



で、漁業の成り手が減っているということ。対して、風力発電事業は地元の新産業になり、地域おこしにつながる。孫の代まで続く事業になるのです。

#### 基幹送電線の容量割り当てを再エネ優先に

再エネ事業の展望についていえば、私がレノバに加わった2014年当時はまだ夜明け前といった状況でしたが、最近では光明が見え始めたといえます。

例えば、2018年7月の政府発表の「第5次エネルギー基本計画」では再エネを主力電源化する方針が発表されました。これは大きな分岐点です。次いで2020年7月には、梶山弘志経済産業大臣が、効率が低い古い石炭火力の設備を規制して高効率化すると同時に、2030年時点の洋上風力発電の促進地域を（それまでの5カ所から）30カ所にすると発表しました。基幹送電線についても、再エネを優先して容量を割り当てることを検討するとしています。非常に

勇気づけられる転換点になったと思います。

ただ、強いて言えば、「検討」ではなくて早く具体的な政策を「確定」してもらいたい。通信分野では、当時の中曽根（康弘）内閣の郵政大臣が事業者の新規参入を自由化することを確約してくれたことが改革の加速につながりました。

日本の「失われた30年」を取り戻すには米国のGAFA（Google、米Amazon、米Facebook、Apple）のような若くてフレッシュ、人材の多様性に富んだ柔軟なベンチャーが現状に挑戦し、活性化していくことが必要です。私はレノバをGAFAのようにしたい。特に注目はアジアです。欧州は再エネが伸びているといっても人口も経済も成熟してしまっている。その点、アジアは人口も増えており、エネルギー消費も伸びていて今後のマーケットの中心です。そこで日本の再エネのリーダーがトップになることは夢ではありません。（談）



## Perspective

論文

原 基揚

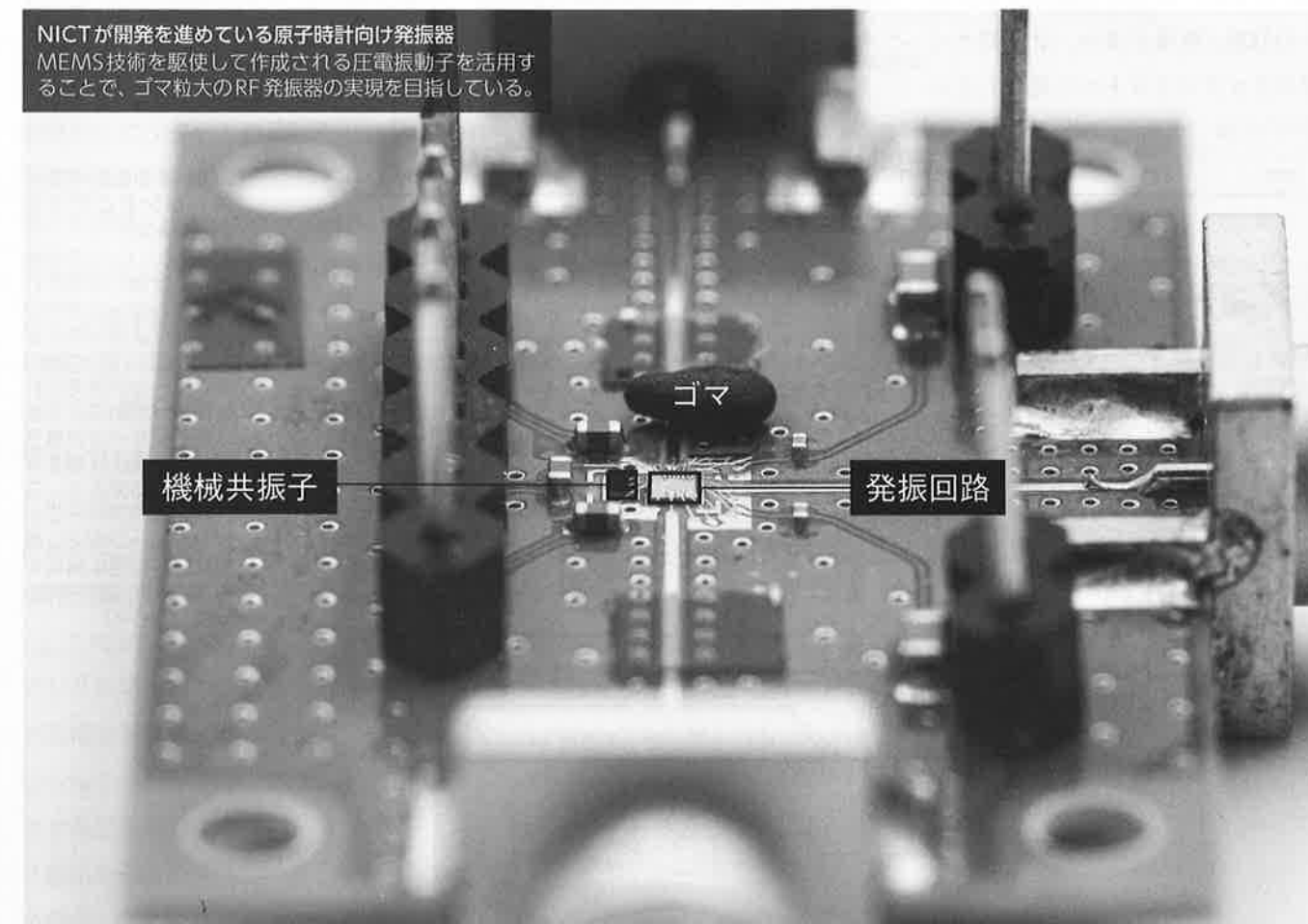
情報通信研究機構 電磁波研究所  
時空標準研究室 主任研究員

カラー版はWebで [nkb.jp/NE2009085](http://nkb.jp/NE2009085)

