加熱及び冷却による水の温度変化と動きを同時に観察できる教材の開発と評価

—サーモグラフィーと示温インクを利用して—

寺 田 光 宏 ・ 中 嶋 健 二[1)]

Development and Evaluation of Teaching Materials which can Observe Simultaneously Temperature Change and Movement of Water in heating and cooling Using Thermography and Thermosensitive Ink

Mitsuhiro TERADA ・ Kenji NAKAJIMA

Abstract

The purpose of this study was to develop and evaluate teaching materials which can observe temperature change in and movement of water simultaneously in the unit “How water is heated” in 4th grade elementary school science. For this purpose, wedeveloped teaching materials which can simultaneously observe temperature rise and movement in water using thermography or thermosensitive ink. Both can heat any area in a container. The device using thermography is suitable for demonstration experiments. Thermography devices are relatively expensive, and cannot experimentally indicate that low-temperature water moves downward. By using the inexpensive thermosensitive ink, on the other hand, children were able to experiment by themselves We also developed a device that can observe downward flow due to cooling as required. We used these devices in one class (28 pupils) in a public elementary school in Gifu Prefecture, and were able to confirm their educational effectiveness.

Key words

temperature, movement, observation, thermography, thermosensitive ink

Ⅰ．はじめに

１．問題の背景

小学校４年生理科「物のあたたまり方」の単元における，水の温まり方と水の移動に関して様々な議論があり，教科書の表記も改訂ごとに変化している．これに関して，加熱によるビーカー内の水の動きは非定常伝熱で一般化することが難しく（鎌田・佐藤，2002），おが屑や味噌などは自重により下降するためトレイサーとしての限界がある（勝俣・栗田，1981）ことが明らかにさ

１）半田市立宮池小学校

れている．また，教科書に掲載されているおが屑や味噌などの水のトレイサーと示温インクの結果の差により児童の概念形成が阻害されている報告もある（荻野ら，2013）．また，示温インクを使いビーカーをガスバーナーなどで温める実験では，実験後の対流の概念も定着せず水の移動の観察が難しいことを示唆している（相場・柊原，2009；森ら，2013）．この理由の一つとして，水のあたたまり方（温度変化）と水の移動（位置）という２変数を，同時に観察しにくい従前の実験方法で理解させせようとしている点に問題があると考えられる．そこで，水の温度変化と水の位置の２変数を同時かつ確実に観察することができ，獲得した対流の概念が定着する教材が必要となる．そのため，可視化とともに現象の仕組みを理解しやすくすることも重要である．そして，特に加熱のみの条件下において下降流は乱流になる（物理学辞典編集委員会，2005）ため，加熱による下降流の動きは考慮せず，「物のあたたまり方」として加熱時の上昇流のみを対象とし，下降流は別に論ずる必要がある．

物の温まり方に代表される熱による対流は，温度変化部分のみに注目すれば，物質の温度変化とほぼ同時に物質の移動が起こる．そのため，物質の温度分布をリアルタイムに可視化できれば，物質の移動（位置）が分かる．これにより，水の温度変化（温度）と水の移動（位置）という２変数を同時に観察することが可能である．

２．本研究の目的

水の温度変化と移動の２変数を同時かつ確実に観察するために，サーモグラフィーを利用した演示実験用装置を開発し，それと同様な効果をもつ示温インクを使用した児童実験用装置を開発する．これにより，水の温まり方の仕組みの理解を促進させ概念形成の安定化を図る工夫をし，この効果を検証する．

Ⅱ．サーモグラフィーによる「物のあたたまり方」の観察装置の開発

１．問題点およびその解決と開発の視点

加熱させる水をサーモグラフィーにより温度計測するためは，２つの問題点があり，それぞれ以下のように解決した．まず，ビーカーをガスバーナーなどで観測対象の外部を加熱すると，サーモグラフィーはその性質上，内部の温度変化ではなく表面の温度変化を計測してしまう．また，ガラスやプラスチックの多くは赤外線を吸収するため，内部の温度変化が計測できない．そこで，まず，ニクロム線を使い点熱源として内部から加熱した．これにより加熱部が観察者に分かりやすく，水槽内の自由な場所を加熱することができた．水槽の中深部も加熱することができ「攪拌が必要な風呂」様態の温度変化が簡単に再現することができる．また，サーモグラフィー（１）の測定波長において，ほぼ赤外線を透過させる丈夫なポリエチレン膜（２）を使用し計測を可能にした．

