様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ６ 月 １３ 日現在

機関番号：８２１１８
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2022～2024
課題番号：２２Ｈ０１２５６・２３Ｋ２２５２７

研究課題名（和文）宇宙マイクロ波背景放射観測のための超伝導ミラーの開発

研究課題名（英文）Development of superconducting mirror for the CMB observation

研究代表者
梅森　健成（Umemori, Kensei）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：６０３５３３６４

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　13,700,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙マイクロ波背景放射の観測において測定精度の制限要因となっている集光ミラーの超伝導化に取り組んだ。偏光測定装置の開発とニオブスズ製超伝導ミラー開発を並行して行った。偏光測定システムではアルミ・鉄・SUSの場合の偏光強度を測定するとともに、ニオブ板を用いた超伝導転移温度以下までの冷却試験までを行い、いよいよ超伝導ミラーの実験が行えるところまで装置の整備を進めた。ニオブスズ超伝導ミラーの開発は、ニオブ/ブロンズのクラッド材を用いてブロンズ法にてニオブスズ板生成の最適化を行った。最終的には実機を見越して、ニオブ/ブロンズ/無酸素銅の3層構造でのニオブスズ板製造の基盤技術開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
昨今の量子技術など、様々な技術を支えるのが超伝導技術である。その中でも高温超電導体を含んだ薄膜超伝導体の技術はますます重要度が増している。今回の研究では、超伝導加速空洞や超伝導電磁石用に開発されて来た超伝導技術の応用開発を行った。直接的な学術的意義はCMB偏光測定の精度向上に繋がる。より広い社会的意義としては、量子コンピューターや量子デバイスなどへの応用展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have worked on the development of superconducting focusing mirrors, which are a limiting factor in precise measurements of cosmic microwave background (CMB) radiation. The development of a polarized measurement system and a superconducting mirror made of Nb3Sn were carried out in parallel. The polarization measurement system measured the polarization strength for aluminum, iron, and stainless steel mirrors, and conducted a cooling test using a Nb plate below the superconducting transition temperature. For the development of the Nb3Sn superconducting mirror, we optimized the formation of the Nb3Sn plate by the bronze method using a niobium/bronze cladding material. Finally, we developed the basic technology for producing NB3Sn plates with a three-layer structure of Nb/bronze/oxygen-free copper in anticipation of actual production.

研究分野：加速器科学

キーワード：超伝導　宇宙マイクロ波背景放射　超伝導ミラー　ニオブスズ　ニオブ

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)観測においては、宇宙空間における電磁波の偏光分布測定を行い、宇宙誕生の謎に迫ろうとしている。

CMB観測においては、精度の高い偏光分布測定が要求されるが、その測定精度を制限する要因になっているのが、集光ミラーの抵抗成分により生み出される偽偏光シグナルである。現在、集光ミラーの材質としてはアルミが用いられているが、超伝導ミラーを採用することで偽偏光シグナルを抑制し、測定精度を向上させることができると期待されている。

一方で、素粒子実験や放射光実験等に用いられる粒子加速器の技術開発として、超伝導加速空洞や超伝導電磁石などの超伝導技術が広く開発されてきた。素粒子・加速器・超伝導の専門家がタッグを組み、CMB実験用超伝導ミラーの開発を行う。

２．研究の目的

上記述べたように、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)観測では、集光ミラーを用いて電磁波を集光し、宇宙空間における電磁波の偏光分布測定を行っているが、その測定精度を制限している要因が、現在用いられているアルミ製集光ミラーにより生ずる偽偏光シグナルである。この偽偏光シグナルはミラー表面の抵抗成分によるものであり、極力表面抵抗の小さい超伝導ミラーを適用することで、最大数万分の一に削減できると期待されている。

図１にアルミ・ニオブ・窒化ニオブ・ニオブスズを集光ミラーとしてそれぞれ用いた場合に生ずる偽偏光の割合を示す。低温にて超伝導特性を示すニオブやニオブスズなどの材料を用いることで、通常のアルミミラーに対して、偽偏光シグナルが劇的に削減されることが期待される。

