

2-5 Beyond 5G を実現する時空同期技術

2-5 Space-Time Synchronization Technologies for Beyond 5G

原基揚 矢野 雄一郎 安田 哲 福岡 政大 志賀 信泰 市川 隆一 井戸 哲也

HARA Motoaki, YANO Yuichiro, YASUDA Satoshi, FUKUOKA Masahiro, SHIGA Nobuyasu, ICHIKAWA Ryuichi, and IDO Tetsuya

B5G の展望を拡張し、サイバー空間とフィジカル空間の連携を強化するための時空間同期技術を検討する。当該検討において、デバイスレベルで実際の B5G 技術として実現すべきコンセプトと実際の開発状況について紹介する。

We expand the prospects of B5G from the future vision and discuss space-time synchronization technology to strengthen the collaboration between cyberspace and physical space appropriately. This paper introduces the concept that should be realized as practical B5G technology at the device level.

1 背景

2010 年代初頭より、クラウドデータに対する一貫性と可用性への要望が、金融業界を中心に急激な高まりを見せ、近年では高度 AI 処理や量子コンピューティングなどをネットワーク上で行う技術が急速に進展しつつある [1]。このような市場の動向を反映して、サイバー空間における時刻同期はナノ秒オーダーに達し、GNSS (衛星測位システム: Global Navigation Satellite Systems) の脆弱性の議論から、この同期をロバストにレジリエントに運用する技術開発も急速な発展を見せている。

しかし、これらの安定したナノ秒同期に関する議論は有線系のいわゆるサイバー空間内に留まっており、多数のユーザーを抱える無線系システム (フィジカル空間) では、必ずしもその恩恵が波及しているとは言えない。コネクテッドカーの研究開発では、ハイパースケールサーバの演算能力をネットワーク上で活用する方式ではなく、そこで培われた技術を活用した高度並列演算プロセッサ (GUI ラック、GUI ポッド) を車両に搭載し、車両内で同期運動させる技術開発が加速している [2][3]。自由空間では時刻同期精度が応用範囲 (通信距離) によって不確実性を増し [4]、通信速度も、高周波化による帯域拡張を前提とすると、時刻同期精度と同様に、応用範囲 (通信距離) によって制限を受けてしまう。換言すれば、通信位置による通信の質のムラは通信インフラの整備だけでは十分に克服し得ず、安全性が重視される自動車産業においては、サイバー空間から常時接続によって支援を得る方式を最終的な解とは捉えにくい実状がある。

2 時空間標準技術の開発アプローチ

前出のサイバー空間とフィジカル空間の分断を打破し、これらの適切な運動によって、社会コストを全体最適へ導くとともに、フィジカル空間に時刻同期によって新たな価値を付加していくためには、サイバー空間とフィジカル空間との効率的で瞬時的な連結と、フィジカル空間におけるデバイス群の自律的なクロックの維持が必要と考える。自律という観点では、さらに、GNSS やその他衛星、地上局などの外部から提供

