

# 原子時計チップの開発と その社会実装に向けたシナリオ

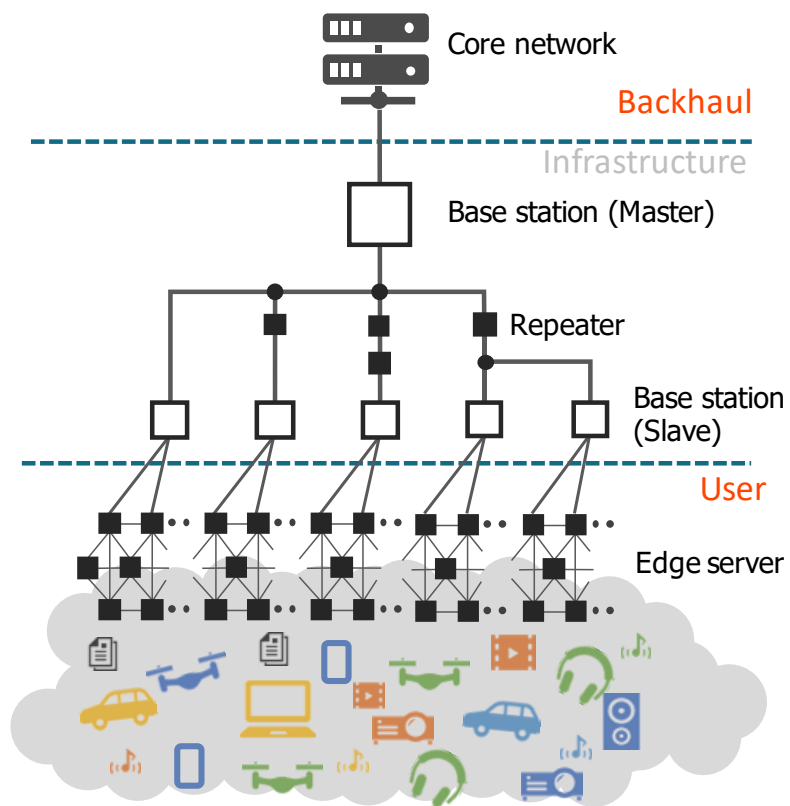
国立研究開発法人情報通信研究機構  
電磁波研究所 時空標準研究室  
原 基揚

## 1. 未来展望と開発方針

## 2. 原子時計チップの開発進捗

## 3. NICTにおけるその他の先進的取り組み

## 4. まとめ

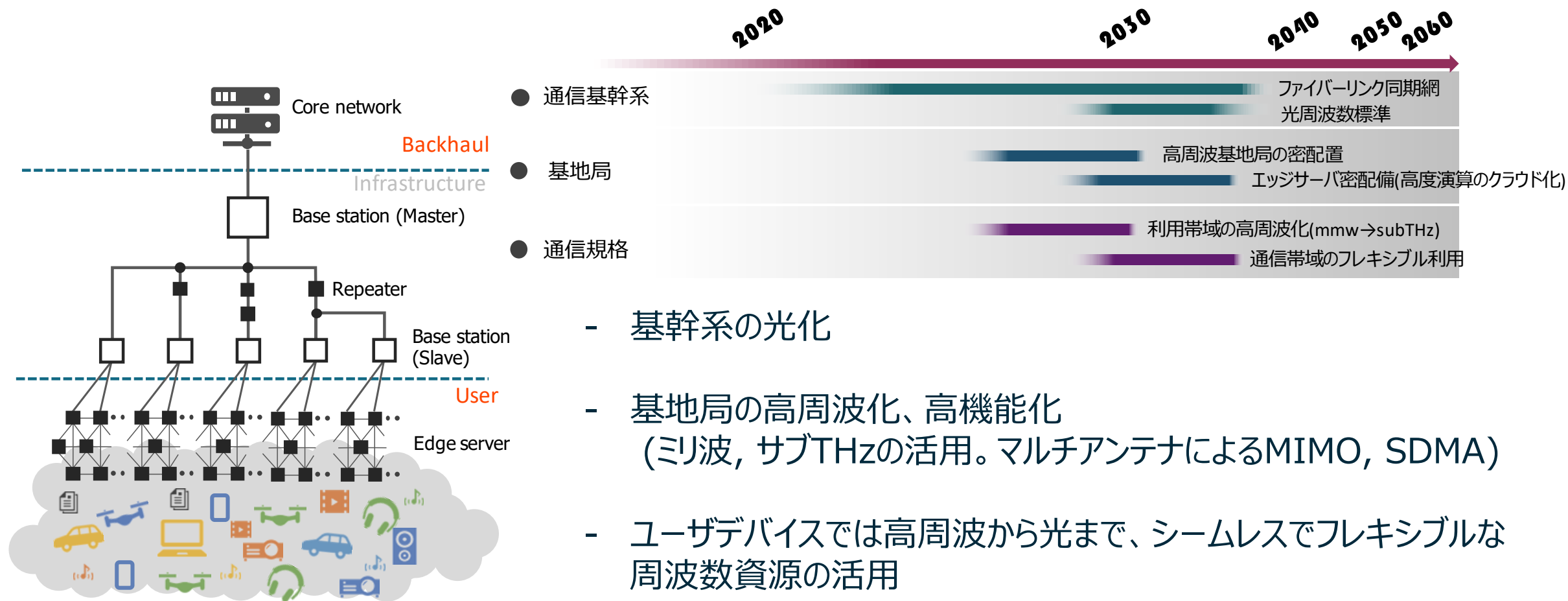


携帯電話の枠を超え、モノのインターネット(IoT)を志向した5G

インターネットは対象を”ヒト”から”モノ”に変え、そのカバー率を100%とすることを目指している。

その先に求められる通信インフラとは？

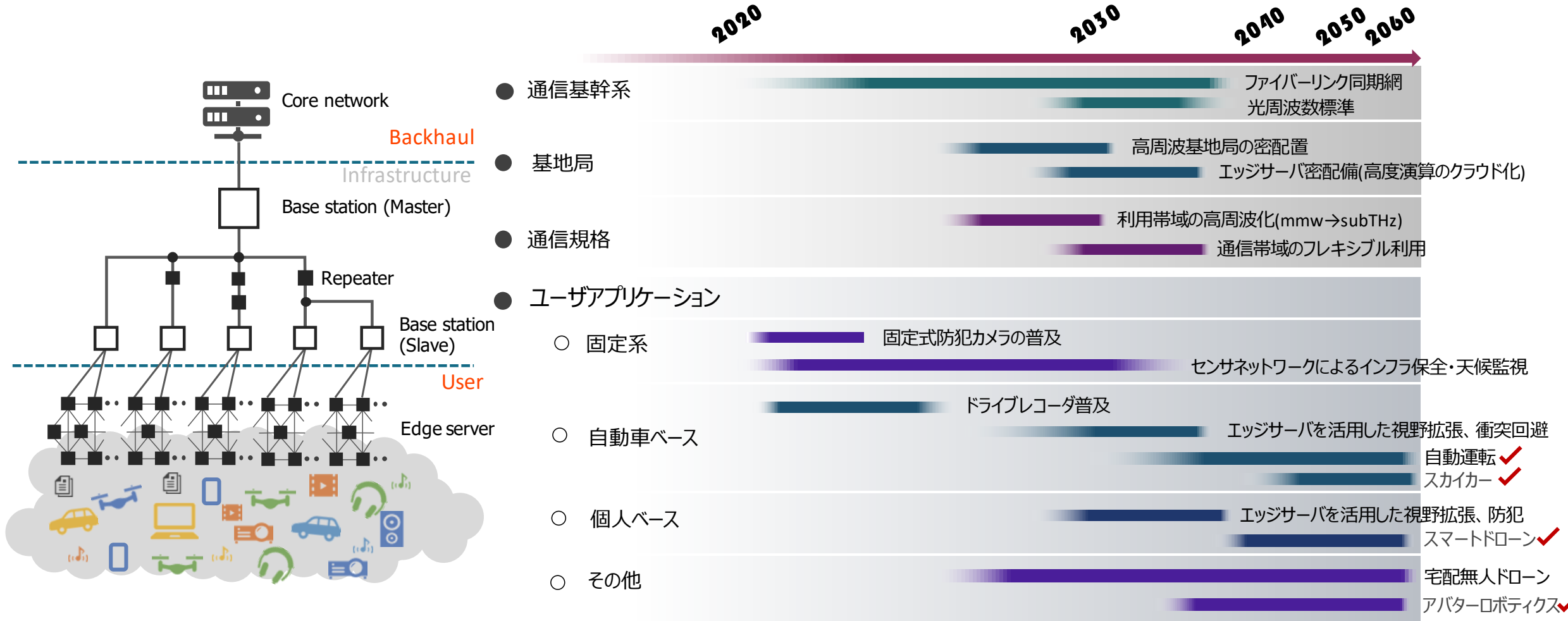
# 通信システムの展開予想 2030年を見据えて



- 基幹系の光化
- 基地局の高周波化、高機能化  
(ミリ波, サブTHzの活用。マルチアンテナによるMIMO, SDMA)
- ユーザデバイスでは高周波から光まで、シームレスでフレキシブルな周波数資源の活用

