

大学の研究・動向

メタマテリアル、光の量子計測、光時計の研究 —電磁気学と量子力学を基礎として—

工学研究科 電子工学専攻 量子機能工学講座 量子電磁工学分野（北野研究室）

教授 北 野 正 雄

准教授 杉 山 和 彦

助教 中 西 俊 博

1. はじめに

量子電磁工学分野（北野研）では、電磁気学と量子力学の根幹にかかわる基礎的な研究から、それらの工学的応用を視野に入れた研究まで、幅広い研究を行っている。研究室が開設された約15年前を振り返ってみると、電磁気学のテーマとしてエバネセント波など、量子力学のテーマとして量子ゼノの効果やレーザー冷却などの研究を行っていた。エバネセント波は、近接場といって遠方へは伝搬しない特殊な状態の電磁波である。このような特殊な電磁波伝搬の研究は、2.4節にもあるように電磁気学の理解への興味を基盤として、研究室開設直後に研究分野が立ち上がってきたメタマテリアルの研究へとつながっている。メタマテリアルは波長よりも小さな大きさの構造体による媒質で、誘電率や透磁率を自由に設計することができる。光をガラスに入射するとき、偏光の向きと入射角を選ぶと表面反射がなくなるというブリュースタ現象は、通常は電磁波の電場に対するものである。透磁率も自由に設計できるメタマテリアルでは、磁場に対してもブリュースタ現象を実現できる。この研究を皮切りに研究室のメタマテリアルの研究は進展し、第2章で説明するメタ表面の研究などが進んでいる。

量子力学の研究テーマとして行っていた量子ゼノの効果とは、系の状態を観測することが系の時間発展を阻害する現象のことをいう。このような量子力学の基本概念に関する研究は、第3章で説明する時間反転対称性の研究に引き継がれている。レーザー冷却は、原子の共鳴とレーザー光の相互作用により原子の速度を低減させる技術で、量子力学的効果の応用として発展が期待されていた。たとえば、低速の原子ではドップラーシフトが低減して原子本来の共鳴周波数を観測できるので、周波数のよい基準となる。光領域にある共鳴周波数を基準とする原子時計では、単位“秒”の定義とされているマイクロ波領域の共鳴周波数を基準としたものよりも不確かさが2桁も小さく、周波数値を18桁も決められるものが世界的に実現されてきた。研究室では単一イオンを用いて研究を進めている。不確かさが小さいことは、原子時計を用いて非常に小さな効果を観測できることを意味していて、最近では素粒子物理学の研究者とも交流が生まれてきた。これらの研究に関して第4章で説明する。

当分野では3人の研究者の志向（嗜好というほうが正しいかもしれない）が異なることもあり、研究テーマは発散しているようにも見える。しかし、第1章を執筆した筆者（杉山）が、研究室に参画した2001年ごろから今までを振り返ってみると、物理の基礎概念を大切にすると、同時に、今行っている研究を大切に深化あるいは展開していくところは共通している。そこに研究室の伝統的な哲学を感じることができたことは収穫だった。以下、各研究テーマについて概要を紹介する。

2 メタマテリアル

2.1 メタマテリアルとは

通常、媒質は図1 (a) のように原子や分子の集団から形成されるが、原子や分子のサイズは電磁波の波長より十分小さく、媒質の性質は屈折率などの媒質パラメータで記述される。それに対して、図1 (b) のように金属や誘電体などで構成される人

