

ガスパフ Z ピンチプラズマの挙動と
軟 X 線輻射の研究

2002 年 3 月

熊本大学大学院自然科学研究科
村山 浩一

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景及び目的	1
1.2 論文内容	3
第2章 ガスパフZピンチプラズマの不安定性と軟X線放射及び軟X線源 としての考察	5
2.1 はじめに	5
2.2 巨視的不安定性	5
2.2.1 レイリーテイラー (Rayleigh-Taylor) 型不安定	5
2.2.2 ソーセージ (sausage) 型及びキンク (kink) 型不安定	6
2.3 軟X線放射原理	7
2.4 軟X線源としての考察	7
第3章 誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー電源ASO-IIによるガスパフZピンチ プラズマと不安定性のレーザ干渉計測	10
3.1 はじめに	10
3.2 誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー発生装置 ASO-II	10
3.2.1 ASO-IIの仕様	11
3.3 誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー発生装置 ASO-IIによるガスパフZピ ンチプラズマの挙動観測	12
3.3.1 実験装置	12
3.3.2 実験方法	14
3.3.3 実験結果及び考察	15
3.4 コンパクトなコンデンサバンク電源を用いたガスパフZピンチプラズマでの レーザ干渉計測	19
3.4.1 レーザ干渉法	20
3.4.2 高感度マルチチャンネルシートマイケルソン型干渉計による入射ガスの密 度分布計測	23
3.4.2.1 実験装置	23
3.4.2.2 干渉計の配置	23
3.4.2.3 実験方法	24
3.4.2.4 実験結果及び検討	24
3.4.3 YAGレーザの2倍高調波を光源とした2次元マッハツェンダー型干渉計に よるプラズマの挙動観測	27
3.4.3.1 実験装置	27
3.4.3.2 干渉計	27
3.4.3.3 実験方法	29

3.4.3.4	実験結果及び検討	30
3.5	まとめ	33
第4章	誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置ASO-XによるガスパフZピンチプラズマ	35
4.1	はじめに	35
4.2	誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置 ASO-X	35
4.2.1	ASO-Xの仕様	36
4.3	誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置 ASO-X 及びプラズマオープニングスイッチを用いたガスパフZピンチプラズマの挙動観測	37
4.3.1	実験装置	37
4.3.2	実験方法	40
4.3.3	実験結果及び検討	40
4.4	誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置 ASO-X 及びプラズマオープニングスイッチを用いたガスパフZピンチプラズマの軟X線分光	48
4.4.1	実験装置	48
4.4.2	実験方法	48
4.4.3	実験結果及び検討	49
4.5	まとめ	54
第5章	総括	56
	参考文献	60

第1章 序論

1.1 研究背景及び目的

電磁エネルギーを時間的, 空間的に圧縮, 重畳することで得られる, 高密度で高いピーク値を持つエネルギーを総称してパルスパワー [1] という. このパルスパワーには, 立ち上がり時間やパルス幅が短く, 狭い空間に大電力を供給できるという特徴があり, このパルスパワー技術を利用することで今まで為し得なかった極限状態を実現することができるようになった. このパルスパワーを利用した様々な応用が考え出され, 電磁加速器 [2], 排気ガス分解処理 [3], オゾン生成 [4], 電界殺菌 [5], 岩石破壊 [6], キャピラリー放電 [7] や高密度プラズマの生成 [8][9][10] などの研究が行われており, 今後も幅広い分野での発展が期待されている. 私はこの中でも高密度プラズマの生成, 特にガスパフ Z ピンチプラズマについての研究を進めてきた [11].

圧縮性物質であるプラズマに電流を流すことで, そのプラズマは自己磁場により収縮する. この収縮現象は「ピンチ現象」と呼ばれており, 比較的簡易な装置でも高温高密度のプラズマを生成できるため広く研究がおこなわれている [12]. このピンチ (pinch) という言葉は, 1937 年に Tonks らによる大電流アーク放電でのプラズマ柱の収縮に関する研究において初めて用いられた. その後, 人類は無数のエネルギーを手に入れるための方法として核融合現象の研究を始め, この際必要とされる高温高密度のプラズマを生成する手法としてピンチ現象が注目され 1950 年代から本格的な研究が進められた. 最初は 0.01 ~ 10 Torr 程度の希薄ガスを詰めた放電管に大電流を流すことでピンチ現象を実現する単純ピンチから研究が始まったが, この方法では θ 方向の非一様性を排除できず, 核融合に必要な $n\tau$ 値 (プラズマ密度 n と保持時間 τ の積) を達成することができなかった. そこでこの問題を克服すべく, 1960 年代ごろには単純ピンチを原点とした 3 つの流れに派生していった. 1 つはあくまで単純ピンチを基本とした自己磁場収縮型の Z ピンチプラズマの発展型, もう 1 つはプラズマ源となるガスを詰めた放電管に, 急速に増加する z 軸方向の縦磁場を印加することで誘導電圧を発生させてピンチをおこなうテータピンチ, 最後はむしろピンチを避けて, 磁場で作った磁気容器内にプラズマを保持して $n\tau$ 値を稼ぐ磁場閉じ込め方式である. しかし, 改良を加えられていった Z ピンチでもプラズマの不安定性を解決できず, またテータピンチは, 外部磁場を作り出すための装置の機械的強度の点から生成磁場強度には限界があるため, それぞれ核融合に必要な $n\tau$ 値を達成することは困難とされ, 核融合を実現するための手法としては磁場閉じ込め方式に研究が絞られていった [13].

しかし, 上述したパルスパワー技術の発展により, 一度は潰えたかに見えた Z ピンチやプラズマフォーカスといった自己磁場収縮型の手法が再び注目されることになった. パルスパワー技術により, 立ち上がりの速い高電圧大電流を供給することが可能となったため, 単純ピンチにおいて用いられていた大容量コンデンサのみを電源とした方法では成し得なかった, 準安定ともいえるプラズマの生成が可能となったからである. またプラズマ源の供給方法も, あらかじめ放電管内にガスを詰めておく方式か

ら、真空容器中に設置した電極間にガスを入射して放電をおこなうガスパフ方式や、重水素ガスを細線状に凍らせプラズマ源として用いる細線ピンチへと進化していき、現在ではワイヤーアレイをプラズマ源としたZピンチプラズマの研究がアメリカのサンディア国立研究所などで進められている。

このようにZピンチプラズマは、核融合を実現するための手法として研究が始まったが、実はもう1つの大きな可能性を有していた。それは強力な軟X線源としての可能性である。その代表的な応用例としては、半導体リソグラフィ、軟X線顕微鏡 [14][15]そしてLIGAプロセス [16][17]が挙げられる。

近年の高度情報化社会において、半導体集積回路の進化はめざましく、およそ3年1世代ごとにプロセスルール(最小線幅)の0.6~0.7倍の微細化と、ウェーハ面積の1.3倍の拡大というスケーリング則に従って発展を遂げてきた。このため半導体の本格利用から50年足らずの間に集積度は飛躍的に増加し、現在ではわずか数十mm四方の半導体の中に数千万ものトランジスタが集積化され、そのプロセスルールは0.13 μm まで縮小されている。その結果、半導体製造技術も年々改良が進められてきたが、その根本となるリソグラフィ光源については、現在利用されているエキシマレーザーでは限界が近づいており、次世代リソグラフィ用光源として極端紫外線(EUV)から軟X線領域の光源の開発が急務とされている [18]。

また生物の微細構造を観察するためには、一般的に光学顕微鏡や電子顕微鏡が用いられているが、光学顕微鏡の分解能は200 nmが限界であり、電子顕微鏡は電子線の物質透過性が良くないため、試料を超薄切片にしなくてはならないという欠点がある。そこで波長が可視光線よりも短く、試料透過性が高い軟X線、特にwater windowと呼ばれる2.2~4.4 nmの波長を光源として用いると、X線吸収端の相違から生じるこの領域の酸素と炭素のX線吸収率の大きな差を利用して、タンパク質や核酸などの主だった構成元素である炭素と、水分子を構成している酸素のコントラストを画像化することができる。この原理を利用した軟X線顕微鏡は、半導体リソグラフィ技術の発展に伴い、軟X線顕微鏡として必要な周辺技術も同時に発展したことで脚光を浴びており、光学顕微鏡よりも高い分解能で、生体試料を生きたまま観察できるという特徴を生かすべく研究が進められているが、光源としての軟X線源が今後の発展の鍵を握っているのは言うまでもない。

LIGAとは、ドイツ語のLithographie(リソグラフィ) Galvanoformung(電着成形) Abformung(モールド)の略で、ドイツのカーlsruエ原子核研究所(Kernforschungszentrum Karlsruhe)で開発された微小構造体製作技術の1つである。具体的には、波長の短い軟X線を光源として用いることで、一般の半導体製作技術よりもレジストを深く露光し、そのレジストを現像することで仮型をつくり、その仮型に電気沈着(電鍍成形)をおこない金属を堆積させ、レジストを除去し金属型を製作する。最後にその金属型を用いて射出成形や鋳造法により「マイクロマシン」[19][20]と呼ばれる高アスペクト比を持った微小構造体を製作する手法である[21][22][23]。このLIGAプロセスについては、主にシンクロトロン放射光源による比較的波長の硬い領域の軟

X線(0.14～2 nm)が用いられているが、根本的なコストとスループットの問題を抱えており、経済的多量生産技術として確立するためには、それらを解決できるような新たな光源が必要不可欠である。

こうした状況から軟X線源としてのZピンチプラズマが注目され、特に真空放電容器中に設置した電極間にプラズマ源となるガスを入射し、そのガスをプラズマ化してピンチさせるガスバフZピンチプラズマ(gas-puff z-pinch plasmas)は、生成されるプラズマの再現性に優れ、かつプラズマ源となるガスの種類を変えることで放射される電磁波の波長を選択できるという特徴のため、軟X線源としての研究が進められてきた。Pearlmanらは13 kJのコンデンサ電源によるクリプトンのガスバフZピンチプラズマで、1放電当たり20 J程度の軟X線放射を20回繰り返し照射することでCOP(epoxy copolymer of glycidyl methacrylate and ethyl acrylate)レジストを露光させ[24]、Okadaらは1放電当たり100 J程度の軟X線放射があるZピンチプラズマにおいて、1 μm厚のSi-Nマスクを介した場合は40回、2 μm厚のSi-Nマスクを介した場合だと80回の繰り返し放電でレジストを露光し、0.3 μm程度の解像度を得ている[25]。また軟X線顕微鏡への適用については、Weinbergらが4 kJの電源によるガスバフZピンチプラズマによって、バチルス菌の化学構成を150 Å程度の分解能で観測したという報告がある[26]。

このように軟X線源としてのガスバフZピンチプラズマの研究も進められているが、残念ながら現在も実用化までには至っていない。その最大の要因は、宿命ともいえるプラズマの不安定性を、軟X線源として満足できる所まで抑制できていないためであり、特にコンパクトなパルスパワー電源を用いたZピンチプラズマにおける、不安定性の発生機構とその抑制方法について理解を深めることは、ガスバフZピンチプラズマを軟X線源として実用化するために重要なことと思われる。そこで本研究ではこの状況を踏まえて、次に記すような実験をおこなった。

1.2 論文内容

本研究では、軟X線源としての利用を見据え、プラズマ不安定性の抑制を目指して、誘導性のパルスパワー発生装置を電源としたガスバフZピンチプラズマの諸特性を調べ、その結果を5章から構成される本論文にまとめた。

第1章では、研究の背景としてパルスパワー技術の有用性と応用、及びZピンチプラズマの生い立ちとパルスパワー技術との関連を紹介し、特にガスバフ方式のZピンチプラズマを軟X線源として適用する場合の問題点と、本研究をおこなうに至った経緯について述べている。

第2章では、ガスバフZピンチプラズマにおける不安定性の中でも、特に軟X線源として実用化するための最大の障害となっているレイリーテイラー型及びソーセージ型、キック型といった巨視的な不安定性について説明し、さらにピンチプラズマからのX線放射原理について述べる。また実際に軟X線源として適用する際の問題点についても検討する。

第3章では、誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー発生装置であるASO-IIを電源とし、ワイヤーヒューズオープニングスイッチを設置し誘導性電源として駆動させた場合と、ヒューズを設置せずにファーストバンク方式の電源として駆動させた場合のガスパフZピンチプラズマについて、メッシュとソリッド2種類の電極をカソードとして用いた時のプラズマの挙動及びホットスポットの空間的再現性について観測をおこない、比較検討をおこなった。誘導性のパルスパワー発生装置は技術的には未完成だが、エネルギー密度やコストにおいて容量性よりも優れているため今後の発展が期待されている。しかし誘導性の電源を用いたZピンチプラズマの研究例は少ないことから、本研究室で開発された誘導性パルスパワー電源であるASO-IIにより駆動させたZピンチプラズマの諸特性について観測をおこない、その有用性を調べた。またこの実験結果をふまえて、ソリッド電極、メッシュ電極をカソードとして用いた時の入射ガス密度分布をアルゴンイオンレーザを光源とした高感度マルチチャンネルシートマイケルソン干渉計により計測し、さらにコンパクトなコンデンサバンク電源によるガスパフZピンチプラズマについて、YAGレーザの2倍高調波を光源とした2次元マッシュェンダー干渉計によるプラズマの挙動観測をおこない、Zピンチプラズマの不安定性の発生機構の詳細を明らかにした。

第4章では、本研究室で開発された誘導電圧重畳方式パルスパワー電源であるASO-Xについて、その構成や動作原理などについて説明し、ASO-X、さらにプラズマオープニングスイッチ(POS)を導入した場合のガスパフZピンチプラズマについて実験をおこなった。ASO-Xは線形誘導加速器の原理を応用したパルスパワー発生装置で、1/4周期で1.33 μ s、最大400 kAの電流を負荷に供給することが可能である。さらにASO-XにはPOSが接続されており、このPOSを動作させることで電流の立ち上がりを大きく改善することができる。そこでASO-Xを電源としたガスパフZピンチプラズマにおいて、POSを動作させた場合と動作させなかった場合についてのプラズマ柱の挙動観測と軟X線分光及びホットスポットのピンホール写真撮影をおこない、結果を比較検討することでその諸特性を明らかにした。

第5章では、本研究で得られた成果をまとめ、本論文の総括とした。

第2章 ガスパフZピンチプラズマの不安定性と軟X線放射 及び軟X線源としての考察

2.1 はじめに

電磁流体であるプラズマを圧縮するZピンチプラズマにおいては、不安定性の発生は必然的なものである。この不安定性の発生機構[27]についてはいくつか種類があるが、巨視的なものでは、プラズマ柱の半径方向に収縮速度が加わることによって発生するレイリーテイラー型のもものと、平衡状態に達したプラズマ柱において発生するソーセージ型及びキック型のものに大別される。また、ピンチプラズマから放射される軟X線は主として、局所的に高温高密度なホットスポットとよばれる部位での脱励起や再結合といった現象によるものである[28]。この章では、本論文の研究に大きく関与している巨視的不安定性とピンチプラズマからのX線放射原理について説明し、さらにガスパフZピンチプラズマを軟X線源として適用する際の問題点[18]について検討する。

2.2 巨視的不安定性

2.2.1 レイリーテイラー(Rayleigh-Taylor)型不安定

密度の異なる2つの流体が、ある界面で接触し、かつ密度(ρ_2)の大きい流体から密度(ρ_1)の小さい流体に重力などの外力が働く場合、その界面に微小な擾乱が存在すると、その擾乱が成長するような現象が発生する。このような不安定性をレイリーテイラー型不安定といい、その成長率 γ は、

$$\gamma = \sqrt{gk \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}} \quad (2.1)$$

で与えられる。ここで g は重力加速度、 k は境界面に生ずる変位をフーリエ展開したときの波数である。これと同様な現象が、本研究で取り扱うプラズマにおいても生じ得る。図2.1の様にプラズマと真空空間がx-y平面で互いに接していて、その境界面に平行に、一様な外部磁場 B_0 が存在している場合を考える。さらに境界面に垂直に、プラズマから真空側に向けて非電磁氣的力(実効的な重力加速度 g)を受け、質量の有限なプラズマが真空の上側に乗っているとすると、実効的な重力加速度 g による力 $F = mg$ のためドリフト運動($F \times B$)/ qB^2 が境界面に沿って起こる。イオンのドリフト速度は電子のドリフト速度よりも遙かに大きいため、外乱が生じて境界面が僅かでも乱れると境界面がずれて電界 E が誘起され、その電界 E と磁場 B_0 によるドリフト運動によってプラズマ-真空境界面の乱れ、つまり不安定性が促進される。このような一様真空磁場中で支えられたプラズマに起こる不安定性を、特にKruskal-Schwarzschild不安定と呼ぶこともある[29][30]。

