

センサ端末同期用原子時計の開発

柳町 真也*（産業技術総合研究所／NMEMS 技術研究機構）

原坂 和宏 鈴木 暢 鈴木 亮一郎 池田 純一 安達 一彦

（(株)リコー／NMEMS 技術研究機構）

Development of Ultra Low Power Atomic Clock used for Wireless Sensor Terminal
Shinya Yanagimachi* (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
/ NMEMS Technology Research Organization)

Kazuhiro Harasaka, Mitsuru Suzuki, Ryoichiro Suzuki, Junichi Ikeda, Kazuhiko Adachi
(RICOH Company, Ltd. / NMEMS Technology Research Organization)

In order to accurately perform safety diagnosis of the infrastructure, it is necessary to guarantee the correlation between the acquired data, then the time synchronization between the sensor terminals becomes important. Road Infrastructure Monitoring System(RIMS) employs a wireless synchronous system. If an atomic clock can be installed in sensor terminals, it is expected that a significant cost reduction in a construction of the wireless synchronous system will be achieved. It is introduced that, for aiming such a goal, the development of Ultra Low Power Atomic Clock(ULPAC) has been proceeded for years.

キーワード：原子時計，センサ端末，低消費電力，チップスケール原子時計，時刻同期

(Atomic clock, Sensor terminal, Low power consumption, Chip Scale Atomic Clock, Time synchronization)

1. はじめに

米国 DARPA では 2001 年頃よりチップスケール原子時計 (Chip Scale Atomic Clock=CSAC) と称した超小型原子時計の国家プロジェクトが進行した⁽¹⁾⁽²⁾。アメリカ国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology=NIST), Microsemi, Honeywell, などの 12 グループがお互いに切磋琢磨して競争する体制を採り, 2011 年に Microsemi 社から CSAC が製品化(消費電力 120mW)され, 現在では海底資源探査, 海底地震計などの Global Positioning System(GPS)の電波受信困難地域での時間標準として活用され新たな市場を開拓している⁽³⁾。CSAC は限定された使用時間であればバッテリー駆動が可能であり, また小型で制御ボードに搭載可能であるため, センサネットワークの同期システムを簡略化・広域化し社会インフラ, 建築構造物モニタリングの研究に応用されている⁽⁴⁾。

本研究は道路インフラモニタリングシステム (Road Infrastructure Monitoring System=RIMS)の先導研究として 2015 年 8 月より開始された。開発期間は約 3 年半となる 2019 年 3 月までを予定している。そこでは, 低消費電力型プロトタイプ原子時計 (Ultra Low Power Atomic Clock=ULPAC)を試作しつつ, RIMS で利用されるセンサ端

末に搭載可能な仕様の実現可能性を検討する。表 1 に示す RIMS 適用可能仕様として時刻同期性能(10 ms/10 年)は, 巨大構造物(特に橋梁)の固有振動解析に有効とされるサンプリング周波数 100 Hz⁽⁴⁾, 10 年はインフラ義務化点検周期の 5 年⁽⁵⁾を超えるものとしている。消費電力(1 mW)はセンサ端末に利用されることが多い温度補償型水晶発振器 (Temperature Compensated Crystal Oscillator=TCXO)を置き換えるもの, サイズ(15×15×5 mm³)は汎用の恒温槽付水晶発振器(Oven Controlled Crystal Oscillator=OCXO)を目安とした。

図 1 は消費電力を横軸として ULPAC プロトタイプ試作目標, 及び上記 RIMS 適用可能仕様と共に, 現在市場で入

表 1 ULPAC プロトタイプ目標仕様

Table 1. ULPAC prototype target specification.

