

コンパクト軟X線結晶分光器の開発

下田 勝二

群馬大学工学部

1. まえがき

近年、X線リソグラフィ、X線顕微鏡、生物試料を生きたまま観察することが出来るX線顕微鏡などの応用のための軟X線源への需要が高まりつつある。Zピンチ方式放電によるピンチプラズマ軟X線源は、設備が小型、高効率、ローコストなどの特徴から、これらの応用に対し有力なX線源として有望視されている。軟X線源として実用化されるためには、軟X線の放射が発生する機構を明らかにして放電の条件を制御し、希望する性質(波長、強度など)のX線放射を引き起こすための技術の開発が課題である。ピンチプラズマから発生するX線の放射現象を解明するには波長、強度などのほかにナノ秒、サブナノ秒といった非常に短い時間スケールにおける現象の観測を必要とする。

そこで、軟X線源としてプラズマフォーカス装置¹⁾を利用可能とするには、プラズマの巨視的挙動と軟X線発生メカニズムの検討および形成される軟X線源について特性を調べる必要がある。そのため高温高密度プラズマから放出される軟X線の波長観測のために結晶分光器を開発したので報告する。

2. 波長と分光器

分光器の種類は、プリズムによりスペクトル要素を分散するプリズム分光器、プリズムの代わりに回折格子を用いて高性能の測定を可能にした回折格子分光器、結晶を用いた結晶分光器があり、これらは分散型分光器という。分光器のスペクトル分解能は、分散要素によって作られる最大光路差によって決まる。分解能は用いられる格子やプリズムの大きさにより制限される。また、干渉計を用いたものを干渉分光計という。分光器は観測可能な波長領域によっても分類される。赤外スペクトル測定用のものを赤外分光器、可視スペクトルと紫外スペクトル測定用のものを可視光紫外分光器、真空紫外スペクトル測定用のものを一般に真空分光器という。

X線は1895年にレントゲンによって発見され、強い透過力を持った目に見えない光線として知られている。

電磁波は、波長の短い方から、 γ 線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、電波となっている。X線の波長領域の分類と用いられる分光器について図1に示す。

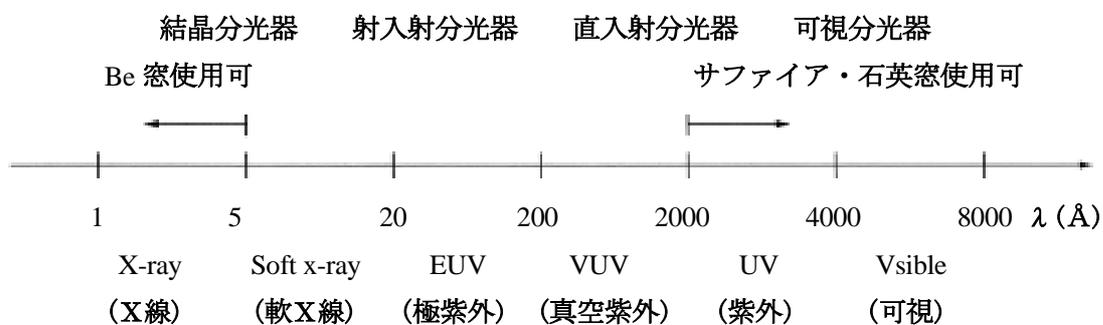


図1. X線の波長領域の分類と用いられる分光器

X線の長波長側は遠紫外線に、短波長側は γ 線に連続的につながっている。このX線領域にある電磁波のうち、長波長側を軟X線、短波長側を硬X線と呼ばれ、これらの境界の波長は明確に定義されていない。

本研究では、 20\AA 以下の波長領域が測定対象である。観測用の窓として、結晶分光器ではベリリウム、斜入射分光器では窒化珪素などの薄い泊が用いられている。

3. 結晶分光器

ピンチプラズマから放出され軟X線の特徴として、光源が点光源である。コンパクトで 35mm フィルム 1 本で 10 数ショット枚を記録できるように設計した。広い波長域を計測するためには入射角を大きく取る必要がある。そのためには①光源と結晶の距離を可能な限り近づけること、②波長分散方向に長い結晶を用いること、③波長分散方向に長いスリットを用いることが必要である。

