

小・中理科における望ましい粒子概念教育の提言 — 国の調査結果の背景および独自調査の分析から —

村 上 祐*

(2009年12月9日受理)

1. はじめに

小学5年生と中学2年生を対象に文部科学省・国立教育政策研究所が行った理科学力テスト「特定課題調査」(2006年1,2月, 全国211校で実施)の結果が2007年11月に公表された。資料1に示すように, 水に食塩を溶かした後の食塩水の質量を問う設問への正答率が, どちらの学年も理由を含め50%台と低い結果となった¹⁾。

資料1 特定課題調査(2006年)から¹⁾

「食塩20gを水100gに溶かしてできた食塩水の質量はどうなりますか」 (小学校111校, 3,284人, 中学校100校, 3,196人)		
選択肢と選択割合(%)	小学5年生	中学2年生
100g	13.2%	17.0%
100gより大きく120gより小さい	21.2	20.2
120g	63.2	59.4
120gより大きい	2.1	2.8
理由を含めての正答率	57.4	54.4

正答理由例
「食塩は水に溶けても溶けなくても, 重さは変わらない」
「食塩は水に溶けて見えなくなっても, なくなったわけではないから」
(ただし, この正答率のなかには, 単に「混ぜ合わせただけだから」や「水100g + 食塩20g = 食塩水120g」のように数値的なことのみ記述した準正答率を含み, その割合は小5で33.5%, 中2で38.5%と過半を占めている。)

* 岩手大学教育学部

誤答理由例

「食塩は溶けるとなくなることと同じ」

「食塩が水に溶け込んだことによって、水と一体化したから水の質量と変わらない」

「食塩は、溶けて液体になると軽くなる」

「食塩は溶けて見えなくなったけど、なくなったわけではなく、水に溶けた分質量が少し減る」

この結果に対し、国立教育政策研究所は次のように考察している（部分）。

- ・小学校5年生は調査の直前に「ものの溶け方」で「ものは溶けてもなくなるしない」を学習しているが、4割近い児童に「質量保存の考え方」が定着していない。
- ・中学2年生は、1年で「状態変化では体積は変化するが、質量は変化しない」や、2年で「化学変化の前後で物質の質量の総和は等しい」など、質量保存に関する学習をしているが、それにより小学校で学習した溶解の場面における質量保存の理解が深まっているとは言えない。
- ・「溶けても物質が混ざっただけで、質量は変わらない」などのように、質量の保存概念を踏まえた正答は中学2年生で16%であった。これらの生徒は、(2年の「原子・分子」で学習した)物質は目に見えない小さな粒で構成されており、それらの粒は水溶液中では拡散しただけなので質量が保存される、と考察したと考えられる。

この調査から、原子・分子の「粒子モデル」を用いて質量保存を学習しても、それを生かして正答した中学生が16%に過ぎず、生徒の大半に「粒子概念」が身につけていないことや、多くの中学生は小学校で学んだ質量保存の考えを深めることができていない、などの実態が浮かび上がる。この調査結果が公表されたのは、学習指導要領改訂の中間まとめで「ゆとり教育」の見直しの方向が打ち出された時期と重なり、また OECD（経済協力機構）による2006年の学習到達度調査 PISA（Programme for International Student Assessment, 15歳対象、日本では高校1年対象）などにおける学力低下が問題視されていたときでもあって²⁾、中学生の「質量保存の法則」の理解度が小学生を下回ったことが特に注目され、大きく報道された。

本稿³⁾では、はじめに、今回の学習指導要領改訂（小・中学校2008年3月、高校2009年3月）で、「粒子」が理科学習の柱のひとつとなった背景を分析する。次に、指導要領・同解説および教科書等における粒子の取り扱いを調べ、その問題点を明らかにする。最後に、子供達の「粒子概念」理解の実態調査を踏まえ、望ましい「粒子概念教育」を提言する。

2. 「粒子」が理科教育の柱となった背景

(1) 前学習指導要領（学習内容3削減）への批判

1998（平成10）年、学習指導要領が「自ら学び自ら考える力などの『生きる力』の育成」を標榜して大幅に改訂された（小中学校2002年実施、高校2003年実施。学年進行）。改訂された学習指導要領のねらい達成のため、「総合的な学習の時間」が新設される一方、既存

小・中理科における望ましい粒子概念教育の提言

の教科で「基礎・基本を確実に定着させる」という名目で教育内容が厳選された（いわゆる「教育内容の3割減」）。教育内容の厳選は、次の2つの方針のもと行われた。

- ・高度になりがちな内容を上の学年や学校段階に移行し、もともと上の段階で扱っていた内容と合わせることにより、体系的にわかりやすく指導
- ・各学校段階間、各学年間、各教科間で重複する内容を削除

しかし、このような厳選方針に対し、理科の教育方法として重要と言われてきた「スパイラル学習」⁴⁾の弱体化を招く、との強い批判があった⁵⁾。しかも、2002年度から学校週5日制が完全実施されて全授業時間数が減っている中で「総合的な学習の時間」の新設は、既存の教科に多大な影響を及ぼすこととなった。たとえば、中学校の理科の授業時間数は、1960年代の420時間から290時間にまで減少し、小学校を含めた義務教育段階における理科の総授業時間数は、1048時間から640時間へとほぼ4割減となった（表1）。この授業時間数の激減は、学習負担の軽減を図るため「各教科等の目標・内容を中核的事項にしぼる」として1977年にいわゆる「ゆとり教育」が導入されたことから始まり、1989年の「社会の変化に自ら対応できる心豊かな人間を育成」するためとして「生活科」の新設、1998年の「自ら学び自ら考える『生きる力』を育成」するとして「総合的な学習の時間」の新設と、学習指導要領改訂とともに新科目が創設されたことによる。

