

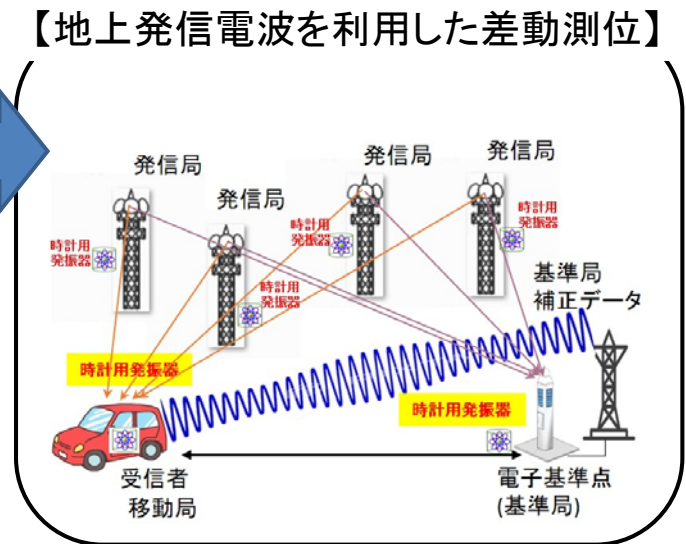
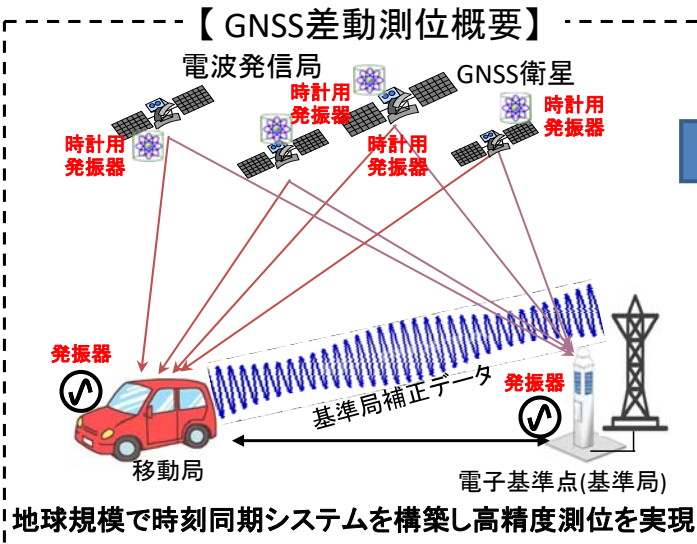
小型高安定で超低消費電力な原子時計の基礎研究

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、背景

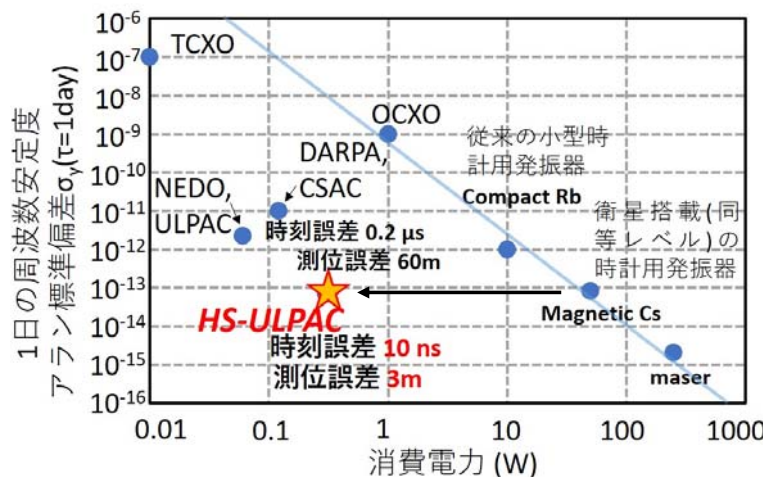
原子時計の車載や次世代移動通信基地局への設置等を想定し、測位衛星からの電波が途絶しても高精度測位を維持するための小型原子時計用の実現を目指す。測位衛星搭載用原子時計の発振器と同等の性能を有し、かつ手のひらサイズで低消費電力の小型原子時計を高安定化するための基礎研究として、主要な周波数変動要因の解明及びプロトタイプでの実証・評価等を実施する。



