

1 はじめに

液体窒素というと生徒はバナナを凍らせて釘を打つことや花を凍らせるとガラスのように砕けることなどを想像する。液体窒素を使用した実験は生徒が興味を持ちやすく、いろいろな物理現象について理解を深めさせることのできる教材になると考える。

たとえば、熱運動、状態変化、気体の体積の変化、温度による電気抵抗の変化などは、液体窒素を使用すると室温との温度差が大きいので変化がわかりやすくなる。また、液体窒素を使用することで低温特有の現象を確認することができる。しかし、これらの実験を行う場合に透明ジュワーびんを用いると使用中に結露により側面から内部が見えなくなってしまう観察しにくくなる欠点がある。そこで長時間内部が見えるように改良した実験装置を開発して、液体酸素の色と常磁性を安定して観察することができるようにする。また、低温状態の特徴を生かせるような実験方法と授業方法の研究を行うことにした。実験装置は入手しやすい材料と工作が比較的簡単な方法でつくることが基本とした。

低温状態では日常とは異なる表情を見せる自然の姿に触れることで生徒に物理現象や自然科学に興味・関心を持たせるような実験方法を研究して授業で検証をしていく。

2 研究方法

- (1) 液体酸素の色と常磁性を安定して長時間観察できる実験装置の開発
- (2) 液体窒素を利用した実験方法と授業実践方法の研究

3 研究内容

- (1) 液体酸素の色と常磁性を安定して長時間観察できる実験装置の開発

約 40 名の生徒に液体酸素の色と液体酸素が磁石に引きつけられることを実験で示すためには、安定して長時間観察できるように工夫する必要がある。透明ジュワーびんは使用中に表面が結露や霜の付着により内部が見えにくくなる。そこで、透明ジュワーびんを空の水槽に入れて水槽中の空気を乾燥剤で乾燥させることと、水槽の空気による断熱効果で実験装置が結露しにくい構造にした。このようにすると水槽の表面に結露による曇りが生じてても表面を乾いたタオルなどで拭けば簡単に曇りがとれる。この実験装置でジュワーびん中の実験の様子が長時間側面から観察できるようになる(図1)。

この実験装置を使用すると図2に示したように液体窒素中での実験の様子がわかりやすくなる。



図1 実験装置の全体の写真



図2 左 図1の実験装置
右 ジュワーびんのみ

ジュワービン中の様子が見える状態で実験が行えるので液体酸素の色や磁石に引きつけられる様子を長時間観察することが可能となる。

実験装置は水槽と発泡スチロールを使用して製作した。実験装置の構造を図3に示す。透明ジュワービンは市販の実験器具を使用している。

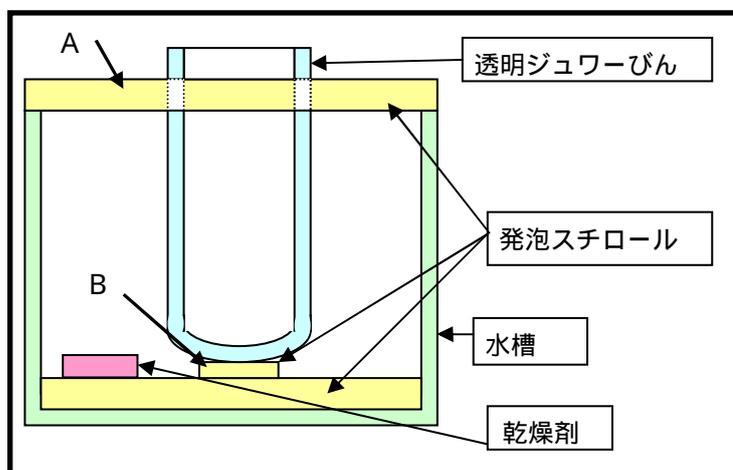


図3 水槽を使用した実験装置の説明図

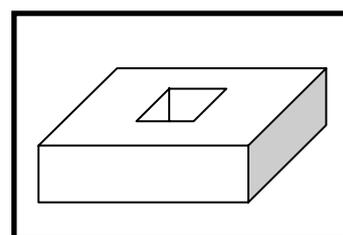


図4 図3のBの説明図

図3中のAの発泡スチロールは透明ジュワービンに合わせて、間に隙間ができないように少しきつめに加工する。これにより透明ジュワービンの重さにより発泡スチロールは水槽に押さえつけられる状態ができる。水槽中の乾燥剤はシリカゲルを使用した。乾燥剤を交換しやすくするために図3中のAの発泡スチロールは簡単に水槽から外せるようにしておく。湿度の高い季節や水槽と発泡スチロールの間に隙間ができる場合はテープなどで止めるとよい。図3中のBの発泡スチロールは透明ジュワービンの下がとがっているので、図4に示したように口の字型にする。

