



# 原子周波数標準チップ(CLIFS)の開発

ツイート いいね10

ほとんどの原子周波数標準は、いまだに実験室レベルの高度な装置に留まっていますが、多くの研究者たちの継続的な努力により、私たちの日常生活にも利用可能な小型、かつ、低コスト、低消費電力な原子周波数標準も提供されつつあります。

原子周波数標準のサイズおよびコストの抑制は、年々、進捗しており、今まで想像しなかったようなアプリケーションの創出を期待させます。そこで、私たちは、CLIFS(Chip-Level-Integrated Frequency Standard)の開発プロジェクトを立ち上げ、最新の集積回路とMEMS技術とを駆使して、格段に小さい原子周波数標準の作製に取り組んでいます。

1967年以降、SI単位系において、マイクロ波原子時計が秒を定義してきました。そして、国際標準時間は、世界中のごく限られた計量機関に設置された一次周波数標準器を用いて、この秒の定義から逸脱しないように、精緻に管理・運用されています。ただし、これらの二次周波数標準器を用いてさえ、皆様に標準時刻を提供する工程では、市販のラックマウントサイズのセシウム時計の力を借りなければなりません。ラックマウントサイズのセシウム時計は、複数台の並列動作により可換性と、平均処理により提供時刻の安定性と精度の向上において、なくてはならない存在です。

ラックマウントサイズの原子時計の登場は、衛星への原子時計の搭載も可能にし、全地球測位システム(GPS)の普及に重要な役割を果たしました。また、通信システムの基地局にも活用され、高帯域幅ネットワークに必要な正確なタイミングを提供します。しかし、原子時計は原子時計を汎用的に活用するには、まだまだ巨大かつ高額であり、無線機器にてバッテリー駆動するには消費電力も過大であるため、携帯電話に代表されるような民生デバイスに搭載することは非現実的です。



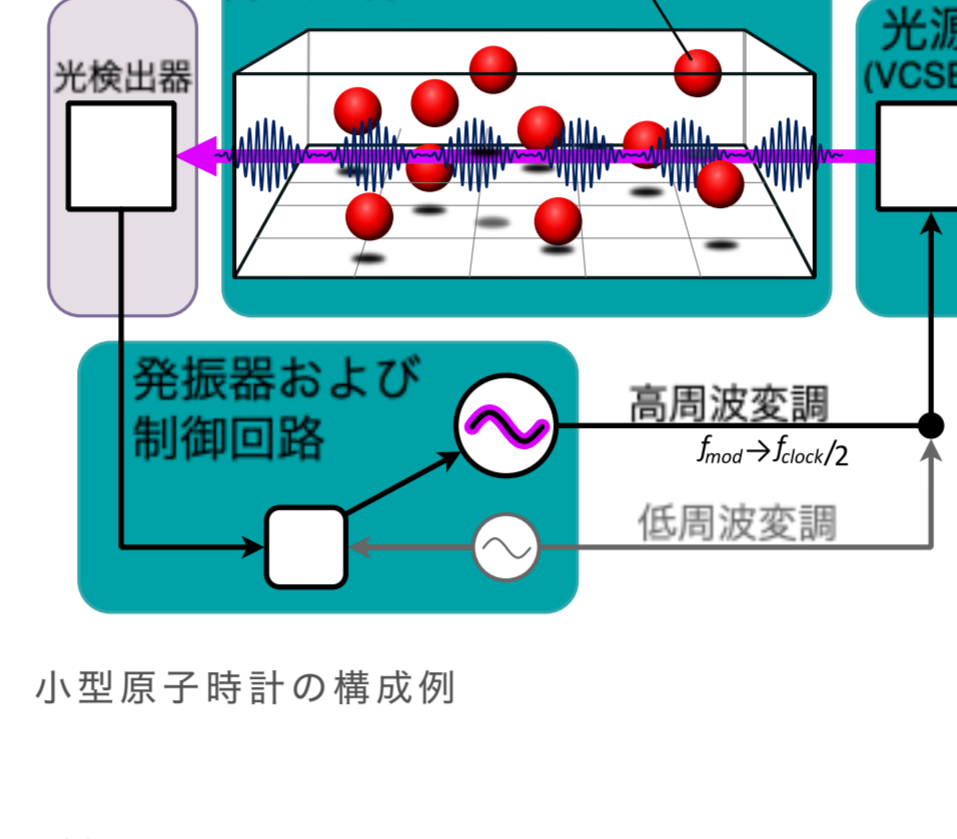
原子時計はすでにグローバルな通信ネットワーク網に使用されていますが、そのコストとサイズにより、一般的なユーザーデバイスでのアプリケーションには適していません。

私たちは、原子周波数標準の開発におけるこの最後の「険しい崖(クリフ)」を克服し、マイクロチップのような電子部品として活用可能な原子時計の提供を目指します。

5G以降、通信ネットワークが単なる携帯電話網から、自動車、ロボット、空中ドローンなどの多様なアプリケーションを含むように進化するに伴い、エンドポイントでの正確なタイミングの提供は、GPS信号が利用できない場面でも、認証された時間と位置を提供することを可能にし、将来の様々なアプリケーションに必要な効率、セキュリティ、および安定性の向上の大きく寄与します。

## 要素部品の小型化・微細化

CLIFSの開発には、原子時計を構成する複数のコンポーネントを大量生産に適合する手法で微細化する必要があります。原子時計を構成するコンポーネントには以下の機能が必要とされます。



- 特定の原子種(アルカリ金属)からの選択的な原子共鳴の取得
- 原子共鳴に必要な原子種の封入
- 原子共鳴を安定的に取得するための高周波数源

## レーザー光源

垂直共振器面発光レーザー(VCSEL)は、電力効率の高い有用な光源です。VCSELは、GaAs基板上に半導体プロセスも用いてパッチ生産が可能であり、コストメリットにも優れます。放射されたレーザー光に直接対する原子応答は、一般に、原子の封入容器を挟んで対向する光検出器で直接測定されます。

