

都立大 SQUID # 3 性能評価

影井 智宏

2000 年 6 月 16 日

概要

2000 年 5 月 19 日と 6 月 2 日に都立大希釈冷凍機にて、SQUID # 3 の性能評価を行った。5 月 19 日の測定においては入力端子を引き出さず、希釈冷凍機の中で短絡させた状態で、また 6 月 2 日の測定においては SQUID の入力端子を希釈冷凍機外に引き出した状態で、その特性を評価した。その結果、どちらも従来のスペックに比較的近い特性を得ることができた。ノイズレベルは Input 端子をソースにつなぐまでは低いノイズレベルを達成することができるが、ソースにつなげるとノイズは高くなってしまった。今回はその結果を詳細に報告する。

SQUID # 3 のスペック

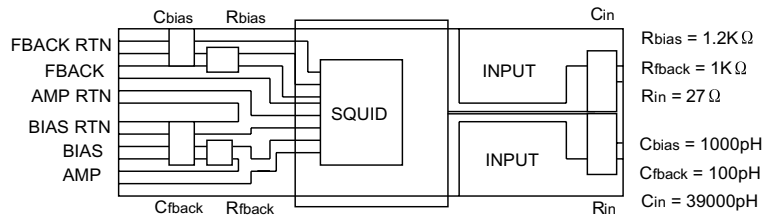


図 1: SQUID 基板

Amp 端子間	568 [Ω]
Bias 端子間	1765 [Ω]
Fback 端子間	1560 [Ω]
Input 端子間	12.23 [K Ω]

表 1: 常温における SQUID 基板上での抵抗値

臨界電流: I_c	34 μ A
フィードバックコイルと SQUID の相互インダクタンス: M_{ms}	80 pH
インプットコイルと SQUID の相互インダクタンス: M_{is}	3.0 pH
電流感度	750000 V/A

表 2: セイコ・インストルメンツによる SQUID のスペック

1 入力電流 (Input) 端子を短絡させた SQUID の動作

2000 年 5 月 19 日に都立大にて SQUID の Input 端子を短絡させることにより Input 端子から入るノイズを押さえ、4.2 K、2.5 K における SQUID # 3 の基本動作およびその出力のノイズレベルを測定した。

1.1 測定条件

- 前回、前々回の SQUID の Input コイルを焼き切ってしまった経験から、Nb シールド内で Input-Rtn と Bias-Rtn とを銅皮膜付きの NbTi 線で短絡させた (図 2)。
- Input 端子間を EXPERIMENTAL PLATFORM において 2.1 K Ω の金属皮膜抵抗で短絡させた (図 2)。表 1 より Input 端子間の抵抗値は 12.23 K Ω であるから、EXPERIMENTAL PLATFORM 上の金属皮膜抵抗の両端

の抵抗値を測定したときに

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{12.23} + \frac{1}{2.1} \simeq \frac{7}{12}$$

から、 $R \sim 1.7 \text{ K}\Omega$ であればよく、Input コイルの生死の確認に便利である。

- SQUID から希釈冷凍機の 26way コネクタ - までは銅皮膜付きの NiTi 線を使用している (図 2)。
- SQUID の駆動装置の電源には、電源駆動 (Power Unit) を用いた。

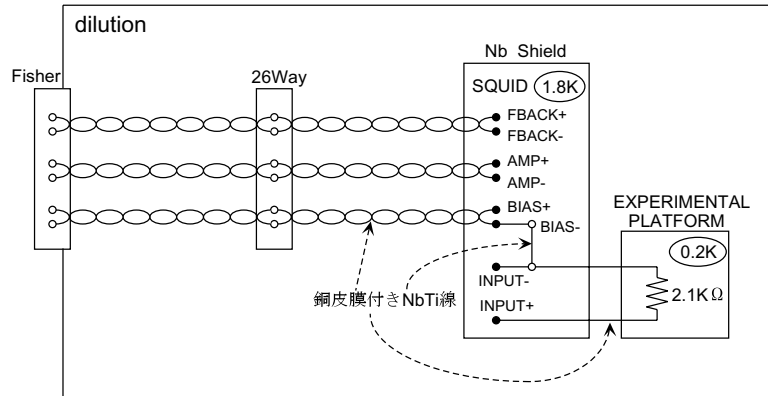


図 2: 希釈冷凍機内の配線

1.2 I - V/Φ - V 測定

今回の測定におけるセットアップとそのグランドまわりは図 3のとおりである。トランジスタ電源とデジタルオシロの電源はノイズカットトランスを用いることによって、グランドからは浮かしている。希釈冷凍機の配管と温度計は希釈冷凍機から電気的に切り離してあり、希釈冷凍機自体は I - V/Φ - V 測定回路ボックスのみからグランドに落ちている。なお、グランドは配電板のグランドを使用している。

