

光格子時計のネットワーク技術の進展状況と 超高精度クロック配信ビジネスへの期待

日本電信電話(株) NTT先端技術総合研究所
寒川哲臣

2023年1月18日

光格子時計ネットワーク(NW)研究@NTT・東大・理研



現在の時間基準であるセシウム原子時計に対し、精度が1000倍上回る「光格子時計」を光ファイバ網でつなぎ、GNSS (GPS) を凌駕する超高精度光周波数(時間)基準の遠隔地間配信技術の確立を目指す。

超高精度同期網によるタイムビジネスや相対論的効果に基づく地殻変動監視網など、次世代の安心・安全・高信頼インフラの応用可能性を探索する。

光格子時計とは？

2001年東大香取教授により考案

精度: $\sim 10^{-18}$ (300億年に1秒のずれ)

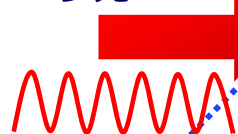
cf. Cs原子時計 $\sim 10^{-15}$ (3000万年に1秒のずれ)

NTT商用原子時計 $\sim 10^{-12}$ (3万年に1秒のずれ)

“秒の再定義”の最有力候補

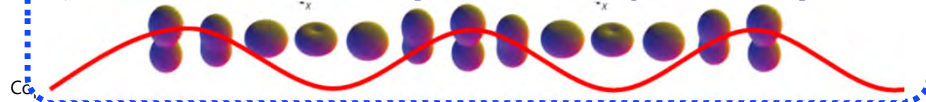
光のかご(光格子)に捕獲された原子

レーザ光



原子の極めて正確な周期現象(振動)を光で読み出すことで、“時を数える”装置

光で引き起こされる原子内の電子状態の共鳴振動



光格子時計NW構想

JST未来社会
創造事業



光格子時計NWの応用分野

従来の周波数基準: 高周波帯(電波・高周波伝送) → 光格子時計NW: 光周波数帯(200THz)をファイバ伝送

地上の"GPS"タイムビジネス

- ・超高精度周波数・時間基準配信
- ・モバイル時分割多重用時刻同期
- ・通信クロック(網同期)・独立同期
- ・超高精度マイクロ波基準
- ・超狭線幅レーザ基準応用(コヒーレント通信用基準光源、ファイバセンシング基準光源)

現在の周波数基準配信

10⁻¹⁵~10⁻¹⁷程度
の高精度領域へ

伝送精度

10⁻¹⁸以上の
超高精度領域へ

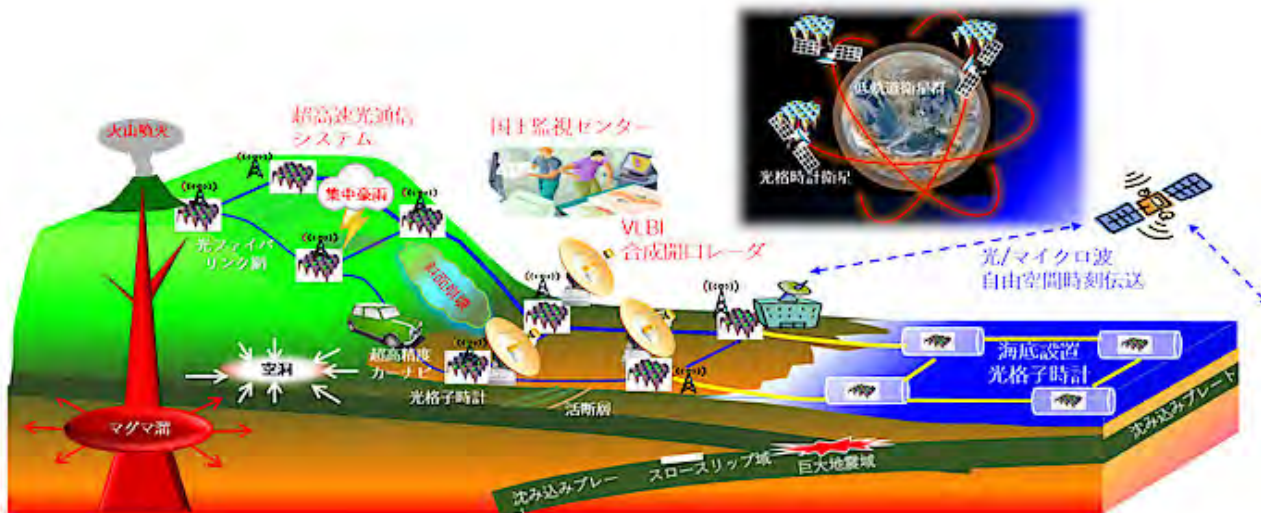
GNSS: 10⁻¹²~10⁻¹³

CSM: 10⁻¹¹

相対論効果のアプリケーション

- ・科学研究用超高精度周波数標準配信
- ・相対論的測地学(量子水準点NW)・GNSS測位の高精度化・ジオイドマップ
- ・地震学、火山学(国土監視NW)
- ・資源探査
- ・物理定数の恒常性検証

