

X線マイクロカロリメータ読み出しに用いる SQUID 電流計の開発と評価

山本亮 (東京大学, ISAS/JAXA)

平成 23 年 8 月 31 日

1 Abstract

宇宙空間における高温、高エネルギー天体からは X 線が放射されており、その X 線を精密分光し、各輝線の微細構造を見ることで、放射天体の物理状態や元素組成を理解することができる。X 線マイクロカロリメータは X 線のエネルギーを素子の温度上昇として測定する分光器であり、我々は温度計として超伝導遷移端を使用する TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発を続けている。TES の超微小な電流変化を読み出すには、低ノイズかつ低インピーダンスの電流計が必要である。その点で超伝導量子干渉計 (SQUID) は最良の電流計である。SQUID はジョセフソン効果 (二つの超伝導体を各々の波動関数が重なりを持つ程度に接近させるとその間で超伝導トンネルの位相差に比例した電流が流れるという現象) を利用した測定素子である。DC-SQUID は二つのジョセフソン接合を持つワッシャーであり、位相差はワッシャーを貫く磁束によって決まる。そこで、TES と SQUID をコイルを介して結合することで電流計として使用できる。我々は 8 入力 SQUID という複数の入力コイルによって TES の信号を多重化できる SQUID の開発を行っている。また、宇宙環境下での動作を確認するため SQUID にプロトン照射し、照射前と照射後の SQUID の特性を評価した。本講演では SQUID の原理、特徴および、我々の開発している SQUID の特性について発表する。

2 SQUID 電流計とは

2.1 TES 読み出しに用いる SQUID 電流計

X 線マイクロカロリメータとは、X 線光子のエネルギーを素子の温度上昇として計測する分光検出器であり、我々のグループでは超伝導遷移端温度計 (Transition Edge Sensor: TES) を温度計として用いた TES 型 X 線マイクロカロリメータの研究開発を進めている。TES は常伝導状態から超伝導状態に遷移する遷移端を温度計として用いるので、TES からの信号を読み出す電流計の条件として、

- 低インピーダンス ($1\text{m}\Omega$ 以下)
- 低ノイズ ($\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度)

- 微少の抵抗変化 ⇒ 微少の電流変化を測定できる感度

の三つが挙げられる。この三つの要求を満たすのがSQUID電流計である。SQUID(Superconducting QUantum Interference Devices)とは磁束の変化を電圧の変化として読み出す磁束検出器である。TESとコイルとを直列につなぎ、そのコイルとSQUIDをつなぐことによって(図1)TESの電流変化を読み出すのである。

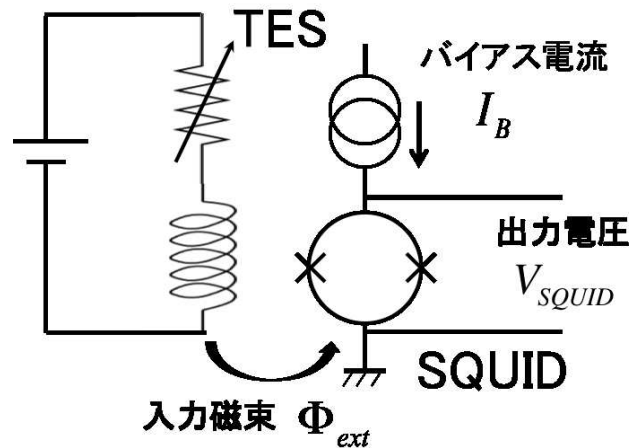


図 1: TES と SQUID の模式図。SQUID の回路記号は円に×を二つ付ける。この×はジョセフソン接合を表している。

2.2 Φ - V カーブ

我々がTESの読み出しに用いているSQUIDはジョセフソン接合¹が2箇所あるdc-SQUIDである。図1から、入力磁束 Φ_{ext} を横軸、SQUIDの出力電圧 V_{SQUID} を縦軸にとると、図2の様なグラフが書ける。

これをSQUIDの $\Phi - V$ カーブといい、SQUIDの特性を決めるものである。図2を見れば分かるように、SQUIDのバイアス電流を徐々に上げていくと、それに比例してSQUIDの出力が現れる。横軸は磁束量子²で規格化されている。以上からSQUIDは、

