



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

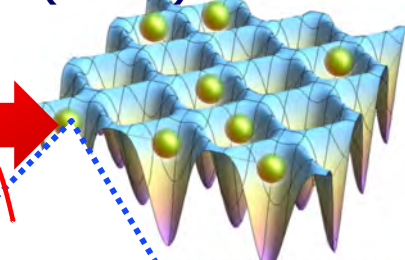
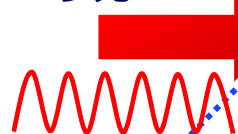
精度: $\sim 10^{-18}$ (300億年に1秒のずれ)

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

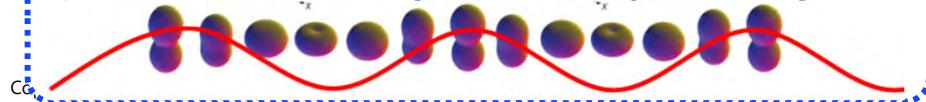
光のかご(光格子)に捕獲された原子

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

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

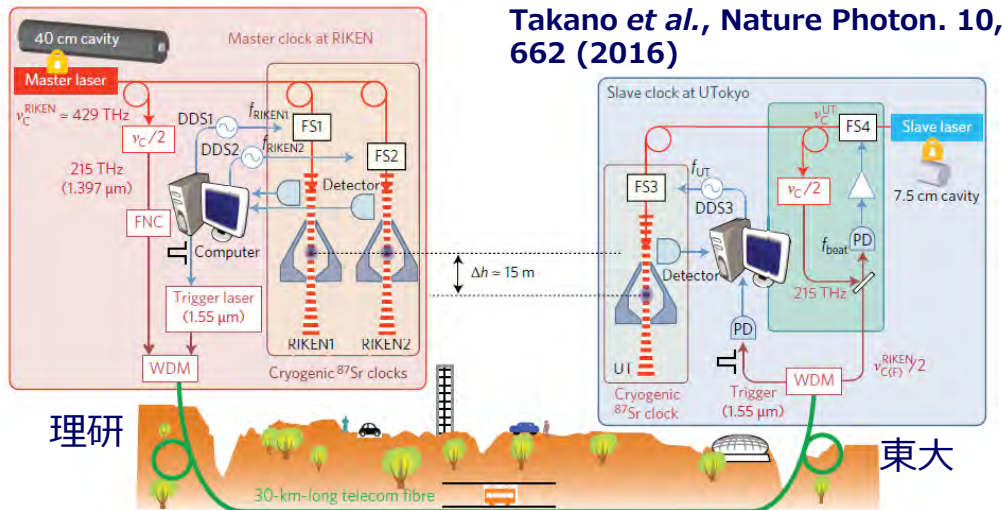
1 × 10⁻¹⁸の精度で周波数を比較

↓
1 cm の高度差比較

外部状況～日本の戦略

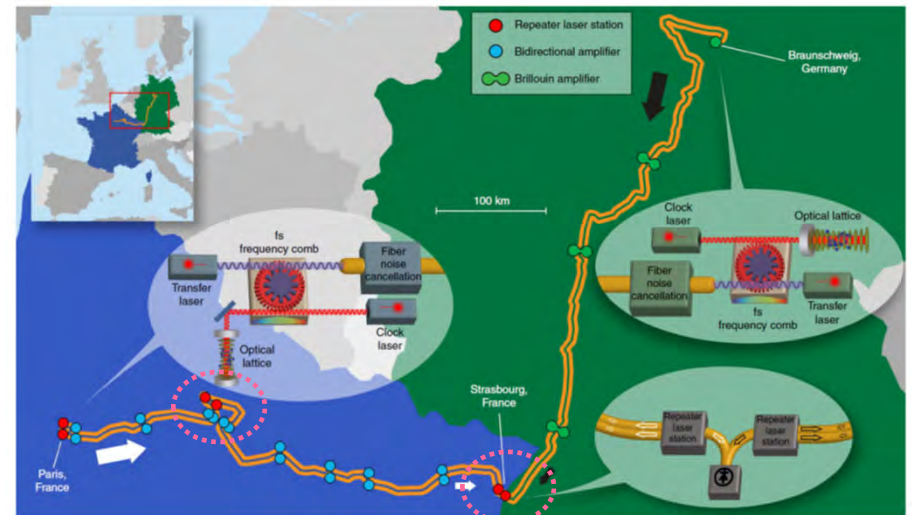
東大・理研の「光格子時計」技術と、NTTの有する光中継・光デバイス技術と、光通信商用ファイバ網を組み合わせ、**世界最高精度($\sim 10^{-18}$)の1000km級光格子時計NWによる相対論的測地の実現をめざす。**

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)



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)



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

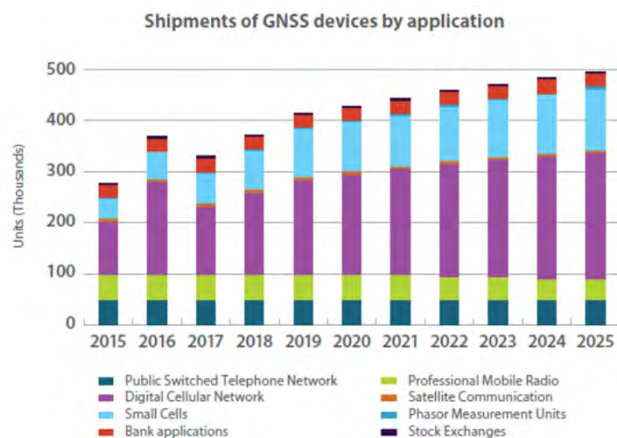
SYRTE(パリ)-PTB(ブラウンシュバイク)間1400kmを2中継接続。比較精度は日本より1桁劣る 5×10^{-17}

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。

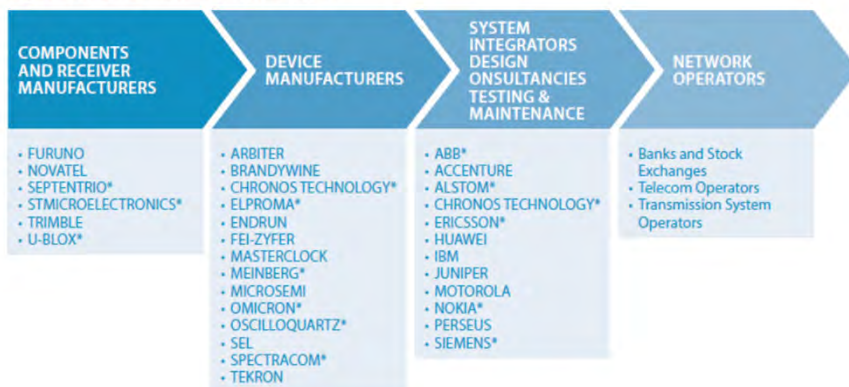
参考：タイミング&同期ビジネス分析(GNSS)

- 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?

