

2012.5.14@KEK

時間・周波数標準の現状と その応用

フレックタイム (株)
今江 理人

Freqtime

今江理人 (Michito Imae)

- 1976 郵政省電波研究所 (現情報通信研究機構) 入所
- ～1978 原子時系アルゴリズム
- ～1979 NTS-1 (測位技術試験衛星) による国際時刻比較
- ～1983 CS (実験用通信衛星) を用いた衛星双方向時刻比較
- ～1984 GPSを用いた国際時刻比較
- 1987-88 BIPM (在仏国際度量衡局) にて在外研究
- 1989-94 VLBI, ミリ秒パルサータイミング計測等
KSP (Key Stone Project) の整備
- 1995～ 精密時刻比較、ミリ秒パルサータイミング計測
長波標準電波施設整備
- 1999～ 精密時刻比較、衛星測位基盤技術
- 2004～ (独) 産業技術総合研究所へ移籍
時系の高度化、時刻比較の高度化、
時間・周波数遠隔校正技術の開発
- 2012～ 産総研を退職し、産総研技術移転ベンチャー
(フレックタイム (株)) で時間・周波数標準関連
機器開発に従事

Freqtime

内容

1. 秒の定義と時間・周波数標準の国際的枠組み
2. マイクロ波帯時間・周波数標準器
3. 光周波数標準と秒の再定義に向けた動向
4. 時間・周波数比較技術
5. 時間・周波数供給技術
6. まとめ

Freqtime

秒の定義と時間・周波数標準 の国際的枠組み

Freqtime

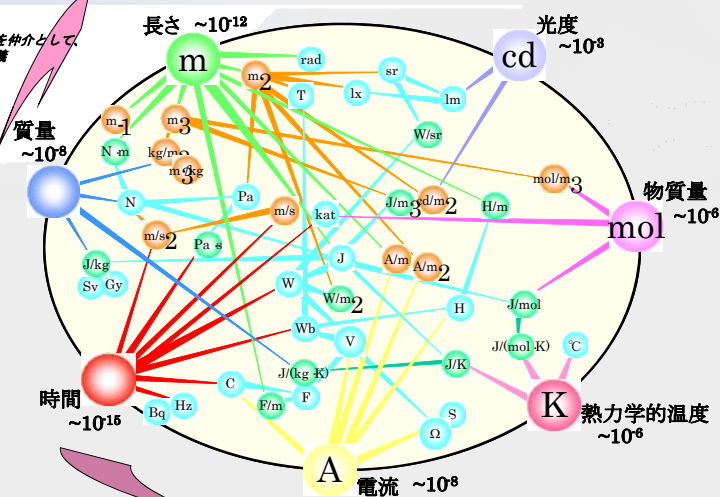
時間・周波数標準に関する国際機関等

- 計量標準としての秒の定義
メートル条約に基づく国際度量衡総会（CGPM）／国際度量衡委員会（CIPM）とその傘下の時間周波数諮問委員会（CCTF）
最近では、秒の再定義に関連して、長さ諮問委員会（CCL）ともリンク
- 時刻の基準としての協定世界時（UTC）における「うるう秒調整」実施の決定
国際測地学及び地球物理学連合（IUGG）、国際測地学協会（IAG）傘下の国際地球回転観測事業（IERS）
- 協定世界時（UTC）の定義、特に「うるう秒」方式の再検討
国際電気通信連合無線通信セクター（ITU-R）

Freqtime

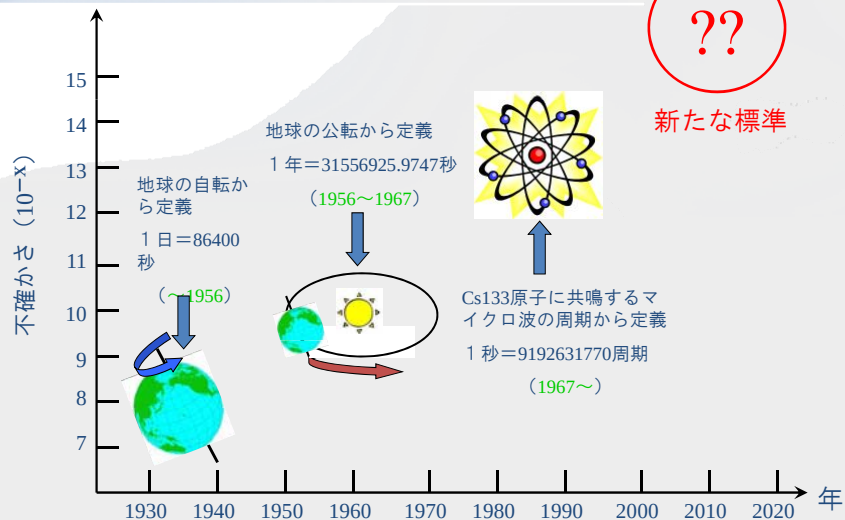
計量標準におけるSI単位系と時間・周波数標準

真空中の光速（定数値）を仲介として、
時間標準で長さの標準を定義
 $\lambda = c / \nu$



Freqtime $\nu_N = (h/2e) \cdot N \cdot \nu$

秒の定義の変遷

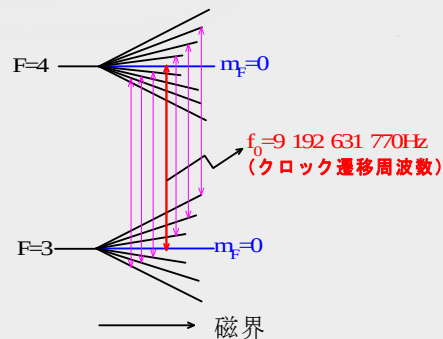


Freetime

現在の秒の定義

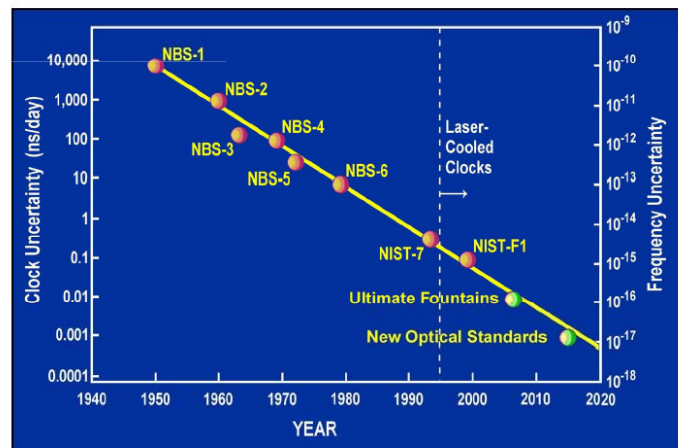
秒（周波数）の定義

秒はCs133原子の基底状態の二つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の周期の9 192 631 770倍の継続時間である



