

超電導を使うとどんなことができるのか？

東北大学 大学院工学研究科 津田 理

「超電導」という言葉を聞いて、何を連想するでしょうか？「電気抵抗がゼロ」、「エネルギーロスが無いので省エネに役立つ」、「超電導リニア」、「MRI(医療用画像診断装置)」など様々だと思いますが、「超電導」について詳しく見たり聞いたりする機会は、なかなかないと思います。そこで、今回は、「超電導とは？」、「どのような物質が超電導になるのか？」、「超電導を使うとどのようなことができるのか？」、「超電導によって未来はどう変わるのか？」など、「超電導」について少し詳しく説明したいと思います。

1. 超電導とは？

超電導現象は、1911年に、オランダのカメリン・オンネスによって発見されました。では、カメリン・オンネスは、どのようにして超電導現象を発見したのでしょうか？

物理学の分野では、19世紀末頃より、極めて低い温度では、物質がどのような特性を示すのか、についての研究が盛んに行われていました。しかし、極低温という特殊な温度環境を実現するのは簡単なことではありませんでした。そこで、当時は、沸点の低い気体を液化する研究が盛んに行われ、窒素(沸点:77K(-196°C))、酸素(沸点:90K(-183°C))、水素(沸点:20K(-253°C))の液化が、次々と成功されていきました。そして、最終目標であったヘリウム(沸点:4.2K(約-269°C))の液化に成功したのが、カメリン・オンネスでした。4.2Kというこれまでに無い極低温の環境を手に入れたカメリン・オンネスは、早速、金属の電気抵抗が温度によってどのように変化するのかについて検討しました。そして、水銀の電気抵抗を測定したところ、図1のように、ある温度で電気抵抗が突如ゼロになることを発見したのです。超電導現象は、このような研究の流れの中で発見されました。今から約110年前のことです。

それでは、超電導現象を示す物質を冷やして超電導状態にすれば、すぐに超電導を活用できるようになるのでしょうか？答えは、「NO」です。「超電導」とは「超電気伝導」を略したもので、電気を流したときに固有の性質を示します。このため、超電導を活用するには、超電導物質にどの程度の大きさの電流を流せるかがポイントになります。しかし、実は、超電導状態で流せる電流の最大値や、超電導状態を維持できる磁場の最大値は、超電導物質によって異なります(超電導状態を維持できる最大の温度・電流・磁場を、それぞれ臨界温度・臨界電流・臨界磁場と言います)。このように、超電導物質が超電導状態を維持するには、温度・電流・磁場のすべてを臨界値以下にする

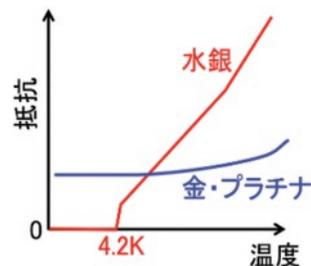


図1. 水銀の電気抵抗の消失

必要があるため、超電導を活用する場合には、これらの臨界値についてよく検討する必要があります。

2. どのような物質が超電導になるのか？

1911年にカメルン・オンネスが、水銀の電気抵抗がゼロになることを発見した後も、新たな超電導物質の探索が継続して行われました。しかし、当時は、金属原子が規則正しく並んでいる方が電気抵抗が小さくなる、と考えられていたため、主に、不純物の少ない純粋な金属元素の探索が中心に行われていました。そして、鉛やスズなど、冷却すれば超電導現象を示す金属元素が次々と発見されました。これまでに発見されている冷やすだけで超電導現象を示す元素は29種類で、高圧にするなど特殊な環境であれば超電導現象を示す元素を含めると、全部で50種類以上になります。

