

DECIGO 用ヨウ素安定化レーザーの短期周波数安定度の向上

武者研究室 下奥あゆ美

1. 序論

2016年2月にアメリカの重力波検出器 adv. LIGO の重力波の初の直接検出報告以来、現在に至るまで様々な重力波が検出されてきた。重力波はその特徴として物質との相互作用が電磁波と比較して小さいことがあげられるため時間が経っても減衰せず、検出されれば電磁波観測では理解できなかったより高密度状態の原始宇宙の理解が深まるといわれている。一方で物質との相互作用が小さいということはそれだけ検出が困難であることを意味し、重力波による相対空間変位量 $dL/L < 10^{-23}$ よりも変位感度の高い検出器が必要となる。我々の研究室では宇宙型重力波検出計画 DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational-wave Observatory) 及びその前哨計画である B-DECIGO のための周波数安定化光源の開発を行っている。その中でも私は光源の短期的な周波数安定度の向上を目指すべく、Lock-In 検出の変調周波数である 200 kHz で能動的な制御であるレーザーの強度安定化及び受動的な制御である差動受光の両方を行ったのでその結果をここに報告する。

2. 重力波検出計画 DECIGO

2.1. 重力波とは

重力波とは、宇宙空間において超新星爆発やビッグバンなど、巨大な質量変化が起きる際に生じる空間の歪みが横波として光速で伝搬する現象である。これは A. Einstein の一般相対性理論の中で予言されていた現象で、2016年にアメリカの adv.LIGO が初の直接検出に成功したことによりその存在が認められつつある。また、重力波の性質の一つである物質との相互作用が電磁波と比較して小さいことから、その検出により高密度状態の初期宇宙など、重力波天文学や宇宙論の理解が深まるといわれている。

2.2. 重力波検出計画

重力波検出計画は主に地上型重力波検出計画と宇宙型重力波検出計画に分けることができ、どの重力波源をターゲットとするかにより干渉計の観測帯域が異なる。現在、地上型の検出計画には日本の KAGRA、アメリカの adv.LIGO、イタリア・フランスの VIRGO、ドイツ・イギリスの GEO などがある。しかしながらそれら地上型の検出器では干渉計の腕の長さに限界があることや地面振動など、低周波側の雑音によって干渉計の感度がリミットされてしまうため、より低周波にある重力波源にアクセスすることができない。そのため、それらの重力波源へのアクセスを可能にするために検出自体を宇宙で行う計画が宇宙型重力波検出計画で

ある。宇宙型重力波検出計画にはヨーロッパ・アメリカの LISA や日本の DECIGO などが挙げられる。

2.3. DECIGO と B-DECIGO

我々の研究室では背景重力波をターゲットとする宇宙型重力波検出計画 DECIGO 用の光源開発を行っている。DECIGO は図 1 のように夾角 60 度、基線長 1000 km の 3 つの Fabry-Perot マイケルソン干渉計で構成されており、Fabry-Perot 共振器を組み込むことで実効的な基線長を伸ばしている。また、B-DECIGO とは DECIGO の前哨計画であり、基線長は 100 km と DECIGO 計画の 10 分の 1 だが DECIGO/B-DECIGO 共に干渉計の光源に求められる周波数安定度、強度安定度は観測帯域 1 Hz においてそれぞれ 1 Hz/√Hz, $1 \times 10^{-8}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。

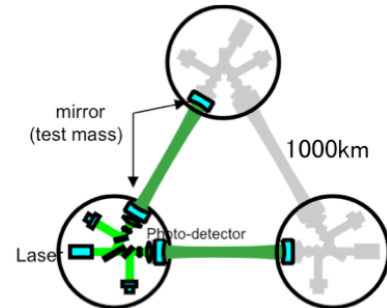


図 1 DECIGO 計画

3. ヨウ素安定化 Fiber DFB レーザー

3.1. 開発中の光源

DECIGO/B-DECIGO の光源に求められる高い周波数安定度及び強度安定度を達成すべく、図 2 のようなヨウ素安定化 Fiber DFB レーザーを開発した。

