

材質の異なる固体の簡便な熱膨張実験法 —小学4年「ものの体積と温度」における「深い学び」に関連して—

村上 祐*、菊地 洋一**、武井 隆明**

(2020年2月21日受理)

MURAKAMI Tasuku, KIKUCHI Yoichi, TAKEI Taka-aki

An Easy Experimental Method of the Thermal Expansion on Solids of Different Materials

1 はじめに

(1) 学習指導要領の改訂と理科の見方・考え方および深い学びについて

2017年告示され、18年から施行された小学校および中学校の新学習指導要領では、「主体的・対話的で深い学びの実現に向けた授業改善」が求められている。そして、指導要領解説(理科編)の「指導計画の作成と内容の取り扱い」においては、「理科の見方・考え方」を、習得・活用・探究という学びの過程の中で働かせ、深い学びの実現に向けて取り組むことの重要性が指摘された¹⁾。新学習指導要領で「見方・考え方とは、教科の特質に応じた物事を捉える視点や考え方」と整理されたこと受け、「理科の見方・考え方」は次のように変わった。「理科における見方」として、たとえば、「エネルギー」領域における自然の事物・現象を主として量的・関係的な視点で捉えること、「粒子」領域では事物・現象を主として質的・実体的な視点で捉えることなど、理科を構成するそれぞれの領域における特徴的な視点が示された。また、「理科における考え方」とは、これまで理科で育成を目指してきた問題解決の能力(課題の発見・探究・解決)を基に、子どもが問題解決の活動の中で「比較したり、関係付けたり、条件を制御したりするなど、科学的に探究する方法を用いて、事象の

中に何らかの関係性や規則性、因果関係等が見出せるかなどについて多面的に考えたりすることとされた²⁾。

(2) 小学校4年「ものの体積と温度」における学習内容の変化

このような新学習指導要領における見方・考え方に基づき、本研究の主題に関わる小学4年「ものの体積と温度」の単元でも学習内容に変化が見られる。「金属、水及び空気は、温めたり冷やしたりするとそれらの体積が変わる」というこれまでの内容に、新学習指導要領では「その程度には違いがあること」も加えられた。これは粒子領域の見方である「質的」という点を重視する上で追加された。すなわち、金属、水、空気を温めたり冷やしたりしたときに、子どもたちが「体積変化という質的な視点」を働かせることができたならば、これらが温度によって体積変化するだけでなく、それぞれの体積変化の程度が違うことにも気付くはずだということと説明されている。また、そういった点を子どもたちに気づかせることが粒子領域の質的な見方を成長させることにつながるとしている³⁾。しかし、これまで教科書に記載されてきた実験では、その気づきを確認することができない。

*岩手大学名誉教授、**岩手大学教育学部

(3) 結果を比較できず戸惑う子どもたち

以前、著者らの研究グループが報告⁴⁾したように、この単元を教科書通りに授業を進め、試験管とガラス管を用いた空気・水の膨張実験とバーナーで加熱する金属球膨張器具による実験を終えた後、「空気・水・金属で、温度変化による体積変化の大きい順」を質問したところ、「空気」が最も変化が大きいことは誰でも理解していたが、「水」と「金属」については戸惑いがみられ答えられなかった。その理由は「実験方法が違う」、「実験温度が違う」、「観察方法が違う」などであった。別の実践授業⁵⁾でも、金属球の実験でこの単元を終わると、子どもたちに体積変化の順序づけに対する戸惑いが残ることが確認された。それでは、これらの授業で子どもたちは、上記の「体積変化という質的な視点」を働かせることができなかったのだろうか。