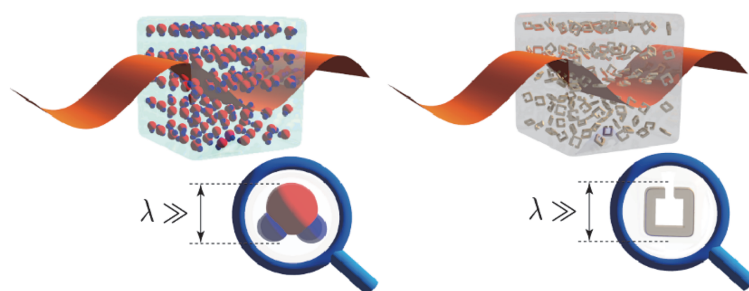


図1 (a) 通常の媒質 (原子 / 分子系) (b) メタマテリアル

工的な構造に対しても、波長が構造よりも十分大きければ媒質パラメータを定義することができる。この「人工的な原子」はしばしばメタ原子と呼ばれ、その集合はメタマテリアルと呼ばれる。メタ原子の材質及び構造の設計によって自然の媒質では実現できないような媒質パラメータとそれに関係した物理現象を実現することができる。さらに、マクスウェル方程式のスケール不変性から、原理的には人工原子のサイズを変更するだけでマイクロ波領域から光領域まで様々な波長に対応したメタマテリアルを実現することができる。

負の屈折率は自然の媒質では実現できない媒質パラメータの典型例で、マイクロ波領域での実証実験からメタマテリアルの研究が爆発的に増加した。負の屈折率により、媒質境界で「く」の字型に電磁波が屈折する特殊な状況が実現できるだけでなく、回折限界を超えたイメージングを実現できることが知られている。また、メタマテリアルを用いることで媒質パラメータを空間依存した形で自在に変化させることができる。自然界において蜃気楼は屈折率が空間変化することで光路が曲がる現象であるが、これをより一般化するとより高い自由度で電磁波の伝搬制御をすることができる。例えば、メタマテリアルを用いることで、ある領域を迂回するように電磁波伝搬を制御することも可能になり、迂回した領域は外部から認識できないため、「透明マント」と呼ばれる。この手法は、マクスウェル方程式を座標変換することで定式化されることから座標変換媒質と呼ばれ、透明マントを含む幅広い電磁波伝搬制御手法として注目を集めている。

メタ原子を平面上に配置した場合は特にメタ表面と呼ばれる。この場合、面での反射と透過だけが問題になる。作成上の容易さから、マイクロ波領域から光領域まで幅広く数多くの研究があり、波長よりも薄い光学素子 (波長板、周波数フィルタ、吸収体) を実現することや、波面の制御などに応用されている。

2.2 メタマテリアルを用いた電磁波の速度制御

電磁誘起透明化現象 (EIT 現象) とは、元々原子系で研究されてきた現象で、制御光と呼ばれる補助的な光 (電磁波) の入射で不透明な媒質が透明になるという非線形光学現象である。この透明化は、非常に狭帯域で起こる上、その透明化帯域において光の群速度が非常に遅くなる。さらに、制御光を動的に変調することで、媒質中に光を保存し任意のタイミングで取り出す (再生する) ことができることから、光メモリを実現するものとして注目を集めている。人工原子系ともいえるメタマテリアルで EIT 現象を模擬することも可能で、これまで様々な構造が考案され、マイクロ波領域から光領域まで広く実証されている。しかし、これまでの研究では、電磁波の保存と再生に必要な、EIT 現象の動的変調 (ON/OFF) ができなかった。これに対して、当研究室では、直流電場の印加によって EIT 現象を制御するメタマテリアルの構造を提案し、マイクロ波領域で電磁波の保存と再生に初めて成功した [Phys. Rev. B, 87, 161110, (2013)]。さらにこの研究を進め、本来の原子系の EIT 現象である、電磁波の入射によって媒質を透明にする手法を考案し、マイクロ波領域でこの「真の EIT 現象」を実現した [Phys. Rev.

