粒子概念の系統的カリキュラムに関する検討

野ヶ山　康弘，谷口　和成
（京都教育大学附属京都小中学校，京都教育大学理学科）

Study on Systematic Curriculum of Particle Concept

NOGAYAMA Yasuhiro，TANIGUCHI Kazunari

2016年11月30日受理

抄録：児童・生徒の認知発達を促す英国の「認知促進（Cognitive Accelation:CA）」の考え方[1]の日本の理科授業への応用[2]を検討している。特に，学習指導要領で重点項目として挙げている「粒子概念の育成」について，CAの理論に基づく理科授業を開発し，その中で生徒の形式的モデルの構築過程を追跡調査したところ，「形式的モデルの構築とその活用」を促す自作教材の有効性と，形式的モデルの構築過程にある一定の普遍性を明らかにすることができた[3]。そこで，本研究では，この成果をもとに，形式的モデルの構築と活用を促す教材とカリキュラムの開発を行い，その成果を評価した。

キーワード：粒子概念，モデル化，論理的思考力，系統的カリキュラム

Ⅰ．はじめに

学習指導要領の中で，『科学的な概念の理解など基礎的・基本的な知識・技能の確実な定着を図る観点から，「エネルギー」，「粒子」，「生命」，「地球」などの科学の基本的な見方や概念を柱として，子どもたちの発達の段階を踏まえ，小・中・高等学校を通じた理科の内容の構造化を図る方向で改善する』とあり，この中で思考力・判断力・表現力等の育成を図ろうとしており，この中で「粒子概念」は柱の一つとなっている[4]。

本研究における粒子概念とは，「事象を抽象化して，図（式）に表したり，その図（式）を使って思考を進めたりする能力」と定義づけた。そして，その中心が「粒子モデル」と呼ばれる「科学的モデル」を用いた思考であり，科学的に思考する方法の一つである。しかし，子どもたちの実態や小学校と中学校の教育内容（教育課程）の実態を踏まえて教科書を見ると，水分子を最初から１個の粒として示しており，事象を抽象化して説明しようとする科学的なモデルの粒子ではなく，粒で説明することを教え込む形になっている。これでは，「真の意味」で粒子概念を育成できていないのではないかという疑問が生じる。特に，小学校第４学年における「水の状態変化」，小学校第５学年における「もののとけ方」の単元では，認知的な発達段階が具体物を使った説明が必要な時期である。つまり，抽象的な思考が難しいことを考えると，もっと具体的で系統だった教材やもっと丁寧な教育方法が必要なのである。しかしながら，これらの点を押さえた有効な教材や教育方法[5)6)]，実践事例[7)8)]があまりないのが実態である。そのために，目に見えないものをどう表現するのかという科学的なものの見方（ここでは粒子概念）について，教科書を使って「粒」を示して教え込む形になってしまっている。さらに，これまでの研究成果から判断しても，具体的操作期の発達の段階の子どもたちに，形式的操作期の子どもたちでなければ難しい内容を教え込む形なっているので（中学校理科のこと），知識として覚えるだけになり，粒子について十分な理解が得られていない。

その一方で，英国において科学的な思考力を育成する手段として，CASEプログラム（科学教育を通して認知発達を促すプログラム）が存在し成果を上げている。このプログラムに「Thinking Science」や「Let's Think!」と呼ばれる教材があり，子どもたちの発達段階に応じて，さまざまな科学的なものの見方・考え方（論理的思考）

を概念形成という視点で高めていく教材となっている[9)10)]。しかし，このCASEプログラムはあくまでも論理的思考の認知発達がねらいであり，本研究が求めている科学的な概念形成を求めているわけではない。

そこで,学習指導要領でも示されている子どもたちの発達段階を踏まえて論理的思考を育むことができるCASEプログラムを参考にすることは理に適っており,日本の子どもたちの実態[11)]に合った教材を作成し,授業実践していくことにより,子どもたちの粒子概念の形成が促すことができるのではないかと考えた。この粒子概念は,科学的なものの見方・考え方の基本であり,この粒子概念を概念形成という視点で高めていくことが,現代の教育的課題でもある思考力や表現力を高めることにもつながるのではないかと考えた。さらに,概念形成という視点においた教材や系統だった教材は少なく,小中一貫校である本校において,小学校の学習を考慮した系統性の高い新しい教材開発を行うことができ,この点においても本研究の必要性は高いものと考える。

Ⅱ．実践の内容

1. 本研究のねらいと方法

（1）研究のねらい

第４学年から第９学年（中学３年）までの粒子概念に関連する代表的な学習項目を取り上げると，「状態変化」,「溶解」,「化学変化」が挙げられる。子どもたちは，この一連の学習の中で，自然事象の仕組みを科学的モデルによって説明することが求められる。ここで，前述のように，粒子概念はCASEプログラムにおいて[9)]「形式的モデルの構築と活用」（以下，モデル化）の「推論形式」（本稿では「論理的思考の形式（表2)」に対応）と呼ばれる思考操作能力に相当し，それを参考にしたこれまでの研究成果によって，子どもたちの発達の段階に応じて表１のように概念が形成されていくことが示唆されている。また，このモデル化は，実際の教育現場では教え込みの形になりやすく概念形成が促されないため，自然事象のしくみを説明できる生徒が少ない[11)]。特に，第８学年の学習において質量保存の法則，第９学年でイオンを学んでいく上で，自然事象の理解の点において「モデル化」の思考操作能力は重要である。しかし，本研究の対象生徒は，第７学年までの学習でモデル化の概念形成を促すような授業経験が不十分であったため，補完し強化する必要があると判断した。そこで，発達段階に応じた粒子概念の構築を促進するこれまでの研究成果をもとに，第８学年における短期間促進プログラムを開発し，実践的検討を行うこととした。