移動体に高精度発振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。

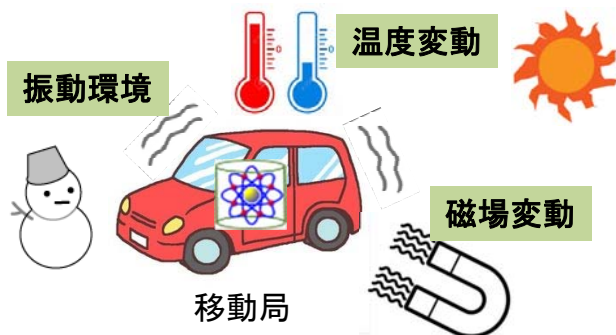
2

【原子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

【車載環境での性能実現を目指す】



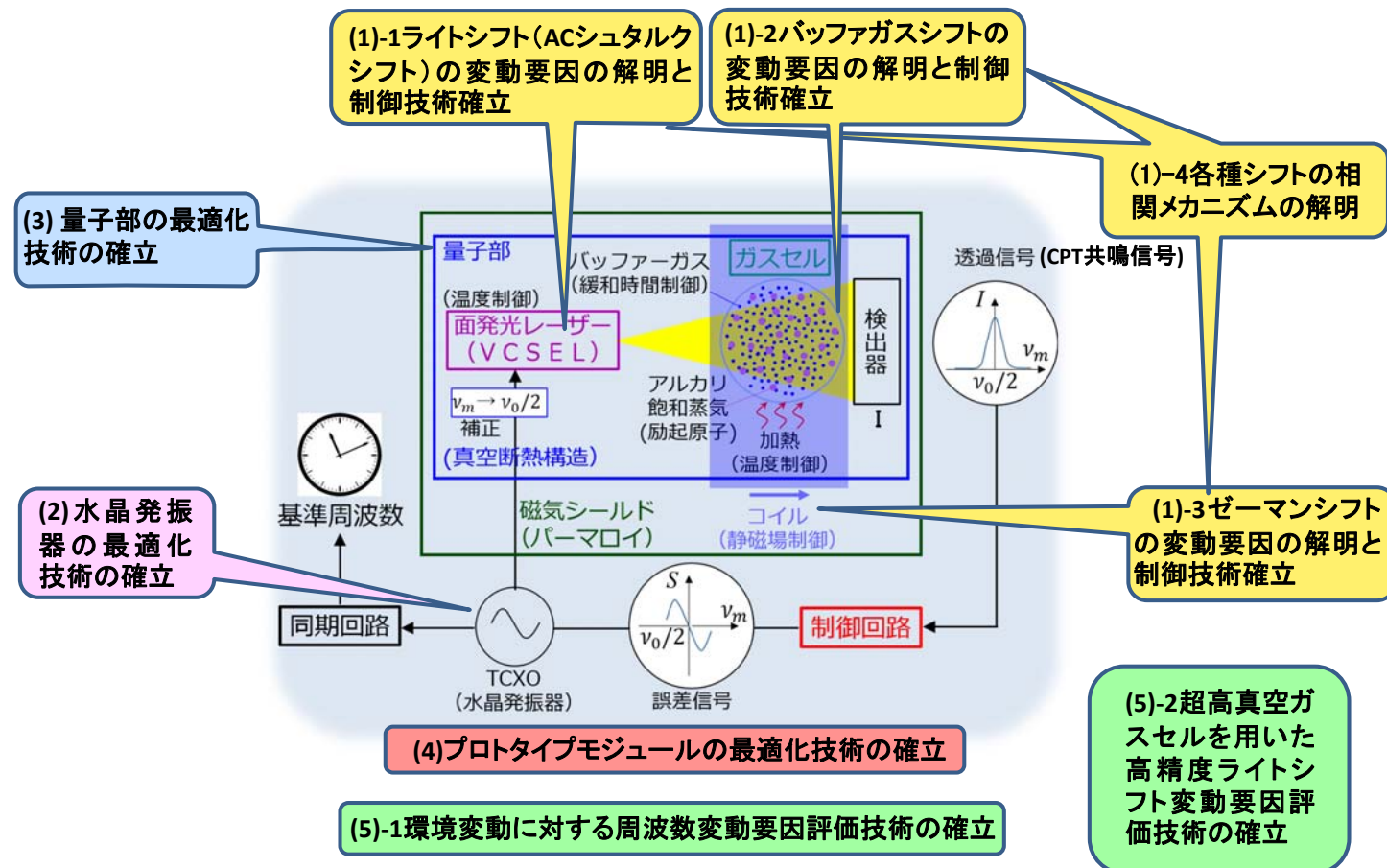
・磁場: $0\text{T} \sim 2 \times 10^{-4}\text{T}$ ・温度: $-10^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$
・振動: 加速度 3G

