形式的モデルの構築とその活用を促す理科授業
―粒子概念の定着を目指して―

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

Science class to promote construction and the inflection of the formal model
－For the fixation of the particle concept－

Yasuhiro NOGAYAMA，Kazunari TANIGUCHI

2014 年 11 月 30 日受理

抄録：理科学習において求められている科学的な知識や考え方を活用する力を育む手段として，英国の認知促進（Cognitive Acceleration: CA）の考え方の日本の理科授業の応用を検討した。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をしたところ，「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が明らかになった。

キーワード：認知促進，概念図，形式的モデル（粒子概念），自作教材，科学的思考力，思考操作

Ⅰ．はじめに

現行の理科学習指導要領[1)]が目指す，科学的なものの見方や考え方（科学的思考力）の育成のために，現在，さまざまな取り組みが全国的に行われている。そのひとつとして，全国学力・学習状況調査の B 問題に見られるように，変数制御（条件制御）や分類，比例などの科学的思考の「推論形式」を問題解決に活用できる能力の育成がある。しかし，現在行われている取り組みは，これらの推論形式を「思考スキル」として捉え，その習得を目指すものが多く，これらには科学的思考を行う際のスキル的な側面があることは否定できないが，それが強調され過ぎると，授業で設定された文脈に合った（その課題を解くための）スキルとして生徒が認識してしまう可能性がある。つまり，その文脈以外では活用することができない「知識としてのスキルの習得（暗記）」といった，科学的思考力の育成とは，ほど遠い結果になってしまう恐れがある。この点については，前述の調査【 小学校 】の報告書[2)]において，「実験結果を基に自分の考えを改善して，その理由を記述することに課題がある」と指摘されているように，知識の活用という部分での課題が示されていることからもいえる。

本研究では，それを避けるため，生徒自身が科学的な「概念形成」を行う中で，その必要性として，これらの推論形式を認識できるような展開を目指している。特に，理科教育で扱う科学概念には，生徒の中に「素朴概念」をはじめとする，さまざまな誤概念が存在することから，それらを問題解決の題材とすることで，生徒自身の内面において認知的な葛藤を生じさせ，それを解決する手段として推論形式の内発的な獲得や発達を促すことが期待できる。さらに，単発の授業で終わることなく，単元および学年を通して，その推論形式を必要とする場面を断続的に設定することにより，さまざまな文脈における知識の活用力や応用力としての科学的思考力が身につくことも期待できる。この視点は，まさに英国で実施されている“Cognitive Acceleration through Science Education: 科学教育による認知促進（以下 CASE）”プロジェクト[3)]の目指す視点に他ならない。CASE では，表 1 に示される，ピアジェのいう形式的操作の推論形式（変数の制御・除外，分類，比と比例性など）に注目し，科学教育を通して，それらの操作能力を育むことにより，児童・生徒の認知的な発達を促すことが目指される。その基本概念は，“認知促進（Cognitive Acceleration: 以下 CA）”と呼ばれ，実際，英国ではそれに基づく授業プログラムとして『Thinking Science』[3)]が開発され，効果を上げている[4) 5)]。

そこで我々は，科学的な思考力を育てる新しい試みとして，2010 年度より，この『Thinking Science』を本

校の新教科「サイエンス」において第 5～7 学年の 3 年間にわたって継続的に実践するカリキュラムを開設し，生徒の表現力と思考力における教育的効果を確認してきた[6]。さらに，科学的な「概念形成」の文脈の中で CA の概念を組み込んだ理科授業を開発し，実践的に検証してきている。これまでに，変数の制御・除外[7]，分類[8]，比と比例性[9]などの推論形式の発達を促す理科授業を開発し，『Thinking Science』と同等の教育的効果も確認している[10]。

今回，本研究では，「形式的モデルの構築と使用」の推論形式に着目し，これを用いた操作能力の育成を目指す理科授業の開発，実践を行った。この推論形式は，現在の学習指導要領において目指される，科学の基本的な見方や概念の４つの柱のひとつ「粒子」において獲得が目指される「粒子概念」に対応する。そこでは，極めて形式的な操作が求められる「粒子モデル」を用いた現象を解釈・説明することが求められるが，ピアジェによれば，その可否は生徒の認知的な発達段階に強く依存する。実際，理科学習における“中 1 ギャップ”と呼ばれる困難に中学生が直面する単元のひとつになっており，解決すべき学習課題のひとつにもなっている。そこで，本稿では，「形式的モデルの構築と使用」の推論形式の発達を促す『Thinking Science』の授業展開を参考として，通常の理科授業に CA の視点を組み込んだ，小学校第 5 学年「もののとけ方」における実践をもとに，粒子概念の獲得を目指す授業の視点について考察した結果を報告する。

推論形式(シェマ)	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

表 1　論理的思考の推論形式（シェマ）の種類と特徴

1. 本研究のねらいと方法

（1）研究のねらい

現行の学習指導要領の科学の基本的な見方や概念の柱の 1 つである「粒子」に着目し，「物の溶け方の規則性についての見方や考え方」単元における粒子概念の形成を通した，科学的思考力の育成に取り組むことにした。この概念を扱う理由として，その理解には，①最終的に微視的な視点における論理的な思考が求められるため，したがって認知的な発達段階に左右されやすく，認知的葛藤を起こす課題として適していること，したがって，②多くの生徒にとって理解が困難であるのみならず，思考する方法としても重要であること，③学習指導要領の柱のひとつであることから，義務教育を通して，継続的に働きかけることができること，等のメリットが挙げられる。

