

3年生特別研究

72 物理分野 「高温超伝導セラミックスの焼成と特性測定」

(1) 研究開発の概要

事前授業で、超伝導セラミックスの性質・製法や熱電対や四端子法などの測定法についての講義を行った。その後、2回の生徒実験を通して、超伝導セラミックスの臨界温度の測定や金属線の抵抗率の測定を実施し、レポートを作成させた。最後に、特別研究のまとめとして、名古屋工業大学電気電子工学科助教授の大原繁男先生に、生徒の実験レポートの講評と超伝導一般についてのまとめの講義をお願いした。

(2) 研究開発の経緯

平成16年度にも、名古屋工業大学大原先生のご援助で超伝導に関する特別研究を実施している。今回の特別研究は、その内容を発展させたものである。前回は2年次の実施であったが、今回は物理・のカリキュラムとの整合性を考慮して、3年次の実施となった。

平成16年度の特別研究終了時に、1年間の期間を空けて、平成18年度に再び実施することをお願いしてあった。本年、4月に大学を訪れて正式にお願いし、その後はメールでの打ち合わせが中心となった。打ち合わせ内容は、事前授業、実験、レポート、まとめ講義へと進む特別研究の形式について、まとめ講義の内容と其中で生徒の実験レポートの評価をお願いしたいこと、本校で実施する実験への技術的な援助であった。

その後、事前授業、実験を終えた6月28日に、大学の研究室において、まとめ講義の内容について再度依頼すると同時に、生徒の実験レポートをお渡しして評価をお願いし、その内容をまとめ講義に含めていただいた。

(3) 仮説(ねらい、目標)

本特別研究のねらいは以下のア～ウの通りである。

ア 高温超伝導セラミックスに関する知見を体験的・総合的に学習する。

イ 実際の電気回路に慣れ、熱電対による温度測定の方法や小さな抵抗を測定する方法である四端子法による抵抗値の測定を体験する。

ウ レポートの作成や、まとめ講義でレポートへの評価を聞くことを通して、科学的な考え方や実験を企画する力、表現力を養う。また、本校で実施している生徒実験の数が少ないので、生徒に理論と実際の違いを体感させる機会としても位置づけた。

(4) 研究の方法および内容

ア 対象生徒

3学年理系物理選択者 142名

イ 実施日程

事前授業 (65分) 平成18年 6月 5日(月) ~ 8日(木)

実験 (65分) 平成18年 6月12日(月)、13日(火)

実験 (65分) 平成18年 6月14日(水)、15日(木)

まとめ講義 (65分) 平成18年 7月 4日(火)、5日(水)

ウ 実施場所

事前授業 : 各教室

実験・ : 物理実験室

まとめ講義 : 視聴覚教室

エ 実施内容

(ア) 事前授業(65分)

a 高温超伝導セラミックスとは

高温超伝導体とは、液体窒素温度(77.4[K])以上で超伝導現象が起こる物質で、本実験ではBa系銅酸化物超伝導セラミックス $YBa_2Cu_3O_7$ を利用する。これは1987年2月に米国・ヒューストン大学のM.K.Wuによって開発されたもので、世界で初めて高温超伝導を達成した(臨界温度 T_c = 約93K)。

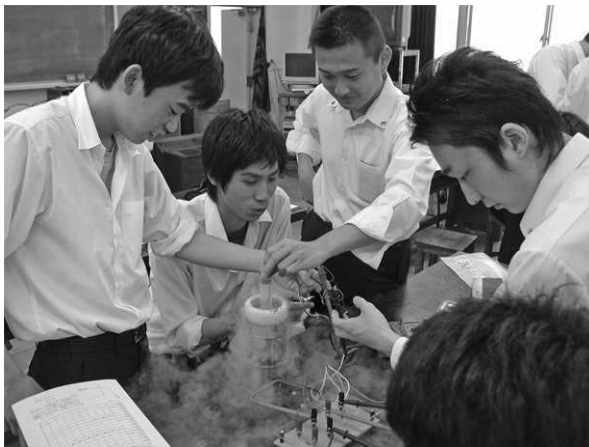
b 超伝導セラミックスの製造過程

超伝導セラミックスは、通常、秤量、混合、焼成(仮焼き)、粉碎・混合、焼成(仮焼き)、粉碎・混合、加圧成形、焼成(本焼き)の各過程を経て作られる。本実験では、簡易的に、島津理化学器械(株)からUFO Powderの商品名で販売されている超伝導体焼成用粉末を利用する。これは、の秤量～の粉碎・混合をすでに終えてある粉末で、加圧成形、焼成(本焼き)を行えば簡便に超伝導体を作ることができる。

