

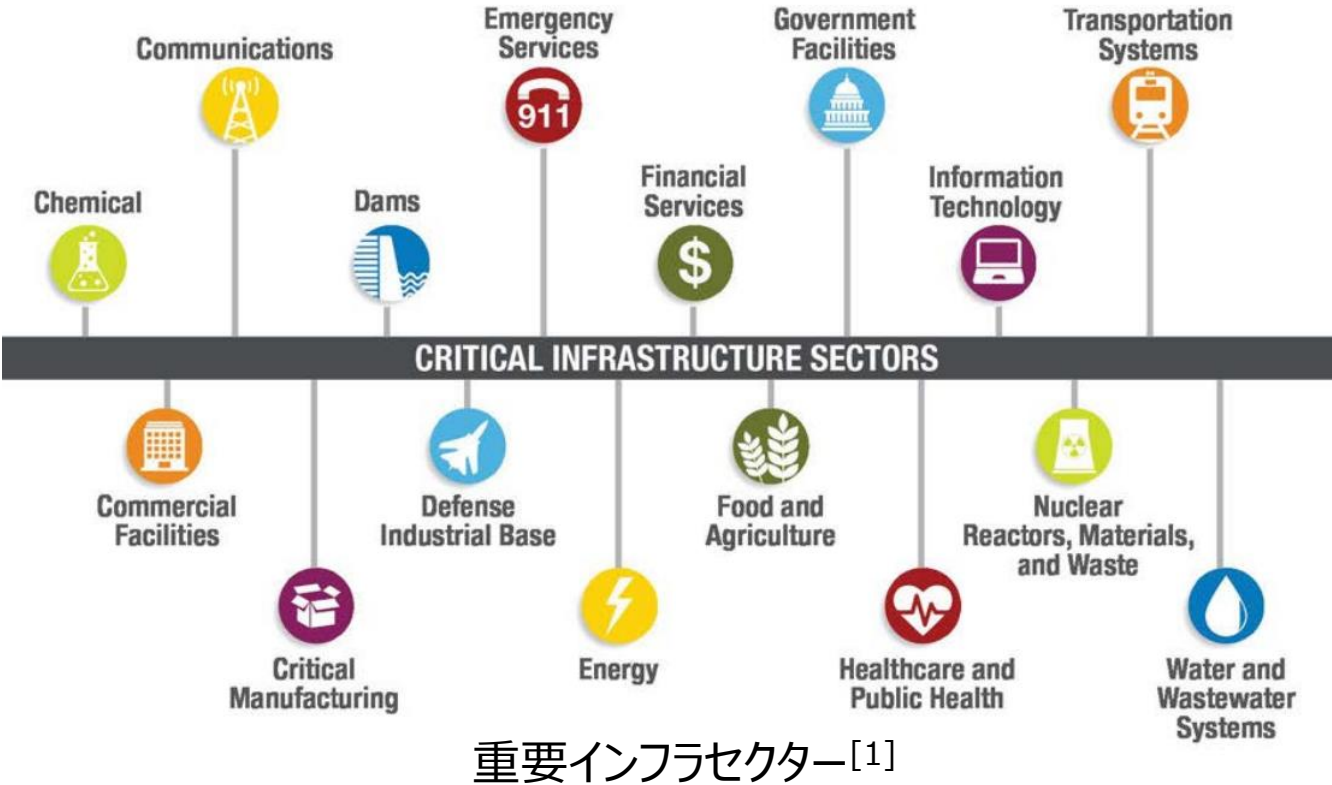
超多数端末接続ネットワークでの 高精度時刻管理方式

情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁波標準研究センター
時空標準研究室 矢野 雄一郎

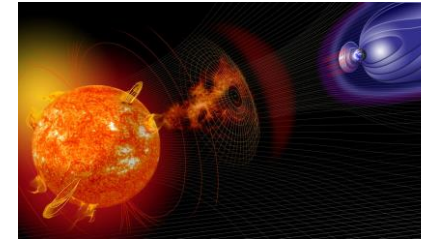
背景①：時刻同期の重要性とGNSSの脆弱性の指摘

略語補足

GNSS: Global Navigation Satellite System, 全地球測位システム



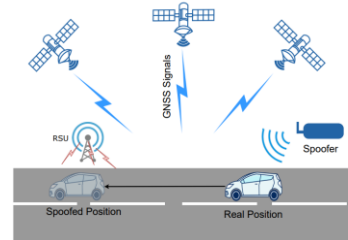
GNSS時刻同期の脅威となる要因



太陽フレア[2]



ジャミング[3]



なりすまし[4]

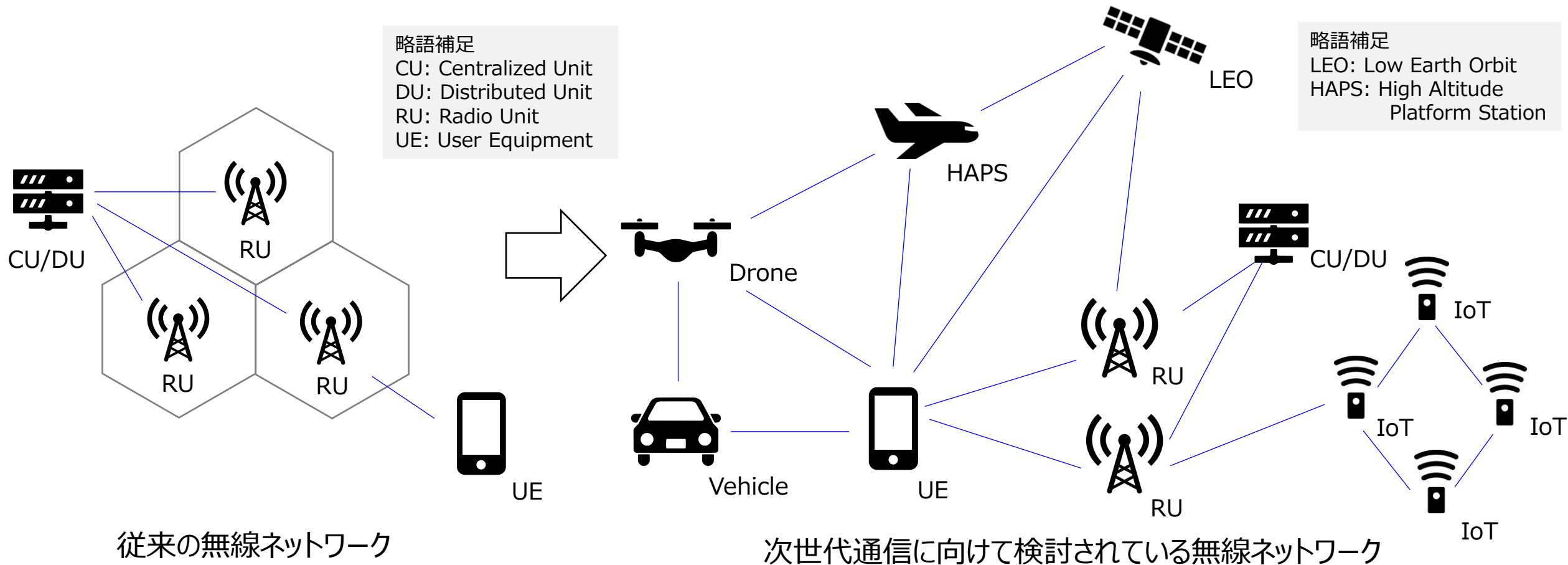
米国の試算によれば、GNSSが利用できない場合の損失は1日当たり10億ドルになる。

