1.5 µmの3倍波を用いたヨウ素周波数安定化レーザーの開発

1. はじめに

より高安定な測位衛星システム開発の一環で 精度の良いマイクロ波を生成するという計画が 立てられている。以前、本研究室では宇宙重力 検出器計画(DECIGO)の一環で人工衛星に搭載 するヨウ素周波数安定化レーザーを開発してき た。このことを受け、次世代測位衛星用の周波 数基準に応用し、高安定なマイクロ波を生成す ることにした。生成されるマイクロ波の安定度 は周波数基準の安定度に依存するため、より安 定な周波数基準が求められる。現在、利用され ているルビジウム原子時計による周波数安定度 は約∆f/f = 10<sup>-13</sup>であるが、周波数基準の長期 安定度を10-15台まで向上させる必要がある。そ のため、私は 1.5 µmの光源を用いた光学系を組 み立て、長期周波数安定度を向上させるために 取り組んだ。DECIGO では1µmの光源を利用し ていたが、1.5 μmの場合、今後用いる光周波数コ ムとの親和性が良い、人工衛星用の部品が多 い、高出力化の必要がない、狭線幅のため周波 数安定度の向上が期待される(図1参考)といっ た観点から光源を変更することにした。また DECIGO では 10 秒の短期周波数安定度を目指 していた一方、測位衛星は 10000 秒の長期周波 数安定度を目標としている。



図1. 1.5 µmレーザー(青)と1 µmレーザー(赤)の 線幅比較

武者研究室 2233061 CHO YEACHAN



図2.1µmから1.5µmへ光源交換

光源を1µmから1.5µmに変更したため、1.5µm光 源用の光増幅器や波長変換結晶などの光学系を 新たに開発した。1 µmのファイバーDFB レーザ ーから 1.5 μmの PLC-ECLD に置き換えたた め、光増幅器を YDFA から EDFA に置き換え、 波長変換結晶も SHG 結晶から THG 結晶に置き 換えて DECIGO と同様に 515nm 帯のヨウ素分 子がレーザーを吸収できるようにした。次に開 発した EDFA や THG 結晶用の光学系を示す。 EDFA に関しては後方励起方式を使い、LD2個 のパワーが合算されるようにしたため、10mW のシード光で約 430mW まで増幅できる。そし て3倍波のみ抽出する光学系では3倍波のパワ ーが十分取れるようにミラーの位置に気をつ け、ファイバーカップリングの効率向上のため にシミュレーションを行なった。



2. 研究概要

# 図3. 開発した EDFA(上)と THG 結晶光学系 (下)

上述した装置を組み込んだヨウ素周波数安定化 レーザーの概略図を示す。



図4. ヨウ素周波数安定化レーザーの概略図

先ほどの装置を用いて生成した 515nm の光をフ ァイバーカップリングさせ分光に用いた。この 光を信号光と励起光に分けてヨウ素セルの中で 対向入射されるように光学系を組み立てた。信 号光は干渉と強度変調のために AOM で 80Mhz の周波数シフトを受ける。また励起光は 200kHzの位相変調を受ける。この励起光の位 相変調がヨウ素セルの中で信号光に移乗される 変調移乗法を利用している。その信号光をロッ クイン検出し、エラー信号(周波数弁別信号)を 取得し、レーザー光源にフィードバック制御し ている。さらにこの研究では長期周波数安定度 向上を目指しているため、レーザー光強度の揺 らぎを抑える強度安定化、位相変調の際に引き 起こされる残留強度雑音の安定化やヨウ素セル の気圧安定化や磁場安定化などレーザーの周波 数がドリフトが起こらないようにするために 様々な工夫がされている。

本研究では周波数安定度の評価のために上記 のヨウ素周波数安定化レーザーのような周波数 が安定なレーザーを2台用意し、2台のビート 周波数を測定することで周波数安定度を評価し ている。