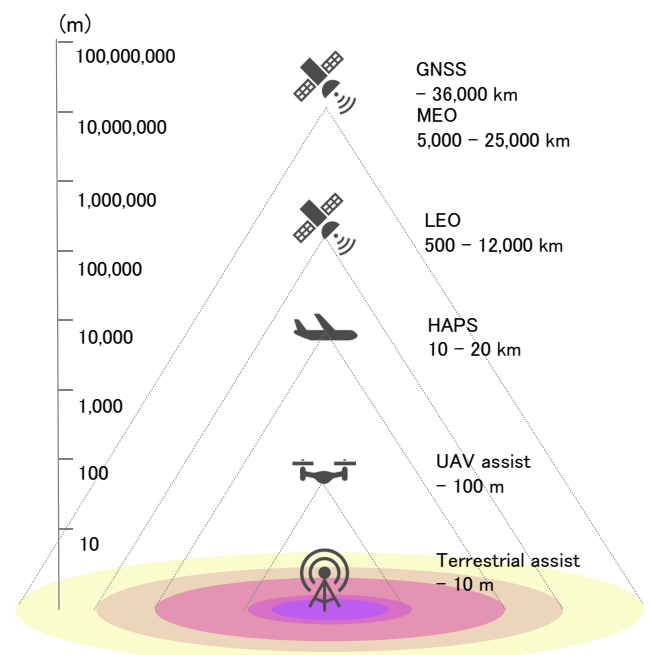


図 1 時刻情報の多元化の例

表 1 技術課題と NICT での取組

	サイバー空間とフィジカル空間の効率的で瞬間的な連結	デバイスにおける自律的な時系の維持	外部から提供される時刻同期信号の自律診断・判別
目的	高速・大容量通信によるバースト処理 インタラクションの時間幅を極小化することで、速度や位置依存を抑制	サイバー空間へ接続が難しい状態での、センサーデータや画像データへのタイムスタンプの装荷、サイバー空間への接続時のデータコヒーレンシーの確保	利用可能な外部クロックを全て活用し、デバイス搭載クロックの安定性を確保する
技術課題	ミリ波やsubTHzを活用した高速D2D通信 低位相雑音の超高周波LO	ドリフトフリーな内蔵クロック	近傍端末間での時刻同期技術 多数の時刻源に対する、クロックの質の診断と協調安定化 外部クロックを評価するための安定したクロックの搭載
NICT 開発技術	シリコンベースの送受信チップの開発	超小型原子時計 (CLIFS)	クラスタクロックシステム 無線双方向時刻同期(Wi-Wi)

される時刻同期信号 (図 1) に対して、その品質を自律的に判別する機能も必須となる。

これらの技術課題に対する我々のアプローチを表 1 にまとめる。これらのアプローチによって、図 2 に示すように、通信位置に束縛されないサイバー空間とフィジカル空間の定常的な連動が可能となる。実際の空間どうしの接続は、スポット的なものであるが、自律系の補間により、フィジカル空間に位置するユーザーに対して、サイバー空間の高機能・高性能な演算能力を常に活用できているという使用感を与える。

表 1 で示すように、ユーザーが使用するデバイスに安定した(ドリフトフリーな)クロックが装備されることが望ましく、本稿では、これに相当する技術として、原子時計の小型化技術の開発進捗を紹介する。また、この原子時計を使いこなすという観点と、産業的な波及という観点から、クロック間の連携技術についても最後に触れる。

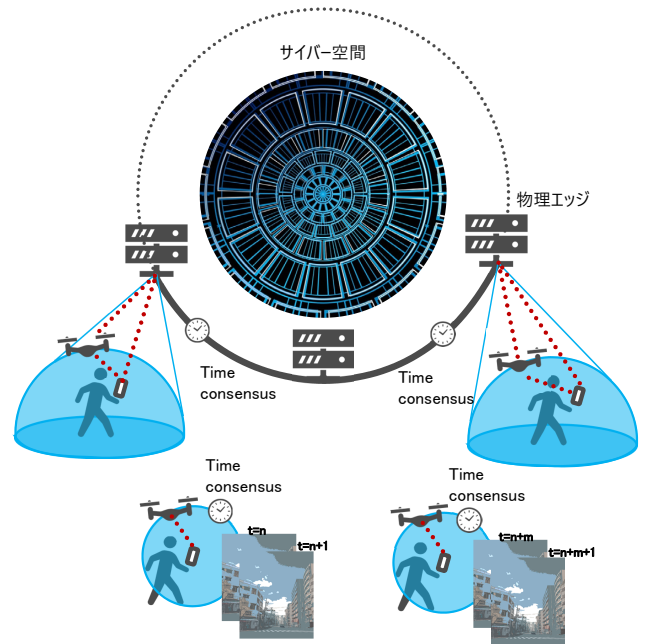


図 2 スポット的なサイバー空間への接続イメージ

3 原子時計に超小型化に向けた MEMS 技術

原子時計はアルカリ金属元素のマイクロ波帯にある吸収線を活用し、外部のマイクロ波クロックを安定化する技術である。その構成は、吸収スペクトルを得る物理パッケージと高周波(マイクロ波)発振器、そして高周波発振器の発振と吸収線の差分を計測して、発振器へフィードバック信号を送るデジタルコントローラの三つから成る (図 3(a)(e))。

