているのである。「モルは物質量である」とは、モル(という単位)は物質量という次元の中の一つの物質量と述べている。そこでもう一段「物質量は物理量である」を加えてみる。つまり、物理量には(いろいろあって)物質量も含まれているとすると、三段論法の結果「モルは物理量である」は正しい。これら三者、モル・物質量・物理量、の包含関係は「化学と教育」51(2), 142-143 (2003) を参照のこと。
- 5) 用語「同一視」「類」「代表」などは科学教育の文献ではほとんどみかけない。化学物質との関連については、Morikawa, T., and Newbold, B. T. (2001) "Step-by-Step Identification for Teaching the Concept of Chemical Substance," *KHIMIYA* (ISSN 0861-9255), 10(6), 383-388 を参照のこと。
- 6) 前原昭二『数理論理学序説』(共立全書160, 共立出版, 1966) では、前提 A と結論 B の関係「A ならば B」(第 I 部の第 6 章)や第 II 部では「述語論理 predicate logic」を解説している。本稿で科学的概念形成に利用する論理は、この述語論理よりも形式がはるかに緩いので「記述論理」(本稿の造語)とよぶことにする。
- 7) Clement, J. (1982) "Students' Preconceptions in Introductory Mechanics," *American Journal of Physics*, 50(1), 66-71 を参照のこと。
- 8) 銀林 浩『人文的数学のすすめ』(日本評論社, 1989) は、言語と論理について極めて示唆に豊む。
- 9) 森川鐵朗・樫田豪利「物質量とモルの授業計画—方法と展開—について」(上越教育大学研究紀要, 22(2), 637-651, 2003) では、モルをめぐる循環論法に言及している。
- 10) Hornby, A. S. (1974) *Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English*, third ed., Oxford University Press. 「beg the question」では, "assume the truth of the matter that is in question" という。
- 11) 森川鐵朗・樫原正明「科学の学習過程にみられる思い違い—教師教育のための分析と教材化」(上越教育大学研究紀要, 22(1), 1-10, 2002) の註17の「論点先取の虚偽」を参照のこと。
- 12) 野崎昭弘『計算数学セミナー』(数学セミナー増刊, 日本評論社, 1976) 第 6 章代数系では、数学者の本領は(区別するよりも類似点に注目して)同一視する面にある、という。
- 13) Johnson, P. (1996) "What is a Substance?," *Education in Chemistry*, 33(2),

- 41-42 (continued to p.45) には、生徒 (11-14歳) にとって「the concept of a substance」は難しいとの調査結果が報告されている。
- 14) Ryan, C. (1990) "Student Teachers' Concepts of Purity and of States of Matter," *Research in Science and Technological Education*, 8(2), 171-183, では、生徒の物質に関する「純 purity」概念については調査している。
 - 15) Partington, J. R. (1948) "The Concepts of Substance and Chemical Element," *CHYMIA: Annual Studies in the History of Chemistry*, 1, 109-121, で物質概念 (concept of substance) の概略史を参照するとよい。それは物質の構成要素を明らかにする歴史であり、原子論史と一体であったことが説明されている。
 - 16) 物質について議論した (珍しい) 説明文は、以下を参照のこと。加藤俊二「化学教育は物質を意識することから始まる」(化学と教育, 31(3), 204-207, 1983) では「大きさと形を捨象したということは、物質とはある意味で抽象概念である」という。
 - 17) 加藤俊二「元素と単体の概念」(化学と教育, 36(6), 582-585, 1988) には、化学で扱う「物質とは、形・量・位置・個数という性格はもたないが、それぞれ固有の物性を備えているもの」とある。前註16) と共に考えると、この定義では、物質は抽象的だが固有の物性をもつ (実験の対象は抽象的な物質) としているようだ。本稿の「同一視」では、実験の対象は具象物、と考えている。
 - 18) 加藤俊二『物質の理解—日常生活と化学』(化学同人, 1975) の「序」による。
 - 19) Selley, N. J. (1978) "The Confusion of Molecular Particles with Substances," *Education in Chemistry*, 15(5), 144-145. 化学の文献ではしばしば、個別の粒子 (イオンとか分子など) と巨視的な物質 (金属や化学物質や電解質や塩など) との名称が混同されて使われている。「ionic イオンの」を巨視的な意味に対して使ったらどうか、と提案している。すると「ionic substance イオン物質」は、全体として電解質を意味して、一個のイオン (粒子) から成る電解質の部分ではなくなる。
 - 20) 堀内寿郎「化学を如何に読み如何に学ぶべきか」(化学の領域, 4(5), 260-261, 1950, 南江堂) の短い文章には「純物質とは混り気のないもの」をさける説明がある。
 - 21) Redlich, O. (1970) "Intensive and Extensive Properties," *Journal of Chemical Education*, 47(2), 154-156.

Descriptive Logic for Science Education and Formation of Macroscopic Concepts in Relation to Chemical Substance

Tetsuo MORIKAWA* and Kazuhiro SAWADA**

(Received October 29, 2004; accepted December 6, 2004)

ABSTRACT

Let A be an "object" in the real world; and B be a macroscopic concept such as matter, metal, pure substance, mixture, acid, and base in natural science. A implies B, but it is well-known that understanding B is difficult in science education, because B is abstract. Here "A is B", "A is not B" etc are called "descriptions". The present paper deals with a method, by which a class of students learns a list of descriptions to form macroscopic concepts. The examination in an introductory science course suggests that "descriptive logic" plays a very important role in science education.

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

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