### 3. 研究結果

上記の概略図で示したヨウ素周波数安定化 レーザーができたところで 2023 年 3 月に情 報通信研究機構(NICT)にレーザー全般を持ち 込み周波数安定度の評価を行なった。NICT にて評価を行なったのは高安定のレーザーが あるためである。普段、実験室では2台のヨ ウ素周波数安定化レーザーを利用し安定度の 評価を行うが、周波数安定度の測定特徴上、 悪い方のレーザー安定度を大きく反映するた め、安定度が似たレーザー2台で測定した場 合、どのレーザーが原因なのか見分けること が困難である。しかし、今回用いた NICT の 水素メーザー同期光周波数コムの場合、その 周波数安定度がヨウ素周波数安定化レーザー よりも安定であることが確定である。そのた め、レーザー2台によるビート周波数ではあ るが、アラン分散で示される値は全部ヨウ素 周波数安定化レーザーの安定度だとみなして 良いことになる。次に研究結果を示す。



図5. 周波数安定度測定結果

周波数安定度は NICT に持ち込んだ当初緑 線のように-13 乗台だったが、測定を繰り返 して行なった末に-15 乗台近い安定度を得る ことができた。日によってヨウ素レーザーの 安定度が向上した理由は以前できなかった細 かい作業ができたためである。例えば、安定 度が悪い方向でドリフトした場合、ヨウ素レ ーザーの方が悪いと分かっているため、そこ を見つけすぐにアラインメントすることで反 射光や戻り光に対する対策が効果的に行え た。電気制御のパラメータに関しても同じこ とができる。

目標としている周波数安定度まで向上する ことができたが、まだ長期周波数安定度まで は行かずの状態で安定化システム上でも不安 定な部分もあった。このことを受け、長期周 波数安定度向上のために再び取り組んだ。

#### 4. 研究内容

長期周波数安定度を向上させるには長期的 な周波数ドリフトを防止することが重要であ る。その原因として揺らぎの原因を2タイプ に分けて考えた。

1つ目は周波数弁別信号の中心周波数をド リフトさせる原因で2つ目は周波数弁別信号 のオフセットを揺らす原因である。中心周波 数をドリフトさせる原因はまたヨウ素の蒸気 圧揺らぎ、ゼーマンシフト、信号光の強度揺 らぎなどがある。オフセットの揺らぎを起こ す原因は電気の干渉、光の干渉、残留強度雑 音などがある。

各々の原因は対策もそれぞれ異なるため、 それぞれおの制御が互いに影響しないように することが重要である。ここでは1つ目の原 因からそれに対して行なった対策まで説明す る。

・ヨウ素セルフィンがーの温度安定化

ヨウ素の蒸気圧を制御することで圧力広が りと圧力シフトによる影響を低減させること ができる。蒸気圧はセルのフィンガーと呼ば れるところの温度を制御することで制御でき る。本研究では圧力広がりを防ぐために温度 を約-13℃一定にし、圧力シフトを防止するた めに温度揺らぎを数十 mK 以下に抑えること を目的にした。温度を-13℃程度に維持してい る理由は常温よりも大きいエラー信号が取得 できるためである。しかし、低すぎる場合に はガス状態のヨウ素分子が固体に昇華してい まい取得できる信号が小さくなるため、その 温度の間で釣り合いが重要である。

本研究でフィンがーの温度がビート周波数 にどの程度影響があるかを先に調べたとこ ろ、1℃の変化で180Hzの動きが見えた。



図6.フィンガー温度と周波数の関係

次に実際の気温下でセルの温度を測定した ところ、3時間で600mK程度の変化があっ た。-15 乗台を達成するためには周波数揺ら ぎを100Hz以下に抑えることが重要である。 研究室では空調で気温を調節しているが、真 夏の場合に5℃以上の温度変化があるため長 期で周波数安定度を測定した場合、少なから ず影響が現れると予想される。



図 7. 改良前のセル温度変化

この時のセルの様子を次に示す。





改良前のフィンガーはフィンガーを囲んで いるアルミ板が外部空気と接触していた。し かもアルミ板が太くサーミスタで温度を読み 取る際にセルの温度変化が素早く伝わらない ミスがあった。先ほど説明したように実験室 の温度は一定ではないため外の影響を遮断す ることが重要であった。その対策として次に 示すようにフィンガー部を改良した。



