

日本標準時と周波数校正、 その他の話題

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)
時空標準研究室/
電磁環境研究室 標準校正グループ
関戸 衛

講演内容

- NICTの校正サービス
- 日本標準時とトレーサビリティ
- NICTの時間・周波数分野の研究開発
- その他の話題
 - 全球測位衛星システム（GNSS）を受信して得られる時間・周波数と計量トレーサビリティ

NICTの校正サービスメニュー

無線用測定器等の校正（電波法）

- 周波数計
- スペクトル分析器
- 電界強度測定器
- 高周波電力計
- 電圧電流計
- 標準信号発生器
- 周波数標準器

計量法に基づく校正

- 周波数標準器
- 標準電圧電流発生器
- 高周波電力計
- 高周波減衰器
- ループアンテナ

JCSS

JCSS

ASNITEに基づく校正（ILAC-MRA, IA-Japan）

- 周波数標準器

委託校正（上記法制度以外の校正）

- 周波数標準器、周波数計、高周波電力計、高周波減衰器、標準電圧電流発生器、電圧電流計、アンテナ、比吸収率測定装置

NICT 国立研究開発法人 情報通信研究機構 校正サービス

HOME 校正サービス 確認サービス 各種情報

申請および技術的内容について お問い合わせ

NICT Calibration Service

国立研究開発法人情報通信研究機構の校正サービス

無線用測定器等の校正はこちら 無線用測定器の確認はこちら

- 登録検査等事業者用測定器等の校正
- 計量法に基づく周波数標準器の校正 (JCSS)
- 計量法に基づく高周波電力計等の校正 (JCSS)
- 製品評価技術基盤機構の認定制度 (ASNITE) に基づく校正
- 委託校正
- 確認サービス

時間・周波数の定義の変遷～周波数標準

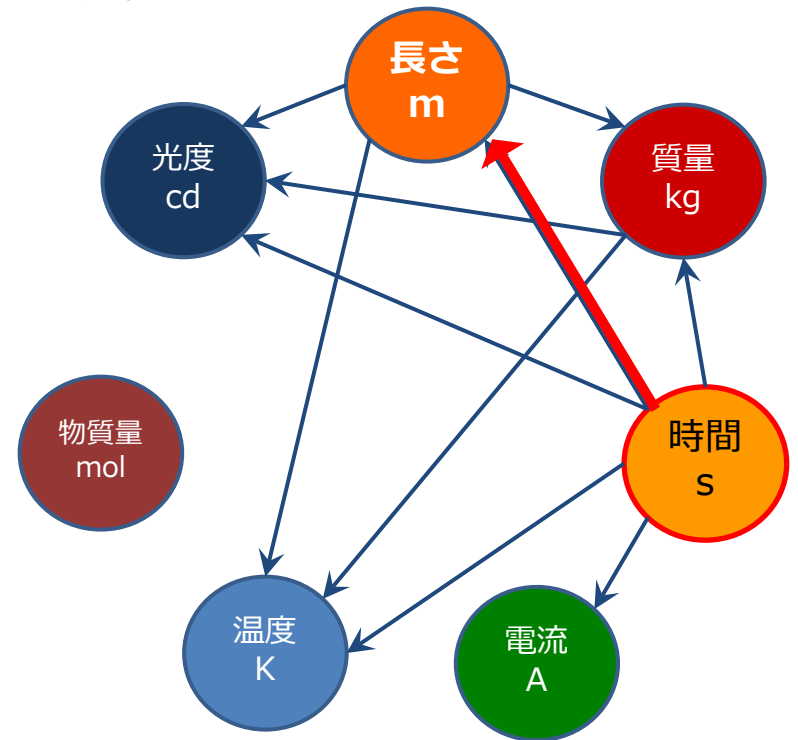
- 1935年国際天文学連合の総会において「秒は平均太陽日の86400分の1」と決議 **(自転周期)**
- 1960年第11回国際度量衡総会 (CGPM) 「秒は1900年1月0日12時に対する太陽年の $1/31556925.947$ 倍である」と決議 **(地球公転周期)**
- 1967年第13回国際度量衡総会 (CGPS) 「秒はセシウム133原子の基底状態の2つの超微細構造準位間の遷移に対する放射の9192631770倍の継続時間」
(原子の遷移周波数)

時間・周波数

- 時間間隔・周波数：もっとも正確に測定される量の一つ。
- Cs原子時計の放射する電磁波の周期を9,192,631,770回数える時間をSI単位系の「1秒」と定義されています。



世界的に広く使用されている
商用Cs原子時計
Agilent 5071A, Microsemi 5071A



SI国際単位の依存関係(2019~)

時系について

- UT (世界時) : 恒星時から作られる時系
 - UT0:観測地そのままの時系 (極運動を考慮していないため観測地点により異なる)
 - **UT1 : 極運動を考慮した地球上共通の地球の自転角を表す時系**
 - UT2:UT 1 の季節変化を計算して取り除いた時系。1972年のUTC導入以前の日常生活の基準であった。
- TT(Terrestrial Time):ジオイド (*) 上で定義された時系。
TT=TAI+32.184秒
 - (*) ジオイド : 地球の平均海水面に極めて良く一致する等重力ポテンシャル面
- T A I (国際原子時Temps Atomique International) : 世界各国の原子時計の加重平均から計算される座標時TTの実現値。
- **UTC (協定世界時Coordinated Universal Time):TAIを基に作られUT1と0.9秒を超えないように調整された時系**

原子時と「うるう秒」

国際原子時 (TAI)

特別調整

1972年1月1日0時において国際原子時 (TAI)と協定世界時 (UTC)との差が10秒になるように調整

協定世界時 (UTC)

1972年からオフセット方式を廃止し、「うるう秒」調整により UT1 に近似させている原子時 (1秒の長さが国際原子時(TAI) と同一)

うるう秒調整

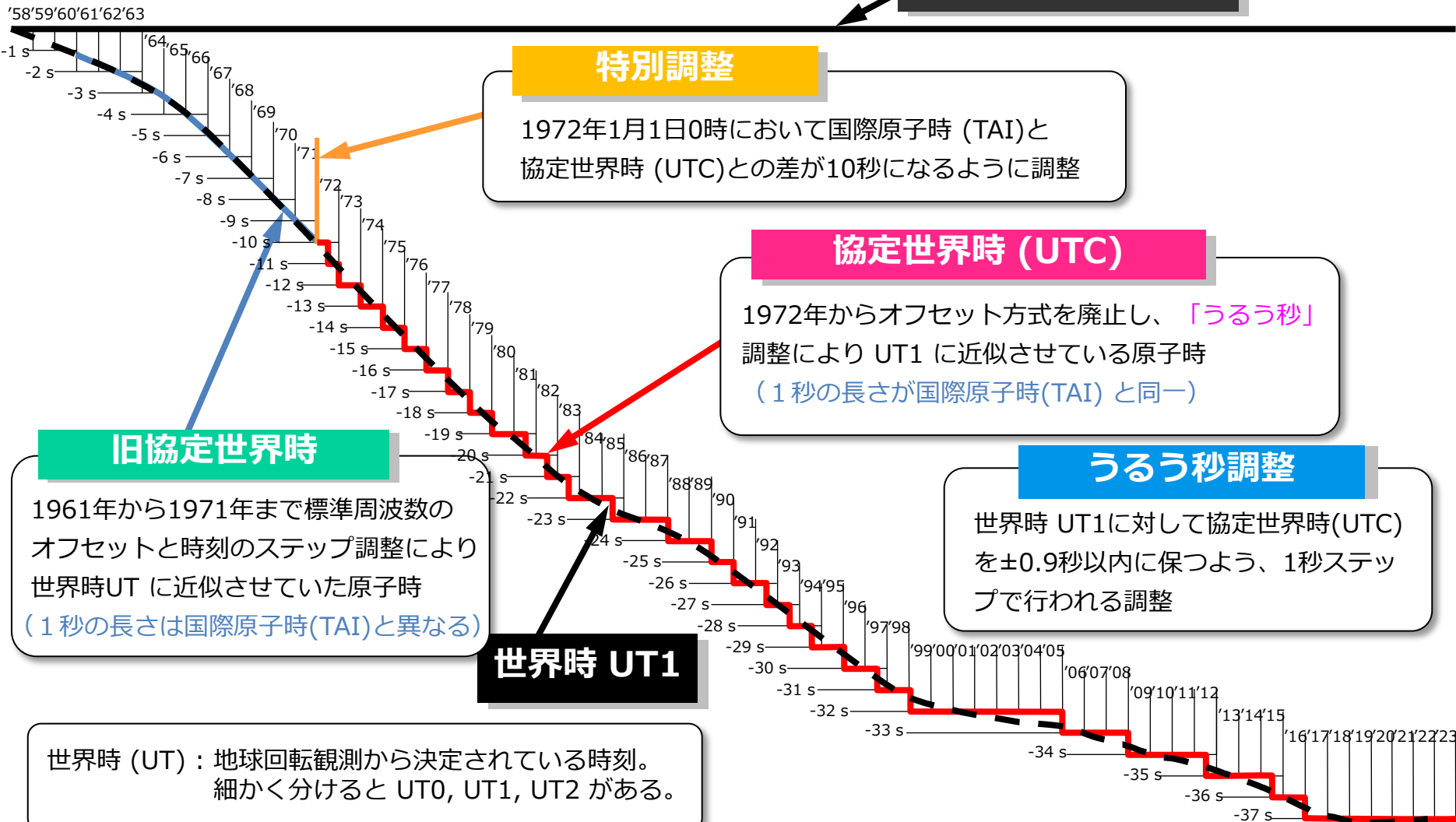
世界時 UT1に対して協定世界時(UTC)を±0.9秒以内に保つよう、1秒ステップで行われる調整

