

## 5-3 準天頂衛星計画

### 5-3 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) Project

浜 真一 高橋靖宏 木村和宏 伊東宏之 雨谷 純

HAMA Shin'ichi, TAKAHASHI Yasuhiro, KIMURA Kazuhiro, ITO Hiroyuki, and AMAGAI Jun

#### 要旨

2010年9月11日に、準天頂測位衛星の初号機(QZS-1) (愛称: みちびき)が打ち上げられた。本稿ではこの準天頂衛星プロジェクトの意義と経緯、およびプロジェクトの中で情報通信研究機構(NICT)が果たす役割について紹介する。なお準天頂衛星システムの詳しい技術的内容については、別途論ずる機会を持つこととしたい。

The first satellite "Michibiki" of the Quasi-zenith satellite system (QZSS) was launched on September 11, 2010. This paper introduces the features and the history of the QZSS project and the role of the National Institute of Information and Communications Technology (NICT) in the project. The technical details of the QZSS will be discussed in a different opportunity.

#### [キーワード]

準天頂衛星, QZSS, 測位衛星, 衛星双方向時刻比較

Quasi-zenith satellite system, QZSS, Navigation satellite, TWSTFT

## 1 まえがき

今や、カーナビ等の日常的な応用だけでなく、測量や携帯電話基地局の時刻同期、その他多くの分野で衛星測位システムはなくてはならない存在となっている。従来は衛星測位は米国が管理運営するGPS(全地球測位システム)とロシアのGLONASSのみであったが、他国のシステムに頼る脆弱性を避けるためか、EU、中国、インドも独自の衛星測位システムを確立しようとしている。我が国は、準天頂衛星システムの研究開発を行い、当面はGPSの補完・補強をめざす政策を選択した。

の場合は特に高層ビルの谷間や山陰では移動体の位置によって頻繁にシャドウイングやマルチパスが発生する。これを避けるためには衛星が高仰角に位置するのが望ましい。そこで衛星の軌道面を傾け、周期的に衛星が高仰角に来るような軌道が、1972年RRL(電波研究所; 現NICT)の高橋から提案された[1]。当時はこの軌道を維持するために多くの燃料が必要と思われていたが、さまざまな軌道の研究[2]の結果、静止軌道と同程度の燃料消費で準天頂軌道を利用できることがわかり、準天頂軌道の利用が現実的なものとなってきた。

なお、当時は準天頂軌道は移動体向けの通信・放送への利用が主として考えられていた。

## 2 準天頂衛星プロジェクトの成立と経緯

### 2.1 準天頂軌道の検討

静止衛星は、東京近辺の地上からは南方の仰角45度近辺に見える。固定局の場合は衛星がよく見える場所にアンテナを設置すれば良いが、移動局

### 2.2 測位衛星システム開発の契機

1990年代に入ってGPSの利用がめざましく進む一方、選択利用性(SA)によって精度の劣化を強要される(2000年5月に解除)という経験もあり、米軍のシステムであるGPSのみに頼らず(さらにGLONASSにも頼らず)我が国独自で測位衛星技術またはシステムそのものを有すべきという

