

博士論文要旨

粒子理論の教授学習過程の構成と展開に関する研究
— 構成主義に基づく理科教授の構想と実践 —

片平 克弘*

Katsuhiko KATAHIRA

本論文は、粒子理論の形成を目指した化学の教授学習過程の構成に関する研究成果をまとめたものである。すべてのものが原子レベルから構成されているとする粒子理論は、自然事象を統一的に理解するために欠かせない理論である。むしろ理科教育においても、原子や分子の構造や性質に係わる粒子理論の学習は、粒子概念を形成することの重要性の主張と相まって中心的な位置を占めている。原子概念や分子概念は、素朴な物質認識から直接的に派生しない概念であり、理科授業を通して新たに学習しなければならない概念として重要である。粒子理論の学習では、物質を連続体として捉える認識から粒子的な認識への転換、静的な粒子認識から動的な粒子認識への拡張、そして、最終的には原子や分子に基づいた物質認識の形成が目指されており、各学年段階に相応しい内容をいかに選択し、それをどのように扱うかは難しい課題となっている。

このような課題に対して、粒子理論の教授学習過程に関連する多様な研究がこれまで行われてきた。主たるこうした先行研究を研究関心に応じて分けると次のように3つに分類することができる。第一に、子ども達の粒子認識の実態に関する研究である。第二に、種々の誤った粒子認識から、科学の正規の粒子理論に変容・変換する理論、いわゆる概念変容 (conceptual change) の理論を解明する研究である。第三に、第二の概念変容の理論をも踏まえて、子どもが正規の粒子理論を構成する教授学習過程の在り方を探る研究である。本研究は、これらの研究から多くを学んでいるが、それらの中に見られる不十分な点やさらに解明を要する点をまとめると次のようになる。

*理科教育学

第一は、粒子認識の実態に関する研究で、

1. 物理分野の認識研究の多さに比べ、化学分野の理論、とりわけ粒子理論をテーマとした認識研究それ自体が少ない。
2. 粒子理論をテーマとした認識研究は特定の現象や文脈（固体・液体・気体、湯気、空気等）のもとで探っている研究が多く、子どもの年齢や発達段階に基づく縦断的なデータはほとんど無い。

第二は、概念変容の理論を解明する研究で、

1. 国内外において、ミスコンセプション(misconception)の根強さやそれによる深刻な影響は解明されてきたが、それらを科学的知識に変容させるための概念変容アプローチの開発が十分には行われていない。
2. 概念変容アプローチで用いられる「葛藤の生起」の有効性や、学習形態としての「共同(協同)学習」の必然性が明らかにされていない。

第三は、粒子理論の教授学習過程の在り方を探る研究で、

1. 粒子理論に基づく粒子概念は教授すべき概念と考えられており、概念変容理論に基づく教授学習過程研究が極めて少ない。
2. 粒子概念の形成過程は、生徒の頭の中に新たな粒子的世界像を作り出す認知過程と言えるが、理科授業の中では長期間に渡るデータ収集が困難なために十分に解明されていない。

以上のことを踏まえ、本研究の目的は「物質の粒子性」に焦点を当て、粒子概念形成の有効なアプローチを探り、その効果を実際の理科授業で検証することにある。具体的には、(1)「物質の粒子性」に関する子どもの認識の発達の特性を明らかにする。(2)構成主義特有の概念変容モデルを分析し、理科教授における有用性を明らかにする。(3)「物質の粒子性」に関する概念変容を目指した授業デザインを構想し、検証する。実証研究から得られたデータの分析結果をもとに、新たな粒子理論の授業デザインを提案する。研究方法としては、(1)(2)の研究では、質問紙やインタビューを用いた調査研究および文献研究を行う。(3)の研究では、描画やワークシートなど生徒の学習成果物であるポートフォリオを用いて授業評価を行う。

本研究は粒子理論の教授のための基礎研究であり、生徒が教室に持ち込むミスコンセプションを活かした粒子理論の教授を念頭に置き、「知識は構成されるものだ」とする知識観や、生徒の「学習への責任」を強調する構成主義の原理に基づ

