

「量子干渉効果による小型時計用発信器の高安定化の基礎研究」

(令和元年度安全保障技術推進制度、令和2年3月3日～令和6年3月31日)

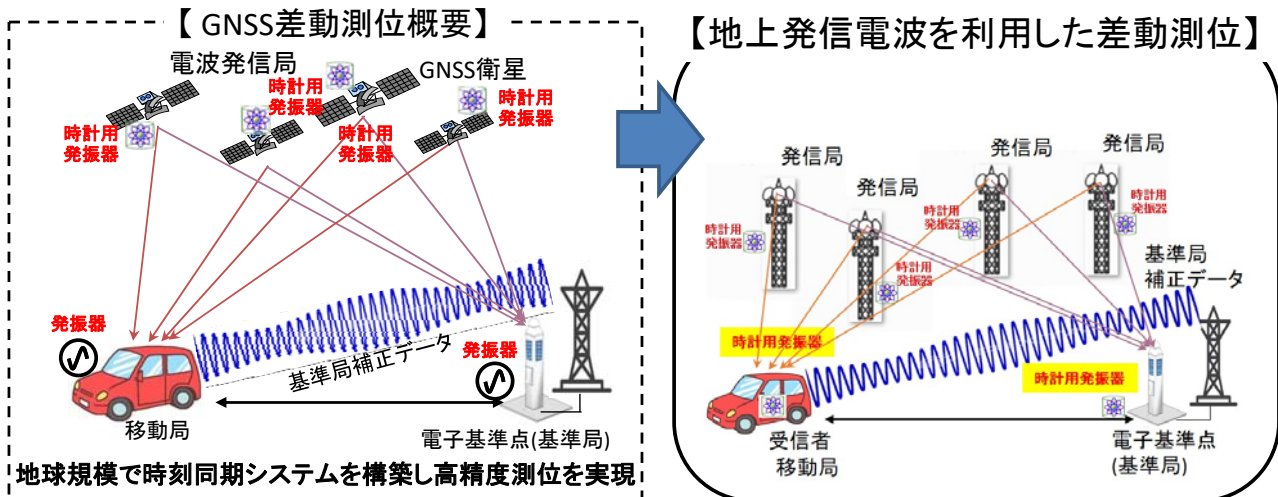
令和2年12月10日東京ビッグサイト
MEMSセンシング&ネットワークシステム展

一般財団法人マイクロマシンセンター (MMC)
HS-ULPAC研究センター長 池上健

1

研究の概要

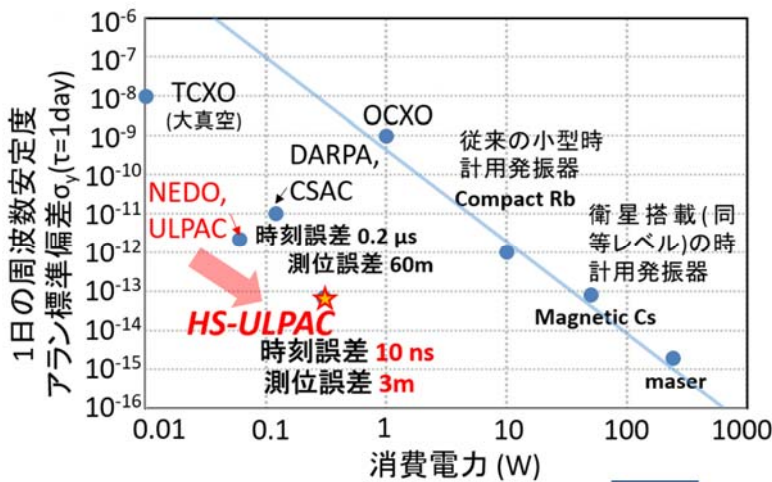
時計の車載や次世代移動通信基地局への設置等を想定し、測位衛星からの電波が途絶しても高精度測位を維持するための小型時計用の高精度発信器の実現を目指す。測位衛星搭載用時計の発信器と同等の性能を有し、かつ手のひらサイズで低消費電力の小型時計用発信器を高安定化するための基礎研究として、主要な周波数変動要因の解明及びプロトタイプでの実証・評価等を実施する。



移動体に高精度発信器を搭載することで、基準局との時刻同期レベルを高精度化でき、衛星信号が途絶した場合でも測位精度を維持することが可能となる。

2

【時計用発振器の周波数安定度と測位誤差の関係】



CSAC: Chip Scale Atomic Clock
 OCXO: Oven Controlled Crystal Oscillator
 TCXO: Temperature Compensated Crystal Oscillator

ULPAC
 【Ultra Low Power Atomic Clock】
 量子部内部構造

検出器 ガスセル
 VCSEL
 VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser
 ADコンバータ マイコン
 PLL 量子部 制御基板

プロトタイプモジュール(2018)
 1秒の周波数安定度; $\sigma(\tau=1s) = 3.5 \times 10^{-10}$
 1日の周波数安定度; $\sigma(\tau=1day) = 2.2 \times 10^{-12}$
 消費電力; 60 mW 体積; 15 cm³
 NEDO(ULPAC) 成果報告書2018より

Zhang, Haosheng, et al. "ULPAC: A Miniaturized Ultralow-Power Atomic Clock." *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 54.11 (2019): 3135-3148.

