

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14483

研究課題名（和文）地面反射光の侵入を抑制するCMB望遠鏡用リングバツフルの開発研究

研究課題名（英文）Development of Ring Structure Forebaffles that Effectively Reduce Ground Signal Systematics in CMB Telescopes

研究代表者

Matsuda Frederick (Matsuda, Frederick)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特任助教

研究者番号：40867032

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）地上実験のBモード探索において、大きな系統誤差となる地形反射による迷光汚染を抑制するリングバツフル技術の開発が目的である。本研究では、光学解析を実施し、リングバツフルを望遠鏡に搭載することにより、地形反射の系統誤差を0.005%まで低減できることを示した。そしてリングバツフルの実用に向けた開発リスクを洗い出した。リングバツフルの実装には至らなかったが、Simons Observatory望遠鏡用に改良したバツフルを完成させた。本開発を通して、リングバツフル開発と共通した構造の安定性やコスト面の開発リスクを低減するバツフルの基礎設計・手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、次世代CMB実験において、地形反射により計測器に侵入するシグナル汚染（迷光）をどのように低減するかは大きな課題である点です。高い統計感度を持つ次世代望遠鏡にとって、地形反射は大きな系統誤差となりうるため、望遠鏡のバツフル構造を改良し系統誤差を抑制することは必須である。そして、望遠鏡の外部バツフルとしてリングバツフル構造を応用するのはCMB地上実験では新たな試みであるため、本成果はリングバツフルの実用に向けた重要な研究開発である。将来的なリングバツフルの実装により、CMB地上実験の飛躍的な感度向上を目指す。

研究成果の概要（英文）：The main goal of this research is to develop a ring structured forebaffle for ground-based cosmic microwave background (CMB) experiments that can effectively reduce ground signal systematics during observations. Based on optics simulations, we showed that ground signal systematics can be reduced to 0.005% using an optimized ring structured forebaffle. We were also able to identify the various fabrication risks related to structural integrity and cost. Even though we were not able to deploy a ring structured forebaffle in this research, based on our research findings, we developed an improved standard forebaffle for the Simons Observatory small aperture telescope. Through this up-grade development, we were able to mitigate to a certain extent the fabrication risks that were common to both the development of the ring structured forebaffle and improved standard forebaffle. Using a similar design strategy, we aim to deploy a ring structured forebaffle for future CMB telescopes.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙マイクロ波背景放射 インフレーション CMB 光学 バツフル

1. 研究開始当初の背景

「インフレーション宇宙論」によれば、宇宙初期の高温高密度プラズマ(ビッグバン)は、短時間の時空の加速膨張により生まれたとされている。インフレーションの決定的な証拠となりうるのが、宇宙創生時の重力場の量子ゆらぎから生まれる「原始重力波」である。原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光成分に大角度スケール(2度前後)の「Bモード」と呼ばれる奇パリティパターンを刻印する[1]

現在多数のCMB観測望遠鏡による地上観測実験が進められているが、数百 nano-Kelvin 以下の強度と推測されるBモードの測定は難しく、次世代望遠鏡による観測が期待されている。CMB地上実験における大きな問題となっているのが、望遠鏡の side-lobe (周辺視野)から計測器に入る地形反射による偏光シグナル(迷光)汚染である(図1)。次世代地上実験では高い精度での系統誤差の制御が必須であり、この迷光はCMB観測の感度を制限する大きな系統誤差となっている[2]。さらなる統計感度向上を見込む次世代地上実験では、どのように地形反射によるシグナル汚染を抑制できるかが大きな課題である。

