

博士学位論文

シームレス閉ループ構造を用いた
高温超伝導磁束トランスの構築と
高感度磁気計測応用に関する研究

2022 年 1 月

金沢工業大学

大学院工学研究科 高信頼ものづくり専攻

7600069 小森 和範

(指導教員) 上原 弦 教授

目次

第1章 序論	p. 1
1. 1 本研究の目的と意義	p. 1
1. 2 超伝導現象の特異性と磁気計測への応用	p. 2
1. 2. 1 超伝導体の完全反磁性と超伝導閉回路の 特徴的なふるまい	p. 2
1. 2. 2 超伝導磁束トランスの構造と磁場伝達機能	p. 5
1. 2. 3 SQUIDマグネトメータにおける 超伝導磁束トランスの適用	p. 8
1. 2. 4 フラックスガイドとしての超伝導磁束トランスと 汎用磁気センサの結合	p. 9
1. 3 高温超伝導材料を用いた超伝導磁束トランスの実現 における問題点と本研究におけるアプローチ	p. 11
参考文献	p. 13
第2章 高温超伝導線材を用いたシームレス閉ループの構築と 定常磁場に対する応答	p. 18
2. 1 序言	p. 18
2. 2 試料作製および実験方法	p. 19
2. 2. 1 「切り紙」手法による高温超伝導シームレス閉ループ の作製	p. 19
2. 2. 2 高温超伝導シームレス閉ループの磁気特性評価	p. 22

2.3	実験結果	p. 24
2.4	考察	p. 26
2.5	本章のまとめ	p. 28
	参考文献	p. 29
第3章	高温超伝導磁束トランスの作製および磁場伝達特性の評価	p. 31
3.1	序言	p. 31
3.1.1	超伝導磁束トランスにおける磁場伝達の効率	p. 32
3.2	試料作製および実験方法	p. 33
3.2.1	高温超伝導磁束トランスの作製	p. 34
3.2.2	超伝導磁束トランスによる磁場伝達効率の測定	p. 37
3.3	実験結果	p. 39
3.3.1	直交型構造を持つ高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達特性の評価	p. 39
3.3.2	平行型構造を持つ高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達特性の評価	p. 42
3.4	考察	p. 44
3.4.1	高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達機能	p. 44
3.4.2	ループインダクタンスの調整と磁場伝達効率の変化	p. 45

3. 4. 3	コイルインダクタンスの見積もりを用いた高温超伝導 磁束トランスの磁場伝達特性の推定	p. 49
3. 5	本章のまとめ	p. 54
	参考文献	p. 55
第4章	高温超伝導グラジオメータ(磁場勾配計)の作製と 一様分布した磁場下にある磁性体片の検知	p. 57
4. 1	序言	p. 57
4. 2	試料作製および実験方法	p. 58
4. 2. 1	高温超伝導グラジオメータの作製	p. 58
4. 2. 2	一様分布した磁場及び勾配磁場を印加した グラジオメータの磁場信号計測	p. 60
4. 2. 3	一様磁場内に置かれた磁性体片の検知試験	p. 60
4. 3	実験結果	p. 63
4. 3. 1	一様な定常磁場および勾配を持つ定常磁場の印加 によるアキシアル型グラジオメータの磁気信号	p. 63
4. 3. 2	プラナー型高温超伝導グラジオメータを用いた 一様な磁場中にある磁性体片の検知	p. 64
4. 4	考察	p. 67
4. 4. 1	定常磁場によるバックグラウンド信号の除去と 勾配磁場の検出	p. 67
4. 4. 2	局所的な磁場勾配を利用した磁性体片の検知	p. 68

4. 5	本章のまとめ	p. 70
	参考文献	p. 71
第5章	総括	p. 72
5. 1	本研究結果のまとめ	p. 72
5. 2	今後の展望と課題	p. 73
	謝辞	p. 74
	本論文に関する研究発表など	p. 75

第1章

序論

本章では、本研究の目的と概要、意義について述べるとともに、背景となる超伝導材料を用いた磁気計測応用技術、閉じた超伝導回路の磁場に対する特徴的なふるまいと超伝導磁束トランスの概要、高温超伝導材料を用いて磁束トランスを作製する意義と現状における応用上の問題点などについて述べる。

1. 1 本研究の目的と意義

本研究では、高温超伝導体を用いた超伝導磁束トランスの作製と液体窒素温度領域における定常磁場伝達機能の実現、さらに高温超伝導磁束トランスを用いた汎用磁気センサの感度向上に関する検討を目的とする。超伝導磁束トランスに不可欠な閉回路構造の作製には接合を用いない閉ループ構造作製手法を適用し、市販の高温超伝導線材を用いて高温超伝導磁束トランスを作製する。作製した高温超伝導磁束トランスの定常磁場印加に対する磁場伝達特性を計測し、素子のデザインと磁場伝達特性の関係を明らかにする。さらに、超伝導電流の流れ方を考慮して設計される高温超伝導グラジオメータを作製し、一様磁場や勾配磁場に対する特性を計測することで高温超伝導磁束トランスの機能及び設計について検討する。

超伝導磁束トランスは、SQUID（超伝導量子干渉素子：Superconducting Quantum Interference Device）を用いたマグネトメータのシステムにおいて用いられている。このシステムにおいて、超伝導磁束トランスは、測定対象の磁束を捕集し、高感度磁気センサである SQUID に高効率に伝達する役割を持つ¹⁾。超伝導磁束トランスは時間変化のない定常磁場でも高効率に磁束伝達できることが特長であり、磁束の散逸による伝達効率低下を生じる高透磁率磁性体による磁束伝達や定常磁場を伝達できない電磁誘導による電流を介した金属コイル間の磁束伝達と本質的に異なる。

これまで、超伝導磁束トランスには金属系超伝導材料が用いられてきた²⁾。金属系超伝導材料の臨界温度 T_c の制約から、超伝導磁束トランスは動作に液体ヘリウム温度 (4.2K) 領域への冷却が必要であり、SQUID 以外の汎用センサへの適用が困難であった。一方、1986 年の J. G. Bednorz と K. A. Müller による酸化物高温超伝導体の発見³⁾以来、液体窒素温度 (77K) を超える高温

の T_c を示す様々な高温超伝導物質 (High-Temperature Superconductor: HTS) が発見され、2021 年現在では T_c は超高压下にある CH_3S において 287.9K に達している⁴⁾。これらの超伝導物質のうち、RE-123 系⁵⁾およびビスマス系⁶⁾の酸化物、 MgB_2 ⁷⁾などの超伝導材料においては、キロメートル級に達する長尺線材が開発され、数社から良好な特性の線材が市販され^{8), 9)}、これらの線材を用いた超伝導マグネットの開発¹⁰⁾が行われている。

液体窒素温度領域は液体ヘリウム温度領域に比べて断熱などの取り扱いが簡便であり、かつ小型の冷凍機による冷却システムでも容易に達成できる。高温超伝導線材を用いて液体窒素温度で動作する超伝導磁束トランスを実現できれば、これをフラックスガイド (flux guide: 磁束伝達器) として用いて、高温超伝導体 SQUID や汎用磁気センサと組み合わせた液体窒素温度領域で動作する高感度マグネットメータを実現できる。この高温超伝導マグネットメータでは、冷却の簡便性により可搬型や屋外使用ができる計測システムが可能となる。特に構造物の非破壊検査、食品における金属異物検査、地磁気下での資源探査、極低周波を利用した通信技術などへの応用を視野に入れることができる。

1. 2 超伝導現象の特異性と磁気計測への応用

超伝導現象を特徴づける最も重要な点は、多数電子の協調による巨視的な量子現象の発現である。極低温下にある液体ヘリウムに生じる超流動現象を除けば、超伝導現象はこのようなミリメートルレンジを超えるマクロスコピックなサイズの物体において量子状態を観測できる唯一の物理現象である。超伝導物質が示す電気抵抗の消失、完全反磁性といった特徴的な物性は、量子状態にある粒子、すなわち超伝導物質においては物質中に形成される超伝導電子対が、位相の回転や接続、また干渉といった波動的なふるまいを強く示すことが起源となっている。

超伝導現象を利用して高感度な磁気計測を可能にするものが SQUID マグネットメータである。この SQUID マグネットメータでは超伝導現象を、高感度な磁気センサである SQUID と、測定対象である磁束を捕集し SQUID へと伝達する磁気回路をなす超伝導磁束トランスで利用している¹⁾。

1. 2. 1 超伝導体の完全反磁性と超伝導閉回路の特徴的なふるまい

本研究の中核である超伝導磁束トランスの概要を述べるにあたり、機能の前

提となる超伝導体の完全反磁性と、定常磁場印加に対する超伝導閉回路のふるまいについて述べておく。

超伝導物質のバルク体に磁場を印加すると、磁場に反発する反磁性体としてふるまう。印加磁場が超伝導体の臨界磁場（第1種超伝導体では臨界磁場 H_c 、第2種超伝導体では下部臨界磁場 H_{c1} ）よりも弱い場合には、バルク体の内部から完全に磁場が排除され、完全反磁性体となる。磁場中に超伝導物質を置く場合、印加磁場がゼロの状態において冷却により超伝導状態に転移したバルク体に後から磁場を印加するゼロ磁場冷却、また、あらかじめ磁場中にバルク体を置き冷却により超伝導転移させる磁場中冷却の2つの方法があるが、完全反磁性を実現できる印加磁場条件においては、超伝導物質内部からの磁場の排除は、いずれの方法においても発生する。この性質はマイスナー効果¹¹⁾として知られている。超伝導体に磁場が印加されているとき、超伝導体を貫く磁束によって超伝導体の周囲にベクトルポテンシャルが生じ、超伝導体の表面には印加磁場に対向する磁場を発生させる円電流が生じる。この電流は、電磁誘導による起電力から生じる渦電流とは異なり、時間変化のない定常磁場の印加に対しても発生する超伝導電流であり、超伝導体内部に磁場が導入されないよう超伝導物質の表面のみに存在する。ここで円電流が流れ磁場が侵入している表面層の厚さを、磁場の侵入深さと呼ぶ。

この超伝導電流による磁場の遮蔽は、内側を空洞にした円筒においても生じる。この場合、磁場を遮蔽する超伝導電流は円筒の内周に流れることで、円筒内側の空間を貫く磁場を遮蔽する。しかし、円筒内側にある空洞部には局所的な遮蔽電流が存在せず、空洞部は磁束の通過が可能である。そのため円筒形状の超伝導体が遮蔽できる磁場の強さには一定の限界が生じる。円筒の内径が大きい、あるいは印加磁場が大きい場合には、電流経路から離れた円筒中心付近の領域では磁束の侵入が可能になる。内側に侵入した磁束が保存された円筒形状の超伝導体では、超伝導体の内部に磁束は入ることができないため、遮蔽電流は最も強い磁場と超伝導体の界面、つまり円筒形状の超伝導体の内側表面に集中する。

超伝導体で作られた円筒に強い磁場を印加すると円筒内部を貫く磁束の増加は印加した磁場に対応する連続的な変化をとらず、階段状の離散的な変化をとることが B. S. Deaver ら¹²⁾ や R. Doll ら¹³⁾ によって実験的に確かめられた。この変化で階段の段差に相当する値は

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.067833848 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad (1.1)$$

であり、 Φ_0 は磁束量子(fluxoid)と呼ばれる。超伝導体円筒の内側を通過できる磁束は Φ_0 の整数倍となる離散的な値しか取り得ず、磁束の量子化(flux quantization)が生じる¹⁴⁾。超伝導現象は巨視的な量子状態よって生じる現象であるので、超伝導電流が閉回路を流れる場合には、閉回路にある超伝導電子対が量子条件を満たす必要がある。閉回路を流れる電荷 q をもつ荷電粒子の量子条件は、経路における波動の位相の周回積分が 2π の整数倍でなければならない。空間に磁束密度 B の磁束が存在するとき、磁束の周辺には

$$B = \text{rot } A \quad (1.2)$$

を満たすベクトルポテンシャル A が存在する。また、荷電粒子の経路周囲にベクトルポテンシャル A が存在する場合、荷電粒子の波動関数の位相 θ は

$$\theta = 2\pi \frac{q}{h} \oint_C A \cdot dl \quad (1.3)$$

に従って変化する。ここで h はプランク定数である。円筒型の超伝導体を磁場中に置いた場合、円筒内側の空間を磁束が通過しようとする。簡単のため円筒の内側だけを磁束が通過すると考えると、円筒の内側にある磁束により、円筒型超伝導体の周囲に磁束を発生させるベクトルポテンシャルが存在する。そこで円筒内面を周回する超伝導電流の位相は、(1.3)式に従って変化する。(1.3)式は Stokes の定理から

$$\oint_C A \cdot dl = \int_S B \cdot dS, \quad \theta \text{ は } 2\pi \text{ の整数倍であるから}$$

$$\int_S B \cdot ds = \frac{\theta}{2\pi} \cdot \frac{h}{q} = n \cdot \frac{h}{q} \quad (n \text{ は整数}) \quad (1.4)$$

であり、(1.4)式から $q=2e$ である超伝導体では円筒内部を貫く全磁束は磁束量子の整数倍となる。超伝導体円筒内側に印加される磁束が 0 以上 $1/2\Phi_0$ を超えない場合には、円筒内側の磁束を 0 に保つように超伝導電流が誘起され印

加された磁束を遮蔽する。超伝導体円筒内側に印加される磁束が $1/2\Phi_0$ を超えた場合には、円筒内側の磁束を Φ_0 に保つように超伝導電流が誘起され印加された磁束を増補する。このように最初に円筒内側を通過する磁束が無く次いで定常磁場を円筒に印加した場合、円筒内側を通過する磁束が $\pm 1/2\Phi_0$ 間の範囲において、磁場の増加と共に超伝導体内周に誘起される超伝導電流は増加する。印加する磁場が強くなり、超伝導体の臨界電流よりも超伝導電流が大きくなると磁束の相殺ができなくなり Φ_0 の磁束が円筒内側に侵入する。磁束の侵入によって超伝導電流の位相は負に反転するが、磁場の増加につれて正の位相へと移り、さらに Φ_0 の磁束が円筒の内側に侵入すると超伝導電流の位相は再度負に反転する¹¹⁾。

円筒内側の磁束は、印加磁場により円筒内側に導入される磁束と円筒を環状に流れる超伝導電流による磁場から導入される磁束の和である。連続的に変化する印加磁場に対して超伝導円筒の内側に侵入する磁束が量子化することは、階段状の変化の平坦部では、印加磁場の変化による磁束の増減が超伝導電流により生じる磁束で相殺されることを示している。円筒内側にある磁束の量子化は円筒表面を流れる超伝導電流が、印加磁場に対応して適切に調節されながら変化することを示すものであり、超伝導電流の大きさと方向が印加磁場の情報を含んでいることを示す。印加磁場に対する超伝導円筒内側を貫く磁束の変化は非常に小さな物理量である Φ_0 の単位で生じるものであり、超伝導電流を測定することで円筒内側にある磁束を高感度に測定することができる。これが SQUID の動作原理である。

1. 2. 2 超伝導磁束トランスの構造と磁場伝達機能

定常磁場印加により誘起される超伝導閉回路上の超伝導電流は、印加された磁場の強度の情報を含んでいることを先に述べた。超伝導磁束トランスは、この超伝導電流を磁場印加領域の外に引き出しインダクタに注入することで、印加磁場強度に対応した磁場をインダクタ上に作り出し、この作用により高効率に磁束の伝達を行う素子である。

超伝導磁束トランスの機能は、次のように説明することができる。1. 2. 1項で述べたように、ゼロ磁場冷却した超伝導閉回路に定常磁場を印加すると、マイスナー効果により磁束が閉回路で囲まれた空間から排除され、この時に回路上に印加磁場をシールドする超伝導電流が誘起される。超伝導閉回路の内側の一部領域にのみ磁束を導入した場合、閉回路内の磁束の総和を0に保つため

に、導入した磁束は閉回路内の別の領域から排出される。従って超伝導閉回路内に磁束の侵入領域と排出領域を設定し、他の部分における磁束の排出を妨げれば、2つの領域間で定常磁場に対する高効率の磁束伝達が可能になる。図1. 1に、近傍にある磁束に対する超伝導閉回路のふるまいを示す。

測定対象が変動磁場であれば、磁束の伝達は金属線コイルを用いた電磁誘導による電流を介した方法でも可能である。しかし電磁誘導方式では、極低周波磁場では誘導される信号電圧が微小になり、また定常磁場に対しては原理的に磁束伝達機能が生じない。一方、超伝導閉回路は定常磁場に対して電流を介した磁束伝達機能を有することが特長である。ここで図1. 1に示す超伝導閉回路において、磁束が侵入する領域と磁束が排出される領域を互いに独立したループ形状にし、その間を細い平行線で繋いだ眼鏡形の閉回路を考える。この閉回路では、両ループのインダクタンスが等しい場合、すなわちループ内側の磁束とループを周回する電流の比が同じである場合に、一方のループに侵入した磁束は超伝導電流の誘起を介して他方のループへと損失なく伝達される。これが超伝導磁束トランスの構造である。超伝導磁束トランスにおい

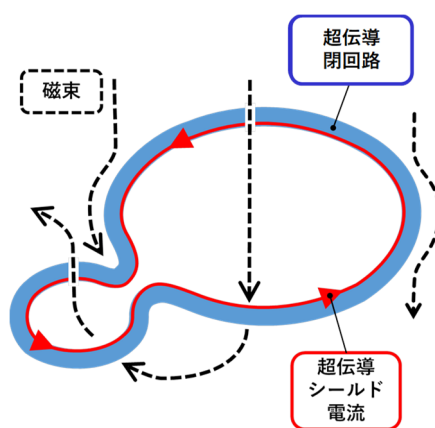


図1. 1 超伝導閉回路の近傍の磁束に対するふるまい

定常磁場の印加に対して誘導される超伝導シールド電流により磁束は閉回路の内側から排除される。そのため閉回路内側の一部領域に侵入した磁束は、他の領域から排出される。この時、超伝導電流は閉回路上の内側境界面を流れる。

では磁束が侵入する側のループを Pickup コイル、磁束が排出される側のループを Input コイルと呼ぶ。Pickup コイルは測定対象の磁束を捕集する役割を、Input コイルは伝達された磁束を SQUID などの磁気センサに送るインターフェースの役割を持つ。図1. 2は SQUID 磁気センサと結合した超伝導磁束トランスによる磁束伝達の概要である。大きい径の Pickup コイルに捕集された磁束は小さい径の Input コイルに伝達される。ここで一般に、インダクタンスを整合させるよう Input コイルは Pickup コイルよりも多いターン数で設計される。インダクタンスが理想的に整合している場合に Pickup コイルと Input コイルの磁束は等しくなるが、径がより小さい Input コイルに磁束が伝達されることで Input コイルの磁束密度は Pickup コイルの磁束密度に比べて増大する。これを利用することで、Input コイルに結合した磁気センサの実効的な磁場感度を増強することができる。

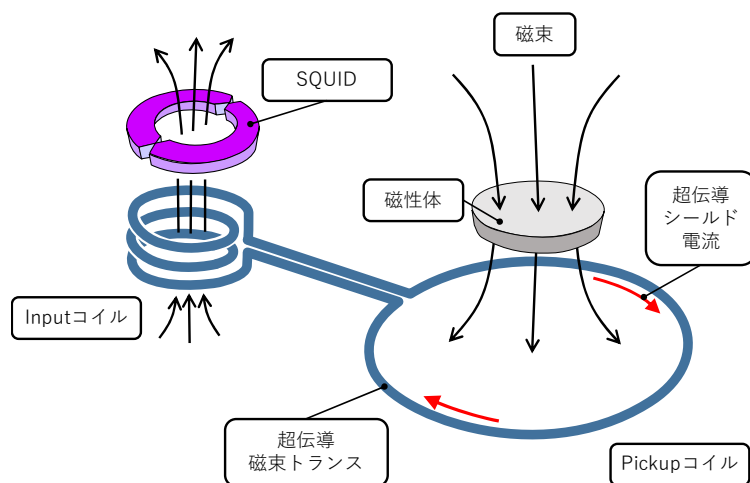


図1. 2 SQUID と結合した超伝導磁束トランスによる磁束伝達

測定対象となる磁束は Pickup コイルで捕集され、Input コイルをへて磁気センサ(SQUID)へと伝達される。

1. 2. 3 SQUIDマグネトメータにおける超伝導磁束トランスの適用

金属超伝導体を用いた超伝導磁束トランスは、SQUID マグネトメータにおいて実用化されている。SQUID とは、接合を内包する超伝導閉回路における超伝導電流が、閉回路を貫く磁束によって自律的に変化することを利用する磁気センサである。ここでは SQUID について簡単に触れておく。

1. 2. 1項で述べたように、超伝導閉回路に磁場を印加すると、回路の内側にある空間を貫く磁束によって、閉回路を周回する超伝導電流が誘起される。閉回路の一部に絶縁体などを挿入して超伝導体間に間隙を設けた場合、間隙が十分に薄い状態であれば、超伝導電子対はトンネル効果によって間隙を横断し、両側の超伝導体は量子的に接続する。この接続によって、間隙には両側の超伝導体にある電子波の位相差に応じた超伝導電流が流れる。この現象は超伝導体におけるジョセフソン効果として知られ¹⁵⁾、間隙を設けた部分はジョセフソン接合と呼ばれる¹⁶⁾。間隙を横断して閉回路を周回する超伝導電流は、閉回路内周を貫く磁束によって位相が変化するが、接合部は閉回路上の他の部分に比べて臨界電流が小さいため、超伝導電流はジョセフソン接合における臨界電流を最大値として変動する。この超伝導電流の変化は、位相が逆転する点、すなわち閉回路の内側を貫く磁束が磁束量子 Φ_0 だけ増減する磁場において最も大きくなる。この変化を、2つの接合で接した2つの弧状形の超伝導体に生じる電圧として検出する、あるいは、一つの接合を持つ閉回路のインダクタンスの変化として検出することで、 Φ_0 を単位とする高感度な磁束の計測が可能になる。前者は DC-SQUID、後者は RF-SQUID と呼ばれる構成である¹⁶⁾。

これまで金属超伝導体を用いて実用化されている SQUID は、Nb や Pb などを用いて作製され、動作に液体ヘリウム温度付近までの極低温冷却が必要であるものの、他の磁気センサに比べ非常に高い定常磁場感度を持つ。SQUID の極めて高い磁気感度は、磁気計測における優位性を示す一方で、磁気的な外乱に対しての不安定性の原因ともなり得る。そこで SQUID マグネトメータでは、SQUID を磁気シールド内に置き、フラックスガイドを用いて測定対象の磁束を補集し、SQUID に伝達する機構がとられている。ここで、フラックスガイドとして用いられるのが超伝導磁束トランスである。図1. 3に SQUID マグネトメータの構成における超伝導磁束トランスの適用例を示す¹⁾。