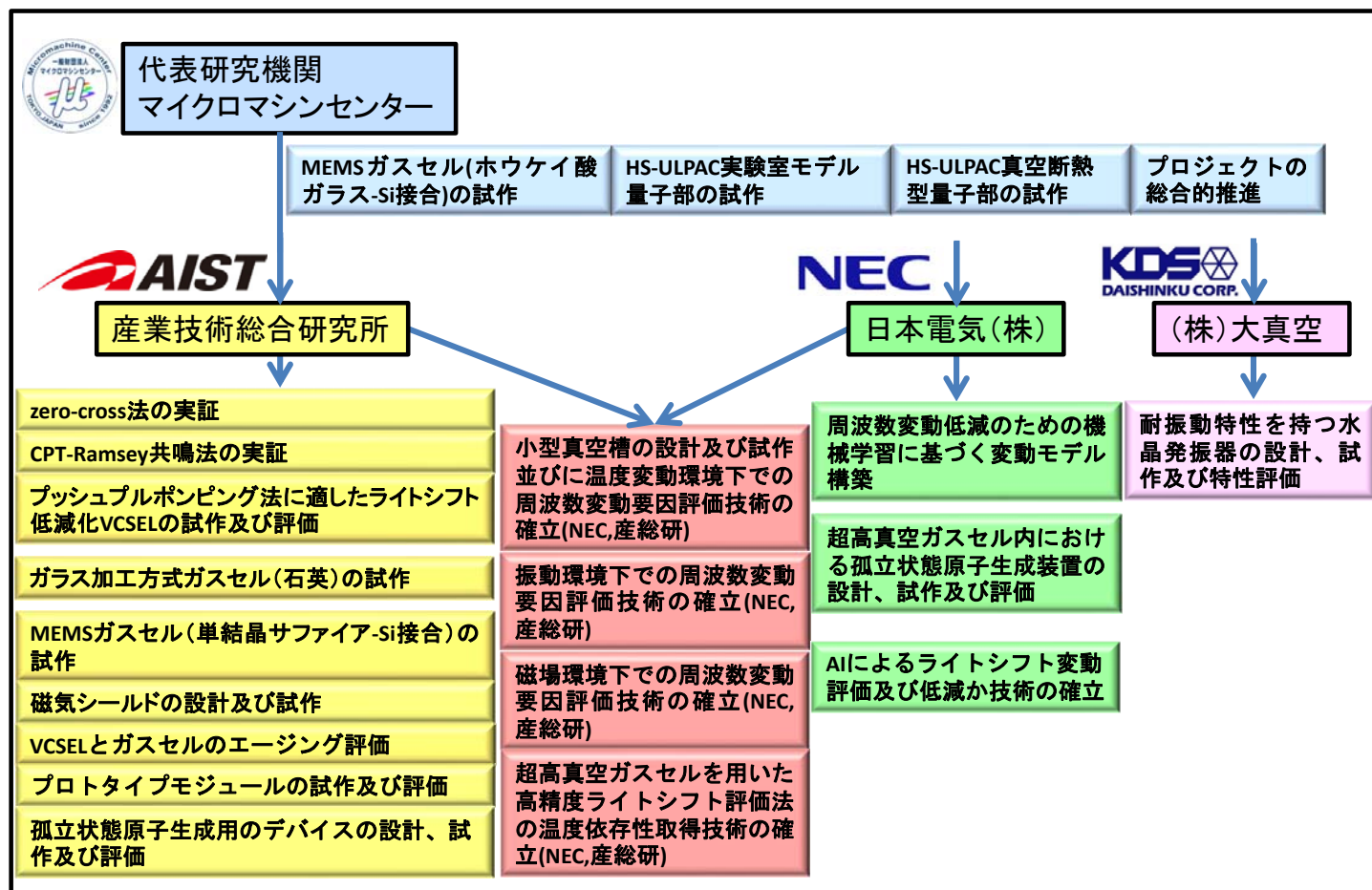
周波数変動要因の原理解明まで踏み込んで、究極の高安定化を実現

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

3

量子干渉(CPT共鳴)効果を用いた原子時計の構造と目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題





5

ライトシフト(ACシュタルクシフト)とその変動要因の解明及びその制御技術の確立

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

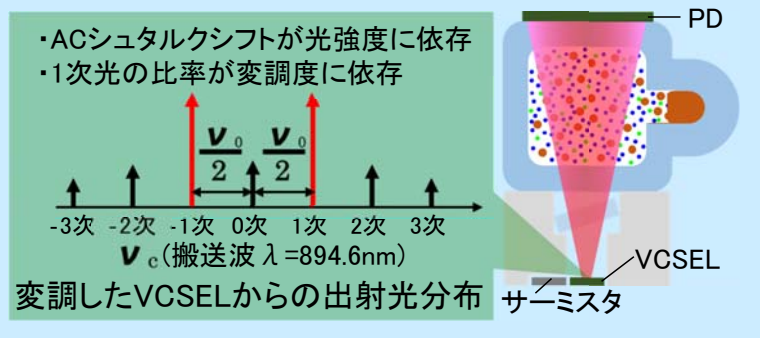
変動の主要因: VCSELの強度変動、波長変動

提案手法:

- ・zero-cross法の適用:ドリフト低減
- ・CPT-Ramsey共鳴法($\tau=0.1\text{ms}$, $T=1\text{ms}$)の適用: シフト量自体を1/10に低減
- ・円偏光VCSELの開発: 信号強度増加

《ライトシフト変動》

【原因】VCSELからの励起光の強度や変調度の変動



6

【zero-cross法の実証】

【Zero-cross法のモデル式】

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

δv_{LS} : ライトシフトによるドリフト α : ライトシフト係数

δI : 動作電流のドリフト I_0 : レーザーの動作電流

I_{th} : レーザーの閾値電流 P_0 : レーザー光強度

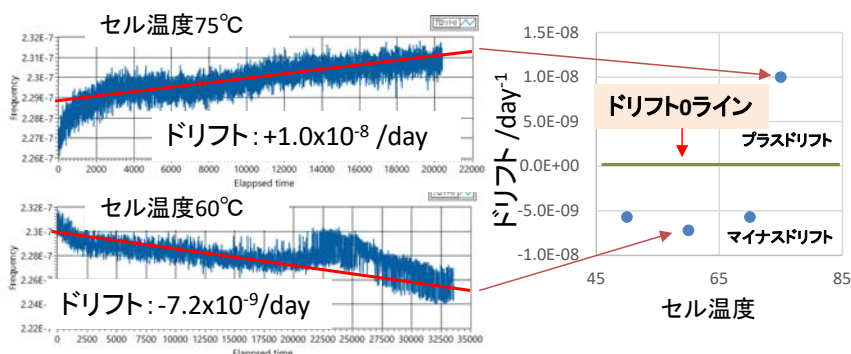
$\frac{d\alpha}{dm_{fm}}$: レーザー光変調指数の変化に対するライトシフト係数の変化割合

$\left(\frac{dm_{fm}}{dI} \right)_{I=I_0}$: レーザー動作電流の変化に対するレーザー光変調指数の変化割合

【パラメータ各種の検討】

$\alpha (m_{fm} = 1.5)$	$1.7 \times 10^{-11} (\mu W/cm^2)^{-1}$
δI	$10^{-7} \sim 10^{-8} A/day$
I_{th}	$0.6 \times 10^{-3} A$
$\delta I / (I_{th} - I_0)$	$10^{-4} \sim 10^{-5} A/day$
P_0	$\sim 2200 \mu W/cm^2$
$\left(\frac{d\alpha}{dm_{fm}} \right)$	$-2.5 \times 10^{-11} (\mu W/cm^2)^{-1}/index$
$\left(\frac{dm_{fm}}{dI} \right)_{I=I_0}$	$-1000 \sim 1000 A^{-1}$

十分にレーザーのエージングが進めば、ドリフトは凡そ $\pm 10^{-11}/day$ 以内に収まる。

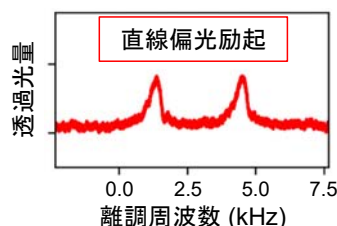
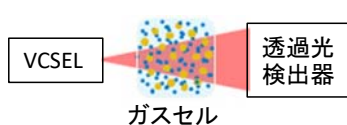
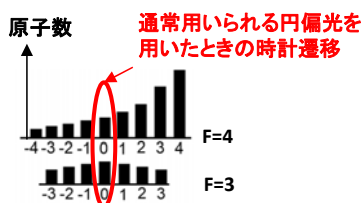


プロトタイプ実験室モデルでドリフト0の点の存在を確認

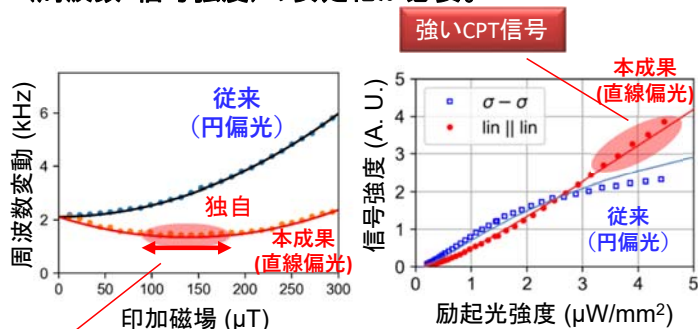
Zero-cross法の物理モデルを確認し、定量的な予測を行うための計算手法を開発した。 7