2月に実施した授業では3日間で5クラスの実験に使用した。その間、水槽中の乾燥剤は交換しなくてもジュワービンの表面と水槽の内側に結露による曇りは全く発生しなかった。水槽の外側に発生した結露による曇りは乾いたタオルでふき取ることで簡単に取り除くことができた(図5)(図6)。



図5 水槽の外側の結露



図6 5クラスの授業を実施後に水槽の外側の結露を拭き取ったときの状態

6月に実施した授業では水槽の外側の結露が冬に行ったときより発生しやすかったが、水槽の外側を乾いたタオルで拭き取ることで内部は十分に観察することができた。また、乾燥剤の効果は1日程度で早めに交換する必要がある。水槽とジュワーびんが冷えていない状態のときに乾燥剤を交換する。冷えているときに水槽上部の発泡スチロールを外すとジュワーびんの外側や水槽の内側に結露が生じ、曇りを短時間で取り除くことが難しくなる。

長時間の観察を行うと液体窒素中に空気中の水分が入り細かな氷が生じて白濁してくる。ジュワーびんが曇らないことで、氷による液体窒素の白濁が気になる場合がある。

次に、液体酸素の色と常磁性を透明ジュワーびん中で観察できるように試験管を使用した装置を開発した。気体や液体の捕集用のマイティーパックという口の付いた袋と、チューブコネクターを利用したことで装置の製作が簡単になり、使いやすいものに仕上がった。事前にマイティーパックに酸素を準備することもできるし、酸素のカートリッジを接続して説明をしながら授業を進めることも可能である。液体酸素の観察装置に使用した材料を下に、構造を図7～図13に示す。

液体酸素の観察装置に使用した材料

- ・試験管 径 12mm
- ・シリコン管 内径 10mm 外径 14mm
- ・シリコン管 内径 5mm 外径 7mm
- ・TPXチューブコネクター T型 径5～8mm用
- ・TPXチューブコネクター I型 径5～8mm用
- ・マイティーパック 1800mL
- ・プラスチック管 外径 6mm
- ・シリコン栓 上径18mm 下径14mm

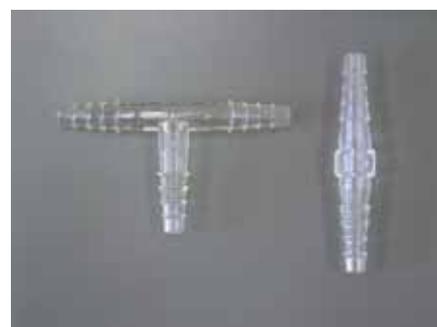


図7 TPXチューブコネクター T型(左), I型(右)