Freetime

セシウム一次周波数標準器の不確かさ向上の履歴



Freqtime

時刻標準・時系としてのTAI/UTCの仕組み

TAI : 国際原子時

International Atomic Time (英語表記)

Temps Atomique International (仏語表記)

UTC : 協定世界時

Coordinated Universal Time (英語表記)

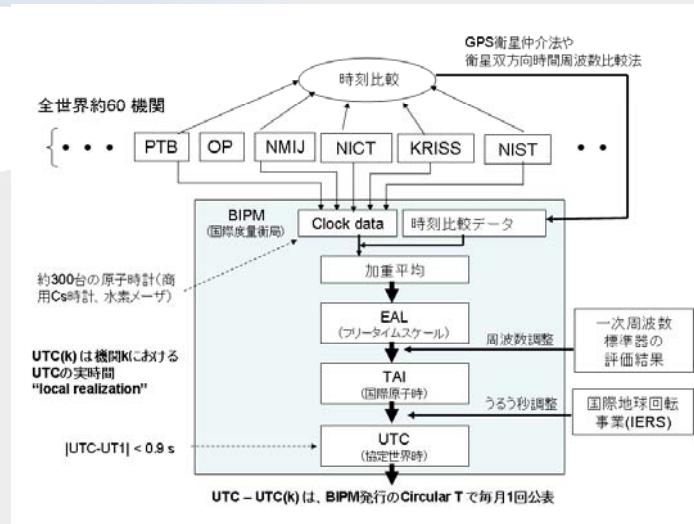
Temps Universel Coordonné (仏語表記)

- ①国際度量衡局 (BIPM) が時計比較データを集約して決定
- ②世界各国の時間・周波数標準研 (60 数機関) の350台前後の原子時計 (セシウム原子時計、水素メーザ) の重み付け平均 → EAL(自由時系)
- ③7カ国 (ドイツ、米国、フランス、日本、英国、イタリア、韓国) 8機関の一次周波数標準器のデータで周波数調整
- ④TAIとUTC1秒の長さは同じ
- ⑤世界時 (UT1) とUTCの差が0.9秒以内に維持されるように「うるう秒」調整を実施
- ⑥TAI/UTCの計算は、月単位で実施 (前月分の計算が次月上旬に実施され、BIPMより公表)

TAIの不確かさ : $2 \sim 3 \times 10^{-15}$

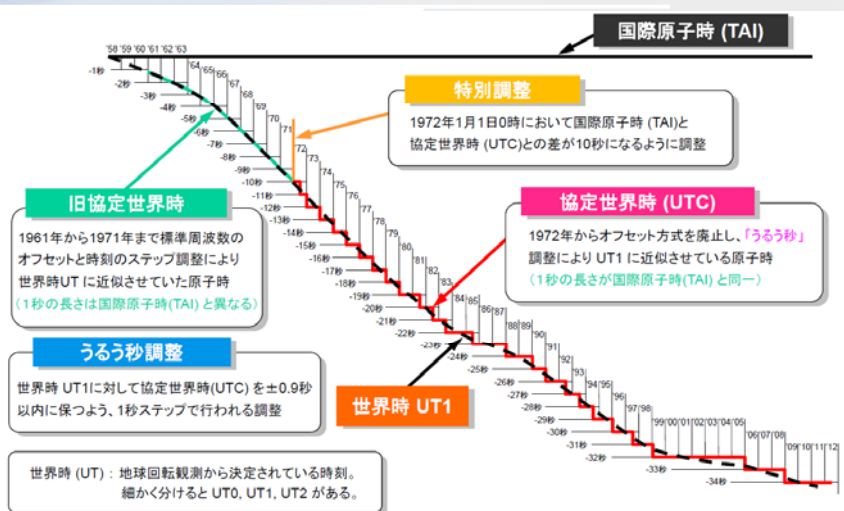
Freqtime

国際原子時・協定世界時生成の国際的枠組み



Freetime

うるう秒調整の履歴



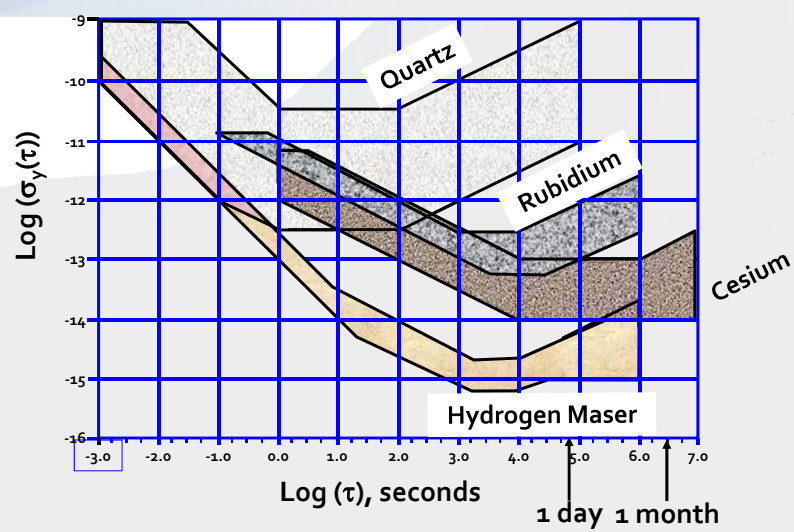
Freetime

NICTのWeb site より

マイクロ波帯 時間・周波数標準器

Freqtime

各種高安定発振器の安定度代表例



Freqtime

出展: http://www.ieee_uffc.org/fc (John Vig and R. Sydnor)

