

人工衛星搭載用周波数安定化レーザーの開発

電子工学科 植田研究室 堀内慎也

1.序論

現在重力波を用いることで宇宙をとらえる重力波天文学が活発になっている。重力波は宇宙始まり直後の状態や、中性子星など高密度の物質についての情報を提示するとされる。世界中ではレーザーを用い、マイケルソン干渉計を構成して重力波検出を試みているが未だに検出に成功していない。

日本では重力波検出のため次世代の計画が進行中である。宇宙空間での検出を行う DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory) 計画と地下で検出を行う LCGT(Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) 計画である。前者の DECIGO 計画は 2024 年に観測衛星を打ち上げることを目標に現在推進中であり、2012 年には観測の技術検証を行う試験衛星 DECIGO Pathfinder(DPF) である。

本研究では DPF の光源部におけるエンジニアリングモデルを設計、製作することを目的に行った。

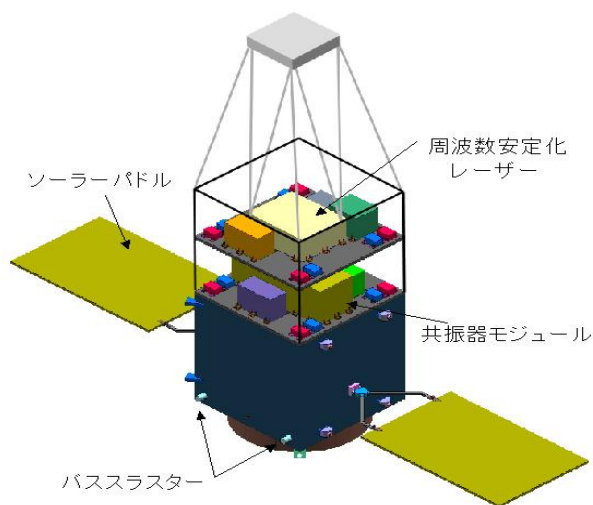


図 1 DPF 概略図

2.重力波について

重力波は中性子星など大きな質量の星が移動することで周囲に伝播する。伝播した波は空間を歪ませ、その様子は太陽地球間に対して水素原子 1 個程度の歪みしかない。重力波は宇宙誕生の直後から伝播しており、原始宇宙状態解明の手がかりとされる。

重力波はアインシュタインによってその存在を予言されており、現時点では間接的にその存在が確認されている。1974 年、ジョゼフ・テイラーとラッセル・ハルスは連星中性子星の観測記録とアインシュタインの導いた結果が誤差 0.5 % 以内で一致したことが確認された。これにより二人は『重力研究の新しい可能性を開いた新型連星パルサーの発見』という業績で 1993 年にノーベル賞を受賞している。このように重力波の存在は世界的にも認められている。しかし世界中で重力波の直接的検出に力を注いでいるが、未だに検出されていない。

そこで感度をさらに上げ、さらに地上で観測できない周波数帯域の重力波検出計画が日本と欧米で進められている。DECIGO 計画では 1Hz 帯をターゲットとし、LISA 計画と LCGT 計画の橋渡しをする。

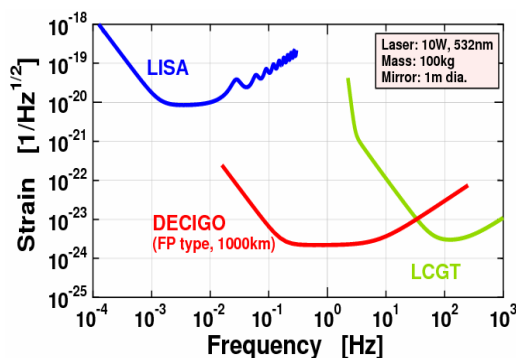


図 2 各計画の重力波検出帯域

3.周波数安定化

検出の標的となる重力波は非常に小さい変化しか周囲にもたすことが無く、検出には困難を極める。通常のレーザーでは単色光源であっても周波数変化が僅かにあり、これが雑音となって重力波が埋もれてしまう。

