NICTでのSr光格子時計開発とクロックレーザー用新型光共振器の設計

井戸 哲也, 山口 敦史, 小出 美知

(独)情報通信研究機構 光・時空標準グループ (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

A Sr Lattice Clock at NICT and A Design of An Optical Cavity to Stabilize Clock Lasers

Tetsuya IDO, Atsushi YAMAGUCHI, and Michi KOIDE

Space-Time Standards Group, National Institute of Information and Communications Technology,
4-2-1 Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

(Received February 25, 2010)

An ^{87}Sr lattice clock has begun to work in NICT (National Institute of Information and Communications Technology). The obtained spectral width of high resolution spectroscopy was 1.2 kHz (full-width-half-maximum) and absolute frequency agreed with the frequency recommended by CIPM. In addition, a novel design of rather long high-finesse optical cavities to stabilize clock lasers is proposed. The variation of cavity length caused by vibrations was reduced by optimizing various dimensions of the cavity, resulting in the projected vibration immunity in the same level as state-of-the-art 10 cm cavities.

Key Words: Optical frequency standard, Lattice clock, Clock laser, Optical cavity, Laser stabilization

1. 歴史的転換点にある周波数標準

科学技術のひとつの目的は自然をある程度制御・利用することによって我々の生活水準を上げることにある。これを実現するための第一歩はまず自然の状態を知ることであるが、その際には状態を定量的に把握することが肝要である。定量的に状態を把握する作業がいわゆる計測であるが、次元のある物理量を測定する場合通常行っている作業は計測される量と、既知の信頼できる量との比率を出しているに過ぎない。この測定の基礎となっている既知の信頼できる量を供給する技術こそが「標準」技術であり、科学技術の大きな基礎を形成している。

周波数標準は通常孤立原子の量子遷移の共鳴周波数に求められるが、得られる精度が他の物理標準に比べて圧倒的に高いため、多数の物理標準や精密計測は測定量を時間に変換することによって精度を実現している。そしてこの標準の中の標準とも言われる周波数標準は実は現在歴史的な転換点にさしかかっている。現在の時間標準である“1秒”はセシウム原子の基底状態における超微細構造準位間の共鳴周波数によって1967年に定義され、それ以来周波数標準の確度は年々向上し、90年代には原子泉方式を利用することによって大きく進歩して現在では 4×10^{-16} に到達している。しかし、この確度は時計の動作を10日間以上に渡って行いその平均を取ることによってようやく得られるため、現状のまま確度を改善するには系統誤差の評価等に膨大な測定時間が必要になる。ま

た原子数の増加もしくは飛行時間の延長で安定度を上げて測定時間を短縮する試みについても大きな衝突シフトによる確度の劣化を伴うために最終的な確度の改善になかなか寄与しないのが現状である。一方でこの状態を予見して、周波数がより高い原子の光学遷移にその標準を求める研究がレーザーの発明時より精力的に行われてきており、さらには前世紀末の光周波数コムが発明により光学遷移においてその周波数を現行のCsによる定義に基づいて計測することが可能となり、新たに光学遷移にて国際単位系の1秒を再定義する際の過去との連続性が担保された。そして今世紀に入りついにCs原子泉時計を超える光時計が現実の物となり、秒の再定義が時刻周波数標準の研究者の間で真剣に議論されつつある。光領域での秒の再定義についての議論は、一般にはCsでなくどんな原子もしくはイオンを利用するのか、という話題になる傾向にある。しかし、その際には新たな高性能標準による利益を享受するには同時に周辺技術の改善も強く要請されることを頭に置きたい。具体的な関連技術としては、雑音を付加することなく光からマイクロ波に周波数変換する技術、離れた2点間の時計の周波数を比較する技術等である。とりわけ周波数を比較する技術は標準開発の本質を表している。通常我々が計測する場合は非測定物よりも安定なものさしで測定するが、最も性能が高いものさしの性能を測定する場合には、より安定なものさしは存在しないため、我々に出来る最善の手段は同一性能のものさしでお互いの相対的な関係を測定し

