

小学校理科「水の温まり方と水の動きの問題」

Analysis of Elementary Learning of Water Heating and Movement with the Injection Mapping Experiments

○加茂川恵司^{*1}, 菊地洋一^{*2}

Keiji KAMOGAWA^{*1}, Yoichi KIKUCHI^{*2}

^{*1}東邦大学理学部 (非), ^{*2}岩手大学教育学部

^{*1}Faculty of Science, Toho University, ^{*2}Faculty of Education, Iwate University

[要約] 小学校理科4年で学ぶ水の温まり方単元では、熱せられた水の動きをめぐる様々に異なるアプローチや理解・議論が混在している。本研究はこれまで構築してきた注入観察実験法で得られた知見を俯瞰的に眺めることにより、水の温まり方と水の動きについて学校実験器具に準拠しつつ知見を整理することを意図した。それにより、ピーカーや試験管実験では“水は熱せられて全体的に速やかに循環する”という共通の基軸が見出された。一方熱水が循環する時の回転や滞留の動きは概念的な正誤でなく、熱源の大きさなど加熱の設定で変わる形態差であることが示された。また熱せられた水は周りの水に混じり合い速やかに冷却されることがいくつかの観察結果から見出された。多様な観察やWEB情報はこの基軸と多様性を通して統合的に捉えることができる。

[キーワード] 小学校理科, 水の温まり方, 水の動き, 注入観察法, 膨潤, 基軸と多様性

I. 問題の所在

小学校4年で学習する「ものと水の温まり方」は教師と児童にとって触れ易い課題であり、多彩な取り組みが授業で行われている。良く見られる基本的な構成要素は次の2つである。

[1]熱せられると水は上から温まる,

[2]熱せられると水は移動する,

どちらも目には見え難い水の変化を可視化して捉える展開が軸となる。[1]では温度計の複数配置の他、示温インク(シート)・ヨウ素デンプン反応液や白濁する洗剤など、ある温度で相転移する色材料が良く用いられている。[2]では茶殻など固体粒が水の動きを知るために添加されている。これらを観察し話し合いや思考を経て水の温まり方の考え方に結び付けてゆく。

これらの教材には教師を困らせる側面がある。[1]の示温インク溶液は色が濃く内部の色合いは分かり難い。また相転移現象は特定の温度域でのみ起こり、その外の高温度域や低温域で色は変化しない。色の濃さは示温インクをカプセルや寒天に封入して解消できる。ただ色変化は転移温度に限定され、担体の浮き沈みと必ずしも連動はしない。[2]で固体粒は水と共に熱せられて上昇し下降する。児童はこれを「水は回転しながら温まる」と捉える傾向が良く知られている。ただ粒は密度差から自重で浮遊沈降する性質がある。そこで「回転説」は誤った概念であり、

熱水は降下せず上層に留まる滞留説(簾説)を正しい理解とする指導がある。回転説への対応は地域(教科書)や教師・研究者によって様々である。次のように整理できる。

【回転説を児童の主体的な学びと評価する授業】

最も良く見られる。「自重で沈む」課題についてはタバスコなど沈み難い素材を用いる工夫例がある。

【回転説を誤りとして滞留説へ誘導修正する授業】

大きな影響を与えたのは勝俣・栗田(1981)である。教員研修で指導する例(山形市ほか)や積極的に熱画像カメラやその資料を活用して習得を図る例がある。回転説を修正させる授業も実践されている。

【上から温まる観察や知識を重視する授業】

水の下降する動きよりも温度に着目し、感熱シートや温度計を並べて観察する実践などがある。近年は熱水の上昇を確かめるため、熱水入り容器を水中で開栓する、熱水と冷水の仕切板を外して見る例がある。さらに密度の観点から熱水の重さや体積を測る論理的な授業もある。

このように水の温まり方と動きをめぐる授業の観点は地域により授業者により様々に異なっている。また回転説を誤りとする研究や指導・批判が存在し、その見方は教科書の図にも反映されている。一方で、各現場でなされた実験や児童の観察はそれぞれの正統性を持っているはずである。本研究では異なる結果や理解にこの学習の本質があると考えられる。

