

## 5 時空標準計測・比較技術

### 5 *Remote Comparison of Space-Time Standards*

#### 5-1 高精度時間・周波数計測と測地学

##### 5-1 *Precise Time and Frequency Metrology and Geodesy*

市川隆一

Ryuichi ICHIKAWA

近年、高精度時間・周波数計測は測地学においてますます重要な役割を果たしつつある。原子時計の開発を背景に発展した衛星測位システム (GNSS: Global Navigation Satellite System) や超長基線電波干渉法 (VLBI: Very Long Baseline Interferometry) などの宇宙測地技術は、大陸間の距離をミリメートル精度で計測できるようになった。一方で、これらの宇宙測地技術は、高精度な時間周波数比較の実現に多大な寄与をもたらし、特に GNSS は国際原子時 (TAI: International Atomic Time) 及び協定世界時 (UTC: Coordinated Universal Time) の維持には欠かせない存在となっている。さらに最近では、光格子時計の目覚ましい発展を背景に、センチメートル精度での重力ポテンシャルの計測など、相対論的測地学が現実のものとなりつつある。本稿は、これまでの時間・周波数計測と測地学との連携について最新の成果まで含めてレビューし、今後の情報通信研究機構 (NICT) において同分野の研究を進めるうえでの糧とすることを目的とする。

Precise time and frequency metrology plays a crucial role in geodesy. Space geodetic techniques such as the Global Navigation Satellite System (GNSS) and very long baseline interferometry (VLBI) can measure the motion of Earth's tectonic plates with a precision of a few millimeters by using an extremely accurate atomic clock. On the other hand, the GNSS is applied to perform precise time and frequency transfer in order to maintain international time scales, i.e., International Atomic Time (TAI) and Coordinated Universal Time (UTC). In addition, time and frequency transfer using VLBI has been evaluated over the last decade. Recently, applications of optical lattice clocks have provided an attractive method of measuring the gravity potential difference with centimeter accuracy. In this article, I have summarized interactions between time and frequency metrology and geodesy including current research in the context of relativistic geodesy in order to advance precise time and frequency research and development in the National Institute of Communications and Information Technology (NICT).

### 1 はじめに

現代の時間・周波数計測分野において、測地学的な観測手法は極めて重要な技術として認知されている。特に、世界共通の時刻、つまり協定世界時 (UTC) を高精度に維持する上で必要不可欠な技術として、距離を隔てた2地点間に存在する時計間での周波数時刻比較に測地学的手法が適用されてきた。その代表例が米国の GPS (Global Positioning System) に代表される GNSS である。UTC 維持のみならず、国内において

も NICT 本部で生成する日本標準時と未来 ICT 研究所内の神戸副局及び2箇所の標準周波数局 (おたかどや山とはがね山の2つの長波局) における時刻との整合性を担保するために、衛星双方向時間・周波数比較 (TWSTFT: Two Way Satellite Time and Frequency Transfer) と並んで GPS が各施設間の周波数比較に用いられている。

また NICT では、GPS に加え、銀河系外の電波星からの信号を用いた VLBI による大陸間等の遠距離時間周波数比較を実現するため、精力的な研究開発を進

めてきた。GPS と VLBI は、本来は高精度な測位を行うための技術として 1970 年代末頃より開発が進められてきたが、本質的な技術要件として高精度な時計なくして実現不可能であった。その意味で本来時間・周波数計測分野と測地学とは強いつながりを持ち、我々が所属する時空標準研究室の名称や存在意義もそれを踏まえたものと言える。

さらに、最近の光周波数標準器の開発は目覚ましく、時間周波数比較とは逆に時間・周波数計測分野から測地学への寄与が盛んに議論され、実際の実験観測や衛星ミッションも精力的に進められている。そこで、このタイミングで改めて時間・周波数計測分野と測地学との連携についてレビューし、今後の研究方針を立てる上での材料とすることは重要と考える。本稿では、これら高精度時間・周波数計測と測地学との連携について、まず、原子時計と宇宙測地技術の関係、特に GNSS 及び VLBI を用いた時間周波数比較を通してこれまでの研究開発を振り返る。次に、最近機運の盛り上がり著しい光格子時計の測地学利用を中心に、いわゆる“相対論的測地学”について概説し、加えて NICT も参画している ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) ミッションを紹介する。なお、TWSTFT については、最新の開発成果について述べられた本特集号 5-2 [1] を参照されたい。

## 2 高精度時間・周波数計測と宇宙測地学

VLBI や GNSS 等の宇宙測地技術を用いた観測において、原子時計が鍵技術 (key technology) であることは論をまたない。また、1990 年代に実用化の域に達し、地上系とは独立した時系を衛星軌道に持つ GPS の登場は、地球とその近傍で複数の異なる時系を常時維持管理することの必要性をあらわにした。ここでは、こうした宇宙測地観測や時系監視の実現を可能とした背景及び具体的な宇宙測地技術の応用例として時間周波数比較について述べる。

### 2.1 IERS Conventions<sup>\*1</sup>

時間・周波数計測分野と宇宙測地学の双方が緊密な連携を持つ証左のひとつが、宇宙測地観測データの解析処理全般におけるバイブルとも言える“*IERS Conventions*”である。ここで、*IERS* とは、International Earth Rotation and Reference Systems Service (国際地球回転事業) の略である。1989 年、*IERS Conventions* の前身に当たる“*IERS Standards (1989)*[2]”が初めて発行された。これには、地球自転変動を計測する VLBI や地球重心の決定に重要な衛星レーザー測距 (SLR: Satellite Laser Ranging)、あるいは月軌道の精

密決定のための月レーザー測距 (LLR: Lunar Laser Ranging) のデータ解析に不可欠な物理定数、基準座標系、あるいは物理モデル等が記載された。その後、GPS の拡充に伴って関連する記述が増えた“*IERS Standards (1992)* [3]”が 1992 年 7 月に発行され、次に、基準座標系や惑星暦の更新を反映させ、かつ名称を改めた“*IERS Conventions (1996)* [4]”が 1996 年 7 月に発行された。

その後、2004 年に発行された“*IERS Conventions (2003)* [5]”で“clock”の語が初めて登場する。“*IERS Conventions (1996)*”までは、米国海軍天文台 (USNO: United States Naval Observatory) の Dennis McCarthy が単独の編者だったが、“*IERS Conventions (2003)*”では、McCarthy に並んで国際度量衡局 (BIPM: Bureau international des poids et mesures) の Gérard Petit が編集責任者に名前を連ね、“Time coordinates”の記述が新たに登場した。これは、本特集号 7-1 [6] でも示された、BIPM と国際 GPS 事業 (IGS: International GPS Service<sup>\*2</sup>) の協力によるパイロットプロジェクト (1989 年～) によって、IGS 観測網に参画した世界各国の標準機関における UTC (k)<sup>\*3</sup> を基準とした観測に基づく GPS 衛星クロックオフセット<sup>\*4</sup> 推定の劇的な改善がなされたことが背景にある。その後、2010 年に改定発行された“*IERS Conventions (2010)* [7]”では、Gérard Petit が筆頭編者を務め、時系の取扱いの重要度が更に増したことを印象づけている。