ライトシフト(ACシュタルクシフト)とその変動要因の解明及びその制御技術の確立

魔法磁場*を有し、信号強度の高いCPT共鳴の観測に成功



原子時計の周波数安定度の向上のため、CPT共鳴信号(周波数・信号強度)の安定化が必要。



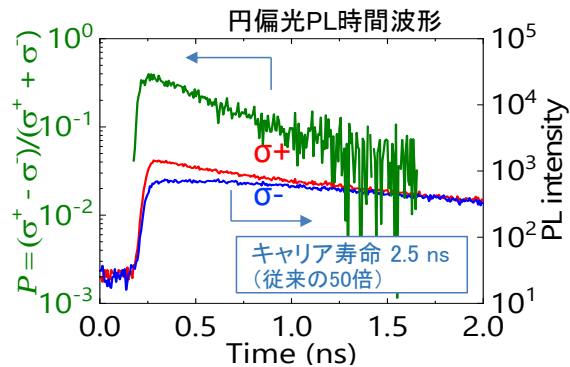
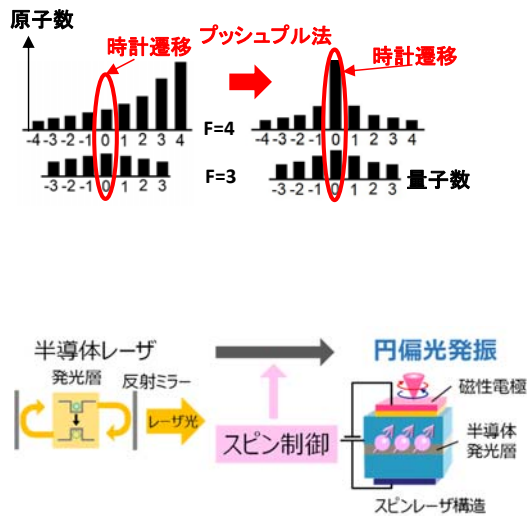
揺らぎに対し安定

磁場変動に対する高い周波数安定性を実現。

共鳴準位の占有数を高め、高い信号強度を実現。

*魔法磁場: 磁場変動に対して周波数変動が小さい領域を持つこと

プッシュプルポンピング法に適したライトシフト低減化円偏光VCSELの試作及び評価



・高品質結晶の作製成功とそれを用いたスピン緩和時間1ns以上を実現

- 従来とは大きく異なる成膜条件を見出し、高品質活性層の作製に成功

852nm → (110)GaAs/AlGaAs量子井戸

894nm → (110)InGaAs/AlGaAs量子井戸

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

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

サファイア結晶ガスセル：ガス透過性が低く、アルカリ原子と反応しない究極素材

石英ガスセル：基準データの取得

MEMS*ガスセル：量産性



パイレックスガラス製のガスセルに封入されたセシウム原子

*MEMS: Micro Electro Mechanical Systems

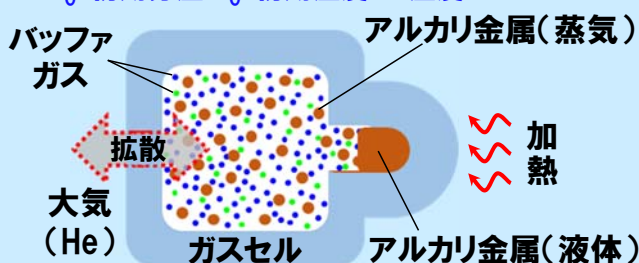
《時刻精度劣化要因①: 衝突シフト変動》

【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

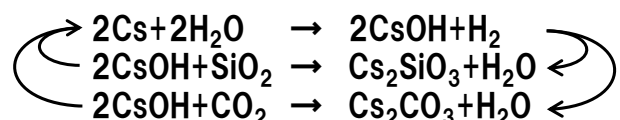
P_0 : 初期分圧 T_0 : 初期温度 T : 温度



《ガス分圧: ガスセルの高純度化》

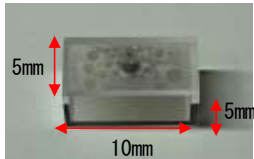
ガス分圧変動要因

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℃、10⁻⁵Pa)
3. Csと不純ガスの化学反応
→ 高純度ガスの導入



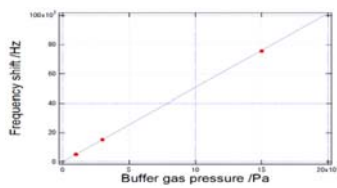
【ガラス加工方式ガスセル (ホウケイ酸ガラスによる四角柱ガスセル)】

- ・高純度アルカリ原子導入に関する基準データの取得



大きさ 5 mm×5 mm×10 mm

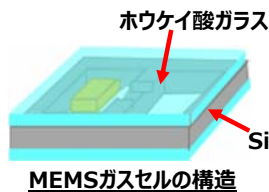
モニターガス圧と周波数シフトの関係



精密なガス封入技術を確立

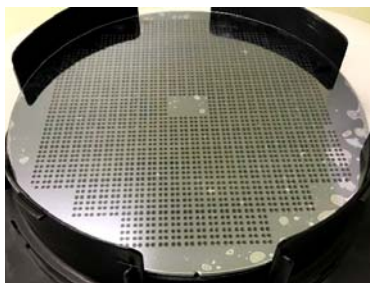
【MEMSガスセル】

- ・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



MEMSガスセルの構造

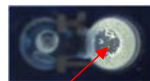
MEMSガスセルが形成されたウエハ



(1280セル/ウエハ)

