

# 3 光周波数標準の研究開発

## 3 Optical Frequency Standards

### 3-1 光周波数標準の国際的動向

#### 3-1 Recent Activity of Optical Frequency Standards

井戸哲也 早坂和弘 細川瑞彦

IDO Tetsuya, HAYASAKA Kazuhiro, and HOSOKAWA Mizuhiko

#### 要旨

秒の定義を光領域に得ることを目指し、NICTを含む各国の標準研究所で光周波数標準の研究が精力的になされている。本稿では光周波数標準についてそれを構成する狭線幅連続波光源・精密原子分光・マイクロ波への分周器の3要素について概説すると共に、現在の国内外の研究動向について紹介する。

In order to obtain the definition of the second based on optical radiation, optical frequency standards are extensively studied in every national standards laboratories including NICT. In this article, three main components of optical frequency standards, namely narrow-line cw lasers, precision atomic spectroscopy, and frequency dividers to microwave regime, are briefly introduced with current status of the activities in foreign and domestic laboratories.

#### [キーワード]

光周波数標準, 光共振器, 光原子時計, 光周波数コム, 秒の再定義

Optical frequency standard, Optical cavity, Optical atomic clock, Optical frequency comb, Redefinition of the second

#### 1 歴史的転換点を迎える周波数標準

周波数標準は数ある物理標準の中で圧倒的に高い精度が得られる。従って、その開発は「人類はどこまで自然を微細に測定出来るのか」という命題への挑戦であり、一国の科学技術の水準を示す1つの指標となりうるため各国の国立標準研究所において精力的に研究がなされている。また、89年にイオントラップ、97年にレーザー冷却、そして2005年に光周波数コムとほぼ10年に一度の頻度で周波数標準に関わるブレークスルーにノーベル賞が贈られている事実は、その進展がいかに広く科学技術全体に大きなインパクトを与えるかを象徴している。現行の国際単位系の秒の定義は1967年にセシウム原子の超微細準位間のエネルギー差によって規定されており、それ以来40年以

上に及ぶ周波数標準の研究は直截に言えば、「現行のセシウムによる表現をより正確に実現するための研究」と「現行のセシウムより優れた新しい周波数標準の研究」の2つに大別される。後者については、その最終目標は国際単位系の秒の再定義であるが、これについては広く科学技術に大きなインパクトを与えるためセシウムと比して圧倒的に優れた確度・安定度を証明する必要がある、必然的にマイクロ波域でなくより周波数の高い光学遷移によることになることになると認識されてきた。ではなぜ、周波数が高い光学遷移の場合マイクロ波遷移に比べて圧倒的に有利になりうるのか、それは原理的には

