

【初等中等教育における探究学習への支援プロジェクト】

中学生の「超伝導」についての探究学習に、大学院新領域創成科学研究科の
芝内 孝禎先生がアドバイスを行いました

2026.9

東京大学大学院教育学研究科附属学校教育高度化・効果検証センター（CASEER）では、「初等中等教育における探究学習への支援プロジェクト」において、児童生徒の発意や関心に基づく探究学習に対して専門の研究者が的確なアドバイスをすることにより、探究の成果をいっそう高度で充実したものとするをねらいに、東京大学の教員もしくは大学院生がオンラインを通じて支援・指導を行っています。

今回は、東京都の中学3年生 Y さんの超伝導に関する探究プロジェクトを通して出てきた疑問や悩みに、大学院新領域創成科学研究科・物質系専攻の芝内 孝禎先生がアドバイスしました。

- ・探究のテーマ：超伝導について
- ・相談者：Y さん（中学3年生）
- ・探究学習の取組単位：個人



- ・アドバイした人：大学院新領域創成科学研究科
物質系専攻物性・光科学講座 芝内 孝禎教授
[専門] 物性物理学
[研究テーマ] 強相関電子系超伝導に関する研究
→[芝内先生のページへ](#)



- ・コーディネーター：教育学研究科 本田由紀教授（CASEER センター長）
- ・オブザーバー：東京大学大学院総合文化研究科・
教養学部共通技術室（基礎実験化学）
技術専門職員（指導実施時）
白山智佳先生



