

レーザー誘起蛍光法のマイクロ波放電式イオンエンジンルームへの適用

Measurement of XeII Fluorescence Inside $\mu 10$ Ion Thruster Using LIF

○山本 雄大(静大・院)・月崎 竜童・西山 和孝・國中 均(宇宙航空研究開発機構)・
神田 大樹(東大・院)・山極 芳樹(静大)

○Yuta Yamamoto (Shizuoka University)・Ryudo Tsukizaki・Kazutaka Nishiyama・Hitoshi Kuninaka (JAXA)
Daiki koda(The University of Tokyo)・Yoshiki Yamagiwa (Shizuoka University)

Abstract (概要)

Ion thruster is an electric propulsion device. The plume of ion thruster is circled around the propulsion axis through the space operation of ion thruster. Torque due to the swirling flow is called swirl torque. Because the torque is limitation of operation, it is necessary to understand the mechanism. In this study, the first aim is to obtain the fluorescence signal in $\mu 10$ plume and Xe discharge tube using LIF for measuring the circumferential velocity. In the measurement of the plume, induced frequency is changed by the circumferential velocity component. Comparing the fluorescence signal of the Xe discharge tube and the plume, the circumferential velocity can be measured from the different in frequency.

記号の説明

V : 速度
 c : 光速
 λ_0 : 励起波長
 $\Delta\lambda$: 波長のシフト量
 θ : 粒子の速度方向とレーザー光のなす角
 f : 変調周波数

1. 緒言

1.1 研究背景・目的

イオンスラスタは電気推進機の1つであり、電気エネルギーを運動エネルギーに変換するタイプのスラスタである。推進剤を放電により加熱・電離させ、高電圧が印加されたグリッド状の電極を用いて加速噴射することで推力を発生する静電加速型の電気推進機である。(Fig.1-1)

1990年代以降の電気推進機の本格的な宇宙運用を通じて、加速噴射されたイオンビームが推進方向のみに噴射されるのではなく、推進方向軸を中心に旋回しており、粒子が旋回するように噴射されていることが判明した。このような現象は従来の地上試験では確認できず、イオンビームの軸を中心としたイオン旋回流によるトルクを「スワールトルク」とよぶ。^{1),2),3)} このイオンの旋回流により推進方向とは別のトルクが発生することになる。特に、小惑星探査機「はやぶさ」やNASAの「Deep Space 1」や「Dawn」

などの深宇宙探査機では、イオンエンジンの運用時間が数万時間と非常に長時間となっている。そのため、スワールトルクによる姿勢制御への影響が無視できないものとなり、実際の宇宙運用においては、RCS(化学スラスタ)やリアクション・ホイールによる姿勢制御がその分必要とされる。

イオンエンジン以外の電気推進機のスワールトルクの地上環境下での研究は、2010年にアメリカ空軍の研究チームによりホールスラスタでイオンの旋回速度が変化していることが発表されている。⁴⁾ また、フランスの研究チームが中和器によって、イオンの旋回速度が変化していることを発見している。⁵⁾

しかしながら、イオンエンジンにおいては、未だ研究報告がなく、スワールトルクの発生メカニズムは未だ明らかになっていない。そこで、この実験的解明が必要である。

本研究はイオンエンジンにおける、ルーム中のイオンの旋回流計測に向けた実験研究である。レーザー誘起蛍光法を用いることで、ルーム中のキセノンイオンの蛍光信号を取得し、基準としてキセノン放電管により取得した蛍光信号と比較する。その差をドップラーシフトから計測することで、ビーム軸方向の速度を計測することができる。これにより、スワールトルクを発生させている旋回流速の速度分布を得る。これにより、スワールトルクの解明を解明する。そのため、本研究では、旋回流速の計測のために、レーザー誘起蛍光法によるマイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ のルームの蛍光の取得を目標とする。