近年この多様性に新たな動きが加わった。まず WEB 資料の拡大があり多様な例示が存在する。次に主体的対話的な学習の伸展がある。児童の「主体的で深い学び」が生まれ、時にはそれが「対話的な学び」の中でクラスに共有されない場面も見受けられる。こうした状況から、本研究では水の温まり方学習について俯瞰的に捉えなおし、多様な見方に橋を架ける必要があると考える。それには学校で行われている実験手法に準拠しつつ柔軟に観察できる方法が必要である。我々はこれまで水の温まり方について「注入観察法」を構築し観察を重ねてきた(加茂川・菊地, 2018 ; 同, 2019ab)。本報告ではこれまでの知見を整理し、それに基づいて水の温まり方と動き学習の持つ課題を整理し理解を試みる。

II. 注入観察法による基礎的知見

1. 方法

水の動きを見るために着色液をスポイト等で注入して観察する授業は以前から WEB に散見される。ただ詳しい報告は見られない。本研究の方法を図 1 に示す(加茂川・菊地, 2018 ; 同, 2019ab)。注入液を使い捨て注射筒に 0.5~1 mL 採り油用チューブ等をつないで先端を見たい場所に保持し、見たい水温でゆっくり注入した。配置図は光散乱で見える場合のもので、吸収色の観察は室内光照明で良好であった。加熱はまず直火でなくホットプレートや湯煎で行った。画像と温度・時刻の同時記録はタブレットカメラで行われた。注入液は表 1 のように各種試みた。

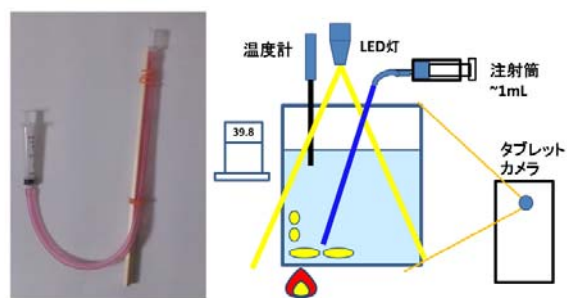


図 1. 注入観察法の器材(左)と配置図(右)

2. ビーカー結果の分析

500 mL ビーカー水で転移温度より上の 58 °C で注入すると液は壁に沿って上昇し、表面に達した後水平に広がった。その後反転し概ね回るように降下した。同様の動きは転移温度下の 32 °C でも見られた。

表 1. 注入素材例

素材の種類	濃度	特徴
示温インク	25倍希釈	温度応答性微粒子
水性絵の具		着色微粒子
食用色素液(赤)	30 mg/50 mL	透明
メチレンブルー溶液	10 mg/100 mL	透明
コーヒーシュガー溶液		透明密度大
タバスコ希釈液	5倍希釈	小粒子分散
過マンガン酸カリウム	0.005M	透明
粉末コーヒー液	3 g/20 mL	概ね透明

このような速やかな回転と拡がりには原液の注入(水量 1.5 L)でも明瞭に動的に捉えられた(図 2)。

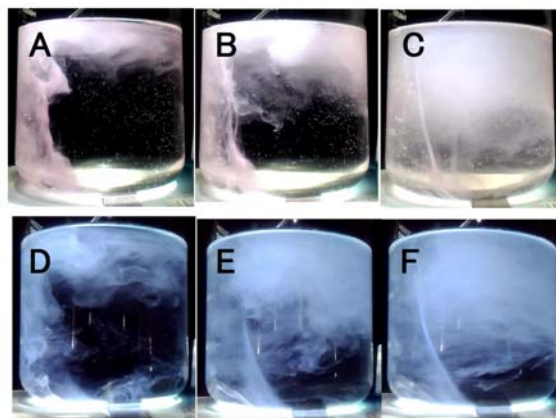


図 2. 1.5 L 水に対する 1 mL の示温インク原液注入 (上: 50 °C 水に注入 A:17 秒, B:27 秒, C:1 分経過, 下: 30 °C 水に注入 D:30 秒, E:1 分, F:1 分 25 秒経過)