旧協定世界時

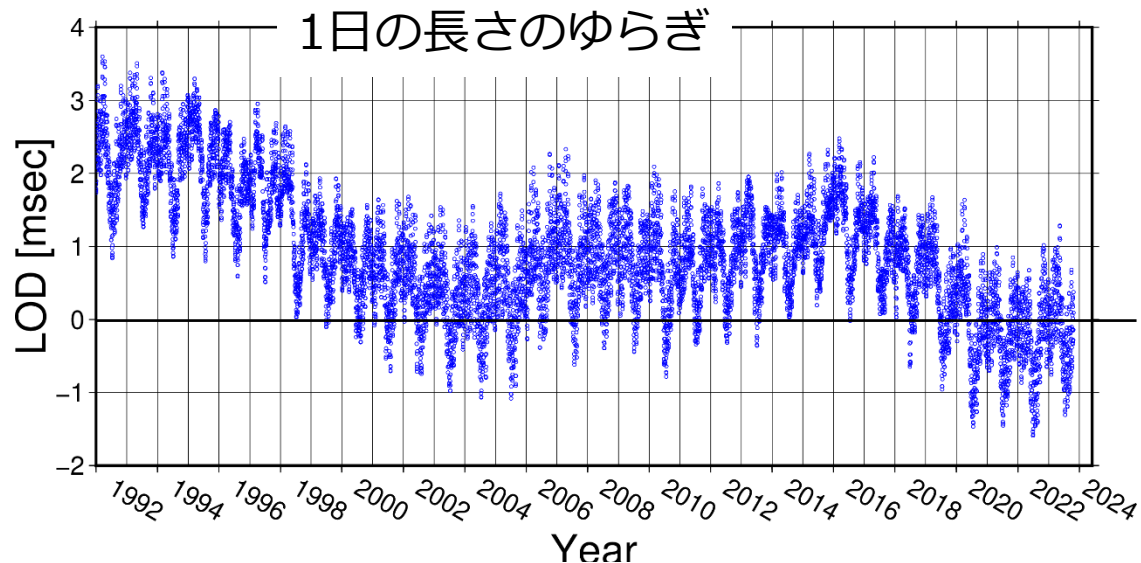
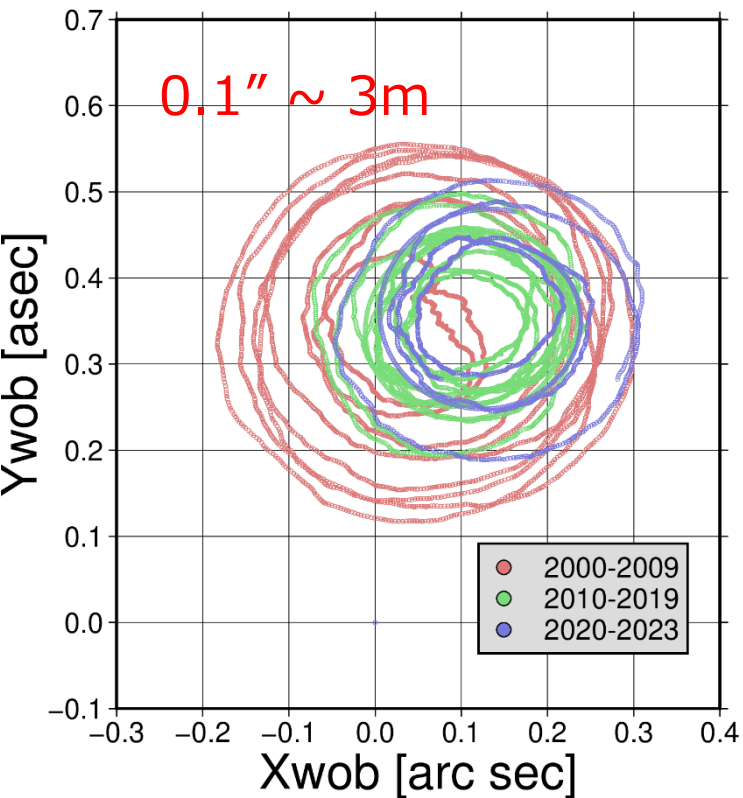
1961年から1971年まで標準周波数のオフセットと時刻のステップ調整により世界時UT に近似させていた原子時 (1秒の長さは国際原子時(TAI)と異なる)

世界時 UT1

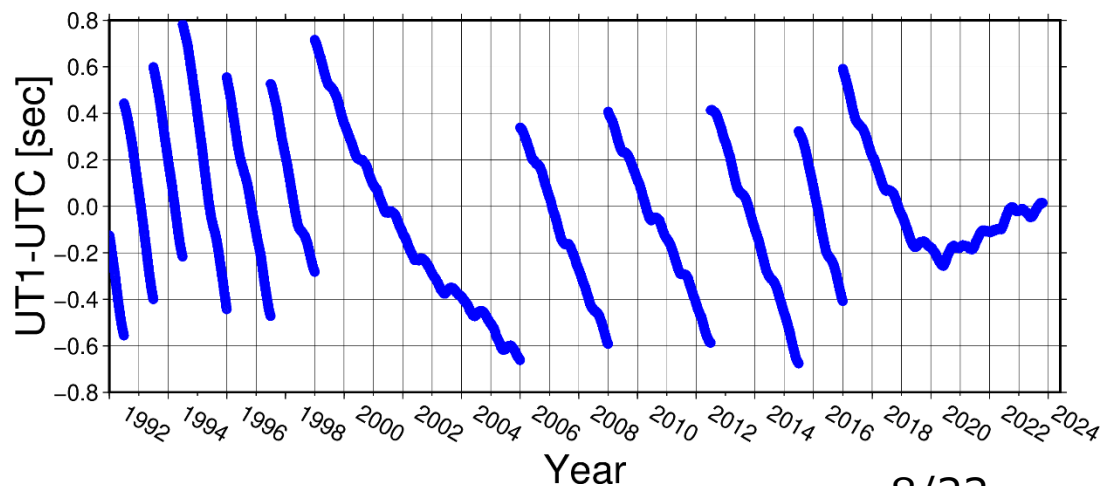
世界時 (UT) : 地球回転観測から決定されている時刻。
細かく分けると UT0, UT1, UT2 がある。



地球の自転のふらつきの大きさ



地球の自転で決まる時刻UT1とUTCの差



地球の自転軸の運動や自転速度変動はGNSS、SLR、VLBIなどの宇宙測地技術により測定されている。

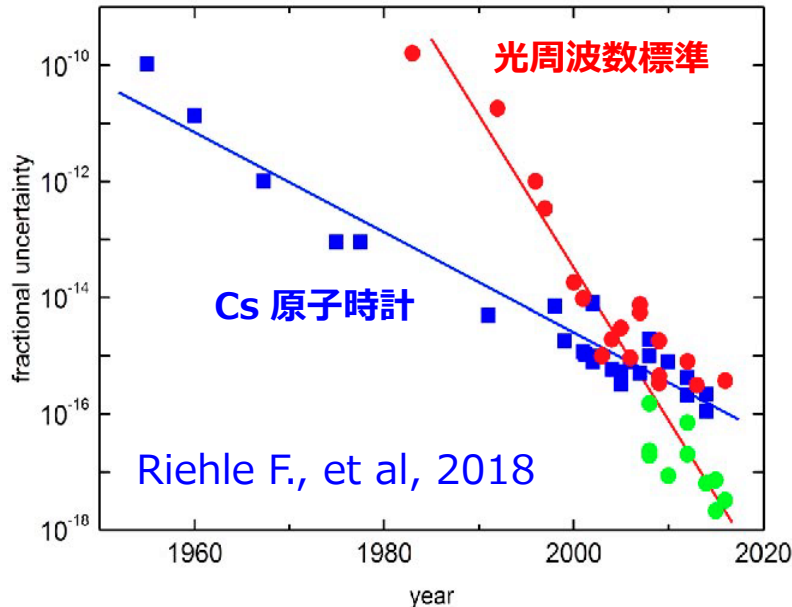
GNSS: 全球測位衛星システム

SLR: 衛星レーザ測距

VLBI: 超長基線電波干渉法

光周波数標準技術の急速な進展.