（2）対象

本校（附属京都小中学校）第8学年3クラス84名

表１　論理的思考の発達段階

	論理的思考の発達の段階		
モデル	具体的操作期（第４～５学年）	移行期（第６～７学年）	形式的操作期（第８～９学年）
微視的 ↑ 巨視的	**モデル（絵を含む）に性質を持たせ**，現象を説明できる。	**形式的モデル**を使って現象を説明できる。	**形式的モデルに性質を持たせ**，現象を説明できる。
	モデル（絵を含む）を使って現象を説明できる。		

表２　論理的思考の形式の代表的な種類

論理的思考の形式	特　徴
変数の制御 変数の除外	適切に条件を設定して，現象の因果関係を明らかにする能力
分　類	対象から特定の属性を抽出し，その共通点や相違点に着目し，関係づけて把握する能力
比と比例性	伴って変わる2つの量の間の比が一定であるという関係を用いて思考する能力
補　償	伴って変わる2つの量の間の和や積が一定であるという関係を用いて思考する能力
蓋 然 性	事象の実現性や知識の確実性の度合い，確からしさを判断する能力
相 関 性	１対１の対応だけの因果関係ではなく，複数のサンプルから得られた結果の全体的な傾向を把握して，結論付ける能力
形式的モデルの構築と使用	事象を抽象化して，図（式）に表したり，その図（式）を使って思考を進めたりする能力
平　衡	4つの独立な変数a，b，c，dの間に，a×b＝c×dという関係を見出し，その関係を用いて思考する能力

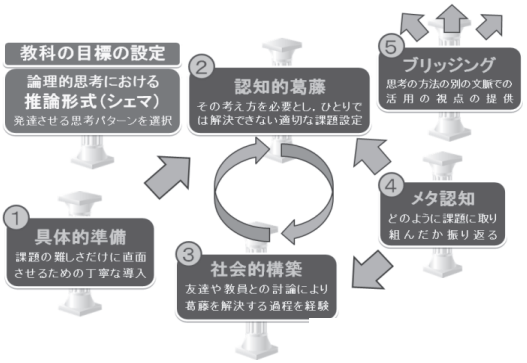


図１　CASE プログラムを取り入れた授業展開

（3）授業モデルとカリキュラムモデル

①基本的な授業構成

これまでの研究成果[2),3)]より得られた認知促進の考えを取り入れた授業を参考に，通常の1時間の授業では，認知促進プログラムの授業構成を応用し，いくつかある論理的思考の形式（表2）の中からどれか1つを選び，活動の中で認知的葛藤が生じるような課題（題材）解決に取り組む。その解決には，班や全体での話し合い（社会的構築）を基本とし，さらに自分の考え方の変遷を振り返る場面（メタ認知）が必ず含まれるようにしている。

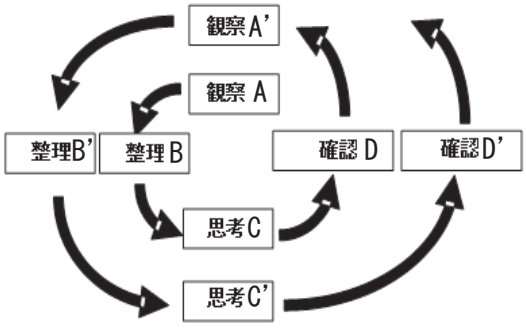


図2　スパイラルなカリキュラムの例

②葛藤場面における授業モデル

一般に，自然事象を理解するためには，しっかりと観察することが必要であり，この観察に基づき，事実を整理することによって事象の仕組みの理解につながる。この事実を整理する過程において必要となるのが，「論理的思考の形式」である。したがって，通常の１つの題材を扱う単元では，その理解のために必要な「思考の形式」を設定し，図２のように以下のＡ～Ｄが連続的に，かつスパイラルに発展していくように授業カリキュラムを構成している。具体的には，Ａ「観察：事象をしっかりと観察する」→Ｂ「整理：事象の事実を整理する」→Ｃ「思考：事象のしくみ考える（「形式的モデルの構築と活用」の形式に対する認知的葛藤）」→Ｄ「確認：事象としくみの整合性を確認する（メタ認知）」→新たなA'「事象をしっかりと観察する」→…となるように構成している。これによって，思考の連続性が確保され，同じ「論理的思考の形式」を異なる文脈においても使用して説明することが必要となる。これは，CASEにおける授業構成の6つの柱のひとつ「プリッジング」に対応し，その結果，概念形成が促されると考えられる。

（4）授業構想

第８学年で学ぶ化学変化について理解するためには，状態変化との違いを理解することが大切であり，また第９学年のイオンの学習につなげていくためには溶解を理解することも大切である。そこで，本研究における短期間促進プログラムでは，これまでの学びとこれからの学びの連続性を考慮し，「溶解」，「状態変化」，「化学変化」，「電気分解」を取り上げることとした。これにより上記のＡ～Ｄのスパイラル構造が１セットとなって，１つ１つの事象の説明の中に組み込まれ，モデル化の思考の形式を何度も繰り返し使用することが可能となる。このとき，事象を科学的に説明するためにはモデル化の論理的思考の形式が必要であり，その思考の形式が不十分であるがゆえに生じる葛藤が認知的葛藤である。

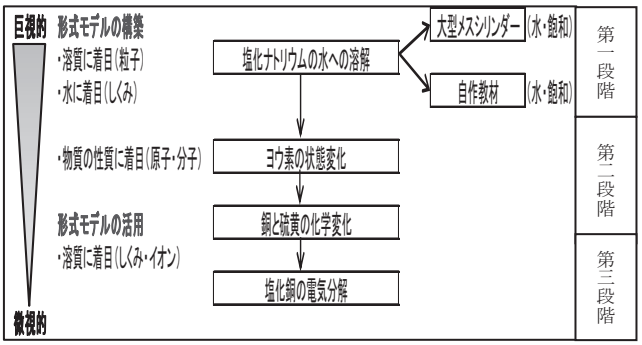


図3　授業の段階

つまり，この認知徹葛藤を生じさせ，何度もモデル化に関する文脈の違う課題に接することで，溶解，化学変化，状態変化，溶解と化学変化（イオン）を巨視的から微視的に視点が移行していくようなカリキュラム（図３）を組み，形式的モデルの構築と活用に対して認知的葛藤が段階的に生じるようにした。