- 入力磁束に対して出力電圧は周期的に変化する。
- 磁束量子程度の磁場も検出可能。

といえる。ちなみにSQUIDのゲインは $\Phi - V$ カーブの傾きの大きさと定義される。

¹二つの超伝導物質を各々の波動関数が重なりを持つ程度に接近させると、その間で超伝導トンネル各間の位相差に比例した電流が流れるという現象。

²量子化された磁束。値は $\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}$ 。

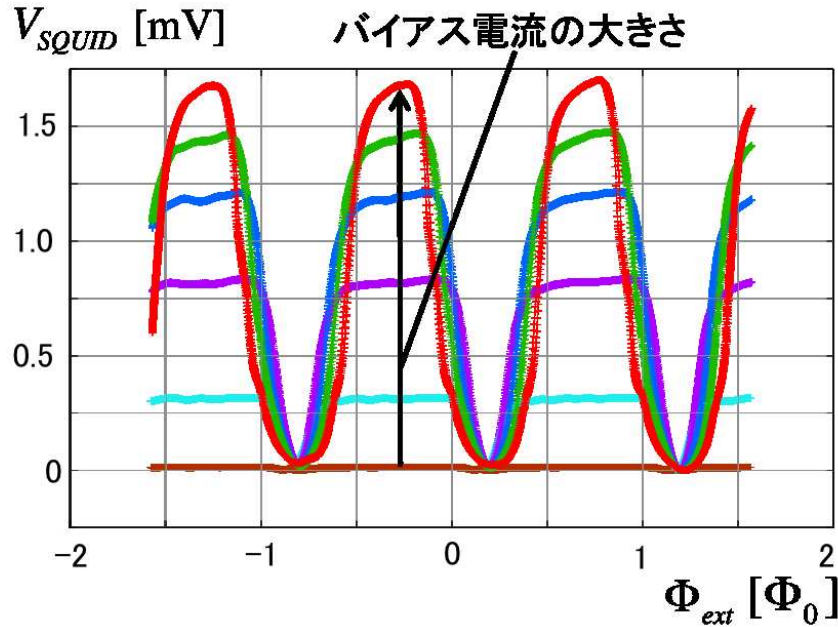


図 2: 典型的な SQUID の $\Phi - V$ カーブ。最初は出力がゼロだがバイアス電流 I_B を大きくしていると、出力が見え始める。横軸は磁束量子で規格化している。

2.3 SQUID の課題点

2.3.1 素子のアレイ化について

X線マイクロカロリメータは極低温環境 (~ 100 mK) で動作させるため、大規模アレイの場合一素子一読み出しだと配線からの熱流入が問題となるので、信号の多重化による読み出しが必須である。その為我々は多入力 SQUID の開発によって、複数信号の同時読み出しを行っている。今回の発表では、我々が独自に開発している 8 入力 SQUID を使用し、2 信号の同時読み出しを行った。

2.3.2 宇宙線への耐性

宇宙空間では宇宙線のフラックスが大きく、それによって半導体等が損傷を受ける。SQUID のジョセフソン接合部分は数 nm 程度の超電導薄膜でできており、これも宇宙線による損傷を受ける可能性がある。ジョセフソン接合が損傷を受けると、この界面が変化し、臨界電流が変化し出力すら出なくなってしまう可能性がある。まだ SQUID は宇宙空間で使用されたことの無い素子であり、そもそも放射線に対する耐性は今まで調べられてこなかった。

そこで SQUID の宇宙線への耐性を調べるため、擬似宇宙線としてプロトンを照射した。照射量は我々が計画している衛星軌道上に約 10 年居ると同じ量である。照射前後の SQUID の特性を評価して、放射線の影響を調べた。

3 多入力 SQUID

3.1 8入力 SQUID

我々は複数信号を同時に読み出す SQUID として 8 入力 SQUID の開発を行なっている。これは、ジョセフソンリングにコイルを八つ接合させ、一つの SQUID で八つの TES からの信号を同時に読み出すことが出来る。写真を図 3 に示す。写真だけでは分かりにくいですが、コイル一つ一つは SQUID とはカップルするがお互いのコイルとの干渉を少なくするような構造になっている。また、8 入力 SQUID は出力が小さいという欠点があるが、これは SQUID アンプを同時に使用することによって解決する。SQUID アンプの写真も図 3 に示す。これは SQUID とコイルのペアを直列に並べることによって、低温部で信号を増幅することができる。