表1 理科の授業時間数の変遷

学習指導要領改訂年	中学校(時数)	小学校(時数)	義務教育合計(時数)	備考
1958	420	628	1048	
1969	420	628	1048	教育内容の現代化
1977	350	558	908	ゆとり教育導入
1989	315	420	735	「生活科」新設
1998	290	350	640	「総合的な学習の時間」新設
2008(今回)	385	405	790	「確かな学力」の確保

学習内容の3割削減に対し、特に、理数系の学会や現場教員・大学教員から、「教育内容が細切れになり、繋がりがなくなる」、「さらなる学力低下を招く」など、多くの批判があった。化学領域では、特に、1950年代から一貫して中学校で学習してきた物質の基本的粒子「イオン」が高校へ移行したことに批判が集中した⁶⁾。中学校で「イオン」を学習しないことを受けて高校の学習内容に大きな影響があった。たとえば、「生物I」では「イオン」という用語を一切扱えず、それで生命現象を高校生に理解させることができるのかどうか疑問とされた⁷⁾。さらに大きな問題と考えられたのは、高校での科目選択によっては（「理科総合B」と化学以外の「〇〇I」を選択した場合）、小・中・高を通して「イオン」を一度も学習せずに高校を卒業してしまうこともあり得ることであった。

(2) 学力低下問題 —ゆとり教育の見直しへ—

1977年の「ゆとり教育」導入以来、80年代後半から90年代にかけて、特に、大学生の

学力低下が指摘されるようになった。なかでも、「分数ができない大学生」（岡部恒治他著、紀伊國屋書店1999年）に代表される実情報告などにより、理数系の学力低下は世間に広く知られることとなり、「科学技術立国」を国是とする日本にとって放置できない大きな教育問題であるとして急浮上した。また、2003年のPISA⁸⁾で日本の順位が前回（2000年）より低下したことから、マスコミが「ゆとり教育による学力低下」と盛んに報道するようになった。さらに、国際教育到達度評価学会（IEA）が2003年に行った国際数学・理科教育動向調査TIMSS（Trends in International Mathematics and Science Study、小学4年生、中学2年生対象）でも、1999年調査より正答率が下がった問題が多かったことや、「数学の勉強が楽しい」と答えた中学2年生の割合が国際平均より著しく低かった⁹⁾ことなども、「ゆとり教育」見直しへ進む根拠となった¹⁰⁾。

こうした状況で、教育内容のいわゆる「3割削減」に対する「学力低下」を懸念する世論に押され、文部科学省は学習指導要領を一部変更せざるを得なくなった（2003年12月）。「学習指導要領は全ての児童・生徒が学習する最低基準である」ということを明確にする一方、いわゆる「はじめ規定」を撤廃した。さらに、場合によっては学習指導要領に示されていない内容を「発展的な学習」などとして授業に取り入れることを容認した。この指導方針変更により、教科書にも「発展的な学習内容」が登場することとなった。しかし、指導要領外のため、どのような内容を加えるかは教科書出版社により異なり（分量は制限）、授業でとり上げるかどうかなども学校の裁量とされた。このような変更にもかかわらず、「学力低下」批判は収まらず、ついに、前学習指導要領の施行後間もない2005年2月、文部科学大臣から中央教育審議会（中教審）に対して「学習指導要領の見直し」が要請された。

（3）教育基本法・学校教育法の改訂

「美しい国」造りを標榜した安倍内閣が2006年9月発足し、翌10月には「教育再生会議」が組織された。2007年1月の教育再生会議第1次報告では早くも「ゆとり教育の見直し」を謳っており、同年12月の第3次報告で、「学力の向上に徹底的に取り組む」ことを一番目の柱とした。その教育再生会議の発足や審議進行と並行するように、教育基本法（2006年12月）および学校教育法（2007年6月）が改訂された。

改訂された学校教育法には以下の内容が記載されている（第30条他）¹¹⁾。

「生涯にわたり学習する基盤が培われるよう、基礎的な知識および技能を習得させるとともに、これらを活用して課題を解決するために必要な思考力、判断力、表現力その他の能力をはぐくみ、主体的に学習に取り組む態度を養うことに、特に意を用いなければならない。」

したがって、これからの学校教育では、次の3点がより一層求められることとなった。

- ① 基礎的・基本的な知識・技能の習得
- ② ①を活用して問題解決するのに必要な思考力、判断力、表現力などの育成
- ③ 主体的に学習する態度の養成（学習意欲の向上）

中教審による2005年2月からの学習指導要領の改訂は、これらの教育基本法・学校教育法改訂以前に着手されたけれども、指導要領改訂の基本方針はこれら両法の改訂を踏まえ

小・中理科における望ましい粒子概念教育の提言

たものとなっている。また、今回の指導要領改訂の主要目標に、「ゆとり教育」により低下したとされる理数系学力の向上のため「小・中学校における理数系教育の充実」が謳われている。他の重点項目は、「外国語教育の充実」および「伝統文化の教育」である。