### 2.2 GNSS による時間周波数比較

#### 【GPS 供視法 (GPS common-view)】

汎地球的規模での高精度測位を実現した米国の GPS は、GNSS の先駆的存在であり、かつ現在でもその代表格といえる。衛星内部に高安定の原子時計を搭載した GPS を時間周波数比較に応用する構想は、早くも 1980 年には議論され始めた。Allan and Weiss[8] により提唱された GPS 供視法 (GPS common-view) は、全世界規模での比較を可能とし、TAI の比較ネットワーク構築に多大な寄与をもたらした。

GPS 供視法は、距離を隔てた 2 地点間で共通に見える GPS 衛星から得られたデータの差分を取ることによって時間周波数比較を行う。そのため、衛星搭載時計の

\*1 強いて言えば「*IERS 規定*」だが、適切な邦訳はなく、このままの語で用いられることが多い。

\*2 2005 年 3 月、International “GNSS” Service と改称。

\*3 BIPM で決定される協定世界時 UTC に対して、各国の標準機関で決定する UTC を慣例的に UTC (k) と呼称する。

\*4 GPS 時系に対する衛星搭載原子時計の時刻オフセット。現在では IGS が全世界の観測ネットワークで受信したデータから推定してフリーで提供している。

時刻ずれを相殺できるという利点がある。一方で、2地点間の距離が遠くなるほど、共通視野に見える衛星の個数が減るとともにその視線方向が低仰角となるため、データ数の減少や大気・電離層での伝播遅延誤差の影響で精度が劣化する。現在ではGPS衛星から発射されるL1とL2の2つの周波数信号を用いて電離層伝播誤差を除去する手法が確立しており[9]、GPS供視法の比較精度は、おおむね平均化時間1日で1ナノ秒程度に達成する[10]。

### 【GPS全視法(GPS All in View)】

GPSの基準時系であるGPS timeに対する各衛星の時計のずれ(クロックオフセット)が既知とすれば、任意の衛星を介した時間周波数比較ができる[11]。したがって、共通視野に見える衛星に限定せず、各々の観測点で視野内の全衛星のデータを用いた比較ができ、この手法を「GPS全視法(GPS All in View)」と呼ぶ。ただし、衛星から放送される軌道情報(放送暦)を用いる限りは、その決定精度1m及びクロックオフセット精度2.5ナノ秒で制限され、例えば長基線であってもGPS供視法に比べて精度が劣る。

一方、前述にあるように、1998年以降、国際GPS事業(IGS、2005年に「国際GNSS事業(International GNSS Service)」に改称)の観測網に参画した世界各国の標準機関においてUTC(k)を基準とした観測が実現し、IGSにおける衛星クロックオフセット推定の劇的な改善が達成された。これを踏まえ、IGSは、前世紀の終わり頃から、高精度に決定した衛星クロックオフセットとGPS衛星の軌道をftpやWEBサイトで公開している[12]。IGSが公開するこれら情報の精度は、観測から2週間後程度で提供される最終版(final orbit and clock)で、衛星クロックオフセットが20ピコ秒、衛星軌道が2.5cmの精度に達している。また、2019年現在では、観測終了後2日程度で提供される高速版(rapid orbit and clock)でも、クロックオフセットと軌道が同程度の精度で提供されている。これらの情報を用いることで、放送暦を用いていた場合に比べてGPS全視法の精度は2桁以上向上する[11]。

### 【精密単独測位(PPP: Precise Point Positioning)】

先に述べたGPS供視法やGPS全視法では、市販のカーナビゲーションシステムや登山用GPS機器等と同様に、衛星-地上の受信機間での擬似距離による測位計算から得られたデータを用いて時間周波数比較を行う。一方、1980年代半ば頃から急速に発展した精密GPS測量の分野では、サブセンチメートル精度での観測点位置を求めるために、当初より搬送波位相データを用いてきた。初期に開発された解析手法では、

衛星時計や受信機時計のオフセットを相殺するために、各々の観測量を引き算して得られる二重位相差データを解析に用いたため、本質的に時間周波数比較には使えなかった。

その後、1990年代後半に観測データの差分を行わない精密単独測位(PPP: Precise Point Positioning)が開発され[13]、前述の衛星クロックオフセットや衛星軌道情報の高精度化と相まって、差分を取ることなくサブセンチメートル測位が実現した。PPPは急速に普及し、二重位相差方式と遜色なくプレート運動や地殻変動計測が可能であることが実証された他、中性大気による伝播遅延も精度良く推定できることが確かめられ、GPS観測網から推定した水蒸気情報を天気予報に生かす、いわゆる「GPS気象学(GPS meteorology[14])」の実用化にも寄与した。

PPPでは、未知パラメータとして観測局の3次元位置や中性大気遅延量と同時に受信機のクロックオフセットを推定する。そこで、測地分野でのPPPの有効性が確認されたことを踏まえ、このクロックオフセットを時間周波数比較に用いる試みが前世紀の終わり頃から始まった。当初は、例えば米国NASAのジェット推進研究所(JPL: Jet Propulsion Laboratory)が開発したGIPSY(GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software)[15]等、測地分野で使用される専用ソフトウェアを用いた解析を行う必要があり、かなり高度な測地学的な専門知識を要した。その後、2003年10月からカナダの天然資源省(NRCan: Natural Resources Canada)が、CSRS-PPP(CSRS - Precise Point Positioning)という名称でWEBベースでのPPPサービスを開始し、時間周波数比較の研究者が容易にPPPを実行できる環境が整った[16]。また、並行して世界の主だった標準機関でも、IGS観測網同様の測地用二重波受信機の導入が進み、現在では、PPPはGPS時間周波数比較の主流となり、UTCの高精度維持に不可欠な手法として確立している。

PPPにおいて、位相データの不確定性は本来整数値のバイアスであるが、従来はその推定手法が確立していなかったため、この不確定性を浮動小数点で取り扱う手法が主流であった。近年、IPPP(Integer PPP)、あるいはPPP-AR(Ambiguity Resolution)といった波数不確定性整数値の決定手法が確立し、GPS時間周波数比較の精度向上に寄与している[17][21]。例えば、2017年にNICTと韓国標準機関である韓国科学技術研究院(KRISS: Korea Research Institute of Standards and Science)との間で実施した周波数比較実験では、搬送波位相方式の衛星双方向比較(TWCP)とIPPP比較の二重差で $10^{-17}$ 台(平均化時間:250000秒)