「超伝導とは何か？」から、その先の新たな問いへ

—BCS 理論から高温超伝導・室温超伝導まで

Series8. 超伝導について

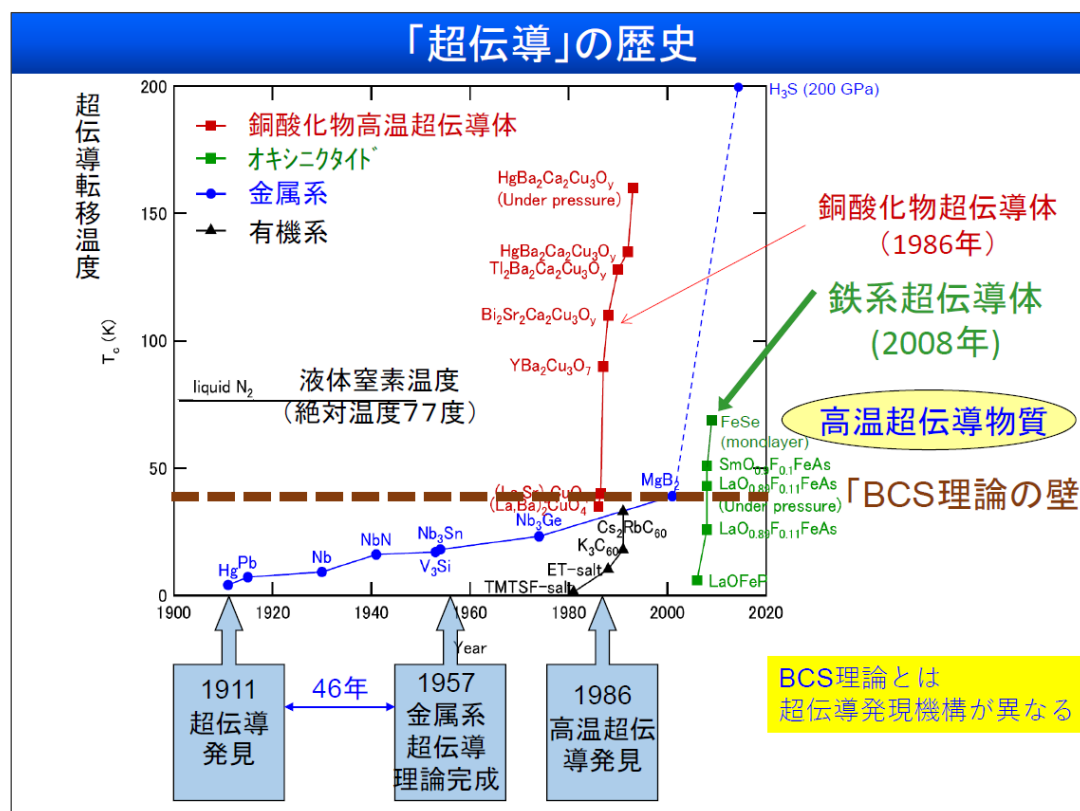
本田先生：では、Yさんの自己紹介からお願いします。

Yさん：Yと言います。H中学校の3年生です。

芝内先生：Yさんは超伝導の研究をしているということですが、まず最初に、なぜ超伝導に興味を持ったか説明してもらえますか？

Yさん：研究者の方々が学校に来てくれて、超伝導の実験をしてもらいました。その実験で超伝導に興味を持ち始めて、もっと研究したいなと思いました。

芝内先生：あらかじめ質問事項を書いてくださったんですが、すごく良い質問が多かったです。上辺だけでなく本質的なところを質問されているので、その答えも含めて、資料を準備したので、それを見せながら超伝導の研究のYさんが面白いと思っているようなところをかいつまんで説明していきましょう。



最初に、超伝導は低温で起こりますが、どのぐらいの温度から超伝導になるか、という超伝導低温温度の歴史を簡単に説明します。実は最初に発見された超伝導体が水銀で、1911年に発見され、この時の低温温度は4ケルビンでした。この温度の単位は大丈夫ですか？

Y さん：大丈夫です。

芝内先生：恐らく実験では液体窒素が使われたと思いますが、液体窒素の 1 気圧での沸点が 77 ケルビンという値になります。同じようにもっと冷たい液体があって、それがヘリウムですね。ヘリウムの液体の 1 気圧での沸点は 4.2 ケルビンなので、だいたいこのヘリウムと窒素が温度を冷やす時に使う主な寒剤になっており、この二つの温度が超伝導で重要な温度になります。実はこの窒素とヘリウムでは価格が全然違います。

Y さん：調べたんですけど、すごいですね。

芝内先生：そうですね。大体窒素が約 1ℓ で数百円程度、ヘリウムが数千円。これがどんどん今上がっており、非常に高い液体になっています。感覚としては窒素がウーロン茶だとすると、ヘリウムがウイスキーくらいの値段になってきているので、なるべく安い窒素を使えるとより嬉しいということになります。最初の水銀が超伝導になる温度が約 4 ケルビンで非常に低いので、液体ヘリウムという高価な液体を使わないと超伝導にはできないということです。その後、より高い温度で超伝導になる物質がいろいろ見つかってきましたが、この 1911 年～1957 年の間は非常に低い温度の超伝導体しか見つかってきませんでした。そして 1957 年に一度、超伝導の理論が完成します。それがバーディーン・クーパー・シュリーファーという三人の物理学者によって作られた BCS 理論です。実はこのバーディーン先生は唯一、ノーベル物理学賞を二回取っている先生です。

Y さん：はい。

芝内先生：一回目はトランジスタの発明でノーベル賞を取っています。普通、一度取ったら二度目はなかなか難しいのですが、この超伝導の理論があまりにも素晴らしかったので、これはあげざるを得ないという形で、この BCS 理論に対して 1972 年にノーベル物理学賞が出ています。BCS 理論は、世界で最も美しい物理学理論の一つとも言われ、宇宙物理学や素粒子物理学などの他の分野にも影響を与えています。この理論によって超伝導体の性質のほぼすべてがわかったということで、一旦、超伝導の研究が落ち着きました。

ところが 1986 年に、全く異なる系統の超伝導体が見つかりました。銅 (Cu) と酸素 (O) を含む「銅酸化物高温超伝導体」です。液体窒素の温度を初めて超える超伝導体ができたとすることで、ものすごい超伝導研究のフィーバーが物理学界で起こりました。最初に発見したのはベドノルツとミュラーという