(4) 小・中理科教育の柱となった粒子

小学校・中学校の理科でも、学校教育法に依拠した上記の①～③に対応する次の4点が学習指導要領改訂のポイントとして挙げられた(資料2)¹²⁾。ここで初めて、「基礎的・基本的な知識・技能の定着のため」として「エネルギー」や「粒子」などの基本概念が理科教育の柱に据えられ、それらの基本概念に関連する内容を小学校・中学校を通じて一貫性を持って学習することとなった。また、「国際的な通用性、内容の系統性の確保」という視点から、指導内容を充実することになり、旧指導要領で高校へ移行していた「電子」、「イオン」、「遺伝」などが中学校に復活した。このように改訂された学習指導要領を実施し、「確かな学力」を確保するとして、小・中理科の授業時間数が大幅に増加された。特に、中学校の授業時間数は「ゆとり教育」導入時を上回ることとなった(表1)。

資料2 小・中理科改訂のポイント¹²⁾

- ① 基礎的・基本的な知識・技能の定着のため、科学の基本的な見方や概念(「エネルギー」、「粒子」、「生命」、「地球」)を柱に、小・中学校を通じた内容の一貫性を重視。
- ② 国際的な通用性、内容の系統性の確保等の視点から、必要な指導内容を充実。(小学校では「ものと重さ」、「人の体のつくり」など。中学校では「イオン」、「遺伝の規則性」、「進化」など)
- ③ 科学的な思考力・表現力等の育成の観点から、観察・実験の結果を分析し解釈する学習活動、科学的な概念を使用して考えたり説明したりするなどの学習活動等を充実。
- ④ 科学を学ぶことの意義や有用性の実感および科学への関心を高める観点から、日常生活や社会との関連を重視し改善。

学習内容の一貫性は、たとえば、次のように実現された。小3から中3までの7年間の「物質」に関する学習内容が「粒子」に関係する系統性を考慮して構成され、それらの学習単元が「粒子の存在」、「粒子の結合」、「粒子の保存性」、「粒子の持つエネルギー」という4つの観点から配置されている(小学校・中学校学習指導要領解説・理科編)^{13,14)}。

しかし、文部科学省教科調査官の説明¹⁵⁾によれば、児童・生徒の発達段階を考慮すると、「粒子」を柱にするといっても、小学校から「粒子概念」を導入するのではなく、小学生は「粒子のメタファー体験や粒子への気づき」を学び、中学校に入って初めて「粒子概念を導入し、論理的、総合的に理解させる」ことが必要とのことである。高校では、「より定量的に、より発展的に」理解させるとしている。

3. 小・中・高で実施される新しい粒子教育

(1) 小学校における「粒子」の取り扱い

教科調査官の「小学校では粒子概念を扱わない」という説明の通り、小学校学習指導要領では、「粒子」に全く言及していない。また、たとえば、指導要領解説で「粒子の存在」に位置づけられた4年「空気と水の性質」の学習内容の記述は、旧指導要領とあまり変わっていない¹⁶⁾。しかし、指導要領解説¹²⁾には次のような記述がある。

「ここでの指導に当たっては、空気と水の性質の違いを、力を加えたときに手ごたえなどの体感を基にしながら比較できるようにする。また、力を加える前後の空気の体積変化について説明するために、図や絵を用いて表現することができるようにする。」

このように、指導要領解説では、「図や絵を用いて表現できるように」と授業のあり方に踏み込んでいる。したがって、実際の授業では次の点に留意する必要があると考えられている¹⁷⁾。

- ・単に空気と水の性質を理解させるだけでなく、絵や図に表す活動を取り入れて、見えない空気、見えている水のイメージを表す。
- ・粒や他のもので空気や水をモデル化して表すと、起きている現象をうまく説明できることに気づかせる。

同様に、5年生「ものの溶け方」に対しても「図や絵などを用いて表現するなどして考察し、適切に説明できるように」指示されており、物質を小さな粒で表すなどのイメージ・モデルで説明することが必要である。

このように、指導要領の中では「粒子」に直接言及していないものの、指導要領解説では「図や絵を用いて表現する」と指導しており、何らかの「粒子イメージ」、 「粒子モデル」を導入する必要がある。しかし、どのような「粒子イメージ」あるいは「粒子モデル」が適切かは記述していない。このため、新学習指導要領に沿った2010（平成22）年度出版予定の教科書では、指導要領・解説の解釈の仕方によって、あるいは執筆者の考え方によって、多様な「粒子の取扱い」となることが予想される。

(2) 中学校に導入される粒子概念

中学校指導要領の「内容の取扱い」で、「物質の溶解」と「状態変化と熱」とを「粒子のモデル」と関連づけることとされており、さらに、「状態変化と熱」では「粒子の運動」にも触れることが指示されている。物質を構成する基本粒子「原子・分子・イオン」の学習前に、これらの「粒子モデル」が、実際の教科書でどのように記述・説明されているかを、5出版社の教科書（2009年度補助教材）で調べた¹⁸⁾。

5社の補助教材のうち、3社の教材で最初に「状態変化」に粒子モデルを導入している。その内容は、概ね、「物質は小さな粒でできており、温度によってその粒の集まり方や運動が違い、それによって固体・液体・気体となる」で、物質を小さな粒で表した図で説明している。その後、「物質の溶解」も粒子モデルで図示している。残りの2社の教材は、逆に、「物質の溶解」で先に粒子モデルを導入し、溶質を粒で表した図で説明した後、「状態変化」