しかし、超電導状態を維持するには、物質の温度が臨界温度以下になるように冷やし続けなければなりません。このため、臨界温度はできるだけ高い方が望ましいのですが、金属元素の一番高い臨界温度は、ニオブの9.2K(-264℃)でした。このため、その後も、より臨界温度の高い超電導物質が探索され、ニオブとチタンの合金のNbTi(臨界温度:10K(-263℃))や、ニオブとスズの金属間化合物のNb₃Sn(臨界温度:18.2K(-255℃))が超電導状態になることが発見されました。このNbTiは、現在、病院などで使用されている医療診断用のMRI装置(体内の細胞や組織の様子を画像化して体の断面写真をつくる装置)で、Nb₃Snは、次世代の発電装置として期待されている核融合装置(原子同士が合体するとき発生するエネルギーを取り出す装置:核融合反応は太陽の中で行われている)でそれぞれ使われています。

NbTiやNb₃Snを超電導状態にするには液体ヘリウムで冷却しなければなりません、ヘリウムは、全宇宙には多く存在するものの、地球上で確保するのは容易なことではありません(最近では、ヘリウム不足が深刻な問題となっています)。このため、地球上に大量に存在する窒素(沸点:77K(-196℃))を液化した液体窒素で超電導現象を示す材料の開発が大きな目標となっていました。こうした中、1986年に発見されたのが、銅酸化物の超電導体です。銅酸化物超電導体は、2種類以上の金属元素を含む酸化物で構成される超電導体で、銅が含まれているのが特徴です。現在、主に使われている銅酸化物超電導体には、ビスマス・鉛・ストロンチウム・カルシウム・銅・酸素で構成されるBi2223(臨界温度:107K(-166℃))や、イットリウム・バリウム・銅・酸素で構成されるYBCO(臨界温度:92K(-181℃))があります。これらは、容易に入手できる液体窒素を用いた冷却で超電導状態になるため、銅酸化物超電導体の発見後は、超電導応用の研究開発が、より盛んに行われるようになりました。

なお、これまでに発見されている超電導体の臨界温度の最高値は、水銀・バリウム・カルシウム・銅・酸素で構成されるHgBaCaCuOの133K(-140℃)です。また、炭素・水素・硫黄で構成されるCSHは、大気圧の267万倍の圧力を加えることが前提となりますが、288K(15℃)という室温で超電導状態になることが確認されています。

3. 超電導を使うとどのようなことができるのか？

超電導体には幾つかの固有の性質がありますが、その中で代表的なものが、「完全導電性(電気抵抗がゼロ)」と「完全反磁性(マイスナー効果:磁場が存在する場所に超電導体を置いても、超電導体内の磁場は常にゼロとなる)」です。このうち、「電気抵抗ゼロ」については、電流を流しても抵抗損失が発生しませんので、省エネ化が必要なエネルギー関連機器やシステムに使うと効果的、ということは容易に想像できると思います。一方、「完全反磁性」についてはどうでしょうか？あまり聞いたことがないと思います。図2のような、永久磁石の上に超電導体を浮かすデモ実験がよく行われますが、これは、超電導体の「完全反磁性」に関する「ピン止め効果」という性質を利用しています。超電導体は、図3のような「完全反磁性」のために磁場を超電導体の中から排除しようとするのですが、図4のように超電導体の中に不純物がある場合は、磁場が超電導体の中に侵入することが可能になります。「完全反磁性」の状態では、図3のように、超電導体の中からすべての磁場が排除されるため、永久磁石の上で安定に浮上することができません。しかし、超電導体内に不純物がある場合は、図4のように、磁場が超電導体を串刺しするかのように入り込みます(この状態を「ピン止め」と言います)。このため、超電導体は、永久磁石と反発しながらも、磁場を通じて永久磁石と磁氣的に結合するために、永久磁石上空で静止して安定に浮上することができます。永久磁石同士では静止安定浮上ができないのは、反発力が働いても、永久磁石間に磁氣的な結合が生じないためです。



