

高性能な密度計測器の開発

秋山 毅 志

車のエンジンでは、アクセルを踏み込むとエンジンの中に空気と混ぜられた霧状のガソリンが噴射されます。図1(a)がガソリンエンジンの仕組みです。車をある一定のスピードで走らせるためには、エンジンの中でガソリンの濃さを適切に保つ必要があります。ところで、プラズマは図1(b)のように、燃料ガスがイオンと電子に分かれた状態です。プラズマの場合は、「濃さ」を表すのが電子密度という量です。これは、1立方メートルあたりに電子が何個あるかを示します。将来の核融合発電炉は、燃料ガスを高温高密度のプラズマ状態にし、その結果発生する核融合反応によって電気エネルギーを作り出します。その際、一定の電気を安定に発生させるためには、「濃さ」である電子密度を適切な値に保つ必要があります。ガソリンエンジンは、弁の開き具合と濃さの関係が既に分かっているので、いちいち濃さを測定していませんが、プラズマの場合は幾つかの要因で電子密度が変わってしまいますので、プラズマ実験を行う際は、電子密度を測定しながら、どれだけの燃料ガスを供給すればいいかを決めています。

プラズマの電子密度を測定する方法は幾つかありますが、レーザー光を使った「干渉法」という方法は、非接触の測定方法なのでプラズマを乱しません。

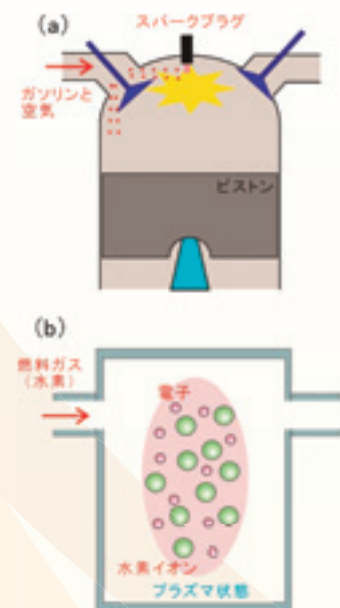


図1：(a) ガソリンエンジンの仕組み、(b) プラズマ実験

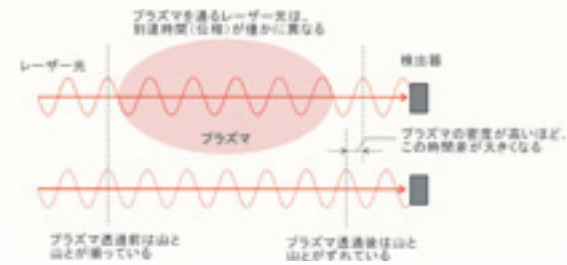


図2：プラズマ中のレーザー光

そのため、核融合プラズマ研究の黎明期から、プラズマ密度の測定に使われてきました。干渉法は、レーザー光が真空中とプラズマ中で進む速度が異なることを利用しています。図2にあるように、レーザー光から同時に発振された光は、その光の通る道筋上にプラズマがある場合と無い場合では到着時間(位相)に差が生じてきます。密度が高ければ高いほど、その時間(位相)差が大きくなりますので、その差を測定することによって、プラズマ密度を知ることができます。

話は逸れますが、図2のように、レーザー光の「山が進んでみる」速度(位相速度と言います)はプラズマ中で光速を超えます。これは、通常の物質と違って、プラズマの屈折率は1より小さいためです。このことは、一見すると「情報は光速より速く伝えることができる」という相対性理論と矛盾するように思えます。しかし、情報は波の形を歪ませて伝えるのですが、歪んだ形が伝わる速度(群速度と言います)は山が進む速度と異なり、これはプラズマ中でも光速を超えることはできません。そのため、相対性理論に矛盾することはないのです。

話を元に戻しましょう。干渉法には一つの問題があります。時間差は、プラズマだけでなく、レーザー光の道筋の長さ(光路長と言います)が変化した場合でも生じてしまうことです。それを利用して、干渉法は距離の測定にも使われることがある程です。通常の干渉法は、時間差が変化しても、それがプラズマの密度が変わったのか、光路長が変化したのか、区別ができません。そのため、測定中に光路長が変化してしまうと、密度を正しく知ることができなくなってしまいます。レーザー光を所定の位置まで伝送させるには、鏡を使います。どんなにしっかりと固定しているように見えても、光の波長であるマイクロメートルスケール(0.000001m)の世界では、振動している

ものです。使うレーザー光の波長によっては、そのような振動も大きな測定誤差になってしまいます。これまで、エアクッション等を使って振動を極力抑制することで、誤差を減らしてきましたが、根本的な解決ではありませんでした。また、全ての鏡の振動を抑えることが難しいため、干渉計の設置自体が難しい場合もあります。