注入液の動きは以下に要約される。

- ①表面層に上昇し水平に移動する
- ②表面から下方に回るように速やかに移動する
- ③下部に移動するに伴い膨潤して薄まる

これまで「粒の沈降は自重により水の動きではない」という指摘や懸念があった。どの物質も水との密度差があり温度次第でいずれ浮か沈むことになる。①②より、表層にて水平移動を十分に示すものは添加剤として観察上有効と判断できる。この指針では、コーヒーシュガー溶液は上昇しても表面を渡らずに直ぐに沈むので動きを見るには不十分であった。

②③で、注入液は 1~2 分程度で速やかに水の下層に達して拡がるが、この間に表層温度はさほど上昇していなかった。これは高温の熱水が積層しゆっくり低温の水を押し下げるのではなく、循環する動きを繰り返しながら少しずつ温まってゆくことを意味する。また膨潤して薄まる変化は熱水が周りの水に混入してゆく分散を示す。膨潤で熱水塊が冷却され

る(周囲は温められる)ので、温度が下がり高温の熱水に対しては容易に下降に転じることになる。

3. 試験管結果の分析

試験管を傾けて熱すると高温色インクの上昇が見え易く授業で用いられる。そこで湯煎により水温を転移点下の 22 °C にて設定し注入した(図 3)。インク液は色変化せずに上壁に沿って上昇し同時に下壁のインクが下降した(A)。表面に達すると反転し(B)、下側の壁に沿って下降(C)、その後再び先頭が再上昇した(D)。よって高温の水でなくても上昇し循環する動きが確認され、表面への最初の到達は温度ジャンプとして検知された。転移温度より上の 45 °C 注入ではインクが高温色にて同様に上昇→下降→再上昇を示した。上層に留まる滞留は見られなかった。

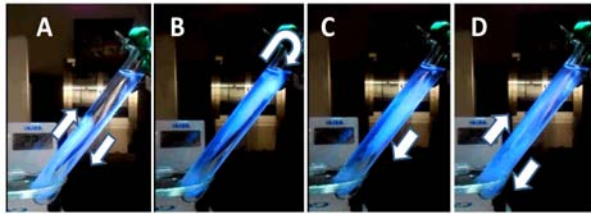


図 3. 暗視野照明下の低温相 25 倍希釈インクの上昇 (A:開始後 10 秒, B:18 秒, C:23 秒, D:31 秒)

なお試験管の中央部を熱した場合、循環は加熱点上部でのみ起こり、底部に混入した液塊は移動しなかった。これらの結果の要点は

④液は熱せられて表面に上昇後下降して循環

⑤加熱部でない場所の液も上昇と連動して下降

である。循環する動き④は、熱せられた水が管の上壁に集まって上昇流路が形成され残る下側が下降流路となって明瞭に現れたと理解される。また再上昇まで良く見えるのは狭い管内で膨潤が遅い結果と見られる。再循環までの時間は数十秒程度と短く、循環を繰り返しながら水全体が少しずつ温まっている。このような循環する温まり方については、「上から温まる？」は最適な問いや表現ではない。

以上より、熱せられた水が容器の中で回転するか表面に滞留するかは正しい概念か誤概念かではなく、加熱の条件により異なる形態の違いと捉える必要が出てきた。加熱条件を適切に調整すれば、教師が意図する通りに回転や循環で温まる姿を見る観察に、あるいは表面に熱水が滞留する姿を見る観察に至ると考えられる。

III. 加熱による動き方の変動

1. 方法

前章で回転的な動きが見えたホットプレート加熱は広さがあり、一方ガスコンロ加熱は狭い加熱ができる。循環の動きが見えた試験管では加熱面積は水に比べて同等に広い。この要素として、加熱点の相対的な広がり(次元)と加熱の強さが挙げられる。そこで、授業実験と同様の器具や設定を用いて「広い加熱」・「狭い加熱」による温まり方を比べた。

注入は前と同様で、加熱に理科実験用カセットコンロをレベル 1.5~2 で使用した。炎が底面の半分を温めるよう半径の 1/2 位置にビーカーを配置してホットプレートの半底加熱のモデルとした(図 4)。またバーナー(30φ)がビーカー壁の直下になるようにビーカーを配したものを端加熱のモデルとした。