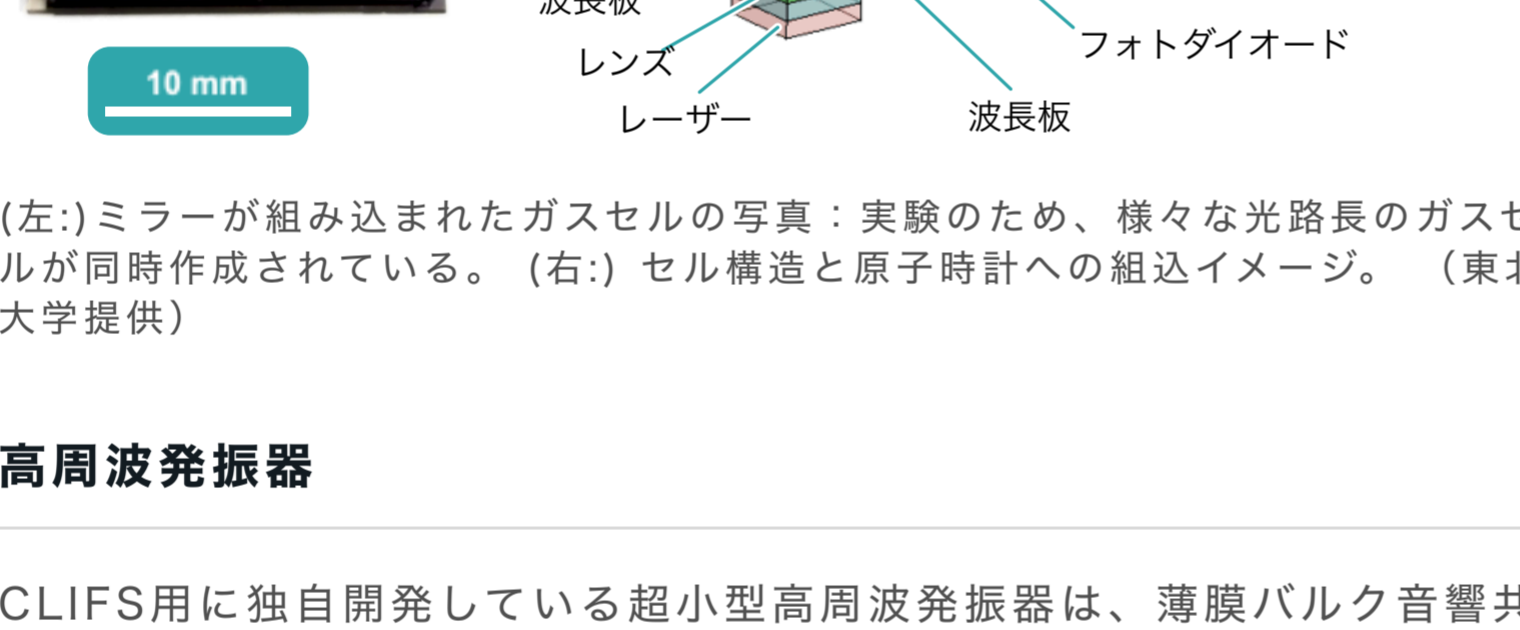
最も正確な原子時計では、光原子共鳴を直接検出しますが、そのためにはレーザーの高度な安定化と狭線化が必要であり、小型化は容易ではありません。私たちが開発を進めている原子時計は、光源の高度安定化の代わりに、レーザーにGHzの高周波数変調を施します。適切な周波数の変調を行うことで、コヒーレント ポビュレーション トラップ(CPT)共鳴として知られる狭線化された共鳴が取得でき、レーザーの安定化を必要としない、小型化に適した装置構成が提供されます。

ただし、安定化の機構を不要としても、レーザーの波長は、原子と相互作用する波長の近傍に維持されなくてはなりません。従来は、熱源を使用して波長制御を行いますが、この手法は消費電力の観点から、常時の制御に適していません。そこで、我々は、レーザー共振器の間隔を静電的に制御する手法を検討しています。より具体的には、微小電気機械システム(MEMS)構造を活用して、共振器の間隔を制御して、波長を必要とする値にロックする手法です。



## ガスセル

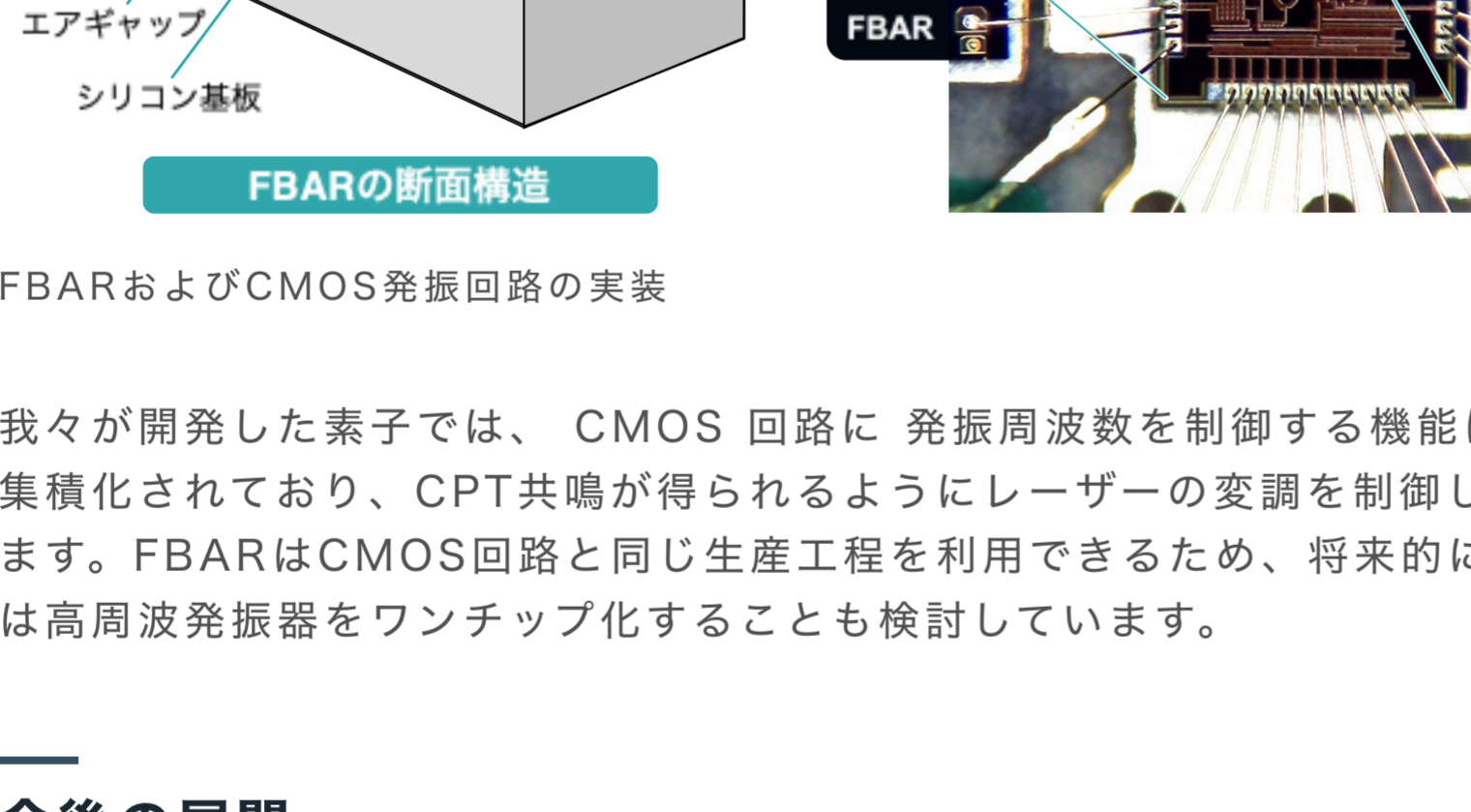
レーザーと干渉する原子種は、シリコンとガラスとで構成される小型ガスセルに封入されます。コンパクトなパッケージを提供するために、レーザーと光検出器とがセルの片側に集積されることが望ましく、我々が提案する手法では、2つのミラーがガスセル内に集積化されています。ここでは、ルビジウムがセル内に封入されており、セル内壁とルビジウム原子との衝突を緩和するためのバッファガスとして窒素とアルゴンが封入されています。