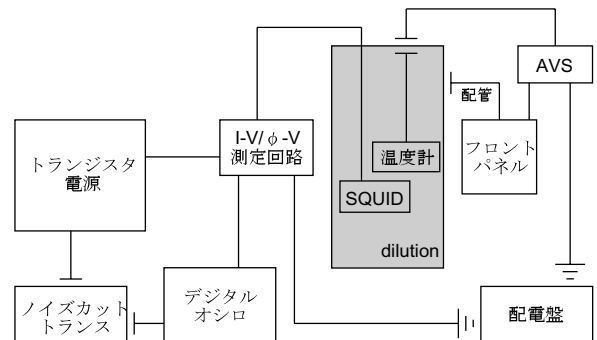


図 3: I - V/Φ - V 測定系

1.2.1 I - V 測定

4.2 K における SQUID に対して、振幅 $40 \mu\text{A}$ 、 $130 \mu\text{A}$ (共に振動数 30 Hz) の交流信号を入力したときのデジタルオシロで見る I - V 曲線をそれぞれ図 4、図 5に示す。どちらも DC=0、Average 100 としている。X 軸は、

$$(\text{SQUIDにかけたバイアス電流}) \times (I - V/\Omega - V \text{ 駆動回路に組み込まれた } 10 \text{ K}\Omega \text{ の金属皮膜抵抗})$$

であり、Y 軸は

$$(\text{SQUIDの両端に生じる電圧差}) \times (1000)$$

である。

このときの SQUID の臨界電流 I_c は図 4を用いて、

$$I_c \simeq \frac{1.460 \text{ [mV]}}{2 \times 10 \text{ [K}\Omega]} = 23 \text{ [\mu A]}$$

となる。

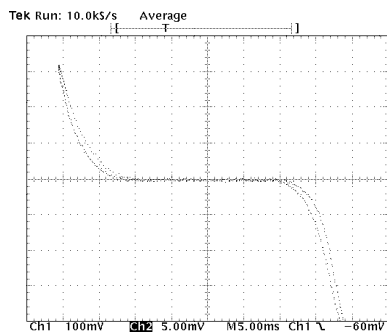


図 4: 4.2 K において振幅 $40 \mu\text{A}$ の交流信号を入力したときの I - V 曲線

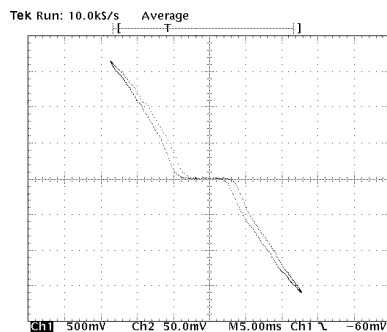


図 5: 4.2 K において振幅 $130 \mu\text{A}$ の交流信号を入力したときの I - V 曲線

またシャント抵抗は図 5 において、SQUID への入力電流が臨界電流よりも十分に大きい部分でフィッティングし、(シャント抵抗は SQUID にたいして並列に二つ入っていることから) その値を 2 倍すると $R_s \sim 2.6 \Omega$ と得られた。

2.5K において、振幅 $50 \mu\text{A}$ 、 $110 \mu\text{A}$ (共に振動数 30 Hz) の交流信号を入力したときのデジタルオシロで見る I - V 曲線をそれぞれ図 6、図 7 に示す。どちらも DC=0、Average 100 としている。

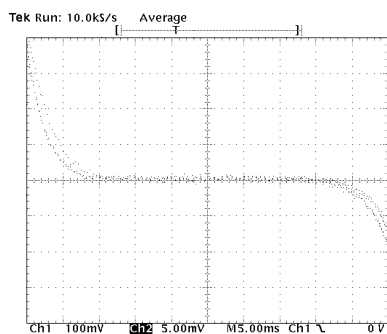


図 6: 2.5 K において振幅 $50 \mu\text{A}$ の交流信号を入力したときの I - V 曲線

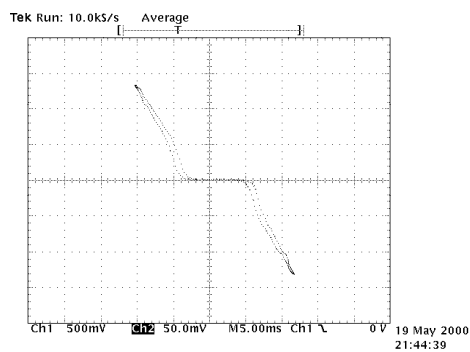


図 7: 2.5 K において振幅 $110 \mu\text{A}$ の交流信号を入力したときの I - V 曲線

このときの SQUID の臨界電流 I_c は図 6 を用いて、 $\sim 33 \mu\text{A}$ と得られ、これは SQUID のスペック (表 2) の $34 \mu\text{A}$ とほぼ等しい値となっている。