２．観察装置

観察装置は水槽（図１），加熱部（図２）からなる．水槽は，図１のようにアクリル樹脂で製作した．水槽の枠は，板（150 mm×150 mm×３ mm）の左右・下部に柱（左右部:10 mm×10 mm×150 mm，下部:10 mm×10 mm×130 mm）を接着剤で接合した．この空いた面にポリエチレン膜（150 mm×150 mm）を耐水性の両面テープで貼り，水槽とした．ポリエチレン膜に張りをもたせるためにアクリル樹脂の補助板（150 mm×10 mm×３ mm）に両面テープで上部を固定した．

加熱部は，図２のようにニクロム線（オーム電機100 V－600 W を巻部９ mm 幅および１

cm 程度の接続部：約1.6 Ω）をスリーブでＦケーブルに固定した．操作性を良くし，感電を防ぐために，他端にプラグを着け，電源装置からのケーブルの端にコードコネクタボディをつけ，結合させた．

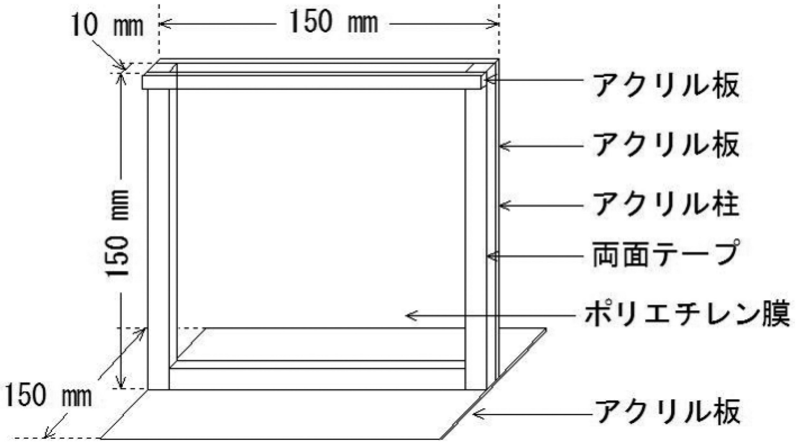


図１　観察装置の概要

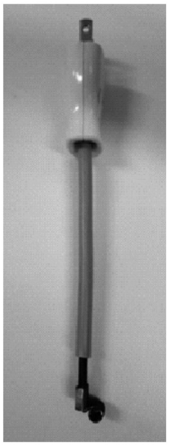


図２　加熱部

３．実験方法・結果

ａ．実験方法

水は補助板より数 mm 下まで（約160 mL）入れた．電源につないだ加熱部は左端に入れ，電熱線を底から約５ cm に設置し，2.5 V（約３ A）で加熱した．

ｂ．結果

サーモグラフィーの画像により，加熱部で色が変化し温度の上昇が確認され，その部分から色の移動により水が上部に移動することが観察できた（写真１）．その後，加熱されて水が上部で広がっていくことが観察できた（写真２）．加熱を続けても加熱部より下部は温度変化がほとんどないことが観察できた（写真３）．

４．実践結果・考察

上記の実験を2012年５月に沖縄県中部理科教育研究会において小学校教員を対象に，画像をプロジェクターでスクリーンに投影して演示実験として実践した．

参加者はサーモグラフィーによる温度変化と色の変化の関係を日頃から見慣れているため，ほとんど違和感なく受け入れられたようだった．これは，「水の温度上昇と水の上昇移動を，色の変化を介して２変数を同時に観察できた」ということである．「水が上部に上がり広がった後に下部に広がっていく様子が明確に観察できた.」そして，受講者からは「加熱した部分より下部が温まらないことが確認できると改めて認識できた」という意見もいただいた．この「下部が温まらないことにより，水のあたたまり方の原理を理解しやすくなり，水槽内の水が回転して温まるという概念をこの観察により払拭できた」という意見もあった．

