多彩な応用へ前進する周波数コム

ジェフ・ヘクト

数十年前に最先端の超高速分光法として誕生したフェムト秒周波数コムは、2005年にジョン・ホールとテオドール・ヘンシュにノーベル賞をもたらした。現在の新しい周波数コムは、天文学からレーザレーダや通信まで多彩な応用が開発されている。

最初の光周波数コムは1970年代の初めに超短光パルスのパルス列から生成されたが、その帯域幅は限定され、絶対周波数を測定できなかったため、ほとんど注目されなかった。それから20年が経過し、一連の進歩が実現して、周波数コムの帯域はオクターブへ広がり、周波数の精密測定が可能になった。このような計測工学の大きな進歩によって、ジョン・ホールとテオドール・ヘンシュは2005年のノーベル物理学賞を授与された。

現在の光周波数コムは可変波長レーザのキャリブレーションやコヒーレントレーザレーダの精度の改善から太陽系外の恒星を周回する地球サイズの惑星の探索まで新しい計測工学の最前線の開拓に使われている。一方で、より小型でロバスト性のある周波数コムが実現すると、高速通信や宇宙用機器を含めて、より広範囲の応用が可能になる。

周波数コムの種類

周波数コムは短い光パルスがフーリエ変換された一連の等間隔の光周波数だ。パルスが短いほど、そこに含まれる周波数の範囲は広くなり、周波数コムの帯域幅は広くなる。フェムト秒周波数コムはオクターブの広がりが得られる。コムの周波数間隔はパルスの繰返し速度に等しい。**図1**に示すように、コムのそれぞれの歯は連続ビームであり、その出力はスペクトルの全体にわたり変化する。

最初のオクターブ広がり周波数コムはTi：サファイアレーザを用いて生成され、現在も広く使われている。Ti：サファイアレーザは高い繰返し速度や高いピークおよび平均出力をもつ超短パルスを直接発生する。その雑音はすべての周波数コムのなかで最も低い。しかし、このレーザが大型かつ繊細であり、高価なポンプ用グリーンレーザが必要になる。

ファイバレーザは固有スペクトル幅が狭いため、Ti:サファイアレーザほどの短いパルスを生成できないが、その出力を非線形ファイバに通すと、帯域幅は1オクターブ以上に広がる。エルビウムおよびイッテルビウムドープファイバレーザはいずれも周波数コムを生成し、いずれも短波長への周波数2倍化を行うことができる。ピーク出力と繰返し速度はTi：サファイアレーザに及ばないが、ファイバレーザは使いやすく、安価であり、ロバスト性も優れている。このような特徴を組み合わせることで、ファイバレーザは研究室外の用途にも応用できる魅力が付与される。また、宇宙空間での無重力実験

