精密周波数発生回路とその応用

最近の原子周波数標準器とその関連技術

特集解説

キーワード

原子周波数標準器, セシウム, 水素メーザー, イオン・トラップ,
サファイア共振器

大 嶋 新 一

計 量 研 究 所

1. はじめに

原子周波数標準器として向上させたい特性には、正確さや周波数安定度、利便性、周波数範囲の拡大といったことが上げられる。最初の特性は標準器自身の性能であり、セシウム標準器をはじめとして、すでに極めて高い特性のものが得られていることは周知のことである。これに対し、利便性の面では、GPS 時刻に同期した発振周波数が得られる水晶発振器やルビジウム発振器が発売されたことによるインパクトが極めて大きく、一般のユーザーでも 1×10^{-12} を越える正確さの標準器を容易に得ることが出来るようになった。今後、このような発振器が急速に普及すると考えられ、将来は時間や周波数の高精度なトレーサビリティを確立する上で利用されてゆくと思われる。⁽¹⁾ そのような高精度な発振器が、技術開発の現場を支える基盤技術としてごく普通に利用されるようになるに従い、技術開発の自然な流れとして、それらを支える原子周波数標準器自身の特性を更に向上させる要求が高まることが予想される。このような状況を踏まえ、ここでは最近の高性能原子周波数標準器の研究状況、及びそれらの実現を支える技術について記述したい。3 番目に上げた周波数範囲の拡大については、現在は可視光の領域まで延ばそうという研究がなされており、この特集号でも取り上げられているので参照していただきたい。

2. 原子周波数標準器の研究状況

2.1 セシウム標準器

偏向磁石を用いた従来型の一次標準器は、ドイツ物理工学研究所 (PTB) などで現在も運用されており、その機構的な安定性から時計として連続運転されている。また、この特集号にも報告されているように、光ポンピング方式による一次標準器も実用の域に達し、運用が行われている状況である。この方式ではセシウム周波数標準器に初めてレー

ザー技術が導入されたが、開発当初は半導体レーザーの周波数安定化技術が問題であった。しかし、最近では性能の良い半導体レーザーが市販されるようになり、セシウム標準を支える重要な基盤技術となっている。次に述べる原子泉型標準器では、さらに多くのレーザー光と、その高度な制御技術が必要とされ、これからのセシウム標準の研究・開発におけるレーザーの重要度はますます高まってきている。原子泉型標準器の開発は、原子のレーザー冷却技術の開発に端を発している。このレーザー冷却技術の進展に寄与した 3 人の研究者 S. Chu、W. D. Phillips、C. Cohen-Tannoudji に対して、1997 年度のノーベル物理学賞が与えられたのは記憶に新しい。原子周波数標準器と最先端の科学技術の関連が極めて深いものであることを印象づける一例となった。

レーザー冷却の原理は、次のように説明される。静止しているセシウム原子の共鳴周波数 ν_A に対して僅かに $\delta\nu_L$ だけ低い周波数のレーザー光を、図 1 のように真空中のセシウム原子に左右から照射した場合を考える。例えば、右方向に動いている原子にとっては右から来るレーザー光の周波数はドップラー効果のために共鳴周波数に近づくため吸収されやすくなる。光は運動量を有しているため、それを吸収すれば原子は減速される。セシウム原子の場合、D₂ 線のスペクトルを用いると、光を一回吸収するたびに、0.35mm/s だけ減速される。吸収された光は自然放出され

図1 原子のレーザー冷却とムービングモラセス

Ultra-Stable Oscillation Circuits and Applications.
Recent Atomic Frequency Standards and their Technology.
By Shin-ichi Ohshima (National Research Laboratory of
Metrology).

るが、これは等方的に放出される。従ってその反跳により原子が受ける運動量は統計的には等方的となり、全体としては加速も減速もされない。これに対して反対方向からのレーザー光の周波数は共鳴周波数から離れる方向であるため吸収されにくくなるが、逆に左の方向に動いている原子を減速させることになる。このように、運動している原子は、光の吸収・放出の過程を多数繰り返すことにより、常に運動と逆方向の力を受け、次第に静止することになる。図1では1次元で示したが、実際には対向する3組（計6本）のレーザー光を用いて3次元的に行う。このように、光の中で原子が動きにくくなる状態は光モラセスと呼ばれる。このような原理だけでは、セシウム原子の場合には120mKまでしか冷えないが、原子の超微細構造やレーザー光の偏光などを利用すると更に冷却される。到達する原子の温度は、レーザー光の強度や $\delta\nu_L$ に依存するが、数 μ K以下まで冷却することができる。この光モラセスでは、原子は減速されるが空間的位置が固定されるわけではない。位置を固定するためには、磁場を併せて利用する磁気光学トラップと呼ばれる方法が用いられる。この方法は原子を非常に安定に捕捉することができるため、しばしば用いられる方法であるが、最終的な冷却には光モラセスが用いられる。