- 原子の準位が一定量の摂動を受ける場合、高周波数の遷移を利用していた方が比率として

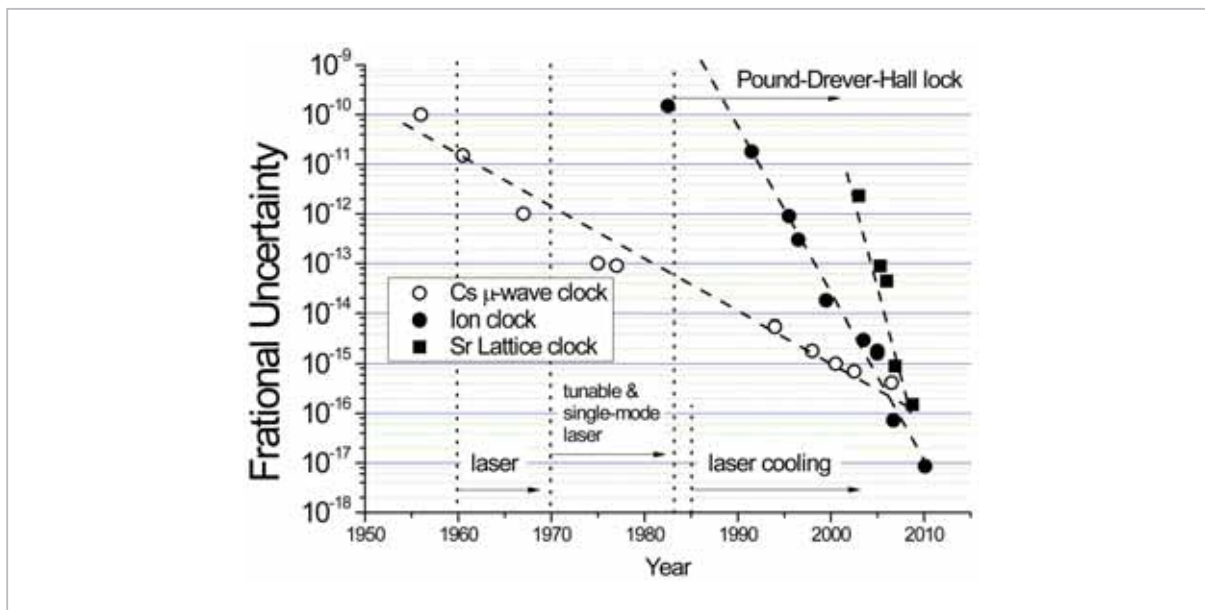


図1 原子時計開発の歴史と確度

その影響が小さくなる

- より高周波数の標準信号を利用して周波数を測定する方が、短期間に高精度に測定出来る

という2点に集約出来る。現象論的には可視・紫外光領域の中に多数、原子の量子遷移があり、その中には周波数標準に好適な禁制遷移も多い、ということが挙げられる。

さて、図1にセシウムによる時計、および光学遷移による時計の確度についてこの30年程度の歴史と、開発された技術についてまとめた。ここでは2000年代後半について光周波数標準がマイクロ波標準を性能面で追い越したことが示されており、そのため国際度量衡委員会等、時刻周波数標準の専門家によって構成される会合では秒の再定義が真剣に議論され始め、セシウム原子時計の性能を上回り秒の再定義の候補と認められる原子遷移のリストが「秒の二次表現」として作成されている。また、2009年に行われた時間周波数諮問委員会(CCTF)では、現在急速に改良が進んでいる光周波数標準についてその進展がある程度落ち着くことと、光周波数標準の国際比較の技術が進展することを期待して、2019年を秒の再定義を行うメドとしている。また図1において興味深いことは、Cs原子時計は波長可変連続波レーザーやレーザー冷却技術等、量子エレクトロニクス分野

の最新技術を巧みに利用して光励起型、原子泉型と改良を重ねてそのリードを守ってきたことである。しかしながら、2000年以降の量子エレクトロニクス分野の進展はマイクロ波時計の改善につながらず、ついに光周波数標準に対してそのリードを失ったと理解出来る。半世紀前に発明されたレーザーとそれに伴う周辺光学技術のめざましい発展は記憶ディスク、情報通信等数多くの分野において従来の方法を光を利用した方法に置換してきたが、周波数標準においても今それが現実となりつつあるのである。

## 2 光原子時計の仕組み

図2に光原子時計のブロック図を示す。

- A) 局部発振器としての波長可変狭線幅レーザー
- B) 精密原子分光
- C) 光 → マイクロ波周波数変換器

の3つの部分から構成されており、基本的なアイデアはレーザー発振周波数の原子共鳴からのシフト量を検出してそれを補償するようにフィードバックをかけるというものである。また、こうして光周波数域に周波数標準が得られたとしても高精度の周波数標準の需要は現在主にマイクロ波領域にあり、また現行の国際単位系とトレーサブルにするためにもC)によって狭線幅レーザーの数

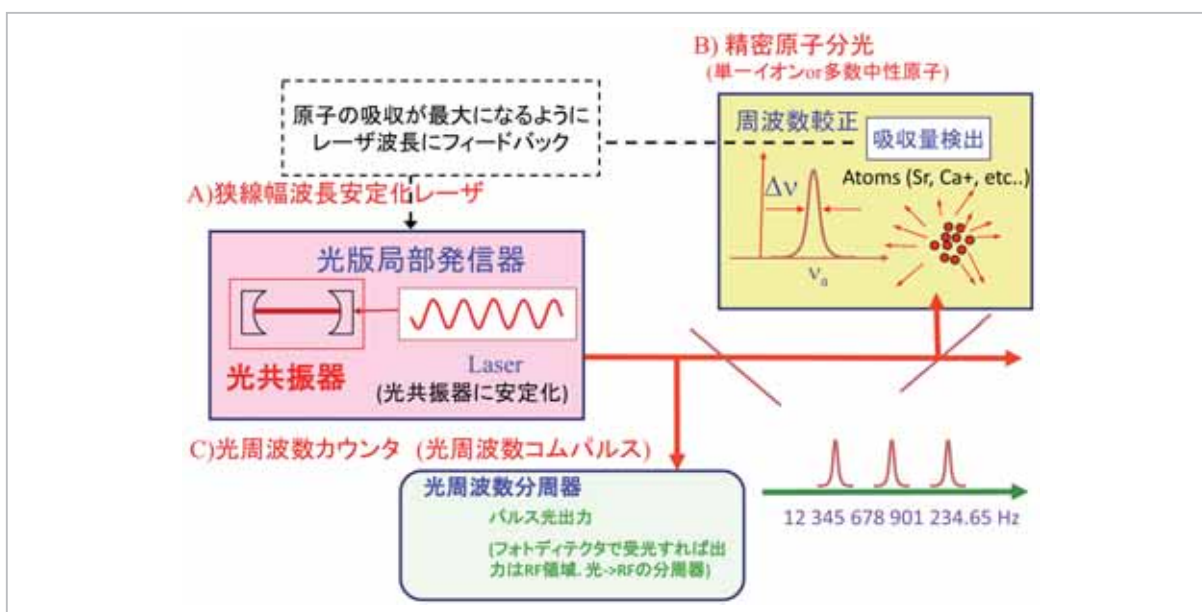


図2 光原子時計の構成

100 THzという周波数をマイクロ波まで分周する必要がある。一般に光周波数標準というB)の精密原子分光の部分のみに着目して、どの原子種のどの遷移を利用するのが有利かということのみに着目するきらいがあるが、3つはどれも欠くべからざるパーツとなっており、結果光周波数標準全体の性能はA) B) C)の中で最も相対的に性能が出ないものによって制限されて決まる。従って、逆に言えば性能が悪いものにおいてブレークスルーが起きると、形勢が逆転し他の2つのうちどちらかが光周波数標準全体の開発の“足を引っ張る”状況になり、それがまたその分野の研究を活性化して今度はそこでブレークスルーが起きる、という正のフィードバックが光周波数標準全体の発展をもたらしてきた。

本稿では3分野それぞれにおいてこれまでの開発の状況を振り返り、そして現在の開発のボトルネックとなっている部分とそれを克服するためのNICT及び国際的な研究動向についてまとめた。