➡ 高速・大容量・低遅延化の更なる加速

# 通信システムの展開予想 2030年以降の応用展開



インフラの拡充に伴い、様々なアプリケーションが開花する。

興味深い応用分野はたくさんありますが、全てを話すには時間がありません・・・

# 近未来予想の一例

## 例えば) スマートカメラドローンシステム

デバイス間時刻同期(測長・測位)

- 無線時刻同期
- ドリフトフリークロック(原子時計)

原子時計 on Smartphone  
→ GPS衛星の携行



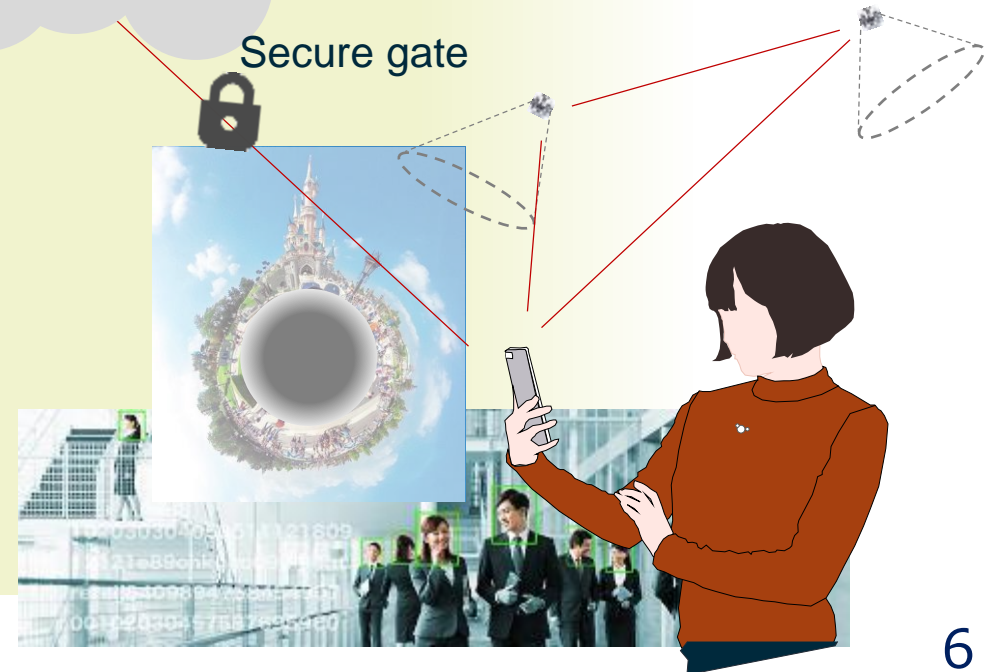
パーソナルな領域での

- 視野拡張
- 顔認証
- 感情判別

CLOUD computing  
AI processing  
Memorize

Secure gate

Smart drones



もちろん。社会通信インフラの拡充も大切

### ● 次世代クラウド

AI画像処理のクラウド化

大容量メモリクラウド

パーソナル境界でのセキュリティ

### ● 次世代通信

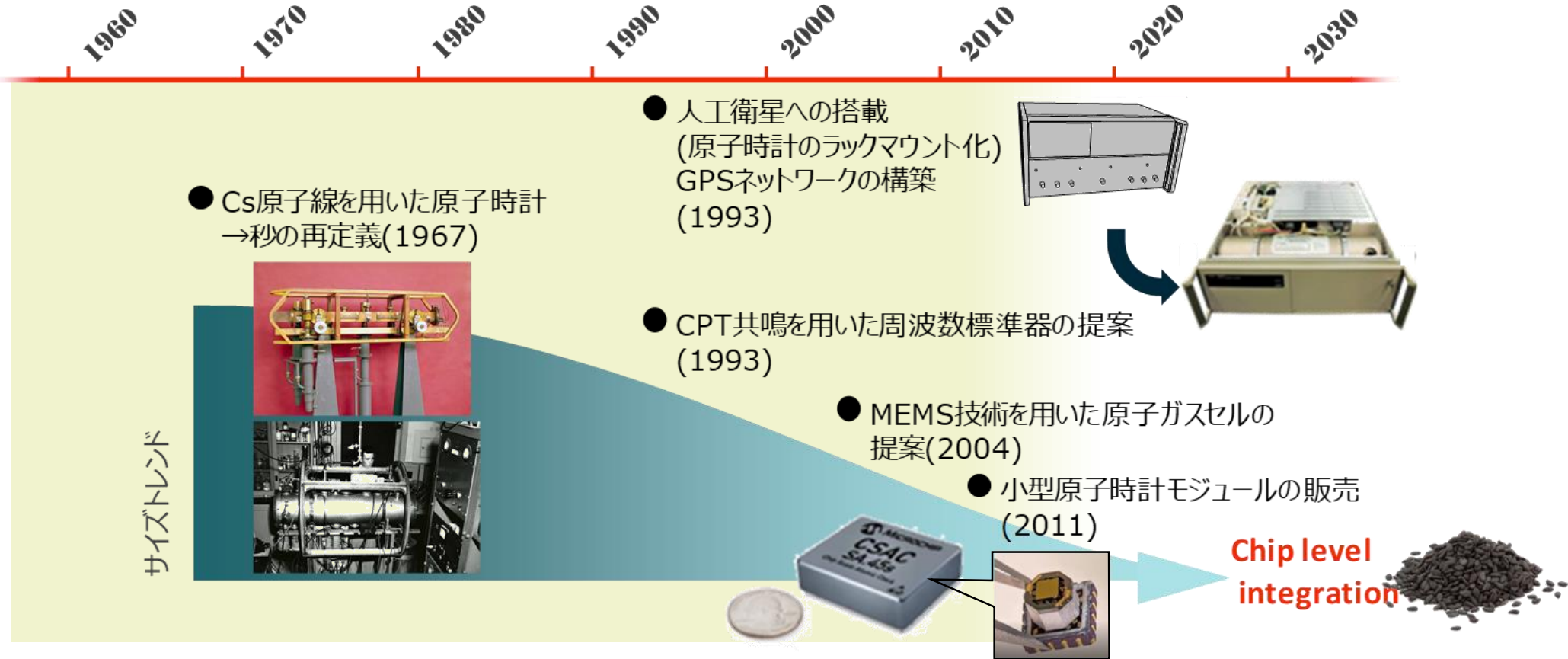
高速大容量(高周波化)

遅延管理(高周波化+マルチアンテナ)

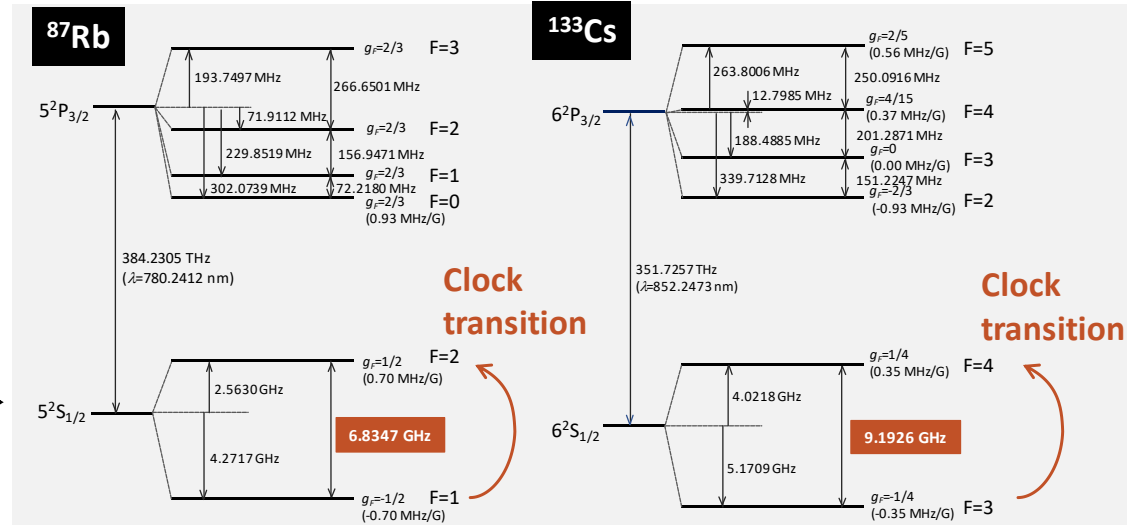
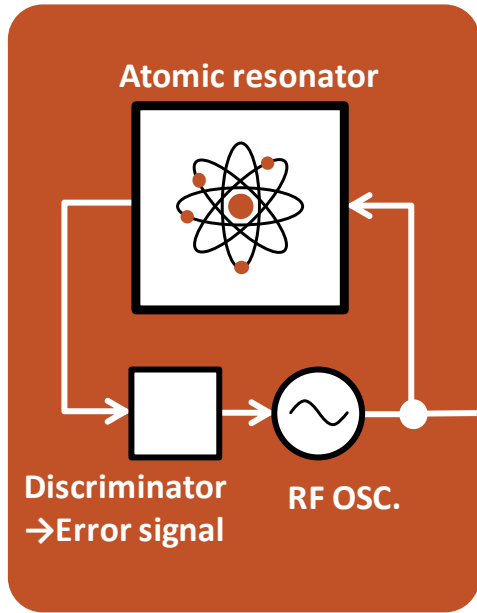
# 現状と開発方針

