

# 超電導応用

大阪大学工学部電気工学教室

犬石嘉雄 白藤純嗣

## § 1. はじめに

1911年 オランダのカマリン・オンネスは図1のように水銀(Hg)の電気抵抗Rが液体ヘリウム温度付近の4.2 K (絶対温度ケルビン)以下の低温で急に0になることを発見し、この現象を超電導(Superconductivity)と名付けてそれ以上の温度で有限の抵抗をもつ常電導状態と区別した。この新現象は多くの物理学者の興味を引きその本性が理論と実験の両面から追求されると共に、種々の物質で続々と超電導が発見された。その結果今日では一応超電導の基礎物理学は確立されたといっても過言でない。ところがカマリン・オンネスの発見後約60年たった今日になって急に超電導の工学的応用が遅

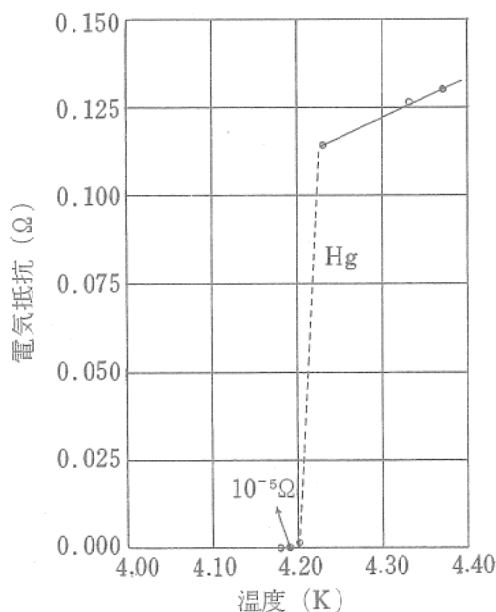


図1 水銀(Hg)の電気抵抗と温度の関係  
(カマリン・オンネスによる測定結果)

い北国の春のように一せいに開花し急に脚光をあびるようになり、“超電導工学”の領域が産れようとしている。この推進力になったものの一つは最近のエネルギー問題であり、エネルギー(電力)の大量輸送と節約の要請である。いま一つは超電導のエレクトロニクスへの応用で超電導電子の量子干渉効果を用いたジョセフソン(Josephson)素子が実用されつつある。以下本稿ではこれら超電導応用の概要について簡単に解説を試みる。

## § 2. 超電導の物性

超電導現象の最大の特長は物質によって定まるある臨界温度  $T_c$  以下の低温で電気抵抗Rが急に零になること、つまり  $T_c$  を境にして常電導状態から超電導状態に移ることである。従って超電導状態の電線では電流Iを流しても電力損失(ジュール熱)  $I^2 R$  を生じないからエネルギー損失なしに電力を送ることができる。また超電導物質で出来たコイルに一度電流を流して磁界を作れば、あとは電源を切ってコイルを短絡しておけばエネルギー損失がないから電流は流れつづけ永久磁石になる。これを超電導マグネットという。

超電導のいま一つの特徴として図2(b)のように磁力線を通さない完全反磁性の性質がある。即ち同図(a)のように常電導状態で磁力線が通っている金属を低温にして超電導状態にすると図(b)のように磁力線は金属の外へおし出される。このような反磁性の性質をマイスナー(Meissner)効果という。(b)の超電導状態でも外部磁界Hを強くして行くと磁力線が内部へ侵入し出すと共に超電導状態がくずれ常電導状態となる。