そこで周波数基準を別に用意し、それを参照して光源の周波数を安定にするシステムを作製した。周波数基準となるのはヨウ素の吸収線である。光は分子と共鳴すると吸収されてしまい、特定の周波数において強い吸収が起こる。これを参照し光源の周波数を吸収線に掃引する。掃引後は制御利得を上げることで周波数をロックし高安定な光を得る。

しかし実際には分子の熱運動によって吸収線がドップラーシフトしてしまい、線幅が大きく広がってしまう。この場合、参照できる周波数が特定できず光源を安定化させる参照光としては不十分である。ここでヨウ素に対し、双方向から光を照射すると、広がった吸収線の中心に dip が形成される。これを飽和吸収といいこの dip を参照して光源を安定化した。

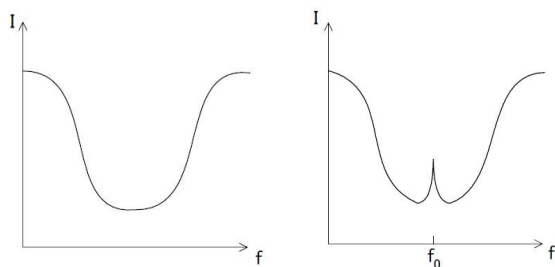


図3 左 吸収線が広がる様子
右 飽和吸収線が生じる様子

4.光源について

今回使用した光源は Yb:YAG NPRO (Non-planer Ring Oscillator) である。発振波長は 1030 nm でヨウ素の 515 nm 帯の吸収に合わせ第二高調波を得てヨウ素セルに照射した。

従来の方式では Nd:YAG を使用し 1064 nm の光を発振後、ヨウ素の吸収線に合わせてこの第二高調波 532 nm の吸収線を用い周波数安定

化を行っていたが、これでは重力波を検出する十分な周波数安定度 $\delta f \leq 0.5 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ を達成できない。今回 Yb:YAG NPRO を利用することで従来の方式より吸収線幅を狭めることができるのでこれにより更なる高安定化を行った。

5.光学系の小型化

人工衛星搭載を考え光学系全体の小型化を行った。ヨウ素吸収線については前年度から測定されており、それらは 1 m × 2 m 程度の定盤上にヨウ素セルなど光学素子が配置されていた。本研究では人工衛星に搭載するため、これらの光学系を 400 mm × 400 mm の定盤上に小型化した。小型化したのは周波数基準を得るための部分でヨウ素セルは長さ 400 mm であり、定盤に対して対角線上に置きその周りに他の光学素子を設置した。図4に今回作製した光学系の設計図を示す。光源から放たれた光は図の左上から定盤場内へ入射する。入射した光は PBS で二つに分かれそれぞれヨウ素吸収線の信号を得るプローブ光と、飽和吸収信号を得るためプローブ光とは正反対にヨウ素セルに入射するポンプ光である。

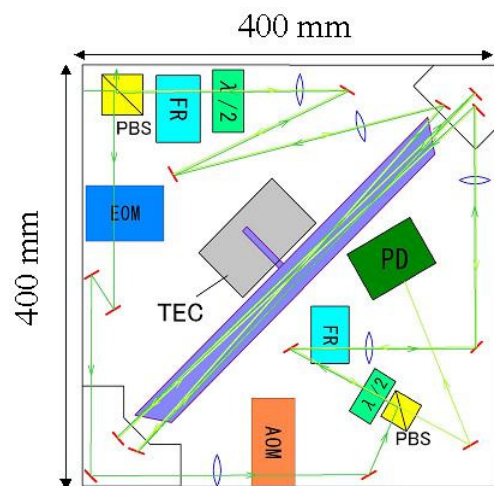


図4 定盤設計図

EOM と AOM は飽和吸収信号を得るための光学素子で、ヨウ素に照射する片方の光に対

し周波数を変調させる。ファラデーローテータと半波長版はポンプ光のヨウ素セル端面での反射を抑え、さらに光源へ光が戻ることを防ぐ。またヨウ素に入射する前にレンズを設置した。これはビームエキスパンド用のレンズで、ビーム径を広げる事で TOF ブロードニングを抑える。

