

2-3-6 イーサクロック ——どこでも光格子時計——

Aetherclock: Optical Lattice Clocks Anywhere

香取秀俊

1. インフラ覇権争奪戦

度量衡を統一して交易を促進したことが秦の始皇帝の功績と学校で習っても実感はないが、社会に出れば、有効なプラットフォームを押さえることがビジネスや研究の成功の鍵と分かる。四半世紀前には、当時、一世を風びした PC-98 さえあればどんな実験もできる気がしたが、今ではその影もない。マイクロソフト、アップル、グーグルのプラットフォームで、世界中のパソコン、スマホが動く。ハードウェアがコモディティ化し、価格競争を迫られると、そこで日本が勝負するのは厳しくなる。

欧米諸国は時間研究に多くの資本を投じてきた。大英帝国のハリソンのクロノメータ開発による大航海時代の幕開けから、グリニッジ平均時 (GMT) へとつながる経緯は、時計による覇権の典型である。このデファクトスタンダードが協定世界時 (UTC) と名を変え受け継がれる。フランス革命の「メートル法」以来、フランスは度量衡の整備を率先し、その言葉はフランス語が貫かれる。国際単位系は SI (Le Système International d'Unités), 国際度量衡総会は CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures) という具合だ。

米ソ冷戦のさなか、DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) は原子時計を搭載した GPS (Global Positioning System) 衛星の整備を開始した。日常生活に浸透したカーナビやスマホナビは、この圧倒的傘下にある。この米国インフラへの一極集中を脅威と思うロシア、欧州連合、中国は自前の測位システム、GLONASS, Galileo, 北斗を整備し、これら総称して GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれ

る。日本も GNSS を補完する準天頂衛星「みちびき」を投入し始める。

DARPA は実に時計開発と市場形成の原動力である。2000 年初頭から圧倒的な研究資金注入で立ち上げた超小形・安価な CSAC (Chip Scale Atomic Clock) は、新たな小形原子時計の市場とニーズを開拓する。ICT の中核を担うインターネット技術も DARPA の前身が始めた ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) に端を発する。このような米国の先見性と戦略は驚異的だ。今度は、その ICT プラットホーム上でビジネスを成功させた企業が、量子コンピュータ、宇宙投資と、かつての国家事業だった次世代インフラ整備まで手掛ける激動の、アイデア次第の時代になった。

2. 半世紀ぶりの好機到来

普遍的な周期現象を見つけて万人で時間を共有するための道具が時計だった。20 世紀の半ばまで、時間は地球の自転で定義されてきたが、地球の自転は潮汐摩擦で遅くなる。天文観測の進歩は「天文学的・秒」があてにならないことを露呈させた (図 1)。

「物質の最小単位である原子の振動を基に 1 秒を定義すれば、普遍的な時間を実現できるだろう」太古の人々が天体の運行は不変であると信じたように、「物理定数は普遍」なはず、と期待する。1955 年、イギリスのエッセンはセシウム (Cs) 原子時計を発明した。この精度が当時の「天文学的・秒」に追い付くと、1967 年に Cs 原子の超微細準位間の固有振動を (ν_{Cs}) 9,192,631,770 Hz として 1 秒が定義される。当時の 1 秒と整合させるにはこの 10 桁の数字で十分だった。これが長足の進化を遂げ、今では 15 桁超の精度が国際原子時として共有される。

時計の不確かさは経過時間 t 当りの時間のずれ ($\Delta t/t$) で評価される。 $\Delta t=1$ s ずれるのに、最先端の Cs 原子

香取秀俊 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
E-mail katori@amo.t.u-tokyo.ac.jp
Hidetoshi KATORI, Nonmember (School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8656 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.100 No.11 pp.1303-1308 2017 年 11 月
©電子情報通信学会 2017