「秒」の2次表現として指定された28種類の原子遷移周波数



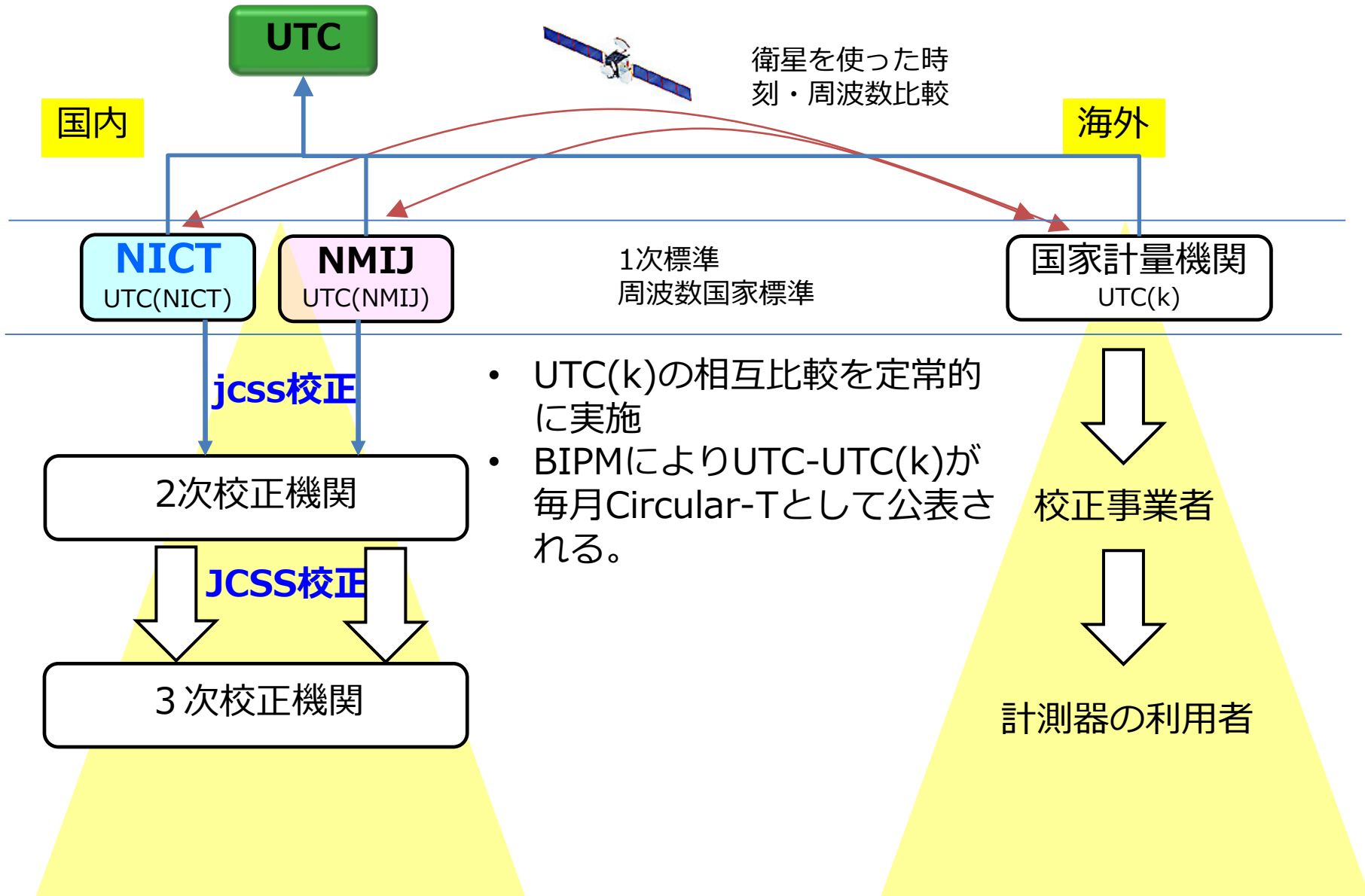
- 光周波数標準の不確かさは 10^{-18} に達し、
- 28種類の原子時計がSI「秒」の2次表現として選定されている。
- 「秒」の再定義に向けて、準備が進められている。

原子	周波数/波長	原子	周波数/波長
$^{155}\text{In}^+$	1267 THz/ 237 nm	I_2	490 THz/ 612 nm
H	1233 THz/ 243 nm	I_2	474 THz/ 633 nm
^{199}Hg	1129 THz/ 265 nm	HeNe	474 THz/ 633 nm
$^{27}\text{Al}^+$	1121 THz/ 267nm	I_2	648 THz/ 640 nm
$^{199}\text{Hg}^+$	1065 THz/ 282 nm	^{40}Ca	456 THz/ 657 nm
$^{171}\text{Yb}^+$	688 THz/ 436 nm	$^{88}\text{Sr}^+$	445 THz/ 674 nm
$^{171}\text{Yb}^+$	642 THz/ 467 nm	^{87}Sr	429 THz/ 698 nm
I_2	582 THz/ 515 nm	^{88}Sr	429 THz/ 698 nm
I_2	564 THz/ 531 nm	$^{40}\text{Ca}^+$	411 THz/ 729 nm
I_2	563 THz/ 532 nm	^{85}Rb	385 THz/ 778 nm
I_2	552 THz/ 543 nm	^{87}Rb	384 THz/ 780 nm
I_2	520 THz/ 576 nm	$^{13}\text{C}_2\text{H}_2$	194 THz/ 1.54 μm
^{171}Yb	518 THz/ 578 nm	CH_4	88.4 THz/ 3.39 μm
^{86}Kr	495 THz/ 606 nm	OsO_4	29.1 THz/ 10.3 μm
		^{87}Rb	6.835 GHz/ 43.9 mm

1 THz = 10^{12} Hz、1 GHz = 10^9 Hz

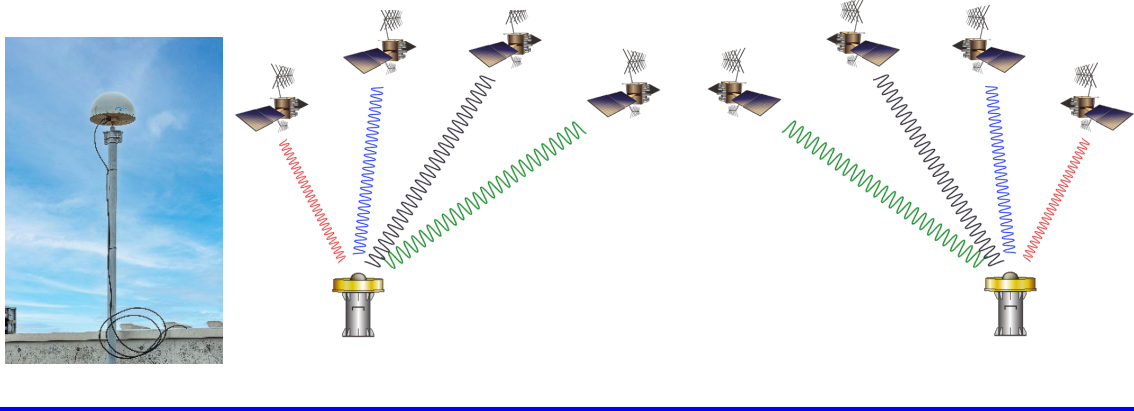
<https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies>