また、このときのシャント抵抗は図 7 から、 $R_s \sim 2.8 \Omega$ と得られた。

1.2.2 Φ - V 測定

フィードバックコイルに振幅 $90 \mu\text{A}$ の交流電流を入力し、SQUID にかけるバイアスを変化させたときの $\Phi - V$ 曲線を図 8 に示す。これはデジタルオシロで見た入力・出力であり (DC=0、Average 100)、X 軸はフィードバックコイルにおける入力電圧、Y 軸はそのときの SQUID にかかる電圧をとっている。また、図 9 は図 8 において、SQUID に流す電流が $40 \mu\text{A}(=1.74 I_c)$ のときのグラフを、X 軸をフィードバックコイルに流れる電流、Y 軸を SQUID にかかる電圧に、それぞれ変換したものである。

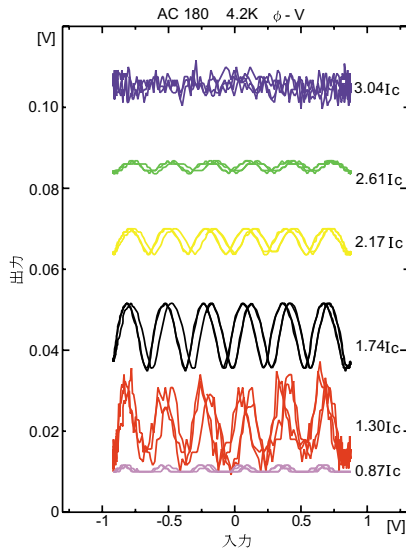


図 8: 4.2 K において振幅 $90 \mu\text{A}$ の交流信号をフィードバックコイルに入力したときの $\Phi - V$ 曲線 (横にある値は SQUID に流した定電流を、臨界電流 I_c を単位として示したもの)

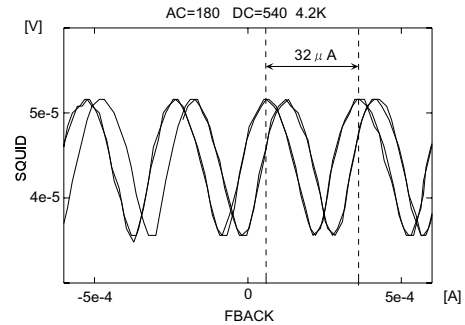


図 9: 4.2 K において SQUID に $40 \mu\text{A}(=1.74 I_c)$ の電流を入力したときの $\Phi - V$ 曲線

図 9 より、SQUID にかかる電圧差の周期は $32 \mu\text{A}$ であることから、磁束量子 $\Phi_0 (=2.067 \times 10^{-15} [\text{Wb}])$ をもちいるとフィードバックコイルと SQUID 素子との相互インダクタンス M_{fw} は

$$M_{fw} = \frac{\Phi_0}{32 \mu\text{A}} \simeq 64.6 [\text{pH}]$$

と得られる。

2.5K において、フィードバックコイルに振幅 $95 \mu\text{A}$ の交流信号を入力したときのデジタルオシロで見る $\Phi - V$ 曲線を図 10 に示す。また図 11 は、図 10 において、SQUID に流した電流が $40 \mu\text{A}(=1.25 I_c)$ のときの $\Phi - V$ 曲線である。このとき、フィードバックコイルと SQUID 素子との相互インダクタンス M_{ms} は図 11 を用いて $\sim 66.7 \text{pH}$ と得られ、これは SQUID のスペック (表 2) の 80pH とほぼ等しい値となっている。

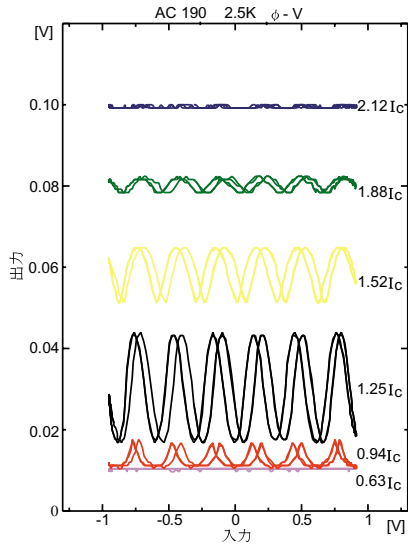


図 10: 2.5 K において振幅 $95 \mu\text{A}$ の交流信号をフィードバックコイルに入力したときの $\Phi - V$ 曲線 (横にある値は SQUID に流した定電流を、臨界電流 I_c を単位として示したもの)

