2017/12/21

# 衝突輻射モデルを用いたヘリコン源の アルゴンプラズマ分光計測

#### ΤΔΤ

#### <u>堀田大貴</u><sup>1</sup>、桑原大介<sup>1</sup>、赤塚洋<sup>2</sup>、篠原俊二郎<sup>1</sup>

#### 東京農工大学<sup>1</sup>、東京工業大学<sup>2</sup>

「原子分子過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー効果によるプラズマ科学の展開」 「原子分子データ応用フォーラムセミナー」 合同研究会 発表

### 0. 発表内容

- 1. 背景~電気推進機とは~
- 2. 目的 ~電気推進機評価のための測定法~
- 3. 原理 ~衝突輻射モデル(CRモデル)~ ArプラズマのためのCRモデル
- 4. 改善点 …使用波長範囲の拡張、断面積データの改善
- 5. 実験1 ~大型ヘリコン源 LMD~
- 6. 実験2 ~小型ヘリコン源 SHD~
- 7. 結論·今後の課題

プローブ法とCRモデルを用いた - 強度比法(改善前、改善後) によるn<sub>e</sub>, T<sub>e</sub>測定



1/17

1.背景



[1] Shinohara, S. et al., IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 42, No. 5 (2014), pp. 1245-1254.







[2] Vlček, J., J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 22, No. 5 (1989), pp. 623-631.



#### $He \diamond H_2$ : 多手法で実験結果と一致が見られている

使用波長の同定済 発光強度の絶対値を用いる方法も スペクトル→電子密度、電子温度では同一オーダーでの一致<sup>[3-5]</sup> 実験で測定法として比較的使用可能に

Ar:素過程が複雑で十分な結果はまだ得られていない

スペクトル→電子温度、電子密度<sup>[6]</sup> 電子温度、電子密度→数密度<sup>[7]</sup>の両方から研究が進んでいる



#### 推進機開発で用いるArでの衝突輻射モデルの開発が急がれる

[3] T. Fujimoto, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 21 (1979) 439.

[4] M. Goto, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **76** (2003) 331. [5] K. Sawada *et al.*, Plasma Fus. Res. **5** (2010) 001-1.

[6] Akatsuka, H., Phys. Plasmas, 16 (2009), pp. 043502-1-16. [7] Amy M. Keesee, et al., Rev. Sci. Instrum 77 (2006) 10F304



#### 衝突輻射モデル<sup>※</sup>(Collisional Radiative model: CR model)

原子, イオン, 電子のプラズマ中における衝突, 輻射過程を 多くの準位において考慮, 定式化されたプラズマモデル 電子温度, 電子密度と各順位の数密度を関連付ける

※本研究ではJ. Vlček教授論文の元に 東京工業大学の赤塚洋准教授が プログラミング<sup>[6]</sup>したものを用いた

$$\frac{dN_{p}}{dt} = \sum_{q=2}^{65} a_{pq} N_{p} + \delta_{p} \quad (p = 2, 3, \dots, 65)$$
three body recombination Radiative recombination (6)
$$a_{pq} = \begin{cases} C_{pq}n_{e} + K_{pq}n_{1} \quad (p > q) \\ F_{pq}n_{e} + L_{qp}n_{1} + \Lambda_{pq}A_{qp} \quad (p < q) \\ -\left(S_{p}n_{e} + V_{p}n_{1} + \sum_{\substack{i=1\\i\neq q}}^{65} a_{qi} + \frac{D_{p}}{R^{2}} + B_{p}n_{1}^{2}\right) \\ (p = q) \end{cases}$$

$$(p = q)$$

$$\delta_{p} = n_{e}^{2}(O_{p}n_{e} + W_{p}n_{1} + \Lambda_{p}R_{p})$$
three body recombination Radiative recombination (6)
$$(p = q)$$

$$\delta_{p} = n_{e}^{2}(O_{p}n_{e} + W_{p}n_{1} + \Lambda_{p}R_{p})$$
three body recombination (6)
$$(p = q)$$

$$\delta_{p} = n_{e}^{2}(O_{p}n_{e} + W_{p}n_{1} + \Lambda_{p}R_{p})$$
three body recombination (6)
$$(p = q)$$

$$(p = q)$$

$$\delta_{p} = n_{e}^{2}(O_{p}n_{e} + W_{p}n_{1} + \Lambda_{p}R_{p})$$



# 4.改善点 4.1 使用波長

・使用波長に高エネルギー(~15 eV)で発光する波長を加えた



# 4.改善点 4.2 電子衝突励起断面積



[14] Puech database, www.lxcat.net, retrieved on August 28, 2017. [15] TRINITI database, www.lxcat.net, retrieved on August 28, 2017.



# 5.実験1~大型ヘリコン源 LMD~



TAT







[17] Kuwahara, D. et al., Rev. Sci. Instrum., Vol. 84, No. 10 (2013), pp. 103502-1~4







プローブ結果と比べ圧力増加に対する 電子温度低下傾向が顕著 で更なる比較、評価が必要









単純に面積比で1mm管部の密度を推定すると10<sup>12</sup> cm<sup>-3</sup>以上と考えられる。

減衰を考慮すると1 mm管中の結果も妥当な密度と言える プローブ挿入による減衰でプローブ結果が低い可能性も

7.結論・今後の課題



CRモデルを用いて電気推進機評価法開発のため以下の改善を行った

✓ 使用波長の拡張 …高励起エネルギーでの発光も使用(13.168~15.329 eV)

 <del>差:最大2.16 eV</del>

改善結果の検証のため本研究室にある2つの実験装置でプローブ結果と比較した

LMD ・・・電子密度結果に大幅な改善: プローブとの比 0.43~3.73 倍 20 mm 管…同一強度比での結果の向上を確認 SHE 段付き1 mm管 …1 mm管内の密度の推定が行えた 電子密度:約2×10<sup>12</sup> cm<sup>-3</sup> 電子温度:約3.2 eV



16/17

今後の課題

- ✓ プラズマ条件に対応した最適なラインの選定
   ・3つ以上の強度比で交点が得られることも
   ・3つ以上の強度比で残差が最小になる値を CRモデルでの真値とする
- ✓ 電子エネルギー分布がMaxwell分布以外の時にも対応
   ・低エネルギーでより誤差が大きくなる傾向にある
   高周波補償プローブ等で電子エネルギー分布を測定し、
   CRモデルに適応することでより精度の向上を狙う



- ・HeとArの混合プラズマについてHeのCRモデルとの結果を比較することにより 計測結果の検証を行う
- ・より高密度(~1013 cm-3)のプラズマで測定を行うことで計測結果の検証を行う



*I* (675.3nm) /*I* (763.5 nm) *I* (603.2nm) /*I* (763.5 nm) *I* (603.2nm) /*I* (675.3 nm)

