

ガスパフ Z ピンチプラズマにおける硬 X 線の発生と 金属微粒子の X 線シャドウグラフ計測

Generation of Hard X-ray in a Gas-puff Z-pinch Plasma And X-Ray Shadowgraph Measurement of Metallic Fine particles

○宮崎孝基¹, 高杉恵一²*Takanori Miyazaki¹, Keiichi Takasugi²

1. はじめに

ガスパフ Z ピンチプラズマの X 線像において、ピンチプラズマの近傍に雲状の空間構造が確認されており、この構造は電極金属由来の微粒子から構成される事が確認されている^[1]。本研究では、ピンチプラズマの時間進展に伴う、金属微粒子の時間空間分布を解明する事を目標に、コマ撮りによる直接露光 X 線シャドウグラフ計測を計画して、計測用単パルス X 線源を開発して来た^[2]。このピンチプラズマ中の金属微粒子に対する X 線シャドウグラフ計測においては、微粒子に吸収される様な比較的低エネルギーのパルス軟 X 線を用いて計測を行う観点から、ピンチプラズマ近傍から放射される硬 X 線をできるだけ除去する事が、重要な課題である。本稿では、ガスパフ Z ピンチ放電に伴う硬 X 線の放射エネルギー特性の計測結果について概説し、放射起源に対する議論を通して、X 線シャドウグラフ計測への対応について述べる。

2. 放電開始時刻変化における放電形態の変化

ガスパフ Z ピンチプラズマ生成装置 SHOTGUN-1 は、使用ガス種の変更による生成プラズマの放射特性変化の他に、ガスパフ放電電極間に超音速ガスを噴射してから放電を開始するまでの時間（以後ディレイタイムと表記）を変える事で、生成プラズマの形状や温度等のパラメータを変える事ができる。

図 1 はアノード、カソード電極に流れる放電電流の波高値を、各ディレイタイムについて計測した結果である。実験は、電極加熱による電極プラズマが生成されやすいとされる軽元素ガス、窒素、ヘリウムを用い、電流計測にはログスキーコイルを用いた。図 1 によると、ディレイタイムが遅い(iii)の領域において、アノードとカソードを流れる電流波高値が同値を示さなくなる事がわかる。これは、ディレイタイムが遅くなるにつれ装置内にガスパフしたガスが拡散し、ガス詰め放電に近い条件下で放電が開始される為であり、沿面放電により、アノード、カソード電極に流れる電流波形の立ち上がりに時間差が生じていると考えられる。逆に(i)、(ii)の領域では、沿面放電を必要としない、電極間放電ピンチプラズマが生成されていると判断できる。また、窒素、ヘリウムの結果を比較すると、より低 Z であるヘリウム放電の方が、遅いディレイタイムにおいて沿面放電が起こりにくいと考えられる。

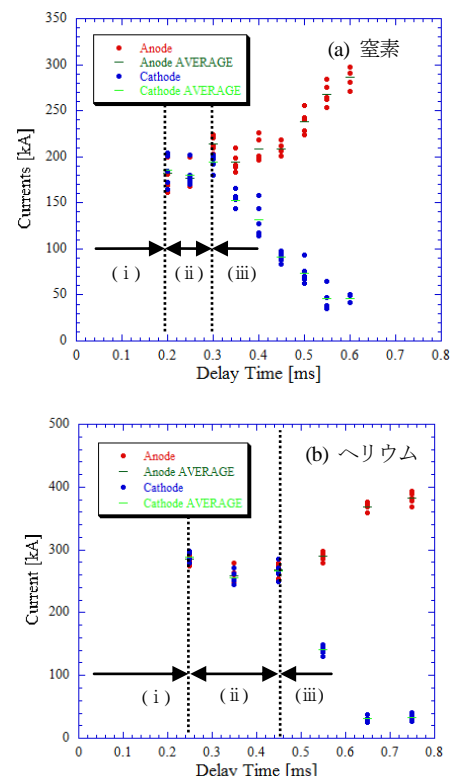


図 1. ディレイタイムに対するアノード、カソード電流波高値の変化と放電形態の遷移
(i) 真空放電領域, (ii) Z ピンチ放電領域,
(iii) ガス詰めフォーカス様放電領域

3. 放電形態変化に伴う硬 X 線輻射依存

図 2 は、各ディレイタイムにおいて放射される硬 X 線の平均エネルギーを X 線吸収法を用い計測した結果である。実験は 25kV 充電で行い、5 ショットの積算計測とした。図 2 によると、ディレイタイムが 0.4ms より遅い領域、すなわち図 1 におけるガス詰めフォーカス様放電領域においては、SHOTGUN-1 装置のコンデンサ充電電圧以下の硬 X 線が、窒素、ヘリウム両放電において発生する事がわかる。一方窒素放電において、0.3ms 付近に充電電圧の約 4 倍近いエネルギーの硬 X 線が発生する。このディレイタイム 0.3ms においては図 1 (a) における Z ピンチプラズマ領域であり、硬 X 線の発生は、ピンチ現象に由来する誘導起電力により、高エネルギーの荷電粒子が発生する為と考えられる。