光モラセスに一定方向の速度を与えるときには、図1のように左からの光の周波数を更に $+\Delta\nu_L$ だけシフトさせ、右からの光の周波数を $-\Delta\nu_L$ だけシフトさせる。この時、 c を光速とすると、右に向かって速度 $v=c\cdot(\Delta\nu_L/\nu_L)$ で動く座標系で見たときには、ドップラー効果により通常の光モラセスと全く同じ条件となる。すなわち、冷却された原子群に、加熱することなく必要とする速度を与えることができ、これはムービング・モラセスと呼ばれる。原子泉では、原子を上方に打ち上げ、原子の“泉”を作る。この時には、上方に向かうムービング・モラセスを作る。

従来方式と原子泉方式のそれぞれの原理を図2に示す。セシウム標準器におけるラムゼイ共鳴信号は原子とマイクロ波を2度相互作用させることによって得られるが、その時間間隔はドリフト時間と呼ばれる。これを T_R とした時、信号の線幅はそれに反比例し

$$\delta\nu_R \sim 1/(2T_R)$$

で与えられる。2つの方式の大きな違いは、マイクロ波と原子の相互作用時間 T_R の違いである。従来方式では、熱ビームを長さ1m程度のU字型のマイクロ波共振器を通過させる。この時、 T_R は数msくらいであり、 $\delta\nu_R \sim 100\text{Hz}$ 程度となる。これに対して原子泉方式では、重力場中で上方に打ち上げられて弾道運動する原子を利用している。途中に置かれた共振器を2回通過してラムゼイ共鳴が得られるが、ドリフト時間 T_R として1sくらい、すなわち1Hz程度の線幅を実現することができる。しかし、通常の温度の原子ではこのように長い間ドリフトさせることは不可能で、ほとんど瞬間的に拡散してしまう。レーザー冷却がそのような原子の並進運動を抑制している。レーザー冷却技術を用いた原子泉方式は、中性原子を用いる限り、地球上で実現する方法としては最も長い相互作用時間を実現する方式である。現在、原子泉方式の標準器が標準器として動作しているのはフランスの一次時間周波数研究所(LPTF)においてのみであるが、米国、ドイツ、日本など、多くの国で開発が進められている。LPTFは 2×10^{-15} という正確さを報告しているが、これは参照用に用いている水素メーザーの安定度によって制限されている値とされている。⁽²⁾セシウム原子を用いた場合の問題点として、冷却原子同士との衝突に伴う周波数シフトの問題が指摘されている。⁽³⁾これを解決する方法として、ルビジウム原子を用いた原子泉が有望と言われており、セシウムよりも正確さを1桁程度向上させることができるとされている。⁽⁴⁾

2.2 イオン・トラップ

イオン・トラップによる標準器は、これまで次世代の一次標準器として期待され、 Hg^+ 、 Be^+ 、 Ba^+ 、 Yb^+ 等、様々なイオンについて開発、研究が行われてきた。研究としては、多数のイオンを蓄積してS/Nを向上させ、周波数短期安定度を極限まで向上させようという方向と、イオンの数を制限して、正確さを向上させようとする方向がある。前者は、これまで水素メーザーが得意としていた分野であるが、その置き換えを目標に掲げている場合が多い。米国のジェット推進研究所(JPL)における 199Hg^+ ⁽⁵⁾、オーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO)における 171Yb^+ ⁽⁶⁾では、それぞれ 10^6 個程のイオンをリニアトラップに蓄積し、バッファガスをを用いて冷却することによって約 $5 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ という極めて高い短期周波数安定度を実現している。しかし、その正確さは2次のドップラーシフトの影響により、 4×10^{-14} に制限されている。

一方、後者は純粋に正確さの向上を目指し、セシウム標準に置き換えることを目標に研究が進められている。特に Hg^+ は、以前より信号が高いQを有することにより、極めて有望であるとされてきた。米国の国立標準技術研究所(NIST)、Berkeland等の Hg^+ イオントラップに関する報告では⁽⁷⁾、 3.4×10^{-15} の正確さが報告されている。 Hg^+ イオンの基底状態は $F=1$ と $F=0$ の状態を有し、 $(F=0, m_F=0) \rightarrow$