課題として，サーモグラフィーは高価で小学校で購入は難しく現実的でない．そして，「本方法では，機材の関係のため演示実験にならざるを得ず児童は見ているだけとなり，児童自身が実験できる方法がより良い」という意見をいただいた．また，「下降流は観察できないのか」という疑問を受け，一部の教科書にある「冷たい水は下降する」という現象も観察できるのかという意見をいただいた．「冷たい水は下降する」現象を次章 III と同様な方法で観察可能とし撮影し

た（写真４）.

Ⅲ．示温インクによる「物のあたたまり方」の観察装置の開発

１．開発の視点

サーモグラフィーと同様に水の温度変化と水の移動の２変数を同時に観察でき，児童が実験できる装置が必要である．また，必要に応じて下降流が観察できることも必要である．使用した示温インク（３）は，約40 ℃で青色から桃色に，約35 ℃で桃色から青色に変わるように調整してあった．また，直流電源を使いニクロム線で加熱を繰り返すとインクの色素が分解してしまうので，今回は交流電源で行った．

２．観察装置

観察装置は水槽，加熱部，冷却部からなる．水槽は基本的に図１と同じ大きさで，ポリエチレン膜を使わず両面ともアクリル板で製作した．ただし，左右・下部にアクリル柱は不要のため板に変更した．また，加熱部はサーモグラフィーを使用したものと同様である．

冷却部は，図３のように外容器をスチール缶で，中容器をアルミニウム缶で作成した．熱伝導線は銅線14本を使い，スチール缶の底部に穴を開け，銅線を内部の壁に沿わせ，穴と銅線のすき間はハンダで閉じた．

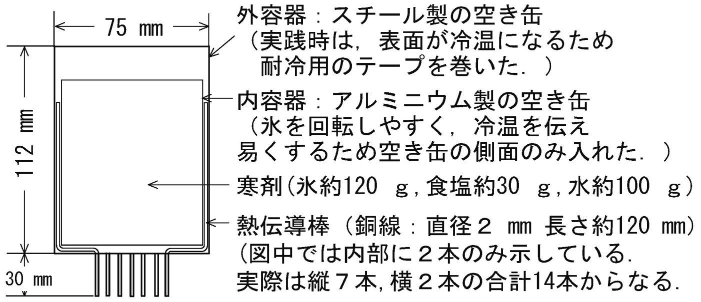


図３　冷却部

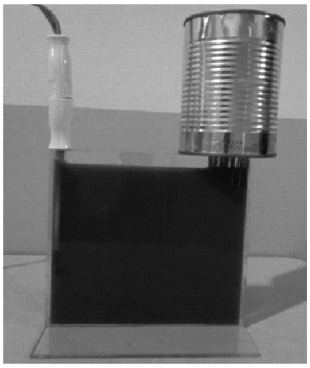


図４　観察装置の概要

３．実験方法・結果

示温インクは変色を明確にするために，既定の２倍に希釈した．水槽に希釈した示温インク200 mL 程度を入れ，交流電源につないだ電熱線を底から約５ cm の位置に設置した．

最初は少し高温になるように５ V（約６ A）で加熱した．加熱部から変色が始まり桃色（高温の水）が上部に移動していることが観察できた（写真５）．しばらくすると，桃色が上部で広がっていくことが観察できた（写真６）．その後，加熱を続けても加熱部のある高さで２色に分かれ，下部は温度変化がほとんどないことが観察できた（写真７）．示温インクは青色と桃色の２色ではあるが，サーモグラフィーの多色の観察結果と遜色はなく，水の温度変化と水の移動の２変数を同時に観察することが可能であった．

また，「冷たい水は下降する」ことを観察するため，水槽の加熱を弱めるために2.5 V（約３ A）に下げ，冷却器を設置した．示温インクは温度上昇・下降による変色域が異なるため，完全に水の動きと一致しない．そのため，冷却部の熱伝導棒が桃色の水を冷却し青色になる前に，２層の境界面が大きく波立つことが観察できた．しばらくすると，冷却部の熱伝導棒の付近から，

青色のインク（低温の水）が筋状に下降していくことが観察できた（写真８）.