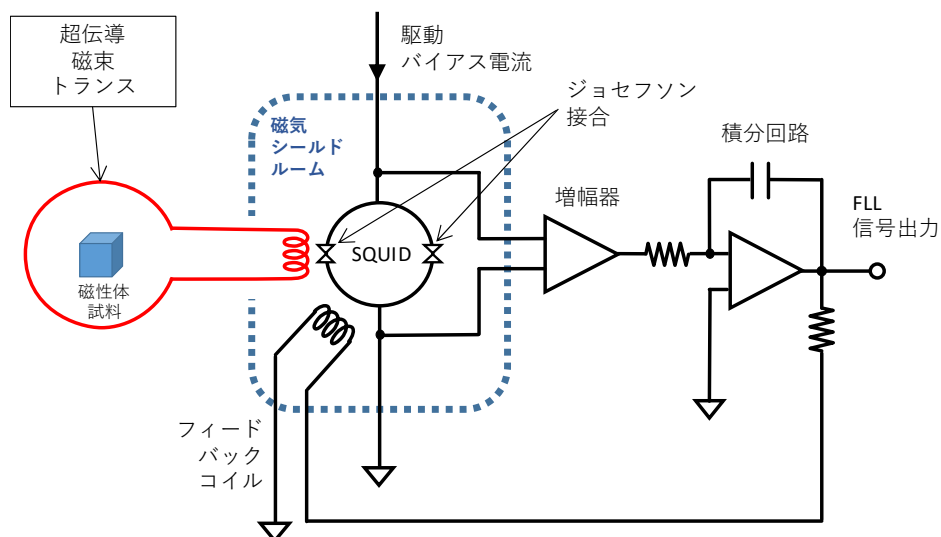


図 1. 3 超伝導磁束トランスを適用した SQUID マグネトメータの構成

図は DC-SQUID と FLL(Flux Locked Loop)回路によるフィードバックを用いた構成例。多くの場合、超伝導磁束トランスは測定対象となる磁束を捕集し、磁束密度を引き上げて磁気シールド内の SQUID に伝達する。

1. 2. 4 フラックスガイドとしての超伝導磁束トランスと汎用磁気センサの結合

磁気計測においては、測定対象でありながら磁気センサに感知されない漏れ磁束を捕集し、磁気センサに伝達することで、感度に優れるマグネトメータを構築できる。一般に、このように効率的に磁束を捕集するためには、フラックスガイドとして高透磁率材料を適用することが考えられる。ホールセンサなどの汎用磁気センサを用いた磁気ヘッドや電流センサでは、センダスト合金やパーマロイ、Fe-Co 系アモルファス合金など初透磁率および最大透磁率が大きく保磁力が小さい軟磁性材料がフラックスガイドに適用されている。さらに、フラックスガイドの形状を考慮した磁気回路を設計し、捕集した磁束をより小さなエリアに送ることで磁束密度を濃縮するフラックスコンデンサ (flux condenser: 磁束濃縮器) を構築し、マグネトメータの感度を飛躍的に向上させることができる。

このような視点から、高透磁率磁性体で構築したフラックスコンデンサを用いて、MR(Magneto-Resistive)センサなど取り扱いが簡便な磁気センサの磁場検出感度を高感度化し、SQUID に匹敵し得る性能を実現する研究が行われている¹⁷⁾。これらの研究では、高感度ではあるが液体ヘリウム温度までの冷却が必要な SQUID に対し、非冷却あるいはノイズ低下のために液体窒素温度領域の簡便な冷却環境で動作する汎用磁気センサに、パーマロイなどの高透磁率材料によるフラックスガイドを結合させている。センサよりも大型のフラックスガイドを用いて捕集した磁束をセンサに伝達することで磁気センサの実効的な磁気検知面積を増大し、フラックスコンデンサとして機能させることで磁場感度の引き上げを図っている¹⁸⁾。

センダスト合金やパーマロイは、極低温下では初透磁率や最大透磁率が大きく低下すること^{19),20)}やフラックスガイドを介した熱流入の視点から、極低温動作する SQUID との結合は難しい。そのために、金属系超伝導体 SQUID を用いたマグネトメータでは超伝導磁束トランスが適用されている。フラックスガイドとしての超伝導磁束トランスの磁束伝達機能は、1. 2. 2項で述べたように超伝導閉回路内で量子化された磁束が保存される性質に基づいており、極低温環境下においても高効率な 磁束伝達が可能である。また、SQUID は素子のループインダクタンスが小さいほど磁束に対する電流が大きくなり感度を向上できるため、接合を含む超伝導ループが成す面積は非常に小さいものに設計されている。一方で磁束を捕集する面積が小さいために磁場の変化に対する磁束の変化量は小さい。そこで SQUID マグネトメータにおける超伝導磁束トランスは、大きい断面積の Pickup コイルで捕集した磁束を小さい断面積の Input コイルに伝達することで、磁束密度を増大し SQUID の実効的な磁場感度を向上させる目的で用いられている²¹⁾。

超伝導磁束トランスを汎用のフラックスガイドとして考える場合、液体ヘリウム温度領域で動作する超伝導磁束トランスは、高度な断熱の必要性などから半導体磁気センサなどとの結合は難しい。この課題に対して、高温超伝導体を基材として超伝導磁束トランスを作製できれば、液体窒素温度領域の簡便な冷却で動作する磁気センサとの結合、あるいは非冷却環境で動作する磁気センサとの簡便な断熱を介した結合が可能であり、高い磁場感度を持つマグネトメータを構築できると考えられる。

上述した高透磁率材料を用いたフラックスガイドでは、磁束の伝達に主に磁壁移動による磁化変化を利用する。磁氣的に等方性を示す材料であっても磁壁移動についてはわずかにしきい値が存在するため、極微小な磁場に対してはフラックスガイドへの印加磁場とセンサに伝達される磁場が比例しない。また

磁壁移動は磁束の伝達抵抗となるためフラックスガイドの形状に依存する磁束の散逸が生じ、細長いフラックスガイドを介した場合には磁束の伝達効率が低下する。MI(Magneto-Impedance)センサなどの高感度磁気センサに応用される細ワイヤや薄膜形状の FeCoSiB アモルファス材などに見られる回転磁化による磁束伝達²²⁾ではこれらの磁壁移動に伴う問題は生じない。しかしながら、回転磁化による磁化変化は磁壁移動による磁化変化に比べて小さいため、フラックスガイドとして用いる場合にマグネトメータのダイナミックレンジが小さくなると考えられる。一方で、超伝導磁束トランスをフラックスガイドに用いる場合には、磁気抵抗による磁束伝達効率低下や測定系のダイナミックレンジの低下、また微小磁場における初透磁率の非線形性などの問題が原理的に生じない。このことから、高温超伝導磁束トランスは、微弱な定常磁場あるいは低周波磁場を広い範囲で捕集する用途、すなわち大型物を対象とする非破壊検査、地磁気計測による資源探査などにおいて特に優位性を持つと考えられる。

1. 3 高温超伝導材料を用いた超伝導磁束トランスの実現における問題点と本研究におけるアプローチ

1. 2. 2項で述べたとおり、超伝導磁束トランスの作製には超伝導体による閉回路が不可欠である。超伝導体による閉回路を実現する方法として、a) 超伝導線材を用いてループを作製し線材両端を接合する²⁾、b) 平板形状の高温超伝導体を作製し内心部をくりぬく^{32)–34)}の2つ方法が従来提案されてきた。

a)の方法、すなわち超伝導線材で円弧を作り、線材の両端を接合する方法は、単純であり、大型のループ線やマルチターンコイル構造を得るために有効な方法である。そのため NbTi 線、Nb 線などの金属系の超伝導材料において、線材接合による超伝導磁束トランスの作製が行われてきた²⁾。これらの材料では、圧接²³⁾、スポット溶接²³⁾や超音波接合²⁴⁾、電子ビーム溶接²⁵⁾などの溶接による接合や液体ヘリウム温度で超伝導性を示す Bi-Pb-Sn 超伝導ハンダ²⁶⁾などによる接合技術が開発されており、接合部における T_c や臨界電流密度 J_c などの特性の劣化も小さいため、比較的容易に接合部を超伝導状態に保つことが可能である。

これに対して特に液体窒素温度を超える T_c を示す RE-123 系やビスマス系酸化物超伝導体においては、溶融によって結晶内酸素原子の散逸や非超伝導相の形成、結晶配向性の低下による超伝導特性の著しい劣化が生じるために、溶融による接合処理では接続部の超伝導特性を担保することは困難であ

る。また、液体窒素温度で超伝導特性を示すろう接材は現在のところ知られていない。

このような理由から、高温超伝導線材の両端を接合することによって閉ループ構造を構築することは著しく困難である。現在までに報告されている高温超伝導体線材の接合研究の多くは、ハンダ付けなどによる低抵抗接続²⁷⁾、あるいは超伝導特性の劣化分を補償するために、接合領域の形状拡大や冷却の簡便性を排して液体ヘリウムなど極低温環境で超伝導特性を維持する²⁸⁾、などの方法を用いている。低抵抗接続は、超伝導マグネットなどのシステムにおける電力損失を改善し得る非常に小さな接合抵抗が報告されているが²⁷⁾、接合部が量子位相的な超伝導接続にはならない。そのためマイスナー効果によるシールド電流が誘起されず、この方法を超伝導磁束トランスへ適用することは不可能である。また、従来の超伝導接続は機器形状や冷却装置など動作環境の点で大きな制約が生じる。近年、RE-123 系の高温超伝導(HTS)テープ線材における新しい接合方法として、温度制御された半熔融状態を介して HTS テープ線材の超伝導層同士を拡散接合する手法が研究され、液体窒素温度での超伝導接続の達成が報告されている^{29)–31)}。しかしながら、線材より大きな形状のバルク体を接合させるために接合部の形状に制約がある²⁹⁾、結晶配向の整合性を良好にするための線材の位置合わせや超伝導層表面の熔融に伴う結晶内酸素欠損を補うために高圧酸素による長時間の拡散処理を必要とする^{30),31)}、といった問題が存在する。

b)の方法については、超伝導閉回路内に超伝導性を低下させる接合部を有しないため、閉回路全体を超伝導状態に保つことは容易である。この方法による高温超伝導磁束トランスの作製例として、単結晶基板や金属テープ上に作製した薄膜などの平板形状の高温超伝導材料を基材として、パターニングにより閉回路を作製する方法が報告されている^{32)–34)}。しかしこの方法では Pickup コイルおよび Input コイルの大きさは超伝導材料の幅が上限となるためコイル径は実質的に2インチ程度が上限となっている。また、一層構造の薄膜を用いたパターニングでは、コイル形状はシングルターンに限られマルチターンのコイル形状を作製することはできない。基材として絶縁層を内包したマルチレイヤー超伝導薄膜を用いた、マルチターンの超伝導平面コイルを内包する高温超伝導磁束トランスの試作も報告されているが³⁵⁾、定常磁場印加に対する液体窒素温度での磁束伝達機能は確認されていない。

大口径のループやマルチターンコイル形状を可能にする方法として、本研究では、無接合(シームレス)で閉回路を構築する手法を市販の高温超伝導線材に適用することで液体窒素温度領域において動作する超伝導磁束トランスを

作製する方法を提案する³⁶⁾。この無接合での閉回路の構築手法の詳細については第2章で述べる。本研究で作製した高温超伝導シームレス閉ループについて、液体窒素温度において、超伝導磁束トランスに不可欠である閉ループ全体に渡る超伝導性を確認した。さらにはこのシームレス閉ループ内に複数のコイル部を実装することでマグネトメータやグラジオメータ構造の高温超伝導磁束トランスを作製し、液体窒素温度での定常磁場計測への応用を検討した。それらの特性について第3章および第4章で述べる。

参考文献

- 1) “Introduction to Nb-Based SQUID Sensors”, Dietmar Drung, IEEE/CSC & ESAS SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM(SNF) Issue No. 36, CR70 (April 2016).
- 2) “Superconducting quantum interference devices: State of the art and applications”, R. Kleiner, D. Koelle, F. Ludwig, and J. Clarke, Proceedings of the IEEE Vol. 92, No.10, pp. 1534 – 1548 (2004); DOI:10.1109/JPROC.2004.833655.
- 3) “Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system”, J. G. Bednorz and K. A. Müller, Zeitschrift für Physik B Condensed Matter volume 64, pages 189–193 (1986); doi:10.1007/BF01303701.
- 4) “Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride”, Elliot Snider, Nathan Dasenbrock-Gammon, Raymond McBride, Mathew Debessai, Hiranya Vindana, Kevin Vencatasamy, Keith V. Lawler, Ashkan Salamat and Ranga P. Dias, Nature 586, pp.373–377 (2020); doi: 10.1038/s41586-020-2801-z.
- 5) “Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure”, M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, Phys. Rev. Lett. 58, pp. 908-910; doi: /10.1103/PhysRevLett.58.908.

- 6) “A New High-Tc Oxide Superconductor without a Rare Earth Element”, H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano, Japanese Journal of Applied Physics, Volume 27, L209-210 (1988); doi: 10.1143/JJAP.27.L209.
- 7) “Superconductivity at 39 K in magnesium diboride”, J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu: Nature 410, 63-64(2001); doi: 10.1038/35065039.
- 8) “イットリウム系薄膜高温超伝導線材開発の現状と展望”, 和泉 輝郎, 柳 長門, プラズマ・核融合学会誌 93 巻 5 号, p.222-229 (2017).
- 9) “ビスマス系超伝導線材と応用開発の最前線”, 林 和彦, 日本金属学会誌 74 巻 7 号, p.394-403 (2010).
- 10) “高温超電導 MgB₂ 線材を使用した超電導磁石の納入”, 日立評論 2020 Vol.102, No.1.
<https://www.hitachihyoron.com/jp/archive/2020s/2020/01/12/index.html#sec03>.
- 11) 超伝導電磁気学 (大沼 俊朗, コロナ社(1995); ISBN 4-339-00635-1) , 第 3 章.
- 12) “Experimental evidence for quantized flux in superconducting cylinders”, B.S.Deaver and W.M.Fairbank, Phy. Rev. Lett. 7, No.2, pp. 43-46 (1961).
- 13) “Experimental proof of magnetic flux quantization in a superconducting ring”, R.Doll and M. Nabauer, Phy. Rev. Lett. 7, No.2, pp. 51-52 (1961).
- 14) “Theoretical considerations concerning quantized magnetic flux in superconducting cylinders”, N. Byers and C. N. Yang, Phy. Rev. Lett. 7, No.2, pp.46-49 (1961).
- 15) “Possible new effects in superconductive tunneling”, B. D. Josephson, Physics Letters vol. 1, No, 7, pp.251-253;
doi:10.1016/0031-9163(62)91369-0.

- 16) 超伝導電磁気学 (大沼 俊朗, コロナ社(1995); ISBN 4-339-00635-1) , 第 6 章.
- 17) “Highly Sensitive Uncooled Magnetometers: State of the Art. Superconducting Magnetic Hybrid Magnetometers, an alternative to SQUIDS?”, D.Robbies, C.Dolabdjian, S.Saez, Y. Monfort, G. Kaiser, and P. Ciureanu, IEEE Trans. on Appl. Supercond. Vol. 11, No. 1, pp. 629 - 634(2001); doi: 10.1109/77.919423.
- 18) “A high-sensitivity magneto resistive magnetometer”, N. Smith, F. Jeffers, and J. Freeman, J. Appl. Phys. 69(8), pp.5082-5084 (1991); doi:/10.1063/1.348130.
- 19) “センダストの圧延加工性および磁気特性に及ぼす合金組成の影響”, 渡辺貞夫, 中村 善吉, 花田 修治, 佐藤 敬, 和泉 修, 日本金属学会誌 第 47 巻, 第 4 号, pp. 353-358 (1983).
- 20) “超伝導空洞の磁気シールド”, 増澤 美佳, 高エネルギー加速器セミナーOHO'14, テキスト No. 11 (2014.9.9 – 9.12, 高エネルギー加速器研究機構); <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt4.html>.
- 21) “SQUID 磁束計による生体磁場計測”, 葛西 直子, 低温工学 26 巻 5 号, p. 344-353 (1991); doi: 10.2221/jcsj.26.344.
- 22) 磁気センサ理工学 –センサの原理から電子コンパス応用まで- (毛利 佳年雄, コロナ社(1998; ISBN:978-4-339-00882-1)), 第 2 章 2.8 節.
- 23) “Two methods of fabricating reliable superconducting joints with multifilamentary Nb-Ti superconducting wire”, S. Phillip, J. V. Porto, and J. M. Parpia, Journal of Low Temperature Physics. 101. 581-585; doi: 10.1007/BF00753357.
- 24) “Joining NbTi superconductors by ultrasonic welding”, J. Hafstrom, D. Killpatrick, R. Niemann, J. Purcell, and H. Thresh, IEEE Transactions on

Magnetics Volume: 13, Issue: 1, pp. 94 – 96 (1977);
doi: 10.1109/TMAG.1977.1059416.

- 25) “A novel Nb superconducting joint with ultralow resistance fabricated by electron beam welding method for superconducting gravimeter”, Z. Zhang, X. Huang, C. Cui, H. Wang, F. Niu, Y. Zhang, X. Kong, L. Han, L. Wang, X. Hu, and Q. Wan, *Superconductor Science and Technology* 35 (2022) 015008 (2022); doi:/10.1088/1361-6668/ac3742.
- 26) “Development of a Superconducting Joint for High Field NMR”, T. Fukuzaki, H. Maeda, S. Matsumoto, S. Nimori, S. Yokoyama, and T. Kiyoshi, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (Volume: 16, Issue: 2, June 2006) pp1547 – 1549; doi: 10.1109/TASC.2006.870842.
- 27) “Diffusion joint of YBCO coated conductors using stabilizing silver layers”, J.Y.Kato, N.Sakai, S.Tajima, S.Miyata, M.Konishi, Y.Yamada, N.Chikumoto, K.Nakao, T.Izumi, and Y.Shiohara, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Volumes 445–448, Pages 686-688 (2006); doi:/10.1016/j.physc.2006.05.005
- 28) “Low Temperature and Magnetic Field Performance of Spliced Commercial YBCO CC”, R. Tediosi, M. Alessandrini, C. Beneduce, S. Schneider and D. Eckert, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.22, Issue 3, pp.6600804 (2012); doi: 10.1109/TASC.2011.2178579.
- 29) “Development of a superconducting joint between a $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -coated conductor and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bulk: towards a superconducting joint between RE (Rare Earth) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -coated conductors”, Xinzhe Jin, Yoshinori Yanagisawa, Hideaki Maeda and Yoshiki Takano, *Superconductor Science and Technology*, Volume 28, Number 7, 075010 (2015); doi:10.1088/0953-2048/28/7/075010.
- 30) “Laser drilling: enhancing superconducting joint of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors”, Y. J. Park, M. W. Lee, Y. K. Oh, and H. G. Lee, *Superconductor Science and Technology* Vol. 27, 085008 (2014);

doi: 10.1088/0953-2048/27/8/085008.

- 31) “Fabrication, microstructure and persistent current measurement of an intermediate grown superconducting (iGS) joint between REBCO-coated conductors”, K Ohki, T Nagaishi, T Kato, D Yokoe, T Hirayama, Y Ikuhara, T Ueno, K Yamagishi, T Takao, R Piao, H Maeda, and Y Yanagisawa, *Superconductor Science and Technology*, Volume 30, Number 11, 115017 (2017); doi:/10.1088/1361-6668/aa8e65.
- 32) “High performance dc SQUID magnetometers with single layer YBa₂Cu₃O_{7-x} flux transformers”, D. Koelle, A. H. Miklich, E. Dantsker, F. Ludwig, D. T. Nemeth, and John Clarke, *Appl. Phys. Lett.* 63, 3630 (1993); doi:/10.1063/1.110071.
- 33) “High-Tc superconducting gradiometer with a long baseline asymmetric flux Transformer”, E. Dantsker, O. M. Froehlich, S. Tanaka, K. Kouznetsov, John Clarke, Z. Lu, V. Matijasevic, and K. Char, *Applied Physics Letters* 71(12):1712-1714(1997); doi: 10.1063/1.120012.
- 34) “Highly Balanced Long-Baseline Axial Gradiometer Based on High-Tc Superconducting Tape”, Marcel Bick, Keith E. Leslie, Rex Binks, David L. Tilbrook, Simon K. H. Lam, S. Gnanarajan, Jia Du, and Cathy P. Foley, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Volume 15, Issue 2, pp.765-768 (2005); doi: 10.1109/TASC.2005.850048.
- 35) “Operation of rf SQUID magnetometers with a multi-turn flux transformer integrated with a superconducting labyrinth resonator”, Y. Zhang, H.R. Yi, J. Schubert, W. Zander, H.-J. Krause, H. Bousack, and A.I. Braginski, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Volume 9, Issue 2, pp. 3396 – 3400 (1999); doi: 10.1109/77.783758.
- 36) 特許第 6083725 号 高温超伝導体平テープ線材を用いた環状線構造体 (2017); 特願 2012-038780.

第2章

高温超伝導線材を用いたシームレス閉ループの構築と定常磁場に対する応答

本章では、本研究で提案するシームレス閉ループ構造の作製手法と、作製した高温超伝導シームレス閉ループの定常磁場に対する応答について述べる。

2. 1 序言

第1章で示した通り、定常磁場に対する磁場伝達特性を有する超伝導磁束トランスにおいては、電流経路全体にわたり超伝導状態にある閉回路が不可欠である。一方で、高温超伝導体接合は開発途上にあり、液体窒素温度領域で動作する超伝導接合を金属超伝導線材に並ぶ簡便さで作製する手法はまだ確立されていない。

そこで本研究では、2. 2節に示す「切り紙」手法を用いて高温超伝導閉ループを作製した。この方法により平テープ形状の線材から作製した高温超伝導閉ループは、接合部を持たない超伝導閉回路を成す。そのため接合処理によって線材の超伝導特性の劣化が生じる恐れがなく、液体窒素温度領域において閉ループ全体の超伝導特性を維持できると考えられる。

高温超伝導磁束トランスの作製にあたり、最初に基材とする高温超伝導材料を選択する必要がある。基材の選択にあたり、本研究では以下の3つの項目を検討した。

- ・実用的な長さの線材が入手可能な材料であること。本研究で用いる試料の作製に対しては、数十 cm 程度の長さを持ち、最低 5mm 程度の幅を持つ単芯平テープ形状の高温超伝導線材が必要である。
- ・本研究では液体窒素温度領域での応用を想定することから、液体窒素温度よりも高温の T_c を有する材料であること。これに該当する市販材料は、RE-123 系及び Bi-2223 系高温超伝導材料である。MgB₂ 線材など、冷凍機により達成可能な 20K 付近の温度域における線材間の超伝導接続の達成が報告されている材料はあるが¹⁾、本研究では検討から除く。
- ・液体窒素温度領域における超伝導特性が良好なこと。具体的には磁場印加中に超伝導線材に生じるフラックススクリープへの耐性が必要であり、Bi 系超伝導材料は液体窒素温度領域でのフラックススクリープ耐性が強くないとされる²⁾。

こうした点を考慮し、本研究では高温超伝導磁束トランスの材料として RE-123 系高

高温超伝導体テープ線材を選択した。RE-123 系超伝導材料は、良好な特性を持つ長尺テープ線材が数社から市販されている。本研究ではこれらの市販線材を用いて、「切り紙」手法によりシームレスの高温超伝導閉ループを作製した。

さらに、超伝導磁束トランス機能の発現に不可欠である、定常磁場の印加により超伝導閉回路上に誘起される超伝導シールド電流を確認するために、高温超伝導閉ループに生じる磁場シールド機能を確認した。

2. 2 試料作製および実験方法

2. 2. 1 「切り紙」手法による高温超伝導シームレス閉ループの作製

高温超伝導シームレス閉ループの作製では、市販されている SuperPower Inc.製 2G-HTS Wire (RE-123 系) テープ材 (12mm 幅) を用いて、図 2. 1 に示す加工を行った。このテープ線材は 50 μm 厚の Hastelloy C-276 をベース材とし、超伝導層 (1 μm) の上に保護層として銀 (2 μm)、さらに銅 (20 μm) のコーティングがなされている薄膜単芯線材である。この線材に対し、図 2. 1 に示すように保護層の表面から金属ベース材までを貫通するスリットを、0.1mm 厚のダイヤモンドホイールを用いた切削加工により作製した。また保護層及び超伝導層のみを除去し金属ベース材は貫通しないスリットをマスキングおよび化学エッチングを用いて作製した。エッチング時に下層の同時浸食を避けるため、銅、銀、および超伝導層はそれぞれ 5%塩酸+35%過酸化水素水の混合溶液、1%アンモニア水+35%過酸化水素水の混合溶液、1%塩酸を用いて溶解除去した。この加工材を、貫通スリット部をテープ面に鉛直方向において逆向き方向に広げ、外径 100mm のガラスエポキシ製円筒にはめ込むことで、内径 100mm の円環に近い形状の閉ループ構造を構築することができる。(本研究では、この手法を「切り紙」手法と呼ぶ。)