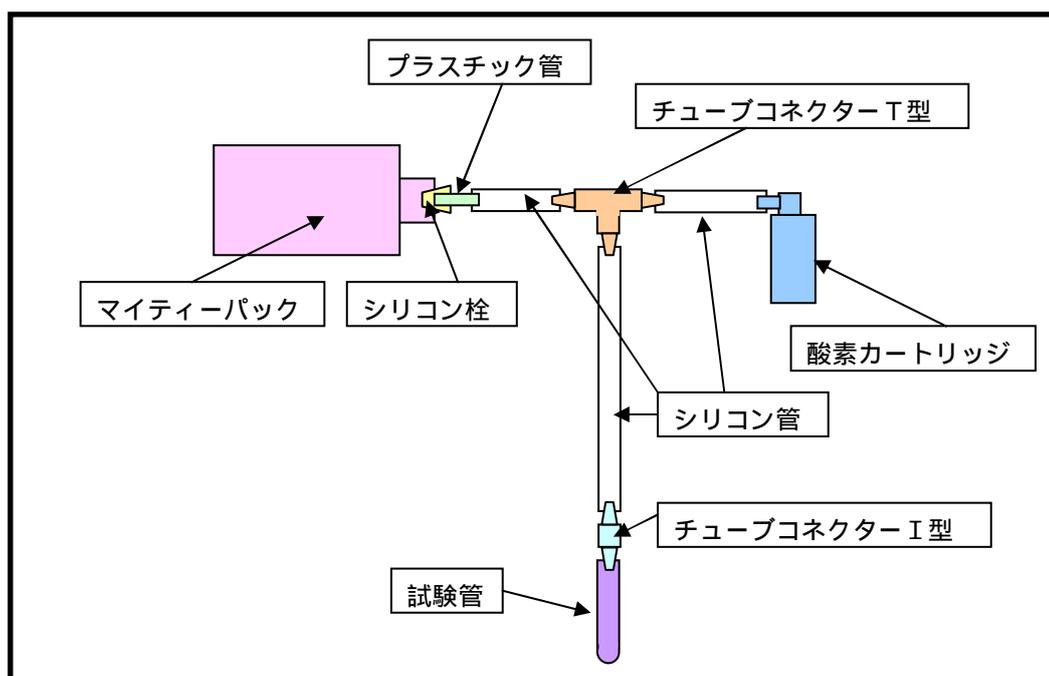


図8 液体酸素の観察装置の説明図



図9 酸素をマイティーパックに入れるときの様子



図10 酸素のカートリッジを外してシリコン管をダブルクリップで止めた状態

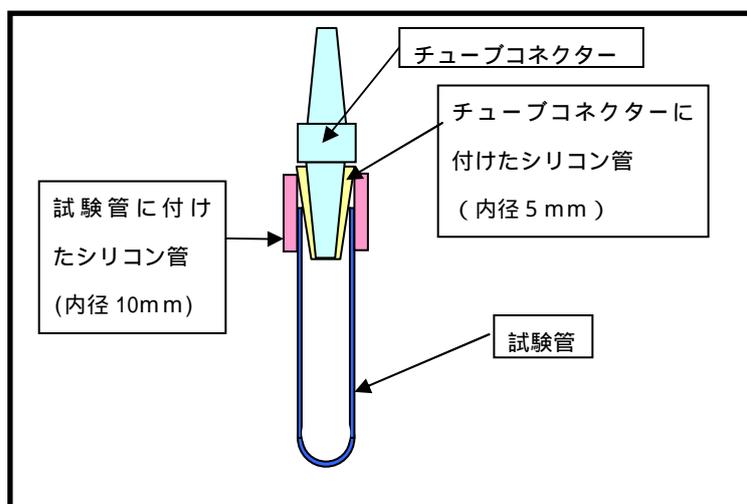


図11 チューブコネクタと試験管の接続部分説明図



図12 チューブコネクタと試験管の接続部分の構造

図8に示したようにT型チューブコネクタで三方向にシリコン管を使って酸素カートリッジ，マイティーパック，試験管を接続する。配置はどの順番でもかまわない。図9のようにして酸素を入れる。その後，図10のように酸素のカートリッジを外しシリコン管の先端を折ってダブルクリップで止める。試験管の接続部分から液体窒素が入り，常温にしたとき気化して試験管と袋の内圧が上昇してもダブルクリップを外すことで安全に実験できる。図11，図12に示したようにチューブコネクタと試験管の接続部分は，チューブコネクタと試験管の口の両方にシリコン管を付けて，冷却しても隙間ができてにくいような工夫をした。この構造で接続部分が液体窒素中になっても使用できるようになった。



図13 実験装置を組み立てた様子

シリコン管は繰り返しの使用で図14に示したように割れることがある。予備を用意して実験するとよい。長い試験管や圧気発火器用のガラス管を使用して接続部分が液体窒素中に入らないようにする方法もある。

この装置により液体酸素の色が長時間観察できた(図 15)。長時間の観察が可能になったことで多くの生徒に液体酸素の色を実際に見せることができた。淡青色の液体酸素を直接観察したことで多くの生徒が興味を持ち、授業後も色を確認する生徒がいるなど長時間観察できるメリットは大きい。授業後の生徒の感想にも直接見たことの驚きなどが書かれていた。



