

衛星搭載用超高安定化レーザーの開発

量子・物質工学科 武者研究室 中澤 慧

1. 研究背景

現在日本では、宇宙空間で重力波検出器を建設する DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory)計画が進められている。一辺が 1000 km の三角形のレーザー干渉計を用いて空間の変位を検出する。前哨計画として打ち上げられる小型衛星 DECIGO Path Finder(DPF)がある。DECIGO 計画に向け、ドラッグフリー衛星、周波数安定化レーザー、光共振器制御などの技術検証を行う。我々のグループではこれらの計画の光源開発を行なっている。DPFに求められる光源の要求値は出力 20 mW、波長 1.0 μm 、周波数安定度は検出帯域の 1 Hz において 0.5 Hz/Hz^{1/2}である。

衛星に搭載するためのプロトタイプである、ブレッドボードモデル(BBM)の開発を現在おこなっていて、これは決められた大きさ内に光学系を配置し、小型化、機械的安定性を向上させ、制御の自動化システムの構築を行っている。

2. 原理, BBM の作成

周波数安定化はヨウ素分子の吸収線を基準として用いる。その基準に光源の周波数をあわせることで安定化を行う。光源には Fiber DFB Laser を使い波長 1030 nm の光を Yb Doped Fiber Amplifier を用いて増幅させ、導波路型周期分極反転ニオブ酸リチウム(WG-PPLN)を用いて第二高調波を発生させた。 piezo素子により周波数挿引を行い、波長 515 nm の光をヨウ素セルに対してポンプ光とプローブ光にわけ、同軸対抗入射させる。ポンプ光には電気光変調器(EOM)を用いて位相変調を加え、モジュレーショントランスファー法により飽和吸収信号を取得する。サーボフィルタを介し、piezoドライバーに