「切り紙」手法で立体的に作製した構造では、溶接その他の方法による線材の接合部が存在しない。このため、液体窒素温度領域において閉ループ全体で超伝導特性が維持される。また、本手法の特長として、貫通スリット長さを L とすると直径がおおよそ $2L/\pi$ の円環形状に近い閉ループを作製できるので、現在市販されている RE-123 超伝導線材の長さを考慮すると、直径数 m 以上の広口径でも高温超伝導シームレス閉ループを作製することができる。さらに、図 2. 2 に示すように複数の貫通スリットを設け交番方向に曲げ加工を施すことで、マルチターン形状のコイルを作製することができる。

貫通スリットを有する平テープ形状の高温超伝導線材を湾曲させて閉ループ構造を作製する手法は、永久電流モードで動作するマグネットの試作として Lee らによって先駆的に報告された³⁾。これらの高温超伝導シームレス閉ループの電磁気的特性については、磁場中冷却によるループ内への捕捉磁束⁴⁾と緩和測定⁵⁾などが報告されている。また電力変換トランスなどへの応用⁶⁾などが報告されているが、これまでの研究における高温超伝導シームレス閉ループは大電力応用が志向されてきた。

これに対して、本研究では、この加工技術を高温超伝導磁束トランスの作製に適用することを試みた。第1章で述べたとおり、超伝導磁束トランスは原理的に印加磁場に対するしきい値を有しないために精密な磁気計測に有用な素子である。液体窒素温度領域動作する高温超伝導磁束トランスを実現することで、屋外における磁気探査技術などへ応用が広がることが期待できる。これまで上記のような電力応用の報告例はあるが、この手法³⁾により作製したシームレス閉ループを高温超伝導磁束トランスに応用した研究例はこれまでにない。

超伝導磁束トランス応用においては、大電力応用と以下の点が異なる。

- ・ 閉ループ上に誘起される超伝導電流がそれほど小さくなくて良いため、線材幅を細く加工できる。
- ・ 超伝導磁束トランスは閉ループ内に複数のコイル部が必要であり、加工において各コイル間のシームレスな連続性を考慮した設計が必要になる。
- ・ 資源探査応用などを視野にしたメートル級の口径を持つコイルの作製、インダクタンス設計の自由度を向上させるためのマルチターンコイル設計が重要である。

このためには、加工手法を工夫する必要がある。本研究では上述の先行研究 3)-6) で用いられた加工法について、以下の点で拡張を図っている。

- ・ 複数のコイル部を適切に配置した超伝導閉ループの作製のための、線材上のスリット位置および折り返し位置の設計。
- ・ 図2. 2に示す複数スリットの設置と曲げ加工によるマルチターンコイルの作製方法。

これにより、例えば、文献4)に示される方法では不可能であった偶数ターンのコイルも作製することができる。

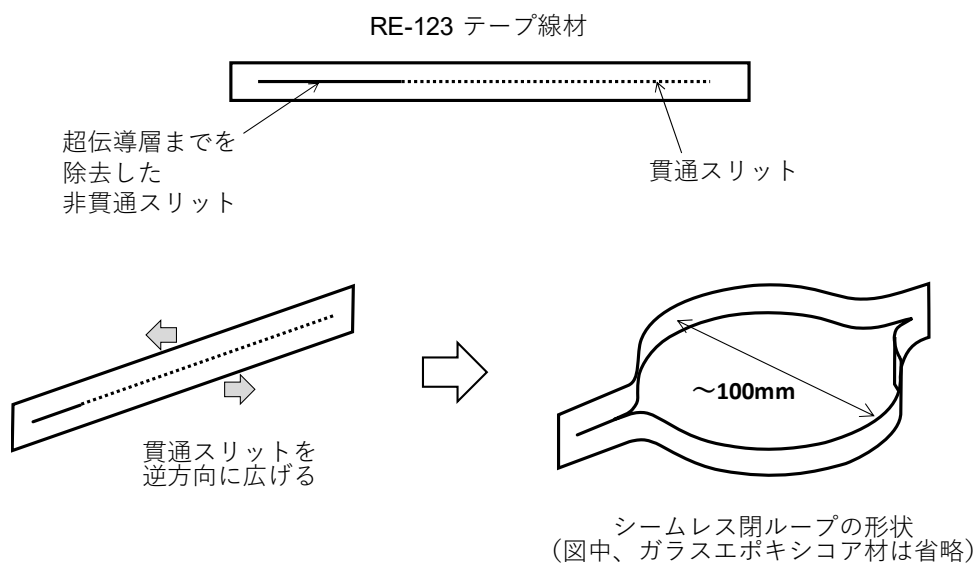


図2. 1 「切り紙」手法によるシームレス高温超伝導閉ループの作製

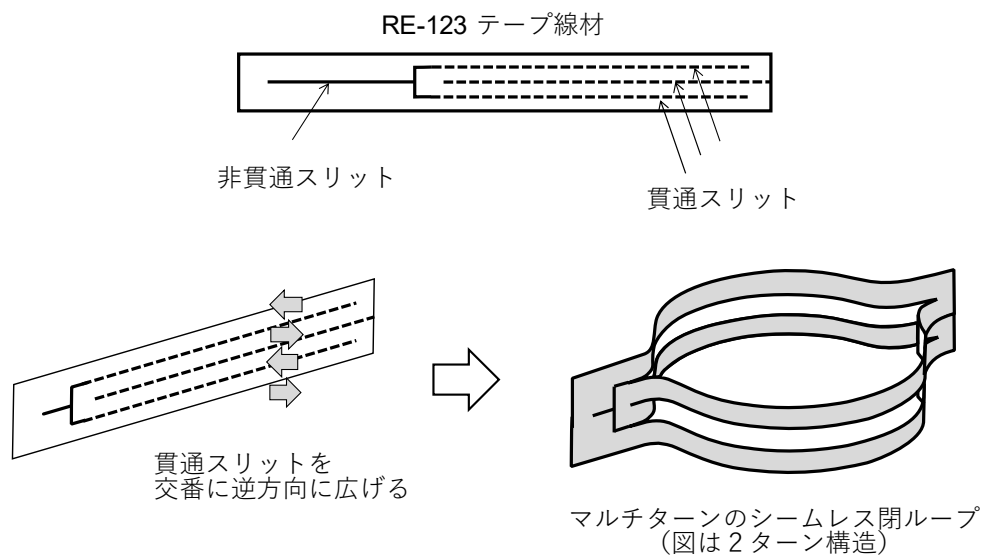


図2. 2 複数スリットを使ったマルチターンシームレス閉ループの作製

2. 2. 2 高温超伝導シームレス閉ループの磁気特性評価

高温超伝導閉ループを超伝導磁束トランスへ応用するためには定常磁場印加により閉ループ上に超伝導シールド電流が誘起されることを確認する必要がある。これは下記の2つの実験で確認することができる。

- ・磁場遮蔽の確認:ゼロ磁場で超伝導転移させた後に磁場を印加し、その後に閉ループに対して局所的な加熱を行う。
- ・磁場捕捉の確認:有限磁場で超伝導転移させた後に磁場を除去し、その後に閉ループに対して局所的な加熱を行う。

そこで、作製した高温超伝導閉ループの定常磁場に対する応答を確認するため、磁気シールドルーム内に図2. 3に示す測定系を構築した。線径 0.5mm のポリウレタン被覆銅線を片側 250 ターン巻いた直径 308mm のヘルムホルツコイル中に、図2. 1に示した高温超伝導閉ループを設置する。高温超伝導閉ループは、閉ループの中心軸がヘルムホルツコイルの中心軸と一致するように配置し、閉ループの中心直上に磁気センサを配置する。液体窒素を用いて高温超伝導閉ループ全体をゼロ磁場冷却した後、ヘルムホルツコイルにより高温超伝導閉ループに定常磁場を印加する。ヘルムホルツコイルの発生磁場については、コイル電流による中心磁場の変化及び磁場分布をあらかじめ磁気センサにより測定しておく。この測定系において、閉ループ中心軸上に配置した磁気センサの測定値とヘルムホルツコイルの発生磁場の差から、印加した定常磁場に対する高温超伝導閉ループのシールド機能の発現を調べた。

また、高温超伝導閉ループの冷却時に、液体窒素冷却槽内にある閉ループの線周の一部の 5cm ほどの部分を発泡ポリスチレン材で覆い液体窒素から断熱することで、断熱部分にある線材を局所的に常伝導状態に転移させることができる。この作業により、部分的に超伝導性を消失させ、閉回路を周回する超伝導電流を止めることができる。この局所加熱による部分的な超伝導性の消失、また加熱部の再冷却による超伝導性の回復を磁場印加中に行うことで、高温超伝導閉ループに対して磁場中冷却を施すことができる。この時の閉ループ上部の磁場とヘルムホルツコイルの発生磁場の差を測定することで、閉ループを周回する超伝導シールド電流の誘起と消失を調べた。

本実験において、磁気センサには MI センサを用いた。MI 効果は表面応力を付与した細ワイヤ形状の FeCoSiB アモルファス磁性材において見出された、表面抵抗を含むワイヤのインピーダンスが磁場に対し鋭敏に変化する現象⁷⁾である。MI センサはこの原理を用いて、ワイヤの高周波パルス通電による磁化と、磁場による磁化の揺動を

利用して高感度に磁場計測を行うことができる⁸⁾。定常磁場を計測するセンサとして、MIセンサは取り扱いが簡便であり、SQUID には及ばないもののフラックスゲートやホールセンサに比べて磁場感度が高い。一方で、細いアモルファスワイヤを芯としたコイルであるセンサ自体は非常に小さくできるものの、高周波動作する駆動回路をセンサ近傍に置く必要があり、動作には半導体回路が駆動できる温度環境が必要になる。本実験では MI センサとして、“ナノテスラセンサ”としてアイチ・マイクロ・インテリジェント株式会社から販売されている評価キット MGM-1DS を用いた。この評価キットは常温付近で動作するように設計されている。そのため図2. 3の装置ではセンサヘッドは液体窒素中にある高温超伝導閉ループの中心ではなく、閉ループの中心軸上の離れた位置に置かれている。またこのセンサユニットでは、MI センサ本体はセンサヘッドの外装の端部から 5mm 内側に設置されている。図2. 3の配置では、MI センサ本体がヘルムホルツコイル中心に合わせた高温超伝導閉ループの高さ中心から 38mm の距離に設置されている。

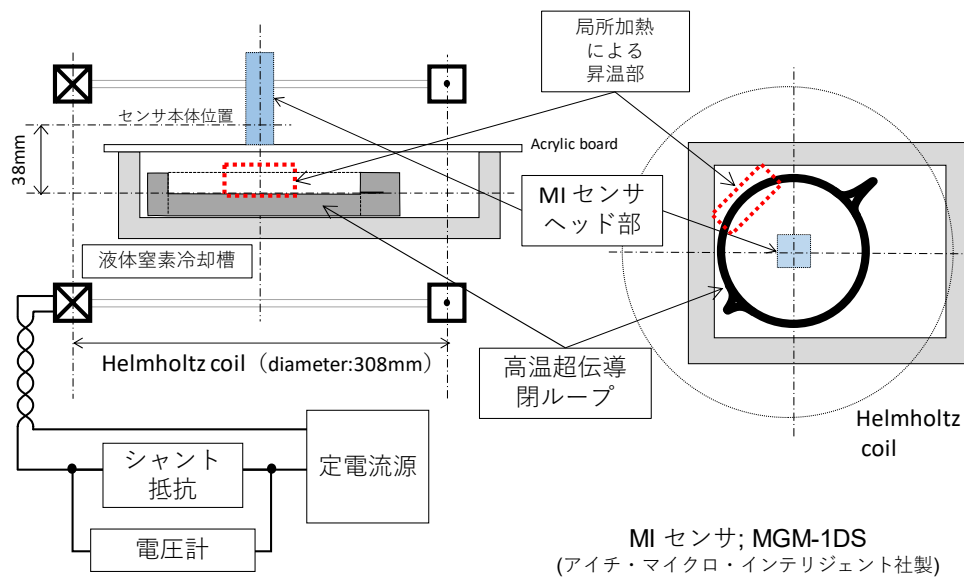


図2. 3 シームレス高温超伝導閉ループの
定常磁場に対する応答の評価装置

2. 3 実験結果

図2. 1の方法により作製した、内径 100mm、シングルターンの高温超伝導閉ループを液体窒素温度(77K)でゼロ磁場冷却した後、ヘルムホルツコイルにより定常磁場を印加して閉ループ直上の磁場を測定した。また任意の印加磁場において、高温超伝導閉ループの局所加熱及び再冷却により磁場中冷却行った場合の、閉ループ直上の磁場変化を測定した。

図2. 4はゼロ磁場冷却を行った高温超伝導閉ループに磁場を印加したときの閉ループ直上の磁場と、磁場印加中に閉ループの一部を加熱した場合の閉ループ直上の磁場の変化である。ゼロ磁場状態で冷却した高温超伝導閉ループをヘルムホルツコイル内に置き、一様な定常磁場を印加すると、印加磁場に対して高温超伝導閉ループ直上の磁場は減少し、この減少量は印加磁場の強さに対して直線的に変化した。またゼロ磁場冷却後に、任意の磁場印加下において閉ループの一部を加熱して超伝導性を消失させると、閉ループ直上の磁場は印加磁場に等しくなった。

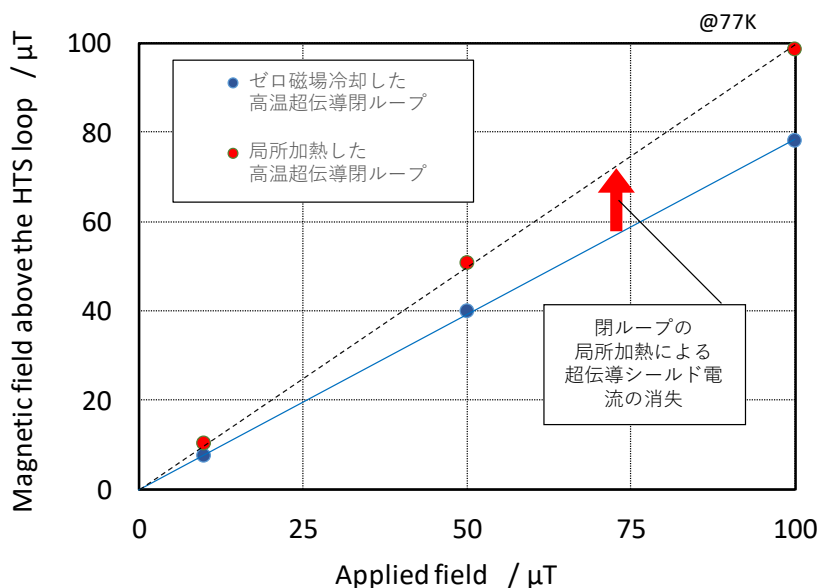


図2. 4 ゼロ磁場冷却した高温超伝導閉ループ、および局所加熱した高温超伝導閉ループに、磁場を印加した時の閉ループ直上部の磁場

図中の点線は閉ループ直上の磁場と印加磁場が等しい点を示す。ゼロ磁場冷却した高温超伝導閉ループには磁気シールド効果が認められる。閉ループの局所加熱によりシールド効果が消失し閉ループ直上の磁場は印加磁場と等しくなる。

図2. 5は閉ループの一部を断熱し超伝導性を消失させた状態で磁場を印加した後、閉ループ全体を超伝導状態に戻した磁場中冷却時の閉ループ直上の磁場と、磁場中冷却での超伝導転移後に閉ループへの印加磁場をゼロにした場合の閉ループ直上で測定した超伝導閉ループ上の残留磁場である。印加磁場を除いた状態でも超伝導閉ループ上には残留磁場が観測され、その強度は磁場中冷却時に印加した磁場の強度に比例した。この磁場中冷却による閉ループの残留磁場の経時変化を調べたところ、印加磁場 $100\ \mu\text{T}$ の場合に 6 時間経過後も測定誤差の範囲で変化は見られなかった。

さらにこの残留磁場に対して、再度、閉ループの局所加熱を行い、局所的な常伝導転移を生じた場合の閉ループ直上の残留磁場の変化を図2. 6に示す。閉ループの全周長に比べてごく一部の領域を常伝導状態にすることで、磁場中冷却により閉ループに残留した磁場は消失した。

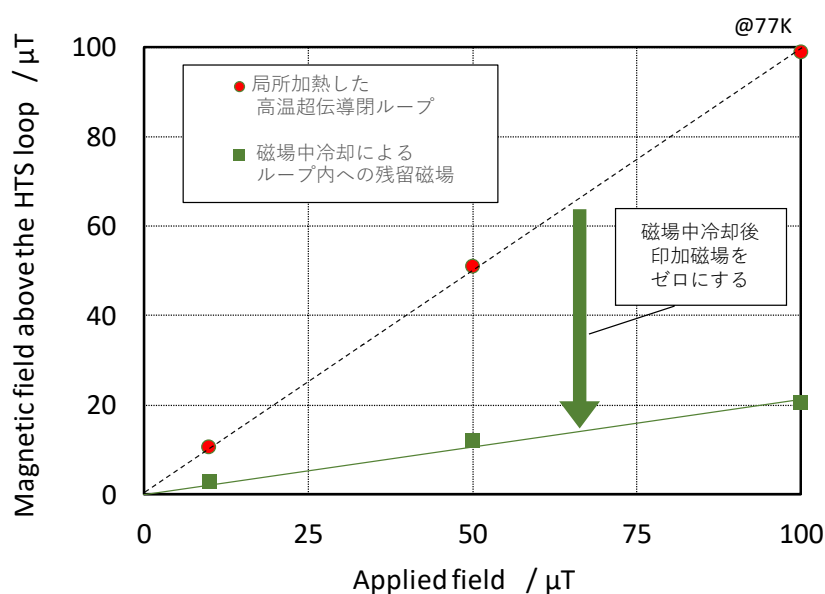


図2. 5 磁場中冷却した高温超伝導閉ループに捕捉された残留磁場

磁場中冷却での超伝導転移によって高温超伝導閉ループに捕捉された磁場は、印加磁場の除去後も閉ループ上に残留する。またこの時間閉ループ上には残留磁場によって超伝導電流が誘起されている。

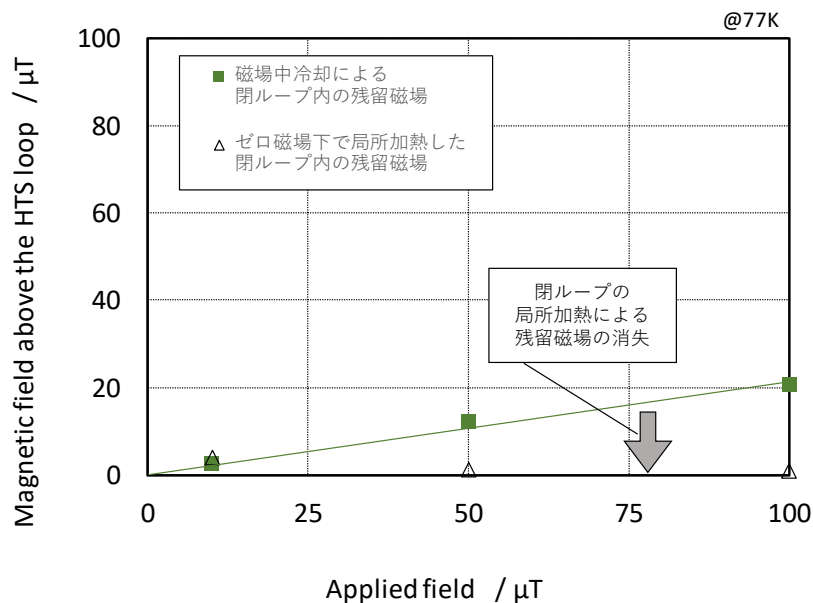


図2. 6 磁場中冷却で高温超伝導閉ループに残留した磁場と
閉ループの局所加熱による残留磁場の変化

磁場中冷却により高温超伝導閉ループに捕捉された磁場は、
閉ループのごく一部の加熱により消失する。

2. 4 考察

高温超伝導閉ループに超伝導シールド電流が生じる場合、閉ループ近傍の磁場は超伝導シールド電流が作る磁場の分だけ印加磁場よりも小さくなる。また、高温超伝導閉ループを磁場中冷却し、その後に印加磁場を除去した場合には、超伝導転移した時点で閉ループの内側にある磁束を保存するように超伝導シールド電流が誘起されるため、印加磁場をゼロにした場合にも閉ループ近傍に磁場が残存する。

1. 2. 1項に示したこの原理に基づき、図2. 4の結果は次のように説明することができる。閉ループのごく一部分を加熱し常伝導状態に転移させた場合、閉ループは超伝導閉回路にはならない。そのため定常磁場印加に対して超伝導シールド電流は誘起されない。また、すでに閉ループを周回する超伝導電流がある場合には、この電流は消失する。従って、閉ループに局所的な加熱を行っ

た場合には、超伝導電流による印加磁場のシールド効果は生じない。そのため、定常磁場を印加した場合の閉ループ周辺の磁場は、閉ループを設置しないときと等しくなる。

さらに図2. 5に示すように、磁場印加下で局所加熱された閉ループを再冷却して超伝導状態に戻し、ついで印加磁場をゼロにすると閉ループ内に磁場の残留が観測されるが、再度閉ループの一部を加熱するとこの残留磁場は消失する。1. 2. 1項に示した議論から、磁場印加によって超伝導閉ループ近傍にベクトルポテンシャルが生じており、このため閉ループ全体が超伝導転移した時点で閉ループ内側に存在した磁束を保存するように、超伝導電流が閉ループ上に誘起される。閉ループに捕捉された磁場が閉ループの局所的な再加熱によって消失することは、超伝導閉回路が壊されることで閉ループを周回する超伝導電流が消失するためと考えられる。このように、図2. 4、図2. 5および図2. 6に示す閉ループの局所加熱により生じた磁場変化は、超伝導閉回路となった閉ループ上に誘起される超伝導電流によって説明ができる。

一方、高温超伝導線材で作製したループの近傍の磁場を変化させる原因として、超伝導体上に磁束を捕捉する磁束ピンニング効果による影響の可能性がある。しかし以下の理由から、この閉ループの局所加熱で観測された磁場変化は、磁束ピンニング効果では合理的な説明ができない。本実験において加熱により超伝導状態が消失した部分は最長で 5cm 程度であり、全円周長(形状が完全円ではないため、加工前のスリット長 173mm として周長を 346mm と考える)の 14%程度である。本実験における高温超伝導閉ループへの磁場の残留が線材の磁束ピンニングによるものであれば、閉ループにこの局所的な加熱を加えた場合にも、ループ全周長の 85%以上は磁束をピンニングしたままで超伝導性を保つと考えられる。これに対し、図2. 6に示す測定結果においては、閉ループ直上で見られる残留磁場はほぼゼロに減少した。このことから、閉ループへの磁場の残留は閉ループを周回する超伝導シールド電流によるものであり、磁束ピンニング効果により高温超伝導線材上にトラップされた磁束による寄与はほとんどないと考えられる。

以上の結果から、本実験で作製した高温超伝導閉ループについて、液体窒素温度(77K)における定常磁場の印加により超伝導シールド電流が誘起されており、閉ループ全体に渡る超伝導性の維持が確認できたと考えられる。また定常磁場印加における超伝導電流の変動は確認できないレベルであったことから、超伝導磁束トランスの機能を実現するために十分な特性を有すると言える。

