

# ヨウ素の 515 nm 吸収帯を用いた Yb:YAG レーザーの周波数安定化

電子工学科 植田研究室 中村 真大

## 1. 研究の背景

レーザー光は単色性、可干渉性、指向性に優れ、分光分析や干渉測定、波長標準などさまざまな応用ができる。本研究で開発を目指す周波数安定化レーザーは、日本が進めている宇宙重力波アンテナ計画 (DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory, 通称 DECIGO 計画)の光源を目標にしている。この計画の光源に求められる周波数安定度は 1Hz 帯において  $1\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下の周波数雑音である。この周波数安定度は、外乱が少ない実験室環境で超高感度の光共振器を用いた場合での、世界最高の周波数安定度である。よって機械的信頼性を考えると、人工衛星での運用には吸収線を基準としたレーザー周波数安定化が適していると考えられる。このような発想から当研究室ではここ数年、ヨウ素の 532nm 吸収帯を利用した Nd:YAG レーザーの周波数安定化を行ってきた。しかしこれまでの研究では、吸収線幅に由来する周波数基準の不確かさから、DECIGO の要求する周波数安定度を達成することができなかった。そこで今年度の実験では更なる周波数の高安定化を行うために、532nm 帯よりも吸収線幅が細い 515nm の吸収帯を利用した Yb:YAG レーザーの周波数安定化を行った<sup>[1]</sup>。しかしヨウ素気体分子の吸収線には、ドップラー広がりという吸収線の広がりがある。吸収線幅が広いということは周波数基準としての不確かさに繋がるので、線幅は可能な限り狭いことが望ましい。本研究は飽和吸収分光という手法で線幅の広がりの中でも影響が大きいドップラー広がりを取り除いた<sup>[2]</sup>。それに加えて今年度の実験ではセル長の延長やレーザー光の高出力化の改良を行い、昨年度よりさらに高安定化を目指した。

## 2. 実験方法

まずレーザー媒質の違いによって、532 吸収帯より 4 倍ほど線幅が細い 515nm 帯を利用でき、これによって周波数誤差の検出感度が大幅に向上できると予想できる。波長変換素子については、昨年使用したバルク型素子よりも変換効率が高いリッジ導波路型のものを利用することで、最終的に得られる第 2 高調波のパワーを約 4.5 倍に増した。このように検出に用いるレーザーの出力を増すことで、周波数誤差の検出感度が上昇するだろう。それに加えて、使用するヨウ素セルを長さ 100 mm のものから 400 mm へ伸ばすことにより光吸収の相互作用長の延長を行った。吸収作用長が伸びれば、セル内部のヨウ素蒸気圧を低下させて圧力広がりを低減させた際の弊害となる吸収強度の低下を補うことが出来る。

表 2.1 今年度の実験における改良点

	昨年度の実験	今年度の実験
レーザー媒質	Nd:YAG	Yb:YAG
波長	532 nm	515 nm
光源出力	400 mW	150 mW
波長変換素子	バルク型(1.75 mW)	導波路型(10 mW)
ヨウ素セル長	100 mm	400 mm