図2 熱ビーム型と原子泉型の比較

図3 リニア型イオントラップ

($F=1, mF=0$) が時計遷移として用いられる。Berkeland 等の装置でも図3に示すようにリニアトラップが用いられているが、このトラップは液体ヘリウムのデュアーに入れられているので、極低温の環境によりバックグラウンド・ガスが大幅に除去される。これまで大きな障害とされてきた、バックグラウンド・ガスとの衝突による周波数のシフトやイオン数の減少といった問題が解決されている。正確さを制限している最大の要因はトラップに用いている rf に伴う AC ゼーマンシフトであるが、まだ改善の余地があるとされている。短期周波数安定度の関しては、蓄積されたイオン数が7個の時に、 $3.3 \times 10^{-13} \tau^{1/2}$ ($\tau < 2$ 時間) が得られており、極めて優れていると言える。現時点では、セシウム原子泉方式と同程度の性能であるが、将来どのように発展するか期待が持たれている。しかし、原子泉方式などに比べてときに、イオントラップの有する特徴は「単純性」にあると言えるが、現時点での装置がヘリウム温度で動作していること、レーザー冷却に用いられるレーザー光の波長が 194nm と紫外域にあることなど、複雑な要素もあり、今後の発展の疎外要因となることも考えられる。

2.3 水素メーザー

水素メーザーは、これまで最も短期安定度の優れた発振器として位置付けられ、VLBI への応用など実用的な標準器として利用される他に、高性能な標準器の開発などにおいても性能評価のための参照用発振器として重要な働きをしてきた。しかし、LPTF における原子泉方式標準器の正確さ評価に関して前述したように、高性能な標準器を評価するには不十分な状況になってきている。イオン・トラップなど他の標準器の評価においても、中・長期の周波数安定度を評価した場合、その評価を制限している要因として水素メーザーの周波数安定度を上げている事例が多い。このところ、残念ながら水素メーザーの性能を画期的に向上させた例はあまり見られない。しかし、水素メーザーは商品化されている装置であり、それだけにユーザーにとっては大変便利な装置であり、一層の性能向上を期待したい。

水素メーザーの中・長期の安定度を劣化させる原因は、水素メーザーの重要な構成要素である共振器の共振周波数が、様々な外的要因により、次第にずれてしまうことに起因するとされている。このような共振器の共振周波数を安定化するための自動同調方式が必要とされるが、水素メー

ザーの優れた周波数短期安定度を劣化させることなく、中長期の安定度を向上させることが望まれる。これまで、スピン交換法、共振周波数スイッチング法、キャリアフリー共振器周波数検出法などが提案されてきたが、特に3番目の方法は短期安定度を劣化させずに、中長期の安定度を向上させる方法として期待されている。この方法では、共振器の共鳴周波数を測定するために、プローブ用の周波数を共振器内に導入する。プローブ周波数を矩形波変調して共振曲線の中心周波数を検出し、それを誤差信号として共振器に組み込まれたバラクタダイオードを制御して、中心周波数の安定化を図る。共振器が安定化された時に、矩形波の中心周波数（キャリア）がメーザー発振の周波数に混入することが無いよう、変調指数の選択を行う。キャリアの抑圧がどこまで可能なのか、技術的に興味あるところである。Barillet 等の実験では⁽⁸⁾、確かに短期安定度の劣化は極めて少ないにも関わらず、中長期の安定度の向上が見られる。しかし、この実験では、自動同調によって実現された周波数安定度は、高性能なフリーランの水素メーザーと同程度である。従って、そのような高性能な水素メーザーに対してこの方法を適用した時に、どの程度周波数安定度を向上させることができるのか、まだ研究課題である。

2.4 低位相ノイズ発振器

最近の高性能周波数標準器では、原子泉やイオン・トラップなどに見られるように、マイクロ波と原子・イオンとの相互作用を連続して行うことができないものが多い。例えば、原子泉において原子を集めて打ち上げるまでに 0.5 秒かかり、原子が共振器の上をドリフトする時間が 0.5 秒かかったとすると、50%の時間はマイクロ波と原子が相互作用しないデッドタイムとなってしまう。このようにデッドタイムがある時には、マイクロ波の位相ノイズによって標準器の周波数安定度が制限されてしまうことがある。このような現象はディック効果と呼ばれる。⁽⁹⁾ これまで標準器の局部発振器には水晶発振器などが用いられてきたが、それがマイクロ波の源発振器になっているため、マイクロ波の位相ノイズは主に局部発振器の位相ノイズによっている。