にも粒子モデルの図を入れている。

ここで問題なのは、これらの補助教材すべてで、「物質の溶解」を説明する図に粒で表されているのが「溶質」のみで、溶媒の「水」は粒で表されていないことである（1 補助教材のみ、「見やすくするために、水の粒は省略している」との注釈がついている）。文章による説明は「食塩の粒と粒の間に水が入り込み～」などが多い。

一方、「状態変化」では「粒子モデルを用いて理解させる」よう指導しているため、すべての教科書で水を粒で表して状態変化を説明している。しかし、「溶質の溶解」では溶媒の水を粒として扱っておらず、一貫していない。これでは、「物質が粒子でできている」という「粒子概念」を学習することにならない。また、溶質を粒で表しながら溶媒の水を粒で表さないというのは、科学的にも不適切と考えられる。

このような誤った取扱いの原因は、指導要領解説で「～水溶液においては溶質が均一に分散していることを粒子のモデルと関連づけて理解させることが狙いである。（中略）～その際、溶質を粒子のモデルで表し、溶質が均一になっている様子について説明できるように～」と指示していることにとらわれているためと推測される。指導要領解説のこの部分では、溶媒の水を粒子で表すことには触れておらず、「溶質を粒子のモデルで表し」としているので、教科書の執筆者はその指示だけを守ったということになる。もちろん、実際の授業では、水の粒にもふれ、溶質の粒が水の粒のなかに分散する様子を理解させる必要がある。

（3）高校化学における粒子教育

今回の高校理科の学習指導要領改訂で科目構成が変わり、化学はこれまでの「化学Ⅰ（3単位）・化学Ⅱ（3単位）」から、「化学基礎（2単位）・化学（4単位）」となった。また、履修基準も変更になったため、「化学基礎」を選択履修する高校生は、これまでの「化学Ⅰ」履修生よりも多くなると予想される¹⁹⁾。

学習内容の面では、中学校との関連をはかる上から、多くの生徒が選択すると考えられる「化学基礎」において、科学の基本的な見方や「粒子概念」を踏まえて内容が構成されている。具体的には、中学校との接続に配慮し、「粒子」と関連づけて物質の性質の違いを理解するために必要な「化学結合」の内容が充実された。これは、これまで主として「化学Ⅱ」で学習してきた化学結合の内容を、「化学基礎」へ移行するものである。これにより、物質には化学結合の違いにより「分子性物質」、「金属」、「イオン性物質」などがあること、「原子・分子・イオン」の粒子の種類とその結合が物質の性質と関わっていることを理解させることができる。さらに、「化学基礎」には、「化学結合」の学習前に、「熱運動と物質の三態」が加わり、「物理変化と化学変化の違い」および「気体分子のエネルギー分布と絶対温度」にも触れることとなった。

これらの内容は、これまで「化学Ⅱ」で主として理系大学へ進学する生徒だけが学習していたものであるが、これからは多くの生徒に粒子の熱運動・温度と物質の存在状態の関係、および粒子の種類・結合と物質の種類の間関係を理解させることが可能となった。その一方、無機化合物や有機化合物の多くが「化学」へ移行した。実際の教科書での取扱いはまだ不明であるが、「化学基礎」と「化学」の間でのこのような内容の入れ替えは概ね妥当と評価できる。日本におけるいわゆる「科学的リテラシー」を考慮したとき、高校生の

大多数が学ぶ化学の基本的内容として、いろいろな化合物に関する細切れの知識を学習・記憶するより、「物質の本質」に関わる事項を学習・理解しておくの方が重要であると思われるからである（PISA では、「科学的リテラシー」を、「自然界及び人間の活動によって起こる自然界の変化について理解し、意思決定するために、科学的知識を利用し、課題を明確にし、証拠に基づく結論を導き出す能力」としている）。

4. 小学生から大学生までの「粒子概念」理解度

小・中学校における理科教育、特に、化学分野の主な目的は、「物質概念」の基礎をつくることと言われている。これまでの学習指導要領から大まかに言えば、小学校においては、日常の身近な現象や体験的な実験を基に、物質に関わる性質・現象を知識として獲得することが主な内容であり、中学校においては、物質の性質等の学習を深めるとともに、最終的にはそれらの物質の様々な性質を原子・分子・イオンの「粒子概念」で理解することが目標となっている。しかし、冒頭の特設課題調査を含むこれまで実施されてきた各種調査によれば、「粒子概念」は中学生に定着していないことが明らかになっている²⁰⁾。筆者の研究グループでこれまで2度にわたり調査してきた結果も同様であった^{21,22)}。

この度の学習指導要領改訂で、「粒子」が小・中学校の理科教育の柱のひとつとされたことを踏まえ、改めて「物質は小さな粒できている」という「粒子概念」と表裏の関係にある「粒と粒の間のすき間」および「粒の（熱）運動」に焦点を当てて、それらの理解度を調査するアンケートを実施した。対象は主として岩手県内の小学5、6年生、中学1、2、3年生、高校1、2年生、および大学3年生で、各学年の人数は70名前後（2クラス分）である。大学生（教育学部小学校教員養成コース）のみ54名であった。なお、教育学部小学校教員養成コースは文系と見なされているため（その多くは高校で文系コースに所属）、理系の大学3年生（教育学部理科所属生と工学部応用化学科所属生、計71名）も調査した²³⁾。