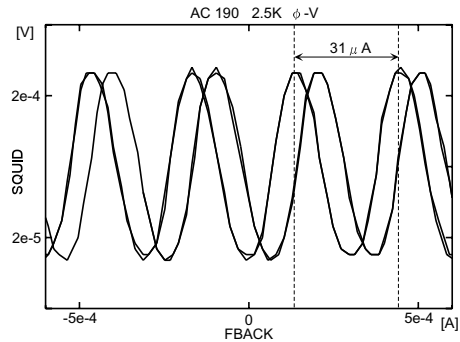


図 11: 2.5 K において SQUID に $40 \mu\text{A}$ ($=1.25 I_c$) の電流を入力したときの $\Phi - V$ 曲線

1.2.3 ノイズ測定

測定系のセットアップとそのグランドまわりは図 12 の通りである。FFT アナライザと Power Unit の電源はノイズカットトランスを用いることにより、グランドからは浮かしている。希釈冷凍機は SQUID ANPLIFYER からのみでグランドに落ちている。

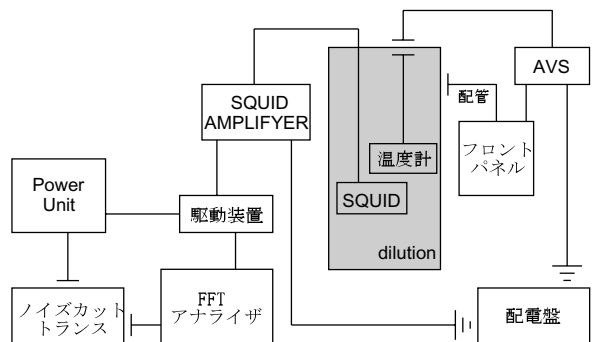


図 12: 希釈冷凍機内の配線

今回の測定において、最もノイズレベルが低かったものを図 13 (動作温度 $\sim 4.2\text{K}$)、図 14 (動作温度 $\sim 2.5\text{K}$) に示す。これらのグラフの X 軸は周波数、Y 軸は FFT アナライザの出力電圧を (表 2) の電流感度 750000 [V/A] で割ったノイズレベルである (単位は $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$)。

駆動装置のバイアス目盛り: B_{div} と、そのとき流れる電流: I の関係式は [1] より

$$I = -2.00 \times 10^{-3} + 8.955 \times 10^{-2} \times B_{div} \text{ [}\mu\text{A]} \quad (1)$$

であることを用いると、図 13 における最適バイアスの目盛りは $B_{div}=340$ であったことから、 $I \sim 30.4 \mu\text{A}$ ($\approx 1.32 I_c$) となる。図 13 から、 1024 Hz におけるノイズレベルは $\sim 12.4 \text{ [pA}/\sqrt{\text{Hz}}]$ であり、カットオフ周波数を 1024 Hz におけるノイズの $1/\sqrt{2}$ (図 13 の実線) とすれば、 $\sim 4200 \text{ Hz}$ となる。

また、図 14 における最適バイアスの目盛りは $B_{div}=460$ であり式 (1) を用いると $I \sim 41.1 \mu\text{A}$ ($\approx 1.25 I_c$) となる。図 14 から、 1024 Hz におけるノイズレベルは $\sim 11.7 \text{ [pA}/\sqrt{\text{Hz}}]$ であり、このときのカットオフ周波数は ~ 10500 となる。

