

<実践報告>

液体窒素を用いた小学校での出前授業「超低温の世界」

ー須坂市公立小学校6年生を対象とした
 『理科大好キッズ育成事業』の取り組みを通してー

神原 浩 信州大学学術研究院教育学系 理科教育グループ

キーワード：液体窒素，低温，理科教育，出前授業，地域連携

1. はじめに

長野県須坂市に平成27年度に新設される総合技術高校へ目標を持って入学する生徒，また，理系大学への進学を希望する生徒を育てるという目的で，須坂市教育委員会が平成23年度より「理科大好キッズ育成事業」の取り組みを行っている。事業概要は、『信州大学と須坂市の包括的連携協定に基づき，大学教員による「ほんもの体験」，「驚きと感動」に満ちた理科授業を市内全小学校の6年生（1～2時限）が受講する。』というものであるが，その中の特別授業の1つとして，筆者は，「超低温の世界」という題目で液体窒素を使った出前授業を平成23年度より平成26年度まで4年間担当してきた。これまでに実施してきた小学校とそのクラスおよび児童数は表1の通りである。（ちなみに，他の特別授業の題目は，「光はおもしろい」，「人体の仕組み」，「空気の力」であり，それぞれ，信州大学理学部，医学部，諏訪東京理科大学の教員が担当している。）ここでは，出前授業の実践内容を紹介し，実際に授業を受けた小学6年生の児童に対して行った，理科および出前授業に対する簡単なアンケートと感想を分析し，まとめたので報告する。

表1 「超低温の世界」の出前授業を行った小学校とそのクラスおよび児童数

平成 23 年度			平成 24 年度			平成 25 年度			平成 26 年度		
学校名	組名	児童数	学校名	組名	児童数	学校名	組名	児童数	学校名	組名	児童数
森上小	勇	24	井上小	竹	27	小山小	東	25	森上小	智	34
	智	26		松	27		中	28		仁	33
	仁	25	豊洲小	松	23		仁礼小	西	21	井上小	松
小山小	東	28		竹	22	仁		28	竹		22
	中	30	旭ヶ丘小	敬	34	礼		25	高甫小	敬	29
	西	29	日滝小	東	24	須坂小	松	31			
				西	25	旭ヶ丘小	敬	33			
児童数小計 162			182			191			141		
児童数合計 676											

2. 授業内容

2.1 概略

液体窒素を使った実験は、「薔薇の花がバラバラになる」、「バナナで釘が打てる」などのテレビの映像がよく知られているが、ほとんどの児童は実際には見たことはない。出前授業では、液体窒素を用いて冷やして遊ぶだけではなく、理科の授業の要素を取り入れることに重点を置いた。「ものを冷やす」ということが、単に見た目の状態を変えるだけでなく、目に見えない電子の運動など、物質の内部の状態をも変えるということを実験を通して気付かせ、液体窒素が科学的なものの見方や視野を広げる教材となることを期待して 1 回につき 90 分の授業を行った。

出前授業の概略を図 1 に示す。導入部分は、「冷たいもの」で連想される「氷、アイス、雪」から「水の状態変化」（小学 4 年生で学習）の話と関連させ、温度を下げるということが、物質の状態を変化させること（気体 → 液体 → 固体）を復習し、一般には“気体”と認識されている「空気」（小学 6 年生で学習）も温度を下げることで液体に変化するのだろうかと問題を提起した。ここで、正体をまだ明かさず、とても冷たい液体として液体窒素を持ち出し、空気をつめた風船をその液体につけることで、風船がしぼみ、空気も十分に低温に冷やせば液体に変化するというを示した。寒剤として用いたこの液体こそが、液体窒素であり、1 気圧のもとでの沸点は -196°C （絶対温度で 77 K）である。つまり、児童の目の前にある液体の温度は約 -200°C なのである。液体窒素を取扱うときの注意を演示実験を交えながら説明した後、空気、酸素、二酸化炭素の状態変化を演示した。その後、各グループで、コイル（電磁石）（小学 5 年生で学習）を直列につないだ回路を作り、コイルを冷やすと回路に流れる電流がどうなるのかを、豆電球の明るさの変化や電磁石の強さの変化を調べることで実験をした。また、特別授業ということで先端技術が作り出した高温超伝導リボンケーブルを用いて、超伝導現象の演示実験を行った。最後に、事前に各自で用意しておいた冷やしてみたいものを液体窒素を使って自由に冷やしてみて、超低温の世界を体験させた。授業の後で、理科およびこの出前授業に関