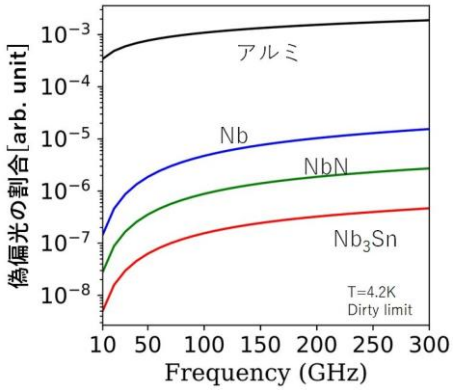

図1: ミラーの材質により生じる偽偏光の割合の周波数依存性の計算結果

本研究では、これまで加速器用に開発してきた超伝導技術を応用して、ニオブ、ニオブスズ、窒化ニオブなどの超伝導ミラーの製作を行う。CMB観測システムを模擬した測定系を構築し、現状のアルミ製ミラーの場合と超伝導ミラーの場合の比較を行い、偽偏光シグナルの削減ならびに偏光分布測定の精度向上を示す。

３．研究の方法

本研究では、CMB 偏光の精密測定のために、集光ミラーで生じる偽偏光を極限まで抑えるための超伝導ミラーを開発し、精度向上を実証することを目的としている。そのために、試作した超伝導ミラーを用いた偽偏光強度を評価するための偏光測定システムを開発し、通常の金属ミラーと比較して偏光強度が大きく減少している事を確認する。開発する偏光測定システムは、図２の様に直径 60cm, 高さ 60cm 程度の SUS 製チェンバーの中に構築した。10K 程度まで冷却した内層の壁面に導電性の高い電波吸収体を敷き詰めて、実際の CMB 偏光観測と同程度の輻射環境を再現している。電波吸収体からの無偏光信号がミラーによって反射された際に、ミラーの抵抗率の

1/2 乗に比例する偏光成分が生じる。これを偏光に感度のある検出器で受信し、偽偏光強度を評価する。本研究では、まず通常の金属ミラーを用いて、偽偏光の強度を測定し、強度が期待通りである事を確認し、測定システムの原理検証とする。その後、超伝導ミラーを複数の周波数帯域で測定・評価を行い、金属に対する優位性を実証する。

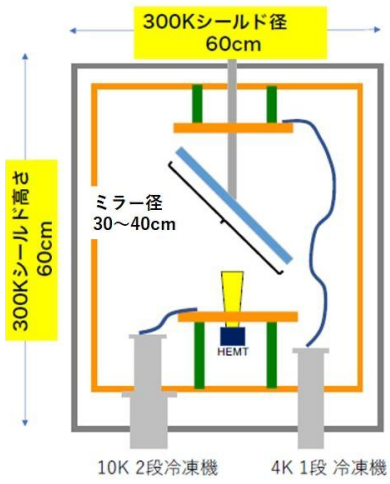

図 2: 本研究で開発する偏光測定システム

偏光測定装置の開発と並行して超伝導ミラーの開発を進めた。図 1 に示すように最も良い性能が期待できるのがニオブスズ(Nb_3Sn)であるため、ニオブスズ製超伝導ミラーの開発を行った。ブロンズ（Cu-Sn）合金の母材中に複数のニオブフィラメントを複合して熱処理を行うと、ブロンズ中のスズとニオブが 650℃程度の比較的低温での熱処理で反応し、均質で緻密な組織をもつ Nb_3Sn 相が厚く生成される。この原理は実用 Nb_3Sn 超伝導線材の量産製法として成功を収め、「ブロンズ法」と呼ばれている。本研究では、このブロンズ法を超伝導ミラーの製法として水平展開し、一軸熱間プレス加工を活用してニオブ／ブロンズの２層構造の複合円板の試作に取り組んだ。プレス加工実験には、物質・材料研究機構が保有する住友重機械工業製の最大荷重 1,500 トンの油圧プレス機（図 3）を使用した。本装置は、温度やひずみ速度はじめ様々なプレス条件を精緻に制御された世界最高水準の恒温プレスが可能である。最も特徴的な点はプレス時の加熱温度を一定に保持できることで、一般的にはプレスワーク部分は室温大気開放のため、加熱された加工対象物の温度は一方的に下がりながらプレスする。

