

CMB 観測実験におけるアクティブ除振装置の設計開発

○金山高大^{#A)} 長谷川雅也^{AB)} 井上優貴^{ACD)} 金子大輔^{B)} 田邊大樹^{ACD)} 五十嵐悟^{E)} 鈴木純一^{A)} 山岡広^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所(IPNS)

^{B)}高エネルギー加速器研究機構 量子場計測システム国際拠点(QUP)

^{C)}国立中央大学(National Central University)

^{D)}中央研究院(Academia Scinica)

^{E)}株式会社エイ・イー・エス(AES)

概要

KEK が携わっている POLARBEAR 実験では、CMB 偏光を精密に測定することでインフレーションの証拠となる原始重力波の痕跡や重力レンズ効果の観測を目指している[1]。観測感度を上げるには、低周波ノイズの抑制が重要な課題とされる[2]。CMB 観測におけるノイズは、光子の揺らぎ、熱伝導の揺らぎ、熱雑音、と様々であるが、装置内部の振動が起因となり焦点面の温度変動を起こす低周波ノイズが問題となっている。KEK/QUP では、この問題に対して冷凍機に着目し、振動をアクティブに除振する装置の R&D を行っている。

本報告では、一昨年度開催された核融合科学研究所技術研究会や、昨年度開催された分子科学研究所技術研究会での報告[3][4]からの進捗状況について報告する。

1. 研究背景

宇宙の起源は、超高温高密度の火の玉「ビッグバン」の膨張により誕生したとされる。ビッグバン以前の宇宙では、真空のエネルギーに斥力が働いて急膨張が起こり、相転移が起きて熱エネルギーが放出され、ビッグバンになったとする「インフレーション理論」が有力な仮説である。仮にインフレーションほどの急膨張が起きたとすると原始重力波が生じるはずであるが、地球に届く重力波は微弱であるため観測が難しい。しかし、宇宙のどの方向からも一様に飛来して 2.7 K の電磁波として観測できる宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background: CMB)では、原始重力波がぶつかることで B モードと呼ばれる大きな渦状の特殊な偏光(Polarization)パターンが作り出されるとされ、観測できればインフレーションの証拠となり宇宙の起源解明に繋がる。

KEK/QUP では、CMB 偏光の精密測定を目的とした POLARBEAR という国際コラボレーション実験を行っている。実験装置の望遠鏡は、観測の際に大気の影響が少ないチリのアタカマ高地で実験している。装置の構成は、主鏡、副鏡、レーザーシステムから構成される反射型望遠鏡である。図1に装置を示す。



図1. POLARBEAR 望遠鏡

CMB 観測を実現するために、レーザーシステム内部には、超伝導検出器(Transition Edge Sensor: TES)と呼ばれる高感度で温度変化を測定できる検出器が組み込まれており、アンテナに入射したCMBのエネルギーを熱に変換し、その時に生じる僅かな温度上昇を検出することによりCMBを測定している。

検出器の感度を限りなく高く保つために、100 mK程度の極低温に冷やす必要がある。この低温環境を実現するために、パルス管冷凍機(CRYOMECH: PT415-RM)や、3He と 4He による希釈冷凍機といった冷却システムが搭載されている。

パルス管冷凍機自体は一般的に低振動とされているが、冷媒であるヘリウムガスの循環に起因する低周波振動(~10 μ m, 1.4-1.5 Hz程度)は筐体やヒートリンク越しにTESへ伝達してしまう。この低周波振動には、パッシブな除振方法は適さないため、アクティブな除振装置を開発している。図2に装置の振動を示す。

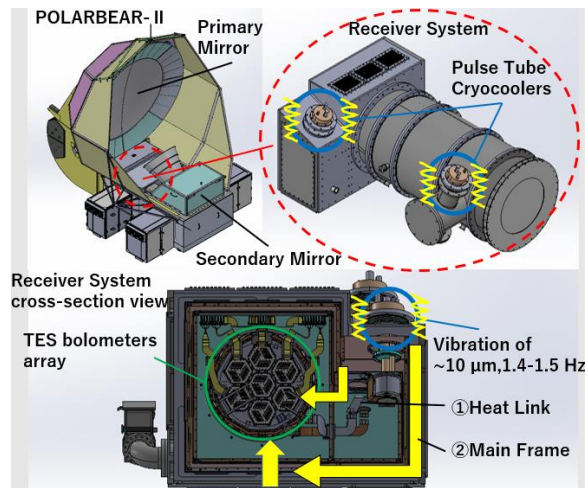


図2. 実験装置の振動

2. 昨年度までの開発状況

2.1 アクティブ除振試験(鉛直方向制御)

