

# 都立大 SQUID アンプの特性評価 (2001 年 1 月 -2 月)

広池 哲平

2001 年 3 月 15 日

## 概要

2001 年 1 月 17 日に引続き、2 月 1 日に都立大希釈冷凍機にて、SQUID アンプの  $\Phi - V$  特性、ノイズ特性評価を行った。1 月 17 日とセットアップで異なる点は、ヘッドアンプ-希釈冷凍機間の配線を変更した点のみである。測定時のインプットの状態を色々と試してみたが、SQUID が飛んで測定にならなかった。今後はきちんとしたコネクタを使用して、ノイズが本当に大きいのか調べる必要がある。

## 1 SQUID のスペック

|                  |                   |
|------------------|-------------------|
| input 端子間        | 134 [ $\Omega$ ]  |
| bias1 端子間        | 337 [ $\Omega$ ]  |
| bias2 端子間        | 2131 [ $\Omega$ ] |
| $\Phi$ bias1 端子間 | 517 [ $\Omega$ ]  |
| $\Phi$ bias2 端子間 | 7500 [ $\Omega$ ] |

表 1: SQUID 基板上での抵抗値 (室温)

|   |           |
|---|-----------|
| フィードバックコイルと SQUID の<br>相互インダクタンス : $M_{ms}$ | 80 pH     |
| インプットコイルと SQUID の<br>相互インダクタンス : $M_{is}$   | 2.7 pH 以上 |

表 2: セイコーインスツルメンツによるスペック

## 2 セットアップ

- ショット抵抗 28.7 m $\Omega$ 、バイアス抵抗 10 k $\Omega$  で、カロリメータ # 46B と X 線源を組み込んでいる。
- 希釈冷凍機-ヘッドアンプ間の配線は、同じポートから input の配線を triax ケーブルを用いて引き出している。
- input の配線は、triax で引き出されており、input input-return を短絡することができるようになっている。それとは別に、最外シールドについては、ワニ口クリップで GND へ落とすことができる仕様となっている。
- BIAS、 $\Phi$  BIAS、FB、AMP の線はツイスト線であり、まとめて網線でシールドがなされている。
- SQUID の駆動装置の電源には、AC 電源を用いている。
- ヘッドアンプの置き場所は、図 1 の様にして万力を 2 つ用いて希釈冷凍機、GND へと圧着させている。万力の 1 つは、ヘッドアンプと太い網線の GND とを希釈冷凍機に圧着させている。もう 1 つは、D-sub と太い網線の GND とを希釈冷凍機に圧着させている。
- 希釈冷凍機-ヘッドアンプ間のケーブルを、1 月 17 日の実験時と比較して、以下のように変更した。
  - ヘッドアンプ内の GND へと繋がっている線を、ケーブルのシールドに繋げ、それをネジ止め用の圧着端子で出している。  
その写真を図 2 に示す。

- 希釈冷凍機側は、シールドからの線(ヘッドアンプのGND)をワニ口クリップで出しており、今後希釈冷凍機内で落すことを考え、フィッシャー側 23 番ピンにも接続されている。(フィッシャーの 24 番ピンは GND に落ちていたので、23 番ピンを用いた。) 23 番ピンは浮いていることになる。その写真を図 3 に示す。
- ヘッドアンプ側からも希釈冷凍機側からもケーブルシールドの GND が落せる仕様となっている。(測定は両者とも GND へと接続。)
- 配線図は図 4 の様になっている。

