

周波数資源の有効活用に向けた高精度時刻同期基盤の研究開発

課題ア：原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

課題イ：原子時計評価システムの研究開発

● 参画機関

情報通信研究機構

京都大学
東洋紡エムシー株式会社
株式会社マイクロジェット

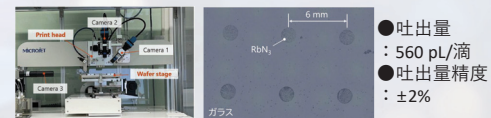
東京大学
東京科学大学
サンテック株式会社

TDK株式会社
浜松ホトニクス株式会社

東京科学大学
東京都立大学
ネオアーク株式会社

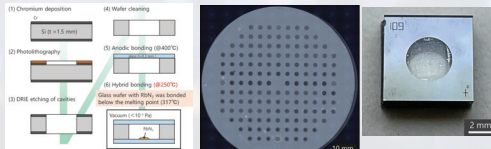
● 課題ア①成果

- 反応生成物のない個体ソースの合成に成功
- 個体ソースのウェハ上へのパターニング技術の確立

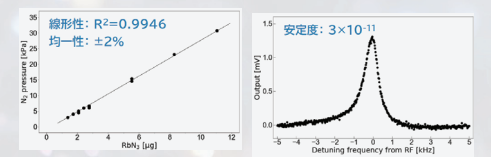


● 吐出量 : 560 $\mu\text{L}/\text{滴}$
● 吐出量精度 : $\pm 2\%$

● 実際のウェハプロセスへの適用

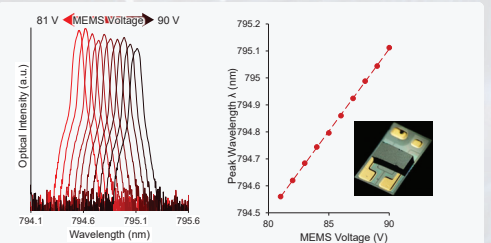


精密な窒素分圧制御とシャープなCPT共鳴を確認

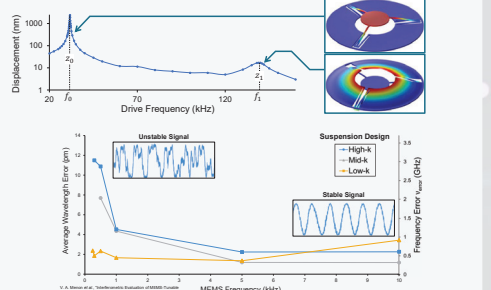


● 課題ア②成果

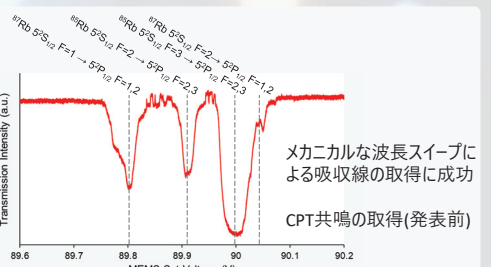
- 795nmに適合するVCSEL構造の提案と製造



- DC波長制御安定性の課題克服



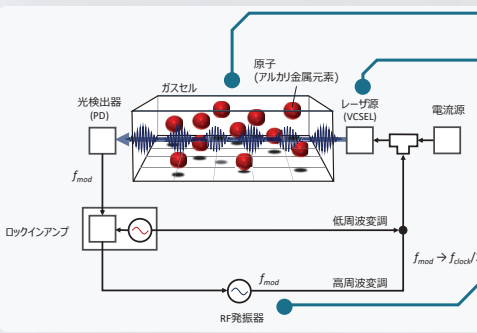
- 波長MEMSチューニングによる原子共鳴検出に成功



● 背景 原子時計システム

原子時計の超小型化と日本における継続的な開発環境の維持においてキーとなるのは？

- ➔ MEMS・CMOS技術による要素部品の微細化(フォトリソプロセス)・低コスト化(ウェハプロセス)
- ➔ 要素部品の評価技術の確立(原子時計ループ、並列評価)



