

レーザー学会第 45 回定時総会レーザー学会奨励賞 を受賞して

小林研究室 中村 卓磨

2017年5月31日にレーザー学会第45回定時総会において、レーザー学会奨励賞を受賞致しました。対象となった発表はレーザー学会の第496回研究会において行った招待講演「MOM(磁気光学変調器)によるファイバーコム的高速制御」です。この奨励賞は、レーザーに関する研究できわめて示唆的かつ独創性、将来性のあるものに対して贈られる賞です。博士課程の最終年度にこのような賞により研究が評価されたということをついに嬉しく感じています。この受賞研究の遂行にあたり、ご協力いただきました関係者の皆さまに深く感謝申し上げます。

さて、本研究はレーザーの超精密制御の新しい方法を提案するものです[1]。今日において、レーザー発振周波数(即ち波長または光の色に相当するものですが)は人類が最も上手に制御できる物理量の一つになっています。例えば、300 THz($\text{THz}=10^{12}\text{ Hz}$)という発振周波数のレーザーを1 Hzを遥かに下回る精度で制御する、といった事が世界中の研究機関で行われています。これは光の周波数を15桁以上の精度で決定できる事に相当します。このレベルの測定は、私の知る限り、他の物理量において達成されていません。

では、こんなにも精密なレーザーを使うと何が出来るようになるのでしょうか?例えば“距離”の測定が非常に精密に出来るようになります。距離、すなわち“長さ”は現在、光速($299\,792\,458\text{ m/s}$)で定義されています。一方、レーザーの発振周波数($\text{Hz}=1/\text{s}$)は時間の逆数になります。周波数が正確であるという事は正確な時計を持っている事になり、それは正確に長さが測定できる事に繋がります。応用として、例えばGPSの精度向上に繋がります。超精密GPSを地面に埋め込むことで、微小な地殻変動を捉えることが出来るようになり、地震予知に繋がるのではないかと期待されています。また、光をそのまま用いる応用としては、宇宙の恒星の“色”を正確に測定できるようになります。正確には恒星の色の変化を精密に測定します。ある恒星と地球の位置関係は常に変動しています。すると、相対的な速度の変化により地球に届く恒星の色(光の周波数)が光のドップラー効果により変動します。仮に、地球の変動分を無視すると、恒星の色の変化は恒星の

動きを反映していることとなります。この動きの情報には、恒星の周りの惑星の重力による僅かな変動が含まれており、光の色を超精密に測定することで、惑星の数、位置、質量が分かるのです。例えば、あの星の周りには地球型惑星がある、というのがわかります。このような研究は将来、宇宙人の発見に繋がるかもしれません。

さて、話をレーザー開発に戻します。どうすれば、そんな超精密なレーザーが出来るのか?と聞いてみると、実際は様々な要素が絡み合った複雑な問題です。しかし、その中の一番大きな要素の一つがレーザー共振器の長さを一定に保つ事です。レーザーというのは光の共振器(最も単純化すると二つの合わせ鏡)の中を光が何回も往復し続けます。往復し続けている光の一部が部分反射の鏡から取り出されてレーザー出力となっています。レーザーの共振器の中には“光の定在波”が出来る条件を満たす周波数の光のみが生き残り、他は光が往復する過程で淘汰されていきます。光の定在波の条件は共振器の長さで変わります。こういった理由でレーザーの発振周波数と共振器長は非常に密接に関わっています。

本研究ではこのレーザー共振器長を制御する新しい方法を開発しました。従来はどのような方法を用いていたか、と聞いてみると、ミラーを張り付けたピエゾ素子というものを使っていました。ピエゾ素子というのは圧電素子とも呼ばれ、電圧をかけると伸び縮みするものです。つまり物理的にミラーを動かして、外部からの振動や音響ノイズをキャンセルすることで、共振器長を一定に保っていました。この方法は非常に有効で今日でも大半のレーザー安定化手法に用いられています。一方で、最先端の超高安定なレーザーに用いるのは物足りない事が多くなってきました。ピエゾ素子は物理的にミラーを動かすため、動作速度に限界があります。そのため、超音波領域($>20\text{ kHz}$)の外乱の制御が出来ず、これがレーザーの安定度を損ねていました。私の専門である“光周波数コム”という最先端レーザーにとってこれは致命的でした。この状況を改善したのが電気光学素子(EOM)の採用です。EOMは透明な素子で光を透過させて使用します。これに電圧をかけると素子の屈折率が僅かに変化します。光が感じる実効的な長さというのは、

物理的な長さや屈折率の積になるため、屈折率を変化出来ることは実効的なレーザー共振器長を変化出来る事になります。この EOM が光周波数コムに初めて採用されたのが 2005 年の事でした。EOM により共振器長制御は飛躍的に制御帯域を拡大し 300 kHz を超える高速で微小な外乱までキャンセル出来るようになりました。しかし、この EOM にも問題があります。電圧の印加で屈折率変化を引き起こす際に、わずかに EOM そのものに物理的な歪みが発生してしまうのです。これが機械的振動になり、EOM を固定するマウントとの共振現象を引き起こしてしまいました。共振現象があると、共振周波数付近の制御信号は意図したタイミングで伝わらなくなります。EOM に送った制御信号の位相が歪んでしまうのです。こうなると、もはや共振器長の変動をキャンセルできません。これが現状のレーザー共振器長制御の限界でした。

この問題を解決したのが私の開発した磁気光学素子 (MOM) です。これは電圧 (電場) を印加する代わりに磁場を印加することで素子の実効的な屈折率を変化させます。磁場を使うメリットは磁場の印加により引き起こされる物理的な歪みが EOM に比べて圧倒的に少ないことです。したがって、機械的な共振現象を誘起しないため、EOM よりも遥かに広帯域な制御が期待できるわけです。しかし、デメリットもあります。それは変化できる共振器長の幅が非常に小さい事です。私の開発したデバイスではサブ nm (10^{-10} m) レベルがやっとでした。この振幅では共振器外乱をキャンセルするには不十分です。一般的にレーザーの共振器の外乱は低周波ほど大きく、高周波になるにつれて急激に少なくなります。そのため、将来的には低周波はピエゾ素子、中域は EOM、高周波は MOM というように担当領域をわけることで、この問題は解決できます。私は実際にこの MOM デバイスが共振器制御に有効であるという事を実験的に示すことが出来ました。今後は工業的に洗練された MOM デバイスが開発され、様々なレーザーに適用されることが期待されます。

最後になりましたが、自分の思いつきを快諾し後押しして下さった小林洋平准教授と、訳の分からない議論に沢山付き合ってく下さった谷峻太郎助教に感謝致します。

[1] "Magneto-optic modulator for high bandwidth cavity length stabilization," T. Nakamura, S. Tani, I. Ito, and Y. Kobayashi, Opt. Express 25, 4994-5000 (2017).

