

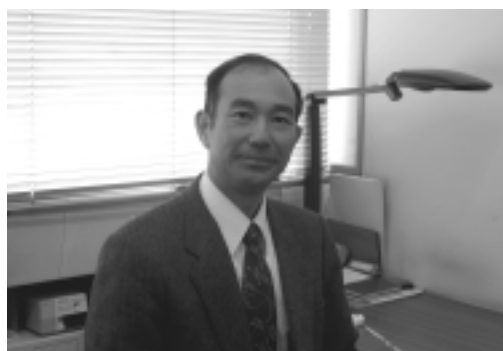


In Laboratory Now

研究室訪問 3

超伝導を支える冷却技術

岡村 哲至 研究室～創造エネルギー専攻



岡村 哲至 教授

超伝導とは、超伝導体を冷却すると電気抵抗が0になる現象であり、わずかな電圧で大電流を流すことができる。その特性を活かして、現在超伝導は、強磁場を生み出す超伝導マグネットとして多方面で応用されている。その超伝導マグネットの性能を上げるカギとなるのが、冷却技術だ。

ここ岡村研究室では、超流動ヘリウムという冷媒の特性に着目して超伝導マグネットの冷却技術の研究を行っている。そしてその研究から、従来の冷却システムの性能を大幅に向上させる可能性が見い出された。



超伝導マグネットを冷やす

超伝導という言葉も、誰もが一度は耳にしたことがあるだろう。それは超伝導体とよばれる物質を臨界温度まで冷却したときに電気抵抗が0になる現象であり、わずかな電圧でも大きな電流を流すことができる。その大電流を利用して強力な磁場を作り出す超伝導マグネットは、現在ではリニアモーターカーやMRI(磁気共鳴イメージング)装置など、様々なところに応用されている。また世界規模で開発が進行している核融合反応装置にも、超伝導マグネットは不可欠な存在である。

しかし、いくら超伝導マグネットとはいっても無条件に強力な磁場を作り出せるわけではない。限界値以上の電流が流れたり磁場がかかると、超伝導状態は壊れてしまうのである。ただしその限界値は、低温にすればするほど大きくなり、強力な磁場を生み出すことが可能になる。おおまかに言うと、同じ超伝導マグネットでも、温度を半分にするれば、作り出す磁場の強さを2倍にすることができるのである。そこで、超伝導マグネットを臨界温度よりさらに低温にして、より強い磁場を

生み出そうという研究が行われている。

超伝導マグネットの材料として主に用いられている物質は、金属系超伝導体と高温超伝導体とよばれるもので、それぞれ約10 Kと約80 Kで超伝導状態となる。これらの臨界温度よりもさらにマグネットを低温にするために冷媒として用いられるのが、岡村先生の研究に欠かせない「超流動ヘリウム」という物質だ。

超流動ヘリウムとは、ヘリウムを常圧下で約2 Kまで冷却したときに液体から相転移してできる特殊な流体である。超流動ヘリウムは温度が非常に低く、熱伝導率が大きい流体である。また、2 K以下になると普通の物質では固体になってしまう冷媒に用いることが難しくなるため、超伝導マグネットの冷媒として不可欠な物質である。それだけではなく、この超流動ヘリウムは非常に面白い特性も幾つか併せ持っている(*注)。その特殊な性質を有効に利用して、従来よりもさらに冷却システムの性能を向上させることが、現在岡村先生が取り組んでいる研究課題なのである。

*注 超流動ヘリウムは、粘性がない超流動成分と通常流体の性質を示す常流動成分が混ざった状態になっており、特殊な性質を示すのは正確に言えば、超流動成分である。



超流動ヘリウムを活かす

超流動ヘリウムを用いて大型超伝導マグネットを冷却する一般的な方法として、コイルにスペーサーを組み込む方法がある。まず超伝導線を巻く際にあらかじめスペーサーというものを挟み込み、コイル内に隙間を作りながら巻いていく。そしてでき上がったコイルを超流動ヘリウムの中へ浸け込む(図1左)。超流動ヘリウムには、どんなに細い管でもスリリと通り抜けるという特殊な性質があるので、スペーサー内部の空隙やコイルとスペーサーの隙間を流れて、コイルの隅々にまで超流動ヘリウムが行き渡るのである。