周波数変動要因の原理解明まで踏み込んで、究極の高安定化を実現

High Stability Ultra Low Power Atomic Clock (HS-ULPAC)

本スライドの一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究業務の結果得られた成果です。³

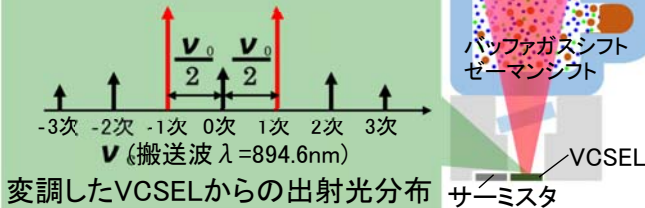
研究課題の最終目標

【研究内容】

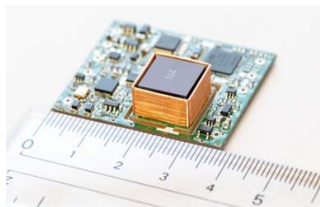
- ・各種周波数変動要因の解明
- ・車載環境(移動局)で周波数安定度を維持するための条件の解明
- ・プロトタイプモジュール試作による性能評価・実証

【周波数変動要因の解明】

- ・ACシュタルクシフトが光強度に依存
- ・1次光の比率が変調度に依存

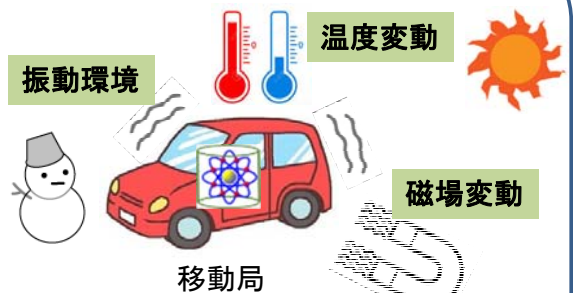


【プロトタイプモジュール試作】



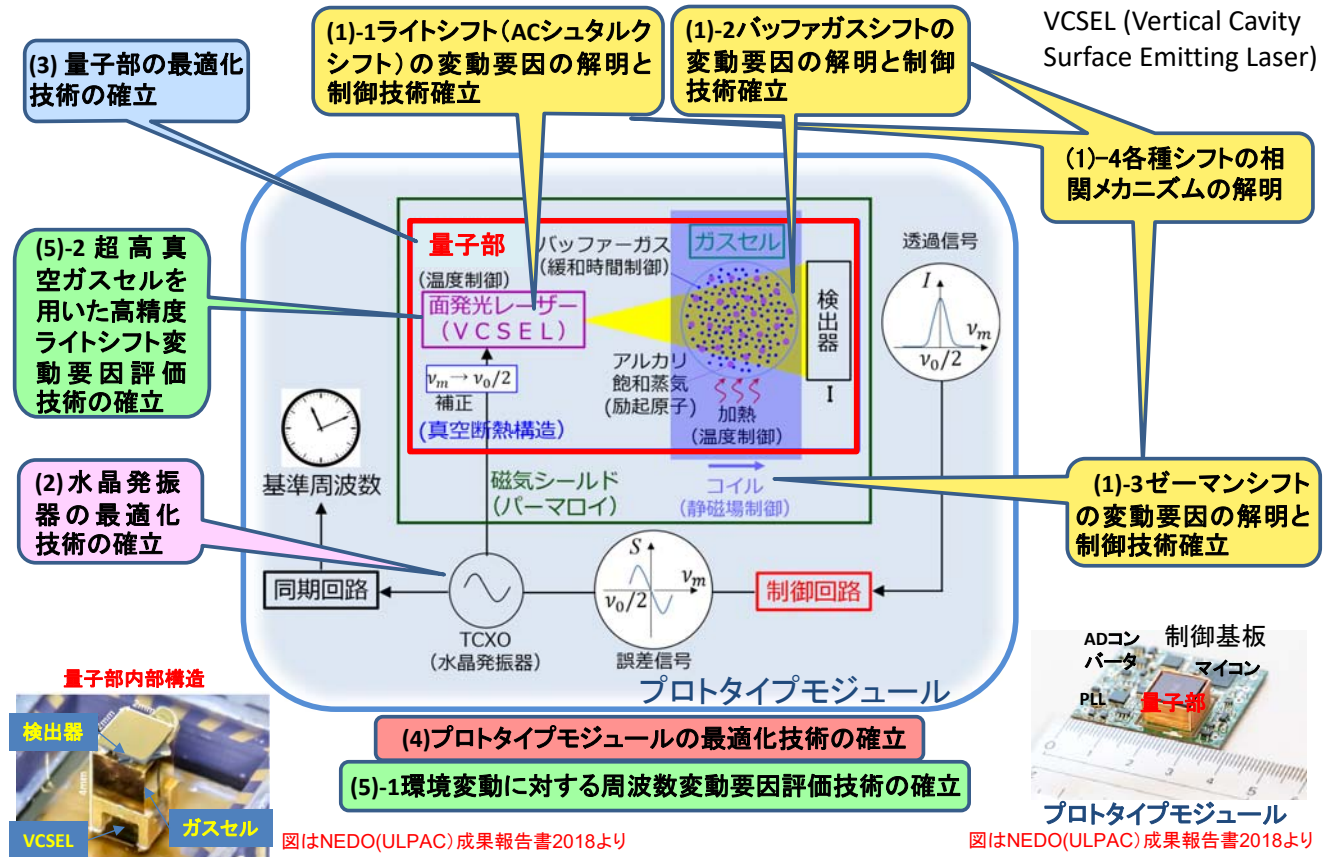
NEDO(ULPAC) 成果報告書2018より

【車載環境での性能実現を目指す】



- ・磁場: 0T ~ 2×10^{-4} T
- ・温度: -10°C ~ $+70^{\circ}\text{C}$
- ・振動: 加速度3G

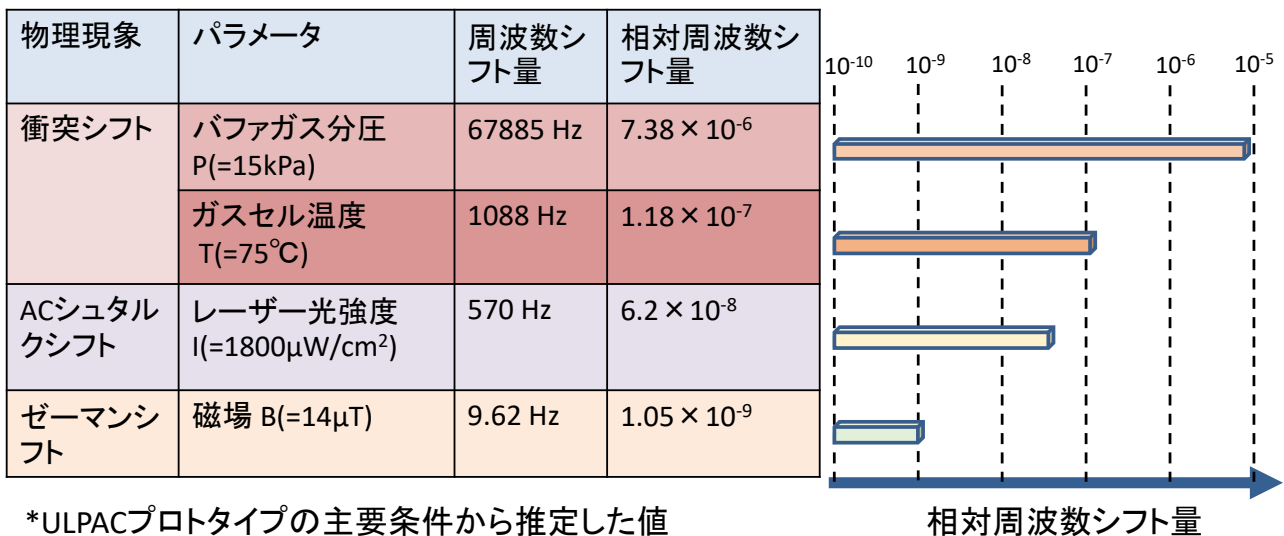
量子干渉(CPT共鳴)効果を用いた時計用発振器の構造と 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題



本スライドの一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究業務の結果得られた成果です。 5

小型原子時計における主要な周波数変動要因