- 課題ア① 固体金属ソースの合成およびパターニング、ガスセルウェハプロセスへの適用
- 課題ア② 熱・電流以外のパラメータでの波長制御→波長オフセットの修正
- 課題ア③ GHz帯MEMS共振器を活用した超小型発振器
- 課題イ 調整不要で、原子時計相当のタイミング性能を即時に再現できる評価システム

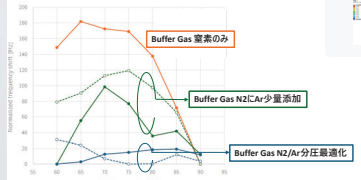
後半2年の追加テーマ

- ➔ 課題ア① Advance 物理パッケージ(VCSEL, PD, ガスセル, 磁場制御系, 温度制御系)の開発
- ➔ 課題ア③ Advance 原子時計制御システムの一体制御

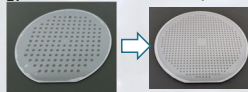
● ローエンドアプローチ

将来の小型・低コスト・量産を志向

- Ar/N₂混合封入技術の確立
- Rb-(Ar,N₂) MEMS cellで世界初のゼロ温特を実証

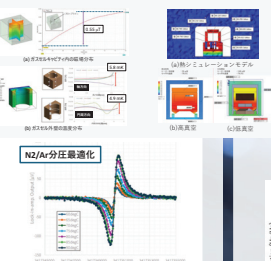


- Rb-(Ar,N₂) MEMS cellの小型化とゼロ温特を実証



● 課題ア① Advance成果

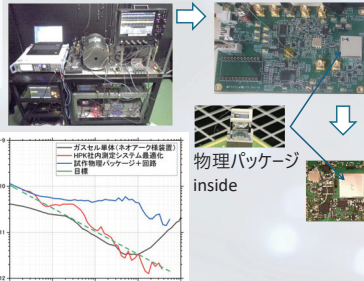
- 磁気シールド・断熱構造設計



● ハイエンドアプローチ

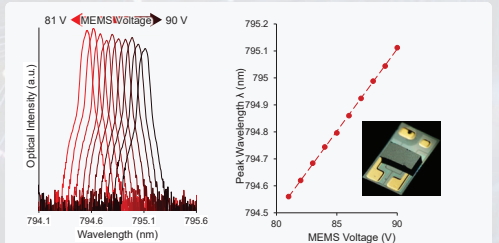
性能検証・システム成立性の実証を志向

- 原子時計自立モジュールの試動作確認に成功

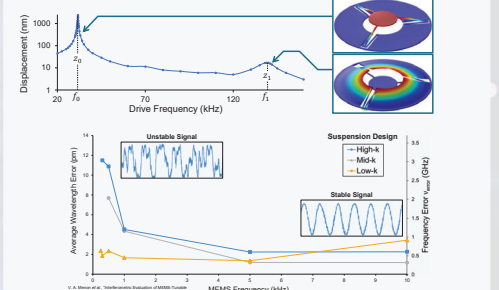


● 課題ア③成果

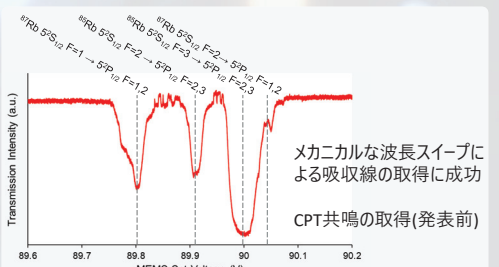
- LTCC PKGed FBAR OSC.の開発



- DC波長制御安定性の課題克服

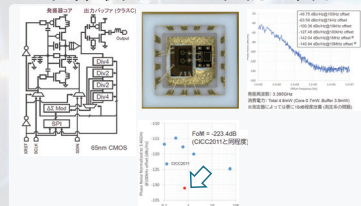


- 波長MEMSチューニングによる原子共鳴検出に成功



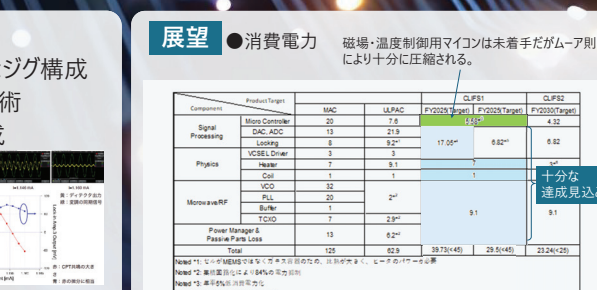
● 課題ア③成果

- LTCC PKGed FBAR OSC.の開発
- ➔ 世界最高レベルの性能を確認



● 課題ア③ Advance成果

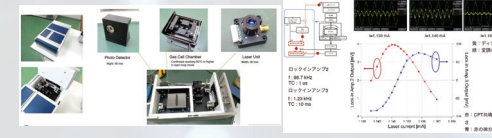
- 要素機能のASIC化の完了*
 - * 磁場制御、温度制御は未最適化
- TunabilityとQ値のTrade-offの解消(SSBM arch.特許取得)
- 位相変調(RF制御)と振幅変調(波長制御)の集積化
- VCSELドライバの集積化



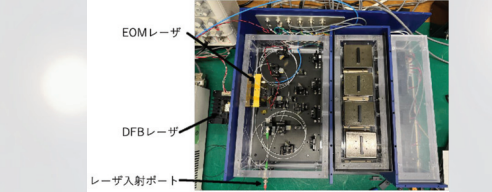
- マルチ変調器