図 14 繰り返しの冷却で割れた
接続部分のシリコン管



図 15 液体酸素の色

液体酸素の常磁性は、装置が小さいため事前に準備した写真をプロジェクターで示して説明後に観察させた(図 16)(図 17)。

生徒は液体酸素が磁石に付くことを興味深く確認していた。

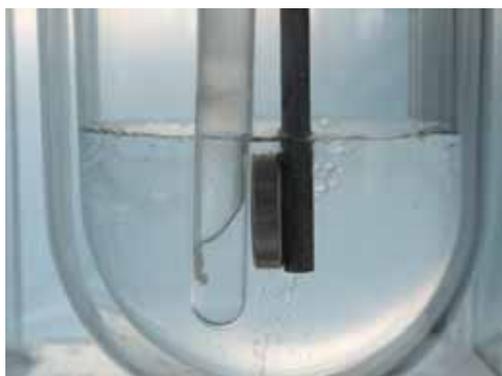


図 16 液体酸素にネオジム磁石を
近づけたとき



図 17 液体酸素からネオジム磁石を
遠ざけたとき

また、空き缶の中に液体窒素を入れて空中につるして缶の周りから液体が垂れる様子を観察させた。空気中の酸素が液化して垂れる様子を観察することができ、生徒に興味・関心を持たせるきっかけになる(図 18)。



図 18 液体窒素を入れた缶の周囲から
液体酸素が垂れる様子

(2) 液体窒素を利用した実験方法と授業実践方法の研究。

ア ヘリウムを使用したシャルルの法則の実験

液体窒素を用いてより低温にすることで気体の体積が減少し体積が0になることが予想しやすくなる。また、液体窒素とお湯を使うことで約300の温度差においての気体の体積と温度の関係を確認することができる。この実験結果から絶対零度を計算により導く。ヘリウムを使用して実験を行うと液体窒素で冷却しても液化せずに実験ができる。

100 mL のガラスシリンジを使い、目盛りを読みやすくするように図 19、図 20 のように実験装置を作る。



図 19 実験装置



図 20 実験装置を組み立てた様子

図 21 のようにシリンジの先端にシリコン管を使用する。これはヘリウムが漏れないようにすることと、ヘリウムをシリンジに入れやすくすることの両方に有効である。ヘリウムを入れたシリンジの先端は図 22 のようにシリコン管を折り曲げてダブルクリップで止める。シリンジの先端はシリコン栓を使用してふさぐと冷却したときシリコンが収縮して隙間ができてヘリウムが抜けてしまうことや、できた隙間に液体窒素が入り温度を上昇させたとき窒素が気化してシリンジに入り体積が増加する場合があります安定して実験することが難しい。



図 21 シリンジの先端にシリコン管を付けた様子



図 22 ダブルクリップで先端を閉じた様子

シリンジにヘリウムを入れる方法は図 23 に示したようにヘリウムのボンベとシリンジをシリコン管で接続して行う。シリコン管に残った空気の割合が小さいので空気の混入による影響は少ないと考えられる。授業ではこの方法でシリンジにヘリウムを入れて実験を行った。空気の混入をさらに減らすには図 23 の右上の図のように接続するシリコン管の途中にチューブコネクタの T 型を付けて一度シリンジに入れたヘリウムを捨てられる構造にして、再度ヘリウムを入れるようにするとよい。ヘリウムはボンベのノズルを押し下げると少しずつ取り出すことができる(図 24)(図 25)。ヘリウムのボンベはレギュレータ付きの 120 L 入りを使用した。

