

ETL-11 SQUID

ジョセフソン効果を利用した測定素子を総称して **SQUID(Superconducting Quantum Interferometric Device)** と呼びます。超電導の量子化現象を応用した、超高感度磁気センサーで、微小な磁場を測定するのに使用されます。従来の磁気センサーに比べ **100** 倍以上の感度を有し、地磁気の **5,000** 万分の 1 以下という微弱磁場を検出することが可能です。超伝導を用いるため、**SQUID** は液体ヘリウム (**4.2K : -269℃**) 窒素 (**77.3K : -196℃**) で動作し、微弱磁場計測が出来る特性を生かして、非破壊検査、異物検出、漏洩磁場検出、生体・バイオ、半導体検査等への応用がなされています。

超伝導

超伝導とは、下記の 2 点が特徴的な現象として観測されます。

- (1) 電気抵抗が「ゼロ」であること (完全電気伝導性)
- (2) 「マイスナー効果」が観測されること (完全反磁性)

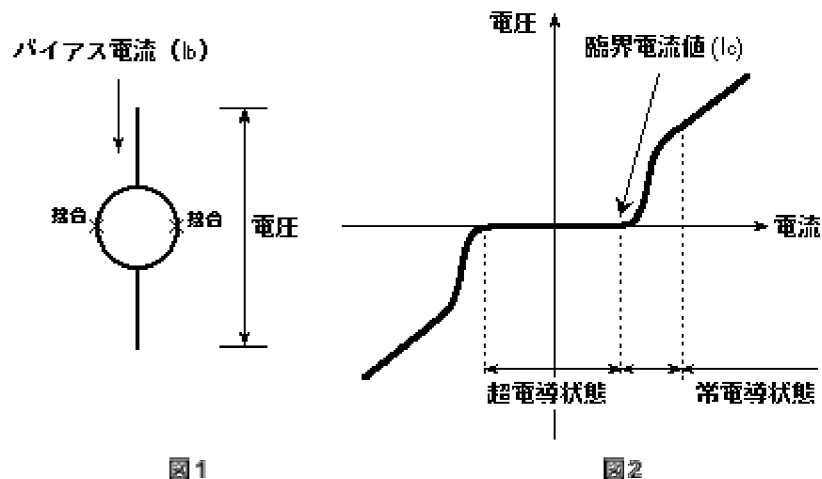
電気抵抗が「ゼロ」であることは、電流が流れるときに電気抵抗による熱エネルギーの発生によるロスが無くなることで、超電導体のリングを作り電流を流すと永久に流れ続けます。

「マイスナー効果」とは、通常、物質を貫く磁束が、超電導状態ではその磁束が排除されてしまうということです。この現象が起きているか否かで、その物質が超電導状態にあるのか常電導状態にあるのかを判断することが出来ます。

その材料は現在、液体ヘリウムを冷却媒体とし、**4.2K** (**-269℃**) まで冷却する必要のある低温超電導体 (金属：ニオブ化合物) と、液体窒素を冷却媒体とし、**77.3K** (**-196℃**) で超電導状態となる高温超電導体 (酸化物：セラミックスの一種) に大きく **2** 分されています。

動作原理

超電導体に「ジョセフソン接合」を **2** ヲ所設けます (図 1)。このジョセフソン接合部を設けた **SQUID** に電流 (バイアス電流) を流すと、この接合部分での電流量に制限がある為、制限を越えたところで常電導状態になり、電気抵抗が発生します。また、**SQUID** に磁束を加えると、超電導に特有の現象として、磁束を排除しようとする遮蔽電流が発生し (マイスナー効果)、超電導状態を保持できるバイアス電流値が変化します。このとき、バイアス電流値を超電導状態と上電動状態の境界付近で、臨界電流値として一定値に固定しておくとし、磁界の変化により **SQUID** の両端に発生する電圧が変化します (超電導状態になった際には電圧が発生する) (図 2)。これが超電導磁気センサーの動作原理です。



クラーク素子

図1のような構造は真空蒸着を用いることによって作ることができますが、ここではもっと簡単にできて、本質的には図1と同じになるクラーク素子を作製します。クラーク素子は図3のように細い超伝導細線をはんだの中にうずめただけのものです。ジョセフソン接合は細線の酸化皮膜をはさんではんだとの間で形成されると考えられます。

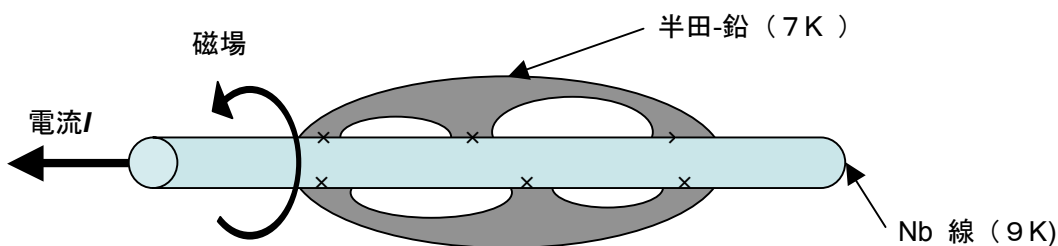


図3

超伝導細線とはんだとの間にバイアス電流を流した状態で細線に電流を流します。すると細線とはんだの隙間にまきついた磁場ができ、発生する磁場に従って電圧が周期的に変化します。