IBM の研究者で、発見のわずか 1 年後にノーベル賞を取っています。実は当初、彼らが論文を発表した時は、発表したデータが十分とは言えず、信じがたいような論文だったので、ほとんど誰も信じなかったんですね。しかし、東京大学工学部物理工学科の田中昭二先生らが本物であることを証明し、その後わずか一年ぐらいの間に、非常にたくさんの研究がなされて、ノーベル賞に導かれたということになっています。

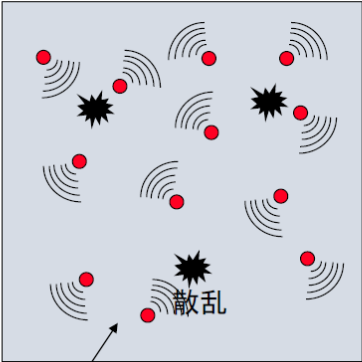
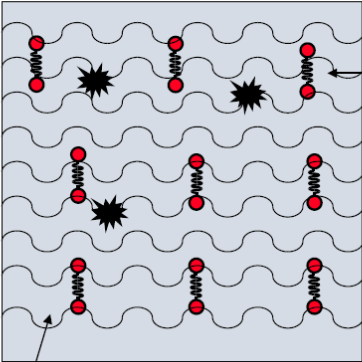
さらに 2008 年には、当時の東工大の細野先生が鉄を含む「鉄系超伝導体」を発見しました。銅酸化物系と鉄系はいずれも高い転移温度を示し、普通の金属超伝導体とは一線を画すと言われています。実は BCS 理論は非常に優れた理論なので、世の中に存在する物質のさまざまなパラメータからどのぐらいの転移温度になるか計算することができます。これは質問にあった「**超伝導の転移温度を計算できるのか**」という点になりますが、昔は計算が非常に大変でしたが、最近ではコンピュータの性能向上により、第一原理計算を使って、結晶構造を与えると、BCS 理論に基づいた超伝導の転移温度が完璧に計算できるようになっています。通常物質では 40 ケルビンを超えるのは難しいと考えられ、これがいわば「BCS 理論の壁」とされていました。ところが、この銅酸化物超伝導体と鉄系超伝導体は、BCS 理論の壁を圧倒的に超えているわけです。これらの超伝導体について第一原理計算で計算するとわずか 1 ケルビンぐらいの超伝導しか計算では出てこないのですが、実際には 77 ケルビンの窒素温度を超えた超伝導体が見つかっています。つまり、通常の金属超伝導体は、BCS 理論で完璧に説明できるが、銅酸化物超伝導体や鉄系超伝導体は BCS 理論では説明できないメカニズムで超伝導が起きているということです。

実はごく最近、すごい圧力を加える技術が発達してきて、200 万気圧という非常に高い圧力を加えることで水素を含む超伝導体が 200 ケルビンを超える温度で見つかりました。BCS 理論では、二つの電子が対をつくることで超伝導になります。なぜ電子同士でペアを作ることができるかという点、その間にある「格子振動」を使います。規則正しい物質の中には原子が並んでいますが、それぞれわずかですが、非常に小さく振動しています。その格子振動を使って電子と電子がペアを組むことができるというのが BCS 理論の基本的な考え方です。

水素は非常に軽い原子です。そのため、水素の格子振動は他の元素とは異なる性質を持つことが知られていました。実は BCS 理論ができた頃から水素を固体化できれば、高い低温度が出るのでは、ということが言われていました。ところが、ご存知のとおり水素は常圧では気体です。水素を固体化する技術はありませんでした。それを高圧を使い、硫黄を混ぜることで固体化し、固体化した水素を使うと高い低温度が出るということが証明されました。BCS 理論の壁が実は「壁」はなく、マテリアルパラメーターをうまく調整すれば、実は転移温度をあげられることが証明されました。