(左)ミラーが組み込まれたガスセルの写真:実験の成果、様々な光路長のガスセルが同時作成されている。(右)セル構造と原子時計への組み込みイメージ。(東北大学提供)

## 高周波発振器

CLIFS用に独自開発している超小型高周波発振器は、薄膜バク音響共振器(FBAR)を活用します。これは、両面を金属膜で挟まれた圧電自立膜からなる弾性波素子です。水晶発振器とは異なり、FBARは半導体プロセスで製造されるため、サイズがわずか数マイクロメートルの精密な構造を製造できます。また、薄膜の共振器のため、GHz帯での共振を得ることが容易であり、ルビジウムまたはセシウムのCPT共鳴を得るのに必要な変調周波数(3.4 GHzまたは4.6 GHz)に適合させることも容易です。この特徴は、CMOS技術で構成される発振回路を大幅に単純化することに繋がり、低コスト化、小型化、低消費電力化に大きく寄与します。

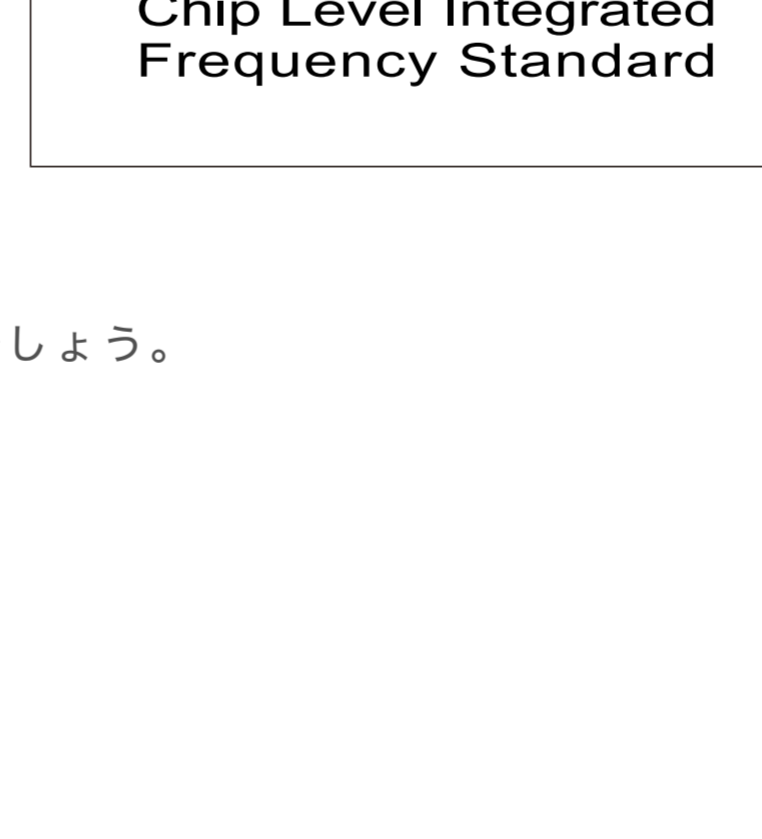


FBARおよびCMOS発振回路の実装

我々が開発した素子では、CMOS回路に発振周波数を制御する機能は集積化されており、CMOS共鳴と同じように利用できるように変調を制御します。FBARはCMOS回路と同じ生産工程を利用できるため、将来的には高周波発振器をワンチップ化することも検討しています。

## 今後の展開

高安定でドリフトのない原子時計チップが最新のマイクロプロセッサに相当するサイズとコストで利用可能になると、GPS信号のみ依存してきたタイミングがロバストに、冗長性をもって活用できるようになります。これは、いままで安全性とセキュリティの観点から、GPSの活用を避けてきた様々なアプリケーションに高度な位置情報と時刻同期を提供することが可能になります。これは、Beyond 5Gおよび6Gネットワークの通信プロトコルをも革新していくでしょう。



## 参考文献

### CLIFSの概要

- 1) M. Hara, **Perspective** スマホに載る原子時計 実現へのシナリオ, [日経BP日経エレクトロニクス 1219\\_85](#) (2020)
- 2) M. Hara, **Perspective** 原子時計のチップ化が導く 超高精度デジタルツイン, [日経BP日経エレクトロニクス 1217\\_81](#) (2020)