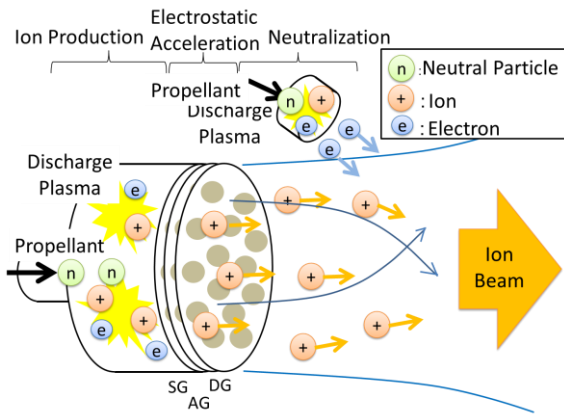


Fig.1-1 イオンスラスタの概要図

2. 実験手法

2.1 レーザ誘起蛍光法（LIF法）

Fig.2-1 に示すように可変波長レーザを用いてプラズマ中の粒子の励起準位に相当する波長の光を発生させることにより、粒子がレーザ光のエネルギーを受けて上準位に励起される。その後、再び電磁波を放出して下準位へ遷移する。この放出電磁波を蛍光と呼ぶ。Fig.2-2 のように、誘起蛍光強度の測定を行い、適切な方法で光学系を較正すれば、レーザビームと分光検出系の軸が交差する局所的な場所におけるプラズマの計測が可能となる。これをレーザ誘起蛍光法（LIF法）と呼ぶ。

レーザ誘起蛍光法において対象粒子が運動している場合、その蛍光信号の周波数がシフトする現象が光のドップラー効果である。この周波数シフト量から移動速度を測定する装置がドップラー速度計である。これを利用して、計測したい粒子の蛍光信号と基準となる蛍光信号を取得することでシフト量を計測することが可能となる。この両者の信号を取得・比較することで、粒子の存在する位置での粒子の運動状態の測定が可能となる。本研究では、研究対象であるマイクロ波放電式イオンエンジンのプルームと、シフト量計測のための基準として、キセノン放電管中のキセノンイオンの蛍光信号の取得を行う。この両者から計測したドップラーシフトを利用し、旋回流速計測を行う。イオンの運動により共鳴周波数が変化するため、狭帯域にした波長可変レーザを掃引することで、任意の位置での共鳴周波数のプロファイルを得る。そのプロファイルを用いることで、イオンのドップラープロファイル、すなわち、速度分布を求めることができる。イオンの速度は、励起波長のシフト量から決定することができ、Fig.2-3 より、以下のような関係となる。