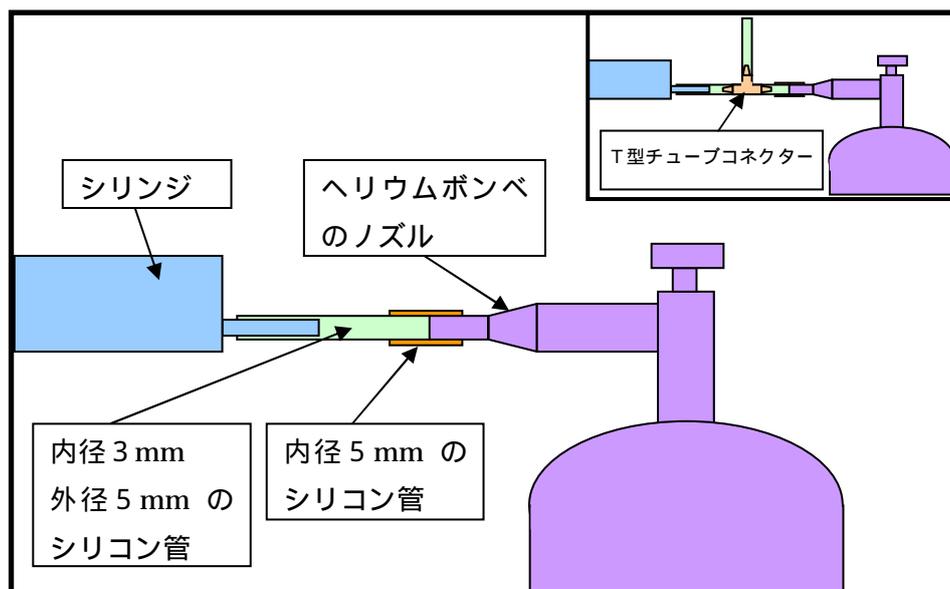


図 23 ヘリウムボンベとシリンジの接続方法の説明図



図 24 ヘリウムボンベ



図 25 シリンジにヘリウムを入れる様子

シリンジにヘリウムを入れて室温と同じ温度になるまで少し時間をおいてから実験するとよい。また、ヘリウムはシリンジの隙間からわずかに抜けるので、半日から一日経過すると体積が変化してしまう場合がある。初めて使用するシリンジは洗剤などでよく洗い潤滑剤などを取り除いておく。不十分だと凍結してピストンが動かなくなる場合がある。実験は室温から始めて液体窒素、お湯の順で測定をした。液体窒素で冷却するとき、器具が乾燥していた方が安定して実験を行えるためである。また、ガラスシリンジは温度差のために破損する場合があるので注意して実験を行う。

実験の結果をまとめるために、表計算ソフトを利用する。プロジェクターで投影し、結果の解析をしながら授業を進める。結果の解析のための画面を図 26 に示す。また、実験結果の一例を図 27 に示す。

