

衛星搭載用較正線源としての X 線発生装置 の開発基礎実験

立教大学 理学研究科 物理学専攻

修士課程 1 年 小松飛斗

1. 概要

観測衛星に搭載された X 線検出器は宇宙線によって損傷を受けるため、検出器の動作状況を確認するための較正線源は不可欠である。特に、2013 年度に打ち上げが予定されている X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載されるマイクロカロリメーターのように、温度変化に敏感な検出器では数分に 1 回の頻度で較正をしたいため、発生させる X 線を短時間で on/off したい。そこで、紫外線 LED を使い光電効果で電子を放出させ高電圧で加速した電子を電極に当て X 線を発生させるという新しいタイプの X 線発生装置の提案がある。設計した装置がどの程度電子を陽極に収束させるかを調べるため、装置内の電子軌道をシミュレートした。この結果に基づいて装置を開発し、動作試験を行った。

2. X 線発生装置の原理

本研究では図 1 のような X 線発生装置を設計する。この装置は、対陰極型の X 線発生装置である MANSON MODEL 2 ULTRASOFT X-RAY SOURCE を参考に設計した。MANSON MODEL では、接地した円筒内に、ヘアピン状のフィラメントに数 10V の電圧をかけた陰極と高電圧をかけた陽極を設置することで、陽極と円筒が静電レンズの役割を果たし、陰極を飛び出した熱電子は陽極に収束する。飛び出した熱電子は加速されて陽極に衝突し、X 線を発生する。[1]

今回提案する X 線発生装置は、フィラメントから熱電子を発生させる代わりに、波長の短い紫外線 LED からの紫外線を金属に照射し、光電効果によって電子を発生させる。LED はそれ自体とても小さいので、小型・軽量とすることができる。また、LED はスイッチの on/off によって瞬時に紫外線を on/off できるので、容易に電子を on/off することができる。

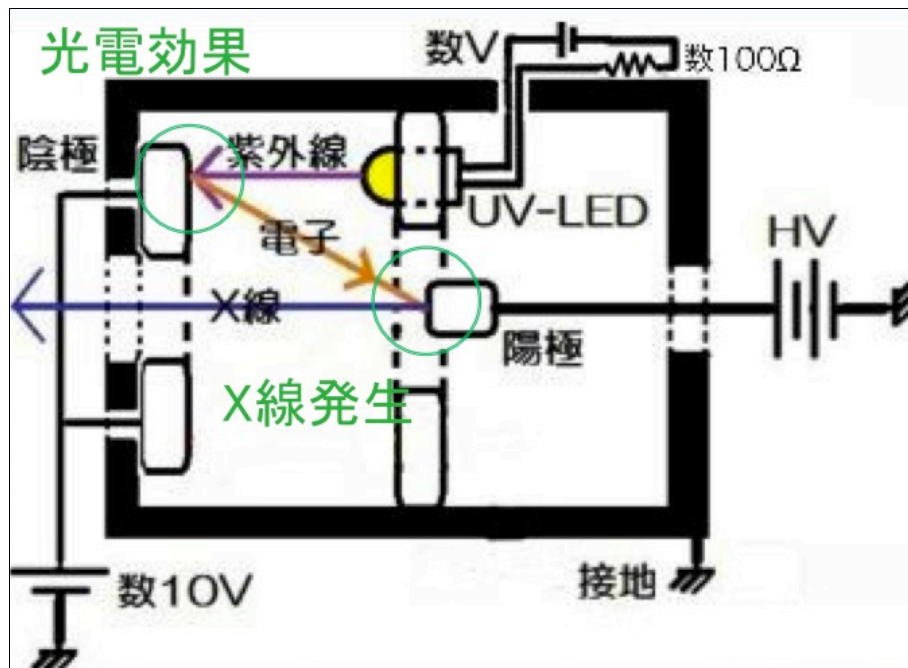


図 1 X 線発生装置の概念図

X 線発生のための電子源としての紫外線 LED と、光電面としての陰極を次のように設定する。光電効果で電子が発生する条件は、

$$E_{LED} > \phi \rightarrow \frac{hc}{\lambda_{LED}} > \phi \quad (\phi : \text{仕事関数}) \quad (1-1)$$