ヨウ素セルには信号強度を増強するためにマルチパスで光を通過させる工夫を行った。パスの数は 4 でこれに伴い専用のミラーマウントを作製した。光軸の高さは定盤から 5 cm に設置することで系全体の機械的安定性を高めた。以上の点を踏まえて作製した光学系を図 5 に示す。

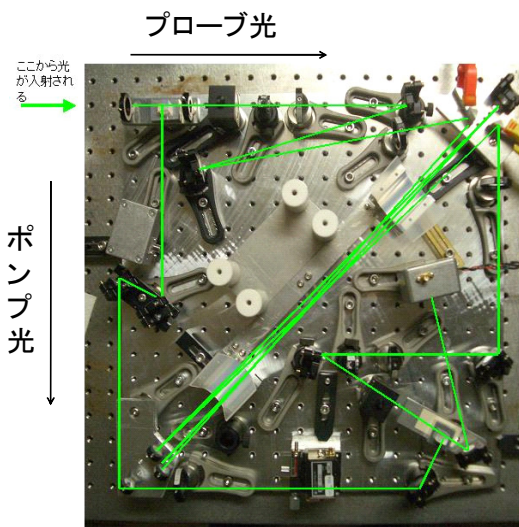


図 5 作製した光学系写真

6. マイコンによる自律制御

宇宙空間では容易に人が立ち入ることができないので、周波数を自動で高安定になるシステムを利用して開発した。

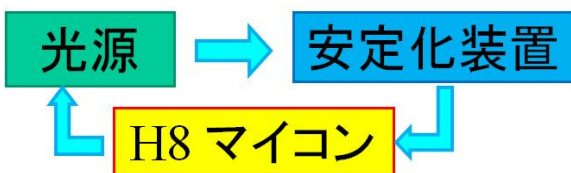


図 6 マイコンが制御を行う流れ

自動制御に利用したのは H8 マイコンと呼ばれる安価なマイクロコンピュータである。このマイコンの特徴は、内部に A/D、D/A コンバータが内蔵されており外部との信号のやり取りが簡単に行える。またカウンタも内蔵しており正確に時間を刻むことができる。これらの機能を利用し外部からの信号を適切に処理して自律制御システムを作製した。

マイコンが制御を行う流れは以下のようになっている。

- (1) 周波数を大きく掃引
⇒線形吸収信号を得る
 - (2) 吸収中心近傍で小さく掃引
⇒飽和吸収の微分信号から吸収中心にロック
 - (3) 制御利得を上げる
⇒光周波数の高安定化
 - (4) ロックが外れていないか常に監視
⇒外れた時に飽和吸収へ再掃引しリロック
- マイコンが制御を行う対象は光源の周波数と、制御利得を上げるためのスイッチングである。ヨウ素セルを含んだ光学系から得られる周波数基準を逐一確認し、光源にフィードバックする。

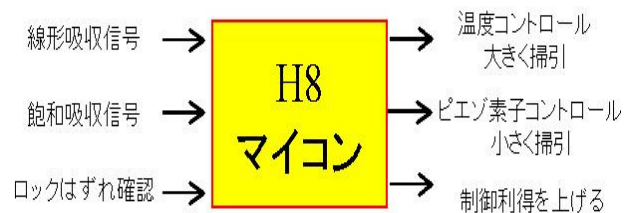


図 7 マイコンが制御を行う対象

光源の周波数掃引は 2 種類ある。一つは結晶温度を操作して GHz 単位で周波数を変化させる。もう一つはピエゾ素子をコントロールすることで、結晶を歪ませ MHz 単位で周波数を微調する方法である。本研究ではヨウ素が光を吸収する線形吸収の様子をマイコンで捉え、吸収が一番大きい周波数を探し出し最終的に吸収中心まで掃引する操作までを行った。