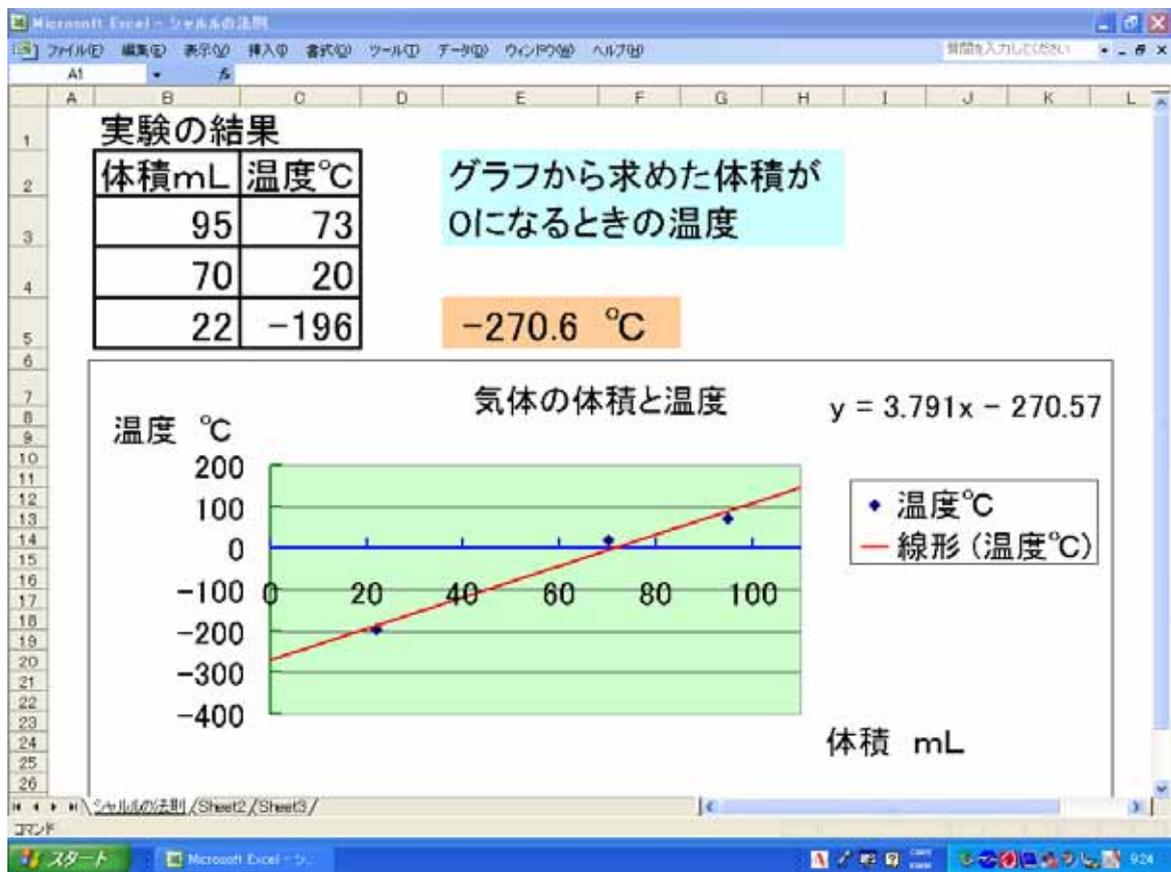


図 26 気体の体積と温度の関係を求める画面

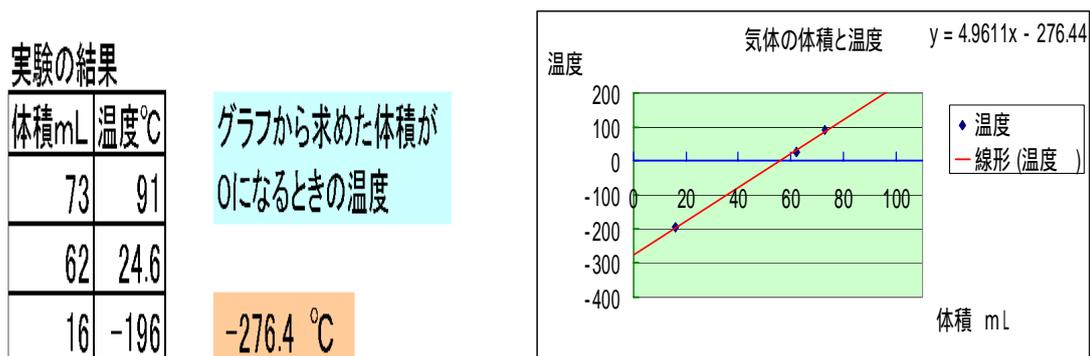


図 27 実験結果の例

実験の結果からシリンジ内の気体の体積が0になる温度を計算すると、約 - 270 から約 - 300 の結果が得られた。また、気体の体積と温度はほぼ比例関係にあることがグラフからも確認できた。コンピュータを利用して実験結果を解析しながら授業を進めることで理解を深めさせることができる。

イ 導体と半導体の温度による電気抵抗の変化

(ア) 冷却による導線の電気抵抗の減少

室温で豆電球がかすかに点灯する状態の電気抵抗になるようにしたエナメル線を液体窒素で冷却し、豆電球の明るさが変化することで電気抵抗が減少することを観察する。エナメル線などの冷却による電気抵抗の減少を豆電球の明るさの変化を利用して行う実験方法についてはいろいろと発表されているが、多くの場合エナメル線を豆電球が室温では点灯しない長さになっている。点灯していない豆電球を見てもスイッチが切れているのか、他の理由のためかわかりにくい。室温で点灯している豆電球の明るさが変化していくことを観察したほうが電気抵抗の変化がわかりやすいと考える。

単3乾電池1本で実験できるように豆電球と直径0.2mmのエナメル線の長さを4mにして巻いて使用した。細いエナメル線を使用すると断面積が小さいため同じ長さでの電気抵抗が大きいので、長さがより短くてすむ。また、冷却が速く進み実験を行いやすい。ミシン用のプラスチックポビンにエナメル線を巻くと簡単につくることができる(図28)。エナメル線の長さを4mにすると豆電球は実験室など大きめの教室の後ろの席でも確認できる明るさとなる。

条件によりエナメル線の長さが8mぐらいまで豆電球はかすかに点灯するので、授業方法や使用する教室の大きさに合わせて適当な長さに調整したエナメル線を用意して行うとよい。

上記の条件での写真は印刷ではわかりにくいので図29、図30の写真は単3乾電池2本を直列接続して電圧を3ボルト、エナメル線の長さは10mのものを使用して撮影した。



図28 ミシン用のポビンに巻いたエナメル線

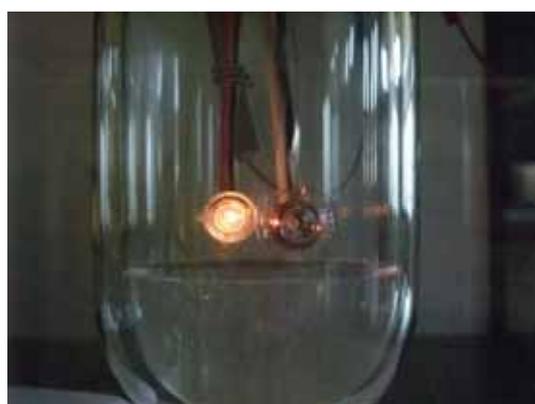


図29 エナメル線を室温にして点灯した豆電球



図30 エナメル線を液体窒素で冷却して明るく点灯した豆電球

この実験は電気抵抗が温度により変化することを豆電球の明るさの変化として直接見ることができるので理解しやすい。また、温度が低くなると導体の電気抵抗が小さくなることから超伝導の話題につなげるなど、いろいろな話題に発展させることができる。