である。本研究では、Sensor Electronic Technology, INC. 社の UVTOP270TO39BL という波長 270nm の紫外線 LED と、陰極として仕事関数 4.2eV のアルミニウム Al を使用する。[2][3]また、陽極金属にもアルミニウムを用いた。

3. シミュレーションの結果と評価

設計した X 線発生装置がどの程度電子を陽極に収束させることができるのか、また陰極に電圧をかけた場合とかけない場合で静電レンズの効果がどの程度変化するか、すなわち陽極面での電子の収束の程度がどの程度変化するかを調べたい。

そこで、陰極電圧を 0V から 10V おきに 50V まで変化させたときの電子軌道と、陽極面における電子の分布を調べた。図 2～図 4 はそれぞれ、シミュレーションで再現した装置、陰極電圧 20V の場合の電子軌道を示す。また電子が中心

からどの程度の位置に分布しているかを調べるために、陽極中心から最も遠い位置に着弾した電子の中心からの距離を電圧ごとにまとめたものが表1である。

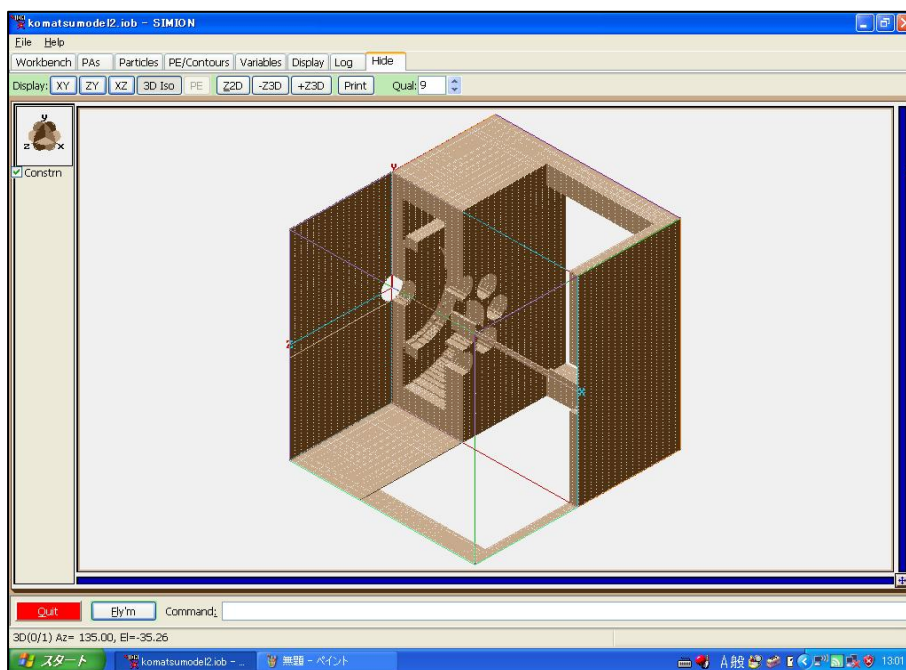


図 2 シミュレーションで再現した装置の内観図