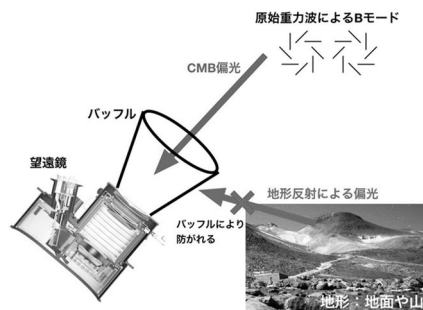


図1: 地形反射による偏光シグナル汚染。望遠鏡 side-lobe から地形反射光が計測器に侵入し、大きな系統誤差を産む。パッフルは反射光を防ぐ役割を持つ。

2. 研究の目的

本研究では、地上観測での地形反射による影響を抑制する望遠鏡の新たなリングパッフル構造と手法を研究し、CMB観測感度の向上を目指す。望遠鏡の光学窓の回折や散乱から生まれる side-lobe により侵入する地形反射が偏光シグナル汚染の大きな要因とされている。従来実験では、光学窓付近に円錐状の電波吸収体(黒体)を用いた吸収型のパッフルを望遠鏡に設置することにより迷光の抑制を試みているが、この場合黒体の反射率により性能は制限される。軽量かつ低反射率の常温黒体の開発は難しく、現在使用されている黒体でも1%未満の表面反射率を実現するのは困難である。リングパッフルとは複数の輪が連なった形状のパッフルであり、従来のパッフルに比べ、迷光が side-lobe を通して望遠鏡内部に侵入するまでにパッフル面を複数回(二回以上)反射させる性能を持つ(図2)。反射回数を増やすことにより実効的な反射率をさらに1/10以下にし、今まで以上の迷光の抑制が可能となる。

迷光汚染の抑制に、望遠鏡外部のパッフルとしてリングパッフルを応用するのはCMB地上実験では新たな試みである。本研究では、リングパッフルの地形反射による系統誤差を抑制する効果を調べ、次世代望遠鏡でのリングパッフルの応用に向けた技術開発を実施する。それを基に、現在開発段階にある史上最大のCMB望遠鏡群となる Simons Observatory (SO) 実験の次世代望遠鏡に搭載するパッフルを改良する。

3. 研究の方法

SO実験はインフレーションに特化した大角度測定用望遠鏡を三台開発中である。チリ・アタカマ高地(海拔5,200m)にて、望遠鏡群で27-270GHzの周波数帯でCMB観測を行う予定である。2023年中に1台目と2台目望遠鏡での観測を開始する予定である。1台目望遠鏡では従来のパッフル設計を採用している。

本研究では、光学シミュレーションを用いて最も効果的なリングパッフル形状を解析し、地形反射による迷光汚染の系統誤差の抑制効果を推定する。この光学設計を基に、リングパッフルの構造解析を行い、リングパッフルの基礎となる設計手法と技術の開発を実施する。これらの開発を基に、SO望遠鏡用のパッフル設計を見直し、改良したパッフルを二台目望遠鏡に搭載する。改良パッフルの開発・製造を通して、リングパッフルと共通した開発リスクの低減を行い、将来的なリングパッフルの実用を目指す。

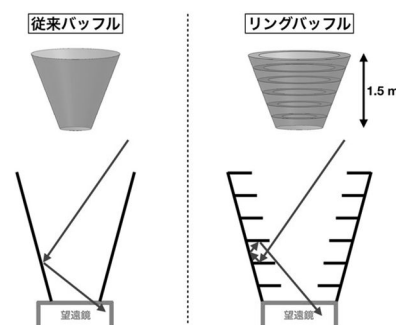


図2: 従来パッフルとリングパッフルの比較。従来パッフルと比べ、迷光は二回以上反射しなければ望遠鏡内部には侵入できない設計となっている。

4. 研究成果

(1) S0 実験の一台目望遠鏡の従来バッフル設計 (1.7 m 長さ・2.1 m 直径) を基に、リングバッフルの光学設計を行った。望遠鏡の視野を遮らないためにバッフル内径を維持しながら、長さ 200 mm 間隔でリング構造を追加する設計を検討し、幾何光学シミュレーションを基に地形反射の抑制効果を解析した。解析の結果、S0 実験の従来バッフルでも、地形反射による迷光汚染を 0.039% まで減少できることが分かった。さらに、リング構造の深さ ΔR が 100 mm 以上のリングバッフルへと変更することで、迷光汚染を 0.005% まで減少できる。しかし 10 mm 程度の浅いリング構造では、従来バッフルの抑制効果と大差がないことが分かった (図 3)。本解析から、現段階の地上実験では S0 の従来バッフルでも光学性能は足りるが、近い将来望遠鏡の台数が増え、統計感度が向上した際はリングバッフルが必要であることが分かった。