# スマホに載る原子時計 実現へのシナリオ

情報通信研究機構（NICT）では、原子の発光スペクトルを活用したクロック安定化技術のオンチップ実装を目指している。本誌2020年6月号Perspective「原子時計のチップ化が導く、高精度デジタルツイン」では、高安定なクロックチップを小型化し、様々なデバイスに組み込むことによって得られる社会的インパクトについて述べた。本稿では、この高安定なクロックチップを実現するためのキー技術について紹介する。

NICTが開発を進めている原子時計向け発振器  
MEMS技術を駆使して作成される圧電振動子を活用することで、ゴマ粒大のRF発振器の実現を目指している。



（撮影：スタジオキャスパー）

現在、セシウム (Cs) ビームを利用したラックマウントサイズの原子時計が各国の時刻標準の生成に広く採用されている (図1)。情報通信研究機構 (NICT) にも18台のCsビーム型原子時計<sup>†</sup>が配備され、水素メーザー<sup>†</sup>や原子泉型<sup>†</sup>の周波数標準と組み合わせで日本標準時 (Japan Standard Time : JST) の生成を担っている。Csの吸収遷移、いわゆる時計遷移がSI単位系の秒の定義として1967年に採用され、その後、GPS衛星への搭載とともに、原子時計は堅牢な筐体への収納・集積が進み、計測器サイズのラックマウントへと進化してい

った。しかし、ラックマウント実装は可搬ではあるものの、ハンドキャリアには重厚で、先進デバイスとなるエッジサーバーや携帯端末への高精度な周波数/時刻標準源の搭載には、さらなる技術革新を必要とした。

詳細は後述するが、原子時計の小型化の契機となったのは、1993年のCPT (Coherent Population Trapping) 共鳴を利用した周波数標準源の提案<sup>1)</sup>である (p.93の別掲記事「CPT共鳴とそれを活用した周波数標準」を参照)。本方式は原子からの時計遷移を原子への変調レーザーの照射のみで取得することができた

め、原子ビームを生成する加熱炉やマイクロ波干渉を得る導波管など、微細化が困難な装置類を原子時計から除去できる可能性が示された。そして、2000年代に入り、MEMSパッケージやレーザー受発光素子のチップ化・低コスト化が成熟し、米国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology : NIST) を中心にCPT方式を用いた小型原子時計の実装が報告され、モジュールデバイスとして市販されるに至った<sup>2)3)</sup>。このMEMS技術を活用したNISTの報告は世界に大きな衝撃を与えた。

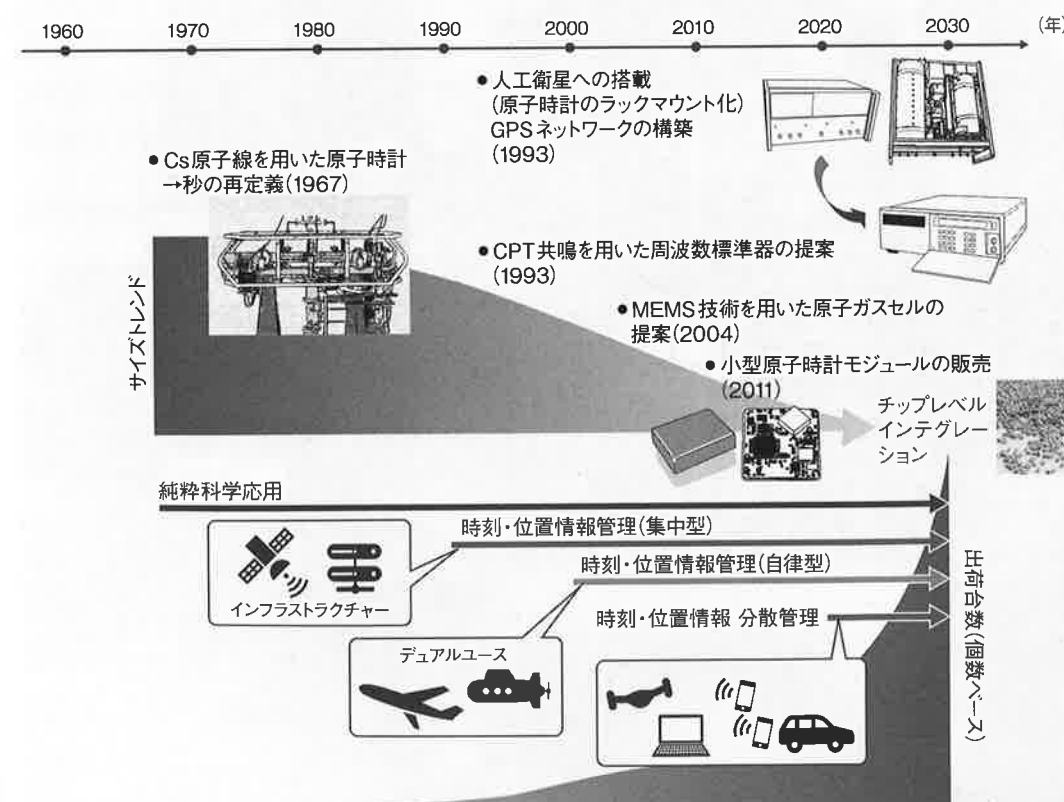


図1 原子時計のサイズトレンドとアプリケーション  
1967年にCsの吸収線が秒の定義に採用されてから、ラックマウント実装による小型化が進み、現在、数cm角のモジュールが発売されるに至っている。今後はチップサイズの原子時計が市場に登場することになるだろう。これに伴い、スマートフォンやドローンなど、原子時計の応用は格段に拡張される。(図：筆者、写真：PIXTA)