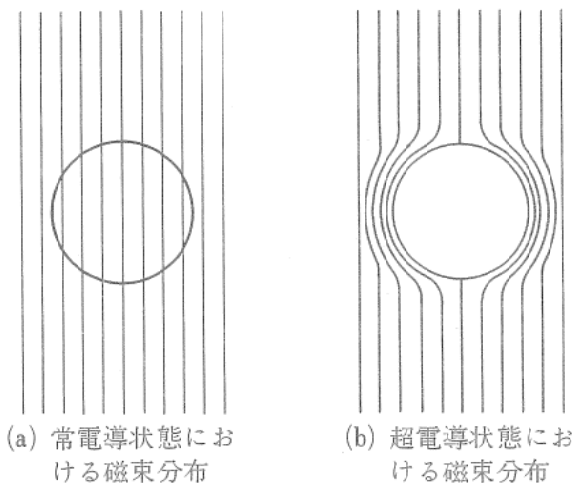


図2 マイスナー効果

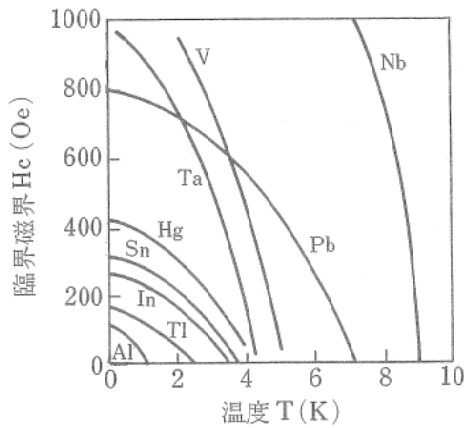


図3 種々の超電導金属元素の Hc-T 曲線

この限界の磁界  $H_c$  を超電導の臨界磁界という。さらに超電導状態には2種類あり、 $H_c$  以上で急に磁力線が全面的に侵入し常電導状態になる第1種超電導体と  $H_c$  より少し低い磁界から徐々に侵入しはじめる第2種超電導体がある。 $H_c$ 、 $T_c$  が超電導物質の使用限界をきめるが、この間には図3のように

$$H_c(T) = H_c(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

の関係がある。単体ではニオブ(Nb)、鉛(Pb)などが  $T_c$ 、 $H_c$  が大きい。

このような超電導現象の理論は1957年イリノイ大学のバーディーン(Bardeen)、クーパー(Cooper)、シュリーファ(Schrieffer)の3人によって完成されBCS理論といわれる。その骨子は次のようである。図4のように超電導体

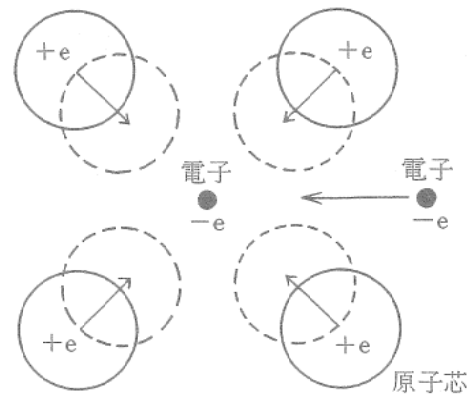


図4 金属の格子と電子の相互作用

の中に1個の電子を置くと周囲の正電荷を帯びた原子芯(金属の構成原子から電導にあずかる自由電子をとり去ったもの)がこれに引かれ点線のように電子の方向に移動する。このため中央部の電子近傍では正電荷が余り、さらに余分の1個の電子が借老同穴のようにこのの中にくわえ込まれる。このように周囲の原子の振動(フォノン)を媒介にしつつ結合した2つの電子をクーバー対(Cooper pair)と呼ぶ。普通の自由電子は金属結晶の原子芯の振動(フォノン)と衝突してエネルギーを失うからジュール熱を発生し、一定の抵抗Rをもっている。ところが超電導状態ではクーバー対となり、いつも2個の電子が対となって原子芯の振動と作用しながら結晶中を動き廻っているから一方の電子が原子振動に与えたエネルギーを他方の電子がすぐり返しクーバー対全体としてはエネルギー損失がない、つまり抵抗が零となる。温度が上り  $T_c$  以上ではクーバー対の結合がやぶれ常電導になる。

その後多くの合金や化合物で超電導が発見されたが、マサイアス(Matthias)によると1原子あたりの価電子数が4~5か6~7の間にあるものは  $T_c$  の高い超電導体になるといわれている。さらに多数の冶金学者、物理学者が臨界温度  $T_c$  や臨界磁界  $H_c$  の大きい超電導材料(主として金属間化合物)を合成する研究を行った結果図5のように年と共に臨界温度  $T_c$  は上昇して行き、 $Nb_{0.79} [Al_{0.73} Ge_{0.27}]_{0.21}$  では20Kを突破している。仮りに25~30K以上の  $T_c$  をもつ超電導体が発見されれば、恐らくノーベル賞にも値する画期的な出来事となる。というのは現在までの超電導体はすべて液体ヘリウム(沸点4.2K)を冷媒として用いて

