

光渦レーザー吸収分光法における方位角ドップラーシフト分布 の二次元的な解析による横方向流速の測定

日大生産工 (院) ○皆川 裕貴 核融合研 吉村 信次
九大総理工 寺坂 健一郎 日大生産工 荒巻 光利

1. 序論

半導体レーザー吸収分光法 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy: TDLAS) は, プラズマ中の粒子の速度分布を高精度に測定する強力なプラズマ診断法である[1,2]. TDLASでは, 励起レーザーの等位相面と粒子の間に働く縦ドップラーシフトによって個々の粒子の共鳴周波数がシフトすることでドップラースペクトルが観測される. 縦ドップラーシフトは, 励起レーザーの波動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で励起レーザーに用いられる等位相面が平面に近似される光波では, レーザーの伝播方向と垂直な方向の速度成分を測定することが困難となる. このような等位相面の形状に起因する測定方向上の制限は, 螺旋状の等位相面を持つ光波である光渦によって克服できる可能性がある. 光渦中の粒子は, 光渦の螺旋状の等位相面によって方位角ドップラーシフトを経験するため, 光渦ビームと垂直な速度成分のみを持つ粒子においても縦ドップラーシフトが生じる[3]. 我々は, TDLASの励起レーザーとして一般的に用いられている平面波ビームを光渦ビームに置き換えることで, TDLASの測定方向上の制限を克服できる光渦レーザー吸収分光法 (Optical Vortex Laser Absorption Spectroscopy: OVLAS) の開発を行っている. 光渦は, 螺旋状の等位相面を持つため, ビーム断面上に生じる方位角ドップラーシフト分布は二次元的な構造となる. したがって, 方位角ドップラーシフト分布を二次元的に解析すれば, ビームの伝播方向に対して横方向の粒子の速度を計測できると考えられる. 本講演では, 方位角ドップラーシフト分布を二次元的に解析し, 実験的に横方向流速を測定する.

2. 螺旋状の等位相面を持つ光波

光渦とは, 螺旋状の等位相面を持つ光波である. 光渦は, ヘルムホルツ方程式の円筒対称解であるラゲール・ガウシアン (LG) モードの中心に存在する[4,5].

$$E_{\ell p}(r, \phi, z) = u_{\ell p}(r, \phi, z) \exp[i(kz - \omega t)].$$

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

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TEM₀₀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. この項が, 光渦の基本モードとしてLGモードが扱われる所以である. ℓ はトポロジカルチャージと呼ばれる軌道角運動量の量子数を定義する項である. 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, 光渦のビームプロファイルはドーナツ状となる.

3. 光渦中の粒子が経験する方位角ドップラーシフト

光渦中の粒子は, 通常の軸方向の縦ドップラーシフトに加えて, 方位角方向への追加のドップラーシフトを経験する. コリメートされたLG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表される[3].

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

Two-dimensional analysis of the azimuthal Doppler shift distribution in the optical vortex laser absorption spectroscopy to measure transverse flow velocity

Hiroki MINAGAWA, Shinji YOSHIMURA, Kenichiro TERASAKA
and Mitsutoshi ARAMAKI

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スhift，第2項が方位角ドップラースhiftを表す．我々は，ビーム横切る流れの速度 U_x を測定する． U_x の方位角方向成分は， $-U_x \sin\phi$ で表される．Fig.1にEq.2によって計算された方位角ドップラースhift分布を示す．このとき，トポロジカルチャージは $\ell = +10$ ，横方向速度 $U_x = 3000$ m/sである．方位角ドップラースhiftは，非等方な二次元分布となる．また， r, ℓ, ϕ に依存しているため，方位角ドップラースhift分布を二次元的に解析することで，横方向流速 U_x を測定することができる．

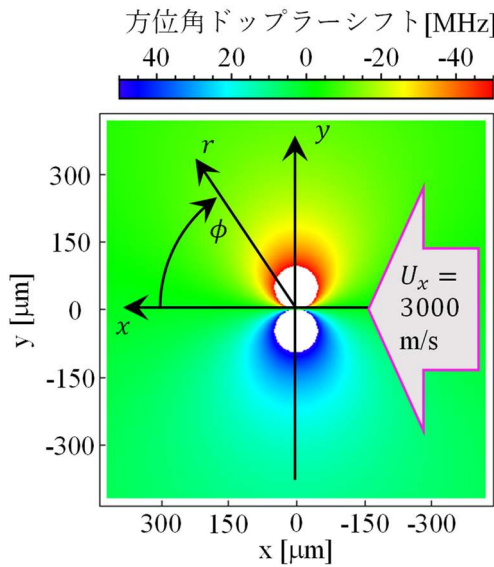


Fig.1. 方位角ドップラースhift分布

4. 方位角ドップラースhiftによる非等方な共鳴吸収

円筒座標系での速度分布において，螺旋状の等位相面によって励起される粒子をEq.2による δ_{LG} の関数として解くことで，励起レーザー側から観測したドップラースペクトルを得られる[6].

