

金属の抵抗と温度の関係

39期

I テーマ設定の理由

理科が好きな僕は、1年と2年と自由研究で理科に関するをやろうと思ったのですが、よい題材が見つかりませんでした。しかし、授業で実験をしていたり、問題集を解いていると電流や抵抗のことに興味を持ちました。そして、偶然に超伝導ブームが重なり、雑誌でセラミックス超伝導体であれば非常に簡単に作ることができることを知り、金属とセラミック超伝導体について調べてみようと思いました。

II 研究方法

[1] 金属の抵抗と温度について

- (1) 金属の抵抗と温度について
- (2) 抵抗がどのようなもので、なぜ発生するのかを調べる。
- (3) 抵抗がなくなる時はどんな時かを調べる。

[2] 超伝導体について

- (1) 超伝導体をつくる。
- (2) 超伝導現象はどういう現象なのかを調べる。
- (3) 超伝導現象の起こる秘密を調べる。

[3] [1],[2] に結果をもとに、金属の抵抗と温度との関係を調べる。

III 研究内容

[1] 金属の抵抗と温度について

(1) 実験により抵抗と温度を調べる。

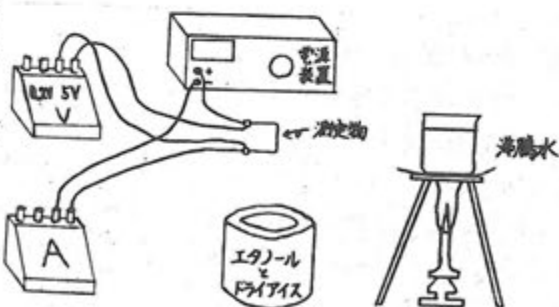
準備物 電圧計、電流計、電源装置、加熱器具、ピーカー、純水、温度計、金づち、エタノール、ドライアイス、リード線、ポット

方法 ①測定器具を図のように

つなぎ、電源電圧を調整して、電圧計が 0.2 V を指すようにする。

②電流計と温度計の目盛を読みとる。

この2つの動作を、エタノール中、空気中(常温)、沸騰水中で行う。



○エタノールにドライアイスを入れて、 -80°C を得る。

○測定物は鉄線とニクロム線で行う。

結果 鉄

	電圧計	電流計	抵抗値
-80°C	0.20 V	1.98 A	0.10 Ω
30°C	0.20 V	1.68 A	0.12 Ω
100°C	0.20 V	1.42 A	0.14 Ω

この結果の抵抗値は、実験者の未熟さにより、理論値との差がかなりあります。

ニクロム

	電圧計	電流計	抵抗値
-80°C	5.00 V	300 mA	16.7 Ω
30°C	5.00 V	300 mA	16.7 Ω

考察 鉄は温度が下がると抵抗値も小さくなっていくが、ニクロムは温度が変化しても抵抗値が変わらないということが考えられる。しかし、測定物の種類の少なさ、測定器具の精度の問題といったことがあり、文献を見ました。

0°C 、 t [$^{\circ}\text{C}$] の時の抵抗率を ρ_0 、 ρ とすると、

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

が成り立ちます。 α を抵抗率の温度係数といいます。このことから、 t の値が小さくなると ρ の値も小さくなるということがわかります。そこで、断面積を S [m^2]、長さを l [m] とすると、電気抵抗は、

$$R = \rho l / S \quad (R: \text{電気抵抗})$$

と表されます。つまり、 ρ の値が小さくなれば R の値が小さくなる、温度が下がれば電気抵抗が小さくなる可以说です。

ところが、抵抗率とはどんなものかということですが、これは大変難しく、ここでは説明できません。温度係数についても同じです。しかし、どちらも、それぞれの物質固有の数値であるということだけをここで使おうと思います。

それでは、上の式から、 ρ の値が大きければ大きいほど電気抵抗は大きくなるということがわかります。また、 α の値が大きければ大きいほど温度による電気抵抗の変化が大きくなるということがわかります。このことは、ニクロムの実験結果を説明するのに好都合です。要するに、ニクロムは α の値が小さく、電流計で読みとれるほどの抵抗値の変化がなかったのです。実のところは、このことを先生に教えていただいて、 α の値も大きく ρ の値も大きい「鉄」で実験をしたのです。ちなみに、タングスタンは α の値、 ρ の値共にとても大きいのですが、空気中での実験は困難を極めます。また、銅は α の値は大きいのですが、 ρ の値は、ご承知のとおり素人が計測できるようなものではありません。このよう

に、いいわけがましくなりますが、測定物の種類が限られていた為に、2種類の金属しか調べることができなかったのです。

(2) 抵抗がどのようなもので、なぜ発生するのかを調べる。

抵抗、正式には電気抵抗。水が高いところから低いところに流れるように、電気も電圧によって物質の中を流れます。このとき、電流の大きさが、電圧と抵抗という値で決まることはよく知られています。有名な「オームの法則」は、電圧が高いほど、あるいは抵抗が小さいほど、大きな電流が流れるということを数式の形で表わしたものです。そこで、電圧を電流で割ったものが、電気抵抗と呼ばれます。電気抵抗は物質によってそれぞれ値が決まっています、普通の状態では、どんな物質にも抵抗があります。