科学の基本として、いろいろな実験データを比較して結論を導く際には、実験条件を厳密に吟味することが必要である。本単元の「ものの温度と体積」における教科書の実験は、試験管や丸底フラスコ内に入れた空気や水を温水や氷水に浸けて、温度変化による体積変化を観察している。温水の温度は、高温でも60~70℃で行われる。一方、金属の温度による体積変化を測定するための器具は、空気や水の場合と全く異なる。常温である大きさの金属輪を通った金属球は、60~70℃の温水に浸けても金属輪を通るが、アルコールランプやガスバーナーで加熱するとその金属輪を通らなくなるという実験である。この実験によって、70℃に温めても膨張しない（と見える）金属も高温にすると（アルコールランプの炎温度は600℃、ガスバーナーでは1,000℃以上にもなる）膨張し体積が増えることを確認できる。しかし、これらの空気、水、金属の実験から、温度による体積変化の順序づけができるだろうか。子どもたちが戸惑っているように、空気・水と金属では、実験器具や実験温度などの実験条件が全く異なっているため、データを比較できないのである。子どもたちは、データを比較して結論を出すときには、実

験条件が同じでなければならないということを体得していたのである。

このように、これまで教科書に記載されてきた実験では、空気・水の実験結果と金属の実験結果を比較することが不可能であり、「金属・水・空気は、温度によって体積変化するだけでなく、それぞれの体積変化の程度が違う」という結論は下せない。また、上記の新学習指導要領における理科学習の考え方（比較したり、関係付けたり、条件を制御したりするなど、科学的に探究する方法を用いて、事象の中に何らかの関係性や規則性、因果関係等が見出せるかなどについて多面的に考えたりする）に明らかに合致しない。

(4) 根拠をもって比較できる実験

金属・水・空気の温度による体積変化を比較し、その程度を議論するためには、実験装置を統一する必要がある。我々の研究グループは、空気・水の体積変化に用いられる実験を金属にも適用した授業実践を行い、子どもたちの戸惑いを解消させることに成功した^{4,5)}。その実験は次のようである。「空の試験管（空気が入っている）」、「水を入れた試験管」および「金属球と水を入れた試験管」を準備し、それらを同時に温水に浸け、体積変化（膨張）を観測する。変化の大きさは「空気」>「水」>「水+金属球」となった。これにより、「空気」の体積変化が他より格段に大きいことが改めて確認できる。それとともに、「水だけの方が、水+金属球より体積変化が大きい」という事実から、「金属は水より体積変化が小さい」ことが考察される。このように、「温度による体積変化順は空気、水、金属となる」と順序立てて思考できる。すなわち、実験器具および実験条件を統一することによって、根拠をもって水と金属の膨張を比較でき、正しい結論を得ることができた。なお、この実験だけでは、金属の体積が変化しているかどうか判断できない。「水より小さいが、金属もさらに高温では膨張する」ことを金属球膨張器具で確認することも、子どもたちの確かな理解には必要である。

2 本研究の目的

学習指導要領では、育成すべき資質・能力の一つである「問題解決力」は学年ごとに整理されており、小学4年では「主に既習の内容や生活体験を基に、根拠のある予想や仮説を発想する力」とされている。「ものの体積と温度」の单元では、物質の3状態：気体・液体・固体の代表として、空気・水・金属を選んで、それぞれの温度と体積について実験し、議論している。しかし、生活体験でよく目にする固体には、金属以外にもいろいろな材質の物がある。その中では、金属と異なってバーナーで加熱できない材質も多い。そのような物でも、上述の「試験管に固体と水を入れる」実験法を用いると、「水+鉄球」と同じように温度上昇における膨張の大きさを比較できる⁶⁾。本研究では、この実験方法を発展させた自作の実験装置を用いて、材質の異なる幾つかの固体の熱膨張を簡便に、しかもより精密に測定し、その結果から、身近にあり教科書にもとり上げられている「ものの体積と温度」関連の事象・現象を理解し、この単元の深い学びにつなぐことを目的とする。

3 実験装置および実験操作

(1) 実験装置

実験装置の全体像を図1に示す。固体試料と水を入れる試験管として、25 mLの肉厚試験管を用いる。この試験管内部の温度を均一にコントロールするため、試験管全体が水に浸かるように1 Lトールビーカーを用いる。ビーカーの上部に6本用試験管立て(自作)を取り付ける。