安定化装置ではプローブ光の強度を観察す

る。吸収が強い場合光はヨウ素セルを透過しきれず、フォトディテクターでは弱い信号として示される。そのときの電圧をマイコンは逐一記録して最後に最小値を比較する。比較後信号最小値に対応する信号を光源にフィードバックした。実験結果を図8に示した。

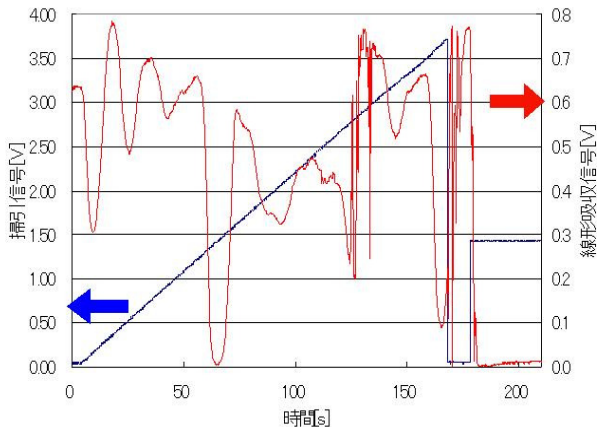


図8 マイコンによる線形吸収掃引

7.考察

マイコンから掃引信号を送ると幾つかの吸収が確認できた。肉眼でもこの間時刻経過に伴いヨウ素セルが光を帯びることが何度か確認できた。マイコンで掃引できる周波数振れ幅いっぱいまで信号を操作した後、マイコンは線形吸収信号の大きさを比較して最小値を検索し吸収が一番強いときの掃引信号を出力している。図8の約170s以降が吸収中心に周波数掃引している部分である。掃引信号を大きくするにつれて約130sでは線形吸収信号が不安定になっている部分がある。これは光源がモードホップしていると考えられ、今後の実験においてはこれを避けるように予めマイコンの掃引幅を設定し、不安定要因を極力避けるようにシステムを作り上げる努力が必要だと確認できた。

8.今後の展望

作製した小型の周波数安定化装置において線形吸収信号、飽和吸収信号を測定することが

これから先の最初の目標になる。今回マイコンで信号を得たのは、前年度から吸収信号を測定していた光学系を利用したものである。正しい信号が作製した光学系で測定できるかを確認していく。

今回の実験ではマイコンは第一段階の制御を行っただけで、それ以降の飽和吸収信号を利用して周波数ロックまで制御していない。マイコンを通さず常に安定した信号を得られたことを確認し、その信号をもとに閾値を定めそれをマイコンに記憶させてスムーズな周波数掃引を行う予定である。その他周波数が吸収中心から外れた際のモニタ回路を作製しマイコンは掃引完了後、常に監視状態にして周波数外れに対して順応できるかのテストも行わなければならない。

ヨウ素の515nm帯での新しい周波数基準が認められれば、今回の小型化した系は可搬用なので世界中の周波数基準と比較し更なる高安定システムを世界中で共有できる可能性を秘めている。本研究では重力波を検出するための高安定なレーザーシステムの開発が目的だが、応用範囲はとて広く次世代の周波数基準として活用される要素も含まれている。更にマイコンを利用して誰でも簡単に高安定な基準が得られればあらゆる研究室に周波数基準を設置することができる。今後は光学系の完成を見通すだけでなく、多目的にこの研究が活用されないか様々な視点でこの研究を見ていく必要がある。

参考文献

- [1] Thomas J. Kane and Robert L. Byer, Opt.Lett. **10**, 65-67 (1985).
- [2] 横山直隆, “C言語によるH8マイコンプログラミング入門,” 技術評論社 (2003).
- [3] 古在由秀, “宇宙を探る新しい目 ―重力波―,” クバプロ (2002).