第一段階として，「溶解」に対するモデル化を扱うこととした。ここでは，食塩（塩化ナトリウム）の水への溶解を扱い，食塩の粒子が水の中で次第に小さくなっていく様子が観察でき，巨視的な視点でモデル化しやすいと考えられる。また，食塩を溶かす水の存在にも目を向ける必要があり，見えないものを説明することで微視的

な視点での葛藤も生じやすいと考えた。

第二段階として，状態変化と化学変化を同時に観察させ，可逆性の事象と不可逆性の事象の違いを比較することで，微視的な視点でモデル化しやすいと考えられる。ここで，化学変化を説明するためには，物質の性質の変化を示す必要があり，前段階で構築した状態変化や溶解におけるモデルを再構築する必要が生じ，この点で認知的な葛藤が生じると考えられる。

第三段階として，電気分解を扱うことにより，水溶液中で起こる化学変化をモデルで説明することになる。ここでは，第一段階の溶解と第二段階の化学変化のそれぞれのモデルをふり返り，新たなモデルを構築しなければ事象の説明はできない。この点でモデル化に対する葛藤が生じると考えられる。また，ここでの事象を説明する経験を第９学年で学習する「イオン」の理解のための土台とすることを目指している。

このような三段階の単元構成によって，短期間かつ効果的に，モデル化の操作能力の発達にはたらきかけることにより，粒子概念の形成を促すことを目指した。

（5）分析に用いた思考のタイプ

本研究では，自然事象で扱う物質を生徒がどう捉えているのか（思考のタイプ）について，定量的なのか，定性的なのかという視点で，それぞれの物質の捉え方を分類することにした。そして，既習内容における形式的モデルの概念が定着しているのかどうかを表１の基準で調査した。

それぞれの基準の内容は以下のとおりである。

①定量的モデル

物質を形式的モデル（物質を構成する原子１つをモデルで捉える）で示す。

②定性的モデル

物質を形式的モデル（性質を示す分子を１つのモデルで捉える）で示す。

③非モデル

見たままにそのまま描く。

表３　思考のタイプ

		物質1		
		非	定性的	定量的
物質2	定量的	C3	B1	A
	定性的	C1	B	B2
	非	C	C2	C4

これまでの研究3）により，モデル化の思考操作能力は，表１のＡに向かって進んでいくことが明らかになっている。そこで，考え方の柱となるモデル化に関して，「見た目だけをもとに現象の仕組みを説明するのか（巨視的)」，「モデルとなる図を使って現象の説明が分かりやすく説明するのか（微視的)」という視点で子どもの考え方を分析した。これは，表１において「Ｃ→Ａ」に向かっていくほど巨視的視点から微視的な視点に向かっていることを表している。つまり，ＣよりもＣ４，Ｃ４よりもＢ２の方が微視的な視点であるという評価である。

Ⅲ．実践の結果と考察

1．第一段階：塩化ナトリウムの水への溶解

（１）自作教材を使った食塩の溶解

まず，視点の反転を狙った装置3)を使って食塩に水を加えたときの食塩が水に溶ける現象を説明させたところ，見たままの考え（考え方１：図４）とモデルを使った考え（考え方２：図５）のような考え方が見られた。学年全体としては，55%の生徒が食塩と水を粒子で示した考え方１で説明していた。また，大多数の生徒が食塩を粒子で捉えているのに対し，水は半数近くの生徒しか粒子で捉えていなかった（表４）。このことから，生徒にとって水に比べ食塩の方が粒で考えやすいことが伺える。そして，食塩に水を加えたときの現象についてモデルを使ってわかり役説明できていた生徒は，食塩と水の両方を粒子で捉えた55%の生徒であった。

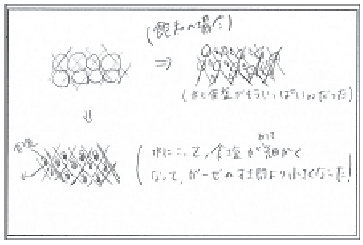


図４　そのまま示した考え

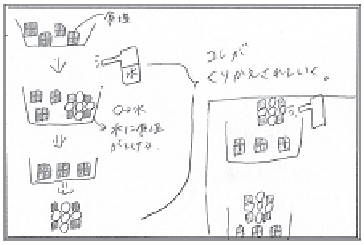


図５　モデルを使った考え

表４　溶解における考え方の分布（水→食塩）

学年 自作教材 (n=80)		食塩 現象をそのまま示すCタイプ	食塩 粒子で示す（化合物を1つの粒）Bタイプ	食塩 粒子に性質を持たせる（原子）Aタイプ
水	Aタイプ〜粒子に性質を持たせる〜	0 (0)	0 (0)	0 (0)
水	Bタイプ〜粒子で示す（分子を1つの粒）〜	0 (0)	44 (55.0)	0 (0)
水	Cタイプ〜現象をそのまま示す〜	1 (1.3)	35 (43.7)	0 (0)

このように，そもそも食塩はナトリウムと塩素，水は酸素と水素の原子が結合した物質であるが，生徒たちは物質の性質を持った一つの粒で捉え，現象を説明しようとしていることが伺える。このことから，食塩が水に溶ける現象を物質の性質を基準に定性的なモデルで現象を説明しようとしていることが考えられる。また，通常のカリキュラムの場合，水に食塩を加えて，そのとける様子からそのしくみを考えるのだが，この場合，水をモデルで示してとけるしくみを考える生徒はほとんどいない。しかし，食塩に水を加えたときの現象を示すことによって，水に意識が向き，水をモデルで考える生徒が多く見られたと考えられる。