Appl. 4, 024013 (2015)〕。現在は、光領域を見据えた更なる高周波化を目指して研究を行っている。

以上に加えて、電磁波の速度制御として、金属表面に伝搬する表面電磁波（擬似表面プラズモン）の研究も行っている。通常の金属表面でもこのような表面波はあるが、金属の種類で特性は全て決まってしまう。一方、擬似表面プラズモンでは、金属構造によって様々な伝搬特性を制御することが

ができる。当研究室では特に、フラットバンドと呼ばれる、波動の分散関係が波数によらず一定になる現象に注目して研究を行っている。フラットバンド上では、表面波の群速度は全方位的に0になり、波動は広がることなく局在化する。図2 (a) に示す、カゴメ格子と呼ばれる金属周期構造に関して、擬似表面プラズモンの分散関係が平坦になることを回路モデルから定式化し、テラヘルツ領域における透過測定でフラットバンドの存在を明らかにした [Phys. Rev. B, 85, 205128 (2012)]。さらに、同図 (b) のリープ格子において、透過測定と全反射減衰分光法により、より広い波数領域で擬似表面プラズモンの分散関係が平坦になることを実証した [Phys. Rev. B, 93, 075126 (2016)]。この結果は、擬似表面プラズモンが3次元的に完全に局在化することを意味している。この特徴を利用することで、電磁波と物質の相互作用を大きくすることが可能になるため、高感度センシングなどの応用へと進展することが期待される。

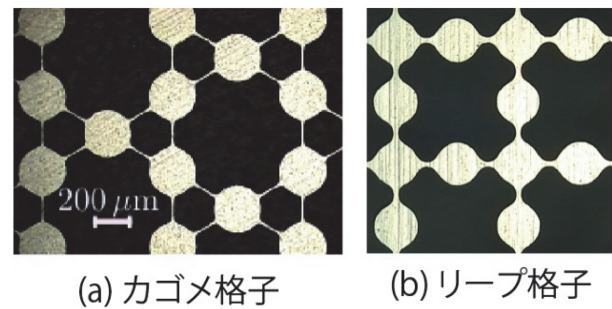


図2 フラットバンドを実現する金属格子構造

2.3 チェッカーボード構造を利用した電磁波応答の制御

金属を用いた平面構造はしばしば、電磁波の制御に用いられる。このような構造に関しては、金属部と空隙部を入れ替えた補対構造が存在する。補対構造間にはバビネの原理と呼ばれる関係があり、両者の反射と透過にはある関係がある。当研究室では、この関係を抵抗膜を含むメタ表面の電磁応答にまで拡張し、補対構造が元の構造と同一になる「自己補対構造」において、電磁波応答の周波数依存性がなくなることを示した。また、図3 (a) に示したような構造を用いてテラヘルツ領域での実験的検証にも成功した [Phys. Rev. Lett. 114, 237401 (2015)]。加えて、このメタ表面に両側から同位相の電磁波を当てると完全吸収が起こることが予想される。コヒーレント完全吸収と呼ばれるこの現象の観測にも成功している [Opt. Lett. 41, 4472-4475 (2016)]。

さらに、補対構造を切り替えることで、透過・反射特性を切り替える方法を提案した。図3 (b) にその構造の顕微鏡写真を示す。構造には金属（アルミニウム）以外に、二酸化バナジウム（VO₂）が利用されている。二酸化バナジウムは、ある転移温度を境に、絶縁体から伝導体へと変化する性質がある。これを補対構造の切り替えに利用することで、テラヘルツ領域における実験において透過と反射が相転移温度を境に入れ替わることを実証した [Opt. Express, 24, 4405 (2016)]。