位相ノイズの少ない発振器としては、ジェット推進研究所や西オーストラリア大学などで研究が進められている極低温技術を用いた発振器が知られており、周波数安定度で表した時、1 ~ 1000 秒で 10^{-15} 台の値が得られる。性能的には全く問題のない理想的な局部発振器であり、長期運転も可能とする工夫もなされているが⁽¹⁰⁾、しかし、まだ一般ユーザーが使えるような市販品にはなっていない。

これに対し、性能的にはまだ問題はあるが、室温動作のサファイヤ共振器を用いた発振器は市販のものが入手できるようになった。図4の(A)はその位相ノイズを表している。実線は測定データで、点線部分はその外挿である。9.2GHz 付近の発振器としては位相ノイズは大変小さく、精密実験への応用が期待される。(B) も同様な室温動作

のサファイア共振器を用いた発振器であるが⁽¹¹⁾、(A)との違いは周波数同調機能を持っていないことである。これは、周波数同調に用いられる部品の高性能化が達成されれば、周波数同調機能を付加しても(B)のレベルまで到達する可能性がある。比較のため、セシウム原子泉型標準器における局部発振器への要求条件の例と、9.2GHzをBVA水晶発振器から周波数合成した場合の例を(C)、(D)に示す。⁽¹²⁾これらと比べて(B)は有望なレベルにある。しかし、室温動作のサファイア共振器は温度変動の影響を大きく受け、まだ使いやすいものにはなっていない。温度補償を行った共振器の研究も進められており⁽¹³⁾、今後の発展に期待したい。

図4 9.2GHz付近の低位相ノイズ発振器の特性例

3. おわりに

高性能な原子周波数標準器とその関連技術について記述してみたが、話題の選び方については公平性に欠けるかもしれない。この分野は様々な標準の中でも最も高度な技術分野となっており、技術の細部に渡り話題とすべきテーマが多いからである。また、それらが他分野における高精度な計測技術として応用可能な例も多い。周波数標準器に関わる研究開発は、今後も極めて高度な技術開発とその向上を行ってゆく場であり続けるものと考えられる。

(平成11年5月24日受付)

文 献

- (1) J.A.Davis and J.M.Furlong, "Report on the Study to Determine the Suitability of GPS Disciplined Oscillators as Time and Frequency Standards Traceable to the UK National Time Scale UTC(NPL)", NPL Report CTMI (1997).
- (2) S.Ghezali, Ph.Laurent, S.N.Lea and A.Clairon, Europhys. Lett., **36**, p.25, (1996).
- (3) E.Tiesinga, B.J.Verhaar, H.T.C.Stoof and D.van Brat, Phys.Rev.A, **45**, p.R2671 (1992).
- (4) K.Gibble, Phys.Rev.A, **52**, p.3370, (1995).
- (5) R.L.Tjoelker, J.D.Prestage, and L.Maleki, Proc. 5th Symp. on Frequency Standards and Metrology, edited by J.C.Berquist (world Scientific, Singapore), p.33, (1996).
- (6) P.T.H.Fisk, M.J.Sellars, M.A.Lawn, and C.Cole, Proc. 5th Symp. on Frequency Standards and Metrology, edited by J.C.Berquist (world Scientific, Singapore), p.27, (1996).
- (7) D.J.Berkeland, J.D.Miller, J.C.Berquist, W.M.Itano, and D.J.Wineland: Phys.Rev.Lett., **80**, p.2089, (1998).
- (8) R.Barillet, J.Viennet, P.Petit, and C.Audoin: Proc. 5th European Frequency and Time Forum, p.407, (1991).
- (9) G.J.Dick, J.Prestage, C.A.Greenhall and L.Maleki, Proc. 22nd Annu. Precise Time and Time Interval Conf., p.487, (1990).
- (10) 例えば、R.T.Wang and G.J.Dick, Digest of 1998 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Washington D.C., USA, July 6-10, p. 65.
- (11) E.N.Ivanov, M.E.Tobar and R.A.Woode, Proc. 1995 IEEE International Frequency Control Symp., p.314, (1995).
- (12) G.D.Rovera, G.Santarelli and A.Clairon, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect., Freq. Contr., **43**, p.354, (1996).
- (13) M.E.Tobar, J.Krupka, J.G.Hartnett, E.N.Ivanov and R.A.Woode, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect., Freq. Contr., **45**, p.830, (1998).

大嶋 新一 (非会員) 1952年6月30日生まれ。80年筑波大学大学院物理学研究科博士課程終了。80～83年宇宙開発事業団を経て、84年計量研究所に入所。セシウム時間・周波数標準器の研究に従事。理博。