

## 超伝導量子干渉素子アレイを用いた低雑音増幅器に関する研究

## Low Noise Current Amplifier using Superconducting Quantum Interference Device Array

師岡利光\*, 明連広昭\*\*, 高田進\*\*

Toshimitsu MOROOKA\*, Hiroaki MYOREN\*\* and Susumu TAKADA\*\*

Arrays of dc-superconducting quantum interference devices (dc-SQUIDs) consisting of at least 100 repeated dc-SQUID elements connected in series were investigated experimentally and analytically to obtain a low noise current amplifier. The dependences of flux noise on the number of the elements and the number of turns of the input coil were examined. It was found that the flux noise is significantly influenced by the dynamic resistance of the array when the number of the elements exceeds 100, although the influence by the dynamic resistance for a single dc-SQUID is negligibly small. It was also found that the flux noise does not depend on the turn number of the input coil. These results agreed well with the measured flux noise for SQUID arrays constructed using a Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb fabrication process. An ultra low current noise of 1 pA/√Hz was achieved using a SQUID array amplifier consisting of 128 dc-SQUID elements, each of which had a 7-turn input coil and a mutual inductance of 460 pH. On the basis of an equation for the flux noise, device parameters were optimized systematically. The optimized SQUID amplifier achieved a dynamic range of 87 dB for input signals of 50 kHz bandwidth, which is sufficiently wide for X-ray detection applications.

**Keywords: SQUID Array Amplifier, Current Noise, Flux noise, Dynamic Resistance, Dynamic Range, Multiturn Input Coil.**

## 1. 序論

本研究は、極微弱な電気信号を高感度に増幅するために超伝導量子干渉素子 (Superconducting Quantum Interference Device: SQUID) を直列接続して構成される SQUID アレイに関してまとめたものである。

---

\* 埼玉大学大学院 理工学研究科 情報数理学専攻  
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama 338-8570, Japan

\*\* 埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科  
Department of Electrical and Electronics Systems, Faculty of Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama 338-8570, Japan

SQUIDは超伝導現象を利用した高感度磁気センサであり、生体計測や物性測定、精密電気計測、地磁気探査、資源探査などの物理計測に現在応用されている<sup>1)</sup>。特に生体計測応用では、地磁気の10億分の1の磁場分解能10 fT(1 fT=10<sup>-15</sup> T)をもつ高感度dc-SQUID磁束計が開発されてきた。SQUIDの新しい応用として、SQUID特有の低雑音性、低インピーダンス、高速応答性を活かした電流増幅器がある。さまざまな極低温センサの研究が行われている低温エレクトロニクス分野では、センサが発する微小な電流信号を低温中で大きな電圧信号に変換する低雑音電流増幅器が強く求められている。電流増幅器応用では、微弱な信号を計測するための低雑音と大きな信号変化に対応できる大きなダイナミックレンジを得ることが課題となっている。しかし、主

に最小磁場分解能を追求し、開発された従来のSQUID磁束計をそのまま電流増幅器に適用することは難しい。

本研究では、低雑音化、ダイナミックレンジの増大に有効な SQUID アレイに注目し、素子設計に重要な諸特性を明らかにする。さらに、諸特性の解析結果をもとに  $1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  の低雑音を有する SQUID アレイ増幅器を設計、作製し、低雑音電流増幅器を実現するとともに、実験により解析結果の有用性を検証する。本論文は、①SQUID アレイ増幅器の設計と作製、②マルチターン入力コイルを有する低雑音 SQUID アレイ増幅器、③SQUID アレイにおける入力コイル共振特性から構成される。

## 2. SQUIDアレイ増幅器の設計と作製<sup>2)</sup>

### 2.1 SQUID アレイの磁束ノイズ

SQUID電流増幅器は2個のジョセフソン接合を含むSQUIDループLとそのSQUIDループに相互インダクタンス $M_{in}$ で磁気結合された入力コイル $L_{in}$ から構成される。SQUID電流増幅器の電流ノイズ $I_n$ は、磁束ノイズ $\Phi_n$ と $M_{in}$ を用いて $I_n = \Phi_n / M_{in}$ で表される。また、ダイナミックレンジDRは $DR = I_{in}(\text{max}) / (2.36\sqrt{f_B})$ で表される<sup>3)</sup>。 $I_{in}(\text{max})$ は SQUID増幅器の最大入力電流であり、Flux-Locked Loop (FLL)回路の最大帰還磁束 $\Phi_f(\text{max})$ と計測に必要な周波数帯域 $f_B$ を使って、 $I_{in}(\text{max}) = \Phi_f(\text{max}) / M_{in}$ で書き換えられる。 $I_n$ は $\Phi_n$ の減少、そして $M_{in}$ の増大によって向上する。一方、DRは $M_{in}$ の増加とともに減少する。従って、良好な磁束ノイズ特性は $M_{in}$ の削減を可能にするため、磁束ノイズは電流ノイズの減少とともに、ダイナミックレンジの増大にも重要なパラメータである。

SQUIDアレイは大きな磁束-電圧変換係数 $V_\Phi (=dV/d\Phi)$ を持つため、低雑音電流増幅器に有効である<sup>4)</sup>。しかし、その磁束ノイズ特性の詳細は報告されていない。本章では、SQUIDアレイの磁束ノイズ特性を実験と解析の両面から調べた。特に、磁束ノイズのdc-SQUID数依存性を明らかにした。