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	RIMS適用可能仕様
時刻同期性能	0.01 s /3ヵ月	0.01 s /6ヵ月	0.01 s /8ヵ月	0.01 s /12ヵ月	0.01 s /10年
消費電力	1.5W	120 mW	90 mW	60 mW	1 mW
サイズ	na	(40×40×18) mm ³	(40×35×11) mm ³	(30×30×11) mm ³	(15×15×5) mm ³

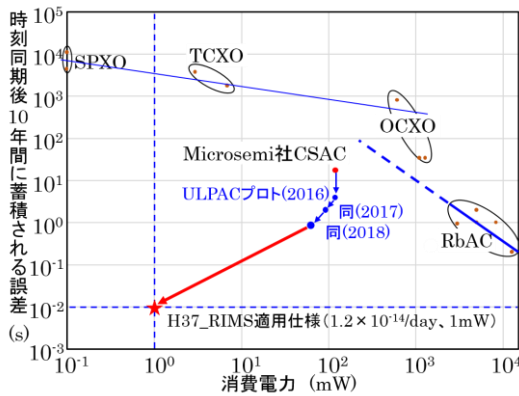


図1 消費電力と時刻維持デバイスの関係

Fig. 1. Time keeping device versus power consumption.

手可能な時刻維持デバイスの時刻同期性能を示したものである⁽⁶⁾。消費電力が大きいほど時刻同期性能が向上する一般則に対して、CSACは消費電力が小さいことが読み取れる。ULPACプロトタイプはCSACを目安に試作を開始し、消費電力を削減しつつ、時刻同期性能向上に取り組んでおり、先導研究の期限である2019年3月時点で目標が達成できる見込みとなっている。本論文ではその概要について紹介する。

2. 低消費電力型原子時計概要

‘時計’と呼ばれるものは、一般的に何らかの周期信号を生成するデバイスとそれを時間情報に変換する同期回路から構成される。日時計であれば、天空中の太陽運行、或は地球自転が発振器に相当する。また機械式時計であればテンブや振り子が発振器、脱進機の一部の機能は同期回路に相当する。

原子時計も電圧制御発振器(Voltage Controlled Oscillator=VCO)から出力された信号を同期回路により‘秒’を刻む機能を備えている。この点は汎用の時計と同様である。異なるのは、電気的な周期信号を原子の固有周波数と比較する仕組みがあり、それらが相異なる場合に、フィードバック機構が働き、原子の固有周波数と一致した状態が保持されることである。発振器の出力信号と原子の固有周波数と比較する部分は求められる精度により種々の方法が採用される⁽⁷⁾。2002年にCSACの技術的な提案が示されて以降、低消費電力型原子時計は、面発光レーザー(Vertical Cavity Surface Emitting Laser=VCSEL)と超小型ガスセルの利用が主流となった⁽¹⁾。ガスセルはmmオーダーのサイズにCsやRbのアルカリ原子をバファガスと共に封入する。VCSELはGHzオーダーまで注入電流を直接変調できるのが特徴で、これらを用いてCoherent Population Trapping(CPT)共鳴と呼ばれる状態を生成する。VCSELの出力光は±1次の側帯波がほぼアルカリ原子の超微細構造間の固有周波数に一致するよう変調周波数 ν_m が選ばれる(Csであれば、 $\nu_m=4.6$

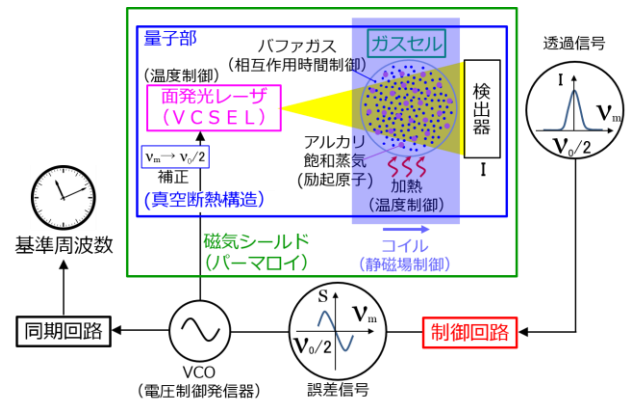


図2 低消費電力型原子時計内部構造概要

Fig. 2. Outline of a low power consumption atomic clock.