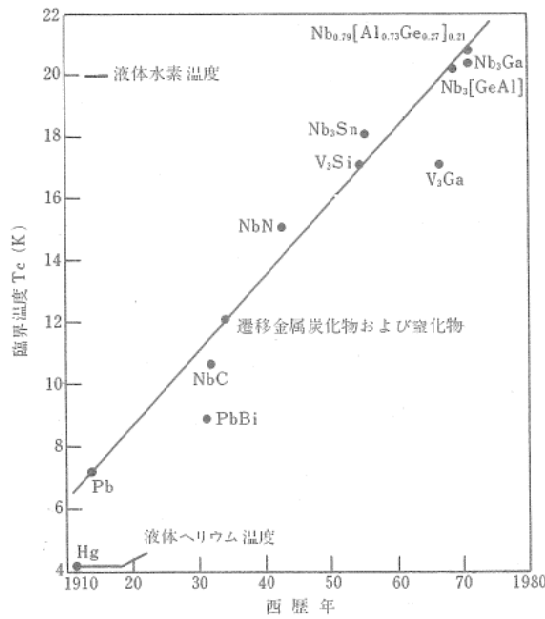


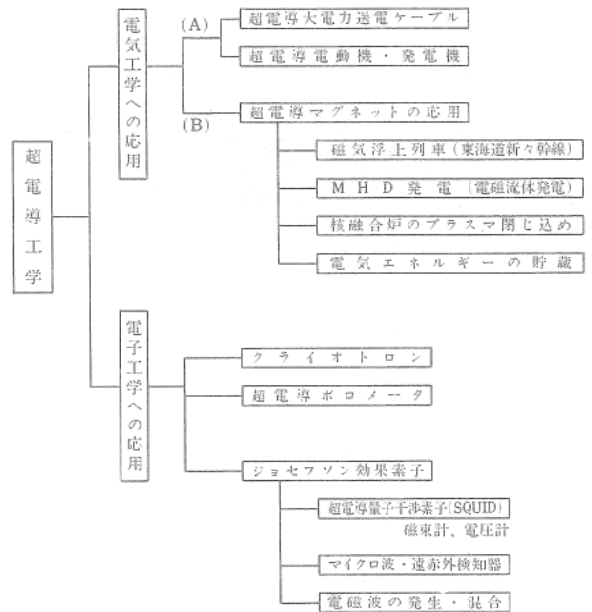
図5 臨界温度から見た超電導材料の進歩

いるが、ヘリウムはアメリカにのみ産し、戦略物質として禁輸の可能性があり高価である。もし液体水素（沸点 20K）を冷媒にする超電導体があればこの冷媒は安価に大量生産され熱容量も大きいから超電導の工学的応用が飛躍的進歩をとげるであろう。今後水素エネルギーの利用と相まって液体水素の安全工学面を確立する必要がある。一方、1964年リトル（Little）は有機高分子の側鎖に適当な分子を選ぶと主鎖中の電子は常温でも超電導状態になるという理論を発表し注目を浴びたが、これを支持する実験結果は現れなかった。最近では TTF-TCNQ という電荷移動型の有機半導体が 60K 付近で銅と同じ位の高い電気伝導度を示すことが発見され話題になっている。

### § 3. 超電導応用の展望

以上のべたように超電導状態の导体では抵抗 0 であるから大電流を無損失で流せること(A)、一度超電導コイルに電流を流しておくと永久磁石と同じ超電導マグネットになること(B)を電気工学的に応用できる。また、ジョセフソン効果を利用した電子工学への応用も重要である。それらを分類すると表 1 のようになる。この内、3 のものについて簡単に解説を試みよう。

表 1 超電導の工学的応用



#### (3.1) 超電導送電と超電導電動機、発電機

我国の電力需要は年々増し 15 年先には現在の 4 倍の 250 GW (ギガワット・ $10^9$  Watt) が必要と見込まれる。しかし公害や石油問題を考えると数十年は遠隔地に充分モニタリング設備の整った大容量原子力発電団地を作って需要地まで長距離大容量送電を行うより手がなさそうである。送電々力を増すためには送電々圧か送電々流のどちらかあるいは両方を増す必要がある。すでに送電々圧は 500KV から 1,000 KV へと超々高圧化の途をたどっているが絶縁問題や誘導障害の問題で限度にきている。さらに都市近郊では深刻な用地難に直面している。以上の点から超電導地下ケーブルによる送電がコンパクトで無損失の大電流送電方式として日、米で注目され多くのケーブル会社でモデル・ケーブルの試作研究が行われ、これまで既に 2~3 MW ていどの通電試験が行われている。超電導ケーブルの構造は図 6 に示すように真空による断熱構造の管の中に液体ヘリウムで冷却されたニオブの导体をおき  $1cm^2$  あたり 10 万アンペア程度の電流を流し無損失送電を行うものである。导体と外部管の間の電気絶縁は熱絶縁のための真空をそのまま利用する方式と液体ヘリウムに含浸されたポリエチレン紙(タイベック)を用