KEKでは、チリの実験装置を模擬したR&D用のクライオスタットを用いて実験を行っている。問題となるパルス管冷凍機も組み込まれており、低周波振動も観測できるため、まずはKEKで開発及び実験を行った上で、チリの望遠鏡に組み込む方針である。図3に開発したアクティブ除振装置を示す。

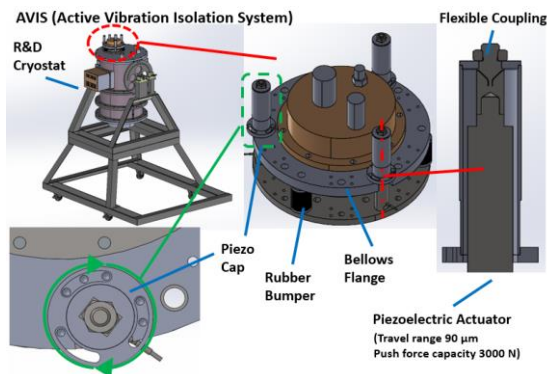


図3. アクティブ除振装置(鉛直方向制御)

構造としては、振動の大きいコールドヘッド部をベローズに固定して、その上部をクライオスタット側に固定したピエゾアクチュエータで押し引きすることで振動を打ち消す設計である。この装置を開発し、オープンループ制御で周波数や電圧を調整することで鉛直方向の振動を除振できるか原理実証を行った。図4にアクティブ除振前後の振動を示す。

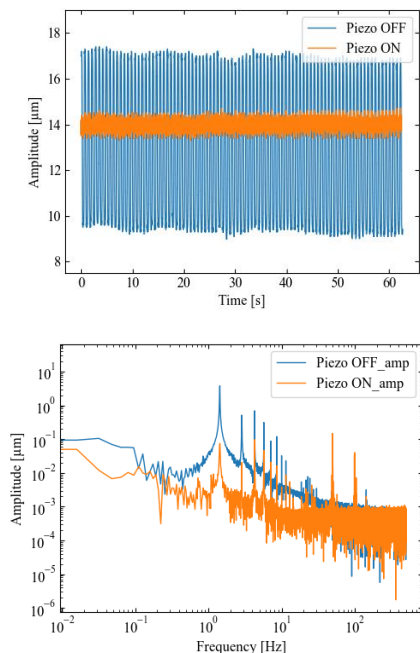


図4. アクティブ除振前後の振動(鉛直方向)

図より、振幅7 μm程度、1.4 Hzピークの振動を、振幅1 μm程度に60秒間除振できたことが分かる。残りのピークも1.4 Hzの高調波であるため減少しており、アクティブ除振の原理実証ができたと言える。

2.2 実験装置のアップグレード(水平方向への対応)

今までは鉛直方向だけのオープンループ制御だったため、水平方向の制御やクローズドループ制御が次の課題となった。図5に改良した除振装置を示す。

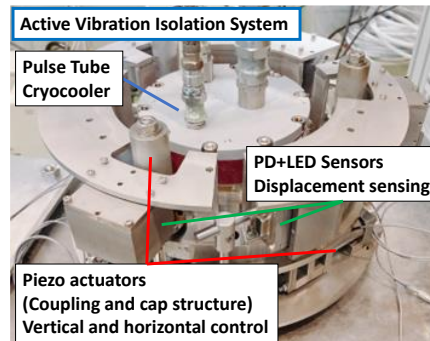


図5. 実験装置のアップグレード(KEK)

鉛直方向3箇所120°置きに加え、水平方向3箇所120°置き(計6箇所)にアクチュエータを組み込むことで、x,y,zに加えてroll, pitch, yawの6軸制御を可能にした。また、POLARBEARへ組み込むことも想定し、限られた空間に組み込めるように改良した。