図 4. 直上から見た半底加熱のビーカー配置

2. 結果の分析

半底加熱の実験(図 5 上)では表面を移動した注入インク液は回るように下降し、渦巻きのように液の混入しない中央領域(破線円)が観察された。これに対して、端を加熱した場合液塊は表層から概ね並んで下降した。熱水移動のポイントは以下となる。

⑥加熱点の相対的な大きさにより動き方が変化

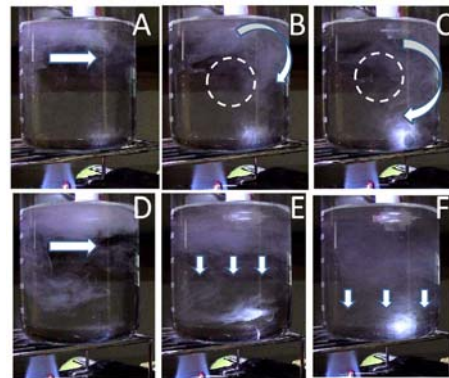


図 5. 加熱位置による比較(上, 半径 1/2 配置) A: 9 秒, B:12 秒, C:15 秒. (下, 端加熱) D:14 秒 E:28 秒 F:38 秒. 破線円は注入液が回転で入らない領域。

次に脱水和型の相転移を伴う高分子系洗剤溶液は転移温度で濁りを生成して見易く、水の動きの観察に用いられている(新潟県, 2004; 佐伯・木村, 2018). その輪郭は転移温度の等温境界線を示す(太田, 2000). 熱水の動き方が加熱設定によって変わるのであれば、相転移型の高分子洗剤系でも似た推移が起こるはずである。そこでエマル洗剤希釈液を用い半底加熱と端加熱の比較を行った(図6). 半底加熱では回転する動きと白濁塊の混入しない渦の中心(破線円内)が観察された。一方端加熱では滞留して下降する動きが見えた。ただし表層から並んで下降せず、反対側の壁に達してから折り畳みや波のように逆に進み概ね水平に境界を形成しつつ下降した。

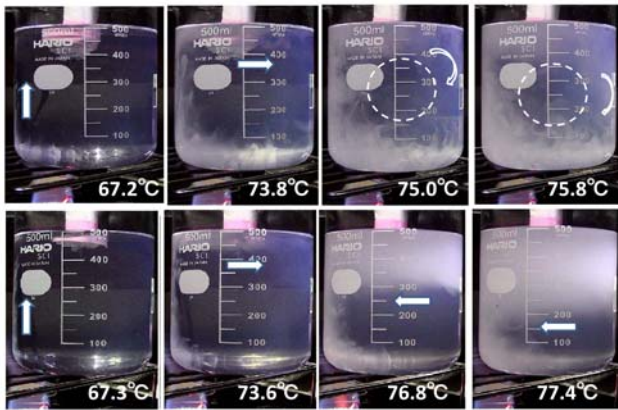


図6. 加熱位置によるエマル 20 倍希釈水溶液の温まり方の違い。(上)半底加熱, (下)端加熱。

IV. 冷却過程の存在

1. 熱水注入の観察

熱せられた水の冷却過程は学習で取り上げなくても良いが、現象としては一つのもので自然に視野に入ってくる。注入観察法で冷却過程は、注入スポットが移動して膨潤し薄まってゆく変化として現れる。この膨潤はタバスコなど粒子の添加では粒の動きが見えずに概要はやや分かり難い。

膨潤の存在は熱水の浮遊実験で偶然に検証された。近年熱水の浮上は熱水と冷水をビーカー内で仕切りそれをはずすなどの演示実験で授業に導入されている。本研究では冷熱水を大きく上下反転させるのではなく、注入法に沿ってチューブを介して熱水を穏やかに表面に加える手法をとった。

注入液は表面に穏やかに注入後一度水中に容易に沈み、それから膨潤して浮上することが観察された。90 °C加熱の注入液 15 mL は浮上して約 200 mL に拡

がり、中層との温度差+4.7 °Cの水平層を形成した。この差は浮遊層の見かけ体積 200 mL から予想される平均的な温度上昇+4.8 °Cに概ね近い。62 °C注入液では一旦深く沈んだ後浮上し、より膨潤した温度差+1.7 °Cの層を形成した(図7)。