（2）研究の方法

CA 授業開発にあたって，はじめに，生徒の粒子に対する知識および生徒の認知的な発達段階の調査を行う。ここで，前者については，全国学力調査の該当箇所の設問，後者については，「Science Reasoning Tasks：科学的推論課題 SRTs」の Task II を用いた（調査方法については後述する）。その結果をふまえ，**図 1** に示す，CA の 5 本の柱[11]から構成される，１時間の授業を開発した。ここで，通常の理科授業の中に CASE プログラムを取り入れる形であることから，学習指導要領に記載されている教科の目標「自然の事物・現象についての実感を伴った理解を図り，科学的な見方や考え方を養う（本報告：物の溶け方の規則性についての考えをもつことができる）」と CASE プログラムの目標「具体的操作期の生徒に対して認知的葛藤を与え，形式的操作を促す（本報告：形式的モデルの構築と使用を促す）」の２本立てとしている。

授業の評価は，次の２つの視点で行う。

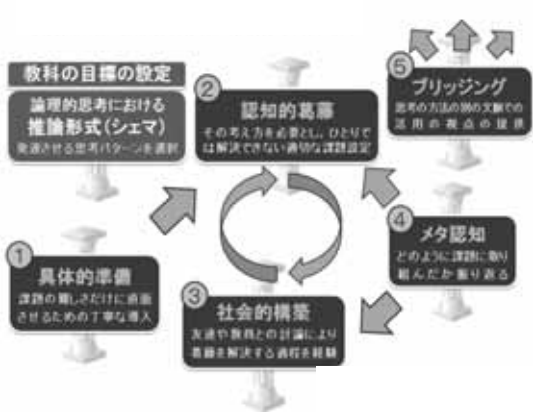

図 1　CASE プログラムを取り入れた授業展開

①認知的な発達段階の評価法（**表 2**）

授業において認知促進（CA）を実現するには，具体的操作期にいる子どもに対して，形式的操作における推論形式を必要とする課題を適切に設定することが重要である。ピアジェによれば，その時期は 11-14 歳とされるが，発達の個人差を考慮すると，対象の子どもの認知的な発達段階を事前に確認しておくことは重要である。またより積極的な意味においては，授業において教師が討論を効果的に運営する上でも貴重な情報となる。そこで本研究では，その評価にあたり「科学推論課題（Science Reasoning Tasks : SRTs）[12]」を用いた。

表 2　SRTs 各課題の内容と評価範囲

Task	課　題	推論パターン	評価可能な認知段階
Ⅰ	空間関係	空間概念	1〜2B*
Ⅱ	体積と重さ	保存概念 複合変数	1〜3A/3B
Ⅲ	振り子	変数制御	2B〜3B
Ⅳ	天びんのつり合い	反比例性	2B〜3B
Ⅴ	傾けた板	補償	2B〜3B
Ⅵ	薬品の組み合わせ	蓋然性	2B〜3B
Ⅶ	棒のしなり	補償 変数制御	2B〜3B

SRTs とは，ピアジェの調査手法に基づきつつ，多人数教育の場で一度に全員の認知段階を評価することができるように開発された記述式の課題であり，**表 2** に示すような形式的操作における幾つかのシェマを必要とする 7 種の課題で構成される。ここで，各発達段階は，前操作期（1），具体的操作期（2A，2A/2B，2B），移行期（2B*），形式操作期（3A，3A/3B，3B）に分類される。ここで，数字が大きいほど，アルファベットは A→B ほど段階が高いことを示している。本実践では，Task Ⅱ「体積と重さ」を用いて，生徒たちの発達段階を見積もり，授業展開や生徒の活動や変容の分析に活用した。

②学習効果の評価法

学習効果の評価法として，授業の前後に「全国学力調査理科の設問【4】」（**図 2**）を用いた調査を行い，正答率の変化を分析した。この設問は，水溶液の均一性を問うものであり，溶媒である水と溶質である物質を粒子（モデル）で捉えていることができる生徒は，十分な説明ができると考えられる。これは，具体的操作期の生徒にとっては，たとえ学習済みであっても，教科書とは異なる日常的な文脈であることから経験的，視覚的イメージに左右されやすいこと，逆に形式的操作期の生徒は，文脈や経験には依存されることはないためである。したがって，事前事後において設問【4】の正答率を評価した。



よし子さんは，完成した梅ジュースの上の方をすくい，味見をします。
梅ジュースにとけている**砂糖のこさ**を，説明しているものはどれですか。
下の **1** から **4** までの中から 1 つ選んで，その番号を書きましょう。

1　上の方の砂糖のこさは，下の方よりもうすい。
2　上の方の砂糖のこさは，下の方よりもこい。
3　上の方の砂糖のこさは，下の方と同じ。
4　上の方は，砂糖がとけていない。

図 2　全国学力調査設問【4】水溶液の均一性

Ⅱ．授業実践

本研究では，これまで取り組んできた認知発達を促す理科授業の実践の成果[8]を踏まえ，小学校第 5 学年理科「もののとけ方」における単元指導において，教え込みになりがちな粒子概念について，「CASE プログラム」の考え方を取り入れて，「形式的モデルの構築と活用」の推論形式の発達を刺激し，教え込みではない粒子概念形成を促す授業実践を行った。

1．対象とその実態

実践は，通常の理科授業の中で，「変数制御」や「分類」などに推論形式に関する CA 授業の考えを取り入れた授業を行っている小学校 5 年生 1 クラス 31 名（5，6 名／班の 6 班編制）に対して行った。