主な原子周波数標準器とその特徴

水素メーザ型周波数標準器

短期安定度が優れる

物理観測（VLBI等）の基準信号源として活用

ルビジウム周波数標準器

短期・長期安定度とも比較的良好

比較的小型軽量化・低廉化が実現

放送・通信の基準発振器として広く活用

セシウム標準器

長期安定度に優れる

1秒の長さの定義

Freqtime

セシウム原子周波数標準器

従来型

- オープンで加熱しCs原子ビームを生成

- マグネットで準位選別

- 不確かさ $\sim 1 \times 10^{-13}$

光励起型

- レーザ光で励起、検出

- 不確かさ $\sim 5 \times 10^{-15}$

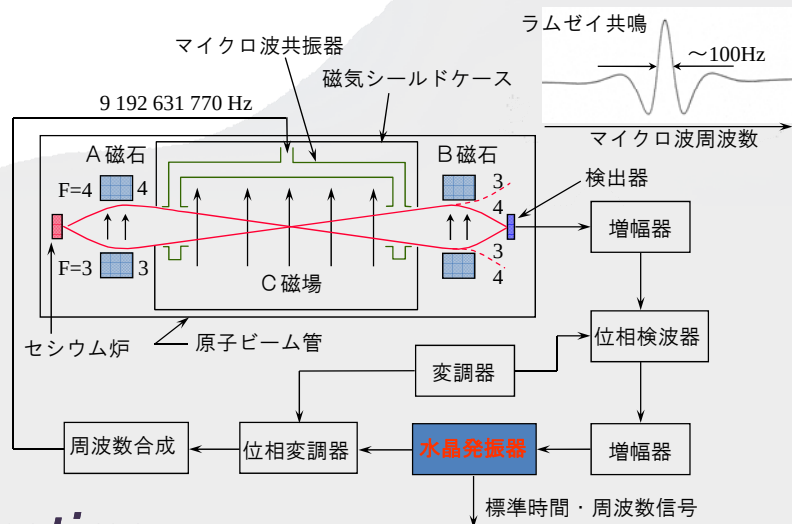
原子泉型

- Cs原子を真空中で冷却、閉じ込め、上方へ投げ上げマイクロ波と干渉

- 不確かさ $< 1 \times 10^{-15}$

Freqtime

従来型セシウム周波数標準器の原理



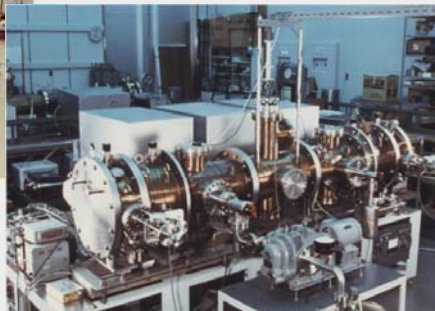
Freqtime

従来型セシウム一次周波数標準器



NRLM- I

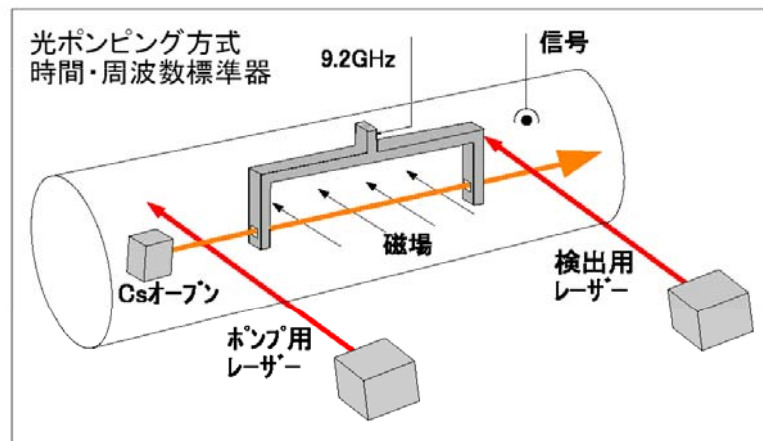
NRLM- II



Freqtime

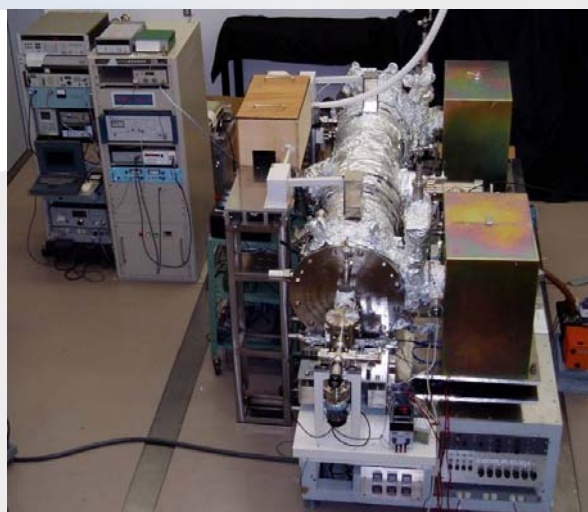
提供：産総研

光ポンピング型セシウム一次周波数標準器 の原理



Freqtime

光ポンピング型セシウム一次周波数標準器

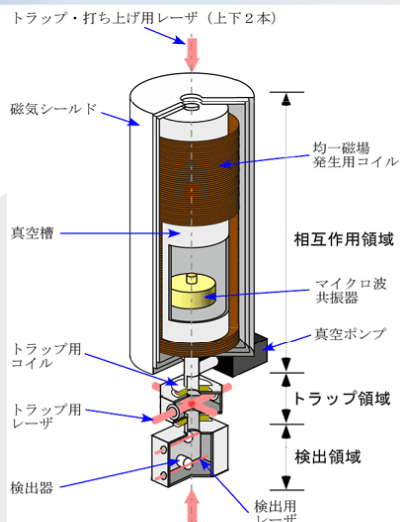


NRLM-4

Freqtime

提供：産総研

原子泉型セシウム一次周波数標準器



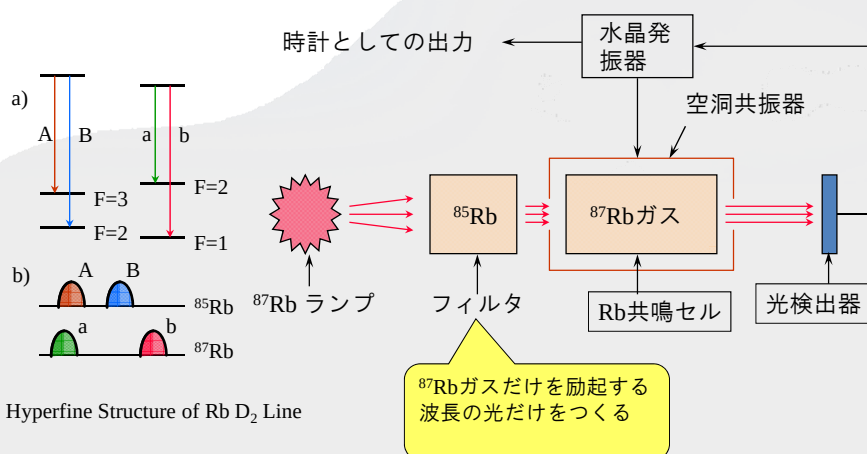