## GPSの脆弱性を補完する原子時計

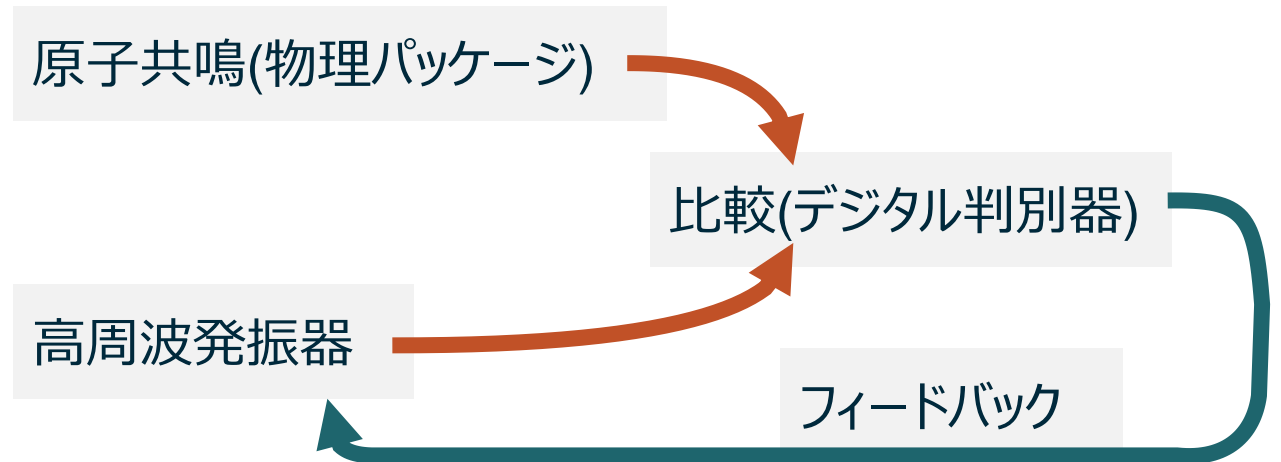
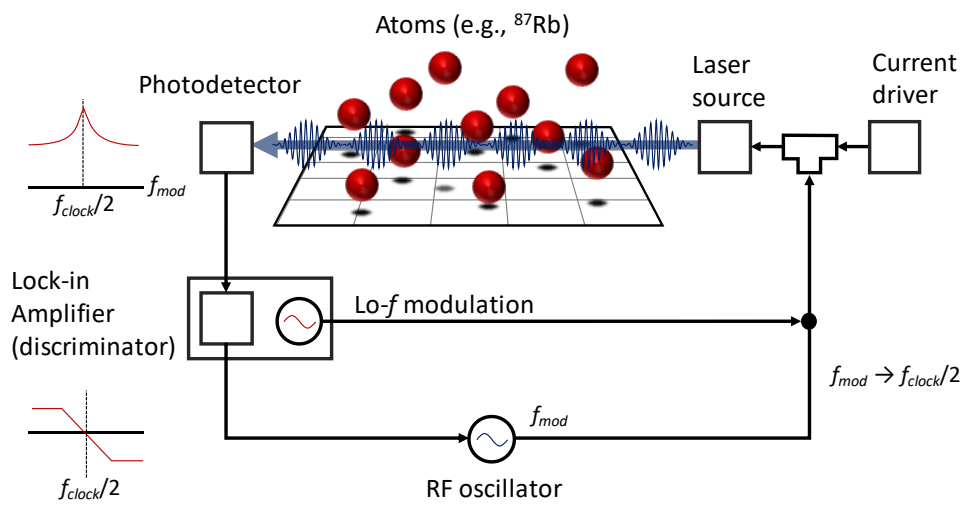
船舶・航空機ではパームトップサイズで十分 → パーソナルシステムへの搭載には壁



NICTでは原子時計をチップ化する研究開発を進めています。



原子の吸収スペクトルを周波数の標準に活用





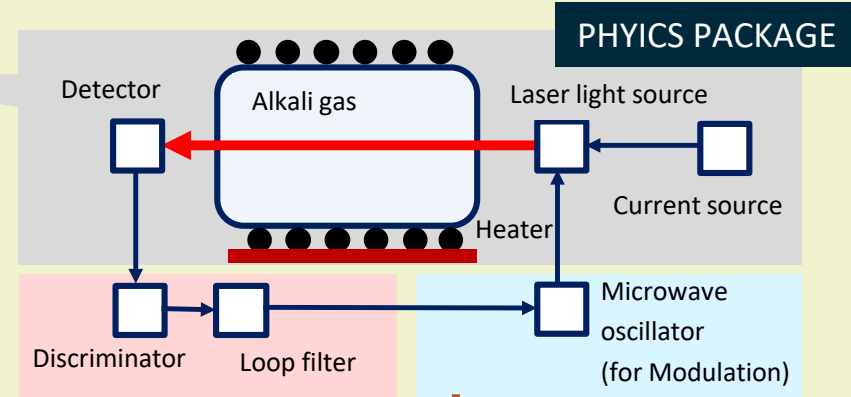
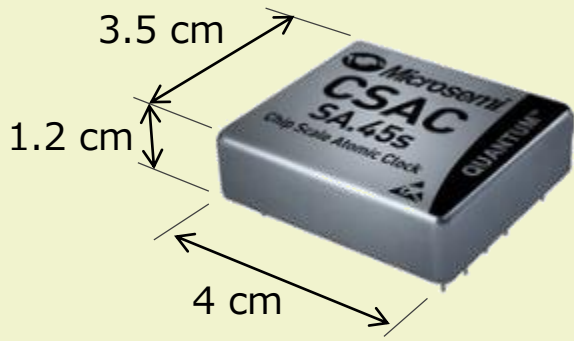
1. 未来展望と開発方針

2. 原子時計チップの開発進捗

3. NICTにおけるその他の先進的取り組み

4. まとめ

# 開発の進捗 既存製品のキャッチアップ



Size : 4cmx3.5cmx1.1cm  
 Power consumption: <120 mW

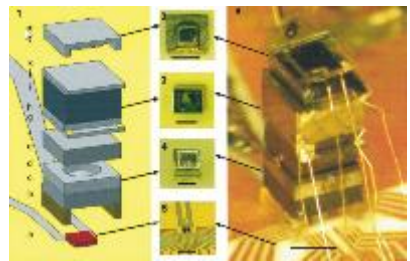
Physical package:	16%
RF control circuit: (VCO+PLL) :	40% (19%+21%)
Lock-in-Amp.:	32%
Regulation and other passive components :	12%

高周波発振器：  
 広いボード占有面積、高い消費電力

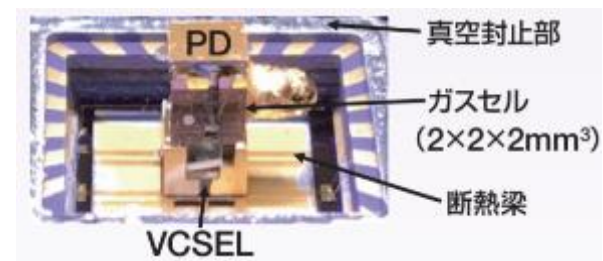
デジタル判別系：  
 広いボード占有面積、高い消費電力

ガスセル(物理パッケージ)：  
 スタック構造による高すぎるデバイスハイト

NIST



AIST



高周波発振器：広いボード占有面積、高い消費電力

➡ 圧電薄膜を利用したGHz帯機械共振子発振器を開発 (PLL free 技術)