結晶分光器の原理は図 2 に示すように結晶の空間子の中の一群の平行な原子面の間隔を d とする。その原子面に波長 λ の X 線が原子面と角 θ をなして入射するとする。そのとき、まず 1 枚の原子面についてみると反射角が入射角（入射角、反射角は X 線の場合、反射通常原子面となす角を言う）に等しければ角散乱波の位相はそろい、波は干渉し互いに強め合う（鏡面反射）。次に、異なった面により鏡面反射を受けた波の間の干渉を考える。異なった面による散乱波は隣り合う面からの散乱波の光路差 $2d \sin \theta$ が波長の整数倍 $n\lambda$ に等しければ、 $2d \sin \theta = n\lambda$ であれば、位相がそろい波は強め合い回折が起こる。これが Bragg の反射条件である。この条件に合う X 線の最大波長 λ_{\max} は $\lambda_{\max} = 2d$ である。

結晶分光器の概念図を図 3 に示す。結晶の形状は光軸調整と波長計算の容易な平板型結晶分光器を試作した²⁾。測定したい波長に対して θ が $0\sim 45^\circ$ の範囲に入るような格子定数 ($2d$) を持つものとして RAP（フタル酸ルビジウム $2d = 26.12\text{\AA}$ ）を選んだ。 $2d = 26.12\text{\AA}$ であり、結晶のサイズは $50 \times 20 \times 1.5\text{mm}$ である。分光器は、硬 X 線領域に対して吸収係数が高い、 $220 \times 220 \times 70\text{mm}$ のアルミニウムを削り出し、蓋は暑さ 10mm のアルミニウム板より構成され真空容器を兼ねている。軟 X 線源（ピンチプラズマ）とスリットまでの距離は 180mm 、スリットと結晶の中心までは 80mm 、結晶の中心と受光部までは 100mm である。スリットは $50\ \mu\text{m} \times 10\text{mm}$ であり、波長分散方向に取り付けた。また、スリットの上に位置にピンホールを設置し同時に軟 X 線の時間積分ピンホール像がフィルムに撮影できる。プラズマから放出する可視光および紫外線をカットするためとプラズマフォーカス装置と分光器の真空度が異なるので $25\ \mu\text{m}$ のベリリウム箔を用いている。観測したい波長ごとに結晶板の角度を回転ステージにより調整できる構造である。回転軸は結晶表面の中心にあり、フィルムは回転軸を中心とした半径 100mm の $1/4$ 円周上にフィルムガイドにより固定されている。フィルムは市販のパトローネ入りの Kodak Tri-X Pan フィルムを使用し、巻き取り機構で撮影した必要な長さを巻き上げることが可能である。 35mm フィルム 1 本で観測波長によっては真空を破らずに 20 数ショット撮影できる。フィルム面上に観測されたスペクトルの波長計算により求めるために回転軸の垂直方向部分から 9mm の位置に、1 ショット毎に基準点を記録できるように LED がフィルムガイドに付けられている。

この分光器の測定波長範囲は $0\sim 18\text{\AA}$ となる。製作した結晶分光器の内部の写真を図 4 に示す。図の (a) はスリット、(b) は RAP 結晶、(c) はフィルムガイドである。また、筆者が設計・自作したものである。