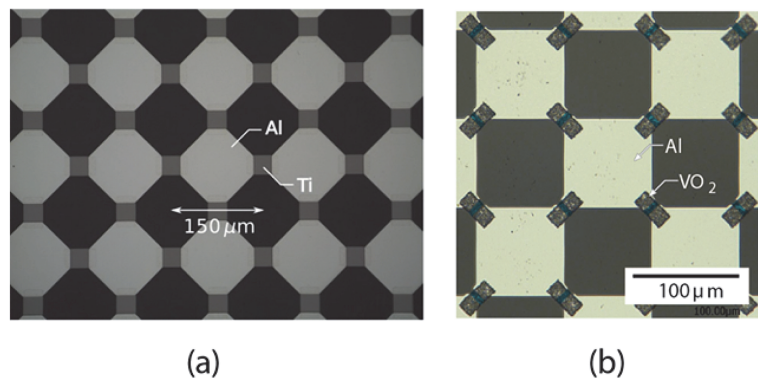


図3 (a) 自己補対構造をもつチェッカーボード型メタ表面
(b) 補対構造の切り替えを実現するメタ表面

2.4 電磁気学の基礎

メタマテリアルは媒質定数を自由に設定することで、電磁波の特異な伝搬を実現するものである。メタマテリアル研究の前提として、真空中における媒質定数、すなわち誘電率、透磁率、光速、インピーダンスの物理的意味を明らかにしておく必要がある。さらに4種類の場合（電場、電束密度、磁束密度、磁場の強さ）のそれぞれの意義の確認も必要である。このような電磁気の基礎的概念に関しては今日でも誤った解釈が流布しており、教科書など物理教育の現場に混乱をもたらしていることを指摘した[大学の物理教育 21 (2), 73 (2015)]。また関連する教育的な実験テーマとして、LC 共振回路による真空中の光速とインピーダンスの測定を提案した[大学の物理教育 21 (3), 126 (2015); 21 (3), 130 (2015)]。

3 時間反転光学系の量子光計測への応用

光計測の技術に量子光学の手法を導入する量子光計測の分野が著しい進展を遂げており、量子相関を利用した高感度量子測定では光子対を用いた位相の超感度測定や量子光コヒーレンストモグラフィー（量子 OCT）が研究されている。しかし、光子対の生成効率の低さや検出速度の問題など実用上の問題も多い。

以上の問題を解決する1つの方法として、量子系の時間反転対称性を利用した方法が提案され、量子 OCT を古典的なチャープ光を用いて実現する方法が実証されていた。当研究室ではこの考え方をさらに発展させ、チャープのない古典パルス光で位相の超分解測定や量子 OCT を実現する方法を考案した。前者の位相超分解の研究は、利用する光の波長の半分の干渉縞を 100% の明瞭度で得ることができる [Phys. Rev. A, 91, 062118 (2015)]。一方、後者の量子 OCT の古典パルスでの実現は、古典 OCT で問題となる分散による分解能の低下を抑えることができる。当研究室では、図 4 (a) に示すような光学系を用いて量子 OCT を実現した。干渉計上部のミラーの位置 x を移動しながら光検出器の信号を取得することで、干渉計下部の反射位置が検出信号のディップとして観測される。測定対象の前に分散媒質がある場合、従来の OCT では同図 (b) に + 印で示すように信号が広がってしまうが、提案手法では ● 印で示すように、分散の影響を受けない測定が可能になる [Phys. Rev. A, 91, 013846 (2015)]。

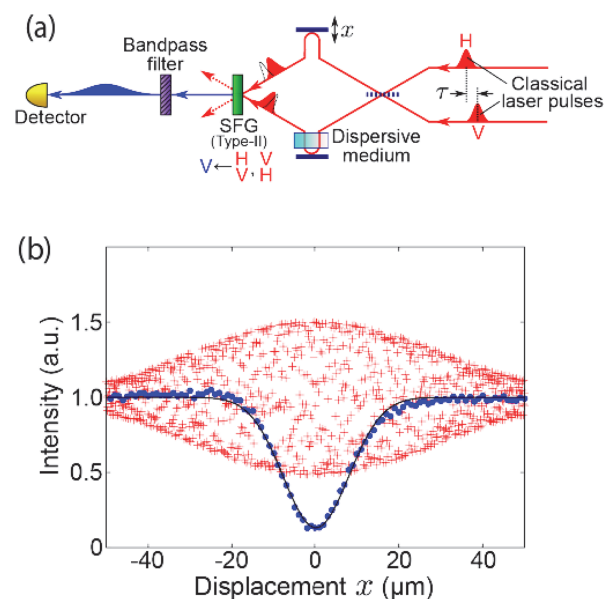


図 4 (a) 時間反転光学系を利用した量子 OCT
(b) OCT 信号。+ 印が従来法、● 印が提案手法の信号。

4 単一イオン光時計の開発と基礎物理学への応用

4.1 光時計の原理

時間を測る装置、時計として、たとえば振り子時計では、振り子の 1 周期がいつでも等しいと仮定し、周期の回数を数えることで時間を計測する。いつでもどこでも 1 周期が同じ、という再現性が、公理として計測のよりどころとなっている。再現性の公理が成り立つ現象では、繰り返し測定して平均をとることで、測定値の不確かさを低減させることができる。