では、なぜ抵抗が発生するのでしょうか。金属のような電気抵抗が小さく電気が流れやすい物質を「導電体」と言います。この導電体とは、自由に動き回ることのできる電子が存在する物質だと考えて下さい。金属などの固体は、原子が格子状に規則正しく並んでいるから、その格子のすき間を電子がある程度の束縛を受けながらも自由に飛び回っている、というのが導電体のイメージです。自由電子はすでに述べたように完全に自由ではなく、熱運動によって起こる格子の振動や、格子中に入り込んだ不純物の原子にぶつかったりすることによって、電子の動きは束縛を受けることになります。この束縛が電気抵抗の原因なのです。

(3) 抵抗がなくなる時はどんな時かを調べる。

抵抗をなくす為には、それは単純に考えれば、格子の振動がなく不純物が含まなければいいのです。格子の振動は温度が上昇すれば激しくなります。つまり、温度を下げていけば、いつかは格子の振動がなくなるのです。

ところで、太陽の表面温度が6000℃、中心温度が1600万℃。宇宙が誕生した時は、何千億度、何兆度という温度が存在したと考えられています。一方、海王星、冥王星の近くは、太陽系の端であるのにも関わらず、-200℃ぐらいである。超高温と極低温では数字の桁数が違う。これは極低温に限界があることを示します。実は、-273.15℃になると、分子などの物質構成原子の運動が止まってしまう、それ以上温度を下げたくても、下げられなくなってしまいます。つまり、原子も分子もすっかり凍った状態になるのです。この温度を絶対零度と言います。

抵抗は、絶対零度の環境下ではなくなるのでしょうか。

[2] 超伝導体について

(1) 超伝導体をつくる

○方法1 準備物 省略

材 料 原料の金属（何かわからない）、硝酸、臭酸

作り方 ①金属を硝酸で処理をして硝酸塩の混合液を作る

②①で作った液に臭酸を加える

③②でできた沈殿物を焼いて酸化物を作る

（この方法は、湿式方と呼ばれる）

○方法2 準備物 七宝焼用電気炉、乳鉢、すり棒、計量スプーン、上皿天びん
材 料 酸化第2銅（1.0g）、酸化イットリウム（0.6g）
炭酸バリウム（1.5g）

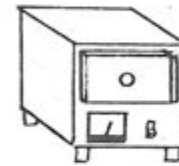
・材料の質量は割合である。

作り方 ① 材料を全て乳鉢に入れて、均質になるように、すり棒でよくかき混ぜる。



少しづつ完全に混ぜようとする。

② 高熱用の素焼の小皿に移し、七宝焼用電気炉に入れ850℃で2時間焼く。



850℃になるまでの時間がかかりかかる

③ 焼き上がった物をスプーン等でかき落とし、乳鉢でゴリゴリとすりつぶす。



皿に黒っぽくこがりつくように焼き上げる

④ 水を加えて押し固める。



水の加えすぎに要注意何か型に入れて押し固めることを勧めり

⑤ 再び850℃で1時間焼く。



焼き終わ、た後の冷えすぎ調整が最も重要。ゆっくりと自然に1時間ぐらいかけて冷ます。この間に超伝導物質になるか否かが決まる。

⑥ 完成

（この方法は、乾式方と呼ばれる）

今まで述べてきたのは、セラミックス超伝導体の作り方です。他に、水銀、アルミニウム、亜鉛、スズ、タングスタン、ウランなどの超伝導元素、ニオブ・チタンといった合金、ニオブ・ゲルマニウムなどの金属間化合物、炭化物、窒化物、硫化物、ホウ化物、もちろんセラミックスといった酸化物と、いろいろなものから超伝導を示す物質が見つかっています。また、セラミックスの中でも、ニオブ・スズ、ランタン・ストロンチウム・銅などと、いろいろな組み合わせのものがある。

(2) 超伝導現象はどういう現象なのかを調べる。

オランダのライデン大学低温研究所で、カメリン・オンネスという教授が、「極低温」の研究に没頭していました。オンネスがまずやろうとしていたことは、ヘリウム・ガスを液化しようとするのでした。当時、すでにさまざまな気体の液化が達成され、酸素、窒素、水素など一時は「永久気体」と名付けられていた気体も次々に液化されていきましたが、ヘリウム・ガスだけは、液化できずに残っていたからです。しかし、オンネスは用意周到な実験を行って、1908年、ついにヘリウムの液化に成功しました。