【物理現象と周波数シフト量の関係】

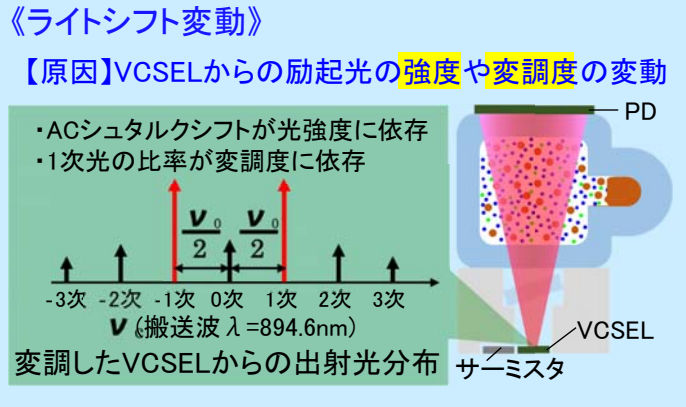


本スライドの一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究業務の結果得られた成果です。 6

ライトシフト 原子に光を照射すると原子の固有周波数が変化して発生

変動の主要因: VCSELの強度変動、波長変動

提案手法: 高安定VCSELの採用とzero-cross法の適用

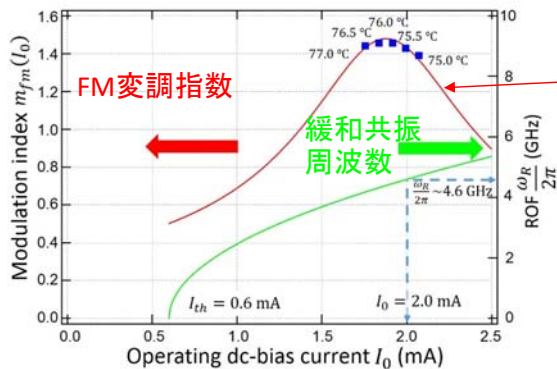


zero-cross法の適用とその最適化

Reducing frequency drift caused by light shift in coherent population trapping-based low-power atomic clocks, Shinya Yanagimachi, Kazuhiro Harasaka, Ryoichiro Suzuki, Mitsuru Suzuki, and Shigeyoshi Goka, Appl. Phys. Lett. 116, 104102 (2020).

ライトシフトとその変動要因の解明及びその制御技術の確立

【動作電流とFM変調指数と緩和共振周波数】

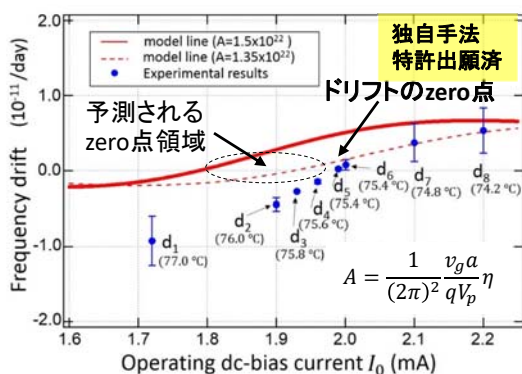


zero-cross法の適用とその最適化

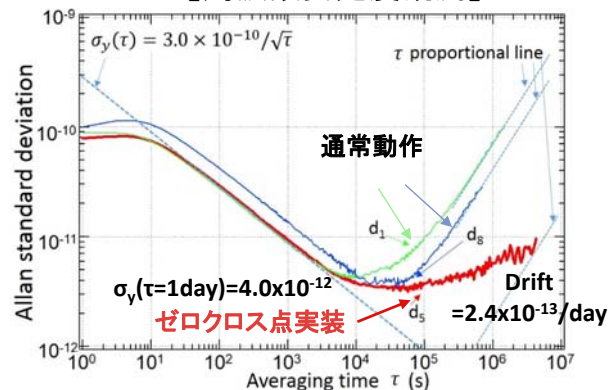
$$m_{fm} \propto \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\gamma_{pp}}{\omega}\right)^2}{(\omega^2 - \omega_R^2)^2 + \omega^2 \gamma^2}}$$