### レーザー光源

- 3) Z. Zhao, M. Toda, T. Ono, M. Hara, S. Shinada, H. Nakagawa and K. Kikuchi, **800 nm band MEMS-tunable VCSEL for microfabricated atomic clock**, in Proc. Smart System Integration (SSI), 26-28 April 2022, Grenoble, to be published in [IEEE Explore](#) (2022)

### ガスセル

- 4) H. Nishino, Y. Yano, M. Hara, M. Toda, M. Kajita, T. Ido and T. Ono, **Reflection-type vapor cell for 45° mirrors**, [Optics Letters 46\(1\), 2272-2275](#) (2021)
- 5) H. Nishino, M. Hara, Y. Yano, M. Toda, Y. Kanamori, M. Kajita, T. Ido and T. Ono, **A reflection-type vapor cell using anisotropic etching of silicon for micro atomic clock**, [Applied Physics Express 12\(7\), 072012](#) (2019)

### 高周波発振器

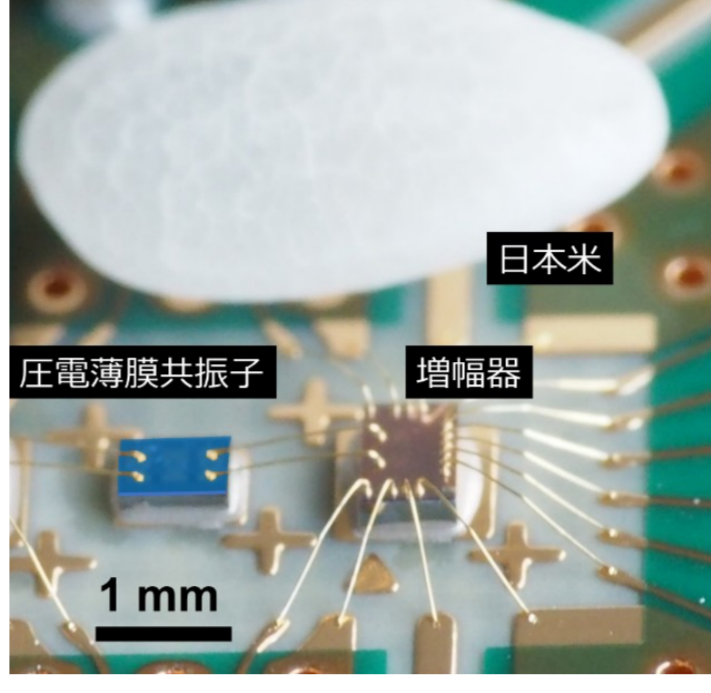
- 6) M. Hara, Y. Yano, Y. Takahashi, T. Nishizawa, S. Hara, A. Kasamatsu, M. Ueda, H. Ito and T. Ido, **Super-high-frequency-band injection-locked two-diverger oscillator using thin-film bulk acoustic resonator**, [Electronics Letters 57\(3\), 132-134](#) (2021)
- 7) M. Hara, Y. Yano, M. Kajita, H. Nishino, Y. Ibata, M. Toda, S. Hara, A. Kasamatsu, H. Ito, T. Ono and T. Ido, **Microwave oscillator using piezoelectric thin-film resonator aiming for ultraminiaturization of atomic clock** [Review of Scientific Instruments 89\(10\), 105002](#) (2018)

# クラスタークロックインフラ

ツイート いいね! 0

原子時計の小型化が大きく進展しており、将来的にはスマートフォンのような携帯端末に搭載される日も遠くないと考えています。

手元の端末の時刻を合わせる最も単純な方法は基準となる時計の時刻に端末の時計を合わせることです。現在の時刻同期方法も基本的には同じで、1つの基準となる時計の時刻に端末の時計を合わせるによりネットワーク全体で同じ時刻を共有しています。この方法は管理がしやすい一方で、中央管理のシステムとなるため、基準となる時計の故障や情報の伝達障害などに対して脆弱です。例えば、GPSを代表とする全球測位衛星システム（GNSS：Global Navigation Satellite System）は時刻同期の一般に利用されますが、太陽フレアやジャミングやなりすましなどによる電波障害などの影響を受けて利用できなくなる恐れがあります。



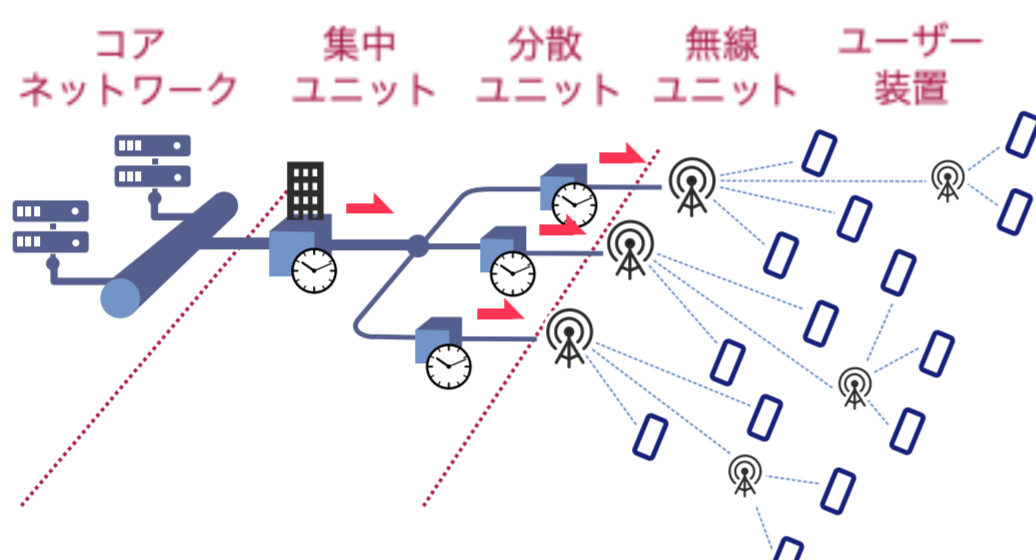
原子時計チップの構成部品。日本米との比較。

我々は小型原子時計の普及が進むと何がかわるのか調査を進めています。すでに日本標準時システムでは、複数の独立した原子時計を利用することで、安定性と堅牢性の両立を実現しています。このシステムでは、約18台の商用原子時計を高度に利用することで、正確かつ不具合への耐性を備えています。我々は小型原子時計の普及を見据えて、Beyond5Gに向けた高精度かつ高信頼な分散管理型の時刻同期の研究開発を進めています。