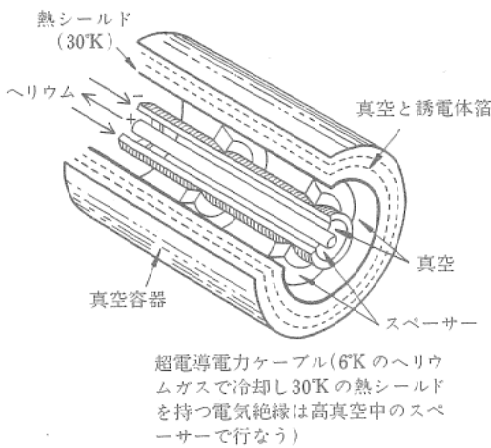


図6 超電導ケーブルの構造

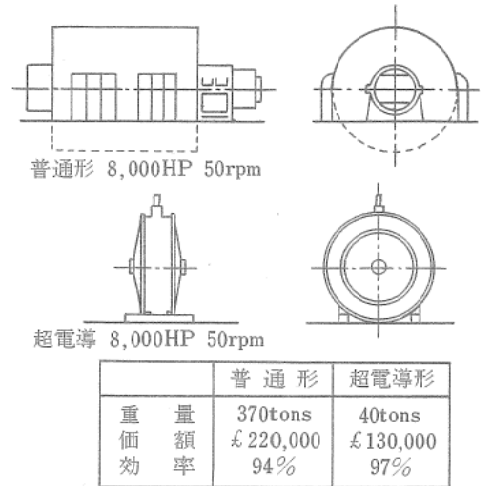


図8 8000HP. 50rpm 電動機の普通形と超電導形の比較

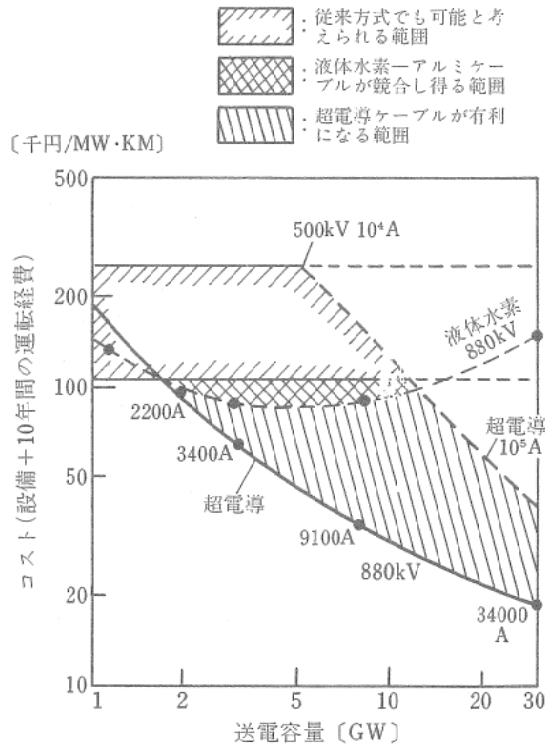


図7 種々の電力ケーブルの経済性の比較

いる方式がある。送電する最大電流は導体電流による自己磁界が超電導の臨界磁界になる電流  $I_c$  できまる。現状では長距離ケーブルの冷却方式、断熱、交流損失の問題をかかえ、競合相手として液体水素あるいは液体窒素温度にすることによって抵抗を減らした銅やアルミ線を用いる低温送電や従来のOFケーブル等をもっているが図7のように大容量送電では超電導ケーブルが有利になるであろう。将来の夢としては北海道から九州までを超電導大電力幹線で結び無損失で電力を融通し合えば当面の電力不足

はのりされるであろう。また通信ケーブルとしても超電導ケーブルの無損失性が利用できる。次に超電導巻線を電動機、発電機の界磁コイルに用いることによって従来の鉄心入り機器より磁束密度をまし、機械をコンパクトにでき、鉄心を省略することによって重量を軽減できる。図8は8,000馬力の電動機を在来形にしたときと超電導形にしたときの大きさと重さを較べたものである。たとえば重さは約  $1/10$  になっているので高速船舶や航空機用として極めて有利で、一部軍用の船舶用として米国で実用化されている。