### 3 局所発振器

光周波数標準の局所発振器は、連続波レーザー光源である。これをクロックレーザーとも呼ぶが、最終的に時計遷移に発振周波数を安定化するために波長可変である必要がある。波長可変レーザー

は当初色素レーザーがその代表であり、90年代まではよく使用されていたが、メンテナンス等の観点から現在では製造技術が著しく発展した半導体レーザーもしくはファイバレーザーが利用されている。また精密分光からシフト量の情報を得てフィードバックする迄の時間については原子時計の性能はクロックレーザーによって決まるため、線幅が狭く、また周波数ドリフトが小さいことが要請される。この要求に対して80年代前半に低損失誘電体多層膜鏡によって作成された高い共振のQ値を持つ外部光共振器にレーザー周波数を安定化する技術(Pound-Drever-Hall法、PDH法)[1]が確立し、また80年代後半にはこの光共振器を零熱膨張ガラスを材料として作ることによりキャビティ長のドリフトが大幅に軽減され、現在では線幅としてはサブHz、レーザー周波数のドリフトレートとしては0.1 Hz/s程度が実現している[2]。尚、このレーザー周波数安定化技術は、光共振器のみならず例えば蒸気セル中の原子の共鳴に安定化するところにも応用され、レーザー冷却の実現に欠かすことが出来ない役割を果たしたことも留意されたい(図1)。

現在のクロックレーザーにおける線幅狭窄化の鍵は、「いかにして光共振器にレーザーを安定にロックするか」ではなく「光共振器の共振器長をいかに安定に保つか」にある。これは現在PDH法に

において残留エラー信号は誤差信号を得る光検出器でのショットノイズで決まっているにも関わらず、実際に得られる光の安定度はそれより数桁悪くなっているという現実から裏付けられる。光共振器については、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が与える 1 GHz 以上の大きなフリースペクトラルレンジ (Free Spectral Range, FSR) でも数 kHz 程度の狭い共鳴線幅が得られるようになった。そして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感度を低くして、鏡のブラウン運動による制限 (熱雑音リミット<sup>[3]</sup>) まで光共振器の安定度が出るのが分かってきた。従来、誘電体多層膜の基板はスペーサーとの熱膨張率の違いを防ぐように、コーニング社の ULE に代表される零熱膨張ガラスが使用されてきたが、零熱膨張ガラスは複数のガラス材料の混合材であるため機械的 Q 値が低い。このため熱雑音による共振器長変化は石英基板より数桁大きく、結果 10 cm 共振器における安定度を  $1 \times 10^{-15}$  程度に制限している。そこで、ごく最近 SYRTE では零膨張性を犠牲にして共振器鏡を石英基板で製作して、16 乗台の安定度を実現している。さらに熱雑音リミットを押し下げるためには、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の影響を相対的に小さくするという 2 種類のアプローチがあり、現在世界各国の標準研究所で研究が計画・実行されつつある。1) については熱雑音は温度の平方根に比例するため、室温中よりさらに 1 桁の改善を期するには液体ヘリウム温度まで冷却する必要がある、スペーサーの極低温での零熱膨張率および温度安定性を実現できるか、また冷凍機の振動が性能を制限してしまうのではないかと懸念されている。零熱膨張率の問題については、シリコン結晶によってキャビティスペーサーおよび鏡基板を製作してその零熱膨張温度 (120 K 及び 18 K 近辺) において使用する計画がなされ、まだ報告はないが JILA と PTB が共同研究を進めている。一方、長い共振器長の共振器については、現在最もよく用いられている零熱膨張材料である ULE における均質かつ大きな部材の入手が困難であるという問題がある。しかし NIST ではこれを入手して鏡間距離 25 cm 程度の共振器をアルミイオン時計、Yb 光格子時計双方で使用しており、双方とも 16

乗台前半の短期安定度を得ている。NICT では ULE の類似材料である AZ ガラスを利用して、共振器長 30 cm の全く新しい形状の光共振器を最近設計し<sup>[4]</sup>、現在製作中である。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であり、振動感度を抑制できる新たな共振器の形状や保持方法が提案されている。

現在得られているクロックレーザーの線幅はサブヘルツである一方、後述する原子・イオンの時計遷移の自然幅は mHz レベルにあり、光周波数標準の短期安定度はクロックレーザーの線幅、すなわち光共振器の安定度によって制限されている。従って、光共振器の改良もしくは狭線幅遷移を利用したアクティブレーザー<sup>[5]</sup>等革新的な狭線幅光源が現在強く要請されている。

## 4 高分解能原子分光

原子時計の性能は確度と安定度で表される。確度とはその時計が作り出す周波数標準の不確かさのことである。原子の共鳴周波数は制御出来ない外場の影響や実験パラメータの設定誤差により本来の周波数からシフトを受ける。このシフト量の完全な予測もしくは測定には実際には限界があり、そのために起こる周波数の不確かさを確度という。一般に原子時計の性能について 1 つの数字、例えば  $5 \times 10^{-15}$  等で表されている場合はこの確度のことを言う。また、もう 1 つ、周波数のふらつく程度を表す指標として安定度 (アラン偏差) があり、これは平均時間  $t$  の関数として表される。厳密な説明は本特集号の梶田らの文献<sup>[6]</sup>に譲るが、簡単には時間  $t$  の平均周波数の測定を繰り返した場合、連続する 2 回でどの程度違う周波数が出てくるかという指標と捉えて頂ければ良いかと思う。従って安定度を議論する際には平均時間何秒での安定度かを特定する必要があり、一般に  $t = 1$  秒程度の安定度を短期安定度、ざっくり言って  $t = 100$  秒以上での値を長期安定度と言う。周波数標準としては当然ながら短期も長期も良いものがあればそれがベストであるが、実際の周波数標準の特性は