最大変調指数を仮定し上式でフィットし、電流微分変調指数を導出可能

【動作電流とプロトタイプモジュールのドリフトレート】



【周波数安定度観測】

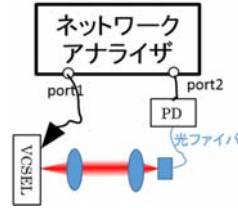


【zero-cross法の適用とその最適化】

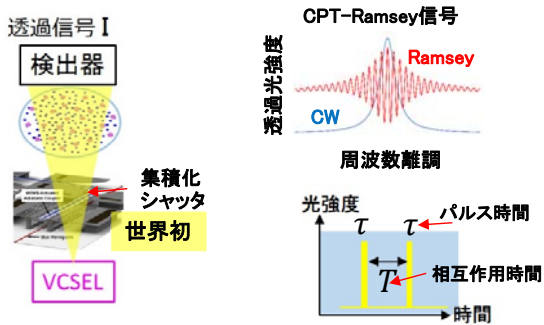
・VCSEL動作電流の最適化によりドリフト最小化技術のHS-ULPACへの適用

・VCSEL基礎パラメータと周波数ドリフトの関係を解明

【VCSELエージング評価】



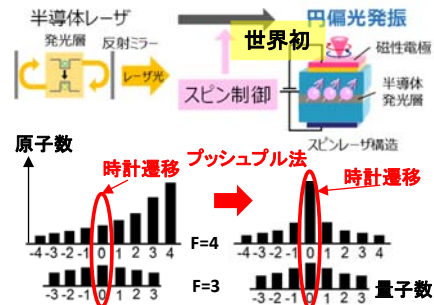
【CPT-Ramsey共鳴法の実証】



・集積化シャッタを用いた光パルス製作によりラムゼー干渉を高安定領域で探求。ライトシフト量を $\tau/(T + \tau)$ の割合で低減化を実現。

集積化シャッタの図は、Seok, T. J., et al. (2016). "Large-scale broadband digital silicon photonic switches with vertical adiabatic couplers." Optica 3(1). より引用

【円偏光VCSELの試作】



・スピン制御技術で円偏光VCSELを実現
・プッシュプル法(CPT信号の生成効率向上→レーザ強度を低減→ライトシフト量低減)に適した偏光切替手法を探索

バッファガスシフト

アルカリ原子とバッファガスの衝突により固有周波数が変化して発生

主要因

ガスの流出・流入・反応によるガス圧変動

提案手法

究極素材であるサファイア結晶を使ったガスセルを開発

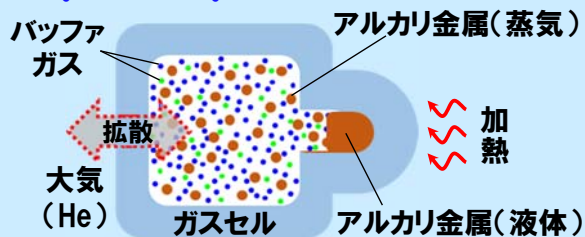
《時刻精度劣化要因①:衝突シフト変動》

【原因】ガスセル内 **ガス分圧・温度** の変動

$$\text{衝突シフト } \Delta \nu = P_0 [\beta + \delta(T - T_0) + \gamma(T - T_0)^2]$$

β : 圧力係数 δ : 1次温度係数 γ : 2次温度係数

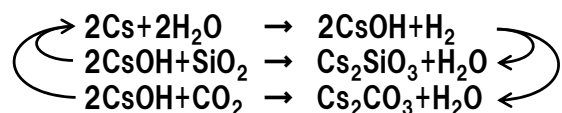
P_0 : 初期分圧 T_0 : 初期温度 T : 温度



《ガス分圧:ガスセルの高純度化》

ガス分圧変動要因

1. 拡散によるガスセルへのガスの流入出
→ 拡散係数の小さなガスセル材料及びガス
2. ガスセル内壁からのアウトガス
→ 分析セル用脱ガス処理(800°C、 10^{-5} Pa)
3. Csと不純ガスの化学反応
→ 高純度ガスの導入



バッファガスシフト及びその変動要因の解明及び制御技術の確立

【開発技術のポイント】

周波数シフトの温度係数の符号が異なる2種類のバッファガスのガスセルへの精密混合封止による温度依存性低減
 バッファガス単独(Ar)と比較し、混合バッファガスでは温度依存性を100分の1に低減

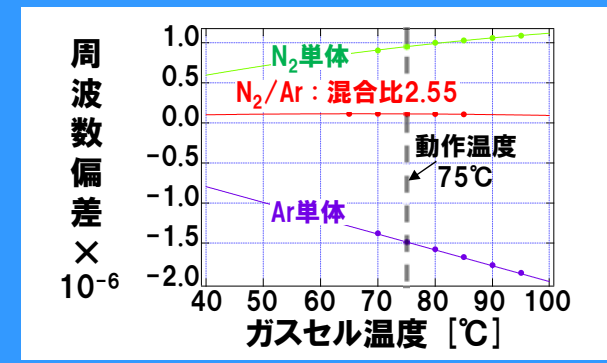
周波数シフトの温度依存性

$$\Delta\nu = P_0 [\beta + \delta(T - T_0) + \gamma(T - T_0)^2]$$

Buffer gas	β (Hz/Pa)	δ (Hz/kPa K)	γ (mHz/(kPa*K ²))
N ₂	6.92	6.18	-18.8
Ar	-1.46	-8.54	0.0

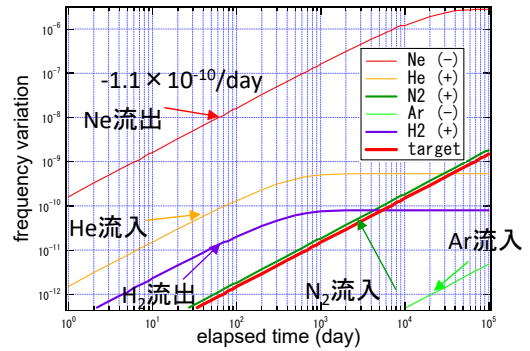
β : 圧力係数 δ : 1次温度係数 γ : 2次温度係数

《温度: 混合バッファガス》



本スライドの一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究業務の結果得られた成果です。 11

【Ne封入セルによる周波数ドリフト発生への推定】

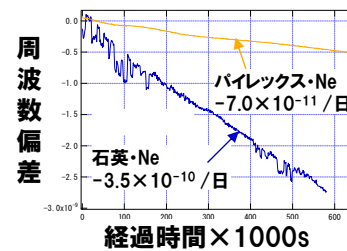


セル外環境: 大気を想定

ガス種	Partial pressure (Pa)	ガス種	Partial pressure (Pa)
N ₂	8.0 × 10 ⁴	Ne	1.9
O ₂	2.1 × 10 ⁴	He	5.4 × 10 ⁻¹
Ar	9.6 × 10 ²	H ₂	5.2 × 10 ⁻²
CO ₂	4.0 × 10 ¹		