(1) アンケート調査内容

改訂前の中学2年の「原子・分子」の単元で学習する粒子概念の内容「物質は小さな粒できている」、「粒は消滅しない」、「粒の質量や大きさは変わらない」を事前に説明した後、「気体と液体の性質の違い」に関する次の3つの問題を「粒で考えよう」というタイトルをつけて調査した（2008年、5～7月実施）。これらの問題をプリントに印刷して配布し、それに記入する形で回答してもらった。なお、解答を記入させる前に、それぞれの問題に関する演示実験をビデオで見せた。回答時間は、ビデオ視聴を含め15～30分とした（小学生には回答時間を長くした）。

問題 1: 袋に入れたエタノールを暖めて気体にして袋を膨らましたとき（液体のエタノールはなくなっている）、気体になったエタノールの粒と粒の間にすき間ができる図を示し、そのすき間はどうなっているか（すき間には何があるのか）を問う。（選択肢から選ぶ）

問題 2: 注射器の中の空気はピストンを押すと押し縮められるが、水はピストンを強く押し縮められないという現象を見せ、その理由を問う。（図と文で説明する）

問題3: 色のついた液体と気体を小さなビーカーに入れ、それぞれ大きな瓶の中に静置したとき、気体だけが瓶全体に広がっていく現象を見せ、その理由を問う。(図と文で説明する)

(2) アンケート調査の結果と考察

問題1: どの学年も「(粒と粒の間には) 何も無い」を選択した正答率はいずれも低く、大学生(小学校コース)でも24%である。小学生では正解者はいなかった。中1年生から学年進行とともに正答率が増える傾向にあり、原子・分子などの学習効果と見ることもできるが、正答率は低いままである(中1~高2:7~18%)。「エタノール」を選択した割合は高学年でも多く、液体と気体の状態の違いを正確に認識していないことによると考えられる。また、低学年では「酸素」や「空気」が比較的多かった。「水蒸気」がどの学年でも多かったが、その理由はエタノールを気化させるために熱湯を使った演示実験による可能性がある。一方、理系の大学3年生の正答率は56%とさすがに高かったが、それでも半数を少し超えている程度に過ぎなかった。

問題2: 文での説明では、粒と粒の間の「すき間」を用いた正答率が高かった(小5, 6年: 平均33%, 中1~3年: 平均54%, 高1:62%, 高2:76%)。これは、問題1の図がヒントになっていると考えられる。また、大学生のコース差はみられなかった(どちらの正答率も70%前後)。しかし、「空気は押し縮められる」ことを図で説明する場合、押し縮める前は空気の粒と粒の間を広くとっていても、押し縮めた状態になると粒と粒を密着させる図も多く見られた。圧縮されても気体である限りは、粒間の「すき間」が重要なポイントである。この図を正確に描いた正答者に限れば、上の正答率はおおよそ半減する(小5~高1:16~28%, 高2:34%, 大(小学校コース):35%)。この点でも、液体と気体の状態の違いを正確に認識していないことが明らかとなった。

問題3: 「粒の運動」で説明した正答者は、大学生(小学校コース)で10名(19%)、高校1年と2年はそれぞれ2名(約3%)、中学2年は1名で、「気体の粒が常に自由に飛び回っている」という認識は非常に薄いことがわかった(理系の大学生では52%)。また、この現象を「液体と気体での分子間力の違い」あるいは「均一になろうとする性質」で説明した正答者を含めると、大学生の正答率はかなり高くなった(小学校コースで39%, 理系で73%)。高校1年生以下では「粒子の質量が空気より軽い」、「周りの空気の対流によって」等の理由を挙げた者が多く、ほぼ50%となっていた。高校2年生と大学生(小学校コース)では、「拡散するから」、「空気と混ざり合う」などと現象を単に言い換えているものが目立った。

アンケート調査の結論: このアンケート調査の結果からまず言えることは、中学2年の「原子・分子」を学習した後でも中学・高校の生徒には「粒子概念」が定着していないことである。物質を構成している基本粒子の理解(物質はすべて小さな粒できている、粒と粒の間はすき間である、粒は消滅しない、粒の質量や大きさは変わらない、など)が不十分であるので、「1. はじめに」で取り上げた簡単な「質量保存則」にも多くの中学生が誤答したと考えられる。このことは、液体と気体

の状態をきちんと区別できていないことにも現れている。また、高校「化学Ⅱ」で学習する「粒は熱運動している」は、高校生と大学生（小学校コース）にほとんど定着していない。大学生については、小学校コースと理系で理解度に大きな差が見られた。これは当然のことと言えなくもないが、小学校教育コースの学生については、卒業後、小学校教師となって「粒子」を柱とする理科をも担当することを考えれば、憂慮すべき現状である。また、理系の大学3年生についても、その多くがおそらく高校からも理系コースで、大学入学後2年の理系科目の学習を経た時点としては、かなり物足りない結果である。

