

物質の状態変化における密度の変化に注目させ粒子概念へと導く指導の工夫

Improvement in the teacher's guidance for developing the concept of particles on the basis of the density change during phase transition of substances

武藤正典¹・勝田長貴²・川上紳一³

Masanori Mutou¹, Nagayoshi Katsuta² and Shin-ichi Kawakami³

1：岐阜市立長良中学校

Nagara Junior High School, 2070, Fukumitsu, Gifu, 502-0817, Japan

2：岐阜大学教育学部

Faculty of Education, Gifu University, 1-1, Yanagido, Gifu, 501-1193, Japan

3：岐阜聖徳学園大学教育学部

Faculty of Education, Gifu Shotoku Gakuen University, Takakuwanishi, Yanaizu-cho, Gifu, 501-6194, Japan

要 約

中学校理科第1学年「身の回りの物質」では、エタノールやロウを用いて状態変化の実験を行い、粒子概念で考察する授業が行われている。これらの実験では、状態変化に伴って体積の変化に意識づけがなされるが、質量の変化を調べることに對する意識づけは弱い。本研究では、身近な物質であるラードを用い、事象提示で、溶けたラードに固体のラードを入れて、密度の違いに注目させたあと、状態変化に伴う体積と質量の変化を実験させた。この結果をもとに、状態変化に伴って質量が変化せずに密度が変化したことを踏まえ、粒子概念で現象を表現させた。粒子概念で現象を説明する際に密度に注目させることで、微視的な概念形成に、生徒が自ら規則を見いだすことができた。実験に用いたラードは、加熱や冷却による状態変化が容易で、何度でも繰り返すことができる点がメリットである。

キーワード：状態変化, 相転移, 粒子概念, 密度, ラード, 南極石, 中学校

1. はじめに

平成20年に発行された中学校学習指導要領-理科編では、中学校第1学年「身の回りの物質」の単元で、「物質を加熱したり冷却したりすると状態が変化することを観察し、状態が変化する前後で体積や質量を比べる実験を行い、状態変化は物質そのものが変化するのではなく、物質の状態が変化するものであることや、状態変化によって物質の体積は変化するが、質量が変化しないことを見いだし、粒子のモデルと関連付けて理解させることがねらいである」と書かれている。こうした記述を受けて、教科書では、エタノールが液体から気体へ変化する実験や、ロウが固体から液体に変化することを調べる実験が取り入れられている。教科書では、水が液体から固体に変化してできる氷は水に浮く

ことから、氷のほうが密度が小さいことが記述されているものがある。

物質の状態変化の学習では、観察事実をもとに粒子概念へと導く学習過程が重要視され研究されてきた（山下・鈴木, 2012; 福田・遠西, 2015）。また、実際の指導場面では、粒子概念を用いて実験結果を、図を使って説明する場合の規則（きまり）について、教師との対話などから気づかせるなど、授業展開において、さまざまな工夫がなされている（太田・川上, 2015）。その際に、教師の意図的な指導の是非が議論になることがあった。本研究では、事象提示の段階で、状態変化における密度の変化に注目させ、質量を測定することの必然性を明確にして、粒子数の不変性に気づかせるような指導の工夫を試みた。

また、これまでの多くの実践では、ロウを用

いることが多かった。ロウを用いた場合には、加熱や冷却に時間がかかること、体積変化を表面のへこみ具合から捉える必要があり、取扱いが難しかった(津田ほか, 2013; 辻井, 2015)。そこで、本実験では、ロードを使用している(武藤, 2015)。本研究では、授業実践を踏まえ、粒子概念の形成に向けた指導のあり方と、実験に用いる教材について議論する。