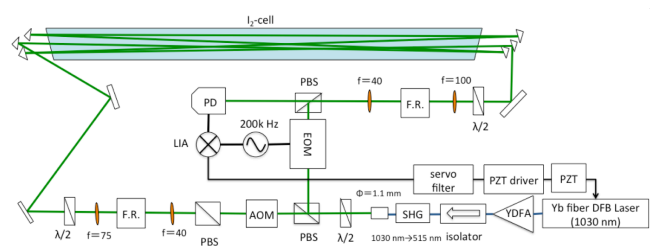


図 2 ヨウ素安定化レーザー概略図

光源には波長 1030 nm の Yb 添加 Fiber DFB レーザーを用いており、従来よりも線幅の細い 515 nm のヨウ素の飽和吸収線を周波数基準として周波数安定化を行っている。レーザーの出力を手製の Yb-doped Fiber Amplifier (YDFA) で増幅した後、Periodically-Poled Lithium Niobate (PPLN) という非線形結晶を用いることにより波長を半分の 515 nm に変換し、その光を

偏光ビームスプリッターを用いることで signal 光と pump 光に分けている。そしてその 2 つを同軸にヨウ素セルに対向入射させることにより飽和吸収分光を行っている。分光により得られる線形吸収の中にあるたくさんの飽和吸収線のうち、最も SNR の良い吸収線の一本を基準に、周波数安定化を行っている。

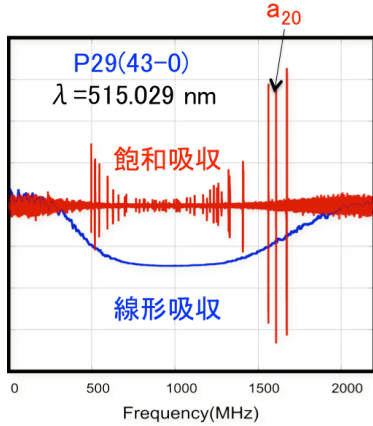


図 3 分光により得られた飽和吸収線

信号取得に関しては、pump 光を電気光学変調素子 (EOM) を用いることで位相変調を行い、受光信号を復調する Lock-In 検出を行うことにより周波数弁別曲線を得ている。そして周波数弁別曲線でレーザーの周波数の揺らぎを電圧情報に変換し、基準との誤差信号である電圧情報を圧電素子のピエゾ素子を制御器としてサーボに入れ、Fiber DFB レーザーに負帰還制御している。

3.2. レーザーの周波数安定度

我々は図 1 に示した周波数安定化光源のブロードボードモデル (BBM) を 2 台開発しており、BBM2, BBM3 のそれぞれの周波数雑音スペクトルを図 4 に示す。

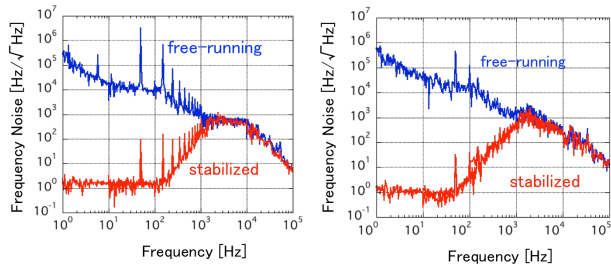


図 4 BBM2 及び BBM3 の周波数雑音スペクトル

図 4 を見ると BBM2, BBM3 共に DECIGO/B-DECIGO の要求値である 1 Hz における周波数安定度は 1 Hz/√Hz を達成していると考えられる。しかしこれはリファレンスにどれだけ追従しているかを表した誤差信号評価であるため、真のレーザーの周波数安定度ではない。真のレーザーの周波数安定度を評価するためには同程度の周波数安定度を持ったレーザーのビート信

号を測定する必要があるため、BBM2 及び BBM3 の 2 台の周波数安定化レーザーのビート信号を位相雑音スペクトルとして測定し、周波数雑音に較正した。その結果を図 5 に示す。

