

# ガスパフ Z ピンチにおけるパルス軟 X 線源を用いた微粒子計測

## Study of Fine Particles Using Pulsed Soft X-Ray in a Gas-Puff Z-Pinch

指導教授 高杉恵一

M2014 宮崎孝基

### 1. はじめに

ガスパフ Z ピンチの X 線像において、ピンチプラズマの近傍に、電極物質由来の内殻励起 X 線による雲状構造が計測されている[1]。内殻励起 X 線は、ピンチ現象に伴い発生する高エネルギー電子と、プラズマ近傍に飛散する電極物質との衝突による輻射と考えられ、最大ピンチ時刻における電極物質の空間分布情報を示すと考えられている。また、電極に錫を用いた実験では、大きさ、約1~100 $\mu\text{m}$ の微粒子が発生し、ピンチプラズマの軸方向に対し方位角方向に非一様飛散する事、ガス種の変更により飛散微粒子の形態が固体や液体に変化する事等が報告されている[2]。これらの報告より、放電に伴い発生する電極物質に微粒子が含まれ、微粒子の帯電現象に伴う Z ピンチプラズマとの相互作用による、複雑な飛散過程の存在が、推測される。

本研究では、これまで最大ピンチ時刻のみに限られていた飛散微粒子の雲状分布に対し、ピンチ放電の時間進展に伴う、任意時刻における飛散過程の解明を目標とした。プラズマ中における微粒子の分布計測は、グロー放電等の定常プラズマを用いた実験において、可視レーザーが一般に用いられるが、光学的に厚く、数  $\mu\text{s}$  の時間スケールで時々刻々と変化するピンチプラズマ中の微粒子計測には適さない。そこで本研究では、10keV 前後のパルス軟 X 線を用いた、コマ撮り X 線シャドウグラフ計測を提案する。

本研究の目的は、X 線シャドウグラフ法を用い、Z ピンチプラズマ近傍に飛散する錫微粒子の、時間分解・空間分布計測を実現する事である。その為、(1)計測用パルス X 線源の開発、(2)計測のバックグラウンドとなる Z ピンチプラズマからの輻射 X 線計測を行い、得られた見識を基に、(3)微粒子の X 線シャドウグラフ計測を行った。

### 2. 真空アークパルス軟 X 線源

0.15 $\mu\text{F}$ ×4個のコンデンサによる最大出力電圧90kV のマルクスジェネレータを電源に備えた、真空アークパルス X 線源を開発した。真空アーク放電は、電極蒸気プラズマによる真空放電である。電流路短絡の前段階において、電界放出により発生する電子が、電極間電圧により静電的に加速され、対向電極に衝突する事により、制動輻射パルス X 線が輻射される。電極には、真鍮針状電極、銅平板ターゲ

ット電極を用いた。10keV 以上の X 線に感度を有するシンチレーションプローブ、及びロゴスキーコイルを用い、電流波形の立ち上がり時刻前における、半値全幅約60ns のパルス X 線輻射を確認した(図1)。この約60ns のパルス X 線を用いた X 線シャドウグラフ計測は、ガスパフ放電の半周期、約6 $\mu\text{s}$  に対し、1/100の時間分解能を有する。また、マイカの凸型結晶分光器、X 線吸収法を用い、銅の  $K\alpha$  スペクトルと制動輻射連続スペクトル、及び輻射 X 線の平均エネルギーを計測した。電源出力電圧20~90kV に対し、18~54keV の X 線輻射を計測した。 $\Phi$ 150 $\mu\text{m}$  の錫ワイヤーを X 線フィルムカートリッジに張り付け、充電電圧20kV における約18keV の X 線を用い、直接露光実験を行ない、X 線シャドウグラフ像が得られる事を確認した。

