

# 超伝導磁力計(I)\*

北村 泰一\*\*・大道 寓男\*\*

## 1. 序

超伝導物性 (Josephson 効果[1]) を利用すると微小磁場を測定することができる。実験室内では現在  $10^{-7}[2] \sim 10^{-9}[3] \text{ G}$  まで測られた例があるし、理論的にはさらに  $1 \sim 2$  けた上まわる  $10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ G}$  まで測定できる可能性もある。この Josephson 効果はこのような極微小磁場の検出に有効であるばかりでなく、ごく微弱な電位差の測定[4] ( $10^{-14} \text{ V}$ ,  $\tau = 1 \text{ sec}$ ) または遠赤外領域[5] ( $10^{-14} \text{ watt/Hz}^{1/2}$  at  $\lambda = 1 \text{ mm}$ ) の検出にも有効であり、その他その応用面の広さから最近研究者の興味をひきはじめつつあるものである。筆者らはまずこの種の磁力計の実用化を目標に研究をはじめたが、今回感度  $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ G}$  程度の素子を試作し得た。これは目標 ( $10^{-8} \text{ G}$ ) とはほど遠いが、基本的な技術も取得でき、また問題点もかなり明らかになってきたので、第一報としてこれを報告する。なおこの実験は外部磁場シールドなしの装置でおこなったのでこれ以上の感度を要求してもあまり意味がないと考えられる。

## 2. 原 理

“Weak link” とは、2 個の超伝導体がわかれてはいるが、超伝導電子が一方から他方ヘトンネル効果、またはその他の過程でリークできる程度に接している状態をいう。具体的には二つの超伝導体が、厚さ数 Å の絶縁被膜 (バリア) を通して互いに接触するか (薄膜素子, 接触素子), または数 Å 幅のやはり超伝導体の “橋” を通して電氣的に結びつけられていると (ブリッジ素子) これらは “弱く” 結合されている。Josephson は、このような素子の両端の電位差がゼロであっても有限の電流が流れ得ることを理論的に示した[1]。しかしこの “ゼロ電位差電流” には限界があって、その臨界値  $I_c$  をこえると素子に電位差が現われるが (第1図), その臨界電流  $I_c$  は外的条件, たとえば絶縁膜の厚さ (“橋” の幅) などの素子のディメンジョンや素子にかかる磁場に依存し,

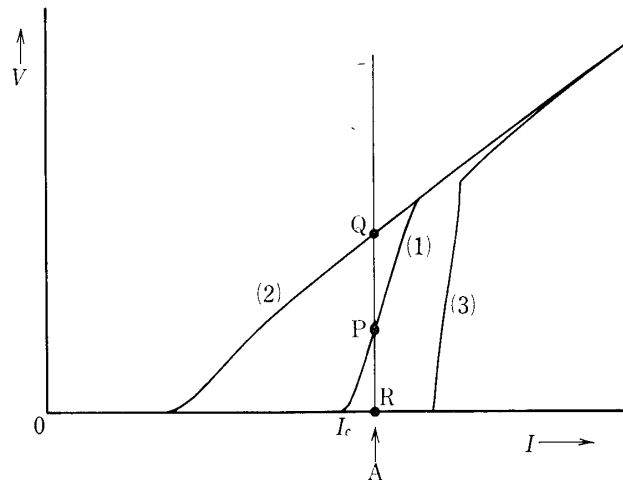
$$I_c = I_{c0} \sin \chi$$

によって変化する。ここに  $\chi$  はバリア両端における超伝導状態の波動関数の伝相差であって、外部磁場とか素子の形状の関数である。第1図はその実例であるが、I-V 特性は磁場によって[1][2][3]のように変化する。そこで、素子に流す電流を  $I_c$  付近に固定すると (第1図のA点) 素子にあらわれる電圧は磁場に依りてそれぞれ、P, Q, R 点のように変化する。