高温超伝導閉ループ直上で測定された磁場の印加磁場に対する減少は、誘起された超伝導シールド電流によって印加磁場を相殺する方向に生じた磁場の影響であると考えられる。この磁場減少の大きさは閉ループへの印加磁場に比例して増大する。これは閉ループ上の超伝導シールド電流の大きさが印加磁場に比例することを示して

いる。超伝導磁束トランスにおいて磁場の伝達は超伝導電流を介して行われるため、閉ループの導線の臨界電流 I_c が小さく超伝導シールド電流の最大電流量に制限が生じる場合には、超伝導磁束トランスのダイナミックレンジなどに大きな問題が生じる。本構造では超伝導特性が低下する可能性を持つ接合部は存在しない。一方で切削加工した 2G-HTS テープ線材を、線材表面に鉛直な方向に曲げることで疑似的に円筒型のループ形状を得ている。そのため加工に伴う超伝導特性の劣化について議論する必要がある。線材を供給する SuperPower Inc. のカタログ⁹⁾ では、11mm の曲げ直径において、77K における自己磁場の臨界電流 I_c として、初期状態の 95% を保証している。またこの HTS テープ線材の適用にあたり、実際に使用する線材を曲げ、77K における I_c の変化を調べたところ、曲率半径 12.5mm まで曲げても I_c の減少は見られなかった。そのため、本研究の試料形状において線材の I_c に劣化は生じず、HTS テープ線材の高温超伝導閉ループへの適用について実用上の問題は無いものと考えられる。今回、「切り紙」手法で作製した高温超伝導シームレス閉ループについて、測定した 100 μ T までの磁場印加範囲で、超伝導状態の閉ループの近傍に生じた磁場の変化量は印加磁場に比例しており飽和が見られない。このことから、閉ループの超伝導線の I_c は誘起された超伝導シールド電流に対して十分に高いと考えられる。磁場印加における超伝導閉ループ上の超伝導電流の見積もりについては、第3章で検討する。

また、本手法によるシームレス閉ループ構造では、図2. 2に示した通り、HTS テープ線材上に複数のスリットを設け、その上下を互いに逆方向に広げることでマルチターンコイル形状を作製することができる。本研究で用いた平テープ形状の薄膜線材はベース材であるハステロイト、超伝導層の間にある配向化した界面バッファ層の間で機械的強度が大きく異なり、線材にツイスト加工などを伴う³⁾ 場合には、ねじりのピッチを細かくできない、線材のベース材と上層の間に複合的な応力が働き、剥離その他による破壊が生じやすいなどの問題がある。本手法によるマルチターンのシームレス閉ループ構造においては、HTS テープ線材には表面に鉛直な方向への単純曲げによる張力あるいは圧縮応力のみが加わるので、捻りなどの加工を加える作製手法に比べて線材の耐力が高いと考えられる。

2. 5 本章のまとめ

市販の RE-123 2G-HTS 単芯テープ線材を用い、狭幅スリット加工と曲げ加工により、接合部がない高温超伝導閉ループを作製した。本研究で作製した高温超伝導シームレス閉ループでは、77K において外部定常磁場の印加により超伝導シールド電流が誘起されており、閉ループ全体が超伝導状態に維持されていると考えられる。

100 μ T までの磁場印加においては、閉ループ内の超伝導シールド電流は印加磁場に比例して変化した。このことから、超伝導シールド電流による磁束伝達を行う超伝導磁束トランスにおいても、本構造の高温超伝導シームレス閉ループは有効に機能するものと考えられる。

参考文献

- 1) “MgB₂ Superconducting Joint Technique Based on Mg Diffusion Method”, Wenhao Luo , Zigeng Huang , Xinwei Cai , Xifeng Pan, Kehuan Linghu , Qianhong Wu, Ruijuan Nie, Qingrong Feng, Furen Wang, and Zizhao Gan, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL. 29, NO. 5, 6200805 (2019); doi: 10.1109/TASC.2019.2905419.
- 2) “High-T_c superconducting materials for electric power applications”, David Larbalestier, Alex Gurevich, D. Matthew Feldmann & Anatoly Polyanski, Nature 414(6861): 368-77(2001); doi: 10.1038/35104654.
- 3) “Design and fabrication of permanent mode magnet by using coated conductor”, Hee-Gyoun Lee, Jae-Geun Kim, Sun-Wang Lee, Woo-Seok Kim, Seung-Wook Lee, Kyeong-Dal Choi, Gye-Won Hong, Tae-Kuk Ko, Physica C: Superconductivity and its Applications, Vol. 445–448, pp. 1099-1102 (2006); doi: 10.1016/j.physc.2006.05.044.
- 4) “Magnetization of the joint-free high temperature superconductor (RE)Ba₂Cu₃O_x coil by field cooling”, Yali Zheng, Yawei Wang, Jianwei Li, and Zhijian Jin, AIP Advances 7, 095218 (2017); doi: /10.1063/1.4998230.
- 5) “Investigation of the Relaxation of Persistent Current in Superconducting Closed Loops Made Out of YBCO Coated Conductors”, Charles C. Rong, Paul N. Barnes, George A. Levin, Jason D. Miller, Daniel J. Santosusso, and Brian K. Fitzpatrick, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL. 25, NO. 3, 8200805 (2015); doi: 10.1109/TASC.2014.2376173.
- 6) “Novel Self-Limiting Transformer With Active Magnetic Short Circuit Using

Perfect YBCO Wire Loops”, Janos Kosa, Istvan Vajda, and Lorant Kovacs, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Vol.21, No. 3, pp.1417-1421 (2011); doi:10.1109/TASC.2010.2100071.

- 7) “Magneto-impedance effect in amorphous wires”, L. V. Panina and K. Mohri, Appl. Phys. Lett. 65, 1189-1191 (1994); doi: 10.1063/1.112104.
- 8) 磁気センサ理工学 –センサの原理から電子コンパス応用まで- (毛利佳年雄, コロナ社(1998; ISBN:978-4-339-00882-1)), 第 4 章.
- 9) SuperPower Inc. 2G-HTS テープ線材カタログ :
<https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>.

第3章

高温超伝導磁束トランスの作製および磁場伝達特性の評価

本章では、市販の高温超伝導体線材を用いて第1章で述べた超伝導磁束トランスを作製し、素子に内包されている2つのコイル部の間の磁場伝達機能について調べた結果について述べる。本研究で用いる高温超伝導磁束トランスは、第2章で示した「切り紙」手法により作製したシームレス閉ループと、同様に作製したシームレス閉ループまたは化学エッチングにより作製した平面型閉ループの、2つのコイル部を1つの閉回路に内包することで作製される。作製した高温超伝導磁束トランスを液体窒素で冷却し、Pickup コイル部に一様分布した定常磁場を印加し、Input コイル部に発生する磁場をコイルに結合した磁気センサで測定して Pickup コイルと Input コイル間の磁場伝達機能およびその効率を調べた。

3.1 序言

電磁誘導を利用して導電性を持つ土壌や金属躯体を調査する磁気計測技術において深部の情報を得るためには、表面に誘導される渦電流による遮蔽効果のために低周波の磁気信号を計測することが重要になる。そこで、例えば地中深部の資源探査や構造体の深部に対する非破壊渦流探傷では低周波磁場に対する感度が優れる MI センサや MR センサ、SQUID などの適用が検討されているが^{1), 2)}、これらのセンサ素子は大型化による広範囲の磁気信号捕集が難しい。広い範囲の磁気信号を捕集するために多数のセンサを配置し広範囲の信号を得る方法も考え得るが、各個センサについて信号バランス調整が必要であったり、センサ間の干渉が起きたりする問題が考えられる。そこで広範囲の磁束を効率的に捕集し磁気センサに伝達するフラックスガイドの適用、中でも磁束トランスを用いた磁気検出技術の研究が進められており、変動磁気信号に対する磁束伝達デバイスとして金属誘導コイルによる電磁誘導に基づく磁束トランスが多く用いられている。しかし電磁誘導による磁束伝達は低周波の磁気信号印加に対して伝達信号が非常に小さくなり、特に静的な磁気信号に対しては感度を持たない。深部探査などの低周波磁気計測を目的として、電気抵抗低減のために液体窒素温度に冷却した低損失共振銅コイルを常伝導磁束トランスとして用い、SQUID マグネトメータに適用するなどの試みがなされているが³⁾、電磁誘導を原理とする以上、印加する磁気信号が低周波になるほど伝達される信号強度は低下する。

一方、電磁誘導に基づく常伝導磁束トランスに対して、超伝導磁束トランスは定常

磁場や極低周波の磁場に対する高い磁束伝達能力を有する。資源探査、構造物の深部非破壊検査、超長波通信などの技術においては、極低周波の磁場の使用が有利であり、超伝導磁束トランスの適用は有効と考えられる。金属系材料による超伝導磁束トランスは動作に液体ヘリウム冷却など大掛かりな冷凍装置が必要であるが、液体窒素や小型冷凍機による冷却が可能で可搬性が高い高温超伝導磁束トランスは屋外運用が望まれるような磁気計測技術でも利用しやすい。

本研究で作製する高温超伝導磁束トランスにおいては、形状の特長として、数十 cm～数 m の開口径を持つ、マルチターン構造の超伝導コイル構築が可能である。磁場の検知コイルとして大口径の Pickup コイルをもつ磁束トランスの適用は、磁気信号の検出における空間分解能については低下するが、一方で微弱磁気信号に対する検知感度の向上が期待できる。またマルチターンコイル構造は、高温超伝導磁束トランスへの適用において次の三点で利点がある。第一に同じ磁束に対して誘起される電流を小さくすることができるので、線材の電流許容値に対して余裕が大きくなり磁束トランスのダイナミックレンジを引き上げられる。第二に素子の設計においてコイル部の自己インダクタンスの設計値の幅を広げることができる。第三に第4章で述べるグラジオメータ構造の作製を可能にする。

図1. 2に示したように、超伝導磁束トランスの基本構造は Pickup コイルと Input コイルの2つのコイル部が内包された超伝導閉回路である。超伝導磁束トランスの Pickup コイルに印加された磁場は、超伝導シールド電流の誘起と伝送を介して Input コイル上に伝達磁場を生成する。本研究で作製した高温超伝導磁束トランスでは、Pickup コイルについては「切り紙」手法により作製した。Input コイルについては、HTS テープ線材の幅よりも大きな径のコイルは「切り紙」手法で作製し、線材の幅よりも小径のコイルはエッチングにより作製した。コイル間の磁場伝達は磁場と電流の変換を通して行われるため、磁場伝達の効率はコイルの磁場－電流の変換係数、すなわちインダクタンスに強く影響されると考えられる。高効率の磁場伝達特性を示す高温超伝導磁束トランスを作製するためには、これらの設計指針が必要である。そこで各コイルの口径、またコイル間の口径比を変化させ、各コイルのインダクタンスとその比を変化させて高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達効率の変化を調べた。

3. 1. 1 超伝導磁束トランスにおける磁場伝達の効率

超伝導磁束トランスの Pickup コイルに磁場 B_{ex} を印加した場合に、Input コイルに結合した磁気センサへ伝達される磁場 B_s は、次の式で表される。

$$B_s = N_i \cdot k I_s = k N_i \cdot \frac{\Phi_{ex}}{L_p + L_i} = \frac{k N_i N_p A_p B_{ex}}{L_p + L_i} \quad (3.1)$$

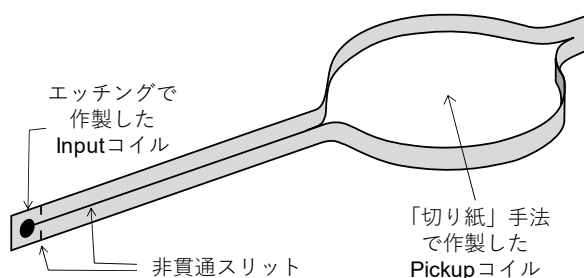
L_p 、 L_i は Pickup コイルおよび Input コイルの自己インダクタンス、 Φ_{ex} は磁場印加により超伝導閉回路を貫く全磁束、 N_p 、 N_i は Pickup コイルおよび Input コイルのターン数、 A_p は Pickup コイルの断面積、 I_s は閉回路を流れる超伝導電流である。Input コイルに引き出された I_s がコイル上に形成する磁場は磁気センサによって B_s として測定される。 k は B_s と Input コイルに流れる電流 I_s との結合定数である。(3.1)式は文献 4)で示されている計算式⁴⁾において、マルチターン化した Input コイルの鎖交磁束を考慮した項目を追加したものである。ここで超伝導磁束トランスの磁場伝達効率⁵⁾は印加磁場に対する伝達磁場の比 B_s/B_{ex} で与えられる。

超伝導磁束トランスでコイル間に伝達される本質は磁束であり、そのため Input コイルに伝達される磁束は Pickup コイルに印加された磁束を超えることはない。しかしこれを磁場伝達として用いる場合には、Pickup コイル上の磁場よりも高い磁場を Input コイル上に作ることは可能であり、このことはフラックスコンデンサとしての応用上で重要である。磁束伝達において、同じインダクタンスを持ちながら面積がより小さく、またターン数が多い Input コイルの適用は、同じ磁束に対して磁束密度の点で優位であり、そのため超伝導磁束トランスの伝達磁場を最大化するには、Input コイルと Pickup コイルのインダクタンスを整合させた上で Input コイルの面積を小さくする設計が望ましい。また Input コイルと磁気センサの結合においては、小さな Input コイルは SQUID など小型の磁気センサとの磁気結合を強くするので、金属系超伝導材料を用いた磁束トランスでは、磁気センサとの磁気結合を高めるために Input コイルの面積を小さくし、伝達される磁束が減少しても磁束密度を引き上げる設計が行われている。一例では、金属超伝導磁束トランスを用いた SQUID システムにおいては Pickup coil から SQUID センサに伝達される磁場は磁束密度で 8 倍に濃縮される⁵⁾。Input コイルと磁気センサの結合は相互インダクタンスに依存するが、これは $\sqrt{L_i}$ に関係するため、超伝導磁束トランスの伝達効率は、 $\sqrt{L_i}/(L_p + L_i)$ に従う。この最大値は $L_p = L_i$ において得られるが、 $L_p < L_i$ の領域での伝達効率の低下は緩やかであり、そのため、マルチターン化などで L_i を大きくした設計が超伝導磁束トランスにおいてなされている⁶⁾。

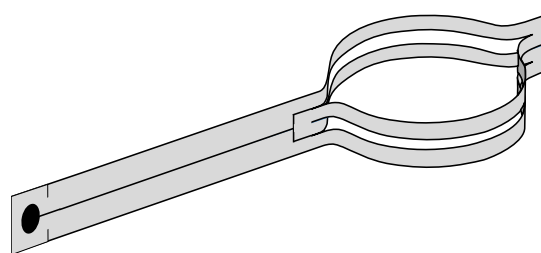
3. 2 試料作製および実験方法

3. 2. 1 高温超伝導磁束トランスの作製

実験では直交型と並行型の2種類の形状の高温超伝導磁束トランスを作製した。図3. 1 a)に示す形状は直交型の高温超伝導磁束トランスである。この形状ではエッチングにより作製した直径 5mm の Input コイルと第2章で示した「切り紙」手法により作製した直径 100mm の Pickup コイルを素子に内包する。この形状の特徴として、Pickup コイルと Input コイルの口径比が大きい点、Pickup コイルと Input コイルの軸方向が直交するため、Pickup コイルにヘルムホルツコイルで磁場を印加する際に Input コイルへの影響が小さいと考えられる点が挙げられる。この直交型の超伝導磁束トランスについては、Pickup コイルのターン数による伝達磁場の変化を調べるため、図3. 1 b)に示す Pickup コイルを2ターンにした形状の素子を作製した。



a) 直交型高温超伝導磁束トランスの形状



b) Pickup コイルを2ターンにした場合の形状

図3. 1 HTS テープ線材から作製した直交型高温超伝導磁束トランス

直交型形状の高温超伝導磁束トランスでは、Pickup コイルを「切り紙」手法で作製し、Input コイルはエッチングで作製する。

さらに Input コイルにおける透磁率の増加を目論み、図3. 2に示すように 0.5mm 厚のパーマロイ板を積層し一辺が 6mm の直方体形状にした磁性体ブロックをコア材として Input コイル表面に接触させた素子を作製した。

図3. 3 a)に示す形状は平行型の高温超伝導磁束トランスである。この形状では Pickup コイルと Input コイルの双方を「切り紙」手法で作製する。この形状の特徴として、30mm 程度の直径を下限として、Pickup コイルと Input コイルの口径を自由に作ることができる点が挙げられる。一方、Pickup コイルと Input コイルの軸方向が並行しているために Pickup コイルに印加された磁場が Input コイルに干渉する恐れがあるので、測定に際して両コイルの距離を十分にとる必要がある。さらに Input コイルのマルチターン化による伝達効率の変化を調べるため図3. 3 b)に示す形状の高温超伝導トランスを作製した。

Pickup コイルと Input コイルの間隔は、中心間距離で

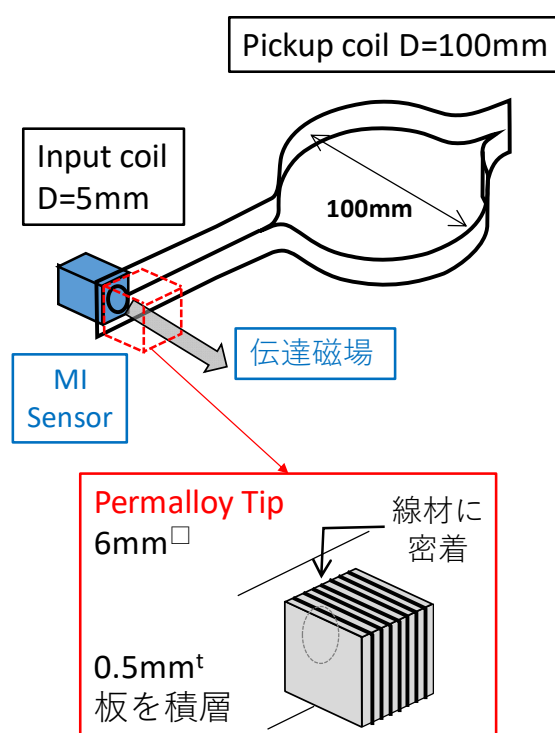
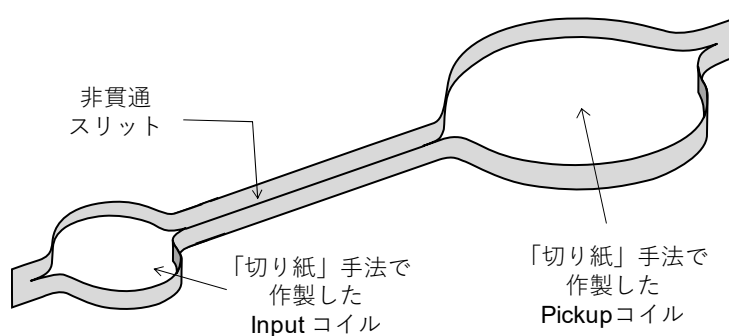


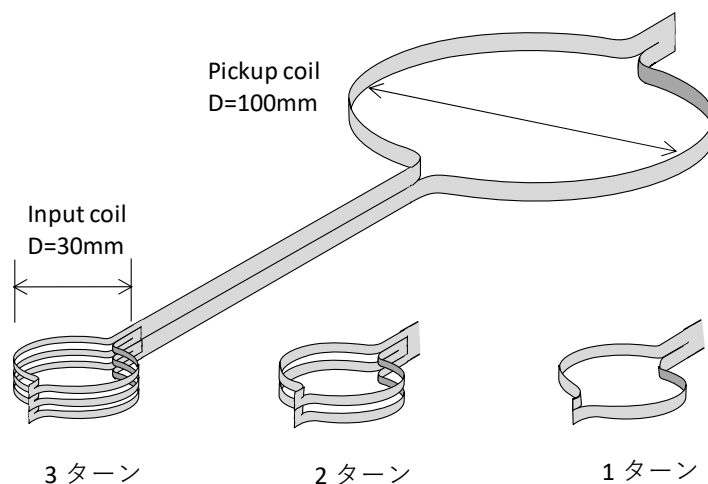
図3. 2 直交型超伝導磁束トランスの
エッチング Input コイルへの磁性コアの結合

- 直交型配置:150mm
- 平行型配置(シングルターン):240mm
- 平行型配置(マルチターン Input コイル):280mm

である。測定時に磁場印加方向とコイル軸方向が平行になる平行型配置において、Input コイルに対する印加磁場の混入をできるだけ避けるために、コイル間距離を長く取っている。



a) 平行型高温超伝導磁束トランスの形状



b) 「切り紙」手法によるマルチターン Input コイルの適用

図3. 3 HTS テープ線材から作製した平行型超伝導磁束トランス

3. 2. 2 超伝導磁束トランスによる磁場伝達効率の測定

作製した高温超伝導磁束トランスについては、次の3点について検証する必要がある。

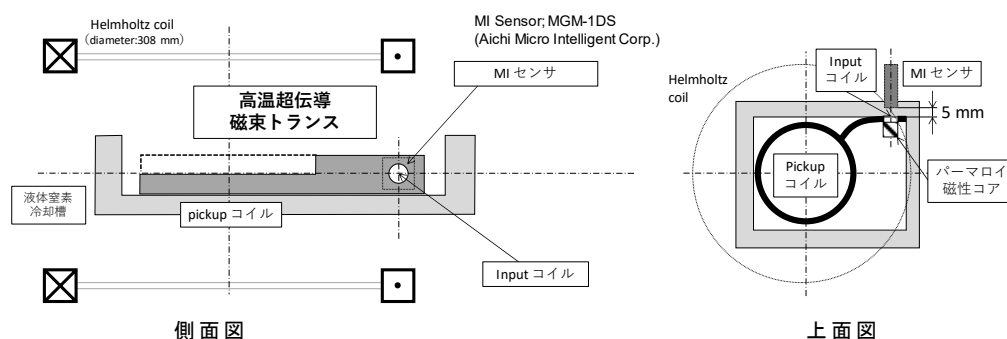
- ・定常磁場印加に対する磁場伝達機能を発現すること。磁場印加コイル中心から離れた位置に磁気センサを固定し、磁場を印加したときに磁気センサの位置に形成される磁場を測定する。この時、磁場印加コイルと磁気センサを高温超伝導磁束トランスで結合した場合にのみ磁気センサで磁場が検出されることを確認する。
- ・印加磁場と伝達磁場の間の相関の評価。(3.1)式から両者には比例関係があると予想できるので、これを確認する。閉ループに誘起される超伝導電流が線材の臨界電流による制限など印加磁場以外の因子に影響される場合には、両者の相関は比例関係から外れると考えられる。
- ・素子の設計による磁場伝達効率の変化。素子に内包されるコイル部の形状などを変化させ、コイル間のインダクタンス比を変化させた場合の伝達磁場の変化を測定する。

このために図3. 4の測定系を磁気シールドルーム内に構築した。直径 308mm のヘルムホルツコイルの中心および中心軸が高温超伝導磁束トランスの Pickup コイルの中心および中心軸と一致するように、ヘルムホルツコイル内に液体窒素冷却槽と高温超伝導磁束トランスを設置する。また Input コイルには MI センサを結合させるが、本研究で用いた MI センサ(アイチ・マイクロ・インテリジェント株式会社 MGM-1DS)モジュールは、室温に近い温度でないと動作しない。そのため、MI センサは間に発泡ポリスチレンボードの断熱材を挟んで液体窒素中にある Input コイルに結合されている。エッチングによる Input コイルにおいては、発泡ポリスチレンボードの厚さ 5mm に加えて、センサモジュールにおける測定ヘッドからセンサ本体までのセットバック 5mm があるため、Input コイル面からセンサ中心まで 10mm の距離がある。また「切り紙」手法により作製した Input コイルにおいては、MI センサは外径 30mm の発泡ポリスチレン円柱の中心に埋め込まれ、センサ中心と Input コイル中心が一致するように配置されている。