- 時刻周波数インフラは、上記のほぼすべてに関連する重要なインフラと位置づけられており、現代社会の基礎を支えている。
- 現在、経済性と利便性から一般にGNSSによる時刻同期が広く利用されているが、**その脆弱性が指摘されている。**
- GNSSに頼りすぎない時刻同期の在り方が求められている。

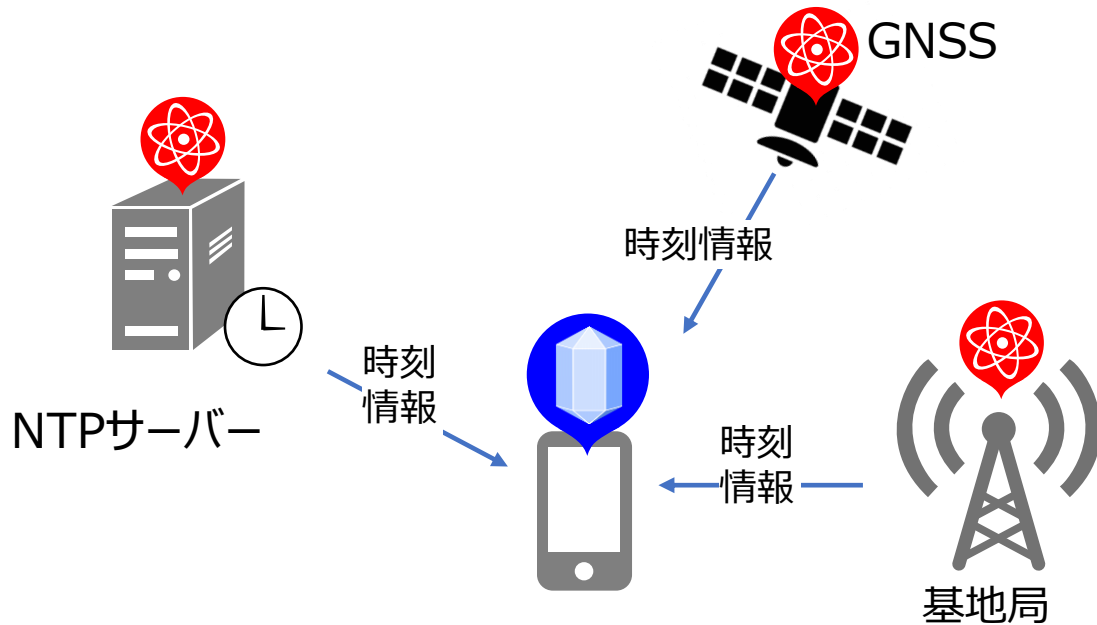
[1]Critical Infrastructure Threat Information Sharing Framework- A reference Guide for the Critical Infrastructure Community, October 2016.

[2]<https://science.nasa.gov/heliophysics/space-weather> [3] R. Yozevitch et al. Sensors, vol.21, no. 14, 4840(2021),[4]A. Lamssaggad et al. IEEE Access vol 9, pp. 9180-9208(2021)

背景②：通信ネットワークの多様化



- 通信分野においても、周波数利用効率の点から時刻同期は必要不可欠である。
- 次世代通信においては、非地上系ネットワーク(NTN)による無線システムの多層化や、通信経路確保のための基地局間の連携、広範に敷設するIoT端末を接続するためのマルチホップなど、従来よりも複雑なネットワーク構成が想定されている。



従来の中央管理型の同期システム

従来システムの課題

低い信頼性

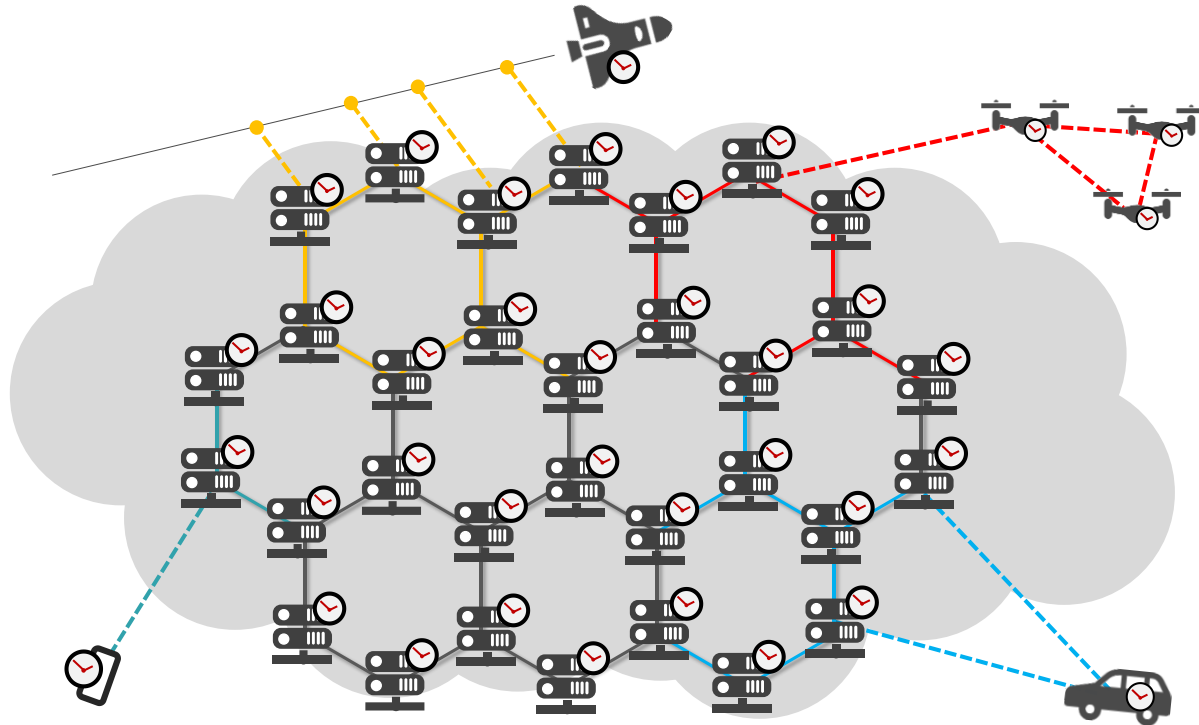
- ・マスタークロックの不具合
- ・妨害、なりすましに対する脆弱性

低い柔軟性

- ・ツリー型もしくはスター型のネットワーク構成

- ・ 端末間では主従関係が成り立つため、マスターの障害が管理されるすべてのノードに影響を与える。
- ・ ツリー型、スター型のネットワーク構成に適用が限られ、想定される次世代通信に対応することは難しい。