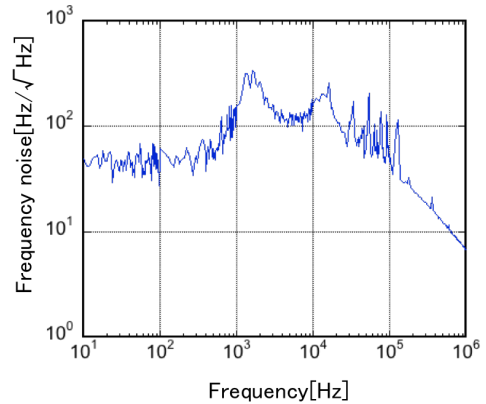


図 5 周波数雑音スペクトル

真の周波数雑音は約 $50 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} @ 10 \text{ Hz}$ と要求値よりも 1 桁半高いレベルにあることがわかる。我々の実験系のように原子や分子をリファレンスとして用いる場合、レーザーの短期的な周波数安定度は周波数弁別曲線の SNR で決まる。そのため、周波数弁別曲線の SNR を向上させる必要がある。我々はレーザーを周波数安定化する過程において pump 光を 200 kHz で位相変調しており、変調周波数である 200 kHz の雑音は周波数弁別曲線の SNR を汚すと考えられる。現状の 200 kHz でのレーザーの強度雑音は図 6 のように理論限界よりも高いレベルにあるため、200 kHz での雑音を能動的な制御である強度安定化、受動的な制御である差動受光の 2 通りで抑圧することを考えた。

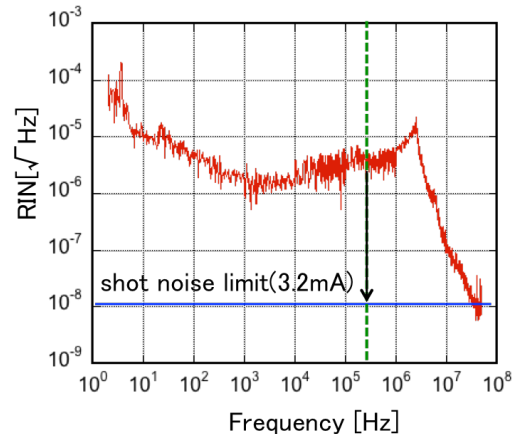


図 6 Yb Fiber DFB レーザーの相対強度雑音スペクトル

4. 変調周波数におけるレーザーの強度安定化

4.1. 負帰還制御

レーザーの強度安定化の制御器としては YDFA, EOM, AOM などが考えられ、制御帯域や元々干渉雑音を防ぐために系に組み込まれていたことを考慮して、

AOM を制御器としてセルに入る前の信号を図 7 のように負帰還制御することを考えた。

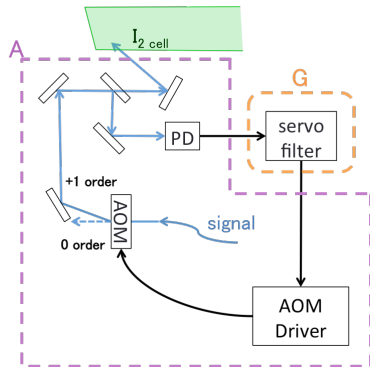


図 7 変調周波数におけるレーザーの強度安定化の系

システムに当たる A の伝達関数を測定し、それに対して目標とする 200 kHz で 20 dB 以上の利得が得られるようにサーボを設計した。200 kHz という高周波での負帰還制御は、制御系が発振しないようにするために高速応答の OPAMP を用いたりするなど、回路を工夫する必要があった。そして設計した制御回路を組み込むことで 200 kHz での雑音を約 6 dB 抑圧することができた。

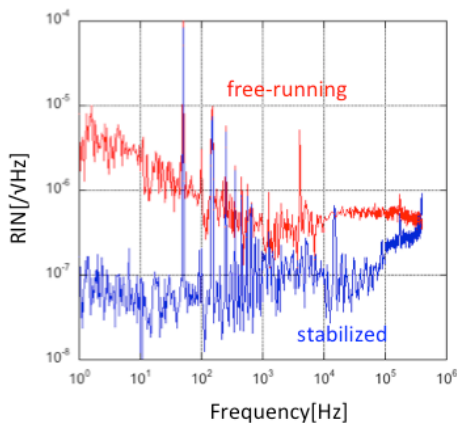


図 8 制御前後のレーザーの RIN

4.2. 発振を利用した制御

負帰還制御では系が発振しないように制御回路を工夫したが得られる雑音抑圧利得に限界があった。そのため、あえて 200 kHz 以上の周波数で発振させることで 200 kHz でのレーザーの強度雑音を落とすことを考えた。そして今までは signal 光のみの安定化を行っていたが pump 光も同時に安定化した場合についても実験を行った。