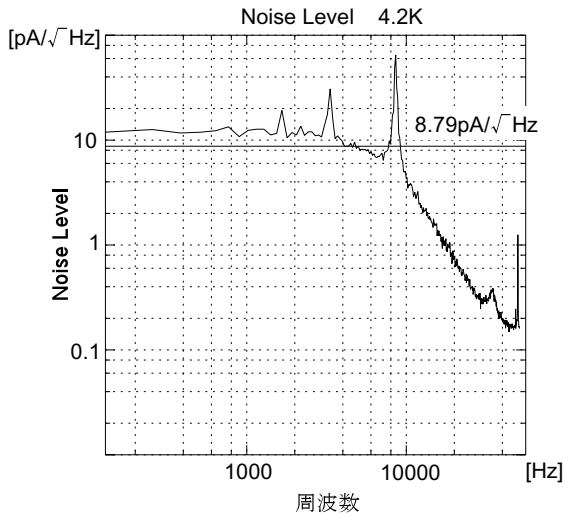


図 13: 4.2 K において、SQUID に $30.4 \mu A (\approx 1.32 I_c)$ の電流を流したときのノイズレベル

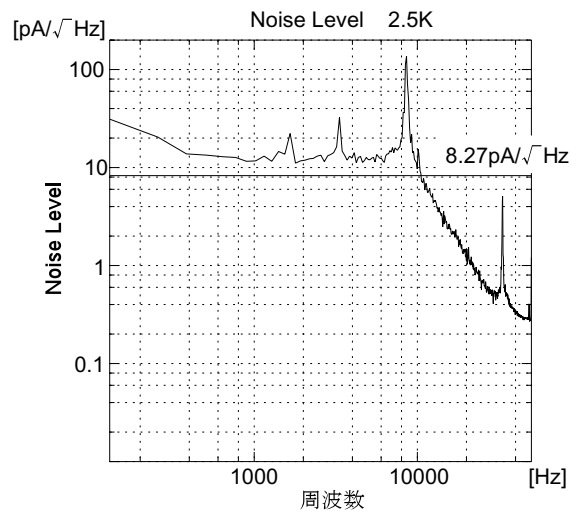


図 14: 2.5 K において、SQUID に $41.1 \mu A (\approx 1.25 I_c)$ の電流を流したときのノイズレベル

2 入力電流 (Input) 端子を引き出した SQUID の動作

2000 年 6 月 2 日、3 日に都立大にて SQUID の Input 端子を引き出して、4.2 K、2.5 K における基本動作およびその出力のノイズレベル、電流感度を測定した。

2.1 測定条件

- 5 月 19 日の実験と同様に Nb シールド内で Input-Rtn と Bias-Rtn とを銅皮膜付きの NbTi 線で短絡させた (図 15)。
- Input コイルに対して、TES の代わりとして 200Ω の金属皮膜抵抗を直列に、シャント抵抗の代わりとして 20Ω の金属皮膜抵抗を並列に入れた (図 15)。
- Input コイルに流す電流を押しやるために、 $100 K \Omega$ の金属皮膜抵抗を配線間に入れた (図 15)。
- SQUID から希釈冷凍機の 26Way コネクターまでの配線は銅皮膜付きの NbTi 線を使用した。
- SQUID 端子の配線と Input 端子の配線は全て同じコネクターを用いて希釈冷凍機外部へ引き出されている。
- SQUID の駆動装置の電源には、電源駆動 (Power Unit) を用いた。

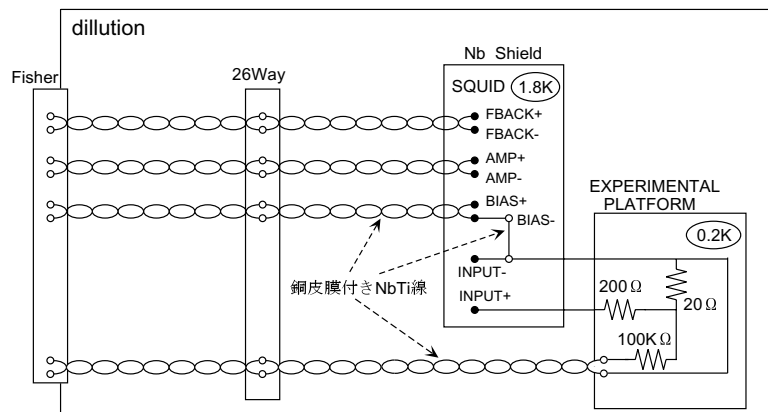


図 15: 希釈冷凍機内の配線

2.2 I - V/ Φ - V 測定

今回の測定におけるセットアップとそのグランドまわりは図 16のとおりである。前回と同様にトランジスタ電源とデジタルオシロの電源はノイズカットトランスを用いることによって、グランドからは浮かしている。希釈冷凍機自体は I - V/ Φ - V 測定回路ボックスのみからグランドに落ちている。Input 端子は D-sub コネクターでショートさせている。なお、グランドは配電板のグランドを使用している。

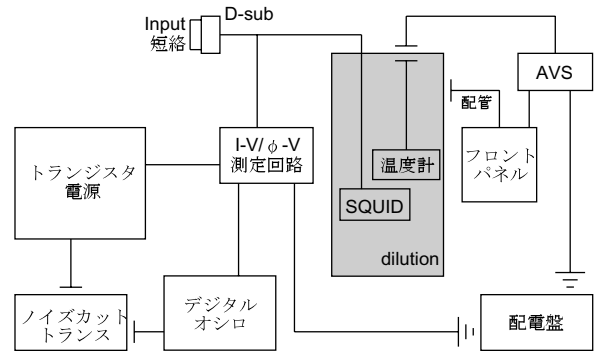


図 16: I - V/ Φ - V 測定系

2.2.1 I - V 測定

4.2 K における SQUID に対して、振幅 $45 \mu\text{A}$ 、 $66 \mu\text{A}$ (共に振動数 30 Hz) の交流信号を入力したときのデジタルオシロで見る I - V 曲線をそれぞれ図 17、図 18に示す。どちらも DC=0、Average 100 としている。