---

\* 宇宙研究特別事業費による研究論文

\*\* 九州大学理学部



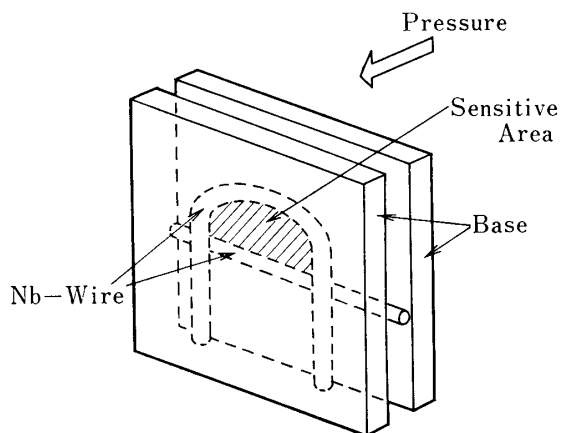
第1図 I-V 特性，特性は素子にかかる磁場により  
(1)(2)(3)のように変化する。

つまり，逆にこの電圧の変化を測定すれば素子にかかる磁場を知ることができる。

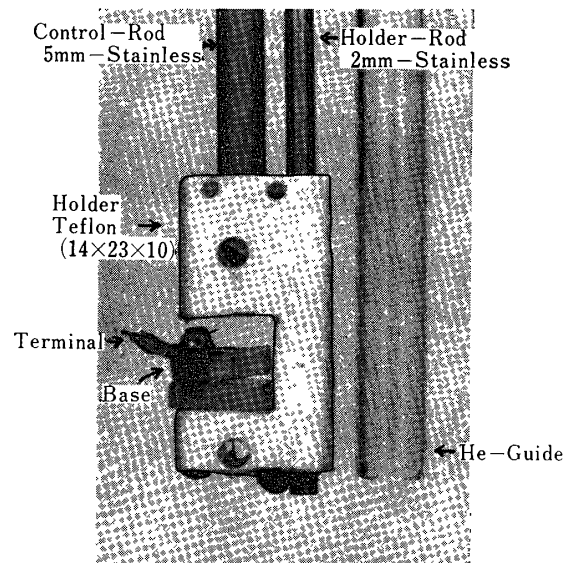
### 3. 素子と回路

素子にはいくつかの種類があるが，筆者達は cross-wire 素子と solder-bead 素子を製作した。

cross-wire 素子は，ニオブ線（直径 0.2mm 室温比抵抗  $0.175\Omega\text{cm}$ ）を第2図のように二枚の基板に固定して適当な圧力をかけたものである。圧力は装置の外部から調整できるようにするために，第3図の制御棒をマイクロメータに連結し，基板に対して 1/50 回転について 0.01mm すすむようにした。なおこの sensitive area は  $0.5\text{mm}^2$  に設定した。



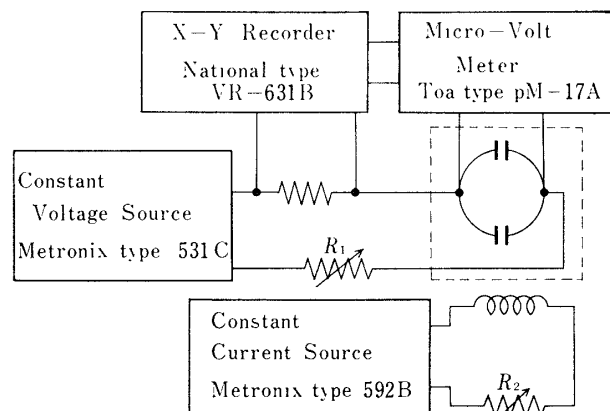
第2図 素子の概念図



第3図 Cross-wire 素子 Base の間にニオブ線が入っていて上から Control-rod で圧力を加える。

solder-bead 素子は Clarke によって考案されたもので、細いニオブ線にハンダをもりつけたものである[4]。ニオブとハンダの間には自然に酸化被膜が存在していると考えられ（または強制的に酸化被膜をつくり）これで一つの素子を形成する。この素子は、ニオブ線に電流を流すと自らがつくる磁場によって I-V 特性が変化するので、これを利用して敏感な電位差計をつくることのできるという点において他の素子と異なる特長をもつものである。この型の素子をいくつか製作したが、ハンダのもりつけに技術を要し、また酸化被膜の厚さがかんが素子の良否を決定した。この報告に含まれる結果は、ニオブ線に 150mA の電流を3分間流して被膜をつくり、これに鋭いナイフで 1mm へだてて2か所傷をつけてそのうえにハンダをもりつけた素子（室温抵抗  $7.2\Omega$ ）によるものである。