GHz, Rbであれば $\nu_m=3.4$ GHz)。それ以前はアルカリ原子の固有周波数に一致するマイクロ波を直接照射していたため、cmオーダーのガスセルが必須であり、光マイクロ波二重共鳴を利用していた。CPT共鳴を利用する場合、光を介してVCOの発振周波数と固有周波数と比較可能なため、省スペースを実現した。±1次の側帯波間の周波数差が固有周波数に一致する場合には、ガスセルを通過するVCSELの透過光強度が極大値とり、これを誤差信号に変換することでVCOの出力周波数が一定になるよう制御する。バファガスはアルカリ原子に対して不活性のガス(希ガスや窒素等)が利用され、ガスセル壁との衝突による緩和を防ぎ、相互作用時間が1ms程度を確保できるような圧力(10~20 kPa)が採用される(図2参照)。

3. 周波数シフト因子と時刻同期性能劣化要因

原子の固有周波数は水晶振動子の発振周波数と比べるとその普遍性は大きい。その一方で、周波数シフト要因も存在する。主なものを表2に示す。これらの値が一定に保持されれば、原子の固有周波数はシフトがあっても定数として扱える。結果、同期回路の設定を調整することで1秒はずれない。すなわち時刻同期性能は劣化しない。しかし周波数シフト要因に関連するパラメータ、例えばガスセルの温度が時間的に変化すると原子時計を駆動している固有周波数が時間的に変動するため時刻同期性能を劣化させる要因となる。

低消費電力型原子時計の場合、相互作用時間を確保するために封入したバファガスとアルカリ原子との衝突により、固有周波数はシフトする⁽⁸⁾。この衝突シフトはシフト量 $\Delta\nu$ とすると

$$\Delta\nu = P_0 \left[\beta + \delta(T - T_0) + \gamma(T - T_0)^2 \right] \quad (1)$$

と表される。ここで P_0 は基準温度0°Cにおけるバファガス圧である。 β 、 δ 、 γ は圧力係数、一次の温度係数、二次の温度係数で、Hz/Pa、Hz/(Pa·K)、Hz/(Pa·K²)のディメン

表2 ULPAC プロトタイプ(2016)の主要条件から推定した周波数シフト量

Table. 2. Frequency shift estimated from the practical condition in ULPAC prototype(2016).

周波数シフト要因となる物理現象	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	バファガス分圧 P(=15kPa)	67885 Hz	7.4×10^{-6}
	ガスセル温度 T(=75°C)	1088 Hz	1.2×10^{-7}
ACシュタルクシフト	レーザー光強度 I(=1800μW/cm ²)	570 Hz	6.2×10^{-8}
ゼーマンシフト	磁場 B(=14μT)	9.6 Hz	1.1×10^{-9}

ジョンをもつ。熱力学的に衝突シフトは圧力依存性(衝突頻度)に由来と、温度依存性(衝突時の相対速度)に分類される。周波数シフト量としては、これらの効果が他と比べると大きい。

衝突シフトの次にシフト量として大きいのは AC シュタルク効果によって発生するものである。これは、レーザー光電場によって誘起される電気双極子モーメントとレーザー光電場の相互作用の結果、原子のエネルギーレベルが変化する現象で、別名ライトシフトとも呼ばれる。発生するエネルギーレベルの変化量を Δw とすると次式の形で表される⁽⁹⁾。

$$\Delta w = \frac{E^2}{4\hbar} |\mu|^2 \frac{(\omega_L - \omega_0 - k \cdot v)}{(\omega_L - \omega_0 - k \cdot v)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (2)$$

ここで、 E はレーザー光電場、 \hbar はプランク定数、 μ は誘起される電気双極子モーメント、 ω_L はレーザー光周波数、 ω_0 はアルカリ原子の D 線の遷移周波数、 Γ は自然幅、 $k \cdot v$ はガスセル内のアルカリ原子がレーザー波面に対して熱運動することで発生するドップラー効果を示す。レーザー光電場はレーザー光強度に由来する。また、実際には VCSEL が変調されレーザー光電場が複数ありそれらの総合的な効果がライトシフト要因となる。表2では簡単のためにパラメータとしてレーザー光強度だけを取り上げたが、より正確には時刻同期性能劣化に結びつくパラメータはレーザー光強度、変調指数、レーザー波長(光周波数)の時間的な変動である。これらは VCSEL のエイジングとも関わり複雑な挙動を示すことが多い。