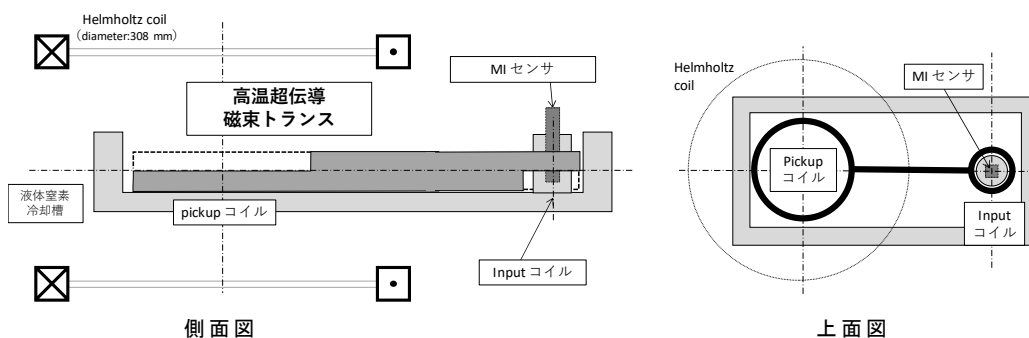
この高温超伝導磁束トランスの全体を液体窒素により冷却し、ヘルムホルツコイルにより発生した定常磁場を Pickup コイルに印加した時に Input コイル上に発生する磁場を MI センサで測定することで高温超伝導磁束トランスの磁場伝達能力を評価した。両コイル間のインダクタンス比は磁場伝達効率に影響すると考えられる。直交型の超伝導磁束トランス構造では図3. 1 b)に示す2ターンの Pickup コイルを内包する素子を

作製し、Pickup コイルのターン数を増やした場合の伝達磁場の変化を測定した。さらに図3. 2に示す、Input コイルのインダクタンスを増加させると考えられる磁性体コアを結合した場合の伝達磁場の変化を調べた。

また、「切り紙」手法で作製した図3. 3に示す平行型の構造では、シングルターンで両コイルの直径を変えた数種の試料を作製し伝達磁場を測定した。両コイルの直径の組み合わせを表3. 1に示す。さらに Input コイルをマルチターン化した平行型の高温超伝導磁束トランスを作製し、Input コイルのターン数を変えた場合の伝達磁場の変化を調べた。



a) 直交型高温超伝導磁束トランスの伝達磁場測定装置



b) 平行型高温超伝導磁束トランスの伝達磁場測定装置

図3. 4 高温超伝導磁束トランスによる伝達磁場測定装置

磁場伝達機能の発現において高温超伝導磁束トランスに誘起された超伝導電流の大きさを見積もるために、エッチングによる Input コイルと同形状のオープンコイルを、磁束トランスの作製に用いた線材と同じロットの 12mm 幅 HTS テープ線を用いて作製した。このコイルに直流電流を通电し、オープンコイルの発生磁場が超伝導磁束トランスにおける Input コイルの磁場と等しくなる時の電流値を測定した。

表3. 1 平行型高温超伝導磁束トランスの作製において用いた
Pickup コイル直径と Input コイル直径の組み合わせ

		Pickup コイル直径			
		40mm	60mm	75mm	90mm
Input コイル 直径	40mm	－	○	－	－
	60mm	○	○	○	○
	90mm	－	○	－	－

表中の○は作製した組み合わせを示す

3. 3 実験結果

3. 3. 1 直交型構造を持つ高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達特性の評価

図3. 1 a)に示す直交型の構造を持つ高温超伝導磁束トランスについて、液体窒素温度における Pickup コイルと Input コイル間の伝達磁場を MI センサで測定した結果を図3. 5に示す。比較のため、図3. 5には高温超伝導磁束トランスにおいて電流経路の一部を液体窒素から断熱することで常伝導状態にした時の伝達磁場測定の結果、および MI センサを磁場印加コイルに対して同じ位置に固定した上で高温超伝導磁束トランスを設置しない場合の MI センサの測定磁場を示した。電流経路の一部を加熱した高温超伝導磁束トランスについて、Input コイルに結合した MI センサで測定した伝達磁場は、 $100\ \mu\text{T}$ の定常磁場印加に対して $1.6\ \mu\text{T}$ と非常に小さい値に留まり、また同じ位置に MI センサを固定し、高温超伝導磁束トランスを設置しない場合の MI センサの測定磁場も $1.8\ \mu\text{T}$ と同様の値であった。これに対して液体窒素温度に冷

却した高温超伝導磁束トランスを設置した場合、MI センサでは約 $25 \mu\text{T}$ の大きな定常磁場が観測された。この高温超伝導磁束トランスによる伝達磁場は Pickup コイルへの印加磁場に比例して変化した。磁場伝達機能の発現において超伝導磁束トランスに誘起される超伝導電流の大きさを見積もるために、超伝導磁束トランスの作製に用いた線材と同じロットの 12mm 幅 HTS テープ線を用いて Input コイルと同寸法のオープンループ平面コイルを作製し、直流電流を通電して発生磁場を測定した。このオープンループ平面コイルに 1.67A の電流を流した時に、隣接させた MI センサで $25 \mu\text{T}$ の磁場が観測された。このことから本実験では、図3. 1 a)に示す最狭部で 3mm 幅の HTS テープ線材に対して約 1.7A の電流が流れたものと考えられる。

また図3. 6に、図3. 5の実験で用いた高温超伝導磁束トランスの磁場伝達特性と、この高温超伝導磁束トランスの Input コイルにパーマロイブロックの磁性コアを隣接させた場合の磁場伝達特性、および Pickup コイルを2ターンにした高温超伝導磁束トランスの磁場伝達特性を示す。Pickup コイルを2ターンにした高温超伝導磁束トランスの外形寸法および Pickup コイル・Input コイルの直径は、図3. 5の実験で用いた試料と

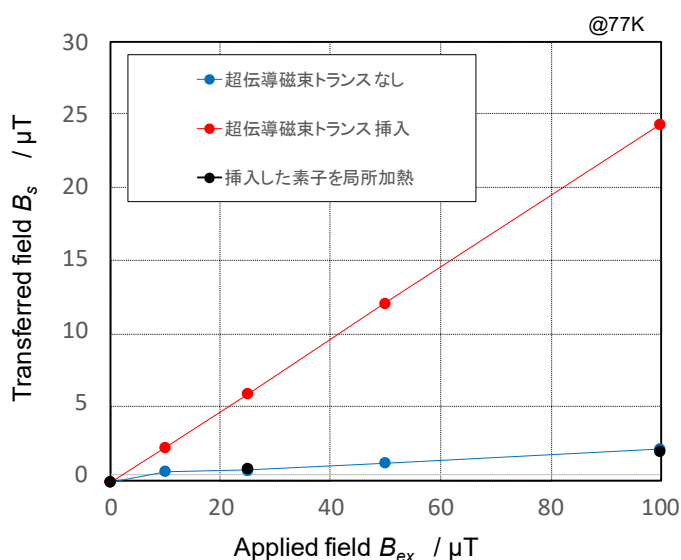


図3. 5 直交型配置の高温超伝導磁束トランスによる磁場伝達の測定結果

素子の Pickup コイル直径は 100mm、Input コイル直径は 5mm である。全体を 77K に冷却した高温超伝導磁束トランスでは印加磁場に比例したコイル間の磁場伝達が行われる。素子の一部を加熱すると磁場伝達機能は発現しない。

等しい。パーマロイ磁性コアを Input コイルに隣接させた高温超伝導磁束トランスでは、磁性コアを用いない場合に比べて磁場伝達効率が大きく向上し、 $100\ \mu\text{T}$ の印加磁場に対して伝達磁場は $43.3\ \mu\text{T}$ となった。これに対して Pickup コイルが2ターンの高温超伝導磁束トランスでは、磁場の伝達機能は確認できたが、伝達効率は Pickup コイルが1ターンの場合に比べて低下し、 $100\ \mu\text{T}$ の印加磁場に対して伝達磁場は $14.9\ \mu\text{T}$ であった。

Pickup コイルを2ターンにした高温超伝導磁束トランスにおいて「切り紙」手法により作製した Pickup コイルのターン数増加によるインダクタンスの変化を見積もるために、厚さ $35\ \mu\text{m}$ の銅箔線を用いて Pickup コイルと同形状のオープンコイルを作製した。このオープンコイルのインダクタンスを LCR メータ((株)NF 回路設計ブロック ZM2372)で測定したところ、1 ターンおよび 2 ターン構造について、それぞれ 305nH 、 960nH であった。

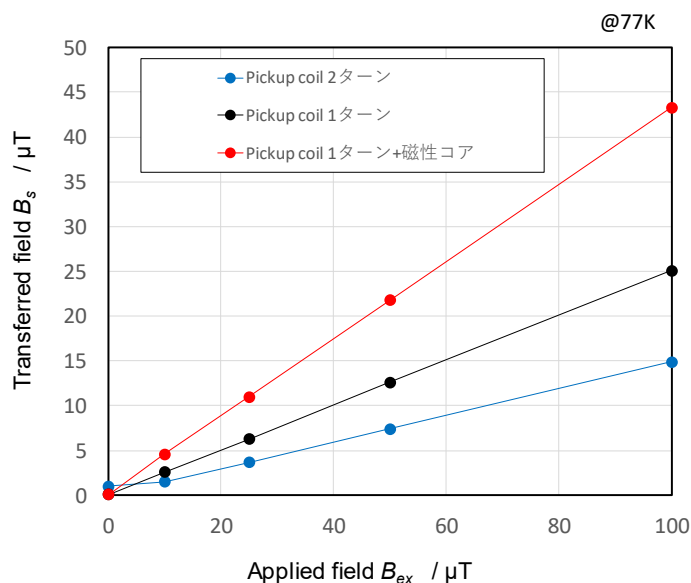


図3. 6 ループインダクタンスを変化させた場合の直交型高温超伝導磁束トランスによる伝達磁場の変化

この構造では、Pickup コイルのインダクタンスが相対的に減少するか、あるいは Input コイルのインダクタンスが相対的に増大した場合に磁場伝達効率が向上する。

3. 3. 2 平行型構造を持つ高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達特性の評価

両コイルのインダクタンスと磁場伝達効率の関係をさらに調べるために、図3. 3 a)に示す平行配置型構造を持つ高温超伝導磁束トランスを作製した。この構造は両コイルの直径比を任意に変えることができる。平行型高温超伝導磁束トランスの Pickup コイルおよび Input コイルの直径を変化させて、Input コイルに結合した MI センサへの伝達磁場を測定した。

Input コイル径を 60mm に固定し、Pickup コイル径を変化させた場合の伝達磁場、また Pickup コイル径を 60mm に固定し、Input コイル径を変化させた場合の伝達磁場をそれぞれ図3. 7及び図3. 8に示す。図3. 7において、同じ Input コイル径に対しては Pickup コイル径が大きくなるにつれて Input コイルに伝達される磁場は増加した。同様に図3. 8においては、同じ Pickup コイル径に対しては Input コイル径が小さくなるにつれて Input コイルに伝達される磁場は増加した。これらのシングルターンの Pickup コイルおよび Input コイルを持つ平行型高温超伝導磁束トランスでは、最大の磁場伝達効率 は 90mm 径の Pickup コイルと 60mm 径の Input コイルの組み合わせにおいて印加磁場の 38% (印加磁場 $100\text{ }\mu\text{T}$ に対して伝達磁場 $37.8\text{ }\mu\text{T}$) であった。

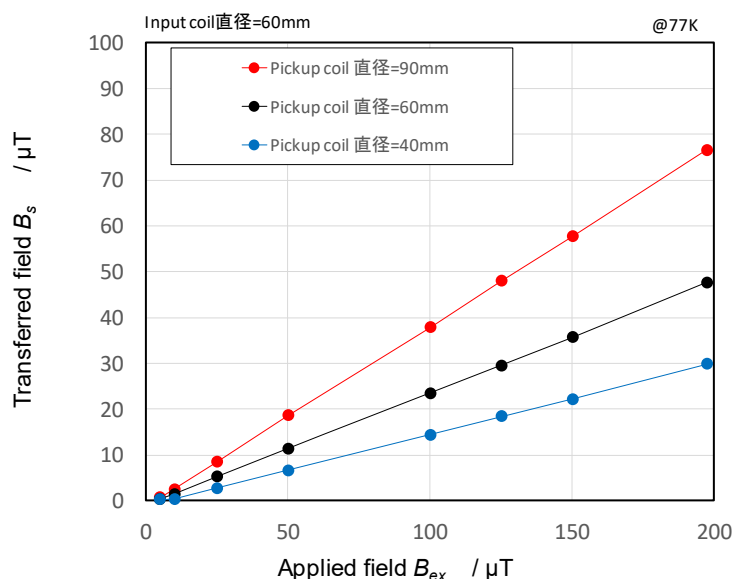


図3. 7 平行型配置の高温超伝導磁束トランスによる磁場伝達の測定結果

Input コイル径を 60mm に固定し、Pickup コイル径を変えた場合の磁場伝達効率の変化を示す。

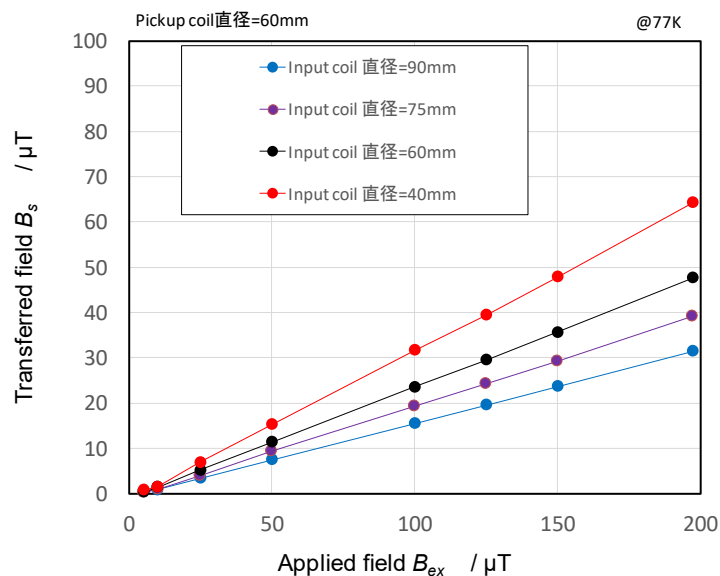


図3. 8 平行型配置の高温超伝導磁束トランスによる磁場伝達の測定結果

Pickup コイル径を 60mm に固定し、Input コイル径を変えた場合の磁場伝達効率の変化を示す。

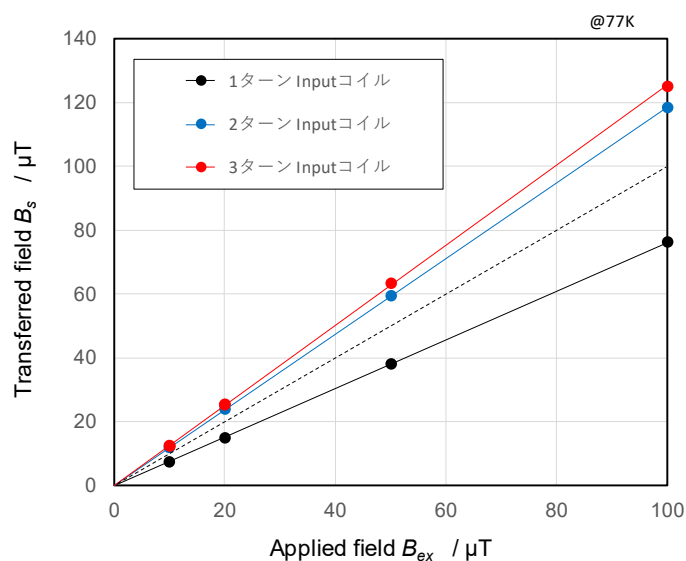


図3. 9 マルチターン Input コイルをもつ
平行型高温超伝導磁束トランスの伝達磁場

Pickup コイルおよび Input コイルの直径はそれぞれ 100mm および 30mm である。また図中の点線は印加磁場と伝達磁場が等しい点を示す。2ターンおよび3ターンの Input コイルを持つ素子において、伝達磁場が印加磁場よりも大きくなる。

図3. 9に示すマルチターンの Input コイルを内包した高温超伝導磁束トランスについての測定では、Input コイルのターン数と共に伝達磁場が増大し、2ターンおよび3ターンの Input コイルを持つ平行型高温超伝導磁束トランスにおいて Pickup コイルへの印加磁場よりも Input コイルへの伝達磁場が大きい増幅作用が得られた。この時の最大の磁場伝達効率は、3ターンの Input コイルを内包する高温超伝導磁束トランスにおいて、125%(印加磁場 $100\ \mu\text{T}$ に対して伝達磁場 $124.9\ \mu\text{T}$)であった。

3. 4 考察

3. 4. 1 高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達機能

図3. 4 a)の実験装置において、図3. 5および図3. 6の実験で用いた各々の直交型高温超伝導磁束トランスの外形寸法は等しいため、Input コイルが発生する磁場を測定する MI センサは装置内で位置を固定される。磁場印加に用いるヘルムホルツコイルによるわずかな横方向の磁場分布が MI センサ固定位置に存在するため、高温超伝導磁束トランスを設置しない状態でも印加磁場の増大に伴い MI センサの検出値は増加する。しかしその割合はヘルムホルツコイルによる印加磁場に対し非常に小さく、印加磁場 $100\ \mu\text{T}$ の時に MI センサの計測値は $1.8\ \mu\text{T}$ と非常に小さい値に留まる。これに対して、1ターンの Pickup コイルを持つ超伝導磁束トランスを磁場印加コイルと MI センサの間に設置した場合には、伝達磁場は印加した定常磁場の強度に比例して増加し、 $100\ \mu\text{T}$ の定常磁場印加に対して約 $25\ \mu\text{T}$ の大きな定常磁場が MI センサで測定された。さらに磁場印加状態で超伝導磁束トランスの電流経路の一部を加熱すると、MI センサの測定磁場の値は大きく減少し、高温超伝導磁束トランスを設置しない場合とほぼ等しくなった。この理由としては、高温超伝導磁束トランスにおいて電流経路の一部が加熱され常伝導状態に移った場合、超伝導閉回路が壊れるために、定常磁場印加による超伝導シールド電流の誘起が生じないことが挙げられる。このことから、作製した高温超伝導磁束トランスでは、超伝導磁束トランスの機能である超伝導シールド電流を介した定常磁場の伝達が行われたと考えられる。また図中には示していないが、電子回路リボンケーブル用銅プリント基板(サンハヤト株式会社製)を用いて作製した、導体層の厚さ以外は高温超伝導磁束トランスと同寸法の銅箔ループを液体窒素冷却槽内に設置した場合も、MI センサで観測された伝達磁場は高温超伝導磁束トランスを設置しない状態の測定値にほぼ等しい。このことは、定常磁場に対して金属導体の閉ループは磁場伝達機能をもたず、液体窒素温度における定常磁場印

加に対する磁場伝達は高温超伝導磁束トランスの特徴的な機能であることを示す。

また印加磁場と伝達磁場が比例関係にあることは、この高温超伝導磁束トランスに生じる超伝導シールド電流が、本研究で印加した定常磁場の範囲で飽和していないことを示している。そこで、今回の測定において HTS テープ線材の I_c に対する超伝導シールド電流の余裕を推定するため、高温超伝導磁束トランスに誘起される超伝導電流を見積もることとした。エッチングで作製した Input コイルと同形状のオープンループに電流を通電して発生磁場を測定したところ、最狭部で 3mm 幅の HTS テープ線材に対して約 1.7A の電流が流れたものと考えられる。この電流値は、図1. 1に示した閉ループ内側境界面への電流の集中を考慮しても、実験に使用した HTS テープ線材のメーカーによる I_c 測定値(12mm 幅線材において平均 312A)よりもかなり小さい。そのため作製した高温超伝導磁束トランスの超伝導シールド電流の線材 I_c に対する余裕は大きく、印加磁場に対する伝達磁場の線形性を保つことができると考えられる。

磁場に対する応答の線形性に関して、これを妨げる要因として線材のピンニングによる磁束のトラップ、閉ループ内へ侵入した磁束の残留といった点が挙げられる。この点について、本研究において用いた印加磁場は最大で $200\ \mu\text{T}$ までの弱磁場であり、RE-123(RE=Y)の下部臨界磁場 H_{c1} と比較すれば⁷⁾、HTS テープ線材内への磁束トラップについての考慮は不要と考えられる。またゼロ磁場冷却の場合は、超伝導電流による閉ループ内側への磁束の保存はない。今回の実験条件においては、超伝導磁束トランスが示す磁場伝達特性は、変化のしきい値を必要とする磁束の捕捉が生じる可能性はほとんど無いために印加磁場に対するヒステリシスがなく、微小な磁場印加に対しての測定が可能であると考えられる。しかし応用上、より強い磁場が高温超伝導磁束トランスに対して印加される場合には、磁束トランス機能の線形性が、線材内の磁束トラップにより変化する可能性は否定できない。

3. 4. 2 ループインダクタンスの調整と磁場伝達効率の変化

図3. 6に示すように、2 ターンの Pickup coil をもつ直交型の超伝導磁束トランスについて伝達磁場の測定を行ったところ、磁場の伝達機能は確認できたが、伝達磁場は1 ターンの素子に比べて低下した。これは同じ径のコイルでは磁束の鎖交数はターン数 N_p に比例するが、一方でインダクタンス L_p はターン数の2乗に比例するため、(3.1) 式において伝達磁場が減少したものと考えられる。直交型の形状では、Input コイルと Pickup コイルの断面積比が $19.6\text{mm}^2 / 7.64 \times 10^3\text{mm}^2$ と大きく、両コイルのインダクタンスは Pickup コイルのインダクタンスが Input コイルのインダクタンスよりも非常に大きい mismatching 状態にあると考えられる。さらに、Pickup コイルと同形状の銅箔オープン

ループのインダクタンスは、1 ターンから 2 ターンへのターン数増加によって測定値が 3.1 倍程度増加している。導体の厚さと磁化率が異なるため、銅箔ループのインダクタンス値は HTS テープ線材で作製した Pickup コイルの値とは異なる可能性はあるが、1 ターン構造よりも 2 ターン構造の方がインダクタンスのミスマッチングは大きくなることは予想できる。このため、1 ターン構造よりも 2 ターン構造の方がインダクタンスのミスマッチングは大きくなり、磁束伝達効率が低下したと考えられる。

コイル間のインダクタンスの大きなミスマッチングを改善する方法として、磁性コアを用いて Input コイルの透磁率を大きくし自己インダクタンスを増大させる方法を検討した。パーマロイ板(0.5mm¹)を積層して一辺 6mm の立方体ブロックを作製し、積層断面を Input コイルに隣接させたところ、磁場伝達効率は 43%まで増大した。これは Input コイル内芯部の実効的な透磁率が近傍にある磁性体により増大したためインダクタンス L_i が増加しインダクタンスマッチングが改善の方向に調整されたこと、また Input コイルと MI センサ間の相互インダクタンスが改善しセンサへの磁場伝達が改善したことの 2 点が原因と考えられる。

両コイルのインダクタンスと磁場伝達効率の関係をさらに調べるために、Pickup コイルおよび Input コイルの直径比を任意に変えることができる、図3. 3 a)に示す平行型構造の高温超伝導磁束トランスを作製し、両コイルの直径を変化させて、素子の磁場伝達の変化を調べた。