Freqtime



NRLM-F1

提供：産総研

ガスセル型ルビジウム周波数標準器



Freqtime

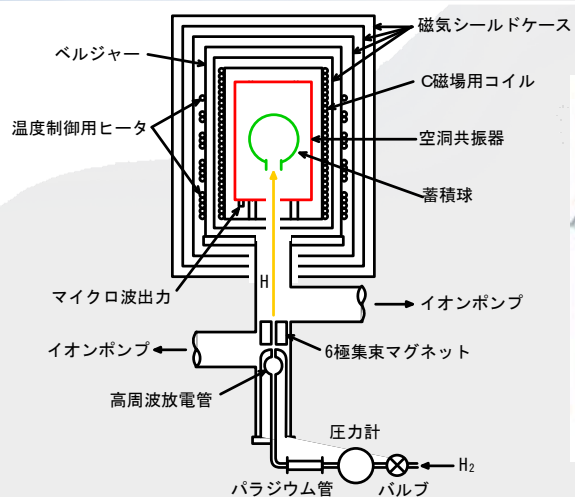
ルビジウム周波数標準器の例



サイズ : 100 × 75 × 50 mm程度
消費電力 : 約10 W
安定度 : 2×10^{-11} @1 s
 1×10^{-11} @10 s

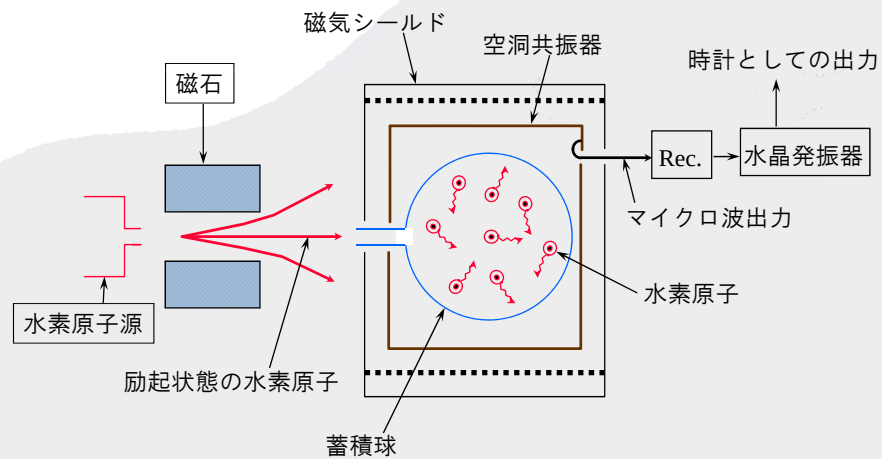
Freqtime

能動型水素メーザ型周波数標準器の構成



Freqtime

能動型水素メーザ型周波数標準器の原理



Freqtime

光周波数標準と 秒の再定義に向けた動向

Freqtime

秒の再定義に向けた動向と光周波数標準

- セシウム原子の遷移周波数を用いた秒の定義（1967年）から40数年経過し、マイクロ波帯での不確かさ向上に限界
- 光周波数コムの実用化に伴い、マイクロ波帯と光周波数帯のリンクが容易に実現
- シングルイオン時計、光格子時計と言った光周波数標準の進歩が顕著

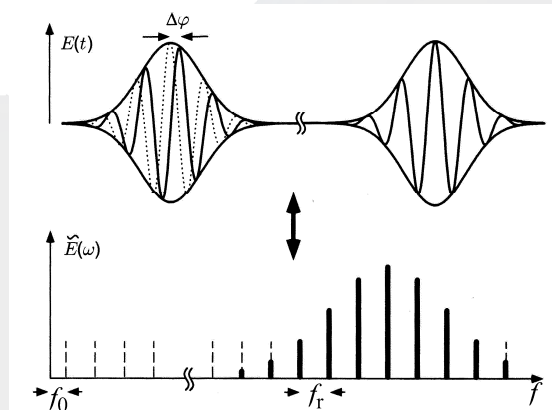


- 2019年頃を目処に秒の定義の改定が予定
- 各方式、原子の開発が熾烈（CCTF/CCL会合毎に候補がリストアップ）

Freqtime

光周波数コム

時間軸と周波数軸の間のフーリエ変換



Ref.: Th. Udem *et al.*, *Phy. Rev. Lett.*, **82**, 3568 (1999).

Freqtime

マイクロ波帯と光周波数帯のリンカーとしての光周波数コム

不確かさ

1×10^{-15}

$10^{-17} \sim 10^{-19}$

*L.-S. Ma et al., Science
303, 1843 (2004).

