

児童や生徒の金属に対する興味・関心を醸成するビスマス結晶づくり

後藤 創紀¹⁾ 布村 一興¹⁾ 中野 英之²⁾ 仁科 篤弘^{**}

1. はじめに

ビスマスは原子番号83の金属元素である。亜鉛とビスマスを衝突させて形成される原子が、113番目の元素「ニホニウム」として認定されたことは記憶に新しい。また、恒星内部の核反応では、中性子捕獲反応の一種であるsプロセスにより、ビスマスまでの元素が形成されることもよく知られている。さらに、ビスマスは化学的にも次のようなユニークな特徴を有している；①単体の融点が544 Kと低いこと、②凝固すると体積が増加すること、③鉛と異なり毒性が銀程度と低く、海外では整腸剤として使用されていること、④容易に過冷却状態が得られること、⑤結晶化するとき骸晶をつくること、⑥結晶を冷却していく過程で表面に構造色を呈する酸化膜が形成されること。

ビスマス結晶がつくる幾何学的な骸晶とその構造色は美しいことで知られ、最近では『世界で一番美しい元素図鑑』⁽¹⁾などに掲載されたことからなどからも人気が高まっている。ビスマスは、現在最も注目を集める金属元素の一つであろう。

ビスマスの結晶は、融点の低さや毒性の低さなどから、個人でも比較的容易に作製が可能であり、Web上で様々な試みが掲載されている。しかし、著者らは、後述するように、Web上の情報をもとに1方法を提示した中込⁽²⁾による先行事例を参考に試行を行ってみたが、必ずしも大きく美しいビスマス結晶を作成できるとは限らなかった。そこで、誰もが確実に大きく美しいビスマス結晶を作成できることを目指し、その方法を探索してきた。本稿では、大きく美しいビスマス結晶を得る方法を提示するとともに、小学生や教員・学生を対象に行ったビスマスの結晶づくりに関する教育実践から、その教材としての可能性について検討を行った。

2. 大きなビスマス結晶をつくる

中込⁽²⁾は、次に挙げる方法でビスマス結晶の作成を行った。直径15 cm程度のステンレス製ボウルにビスマスチップを15個ほど入れ、加熱用ホットプレートで加熱する。次に、融解後に加熱用ホットプレートのスイッチを切り、溶融しているビスマス表面に「島」のようなものが現れたらピンセットではさみ、真上に持ち上げる。持ち上げた「島」を溶融しているビスマス表面から3 cmほど上で10秒ほど停止し、結晶が下方に成長するのを待つ。しかし、著者らが追試を行ったところ、図1(a)のように、2 cm程度の結晶をつくることのできる場合も見られるが、多くの場合、小さい結晶しかつくることのできなかった(図1(b),(c))。この原因としては、「島」を引き上げるタイミングを見計ることや、「島」をピンセットで持ち上げる操作そのものが難しいこと、ステンレス製ボウル内におけるビスマス溶融体の深さが十分な結晶を成長させるほどに深くなかったことなどが考えられる。そこで、著者らは、次に述べるように実験方法の改良を検討することにした。

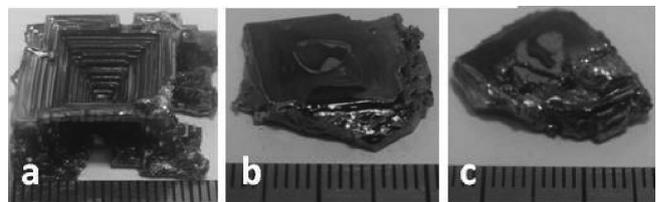


図1 試作したビスマスの結晶。

* 京都教育大学教育学部 1)大学生 2)准教授(〒612-8522 京都市伏見区深草藤森町1)

** 福島県伊達市立大石小学校；教頭

An Education Program of Making Bismuth Artificial Crystals Which Enhances Children's Interests and Concern in Metal; Soki Goto*, Kazuoki Nunomura*, Hideyuki Nakano*, Atsuhiko Nishina** (*Kyoto University of Education, Kyoto. **Date City Oishi Elementary School, Date)

Keywords: materials education, Bismuth, skeletal crystals, structural color, class practice

2016年11月29日受理[doi:10.2320/materia.56.291]