以上のような改良点を踏まえ、本年度の実験でヨウ素 515 nm 吸収帯の飽和吸収の観測実験で用いた実験系を次図に示した。

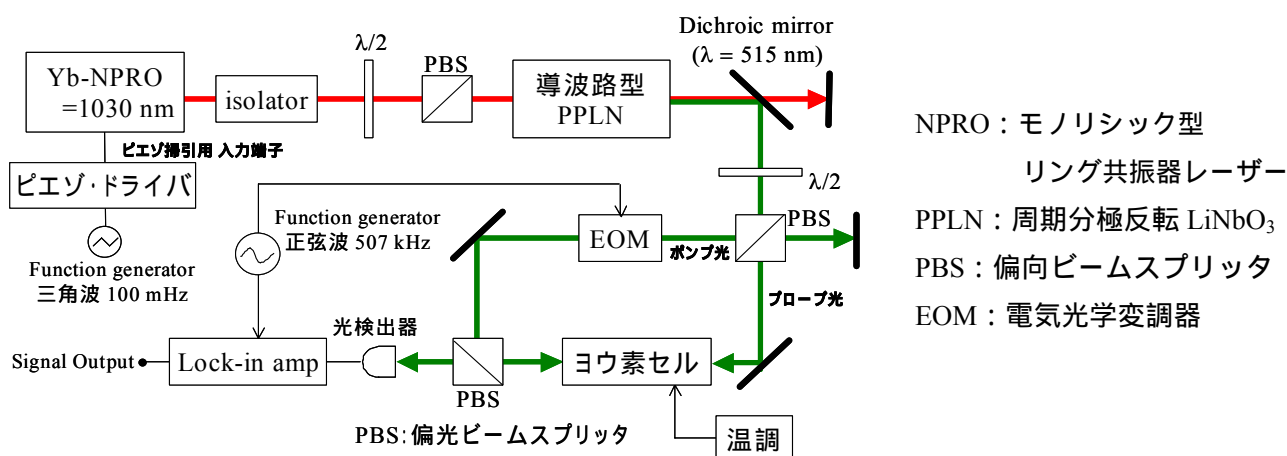


図 2.2 ヨウ素の 515 nm 吸収帯の観測実験

まずはレーザー周波数が掃引可能な Yb-NPRO 光源から波長 1030 nm のレーザー光を発生させた。その光をアイソレータと、λ/2 板と PBS のアッテネータを通過して波長変換素子へ入射させた。このとき波長変換素子はペルチェ素子を用いて温度制御を行った。こうして生じた第 2 高調波を、波長 515 nm が反射されるダイクロイック・ミラーで取り出した。次に λ/2 板と組み合わせると調整可能となった PBS を用いてレーザー光を 2 本に分けた。ヨウ素セルへ入射した後に光検出器へ行く光をプローブ光、EOM で位相変調を加えつつヨウ素セルへ入射しヨウ素の吸収を飽和させ最終的にビーム・ダンプへ入る光をポンプ光と呼ぶ。それを互いに正反対の方向から光軸が重なるようにヨウ素セルへ入射させた。するとヨウ素分子の光吸収を介しプローブ光へポンプ光の変調信号が移り、プローブ光の強度を光検出器で得た。こうして取得した光強度の信号をロックインアンプでヘテロダイン検波することによりヨウ素の吸収線を微分信号として観測した。その際には光源の NPRO に内蔵されたピエゾ素子へ、三角波の電圧信号を入力してレーザー周波数を三角掃引した。これにより連続な周波数範囲での吸収線を観測することが可能となる。ただし一部の周波数領域ではリング共振器のモードホップが起こり、光源の周波数掃引が不連続となった。

この後には、基準信号の周波数感度を向上させるために、ヨウ素気体の飽和蒸気圧を最適化した。これは、ドップラー広がりの方に影響が大きい、衝突広がりという線幅の広がりの悪影響を少なくすることを目的としている。ヨウ素気体の飽和蒸気圧を操作するためには、ガラスセル内のヨウ素固体の温度を制御した。

### 3. 実験結果

測定した飽和吸収信号を次図に示す。光源の励起 LD 電流は 1.80 A で YAG 結晶温度は 25.50 から 25.60 の範囲の 2 種類で、第 2 高調波(波長 515nm)の強度は約 8 mW だった。ピエゾ・アクチュエーションによる周波数の掃引は±80 V, 100mHz の三角波で行った。