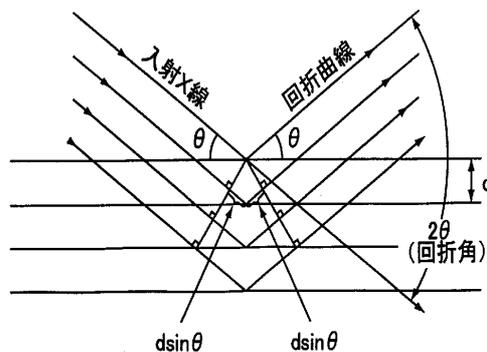


図 2. Bragg の反射条件

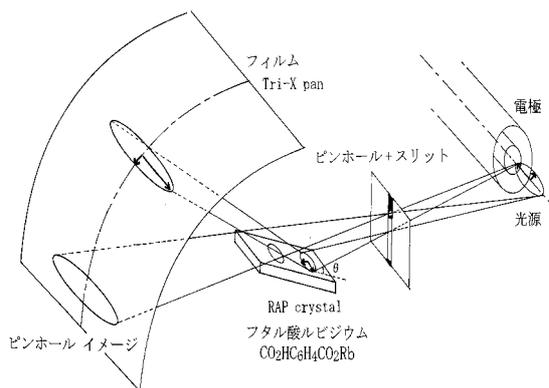


図 3. 結晶分光器の概念図

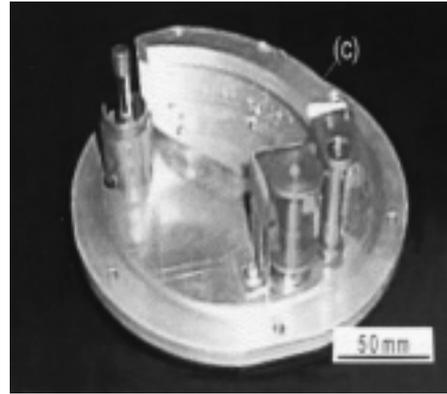
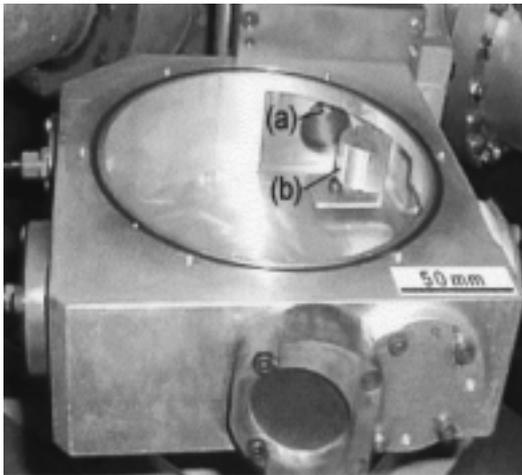


図4. 結晶分光器の内部の写真

フィルム上の点 P に露光した光の波長を計算して求める (図3 参照)。点光源 S から発生した光は結晶面で反射し、フィルム上の点 P に露光する。LED はフィルム上で基準点を求めるために用いられる。また、プラズマ (X線源) の発生する位置が変動することが観測されているので r 方向の変位も考慮している。

4. 軟X線の分光結果

4.1 平面型結晶を用いた例

結晶分光器の結晶に直径 1.25mm の RAP 平面型結晶を用いた場合の観測例を示す³⁾。水素にアルゴンガスを混合したときの積分した軟X線ピンホール像と分光像を図5に示す。スリットの位置にピンホールと配置し、同時に積分した軟X線ピンホール像がフィルム上に記録できる。ホットスポットと呼ばれる高密度プラズマから軟X線が5ヶ所から発生し、その場所から Ar の特性X線のラインが観測されている。Ar のスペクトル分光強度分布を図6に示す。波長特定の結果、3.944 Å の ArXVII $1s^2-1s2p^1P_1$ 、3.963 Å の ArXVII $1s^2-1s2p^3P_1$ 、3.9684 Å の ArXVII $1s^2 2p-1s2p^2$ 、 $1s^2 2s-1s2s2p$ のラインと確認された。その強度は、100: 50:25 で Pecock ら⁴⁾の報告と一致している。