原子時計における小型化のシナリオとして想定されるイメージを図 3 に示す [5]-[8]。このシナリオにおい

て、キーワードとなるのが MEMS 技術である。MEMS は Micro Electro Mechanical System の略で、微細な機械構造体を半導体基板上に作り込み、集積回路だけでは実現できない機能を付加する技術である。以下では、図 3(d)(h) でキーとなる光ハンドリングの技術と、原子時計の低コスト化に寄与する波長制御技術についてピックアップして記述する。

3.1 メタサーフェス構造を活用した小型・低背化

物理パッケージは、アルカリ金属元素を封入したガ

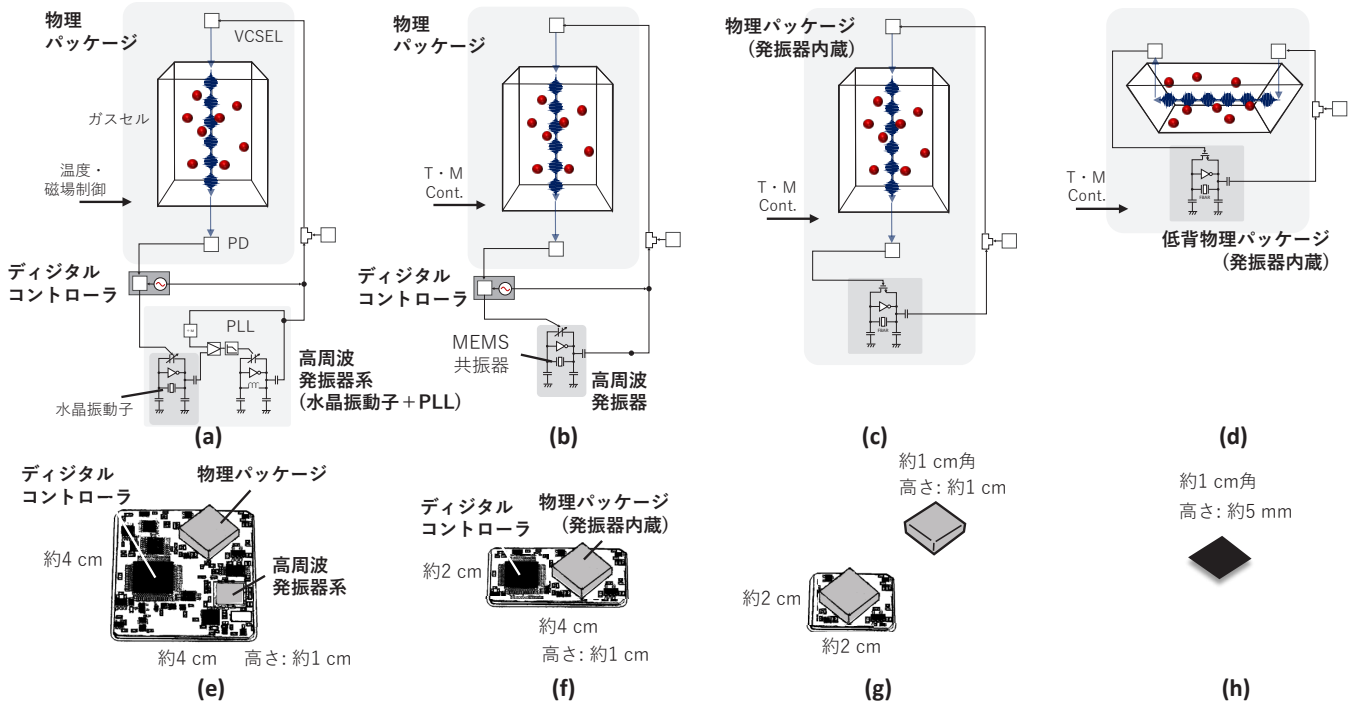


図3 原子時計の小型化のシナリオ

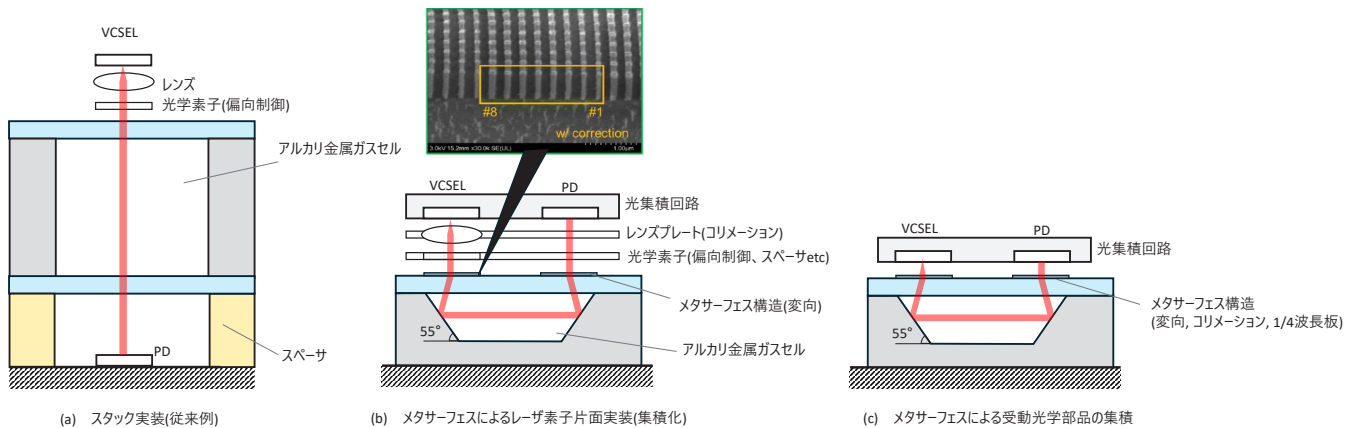


図4 メタサーフェスを活用した原子時計の小型・低背化の提案：写真は実際のメタサーフェス構造の光学顕微鏡写真（8列周期で、微細ピラー構造の太さが変化している）

セルと、そこから共鳴スペクトルを得るための光源（垂直共振器型面発光レーザー（Vertical Cavity Surface Emitting Laser: VCSEL）と受光素子（フォトディテクタ（PD））とを含み、これらに温度と磁場を制御する機構をマウントして、一体パッケージにした部品である。

回路系の集積が完了すると（図3(c)(g)）、次に課題となるのはこの物理パッケージの低背化である。ここでキーとなる技術が光MEMSである。光MEMSは半導体微細加工技術を活用し、ミラーやレンズ・偏光子といった光学素子を基板上に集積し、レーザー等の効率的なハンドリングを行う技術である。

図3(d)に示すようにガスセル内に45°ミラーが配置できれば、VCSELとPDを片面実装ができ、これらの

一体集積化も可能となる。しかし、ガスセルへのミラー面の作り込みをシリコン半導体プロセスにて実現しようとする、アルカリ溶液による異方性エッチングでは、約55°の結晶面（ミラー面）が生成され、所望の角度（例えば45°）を創成することは容易ではない。我々は、この問題を克服するいくつかの手法を提案しているが[9]-[11]、その一つがメタサーフェスである（図4）。メタサーフェス技術は金属または誘電体の薄膜に波長程度の周期パターンを作り込み、光と干渉させることで光を様々にハンドリングする技術である。このメタサーフェスにより光路上に偏向機能を付加すれば、55°の結晶面に対して光収率を下げることなく垂直落射垂直反射を実現することができる（図4(b)）。さ