（２）メスシリンダーを使った食塩の溶解

続いて，メスシリンダーを使って水に食塩を加えたときの食塩が水に溶ける現象を説明させたところ，現象を見たまま示した考え方（考え方１：図６）と現象のしくみをモデルで示した考え方（考え方２：図７）が見られた。考え方１は，食塩が水に溶けるようすを粒子で表しているだけであり，食塩の塊が次第に小さくなっていく様子を示しているだけで，水はかかわっていない。これに対して考え方２は，食塩と水を粒子で示し，食塩が水に溶けるしくみを「食塩と水の関わり方」の視点でモデルを作って表している。

また，授業後の個の考え方の分布（表５）をみると，60%の生徒が食塩と水を粒子で示した考え方１（食塩Bタイプ－水Bタイプ）をしており，33.8%の生徒が食塩だけを粒子で示している考え方２（食塩Bタイプ－水Cタイプ）であった。また，6.2%の生徒が見たままの様子を絵で示した考え方（食塩Cタイプ－水Cタイプ）をしていた。また，水だけに注目すれば，40%の生徒が見たままの様子を示した考え方（水Cタイプ）を示しており，水を意識しにくいことがわかる。これに対し食塩だけに注目すれば，6.2%の生徒しか見たままの様子を絵で示した考え（食塩Cタイプ）はなく，それ以外の生徒は粒を使って示していることから，食塩はモデルで考えやすいと思われる。これらのことから，目の前にある物質であっても，水のように透明な物質へは意識が向きにくいことがわかる。

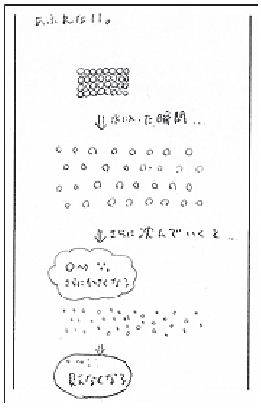


図６　そのまま示した考え

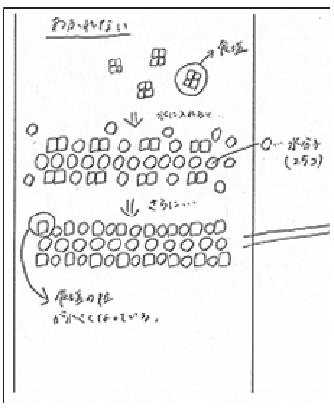


図７　モデルを使った考え

表５　溶解における個の考えの分布（食塩→水）

学年 メスシリンダー (n=80)		食塩 現象をそのまま示すCタイプ	食塩 粒子で示す（化合物を1つの粒）Bタイプ	食塩 粒子に性質を持たせる（原子）Aタイプ
水	Aタイプ〜粒子に性質を持たせる〜	0 (0)	0 (0)	0 (0)
水	Bタイプ〜粒子で示す（分子を1つの粒）〜	0 (0)	48 (60.0)	0 (0)
水	Cタイプ〜現象をそのまま示す〜	5 (6.2)	27 (33.8)	0 (0)

以上のことから，第一段階において，食塩を小さな粒の集まりとして捉え，水に溶けるしくみを説明しようとする生徒が９割以上見られたことから，巨視的な視点でモデル化しやすかったと考えられる。しかし，水を食塩と同様に粒で捉えて溶解の仕組みを説明した生徒が６割であったことから，水の存在をどうモデルで説明するのかという点において，強い認知的葛藤が生じていると考えられる。

2. 第二段階：銅と硫黄の化学変化とヨウ素の状態変化（昇華）

（1）銅と硫黄の化合

まず，銅と硫黄を加熱して硫化銅ができる化学変化を観察させた。この化学変化では茶褐色の銅と黄色の硫黄が化合して青色の硫化銅が生成する。この現象は色の変化が見やすく，物質の変化がA＋B→Cという化学変化の不可逆性や性質の変化を捉えやすいと考えられる。また，１つの銅原子が１つ硫黄原子と化合するので，原子のレベルでのモデル化が促進されやすいのではないかと考えられる。そこで，この現象を説明させたところ，図８から図１０のような考え方が見られた。

１つめの考え方は，違う物質に変化したという性質の変化について全く説明されておらず，目の前で起こった現象を見たままを示した絵に過ぎない。つまり，現象のしくみを説明しているわけではなく，現象を説明するためにモデルを使うところまで至っていないと考えられる（図８）。これに対し，２つめの考え方では，銅原子と硫黄原子を１つの粒として考え，化学変化によって新たな粒が１つできることをモデルで示しめしていることから，物質の性質の変化を示している。つまり，化学変化における物質の性質の変化や不可逆性を説明していることになる（図９）。また，３つめの考え方では，違う物質になる過程を擬人化したモデルで考え，物質の性質の変化と質量に変化がないことを説明している。つまり，化学変化における物質の性質の変化や不可逆性だけでなく，質量保存の考え方も取り入れた説明になっている。(図10)。

このように，この２つめと３つめの考え方は現象を説明するために，わかりやすいモデルを使っていることから，１つめの考え方よりもモデル化の思考操作能力が発達していることが分かる。