### (3.2) 超電導マグネットの応用

超電導マグネットの特長は無損失で永久磁石となり、鉄心磁石のような飽和現象がないから臨界磁界(15~30万ガウス)程度の高磁界が発生できる点である。表2は代表的な超電導マグネット用電線材料とその最高発生磁界を示してある。実際の超電導体には何等かの原因による熱的じょう乱で局部温度が  $T_c$  をこえるとそこが常電導体( $R \neq 0$ )となりジュール熱を発生するから周囲も常電導体となり爆発的に超電導から常電導へ移ってしまうという不安定性がある。これをさけるために細いニオブ等の超電導線のまわりを電導度のよい銅で包み、たとえ不安定をおこしても銅が電流を受けもつようにする。

超電導マグネットは理学方面では高磁界発生

表2 超電導マグネット用電線材料の特性

材 料	臨界温度(K)	4.2Kにおける臨界磁場(wb/m <sup>2</sup> )
金属間化合物		
Nb <sub>3</sub> Sn	18.2	24.5
V <sub>3</sub> Ga	16.8	21.0
Nb <sub>3</sub> (Al <sub>0.8</sub> Ge <sub>0.2</sub> )	20.7	41.0
Nb <sub>3</sub> Al	17.5	30.0
合金		
Nb-48Ti	9.5	12.2

用や各種加速器のマグネットとして原子核物理学の方面では泡箱のマグネットとして盛んに用いられている。さらに超高温プラズマによる核融合の研究でも高温プラズマ粒子を核融合反応を起すに十分な時間だけ閉じこめておくためには広い空間にわたって強磁場を必要とする。現在のところ超電導マグネット以外にこの要求にそえるものはなさそうである。

直接発電の一種として電気伝導度の大きい流体を電磁石の作る磁界中にある速度で吹きこみ速度と磁界に比例する超電力を得て発電する方式をMHD (Magneto-Hydrodynamic) 発電という。電導性流体としては液体ナトリウムやセシウム等の電離電圧の低い分子を混ぜた高温ガス(2,000℃以上)などを用いる。MHD発電では高磁界が必要であるが普通の電磁石では発電した電力の殆んどが図9のように磁石に食

われてしまう。超電導マグネットでは磁石はエネルギーを食わないので発電した電力を全部外部へとり出すことができる。我国では通産省の大プロジェクトとしてMHD発電の研究が行われたが高温に耐える材料の問題で壁に突きあたった。むしろこれに付随して行われた超電導マグネットの開発が将来を注目されている。また超電導コイルに電流Iを流しておくインダクタンスをLとして $\frac{1}{2}LI^2$ の電磁エネルギーがコイルに貯えられる。超電導コイルでは損失がないからこの電流は永久に流れつづけエネルギー貯蔵が行える。この形のエネルギー貯蔵はコンデンサによるエネルギー貯蔵( $\frac{1}{2}CV^2$ )よりも貯蔵密度が秀れており、将来性が注目される。たとえば米国のロスアラモス研究所ではθピンチによる核融合研究装置のパルス磁界発生用のエネルギー貯蔵装置として300KJ(キロジュール)の超電導コイルを試作し、更に250MJのものを計画している。この型のエネルギー貯蔵装置は制御装置とエネルギーの入出力回路さえうまくゆけば揚水発電所の代りに深夜余剰電力の貯蔵に用いることが出来るであろう。最後に最近超電導マグネットの強磁場を用いた選鉱や水中の不純物を分離することが公害防止技術として注目されていることを指摘しておこう。