図3. 7に示すように、同じ Input コイル径(60mm)に対して、Pickup コイル径を 40mm から 90mm まで変化させた場合、Pickup コイル径が大きくなるにつれて Input コイルに伝達される磁場は増加した。この時、Pickup コイル径 60mm を基準として、Pickup コイル径が 60mm から 40mm への変化では伝達効率は 0.613 倍となり、60mm から 90mm への変化では伝達効率は 1.61 倍となった。また逆に、図3. 8に示すように、Pickup コイル径(60mm)を固定し、Input コイル径を 40mm から 90mm まで変化させた場合には、Input コイル径が小さくなるにつれて Input コイルに伝達される磁場は増加した。同様に Input コイル径が 60mm の場合を基準にすると、Input コイル径 60mm から 40mm への変化では伝達効率は 1.34 倍となり、60mm から 90mm への変化では伝達効率は 0.66 倍となった。

平行型高温超伝導磁束トランスにおける磁場伝達効率は、両コイルの直径比が 3:2 までの範囲で大きくなるにつれ増加した。3. 1. 1項で示したように、超伝導磁束トランスにおける磁束の伝達効率は、Pickup コイルと Input コイルのインダクタンスが等しい場合に最大となる。これに対して、実験結果は両コイルの径が等しい場合よりも、Pickup コイル径がより大きい場合の方が伝達磁場は大きいことを示している。磁場伝達の視点で考える場合、インダクタンスが整合しない設計で Input コイルに伝達される磁束が小さくなったとしても、断面積が小さい Input コイルを用いることでコイルの磁束

密度を増大させることは可能である。従って、磁場伝達効率の向上を意図した高温超伝導磁束トランスの設計においては、大口径の Pickup コイルと小径の Input コイルの組み合わせが適していると考えられる。しかし図3. 5に示したコイル直径比が20:1となる直交型の素子の磁場伝達効率は平行型の素子で得られた磁場伝達効率の最大値よりも減少している。そのため両コイルの直径比を大きくするにも限度があり、途中に高い磁場伝達効率を得られる最適な素子のデザインがあると考えられる。

一方で、平行型の素子において得られた磁場伝達効率の最大値は、図3. 7に示す90mm の Pickup コイルと60mm の Input コイルの組み合わせにおいて38%であった。この時の直径比は $D_{\text{Pickup}}:D_{\text{Input}}=3:2$ であり、図3. 8において D_{Pickup} が60mm、 D_{Input} が40mm の組み合わせの場合と同じ比率であるが、図3. 7に示す Pickup コイル径が大きい素子の磁場伝達効率の方がより高いことがわかる。このことはコイル間のインダクタンス比と共に、Pickup コイルの面積を考慮して高温超伝導磁束トランスの設計を行うことが重要であるとの指針を与える。これは(3.1)式において伝達効率に Pickup コイルの面積 A_p が明示的に含まれていることから示唆される。

本研究における目標のひとつは、フラックスコンデンサとして動作する高温超伝導磁束トランスによる磁気センサの実効感度の引き上げである。3. 1. 1項で述べたように、高温超伝導磁束トランスにおける磁束の伝達効率は、Pickup コイルと Input コイルの双方に同じ形状のコイルを用いてインダクタンスのマッチングが取れた設計において良好になる。コイル内にある磁束が同じであれば、コイルの断面積が小さいほうがコイル上の磁場は強い。そのため Input コイルについて、より小さい断面積で大きな自己インダクタンスが得られるマルチターンコイル形状の適用が伝達磁場の増大に有効である。また、図3. 6、図3. 7および図3. 8の実験結果から、Pickup コイルと Input コイルの口径比が大きいほど、また Pickup コイルの口径が大きいほどセンサへの伝達磁場は大きかった。これらの結果から、高い磁場伝達効率をもつ高温超伝導磁束トランスを得るには、大口径の Pickup コイルとより小さな径の Input コイルを組み合わせ、加えてインダクタンスマッチングの視点から Input コイルのインダクタンスを増大させるためにマルチターン化した設計が適していると考えられる。そこで図3. 3 b)に示す、マルチターン Input コイルをもつ平行型の高温超伝導磁束トランスを作製した。図3. 9はこれらの素子における伝達磁場の測定結果である。1ターンの Input コイルをもつ構造において磁場伝達効率は76.1%であり、同様に両コイルが1ターンの組み合わせである図3. 7の最良の結果に比べても大きく増大した。直径比 $D_{\text{Pickup}}/D_{\text{Input}}$ については、図3. 9の素子は3.33 (100mm:30mm)、図3. 7の素子は1.5 (90mm:40mm)である。

さらに、Input コイルのターン数を増やした素子では、2ターンの Input コイルの場合に磁場伝達効率は118.2%、3ターンの Input コイルの場合に磁場伝達効率は124.9%となった。これは Pickup コイルに印加した磁場よりも Input コイル上に発生する磁場が

大きいということであり、高温超伝導磁束トランスがフラックスガイドとしてのみならず、磁束濃縮により印加磁場を増幅して伝達するフラックスコンデンサとして動作したことを示している。図3. 9の結果から、空芯のコイルを用いた高温超伝導磁束トランスにおいては、Input コイルに対して3倍以上の直径をもつ大きな Pickup コイルを有する構造で Input コイルが2ターン以上あるときに、磁場伝達効率が磁束濃縮状態に達すると考えられる。Input コイルの高インダクタンス化については、マルチターン化の他に図3. 2に示した磁性コア導入による方法が考えられる。図3. 6の結果に示すように、磁性コアの適用は素子の磁場伝達効率を大きく変化させる。磁性コアが磁気的なヒステリシスを示す可能性があるために、ごく微弱な磁場に対する感度への懸念はあるが、一方で微小サイズのコイルの設計に関する自由度は大きくなる。

磁気センサへの伝達磁場を増大し、センサの実効感度を向上させるには、Input コイルと磁気センサとの磁気結合の強化も重要である。小径の高インダクタンス Input コイルの使用は、超伝導磁束トランスのコイル間の磁場伝達効率改善だけではなく、小径のコイルに磁束を集束することで Input コイルと磁気センサとの磁気結合が強化され、磁気センサへの伝達磁場も増大すると考えられる。Input コイルと磁気センサとの磁気結合は、液体窒素温度領域で動作する磁気センサの Input コイル上への直接マウントによっても強化することができると考えられる。AMR (Anisotropic-Magneto-Resistive) センサや GMR (Giant-Magneto-Resistance) センサなどは低温への冷却によるノイズレベルの低減が検討されており⁸⁾、液体窒素温度領域で動作する磁気センサの Input コイル上への直接マウントは、両者の相互インダクタンスを改善し磁気センサへの伝達磁場を増大させる方法として期待できる。ループ形状の導体に流れる円形電流が作る磁場は導線上において最も磁場が強く、導線上に磁気センサを取り付けることが高温超伝導磁束トランスと汎用磁気センサによるハイブリッドマグネトメータの感度向上に有効と考えられる。ただし本研究における測定では、平行型の高温超伝導磁束トランスの Input コイル付近で磁場分布を測定したところ、最大磁場はコイルの導線の直上ではなくコイル中心軸上で得られた。本研究で磁気センサとして用いた MI センサの評価キットは室温付近で動作し、液体窒素温度では動作しない。そのため液体窒素温度にある高温超伝導磁束トランスとの結合においては断熱材を介する必要がある。さらに、MI センサ本体はヘッドモジュール端から 5mm のセットバックがあり、コイルの導線からセンサ本体までは距離が離れている。Input コイル直上部の磁場分布において最大磁場がコイル中心軸上で測定されたことは、コイルの導線からセンサ本体までの距離が原因と考えられる。

高温超伝導磁束トランスにおいて磁気センサへの大きな伝達磁場を得るには、この他に、コイル間の伝達路における磁束の散逸の抑止、印加された磁束を Pickup コイルで効率的に捕集するためのインダクタンスの調整などの課題がある。

定常磁場に対する磁場伝達特性を特長的に有する高温超伝導磁束トランスは、小さな定常磁場あるいは低周波磁場を扱う資源探査や構造物に対する深部の非破壊検査技術に有用と考えられる。大口径の Pickup コイルを持つ高温超伝導磁束トランスを適用した高感度マグネトメータは、これらの磁気計測技術において測定対象が大型である場合に特に有用であると考えられ、さらなる磁場伝達効率の向上により、磁気探査技術への応用が期待できる。

3. 4. 3 コイルインダクタンスの見積もりを用いた高温超伝導磁束トランスの磁場伝達特性の推定

超伝導磁束トランスの性能予測、また特性の改良にとって、素子のデザインにおけるインダクタンスマネジメントが重要である。Pickup コイルと Input コイルのインダクタンスによって、高温超伝導磁束トランスの磁場伝達効率が変化することは(3.1)式に示した。超伝導磁束トランスの設計指針を得るためには、本研究で用いた「切り紙」手法による閉ループのインダクタンスの解析を行う必要がある。

線半径 a の導線で作られた内半径 r の1ターンコイルの全インダクタンスは

$$L = \mu_0 r \left\{ \ln \left(\frac{8r}{a} \right) - 2 \right\} + \frac{\mu r}{4} \quad (3.2)$$

で与えられる⁹⁾。コイル形状による外部インダクタンスは右辺第1項、また右辺第2項は導線の内部インダクタンスであり、インダクタンスが大きいコイルに対する細線や薄膜形状の導線の適用においては外部インダクタンスに比べて小さく、無視することができる。本研究で用いた HTS 線材は平テープ形状であり、さらに本研究で用いる「切り紙」手法で加工したシームレス閉ループは非対称的な立体構造を有するため、円断面導線による(3.2)式をそのまま適用することはできないが、HTS テープ線材と断面積が等しい円断面導線を仮定してインダクタンスを試算してみる。

35 μ m 厚のフレキシブルケーブル用ポリイミド基板銅箔フィルム(サンハヤト(株)製)を用いた同形状の1ターンコイルを作製した場合、コイルの幅を 6mm とすると相当する銅線径は 0.52mm となる。これを(3.2)式で計算すると、直径 100mm の 1 ターンコイルのインダクタンスは約 330nH と計算される。作製した銅箔コイルを、LCRメータ((株)NF 回路設計ブロック ZM2372)で測定したところ、インダクタンスの実測値は約 305nH であった。

HTS テープ線材は導体の磁化率が銅箔とは異なるために HTS テープ線材コイルの

インダクタンス値は銅箔コイルの場合とは等しくはならない可能性があるが、インダクタンスの比率計算を行う場合に、およその目安を与えることができる。銅箔フィルムを用いた場合と同様に、相当する断面積を有する導線を仮定した計算で、6mm 幅、1 μ m 厚の HTS テープ線材では直径 100mm の 1 ターンコイルのインダクタンスは 450nH と求められる。

1 ターンコイルのインダクタンスは、(3.2)式により近似的に求めた値と比較的良好一致を見せている。しかし、2ターンのコイルについては、有限長ソレノイドのインダクタンスの表式における単純なターン数の加増からは乖離が認められる。有限長ソレノイドのインダクタンス L は

$$L = \frac{k_N \mu N^2 A}{l} \quad (3.3)$$

で表される^{10), 11)}。ここで μ はソレノイドのコアの透磁率(空芯の場合には $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)、 N はターン数、 A はソレノイドの断面積、 l はソレノイドの長さ、また k_N はソレノイドの口径と長さの比から決まる長岡係数である。有限長のソレノイドでは無限長のソレノイドに比べて両端における鎖交磁束が減少するため自己インダクタンスが低下する。長岡係数はその係数であり、無限長ソレノイドに対する有限長ソレノイドのインダクタンス比である。長岡係数はソレノイドの直径と長さの比 D/l によって一意的に決まる数値であり、

$$k_N = \frac{4}{3\pi\sqrt{1-k^2}} \left(\frac{1-k^2}{k^2} K(k) - \frac{1-2k^2}{k^2} E(k) - k \right), \quad \frac{D}{l} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} \quad (3.4)$$

で表される¹⁰⁾。ここで $K(k)$ および $E(k)$ はそれぞれ k についての第一種完全楕円積分、第二種完全楕円積分である。長岡係数は D/l と数値の対応図表が提供されており¹⁰⁾⁻¹²⁾、また計算サイト¹³⁾を利用して数値を求めることができる。長さが短く口径が大きいコイルほど長岡係数が小さくなり、コイルの自己インダクタンスは小さくなる。

図3.1の素子の 100mm 径 Pickup コイルと同形状のオープンループ銅箔コイルのインダクタンスは、2 ターン構造では1ターン構造に比べておよそ3倍程度であった。巻き線の線幅は1ターンの場合には 6mm であるが、2ターン化することで線幅は 3mm になる。そのためコイル長は、1ターンでは 6mm に対して、2ターンでは線幅2本分に間隔を合わせて 9mm に変化したと考えることができる。口径 100mm に対する長岡係数は(3.4)式からそれぞれ 0.141 と 0.189 であり、

(3.3)式に当てはめると、2ターンのコイルのインダクタンスは1ターンコイルの3.57 倍になると予想できる。

実測におけるインダクタンスの倍率は 3.14 倍と計算値に比べやや小さいが、加工時の切りしろのために線幅が小さくなると計算した倍率は小さくなるので、このインダクタンスの計算方法はコイルのターン数や口径などを変化させた場合のインダクタンス変化を得るのに妥当であるものとする。

(3.1)式を用いて伝達効率の計算をする場合、式の中に比例定数 k があり、各コイルのインダクタンス計算値を用いて伝達効率を直接に求めることは難しい。しかしながら、ある設計の素子に対して、各コイルのインダクタンスを変化させた場合に生じる磁場伝達効率の変化を見積もることはできる。(3.3)式では、コイルのインダクタンスが面積、ターン数、長さ依存して変化することがわかるので、これを利用して口径やターン数を変えた場合のコイルのインダクタンスの変化率を求め、(3.1)式を用いて磁場伝達効率の変化を計算し、実測値との整合について検討を行った。

(3.3)式において、60mm 径の1ターンコイルを基準に取り、ターン数を維持してコイル径を変化させたときのインダクタンスの増加率を求める。例えば、1ターンコイルの高さを 12mm として、コイル径が 90mm になる場合には、コイル径と長さの比 D_{loop}/l は 60mm 径における 5 から 90mm 径では 7.5 となり、このためコイル形状により変化する長岡係数が 0.32 から 0.25 へと低下する。またインダクタンスはコイルの断面積に比例するので、90mm 径コイルでは 60mm 径コイルの 2.25 倍になる。これらを考慮すると、ループインダクタンスは $L_{60mm}=L_0$ として $L_{90mm}=L_0 \times 2.25 \times (0.25/0.32)=1.76L_0$ 、同様に 40mm ループでは長岡係数は 0.41 となるので、 $L_{40mm}=0.569L_0$ となる。これを(3.1)式に当てはめると、伝達磁場 B_s は、60mm 径の Pickup コイルと 60mm 径の Input コイルによる超伝導磁束トランスの値に比べ、Input コイルが同径で Pickup コイル径を 90mm にした場合に 1.63 倍に、Pickup コイル径を 40mm にした場合に 0.566 倍になると求められる。図 3. 7に示す実際の計測値では、それぞれ 1.61 倍、0.613 倍になっており、計算値に近い値を示した。この計算と測定値の対比については表 3. 2に示す。

同様に計算すると、60mm の Pickup コイルと 40mm の Input コイルを組み合わせさせた素子においては、磁場伝達効率の計算値は 1.27 倍となり、90mm の Pickup コイルと 60mm の Input コイルの組み合わせに対して、コイル径比が同じでも Pickup コイルが小さい場合には伝達効率が小さくなることが予想できる。これは図 3. 8に示す実測定の結果(倍率 1.34)とも整合する。

表 3. 2 Input コイル径を 60mm に固定した場合の
ループインダクタンスおよび伝達磁場の変化
数値は、Pickup コイル径が 60mm の場合の数値に対する比率を表す。

D_{pickup}	$L_{\text{pickup}}/L_{60\text{mm}}$ 計算値	磁場伝達効率比 $B_s/B_s(D_{\text{pickup}}=60\text{mm})$ 計算値	磁場伝達効率比 $B_s/B_s(D_{\text{pickup}}=60\text{mm})$ 測定値
40mm	0.569	0.566	0.613
60mm	1	1	1
90mm	1.76	1.63	1.61

また図 3. 9 に示す、100mm 径の Pickup コイルに対して Input コイルの口径、長さが同じでターン数を変えた場合では、同様に(3.1)式を用いて計算すると1ターン Input コイルの場合の磁場伝達効率の値に対して2ターンの Input コイルで 1.60 倍、さらに3ターンのコイルでは 1.81 倍と求められる。実測値はそれぞれ 1.56 倍、および 1.65 倍であり、計算値に近い値となっている。一方、ターン数が2から3への増加においては計算による B_s の増加比が 1.13 倍であり、このループ径比の設計においてはさらなる Input コイルのターン数増加による伝達効率の向上が多く見込めないことがわかる。そのため、Input コイルと Pickup コイルの径比の変更などの設計変更が重要であると考えられる。Input コイルのターン数変更における計算値と測定値の対比を表 3. 3 に示す。

表 3. 3 Input コイル径 30mm、Pickup コイル径 100mm の場合に
Input コイルターン数を増加した場合の伝達磁場の変化
数値は 1 ターンの場合の数値に対する比率を表す。

Input コイル ターン数	磁場伝達効率比 $B_s/B_s(\text{Input コイルターン数}=1)$ 計算値	磁場伝達効率比 $B_s/B_s(\text{Input コイルターン数}=1)$ 測定値
1	1	1
2	1.60	1.56
3	1.81	1.65

これらの結果から、本研究で作製した高温超伝導磁束トランスの設計について、以下のような知見を得ることができた。

- ・ 「切り紙」手法で作製したシームレス閉ループ形状のコイルの自己インダクタンス値については、円断面導線で作製したシングルターンコイルのインダクタンス(3.2)式を用いて近似することができる。この場合、平テープ形状の導体断面積に等しい円断面導線を仮定して計算することができる。
- ・ このコイルの寸法やターン数を変化させた場合の自己インダクタンスの変化は、長岡係数の変化を考慮することで(3.3)式による見積もりと良く合致する。この場合、コイルの長さは線幅と間隙を考慮して近似する必要がある。
- ・ Pickup/Input コイル部のインダクタンス変化に伴い、高温超伝導磁束トランスの磁場伝達効率に変化するが、これは(3.1)式と比較的よく合致する。

また、本研究で用いたシームレス閉ループ構造の高温超伝導磁束トランスにおいて大きな伝達磁場を得るには、以下の設計指針が有効と考えられる。

- ・ (3.1)式で素子の全インダクタンスは小さいほうが伝達磁場は大きく、特に L_i に比べて大きい L_p について小さくするほうが伝達磁場を大きくできる。一方、Pickup コイルの断面積は大きいほうが伝達磁場を大きくできる。これを両立するには、長岡係数が小さくなるよう、断面積が大きく、かつ口径と長さの比が大きい Pickup コイル形状が有効である。
- ・ コイルのインダクタンスは、長いコイルにおいてはターン数の2乗に比例する。そのため、ターン数の増加は自己インダクタンスが小さい Input コイルにおいて有効である。ただし Input コイルのマルチターン化によるインダクタンス増加で(3.1)式の分母が大きくなるので、より多くのターン数で伝達磁場を増大させるには、コイル断面積を小さくするか、コイル長さが短い平面コイル形状の Input コイルを用いるのが有効である。これについては、「切り紙」手法を用いて作製する小径でマルチターン構造のコイル、あるいはエッチングによる小径ループを積層した構造のマルチターンコイル構造の適用などが有効と考えられる。
- ・ (3.1)式で示した通り、Input コイル上に発生する磁場と磁気センサが検知する磁場との間には係数 k の磁気結合が存在する。液体窒素温度にある高温超伝導磁束トランスと今回用いた MI センサの間には断熱のため

間隙が必要であり、磁気結合には改善の余地がある。液体窒素温度で動作する磁気センサの Input コイル上への直接マウントによる磁気結合強化により、磁気センサが検知する磁場の増大が見込まれる。

- Pickup コイルと Input コイル間を結合する伝達路に非貫通スリットが存在する。スリットの幅は非常に細いが、この部分からの磁束漏洩を低減することで磁場伝達効率の向上が期待できる。今後の課題として、伝達路に対するツイストペアケーブル形状の適用、高温超伝導材を用いた磁気シールドの設置などの対策が考えられる。

3.5 本章のまとめ

試作した高温超伝導磁束トランスにおいて、超伝導磁束トランスの機能である、定常磁場印加に対するコイル間の磁場伝達機能を検証した。

磁場の伝達効率、すなわち Pickup コイルに印加された磁場に対する Input コイルに伝達された磁場の比は、Pickup コイルと Input コイルのインダクタンスにより変化する。

両コイルのインダクタンス比が大きい直交型コイル配置をもつ高温超伝導磁束トランスでは、磁性コアを適用して Input コイルのインダクタンスを増大させることで、磁場伝達効率が増加した。インダクタンスの調整のための Input コイルへの磁性コアの結合は素子の磁場伝達効率の向上に有効であった。

平行型コイル配列を持つ高温超伝導磁束トランスでは、Pickup コイルと Input コイルの直径比が 3:2 となる形状において最大の磁場伝達効率を得られた。これは磁束について伝達効率が最大になると考えられる $L_p=L_i$ となる設計よりも L_p が大きい設計である。また Pickup コイルの直径が異なり Pickup コイルと Input コイルの直径比が同じである2種類の素子では、Pickup コイル径が大きい素子の磁場伝達効率が高くなった。さらに両コイルの直径比を大きく取り、Input コイルをマルチターン化した平行型高温超伝導磁束トランスにおいて、印加磁場よりも伝達磁場が大きい磁束濃縮を達成した。磁束濃縮機能を用いることで、磁気センサの実効感度を増大させる高感度マグネトメータの構築に有効と考えられる。

これらの結果から、「切り紙」手法を用いて高温超伝導磁束トランスを作製するにあたり、Pickup コイルと Input コイルのターン数や口径比などの設計指針を得た。今後は設計指針を考慮した素子形状の作製やセンサとの磁気結合など漏洩磁場への対策による改良が見込まれる。非破壊検査技術応用などを目的とする、非冷却あるいは液体窒素温度領域で動作する磁気センサを適用する高感度マグネトメータの開発において、

高温超伝導磁束トランスはフラックスコンデンサとして有用と考えられる。

参考文献

- 1) “Covering Depth Detection of Steel Reinforcing Bar Using Electromagnetic Method”, Dongfeng He, Mitsuharu Shiwa, Satoshi Takaya, and Koichi Tsuchiya, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.42: *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XX)* pp.247-252 (2017); doi: 10.3233/978-1-61499-767-2-247.
- 2) “Eddy-Current-Based SQUID-NDE System for Copper Tubes With Laser Displacement Sensor”, Sho Kanai, Yoshimi Hatsukade, Keita Hayashi, Kazuaki Mori, and Saburo Tanaka, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.19, No.3, pp.786-790 (2009); doi: 10.1109/TASC.2009.2019024.
- 3) “HTS SQUID Magnetometer Using Resonant Coupling of Cooled Cu Pickup Coil”, K. Enpuku, S. Hirakawa, Y. Tsuji, R. Momotomi, M. Matsuo, T. Yoshida, and A. Kandori, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 21, Issue 3, pp.514-517(2011); doi: 10.1109/TASC.2010.2096454.
- 4) “Preparation of a high-T_c superconducting magnetic flux transformer with a 100 mm bore coil and static magnetic field transfer at 77 K”, K. Komori, S. Arisawa, M. Tachiki, S. Ooi, T. Hayashi, and K. Endo, *Japanese Journal of Applied Physics* 60, 073002 (2021); doi: 10.35848/1347-4065/ac0406.
- 5) “高感度磁束センサ SQUID”, 杉山 卓, 井深 丹, *低温工学*, Vol.15, No.1, p.2 (1980).
- 6) “Sensitivity Enhancement of Superconducting Quantum Interference Devices through the Use of Fractional-Turn Loops”, J. E. Zimmerman, *Journal of Applied Physics*, Vol. 42, Number 11, pp. 4483-4487 (1971); doi: 10.1063/1.1659798.