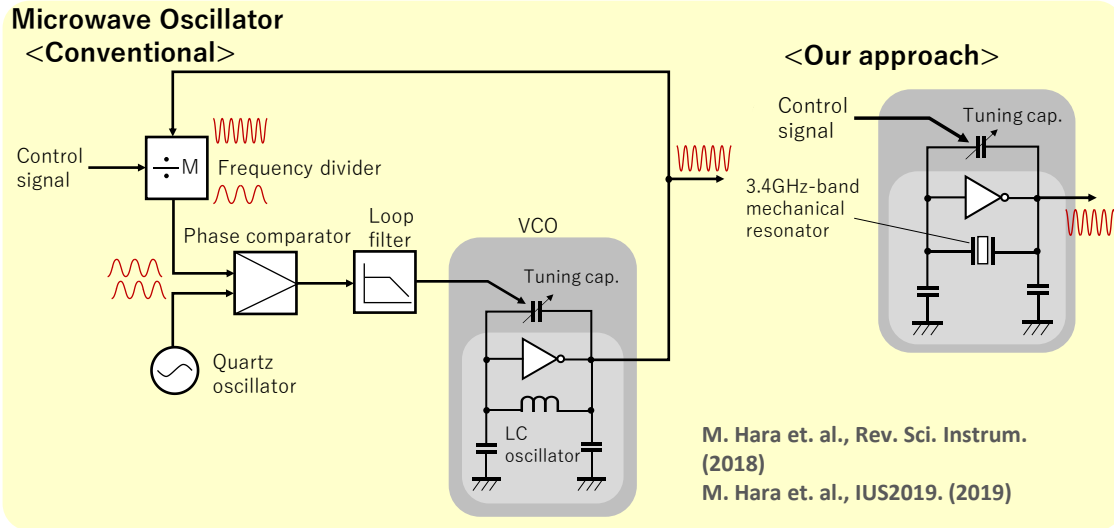
ガスセル(物理パッケージ)：スタック構造による高すぎるデバイスハイト

➡ 光MEMS技術を利用したコンパクトなガスセルの開発

デジタル判別系：広いボード占有面積、高い消費電力

➡ 圧電薄膜の非線形振動を活用した分周発振器の開発 (Lock-in Amp. Free技術)

世界初のNICTオリジナル技術で原子時計のチップ化技術をリード！



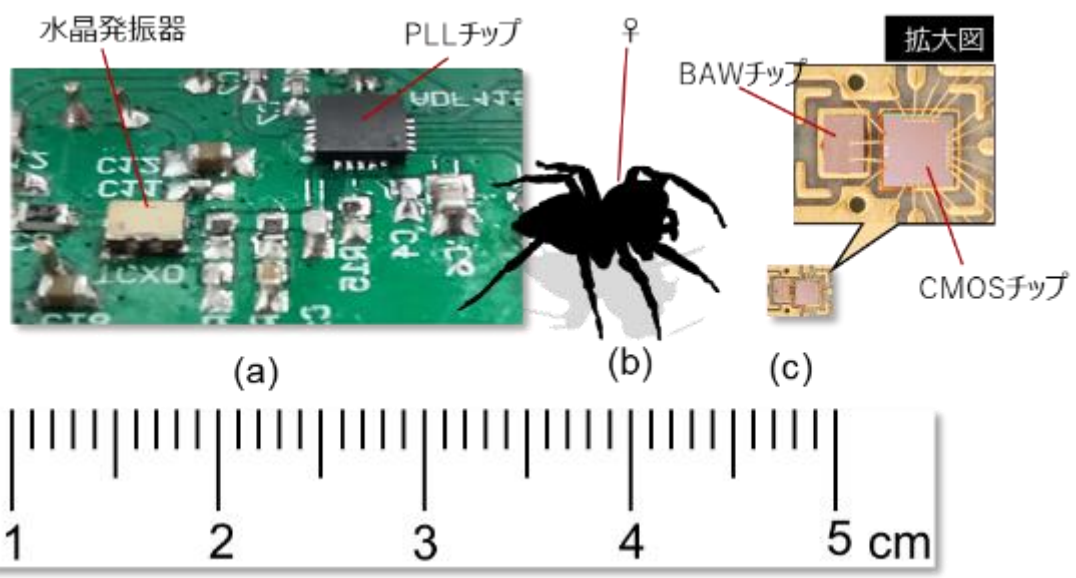
## 従来

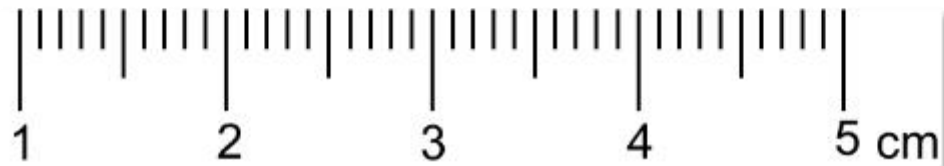
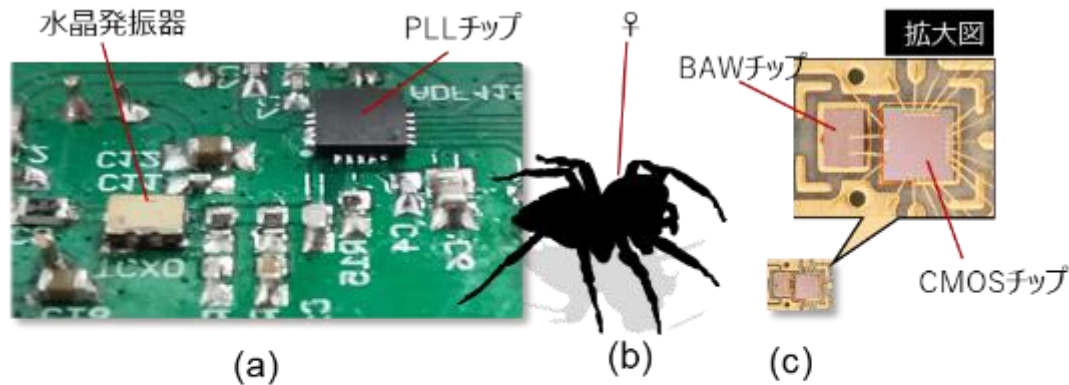
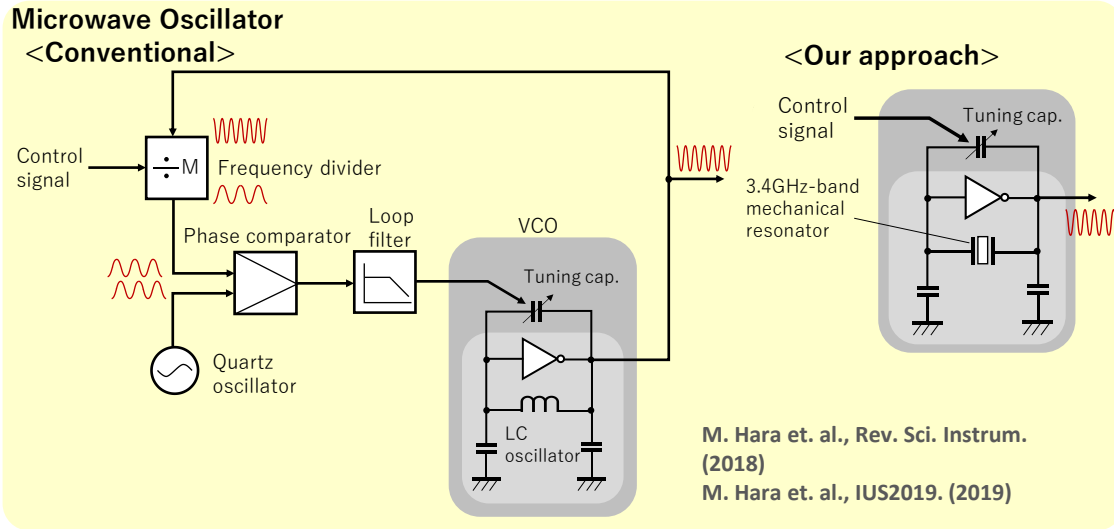
MHz帯のバルク水晶発振器とPLL回路で  
 吸収スペクトルのあるGHz帯に周波数逡倍

