# 光周波数基準の短距離精密分配システムの開発

武者研究室

淺谷情良

### 1. 研究背景

度量衡の中心である時間、周波数は測距、通信 などの日常生活の分野から分光、天文などの基礎 物理分野まで様々な分野で用いられており計測精 度の向上のためより高い周波数安定度をもつ周波 数基準が求められている。周波数基準の周波数安 定度が高くなるにつれそれらを評価、較正、利用 するために周波数安定度を劣化させることなく伝 送する技術が重要視されるようになった。従来、 周波数基準伝送はマイクロ波を用いて行われてき たが電線での伝送では減衰のため高周波を長距離 伝送することは難しく、光の AM 変調でも高精度 伝送は困難である。そこで位相精度の高い光周波 数を用いて伝送付加雑音を高精度に検出、抑制す る超高精度な精密周波数基準分配が行われるよう になった[1]。

本研究室でも過去に周波数基準の長距離伝送、 光周波数のビートとしてのマイクロ波伝送、光周 波数コムを用いたマイクロ波基準信号とタイミン グ伝送を行ってきた[2][3]。本研究室では狭線幅光 源や光周波数コムの開発を行っており、2つを組 み合わせることで様々な周波数の狭線幅光源を作 り出すことができる。そこで本研究では作った狭 線幅光源を利用してもらうために、本研究室のあ るレーザー新世代研究センター(レーザーセンタ ー)内の6階から1階まで約100m弱、光ファイ バーを張りめぐらし比較的短距離で光周波数基準 を周波数安定度10-15を目標に精密に分配するシス テムの開発を行った。

# 2. 光学長ゆらぎの補償

光ファイバーを用いて周波数基準を伝送すると、 空気の揺らぎや機械振動、温度変化などによるフ ァイバーの物理長や屈折率の変化により光学長が 変化し、それが位相雑音となって伝送した光の周 波数安定度が劣化する。このため周波数基準を精 密伝送するためにはこの光学長変動を精密に計測 し補償する必要がある。精密な測距で用いられる

非対称マイケルソン干渉計(図1)により光の干 渉を用いて光学長変動を精密に検出することがで きる。



図1 非対称マイケルソン干渉計

非対称マイケルソン干渉計はマイケルソン干渉計 の一方の光路が非常に長い干渉計である。光源か ら出たレーザー光の一方は参照光として用いる。 他方を長距離伝送させて往復させ参照光とのビー トを測定し往復光の位相変動を精密に測定するこ とで光学長変動を測定する。Δφ<sub>ctrl</sub>を制御位相、  $\delta \phi_{fiber}$ を往路のファイバー長ゆらぎによる位相雑 音(伝送付加雑音)、 $\delta \phi_{trans}$ を伝送信号の位相ゆ らぎ、 $\delta \phi_{orr}$ を誤差信号とする。往復で混入する位 相雑音が等しいとすると計測器を計測光が2回

(往復で) 通る経路に置いて位相ゆらぎを0にす る場合、

 $\delta \phi_{err} = 2\delta \phi_{fiber} + \Delta \phi_{ctrl} = 0, \ \Delta \phi_{ctrl} = -\delta \phi_{fiber}$ となるので伝送信号の位相ゆらぎは

 $\delta \phi_{trans} = -\delta \phi_{fiber} + \delta \phi_{fiber} = 0$ となり制御器を計測光が往復する経路に挿入し往 復光と参照光の光学長変動を補償することで実際 に伝送する経路の光学長変動を補償することがで

#### 3. CW レーザー伝送実験の実験系

まず CW レーザーを伝送し光学長変動を計測、 補償した。実際の実験系を以下の図2に示す。

光源(波長1.5 µmの狭線幅なファイバーレーザ ー)から出たレーザー光を10dBカプラーで2つ に分け一方は伝送ファイバーにつなげ計測光を通 し、他方は参照光として用いた。計測光を送信側