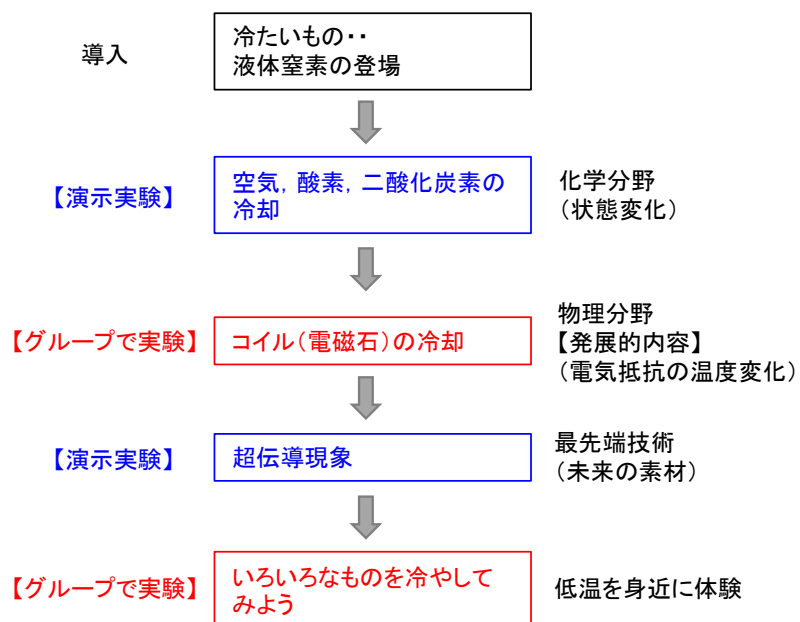


図 1 出前授業の概略

する簡単なアンケート調査を行った。その結果は、「3. アンケートの回答結果と分析」の項で述べる。以下、授業の各内容をやや詳しく記述する。

2.2 液体窒素を見る、触れる

透明ガラスデュワー瓶（魔法瓶）に注いだ液体窒素は、激しく沸騰し、デュワー瓶の内壁が冷えてくると、静かになる。透明な液体を見ると、全て水とってしまう児童が多いが、液体窒素は水ではないことを強調するためには、少しだけ液体窒素を机の上にこぼしてみる。すると、液滴は机の表面上を滑らかに滑走し、やがて気体へと変化し、液体が通った跡が残らない。水の場合は、水滴が残り、水との違いは明白である。

ここで、まず始めに液体窒素を取り扱うときの注意事項を2点まとめておくと、

- (1) 液体窒素で冷やしたものを触るときは、手袋をつけること。
- (2) 液体窒素を入れた容器を密閉しないこと。

であるが、(1)に関しては、一瞬（1 秒程度）なら素手で液体に触れても全く問題はない。これは、人間の体温が液体窒素温度よりも十分高温であるために、指先に触れた液体は直ちに蒸発し、気体の窒素が指の周りを覆うため、直接液体の温度を感じないためである。むしろ、液体窒素に触れたのに触れた感じがしないという不思議な感覚を感じる。実際に触れてみて -196°C の液体といっても、特別に危険なものではないということを体感してもらうことは、この後にいろいろな実験を行うにあたり、液体窒素に対する障壁を取り除く意味でも意外と重要なことであると考えている。但し、ここで注意しておかなければならないことは、液体窒素に直接素手で触るから一瞬だと問題はないということであり、十分に冷えた別の物を直接手で握っては危険ということである。十分に冷えたものは空気中もしくは手の水分が表面に凝結して氷となるため、素手で直接、冷えた物体を触ると手がくっつき、凍傷の危険があるためである。ここは勘違いのないように念入りに注意するところである。(2)に関しては、液体窒素は室温からの熱エネルギーを吸収して、絶えず蒸発（気化）し続けていることによるものである。液体から気体へ状態が変化する際、窒素の場合は、 0°C 、1気圧の気体になると体積が約650倍に増大する¹⁾。従って、液体窒素を密閉容器に入れると容器内の圧力が急激に上昇し、爆発が起きる。ここでは、ペットボトルに液体窒素を入れ、そのふたに穴を開けてガラス管をさしたものでふたをすると、ガラス管の先から勢いよく液体窒素が噴き出すという現象が見られる（図2）。天井にも届くような勢いで噴出する液体窒素を見ると、児童は強い興味を示すが、「面白い」という現象で終わってしまいかねない。そこで、本当に密閉した容器（フィルムケ



