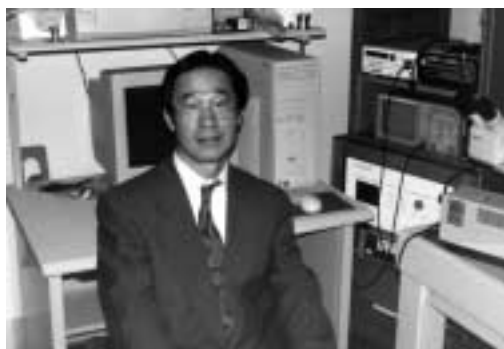




超伝導体を用いた新デバイス

井口研究室～物性物理学専攻



井口 家成 教授

超伝導体。その名は多くの読者が耳にしたことがあるだろう。では、何に使用されているかご存知だろうか。有名なものとしてはやはり、リニアモーターカーである。ところが超伝導体は、コンピュータなどの機器にも用いられる。意外に応用範囲は広いのだ。

ここ井口研究室では、高温超伝導体の研究、中でもそれをコンピュータに応用するための研究に取り組んでいる。これからその研究風景を紹介していこう。



「高温」超伝導体って何？

超伝導体にはふたつの大きな性質がある。ひとつは「マイスナー効果」という現象が生じる点。もうひとつは、電気抵抗値が0という点である。

本来、磁束は物質を図1(a)のように貫く。しかし、超伝導状態では磁束が図1(b)のように排除されてしまう。これがマイスナー効果である。これだけでは実感のわかない読者も、超伝導体の上で磁石が浮かんでいる写真を見たことはあるだろう。これこそがマイスナー効果のなせるわざだ。マイスナー効果は超伝導状態に特有の性質だか

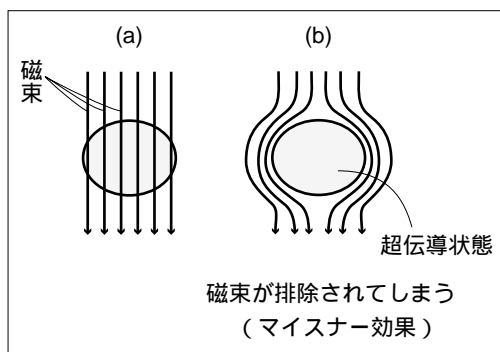


図1 マイスナー効果

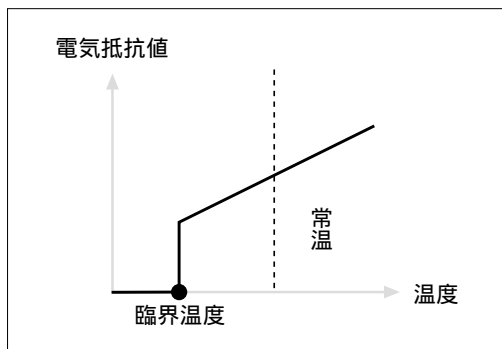


図2 超伝導体の温度と電気抵抗値の関係

ら、この現象が起きているかを調べることで、超伝導状態にあるかどうかができる。

図2は、超伝導体の温度と電気抵抗値の関係を表したグラフである。超伝導体の温度が下がるに従い、抵抗値は最初緩やかに減少していくが、ある点を境に急激に減少し、最終的に0になってしまう。抵抗値が0になる瞬間の温度を臨界温度と呼ぶ。

はじめに超伝導現象が観察された水銀は臨界温度が低いいため、極低温を実現できる液体ヘリウム

(沸点：約4 K)を用いて超伝導現象を起こしていた。ところが液体ヘリウムは高価であるから、大量に手に入れるのが困難である。また、使用したあとのヘリウムの回収など面倒な問題もある。それから超伝導体の研究が進み、より臨界温度の高い超伝導体が次々と発見された。その結果、液体窒素（沸点：約77 K）で冷却することのできる超伝導体が作られるようになった。窒素自体が

空气中に豊富に存在するので、液体窒素を大量に手に入れることはたいして難しいことではない。しかも、使用したあとは空气中にただ戻せばよいので後始末も簡単である。実用面から考えると、液体ヘリウムよりも液体窒素を冷却剤として使う方がよいのだ。このような液体窒素で超伝導状態が実現できる物質を高温超伝導体という。



電磁波に敏感、超伝導体

携帯電話は使っているときに電磁波を発生している。電磁波は有害だと言われているので、脳に近い場所で電磁波を発生させるのは好ましくない。それなら少しでも電磁波の強度を弱めればよいのだが、あまりに弱めすぎると、今度は基地局で電磁波を受信することができなくなってしまう。ここでこの相反する問題を解決するのが、超伝導体なのだ。

超伝導体は高感度で電磁波を捉えられるため、基地局のアンテナ部に超伝導体を用いれば、強度が弱くても受信することができる。また超伝導体を用いれば、機器内における受信に必要な部分の大きさが小さくて済む。その結果、機器全体としても小型化が可能になるので、現在では衛星通信