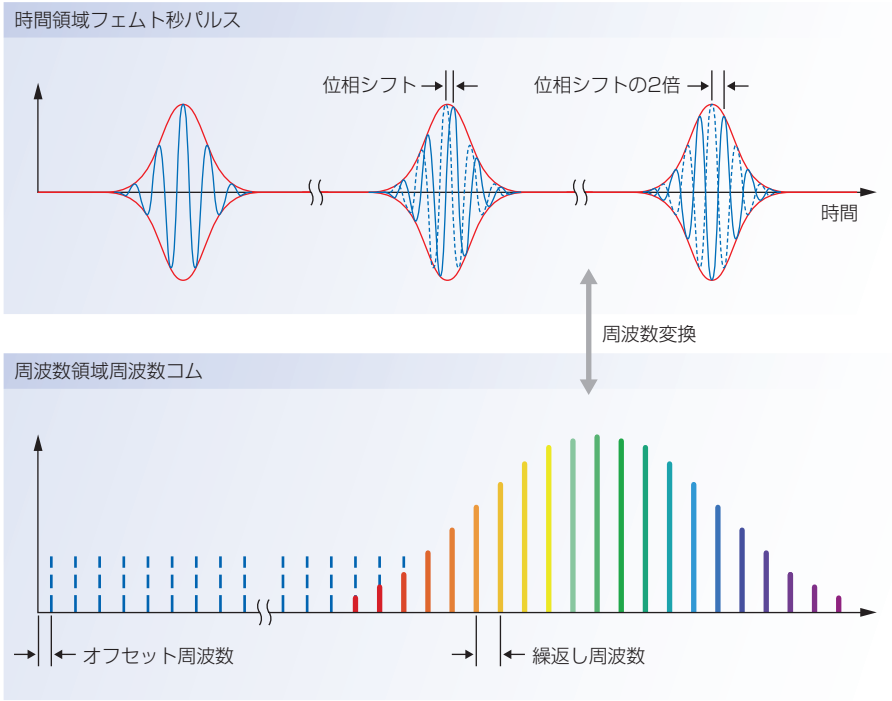

図1　周波数コム（下）はモード同期されたパルス列（上）をフーリエ変換して生成される。コムの歯の周波数間隔はパルスに繰返し速度に等しい。非線形効果により増強されるパルス列のスペクトル帯域幅がコムの周波数範囲を決定する。下図に示すように、コム周波数はコム間隔の整数倍とオフセット周波数からなる。

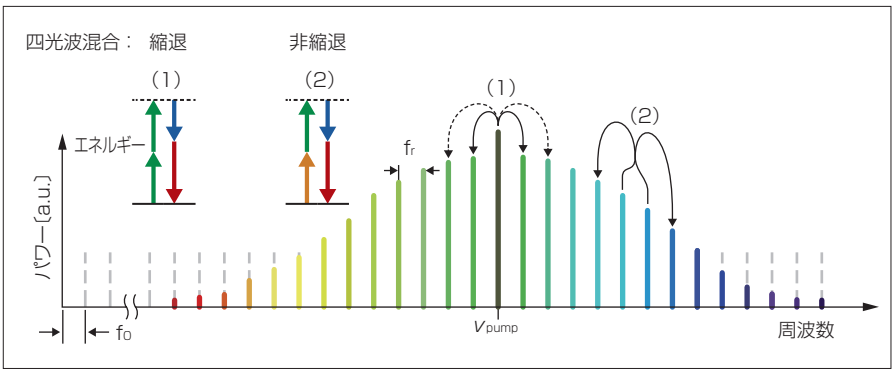

図2　微小共振器周波数コムはリング共振器の四光波混合から生成される。最初の縮退四光波混合はポンプ線の高周波側と低周波側に、同一の増分による新しいスペクトル線オフセットを発生させる。次に、非縮退四光波混合が追加のスペクトル線を発生させる。（資料提供：キッペンバーグ氏ら[1]）

に使用するファイバレーザも開発されている。

微小共振器周波数コム

周波数コムは高Q値の微小共振器による四光波混合からも生成できる。光パラメトリック発振器（OPO）の場合と同様に、ポンプレーザからの光子対を非線形材料に入れると、OPOのポンプ光とアイドラ光のように、同じ全体エネルギーをもつ2つの光子が発生する。しかし、この場合のコム発生は可変波長連続ビームを用いて多数のささやきの回廊モードを振動させる微小リング共振器の励振過程にもとづいている。

一般に、微小共振器と結合する前のポンプビームは増幅を行い、平方センチメートルあたりギガワットの放射強度に高める。この放射強度が縮退四光波混合を引き起こし、**図2**に示すように、1つはポンプ光のスペクトル線の高周波側に、もう1つは低周波側に位置する一対の周波数が生成される。このシフトは原理的にどのような数でも可能だが、微小共振器の場合はささやきの回廊モードと一致する周波数だけが増幅され、ポンプ光から1つ、2つ、またはそれ以上のステップでオフセットされた周波数コムのスペクトル線が生まれる。付加されたコム線は非縮退四光波混合による他のコム線との相互作用が起こり、図2に示すように、より広い周波数コムが発生する。