### 2.2 SQUID アレイの設計と作製

SQUIDアレイの回路モデルを図1に示す。SQUIDアレイは、同じ素子パラメータを持つN個のdc-SQUIDを直列接続することにより、1本のバイアスラインで全てのdc-SQUIDを駆動される。各dc-SQUIDには、信号入力用入力コイル $L_{in}$ とFLL回路の帰還電流を入力するためのモジュレーションコイル $L_m$ が設けられ、それぞれ相互インダクタンス $M_{in}$ と $M_m$ でSQUIDループに磁気結合される。

磁束ノイズのdc-SQUID数依存性を調べるため、dc-SQUID数の異なる4種類のSQUIDアレイ(80-SSA、160-SSA、240-SSA、560-SSA)を設計した。素子パラメータは各dc-SQUIDの固有ノイズ $S_V$ が最適になるように設計され、シールドリングパラメータ $\beta_L (=2I_c L / \Phi_0)$ には $\beta_L = 1$ が選ばれた<sup>1)</sup>。ここで、 $I_c$ はジョセフソン接合JJの臨界電流値を表す。また、ヒステリシスパラメータ $\beta_c (=2\pi I_c R^2 C / \Phi_0)$ には、 $\beta_c = 0.5$ が選ばれた。ここで、Rはシャント抵抗の値、Cはジョセフソン接合容量を表す。基本的なSQUIDアレイの特性を調べるため、入力コイルとモジュレーションコイルはともに1ターンコイルとした。

SQUIDアレイにとって、各dc-SQUIDの素子パラメータが均一であることが非常に重要である。そこで、信頼性、再現性に優れたNb/AIO<sub>x</sub>/Nbトンネル接合プロセスを用いてSQUIDアレイを作製した。設計ルールはジ

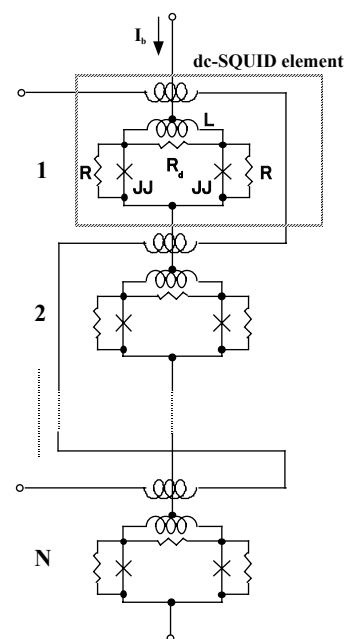


Fig. 1 Model of long SQUID array. JJ denotes the Josephson junction, R the shunt resistor, L the SQUID loop inductor, and  $R_d$  the damping resistor.

Table 1 Device parameters of SQUID arrays.

Parameter	80-SSA	160-SSA	240-SSA	560-SSA
<b>SQUID array</b>				
Number of SQUID	80	160	240	560
$\Delta V$ (mV)	2.5	5	7.5	17
$V_\phi$ (array) (mV/ $\Phi_0$ )	16	29	34	61
$R_{dyn}$ (array) ( $\Omega$ )	600	1000	1100	2000
$L_v$ (pH)	78	71	67	68
$\Phi_n$ ( $\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ )	0.34	0.24	0.18	0.15
<b>dc-SQUID element</b>				
$L$ (pH)*	87*	87*	87*	87*
$I_c$ ( $\mu\text{A}$ )	15	15	15	15
$R$ ( $\Omega$ )	2.6	2.8	2.8	2.7
$R_d$ ( $\Omega$ )	2.6	2.8	2.8	2.7
$R_{dyn}$ ( $\Omega$ )	7.5	6.3	4.6	3.6
<b>Input coil</b>				
Turn number $n_{in}$	1	1	1	1
$M_{in}$ (pH)	61	61	61	61
<b>Modulation coil</b>				
Turn number $n_m$	1	1	1	1
$M_m$ (pH)	61	61	61	61

\* denotes the designed value.

ヨセフソン接合の臨界電流密度  $J_c=50\text{ A/cm}^2$ 、接合サイズ  $A=5\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$ 、接合容量  $C=1.5\text{ pF}$ 、配線の最小線幅  $w=2\ \mu\text{m}$  である。層間絶縁層には  $\text{SiO}_2$  を、また抵抗材料には  $\text{Au}$  を用いた。各 SQUID アレイは  $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$  の Si チップ上に集積された。

