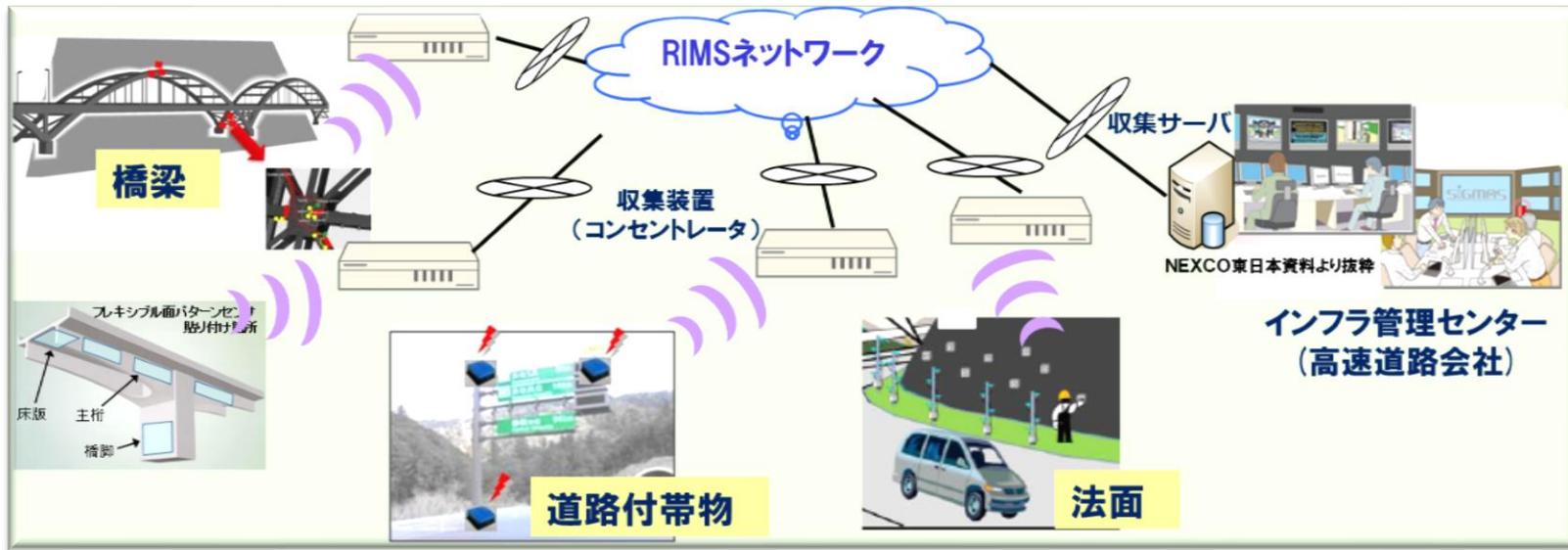


# 「センサ端末同期用原子時計(ULPAC:Ultra-Low Power Atomic Clock)の研究開発」成果発表

国立研究開発法人産業技術総合研究所  
計量標準総合センター物理計測標準研究部門  
柳町 真也

2017年10月5日幕張メッセ  
MEMSセンシング&ネットワークシステム展2017

## 【RIMS概要】

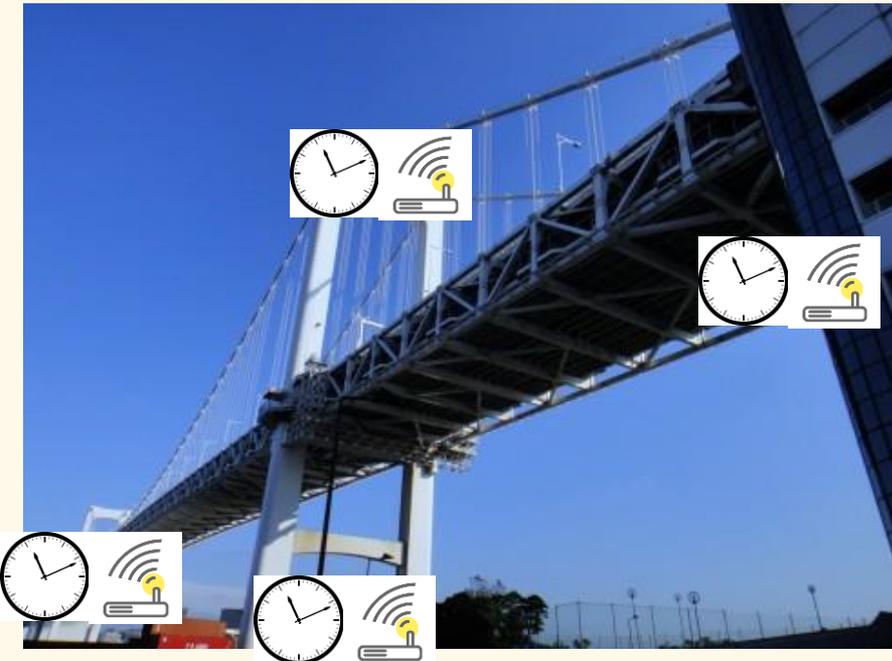


➡ ネットワークを構成するセンサ端末に搭載可能な原子時計 (ULPAC) の開発

## 【ULPACを搭載することで、時刻同期が不要となったRIMSネットワークのメリット】

- \* 橋梁: センシングシステム内の時刻同期性能の向上 → より広範囲なデータ処理
- \* 道路付帯構造物: 無線同期システムの代替 → モニタリングシステム構築の簡略化
- \* 法面: 有線同期システムの代替 → モニタリングシステム構築の簡略化
- \* 収集サーバ: 自律分散的な時刻同期システム → システム運用のセキュリティ強化