ビーカー内の水を加熱するためホットマグミキサーを使い、ビーカー内の温度を一様にするため攪拌子で水をかき混ぜる。6本用試験管立てにセットした1本の試験管は水で満たし、そこにデジタル温度計のセンサーを装着して温度を測定する。他の試験管(最大5本まで)には固体試料と水を入れ、温度変化に伴う体積変化を測定する。その体積変化を精密に測定するため、試験管の上にゴム栓付き1 mLメスピペットを立てる。1 mLメスピペットを用いることで、体積の変化を

0.001 mLまで目測できる。試験管に入れる水は、一度脱気した脱イオン水を用いる。

なお、実験に用いた肉厚25 mL試験管は硬質ガラス(パイレックス)であり、その線膨張率は $2.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ と小さい。このため、温度上昇における試験管内容積の変化を無視して取扱う。



図1 測定装置の全体図

(2) 固体試料

用いた固体試料は次の5種類である。

スチール球(SUS304) $\phi = 5.0 \text{ mm}$ (Stainless Used Steel 18Cr-8 Ni)、亜鉛粒(粒の大きさは様々)、ガラス球(ソーダガラス) $\phi = 5.0 \text{ mm}$ 、PP(ポリプロピレン)球 $\phi = 5.0 \text{ mm}$ 、金魚鉢用小石(石の種類や形状・大きさは様々)

(3) 実験操作

- ①肉厚25mL試験管、ゴム栓付1 mLメスピペット、固体試料の質量を天秤で測っておく。固体試料は、試験管内で占める体積ができるだけ多くなるように、それぞれ準備しておく。
- ②固体試料を試験管に脱気水とともに入れ、1 mLメスピペット付きのゴム栓をして、1 Lトールビーカーにセットした試験管立てに差し込む。
- ③試験管全体が浸かるように、ビーカーに水を入れる。
- ④ホットマグミキサーでビーカー中の水をかき混ぜながらゆっくり加熱する。
- ⑤試験管中の水温をデジタル温度計で測定しながら、固体試料と水を入れた試験管に装着したメ

スピペットの水位を読み取る。

- ⑥15℃（あるいは20℃）を起点として、5℃上昇ごとに水位を読み取り記録する（60℃付近まで）。

(4) 実験操作で注意すべきこと：試験管内で発生する気泡の除去、試験管内の水の質量決定

試験管に入れる水は一度沸騰させて常温に戻した脱気脱イオン水を使うが、固体試料を入れ高温にしていくにつれ、泡が生じる。これは、固体試料の表面に付着していた空気が温度上昇とともに気泡となったと思われる。気泡が生じると体積変化の読み取り誤差を大きくするため、気泡を除去する必要がある。その手順を以下に示す。

- ①固体試料と脱気水を入れた試験管をトールビーカーに設置する前に、一度約70℃の熱水にしばらく浸ける。
- ②固体試料に気泡が発生したら、試験管にガラス栓をして固体試料とともに振ることによって、気泡を試験管の最上部に移す。

- ③ガラス栓の代わりに、メスピペット付のゴム栓をしっかりと嵌める。この際、水が溢れても構わないが、試験管内に気泡が残らないようにする。

- ④メスピペット付のゴム栓がついたまま、試験管を試験立てに立て、室温でしばらく放置する。

- ⑤室温に戻ったら、試験管についている水滴等を拭き取り、全体（試験管、ゴム栓付メスピペット、固体試料、水）の質量を測る。この値から（3）-①の値を差し引くことで、試験管内の水の質量が決定される。

4 実験結果と考察

(1) 本装置で測定したデータの信頼性

上記のような操作で得たデータが信頼できるかどうかを、試験管に水だけを入れた時の膨張で確認した。その結果を表1および図2に示す。試験管に入れた水が32.08 gの場合は15℃を起点とし、31.30 gの場合は20℃を起点として測定した。どちらの実験も、メスピペットの読みから得た増量と理論的膨張（水の密度の温度変化⁷⁾から算出