きる。

で偏光ビームスプリッター (PBS) に通し伝送先 でファラデーローテータミラー (FRM) によって 送信側に戻し再び PBS に通した。戻されて PBS で 屈折した計測光 (往復光) を 3dB カプラーで参照 光と干渉させ、そのビートをフォトディテクター

(PD)で計測した。参照光は音響光学素子(AOM) を用いて 55 MHz の周波数シフトを加えてあるの で干渉光中の 55 MHz のビートが検出できる。多 ビット位相周波数弁別器 (DPFD) でこのビート信 号とAOMに加えたシンセサイザーの 55 MHz とを かけあわせ位相信号を得た。これを制御回路に通 し得られた制御信号を制御器に帰還させ伝送ファ イバーの光学長が一定になるよう制御した。制御 器にはピエゾ圧電素子 (PZT) にファイバーを巻 き付けたファイバーストレッチャー (Fiber

Stretcher: FS)を用いた。PBSを透過したp波はフ ァイバーの複屈折により偏光がぐるぐると変わる が短時間では同じ複屈折であると考えられる。そ のため伝送ファイバーの途中で戻ってきた後方散 乱光はPBSの位置では最初と同じ偏光状態であり 最初と同じようにPBSを透過する。しかし伝送フ ァイバーの終端まで行き FRM で偏光を 90 度回転 させられて戻ってきた往復光はPBSの位置では最 初の光と偏光が 90 度変わった状態となり今度は PBSを透過せずに参照光と合波される。ゆえに PBS と FRM を用いて往復光と後方散乱光を区別 できる。他に AOM とサーキュレータを併用して 区別する方法もあるが伝送先の系を簡素化するた めに本研究では PBS と FRM を用いた。



本研究を行ったレーザーセンターは7階建てで あり、本研究室は6階に位置している。このため 本研究ではレーザーセンターの6階から1、3、5 階まで1.5 µm (SMF28) と1 µm (HI1060) の2種 類の光ファイバーを張りめぐらせ伝送経路とした。 伝送する光ファイバーの長さは64mから100mの 間であると推察される。

# 4. CW レーザー伝送実験

CW レーザーを伝送し伝送安定度の評価を行う 前にシステム雑音の測定を行った。システム雑音 は主に電気、機器の雑音と制御のループに入って いない伝送付加雑音の2つが考えられるが、本研 究では伝送付加雑音の寄与が大きいと考え制御し ても消すことができない伝送付加雑音をシステム 雑音として評価した。レーザー光が2つに分かれ た経路での光学長ゆらぎが伝送付加雑音となって 伝送光の周波数安定度を劣化させる。制御のルー プに入っている往復光は制御することで伝送付加 雑音を打ち消すことができるが、ループに入って いない参照光の伝送付加雑音は取り除くことがで きない。そこで特に伝送ファイバーの長さが0で も入り込んでくる伝送付加雑音をシステム雑音と 考えた。レーザー光が2つに分かれた経路をテー プで適度に固定しシステム雑音の評価を行った。 光学系の図と実際の写真をそれぞれ図 3a、b とし て以下に示す。



図3 システム雑音の評価

参照光は基準となる光であるため伝送付加雑音が できる限り小さいことが求められる。そのため2 つに分かれた経路では図4のように適度にテープ で固定した。音響振動や温度変化を抑制するため に2つに分かれた経路を発泡スチロールで覆った 状態でもシステム雑音を評価した。伝送周波数安 定度のアラン分散をとって評価した(図4)。

図4の赤色がマイクロ波基準、青色が発泡スチ ロールで覆わなかった場合、緑色が発泡スチロー ルで覆った場合である。伝送ファイバー(遅延フ ァイバー)の長さが0のとき発泡スチロールで覆 わなくても伝送周波数の安定度は目標をしていた 10-15を満たしていた。発泡スチロールで覆った場 合、平均時間1秒での周波数安定度のアラン分散 は実際に測定した55 MHz (rf領域)では1×10-10 で、それを光領域に換算すると3×10-17で短期で の周波数安定度はマイクロ波基準には至らなかっ たが追従していた。また発泡スチロールで覆った ときに短期、長期ともに周波数安定度が向上して いることから発泡スチロールで覆うことで短期的 な空気のゆらぎだけでなく長期的な温度ゆらぎも 抑制できることが分かった。この結果から光学長 制御をすることで光領域での周波数安定度10-15 ~10-17 に到達できると推測した。