図7. 加熱なし 500 mL 水への注入(左: 70 °C アクリル絵の具ろ液注入+24秒, 中: 90 °C 食紅液 15 mL 注入+2分50秒, 右: 62 °C 食紅液 15 mL 注入+40秒)

興味深いことは、熱水がそのまま再浮上せず膨潤を伴い、さらに 62 °C熱水の膨潤が 90 °Cの熱水よりも大きい点である。熱水側が上層となり高温ほど浮力の増すことは予想できるが、温度差が小さい熱水ほど周りに混入して冷却され下降し易くなる傾向が見出された。これまで表面に浮上した熱水は冷却され難く沈み難いと考えられてきたが(勝俣・栗田, 1981), この膨潤すなわち周りの水への混入分散が冷却を伴い下降と熱の移動を促すと考えられる。

2. 高分子洗剤による冷却過程の観察

高分子洗剤の観察(図6)で興味ある特徴は、白濁した液胞が透明に戻る変化である。これは前述の膨潤で速やかに熱水塊が冷却されて転移温度 74°Cを下回る境界で起きている。そこで加熱側壁から白濁塊の観察を行った(図8)。初め加熱点近くで白濁塊が発生し上昇するが直ちに消失を繰り返した。全体に水温が上がるにつれて熱水塊が持続して伸び、後の塊ほど表層に達し下降に至った。消失は白濁塊の冷却(周りは熱せられる)を現すので、冷却が加熱点

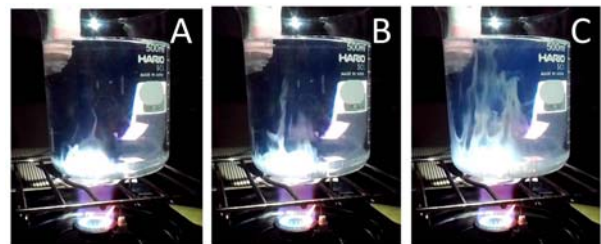


図8. 半底加熱側から見たエマル 希釈水溶液の温まり方。A: 加熱から 7 分 17 秒, B: 8 分 43 秒, C: 9 分。

から表層・中層に至るまで各領域で起きていることが分かる。

3. ヒーターによる直接加熱

熱水の動き方を変える要因として、加熱の強さも考えられる。電熱ヒーターによる直接加熱は強い加熱が可能となる。強い加熱では高温の熱水が浮上して膨潤は後退し滞留し易くなる。図9は1.5 Lの水と示温インク及びコイルヒーター（124 W 相当）による注入観察を示す。リング部を壁に平行密着させ、注入液が留まるようアルミニウムカップで囲んだ。インク液は 43 °C 表層に上昇後横に波打ちつつ概ね水平に下降し、底部に入らない領域が残った。エマルジョン水溶液でも同様に白濁層の滞留が見られた。

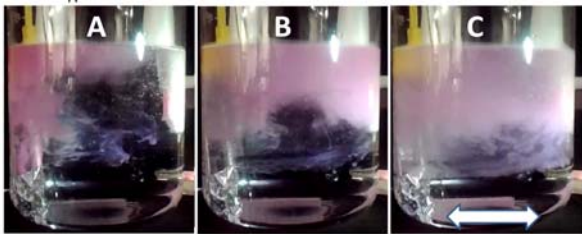


図 9. 直接加熱の示温インク原液の注入実験(A: 注入後 25 秒, B: 56 秒後下降へ, C: 90 秒後下降)

ポイントは熱水の先端が横に波打ち下降する形で滞留が現れる点と底層部には注入液が移動しない点である。これらの特徴は、いわゆる“外焚き型の風呂”でなぜ上部が熱く下部が冷たいかを説明する。外焚き配管により水は高温まで熱せられて浴槽に戻るので、速やかに表面に浮上し膨潤少なく高温で滞留し易い。次に図9同様、加熱点である外焚き釜の吸水口より下に熱水の移動しない領域が生じて冷水層が残る。ビーカーの底加熱では水の回転や移動が速やかに全体に起きて下層に冷たい水は残らないので、“外焚き風呂の比喻”には注意が必要である。