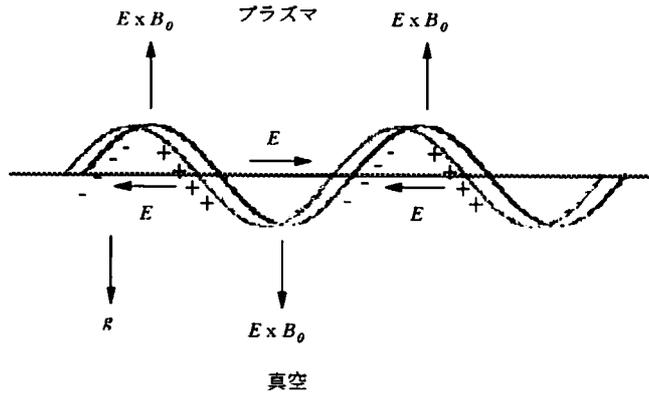


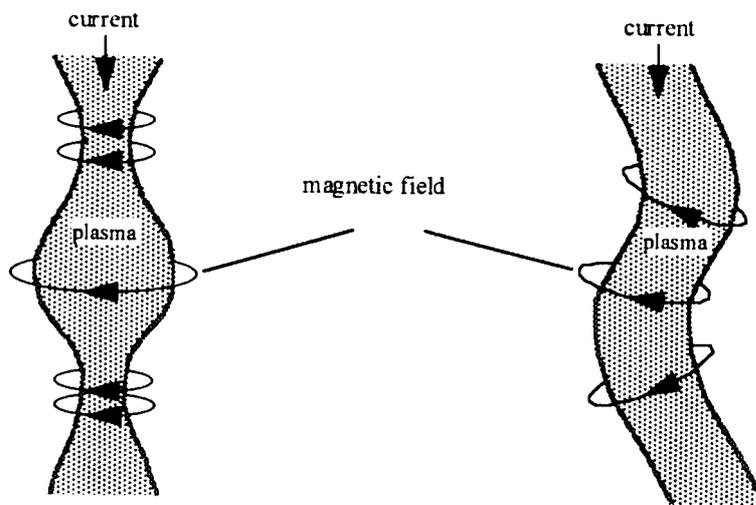
図2.1 レイリーテイラー不安定

2.2.2 ソーセージ(sausage)型及びキンク(kink)型不安定

半径 R の円柱状プラズマ柱を、 z 軸方向に軸対称に流れる電流がつくる自己磁場によって保持されている場合の安定性について考察する。単純化のためプラズマは非圧縮性で導電率は ∞ と仮定すると、プラズマ電流 I_p が中心軸から距離 r だけ離れた場所につくる自己磁場 B は、

$$B = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi r} \quad (2.2)$$

となり、プラズマの境界より外側では中心軸からの距離に反比例する。そこで図2.2(a)のように、プラズマ柱の一部がくびれた状態になると、その表面の磁界は半径に反比例して増大するためますます助長され、ついには引き裂かれてしまう。これはその形状からソーセージ型不安定と呼ばれている。また図2.2(b)のように、プラズマ柱の一



(a) ソーセージ不安定

(b) キンク不安定

図2.2 プラズマ不安定性

部が何らかの外乱により僅かでも屈曲すると、電流がつくる磁力線は電流線に垂直に生ずるため、湾曲内側の B は外側よりも強くなり、磁気圧の不均衡が発生して湾曲が促進される。これをキック型不安定という。さらに、上記不安定性が融合して、プラズマ柱表面に複数の凹凸が生じ、その凹凸がますます助長される場合も起こりうる。この場合、その凹凸の数をモード数(m)とよび、ソーセージ型不安定は $m=0$ 、キック型不安定は $m=1$ となるが、一般的にはこのモード数が小さいほど不安定性の成長率が大きくなることが知られている。

2.3 軟X線放射原理

電流と自己磁場でのローレンツ力により圧縮されるZピンチプラズマは、巨視的不安定性によりホットスポットと呼ばれる局所的に高温高密度の部位が発生することがある。ホットスポット中では、イオンや自由電子といった荷電粒子と、電離されていない原子や分子が不秩序に運動をしているため、高速に移動している自由電子がイオンや原子の軌道電子と衝突する場合がある。その際自由電子から軌道電子に与えられるエネルギーが、その軌道電子と原子核との結合エネルギーより小さい場合は弾性散乱されるだけだが、結合エネルギーを上回るときには励起(excitation)や電離(ionization)といった現象が起こり得る。励起とは、基底状態にある粒子が光の吸収や粒子の非弾性散乱によって外部からエネルギーを与えられ、より高いエネルギーを持つ励起状態に遷移することであり、電離とは、ある値以上のエネルギーが基底状態の粒子に与えられることにより、軌道電子が束縛状態を離れて自由電子となることである。またこれらとは逆の課程で、励起された粒子が自身の持っているエネルギーを放出して基底状態に戻る脱励起(de-excitation)や、電離によりイオンとなった粒子が、自由電子を捕獲して基底状態に戻る再結合(recombination)といった現象も同時に起こり得る。特にこの脱励起や再結合といった現象においては、基底状態に戻る際、そのエネルギーを電磁波として放出するものがあり、その波長は原子の種類に依存している。そのためガスバフZピンチプラズマにおいて軟X線領域の電磁波を放射させるためには、主にネオンやアルゴンといった希ガスがプラズマ源として用いられている。なお、放射される電磁波の強度は電子温度の4乗、密度の2乗に比例し、波長は原子番号が大きい原子ほど短波長になる[31]。

2.4 軟X線源としての考察

ガスバフZピンチプラズマを軟X線源として適用する際の問題として、プラズマの不安定性に起因する光源のずれと放射される軟X線の出力及び放電の繰り返し周波数などが挙げられる。ただし放電の繰り返し周波数については、電源や真空系といった装置上の問題が主であるので、ここでは先の2つの問題について検討する[32]。

ガスバフZピンチプラズマにおいては、2.3節で説明したようにホットスポットから放射される軟X線を光源として用いるため必然的に点光源となる。さらにプラズマにおける不安定性により、ホットスポットの発生位置は放電毎に異なる可能性があるた

め、光源としては、放電毎における発生位置のずれの分だけ物理的な大きさを持つことになる。そのため、図2.3のような状況の場合、光源の大きさやマスクと露光対象物の距離に応じて式(2.3)で表されるボケ量 (penumbral blurring) δ が生じることになる。

$$\delta = s \frac{d}{D} \quad (2.3)$$

ここで s はマスクと露光対象物の間隔、 d は光源の直径、 D は光源とマスクの距離である。

X線リソグラフィにおいては、マスクの損傷をさけるために s は数 μm 程度が必要と

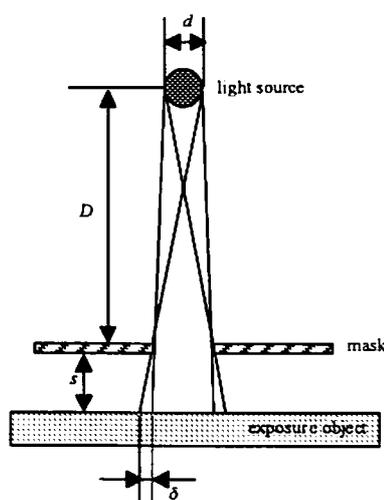


図 2.3 光源とボケの模式図

されており、また本研究で使用する数kJ程度の電源で駆動したガスバフZピンチプラズマにおいては、数十～数百J/shot程度の出力が予想されるため、その出力に対する一般的な光源とマスクの距離は数十cm程度となる。ここで光源の直径とボケ量のおおまかな関係を調べるため、 $s=3\ \mu\text{m}$ 、 $D=10\ \text{cm}$ と仮定して式(2.3)から求めたグラフを図2.4に示す。光源の物理的な直径をホットスポットのずれとし、その値を1mmとするならば、このグラフからボケ量は $0.03\ \mu\text{m}$ となる。目的とする解像度における許容ボケ量を30%程度とするならば、計算上では $0.1\ \mu\text{m}$ 程度の解像度を達成できることになる。このことから、ホットスポットの発生位置のずれを1mm以内に押さえることができれば、軟X線源としてのガスバフZピンチプラズマの実用化への道が開けてくるものと思われる。

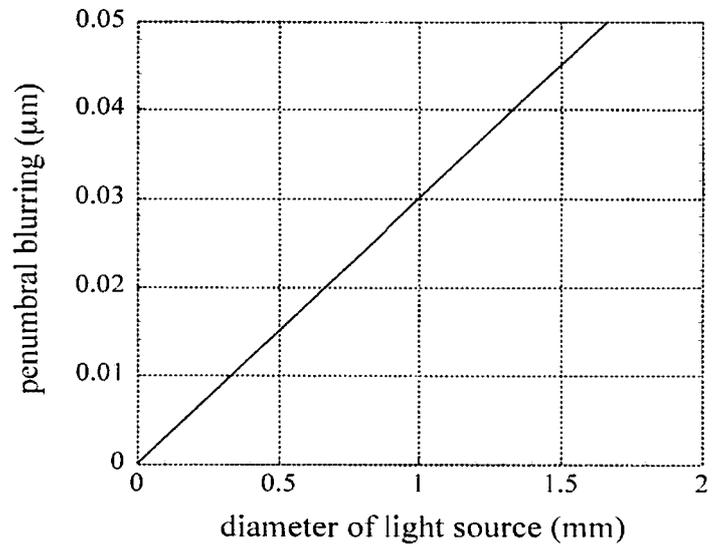


図 2.4 光源の大きさ と ボケ量 の 関係

第3章 誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー電源 ASO-II によるガスパフZピンチプラズマと不安定性のレーザ干渉計測

3.1 はじめに

ガスパフZピンチプラズマを生成するためにはパルスパワーが必要不可欠であり、電源の役割は非常に重要である。パルスパワーを発生させる方式としては、エネルギー蓄積媒体の違いにより誘導性と容量性の2種類に大別され、マルクスバンクに代表される容量性のパルスパワー発生装置は技術的には完成されているが、装置自体が巨大で実験室レベルでの設置は困難である。一方、誘導性のパルスパワー発生装置は技術的には未完成だが、エネルギー密度やコストにおいて容量性よりも優れており今後の発展が期待できる。

そこでこの章では、パルスパワー発生装置 ASO-II において、ワイヤーヒューズオープニングスイッチを設置し誘導性電源として駆動させた場合と、ヒューズを設置せずにファーストバンク方式の電源として駆動させた場合のガスパフZピンチプラズマについて実験をおこない、メッシュとソリッド2種類の電極をカソードとして用いた時のプラズマの挙動及びホットスポットの空間的再現性[33]について観測をおこなったのでその結果について報告する [11]。

また上記の実験結果を踏まえ、コンパクトなコンデンサ電源で駆動したガスパフZピンチプラズマにおいて、それぞれの電極における入射ガスの密度分布を、アルゴンイオンレーザを光源としたマルチチャンネルシートマイケルソン型干渉計により測定し[34][35]、さらにZピンチプラズマの不安定性がどのような機構で発生しているのかその詳細を調べるため、YAGレーザの2倍高調波を光源とした2次元マツハツェンダー型干渉計によるピンチプラズマの挙動観測をおこなったので、その結果についても報告する [36][37]。

3.2 誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー発生装置 ASO-II

誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー発生装置である ASO-II は、1次電源であるコンデンサ、電界歪型ギャップスイッチ、蓄積インダクタ、ワイヤーヒューズオープニングスイッチ設置用の水容器及びスパークギャップスイッチから構成されており、高さ約 2.3 m、直径 1.5 m の同軸状構造である。図 3.1 に ASO-II の概略図を示す。

動作としては、あらかじめ水容器中にオープニングスイッチとなるワイヤーヒューズを設置しておき、1次電源であるコンデンサを充電後、主スイッチである電界歪型ギャップスイッチを短絡させると、1次電源から蓄積インダクタにエネルギーが転送される。同時にワイヤーヒューズに電流が流れるため溶融、気化しパルス圧縮された誘導電圧が発生するため、スパークギャップスイッチが絶縁破壊により短絡され、立ち上がりを改善された電流が負荷へ供給される。

なお、ASO-II をファーストバンク方式の電源として駆動させる場合はオープニングスイッチを設置せずに、あらかじめスパークギャップスイッチを短絡しておく。そし

てコンデンサを充電後，主ギャップスイッチを動作させることで，直接負荷に電圧を印加し，電流を供給する．

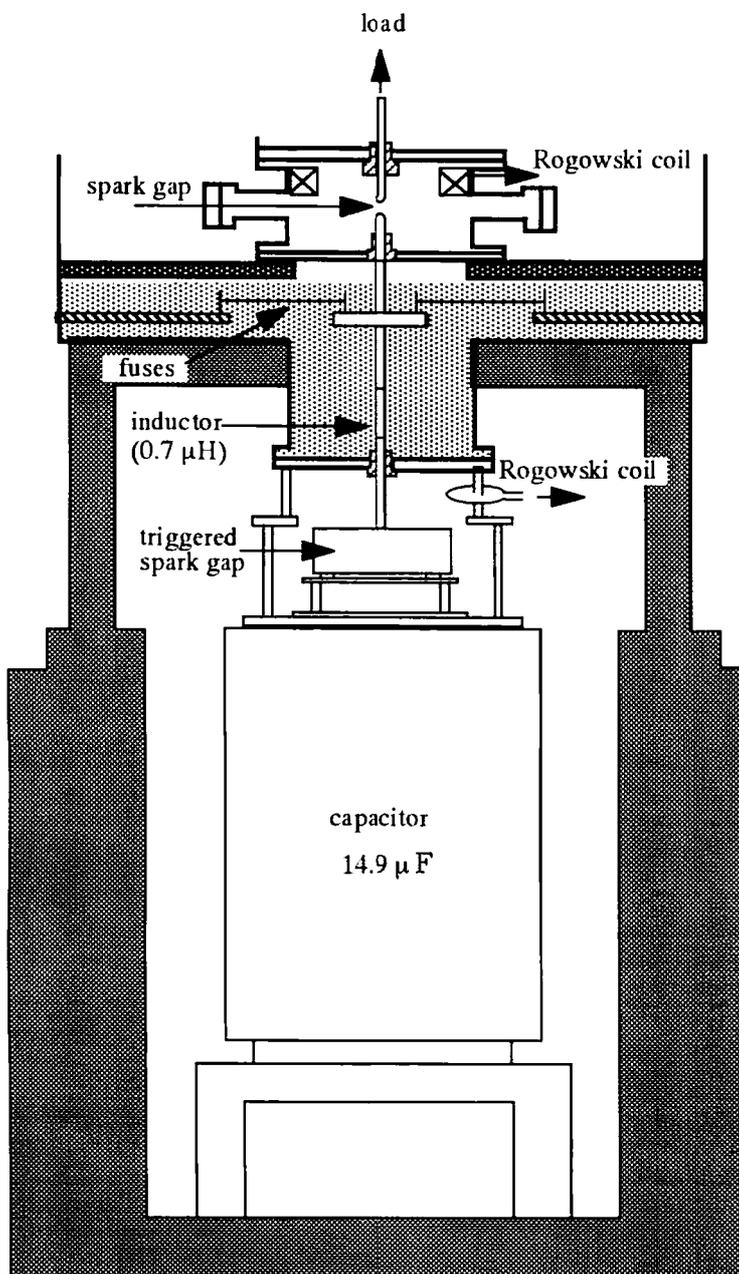


図 3.1 ASO- II の概略図

3.2.1 ASO- II の仕様

以下に ASO-II の仕様を記す．

- (1) 1次電源

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| 静電容量 | 14.9 μ F |
| 最大蓄積エネルギー | 27 kJ |
| (2) 主ギャップスイッチ | |
| 使用ガス | CO ₂ |
| 構造 | 電界歪型 |
| (3) 蓄積インダクタ | |
| インダクタンス | 0.7 μ H |
| (4) 水容器 | |
| 直径 | 150 cm |
| 材質 | ステンレス |
| (5) ワイヤーヒューズオープニングスイッチ | |
| 材質 | 銅線 |
| 最大設置可能本数 | 24 本 |
| | (ファーストバンク方式の電源として駆動する場合は設置しない) |
| (6) スパークギャップスイッチ | |
| 構造 | 自己放電型 |
| 材質 | 真鍮 |
| | (ファーストバンク方式の電源として駆動する場合は短絡) |

3.3 誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー発生装置ASO-IIによるガスパフ Zピンチプラズマの挙動観測