や衛星放送などにも用いられるようになってきている。

ところで超伝導体は電磁波を受信するだけではなく、発振するのに用いることができる。そこで井口研究室では、高温超伝導体を用いた電磁波の受信機と発振器を同一チップ上に作成し、かなり微弱な電磁波を検出することに成功している。この研究は、超伝導体を用いた新しい発振器を作ることに応用できるのではないかと期待されている。また、光通信や光コンピュータに見られるような、光学と電子工学の境界領域の分野に応用していこうというのが、井口研究室の今後の展望である。



ジョセフソン素子を複雑なデバイスに

これまでのコンピュータでは、CPUなどにシリコンを用いていた。しかし、半導体産業の目を見張る進歩の結果、シリコンに限界が見え始めてきた。そのため、コンピュータの処理速度を上げるにはシリコンとは別の物質を利用することを考えなければならなくなった。そこで登場するのが、超伝導体を利用したジョセフソン素子である。ここで図3のように非常に薄い絶縁体を2つの超伝導体で挟んだ接合（ジョセフソン接合）があるとすると、絶縁体は電気を通さないから本来、図3(a)のように絶縁体のところで電流が流れなくなってしまう。しかし、絶縁体が非常に薄いという特別な条件のもとでは、図3(b)のように電子が絶縁体を通り抜ける、トンネル効果と呼ばれる現象が起きる。このトンネル効果を利用した素子が、ジョセフソン素子と呼ばれるものだ。これには電流が

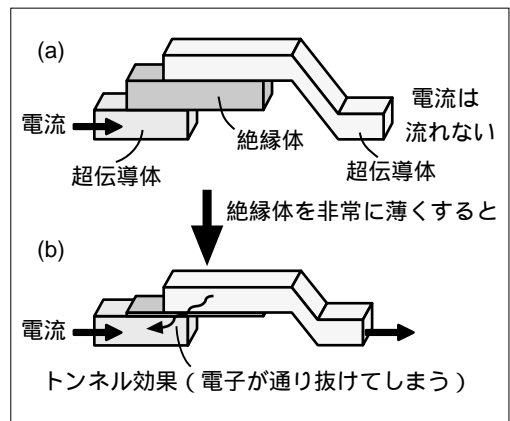


図3 トンネル効果

回路を流れるときの発熱量がシリコンを用いたときに比べて少ないという特徴がある。また、ジョ

セフソン素子においては、電子が回路を進む速度も速い。以上のような特徴から、ジョセフソン素子を用いれば、集積度や処理速度を上げることが可能だろうと考えられている。

このようにジョセフソン素子は、コンピュータの処理速度を上げるのに有用であるが、これからは速さとは別の性能も求められるようになってきている。この背景のもと、井口研究室ではデバイスをいかに速くするかということよりも、ジョセフソン素子を用いて複雑な動作ができる新しいデバイスを作ることに重点を置いている。

図4は、このデバイスの入力の部分の様子をモデル的に表したものである。図4(a)で点線で囲まれている部分を拡大し、横から見たのが図3(b)である。ここで2つの高温超伝導体を図4(a)のように配置する。高温超伝導体には電流を流すとき、その流す方向によってその動作が変わるといった性質もある。つまり、図4(b)のように電流を流したときと、図4(c)のように電流を流したときと

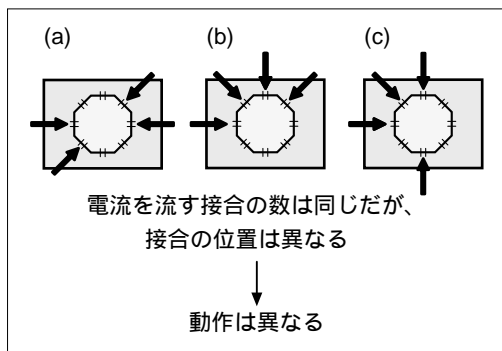


図5 複数の接合から電流を流す

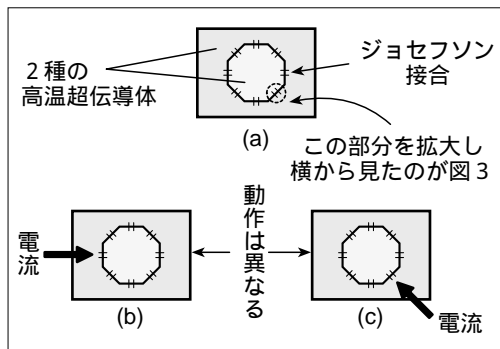


図4 流す接合によって反応が変わる

では、デバイスとしての動作が異なるのだ。電流の流し方は何通りもあるから、入力仕組みを複雑にすることが可能である。

図5を見てほしい。(a),(b),(c)それぞれ電流を流す接合の数は同じであるが、その接合の位置は異なっている。図4に見られる性質より、図5の(a),(b),(c)のように電流を流すと、デバイスとしての動作が全て異なるのである。このような特異な現象は、高温超伝導体ならではのものだ。