冷却性能を調べる際には、実際のコイルは用いず、図2のような流路素子を用いて実験を行う。素子にはコイル内の発熱の代わりとしてヒーターを取りつける。そして流路内に熱を与えていき、超流動ヘリウムが通常の液体ヘリウムに転移する(この転移を 転移という)ときの熱量を測定する。これをヒーターの断面積で割った値を 転移熱流束(q)とよび、この q が冷却性能を測るパラメータになるのだ。 q が大きければ大きいほど、それだけ大きな熱量が発生しても、マグネットを2 Kに保つことができるといえる。

では、この q を大きくするためには具体的にどうしたら良いのだろうか。まず考えつくのは、流路を広げるという方法である。しかし流路を広げると、コイルはすかすかになり、結果として大型化してしまう。超伝導マグネットに要求されるのは、より小さなコイルでより強い磁場を発生させることであり、流路の幅を変えずに q を大き

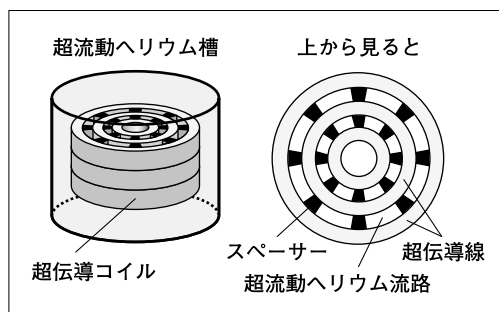


図1 スペーサーを用いた冷却

くする方法を考えなくてはならない。

そこで岡村先生は、超流動ヘリウムの持つ特殊な性質の1つである熱機械効果に注目した。熱機械効果とは、超流動ヘリウムの一部が加熱されると、超流動ヘリウムの中にある超流動成分が低温領域から高温領域に向かって流れるという非常に独特な性質である。この特性を活用して冷却性能を上げようと考案されたのが、スペーサーに多孔質材を用いる方法だ。

流路内の超流動成分は、コイル内で局所的な発熱があると熱機械効果によって温度の高い方に向かって流れる。しかしスペーサーで流路が分断されていると、超流動成分が自由に流れることのできる範囲は限られてしまう。そこでスペーサーの材質を小さな孔がたくさん空いた多孔質に変える。すると超流動成分はその孔を通して行き来することができるため、流路内の1点が発熱しても、周りの流路から超流動成分が自動的に流れ込んで熱をならしてくれる。これならば、流路を広げずに q を大きくすることが可能ではないかと予測したわけである。

実際に、従来使われているFRP(プラスチック繊維強化樹脂)と3種類の多孔質材でそれぞれ流路素子を作り、 q を測定する実験を行った。このとき用いられた多孔質材は、孔径が平均数 μm のアルミナ多孔質材、高密度ポリエチレン、そして孔径 $0.3\mu\text{m}$ 、厚さ $40\mu\text{m}$ の多孔質フィルムの3種類である。

実験の結果、FRPスペーサーに比べて、多孔質材を用いたスペーサーの方が極めて q が大きくな

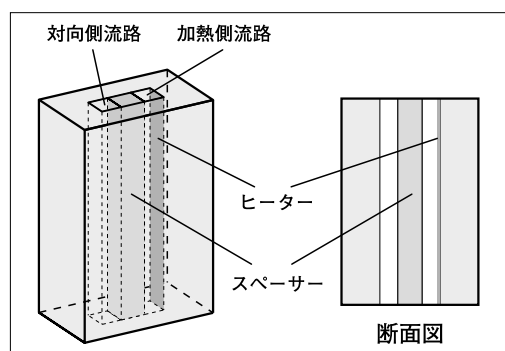


図2 実験で用いた流路素子

ることがわかった(図3)。グラフ中の実線は、従来のFRPスペーサーで流路を2倍にしたときの q の理論値を表している。グラフからわかるように、流路を2倍に広げるよりも多孔質材を用いた方が q が大きくなるといえるのだ。このことは、