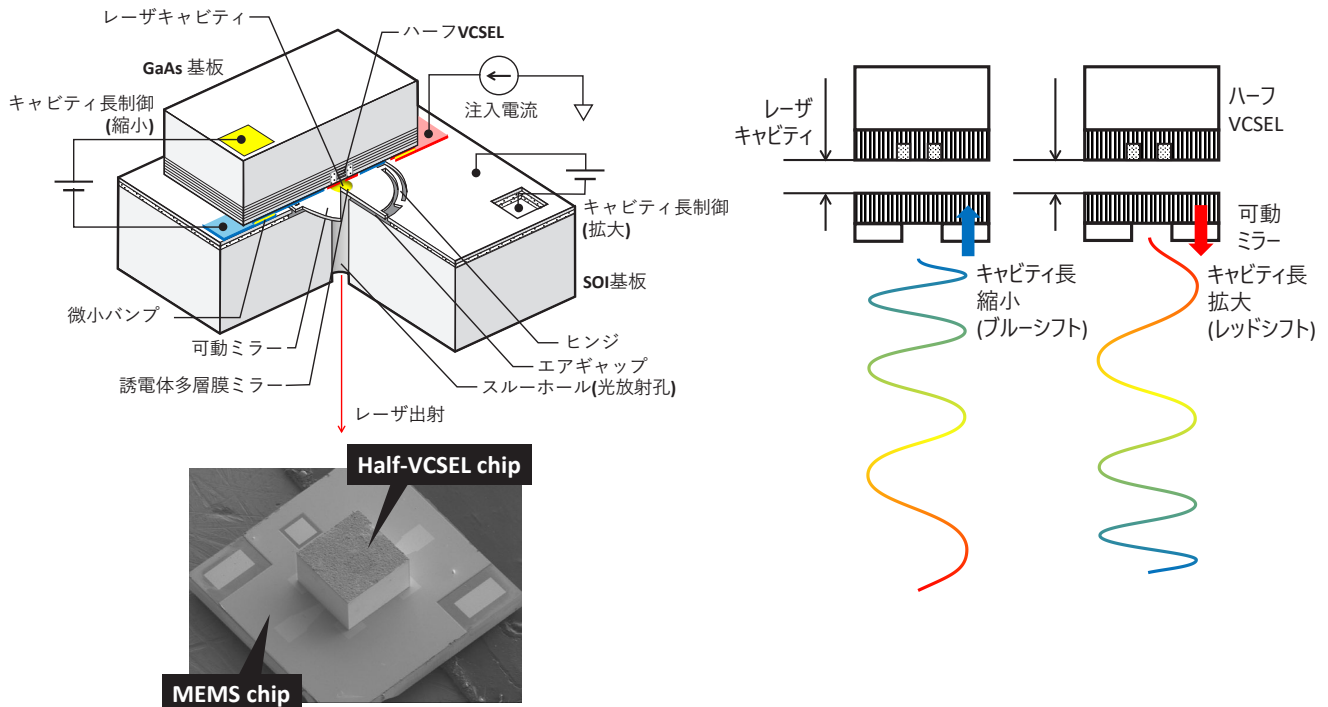


図5 MEMS 可動ミラーを用いた波長チューニング：写真は実際の組立後の素子の電子顕微鏡写真

らに、メタサーフェスの周期構造を適切に設計することで、コリメータレンズや偏光制御を1層のメタサーフェス構造に集積することも可能となる(図4(c))。

3.2 光 MEMS による低コスト化の検討

物理パッケージに搭載される VCSEL はすでにスマートフォンの顔認証など、ユーザデバイスに実装される一般的な電子部品となっているが、原子時計への適用においては、求められる波長トレランスを大幅に厳格化する必要がある、スクリーニングコストの増大が避けられない。そこで、我々は図5に示すような、VCSEL に MEMS 波長チューナを備えた、可変波長 VCSEL を原子時計システムに適用することを提案している [12][13]。MEMS 波長チューナを用いて、製造バラツキによる波長のオフセットをキャンセルできれば、波長トレランスの緩和につながり、さらに、当該技術の適用によって波長制御に新たなフィードバック端子を設けることに相当し、冗長制御により、原子時計をより堅牢かつ柔軟に安定動作させ得る。

た希ガス) とが封入されている。ガラス管でガスセルを製造する場合は、これらのガスを吹き込んで、封入口を溶断すれば完成となるが、シリコンウェハーでバッチ製造する (MEMS ガスセル) 場合、全く新しい製造方法が必要となる。一般には、アルカリ金属の化合物と還元剤とを混ぜた圧粉体のペレットをセル内に入れ、封止後に紫外線やレーザなどでペレットを活性化してアルカリ金属ガスを生成・充填する。