周波数国家標準と校正

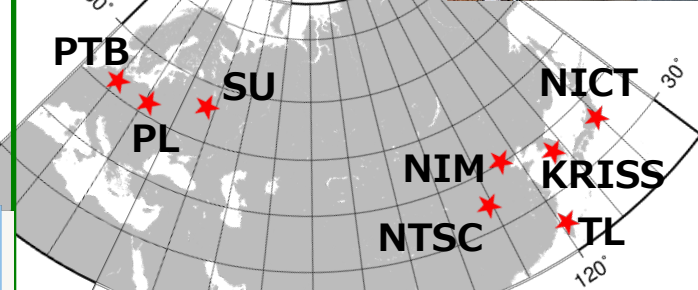
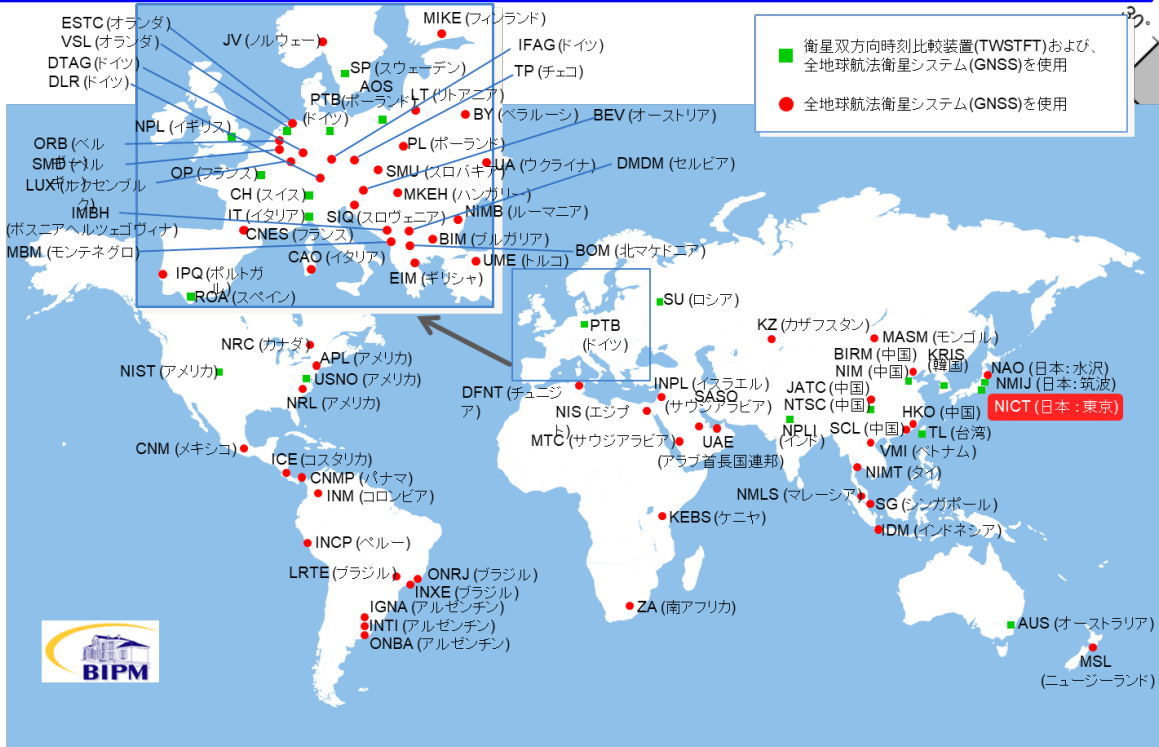
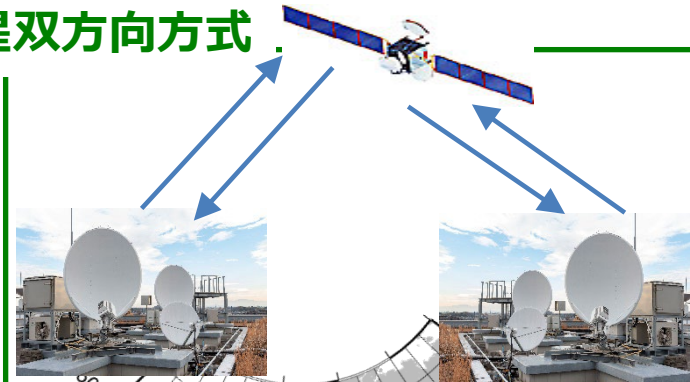


衛星を使った時刻・周波数の相互比較

GNSS受信による比較方式



衛星双方向方式



PTB: ドイツ、SU: ロシア、
PL: ポーランド、
NIM, NTSC: 中国、
KRISS: 韓国、TL: 台湾



NICTの衛星双方向比較モデム

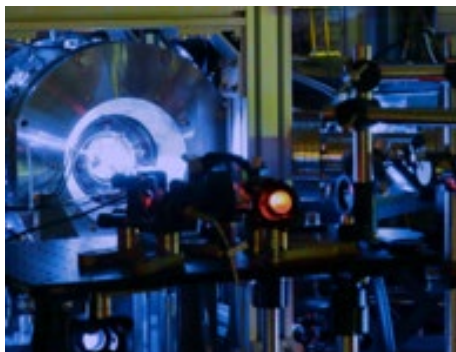
UTC(NICT)を基に日本標準時を生成・供給



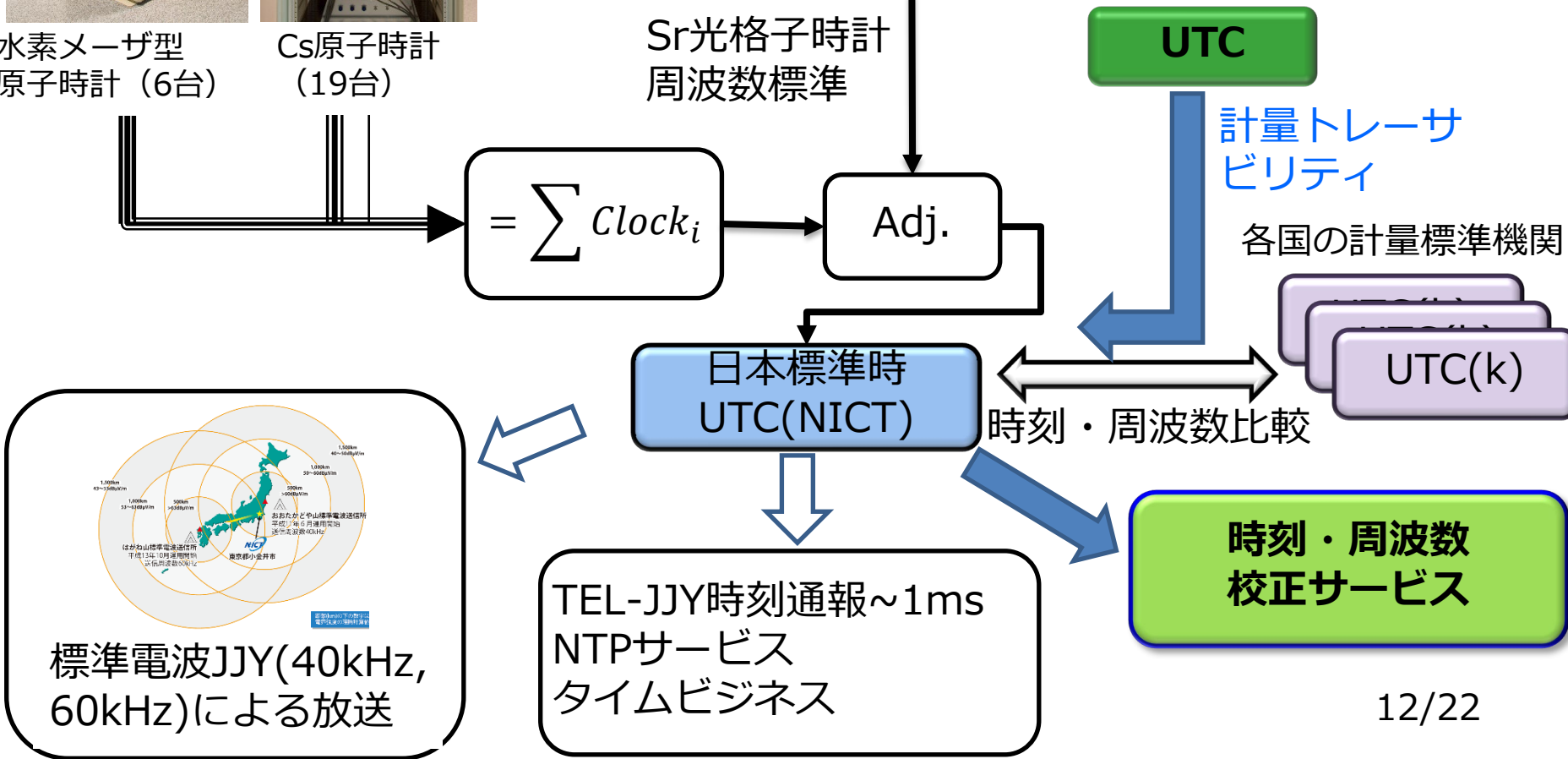
水素メーザ型
原子時計 (6台)



