

令和 4 年度 (2022) 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Ⅲ 英文：Development of scattered light measurement technique and noise reduction for improving sensitivity in KAGRA III	
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	岸野翔生
	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
研究成果概要	<p>光学素子の光散乱・反射特性測定システムに関しては、以前から研究を継続しているが、これまでは垂直入射する試料を測定対象としていたため、散乱面を有する試料の測定は困難であった。そこで、マイケルソン干渉計をベースとした従来の測定システムにおいて、参照光側のミラーを凸面鏡に変更し、参照光を広げれば、散乱により広がった物体光に対する 2 次元計測が可能ではないかと考えた。今回は、物体光側の試料として散乱体ではなく、平面ミラーを設置し、その角度を変えて散乱角を模することで動作の検証を行った。平面ミラーを 60 Hz で振動させて、ミラーの傾き角を 0.51° 間隔で変え、-4.08°~+4.08° の範囲内において干渉信号を検出した。得られた干渉信号から各角度における振幅反射率を算出した結果、振幅反射率は、傾き角+1.02° のときに約 0.28 で最大となり、傾き角が大きくなるにつれて減少した。減少の原因として、参照光のパワーが面内で一様ではなく、ガウス分布に相当する分布をもつこと、ビームスプリッタの反射率が入・反射角に依存することなどが考えられる。動作原理の確認には成功したが、角度依存性を抑制する方策について、さらなる検討が必要である。</p> <p>次に、KAGRA における地面振動と海洋波浪の関係について、昨年度に引き続き考察を行い、研究を深化させた。波浪データは国土交通省港湾局、全国港湾海洋波浪情報網ナウファスのデータを用いた。波浪データを使用する地点は大きく分けて、輪島をはじめとする日本海側、御前崎をはじめとする太平洋側（南岸）、鹿島をはじめとする太平洋側（東岸）で、それぞれのエリアに対して複数地点を選定した。一方、地面振動のデータとして、KAGRA の中央付近、X および Y エンドの 3 箇所に設置されている地震計の 3 軸データを使用した。各地震計の各軸の ASD から類似性が確認できたため、中央付近の地震計の z 軸（地面に対し垂直方向）のデータを地面振動の代表値とすることとした。</p>	

次に、日本海側 7 地点、太平洋側（南岸）3 地点、太平洋側（東岸）3 地点を対象に有義波高の相関を見たところ、一部例外はあるものの、エリア内各地点の相関は高く、一方でエリア間の相関は低いことが分かった。そこで、個々のエリアにおいて、各地点の有義波高データの 2 乗値を基に主成分分析を行い、第 1 主成分を取り出した。なお、波高データに関しては、事前に標準化等のデータ処理を行っているが、詳細は省く。そして、地面振動データ（BLRMS : 0.1~0.5 Hz, 20 分間）の 2 乗値が、各エリアの第 1 主成分のべき関数の和で与えられるものとし、非線形フィッティングにより、係数やべき指数を決定した。台風が原因と思われるずれ等を除くと、有義波高から求めた地面振動の予測値は実際の地面振動とよい一致が見られた。この結果を受けて、お天気.com の波浪予報データを用いて地面振動を予測するシステムを KAGRA において実装した。

ところで、重力波観測において重力波の到来方向選定のために、複数の検出器の時間差観測が必要である。検出器の同時稼働率の向上のためには、各々の検出器の安定化が必要である。KAGRA の鏡は防振のために振り子で懸架されるが、共振器を長期間運用すると鏡が回転方向にドリフトし、光軸が不安定になる。そのために、光軸変化を検出し、鏡の角度方向にフィードバック制御をすることで、KAGRA の安定化を図る。特に、波面検出による共振器前後の光軸の相対ずれを検出する Wave Front Sensing (WFS) が有効である。しかし、2020 年に行われた国際共同観測 O3GK の時には WFS が導入できなかった。原因として光路上でのクリッピング、腕共振器に用いられるサファイヤ鏡の複屈折の影響などが挙げられた。今後 WFS を用いた制御を導入するため、WFS 信号の測定により、WFS が正しく機能しているかを確認した。結果、複屈折による WFS 信号の変化は小さく、WFS は角度検出手法として実用的であることが分かった。実際に KAGRA の腕共振器に WFS を用いた角度制御を導入することに成功した。

さらに、重力波の計測に必要な干渉計シミュレーションを行うための GUI ソフトウェアの開発を継続して行い、KAGRA のワークステーションにインストールを行った。また、干渉計の鏡の複屈折による影響を除去するため機械学習を用いた新しい鏡の姿勢制御手法の開発に取り組んだ。具体的に担当した部分として、従来の手法よりも自由度が増えた 64 分割 PD を用いた新しい姿勢制御信号のシミュレーション手法を FINESSE を用いて開発した。64 分割 PD の出力は FINESSE を用いて直接導入することができなかったため、シミュレーション上でキャリアと RF 成分を個別に取得して掛け合わせ、姿勢制御信号を再構成した。最終的には姿勢制御信号を 64 分割 PD で取得し、機械学習モデルに入力することにより動作点周りで線形な制御信号を抽出することを目指している。また並行して、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ている。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 94.1% 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 GradCAM 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。