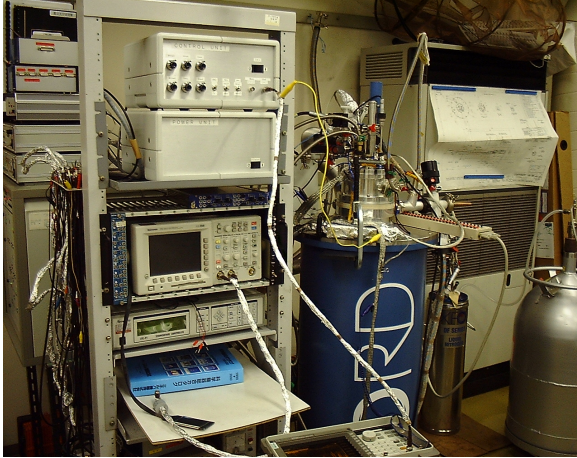


図 1: ヘッドアンプの置き場所

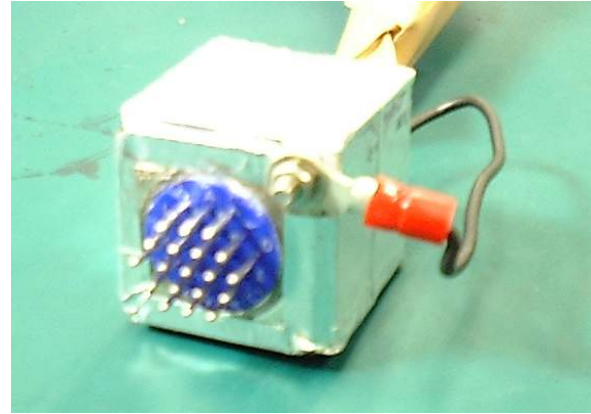


図 2: ヘッドアンプ側コネクタ

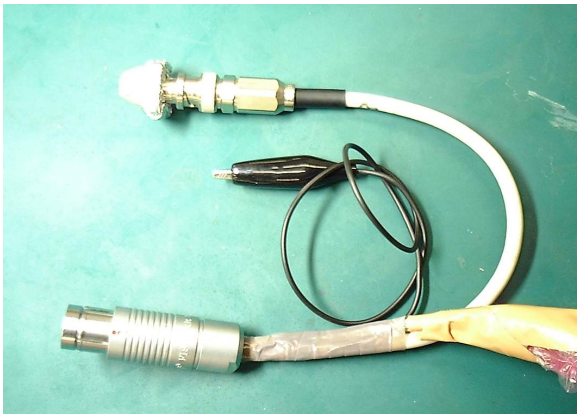


図 3: 希釈冷凍機側コネクタ

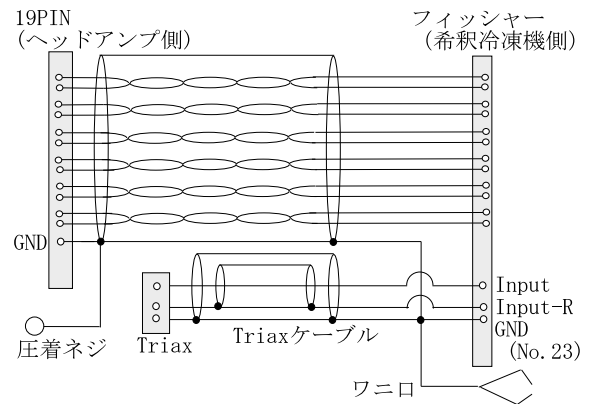


図 4: ヘッドアンプー希釈冷凍機間の配線図

宇宙研との仕様の違いを、いくつか下に挙げる。

## 都立大

- 希釈冷凍機—ヘッドアンプ間の配線の BENDIX 側 (19 ピン) コネクタは、写真の通り、シールドの部分が正規のものではなく、アルミ角材による手作りである。
- この配線には、bias、 $\Phi$  bias、feedback、amp、等どれもツイスト線 (ジュンフロン線を手で寄り合わせたものでシールドはなし) を用いている。
- SQUID を駆動させるのと同じポートから、input を引き出している。
- ヘッドアンプの GND を、希釈冷凍機内で GND へは落していない。

## 宇宙研

- 正規の BENDIX コネクタを用いている。
- 配線は、bias、 $\Phi$  bias、feedback にはツイストシールド線、amp には同軸ケーブルを使用している。
- input を他のポートから出している。
- ヘッドアンプの GND を、クライオスタットの 4 K ステージに落してある。
- 測定はシールドルーム内で、クライオスタットをパーマロイシールドにいれた状態で行なわれている。

## 3 測定方法

$^4\text{He}$  を転送後、SQUID アンプを駆動させてみたところ、後段のシリーズ SQUID の磁束のトラップ条件が揃わず、 $\Phi - V$  の出力が小さくなってしまった。

そこで、SQUID のトラップ磁束を解放するために、SQUID のワッシャーに用いられている Nb が常伝導になるように、一度温度を上昇させ ( $\sim 12$  K)、再度冷却したところシリーズ SQUID の磁束トラップ条件が揃うようになり、 $\Phi - V$  の出力が大きくなった。 ( $\sim 900$  mV(Pk - Pk))

その後、循環運転に入ったところ最低到達温度は  $\sim 90$  mK を達成した。

ただし、ETF 特性をみようとしてみたところ、ノイズが大きいため SQUID がとんでしまい、全くデータは取れなかった。

また、FFT アナライザを用いてノイズの測定を試みても、SQUID がとぶので測定不能だった。

これは TES が超伝導であることが原因となっている可能性があったので、TES が抵抗を持つように E/P の温度を 200 mK、300 mK、400 mK と上げて再度測定を行ったが、ETF 特性は取得できなかった。

FFT アナライザを用いてノイズ特性は取れるものの、こぶだらけの形状をしていた。(大きなピークは 200 kHz、300 kHz、400 kHz)