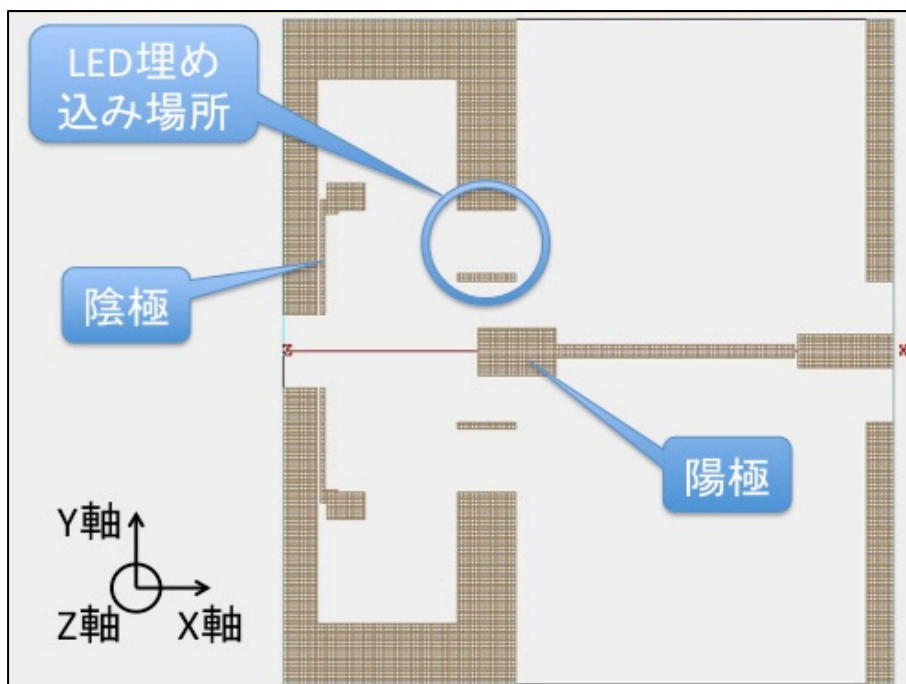


図 3 シミュレーションで再現した装置の断面図

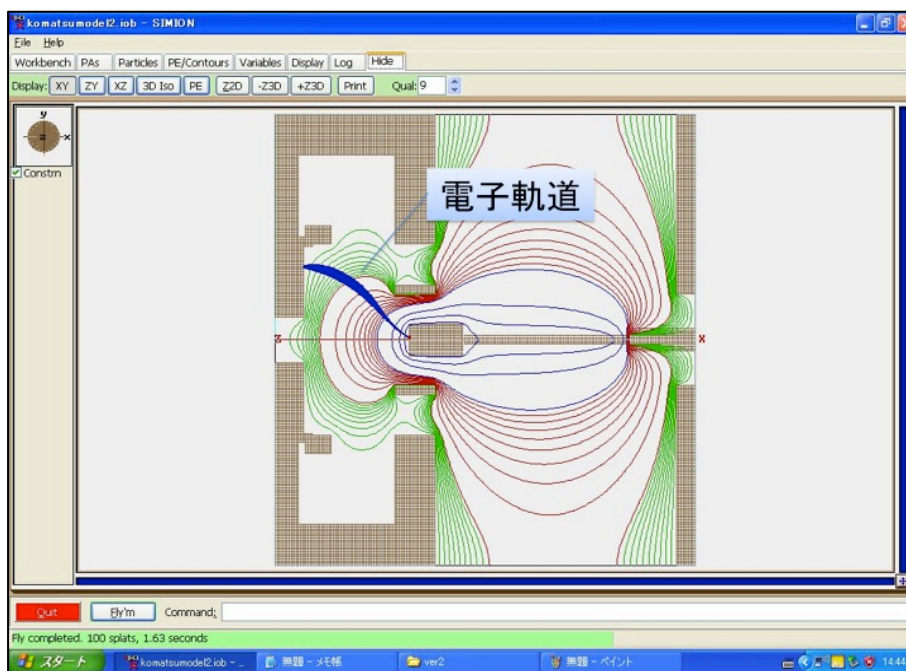


図 4 陰極電圧 20V の時の電子軌道

陰極電圧[V]	陽極中心から最も遠い位置に着弾した電子の中心からの距離[mm]
0V	0.577
10V	0.472
20V	0.375
30V	0.296
40V	0.264
50V	0.418

表 1 陽極中心から最も遠い位置に着弾した電子の中心からの距離

表 1 より、陰極電圧をかけたときはかけないときに比べてより電子が収束し、静電レンズの効果があることがわかった。しかし、どの電圧においても半径 0.6mm 以内に収束しており、陰極電圧の有無に関わらず X 線発生に十分な電子収束を実現できることが分かった。

4. 装置の動作試験と結果

シミュレーション結果に基づき、X線発生装置を製作した(図5)。真空チェンバー内でX線発生装置とX線検出器の位置がずれ、X線が検出できなくなることを防ぐために、X線発生装置とX線検出器を1つの台上に置き、固定した。なお、使用したX線検出器はAmptek社製のXR-100SDD(Silicon Drift Detector)である。