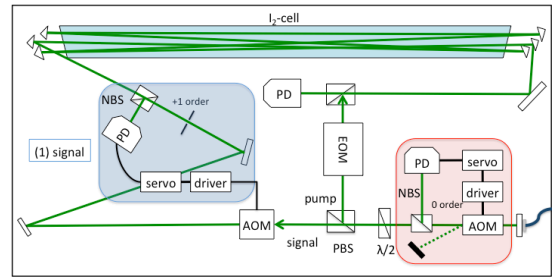


図 9 変調周波数での強度安定化

また、サーボに関しては負帰還制御で用いていた OPAMP の代わりに Low Noise の AC Voltage Amplifier を二段直列につなぐことにより利得を得た。signal 光のみの場合、及び signal 光と pump 光を両方強度安定化させた場合の結果を相対強度雑音スペクトル (RIN) として図 10 に示す。どちらの場合も目標とする 200 kHz では 1 桁半の雑音を抑制できていることがわかる。

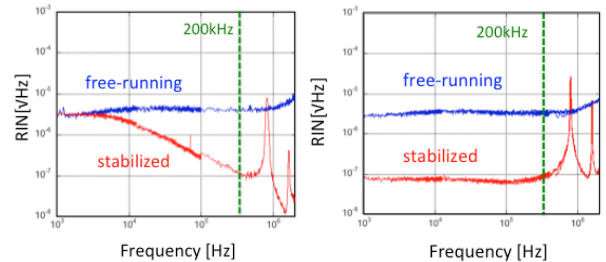


図 10 相対強度雑音スペクトル(RIN)

また、弁別曲線の SNR を評価するため signal 光で強度安定化された系を用いて復調信号の雑音スペクトルを測定したところ、図 11 のようになった。

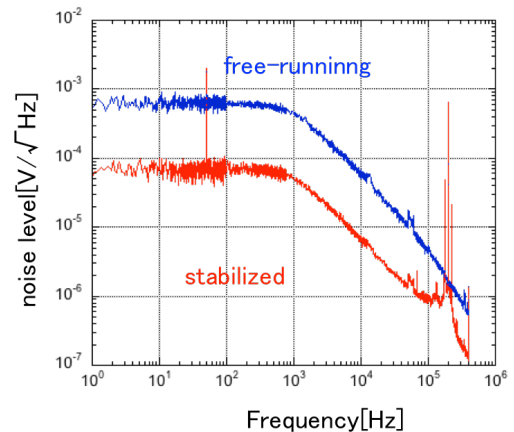


図 11 周波数弁別曲線の復調信号 RIN

雑音は全域にわたって 1 桁抑圧されていることがわかる。信号の大きさが同じであれば SNR として評価した際に向上が見込まれるが強度安定化を行っている際に弁別曲線の信号が小さくなってしまった。レーザーの短期周波数安定度は弁別曲線の SNR で支配されるため、信号が小さくなってしまえば SNR 向上したとは言えな

い。そこで新たに受動的な制御である差動受光を系に組み込むことを考えた。

5. 差動受光

5.1. 原理と差動受光回路

周波数弁別曲線の雑音を減らすもう一つの方法として差動受光法があげられる。これは図 12 のようにセルに入射する前の信号と後の信号の 2 つの共通雑音成分を落として最終的に SN 比向上を目指す手法である。

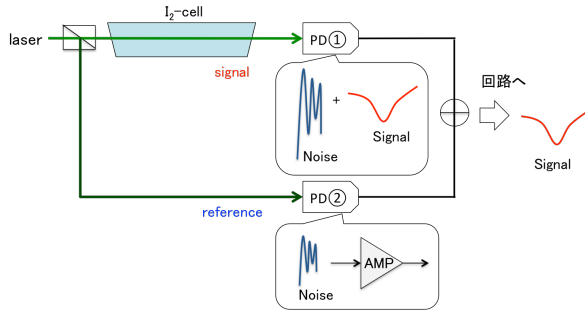


図 12 差動受光の原理

また、受光後の差動回路を図 13 に示す。セル前の信号を **reference** とし、セル後の信号を **signal** とした時この回路は両者の DC 電圧を揃えるようにトランジスタが負帰還動作する仕組みとなっている。またこの回路において、**reference** のパワーは **signal** のパワーよりも大きくなければならず、**signal** と **reference** のパワー比によっても雑音抑圧の利得が変化するため、パワー比を最適化しなければならない[1]。そのため **reference** の光路中に光 attenuator を入れ、それを調節することで強度雑音が最も小さくなるパワー比に設定し、相対強度雑音スペクトルを測定した。