この研究をする上でどういった点に苦勞しているかということ、図3における絶縁層を適当な厚さにし、更に一様に作らなければならないという点だ。この部分を厚く作ると、トンネル効果は起きない。一方で薄すぎると、単に電氣的にショートして電流が流れてしまうのである。いずれにせよ、絶縁層を適した厚さにしないとトンネル効果は起きず、このデバイスの特徴である、相互に関係するという点が失われてしまう。井口研究室ではこの部分をうまく作るために、最先端の薄膜作製と微細加工の技術を用いている。



研究の今後とその課題

今まで見てきた井口研究室で研究されているデバイスは、ニューロコンピュータに応用できるのではないかと考えられている。

これまでのコンピュータは、ノイマン型の逐次式コンピュータであった。これは、プログラムに沿って計算していき、出力するものである。それとは対照的なコンピュータとして、ニューロコンピュータというものがある。これはプログラムなしでちょうど人間の右脳のように直観的に答えを

出して出力するものだ。

ニューロコンピュータは、プログラムなしでどのように答えを出すのだろうか。それを説明するために、サイン照合で使われるニューロコンピュータについて見ていこう。

人間がサインを判断するときと、ニューロコンピュータが判断するときとを比較してみよう。人間の場合は、そこにあるサインの形を見て判断する。ニューロコンピュータの場合はサインの形、

書いているときの筆圧の変化、書く速さなどを元に認識している。判断材料はコンピュータの方が多いが、このこと自体はさほど問題ではない。ここで注目したいのは人間もニューロコンピュータもサインの形を見ている点である。サインにおける文字のはね方やはらい方など、様々な角度から捉えている。それではニューロコンピュータの認識のメカニズムは一体どのようなになっているのだろうか。

ニューロコンピュータにはプログラムというものがない。だから、正しい出力を得るためには学習が必要である。初めのうちはそのサインが本物が偽物かの判断は曖昧である。しかし、異なるサインを何度も入力して、正しい判断が出るようになるまで「シナプス」と呼ばれる部分を調節する。この調節を「重み付け」という。こうした学習を繰り返すことにより、いつでも正しい判断が下せるようになる。そうなればいかなる人のサインであれ、本物が偽物かを判定できるようになるのだ。

要は図6にあるように、各入力にシナプスで重み付けをする。その和が一定値（図6ではh）を超えていれば「サインは本物である」と判断し、一定値を超えていなければ「偽物である」と判断するのである。

今述べたことは、図6を見てもわかるように、井口研究室で研究されているジョセフソン素子による新しいデバイスの仕組みに類似している。どこが似ているのかというと、ニューロコンピュータにおける「どれくらい重み付けするか」というところが、このデバイスでは「どことどの接合から入力させるか」ということに対応していると

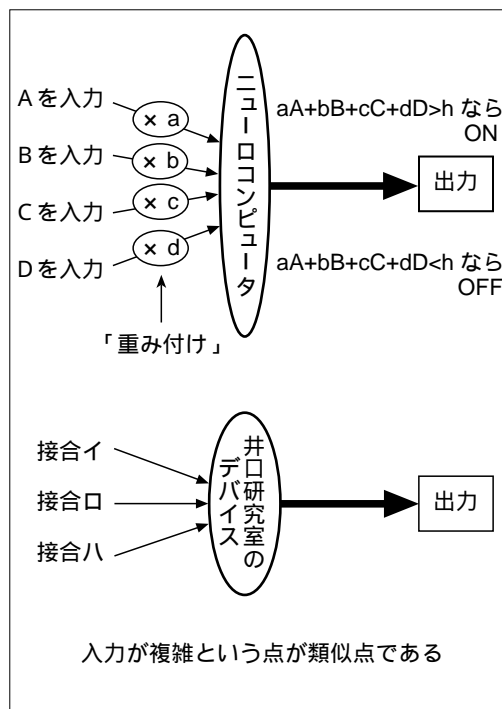


図6 各デバイスの仕組み

ころである。これほどまでに似た仕組みのデバイスだから、ニューロコンピュータに応用できるだろうと考えられるのも自然な帰結であろう。井口先生によると、この新しいデバイス作成の研究は軌道に乗り始めたところだという。

ただ、このデバイスの実際の動作を知るためには、複雑な方程式を解く必要があるが、井口研究室としては、まだその段階にまで研究が達していない。そういった方程式を解くことが井口研究室の今後の課題である。

初めにも述べたように、超伝導体は非常に応用範囲が広い。特に高温超伝導体ともなると、発見されてから十数年しか経っていない。そのため、どうして超伝導状態が起きるのかというメカニズムさえまだまだ分かっていない。謎を秘めた物質なのだ。

井口研究室では、高温超伝導体を用いた応用研究を非常に広い視野で行っている。その研究内容は多岐にわたるが、ここでは電磁波の受信機と発振器について、新しいデバイスについてのみ紹

介させていただいた。

これまで見てきた研究は、色々な場面での応用が期待されている。以前まで考えつかなかったようなことが実際にできるかもしれないのでは、と。

たくさんの可能性を秘めた超伝導体。かつてリニアモーターカーで世間をアッと驚かせたときのような応用が、いつかきっと出てくることだろう。井口研究室の研究成果に心より期待したい。

(田中 宗)