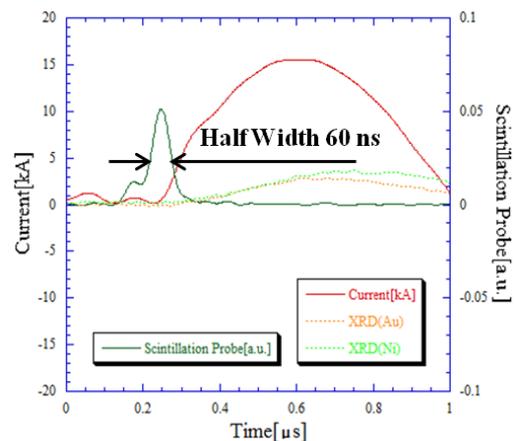


図1. 真空アーク型パルス X 線源の X 線輻射時間

### 3. ガスパフ Z ピンチにおける硬 X 線輻射

ガスパフ Z ピンチ放電において、ガスを噴射してから放電を開始するまでの遅延時間(ディレイタイム)を変更し、X 線吸収法を用いて輻射 X 線のエネルギーを計測した(図2(b))。ディレイタイムが遅くなると、X 線のエネルギーが低くなり、0.45ms 以降において、パルス X 線源のエネルギー領域を下回る。この18keV 以下のバックグラウンド X 線は、15 $\mu\text{m}$  のアルミフィルターを用いる事で遮蔽出来る(図2(a))。図2(a)上における、パルス X 線源から輻射される X 線のエネルギー領域約18~54keV、及び典型的な大きさの錫微粒子における X 線の吸収領域、のマッピングより、オレンジで囲んだ約18~30keV の領域において、約100 $\mu\text{m}$  前後の錫微粒子に対する X 線シャドウグラフ計測が期待できる。

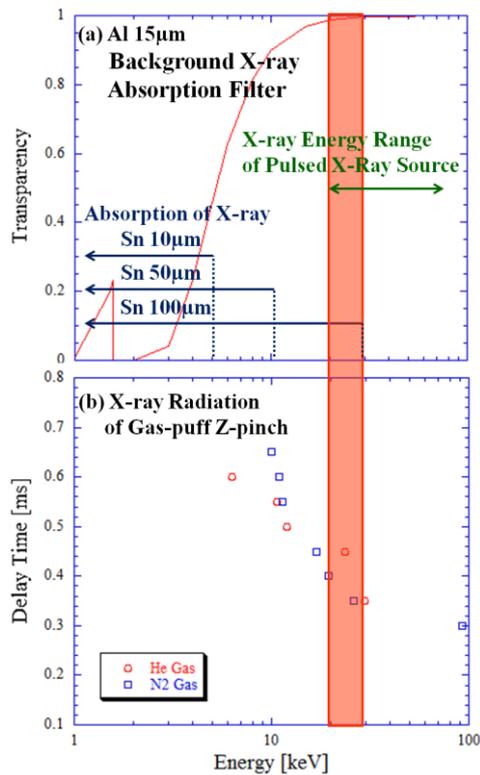


図2. 錫微粒子に対する X 線シャドウグラフ像の計測領域、(a)アルミフィルターによるバックグラウンド X 線の吸収率と、パルス X 線源の放射エネルギー領域、錫微粒子の完全吸収領域、(b)ガスパフ Z ピンチプラズマにおけるディレイタイムに対する X 線放射変化

#### 4. X 線シャドウグラフ計測

開発したパルス X 線源を用い、ガスパフ放電装置のプラズマ生成部に  $\Phi 150\mu\text{m}$  の錫ワイヤーを貼り、X 線シャドウグラフ計測の予備実験を行った(図3)。エネルギー約18keV のパルス X 線源放射を用い、錫ワイヤーのシャドウグラフ像の計測に成功した。本計測により、数百  $\mu\text{m}$  の錫の微細構造に対する、計測の有用性が確認された。