- a) 短期は性能が良くないが長期にわたる平均化を得ると精度が出るもの
- b) 短期的には性能が良いが周波数のドリフト

等があるために長期の平均をしても精度がよくならないもの

のどちらかに当てはまるものが多く、マイクロ波域においては、a)はCs原子時計、b)は水素メーザもしくはクライオジェニックサファイアオシレータが相当する。

さて、原子分光において高分解能分光をするための必須条件は原子を空間的に強く束縛することである。原子が自由空間中に存在するときは光子の吸収放出によって原子は反跳運動量を受け、それにより運動エネルギーが変化する。従って、運動する原子に光子を吸収させるには原子の運動エネルギーの変化分を補償する形で本来の共鳴周波数からずれたところで吸収が起きる。これがいわゆるドップラー効果であるが、それゆえ光周波数標準として利用する原子分光においては原子を遷移波長より十分小さい領域に固定して、光子反跳を受けないようにするのが必須である(ラムディック領域)[7]。このラムディック領域に閉じ込める手法としては80年代よりイオントラップ時計が精力的に研究されてきたが、中性原子系においても2001年に香取現東大教授が提案した光格子時計によって実現しNICTでは単一イオン時計としてはCaイオンを用いた時計を、また光格子時計についてはSrを用いた時計を開発している。Caイオン時計については本特集号の松原らの文献[8]を、Sr光格子時計については山口らの文献[9]を参

照されたい。

#### 4.1 単一イオン光周波数標準

単一イオン光周波数標準では、イオントラップ内でレーザー冷却により遷移波長以下の領域に局在した単一イオンの電子遷移を周波数基準として用いる。その原型は1980年代にH. Dehmeltにより提案された[10]。現在、 $^{191}\text{Hg}^+$ 、 $^{171}\text{Yb}^+$ 、 $^{88}\text{Sr}^+$ 、 $^{40}\text{Ca}^+$ 、 $^{115}\text{In}^+$ 、 $^{27}\text{Al}^+$ の6イオン種の光周波数計測が報告されており、そのうちHg<sup>+</sup>、Yb<sup>+</sup>、Sr<sup>+</sup>が秒の二次表現として採用されている。Al<sup>+</sup>同士の比較で $8.6 \times 10^{-18}$ の不確かさが報告されており、現在、周波数標準として最も高い確度が単一イオン光周波数標準で実現されている。単一イオン光周波数標準は、ポルトトラップ中に静止したただ1つのイオンを基準として用いるために、周波数シフトの制御や評価がしやすく確度に優れるが、信号強度が微弱なために光格子時計には安定度で及ばない、という特徴を持っている。これまでに遷移周波数が報告されているイオン種を表1に示す。

アルカリ金属型電子配置を持つイオン種のうち、質量数奇数の同位体である $^{191}\text{Hg}^+$ 、 $^{171}\text{Yb}^+$ では全角運動量( $F$ )が整数となる。ゼーマン副準位の内、磁場方向成分がゼロとなる準位間( $m_F = 0$ )の遷移を時計遷移とすると、一次ゼーマンシフトが消失するために磁場変動に対する周波数変動が無

表1 光周波数標準として研究されている主なイオン種

イオン種	遷移	波長[nm]	自然幅[Hz]	不確かさ	主な研究機関
$^{40}\text{Ca}^+$	$^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$	729	0.14	$2.4 \times 10^{-15}$ [15]	NICT, Innsbruck 大学
$^{88}\text{Sr}^+$	$^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$	674	0.4	$3.8 \times 10^{-15}$ [13]	NPL, NRC
$^{171}\text{Yb}^+$	$^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{3/2}$	436	3.1	$3.8 \times 10^{-16}$ [11]	PTB, NPL
$^{171}\text{Yb}^+$	$^2\text{S}_{1/2}-^2\text{F}_{7/2}$	467	$10^{-9}$	$2 \times 10^{-14}$ [12]	NPL, PTB
$^{199}\text{Hg}^+$	$^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$	282	1.8	$1.9 \times 10^{-17}$ [14]	NIST
$^{27}\text{Al}^+$	$^1\text{S}_0-^3\text{P}_0$	267	0.008	$8.6 \times 10^{-18}$ [19]	NIST, PTB
$^{115}\text{In}^+$	$^1\text{S}_0-^3\text{P}_0$	237	0.8	$1.8 \times 10^{-13}$ [17]	MPQ, NICT, PTB

研究機関名は以下の通り ; NPL: National Physical Laboratory (英国)、NRC: National Research Council of Canada (カナダ)、PTB: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (ドイツ)、NIST: National Institute of Standards and Technology (米国)、MPQ: Max-Planck Institute of Quantum Optics (ドイツ)