3.3.1 実験装置

図3.2に本実験で使用した実験装置の概略図を示す。Zピンチプラズマの駆動電源としてASO-IIを用い、カソードとして直径30mmの真鍮削りだしにより製作したソリッド電極と、1mm格子のステンレスワイヤメッシュを直径60mmの銅管の上部に設置したメッシュ電極の2種類の電極を使用した。アノードは直径30mmの真鍮製で、中心にはガスを入射するため外径8mm、内径4mmの噴出口がある。その噴出口には、入射したガスの拡散を低減するため中心軸に向かって13.5°の傾斜が付いており、厚さ2mmの同軸円柱状のガスを電極間に入射する形状となっている。このアノードの模式図を図3.3に示す。なおアノードとカソード間の距離は10mmで、Zピンチチャンバー内は油回転ポンプで粗引した後、油拡散ポンプにて 5×10^{-2} Pa程度に排気している。

実験時の電源電流及び負荷電流はログウスキーコイルにより測定し、軟X線は3 μ m厚のアルミ箔をフィルターとしたPINフォトダイオード(浜松フォトニクスs1722-02)により検出している。また、プラズマの時間的な挙動を観測するためにイメージコンバータカメラ(HADLAND photonics IMACON 760)を使用し、フレミングモード(露光時間10 ns, コマ間隔50 ns)にて撮影した。さらにホットスポットの空間的再現性を調べるために3 μ m厚のアルミ箔フィルターで覆った穴径400 μ mのピンホールカメラを使用し、医療用X線フィルム(Fuji super HR-A)を、増感紙を貼ったフランジ上に取り

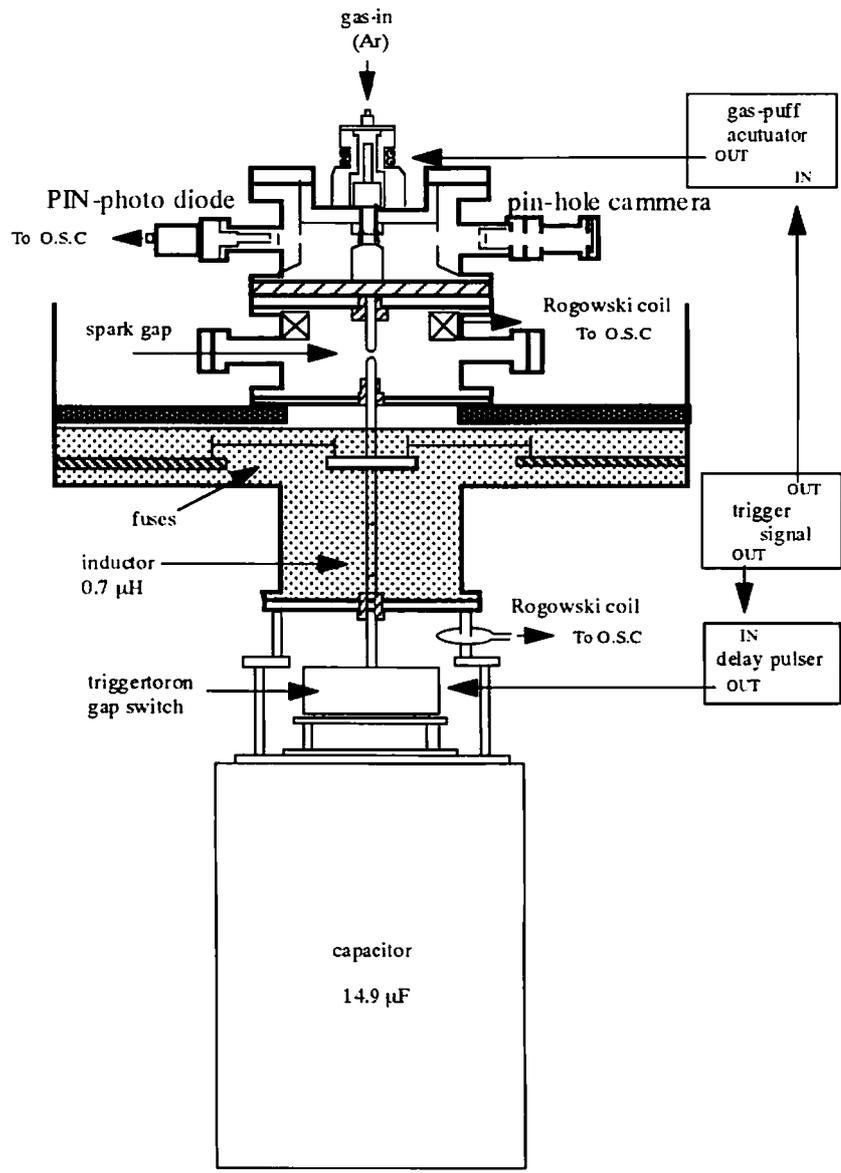


図 3.2 実験装置の概略図

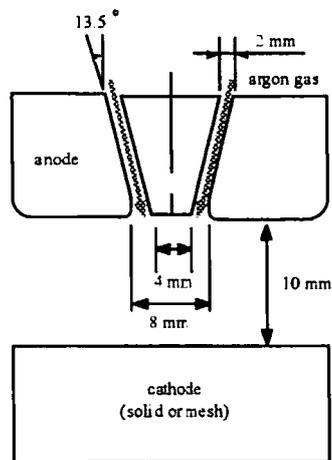


図 3.3 アノードの模式図

付けて撮影をおこなった。これらPINフォトダイオードとピンホールカメラの配置図を図3.4に示す。

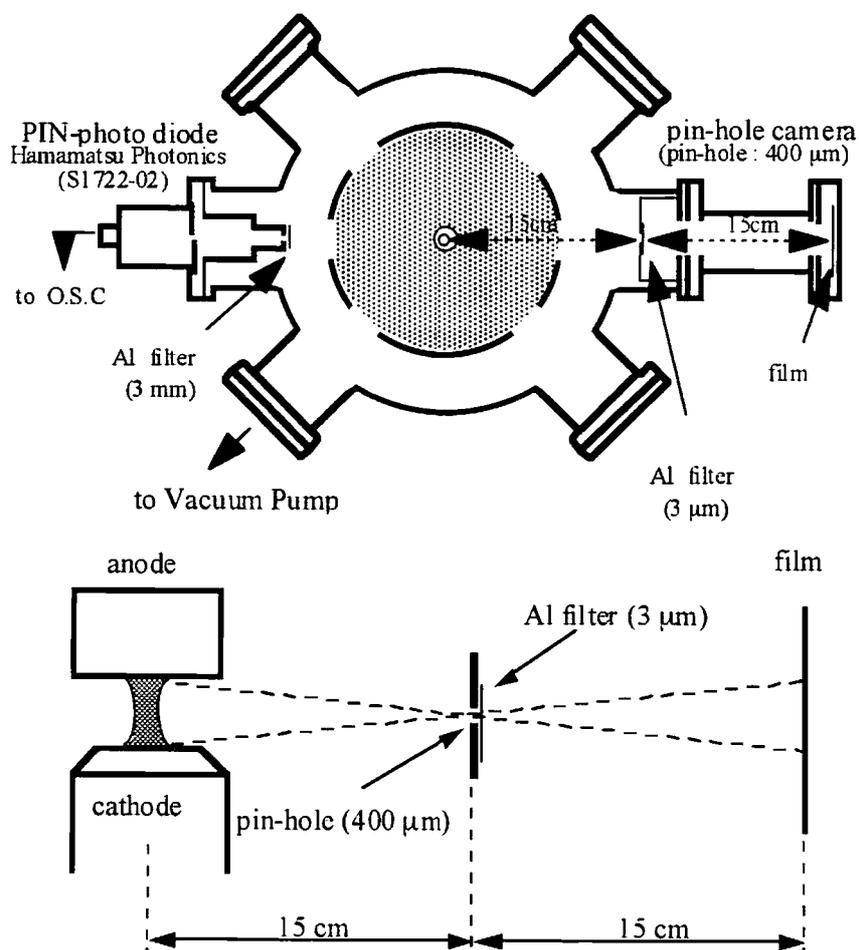


図3.4 PIN フォトダイオードとピンホールカメラの配置図

3.3.2 実験方法

3.2節で述べたとおり，ASO-IIを誘導性電源として駆動させる場合は，オープニングスイッチとして銅線のワイヤーヒューズを水容器内に設置し，ファーストバンク方式の電源として駆動させる場合には，あらかじめスパークギャップスイッチを短絡しておく．電磁弁にプラズマ源となるアルゴンガスを封入し，コンデンサを充電後，トリガー信号を電磁弁駆動電源に入力することで電磁弁を動作させ，ガスを電極間に入射する．同時に，電極間に入射されるガス量を調整するため「遅延時間」としてディレイパルサーにより数百 μs 程度遅らせた後，主スイッチである電界歪型スパークギャップスイッチを動作させASO-IIを駆動する．これらの手順により生成したZピンチプラズマについて，軟X線の出力をPINフォトダイオード，プラズマの挙動をイメージコンバータカメラ，ホットスポットをピンホールカメラで観測した．なお，アルゴンガ

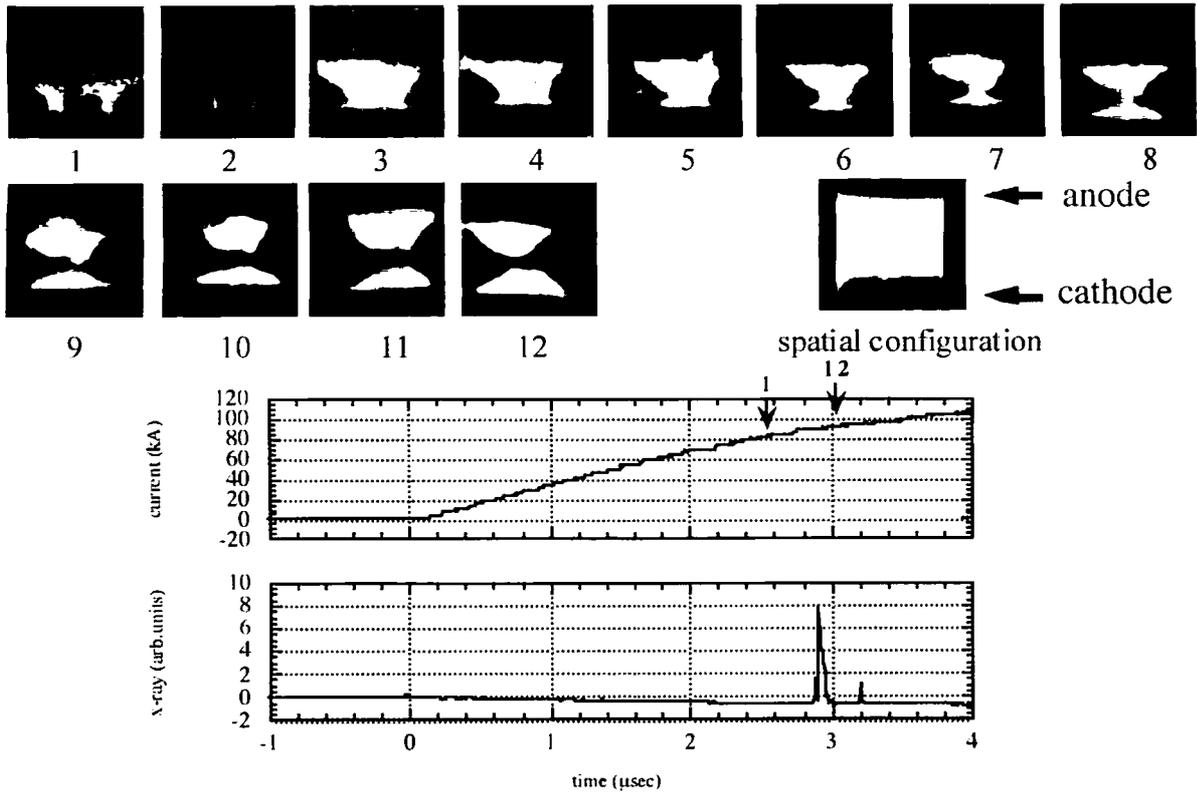
スの電磁弁内の封入圧力は 0.15 MPa(1.5 気圧), ASO-II のコンデンサの充電電圧は 25 kV で実験をおこなった。

3.3.3 実験結果及び考察

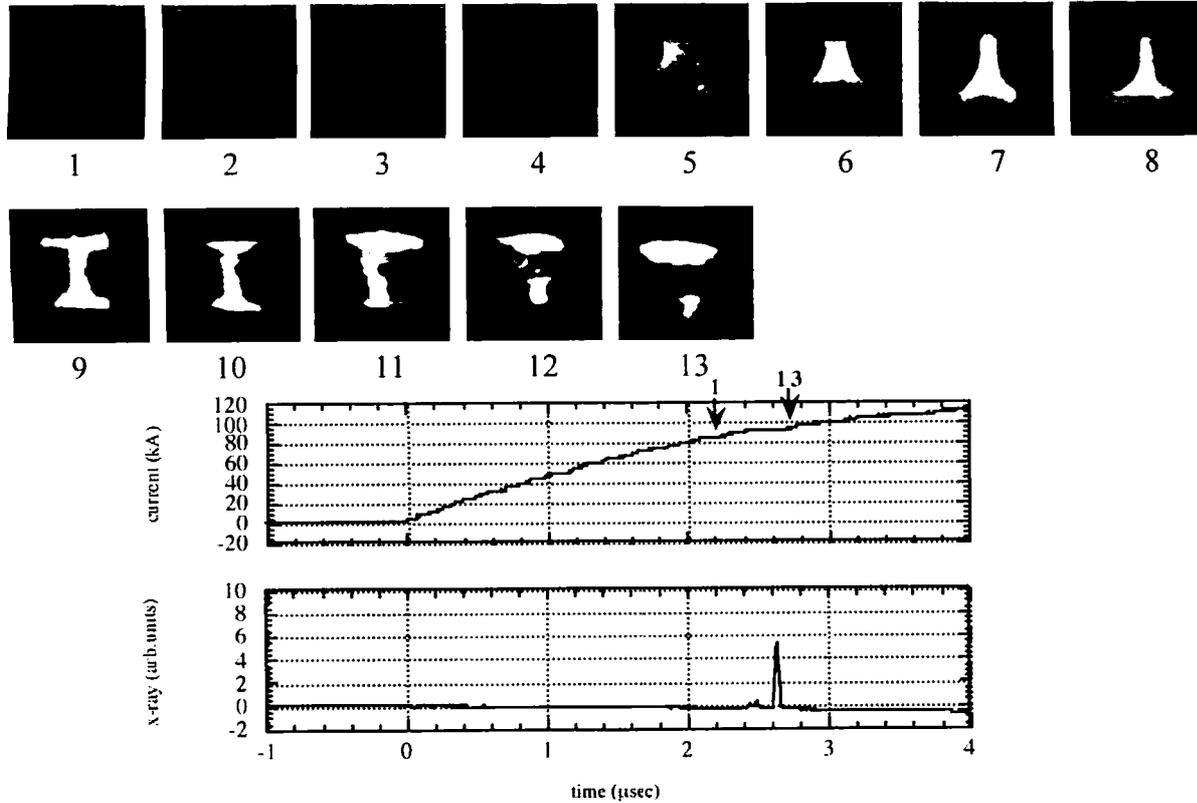
図 3.5 に、遅延時間を 800 μ sec としたときのプラズマの挙動と電流及び軟 X 線波形の代表的な観測結果を示す。(a) がソリッド電極でファーストバンク方式の電源, (b) がメッシュ電極でファーストバンク方式の電源, (c) はソリッド電極で誘導性電源, (d) がメッシュ電極で誘導性電源として駆動した場合の実験結果である。また電流波形に示してある数字がプラズマの写真の番号に一致しており、撮影開始時刻と終了時刻を示している。

ASO-II をファーストバンク方式の電源とし駆動させた場合の結果を見てみると、ソリッド電極を用いた (a) の場合、ガスはアノード側より入射されているにも関わらず、写真 1 においては逆にカソード側から上部に広がった形のプラズマが観測されている。そのプラズマは時間が進むにつれ徐々に収縮してプラズマ柱を形成しているが、写真 7 のようにアノード側のプラズマはあまり収縮されず、電極間でのプラズマの収縮に大きな偏りがあることがわかる。そしてカソードに近い部分のプラズマが局所的にピンチした後にプラズマ柱が崩壊し、プラズマが拡散していく様子が観測された。一方 (b) のメッシュ電極の場合は、アノード側から入射したガスがカソード側に向かって広がるような形でプラズマ化し、時間の経過と共に収縮して写真 8 のようなプラズマ柱を形成するが、ソリッド電極を使用した (a) の場合と異なり電極間全体に渡ってプラズマが収縮している。しかしその後プラズマ柱には写真 10 のようなソーセージ型不安定が発生し、さらに写真 11 においてはキンク型不安定により大きく変形している様子が観測されている。次に ASO-II を誘導性電源として駆動させソリッド電極を用いた場合の実験結果 (c) を見ると、主にカソード表面に近い部分の発光が強く、写真 12 までは (a) の結果と同様、主にカソード付近のプラズマが収縮していく。そしてプラズマ柱が形成されるが、この場合は (a) の結果と違って写真 14 のような電極間に一様なピンチ柱が観測されている。ただし写真 15 においては弱いキンク型不安定とソーセージ型不安定が発生しており、最終的には写真 16 の様にプラズマ柱が崩壊している様子が観測された。メッシュ電極を用いた場合 (d) は、(b) と同様にアノード側からカソード側に広がったプラズマが徐々に収縮して写真 9 の様なプラズマ柱を形成している。その後写真 10 では上部が若干傾いているものの、(b) のファーストバンク方式の電源の場合と比較してプラズマ柱の不安定性が低減されている。