事前に SRTs Task Ⅱ「重さと体積」を用いて生徒の論理的思考における認知的発達の段階の実態調査と，全国学力調査の設問【4】「水溶液の均一性」を用いた「粒子」に対する基本的な見方や概念の実態調査を行った。SRTs Task Ⅱの結果（**図 3**），形式的操作期への移行期の生徒（16%）を含め，８割以上の生徒が「具体的操作期」にあり，その分布もより早期の段階の方に広がっていることから，論理的思考を必要とする活動に対しては，具体物を用いる必要があることが示唆される。なお，参考のために，本校 6 年生に対して行った同調査結果も図 3 内に示している。この図より，認知段階のピークが 5 年生より高い方へシフトした，同様に幅広い分布であることがわかる。

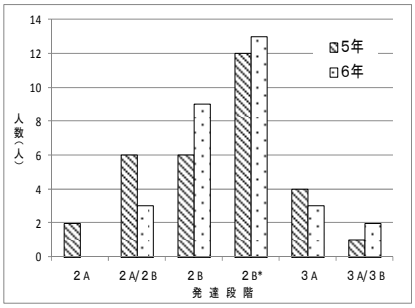

図 3　児童の論理的思考の発達段階

また，全国学力調査設問【4】の結果，クラス全体の正答率は 33%であった。全国平均（6 年生）の 66%に比べると低い値となったが（**図 4**），学習前であることから当然のこととも言える。この問いの正答率と認知段階との関係を分析した結果，**図 5** に示すように，認知的な発達の段階と水溶液の均一性に対する考え（粒子概念）との間に，何らかの関係がある可能性が示された。

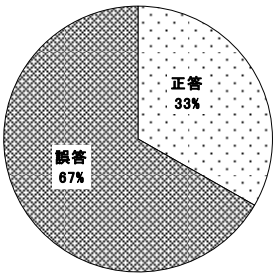

図 4 水溶液の均一性の正答率

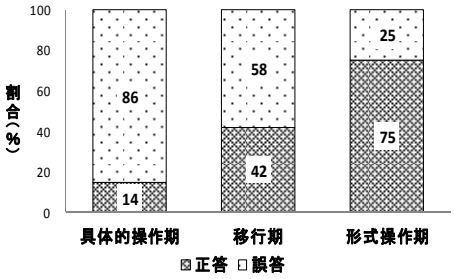

図 5　発達の段階と正答率の関係

表 3　全国学力調査設問【4】の解答の理由

	理　由　の　例
正答	・とけたら全体にいきわたった。（知識） ・氷砂糖のままだったら下に沈んで下の方が濃くなるけど，全てとけたから上の方も下の方もこさは同じだと思った。（経験） ・上から下まで氷砂糖がすべて均一にとけたということだから。（知識） ・砂糖のこさは同じだと思った。（経験） ・氷砂糖を上の方も下の方も入れているから，とけたあとも味は同じだから。（経験）
誤答	・氷砂糖の成分は下にたまっているから。（経験） ・こい味がどんどん上に上がってくるから。（経験） ・砂糖は下に行くから。（経験） ・砂糖はとけても重いから，砂糖の水は下の方に行くから。（経験） ・無記入

一方，この問いは選択式の問いであることから，問いに追加して，選択した理由を記述させたところ，**表 3** に示すように，選択肢の正誤に関係なく，ほとんどの生徒が生活経験や本などの知識に頼った考えを示しており，「溶質に対する意識はあるが，溶媒である水に対する認識が低い」ことが明らかになった。つまり，問いに正答していても必ずしも，正しい概念を持っているとは限らないことを示唆している。全国学力調査の分析結果では，「水溶液の均一性」の考え方を梅ジュースに適用して考察することに課題がある」[2] と示され，科学的な見方や考え方を，日常の生活に見られる水溶液に適用できていないことから，このことからも正しい概念を持っているとは限らないことを示唆していることがわかる。

さらに，生徒たちの記述を分析すると，現象を文章や図で説明していた。そこで，この思考の表現方法の違いを思考「形式的モデルの構築と活用」の深化の評価法に活用かせるのではないかと考えた（**図 6**）。この思考の表現方法の違いは，粒子概念の発達状況を反映すると考え，その時々の生徒個人の記述方式を，「文章表記」と「図表記」で分けた上で，さらにその内容を「表記できない【無】」，「現象をそのまま表記【現象】」，「比喩を用いて表記【比喩】」，「意味を持たせて表記【意味】」で分けて，思考の深化を概念図 [13] としてプロットした。ここで，【無】および【現象】の領域は現象を見たまま表現したに過ぎず，粒子概念としては「未発達」，【意味】の領域は，自分なりのモデルでの説明に成功していることから概念的には「既発達」，【比喩】の領域は，見たままではないものの説明に失敗していることから「移行期」と捉えることとした。

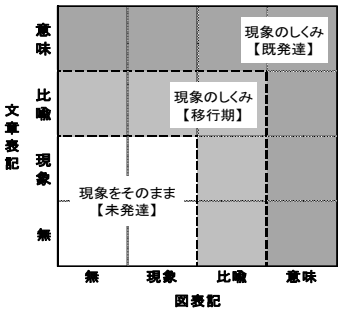

図 6　思考の深化を示す概念図

この思考の深化の評価法を使って，形式的モデルの使用状況を調べるために，特別教科「サイエンス」において『Thinking Science』を受けた 6 年生に対して，食塩が水に溶ける現象と飽和食塩水に食塩が溶けない現象を観察させ，その現象のしくみついて記述させた。このときの生徒の記述から考え方を分析（文章表記・図表記）

すると，「現象を見たまま説明する（現・無）」が 29 名中 14 名と半分を占め，「現象のしくみを説明する（意・意）」は，一人もいなかった（**図 7**）。ここで，認知的な発達段階と考え方の違いを分析すると，全国学力調査設問【4】の正答率（**図 5**）と同じような傾向が見られることから，認知的な発達段階と現象のしくみを考えようとすることの間に関係性が存在することが考えられる（**図 8**）。