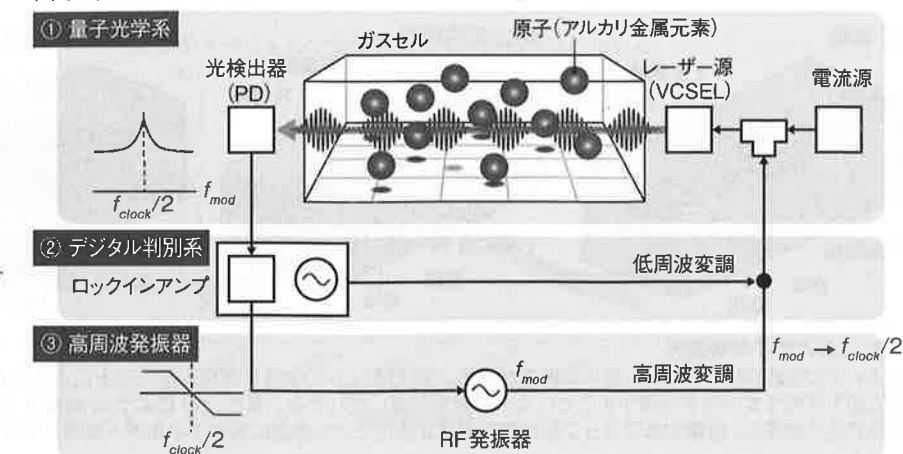
小型原子時計モジュールは、国防的な意図を持った大規模プロジェクトの下、開発が進められたが、今後は、当該技術に集積回路技術や微細加工技術を詰め込み、格段の小型・低コスト化を図って民生用途の市場へ浸透・拡散を図るフェーズへとシフトチェンジしていくだろう。そして、このフェーズは我が国が得意としてきた精緻 (せいち) なキャッチアップ戦略と整合する。

### チップ化への道しるべ

CPT方式を用いた小型原子時計モジュールの開発は、NISTから欧州、中国そして日本へと波及した<sup>注1)</sup>。情NICTにおいても、ここからさらに小型化を推進し、オンチップレベルにまで集積化する研究を進めている。

CPT原子時計のシステムブロックを図2 (a) に示す。原子時計はガスセルを含む量子光学系①と高周波発振系③、そして、量子光学系からスペクトルを得て高周波発振器へ周波数補正用のエラー信号を供給するデジタル判別系②の3つのシステムからなる。この3つの中で、高周波発振器とデジタル判別器とが消費電力とボード面積の70%近くを占有することが知られている<sup>7)</sup>。特に、高周波発振器は水晶発振器などの多数のオフチップ部品から構成されていることから、小型化・低消費電力化の余地が大き

### (a) 従来型CPT原子時計



### (b) デジタル判別器を用いない自動発振型CPT原子時計

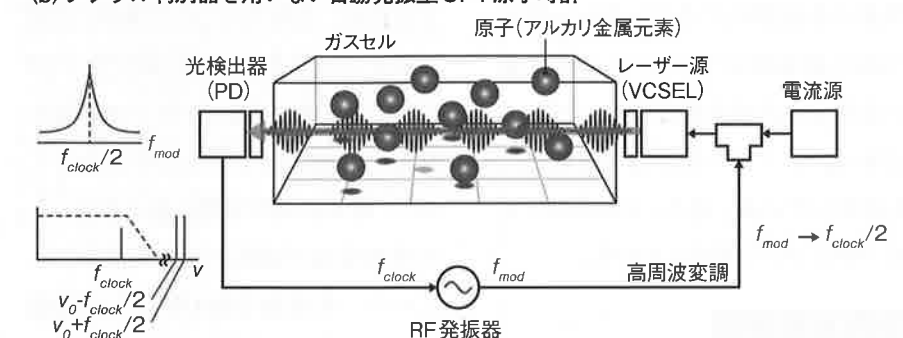


図2 CPT原子時計のシステムブロック  
従来のCPT原子時計のシステムブロックは3つの要素に分けることができる (a)。量子光学系を共振器と捉え、自動発振系を構築できれば、デジタル判別器を省略でき、原子時計システムの格段の小型化が期待される (b)。(図：筆者)

いと考えられる。そこで、我々は、水晶発振器とPLL (Phase Locked Loop) ベースの周波数通倍器からなる従来の高周波発振器ではなく、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を活用したBAW (Bulk Acoustic Wave、体積弾性波) 発振器に着目した。これにより、高周波発振器はBAW素子と増幅器のみで構成され、さらにワンチップ化も視野に入れることが可能となる。

また、モジュールハイト (高さ) にも目を向けると、スタック構造で実装される量子光学系の高さが際立つ。これに対して我々は、ミラーなどの光

<sup>†</sup>Csビーム型原子時計=Csを加熱によってビーム状に放射させ、時計遷移に相当するマイクロ波を、インターバルを置いて2回、相互作用させる。これによってラムゼー共振を誘起し、Csの時計周波数 (約9.12GHz) を狭線幅に取得する。周波数安定度は $10^{-12}$ 台である。

<sup>†</sup>水素メーザー原子周波数標準=中性水素原子メーザーを用いた周波数標準。約1.42GHzで発振し、 $10^{-15}$ 程度の高い周波数安定度を得る。

<sup>†</sup>原子泉型周波数標準=マイクロ波を作用させた冷却原子を噴水状に打ち上げて、自由落下させたのち、再度、マイクロ波を照射する。Csビーム方式よりマイクロ波との相互作用のインターバルを長く確保できるため超狭線幅な共振が実現され、 $10^{-15}$ オーダーの優れた周波数安定度が得られる。