それぞれ外径が 150mm のニオブ箔（厚さ 0.1mm）とブロンズ板（厚さ 3.0mm）を重ね合わせ、同じく外径 150mm のステンレス製円盤（厚さ 3.0mm）２枚で挟み込み、それらを厚さ 0.5mm のステンレス製パックに格納して脱気する。これは、熱間プレス中にニオブ箔及びブロンズ板の酸化を防止するためである。ステンレス製パックごと、プレスアンビルの上に設置し、加熱温度を 400℃～750℃の種々の温度に設定し、荷重を 600 トン～1,500 トンの間で一軸プレスした。設定荷重に到達したら 1 分保持した後に速やかに除荷し、プレスワーク外に取り出して空冷した。プレス後の円板サンプルは、ニオブ箔とブロンズ板の両者の密着性を目視で確認し、一部切り出して短冊状のサンプルに切断して、600℃～900℃の間で種々の時間の拡散熱処理を 10^{-4}Pa 以上の高真空中で実施した。拡散熱処理後のサンプルは、直流４端子法により臨界温度の測定を行って超伝導特性を評価した。また、樹脂に埋め込んで断面研磨した後に、光学顕微鏡あるいは走査型電子顕微鏡により反応層の厚さや結晶粒径を調査した。

図 3： 物質・材料研究機構が保有する 1500 トン熱間油圧プレス装置。最大荷重 1500tf、加熱温度～1100℃、ストローク速度制御 0.01～300mm/s、ひずみ速度制御 0.001～9.99 /s、素材長さ～200mm、素材高さ～300mm、素材重量～25kg