## 【ULPACの利用イメージ】



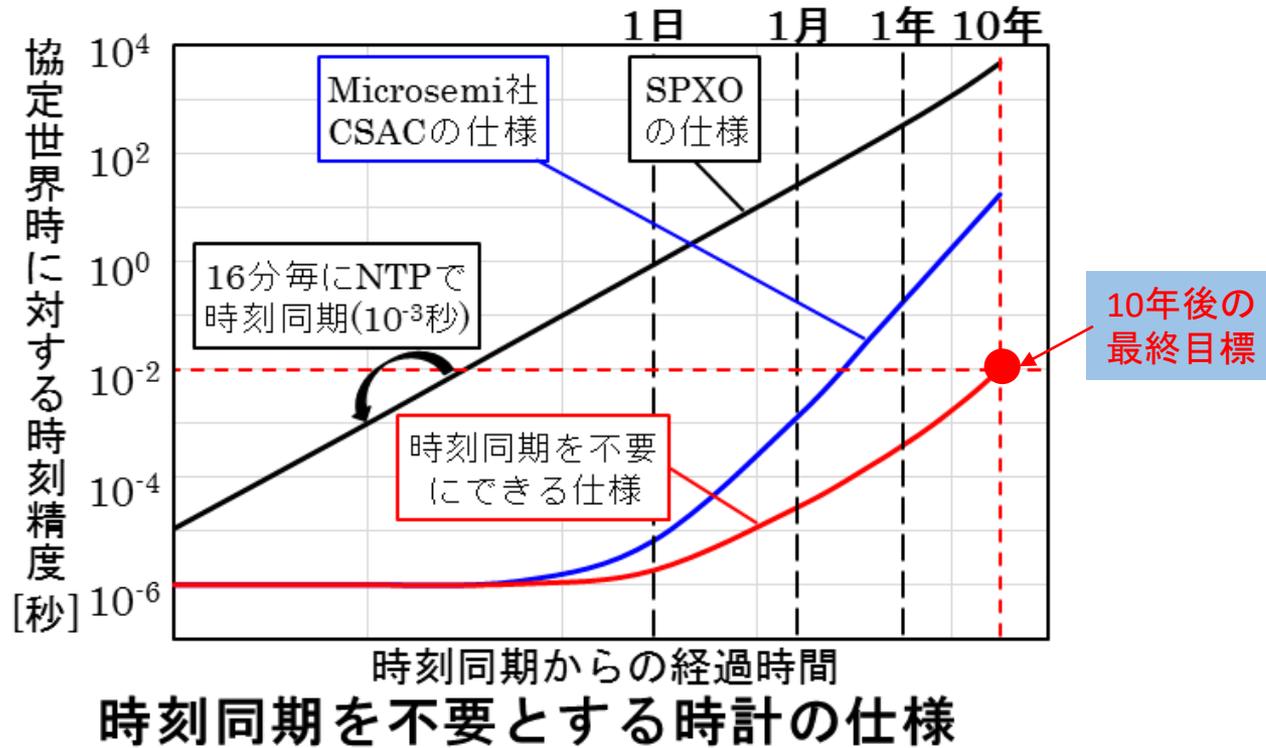
橋梁センシングの同期しているイメージ図

ULPACによって、各センサーで同じ時間を保持している。  
時刻が同期していることで、構造物全体の揺れや変動を測定可能となる。



トンネルセンシングの同期しているイメージ図

GPSが届かない環境でも、センサ間の時刻同期が保証される。

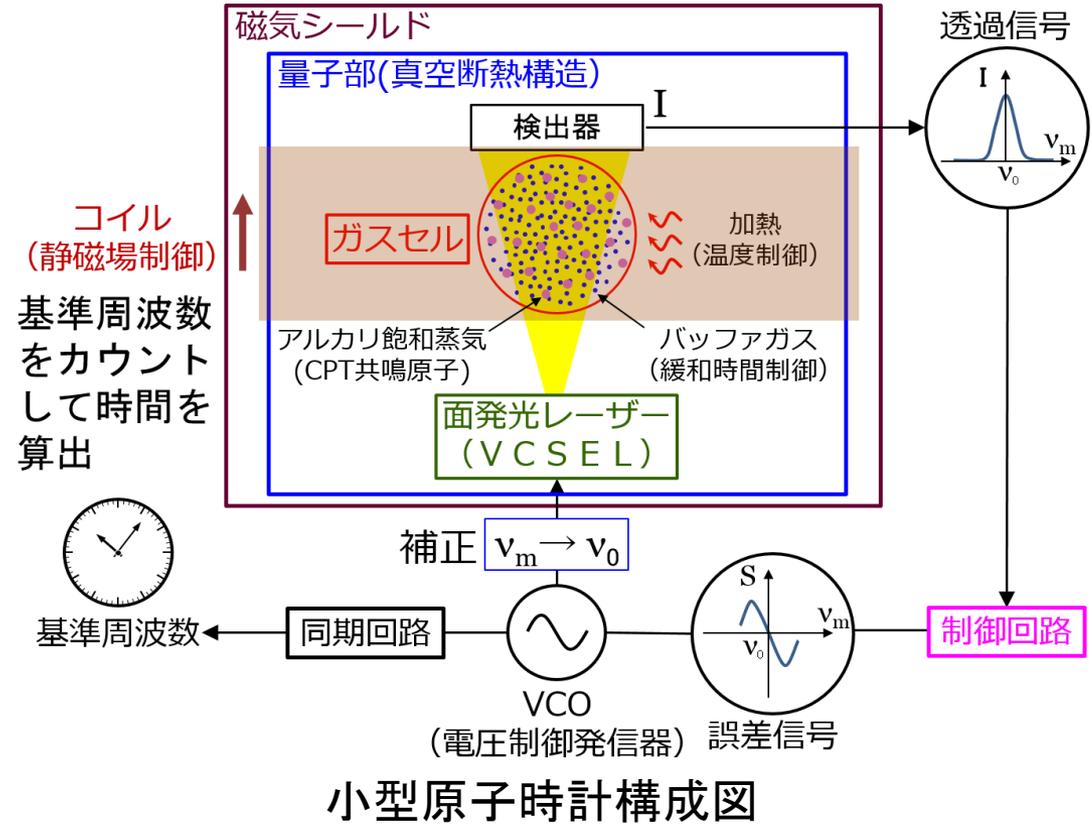


**\*時刻同期性能を10年間で、10ms維持。消費電力1mW。サイズ15×15×5mm<sup>3</sup>。**  
 → 先行販売されている小型原子時計比で、約3桁の時刻同期性能向上、約2桁の低消費電力化、1桁のサイズ低減が求められる。