図2 ペットボトルから飛び出す液体窒素

ース) を使って実験も行う。ティッシュペーパーに液体窒素を浸して、それをフィルムケースに入れ密閉すると、1~2 秒程度で「パンッ!」という激しい爆発音がして、ふたが勢いよく飛んで行くのが見られる。授業の初めにはあまり関心のない表情を見せていた児童もこれらの演示実験で驚きと興味の表情を示すようになる。

2.3 空気を冷やしてみる

空気入れで透明の風船に空気を入れ、膨らませ、鉗子で空気を閉じ込める。空気を液体窒素につけるとどうなるか予想させると、風船はしぼむと予想する児童が大半だが、中には冷やすと割れるという児童もいる。演示実験を行うと、風船はしぼんでいく。十分しぼんだ後、外に取り出してみると、風船の中には液体がたまっていることが分かる。透明な液体を見ると、何でもかんでも水と思ってしまう児童が多いが、風船の中にたまっていたのは空気しかないことに注意し、これが実は液体空気であること、空気の気体が液体になると、体積が約 $1/650$ になるので風船がしぼむことを解説する。また風船を外に取り出し、常温に戻していく過程で、風船がみるみる元通りの大きさまで膨らんでいくことから、空気は風船の中に閉じ込められており、その姿を変えただけであることに気付く。この様子に素直に驚く児童も多い。

2.4 酸素、二酸化炭素の状態変化

小学 6 年生は通常、一学期の前半に理科で「ものの燃え方と空気」の学習をすませており、空気を構成する、窒素、酸素、二酸化炭素とその割合などについて学習している。そこで、空気の実験の次に、

酸素だけを充填したビニル袋と二酸化炭素だけを充填したビニル袋を用意し、それぞれを液体窒素で冷却する。酸素の沸点(1 気圧)は $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ (90 K) と窒素よりも沸点が高く、容易に液体酸素を作ることができる。その液体酸素は薄い水色をしており、液体酸素は磁石に引きつけられるという性質を示す。これらの理由については、酸素分子の電子配置とスピンを考



図3 酸素・二酸化炭素の状態変化の演示風景(須坂市立旭ヶ丘小学校「学校だより」平成 25 年 7 月 25 日より引用、転載承認確認済)

える必要があり、初等的な量子力学の知識を必要とする^{2), 3)}ため、小学生に原理そのものを教えることは困難である。しかし、酸素が液体になると磁石にくっつくという現象を見せるだけでも十分であろうと考えている。また、二酸化炭素の場合は、1気圧のもとでは -78.5°C (194.5 K) で気体から固体へと変化(昇華)する。従って、液体窒素で冷却すると、いわゆるドライアイスとなる(図3)。

2.5 コイル(電磁石)を冷やす

コイルと電磁石は小学5年生で学習している。電磁石は、導線を巻いてコイルにしたものの中に鉄心を入れ、コイルに電流を流すと磁石となるもののことを言うが、電磁石を冷やしてみるということは授業では扱わないし、通常考えないことである。電磁石を強くするにはコイルの巻き数を増やすか、乾電池の数を直列に増やすという方法を学んでいるが、電磁石を液体窒素で冷却すると強さは変わるのか、または変わらないのかを予想させ、各グループで実験をしてもらった。実験の方法として、 1.5 V の乾電池1個を用いて、銅線を巻いたコイル(室温での電気抵抗は約 $2\ \Omega$) をつないで回路を作り、電磁石として作用させる。電磁石を冷却する前と後とで、回路に流れる電流の大きさを検流計で読み取り、電磁石につくクリップの数の変化で電磁石の強さを測る。導線(金属)を冷却すると、金属内の原子の振動が小さくなるため、電気抵抗の原因である、自由電子と陽イオンとの衝突が起こりにくくなり、温度に比例して電気抵抗は小さくなる。その結果、回路に流れる電流が大きくなるため、電磁石の強さは大きくなる。結果として、コイルを液体窒素で冷却すると、電流の強さ、および電磁石につくクリップの数は大体3倍程度大きくなる。また、電磁石としてののはたらきを調べる他に、導線を流れる電流が大きくなることを、回路に直列につないだ豆電球($1.5\text{ V}-0.3\text{ A}$)の明るさが明るくなることでも調べた。但し、豆電球をつないだ状態では回路に流れる電流が小さくなって電磁石としてののはたらきが小さくなるため、電磁石としての実験をするときは豆電球を外して行った。