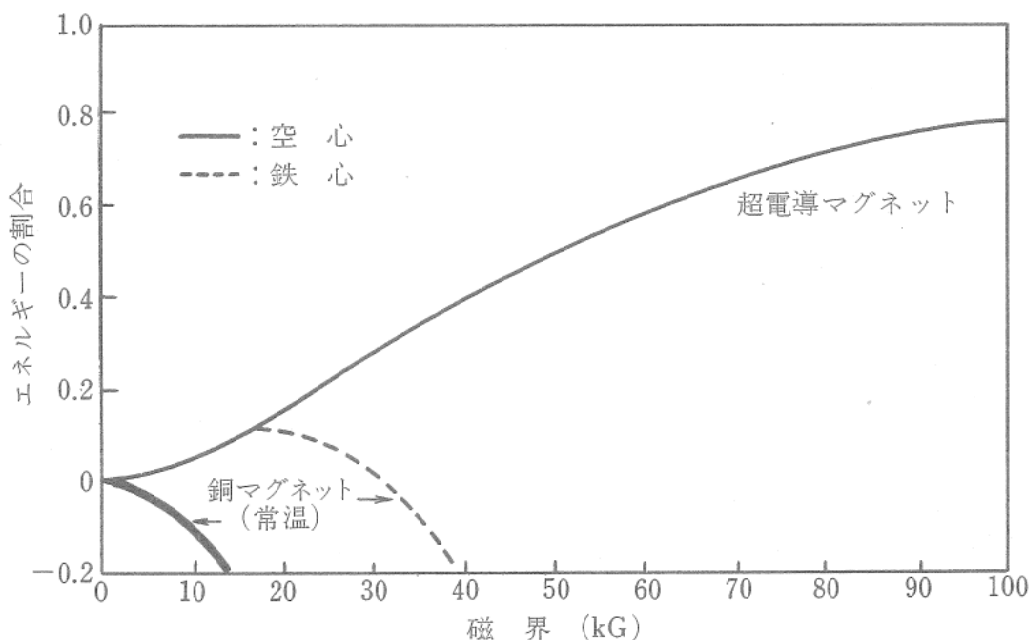


図9 MHD発電機におけるエネルギー配分。  
ダクト入口での熱流束20MW、出口での熱流束9MW、  
ガス電導率50Ω/m、負荷率80%として計算されている。