これらの実験結果における (a) と (b), (c) と (d) の対比から、ソリッド電極とメッシュ電極を使用した場合のプラズマの生成状態について比較すると、ソリッド電極を用いた場合はカソード付近でのプラズマの発光が強く、主にその付近でプラズマが生成されるのに対して、メッシュ電極ではアノード側からカソード側に広がったプラズマが生成されていることから、カソードの形状が電極間に生成されるプラズマに影響を及ぼしていることがわかる。また (a) と (c), (b) と (d) の対比から、ASO-II をファースト

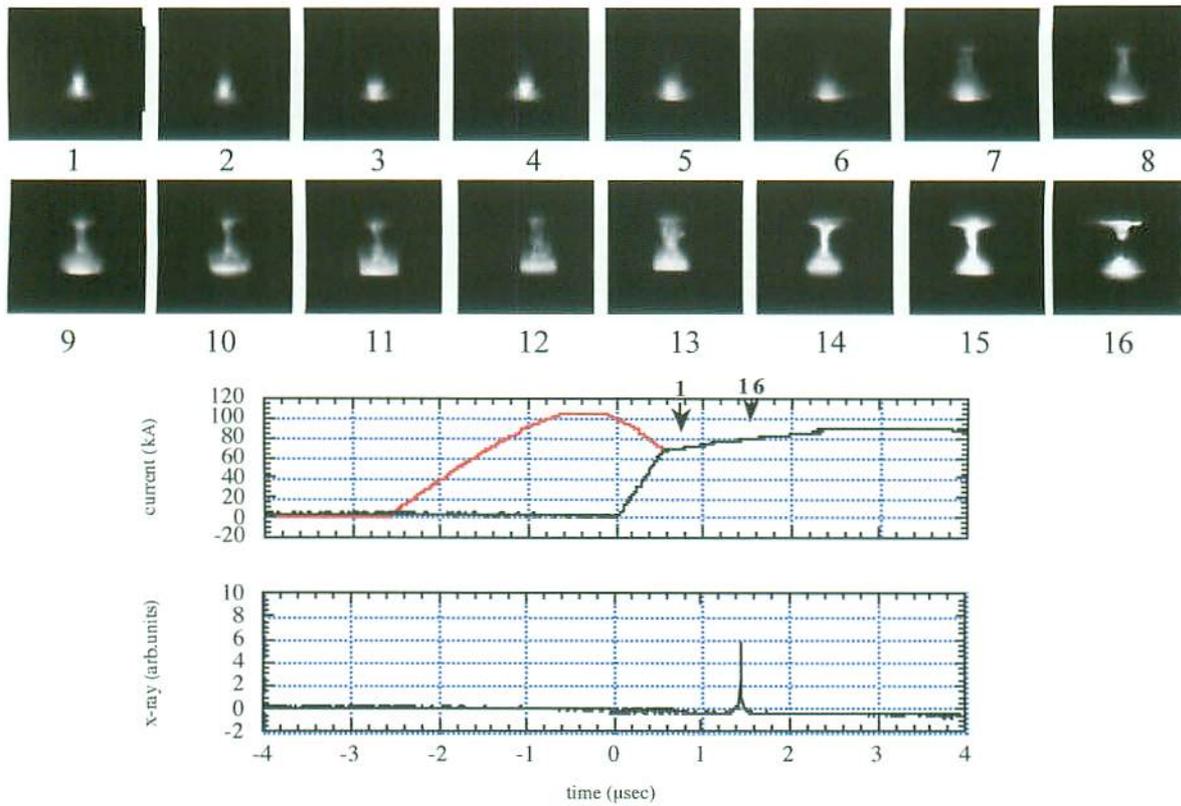


(a) ファーストバンク電源・ソリッド電極

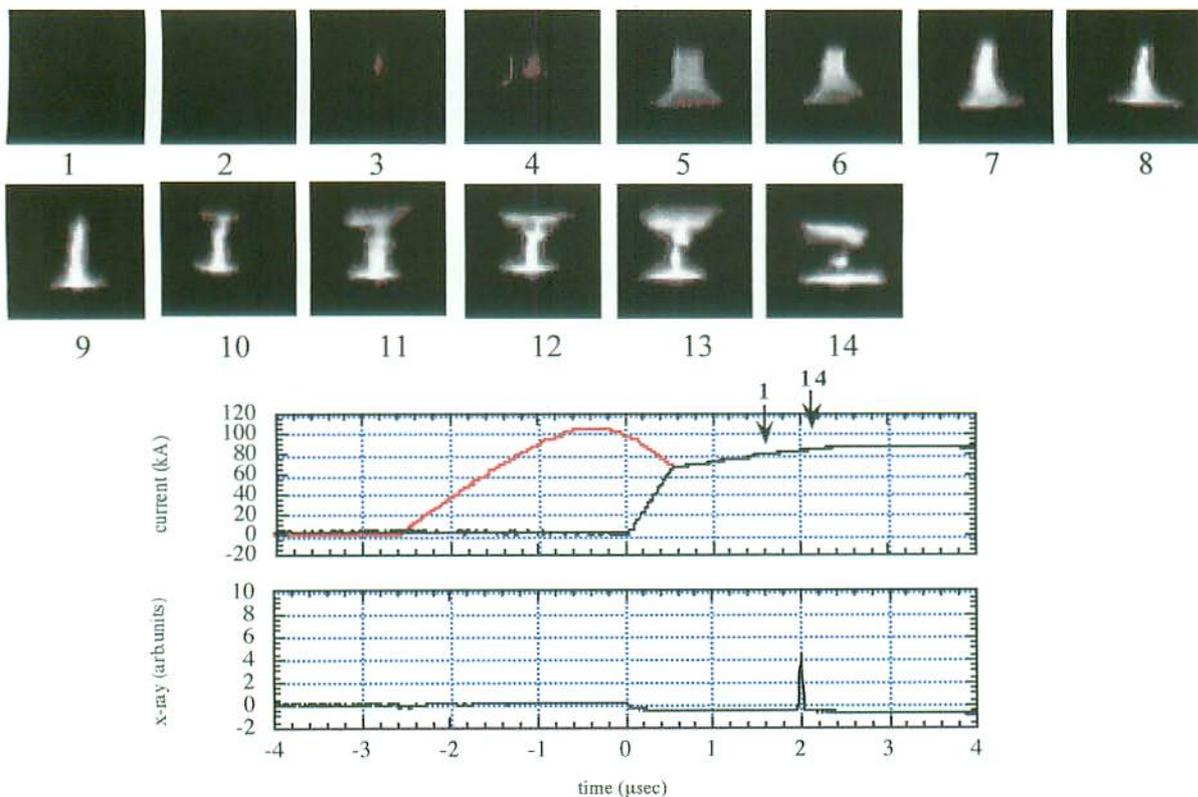


(b) ファーストバンク電源・メッシュ電極

図 3.5 プラズマの挙動と電流及び軟 X 線波形



(c) ASO-II 電源・ソリッド電極



(d) ASO-II 電源・メッシュ電極

図 3.5 プラズマの挙動と電流及び軟 X 線波形

バンク方式と誘導性、それぞれの電源として駆動させた場合のプラズマの挙動を比較すると、誘導性の電源として駆動させた場合の方が、ファーストバンク方式よりもプラズマ柱の不安定性が低減している。これは、ASO-IIを誘導性の電源として駆動させる場合、ワイヤーヒューズオープニングスイッチが開放する際に充電電圧の数倍もの誘導電圧が電極間に印加され、かつ立ち上がりを改善された電流がZピンチプラズマに供給されるためだと思われる。

図3.6は、それぞれの条件における遅延時間とその軟X線平均出力の関係を示したものである。誘導性電源の場合は電流の立ち上がりが改善されるため、ファーストバンク方式の電源の場合よりも軟X線放射のピークが遅延時間の短い方へ若干ずれているものの、ソリッド電極では遅延時間が650 μsec からおよそ900 μsec で、またメッシュ電極では600 μsec からおよそ1150 μsec の間で軟X線が観測されており、メッシュ電極を用いた方が軟X線を放射できる遅延時間の幅が広いことがわかる。

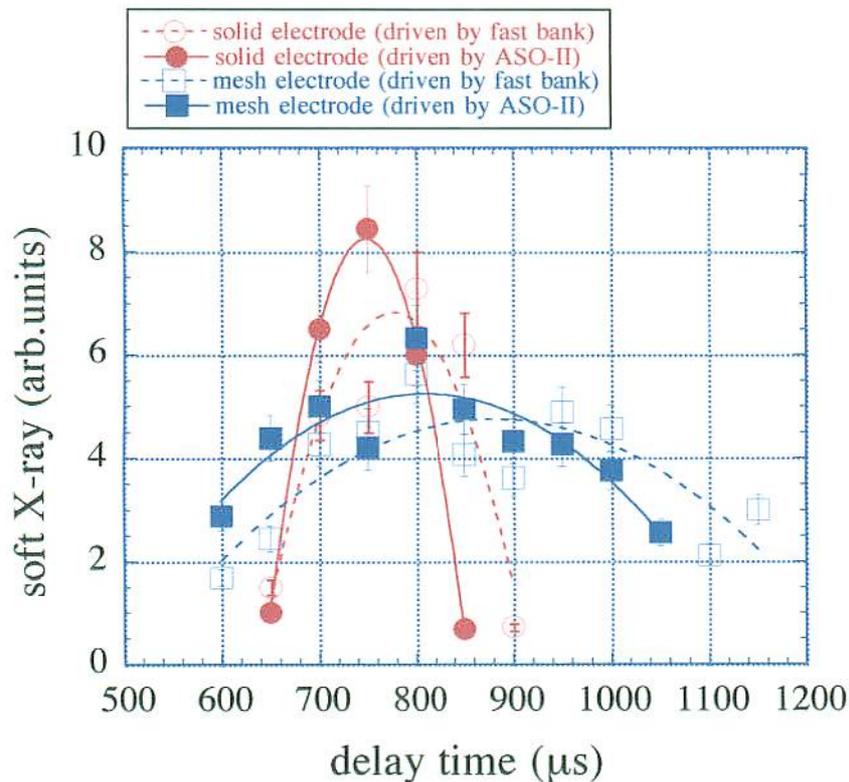
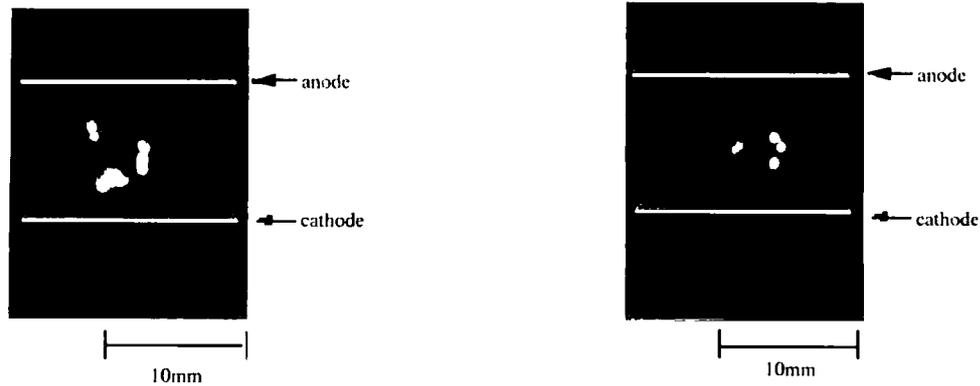
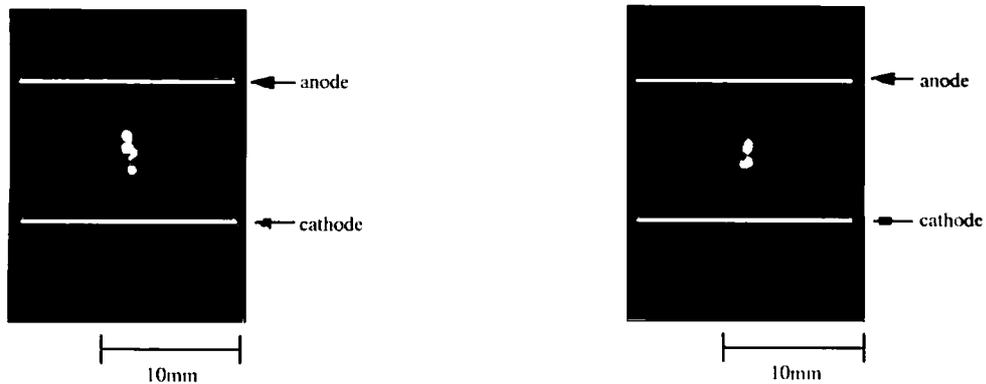


図3.6 遅延時間と軟X線出力の関係

図3.7は図3.4の実験と同じ条件で生成したZピンチプラズマ10放電において、そのホットスポットを重畳して撮影したピンホール写真である。結果を比較してみると、主に径方向のホットスポットの分散が(a)(c)のソリッド電極の場合よりも(b)(d)のメッシュ電極の場合の方が低減されており、さらにASO-IIを誘導性電源として駆動した場合の結果(c)(d)の方が、ファーストバンク方式の電源として駆動させた場合の(a)(b)よ



(a) ファーストバンク電源・ソリッド電極 (c) 誘導性電源・ソリッド電極



(b) ファーストバンク電源・メッシュ電極 (d) 誘導性電源・メッシュ電極

図3.7 ホットスポットのピンホール写真(10 放電重ね取り)

りも空間的再現性が向上している。

これらの結果からソリッド電極を用いた場合は、メッシュ電極の場合と比較して電極間で生成されるプラズマに偏りができ、均一な収縮ができないため、結果的に軟X線が出力される遅延時間の幅が狭く、ホットスポットの分散も大きくなったものと推測され、カソードの形状がプラズマの挙動やホットスポットの空間的再現性に影響を及ぼしていることがわかった。またASO-IIを誘導性の電源として駆動すると、パルス圧縮された高電圧の誘導電圧が電極間に印加され、かつ立ち上がりを改善された電流がZピンチプラズマに供給されるため、ファーストバンク方式の電源として駆動させた時よりもプラズマの不安定性を低減でき、ホットスポットの空間的再現性も向上できることが確認された。

3.4 コンパクトなコンデンサバンク電源を用いたガスパフZピンチプラズマでのレーザ干涉計測

前節の実験でカソードの形状がZピンチプラズマの不安定性に影響を及ぼしていることを示唆する結果が得られたことを踏まえ、次にコンパクトなコンデンサバンク電源により駆動したガスパフZピンチプラズマにおいてソリッド、メッシュそれぞれの

電極を用いた場合の入射ガスの密度分布を、アルゴンイオンレーザを光源としたマルチチャンネルシートマイケルソン型干渉計により計測した。さらにZピンチプラズマの不安定性がどのような機構で発生しているのかその詳細を調べるため、YAGレーザの2倍高調波を光源とした2次元マッハツェンダー型干渉計によるピンチプラズマの挙動観測をおこなった。

3.4.1 レーザ干渉法

ある密度をもった気体やプラズマ中の電磁波の位相速度は、真空中のものとは異なる。この位相速度の違いを利用し、密度を非接触的に測定する方法として、「干渉法」という高精度な計測技術が確立している。これは、気体またはプラズマ中を通過させた電磁波と、真空または大気中を透過させた電磁波とを干渉させ、その干渉縞の変位