- 発振器
- 発振器 + 変調器
- 小型実装提案

● 課題イ成果

- 要素部品の付け替えを容易にする多彩なジグ構成
- 低Q応答もデテクトを可能とする特許技術
- 位相変調、-ダブルロックインアンプ構成



- ガスセル量産の現場に対応する並列・対照評価オプション



● 展望

- 消費電力 磁場・温度制御用マイコンは未着手段がムーア則により十分に圧縮される。

Component	Product Target	MAC	ULPAC	CLF51	CLF52
Signal Processing	Micro Controller	20	3.8		
	DAC/ADC	13	21.9		
	Logic	3	9.2		
Physics	VCSEL Driver	3	3.2	17.05*	5.82**
	Coil	7	5.1		
	Coil	1	1		
	VCO	32	32		
	PLL	20	20*		
MonawaRF	Buffer	1	2*		
	TCXO	7	23**		
Power Manager & Passive Parts Loss		13	6.2**		
	Total	125	62.8	38.73(45)	28.8(45)
				23.24(25)	

- サイズ
 - Full system-in < 3x3x1 mm (0.009cc)
 - 0.6ccデザイン + RF IC + MEMS cell
 - 5x5x1.5 mm (0.0375cc)
 - 10x10x1.5 mm (0.15cc)

- 各部品の小型化が進捗、物理パッケージに制御系を含めてびつとインできるレベルにまで小型化

● 謝辞

本研究の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発」(JP1000254)の委託を受け、実施されました。ここに深く感謝申し上げます。

周波数資源の有効活用に向けた高精度時刻同期基盤の研究開発

課題ウ：小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

課題工：多点測位システムの研究開発

● 参考文献

情報通信研究機構

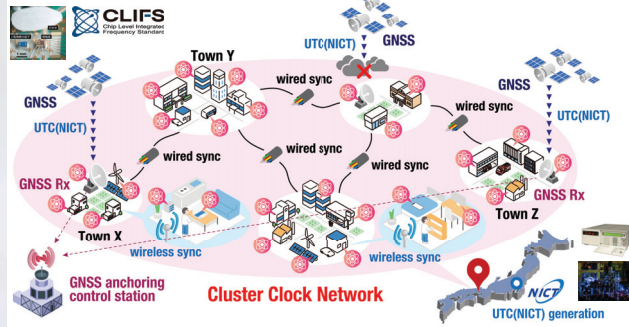
東京科学大学
群馬大学
東京海洋大学

セイコーソリューションズ株式会社
株式会社レイドリクス

株式会社コア
九州工業大学

● 背景

光格子時計や超小型原子時計などの進展で、デバイスの所有する時刻精度が大幅に(周波数安定度が5桁以上)改善された場合の社会インフラの展望と課題を考える。



- ・単一時刻源(GNSS, マスタークロック)からの脱却
- ・各時計の個体差・ドリフト・異常をネットワーク全体で吸収
- ・大規模・動的ネットワーク(加入・離脱・移動)への対応