しかし、高圧でできた超伝導体をそのまま使うのは無理なんですね。こんなに高い圧力を大きな試料で作るのも無理ですし、その状態のまま保持するのも絶対無理です。なので、超伝導転移温度の壁がないとわかったのは重要ですが、圧力をかけないで高い転移温度を出すための機構を物理的に明らかにすることが現在の超伝導の重要な研究課題になっています。では、先ほどの対を組むとなぜ超伝導になるかという、普通の金属では、電子が物質中を動き回っていますが、こういう散乱体にあついたりして、それが抵抗の原因になります。

超伝導のメカニズム(擬ボース・アインシュタイン凝縮)

金属	超伝導	
		2つの電子が ペアを組む (ボース粒子のように 振る舞う)
電子の波はバラバラ → 電気抵抗が発生する	電子はペアを組んで揃った波となる (コヒーレントな波) → 電気抵抗ゼロ	
		

ところが超伝導になると、二つの電子が対を組むことで、波の性質が強調されたような、新しい状態になるんですね。イメージとしては、白熱灯からレーザーになるような感じです。そうすると散乱体があっても、それに散乱されないような状態になり、電気抵抗がゼロになります。BCS 理論では、二つの電子が「格子振動」を介して、対を形成します。電子はどちらもマイナスの電荷をもつため、普通は反発します。しかし、この格子振動を介することで、特別な状態で電子同士が引き合うということがわかりました。BCS 理論では電子と電子を引っ付ける糊が格子振動でしたが、現在考えられているのは、違うものを介したら、より高い転移温度を持つ超伝導ができる可能性があるのではないかと、ということで、高温超伝導物質のメカニズムが日々研究されています。どのよ

うな「糊」を使用すればいいのか様々議論がなされており、それを見つけることが、より転移温度の高い物質を見つけるための一番の近道になると考えられており、それが見つかれば、室温超伝導も夢ではないと考えられています。

Y さんの質問に「**研究者は超伝導転移が高い物質を見つけているのか**」とありましたが、現在はこれを説明する研究をしています。もう一つの質問は、「**室温で使える超伝導材料を開発する上で一番大きな問題点は何か**」ということですが、今のところ BCS 理論ではなかなか難しそうだということがわかっているので、例えば超高压を使えば別ですが、普通の状況ではなかなか難しいです。ところが、BCS 理論における格子振動とは異なる何かがうまく電子に引力を働かせることができれば高温超伝導ができるのではないかということです。また、「**今もまだわかってない超伝導についての謎があるのか**」という点は先ほど説明したように、この糊が何かという点が最大の謎になっているわけです。

「**ある物質の超伝導転移を実験する前に予測できる方法はあるか**」という質問ですが、先ほど話したように今コンピューターが発達していますので、第一原理計算でこのメカニズムの転移温度は計算ができます。しかし、それと異なるメカニズムは計算ができないので、ちゃんとわかることが重要なことになります。最後の質問は、「**もしも資金が無限にあるとしたら、超伝導についてどのような実験をしますか?**」ということですが、実はこういう物質の共通性をまず知ることが大事なので、今、例えば化学式の組成を少し変えたら、超伝導の特性がどう変化するのかなど実験を通して色々調べています。なので、そういった実験がたくさんできるように必要な実験装置を購入して、実験をたくさんすることが大事だと考えます。大体の説明をしました、Y さんから何か質問はありますか？

Y さん：一点だけ、色々調べた中で見つけたんですが、わからないやつがあって。Nature に記載されているらしいんですが、真空揺らぎによる要因によって超伝導が増強されるということがあったのですが、それがどのようなものなのか、少しでもいいので理解したいです。