く、特に電源ラインからの交流磁場の影響を避けることができ都合が良い。 $^{171}\text{Yb}^+$ は主にPTB、NPLで研究開発が進められ、 $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 遷移(436 nm)を用いた方式では $3.8 \times 10^{-16}$ [11]、 $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{F}_{7/2}$ 遷移(467 nm)を用いた方式では $2 \times 10^{-14}$ [12]の不確かさが報告されている。NISTが研究開発を進める $^{191}\text{Hg}^+$ ではHgの高い蒸気圧による衝突シフトを防ぐために液体ヘリウムで冷却された真空チャンバー内に設置されたイオントラップが用いられる。この方式では高い真空度により残留ガスとの衝突を減らせるだけでなく、黒体放射シフトを著しく低減できるという利点がある。後述する $\text{Al}^+$ 光周波数標準との比較で $1.9 \times 10^{-17}$ [14]の不確かさが報告されている。

原子核の角運動量( $I$ )の値が $1/2$ である $^{191}\text{Hg}^+$ 、 $^{171}\text{Yb}^+$ に対して、大きな値を持つ $^{87}\text{Sr}^+$ ( $I = 9/2$ )、 $^{43}\text{Ca}^+$ ( $I = 7/2$ )では、ゼーマン副準構造が過度に複雑となり、 $m_F = 0$ 間遷移の励起は困難を伴う。そのため、副準位構造の単純な偶数同位体 $^{88}\text{Sr}^+$ 、 $^{40}\text{Ca}^+$ の $m_F \neq 0$ 間遷移が用いられる。このときの時計遷移は一次のゼーマンシフトを伴うので、正、負のシフト量が最も小さな2遷移 $m_F = \pm 1/2 \leftrightarrow m_F = \pm 1/2$ の平均値として遷移周波数を求める。この手法を用いて $^{88}\text{Sr}^+$ ではNPLにより $3.8 \times 10^{-15}$ の不確かさが[13]、 $^{40}\text{Ca}^+$ ではInnsbruck大学により $2.4 \times 10^{-15}$ [15]、NICTにより $4.4 \times 10^{-14}$ の不確かさ[16]が報告されている。NICTの $^{40}\text{Ca}^+$ 光周波数標準の確度向上と詳細に関しては本特集号の松原らによる文献[8]を参照されたい。

これまで述べたアルカリ金属型電子配置を持つイオン種では、電気四重極シフト、黒体放射シフトが到達しうる不確かさを著しく制限する。電気四重極シフトの補正は通常三対のゼーマン副準位磁気副準位間の遷移周波数の平均をとることにより補正される[14]。黒体放射シフトはイオンを囲む温度分布を正確に評価することにより見積られるが、イオントラップの場合電極の正確な温度評価が難しく $10^{-16}$ 台後半の不確かさを伴う。黒体放射シフト量は温度の4乗に比例するため、 $^{191}\text{Hg}^+$ のように極低温に冷却することが黒体放射シフトを小さく抑えるために最も有効な方法だと考えられている。

Dehmeltの提案ではアルカリ金属型電子配置イオン種ではなく、 $\text{B}^+$ 、 $\text{Al}^+$ 、 $\text{Ga}^+$ 、 $\text{In}^+$ 、 $\text{Tl}^+$ 等の

アルカリ土類金属型電子配置イオン種が用いられるはずであった[10]。これらのイオン種では時計遷移に四重極シフトが存在せず、黒体放射シフトが極端に小さい。しかしながら、図3に示す $^{115}\text{In}^+$ のエネルギー準位構造に代表されるように、冷却と観測に用いる遷移( $^1\text{S}_0 - ^1\text{P}_1$ )が真空紫外域に位置するためにその生成が困難を極め、Dehmeltが提案した原型に忠実な光周波数標準は提案から30年経過した現在でも実現していない。1990年代に代替の $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ 遷移(230 nm)をレーザー冷却、検出に用いる $\text{In}^+$ で唯一Dehmelt方式の実現が試みられたが、報告された不確かさは $1.8 \times 10^{-13}$ に留まっている[17]。一方、単一イオン光周波数標準技術を基礎として1990年代後半から盛んに研究が進められている量子情報科学の分野では技術開発が成熟し、小規模量子コンピュータが実現されるに至った。この技術を用いた量子論理分光法(Quantum Logic Spectroscopy、QLS)の出現により、Dehmelt方式に量子情報技術を組み込んだ方式での $^{27}\text{Al}^+$ 光周波数標準が近年になって初めて実現したのである[14]。

$\text{Al}^+$ 光周波数標準ではこれまで用いられてきたポルトラップではなく、線形トラップ内に静止した単一 $\text{Al}^+$ を周波数基準として用いる。冷却は $\text{Al}^+$ と同時に「論理イオン」としてトラップした1個の $^9\text{Be}^+$ による共同冷却で行われる。 $\text{Al}^+$ の運動エネルギーは $\text{Be}^+$ とのクーロン力により $\text{Be}^+$ の運動へ結合し、 $\text{Be}^+$ のレーザー冷却により蛍光光子の運動量として捨てられる。このようにして $\text{Al}^+$ は $\text{Be}^+$ とともに量子化された重心振動運動の基底状態まで冷却される。時計遷移の検出は、時計レーザーの照射により生成された $\text{Al}^+$ 内の量子重ね合わせ状態を、 $\text{Be}^+$ 内の量子重ね合わせ状態へと転写し、 $\text{Be}^+$ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{P}_{3/2}$ 遷移(波長313 nm)から発せられる蛍光によって行う。この過程ではレーザーパルスを用いてイオンの内部量子状態と重心振動量子状態を交換する量子情報技術が用いられており、まさに、量子コンピュータを用いた光周波数標準ということが出来る。このQLSは2005年に最初の報告がなされたが[18]、2008年に $\text{Hg}^+$ との比較による不確かさ $2.4 \times 10^{-17}$ が報告され[14]、論理イオンを $\text{Mg}^+$ とした最近の実験では不確かさ $8.6 \times 10^{-18}$ という光周波数測定では最も正確な値が報告されている[19]。この不確かさ