$$v = \frac{c \Delta \lambda}{\lambda_0 \cos \theta} \quad (1)$$

この関係から、 $\mu 10$ プルームにおける旋回流速の計測を行う。

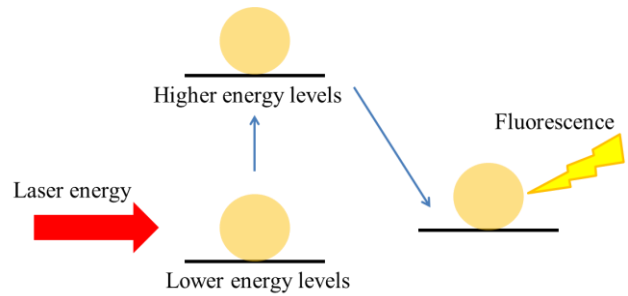


Fig.2-1 光励起と蛍光放出の概要図

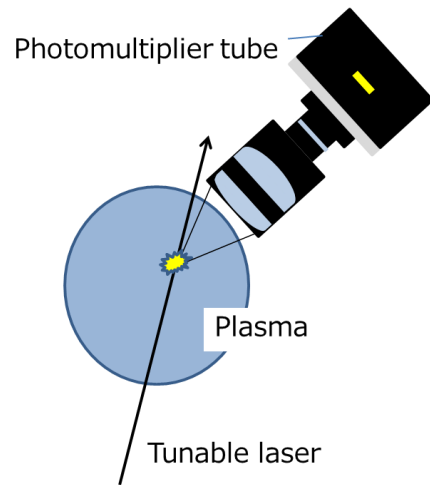


Fig.2-2 レーザ誘起蛍光法の概要図

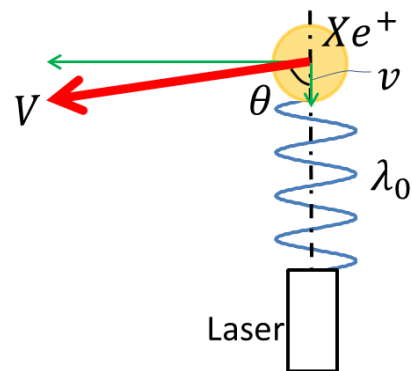


Fig.2-3 レーザ誘起蛍光法による速度計測概要図

2.2 波長変調分光法（WMS）

本研究対象であるマイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ のプルームは非常に密度が低くなっている。そのため、レーザ誘起蛍光法のみでは、蛍光信号がノイズに埋もれて検出が困難となる可能性がある。そこで、微小信号検出のために波長変調分光法を組み合わせることにより、プルーム内のイオンの蛍光信号の検出を行う。

波長変調分光法は、分光法において微弱光かつ微小蛍光を感度よく検出することができる方法である。波長変調分光法とは、レーザー光の発振波長を周波数 f で変調しつつ、 f またはその高周波を参照信号として変調成分(高周波成分)のみを検出する方法である。特徴として、変調周波数を高く設定することで混入するノイズを少なくし、SN比を高くすることができる。しかし、レーザーの上流から変調をかけるためエタロンや波長計に導入されるレーザー光も変調されていることになる。そのため、それらの信号が不安定になる可能性もある。波長変調分光法において、レーザー波長の変調と蛍光強度に対する変調の影響が重要な問題となる。レーザーの振幅に微小なサイン変調を与えた場合、レーザーの中心周波数はわずかな増減を繰り返す。変調をかけながら蛍光のプロファイル全体に波長の掃引を行い、レーザーが蛍光線に近づくと、レーザーが変調されていることで吸収も同時に変調される。このときの波長変調と蛍光強度振幅との関係を示したものが Fig.2-4(a)である。最大蛍光率の付近では、変調による蛍光強度振幅は非常に小さく、中央付近ではゼロになる。逆に、蛍光のプロファイルの傾きが大きい点では、変調による蛍光強度振幅は大きくなる。Fig.2-4(b)は変調による蛍光強度振幅をプロットしたものである。このように、波長変調分光法において得られる一次高周波信号は、蛍光率の微分係数に関する曲線となる。

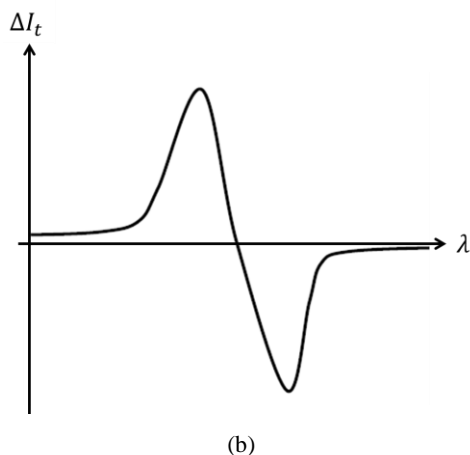
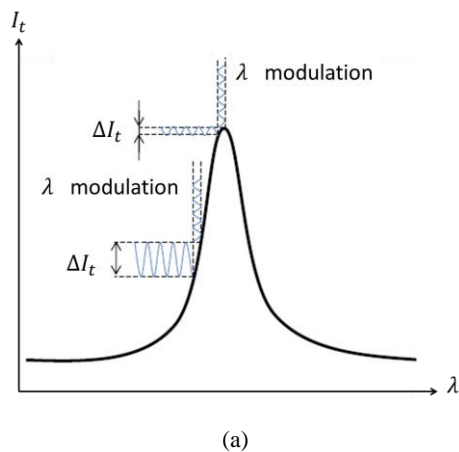