さらに、TES が完全に常伝導 ( $\sim 50$   $\Omega$ ) になるように、E/P の温度を 700 mK まで上昇させた。かろうじてノイズ特性をとることが可能だった。以下の測定は E/P の温度を  $\sim 700$  mK としての測定である。

SQUID 駆動装置から 22 Hz の正弦波を参照信号としてフィードバックコイルに流し、後段 SQUID シリーズの  $\Phi - V$  特性、インプット SQUID である初段 & 後段シリーズでの  $\Phi - V$  特性測定を行なった。駆動装置のフィードバックスイッチは off の状態であり、input は triax をショートさせ、ワニロクリップを用いて GND に落した。GND 周りの様子を模式図 5 に示す。

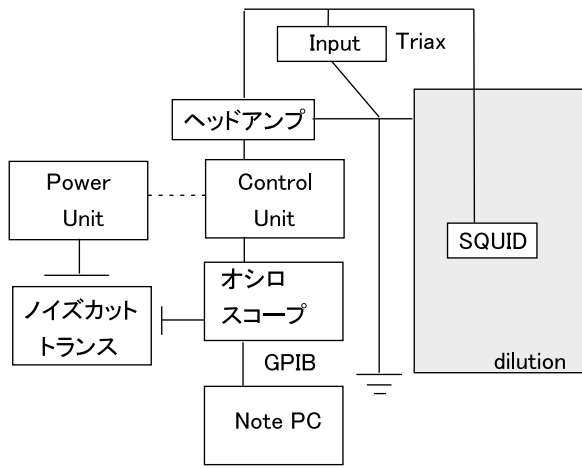


図 5:  $\Phi - V$  測定時

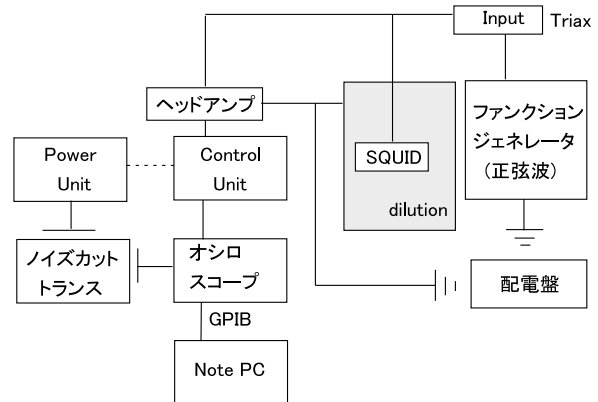


図 6: フィードバックに対するゲイン測定時

### 3.2 システムのゲイン

駆動装置のフィードバックスイッチを入れ、ファンクションジェネレーター HP33120A から 400 mV(Pk-Pk)、1 kHz の正弦波を入力し、初段 & 後段からの出力をみた。ファンクションジェネレータと input の接続は、triax の雄同志を繋げるために、雌-雌変換ができるように簡単な box を作り、アルミホイルを用いてシールドをしたものを用いて接続した。出力はオシロスコープでアベレージをかけることで、正弦波の出力であることが確認できる程度であった。GND 周りの様子を模式図 6 に示す。

実は、この実験で、ファンクションジェネレーターと input の接続に関し、triax 同士の変換を行なったが、実際に必要であったのは、BNC(ファンクションジェネレーター側)と、triax(input 側)の変換であったのにも関わらず、triax を無理矢理接続したため、当初考えていた通りの信号が、きちんと送れていないので、入力された信号は、結局なんなのか、物理的な説明もつけられず、意味のない実験となってしまった。つまり、この実験から得られたシステムのゲインについては、全く妥当性がないこととなる。

### 3.3 ノイズ

駆動装置のフィードバックスイッチを入れ、input のファンクションジェネレーターの電源を off にし、FFT アナライザを用いてノイズ特性を取った。GPIB を繋いでおく必要はないので、GPIB カードは外しておいた。GND 周りの様子を図 7 に示す。また、Power Unit の GND がしっかりと取れていなかったため、Power Unit の DCout1 と Control Unit の CN5 を繋いで GND に落とし、希釈冷凍機-ヘッドアンプ間の配線に緩衝材を巻くなどして、比較のために input をファンクションジェネレーターへ繋ぎ、もう一度データを取った。その時の配線図を図 8 に示す。