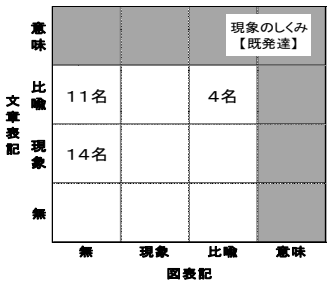

図 7　6 年生の考え方

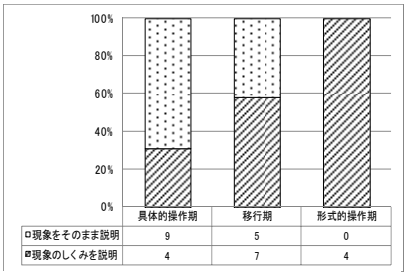

図 8　発達段階と考え方

このような結果になる理由として，実際，教科書の展開を検討すると，小学校 5 年生で物質（溶質）が粒子で示され，学年が上がるにつれて，気がつけば水（溶媒）も粒子で示されている。しかし，生徒の実態としては，水にとけるとき，「ものがだんだん小さくなっていく」ということは答えられるが，水の存在に意識が向いていない。このことは，生徒が水にものを加えてとかすことを日常生活で多く経験しているが，ものに水を加えるという経験は意外と少なく，水を粒子で表現して思考する，つまり，「モデルを構築して，それを問題解決に活用する」機会がないためだと考えられる。このため，水が粒子であることを教え込む形となり，生徒にとって本当の意味で粒子概念が形成されていない可能性がある。

しかし，6 年生になると「水溶液の性質」の単元で，いきなり，水や物質が「粒子」として示され，気体が水にとける現象が「粒子モデル」を用いて説明される。**図 3** に示すように，5，6 年生の時期はほとんどの生徒が具体的操作の段階にあるのにかかわらず，形式的操作を必要とする「粒子モデル」が頭ごなしに導入され，さらに，「活用」が求められることすらある。これでは，児童に求められる思考（操作）に飛躍がありすぎて，結果として，「思考の道具（方法）」であるはずの粒子モデルが「単なる知識」になってしまっている可能性がある。一方，CASE の教材『Thinking Science』では，ここで求められる「粒子モデル」を「形式的モデルの構築と活用」の推論形式として捉え，現象を説明するために，まずは「生徒自身がモデルを構築する」ことからはじめ，その構築の難しさや作ったモデルを用いた説明（活用）におけるモデルの不完全さによる「認知的な葛藤」を経験し，それについての生徒同士の話し合いを通して再構築を繰り返す中で，自然に「形式的モデルの構築と活用」の推論形式が身につくことを目指す展開となっている。

以上の結果は，具体的操作期にある生徒が粒子概念のような形式的操作を理解するには，それが可能となるような，認知的なはたらきかけ（＝認知促進：CA）が必要であることを示唆している。特に，水溶液のような目に見えない現象を説明するための粒子概念は，形式的操作であることから，具体物を用いたていねいな展開が必要であるといえ，特に，溶媒の水に意識が向くような教材の工夫が必要であるといえる。

2. 授業展開

(1)　溶媒の水に意識が向くようにした自作教材

事前調査の結果より，ものが水にとける現象において，いかに水に着目した考えを引き出すかが，粒子概念の自発的な形成において重要であることを示唆する結果を得た。そこで，「食塩に水を加える」という逆転の発想で，空き缶，ペットボトル，ガーゼを使ってろ過器のような教材を作製した（**図 9**）。この教材は，ガーゼの上に角砂糖のように固めた食塩を置き，そこに水を注ぎ，そのときの現象を観察させるものである。この教材では，水がたまって食塩がとけるということが見られず，水を加えた場所から，食塩がとけていく。このため，この現象のしくみを説明するには，水と食塩の関係に着目せざる得なくなり，その結果，水を意識したモデルの構築を促すことが可能になると考えられる。

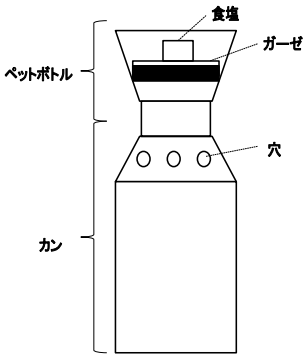

図 9　食塩に水を加える自作教材

(2)　水に意識が向く単元構成

5 年生の「もののとけ方」単元の通常授業では，結晶を水に入れてシュリーレン現象を観察させ，その後，物質が水に溶ける量を調べるという展開が一般的で，通常，現象を観察するだけにとどまり，現象の仕組み（理由）を考える場面は，設定されていない。

表 4　本研究の授業展開と通常授業の展開例との比較

本研究の授業展開	通常授業の展開例 （教科書：大日本図書）
1　実験器具の使い方 ○電子てんびん，上皿てんびんの使い方 ○メスシリンダーの使い方	1　水溶液の重さ ○水溶液 ○電子てんびん，上皿てんびんの使い方 ○水溶液の重さ
2　もののとけ方（水にとけるものの量）（本時） **①食塩に水を加えたとき（自作教材）** **※溶媒「水」に着目させる** **②水に食塩を加えたとき（大型メスシリンダー）** **※溶質「食塩」に着目させる** **③飽和食塩水に食塩を加えたとき（大型メスシリンダー）** **※溶媒と溶質の関係性に着目させる** （水溶液の重さ，食塩が水にとける量） ○ホウ酸が水に溶ける量 ○溶け残りを溶かす方法	2　水にとけるものの量 ○メスシリンダーの使い方 ○食塩が水に溶ける量 ○ホウ酸が水に溶ける量 ○溶け残りを溶かす方法
3　とかしたもののとり出し方 ○ホウ酸の取り出し方 ○ふりかえろう	3　とかしたもののとり出し方 ○ホウ酸の取り出し方 ○ふりかえろう