- c 高温超伝導セラミックスの超伝導特性について
超伝導物質の温度を下げていくと、ある温度を境に電気抵抗が消失する現象が起こるが、この現象が超伝導現象であり、その変化が起きる温度を臨界温度 T_c という。超伝導物質はこの温度を境に高温で安定な常伝導相から、低温で安定な超伝導相へ相転移をするものと考えられている。また、超伝導物質を臨界温度 T_c 以下に冷却した状態においても、超伝導物質に流れる電流を大きくしていくと超伝導状態が破れてしまうが、この時の電流の大きさを臨界電流という。
- d 熱電対について
2種類の異なる金属線を接合して閉回路を作り、2つの接合点に温度差を与えると、回路に起電力が生じて電流が流れる効果をゼーベック効果という。このときに発生する熱起電力は、2つの金属の種類と両端の接合点の温度だけで定まるので、この性質を利用して2つの接合点の間の温度差を測定することができる。
- e 四端子法について
電流計と電圧計を用いた、通常の抵抗の測定法は、2端子法と呼ばれ、簡便で理解しやすいが、抵抗の小さな物質の電気抵抗の測定には、試料と端子の間の接触抵抗や導線の抵抗による影響を受けない4端子法が優れている。
- f デジタルマルチメーターの使用法
ここで用いるデジタルマルチメーターは、1台で直流電圧・交流電圧・直流電流・交流電流・抵抗を測定することができる便利な測定器で、内部抵抗が高く回路に及ぼす影響が小さいので精度の高い測定ができる。
- g 測定回路の結線練習
実験をスムーズに実施するため、実験に用いる回路の結線を練習した。
- (イ) 実験 (65分)
- a 熱電対による測定の練習
アルメル-クロメル熱電対とデジタルマルチメーターを用いて、標準点の温度を氷点(0)として、人間の体温の測定を試みた。
- b 超伝導セラミックス片の観察
超伝導セラミックスは、焼成時にセラミックスが大気中の酸素を取り込んで反応が進むが、セラミックスの中心部では酸素が不足するため、中心部に色が違った部分ができていることに注意させた。この部分は電気抵抗も大きく液体窒素で冷却した場合にも超伝導にはならない。
- c 超伝導セラミックス片の抵抗値測定
2端子法と4端子法の2つの方法で超伝導セラミックス片の抵抗値を測定した。2端子法は簡便に測定できる方法ではあるが、接触抵抗に比べて被測定物体の抵抗値が小さい場合には測定できないことがよくわかった。このことを確認するために、同時に、抵抗値が小さい物体として銅の太線の抵抗値の測定も実施した。
- d 純銅細線コイルの抵抗値の測定
この場合は数十と抵抗値が大きいので、2端子法で十分測定ができる。
- (ウ) 実験 (65分)
- a 超伝導セラミックスの臨界温度測定
超伝導セラミックス片の大きさを物差しで測った後に四端子法による測定回路を結線した。ここで、常温での電気抵抗値を測り、超伝導セラミックス片の抵抗率を求めさせた。また、超伝導セラミックス片を、結線したままで液体窒素で冷却していき、超伝導セラミックスの抵抗率の温度による変化を調べ(温度は熱電対で計測)、この変化から臨界温度を推定した。
- b 純銅の抵抗率の温度変化を測定
超伝導セラミックス片の場合と同じように、純銅線コイルの抵抗値を、液体窒素で冷やしながらか測定し、銅の抵抗率の温度変化を調べた(温度は熱電対で計測)。その結果、銅の場合は温度が下がるとともに抵抗率が小さくなるが超伝導にはならないことがわかった。
- (エ) レポートの作成
実験のまとめ方については、実験後の最初の授業で指示し、実験レポートを提出させた。



実験の様子



実験の様子

(4) まとめ講義 (65分)

名古屋工業大学大原繁男先生に、まとめ講義「超伝導の魅力」を実施していただいた。まとめ講義の内容は以下の通り。

- a 物理学において、実験は理論と対をなして根幹をなす部分である。そして、実験においては、明確な目的意識、現象の全てを見逃さない観察力、集中力体力や何が真実かを見極める客観性が大切となる。
- b 物質を低温にしていくと、ミクロな状態の秩序が整ってきて物質の本性が見えてくる。その途中で、ある温度で、物質を構成する粒子の状態が一齐に変わり、物質の構造や性質が変化する。このような変化を「相転移」という。磁石が高温で磁性を失うこと(キュリー点の存在)や超伝導現象も相転移の一つである(キュリー点についての演示実験を観察)。
- c 超伝導は水銀の絶対零度での電気抵抗を測定しようとしていたオネス(1911)によって偶然に発見された。この時、彼が大発見を見逃さなかったのは、オネスが、注意深い観察力を持っていたことその他にも、どんな結果が得られても客観的に解釈しようとする柔軟な姿勢を持っていたからである。
- d 超伝導の基本的性質は、電気抵抗ゼロ、マイスナー効果(完全反磁性)、磁束の量子化、ジョセフソン効果の4つである。電気抵抗がゼロであることを確かめるためには、リング状の試料に円形電流を流

