

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06382

研究課題名(和文) ジョセフソン接合を用いず極高感度化を実現する新奇超伝導磁束計の研究

研究課題名(英文) Study on superconducting-resonator-type magnetometer without Josephson junctions

研究代表者

武田 正典 (Takeda, Masanori)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：80470061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：磁束変化を共振器の共振周波数変化として読み出すジョセフソン接合を用いない超伝導共振器型磁束計に関する研究を実施した。超伝導ループと櫛形コンデンサから構成される超伝導共振器アレイを設計、試作し、磁束に対する応答特性を評価した。入力コイルとして働く超伝導ループに磁束が入ると、その磁束量に応じた共振周波数のシフトが観測された。また、一定磁界の磁界源において、磁界源からの距離に応じた共振周波数シフトも観測することができた。本研究において、超伝導共振器型磁束計の動作を実証することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導量子干渉素子(SQUID)は極めて高感度な磁束計であり、脳磁計や脊磁計として実用化されている唯一の磁束計であるが、開発コスト及び冷却コストの問題で普及率は低い。本研究において、新しいタイプの磁束計である超伝導共振器型磁束計の動作実証を行った。超伝導共振器磁束計は、高度な技術を要するジョセフソン接合を必要としないことや多チャンネル化が極めて容易などの特徴を持っている。また、単層膜で作製可能なことから高温超伝導体による液体窒素温度での動作も期待できる。このように作製コストや冷却コストが削減できれば、様々な磁気計測分野への応用に期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have studied superconducting-resonator-type magnetometers without Josephson junctions which read out a change of magnetic flux as a change of the resonance frequency. The magnetometer array composed of superconducting loop and interdigital capacitor was designed and fabricated, and its magnetic-flux response characteristic was measured. When magnetic flux is input in the superconducting loop worked as an input coil, a resonance-frequency shift corresponding to the magnitude of magnetic flux was observed. In addition, a resonance-frequency shift corresponding to a distance between the magnetometer and the magnetic source was also observed. In this study, we successfully demonstrated the operating principle of superconducting-resonator-type magnetometers.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：超伝導共振器 カイネティックインダクタンス 磁束計

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

生体磁気計測はヒトの生体活動を磁気信号として捉えるものであり、電気計測よりも高い空間分解能を得やすい利点がある。生体磁気信号は非常に微弱であり、従来の半導体磁気センサでは検出が困難であったが、超伝導量子干渉素子 (SQUID) の登場により十分な信号対雑音比が得られるようになった。SQUID はジョセフソン接合 (超伝導トンネル接合) を用いた磁束計であり、フェムトテスラ ( $10^{-15}\text{T}$ ) オーダの磁束を検出できる極めて高感度な磁束計である。SQUID を用いた生体磁気計測や資源探査などの非破壊検査などの応用開発が国内外で精力的に行われている一方、コスト等の問題で現場への普及率は低い。また技術的な課題としても、ジョセフソン接合の高品質化及び作製歩留まり向上による安定供給、アレイ化及び計測の簡便性などが強く求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、SQUID とは異なる動作原理の超伝導磁束計を新たに提案する。具体的には、超伝導共振器に入力した磁束により超伝導カイネティックインダクタンス変化を誘起し、磁束量を共振周波数変化として検出する超伝導共振器型磁束計の研究を行う。本磁束計は、単層膜で作製可能なことから極めて作製プロセスを容易にする。本研究では、SQUID に匹敵する性能を実証するとともに、高温超伝導体を用いた液体窒素温度動作に発展させる。本研究は、SQUID と同等の感度を有する磁束計を、単層膜かつ光露光技術でも作製可能な構造で実現しようとする点に大きな特色がある。また本磁束計は、バイアス不要であり、一本の読み出しラインに共振周波数が異なる共振器を多段接続することで周波数多重読み出しが可能であるため、計測やアレイ化が極めて容易になる。これによりプロセスにおける開発コストや労力を大幅に削減させ、極高感度磁気計測を必要とする基礎科学研究や医療分野、また工業分野への波及が期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究は、磁束の変化量を共振周波数の変化量として読み出すことを原理とする超伝導共振器型磁束計を提案し、その動作実証を行う。本磁束計は、共振器のインダクタンス部として働く超伝導ループに磁束が入力したときにループに誘起される遮蔽電流によって生じる超伝導カイネティックインダクタンス変化を利用する。そのため、MgO 基板の上の窒化ニオブチタン (NbTiN) 薄膜におけるカイネティックインダクタンスの電流依存性を評価する。超伝導共振器型磁束計を設計、作製するとともに、磁束計としての性能を評価できる測定系を構築する。本磁束計に磁界を印加した場合の共振周波数変化を測定することで、その感度を評価する。また、本磁束計のアレイ化を行い、アレイ化動作とそのクロストークについて検討する。さらに、本磁束計の液体窒素温度動作を目指し、Bi-2212 薄膜の作製を試みる。

