

時間周波数比較法に関する調査研究

和田雅人*

(平成 25 年 2 月 6 日受理)

A survey on time and frequency transfer

Masato WADA

Abstract

Recently, there have been progress in atomic clocks based on optical transitions. Optical clocks using a single ion or trapped atoms in lattice are expected to reach a uncertainty level of 10^{-18} or better, which could surpass the current definition of the second realized by the neutral ^{133}Cs microwave clock. This performance makes them ideal tools for new frequency standards. The transfer of precise time and frequency signals between distant clocks has been used to maintain TAI (International Atomic Time) time links. There are several methods that are used to compare time and frequency. The comparison techniques have been developed with the advent of new clocks. In this report, the current status of the technique on time and frequency transfer and activities by some laboratories are reviewed.

1. はじめに

近年、原子時計等の周波数標準器の性能が向上し、原子泉方式セシウム一次周波数標準器の不確かさは 10^{-16} レベルに到達している。また、光格子時計¹⁾⁻⁶⁾ や単一イオン光時計⁷⁾⁻¹⁰⁾ に代表される光周波数標準では 10^{-16} – 10^{-19} レベルの相対不確かさが検討されており、秒の再定義に向けて研究開発が活発に行われている。これに伴い、標準の同等性の確認や信頼性の確保のため、遠隔地にある標準器間の周波数比較を 10^{-16} レベルより良い精度で行う方法や、標準器の高精度な信号を劣化させずに遠方へ分配供給するための技術が重要になっている。光時計クラスの標準を遠隔地間で超高精度比較できるようになれば、基礎物理定数の不変性や重力ポテンシャルについて調べられるようになる。前者は科学として非常に興味深い問題であるし、後者に関しては地下資源の探索や地殻変動の検出といった産業に恩恵をもたらすツールとなる可能性を秘めている¹¹⁾。

高精度な時間周波数比較の方法としては、衛星を利用する方法と光ファイバを利用する方法がある。全地球測位システム (GPS: Global Positioning System) を仲介した比較や、静止衛星を用いる衛星双方向時間周波数比較 (TWSTFT: Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) の特徴は、大陸間での比較を容易に行うことができることである。このため、衛星による時刻比較は、世界中にある 300 台あまりの原子時計を平均して、協定世界時 (UTC: Coordinated Universal Time) を生成・維持するために日夜利用されている。これに対して光ファイバによる方法は、電離層や大気中の信号伝播がなく、誤差要因が少ないため高精度な比較が可能であり、大陸内において最先端の時計間で周波数比較を行うために用いられることが多い。

本稿では、まず比較方法の性能を表すアラン標準偏差について述べ、次いで各種比較方法のシステム構成、特徴、性能等を調査した結果について報告する。そして、それらを各種時計の性能と比較し、最後にまとめる。

*計測標準研究部門 時間周波数科 周波数システム研究室

2. 比較に用いる評価指標

時間周波数標準の分野では、安定性の評価指標としてアラン標準偏差を用いるのが一般的である。アラン標準偏差 $\sigma_y(\tau)$ は測定時間 τ で平均される周波数の連続測定から得られる¹²⁾。例えば、比較に用いる信号が

$$V(t) = V_0 \cos[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)] \quad (1)$$

で表されるとする。ここで、 V_0 は信号の振幅、 ν_0 は公称周波数、 $\varphi(t)$ は位相変動で $2\pi\nu_0 t$ からのずれである。このとき、公称周波数からの瞬時周波数変動の相対値は

$$y(t) = \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{d}{dt} \varphi(t) \quad (2)$$

となる。実際には、 $y(t)$ を測定せずに、時間 τ で平均された平均周波数揺らぎ $\bar{y}$ が用いられる。時刻 t_k における値を $\bar{y}_k$ とすると

$$\begin{aligned} \bar{y}_k &= \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt = \frac{\varphi(t_k+\tau) - \varphi(t_k)}{2\pi\nu_0\tau} \\ &= \frac{x(t_k+\tau) - x(t_k)}{\tau} \end{aligned} \quad (3)$$

であり、 $x(t) = \varphi(t)/2\pi\nu_0$ は時間変動である。即ち、 $\bar{y}_k$ は位相差または時間変動の測定により求めることができる。ここで注意すべきであるのは、 $\bar{y}_k$ は必ず2つの周波数信号の相互比較としてしか得られない点である。 $\bar{y}_k$ を用いると、2標準標準偏差であるアラン標準偏差（周波数安定度）は

$$\sigma_y(\tau) \equiv \left\langle \frac{1}{2} [\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k]^2 \right\rangle^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

と定義される。 $\langle \rangle$ は無限時間平均であり、 τ はサンプリングの間隔である。実際には、無限時間平均は不可能であるので

$$\sigma_y(\tau) \equiv \left[\frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

となる¹³⁾。ここで、 M は連続した平均周波数揺らぎ $\bar{y}_k$ の総数である。これは、区間（間隔 τ ）平均の周波数が次の区間ではどの程度変わるかということに対する標準偏差であると解釈できる。信号に含まれる雑音が白色位相雑音またはフリッカ位相雑音であるとき、アラン標準偏差は $1/\tau$ に比例して減少する¹³⁾。特に、比較技術に付随する雑音は、通常白色位相雑音であり、 $\sigma_y(\tau)$ は $1/\tau$ の τ 依存性を示すことになる¹⁴⁾。

上記で述べたように、アラン標準偏差は2つの周波数の相互比較によって評価される。よって、基準となる周波数の安定度は十分良い必要があり、これ以上の精度で測定を行うことはできない。周波数源の性能評価をする場合には、比較技術に起因するアラン標準偏差は十分小

さい状況で実験が行われる。また、比較技術の性能評価をする場合には、比較技術を上回る性能を持つ2つの周波数源を用いる。もしくは、1つの周波数源の信号を分割し、一方を参照信号、もう一方を伝送信号として得られる差周波の安定度を測定する。これは比較システムの雑音を反映しており、比較技術自身の安定度と言うことができる。

3. 衛星を用いた比較技術

3.1 GPS衛星による比較

3.1.1 GPS衛星からの送信信号

GPS衛星は原子時計を搭載しており、以下の信号を地上に送信している。搬送波はLバンド帯のL1: 1575.42 MHz 及びL2: 1227.60 MHz であり、各搬送波に測距用の信号であるC/A (Clear and Acquisition) コード及びP (Precise) コードを擬似雑音符号 (PRN: Pseudo Random Noise) により二位相偏移偏重 (BPSK: Binary Phase Shift Keying) をかけて重畳する。それぞれのチップ率は、C/A コードが1.023 MHz、P コードが10.23 MHz である。尚、C/A コードはL1のみ、P コードはそれぞれの搬送波に乗っていることからP1、P2と呼ばれる。