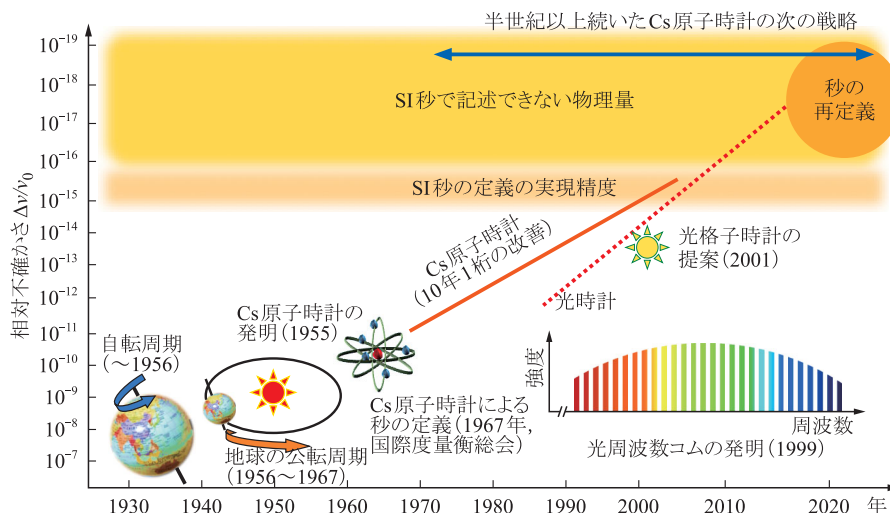


図1 秒の定義の変遷 「天文学的・秒」は、1967年に原子時計に取って代わられる。あと10年ほどで、秒の再定義が期待されている。

時計なら6,000万年、光格子時計なら300億年掛かる計算になる。この不確かさは、振り子の振動数 ν_0 の相対不確かさ $\Delta\nu/\nu_0$ で決まる。この測定不確かさ $\Delta\nu$ を原理的に決める「量子限界」は振動数 ν_0 によらないため、マイクロ波の固有振動数 ν_{Cs} の代わりに $\nu_0 \sim 5 \times 10^{14}$ Hzの光の振動を使えば、時計の精度($\Delta\nu/\nu_0$)は一気に4~5桁向上する。光の発振器「レーザー」の発明で、この光周波数を使う「光(原子)時計」が現実になる。1982年、デーメルトは(ポールが1950年代に発明した)ポール・トラップに捕まえた単一イオンの光遷移を観測する「単一イオン時計」の手法で18桁の原子時計の可能性を指摘し⁽¹⁾、光時計開発の端緒を開く。

原子時計で細心の注意を払うのは、原子運動を凍結してドップラー効果を排除するのはもとより、外場の摂動を受けない原子の固有振動数 ν_0 を測ることである。この観点から、単一イオンをトラップ電界のゼロ点に捕まえるポール・トラップは、摂動を与えずに原子をつかむ究極の容器だった。この完成度の高さが、新しい手法の開拓を尻込みさせた。デーメルト、ポールは1989年に、この単一イオン時計を実験的に完成させたワインランドは2012年のノーベル賞を受賞する。こうして始まった光時計開発は、半世紀続いたCs原子時計の時代に終止符を打とうとしている。

3. 原子に見えない光のかご——光格子時計——

原子の状態観測に伴う「量子雑音」のせいで、振り子の振動数を正確に決めるには時間が掛かる。デーメルトの単一イオン時計では、約1秒掛かる測定を($N=$)100万回繰り返して量子雑音を $1/\sqrt{N}$ に低減し、10日掛けて18桁の精度($\Delta\nu/\nu_0=10^{-18}$)にたどり着く。もし一度

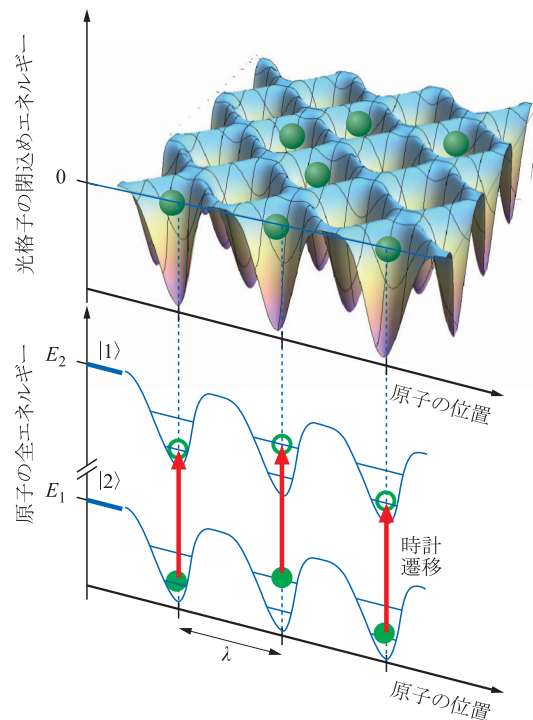


図2 光格子時計の構成 光の定在波によるシュタルクシフトを使って原子を閉じ込める。2状態でこれらの摂動を一致させ、相殺する⁽²⁾。(www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2017/02/72-02_trends.pdf)