の安定度を達成したが、この値はTWCPと従来のPPP比較の二重差に比べて1桁<sup>りょうが</sup>凌駕している[22]。

#### 【マルチGNSS時代のGNSS時間周波数比較】

GPSに加え、前世紀の終わり頃にロシアのGLONASSの本格運用が始まった。その後、EUによるGalileo、中国によるBeiDou、我が国の準天頂衛星システム(QZSS)、あるいはインドのIRNS等、次々にGNSSの拡充が続き、これらを用いた時間周波数比較の検討が議論される時代となっている。しかしながら、2019年現在において、各GNSSが各々独自に維持する時系(例:GPS時系、GLONASS時系、Galileo時系等)間オフセットの具体的な決定法が確立していないため[例えば衛星航法システムに関する国際委員会(ICG: International Committee on Global Navigation Satellite Systems)ワーキンググループD“Working Group on Reference Frames, Timing and Applications”主催のワークショップでのプレゼンテーションなど[23]<sup>\*5</sup>]、マルチGNSSでの時間周波数比較手法はいまだに開発段階にある。

### 2.3 VLBIによる時間周波数比較

#### 【黎明期】

超長基線電波干渉計(VLBI: Very Long Baseline Interferometry)は、複数の電波望遠鏡を用いて、銀河系外の電波星から受信した信号を相関処理することにより、距離を隔てた望遠鏡間の距離と方向をミリメートル精度で、また地球の自転速度変動を1000分の1秒ないしはそれ以上の精度で計測可能な宇宙測地技術である。VLBIの解析では、共通の電波源から到来する信号の遅延時間差が基本の観測量である。この中には2地点間の相対位置のほかに、各々の観測局の基準時計(水素メーザー原子時計)間の時間差(クロックオフセット)や中性大気中での伝播遅延等が含まれ、解析処理の中で未知数として推定する。

ここで推定されるクロックオフセット値を時間周波数比較に応用するアイデアは比較的早い頃には知られており、1980年代には米国NASA深宇宙探査局(DSN: Deep Space Network)での実験において、平均化時間1日で $10^{-14}$ の安定度結果[24]が得られている。その後、1980年代後半には、当時の通信総合研究所時代に浜らによるゼロ基線実験[25]及び吉野らによる当時の首都圏地殻変動観測計画(KSP: Key-stone Project)観測網を用いた短基線実験[26]が行われ、VLBIを用いた時間周波数比較の有効性が示された。

GPS時間周波数比較は高精度な衛星軌道情報と衛星クロックオフセット、あるいはTWSTFTは商用通信衛星の運用という第3者に強く依存し、必ずしも長

期にわたる運用が保証されていないとの指摘がある[27]。一方で、VLBIは自己完結したシステムであり、左記のような制約がなく、国際時間周波数比較での代替手段として有望とみなせることから、今世紀に入ってVLBI時間周波数計測分野の研究は主に我が国と欧州において本格的に検討されるようになった。

#### 【欧州におけるVLBI時間周波数計測研究】

スウェーデンの標準機関であるSP<sup>\*6</sup>のCarsten Rieckは、チャルマーズ工科大学オンサラ観測所(Chalmers University of Technology, Onsala Space Observatory)のVLBI研究者であるRudiger Haasらと協力して2000年代中頃からVLBI時間周波数比較の実証実験を始めた。彼らは、2008年8月に実施され世界11観測局が参加した国際的なVLBIキャンペーン観測CONT08のデータ解析から、平均化時間1日で安定度 $1.5 \times 10^{-15}$ に達する結果を得た[27]。その後、2011年9月に実施された同様のVLBIキャンペーン観測CONT11のデータ解析では、平均化時間1日で $1.0 \times 10^{-15}$ の安定度に達する結果を得た。これらの実験結果は、いずれもGPS時間周波数比較結果とも調和的であった。一連の成果を踏まえ、大陸間でのVLBI時間周波数比較が実用レベルにあることが確認された[27][28]。

2016年、イタリア北部トリノにある国立計量研究所(INRIM: L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica)の光周波数コムから生成された標準信号を、イタリア半島の付け根に位置する国立天文物理学研究所(INAF: Istituto Nazionale di Astrofisica)のメディチーナ(Medicina)VLBI観測所まで550kmのファイバーにより伝送するVLBI実験が行われた。メディチーナVLBI観測所では、INAFからの信号のほかに従来の観測所内の水素メーザー原子時計からの信号もVLBI装置に供給し、双方を切り替えながら観測の品質を評価したところ、INRIMからの信号を用いた観測でも従来と遜色ない結果を得ることに成功した[29]。この実験の成功を背景とし、後述の日伊VLBI時間周波数比較実験の実施につながった(図1)。同じ頃、ポーランドでも類似のVLBI観測局への遠隔光標準信号伝送実験に成功している[30]。

\*5 このワークショップ全体のプレゼンテーションは(<http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/icg/activities/2019/time2019.html>)で見ることができる。

\*6 かつては“Statens Provningsanstalt(スウェーデン語)”の略称としてSPと称したが、現在の正式名称は“SP Technical Research Institute of Sweden”であり、SPは略称ではない。