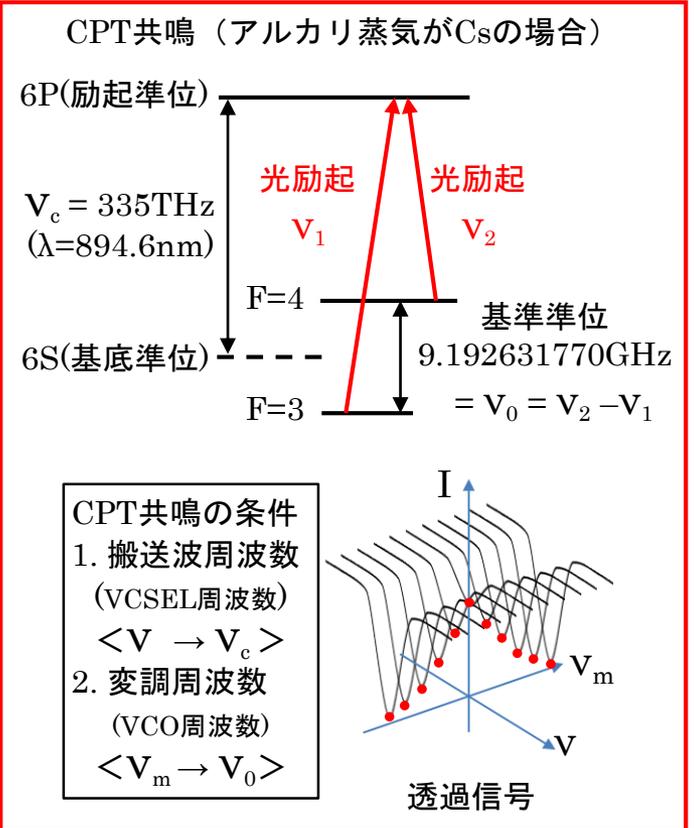
## 参画機関

 国立研究開発法人 産業技術総合研究所	 国立大学法人 京都大学	 一般財団法人 マイクロマシンセンター	 株式会社リコー	 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology	 公立大学法人 首都大学東京
--	---	--	--	--	---

技術開発項目	時刻同期性能の向上	低消費電力化	小型・低コスト化
課題	周波数ドリフトの低減	制御回路、及び量子部 温度維持電力の低減	構成部品の高歩留化、 組み立技術の高度化
取り組み	<ul style="list-style-type: none"> <li> ・ガスセル内環境安定化技術の開発</li> <li>・サーミスタ、VCSEL等量子部構成部品の安定性検討</li> <li> ・ガスセル内環境計測・発振周波数補正技術の開発</li> <li> ・量子部温度制御技術の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> ・低消費電力と低位相雑音を両立した制御回路の開発</li> <li>・PLL回路を用いない制御回路の開発</li> <li> ・高断熱型量子部の開発</li> <li> ・ガラス加工方式ガスセルの小型化</li> <li> ・アルカリ原子励起用フォトリソニック結晶レーザーの基礎検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> ・高断熱型量子部の開発</li> <li>・VCSELの高歩留化</li> <li> ・低ガス透過性材料を用いたウェハー加工方式ガスセルの開発</li> <li> ・制御回路のCMOS集積化</li> </ul>



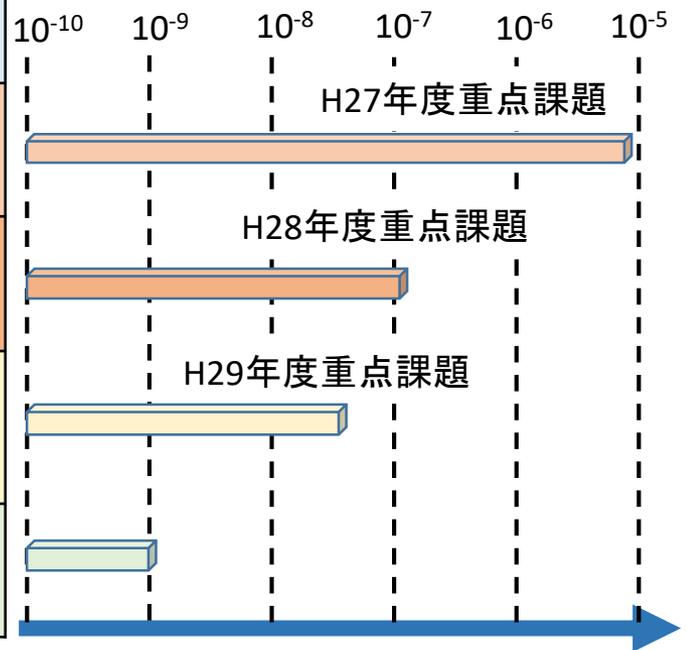
## 【量子干渉状態/CPT共鳴】



\* 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。

## 【物理現象と周波数シフト量の関係】

物理現象	パラメータ	周波数シフト量	相対周波数シフト量
衝突シフト	バッファガス分圧 P(=15kPa)	67885 Hz	$7.38 \times 10^{-6}$
	ガスセル温度 T(=75°C)	1088 Hz	$1.18 \times 10^{-7}$
ACシュタルク効果	レーザー光強度 I(=1800 $\mu$ W/cm <sup>2</sup> )	570 Hz	$6.2 \times 10^{-8}$
ゼーマン効果	磁場 B(=14 $\mu$ T)	9.62 Hz	$1.05 \times 10^{-9}$