く授業デザインを構想し、実践を試みる。一般に、子ども達は、様々な概念を日常世界の中で獲得し、学校教育を通してそれを変化させている。このような概念の獲得や変化は子ども達の認知発達の基盤である。ところで、彼らが教室に持ち込むミスコンセプションは日常世界の中では何ら不都合がなくても、学校教育の中では誤った概念として修正を求められる。とりわけ、科学概念を扱う理科の中では、学習者にミスコンセプションの修正を求めなければならない。

論文の章構成は次の通りである。

序 章 研究の目的と方法

第1節 本研究の目的と方法

第2節 本研究で使用する用語の定義

第1章 理科教育における構成主義と概念変容理論

第1節 近年の構成主義の展開と課題

第2節 理科教育における構成主義

第3節 概念変容理論と概念変容アプローチ

第2章 粒子理論の教授内容と生徒の粒子認識

第1節 理科カリキュラムと粒子理論の教授内容

第2節 生徒の粒子認識の実態

第3節 生徒の粒子認識の変化

第3章 構成主義に基づく粒子理論の授業デザイン

第1節 粒子理論の授業デザイン

第2節 概念変容の教授アプローチとしてのコンフリクトマップ

第4章 粒子理論の教授実践と効果

第1節 粒子理論の教授の構成と実際

第2節 粒子理論の教授と効果

終 章 結語と課題

第1節 本研究の成果

第2節 今後の課題

序章第1節では、子ども達の物質に対する粒子認識の発達の変化、構成主義に基づく概念変容モデル、化学の教授モデルに係わる代表的な先行研究の成果およ

び限界を指摘し、それらを踏まえた本研究の目的と方法を論じた。本研究の目的は、粒子理論の教授を取り上げ、教授の構成原理を探り、上述した3点を明らかにすることである。研究方法としては、調査研究、文献研究、授業研究を行う。小・中・高校生の粒子認識の実態を調査研究で探り、本研究の理論的背景となる教育における構成主義の位置づけを明確にするために、近年の構成主義の動向や概念変容教授の諸相を文献研究によって分析する。構成主義に基づく授業デザインを構成し、実践的に検討するために授業研究を行う。また、検証授業の評価は、生徒の理解の様子を詳細に跡づけるためにポートフォリオ評価を行う。特に、概念変容時の生徒の実態を分析する際には、生徒のワークシート、使用した教材、授業時のプロトコル等のポートフォリオを用いる。第2節では、諸外国におけるミスコンセプション、オルターナティブフレームワーク、チルドレンズサイエンス等の用語の表記と日本語表記を比較しながら、本研究で使用するそれぞれの用語を定義した。

第1章第1節では、概念変容の理論が、個人構成主義の中で主張された包括的な理論から心理学や社会学の特定の立場に焦点化した理論へと変化していることを指摘した。たとえば、J. ソロモンやR. ドライバーらは「他者と共有された知識」や「経験を超えたものとしての知識」の重要性に言及し、学校での学習が社会的な真空状態の中で行われていることはないと主張した。また、近年の社会構成主義の理論は、個人構成主義の理論と比較すると学習の社会的性格を強調しており、個人の思考に影響を及ぼす文化や言語などの社会的要因を明らかにしている。ここでは、近年の代表的な概念変容研究として、S. ボスニアドァウの「統合的意味論」、M. T. H. チイラの「ミスコンセプション修復論」、J. アイバーソンとJ. ショルツとR. サルジオの「社会文化論」の3つの立場について分析を試み、S. ボスニアドァウは、概念変容を「統合」と捉え、M. T. H. チイらは「置き換え」と捉え、そして、J. アイバーソンらは「道具使用」と捉えた点を指摘した。第2節では、理科教育における構成主義研究について論じた。理科教育研究者が構成主義研究で重視されるミスコンセプションに注目するようになったのは、1970年代後半に開始されたACM (Alternative Conception Movement)にある。現在に至るまでミスコンセプションは学習を妨害する要因であり、克服すべきものという考え方のもとに多くの研究が行われている。ここでは、理科教育のミスコンセプション研究の代表事例として力学と重力のミスコンセプションや電気に