機械的な振り子のかわりに、原子が共鳴する電磁波の周期を基準とするものを原子時計という。原子

のとりうるエネルギー準位はとびとびになっていて、準位間のエネルギー差に相当する周波数の電磁波と共鳴する。再現性の公理には、いつでもどこでも同じ周期を実現するために、動作条件を等しくする、という要請がある。機械的な寸法で決まる振子の周期よりも、物理的に決まる原子のエネルギー準位を基準とするほうが、いつでもどこでも再現性よく1秒を決めることができる。現在の時間の単位“秒”は、この特長から原子の共鳴、具体的には、セシウム原子のマイクロ波領域、約 9.2 GHz の共鳴を基準としている。そして、この共鳴を基準とする原子時計では、不確かさ 10^{-16} に達するものが実現されている。

さて、再現性の公理によれば、何周期も測定して平均をとることで不確かさが小さくなる。そうすると、1 周期を観測した時の不確かさは等しいとして観測時間を固定して比べると、周期の速い現象のほうが周期の測定回数が多くなり不確かさが小さくなる。原子時計では周期が速い、すなわち周波数の高い共鳴を基準とするとよい。基準周波数をマイクロ波から光領域にすると、はるかに不確かさの小さい原子時計が実現できそう。一方で、不確かさが小さくなれば、動作条件を等しくするという再現性を担保するための要請が厳しくなる。実際の原子時計では、原子は磁場などの環境を設定された条件のもとにおく。したがって、共鳴には、環境が変化しても共鳴周波数の変化が小さい、あるいは動作環境やその環境下での共鳴周波数を正確に決められる、このような特性が重要になってくる。そのために、原子と共鳴の種類を選択し、共鳴周波数を観測する原子の供給方法を工夫する。現在、光領域の原子時計、光時計（図 5 参照）では、単一イオン光時計と光格子時計の 2 つの方式が研究されている。単一イオン光時計では、原子を 1 個だけ超高真空中に閉じ込めて静止させ、原子本来の共鳴周波数を観測する。信号を出す原子が 1 個なので信号対雑音比 (SN 比) は最悪だが不確かさは小さい。光格子時計は多数個の原子を利用するので、信号の SN 比が改善される。原子はレーザー光の電場で閉じ込められるため、レーザー光の強い電磁場にさらされる。そこで、共鳴に関係する上下の準位に対する影響が等しくなるように、閉じ込めレーザーの周波数を設定して不確かさを改善する。どちらの方式でも、不確かさ 10^{-18} 台のものが報告されてきた。