2.6 超伝導現象を見る

銅酸化物超伝導体はいわゆる高温超伝導体として知られ、超伝導転移温度が約 100 K 程度と高く、液体窒素で容易に超伝導状態に転移させることができる。超伝導体は、その超伝導転移温度(T_c)以下で、①電気抵抗が完全にゼロになる、②完全反磁性(マイスナー効果)を示す、という性質を持っており、演示実験では、②のマイスナー効果の観測を行う。マイスナー効果は、もし超伝導体が磁場中に置かれたとすると、その超伝導体内部の磁束密度をゼロにするように、超伝導体表面に超伝導電流が自発的に流れることで外部の

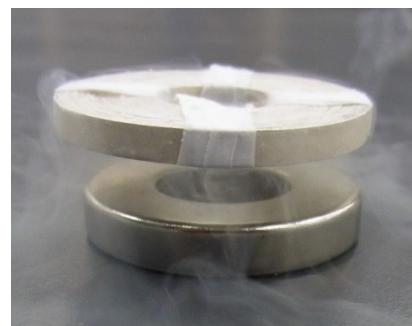


図4 ネオジム磁石(下)の上に浮かぶ超伝導体(上)

磁場を超伝導体内部から完全に排除するものである。その結果として、外部の磁場は歪められ、磁場のエネルギーが高くなるために、磁場の歪みを解消しようとする力が生じ、超伝導体を浮上させることになる。常温では磁石の上に単に載っていた超伝導体が、液体窒素で冷却するだけで磁気浮上が起こる（図 4）。この現象は小学生だけでなく、大人にもやはり不思議な現象として印象に残るものである。また、単に浮上するだけでなく、磁石を上にして超伝導体に乗せた後、磁石を引き上げると、すき間を保ったまま超伝導体を宙吊りすることも可能である（図 5 左）。これは、マイスナー効果に加え、磁束が不純物でピン止めされることで説明できる。“反発しながら引き合う”この現象は、通常の磁石同士では決して起こらないものであり、児童たちからも驚きの声が出る。用いる超伝導体試料は、以前は、自前で結晶の焼成を行う必要があったが、最近では、超伝導線材が市販されており、手軽に演示実験が行えるようになった⁴⁾。使用した線材は、住友電気工業から購入したビスマス系銅酸化物超伝導体（商品名 DI-BSCCO）であり、化合物の組成式は $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ （略称 Bi-2223、超伝導転移温度 $T_c = 110 \text{ K}$ ）である。それが幅 4.3 mm、厚さ 0.3 mm 程度のリボン状線材に加工されている。ただ、線材といっても酸化物であるため、銅線のような柔軟さはなく、最小曲げ半径以下に曲げてしまうと折れてしまう危険がある。そこで、筆者は直径 15 mm の丸棒にらせん状にケーブルを約 3 m 分巻きつけ、線材にくせをつけた後、それをずらしていきながら円状に巻き取って行く方式によって、1 つの円盤状の塊を作成して使用している。これまで 4 年間いろいろな場所で頻繁に演示実験に用いているが、試料の劣化もなく問題なく実験ができています。

2.7 いろんなものを冷やしてみよう

事前に各自で冷やしたいものを用意させておき、実際に、自分で冷やして実験をさせた。後述するように、この時間が児童にとって最も興味・関心が高いものであった（図 5 右参照）。

児童が持ってきたものは花、バナナといった定番のもの他、テニスボール、消しゴム、水風船、シャボン玉、食品類（きゅうり、トマト、ぶどう、ゼリー、生卵、豆腐など）、などであった。