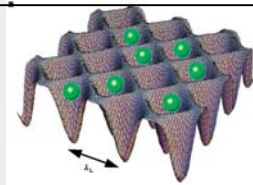
$10^{-15} \sim 10^{-16}$

さらに性能向上中！

光格子時計

H. Katori, *FSM*, St Andrews (2001).

- ・衝突シフトがない
- ・ドップラーシフトがない
- ・長い相互作用時間が確保
- ・原子個数が多い → S/Nの向上

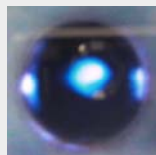
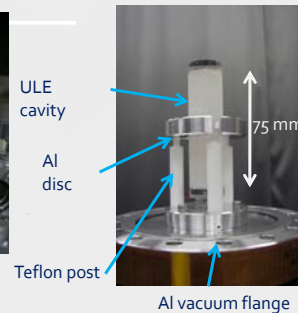
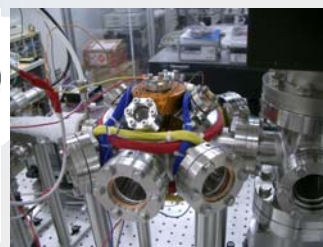
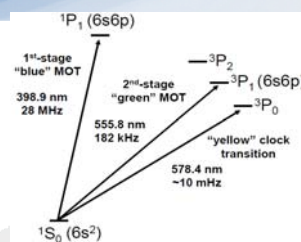


秒の再定義
を目指して

Freqtime

提供：産総研

Yb光格子時計の開発



1st Stage: Blue MOT
(mK)



2nd Stage: Green MOT
(μK)

To do:
3rd Stage: FORT

2009年5月にYb光格子時計としては、世界発の
周波数評価実施。

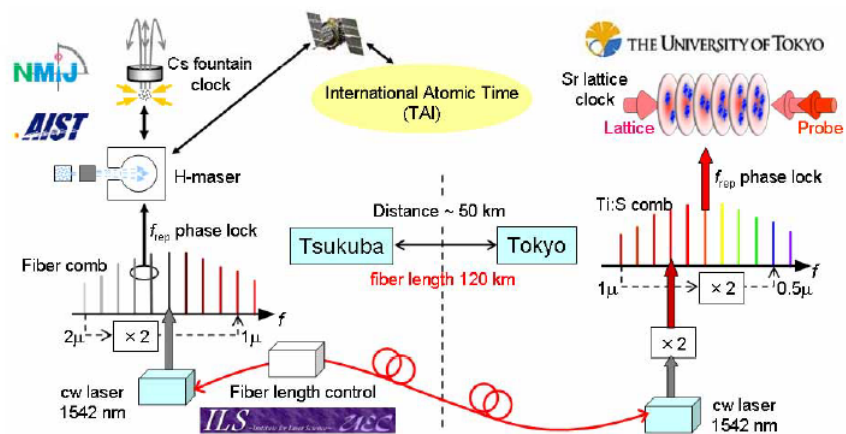
現状 5×10^{-14}

1 Hz Laser

Freqtime

提供：産総研

東大Sr光格子時計の周波数測定（2008）

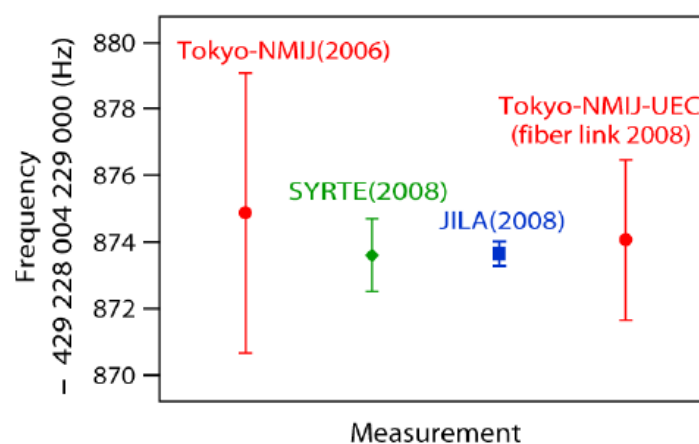


東大、産総研、電通大の共同実験

提供：産総研

Freqtime

Sr光格子時計の周波数評価値の一致度



2008年の結果は、 1×10^{-15} 以内で一致

提供：産総研

Freqtime

光周波数標準の現状

Optical clock state of the art



Ion / Atom	Clock transition	λ nm	Estimated sys. Freq. uncert.
$^{27}\text{Al}^+$ ion	$^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$	267	9×10^{-18}
$^{199}\text{Hg}^+$ ion	$^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$	282	2×10^{-17}
^{87}Sr in lattice	$^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$	698	1.6×10^{-16}
^{171}Yb in lattice	$^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$	578	3.4×10^{-16}
$^{171}\text{Yb}^+$ ion	$^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$	436	4.5×10^{-16}
$^{40}\text{Ca}^+$ ion	$^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$	729	2.4×10^{-15}
$^{88}\text{Sr}^+$ ion	$^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$	674	3.8×10^{-15}
^{40}Ca atom	$^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$	657	7.5×10^{-15}
$^{171}\text{Yb}^+$ ion	$^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{F}_{7/2}$	467	1.8×10^{-14}
$^{115}\text{In}^+$ ion	$^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$	237	1.8×10^{-13}
$^{199,201}\text{Hg}$ in lattice	$^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$	266	

Freqtime

APMP/TCTF meeting 資料より (2011.12.)

時間・周波数比較技術

Freqtime

時系の維持@産総研



セシウム原子時計 (5071A) と恒温チャンパー

水素メーザ (SD1T01A) 格納用
恒温チャンパー

旧タイプ水素メー
ザ (RH401A)

水素メーザ 4台、セシウム原子時計 4~6台で産総研の時間・周波数国家標準 (UTC (NMJ)) を生成。各原子時計は、維持温度環境の向上のため、恒温チャンパー (内部温度変動 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下) 内に格納して運用

Freqtime

提供：産総研

時計計測システム並びに比較システム



Freqtime

時間周波数比較技術の進展

GPS/GNSS利用

GPS common-view法 → All-in view法

C/A code single channel : ~10 ns

C/A code multi-channel : ~数 ns

2周波 (L1/L2) P-code : ~1 ns

2周波 (L1/L2) 搬送波位相 ~数十 ps

衛星双方向

PN code 位相 ~ 1 ns

搬送波位相 数ps~10 ps (想定)