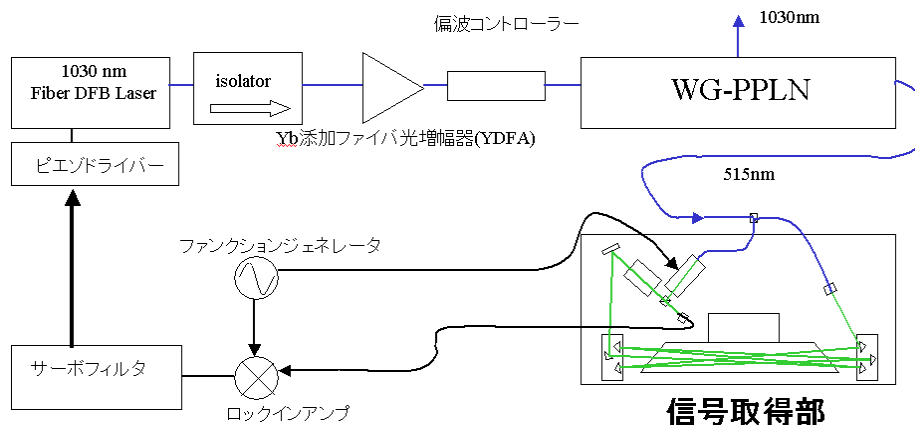


図 1 : 全体図

フィードバックすることで光源の周波数安定化を行う。

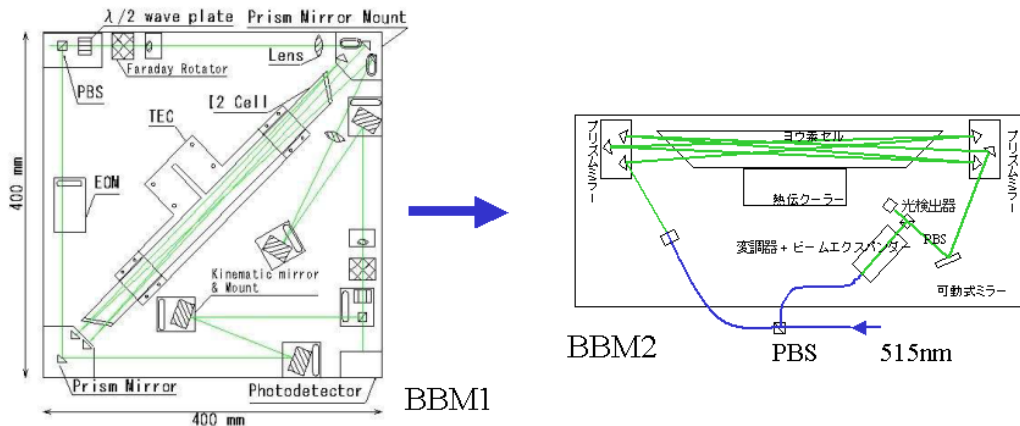


図2：BM1とBBM2の違い

光学系はすべて BBM 内に配置し、光源は前回 BBM(BBM1)で使われていた Yb:NPRO から Fiber DFB Laser に変更した。前回までは自由空間であったが、機械的安定性を高めるために光源から信号取得部までをすべてファイバー化しており、ファイバーで構築されているためにアライメントによる崩れが少なく、また搬送も容易である。図2に信号取得部である BBM の前回のモデル BBM1 と今回のモデル BBM2 の違いを示した。信号取得部では光軸を低くしたことで機械的安定性を高めている。また、稼動部分を図のとおり、少なくしており、これによっても機械的安定性を高めている。6 個のミラーもすべてマウントに直接固定しており、これについては後述する。BBM1 では 4 パスであったものを BBM2 では 5 パスにしており、これによってヨウ素との相互作用長を長く確保でき、SN 比の向上を図った。熱電クーラーはヨウ素セルを冷やし、ヨウ素分子との作用時間を長くするためのものである。また、ビームエクスペンダーも同様にビーム径を広げることで、ヨウ素分子が光を通過する時間を長くし、SN 比を高める目的である。

ポンプ光は S 偏光でヨウ素セルに入射する。しかし、ヨウ素セルの端面はブリュスター角になっているため、端面での反射損失が大きく、セルを抜けきるまでにビーム品質が悪くなってしまった。そこで、波長板とファラデーローテータを入れることにより偏光を変える。図3のような波長板、ファラデーローテータ、ビームエクスペンダーを機械的安定性のために一体型にしたマウントを作成した。S 偏光であるポンプ光は半波長板とファラデーローテータを通過することで P 偏光となり、ヨウ素セルの端面にブリュスター角で入射する。これにより反射損失が抑えられる。また、P 偏光で入射したプローブ光は P 偏光を保持した状態で PBS を通過しフォトディテクターへと入る。

次に反射ミラーの固定方法について記す。反射ミラーはオプティクスマウント上に直接接着している。まず、固定せずにアライメントを行い、ヨウ素セルに光がすべて通ることを確認した。接着方法は図4のようにマイクロメーターを取り付けた治具を用いてまず上面を抑え付けた。この抑え付けの強度により仰角がついてしまうことを避ける必要がある。

