様式８

令和６年度（2024）　共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：重力波望遠鏡 KAGRA の測定感度向上に資する雑音低減および極微小散乱光計測技術の開発 V 英文：Development of scattered light measurement technique and noise reduction for improving sensitivity in KAGRA V	
研究代表者	新潟大学工学部	大河正志
参加研究者	新潟大学／新潟工業短期大学	佐藤孝
	新潟大学工学部	鈴木孝昌
	防衛大学校電気情報学群通信工学科	上原知幸
	新潟大学大学院自然科学研究科	小山直己
	新潟大学大学院自然科学研究科	廣瀬千晶
	新潟大学大学院自然科学研究科	佐藤竜生

研究成果概要

2024 年度は，IOO および PEM サブグループ関係者からご指導・ご協力をいただき，KAGRA オンサイト関連研究として，共振器を構成する鏡の角度制御，機械学習を用いたグリッチノイズの分類，音響雑音に関する課題に取り組んだ。各課題に関する研究成果の概要は以下のとおりである。

KAGRA の第 4 次国際共同観測の時の干渉計構成は，Power Recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer 構成(PRFPMI)であった。重力波信号を増幅するためにマイケルソン干渉計(MI)の両腕に Fabry-Perot 共振器(FPC) が設置されている。また，MI の反射光側に Power Recycling 鏡(PRM) が設置されている。FPC のフロント鏡から PRM までの範囲で，Power Recycling Cavity (PRC)という共振器が形成されている。PRM により MI の反射光を MI に再入射させることで MI の実効的な出力を増加させ，100Hz 以上の高周波帯域を支配するレーザー由来の量子雑音を低減させる。しかし，FPC の基線長が 3km と大規模であるため，PRC 軸や入射光軸を構成する鏡の角度信号が，FPC の鏡の角度信号に埋もれる。そこで，FPC に反共振する 2 つのサイドバンドの差周波で復調した，新たな光軸の姿勢制御を提案した。PRC 光軸や入射光軸を構成する鏡の角度信号が FPC の鏡の角度信号に対して信号分離できるかを確認するため，KAGRA の PRFPMI で信号測定を行った。その結果，入射光軸を構成する鏡の角度信号が他の角度信号に比べて復調位相が直交して検出され，位相選択することで信号分離できることが分かった。そして，実際に入射光軸を構成する鏡にフィードバック制御を導入し，PRFPMI の共振状態を 16 時間 15 分安定的に保つことに成功した。

次に，重力波検出器におけるグリッチノイズの分類に関する研究を行った。先行研究で提案された CNN モデルを参考にし，同様のアーキテクチャを用いた分類モデルを構築した。データセットには Gravity Spy の分類ラベルを用い，事前処理としてグリッチの時間周波数スペクトログラム画像を学習用データとして用意した。分類モデルの解釈性向上のため，推定根拠を可視化する手法として Score-CAM を適用し，CNN がどの領域を重要視しているかを分析した。また，次元削減手法である UMAP を用い，特徴空間に

おけるグリッチの分布を可視化することで，各グリッチクラス間の関係性を考察した。第 1 次および第 2 次国際共同観測（O1&O2）データで学習した分類モデルを第 3 次国際共同観測（O3）データへ適用し，転移学習したモデルに対しても分類根拠の可視化と検討を行った。その結果，本論文で構築した CNN モデルにより，O1&O2 データセットにおいて 98.1%の分類精度を達成した。また，O1&O2 データで学習したモデルを O3 データに適用した際の分類精度は 97.6%であり，転移学習によって新たなグリッチクラスにも適応できることが示された。加えて O1&O2 データに対する Score-CAM の解析結果から，モデルの推定根拠がどの特徴に基づいているかを明らかにした。

さらに，PSL ルームや OMC において影響が示唆されていた音響雑音に関して，PSL ルームにおける音源推定に関する考察，OMC でのアコースティックインジェクションによる音響雑音の影響に関する考察を行った。PSL ルームにおける音源推定に関しては，CSP（白色化相互相関法）法による CSP 係数を用いて，シミュレーションによる音源位置推定を行ったところ，残響がない環境下では，音源位置と推定位置が一致する結果が得られた。しかし，実際には，PSL ルームには残響が存在するため，陸上用スタータを用いてインパルス音を発生させ，RT60 に基づいて残響時間を評価した。500～8000 Hz における残響時間は 0.4～0.6 s と算出され，この結果に基づいて残響が存在する条件で音響シミュレーションを行った。音源位置を推定したところ，壁からの反射波でマルチパス状態となり，音源位置を推定することはできず，マルチパスに対する対策が必要であることが明らかとなった。次に，OMC でアコースティックインジェクションを行い，重力波信号における音響雑音の寄与について評価した。O4a 期間に実施したアコースティックインジェクションでは，音響雑音が重力波干渉計の感度を制限している可能性があることが示唆されていたが，干渉計に対策が施され，本研究のインジェクションにより感度を制限している音響雑音が見られないことが分かった。

整理番号 G06