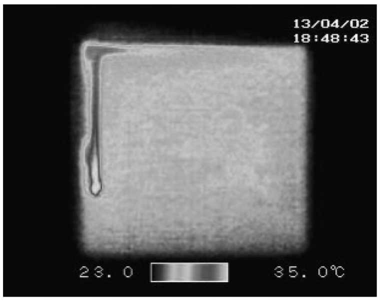


写真１　加熱部分から温度変化が起こり，上部に移動し広がっている状態（加熱から約１分後）.

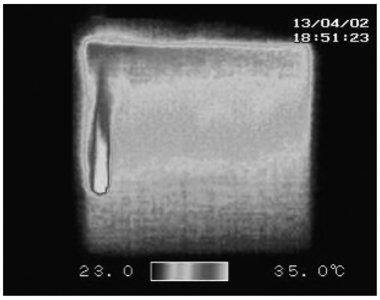


写真２　加熱されて水が上部に広がり，下部に広がっていく状態（加熱から約４分後）

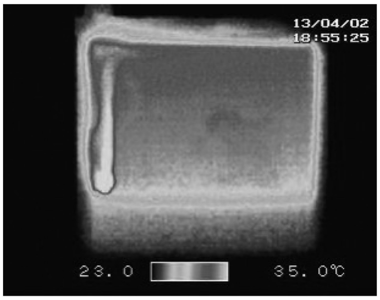


写真３　加熱を続けても加熱部より下部は温度変化がほとんどない状態（加熱から約７分後）

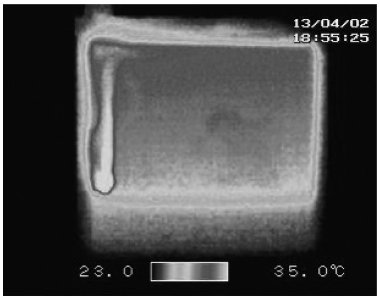


写真４　冷却を始め冷却部から温度が下降し，水が下部に移動している状態（冷却器を入れて約３分後）

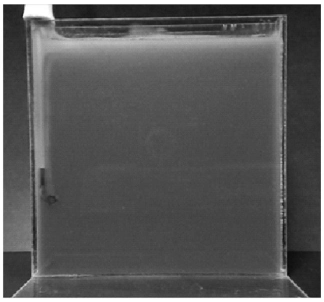


写真５　加熱部分から温度変化が起こり，上部に移動し広がっている状態（加熱から約３分後）

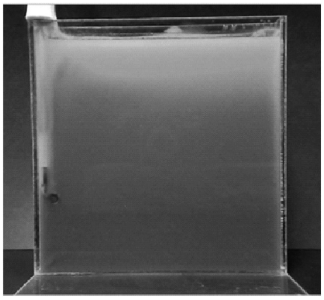


写真６　加熱されて水が上部に広がり，下部に広がっていく状態（加熱から約５分30秒後）

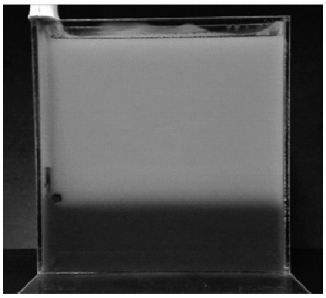


写真７　加熱を続けても加熱部より下部は温度変化がほとんどない状態（加熱から約８分後）

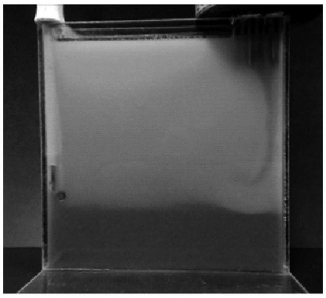


写真８　冷却を始め冷却部から温度が下降し，水が下部に移動している状態（冷却器を入れて約３分後）

Ⅳ．示温インクによる「物のあたたまり方」の観察装置の実践とその評価

１．実践・評価方法

本装置の使用により水の温まり方の仕組みの児童の理解が促進し概念形成が定着することと，本装置の観察し易さや操作性などの教育的な有効性を評価する目的で以下の実践・調査を行った．