芝内先生：なるほど。その論文を実際に読んだことがないのですが、先ほど話していた電子と電子をくっつける部分については、いろんなバージョンが考えられています。例えば磁性体といって、電子が自転していて、自転の方向が同じ方向でそろって、全体の向きがそろって磁石になります。ただ、全てがそろっているわけではなく、若干ゆらゆらと揺らいでいて、その揺らぎを使っているものもあります。あるいは、原子は価数を持っていて、例えば 3 プラスや 4 プラスといった状態がありますが、その価数が少し揺らいでいるようなものも考えられています。いずれにしても、何かが揺らいでいるというのは、物理学的には「ボ

ゾン」というものに置き換えられるという考え方があり、その揺らぎをボゾン化したとして捉え、先ほどの電子と電子の間に揺らぎを挟んでやると、引力を作り出すことが可能になります。その一つのバージョンとして真空の揺らぎがあり、万人が認めているかは不明ですが、このような揺らぎを使った超伝導についても考えられ始めている、ということだと思います。

Y さん：ありがとうございます。

芝内先生：今のところ、先ほど話した高温超伝導が「これだ」というように決定されている状況ではないので、それを皆さん今、頑張って研究していて、恐らくそれを定めた人が次のノーベル賞を取るのではないかと思います。なので、Y さんがもし興味があるのであれば、ぜひそこを目指して大学に行って、頑張って物理の勉強をして、挑戦してみるといいのではないのでしょうか。

Y さん：ありがとうございます。今までの質問と変わるのですが、学校で研究結果の発表があるんですが、発表によって超伝導に興味を持ってもらうことも目標の一つにしています。超伝導の実験をしてみようと思ったのですが、学校の先生に液体窒素が危ないと言われたので、できなくて。他に超伝導の面白さを体感できる方法がありますか？

芝内先生：そうですね。最近だと例えば Youtube とかで実際に超伝導体が浮くような映像もありますし、先ほどお見せした資料もよければ参考にしてみてください。ぜひわかりやすい発表を頑張ってください。ちなみにこの研究は夏休みの宿題か何かですか？

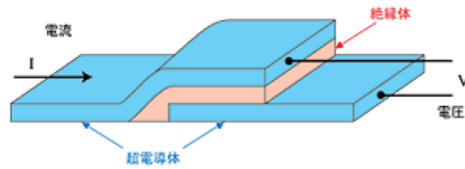
Y さん：宿題ではなく、通っている学校の文化祭のようなイベントで、研究を発表するということをやっていて。それぞれ好きなテーマを決めてやっています。

芝内先生：なるほど。すごいね。将来が楽しみです。

Y さん：ありがとうございます。 もう一つ質問してもいいですか。超伝導の性質の一つとして、自身の物質で磁力を生み出すことと、電気抵抗が 0 になることがあるのですが、もう一つの性質でジョセフソンエフェクトという性質があるのですが、よくわかりません。

芝内先生：ジョセフソン効果というのは、スライドのように超伝導体を 2 つ持ってきます。

ジョセフソン効果



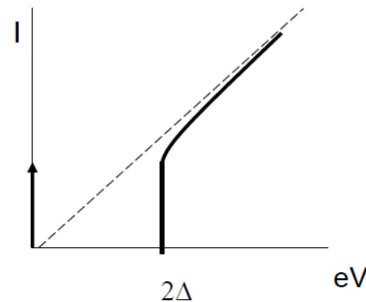
Brian David Josephson

1973年
ノーベル物理学賞



21歳で超伝導量子
干渉効果を予言

絶縁体をはさまって
いても抵抗ゼロで
電流が流れる
高速スイッチング



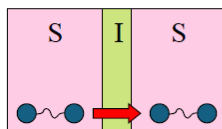
$$\varphi = \theta_1 - \theta_2$$

$$I = I_c \sin \varphi$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2e}{h} V$$