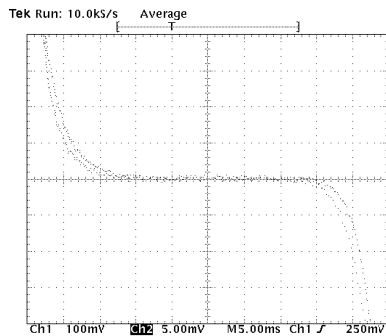


図 17: 4.2 K において振幅 $45 \mu\text{A}$ の交流信号を入力したときの I - V 曲線

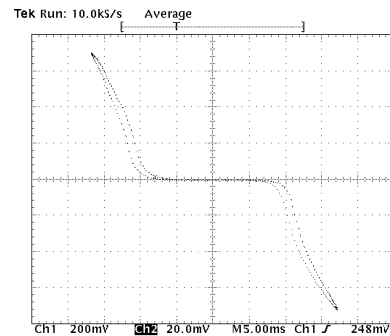


図 18: 4.2 K において振幅 $66 \mu\text{A}$ の交流信号を入力したときの I - V 曲線

このときの SQUID の臨界電流 I_c は図 17を用いて、 $\sim 28 \mu\text{A}$ と得られた。また、このときのシャント抵抗は図 18から、 $R_s \sim 2.2\Omega$ と得られた。

2.2.2 Φ - V 測定

4.2K において、フィードバックコイルに振幅 $87.5 \mu\text{A}$ の交流信号を入力したときのデジタルオシロで見る Φ - V 曲線を図 19に示す。また図 20は、図 19において SQUID に流した電流が $30 \mu\text{A}(=1.07 I_c)$ のときの Φ - V 曲線である。

このとき、フィードバックコイルと SQUID 素子との相互インダクタンス M_{ms} は前回と同様に、図 20を用いて $\sim 69.8\text{pH}$ と得られ、これは SQUID のスペック (表 2) の 80pH とほぼ等しい値となっている。

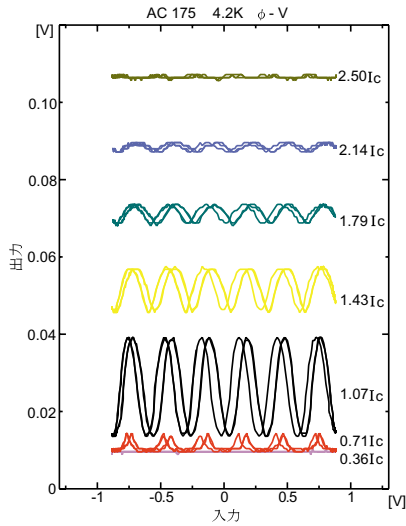


図 19: 4.2 K において振幅 $87.5 \mu\text{A}$ の交流信号をフィードバックコイルに入力したときの $\Phi - V$ 曲線 (横にある値は SQUID に流した定電流を、臨界電流 I_c を単位として示したもの)

2.2.3 電流感度測定

まず初めに、FFT アナライザをソース源として Input コイルに振幅 100 mV の交流信号を入力し、その交流信号の周波数を変化させ、そのときの出力をデジタルオシロで測定する。このとき図 21より、Input 端子には 100 pA の振幅の電流が流れることになる。

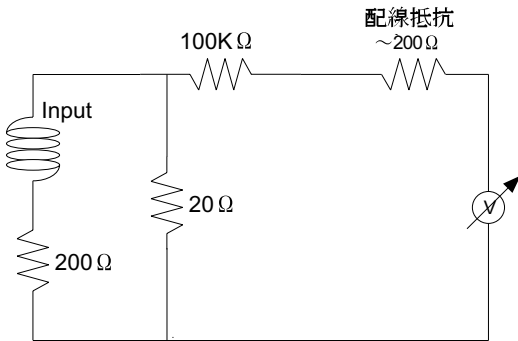


図 21: Input 端子間の配線図

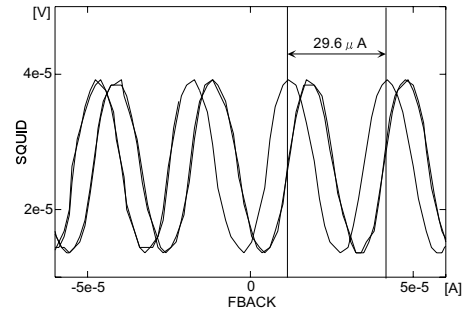


図 20: 4.2 K において SQUID に $30 \mu\text{A}$ ($=1.07 I_c$) の電流を入力したときの $\Phi - V$ 曲線

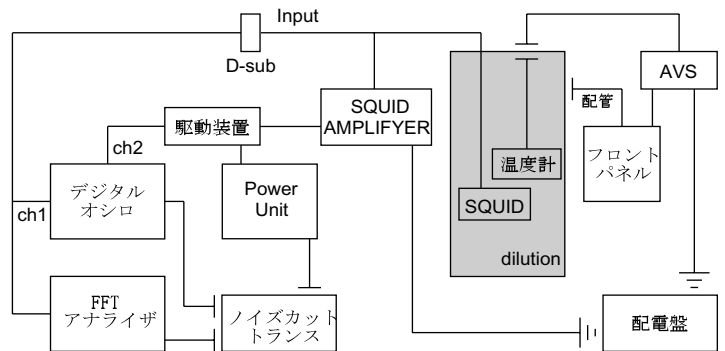


図 22: 電流感度の測定系とそのグラウンドまわり

実験のセットアップとそのグラウンドまわりは図 22のとおりである。FFT アナライザ、デジタルオシロ、そして Power Unit の電源はノイズカットトランスを用いることによって、グラウンドからは浮かしている。Input コイルに入力する交流信号の周波数に対する SQUID の電流感度を図 24に示す。