(1) 実験方法の改良

(a) 大きな結晶を得るための工夫

まず、底部が窄まっている形状のボウルではなく、開口部と底部の内径が等しい100円ショップで販売されているステンレス製の計量カップ(200 mL)を用いることにした。同量のビスマスチップを溶融させた際、ボウルを使用した場合よりも計量カップを使用した場合の方が、深い溶融深度が得られるだけでなく、ぐらつく心配も少なくなる。加熱の際には、加熱用ホットプレートではなく、安価で容易に入手できる高出力バーナーと通常の理科実験室にあるガスバーナーを使用することにした。次に、ビスマス溶融体に結晶成長の核になるような浮子ものを浮かべれば、大きな結晶が得られるのではないかと考えた。そこで、針金をリング状、ルツボ状、コイル状、サンダル状などに加工したものの6種類をビスマス溶融体に投入してみることにした(図2(a)-(f))。針金に取っ手状のものがあればピンセットでも取り出しが容易になると考え、加工の際に取っ手もつけた。6種類の形状の針金を投入した結果を図2に示す。大きな結晶ができやすい順から○、△、×で示している。実験の結果、サンダル状に加工したものの(図2(b),(e))をビスマス溶融体に投入すると大きな結晶が得やすいことが分かった。また、中込⁽²⁾が提示した方法では、ビスマスが溶融してビスマス結晶を取り出すまでに要する時間については示されていない。試行錯誤を行ったところ、ビスマスが融解して浮子を投入後約420秒(約7分程度)経過する頃に針金を取り出すと、大きなビスマス結晶を得られやすいことが分かった。図2(b)のように加工した針金を実験の度に準備することは大変である。そのため、身近なもので図2(b)のような形状のものが他にないかと探索したところ、形状がゼムクリップに似ていることに気づき、図3のようにゼムクリップを加工して取っ手をつけたものを投入することにした。その結果、図2(b)を使用した場合と同様の結果を得ることができたため(図4)、以後浮子としてゼムクリップを使用することにした。サンダル状の形状の浮子を用いると大きな結晶ができる理由については、いくつかの理由は考えられるものの、現段階では不明で

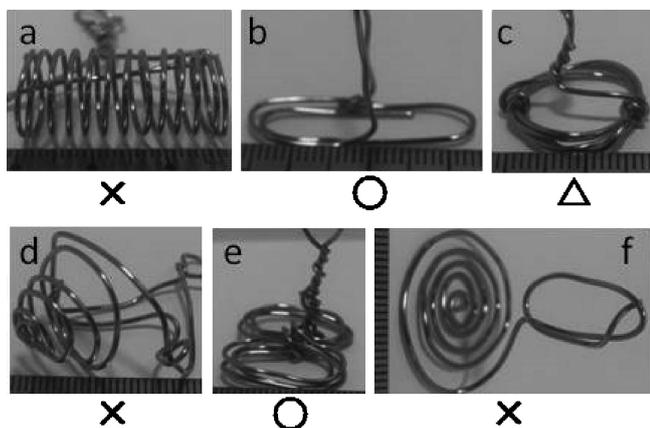


図2 溶融ビスマスに投入した6種類の金属浮子。

ある。その理由の解明については今後の課題としたい。

(b) ビスマス結晶の色を制御する

ビスマス結晶に見られる構造色は酸化膜の厚さにより変化する。取り出したビスマスの結晶は冷却していく過程で、金色から紫色、青色、空色、緑色の順番に変化していく。酸化膜の生成にはエネルギーが必要なため、温度が下がるとそれ以上の色の変化は起こらない。そこで、取り出したビスマス結晶の酸化膜の厚さを変えることで人工的に色を決定できるのではないかと考えた。その方法として以下の2つの仮説を立て、実験を行った；①冷却中に酸素を封入した密閉空間に結晶を入れることで酸化膜の生成を促進する、②冷却の途中で冷水につけ、酸化膜の生成を停止させることで、結晶の色を人為的に制御する。実験を行った結果、酸素雰囲気下で冷却しても、空気中で冷却した場合と異なる色の変化を観測することはできなかった。しかし、②の実験において酸化膜の生成を阻害し、色の変化を停止させることができた。

今回改良を行った実験方法を図5に示す。実験に必要な器具も図5に示した。ビスマスチップをステンレス製の計量カップに入れて加熱する際、三脚の上に金網を置き、その上で加熱を行う。計量カップの底部はガスバーナーで、上部は高出力ガスバーナーを用いて加熱を行う。ビスマスが融解した際、表面に酸化膜が形成されるが、中込⁽²⁾が示したようにスプーンを用いて取り除き、アルミ缶に捨てるようにする。約420秒(約7分)程度経過した後に、ゼムクリップの取っ手



図3 加工したゼムクリップ。



図4 新たな方法で試作したビスマスの結晶。(オンラインカラー)