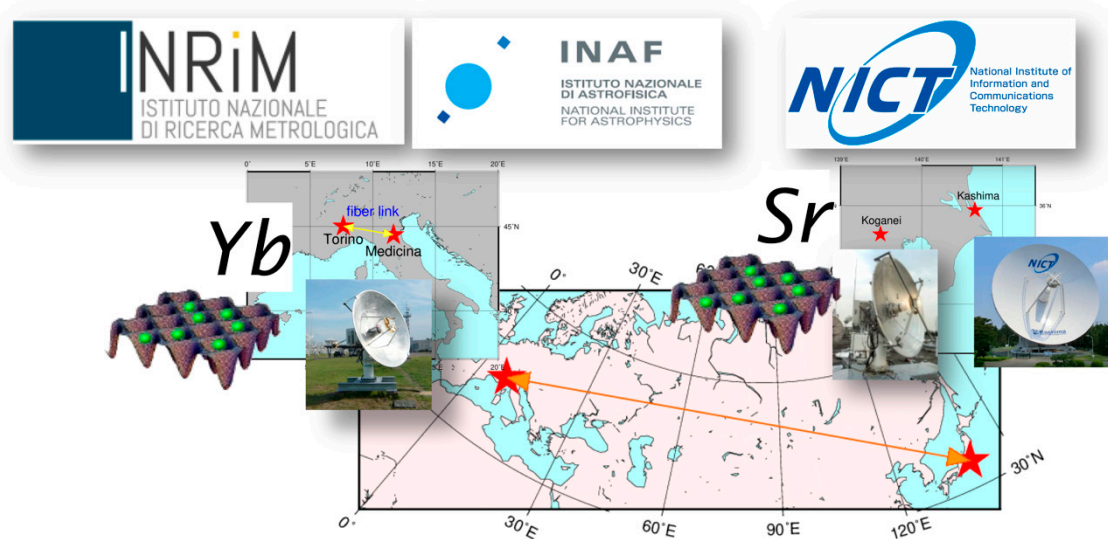


図1 日伊 VLBI 時間周波数比較実験の概要

#### 【NICT における初期の VLBI 時間周波数比較研究】

NICT でも、2007 年頃から VLBI 時間周波数比較の検討を開始、まず KSP 観測網のデータ解析による精度評価を行った[31]。24 時間観測の解析であったため、長期安定度の評価はできなかったが、平均化時間 6 時間で  $10^{-15}$  位の安定度という結果を得た。その後、IVS データベースのデータを用いた大陸間での解析や、鹿島 - 小金井間での解析結果を踏まえ、従来の観測でも  $10^{-15}$  乗位の VLBI 時間周波数比較が可能であることが確かめられた[32][33]。これらの検討において、同一の電波源を追跡する手法が従来の測地 VLBI 観測よりも更に周波数安定度を向上させた比較が可能であることも示された[32]。また、Hobiger らは、CONT11 観測及び VLBI に併設の GPS データを宇宙測地統合解析ソフトウェア C5++ で処理することにより、VLBI や GPS 単独での周波数比較結果より安定度が向上することを示した[34]。

#### 【NICT-NMIJ 周波数比較実験[35]】

さらに NICT では、世界各国での標準機関において将来 VLBI 時間周波数比較を簡便に行うことを念頭に、広帯域受信系を搭載した超小型アンテナの開発に着手した。まず、2014 年 3 月に X 帯受信系を搭載した超小型アンテナを産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ/つくば市) 及び NICT 本部 2 号館屋上 (小金井市) に設置し、実験を開始した。その後、鹿島 34 m アンテナへの広帯域受信系搭載 (6.5-15 GHz マルチモードホーン/2014 年)、同受信系の改良版を鹿島 34 m アンテナに搭載 (3-14 GHz マルチモードホーン及び誘電体レンズ/2015 年夏)、小金井局での 2.4 m 口径アンテナへの換装と 3-14 GHz 受信

系の搭載 (2016 年)、NMIJ 超小型アンテナ局での同様の改造 (2017 年) と開発の進捗に応じて順次改良を加えてきた。2017 年までに実施した小金井・つくば間での UTC (NICT) - UTC (NMIJ) の周波数比較実験において、VLBI-GPS 差分の周波数安定度は 3 日平均で  $10^{-16}$  位に達することが確認された。

#### 【日伊光格子時計比較 VLBI 実験】

その後 NICT では、図 1 に示すように、INRIM のイッテルビウム (Yb) 光格子時計と NICT のストロンチウム (Sr) 光格子時計との間の周波数比較を目的として、2018 年 8 月に超小型 VLBI 局を INAF メディチーナ観測所の VLBI 局近傍に移設した。前述のように、INRIM と INAF は既に光ファイバーリンクで接続されており、これにより双方の光格子時計間での VLBI 周波数比較が可能となる。2018 年 10 月以降、2019 年 7 月現在までに 10 回以上の実験を実施しており、現在データ解析中である[36]。

### 3 時間・周波数計測と相対論的測地学

一般相対論を背景に、時計を測地計測、特に重力ポテンシャル計測に応用する考え方は、“Chronometric leveling<sup>\*7</sup>” という語で Vermeer が初めて提唱した[37]。その後、Bjerhammar は、“高精度な時計が同一速度で時刻を刻む場所で計測された平均海面をつないだ地表面”を相対論的ジオイド (relativistic geoid) と定義付け、これによる測地学的な概念を “Relativistic Ge-

\*7 適切な邦訳は無いが「時計式水準測量」とも言うべきか。



odesy (相対論的測地学)”とした[38]。また、Bjerhammar は、高性能の時計からの周波数信号が供給された VLBI 観測により、2 地点間での重力赤方偏移に起因する周波数差を求め、これにより両観測局間での重力ポテンシャル差を検出する可能性についても述べている[38]。

当時は最も高精度とされた水素レーザー原子時計でも、測定可能な周波数差は 1 日平均で  $10^{-15}$  台であった。地表付近での重力赤方偏移に起因する周波数差は  $1.1 \times 10^{-16}/\text{m}$  程度であり、Bjerhammar の論文でも、水素レーザー原子時計を用いることで、最高 2 m 程度の精度でポテンシャル差検出が可能という見積もりが示されている。また、彼は口径 4 m のアンテナを用いた可搬型 VLBI 観測局による周波数差測定の可能性について指摘しており、前項で紹介した日伊超小型 VLBI 局実験の実に 30 年以上も前に同アイデアを提言したことは、彼の先見性を示すものといえる。

現代では、Relativistic Geodesy の語は、重力ポテンシャル計測のみならず、従来の重力測定 (gravimetry) や重力偏差測定 (gradiometry)、あるいは相対論効果と不可分な宇宙測地計測をも包括した表現で使用されることが多い[39]。一方、先の Chronometric leveling については、最近では“Chronometric Geodesy”として限定された範囲で使われつつある[39]。

### 3.1 光格子時計

“Relativistic Geodesy”が従来の絶対重力測定や水準測量の精度と同レベルで議論が可能となったのは、2002 年に提唱された光格子時計[40]以降のことである。当時から水素レーザーやセシウム等の従来の原子時計の周波数安定度を 2 桁から 3 桁上回ると予想された光格子時計は、2005 年に実証されるに至る[41]。その後香取らは、光格子時計を用いた  $10^{-18}$  の不確かさでのジオイド計測 (仮想的に地表面と一致する地球の等重力ポテンシャル面) の可能性を示した[42]。同じ頃、光ファイバーで結合された NICT と東京大学の双方の Sr 光格子時計を直接周波数比較することに世界で初めて成功し、平均化時間 10 分で  $10^{-16}$  台の周波数安定度を達成した[43]。また、この実験において、NICT と東大との標高差約 56 m に起因する重力赤方偏移をリアルタイムで検出できることが実証された。

### 3.2 内外における光周波数標準研究と測地学

NICT-東大実験以降、光周波数標準を用いた Relativistic Geodesy の研究は、内外で積極的に研究が進められるようになる。国内では、光格子時計による重力ポテンシャル差測定の実証のため、2015 年 9 月に東大と理研双方の Sr 光格子時計との間を 30 km の