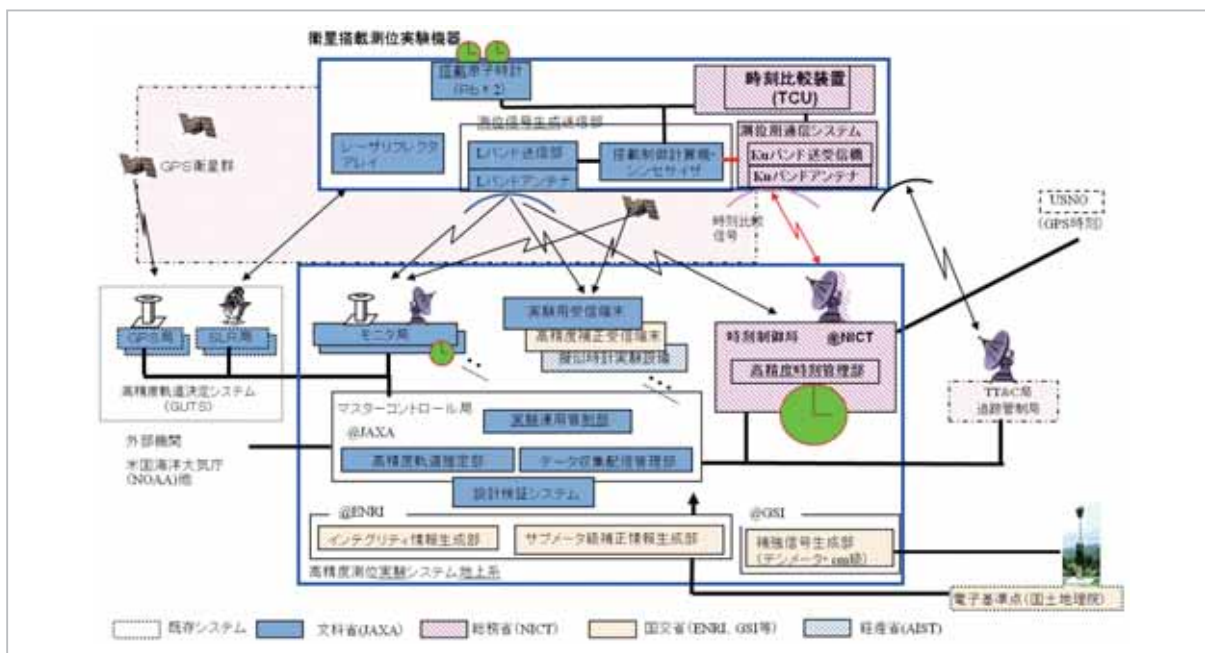


図1 準天頂衛星を用いた高精度測位システムの構成と各省の分担

議論が起こった。

1997年の宇宙開発委員会 衛星測位技術分科会の答申「我が国における衛星測位技術開発への取り組み方針について」において、「衛星搭載用原子時計」、「衛星群時刻管理技術」、「高精度衛星軌道決定技術」の3点が、我が国が独自で開発すべき要素技術として報告された。なおこの頃、ヨーロッパでは独自の衛星測位システムとしてのGalileo計画が具体化していた。

このような背景のもとで準天頂衛星システム(QZSS)を開発しようという気運が高まり、2002年には産・官が連携して「準天頂衛星システム開発・利用推進協議会」が組織された。同年12月には総合科学技術会議で「国家的に重要な研究開発」との評価[3]を受け、これに基づいて2003年度より産官連携での準天頂衛星システム開発のプロジェクトが開始された。民間は通信・放送ミッションを受け持ち、国は文部科学省、総務省、経済産業省、国土交通省の4省とその関連機関が測位ミッションを担当することとなった。図1に準天頂衛星を用いた高精度測位システムの構成と各省の分担を示す。

測位信号は後述のようにGPS民生信号との相互運用性をめざすが、GPSのような軍用の非公開サービスは想定せず、全て公開としているのが特

徴である。

### 2.3 測位衛星としての再出発

地上での携帯電話の急速な普及、ネットワークを流れる情報量の爆発的な増加とコストダウンなどにより、衛星を利用した通信・放送には当初期待されたような需要の伸びはなかった。そのため、準天頂衛星3機による通信・放送サービスの事業性が危ぶまれる状況となり、最終的に2006年3月をもって民間は本システム開発から撤退すると決断した。

2006年4月より、準天頂衛星システムは宇宙航空研究開発機構(JAXA)がとりまとめる国のプロジェクトとなり、ミッションも測位に絞ることとなった。2007年8月に施行された地理空間情報活用推進基本法(平成19年法律第63号)に基づき、政府の測位・地理情報システム等推進会議がその具体化を検討し、2008年4月に「地理空間情報活用推進基本計画」が閣議決定された。この中の「第Ⅱ部 第3章 衛星測位に関する施策 2. 衛星測位に係る研究開発の推進等 (3) 準天頂衛星システム計画の推進」では、以下のように述べられている。

「国が中心となって、1機の準天頂衛星(H-IIAロケットにより平成21年度に打上げ目標)を打ち上げ、総務省、文部科学省、経済産業省、国土交

通省による技術実証、民間、府省庁等による利用実証を行う。〈中略〉

第1段階の技術実証・利用実証に引き続き、第1段階の結果の評価を行った上で、国と民間が協力して、初号機を含めた3機の準天頂衛星によるシステム実証を実施する第2段階へ進む計画とする。