を規定するのは振動運動による二次ドップラーシフトによるものであり、より良い冷却により不確かさはさらに減少するとされている。PTBではNISTとの比較を目指して、可搬型 Al<sup>+</sup> 光周波数標準の開発が試みられている。

Al<sup>+</sup>の成功によってアルカリ土類型電子配置イオン種により実現する高い確度が再び注目を集めている。しかしながら、サイドバンド冷却、量子ゲート動作、適応検出法、等の高度な量子情報技術を駆使して初めて実現する Al<sup>+</sup> 光周波数標準は、どの研究機関もが簡単に導入できるものではない。そこでより簡便な方式でアルカリ土類型電子配置イオン種の確度を実現するものとして In<sup>+</sup>が見直されている。In<sup>+</sup>を他種イオンと共同冷却することにより、QLSに加えて、真空紫外パルス光(159 nm)での検出方式、<sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>3</sup>P<sub>1</sub>遷移(230 nm)での検出方式、という3つの方式での光周波数標準が想定される。図3に In<sup>+</sup>のエネルギー準位図を示す。真空紫外パルス光検出方式では、近年、開発が進む高次高調波発生(High Harmonic Generation, HHG)により、QLSを超える検出速度を実現することが期待されている。<sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>3</sup>P<sub>1</sub>遷移検出方式では通常の許容遷移の1/100程の自然放出確率を利用するので検出速度は非常に遅いものの、周波数コムを経由して光格子時計に周波数ロックした時計レーザーを用いることで、光格子時計の持つ安定度と蓄積イオンの持つ確度を同時に実現する複合型光周波数標準の実現が期待される(Sr-In<sup>+</sup>複合周波数標準)。確度を制限する大きな要因となる黒体輻射シフトは300Kで

10<sup>-17</sup> 台前半の値が予想されており、10<sup>-18</sup> 台の確度が実現可能だと考えられる。NICTでは上記3方式を実現する試みが行われており、PTBでは複数個の In<sup>+</sup>イオンを配置してS/Nを向上させるための小型イオントラップの開発が進められている。

## 4.2 光格子時計

80年代半ばに実現した中性原子のレーザー冷却は分光の際のドップラー幅を遷移の自然幅(MHz)より狭くすることに成功し、中性原子で周波数標準を構築する可能性が指摘された[20]。しかしながら、90年代はこの処方箋に従って自由落下中の原子に対して光ラムゼー共鳴を利用した分光を行っていたため、プローブ光の波面の曲率や不均一性に起因する残留ドップラー効果によって制限されてCs原子泉と同程度の15桁を中性原子系で実現するのは困難と見られていた。しかし状況は2001年の香取の光格子時計という中性原子系でラムディッケ領域を実現する手法の提案で一変する[21]。中性原子をプローブ光の波長オーダーの空間に閉じ込める手法は、トラップ光の干渉によって波長以下の領域での閉じ込めを実現する光双極子トラップしかほぼ考えることは出来ないが、通常はトラップ光が非常に大きいACシュタルクシフトを引き起こして、おおきな系統誤差を引き起こし、周波数標準とはなり得ない。しかしながら香取はアルカリ土類金属等2電子原子の<sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>3</sup>P<sub>0</sub>遷移を時計遷移とする場合、光双極子トラップの波長を上手に選ぶことによって<sup>1</sup>S<sub>0</sub>、<sup>3</sup>P<sub>0</sub>それぞれに同一形状のトラップ形状を作ることが出来てイオントラップに類似したラムディッケ領域が実現し、また相互作用時間も稼げることに着目し、光格子中の多数中性原子を利用した光原子時計を2001年に提案して[21]、原理検証である無反跳分光を2003年には<sup>88</sup>Sr:<sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>3</sup>P<sub>1</sub>遷移において行い[22]、そして2005年には光格子遷移である<sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>3</sup>P<sub>0</sub>遷移で成功した[23]。光格子時計は一重項系列と三重項系列を巧妙に利用して実現させる。原子種としては、ストロンチウム(Sr)、イッテルビウム(Yb)、水銀(Hg)において実験が進んでおり、Srについては東大・JILA・SYRTE・NICT・PTBにおいて、YbについてはAIST(H)、NIST(米)において時計動作が実現されている。水銀(Hg)については東大・SYRTEで開発が進んでい