微小共振器コムの最大幅は共振器材料の波長分散の制約を受ける。四光波混合過程は周波数のオフセットに等しい側波帯のスペクトル線を生成する。しかしながら、非線形材料に存在するすべての波長分散はささやきの回廊モードに波長シフトをもたらすため、波長が変化すると、側波帯スペクトル線からのドリフトが起こり、スペクトル線強度が減少する[1]。

現在はスイス連邦ローザンヌ工科大学（Swiss Federal Institute of Technology Lausanne）に在籍するトビアス・キッペンバーグ氏（Tobias Kippenberg）とその共同研究者は2007年に、最初の広帯域微小共振器周波数コムを発生させた[2]。彼らが実験した共振器モードは850GHzの間隔があり、周波数があまりにも高いため、その光周波数の測定にはマイクロ波エレクトロニクスによる処理が必要であった。米国標準技術研究所（National Institute of Standards and Technologies, NIST）のスコット・ディッダムス氏（Scott Diddams）によると、現在はマイクロ波エレクト

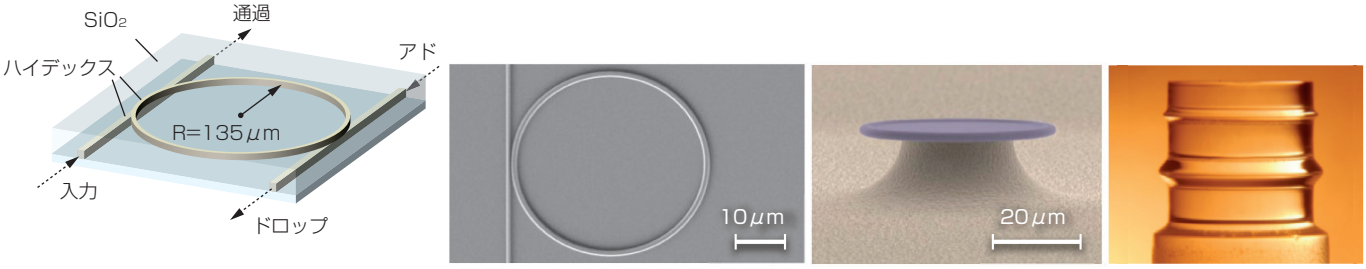

図3 周波数コム発生用に研究されている4種類の微小共振器構造を示す。左側の2つは微小共振器に結合した導波路を持つ。右側の2つは結合光学系を持たない。左から順に、ガラス上シリカリング導波路、シリコン上窒化ケイ素リング共振器、シリコン上トロイダル微小共振器、ミリメートルサイズ結晶共振器を示している。(資料提供:キッペンバーグ氏ら[1])

ロニクスと相性のよい数十GHzの線間隔をもつ微小共振器コムの開発が行われている。

ディッダムス氏によると、開発者たちはチップ上に配置する微小共振器コム発生器の開発が夢であり、その可能性のある多数の設計を検討している。窒化ケイ素はフォトリソグラフィによるシリコン上への製作が可能であり、後処理をほとんど必要としないため、魅力的な材料になる。**図3**はその1つの可能性を他の3つの可能性とともに示している。これらの微小共振器コム発生器はガラスチップ上のシリカ導波路、シリコン上の超高Qトロイダルシリカ共振器およびミリメートルサイズの超高Q結晶共振器から構成されている。

しかし、微小共振器周波数コムはレーザコムと同等の低雑音性を得ることはできないであろう。原子の室温での運動は微小共振器の振動を引き起こし、その出力には熱雑音が導入される。現在、研究者たちは微小共振器コムの雑音限界の理解と、それらを制御する方法の開発を試みている。

応用の多様化

最初の周波数コムはマイクロ波の原子時計を光周波数に接続する厳密な過程に大きな変化をもたらした。コムが出現するまでは、NISTはこの過程を実行するための装置で一杯になった大きな実験室が必要だったとディッダムス氏は回想する。光周波数コムはTi:サファイアレーザによって装置の大きさが平方メートルサイズに縮小し、エルビウムファイバレーザによってさらに縮小し、実験のロバスト性が大幅に改善された。