民間は、第1段階の技術実証・利用実証の結果等も踏まえて事業化判断を行い、民間が事業内容、事業規模等に相応な資金負担を行うことで、計画を推進するものとする。」

(但し第2段階の具体的な開発主体は、本稿執筆時の2010年9月時点では未定である)

### 3 準天頂衛星システムの特長

#### 3.1 準天頂衛星軌道の特長

準天頂軌道では日本上空の天頂付近に衛星が来るのは数時間であり、高仰角の可視性を24時間365日享受するためには複数の衛星が必要となる。類似のシステムとして米国のSiriusという放送衛星があるが、そこでは3機の衛星を離心率0.27の楕円軌道に配し、米国上空で長時間滞空するようにしている。

準天頂衛星システムにおいても、故障時の対応を含めた衛星の個数、軌道傾斜角、楕円軌道の形状についてさまざまな検討がなされた。東西南北に広がっている我が国からの可視性を重視した結果、衛星数を3個、軌道傾斜角を $43 \pm 4$ 度、また離心率を $0.075 \pm 0.015$ として上下非対称の「8の字」軌道とした。各衛星は $120^\circ$ ずつずらした軌道面に配置し、地表に投影した軌道は図2に示すようになる。これによって、例えば東京(静止衛星の仰角は $48^\circ$ 以下)では常に $75^\circ$ 以上の高仰角で衛星を利用することが可能となり、特にビルの谷間では有効である。図3に示すように、新宿のビルの谷間からでは静止衛星(実際は南方に見える)は見えない範囲が大きいのに反し、準天頂衛星の可視範囲が広いことがわかる。

#### 3.2 測位ミッションの目的

準天頂衛星システムの測位ミッションではGPSの補完・補強が目的であり、表1に示すようなL帯の信号をユーザに放送する。少なくとも近代化

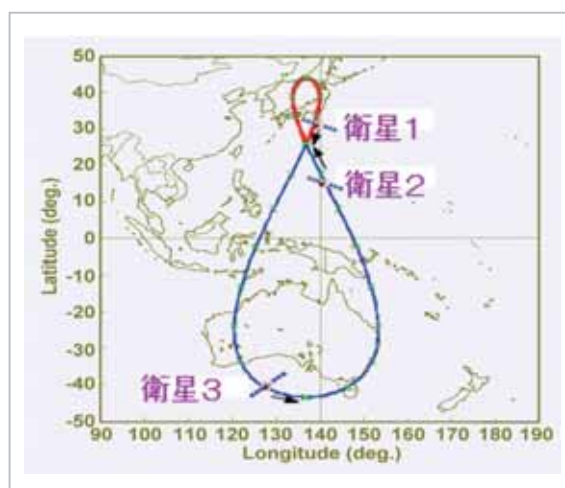


図2 地上に投影した衛星軌道



図3 最適軌道の例(非対称8の字)ビルの谷間からの、静止衛星と準天頂衛星の見え方の違い

GPS (GPS-III) が放送する全ての民生用信号をカバーするほか、L1-SAIF および JAXA による実験用の LEX 信号を放送する。信号の詳細は IS-QZSS<sup>[4]</sup>に譲る。

GPS と相互運用性を有した衛星が天頂付近に常に1個見えることにより、見える GPS 衛星数の不足が大幅に改善され、またより良い衛星配置(小さい DOP)を得られる機会が増える。この「補完」機能が最も大きな目的である。

さらに測位精度を改善するための「補強」機能がある。これは L1-SAIF または LEX 信号の航法



表 1 L 帯の信号の概要

名称	中心周波数 [MHz]	GPS の対応	特徴
L1-C/A	1575.42		最も広く利用されている民生信号
L1C	1575.42	2014 年以降対応	L1-C/A よりも広帯域・耐マルチパス
L2C	1227.60	2006 年より順次対応	第 2 の民生信号
L5	1176.45	2010 年より順次対応	第 3 の民生信号
L1-SAIF	1575.42	—	SBAS と類似の補強用信号 データは 250 b/s
LEX	1278.75	—	QZSS 独自の補強用信号 データは 2000 b/s GALILEO の E6 信号と同じ中心周波数

