

# 高安定マイクロ波基準発生のための光コムの開発

武者研究室 齋藤 瞭太

## 1 研究背景と目的

日本独自の測位システムを構築するために、これまで合計 4 機の準天頂衛星が打ち上げられてきたが、社会インフラである GPS の高精度化のための次の計画として、現在よりも安定度の高いマイクロ波周波数基準を搭載した準天頂衛星を打ち上げ・運用することが検討されている。GPS の精度を決める要因の一つが、人工衛星に搭載される周波数基準の周波数安定度である。これは、測位のための時間基準（時計）であり、現在はルビジウムやセシウムによるマイクロ波原子時計が用いられている。マイクロ波原子時計は原子の持つマイクロ波領域の共鳴周波数を基準として 1 秒を定義する時計である。一般に、周波数安定度の指標として中心周波数からの相対的な周波数ゆらぎの大きさを表す  $\delta f/f$  が用いられる。この指標を用いると、従来の人工衛星に搭載されている原子時計の周波数安定度は  $10^{-12}$  から  $10^{-13}$  程度であり、時間に換算すると数万年に 1 秒ほどのずれに相当する。一方で光領域における周波数安定度を考える。光領域の周波数はマイクロ波領域の周波数に比べて 6 桁以上高いため、高い位相精度でゆらぎを検出することが可能となり、その結果、光領域では高い周波数安定度が実現しやすくなる。実際に光領域においては、光共振器や原子分子分光による周波数安定化技術が発達しており、 $10^{-18}$  台の周波数安定度も実現されている。周波数安定化レーザーは高い周波数安定度を持つが、これを光領域の周波数基準として用いることはできても、マイクロ波領域の周波数基準として直接的に用いることはできない。そこで用いられるのが、光周波数コム（光コム）である。光コムは周波数軸上に多数の周波数成分（縦モード）が等間隔に並んだス

ペクトルを有するレーザーである。光コムの縦モード間の周波数は、レーザー共振器から出力されるパルス列の繰り返し周波数  $f_{\text{rep}}$  に一致する。 $f_{\text{rep}}$  は無制御時にはレーザー固有の周波数ゆらぎを持っているが、光周波数基準を用いて光コムを制御すると、光周波数基準の持つ周波数安定度が光コムに移乗する。そして、制御された光コムの ( $f_{\text{rep}}$ ) を縦モード間のビートとして検出することにより、光周波数基準と同等の周波数安定度を持つマイクロ波信号 ( $f_{\text{rep}}$ ) が得られる。このように、光周波数基準に安定化した光コムを用いることで、高安定なマイクロ波周波数基準を発生させることができる。本研究の目的は、低ノイズな光コムを開発し、ヨウ素安定化レーザーに光コムの繰り返し周波数  $f_{\text{rep}}$  を同期させることにより、高安定マイクロ波周波数基準を発生させることである。

## 2 原理

### 2.1 光周波数コム

光コムは周波数軸上に、多数の縦モードが等間隔に並んだスペクトルを有するレーザーである。光コムの発生方法には、電気光学変調方式 (EOM コム) とモードロックレーザーがある。EOM 光コムは、光をマイクロ波により位相変調することで得られる。EOM 光コムでは、光領域とマイクロ波領域をリンクすることは原理的に不可能である。そのため、我々はモードロックレーザーを用いた光コムを開発している。以下、モードロックレーザーを用いた光コムについて述べる。光コムの周波数空間における模式図を図 1 に示す。このとき、 $n$  番目の周波数成分は、

$$f_n = f_{\text{ceo}} + n f_{\text{rep}} \quad (1)$$

と表される。ここで、 $f_{ceo}$ (Carrier-envelope offset frequency) は周波数軸上で低周波数域まで縦モードを外挿した場合のゼロ番目の縦モード周波数に相当し、 $f_{rep}$ (Repetition frequency) は縦モード同士の間隔である。これは、出力されるパルスの繰り返し周波数に等しい。光コムの場合には、この2つのパラメータ、 $f_{ceo}$  と  $f_{rep}$  が一定となるような制御を行うことが必要となる。つまり光領域の  $f_n$  を光周波数基準に同期させ、同時に  $f_{ceo}$  をマイクロ波周波数基準に同期させることにより全縦モードが安定化された光コムとなり、その結果として高い相対周波数安定度を持つ  $f_{rep}$  を検出することができる。光コムの持つ相対周波数安定度は、