図4 55 MHz ビートの周波数ゆらぎのアラン分散

次に CW レーザーの伝送安定度を評価した。伝 送ファイバーとして樽に巻かれている1kmのフ ァイバー、6階から1、3、5階までのファイバー を用い、光学長を制御し周波数ゆらぎのアラン分 散、位相雑音スペクトルを測定して評価した。本 研究では計測光を伝送光とした。得られた位相雑 音スペクトル、伝送周波数ゆらぎのアラン分散は それぞれ以下の図5、図6のようになった。

図5において赤色、青色、緑色はそれぞれ5階、 3階、1階までのファイバーを伝送経路としたとき の位相雑音スペクトルであり、点線は無制御時、 実線は制御時を表す。薄い黒色の点線はシンセサ イザーの信号を2つに分けてそれぞれを DPFD の 2 つのポートに入れたとき、すなわち雑音限界の 位相雑音スペクトルである。この結果より制御帯 域は 1 kHz であった。制御前の位相雑音は 100 rad/√Hz@1 Hz であったが制御後は 10-3 rad/√Hz@1 Hz となり、速い雑音成分を抑圧できた。



図5 位相雑音スペクトル



図6 伝送周波数ゆらぎのアラン分散

図6において赤色はマイクロ波基準の周波数安定 度、青色は発泡スチロールで覆った場合のシステ ム雑音である。緑色は1階までのファイバーの無 制御時であり、水色は樽に巻かれた1kmのファイ バーを伝送ファイバーとしたときの制御時、ピン ク色、オレンジ色、山吹色はそれぞれ1階、3階、 5階までのファイバーを遅延ファイバーとしたと きの制御時である。光領域での周波数安定度のア ラン分散は平均時間1秒のとき制御前は10-14で あったが制御することで1桁弱改善でき2×10-15 となった。また平均時間1000秒でシステム雑音に 到達した(図7)。これは先行研究の120km長距 離伝送と同程度の周波数安定度である。制御前と 比べて制御後でも周波数安定度が1桁程度しか改 善できていないがこれは制御回路が不十分である ことが要因として考えられる。

### 5. 光周波数コムの配信

光周波数コムとは時間軸上では超短パルスが一 定の間隔で並んでおり、周波数軸上では縦モード が等間隔に並んでいるという周波数特性をもつモ ード同期レーザーである。n本目の光周波数コム の1本の縦モードの周波数はオフセット周波数 *fceo、*繰り返し周波数*frep*を用いて以下のように表 せる。

# $f_n = f_{ceo} + nf_{rep}$

本研究室で開発している周波数安定化光源と光 周波数コムを用いて任意の周波数の狭線幅光源を つくりだせるが安定化光源の配信方法には以下の 2つがあげられる。

1つ目は他研究室で必要な波長の狭線幅光源を 本研究室でつくって CW レーザーとして伝送する 方法で、2つ目は周波数安定化光源に周波数安定 化した光周波数コムを伝送し他研究室で必要な周 波数の狭線幅光源をつくってもらう方法である。

CW レーザーを伝送する場合は既に述べた安定 度で十分である。光周波数コムを伝送する場合に ついて、光周波数コムはモードロックレーザーな のでファイバーを通すと波長分散の影響を受けて パルスが広がり、それぞれの周波数の位相関係が 崩れてしまう。本研究では光の周波数として光周 波数コムを伝送するので離れた縦モード間での伝 送安定度を評価する必要がある。