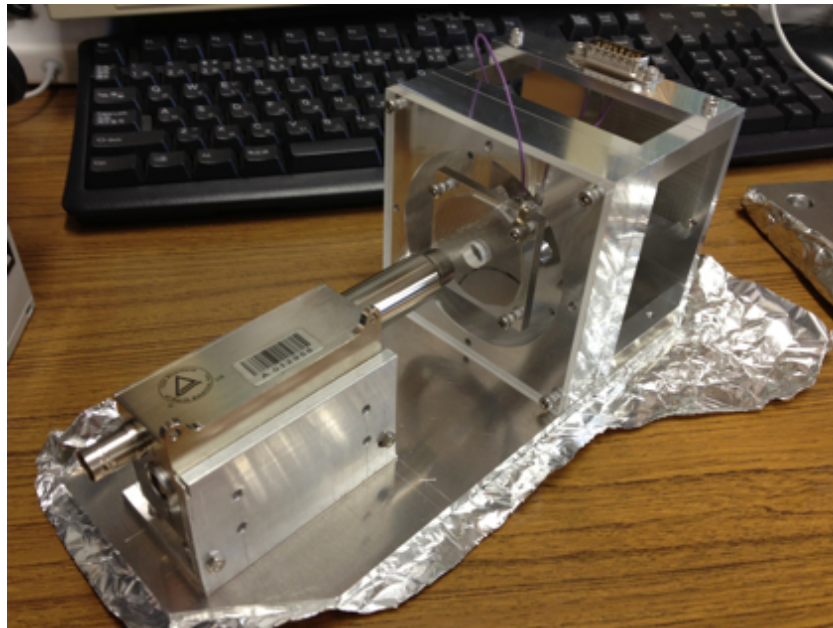


図5 製作したX線発生装置

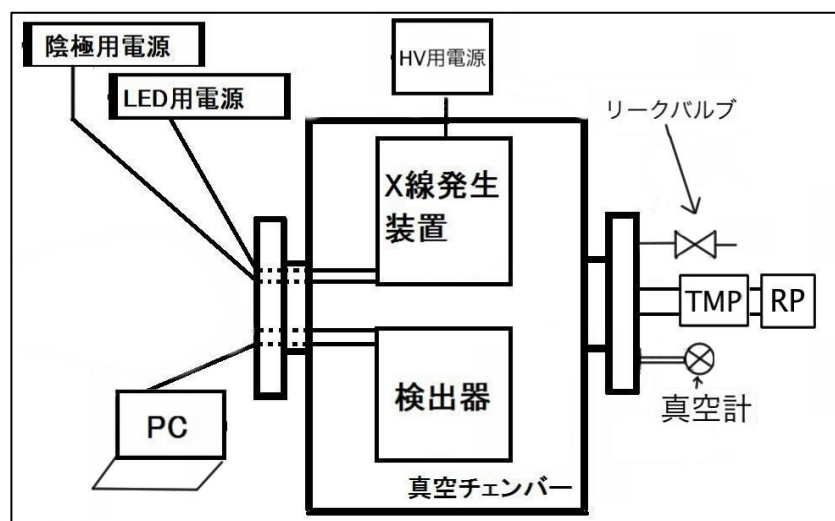


図6 動作試験の概念図

製作した X 線発生装置の動作試験を行う。図 6 が動作試験の概念図である。X 線発生装置と X 線検出器を真空チェンバー内に設置し、チェンバー外部に電源等を設置した。

製作した X 線発生装置が、実際に X 線を発生させることが出来るかどうかを確認する。真空チェンバー内を真空にし、陰極に電圧 0V、LED に電圧 4.87V と電流 19mA、陽極に電圧 5kV をかけたときの、得られた X 線スペクトルを図 7 に示す。ただし、測定時間は 3600sec、LED は 1 つ取りつけた。この時 FWHM は 221eV、カウント数は 4.725counts/sec であった。この結果を検出器の動作確認時に得られた Mn の X 線スペクトル(5.91keV)と比較することにより、得られた X 線スペクトルが Al-K α 線(1.49keV)であることがわかった。