4. 温度変化

「速やかな回転や移動」について更に水の温度差から検証した。図2の設定で表層の水温と中層の水温を測定した結果を図10に示す。約1°Cの差はあるが中層も同様に温度が上昇した。また図9のコイルヒーター加熱時の温度上昇でも中層は追随している(図11)。40 °Cの上層と中層の温度差は5.4 °C、時間遅れは100秒で中層が追随している。この時間差は注入液の速やかな回転時間93秒と符合しており、熱水が繰り返し周回しながら全体を少しずつ温めている

ことを意味する。「上から先に温まる」は「高温の上層・冷たい下層」を意味するのではなく、時間的な遅れが起きている。水を熱する間上層が下層より先に温まる資料はある(NHK,a)が、低層も温まってゆくことは着目されていない。また簾モデルのように熱水が冷却されずに表層から並んで降下してゆくのであれば、境界の一巡に対応して段階的な温度上昇が予想される。しかしそのような傾向は図10, 11では見当たらない。

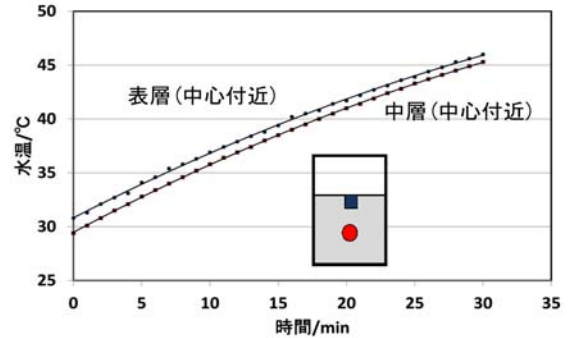


図 10. ビーカー半底加熱時の表層と中層の水温上昇

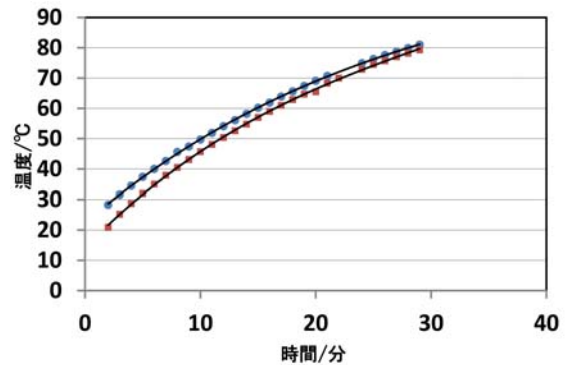


図 11. 内部ヒーター加熱時 (1.5 L 水の水のみの温度上昇, ●: 表層, ■: 中層)

V. 授業実験の参照

加熱の形により水の動き方が変わるとすれば通常

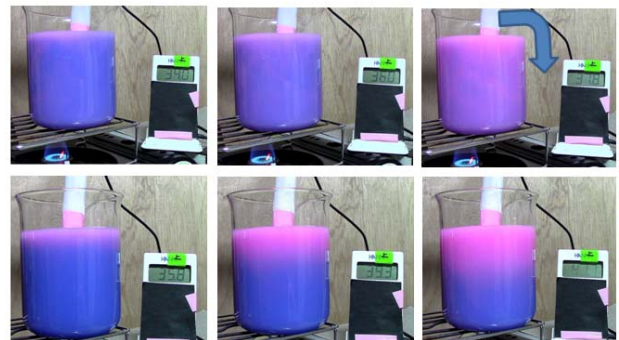


図 12. 加熱による示温インクの温まり方の相違. 上;半底加熱 34.0→37.8 °C, 下;端加熱 35.8→41.1 °C

の実験観察でも起きているはずである。25倍希釈示温インク溶液500 mLを加熱した結果を図12に示す。半底加熱では内部で移動し下降する様子がぼんやりと垣間見えつつ推移し、ある段階で液全体が一斉に高温色に変化した。一方端加熱では高温色の熱水の滞留が明瞭に現れた。従って溶液の観察でも、高温層の滞留は正しい観察・概念というより加熱条件により左右された姿の一つと捉える必要がある。