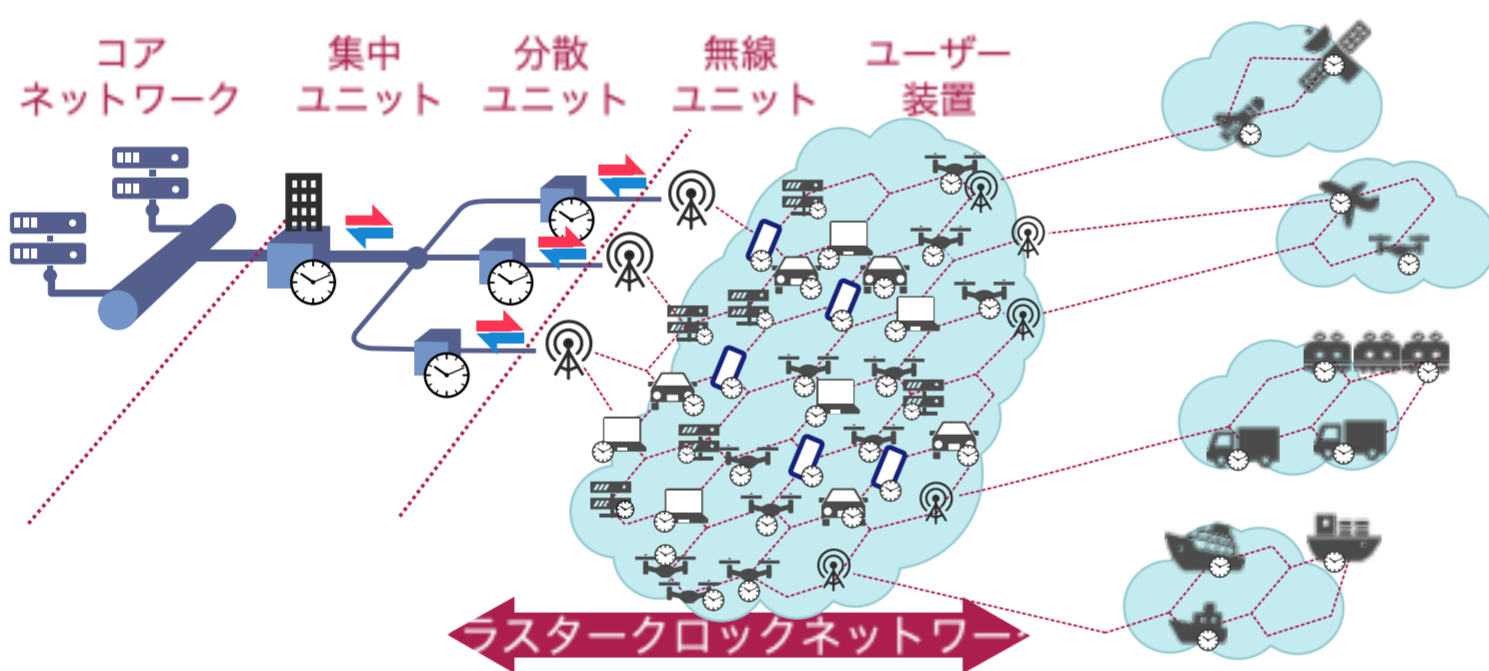
## 数の力

原子時計は単体で使うよりも複数台の時刻情報を集約することで、単体よりも安定性が高まる性質があります。この性質を利用して、一般の通信ネットワークで、複数の原子時計を連携させて時を刻み、安定性と信頼性を高める分散的な時刻同期の研究開発を実施しています。複数の時計で時を刻むことから、この仕組みをクラスター(集団)クロックと呼んでいます。検証実験では、マッチ箱サイズの原子時計3台を利用することで、1台で利用するのに比べて1.6倍の安定性の改善が得られることがわかりました。今後より、さらに多くの台数を利用することやアルゴリズムの改良することで、さらなる正確さと信頼性が得られると考えています。

将来的な分散的な時刻同期システムは、電力供給システムであるスマートグリッドの取り組みが参考になると思います。スマートグリッドでは、IT技術により太陽光や風力などの分散型電源を効率的に制御して電力を安定的に供給することが目指されています。そのほかの類似点も多く、時刻同期においても、原子時計の普及によって中央管理型のシステムから分散管理型のシステムへと変わっていくのは自然な流れだと考えています。



現在の中央管理型の時刻同期システム。



分散的なクラスタークロック時刻同期システム。

ただし、電力は市場価値があり、お金の換算できますが、時間や周波数情報はどれほどの価値に換算できるか現時点では明らかではありません。価値に換算できなければ、このインフラを支える原子時計による時刻の供給者やシステムを維持する事業者は現れないでしょう。しかしながら、ITS(Intelligent Transport Systems,高度道路交通システム)やCPS(Cyber-Physical Systems, サイバーフィジカルシステム)などでは、安全安心と共に信頼性や堅牢さなどが求められます。また、昨今の新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の世界的な大流行により、トラストサービスや電子署名、タイムスタンプなど信頼ある時刻情報への期待が高まっており、サービス面からも時刻情報の価値は今後高まっていくと考えています。

## SDGs

時刻と周波数情報はデータ社会を支える基礎的な情報です。持続可能な社会においては、高精度だけでなく、高品質や高信頼を同時に満たすことが求められます。多くのステークホルダーと共に、そのような要求に柔軟に対応できる持続可能な時刻同期網を目指しています。

## 参考文献

1) Y. Yano and M. Hara, 小型原子時計を活用した分散時刻同期とそのビジョン, [NICT News 494\(4\), 8](#) (2022)

## 時空間同期・標準時供給プロジェクト

タイムビジネス-電子時刻認証-  
公開NTPサービス

NTP: よくあるご質問 (FAQ)