\*H28年度ULPACプロトタイプ的主要条件から推定した値

相対周波数シフト量



## 【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

## 【成果】

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

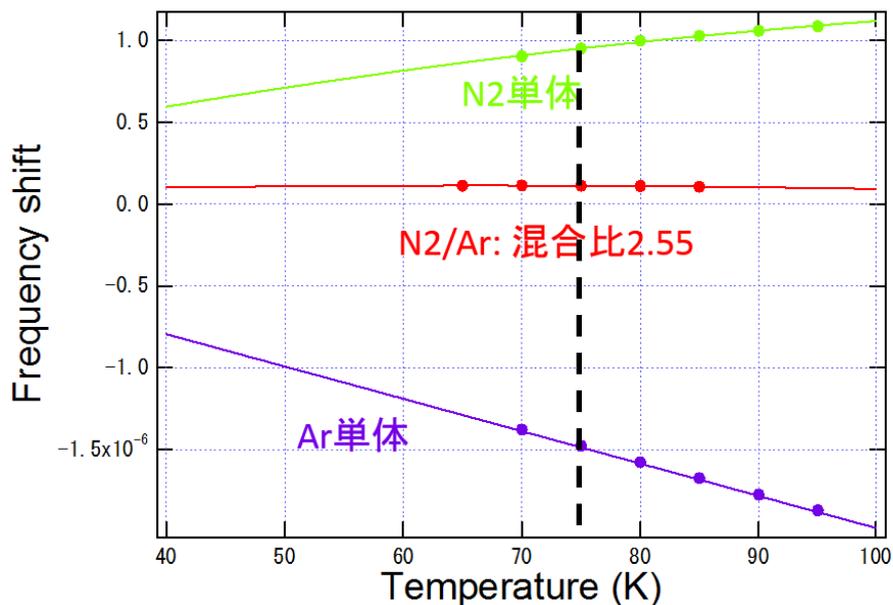
周波数シフトの温度依存性

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

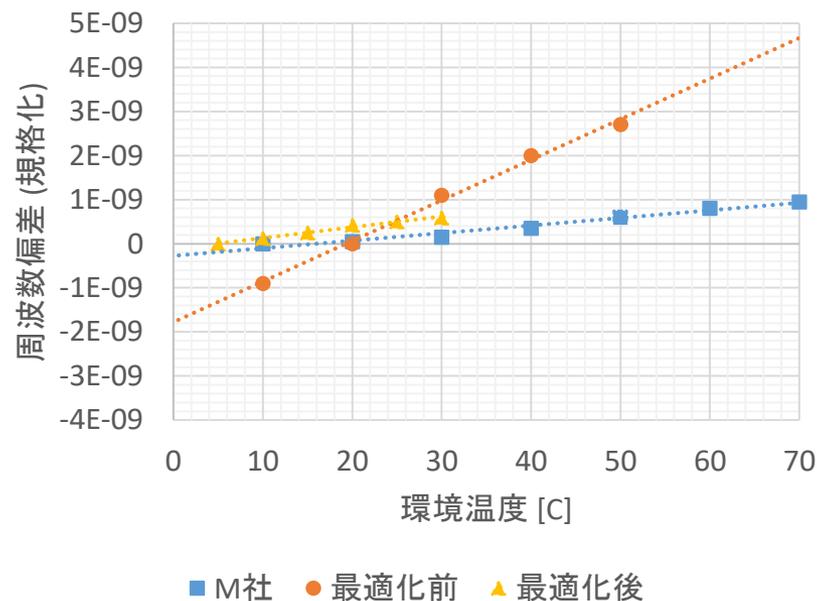
Buffer gas	$\beta$ (Hz/Pa)	$\delta$ (Hz/kPa K)	$\gamma$ (mHz/(kPa*K <sup>2</sup> ))
N2	6.92	6.18	-18.8
Ar	-1.46	-8.54	0.0

$\beta$  : 圧力係数     $\delta$  : 1次温度係数     $\gamma$  : 2次温度係数

## 【ガスセル温度特性評価結果】



## 【H28ULPACプロトタイプ温度特性評価結果】



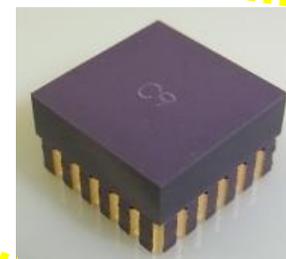
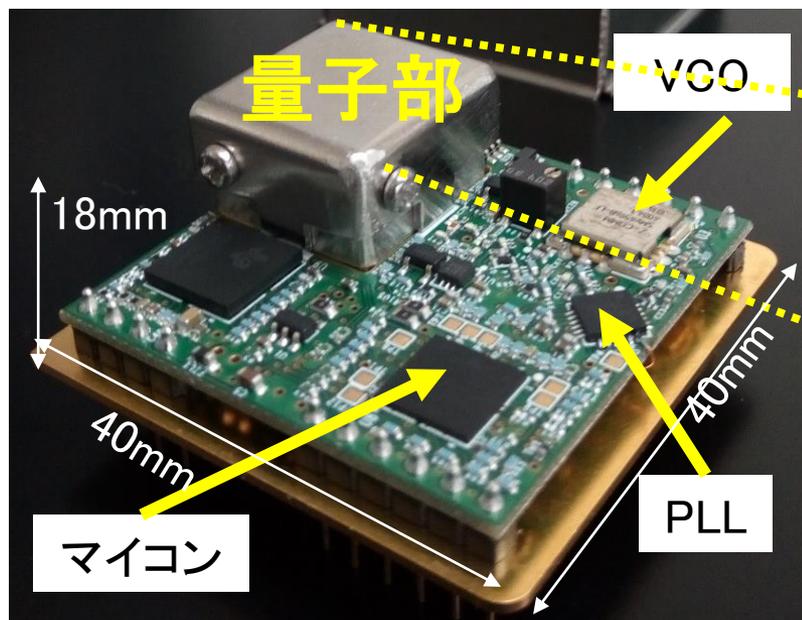
**RICOH**

## 【開発技術のポイント】

ガスセルの小型化により、量子部への真空断熱実装を可能とし、伝熱量を大幅削減。

## 【成果】

同じ制御電力で、ガスセル温度の精度を1桁改善。

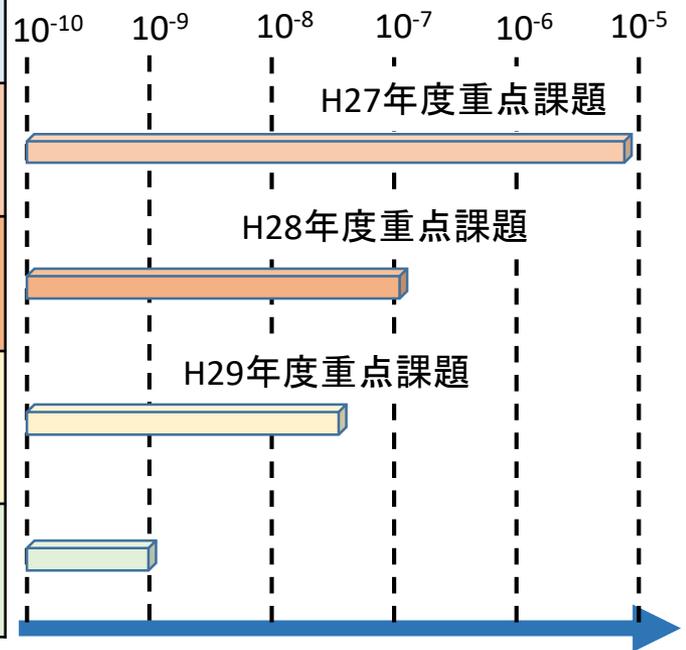


真空断熱型量子部外観 (11 × 11 × 5mm<sup>3</sup>)

平成28年度ULPACプロトタイプ  
内部構造 (40 × 40 × 18mm<sup>3</sup>)

## 【物理現象と周波数シフト量の関係】

物理現象	パラメータ	周波数シフト量	相対周波数シフト量
衝突シフト	バッファガス分圧 P(=15kPa)	67885 Hz	$7.38 \times 10^{-6}$
	ガスセル温度 T(=75°C)	1088 Hz	$1.18 \times 10^{-7}$
ACシュタルク効果	レーザー光強度 I(=1800 $\mu$ W/cm <sup>2</sup> )	570 Hz	$6.2 \times 10^{-8}$
ゼーマン効果	磁場 B(=14 $\mu$ T)	9.62 Hz	$1.05 \times 10^{-9}$