IV. 総合考察

本研究より注入観察法の長所として、

- 1) 様々な素材が使え、見た目の水らしさも残る
- 2) 暗視野光散乱で高感度に広い濃度域で追跡可能
- 3) 観察(注入)する水温と場所を任意に設定できる
- 4) 温度測定と連携ができる
- 5) 移動だけでなく膨潤(拡がり)が見える
- 6) 一つの熱水塊の時間経過が動的に追跡できるが確認された。本法を用いて試験管では循環する動きが、ビーカーでは条件により回転の動きや折り畳み的に滞留しつつ降下する動きが観察された。いずれも短い時間で一巡している。これらに共通する基軸として、「熱せられた水が上昇し、全体が回るように動いて(循環して)温まってゆく」が導かれる。全体を一つの動きとして捉えることが望ましい。「回る」形には幅があり、熱水の滞留、熱水のまま回る、熱水が周りの水に混ざって拡がりながら回る等の多様性がある。各々は実験条件に依存し、回転的な動きは水の面積に比べて広く熱する場合に増す傾向にある。IV章で見たように、「回転的な動きには膨潤による熱水の冷却が関わっている」と考えられる。なお大きいヒーターと微粒子を用いた実験で全体に回転する動きが動画公開されている(NHK,b)。

対流を流体力学的に分類し制御する実験や指導法もあるが、多くの現場では試験管やビーカーの実験状況で水の温まり方を捉える必要がある。授業ではそれらの異なる観察を組み合わせる水の温まり方の考えを構成することが多い。また近年児童の異なる見方を対比させて対話的に検証する授業展開が進んでおり、「回転説」「滞留説」など多様な考えと議論が現れて来る。児童の表現によっては「回る」意味にも幅がある。教師にとって工夫の要る場面であるが、多様な観察から知を深める有効なポイントとして次の2点が考えられる。

(1) 相違の出た観察に、共通する知見は何か？

(2) その(班の)実験の観察ではどれが妥当か？

これは授業の目的知識を共通する基軸に抑え、回り方などの多様性については理論的に予め固定せず“その実験と観察”に立脚させる提案である。

共通基軸と多様性で捉えることは様々なWEB情報を活用する上でも有用である。非イオン系界面活性剤水溶液を用いた加熱では、回転して温まる観察・気づきが知られていた(新潟県2004)。一方で同種の実験が児童には滞留と捉えられた報告がある(佐伯・木村, 2018)。実験条件で振り返ると、前者の記録では三角架が使われており加熱点に広さがある。このため半底加熱に近く、回転する動きが強まったと推察される。一方後者の報告ではビーカーの端を直熱しており、高温度の熱水が速やかに浮上して滞留を促したと推察される。これらの情報は一見異なるけれども、共通する基軸と実験条件に依存する多様性に沿って統合することができる。

参考資料

- 太田哲也(2000)：非イオン界面活性剤を用いた対流と熱伝導の三次元的視覚化，新潟県立教育センター平成12年度理科長期派遣研修報告，84-85。
- 勝俣・栗田(1981)：対流現象に関する一考察，日本理科教育学会紀要，22，2，45-51。
- 加茂川・菊地(2018)：注入観察法による水の温まり方の学習，日本科学教育学会第42回年会論文集，299-300。
- 加茂川・菊地(2019a)：現象を粗視化する学習への教材構築，日本科学教育学会研究会研究報告，33，4，119-122。
- 加茂川・菊地(2019b)：注入観察法を用いた水の温まり方の再考察，日本理科教育学会第69回全国大会発表論文集，436。
- NHK(a)：水の温まり方 | クリップ | NHK for School.
- NHK(b)：「水のあたたまり方 | ふしぎエンドレス 理科4年 |」，NHK for School 第19回，(2020)。
- 佐伯・木村(2018)：洗濯用合成洗剤を使って水の温まり方を調べる実験—小学校理科の第4学年「金属、水、空気と温度」において—，理科教育学研究，58，3，231-238。
- 新潟県(2004)：もののあたたまり方，地区理科教育センター資料：理科指導資料集第25集，67-78。