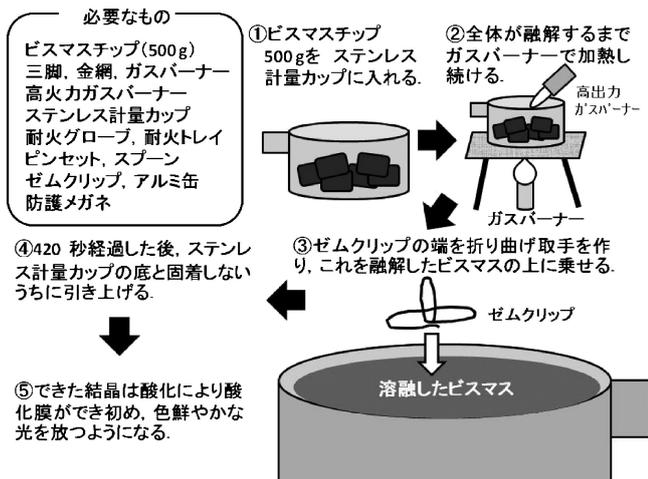


図5 ビスマス結晶の作成方法.

をピンセットでゆっくりと引き上げ、耐熱パット上にビスマスの結晶を取り出して色の変化を観察する。10秒程度の間に、金色、青紫色、空色とビスマスの結晶の色が変化する様子を観察することができる。ピンセットで結晶を引き上げる際、安全のために耐火グローブを用いて結晶を引き上げるようにする。図5のような作成方法で比較的安定して大きなビスマスの結晶を作成することができるようになった。

3. 授業実践

ビスマスの結晶づくりは大変魅力的な活動であり、児童や生徒の金属に対する興味・関心を醸成するために有効に活用できるのではないかと考えた。また、ビスマスには前述のような多くのユニークな化学的な特徴を有していることから、ビスマスの結晶づくりを通して化学分野の学習にもつなげることが期待できる。以下に、小学生と教員・学生を対象に行ったビスマスの結晶づくりの実践について報告し、教材としての可能性について検討を行う。

(1) 小学校での授業実践

2016年2月18日に福島県伊達市内の小学校の児童3・4年生12名を対象にビスマスの結晶づくりの授業実践(1時間)を行った。授業の流れを表1に示す。この授業では、ビスマスの結晶をつくる活動そのものよりも、水以外の物質の状態変化に触れさせることを主な目的としている。小学校の理科では水以外の状態変化の例が示されることが殆どないため、状態変化が水以外の物質にも起こることを理解させるためには、「金属を溶かす」という活動を取り入れることは有効であると考えた。

導入として、まず水の状態変化についての説明を行い、金属の鉄は氷のように融けるのかと児童に質問した。展開では、児童にビスマスチップを手にとらせた後に、演示実験を通して実験方法や注意点について説明を行った。実験中、防護メガネを必ず着用するよう指示を行うとともに、火傷への注意喚起を行った。ビスマスが融解した段階で、導線と豆電

表1 授業の流れ.

	学習の流れ	準備物
導入 (5分)	水の状態変化について 金属の鉄は融けるのか	
展開 (35分)	演示実験 ・ビスマスチップを手にとらせる ・演示実験を通して実験方法や注意点を説明する ・この間、ビスマスチップと溶融したビスマスに電極を入れ、電気が流れることを確認する 全体実験	・3班分の実験セット(図6と同様のもの) ・導線と豆電球、電池からなる自作テスター ・指導者5人が各班に入り指導を行う
まとめ (5分)	今日の実験のまとめ 感想文の記入	・ワークシート



図6 授業実践の様子.

球、電池からなる自作テスターを用いてビスマスチップと溶融ビスマスの通電実験を行い、どちらも電気を通すことを確認した。個別実験では3班に分かれてビスマスの結晶づくりを行った。1班につき、1~2名の指導者が入り指導を行った。授業の最後に、全体のまとめを行うとともに、ワークシートに感想文を書いてもらった。

授業は特に大きな問題もなく、時間内に全員がビスマスの結晶を作成することができた(図6)。金属の鉄は氷のように融けるのかという問いについては、12名中1名の児童が融けると回答した。金属が融けるということは児童にとっては日常生活の中では理解しにくいものであると言える。しかし、この点については著者の一人である中野が毎年同校において行っているマグマの生成実験の影響があるのかもしれない。この実験はマサ土をステンレス製の容器に入れて七輪で加熱してマサ土を融かすものである。高温に耐えるステンレス製の容器を見ると、金属は融けないものになってしまうのも無理のないことのようにも思う。また、作製できたビスマス結晶は著者らが行ったものよりも小型のものが多い傾向が見られた。この原因としては、ゼムクリップを溶融ビスマス

に浮かべてからの経過時間を正確に測定していなかったことが原因として考えられる。

ワークシートに書かれた児童の感想文をフレーズごとに分解し、項目ごとにまとめた結果を図7に示す。数値は出現回数を示している。特に関連性を考察する必要がある項目は線で結んである。