【児童の感想より】

- ・超伝導で磁石が浮いていたことが、一番心に残っている。（上の写真）
- ・ -100°C 以下の液体をさわっても冷たくないというのがすごくびっくりしました。
- ・私が持ってきた花は（液体窒素で冷やしてから）さわるとバラバラになっておもしろかったです。
- ・まだわからないこともあったので、もう少し大きくなったら、わかるまでとことん調べたいです！

図 5 超伝導体の宙吊りの演示（左）と、児童による自由にいろいろなものを冷やしてみる実験（右）（須坂市立井上小学校 学校だより「桐里っ子」平成 24 年 5 月 29 日より引用、転載承認確認済）

基本的に水分を含むものは、液体窒素につけると水が氷になるため、体積が膨張し、割れることが多い。消しゴムも割れるが、これは水分を含んでいるからではなく、ゴムの性質によるものである。温度が高いとき、ゴムを構成する有機分子は互いに絡みあった状態であるが、温度が低くなると、エントロピーを下げることでゴムは伸び、膨張するため割れてしまう。児童が持参するものは、食品類など水分を含むものが多いため、カチコチになって割れたというイメージが強く残ったかもしれない。しかし、基本的には水分を含まない繊維や金属などは、液体窒素につけると熱収縮による縮みが起きるくらいで必ずしもカチコチにはならない。

3. アンケートの回答結果と分析

授業の終了後、理科およびこの出前授業に対する簡単なアンケート用紙を配布し、記入させた。内容は表2の通りである。①～④に関しては、それぞれの人数を数え上げ、全体に対する各項目の割合を調べた（図6）。⑤に関しては自由記述の感想の中から、どの内容に最も興味・関心を示したのかを「2. 授業内容」の項のキーワードで分類した。複数の内容に対して記述している児童も多くいたため、複数の回答を認めて積算した。その結果は図7に示す。

表2 「超低温の世界」の出前授業のアンケートの内容

① 理科は好きですか？		
1. すき	2. ふつう	3. きらい
② 今日の授業は楽しかったですか？		
1. 楽しかった	2. まあまあ	3. 楽しくなかった
③ 今日の授業はわかりましたか？		
1. わかった	2. なんとなくわかった	3. わからなかった
④ 今日の実験に興味をもちましたか？		
1. もった	2. まあまあ	3. もたなかった
⑤ 今日の実験で一番おもしろかったものや心に残ったものはなんですか？ なんでも自由に感想を書いてください。		