この素子は非常に簡単に作ることができるが、接合は必ずしも図1のように2箇所とは限らず、特性の異なる接合が多数あるため、周期の変化もひずんだ波形が観測されます。

実験

上記のクラーク素子を作製するために、ユニバーサル基板上に図4のように4箇所はんだ付けを行う。実際にジョセフソン接合を作るのは、真ん中の2箇所である。必ずしも接合が出来るとは限らないので、少しでも確率を上げるために2箇所にする（測定器具の関係でこれ以上増やすことは出来ない）。超伝導細線を素早くはんだ付けを行う。両端の2箇所は電流・電圧用の端子にするため、細線の表面を磨き、酸化膜がなくなるようにする。金属表面の酸化物を除去するためにフラックスを用いながらはんだ付けを行う。

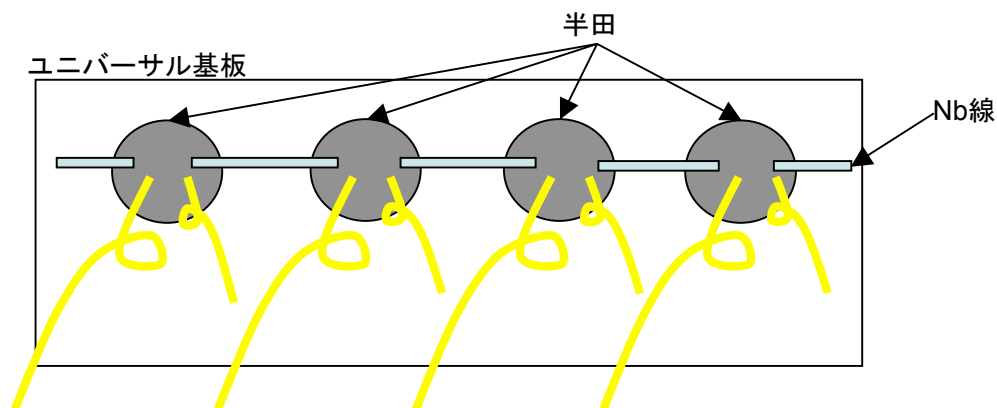


図 4

合計 4 箇所のはんだの島が出来るが、それぞれに計測用の端子を 2 本取り付ける（実際には素子を固定する器具から端子が伸びている）。装置に取り付けた素子を液体ヘリウムのデューワーに静かに下ろす。

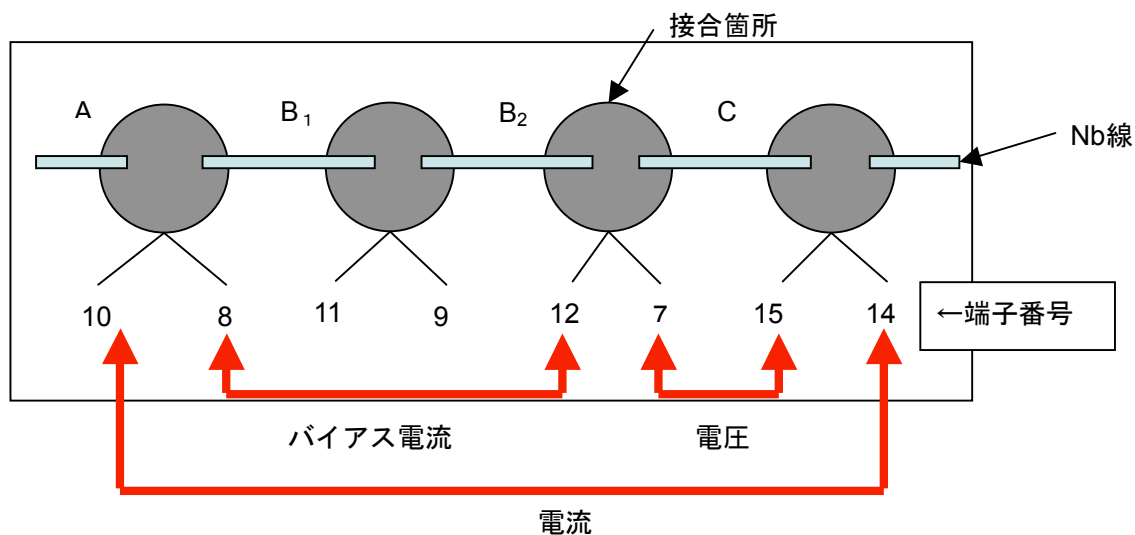
測定

[ジョセフソン接合の電流と電圧特性を測定]

1. 測定用のプログラムは用意してあるので、接合が出来ていると思われる場所に電流を流し、電圧が測定できるように配線を考える。配線の端子は図 5 に示すようになっており、**11** と **12**、**9** と **7** は切り替えられるようにスイッチボックスを用意してある。
2. 接合が出来ていると、図 2 のような電流・電圧特性を観測することが出来る。電圧の立ち上がり部分を、次の測定のバイアス電流にするため値を記録する（幅を持たせて）。