■ 小型原子時計 × 高精度時刻比較 = 分散管理型の同期システム！



分散管理型の同期システム

提案システムの特長

高い柔軟性

- どのような形のネットワーク構成でも対応

高い信頼性

- 各ノードがマスタークロックになれる
- ノード連携による障害耐性

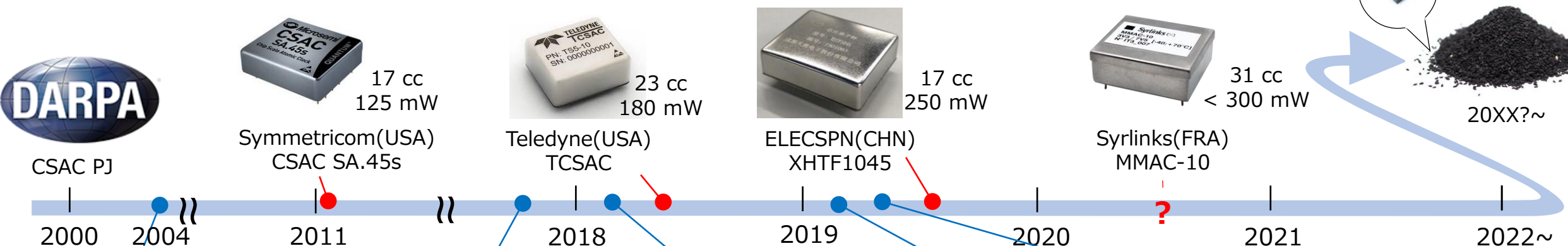
高い安定性

- 原子時計による数の力による安定性の向上

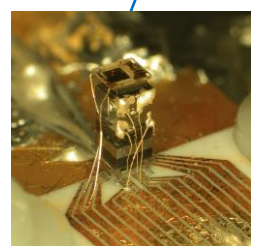
- 普及が見込まれる原子時計と標準化が進捗する高精度時刻比較を活用した同期システムを提案する。
- 本システムでは、主従関係はなく、どのようなネットワーク構成にも対応できる。
- 障害が発生してもノードを連携することで、高い信頼性を確保できる。
- 複数の原子時計の時刻・周波数を共有して利用することで、ネットワーク全体の周波数安定性が向上する。

小型周波数標準の研究開発の状況

■ 商用の小型原子時計のリリース状況



■ 小型原子時計の研究開発状況



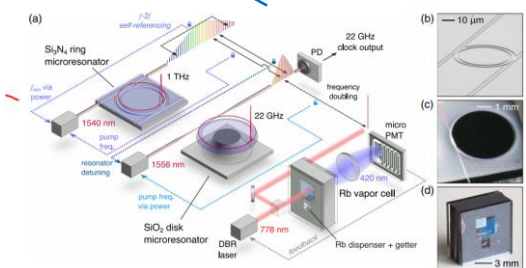
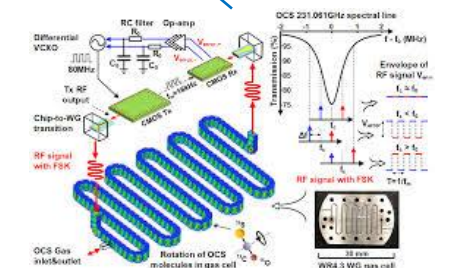
Physics package (NIST)[1]



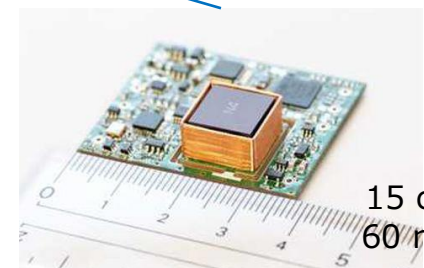
Miniaturization and power saving of circuits (Our group)



Chip-scale molecular clock(MIT)[2]



Chip scale "optical" clock (NIST group)[3]



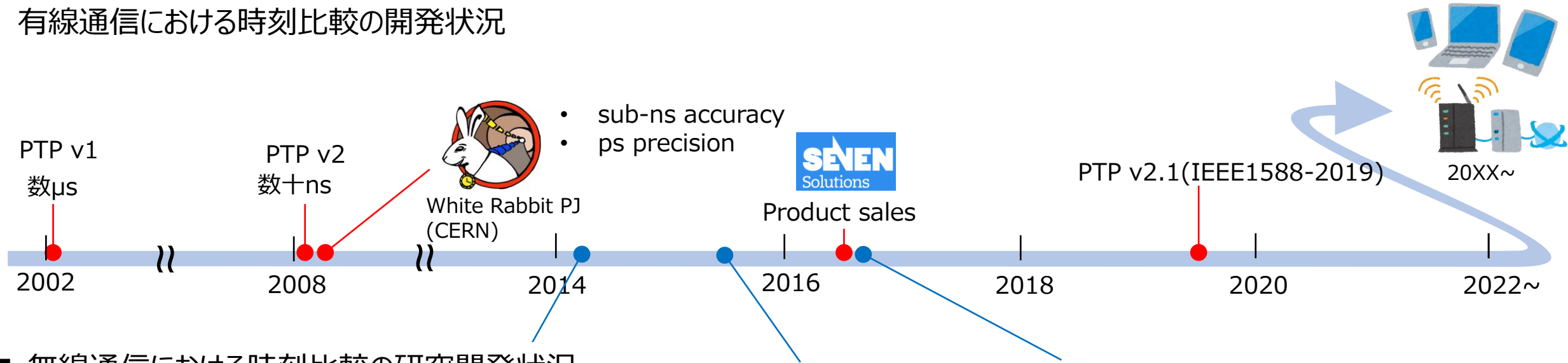
ULPAAC(Ricoh, AIST, TMU, Tokyo Tech.)[4]
15 cc
60 mW

- 商用化では各国から販売が開始されている状況。研究開発では様々なタイプの小型周波数標準が登場。
- 今後、携帯電話に搭載できるサイズの大きさと消費電力となることが期待される。

[1] S. Knappe et al., Appl. Phys. Lett, **85**, 1460(2004) [2]C. Wang et al. IEEE J. Solid-State Circuits,**54**, 4 pp.914-926
[3]Z. L. Newman et al., Optica, **6**, 5, pp.680-685(2019) [4]H. Zhang et al, IEEE J. Solid-State Circuits, **54**, 11, pp. 3135-3148(2019)