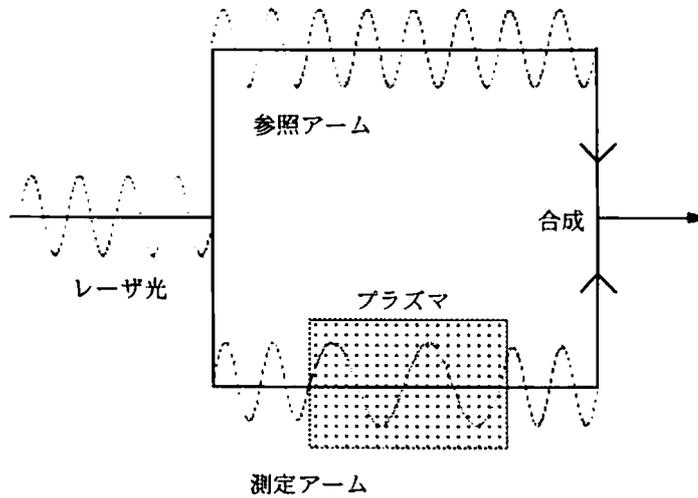
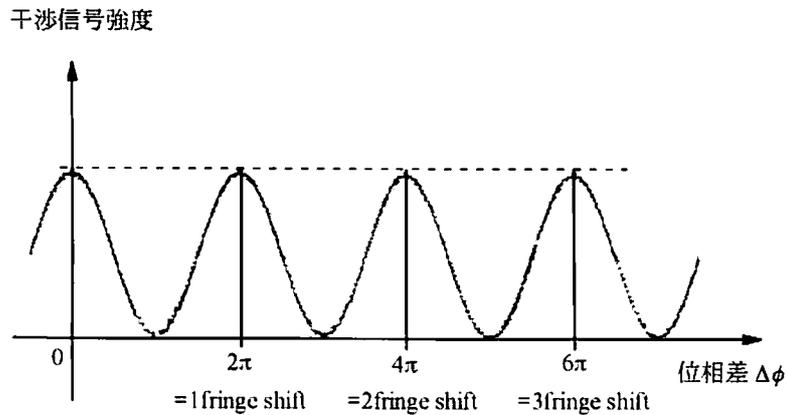


図 3.8 干渉法の原理



位相差の変化分 2π [rad] = 1 fringe shift

図 3.9 位相差とフリッジシフトの関係

量を測定するもので、定量性に優れていることから幅広く用いられている。具体的には図3.8のように、位相の揃ったレーザー光を二分し、一方をプラズマ中に、もう一方を真空もしくは大気中に通した場合、光路長が同じであれば位相速度の違いから二つの波を合成した時に位相差が生じるため、その位相差を合成したレーザー光の強度として測定する。図3.9のように位相差が π , 3π , \dots なら互いの波が打ち消し合い、 2π の整数倍なら互いの波を強め合う。よって位相差 $\Delta\phi=2n\pi$ (n は整数)のとき電磁波の強度は最大となり干渉縞(フリンジ)として現れるため、写真観測または光電測光でその干渉縞の移動量(フリンジシフト)を求めることで電子密度、中性粒子密度を求めることができる[38][39]。以下にその原理を示す。

完全電離プラズマの場合、光がプラズマ中を透過する際の屈折率 N は以下の式で表される。

$$N = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} = \sqrt{1 - \frac{n_c}{n_e}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{n_c}{n_e} \quad (3.1)$$

ここで ω_p はプラズマ周波数、 ω は光の角周波数、 n_e は電子密度、 n_c は ω が ω_p となるようなプラズマの電子密度、つまり、その光に対するカットオフ密度で以下の式で表される。

$$n_c = \frac{4\pi^2 c^2 m_e \epsilon_0}{e^2 \lambda^2} \quad (3.2)$$

ただし上式の λ は光の波長、 e は電気素量、 c は光速、 m_e は電子質量、 ϵ_0 は誘電率である。

中性ガスの影響も考慮しなければならない弱電離プラズマの場合は、 n_a を中性ガス密度として、

$$N = 1 - \frac{1}{2} \frac{n_c}{n_e} + \eta n_a \quad (3.3)$$

となる。 η はガスの種類によって異なる定数で、アルゴンガスの場合 1.032×10^{-23} である。光電測光の場合は、図3.9からもわかるように光強度変化の1周期分、つまり位相差の変化分 2π を1フリンジシフトとして見積もる。よってフリンジシフト ΔS は、透過するプラズマの長さを L として、

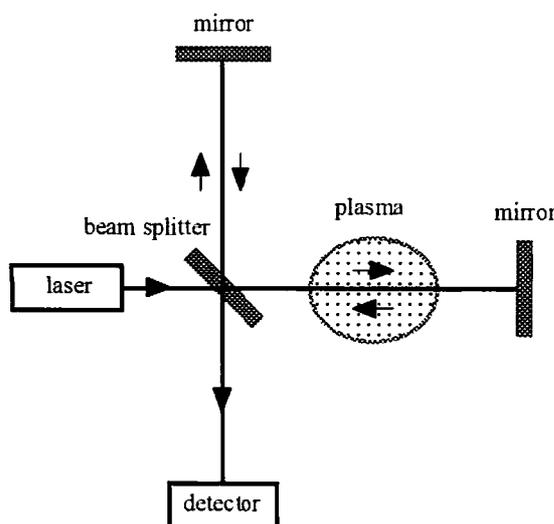
$$\Delta S = \frac{(N-1)L}{\lambda} \quad (3.4)$$

と表されるので、これに(3.3)式を代入して整理すると

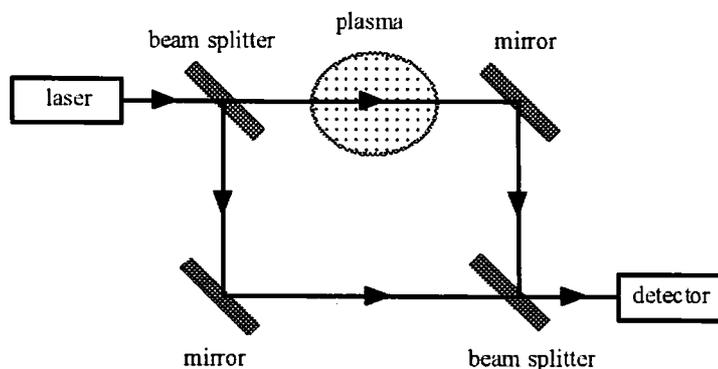
$$\Delta S = -4.485 \times 10^{-14} n_e L \lambda + 1.032 \times 10^{-23} \frac{n_a L}{\lambda} \quad (3.5)$$

となりフリンジシフトと密度の関係式が導かれる [40]. 実験によりフリンジシフトを測定すれば, この関係式からそのプラズマの線密度を求めることができる.

次に代表的な干渉計を図3.10に示す. (a)がマイケルソン(Michelson)型干渉計で, (b)がマツハツェンダー(Mach-Zehnder)型干渉計である. いずれもレーザなどの電磁波を半透明鏡(beam splitter)により二分し, 一方をプラズマ中(測定アーム), 他方を真空中もしくは大気中に通過させた(参照アーム)後に両者を再び半透明鏡により合成し, フリンジシフトを求めるものである. 干渉法では, 干渉前後のフリンジの移動量を測定すればよいので, 測定アームと参照アームの長さを必ずしも等しくする必要はないが, 両アームの光の強度をできるだけ等しくすると, より正確な写真観測または光電測光ができる.



(a) マイケルソン (Michelson) 型干渉計



(b) マツハ- ツェンダー (Mach-Zehnder) 型干渉計

図 3.10 代表的な干渉計

3.4.2 高感度マルチチャンネルシートマイケルソン型干渉計による入射ガスの密度分布計測

3.4.2.1 実験装置

Zピンチプラズマ駆動電源を除き、実験装置は前節の実験で用いたものと同じものを使用した。ただし電磁弁については、より安定したガスの入射を実現するべく三菱重工業(株)製のものに変更したため、前節の実験とは遅延時間の設定も異なっている。またメッシュ電極については、前節で用いたものを改良し、1 mm格子のステンレスワイヤーメッシュを直径30mmの円柱状に加工したものを使用している。

3.4.2.2 干渉計の配置

入射ガス密度を計測するための干渉計測配置図を図3.11に示す。干渉計測を行うための光源には出力700 mW、波長488 nm(青色)のアルゴンイオンレーザ(NEC GLG3200)を使用し、測定感度を上げるためレーザビームを被測定対象中に往復させるマイケルソン型干渉計により測定した。レーザ光を2枚の円筒面平凸レンズ(plano-convex lens)によりシート状にして、半透明鏡で2つのビームに分割する。一方のビームは電極間に入射されたアルゴンガス中を、また、もう一方はチャンバー外の空気中を通し、同様の光路長においてそれぞれ平面鏡で反射させ、再度半透明鏡上で合成して干渉が生じる様調整する。この干渉光を集光レンズにより光ファイバー先端に集光させ、その光ファイバーを通してPINフォトダイオード(浜松フォトニクス S5973)に導く。アルゴンガスが入射されると、その密度変化から干渉光にフリンジシフトが発生するので、その際の強度変化をPINフォトダイオードで検出し、デジタルオシロスコープで観測した。なおこの実験では、中性ガスだけのフリンジシフトを観測しているので、実際の線密度は(3.5)式において $n_e=0$ とした式に、実験で求めたフリンジシフ

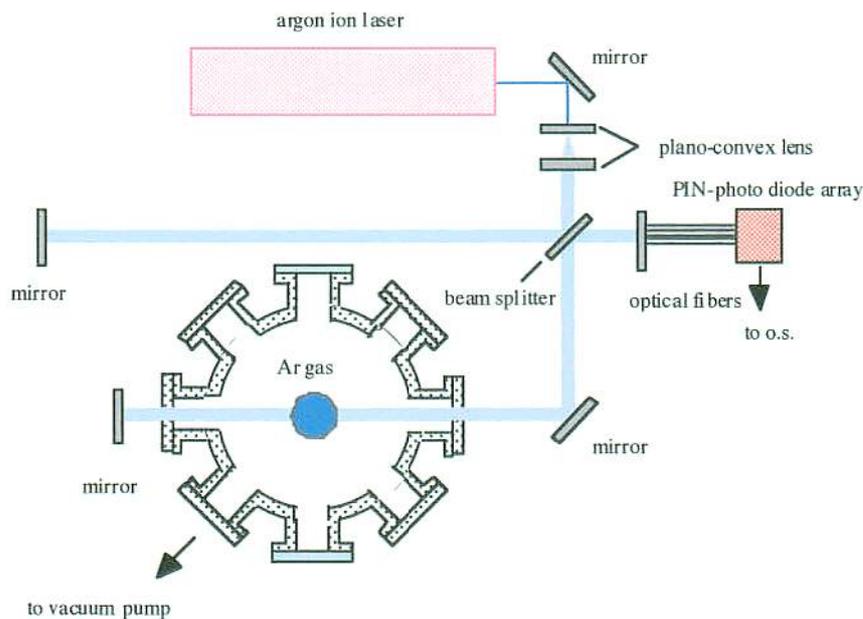


図 3.11 干渉計測配置図

ト量 ΔS を代入して算出している。

3.4.2.3 実験方法

実験は、アノード側から電極間に入射したアルゴンガスによる干渉信号の強度変化を5チャンネルPINフォトダイオードアレイで測定した。このときチャンバー内の真空度は約13 Pa(0.1torr)としている。図3.12にその干渉信号の測定位置を示す。カソード表面から1, 3, 5, 7, 9 mmの位置にシート状レーザー光を通し、電極中心軸においてガスの密度分布が対称であることを想定して、径方向に電極中心から0, 2, 4, 6, 8 mmの位置での信号を計測した。なお、ガスが電極間に入射されるタイミングを確認するため、電磁弁のコイルに流れる電流をB-dotプローブで観測している。

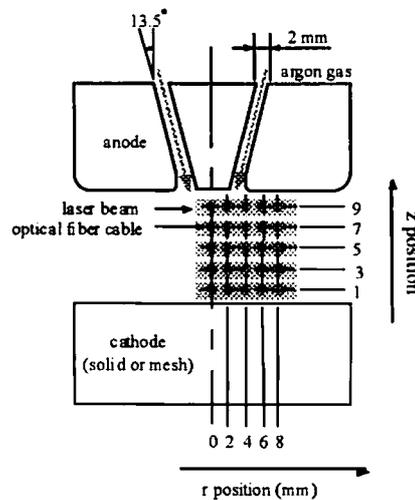


図3.12 干渉信号の測定位置

3.4.2.4 実験結果及び検討

図3.13に電磁弁のコイル電流と典型的な干渉信号波形を示す。入射ガスによるレーザー光の屈折の影響により、干渉信号の上限値及び下限値が振動しているが、電磁弁のコイルに電流が流れてからおよそ1.2 ms後に、密度変化によるフリンジシフトが発生している。この波形より、電磁弁に電流を流してから実際に電極間へガスが入射されるまでに1.2 ms程度の時間を要し、またフリンジシフトによる波形がおよそ2.4 ms付近を軸とした左右対称的な正弦波形となっていることから、この時刻まで入射ガスの密度は増加し、その後減少していくことがわかった。

図3.14にソリッドとメッシュそれぞれの電極を用いた場合の、 $\Delta t=1.7$ msにおける入射ガスの線密度分布を示す。ここで Δt とは、電磁弁のコイルに電流が流れ始めてからの経過時間であり、実際にZピンチプラズマを発生させる実験においては、この値前後が遅延時間として設定される。この結果を見るとソリッド、メッシュ電極共に、アノード側にある噴出口の傾斜のため一端中心軸方向に向かってガスが流れ、その後径