4. 高エネルギー電子の電極衝突による硬 X 線の発生

図 3 は電流方向を反転させ、X 線ピンホールカメラを用いて、硬 X 線の放射源を計測した結果である。実験には、電流方向の反転が可能で SHOTGUN-1 装置と同様のガスパフ Z ピンチプラズマを生成できる SHOTGUN-3 装置を用い、ヘリウムガスによる正放電 +25kV、負放電 -25kV 充電を行った。図 3 より、電流方向を反転すると、硬 X 線の放射源が逆転し、正放電、負放電共にアノード電極表面から、発光を確認できる。アノード電極表面の発光は、高エネルギー電子の電極衝突による制動輻射光である事を示している。

5. X 線シャドウグラフ計測への対応

ガスパフ Z ピンチにおける硬 X 線の発生は、高エネルギー電子のアノード電極衝突による制動輻射光であり、放電領域がガス詰めフォーカス様領域に遷移するに従って、放射エネルギーが減少する事が明らかとなった。このガス詰め領域における硬 X 線エネルギーの減少は、装置内のガス濃度上昇によって、電極近傍のガスプラズマや中性ガスと高エネルギー電子の衝突頻度が増加する事に起因する為であると考えられる。以上より、硬 X 線の発生が少ないディレイタイムの大きな条件においては、軟 X 線を用いたシャドウグラフ計測は有効であると言える。

本研究で X シャドウグラフ計測の対象の 1 つとして考える錫電極微粒子は、EUV リソグラフィ用の 13.5nm の軟 X 線放射を得る目的から、電極物質を選択した物であり、微粒子がどのような実験条件において供給されるのか等、まだまだ未開拓の研究である。故にディレイタイムの遅い領域における微粒子計測も、大いに意義のある重要な課題である。

6. 参考文献

[1] Keiichi Takasugi, Satoru Narisawa and Hisashi Akiyama, "Spatial Structure of Emission of a Gas-puff Z-Pinch Plasma", AIP Conf Proc. 651, 131. (2002)
 [2] Tkanori Miyazaki, Mineyuki Nishio, Keiichi Takasugi, "Development of Pulsed X-Ray Source Based on Vacuum-Arc for the Measurement of Fine Particles in Gas-puff Z Pinch", NIFS-PROC-93, 33. (2013)

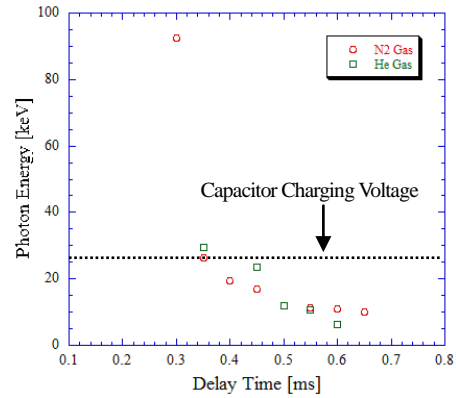


図 2. X 線吸収法によるディレイタイムに対する硬 X 線の放射エネルギー変化

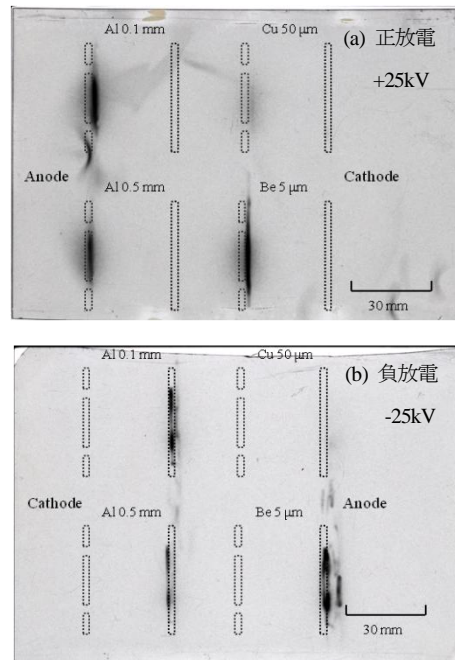


図 3. X 線ピンホール像による電流方向反転実験における硬 X 線の放射源変化(ヘリウムガス, ディレイタイム 0.30ms)