回路は普通に用いられるもので、第4図の  $R_1$  によって素子に流れるバイアス電流を固定し、 $R_2$  によって solder-bead 素子の場合はニオブ線に、cross-wire 素子の場合には素子の周囲に巻かれたソレノイドに流す電流を変化させて素子に磁場を加え、素子の両端の電位差を増幅して XY 記録計に記録させた。



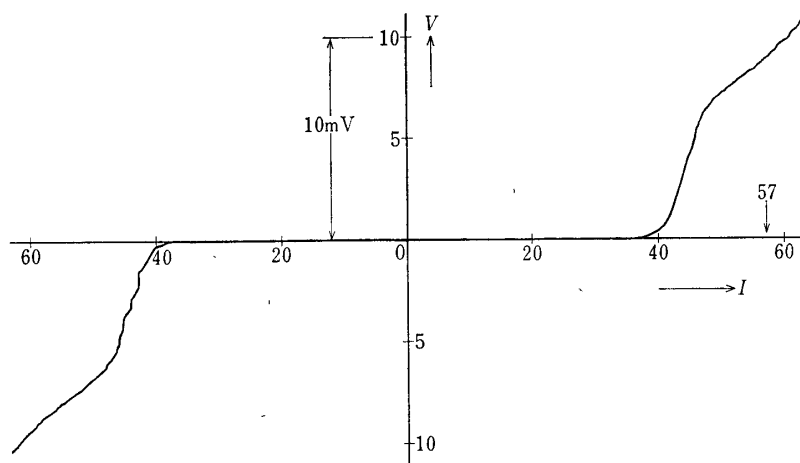
第4図 回路

#### 4. 結 果

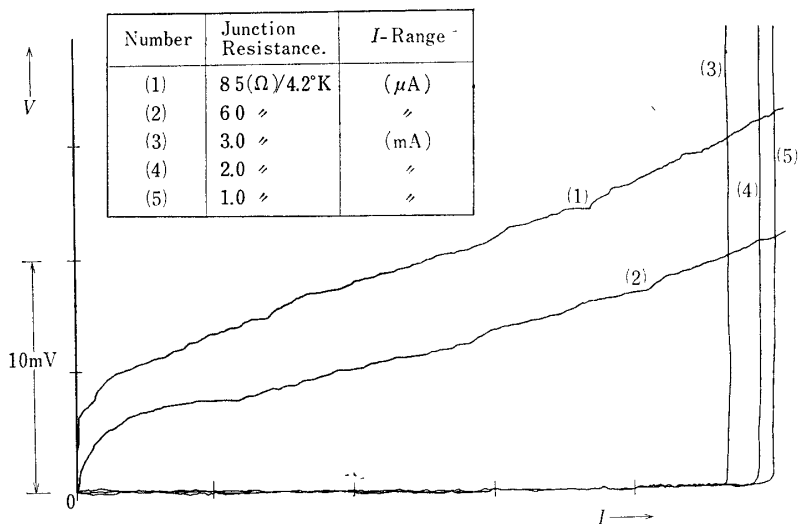
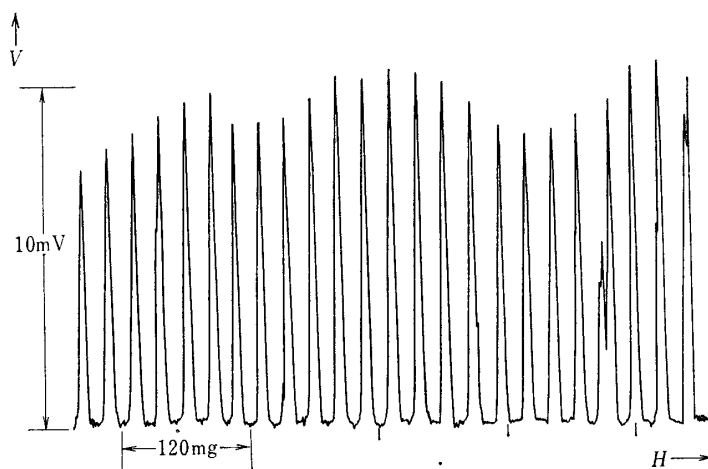
第5図(a)に cross-wire 素子の I-V 特性を示すがこれは素子に加わる圧力によって第5図(b)のように変化する。圧力変化のパラメータとして素子の両端の抵抗を測ったが(b)中(1)(2)の場合は圧力が十分でなく絶縁層の厚さが厚くて特性は pseudo-ohmic であるが(3)の場合になってはじめて求める特性が出現し、(4)(5)と圧力を増加さすにしたがって臨界電流値  $I_c$  が増加してゆく。