そこで，生徒の発達段階を踏まえ，形式的モデルの構築と活用（粒子概念）を自然な形で学習できるように，生徒の目の前でものがとける現象を何度も観察させ，また少しずつ条件を変え，ものがとける現象をモデルで考え，考えを深めていけるように CA を取り入れた授業を 2 時間目に行う単元の構成を考えた（**表 4**）。また，基本的な実験技能が思考に影響しないように，1 時間目に技能習得の授業を取り入れた。これは，CA 授業の柱における具体的準備にあたる（図 1）。

このような単元構成によって，溶質の食塩だけでなく，溶媒の水に着目し，水を意識した説明でき，「ものがとける現象」を科学的に考える（粒子概念）ことができるのではないかと考えた。

(3)　CA を取り入れた授業展開（**表 5**）

本単元では，生徒たちが，今まで何気なく経験してきた「ものが水にとける」という事実を科学的にとらえ直して理解を深めていくことを目指した。CA の視点においては，「目に見えない現象（の仕組み）をどのように説明するか」という粒子概念の視点において，生徒にいかに認知的葛藤をおこし，それを話し合いにより，生徒の認知段階に合わせた解決に導くかがポイントとなる。これは，本単元の導入であり，生徒がもののとけ方について興味・関心を持たせることを大切にした。

表 5　授業展開の例

生徒の学習活動	指導者の支援及び留意点	
食塩に水を加えたときの仕組みを考えよう。【自作教材】		①
・食塩に水を加えたときの様子を観察する。 「食塩がどんどんなくなっていく」 「水がかかったところだけへこんでる」 「水と一緒に下に落ちている」	・目の前で起きている現象のしくみをわかりやすく説明するように指示する。 【具体的準備・認知的葛藤】	
自分の考えを班の仲間にわかりやすく説明してみよう。		
・友だちの考えと自分の考えを照らし合わせて，疑問に感じたことを質問したり，自分の考えを修正したりする。	・わかりやすく説明するように問いかける。 【認知的葛藤・社会的構築・メタ認知】	
水にとけていく食塩を観察して，そのようすを図で表してみよう。		②
・水に食塩がとけていくようすを観察する。 「だんだん小さくなっていく」 「消えちゃった」「かさがそのまま」 「食塩が通ったあとにモヤモヤがある」 ・食塩がとけていくようすを図で表す。	・「物がとける」＝「ものが見えなくなる・透明になる」ということを共通認識させる。 ・変数を意識させるために，「変わるものは何か」ということを問いかける。 【具体的準備・認知的葛藤】	
自分の考えを班の仲間にわかりやすく説明してみよう。		
・自分が考えて書いた図を使って，「物がとける」現象を説明する。 ・友だちの考えと自分の考えを照らし合わせて，疑問に感じたことを質問したり，自分の考えを修正したりする。	・机間指導をする。 ・わかりやすく説明するように問いかける。 ・粒子概念ができているのか，単なる知識なのか判断し，考えを深めさせるために，粒で示している生徒に，粒の意味を問いかける。 【認知的葛藤・社会的構築・メタ認知】	
飽和食塩水に加えた食塩を観察して，そのようすを班で話し合って図で表してみよう。		③
・飽和食塩水を落ちていく食塩を観察する。 「食塩がそのまま落ちていく」 「とけていかない」「かさがふえた」 「モヤモヤがない」 ・食塩が落ちていくようすを図で表す。	・机間指導をする。 ・わかりやすく説明するように問いかける。 ・粒子概念ができているのか，単なる知識なのか判断し，考えを深めさせるために，粒で示している生徒に，粒の意味を問いかける。 ・水のときと飽和食塩水のときの違いに着目させるために「何が変わったのか」問いかける。 【認知的葛藤・社会的構築・メタ認知】	
班の考えを学級の仲間にわかりやすく説明してみよう。		
・班で考えて書いた図を使って，「物がとける」現象を説明する。 ・他の班の考えと自分の班の考えを照らし合わせて，疑問に感じたことを質問したり，自分の考えを修正したりする。	・考えを深めさせるために，各班の考えと自分の班の考えの違いに気づかせるように声掛けをする。 【認知的葛藤・社会的構築・メタ認知】	

そこで，導入では，生徒が日常生活の中でのものをとかした経験を想起しながら，①物がとけているようすやとけたあとのようすを観察する（自作教材）。ここで，現象を説明させることにより，水に着目しやすい状況をつくる。次に，水溶液について考えさせることができる教材として，②水と③飽和食塩水を使う。それぞれが入った大容量のメスシリンダーを用意し，その中に食塩の結晶を加えていくと，水のメスシリンダーは，食塩の結晶が小さくなりながら消えていくが，飽和食塩水では何も変化なく落下していく。ここでは，「現象のしくみを説明しよう」と声掛けをし，現象を見たままの説明にならないように心がけた。これによって，この現象をわかりやすく説明させることで，物がとけることを図で表す必要性が生じ，「形式的モデルの構築と活用」（**表 1**）の推論形式に対する認知的葛藤が生じると予想される。その後，③自分の考えを班，学級全体で討論する中で，物がとけることを図式化する必要性に気づかせていく。そして，このことが粒子概念の形成を目指した。