ファイバー (両地点の距離 :15 km) で結合して周波数比較を行う一方で、国土地理院の協力で双方間での水準測量を行う実験を行った[44]。その結果、双方の周波数差は  $5.9 \times 10^{-18}$  の精度で計測され、その比較から推定される高度差と水準測量の結果は 5 cm の精度で一致することが確かめられた。水準測量は、大気屈折による計測誤差や機器の測定誤差が距離の増加に依存して累積されるため、長距離の計測では不利となるうえに、多大な人的リソースや観測時間を要するためリアルタイム計測は不可能である [45][46]。一方、ファイバーで双方の光格子時計が直接接続されている限り、周波数差計測の精度はほぼ同じであり、特に長距離では水準測量を遥かに凌駕する高度差測定をリアルタイムで可能と期待される[46]。さらに最近では、東大と国土地理院が共同で実施した、東京スカイツリーでの光格子時計による重力ポテンシャル差測定実験が記憶に新しい[47]。

NICT でも、光周波数標準の開発において特に最近の数年間の進捗は目覚ましい。詳細なレビューは井戸[48]に譲るが、蜂須らによる初の大規模光格子時計周波数比較実験の成功[49]や蜂須ら[50]による、一週間ごとに 3 時間、約半年間の Sr 光格子時計の運用で、従来のセシウム一次周波数標準を上回る精度で水素レーザー校正の実証は顕著な成果である。特に後者は、TAI の高精度維持という観点から画期的な成果と言える。また、長時間運用という面で不利とされていた光格子時計を連続観測が不可欠な測地分野に応用するうえでの寄与も期待できる。

国外では、2012 年にドイツの標準機関であるドイツ物理工学研究所 (PTB: Physikalisch-Technische Bundesanstalt) とマックス・プランク研究所 (MPQ: Max Planck Institute of Quantum Optics) との間、920 km のファイバリンクで双方の光周波数コムを結合する周波数比較実験が行われ、平均化時間 1000 秒で  $10^{-18}$  台の周波数安定度を達成し、長距離での高精度光結合周波数比較が可能なることを示した[51]。これ以降、ドイツを中心とする欧州の時間・周波数計測分野の研究者は測地研究者との連携を強化し、EU 域内での光周波数標準を用いた測地観測の実現に傾注するようになる。

例えば、2012 年にスロヴァキアで開催されたワークショップ “Relativistic Positioning Systems and their Scientific Applications” の発表論文集として、2013 年に発行された Acta Futura 誌の第 7 号[52]では、相対論的測地学時代における GNSS の位置付や科学成果への期待がまとめられた。この号の中で、Delva and J. Lodewyck[53]は、1950 年代以降の原子時計の開発経緯をまとめ、2000 年代後半頃から光周波数標準がマ

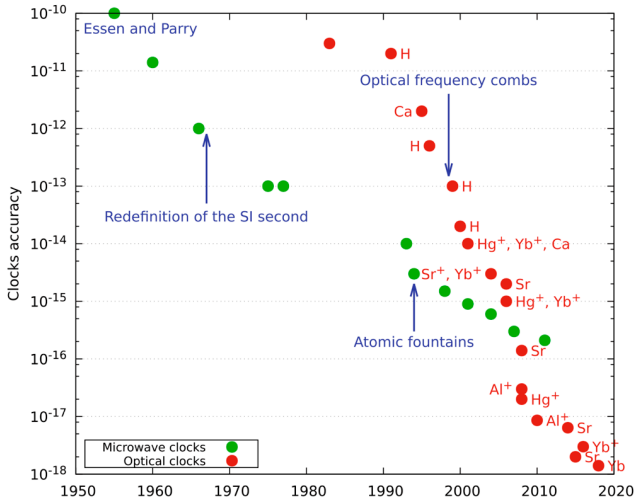


図2 マイクロ波と光、各々の周波数標準器の精度の変遷 [54]。



図3 欧州域内の各研究機関を結ぶファイバーネットワーク [57]。緑の線のリンクでは標準周波数伝送が既に実現している。

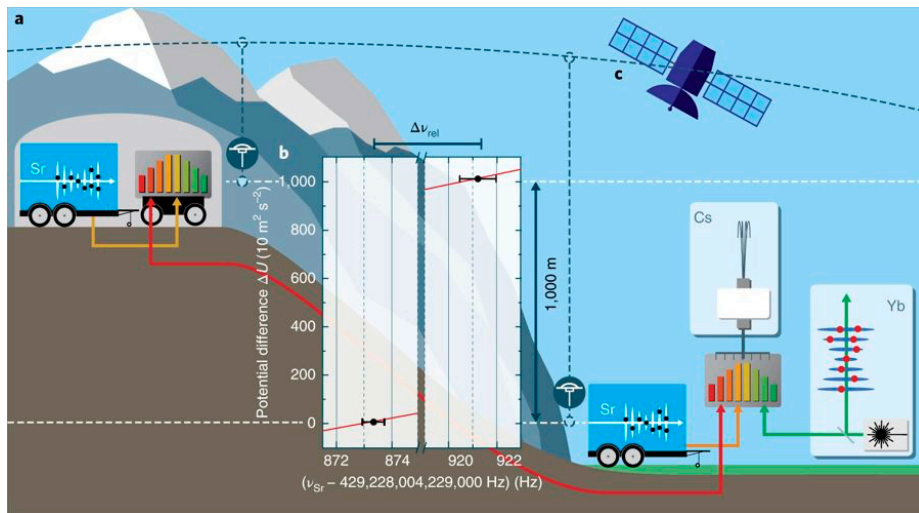


図4 イタリア-フランス国境のフレジュストンネルとトリノのINRIMとの間で実施された可搬型Sr光格子時計による重力ポテンシャル差計測実験の概念図[59]。

マイクロ波標準を凌駕してきていることを示した[53]。この図は、新たな実験成果が得られるたびに更新され、図2は2019年7月時点で最新の成果を含めたものである[54]。

その他、大陸規模の距離でのファイバー伝送技術の実証を目的としたPTB-MPQ間での往復(1840 km)光周波数標準比較実験[55]、その実験を踏まえた欧州の各標準機関をファイバーネットワークでリンクすることによる光周波数標準比較と測地応用の検討[56][57]、将来の衛星搭載も見越した可搬型Sr光格子時計の開発[58]、その可搬型Sr光格子時計を用いた仏伊国境のフレジュストンネルとINRIM(トリノ)との間の重力ポテンシャル差測定実験[59]、光周波数標準を搭載した衛星による重力ポテンシャル差測定に関する測地学的観点からの理論研究[60]、衛星搭載を念頭に置いた光格子時計の要素技術開発[61]及び相対論