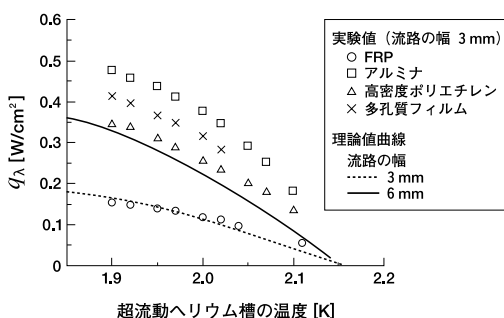


図3 多孔質材スペーサーの実験結果



失敗も楽しみながら

岡村先生の研究は、実験を中心に進められている。実験に失敗はつきものである。なかでも先生の扱っている極低温は、常温に比べてはるかに特殊な世界である。極低温ならではの失敗も多い。

極低温の実験においては、許される誤差はわずか0.001 K以下と、とても厳しい。また実験に用いる計測用の電線が冷えると縮み、途中をつないでいる部分が切れてしまうこともある。そうすると、せっかく時間をかけて極低温まで冷却したにもかかわらず、肝心のデータが出てこないのである。極低温の実験では冷却するのに約2日、その後常温に戻すのに1週間ほどかかる。1サイクルが約10日なのである。そこで失敗すると、データが出ないまま1、2ヶ月があつという間に過ぎてしまう。前章で紹介した多孔質材スペーサーの研究も、ここまで成果をあげるのに数年の歳月を費やしている。

しかし実験と失敗を繰り返すことで得られることもある。超流動ヘリウムを作るには、液体ヘリウム槽を断熱真空槽で覆って冷却する。しかしこの際にヘリウム槽のふたにわずかも隙間があると、液体ヘリウムから超流動ヘリウムになった瞬間に隙間から漏れ出し、断熱真空槽の真空状態が壊れてしまう。超流動ヘリウムには、どんな隙間も通り抜け、壁面をひとりでに這い上がる性質が

流路内の局所的な温度上昇が抑えられたために冷却性能が大幅に向上したことを示している。

ただし、この実験で用いた多孔質材は、本来スペーサー用に開発されたものではないために、様々な問題がある。例えば、極低温への冷却と室温への高温化とを2、3度繰り返すうちにスペーサーはボロボロになってしまう。また、孔径や孔の数を自由に変えて実験してみたいが、そのような材料が現時点では手に入らないことなどだ。

これらを解決するには、材料系の研究者や繊維会社などがスペーサー用に新しく多孔質材を開発することが必要となる。現在岡村先生のもとに、会社側が新素材を提案してくることもあるそうだ。新しい素材の開発により、多孔質材スペーサーの冷却性能はこれからも向上していくことが期待される。

あるので当たり前の失敗なのだが、このような失敗をして初めて超流動を実感することができる。失敗して学ぶことも多いのである。

ところで、岡村先生が実験で扱っているのはテストピースである。そのため、得られたデータだけでは実用化に直接結びつけることはできない。しかし理論を一旦確立すれば、それを用いて他の実験系を説明できるようになり、広く応用できる。そこで岡村先生は実験を行うと同時に、モデルを立て、それに基づく理論計算も行っている。

実験結果と理論計算の数値が一致すれば、立てたモデルが正しいといえる。しかし実験データと理論計算が1度で合うことはほとんどない。両方の結果が合わないとき、先生はまず実験装置に不備がなかったか見直すのだそうだ。変なところで接触していないか、誤差が出るような計測素子の取り付け方をしていないかを全てチェックする。次に、立てたモデルの方を見直してみる。