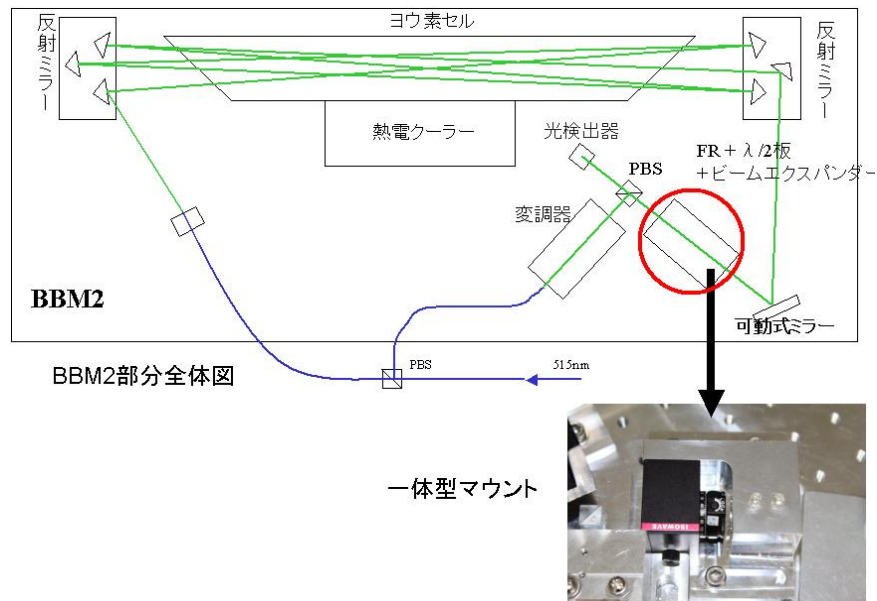


図 3 : BBM2 改良後

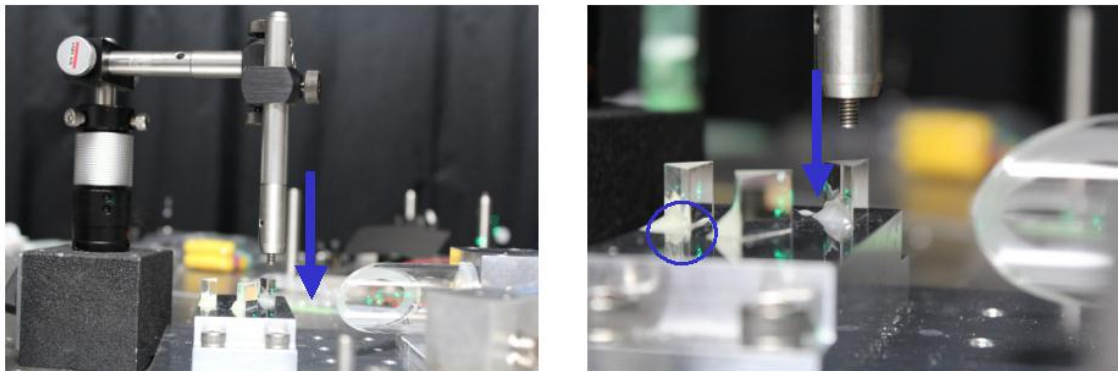


図 4 : ミラーの固定方法

遠方でのビームが同一平面状にあるように強度を調整して、ミラーを抑えた。そして、その状態で二液混合の接着剤を用いて、ミラーを他の覆いながら固定を行った。これは、ゼリー状の瞬間接着剤で行ったときに、気化した接着剤が他のミラーの表面についてしまったためである。接着剤を塗布した場所は図4の右図のようにミラーの側面とマウントの部分であり、下面ではない。下面に塗布してしまうと、接着剤そのものの厚みにより仰角がついてしまうためである。このようにして1つのミラーに対して24時間ほどかけ接着をし、治具を取り外してもアライメントに崩れがないことを確認して、6つのミラーをすべて接着した。一度光を通してしまえば、固定ミラー部分のアライメントが崩れることはなかった。実際、ヨウ素セルの位置を変えるために一度すべてをはずして、固定しなおしたが、最初のミラーへの入射角のアライメントさえできれば、すべてパスが通ることがすぐに確認で

きた。

3. まとめと今後の展望

本研究では宇宙重力波望遠鏡 DECIGO の前哨である DPF 用の超高安定化光源の開発にあって、その光学系の作成を行った。信号取得部までをすべてファイバー結合にした。

また SN 比の良い弁別曲線を得るために信号取得部の、光学系の設計の見直しを行い、P 偏光でヨウ素セルに入射させることで端面損失を軽減した。

残念ながら今回信号取得を行うことができず、周波数安定化を行うことができなかった。その理由としては、アライメントが不十分でありビームが完全に同軸対抗入射できていないためと考えられる。実際、BBM1 の信号取得に関して、見た目では光軸が一致していても信号が取得できないことがあり、わずかに変化させただけで取得できるようになることがあった。よって厳密なアライメントが必要である。

今後の展望としては、アライメントを厳密に行い、ノイズを減らすために散乱による明光を取り払うなどして、SN 比の良い弁別曲線を得ることを最初の目的としている。

また、周波数ロックをかけ、自動制御化することを予定している。