授業では、豆電球を乾電池で点灯させた状態で乾電池を液体窒素で冷却する実験も行った。乾電池の温度が低下すると豆電球が消灯することを観察する。そして、乾電池を液体窒素から取り出しゆっくりと室温に戻すことで再び豆電球が点灯することを観察する。身近にあるものを使用しているため生徒はどうなるのか興味を持ち、実験後の感想でも関心の高さがわかる。

化学反応と温度の関係は、一般的に低温になると化学反応が起こりにくくなる。低温になると乾電池の性能が低下することと暖めると再び使用できることが実験からわかる。冬など寒い時期の電池の使用方法についての説明をすると、授業の知識が身近ないろいろなことに結びついていることを気づかせるきっかけとしても利用できる。

(イ) 導体と半導体の温度による電気抵抗の変化

温度が変わることで導体と半導体の電気抵抗はどうなるか生徒実験で行う方法を研究した。授業は3年生の選択物理 で実施した。

実験で使用する器具などは下に示す。図 31 は導体(エナメル線), 図 32 は半導体(半導体ダイオード)の実験回路である。回路図でエナメル線は抵抗として表示してある。

- 実験で使用する器具など
- ・ 直流電流計
 - ・ 直流電圧計
 - ・ スイッチ付き電池ボックス
(単3乾電池2本用)
 - ・ 単3乾電池2本
 - ・ 豆電球(2.5V 0.3A)
 - ・ 豆電球用ソケット
 - ・ エナメル線を巻いた抵抗(エナメル線の直径0.2mm 長さ10m)
 - ・ 半導体ダイオード
 - ・ スチロール製のコップ
 - ・ コード
 - ・ 液体窒素

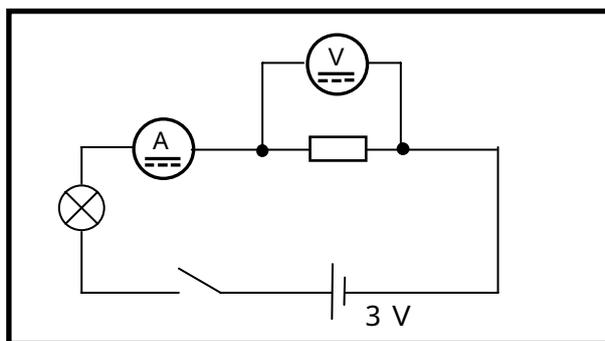


図 31 導体(エナメル線)を使用するときの回路

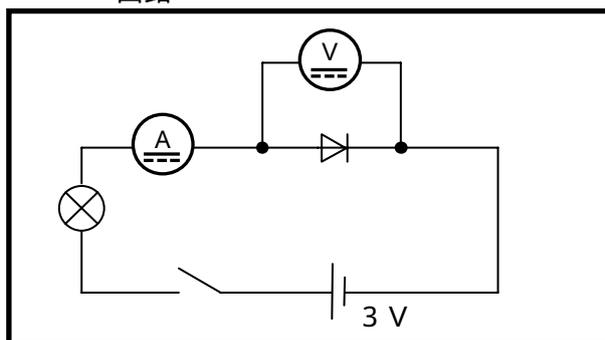


図 32 半導体(半導体ダイオード)を使用するときの回路

この回路を使用するとエナメル線と半導体ダイオードを交換することで他の部分を変えずに実験できる。共通に使用できる回路なので生徒実験を行いやすい。豆電球を使用しない回路にするとエナメル線と半導体ダイオードの発熱量が大きくなる。特に半導体ダイオードは高温となる。