#### 6. 光周波数コム伝送の検証方法

光周波数コムの伝送では以下の3つの観点で検 証する。ここで光周波数コムの繰り返し周波数*frep* は固定されている状態である。1つ目は繰り返し 周波数*frep*の伝送安定度評価である(図7左)。光 周波数コムをフォトディテクターで検出すると各 縦モード間のビートが検出され、これを伝送前後 で比較することで*frep*の伝送安定度を評価できる。 2つ目は、光周波数コムの近い縦モード間の伝送 安定度評価である(図7真ん中)。光周波数コムの 1本の縦モードとCWレーザーのビートをとり伝 送前後で比較することで1本の縦モードの周波数 安定度を評価できる。このときにオフセット周波 数*fceo*も安定化して伝送するとオフセット周波数 *fceo*の伝送安定度が評価できる。3つ目は光周波数 コムの離れた縦モード間の伝送安定度を評価であ る(図7右)。*frepとfceo*を固定した光周波数コム を伝送する。伝送前に1本の縦モードにCWレー ザーを位相同期させる。伝送後に伝送前と異なる 縦モードに別のCWレーザーを位相同期させ、2 つのCWレーザーの周波数安定度を比較すること で離れた縦モード間の伝送安定度を評価できる。



図7 光周波数コムの伝送安定度検証方法

光周波数コムの*f<sub>rep</sub>*の伝送安定度評価実験
光周波数コムの繰り返し周波数*f<sub>rep</sub>*の伝送安定
度評価の実験系を以下の図8に示す。



図8 光周波数コムの伝送安定度検証方法

図8の実験系の下半分はCWレーザー伝送で用いた周波数安定化光源の伝送システムと同一のシステムである。しかしF.S.には分散シフトファイバー(dispersion shift fiber: DSF)を用いた。伝送ファイバーの前に光周波数コムを通し伝送後に取り出した。伝送前後で光周波数コムをPDに入れると

繰り返し周波数*frep*が得られる。光周波数コムの *frep*の基準にしているマイクロ波基準と伝送前後 の*frep*をミキサーにかけることで伝送前後の*frep* の位相ゆらぎを得られる。遅延ファイバーには樽 に巻かれた1kmと4.46kmのファイバーを用いた。

また、光周波数コムと周波数安定化光源の精密 分配システムは別の定盤に位置しており、定盤間 の伝送は金属の棒で作った柱に固定して行った。 また定盤間を伝送する前に光アンプでアンプした。 伝送前後の*f<sub>rep</sub>の*位相雑音スペクトル、周波数ゆら ぎのアラン分散はそれぞれ以下の図 9、図 10 のよ うになった。



図9 伝送前後のfrepの位相雑音スペクトル



図 10 frepの周波数ゆらぎのアラン分散

図9の赤の点線は定盤間を伝送する前(光アン

プの後)であり、青線は伝送後である。図9より 伝送前後でfrepの位相雑音スペクトルが変化して いないことが読み取れる。これより54 MHz では frepの速い成分の伝送付加雑音が検出されなかっ たといえる。過去にマイクロ波基準として繰り返 し周波数6 GHz の光周波数コムを伝送したとき、 frepは8000秒で0.1 rad しか変化していなかった。 そのときと同程度の周波数安定度であると考える とこれは妥当な結果であるといえる。また速い成 分の伝送付加雑音を検出し評価するためには高次 のモードで検出することが必要であると分かった。

図 10 の赤色はfrenを安定化しているシンセサイ ザーの周波数安定度、青線は発生直後のfrenの周波 数安定度である。緑色は光周波数コムがある定盤 上を1m程度伝送されアンプされた後(定盤間の 伝送前)、水色は定盤間を伝送し遅延ファイバーに 入れる前である。ピンク色は遅延ファイバーとし て樽に巻かれた1km ファイバーを用いた場合の 無制御時、オレンジ色は遅延ファイバーとして樽 に巻かれた 4.46 km ファイバーを用いた場合の制 御時である。平均時間1秒ではどの場合もシンセ サイザーの周波数安定度には到達しておらず伝送 距離が長くなると周波数安定度も劣化していたが 大きくは変わらなかった。また平均時間 50 秒程度 以降の長期では1kmファイバーを伝送ファイバ ーとしたときの無制御時とくらべ 4.46 km ファイ バーを伝送ファイバーとしたときの制御時で周波 数安定度の劣化が防げていたことも読み取れる。 これらのことより上述のとおり速い成分の伝送付 加雑音は54 MHz ではほとんど検出できないが、 長期では伝送付加雑音を検出でき、制御すること で抑えられることが分かった。またこれらは全て 目標としていた光領域での周波数ゆらぎのアラン 分散 10-15 以下を満たしていた。