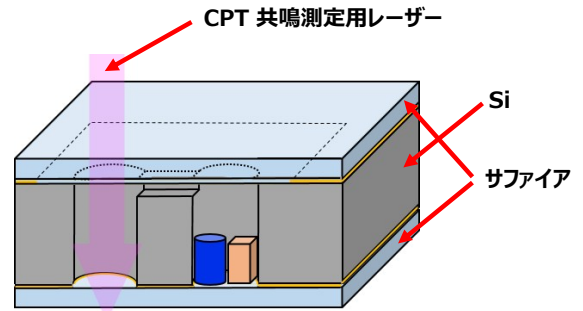
ウエハレベルで多数のCsガスセルを一括作製

レーザ加熱によるCsの活性化

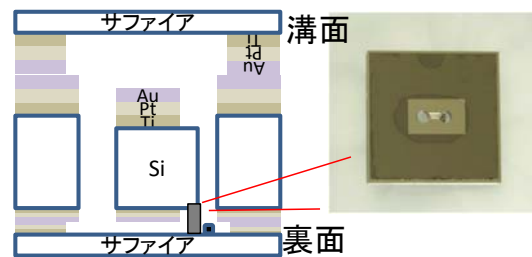


活性化されたCs

【MEMSガスセル(単結晶サファイア-Si接合)】



- ・窓材として単結晶サファイアを、キャビティ材としてSiを用いた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



200℃程度までの高温脱ガス処理に耐える
Si-サファイアガスセル製造プロセスを確立

11

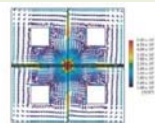
各種周波数変動要因の解明および制御技術の確立

ゼーマンシフト

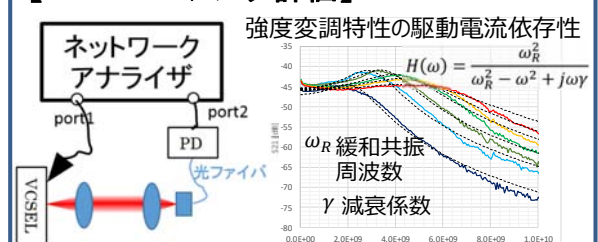
【磁気シールドの設計及び試作】

- ゼーマンシフト
磁場により固有周波数が変化
- 主要因
外部磁場、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

- ・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



【VCSELエージング評価】



- ・VCSEL基礎パラメータと周波数ドリフトの関係を解明

その他のさまざまなシフト

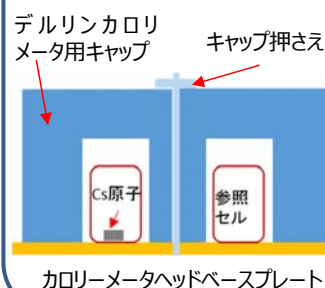
【機械学習に基づく周波数変動モデル構築とその低減】

- 振動A(周波数f) 熱(温度T, 熱流q)
- 圧力P 温度勾配∇T 磁場勾配∇H 磁場H
- 素子形状等(セルサイズL, ガス密度ρ, ...etc)
- ・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
- ・時系列数値データの学習による非連続な周波数シフト(異常、故障)を予測

異種混合学習:

多次元データに対し、データの区分けと各区でのモデル化を同時・自動に最適化

【ガスセルエージング評価】



- ・DSC*によるアルカリ原子減少率推定技術の確立
- 示差走査熱量測定(*DSC: differential scanning calorimetry)

12

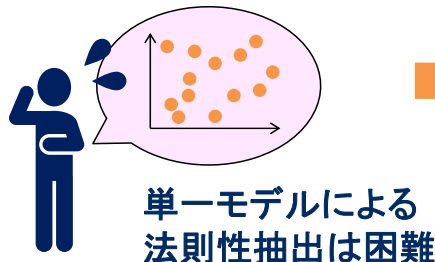
多次元の回帰分析: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

課題:

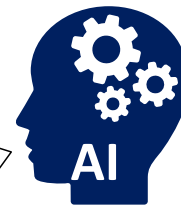
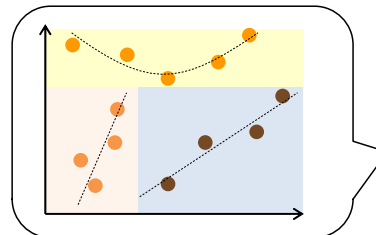
- nの数が極めて多い多次元空間での最適化が必要
 - 実際の物理系では、様々な環境変数や物理法則が複雑に入り乱れる
- 従来型の回帰アルゴリズム(非線形最小二乗法等)の適用が困難

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)



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)

13

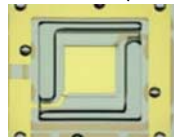
プロトタイプモジュールの実証

水晶発振器の最適化技術の確立

【耐振動特性を持つ水晶発振器】



高Q値化が可能な振動子の保持方法(一例)

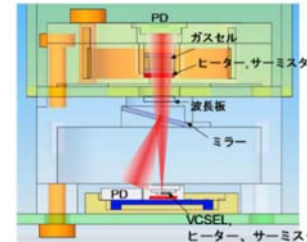


- ・ウエハレベルパッケージ(WLP)プロセスを適用した小型低ノイズ水晶発振器
- ・振動部の保持技術確立による耐振動性能改善
- ・振動エネルギー閉じ込め効率向上による高Q値化

実装

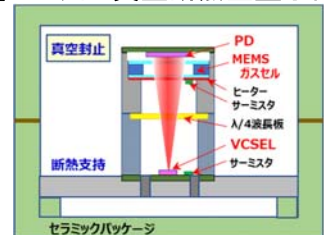
量子部の最適化技術の確立

【実験室モデル量子部】



- ・CPT共鳴周波数安定度に及ぼす各環境要因を個別に制御(基準データの取得)

【プロトタイプ真空断熱型量子部】



- ・リブを有する高剛性支持脚で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)