Cs原子時計
(19台)

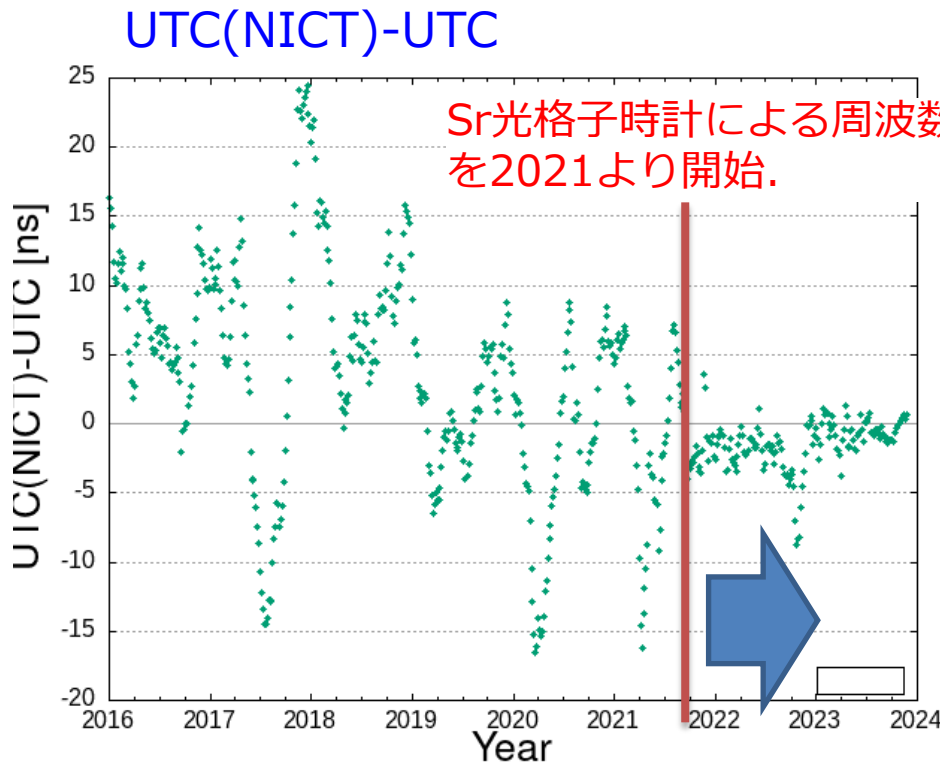
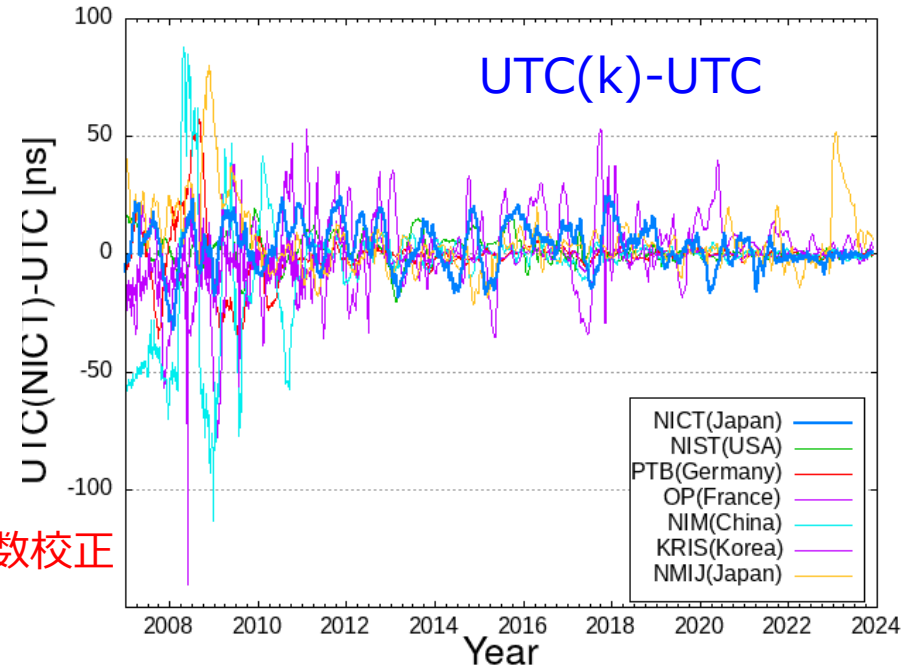


Sr光格子時計
周波数標準



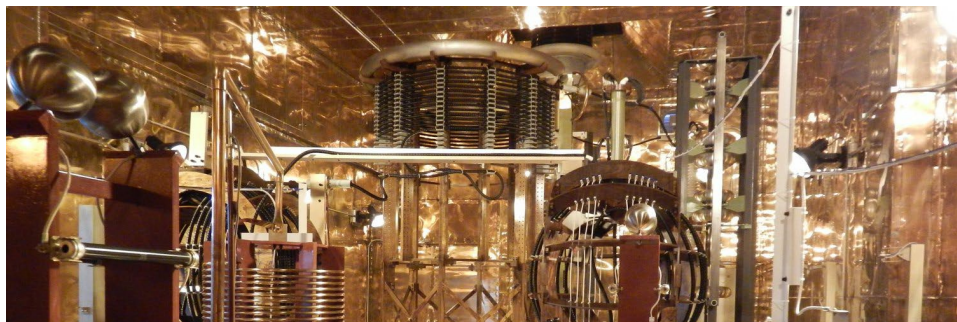
各国の時系UTC(k)と協定世界時UTC

各国の計量標準機関 (k) はそれぞれの原子時計群を運用し、相互比較を行ってデータをBIPM (国際度量衡局) に報告する。これにより各国の時刻と周波数が統一的に維持される。



NICTは2021年よりSr光格子時計を基準にしたUTC(NICT)の調整運用を開始した。これによりUTC (NICT)のUTCに対する差はより小さくなっている。