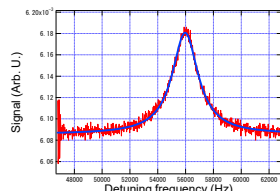
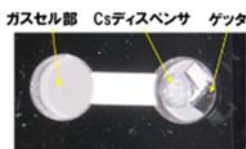
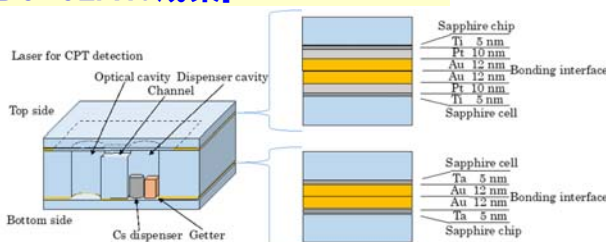
バッファガスシフト及びその変動要因の解明及び制御技術の確立

提案手法 究極素材であるサファイア結晶を使ったガスセルを開発



ガスセル材料(透過定数)の周波数への影響

サファイア製ガスセルでCPT共鳴観測 [NEDO: ULPAC成果]



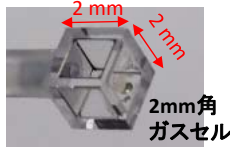
サファイア製ガスセル

Cs-CPT共鳴観測

Kurashima, Yuichi, et al. "An all-sapphire Cs gas cell for a chip-scale atomic clock." *Japanese Journal of Applied Physics* 58.9 (2019): 096506.

本スライドの一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究業務の結果得られた成果です。 12

【ガラス加工方式ガスセル(石英)】

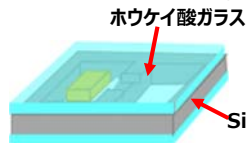


・高純度アルカリ原子導入に関する基準データの取得

Heに対するガス透過係数
 $\eta = 1.9 \times 10^{-18} \text{ (m}^2/\text{s/Pa)}$

【MEMSガスセル(ホウケイ酸ガラス-Si接合)】

MEMSガスセル製造プロセス	
①Si基板上マスク形成	
②Siエッチング	
③Siキャビティ形成	
④裏面ガラス接合 (ホウケイ酸ガラス)	
⑤Csデイスベンサー搭載	
⑥表面ガラス接合 (ホウケイ酸ガラス)	
⑦レーザー照射による活性化(Csガス充填)	



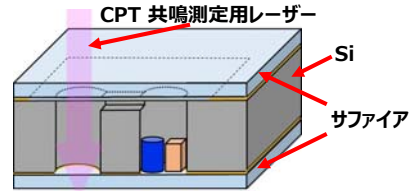
・生産効率の向上
・ガス透過性、加工プロセスにおける不純物混入、接合部からの微小リークの検証

ガス透過係数 $\eta = 5.7 \times 10^{-19} \text{ (m}^2/\text{s/Pa)}$

図はNEDO(ULPAC)成果報告書2018より引用

【MEMSガスセル(単結晶サファイア-Si接合)】

特許出願済
独自技術



・窓材として単結晶サファイアを、キャビティ材としてSiを用い製造プロセスを確立、MEMSプロセスの脱ガス、接合手法の違いを検証

ガス透過係数 $\eta < 1 \times 10^{-25} \text{ (m}^2/\text{s/Pa)}$

本スライドの一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究業務の結果得られた成果です。

ゼーマンシフトとその変動要因の解明及びその制御技術の確立

ゼーマンシフト

アルカリ原子に磁場を印加すると固有周波数が変化して発生

主要因

外部磁場、プロトタイプモジュール内部の磁場変動

提案手法

シミュレーションに基づく遮蔽技術開発。高感度磁気センシング技術を用いた最適実装

【磁気シールドの設計及び試作】

3次元静磁場シミュレーション(一例)

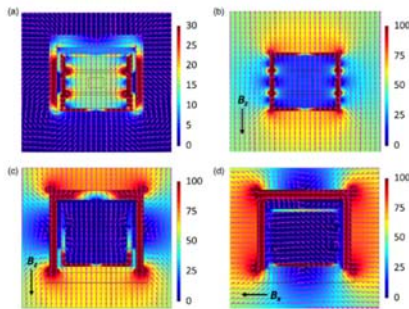
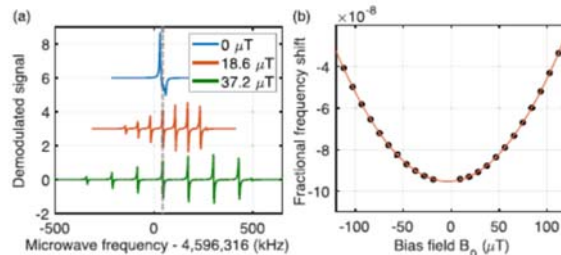


Fig. 2. (Color online) A cross-sectional view of the simulated magnetic field distribution. (a) The amplitude (color density) and direction (magenta arrow) of the field created by the internal Helmholtz coil with 1 mA of current. (b) The field distribution for a uniform external field of 50 μT in the longitudinal direction without the lid. (c) Same as (b) but with the lid. (d) The same for the transverse field with the lid. The unit for colorbar is μT .

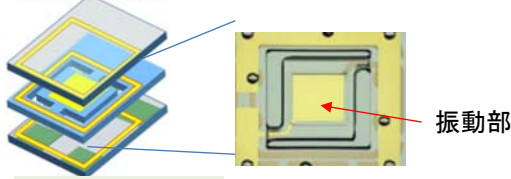


Hong, Hyun-Gue, et al. "Magnetic shield integration for a chip-scale atomic clock." *Applied Physics Express* 13.10 (2020): 106504.