\*H28年度ULPACプロトタイプ的主要条件から推定した値

相対周波数シフト量

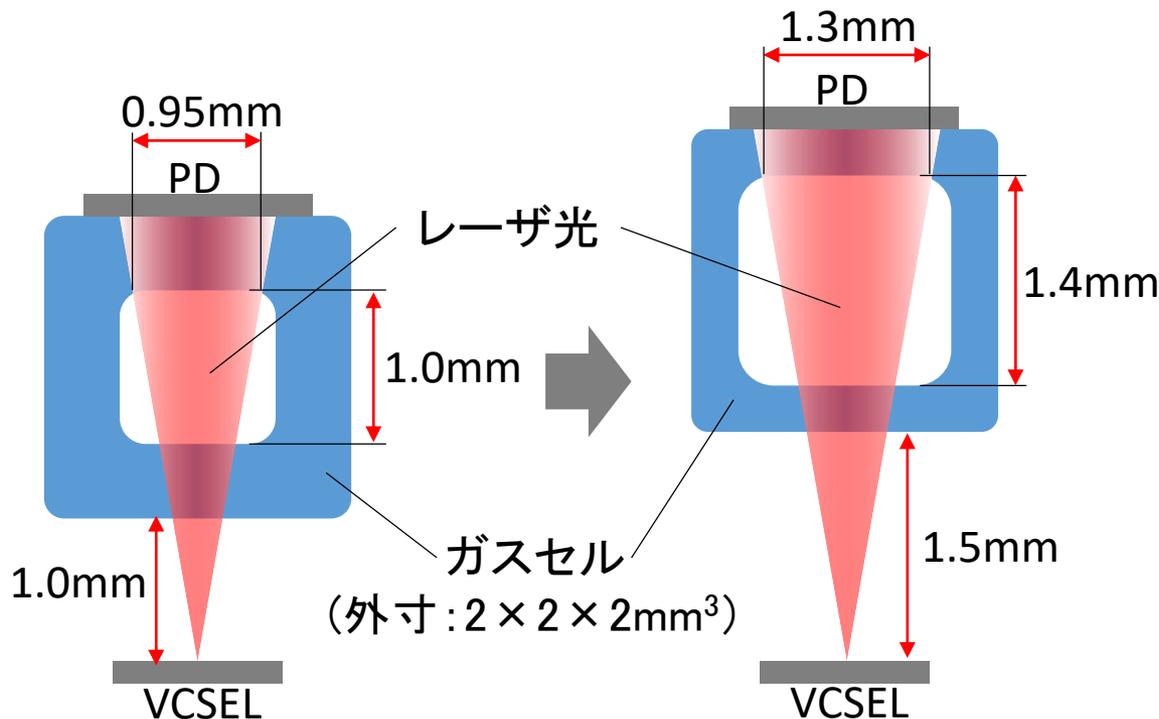


## 【開発技術のポイント】

ガスセルの内容積拡大(2.7倍)と、VCSEL-ガスセル間距離の拡大(1.5倍)による、「レーザ照射Cs原子数の増大(約2.5倍)」と、それにより可能となる「レーザ照射強度の低減(約42%低減)」により、1)短期安定度の改善、2)ライトシフト量の低減、を図る。