5. 小学校・中学校における望ましい「粒子概念」教育

筆者の科研費研究グループを含め多くの教員・研究者から、小学校の学習単元に「ものはすべて小さな粒でできている」などの「初歩的粒子概念」を導入しても、小学生は十分理解できるとの実践報告がなされている²⁴⁾。さらには、そのような授業を受けた子供たちには、「難しいけれど、よくわかった」という意見が多かったことも事実である。目に見えない「粒」を想定して学習するので、難しいのは当たり前であるが、それを使うことによっていろいろな事象が理解できるということを示している。我々の研究グループは先に小学校・中学校および高校を通じた「粒子概念の段階的教育」を提案している²²⁾。それによれば、小学校では「物質はすべて小さな粒でできている」ことでマクロな科学現象を学習・理解し、中学校では1年で「粒の正体は、原子・分子・イオンである」ことを学び、2・3年で化学変化をそれぞれ「原子・分子で考える」・「イオンで考える」学習をする。さらに、高校では「原子の電子配置で、物質の多様性と規則性を理解する」こととして、小・中・高を通して、物質の性質・化学変化を「小さな粒」・「原子・分子・イオン」・「原子の電子配置」で理解するという系統的カリキュラムとした。

ここでは、その提案の骨格を基本的に維持しつつ、新学習指導要領で小学校・中学校を通して「粒子」が柱となったことを踏まえ、望ましい「粒子概念」教育をより具体的に提言する。本提言では、新学習指導要領・同解説に依拠した小・中学校の粒子教育を改善し、物質理解の基本である「粒子概念」の定着度を高めるため、「粒子」を理科教育の柱とした背景・議論を手がかりに、小・中学校で導入すべき「粒子モデル」を提案する。

(1) 小学校における粒子モデル

日常の身近な現象や体験的な実験を基に、物質に関わる性質・事象を知識として獲得することが、小学校理科の主たる目的であると前に述べた。しかし、そのような科学的事象を「なぜそうなるのか」と子供たちに考えさせることを重視してこなかったと思われる。小学生が「なぜそうなるのか」と考え、他人と意見交換した上で納得するのでなければ、学習した事象をそれぞれ別個の知識として獲得・記憶するのみであり、科学的思考力育成に繋がらない。

今回の学習指導要領改訂の基本的方向として、前述したように改訂学校教育法に依拠して、①基礎的・基本的な知識・技能の習得、②それを活用して問題解決するのに必要な思考力、判断力、表現力などの育成、③主体的に学習する態度の養成（学習意欲の向上）、の

小・中理科における望ましい粒子概念教育の提言

3点が挙げられている。しかも、学習指導要領の小学校理科の目標として「実感を伴った理解」が新しく強調された。これらのことを考慮すると、次のように「ものはすべて小さな粒でできている」を基本的知識として習得し、それを活用することで、単元で取り上げている様々な事象を「なぜそうなるのか」と探求することが、改訂の基本的方向に適っている。そこで、次の小学校における「粒子モデル」を提言する。

提言1 小学校における「粒子モデル」

「ものはすべて目に見えない小さな粒でできている」

これを基本として、小学校で学習するマクロな科学現象を「なぜそうなるのか」考えさせ、それぞれが関連していることを理解させる。

- ・「空気は押し縮めることができるが、水は押し縮めることはできない」
- ・「温度によって姿を変える水」
- ・「水蒸気が見えなくて、湯気は見える」
- ・「食塩が水に溶けて見えなくなっても、重さは変わらない」
- ・「熱の伝わり方が、金属、水、空気違う」
- ・「温度による体積変化は、空気、水、金属の順になる」

これらの現象を「小さな粒」で考えさせ、理解させる際、適宜「粒と粒の間はすき間である」、「粒の大きさや質量は変わらない」や、「粒の集まり方で、固体・液体・気体となっている」なども取り入れる。

「小さな粒」の導入方法は、単元によって、あるいは、授業者によって異なる。しかし、導入法は異なっても、「小さな粒」でいろいろな事象を理解・説明できたとき、子供たちはそれぞれの事象が関連していることに気づくであろう。これが「実感を伴った理解」であり、さらに「別の事象はどうなっているのか」など、科学への興味・関心を引き出すことに繋がって、主体的な学習態度の育成へと繋がるものと期待される。

(2) 中学校における「粒子モデル」

中学校学習指導要領の「物質の溶解」および「状態変化と熱」で、「粒子のモデル」と関連づけること、さらに、「状態変化と熱」では「粒子の運動」にも触れることが指示されている。しかし、上述したように、「物質の溶解」では、学習指導要領解説および教科書の教材は不十分・不適切である。したがって、小学校の「ものはすべて目に見えない小さな粒でできている」を引き継いで、中学校で学習する「粒子モデル」は、次の提言のようになる。

提言2 中学校における「粒子モデル」

「粒は常に運動している」(温度を高くすると、運動が激しくなる)

「粒と粒はくっついたり、離れたりしている」(粒同士の相互作用)

この二つの粒子概念を導入し、物質の状態変化と溶解・拡散について正しく理解できることを目的とする。

- ・「加熱して温度を高くすると、粒の運動は大きくなり、固体→液体→気体と

変化する」

- ・「溶質の溶解は、溶質の粒の間に溶媒（水）の粒が入り込み、溶質の粒を引き離す現象」（有色気体の空気中への拡散も同様）

このようにすれば、小学校の粒子モデルのレベルと中学校のレベルをはっきり差別化した上で、物質の三態変化、溶解・拡散現象、熱の伝わり方・物の暖まり方、などの「物質」の基本的性質を、中学1年でほぼ理解できるようになる。

2年以降で物質を構成する基本粒子「原子・分子・イオン」を学習すると、小学校で学習してきた「小さな粒」の正体を理解することができる。その上で、これまで学習してきた物質の性質やいろいろな化学変化を、それらの基本粒子で考え、理解していくことになる。