2.3 PD+LED センサ

除振装置に必要な振動のモニタには、PD(Photo Diode)とLED(Light Emitting Diode)を用いた変位測定センサを用いることを検討している。市販のセンサやシステムでは、多軸のFeedbackや複数のフィルターを用いた制御を行うことが困難なため、オリジナルのセンサを使う必要がある。今回は、台湾の重力波実験グループで実績のあるセンサをKEK用に設計変更したものを製作した。図6にセンサ、図7にPD+LEDのキャリブレーションの図を示す。

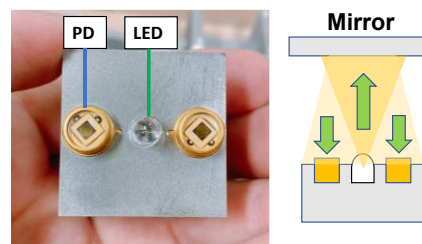


図6. PD+LED 変位センサ

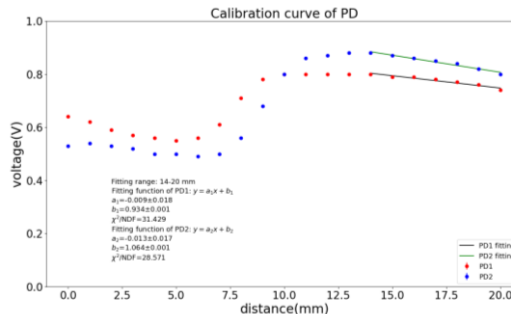


図7. PDのキャリブレーション

LEDから出された光を振動源側に固定したミラーに反射させ、その反射光をPDで測定することで電圧値の線形部を換算して距離を計測する仕組みである。

3. 今年度の進捗状況

3.1 クローズドループ制御に向けて

昨年度までは、鉛直方向のオープンループ制御を達成し、水平方向にも対応できるように装置を改良してきたので、次のステップとしては、全方向での同時制御及びクローズドループ制御することを目指した。制御システムの構成として、振動をセンシングしてアクチュエータで押し引きする除振装置、その振動からアクチュエータの駆動量を計算して信号を出す Feedback PC、それらの値をモニタ及び制御する Control PC、から成るシステムである。図8にシステムの構成を示す。

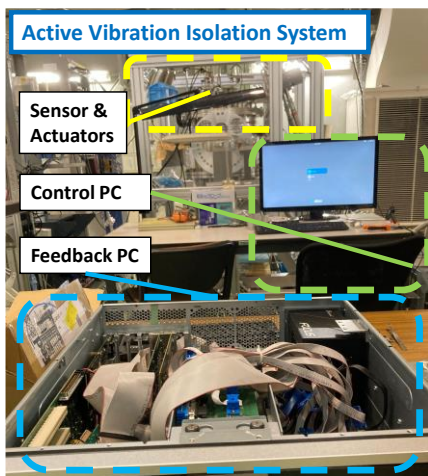


図8. アクティブ除振システムの構成

制御には advligorts (The Advanced LIGO Real-Time Digital Control and Data Acquisition System)と呼ばれる EPICS などが応用されたシステム[5]を利用しており、多軸のリアルタイム Feedback 制御を実現する。

また、Feedback PCには FPGA や DAC、ADC などが組み込まれており、受け取った変位のインプットを piezo の駆動電圧に換算して、アウトプットすることができる。

更に、Control PC の制御画面から、I/O や DAQ のステータスなどをモニタすることができる。図9に制御画面を示す。



図9. 制御モニタ

これらのシステムは、台湾の重力波実験グループ (ASGRAF) の協力を得ながら、現在立ち上げ中である。来年度はこのシステムが動くようにして、全方向でのアクティブ除振を成功させることが目標である。

3.2 台湾重力波実験施設でのアクティブ除振

台湾の重力波実験グループ (ASGRAF) の実験装置でも同種類のパルス管冷凍機が組み込まれており、同様のノイズ問題を抱えている。そのため、KEK/QUP と技術協力を行っている。図10に重力波実験施設のセットアップの一例を示す。