てその信頼性を確認することであり、これこそが比較なのである。

さて、話を戻して、Csの超微細構造間のマイクロ波遷移の代わりにどの光学遷移を利用するか、という観点では現在イオン時計と中性原子による光格子時計に大きく分けることが出来る。イオン時計については80年代より欧米の研究所を中心に開発が進められてきたが、光格子時計については東大の香取教授が提案・開発した日本発の技術であり、本稿の筆者の一人である井戸も開発初期のストロンチウム原子のレーザー冷却実験において苦楽を共にし、また米国にて光格子時計の普及を図っただけに親近感を抱くところではある。しかし、最も分かりやすい時計の性能を表す指標である確度については現時点でNISTが開発している Al^+ や Hg^+ の単一イオン時計に及ばない。このような現実を踏まえ、現在NICTではSr光格子時計・ Ca^+ 単一イオン時計双方の開発を進めており、単一イオン時計についてはより将来性の高い In^+ による時計に徐々にシフトしていく予定である。単一イオン時計については松原による別稿を参照頂くとして、ここでは光格子時計についてその実験的な詳細及びNICTでの開発状況を報告し、また光格子方式・単一イオン方式を問わず、現在の光周波数標準開発におけるボトルネックとなっているクロックレーザーを安定化するための光共振器についてNICTで開発されつつある新型共振器の設計を紹介する。

2. Sr光格子時計—NICTでの開発の状況—

ストロンチウム(Sr)原子を使った光周波数標準は、遷移の自然幅が約10 MHzと極めて狭い $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ 遷移の、無摂動状態での遷移周波数を利用する。この遷移 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ (時計遷移と呼ばれる、Fig. 1参照。)は本来禁制遷移であるが⁸⁷Srは核スピン($I=9/2$)を持つため超微細結合が生まれ、非常に弱くではあるが遷移が可能になっている¹⁾。

Sr原子の時計遷移に対する魔法波長は、およそ813 nmであることが実験的に確かめられている²⁾。本実験でもこの波長のレーザーを使って光格子ポテンシャルを作り、そこにトラップされた⁸⁷Sr原子の時計遷移を分光している。光格子ポテンシャルのポテンシャル深さは、温度にして30 μK 程度である。したがって、光格子ポテン

シャルにSr原子をトラップするためには、ポテンシャル深さよりも十分低い温度までSr原子を冷却する必要がある。

Sr原子は常温での飽和蒸気圧が低いため、まずは温度600 $^{\circ}\text{C}$ 程度のオープンでSr蒸気を生成し、原子ビームを生成する。次に、この原子ビームに対向する方向から、強い遷移 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$ (Fig. 1参照)に共鳴したレーザーを照射し、その強い輻射力により原子ビームを減速する。この際、周波数を共鳴から800 MHzほど負に離調して自由空間におけるドップラーシフト分を補正する。加えて、オープンからトラップチャンバーまで空間的に磁場に勾配をつけることで、減速に伴うドップラーシフトの変化をゼーマンシフトで補い、原子に対して常にレーザーが共鳴するようにしている(ゼーマン減速法)³⁾。

こうして減速された原子は、トラップチャンバーの中心に到達し、そこに用意された磁気光学トラップ(MOT)に捕獲される⁴⁾。MOTとは、アンチヘルムホルツコイルが生成する磁場勾配中で原子に対して6方向からレーザー光を照射することで、原子を冷却しつつ磁場の零点に空間的にトラップする手法である。本実験では、最初に強い遷移 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$ (自然幅32 MHz)を用いたMOTに原子をトラップしている。強い遷移を用いたMOTでは、到達可能温度は2 mK程度で 10^6 個程度の原子を捕獲することが可能である。これらの原子をさらに冷却するため、冷却遷移を到達可能温度のより低い、弱い遷移 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$ に切り替えて再捕獲する⁵⁾。これにより、原子は2 μK 程度にまで冷却され、深さ30 μK 程度の光格子ポテンシャルで原子を捕獲することが可能となる。以上の手順により、我々はおおよそ 10^4 個の⁸⁷Sr原子を一次元光格子ポテンシャルに捕獲している。