### 2.3 測定結果

各 SQUID アレイの電流-電圧(I-V)特性、磁束-電圧( $\Phi$ -V)特性が測定され、均一な特性をもつ dc-SQUID から構成されていることが確認された。Table 1 に、SQUID アレイの素子パラメータを示す。磁束ノイズ  $\Phi_n$  の測定には、市販の Burr-Brown 製低雑音オペアンプ INA103 (電圧ノイズスペクトル  $\sqrt{S_{V,amp}} = 2\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、電流ノイズスペクトル  $\sqrt{S_{I,amp}} = 2\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) を基本とした FLL 回路を用いた。Fig. 2 は dc-SQUID の数  $N$  をパラメータとして  $N$  と  $\Phi_n$  の関係を表したグラフである。 $\Phi_n$  の測定結果が Fig. 2 中に○印として示されている。また、従来の単一 dc-SQUID の理論式を SQUID アレイに適用し得られた計算結果 (eq.(1)) が Fig. 2 中に破線として表されている<sup>5)</sup>。

$$\Phi_n(\text{array}) = \frac{\sqrt{S_V(\text{total})}}{V_\phi(\text{array})} = \frac{\sqrt{\frac{S_V}{N} + \frac{S_{V,amp}}{N^2}}}{V_\phi} \quad (1)$$

ここで、 $S_V(\text{total})$  は FLL 回路の寄与を含む全電圧ノイズ

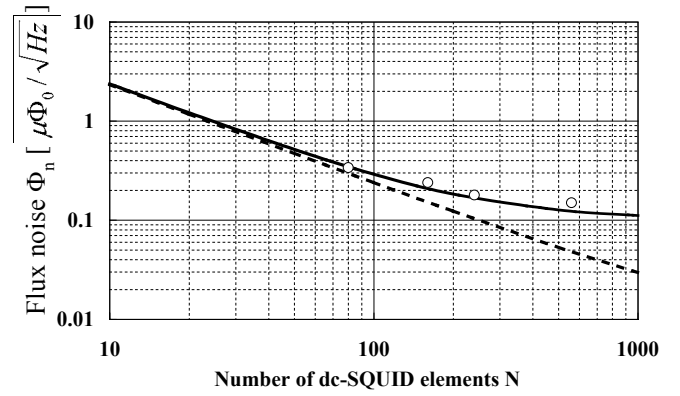


Fig. 2 Effect of the number of dc-SQUID elements on the flux noise in SQUID array. Open circle shows the experimental result. The solid line and the dotted line show the calculated flux noises obtained by substituting designed parameters for eq.(3) and eq.(1), respectively.

スペクトルを表す。SQUID アレイの固有ノイズ  $S_V(\text{array})$ 、磁束-電圧変換係数  $V_\phi(\text{array})$  はそれぞれ、 $S_V$ 、 $\Phi_V$  を使って  $S_V(\text{array})=N S_V$ 、 $V_\phi(\text{array})=N V_\phi$  で表される。 $S_V$  には J. Clarke によって提案された理論式  $S_V=16k_B T R$  を用いた<sup>1)</sup>。ここで、 $k_B$  はボルツマン定数 ( $=1.38\times 10^{-23}\text{ J/K}$ )、 $T$  は動作温度である。従来の理論式による計算結果は  $1/N$  に比例し減少しており、磁束ノイズが  $S_{V,amp}$  に支配されていることを意味する。一方、測定結果は、 $N$  が 100 より小さい場合は、従来の計算結果と同様、 $1/N$  に比例して減少している。しかし、 $N$  が 100 を越えると、 $\Phi_n$  は  $N$  の増加とともに単調に減少しないという結果が得られた。この結果は、100 個以上の dc-SQUID で構成される SQUID アレイでは、FLL 回路の電圧ノイズ  $S_{V,amp}$  以外のノイズ成分を考慮しなければならないことを示している。

### 2.4 SQUID アレイの磁束ノイズ解析

dc-SQUID 数の増加にともない、測定結果が従来の理論式による計算結果からはずれていく原因を調べるため、SQUID アレイの磁束ノイズを解析した。

Table 1 に示した素子パラメータの中で、I-V 特性の微分成分を表す動抵抗  $R_{dyn}(\text{array})$  が大きい点に注目し、動抵抗を考慮した磁束ノイズを導出した。単一 dc-SQUID の固有ノイズスペクトル密度  $S_V$  は動抵抗  $R_{dyn}(=dV/dI_b)$  の寄与を考慮し、以下のように書き換えられる<sup>6)</sup>。

$$S_V \approx \frac{2 \alpha k_B T}{R} (4 R_{dyn}^2 + L^2 V_\Phi^2) + \frac{4 k_B T}{R_d} L^2 V_\Phi^2 \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ はI-V特性の非線形性に起因するパラメータである。SQUIDアレイの磁束ノイズ $\Phi_n$ (array)はこの $S_V$ を使って以下の式で表される。

$$\Phi_n = \sqrt{\frac{2 k_B T}{N} \frac{4 \alpha L_v^2 + (2 + \alpha)L^2}{R} + \frac{S_{V,amp}}{N^2 V_\Phi^2} + S_{I,amp} L_v^2} \quad (3)$$

ここで、 $L_v$ は $R_{dyn}$ の寄与分であり、 $L_v = R_{dyn}/V_\Phi$ で表される仮想インダクタンスを表す。

本研究で導出した理論式 (eq.(3)) を用いて、SQUIDアレイの磁束ノイズを改めて計算した。その計算結果をFig. 2中に実線で示す。計算結果は、dc-SQUID数 $N$ が100以上になると磁束ノイズが減少しないという実験結果と同じ傾向を示した。動抵抗の影響を受ける $S_V$ (array)と $\sqrt{S_{I,amp} R_{dyn}}$ (array)は $N$ の増加とともにその寄与率を大きくする。これらの結果は、dc-SQUID単体では無視することができた動抵抗が $N$ の大きなSQUIDアレイにとって重要なパラメータであることを示している。