関するミスコンセプションを取り上げた。一連のミスコンセプションは素朴理論とも呼ばれ、これらの理論は一貫しておりかつ強固に統合されており、学校で学ぶニュートン物理学に匹敵するものと考えられている。第3節では、先行研究を踏まえ、理科教育における概念変容理論と概念変容モデル（Conceptual Change Model: CCM）について、生徒が教室に持ち込むミスコンセプションの強固さやそれを授業でいかに変容させるか等の観点から分析した。CCMは新しい概念と既存の概念間の相互作用として学習を捉えており、概念の優劣によって決められる「地位」と、概念が生成・消滅する「生態環境」という観点から概念変容をモデル化している。特に、概念の地位を考える際のポイントは、概念の理解しやすさ、概念の信頼性、概念の有益性にある。また、概念変容理論の分析では、学習者の知識や思考法はそれなりに一貫し統合されているとする一貫説の立場と、学習者の知識は全体が統合的ではなく、ある程度独立した要素群から構成されているとする断片化説の立場から考察し、両者の立場の根本的相違が認知的な葛藤を用いた教授的介入の有無に現れることを指摘した。教授的介入に関しては、矛盾した事象や現象に基づく「認知的な葛藤」を概念変容の契機まで高めることがかなり複雑なプロセスである点、「認知的な葛藤」に用いる材料の多くが、その後の学習過程で前向きに使用されることがない生徒の既有知識を用いている点が問題視されている。

第2章第1節では、小・中・高等学校の理科カリキュラムにおける粒子理論の教授内容の系統性を明らかにした。粒子理論は、小学校では「物質・エネルギー」の領域、中学校では主に第1分野で扱われており、粒子の巨視的性質や微視的性質に関する内容が各学年段階に対応させて配置されている。第2節では、質問紙法による小・中・高校生の粒子認識の調査結果から、物質の連続体モデルを持っている小学生が、5・6年生を境に粒子モデルを持つようになることを明らかにした。「原子や分子からできているもの」の調査では、高校生の正答率は、理科授業で用いる物質については高いものの、身近な物質や生物については低くなる。また、日常的な現象（「ゆげの観察」）についての粒子的な見方は、小学校4年生と5年生頃を境に形成されること、日常的にあまり馴染みのない現象（「ドライアイスの昇華の観察」）についての粒子的な見方は、小学校の6年生になってはじめて可能となることを面接調査から明らかにした。また、「食塩の溶解現象」の面接調査からは、児童の粒子的な見方は物質の外見に依存することが確認できた。た

たとえば、小学校1年生でも食塩が完全に溶け透明になった食塩水の中の様子を粒子的に描いていたが、他方で、ゆげやドライアイスの観察結果や質問紙法による調査結果では、粒子的に描くことは少なく、小学校1年生ですでに粒子概念が形成されているとは言えない。第3節では、検証授業を構成する観点を得るために、中学校や高等学校で行った物質の粒子性に関する授業を分析した。第一は、中学生5人のグループを対象とした、温度変化による「空気」の膨張・収縮時の「粒子の均一性」に関する実験活動の分析、第二は、「イオン」の授業を受けた中学生が書いた授業の振り返りシートの分析、第三は、高校生を対象とした「物質量 (mol)」概念学習後のテスト結果や質問紙の分析を行った。「空気」の膨張・収縮に関する授業実践のプロトコル分析では「学習の共同性」の観点、「イオン」の授業実践時に用いた振り返りシートの分析では「メタ認知」の観点、高校生を対象とした「物質量 (mol)」の認識調査の分析では学習内容の関係論的観点を、授業を構成する際の中心的観点として設定した。また、同じ現象の説明を求めても、生徒達が示す根拠や理由は異なっていることが判明した。この点に関しては、生徒達が自らの経験に基づく根拠や理由をもとに、目の前の事象や現象に対し多様な意味づけを行っていることの現れ、と言えよう。

第3章では、構成主義に基づく粒子理論の授業デザインを構想する観点を述べた。第1節では、構成主義に基づく教授方法は、探究的な学習による教授方法との類似点があるものの本質的に異なっていることを指摘した。第2節では、具体的な授業デザインやカリキュラムデザインが構成主義的であると特徴づける主たる要件について検討した。主たる要件として、「ミスコンセプションを引き出す」、「認知的な葛藤や不調和を引き起こす」、「学習して得た知識をフィードバックし、新たな対象に応用する」、「学習全体を振り返る」の4要件を提示した。第3節では、検証授業のための授業デザインを構想した。本授業デザインは台湾の理科教育研究者であるC.C. ツエイが提唱するコンフリクトマップを参照した。C.C. ツエイの教授アプローチは、日常現象との接点や比較から理論が導かれる物理の特性を活かしたアプローチであり、ミスコンセプションに対峙する2つの葛藤場面（「葛藤1」「葛藤2」）を設定し、学習者に自らの見方や考え方の限界を痛感させている。C.C. ツエイがここで扱うミスコンセプションは、速度や落下などの自然に対する知覚的な経験から誘発された概念がほとんどである。一方、化学の教授に関しては、多様なアプローチの提案・実践はあるものの構成主義に基づいた