このような小・中学校を通じた学習は、高校「化学基礎」の「粒子の熱運動・温度と物質の存在状態の関係」および「粒子の種類・結合と物質の種類の関係」を深く理解するための基礎となり、「粒子概念」等の科学の基本的な見方や概念の定着に貢献できる。

6. おわりに

今回の学習指導要領改訂によって、小・中・高を通じて「粒子」などの科学的基本概念を系統的に学習できるようになったこと、また、前回の改訂で削除された「イオン」、「電子」、「周期表」などが中学校に復活したことは、国際的通用性²⁵⁾の上からも評価できる。しかし、小学校の「粒子」の取扱いが曖昧である。「粒子を柱に」としながら、指導要領では「粒子」にまったく触れておらず、その解説では単元を「粒子概念」に位置づけてはいるが、「粒子」の具体的な取扱い方を述べていない。また、中学校の教科書（2009年度補助教材）の記載は不十分・非科学的であり、教科書改訂に当たって修正を要望したい。

なお、いろいろな調査・研究によって、日本の子供たちの「理科離れ」、さらには「勉強離れ」が進んでいることは明らかである。今後、これまでの理科カリキュラムあるいは教授法が適切ではなかったという認識のもとに、新しいカリキュラム・教育方法を作っていく必要がある。物質学習の面では、「マクロな科学現象を小さな粒で考える」学習を通して、小学生の段階から「小さな粒」により「どうしてそうなるのか」と考えさせ・理解させることが必要であると強調したい。そのような小学校での物質理解の定着によって、初めて中学校でのより高度な物質学習・粒子概念学習にスムーズに入っていくことができる。この点から、本論文が特に小学校の理科カリキュラム改革へささやかでも貢献できればと願うものである。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C）「粒子概念の早期定着をめざす小・中連携教育カリキュラムの実践研究」、課題番号19500715）によって行われた。記して感謝の意を表す。

なお、査読者からの適切なコメントにより、本論文の内容および文章が改善された。記して感謝の意を表す。

注および参考文献

- 1) 特定の課題による調査（理科）http://www.nier.go.jp/kaihatsu/tokutei_rika/index.htm, 国立教育政策研究所
- 2) PISA2006年調査（57ヶ国・地域参加）によれば、日本の15歳段階生徒の科学的リテラシー（科学的活用力）はやや低下し、初めて1位グループから2～5位グループへ転落した。OECD 生徒の学習到達度調査 http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/gakuryoku-chousa/sonota/07032813.htm, 文部科学省
特に、科学的能力の3領域「科学的な疑問を認識すること」、「現象を科学的に説明すること」、「科学的証拠を用いること」のうち、前2領域の得点が低く全体の平均点を下げていた。さらに、「生徒の科学に対する自己効力感」・「科学の楽しさ」・「理科学習に対する道具的な動機付け」・「生徒の科学に関連する活動」など、科学的態度に関する多くの指標で国際的に低い水準となり、科学的関心・意欲という点では最下位であった。この調査は、科学的能力は維持しつつも、「理科に際だって消極的な日本の高校生」という実態を白日の下に晒す結果となった。
- 3) 本論文は、第32回教師のための化学教育講座（日本化学会東北支部主催、2009年8月、弘前大学）における講演内容を元になっているが、それを大幅に加筆修正したものである。
- 4) 竹村・秋山編「重要用語300の基礎知識⑥ 理科」, p102, 明治図書（2002）
- 5) たとえば、岡博昭「新指導要領における化学教育の問題点—小中高化学教育における継続性を中心に—」大阪教育大学附属高校研究集録42集 pp103-119（2000）
- 6) 堀哲夫「教育内容厳選の基準の検討に関する一考察—イオン概念を事例にして—」, カリキュラム研究, 10, 99-111, 2001. 佐藤明子・細矢治夫「科学の基本概念の段階的に繰り返しを活かした学習—化学分野のイオンと関連概念の外国での教育を例として—」, 科学教育研究, 27（5）, 362-371, 2003. 下末伸正「イオンを教えよう」, 理科教室, 2004（4）, 48-51. 菊地洋一他「イオン学習をどのように位置づけるか—旧教育課程における中学校教師のアンケートを通して—」, 理科教育学研究, 46（1）, 15-24, 2005. 高橋治他「中学校理科にイオンをどう取り入れるか—現教育課程におけるイオン学習の実践—」, 理科教育学研究, 46（3）, 33-43, 2006. 蘭部幸枝「中学校における粒子概念の授業実践—原子・分子・イオンの学習をとり入れて—」, お茶の水女子大学附属中学校紀要, 36, 1-22, 2007.
- 7) 青井千明他「生物の教育内容はイオンとどのような関係にあるか—現教育課程の高校生物におけるイオンの取扱いと問題点—」, 日本理科教育学会第54回大会（筑波大学）, pp133-134（2004）
- 8) PISA2003, http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/001/04120101.htm, 文部科学省
- 9) 「数学の勉強が楽しいか」に対して、「強く思う」9%（国際平均29%）, 「そう思わない」「まったくそう思わない」は併せて61%（国際平均35%）。TIMSS2003, <http://www.nier.go.jp/kiso/timss/2003/top.htm>, 国立教育政策研究所
- 10) 学力低下論に対して、2003年国立教育政策研究所が行った小・中学校教育課程実施状況調査（http://www.nier.go.jp/kaihatsu/katei_h13/top.htm）および2005年の高等学校教育課程実施状況調査（http://www.nier.go.jp/kaihatsu/katei_h15_h/index.htm）などの結果から、文部