図2. 浮上デモ

では、超電導体の中に不純物さえあれば、永久磁石の上で静止安定浮上が可能になるのでしょうか？答えは「NO」です。実は、超電導体の中に不純物がある場合は、超電導体が冷やされて臨界温度以下になるときに、超電導体が経験している磁場分布を記憶する性質があります。これが、図4の「ピン止め効果」です。

ですので、超電導体の経験する磁場がゼロの時に冷やして超電導状態にすれば、永久磁石と超電導体間には「ピン止め効果」による磁氣的な結合は生まれませんので、「完全反磁性」の性質が強く出て、静止安定浮上を実現できません。しかし、超電導体が冷やされるときに経験している磁場がゼロでない場合は、超電導状態になるときの磁場分布を記憶しようとするので、永久磁石と超電導体の間に「ピン止め効果」による磁氣的な結合が生まれ、静止安定浮上が可能になります。

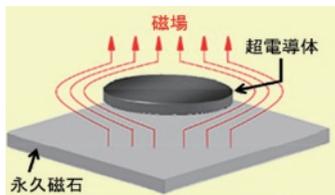


図3. 完全反磁性

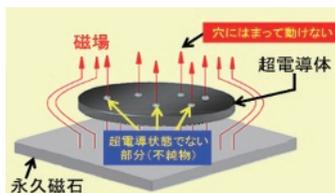


図4. ピン止め効果

この超電導体の「ピン止め効果」を利用したものが、図5の「超電導ジェットコースター」です。永久磁石を同じ間隔で並べてレールをつくり、その永久磁石レールの上で超電導体を冷やして超電導状態にします。すると、「ピン止め効果」により、上下左右方向の動きに対しては、元の位置に戻ろうとする力が働きますが、レール方向は磁場分布が変わらないため、元の位置に戻ろうとする力が働きません。

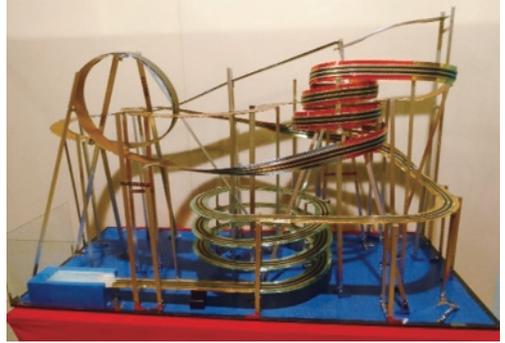


図5. 超電導ジェットコースター

このため、超電導体が、抵抗なく永久磁石レールの上を浮いたまま移動できるようになります。なお、図5の「超電導ジェットコースター」では、超電導体を冷やす時に永久磁石を超電導体の上下に配置しているため、永久磁石レールの上を浮上走行だけでなく、永久磁石レールの下を宙づりになりながら走行することも可能です。

しかし、「超電導ジェットコースター」は、デモ実験としては面白いのですが、直接社会に役立つものではありません。そこで、「超電導ジェットコースター」の原理を活用した図6のような「磁気浮上型超電導免震装置」を開発しました。我が国は地震大国であり、2011年の東北地方太平洋沖地震後も、北海道の胆振東部地震をはじめ多くの大規模地震が発生しています。また、東海・南海・東南海・首都直下型などの巨大地震が、今後30年以内に70%以上の確率で発生すると言われていています。地震時の被害は、主に横揺れに起因するため、最近では、免震装置が導入されていますが、既存の免震装置は、1秒以上の長周期振動には効果が小さく、長周期振動への対応が課題になっています。これに対して「磁気浮上型超電導免震装置」では浮かせているため、全ての横揺れを伝えません。