に($N=$)100万個の原子を観測できれば、たった1回、1秒の計測で18桁の振動数を読み出せるだろう。これが光格子時計発明の皮算用である。狭い領域にクーロン反発するイオンを100万個も集めるのは難しいが、相互作用の弱い中性原子なら無理ではない。

中性原子を捕まえるには、原子の状態 $|i\rangle(i=1,2)$ はそ

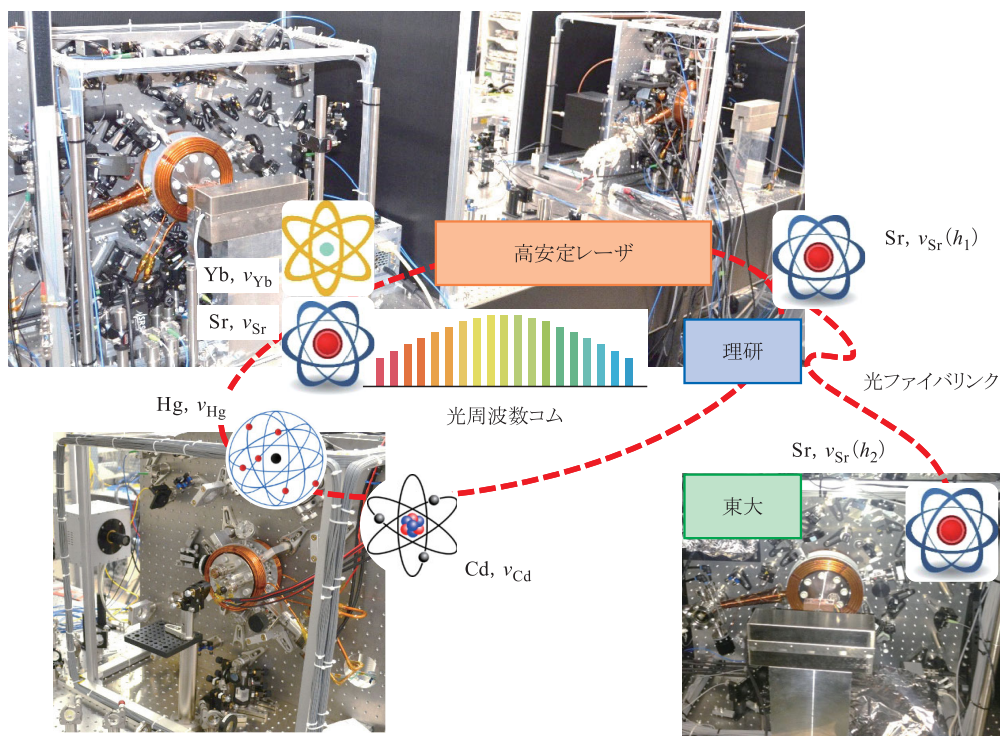


図3 光格子時計のネットワーク Sr, Yb, Hg, Cd 原子から成る異種原子・光格子時計群を構築する。これらの周波数比較は、物理定数の安定性の検証や、相対論的測地のセンサとして機能する。

それぞれ基底状態、励起状態に対応する) のエネルギー E_i を空間的に変化させればよい。レーザ光をミラーで折り返せば、電界振幅 $\mathbf{E}(\omega, \mathbf{r})$ が半波長周期で変化する定在波ができる。周波数 ω の電界中で、原子は分極し誘起双極子 $\alpha_i(\omega)\mathbf{E}(\omega, \mathbf{r})$ を生じる。この電気双極子が更に電界と相互作用することで、 $|i\rangle$ 状態エネルギーが

$$E_i' = E_i - \frac{1}{2} \alpha_i(\omega) |\mathbf{E}(\omega, \mathbf{r})|^2$$

と変化する。これは光シュタルク効果と呼ばれる。双極子分極率 $\alpha_i(\omega)$ が正のときには、定在波の腹の位置で原子のエネルギーは極小になり、原子が周期的に捕捉される「光格子」ができる。しかし、せっかく原子運動を凍結しても、遷移振動数 $(E_2' - E_1')/h$ (h はプランク定数) が空間的に変化する器では、原子時計には使えない。