### 3. マルチターン入力コイルを有する低雑音SQUIDアレイ増幅器<sup>7)</sup>

#### 3.1 SQUIDアレイ増幅器の電流ノイズ

SQUIDアレイ増幅器の電流ノイズ $I_n$ はeq.(3)を使って以下の式で表される。

$$I_n = \frac{\sqrt{\frac{2 k_B T}{N} \frac{4 \alpha L_v^2 + (2 + \alpha)L^2}{R} + \frac{S_{V,amp}}{N^2 V_\Phi^2} + S_{I,amp} L_v^2}}{M_{in}} \quad (4)$$

Fig. 2の結果から、仮にdc-SQUID数を1000個まで増やした場合、電流ノイズは4 pA/√Hzとなることが分かった。1ターン入力コイルを持ち、相互インダクタンス $M_{in} = 61$  pHのdc-SQUIDの数を単純に増やすだけでは、1 pA/√Hzの超低雑音は得られない。そこで、SQUIDアレイを構成するdc-SQUIDにマルチターン入力コイルの採用をし、 $M_{in}$ を増加させることによりSQUIDアレイ増幅器の低雑音化を行った。単一のdc-SQUIDに比べ、多数のdc-SQUIDで構成されるSQUIDアレイには複雑な共振モードが存在することが考えられる。しかし、

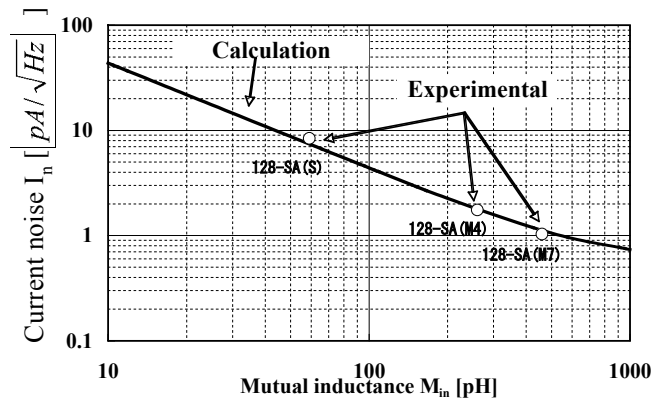


Fig. 3 Current noise  $I_n$  vs mutual inductance  $M_{in}$  between input coil and SQUID loop. Solid line indicates the calculated  $I_n$ . Open circles indicate the experimental  $I_n$ .

入力コイルによるSQUIDアレイの磁束ノイズへの影響に関する詳細な報告はなされていない。本章では、マルチターン入力コイルを有するSQUIDアレイで構成される電流増幅器について、磁束ノイズの入力コイルのターン数依存性を調べた。その実験結果を用いて、入力コイルのターン数を最適化されたSQUIDアレイ増幅器を作製し、電流増幅器にとって重要な電流ノイズおよびダイナミックレンジを評価した。

#### 3.2 設計と作製

相互インダクタンス $M_{in}$ と電流ノイズ $I_n$ の関係をFig. 3に示す。Eq.(4)から得られた電流ノイズの計算結果をFig. 3中に実線で表す。この計算では、磁束ノイズ $\Phi_n$ は $M_{in}$ に依存しないと仮定した。素子パラメータには $\beta_L = 0.91$ 、 $\beta_c = 0.5$ 、 $J_c = 60$  A/cm<sup>2</sup>を用いた。磁束ノイズのdc-SQUID数依存性評価の結果から、dc-SQUID数 $N$ は128個とした。この結果から、 $M_{in}$ が450 pH以上のとき、1 pA/√Hzの電流ノイズが期待できる。 $M_{in} = 450$  pHを得るため、各dc-SQUIDのSQUIDループインダクタンス $L$ と入力コイルのターン数 $n_{in}$ はそれぞれ $L = 63$  pHと $n_{in} = 7$ ターンとなるように設計された。各入力コイルには、 $R_d(in) = 2R = 5.4$  Ωの値をもつ共振抑制用ダンピング抵抗 $R_d(in)$ が並列に接続された<sup>8)</sup>。

マルチターン入力コイルによる共振特性を調べるため、入力コイルのターン数を系統的に変化させた3種類のSQUIDアレイ増幅器を作製した。そのターン数を1ターン、4ターン、7ターンとし、それぞれのSQUID