3.1.2 Common-View 法

GPS から送られてきたコード信号を地上局で同時に受信する方法による時間比較法をCommon-View (CV) 法という¹⁵⁾。局A、BがGPSの時刻信号 t_s を経路S-A、S-Bによる時間遅延 τ_{SA} 、 τ_{SB} を経て受け取るとする。このとき、局A及びBが測定する時刻差はそれぞれ $\Delta t_A = (t_s - \tau_{SA}) - t_A$ 、 $\Delta t_B = (t_s - \tau_{SB}) - t_B$ となる。ここで、 t_A 、 t_B は局A、Bの時刻である。インターネット等を介してこれらの差をとると

$$\Delta t_B - \Delta t_A = (t_A - t_B) - (\tau_{SA} - \tau_{SB}) \quad (6)$$

が得られ¹⁶⁾、局A-B間の時刻差を知ることができる。この時刻差を ΔT とすると、時間 τ において同様の測定を行うことにより、平均周波数差の相対値は

$$\frac{(\bar{f}_A - \bar{f}_B)}{f_A} = \frac{\Delta T(t) - \Delta T(t+\tau)}{\tau} \quad (7)$$

として求まる。ここで、 f_A 、 f_B は局A、Bの発振周波数である。この手法では t_s がキャンセルされるので、衛星等において正確な時間が不要であるという利点がある。

測定における主な誤差要因はいくつかある。衛星側としては軌道（位置）による誤差であり、受信機側ではマルチパス混信による誤差、アンテナの位置による誤差、受信機内の遅延誤差がある。そして、伝送に関しては電

離層や対流圏での遅延誤差がある。衛星の位置とアンテナの位置による誤差としては、アンテナ位置を既知とすることにより、衛星軌道だけが問題となる。軌道情報は GPS 衛星の信号に航法メッセージとして含まれており、放送層と呼ばれる。更に高精度なものとして 3 種類の精密層（予測層、速報層、最終層）が後処理によって発表され、最終層の系統誤差は 5 cm 以下である。これらの誤差は局間の基線長が長くなると大きくなる。これは、長基線になるに従い、視線方向が異なってくるためである。伝送中の遅延に関しては、2 周波受信による実測値補正により改善することができる。遅延の補正には、それぞれの搬送波に乗った P コードを使用する。近年では、C/A コードを用いて平均化時間 1 日で 1×10^{-13} の国際比較が行われている¹⁷⁾。

3.1.3 All-in-View 法

GPS CV 法では前節で述べたような誤差要因が比較的大きい。また、基線長が離れて共通視衛星数が減少し CV 法が困難な場合があることから、IGS (International GNSS Service) データを活用し受信された全ての GNSS 衛星を利用して解析する All-in-View (AV) 法が発展した。全地球衛星測位システム (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) とは、米国が運用する GPS の他に GLONASS (ロシア)、Galileo (ヨーロッパ共同体)、Compass (中国) などを含めた衛星による測位システムである。AV 法では、ある機関 k における利用可能な全ての GPS 衛星または GNSS 衛星による時刻差測定が時刻差 $[UTC(k) - T_{REF}]$ の推定値を得るために平均される。ここで T_{REF} とは衛星が参照する時刻である。この手法では 2 つの機関間の時刻差は単に $[UTC(k) - T_{REF}]$ 同士の差をとることで得られる。マルチチャンネル受信機の普及に伴い考案された比較法であり、衛星の時計や軌道の誤差をキャンセルすることができないことから当初は CV 法より劣っていた。

1990 年代から IGS は GPS 衛星の正確な軌道情報を提供するようになり、このサービスは GNSS システムに広がった。2000 年代には IGS はタイムリファレンスに対してオフセットを決められる正確な時計を提供するようになった。そして 2004 年にはこのタイムリファレンスは IGST となり、IGS によって維持される高安定な時系となった。GPS の精度を意図的に劣化させる制度 (Selective Availability) が取られていた頃には 1 日平均で 10^{-13} であった GPS 信号の安定度は、IGST では 10^{-15} となり、15 年間で 2 桁改善された。この結果、衛星の時計や軌道による誤差は問題とならなくなり、残る主な誤差は受信機となった。これらのことから、一度に多く

のデータを得られる AV 法の優位性が顕著となり、国際的な時間周波数比較において主に用いられるようになった¹⁸⁾。その比較精度は 1×10^{-13} かそれより少し良い程度である。特に、局間の距離が 5000 km 程度であれば AV 法の精度は CV 法よりも改善され、2500 km 程度の短距離間の比較であればその精度は AV 法、CV 法共に同程度になると報告されている¹⁹⁾。

3.1.4 Carrier Phase 法

コード情報 (C/A, P1, P2) を利用する CV 法などに対し、GPS から発信される信号を全て使う方法を GPS 搬送波位相 (GPS CP: GPS Carrier Phase) 法という。これは、GPS から発信されているコード情報に加えて L1, L2 のキャリア信号そのものの位相情報を利用することにより高精度な測定を行う方法である。コードの周波数に比べて搬送波の周波数は約 1000 倍大きいことから、原理的にはそれだけ高い精度で比較が可能である。この手法を用いて 2 周波信号の到着時刻の差から対流圏や電離層の影響による伝送遅延を計算し、これらの影響を実測値により補正すれば、1 日平均で 10^{-15} を実現することができる²⁰⁾。即ち、コード情報だけを利用した CV 法よりも 2 桁高い精度で時間 (周波数) 比較を行うことができる。

GPS CP 法を行うための受信機は一般的には高価であり、基準信号となる周波数源も高安定でなければならない。また、アンテナと衛星間の距離が cm 以下のレベルで精密に分かっていることも必要である。

3.2 通信用静止衛星による比較

衛星双方向時間周波数比較 (TWSTFT) 法は、現在 GPS CP 法と並び最も比較精度の良い比較手段である¹⁵⁾。

3.2.1 TWSTFT の原理

TWSTFT は図 1 に示すように時計及び送信機・受信機を持つ地上局 A, B と通信用静止衛星で構成される。それぞれの局は同時に衛星に向けて時刻情報を持つ信号を送り (アップリンク)、衛星は局から送られてきた信号を他方の局へと送信する (ダウンリンク)。弱い入射信号を同一のアンテナの強い発射信号で妨害しないようにアップリンクとダウンリンクでは異なるキャリア周波数が用いられる。比較では電離層や大気の影響を極力減らすため Ku バンド帯を使った衛星を用いることが多く、周波数はアップリンクが 14 GHz、ダウンリンクが 12 GHz 程度である。局 A の時計で定義される時刻 t_A において信号が衛星を通して局 B に送信され、同時に局 A のカウンターがスタートする。同様の動作が局 B においては時刻 t_B でスタートし、カウンタは衛星からの