$$f_{abs}(\delta_{LG}) = \alpha_0 k \left(\frac{r^2}{\ell^2 + k^2 r^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \exp \left[-\frac{m}{2k_B T} \frac{r^2}{\ell^2 + k^2 r^2} \left(\delta_{LG} + \frac{\ell}{r} U_x \sin \phi \right)^2 \right], \quad (3)$$

ここで， α_0 は r が無限大の位置での共鳴中心における吸収係数である．Fig.2に共鳴中心からの離調周波数+360 MHzにおける吸収係数分布を示す．このとき，ガス温度は300K， $\alpha_0 = 46$ m⁻¹である．Fig.2のA, Bは，離調周波数に依存し

た位置ごとの吸収係数スペクトルである．吸収係数分布は空間的に不均一であるため，LGビームの強度分布は一様な流れのプラズマを透過することで変形される．ドップラースペクトルは，横方向速度とビーム断面上の位置に依存してドップラースhiftしている．実際の実験では，カメラのデバイス上の全てのピクセルでドップラースペクトルを観測することで，方位角ドップラースhift分布を解析することができる．

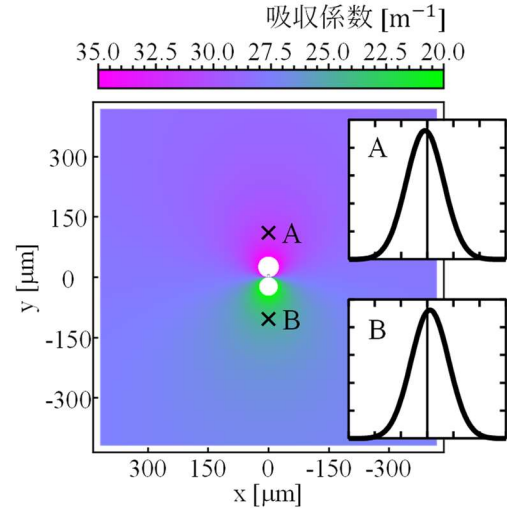


Fig.2. 吸収係数分布とドップラースペクトル

5. 光渦による横方向流速測定

OVLASによる横方向流速の測定系をFig.3に示す．外部共振器型半導体レーザー (ECDL) の出力をシングルモードファイバ (SMF) にカップリングし，空間フィルタ (SF) に入射することで高品質なガウシアンビームを生成する．一次回折光としてLGビームを再生する計算機合成ホログラム[7]を描画した空間光変調器 (Spatial Light Modulator : SLM) にガウシアンビームを照射する．1次回折光はレンズL1の焦点位置に設置したピンホールによって取り出されて，LGビームが生成される．放電管内では，アルゴンのICPを生成し，ガス流速はマスフローコントローラーによって制御する．我々は，ガス流速によってアルゴン準安定原子の粒子速度を制御する．LGビームをプラズマに透過させ，出射光を4f光学系によってsCMOSのデバイス面に結像した．sCMOSのシャッターとECDLの周波数掃引を同期させ，ピクセルの強度変化からドップラースペクトルを測定する．ドップラースペクトルに対してガウシアンフィッティングを行うことで，ドップラースhift