### 4. 研究成果

#### (1) NbTiN 薄膜の超伝導特性評価

本磁束計は、電流によって生じる超伝導カイネティックインダクタンス変化を利用する。NbTiN 薄膜の超伝導特性及びそのカイネティックインダクタンスの電流依存性を測定した。

##### ① NbTiN 薄膜の作製

NbTiN 薄膜は、アルゴン (Ar) と窒素 ( $\text{N}_2$ ) の混合ガスを用いて反応性 DC マグネトロンスパッタにより作製した。作製に用いた 8 インチ NbTi ターゲットの組成比は、質量比において 100:20 (Nb:Ti) である。Ar 及び  $\text{N}_2$  ガスの流量をそれぞれ 100 sccm 及び 36 sccm、またスパッタ電流 3 A、圧力 2 mTorr に設定した。膜厚 50 nm の NbTiN 薄膜を MgO 基板上に作製した。作製した NbTiN 薄膜を 4 端子測定により超伝導転移温度と 20 K における常伝導抵抗率を測定したところ、それぞれ 13 K と  $72 \mu\Omega\text{cm}$  であった。

##### ② NbTiN 薄膜のカイネティックインダクタンスの電流依存性

カイネティックインダクタンスの電流非線形性を測定するため、膜厚 50 nm、ストリップ幅 4  $\mu\text{m}$ 、CPW ギャップ 2  $\mu\text{m}$  及び線路長 0.2 m の NbTiN 薄膜超伝導 CPW を作製した。ストリップ導体に電流が印加されカイネティックインダクタンスが変化すると、線路の電気長が変化する。そこで、作製した超伝導 CPW の透過係数  $S_{21}$  の位相をベクトルネットワークアナライザで測定した。作製した超伝導 CPW は筐体の実装し、機械式冷凍機

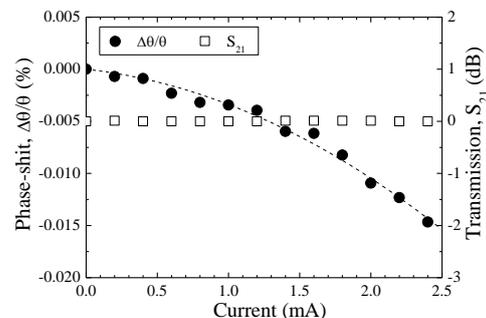


図1 NbTiN 薄膜超伝導 CPW の電流印加時の電気長変化及び伝送損失。

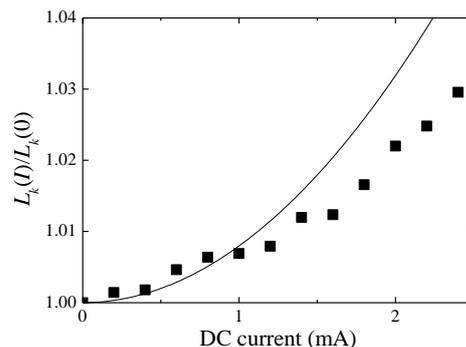


図2 カイネティックインダクタンスの電流依存性 (■) 及び理論計算 (実線)。

で 4 K まで冷却している。電流はバイアススティを通じてストリップ導体に供給した。また、電流を印加していない場合の値が基準値になるようベクトルネットワークアナライザを校正した。