入射信号でストップする。よって、カウンターが計測する時刻差は

$$\Delta t_A = t_B - t_A + \delta_{B \rightarrow A} \quad (8)$$

$$\Delta t_B = t_A - t_B + \delta_{A \rightarrow B} \quad (9)$$

となる。ここで、 $\delta_{B \rightarrow A}$ 、 $\delta_{A \rightarrow B}$ は局から局へ信号が伝送される際の遅延時間である。2つの局の時計の時刻差 $\Delta T = t_B - t_A$ は、これらの操作の後に式(8)から式(9)を引くことで

$$\Delta T = \frac{\Delta t_A - \Delta t_B}{2} + \frac{\delta_{A \rightarrow B} - \delta_{B \rightarrow A}}{2} \quad (10)$$

と得られる。伝送が完全に対称に行われれば $\delta_{B \rightarrow A}$ と $\delta_{A \rightarrow B}$ は等しくなるが、実際には誤差が残る。地上局の送受信機内での遅延をそれぞれ $\tau_{A \rightarrow B}^{T \text{ or } R}$ 、空間中の伝播遅延をそれぞれ $\tau_{A \text{ or } B}^{\text{up or down}}$ 、衛星上の送受信機内での遅延を $\tau_{A \rightarrow B \text{ or } B \rightarrow A}$ とすると、局間遅延は

$$\delta_{A \rightarrow B} = \tau_A^T + \tau_A^{\text{up}} + \tau_{A \rightarrow B} + \tau_B^{\text{down}} + \tau_B^R \quad (11)$$

$$\delta_{B \rightarrow A} = \tau_B^T + \tau_B^{\text{up}} + \tau_{B \rightarrow A} + \tau_A^{\text{down}} + \tau_A^R \quad (12)$$

と表せる。式(11)、(12)を式(10)に代入し、更に相対論的補正項 $\Delta \tau_R$ を加えると2局間の時刻差は

$$\begin{aligned} \Delta T = & \frac{\Delta t_A - \Delta t_B}{2} + \frac{(\tau_A^{\text{up}} + \tau_B^{\text{down}}) - (\tau_B^{\text{up}} + \tau_A^{\text{down}})}{2} \\ & + \frac{\tau_{A \rightarrow B} - \tau_{B \rightarrow A}}{2} + \frac{(\tau_A^T - \tau_A^R) - (\tau_B^T - \tau_B^R)}{2} \\ & + \Delta \tau_R \end{aligned} \quad (13)$$

と計算される²¹⁾。式(13)の右辺第2項は双方の信号が異なった経路を伝播することによる遅延時間の差である。信号が完全に同一の経路を通るとすればこの項はゼロになる。静止衛星の姿勢や電離層と大気の影響を入れても原理的には約100 psの誤差である。右辺第3項は、衛星が方向により異なる受信機を使用する場合の受信機

内遅延差である。局で異なる送受信機を用いることによる遅延差は右辺第4項である。これらの誤差はトータルで数百 ps になる。右辺第5項は地球の回転に起因するサニャック効果である。

時刻差の絶対値を求めるには、式(13)の右辺第4項で表される地上局の装置系の遅延時間に関する誤差を消すことが重要となる。

3.2.2 TWSTFT の課題

衛星双方向時間周波数比較法は、信号が自由空間を伝播する際の誤差をキャンセルするため、GPS CV法等と比べて非常に高精度な時刻比較が可能である。そのため、1990年代中頃から欧米を中心に研究開発が行われ実用化された。しかし、衛星回線費等の運用コストが高いこと、シングルチャンネルの場合同時に多局との比較ができないこと、局内の信号経路が送受信で同一でない部分での誤差がキャンセルできないこと等の課題がある。

更に精度を向上させる方法としては、GPS CP法と同

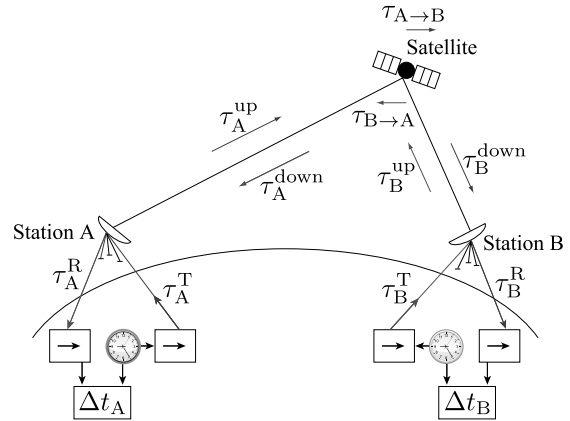


図1 TWSTFTの概略図

表1 衛星を用いた比較法の精度²⁹⁾

Satellite	Comparison mode	Method	Distance	Standard uncertainty (Time comparison)	Frequency instability at 1 day averaging time	Ref.
GPS	Code	CV ¹	6000 km	1.0 ~ 4.5 ns	10 ⁻¹³ ~ 10 ⁻¹⁴	27)
		AV ²	Global			19)
	CP ³	CV ¹	6000 km	0.3 ns	1 × 10 ⁻¹⁵	27)
		AV ²	Global		Approximately 1 × 10 ⁻¹⁵	28)
TWSTFT	Code	Two-way	10000 km	0.4 ~ 1.2 ns	1 × 10 ⁻¹⁵	27)
	CP ³			1 ps *	1 × 10 ⁻¹⁷ *	22)
ACES	CP ³	Intercont.	2000 km	< 100 ps *	5 × 10 ⁻¹⁷ *	25)
		CV ¹	Continental		5 × 10 ⁻¹⁸ *	

¹ Common-View

² All-in-View

³ Carrier Phase

* predicted value

様に搬送波の位相を利用する手段が考えられる。現状ではコードを用いた場合の比較精度は 0.1 ns (1 秒平均における安定度 10^{-10}) 程度であり、1 日平均では 10^{-15} に達するが、10 GHz の搬送波の位相を利用した場合 1 ps (1 秒平均における安定度 10^{-12}) での比較が可能になると予測されている²²⁾。これは 1 日平均で安定度 10^{-17} に達することになり、光時計同士の比較にも応用できる可能性があり、研究開発が進められている²³⁾。