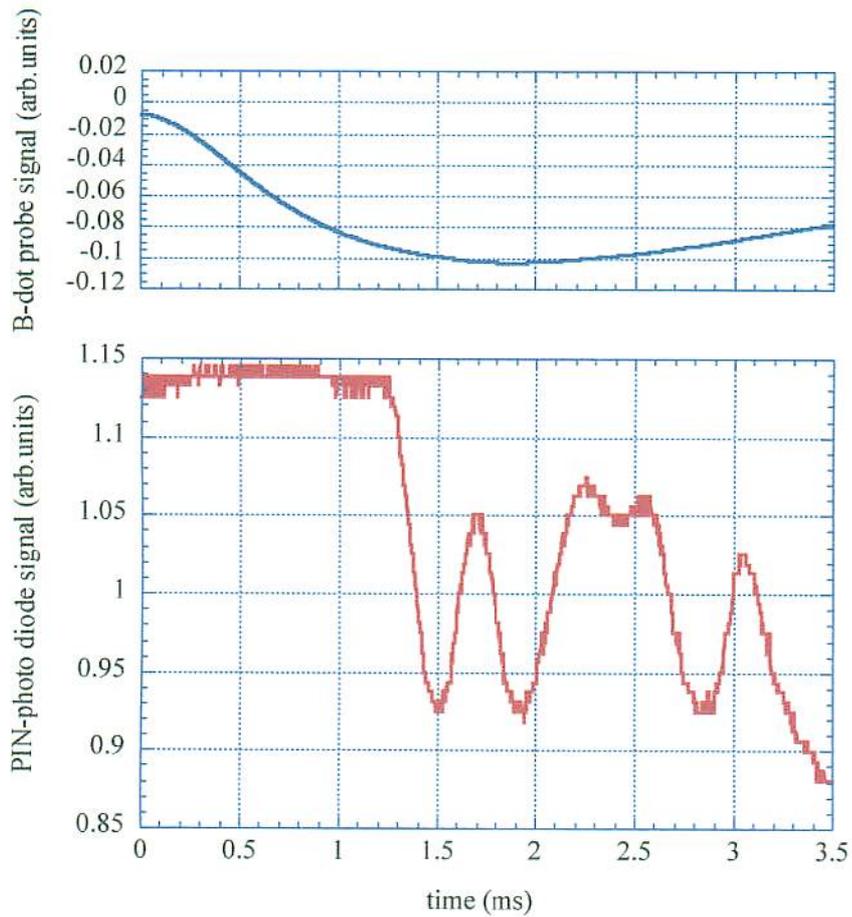


図 3.13 電磁弁のコイル電流と典型的な干渉信号置

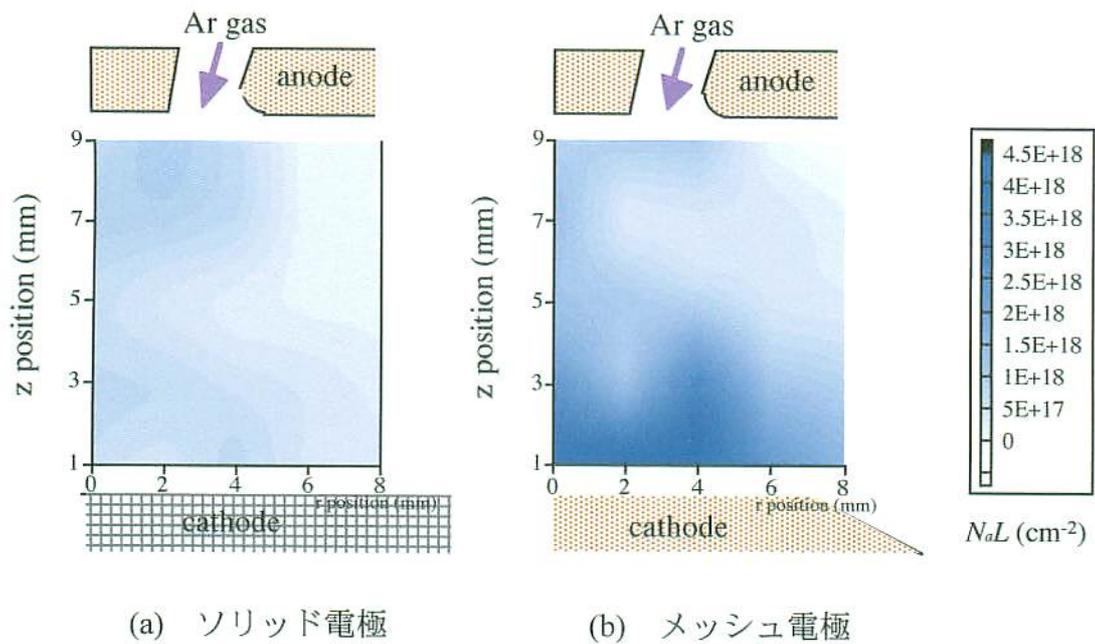
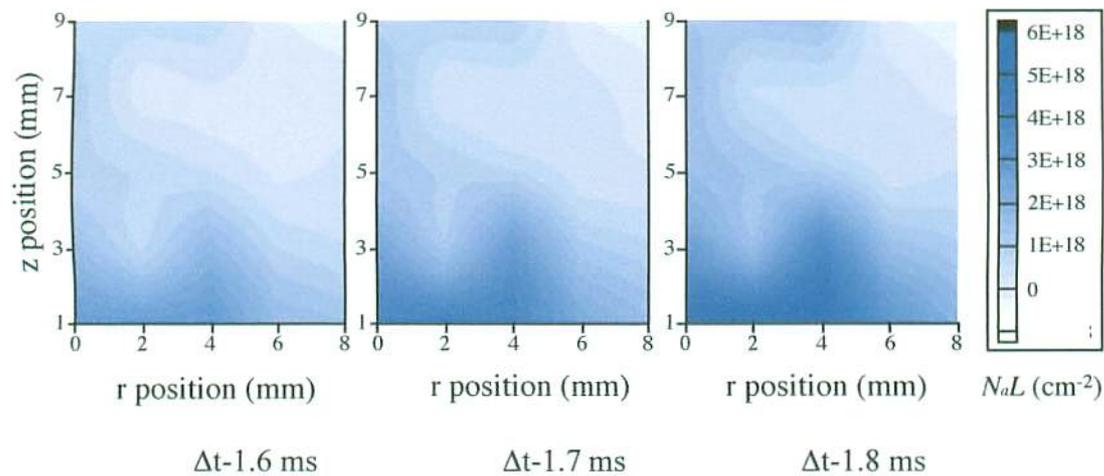


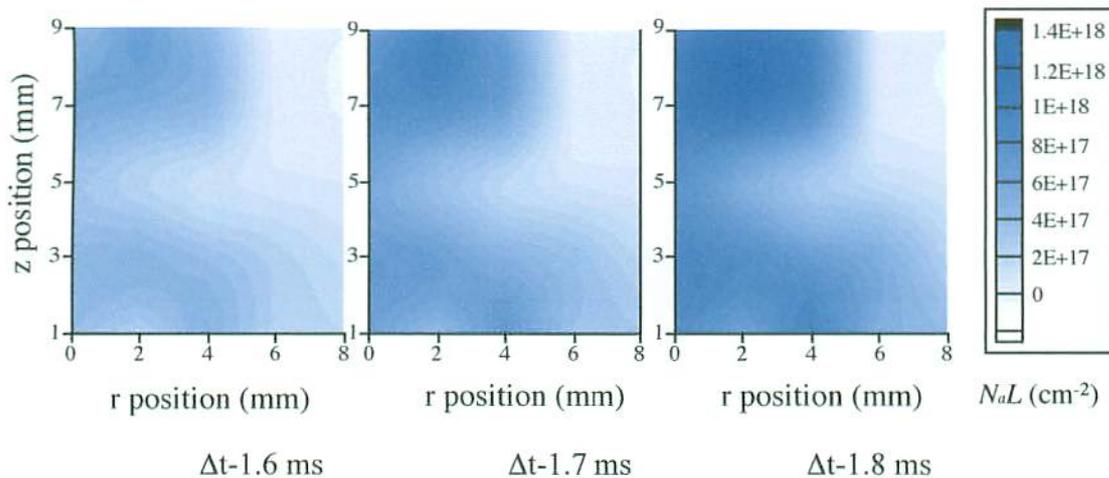
図 3.14 電極間の入射ガス線密度分布 ($\Delta t=1.7$ ms)

方向外側に拡散していることがわかる。線密度を見るとソリッド電極の場合は、噴出口($z=9\text{mm}$)付近から電極間中間($z=5\text{mm}$)の部位において $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 程度の値であるのに対し、カソード表面($z=0\text{mm}$)付近はおよそ $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ と高い値を示している。これは入射されたガスがソリッド電極表面上で反射して澱み(stagnation)をおこしているためである。一方メッシュ電極の場合は澱みの影響がほとんど無く、電極間全体の入射ガスの線密度が $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 以下で、密度勾配がソリッド電極の場合と比較すると緩やかであり、入射ガス密度の均一性において優れている。

次にソリッド電極、メッシュ電極それぞれの場合の、 $\Delta t=1.6, 1.7, 1.8\text{ms}$ における入射ガス密度分布の時間推移を図3.15(a), (b)に示す。ソリッド電極の場合は、時間が経過するにつれて主にカソード表面付近のガス密度が高くなり、さらにその部位が径方向外側に拡がっていく様子が見られる。時間的な線密度の変化については、噴出口付近($z=9\text{mm}$)においておよそ 1.0×10^{18} から $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ への増加であるのに対し、カソー



(a) ソリッド電極



(b) メッシュ電極

図 3.15 入射ガス線密度分布の時間推移

ド表面 ($z=0\text{mm}$) の密度はおよそ 2.0×10^{18} から $6.0 \times 10^{18}\text{cm}^{-2}$ へと変化しており、特にカソード表面での密度変化が大きいことがわかった。それに対しメッシュ電極の場合は、噴出口の傾斜により電極間の中間 ($z=5\text{mm}$) 付近に窪みが見られるが、時間的な線密度変化が顕著である噴出口付近 ($z=9\text{mm}$) においてもおよそ $0.2 \times 10^{18}\text{cm}^{-2}$ から $1.2 \times 10^{18}\text{cm}^{-2}$ への増加にすぎず、ソリッド電極に比べて線密度の時間的な変動が少なく、電極間における入射ガスの密度勾配も優れていることがわかる。

以上の結果からソリッド電極を用いた場合は、カソード表面での入射ガスの反射と激みの影響により電極間の密度勾配や時間的な変化が大きく、これがZピンチプラズマの生成における不安定性の発生や成長を助長する一因となっていると推測される。逆にメッシュ電極を用いることでホットスポットの空間的再現性が向上するのは、入射ガスの密度勾配、時間的な変動共にメッシュ電極より優れているからだと思われる。

3.4.3 YAGレーザーの2倍高調波を光源とした2次元マッハツェンダー型干渉計によるプラズマの挙動観測

3.4.3.1 実験装置

ガスパフZピンチプラズマの駆動電源として、 $6.39\ \mu\text{F}$ のキャパシタ (Maxwell Lab.) と電界歪型スパークギャップスイッチ (日新電機) で構成されているコンデンサバンクを用いた。この電源は同軸状構造となっており、Zピンチプラズマが生成されるチャンバ及び電磁弁がその上部に接続される形となっている。装置全体のインダクタンスはおよそ $1.2\ \mu\text{H}$ で、電界歪型スパークギャップスイッチをクロー징することで、パルスパワー発生制御装置 (日新電機) により充電されたコンデンサから直接電流を負荷に供給する方式の電源である。Zピンチプラズマ生成用のチャンバ、電極及び電磁弁は3.4.1節の実験で使用したものと同様であるが、不安定性抑制の見地からカソードはメッシュ電極のみを使用した。なお、Zピンチプラズマに供給される電流はロゴウスキーコイル (Pearson model 110A) により測定し、軟X線の検出には3.3節と同じ $3\ \mu\text{m}$ 厚のアルミ箔をフィルターとしたPINフォトダイオードを用いている。真空は油回転ポンプで粗引した後、ターボ分子ポンプにて、 $5 \times 10^{-2}\text{Pa}$ に排気して実験をおこなっている。これら実験装置の概略図を図3.16に示す。

3.4.3.2 干渉計

干渉計測配置図を図3.17に示す。干渉計測を行うためのレーザー光源として、出力 $300\ \text{mJ}$ 、波長 $532\ \text{nm}$ (緑色) のYAGレーザー (HOYA Continuum Surelite II) 2倍高調波を使用した。発振されたレーザービームを平凹レンズ ($f=-35\ \text{mm}$) 及び平凸レンズ ($f=400\ \text{mm}$) により拡大し、半透明鏡 (シグマ光機 CSMH-30-550) で2つのビームに分割する。一方をプラズマ中に、もう一方を大気中に透過させ、それぞれのビーム光を再度半透明鏡上で合成して干渉が生じるよう調整し、NDフィルター (透過率 12.5%) 及びバンドパスフィルタ (エドモンドオプティクス CJ30909) を通してポラロイドフィルム (日本ポラロイド T667) により干渉像を撮影した。

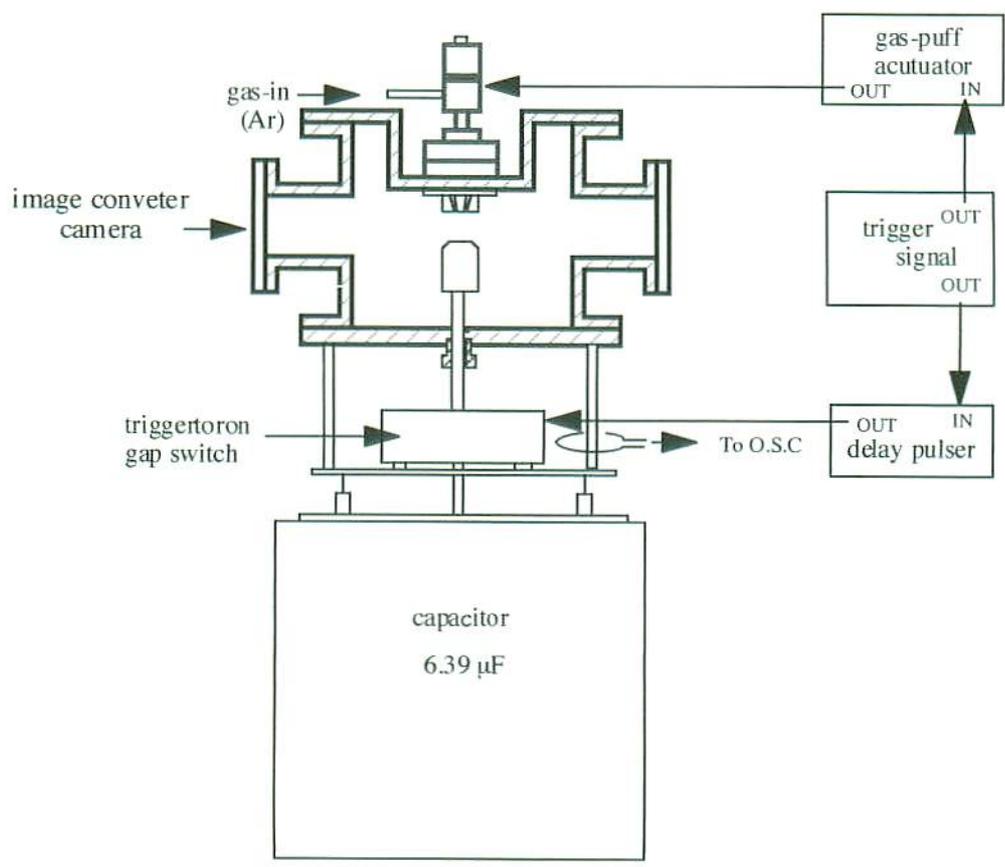


图 3.16 実験装置概略図

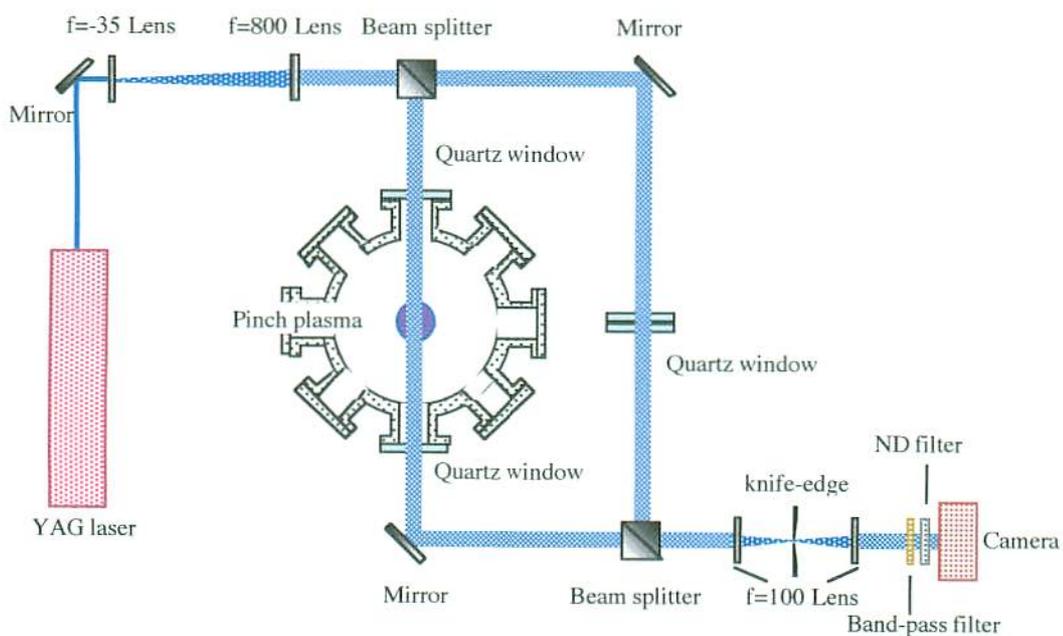


图 3.17 干涉計測配置図

3.4.3.3 実験方法

最初にガス入射用の電磁弁へトリガー信号を送り、電極間にプラズマ源となるアルゴンガスを入射する。ディレイパルサー (Stanford Research Systems model DG535) により、そのトリガー信号から 1.7 ms 後にコンデンサバンク電源の電解歪型スイッチを動作させ、Zピンチプラズマを生成する。同時に、所望の観測時刻にレーザが発振するようあらかじめ遅延時間を設定しておいたもう1台のディレイパルサー(同)によって、フラッシュランプとQスイッチを動作させてレーザを入射しZピンチプラズマの干渉像を撮影した。この実験における装置への制御信号の流れを図3.18に示す。なお電磁弁内のアルゴンガス充填圧力は0.15 MPa (1.5 atm), コンデンサの充電電圧は25 kVとしている。