し込みそれが減衰しないことを調べればよい。また、かなり多くの元素の単体が低温下や高圧下で超伝導体になることを考えると、超伝導は珍しい現象ではないといえることができる。

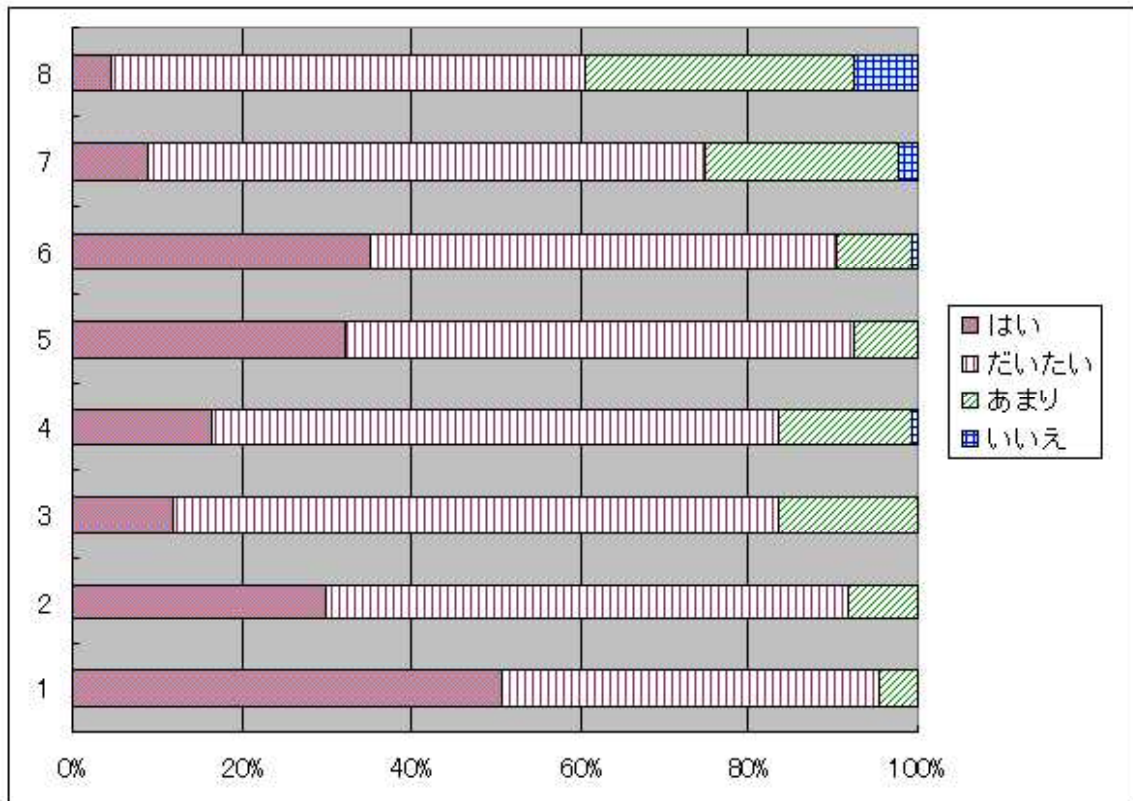
- e 量子力学を用いたBCS理論電子によると、電子が金属の結晶格子を歪めると、その影響で電子のクーパー対が形成され、それによって電子の性質が変わり超伝導が起きる。
- f 超伝導は、送電線用ケーブル、超伝導モーター、リニアモーター、フライホイール(エネルギー貯蔵)、ジョセフソン素子など応用範囲は非常に広い。室温で超伝導が実現する日を夢見て、世界中の研究者が研究を進めている。
- g 各班のレポートの講評から
一つ一つの測定結果だけを見ていると真偽がよくわからないが、多くの測定結果を1つのグラフにまとめて、様々な観点から考察を加えると、測定結果の陰に潜んでいる誤差等の要因が見えてくる。

(5) 検証(成果と反省)