図 1 に電流印加時の電気長の変化量及び  $S_{21}$  の振幅を測定した結果を示す。測定周波数は 5 GHz である。電気長の変化量  $\Delta\theta$  は、電流を印加していない場合の電気長  $\theta$  で正規化している。また各点は 5 回の測定の平均値である。図 1 から、線路に電流を印加した場合、伝送損失を伴わず電気長が変化していることを確認した。電気長の測定結果からカイネティックインダクタンスを算出した結果を図 2 に示す。実験結果は概ね計算結果と一致している。

### (2) 超伝導共振器型磁束計の設計

電磁界シミュレーター (SONNET) を用いて磁束計として動作する超伝導共振器の設計を行った。超伝導共振器は超伝導ループと楕円形コンデンサにより構成した。超伝導ループは、磁束の入力コイルとしても振舞うためその面積を大きく、また電流によるカイネティックインダクタンス変化を大きくするため細線で設計した。またアレイ化においては各共振器の共振周波数を変化させる必要があるが、超伝導ループの形状は同一にし、楕円形コンデンサにより調整するようにした。設計したアレイ数 2 の超伝導共振器型磁束計を図 3 に示す。また、図 4 にシミュレーション結果を示す。2 つの共振器に対応する共振周波数が現れていることを確認できた。

### (3) 超伝導共振器型磁束計の動作実証

設計した超伝導共振器型磁束計を作製し、構築した測定系を用いて磁束計の応答特性とアレイ化におけるクロストークの評価を行った。

#### ① 磁束計の応答特性

設計した超伝導共振器型磁束計は、50 nm の膜厚を有する NbTiN 薄膜を用いて 10 mm 角 MgO 基板上に作製した。作製した磁束計を筐体の実装し、機械式冷凍機を用いて温度 4 K に冷却した後、ベクトルネットワークアナライザを用いてマイクロ波帯で S パラメータを測定した。測定結果を図 4 に示す。共振器 A と共振器 B の共振周波数は、それぞれ 1.95 GHz と 2.55 GHz であった。シミュレーション結果と測定結果における共振周波数の違いは、シミュレーションでは完全導体を仮定して計算しているためである。実際の超伝導薄膜はカイネティックインダクタンスを有しているため、測定結果では低周波側に共振周波数がシフトしている。

次に、共振器 A に磁界を印加し、その共振周波数の変化を観測する。磁束計チップ内に共振器とは独立に線路を設け、この線路に電流を流すことにより磁界を印加した。電流 0, 20, 50, 90 mA を流したときの共振器 A の共振周波数変化を図 5 に示す。電流量が大きくなるほど、すなわち磁界が強くなるほど、共振周波数は低周波側にシフトしていることが分かる。これは磁界が入力されることで超伝導ループのカイネティックインダクタンスが増加したからであり、超伝導共振器型磁束計としての動作が実証できた。