教授アプローチは確立されておらず、しかも、粒子理論の教授アプローチで、構成主義の概念変容の理論に基づいて確立されたアプローチは存在しない、と言ってよい。さらに、粒子理論は、知覚的な経験から直接派生するものではない。そのため、生徒が粒子理論に関する事前の知識を何ら持ち得ないことが危惧され、C. C. ツェイのコンフリクトマップを参照しつつも、粒子理論特有の新しい教授アプローチの必要性を論じた。

第4章では、前述した第2章第3節の3つの観点、第3章第2節の4つの要件をもとに、粒子理論の授業デザインを構想し、それに基づく検証授業の結果を示した。この検証授業によって、多くの中学校1年生に概念変容を生じさせることができたことを指摘した。この検証授業で取り上げる「目標とする科学概念」は、気体の粒子概念と粒子に基づく化学反応概念である。また、検証授業時の具体的な教授目標は、「気体は目に見えないが粒子として存在する。化学反応の前後で粒子の組み合わせが変化する。」ことへの理解である。教授アプローチの要点は、以下の1)～7)である。

- 1) 生徒の見方や考え方と矛盾する実験1（「フラスコ内の木炭の燃焼実験」）を観察させる。ここでは、「燃えるとフラスコ内には何も残らない」現象を観察させ、生徒に木炭はどうなったのだろうかと考えさせ、彼らの「矛盾する知覚や感覚①」を覚醒させる。この実験では、石灰水を入れると白濁することを観察させ、二酸化炭素の発生を確認させる。
- 2) 実験1を行うことによって表出した生徒のミスコンセプション（たとえば、「物が燃えると必ず二酸化炭素が発生する。」）と矛盾する実験2（「フラスコ内の硫黄の燃焼実験」）を観察させる。これにより、「矛盾する知覚や感覚②」を覚醒させる。すなわち、硫黄の燃焼実験では、二酸化炭素ではなく、二酸化硫黄が生じることを生徒に確認させる。1) 2)の活動には、目に見えない現象を生徒がどう捉えているのかを描画させる作業を含む。
- 3) 「目標とする科学概念」に密接に係わる概念を理解させるための現象を提示する。ここでは、発生させた O_2 、 CO_2 、 H_2 をシャボン玉に入れて、それぞれが上へ下へと浮遊する様子を観察させる。この観察から、気体それぞれには質量があり、密度が異なることを探究させる。
- 4) 粒子概念を支持する基礎理論を生徒に確認させる。（「化学反応論」、「分子運動論」）

- 5) 生徒の見方や考え方の原因となる経験に働きかける事象（「臨界事象」；塩化アンモニウムの合成実験）を観察させ、その様子を描画させる。
- 6) 「目標とする科学概念」を提示し、生徒に確認させる。
- 7) 1) 2) 3) 5) で作成した描画を比較させ、生徒に自らの概念の変容を振りかえさせる。

この1)～7)の展開は、C. C. ツェイのコンフリクトマップの展開と次の2点で大きく異なっている。第一の相違点は、本検証授業では、教師が提示した実験を観察したことによって、生徒が表出したミスコンセプション（この実験から表出されると、教師が想定しなかったミスコンセプション）を、一人一人の生徒に自覚させるために、第二の葛藤（「矛盾する知覚や感覚②」の覚醒）を生起させる事象の提示が必要となった点である。化学変化を伴う事象では目に見えない変化に対する推論が必要となり、教師がよほど単純化した事象を示さない限り、「矛盾する知覚を生じさせる」事象の提示が新たなミスコンセプションを生徒に誘発してしまう危険性がある。第二の相違点は、C. C. ツェイのコンフリクトマップでは、早い時点で「目標とする科学概念」を提示し、生徒に確認させることが強調されていたが、本検証授業ではこの提示を展開の最終段階の6)の位置に移動した点である。これは、5)の「臨界事象」を提示する前に、初めてこの単元を学習する生徒に気体の様々な性質に関する経験（「豊かな経験」）をつませる必要が生じたからである。具体的には、3)4)で粒子概念に密接に係わる幾つかの理論や、気体の質量・体積・密度に関する基礎的な事項を学習させた。このような経験をつませた後に、5)で生徒達に臨界事象を提示した。その結果、多くの生徒が臨界事象を粒子モデルを用いて描けるようになった。