ゼーマンシフトは、外部磁場と磁気モーメントが相互作用することで原子のエネルギーレベルがシフトすることに由来する。原子時計を構築する際には、外部磁場の直接的な影響を避けるために磁気量子数 $m_F=0$ (F は核スピン I と全角運動量 J の合成角運動量)の遷移が選ばれる。そのため、縮退を解く目的で注意深く制御された磁場が印加され、アルカリ原子の基底状態($J=1/2$)では、Breit-Rabi の式に従つ

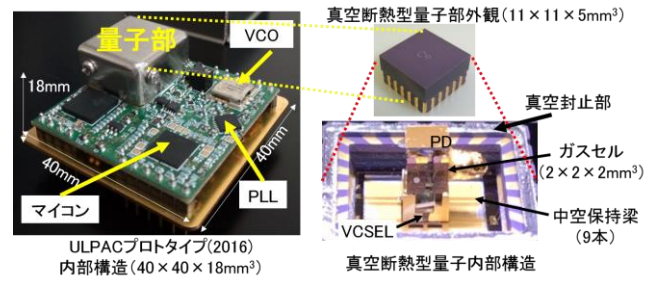


図3 ULPAC プロトタイプ(2016), 及び量子部の内部構造
Fig. 3. Picture of ULPAC prototype(2016) and internal structure of physics package. Vertical Cavity Surface Emitting Laser(VCSEL), Photo Detector(PD), Phase Lock Loop(PLL), Voltage Controlled Oscillator(VCO)

た周波数シフトが発生する⁽¹⁰⁾。

$$\Delta\nu = \frac{x^2}{2}, \quad x = \frac{(g_j - g_i)\mu B}{\hbar\nu_{hfs}} \quad (3)$$

ここで g_j, g_i はそれぞれ軌道角運動量と核スピンの g 因子、 μ はボーア磁子、 B はガスセルに印加されている外部磁場、 ν_{hfs} はアルカリ原子の基底状態超微細構造間の遷移周波数 (Rb : 約 6.8GHz, Cs : 約 9.2GHz) である。

以上記載した四つの周波数シフト要因は、それぞれ VCO 発振周波数と原子の固有周波数を比較する機能を導入するために避けられないものである。そのため、プロトタイプの試作では、これらの周波数シフト量を低消費電力でいかに一定に維持するかが重要な技術となる。

4. プロトタイプ試作

本プロジェクトにおけるプロトタイプの試作では、アルカリ原子として Cs を用いることとした。CPT 共鳴では一般的に D₁線が D₂線よりも S/N 比が大きく、D₁線の観測には Cs が有利となる。理由の一つとして、Rb の D₁線は Rb85 と放射性同位体の Rb87 の共鳴線がバファガス拡がりにより干渉することが挙げられる。

プロトタイプを試作する上で、重要な部品と考えられるガスセルと VCSEL はそれぞれ独自開発した。ガスセルは手作業によるガスセル製造装置を立ち上げ、ガスセルを構成する素材とバファガスのガス透過性の関係を定量的に把握した。また、外形 2 mm 角、内形 1.4 mm 角の非常に小さい石英製のガスセルを製作し、バファガスには N₂ と Ar が 2.55 の分圧比の混合ガスを利用し、動作温度 75°C をピークとした二次温度特性を示すよう配慮した。これは(1)式で示される衝突シフトの温度依存性の一次の温度係数が打ち消されることによる。VCSEL は歩留まり向上を視野に入れ、波長調整層を有する多波長垂直面発光レーザーを考案、作製した⁽¹¹⁾(図3参照)(図4参照)。