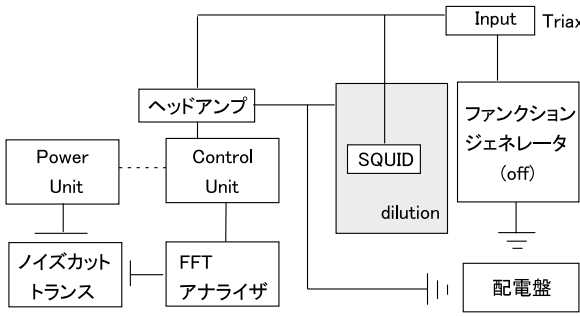


図 7: ノイズ測定時 (改善前)

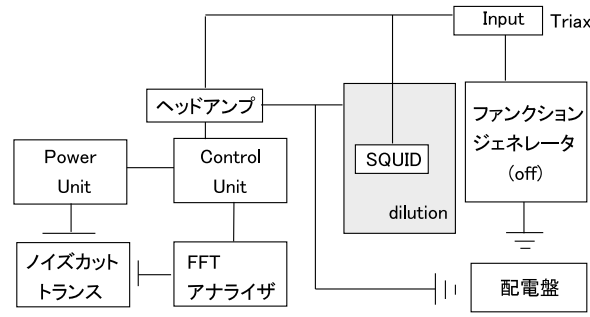


図 8: ノイズ測定時 (改善後)

## 4 結果

### 4.1 $\Phi - V$ 特性、ゲイン

#### 4.1.1 後段のフィードバックコイルの相互インダクタンス & ゲイン

後段だけの  $\Phi - V$  特性から、後段のシリーズのフィードバックコイルとワッシャーの相互インダクタンスを求める。図 9 から  $\Phi_0$  に相当する横軸の値を読み取ると、 $V_0 \sim 260$  mV である。フィードバック抵抗  $R_{FB} \sim 10$  k $\Omega$  の値を用いて電流換算してやることで、フィードバックコイルを流れる電流が、

$$I_0 = \frac{V_0}{R_{FB}} \quad (1)$$

$$\sim 2.6 \times 10^{-5} \text{ [A]} \quad (2)$$

$$(3)$$

と求まる。従って相互インダクタンス  $M_{FB2}$  は、

$$M_{FB2} = \frac{\Phi}{I} = \frac{\Phi_0}{I_0} \quad (4)$$

$$\sim \frac{2.0678 \times 10^{-15}}{2.6 \times 10^{-5}} \sim 80 \text{ [pH]} \quad (5)$$

と求まる。また、図 9 の  $\Phi_0/4$  付近での  $\Phi - V$  曲線の傾き ( $4.0/\Phi_0$  [V/Wb]) から出力電圧 / 入力磁束として後段のオープンループゲイン  $A_{FB2}$  が求まる。これを出力電圧 / 入力電流として換算してやると、

$$A_{FB2} \sim \frac{4.0 M_l}{\Phi_0 \Phi} \quad (6)$$

$$\sim \frac{4.0 \times 80 \times 10^{-12}}{2.0678 \times 10^{-15}} \sim 1.2 \times 10^5 \text{ [V/A]} \quad (7)$$

と求めることができる。

#### 4.1.2 初段のフィードバックコイルの相互インダクタンス & ゲイン

同様にして、初段 & 後段の  $\Phi - V$  特性から、初段 SQUID のフィードバックコイルの相互インダクタンス  $M_{FB1}$  についても求める。図 10 から  $\Phi_0$  に相当する横軸の値を読み取ると、 $V_0 \sim 240$  mV となることから、

$$M_{FB1} = \frac{\Phi_0}{I_0} \sim 86 \text{ [pH]} \quad (8)$$

と求まる。また、全体のオープンループゲイン  $A_{FB1}$  については、図 10 から傾き ( $1.8/\Phi_0$  [V/Wb]) を読みとり、出力電圧 / 入力磁束として、

$$A_{FB1} \sim \frac{1.8 M_{FB2}}{\Phi_0 \Phi} \quad (9)$$

$$\sim \frac{1.8 \times 86 \times 10^{-12}}{2.0678 \times 10^{-15}} \sim 5.8 \times 10^4 \text{ [V/A]} \quad (10)$$

と求めることができる。

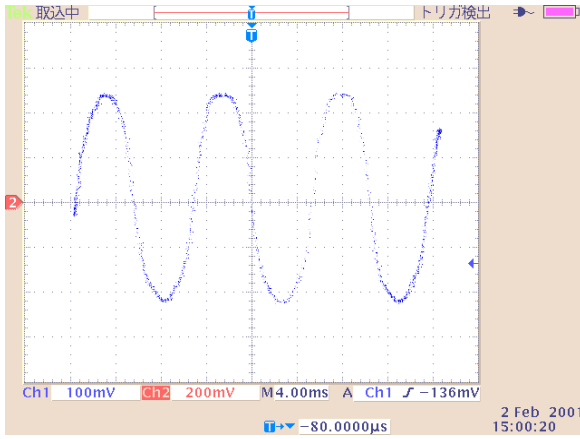


図 9:  $\Phi - V$  特性 (後段 SQUID)