Fig.2-4 波長変調分光法における蛍光強度計測

2.3 実験装置

2.3.1 概要

Fig.2-5に実験装置の概要を示す。半導体レーザーから出力されたレーザー光は、ビームスプリッターにより3方向に分割され、それぞれ $\mu 10$ プルーム、波長計、エタロンに導入される。半導体レーザーは温度および電流コントローラによりキセノンイオンの励起波長である 834.95nm 付近に設定し、さらに、レーザーコントローラのオシレータにより波長の掃引を行う。波長計はレーザーの大まかな波長測定に使用し、エタロンにより詳細な波長の変化を測定する。プローブ光はロックインアンプのオシレータにより変調をかけられ、ビューポートを通して真空チャンバ内に導入され、 $\mu 10$ プルームを通り、対象粒子であるキセノンイオンを励起させる。励起された粒子の蛍光は集光系にて集められる。集められた光は、プラズマからの発光など対象とする蛍光以外の光も含むため、まずバンドパスフィルターにて付近の発光以外を取り除き、そのうえで光電子倍增管によって信号として検出する。検出された信号のうち、蛍光の成分は変調がかけられているので、ロックインアンプにてその信号から同期した信号のみを出力する。

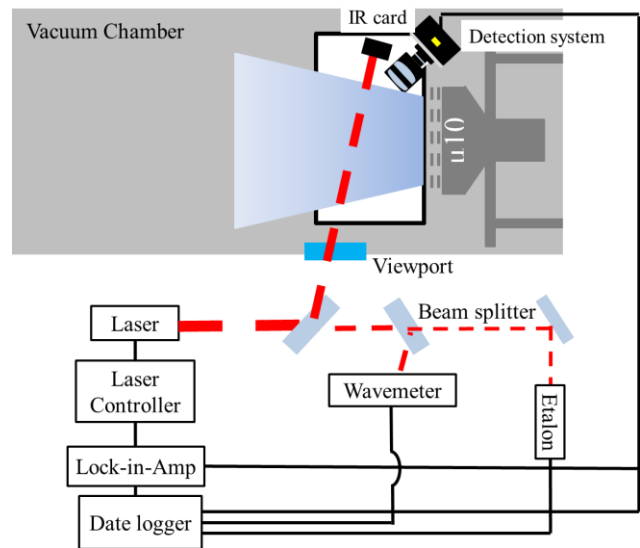


Fig.2-5 $\mu 10$ プルームを対象とした実験系

2.3.2 集光系の設計

作成した集光系を Fig.2-6 に示す。集光系はレンズ 2 枚とバンドパスフィルター、光電子倍增管の組み合わせである。 $\phi 2$ インチのレンズを 2 枚使用することで、レンズの焦点とレーザー光の一致する点での光を集光する。レンズ間距離において、Fig.2-7 に示すように、レンズ間の距離が大きいとレンズチューブ壁面での損失が発生するため、接近させ設置する必要がある。また、ノイズ除去のために $\phi 1$ インチのバンドパスフィルターを設置する。設置のための $\phi 1$ インチのチューブ長が長くなると、レンズにより集光した光がチューブ接続面で遮断されてしまい損失となる。そこ