４．研究成果

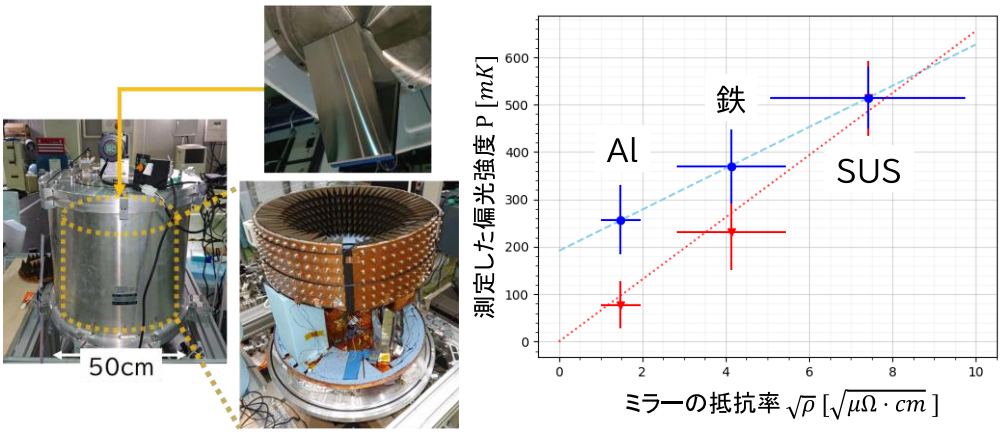

図 4: 開発した偏光測定システムの外観(左)と、システムを用いて測定したミラーの抵抗率と偏光強度の関係(右)。

図 4 に開発した偏光測定システムの外観と、さまざまな金属の偽偏光を測定した結果(右策)を示した。想定通り偏光強度が抵抗率の 1/2 乗に比例する事が確認できた。また、超伝導ミラーを試験する際に重要となる、抵抗率を０に外挿した際の予想偏光強度についても誤差の範囲で０である事を確認出来た。ただし、この精度では(金属と比較して)超伝導ミラーの効果を見ることは可能であるが、超伝導材質による効果の違いを識別するのは難しい。そのため、無偏光信号により生じる測定バイアスをできる限り除くために、現在の片偏波から両偏波の同時観測ができる様に改良を図った。ただし、入射光を直交する 2 偏波にわける素子(OMT)の性能が十分では無く、期待されるノイズレベルを達成することは出来ず今後の課題として残った。
また、超伝導ミラーの試験に向けて、ニオブ板を入れた状態で冷却試験を行った。熱リンクに改良の余地はあるものの、ミラーを 7K と転移温度以下まで冷却する事が出来た。いよいよ超伝導ミラーの試験をする準備が整ったと言える。測定システムに関しては冷凍機を通した電気ノイズが精度をリミットする主要因となっている可能性が高いため、新しいタイプの熱リンクの製作も試みた。4K 以上の温度領域で銅板と匹敵する熱伝導度が確認され、今後の試験でも使用可能な事がわかった。超伝導ミラーの実証試験までは終える事が出来なかったが、必要な基礎技術の開発は出来た。

ニオブスズ超伝導ミラーの開発については、ニオブ箔(厚さ 0.1mm)とブロンズ板(厚さ 3.0mm)を 1500ton プレス機で熱圧着させたクラッド円板の複数回の試作を重ね、種々のプレス加工条件について検討し、およそ 600℃よりも低い温度になるとアルファ相とともに脆いデルタ相が析出して割れの原因となり、逆におよそ 800℃より高い温度になると部分溶融してしまうことがわかった。600℃～800℃の間の温度領域では、ブロンズは面心立方晶のアルファ相と体心立方晶の

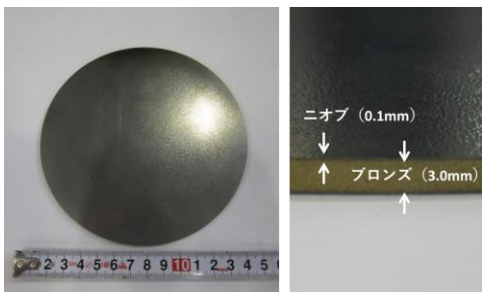

図 5: 直径 150mm のニオブ(0.1mm)／ブロンズ(3.0mm)クラッド円板の外観写真。

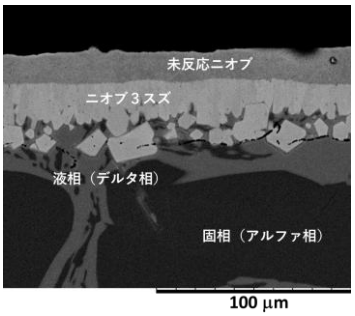

図 6： 900℃で 10 時間の熱処理を行った場合に得られる反応組織。

ベータ相の２相で構成され、いずれも延性に富んでいる。本研究では、700℃近傍が熱間プレスの最適温度であることがわかった。図 5 は、720℃で 800 トンの加重で 1 分間プレスした外径 150mm のニオブ／ブロンズクラッド円板の外観写真である。プレス前後でニオブ箔及びブロンズ板の厚みに大きな変化は認められず、ただし両者は強固に圧着された。

次に、上記のように作製したニオブ／ブロンズクラッド円板を真空中で熱処理し、ニオブ箔とブロンズ板の相互拡散反応について研究した。熱処理温度が約 800℃より高くなるとスズ源となるブロンズが部分溶融するが、液相が介在すると Nb_3Sn の結晶粒は極めて粗大で不均質な反応組織となる。図 6 は 900℃で 10 時間の拡散熱処理を行った場合の反応層の電子顕微鏡写真である。生成したブロック状の粗大な Nb_3Sn 結晶はブロンズの液相に引き込まれるように内部に移動してしまうためスズの拡散が板材表面には進まず、表層にニオブが残留する。一方、750℃で熱処理を行った場合にはブロンズの部分溶融の痕跡は認められず、図 7 に示すような緻密な Nb_3Sn 層が得られた。約 60 時間の熱処理では約 20 μm、100 時間では約 30 μm、240 時間では約 70μm、さらに 400 時間の熱処理では 80μm の反応層を確認した。反応層の厚さを d (μm) とし、熱処理時間を t (h) とすると、750℃の熱処理温度では、$d = 4\ t^{1/2}$ の相関があることがわかった（図 8）。