実装

プロトタイプモジュールの最適化技術の確立

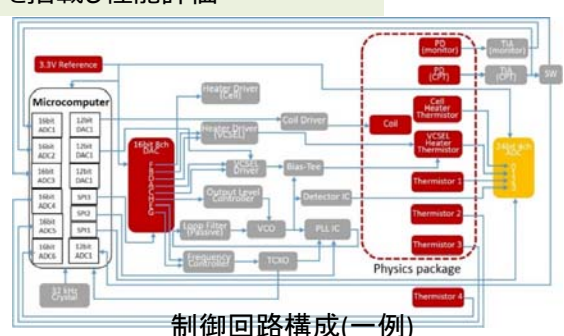
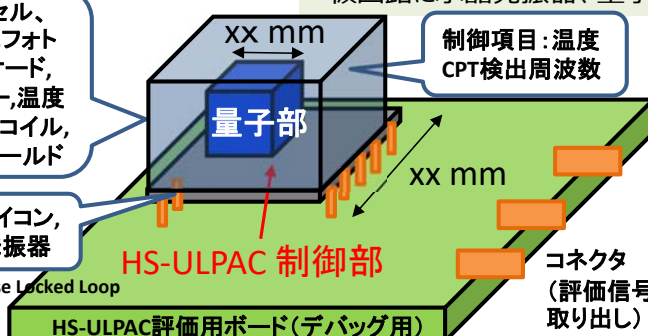
【プロトタイプモジュール】

- ・制御回路基板をプロトタイプモジュール用に設計、試作。制御基板回路に水晶発振器、量子部を搭載し性能評価

ガスセル、VCSEL, フォトダイオード, ヒーター, 温度センサ, コイル, 磁気シールド

PLL*, マイコン, 水晶発振器

*PLL: Phase Locked Loop

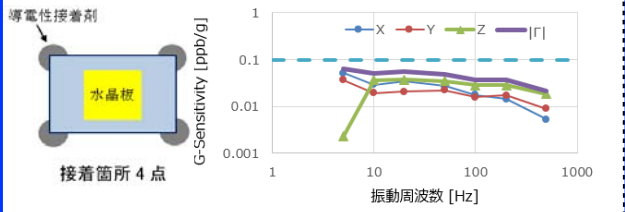


14

プロトタイプモジュールの実証

水晶発振器の最適化技術の確立

【耐振動特性を持つ水晶発振器】



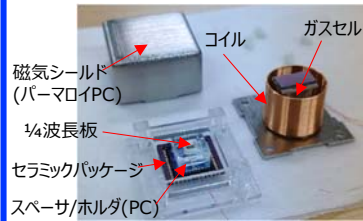
4点保持水晶振動子と静電MEMS加速度センサによる振動補償を組み合わせることで、G-Sensitivity 0.1ppb/G、および振動下での1秒平均のアラン標準偏差が 6.4×10^{-11} となった。