原子の状態 $|1\rangle$ と $|2\rangle$ で分極率がちょうど同じ $\alpha_1(\omega) = \alpha_2(\omega)$ になる周波数のレーザ光で光格子を作れば、二つの状態で光シュタルク効果が打ち消し、原子の固有振動数 $\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$ を観測する光のかご (図2) ができる。この周波数 ω は、後に魔法周波数と呼ばれるようになる。摂動を排除する代わりに、上手くエンジニアリングする対象と捉える逆転の発想だった。

2001年に原子時計の国際会議⁽³⁾で発表したこの「光格子時計」は、光の定在波に閉じ込めて運動を凍結した

100万原子の同時観測を可能にする原子時計の新しいプラットフォームになった。

ストロンチウム (Sr) 原子を用いた最初の実証実験を行った2003年以降、光格子時計の開発は急速に広まった。2006年には秒の再定義の有力候補である「秒の二次表現」の一つとして採択され、現在では30近いグループが高精度化にしのぎを削る。2015年の国際度量衡委員会は、世界7グループの測定結果の加重平均から、Srの振り子の振動数 ($\nu_{\text{Sr}/\text{Cs}} = 429,228,004,229,873.2(2)$ Hz) を勧告した。この16桁の数字は現行の1秒の定義の実現精度だけで制限され、Cs原子で1秒が定義された1967年と瓜二つの状況になった。

光学テーブルに高さをそろえて作った2台の光格子時計を比較すると、18桁目まで振動数が一致する⁽⁴⁾。これは自明な最初の一歩である。時空間の構造や、新しい物理に迫るには、[異なる場所の] 原子や [異種の] 原子の振り子を比較する「光時計のネットワーク」(図3)が必要になる。光周波数の周波数カウンタ「周波数コム」の発明のおかげで、基準のクロック精度次第で20桁の周波数さえ計測可能である。

もはや、15桁しか保証しないセシウム原子時計の基準 ν_{Cs} では、最先端の物理にアクセスできない。Sr原子の振動数 (ν_{Sr}) を基準にして、水銀 (Hg) 原子、イッテルビウム (Yb) 原子の振り子の振動数 ν_{Hg} , ν_{Yb} を $R_{\text{Hg}/\text{Sr}} = \nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$, $R_{\text{Yb}/\text{Sr}} = \nu_{\text{Yb}}/\nu_{\text{Sr}}$ として測定すれば、精度

の上限は ν_{Sr} が決める 18 桁になる。この周波数比 R は、いつどこで測っても同じ値を示すだろうか？もし物理定数が時間的に、あるいは空間的に変化していればその限りではない。超高精度原子時計は、新しい物理を探るセンサとして機能し始める。

この周波数比 R は、現行の SI 秒の制限なしに、研究者の努力次第で幾らでも精度を上げられる⁽⁵⁾。とは言え、「いずれ精度向上の勢いが鈍る時期」が秒の再定義のタイミングとされる(図1)。これは周波数比 R を測定する共通の分母を決める作業にほかならない。例えば、 ν_{Sr} を分母にとった比 $R_{Yb/Sr}$ を測れば、先述の Cs 原子時計で測った Sr の振り子の振動数 ($\nu_{Sr/Cs}$) を使って、Yb 原子の振動数は $\nu_{Yb} = R_{Yb/Sr} \times \nu_{Sr/Cs}$ として現行の SI 秒と矛盾なくつながる。どの原子が分母に置かれるだろう？このタイミングは、早すぎると定義が不安定になるし、遅すぎても役立たない。およそ 10 年後と見込んで、検討が始まっている。