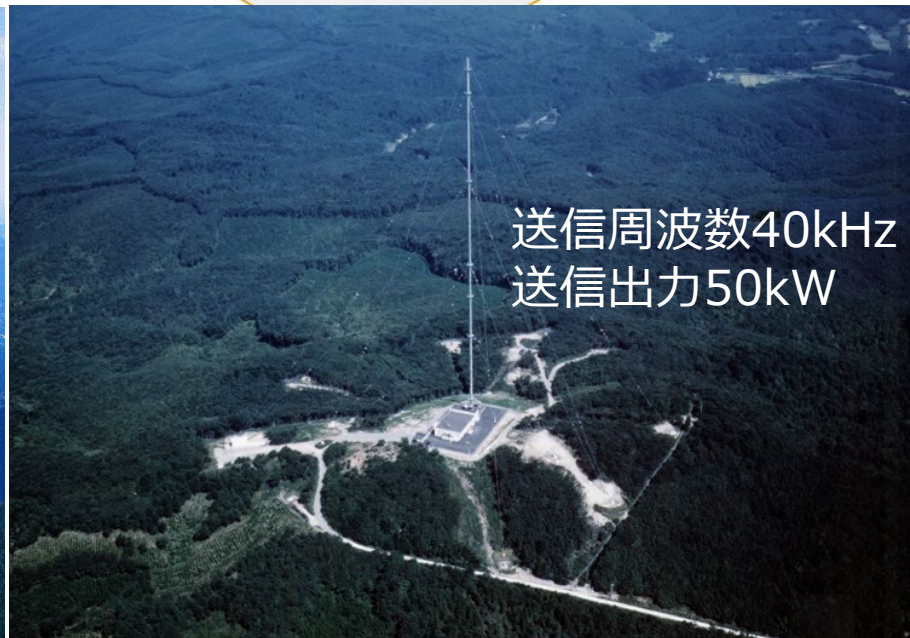
標準電波の送信局



送信所の整合器室



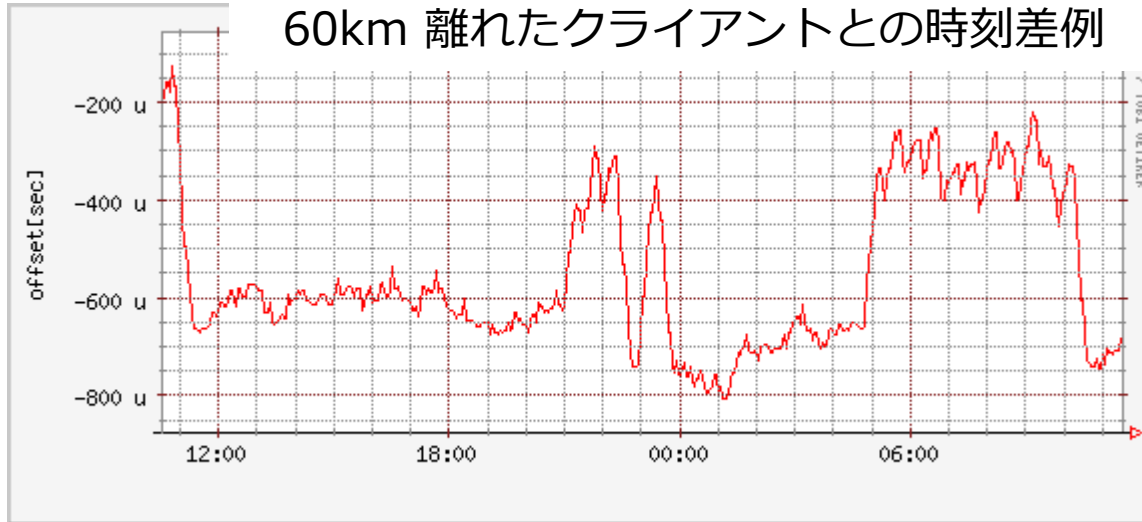
はがね山送信所（佐賀県/福岡県）



おたかどや山送信所（福島県）

NTPと光テレホンJJY

- NTP:サーバ側では10ns以内、クライアント側では通信環境によって変動する。



- 光電話回線による時刻供給システム（光テレホンJJY）
 - 拡張NTPプロトコルを使用（テレホンJJYと同等の情報）
 - 電話番号による1対1のセキュアな通信が可能
 - 通信速度は最低でも64kbpsの通信が可能
 - 時刻同期の不確かさは1ms以下
(平均200μsec, 95%不確かさ約400μsec)

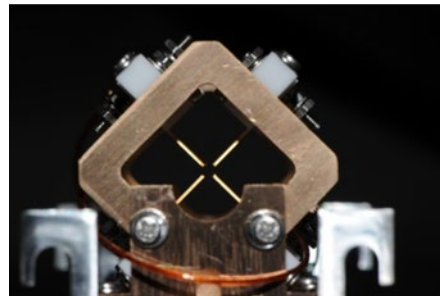
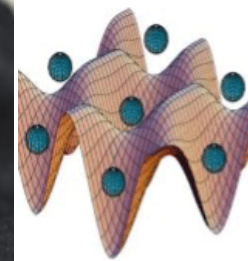
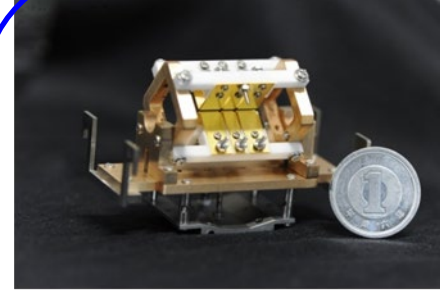


光テレホンJJY
ホストシステム

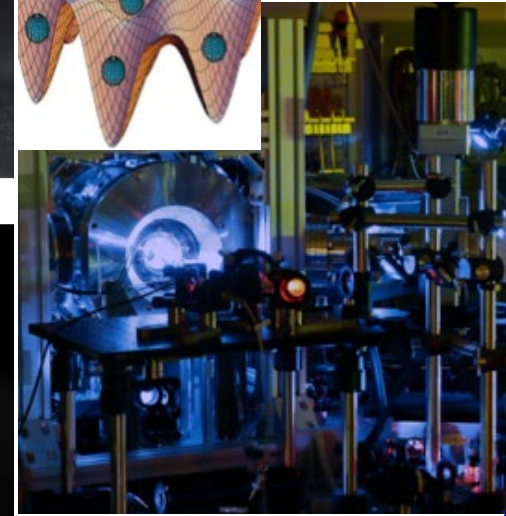
研究開発(時空標準研究室)