注1) 各国での小型原子モジュールの研究状況については参考文献4) 5) 6) を参照されたい。また、小型化のシナリオについては、参考文献7) が参考になる。

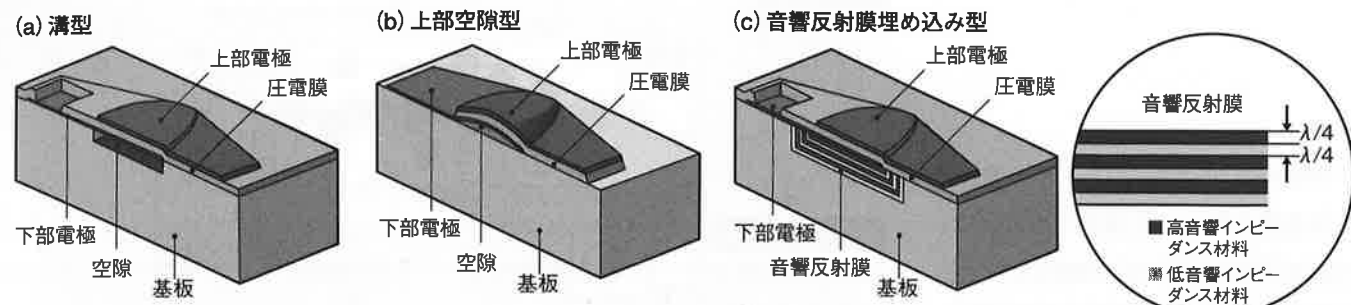


図3 BAW素子の構造例

BAWでは振動絶縁のために、様々な構造がある。例えば、(a)のように基板の掘り込みにより共振器の直下に空隙を形成したり、(b)のように基板に加工を施さず共振器を浮かすことにより空隙を形成したりする。また、(c)のように音響インピーダンスの極端に異なる2つの膜を $\lambda/4$ の厚さで交互に成膜し、音響的なブラッグ反射膜を形成することで共振器に振動エネルギーを閉じ込める構造も実用化されている。(図：筆者)

学素子を集積化することでレーザー光路を最適設計し、コンパクトな量子光学系の実現を目指した。そして、近年は、デジタル判別器の省略化にも着手している。以下、これらのアプローチについて紹介していく。

## 高周波発振器

### BAW素子採用でPLLを不要に

体積弾性波素子(BAW素子)は水晶など体積弾性波を利用した圧電振動子の総称であるが、水晶と差別化

するため、本稿ではこの定義を「圧電薄膜を用いた振動子」に限定して用いることとする。BAW素子は圧電薄膜を上下電極膜で挟んだ構造をしており、基本振動を強勢に得るため、この多層構造が基板から振動絶縁されている。代表的なBAW素子の構造を図3に示す。

BAW素子は携帯電話機のフロントエンドにて、送受信デュプレクシングを行うフィルター素子として広く活用されており、表面弾性波素子

(Surface Acoustic Wave: SAW素子)と比較して、2GHzを超えるような高い周波数帯で好適に利用される(図4)。CPT原子時計で活用される代表的なアルカリ金属元素であるルビジウム(Rb)とCsの時計遷移周波数を図4に書き加えると、BAW素子の利用帯域が原子時計の帯域に重なることがわかる。特にRbの周波数は実際の通信規格のそれと重なる。このBAW素子を共振器として活用し、原子時計用の発振器を構築すること

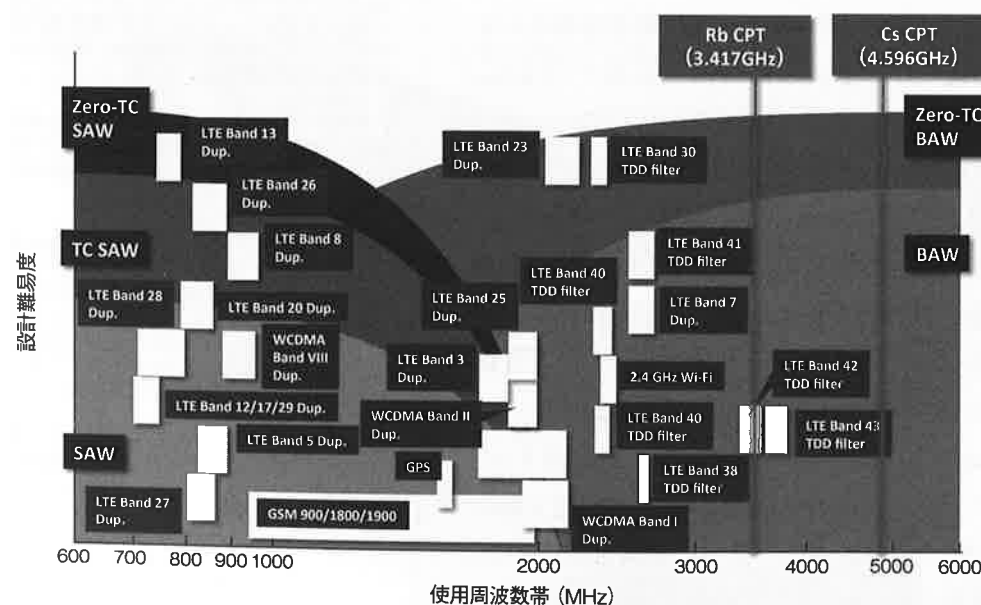
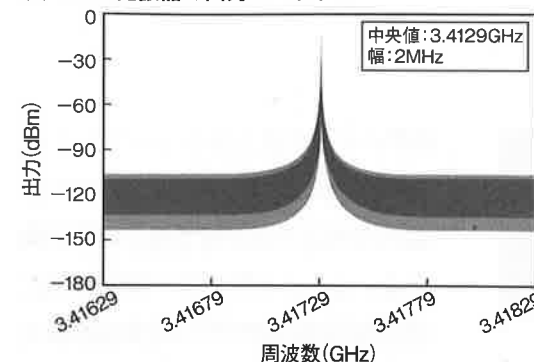