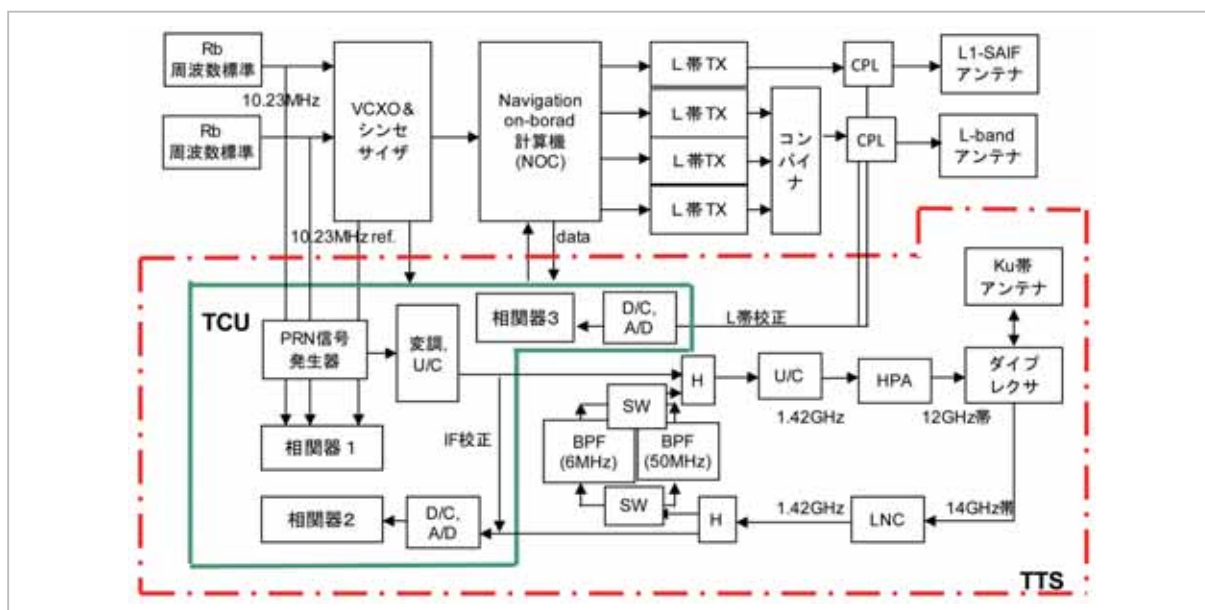


図 4 測位ミッションの搭載機器の構成(冗長系を除く)

太一点鎖線で囲まれたのが NICT 担当の TTS、太実線で囲まれたのが TCU (時刻比較装置)

メッセージで電離層情報等のデータをユーザに放送するものである。

## 4 NICT の研究開発する時刻管理系

### 4.1 NICT の担当ミッション

NICT は平成 15 年度より総務省から研究開発の委託を受け、従来からポテンシャルを有する実験用衛星搭載水素メーザーの開発、および高精度時刻管理系の開発と実験を行うことになった。

しかし水素メーザーについては準天頂衛星で使われる予定だった GPS 搭載用ルビジウム (Rb) 原子時計に比べ寸法、重量とも大きく、衛星搭載は

しないこととなった。BBM の開発で明らかとなった衛星搭載に伴って生じる使用寿命の問題、耐振動衝撃などの課題に対応したエンジニアリングモデル (EM) までの開発を行い [5]、宇宙環境を模擬した環境試験に耐えることを実証し、その結果をとりまとめた [6]。

### 4.2 搭載システムの開発

NICT のミッションは 1997 年の宇宙開発委員会衛星測位技術分科会報告における「衛星群時刻管理技術」に相当する。地上の基準局に対する衛星の時刻を知るため、NICT では衛星・地上間で双方向の時刻・周波数比較を行い、高精度の達成を