現在、NISTのナサーン・ニューベリー氏(Nathan Newbury)がNature Photonicsの2011年4月号に書いたように、光周波数コムの応用は拡大を続けている[3]。彼の応用リストの筆頭には光学時計の周波数測定がある。この時計は測定する遷移のレーザコムを同期して、10^{17}分の1の測定精度を実現する。また、従来のエタロンや気体セルに比べると、コムは可変波長レーザのキャリブレーションを数千倍の精度で行うことができる。この精密測定は複雑な動作が必要になるが、そのための小型で簡単なコム光源の開発も行われている。

キャリブレーションへの応用は間違いなく将来の天文学ニュースの見出しになる。太陽系外惑星の研究は恒星を周回する地球サイズの衛星による小さなドップラーシフトを検出しなければならない。ディッダムス氏によると、周波数コムは従来の方法に比べると、恒星スペクトルの3桁から4桁も高精度のキャリブレーションが可能になり、原子時計の極端な精度を必要としない。周波数コムのコストと複雑さの低減は天文学に対して巨大な利益をもたらす。

周波数コムは新種の分光用光源としても応用できる。ニューベリー氏の記述によると、その利点は「利用可能なスペクトル範囲が可変波長レーザよりも広く、コリメーションした単一モードビームから構成され、長い有効光路長のための整合共振器と結合したスペクトル線の歯が得られる」ことにある。周波数コムの利点を完全に利用するには、試料と相互作用した光の各スペクトル線の解像が必要になるが、このことはすでに実証されている。

コムの位相コヒーレンスと広帯域幅は周波数と時間信号の遠距離伝送にも魅力的だ。周波数信号はドップラー補償ファイバを用いることで数百キロメートルの距離を10^{19}分の1の不確かさで伝送できるが、光学時計からの時間信号は伝送が難しく、いまだに実証されていない。光周波数コムはコムを光源として使用し、あるいはこの光源を使用して従来のコヒーレントレーザレーダのスペクトルを測定することで、レーザ距離測定の精度の向上も可能になる。コムは従来のマイクロ波発振器よりも著しく低い位相雑音のマイクロ波を発生できるため、レーダや干渉測定への応用も期待できる。また、コムはそれぞれの歯の位相振幅を変調すると、任意の光波形を合成することもできる。

最近、2つの研究グループがかなり

狭帯域の周波数コムを使用して、通信用の高速光データ伝送を実証した。2011月5月に開催されたCLEOにおいて、米コーネル大学(Cornell University)のヤコブ・レヴィー氏(Jacob Levy)とその共同研究者は、微小共振器周波数コムからの6本の各スペクトル線による10Gbit/s伝送を報告した。彼らはこの技術を集積システムに拡張すると、1Tbit/s以上のデータ速度が可能になると語っている[4]。しかし、彼らの成果は間もなく、独カールスルーエ工科大学(Karlsruhe Institute of Technology)のデイビッド・ヒラークス氏(David Hillerkuss)とその共同研究者によって追い越された。ヒラークス氏らは1533から1565nmまでに広がるエルビウムドープファイバコムの325本のスペクトル線を組み合わせて、単一スーパー搬送波を構成し、50kmのファイバによる26Tbit/sの伝送を実証した。