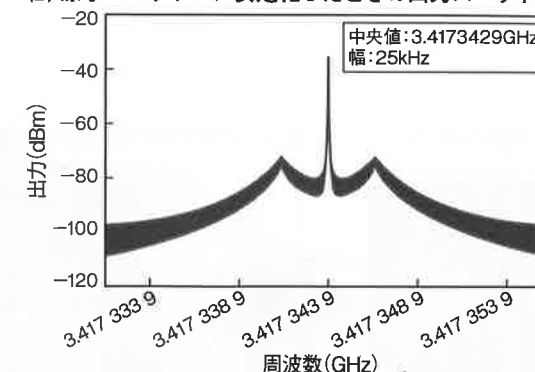
図4 SAW/BAW素子の通信システムにおける住み分けと原子時計の動作周波数との関係  
2GHz周辺以下ではSAW、以上ではBAWが適していると言われている。ただし近年の開発では、これに限らない。(図：筆者)

Dup.: Duplexer、複信器  
SAW: Surface Acoustic Wave、表面弾性波  
TC: Temperature Coefficient、温度特性  
TDD: Time Division Duplex、時分割多重

(a) BAW発振器の出力スペクトル



(b) 原子スペクトルに安定化したときの出力スペクトル



(c) BAW発振器の周波数安定度

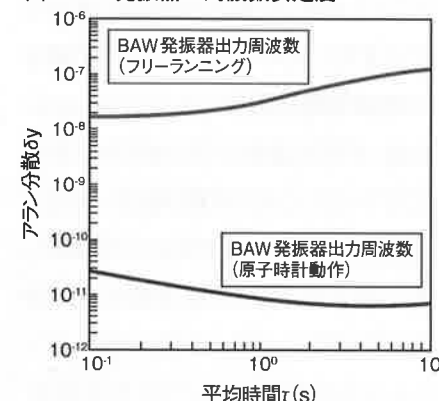


図5 原子時計用BAW発振器の特性

開発した素子の発振スペクトルでは、Rb原子時計で必要とされる3.417GHzの発振周波数を周波数通倍処理なしに実現している(a)。RbのCPT共鳴を用いて安定化を行うと、発振ピークが急峻となり、位相雑音も改善される(b)。発振の安定度の指標であるアラン分散では、原子スペクトルに安定化され、平均時間にもなって分散が減少していく様子が確認できる(c)。(図：筆者)

で、水晶発振器とPLLベースの周波数通倍器とを必要としない、新規の原子時計システムを、円滑に市場展開することが可能となる。

図5は我々が開発したBAW発振器の特性である。図5(a)は開発した素子の発振スペクトルである。Rb原子時計で必要とされる3.417GHzの発振周波数が周波数通倍処理なしに実現されている<sup>8)</sup>。図5(b)はRbのCPT共鳴を用いて安定化を行った場合の発振スペクトルである。測定スパンが大幅に狭まっていることに注目すると、発振ピークが急峻となり、位相雑音の改善が得られている<sup>9)</sup>。

図5(c)は、アラン分散による周波数安定度を評価した結果である。こ

こで、アラン分散は発振周期のばらつきを統計的に処理したもので、分散が小さいほど周期(周波数)が安定していることを示す。また、この分散が平均時間を増大させるのに伴って減少する場合は、発振器への安定化制御が有効に機能し、平均化効果で周期のばらつきが抑制されていることを示している。一方、増大していく場合は、周波数が定まらず、ずれていく(ドリフトする)様子を表している。本図では、フリーランニング状態のBAW発振器がドリフトしていくのに対して、BAW発振器を図2(a)のフィードバックシステムに組み込むことで、安定した原子時計動作が得られていることが確認される<sup>9)</sup>。



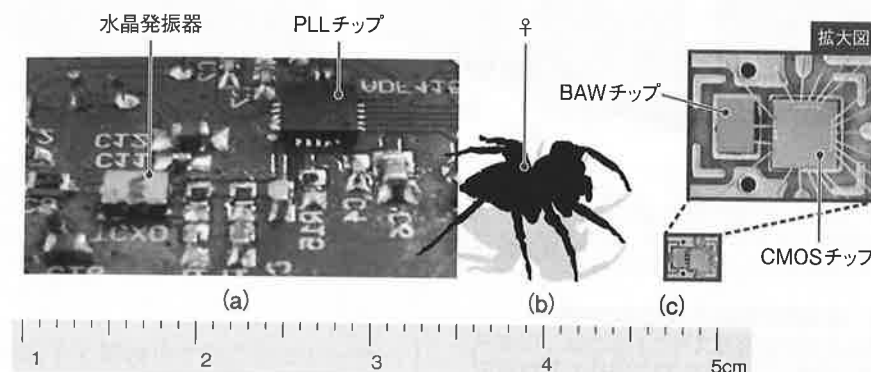


図6 原子時計用BAW発振器のサイズイメージ

水晶発振器をPLLを用いて通信処理を掛ける場合(a)と比較して、開発を行ったBAW発信器では大幅な小型化が実現できる(c)。なお、真ん中のクモ(b)は、ハエトリグモ(♀)で、日本で一般的に見られる巣を持たない徘徊性のクモである。発達した2つの愛らしい目が特徴的である。(図・写真:筆者)

図6は我々が開発したBAW発振器の写真である。サイズ比較のため、水晶発振器とPLLチップとで構成した原子時計用RF発振器の写真を付記した。本図より、BAW発振器のコンパクトさが実感される。

## 量子光学系 MEMSミラーで低背化

原子時計がチップ部品として受け入れられるには低背化の議論が必須である。小型原子時計モジュールの高さは、現状、cmオーダーであり、そのまま実装するとボードから突き出し、携帯機器のスマートな筐体デザインを損ねてしまう。