一方、線幅の極めて狭い時計遷移の周波数を精密に測定するためには、時計遷移励起用のレーザー(クロックレーザー)の周波数を可能な限り安定にする必要がある。Sr原子の場合、時計遷移の波長は698 nmである。この波長は半導体レーザーで安価に直接出すことが可能であり、高い周波数安定度については半導体レーザーの周波数を高フィネス($F \sim 300,000$)の外部共振器に安定化して実現している。この外部共振器は、空気ゆらぎ、および床からの振動によるミラー間隔の不安定性を取り除くため、真空槽内に入れられた上で、精密除振台(共振周波数0.5 Hz)に設置されている。さらに、共振器のミラー間隔を決めているスペーサーには超低熱膨張ガラスを用い、その温度ゆらぎを $\pm 500 \mu\text{K}$ 以下に精密にコントロールし、長期の周波数安定度も向上させている。

Fig. 2に本実験のクロックレーザー(698 nm)と冷却サファイア発振器(Cryogenic sapphire oscillator, CSO)との周波数安定度を比較した結果を示す。クロックレーザーの周波数安定度は、ある測定時間 τ に対する安定度を表すAllan deviationと呼ばれる指標を用いて評価されることが一般的である。Fig. 2では横軸が平均化時間 τ 、縦軸がAllan deviationである。CSOとはサファイア結晶内のwhispering gallery modeを利用した発振器で、結晶を10 K以下の低温に置くことによってマイクロ波域での究極の

Fig. 1 Relevant energy level diagram of strontium atoms.

Fig. 2 Instability of the 698 nm clock laser obtained by the comparison against a cryogenic sapphire oscillator.

周波数安定度を実現しており、図中の丸点のデータがCSO自身の安定度を表す。観測された我々のクロックレーザーの安定度(図中、四角)は、CSO自身の安定度よりも十分大きいことを考えると、クロックレーザー自身の安定度を表しているといえる。クロックレーザーの安定度は平均化時間20秒でおよそ 5×10^{-15} に達しており、現在の安定度でもHzレベルでの時計遷移の周波数測定は可能である。しかし、クロックレーザーの安定度の限界を決めると考えられているミラーの熱雑音・共振器の機械振動に起因する安定度のレベルは 10^{-16} 台後半であると予測され、さらなる安定度の向上を目指し、現在も装置の改良を行っている。

以上で、一次元光格子ポテンシャルにトラップされた ^{87}Sr 原子、およびその時計遷移を観測するための安定なクロックレーザーがそろった。以下では、 ^{87}Sr 原子の時計遷移 $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$ の分光実験の結果を述べる。実験では、クロックレーザーを光格子ポテンシャルにトラップされた ^{87}Sr 原子に照射した後、強い遷移 $^1\text{S}_0$ - $^1\text{P}_1$ に共鳴したレーザーを照射し原子からの発光を観測した。クロックレーザーが時計遷移に共鳴すると、原子は励起状態 $^3\text{P}_0$ に励起されその準位にとどまるため、強い遷移に共鳴したレーザーを吸収しなくなり発光も観測されなくなる。すなわち、本実験では時計遷移の励起は発光の減少として観測される。

Fig. 3が本実験で観測された時計遷移のスペクトルである。横軸はクロックレーザーの周波数(観測された共鳴の中心を0としている)、縦軸は原子からの発光強度である。観測されたスペクトル線幅は1.2 kHzであった。これは残留磁場により、基底状態および励起状態の超微細構造がゼーマン分裂を起こした結果であると考えている。このスペクトルを取るのと同時に、TAI(国際原子時)にリンクされた光周波数コムを使い、その時のクロックレーザーの絶対周波数を測定した。そして、この時計遷移の絶対周波数測定を繰り返した結果、共鳴周波数は429 228 004 229. 80(12) kHzと測定された。この値は、2009年の国際度量衡委員会(CIPM)の勧告値とエラーの範囲内で一致している。

Fig. 3 Observed spectrum of the ^{87}Sr lattice clock transition.