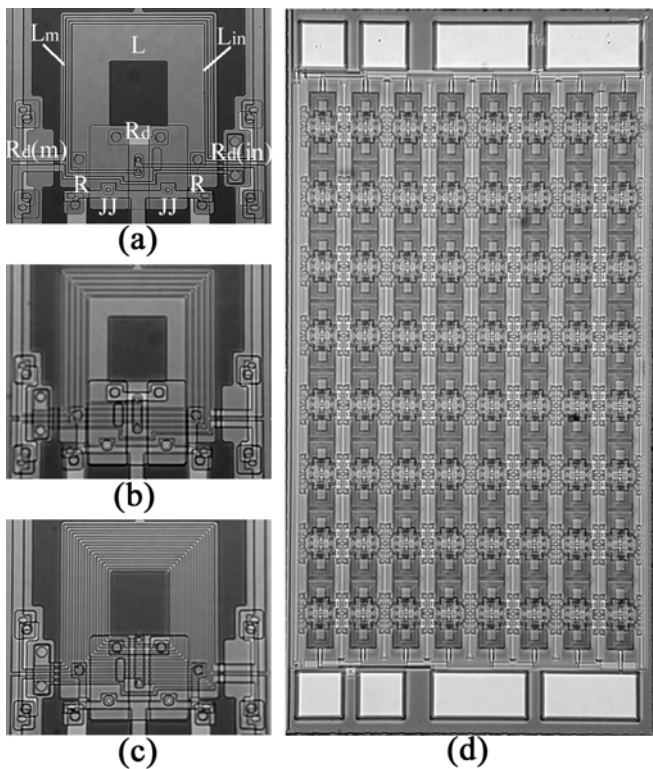


Fig. 4 Photographs of (a) dc-SQUID element with a 1-turn input coil, (b) a 4-turn input coil, and (c) a 7-turn input coil, and (d) the whole circuit of the 128-SA(M7) amplifier which consists of 128 dc-SQUID elements with a 7-turn input coil.

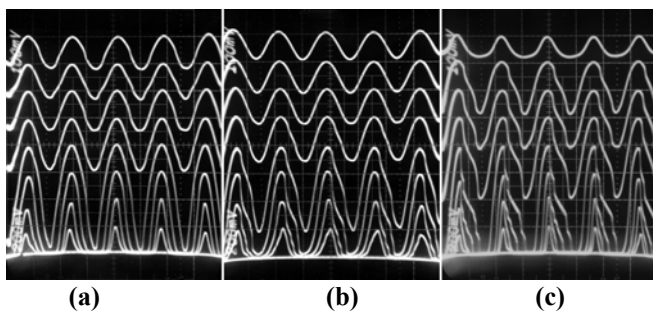


Fig. 5  $\Phi$ -V characteristics of (a)128-SA(S), (b)128-SA(M4), and (c)128-SA(M7) amplifiers at various bias currents. The horizontal axis is the magnetic flux in  $0.56 \Phi_0/\text{div}$  and the vertical axis is the voltage in  $1\text{mV}/\text{div}$ .

アレイ増幅器を 128-SA(S)、128-SA(M4)、128-SA(M7) と名付けた。Fig. 4(a)、4(b)、4(c)に、それぞれ 128-SA(S)、128-SA(M4)、128-SA(M7)増幅器を構成する dc-SQUID の顕微鏡写真を示す。各 dc-SQUID のサイズは  $150 \mu\text{m} \times 175 \mu\text{m}$  である。SQUID ループ上には、最外周に 1 ターンのモジュレーションコイルが、そして、その内側に入力コイルが形成されている。Fig. 4(d)に、128-SA(M7)の顕微鏡写真を示す。全ての SQUID アレイ増幅器はミアンダー状に配置された 128 個の

Table 2 Device parameters of 128-SQUID array amplifiers.

Parameter	SA(S)	SA(M4)	SA(M7)
SQUID array			
Number of SQUID N	128	128	128
$\Delta V$ (mV)	3.8	3.9	4.5
$V_\phi$ (array) (mV/ $\Phi_0$ )	23	19	29
$\Phi_n$ ( $\mu \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ )	0.24	0.22	0.23
$I_n$ (pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )	8.4	1.4	1.0
dc-SQUID element			
L (pH)	63*	63*	63*
$I_c$ ( $\mu\text{A}$ )	15	14	15
R ( $\Omega$ )	2.6	2.7	2.8
$V_\phi$ ( $\mu\text{V}/\Phi_0$ )	180	150	230
Turn number $n_{\text{in}}$ of input coil	1	4	7
$L_{\text{in}}$ (pH)	130*	1300*	3500*
Strip line inductance $L_{\text{strip}}$ (pH)	67*	250*	410*
$M_{\text{in}}$ (pH)	59	260	460
$C_{\text{stray}}$ (fF)	86*	320*	560*
$R_d(\text{in})$ ( $\Omega$ )	5.2	5.4	5.6
Resonance properties			
$\omega_j/(2\pi)$ (GHz)	69	11	5.6
$V_{\text{dc}}$ ( $\mu\text{V}$ )	140	24	12
$NV_{\text{dc}}$ (mV)	18	3.0	1.5

\* denotes the designed value.

dc-SQUID で構成され、 $1.5 \text{mm} \times 3 \text{mm}$  の Si チップ上に形成された。

### 3.3 測定結果

3 種類の SQUID アレイ増幅器について、4.2K における  $\Phi$ -V 特性、磁束ノイズが測定された。Fig. 5(a)、5(b)、5(c)に、128-SA(S)、128-SA(M4)、128-SA(M7)増幅器の  $\Phi$ -V 特性を示す。128-SA(S)増幅器の  $\Phi$ -V 特性は歪みがなく、対称性の良い理想的な特性を示す。しかし、マルチターン入力コイルをもつ 128-SA(M4)、128-SA(M7)増幅器の  $\Phi$ -V 特性は、各入力コイルに  $5.4 \Omega$  と小さなダンピング抵抗を挿入したにもかかわらず、スムーズなスロープと歪んだスロープからなる非対称構造を示した。その歪みはターン数の増加とともに大きくなった。この結果は、マルチターン入力コイルをもつ SQUID アレイ増幅器の非対称  $\Phi$ -V 特性が、これまで報告された単一の dc-SQUID で発生する入力コイル共振とは異なる共振モードによって生じていることを示す<sup>8)</sup>。  $\Phi$ -V 特性に大きな歪みが現れたが、128-SA(M4)、128-SA(M7)増幅器の出力電圧は  $3.9\text{mV}$  以上と大きく、