## 提案技術

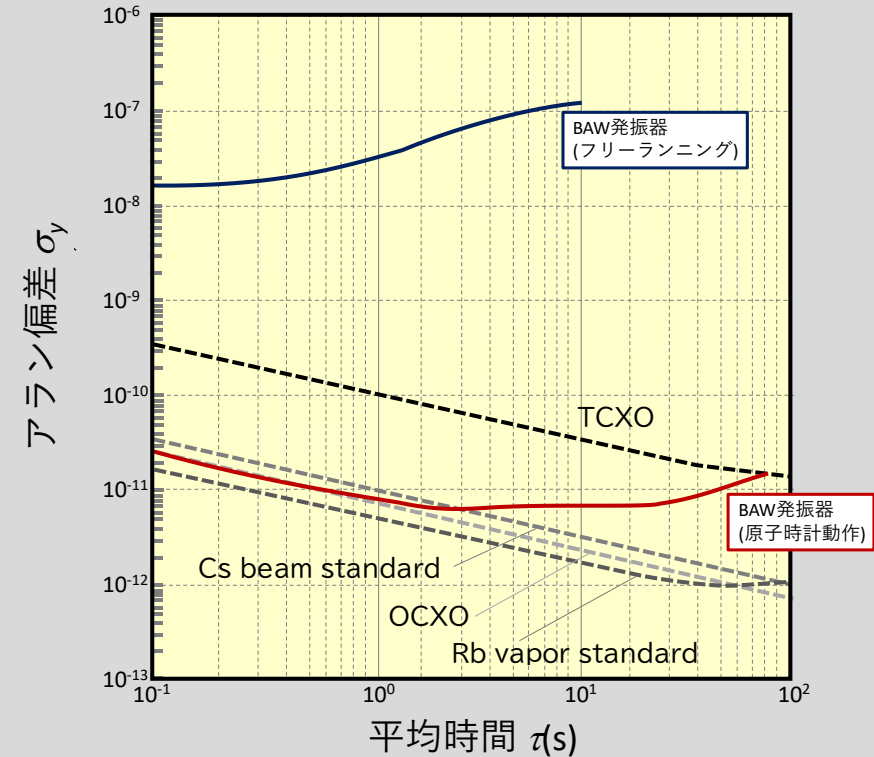
GHz帯の薄膜発振器で  
 吸収スペクトルのあるGHz帯を直接発振

→ 小型化・低消費電力化に成功

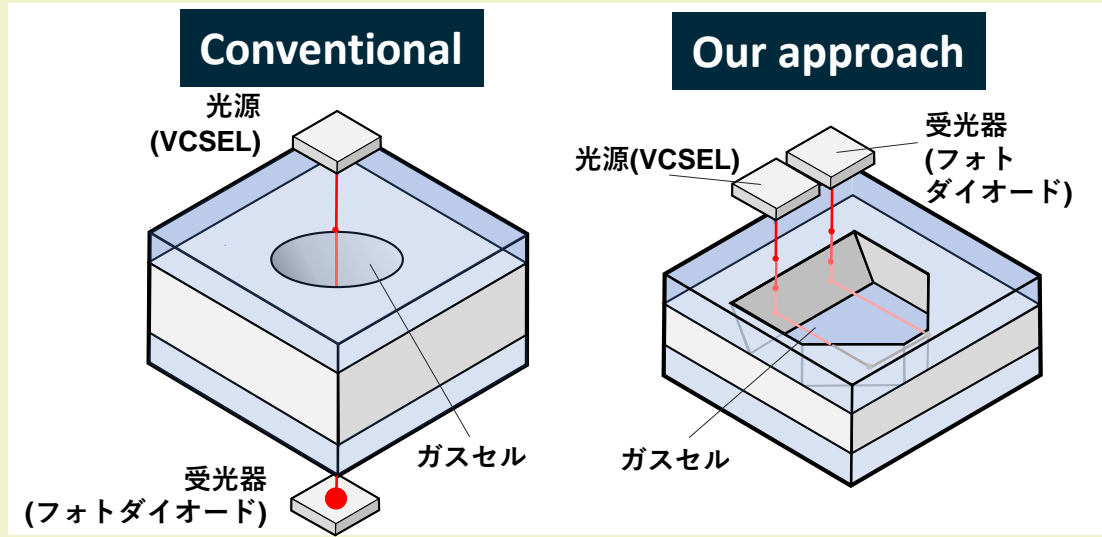




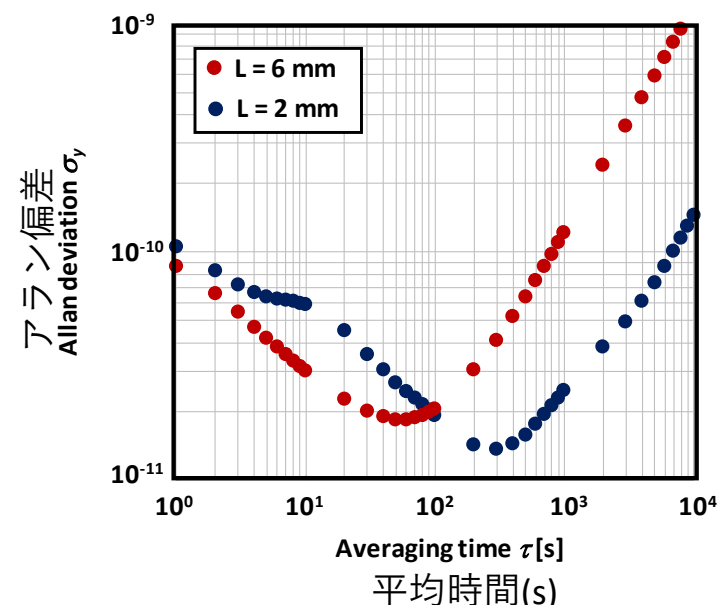
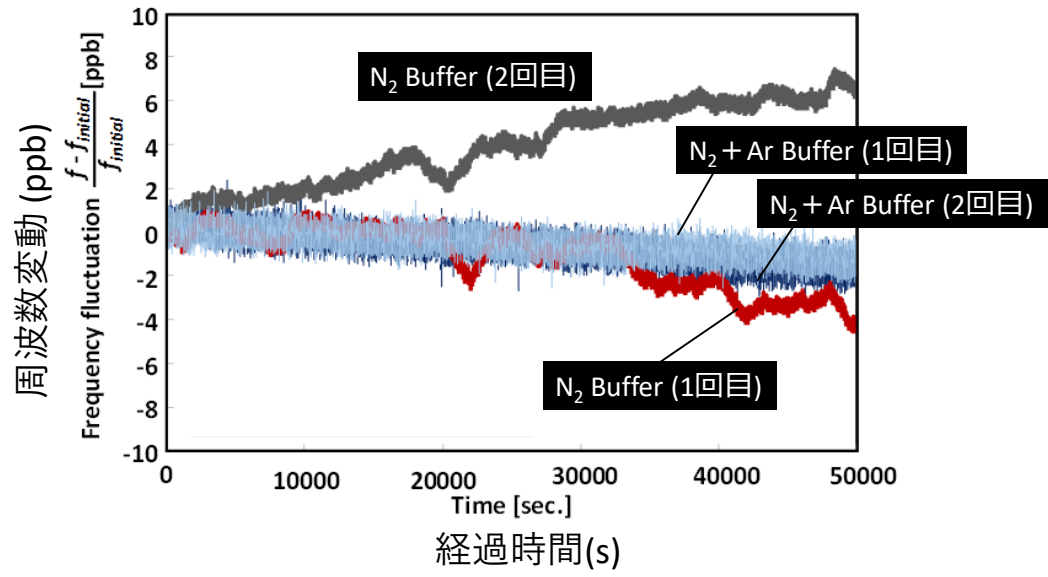
## 原子時計への組込実験(周波数安定度評価)