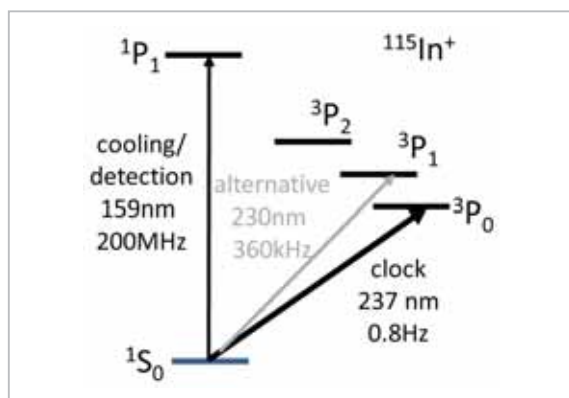


図3 <sup>115</sup>In<sup>+</sup>のエネルギー準位図

遷移の用途、波長、線幅を示す。

るが、使用する殆どの遷移が紫外域にあることによる技術的な理由から光格子中の原子に対するクロック遷移の分光にまで至っていない。しかし、黒体輻射シフトによる不確かさが他に比べて圧倒的に低いため無反跳分光が実現したときには Sr よりも良好な確度が期待されている。Sr 光格子時計は 2006 年には秒の二次表現として国際度量衡委員会 (CIPM) に採択され、日米仏独英中の標準研究所で研究が行われており、単一イオン時計を含めて複数ある秒の二次表現の中で現在最も不確かさが小さく、秒の再定義の候補となっている。性能としては確度  $1 \times 10^{-16}$  で、確度を制限している不確かさは黒体輻射シフト ( $1 \times 10^{-16}$ )、衝突シフト ( $5 \times 10^{-17}$ )、光格子レーザーによる AC シュタルクシフト ( $5 \times 10^{-17}$ ) となっており、安定度は  $2 \times 10^{-16}$  @ 300s と報告されている [24]。Yb による光格子時計では確度  $3.4 \times 10^{-16}$  となっている [25]。NICT においてはごく最近 Sr 光格子時計が時計動作を開始した。詳しくは本特集号の山口の文献 [9] を参照頂きたい。また最近この光格子時計はファイバリンクを介して東大の光格子時計と直接比較を行うことが可能となり、平均時間 1 秒で 14 桁に及ぶ安定度での周波数伝送をデモンストレートする舞台の一端を担っている。ファイバリンクについては本特集号の藤枝の文献 [26] を参照されたい。

なぜ現在殆ど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  $\sigma(\tau)$  は、原理的にはクロックレーザーの照射後に励起状態のポピュレーション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 (Cryogenic Sapphire Oscillator) 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を周波数コムや信号発生器等の基準信号として使う。そして、その絶対値については Cs 時計や GPS 信号等で較正することが行われ、実際に大学等の研究環境においては水素メーザーの低い位相ノイズ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もしくは技術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マイクロ波領域でのメーザーもしくは CSO の代替を光領域において優れた安定度で供給する手段となる。従って光周波数標準の開発を進める上で必須の技術なのであり、上述した Sr-In<sup>+</sup> 複合周波数標準も光格子時計の優れた安定度を利用しようという戦略を基本としている。

## 5 光周波数分周器 (周波数コム)

レーザーの発明以来、マイクロ波と比して 4 桁もキャリア周波数が高い光領域で周波数標準を実現することは光物理学者の大きな目標であったが、その一方で実用面から時刻周波数標準の専門家には光周波数標準について懐疑的な見方が少なからずあった。それは例え光周波数標準が確立して安定度・確度が圧倒的に高い光周波数が得られたとしても、想定しうる周波数標準の需要は主としてマイクロ波域にあるという現実があり、従って光からマイクロ波へ 4 桁にも及ぶ精密な分周技術が確立される必要があるからである。この命題に対しては 90 年代後半まで各国の標準研究所では周波数チェーンの開発がなされていたが、ここではマイクロ波と光の境界領域にあたるいわゆるテラヘルツ域をどう精度良く位相リンクするかという、極めて困難な問題に直面していた。そんな折に、マックスプランク研究所の Hänsch らのグループはパルスレーザーが繰り返し周波数と同一の間隔をもつ等間隔の櫛状の周波数スペクトルを持つことに着目して、この繰り返し周波数を単純にフォトディテクターで取り出すことによって光領域からマイクロ波域に容易に分周できることを証明してこの命題は一気に解決した。コムスペクトルについてその間隔は繰り返し周波数によって決まる



が、オフセット周波数についてはパルスにおけるエンベロープと光位相の関係(キャリア-エンベロープ位相、CEP)によって決まる。90年代前半まではこのキャリアエンベロープ位相を精密に制御するというにはある種机上の空論と思われていたが、利得帯域幅が極めて大きいチタンサファイアレーザーの発明と、半導体レーザー励起YAGレーザーの倍波でその励起レーザーを従来のAr<sup>+</sup>レーザーより劇的に少ない強度雑音で得たこと、そしてスペクトル幅を1オクターブ以上に広げるフォトニッククリスタルファイバの発明により、高精度なスペクトルを持つ光周波数コムが実現した。ここでオフセット周波数は1オクターブ以上のスペクトルにおいてf-2f自己参照干渉計を組むことによって精密に得られることが分かり、これによって周波数コムのスペクトルを完全に制御出来るようになった。周波数コムは当初はチタンサファイアレーザーのみであったが、2000年代前半より、Ti:CrO<sub>4</sub>レーザー、CrLiSAFレーザー、Er<sup>+</sup>ファイバレーザー、Yb<sup>+</sup>ファイバレーザー等においても、CEPの安定化が可能となり周波数標準の用途にも十分使える性能が得られるようになってきた。これらの開発の動機は固体レーザーについては高価な532 nmレーザーを避けて安価な半導体レーザーをポンプレーザーとするところ、またファイバベースのレーザーについては空気の影響を受けにくく長期間連続運転が可能となること、またモードロックが高強度でも安定に実現する点にあり、これらが実現した今周波数コムの開発はファイバレーザーが主流となっていくと思われる。NICTにおいては現在2台のCEP安定化チタンサファイアレーザーによる周波数コムが定常運用されており、またEr<sup>+</sup>ファイバレー