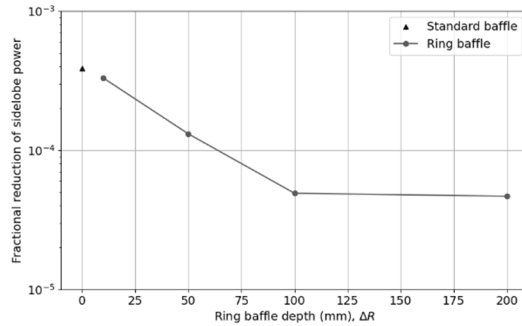
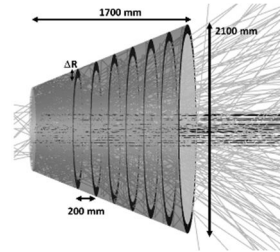


図 3: リングバッフルによる地形反射の抑制効果。幾何光学シミュレーション解析により、最適なリング深さ ΔR を導き出した。



100 mm 深さのリングバッフルの構造設計を実施したところ、アルミニウムの場合、2.3 m 直径への肥大化とリング構造の追加で、総重量が約 169 kg と従来バッフルより 65% 程度重くなる。望遠鏡上の支持構造が限られているため、バッフルの根本 (口径が小さい側のフランジ面) のみでしか支持ができず、バッフル自身もなるべく軽量にする必要がある。そのため、総重量の増加と重心が大きい口径側へとさらに偏る影響により、構造的な安定性が損なわれ、振動による観測中の系統誤差が懸念されることが判明した。さらに、大きさ故に一体物としての製造精度の維持が難しく、それに伴い製造コストも大幅の増加することも分かった。これらのリスクを考慮し、S0 実験の二台目望遠鏡にはリングバッフルは実装せず、コストを抑えつつより構造的な安定性と強度を持つ改良型のバッフル設計を検討した。

(2) 二台目望遠鏡のバッフル設計の最適化を行い、観測に必要な光学性能を維持しながら、構造・光学的により安定性が高く、より運用しやすい四分割の組み立て式バッフル設計へと変更した (図 4)。分割部分の接合面がリブ構造の役割を担い、重量 10% 程度の増量に留めながら、飛躍的に強度を高くし、安全率を 170 以上確保することに成功した。製造コストは約 14% 程度増加した。だが、1.7 m 長さとして 2.1 m 直径のバッフルを四分割の構造にすることにより、観測地 (チリ) への輸送時に木箱によりコンパクトに詰め合わせることができ、輸送と保管コストは大幅に下がった。それにより総コストも下がった。さらに四分割のパーツ毎の製造精度を改善することができ、組み立て時には補助リング治具を使うことにより、バッフルの 2.1 m 口径部分で ± 5 mm 以内の精度を実現した。従来バッフルでは製造精度が ± 10 mm が限界であった。改良したバッフル設計により、安定性・コスト・製造精度の大幅な改善を実現し、将来的なリングバッフルの実用に向けたバッフル構造の基礎となる設計を完成させた。

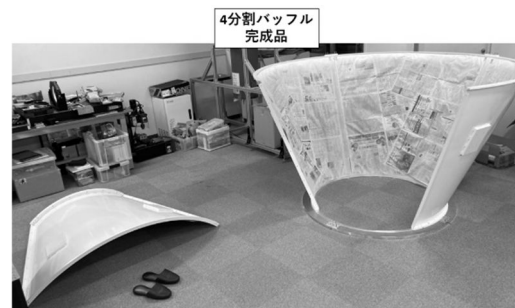


図 4: 四分割バッフルの完成品と CAD モデル。補助リングを用いて精度を維持し組み立てる。



(3) バッフル内面に貼る電波吸収体 (Eccosorb HR-10) と耐候性を高める表面膜 (Volara) の反射率を vector network analyzer (VNA) 装置で測定し、55-220 GHz の周波数帯域では -20 dB 以下の性能を維持していることを確認した (図 5)。この実測値を光学シミュレーション解析に反映し、改良バッフルが観測に必要な光学性能を持つことが推定できた。