$$\begin{aligned} \frac{\delta f_n}{f_n} &= \frac{\delta f_{ceo} + n\delta f_{rep}}{f_{ceo} + n f_{rep}} \\ &\approx \frac{1}{n} \frac{\delta f_{ceo}}{f_{rep}} + \frac{\delta f_{rep}}{f_{rep}} \\ &\approx \frac{1}{n} \frac{\delta f_{ceo}}{f_{ceo}} + \frac{\delta f_{rep}}{f_{rep}} \end{aligned} \quad (2)$$

と表される。ここでは、 $n \gg 1$  である。この式から分かるとおり、 $f_{rep}$  の相対周波数安定度  $\frac{\delta f_{rep}}{f_{rep}}$  は光の相対周波数安定度  $\frac{\delta f_n}{f_n}$  にほぼ等しくなる。一方、 $f_{ceo}$  の相対周波数安定度  $\delta f_{ceo}/f_{ceo}$  は周波数成分の次数を表す  $n$  ( $> 10^6$ ) の分だけ寄与が少なくなるため、より低い安定度を持つマイクロ波基準でも問題がない。

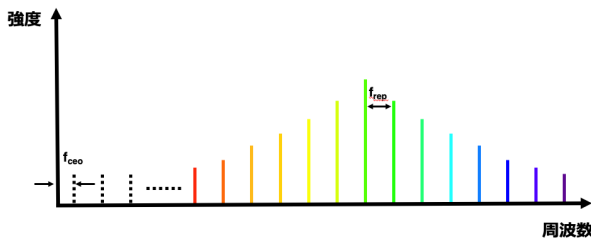


図1 光コムの周波数領域における模式図

## 2.2 Figure-8 レーザー

可飽和吸収体を用いない非線形増幅ループミラー (Nonlinear Amplifying Loop Mirror, NALM) をモードロック機構したレーザーの一つが Figure-8

レーザー [1] である。Figure-8 レーザーの模式図を図2に示す。

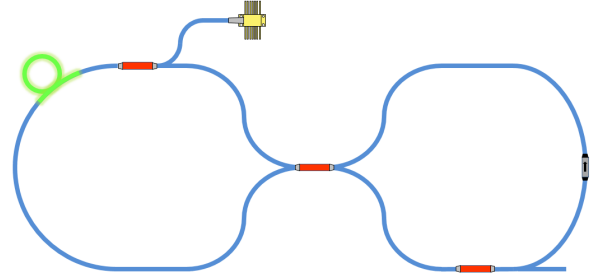


図2 Figure-8 レーザーの模式図

一般的な Figure-8 レーザーは、NALM ループとアイソレーターおよび出力ポートを有するループの2つの要素により構成される。NALM ループでは NALM の原理で述べたとおり、光の受ける非線形効果の強さによって、透過率が変化、つまり出射方向のスイッチングが起こる。これをパルスに適用して考えてみる。当然だが、パルスには強度の高い部分と弱い部分が存在する。具体的には、パルスのピーク部分は強度が高く、パルスの裾の部分は強度が低い。Figure-8 レーザーの中で、何らかの摂動や雑音に起因して、強度変調もしくは小さなパルス (シードパルス) が発生したと考える。共振器内を伝搬するにつれて、いずれこのシードパルスは NALM ループへと入射する。そして、50:50 のカップラにおいてこのパルスの強度は等分されて CW 方向と CCW 方向に別れて伝搬する。このとき、パルスを時間軸で要素に分解したとする。当然、2つのパルスの持つ要素ごとの強度はカップラ出射直後には等しい。ここで、NALM の原理に従って考えると、CW 方向を伝搬するパルスはループの前方で増幅されるため、非線形効果を強く受け、相対的に大きな非線形位相シフトが生じる。一方で、CCW 方向に伝搬するパルスはループ後方で増幅されるため、非線形効果は弱く、生じる非線形位相シフトは相対的に小さくなる。つまり、もともとは同じパルスであったとしても、2つのパルスのそれぞれの成分間では異なる量の位相シフトが生じることとなる。また、一方のパルスの内部で比較をした場合でも、パ