3.3 国際宇宙ステーションによる比較

国際宇宙ステーション (ISS) の科学実験施設コロンバスに搭載する原子時計を用いて、地上にある時計間の比較等を行う ACES (Atomic Clocks Ensemble in Space) プロジェクトが計画されている。原子時計は、宇宙用元素メーザ (SHM: Space Hydrogen Maser) と PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbit) と呼ばれる一次標準器²⁴⁾により構成され、SHM は PHARAO のローカル発振器として用いられる。予測値として、搭載時計の周波数安定度は $1 \times 10^{-13} \tau^{-\frac{1}{2}}$ 以下 (または、平均時間 1 日で 3×10^{-16})、不確かさは 10^{-16} レベルである。

ISS は、地上高 400 km を 90 分程で地球を周回するため、ISS 搭載時計と地上の時計との間で比較を行い、ISS が他の大陸等の上空を飛行する際に他機関で同様の測定を行うことにより、大陸間での比較が行える。また、GPS CV 法のように、局所的な機関同士での同時比較 (ACES Common-View) も行える。目標としている比較精度は GPS CP 法に比べ、大陸間の比較の場合、1 桁程度高く、ACES CV の場合、2 桁程度高い²⁵⁾。これは 1 日平均の安定度で表すと、大陸間比較で 5×10^{-17} 、局所的比較で 5×10^{-18} に相当する。

更に、ACES プロジェクトでは重力赤方偏移、基礎定数の変化、光速不均一性等の検証実験が計画されている²⁶⁾。

3.4 衛星による比較のまとめ

以上で述べた衛星を用いた比較法の性能を表 1 にまとめた。ACES Intercont. は大陸間での比較を指す。また、周波数安定度とは、冒頭で述べたアラン標準偏差を意味する。現状の衛星による比較法で最も精度が良いのは、GPS CP 及び TWSTFT である。2004 年から行われた衛星を用いた各国の標準器比較では、GPS CP と TWSTFT が 1 日平均で 1×10^{-15} 程度のリンクの安定度を示している²⁷⁾。実験では、IEN (Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris)、NPL (National Physical

Laboratory)、OP (Observatoire de Paris/Systèmes de Référence Temps Espace) の 3 機関の間で原子泉方式セシウム一次周波数標準器の比較を行っているが、比較精度は標準器固有の不確かさと比べて無視できないレベルとなっている。このため、光周波数標準の比較を行うためには、安定度を更に良くする手法の開発が必要であるが、特に衛星を用いたシステムは、大陸間の遠隔比較を簡便に行うことができるという利点がある。ただし、GPS CV 法による比較精度は基線長に依存するので、6000 km を超える距離で比較する場合にはほとんど用いられることはなく、AV 法による比較の方が優位になる^{19), 28)}。

4. 光ファイバを用いた比較技術

4.1 光ファイバを用いた時計の比較

光ファイバを用いた時計の比較の原理は、基本的には TWSTFT と同じである。即ち、比較用信号として一心の光ファイバに逆方向に光信号を伝送させ、比較を行っている。

4.2 位相安定化の概略

光ファイバを用いた比較システムでは、光の送信先 (リモートサイト) で送信元 (ローカルサイト) の周波数やタイミングの基準信号を生成することになる。そこで問題となるのは種々の摂動による位相変動であり、正確な周波数を伝送するためにはこれらを検知してキャンセルする必要がある。比較システムは、信号の種類によりマイクロ波、光キャリア、光周波数コム²⁹⁾の 3 つに分けられ³⁰⁾、位相補償の方法は伝送信号の種類による。この節ではこれらの手法に共通な基本要素について述べる。

4.2.1 位相変動の要因

位相変動のうち最も大きいものは、機械的もしくは温度変化による屈折率変動及び伝送路の伸び縮みである。周波数領域では、これらの要因がドップラーシフトを引き起こす¹¹⁾。その他の要因としては、ファイバコネクタ等での反射による迷光、誘導ブリルアン散乱 (SBS: Stimulated Brillouin Scattering)、偏波モード分散 (PMD: Polarization-Mode Dispersion) の変動である。周波数比較を行うためのシステムを構築する際、重要となるのは、リンクの群遅延、光の位相、アクチュエータのダイナミックレンジ、レーザのパワー、リンクの群速度分散 (GVD: Group-Velocity Dispersion)、入射光の偏光、サーボの帯域幅である。

SBS は主に入射レーザのパワーを制限する。PMD 変

動は、偏波保持 (PM: Polarization-Maintaining) ファイバを用いない場合の伝送に生じる。これは、ビートのヘテロダイン検波の際に回転偏光により生じる RF 信号の振幅変動である³⁰⁾。GVD については光コムを送る場合、即ちパルスで問題となる。帯域幅については、S/N 比やダイナミックレンジ、ファイバの積算雑音などの相互作用によって考慮され、位相同期のサーボの帯域幅はラウンドトリップ遅延の逆数で制限される。また、他の制限は S/N 比やダイナミックレンジであり、これが十分であれば帯域幅内の雑音キャンセルが可能である。

4.2.2 位相のエラー検出とその補償法

基準信号はリモートサイトに伝送される際、伝送路で位相変動を受ける。この位相を安定化する一般的な方法^{30), 31)}の概念図を図2に示す。この変動は伝送する信号の種類によって適当なアクチュエータを用いて補償する必要がある。一般的に、リモートサイトに送られた光の一部は反射等により送り返され、ローカルサイトにて検出したラウンドトリップ信号の位相と基準信号の位相を比較する。光の損失は双方向のアンプの設置やリモートサイトの受信機で一旦受けてから増幅する等の方法で補われる。また、ファイバ連結部での反射による迷光とラウンドトリップ光を区別するため、リモートサイトではキャリアの周波数をシフトさせる手法³²⁾が用いられることが多い。アクチュエータは行きと帰りの各々で位相を付け加える役割を果たす。典型的なアクチュエータとしては、ピエゾ素子によるファイバストレッチャーやファイバスプール、音響光学変調器 (AOM: Acousto-Optic Modulator) 等があり、前者はファイバ長の変化により群遅延に作用し、後者は光の位相に作用する。特に AOM は光周波数に作用するため、ダイナミックレンジの制限がないという特徴がある。