時空間のゆがみを探る光格子時計NW: アインシュタインの一般相対論の予言



一般相対性理論(重力赤方偏移):
重力が強い場所ほど時間の進みが遅く、
光は低周波数にシフト

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{g\Delta h}{c^2} = 10^{-18}\Delta h [cm^{-1}]$$

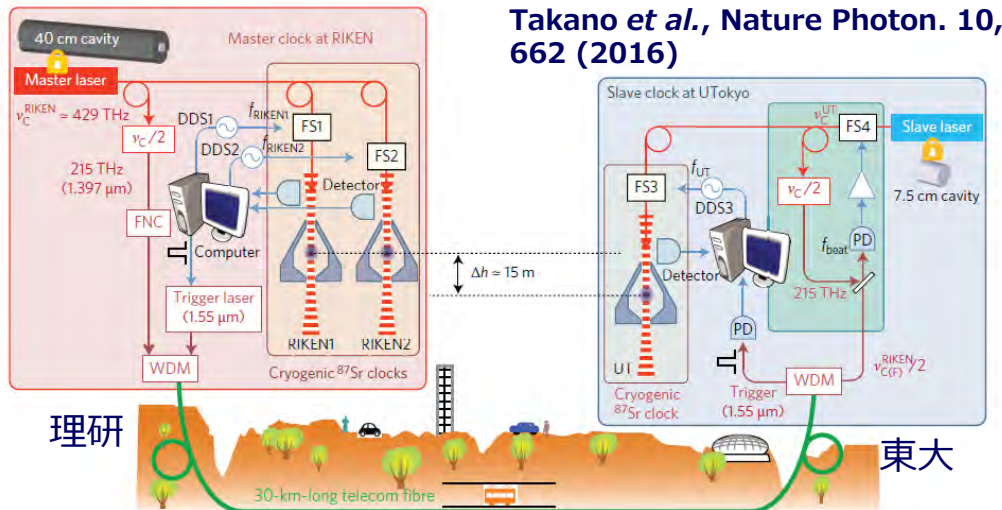
1 × 10⁻¹⁸の精度で周波数を比較

↓
1 cm の高度差比較

外部状況～日本の戦略

東大・理研の「光格子時計」技術と、NTTの有する光中継・光デバイス技術と、光通信商用ファイバ網を組み合わせ、**世界最高精度($\sim 10^{-18}$)の1000km級光格子時計NWによる相対論的測地の実現をめざす。**

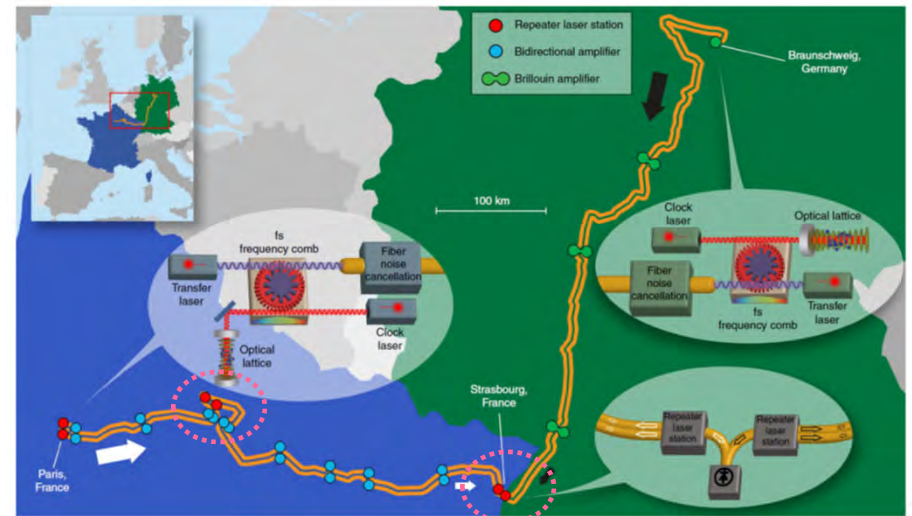
光格子時計周波数比較による世界初の数cm級精度での相対論的測地 (日本)