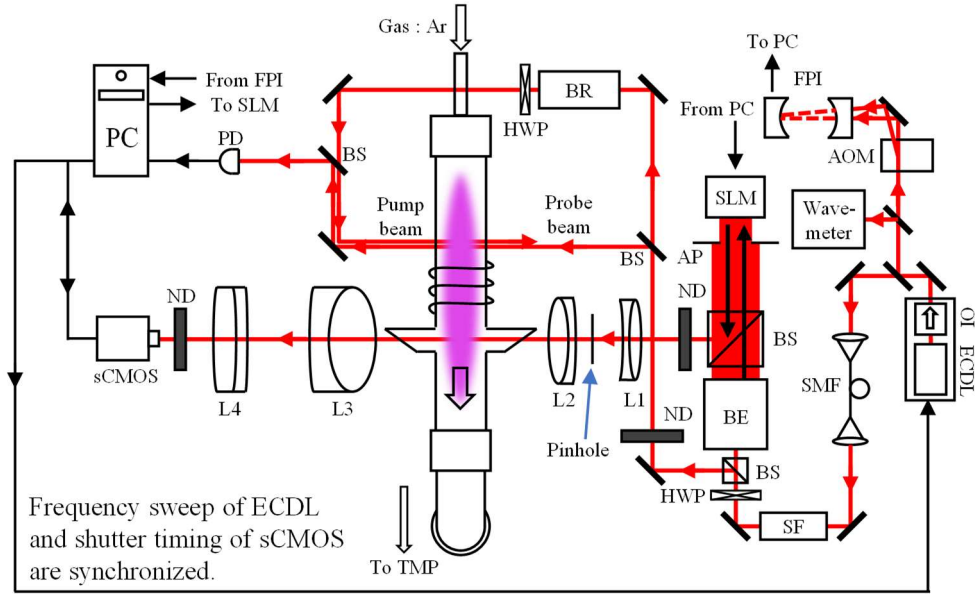


Fig.3. OVLAS による横方向流速測定系

フトを解析する. この一連の測定は10回行われた. また, ECDLからの出力の一部はAOMに入射され, 0次回折光と1次回折光は同一のファブリペロー共振器 (FPI) に導入された. 0次回折光と1次回折光の周波数差は80MHzで, ECDLの周波数掃引と同時にFPIのスペクトルを観測し, 0次回折光と1次回折光の干渉縞のFSRから周波数の相対値校正を行った. さらに, OVLASと同時に飽和吸収分光も行った. 飽和吸収スペクトルのLamb dipを中心周波数とし, 10回分のドップラーシフト分布を平均し, SNRを改善した. 軸方向ドップラーシフトはドップラーシフトの二次元分布全体にわたるオフセットとして加わるため, 信号強度の強いピクセルのドップラーシフトを平均して軸方向ドップラーシフトをキャンセルすることで方位角ドップラーシフト分布を解析できる.

6. 方位角ドップラーシフト分布の観測

Fig.4に放電管内の流量400 ccm, トポロジカルチャージ $\ell = +10$ のときの方位角ドップラーシフト分布を示す. プラズマは $+x$ 方向に流れている. 空間的に非等方な構造となっており, 図の上側ではレッドシフト, 下側ではブルーシフトで, Eq.3によって理解できる. 方位角ドップラーシフト分布は, 全体として時計回りに回転している. また, トポロジカルチャージが $\ell = -10$ の場合は, 上下が反転し, 逆転した回転の方位角ドップラーシフト分布が観測された. この回転は, Gouy位相シフトに起因していると考えられる. 欠陥構造を有するLGビームは伝播に伴うGouy位相シフトによって構造が回転

することが報告されている[8]. OVLASにおける非等方な吸収率分布もまた欠陥構造であるため, プラズマ透過中のLGビームは回転していることが考えられる. 我々は, 実験パラメータを元にした数値解析によって, Gouy位相シフトが方位角ドップラーシフト分布を回転させることを示している[6]. 今回観測された方位角ドップラーシフト分布の回転は, 数値解析の結果と定性的に一致したものとなった.

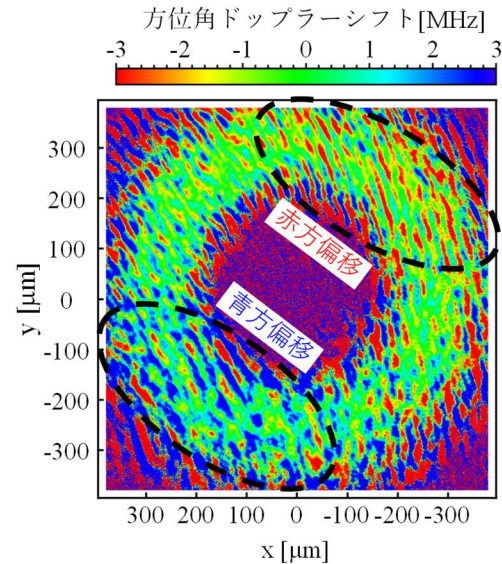


Fig.4. 観測された方位角ドップラーシフト分布

7. 方位角ドップラーシフト分布の二次元的な解析

ドーナツ状のビーム構造において信号強度の強い領域の方位角ドップラーシフトを ϕ 方向に取り出し、同じ角度ごとに平均した結果をFig.5に示す. 方位角ドップラーシフトは正弦波のような形状となっており、回転によってシフトしていることが分かる.