3. 実践結果

(1)　①食塩に水を加えたとき（自作教材）：

溶媒「水」に着目

はじめに，「食塩に水を加える」現象のしくみを考えさせた。生徒たちは，「食塩がなくなっていく」や「食塩が水と一緒に下に落ちていっている」とつぶやいていた（**図 10**）。そこで，この現象について，「この現象のしくみを班で考えよう」と課題を提示したところ，「う〜ん」と悩んでいる姿が多く見られた。このことから，「食塩に水を加える」という通常と反転させた教材の工夫によって，生徒たちは目の前で起きている現象を説明することに葛藤を感じていたと思われる（**図 11**）。



図 10　自作教材による課題提示



図 11　班の話し合いの様子

各班の話し合いでは，「現象をモデルで説明しようとしている班」と「現象を見たまま示している班」と２つに分かれた（**図 13**）。モデルを使った考えとしては，「水と食塩を小さな粒で示す（5 班）」，「水を擬人化して示す（1 班）」，「水を人の顔（3 班）」であった。「水と食塩が一緒に落ちる」という現象を説明するために，1 班と 3 班は水を擬人化し，水に性質を持たせていた。つまり，形式的モデルを構築していた（**表 1**）。次に，各班の考えについて学級全体で話し合うと，生徒たちは 3 班の「人の顔モデル（以下，パックマンモデル）」の考えに強く納得していた。これによって，生徒たちの視点は溶質の食塩から溶媒の水へ移り，現象を説明するために水をモデルで示そうとするようになった。

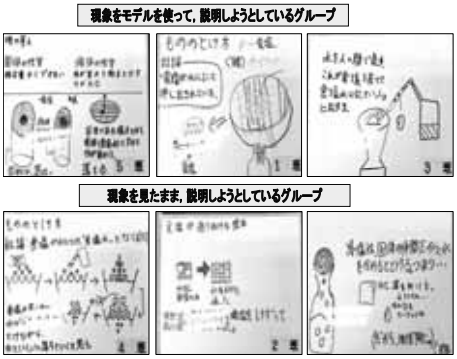

図 12　食塩に水を加えた現象に対する各班の考

(2)　②水に食塩を加えたとき（大型メスシリンダー）：

溶質「食塩」に着目

「水に食塩を加える」現象のしくみを考えさせた。生徒たちは，「食塩がだんだん小さくなっていく」や「食塩が通った筋がある」とつぶやき，食塩に意識が向いていた（**図 13**）。そこで，この現象について，「この現象のしくみを班で考えよう」と課題を提示したところ，はじめは，パックマンモデルを用いて考えようとする班が多く見られたものの，結局，元の自分たちの班の考えで説明する班が多かった。つまり，活動①で，3 班のパックマンモデルの説明を聞いて，多くの生徒がその説明に納得し，有用性を感じたものの，文脈が変わった活動②で，パックマンモデルを用いて現象のしくみを説明（活用）できるほどには，自分のものにできてないことがわかる。このことは「形式的モデル」の構築および活用の難しさを表している場面であるが，まさにこのとき，これらの班は「形式的モデル」に対する認知的葛藤が生じていることもわかる（**図 14**）。結局，最終的に形式的モデルで現象を説明できたのは，初めからパックマンモデルで考えていた 3 班のみであった。3 班だけは自ら考えた「形式的モデル」を先ほどとは異なる文脈で活用することに成功したことがわかる。これらのことは，与えられた形式的モデルは，容易には定着できないことを示唆しているとも言える。



図 13 大型メスシリンダーによる課題提示

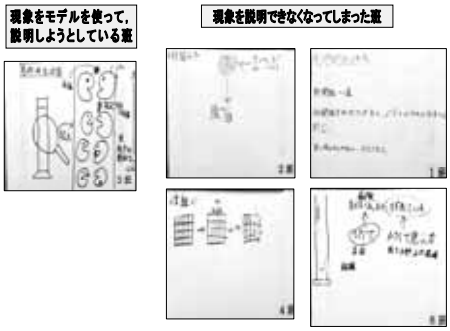

図 14 水に食塩を加えた現象に対する各班の考え方

(3) ③飽和食塩水に食塩を加えたとき（大型メスシリンダー）：

溶質「食塩」と溶媒「水」との関係性に着目

次に，もう 1 つの大型メスシリンダーを使って，「飽和食塩水に食塩を加える」現象のしくみを考えさせた。この「溶け残る」現象を説明するには，必然的に溶媒との関係を意識することが必要であるため，溶質だけに注目している生徒には認知的葛藤を生じることが予想される。したがって，この活動では，その葛藤の解決のために，パックマンモデルのような「溶媒（水）」を意識した「形式的モデルの構築とその活用」が促されることを目指した。実際，生徒たちは，「食塩がそのまま落ちていく」や「食塩がゆっくり落ちていく」とつぶやき，食塩がとけていかないことに疑問（認知的葛藤）を感じていた。ここで，生徒から 2 つのメスシリンダーを持ち比べてみたいと声が上がったので，生徒に実際にもたせることにした。その結果，飽和食塩水の入ったメスシリンダーが持ち上がらないほど重いことに生徒たちは驚きを示していた。

そこで，これまでの学習を生かしてモデルで考えることができるかどうか，生徒個人の思考を確かめるために，「この現象のしくみを個人で考えよう」と課題を提示した。ここでも，水をパックマンモデルで示して考えようとする姿が多く見られたが，さきほどと異なり，パックマンモデルを採用して，現象の説明に成功した生徒が 31 人中 12 名いた。一方，依然として，現象をそのまま説明した生徒は 31 人中 9 名，まったく説明できなかった生徒は 31 名中 10 名であった。また，パックマンモデルで考えた生徒は，食塩を食べてお腹がいっぱいになった食塩を赤色にするなど，自分なりの性質を持たせ現象をわかりやすく説明しようとする姿が見られた（**図 15**）。