ア 事後アンケートの結果から

事後アンケートの集計結果からは、ほとんどの生徒が、実験は、難しかった面もあるが面白いと感じていたことがわかる。また、実験での経験が将来に役立つと思いますかとの問いに対しては8割以上の生徒が肯定的に答えている。しかし、将来に必ず必要になる熱電対や四端子法といった測定法を学んだのにも関わらず、最も肯定的な「はい」と答えられた生徒が2割しかいなかったことは残念であった。これは、熱電対や四端子法といった新しい技法を扱ったのに、これらの説明にかけた時間が少なすぎて、生徒が消化不良を起こしたためと考えられる。

講義に対する感想も、8割の生徒が、内容は難しいが面白かったと答えている。超伝導現象の原因の説明は、量子力学的な話にならざるを得ないが、その部分を難しく感じたようだ。



事後アンケートの集計結果

設問番号

- 1 実験の内容は面白かったですか。
- 2 講義で取り扱った内容は高度であったと思いますか。
- 3 実験の内容は、自分なりに理解できましたか。
- 4 実験での経験は、将来役に立つと思いますか。
- 5 講義は面白かったですか。
- 6 講義で取り扱った内容は高度であったと思いますか。
- 7 講義の内容は、自分なりに理解できましたか。
- 8 講義の内容に関連して、さらに知りたいことを自分で調べようと思いますか。

イ 生徒の実験レポートから

生徒の実験レポートの感想からは、超伝導現象を面白く感じながらも、生徒が、実験にかけた時間が少なすぎたためにじっくりと取り組めなかったと感じていたことが分かった。

以下に生徒の感想の一例を示す。

- ・超伝導セラミックスの抵抗の測定を2端子法で行うと、値がぶれてしまって測定できなかったが、4端子法では抵抗値が一定となり優れていると実感できた。
- ・今回の内容は、理由や原理が難しくて、よくわからない点多かった。やさしい教科書レベルの実験をもっとたくさんやりたい。
- ・超伝導という現象はとても不思議だと思った。第一、なぜ超伝導になるのか。実験のグラフを見ると臨界温度付近で急激に抵抗が落ちている。その少し前では変化があまり見られない。このあたりに何か秘密があるのだろう。
- ・磁石が上に浮くという現象は普通では考えられないことであった。超伝導現象では解明されていないことも多いのでこれからが楽しみだ。
- ・実験レポートにもう少し自分の意見・見解が書けると良かった。実験に時間が欲しかった。
- ・四端子法などのしくみが深く理解できないまま実験に取り組んでいたことが反省点

です。また、講義を聴いてからもっとじっくり実験結果を考察すれば良かったと悔やんでいる。

- ・自分たちで実験方法を考えて実験をやりたかった。
- ・実験器具の取り扱いに慣れていなくて、最初はなかなかうまくいかなかったし、レポートのまとめ方にも苦労したけれど、将来のためにもいい経験となりました。

ウ 今後の特別研究に向けて

本特別研究を実施しての反省点は以下の通りである。

- (ア) 生徒のレディネスに応じた時間数で実施する必要がある。

前述のように、実験レポートの感想からは、多くの生徒が、事前授業や実験の時間が短か過ぎたために理解できなかったと感じていることが分かった。これは、平成 16 年度に、よく似た内容の特別研究をほぼ同じ時間数で実施した際には問題とならなかった事項である。また、今回は、実験中に回路の結線違いに起因するデジタルマルチメーターのヒューズの切断が 5 件発生したが、これも平成 16 年度の特別研究では全く発生しなかったことである。これらは、平成 16 年度には生徒がそれ以前に何度も S S H 授業を受けていたのに対し、今回は生徒が体験する 2 回目の S S H 物理実験であったこともあり、発展的な内容に対する生徒の受入準備が整っていなかったためと思われる。このように、生徒のレディネスに応じた時間配分が必要であることがわかる。

- (イ) まとめ講義の中で実験結果の評価をしていただいたことは有意義であった。

特別研究の最後のまとめ講義の中で、生徒各自が実験レポート中で作成した超伝導体の抵抗値の温度特性のグラフをもとに、そこから推定できる実験の善し悪しについて、研究者の経験に基づいた有意義な助言をいただいた。この内容は、生徒にとっても、教師にとっても、実際の実験データをどのような姿勢で考察すべきかについて考える良い事例となった。

- (ウ) 生徒自身に企画させる実験も必要である。

本特別研究で実施した実験は、生徒がマニュアルに沿って実験を進める形式のものであるが、生徒の関心や能力をより引き出すためには、実施時間数は多くなってしまいう問題点が生じるが、生徒が実験方法を考えて進める形式が望ましい。

最後になりましたが、お忙しいところを親切にご指導を頂きました名古屋工業大学電気電子工学科の大原繁男先生に心より感謝申し上げます。