ラックマウント式の原子時計に遜色ない、  
周波数安定度を確認

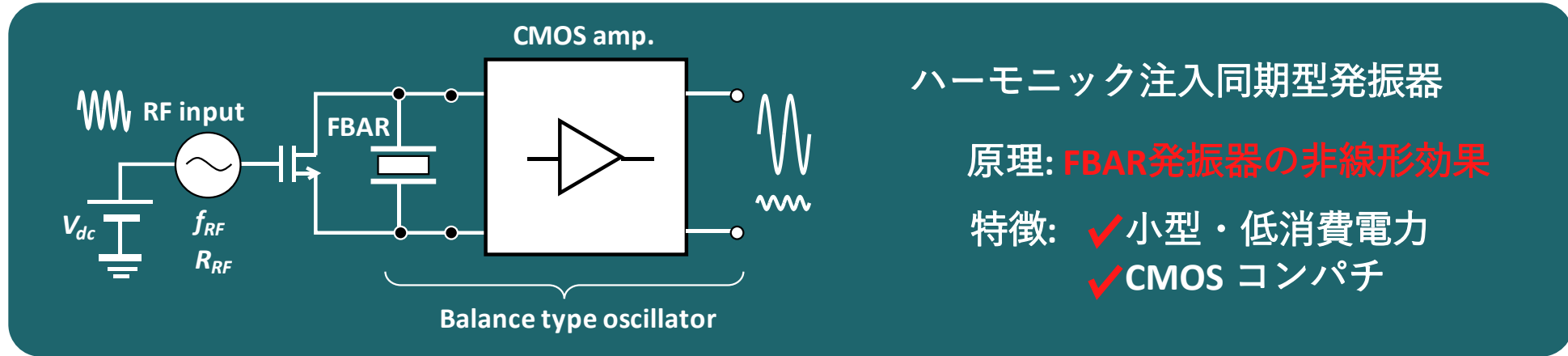


- ガスセルへのMEMSミラー集積化
- + 干渉光路の効率設計(薄くても長い光路長)
- + 光半導体素子の片面集約→集積化

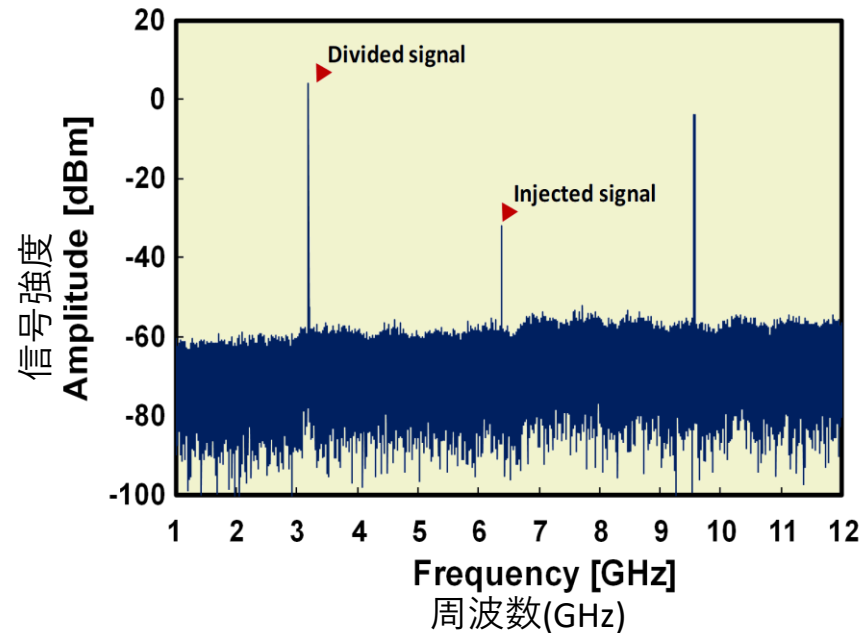


反射型セルでは、  
世界に先駆けて  
原子時計動作を確認！

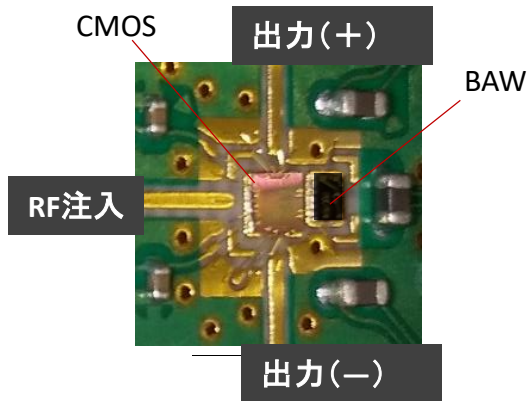
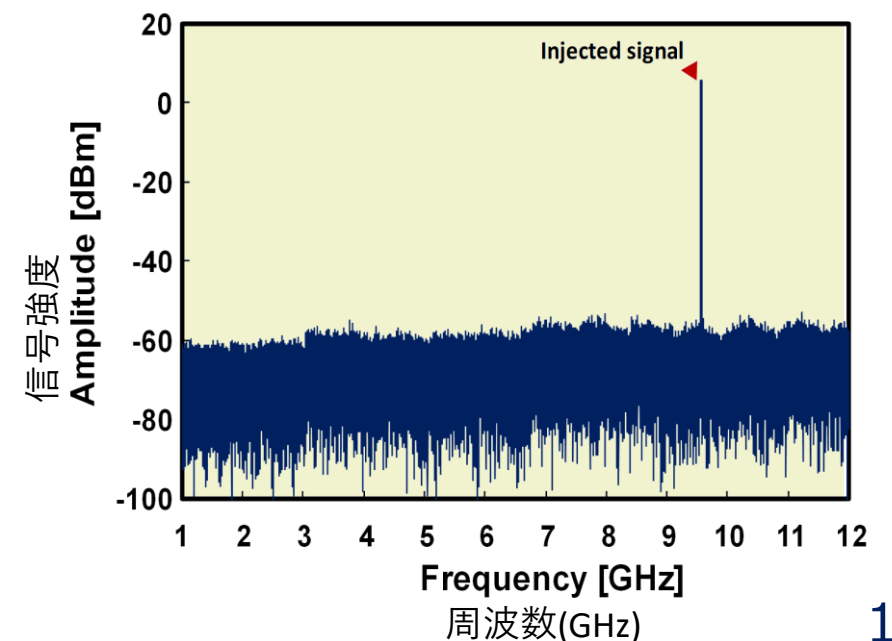
# デジタル判別系の省略(1) 非線形効果の活用



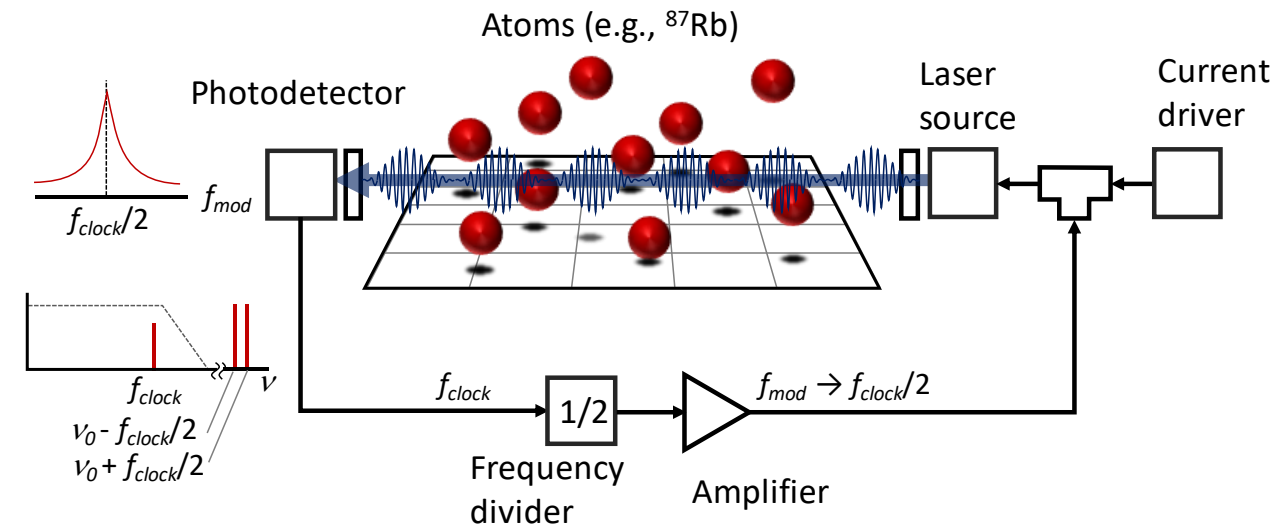
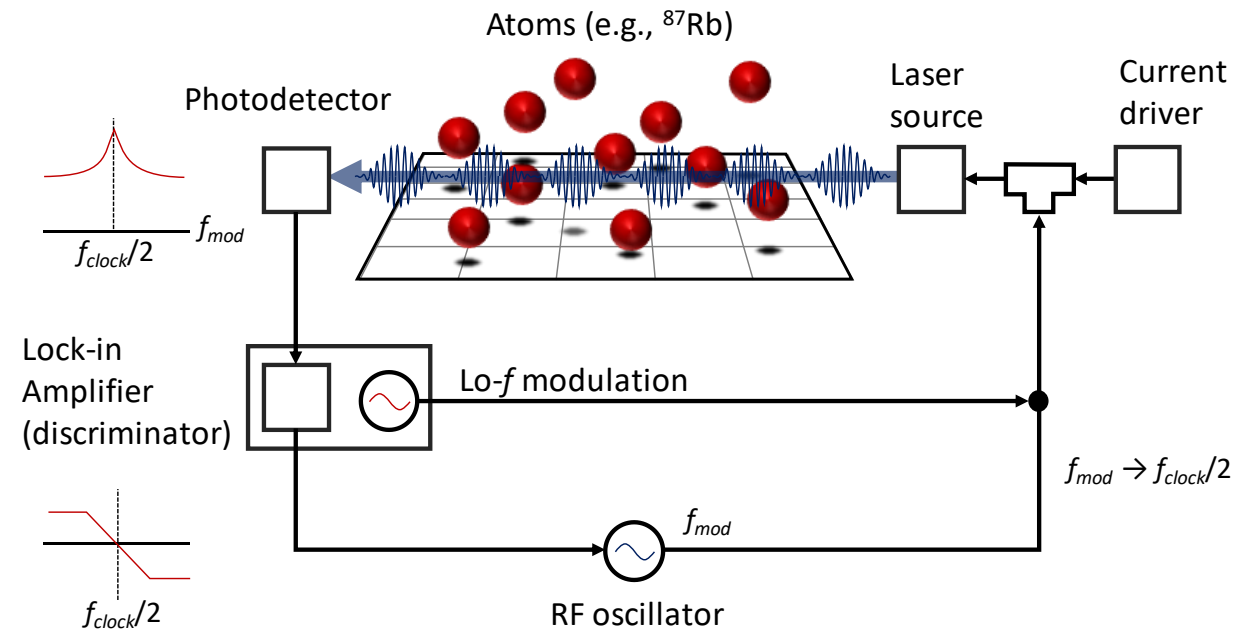
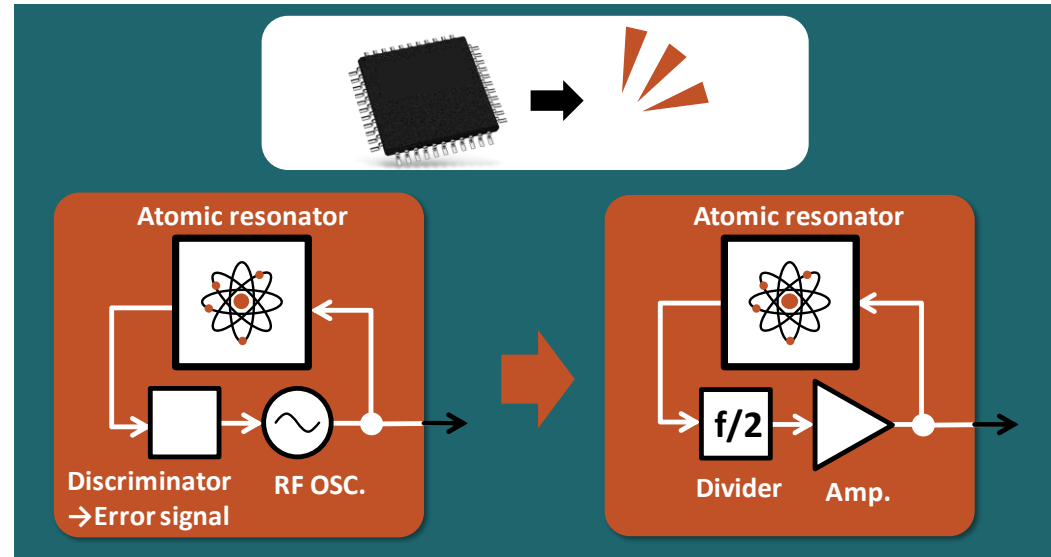
2<sup>nd</sup> harmonics injection → divided-2-mode