理研-東大間を30kmファイバで無中継接続
世界最高精度 5×10^{-18} で周波数比較に成功

1000kmファイバNW構築による国家間光格子時計周波数比較 (独・仏)

Lisdat *et al.*, Nature Commun. 7, 12443 (2016)



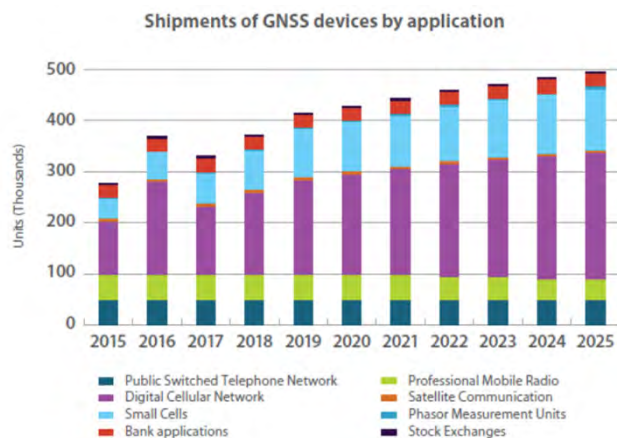
SYRTE(パリ)-PTB(ブラウンシュバイク)間1400kmを2中継接続。比較精度は日本より1桁劣る 5×10^{-17}

欧州が光格子時計周波数の精度化よりも伝送距離の長距離化に力を入れているのに対して、
日本はできるだけ短時間で1cm級の高さ測定を可能にするための周波数のさらなる高精度化に注力。

※ GPSで1cm級の高さ精度を実現するには、1日程度の測定時間と、大気状態を仮定した補正などが必要。

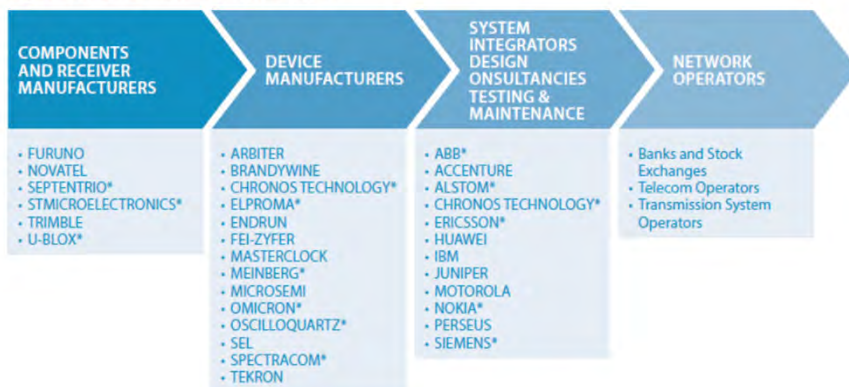
参考：タイミング&同期ビジネス分析(GNSS)

- EUSPA(European Union Agency for the Space Programme)による時刻・同期ユーザーのニーズ調査報告書
- GNSSのメインユーザーとして、テレコム、電力配信、金融を挙げ、それらの要求やニーズなどを調査。
- **GNSSの脆弱性を回避し、精度・信頼性・安全性に優れた周波数配信NWへの潜在ニーズが読み取れる。**



	Telecom	Electricity transmission	Finance
Main potential future drivers for GNSS	<ul style="list-style-type: none"> • Resilience and reliability • GNSS Authentication • Improved robustness to interference • Nanosecond accuracy for massive MIMO and COMP mode in 5G • High availability • Accuracy Low(1ms) / medium (1μs) for Timing, Low (1ms) /High (100 ns) for Synchronisation • Calibration of hardware equipment delays 	<ul style="list-style-type: none"> • Resilience and reliability • GNSS Continuity of service • Improved robustness to interference • GNSS Authentication • Accuracy medium for T&S (1μs) and even high (<100ns) for fault location • Calibration of hardware equipment delays 	<ul style="list-style-type: none"> • Resilience and reliability • Security • Traceability • High availability • GNSS Authentication • Low (1ms) /Medium (1 μs) Accuracy for T&S • Calibration of hardware equipment delays