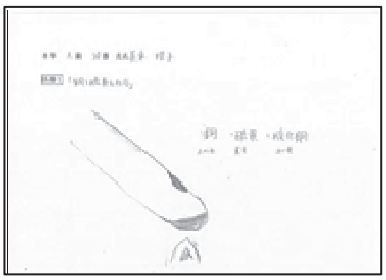


図８　見たままの考え

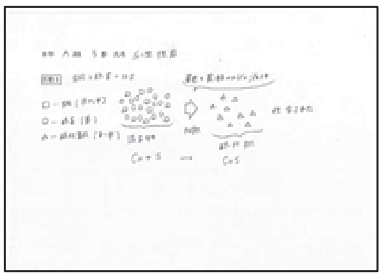


図９　不可逆性の考え

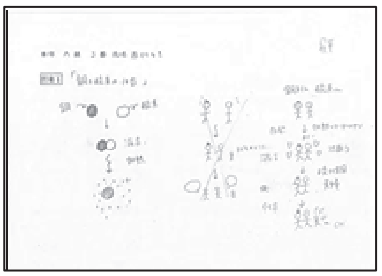


図 10　質量保存の考え

（2）ヨウ素の昇華

次に，固体のヨウ素が気体に変化する状態変化（昇華）を観察させた。この現象では，子どもの目の前で紫色の光沢のある固体が紫色の気体に変化するため，物質の状態の違いが見やすく，体積の変化や状態が変わっても同じ物質であるという状態変化を捉えやすいと考えられる。そこで，この現象を説明させたところ，図11から図13のような考え方が見られた。

１つめの考え方は，目の前で起こった現象を見たままを示した絵に過ぎず，粒子を使ってはいるが，現象のしくみを説明しているわけではなく，現象を説明するためにモデルを使うところまで至っていないと考えられる（図11)。これに対し，２つめの考え方では，ヨウ素分子を１つの粒子で示し，固体から気体に状態が変わっていくしくみについて，体積変化を含めて説明している（図12)。さらに，３つめの考え方では，２つめの考え方

とほぼ同様の考え方であるが，状態変化による体積変化まで説明はできていない（図13）。

これらのことから，状態変化を説明するためにモデルを使う必要性は感じているが，状態変化で何が変化したのかという観察の部分が不十分であったために，体積変化の説明についてモデルを使って説明できなかったと考えられる。それは，今回のヨウ素の昇華実験では，ビーカーを使って実験を行っており，体積変化を捉えにくかったからである。

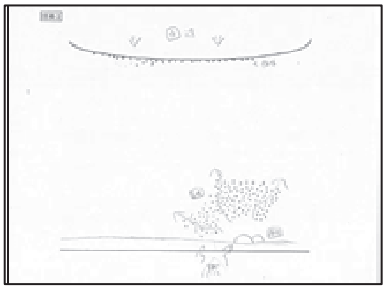


図 11　見たままの考え

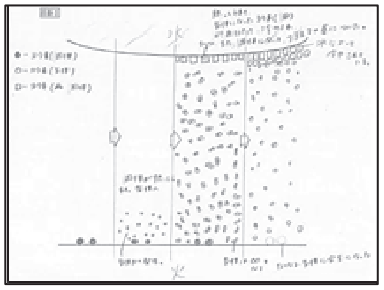


図 12　体積変化の考え

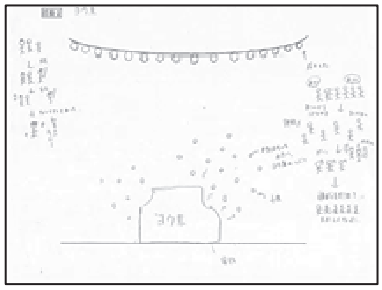


図 13　不十分な状態変化の考え

（3）銅と硫黄の化学変化とヨウ素の状態変化（昇華）の考え方の分布（表７）

そこで，化学変化と状態変化をどのように示して説明しているのか，考え方の分布を調べたところ，表７のようになった。銅と硫黄の化学変化については，全体として，粒子で化学変化を説明している生徒（化学変化ABタイプ）が79.7%いた。さらに，全体の63.3%の生徒が粒子に性質を持たせて（化学変化Aタイプ），原子を粒子で示して化学変化を説明していた。

これに対し，状態変化については，67.1%の生徒が粒子を使って（状態変化ABタイプ）状態変化を説明していたが，原子に性質を持たせた粒子で示して（状態変化Aタイプ）状態変化を説明している生徒はわずか3.8%であった。

表７　状態変化と化学変化の考えの分布

学年 (n=78)		銅と硫黄の化学変化		
		現象をそのまま示す Cタイプ	粒子で示す（化合物を1つの粒） Bタイプ	粒子に性質を持たせる（原子） Aタイプ
ヨウ素の状態変化	Aタイプ（粒子に性質を持たせる〈原子〉）	0 (0)	0 (0)	3 (3.8)
	Bタイプ（粒子で示す〈分子を1つの粒〉）	6 (7.6)	11 (13.9)	33 (41.8)
	Cタイプ（現象をそのまま示す）	10 (12.7)	2 (2.5)	14 (17.7)

また，化学変化も状態変化もともに粒子を使って現象を説明している生徒（状態変化ABタイプ－化学変化ABタイプ）が59.5%あり，どちらか一方について粒子を使ったモデルで説明している生徒が87.3%であった。

一方，化学変化では63.3%の生徒が原子を粒子モデルで考えているにもかかわらず，状態変化ではわずか3.8%であった。このように，化学変化より状態変化の方が原子を粒子モデルとして説明する生徒が少なかったのは，ヨウ素が分子という塊で性質を示しており，原子が二つ結合したモデルで示して説明する必然性がなかったからでないかと考えられる。

（4）班の中での討論と学級での討論

化学変化と状態変化の説明を各班で討論させ，その後，学級全体で討論させ，自分の考え方をメタ認知し，考えを深めていく場面を設定した。

２班における話し合いでは，状態変化において粒子の大きさが一貫しておらず，状態変化で質量が変化してしまうというモデルの矛盾に気づいたり，体積変化をモデルで示すことができていないことに気づいたりして，これらの気づきを修正してより良いモデルを創りあげている（図14）。特に，粒子の大きさや数を揃えて質量は合わらないが体積は変化することをわかりやすく説明しようとしている。また，化学変化については，原子を粒子モデルで示し，原子の種類によって性質が違うことや銅と硫黄が化合して別の物質になったこともわかりやすく