NICTにおいて実現した ^{87}Sr 光格子時計については、2006年の秒の二次表現としての採択に貢献した東大-AIST連合・JILA(米)・SYRTE(仏)につぐ、4つめの研究機関となるが、この他にもSrについては独伊英中加ポーランド、Ybについては米日中独等多数の国立標準研究所・大学で研究が精力的になされている。では上述したように確度が未だNISTの Hg^+ や Al^+ イオン時計に及ばないにもかかわらず、なぜ現在多数の標準研究所が光格子時計の開発を行っているか、その最大の理由は光格子時計が潜在的に備えている優れた短期安定度にある。一般に原子時計の安定度は、原理的にはクロックレーザーの照射後に基底状態・励起状態間のポピュレーションの比率を破壊測定する際に生じる量子ノイズ(量子射影ノイズ)によって制限され、これは

$$\sigma(\tau) = \frac{\Delta\nu}{\nu} \sqrt{\frac{T}{N\tau}} \quad (1)$$

で表される。尚、ここで $\Delta\nu/\nu$ は高分解能分光を行う際のQ値、 T は計測1回に要する時間、 N は原子数である。従って高分解能分光のスペクトル形状が同一であれば多数の中性原子(10^4 - 10^5 個)を利用する光格子時計はイオン時計に比べて安定度の観点からは圧倒的に有利なことが分かる。マイクロ波領域ではこれまで確度を求めるならばCs、短期安定度を求めるなら水素メーザーもしくはCSOが使われており、13桁以上の精度を狙う研究開発の現場ではより位相雑音が小さい水素メーザーの方が周波数コムや信号発生器等の基準信号としては使い勝手がよく、実際に大学等通常の研究環境においては水素メーザーの基準周波数の供給を受けられないことが周波数標準の研究の遂行を困難にしているといっても過言ではない。これとのアナロジーを考えると、万一今後の確度向上について原理的限界が光格子時計において見えてきたとしても、光格子時計は現行のメーザーもしくはCSOの代替を光領域においてより優れた安定度で供給する手段となるため、光周波数標準の開発を進める上で必須の技術なのである。

3. 光周波数標準開発の鍵を握る高安定光共振器の開発

(1)式から分かるように、安定度を決めるもう一つの重要なファクターは高分解能分光の Q 値であり、これについては現在光格子時計・イオン時計双方ともクロックレーザーの線幅という技術的要因で制限されている。クロックレーザーは通常高フィネス光共振器に安定化して高域の位相雑音を抑圧したものを利用するが、この場合光源の周波数安定度は光共振器にどれだけ完全にロック出来るかではなく、レファレンスである光共振器の共振器長そのものをどれだけ安定に保てるかで決まる。共振器長の安定度については、近年の誘電体多層膜の低損失化技術の進歩により小型の共振器(共振器長10 cm)が与える1.5 GHzという比較的大きなフリースペクトラルレンジ(Free Spectral Range, FSR)でも十分狭い共鳴線幅が得られるようになり、さらに除振台及び共振器の支持方法を工夫して外部からの振動に対する共振器長変化の感度を低くすれば、鏡のブラウン運動による制限(熱雑音リミット⁶⁾)まで安定度が出ることが分かってきた。そしてさらにこの熱雑音リミットを押し下げするためには、一般に、1)低温に冷やす2)共振器長を長くして共振器長に対する熱雑音による鏡振動の影響を相対的に小さくするの2種類のアプローチがある。この問題に関して我々は2)の戦略を取り、共振器長30 cmの新しい形状をした光共振器を最近設計した。一般に共振器長が大きくなると、振動感受率が大きくなるため、本設計では振動対策が最も重要なポイントになる。