で、集光した光の損失をなくすために、 $\phi 1$ インチチューブは最少の長さとした。

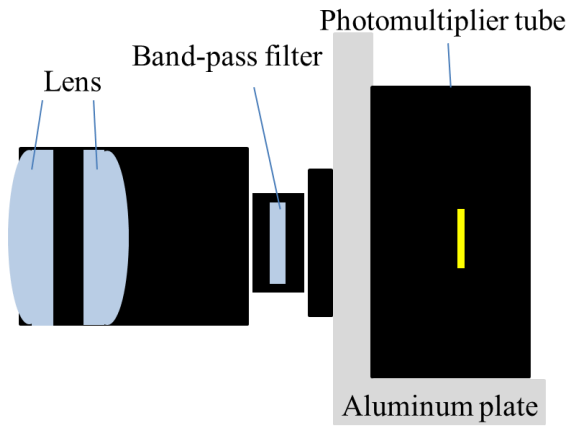
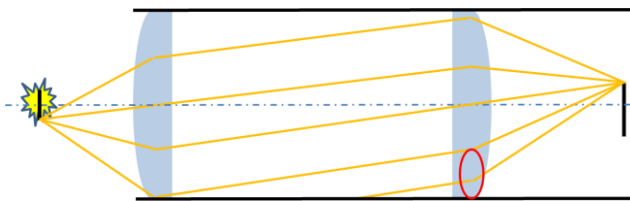
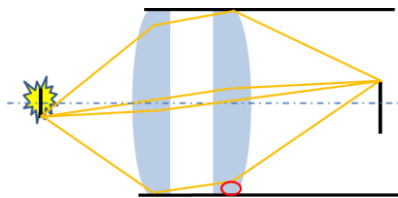


Fig.2-6 集光系の概要図



(a) レンズ間距離：大



(b) レンズ間距離：小

Fig.2-7 レンズ間距離と受光損失の概要図

3. 基準値測定のためのXe放電管での蛍光取得実験

3.1 実験条件

ドップラーシフトを利用した旋回流速を計測するために、シフト量を計測するための基準となる蛍光信号の取得が必要となる。そこで、キセノン放電管を用いて、放電管内のキセノンイオンの蛍光信号を取得することで、基準値を求める。キセノン放電管による蛍光信号検出のための光学系を Fig.3-1 のように作成した。レーザを光学台上に設置したキセノン放電管に導入することで蛍光信号の検出を行った。

結果を Fig.3-2 に示す。ロックインアンプの出力信号より、蛍光信号が確認できる。これにより、レーザ誘起蛍光法による蛍光信号検出が可能であることを確認できた。また、光電子増倍管の出力に注目すると、上に凸の信号が確認で

きる。これは、ロックインアンプを介さず、光電子増倍管の出力からでも蛍光信号を確認できることを示している。しかし、両者の蛍光信号の位置を比較すると、蛍光信号の位置にズレが発生していることが確認できる。要因として、ロックインアンプを入力することにより、ロックインアンプ内の時定数によるローパスフィルタによって時間遅れが発生していることが考えられる。ここでは基準となるキセノン放電管の蛍光信号と $\mu 10$ プルームの蛍光信号を比較する際に、ズレをシフト量に含んでしまうことになり、正確なシフト量を計測することができない。