2. 指導計画

(1) 物質の状態変化とは

物質の状態変化は、相変化と呼ばれている。これは熱力学的な概念であり、温度や圧力が変化すると、物質はある相から別の相へと変化する。水の場合には、気相、液相、固相があり、相が変化することを相転移と呼ぶ。相転移が起こると、物質を構成する粒子の配列や運動様式が変化し、一般的に密度の変化が起こる。中学校の理科授業では、物質の状態変化を調べる実験を行い、状態が変化することで体積が変わるが、質量が変わらないことを理解することになっている。物質の状態変化によって、密度が変化するが、密度変化に着目させるような指導は求められていない。しかし、状態変化に伴う密度の変化は科学的に重要な概念であり、従来の中学校の理科授業をちょっと工夫することで、無理なく密度変化を学習させることができる。さらにそれを踏まえて、無理なく粒子概念へと導くことができるのではないかと考えた。

そのために、次のような指導の工夫を行った。本授業実践は、中学校第1学年「身の回りの物質」の単元における第19時に位置づけた。

(2) 単位時間の役割を踏まえた本時のねらいの明確化

単元における単位時間の役割が明確になっていることで、単位時間のねらいも明確になる。本時(第19時)は、「粒子のモデルを活用し、微視的な見方や考え方を鍛える段階」にあたり、状態変化による質量や体積の変化について学習する単位時間である。この授業を履修する生徒は、小学校4年生の単元「金属、水、空気と温度」において、空気や水、金属などは、冷やさ

れると体積が小さくなり、温められると体積が大きくなることを学習している。小学校理科学習では、物質の温まり方と体積変化を関係付けて考えてきたものの、本時の学習が既習内容と大きく異なる点は、状態変化したときの体積だけでなく、質量にも着目する必要があることである。しかし、従来の授業実践では、質量を測定する必然性を提示するのが難しかった。

そこで、密度に着目させることを念頭において、体積だけでなく質量についても考える必然を生み出せるよう、本時のねらいを「液体のロードに固体のロードを入れると沈むことに疑問をもち、液体と固体のロードの体積や質量をそれぞれ調べる実験を行うことで、固体⇔液体の状態変化では、質量は変化しないが体積が変化する(固体<液体)ことに気づき、同質量で体積が小さくなる固体のロードの方が密度が大きく、液体のロードに沈むことを見いだすことができる。」とした。

(3) 問題解決の過程における指導の工夫

前時は、教科書と同様、エタノールを用いて液体⇔気体の状態変化において、質量が変化しないことと、体積は液体より気体の方が大きいということ調べている。そこで、本時では、液体⇔固体の状態変化における質量や体積の変化を考えていくのであるが、その中で、次の4点に配慮した。

(a) 事象提示

状態変化における体積と質量を調べるとき、よく目にしてきた授業展開は、事象提示でエタノールが入った袋にお湯をかけると膨らむ様子を見せている。その後、液体と固体のロウを用いて質量や体積を調べている。教科書も同様な展開である。

ここで考えなければならないことが2点ある。1点目は、事象提示において液体⇔気体の体積変化に着目させているにもかかわらず、調べているのは液体⇔固体の体積変化についてであるということである。状態変化という点においては同じなのかもしれないが、目の前の事実疑問をもち、課題化を図っていく学習者の科学的な追究を大切にしていけるのであれば、事象提示と同じ物質を使って、液体⇔気体の体積変化を調べるのがふさわしい。2点目は、エタノー

ルが入った袋にお湯をかけると膨らむ様子を見させると、体積の変化には着目しやすいが、質量の変化に着目することは難しいということである。

そこで、1点目については、前時に気体⇄液体の状態変化における質量や体積について調べ、本時(19時)では、液体⇄固体の体積変化について考えるようにした。2点目については、液体のラードに固体のラードを入れる事象提示を行い、固体のラードが沈む事実から密度に着目させることで、質量や体積を考える必然を生み出した。また、校内実力テストの結果から、密度についての問題の正答率が毎年低いことがわかってきたため、習得したことを繰り返し活用させることで、確実に身に付けることにつながると考えた。ただし、密度の学習では、同体積で条件制御して、質量の違いを調べ比較しているのに対して、本時は同質量で体積が違う場合を扱っている。

(b) 実験方法

本時では、事象提示に用いたラードを生徒が行う実験でも用いた。液体⇄固体の状態変化については、従来、ロウを用いて調べることが多かった。その際、加熱や冷却に時間がかかったり、体積の変化を表面のへこみ具合からとらえる必要があったりした。