今回設計した30 cm長光共振器の形状をFig. 4に示す。材質は、旭硝子(株)製の低熱膨張ガラスであるAZ⁷⁾を使う予定である。これはヤング率68 GPa, ボアソン比0.17, 密度2.2 g/cm³で室温付近にゼロ膨張温度を持っており, 熱膨張係数などULEとほぼ同一性質のガラス材である。ULEの場合, 30 cmという比較的大型のサイズで,

なおかつ精密な切削加工をしたものを調達するのは困難であったためここではAZガラスを使用しており、ULEに対する性能面での明らかな優位性があるわけではない。共振器の本体部分は直方体をしており、長いために横置きにする。全体のサイズは長さ30 cm幅8 cm高さ9 cmで、固定のための脚は本体と一体型とし、直方体のガラス材に横穴を開けることによって本体・支持脚・台座部分を形成するようにした。本体部分の高さは5 cmで、中心にレーザー光を通すための孔($\phi 12$)が開いている。脚の下部は共振器を支える台座で、底面から伝わる振動についてその空間分布の非一様性を緩和することを期待している。また、この下部の台座部分と脚部分には、重力や振動の加速度によって共振器本体部分に掛かった応力を逃がし本体の歪みを軽減する効果も持たせてある。一般に共振器は筐体の対称軸に光軸を置いて対称性により振動感度を抑えるのが基本戦略であるが、このデザインでは鉛直(Y)方向への対称面がないため鉛直方向の加速度感度を抑制することが最も重要であり、そのための具体的に重要なパラメータは支持脚の位置と幅になる。底面から上向きの加速度が掛かった場合、まず鉛直方向に共振器は潰れ、その際にボアソン比のために鏡は外に押し出される。一方、この構造では共振器の脚で支えられていない部分は慣性により下方に垂れ下がり、その際、鏡は光軸方向にもわずかにシフトする効果を与える。この2つの効果がトータルで零になる点を探せば共振器長の垂直方向の振動感度を抑制することが可能である。

設計は有限要素法を用いて行った。有限要素法は、個体を小さな領域(要素)に分解し、それぞれの接点にかかる応力と変位を計算するものである。ポワソン比やヤング率、密度など材料固有の物性値を使うことによって例えば重力によるたわみなど、実際に材料が受ける変形の様子を計算することが出来る。通常の機械設計等の場合

Fig. 4 The design of vibration insensitive cavity with 30-cm-length.

の有限要素法では、力がかかる部位とその大きさ、そして境界条件として動かない拘束部位を仮定することによって計算が成される。一方、光共振器の場合、想定する力は外部との接触点(この場合底面)から伝わり、他の部分は外的な拘束は無い。この場合のシミュレーションを有限要素法に落とし込むためには慣性力概念を利用するのが有効である。共振器の外部接触点が振動によって運動するが、この外部接触点と共に運動をする座標系から見ると、接触点以外全体に振動による加速度が逆向きに掛かっているように見える。従って支持部が動かないと仮定して、他の部分に拘束を掛けずに一様に加速度がかかると考え、変形を考えれば良い。この状態は加速度が鉛直上方向であれば単に接触点を拘束した上で系に重力を掛けていることと相似形である。有限要素法を用いて低振動感度の光共振器を設計する試みは幾つか例があり、従来の円筒型以外の形状でより振動感度の低い光共振器の開発がなされている⁸⁻¹⁰⁾。さて、形状の最適化のプロセスとしてはまず最初に共振器の底面全体を固定とした上で加速度は鉛直方向(図の-Y方向)に 1 m/s^2 をかけて、ミラー中心点のZ方向変位(Δz)がどのくらいになるのか計算した。支持脚の中心の位置 z_c を縦軸、その幅 w を横軸として Δz の依存性を示したのがFig. 5である。図中の黒線が、加速度による共振器長の変位がゼロとなる z_c と w の組み合わせである。この等高線上であればどの組み合わせでも鉛直方向の加速度については感度ゼロであるので、黒線上の14点(A~N)を取り上げてこの中でその他の条件について計算し、最適解を探すことにした。