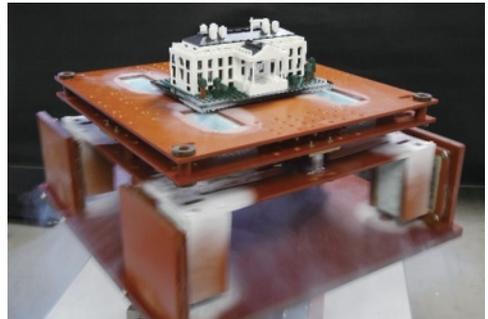


図6. 磁気浮上型超電導免震装置

図7のように、「超電導ジェットコースター」の永久磁石レールと超電導体の組合せたものを直交させて配置すると、最下層と中間層間では、x方向の振動伝達が、中間層と最上層間ではy方向の振動伝達がそれぞれ排除され、全体で全ての横揺れを排除することが可能になります。このような磁気浮上型超電導免震装置は、多数の精密な製造工程を必要とする半導体工場や、患者を治療するために多くの精密

機械を使用し、患者への精神的ストレスを回避することが重要となる病院などで使うと効果的です。ただ、半導体工場や病院に超電導免震装置を導入する場合は、工場内の大型装置や病院の建物を浮上させなければなりません。果たして、そのような重量物を超電導体で浮かせることができるのでしょうか？実は、永久磁石と超電導体間で発生する浮上力は、 1m^2 あたり約5トンになりますので、浮上対象の重量に応じて超電導体の数を増やせば、永久磁石との組合せにより浮上させることが可能になります。

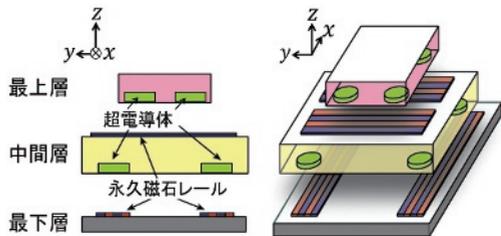


図7. 磁気浮上型超電導免震装置の構成

また、超電導体を磁気浮上に活用したものに「超電導リニア鉄道」がありますが、超電導体の使い方や浮上の原理は、「超電導免震」と大きく異なります。「超電導リニア鉄道」では、図8のように、鉄道車両の車輪の位置に超電導線が巻かれたコイル（電磁石）が設置されていて、そのコイルに大きな永久電流を流すことで強力な電磁石にしています。この電磁石が側壁にある浮上コイルの前を通過すると、「電磁誘導の法則」という物理現象により、浮上コイルに電流が誘起されて一時的に電磁石化します（車両が通過していない時は電流がゼロ）。この超電導コイルと浮上コイル間に吸引力と反発力が働くことにより車両が浮上します。「電磁誘導の法則」によって浮上コイルに誘起される電流は、浮上コイルの前を通過する車両の速さに比例して大きくなります。このため、車両の速さが 150km/h 以下の時は、車両を浮上させるのに必要な浮上力が得られないためにタイヤ走行となり、車両が加速して速さが 150km/h 以上になると浮上して走行します。鉄道車両は、レールの上を車輪が転がる時の摩擦力により走行しますが、走行速度が速くなると、車輪がレールの上で空回りするため、十分な摩擦力が得られません。このように摩擦力を用いた走行には限界があるため、「超電導リニア鉄道」では、電磁力で浮上させて加速する方法が採用されています。

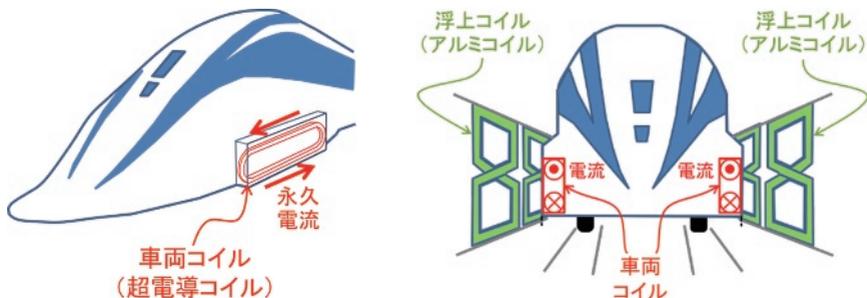


図8. 超電導リニア鉄道用の超電導コイル