また、伝送中に生じた雑音の評価を行うため、伝送光と基準光の out-of-loop 測定を行う必要がある。リモートサイトに位置するユーザはリモートで複製される基準信号と元の基準信号を比較できないので、先行実験によりファイバリンクの安定度を確認することが必須となる。即ち、直接比較を行うためローカルサイト、リモートサイトを同じ場所に設置して実験した後実際の伝送システムを構築する。ラウンドトリップ光からの in-loop 信号の安定度は制御の安定性を表すが、実際に伝送される信号の安定度と等しいわけではないので、リンクの安定度であるとは考えられない。out-of-loop 測定における安定度は、伝送遅延に起因する位相雑音のため in-loop 測定のそれよりも悪くなる³³⁾。他には、比較中に安定度を測る方法もあり^{32), 34)}、この場合独立した2本目のファ

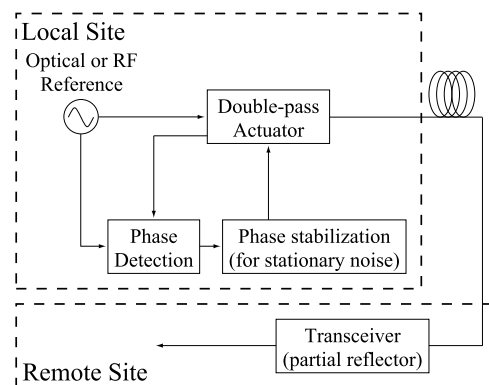


図2 光ファイバの位相補償の原理

イバを用いて基準信号の複製を送り返すことになる。

4.3 マイクロ波による比較

マイクロ波を基準信号として比較する場合、ファイバに入射するレーザの電流に RF 信号で変調をかけて周波数を伝送する。そして、リモートのユーザは振幅変調された信号を検出することによりマイクロ波の情報を得る。位相補償を行わなければ長期の安定度は制限されるので、光周波数標準の比較や遠隔同期をとるためには位相の安定化を施す必要がある。

4.3.1 マイクロ波の位相変動補償

マイクロ波領域における位相補償法は主に2つある。それは、RF 信号の変調をシフトさせる電氣的補償法とファイバ中の伝播遅延を変化させる光学的補償法である。光学的補償法に用いられるアクチュエータはピエゾファイバストレッチャーや温調ファイバスプール等である。電氣的補償法では、ラウンドトリップ光のエラー信号を電圧制御発振器 (VCO: Voltage-Controlled Oscillator) に返して電氣的に位相変動をキャンセルする手法が一般的である。通常、マイクロ波伝送では伝送する $1.5 \mu\text{m}$ の光に振幅変調を加え、この変調周波数が高ければ高いほど雑音を小さくできる。

4.3.2 欧米の開発状況

マイクロ波伝送の電氣的補償法及び光学的補償法は、フランスの SYRTE (Systèmes de Référence Temps Espace) 等で研究されており、実験系の詳細は文献³²⁾で解説されている。SYRTE は実際に敷設された 86 km のファイバを用いて、100 MHz の制御信号による光学的補償を施し、1日平均で 10^{-17} の安定度の伝送を行っている³⁴⁾。更にその後 PMD ノイズによる影響を低減し、1 GHz の制御信号による伝送により1秒平均で 5×10^{-15} 、1日平均で 2×10^{-18} の安定度にも達してい

る³⁵⁾。

4.3.3 NMIJ の開発状況

NMIJ (National Metrology Institute of Japan) はマイクロ波伝送システムを開発している。周波数の基準信号を低コストなシステムで遠隔地へ伝送する手法を開発しており^{36)~38)}、沖縄までの 1500 km という長距離にわたる比較も行っている³⁷⁾。ここでは、10 日平均で 1×10^{-13} の安定度を達成しており、この技術の実用化が有望視される。また、精度の高い信号伝送を行うため、双方向光アンプの導入についても検討している³⁹⁾。さらに、光学的補償法を採用した伝送方法では、加速器等の信号のタイミング同期を目的とした 400 m 程度の中距離伝送にも取り組んでいる⁴⁰⁾。この実験では、室内においてファイバストレッチャーを用いることにより、1 日平均で 6×10^{-20} に到達する安定度を実現している。また、このシステムにアクチュエータとしてファイバスプールを加えることにより、長距離への適用についても検討を始めた⁴¹⁾。

4.4 光キャリアによる比較

光周波数の基準信号の開発が進み、マイクロ波伝送よりも安定度の良い比較技術が望まれるようになった。光の基準信号を用いた伝送ならば、リンクの位相変動を高い分解能で検出できるのでマイクロ波よりも高精度な比較ができる。光キャリア伝送では光周波数を直接ファイバに入れることになる。そして、リモートサイトで基準信号は光周波数と比較することができ、伝送周波数と他の周波数のギャップを埋める光周波数コムを用いることでマイクロ波との比較も可能となる。

4.4.1 光の位相変動補償

一般的に、光キャリア伝送におけるファイバ安定化はアクチュエータとして AOM を用いる。各国で開発されているシステムのほとんどが AOM を利用したものであり、根本的な違いはない。出力されたビームの一部は基準信号として使われ、残りのビームは AOM で一度目の周波数シフトを受けた後ファイバに入射される。リモートサイトでは、ファラデー回転鏡 (FRM: Faraday Rotator Mirror) 等を用いて光を返送する⁴²⁾。そして、ラウンドトリップ光と基準信号のヘテロダインビートを取ることで位相変動によるエラー信号が得られ、AOM にフィードバックをかけることが可能となる。このため、長距離リンクの光キャリア伝送において適切に位相変動のキャンセルを行うためには、伝送先での光のコヒーレンスを保つために狭線幅のレーザが必要となる。

S/N 比は光パワーにより制限されるが、光キャリア

による比較は同じ伝送路を使ったマイクロ波による比較よりも高い精度で周波数を送ることができる。高い周波数を用いると、S/N 比が小さいために位相雑音が大きかったとしても良い安定度が得られる^{43), 44)}。S/N 比はファイバコネクタによる後方散乱によって制限される。これを避ける方法としては、全コネクタ部分を溶融接続する方法かリモートで送り返す光の周波数をシフトさせる方法がある。また、S/N 比を改善しても、非 PM ファイバの使用のため PMD によるヘテロダインビートの振幅-位相変換雑音が生じることがある。

光キャリア伝送においては遅延の突発的な変動も問題となりうる。特にリンクが数十 km にも及ぶ場合にはよく起こり、サーボのダイナミックレンジやスループレートが十分でないときにはサイクルスリップが発生する。この問題を解決する方法としては、多ビットデジタル位相周波数弁別器 (DPFD: Digital Phase-Frequency Discriminator) を用いたサーボシステム等が開発されている⁴⁵⁾。