まず、鉛直方向に加速度が掛かった場合のミラーの角度変化を計算した。Fig. 5のAからNまで14個の点での角度変化 θ_y は $\sim 10^{-9} \text{ rad}$ で、E、Fのあたりで角度ゼロとなる。ミラーの角度が共振器長に与える変化は原理的には $\sim \theta^2$ でスケールされる二次の効果であり、無視できる。しかしながらこれは共振器の機械的な対称軸と共振器内の光軸が完全に一致している条件下であり、そうでない場合ミラーの中心の光軸孔の中心からのずれを d と

Fig. 5 Contour plot of the fractional sensitivity of the cavity length to vertical unit acceleration. The unit is $/\text{ms}^{-2}$. The sensitivity is depicted as a function of the position and width of monolithic supports produced by making slots beneath the cavity.

すると共振器長変化は $d \cdot \theta_y$ となる。 d については基本的には鏡をオプティカルコンタクトをする際の位置決め精度で決まり、これを 0.5 mm と仮定すると $10^{-12}/\text{ms}^{-2}$ 程度となった。

次に共振器の水平方向の加速度に対する感度について検討を行った。尚、通常の実験室では地面振動について鉛直方向と水平方向ではほぼ同程度の大きさを持つことが分かっている。水平の二方向について変形の様子を表したのがFig. 6である。図のa)がx方向、b)がz方向に 1 m/s^2 の加速度がかかった場合の共振器のz方向変位の様子を実際の表示したものであり、それぞれの変位は濃淡によって示してある。まずa)についてだが、共振器の中央部分から左右対称に変位が起こるため、光軸が共振器の機械的中心軸と完全に一致している場合ミラーの中心の光軸方向へのシフトについては加速度感度は非常に小さい。オプティカルコンタクトのずれに起因する光軸と機械的中心軸のずれを $d = 0.5 \text{ mm}$ であるとした場合、AからNまでの14点での加速度感度は $10^{-12}/\text{ms}^{-2}$ のオーダーに収まった。これは鉛直方向加速度によるミラーの傾きから来る振動感度とほぼ同程度で、 30 cm と言う長い共振器を横向きに保持しているにもかかわらず比較的小さく、支持部分を大きくして共振器本体への応力を脚及びベースプレートに逃がしている効果が出ている。Fig. 6の(b)を見ると、光軸孔に平行な方向に加速度が掛かった場合の共振器の変位は、二枚のミラーで同じ方向であることがわかる。この二枚のミラーの中心での変位と傾き角を詳しく調べるとこの二つはちょうど相殺されるため、z方向加速度の影響については無視しても良いことがわかった。

また工作精度が共振器の加速度感度にどう影響を与えるかについても調べた。ここで問題としている振動感度への影響が一番大きいのは、Fig. 4の $z_1 \sim z_4$ のパラメータである。旭硝子によると、この形状のAZガラスの工作精度は 0.1 mm とのことであり、 z_1 の値が 0.1 mm ずれた場合振動感度は $10^{-13}/\text{ms}^{-2}$ 程度変化することが分かり、工作精度が性能を致命的に制限することはないようである。また、有限要素法によると共振器の持つ最低固有振動数はおよそ 5 kHz であった。精密除振台上では $0.5 \sim 1 \text{ Hz}$ 程度をカットオフ周波数として高域の振動が除振されるため、このシミュレーションのような静加速度による振動感度の見積りで十分である。

Fig. 6 Strain of cavity induced by horizontal accelerations oriented to (a) transverse and (b) longitudinal directions against the optical axis.

