

光渦による横方向流速の高速測定

日大生産工(院) ○皆川 裕貴 核融合研 吉村 信次
崇城大 寺坂 健一郎 日大生産工 荒巻 光利

1. 序論

波長可変半導体レーザー吸収分光法 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy: TDLAS) は、励起レーザーの等位相面とプラズマ中の粒子の間に働く縦ドップラー効果を利用して、測定対象である粒子の速度分布を高精度に測定する手法である。[1,2]. 縦ドップラー効果は、励起レーザーの波数ベクトルと速度成分の内積で与えられる。そのため、通常のTDLASで用いられる平面波状の励起レーザーでは、レーザーの伝播方向に対して垂直方向(横方向)に運動する粒子には縦ドップラー効果が働かず、横方向の速度成分を測定することが困難である。このような励起レーザーの等位相面の構造に起因するTDLASの測定方向上の制限は、三次元的な位相構造を持つ光渦と呼ばれる光波によって克服できる可能性がある[3]。光渦中の粒子は、螺旋状の等位相面によって、通常の伝播方向(軸方向)のドップラーシフトに追加の方位角方向のドップラーシフトを経験する。そのため、横方向に運動する粒子の速度成分を測定することができると考えられる。我々は、このような光渦を励起レーザーとして用いた吸収分光法を光渦レーザー吸収分光法(Optical Vortex Laser Absorption Spectroscopy: OVLAS)と呼び、原理検証を達成している[4]。

現在のOVLASでは、受光系にカメラを用いて光渦ビーム断面上の吸収スペクトルの方位角ドップラーシフトを精度良く測定できるが、時間分解能はカメラからPCへのデータ転送時間や露光時間に依存する。また、レーザーの周波数ごとの二次元画像から吸収スペクトルを解析するため、データ量が莫大となる。OVLASを時間発展を有する現象や多様なプラズマ実験に適用していくためには、測定的高速化・簡便化が望ましい。これまで、受光装置として用いられるカメラを4分割フォトダイオード(Quadrant Photo Diode: QPD)と呼ばれる受光素子が4象限に分割されたフォトダイオードに置き換えた測定の粗視化の試みがなされている[5]。粗

視化OVLASは、吸収スペクトルの測定時間がTDLASと同等となり、また、記録されるデータ量も1/120へと大幅に削減される。OVLASは、ビーム断面上の空間的な位置に依存する方位角ドップラーシフトから横方向流速を解析している。このとき、ビーム断面上の上下で絶対値の等しい符号の異なる方位角ドップラーシフトが観測される。したがって、測定対象にドップラーシフトのない共鳴吸収周波数にて、ビーム断面上の上下に吸収率の差が生じる。この吸収率の差の大きさから横方向流速を測定できる可能性がある。本研究では、非常に狭いレーザーの掃引周波数範囲で吸収スペクトルの微分信号を実験的に取得し、吸収信号に比例する微分信号の差によって横方向流速の測定を高速化する。

2. 光渦とは

光渦とは、螺旋状の等位相面を持つ光波である。光渦は、主に、ラゲール・ガウシアン(LG)モードによって、単一横モードとして扱われる[6]。LGモードを次の式に示す。

$$\begin{aligned}
 E_{\ell p}(e, \phi, z) &= u_{\ell p}(r, \phi, z) \exp[i(kz - \omega t)]. \\
 u_{\ell p}(r, \phi, z) &= \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|\ell|)!}} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w(z)}\right)^{|\ell|} L_p^{|\ell|} \left[\frac{2r^2}{w(z)^2}\right] \frac{w_0}{w(z)} \\
 &\times \exp\left[-\frac{r^2}{w(z)}\right] \\
 &\times \exp[i\ell\phi] \\
 &\times \exp\left[-i(1+2p+|\ell|)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)\right] \\
 &\times \exp\left[i\frac{kr^2}{2R(z)}\right], \tag{1}
 \end{aligned}$$