3<sup>rd</sup> harmonics injection → No response



# デジタル判別系の省略(2) 自励発振による判別器の省略





民間セクターの活用には市場の明確化と共に製造コストも重要

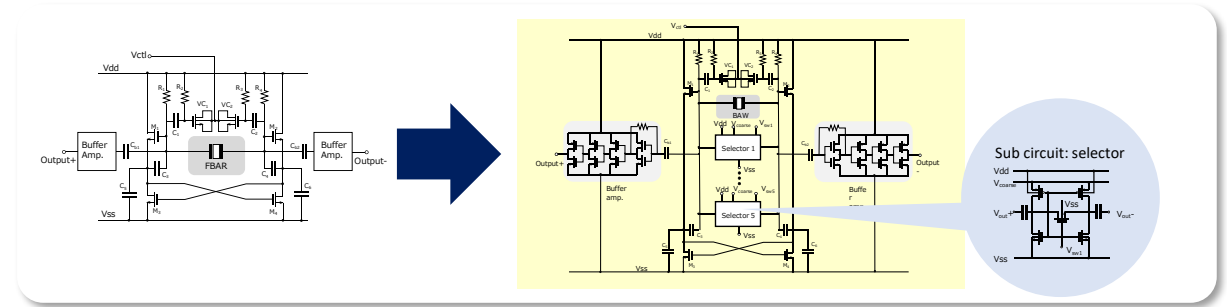
- **テクノロジーダウン (65nm CMOS → 180nm CMOS)**

65nm CMOS MEMS発振器(既開発)を180nm CMOSプロセスで再版 脱VDEC

- **歩留まりを低下させる部品選別の緩和(スクリーニングフリーテクノロジー)**

<発振器の初期周波数の可変性>  
スイッチング回路の集積化

<VCSEL初期波長の可変性>  
MEMS+VCSELコンポジット構造の提案

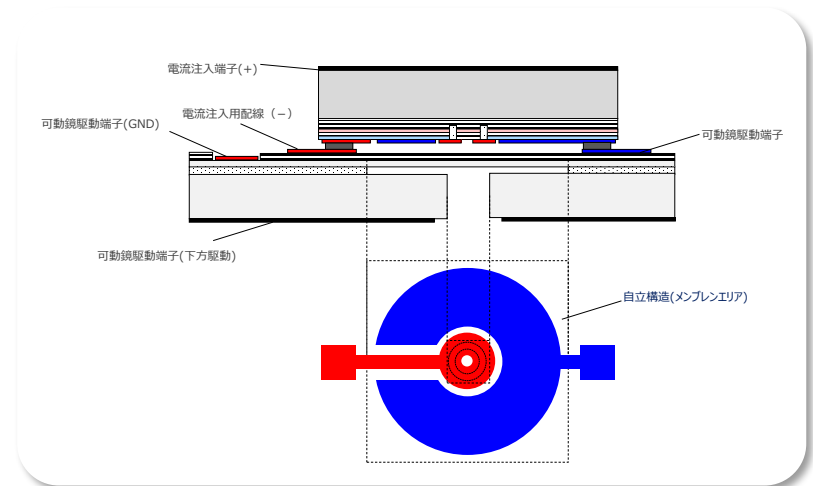


- **サプライチェーンを意識した材料開発**

新規RbソースRbN<sub>3</sub>の国内製造と当該試薬の分解評価

- **技術支援制度を利用したオープン化**

原子時計動作評価系 / CPTシミュレータ



1. 未来展望と開発方針

2. 原子時計チップの開発進捗

3. NICTにおけるその他の先進的取り組み

4. まとめ

# 原子時計チップ以外にも

## デバイス間時刻同期(測長・測位)

- 無線時刻同期
- ドリフトフリークロック(原子時計)

原子時計on Smartphone  
→ GPS衛星の携行



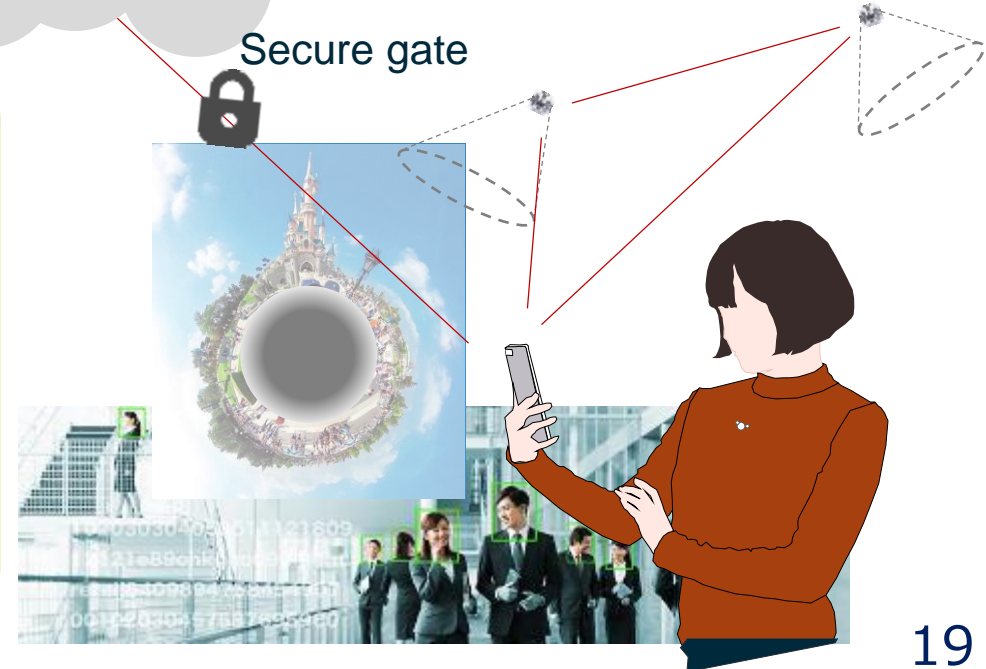
パーソナルな領域での

- 視野拡張
- 顔認証
- 感情判別

CLOUD computing  
AI processing  
Memorize

Smart drones

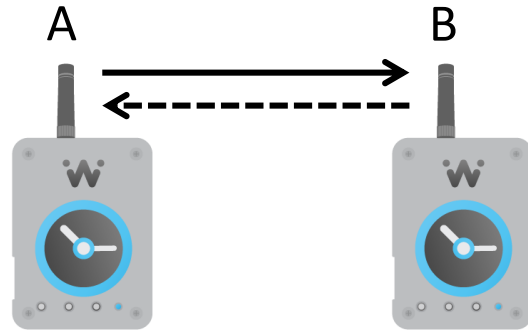
Secure gate



- 無線時刻同期 → 無線双方向時刻同期技術(WiWi)
- 原子時計チップの今後の開発
  - ドリフトフリーなクロックが巷にあふれる。
  - ⇒ 自律分散系でありながら、同時に皆でシステムクロックを共有する方法は？

時空間同期：個々のデバイスが時刻同期し、互いの位置を把握する状態が維持される。

無線双方向  
時刻比較技術  
(ワイワイ)