図 9. 改良後のフィンがー

以前、外部空気と接触していた部分をもう 一枚の銅板を使い、囲んで中に空気層を入れ た温度シールドを制作した。フィンガーを囲 んでいたアルミ板も銅板に変え、小さくし温 度調節を効果的にできるようにした。温度シ ールドにペルチェ素子とサーミスタをつけ、 空気層の温度も一定になるように設計を行な った。







その温度変動を見ると2段目のペルチェを 用い空気層を最初冷やして一定になってから 1段目のペルチェでフィンガーの温度を一定 に保つ仕組みにしたため、外の影響を受けづ らい環境を構築した。実際、フィンガーの温 度変化を20mK以下に収めることができた。

·強度安定化



図 12. ループを構成(①励起光、②信号光)

上述したように生成された 515nm の光を励 起光と信号光に分ける。レーザーの周波数を 安定化させるには両方とも強度を安定化させ る必要がある。参考文献によると 1mW の強 度変動は数百 Hz から数千 Hz の周波数ドリフ トを起こす。そのため、信号光と励起光それ ぞれに対して強度安定化を行なった。そのア クチュエーターとして励起光は EDFA のカレ ントドライバー、信号光は AOM を利用して いる。本来、光強度の大部分は EDFA の LD に流れる電流をコントロールすることで制御 しているが、長期の周波数安定度および高安 定なループを目指すに信号光側にもループを 作った。

強度安定化ループの評価は out-of-loop の挙 動をチェックすることより行われた。In-loop とは loop 内の信号を意味していて設定した値 に追従されるようにアクチュエーターが働 く。Out-of-loop 信号とはループから外に出た 信号のことを意味している。ループが堅牢で 丈夫であれば、Out-of-loop 信号は基本的に in-loop と大きく相違することはないが、ルー プ内ではなかった部分が外にはある可能性が あるので信号が変動することもあり得る。



図 13. Out-of-loop と in-loop の変動比較

上のグラフは in-loop と out-of-loop の強度 を数時間測定したデータである。In-loop の場 合、時間が経っても強度に変動が現れず、最 初の設定値に追従している。一方、out-ofloop では時間とともに上下に変動しているこ とを確認した。



その原因は強度安定化のためにピックオフ ミラーとして使っていたものの反射率の偏光 依存性であった。この偏光依存性がある上に 偏光揺らぎが存在しているため、光の反射率 が変わり、結果的に out-of-loop への強度に影 響を与える。最初から偏光揺らぎを最小にす れば良い話であるが、ファイバーカップリン グをしている以上、100%偏光を合わせるこ とが難しいため発生する。その対策として偏 光揺らぎの少ないウェッジプレートを試み た。ウェッジプレートの片面は角度がついて いるため、反射光と透過光をきれいに分別す ることができる。実験ではこのウェッジプレ ートを用いて偏光揺らぎの影響を一番受けな いような場所を見つけ、プレートの角度を変 えながらすべてのケースで測定を行った。そ の結果、ウェッジプレートの角度を0度(ほぼ 0度という意味:実際は若干角度がついてい る状態)にして強度安定化ループを構成した。 その結果が下のグラフである。



図 15. Out-of-loop の強度揺らぎ比較

今まで使っていた BSX04(青線)とウェッジ プレート(オレンジ線)の Out-of-loop の強度 変化を時間で測定した。その結果、今まで使 っていたピックオフミラーよりも最大 10 倍 程度偏光揺らぎが収まった。このことは以 前、偏光が回ることによって長時間ロックが できなかった問題の解決にもつながり、安定 な制御ができるようになった。





図 16. 磁場の変動(磁気シールドあり) ゼーマンシフトはヨウ素分子が磁場に置か れることによって起きるシフトである。磁石 を用いてヨウ素セルに外から磁場をかけると 1 ガウスあたり約 90Hz の相関が見えた。し かし、外部から強い磁場が存在することはな く、外部磁場による影響は他のものに比べる とそれほど大きくはないが、ファラデーロー テータを用いたりすることもあるため、磁気 シールドをヨウ素セルに被せた。