有無線通信における時刻比較の研究開発の状況

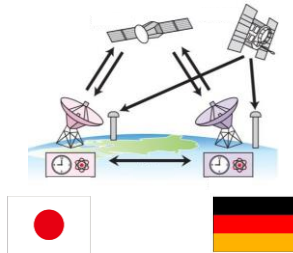
■ 有線通信における時刻比較の開発状況



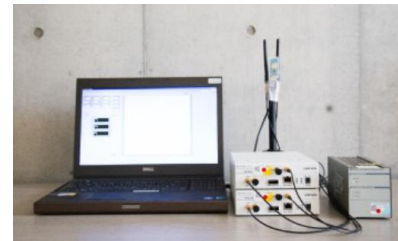
■ 無線通信における時刻比較の研究開発状況



Very-long-baseline interferometry (VLBI)



Two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT)



Original Assembly
Wireless two-way interferometry (Wi-Wi)

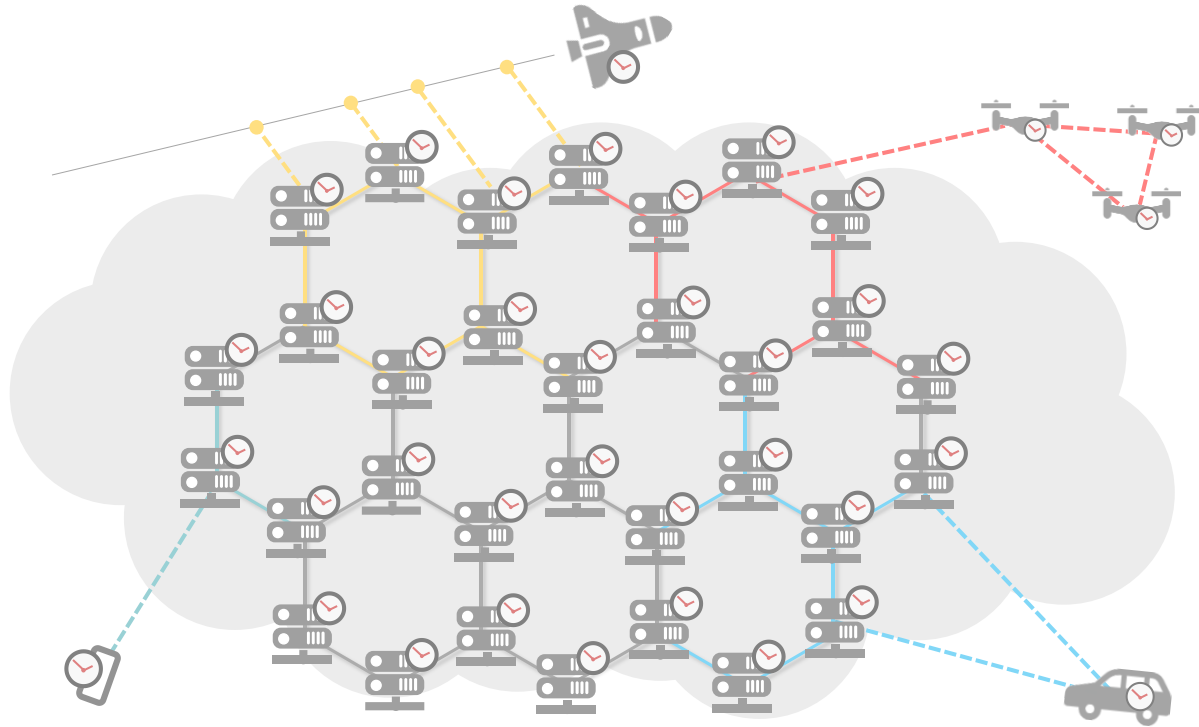


Prototype

- 920MHz (Unlicensed band)
- IEEE802.15.4
- few ps precision

- 有線・無線通信における時刻比較精度が近年大幅に向上。標準化や製品化も進捗。
- 今後、一般のデータ通信端末でも高精度な時刻比較ができるようになると思われる。

■ 小型原子時計 × 高精度時刻比較 = 分散管理型の同期システム！



分散管理型の同期システム

提案システムの特長

高い柔軟性

- どのような形のネットワーク構成でも対応

高い信頼性

- 各ノードがマスタークロックになれる
- ノード連携による障害耐性

高い安定性

- 原子時計による数

突拍子もない話なのでは？

- 普及が見込まれる原子時計と標準化が進捗する高精度時刻比較を活用した同期システムを提案。
- 本システムでは、主従関係はなく、どのような形のネットワーク構成にも対応できる。
- 障害が発生してもノードを連携することで、高い信頼性を確保できる。
- 複数の原子時計の時刻・周波数を連携して利用することで、ネットワーク全体の周波数安定性が向