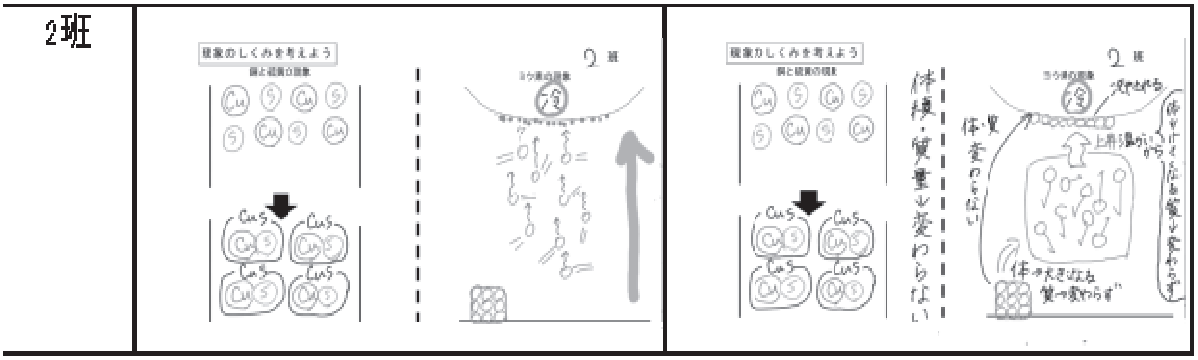


図 14 ２班の学級討論前後における考え方の変容（左：討論前，右：討論後）

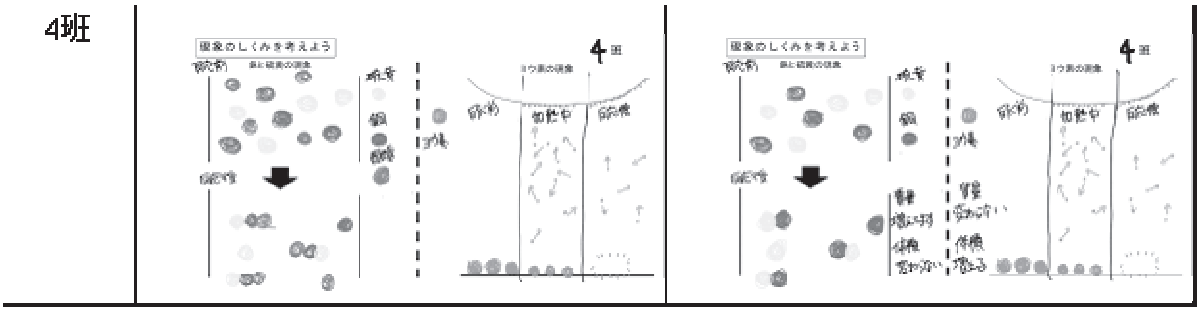


図 15 ４班の学級討論前後における考え方の変容（左：討論前，右：討論後）

説明されている。

４班における話し合いでは，化学変化の説明において酸素が示されていたが，酸素が直接関係していないことに気づき，酸素がない化学変化を原子の粒子のモデルを使った説明に変えていた。特に，原子を粒子モデルで示し，原子の種類によって性質が違うことや銅と硫黄が化合して別の物質になったこともわかりやすく説明されている。このように，これらの気づきを修正してより良いモデルを創りあげている（図15）。しかし，状態変化については，化学変化で粒子の大きさや数を揃えていたにも関わらず，粒の大きさ数にこだわりが見られず，検証のしくみの説明としては不十分なものとなっている。

このように，班の話し合いで個々のアイデアが出されたことで，現象のしくみをわかりやすいものにしようとしたり，みんなが納得する考え方を出し合ったりする中で，班の考えがより良いものへと深まっていることがわかる。この中で，現象のしくみを見たまま描くのではなく，モデルを使って説明することが大切であるということも話し合いの中で気づくことができていた。この状態変化と化学変化のしくみをモデルで説明することによって，生徒たちは状態変化と化学変化の違いをあきらかにできるようになっていることがわかる。

以上のことから，状態変化と化学変化を同時に観察させ，可逆性の事象と不可逆性の事象の違いを比較することで，微視的な視点でモデル化が容易だったと考えられる。また，話し合い活動が自分の考えをメタ認知する機会となり，それによってこれまでのモデルを再構築したり，認知的な葛藤が生じたりしながら概念が形成されていったと考えられる。

4. 塩化銅の溶解と電気分解

これまで溶解，状態変化，化学変化の学習場面で，繰り返し取り組んできた「モデル化」の思考形式を使って電気分解を説明するというに活用できるか試みた。ここでは，物質の水への溶解のしくみと化学変化のしくみの両方について微視的な視点での理解がなければ，説明することが困難であると考えられる。さらに，電子という

新たな微視的な視点（モデル）がなければ電気分解を説明できない。つまり，ここでの課題は極めて難易度が高く，義務教育カリキュラムにおけるモデル化の最終到達点でもある。