原子時計モジュールの低背化に向けたボトルネックは量子光学系にある。アルカリ金属元素を封入したセルを挟むように発光素子と受光素子とが対向配置される現行の実装方式

(図7(a))では、高さ方向のサイズ圧縮に限界がある。これに対し、我々は、MEMSミラーを内蔵した図7(b)のガスセルを開発した<sup>10)</sup>。本方式では、受発光素子を片面実装できるとともに、原子とレーザーとの干渉長を、ガスセルの厚さを増大させず、ミラーアレイだけで延伸させることが可能である。また、片面に集約された受発光素子は光集積回路としてワンチップにすることも可能である。MEMS技術を用いたミラーの内蔵は、高反射率な貴金属薄膜に対するアルカリ金属元素の高い反応性から、反射率の確保に課題があった。我々は、ミラーとして誘電体多層膜を活用して耐腐食性を確保し、高い反射率を実現した。これによって狭線幅なCPT共鳴の取得に成功し<sup>11)</sup>、原子時計動作の実測評価から、短期周波数安定度として $10^{-11}$ オーダーの特性を取得し

た<sup>12)</sup>。

将来的にガスセルは全固体化・薄膜化されることが望まれ、それに向けたいくつかの研究シーズがすでに報告されている<sup>13)14)</sup>。いずれの研究でも、炭素結晶中に原子(不活性な窒素原子が多い)が不対電子を維持したまま閉じ込められており、この原子の超微細構造遷移(Hyperfine splitting)を時計遷移として光学的に取得している。これらの技術は、製造コストや安定性の面でブレークスルーを必要とするものの、今後の発展が大いに期待される。

## デジタル判別系 よりシンプルなシステムループへ

デジタル判別器はロックイン増幅器によって実装される。従来は市販のマイクロコントローラーを用いてボード上に組み込まれるが、このままでは低消費電力化と小型化とに行き詰まる。ASIC(Application Specific Integrated Circuit)を活用する手段も想定されるが、その場合、市場の獲得と開発コストとの間でジレンマを抱えることとなる。

1つの解は、量子光学系を共振器と捉え、自励発振系を構築することである(図2(b))。これによってデジタル判別の工程自体が省略できる。ただし、自励発振系の構築には、新規に2つ技術開発を要する。1つはより高

コントラストに量子光学系から共鳴線を得る手法であり、もう1つは時計周波数を2分周してフィードバックする発振回路の開発である。

CPT共鳴はセルの透過光強度により観測されるため、バックグラウンド光の影響を受けやすく、高いSN比の確保が難しい。コントラストを向上させる手法として直交偏光子法と4光波混合法とが挙げられる<sup>15)16)</sup>。直交偏光子法は直線偏光レーザーが原子と相互干渉したときにわずかながら偏光方向を変化させることを利用したもので、原子へのレーザー照射を直線偏光で行い、検出器前段の偏光子の角度を調整することで、不要なバックグラウンド光を除去する。4光波混合法は、励起準位の異なる2つの3準位系において、2つのポンプ光 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ とプローブ光 $\lambda_3$ が注入されると、 $\lambda_4$ なる光が生成される現象を利用するものである(p.93の図A-1を参照)。この $\lambda_4$ を偏光子とガスセルを用いて単離することで、高コントラストな共鳴線が得られる。4光波混合法は高コントラスト化に非常に優れる一方、ガスセルと光源とをそれぞれ複数準備する必要があり、オンチップ化は容易ではない。

2分周発振回路はCPT方式固有の課題と言える。CPT共鳴に必要な2本のレーザーには、通常、単一レーザーへの周波数変調によって得られる

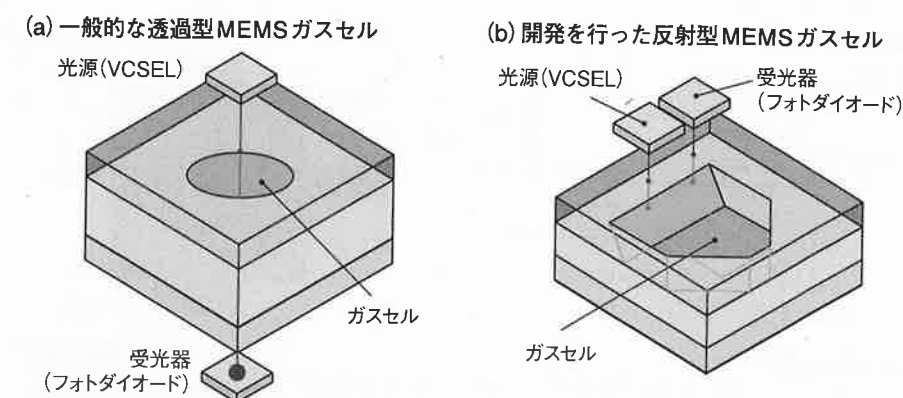


図7 MEMSガスセルの構成

これまでのガスセルは、発光部と受光部がガスセルを挟んで、積み上げるように配置されていたため、モジュールのコンパクト化が難しかった(a)。MEMSミラーを集積することで光路を自由に設計でき、よりコンパクトで薄型のガスセルを実現できるようになった(b)。(図:筆者)

サイドピークが充てられる。そのため、量子光学系から出力される時計遷移周波数に対して、半分の変調信号を入力する必要がある。我々は、現在、前述のBAW発振器への注入同期による分周を検討している(図8(a))。3GHz帯に共振周波数を持つBAW素子に6GHz帯の時計周波数を強制注入し、BAW素子の非線形性から2分周された3GHz帯の発振を得る試みである<sup>17)</sup>。すでに実際のデバイスにて、6GHz帯の信号注入に対して、3GHzの発振が得られることが確認されている(図8(b)、(c))。

## おわりに

原子時計の小型モジュール化は、2000年代のNISTからの衝撃的なレポートを起点に、世界各国で検討されることとなった。先行した米国でのプロジェクトは製造まで意識し、早い段