Smart Grid



スマートグリッドの概念図

類似点

1. 供給源の多様化

過去、現在：
未来：

2. 協調動作

集約、管理するもの
最小化するもの
供給するもの

3. 供給者、消費者、プロシューマーの存在

供給者：
消費者：
プロシューマー：

スマートグリッド



発電所
ソーラー、風力など

電力
送電ロス
電力

発電所
電力使用者
ソーラー所有者

分散時刻同期



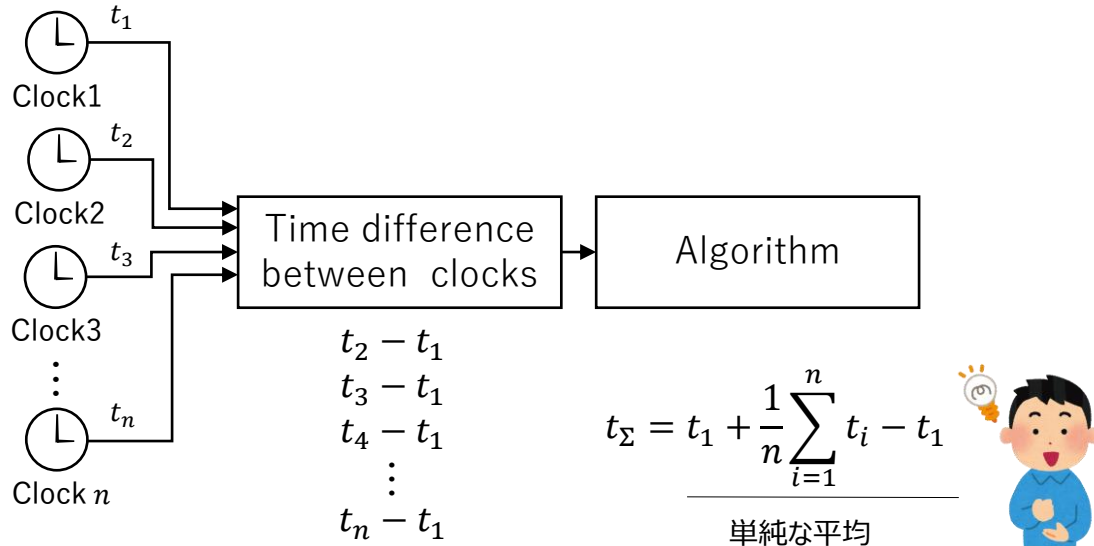
NICT
小型原子時計

時刻、周波数情報
伝搬誤差
時刻、周波数

NICT
原子時計非搭載の端末
原子時計の所有者

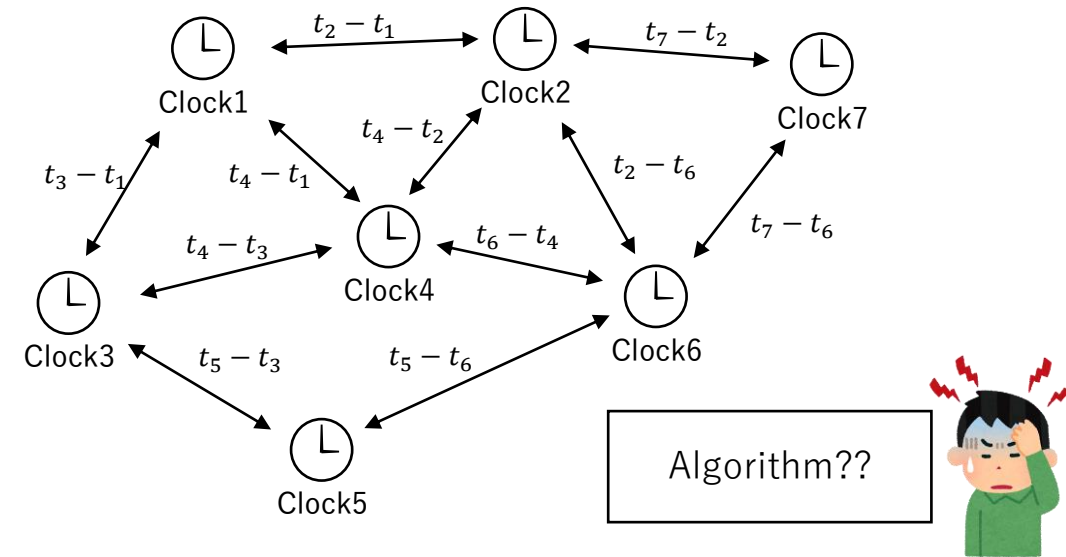
- 本技術をベースにした時刻同期の将来像はスマートグリッドの概念と似ている。
- 小型原子時計の普及に伴って、時刻同期システムにおいても**集中型から分散型への移行が進捗する**と予想。

従来の理想的なシステム(日本標準時システム)



ネットワーク構成：スター型のみ

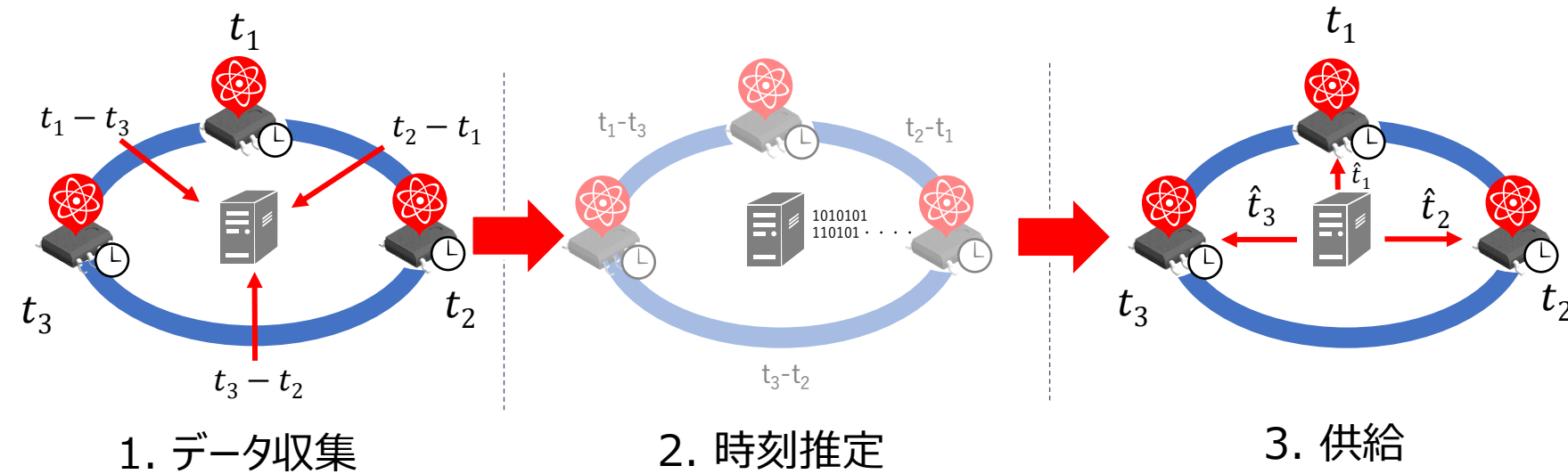
実際のシステム(通信ネットワーク)



ネットワーク構成：ツリー、スター、メッシュ、スパインリーフ…

- 複数の原子時計の平均処理は日本標準時など特殊用途で利用されてきた。
- ただし、日本標準時システムで利用される時刻管理を、実際の通信ネットワークのようなネットワーク構成にそのまま適用できない。