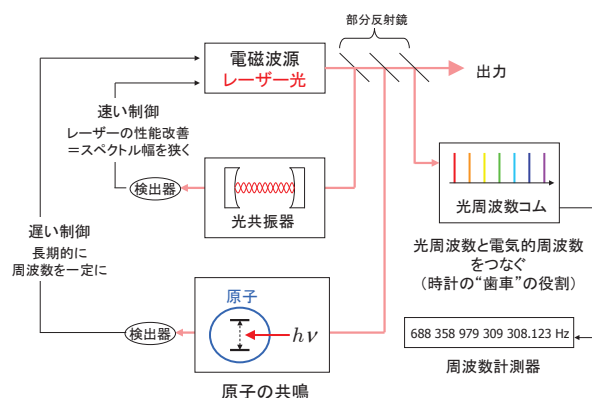


図 5 光時計の構成。

光時計がマイクロ波原子時計よりも優れた性能をもつことは、すでに 1980 年代には知られていた。しかし、それを電氣的に扱うことができるマイクロ波以下の実用的な周波数に変換できなければ、基準周波数として利用できない。そのよい方法は長い間模索されてきたが、2000 年に登場した光周波数コムによって解決にめどが立ち、光時計実現に向けた道が開けた。ここでいう光周波数コムは、モード同期レーザーとよばれる正確な繰り返し周期でパルス光を出力するレーザーで発生させる。これを周波数軸で見た姿は、一定の周波数間隔で発振している多数のレーザー光の集合体で、その形状からコム (comb = 櫛) とよばれる。その等間隔性は 10^{-19} 台よりもよいことが検証されている。コムは周波数軸上のマーカーで、長さを測るものさしのメモリのような役目を果たす。もしコム全体の周波数 0 からの位置、オフセット周波数を測定し固定できれば、コム 1 本との比較からレーザー周波数を決定することができる。説明は省略するが、コムのスペクトル幅が 1 オクターブ以上、すなわち、高周波端が低周波端の 2 倍以上に広がっていると、容易にオフセット周波数を測定できる。ちょうど 2000 年頃に、非線形光学効果によってスペクトル幅を拡大する、フォトニック結晶ファイバーという特殊な光ファイバーが開発されて、スペクトル幅 1 オクターブのコムは容易に実現できるようになった。これによって、光周波数と

RF・マイクロ波周波数との比較、あるいは光周波数同士の比較が自由に可能となった。時計の構成で言えば、任意の時間に周期を分周する歯車に相当する装置が実現したことになる。

光周波数コムの開発は、本章の筆者が前所属（旧国研）で行った最後の研究で、2001年に光周波数計測を達成した〔日本物理学会誌, 58, 175 (2003).〕。大学へ移って研究所の高精度のマイクロ波装置は使えなくなったが、光周波数の比の計測であればマイクロ波と光周波数の比 10^6 が利いて、比較的安価なGPS時計、不確かさ 10^{-12} 程度でも 10^{-18} まで測定できる。そもそも光時計の不確かさはマイクロ波周波数標準を超えているので、光時計の再現性を確認するには光時計どうしを比較するしかない。光周波数の比の計測はその点で本質的で、それが可能なら大学で研究する価値があると考えた。また、不確かさが 10^{-18} にも及ぶ計測技術は、再現性の公理を担保している物理法則の普遍性を検証することになる。エネルギー単位は電磁気力が関係していて、その力の大きさを示す結合係数は微細構造定数 α である。もし、 α が時間変化すれば、 α の変化に対する感度が異なる共鳴周波数の比も時間変化する。標準模型とよばれる現在の素粒子物理学の枠組みでは α の時間変化は起こりえないが、重力を他の力と統一して扱う革新的な理論では α の時間変化は可能である。そのような理論は宇宙のごく初期段階を説明する可能性があるもので、宇宙の遠方から届く、はるか昔の原子・分子のスペクトルを観測して、その周波数シフトから α の時間変化が議論されている。その時代での議論を現在まで外挿すると変化ははるかに小さくなるが、光時計の不確かさなら検証可能な大きさという。このような原子・分子の精密計測と素粒子物理学との接点は、近年注目されている。素粒子物理学実験といえば、大型の加速器実験が思い起こされるだろう。これまで $E=mc^2$ の関係から、質量 m の大きな未知の素粒子を検出する目的で、より大きなエネルギー E (c は光速) を得るために大型の加速器が建設されてきた。加速器の大型化がそろそろその限界を迎えつつあるなか、原子・分子を用いた精密計測は、加速器実験では到達が難しい高いエネルギー領域に感度があり、相補的な実験方法となりうる。我々も科研費・新学術領域研究「原子が切り拓く極限量子の世界（平成 21～25 年度）」に参画し、以下のように研究を進展させてきた。なお、最近の研究成果は、博士課程の今井康貴、三滝雅俊、両君の努力によるところが大きいことを記す。