また、図 25は Input コイルに入力する交流信号の周波数を一定にし、振幅を変化させたときの SQUID の電流感度を示したものである。

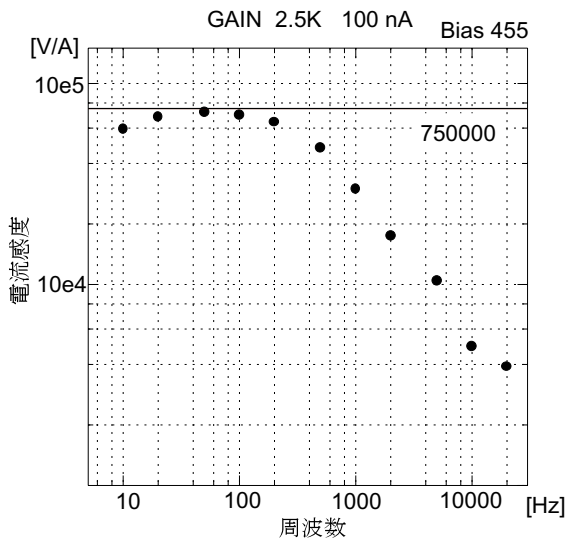


図 23: 100 nA の交流電流を Input 端子に流したときの周波数に対する SQUID の電流感度

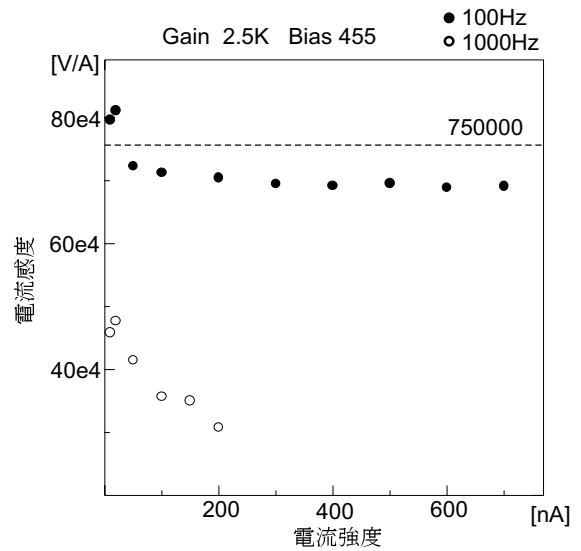


図 24: 100 Hz と 1000 Hz の交流電流を Input 端子に流したときの、電流強度と SQUID の電流感度の関係

2.2.4 ノイズ測定

2.5K におけるノイズ測定を以下に示す図 26、図 28、図 30 の 3 つのパターンで行った。その測定系におけるノイズは右の図 (図 27、図 29、図 31) にそれぞれ対応する。これらのバイアスの目盛りは $B_{div}=340$ であったことから、式 (1) を用いると、 $\sim 40.7 \mu\text{A} (\approx 1.45 I_c)$ の電流を SQUID に流したことになる。

- Input 端子を D-sub コネクタまで引き出し、そこでショートさせる

このとき、1024Hz におけるノイズレベルは $8.85 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ でありカットオフ周波数は $\sim 9500 \text{ Hz}$ である。