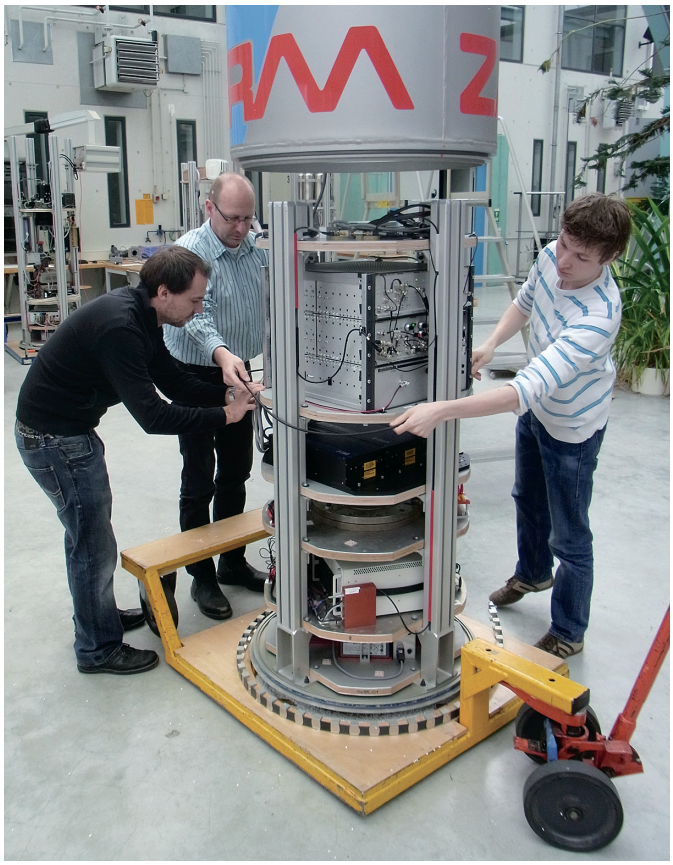

図4 メンロシステムズ社が製作した周波数コム装置を示している。この装置はカプセル容器に収容され、ブレーメン大学の深さ120mの落下塔による微小重力実験に使用される。黒色モジュールの光学ヘッドが中央に、コム装置の電子装置が上部に、その他の3つの実験機器が下部に収容されている。(資料提供:メンロシステムズ社)

応用への技術の適合性

しかしながら、恐ろしく難しい課題が残されている。光周波数コムの技術は若い。周波数コムとそれらの応用のほとんどは研究段階にあり、それぞれの可能性と応用の要件との適合性が研究されている。NISTのニューベリー氏は「それぞれの応用には独自の要件がある」と語っている。いくつかの応用の要件は非常に難しいが、彼は「多分、コムは世界にある最高の光学時計に匹敵する安定化を必要としないだろう」と述べた。天文学用のコムはその好例になる。太陽系外の恒星を周回する地球状の衛星の探索は17桁の精度を必要としないが、その成果は天文学ニュースの見出しになる。そこでは宇宙空間の動作に十分な堅牢性をもつコムの開発が課題になる。

この課題は解決されようとしている。完全な商用の周波数コム装置を製造する唯一の企業である独メンロシステムズ(Menlo Systems)は、独ブレーメン大学(University of Bremen)応用宇宙技術微小重力センターに対して、完全位相同期周波数コムシステムを供給した[6]。このシステムは**図4**に示すように、ブレーメンの120mの微小重力実験塔を落下する装置内の原子干渉計の研究において重要な役割を果たしている。この装置のファイバレーザは微小重力ばかりでなく、落下塔の底にある大量の発泡スチレンビーズによる減速にも耐えることができる。メンロシステムズは同社の標準周波数コムシステムに落下塔システム用の機能を追加し、また、宇宙空間の動作の厳しい要件にも適合できる特殊装置の開発を進めている。

参考文献

(1) T.J. Kippenberg, R. Holzwarth, and S. Diddams, "Microresonator-based optical frequency combs," Science, 332,555 (Apr. 29, 2011).

(2) P. Del'Haye et al., "Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator," Nature, 450, 1214-1217 (Dec. 20, 2007); doi: 10.1038/nature06401.

(3) N. Newbury, "Searching for applications with a fine-tooth comb," Nature Photon., 5, 186-188 (April 2011).

(4) J.S. Levy et al., "High-Performance Silicon-Based Multiple Wavelength Source"; http://arxiv.org/pdf/1106.2834.

(5) D. Hillerkuss et al., "26 Tbit s21 line-rate super-channel transmission utilizing all-optical fast Fourier transform processing," Nature Photon., 5, 64 (June 2011); dio:10.1038/NPHOTON.2011.74.

(6) http://www.zarm.uni-bremen.de/space-science/fundamental-physics/projects/primus.html.

LFWJ