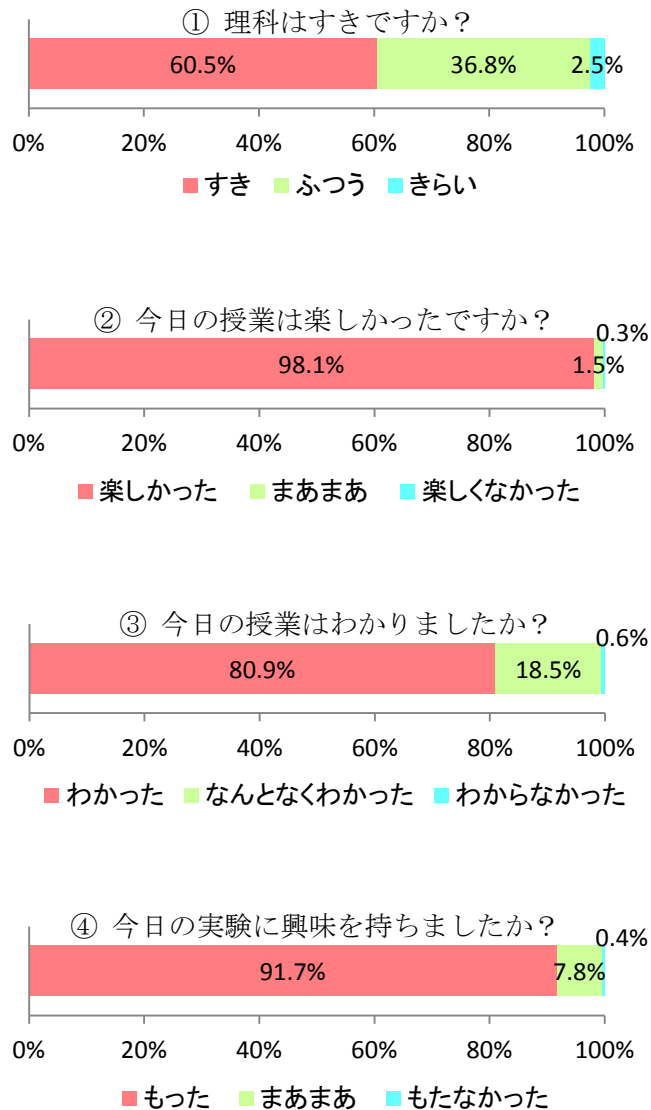


図6 アンケートの結果（676名）

アンケート結果を見ると、「①理科は好きですか？」で、はっきりと「好き」と答えた児童の割合は60.5%で、好きでも嫌いでもどちらでもないと解釈される「ふつう」が36.8%とそれなりに大きな値を示すことが分かった。また、はっきりと「嫌い」と答えた児童の存在も2.5%あり、無視はできない。ところが、「②今日の授業は楽しかったですか？」の項を見ると、はっきりと「楽しかった」と答えた児童が98.1%にも達し、液体窒素を使った授業や体験は、楽しく印象に残って記憶に刻まれたものと推測できる。次に、「③今日の授業はわかりましたか？」を見ると、「わかった」は80.9%、「なんとなくわかった」が18.5%であった。これらを合わせて、「わかった／なんとなくわかった」割合は99.4%であり、扱った内容が発展的なもの（電気抵抗の温度変化）や、超伝導現象など、通常の学習範囲を

超えているものがあつたとしても、児童は現象を見て、「わかった／なんとなくわかった」と児童なりに納得できるのであろうと思われる。最後に、「④今日の実験に興味を持ちましたか？」に関しては、はっきりと「もった」と答えた児童が 91.7%であり、「まあまあ」と答えた児童と合わせて、「もった／まあまあ」と肯定的にとらえてくれた児童は 99.5%にも達した。①で「ふつう」と答えた児童も、多くが液体窒素を使った実験に興味を示すということが分かった。また、ここで注目すべきことは、①で理科は「きらい」と答えた児童も、授業は楽しく、実験に興味を持ったという事実である。これは、⑤の自由記述の感想文の中に読み取ることができた。そのうちの 2 人の感想文（児童 A、児童 B）を以下に引用しておく。

（児童 A）「自分達で目で見ると液体ちっ素は水みたいなのに、机や床などに、液がおちると、液体ちっ素は、シュワーとなるところがすごいと思った。また、液体ちっ素の中に何かを入れてこおらすという実験もおもしろかったし、楽しかった。」

（児童 B）「私は、理科が、きらいです。でも、今日の実験を見たら、理科が、少し好きになりました。今まで、やった、実験の中で、一番楽しかったです。今日は、本当に、ありがとうございました♪」

最後に、この出前授業で最も興味・関心のあつたものを「2. 授業内容」の項で挙げた内容別に、⑤の自由記述感想文の中から読み取り、それをヒストグラムにまとめた（図 7）。その際、例えば、先の（児童 A）の感想には、下線部で「液体窒素そのもの」に強く興味を持ったことが分かるが、その他に、二重下線部にあるように、液体窒素の中に「いろいろなものを冷やしてみる」ということにも大変関心があつたことが伺えるため、この場合は、「液体窒素そのもの」と「いろいろなものを冷やしてみること」の両方にカウントした。ただ、（児童 B）の感想を見ると、どの実験に最も興味があつたのか具体的な記述がないため、これは「その他」に分類した。図 7 を見ると、「いろいろなものを冷やしてみること」が圧倒的に興味・関心の高かつたことが分かる。これは、やはりものに触れて、自分で実験して確かめるといふ、理科の本質そのものを十分に堪能できたことに対する満足感の現れかもしれない。不思議な現象が自分の動かした手で目の前に起きているという素朴な驚きもあるであろう。このときの児童の表情は実に生き生きとしていた。その他には、少ないといっても、「空気・酸素・二酸化炭素の状態変化」や「電磁石の冷却」にも一定数の関心の高さを伺える。これまでの理科の学習がきちんと土台になっているからこそ、扱ってきた理科の題材に関して、教科書にはない発展的な内容が付加されることで新たな興味・関心の芽を持つことができるのであろうと思われる。また、「液体窒素そのもの」や「超伝導現象」には興味・関心が非常に高いことが分かった。「超伝導現象」は超伝導状態になると、磁石の上に超伝導体が浮くということ（当然、逆さにして、超伝導体の上に磁石を浮かせることも可能）、そして、超伝導体を宙吊りしたまま移動させることができるのを見せると、児童からは驚きとともに「UFO みたい」という声上がる。やはり、不思議な現象には興味・関心が高いのであろう。ただ、超伝導現象と同じくらい興味・関心が高かつた