科学省は「学力低下はない」と主張していた。また、学力低下の原因についてはいろいろな意見があり、「ゆとり教育」にあるとは言えないとする研究者も多数である。

- 11) 学校教育法, http://www.mext.go.jp/b_menu/houan/an/166/07040503/003.pdf, 文部科学省
- 12) 学習指導要領改定案を2008年2月に公表した際の資料, http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/news/080216/009.pdf, 文部科学省
- 13) 小学校学習指導要領解説理科編 (文部科学省), 大日本図書 (2008)
- 14) 中学校学習指導要領解説理科編 (文部科学省), 大日本図書 (2008)
- 15) 笹尾幸夫「理科 (化学) 改善の方向性—学習指導要領改訂の取組から—」, 第12回化学教育サロン (日本化学会化学教育研究協議会近畿支部主催, 京都教育大学, 2007年11月)
- 16) 「小学校学習指導要領 ちがいがわかる新旧対照表」, 東京書籍 (2008)
- 17) 木村幸泰「新学習指導要領における小学校4年「空気と水の性質」の学習」, 理科の教育, 2008 (10) (特集 理科における「粒子」とは), pp662-664.
- 18) 新学習指導要領の中学校における前倒し施行は平成21年度から始まり, 新しく加わった内容については教科書改訂が間に合わないため, 各出版社とも補助的教材として別冊でつけた。
- 19) 大多数の進学校・進学クラスでは, 「(物理・化学・生物・地学の) 基礎のついた4科目のうちから3科目選択」の履修基準を選ぶと予想される。したがって, これまでの「(実質) 2科目履修」に比べて, 学習する科目数が多くなる。
- 20) 高野圭世他「粒子概念の理解に関する研究—「空気の温度による体積変化」を通して—」, 日本理科教育学会研究紀要, 32 (2), 91-99, 1991. 宗近秀夫「小・中学生の溶解概念に関する実態調査」, 理科教育学研究, 40 (3), 13-21, 2000.
- 21) 菊地洋一他「中等教育における粒子概念に位置づけと理解度調査」, 日本理科教育学会第56回全国大会 (奈良教育大学), p182, 2006. 武井隆明他「初等・中等教育における粒子概念の理解度調査」, 日本理科教育学会第56回全国大会 (奈良教育大学), p183, 2006.
- 22) 菊地洋一他「粒子概念の位置づけと物質学習カリキュラム」, 理科教育学研究, 49 (1), 35-51, 2008.
- 23) このアンケート調査およびその結果については, 以下の学会で部分的に口頭発表している。村上祐他「児童・生徒の粒子概念の認識に関する調査研究—液体と気体における粒子の「すき間」と「運動」はどのように認識されているか—」, 日本科学教育学会第32回年会 (岡山理科大学), pp453-454, 2008. 村上祐他「教員養成学部学生の粒子概念の理解度と課題」, 日本理科教育学会第58回全国大会 (福井大学), p242, 2008. 武井隆明他「小学生から大学生の粒子概念の理解度と教員養成の課題」, 平成20年度化学教育研究協議会東北大会 (八戸工大), pp28-30, 2008.
- 24) 宗近秀夫「小学生の溶解認識における概念変容の研究」, 理科教育学研究, 43 (2), 1-13, 2002. 久田隆基他「科学的思考力をはぐくむための理科教材の開発研究—小学生の気体概念および科学的な見方に対する認識状況—」, 科学教育研究, 29 (2), 146-156, 2005. 今村哲史他「第5学年「ものの溶け方」における粒子的見方の育成」, 日本理科教育学会第57回全国大会 (愛知教育大学), p134, p135, 2007. 村上祐他「小学校における粒子概念の導入—なぜ水蒸気は目に見えないのか—」, 日本科学教育学会第33回年会 (同志社女子大学), pp425-416, 2009. 増田伸江他「小学校における初歩的粒

- 子概念形成の試み—「変身する水を調べよう」の実践を通して—, 日本理科教育学会第59回全国大会 (宮城教育大学), p324, 2009.
- 25) 今村哲史「アメリカの化学教育事情—学校科学における粒子概念の取り扱い—」, 化学と教育, 50 (9), 618-621, 2002. 藤井浩樹「ドイツの化学教育事情—粒子概念の取り扱いを中心に—」, 化学と教育, 50 (9), 622-625, 2002. 佐藤明子他「イオン学習の適時性—教科書の国際比較に基づいて—」, 理科教育学研究, 46 (2), 21-27, 2006. 佐藤明子他「海外の科学教育における粒子の学習—アメリカの各州のスタンダードを例にして—」, 日本理科教育学会第58回全国大会 (福井大学), p374, 2008. 佐藤明子他「海外の教科書に見る粒子概念の学習」, 日本理科教育学会第59回全国大会 (宮城教育大学), p328, 2009. 松原静郎「諸外国では初等理科教育をどのように進めているか (その1) 国際調査から見たわが国の初等理科教育」, 化学と教育, 56 (7), 355-358, 2008 (以下このシリーズでは現在まで, イギリス, ドイツ, フランス, 韓国, フィンランド, 中国, 台湾, アメリカの各国の初等理科教育を調査・紹介している)。