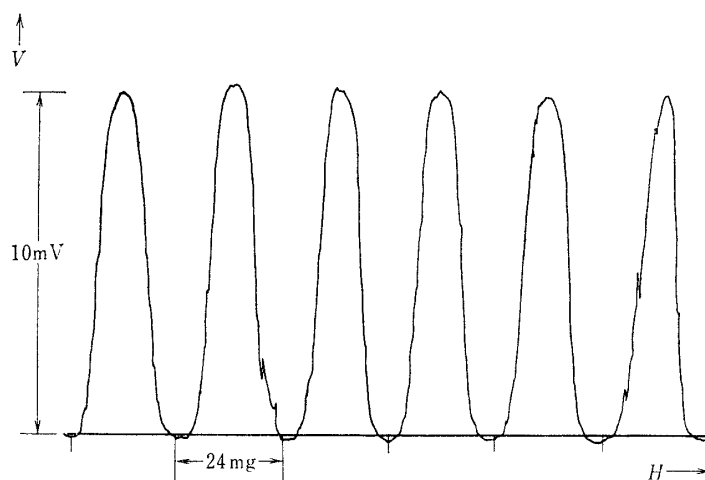
つぎにこの素子においてバイアス電流を  $57.2\mu\text{A}$  に固定し(第5図(a)参照)磁場を変化させると第6図(a)のごとき結果が得られた。その拡大図は(b)であるが、(a)(b)においてカーブが滑らかでないのは雑音磁場による乱れ ( $10\gamma \sim 30\gamma$ ) と考えられる。この場合の磁場周期は約  $2400\gamma$  である。

Solder-bead 素子については第7図のごとき電圧変化曲線が得られた。この場合の磁場周期は  $400\gamma$  で、かなり感度がよいために雑音磁場の影響をうけやすく、曲線が cross-wire 素

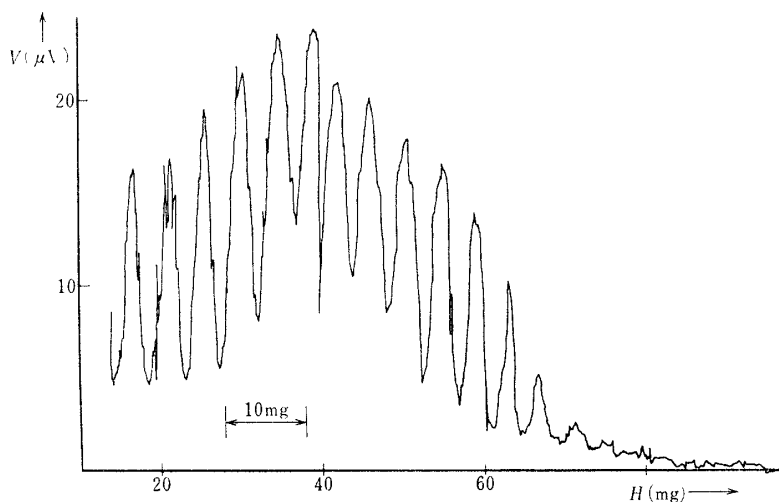


第5図 (a) Cross-wire 素子の I-V 特性

第5図 (b) Cross-wire 素子の I-V 特性, 接触圧を変化させると特性は変化する(1)(2)は接触圧不足(3)(4)(5)と圧力が増すに従い  $I_c$  が増加する.第6図(a) Cross-wire 素子の磁場電圧変化磁場周期は 2400 $\gamma$  である.