図 15 飽和食塩水に食塩を加えたときの考え方

つまり，本授業において，少しずつ文脈が異なる一連の活動を通して，認知的葛藤を繰り返し，形式的モデルの構築と活用の機会を経験した結果，はじめは他人のモデルであった形式モデル（パックマンモデル）を，ついに，自分のものにするに至ったと考えられる。もちろん，これは完全な粒子モデルではないが，粒子モデルを受け入れる準備ができつつあると考えることができる。

Ⅲ．授業実践の考察

開発した授業が CA 授業として，生徒の「形式的モデルの構築とその活用」の推論形式の発達に有効であったかどうかについて，(1) 個々の生徒の形式的モデルの構築とその活用について，生徒の記述の変容を概念図で分析を行った。さらに，(2) 学習効果について事前事後の全国学力調査の正答率の比較を行った。

1. 概念図による分析

開発した授業において，ポイントとなる，活動①，活動③において，生徒の思考におけるモデルの出現状況を探るために，この記述の変容について，単元 2 時間目の授業 1 時間における生徒の思考の変化（□→○）を概念図にプロットして分析を行った。

授業の最初に，食塩が水に溶けるようすを見せた上で「ものがとけるとはどういうことか」と質問し記述させたところ，だれも答えることができなかった。授業前の段階では，ものが水にとけるということをどう説明してよいのかわからない状況であり，概念図において 31 人全員が（無・無）であったといえる。

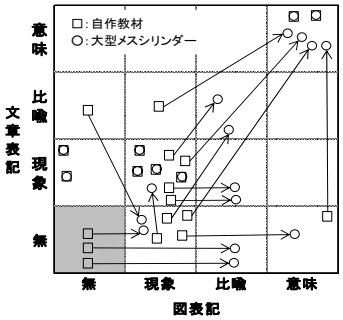

図 16 5 年生の形式的モデルの変容
(31 人中 23 人の追跡記録)

自作教材を用いた，通常とは“逆の操作”の溶解現象のしくみを説明する活動（活動①）では，最初の活動において，「ものがとける」現象を説明できなかった生徒 23 人の内（31 人のうち欠席のため途中の授業を受けていない生徒 8 人を除く）17 人が図を使い，3 人が文章で説明するなど，「現象を見たままの図と文章で表現（現・現）」できるようになったことがわかる（**図 16**（□））。続く，大型メスシリンダーにおける現象のしくみを説明

する活動（活動②，③）では，前出の 23 人中 11 人が，現象を見たままではなく，比喩を用いたり，比喩に意味を持たせたりした説明をしていることがわかる。さらに，文のみの記述ではなく，現象を比喩した図を文章で説明（図に意味を持たせて説明）する生徒，つまり「形式的モデル」で説明する生徒が明らかに現れていることがわかる（図 16（○）（意・意））。以上のことは，生徒の思考の流れとして，「活動①：自作教材における現象を説明する活動」→図や文章で表現することに対する「認知的葛藤」→話し合い→「現象を図と文章で説明できる」→「活動②，③：大型メスシリンダーの現象を説明する活動」→「溶ける現象」と「溶け残る現象」を統一的に説明する表現方法に対する「認知的葛藤」→話し合い→「“形式的モデルの構築と活用”が促される」という，生徒の思考の流れが想定される（**図 17**）。ここで，前述のように，5 年生次に，溶解現象を通常展開の理科授業を受け，さらに特別教科「サイエンス」において『Thinking Science』を受けた 6 年生でも，約 8 割の生徒は水に注目できない（**図 7**）ことから，自作教材が水を意識させ，図と文章を使って現象を説明する思考のきっかけとなっていることがわかる。

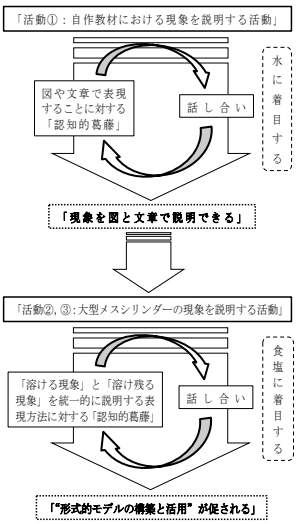

図 17　生徒の思考の流れ

2. 全国学力調査設問【4】「水溶液の均一性」の正答率の比較

「水溶液の均一性」に関して，本実践の事前，事後，全国平均（6 年生）の正答率を比較したところ，事後の正答率が全国平均と同じ値まで上昇した（**図 18**）。そこで，生徒の論理的思考の発達の段階による差があるかどうか調べたところ，具体的操作期と移行期の生徒において，事前では誤答であったが事後は生徒になった生徒が顕著に上昇し，全体として正答率が 33%から 65%まで上昇した。しかし，形式操作期の生徒における正答率には，ほとんど変動はみられなかった。