Figure 2: Value Chain – GNSS T&S for CI



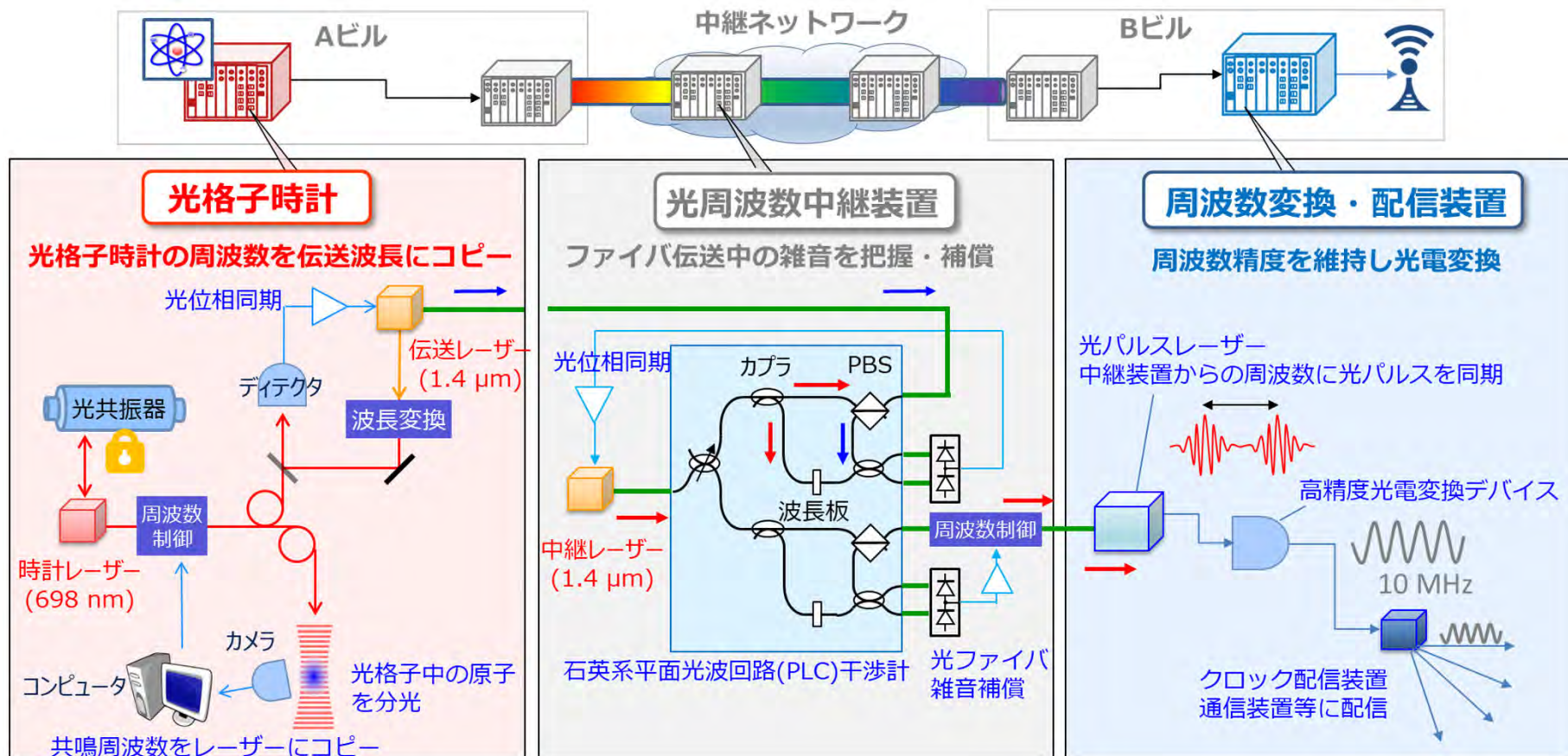
5.2 PROSPECTIVE USE OF GNSS IN TIMING & SYNCHRONISATION

5.2.1 FUTURE TRENDS

GNSS has been used for Timing & Synchronisation since decades. In particular it strongly participated to the revolution of Telecom and can even be considered as a **disruptive technology** in this sector: without GNSS some telecom architectures would never have been developed (it would have been too complex and too expensive to rely on Atomic clocks only).

光格子時計NWを実現する要素技術

光格子時計の発する超高精度光周波数(時間)基準を
いかに劣化させないで、遠方へ送るか? & 別周波数へ変換するか?