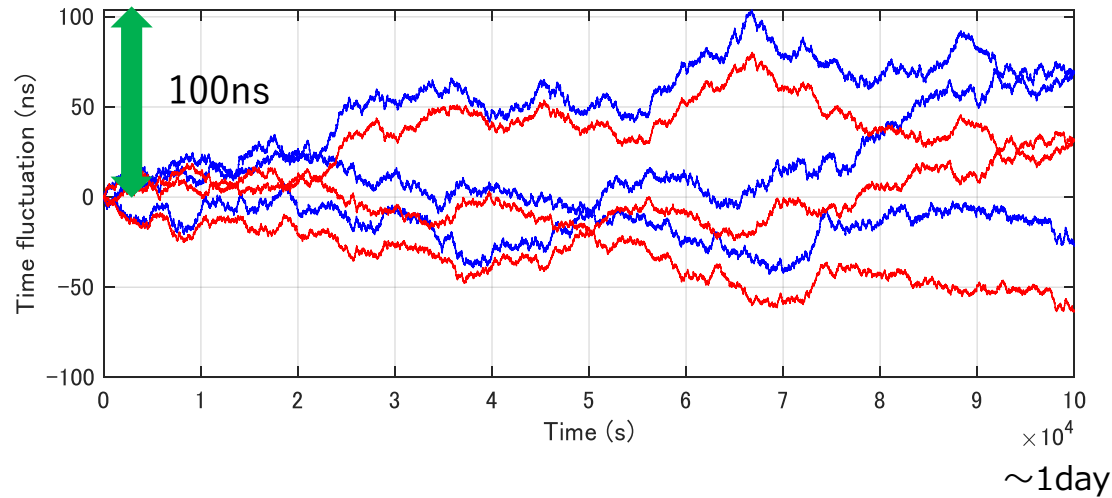
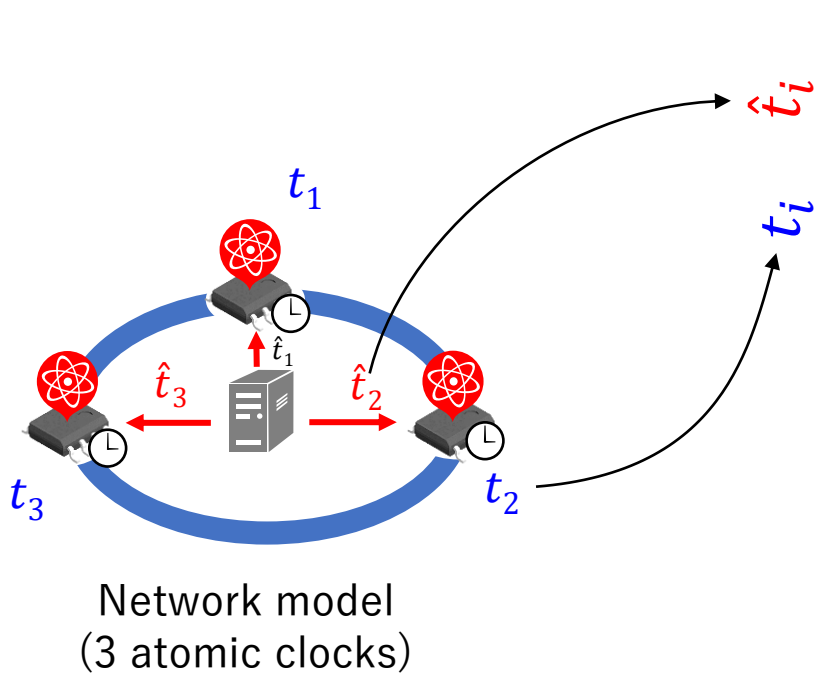
提案法の手順



1. 隣接ノードから時刻・周波数差情報を収集
2. 時刻・周波数差情報から各ノードの最も確からしい時刻を推定
3. 推定結果を各ノードに供給する

- 原子時計の性質に基づいた数理モデルとデータ同化を活用することで、各ノードに最も確からしい時刻を供給することができる。

適用例①：フルメッシュ型の場合のシミュレーション結果例

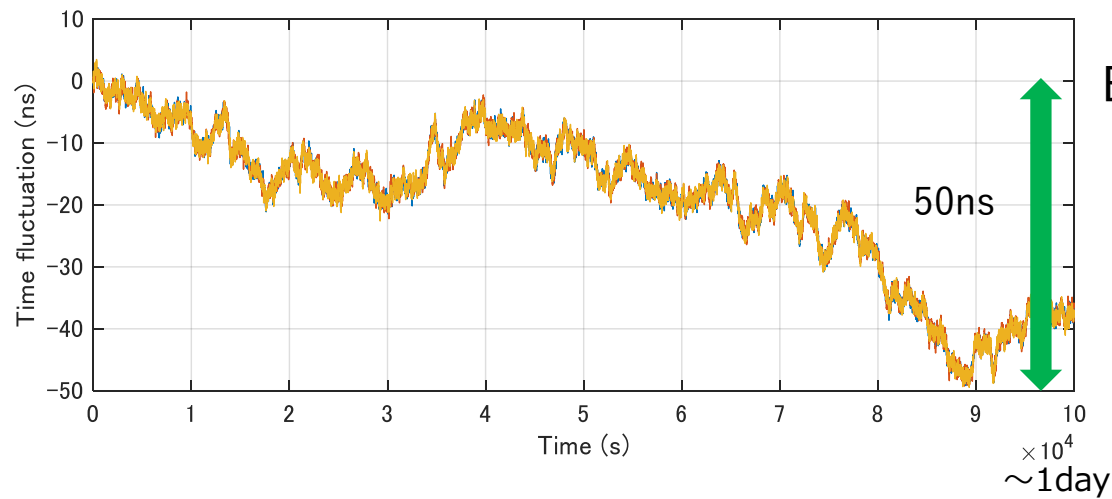


赤線：推定値

\hat{t}_i

青線：参照値

t_i



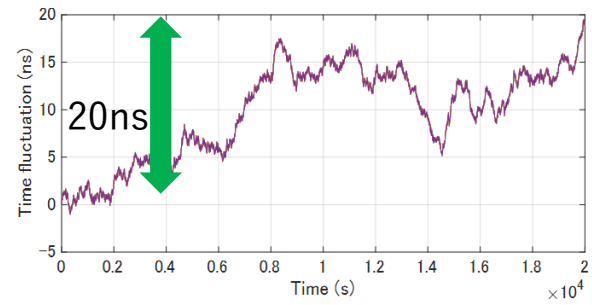
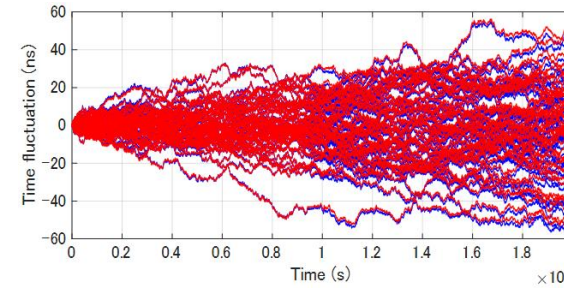
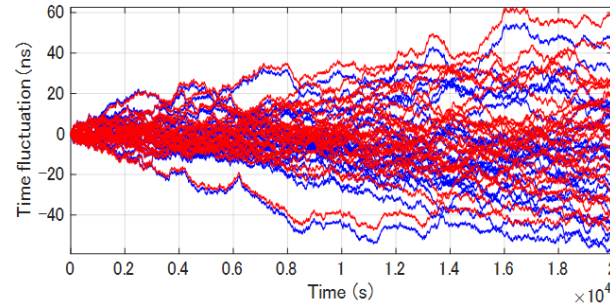
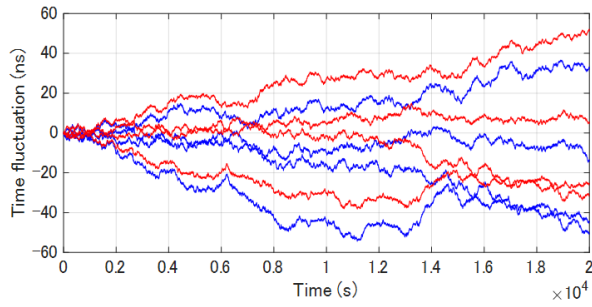
Estimation error ε_i