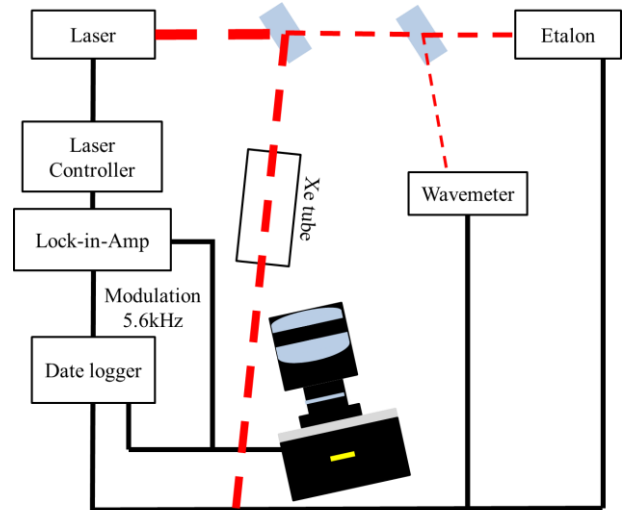


Fig.3-1 キセノン放電管を対象とした実験の光学系

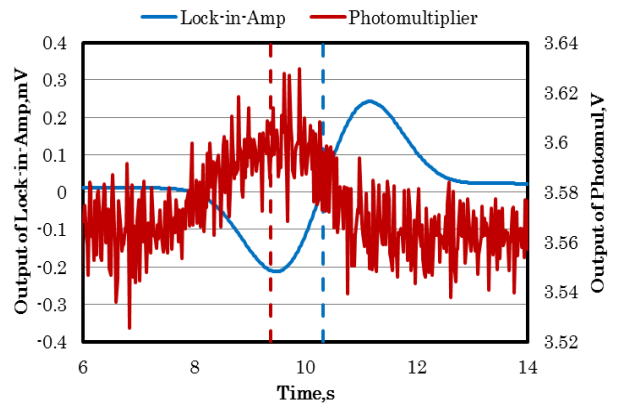


Fig.3-2 キセノン放電管を対象とした実験の結果

3.2 ロックインアンプの時定数と時間遅れの関係

キセノン放電管による蛍光取得により、蛍光信号にズレが発生していることが判明した。そこで、要因として考えられるロックインアンプの時定数と信号のズレの関係を取得することでズレの影響をキャンセルする必要がある。そのために、ロックインアンプの時定数を変化させ、それともなう蛍光信号のズレの変化を取得することで両者の関係を補正できるようにする。

実験方法として、ロックインアンプの時定数を10ms→50ms→100ms→200ms→500ms→1sと変化させ、遅れと時定数の関係を取得した。各時定数における周波数のズレの結果をFig.3-3に示す。この結果から、時定数が増大させると蛍光信号のズレも増大していることが確認でき、時定数をズレの関係は線形であることが確認できる。時定数は周波数応答を示す値であり、ノイズ除去に影響を与える。時定数を大きく設定すると、ノイズ除去の効果も大きい。しかし、大きすぎると取得したい信号までカットしてしまいます可能性がある。したがって、最適な時定数が存在する。そこで、この関係を利用することで、最適な時定数において、ロックインアンプの出力と光電子倍增管の出力のズレを補正することが可能となった。

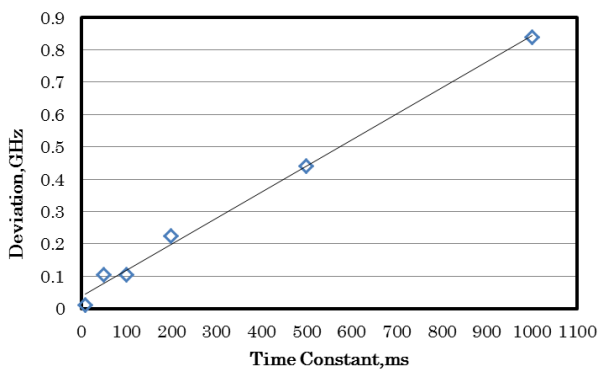


Fig.3-3 時定数とズレの関係

4. $\mu 10$ プルームでの蛍光取得実験

4.1 変調周波数の最適化

波長変調分光法において、変調周波数の設定は重要であり、変調周波数とバックグラウンドノイズの周波数は異なる領域で設定する必要がある。そのため、 $\mu 10$ のプルームによるバックグラウンドノイズをバンドパスフィルターを通して光電子倍增管により測定することで、ノイズの周波数を確認する。結果は、Fig.4-1のように周期的な振動が発生していることが判明した。この振動の周波数とロックインアンプのオンレタによる変調周波数が一致してしまうと、ノイズをカットすることができず、蛍光信号検出が困難となる。そのため、ノイズ信号においてフーリエ解析を行うことで、ノイズに含まれる周波数成分を検出する。そのうえで、変調周波数をノイズの含まない領域に設定することで、変調周波数の最適化を図った。