光テレホンJJY

光テレホンJJYのよくあるご質問

テレホンJJY

テレホンJJY: 追加情報

原子周波数標準チップ (CLIFS)の開発

クラスタークロックインフラ

Wi-Wi: 無線双方向時刻同期

### NICTについて

- 理事長挨拶
- 役員紹介
- 組織
- 研究所長紹介
- NICT憲章
- 目標・計画
- 事業報告書
- 評価
- 公開情報
- 所在地案内
- 沿革
- NICTフェロー紹介
- アドバイザリーコミッティー
- NICT PRムービー『Nのいる未来』

### 研究成果

- 研究データ
- 知財一覧
- 論文一覧
- 受賞一覧
- NICTシーズ集
- 技術活用一覧
- 標準化活動一覧
- 出版・書物一覧
- サービス・アプリ一覧

### 研究紹介

- 電磁波研究所
  - 電磁波伝搬研究センター
  - 電磁波標準研究センター
  - 電磁波先進研究センター
- ネットワーク研究所
  - フォトニックICT研究センター
  - ワイヤレスネットワーク研究センター
  - レジリエントICT研究センター
- サイバーセキュリティ研究所
  - サイバーセキュリティネクサス
  - ナショナルサイバートレーニングセンター
  - ナショナルサイバーオペレーションセンター
- ユニバーサルコミュニケーション研究所
  - 先進的音声翻訳研究開発推進センター
  - データ駆動知能システム研究センター
  - 統合ビッグデータ研究センター
- 未来ICT研究所
  - 神戸フロンティア研究センター
  - 小金井フロンティア研究センター
  - 脳情報通信融合研究センター
- Beyond 5G研究開発推進ユニット
- テラヘルツ研究センター
- 量子ICT協創センター

### オープンイノベーション推進本部

- 設備・データを使いたい
- 総合テストベッド
- AIデータテストベッド
- 研究データ
- B5G共用研究施設利用 (委託研究)
- 研究施設等の外部利用
- 連携・相談したい
- 共同研究をしたい
- 委託研究を受けたい
- 研究を委託したい
- 国際連携したい
- 相談したい (技術相談)
- 外部連携の事例
- 研究成果を使いたい
- NICTシーズ集
- ニューノーマル時代に資する技術シーズ集
- 研究成果/知財/標準化
- 支援を受けたい
- スタートアップ支援
- 情報バリアフリー
- 各種支援制度
- Beyond 5G研究開発促進事業
- Beyond 5G研究開発促進事業 (ポータル)
- Beyond 5G研究開発促進事業 (委託研究)
- B5G共用研究施設利用 (委託研究)

### イノベーションデザインイニシアティブ (IDI)

- ホワイトペーパー
- 活動報告書

### 採用

- 研究職・研究技術職採用
- 総合職・有期一般職採用
- インターンシップ
- 障がい者採用

### 広報

- 新着情報
- プレスリリース
- お知らせ
- イベント
- オープンハウス一覧
- 出版物・発行書籍
- パンフレット
- Youtube動画
- Twitter
- Facebook
- Instagram
- 展示室のご案内
- バーチャル展示室のご案内
- 本部展示室見学ツアーのご案内
- ホワイトペーパー
- NICT先端研究
- NICT PRムービー『Nのいる未来』