表1 本実験の信頼性（確度）

A：水 32.08g および B：水 31.30g の熱膨張の測定と密度変化による理論的増量の比較（注）

温度 (℃)	水の密度 (g/cm ³)	A：水 32.08 g			B：水 31.30 g		
		測定増量 (mL)	密度による 体積 (mL)	理論的増量 (mL)	測定増量 (mL)	密度による 体積 (mL)	理論的増量 (mL)
15	0.99914	—	—	—	—	31.33	—
20	0.99823	—	32.14	—	0.029	31.36	0.03
25	0.99706	0.037	32.18	0.04	0.068	31.39	0.06
30	0.99565	0.083	32.23	0.09	0.114	31.44	0.11
35	0.99403	0.135	32.27	0.13	0.165	31.49	0.16
40	0.99221	0.205	32.33	0.19	0.223	31.55	0.22
45	0.99021	0.263	32.40	0.26	0.288	31.61	0.28
50	0.98803	0.332	32.47	0.33	0.359	31.68	0.35
55	0.98569	0.410	32.55	0.41	0.438	31.75	0.42
60	0.98320	0.493	32.63	0.49	0.514	31.84	0.51

（注）水の質量は小数点以下2桁（有効数字4桁）なので、密度変化による体積も同じ小数点以下2桁にした。

は、よく一致した。このことから、本実験で得られるデータはかなり高い信頼性（確度）を持っているといえる。

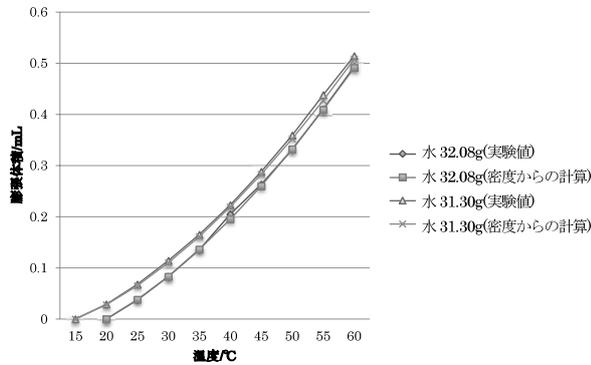


図2 測定データの信頼性—水の熱膨張から—

表1の水30.08gと31.30gそれぞれの測定増量と密度の温度変化による理論的増量の比較

(2) スチール球の熱膨張

試験管にスチール球（SUS304）128.22gと水15.51g（水の質量は上記3（4）-⑤のように決定）を入れ、15℃を起点として体積膨張を測定し

た結果を表2および図3に示す。メスピペットで測定される増量は全体「スチール球+水」の膨張によるものである。スチール球だけの膨張は、全体「スチール球+水」の膨張から水の膨張分（水の密度の温度変化から算出）を差し引いたものである。この実験で、スチール球も温度上昇に伴い膨張していることがわかる（15℃から65℃への温度上昇で0.11 mL膨張）。試験管に入れたスチー

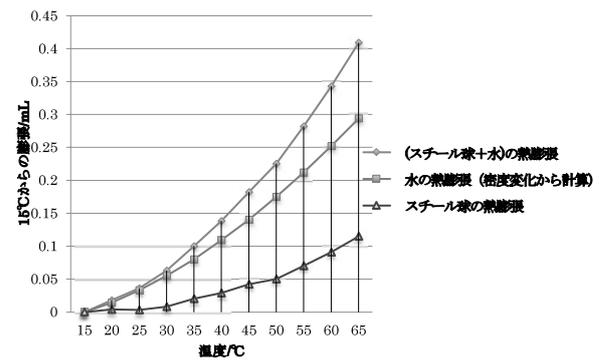


図3 スチール球の熱膨張

表2の測定増量、水の密度変化による増量およびそれらから計算されたスチール球の体積増

表2 スチール球の熱膨張の測定と計算

(スチール球128.22g + 水15.51g) の温度による体積増とスチール球の膨張 (注)