振動補償を用いて、
G-Sens.=0.1ppb/G、
 σ_y (1秒)= 6.4×10^{-11} を達成

量子部の最適化技術の確立

【実験室モデル量子部】

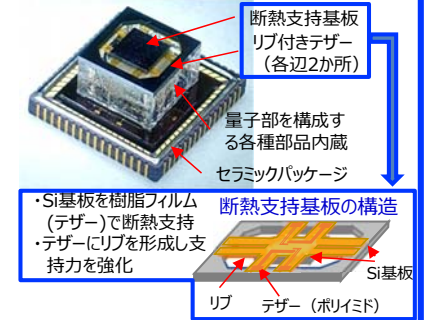
試作した量子部の内部構成



伝熱シミュレーションをベースに基本構造を決定し、基準データの取得を可能とする実験室モデル量子部の1次試作完了

【プロトタイプ真空断熱型量子部】

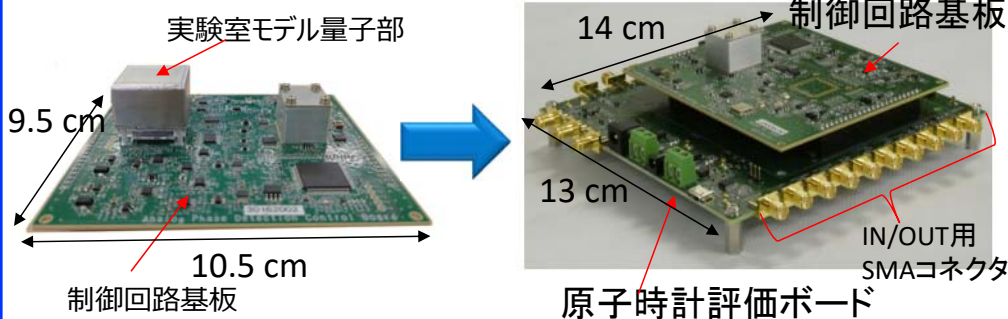
試作した量子部の内部構成



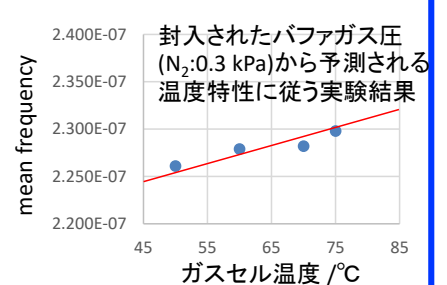
低消費電力と高耐振動性を両立したプロトタイプ真空断熱型量子部の試作に成功

プロトタイプモジュールの最適化技術の確立

【プロトタイプモジュール】



ガスセル温度vs 原子時計周波数

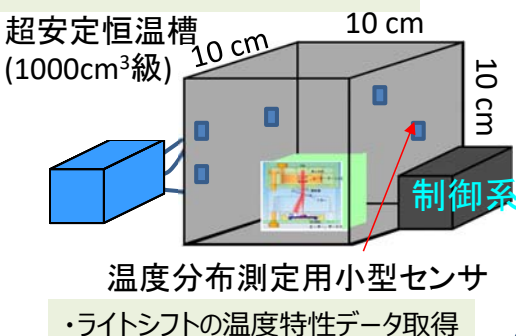


15

環境変動に対する周波数変動要因評価技術の確立

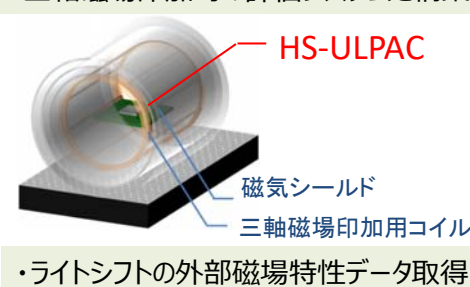
【温度:(目標)-10°C~70°C】

・mKオーダの超安定恒温槽構築



【磁場:(目標)0T~2×10⁻⁴T】

・三軸磁場印加時の評価システムを構築

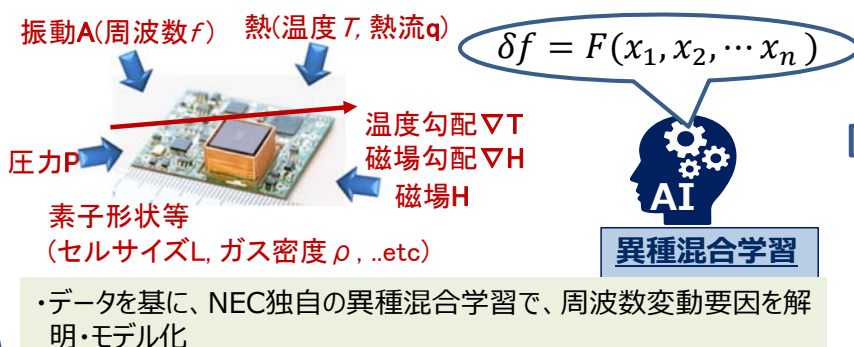


【振動:(目標)<3G】

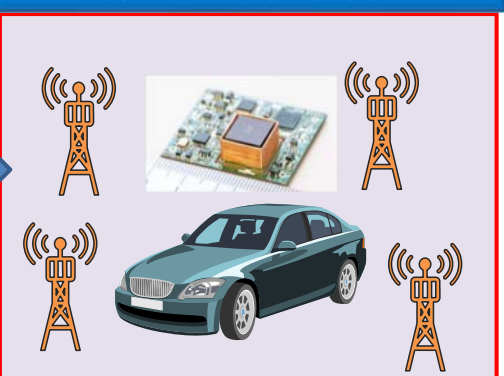
・三軸振動試験機に基づく周波数変動評価システムを構築



【機械学習に基づく周波数変動モデル構築とその低減】



移動体での周波数安定度実証

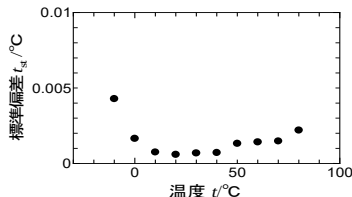


16

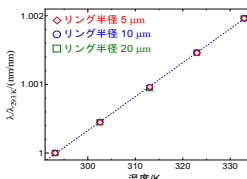
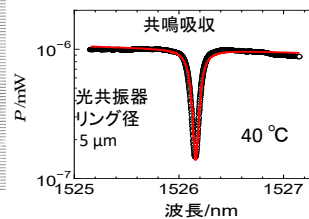
環境変動に対する周波数変動要因評価技術の確立

【温度:(目標)-10℃~70℃】 小型恒温槽の温度安定度

作製した小型恒温槽



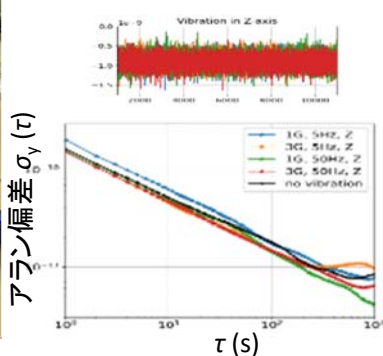
体積1000cm³級の超安定恒温槽を開発し、-10℃~70℃において0.01℃オーダーで安定な小型恒温槽を実現



精密温度計測のための光共振器温度計の測定システムを開発し、光共鳴波長の温度依存性を測定した。シリコン光導波路によるリング共振器を用いた高精度温度計を実現

【振動:(目標)<3G】

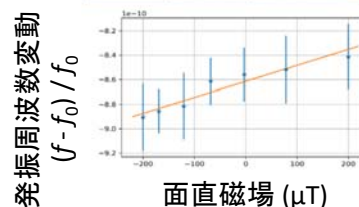
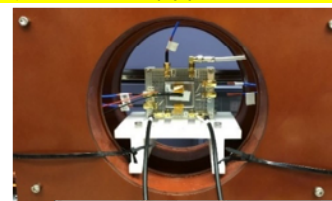
三軸振動試験機に基づく周波数変動評価システムを構築



Z軸方向加振1~3G、5 Hz or 50 Hz

【磁場:(目標)0T~2×10⁻⁴T】

三軸磁場印加時の評価システムを構築

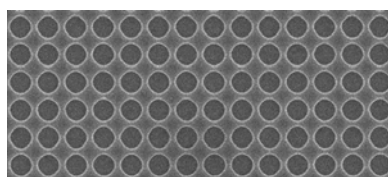


17

超高真空ガスセル中の孤立状態原子を用いた 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

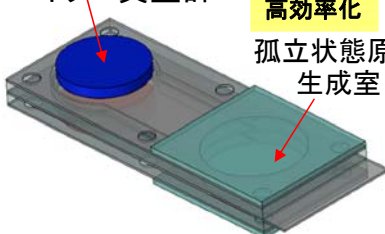


・超高真空ガスセルに特化した高効率回折格子を独自に設計、試作

50kV 9.4mm x 10.0k SPM(U) 2000μm

・小型超高真空ガスセル

マイクロ真空計

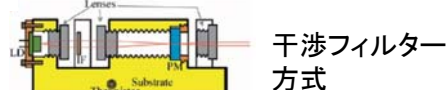


高効率化

孤立状態原子生成室

・超高真空ガスセル(10⁻⁶Pa)実現

・外部共振器型レーザ(ECDL)



・長期的にモードホップフリーな小型ECDLを実現

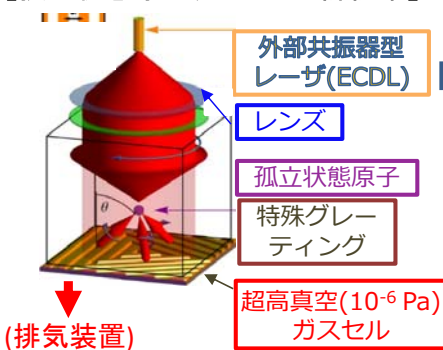


・光集積回路と光シャッターを集積化し、超小型化(20mm□)を実現

デバイス組込み

デバイスフィードバック

【孤立状態原子ライトシフト評価系】



(排気装置)