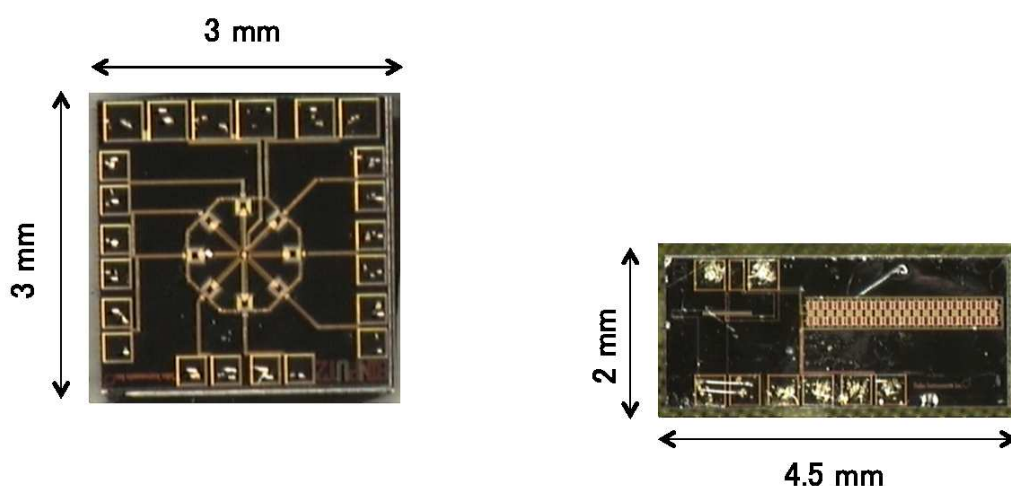


図 3: 左の写真が 8 入力 SQUID、右の写真が SQUID アンプである。8 入力 SQUID は中心に見える点がジョセフソン接合部分で、その周りの八角形の配線に沿う様に四角形のコイルが置かれている。SQUID アンプの右側中心部にあるのが、SQUID のアレイである。

3.2 複数信号の読み出し方法

複数信号の同時読み出しは、図 4 の様にして行う。まず、TES を MHz の交流で駆動させる。そこに X 線が入射すると、図 4 の様に TES の抵抗が変化し、それともなってコイルを流れる電流も変化する。これは信号を AM 変調した状態になる。それを SQUID で読み出し、室温回路で復調すると TES の信号 (抵抗変化) が読み出せる。この TES にかける電圧の周波数をそれぞれで変える事によって、どの TES からの信号かを区別することが出来る。

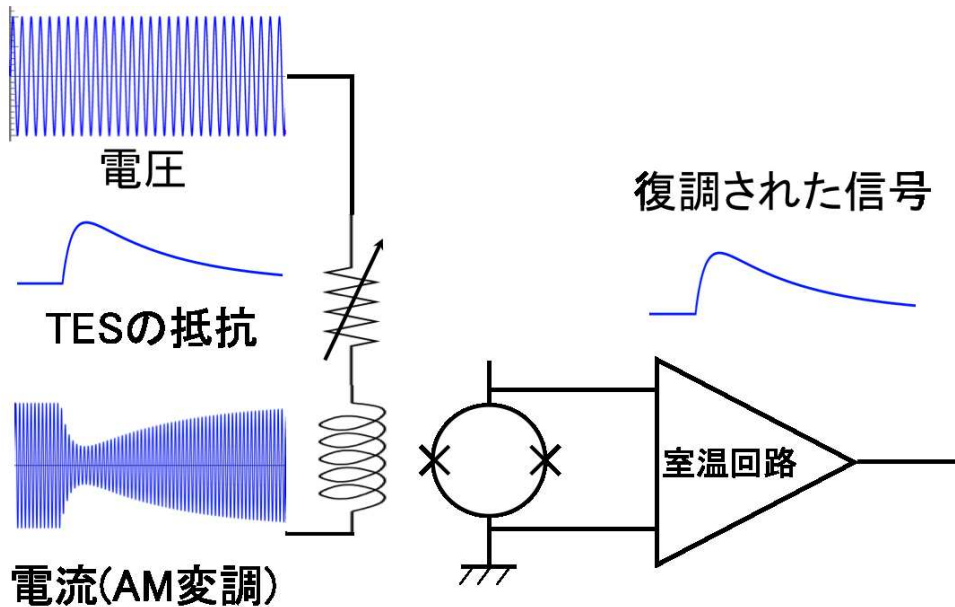


図 4: 信号読み出しの概念図

4 実験結果

SQUID は低温環境 (~ 4.2 K) で使用する。そこで、SQUID の特性評価の為には低温環境を作る事が必要となる。我々の実験では、1.2 m のプローブの先端に SQUID 素子をマウントし液体 He の Dewar に直接挿入して、低温環境を作っている。

4.1 多入力 SQUID 測定実験結果

今回は 8 入力 SQUID と、SQUID アンプを用いて、2 つの信号を同時に読み出す事を目的とした。TES からの擬似信号としてファンクションジェネレーターで、別々の Input coil から 1.0 MHz (5 kHz の変調) の sine 波と、1.5 MHz (10 kHz の変調) の sin 波を入力し、それを室温回路で復調させた。図 5 が結果である。