温度 (℃)	測定増量 (mL) ピペットの読み	密度変化による水の増量			スチール球 の膨張 (mL)
		水の密度 (g/cm ³)	水の体積 (mL)	水の増量 (mL)	
15	—	0.99914	15.52	—	—
20	0.018	0.99823	15.54	0.02	0.00
25	0.036	0.99706	15.56	0.03	0.01
30	0.063	0.99565	15.58	0.06	0.00
35	0.100	0.99403	15.60	0.08	0.02
40	0.138	0.99221	15.63	0.11	0.03
45	0.182	0.99021	15.66	0.14	0.04
50	0.225	0.98803	15.70	0.18	0.05
55	0.282	0.98569	15.74	0.22	0.06
60	0.343	0.98320	15.78	0.26	0.08
65	0.409	0.98056	15.82	0.30	0.11

(注) 水の質量は小数点以下2桁（有効数字4桁）なので、密度変化による体積も同じ小数点以下2桁とした。

ル球全体の体積は15℃で約16.2 mLであったので、15℃から65℃へ温度上昇に伴い約0.7%体積が増えたことになる。同じ温度範囲では、水は約1.9%膨張していた (15.52→15.82 mL)。

(3) 材質が異なる固体の熱膨張

以上と同様にして測定した5種類の固体試料の熱膨張の様子を図4に示す。図4の縦軸は、15℃を起点としたそれぞれの固体の膨張量を示している。しかし、試験管に入れたこれらの固体試料の体積が異なっているため、それぞれどれだけの割合で膨張したかを正確に比較できない。表3は、15℃における固体の体積から何%膨張したのかを計算した結果である。図4および表3から、これら

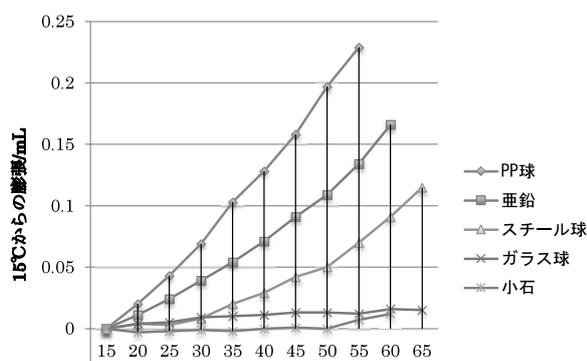


図4 5種類の材質が異なる固体試料の15℃を起点とした熱膨張

の固体試料の熱膨張は、小さい順に「小石～ガラス球 (ソーダガラス) < スチール球 (SUS304) < 亜鉛粒 < PP球 (ポリプロピレン)」となった。この結果は固体の材質 (セラミックス、金属、線状ポリマー) を反映しており⁸⁾、次に示すそれぞれの線膨張率 (20℃、単位 10^{-6}K^{-1})⁷⁾の順と一致した。

ガラス (ソーダガラス)	8.5~9
スチール (SUS304)	14.7 (17.3) ⁹⁾
亜鉛	30.2
PP (ポリプロピレン)	58~102 ⁹⁾

今回試料として用いたスチール (SUS304) は、鉄を主体とした合金 (18% Cr, 8% Ni) で、錆びにくい。鉄の膨張率は $11.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ で、亜鉛に比べてかなり小さい。同じ金属でも温度による体積変化が異なることが、本実験でも確かめられた。金魚鉢用小石にはいろいろな材質 (鉱石種) が含まれているとみられるが、これらはセラミックスに分類され、膨張率は小さい (例えば、花崗岩の線膨張率は $4 \sim 8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ で、ソーダガラスと同程度である)。また、ポリプロピレンの膨張率は大きく、15℃から55℃まで約1.5%膨張し (14.53 mL → 14.75 mL)、同じ温度範囲での水の膨張約1.4% (表1の数値から、31.33 mL → 31.76