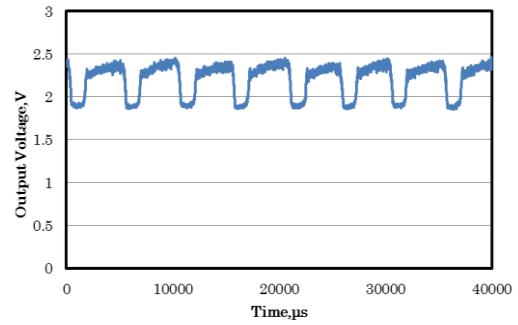


Fig.4-1 $\mu 10$ プルーム中のバックグラウンドノイズ

フーリエ解析の結果をFig.4-2に示す。この結果から、 $\mu 10$ のプルームには2kHz以下の領域にノイズ成分が存在することが確認できた。変調周波数をこの領域内に設定してしまうとこのノイズがカットされずに出力されることになるので、より高周波領域での設定が必要となる。そこで、本実験では、ロックインアンプの出力範囲が1mHzから250kHz、レーザコントローラの入力範囲が最大7kHzであることを考慮して、5.6kHzを変調周波数とすることで、混入するノイズを少なくし、SN比の向上および蛍光信号の検出を行った。

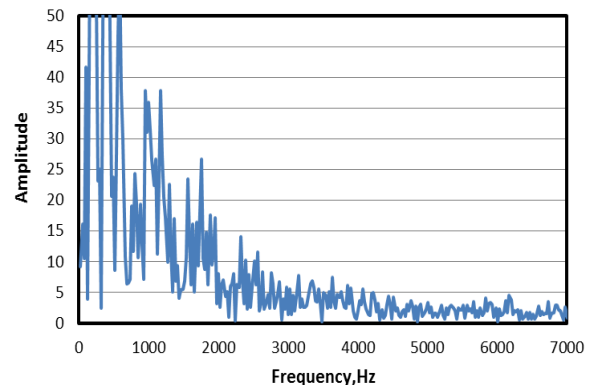


Fig.4-2 フーリエ解析によるノイズ周波数成分

4.2 実験条件

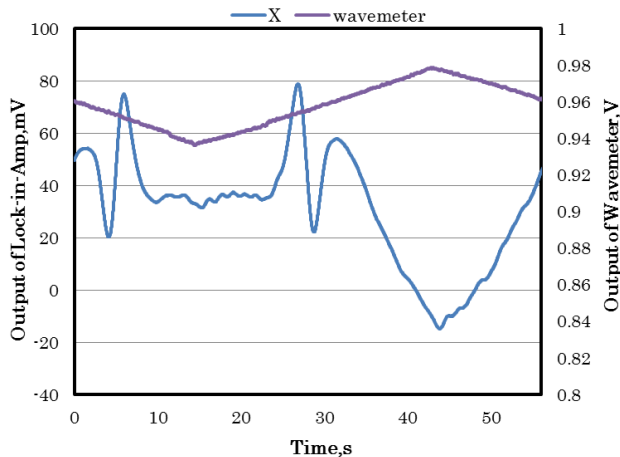
マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ のプルームにおける蛍光信号検出のために、Fig.2-5のような光学系を作成し実験を行った。実験の際の $\mu 10$ の条件を以下のTable 4-1に示す。

Table 4-1 $\mu 10$ の作動条件

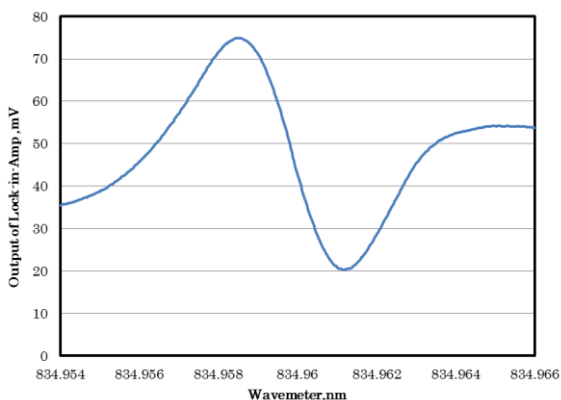
Propellant	Waveguide = 0.1sccm Discharge area = 3.0sccm
Microwave	35W
Sc grid	Voltage = 1.5kV Current = 188mA
Ac grid	Voltage = -350V Current = 3mA