時刻周波数比較用 多周波GNSS受信機



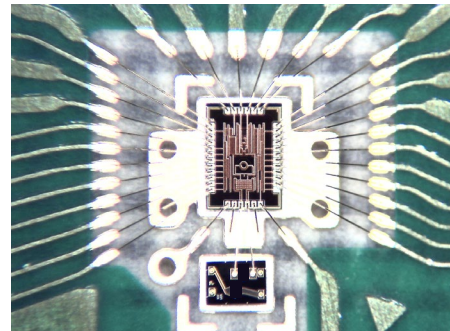
Inイオン光時計



Sr光格子時計



Wi-Wi 無線双方向時刻同期・測距システムの開発



チップスケール原子時計の開発

GNSS受信機から生成される周波数と時刻はUTC (協定世界時) にトレーサブルか？

答え：NO

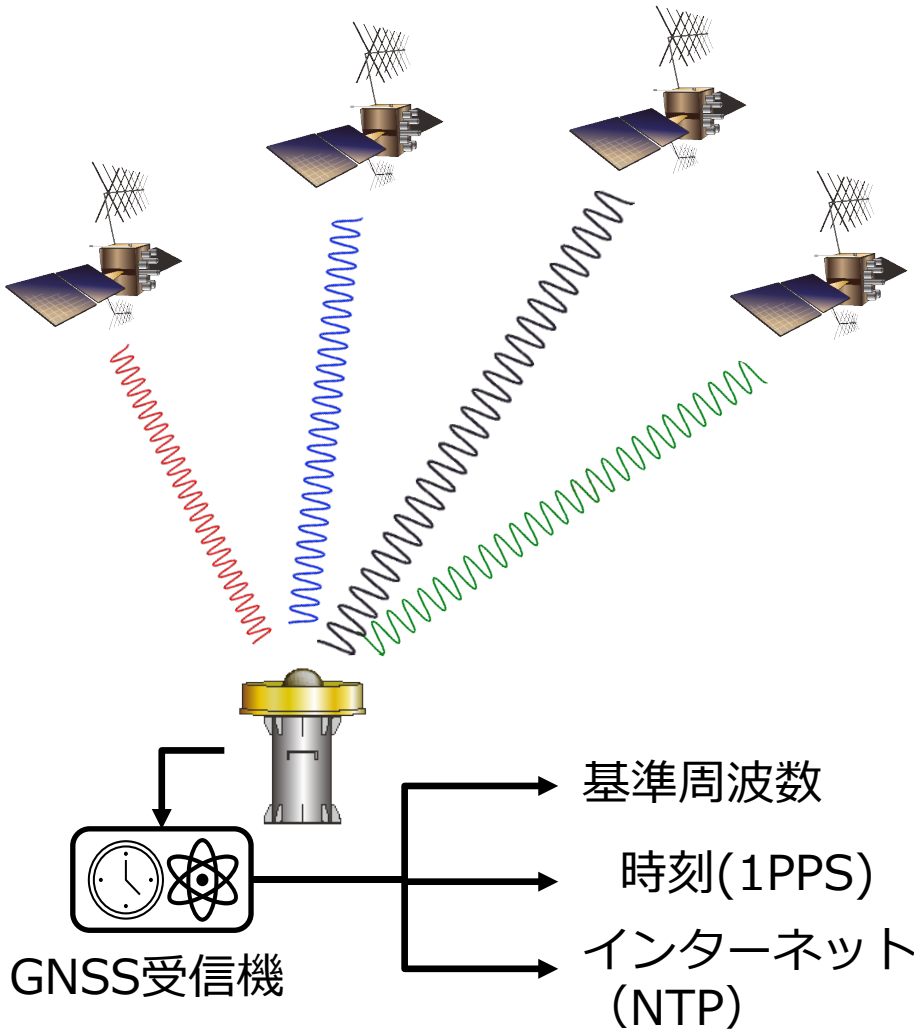
なぜか、考えてみましょう

GNSS信号を受信して5MHz,10MHzの基準信号や1 PPSの時刻情報を出し、NTPサーバとなる機器。

広く使われている時系として、電力、産業、金融、Networkの時刻として利用されている。

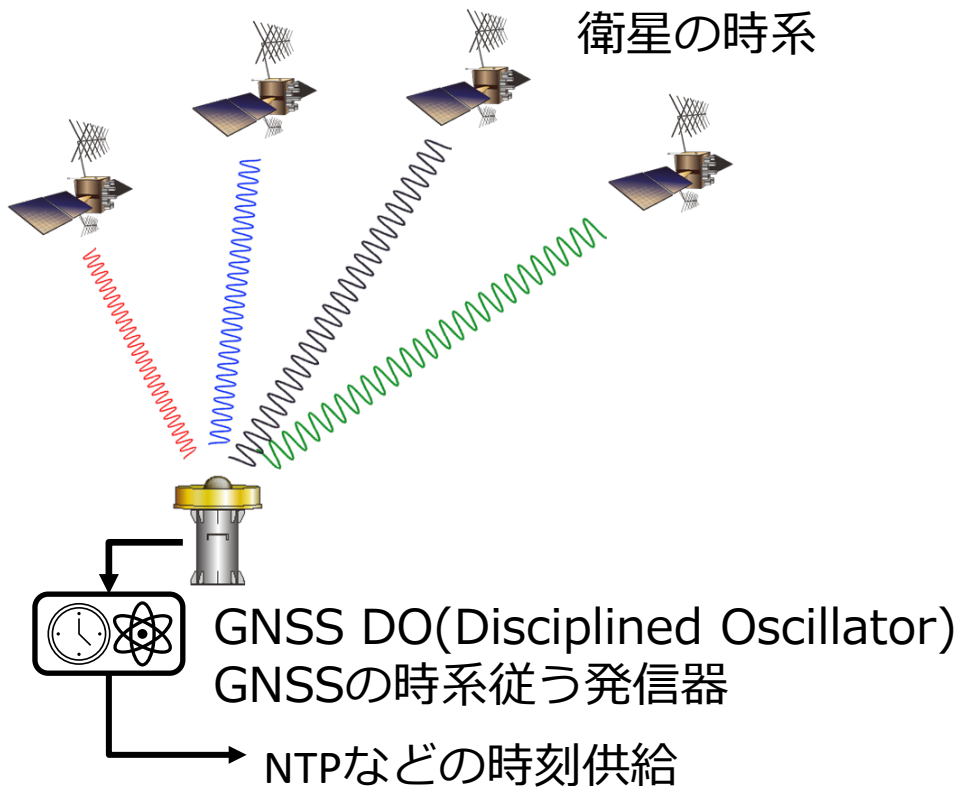
GNSS(全球測位衛星システム)とはGPS(米国)や、GLONASS(ロシア), GALILEO(欧州), BeiDou(中国), QZSS(日本)などの衛星測位システムの総称

NTP(Network Time Protocol)とはネットワーク(インターネット)につながった計算機やスマホなどの時計を同期する仕組み



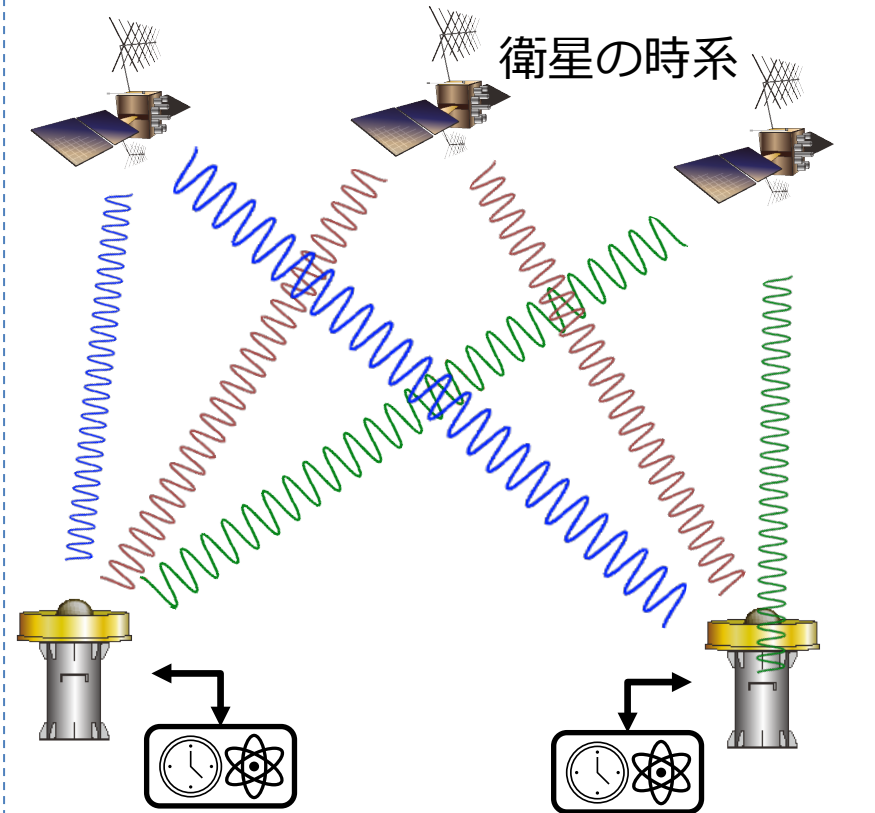
GNSS受信機で時刻を比較・取得する方法

A) オールインビュー法



衛星系が放送する時系を得て、これを自らの時刻とする。

B) コモン ビュー法



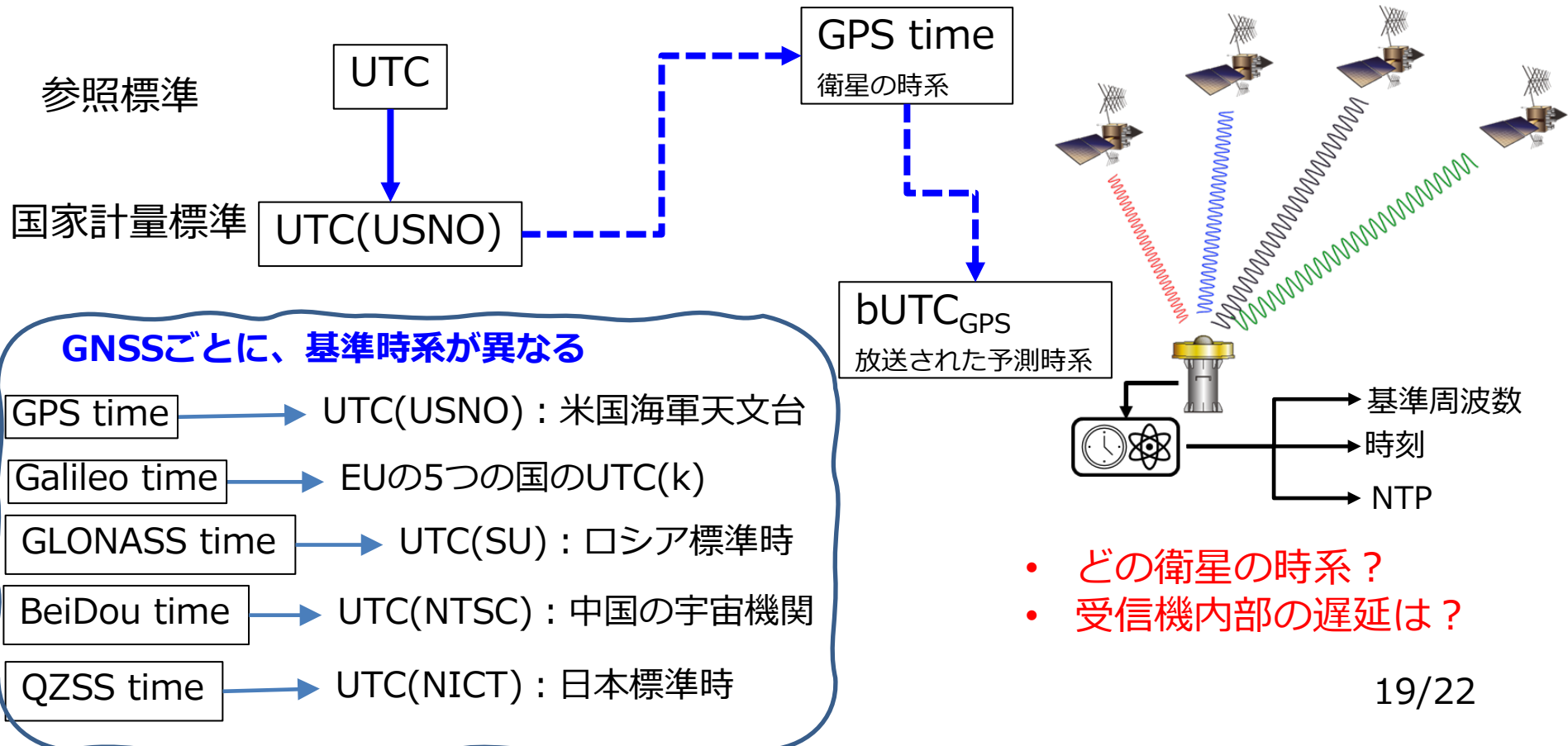
衛星系の時刻と自らの時系の差を取得し、差を取ることで衛星系の影響を消して離れた2つの時計を比較する。