終章の「結語と課題」では、第1章～4章までの研究成果をまとめた。

- (ア) 「物質の粒子性」の理解には、児童・生徒が一定の発達の水準に到達していることが必要である。質問紙調査とインタビュー調査の結果から、粒子理論に係わる概念形成は小学校高学年から中学校初学年の児童・生徒で可能となる。
- (イ) コンフリクトマップを用いた粒子理論の教授アプローチにより、多くの中学校1年生に概念変容を生じさせることができた。教授アプローチの中で葛藤1・葛藤2の反証以外に、葛藤1を補足するために第3の反証が必要となった。粒子理論のような目に見えない現象をも扱う教授ではより多くの反証

が必要となる，と言える。

- (ウ) 本授業デザインが構成主義的であると特徴づける主たる4観点の有効性が明らかとなった。また，ミスコンセプションに関しては，コンフリクトマップの「葛藤」状態を引き起こすためには欠かせない対象（前提）であり，粒子理論の教授では特に否定すべき対象ではない。

本研究の残された課題は，構成主義に基づく授業デザインをより有効なものにするために，第一は，ミスコンセプションに直接働きかける「決定的な証拠（反証）」をどの段階で示したら良いかを確定することである。「物質の粒子性」や「粒子の運動性」などの概念は，物質の巨視的な性質の適用範囲や限界を調べる中で漸進的に扱われなければならない，反証を示すタイミングをどこに設けるかを解明しなければならない。第二は，観察の理論負荷性の視点から，生徒が同じ反証を異なった証拠として「見る」場合があり，生徒のミスコンセプションと反証との関連を明確にすることである。

〈文献〉

- (1) Vosniadou, S. (ed.) (2008) *International Handbook of Research on Conceptual Change*, Routledge.
- (2) Tsai, C.C. (2000) Enhancing science instruction: the use of 'conflict maps', *International Journal of Science Education*, 22 (3): 285-302.
- (3) Schnotz, W., Vosniadou, S., Carretero M. (1999) *New Perspective on Conceptual Change*, Pergamon.
- (4) Matthews, M.R. (1993) *Constructivism and Science Education: A Philosophical Examination*, Kluwer Academic Publishers.
- (5) Particles Working group of the Children's Learning in Science Project (1987) *Approaches to Teaching the Particulate Theory of Matter*, University of Leeds.
- (6) Pines, L. H. T., West, A. L. (eds.) (1985) *Cognitive Structure and Conceptual Change*, Academic Press.
- (7) Cary, S. (1985) *Conceptual Change in Childhood*, MIT Press.
- (8) 片平克弘，理科教育学における科学概念の変容研究に関する研究動向と課題，筑波教育学研究，第9号，83-101，2011。
- (9) 片平克弘，概念変換研究における「科学概念形成」の多様性，新時代を拓く理科教育の展望（長洲南海男編著），東洋館出版社，133-142，2006。
- (10) 片平克弘，理科教授における概念変換の困難性と獲得された科学概念の耐久性，埼玉大学紀要教育学部（教育科学），第53巻，第1号，1-8，2004。

- (11) 片平克弘, 理科授業実践と概念変換 (conceptual change) —子ども達の科学知識の変換と理科教師の教授知識—, 鳴門教育大学学校教育研究センター紀要, 第7号, 97-103, 1993.
- (12) 片平克弘, 児童・生徒の粒子概念の形成に関する研究(その2) —構成主義的研究の基本的立場と粒子理論の教授プログラム—, 鳴門教育大学研究紀要(教育科学編), 第8巻, 11-20, 1993.
- (13) 片平克弘他, 児童・生徒の粒子概念の形成に関する研究(その1) —原子論的物質観の形成—, 鳴門教育大学研究紀要(教育科学編), 第5巻, 217-233, 1990.