### 公募・調達

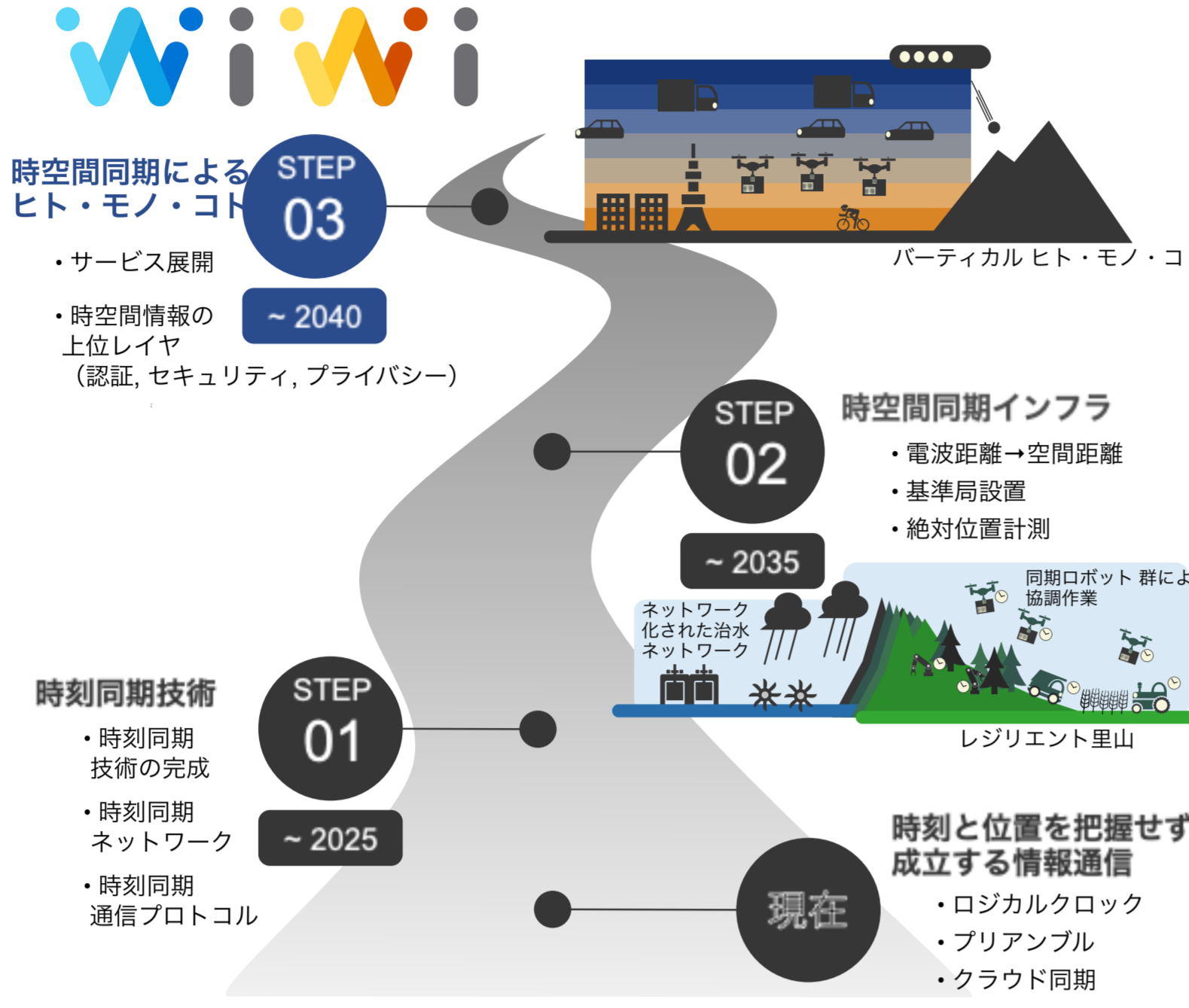
- 公募情報
- 調達

# Wi-Wi: 無線双方向時刻同期

ツイート いいね! 0

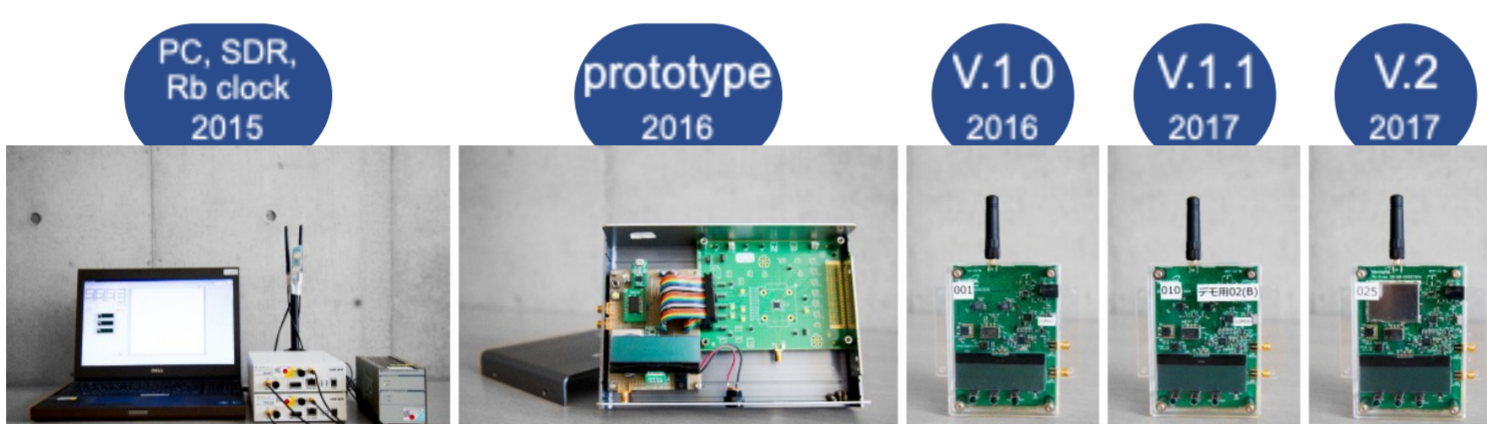
このプロジェクトでは、すでに普及している無線通信技術を活用してピコ秒精度で時刻を同期するための新しいプラットフォームを開発することを目指しています。

「モノのインターネット」(IoT)の時代にあって、1兆を超えるデバイスやセンサーがワイヤレスで通信する未来に向かっていきます。このような背景から、私たちの研究は、「これらの無線機器の間で高精度な時刻同期を行う方法があったら?」という疑問から始まりました。今日の情報通信技術は、送受信者間で時計が一致していないことを前提として構築されています。



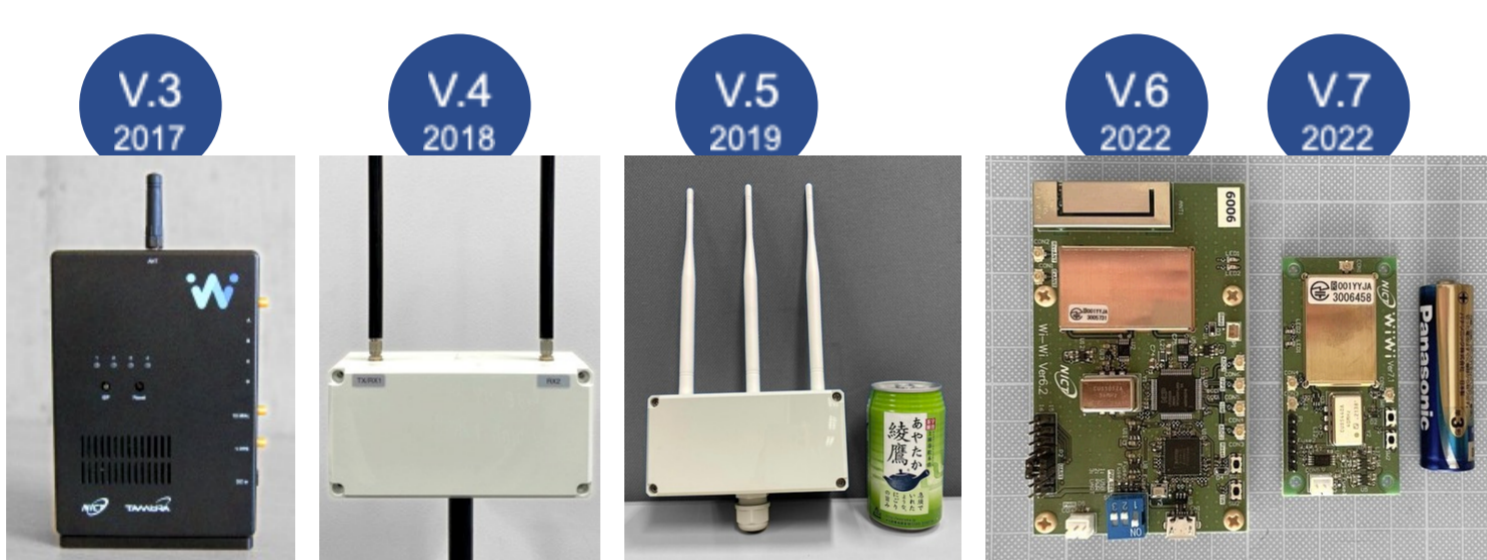
デバイスとサービスの有機的なコラボレーションに向けた Wi-Wi ロードマップ。