実験結果の例を導体は表 1, 図 33, 図 34 に, 半導体ダイオードは表 2, 図 35, 図 36 に示した。

表1 導体（エナメル線）の実験結果

	室温 27	- 196
電圧 V	1.3	0.2
電流 A	0.22	0.30
電気抵抗	5.9	0.67



図33 導体（エナメル線） 室温

表2 半導体（半導体ダイオード）の実験結果

	室温 27	- 196
電圧 V	0.9	1.2
電流 A	0.25	0.23
電気抵抗	3.6	5.2



図34 導体（エナメル線） - 196



図35 半導体（半導体ダイオード）室温

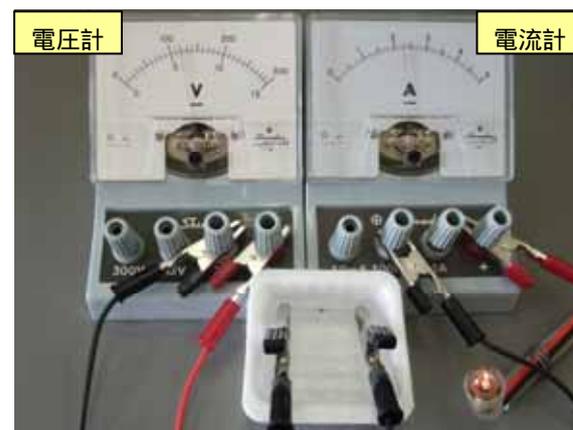


図36 半導体（半導体ダイオード）
- 196

実験結果から導体は温度が低下すると電気抵抗が減少し、半導体は温度が低下すると電気抵抗が増加することがわかる。液体窒素を使用すると室温との温度差が大きいため電圧と電流の数値の変化がわかりやすい。エナメル線の場合は豆電球の明るさの変化が大きく視覚的にも電気抵抗の変化がわかる。半導体ダイオードの場合この回路では豆電球の明るさの変化は少ない。

半導体の電気伝導率は $\exp(-E/k_B T)$ に比例する。Eは活性化エネルギー、 k_B はボルツマン定数、Tは絶対温度である。半導体は価電子帯と伝導帯が禁止帯で隔てられているために熱的あるいは光学的に励起されることでキャリアー（荷電粒子、半導体の場合は正孔と電子）の濃度が高くなる。このため半導体の電気伝導率は絶対温度とともに増大する関数となる。従って半導体の電気抵抗は温度が上昇すると小さくなる。

(3) まとめ

ア 実験後の生徒の感想

- ・液体酸素が青いのを知った。
- ・液体酸素の色がとてもきれいだった。
- ・液体酸素に色があることに驚きました。
- ・液体酸素の色などは知っていたが磁石にくっつくことは知らなかった。
- ・缶の周りから液体酸素が垂れるのがすごかった。
- ・温度変化によって起こる現象が思っていたより多くて驚いた。
- ・電気抵抗は温度が低下すると小さくなるのがすごかった。
- ・乾電池を冷却すると起電力が低下することは予想していなかったので驚いた。
- ・絶対温度と絶対零度についてよくわかった。
- ・自然界の最低温度が -273 と、とても低くてびっくりした。
- ・自然界では冷たくても -273 までしかないとは意外だった。もっと寒いところがあると思っていた。
- ・導体と半導体で思っていたよりはっきりと電気抵抗の違いがわかった。

イ 考察

授業前には液体酸素の色は無色と考える生徒が多く、色を予想した生徒も様々な色を予想していた。実験により直接観察した意味は大きいことが生徒の感想からもわかる。開発した実験装置により実験の様子を見ることが可能となり、多くの生徒が同時に観察できることが利点である。また、長時間の観察が可能なので余裕を持って授業を進めることができるようになった。いろいろな実験に応用することができると思う。

4 おわりに

液体酸素に色があることの驚きとその色の美しさを直接観察させたいと考えていたが、以前は容器がすぐに曇ってしまいあまりはっきりと観察させることができなかった。安定して観察できる方法を工夫できないかと考えたことが本研究のきっかけである。授業で十分な時間観察できるようになり生徒が驚きや興味を抱く姿を見て自然科学の探究には実験や観察による直接の体験が欠かせないことを改めて感じた。この研究の経験を今後の自然科学への興味・関心を高める実験や授業方法の工夫に生かせるようにしたい。

最後に、本研究を進めるにあたりご指導、ご助言をいただいた諸先生方に心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- 岩波 理化学辞典 第5版(1998) 株式会社 岩波書店
第2版 MARUZEN 物理学大辞典(1999) 丸善株式会社
物理学辞典 改訂版(1992) 株式会社 培風館
物理学大百科(1989) 株式会社 朝倉書店
理科年表 平成21年 国立天文台編(2008) 丸善株式会社