ルス自身の持つ強度分布に応じて、生じる非線形位相シフトの量は変化する。ここまで述べてきた2つのパルス間での非線形位相シフトの差とパルス内部での非線形位相シフトの差を合わせて考える。最終的なNALMの透過率はそれぞれの方向を伝搬する光の間に生じる位相差によって決定されることを原理にて述べた。ここに、パルス内部の要素間にも位相差が生じていることを加えれば、適切な位相差を発生させることによって、パルス中の任意の成分だけを透過方向へと出射できることが分かる。図??において、パルス中の高強度部分がもう一方のループのCCW方向に、パルス中の低強度の部分がCW方向に伝搬したと想定する。このとき、CCW方向に伝搬する成分はアイソレーターを透過できるため、再びNALMループへと戻る。一方で、CW方向に伝搬する成分はアイソレーターを透過できず、NALMループへと戻ることはできずに損失となる。これは、前述したモードロックの原理である「強度依存の損失」に他ならない。このようにして、生じる位相差を適切に設定することで、Figure-8レーザーにおいてモードロックが実現される。

### 3 ソリトン Figure-8 レーザーの開発

図3に本研究にて開発した異常分散領域でのソリトン Figure-8 レーザーの概略図を示す。共振器は偏波保持ファイバによって構成することにより堅牢性を高めている。また、モードロック機構には非線形増幅ループミラー (Nonlinear Amplifying Loop Mirror, NALM) を用いており、可飽和吸収体と比べても長期動作が可能になっている。図4にソリトン Figure-8 レーザーの発振スペクトルを示す。スペクトル幅は9 nmで、繰り返し周波数は32 MHzとなった。共振器中のファイバを短縮することで、繰り返し周波数を高めることは可能である。

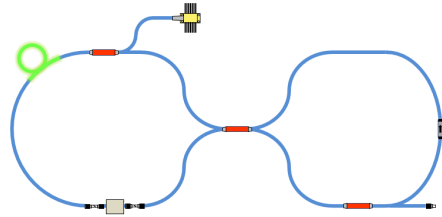


図3 開発したソリトン Figure-8 レーザーの概略図

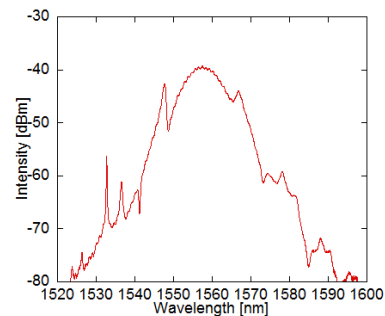


図4 ソリトン Figure-8 レーザーの発振スペクトル

## 4 分散調整 Figure-8 レーザーの開発

$f_{ceo}$  の持つ線幅はモードロックレーザーの持つ分散値がゼロに近いと細くなる。そのため、正常分散の利得ファイバと分散補償ファイバを用いることで全体の分散値をゼロに寄せた分散調整 Figure-8 レーザを開発した。開発した分散調整 Figure-8 レーザーの概略図を図5に示す。共振器中ではソリトンの場合とは異なり、正常分散のエルビウム添加ファイバを利得媒質としている。また、偏波保持分散補償ファイバを0.45 m使用した。分散補償ファイバと一般的な偏波保持ファイバを融着する際には、モードフィールド径のミスマッチが主因となり最大1 dBのロスが発生するとされている。これについては、経験的には、問題にならない大きさのロスであると判断した。図6に分散調整 Figure-8 レーザーの発振スペクトルを示す。スペクトル幅は28 nm、繰り返し周波数は36 MHzとなった。また、共振器の持つ分散値は $-0.008 \text{ ps}^2$ と見積もられる。平均出力はシングルパルス動作時で0.7 mW程度である。