A) オールインビュー法で時刻を得る場合

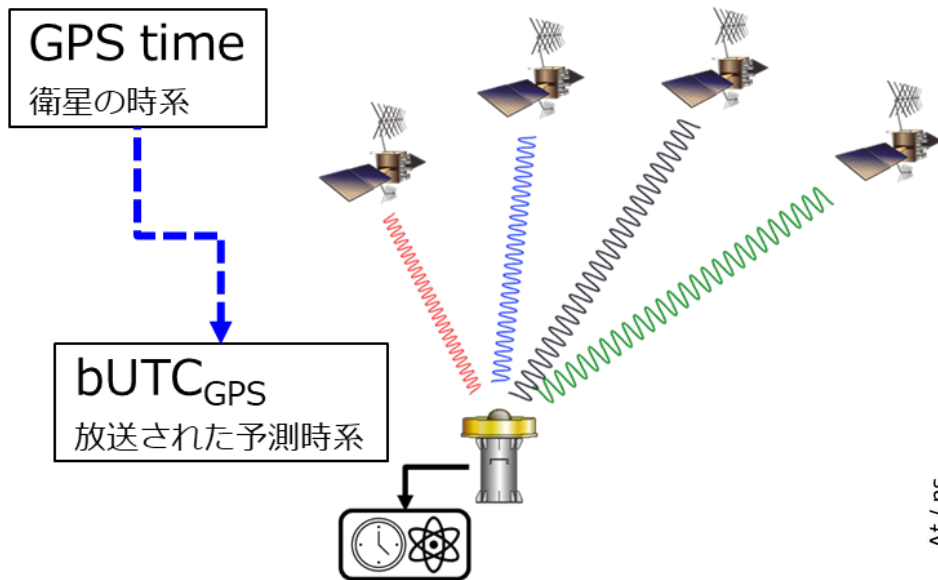
単純にGNSS受信機で受信され、生成された時系・周波数がそのままUTCにトレースアブルと言えない。

なぜか：

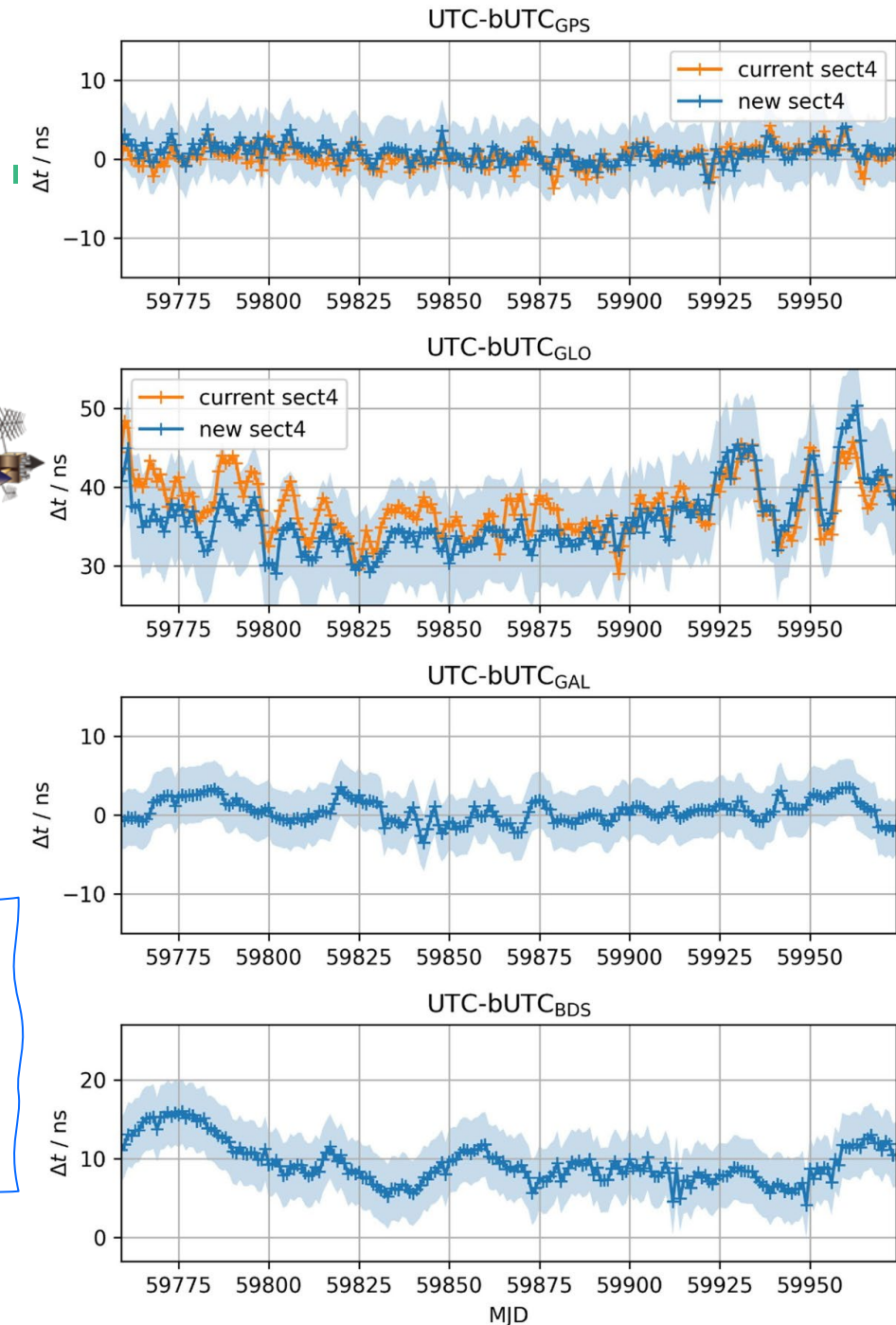
- ① 参照標準 (UTC) にさかのぼれる文書化された校正 (不確かさ評価) の連鎖がない。
- ② 衛星系 (GPS, Glonass, Galileo, Beidou, QZSS) 毎に時系はそれぞれ違う。
- ③ 受信機から出てくるタイミング (受信機内の遅延) が不明



放送される時系(bUTC)とUTCの差



BIPM (国際度量衡局) は各衛星系 (GPS, GLONASS, GLILEO, BeiDou) と UTC との差を Circular-T に含め公表することを決定。(但しこれだけでトレーサビリティが取れるわけではない。)

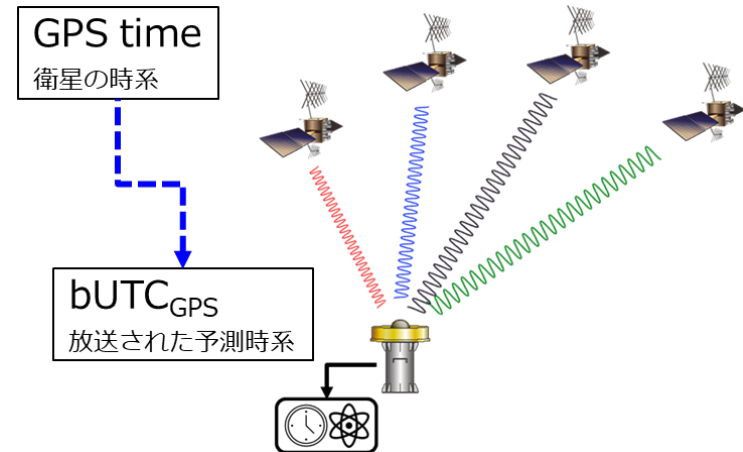


まとめ

GNSS受信機から生成される周波数と時刻はUTC（協定世界時）にトレーサブルか？

➡ 校正がなければ**NO**

- 「トレーサビリティ」「不確かさ」を必要としなければ、衛星受信して得られた時刻、周波数を得る有効なツール
- 「トレーサビリティ」とは度量衡の単位を校正する仕組みです。単位の精密さを必要とする用途では「トレーサビリティ」を考慮することが必要です。



ご清聴ありがとうございました