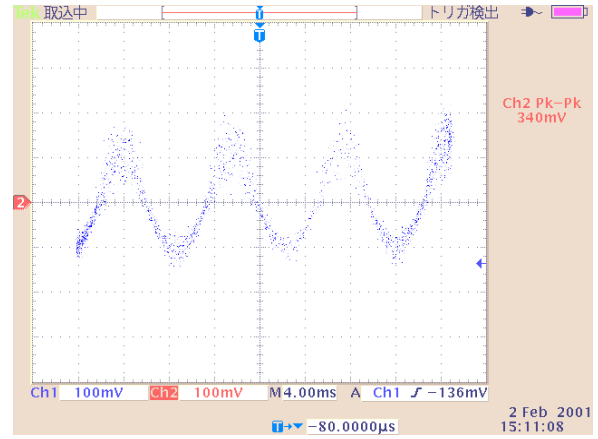


図 10:  $\Phi - V$  特性 (初段 & 後段 SQUID)

#### 4.1.3 インプットに対するシステムゲイン

input は  $V_{in} = 400 \text{ mV(Pk-Pk)}$  の正弦波である。バイアス抵抗  $R_B \sim 10 \text{ k}\Omega$ 、シャント抵抗  $R_S \sim 28.7 \text{ m}\Omega$ 、温度  $\sim 0.7 \text{ K}$  でのカロリメータの抵抗  $R_{cal} \sim 50 \text{ }\Omega$  である。SQUID からの出力を図 11 に示す。これにアベレージをかけて、Pk-Pk で  $V_{out} \sim 8 \text{ mV}$  であることから、カロリメータを流れる電流を  $I$  とし、システムのゲインを  $A$  すると、

$$I \sim \frac{R_S}{R_{cal} + R_S} \frac{V_{in}}{R_B} \quad (11)$$

$$\sim \frac{28.7 \times 10^{-3}}{50 + 28.7 \times 10^{-3}} \frac{0.4}{10^4} \quad (12)$$

$$\sim 2.29 \times 10^{-8} \text{ [A]} \quad (13)$$

$V = IA$  の関係があることから、

$$A \sim \frac{8 \times 10^{-3}}{2.29 \times 10^{-8}} \quad (14)$$

$$\sim 3.5 \times 10^5 \text{ [V/A]} \quad (15)$$

と求めることができる。

---

先に述べた通り、このシステムゲインの値は、信用できる根拠が皆無である。

---

## 4.2 入力コイルの相互インダクタンス

初段 SQUID のフィードバックコイルの相互インダクタンスを  $M_{FB1}$ 、入力コイルの相互インダクタンスを  $M_{in}$  とすると、システムのゲイン  $A$  は、

$$A = \frac{M_{in} R_{FB}}{M_{FB1}} \quad (16)$$

と書けるので、各々の値を代入してやると、

$$M_{in} \sim \frac{3.5 \times 10^5 \times 86 \times 10^{-12}}{10^4} \sim 3.0 \text{ [nH]} \quad (17)$$

と求めることができる。

**SQUID アンプのスペック値と実測値の比較 (インダクタンス)** 上で得られた値を、セイコーインスツルメンツによるスペック値との比較を表 3 に示す。フィードバックコイル相互インダクタンスを  $M_{ms}$  とし、インプットコイル相互インダクタンスを  $M_{is}$  とする。セイコーインスツルメンツによるスペック値とよく一致していることがわかる。

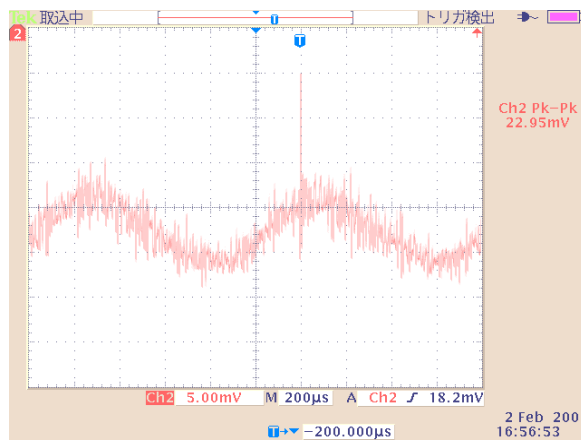


図 11: パルスジェネレータを用いて input に正弦波を入力

|               | スペック値  | 実測値 |
|---------------|--------|-----|
| $M_{ms}$ [pH] | 80     | 86  |
| $M_{is}$ [nH] | 2.7 以上 | 3.0 |