測地学を進める上で不可欠な解析ツールの理論的な考察[62]、ファイバー接続された光周波数標準器による重力ポテンシャル差測定の定式化[63]等の論文が次々出版されている。以上のうち、ファイバーネットワークで結合された欧州各国の標準機関を図3に、可搬型光格子時計を用いた重力ポテンシャル差計測実験の概念図を図4に示す。

こうした研究の進捗を踏まえ、国際測地学・地球物理学連合(IUGG: International Union of Geodesy and Geophysics)傘下の国際測地学協会(IAG: International Association of Geodesy)の下に、関連分野の研究を推進するためのワーキンググループ(Joint Working Group 2.1 on Relativistic Geodesy)が2017年に設けられた。このワーキンググループは今年2019年を一区切りとして活動を行ってきたが、一連の研究成果について、欧州地球科学連合(EGU: European Geosci-



ences Union) 総会や同じく今年モンリオールで開催された IUGG 等、複数の国際研究集会において多数の発表がなされている。とりわけ、光周波数標準の比較実験が盛んなヨーロッパのお膝元のウィーンで開催された今年の EGU2019 において、PTB が積極的に発表を行っているのが印象的である[64]。

ここで示した最近数年間の内外の研究動向については、前述の Acta Futura 誌のほかに、2018 年発行の Reports on Progress in Physics 誌に掲載されたレビュー論文“Atomic Clocks for Geodesy [65]”及び今年(2019 年)に発行された Springer 社の論文集“Relativistic Geodesy [66]”にかなりの部分が網羅されており、大いに理解の助けとなる。また、邦文では、測地学的観点から重力測定について記し、光格子時計との連携についても解説した 3 編の論文[45][46][67] が参考になる。

### 3.3 ACES

ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) とは、欧州宇宙機関 (ESA: European Space Agency) が計画するプロジェクトであり、NICT も参画している。国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) に超高安定の原子時計を搭載し、これを介して地球上の複数の標準機関で開発が進む光周波数標準の高精度周波数比較を行うことが主目的である。また、重力赤方偏移を含む一般相対論の検証等も重要な科学目的と位置付けられる[68][69]。測地学的観点から見た重力赤方偏移の観測は、 $10^{-17}$  の不確かさでの周波数差計測により 10 cm の精度でジオイド高の差が計測可能であることを意味し、前述の Relativistic Geodesy の一翼を担う形で ACES プロジェクトの目的に含まれる。

ACES 搭載器の ISS への打ち上げは、当初は 2016 年中に予定されていたが、諸事情により延期を重ね、2019 年 7 月現在、2020 年夏頃の打ち上げ予定となっている。ACES プロジェクトでの核心的な実験機器は、ISS 上の ESA 実験設備コロンバス (Columbus) に設置する 2 台の高性能原子時計、レーザー冷却セシウム一次周波数標準器“PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbit)”及び衛星搭載用に開発されたアクティブ型水素メーザー原子時計“SHM (Space Hydrogen Maser)”である。PHARAO と SHM を組み合わせることで、ACES では少なくとも  $1 \times 10^{-16}$  の周波数安定度が実現される予定である。これらの原子時計、地上の光周波数標準等との間での双方向周波数比較を実現するための専用地上マイクロ波送受信局 (MWL: MicroWave Link) 及び地上の光通信局とのリンク、軌道決定のための SLR 観測及び大気遅延補正に用いる ELT (European

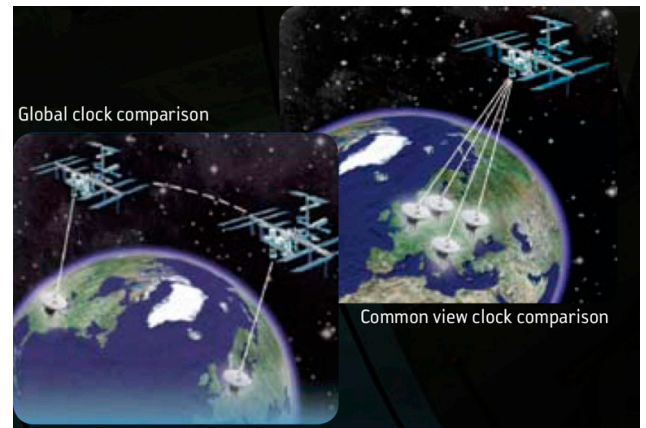


図5 ACES 実験での大陸間時間周波数比較の概念図。左は大陸間比較、右は欧州域を例に取った共通可視域 (供視法) での比較[70]。

Laser Timing) で全体の実験系が構成される。

2019 年現在、MWL は NICT のほか、PTB、パリ天文台時空標準機構 (SYRTE: Systèmes de Référence Temps Espace)、イギリス国立物理学研究所 (NPL: National Physical Laboratory)、JPL (米) 及びアメリカ国立標準技術研究所 (NIST: National Institute of Standards and Technology) の計 6 箇所に設置が予定されている。また、2 基の可搬型の MWL も整備され、ドイツ連邦地図測量庁 (BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) の Wettzell/GGOS 観測局、スイス連邦計量・認定局 (METAS: Federal Institute of Metrology)、あるいはイタリアの INRIM に設置しての実験や校正観測に用いられる。

ACES プロジェクトでは、ISS 上の原子時計を介して各機関の光周波数標準から周波数信号を受けた各 MWL 間での周波数比較実験を行うが、従来の GNSS や TWSTFT を 1 桁ないしは 2 桁<sup>りょうが</sup>凌駕する比較が可能とされる。これを検証するために、実験開始までには後述するように、PTB、SYRTE 及び NPL 間のファイバーリンクも確立し、定常観測ができるようになる予定である[69]。ISS は軌道傾斜角 51.6 度、軌道高度 400 km の軌道を 5,400 秒で周回するが、欧州域内や米国本土内では共通可視域にある ISS を介した供視比較 (Common view clock comparison) が可能である (図 5)。しかしながら、大陸間をまたぐ距離、例えば欧州 - 日本間、あるいは欧州 - 米国間では、双方の機関の共通可視域に ISS が入らないため、間接的なグローバル比較 (Global clock comparison) となる[70]。なお、ACES プロジェクトでは、実験機器の打ち上げ後、約 1 年半程度の実験期間を想定している。