## 【成果】

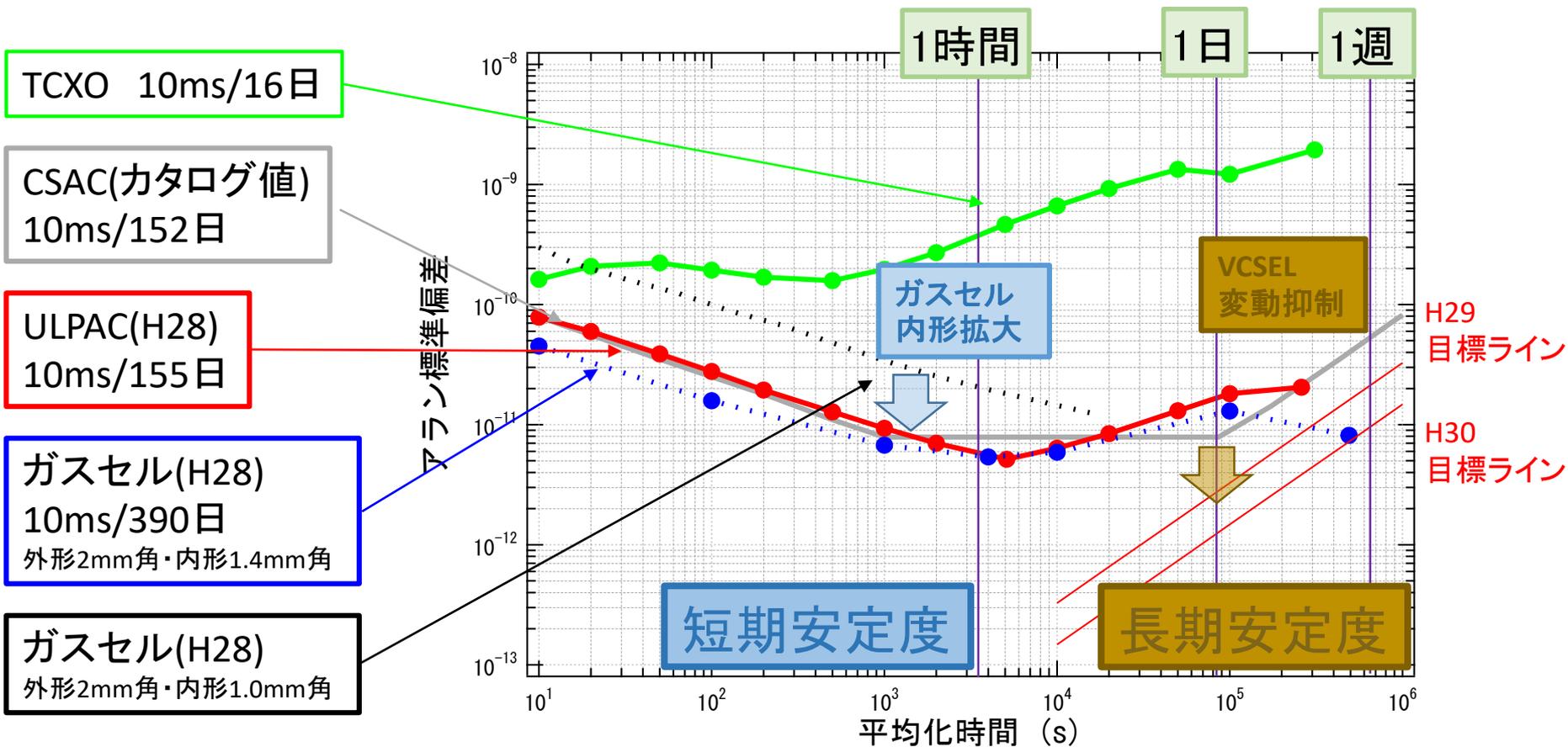
短期安定度は、約3.5倍の改善。ライトシフト量は評価中。





**【成果】**

- ・H28年度ULPACで、10ms/155日以上を確認し、先行する米国CSACと同等以上を達成
- ・ガスセルで10ms/390日以上を達成。H29年度ULPACで10ms/240日以上を達成の見込み



TCXO 10ms/16日

CSAC(カタログ値)  
10ms/152日

ULPAC(H28)  
10ms/155日

ガスセル(H28)  
10ms/390日  
外形2mm角・内形1.4mm角

ガスセル(H28)  
外形2mm角・内形1.0mm角

アララン標準偏差

1時間

1日

1週

ガスセル  
内形拡大

VCSEL  
変動抑制

短期安定度

長期安定度

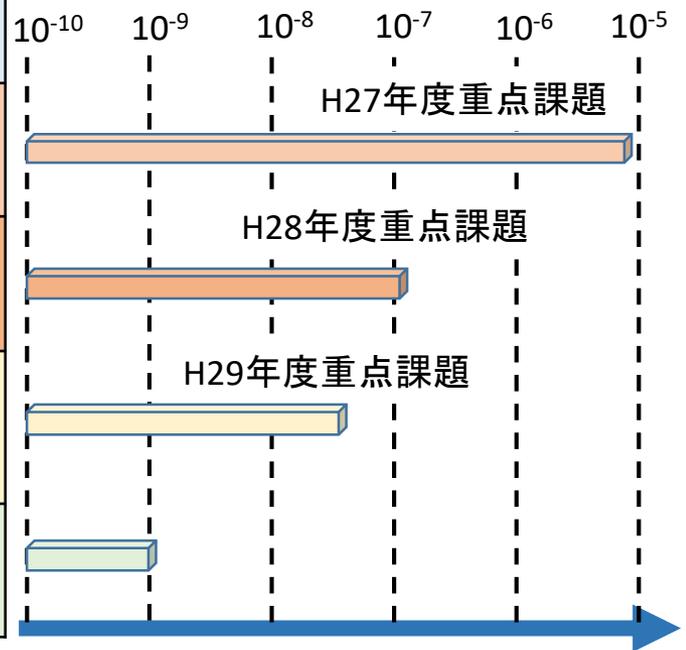
H29  
目標ライン

H30  
目標ライン

平均化時間 (s)

## 【物理現象と周波数シフト量の関係】

物理現象	パラメータ	周波数シフト量	相対周波数シフト量
衝突シフト	バッファガス分圧 P(=15kPa)	67885 Hz	$7.38 \times 10^{-6}$
	ガスセル温度 T(=75°C)	1088 Hz	$1.18 \times 10^{-7}$
ACシュタルク効果	レーザー光強度 I(=1800μW/cm <sup>2</sup> )	570 Hz	$6.2 \times 10^{-8}$
ゼーマン効果	磁場 B(=14μT)	9.62 Hz	$1.05 \times 10^{-9}$



\*H28年度ULPACプロトタイプ的主要条件から推定した値

相対周波数シフト量

## 【開発技術のポイント】

バッファガス圧依存性の異なるCs原子とRb原子を用いることで、バッファガス圧の変動量を推測し、それを基に周波数を補正。

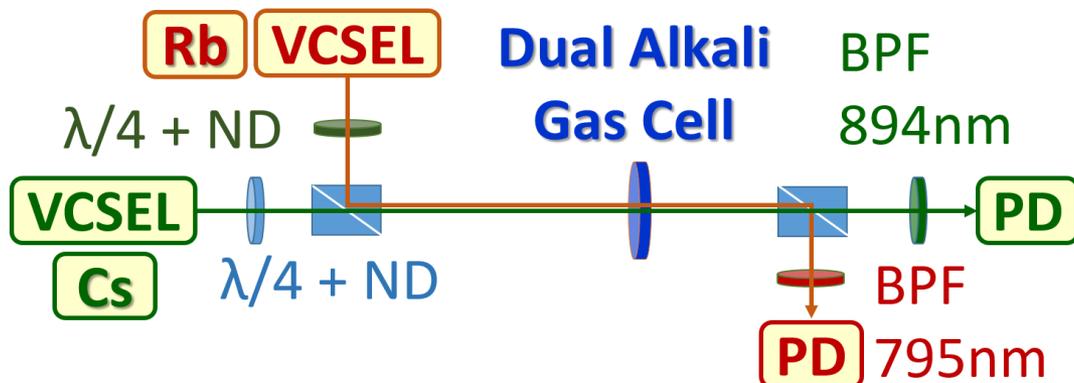
## 【圧カシフト補正アルゴリズム】

$$\Delta\nu_1 = \frac{\nu_{02} - \Delta \frac{\nu_{CPT2}}{\nu_{CPT1}} \nu_{01}}{\Delta \frac{\nu_{CPT2}}{\nu_{CPT1}} - \frac{\beta'_2}{\beta'_1}}$$