表3 温度上昇 (15℃→60℃) による各物質の膨張割合

試料	試験管内質量 (g)	15℃での体積 (mL)	60℃での体積増 (mL)	膨張割合 (%)
スチール球 ^{*1}	128.22	16.17	0.08	0.49
ガラス球	42.91	16.18	0.02	0.12
亜鉛粒	102.92	14.42	0.13	0.90
小石	39.23	13.90	0.02	0.14
PP球	13.08	14.53	0.22 ^{*2}	1.51 ^{*2}
水 ^{*3}	31.30	31.33	0.51	1.63

*1 表2のデータから

*2 PP球は55℃までの膨張

*3 表1の水31.30gのデータから

mL) とほぼ同じであった。このように、本実験によって、固体の中にはいろいろな物質があり、温度による体積変化も様々であることが視覚的に観察できる。

5 単元「ものの温度と体積」の深い学びのために

「はじめに」にも述べたように、新学習指導要領の解説（理科編）は、深い学びの実現に向けて、「理科の見方・考え方」を習得・活用・探究という学びの中で働かせるよう指摘している。本研究の主題に関わる小学4年「ものの体積と温度」の単元でも、粒子領域の見方である「質的」という点を重視し、「金属、水及び空気は、温めたり冷やしたりするとそれらの体積が変わる」というこれまでの学習内容に、「その程度には違いがあること」も加えられた。これは、子どもたちが「体積変化という質的な視点」を働かせることで、温度によって体積変化するだけでなく、それぞれの体積変化の程度が違うことにも気づくはずだと説明されている。しかし、粒子領域のこの単元における「質的な視点」とは何か、必ずしも明確ではない。固体、液体、気体という異なる状態を考慮すれば、体積変化の程度の違いに気づくということなのだろうか。しかし、上に述べたように、固体（PP）でも液体（水）と同程度の体積変化をするものもあるのである。また、小学校4年の段階では、物質を構成する粒子およびその結合状態を全く学習していない。ましてや、その粒子の熱的運動に気づくはずがないと見るべきだろう。

本単元では、気体・液体・固体の体積変化の違いを、同じ器具を用い、同一条件下で観測させるという、科学の基本に沿った実験こそが重要である。しかし、これまで教科書で取り上げられてきた実験や、その改善・発展を目的とする研究¹⁰⁾は、同一器具・同一条件を満たしていない。教科書¹¹⁾では、「金属は60～70℃の温水に浸けても膨張しないが、ガスバーナーで熱すると体積が増える。」と結論づけているのに、その後の「活用しよう」には「びんの金属の蓋が開かない時、蓋の部分

湯で温めると開きやすくなる。」とあり、教科書実験と日常生活で体験する内容が全く一致していない。別の教科書¹²⁾では、同じ実験結果から、「学んだことを使おう」で「固く締まったビンの蓋をガスコンロで温めると蓋が開きやすくなる理由を説明しましょう」としている。こちらの教科書では、金属の体積はバーナーで加熱して増えたので、ビンの蓋をガスコンロで温めることを勧めたのであろう。この方が首尾一貫しているが、誰もこんな危険なことはしない。火傷やビンが割れてしまう恐れがある¹³⁾。これでは、教科書で学んだことが日常生活に結びつかず、「深い学び」にはならない。

もう一つ身近な例としてどの教科書にもとり上げられているのは、鉄道のレールである。長いレールとレールの間には隙間があり、夏の高温時にはその隙間が狭くなっていることを、レールの熱膨張で理解させようとしている。しかし、夏の炎天下で、レールに異常が生じて運休になる場合でも、レールの温度が数100℃になることはない。安全対策上、レール温度の一般的な上限は60℃とされ、それを超えるとレールに歪みが生じる恐れがあるとされる¹⁴⁾。これも、教科書で学んだ「金属は60～70℃では膨張しない」が、日常経験する事象とかけ離れている例である。