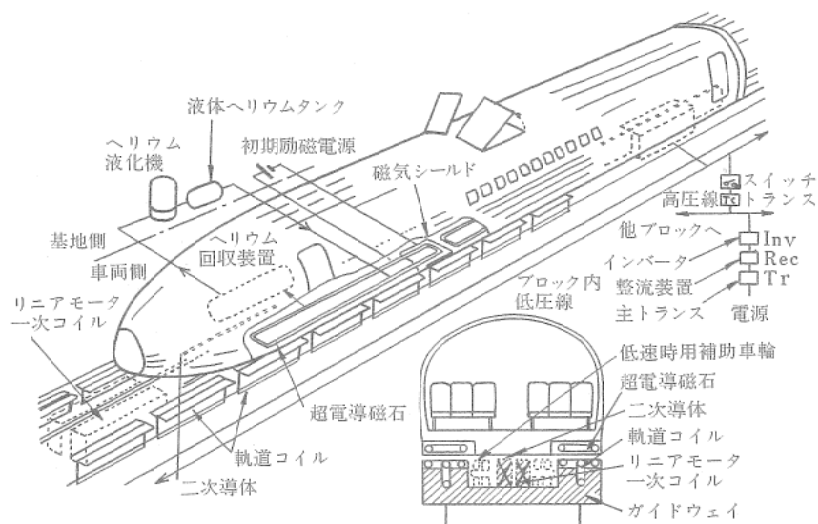


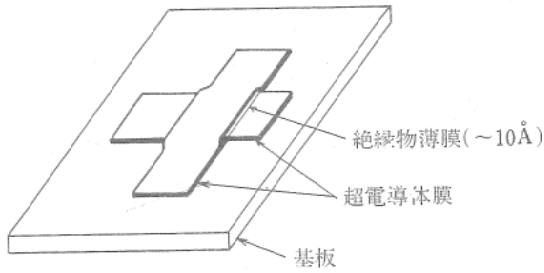
図10 磁気浮上列車の概念図

### (3.3) 磁気浮上と東海道新々幹線

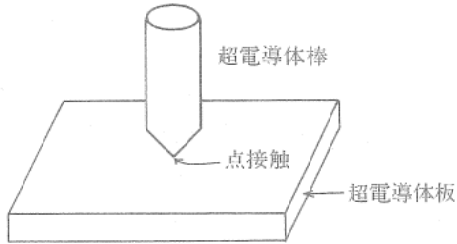
現在軌道上を走る列車の速度は車輪とレールの摩擦力を利用しており 300 km/hr 位が上限とされている。より高速の列車を作るためには車輪を利用しない浮上方式が必要である。図10のように列車上に磁化された超電導マグネットを置きこのマグネットの作る磁界と軌道上に敷かれた誘導コイル(軌道コイル)にレンツの法則によって誘起される電流の作る反対方向磁界との反発力を利用するとかなり重い列車を重力にさからって浮上させ「磁気浮上」ができる。これとレール上におかれたリニアモータ・コイルの作る進行波磁界によって駆動するのが国鉄の開発している東海道新々幹線の磁気浮上列車である。当初は 1980 年の実施を目的に時速 550 km (ひかり号の速度の約 2 倍) で運転することを計画し現在 4 人乗のモデル列車が運転されている。これは“Magneto Plane”ともいわれ、騒音、大気汚染などの現在のジェット機の欠点をもたずスピードも短区間では変わらないから将来国内線のジェット機にとって代ることも考えられる。米国でもボストン～ニューヨーク間を同様な弾丸列車で結ぶ計画がある。さらに真空チューブ中を磁気浮上列車を走らすことによって空気抵抗をなくすことも考えられている。この方法では人体に対する加速度限界を考慮しても東京～大阪間を 30 分で走れることになる。

### § 4. ジョセフソン効果とその応用

超電導状態では 2 個の電子が格子の歪みを通じて手を結び合いクーパー対になっている。これらの対はすべて同じ量子状態になっているので、すべての超伝導電子は 1 つの波動関数で表示できる。常電導状態の電子は 1 個 1 個がそれぞれ別の状態に量子化されているのに対し、超伝導状態では巨視的な量子化が起っていると云える。この状態では波動関数が系全体にわたって同一の値をとろうとする傾向(位相のコヒーレンス)がある。今、図 11(a)のように極く薄い絶縁膜(厚さ $\sim 10^{\circ}$ )をはさんで 2 個の超電導体を接近させると、絶縁体がポテンシャル障壁となるが、トンネル効果によって電子のしみ出しがあるから 2 つの超伝導体は弱いながら結合し、それらの波動関数の間に位相差ができる。また 2 つの超伝導体の点接触〔図 11 (b)〕を作ると、位相のコヒーレンスが弱められて、点接触の両側で位相差が現われる。コヒーレンスが弱められているこのような接合部(ジョセフソン接合)に外部から電流を流したり、電圧や磁界を印加したりすると、位相のコヒーレンスに逆らって、位相差をより大きくすることができる。ジョセフソンは位相差 $\chi$ の弱く結合した接合では電圧の発生を伴わず  $I = I_c \sin \chi$  ( $\chi \leq 90^{\circ}$ )に従って図 12 のように最大  $I_c$  までの直流超電導電流が流れること(直流ジョセフソン



(a) トンネル形接合



(b) 点接触形接合

図11 代表的なジョセフソン接合

効果)および $\chi > 90^\circ$ となると接合部に電圧 $V$ が現われ位相差は $d\chi/dt = 2\pi V/\phi_0$ 。 $(\phi_0 = 2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}$ : 磁束量子)に従って時間的に変化し、交流超電導電流が流れること(交流ジョセフソン効果)を理論的に予言した。この予言は多くの人達によって実験的に検証された。点接触ジョセフソン接合を図13のように2つ並列に接続してループを作り、弱い磁場中におくと、電圧を伴わないで流れうる最大直流電流 $I_{\text{max}}$ は、 $I_{\text{max}} = 2I_c |\cos \pi \Phi/\phi_0|$ のようにループを貫く磁束 $\Phi$ の磁束量子 $\phi_0$ を周期とする周期関数となる。これは磁場の効果によって2つの接合で位相差が異なり、光の干渉と同じように2つの接合の波動関数の干渉効果があったためである。従って図13の素子を超電導量子干渉素子(SQUID)と呼んでいる。ループを貫く磁束の変化によって超電導直流電流が変化するから、それを検出して微小な磁場を測定できる。現在市販されている磁束計の感度は $10^{-3} \sim 10^{-4} \phi_0$ であるので、ループ直径が $2 \sim 3 \text{mm}$ の素子では $10^{-9} \sim 10^{-10}$  Gaussの感度になる。このようにSQUIDは極めて鋭敏な磁束計なので本来の目的の磁気測定の外、筋肉電流の作る微弱な磁場を検出する心磁図計、磁性体の僅かな変位( $\text{\AA}$ 程度)を磁場の変化によって検出するなどの応用がある。電流の作る磁場を検出することによって検流計としても使用できる。その検知感