第6図(b) 拡大図

第7図 solder-bead 素子の磁場電圧曲線磁場周期は  $400\gamma$ 

子のそれよりも乱れているのはそのためによるものと考えられる。この磁場電圧曲線が第6図(b)とかなり異なっているのは、solder-bead 素子においてはニオブとハンダの接触の仕方はコントロールがあまり効かず、第7図の場合もこの素子の接触の仕方がかなり複雑で、いくつかの点で接触しているため、このような modulated pattern が得られたものと考えられる。

## 5. 結 語

今回得られた結果は、磁場周期  $400\gamma$  と  $2400\gamma$  の二種類であるが、出力電圧の  $1/100$  の変化はわりあい容易に読みとり得るので、これらの素子の感度はそれぞれ  $4\gamma$ ,  $24\gamma$  となる。この程度の磁場変動は外部雑音磁場として普通に存在するので、これ以上の感度のものは外部雑音磁場をシールドしなくては実験できない。今回の実験の経験から感度をもう1けた～2けたあげることはそう困難なことではないが、高  $\mu$  メタルや超伝導シールドを使っても

絶対磁場ゼロに近い空間をつくり出すことは容易なことではないと考えられる。

この研究の目的は、序論でも述べたが超伝導磁力計の実用化、特にその宇宙科学的利用を目的としているが、その技術面での困難性は大変多い。地上使用はともかくロケット、衛星搭載の場合には、たとえば

- (イ) 素子の堅牢性と再現性
- (ロ) 冷媒として液体ヘリウムは不適當なこと
- (ハ) 冷媒維持のための電力消費量

がある。(イ)は発射時の加速に耐え、また液体ヘリウム温度、室温間を何度往復しても特性が変化しないようではなくてはならない。今回製作したような酸化被膜をバリアとするような型の素子(いわゆる接触型)では、この点が大変不利である。筆者らは、これについては新しい拡散型素子にその解決点を見出すべく準備をすすめている。

(ロ) は液体ヘリウムの使用は実験室のように装置が静止している場合には問題はないが、装置が傾いたりして液体ヘリウムがあたたかい壁面にふれると爆発的に蒸発する。これを避けるために固体水素またはヘリウムガスを冷媒として使用することを考えている。

(ハ)の消費電力については根本的な解決の見通しはない。しかし素子材料としてなるべく  $T_c$  (金属の超伝導臨界温度) の高い物質を使用するならば(現在では  $20^\circ\text{K}$  位)、現在すでに軽量、低電力のミニチュアポンプが開発されていてある程度解決の可能性がある。

一方この磁力計の特長は、その高感度性にあるが、これだけでは最近開発されつつあり同程度の性能が期待される新型のオプティカルポンピング磁力計とくらべて上記の欠点があるだけ不利である。しかし、筆者らはその応用面の広さ、たとえば遠赤外波長領域の検出器として、そしてそれから始まる宇宙科学分野でのその領域の観測研究に連なる点に大きな魅力を感じている。

最後にこの研究にあたって種々の助言、器機の貸与などの援助をくださった九州大学理学部青木亮三助教授に感謝の意を表する。

1971 年 1 月 14 日

## 参 考 文 献

- [1] Josephson, B. D: Possible New Effects in Superconductive Tunnelling, Phys. Letters, **1**, 251-253, 1962.
- [2] Forgacs, R. L., and A. Warnick: Digital-Analog Magnetometer Utilizing Superconducting Sensor, Rev. Sci. Instr., **38**, 214-220, 1967.
- [3] Zimmerman, J. E., and A. H. Silver: Macroscopic Quantum Interference Effects Through Superconducting Point Contacts, Phys. Rev., **141**, 367-375, 1966.  
Nisenoff, M: Superconducting Magnetometers with Sensitivities Approaching  $10^{-10}$  Gauss, Rev. de Phys. Appl., **5**, 21-40, 1970.
- [4] Clarke, J: A Superconducting Galvanometer Employing Josephson Tunnelling, Phil. Mag., **12**, 115-127, 1966.
- [5] Grimes, C. C., P. L. Richards, and S. Shapiro: Josephson Effect Far-Infrared Detector, J. Appl. Phys., **39**, 3905-3912, 1968.