ａ．実践対象　岐阜県公立Ｋ小学校４年生　28人

ｂ．実践時期　2012年11月

ｃ．授業展開　「物のあたたまり方」の「水や空気のあたたまり方」においてサーモテープを用いた実験の後に，示温インクの性質を説明した次の授業で，本装置を利用した実験を実施した．本時は，「Ⅲ．３．実験方法・結果」に従い，１班４名，７班で実施した．ただし，熱による対流の仕組みは教師が説明し，トレイサーを利用した実験は実施していない．

ｄ．調査問題

問１（１）熱源が容器の中深にある場合の水の「温まる範囲」の理解,」（２）水の「温まる順序」の理解および水の「温まる順序の理由」からなる．

１．水のあたたまり方について答えてください。

図１のように，とうめいなケースに水を入れて，電熱線であたためました。

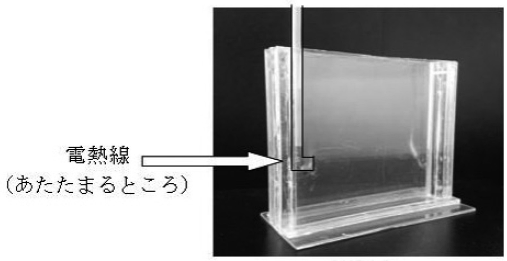
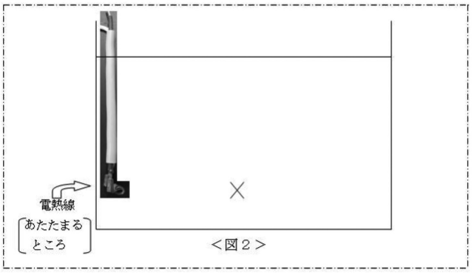


図１

（１）図２は，図１を横から見たものです。
　数分あたためた後に，×印のところの温度をはかると，40℃でした。他に40度以上の温度になっているところはどこですか。ぬりつぶしてください。
＊電熱線とは，電源とつなげるととても熱くなるものです。水の中に入れると，水をあたためることができます。電熱線は，トースター，ドライヤー，電気ストーブなどに使われています。

（２）（１）のようになるまでのあたたまり方を矢印でかいてください。また，そのようにかいたわけをかいてください。



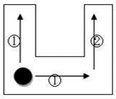
[わけ]
＊毎日の生活の中で知ったことや，今までに学んだことなどから考えて，書いてください。

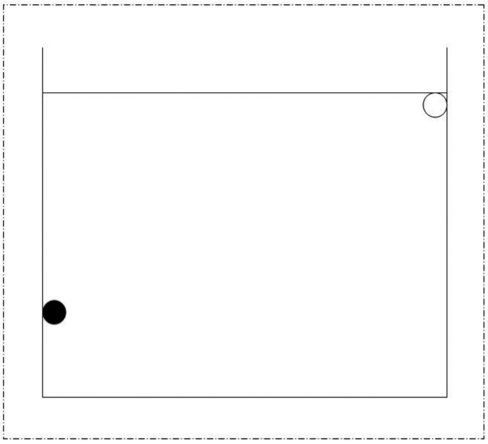
問２（１）「加熱部の水の動き」「冷却部の水の動き」
　　（２）水の動きの「加熱部の理由」「冷却部の理由」

２．次の問いについて答えてください。

とうめいなケースに水を入れて，●の部分をあたため，○の部分を冷やしました。
（１）このとき，水はどのように動きますか。例を参考に，矢印でかいてください。また，動く順番に①，②，③，…と番号をつけてください。
＊矢印は，●からかき始めてください。
＊同時に動くと考えた場合は，同じ番号をつけてください。

例





（２）（１）で番号それぞれの水の動きを次の〔　　〕内の言葉から１つ選んで，説明してください。
＊〔　　〕内の言葉は，例のように，文章に合わせて変えてもいいです。
例　「大きい」→「大きくなり」，「軽い」→「軽くなる」