その問題点を改善するために、身近な物質であり、融点が低いラードを用いることで、加熱や冷却を容易にした(武藤, 2015)。また、ラードを用いることで加熱と冷却を繰り返し行うことが可能となった。体積変化については、ラードを入れたガラス管付試験管を用意し、お湯で温めたり、氷水で冷やしたりする中で、体積の変化を調べさせることにした。ガラス管付試験管に入れることで、体積変化を大きく観察でき、液面の変化で体積の変化をとらえやすくなる(図1)。また、小学校第4学年で水や空気の温度変化による体積変化を調べた方法と同様であり、自ら実験方法を考えることができる。さらに、一人一実験で行った。一人一人が確実に事実を得たり、複数の事実から考えたりすることができるようにした。

実験器具に使用したものは、次のようである。

- 試験管(直径12mm, 長さ105mm, 肉厚1.1mm)
- ゴム管(1号)

- ガラス管(外径6mm, 長さ40cm)
- ラード(食用)

(c) 考察の場面での工夫

考察の場面では、液体と固体では質量は同じであるが、液体より固体の方が体積が小さいことから、密度が大きいことを見いださせるようにした。ただし、第4時の密度の学習では、同体積で質量が異なる物質を比較したり、質量や体積を数値で表し密度も数値で求めたりしている。よって、同質量で体積が異なる場合を考えるのは初めてであるため、密度の違いを考えることに難しさを感じる子どもがいると予想された。そこで、液体と固体のラードを粒子のモデルを用いて表すように促した。

粒子のモデルで考える際に、質量が変化しないことから全体の数は変わらないが、密度の違いを考慮すると、粒子の間隔を考慮する必要が生じ、本時のねらいに迫ることができるのではないかと予想した。

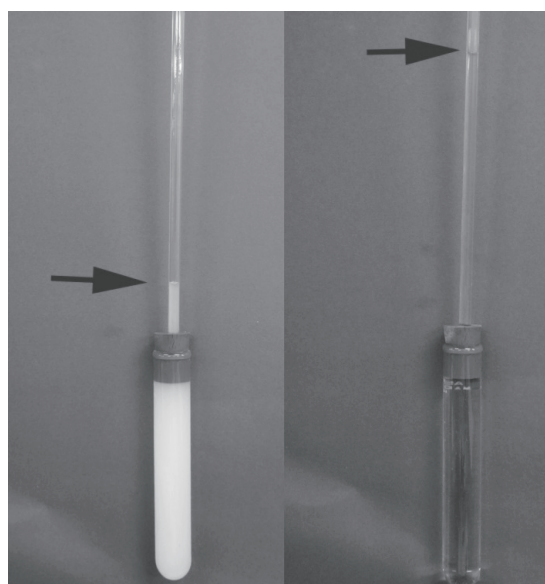


図1. 実験器具。固体状態のラード(左)と液体状態のラード(右)。

(d) 終末事象

日常生活の中では、水に氷を入れると水が浮く事実の方が身近である。よって、終末では、ラードと同じように、液体のロウに固体のロウを入れ、固体のロウが沈む事象を提示する。その後、水に氷が浮く様子を見せ、ラードやロウとは異なることに気付かせ、その理由を考えさ

せる。つまり、前者の事象提示は、導き出した結論を別の事象に当てはめ、一般化を図り、生徒自身が学びを実感するとともに、教師が学習内容の定着を見届ける手立てとしての役割をもたせた。後者は身近な事象の不思議さに気付かせ、学んだことを活用させたり、本単元で重要な物質の固有性を実感させたりすることで、科学的な見方や考え方を養っていく役割をもたせた。

3. 授業実践

(1) 事象提示

事象提示では、液体のラードに固体のラードを入れた(図2)。入れる直前に、「どうなると思いますか。」と問うと、生徒は、「浮く。」「液体の途中で止まる。」「沈む。」の大きく3点の考えをもっていた。その考えの背景は、以下の通りである。

