

平成 30 年度共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名 和文：bKAGRA のモードクリーナーにおける高光強度化の影響の検討と技術開発 II
英文：Technical development for effects on high optical power for bKAGRA mode cleaner II

研究代表者 佐藤 孝

参加研究者 大河正志, 鈴木孝昌, 上原知幸, 陳浴佑

研究成果概要

本研究に参画する研究者は, KAGRA の I00 (Input-Output-Optics) のグループに所属しており, レーザーダイオードの発振周波数の安定化並びにレーザーダイオードの周波数雑音を用いた物理乱数の生成実験を行うなど, レーザービーム並びにレーザーダイオードの発振周波数を制御する研究を行っている。

重力波検出器 KAGRA では, ショットノイズ雑音を低減するため bKAGRA に移行する段階で高強度のレーザーを使用する。レーザービームは真空中に吊り下げられた鏡等の各光学部品で反射, 若しくは, 透過する。ここで光学部品の内部ではわずかな吸収が起り, 光学部品が過熱される。これにより, 熱レンズ効果が発生し, KAGRA の感度に影響を与える。また, 光学部品における散乱光は, 雑音となるため, KAGRA の感度を悪化させる。本研究では, 散乱光に対する対処, 熱レンズ効果による影響の検討, および, その制御の技術の検討および開発を行ってきた。さらに, Gouy 位相と呼ばれる光共振器から反射してくる波面の位相を測定することにより, 光共振器のアライメントを自動的に制御するための測定系を構築した。その結果を受けて, KAGRA 全体の光学雑音を軽減し, 重力波の直接観測の感度向上を目指し, モードクリーナー周辺の KAGRA のメインビームの散乱光に起因する光雑音軽減を目指す本研究を実施することとした。

基礎実験では, 新潟大学工学部または防衛大学校通信工学科において, 光学系内の迷光をなるべく少数のビームダンプで要求されるレベルまで減衰させるため, 迷光のパワーレベル並びに迷光の位置・方向に関する必要なシミュレーションを行った。それと並行して開発・製作されたビームダンプを用いた特性評価を行った。本研究では, 光学素子 (ビームダンプ, ビームスプリッター, レンズ, ミラー, 偏光板等) における散乱および熱レンズの特性を評価すること及びそれらの素子を KAGRA にインストールすることを目的として研究を行っている。

モードクリーナー周囲における散乱光および熱レンズ効果の影響の検討を検討するため, 光学解析ソフトウェア Finesse を用いて熱レンズの影響を検討した。インプットオプティクスにおける散乱光のシミュレーションとダンピングを行うため, Lighttools により光学シミュレーションを行った。インプットモードクリーナーにおける Gouy 位相のシミュレーションと測定を行うため, Optickle により光学シミュレーションを行った。

真空槽内で発生した迷光がメインの光軸に再合流すると, その合流した迷光の位相揺らぎは偽の重力波信号になりうるため, 測定感度を大きく低下させることになる。そこで, まずはシミュレーションで迷光の位置, 方向, パワーを求め, 影響の大きさを見積もり, 実験ではメインビームと迷光の干渉を測定し, その影響を調べた。

解決すべき課題は, ビームダンプの設計と設置位置の決定である。レーザービームが光学素子を通る際に, 様々な工夫を施してもメインビームの他にわずかだが, 反射光・散乱光が生じることは避けられない。この反射光・散乱光は, KAGRA のメインビームがハイパワーであることから, パワー比が小さくても大きな問題となることが予想される。計算では, 散乱光のメインビームに対するパワー比を 10^{-16} 以下にする必要があると見積もられている。そこで, ビームダンプで迷光を減衰させるわけである。

各種光学素子により、迷光の特性が異なることが予想される。そこで、それぞれの迷光に合わせたビームダンプの特性と設置位置について加振実験をすることになる。測定する対象は、メインビームと散乱光との干渉である。微小な散乱光がどの程度メインビームに影響を与えるかを測定する実験を行った。

本報告では、そこで行った以下の実験を中心に報告する。

IOO で使用されるビームダンプの定量的性能評価を行うのが目的で、散乱係数 10^{-8} の計測を目指している。計測システムは、図 1 のようなマイケルソン干渉計をベースにした光学系で、一方のアームに被計測試料を設置して、一定の周波数で振動させる。干渉計測を採用することにより、散乱係数に比例した出力が得られるので、パワー（散乱係数の 2 乗に比例）に基づく計測に比べて、大きな利点がある。

実験では、振動周波数 f を 100 Hz とし、圧電素子でミラーを振動させた。また、散乱係数の異なる試料を用意する代わりに、今回はビームスプリッターと振動ミラーの間に ND フィルターを置き、透過光量を調整することで、散乱光を模擬した。なお、この実験では、ND フィルターのパワー透過率（片道）が散乱係数に相当する。さらに、光源の波長は 1064 nm で、パワーは 10 mW とした。