印加電流  $I$  から磁束  $\Phi$  への変換は次の式を用いた。

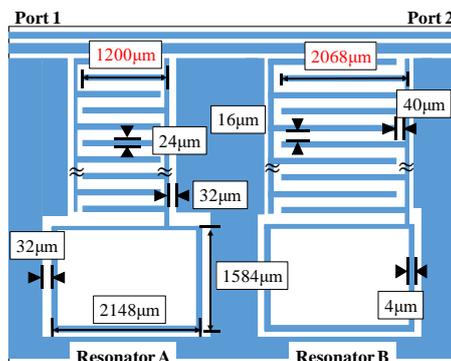


図 3 超伝導共振器型磁束計アレイ。

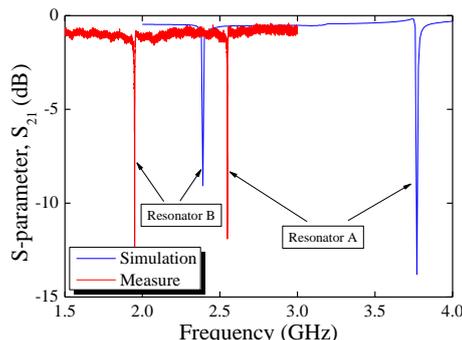


図 4 共振器特性のシミュレーション結果 (PEC) と温度 4 K における測定結果 (超伝導 NbTiN 薄膜)。

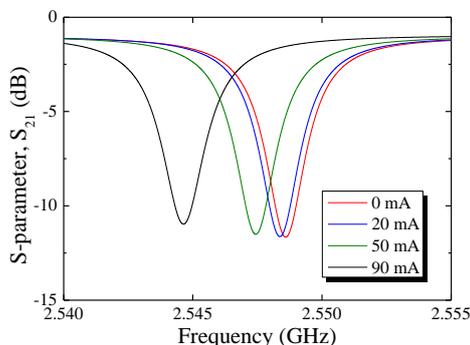


図 5 電流線路に電流 (0, 20, 50, 90 mA) を流したときに共振器 A で生じる共振周波数変化。

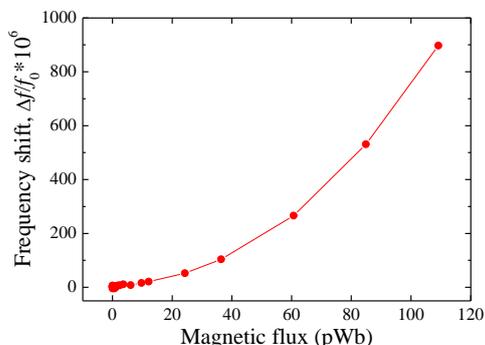


図 6 超伝導共振器磁束計 (共振器 A) の磁束応答特性。

$$\Phi = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \frac{d+a}{d}$$

ここで、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $d$  は電流線路から超伝導ループまでの距離、 $a$  は超伝導ループの高さ（電流線路と直交する方向の長さ）、 $b$  は超伝導ループの幅（電流線路と平行方向の長さ）である。磁束入力に対する超伝導共振器型磁束計の応答特性を図6に示す。縦軸は、磁束未入力の際の共振周波数と磁束を入力したときの共振周波数の差（共振周波数シフト量）を磁束未入力の際の共振周波数で規格化した値にしてある。磁束 1 pWb 以上の入力では、再現性良く磁束に対応した共振周波数シフト量が得られた。しかしながら、1 pWb より小さい磁束の入力に対しては、共振周波数シフト量の揺らぎが大きく、安定に測定することができなかった。本研究ではベクトルネットワークアナライザの信号を増幅せず読み出しているが、低雑音増幅器を使用することで信号対雑音比の改善が期待でき、1 pWb 以下の微弱磁束でも安定して測定できると考えている。

#### ②クロストークの評価

共振器 A の直下に磁界印加のための電流線路を設置し、磁界を印加したときの共振器 A と共振器 B の共振周波数シフト量からクロストークについて調べた。また共振器 A と共振器 B の間隔を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm に変えたものを作製し、それぞれについて測定した。一例として、共振器 A と共振器 B の間隔を 2 mm にしたときの測定結果を図7に示す。この場合、共振器 A 付近に磁界源（電流線路）を置いているので、磁界印加に対して共振器 A の共振周波数シフト量は大きく、共振器 B の共振周波数は変化しないことが理想であるが、共振器 B においても予想以上に大きい共振周波数シフトが生じてしまった。共振器間隔に対する共振器 A と共振器 B の共振周波数シフト量の比を図8に示す。縦軸の値が小さいほど、磁界を印加したときに共振器 B の共振周波数シフト量が小さいことを表している。図8から、共振器が磁界源から遠ざかるにつれて共振周波数変化は小さくなっており、アレイ動作についても実証できたと言える。しかしながら、磁界印加に対して共振器 B の変化も大きく、定量的なクロストークの評価はできなかった。これは、磁束計チップ内の電流線路に電流を流すために筐体とチップをワイヤーボンドで接続しているが、このワイヤーでも磁界が発生し、その磁界が両共振器に入力されていることが原因である。クロストークを定量的に評価するためには、磁界の印加方法を工夫・改善する必要がある。

#### (4) Bi-2212 薄膜の作製

超伝導共振器型磁束計の液体窒素温度動作を目指し、有機金属分解法 (MOD 法) により Bi-2212 薄膜の作製を試みた。MOD 法における仮焼成温度及び本焼成温度の最適化を行い、焼成時に酸素を導入することで液体窒素温度以上の 78 K で超伝導に転移する薄膜を作製することができた。しかしながら、超伝導共振器型磁束計を作製するまでには至らなかった。今後、Bi-2212 薄膜の極薄膜化や細線化を目指し作製プロセスの改善を行い、液体窒素温度以上で本磁束計の動作を実証していく。