光格子時計NWの構築: 首都圏テストベッドから東北へ

都心部を通過して神奈川-埼玉をつなぐ首都圏超高精度光格子時計NWのフィールド実験用プロトタイプが完成。
JST未来社会創造事業では、東京から岩手県水沢天文台まで光格子時計NWを拡張中。



厚木-和光間ファイバ
距離190 km



まとめと展望

●光格子時計NW

- ・現在の秒の基準であるCs原子時計や、それを衛星に搭載したGNSSよりも桁違いに**高精度な周波数基準をファイバ配信可能**
- ・光格子時計を多地点に設置し、相互比較することで高度差情報が取得可能
- ・高精度・信頼性・安全性に優れる時刻・周波数配信技術への潜在的ニーズ

●光格子時計NWのフィールド実験用プロトタイプを実現・運用中。

- ・JST未来社会創造PJにより、各要素技術を、研究室の“実験装置”からフィールド実験可能な技術レベルへの進化を推進。
- ・24時間365日連続運転というビジネスニーズと比べると、完成度はまだ未成熟。
→**キャリアグレード化に向けた研究開発が必要。**
- ・超高精度タイムビジネスの多様化・普及を促進する仕組みが必要

●“秒の再定義@国際度量衡総会：CGPM2030”に向けた議論が本格化（補足資料）

以下、補足資料





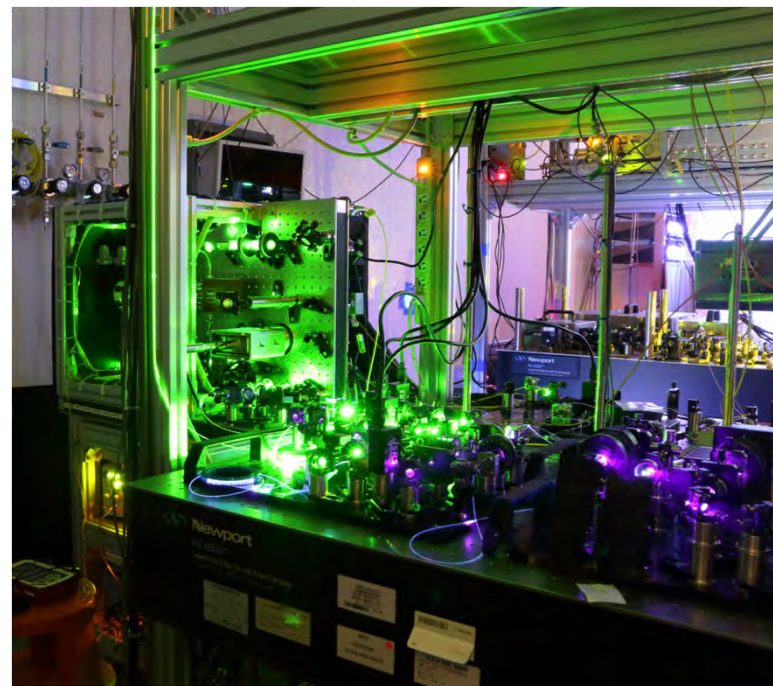
RS (秒の再定義グループ) 進捗報告

秒の再定義・標準化に向けた取り組み

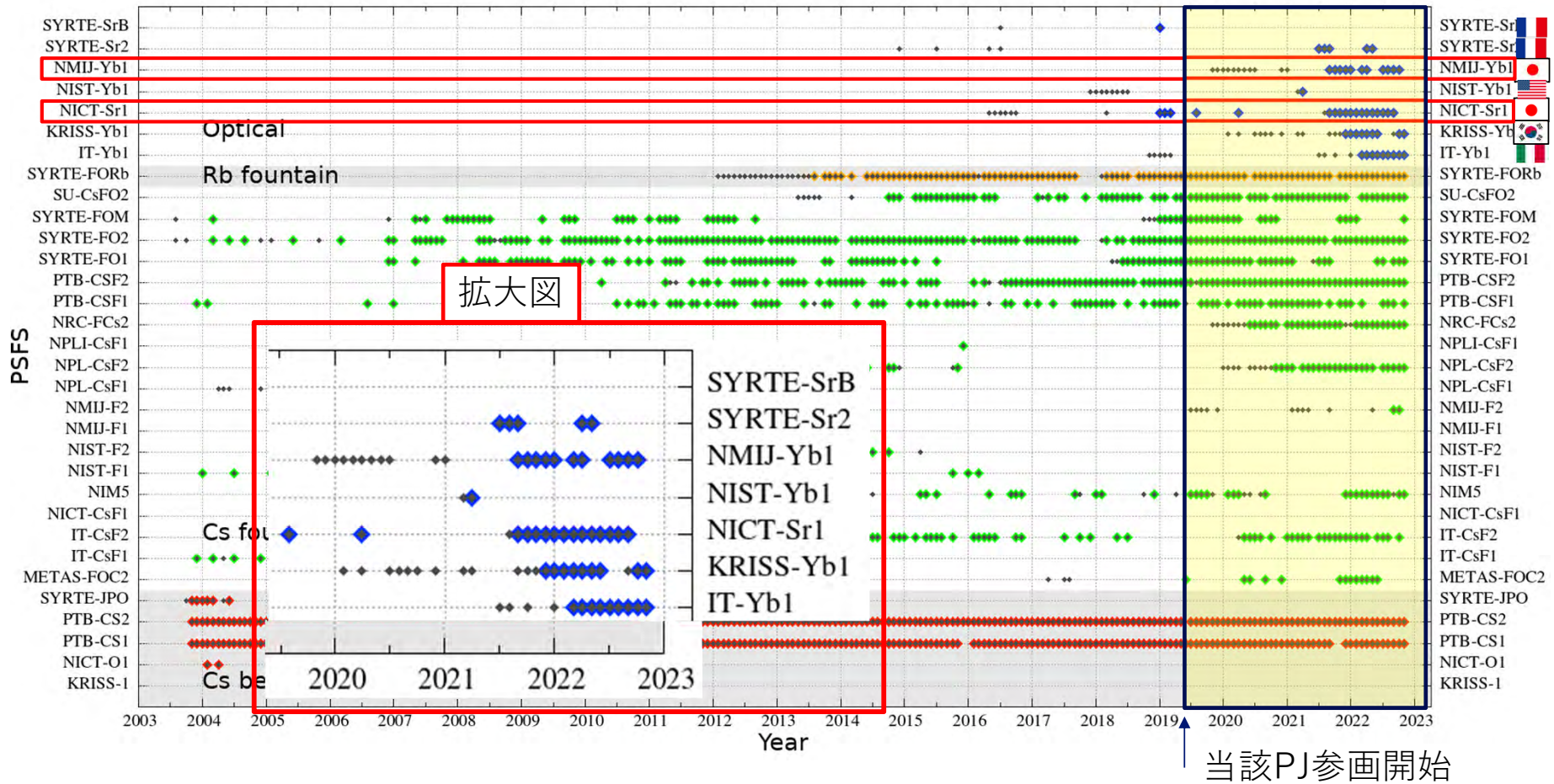
産総研(AIST)
計量標準総合センター(NMIJ)
時間標準研究グループ
安田 正美