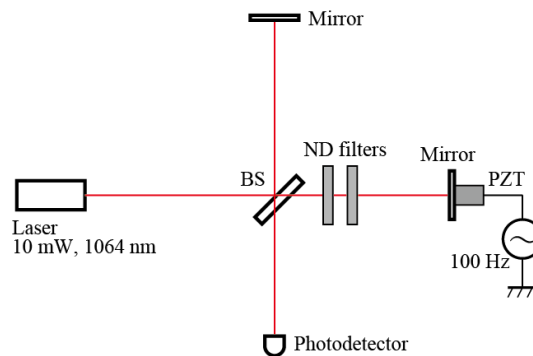


図 1 散乱係数計測のための光学系。図では、ミラーに PZT をつけて振動させているが、実際には、被計測試料を設置し、振動させる。

ところで、干渉信号の振動周波数成分は散乱係数の大きさを反映したものとなるが、干渉計の動作点（初期位相差）の影響も強く受ける。そこで、本研究では、周波数 f と $2f$ の成分を FFT により算出し、それぞれを V_f 、 V_{2f} として計算で求めた次の値 $\sqrt{\left(V_f/J_1\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right)\right)^2 + \left(V_{2f}/J_2\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right)\right)^2}$ を用いることとした。ただし、 $J_n(\cdot)$ は n 次の第一種ベッセル関数、 a は振動振幅、 λ は波長である。これにより、初期位相差に無依存となる。

図 2 は、ND フィルターがない場合の実験結果で、(a) が検出信号、(b) が FFT の実行結果である。また、図 3 は、ND フィルター 2 枚通過時の透過率が 5.56×10^{-4} の時の実験結果である。図 2 (b) と図 3 (b) から得られた $\sqrt{\left(V_f/J_1\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right)\right)^2 + \left(V_{2f}/J_2\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right)\right)^2}$ の値はそれぞれ 3.27 V と 2.17 mV であった。

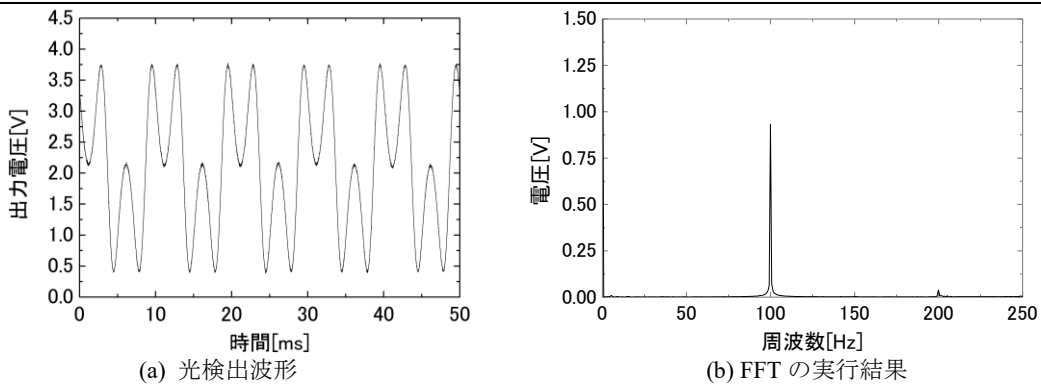


図2 ND フィルターがない場合の実験結果

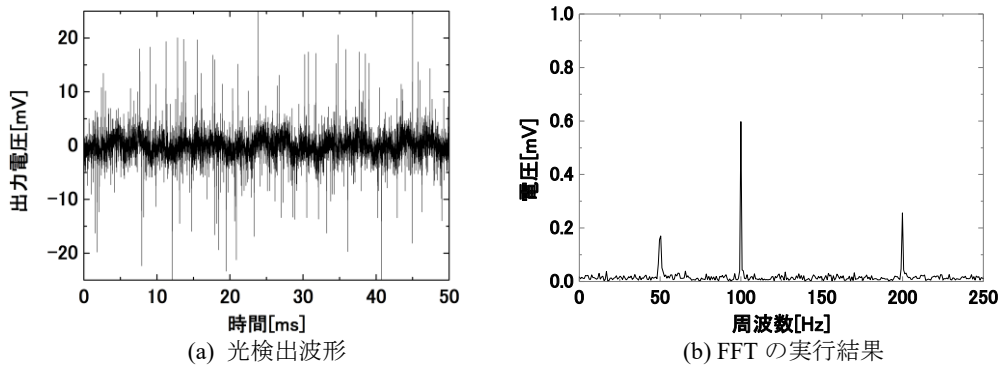


図3 複合 ND フィルターの透過率の場合の実験結果

図4は、ND フィルタのパワー透過率と ND フィルターなしの値を 1 に正規化した $\sqrt{\left(V_f/J_1\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right)\right)^2 + \left(V_{2f}/J_2\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right)\right)^2}$ の値で、ND フィルターのパワー透過率 5.56×10^{-4} までは線形的な出力値が得られた。また、図4にはプロットされていないが、透過率 1×10^{-4} の計測においても、まだ S/N 比に多少の余裕があったため、散乱係数 10^{-5} 台の計測も可能であると期待される。

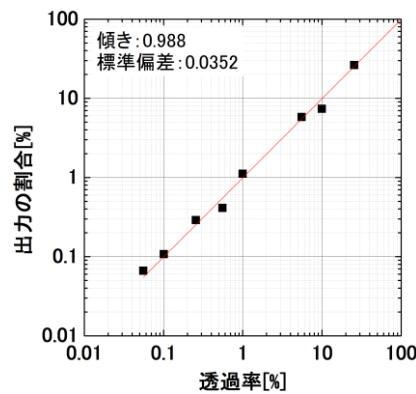


図4 ND フィルターのパワー透過率と正規化出力の関係

今後は、雑音対策等を行い、散乱係数 10^{-8} の計測を目指す。また、現状では、被計測試料を振動させていないことから、試料に定周波の振動を与える方法について検討が必要である。これらの計測技術が確立できた後、実際のビームダンプ素材、ビームダンプの散乱係数の実測を行う計画である。