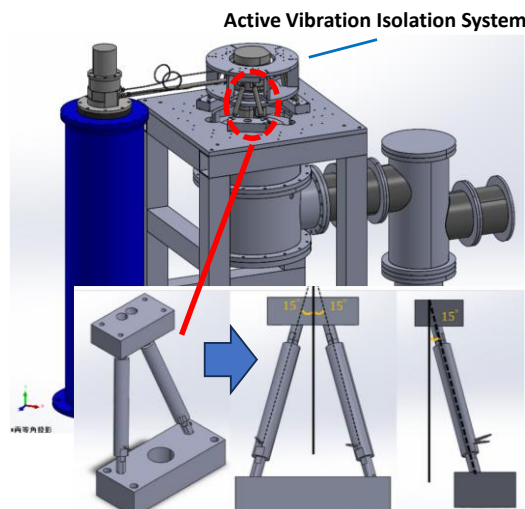


図10. 重力波実験施設での除振装置(台湾)

全方向の振動を除振するため、アクチュエータをハの字に 15° 傾けた後、更に内側に 15° 傾けている。この構造が 120° 置きに3箇所配置されており、合計6つのアクチュエータを用いて制御を行っている。これらの構造設計について KEK が開発協力を行った。また、この構造が使用され、6軸の Feedback 制御に成功した[6]。この成功例に続いて、KEK でも制御システムを完成させる予定である。

3.3 低温環境での変位測定に向けた開発

最終的な目標となる CMB 観測部での除振を達成するためには、低温環境での変位測定や除振をする必要がある。その前段階として、ビューポート越しに対象物の変位を確認する試験を行った。図11にその様子を示す。

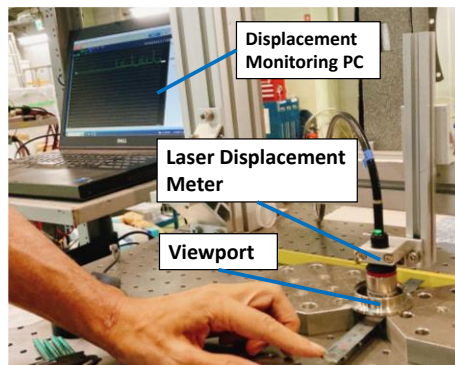


図11. ビューポート越し測定試験

ビューポート越しでも変位の測定はできることが確かめられたので、今後はクライオスタットに組み込んだ上での振動測定試験を行う予定である。

4. 今後の開発計画

4.1 多軸クローズドループ制御システムの構築

前頁で述べたように、アクティブ除振システムの立ち上げ途中であるため、引き続きシステム構築を進めていく。予定としては来年度中の完成を目指す。

4.2 POLARBEAR 望遠鏡への除振装置組み込み試験

来年度、POLARBEAR 望遠鏡のメンテナンスができるタイミングで、完成している範囲のアクティブ除振システムを組み込み、試験・評価することを計画している。図12に除振装置取り付け予定箇所を示す。

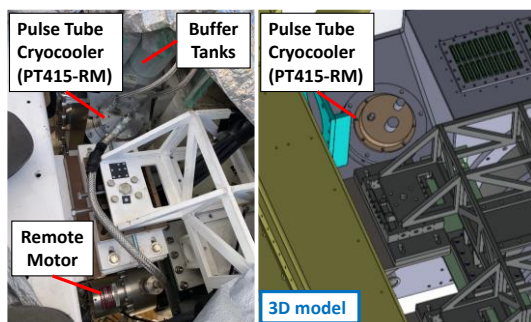


図12. POLARBEAR 冷凍機取り付け箇所

二箇所組み込まれているパルス管冷凍機のうち、まずはTESに近い側の除振を検討している。KEKのR&D用クライオスタットでは、チリのPOLARBEARに組み込むことを想定した省スペースで除振装置を設計しており、望遠鏡の3Dのモデルもあるが、様々な相違点や制約があるため、望遠鏡用の除振装置は現地と確認を進め慎重に設計していく予定である。