情報通信研究機構 (NICT)
電磁波研究所 電磁波標準研究センター
時空標準研究室
井戸 哲也

JST未来社会創造プロジェクト
ワークショップ
2022/12/13

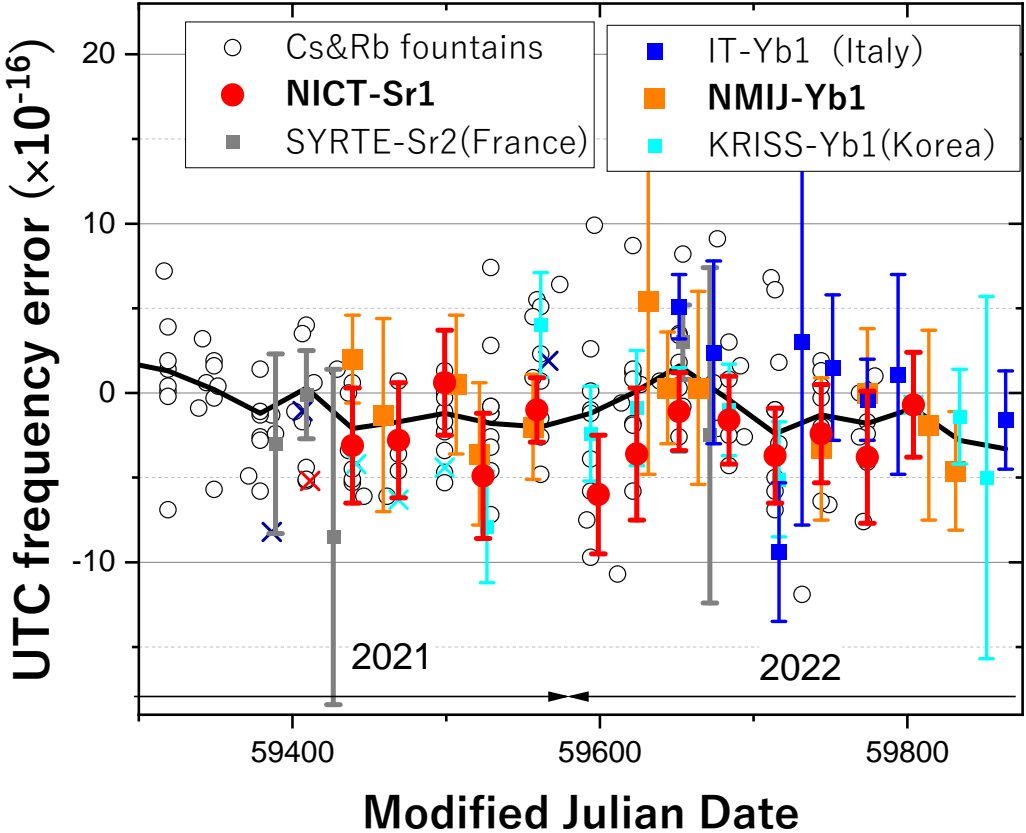


光格子時計による国際原子時への貢献(revised)



NICT, NMIJ両機関で光格子時計による国際原子時への貢献が、世界の過半の寄与率。(54%)

光格子時計による国際原子時への貢献(revised)



NICT, NMIJの光格子時計が定常的に国際原子時の周波数調整に貢献

国際原子時にうるう秒調整を入れたものが協定世界時UTC.