ただし、この場合、活性化後の反応生成物が問題となる。反応生成物は緩衝ガスを付着・吸収するため、セル内の内圧が緩やかに変化し、原子時計の長期安定度を損なってしまう。そこで、我々は反応生成物のないクリーンなアルカリ金属源として、アルカリ金属のアジ化物に着目し、当該試薬の国内製造に取り組んだ [14]。さらに、試薬供給だけに留まらず、ウェハー上にパターン化して提供するサービスの立ち上げも進めており、多くの企業のガスセル開発への参入を容易にする、支援体制を整えている。

< 原子時計部品の評価システム >

原子時計はここまで述べたように、様々な部品によって構成されている。しかし、原子時計用にこれらの部品開発から始めようとしても、評価のための原子時計ループの構築が先行的に必要となる。より具体的には、図3(a)で示したような量子光学系を含む周波数制御ループを独自に準備しておく必要がある。我々はこの間に開発の参入障壁が存在すると考え、独自に原子

4 低コスト化を意識した材料技術・評価技術の提案

< クリーンなアルカリ金属源の開発 >

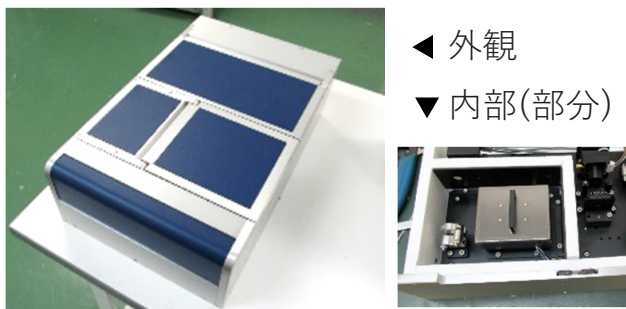
ガスセル内には、マイクロ波帯で吸収スペクトルをもつアルカリ金属ガスと、このガス原子がセル壁面に衝突することを防ぐ緩衝ガス(窒素やアルゴンといっ

時計評価システムのパッケージ販売を検討し開発している(図6)。

当該装置は、原子時計を構成する物理パッケージ(ガスセル、VCSEL, PD)や高周波発振器などを装置に挿入し、原子時計動作の安定度を評価できるようにしており、この装置の導入によって、企業の原子時計用部品の開発が促進され、さらに将来的には、評価データベースの積み上げによって、工業標準化に向けた新たなステップが提示されることを期待する。

5 開発ステージを意識したシームレスな開発に向けて

図7は原子時計の開発のフェーズを示しており、3に示したように、様々な原子時計用コンポーネントの開発が進んでいる。また、4に示したように材料や評価技術の開発も進捗している。さらに、原子時計の応



◀ 外観
▼ 内部(部分)

((株)ネオアーク様ご提供)

図6 原子時計評価システム

用可能性を明確にし、原子時計モジュールの製造企業の掘り起こしを企図し、端末間をD2Dにて同期する無線双方向同期技術(Wi-Wi) [15]や、これを活用した時計群を集約して、時計の数の力で、個々の時計では成し遂げ得ない高安定な時計を実現する技術開発(クラスタクロック)を進捗させている[16]。これらの技術は、超小型原子時計開発を含む時空間同期の応用フェーズに位置し、これら時空間同期技術の一体とした連携は、緒言で述べたようなサイバー空間とフィジカル空間の連動(サイバーフィジカル空間:CPS)の実現に向けて、より立体的な社会実装のシナリオを我々に提供してくれる。

6 おわりに

本稿では、B5Gの展望を拡張し、サイバー空間とフィジカル空間の連携を強化するための時空間同期技術を検討し、それに関連する技術開発の進捗を示した。具体的には、超小型原子時計(CLIFS)を軸に、その産業化に向けた新規コンポーネント技術、材料技術、評価技術を紹介するとともに、その応用シーンを拡張する技術として、無線双方向同期技術(Wi-Wi)及びクラスタクロック技術を紹介した。紙面の都合により、詳細な図や議論、評価データの展開は省略しているが、これらは以下の参考文献にて是非、ご参照いただきたい。