- 7) “Lower critical fields in an ellipsoid-shaped YBa₂Cu₃O_{6.95} single crystal”, R. Liang, P. Dosanjh, D. A. Bonn, W. N. Hardy, and A. J. Berlinsky, Physical Review B 50, pp.4212 (1994); doi: 10.1103/PhysRevB.50.4212.
- 8) “Highly Sensitive Uncooled Magnetometers: State of the Art. Superconducting Magnetic Hybrid Magnetometers, an alternative to SQUIDS?”, D. Robbes, C. Dolabdjian, S. Saez, Y. Monfort, G. Kaiser, and P. Ciureanu, IEEE Trans. on Appl. Supercond. Vol. 11, No. 1, pp. 629 - 634 (2001); doi: 10.1109/77.919423.
- 9) Inductance Calculations: working formulas and tables, F. W. Grover, (Dover Publications (2009), ISBN 0-486-47440-2), Chapter 16.
- 10) 電気磁気学(第3版改訂)(山田 直平, 桂井 誠, 電気学会(2002)), 第10章; ISBN: 4886862314.
- 11) 電気磁気学(第2版)(抜山 平一, 丸善株式会社(1958)), 第3章.
- 12) ベクトル電気磁気学(中)(W. B. Boast 著, 片方 義治, 玄地 宏 共訳, 近代科学社 (1968)), 第18章.
- 13) 例えば、**keisan** 生活や実務に役立つ計算サイト.
<https://keisan.casio.jp/exec/user/1225887110>

第4章

高温超伝導グラジオメータ(磁場勾配計)の作製と一様分布した磁場下にある磁性体片の検知

本章では、「切り紙」手法による高温超伝導グラジオメータの作製と、高温超伝導グラジオメータの一様な磁場および勾配のある磁場に対する磁気特性について述べる。また一様磁場内に磁性体を置いた場合に磁性体周辺に生じる局所的な勾配磁場を利用して、高温超伝導グラジオメータに対する磁性体の相対位置を検知する実験を行った結果について述べる。

4.1 序言

磁気計測で用いられる高感度な磁気センサは、環境磁場によるノイズの影響を受けやすいことや地磁気を検出対象の磁気信号にバイアス成分を付加することから、磁気シールドを用いずに磁気検査技術に高感度磁気センサを適用する場合には様々な問題が生じる。高感度のマグネトメータではこの問題を解決するために、磁気センサへの磁気ノイズの影響を抑制できる磁気シールドを用いて環境磁場から遮蔽した磁気センサに対し、フラックスガイドを介して磁気信号を伝達する設計が行われる。例えば SQUID を用いる高感度マグネトメータでは、磁気シールドルーム内に SQUID を配置し、超伝導磁束トランスを用いて対象となる磁気信号のみを捕集しシールド外部から SQUID に伝達することで、SQUID の動作に障害となる周囲の磁気ノイズの影響を排した高感度磁気計測を行っている(図1. 3)。また磁気信号に混入する地磁気などバイアス成分の除去については、適切に配置した 2 つの磁気センサの信号の差分を求め、一様な磁場によるバイアス成分を除去する方法が提案されている¹⁾。この方法では、2 つの独立した磁気センサを用い、一方を信号計測用、他方をバックグラウンド測定用として、信号演算によりバックグラウンドの影響を排除する。2つのセンサが同相の場合には差分信号はゼロとなり、2つのセンサ間に磁場勾配があるときのみ差分信号が生成されるので一様分布した磁場によるバイアス成分は測定信号から排することができる。しかしこの構造では、温度ドリフトなどセンサの個体差により生じる差異が信号に影響する。

これに対して、超伝導磁束トランス技術において複数の Pickup コイルを磁場に対して適切に配置し、各々の Pickup コイルに誘起される超伝導シールド電

流を相殺させることで、バックグラウンド信号成分を排するグラジオメータ構造が提案されている²⁾。超伝導グラジオメータはそれ自身が一様磁場によるバックグラウンド信号を相殺する構造であるため、1つの磁気センサで差分信号の計測システムを構築できる。そのためセンサの個体差の影響を考慮する必要がない。

第3章において、高温超伝導磁束トランスを作製し、定常磁場に対する磁場伝達機能を評価した。また第2章で示した通り、本研究で提案する「切り紙」手法を用いた高温超伝導シームレス閉ループの作製では、複数ターンのコイルの作製が可能である。そこで、高温超伝導磁束トランスの構造を拡張し、一つの超伝導閉回路の中に2つの Pickup コイルと1つの Input コイルを内包させて一次の高温超伝導グラジオメータを作製した。この高温超伝導グラジオメータについて、2つの Pickup コイルの配置方向によってアキシアル型とプラナー型の2種類の素子を作製した。

アキシアル型の高温超伝導グラジオメータについて、一様な分布をした定常磁場および勾配のある分布をした定常磁場を Pickup コイルに印加し、Input コイルに生じる磁場の強度を測定した。

また、プラナー型の高温超伝導グラジオメータを用いて、一様な磁場内に置かれた強磁性体の検知を試みた。一様な磁場内に強磁性体でできた磁性体片を置いた場合、透磁率の分布によって磁性体片の周囲の空間に局所的な磁場勾配が発生する。この磁場勾配を高温超伝導グラジオメータで検出することで、高温超伝導グラジオメータと磁性体片の相対位置の検知が可能と考えられる。

4. 2 試料作製および実験方法

4. 2. 1 高温超伝導グラジオメータの作製

本研究においては、中心軸が一致するように2つの Pickup コイルを軸方向に配置したアキシアル型のグラジオメータ、および2つの Pickup コイルを平面上に隣接配置したプラナー型の高温超伝導グラジオメータを作製した。

図4. 1に「切り紙」手法を用いたアキシアル型の配置を持つ高温超伝導グラジオメータの作製図を示す。HTS テープ線材に対し、テープ幅を4分割する様に貫通スリットを3本作製し、図4. 1右下に示すように押し広げることで Pickup コイル部を作製する。比較のため、同じ直径で2ターンの Pickup コイルをもつ磁

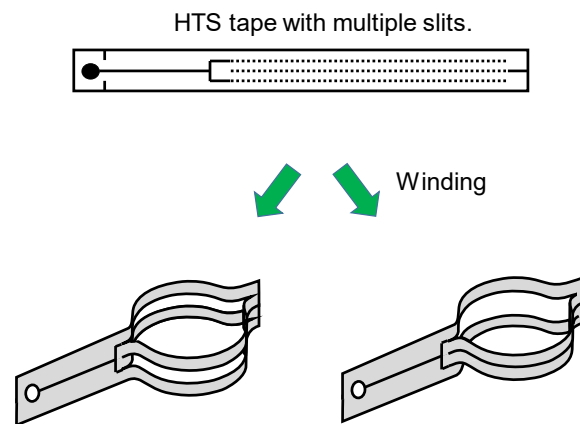


図 4. 1 2 ターン Pickup コイルをもつ高温超伝導磁束トランス（左）と
アキシャル型高温超伝導グラジオメータ（右）.

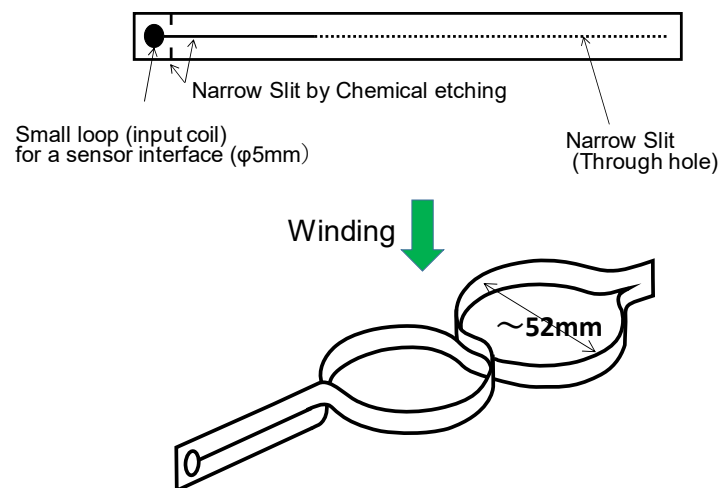


図 4. 2 プラナー配置型高温超伝導グラジオメータの作製

束トランスも作製した(図4. 1左下)。この2つの違いはスリットを広げる方向の順番のみである。両構造共に、Pickup コイルの直径は 50mm であり、エッチングで作製した Input コイルの直径は 5mm である。

また図4. 2は、プラナー型の配置を持つ高温超伝導グラジオメータの作製図である。HTS テープ線材に設けたスリットを、上下が対称となる様に S 字形状に曲げることで、巻き方向が逆向きである2つの Pickup コイルを平面上に構築する。Pickup コイルの直径は 52mm であり、エッチングで作製した Input コイルの直径は 5mm である。

4. 2. 2 一様磁場及び勾配磁場を印加したグラジオメータの磁場信号計測

磁気シールドルーム内に設置した図4. 3に示す測定系を用いて、ヘルムホルツコイルおよびマックスウェルペアコイルの中心にアキシャル型超伝導グラジオメータを設置し、一様磁場あるいは勾配磁場を印加して Input コイルに発生する磁場を計測した。磁場測定には第2章及び第3章の実験と同様に、平面 Input コイルに断熱材の発泡ポリスチレン(厚さ 5mm)を挟んで結合させた MI センサを用いた。

一様分布した磁場の印加については、第2章及び第3章の実験で用いた直径 308mm のヘルムホルツコイルを用いた。また勾配磁場の印加については、マックスウェルペアコイルを用いた。マックスウェルペアコイルは、実験で用いたヘルムホルツコイルを分解し、端部のコイルはそのままコイルの向きとコイル間隔を変更することで作製した。そのためコイル直径は 308mm であり、コイル間隔はヘルムホルツコイルの 154mm に対してマックスウェルペアコイルでは 266.7mm となる。

また図4. 1の左下に示すように寸法と形状がアキシャル型超伝導グラジオメータと等しく Pickup コイルの巻き方のみを変更した、2ターンの Pickup コイルをもつ超伝導磁束トランスについて同様の実験を行い、グラジオメータ構造の結果と比較した。

4. 2. 3 一様磁場内に置かれた磁性体片の検知試験

図4. 4に磁気シールドルーム内に設置した測定系の構成を示す。一様磁場印加に用いるヘルムホルツコイルの中心とグラジオメータの2つの Pickup コイル

の中心が一致するように、ヘルムホルツコイル中に液体窒素冷却槽とプランナー型高温超伝導グラジオメータを設置する。液体窒素冷却槽の上に 2mm 厚のアクリル板を置き、その上に磁性体片として機械構造用炭素鋼鋼材 S45C 材の円柱 ($\Phi 20\text{mm} \times 10\text{mm}^{\text{t)}$) を静置する。このとき高温超伝導グラジオメータの高さ中心から円柱形状の磁性体片の下面までの距離はアクリル板を挟んで 32mm となる。この測定系において、ヘルムホルツコイルにより一様磁場を Pickup コイル部に印加し、アクリル板上に置いた磁性体片の位置を Pickup コイルに対して相対的に変化させたときに Input コイルに現れる磁場信号の変化を調べた。磁性体片の位置変化は図 4. 5 に示すように、Input コイルの逆端にある側の Pickup コイル中心を含み、2つの Pickup コイル中心を結ぶ方向、またこれに垂直な方向に変化させた。

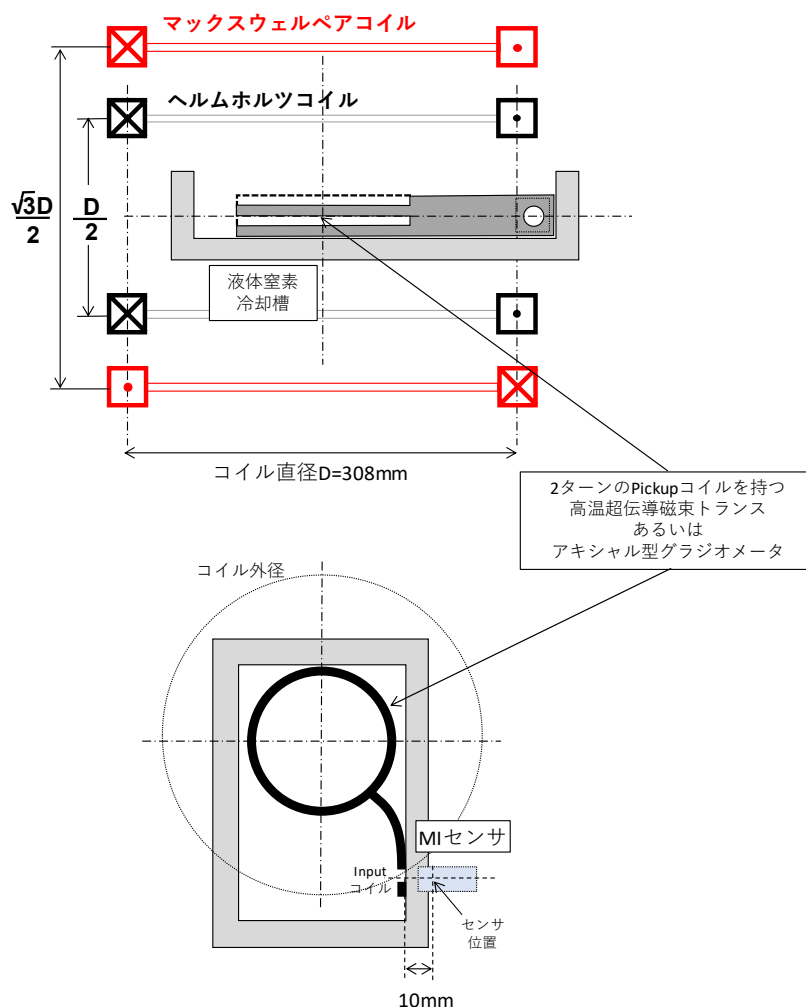


図 4. 3 磁場発生コイルを用いた一様磁場または勾配磁場の印加装置

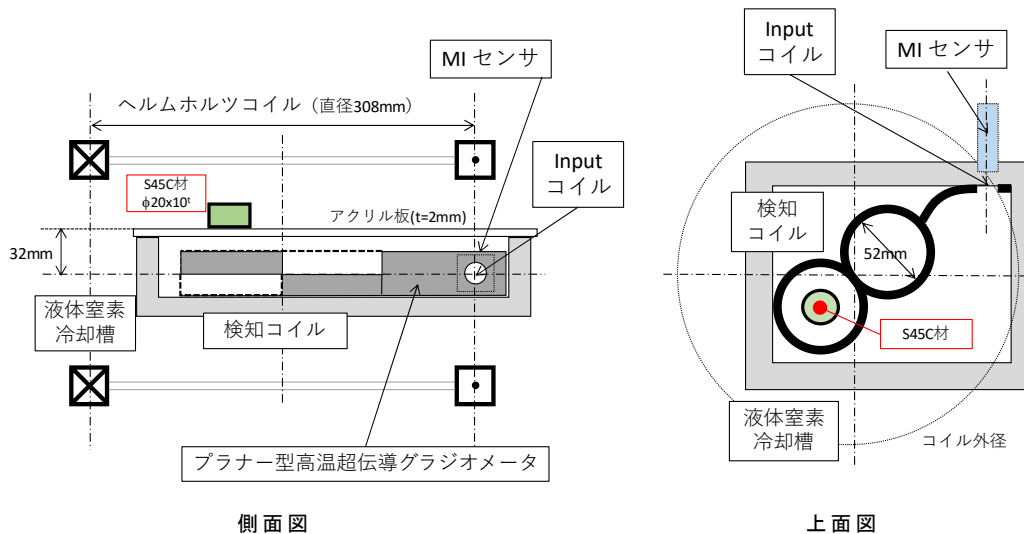


図4.4 プラナー型高温超伝導グラジオメータを用いた
磁性片検知試験装置

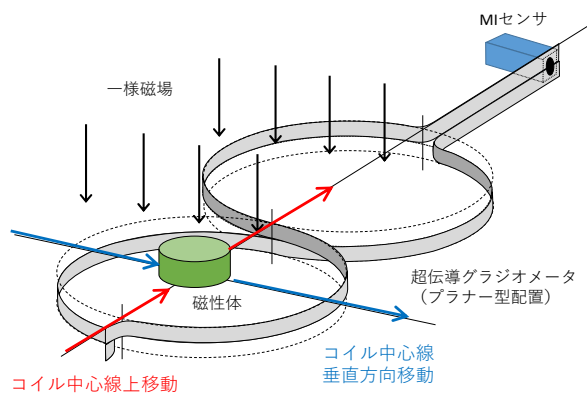


図4.5 プラナー型高温超伝導グラジオメータによる磁性体片(S45C 材)の検知

検知コイルに対する磁性体片(S45C材円柱)の位置を図中矢印方向に移動させて Input コイルに発生する磁場の変化を結合した MI センサで測定した。

4. 3 実験結果

4. 3. 1 一様な定常磁場および勾配を持つ定常磁場の印加による アキシアル型グラジオメータの磁気信号

アキシアル型高温超伝導グラジオメータ、また比較のため同径の2ターン Pickup コイルを持つ高温超伝導磁束トランスに対して、ヘルムホルツコイルを用いて一様な定常磁場を Pickup コイルに印加したときに Input コイルに現れる磁場を測定した結果を図4. 6に示す。また Pickup コイルに対してマックスウェルペアコイルを用いて勾配を持つ定常磁場を印加した場合の結果を図4. 7に示す。高温超伝導磁束トランスでは一様磁場の印加に対して磁場伝達になされ Input コイル上に磁場を生じるが、高温超伝導グラジオメータでは Input コイル上に磁場が生じていない。一方で勾配磁場の印加に対しては、高温超伝導グラジオメータでは2ターン Pickup コイルを持つ高温超伝導磁束トランスよりも大きな磁場が Input コイル上に生じている。

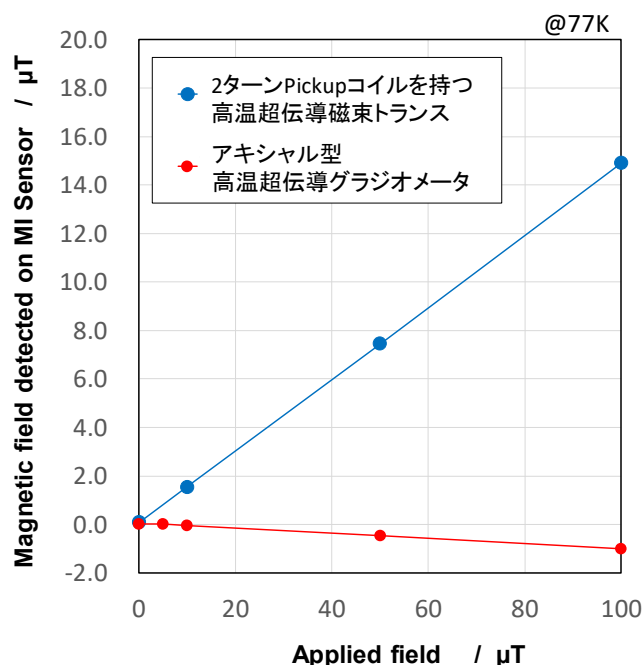


図4. 6 一様磁場印加に対するアキシアル型超伝導グラジオメータと
2 ターン Pickup コイルを持つ超伝導磁束トランスの応答

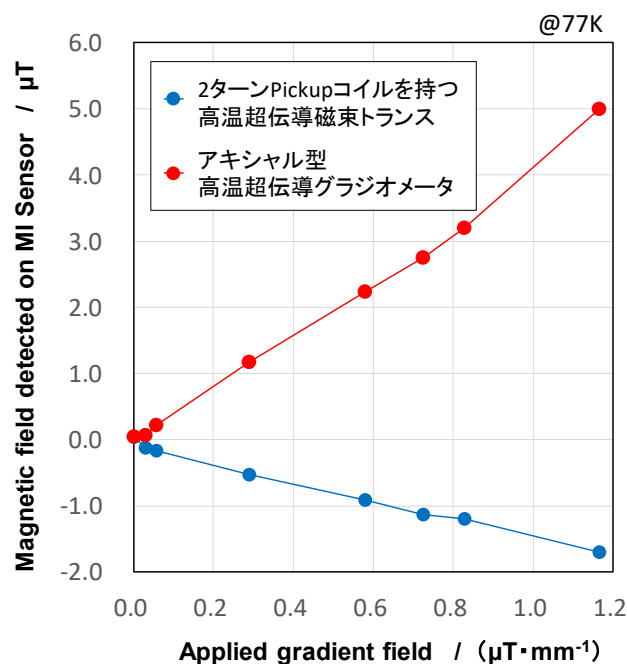


図4. 7 勾配磁場印加に対するアキシシャル型超伝導グラジオメータと2ターン Pickup コイルを持つ超伝導磁束トランスの応答

4. 3. 2 プラナー型高温超伝導グラジオメータを用いた一様な磁場中にある磁性体片の検知

図4. 4に示すように、ヘルムホルツコイルによる一様な磁場中にプラナー型高温超伝導グラジオメータを設置した。Pickup コイル上部に磁性体片を置き、磁性体片の位置を2つの Pickup コイルの中心を結ぶ線に対して、図4. 5に示す

- i) この線上を先端側 Pickup コイルの外から中心を経て他方のコイルに入るまでの範囲
- ii) この線に直交方向に、先端側 Pickup コイルの外側からコイル中心を経て逆の外側へ出るまでの範囲

の2つの方向で移動させ、Input コイルに現れる磁場の変化を測定した。i) の方向の磁性体片位置移動における測定結果を図4. 8に示す。図4. 8において a)は Input コイルが発生する磁場の磁性体片位置による変化、b)は磁性体片と

Pickup コイルの相対位置である。磁性体片が先端側の Pickup コイル外縁部よりも外側にあるとき、Input コイルの発生磁場はほぼゼロかわずかに負の値となる。磁性体片の位置が先端側 Pickup コイルの中心に近づくにつれ発生磁場は増加し、Pickup コイル中心を通過すると Input コイルの磁場信号は減少に転ずる。磁性体片の位置が2つの Pickup コイルの境界にあるとき、Input コイルの出力磁場はゼロを示す。さらに、逆側の Pickup コイルの領域に磁性体片が入ると、発生磁場は負の値に転じた。また印加する定常磁場の強さを $100\ \mu\text{T}$ から $200\ \mu\text{T}$