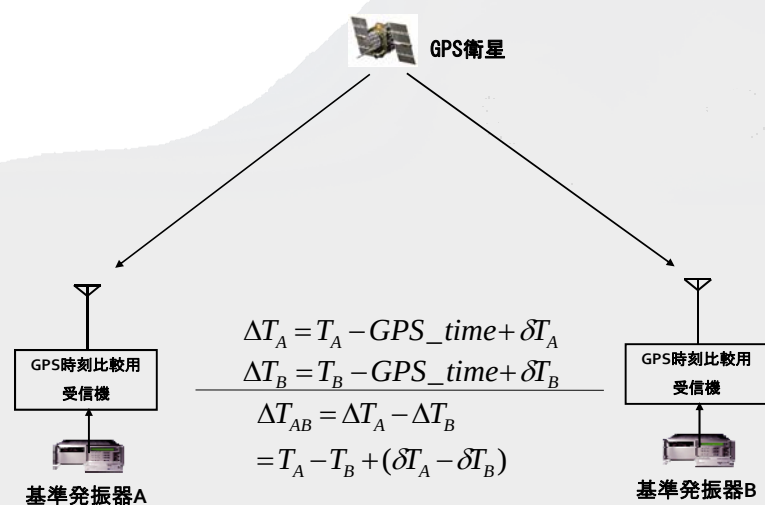
光ファイバー利用双方向 (周波数比較)

変調波 $<10^{-12}@1\text{ s}$

キャリア位相利用 $<10^{-14}@1\text{ s}$

Freqtime

GPSコモンビュー法の原理図

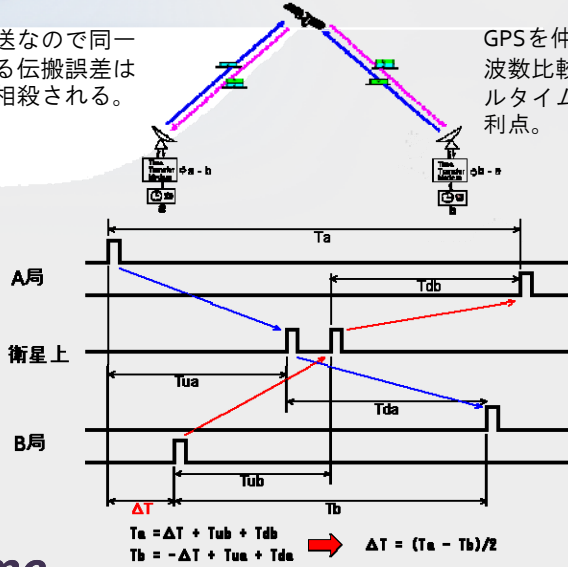


Freqtime

衛星双方向時刻周波数比較(TWSTFT)の原理

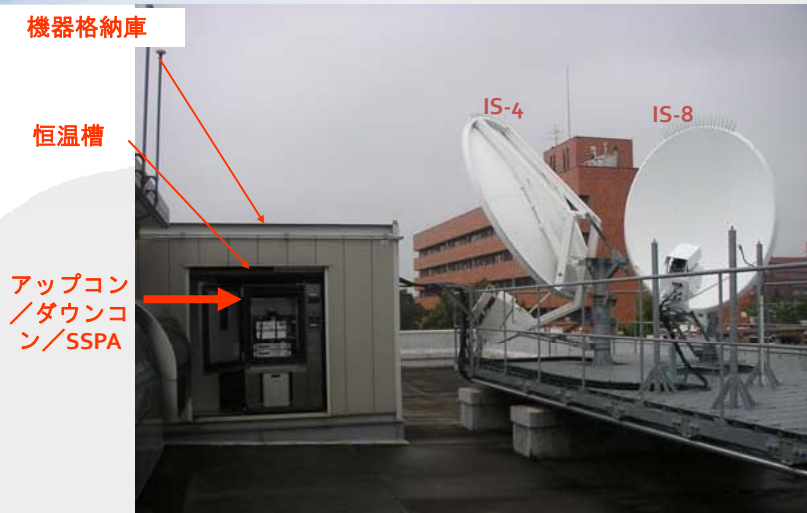
双方向伝送なので同一経路をとる伝搬誤差はほとんど相殺される。

GPSを仲介とした時間周波数比較法よりもリアルタイムな精度などが利点。



Freqtime

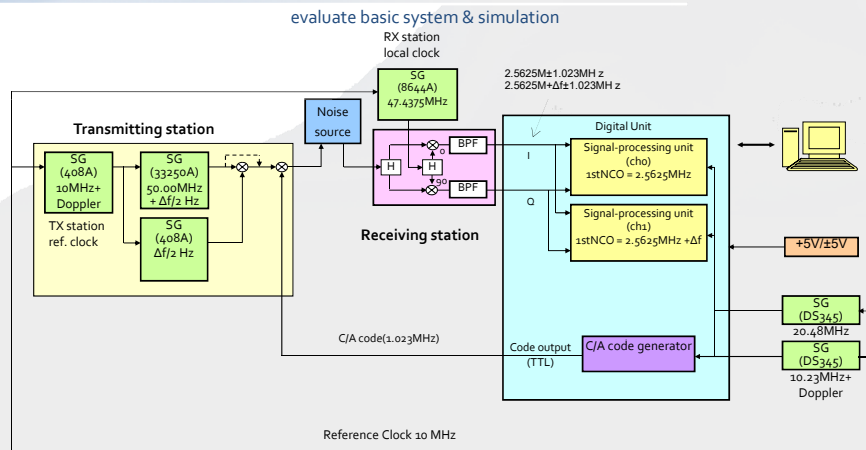
衛星雙方向時間周波數比較用地球局



Freqtime

提供：産総研

10⁻¹⁷を目指した搬送波位相方式 衛星双方向時間周波数比較法の基礎開発

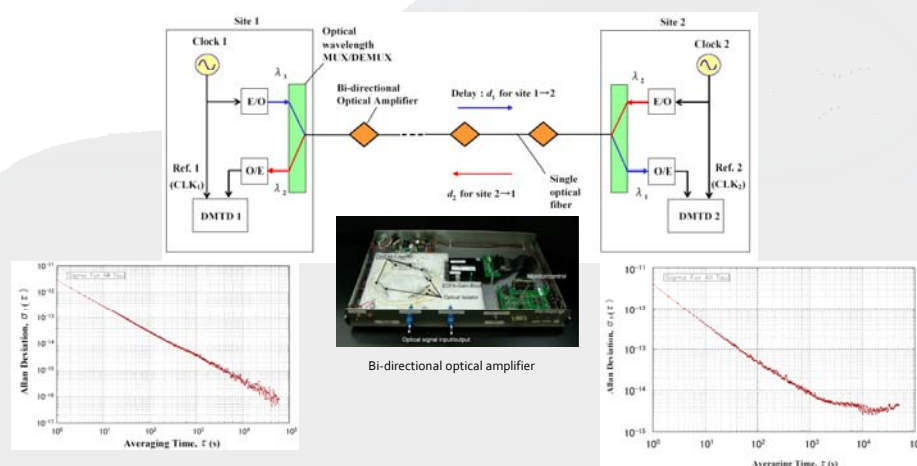


We are planning to solve the ambiguity comparatively easily by using a sub-carrier signal which is generated coherently with the main carrier signal.