〔大きい　小さい　軽い　重い　上がる　下がる
なくなる　動く　おぎなう〕

ｅ．調査方法

事前調査：単元の開始前　　問１・２
事後調査：本実験の終了後　　問１・２・感想
遅延調査：単元の終了４ヶ月後　　問１・２

２．結果・考察

表1　事前・事後・遅延調査における正答数（%）

有効回答数　N＝26

	調査	事前	事後	遅延
問１	（１）温まる範囲	0（0）	21（81）	25（92）
	（２）温まる順序	0（0）	25（95）	24（92）
	温まる順序の理由	0（0）	14（54）	22（85）
問２	（１）加熱部の水の動き	1（4）	26（100）	26（100）
	冷却部の水の動き	1（4）	25（96）	26（100）
	（２）加熱部の理由	4（15）	23（88）	24（92）
	冷却部の理由	1（1）	20（77）	20（77）

上記結果の解答の類型化とその考察を以下に記す．

ａ．事前調査

問１：（１）温まる範囲

「加熱部より上部」を塗ったものを正答とした．「熱源周囲，熱源側半分」とした児童が15名で，５割以上が金属のように熱の伝導による温まり方と同様なイメージをもっていた．「熱源より下部」とした児童が７名おり，普段から水は下から温められるという感覚から答えたと考えられる．残り４名は上記に分類できない解答だった．

問１：（２）温まる順序

「加熱部より温まり，上昇し水面より溜まっていく」のように描かれたものを正答とした．「放射状（伝導と同様）に温まる」が15名，「回転して温まる」が２名，その他が６名，未記入が２名であった．この結果からも伝導と同じような温まり方をすると５割以上の児童は考えていた．

問１（２）：温まる順序の理由

「温められた水は，体積が大きくなり軽くなって上がり，水面で広がる」を正答とした．「伝導と同じ」が18名，「回転する」が１名，その他が２名，未記入が５名であった．

児童の水の温まり方の概念は，一般にいわれるように，多くの児童は水も伝導と同じように温まると考えていた．

問２（１）：加熱部，冷却部の水の動き

加熱部は，「上昇する」のように描かれたものを正答とした．正答した児童Ａが１名，「放射状に移動する」が17名，その他が８名であった．これも伝導と同様であると考えていることが明らかになった．

冷却部は，「下降する」のように描かれたものを正答とした．児童Ａ１名が正答し，「放射状に移動する」が２名，その他が４名，未記入が19名であった．これは加熱部より冷却部は水の移動の予想が難しかったようである．

問２（２）：加熱部と冷却部における水が移動する理由

加熱部は「(温められた水は,）体積が大きくなり軽くなって上がる」を，冷却部は「(冷やされた水は,）体積が小さく重くなって下がる」を正答とした．

学習以前の内容であるので，問１と同様にほとんど正答できないと予想していた．しかし，問２（１）で正答した児童Ａは，「あたためた方は水じょう気や湯気になるからあたたまるとかるくなって上にあがるから」と記し，熱による対流を一部理解していていた．他にも，問２(1)では誤答であったが，理由の一部としてほぼ正しい記述が次の３名あった．

「あたためられて，温度が上がり体積が大きく軽くなって上の方に行くけど，そこでひやされて体積が小さくなると重くなるから下にいく」

「あたためると体積が大きくなるから，あたためたところの方が一番上に上がって」

「あたためられ軽くなって上に上がって横に動く」

これらの児童の記述から推測すると，本実践は偶然「物の温度と体積」「水のすがたとゆくえ」単元の終了後に実施したため，学習した内容が活用されやすかったと考えられる．

ｂ．事後調査，遅延調査

ほとんどの項目で約８割以上の正答率を示し，児童の「物のあたたまり方」に関する理解が向上し，概念形成も長期的に定着したことが明らかになり，本装置の有効性が示された．

問１（１）：温まる範囲

事後調査の誤答した５名は遅延調査では正答できた．この理由として彼らは記入方法が理解で

きなかったと考えられ，観察はできたと判断できる．ただ，遅延調査で，誤答の１名児童Ｂは，事後調査では正答であったが，理解できていないため最終的には誤答であったと考えられる．