4. 時空間のゆがみを探る時計

理研(埼玉県和光市, 標高 35.6 m) の時計と、15 km 離れた東大(東京都文京区本郷, 標高 20.5 m) の時計の振り子の振動数を比べると、東大の振り子が僅かにゆっくり振動するのが見えてくる⁽⁶⁾。これは重力が強い場所ほど時間がゆっくり進むと予言するアインシュタインの一般相対論の効果である。重力加速度 g の地表近傍で高低差 $\Delta h = h_2 - h_1$ にある 2 台の時計は、 c を光速として

$$\Delta\nu/\nu = g\Delta h/c^2 \approx 1.1 \times 10^{-18} \Delta h/\text{cm}$$

だけ振動数がずれる。つまり時計は 2 地点間の重力ポテンシャル差 ($g\Delta h$) 計として機能する。18 桁の時計なら、

片方の時計を地面に僅か数 cm 近付けるだけで、ゆっくり進む時間を表示する。時間を共有するための道具が、重力でゆがんだ時空間を探るセンサに変貌する。ダリがアインシュタインの相対論に靈感を受けて描いた、重力でカマンベールチーズのようにゆがむ地上の時計は、額縁をはみ出して現実の景色になった。

こうして相対論的な時空間のゆがみが日常のスケールに顔をのぞかせると、かつてロケット実験だった相対論の検証が地上実験になる。1980 年代、NASA は当時の最高精度原子時計(水素メーザ)を高度 1 万 km に打ち上げ、時計の重力赤方偏移と一般相対論の予言を 1.4×10^{-4} の精度で検証した。今や、僅か 15 m の標高差の東大—理研の光格子時計が 3×10^{-3} の精度で相対論を検証する。18 桁精度の光格子時計を東京スカイツリーの 450 m 展望台と地表で比較すれば 2×10^{-5} で相対論を検証し、ロケット実験を一桁凌駕する。更に富士山頂 3775.51 m の赤方偏移を読めば、 2.6×10^{-6} の検証になる。地上の僅かな凸凹が相対論検証のテストベッドになる(図4)。

5. 時計のインターネットと非同期時計

さて、半世紀で圧倒的進化を遂げた原子時計—光格子時計—をどのように使おう？重力でゆがんだ地上では、異なる場所で同じ時間を共有するのは難しいと相対論が教えてくれる。他者の時計をのぞき見れば、両者の重力ポテンシャル差から、相対論的測位ができる。一方、桁違いの精度は、ICT の中核技術であるタイミング同期にも新たなシステムデザインを迫るだろう。