## 5. まとめ

本研究では高安定マイクロ波生成のために 長期で安定なヨウ素周波数安定化レーザーの 開発を行った。周波数安定化にはヨウ素分子の 飽和吸収線が基準として用いられた。しかし、 様々な外部要因により周波数安定度は $\Delta f/f = 10^{-13}$ 台あり、目標である $10^{-15}$ まで2桁残っている状況であった。周波数安定度向上のために本研究で様々なところに注目した。

最初は光源を 1 µmから 1.5 µmへ切り替えに あたって EDFA を開発した。EDFA の動作安 定性を高めるために戻り光を消し、強度安定化 制御が安定にかかるようにした。その後、ヨウ 素分子の吸収を利用するために周波数を 3 倍 にする THG 結晶を用い波長変換を行い、ヨウ 素分子の飽和吸収線を微分信号として取得に 成功した。しかし、in-loop と out-of-loop での 光の強度の挙動は予測と違い、偏光ゆらぎの解 決に取り組んだ。偏光揺らぎは信号光と励起光 の強度比を変化させるため調整が必要であっ た。その際、グランテーラー偏光子とポリマー 円偏光子、2種類を用いありとなしでどのよう な変化があるか検証を行った。その結果、偏光 子を使った場合、偏光揺らぎが収まり、種類に よっては大きな差がなかったため、使い勝手の 良いポリマー円偏光子を利用することにした。 そうすることで偏光揺らぎを低減させ、結果的 に強度安定化を長時間のロックをかけても外 れることがなくなった。その他、外部の影響を 遮断するためにガラスセルのフィンガー部と 磁場シールドを改造・改良した。フィンガー部 については温度シールドを作り、外部と直接触 れないようにし研究室の気温による影響を低 減させ、セルの温度偏差を数十 mK まで抑える ことができた。磁場についてはまず磁場の影響 を確認し、磁場シールドを被せ、外の磁場を 0.02Gauss まで低減することができた。上述し た取り組みの上で周波数安定度を測定した結 果、1.5 µmレーザーでは1万秒で2×10<sup>-13</sup>に、 1.5 µmと水素メーザー同期光周波数コムとでは 2000秒で1×10<sup>-14</sup>まで達成することができた。

今回、残留強度雑音については都合上検証を 行うことはできなかったが、残留強度雑音は現 状大きな課題の一つとして制御の最適化が必 要なところである。したがって、今後の課題と しては RAM の安定化が一番に考えられる。た だし、RAM の安定化はモニタリング上の数値 だけでなく、out-of-loop とともに制御電圧で 引き起こされるビート周波数のドリフトも踏 まえた総合的な評価が必要である。本文では触 れなかったが、RAM の制御によって信号光が 数十 mV 動くような現象も一緒に解消すべき である。その他、アラインメントをもう少し最 適化し、周波数弁別信号に現れる薄い干渉雑音 を消す必要がある。信号に関してはビーム径を 整えて信号光と励起光の差を埋めることも重 要だと考えている。

#### 6. 参考文献

[1] Y. Takeuchi, T. Kurihara, T. Yamada, S. Endo, S. Matsushita, A. Suemasa, T. Sasaki, H. Takiguchi, I. Kawano, S. Kogure, M. Musha. Figure-8 type optical frequency comb for spaceborne frequency reference. : ICSO 2022, 2022.

[2]https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?o bjectgroup\_id=4807&pn=BSX04#6059

## 7. 発表実績

[1]趙叡讚,竹内裕一,末正有,武者満 スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(150):
DECIGO 用光源開発,日本物理学会 2022 年秋季大会
(岡山理科大) 2022.9.16
[2]趙叡讚,藤田悠生,竹内裕一,末正有,武者満 スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(159):1.5μ mのヨウ素安定化レーザーの安定度評価
日本物理学会 2023 年春季大会(zoom) 2023.3.24
[3]CHO YEACHAN、竹内裕一、藤田悠生、末正 有、武者満:衛星搭載用高安定マイクロ波発生のため
1.5μmヨウ素周波数安定化レーザー、日本光学会年次
学術講演会 2023