4.2 単一イオン分光

研究室ではイッテルビウムイオン (Yb^+) とバリウムイオン (Ba^+) を用いた単一イオン光時計の開発を進めている。 Yb^+ には磁場に鈍感な基準となる共鳴（以下、時計遷移）をもつ安定同位体 171 があり、そのような特徴をもつ他のイオンに比べて準位構造が比較的簡単なため、必要とするレーザー光の本数が少なくすむ。 Ba^+ には、準位構造は複雑だが磁場のみならず電場に対しても鈍感な時計遷移をもつ奇数同位体があり、イオンの電荷がつくる電場による周波数シフトのためにイオン数を増やすことができない、というイオン光時計最大の弱点を克服できる可能性をもつ。

イオンは、超高真空中に設置されたイオントラップとよばれる電極（図 6）の間に高周波電場を印加し、電極で囲まれた中央の空間に捕捉する。オープンから原子をビーム状にとばし、トラップ内で光イオン化法、すなわち共鳴するレーザー光を照射してイオン化ポテンシャル以上に励起する方法でイオンを生成する [Appl. Phys. B, 105, 729 (2011)]。同位体により共鳴周波数がわずかに異なることを利用し、天然同位体混合物から特定の同位体を選んでイオン化することが可能である。我々も 7 種類ある Yb^+ の安定同位体のうち、



図 6 イオントラップ。中央のリング状の空間、直径 $800\ \mu\text{m}$ の中央にイオンはトラップされる。

5種類で単一イオンの捕捉に成功している。トラップした単一イオンは、強い蛍光を発する共鳴を用いてレーザー光と相互作用させてレーザー冷却を行い、トラップ中心にほぼ静止させる [Appl. Opt., 49, 5510 (2010).]。そして、時計遷移を励起するレーザーを照射し、スペクトルを取得する。時計遷移はスペクトル幅が狭いので、これを励起するレーザーの発振スペクトルを狭窄化しておく。これは、レーザーの発振周波数を光共振器の共鳴に高速でフィードバック制御して達成する。このようにして観測した単一 $^{171}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2}$ ($F=0$) – $^2\text{D}_{3/2}$ ($F=2$) 時計遷移のスペクトルを図7に示す [Radio Sci., 51, 1385 (2016).]。イオンは1個なので、1回の観測ではレーザーの光子を吸収した、しなかった、という情報しか分からない。レーザーの周波数を固定して何回も繰り返し観測して遷移確率そのものを測定し、レーザー周波数を掃引してスペクトルを得る。さらに狭いスペクトルを観測するために、レーザーの線幅狭窄化を改良していく。また、2台目の装置でも単一イオンの時計遷移スペクトル観測に成功していて、2台の比較による不確かさ評価を開始できるところまで到達している。

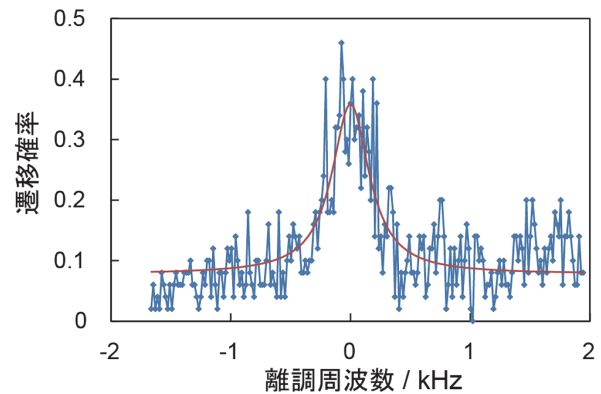


図7 単一 $^{171}\text{Yb}^+$ イオン $^2\text{S}_{1/2}$ – $^2\text{D}_{3/2}$ 時計遷移のスペクトル。半値全幅 380 Hz。

4.3 光周波数器としての長時間連続運転可能な光周波数コム

光周波数コムに関しては、モード同期チタニウムサファイア (Ti:Sa) レーザーを自作するところから研究を開始し、フォトニック結晶ファイバーを用いてスペクトル幅1オクターブを実現し、周波数測定器として完成させた。 piezo素子を用いて高速で制御可能なミラーマウントを導入し、レーザーに対して位相同期する技術も実現させた [日本物理学会 2014 年秋季大会 10pAW-5.]。