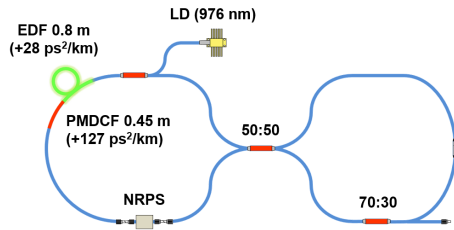


図5 開発した分散調整 Figure-8 レーザーの概略図

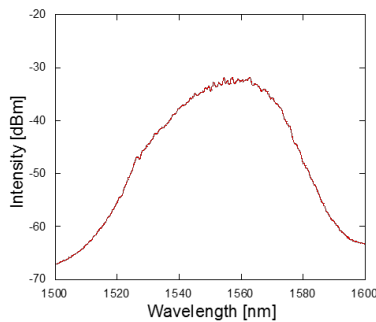


図6 開発した分散調整 Figure-8 レーザーの発振スペクトル

ソリトン Figure-8 レーザーと分散調整 Figure-8 レーザーで使用している NRPS は自由空間に構成した手製の位相シフタである。そのため、モジュール化された NPRS を使用する場合と比較して、共振器中のロスが大きくなっている。このロスを低減することによって、平均パワーやスペクトル幅を向上させることが可能であると考えている。実際に、分散調整 Figure-8 レーザーにおいては、初期状態ではスペクトル幅が 11 nm 程度であったものが、空間分でのロスを低減した場合に、上記のスペクトル幅 28 nm へと拡大した。最終的には、モジュール化または使用素子の十分な選定が必要になると考えている。

## 5 光コム化に向けたソリトン Figure-8 レーザーのための増幅器の開発

開発したソリトン Figure-8 レーザーをオシレーターとし、光コムにするための  $f_{\text{ceo}}$  ビートの検出を目的に、増幅器の開発とスペクトル拡大の実験を行った。作製した増幅器の概略図を図9に示す。

チャープパルスアンプの構成となっており、最終段にて分散調整を行うことでパルスを圧縮する。30dB/m の吸収量の EDF を 3 m 用い、オシレーターの平均出力 1 mW を 120mW 程度まで増幅した。図7と図8に EDFA で圧縮を行った際のパルスの自己相関波形とそのときの光スペクトルの様子を示す。自己相関波形からパルスの分裂が生じていることが分かる。しかしながら、メインピークで考えれば高いピークパワーが得られていると考えられたため、高非線形ファイバ (HNLF) を融着しスペクトルの拡大を行った。

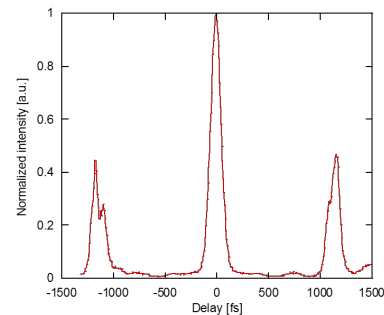


図7 EDFA で圧縮を行った際のパルスの自己相関波形

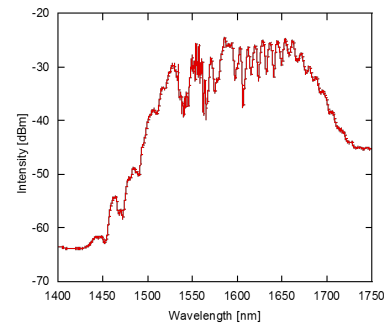


図8 EDFA で圧縮を行った際の光スペクトル

今回の系では、スーパーコンティニューム光の基本波の 1030 nm 成分と、2060 nm 成分の SHG を取った 1030 nm 成分とを f-2f 干渉計を用いた自己参照法によってビート検出することにより  $f_{\text{ceo}}$  ビートを取得する。ここで得られたスーパーコンティニューム光での基本波と SHG 光のスペクトル上での重なり合いの様子を図10に示す。スペクトルの広がり十分であることが確認されたため、 $f_{\text{ceo}}$  ビー