表 3: 相互インダクタンスのスペック値との比較

### 4.3 ノイズ

ノイズレベルが高いために、SQUID が飛ばずに 50 カウント取得するのは、大変至難な状況であった。input を GND に落した状態、電池ボックスを繋いだ状態では、駆動装置のスイッチを MEAS モードにするだけで、SQUID が跳びまくって特性測定が無理であった。input をファンクションジェネレーターへ繋ぎ、電源を off にした状態で測定をした時、(運良く?) データをとることができた。102.4/51.2/12.8/1.6 kHz までのノイズスペクトルのデータを図 12 に重ねて示す。

また、配線周りのノイズ対策後の、102.4/51.2/25.6/12.8/1.6 kHz までデータを重ねて表したものを、図 13 に示す。SQUID が飛びまくり、有意な測定とは言えないが、ノイズレベルが多少低くはなった。

E/P の温度が 0.7 K の際の電流換算をした、ジョンソンノイズの見積もりを表 ?? に示す。電流換算ノイズを電圧換

| E/P の<br>温度 [K] | TES の<br>抵抗値 | ジョンソンノイズ [pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ] |       |     |
|-----------------|--------------|------------------------------------|-------|-----|
|                 |              | TES & シャント                         | フィルター | 合計  |
| 0.7             | 50           | 0.88                               | 0.80  | 1.2 |

表 4: 電流換算ノイズの見積もり

| 電圧換算に用いる<br>ゲインの値 [V/A] | ノイズレベル [ $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ] |     |
|-------------------------|---|-----|
|                         | 見積もり                                      | 実測値 |
| $3.5 \times 10^5$ (都立大) | 0.4                                       | 9   |
| $16 \times 10^5$ (宇宙研)  | 1.9                                       | 9   |

表 5: 実測値と見積もりとの比較

算ノイズとして表す際、システムのゲインを演算してやれば良いのだが、今回の実験結果から計算して求めたゲインと、宇宙研での実験から求められたゲインを比較して表 5 に示す。これを測定値と比較してみると、都立大・宇宙研のどちらのゲインを用いても、ジョンソンノイズだけでノイズを説明することはできず、何らかの他の要因のノイズがのっていることになる。

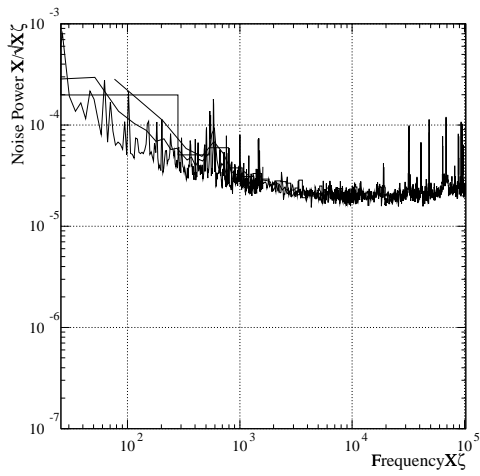


図 12: 環境改善前 ノイズパワースペクトル (電圧換算)

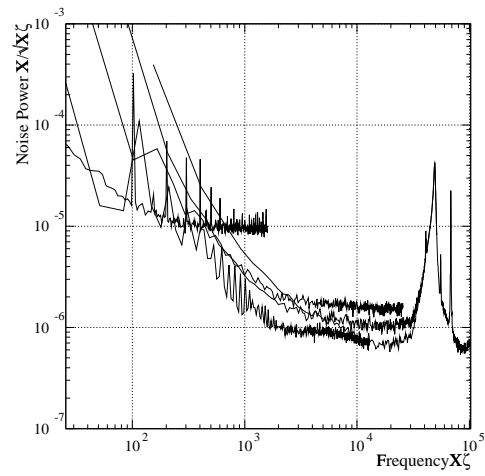


図 13: 環境改善後 ノイズパワースペクトル (電圧換算)