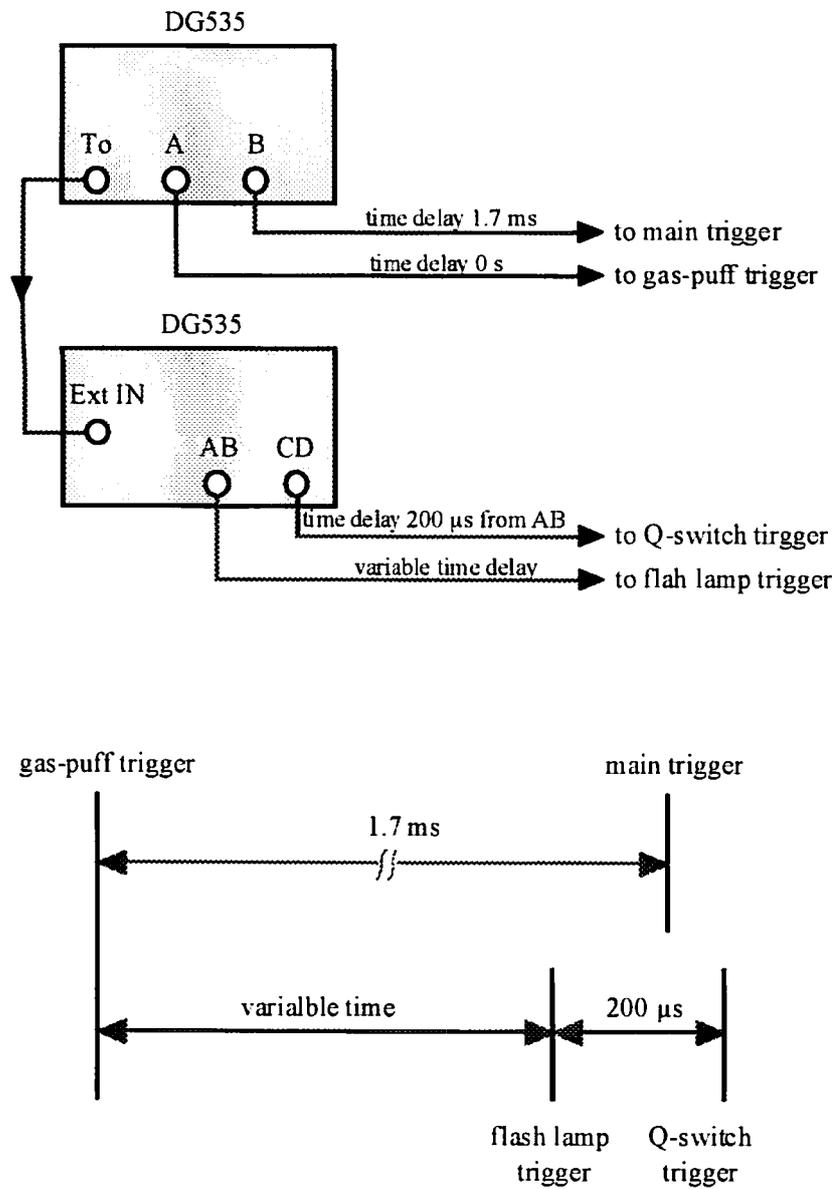


図 3.18 制御信号の流れ

3.4.3.4 実験結果及び検討

図 3.19 に各時刻におけるプラズマの干渉像を示す。この写真に示している時間は、プラズマに電流が流れ始めてからの経過時間である。光源として用いた YAG レーザは最大発振周波数 20 Hz のパルスレーザであり、記録媒体としてはポラロイドフィルムを使っているため、Z ピンチプラズマ 1 回の放電につき 1 枚の干渉像しか撮影できない。そのためこの一連の収縮過程の写真は、放電毎に YAG レーザの発振時刻を変えて撮影をおこなったものを時系列に並べたものである。ただしこの場合、放電毎のプラズマの再現性が問題となるが、後述するように不安定性が発生する段階以前については十分な再現性が確認されている。なお、それぞれの像の露光時間はレーザが照射された時間に相当するので、YAG レーザのパルス幅である 10 ns となる。またこれら干渉像から得られたアノード、カソード近傍それぞれの部位におけるプラズマ径の時間変化のグラフを図 3.20 に、衝撃波面と電流層の径の時間変化のグラフをそれぞれ図 3.21(a), (b) に示す。

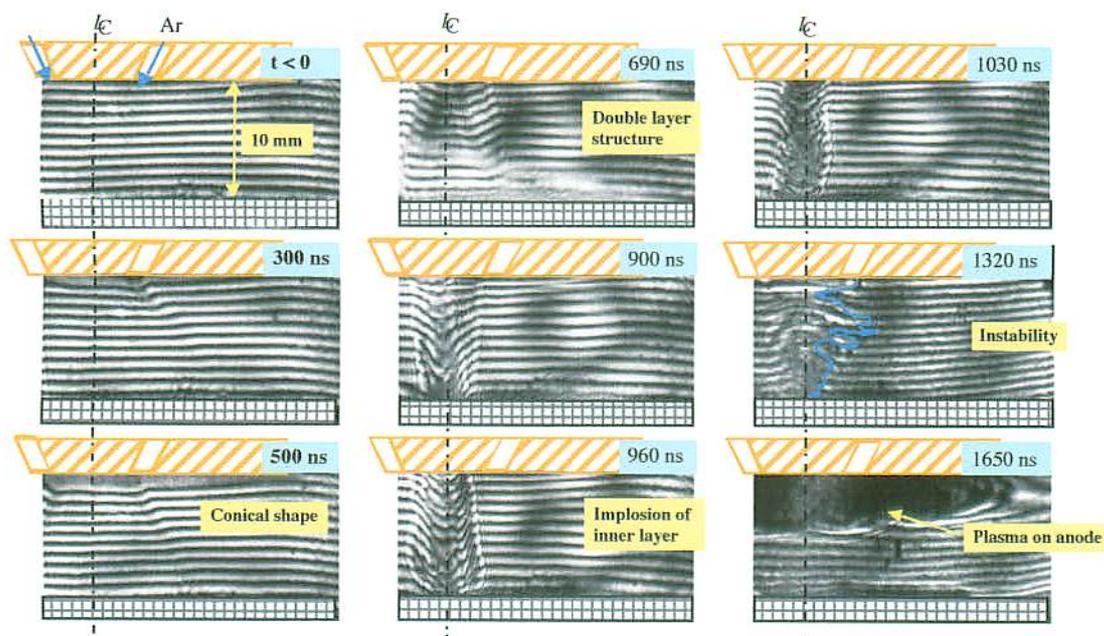


図 3.19 プラズマの干渉像

図 3.19 の 300 ns, 500 ns の写真から、放電の初期におけるプラズマの形状は円錐状になっていることがわかる。これは前節で示したガスの分布とおおよそ一致していることから、初期放電は入射ガスの境界面で起こっていると考えられる。その後 690 ns の写真においては、放電により生成されたプラズマが収縮し、中空円筒状の 3 層構造になっている様子が見られる。一般的に収縮時のプラズマの構造は、プラズマ層が、外側の電流層とプラズマの収縮により発生した衝撃波面に挟まれている構造とされているため、この干渉像の内側に見られるフリンジシフトは衝撃波面に相当するものと考えられる。そしてこの衝撃波面を伴ったプラズマは収縮を続け、放電を開始してから

900 ns 後にプラズマ柱が形成されるが、この段階においてはまだ目立った不安定性は認められない。また図3.20のグラフからもわかるように、初期段階ではアノード側の径が小さく、カソード側の径が大きい円錐状のプラズマが、この時刻までにはほぼ円柱状のプラズマとして形成されている。これはカソード側の入射ガス密度がアノード側に比べて小さいため、生成されるプラズマの密度もカソード側が小さくなり、その結果収縮速度が増加するためと推察される。そして960 nsの写真においてはプラズマ柱内部のフリンジシフトが外側に拡がっており、その後1030 nsの写真のようなプラズマ柱内部に不安定性が発生している様子が観測された。これは図3.21のグラフより、アノード、カソード側共に衝撃波面の径が最小になった後再び膨張し、電流層の径と交差する時刻と一致していることから、本実験のZピンチプラズマにおいては、衝撃波面がプラズマ柱の中心で衝突し、その反動により外側へと伝播した衝撃波面と、収縮を続ける電流層の間で相互作用がおこることによって不安定性が発生していると考えられ、この時刻までの衝撃波面及び電流層の挙動については比較的再現性が高い。さらに時間が経過すると、プラズマ柱内部で発生した不安定性が1320 nsの写真のように成長し、最終的にプラズマ柱が崩壊する。1650 nsの写真では、アノード表面から高密度のプラズマが噴出している様子が観察された。これは、プラズマ柱の崩壊の際に発生した誘導電圧により電子ビームが加速され、アノード表面に衝突することによって発生したものと考えられる。

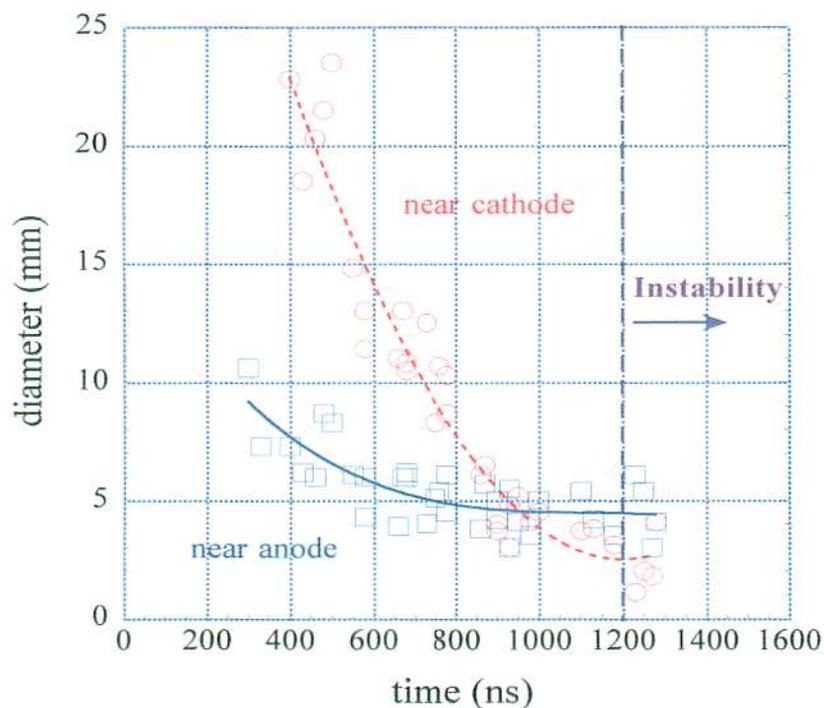
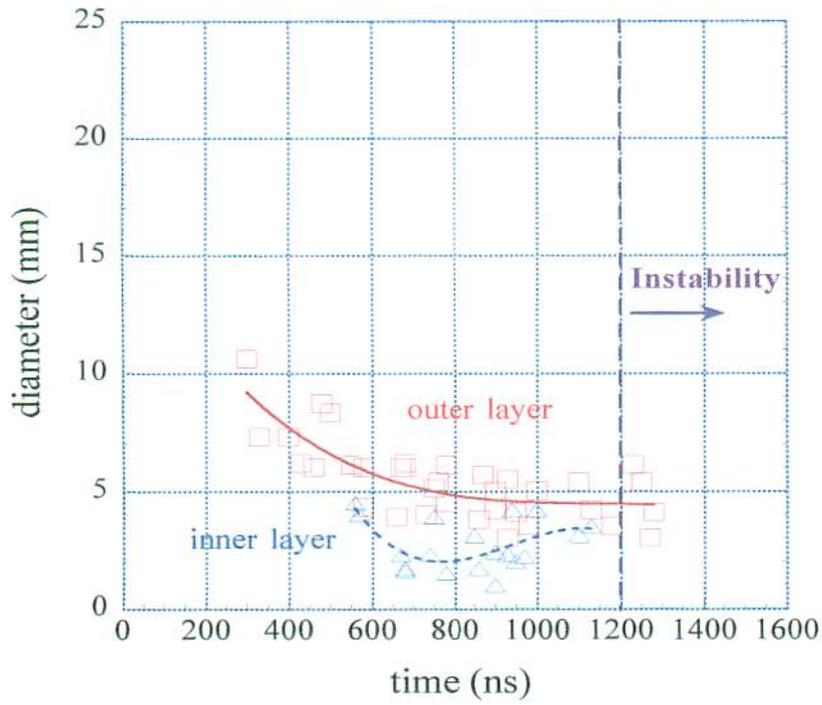
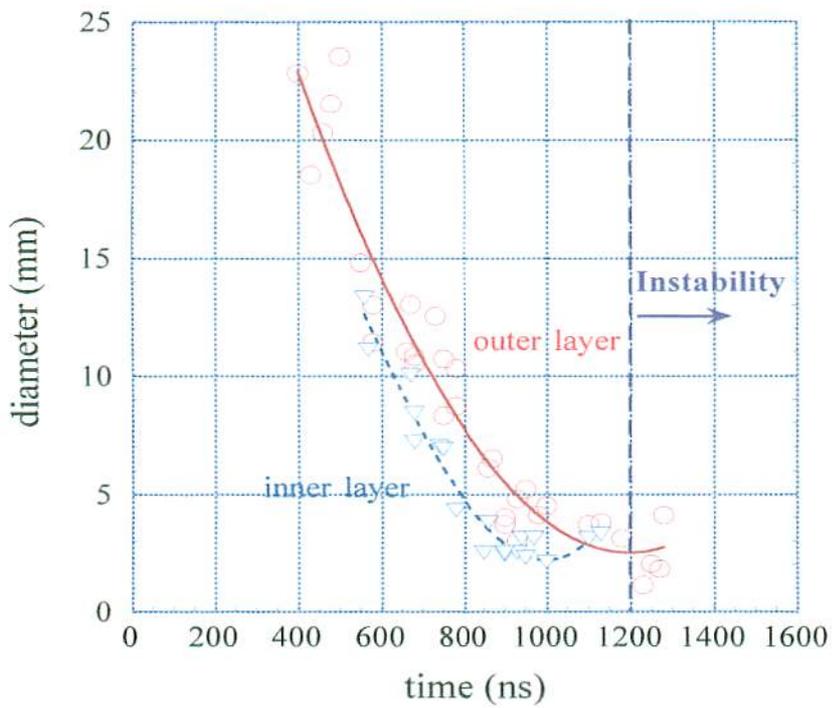


図 3.20 プラズマの径の時間変化



(a) アノード近傍



(b) カソード近傍

図 3.21 電流層と衝撃波面の径の時間変化

3.5 まとめ

誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー発生装置である ASO-II を電源とし、ワイヤーヒューズオープニングスイッチを設置して誘導性電源として駆動させた場合と、ヒューズを設置せずにファーストバンク方式の電源として駆動させた場合のガスパフ Zピンチプラズマについて、メッシュとソリッド2種類の電極をカソードとして用いた時のプラズマの挙動及びホットスポットの空間的再現性について観測をおこなった。

それぞれの電極における実験結果を比較すると、ソリッド電極の場合は電極間で生成されるプラズマに偏りが生じ均一な収縮ができないため、結果的に軟 X線が出力される遅延時間の幅が狭く、ホットスポットの分散も大きかった。一方メッシュ電極の場合は、アノード側から入射したガスがカソード側に拡がってプラズマ化し、そのプラズマが電極間全体にわたって収縮することでプラズマ柱が形成されており、ホットスポットの径方向の分散が改善されていた。このことから、カソードの形状がプラズマの挙動やホットスポットの空間的再現性に影響を及ぼしていることがわかった。また ASO-II を誘導性の電源として駆動すると、パルス圧縮された高電圧の誘導電圧が電極間に印加され、かつ立ち上がりを改善された電流が Zピンチプラズマに供給されるため、ファーストバンク方式の電源として駆動させた時よりもプラズマの不安定性を低減でき、ホットスポットの空間的再現性も向上できることが確認された。

次にカソードの形状が Zピンチプラズマの不安定性に影響を及ぼしているという上記の実験結果を踏まえて、それぞれの電極を用いた場合についての入射ガスの線密度分布をアルゴンイオンレーザを光源としたマルチチャンネルシートマイケルソン型干渉計により測定した。

実験結果より、電磁弁のコイルに電流が流れ始めてから実際にピストンが動作して電極間にガスが入射されるまでに 1.2 ms 程度の時間を要し、入射されたガスの密度はおよそ 2.4 ms まで増加した後、減少していくことがわかった。また、 $\Delta t = 1.8$ ms での入射ガスの線密度分布については、両電極共にアノード側にある噴出口の傾斜のため一端中心軸方向に向かってガスが流れ、その後径方向外側に拡散していた。しかしソリッド電極の場合は、入射ガスが電極表面上で反射して濺みをおこしているため、その部位での線密度は $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 程度と他の部位に比べて高い値を示しているのに対し、メッシュ電極の場合はその影響が認められず、電極間全体の入射ガスの密度は $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 以下であり均一性において優れていた。また線密度分布の時間推移についても、ソリッド電極の場合はカソード表面付近にある密度の高い部位が径方向外側に拡がっていき、それに併せて線密度の変化も大きかった。一方メッシュ電極の場合は、噴出口付近における線密度変化が顕著であるが、その変動の度合いはソリッド電極に比べて明らかに小さく、線密度の時間的変動も優れていることがわかった。これらの結果から、ソリッド電極の場合と比較して入射ガスの密度勾配、時間的変化共に小さいメッシュ電極を用いることで、プラズマの挙動やホットスポットの空間的再現性の改善に効果があったものと思われる。

次に、コンパクトなコンデンサバンクを電源とした Zピンチプラズマにおいて、そ

のプラズマがどのような振る舞いをして不安定な状態に移行していくのかを調べるため、YAGレーザーによる2次元マッハ-ツェンダー型干渉計によるピンチプラズマの挙動観測をおこなった。