Fig. 7 Summary of the vibration sensitivity of the cavity length. Total fractional sensitivity of $\sim 10^{-12}/\text{ms}^{-2}$ is in same level with state-of-the-art vibration insensitive 10 cm cavities.

Fig. 7が全ての計算結果のまとめである。y方向加速度による角度変化とx方向加速度による角度変化、工作精度の各変化に対する振動感度とそれらをまとめた全振動感度をプロットしてある。今回設計した共振器の振動感度は $6 \times 10^{-12}/\text{ms}^{-2}$ 程度で、レーザーの波長が698 nmの場合 $2.5 \text{ kHz}/\text{ms}^{-2}$ に相当する。これは現在一般的に用いられている長さ10 cmの共振器で振動対策を施したもの¹⁰⁾と同レベルにある。共振器長を30 cmにすることによって熱雑音は 3×10^{-16} のレベルまで抑えることが出来るが、本設計によって一般の地面振動 + 受動精密除振台の環境(帯域 $> 0.5 \text{ Hz}$ で $\sim 10^{-4} \text{ m/s}^2$)で振動による制限を熱雑音と同程度に抑えられていることが分かる。Fig. 7ではオプティカルコンタクトの空間的なずれdについて、鉛直方向、水平方向、共に0.5 mmと仮定している。この場合A~Nまでの14点で比較的フラットな依存性を示すy方向振動感度が支配的であり、A~Nの中で最適な組み合わせは特に見つからなかった。その上で、定常的な重力による経年変化の影響が少なくなるようにはおそらく太い脚の方が望ましいと考えられる。但し、技術的な要因でx方向のオプティカルコンタクトの位置の公差を非常に小さく出来る場合はE or Fが最適となる。尚、本設計の共振器は現在製作中で、いずれ実験結果を報告する予定である。

4. まとめと展望

以上、NICTにおいて筆者らが開発しているSr光格子時計及び新型光共振器について概略を述べた。Sr光格子時計については残留磁場等スペクトルを広げている要因を取り除き、相互作用時間でリミットされる線幅を実現し、さらに時計遷移分光の結果を直接クロックレーザー周波数にフィードバックして、長期の積算によって時計

精度を向上させ、最終的に系統誤差を16桁もしくはそれ以上まで縮小させ、その限界を探る予定である。また、光共振器については上述したように現在製作中であるが、ここでは零膨張ガラス材やイオンビームスパッタリングによって得られる低損失誘電体多層膜を国内企業から調達する予定で、これまで完全に米国Advanced Thin Films社に依存していた光共振器の作成に関してそれと比肩しうる技術を国内に確立すべく研究開発型独立行政法人として努力しているところである。

NICTにおける光原子時計はその完成した暁には国際原子時及び日本標準時に貢献することが求められるが、Sr光格子時計や単一イオン時計を24時間365日動作させて日本標準時を供給するのは非現実的である。この状況は現在のCs原子泉時計も同様であり、Cs原子泉時計¹¹⁾においてもノンストップでの連続運転の実現は非常に困難であり、通常間欠的に運転して国際原子時の較正に使用されている。従って、現行のCs原子時計の代替としてSr光格子時計によって国際原子時や日本標準時の較正に使用するということが光原子時計による時刻供給への貢献としては最初のステップと思われる。では較正される日本標準時は現在どのようにして生成されているのか？これは誤解をおそれず簡単に言うと、多数の商用Cs時計のアンサンブルの信号で計算上の安定な標準時を作り出し、これに短期安定度に優れた水素メーザーの周波数を長期的に追従させて生成している。時刻の途切れない安定な供給という観点に立ったとき、現在の商用Cs原子時計(SymmetriCom社 5071A等)を多数運転することによって得られるロバストネスと冗長性は偉大である。光原子時計が精度の面で従来の原子時計を凌駕することが確認された今、その精度を複数の光原子時計の相互比較によってさらに上げると同時に、商用マイクロ波時計と比肩しうる安定性と冗長性を光領域の時計において実現することもまた時刻に責任を持つ標準研究所としての大きな目標であるが、現状としてはまだ有力な方式は出てきていない。また同時に時刻の供給について光原子時計によって得られる時刻周波数情報を性能劣化を伴わずに物理的に離れた地点に届ける技術の確立をする必要がある。これについてNICTは最近ダークファイバによる東大との光ファイバリンクを確立して東大-NICT間での高精度周波数配信技術の研究開発を始めたところであり[†]、ここでの配信技術の評価手段は東大とNICTのSr原子時計の周波数比較そのものである。ロバストな光原子時計群とその高精度配信技術、これら双方が成し遂げられたとき、ついに我々は時をも光によってより正確に刻むことが出来るようになるのである。