$\frac{\Delta \nu_{CPT2}}{\nu_{CPT1}}$  2共鳴の周波数比

デュアルガスセルを用いてリアルタイムに測定可能

$\frac{\beta'_2}{\beta'_1}$  計測前の測定で固有パラメータを決定可能



デュアルガス補正システムの構成

$\nu_{01}$ :Cs原子の遷移周波数

$\nu_{CPT1}$ :Cs原子のCPT共鳴周波数

$\nu_{02}$ :Rb原子の遷移周波数

$\nu_{CPT2}$ :Rb原子のCPT共鳴周波数

$\Delta\nu_1$ :Cs原子の周波数変動量

$\Delta \frac{\nu_{CPT2}}{\nu_{CPT1}}$  を測定

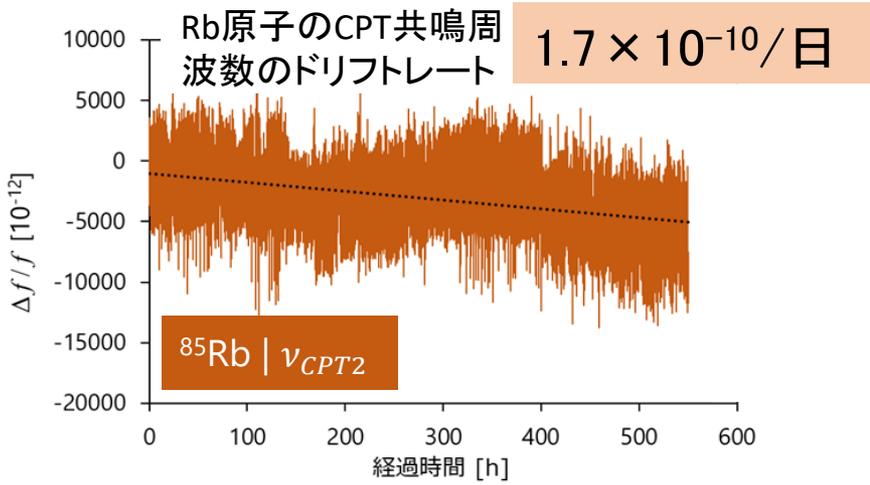
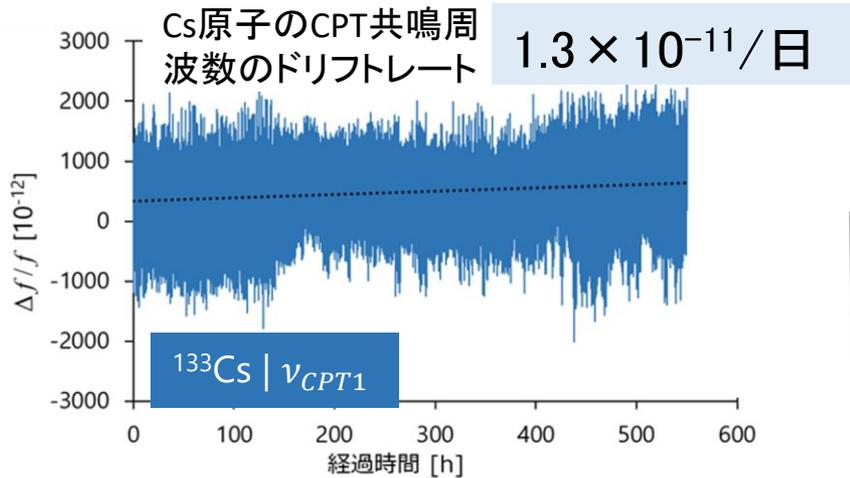
$\Delta\nu_1$  を推定

$\nu_{CPT1}$  を補正

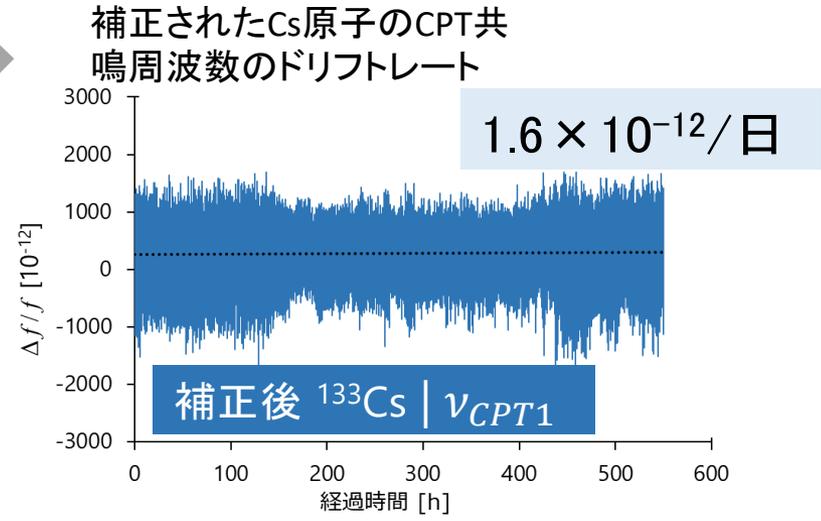
長期安定度の改善

**【成果】**

3日間の2周波数変動データからパラメータを求め、Cs原子のCPT共鳴周波数全体を補正し、8倍以上の精度向上効果を確認。現状のプロトタイプの時刻同期性能を大幅に上回る可能性を検証。



3日間のデータから  $\frac{\beta'_2}{\beta'_1}$  の値を決定し、周波数を補正

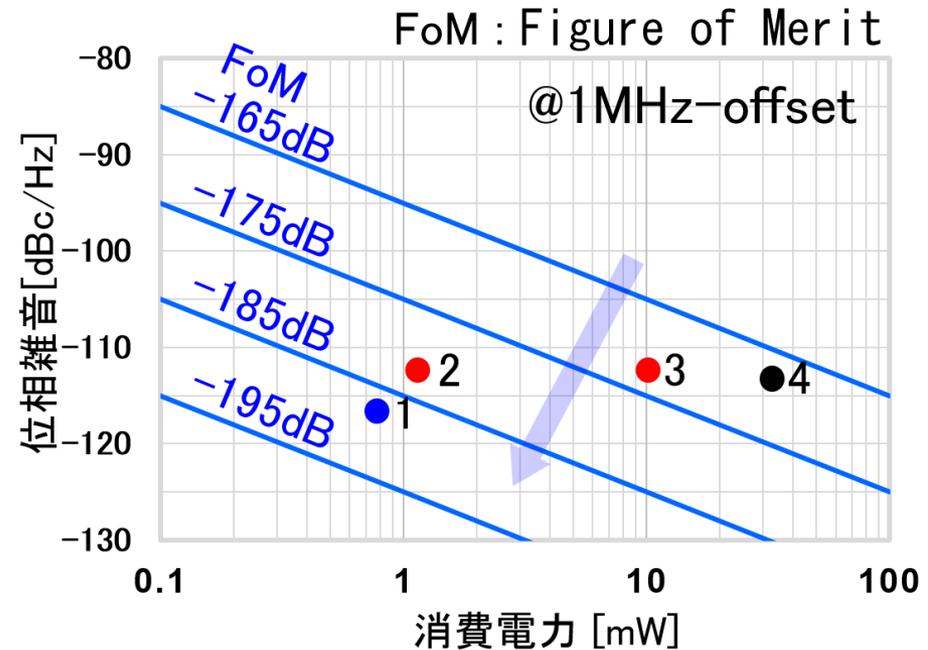


【開発技術のポイント】

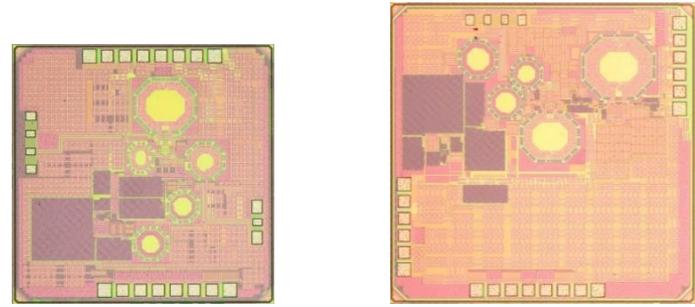
- ・tail-pump型回路を採用することでVCO単体の消費電力を大幅削減
- ・PLL回路もCMOS集積化することで、消費電力を大幅削減