これらの部品は CPT 共鳴を観測するためのフォトディテクター(PD)と共に、11x11x5 mm³ のセラミックパッケージ

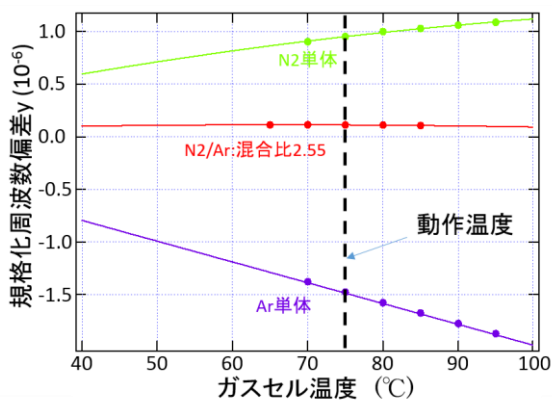


図4 ULPAC プロトタイプ(2016)に搭載されたガスセルの温度特性(赤色, 混合分圧比 $N_2/Ar=2.55$)

Fig. 4. Temperature dependence of gas cell implemented in ULPAC prototype(2016). 緑と紫はそれぞれ N_2 , 或は Ar をバファガスとした場合の温度特性を示す。

内に配置し, 圧力 1~数 Pa の中真空度で封止した。これによりパッケージ外側からの大気を介した伝熱を抑制している。ガスセルの温度安定性を高めるため, 熱を伝えにくいフィルムでガスセルを中空保持する構造を開発した。また, 全体を金でコーティングする事で, 輻射による熱の伝わりも抑制している。これらの真空断熱量子部の熱抵抗は約 5000 K/W で, ガスセル近傍を 75°C に維持するための消費電力は 10 mW 程度である。量子部の周辺には縮退を解くための DC 磁場印加用のコイルを配置し, PC パーマロイ製磁気シールドによって外部磁場の変動を遮蔽する。シールドインダクタンスは 60 から 70 である。プロトタイプ(2016)では上記のものが制御回路を含めて 40×40×18 mm³ の筐体中に収められ, 全体の大きさが 4 cm 角以下に収まるプロトタイプを実現した。周波数安定度は CSAC と同等レベルの性能が得られ, 平均時間約 300 000 秒でアラン標準偏差として 2×10^{-11} であった。また, 同時に消費電力も約 120 mW を実験的に確認した(図 5 参照)。

以降の ULPAC プロトタイプ(2017), 同(2018)では VCSEL の長期特性を詳細に把握し, ライトシフト対策に重点を置き開発を進めている。また, 制御回路についても専用の C-MOS 集積回路を新たに開発し, 更なる低消費電力化, 及び小型化の見通しが得られている。予定されている 2019 年 3 月のプロジェクト終了時には時刻同期性能, 消費電力で CSAC を上回る ULPAC プロトタイプを完成することが期待される。

5. 屋外連続稼働実験

RIMS ではセンサ端末を屋外に設置してデータ収集を図る。そのため原子時計も屋外利用を想定する必要があり, 本プロジェクトでは屋外環境での連続稼働実験を進めてい

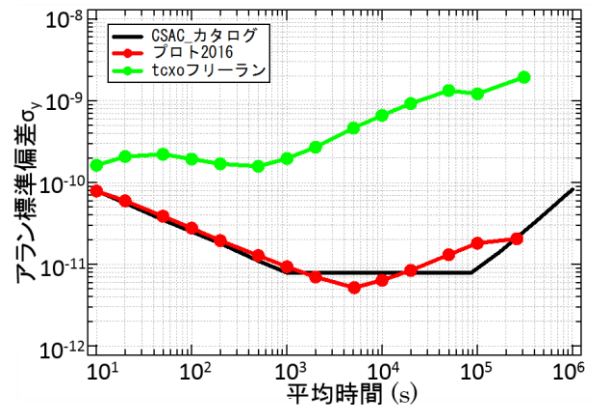


図5 ULPAC プロトタイプ(2016)の周波数安定度 vs 平均化時間

Fig. 5. Frequency stability as a function of the averaging time. CSAC のカタログスペック(黒線), プロトタイプ内に実装している TCXO 自走状態(緑), プロトタイプ(2016)(赤), それぞれの周波数安定度を示す。