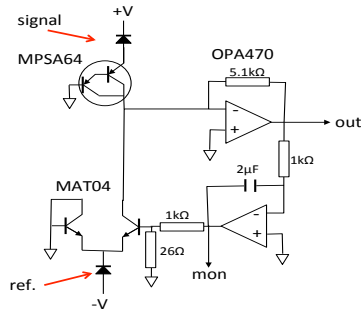


図 13 差動受光回路

signal のパワーを一定にし、**reference** のパワーを光 attenuator で変えながら両者のパワー比を変化させて測定した RIN を図 14 に示す。

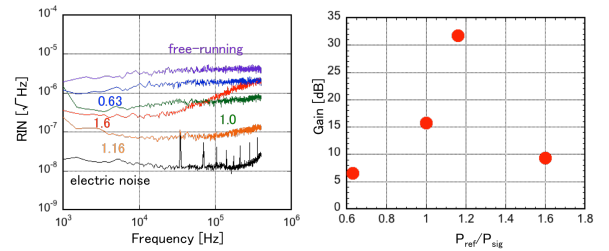


図 14 Signal と Reference のパワー比を変えた時の RIN(左)と抑圧利得(右)

この時 **signal** のパワーは 1.02mW であり、パワー比を最適化 ($P_{\text{reference}} = 1.16 P_{\text{signal}}$) することにより無制御時に比べて 1 桁半の雑音を除去することが出来た。また、回路の Monitor 信号の電圧値は **Signal** と **Reference** のパワー比と対応しており [1]、雑音の抑圧利得が最大になる付近では Monitor 信号の電圧値は 0V であったことから今後は Monitor 信号が 0V になるように制御する。

5.2. 差動受光の系への組み込み

BBM2 及び BBM3 それぞれ 1 台ずつ差動受光回路を配置するため、作成した差動受光回路を周波数安定化ブレッドボードモデルに組み込むことを考えた。**Signal** の受光位置は周波数安定化時と同じであり、セルに入射する前の光をウェッジプレートで 2 つに分け、セルに入射しない光を **Reference** として差動受光回路に入射した。

差動受光回路を既存の **BBM** に組み込んでレーザーの周波数をヨウ素の共鳴周波数に合わせて共鳴させた状態で復調後の雑音をスペクトルとして評価した結果とその時の弁別曲線の様子が図 15 である。

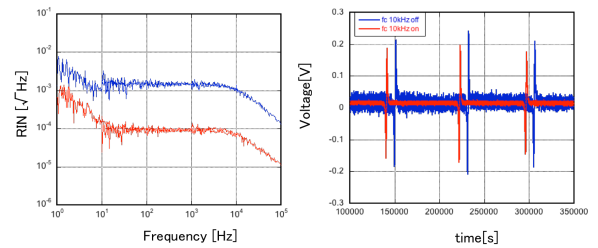


図 15 復調後の雑音スペクトル及び弁別曲線

青が差動受光を **off** にした場合で赤が **on** にした場合である。差動受光の有無で雑音が全域にわたって 1 桁抑圧できていることがわかる。また、低域で復調雑音が高くなっている原因として考えられたのは復調前の 200 kHz での雑音が大いからだと考えられた。実際、復調前のレーザーの RIN は図 16 のようになっており、200 kHz の周波数で雑音のピークを確認できた。

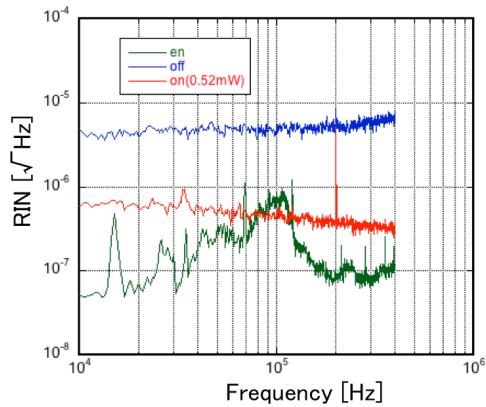


図 16 レーザーの相対強度雑音スペクトル

この雑音は光を遮断しても現れたため、電気的な雑音だと考えられた。実際、測定器が差してある電源タップの ground を定盤と共通にすることでこの雑音を除去することができた。もう一つ注目すべきことは図 12 で回路に入射する 2 つの光のパワー比を最適化すると雑音の抑圧利得が 1 桁半得られたのに対して、今回のように BBM に組み込んで共鳴させると抑圧利得が減少したことである。この原因に関しては差動受光における 2 つの光の共通部分でないセル内で発生した雑音だと考えられた。次に、差動受光を行いながらレーザーの周波数を安定化した結果のレーザーの RIN とその時の周波数雑音スペクトルを図 17 に示す。