5.1 時計はセンサ、クラウド展開

2 台の時計の振り子を比較するとき、相手の時計が速度 v で遠ざかると、ドップラー効果により振り子の振動

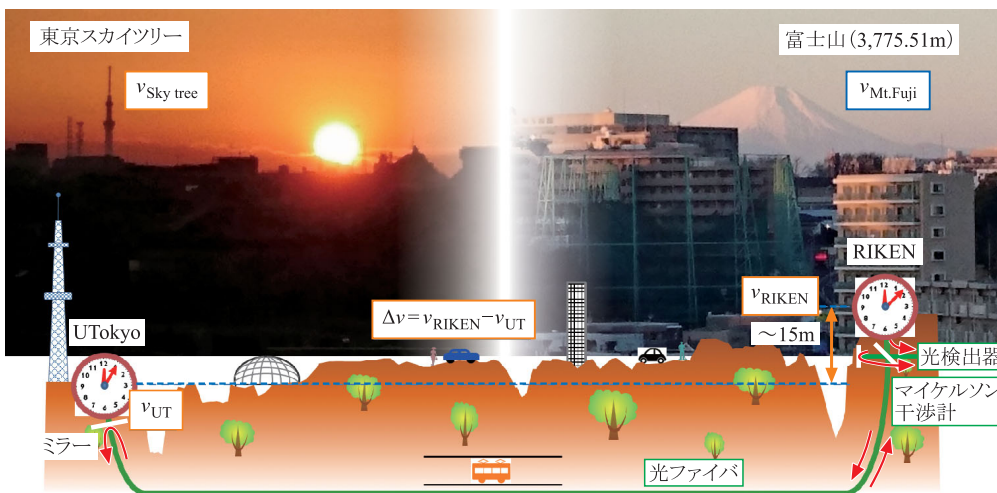


図4 光ファイバで時計を高精度につなぐと時空間のゆがみが見える

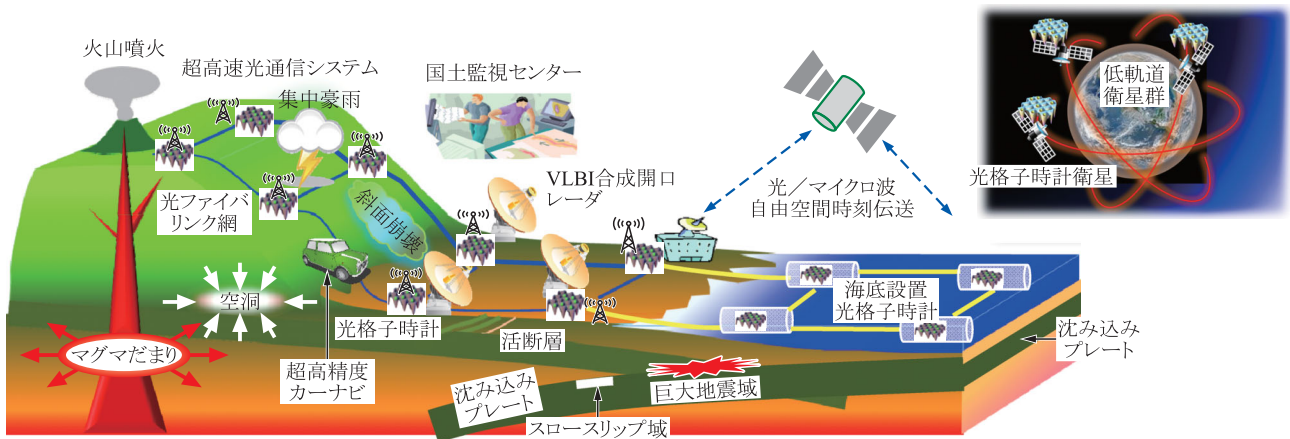


図5 光格子時計ネットワークは地上でも宇宙でも有効なクラウドセンシングになる

数は v/c だけ低くなる。これを 18 桁に抑えるには、 $v < 300 \text{ pm/s}$ が必要になる。大気中で光を伝送すると、時間・空間的な屈折率 $n(\mathbf{r}, t)$ 揺らぎが光路長を変動 ($dn(\mathbf{r}, t)l/dt$) させて比較精度が劣化する。光ファイバ中ならこのじょう乱はずっと少ないが、ファイバが伸びれば相手の時計が遠ざかりドップラー効果が生じる。相手に伝送した光の一部を同じファイバを使って戻して作るマイケルソン干渉計でファイバの伸びを読み出して、ファイバ長を一定にするサーボを組んで実験が始まる。このような「安定化・光ファイバ」の構築が、光時計ネットワークの第一歩だ (図4)。

安定化・光ファイバでつながれた光格子時計ネットワークは、時計間の標高差を読み出す「量子水準点」になる。水準測量と違い、測量距離 L に対する累積誤差 \sqrt{L} を生じない上に実時間性があるのがいい。たとえ 1,000 km 離れても、時計精度だけで決まる cm の不確かさで高低差 Δh を読み出せる。これほど離れた 2 点間で、実時間で標高差を読み出すと、地球の柔らかさが見えてくる。東京—九州の時計をつなげば、月や太陽の潮汐効果で、6 時間ごとに 14 cm の相対的な浮き沈みが見えるだろう⁽⁴⁾。

ヨーロッパでは、光時計の新時代を見越した安定化光ファイバの整備を大々的に始めた。ドイツ・ブラウンシュバイクからフランス・パリに至る 1,000 km のファイバリンクを完成させて光格子時計の比較実験を行い⁽⁷⁾、更にファイバをイギリス・ロンドン、イタリア、ポーランドに延伸する。イタリア、ポーランドでは既に国を縦断する光時計リンクを完成させた。時計リンクによる相対論的測位は、地続きのヨーロッパでは水準測量の体系化に有効だろう。そして何より、欧州一丸となつての秒の再定義の猛アピールである。