それぞれのグラフはオシロスコープによる実測のグラフである。合成された信号を室温回路で 1.0 MHz、1.5 MHz で復調するとそれぞれ 5 kHz の sin 波と、10 kHz のサイン波がみえている。これによって 8 入力 SQUID で二つの信号の読み出しに成功したと言える。

4.2 放射化 SQUID 測定実験結果

擬似宇宙線としてプロトンを照射した SQUID の特性を評価した。

4.2.1 $\Phi - V$ カーブ

図 7 に照射前後での $\Phi - V$ カーブを示す。まず、少なくとも SQUID の出力が出なくなるとい事はなかった。また、 $\Phi - V$ カーブの形に大きな変化も見られなく、SQUID のゲインで

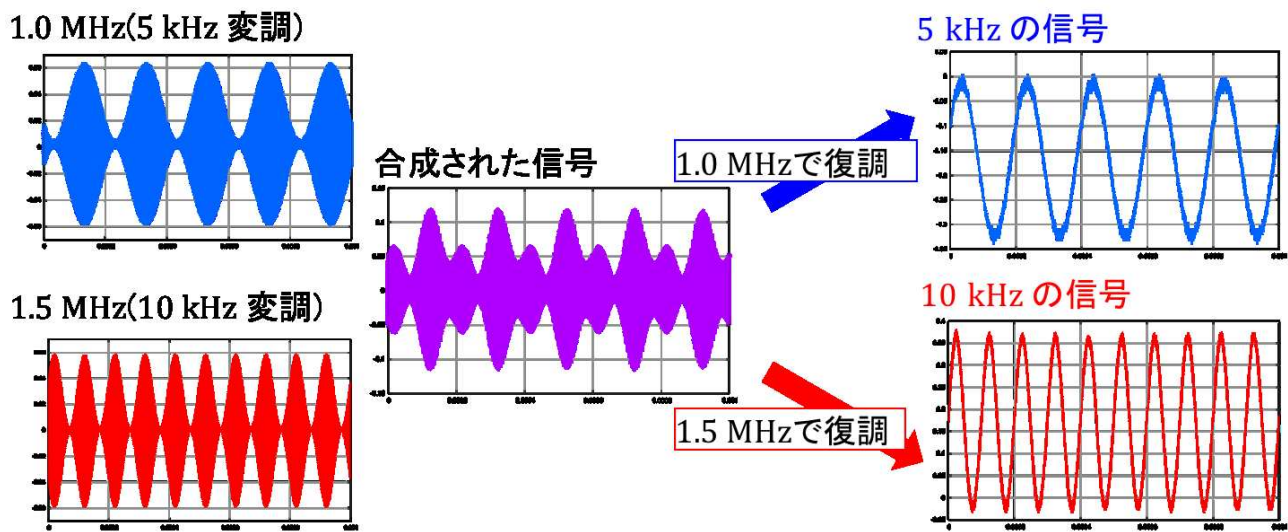


図 5: 複数信号読み出し実験結果。それぞれオシロスコープでの実測のグラフ。合成された信号を 1.0 MHz、1.5 MHz で復調するとそれぞれ変調された信号が取り出せている。

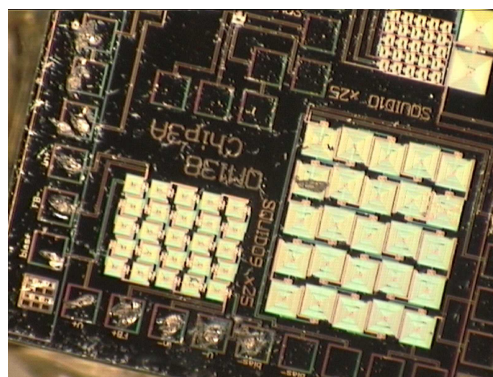


図 6: 今回放射化した SQUID(QM138Chip3A) 測定したのは左下のアレイ部分。

ある $\Phi - V$ カーブの傾きも、放射化前が $6.2 \text{ mV}/\Phi_0$ 、放射化後が $6.6 \text{ mV}/\Phi_0$ とほぼ同値であった。しかし、この測定はそれぞれのバイアス電流 I_B が違うので、直接的な比較とは言いにくい。これは放射化前の測定時に磁場をトラップしてしまっているためだと考えられる。

