

## 令和 5 年度 (2023) 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 IV 英文：Development of scattered light measurement technique and noise reduction for improving sensitivity in KAGRA IV	
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	星野壮太
	新潟大学大学院自然科学研究科	石井千皓
	新潟大学大学院自然科学研究科	佐藤竜生
研究成果概要	<p>「高精度反射・散乱特性計測技術の開発」では、マイケルソン干渉計からなる計測システムをベースにしているが、参照鏡に凸面鏡を、光検出器に 2 次元光検出器アレイを使用することで、ある入射角度に対する試料の散乱分布特性を 1 回の測定で取得できる。そこで、光検出器として 16 素子・1 次元光検出器アレイを用い、動作確認を行った。また、ADC のチャンネル数の制限から、1 次元光検出器アレイのうち 7 素子の信号を使用することとし、光検出波形表示、データ保存、FFT 解析、反射／散乱係数の算出、変調度及び動作点のモニタリング等を行えるよう、測定・解析統合システムの改良を行った。実験では、参照鏡を凸面鏡とし、もう一方の物体光側は平面鏡を使用し、この平面鏡を圧電素子で振動させた。その振動周波数を 60 Hz、変動度が 2.404 となるよう振動振幅を調整した。そして、各 ADC チャンネルで光検出器アレイの干渉信号の時間変化を記録し、FFT 解析から基本波成分 <math>I_f</math> の他、高調波成分 <math>I_{2f}</math>、<math>I_{3f}</math> および直流成分を取得して、振幅反射率、変調度等の算出を行った。構築したシステムの基本動作を確認することはできたが、参照鏡に凸面鏡を使用したことにより、参照光のパワー密度が減少したため、この減少が振幅反射率の算出値に影響を与えることが明らかとなった。改善に向けての効果的な対策が不可欠で、今後検討を要する。</p> <p>「KAGRA オンサイト関連研究」では、IOO および PEM サブグループ関係者から指導をいただき、以下の 4 つの課題に取り組んだ。まずはじめに、次期共同観測に向けた新たな姿勢制御を導入した。特に、量子雑音低減のためにレーザー出力を増加させた際に、腕共振器の光軸が並進する自由度では、輻射圧の影響で鏡の傾きが助長され、光軸並進が進む。そのため、腕共振器の光軸自由度を、並進する自由度と傾く自由度に分離して、共振器内外の光軸の相対差を検出する Wave Front Sensing(WFS)制御を、傾く自由度に対して導入した。また、KAGRA では、マイケルソン干渉計の反射光側に Power Recycling Mirror(PRM)を設置し、マイケルソン干渉計のインพุットミラーと PRM までの範囲で、Power Recycling Cavity (PRC) という共振器を形成する。PRM により反射光を反射させ、マイケルソン干渉計に再入射させることで、実効的な出力を増加させ、100Hz 以上の高</p>	

周波帯域を占領する量子雑音を低減させる。PRCの光軸の姿勢制御として、新たなWFS制御を提案して、干渉計シミュレーションツールFinesse3を用いてシミュレーションを行い、その有効性を確認した。現在、KAGRAにて、制御導入の準備を進めている。

次に、市民科学者と機械学習アルゴリズムの協力で作成されたGravity spyデータセットを用いて、教師あり学習を行うモデルを作成し、重力波検出器のグリッチノイズが機械学習アルゴリズムによって各ラベルに分類される推定根拠を明らかにする研究を行った。作成したアーキテクチャは、Gravity Spyデータセットを用いて作成したテストセットで98.1%の精度を達成した。このアーキテクチャの各畳み込み層の出力である特徴マップからScoreCAMという手法を用いて分類の推定根拠をヒートマップとして可視化することができた。分類の根拠を可視化した結果から、モデルがどのようにグリッチを分類しているか、また誤分類の理由を検討して、モデルが明確な形態的特徴に基づいて分類を行っていることを確認した。

さらに、海洋波浪および地震とKAGRA坑内における地面振動の関係について研究を行った。2022年度の波浪データを用いたKAGRAの地面振動予測では、ナウファスの12地点の波高データを用いた主成分分析と重回帰分析を用いた予測手法を採用したが、2023年度は非線形の変化に対応するように予測手法に改良を加えた。この改良によって、特に波高が高いときの地面振動の予測精度が向上した。さらに、地震による地面振動の研究を行った。O4a観測期間(2023年5月24日～6月21日)のロックロス(Lockloss)は119回で、そのうち70回以上は地震によるロックロスと推定される。個々の地震とKAGRA地震計のデータを対応付けるため、地震動の到達時刻が重要となるが、PythonモジュールのObsPyを使用し、到達時刻を算出した。この時刻を基に、地震イベントとKAGRAの地震計で観測された地面振動を対応付け、KAGRAに影響を与える地震と与えない地震の選別を行った。さらに、Locklossとの関係についても考察を行い、O4a観測期間に発生した119回のLocklossのうち、40回以上についてその原因となった地震を特定した。

音響雑音に関する研究も行っている。まず、ビームの上流部に当たるPSLルームの音響雑音源調査のために残響時間測定を行った。これはシミュレーションによる音源位置探査手法の開発を目的として実施した。残響時間測定は完了しており、この結果をシミュレーションに反映し、条件として取り込むことができた。今後はこれを用いてPSLルームでの音響雑音源位置特定のための手法開発を行っていく予定である。さらに、OMCチェンバーへのAcoustic Injectionを行い、干渉計への影響を調査した。特定の周波数では非線形の影響が見られることを見出し、またそのサイドバンドの特徴を明らかにした。