問１（１）：温まる順序

遅延調査24名（92％）の児童が事後・遅延調査と正答でき，安定した概念を形成できた．しかし，遅延調査で誤答の２名児童Ｂ，Ｃは，問１（２）あたたまる順序の理由の事後・遅延調査でも誤答で，温まる順序の理由が理解できていなかった．

問１（２）：温まる順序の理由

正答率が事後調査から遅延調査で大幅に上昇した．事後調査の誤答は「実験の結果から」という間接的な解答が10名であった．この内８名が遅延調査で正答し，10名全員が問２(2)事後・遅延調査の加熱部の理由は正答していたため，遅延調査において24名は理解していると判断できる．残り２名は問１（２）遅延調査の誤答の児童であり，児童Ｃは伝導，児童Ｂは回転するという考えから抜け出せないでいた．

問２（１）：加熱部，冷却部の水の動き

加熱部に関しては，事後・遅延調査とも全員が正答した．冷却部においては事後において１名が未回答であったが遅延調査で正答していたため，全員が理解していると判断できる．

問２（２）：加熱部と冷却部における水が移動する理由

加熱部において，事後調査で１名が未解答であったが遅延調査で正答していたため理解していると判断できる．加熱部で水が上昇する理由については，児童Ｂ，Ｃが誤解答した．この２名は残念ながら伝導や回転する考えより抜け出すことができなかった．また，冷却部において，児童Ｂ，Ｃ以外の４名の内，３名は事後・遅延調査で誤解答であり，１名は事後調査は正答し，遅延で誤解答している．これは，温度変化による水の移動の理由は，加熱部より冷却部で理解が困難である傾向が明らかになった．

ｃ．事後調査による感想

１）観察装置の形状

試験管やビーカーと比較して，「（容器が）『しかくだった』や『うすかった』ので見やすかったです」という感想があった．その理由としては，「水の温まり方がけむりみたい」「どこが温まってないかよく分かる」などがあった．

２）熱源を中深部に配置

「あたためている所までしかピンクにならない」とか「水は，温まるとその部分より下におちなかったり，温めるほど軽くなることが分かった」などの感想があった．これは，著者らが期待した「攪拌が必要な風呂」の仕組みを利用して，熱による対流の仕組みを理解するのに一役買ったと考えられる．

３）操作性

全般的に「簡単だった」という感想が多かったが，電熱線が入りにくいという意見も多く，装置の改善が必要である．

V．おわりに

1．総合考察

a．装置としての有効性

温度変化と水の位置の 2 変数を同時かつ明確に観察できるサーモグラフィーを利用した演示実験用装置を開発できた．これと同様な効果をもつ示温インクを使用した児童実験用装置により，ほとんどの児童は，水の温まり方やその仕組みの理解ができるようになり，概念形成の定着を図ることが可能となった．このような結果が出た理由を整理すると，次の 3 つの本装置の特徴によると考えられる．

1）薄い容器内を点熱源で加熱する

サーモグラフィーおよび示温インクを利用した本装置は，点熱源のために加熱する点が明確でニクロム線で温められた水は「煙」のように上昇し水面に広がった．水面全体に行きわたった後，上から順に温められた水が溜まっていく様子が観察された．同時に，小さな渦巻きが観察された．このように，サーモグラフィーによる水の温まる温度（色の種類）と，この水の移動の様子から 2 変数を同時に観察することが可能である．児童実験用の示温インクによる方法でもほぼ同様な結果を得ることができた．これは，薄い容器を使用しているため，3 次元のビーカーを 2 次元の断面として表現できたためであると考えられる．これにより，あたたまり方の段階的な概念理解がしやすく，図に表現しやすいため，正答率が上がったと考えられる．