全地球を 30 余台の原子時計で監視しようとした 40 年前とは時代が違う。既存の半導体レーザ、エレクトロニクスと原子でできる光格子時計を安く量産し、地球を取

り巻く「イーサークロック」を、更に、それらを光ファイバでつなげて「時計のインターネット」を作ろう (図5)。重力ポテンシャルを実時間でマッピングする量子水準点ネットワークは、地殻や地下水の変動、マグマだまりの移動など、実時間で地下の構造を観測するクラウドセンサとして機能する。GNSS でアクセスできない海底変位のセンシングにも有効だろう。電離層と大気じょう乱の影響を免れた地上の星 (= 光格子時計) を見ながらの自動運転も当然可能になる。

大気じょう乱のない静かな宇宙環境では、自由空間伝送も視野に入る。地上インフラなしに、世界中でインターネット環境実現を目指す低軌道通信衛星 (LEO, Low Earth Orbit) が現実味を帯びてきた。その外周に、複数の光格子時計を飛ばせば、LEO のマスタクロックに使えるだろう。LEO を地球の重力環境のテストマスと思えば、地球の重力環境のクラウドセンシングになる。インターネットの宇宙進出の勢いに乗れば、光格子時計衛星 + LEO 群が GNSS に取って代わる時代だって来るかもしれない。

5.2 非同期時計

GNSS さえ見れば、容易に Cs 原子時計の精度にアクセスできてしまうのが落とし穴だ。これを頼りに高精度同期システムを構築してしまうと、GNSS にアクセスできなくなった途端にシステムが破綻する。他国のジャミング、太陽フレア等、無線通信は常にせい弱さをはらむが、手元に数多の原子時計があれば安心だ。18 桁の高精度時計の分散システムは、堅牢な時間インフラを提供する。時計の一つが故障しても、ファイバでつながった隣の時計を見ればいい。

300 億年で 1 秒の精度は何の役に立つの? と思うだろうが、例えば、40 GHz でデータをやりとりする光通信システムなら、25 ps のタイミングジッタが致命的だ。18 桁精度の基準クロックなら、非同期でも 1 年弱

($\approx 25 \text{ ps}/10^{-18}$) は同期が保たれる。今の通信ネットワーク同期のプロトコルは、その策定当時 (1988 年) の商用原子時計スベック (11 桁) を想定するが、この前提が 7 桁違えば、全く違うシステム最適化が可能だろう。

同じ光を分割しないとヤングの干渉じまは見えないと思っていたのはもう過去のこと、2 台の光格子時計から出る光の干渉じまはぴくりとも動かない。光格子時計をアンテナの脇に置いて基準クロックにすれば、開口合成で分解能を稼ぐ VLBI (Very Long Baseline Interferometry) や開口合成レーダに役立つし、その光領域版だって可能だろう。デジタルコヒーレント通信も、中継局に光格子時計と光周波数コム、周波数グリッドがあれば、提案当初のコヒーレント光通信に先祖返りするだろう。局発光の位相を追い掛けるハイテクのデジタル処理の負担は激減し、その分のリソースを他の処理に使えばいい。

6. エンジニアリングとサイエンスの協奏

今実験室で出来立ての光格子時計は、複数のレーザー光がミラーで曲げられ空間中を飛び交う、真空管の時代の立体配線のラジオさながらだ。原理検証さえできれば、あとは日本の得意な高度・実装技術の出番である。真空管テレビがフルセグ・スマホに進化したこの半世紀を思えば、実験室の光格子時計が、スマホサイズになっても不思議はない。ターゲットの市場さえあれば、日本の技術力に怖いものはない。今まで惜しいのは、いい‘もの’を作ってもその‘もの’で成り立つ強力なビジネスプラットフォームを手中に収めなかったことだ。

GPS カーナビ、インターネット、Google マップなどインフラの便利さを享受したときにはもう手遅れだ。世界を巧みに取り込むインフラを構築する勝負に出よう。[GPS+Google マップ=自動運転] の図式がにわかには想像できなかった昔のように、光格子時計の 20 年後に思いを馳せるにも、相当のナンセンスさが肝心だ。そんなのビジネスにならないと、今は鼻で笑われるようなオーバスペックな箱がいい。iPhone が全てのアプリを飲み込んで、なお進化を続けるように、人類社会・情報社会の根底を握る時間インフラはきっとその上に全てのビジネスアプリを吸収する。イーサネット、デジタルコヒーレント通信など、今の主流はタイミング非同期、周波数精度に頼らないシステム最適化だが、どこでも高精度クロックにアクセスできる「イーサークロック」環境は、この設計指針を一気に変えるゲームチェンジャーになる。