活動前の状況に関しては、ビスマスの重さや結晶構造について興味を示す記述が見られるとともに、火傷や作業の困難さなど実験に対する不安などの記述も見られた。

活動中の状況については、色やその変化、結晶構造に「びっくりした」、「きれい」、「すごい」という感想が多くみられた。12名の児童に対してこうした感想が20件挙がったことから、ビスマスの結晶そのものに感動した児童の多さを窺い知ることができた。ビスマスの結晶づくりは、体験を通して児童の金属に対する興味・関心を醸成する教材として非常に有用である。一方で、活動中も実験が怖いと述べている児童もみられた。つくるのが大変だったという感想を述べた児童も4名みられたが、そのうち1名は「小さいものしかできなかったがまたやりたい」と述べるなど、失敗を肯定的にとらえていることが分かった。実験に不安を感じていた児童からは、「細かい作業なのではないかと考えていたが、ただ固まるのを待つだけだったので驚いた」、「火傷が心配だけれど友達の見ているのでやりやすくなった」、「きれいな結晶を見て実験が怖くなくなった」といった感想が寄せられた。安全面での対策を十分に行うことは大前提であるが、簡便にきれいな結晶を得られる活動に触れることで、実験に対する不安を軽減できることが分かった。「なぜラーメンのどんぶりのような模様ができるのか」と活動を通して骸骨ができる理由についての疑問について記した児童も見られた。

(2) 現職教員・学生を対象とした授業実践

日本地学教育学会全国大会(2016年10月9日)のワークシ

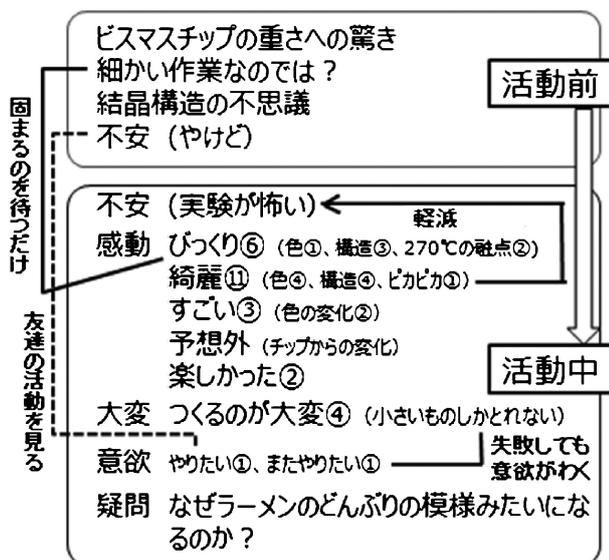


図7 授業実践のアンケート分析。

ョップにて、現職教員・学生約25名を対象とした授業実践を行った。実践は、演示実験を行った後に、全体実験を行うという流れで行った。会場はガスバーナーのない施設であったため、ガスバーナーの代わりにカセットコンロを使用した。ワークショップは25名を2班に分かれて全体実験を行うことにした。1班あたりの参加者が12~13名であったため、全員がビスマス結晶を作成するのに2時間を要した。実践後に、大型のふせん紙を配布して自由に感想を記述してもらった。スタッフは指導者として2班にそれぞれ3名、計6名入った。

ワークショップは、ビスマスの結晶づくりを行うのは初めての参加者が殆どであったためか、ビスマスを引き上げる際には歓声上がるなど、大変に盛り上がった(図8)。班内の連携も円滑で、完成後の受講者の達成感も高かった。同時に、活動を楽しむだけでなく、理科教員の立場から客観的に本教材を考察しようという姿勢が伝わってきた。ゼムクリップの形を更に改良したらどうなるか試行錯誤する班も見られた。今回は、ゼムクリップを浮かべてから約420秒(約7分)程度経過した後にビスマスの結晶を引き上げたため、多くの参加者が大きなビスマス結晶を作成することに成功した。

参加者のうち、感想文の提出のあった19名について、同様のアンケート分析を行った。図9はその結果をまとめたものである。感想はビスマスの結晶づくりに関する直接的な感想だけでなく、生徒実験としての利点や授業での活用、実践者への提案など多岐に渡った。

小学校での実践同様に、色やその変化の美しさに感動したというコメントが多く、簡便に安価で行えることに肯定的なコメントや、盛り上がる、大きな結晶がつくれてうれしいという感想が見られた。またやりたいという意見も見られ、参加者の満足度の高い活動であることが分かった。構造色や骸骨構造ができる理由についての疑問や固まるタイミングが分からないといったコメントも寄せられた。

生徒実験としての利点を挙げたコメントも多く挙がった。生徒と一緒に盛り上がるができることや、2つと同じものができず、適度に失敗する点、見て美しいといった点が評価されたようである。ビスマスの結晶づくりは、体験を通し



図8 ワークショップの様子。