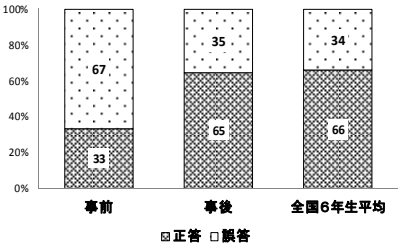

図 18　事前事後の正答率

さらに，論理的思考の各発達の段階における事前事後の個々の生徒の解答を分析してみると，事前で正答していた生徒は事後でもほぼ正答しており，事前に誤答していた生徒が，本実践によって，正答するようになったことを示していると考えられる（**図 19**）。移行期と形式操作期において，事前では正答しているが事後において誤答をしている生徒が若干いるが，考えの理由をみると考えすぎによる誤答（「氷ざとうがとけていたといっていたけれど，目に見えていないだけで，まだ存在しているから，下の方にひそかにたまっているかもしれないから」など）であり，水溶液の均一性については，十分に理解していると思われる。この問いでは，形式的モデルを物質がとけた水溶液に活用して考える必要があり，その視点で本実践を振り返ると，「構築」までの生徒，「活用」までの生徒など，別々に存在するように思われる。例えば，**図 20** に示す記述をした生徒は，「構築」まで至ることはできたが，「活用」まで至っていない。これは，現象をモデルで示す必要性・有用性に気づき，パックマンモデルで示しているが，現象をパックマンに性質を持たせて説明できるほど“自分のもの（思考モデル）”には至っていないからである。

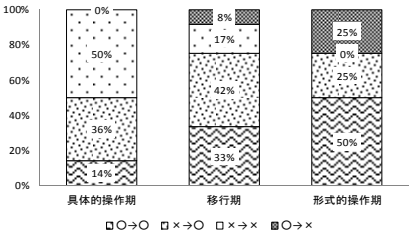

図 19　事前事後の考え方の変

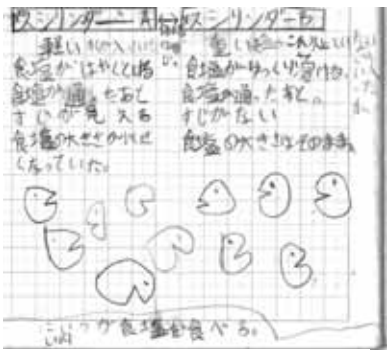

図 20　「構築」までの生徒の記述

このように，具体物を使った授業展開（自作教材）が，現象のしくみを考える手助けとして働き，現象のしくみを考えやすくしたものと考えられる。そして，その結果として，具体的操作期と移行期の生徒の水溶液の均一性の設問の正答率上昇に対して，効果的に影響したものと考えられる。

Ⅳ．おわりに

本研究では，粒子概念形成を目指すために，「形式的モデルの構築と使用（モデル化）」の推論形式に視点を置いた授業展開を行った。生徒にとって「ものが水にとける」ということは，「ものが水の中で小さくなっている」という意識であり，したがってものを粒子で考えることは容易であるが，水に意識がないために水を粒子で捉えることができず，粒子概念という意味で「ものが水にとける」ことを理解できていなかった。そこで，自作教材によって水に意識を向かせることで，水を粒子で捉えることができるようになり，それによって粒子概念形成を促すことができた。そして，教科書とは発想が逆である「食塩に水を加える」という現象を観察できる自作教材が効果的に働いたことが示された。

本研究では，この授業だけで粒子概念を定着させることを狙っていたわけではなく，粒子概念の構築に向けたきっかけを与えることが目的であった。この点から，生徒たちの視点は食塩ではなく水に向かったのは事実であり，そこから継続的にもののとけ方に対して，水を中心に考えていくことができた。このように，食塩に水を加える自作教材が有効に働いたことにより，形式的モデルの構築と活用が促されたと考えられる。そして，論理的思考の形式に対する認知的葛藤を引き起こす CA 授業の展開によって，生徒たちのモデル化が進み，確実に粒子概念形成も高まったといえる。しかしながら，具体的操作期の生徒にとって，モデル化は高度な思考であり，小学 5 年生では課題設定として，少し高かったように考えられる。このことは，自作教材を使用する際に，「水だけを入れた場合は下に落ちる」，「食塩だけを入れた場合は落ちない」，「食塩に水を加えると落ちる」といった段階を踏んだ活動からも，丁寧な働きかけをし続けることに意味があるといえる。

Ⅴ．参考・引用文献

1) 文部科学省(2008)：小学校学習指導要領解説理科編
2) 国立教育研究所，(2012)：全国学力・学習状況調査【 小学校 】報告書
3) M. Shayer, P. Adey and M. Yates(2001)：Thinking Science 3rd edition, Nelson, Walton- on- Thames.
4) 栗田一良（1990)「認知能力の促進を図る CASE プロジェクトのカリキュラム」日本理科教育学会全国大会要項 No. 40, p. 22.
5) 小倉 康，編(2004)『英国における科学的探究能力育成のカリキュラムに関する調査』p.155.
6) 野ヶ山康弘，谷口和成（2012)『認知発達を促す理科授業の実践Ⅲ～英国 CASE プログラムの教育的効果～』日本理科教育学会近畿支部大会発表論文集 p.56
7) 野ヶ山康弘，谷口和成(2013)『認知発達を促す理科授業の実践Ⅳ～変数に着目した授業の成果～』日本理科教育学会全国大会発表論文集 p.382
8) 野ヶ山康弘，谷口和成（2014)『認知発達を促す理科授業の実践Ⅶ～分類の思考操作を促す授業～』日本理科教育学会近畿支部大会発表論文集 p.41
9) 野ヶ山康弘，谷口和成(2011)「認知促進を促す理科授業の実践～中学校２年単元『植物のからだのつくりとはたらき』～」日本理科教育学会全国大会発表論文集 p.295
10) 野ヶ山康弘，谷口和成(2013)『認知発達を促す理科授業の実践』，京教大教育実践紀要 13 号，p.63-71
11) P. Adey and M. Shayer, 1994: Really Raising Standards Cognitive Intervention and Academic Achievement, London, Routledge.
12) Shayer, et al. (1978)Science Reasoning Tasks. Slough: NFER.
13) 山口悦司(2002)「概念図 ： 理科教育における研究動向とその現代的意義」理科教育学研究 43(1)，p.29-51