$$f = \omega_J / 2\pi = eV / \pi h$$

$$= 483593.420 \text{ GHz/V}$$



クーパー対の
量子トンネル現象

10桁

電圧標準

青いところが超伝導体です。そこに薄い絶縁体を挟み込む。そして、全部を冷やして超伝導体が 0 抵抗になるようにします。絶縁体は電気を流さない物質なので、抵抗が非常に大きな物質が挟まれています。この状態で左から右に電流を流そうとした場合、果たして電流は流れるのか、という問題設定をジョセフソンは考えたんですね。通常であれば、超伝導体は抵抗が 0 です。この間に非常に抵抗の大きな絶縁体が挟まってるから、電流は流れないというのが普通ですよね。ところがジョセフソンは先ほどの電子が対になっているという状態を考えて、この絶縁体が非常に薄い時は、この電子対が絶縁体を飛び越せると予言したんです。実際この予言をした時、先ほどのノーベル賞を二回取ってるバーディーン先生は「そんなこと起きるはずない」と言いました。いわば、バーディーン先生はノーベル賞を二回取っている大御所の大先生で、ジョセフソンはまだ大学院生の若造だったので、普通はバーディーン先生が「そんなことあるはずない」と言ったら、みんな信じなかったんですね。ところが実験をやってみると、ジョセフソンの言っていることの方が正しかったんです。つまり、間に絶縁体が挟まってるにも関わらず、電流が抵抗値ゼロで電流が流れますということを証明したのが、ジョセフソン効果であり、超伝導の特徴の一つになります。この効果を使うと、実は脳磁計とかに使用されている非常に高感度な磁束計が作れたりするので、ジョセフソン効果が応用されています。なので、

実は物理の世界は大御所が必ずしも正しいとは限らず、こういう若造でも正しいということがありえろということなんです。

Yさん：ありがとうございます。

本田先生：私からも質問していいですか。今Yさんは中学3年生なので、大学に入るまでにあと3年間ありますが、芝内先生からYさんに対して、どんな勉強を勧められますか？ おすすめは何かありますか？

芝内先生：そうですね、例えば今、数学とか理科が好きだったら、やっぱりそれを極めていくのがいいのではないのでしょうかね。特に数学は理系全般、どこにいても重要なので。理系にいきそうなのかな？

Yさん：理系にいくと思います。

芝内先生：理系にいくなら、やっぱり今の時期だったら、数学をきちんとやるのが一番。

Yさん：今年そのことに気づいて、数学を頑張ってます。

芝内先生：いいと思います。全ての基本になります。科学的な分析力は数学と通じるものがあるので、今中学三年生だったら、やっぱり今は数学をちゃんとやるのがいいです。

本田先生：特に数学のどの分野とかありますか？

芝内先生：微分積分はすごく重要ですので、そこをきっちり、少しわからないけどまあいいか、ではなく、そこは突き詰めて、最後まで、わかるまでやるみたいな感じがいいんじゃないでしょうか。

本田先生：ありがとうございます。Yさん頑張ってるね。白山先生、何かおありですか？

白山先生：はい。Yさんが中学3年生で調べていることがすごいなと思って。natureなど論文が手に入るようなら、どんどん論文を読んでいくと楽しいと思います。論文を読むためにこの数学を勉強しようとか、この理科のこの本を勉強しようとか繋がると思うので。どこかで論文を手に入れる機会がないか学校の先生に聞いてみてもいいかなと思います。これから勉強頑張ってください。

Yさん：はい。

本田先生：では、終わります。ありがとうございました。

<支援ミーティングを終えて>

*Yさんより

芝内先生のおかげでプレゼンテーションの内容が遥かに良く、自信を持って発表できるものになりました。またこのような機会は CASEER がなければ成り立たないものです。このようなことを可能にしてくださった芝内先生と CASEER に心より感謝しています。

*芝内先生より

今回、超伝導に興味を持って、質問していただきありがとうございました。超伝導は非常に奥深い現象で、多くの研究者を魅了し続けています。その本質を本当に理解するには、物理学の勉強が必要ですが、物理学は理解の積み重ねが必要な学問なので、普段勉強している内容を完全に理解していくことが大事です。中学・高校で学ぶ内容は、将来、興味を持った事柄を深堀するときに必ず役に立つと思いますので、目の前の学習を大事にしてください。