#### 4.3.1 1月17日の測定との比較

1月17日のFFTアナライザを用いた測定結果を図14、図15に示す。図14は、E/Pの温度が0.1Kで、図15については、0.5Kである。

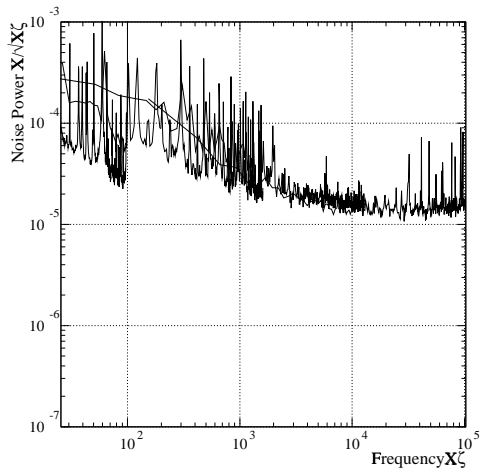


図 14: 100 mK に於けるノイズパワースペクトル (電圧換算)with FFT アナライザ

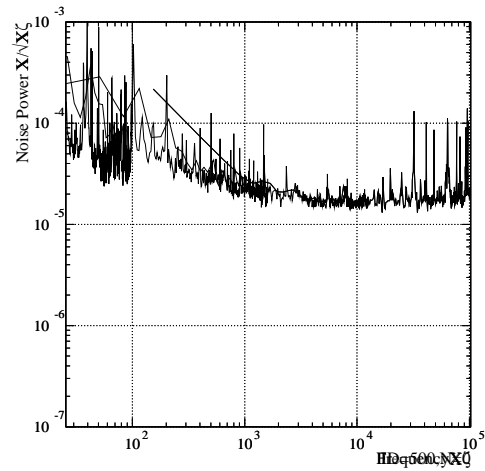


図 15: 500 mK に於けるノイズパワースペクトル (電圧換算)with FFT アナライザ

1月17日の横河オシロを用いた測定結果を図16、図17に示す。

図7より、0.1Kに於けるジョンソンノイズの宇宙研の測定から求めたゲインを用いた見積もりは、測定値よりも大きな値を示している。このことは、その見積もりが正しくできていないことを示唆している。すなわち、宇宙研の値を用いることは適切ではないということである。



| 温度      | TES の<br>抵抗値 [ $\Omega$ ] | ジョンソンノイズ [ $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ] |       |     |
|---------|---------------------------|---|-------|-----|
|         |                           | TES& シャント                                 | フィルター | 計   |
| 0.1 [K] | —                         | 13.872                                    | 0.80  | 14  |
| 0.5 [K] | 11.8                      | 1.528                                     | 0.80  | 1.7 |

表 6: 0.1 K, 0.5 K に於ける電流換算ノイズ

| E/P の<br>温度 [K] | 電圧換算に用いる<br>ゲインの値 [V/A] | ノイズレベル [ $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ] |     |
|-----------------|-------------------------|---|-----|
|                 |                         | 見積もり                                      | 実測値 |
| 0.1             | $3.5 \times 10^5$ (都立大) | 4.8                                       | 13  |
|                 | $16 \times 10^5$ (宇宙研)  | 22  |     |
| 0.5             | $3.5 \times 10^5$       | 0.6                                       | 15  |
|                 | $16 \times 10^5$        | 2.8                                       |     |

表 7: 実測値と見積もりとの比較

## 5 まとめと今後

SQUID アンプの都立大希釈冷凍機バージョンである、今回の実験ではノイズが過多であるために SQUID がすぐに飛んでしまい、ETF 特性をとるまでには至らなかった。まずはこのノイズを軽減しないことには話にならない。Φ-V 特性を見る限り、後段のシリーズ SQUID については特に問題はなさそうであるが、input である初段 SQUID はノイズがシビアに効いている。今後の対策について、希釈冷凍機の外でできること、希釈冷凍機内でできることにわけて以下に挙げる。希釈冷凍機内をいじるのは大変なので、まずは希釈冷凍機の外で可能な限り対策を練ったのちに、中の変更を行うのが良いと思われる。

### 希釈冷凍機の外

- 正規の BENDIX のコネクタを使用し、bias などの線をツイストシールド線にし、amp は同軸ケーブルにすることで、希釈冷凍機-ヘッドアンプ間の配線を改良する。
- GND 周りの見直しをする。
- input にコモンモードフィルタを入れてみる。
- 駆動装置電源に、DC 電源を用いてみる。

### 希釈冷凍機の中

- 1 K pot に置かれている、カロリメータバイアス用の抵抗 ( $10 \text{ k}\Omega$ ) を、以前の  $100 \text{ k}\Omega$  に戻す。
- ヘッドアンプの GND を希釈冷凍機内で Nb へ落してみる。

1 月中旬からの都立大における実験では、SQUID が飛んでしまうため、ETF 特性をとることはできなかったが、その後 2 月 9 日の宇宙研での SII-2-A の測定においても、SQUID が飛んでしまい、ETF 特性を取得することはできなかった。その前の回の SII-2-A の測定ではパルスの取得までできていたにも関わらず、セットアップがシャント抵抗の値を変更した以外は、全て同じ状況であっても、測定できない状況であった。シャント抵抗を大きくすると、ジョンソンノイズは小さくなるので、よりノイズを抑えることができると思われる。しかし、このセットアップで SQUID アンプが正常に働かないということは、駆動装置がどこか調子が悪いのではないかと考えることができる。シャント