Ti:Sa レーザーはパルス幅が狭く低雑音性も優れているが、大きな出力の励起レーザーが必要で、熱的な安定性とランニングコストに問題がある。一方、光周波数比の計測では、不確かさを低減させるために長い積算時間が必要になるので、長時間連続動作が必要になる。半導体レーザー直接励起で長時間連続動作する光周波数コムとして、ファイバーレーザーを用いたものが実用化されてきた。ファイバーレーザーは低雑音化するために特有の技術が必要であり、我々は Ti:Sa レーザーの経験が生かせる固体レーザーで、半導体レーザー励起可能な Yb:KYW レーザーを用いて光周波数コムを実現することを考えた。

実際開発を始めてみると、モード同期の実現、スペクトル幅1オクターブへの拡大、オフセット周波数のビート検出とその位相同期と、各段階で Ti:Sa レーザーとは異なる問題に直面したが、1歩ずつそれらを解決してきた。研究期間中に先行研究が1例現れたものの、我々のシステムは高効率でモード同期発振するため光出力が大きく、雑音源ともなるファイバーアンプを使用することなくスペクトル幅1オクターブを達成し、雑音の小さい光周波数コムを実現した。その装置全体を図8

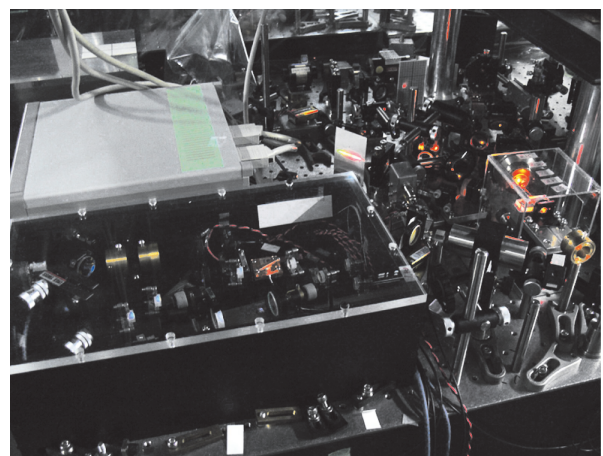


図8 Yb:KYW レーザーによる光周波数コム装置。中央は回折格子で分光したコムのスペクトル。

に示す。Ti:Sa レーザーで実現したレーザーへの位相同期の技術移転も成功し、図9に示すように、2時間は連続測定が可能なシステムを実現した [Advanced Solid State Lasers 2016, JTU2A.26 (1-3).]。今後は光周波数比計測装置としてさらに改良を加えていくとともに、長時間連続運転可能な“使える”光周波数シンセサイザとして、様々な応用に展開していきたいと考えている。

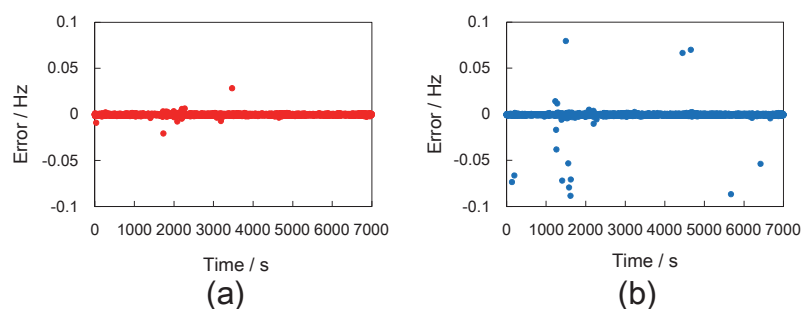


図9 Yb:KYW レーザー光周波数コムとの位相同期。(a) オフセット周波数、(b) レーザーとコムとのモードとのビート周波数。周波数カウンタのゲート時間1秒。Errorがその逆数1Hzよりも十分小さく位相同期が達成されている。