* 「浮く」と考えていた生徒

⇒水やジュースに氷を入れると浮いているから。〔既習事項を基にした見方・考え方〕

* 「液体の途中で止まる」と考えていた生徒

⇒状態は変化しているものの、同じ物質である。〔物質の固有性に着目した見方・考え方〕

* 「沈む」と考えていた生徒

⇒白色でギュッと粒子が詰まった感じがする。〔粒子に基にした見方・考え方〕

そして、液体のラードに固体のラードを入れると、固体のラードが沈んでいく様子を目にした生徒たちは、「え〜。」という声を上げた。それは、多くの生徒が「浮く。」「液体の途中で止まる。」と考えていたからである。



図2. 授業の導入での事象提示。液体状のラードの入ったビーカーに、固体状態のラードを入れた。

ここで大切にしたことは、「液体のラードに固体のラードが沈む」という事実を全体で確かめ合うとともに、問題を明らかにし、生徒の問題意識を大切にして課題化を図ったことである。実際に、生徒たちは交流の中で「液体のラードに固体のラードが沈んだ。」「同じ物質なのにどうしてだろうか。」と発言し、本時、解決しなければならない問題を全員で明らかにすることができた。さらに既習事項を生かしながら、「沈むという事実から、固体のラードの方が液体のラードより密度が大きいのではないか。」と考えをつなぎ、より質の高い課題として、「液体のラードと固体のラードでは、密度が違うのだろうか。」と設定することができた。また、全体交流で生徒が発言した「同じ物質なのに…」という考えを大切にしておくことで、要因を限定できるように配慮した。

(2) 予想とその交流

課題化を図った後、一人一人の予想を交流した。その中で、

- 「液体のラードに固体のラードが沈んだのだから、固体の密度の方が大きいと考えるべきだ。」
- 「液体より固体の方が、粒がギュッと固まって、体積が小さくなるので、密度が大きくなると思う。」
- 「でも、前の学習のとき、密度は物質によって違ったので、同じラードなので密度は変わらないのではないだろうか。」
- 「固体のラードの方が液体のラードよりも質量が大きいのかもしれない。」

このような発言を踏まえて、密度に着目させることで、「体積」や「質量」を調べる必要があることが明確になった。

(3) 実験方法の立案

これらの予想を検証するために、実験方法を考えた。小学校4年生で、物質の状態変化と体積、質量に着目したという既習事項を踏まえ、物質の温度を変化させて体積を調べる方法を考えることができた。すなわち、小学校第4学年では、試験管に空気や水を入れ、カップに入れたお湯や水で温度を変化させ、体積変化を調べている。同じ方法で試験管にラードを入れ、お

湯で加熱，氷水で冷却することで，体積変化を確認したり，質量を測定したりした。

(4) 実験

一人一人が実験を行う個別実験を位置付けた(図3)。同じ実験であるため，結果を互いに確認し合いながら，全員が確実に事実を得ることができるよう，班内での協同的な学びを促した。同じ実験の結果が複数得られたことで，事実を客観的にとらえ，分析的に解釈したり，総合的に考察したりすることが可能となった。

実験では，液面の変化に着目しながら，固体のラードの入った試験管をお湯につけた。生徒は，液面の変化に着目すると同時に，試験管を見ながらラードの状態変化の様子を観察した。固体のラードは白色であるが，液体に変化すると透明になるため，状態変化の様子をつかみやすかった。さらに，固体のラードが液体に変化していく事実と，液面が上がる事実をつなげて考えようとする生徒もいた。



図3. 実験を行う生徒の様子。

そして，ラードが白色から透明に変わり，固体から液体に状態変化すると，液面が上昇する事実を全員が確実に確かむことができた。また，その際に電子天秤を用いて質量を測定すると，変化していないことも確かめることができた。図4に生徒のノートの記述例を示す。

さらに，得た事実を確かにするために，液体に変化したラードを氷水に入れることで，液体から固体に変化する際の体積変化や質量変化も調べた。液面が一気に下がる事実を目にすることで，体積が小さくなることを，実感をもって理解することができた。