4.4.2 欧米の開発状況

次世代・高精度周波数伝送インフラとして、光ファイバ周波数リンクの整備が欧米の先進国をはじめ各国で進んでいる。米国では、2008 年に JILA-NIST 間の 4 km の光ファイバを利用して JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) の Sr 光格子時計が NIST (National Institute of Standards and Technology) の Ca 光時計で測定された。得られた安定度は 1×10^{-16} に達し、これは一次周波数標準器の安定度を超えている⁴⁶⁾。また、32 km のファイバ⁴⁷⁾と 251 km のファイバ⁴⁸⁾を用いた実験では、1 秒で 1×10^{-17} と 2×10^{-16} の安定度が得られている。ただし、これらのファイバの大部分は実験室に設置されたスプール状ファイバであり、実際に敷設されているのは一部分のみである。ヨーロッパでは特に関心が高く、ドイツのミュンヘンとブラウンシュバイクという約 600 km 離れた遠隔地間をつなぐ長距離ファイバリンクが完成している。2 本のファイバが静かな地中で平行に敷設されており、その伝送距離は 920 km である。PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) と MPQ (Max-Planck-Institut für Quantenoptik) の双方から狭線幅レーザを伝送した実験ではファイバリンクの安定度は 10^4 秒で 10^{-18} を達成しており⁴⁹⁾、パリまで延伸するファイバリンクが構想されている。最近では、2 本のファイバを PTB で連結し、1840 km での比較も達成した⁵⁰⁾。また、フランスでは LPL (Laboratoire de Physique des Lasers) と SYRTE がインターネット回線と光分岐挿入装置 (OADM: Optical Add/Drop

Multiplexers) を利用して 540 km の比較を実現している⁵¹⁾。光時計はこれらのファイバ網で相互につながり、新時代の超高精度・時間インフラを形成すると言われている。

4.4.3 NMIJ の開発状況

NMIJ では、2008 年に世界で初めて実際に 100 km 以上敷設されたファイバ (JGN2: Japan Gigabit Network II) を用いて光キャリア伝送を行い、Sr 光格子時計の周波数を測定している²⁾。この実験では電通大 (UEC: Unique & Exciting Campus) のチームと協力して NMIJ-東京大学 (本郷キャンパス) 間を 120 km のファイバでつなぎ、光キャリアによる周波数比較を行った。先行実験により確かめられた比較の安定度は 1 秒で 8×10^{-16} であり⁵²⁾、これは当時の Sr 光格子時計の安定度より 1 桁以上高い。水素メーザ、原子泉方式セシウム一次周波数標準器、ファイバコム等を用いた 3 時間の測定により 5.6×10^{-15} の不確かさでの周波数の決定を達成した⁵³⁾。また最近の NMIJ では、伝送系のシステム雑音特性、雑音耐性、伝送信号の非対称性による雑音等を詳しく調べた実験を室内で行っており、理論的な伝送限界に迫る精度での比較が実現している⁵⁴⁾。東京圏で 18 桁に迫る精度の光時計のファイバネットワークが実現すれば、高度差 1 cm に対応する重力ポテンシャルの変動をマッピングすることが可能となる¹¹⁾。

4.5 光周波数コムによる比較

光とマイクロ波の基準信号を同時に送る場合には、光コムを伝送する方法が用いられ、位相補償は光学的補償法で行われる。この場合、リモートサイトで得られるパ

ルスの繰り返しレートを一定にするため群遅延を制御することになる。リンクで発生する GVD の調整は分散補償ファイバ (DCF: Dispersion-Compensation Fiber) 等で行う。これにより、極めて小さいジッタのタイミング信号を供給できることから、大型加速器や電波望遠鏡群への応用が考えられている。

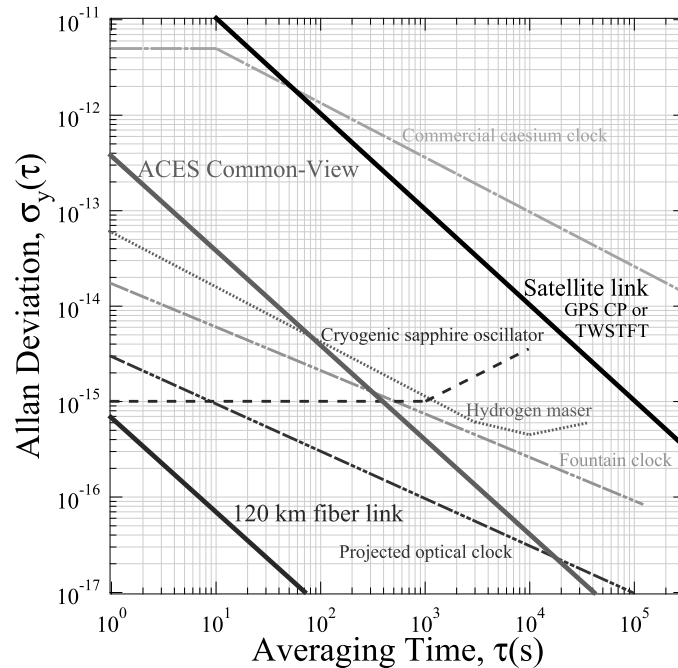
NIST では 6.9 km の BRAN (Boulder Research and Administration Network) と呼ばれるファイバリンクを安定化することにより 1 秒で 9×10^{-15} 、100 秒で 1×10^{-15} の安定度を達成している³⁰⁾。また、イギリスの NPL では 86 km のダークファイバを用いて、ストレッチャーとスプールの 2 重制御と DCF による分散補償を組み合わせたシステムを開発している⁵⁵⁾。Λ タイプのカウンター⁵⁶⁾により測定した安定度は 1 秒で 5×10^{-15} 、1600 秒で 4×10^{-17} が得られている。

4.6 光ファイバによる比較のまとめ

各国の機関が達成している光ファイバを用いた比較の性能を表 2 にまとめた。尚、これらは先行実験により測定されたリンクの安定度を含んでおり、実際の時計比較実験で用いられるリンクと同一であるとは限らない点に注意しておく。現状で最も高精度な比較を行うことができるのは、光キャリアによる比較である。特に欧米の機関が活発に研究しており、長距離における比較が実現されている。既に光時計同士の比較も行われつつあり、最近ではリピーター局を設置する等して比較の長距離化が進められている⁵⁹⁾。