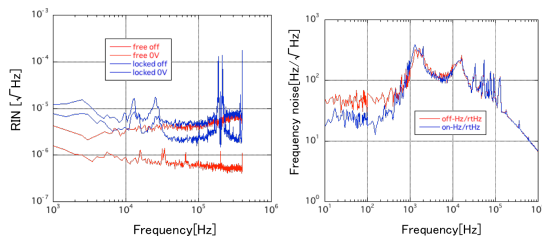


図 17 レーザーの周波数を安定化した時の RIN(左)と周波数雑音スペクトル(右)

レーザーの周波数を安定化した際には共鳴時よりもさらに雑音の抑圧利得が減少しているが、BBM2,3 ともに差動受光を行い周波数を安定化した状態でそのビート信号から位相雑音スペクトルを測定し、周波数雑音として評価すると差動受光によって変調周波数での強度雑音が減少した分だけ周波数雑音も減少していることが確認できた。結果として、差動受光回路を組み込むことにより 1 Hz において 17 Hz $\sqrt{\text{Hz}}$ という周波数雑音を達成することができた。

5.3. 最適な SNR の条件

最終的な目標である弁別曲線の SNR の向上を考え、信号・雑音に関して最適条件を探すためにセル内のパス数やセル内の温度などのパラメータを変えて実験を

行った。まずセルのパス数を変えることによる効果としては吸収量と蛍光量の 2 つが挙げられると考えた。吸収量が変わることによりセルを通った後の受光電圧も変わるため、信号の大きさも変わる。吸収量の変化に伴ってセル内で発生する蛍光量も異なり、蛍光量は受光する光の強度雑音になるため蛍光量が変わることにより雑音の大きさも変わると考えた。一方、セル内の温度を変えることによる効果としては上記の吸収量、蛍光量の変化に加えて pressure broadening による線幅広がりの影響も考慮しなければならない。以上のことを踏まえてまず、セル内の温度を変えるために温調内のサーミスタの抵抗値を 10.5 ~15.5 kohm まで変化させた。サーミスタの抵抗値と温度の関係を図 18 に示す。

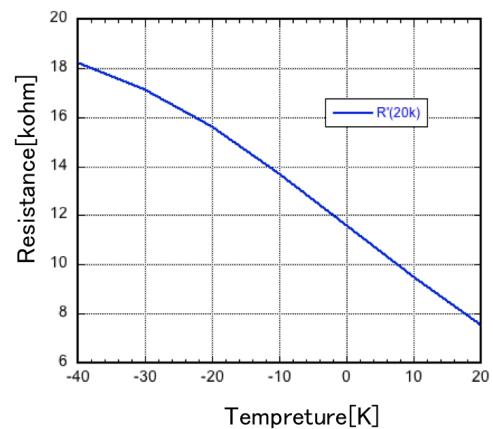


図 18 温調の抵抗値と温度の関係

また、温調の抵抗値を変化させた時の 3pass 時のレーザーの強度雑音(差動 on/off)と信号の大きさの変化を図 19 に示す。

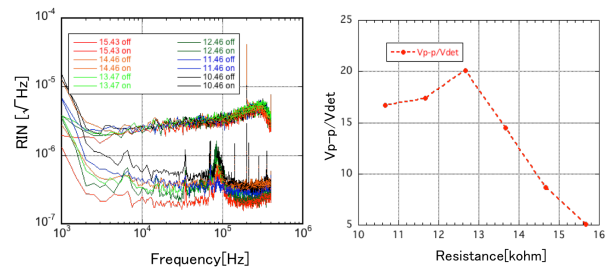


図 19 セル内の温度を変えた時のレーザーの RIN(左)と信号の大きさ(右)