2）容器の中深部を加熱する

加熱部を最深部に置かず中深部に置くと，普段経験をしていない「攪拌が必要な風呂」と同様な結果を色で観察でき，概念的不調和を起こした可能性がある．鎌田ら（2002）が指摘しているように，対流現象を実感でき，原理を考えるきっかけになり，理解が深まったと考えられる．これは，加熱部まで温められた水が溜まった後，加熱部より下には下降せず，色が明確にと分かれた．上から温められた密度が小さい水が溜まってくるから，下の密度の大きい水は動かない．加熱部まであたたまり，その下はそのままで水全体が回転しないことが分かりやすいと考えられる．

3）冷却による水の移動を観察できる

本実験は，準備や操作が面倒で，児童の一部は理解が難しかったため，評価が分かれるところである．本単元の対象は，物の温まりまり方で冷え方ではないが，熱による対流の加熱だけでなく冷却という両現象を多くの児童が理解できた．これは，未学習の密度を正確ではないがある程度理解し，熱による対流の仕組みのより深く理解ができる可能性を示唆している．ただ，本実験は，このような有効性は認められるが，もっと簡易に実験できる必要があり，同時に指導方法の改善が今後の課題である．

b．指導上のポイント

1）現象の可視化と概念理解の深化

今回は，熱による対流の仕組みを児童自ら気がつくことに重きを置かなかったが，本実験のように温度の異なる液体の移動を色で可視化することにより，温められた水は軽くなり上昇し，冷やされた水は重くなり下降するという規則性に児童が気がつき，熱による対流の原理の発見に寄与すると考えられる．清水・山崎（2014）が指摘しているように可視化による法則発見の可能性があると予想される．

2）本単元の指導順序

本実践は偶然「物の温度と体積」「水のすがたとゆくえ」単元の終了後に実施したが，これら

の学習内容の活用されやすさが示唆された.「物のあたたまり方」において，この2単元との関わりは有効である．主要5社の教科書でも，この3単元は順序も多様であるので，今後，学習順序の検討が必要となる.

２．課題

本装置は，現状では消費電力が大きく，実験室の電源の問題があった．そのため，示温インクの量を減らす（容器を小さくするなど）工夫をして使用電力を減らし，簡易な電源でできるようにする必要がある．また，加熱部と同様に，冷却部も装置の設定が大かがりであるので，簡易にできるような工夫が必要である.

Ⅵ．謝辞

日本アビオニクス株式会社の寺岡孝祐氏にはサーモショットF20の特性や赤外線透過材質について教授いただいた．また，本研究に基づき株式会社ヤガミより本研究の一部を商品化いただいた。

注

（1）今回使用したサーモグラフィーは，NEC Avio赤外線テクノロジー株式会社製サーモショットF20である．測定波長は8～14μmであり，温度を256階調の色で表示できる.

（2）ポリエチレンは，3.5，6.8，13.9μmで吸収をもつため，可視光線，赤外線に透過性をもちF20で温度測定が可能にある．また，今回は市販品で丈夫な旭化成のジップロックを使用した.

（3）示温インクは今回，株式会社ナリカの示温インク(サーモインク)を使用した．数回であれば，直流電源でも問題なくできるので，電源装置でも可能である.

引用文献

相場博明・柊原礼士：小学校4年「水のあたたまり方」における誤概念と「サーモインク」教材の有効性，理科教育学研究，49（3），1-11，2009.

物理学辞典編集委員会：物理学辞典三訂版，1303-1304，倍風館，2005.

鎌田正裕・佐藤時子：小学校4年理科「もののあたたまり方(自然対流電熱)」に関する2，3の考察と可視化実験法の開発，科学教育研究，26（4），309-314，2002.

勝俣仁・栗田一良：対流現象に関する一考察，日本理科教育学会研究紀要，22（2），45-51，1981.

森麗名・中島才喜・寺田光宏：実感を伴った理解を図る理科学習，岐阜聖徳学園大学教育実践科学研究センター紀要，12，61-70，2009.

荻野伸也・久保田善彦・桐生徹：小学校4年生の水への熱の伝わり方の概念形成に関する事例研究－「もののあたたまり方」単元における概念の関連から，理科教育研究，55（1），27-36，2014.

清水誠・山崎麻美：現象を可視化することが規則性の発見に及ぼす効果－葉のつき方の学習を事例として－，科学教育研究，38（1），21-26，2014.