(5) 結果および考察の交流

実験後，まずは班で結果を確認し合い，事実を客観的にとらえた後，考察をノートに書きまとめた。その後，全体で意見交流を行った(図5)。

最初に，「液体のラードも固体のラードも○○gだった。どの班の結果からも，固体と液体の質量は同じだといえそうだ。」という発言が出た。続いて，状態変化によって質量が変化しない事実を踏まえ，「液体のラードを冷やすと，固体に変化して液面が下がった。」「逆に温めると，液体に変化して液面が上がった。固体より液体の方が体積が大きくなるんだ。」という発言が出た。この発言を受けて，状態変化によって体積が変化するという事実を確認した。そして，「気体⇔液体の状態変化と同じように，質量は同じだけど，体積が変化することがわかった。」というように，2つの事実や既習事項を関係付けた考察をクラス全体で確認した。さらに，「固体と液体で質量は同じでも，固体の方が体積は小さくなるので密度が大きくなり，固体のラードが液体のラードに沈んだのだ。」という発言があり，課題に対する結論を全員で確かめた。

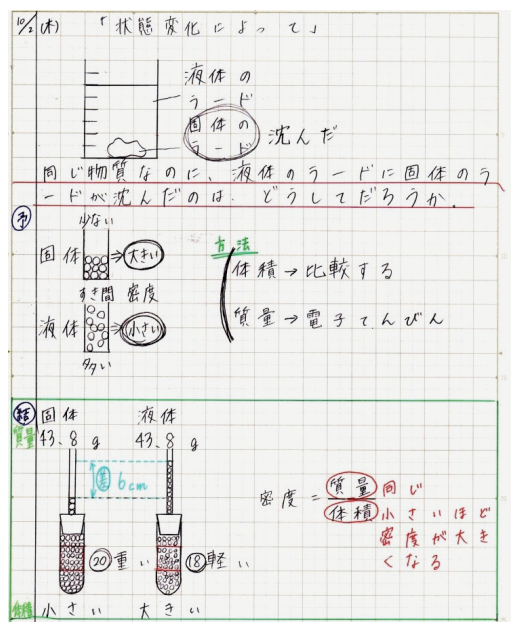


図4. 実験結果を記入したノートの例。

この結果をモデルで考察するように促したところ，「ラードの粒の数は変わっていないけど，固体になると粒と粒の間隔が狭くなって体積が小さくなるんだ。」とあって，固体と液体の違い

を図で表す姿がみられた。さらに、「同じ体積分を見ると、粒の数は固体の方が多く、質量が大きくなるので密度が大きくなるのがわかる。」という発言があり、微視的な見方や考え方をを用いて、質量は変化しないが、体積が変化する理由まで考察する姿がみられた。

(6) 終末事象と振り返り

先述の通り、終末事象として、まずはラードと同じように、液体のロウに固体のロウを入れ、固体のロウが沈む事象を提示することで、実験結果の一般化を図った。さらに、水に氷が浮く様子を見せ、ラードやロウの場合とは異なることに気付かせ、その理由を考えさせた。