ト検出を試みたが、信号を取得することはできなかった。

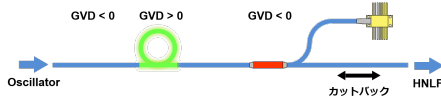


図9 スペクトル拡大のためのEDFAの概略図

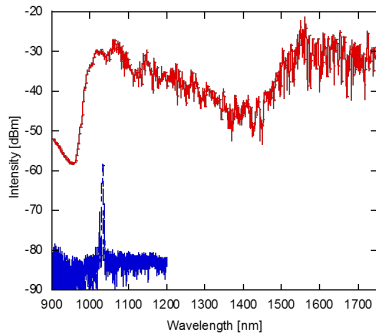


図10 HNLfでのスペクトル拡大により得られたSC光とSHG光

スペクトル上でのオーバーラップが観測されたにも関わらず  $f_{ce0}$  ビートを検出することができなかったため、その原因について検証を行った。まず、受光強度についてである。SC光の基本波の1030 nm成分とSHGの1030 nm成分それぞれの強度に基づいてフォトディテクター上でのビート信号の受光強度を簡易的に計算すると、測定器のノイズレベルを上回る強度でビートが得られるという結果が得られた。また、測定器のノイズレベル以下でしかビート信号が得られていないことも考慮し実際の測定時には電氣的に40 dBのアンプも用いていた。それでも、 $f_{ce0}$  ビートを検出することができていないことから、受光強度以外の要因によって制限されていると考え、次にSC光の持つコヒーレンスの検証を行った。ここでは、SC光と1.5  $\mu\text{m}$ 帯のECLDとのビートを取得することにより簡易的なコヒーレンスの検証とした。結果として、オシレーターの出力ポート直後の出力とのビートとEDFAでの増幅直後とのビートは検出することができた。しかし、HNLfでのスペクトル拡大後の出

力とのビートだけが検出できなかった。この結果から、HNLfにおけるスペクトル拡大の過程でコヒーレンスの低下が生じていることが懸念された。この結果を踏まえて調査を行うと、HNLfへ入射するパルスのパルス幅がコヒーレンスに影響するということが分かった [2][3]。そこで、EDFAに含まれるSMFの長さを変えることでパルス幅の調整を行ったところ、と1.5  $\mu\text{m}$ 帯におけるコヒーレンスの向上が確認できた。このとき観測したビート信号を図??に示す。HNLf直後の場合でも増幅直後の場合と同様にビート信号が得られていることが確認できる。しかし、と1  $\mu\text{m}$ 帯でのビートを検出することはできておらず、SC光全域でのコヒーレンス保持には至っていないと考えられる。そのため、さらなる増幅器の構成の最適化が必要であると言える。

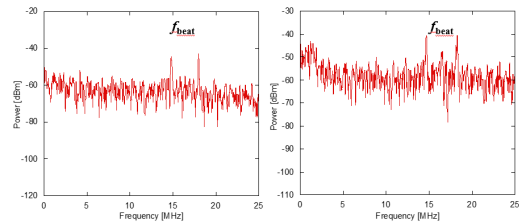


図11 パルス幅調整によって得られたビート信号 (左)EDFでの増幅後 (右)HNLf後

## 6 まとめと展望

本研究では、異常分散領域のソリトン Figure-8 レーザーとゼロ分散領域の分散調整 Figure-8 レーザーを開発した。ソリトン Figure-8 レーザーでは、スペクトル拡大に向けたEDFAを開発し、 $f_{ce0}$  ビート取得に十分と考えられるスペクトル幅を得ることができた。しかし、コヒーレンス低下が原因で  $f_{ce0}$  ビート検出することはできなかった。分散調整 Figure-8 レーザーでは、 $f_{ce0}$  検出に向けてオシレーターの最適化を行った。こうした結果を踏まえて、今後はソリトン Figure-8 レーザーにおいては発振状態の見直しや増幅器の構成を変更することによりシングルパルスでの十分なパルス圧縮によってコヒーレンスを保持したままスペクトルを拡大し、 $f_{ce0}$  ビー

トの検出と制御を行っていく必要がある。分散調整 Figure-8 レーザーは平均出力やスペクトル幅など、共振器の発振状態が最適ではないと考えられ、分散値やゲインとロス調整が必要と考えている。分散調整 Figure-8 レーザーにおいても  $f_{ceo}$  ビートの検出と制御を行った後には、ソリトン Figure-8 レーザーと分散調整 Figure-8 レーザー間での比較およびそれぞれをオシレーターとした光コム間での比較を行い、マイクロ波周波数基準発生のための低ノイズ光コム開発につなげていく。

## 参考文献

- [1] J. W. Nicholson et al. Opt. Express 14, 8160-8167 (2006).
- [2] M.Nakazawa et al. Opt. Fiber Tech. 4, 215-223 (1998)
- [3] J.W.Nicholson et al. Opt. Express, 12, 679-688 (2004)