$$\varepsilon_i = \hat{t}_i - t_i$$

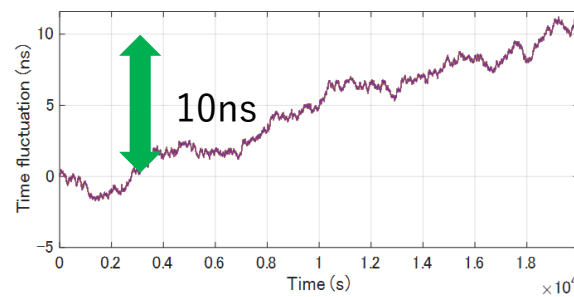
- 本技術を適用することでより安定した時刻を刻むことができる。

適用例①：フルメッシュ型の場合のシミュレーション結果例

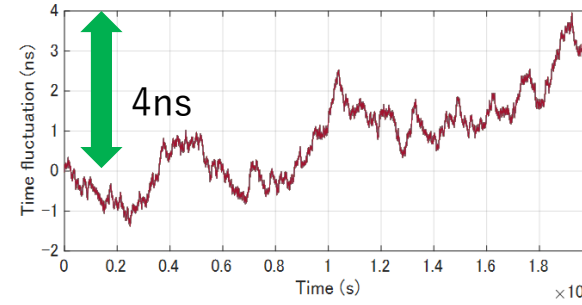
$$\varepsilon_i = \hat{t}_i - t_i$$



N=4



N=25



N=64

赤線：推定値

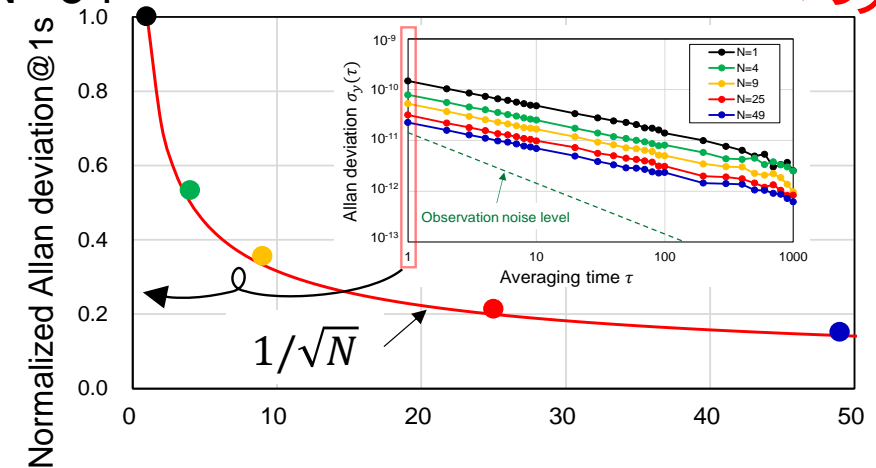
\hat{t}_i

青線：参照値

t_i

原子時計による数の力

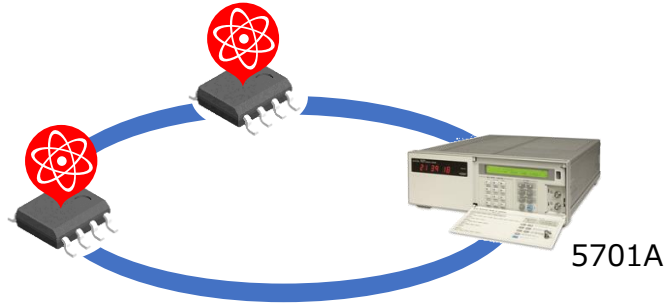
- 本技術の適用により、原子時計の数が増えるほどホールドオーバー性能の向上が期待できる。



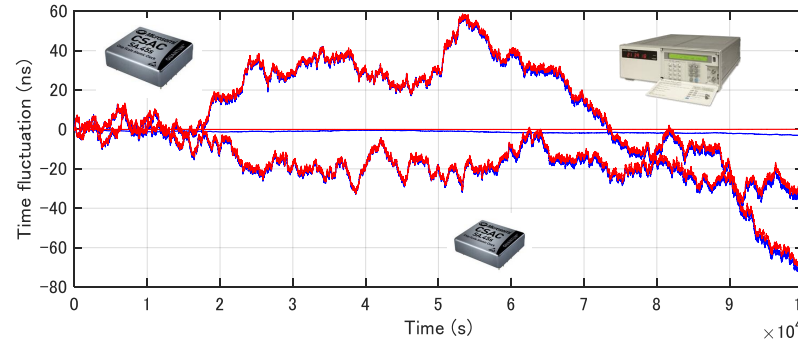
Number of clocks N

適用例②

ケース 1 : 高精度な原子時計が含まれる場合



ネットワークモデル
(小型原子時計 x 2, Csビーム型 x 1)



赤線 : 推定値

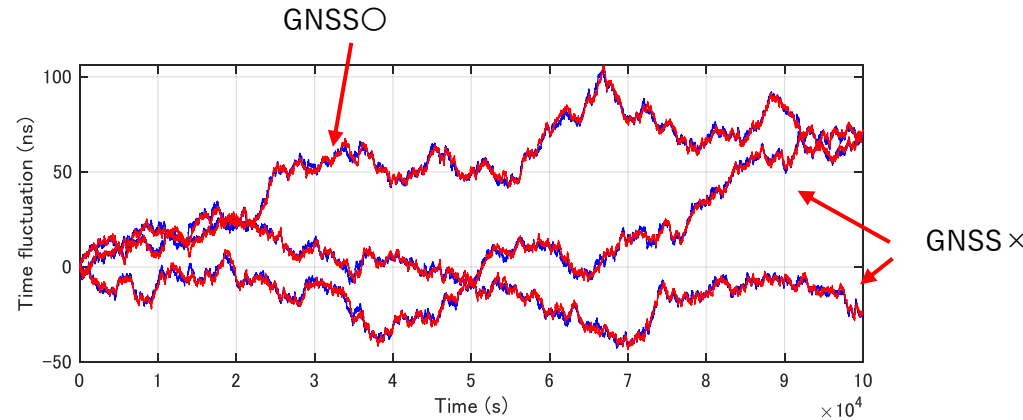
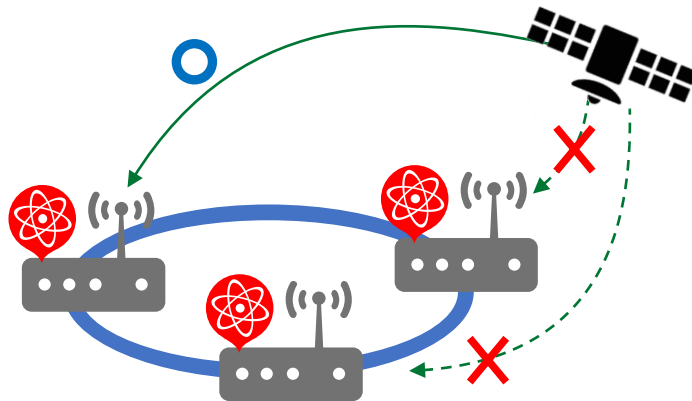
\hat{t}_i