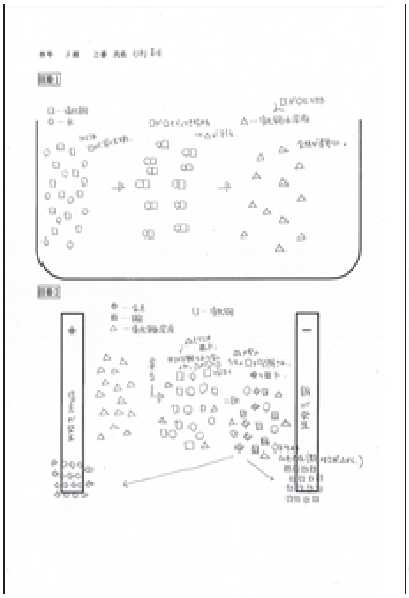


図 16　モデルを使った考え

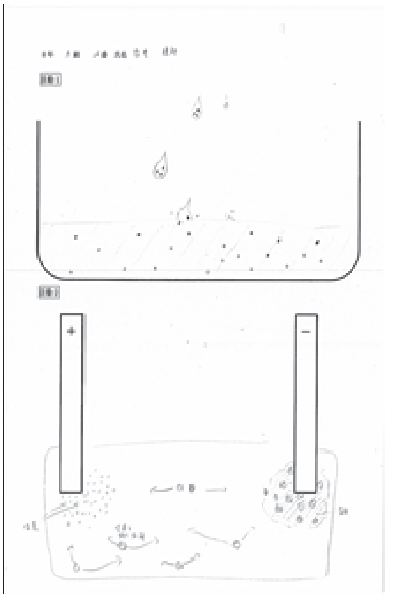


図 17　見たままの考え

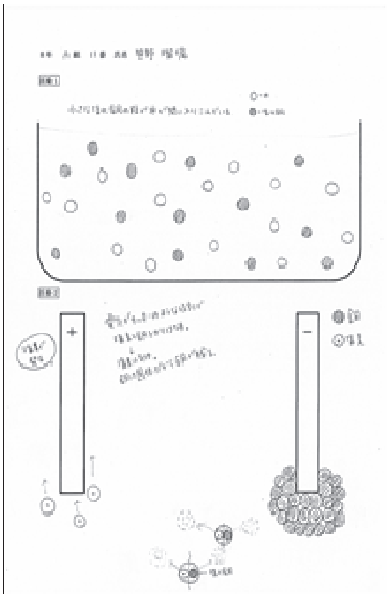


図 18　新たなモデルの考え

１つめの考え方は，これまでの原子を粒子で示したモデルを使って溶解を示し，さらに電気分解によってそれぞれから発生する物質を化学変化で考えたモデルを使って現象を説明している（図16）。しかし，なぜそれぞれの電極に違う原子が引き寄せられるのか説明することまではでいていない。また，２つめの考え方は溶解でのモデルを活用して現象を説明しようとしているが，電極での反応は見たままを描いているだけであり，モデルで説明ができているわけではない（図17）。これに対して，３つめの考え方は，これまでの原子を粒子で示したモデルを使って溶解を示し，さらに電気分解によってそれぞれから発生する物質を化学変化で考えたモデルを使って現象を説明している。さらに，それぞれの電極に違う原子が引き寄せられる仕組みを新たな電子モデルをつくって説明している（図18）。

また，生徒にどこが難しかったのかインタビューすると,電気分解を説明するとき,電極と電極の間がどのようになっているのか考えることが難しかったと答えており,モデル化に対する認知的葛藤が生じていることが分かる。

さらに，塩化銅の溶解と水の状態変化を説明する新たな課題に取り組ませ，そのときの生徒たちの考え方の分布（表８）をみると，塩化銅の溶解を79.5%の生徒が粒子を使ったモデル（塩化銅の溶解ABタイプ）で説明をしており，さらに内の半数が原子をモデル（塩化銅の溶解Aタイプ）で示した説明をしていた。これは，食塩の溶解の説明と比較すると，まったくいないところ（表４：食塩Aタイプ，水Aタイプ）から39.7%の生徒が示すようになっており（塩化銅の溶解Aタイプ），生徒のモデル化がかなり促進されたことが伺える。

表 8　状態変化と電気分解の考えの分布

学年 (n=78)		塩化銅の溶解		
		現象をそのまま示す Cタイプ	粒子で示す(化合物を1つの粒) Bタイプ	粒子に性質を持たせる(原子) Aタイプ
水の状態変化	Aタイプ〜粒子に性質を持たせる〜原子	0 (0)	0 (0)	3 (3.8)
	Bタイプ〜粒子で示す〜分子を1つの粒	0 (0)	30 (38.5)	17 (21.8)
	Cタイプ〜現象をそのまま示す	16 (20.5)	1 (1.3)	11 (14.1)

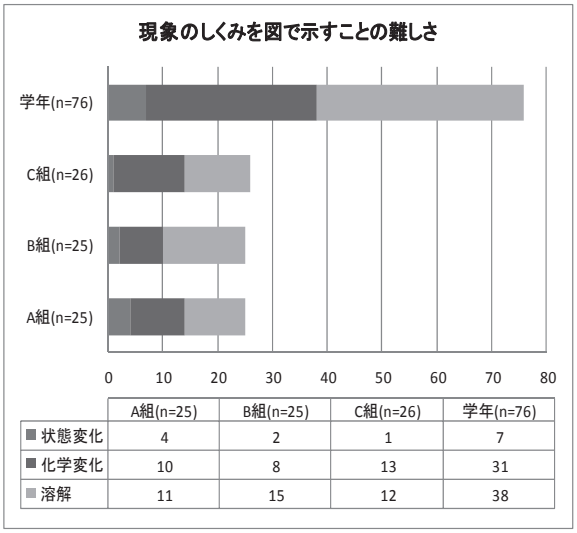
Ⅳ．授業効果

モデル化の思考操作生徒の意識を調査するために，授業後に，現象のしくみを説明する難しさと易しさについて，溶解，状態変化，化学変化の順位づけをするアンケートを行った。この結果，溶解のしくみを説明することに対する難しさに関しては，５割の生徒が難しいと感じ，化学変化に対しては４割の生徒が難しさを感じていた。このことから，溶解と化学変化について，現象のしくみを理解しにくいことが予想される（図19）。これに対して，５割の生徒が状態変化は考えやすいと答えていることから，現象のしくみを理解しやすいことも予想される（図20）。

これらのことから，溶解は微視的な視点で考えなければ現象のしくみを説明できないことから，生徒にとって最も難しい現象であったと考えられる。実際に，食塩の水への溶解を対象とした活動の結果（表４と表５）からもわかるように，現象についてモデルを使って説明するために，粒子に性質を持たせた考え方が見られなかったり，水を意識した考え方をもつ生徒が少なかったり（約６割）している。さらに，塩化銅水溶液の電気分解を対象とし活動では，塩化銅の水への溶解を説明できない生徒が２割（表８）と食塩の溶解に比べて増えていることがわかる。つまり，溶解のモデル化の能力が不完全であることを示唆しているが，これは，溶解に加えて，化学変化（電気分解）の両方の説明が必要であることや，その説明には電子というさらに微視的な新たな考え方を生み出さなければならないことなどが，生徒にとても高い課題となっていることを示唆している。