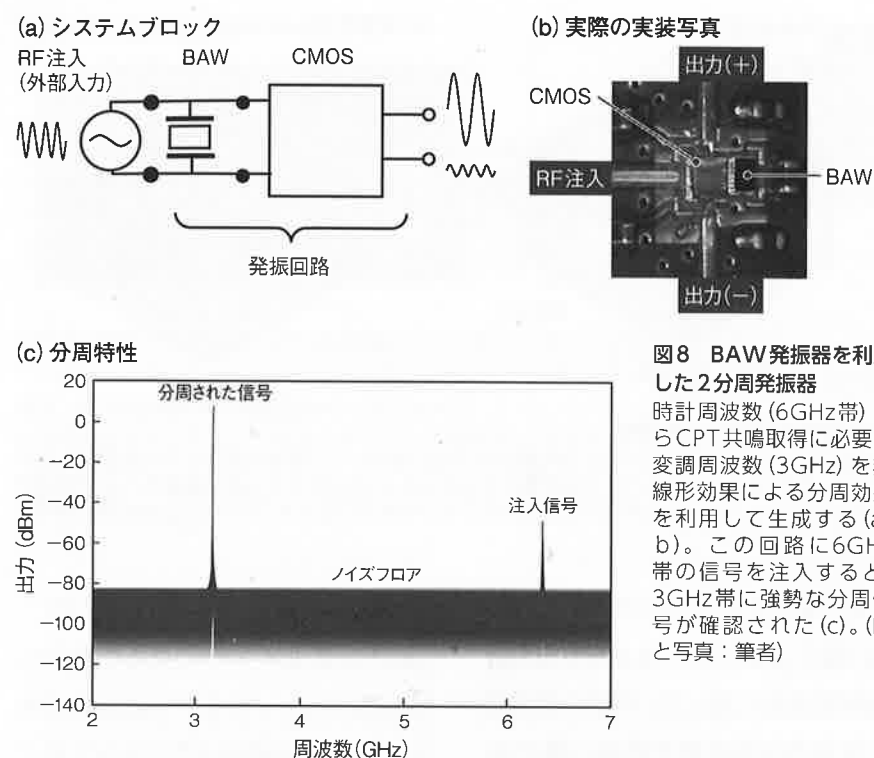


図8 BAW発振器を利用した2分周発振器  
時計周波数 (6GHz帯) からCPT共鳴取得に必要な変調周波数 (3GHz) を非線形効果による分周効果を利用して生成する (a, b)。この回路に6GHz帯の信号を注入すると、3GHz帯に強勢な分周信号が確認された (c)。(図と写真: 筆者)

階で企業間の競争が促された<sup>18)19)</sup>。市販化までの急峻な立ち上がりはここにも1つの要因があったように思われる。

本稿では、先行して開発された小型原子時計モジュールを要素に分け、個々に小型化・簡単化の方向性を示

し、NICTが大学などの研究機関と共に得た成果を中心に議論を進めた\*。今後の集積化・集約化のフェーズでは、熱や磁場の閉じ込めに配慮したパッケージ設計や、振動・放射線といった環境変数に対する耐性強化など、さらに多くの検討課題と向き合うこと

となる。これらに、多元的かつ、効率的に取り組むには、今までのように官学のプレーヤーだけでは限界があり、明らかにピースが欠けている。やはり、民間企業によるエンジニアリングが必要不可欠と考える。これは、米国の先行事例からも明白に感じ取られる。

NICTでは、本編で示した要素技術の開発に注力するとともに、企業、特に我が国の製造業が参画しやすい環境を整えている。原子時計動作の評価を目的としたテストベンチや、CPT共鳴の高速シミュレータの開発を実施し、これらを用いた開発環境を技術支援制度の一環としてオープンラボ化している。また、実際の部品供給で課題となる特殊材料の入手や組み込み部品の歩留り (スクリーニングコスト) 改善に向けた技術開発も行っている。