ここで、 k は波数、 ω は角周波数、 $L_p^{|\ell|}$ はラゲール倍多項式、 $w(z)$ は最低次モードにおけるビーム径、 z_R はレイリー長、 $R(z)$ は波面の曲率である。 $\exp(i\ell\phi)$ の項が、方位角方向への位相変化を表す。 ℓ はトポロジカルチャージと呼ばれ、方位角方向への位相変化を特徴づける上で特

High-speed measurement of transverse flow velocity using optical vortex

Hiroki MINAGAWA, Shinji YOSHIMURA, Kenichiro TERASAKA
and Mitsutoshi ARAMAKI

に重要である。光渦の中心は位相が定まらず、この点のことを位相特異点と呼ぶ。位相特異点の存在によって、光渦のビーム中心では、暗点が生じ、光渦の強度分布はドーナツ状となる。

3. 方位角ドップラーシフト

光渦中の粒子は、通常の軸方向ドップラーシフトに加えて、方位角ドップラーシフトを経験する。コリメートされた光渦ビームの場合、光渦中の粒子が経験するドップラーシフトは次のように示される[3]。

$$\delta_{LG}^{(\ell)} \approx -kv_z - \left(\frac{\ell}{r}\right)v_\phi, \quad (2)$$

ここで、 v_z 、 v_ϕ はそれぞれ軸方向、方位角方向の速度成分である。第1項が軸方向ドップラーシフト、第2項が方位角ドップラーシフトを表す。ビーム横切る流れの速度 U_x を仮定すると、 U_x の方位角方向成分は、 $-U_x \sin\phi$ で表される[7]。したがって、方位角ドップラーシフトは、ビーム断面上の位置に依存する。OVLASでは、位置に依存した方位角ドップラーシフトを解析することで、横方向流速が測定される。

4. 吸収信号に比例する微分信号の観測

本研究では、レーザーの周波数掃引と同時にレーザーを小振幅の高周波で変調させる。QPDで観測された吸収信号をロックインアンプに入力すると、吸収信号の微分に比例する信号がロックイン検出される(Fig.1)。レーザーの離調周波数が吸収スペクトルの中心周波数と一致すると、微分信号はゼロクロスする。ビームを横切る流れのあるプラズマの場合、このゼロクロス周波数が光渦ビームの上下で異なる符号でドップラーシフトする。このとき、方位角ドップラーシフトによって生じる微分信号の差を用いることで、周波数掃引なしで方位角ドップラーシフトを観測できる。したがって、横方向流速の測定を高速化できると考えられる。本講演では、ロックイン検出によって吸収スペクトルの微分信号を取得し、横方向流速測定を高速化した結果について、詳細に報告する。

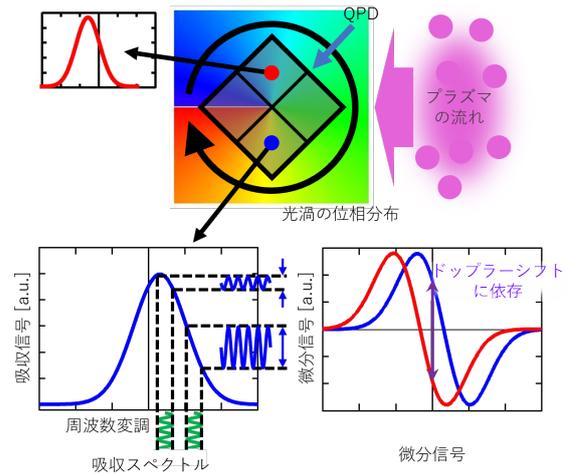


Fig.1. ロックイン検出による吸収スペクトルの微分信号の検出とドップラーシフト

参考文献

- [1] M. Aramaki *et al.*, AIP Advances **8**, 015308 (2018).
- [2] S. Yoshimura *et al.*, Plasma Fusion Res. **5**, S2052 (2010).
- [3] L. Allen *et al.*, Opt. Commun. **112**, 141 (1994).
- [4] H. Minagawa *et al.*, Sci Rep **13**, 15400 (2023).
- [5] H. Minagawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 056002 (2024).
- [6] A. E. Siegman, *Lasers*. Chap.6, (University Science Books, Mill Valley, California, 1986).
- [7] H. Minagawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **17**, 1401099 (2022).