【成果】

4.6GHzVCOの消費電力0.65mW、位相雑音-166dBc/Hzの世界最高性能を実現



1: 2016実績	0.65mW	2: 2017目標	1mW
	-116dBc/Hz		-112dBc/Hz
3: 2015目標	10mW	4: M社CSAC	32mW
	-112dBc/Hz		-113dBc/Hz



VCO PLL  
試作したCMOS集積化回路  
(実装サイズ: 3mm角)

Tail-pump型4.6GHzVCO  
位相雑音特性vs消費電力



### 【成果】

- ・真空断熱実装により、量子部の消費電力を大幅削減
- ・4.6GHz発振回路をCMOS集積化することで、消費電力でも差別化
- ・システムの最適化で、電力損失を大幅削減
- ・H28年度にULPAC消費電力117mWを達成
- ・H29年度はCMOS集積化4.6GHz発振回路で72mWを達成見込み

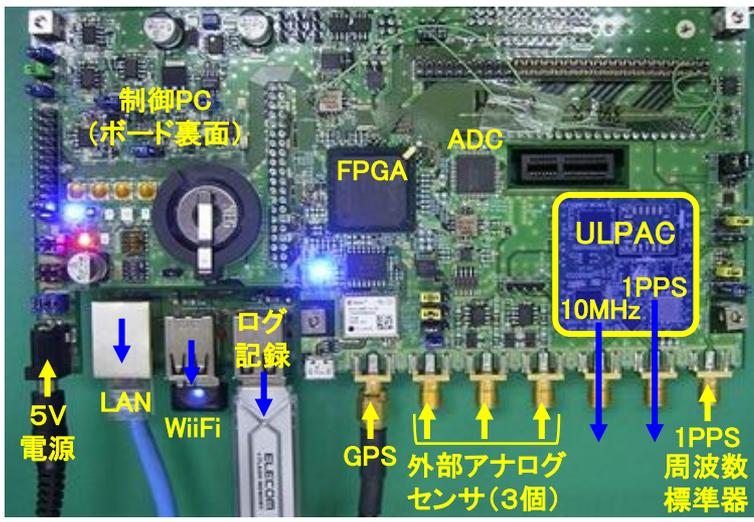
平成28年度ULPACプロトタイプ

	CSAC (Microsemi)	ULPAC (H27)	ULPAC (H28)	ULPAC(H 29)見込 み
量子部	11mW	280mW	11mW	11mW
4.6GHz発振回路	52mW	68mW	64mW	18mW
制御回路	49mW	253mW	37mW	36mW
電力損失	13mW	799mW	5mW	7mW
total	125mW	1400mW	117mW	72mW

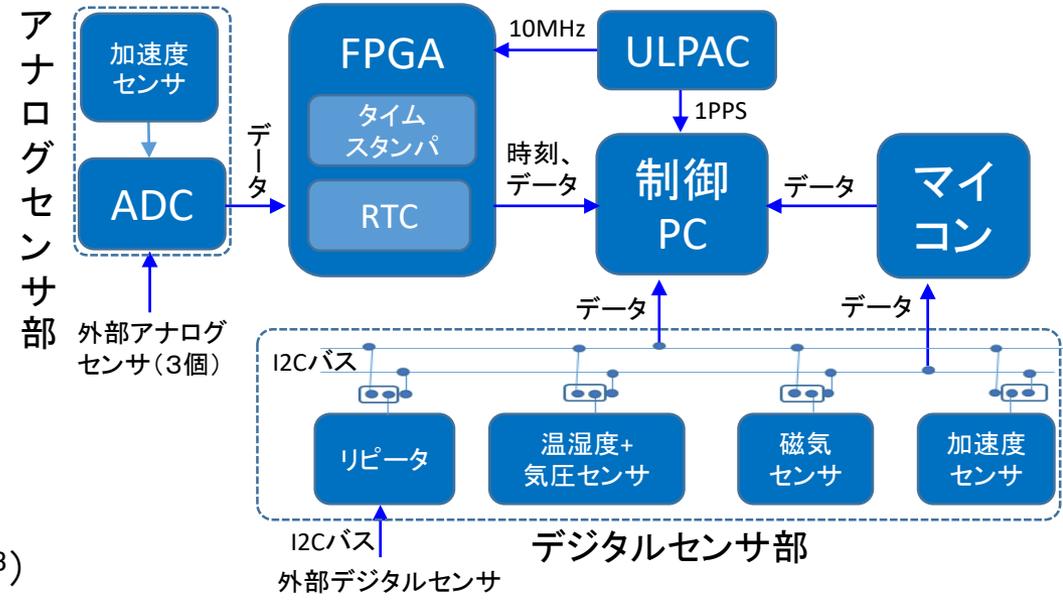
# 屋外での実証実験に向け、評価用モジュールを開発

## 【ULPAC評価用時刻同期モジュールの機能】

- ① 時刻同期性能評価機能
  - ・ GPSに連動したULPACの初期時刻自動調整機能
  - ・ GPS(1PPS)基準のULPAC時刻偏差記録機能
- ② 実証実験環境記録機能
  - ・ タイムスタンプ : ULPAC基準(分解能100ns、アナログデータ用)、システムクロック基準(分解能1 $\mu$ s、デジタルデータ用)
  - ・ 設置環境記録機能 : 加速度/磁気/温度/湿度/圧力 (オンボード) +  $\alpha$  (外部アナログ/デジタルセンサ)



時刻同期モジュール外観 (100 × 190 × 45mm<sup>3</sup>)



時刻同期モジュールの構成

本研究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。

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。