⇒ 課題ウ① 原子時計による時刻管理のためのアルゴリズムの研究開発

- ・有線高精度な時間基準を構築し、無線で時間を空間へ展開
- ・有無線混在の実ネットワークを想定した、シームレスな時系配布
- ・無線時刻比較に含まれる伝搬遅延を“誤差”ではなく“情報”として活用(空間同期との連携)

⇒ 課題ウ② 小型原子時計を搭載した有無線モジュールの研究開発

- ・ナノ秒級の時刻同期の距離・位置精度への展開活用
- ・分散MIMOやビームフォーミングへの展開可能性
- ・空間情報の利活用の拡大(空間同期)

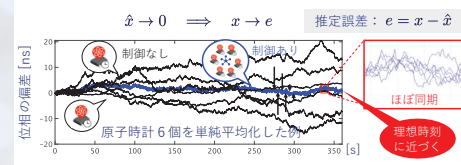
⇒ 課題工 多点測位システムの研究開発

課題ウ① 成果1

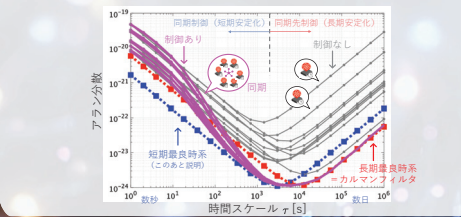
● 時刻生成用カルマンフィルタ

- ・可観測部分：原子時計の同期誤差
- ・不可観測部分：原子時計の同期先＝時系

→可観測な推定値を制御して、不可観測な推定誤差に同期



【数学的定理】
原子時計群に対するカルマンフィルタは、アラン分散の意味で**長期安定度が最大**となる時系を生成する。

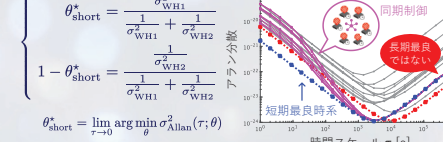


● 短期と長期の安定度を両立する時系生成

重みパラメータを明示した生成時系のアラン分散

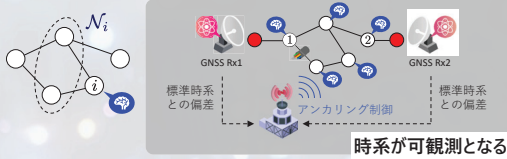
$$\sigma_{\text{Allan}}^2(\tau; \theta) = \tau \{ \theta^2 \sigma_{\text{WH1}}^2 + (1-\theta)^2 \sigma_{\text{WH2}}^2 \} + \frac{\tau^3}{3} \{ \theta^2 \sigma_{\text{RW1}}^2 + (1-\theta)^2 \sigma_{\text{RW2}}^2 \}$$