Freqtime

提供：産総研

光ファイバーを用いた時間・周波数比較

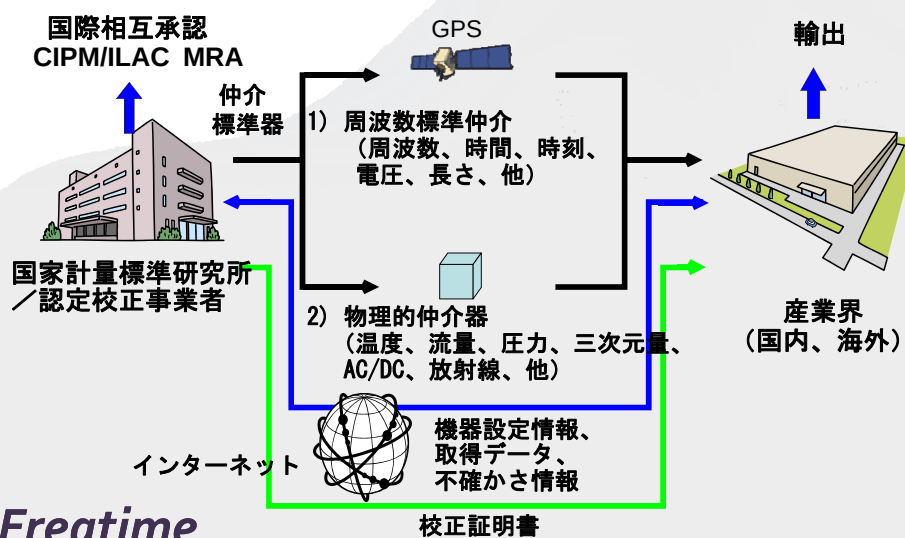


Freqtime

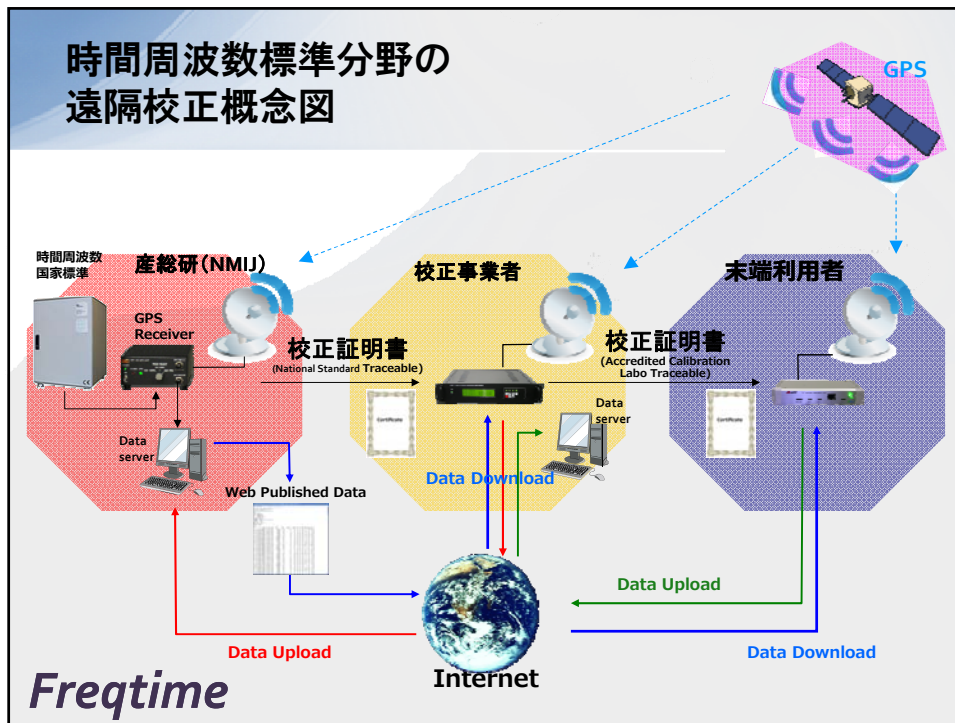
時間・周波数供給技術

Freqtime

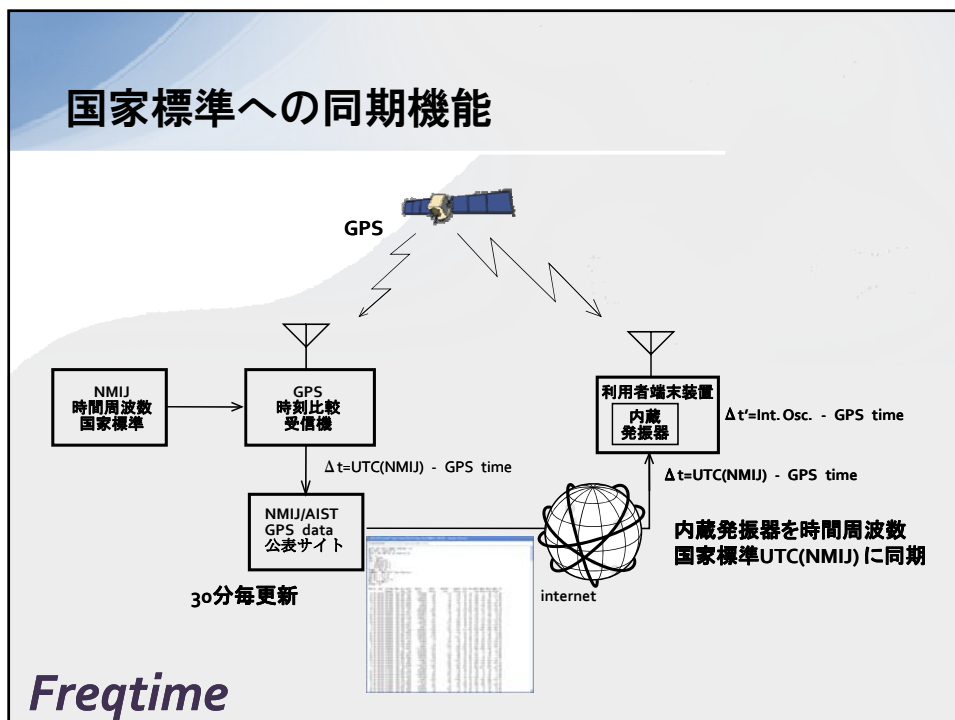
e-traceの概念図 (2001～2008年度 NEDO委託開発事業)