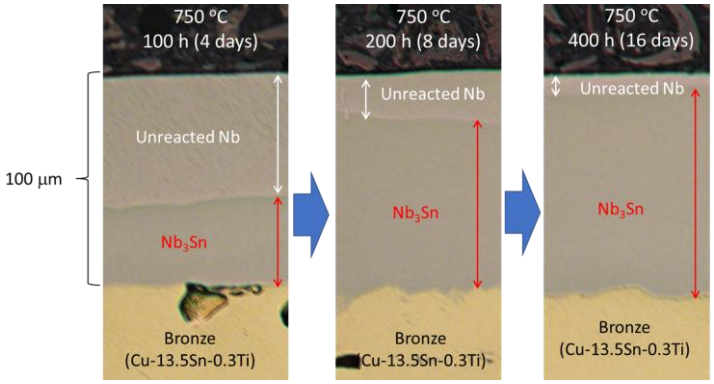

図 7： 750℃で 100 時間、200 時間、400 時間の熱処理を行った場合に得られる反応組織。

この関係式から厚さ 0.1mm のニオブ箔のすべてを反応させるには、650 時間のおよそ１ヶ月にも及ぶ長時間の熱処理が必要と見積もられる。そこで、ニオブ箔の厚さを 0.1mm から 0.05mm に変更し、改めてニオブ箔（厚さ 0.05mm）とブロンズ板（厚さ 3.0mm）からなるクラッド円板の試作に取り組んだ。ニオブ箔の厚さを 0.05mm まで薄くしても、熱間プレス後にニオブ箔が破れずほぼ均一な厚さのままブロンズ板に圧着できる条件を見出すことができた。さらに、Nb_3Sn 超伝導ミラーとしての超伝導の安定性及び冷却効率を高めるために、これまでのニオブとブロンズの 2 層構造から、ニオブ、ブロンズ及び純銅の 3 層構造のクラッド円板の開発に取り組んだ。ニオブはこれまでと同様の厚さ 0.05mm の箔を使い、ブロンズ板材は特殊な放電加工法を駆使して 3.0mm から 0.8mm まで薄くスライスし、主な基材は厚さ 2.5mm の無酸素銅の板を採用した。これまでの知見を展開して、新 3 層構造での最適なプレス条件も速やかに見出すことができた。本研究により、Nb_3Sn 超伝導膜が厚く被覆された純銅円板を簡便に製造する基盤技術を開発した。

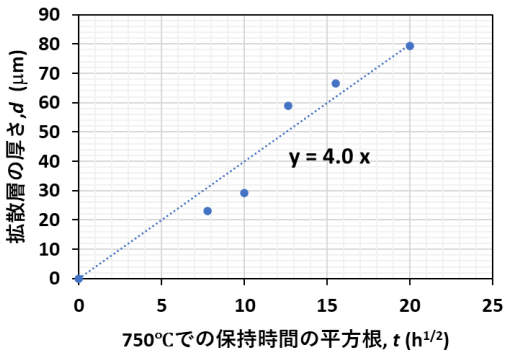

図 8： 750℃で生成する拡散層の厚さと保持時間の関係

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計0件

〔学会発表〕　計2件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 長谷川聡美(総研大)、長谷川雅也(素核研/QUP)、金子大輔(QUP)、高久諒太(QUP)
２．発表標題 CMB観測装置の実験室での検証作業に向けた低温評価系構築に関する研究
３．学会等名 物理学会（第79回年次大会）
４．発表年 2024年

１．発表者名 郷原康司
２．発表標題 宇宙マイクロ波背景放射の精密観測に向けた超伝導ミラー開発のための低ノイズ試験システムの研究
３．学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
４．発表年 2023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	菊池　章弘 (Kikuchi Akihiro) (50343877)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究センター・グループリーダー (82108)	
研究分担者	長谷川　雅也 (Hasegawa Masaya) (60435617)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授 (82118)	

６．研究組織（つづき）

	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	道前　武 (Dohmae Takeshi) (70740471)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授 (82118)	

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関