・最近行われた優れた国外の実験結果を参考、3次元静磁場解析及び、プロトタイプ用磁気シールド試作による外部磁場遮蔽の最適化技術の確立

プロトタイプモジュールの最適化技術の確立

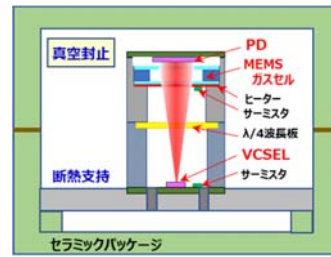
【耐震動特性を持つ高安定水晶発振器】



・WLPにより振動部を小型化し振動耐性を強化

・振動モードの最適化によるQ値の向上

【真空断熱型量子部】

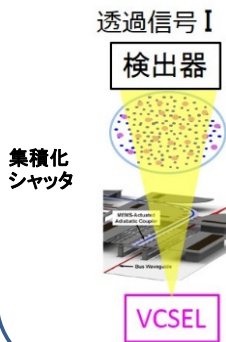


NEDO(ULPAC)成果
報告書2018より

・パーツを強固に断熱支持し全体を真空封止
(低消費電力と高耐振動性を両立)

本スライドの一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究業務の結果得られた成果です。

【光パルス生成用集積化シャッタ】

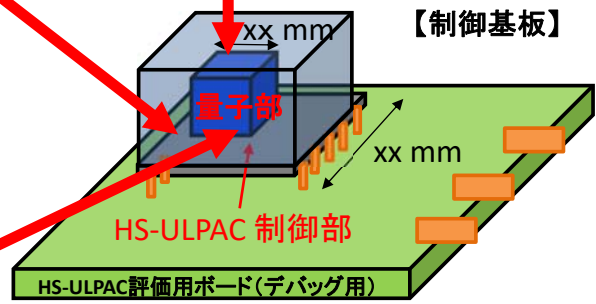


・集積化シャッタを用いた光パルス製作によりラムゼー共鳴法を高安定領域で探求

世界初

集積化シャッタの図は、Seok, T. J., et al. (2016). "Large-scale broadband digital silicon photonic switches with vertical adiabatic couplers." Optica 3(1). より引用

【制御基板】

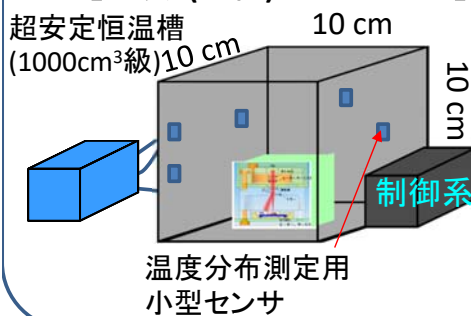


【プロトタイプモジュール】

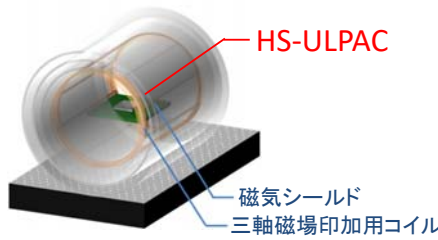
集積化光シャッタなどのMEMSデバイス、水晶発振器、量子部を制御基板回路に搭載し性能実証

環境変動に対するプロトタイプモジュールとしての性能評価

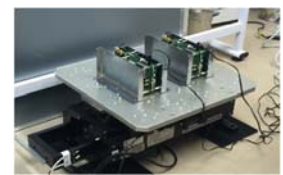
【温度:(目標)-10°C~70°C】



【磁場:(目標)0T~2×10⁻⁴T】

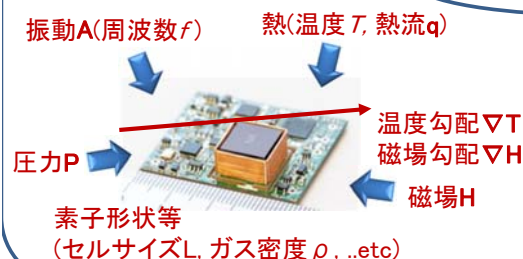


【振動:(目標)<3G】



加振装置(例)

【機械学習に基づく周波数変動モデル構築とその低減】

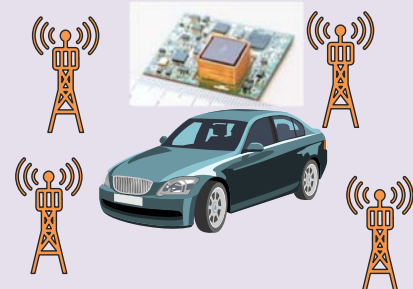


世界初



異種混合学習

移動体での周波数安定度実証



・データを基に、NEC独自の異種混合学習で、周波数変動要因を解明・モデル化

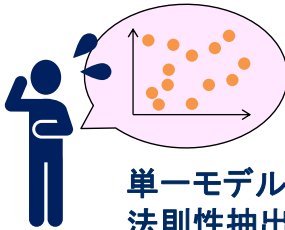
多次元の回帰分析: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

課題:

- nの数が極めて多い多次元空間での最適化が必要
 - 実際の物理系では、様々な環境変数や物理法則が複雑に入り乱れる
- 従来型の回帰アルゴリズム(非線形最小二乗法等)の適用が困難

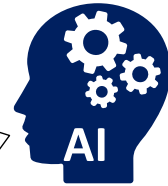
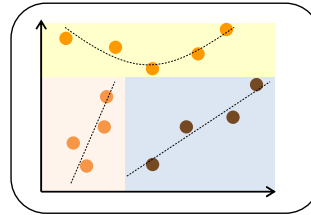
異種混合学習とは

各データ: 多次元空間上の点(実験データ等)



単一モデルによる
法則性抽出は困難

異種混合学習による
区分線形回帰



異種混合学習

- ・データを自動的にグループ分けし、各グループごとに法則性を自動抽出

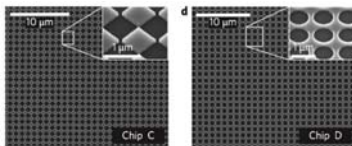
参考: 機械学習の材料開発への適用(Materials Informatics)

- [1] Y. Iwasaki, et al. "Machine-learning guided discovery of a new thermoelectric material" Sci. Rep. 9, 2751 (2019).
 [2] Y. Iwasaki, et al. "Identification of advanced spin-driven thermoelectric materials via interpretable machine learning" npj Computational Materials. 5, 103 (2019)