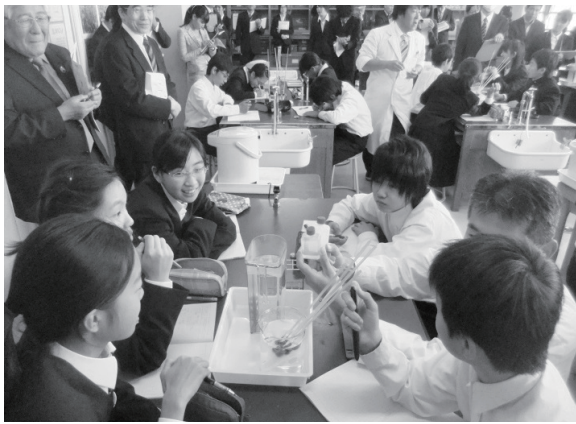


図5. 授業の終末で、実験結果について交流する生徒の様子。

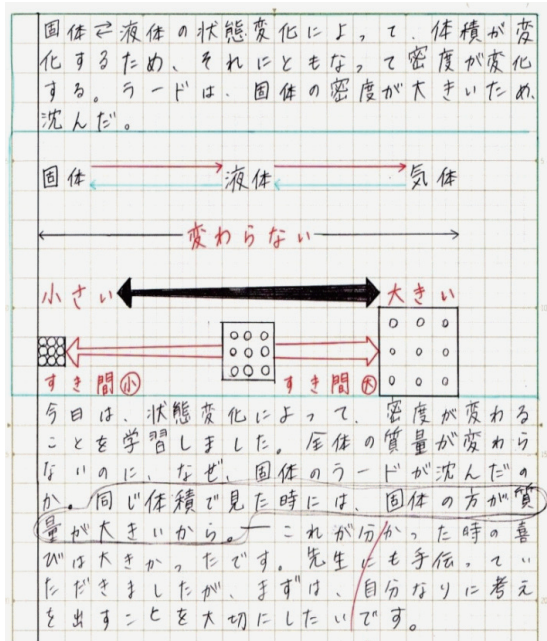


図6. 生徒のノートの記述の例。

生徒のノートからは、粒子のモデルで考えたり、密度の公式を用いたりしながら、多面的な考察ができていることが読み取れる(図6)。これは、これまで、粒子モデルを用いながら考察したり、既習事項を活用して考える学び方を大切にしてきたりしてきた成果であると考えられる。

4. 議論

(1) 粒子概念の形成を促す指導の在り方

物質の状態変化を粒子概念で理解させることは、理科教育学における重要な課題である(福田・遠西, 2015)。多くの授業実践では、エタノール、ロウ、水などの状態変化に関する実験を行い、物質の状態変化を微視的な粒子概念で表現することが行われている(山下・鈴木, 2012; 風呂ほか, 2014)。こうした授業実践では、生徒に段階的に粒子概念の形成を促すような学習指導のあり方が重視されている。こうした実践では、事象を粒子概念で表現するうえでのきまりを構成していくことが重要となる(加藤・東, 2009; 太田・川上, 2015)。その際に、教師の発言によって、粒子概念によるモデルを描かせるうえでの注意点を自覚させることがあり、学習者が自分の力で粒子概念を構築していけるかは、あまり問題にされてこなかった。

事実、これまでの実践では、エタノールの状態変化について、体積が変化する事実を、目的意識をもって調べているため、体積変化を粒子モデルを用いて表現できていた。その一方で、質量の変化については目的意識が低いため、状態変化前後の粒子モデルの数が異なってしまっている場合がみられた。こうした状況に陥らないようにするためには、先行学習において、粒子概念による実験結果を図に表現する際のきまりを知識として獲得させることが必要だったのである。

本実践では、状態変化において、質量が変化せずに、体積が増加する現象に触れさせ、密度の変化をもとに、状態変化にともなって粒子の配列や間隔が変化するモデルを生徒自身の力で導けるかどうかを問題とした。本実践を踏まえて、生徒が示した粒子概念による現象の説明や考察をみると、粒子数の保存を踏まえ、状態変

化によって配列や間隔が変化したことを多くの生徒が表現しており、本研究で構想した、密度に着目して実験を行うという指導の意図が、授業実践において、生徒自ら粒子概念による表現における規則を見いだしていることが示された。

実際の物質の状態変化では、粒子の配列は間隔だけでなく、粒子の熱振動が物質の性質や変化に大きな役割を果たしている。すなわち、状態変化は熱力学的な現象であり、構成される粒子の熱運動についてまで表現することは、さらなる工夫が必要となる。山田ほか (2010) は、授業の終末において、分子動力学シミュレーションを行って作製した、水分子の熱運動が状態変化によってどのように変化するかを示す動画コンテンツを視聴させることで、熱運動の概念を理解させる試みを行っている。