4.3 実験結果

結果を以下の Fig.4-1 (a) に示す. また, 波長計とエタロンの信号を用いて, 横軸を時間から波長に変換し, 0s から 10s 付近の信号を示したものを Fig.4-1 (b) に示す.



(a)



(b)

Fig.4-1 $\mu 10$ プルームを対象とした実験結果

この結果より, 上に凸の曲線を微分したような波形が確認できる. これは, 波長変調分光法によってみられる蛍光信号と一致している. したがって, $\mu 10$ のプルームにおいても蛍光信号の取得に成功したことがわかる. よって, レーザ誘起蛍光法を用いて, さらに, 波長変調分光法により高感度測定を実現したことにより, ビューポートを通して真空チャンバ内にレーザを導入することで, プルーム中のキセノンイオンの蛍光信号を検出することが可能であることを実証することができた.

5. 旋回流速の計測

本実験では, ビューポートを介して真空チャンバ内にレーザを導入したが, その際に透過率の関係からビューポー

トに対して角度をつけて入射している. そのため, $\mu 10$ プルームの旋回流方向のみでなく, 推進軸方向の速度成分もドップラーシフトに寄与するような実験系となっている. 推進方向の速度は旋回方向の速度に比べて非常に大きいため実験系のわずかな誤差の存在で大きな影響を与える. そのため, 本実験の結果のみからでは正確な旋回流方向のドップラーシフトを計測できておらず, 正確な旋回流速を求めることができていない. そのため, 複数点計測による推進軸方向の速度成分の除去やプルームへのレーザ入射を旋回方向のみから行うような改善が必要となる.

5. 結論

本研究により得た結論を以下にまとめる.

- 光の損失を最小限にするような集光系の作成を行った.
- ドップラーシフト計測のためにキセノン放電管による蛍光取得実験を行うことで, 光電子倍增管の出力とロックインアンプの出力に差異を発見した. ロックインアンプの時定数と差異の関係を得た.
- プルームの振動によるノイズをフーリエ解析することにより, ノイズ成分を除去し, 最適な参照周波数の設定を行った.
- $\mu 10$ のプルームを対象に LIF 法を適用し, プルーム中のキセノンイオンの蛍光信号の検出に成功した.
- 旋回流計測のために, 実験系の改善が必要である.

6. 参考文献

- 1) Kozubsky, K., Zhurin, V., Higham, J. : Disturbance Torques Generated by the Stationary Plasma Thruster, 29th joint Propulsion Conference, AIAA-93-2394, Monterey, CA, USA, 1993.
- 2) Brophy, J.R., Garner, C.E., Mikes, S. : Dawn Ion Propulsion System Initial Checkout after Launch, 44th Joint Propulsion Conference, AIAA-2008-4917, 2008, Hartford, Connecticut, USA, 2008.
- 3) 細田聡, 國中均 : イオンエンジンによる小惑星探査機「はやぶさ」の帰還運用, J. Plasma Fusion Res., Vol. 86, No.5, pp282-292, 2010.
- 4) William A. Hargus, et al. : Near-plume laser-induced fluorescence velocity measurements of a medium power Hall thruster, of Propulsion and Power, Vol.26, No.1, pp.135-141, 2010.
- 5) G. Bourgeois, S. Mazouffre, and N. Sadeghi, : Unexpected transverse velocity component of Xe⁺ ions near the exit plane of Hall thruster, Phys. Plasmas 17, 113502, 2010.