歪みのない 128-SA(S)増幅器とほぼ同じレベルであった。各SQUIDアレイ増幅器の素子パラメータをTable 2に示す。128-SA(M7)増幅器によって、 $M_{in}=460$  pHが得られた。

$\Phi$ -V特性の動作点をスムーズな傾斜上に固定し、SQUIDアレイ増幅器の磁束ノイズ $\Phi_n$ を測定した。電流ノイズ $I_n$ は $\Phi_n$ と $M_{in}$ から換算され、 $I_n$ の測定結果がFig. 3中に○印として表されている。ノイズレベルは白色雑音領域にある 10kHzの値で定義された。電流ノイズは $M_{in}$ の増加とともに減少し、128-SA(M7)増幅器によって  $1$  pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の超低雑音を得られた。また、測定結果と磁束ノイズの理論式を用いた計算結果は良い一致を示した。この結果は、動作点がスムーズな傾斜に固定されるとき、マルチターン入力コイルをもつSQUIDアレイ増幅器の $\Phi$ -V特性に表れる歪みはノイズ特性に影響しない、従って、磁束ノイズは入力コイルのターン数に依存しないことを意味する。さらに、本研究で導出した磁束ノイズの理論式が1ターン入力コイルだけでなく、マルチターン入力コイルのSQUIDアレイにも適用できることを示している。

### 3.4 ダイナミックレンジと最大入力電流

128-SA(M7)増幅器のダイナミックレンジDRを評価した。最大入力電流 $I_{in}(\text{max})$ は次の式で表される<sup>4,9)</sup>。

$$I_{in}(\text{max}) = \frac{\Phi_f(\text{max})}{M_{in}} = \frac{1}{\sqrt{2}\tau_p\omega\sqrt{2\tau_p^2\omega^2+2}} \frac{\Phi_0}{4} \frac{1}{M_{in}} \quad (5)$$

ここで、 $\omega_{ip}$ はFLL回路を構成する電子回路のカットオフ周波数を表す。低雑音電流増幅器にとって、 $I_{in}(\text{max})$ が小さい場合、微小な信号を計測できるが、大きな信号に対応できないという問題が生じる。 $1/(2\pi\tau_{ip})=1$  MHzのFLL回路を用いた場合、128-SA(M7)増幅器の $I_{in}(\text{max})$ は 蛍光X線分析で必要とされる周波数帯域に相当する 50kHzの入力信号に対して  $11 \mu\text{A}$ が得られた。この値は 87dBのダイナミックレンジに相当する。これまで、 $1\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ の超低雑音は2ステージSQUID(Two Stage SQUID: TSS)を用いたSQUID増幅器により達成されているが<sup>10)</sup>、そのDR、 $I_{in}(\text{max})$ はそれぞれ 70 dB、 $1.6 \mu\text{A}$ と小さく、蛍光X線分析に必要なエネルギー帯域( $\sim 10\text{keV}$ )をカバーするには十分ではな

かった。本研究では、磁束ノイズの理論式を用いて相互インダクタンスと入力コイルのターン数を最適化した。その結果、低雑音と大きなダイナミックレンジを両立したSQUID増幅器が得られた。 $I_n=1$  pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ とDR=87 dBは蛍光X線分析において 10 keVのエネルギー帯域に対して 0.45 eVの高分解能を与える。

## 4. SQUIDアレイにおける入力コイル共振特性<sup>11)</sup>

### 4.1 SQUIDアレイの非対称 $\Phi$ -V特性の解析

マルチターン入力コイルをもつ SQUID アレイ増幅器の $\Phi$ -V特性は、単一 dc-SQUID における入力コイル共振とは異なるモードによって生じていることがわかった。さらなる電流ノイズ向上には入力コイルのターン数の増大は必要不可欠である。本章では、SQUID アレイの入力コイル共振について実験と解析の両面から調査した。

実測したSQUIDアレイの $\Phi$ -V特性に基づき、非対称 $\Phi$ -V特性の起こりうるメカニズムは以下のように説明できる。隣接するdc-SQUID間のバイアスラインと入力コイルを接続するとき、単一dc-SQUIDには存在しないシャント回路がその間に形成される。そのシャント回路を含む2つのdc-SQUIDで構成されるSQUIDアレイ

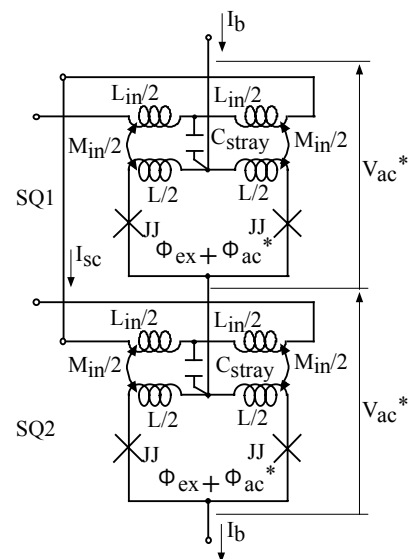


Fig. 6 Equivalent circuit of a SQUID array that includes a shunting circuit. JJ denotes the Josephson junction, L the SQUID loop inductor,  $L_{in}$  the input coil,  $C_{stray}$  the stray capacitor between the SQUID loop and the input coil,  $M_{in}$  the mutual inductance between the SQUID loop and the input coil.