つまり、

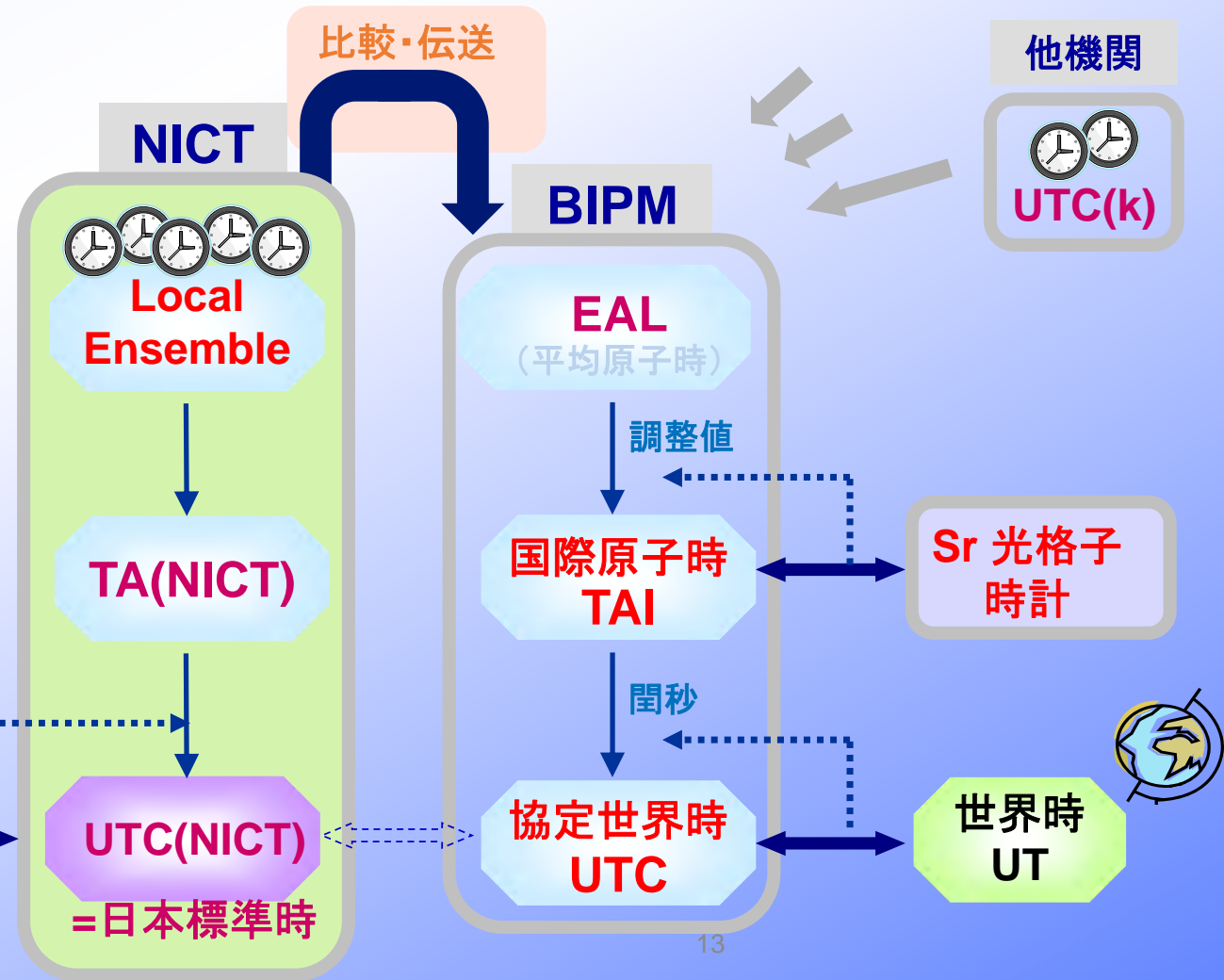
NICT, NMIJの光格子時計は既に世界の基準時刻の維持に貢献している

→光格子時計の最初の社会実装

日本標準時への光格子時計の導入



2021年8月より前述の技術を総動員して、日本標準時は光格子時計による高精度化を実現



2022/06/09
プレスリリース



<https://www.nict.go.jp/press/2022/06/09-1.html>

秒の再定義へ向けた動き

2022年11月15-18日 開催の 国際度量衡総会 での決議文



- ・決議文4: うるう秒問題: 2035年までに、 $|UT1-UTC|$ の許容範囲拡張。
- ・決議文5: **秒の再定義**: CIPMは2030年に秒の再定義をすべく2026年に再定義の方法を提案せよ

採択された決議(案と同一)

Draft resolution

The CGPM, at its 27th meeting,

recalling ...

noting...

further noting...

encourages the International Committee for Weights and Measures (CIPM)

– to promote the importance of achieving the objectives in the roadmap for the redefinition of the second,

– to **bring proposals to the 28th meeting of the CGPM (2026) for the choice of the preferred species, or ensemble of species for a new definition of the second, and for the further steps that must be taken for a new definition to be adopted at the 29th meeting of the CGPM (2030),**

and **invites** Member States to support research activities, and the development of national and international infrastructures, to allow progress towards the adoption of a new definition of the second.

検討される再定義の2つの方法

Option 1:

- Cs 超微細構造遷移に代わる特定の原子の光学遷移を選定し、その遷移周波数を定義値とする。それ以外は秒の二次表現。

Option 2:

- 複数の光学遷移周波数の重み付き相乗平均を定義値とする(ことで複数の遷移が定義に貢献出来るようにする。)

J. Lodewyck, Metrologia 56, 055009 (2019)

Option 2は問題点は見つかっていないが少々方法等理解するのが困難。
(基礎物理定数に基づくOption 3は当面除外)

Option 2: 複数の遷移による再定義の提案

J. Lodewyck, Metrologia 56, 055009 (2019)

複数原子遷移の重み付き相乗平均の定義値を与える。

遷移ごとの重みは積の累乗数で与える。

CCTFにおいて、新しい測定結果を入れて重みを更新し、結果定義値もそのたびに変更する。

$$1 \text{ Hz} = \sum_{i \in C} a_i \nu_i = \frac{1}{N} \prod_i \nu_i^{w_i}$$

相加平均でなく相乗平均で束縛式を作ると
・重みが式に明示的に出てくる
のがメリット

但し $w_i = a_i \nu_i$

$$N = \prod_i N_i^{w_i}$$

ν_i : 時計遷移 i の周波数
 w_i : 時計遷移 i の重み
 N_i : 時計遷移 i の最尤値
 N : 定義値

現行SI

Csのみを考慮

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{9192631770} \prod_{i=\text{Cs only}} \nu_{\text{Cs}}^1$$

二次表現CCTF2017推奨値全てを入れると

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{152\,329\,318\,467\,266.642} \prod_i \nu_i^{w_i}$$

この数字と結びつく物理量がイメージ出来ない...

現在の状況

複数の遷移で再定義される可能性が徐々に大きくなっている傾向

複数の遷移であれば

- ・光格子時計は、ストロンチウム、イッテルビウム、共に定義になれそう。
- ・光格子時計とイオン時計で競争することなく、コミュニティが協力して秒の再定義を推進しやすくなるか。

しかし定義のわかりにくさがネック。

→ 従来の定義は新しい定義の特殊形に過ぎなく、全く違う考え方というわけではない、等安心できる説明が必要。

致命的な問題点がないかも引き続き、確認していく必要あり。

→国内ステークホルダーへの周知等@国際計量研究連絡委員会・時間分科会(2023/1/26)