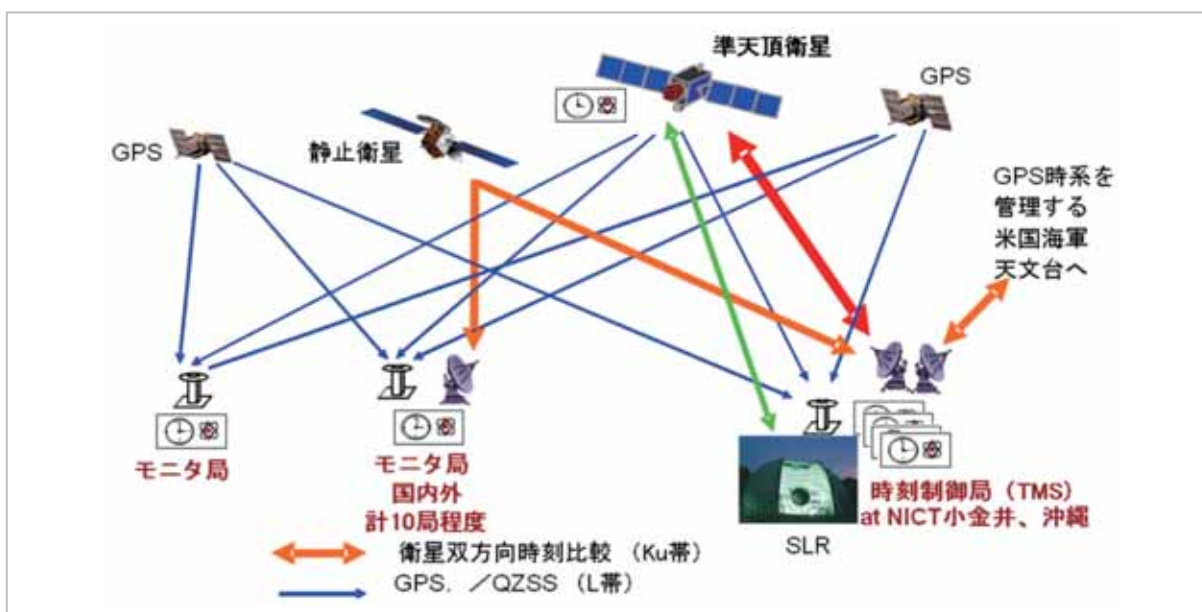


図5 地上系の構成

めざしている。また、産業技術総合研究所 (AIST) が実施する擬似時計実験<sup>[7]</sup>は NICT の搭載機器等の利用を前提としており、協力して実験を実施する予定である。

搭載機器 (TTS: Time Transfer Subsystem) は、心臓部である時刻比較装置 (TCU) と、地上局との間で信号を送受する Ku 帯の通信装置から構成される。搭載機器の構成を図 4 に示す (冗長系を除く)。機器の機能は以下である。

- (1) 搭載原子時計と TMS の原子時計間との時刻・周波数差を、Ku 帯の双方向時刻・周波数比較技術で計測する。
- (2) 搭載原子時計 (2 台の Rb 周波数標準と VCXO 経由で生成された衛星基準クロック) 同士の時刻差を計測する。
- (3) L1 (L1 C/A と L1-SAIF)、L2C、L5 信号間の時刻差を計測する。
- (4) ベントパイプ機能を利用した地上間の高精度時刻比較実験を行う。
- (5) TCU の機内遅延の校正を行う。

2007 年に EM の開発、環境試験とその評価が完了し、フライトモデル (PFM) の開発に入った。PFM は各コンポーネントの試験後、TTS としての試験、JAXA 開発の L 帯システム (LTS) との組み合わせ試験を経て、2009 年に衛星システムに引き渡された。衛星バスと組み合わせた試験も順調

に終了し、2010 年 5 月に射場のある種子島に運ばれ、9 月 11 日に打ち上げられた。

打ち上げ後約 3 ヶ月はバス系およびミッション系の初期機能確認試験を実施中 (本稿執筆の 2010 年 9 月時点) で、12 月から JAXA・AIST と協力して技術実証試験を行う。

### 4.3 地上セグメントの開発

地上系は、衛星との間で時刻比較を行うための時刻制御実験局 (TMS) と、モニタ局に設置する時刻管理部から構成される。概要を図 5 に示す。

TMS は日本標準時を生成・維持している NICT 本部 (東京都小金井市) に主局を、また 24 時間衛星が可視となる NICT 沖縄亜熱帯観測センター (沖縄県恩納村) に副局を設置した。TMS には、Ku 帯の送受信装置、搭載 TCU と同等な時刻比較用モデム、各種ソフトウェアを搭載した計算機群がある。小金井には 1.8 m 径、沖縄には 3.7 m 径の全天駆動型 Ku 帯パラボラアンテナを設置した。両局の間は衛星双方向時刻比較 (TWSTFT) によって、常に時刻比較を行っている。