# 光周波数コムの縦モード間の伝送安定度評価 光周波数コムの縦モード間の伝送安定度 CW レ ーザーを介した方法、コム自身を計測光にした方 法の2種類の方法で行った。実験系をそれぞれ図

図 11 の一番上は安定化光源精密分配システム である。F.S.には DSF を用いた。光学長安定化フ ァイバーに光周波数コムを通し伝送前後で計測光

11、図 12 で示す。

とは異なる CW レーザーとのビートを測定してミ キサーにかけると伝送前と別の CW レーザーとの ビートを参照信号として縦モード間の伝送付加雑 音が得られる。



図11 CW レーザーを介したコムの伝送安定度評価実験

往復光にコムが混ざるという問題点があったが PBSの後にコムを混ぜることで解決できた。しか し本研究で用いた光周波数コムの*frep*と AOM の 駆動周波数が近く signal noise 比(S/N 比)の良い ビート信号を得られなかった。これを解決する方 法として光周波数コムと計測光を同期して測定す る方法、繰り返し周波数が高いコムを用いる方法、 駆動周波数の異なる AOM を用いる方法の3つが あるので今後はそれを行う。



図 12 コム自身を計測光にした伝送安定度評価実験

図 11 までの実験では安定化光源配信システムに CW レーザーを用いていたがこの実験では光周波 数コム自身を計測光としても用いた。同様に F.S. には DSF を用いた。得られた結果を図 13 に示す。 この方法ではビートは光領域で重ね合わされるの で強いビートが得られると考えたが、0 Hz 付近で は変なピークがあり(図 13 左)、54 MHz では*frep*ビ ートの近く(図 13 右)であったため S/N 比のよい ビートを得られなかった。



S/N 比のよいビートを得るためには実験系を見直

### 9. まとめと展望

レーザーセンター内に敷設したファイバー網と 光周波数基準の短距離精密分配システムを用いて CW レーザーを光ファイバーで伝送し制御した。 また光周波数コムの伝送安定度の評価方法を考え 実験を行った。CW レーザー伝送では平均時間1 秒での周波数安定度のアラン分散は10-15台となり、 1 Hz での位相雑音スペクトルは 10<sup>-4</sup> rad/√Hz とな った。この結果から速い雑音成分は抑制できたが 遅い成分を抑制するには制御回路の最適化が必要 であるとわかった。光周波数コムのfrenの伝送では 制御により長期的なゆらぎは抑制できたが、短期 的なゆらぎを検出することはできなかった。これ はマイクロ波でfrep ビートを検出していたためで あり、解決するためにはfrepの高次のモードで検出 する必要がある。光周波数コムの縦モード間の伝 送安定度評価実験は2つの方法で行ったが、ビー トの S/N 比が悪く伝送安定度を測定できなかった。 これを解決するためには高繰り返しのコムか駆動 周波数の異なる AOM を使う必要があると考えら れる。今後は制御回路の最適化、異なる駆動周波 数の AOM または高繰り返しのコムを用いた実験 を行い CW レーザーの伝送安定度を向上させ、光 周波数コムの伝送安定度の評価を行う予定である。

# 10. 参考文献

K. Predehl1, et.al. Science 336, 441 (2012)
M. Musha, et.al. Appl. Phys. B 82, 555 (2006).

 [3] M. Musha, et.al Opt. Exp. 16, 16459 (2008).
また光周波数コムの伝送安定度を評価する方法を 考え実験を行った。CW レーザー伝送では1秒で の周波数安定度のアラン分散は10-15 台となり、