表 2 主な機関で実証されている光ファイバの周波数比較精度

Method	Institute	Length	Frequency instability at 1 s averaging time	Frequency instability at long-term averaging time	Ref.
Microwave frequency	LPL, SYRTE	86 km	5×10^{-15}	2×10^{-18} at 1 day	35)
	NMIJ	400 m	2×10^{-15}	6×10^{-20} at 1 day	40)
Optical carrier	NIST	251 km	2×10^{-16}	6×10^{-19} at 100 s	48)
	LPL, SYRTE	86 km	1.5×10^{-16}	6×10^{-19} at 1000 s	57)
	LPL, SYRTE	540 km	3×10^{-14}	1×10^{-18} at 30000 s	51)
	PTB-LUH	146 km	3×10^{-15}	1×10^{-19} at 30000 s	58)
	PTB-MPQ	920 km	3.8×10^{-14}	4×10^{-18} at 8000 s	49)
	PTB-MPQ	1840 km	1.3×10^{-13}	1.3×10^{-15} at 100 s	50)
	NMIJ, UEC	110 km	8×10^{-16}	1.5×10^{-18} at 400 s	52)
	NMIJ	90 km	4.4×10^{-15}	5×10^{-18} at 1000 s	54)
Optical frequency comb	NIST	6.9 km	9×10^{-15}	1×10^{-15} at 100 s	30)
	NPL	86 km	5×10^{-15}	4×10^{-17} at 1600 s	55)

図3 各種時計の安定度及び比較技術の性能^{27), 30), 32), 52), 60)}

5. 時計及び衛星、光ファイバの性能比較

主な周波数標準器と周波数比較法の安定度をまとめると図3のようになる。商用セシウム原子時計レベルの比較であれば、通常の衛星を用いた比較で十分であるが、原子泉方式一次周波数標準器の比較に対してはリンクの不確かさが顕著になる。特に、1日平均で 10^{-17} に達する光格子時計が実現した場合、光ファイバもしくはACESによる比較が重要となってくる。図3に示したファイバリンクの“120 km”は産総研－東大間のファイバ長であり、光ファイバを用いれば光時計同士の短期の比較が可能であることがわかる。

6. NMIJ の計画

NMIJ では、高精度な比較手段として光ファイバを利用した2つの比較方法について検討を始めている。1つはマイクロ波を用いる方式であり^{36)~40)}、もう1つは光キャリアを用いる方式である。マイクロ波方式は信号の遠隔同期等への応用が有望視されており、光キャリア方式は専ら光周波数標準の比較に適当であると考えられる。将来的には、光格子時計の比較を関東圏で行うことを視野に入れて研究開発を進めている。この際、最先端の光格子時計よりも良い精度で比較することを目標とし

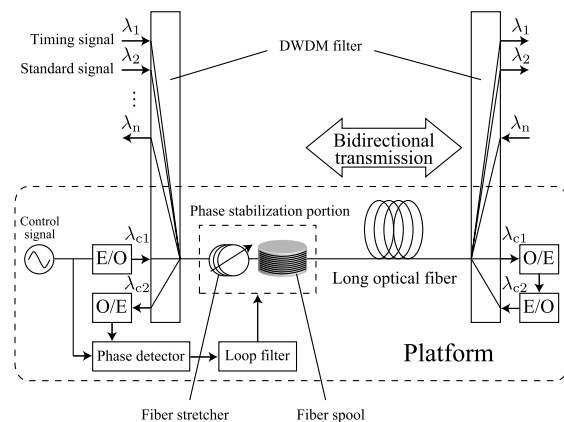


図4 双方向波長多重信号による長距離光ファイバの位相安定化

ている。

6.1 マイクロ波方式

標準信号やタイミング信号等、多種用途の信号を波長多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）して送受信することを可能にするため、光学的補償法を採用した位相補償システムの開発を検討している⁴¹⁾。本システムは図4に示すように、高密度波長多重（DWDM: Dense WDM）フィルターと一心の光ファイバを用いて

双方向に異なる波長で RF 信号を伝送させ、位相変動量を送信側で検出し、応答速度の速いピエゾ素子駆動の微調用ファイバストレッチャーと長距離ファイバの位相変動に対応可能な粗調用ファイバスプールの 2 重の制御ループで高精度に位相制御する。この方式の特徴は高密度の双方向波長多重信号を用いる点と位相補償装置として全てファイバを用いる点にある。これにより光ファイバ長の変動がない理想的な伝送路を実現できれば、時間周波数標準の伝送のみならず、アンテナアレイ、大型加速器等への信号配信、ジョセフソン電圧標準、長さ標準、更に地震や建造物の振動といったセンサー情報のネットワークへの応用も期待できる。

6.2 光キャリア方式

光時計クラスの高精度な時計の比較を目的としては、光キャリア方式による比較を検討している⁵⁴⁾。ペースとなる比較システムの系を図 5 に示す。この方式では、光領域で位相を安定化させるため、フィードバック制御の原理的な限界に迫る高精度な周波数比較が可能となる。室内でファイバスプールを用いた実験では、90 km の伝送路に対して 1000 秒で 5×10^{-18} の安定度を達成している。今後は、各種雑音要因に対する改善手法の開発、実際の伝送路を用いた実験、リピーター局を用いたロバストなシステムの開発等を進めていく予定である。

7. おわりに

遠隔地の光時計を 17 桁で比較する手段としては、光ファイバ、ACES を用いた比較技術が有用であり、秒の再定義に貢献できると考えられる。また、時計比較を通して時間／測位技術、基礎物理研究等への応用も可能であり、今後も時間周波数比較技術の更なる高度化が期待される。

謝辞

本調査研究を行うにあたって、ご指導・ご助言を頂きました時間周波数科研究科長の洪鋒雷博士、周波数システム研究室研究室長の雨宮正樹博士に感謝申し上げます。本稿をまとめるにあたり、貴重な意見を頂きました計測標準研究部門の榎原研正博士に感謝申し上げます。