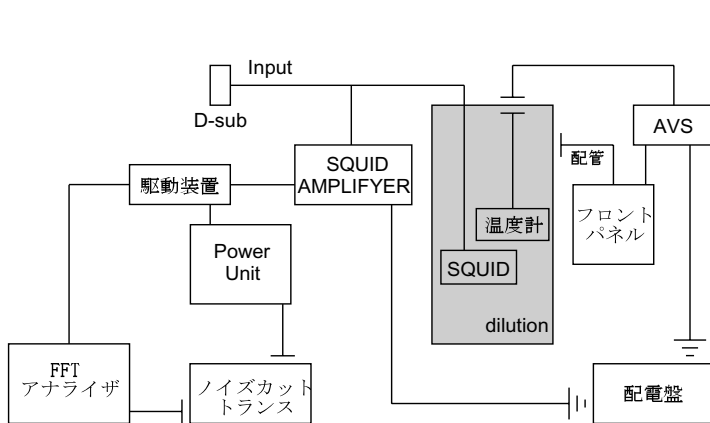


図 25: Input 端子を D-sub コネクタまで引き出す

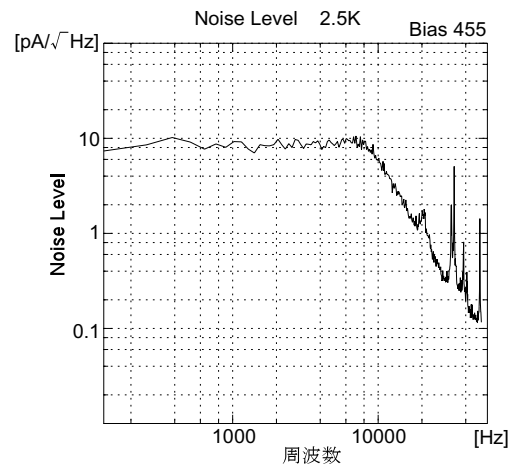


図 26: 図 26 におけるノイズレベル

- Input 端子をさらに remo コネクタまで引き出し、そこでショートさせる

このとき、1024Hz におけるノイズレベルは $18.9 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ でありカットオフ周波数は $\sim 2700 \text{ Hz}$ である。

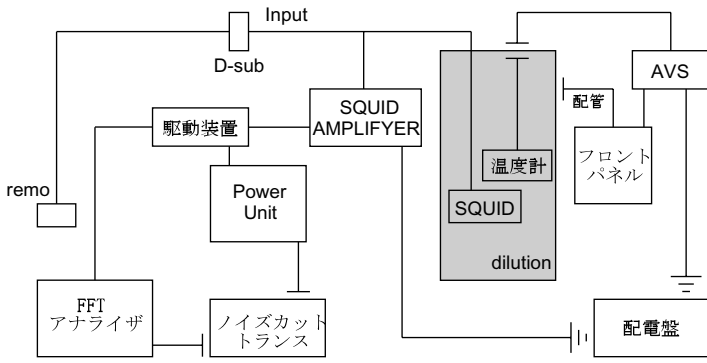


図 27: Input 端子を remo コネクタまで引き出す

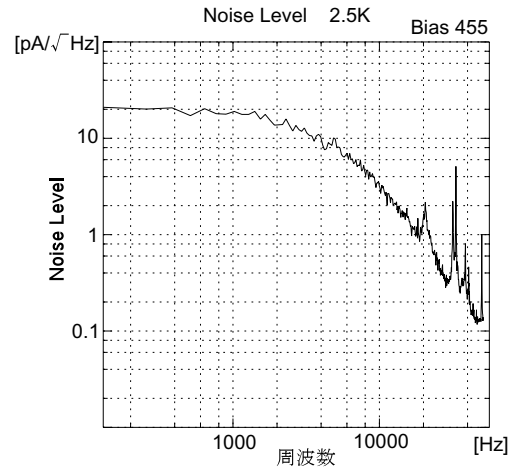


図 28: 図 28におけるノイズレベル

- Input 端子を FFT アナライザにつなげる。このとき、1024Hz におけるノイズレベルは $33.9 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ でありカットオフ周波数は $\sim 1500\text{Hz}$ である。

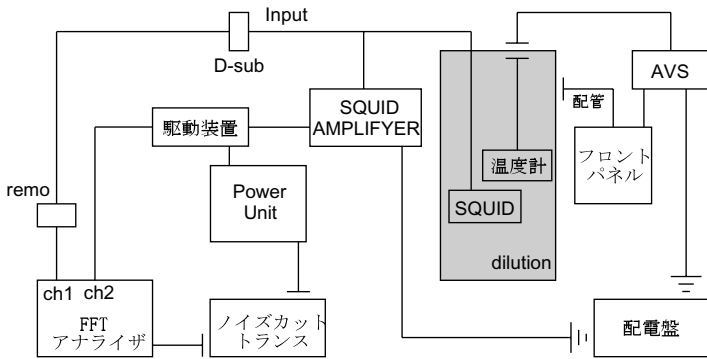


図 29: Input 端子を FFT アナライザにつなげる

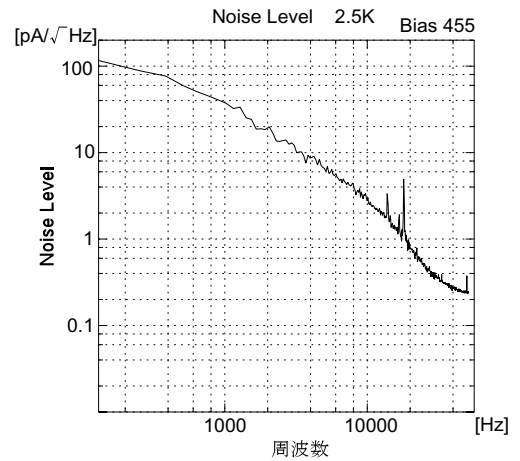


図 30: 図 30におけるノイズレベル