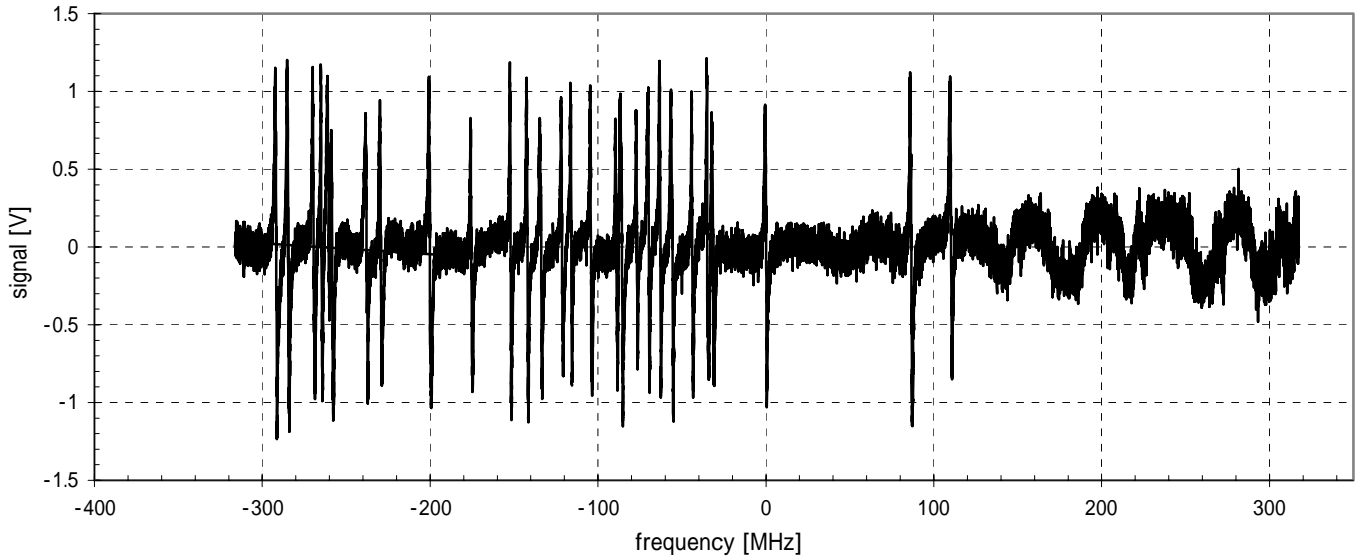


図 3.1 ヨウ素 515 nm 吸収帯の飽和吸収微分信号

この結果の周波数軸で 0MHz の基準となっている吸収は、ヨウ素の波長 515.0012 nm の R[56]44-0 という吸収である。さらに、その吸収線の他にも多数のモードが立っていることがわかる。周波数の校正は事前に測定したピエゾの周波数特性 2.20 MHz/V を利用して、掃引信号の電圧をレーザー周波数に対応させた。基準とした前述の吸収の性質を調べると、その吸収線幅は 1.06 MHz で、信号の電圧振幅は 1.94 V だった。よって周波数誤差の検出感度  $\Delta V/\Delta f$  は 1.83 V/MHz である。ただし信号に乗った雑音の電圧振幅は約 0.2 V だった。

次にヨウ素の気体分子の飽和蒸気圧を変化させたときの、ヨウ素の吸収線幅の変化を次に示した。

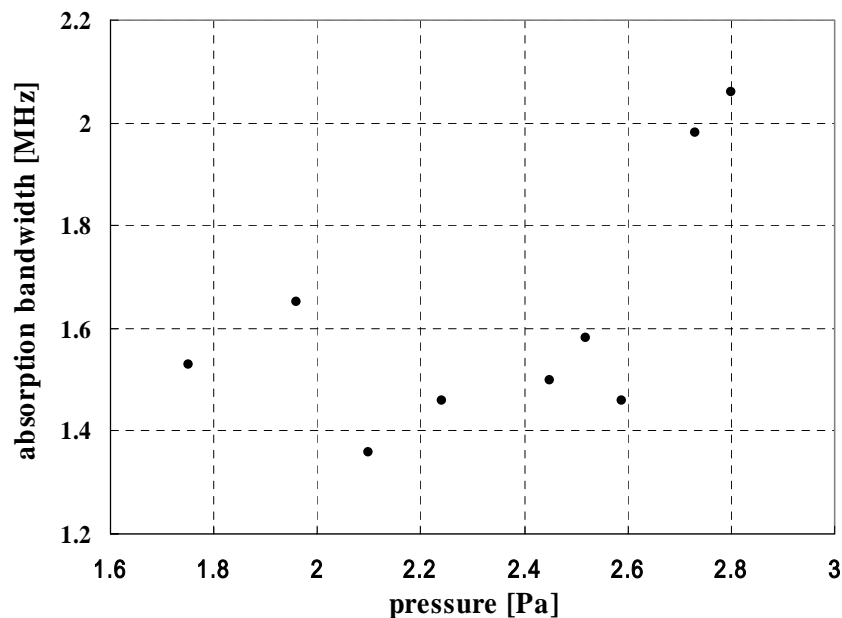


図 3.2 ヨウ素の飽和蒸気圧最適化実験

この結果から、ヨウ素の飽和蒸気圧を操作することで吸収線幅が 2.0MHz から 1.4MHz へ、約 0.6MHz の狭窄化ができた。ただしヨウ素の飽和蒸気圧を下げるとセル内の気体分子数が減り、吸収強度も低下することが予測できる。よって線幅だけでなく信号強度についての検討も必要だろう。