超高真空ガスをを用いた高精度ライトシフト変動要因評価技術の確立

【孤立状態原子生成用デバイス】

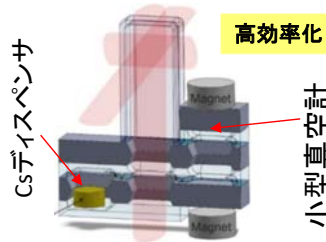
・四面体光照射用グレーティング



★ 図はC.C. Nshii, et al., "A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies," Nat. Nanotechnol. 8, 321 (2013)より引用(下左、下右の図も)

- ・超高真空ガセルに特化した高効率回折格子を独自に設計、試作($\lambda=852\text{nm}$)

・小型超高真空ガセル

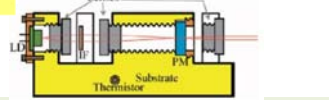


図はP.Knapkiewicz, Alkali Vapor MEMS Cells Technology toward High-Vacuum Self-Pumping MEMS Cell for Atomic Spectroscopy, Micromachines 2018, 9, 405より引用

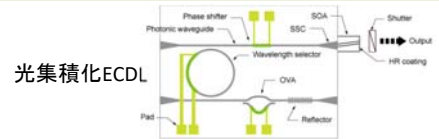
・超高真空ガセル(10^{-6}Pa)実現

・外部共振器型レーザー(ECDL) 干渉フィルター方式

独自手法



- ・長期的にモードホップフリーな小型ECDLを実現



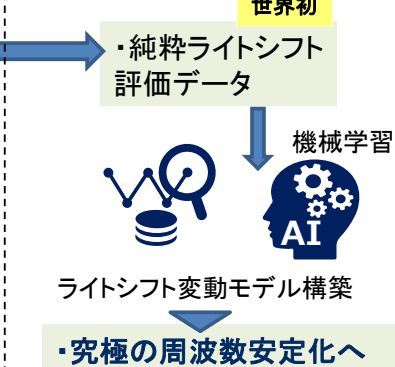
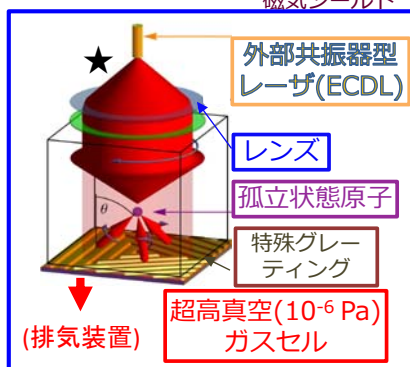
- ・超高Q値光導波路型リング共振器と光制御方式シャッターを集積化し、超小型化($20\text{mm}\square$)を実現

デバイス組み込み

デバイスへフィードバック

【孤立状態原子ライトシフト評価系】

【ライトシフト変動評価・低減法】

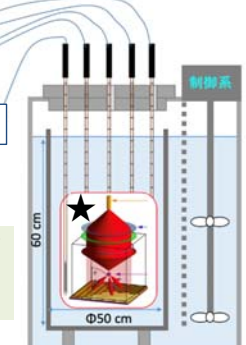


【温度依存性取得技術の確立】

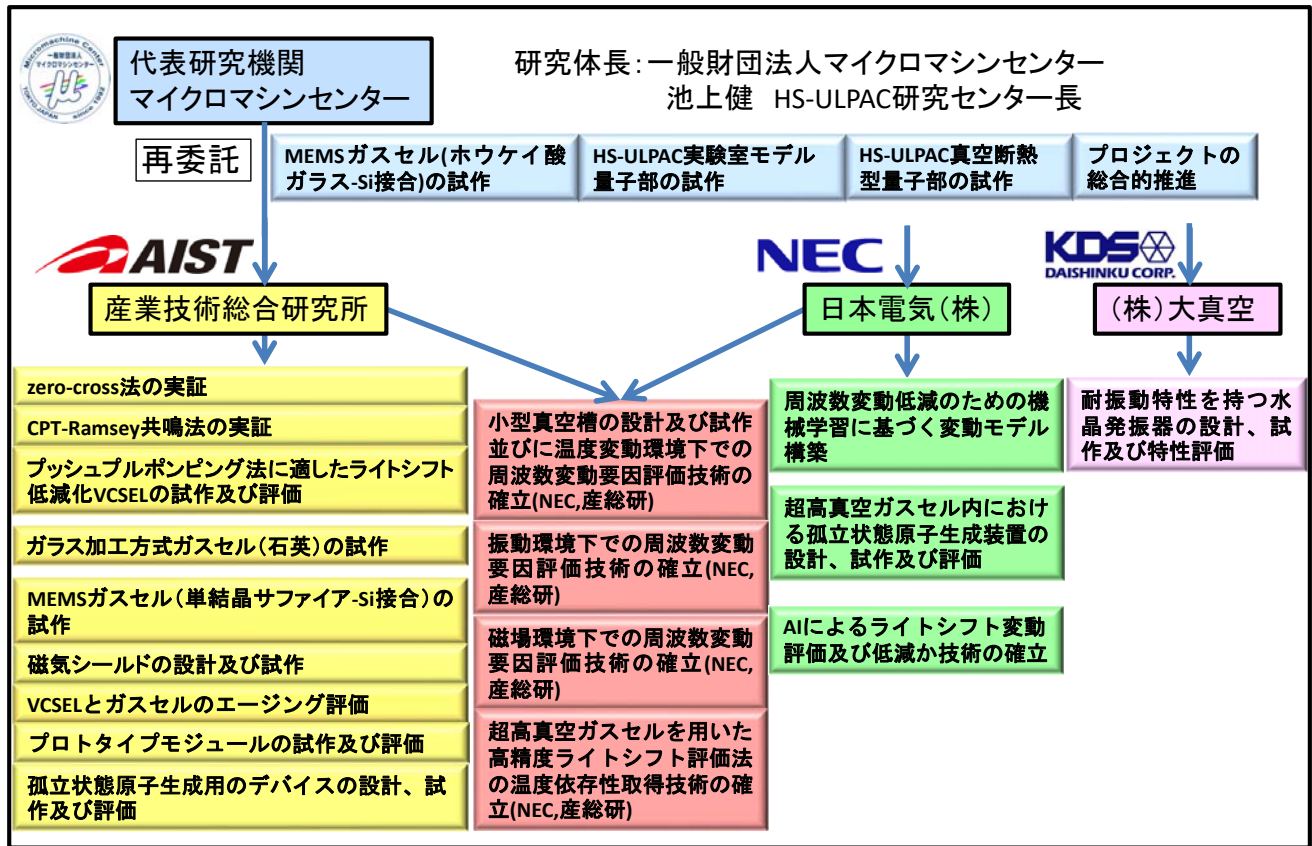
世界初

- ・スキャナー
- ・温度分布モニター
- ・高精度温度計測

- ・空間均熱性、及び温度安定性がmKオーダー



超安定恒温槽 ($100,000\text{cm}^3$ 級)