## 4 まとめ

元来、地球の大きさや形状、あるいは重力を測る学



問である測地学(現在はこれらの時間変化も計測対象とする)と時間・周波数計測とは車輪の両輪とも言うべき関係にあった。本稿では詳しく述べなかったが、測地学と関連深い位置天文学も精密な時間計測なくしては成り立たない。前世紀の半ば過ぎまでは、地球の自転や公転に準拠した時刻が広く使われていたし、より長い時間スケールの時の体系である暦の基礎は天体観測から得られる[71][72]。その後のセシウム原子時計の発明と、これによる1967年の秒の定義の改定は宇宙測地技術の飛躍的な開発・実用化をもたらした。21世紀に入った現代において、例えばGNSSに代表されるように高精度な時間周波数比較を行ううえで宇宙測地技術は不可欠な存在であるが、今世紀に入ってから光格子時計の発明は、史上初めての重力ポテンシャルの直接測定という形で時間・周波数計測分野から今一度測地学へのフィードバックをもたらした。グローバルな潮流を見渡しても、光周波数標準器による秒の再定義をひとつの節目としつつ、時間・周波数計測と測地学の連携が一層深まることは間違いない。この潮流を踏まえ、NICTとしても、光周波数標準器の開発を更に進めるとともに、その利活用についての将来展望を示していく必要があると考えている。

## 謝辞

本稿は、時空標準研究室の皆さんや測地学研究者、特に東京大学、京都大学、国立極地研究所及び国土地理院の方々との議論を踏まえてまとめたものである。記して謝意を表する。

## 【参考文献】

- 1 藤枝美穂, 田淵良, 相田政則, 後藤忠広, "TWCP - 搬送波位相利用衛星双方向比較 -," 情報通信研究機構研究報告, vol.65 no.2, 5-2, 2019.
- 2 IERS Standards (1989), Dennis D. McCarthy (ed.), (IERS Technical Note no. 3), Paris: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, 1989.
- 3 IERS Standards (1992), Dennis D. McCarthy (ed.), (IERS Technical Note no. 13), Paris: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, 1992.
- 4 IERS Conventions (1996), D. D. McCarthy (ed.), (IERS Technical Note no. 21), Paris: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, 1996.
- 5 IERS Conventions (2003), Dennis D. McCarthy and Gérard Petit. (IERS Technical Note ; 32), Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004.
- 6 花土ゆう子, 細川瑞彦, 小山泰弘, 根津ひろみ, 小竹昇, 伊東宏之, 藤枝美穂, 後藤忠広, 市川隆一, 関戸衛, 井戸哲也, "時空標準活動に関する国際的枠組みへの貢献," 情報通信研究機構研究報告, vol.65 no.2, 7-1, 2019.
- 7 IERS Conventions (2010), Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). (IERS Technical Note ; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010.
- 8 D.W. Allan and M.A. Weiss, "Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite," Proceedings of Frequency Control Symposium, pp.334-336, 1980.
- 9 P. Defraigne and G. Petit, "Time transfer to TAI using geodetic receivers," *Metrologia*, vol.40, Issue 4, pp.184-188, 2003.
- 10 後藤忠広他, "4-2 GPS コモンビュー法," 通信総合研究所季報, vol.49, nos.1/2, pp.111-119, 2003.
- 11 後藤忠広, 森川容雄, "全視法による GSP 時刻比較の精度評価," 電気学会論文誌 C, vol.125, no.8, pp.1185-1190, 2005.
- 12 <http://www.igs.org/products>
- 13 J.F. Zumberge et al., "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks," *Journal of Geophysical Research*, vol.102, no.b3, pp.5005-5017, 1997.
- 14 Bevis et al., "GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system.," *J. Geophys. Res.* 97 (D14), pp.15787-15801, 1992.
- 15 <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov>
- 16 "CSRS-PPP: An internet service for GPS user access to the Canadian Spatial Reference frame," *Geomatica* 59(1):17-28, 2005.
- 17 Ge, M. et al., "Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions," *J. Geodesy*, 79: 103, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00190-005-0447-0>.
- 18 Ge M. et al., "Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations," *J. Geod.* 82 389-99, 2008.
- 19 Geng J. et al., "Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison," *J. Geod.* 84 569-81, 2010.
- 20 Gérard Petit et al., "1 × 10<sup>-16</sup> frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution," *Metrologia*, 52, pp.301-309, 2015. doi:10.1088/0026-1394/52/2/301.
- 21 高須他, "MADDOCA における PPP-AR 機能の拡張と評価," 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2 H13, 2015/10/7-9, かがしま県民交流センター, 2015.
- 22 M. Fujieda et al, "Advanced Satellite-Based Frequency Transfer at the 10<sup>-16</sup> Level," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol.65, Issue:6, pp.973-978, 2018. 10.1109/TUFFC.2018.2821159.
- 23 M. J. Coleman et al., "Considerations on GNSS Timescale Offsets," Timing Workshop ICG Joint Meetings, 14th June 2019, [http://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2019/Time\\_June2019/Time\\_June2019\\_07.pdf](http://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2019/Time_June2019/Time_June2019_07.pdf)
- 24 Spencer et al., "Comparison of VLBI, TV, and Travelling Clock Techniques for Time Transfer," *Proc. 13th PTTI*, p.231, 1981.
- 25 Hama et al., "Japan-US time comparison experiment for realizing better than 1-ns accuracy by using a radio interferometric technique," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, p.640, 1989.
- 26 Yoshino et al., "Development of VLBI time transfer system toward 0.1 nsec accuracy using transportable ground terminal for calibration," *Proc. IEEE IMTC/94*, vol.2, p.806, 1994.
- 27 Rieck C. et al., "VLBI Time-Transfer using CONT08 Data," *EFTF2010*, 2010. 10.1109/EFTF.2010.6533654.
- 28 Carsten Rieck et al., "VLBI Frequency Transfer using CONT11," *Eur. Freq. Time Forum* 163-5, 2012.
- 29 Clivati et al., "A VLBI experiment using a remote atomic clock via a coherent fibre link," *Scientific Reports*, vol.7, 40992, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep40992>
- 30 P. Krehlik et al., "Fibre-optic delivery of time and frequency to VLBI station," *A&A*, 603, A48, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730615>.
- 31 Takiguchi H. et al, "Comparison Study of VLBI and GPS Carrier Phase Frequency Transfer -Part II-, " *IVS NICT-TDC News*, no.30, 26-29, 2009.
- 32 Takiguchi H. et al., "VLBI and GPS carrier phase time and frequency transfer," *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, vol.57(3), pp.257-266, 2010.
- 33 Koyama Y., "The use of very long baseline interferometry for time and frequency metrology," *MAPAN* 27 pp.23-30, 2012.
- 34 Hobiger, T. et al., "Combining GPS and VLBI for inter-continental frequency transfer," *Metrologia*, 52, pp.251-261, 2015. doi:10.1088/0026-1394/52/2/251.
- 35 関戸他, "広帯域 VLBI システムの開発と測地・周波数比較実験の報告," 測地学会誌, 第 63 巻, 第 3 号, pp.157-169, 2018.
- 36 Sekido et al., "Broadband geodetic VLBI system and its application to optical clock comparison," *EGU General Assembly 2019*, EGU2019-12504, 2019.
- 37 Vermeer M., "Chronometric leveling," *Rep. Finn. Geod. Inst.* 83, 2, 1983.
- 38 Bjerhammar, A., "On a relativistic geodesy," *Bulletin Geodesique*, 59(3), pp.207-220, 1985.
- 39 P. Delva and J. Geršl., "Theoretical Tools for Relativistic Gravimetry,