(2) 状態変化における密度の変化を捉えさせる教材について

中学校理科において、固体と液体の間の状態変化にともなう体積の変化を捉えさせる物質として、長年ロウが用いられてきた (津田ほか, 2015)。しかし、ロウは加熱や冷却に時間がかかること、凝固にともなって真ん中がへこむといったことが起こり、どのように授業で活用するのかについて、議論が繰り返した (辻井, 2015)。本研究では、身近な物質で、融点が高いラードを使用した。体積変化については、ラードを入れたガラス管付試験管を作成し、お湯で温めたり、氷水で冷やしたりするなかで、体積の変化を繰り返し調べさせることができた。

ラードは脂肪でできているが、無機物で融点が高い物質として、天然鉱物である南極石 (antarcticite) が知られている。これは南極で発見された鉱物であり、融点は24℃で、お湯で温めると液体になり、氷水で冷やすと結晶が晶出する。あまり身近ではないが、天然鉱物で融点が高い物質として興味深い。筆者らは、鉱物販売業者からカリフォルニア産の南極石を入手して、予備実験を行っている。南極石が固化する様子をビデオで撮影すると、液体から固体へと変化することで、体積が減少することがわかる (図7)。大量に確保することは難しいが、ラ-

ードと同様扱いやすいものであり、今後、授業実践で、有効性を調べることを想定している。



図7. 南極石の固化。24℃以下に温度を下げると、容器の下面から針状の結晶が成長し、容器の上部の空気の体積が増える。

<http://www.ha.shotoku.ac.jp/~kawa/KYO/Busshitsu/kessho/ant.html>

5. おわりに

中学校理科第1学年「身の回りの物質」における状態変化の学習において、状態変化に伴う体積と質量の変化を調べる必然性をもたせる授業実践を行った。授業導入時の事象提示において、溶けたラードに固体のラードを入れて、密度の違いを意識づけ、実験結果をもとに粒子概念を用いたモデル図の描き方のきまりを見いだし、適切なモデル図を描いていることが明らかになった。実験に用いたラードは身近な物質で、加熱と冷却が容易であり、一般に使われているロウよりも扱いやすい。ラードは脂質であるが、天然鉱物として融点が常温の南極石があり、状態変化の学習に活用できる可能性がある。

謝辞. 本論文をまとめるにあたり、岐阜県教育委員会美濃教育事務所山田茂樹氏には、有益なコメントをいただいた。ここに記して深謝する。

引用文献

福田恒康・遠西昭寿 (2015) 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-. 理科教育研究, 57, no.2, 203-211.

風呂和志・山崎敬人・柴一実・三田幸司・升岡智子 (2014) 子どもの科学的な学びを創造する理科授業に関する研究 (1)-「化学変化と原子・分子」の単元を事例として-. 広島大学学部・附属学校共同研究機構研究紀要, 第39号, 231-236.

加藤圭司・東和寿 (2009) 状態変化と化学変化を「粒子」の視点から統合していく学習指導の課題, 日本理科教育学会関東支部大会研究発表要旨集, 48, 58.

武藤正典 (2015) 微視的な見方や考え方を養う理科指導～物質の状態変化による質量と体積の変化を容易に調べる教材の開発～. 日本理科教育学会東海支部大会研究発表要旨集, C1015.

太田智美・川上紳一 (2015) 粒子概念の形成につながる体験活動と図を用いた思考・表現活動の工夫～第4学年「空気と水の性質」～. 岐阜大学教育

学部研究報告 (自然科学), 39, 33-40.

津田謙太郎・向平和・隅田学・熊谷隆至 (2013) 凝固の過程に着目した状態変化の指導法. 日本理科教育学会第39回全国大会論文集, 128-129.

辻井修 (2015) 中学校における探究過程に着目した「状態変化」の授業実践. 日本理科教育学会四国支部大会, 33, 19-20.

山田貴之・川上紳一・赤松直 (2010) 物質の状態変化を「粒子」のモデルと関係付けて学ぶ理科学習: 中学校理科における水の状態変化の分子動力学シミュレーション教材の効果的な活用. 岐阜大学教育学部研究報告 (自然科学), 36, 61-66.

山下修一・鈴木康代 (2012) コア知識一覧表を用いた中学校1年「物質の状態変化」の授業の効果. 日本理科教育学会全国大会要項, 62, 98.

単元指導計画