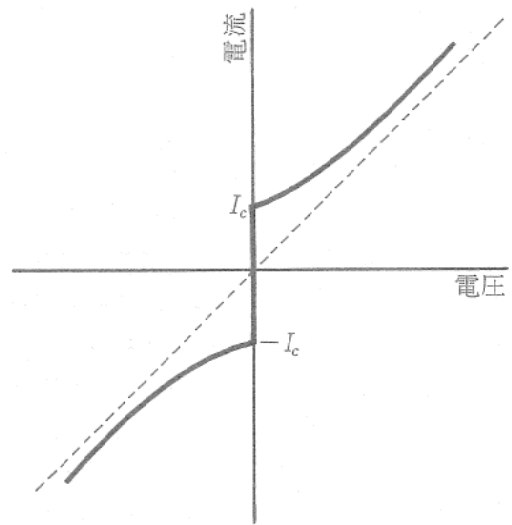


図12 点接触形ジョセフソン接合の電流—電圧特性

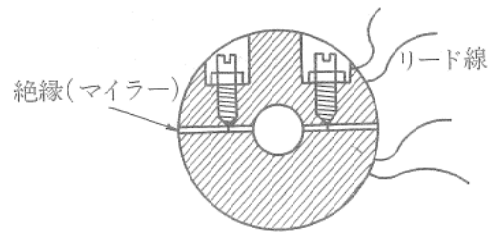


図13 代表的な超電導量子干渉素子(SQUID)の構造

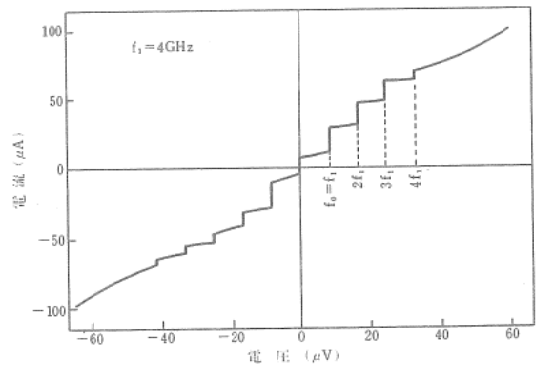


図14 マイクロ波を入射した時のジョセフソン接合の電流—電圧特性

度は $10^{-7} \text{A}$ なので、 $10^{-8} \Omega$ の抵抗と組合せて $10^{-15} \text{V}$ の検知感度を持って電圧計となる。

一方、ジョセフソン接合に電圧 $V$ が印加されると、前に述べたように位相差 $\chi$ は時間と共に変化するので、周波数 $f_0 = V/\phi_0$ の交流電流が流れる。 $1 \mu\text{V}$ に対して $f_0 = 483.6 \text{MHz}/\mu\text{V}$

である。もし外部から  $mf_1 = f_0$  ( $m$ : 整数) なる周波数  $f_1$  の電磁波が入射すると同期効果によって、ジョセフソン接合に直流超電導電流が流れる。図 14 はその例で、 $mf_1 = f_0$  の条件が満される個所で電流のステップが現われる。この現象を用いてマイクロ波や遠赤外領域の検知ができるが、 $10^{-13} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度の検知感度を持っているので分光器用検知器や輻射望遠鏡の検知器としての実用化が進められている。

この他、ジョセフソン接合の大きな非線形性を用いて 2 つの電磁波の混合や、高次の高調波発生を行うこともできるので将来通信システムや電子計算機の素子として応用される可能性もある。

### § 5. おわりに

これまで述べて来たように、超電導応用は電力からエレクトロニクスまで多岐にわたっている。物理的には良く理解されている超電導現象

も、工学的応用の面から見ると、材料とその加工、制御方式、安定化、信頼性など技術的に困難な問題を多くかかえている。しかし、これらの難問を 1 つ 1 つ解決し、実用への基礎を固めるのが工学の使命である。今後の課題として、電気工学的応用では、高転移温度、高臨界磁場材料の開発、第 2 種超電導材料の交流損失の低減と安定化、大型機器の制御方式、冷却方式の確立、またエレクトロニクス応用では、ジョセフソン素子の安定化と信頼性の改善、素子の製作技術の向上がある。エネルギーの有効利用とクリーン化、情報処理の大容量高速化が文明の維持発展に必要なから、将来超電導工学の担う役割は極めて大きいと言わねばならない。