また、日頃より研究に関する議論をして頂いた周波数システム研究室の渡部謙一博士、鈴山智也博士及び時間周波数科の皆様に感謝申し上げます。

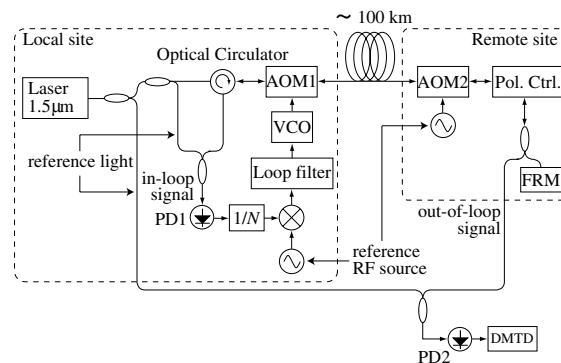


図 5 光キャリアによる位相安定化の実験系

参考文献

- 1) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, *Nature* **435**, 321 (2005).
- 2) F.-L. Hong *et al.*, *Opt. Lett.* **34**, 692 (2009).
- 3) M. Yasuda *et al.*, *Appl. Phys. Express* **5**, 102401 (2012).
- 4) R. Le Targat *et al.*, *Nat. Commun.* **4**, 2109 (2013).
- 5) N. Hinkley *et al.*, *Science* **341**, 1215 (2013).
- 6) D. Akamatsu *et al.*, *Appl. Phys. Express* **7**, 012401 (2014).
- 7) T. Rosenband *et al.*, *Science* **319**, 1808 (2008).
- 8) C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, and T. Rosenband, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 070802 (2010).
- 9) N. Huntemann *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 090801 (2012).
- 10) C. J. Campbell *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 120802 (2012).
- 11) 香取秀俊, “光格子時計の発明と展開”, *応用物理学会誌* **81**, 656-662 (2012).
- 12) D. W. Allan, *Proc. IEEE* **54**, 221 (1966).
- 13) *IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology-Random Instabilities*, IEEE Standard 1139-1999 (1999).
- 14) 吉村和幸, 古賀保喜, 大浦宣徳, “周波数と時間：原子時計の基礎／原子時のしくみ”, *電子情報通信学会* (1989).
- 15) F. Riehle, in *Frequency Standards*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2004).
- 16) D. W. Allan and M. A. Weiss, *Proc. 34th Ann. Freq. Control Symposium*, 334 (1980).

- 17) 雨宮正樹, 鈴山智也, 藤井靖久, 今江理人, “時間・周波数標準の発生とその比較・供給法について”, JEMIC 計測サークルニュース **40**, 1-7 (2011).
- 18) G. Petit and Z. Jiang, *Metrologia* **45**, 35 (2008).
- 19) M. A. Weiss, G. Petit, and Z. Jiang, *Proc. IEEE Frequency Control Symp. and Exposition (Vancouver)*, 324 (2005).
- 20) K. M. Larson and J. Levine, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **46**, 1001 (1999).
- 21) D. Kirchner, *Proc. IEEE* **79**, 983 (1991).
- 22) D. Piester, A. Bauch, J. Becker, E. Staliuniene, and C. Schlunegger, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **55**, 1906 (2008).
- 23) B. Fonville, D. Matsakis, A. Pawlitzki, and W. Schäfer, *Proc. 36th Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting*, 149 (2004).
- 24) P. Laurent *et al.*, *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **84**, 683 (2006).
- 25) L. Cacciapuoti and C. Salomon, *ACES mission concept and scientific objectives* (ESA, 2007).
- 26) L. Cacciapuoti *et al.*, *Nucl. Phys. B* **166**, 303 (2007).
- 27) A. Bauch *et al.*, *Metrologia* **43**, 109 (2006).
- 28) S. W. Lee, B. E. Schutz, C.-B. Lee, and S. H. Yang, *Metrologia* **45**, 156 (2008).
- 29) D. Piester, M. Rost, M. Fujieda, T. Feldmann, and A. Bauch, *Adv. Radio Sci.* **9**, 1 (2011).
- 30) S. M. Foreman, K. W. Holman, D. D. Hudson, D. J. Jones, and J. Ye, *Rev. Sci. Instrum.* **78**, 021101 (2007).
- 31) L. S. Ma, P. Jungner, J. Ye, and J. L. Hall, *Opt. Lett.* **19**, 1777 (1994).
- 32) F. Narbonne *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 064701 (2006).
- 33) P. A. Williams, W. C. Swann, and N. R. Newbury, *J. Opt. Soc. Am. B* **25**, 1284 (2008).
- 34) C. Daussy *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 203904 (2005).
- 35) O. Lopez *et al.*, *Eur. Phys. J. D* **48**, 35 (2008).
- 36) M. Amemiya *et al.*, *IEEE Trans. FM* **126**, 458 (2006).
- 37) M. Amemiya, M. Imae, Y. Fujii, T. Suzuyama, and S. Ohshima, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **57**, 878 (2008).
- 38) 雨宮正樹, 他, 電気学会論文誌 C **130**, 644 (2010).
- 39) M. Amemiya *et al.*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **59**, 631 (2010).
- 40) M. Amemiya, K. Watabe, T. Suzuyama, T. Naito, and H. Tsuchida, *IEEE Trans. on Electrical and Electronic Engineering* **7**, S187 (2012).
- 41) 和田雅人, 渡部謙一, 電気学会研究会資料, *IEEE-ECT* 12060 (2012).
- 42) A. D. Kersey, M. J. Marrone, and M. A. Davis, *Electron. Lett.* **27**, 518 (1991).
- 43) J. Rutman, *Proc. IEEE* **66**, 1048 (1978).
- 44) L. Hollberg *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.* **37**, 1502 (2001).
- 45) M. Musha *et al.*, *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **82**, 555 (2006).
- 46) A. D. Ludlow *et al.*, *Science* **319**, 1805 (2008).
- 47) S. M. Foreman *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 153601 (2007).
- 48) N. R. Newbury, P. A. Williams, and W. C. Swann, *Opt. Lett.* **32**, 3056 (2007).
- 49) K. Predehl *et al.*, *Science* **336**, 441 (2012).
- 50) S. Droste *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 110801 (2013).
- 51) O. Lopez *et al.*, *Opt. Express* **20**, 23518 (2012).
- 52) M. Musha, F.-L. Hong, K. Nakagawa, and K. Ueda, *Opt. Express* **16**, 16459 (2008).
- 53) 洪鋒雷, “秒の再定義に向けての原子時計の新しい進展—「秒の二次表現」—”, *日本物理学会誌* **65**, 80-88 (2010).
- 54) 和田雅人, 他, 電気学会論文誌 C **134**, 526 (2014).
- 55) G. Marra *et al.*, *Opt. Lett.* **36**, 511 (2011).
- 56) S. T. Dawkins, J. J. McFerran, and A. N. Luiten, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **54**, 918 (2007).
- 57) H. Jiang *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B* **25**, 2029 (2008).
- 58) G. Grosche *et al.*, *Opt. Lett.* **34**, 2270 (2009).
- 59) O. Lopez *et al.*, *Opt. Express* **18**, 16849 (2010).
- 60) 雨宮正樹, “光ファイバを用いた時間・周波数標準の供給及び比較技術に関する調査研究”, *産総研計量標準報告* **3**, 551-558 (2005).