本稿の実験について長野 重夫博士、志賀 信泰博士、石島 博氏、小山 泰弘博士、細川 瑞彦博士の協力に感謝致します。また、クロックレーザーの安定度測定については、熊谷 基弘博士(NICT)、C. R. Locke博士、J. G. Hartnett博士(西オーストラリア大)、G. Santarelli博士(フランスSYRTE研究所)によるCSO発振器の開発・運用な

[†] このファイバリンクにおいては量子鍵配信のフィールドテストも行われる予定である。

くしては不可能なものであり、ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) S. G. Porsev and A. Derevianko: Phys. Rev. A **69** (2004) 042506.
- 2) M. Takamoto, F-L Hong, R. Higashi, and H. Katori: Nature **435** (2005) 321; A. D. Ludlow, M. M. Boyd, T. Zelevinsky, S. M. Foreman, S. Blatt, M. Notcutt, T. Ido, and J. Ye: Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 033003; A. Brusch, R. L. Targat, X. Baillard, M. Fauche, and P. Lemonde: Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 103003.
- 3) W. Phillips and H. Metcalf: Phys. Rev. Lett. **48** (1982) 596.
- 4) T. Kurosu and F. Shimizu: Jpn. J. Appl. Phys. **29** (1990) L2127.
- 5) H. Katori, T. Ido, Y. Isoya, and M. Kuwata-Gonnokami: Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 1116.
- 6) K. Numata, A. Kemery, and J. Camp: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 250602.
- 7) Private communications, Asahi Glass Co. Ltd.
- 8) L. Chen, J. L. Hall, J. Ye, T. Yang, E. Zang, and T. Li: Phys. Rev. A **74** (2006) 053801.
- 9) S. A. Webster, M. Oxborrow, and P. Gill, "Vibration insensitive optical cavity," Phys. Rev. A **75** (2007) 11801(R).
- 10) J. Millo, D. V. Magalhães, C. Mandache, Y. Le Coq, E. M. L. English, P. G. Westergaard, J. Lodewyck, S. Bize, P. Lemonde, and G. Santarelli: Phys. Rev. A **79** (2009) 053829.
- 11) M. Kumagai, H. Ito, M. Kajita, and M. Hosokawa: Metrologia **45** (2008) 139.

レーザーワード

時計遷移(clock transition)

周波数標準はまず周波数可変の発振源を用意し、その発振周波数を原子や分子の2状態間の量子遷移に共鳴するように制御することによって実現する。この原子分子等の量子遷移を時計遷移と言い、周波数の低い方から超微細構造間のマイクロ波遷移・分子の振動回転遷移・原子の電子遷移等が利用される。これらの遷移が周波数標準

として機能するためには、自然幅が狭く、なおかつ外場・周辺温度等の環境条件による周波数のシフトが小さいことが要請され、光学遷移では一般に線幅が狭い異重項間の双極子遷移や多重極遷移が利用される。

(井戸 哲也)