A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies, C. C. Nshii, et al., Nat. Nanotech., 8, 321 (2013)

【ライトシフト変動評価・低減法】

・純粋ライトシフト評価データ



機械学習



ライトシフト変動モデル構築

・究極の周波数安定化へ

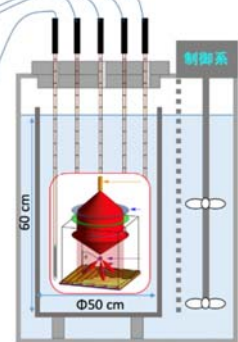
【温度依存性取得技術の確立】

スキャナー

温度分布モニター

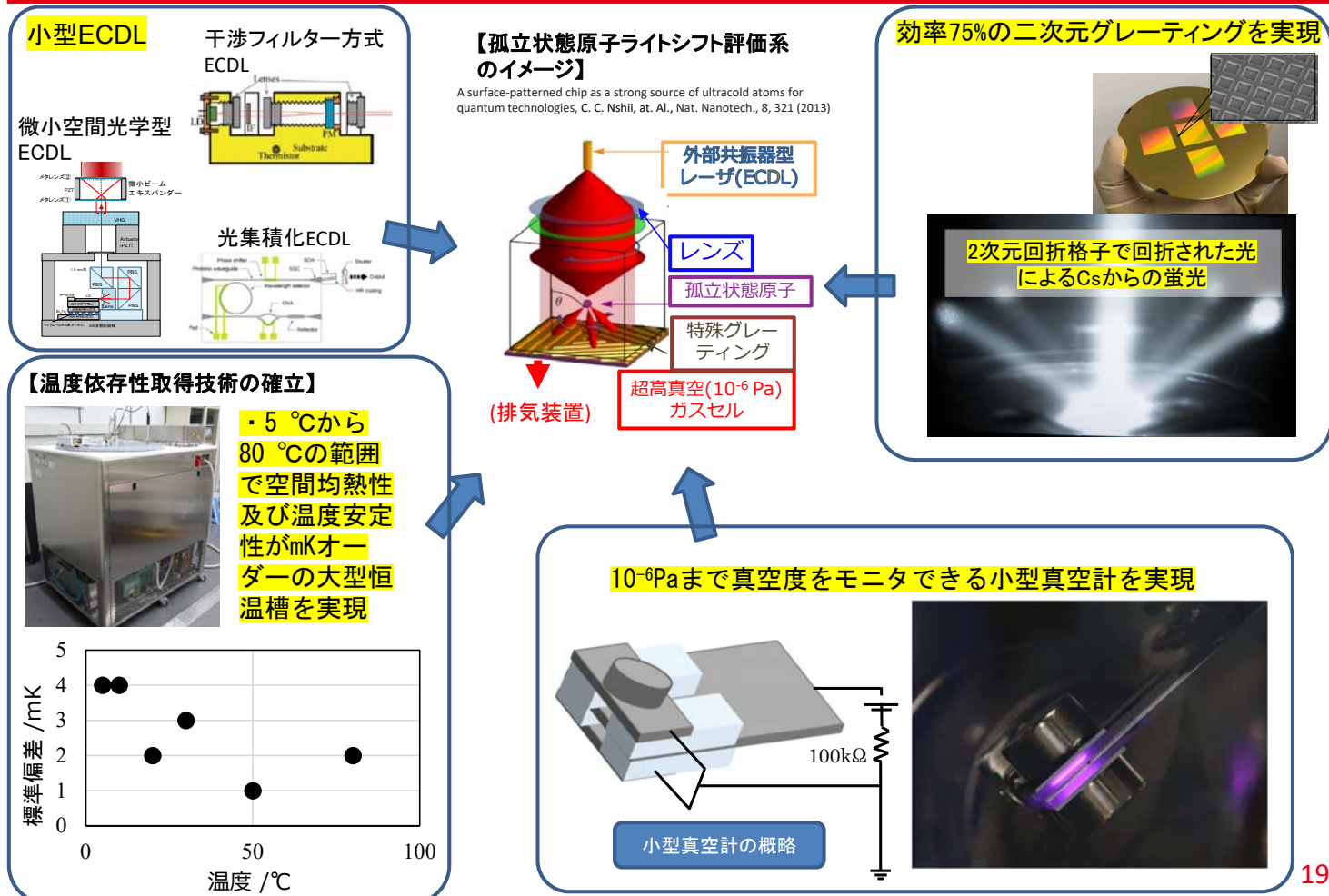
高精度温度計測

・空間均熱性、及び温度安定性がmKオーダ



超安定恒温槽 (100,000cm³級)

18



19

まとめ

手のひらサイズで低消費電力の原子時計を高安定化するための基礎研究として、周波数変動要因の解明とプロトタイプでの実証・評価を進めている。これまでに下記の成果が得られている。

原子時計のプロトタイプ試作と、基本特性の確認

- ①プロトタイプを用いて、**周波数ドリフト0の点の存在を確認**

要素技術として下記を実現

- ②魔法磁場を有し、信号強度の高いCPT共鳴の観測成功
- ③円偏光VCSEL実現のための高品質結晶の作製成功と、スピン緩和時間1ns以上の実現
- ④高温脱ガス処理に耐えるSi-サファイアガスセル製造プロセスの確立
- ⑤水晶発振器において、振動補償を用い、G-Sens.= 0.1ppb/G、 σ_y (1秒)= 6.4×10^{-11} を達成
- ⑥低消費電力と高耐振動性を両立したプロトタイプ真空断熱型量子部の試作成功
- ⑦-10°C～70°Cにおいて0.01°Cオーダーで安定な小型恒温槽の実現
- ⑧シリコン光導波路によるリング共振器を用いた高精度温度計の実現

孤立状態原子を用いたライトシフト評価の要素技術として下記を実現

- ⑨効率75%の二次元グレーティングを実現
- ⑩ 10^{-6} Paまで真空度をモニタできる小型真空計を実現
- ⑪空間均熱性及び温度安定性がmKオーダーの大型恒温槽実現

20

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。