の等価回路図をFig. 5に示す。シャント回路は入力コイル $L_{in}$ と、入力コイルとSQUIDループの間に存在する浮遊容量 $C_{stray}$ で構成する。また、シャント回路は相互インダクタンス $M_{in}$ でSQUIDループに磁気結合されている。シャント回路には、acジョセフソン効果によって各dc-SQUIDで発生している振動電圧 $v_{ac}$ に同期する振動電流 $i_{sc}$ が流れる。その振動電流 $i_{sc}$ は $i_{sc}=v_{ac}/Z_{sc}$ で表される。ここで、 $Z_{sc}$ はシャント回路のインピーダンスであり、 $Z_{sc}=j\omega_J\{L_{in}-1/(\omega_J^2 C_{stray}/2)\}$ で表される。また、 $\omega_J$ はacジョセフソン角周波数である。

入力コイル間が接続されていない状態における振動電圧 $v_{ac}$ とSQUIDループ内の交流磁束 $\Phi_{ac}$ の関係式は $v_{ac}=jV_{\phi}(ac)\Phi_{ac}$ で与えられる。ここで、 $V_{\phi}(ac)$ は交流磁束 $\Phi_{ac}$ に対する磁束-電圧変換係数である。この関係式は単一dc-SQUIDにおける関係式と同じである。

次に、入力コイル間が接続されているSQUIDアレイにおける振動電圧とSQUIDループ内の交流磁束の関係式について検討する。シャント回路が形成されている状態では、 $i_{sc}$ によって誘起される交流磁束 $\Phi_{sc}$ がSQUIDループ自身に帰還されるため、SQUIDループ内の交流磁束 $\Phi_{ac}^*$ は $\Phi_{ac}^*=\Phi_{ac}+\Phi_{sc}$ となる。入力コイル間が接続されているSQUIDアレイにおける振動電圧 $v_{ac}^*$ と $\Phi_{ac}^*$ および $\Phi_{ac}$ の関係は以下の式で表される<sup>12)</sup>。

$$v_{ac}^* = jV_{\phi}(ac)\Phi_{ac}^* = \frac{jV_{\phi}(ac)}{1-G(\omega_J)}\Phi_{ac} \quad (6)$$

$$G(\omega_J) = \frac{V_{\phi}(\max)^2}{2\beta_L V_{\phi}(\Phi_{ex})} \sqrt{1 - \frac{V_{\phi}(\Phi_{ex})^2}{V_{\phi}(\max)^2}} \frac{M_{in}}{|Z_{sc}|} \quad (7)$$

$$V_{\phi}(ac) = \frac{V_{\phi}(\max)^2}{2\beta_L V_{\phi}(\Phi_{ex})} \sqrt{1 - \frac{V_{\phi}(\Phi_{ex})^2}{V_{\phi}(\max)^2}} \quad (8)$$

$G(\omega_J)$ はシャント回路による帰還率を表し、 $G(\omega_J)=1$ となるときSQUIDアレイに共振が生じる。Eq.5は、 $V_{\phi}(\Phi_{ex})$ の符号が正のときのみ共振が発生し、SQUIDアレイの $\Phi$ - $V$ 特性に非対称構造が現れることを示している。一方、 $V_{\phi}(\Phi_{ex})$ の符号が負のとき、 $\Phi$ - $V$ 特性にスムーズなスロープを与える。この結果は、動作点をスムーズなスロープに固定することにより、磁束ノイズが劣化しないことを意味する。

#### 4.2 マルチターン入力コイルをもつSQUIDアレイ増

#### 幅器の共振特性

3章で議論したマルチターン入力コイルをもつSQUIDアレイ増幅器の共振特性を本章で導出した関係式を用いて検証する。Table 2に示した素子パラメータをEq.(6)に代入し、共振条件( $G(\omega_J)=1$ )を満たす周波数を求めた。計算では、出力電圧 $\Delta V$ が最大となるようにバイアス電流が印加されたと仮定した。Table 2には、SQUIDアレイ増幅器の共振周波数 $\omega_J$ とそのときの平均電圧 $V_{dc}$ も記している。1ターン入力コイルをもつ128-SA(S)増幅器では、共振条件を満たす周波数は $\omega_J/(2\pi)=69$  GHzであり、この周波数は $V_{dc}=\omega_J/(2\pi)\Phi_0=140$   $\mu$  Vの平均電圧に相当する。dc-SQUID 1個あたりの出力電圧は約30  $\mu$  Vであり、140  $\mu$  Vの位置で共振が生じることは不可能である。従って、128-SA(S)の $\Phi$ - $V$ 特性は、非対称な特性を示さなかった。一方、7ターンの入力コイルをもつ128-SA(M7)増幅器では、共振条件を満たす周波数は $\omega_J/(2\pi)=5.6$  GHzであり、この周波数は $V_{dc}=\omega_J/(2\pi)\Phi_0=12$   $\mu$  Vの平均電圧に相当する。128-SA(M7)増幅器を構成するdc-SQUIDは $V_{dc}<\Delta V$ を満たすことから、この電圧値で共振することは可能である。従って、128-SA(M7)の $\Phi$ - $V$ 特性に共振による非対称性が現れた。