ザーについても最近CEP安定化が実現し、光周波数標準開発の現場に投入されつつあり、詳しくは本季報の長野らの稿を参照されたい。

光周波数コムにおけるもう1つの開発の方向は波長域の拡大である。現在得られている周波数コムは基本的に波長2μmから300 nm程度となっており、その外側にあたるテラヘルツ域及び真空紫外域に周波数コムを実現する開発も進んでいる。

## 6 最後に

光原子時計はその完成した暁には国際原子時にも貢献することが求められるが、光格子時計や単一イオン光周波数標準を24時間365日動作させて時刻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、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光原子時計によって国際原子時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。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に対して圧倒する安定度と確度を持ちつつも比肩する安定性と冗長性を光領域の時計で実現することもまた大きな課題である。

### 参考文献

- 1 R. Drever et al., Appl. Phys. B, 31, 97, 1983.
- 2 B. C. Young et al., Phys. Rev. Lett., 82, 3799, 1999.
- 3 K. Numata, A. Kemery, and J. Camp, Phys. Rev. Lett., 93, 250602, 2004.
- 4 M. Koide and T. Ido, Jpn. J. Appl. Phys., 49, 060209, 2010.
- 5 D. Meiser, J. Ye, D. R. Carlson, and M. J., Holland Phys. Rev. Lett., 102, 163601, 2009.
- 6 梶田雅稔, 小山泰弘, 細川瑞彦, “時間周波数標準の計測と評価の基礎,” 情報通信研究機構季報, 本特集号, 2-1, 2010.
- 7 R. H. Dicke, Phys. Rev., 89, 472, 1953.

- 8 松原健祐, 李瑛, 長野重夫, 小嶋玲子, 梶田雅稔, 伊東宏之, 早坂和弘, 細川瑞彦, “カルシウムイオン光周波数標準,” 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-2, 2010.
- 9 山口敦史, 志賀信泰, 長野重夫, 石島博, 小山泰弘, 細川瑞彦, 井戸哲也, “ストロンチウム光格子時計,” 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-3, 2010.
- 10 H. Dehmelt, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 31, 83, 1982.
- 11 Schneider T, Peik E, and Tamm C., *Phys. Rev. Lett.*, 94, 230801, 2005.
- 12 K. Hosaka, S. Webster, A. Stannard, B. Walton, H. Margolis, and P. Gill, *Phys. Rev. A*, 79, 033403, 2009.
- 13 H. Margolis, G. Barwood, G. Huang, H. Klein, S. Lea, K. Szymaniec, and P. Gill, *Science*, 306, 1355, 2004.
- 14 T. Rosenband, D. B. Hume, P. O. Schmidt, C. W. Chou, A. Brusch, L. Lorini, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker, S. A. Diddams, W. C. Swann, N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, and J. C. Bergquist, *Science*, 319, 1808, 2008.
- 15 M. Chwalla, J. Benhelm, K. Kim, G. Kirchmair, T. Monz, M. Riebe, P. Schindler, A. S. Villar, W. Hänsel, C. F. Roos, R. Blatt, M. Abgrall, G. Santarelli, G. D. Rovera, Ph. Laurent, *Phys. Rev. Lett.*, 102, 023002, 2009.
- 16 K. Matsubara, K. Hayasaka, Y. Li, H. Ito, S. Nagano, M. Kajita, and M. Hosokawa, *Appl. Phys. Express*, 1, 067011, 2008.
- 17 J. von Zanthier, Th. Becker, M. Eichenseer, A. Nevsky, Ch. Schwedes, E. Peik, H. Walther, R. Holzwarth, J. Reichert, Th. Udem, and T. Hänsch, *Opt. Lett.*, 25, 1729, 2000.
- 18 P. O. Schmidt, T. Rosenband, C. Langer, W. M. Itano, J. C. Bergquist, and D. J. Wineland, *Science*, 309, 749, 2005.
- 19 C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, and T. Rosenband, *Phys. Rev. Lett.*, 104, 070802, 2010.
- 20 J. L. Hall, M. Zhu, and P. Buch, *J. Opt. Soc. Am. B*, 6, 2194, 1989.
- 21 H. Katori, *Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology*, edited by Patric Gill (World Scientific Publishing Co., Singapore, 2002), pp. 323–330.
- 22 T. Ido and H. Katori, *Phys. Rev. Lett.*, 91, 053001, 2003.
- 23 M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, H. Katori, *Nature*, 435, 321–324, 2005.
- 24 G. Campbell et al., *Metrologia*, 45, 539, 2008.
- 25 N. D. Lemke et al., *Phys. Rev. Lett.*, 103, 063001, 2009.
- 26 藤枝美穂, 熊谷基弘, 長野重夫, 井戸哲也, “光ファイバ周波数伝送,” 情報通信研究機構季報, 本特集号, 4-3, 2010.



い ど て つ や  
**井戸哲也**

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ主任研究員  
博士(工学)  
光周波数標準・光精密計測・光周波  
数精密伝送



はや しか かず ひろ  
**早坂和弘**

新世代ネットワーク研究センター  
量子 ICT グループ主任研究員  
博士(理学)  
量子情報科学、量子光学、量子エレ  
クトロニクス



ほそ かわ みず ひこ  
**細川瑞彦**

新世代ネットワーク研究センター  
研究センター長 博士(理学)  
原子周波数標準、時空計測