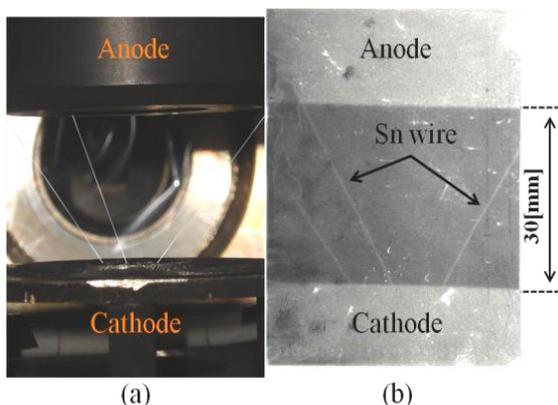


図3.  $\Phi 150\mu\text{m}$ 、錫ワイヤーの X 線シャドウグラフ像、(a)電極構造とワイヤーの位置、(b)X 線シャドウグラフ像

バックグラウンド X 線が問題にならないディレイタイム 0.75ms において錫電極を用いた微粒子計測を行った。図4(a)はガスパフ放電の電流波形であり、アノード、カソード両電極に別々のロゴスキーコイルを取り付け、電流を計測した。カソード電流はプラズマに流れる電流値を示し、アノード、カソード電流値が重なる時刻以降において、電極間放電が行なわれる。任意の3時刻を設定し、可視光高速カメラ計測(図4(b))と X 線シャドウグラフ計測(図4(c))を行なった。可視光高速写真計測より、放電時刻7 $\mu\text{s}$  と11 $\mu\text{s}$  の電極間放電領域において、錫微粒子の発生を期待したが、X 線シャドウグラフ像は計測されなかった。 $\Phi 150\mu\text{m}$  の錫ワイヤーの計測に成功している事より、本結果は0.75ms の実験条件においては、計測されるだけの微粒子が、電極間に十分量存在しない可能性が考えられる。各ディレイタイムにおける微粒子の発生量は、電極の消耗量計測によって、ある程度推測できると考えられ、今後の課題の一つとしてあげられる。

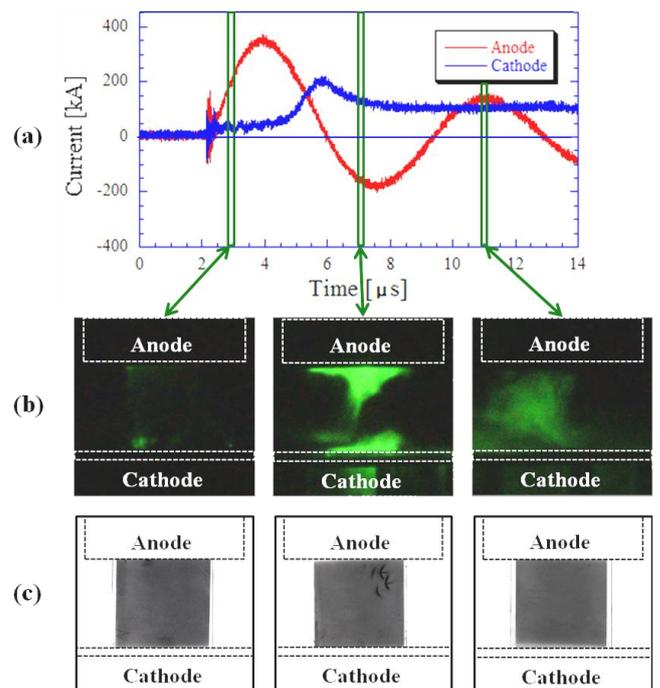


図4. He Gas, Delay Time 0.75ms, Tin 電極放電、(a)ガスパフ Z ピンチ放電におけるアノード、カソード電流波形、(b)可視光高速カメラ写真、(c)X 線シャドウグラフ像

#### 5. 参考文献

[1] K. Takasugi, S. Narisawa, and H. Akiyama, AIP Conf Proc. **651**, 131 (2002).  
 [2] A. Maeda, M. Nishio and K. Takasugi, NIFS-PROC **87**, 26 (2010).  
 [3] K. Koga, G. Uchida, M. Shiratani, S. Nunomura and Y. Watanabe, J. Plasma Fusion Res. **87**, 99 (2011).