短期安定度を最大化する重みを理論的に導出



白色周波数雑音分散の逆比で重み付けすると**短期最良**

→拡張：分散同期ですべてのノードが同期するための条件も導出
→ノード数に制限のないスケーラブルなアルゴリズムが実現可能



課題ウ② 成果1

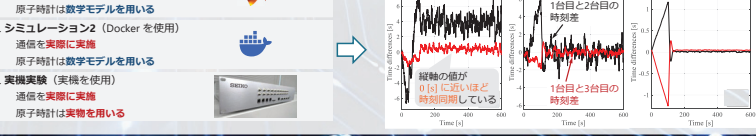
● 小型原子時計を搭載した有無線モジュール開発



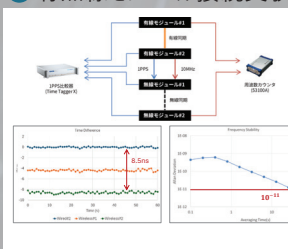
課題ウ① 成果3

● 実機と制御理論の数学モデルの乖離を理論的に整理

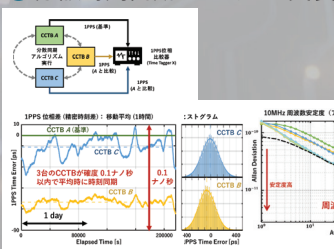
● 複数のCPUによる協調計算とUDP通信を用いたプロトコルを確立



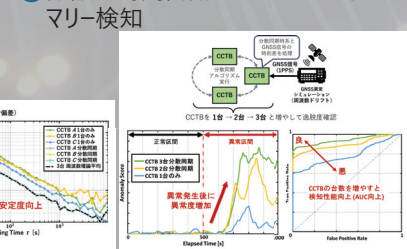
● 有無線モジュール接続実験



● 分散時刻同期アルゴリズム実装



● 分散型時刻同期システムにおけるアンマリー検知



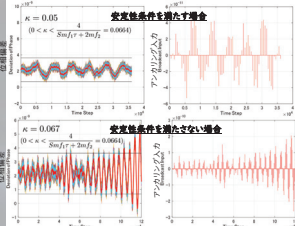
課題ウ① 成果2

● GNSSアンカリングの安定化条件

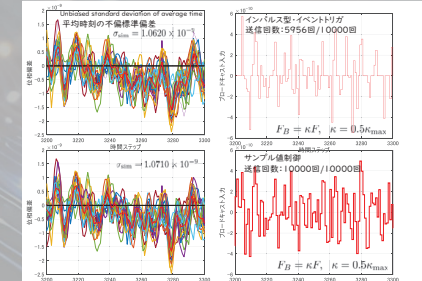
→GNSSアンカの挿入位置・個数の最適化が可能
一定周期配信における安定条件の数学的導出

$$\text{同期ゲインを } F = \gamma \begin{bmatrix} \gamma & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ の形とする。} \quad 0 < \kappa < \frac{4}{\gamma(2 + S\alpha)}$$

アンカリング入力のゲイン κ が右式の範囲であれば、同期先は UTC (NICT) (※複数のGNSSアンカーの状態変数の平均値) に到達する。 S は配信周期。



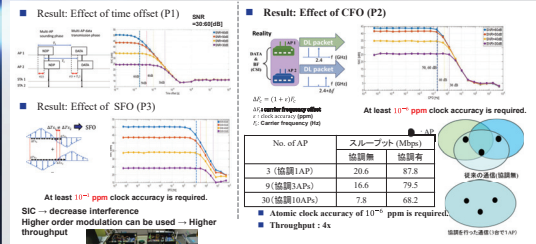
非一定周期配信における適宜のGNSSアンカリング



イベントトリガ制御でGNSSアンカリングの送信回数低減可能性を確認

課題工 成果1

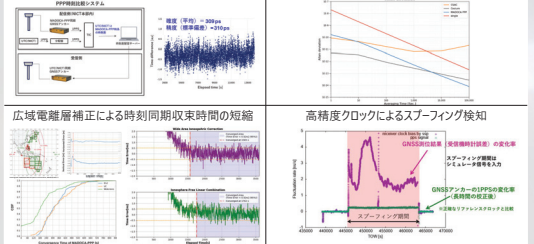
● 時刻同期ずれの原因と影響を解析し、時刻同期によるスループット改善効果(4倍以上)をシミュレート



実験実証(発表検討中)

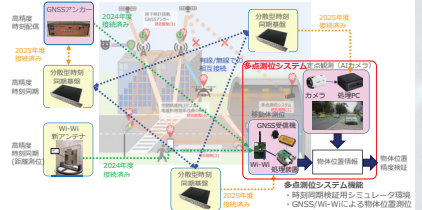
課題工 成果2

● MADOCA-PPPによる高精度時刻補正を活用したサブナノ秒級時刻同期装置GNSSアンカーの開発

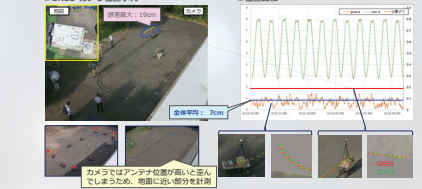


課題工 成果3

● 空間情報の利活用シーンをデバイス連携で拡大



<フィールド検証の一例>



謝辞

本研究の一部は総務省「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。ここに深く感謝申し上げます。