る。ULPAC プロトタイプを屋外で単独駆動させた場合は, 時刻同期性能の評価手段がない。そのため, GPS を介して協定世界時(Universal Coordinated Time=UTC)と時刻比較可能な時刻同期モジュールを製作した。5 V の外部電源で稼働し, モジュールのサイズは 100×190×40 mm³ である。外部の基準周波数発生源, または GPS の 1pps 信号を基準として参照し, ULPAC プロトタイプの周波数と 1pps 信号の時間差を自動調整可能となっている。また, ULPAC プロトタイプが基準信号に同期せずに自律制御で動作している状態で, 経過時間ごとに基準時刻との偏差を 100 ns の分解能で検出し, タイムスタンプと共に記録可能なハードウェアも備えている。併せて ULPAC プロトタイプの内部状態(基板温度, ヒーター電圧等)のログも記録する。温湿度計や加速度センサがオンボードとなっている他, 3 個の外部アナログセンサも接続可能である(図 6 参照)。

2017 年 12 月より屋外連続稼働実験を開始した。屋外環境では天候や時間帯による大きな温湿度差や暴風雨などの屋内に比べて過酷な環境での長期的な実験の運用に耐える必要がある。前述した時刻同期モジュールに GPS アンテナを接続して, UTC に同期した 1pps 信号を基準信号として利用できるようにした。屋外における設置場所は宮城県名取市に所在するリコー応用電子研究所の敷地内において, 3 階建てビルの屋上 2 箇所と屋外の 2 箇所の計 4 箇所を選定した。その一例を図 7 に示す。本設置場所は歩道を挟んで交通量の多い国道 286 号線が存在するため, 走行車両によって発生する振動や電磁波の影響が外乱要因として想定される。他にも, 空調用屋外機近傍や, 日光が直射する場所が選定されており, 振動や温度変動が激しい場合等の長期的な安定性を検証する。

屋外連続稼働実験は最長のもので 1 年間継続されている。

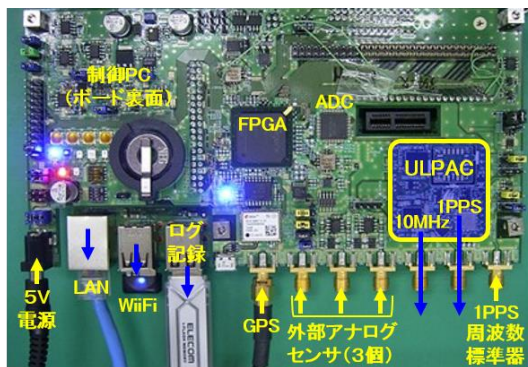


図6 屋外環境で ULPAC プロトタイプを評価するための時刻同期モジュール

Fig. 6. Time synchronization module for evaluating ULPAC prototype in outdoor environment.

これまでに設置環境での磁場や振動は ULPAC プロトタイプ(2016)の特性に影響が無いことが確認された。また、最も大きな変動要因は温度特性であり、補正制御を実装することで影響が軽減することも知見の一つとして得られた。

6. 将来技術の検討

2019年3月にはアメリカ企業により先行発売されているCSACよりも大きき、消費電力、時刻同期性能の点で優れた ULPAC プロトタイプの試作品が出来上がる見通しである。一方、RIMS 適用可能仕様に対しては、特に時刻同期性能と消費電力との観点で、更なる性能向上が求められる。この最終目標仕様を満足するための将来技術の検討も進めている。

時刻同期性能の観点からは、ガスセル内に封止するバファガス圧の変動を検出するデュアルガス補正法を提案し、実験的な検討を進めている⁽¹²⁾。ガスセル内に封入するアルカリ原子を Cs と Rb の2種類とし、それぞれの CPT 共鳴の周波数差を観測し、原子時計を駆動する周波数に補正を加えることで、更なる高精度化を狙う。また、サファイア単結晶を用いてガスセルを構築することでバファガス、或は大気中ガスの入出流を究極的に抑え込む技術の有用性検討も進めている⁽¹³⁾。サファイア単結晶は、ガスセルに通常利用されるホウケイ酸ガラスや石英ガラスに比べてガス透過率が5桁以上小さい。