時間周波数標準分野の 遠隔校正概念図



国家標準への同期機能

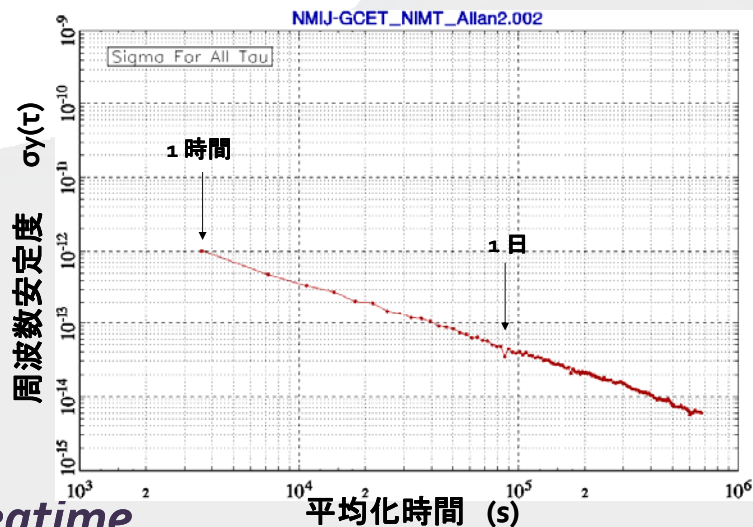


GCETと小型端末装置プロトタイプモデル の主要諸元

		GCET	プロトタイプモデル
GPS 受信部	受信信号	L1(1574.42 MHz), C/A code	L1(1574.42 MHz), C/A code
	同時受信可能衛星数	12 channels	50 channels
	受信感度	< -135 dBm	-160 dBm
基準信号	入力	(option) 10 MHz	1 pps or 10 MHz
	出力	10 MHz/8 ports	10 MHz/1 port
		5 MHz/1 port	-
		1 MHz/1 port	-
		1 pps/1 port	1 pps/1 port
時刻比較	データフォーマット	CGGTTS format	CGGTTS format
	同期機能	NMIJ-DO and GPS-DO	NMIJ-DO and GPS-DO
	データ転送	HTTP protocol	HTTP protocol
内蔵発振器	Rb型	< 1×10^{-13} @ 1 day < 3×10^{-11} @ 1 s	TBD (小型原子時計も想定)
	OCXO型	< 5×10^{-12} @ 1 day < 1×10^{-10} @ 1 s	TBD(ニーズに合わせたVCXO, TCXOを試験中)
データ通信インターフェース		Ethernet (10/100 BASE-T), RS-232C	Ethernet (10/100 BASE-T), USB
サイズ		480 × 430 × 88 mm	190 × 100 × 40 mm PCB 150 × 85 mm

Freqtime

GCETによる時刻比較結果 (つくば～タイ間 基線長 約4,600 km)



Freqtime

時間周波数遠隔校正用端末装置開発の履歴



GCET
 大きさ 480 × 430 × 88 mm
 受信感度 -135 dBm
 機能 NMIJ-DO NMIJ's Web site



小型化技術検証用実験機



小型化プロトタイプ装置

PCB size 150 × 85 mm
 case size 190 × 100 × 40 mm

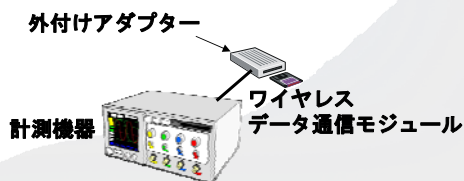


端末
 大きさ < 120 × 100 × 30 mm
 受信感度 < -160 dBm
 無線データ通信

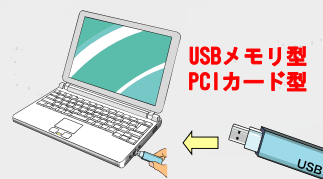
目標とするモデル一例

Freqtime

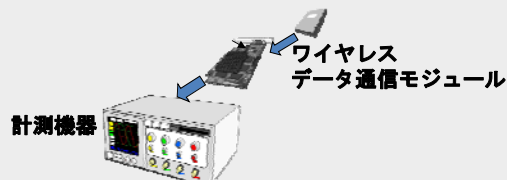
利用者端末装置の超小型化のイメージ



計測機器外付けアダプター型



パソコン挿入型



計測機器プラグイン型



単体据え置き型

Freqtime

フレックタイム株式会社のご紹介

- 2011年5月24日 設立
- 2011年12月1日 産総研技術移転ベンチャーとして認定
- 2012年4月より、時間周波数分野の遠隔校正システムを主体として本格的活動開始
- 時間・周波数標準分野の製品ラインアップ（分配増幅器、周波数安定度測定装置、etc.）を拡充予定
- 時間・周波数標準分野の技術コンサルタント等
- 本社：つくば市花畑

Freqtime

遠隔校正用端末装置ラインアップ



Freqtime

まとめ

- 時間・周波数標準は、各種標準の中でも最も不確かさが小さい
- 20世紀中頃より、原子周波数標準器の開発が進展し、7～10年で1桁、不確かさが向上（現在 10^{-16} 台のものが実現）
- 時刻の決定の国際的な枠組み
- 各種原子周波数標準器を概説
- 秒の再定義に向けた光周波数標準開発の動向
- 時系の維持
- 時間・周波数比較技術
- 時間・周波数遠隔校正技術

Freqtime

ありがとうございました！

Freqtime