[SQUID の測定]

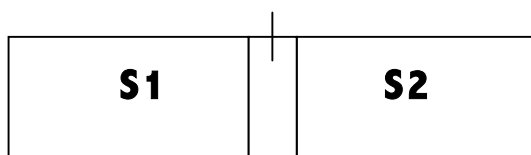
1. 先の測定で記録したバイアス電流の値を適当に流す。導線の電流を変化させ、導線のまわりにできる磁場をはんだと導線の隙間に発生させる。
2. 導線の電流値に対する電圧の値を記録する。



付録 A ジョセフソン効果

超伝導は、金属の抵抗がある臨界温度で **0** になる現象である。**BCS** 理論によりクーパー対が超伝導を担うことが明らかにされた。クーパー対とは、フェルミ準位付近の反対方向の運動量を持つ電子が束縛しあい、対をつくっている状態である。これによってこの複合粒子はボゾンとして振舞う。よって、その統計性はボーズ・アインシュタイン統計に従う。系の大部分のクーパー対は、ある基底状態にボーズ・アインシュタイン凝縮される。クーパー対がボーズ・アインシュタイン凝縮した超伝導状態は、その量子力学的性質がマクロな性質に現れ、一つの巨視的波動関数を用いて表すことができる。そのために、超伝導状態は巨視的位相で特徴づけられる。この巨視的位相の重要性を初めて指摘したのが、ジョセフソンである。

図のような超伝導体(**S1**)と超伝導体(**S2**)の間に絶縁体を挟んだジョセフソン接合を考える。



S1 と **S2** の系が空間的に少し重なりを持った粒子の行き来があるとする、シュレディンガー方程式は、

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi = E \psi \\ & \psi = \psi_1 + \psi_2 \end{aligned}$$

を掛けて全空間で積分すると、新しい方程式は、

$$\begin{aligned} & \int \psi^* \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi d\mathbf{r} = E \int \psi^* \psi d\mathbf{r} \\ & \int \psi^* \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi d\mathbf{r} = E \int \psi^* \psi d\mathbf{r} \end{aligned}$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

を代入し

$$\begin{aligned} & \int \psi^* \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi d\mathbf{r} = E \int \psi^* \psi d\mathbf{r} \\ & \int \psi^* \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi d\mathbf{r} = E \int \psi^* \psi d\mathbf{r} \end{aligned}$$

虚部を比較して

$$\begin{aligned} & \int \psi^* \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi d\mathbf{r} = E \int \psi^* \psi d\mathbf{r} \\ & \int \psi^* \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi d\mathbf{r} = E \int \psi^* \psi d\mathbf{r} \end{aligned}$$

系 **i** に粒子を見出す確立 **Pi** は **Pi=Ci²** より、

$$\begin{matrix} \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} \end{matrix}$$

一つのクーパー対の電流は

全クーパー対による電流は

$$I = \frac{2e}{\hbar} \sqrt{N} \Delta$$

接合には二つの超伝導体の波動関数の位相差の正弦に比例した電流が流れる。これをジョセフソン効果と言う。このとき、電圧は生じず電流は超伝導電流である。**I** が **I₀** を超えると接合はもはや超伝導電流を担いきれず、電圧が生じてしまう。

付録 B 寒剤の種類と性質

寒剤を使うと低温で容易に一定の温度を保つことができる。各種の寒剤の性質を下表にまとめる。

寒剤	N₂	⁴He	H₂	O₂
分子量	28.02	4.00	2.02	32.0
沸点	77.4K	4.2K	20.4K	90.2K
液体の密度 (g/cc)	0.808	0.125	0.059	1.14

表 1．主な寒剤の性質

低温寒剤として主に使用されるのは液体窒素および液体ヘリウムである。それぞれ、沸点が違うため、用途によって使い分ける。通常、窒素温度、ヘリウム温度というとき、それぞれ沸点の **77K**、**4.2K** を指す。また、ヘリウムには同位体の **⁴He** と **³He** があり、化学的な性質に違いはないが、特に極低温での物理的な性質に著しい違いがあるため、低温では区別して用いられる。

通常、液体ヘリウムという場合は **⁴He** を指し、液体ヘリウムを減圧排気すれば、**⁴He** で **1.2K**、**³He** で **0.3K** とさらに低温を比較的容易に得る事ができる。

付録 C SQUID

二つの超伝導体 **A** と **B** が二つのジョセフソン接合 1 と 2 を解してつながっている場合を考える。二つの接合が同じ強さであるとする

超伝導体の中に積分路 **A** と **B** をとって

穴の中の磁束を Φ とすると

以上より、**AB** 間の全超伝導電流の最大値は Φ の関数として

となる。

この素子に電流源をつなぎ電流 I を増してゆくと、 I が $I_{\max}$ をこえたところから電圧が出はじめる。適当なバイアス電流 I_b を流しておくとも電圧が Φ とともに周期的に変化することになる。