多孔質材スペーサーの実験で、素子の置き方を変えて再度実験してみると、垂直に置いた場合と水平に置いた場合とでは異なるデータが出てきた。これは明らかに重力などの影響を受けていることを表しており、モデルに新たな条件を入れる必要がある。こうして実験結果を理論へフィードバックして実験と理論の構築を繰り返しながら、

研究は進んでいくのである。

岡村先生は自らの研究姿勢をこう語る。「失敗は多いけれど、それも1つの勉強だよ。失敗も楽しみながらやらないとね。実験と理論が合わない

ところにこそ、私は研究の面白さを感じる。そこには必ず新しい何かがあるから」。

失敗は成功の母 岡村研究室では、今日も実験が繰り返されている。

ポータブル超伝導マグネット!?

岡村研究室で行われている研究の1つに、熱電素子を使った高温超伝導マグネットという研究がある。これは非常にユニークな研究であり、現在は同専攻の栗山先生と共同で進めている。ここではその研究内容を簡単に紹介しよう。

熱電素子とは、**p型半導体**と**n型半導体**を金属と接合したものであり、素子の一端を加熱すると熱が電気に変換され、電流が流れる。これを熱発電といい、岡村先生たちが行っている研究ではこの熱発電を利用している。

まず、超伝導マグネットのコイルから出ている電線を熱電素子でつなぐ。すると、熱電素子の下側は高温超伝導マグネットの温度である80 Kとな

る。そこで熱電素子の上側に少し熱を加え、温度差をつける。すると、熱電素子は温度差がつくことにより熱起電力が生じて電流が流れるので、熱電素子と超伝導コイルからなる閉回路ができる。コイルは超伝導状態であるから、熱電素子以外の部分の電気抵抗は、ほぼ0である。そのため小さな熱起電力でも大きな電流を流すことができるのである。

熱電素子を利用した高温超伝導マグネットの最大の特長は、大きな電源装置が要らないという点だ。100Aを越す大電流を流すことのできる電源装置は、普通みかん箱くらいの大きさであるが、それが3 mm 四方の大きさで済んでしまう。これにより、実験装置を非常にコンパクトにすることができる。

さらに超流動ヘリウムや冷凍機よりも扱い易い液体窒素を冷媒に用いれば、液体窒素の中にこの装置を浸けるだけで超伝導マグネットが使えるようになる。装置の小型化と冷却方法の簡略化により、まさにポータブルの超伝導マグネットが実現可能になるのだ。

現在3 mm 四方で厚さ1.5 mm の熱電素子を用いて、約180Aの電流を流すことに成功している。

より大きな電流を効率良く流すために現在も研究

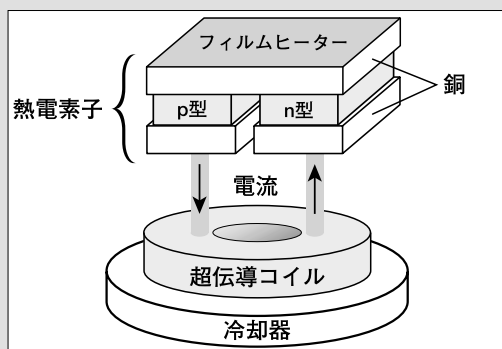


図4 熱電素子を用いた高温超伝導マグネット

岡村研究室で行われている研究のうち、ここでは紹介しきれなかった研究も、私にとっては興味深いものでありました。誌面の都合により、全てを紹介することができず、非常に残念です。

今回初めて記事を書くということもあり、取材の際は非常に緊張していました。しかし岡村先生

はとても気さくな方で、取材を進めるにつれて、緊張もとけていきました。2回目以降は取材に何うのがとても楽しみになったほどです。

最後になりましたが、お忙しい中、度重なる取材や質問にも快く応じて下さった岡村先生に、深く感謝致します。
(吉川 梓)