本稿を通じて、原子時計やその微細化技術に興味を持つ技術者・研究者または学生の輪が広がることを期待している。

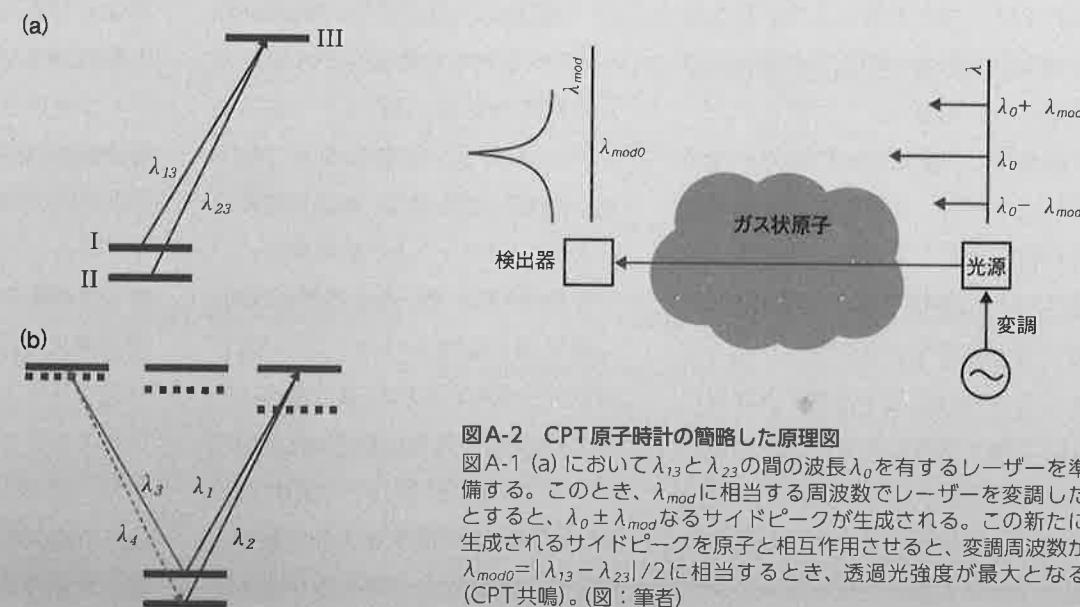
## CPT共鳴とそれを活用した周波数標準

量子論において、光と原子の相互作用が、電子軌道に由来する離散的なエネルギー準位で説明できることはよく知られている。Coherent Population Trapping (CPT) は図A-1 (a) に示すような特徴的なエネルギー準位 (3準位系) にて生じる一種の透明化現象である。3準位系において吸収による蛍光スペクトル中に狭線幅な暗線が観測されることが知られており、1970年代後半にはその現象の理論付けがなされた。理論の詳細にここでは立ち入らないが、現象だけを述べると、図A-1 (a) においてIとIIの準位への直接遷移が禁止されている場合、吸収はIからIII (波長 $\lambda_{13}$ ) とIIからIII (波長 $\lambda_{23}$ ) の2つの遷移のみで生じる。しかし、 $\lambda_{13}$ と $\lambda_{23}$ の光が同時に原子に照射されると、相互作用はキャンセルされ、蛍光現象も止まり、暗線が生じる。これがCPT現象である。

図A-2に示すように、図A-1 (a) の準位を有するガス状原子に2つのレーザーを照射し、ガスを挟んで対向する位置で光検出を行うとする。2つのレーザーの波長が $\lambda_{13}$ と $\lambda_{23}$ の近傍に

図A-1 CPT現象が観測される3準位系

(a) 時計遷移となる微細構造遷移 (I→II) の検出に励起準位IIIを利用することでCPT原子時計が実現される (a)。3準位系を多重に利用することで4光波混合が得られる (b)。(図: 筆者)



図A-2 CPT原子時計の簡略した原理図

図A-1 (a) において $\lambda_{13}$ と $\lambda_{23}$ の間の波長 $\lambda_0$ を有するレーザーを準備する。このとき、 $\lambda_{mod}$ に相当する周波数でレーザーを変調したとすると、 $\lambda_0 \pm \lambda_{mod}$ なるサイドピークが生成される。この新たに生成されるサイドピークを原子と相互作用させると、変調周波数が $\lambda_{mod} = |\lambda_{13} - \lambda_{23}|/2$ に相当するとき、透過光強度が最大となる (CPT共鳴)。(図: 筆者)

### 参考文献

- 1) N.Cyr et al., "All-optical microwave frequency standard: a proposal," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, vol.42, pp.640, 1993.
- 2) J.Kitching et al., "Miniature vapor-cell atomic-frequency reference," Appl. Phys. Lett., Vol.81(3), pp.553, 2002.
- 3) R.Lutwak et al., "The MAC-a miniature atomic clock," in Proc. IEEE IFCS 2005, pp.752, 2005
- 4) J.Haesler et al., "Swiss miniature atomic clock: First prototype and preliminary results," in Proc. EFTF 2012, pp.312, 2012.
- 5) J.Zhao et al., "Chip scale atomic resonator frequency stabilization system with ultra-low power consumption for optoelectronic oscillators," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control., Vol.63(7), pp.1022, 2016.
- 6) H.Zhang et al., "ULPAC: a miniaturized ultralow-power atomic clock," IEEE J.Solid-State Circuits, Vol.54(11), pp.3135, 2019.
- 7) R.Lutwak, "Principles of atomic clocks," in Tutorial Material of the IEEE IFCS 2011.

- 8) M.Hara et al., "Microwave oscillator using piezoelectric thin-film resonator aiming for ultraminiaturization of atomic clock," Rev. Sci. Instrum., Vol.89(10), 105002, 2018.
- 9) M.Hara et al., "Drift-free FBAR oscillator using an atomic-resonance-stabilization technique," IEEE IUS2019, pp.2178, 2019.
- 10) H.Nishino et al., "A reflection-type vapor cell using anisotropic etching of silicon for micro atomic clocks," Appl. Phys. Express, Vol.12(7), 072012, 2019.

- 11) H.Nishino et al., "A reflection type vapor cell based on local anodic bonding of 45° mirrors for micro atomic clock," in Proc. Transducers & Euro-sensors XXXIII, pp.1530, 2019.
- 12) Y. Yano et al., "Micro-device-technologies toward chip level integration of Microwave Atomic Clock System," in Proc IEEE IFCS2020, 2020.
- 13) J.S.Hodge et al., "Timekeeping with electron spin states in diamond," Phys. Rev. A, 87, 032118, 2013.
- 14) R.T.Harding et al., "Spin resonance clock transition of the endohedral fuller-

- ene  $^{15}\text{N}@C_{60}$ ," Phys. Rev. Lett., 119, 140801, 2017.
- 15) S.Knappe et al., "Advances in chip-scale atomic frequency references at NIST," in Proc. SPIE, Vol. 6673, 667307, 2007.
- 16) Y.Yano et al., "High-contrast coherent population trapping based on crossed polarizers method," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, Vol. 61 (12), pp.1953, 2014.
- 17) M.Hara et al., "Injection Locking Type 1/2 Frequency Divider Employing Piezoelectric MEMS resonator for

- Simplifying the Micro Atomic Clock System," in Proc IEEE MEMS 2020, pp.1195, 2020.
- 18) J.F.DeNatale et al., "Compact, low-power chip-scale atomic clock," in Proc. IEEE/ION Position, Location Navigat. Symp., pp. 67, 2008.
- 19) D.W.Youngner et al., "A manufacturable chip-scale atomic clock," in Proc. Int. Solid-State Sensors, Actuators, Microsyst. Conf., Jun. 2007, pp.39, 2007

\*本研究の一部は、総務省 戦略情報通信研究推進事業 (SCOPE)(195003003)の支援を受け、実施された。