「液体窒素そのもの」にも注目すべきであろう。先述の（児童 A）の感想にあるように、液体窒素は一見すると水のように見える。ところが、水だと濡れてしまうのに、液体窒素は濡れなくて、触っても触った感じがしない。床にこぼすと、ホバークラフトのようにまたはアメーバのように浮いて流れていく。そういった「液体窒素そのもの」も小学生にとっては、十分な観察対象になり得ることが分かった。液体窒素は、対象物をしっかりと観察する理科の原点に気付かせる教材であると言えるかもしれない。出前授業をきっかけに、今後の日々の理科授業に少しでもプラスになるような意識の変化が現れればと願っている。

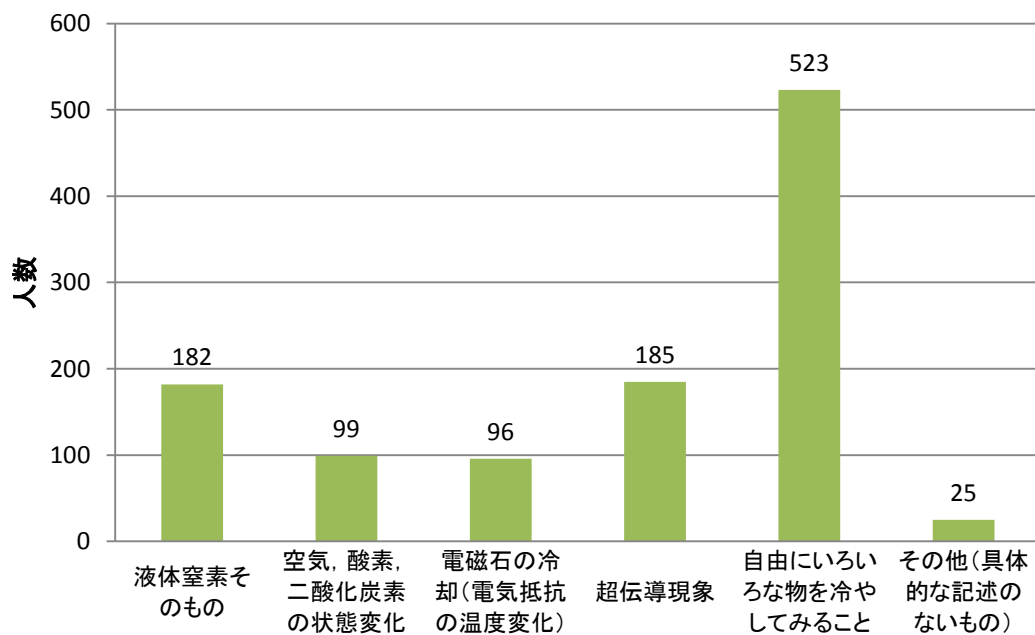


図 7 出前授業で最も興味・関心のあったもの（676 名，複数回答可とした）

謝辞

『理科大好キッズ育成事業』において、須坂市公立小学校で出前授業をさせていただく機会を与えていただいた、須坂市教育委員会とお世話になった各小学校の先生方に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 田沼静一 責任編集：「低温」共立出版（1974）p. 34.
- 2) 下井 守：液体酸素はどうして青く、磁性があるのか，化学と教育，第 54 巻 5 号（2006）pp. 282-285.
- 3) 植田千秋，山岸昭雄，伊達宗行：液体酸素の磁性，固体物理，第 22 巻 3 号（1987）pp. 145-152.
- 4) 大村詠一，上松英介，岸木敬太：線材化されたビスマス系超伝導体による学生実験，大学の物理教育，第 17 巻 1 号（2011）pp. 42-45.

（平成26年10月 9日 受付）
（平成27年 1月 8日 受理）