まとめ

時計の車載や次世代移動通信基地局への設置等を想定し、測位衛星搭載用時計の発振器と同等の性能を有し、かつ手のひらサイズで低消費電力の小型時計用発振器を高安定化するための基礎研究を行い、主要な周波数変動要因の解明及びプロトタイプでの実証・評価等を実施する。

主な周波数変動要因は、ライトシフト、バッファガスシフト、ゼーマンシフトである。これらを含む変動要因を解明し、低減するために下記の基礎研究を行う。

- (1) ライトシフトについては、ゼロクロス法の最適化、CPTラムゼー共鳴法の実証、円偏光VCSELの試作を行う。
また、超高真空ガスセル中の孤立原子を用いてライトシフトを高精度に評価する。そのための超高真空ガスセル、特殊回折格子、光集積化ECDL、超安定恒温槽の開発を行う。
- (2) バッファガスシフトについては、究極素材であるサファイア結晶を使ったガスセルの開発を行う。
- (3) ゼーマンシフトについては、シミュレーションに基づく遮蔽技術開発。高感度磁気センシング技術を用いた最適実装を行う。
- (4) AI（機械学習）に基づく周波数変動モデル構築とその低減を行う。

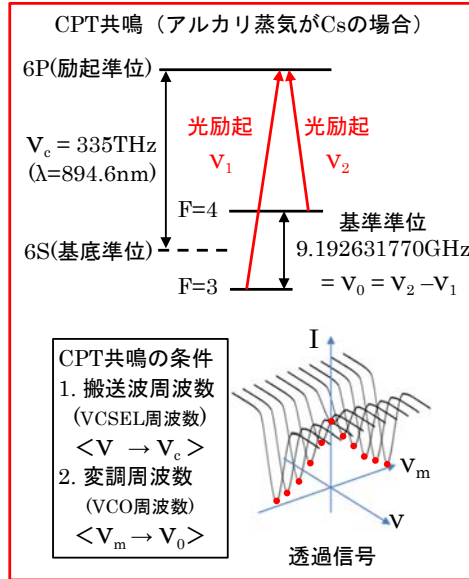
上記の基礎研究の結果に基づいてプロトタイプモジュールを構築し、実際の移動体（自動車）で、変動する温度、振動、磁場環境下での周波数安定度の実証を行う。

本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度JPJ004596の支援を受けたものです

ご清聴ありがとうございます。
より詳細はパネル展示スペースにてご説明申し上げます。

(以下補足説明資料)

【量子干渉状態/CPT共鳴】



* VCSELとアルカリ原子が封入されたガスセルを用いることで、省スペースで普遍性の高い固有周波数を参照することが可能となる。

(補足) Zero-cross法について

【 $\delta\nu_{LS}$: ライトシフトドリフト】

$$\delta\nu_{LS} = \alpha \left(m_{fm}(I_0) \right) \cdot \left(\frac{\delta I}{I_0 - I_{th}} \right) P_0 + \left(\frac{d\alpha}{dm_{fm}} \right)_{I=I_0} \left(\frac{dm_{fm}}{dI} \right)_{I=I_0} \delta I \cdot P_0$$

α : ライトシフト係数 m_{fm} : FM変調指数 δI : VCSEL動作電流ドリフト I_0 : VCSEL動作電流 I_{th} : VCSEL閾値
 $d\alpha/dm_{fm}$: 微分ライトシフト係数 dm_{fm}/dI : 電流微分変調指数 P_0 : 照射レーザー強度

VCSELの波長エージングに関連してVCSEL動作電流がドリフトする。その結果、第1項目と第2項目が打ち消し合う動作ポイントが存在する。

【 dm_{fm}/dI : 電流微分変調指数】 半導体レーザーの小信号周波数応答理論より導出

キャリア密度と光子密度の微分レート方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} dN \\ dN_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\gamma_{NN} & -\gamma_{NP} \\ \gamma_{PN} & -\gamma_{PP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dN \\ dN_p \end{bmatrix} + \frac{\eta_i}{qV} \begin{bmatrix} dI \\ 0 \end{bmatrix}$$

N : キャリア密度 N_p : フォトン密度 q : 素電荷
 $\gamma_{NN}, \gamma_{NP}, \gamma_{PN}, \gamma_{PP}$: 各種レート係数 η_i : 注入効率
 V : 活性領域体積

微分方程式の解

$$N = \frac{\eta I_0 \gamma_{PP} + j\omega}{qV \omega_R^2} H(\omega) \quad H(\omega) = \frac{\omega_R^2}{\omega_R^2 - \omega^2 + j\omega\gamma}$$

ω : 変調角周波数 $H(\omega)$: 光強度変調応答関数
 ω_R : 緩和共振周波数 v_g : 群速度 a : 微分利得
 γ : 減衰係数 V_p : 光子体積

$$N_p = \frac{\eta I_0 \gamma_{PN}}{qV \omega_R^2} H(\omega) \quad \omega_R = \sqrt{\frac{v_g a}{qV_p} \eta (I_0 - I_{th})} \quad \gamma = \gamma_{NP} \gamma_{PN} + \gamma_{PP} \gamma_{NN}$$

FM応答 $m_{fm} = \frac{|N|}{\omega/(2\pi)} \propto \sqrt{\frac{1 + (\frac{\gamma_{PP}}{\omega})^2}{(\omega^2 - \omega_R^2)^2 + \omega^2 \gamma^2}}$

FM変調指数を動作電流の関数として記述