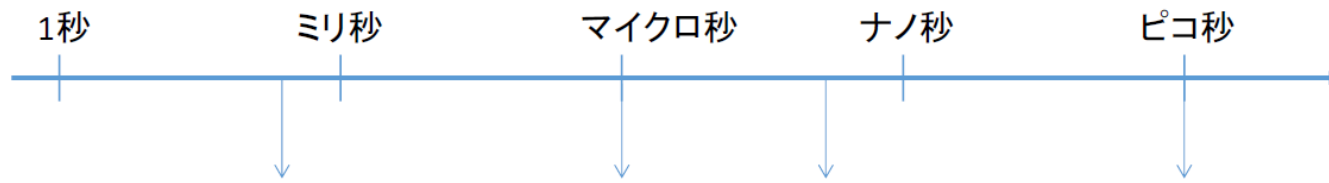
時刻差と距離を  
高精度に計測

$$\Delta T_A = (T_B - T_A) + D$$

$$\Delta T_B = (T_A - T_B) + D$$

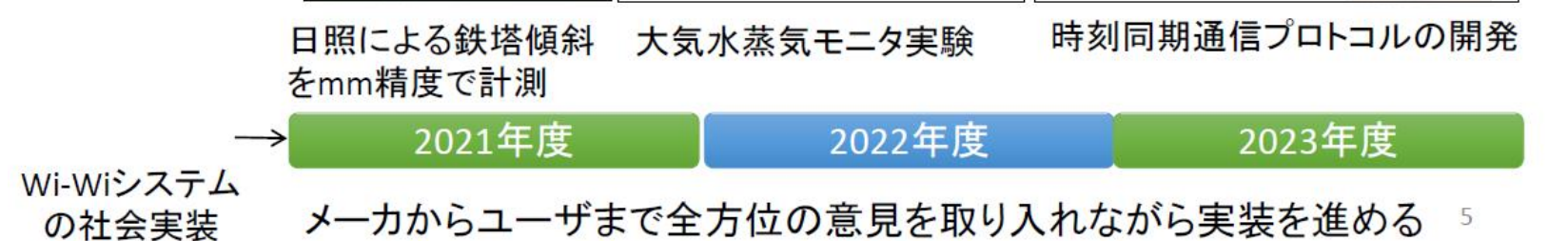
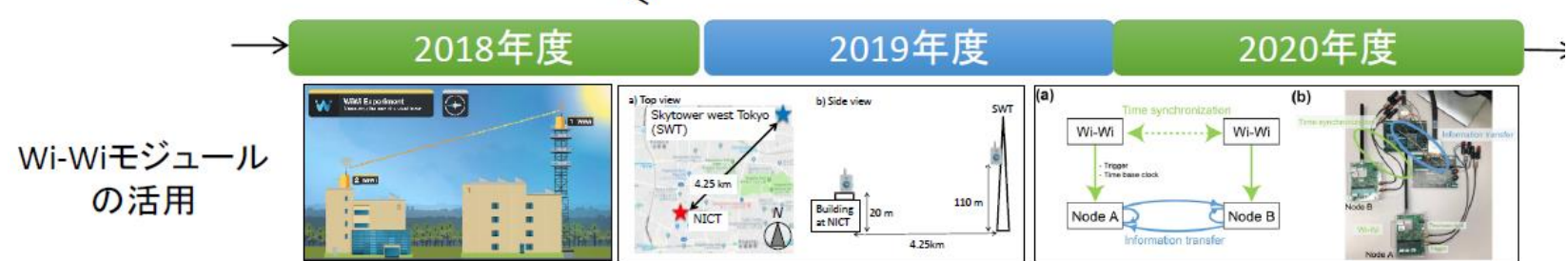
$$D = (\Delta T_A + \Delta T_B) / 2 \quad (\text{伝搬時間} = \text{両計測の和})$$

$$T_B - T_A = (\Delta T_A - \Delta T_B) / 2 \quad (\text{時刻差} = \text{両計測の差})$$



同期精度	10ミリ秒 人との同期	1マイクロ秒 M-M同期	10ナノ秒 位置計測	1ピコ秒 搬送波位相同期、 時空間同期
技術	ntp	PTP	GNSS	Wi-Wi
応用	現状。	高頻度株取引 電力グリッド同期 センサー同期	屋外ナビ	電波で位置計測 協調通信 無線電力伝送

# 無線双方向同期時刻同期技術WiWi(2)



モジュール化・フィールドテストが進捗

# 原子時計クラスターネットワークのモデリング

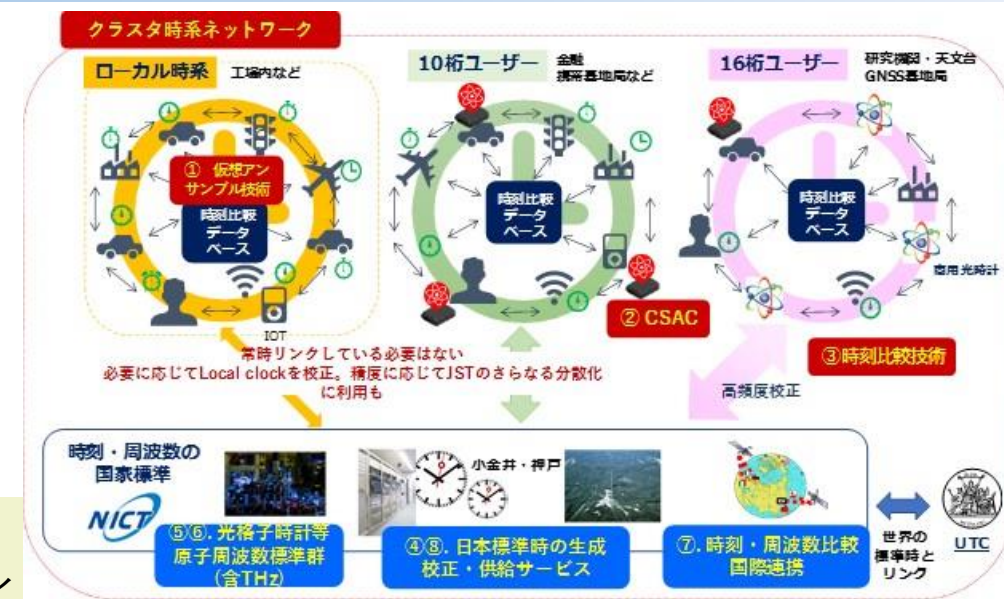
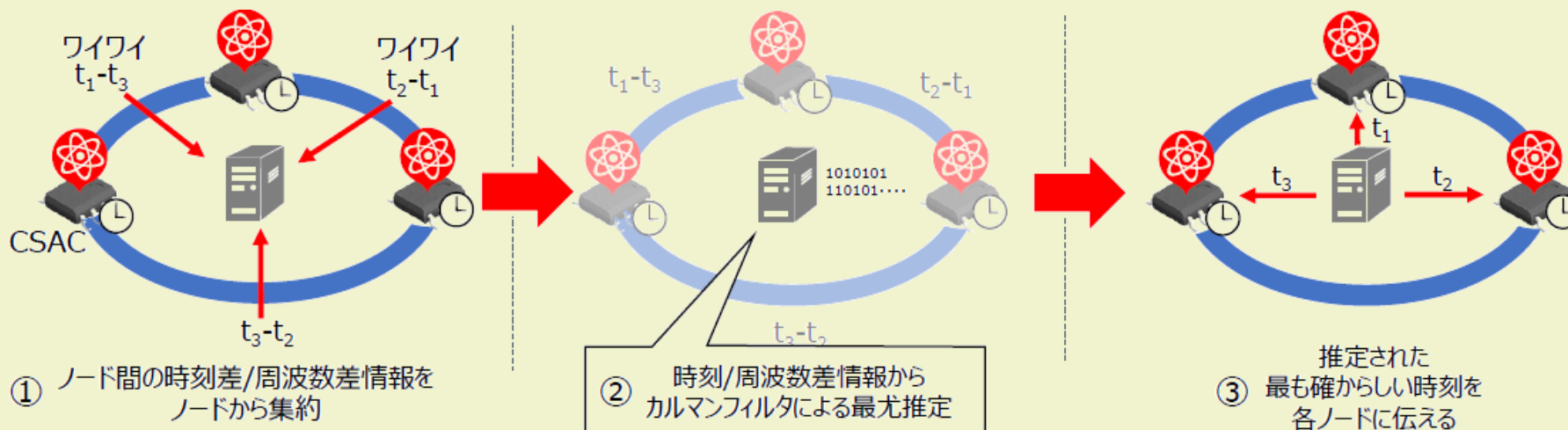
## 将来像

原子時計が巷に溢れる一方、時刻精度のニーズも多様化

- ローカルネットワークでの時刻の最尤点推定は？
- 最適な時刻配信は？

## 時刻配信ネットワークのモデル化・精度評価

Wi-Fi技術と原子時計チップとを前提とし、ローカルネットワークでの時刻推定精度をシミュレーションモデル化



既存技術(CSAC, FPGA, マイクロPC)をベースに実証実験を進め、シミュレーションにフィードバック

## 1. 未来展望と開発方針

光化・高周波化・ソフトウェアによる効率化

GPSの補完・補強としての原子時計の小型化

## 2. 原子時計チップの開発進捗

MEMS、圧電素子、集積回路技術を駆使した原子時計のチップ化

→ よりパーソナルなものに

## 3. NICTにおけるその他の先進的取り組み

時空間同期技術の確立

社会実装に向けたクラスターモデルの構築と検証

# Thank you for your attention.



## Q & A