青線 : 参照値

t_i

パラメータ設定によって自動的にマスタースレーブ関係が成立
本システムは従来の同期網を包括する

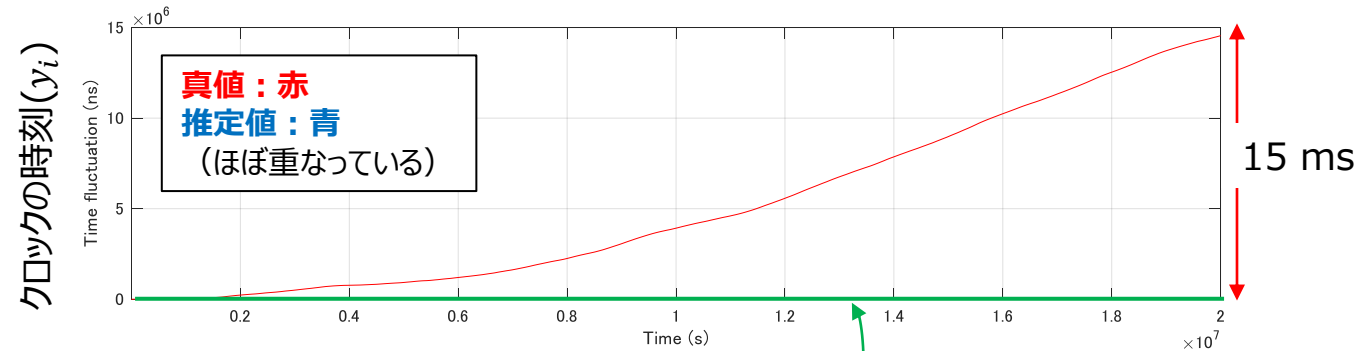
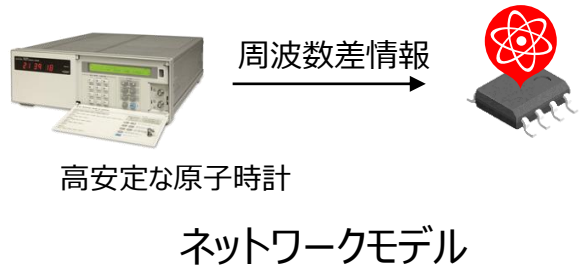
ケース 2 : 1台だけGNSSが受信できる場合



受信可能な端末だけでなく他の時計の時刻推定精度も向上
ネットワーク内の少なくとも1つがGNSS受ければネットワーク全体が恩恵を受ける

- 単体で動作させるよりもネットワークを組んだ方が、安定性とロバスト性の面で有利に働く

ケース3：周波数差情報(片方向通信)のみ得られる場合

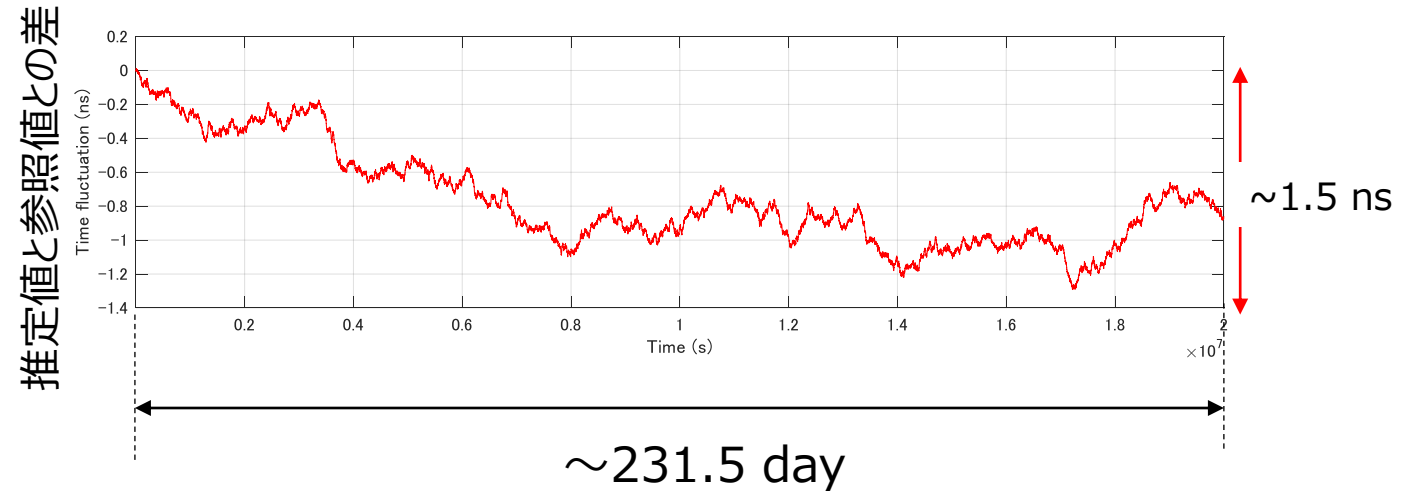


赤線：推定値

\hat{t}_i

青線：参照値

t_i



- 双方向通信だけでなく、片方向通信のみによっても本技術の効果が得られる。
- アップリンクとダウンリンクの通信速度が異なるようなIoT端末における非対称通信においても効果が期待できる。
→ 超多数の端末が接続されているネットワークにおける時刻同期に効果が期待できる。

- ネットワーク構成の柔軟性を活かして、
 - データセンターにおける時刻同期
 - V2V(Vehicle-to-Vehicle)、V2X(Vehicle-to-Everything)などのサイドリンク方式の通信における時刻同期
- 多数接続を活かして、
 - ローカル5G/6Gにおける時刻同期
 - IoT,M2M(Machine to Machine),センサーネットワークにおける時刻同期

- 発明の名称 : 時刻同期ネットワーク
 - 公開番号 : 特開2022-14406
 - 出願人 : 情報通信研究機構
 - 発明者 : 原基揚、矢野雄一郎、井戸哲也
-
- 発明の名称 : 時刻同期装置及びネットワーク
 - 出願番号 : 特願2021-63282
 - 出願人 : 情報通信研究機構
 - 発明者 : 矢野雄一郎、井戸哲也、原基揚

- 高精度に発振器をモデル化するための、実機の時系列データセットが多く必要。複数かつ長期間の時系列データを所有する発振器メーカーとの共同研究を希望。
- 企業連携の取り組みが一部では始まっているところですが、時刻同期に関してモバイル/IoT基地局やローカル 5 G/6G分野への応用展開に興味がある企業との共同研究を希望。

国立研究開発法人 情報通信研究機構
イノベーション推進部門
知財活用推進室

TEL 042-327-6950

e-mail ippo@ml.nict.go.jp