本報では提案する実験法について、簡易的ではあるができるだけ精密な測定を行い、測定値と理論値の比較から実験法の確かさを示した。学校現場で活用する際には、「空気を閉じ込めた試験管」、「水だけがに入った試験管」と「固体と水が入った試験管」のガラス管の水位変化の大小を比較し、その結果の違いを考察する学習が想定される。この結果から水と固体の膨張度合の大小を結論するには、実験結果の意味していることを順序だてて思考することが必要である。教科書で採用している飛躍した実験の比較ではなく、条件をそろえた実験の結果を対象とすることによって、しっかりとした思考が可能であり、学びの質を深くすることができる。

また本実験法では、教科書で扱っている金属球

のみならず、種々の固体を対象に実験を行うことができる。複数の固体間の比較実験を行うこともでき、その際には固体の体積を一定にそろえて実験を行うと水位変化の大小で単純な比較ができる。本実験法によって気体、液体に加えて固体も多種類のを自由に扱うことができるように実験法が拡張されたことになる。教師のアイデアにより学習内容を深めることが可能になると考えられる。例えばガラス球と金属球の比較を行えば、図4に示したようにガラスの膨張率の方が小さいことがわかる。このことが上述の「びんの金属の蓋が開かない時、蓋の部分を湯で温めると開きやすくなる。」につながる。この生活の知恵を科学的な根拠のあるものとして思考対象にする授業構想も考えられる。本実験法を活用した深い学びの実現が期待される。

本論文は、2018年本学で開催された日本理科教育学会第68回全国大会での報告¹⁵⁾を大幅に加筆修正したものである。また本研究は、平成29-31年度科学研究費補助金基盤研究(C)「自然のしくみを理解する喜びと確かな物質観を育てる小・中学校の物質学習」(17K00957)の助成を受けて行った。

引用文献

- 1) 文部科学省「小学校学習指導要領(2017年告示)解説、理科編」。
- 2) 片平克弘(2017)「何ができるようになるか」(特集 新学習指導要領<小学校>、理科の教育、05.pp 8-11。
- 3) 玉木昌知(2017)「粒子領域の学びはどう変わるのか」同上、pp34-37。
- 4) 藤崎聡美・村上祐(2010)「『金属の体積変化は水よりも小さい』を確かめる教材を用いた授業」初等理科教育、6月号、pp 66-69。
- 5) 黄川田泰幸ら(2010)「『金属の体積変化が水より小さい』を実感できる授業」日本理科教育学会第60回全国大会、p274。
- 6) 藤崎聡美ら(2013)「小学4年『ものの体積と温度』における『固体の体積変化が小さい』を確かめる教材」日本理科教育学会第63回全国大会(WS)、p495。
- 7) 理科年表2015, 国立天文台編(丸善出版)。
- 8) 伊藤叡「世の中の材料 金属・セラミックス・高分子」(上)。
www.nipponsteel.com/.../2005_8_9_151_09_12.pdf
- 9) 樹脂成形材料のデータベース、PlaBase。
<https://www.toishi.info/sozai/plastic/pp.html>
- 10) 小池守(2018)「温度変化に伴う固体の体積変化を学ぶ発展学習教材の開発」理科教育研究 59巻2号 pp265-276、および論文中的引用論文。
- 11) 東京書籍(2015)「新しい理科4」、学校図書(2015)「みんなと学ぶ小学校理科4年」。
- 12) 教育出版(2015)「未来をひらく小学理科4」。
- 13) 東京ガスでは、「50℃くらいのお湯に蓋の部分を浸ける」ことを推奨しており、「ライターなどで蓋をあぶるという方法はやけどや瓶の破損のリスクが高く、販売メーカーなどでは推奨されていません。」としている。
<https://tg-uchi.jp/topics/3217>
- 14) 太田幸宏 乗り物豆知識「炎天下のレール、歪みが出るのは何℃から?」。
<https://trafficnews.jp/post/writer/>
- 15) 村上 祐、武井隆明、菊地洋一(2018)「根拠を持って比較できる小学4年『ものの体積と温度』」、日本理科教育学会第68回全国大会、p425。