オンネスが次に手掛けたのは、極低温の世界で金属の電気抵抗がどう変わるかを調べる事でありました。当時すでに低温になるとともに金属の電気抵抗が小さくなることは知られていましたが、絶対零度で抵抗がゼロになるかどうか、研究者の興味的になっていました。初めは、白金、金、銀などの金属を用いて実験を行い、絶対零度付近でも少し抵抗が残り、その値が金属の種類や純度によることがわかってきました。そこでオンネスが目にしたのは「水銀」でした。水銀は金属のくせに、室温でも液体なので、精製して高純度のものを作り出すのが用意でした。オンネスが超伝導現象を確認したのは、ヘリウムの液化に成功した3年後の1911年のことでした。高純度にした水銀を液体ヘリウムで冷却していき、電気抵抗を測定すると、案の定、抵抗は次第に小さくなっていきました。ところが、4K（摂氏マイナス269度）の付近で、途方もないことが起こりました。それまでの電気抵抗の緩やかな減少から一変して、抵抗が突然ストンとゼロに落ちてしまったのです。絶対零度で電気抵抗がゼロになるのならともかく、それより高い温度で抵抗が突然消えたのでした。これは、物理学の常識を超えたことでした。オンネスは、その後の論文で、この状態をスーパー・コンダクティング・ステイト（超伝導状態）と呼んでいます。オンネスのグループはさらに、鉛、スズも超伝導物質であることを発見しました。オンネスは1913年、この発見によりノーベル物理学賞を受賞しています。

ところで、「電気抵抗ゼロ」というのは、「永久電流」の存在で証明されているといわれています。「永久電流」とは、超伝導物質でリングを作ると、そこで発生した誘導電流が減衰することなく流れ続けるというもので、さまざまな実験から、永久電流と呼べる現象が確認されています。

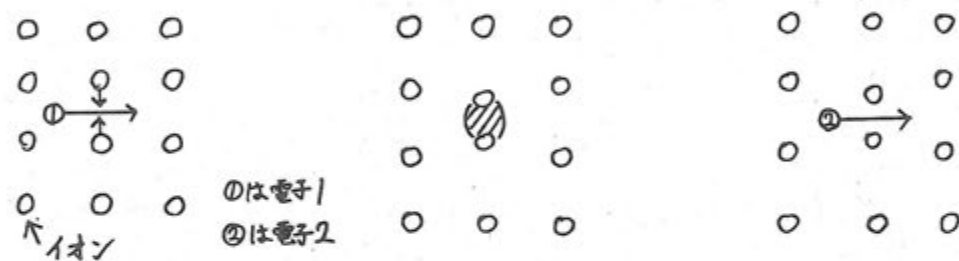
これまでの研究では、超伝導物質の電気抵抗は10のマイナス25乗オーム・メートルより小さいことが確かめられています。オーム・メートルというのは、物質の抵抗の単位で、例えば、銅の場合では、10のマイナス8乗オーム・メートルほどです。この2つの数値を比べると、超伝導物質の電気抵抗は銅の電気抵抗の10京分の1ということになり、これならゼロといっても、差し支えないということになっています。

(3) 超伝導現象の起こる秘密を調べる

超伝導現象を最初に理屈づけることに成功したのは米国のバーディーン、クーバー、シュリーファーという3人の物理学者でした。1957年に発表されたこの理論は、3人の頭文字をとって「BCS理論」と呼ばれ、3人はこの功績によってノーベル物理学

賞を受賞しています。このBCS理論のポイントは、「2つの電子がペアとなったものが超伝導状態のカギを握っている」ということです。

電子がペアを組むとは一体どういうことでしょうか。この組を「クーバー対」と言いますが、これを正確に説明するには、量子力学の世界に入っていかなければならないのですが、ここではやりません。そこで、ごく簡単に説明すると、クーバー対は不思議な性質を持っていて、すべてのクーバー対が集合して1つにまとまります。これは気体分子が集合して液体になるのに似ています。1つにまとまった電子たちは、金属イオンの妨害に関係なく液体のように流れることができます。ですから、超伝導現象は、クーバー対ができることによって起こるのです。では、なぜマイナス同士の電子がペアを組むのでしょうか。ここでは、第1世代セラミックスの時に有力であったBCS理論を紹介しようと思います。（簡単にする為に2次元で説明します。）



電子1が格子の間を通ると、それにつられて周囲のイオンが引き寄せられてくる。

しかし電子1はイオンにくっつきはせず、通り抜けてしまう。金属イオンは重いので直に元の場所に戻らず、一時的にプラスの電荷が濃くなる場所ができる。

そこへ電子2が吸い寄せられてくる。しかしこれもまた、イオンにくっつかずに通り抜けてしまう。

IV 結論

金属の抵抗と温度との関係は、断面積、長さを一定とすると、ある温度で、0℃の時の抵抗値の増分とその時の摂氏温度は比例関係です。そして、温度が上昇すると電気抵抗が大きくなるのは、格子の振動が激しくなり電子がさかんにイオンに衝突するようになるからです。超伝導に関する研究については結論はありません。まだ入口にさしかかったところです。

V 総括

この研究をするのに、担当の先生をはじめ、多くの先生や助手さんに、本当に勝手ばかり言わせていただき、迷惑をかけてばかりいました。どうも有難うございました。結論にも書いたように、超伝導についてはまだまだ調べていこうと思います。中3で1番良い研究ができてとても良かったと思います。あの暑さを思い出せば、その思いはさらに強くなります。

—参考文献— 「超伝導革命」 牧野 昇（昭和62年6月30日 第3刷）