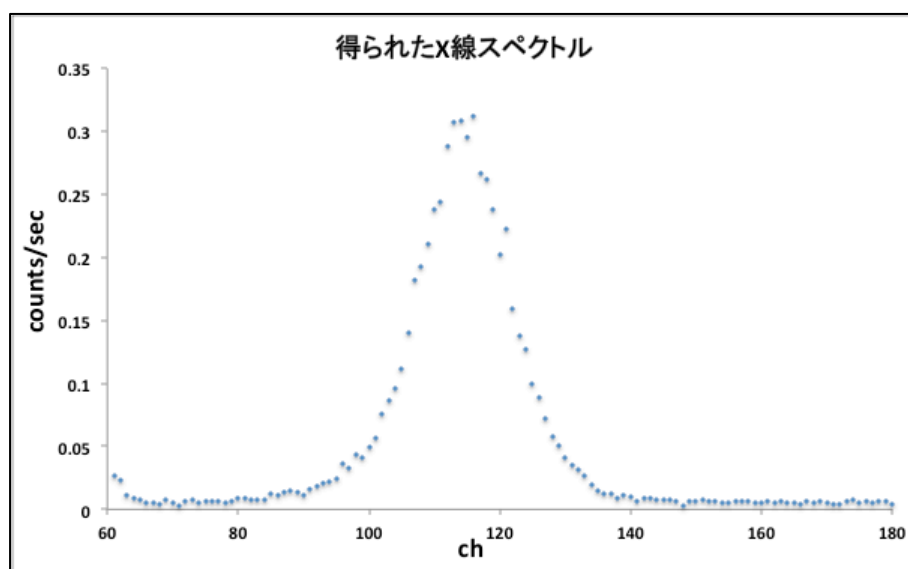


図 7 得られた X 線スペクトル

次に、製作した X 線発生装置の最大強度を見積もる。X 線が $2\pi sr$ に等方的に放射していると仮定し、検出器の大きさを S 、陽極中心から検出器までの距離を r 、実験で検出した X 線のカウント数を N 、装置の最大強度を I とおけば、式 3-1 が成り立つ。

$$\frac{S}{r^2} : 2\pi = N : I \quad (3-1)$$

今回使用した X 線検出器の大きさは 25mm^2 で[4]、陽極中心から検出器までの距離は 48mm、検出した X 線のカウント数は 4.725counts/sec であるから、

式 3-1 より装置の X 線最大強度を $2.73 \times 10^3 \text{counts/sec}$ と見積もることが出来る。製作した X 線発生装置は LED を最大 6 個取り付けることが出来る。LED を全て取り付けたとすると、その X 線強度は約 $2 \times 10^4 \text{counts/sec}$ 程度になると見積もることが出来る。

今回使用した 270nm の紫外線を出す LED の 1 秒あたりの放出する光子数は $\sim 1 \times 10^{17} \text{counts/sec}$ である。光電面における量子効率や陽極における X 線発生効率を考慮に入れると、予想される最大 X 線強度は $\sim 7 \times 10^7 \text{counts/sec}$ 程度である。今回の測定結果は、予想される X 線強度に比べて 4 桁程度小さいことが分かった。予想される X 線強度よりも測定した X 線強度が 4 桁程度小さかった原因の 1 つとして、光電面において期待される電子が出ていないことが考えられる。

5. 今後の予定

X 線強度を向上させるための工夫を行っていきたい。まず、光電面は酸化などによって劣化するので、やすりで磨くなど、表面の状態を良くするための工夫を試みる。MCP などを用いた電子の倍増も検討したい。また、開発した X 線発生装置が短時間パルスの X 線を発生させられるかどうか、ON/OFF 特性の確認も行う。

～参考文献～

- [1] JAMES E. MANSON 「MANSON MODEL 2 ULTRASOFT X-RAY SOURCE INSTALLATION AND OPERATING INSTRUCTIONS」 16 Apr 1983
- [2] <http://www.s-et.com/uvtop-catalogue.pdf>
- [3] CRC Hand book of Chemistry and Physics 84th edition
- [4] <http://www.amptek.com/drift.html>