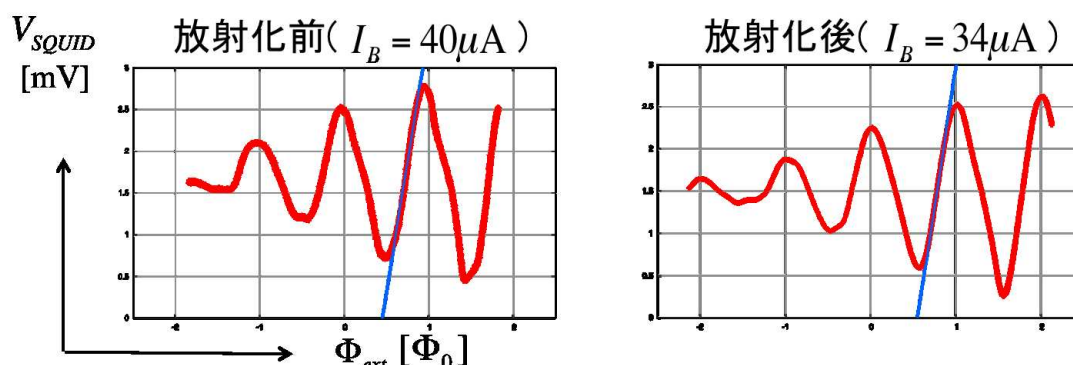


図 7: 左が放射化前、右が放射化後の $\Phi - V$ カーブ。青い線は SQUID のゲインを求めたときに fitting した直線。結果として、放射化前が $6.2 \text{ mV}/\Phi_0$ 、放射化後が $6.6 \text{ mV}/\Phi_0$ と大きな差は見られなかった。

4.2.2 ノイズ測定

同時に SQUID のノイズ測定も行った。

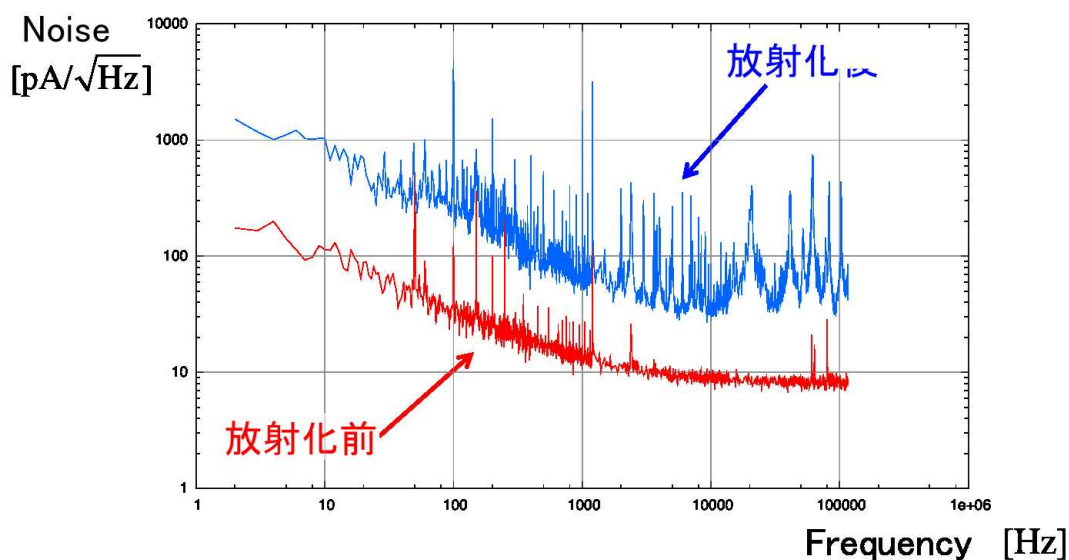


図 8: 放射化前後のノイズ測定の結果。赤が放射化前、青が放射化後である。どちらの測定も FFT アナライザーで行った。

図 8 を見ると、明らかに放射化前後でノイズレベルが大きくなっている。しかし、放射化前後の測定でプローブの設定が違い、後の別の SQUID の測定で放射化後にした測定のセットアップがノイズが大きくなってしまふということが分かっている。このことからノイズ環境を改善し、再測定が必要であると考えている。

5 まとめ

- 8入力 SQUID、SQUID アンプの動作を確認し、2つの信号の同時読み出しを行った。
- 放射化 SQUID の特性評価を行った。
 - 放射化後の SQUID の動作は確認できた。
 - SQUID の臨界電流は違いが見られた。放射化の影響か磁場の影響かは検討中。
 - ノイズレベルが上昇した。これも環境を整備して再測定する必要がある。