4.3 低温環境用変位センサの開発

前頁で述べた通り、最終的にCMBを観測しているTES周辺でのアクティブ除振(振動減少)を行いたい。実現するためには、低温環境での変位測定、除振技術が必要となる。そのため、マイケルソン干渉計の原理を応用した新しい低温環境用変位センサの開発を検討している。図13にその概念図を示す。

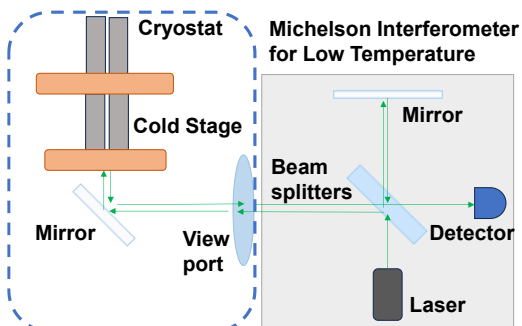


図13. 低温用マイケルソン干渉計の概念図

マイケルソン干渉計とは、光源から照射した光をビームスプリッターで分割し、各経路の反射光を重ね合わせて干渉縞を作り出し、観測することで光の経路の長さ変化を測定できる装置である。この原理を利用して、ビューポートを透過させた光を反射させることにより、低温箇所の変位測定を実現させる。

5. まとめ

KEK/QUPでは、CMB観測実験における観測感度向上を目的とするアクティブ除振装置の設計開発を行っている。このアクティブ除振システムは、将来POLARBEARの他にも、天体望遠鏡、重力波望遠鏡、などの分野での振動抑制への応用が期待されている。この装置は、日本のKEK/QUPと台湾のASGRAFに導入されており、協力して開発を進めている[7]。

昨年度までは、それぞれのセットアップに応じた除振装置の設計開発、原理実証、多軸の制御に向けた装置のアップグレードを行った。

今年度は主に、クローズドループ制御のシステム構築を行った。振動をセンシングして駆動量を換算することでアクチュエータの制御を行うFeedback PC、それらをモニタ及び制御するcontrol PCなどの構築を進めており、POLARBEARに合わせた制御モデルの構築が直近の課題である。

来年度はこのシステムを完成させ、6軸の制御と各方向での振動の抑制を実現させることを目指す。具体的な目標としては、鉛直方向制御で表現した、振動ピーク1.5 Hz程度で振幅1 μm 以下の振動レベルを全方向で達成することが目標である。

今後の計画としては、POLARBEAR望遠鏡へ装置を組み込み、アクティブ除振の振動抑制試験や、除振前後の評価を行う予定である。組み込むにあたって、日本とチリの細かなセットアップの違いや、寸法等、直接確認することができないため、現地の方や、CADモデルから情報を集めることが大きな課題となる。

更に、低温環境用の新しい変位センサの設計開発を予定しており、低温環境の振動測定技術を確立することで、将来の低温環境の振動抑制に向けた開発を進めていく。

最後に、アクティブ除振システムは、圧電素子などで構成されるピエゾアクチュエータやセンサ技術、それらを制御する電子回路やプログラミング技術、などの様々な高度技術の複合技術で成り立っているため、多くの知識が必要となるが、日々開発に携わり、グループで協力することで、装置の完成を目指す。

参考文献

- [1] P. A. R. Ade et al. (POLARBEAR Collaboration) Phys. Rev. Lett. 113, 021301 – Published 9 July 2014
- [2] Satoru Takakura et al., JCAP05(2017)008 Published 3 May 2017.
- [3] 金山高大 他 CMB 観測実験におけるアクティブ除振装置の設計開発 令和3年度核融合科学研究所技術研究会 報告書
- [4] 金山高大 他 CMB 観測実験におけるアクティブ除振装置の設計開発 令和4年度分子科学研究所技術研究会 報告書
- [5] Rolf Bork et al., Preprint submitted to SoftwareX May 6, 2020
- [6] 許翔傑(2023) Study of the cryogenic system and active vibration isolation system for gravitational wave detection 國立成功大學物理學系 修士學位論文
- [7] Yuki Inoue et al., Development and Characterization of active damping cryogenic system for astronomical telescope (QUPosium2023)