消費電力の観点からは、更なる低消費電力化を推進するために間欠駆動法の検討を進めている。この手法は通常の原子時計としての動作と、原子による補正機能を休止させた TCXO の自走状態での時刻維持を図るハイブリッド方式である。原子の補正機能が働かない場合には、TCXO 以外の電力は削減できるため省電力化が期待できる。

7. まとめ

RIMS に用いられるセンサ端末に搭載可能な原子時計



図7 設置場所の一つであるリコー応用電子研究所敷地内グラウンド

Fig. 7. One of the outdoor demonstration of ULPAC prototype(2016). 野球グラウンドの隅にあるため打球による衝撃を防止するための保護ゲージ内に設置している。

ULPAC の目標仕様を CSAC と比較しつつまとめた。このような低消費電力型原子時計では CPT 共鳴を利用するが、その場合の周波数シフト因子と時刻同期性能劣化要因について、ULPAC プロトタイプ(2016)の例に照らし合わせて議論するとともに、屋外連続稼働実験の結果を述べた。ULPAC の性能を飛躍させるために必要な将来技術に関して時刻同期性能と消費電力の観点から進めている取り組みを紹介した。

謝辞 ULPAC プロトタイプ試作においては(株)リコー未来技術研究所の本村寛氏、長澤和輝氏、藤原将行氏、庄子浩義氏、高橋啓行氏、中鉢直氏、阿部宏幸氏に多大なるご協力を頂き、謝意を表す。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ある。

文 献

- (1) J. Kitching, S. Knappe, and L. Hollberg: "Miniature vapor-cell atomic-frequency reference", *Appl. Phys. Lett.* 81, pp.553-555(2002)
- (2) S. Knappe, V. Shah, P. D. Schwindt, L. Hollberg, J. Kitching, L. Liew, and J. Moreland: "A microfabricated atomic clock", *Appl. Phys. Lett.* 85, pp.1460-1462(2004).
- (3) A. Gardner, and J. Collins: "A second look at Chip Scale Atomic Clocks for long term precision timing", *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE.* pp.1-9 (2016)
- (4) 倉田成人: 「建築構造物と社会インフラのモニタリング」, 計測と制御, Vol.55, No.3号 p.197-202 (2016)
<https://doi.org/10.11499/sicej.55.197>
- (5) 2014年に国土交通省により近接目視の点検周期が5年と義務付けられた。例えば参考資料として下記がある。
「定期点検の位置づけ」, 国土交通省資料,
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/0722_01.pdf, (参照 2018-08-14)
- (6) 池上健: 「CPTを利用した小型原子時計開発の世界的動向」, マイクロエレクトロニクス, Vol.52, No.199号 p.77-99 (2008)

<https://doi.org/10.20805/micromechatronics.52.199>

CSAC や、一般的な時刻維持デバイスの性能は当該文献を参考に推測している。

- (7) F. Riehle : "Frequency Standards", Wiley-VCH, Weinheim, pp.229 (2004).
- (8) M. Arditi, T. R. Carver, "Frequency shift of the zero-field hyperfine splitting of Cs produced by various buffer gases", Phys. Rev. 112(2), pp.449(1958).
- (9) S. Ohshima, Y. Nakadan, T. Ikegami and Y. Koga, "Light shifts in an optically pumped Cs beam frequency standard" IEEE trans. Instrum. And meas. 40, pp.1003-1007(1991)
- (10) J.Vernier and C.Audoin, "The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards", Bristol U.K. Adam Hilger , pp.26-30 (1989).
- (11) R. Suzuki, M. Hiroshi, and S. Satoh. "Vertical cavity surface emitting lasers with precise multi-wavelength control." Semiconductor Laser Conference (ISLC), 2016 International. IEEE (2016).
- (12) Y. Furuse, Y. Kase and S. Goka, "Frequency drift detection method using dual alkali gas for coherent population trapping atomic clocks," 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Besancon, pp. 328-331(2017)
- (13) 柳町真也, 池上健, 高木秀樹, 高見澤昭文, 倉島優一 : ガスセル, 原子時計および原子センサ, 特願 2016-198702, 2016/10/07