- Gradiometry and Chronometric Geodesy and Application to a Parameterized Post-Newtonian Metric," Universe, 3(1):24, 2017.
- 40 Katori, H., "Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement," Proc. 6th Symp. on Frequency Standards and Metrology (ed. Gill, P.), pp.323-330, 2002.
- 41 Takamoto M. et al., "An optical lattice clock," Nature, vol.435, pp.321-324, 2005.
- 42 Katori, H., "Optical lattice clocks and quantum metrology," Nature Photonics vol.5, pp.203-210, 2011. DOI: 10.1038/NPHOTON.2011.45.
- 43 Yamaguchi, A. et al., "Direct comparison of distant optical lattice clocks at the  $10^{-16}$  uncertainty," Appl. Phys. Exp. 4, 082203, 2011.
- 44 Takano T., et al., "Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks," Nat. Photon., 10, pp.662-666, 2016.
- 45 野崎京三・新谷昌人, "原子時計をセンサーとした重力ポテンシャル計の可能性," 応用地質技術年報, no.33, pp.65-71, 2011.
- 46 田中愛幸ら, "光格子時計の地震・火山研究応用の可能性を探る," 地震ジャーナル, 65号, pp.36-44, 2018.
- 47 NHK, "サイエンス ZERO 「世界で最も精密 光格子時計」," 2018 年
- 48 Ido T., "Past and Future of Optical Clocks Toward Redefinition of the SI Second," IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, vol.68, no.6, pp.2183-2186, 2019.
- 49 Hachisu H. et al., "Direct comparison of optical lattice clocks with an intercontinental baseline of 9000 km," Opt. Lett., vol.39, no.14, pp.4072-4075, 2014.
- 50 H. Hachisu et al., "Months-long realtime generation of a time scale based on an optical clock," Sci. Rep., vol.8, Art. no.4243, 2018. DOI:10.1038/s41598-018-22423-5.
- 51 Predehl K. et al., "A 920-Kilometer Optical Fiber Link for Frequency Metrology at the 19th Decimal Place," Science 336, 441, 2012. DOI: 10.1126/science.1218442.
- 52 Relativistic Positioning Systems and their Scientific Applications (ed. Duncan James Barker), Acta Futura, Issue 7, 2013. DOI: 10.2420/ACT-BOK-AF.
- 53 P. Delva and J. Lodewyck, "Atomic clocks: New prospects in metrology and geodesy," Acta Futura, 07:pp.67-78, 2013. DOI: 10.2420/AF07.2013.67.
- 54 Delva P. et al., "Chronometric Geodesy: Methods and Applications," In: Puetzfeld D., Lämmerzahl C. (eds) Relativistic Geodesy. Fundamental Theories of Physics, vol 196. Springer, Cham, pp 25-85, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11500-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11500-5_2).
- 55 Droste, S. et al., "Optical-Frequency Transfer over a Single-Span 1840 km Fiber Link," Phys. Rev. Lett. 111, 110801, 2013.
- 56 Lisdat, C. et al., "A clock network for geodesy and fundamental science," Nature Communications, vol.7, 12443, 2016. <http://10.0.4.14/ncomms12443>.
- 57 Riehle F., "Optical clock networks," Nature Photonics, 11, pp.25-31, 2017. DOI: 10.1038/NPHOTON.2016.235.
- 58 Poli et al., "A transportable strontium optical lattice clock," Appl. Phys. B, 117:pp.1107-1116, 2014. DOI 10.1007/s00340-014-5932-9.
- 59 Grotti et al., "Geodesy and metrology with a transportable optical clock," NATURE PHYSICS, vol.14, pp.437-441, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41567-017-0042-3>.
- 60 Shen et al., "Determination of Gravitational Potential at Ground Using Optical-Atomic Clocks on Board Satellites and on Ground Stations and Relevant Simulation Experiments," Surv. Geophys., 38, pp.757-780, 2017.
- 61 Origlia et al., "Towards an optical clock for space: Compact, high-performance optical lattice clock based on bosonic atoms," Phys. Rev. A, vol.98, no.5, pp.053443, 2018. doi:10.1103/PhysRevA.98.053443.
- 62 Delva, P. and J. Geršl, "Theoretical Tools for Relativistic Gravimetry, Gradiometry and Chronometric Geodesy and Application to a Parameterized Post-Newtonian Metric," Universe, 3, 24, 2017. doi:10.3390/universe3010024.
- 63 Shen Z. et al., "Formulation of Determining the Gravity Potential Difference Using Ultra-High Precise Clocks via Optical Fiber Frequency Transfer Technique," J. Earth Sci., 30: 422., 2019. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0834-0>.
- 64 EGU, "Session G4.2 Modern Concepts for Gravimetric Earth Observation and Geodesy," <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/session/30370>, 2019.
- 65 Mehlstäubler, T. E. et al., "Atomic clocks for geodesy," Reports on Progress in Physics, vol.81, 2018, 064401, 10.1088/1361-6633/aab409.
- 66 Relativistic Geodesy Foundations and Applications, Editors: Pützfeld, Dirk, Lämmerzahl, Claus (Eds.), Springer. ISBN 978-3-030-11499-2, 2019.
- 67 宮原伐折羅他, "国土地理院の重力測定の展望 - 測定技術と重力基準の将来像 -, " 国土地理院時報, no.131, pp.95-108, 2018.
- 68 Luigi Cacciapuoti and Christophe Salomon, "Atomic Clock Ensemble in Space," Journal of Physics: Conference Series 327, 012049, 2011. doi:10.1088/1742-6596/327/1/012049.
- 69 L. Cacciapuoti et al., "Atomic clock ensemble in space," Proceedings of 52nd Rencontres de Moriond on Gravitation (Moriond Gravitation 2017) : La Thuile, Italy, March 25-April 1, 2017.
- 70 [http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/others/aces\\_flyer.pdf](http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/others/aces_flyer.pdf)
- 71 片山真人, "暦の科学," ベレ出版, 2012.
- 72 石原幸男, "暦はエレガントな科学," PHP 研究所, 2014.



市川隆一 (いちかわ りゅういち)

電磁波研究所  
時空標準研究室  
研究マネージャー  
博士(理学)  
宇宙測地学、地球物理学