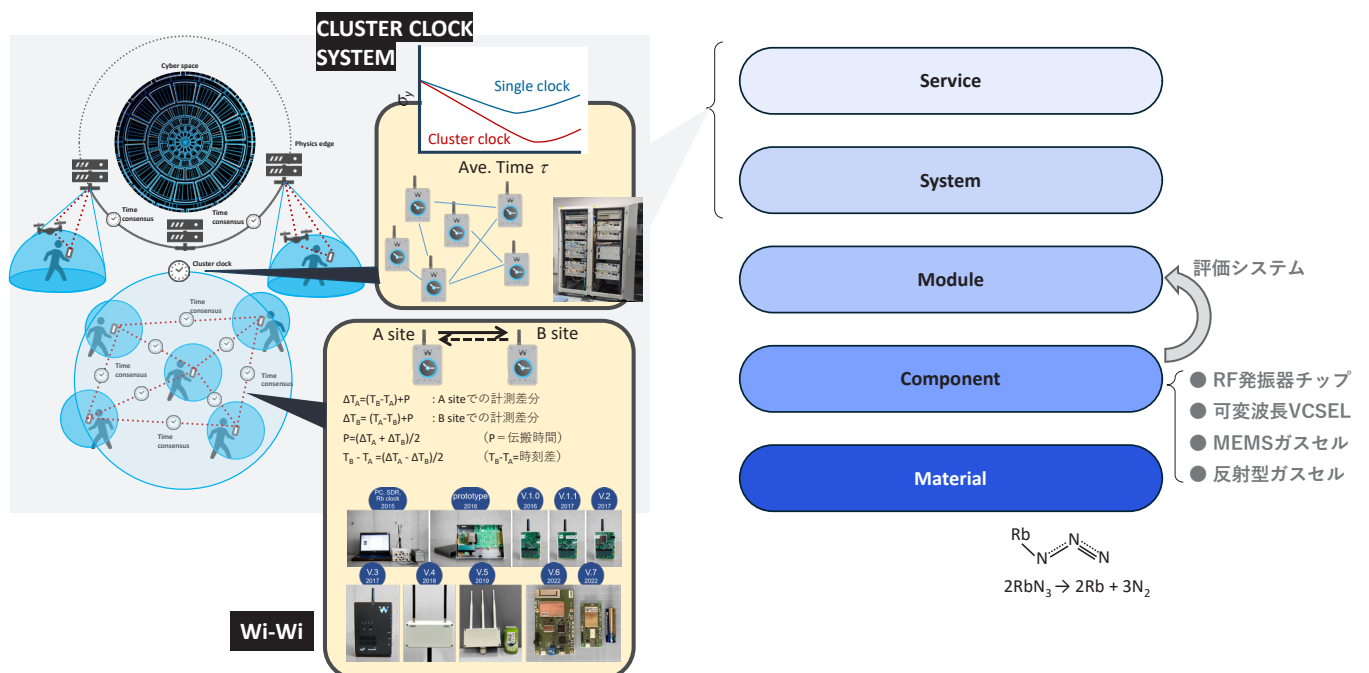


図7 システムやサービスなどの社会実装を意識した開発

謝辞

本研究の一部は、総務省 SCOPE (No. 195003003) 及び「電波資源拡大のための研究開発」(JPJ000254) の委託を受け、実施されました。また、本研究の一部は科研費挑戦的研究(萌芽)(23754737)の助成を受け、実施されました。ここに深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1 D. F. Bacon, N. Bales, N. Bruno, B. F. Cooper, A. Dickinson, A. Fikes, C. Fraser, A. Gudarev, M. Joshi, E. Kogan, A. Lloid, S. Melnik, R. Rao, D. Shue, C. Taylor, M. van der Holts, and D. Woodford, "Spanner: Becoming a SQL system," Proc. 2017 ACM Int. Conf. on Management of Data (SIGMOD 2017), Chicago, USA, pp.331-343, May 2017.
- 2 R. N. Charette, "This Car Runs on Code," IEEE Spectrum, 01, Feb. 2009.
- 3 ASRA 自動車用先端 SoC 技術研究組合 HP: <https://asra.jp/>
- 4 Carlo Rovelli, The Order of Time, Penguin, London, 2019.
- 5 N. F. Ramsey, "A Molcular Beam Resonance Method with Separated Oscillation Fields," Phys. Rev., vol.78,no.6, pp.696-699, 1950.
- 6 N. Cyr, M. Têtu, and M. Breton, "All-optical microwave frequency standard: a proposal," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.42, no.2, pp.640-649, 1993.
- 7 R. Lutwak, "Principles of atomic clocks," Proc. Tutorial Material of the IEEE Frequency Control Symp., San Francisco, USA, May 2011.
- 8 M. Hara, Y. Yano, and T. Ido, "MEMS-Based Technologies for Ultraminiaturization and Cost Reduction of Atomic Clocks," Proc. IEEE Frequency Control Symp., Toyama, Japan, May 2023.
- 9 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 Clocks," Appl. Phys. Express, vol.12, no.7, pp.072012, 2019.
- 10 H. Nishino, Y. Yano, M. Hara, M. Toda, M. Kajita, T. Ido, and T. Ono, "Reflection-type Vapor Cell for Micro Atomic Clocks Using Local Anodic Bonding of 45° Mirrors," Opt. Lett., vol.46, no.10, pp.2272-2275, 2021.
- 11 P. Prutphongs, K. Aoki, S. Ikezawa, M. Hara, and K. Iwami, "Multifunctional Metasurface for a Miniaturized Reflection-Type Atomic Vapor Cell," Proc. Transducers2023, pp.414-420, 2023.