## 4. 結論と今後の展望

本研究で得られた吸収線信号から、目標の DECIGO 計画の要求値を実現するには、信号に乗った雑音を減らす必要があるという結論を得た。ただし吸収信号の線幅に関して言えば、ヨウ素 515 nm 吸収帯の線幅については 1.5 MHz 程度と、昨年度に測定した 532 nm 帯の線幅 3.14 MHz より細くなった。そして、この吸収線幅はセル内部のヨウ素気体分子の蒸気圧を最適化することで、吸収線幅の更なる狭窄化、つまり高感度な周波数誤差検出が可能となるだろう。また吸収信号の強度に関しては、雑音が大きくなったことでロックインアンプのゲインを減らさざるを得なかった。その結果、信号の S/N が低下してしまった。よって今後は微分信号に乗った雑音を低減させ、S/N を改善することが課題である。光検出器からの電気信号を遮断すると、信号の雑音はほぼ観測できなくなる。よってこの雑音は計測系からもたらされたものではなく、光学系によるものだとわかる。

これらを踏まえて、現時点で考えられる改良点は 3 つある。まず一番に考えられるのが光学系のアライメントの最適化である。雑音の原因となり得る可能性が高い光学系の問題は、反射による光の干渉である。特に光検出器の入射口からの反射は他の光学系からの反射に比べて非常に強く、その反射光を適切に処理しなければ光学系全体に大きな影響を与えることとなる。また本研究で使用したレンズやミラー、ヨウ素セルなどの光学素子は出射面が AR コートやブリュースター角で処理されており反射が極力抑えられているとはいえ、僅かながらに反射が起こりうる。これらの反射光は虹彩絞りなどを利用して遮断する必要があるだろう。さらに、ヨウ素セル内部におけるポンプ光とプローブ光のビーム設計の点においても、改善の必要があるだろう。本研究で行ったビーム設計では、プローブ光よりもポンプ光が約 10 % 太くなるように余裕を持たせている。これではポンプ光の強度が足りず、飽和吸収には不十分な恐れがある。

この次に考えられるのが、EOM への入射光の偏光最適化だ。本研究で使用した偏光ビームスプリッタは波長 532 nm 用のものであり、そのため偏光による分岐比が 200 : 1 と、公称値 400 : 1 よりも悪くなっている。こうして EOM に若干の p 偏光のレーザー光が入射することにより、ポンプ光に強度変調が乗ってしまった可能性がある。これを改善するには、より適切に偏光をフィルタリングできるよう適切な波長に対応した偏光ビームスプリッタや、偏光板などを使い、EOM に s 偏光の光しか入射しないようにすべきである。

より信号線幅を狭くする改善点としては、EOM の変調周波数を最適化することが挙げられる。本研究の飽和吸収線の観測実験では、EOM に 507 kHz の変調信号を入力したが、これは昨年度行った 532 nm 吸収帯の場合で最適化されたものである。だから EOM の変調周波数を下げ、スペクトル上で側帯波をより搬送波に近づける必要がある。こうすることでより狭い周波数領域でのみ微分信号が現れるようになり、信号の検出感度が向上すると予想される。

### 参考文献

- [1] Wang-Yau Cheng, Lisheng Chen, Tai Hyun Yoon, John L. Hall, and Jun Ye, “Sub-Doppler molecular-iodine transitions near the dissociation limit (498-523 nm)”, *Opt. Lett.* 27, 8
- [2] J. L. Hall, L. Hollberg, T. Baer, and H. G. Robinson, “Optical heterodyne saturation spectroscopy” *Appl. Phys Lett.* 39(9), 1981