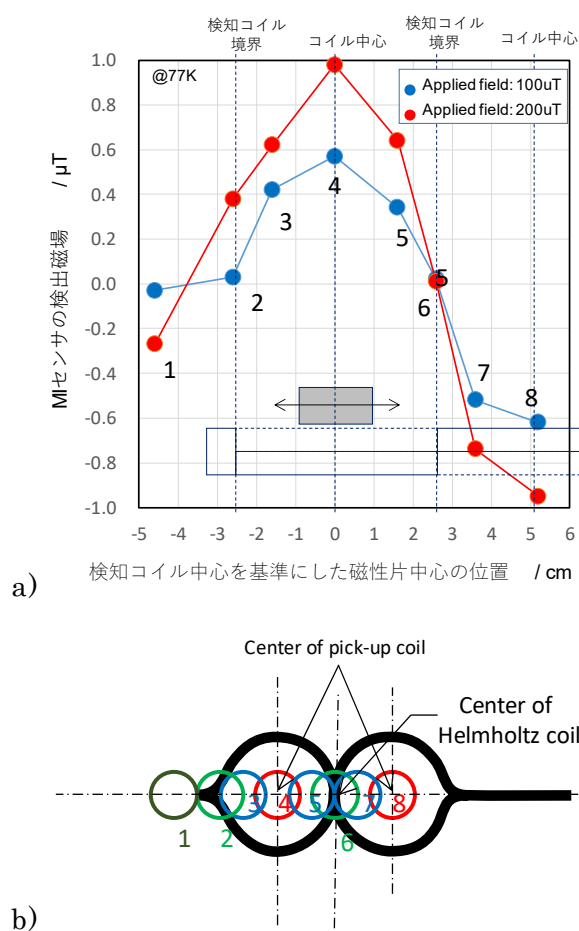


図4. 8 プラナー型超伝導グラジオメータ上での磁性体片の位置と出力磁場

磁性体片の位置はグラジオメータの中心軸上を移動する。

a)内の点に示された指標は b)に示された磁性体片の位置に対応する。

μT まで増加したところ、磁場変化の曲線形状はほぼ等しく、磁場出力信号はほぼ2倍になった。また ii) の方向の磁性体片位置移動における測定結果を図4. 9に示す。図4. 9において a) は Input コイルが発生する磁場の磁性体片位置による変化、b) は磁性体片と Pickup コイルの相対位置である。磁性体片が Pickup コイル外縁部の外側にあるとき、Input コイルの磁場は負の値を示している。磁性体の中心位置が Pickup コイル外縁部より内側に入ると Input コイ

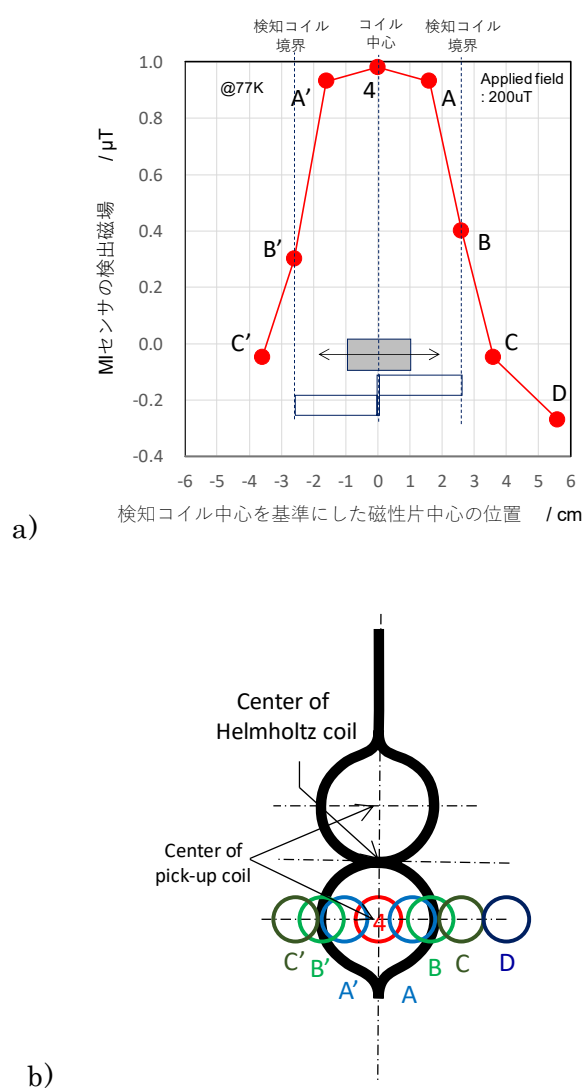


図4. 9 プラナー型超伝導グラジオメータ上での磁性体片の位置と出力磁場

磁性体位置はグラジオメータの中心軸に直交な方向に移動する。

a)内の点に示された指標は b)に示された磁性体片の位置に対応する。

ルの発生磁場は正方向に増大し、磁性体片の外周が Pickup コイルの内側に入ると Input コイルの発生磁場はほぼ飽和する。また移動距離に対する磁場信号の変化率は、ii) の方向で磁性体片を移動した場合に i) の移動方向に比べて大きかった。

4. 4 考察

4. 4. 1 定常磁場によるバックグラウンド信号の除去と勾配磁場の検出

第3章で示した通り、2ターンの Pickup コイルを内包する高温超伝導磁束トランスの Pickup コイルに一樣な定常磁場を印加した場合、Pickup コイルの各ターンに同相の超伝導シールド電流が誘起され Input コイル上に引き出した超伝導シールド電流による磁場が形成される。これに対し、一次の超伝導グラジオメータでは、インダクタンスが等しい2つの Pickup コイルが逆相に接続されており、Pickup コイルへの磁場印加により誘起される超伝導シールド電流の方向が逆になる。そのため内包する2つの Pickup コイルに一樣な磁場を印加した場合、コイルに誘起される電流は相殺され Input コイルに生じる磁場はゼロになる。4. 3. 1項の実験結果で用いたアキシアル型の高温超伝導グラジオメータでは、一樣磁場の印加に対しては上側と下側の各々の Pickup コイルに発生する超伝導シールド電流の大きさが等しいため、逆向きの電流が互いに打ち消しあう。そのため、Input コイルに生じる磁場はほぼゼロになっている。

一方、マックスウェルペアコイルを用いて発生した勾配のある定常磁場をアキシアル型高温超伝導グラジオメータの Pickup コイルに印加した場合、上下の Pickup コイルに各々鎖交する磁束に差があり、誘起される超伝導シールド電流の大きさに差が生じる。そのため Pickup コイルの逆相接続においても閉ループ内に電流が生じ、Input コイル上に磁場が形成される。これに対して2ターンの Pickup コイルを内包する高温超伝導磁束トランスに勾配磁場を印加した場合には、Pickup コイルを形成する2つのループに誘起される超伝導電流が同じ方向であり、Pickup コイル部全体に鎖交する磁束は、一樣磁場の印加の場合に比べて2つのループに各々鎖交する磁束の差分だけ減少する。そのため Input コイルに引き出される電流は一樣磁場印加の場合に比べて減少し、Input コイルに発生する磁場信号は小さくなる。

図4. 6および図4. 7に示した結果は、作製したアキシアル型の高温超伝導

磁束トランスが一様な定常磁場によるバックグラウンドを測定信号から除外し勾配磁場のみを検知する機能を実現していることを示している。この機能は、特に地磁気や環境磁場の影響を受けやすい磁気計測技術、例えば環境磁場下で実施される大型構造物や食品などの深部非破壊検査、資源探査のための地磁気計測などの技術において、高温超伝導グラジオメータ応用の可能性を大きく広げると考えられる。

4. 4. 2 局所的な磁場勾配を利用した磁性体片の検知

また図4. 8および図4. 9に示す実験では、プラナー型高温超伝導グラジオメータを用いた磁性体片の検知を試みた。この実験では、一方の Pickup コイルをバックグラウンドの計測を行うリファレンスとし他方の Pickup コイルを検知コイルとして、プラナー型高温超伝導グラジオメータの検知コイル近傍にある磁性体の検知を行う。一次の超伝導グラジオメータでは2つの Pickup コイルに誘起される超伝導シールド電流の差分により Input コイル上に磁気信号を形成する。一様な磁場内に強磁性体があるとき、磁性体の近傍では空間の透磁率が変化し、このため空間の磁束密度に変化が生じて局所的な磁場勾配を生じる。この磁場勾配を検知コイルで捉えることで、コイル近傍にある磁性体片の検知が可能になると考えられる。

図4. 8において磁性体片が先端側の Pickup コイル外縁部よりも外側にあるとき、Input コイルの発生磁場はほぼゼロかわずかに負の値となった。図4. 2のプラナー型高温超伝導グラジオメータは、2つの Pickup コイルの印加磁場が等しい場合、すなわち勾配のない一様な磁場内では Input コイル上に磁場信号を発生しない。磁性体片が検知コイルから離れているとき、磁性体片の近傍に限られた局所的な磁場勾配は、磁性体片から検知コイルまでの距離において勾配が十分に小さくなる。そのため磁性体片が検知コイルの外側の離れた位置にある場合には高温超伝導グラジオメータは Input コイル上に磁場を発生しない。磁性体片の位置が先端側の Pickup コイルの中心軸に近づくと Input コイルの磁場は増加し、磁性体片の位置が Pickup コイル中心軸上にあるときに Input コイルの磁場は最大となる。この変化は、磁性体が Pickup コイル中心軸上にあるときに印加磁場による磁束を最も効率よく集束し Pickup コイルに伝達するためと考えられる。磁性体片の位置が2つの Pickup コイルの境界にあるときに Input コイルの出力磁場がゼロになるのは、磁性体片近傍に集中した磁束が両 Pickup コイルに均等に振り分けられている結果と考えられる。さらに、逆側の

Pickup コイルの領域に磁性体片が入ると Input コイルの発生磁場が負の値に転じるのは、印加磁場による磁束を集束する磁性体片が移動することで2つの Pickup コイルの間の磁場の勾配が逆転し、超伝導シールド電流の方向が逆転したためと考えられる。この磁性体片の移動による発生磁場の変化は2つの Pickup コイルの中心に対して対称形であり、これは2つの Pickup コイルのインダクタンスが良くマッチングしていることを示している。

この検知試験において、印加磁場を $100\ \mu\text{T}$ から $200\ \mu\text{T}$ に増加させた場合には Input コイルの磁場信号が大きくなり、位置の移動距離当たりの出力信号変化も大きくなった。従って、高温超伝導グラジオメータを用いて検知コイルの走査などの方法で磁性体片の相対位置を推定する場合には印加する定常磁場が大きいほうが有利であることがわかった。

図4. 9に示す方向の磁性体片の位置変化については、磁性体片が Pickup コイル外縁部からより外側に離れているときに Input コイルの磁場は負の値を示した。これは図4. 8の結果と同様に、磁性体片に磁束が集束されることで磁性体の周辺には磁束密度が小さい領域が生じ、検知コイルがこの磁束密度が小さい空間を検知したと考えられる。図4. 8の結果と同様に磁性体片の中心位置が検知コイルの内側に入ると Input コイルの磁場が正に増大するが、磁性体片の外周が検知コイルの内側に入ると信号は飽和し、磁性体片が Pickup コイルの中心軸上に達しても Input コイルの磁場は微増にとどまる。また Pickup コイル外周付近において磁性体の移動距離に対する Input コイルの磁場の変化率は、図4. 8の結果に比べてより鋭敏であるように見える。これは図4. 8の方向では図4. 2に示す Pickup コイル先端部の形状のために検知コイルの有効エリアが引き延ばされていること、また図4. 8の移動方向は図4. 9の方向よりも磁性体片とリファレンスコイル間の距離変化が大きく、リファレンスコイルに生じる超伝導シールド電流が磁性体片の移動による影響を受けやすいのではないかと推測する。

本研究で作製したプラナー型高温超伝導グラジオメータの Pickup コイルは、作製方法の制限により図4. 2に示すようにループの中心を含む断面に対して非対称な形状を有する。しかし磁性体片の移動方向に対して非対称な形状の検知コイルを用いたにもかかわらず、図4. 9の結果では磁性体片の位置変化に対して対称的な信号変化が見られた。1. 2. 2項で示した通り、超伝導シールド電流は磁束の通過領域と超伝導体の界面に集中するため、この形状の超伝導磁束トランスの動作に関係する電流経路はコイルの中空部に隣接したごく狭い幅の領域に限られると考えられる。そのため、この高温超伝導グラジオメータの実際の動作においては、検知コイル部における超伝導シールド電流の流

域は平面的な回路を成すので、磁性体位置の変化に対して対称的な信号が得られたものと推測できる。

これらの実験によって、磁場中にある高温超伝導グラジオメータを用いて、一様磁場によるバックグラウンドを排除し磁場勾配成分のみを検知できること、また局所的な磁場勾配の検知を利用して、一様磁場中にある磁性体片の検知が可能であることがわかった。磁性体が近傍にある場合に高温超伝導グラジオメータを走査させることで、Input コイルが発生する磁気信号が変化する。高温超伝導グラジオメータの検知コイルを異なる複数の方向に走査させるなどの方法で、磁性体や電磁誘導探傷における構造物の欠陥などの位置検出が可能になると考えられる。

4.5 本章のまとめ

「切り紙」手法によるマルチターン構造を有する閉ループの作製法を適用し、一次の高温超伝導グラジオメータを作製した。超伝導グラジオメータでは複数の Pickup コイルを超伝導シールド電流の相殺を考慮して接続する。これにより一様磁場による磁気信号の生成を抑制し、勾配磁場成分のみを検知できる。

液体窒素を用いて冷却したアキシアル配置の高温超伝導グラジオメータについて、一様な定常磁場下および勾配のある定常磁場下での Input コイルの発生磁場を測定したところ、一様磁場の印加では Input コイル上に磁場が発生せず、勾配磁場の印加においては Input コイル上に大きな磁気信号が観測された。

またプラナー配置の高温超伝導グラジオメータを用い、磁性体近傍の空間に生じる局所的な磁場勾配を利用した磁性体片の検知を試みた。この検知試験では、一様磁場内にある磁性体片の外周が高温超伝導グラジオメータの検知コイル内側に交わる場合に磁気信号の大きさが増大した。

このような一様な定常磁場によるバックグラウンドの除去は対象物を囲う大型の磁気シールドルームを必要とせず、非破壊探傷や資源探査、食品異物検査など環境磁場の影響を受けやすい検査技術^{3)、4)}において優位性を持つものと考えられる。本研究で提案した高温超伝導磁束トランス・高温超伝導グラジオメータはメートル級のループ径を持つ大型でも作製が可能であり、かつ冷却システムを簡便にできることから、これらの検査技術で有効であると考えられる。

参考文献

- 1) “Development of First-Order Gradiometer-type MI Sensor and its Application for a Metallic Contaminant Detection System”, T. Takiya, T. Uchiyama, and H. Aoyama, Journal of the Magnetism Society of Japan Vol.40, No.3, pp51-55 (2016);
doi: 10.3379/msjmag.1605R001.
- 2) “SQUID 磁束計による生体磁場計測”, 葛西 直子, 低温工学 26 卷 5 号, p. 344-353 (1991); doi: 10.2221/jcsj.26.344.
- 3) “金属資源探査における物理探査（１）”, 荒井 英一, 物理探査 第 64 卷, 第 4 号, pp. 229-242 (2011).
- 4) “Development of HTS-SQUID magnetometer system with high slew rate for exploration of mineral resources”, T. Hato, A. Tsukamoto, S. Adachi, Y. Oshikubo, H. Watanabe, H. Ishikawa, M. Sugisaki, E. Arai, and K. Tanabe, Superconductor Science and Technology 26, 115003 (2013);
doi:10.1088/0953-2048/26/11/115003.

第5章

総括

本章では、第1章から第4章を通した総括として、本研究で得た実験結果のまとめと高温超伝導磁束トランス研究における今後の課題について記述する。

5.1 本研究結果のまとめ

高温超伝導線材を基材とした、液体窒素温度領域で動作する高温超伝導磁束トランスおよび高温超伝導グラジオメータの作製と特性評価に関して以下の結論を得た。

- ・市販の RE-123 系高温超伝導テープ線材を用いて、超伝導閉回路を成すシームレス高温超伝導閉ループを作製した。この閉ループでは、定常磁場の印加により超伝導シールド電流が誘起されており、液体窒素温度 (77K) において閉ループ全体が超伝導状態にあると考えられる。

- ・2つのコイル部を内包した閉回路構造をもつ高温超伝導磁束トランスを作製し、液体窒素温度において両コイル間の磁場伝達機能の発現を確認した。磁場の伝達効率は、両コイルの口径、ターン数により変化し、この変化は両コイルのインダクタンス比によって説明できる。本研究においては、1ターンかつ大口径の Pickup コイルと小口径かつマルチターンの Input コイルの組み合わせによって磁場伝達効率の大きな向上が見られ、最良の磁束トランス試料において125%の磁場伝達効率が得られた。これは高温超伝導磁束トランスに印加された磁場を1.25倍に増幅し、超伝導磁束トランスに結合した磁気センサに伝達できることを示すもので、測定対象とする磁場の磁束を“濃縮”し、汎用磁気センサの実効感度を引き上げることができると考えられる。

- ・高温超伝導磁束トランスにおいて複数設けた Pickup コイルを逆相に接続することで、一様な定常磁場によるバイアス信号成分を除去し勾配のある磁場成分のみを計測できる高温超伝導グラジオメータを作製した。この高温超伝導グラジオメータは、磁場印加試験において、一様な磁場に対して信号を発生せず、勾配磁場に対してのみ信号を発生することが確認できた。

・超伝導グラジオメータは、内包する2つの Pickup コイルを検知コイルとバックグラウンド磁場のリファレンスコイルとして用いることで、検知コイル近傍にある磁場勾配を計測できる。プラナー型高温超伝導グラジオメータを用いて一様磁場内にある磁性体片の近傍の空間に生じる磁場勾配を検知し、検知コイルに対する磁性体片の相対位置変化を磁気信号として計測できた。この結果は、本研究が将来的に見据える、家畜用注射針や包装用ステープラー針など食品への磁性異物混入検査、大型構造体の深部までの非破壊検査、地磁気計測を用いた資源探査などへの応用の端緒となる成果と考えられる。

5. 2 今後の展望と課題

液体窒素温度領域でフラックスコンデンサとして動作する高温超伝導磁束トランスは実現できたが、実用化されている金属超伝導磁束トランスに比べると磁束の濃縮比はまだ十分ではない。より小口径でマルチターン構造の Input コイルの作製、液体窒素温度領域で動作可能な磁気センサの Input コイルへの直接マウントによる磁気結合強化、コイル間の伝達路における磁束漏洩対策などの方法により、伝達磁場のさらなる増大が可能と考えられる。また、資源探査など特に大型のフラックスコンデンサが要求される技術について、高温超伝導磁束トランスの有効性の検証を進める必要がある。金属線を用いた電磁誘導コイルによる磁束伝達や高透磁率材料を用いたフラックスガイドに対して、超伝導磁束トランスは深部探査で重要な定常磁場あるいは極低周波磁場の信号を高効率に捕集し磁気センサへ伝達することができる。本研究で作製した高温超伝導磁束トランスは冷却システムの扱いが容易であり、数メートル級の大口径コイルやマルチターン構造のコイルの実装が可能である。これらの点で、屋外でも使用が可能な大型のフラックスコンデンサとして、高温超伝導磁束トランスの有効性は十分に考えられる。高温超伝導線材に対する簡便な接合手法が確立されていない現状において、「切り紙」手法により作製されるシームレス閉ループ構造を適用した高温超伝導磁束トランスの研究は重要であると考えられる。

謝辞

本論文の作成において、研究のご指導をいただきました金沢工業大学 上原 弦教授、遠藤 和弘教授に記して謝意を表します。また内容の推敲について貴重なお時間の中、多くのご助言とご指導をいただきました国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS) 有沢 俊一氏、北口 仁氏に感謝いたします。

超伝導磁束トランスの磁場応答に関してご協力と貴重な議論を頂いた、大井 修一氏、仙台高等専門学校 林 忠之教授の各氏、またシミュレーションや測定手法の検討などで多大なご協力とご助言をいただいたNIMS 立木 実氏に感謝いたします。

本研究の核心となる「切り紙」手法や超伝導接続技術、その他の方法による高温超伝導閉ループの作製法に関する研究についてご理解をいただき、また関連する研究において多くのご助言をいただいた、高温超伝導・金属超伝導材料研究に関係する研究者の皆様、特に科学技術庁金属材料技術研究所(現 NIMS) 故・前田 弘氏、戸叶 一正氏、熊倉 浩明氏、田中 吉秋氏、福富 勝夫氏に深く感謝いたします。

最後に、本論文作成に至るまでに様々な形で応援していただいた、NIMS 広報室の皆様に感謝いたします。

本論文に関係する研究発表など

査読論文

“Preparation of a high- T_c superconducting magnetic flux transformer with a 100 mm bore coil and static magnetic field transfer at 77 K”, K. Komori, S. Arisawa, M. Tachiki, S. Ooi, T. Hayashi, and K. Endo, Japanese Journal of Applied Physics 60, 073002 (2021) ;doi:10.35848/1347-4065/ac0406.

“低周波磁場を用いた深部欠陥検査応用のための RE123 系高温超伝導磁束トランスの作製”, 小森 和範, 立木 実, 有沢 俊一, 遠藤 和弘, 電気学会論文誌E(センサ・マイクロマシン部門誌): IEEJ Transactions of Sensors and Micromachines, Vol. 138, No. 10 pp.449-454; doi: 10.1541/ieejsmas.138.449.

プロシーディング

“RE123 系高温超伝導磁束トランスの構築と高感度磁気計測応用の検討”, 小森 和範, 有沢 俊一, 遠藤 和弘, 電気学会 E 部門
フィジカルセンサ研究会 (2016/11/25 金沢工業大学), PHS-16-051.

学会発表(口頭/ポスター発表)

“高温超伝導磁束トランスの作製と静磁場伝達特性の評価”,
小森 和範, 有沢 俊一, 遠藤 和弘, 第 66 回 応用物理学会春季学術講演
会(2019/03/10 東京工業大学).

“高温超伝導磁束トランスにおける磁束伝達効率向上の検討”,
小森 和範, 有沢 俊一, 遠藤 和弘, 第 28 回 日本 MRS 年次大会
(2018/12/20 北九州国際会議場).

“高温超伝導シームレス環線を用いた磁場勾配計の作製と評価”, 小森 和範,
有沢 俊一, 遠藤 和弘, 第 27 回 日本 MRS 年次大会(2017/12/07 横浜
情報文化センター).

“Preparation of magnetic flux transformer and field gradiometer by using
seamless and multi-turn High-Tc superconducting loops”,
K. Komori, S. Arisawa, and K. Endo, IUMRS-ICAM2017
(2017/08/27-2017/09/01, 京都大学 吉田キャンパス).

“Preparation of 4-inch Bore HTS Seamless Loop Using Cut-and-Wind
Method on Coated Tape Conductor Targeting Magnetic Flux Transformer
Application”, K. Komori, S. Arisawa, and K. Endo, 第 26 回 日本 MRS 年
次大会(2016/12/22 横浜情報文化センター).

“Fabrication of Large-Bore Seamless Loop Targeting Magnetic Flux
Transformer Using Cut-and-Wind Method on HTS Coated Conductor”, K.
Komori, S. Arisawa, and K. Endo, 1st. Asian ICMC and CSSJ 50th
Anniversary Conference (2016/11/07- 2016/11/10 金沢歌劇座).

研究アウトリーチ

・知財関連展示会出展

“高温超伝導シームレス多巻きループコイル”，第 15 回 NIMS フォーラム，
ポスターNo. 34 (2015).

・動画配信など

YouTube NIMS channel “まてりある’s eye”，鮮やか！ 実験映像

#4 “他では絶対見られない！ 超伝導 本当のすごさ(前編)”

[https://www.youtube.com/watch?v=G1X2IL8vDak&list
=PLuXvGpDxY2bDaS_9lWYHlwFChip0Ai98h&index=28](https://www.youtube.com/watch?v=G1X2IL8vDak&list=PLuXvGpDxY2bDaS_9lWYHlwFChip0Ai98h&index=28)



#5 “他では絶対見られない！ 超伝導 本当のすごさ(後編)”

[https://www.youtube.com/watch?v=ZBq8hxPFGP4&list
=PLuXvGpDxY2bDaS_9lWYHlwFChip0Ai98h&index=27](https://www.youtube.com/watch?v=ZBq8hxPFGP4&list=PLuXvGpDxY2bDaS_9lWYHlwFChip0Ai98h&index=27)