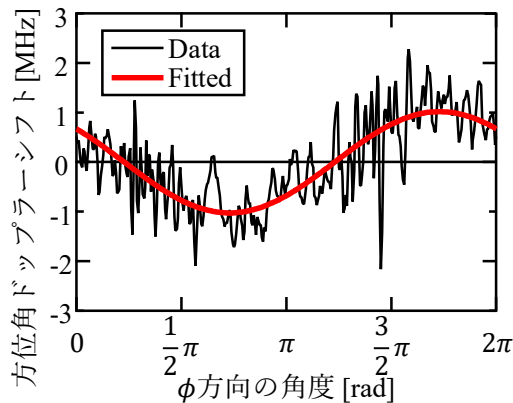


Fig.5. ϕ 方向に取り出した方位角ドップラーシフト

ϕ 方向に取り出した方位角ドップラーシフトに対して、Eq.2で表される方位角ドップラーシフトに回転を考慮して回帰分析を行うことで、横方向流速を解析する. Fig.6に、ガス流速を制御して横方向流速を測定した結果を示す. ここで、凡例の r はOVLASによって測定された横方向流速とガス流速との間の相関係数を表す. 測定された流速は、トポロジカルチャージの正負によらずガス流速と強い相関関係にある. ガス流速が低くなるほど、誤差が大きくなっているが、低速時の誤差は20 m/s程度であり、

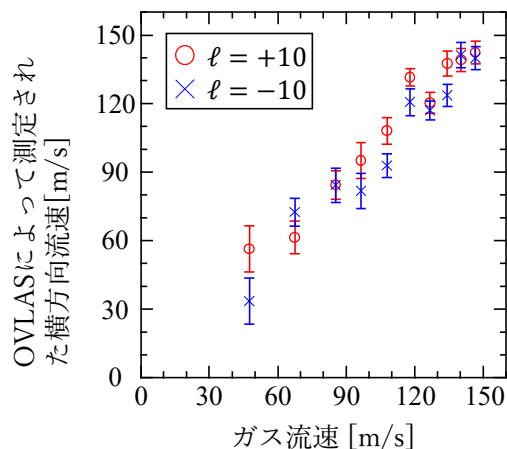


Fig.6. OVLAS による横方向流速の測定

高い精度で横方向流速を測定できていると言える.

8. まとめ

一般的なTDLASで励起レーザーとして用いられている平面波ビームを螺旋状の等位相面を持つ光渦に置き換えることで、ビームの伝播方向に対して横方向に流れる中性粒子の速度を計測した. 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方向のドップラーシフトを経験する. そのため、ビーム断面上には非等方なドップラーシフトの二次元分布が生じる. 観測された方位角ドップラーシフト分布は、トポロジカルチャージに依存して回転していた. この回転は、実験パラメータを考慮した我々の数値計算の結果と定性的に一致したものであり、Gouy位相シフトに起因していると考えられる.

方位角ドップラーシフトは、方位角方向の速度成分、トポロジカルチャージ、ビームの中心からの距離に依存する. そこで、我々はドップラーシフト分布を二次元的に解析することで、横方向流速を解析した. 解析された横方向流速はトポロジカルチャージの正負によらず放電管内のガス流速と強い相関関係にあった.

本講演では、実験結果を数値計算の結果と比較するとともに詳細に報告する.

参考文献

- [1] M. Aramaki *et al.*, AIP Advances 8, 015308 (2018).
- [2] Yoshimura, S. *et al.*, Plasma Fusion Res. 5, S2052 (2010).
- [3] L. Allen *et al.*, Opt. Commun. 112, 141 (1994).
- [4] L. Allen *et al.*, Phys. Rev. A 45, 8185 (1992)
- [5] A.E. Siegman, Lasers (University Science Books, Herndon, 1986), p. 647.
- [6] H. Minagawa *et al.*, Plasma Fusion Res.17, 1401099 (2022)
- [7] V. Arrizón *et al.*, J. Opt. Soc. Am. A, 24, no. 11, p. 3500, 2007
- [8] J. Hamazaki *et al.*, Opt. Express 14, no. 18 (2006)