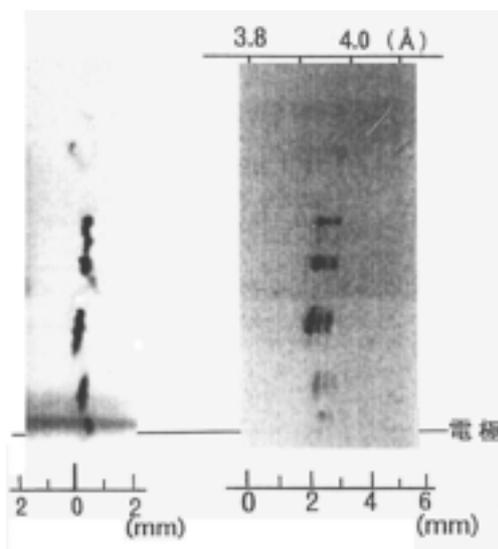


図5. Ar の積分した軟X線ピンホール像と分光像

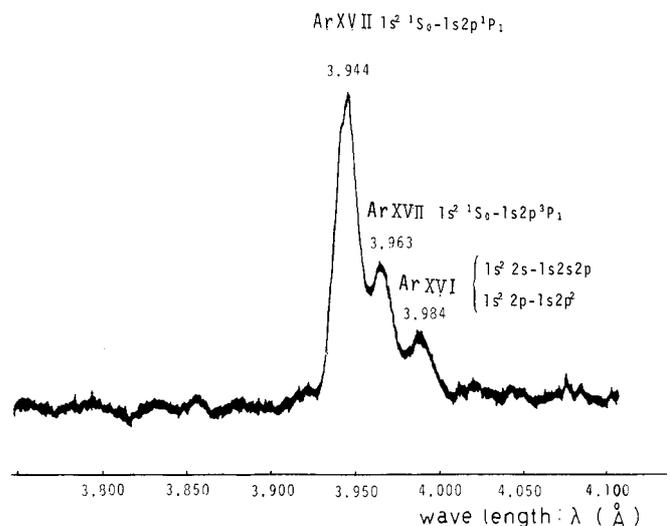


図6. Ar のスペクトル分光強度分布

4.2 コンベックス型結晶を用いた例

結晶分光器の結晶に直径 1.25mm の RAP コンベックス型結晶を用いた観測例⁵⁾を図7に示す。水素にネオンガスを混合したときの分光スペクトル写真図7-a)とその分光強度分布図7-b)である。図7-b)より、H様HeX 1 $s-np$ シリーズは $2 < n < 7$ 、He様HeIX 1 $s^2-1sn'p$ シリーズは $2 < n' < 6$ まで確認することができた。このことから、Inglis-teller の法則より電子密度を求めることができる。

$$\log(N) = 23.26 + 7.5(n) + 4.5 \log(z)$$

(N : イオン密度、 z : イオンの荷電数)

$n=7$ のとき $n_e = 1.5 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 、 $n'=7$ のとき $n'_e = 4.7 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ である。

また、9Åあたりで再結合放射と制動放射による連続スペクトルがみられる。この傾きを再結合放射によるものと仮定すると、その強度は $\exp(-h\nu/kT_e)$ に比例するので、電子温度 T_e は 0.43 keV と求められた。

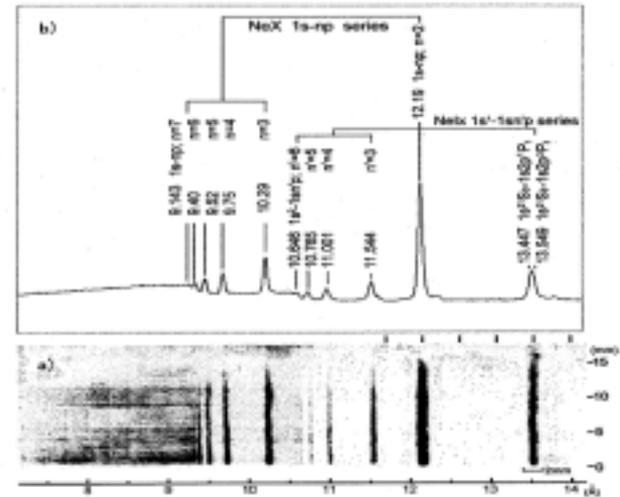


図7. 水素にネオンガスを混合したときの分光スペクトル写真 a) とその分光強度分布 b)

5. まとめ

軟X線源をピンチプラズマを測定対象としたコンパクト軟X線結晶分光器を製作し、その性能を確かめた。結晶に RAP ($2d=26.12 \text{Å}$) を用いた。分光器の性能は、①平面型結晶を用いた場合は結晶の角度 θ を変えることで $0 \sim 18 \text{Å}$ ($0 \sim 53.5^\circ$) の範囲のX線スペクトルを観測することが可能で、分解能 4Å で >1000 、分散は、 $7.6 \times 10^{-2} \text{Å/mm}$ である。②コンベックス型結晶を用いた場合は $3 \sim 20 \text{Å}$ の範囲のX線スペクトルを観測することが可能で、分解能は >600 、分散は、 $1.1 \times 10^{-1} \text{Å/mm}$ である。また、観測したスペクトルから電子温度が 0.43 keV と計算で求められた。

Ar, Ne のスペクトルの観測結果からピンチプラズマの軟X線の波長および電子温度の特定に有用であることが実証できた。X線の発生するメカニズムは軟X線の波長、電子温度の特定、干渉測定、時間分解測定の結果などを総合的に検討した結果、電子ビームとプラズマの相互作用により制動放射で軟X線が発生することがわかった。

6. 謝 辞

本研究を行うにあたって、ご指導下さいました群馬大学名誉教授平野克己先生に深く感謝致します。

参考文献

- 1) K.Hirano, T.Yamamoto, K.Shimoda and Y.Tagaya; Jpn. Appl. Phys., **24** (1985) 1514.
- 2) K.Shimoda, T.Yamamoto, S.Takada, H.Sone and K.Hirano; J. Phys. Soc. Jpn., **64** (1987) 451.
- 3) K.Hirano, N.Hisatome, T.Yamamoto and K.Shimoda; Rev. Sci. Instrum., **65** (1994) 3761.
- 4) N.J.Peacock, R.J.Speer and M.G.Hobby; J. Phys. B, **2** (1969) 798.
- 5) T.Yanagidaira, K.Shimoda, Y.Ono and K.Hirano; Phys. Plasmas, **6** (1999) 4679.