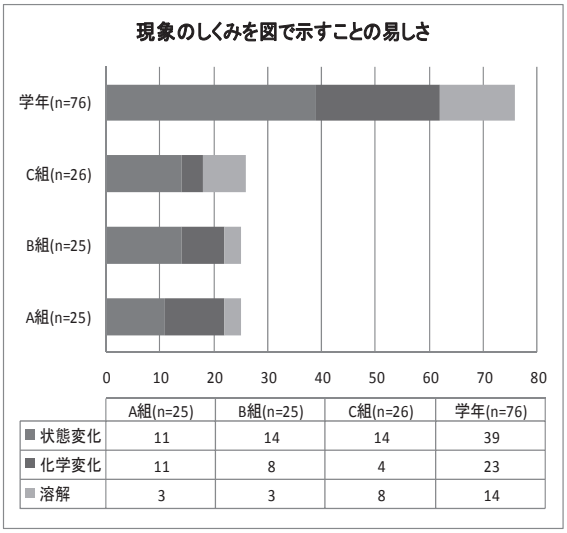
これに対し，状態変化については，多くの生徒が考えやすいと答えているが，図11から図13のように，生徒の記述を見ると気体を原子が２つつながった分子で考えている生徒はほとんどいなかった。つまり，現象を説明する上で，原子であろうが分子であろうが現象の説明において違いがないと考えているのではないかと思われる。今回，生徒に与えた状態変化の課題では，原子で示そうが，分子で示そうが，その違いによって課題の説明に影響がないため当然のことといえる。しかし，その後に与えた化学変化の課題では，原子で考えなければ説明ができず，分子を１つの粒で示していたものを分離しないといけない必要性が生じてくる。このため，化学変化については，図14と図15のように物質を原子の粒で考え，現象を説明する際に必要に応じてモデルをつくりかえていることが伺える。したがって，粒子を使った同じ説明であっても，生徒によって粒子の捉え方が違うこともあり得るということである。

つまり，設定課題の難易度を吟味し，発達段階に応じた系統的な学習指導により，モデル化の概念を形成して



	A組(n=25)	B組(n=25)	C組(n=26)	学年(n=76)
状態変化	4	2	1	7
化学変化	10	8	13	31
溶解	11	15	12	38

図 19　アンケート結果「図で示すことの難しさ」



	A組(n=25)	B組(n=25)	C組(n=26)	学年(n=76)
状態変化	11	14	14	39
化学変化	11	8	4	23
溶解	3	3	8	14

図 20　アンケート結果「図で示すことの易しさ」

いくことが可能であること考えられる。今回の一連の授業において，粒子概念が構築されたのかどうかを定量的に示す指標として，事象の説明に用いたモデルにどのような性質を持たせたのかという観点で分析していくことが１つの指標となり得ると考えられる。具体的には，状態変化と化学変化の違いをどのようなモデルで示したのかという点である。本稿においては，表７の分布がそれにあたると考えられ，化学変化Aタイプ－状態変化Bタイプに向かう方向が粒子概念の構築にあたると考える。したがって，表７において41.8%の生徒に粒子概念が構築された可能性があることが考えられる。

Ⅴ．おわりに

本研究において，モデルを構築と再構築を繰り返すように授業を組むことで，より本質的なモデル化の能力を高めるカリキュラム編成の可能性が示唆された。今回は，短期集中プログラムだったが，この結果ふまえて，中学３年間（もしくは第５学年から第９学年まで）の理科授業の適切な単元の際に継続的にはたらきかけることが重要であることが示された。また，その際の留意点として，教師が「粒子（モデル）」を教え込むのではなく，子どもの発達の段階を考慮し，事象を考えたり，説明したりするために「モデルが有用である」という意識を子どもに持たせる授業を構想し，子ども自身の内発的な概念形成を促すことが重要であると考える。

Ⅵ．参考文献

１）Thinking Science 3rd edition，Nelson，Walton- on- Thames.M．Shayer，P．Adey and M．Yates(2001)
２）認知発達を促す理科授業の実践，野ヶ山康弘，谷口和成，京都教育大学教育実践紀要13号p.63-71(2013)
３）形式的モデルの構築とその活用を促す理科授業，野ヶ山康弘，谷口和成，京都教育大学教育実践紀要15号p.71-80(2015)
４）文部科学省，学習指導要領（平成２７年３月改訂）
５）粒子概念による物質の三態変化の指導 - 経験と理論を統合するコンセプトマップの「ラベル展開」手法の提案 - ，福田恒康，遠西昭寿，理科教育学研究vol.56，No.2，p.203-210(2015)
６）生徒の化学変化についての理解を促すための指導法の考案 - 中学校２年「物質の分解と原子・分子」の内容において - ，小倉恭彦，藤井広樹，理科教育学研究vol.54，No.1，p.105-114(2013)
７）反論を含むアーギュメント構成能力の育成を目指した教授方略のデザイン要素：小学校第６学年「水溶液の性質」の事例，神山真一，他，理科教育学研究vol.56，No.3，p.309-322(2015)
８）個別実験を導入した協同的な学びが科学概念形成に与える影響 - 小学校「水溶液の性質」を事例として - ，栗原淳一，理科教育学研究vol.53，No.1，p.39-47(2012)
９）P．Adey and M．Shayer，1994: Really Raising Standards Cognitive Intervention and Academic Achievement，London，Routledge．
10）Shayer，et al．(1978)Science Reasoning Tasks．Slough: NFER
11）粒子概念の位置づけと物質学習カリキュラム，菊池洋一，他，理科教育学研究 49(1)，35-51(2008)