解析結果は大きな浮遊容量 $C_{stray}$ と相互インダクタンス $M_{in}$ は共振特性に大きく影響することを示した。また、その共振特性は入力コイルが接続されたときのみ生じることを明らかにした。大きな浮遊容量と相互インダクタンスはマルチターン入力コイルの適用により与えられるため、マルチターン入力コイルをもつSQUIDアレイ増幅器の $\Phi$ - $V$ 特性に大きな歪が現れることが示された。

#### 5. 結論

本研究では、低雑音を有するSQUID電流増幅器の実現するため、dc-SQUIDを直列接続して構成するSQUIDアレイ増幅器に着目し、その諸特性を明らかにした。その結果として、以下の結論を得た。

①SQUIDアレイの磁束ノイズを解析し、新たにdc-SQUIDの動抵抗を考慮した磁束ノイズの理論式を

導出した。

②dc-SQUID数の異なるSQUIDアレイを作製し、磁束ノイズを評価した。その結果、これまで無視されてきたdc-SQUIDの動抵抗による寄与がdc-SQUID数の増加とともに大きくなり、dc-SQUID数が100個以上でノイズが減少しないことを明らかにした。また、理論式による計算結果と実験結果とは良く一致し、本研究で導出した理論式の有効性を確認した。

③入力コイルのターン数の異なるマルチターン入力コイルをもつSQUIDアレイ増幅器を作製した。磁束ノイズの理論式を用いて入力コイルのターン数を最適化することにより、本研究での目標値である $1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ の電流ノイズと87 dBのダイナミックレンジを有する低雑音SQUIDアレイ増幅器を実現した。

④SQUIDアレイ特有の非対称 $\Phi$ -V特性の発生メカニズムを解析した。その結果、SQUIDアレイには、dc-SQUIDで議論されてきた入力コイル共振とは異なる新しい共振モードが存在することを明らかにした。また、そのメカニズムから、その非対称構造がノイズ特性に影響しないことを明らかにした。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、懇切なご指導と有益なご助言を賜りました埼玉大学工学部電気電子システム工学科 小林信一教授、高橋幸郎教授に心より感謝いたします。

### 参考文献

- 1) Clarke, J., Principles and Applications of SQUIDS, Proceedings of the IEEE, Vol.77, pp.1208-1223, 1989.
- 2) Morooka, T., Myoren, H., Takada, S., Chinone, K., Characteristics of Flux Noise in Long Superconducting Quantum Interference Device Array, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42, Part1, pp.6848-6852, 2003.
- 3) Welty, R., Martinis, J., A Series Array of DC-SQUIDS, IEEE Trans. Magn. Vol.MAG-27, pp.2924-2926, 1991.
- 4) Foglietti, V., Stawiaz, K., Koch, R., Performance of a

- Flux Locked Series SQUID Array, IEEE Tran. Appl. Supercond. Vol.3, pp.3061-3065, 1993.
- 5) Hirayama, F., Kasai, N., Koyanagi, M., Design of Series SQUID Array Suppressing Josephson Oscillation Interference between Element-SQUIDS, IEEE Tran. Appl. Supercond. Vol.9, pp.2923-2926, 1999.
- 6) Seppa, H., Kirviranta, M., Satrapinski, A., Gronberg, L., Salmi, J., Suni I., A coupled DC SQUID with low  $1/f$  noise, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.3, pp.1816-1819, 1993.
- 7) Morooka, T., Myoren, H., Takada, S., Chinone, K.,  $1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  Amplifier Using Superconducting Quantum Interference Device Array, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42, Part2, pp.L1375-L1376, 2003.
- 8) Enpuku, K., Cantor, R., Koch, H., Modeling the direct current superconducting quantum interference device coupled to the multiturn input coil III, J. Appl. Phys. Vol.72, pp.1000-1006, 1992.
- 9) 長谷川健介著, 基礎制御理論(I), 株式会社昭晃堂, 1987.
- 10) Morooka, T., Tanaka, K., Chinone, K., High-Current Resolution Broadband SQUID Amplifier Suitable for TES Calorimeter, IEEE Tran. Appl. Supercond. Vol.12, pp.1866-1871, 2002.
- 11) Morooka, T., Myoren, H., Takada, S., Chinone, K., Arrays of Superconducting Quantum Interference Devices with Multiturn Input Coil, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.43, Part1, pp.2473-2478, 2004.
- 12) Duzer, T. V., Turner, C. W., Principles of Superconductive Device and Circuits, Chap.5. p.206, eds. E. Arnold, Elsevier North Holland Inc., New York 1981.