抵抗を現在の値から以前の値に戻し、再び測定してみることで、駆動装置について調べることができるであろう。

---

2月21日の宇宙研での測定では、無事パルスをみることができたので、駆動装置については、使用できない状態にあるわけではないことがわかった。やはり第一に考えるべきことは、希釈冷凍機－ヘッドアンプ間のケーブルを新たに作ることであろう。

2月28日、会議を経て。今後やるべきこと。

- フィッシャーのシェルをケーブルのシールド線へ接続。
- ツイスト線 —— > ツイステッドシールド線にする。
- 正規の BENDIX を使用する。
- triax-BNC 変換を、コモンモードフィルタ内蔵でつくる。
- ヘッドアンプ周りの GND を見直す。
- input-return を GND に落すことで、電位の基準を設ける。

## 6 得られたデータ

~/tepei/exp/squid/0201/data に入っているデータ

### 6.1 $\Phi - V$ 、ゲイン

$\Phi - V$  測定については、全て input をショートさせ GND へ落したものである。ゲイン測定はファンクションジェネレーターを用いて、400 mV(Pk-Pk) の正弦波を入れ初段 & 後段の出力をみた。

file 名を TEK0000X.pcx(.tde) とし、X のところに対応する No. が入る。

ここで初段と記してあるのは、初段 & 後段の出力をみていることを意味している。

|          |            |    |    |     |   |   |         |
|----------|------------|----|----|-----|---|---|---------|
| ファイル名 X  | 3          | 4  | 5  | 6   | 7 | 8 | 9       |
| 測定       | $\Phi - V$ |    |    |     |   |   | システムゲイン |
| 温度 [mK]  | 100        |    |    | 700 |   |   |         |
| 出力 SQUID | 後段         | 初段 | 後段 | 初段  |   |   |         |

表 8:  $\Phi - V$  データの表

### 6.2 ノイズ

FFT アナライザを用いて測定した。温度は  $\sim 700$  mK である。input はファンクションジェネレーターに繋がっており、その電源は off になっている。得られたデータは、ファイル名 X.DAT(.ASC) とし X には対応する No. が入る。No.5  $\sim$  9 はノイズを多少軽減したのちのデータである。

|                  |       |      |      |     |       |      |      |      |     |
|------------------|-------|------|------|-----|-------|------|------|------|-----|
| ファイル名 X          | 1     | 2    | 3    | 4   | 5     | 6    | 7    | 8    | 9   |
| 周波数領域 [ $<$ kHz] | 102.4 | 51.2 | 12.8 | 1.6 | 102.4 | 51.2 | 25.6 | 12.8 | 1.6 |

表 9: ノイズデータの表

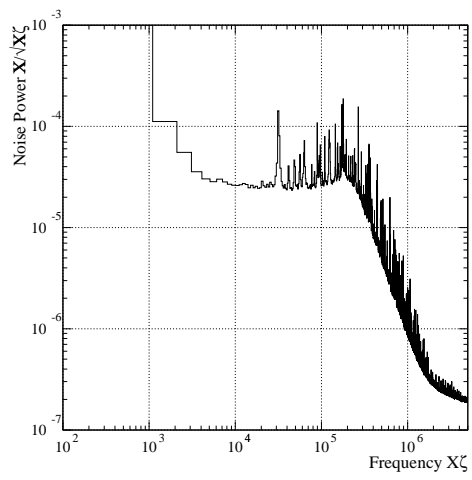


図 16: 100 mK に於けるノイズパワースペクトル (電圧換算)with 横河オシロ

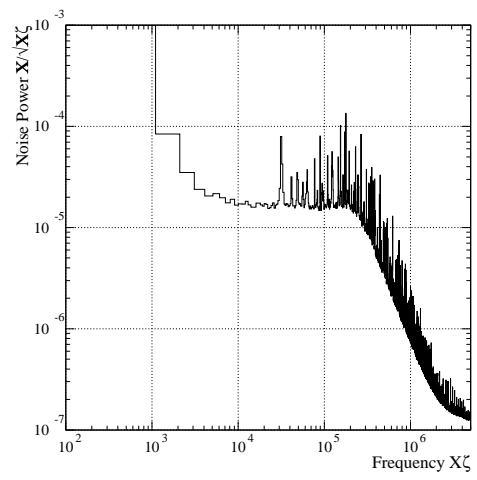


図 17: 500 mK に於けるノイズパワースペクトル (電圧換算)with 横河オシロ