- 12 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," Proc. 2022 Smart Systems Integration (SSI), pp.1-4, 2022.
- 13 V. A. Menon, Y. Xiao, M. S. Khan, K. Isamoto, N. Nishiyama, and H. Toshiyoshi, "Actuator/Reflector Decoupling for Reduced Excitation of Secondary Mechanical Resonance Modes in MEMS-Tunable VCSELs," Proc. MEMS2024, pp.1075-1078, 2024.
- 14 M. Hara, Y. Yano, M. Toda, T. Ono, and T. Ido, "Evaluation of New Solid Rubidium Source Using Atomic Clock Stabilization Loop," Proc. Transducers2021, pp.1158-1161, 2021.
- 15 N. Shiga, K. Kido, S. Yasuda, B. Panta, Y. Hanado, S. Kawamura, H. Hanado, K. Takizawa, and M. Inoue "Demonstration of wireless two-way interferometry (Wi-Wi)," IEICE Com. Exp., vol.6, no.2, pp.77-82, 2017.
- 16 Y. Yano, M. Hara, and T. Ido, "Distributed Synchronization Network Utilizing Miniaturized Atomic Clocks," Joint Conf. of Euro. Freq. and Time Forum & IEEE Int. Freq. Cont. Symp. (EFTF-IFCS), online, July 2021.



原 基揚 (はら もとあき)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
主任研究員
博士(工学)
原子時計チップ、Beyond 5G / 6G



矢野 雄一郎 (やの ゆういちろう)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
主任研究員
博士(工学)
クラスタックロック、原子時計チップ



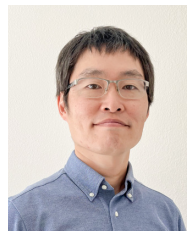
安田 哲 (やすだ さとし)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
主任研究技術員
博士(理学)
ワイワイ (WiWi, 近距離無線双方向時刻周波数伝送)



福岡 政大 (ふくおか まさひろ)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
研究員



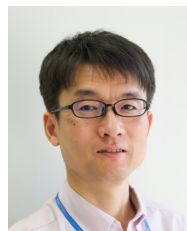
志賀 信泰 (しが のぶやす)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
主任研究員
Ph.D (Physics)
ワイワイ (WiWi, 近距離無線双方向時刻周波数伝送)



市川 隆一 (いちかわ りゅういち)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
研究マネージャー
博士(理学)
GNSS 時刻比較、相対論的測位



井戸 哲也 (いど てつや)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
室長
博士(工学)
光周波数標準、光周波数計測