私達は時計を同期させる新しい技術として「無線双方向時刻同期」(Wi-Wiまたはワイワイ)技術を開発しています。これは、私たちのグループが長い間最先端の研究に携わってきた衛星双方向時刻周波数転送技術(TWSTFT)を簡略化したものです。Wi-Wiは衛星通信を用いるのではなく、普通の無線通信機で同じ技術を実現しました。



Wi-Wiモジュールの試作と初期開発

集積回路と水晶振動子の開発の進歩のおかげで、通常の無線通信デバイスのコストでピコ秒レベルで時刻同期を実行できるモジュールを製造できる時代になりました。このレベルの同期が、今後の通信インフラの改善の鍵になると考えています。



Wi-Wiモジュールの継続開発

正確な時刻同期は、位置測定においても重要な役割を果たします。GPSのようなシステムでは、測位の精度は、衛星の時計がどれだけうまく同期できるかに依存しています。GPSが使えない環境でも利用できる精密な位置計測システムへの応用研究も進めています。

## 参考文献

- 1) S. Yasuda and N. Shiga, 時空間同期によるデバイスの協働, [NICT News 494, 6-7](#) (2022)
- 2) Y. Yamasaki et al., **Delay-Bounded Wireless Network Based on Precise Time Synchronization Using Wireless Two-Way Interferometry**, [IEEE Access 9, 85084-85100](#) (2021)
- 3) B. Panta, K. Kido, S. Yasuda, Y. Hanado, S. Kawamura, H. Hanado, K. Takizawa, M. Inoue and N. Shiga, **Distance Variation Monitoring with Wireless Two-way Interferometry (Wi-Wi)**, [Sens. Mater. 31\(7\), 2313-2321](#) (2019)
- 4) S. Yasuda, R. Ichikawa, Y. Hanado, S. Kawamura, H. Hanado, H. Iwai, K. Namba, Y. Okamoto, K. Fukunaga, T. Iguchi and N. Shiga, **Horizontal atmospheric delay measurement using wireless two-way interferometry (Wi-Wi)**, [Radio Science 54, 572-579](#) (2019)
- 5) N. Shiga, K. Kido, S. Yasuda, B. Patna, Y. Hanado, S. Kawamura, H. Hanado, K. Takizawa and M. Inoue, **Demonstration of wireless two-way interferometry (Wi-Wi)**, [IEICE Communications Express 6\(2\), 77-82](#) (2017)
- 6) N. Shiga and Y. Hashimoto, **新技術説明会資料**, Japanese presentation material available at [shingi.jst.go.jp/pdf/2016/2016\\_kisoken1\\_3.pdf](#) (2016)
- 7) 「ワイワイって何?」YouTubeの動画[プレイリスト](#)

## 時空間同期・標準時供給プロジェクト

- タイムビジネス-電子時刻認証-
- 公開NTPサービス
- NTP: よくあるご質問 (FAQ)
- 光テレホンJJY
- 光テレホンJJYのよくあるご質問
- テレホンJJY
- テレホンJJY: 追加情報
- 原子周波数標準チップ (CLIFS)の開発
- クラスタークロックインフラ

## Wi-Wi: 無線双方向時刻同期

## NICTについて

- 理事長挨拶
- 役員紹介
- 組織
- 研究所長紹介
- NICT憲章
- 目標・計画
- 事業報告書
- 評価
- 公開情報
- 所在地案内
- 沿革
- NICTフェロー紹介
- アドバイザリーコミッティー
- NICT PRムービー『Nのいる未来』

## 研究成果

- 研究データ
- 知財一覧
- 論文一覧
- 受賞一覧
- NICTシーズ集
- 技術活用一覧
- 標準化活動一覧
- 出版・書物一覧
- サービス・アプリ一覧

## 研究紹介

- 電磁波研究所
  - 電磁波伝搬研究センター
  - 電磁波標準研究センター
  - 電磁波先進研究センター
- ネットワーク研究所
  - フォトニックICT研究センター
  - ワイヤレスネットワーク研究センター
  - レジリエントICT研究センター
- サイバーセキュリティ研究所
  - サイバーセキュリティネクサス
  - ナショナルサイバートレーニングセンター
  - ナショナルサイバーオペレーションセンター
- ユニバーサルコミュニケーション研究所
  - 先進的音声翻訳研究開発推進センター
  - データ駆動知能システム研究センター
  - 統合ビッグデータ研究センター
- 未来ICT研究所
  - 神戸フロンティア研究センター
  - 小金井フロンティア研究センター
  - 脳情報通信融合研究センター
- Beyond 5G研究開発推進ユニット
  - テラヘルツ研究センター
- 量子ICT協創センター

## オープンイノベーション推進本部

- 設備・データを使いたい
  - 総合テストベッド
  - AIデータテストベッド
  - 研究データ
  - B5G共用研究施設利用 (委託研究)
  - 研究施設等の外部利用
- 連携・相談したい
  - 共同研究をしたい
  - 委託研究を受けたい
  - 研究を委託したい
  - 国際連携したい
  - 相談したい (技術相談)
  - 外部連携の事例
- 研究成果を使いたい
  - NICTシーズ集
  - ニューノーマル時代に資する技術シーズ集
  - 研究成果/知財/標準化
- 支援を受けたい
  - スタートアップ支援
  - 情報バリアフリー
  - 各種支援制度
- Beyond 5G研究開発促進事業
  - Beyond 5G研究開発促進事業 (ポータル)
  - Beyond 5G研究開発促進事業 (委託研究)
  - B5G共用研究施設利用 (委託研究)

## イノベーションデザインイニシアティブ (IDI)

- ホワイトペーパー
- 活動報告書

## 採用

- 研究職・研究技術職採用
- 総合職・有期一般職採用
- インターンシップ
- 障がい者採用

## 広報

- 新着情報
- プレスリリース
- お知らせ
- イベント
- オープンハウス一覧
- 出版物・発行書籍
- パンフレット
- Youtube動画
- Twitter
- Facebook
- Instagram
- 展示室のご案内
- バーチャル展示室のご案内
- 本部展示室見学ツアーのご案内
- ホワイトペーパー
- NICT先端研究
- NICT PRムービー『Nのいる未来』

## 公募・調達

- 公募情報
- 調達