L 帯信号を受信して衛星の軌道・時刻推定をするためのモニタ局は、JAXA が日本国内に 4 ケ所、海外に 5 ケ所設置している。NICT はモニタ局の時刻管理を行うため、このうち北海道のサロベツ局、小笠原の父島局の国内 2 ケ所とカウアイ

局(米国ハワイ州)に TWSTFT 機能を設置した。国内の他の2ヶ所の JAXA モニタ局は小金井と沖縄であるが、この両局は TMS として時刻比較を行うので、計5局の地上局の時刻が双方向技術を用いて高精度に管理されることになる。なおカウアイ局は NASA のコケエパーク地球物理観測所 (KPGO) 内に設置されるが、ここは NICT 本部と米国海軍天文台 (USNO) の中間にあり、日米間 TWSTFT の中継点としても機能する。

#### 4.4 国際的な対応

準天頂衛星システムは、GPS との電波干渉調整、相互運用性の確保、海外モニタ局の設置などのため、日米 GPS 全体会合の枠を利用して 2002 年から GPS/QZSS 技術ワーキンググループを精力的に実施している。時刻管理システムとしては、GPS 時刻と QZSS 時刻との関係を調整するため、NICT・USNO の間で GPS QZS 時刻オフセット

(GQTO) インターフェイス管理文書 (ICD) [8] を 2004 年に制定した。

さまざまな GNSS の調整の場としては国連の下に ICG (国際 GNSS 委員会) [9] がある。時刻管理に関しては、WG-D「Reference Frames, Timing and Applications (RFTA); 座標系・時系とその応用」の中にできた時系に関するタスクフォースに、2009 年から参加している。

#### 最後に

準天頂衛星システムの設計・開発について、今江理人氏(現 AIST)、森川容雄氏(現 アンリツ)、総務省宇宙通信政策課の担当の方々の貢献に感謝する。また JAXA、AIST、日本電気、NEC 東芝スペースシステム、アンリツ、三菱電機、その他関連メーカーの方々、専攻研として活躍された方々にも、この場を借りて感謝する。

#### 参考文献

- 1 高橋耕三, "人工衛星の軌道とそれに適したミッション," 電波研究所季報, Vol. 18, No. 97, 1972.
- 2 Kazuhiro Kimura et. al., "Required Velocity Increment for Formation Keeping of Inclined Geosynchronous Constellations," 51th International Astronautical Congress, No. IAF-00-A. 7. 07, 2000.
- 3 「準天頂衛星システム」について、総合科学技術会議が実施する国家的に重要な研究開発の評価, 2002年12月.
- 4 IS-QZSS, <http://qzss.jaxa.jp/is-qzss/>
- 5 森川容雄 他, "準天頂衛星搭載水素メーザ原子時計の機能確認モデル開発," 電子情報通信学会論文誌 B, 2005年1月号.
- 6 Hiroyuki Ito et. al., "Development and performance evaluation of spaceborne hydrogen maser atomic clock in NICT," ION NTM 2007, B3, pp. 452-454.
- 7 Toshiaki Iwata et al., "Remote Synchronization System of Quasi-Zenith Satellites Using Multiple Positioning Signals for Feedback Control," ION NTM 2007, B3-4.
- 8 GPS QZS Time offset (GQTO) Interface Control Document (ICD).
- 9 中村真帆, 浜真一, "世界の衛星測位システムの開発計画と利用動向," 情報通信研究機構季報, 本特集号, 5-1, 2010.



はま しんいち  
**浜 真一**

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ研究マネージャー  
衛星測位システム、衛星通信



きむら かずひろ  
**木村和宏**

ユニバーサルメディア研究センター  
推進室室長  
衛星軌道



あまが い しゅん  
**雨谷 純**

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ研究マネージャー  
時刻周波数比較、電波干渉計

たかはし やすひろ  
**高橋靖宏**

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ主任研究員  
衛星通信、衛星測位システム

いとう ひろゆき  
**伊東宏之**

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ主任研究員  
博士(理学)  
原子周波数標準、光周波数標準