

## 令和 3 年度 (2021) 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 II 英文：Development of scattered light measurement technique and noise reduction for improving sensitivity in KAGRA II	
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	中川瑞輝
研究成果概要	<p>反射・散乱等に関する光学特性の測定について、SN 比の向上を狙って、レーザーパワーの高強度化による効果について考察を行った。光学系は、これまでと同様に、マイケルソン干渉計の構成とし、ミラーを 90 Hz で振動させ、ビームスプリッターと振動ミラーの間に設置した ND フィルターにより、極低反射率を模した微弱光を生成した。レーザーパワーは 12, 29, 50 mW の 3 とおりとした。本研究では、ミラー振動時の反射率算出値とミラー静止時の算出値を求め、光パワーとの関係性を評価した。前者の振動時の算出値は信号に相当するものと考えられ、光パワーに比例して、その値が大きくなった。一方、後者の静止時の算出値は雑音に相当するものと捉えているが、戻り光が微弱な時は、光パワー依存性は見られず、ほぼ一定値であった。そのため、光パワーの高強度化により、信号成分が大きくなる一方、雑音成分は変化しないことから、振幅反射率 <math>10^{-5}</math> オーダーの測定の可能性を見出した。ところで、これまでの研究では、動作原理の確認に重きを置いていたため、上述のように、ND フィルターを用いて微弱な戻り光を模擬していたが、これは実際の測定条件とは異なる。そこで、今回は新たに、無コーティング BK7 ガラス (振幅反射率 0.20)、無反射コーティングガラス (振幅反射率 0.05) を試料とし、低反射率試料を用いた特性評価を行った。本測定では、試料の振動周波数を 90 Hz とし、レーザーパワーを 23 mW とした。測定の結果、無コーティングガラスの振幅反射率は 0.19 となり、屈折率から想定される 0.20 とほぼ同じ値となった。一方、無反射コーティングガラスについては、振幅反射率の測定値が 0.039 となり、20%程度の誤差が見られた。このような低振幅反射率となると、良好な干渉の実現が難しく、誤差要因となり得るため、さらなるセッティング技術の向上が必要である。</p> <p>また、重力波検出器 KAGRA における干渉計シミュレーションのための GUI アプリケーションの製作を行なった。干渉計には長さの自由度と角度の自由度が存在する。GUI</p>	

ではこの両方の自由度に対するシミュレーションを行うことができるようにした。新しく実装した機能として、長さ自由度の変化に対する量子感度のプロット、鏡の角度変化に対する干渉計の信号やグイ位相の変化に対する WFS 信号のプロット、作成した干渉計モデルの確認や干渉計内の任意の位置でのビームパラメータの確認などを簡単に行える機能を実装した。また検出器で受光した光を phasor diagram 形式でプロットする新しいシミュレーション方法の実装を行っている。この方法では干渉計の信号取得ポートとサイドバンド周波数、またガウシアンビームにおける TEM のモード次数を指定して、干渉計の長さ自由度と腕共振器の角度の自由度を微小に変動させたときのキャリア光に対する位相差や振幅の大きさが複素平面上で変化する様子を始点と終点を結んだベクトルでプロットすることができる。ただし、シミュレーション結果の正当性に関して検証を行っている途中であり、今後の検討が必要である。

KAGRA のインプットモードクリーナー(IMC)の役目はレーザーの周波数安定化で、IMC の鏡は防振比を上げるため二重振り子で懸架される。しかし振り子の性質上鏡が回転方向に傾く。そのため光軸変化が生じ強度変化やモードの変化が生じ、主干渉計の入射光軸が不安定になる。それらを防ぐために鏡の角度制御を導入した。まず鏡の角度を検出する方法として、共振器の反射光を用いて入射光軸と共振器軸の相対的なずれを検出する Wave Front Sensor 法と、共振器の透過光を用いてビームスポットから光軸の傾き情報に変換する手法を用いた。角度変化検出信号強度は、センサーの位置におけるグイ位相（ビームの広がりに関係する位相）に依存する。この性質を用いて解析計算及びシミュレーション、各自由度の測定値との比較を行い、グイ位相を変化させ信号分離の検証を行い、MCE 透過側で信号分離可能を確認した。そして IMC の鏡の角度方向に制御を施した。また角度制御が主干渉計に入射するビームに与える影響を評価し、角度制御による周波数雑音が発生していないこと及び、また角度制御により強度雑音は減ったことを確認した。現在これらの手法を用いて他の共振器に鏡の角度制御を導入している。

さらに、KAGRA における地面振動と海洋波浪の関係について考察も行った。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。ナウファスでは、全国各地の波浪データがダウンロード可能となっている。データは 20 分ごとに集計されたものとなっており、波数、平均波、有義波、1/10 波、最大波、波向のデータを使用することができる。本研究では、平均波と有義波の間に良好な相関関係があることを確認した上で、有義波を対象にその波高と周期（周波数）を扱うこととした。また、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、それぞれ複数箇所を選定し、幅広く考察を行った。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 (Trillium 120QA) のデータを使用した。取得した地震計のデータは、0.1~0.3 Hz のバンドパスフィルターをかけ、1 時間ごとの RMS (root mean square) を計算し使用した。なお、地震計のエラーや地震のような突発的な現象によるデータは取り除いた。研究対象としたデータの期間は波浪、地面振動ともに 2020 年の 1 年間とした。波浪に関しては、日本海側の各地点における相関が高く、日本海側と太平洋側の地点間の相関はほぼ見られなかった。次に、有義波高と地面振動の相関について考察したところ、富山湾を除く日本海側の地点（輪島、福井、直江津、鳥取）で、相関係数が 0.7 を超え、比較的強い相関がみられた。