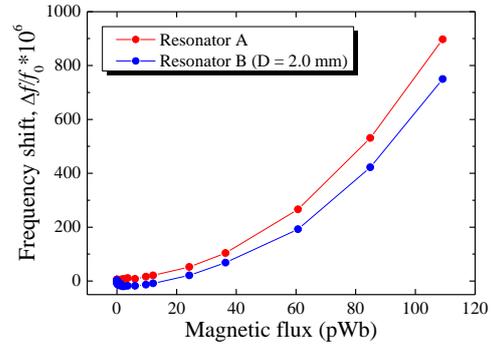


図7 共振器 A 近傍に磁界を印加した場合の共振器 A 及び B の磁束応答特性（共振器 A と共振器 B の間隔は 2.0 mm）。

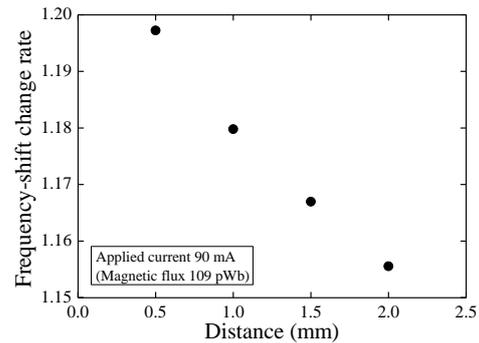


図8 磁束応答の距離依存性。共振器 A 近傍にある電流線路に電流 90 mA を印加した場合の共振器 A と共振器 B の共振周波数シフト量の変化率。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 中川洸希, 齊藤敦, 寺井弘高, 武田正典	4. 巻 SCE2019-25
2. 論文標題 Fishbone型超伝導共振器の性能評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 信学技法	6. 最初と最後の頁 17-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Goto, M. Takeda, S. Saito, H. Shimakage	4. 巻 871
2. 論文標題 Calculation of superconducting parametric amplifier performances	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12081
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中川洸希, 齊藤敦, 寺井弘高, 武田正典
2. 発表標題 Fishbone型伝送線路のカイネティックインダクタンスの評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川洸希, 齊藤敦, 寺井弘高, 武田正典
2. 発表標題 Fishbone型超伝導共振器の性能評価
3. 学会等名 超伝導エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川洸希, 寺井弘高, 武田正典
2. 発表標題 Fishbone型伝送線路を用いた超伝導半波長共振器
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松源, 齊藤敦, 島影尚, 寺井弘高, 武田正典
2. 発表標題 カイネティックインダクタンスにおける電流非線形性の膜厚依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松源, 竹下啓太, 齊藤敦, 島影尚, 寺井弘高, 武田正典
2. 発表標題 MgO基板上の窒化ニオブチタン薄膜カイネティックインダクタンスの電流非線形性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川洸希, 武田正典
2. 発表標題 超伝導パラメトリック増幅器応用に向けたFishbone型伝送線路の解析
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下啓太、前田瞳、齊藤敦、島影尚、武田正典
2. 発表標題 NbTiN薄膜における力学的インダクタンス非線形性の線幅依存性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Maeda, K. Takeshita, H. Terai, M. Takeda
2. 発表標題 Measurement of kinetic-inductance nonlinearity in an NbTiN thin film toward a novel superconducting-magnetometer development
3. 学会等名 Joint Symposium between Sister Universities (JSSUME 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Ishida, T. Goto, H. Shimakage, M. Takeda
2. 発表標題 Measurements of phase shifts in YBCO transmission lines for evaluation of kinetic inductance
3. 学会等名 13th International Superconductivity Symposium
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田亮、後藤隆志、島影尚、武田正典
2. 発表標題 YBCO薄膜コプレーナ線路における位相変化量の測定実験
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Goto, M. Takeda, S. Saito, H. Shimakage
2. 発表標題 Calculations of superconducting parametric amplifier performances
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤隆志, 武田正典, 島影尚
2. 発表標題 YBCO薄膜コプレーナ線路におけるカイネティックインダクタンス評価
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	齊藤 敦  (Saito Atsushi)  (70313567)	山形大学・大学院理工学研究科・教授   (11501)	
研究 分担者	島影 尚  (Shimakage Hisashi)  (80359091)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授   (12101)	