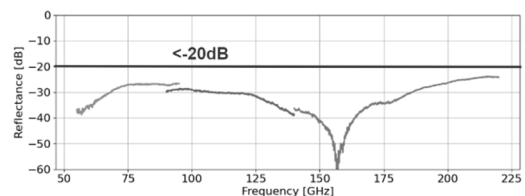


図 5: 電波吸収体と表面膜サンプルの反射率の測定。

(4) 2022 年度末に二台目望遠鏡に搭載する改良バッフルが完成し納品された。実験室での組み

立て試験を行い、設計通りに機能することを確認した(図4)。従来バッフルより、高い光学・構造的な安定性、低コスト、高い製造精度を実現した改良バッフルが完成した。電波吸収体をバッフル内面に貼り、観測地(チリ)へ向けて輸送の準備を行っている。2023年度中に二台目望遠鏡に搭載され、観測を開始する予定である。改良バッフルの開発を通して、リングバッフルでも共通となる光学・構造的な安定性とコスト面での開発リスクを低減する設計手法を確立した。

(5) 本研究では、S0 実験の二台目望遠鏡にリングバッフルを搭載するまでには至らなかったが、本研究の成果により、リングバッフルの地形反射の抑制効果と有用性を定量的に評価でき、より感度が向上する将来望遠鏡に必要であることが分かった。そしてリングバッフルを実装するにあたり直面する光学・構造・コスト面の課題を洗い出した。これらの将来的な開発リスクを低減・改善するために、リングバッフルの基礎となるバッフル設計の改良を実施した。将来的にリングバッフルを実装するための技術開発の一環として、四分分割型の改良バッフルを完成させ、S0 二台目望遠鏡に搭載する予定である。本成果により、リングバッフルの開発リスクを低減することに成功したため、S0 三台目望遠鏡でのリングバッフルの搭載が検討されており、望遠鏡側の支持構造の見直しなども始めている。

引用文献

[1] K. N. Abazajian, et. al., *Astropart. Phys.* 63 (2013) 55-65.

[2] D. Barakats, et. al., *Astrophysical Journal*. Vol 783. Issue 2. Article 67 (2014) 18pp.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ali Aamir M., Matsuda Frederick et al.	4. 巻 200
2. 論文標題 Small Aperture Telescopes for the Simons Observatory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 461 ~ 471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02430-5	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 該当する
1. 著者名 Kiuchi Kenji, Matsuda Frederick et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 The Simons Observatory Small Aperture Telescope overview	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562016	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 該当する
1. 著者名 Xu Zhilei, Matsuda Frederick et al.	4. 巻 60
2. 論文標題 The Simons Observatory: metamaterial microwave absorber and its cryogenic applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 864 ~ 864
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.411711	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 該当する
1. 著者名 Gudmundsson Jon E., Matsuda Frederick et al.	4. 巻 60
2. 論文標題 The Simons Observatory: modeling optical systematics in the Large Aperture Telescope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 823 ~ 823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.411533	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中田嘉信、村田雅彬、飯島健五、安達俊介、木内健司、松田フレドリック、日下暁人、田島治、Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 小口径望遠鏡の受信器を用いた偏光角較正装置スパースワイヤーグリッドの光学性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田雅彬、中田嘉信、飯島健五、安達俊介、清野結大、木内健司、松田フレドリック、日下暁人、田島治、Simons Observatory Collaboration
2. 発表標題 Simons Observatory実験に搭載するワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置の光学試験状況
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Frederick Matsuda
2. 発表標題 Optics Design Development of the Simons Observatory Small Aperture Telescopes
3. 学会等名 SPIE（国際学会）
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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			
米国	University of California Berkeley	University of California San Diego	Princeton University	他18機関
チリ	Pontificia Universidad Catolica	University of Chile		
カナダ	McGill University	University of British Columbia	Dunlap Institute	他2機関
英国	Cardiff University	Imperial College	Cambridge University	他2機関
フランス	APC			