まずは光ファイバがちゅう密に張り巡らされた日本で「時計のインターネット」を展開し、次世代の相対論的時間インフラのテストベッドにしてみたい。国内需要を喚起して、産業界挙げて光格子時計開発に取り組めば、

海外ユーザは安くして便利な既存技術として購入するのが早い。(裏を返せば、これはハイスベック原子時計を導入に頼る日本の現状である。) こうなればしめたもの、デファクトスタンダードとビジネスプラットフォームが出来上がる。これは‘もの’を配って、代わりに最上位の情報である時間情報を手中に収める、究極の IT 戦略である。

19 世紀末ドイツ鉄鋼業の要請で、高炉を眺める中で光量子が見つかり、今の量子の時代が到来した。Curiosity driven に誕生した光格子時計を、工学要請をてこに進化させよう。異種、同種の高精度原子時計ネットワークは、宇宙を満たすどんなエーテルを見つけるだろう⁽⁸⁾。こうした科学と技術の協奏は、知のらせん階段を押し上げる原動力である。新しい時計は、時間を共有・確認し合う道具から、時空のゆがみを利用し、物理の常識に挑むセンサへと時計のパラダイムシフトを加速する。

文 献

- (1) H.G. Dehmelt, "Mono-ion oscillator as potential ultimate laser frequency standard," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-31, no. 2, pp. 83-87, 1982.
- (2) 香取秀俊, "光格子時計—シュタルク効果をエンジニアリングする—(現代物理のキーワード)," 物理学誌, vol. 72, no. 2, pp. 84-85, 2017.
- (3) H. Katori, Spectroscopy of Strontium Atoms in the Lamb-Dicke Confinement, p. 323-330, World Scientific, 2001.
- (4) I. Ushijima, M. Takamoto, M. Das, T. Ohkubo, and H. Katori, "Cryogenic optical lattice clocks," Nature Photonics, vol. 9, no. 3, pp. 185-189, 2015.
- (5) N. Nemitz, T. Ohkubo, M. Takamoto, I. Ushijima, M. Das, N. Ohmae, and H. Katori, "Frequency ratio of Yb and Sr clocks with 5×10^{-17} uncertainty at 150 seconds averaging time," Nature Photonics, vol. 10, no. 4, pp. 258-261, 2016.
- (6) T. Takano, M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Akatsuka, A. Yamaguchi, Y. Kuroishi, H. Muneke, B. Miyahara, and H. Katori, "Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks," Nature Photonics, vol. 10, no. 10, pp. 662-666, 2016.
- (7) C. Lisdat, G. Grosche, N. Quintin, C. Shi, S.M.F. Raupach, C. Grebing, D. Nicolodi, F. Stefani, A. Al-Masoudi, S. Dorscher, S. Hafner, J.L. Robyr, N. Chiodo, S. Bilicki, E. Bookjans, A. Koczwar, S. Koke, A. Kuhl, F. Wiotte, F. Meynadier, E. Camisard, M. Abgrall, M. Lours, T. Legero, H. Schnatz, U. Sterr, H. Denker, C. Chardonnet, Y. Le Coq, G. Santarelli, A. Amy-Klein, R. Le Targat, J. Lodewyck, O. Lopez, and P.E. Pottie, "A clock network for geodesy and fundamental science," Nat Commun, vol. 7, pp. 12443, 2016.
- (8) A. Derevianko and M. Pospelov, "Hunting for topological dark matter with atomic clocks," Nature Physics, vol. 10, no. 12, pp. 933-936, 2014.

(平成 29 年 6 月 26 日受付 平成 29 年 7 月 12 日最終受付)



香取 秀俊

昭 63 東大・工・物工卒。平 3 同大学院博士課程中退。平 6 論文博士。マックスプランク量子光学研究所客員研究員。平 11 東大・工・助教授。平 22 同大学教授。平 23 理化学研究所・香取量子計測研究室・主任研究員。平 24 朝日賞。平 26 紫綬褒章。平 27 日本学士院賞など各受賞。