さらに信号の大きさを 200 kHz でのレーザーの強度雑音で割った値を横軸温調の抵抗値としてプロットした結果が図 20 である。

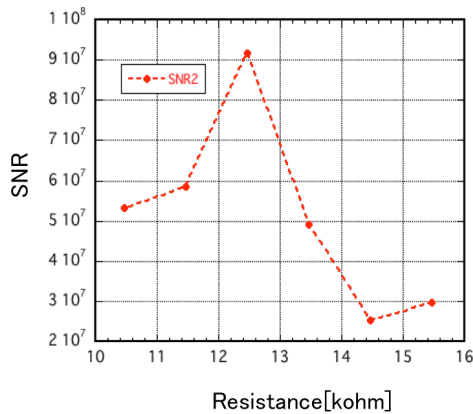


図 20 セル内の温度依存の SNR(3pass 時)

雑音抑圧利得と信号の大きさを考えた時、SNR が最大になるのは 12.5 kohm 付近であると考えられた。5pass においても同様の挙動が得られたため、SNR が最も良い条件である 12.5 kohm でまず、セルの吸収量を同じにしてそのパフォーマンスを観測した。吸収量を同じにした時の 5pass/3pass 時の Signal 及び 200 kHz における Noise の比較を表 5 に示す。

表: 5pass/3pass 時の Signal と Noise の比較

	5pass	3pass
Signal	14.882	20
Noise	9.41e-07	2.19e-07

表 5 の結果より、SNR を考慮すると 3pass 時の方が良いと考えられたため、BBM2 と 3 の 2 台を 3pass にし、セル内の温度に対応するサーミスタの抵抗値をどちらも 12.5 kohm にして差動受光を行い、レーザーの周波数安定化を行った。なお、この時の BBM2,3 の 2 台のレーザーの周波数弁別曲線の SNR はどちらも信号の大きさ V_{pp} を 1 Hz でのレーザーの強度雑音で割った値で $2e+04 \sqrt{\text{Hz}}$ 程度であった。そして BBM2,3 の 2 台のレーザーのビート信号を検出し、そこから周波数雑音スペクトルに較正した結果を図 21 に示す。

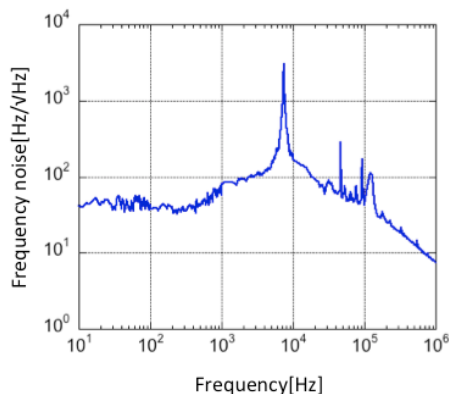


図 21 最適条件時のレーザーの周波数雑音スペクトル

図 21 を見ると、最適化前のレーザーの周波数雑音より悪化していることがわかった。これに関しては原因がわかっていないが実験中、ある時期を境にレーザーの周波数弁別曲線の SNR が全体的に悪化したことから電気雑音の混入が原因として考えられており、今後は電気雑音対策を主として行い、DECIGO のレーザーの周波数雑音の要求値である $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ を目指す予定である。

6. まとめと展望

宇宙型重力波検出計画 DECIGO の周波数安定化光源の開発において、短期的周波数安定度に寄与すると考えられる変調周波数でのレーザーの強度安定化及び差動受光を行った。変調周波数での強度安定化に関しては目標とする 200kHz で 1 桁半の雑音を抑制できたが同時に弁別曲線の信号も小さくなってしまった。差動受光法に関しては回路の最大抑圧利得は 30 dB、周波数安定化時の利得はそれより減少するものの差動受光で抑圧できた雑音分だけ周波数雑音も下がっていることが確認できた。最適条件に関してはまだ模索中であり、Pressure Broadening の影響も考慮していないため今後は SNR の最適化を中心に実験を進める。

参考文献

[1] Philip C.D. Hobbs et al. APPLIED OPTICS vol.36, Issue4, p.p. 903-920 (1997)

発表実績

[1] 下奥あゆ美、末正有、武者満、“宇宙重力波望遠鏡 (DECIGO) のための高出力・高安定光源の開発”、第 60 回宇宙科学技術連合講演会 2016 年 9 月 8 日

[2] 下奥あゆ美、末正有、中川賢一、武者満、“スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(80):安定化光源”、日本物理学会第 72 回年次大会 2017 年 3 月 18 日

[3] 下奥あゆ美、末正有、武者満、“宇宙重力波検出器 DECIGO/B-DECIGO のための高出力・高安定光源の開発”、第 61 回宇宙科学技術連合講演会 2017 年 10 月 26 日