近年、「2倍高調波干渉計」と呼ばれる、干渉計でありながら振動の影響を受けない特別な干渉計を大型ヘリカル装置(LHD)へ設置しました。「2倍高調波」とは、ある光の波長と比べて、周波数がちょうど2倍の光のことです。2倍高調波干渉計は、図3にあるように、レーザー装置から出た元々の光と、その2倍高調波を混合したもので測定をします。2倍高調波は、非線形光学素子と呼ばれる特殊な素子を使って作り出します。この二つの光の通り路は同じなので、同じ振動を受けることになります。一方、周波数が異なると、プラズマによって生じる時間差が違ってきます。周波数が高いと時間差が小さくなります。プラズマを通った後に、元々のレーザー光の成分から再び非線形光学素子を使って、二つ目の2倍高調波を作り出します。そして、プラズマ透過前・後、それぞれで発生させた2倍高調波の間で、時間差があるか調べます。そうすると、二つの2倍高調波は同じ光路を通過しているので、光路長が変わったことによる到着時間の変化は同一になり、二つの間の時間差には違いが生じません。一方、プラズマによる時間差は、プラズマ中で周波数が違っていた分だけ異なるので、二つの2倍高調波の間で共通ではなく、プラズマの密度に応じた時間差が現れます。このように、2倍高調波干渉計では二つの波長を使うことで、うまく光路長の変化による到着時間の差をキャンセルして、その影響を受けずにプラズマ密度の測定を行うことができます。振動を抑制する装置はとて

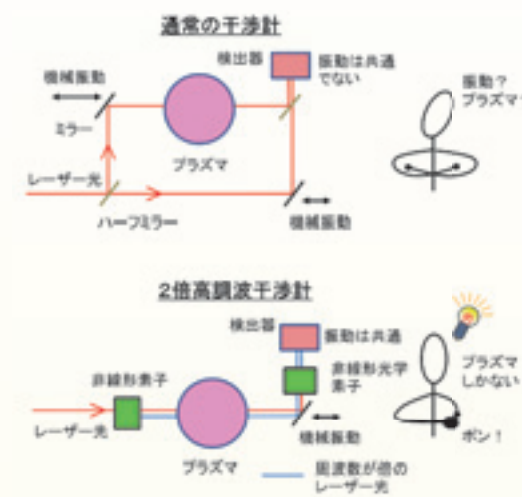


図3：通常の干渉計と2倍高調波干渉計の比較

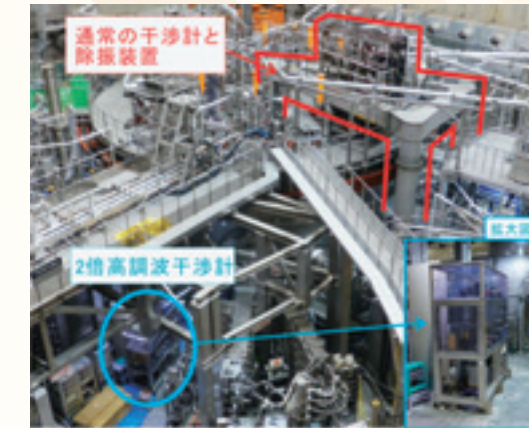


図4：除振装置に載っている通常の干渉計と2倍高調波干渉計

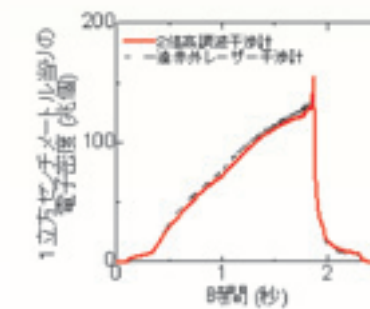


図5：LHDでの電子密度の測定結果。赤線が2倍高調波干渉計の測定結果、黒破線がこれまでの遠赤外レーザー干渉計。

大掛かりになることが多いのですが、2倍高調波干渉計では、そのような装置が必要なくなります。

図4が、除振装置とそれに載っている通常の干渉計と、2倍高調波干渉計の写真です。2倍高調波干渉計には、振動を抑える装置は一切ついておらず、それぞれの規模の違いが分かると思います。図5がLHDでの測定結果です。以前から設置されていた遠赤外レーザー干渉計とほぼ同じ値で計測され、正しい密度測定ができることが確認されました。また、振動を全く抑えていないにも関わらず、測定結果に振動による誤差がほとんど見られませんでした。

将来の核融合発電炉では、装置がLHD以上に大きくなるため、計測器全体の振動を抑制する装置の設置が難しいと予想されています。その場合、干渉計測の計測精度が低下してしまい、プラズマの密度や燃料の供給が正確に制御できなくなるおそれがあります。しかし、LHDでの結果から、2倍高調波干渉計は大きな振動を受けても精度良く密度を計測できることが実証され、将来の核融合発電炉での高性能な密度計測の展望が開けてきました。今後は、核融合発電炉の連続稼働期間である年単位の連続計測でも、計測精度が一定に保たれるための工夫を行い、計測器の性能向上に努めたいと考えています。

(高温プラズマ物理研究系 准教授)