実験により得られた干渉写真からは、はじめに入射ガスの境界面で放電が起こった後、衝撃波面及び電流層に挟まれた中空円筒状の3層構造をしたプラズマが発生していることがわかった。この衝撃波面を伴ったプラズマは収縮を続けてプラズマ柱を形成するが、この段階までは比較的安定しており、目立った不安定性は見られなかった。そしてプラズマ柱内部のフリンジシフトが外側に膨張し、その後プラズマ柱内部に不安定性が発生している様子が観測された。これは、観測写真から求めた径の時間的変化のグラフにおいて、衝撃波面の径が最小の値をとったあと再び増加し、電流層の径と交わる時刻にほぼ一致していることから、プラズマ柱の中心で衝突した衝撃波面が、その反動により外側への伝搬していく2次的な衝撃波面となり、収縮を続ける電流層との間で相互作用をおこすことによって、プラズマ柱内部に不安定性が発生していると考えられる。そしてその不安定性が成長することでプラズマ柱が崩壊し、最終的にはアノード表面から高密度のプラズマが噴出している様子が観測されたが、これはプラズマ柱が崩壊した際の誘導電圧により電子ビームが加速され、アノード表面に衝突することによって発生したものだと考えられる [41]。

第4章 誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置 ASO-X による ガスパフ Z ピンチプラズマ

4.1 はじめに

ガスパフ Z ピンチプラズマを産業応用などの軟 X 線源として適用するためには、軟 X 線の出力や再現性[42][43]、放電の繰り返し周波数など克服しなければならない課題は多い。しかしこれら克服すべき課題の多くは、Z ピンチプラズマが電磁流体であるが故の不安定性[44]に起因していることは明らかである。言い換えれば、この不安定性の問題が解決できれば、軟 X 線源としての実用化への道が大きく開かれるものと思われる。

3章で述べた実験結果から、プラズマに流れる電流の立ち上がりを速くすることで、軟 X 線が放射される局所的高温高密度の部位であるホットスポットの空間的再現性が改善されることが確認された[11][44][45]。軟 X 線光源として Z ピンチプラズマを用いるためには、このホットスポットの空間的再現性の要因となっている均一なピンチプラズマの生成が重要となってくる[33]。そこで本章ではこの問題点を克服するべく、これまでに使用してきた電源よりも更に立ち上がりの速い電流を負荷に供給することのできる誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置 ASO-X[46]及びプラズマオープニングスイッチ (POS) を用いたガスパフ Z ピンチプラズマにおいて、プラズマの挙動とホットスポットの観測、及びに軟 X 線分光をおこなったのでその結果について述べる[47][48]。

4.2 誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置 ASO-X

ASO-Xは線形誘導加速器(Linear Induction Accelerator, LIA)の原理を応用した誘導電圧重畳方式のパルスパワー発生装置で、装置本体は主としてコンデンサ、電界歪型ギャップスイッチ、パルスパワー用のコアから構成されており、これを1ステージとして3ステージ分を重畳する形で接続されている。図4.1にASO-Xの外観と概略図を示す。各ステージは、2つのコンデンサがそれぞれの電界歪型ギャップスイッチの配置されているチャンバを通して、中央の同軸円筒状のチャンバに接続されている。さらにその中央のチャンバには、高透磁率磁気コア(日立金属FINEMET FT-1H)と内部導体が設置されており1ステージを構成している。1次側(外部導体側)は絶縁ガスとしてSF₆ガスが封入されており、2次側(内部導体側)は真空ポンプにより高真空に保たれ、その内部導体にはプラズマオープニングスイッチ(POS)が設置されている。また磁気コアの飽和による負荷電流の減少をおさえるため、磁気コアをリセットするための回路も備えている。

実際の動作については、コンデンサを充電した後に電界歪型ギャップスイッチを短絡することで1次側に電流が流れるが、高透磁率のコアのため、図4.1の点線で示されたコアを周回する電流路のインダクタンスは数mHと非常に大きくなる。そのため実際の電流は、実線で示されるような各ステージのコンデンサを通過して負荷へ供給され、

最後に内部電極を介してコンデンサに戻ってくる経路で流れる。なお各ステージは2つのコンデンサが並列に接続されているので、2次側に流れる電流は1次側の2倍となり、AOS-X全体としては3ステージ分の電源が直列で接続された形となっているため、電圧は3倍に重畳されて負荷に印加される。

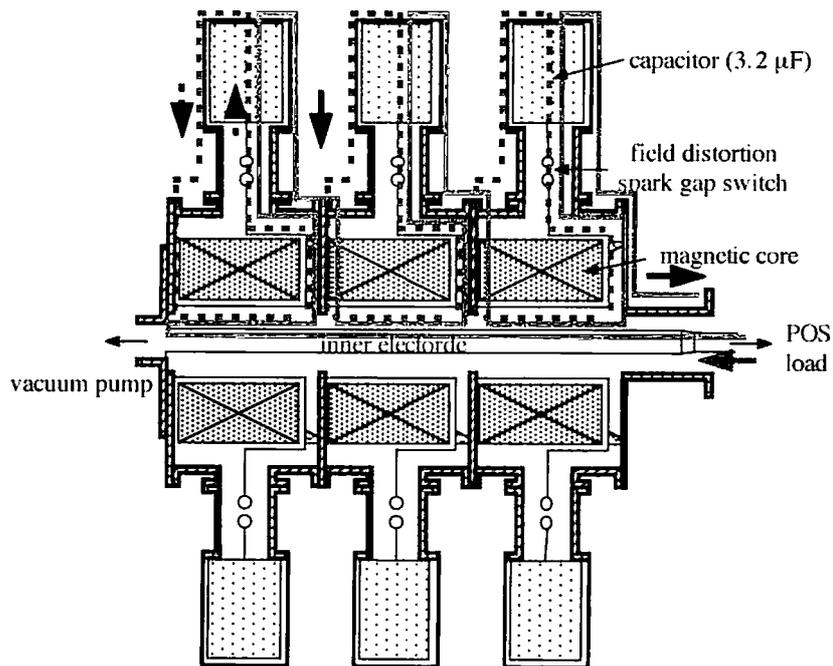
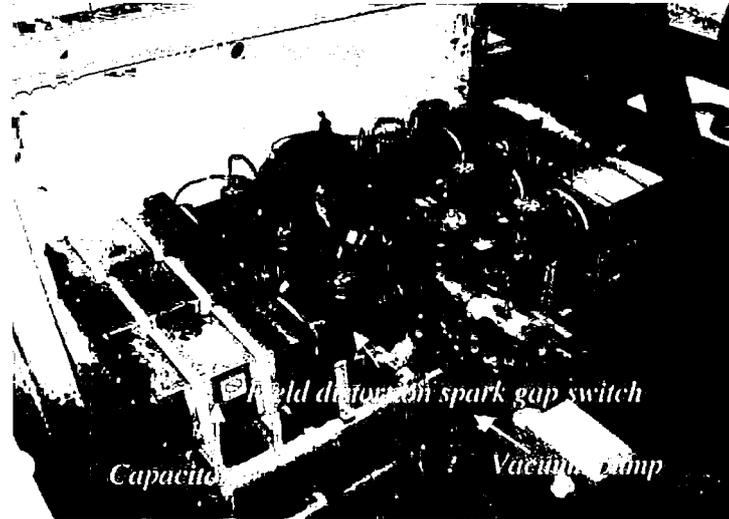


図 4.1 ASO-X の外観と概略図

4.2.1 ASO-X の仕様

以下に ASO-X の性能，仕様を記す。

I. 性能

- (1) 最高充電電圧 60 kV

- (2) コンデンサ蓄積エネルギー 34.5 kJ
- (3) 最高発生電流 400 kA (短絡負荷時)
- (4) 電流立ち上がり時間 1.33 μ s (1/4 周期)

II. 構成機器

(1) コンデンサ

静電容量 3.2 μ F
 残留インダクタンス 12 nH

(2) 主ギャップスイッチ

使用ガス SF₆ ガス
 構造 電界歪型

(3) 誘導電圧重畳部

コア材 鉄基超微結晶合金 Hitachi FINEMET FT-1H
 コア最大使用電圧時間積 45×10^{-3} V·s

4.3 誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置ASO-X及びプラズマオープニングスイッチを用いたガスパフZピンチプラズマの挙動観測

4.3.1 実験装置

図4.2に本実験で使用した実験装置の概略図を示す。Zピンチプラズマの駆動電源としてASO-Xを用い、さらに電流の立ち上がりを改善するために、プラズマオープニングスイッチ(以下POS)がASO-Xと負荷の間に接続されている。POSは同軸ケーブルに

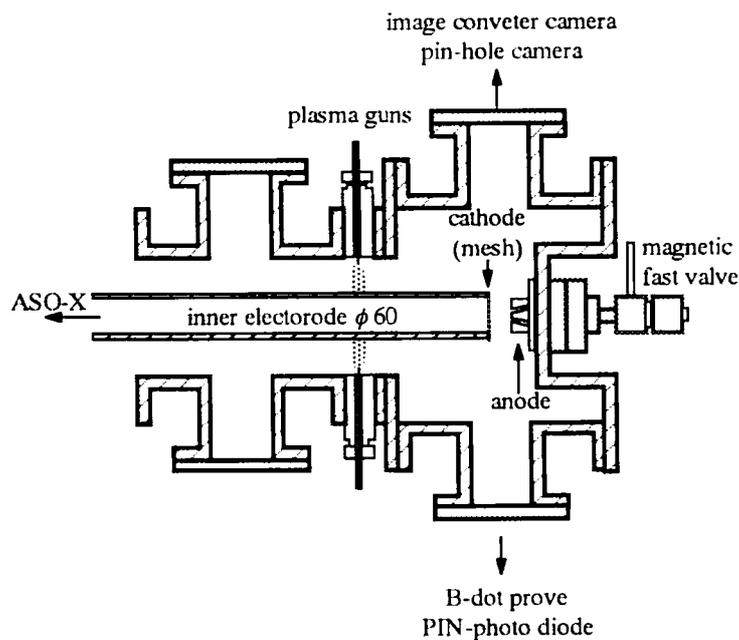


図 4.2 実験装置概略図

よるプラズマガンが2本1組として4組計8本で構成されており、それぞれの組ごとにプラズマガン駆動電源として0.7 μF のコンデンサが接続されている。これらプラズマ

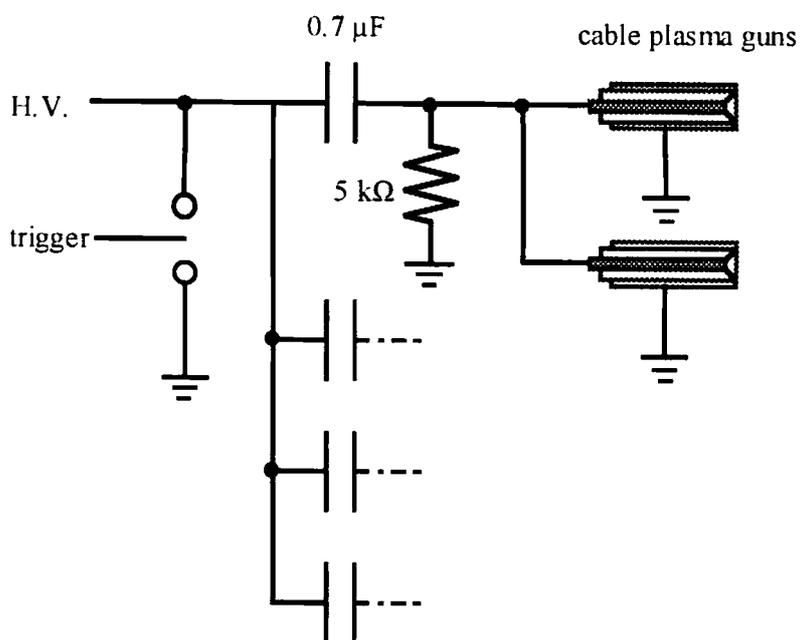


図 4.3 プラズマガンの等価回路

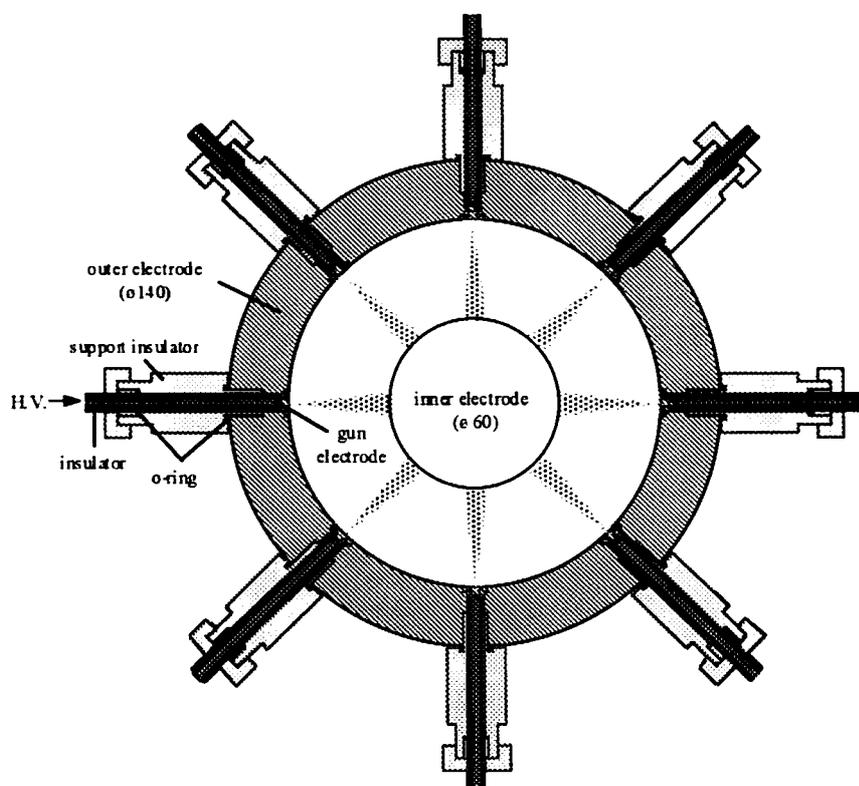


図 4.4 POS 部の断面図

ガンの等価回路と POS 部の断面図をそれぞれ図 4.3, 4.4 に示す。Z ピンチプラズマの生成部はチャンバー、電極、電磁弁等すべて 3 章の実験で使用したのと同じものを使っている。ただしカソードについてはメッシュ電極のみを使用し、取り付け部位である内部導体の形状にあわせて、直径 60 mm の銅管の上部に 2 mm 格子のステンレスワイヤーメッシュを取り付けたものを使用した。

実験時の電源電流はロゴウスキーコイル、負荷電流は B-dot プローブでそれぞれ測定し、軟 X 線は PIN フォトダイオードにより検出している。また第 3 章の実験と同様に、ピンチプラズマの挙動を観測するためにイメージコンバータカメラ (HADLAND photonics IMACON 760) を使い、フレミングモード (露光時間 10 ns, コマ間隔 50 ns) にて撮影した。ホットスポットについても、可視光を遮断するため 3 μm のアルミフィルターで覆った穴径 400 μm のピンホールカメラを使用し、医療用 X 線フィルム (Fuji super HR-A) を、増感紙を貼ったフランジ上に取り付けて撮影をおこなった。

4.3.2 実験方法

実験では、最初にトリガー信号を電磁弁駆動電源に入力し電磁弁を動作させ、プラズマ源となるアルゴンガスを電極間に入射する。同時にディレイパルサー (Stanford Research Systems DG535) により、そのトリガー信号から 2.0 ms 遅らせて ASO-X の駆動スイッチである電界歪型スパークギャップスイッチを動作させ、負荷である Z ピンチプラズマへ電流を供給する。また POS を導入する場合は図 4.5 のように、電磁弁のトリガー信号から 2 ms 後にプラズマガンを動作させ、そのときの動作電流をロゴウスキーコイルで検出してディレイパルサーに入力し、適切な POS の導通時間が得られるよう 3 μs 程度遅延させてから ASO-X を駆動させる。なお、アルゴンガスの電磁弁内の封入圧力は 0.15 MPa (1.5 気圧)、ASO-X 及び POS の各コンデンサの充電電圧はそれぞれ 30 kV, 18 kV で実験をおこなった。

4.3.3 実験結果及び検討

ASO-X により Z ピンチプラズマを生成した場合 (ASO-X モード)、及び ASO-X に POS を導入して生成した場合 (POS モード) それぞれについての典型的な電流、軟 X 線信号を図 4.6 に示す。ASO-X を動作させた (a) の場合、最大電流値が約 180 kA、立ち上がり時間が 1/4 周期で 1.4 μs 程度の電流が負荷である Z ピンチプラズマに供給され、Z ピンチプラズマに電流が流れ始めてから約 1.3 μs 後に軟 X 線が検出されている。一方 POS を動作させた (b) の場合、電源電流 I_G が流れ始めてから 800 ns 程度の導通時間の後に負荷電流 I_L が急峻に立ち上がっており、その負荷電流が流れ始めてから軟 X 線が放射されるまでの時間も約 400 ns と大きく短縮されていることがわかる。

次に、Z ピンチプラズマの時間的な挙動をイメージコンバータカメラで撮影した結果を図 4.7 に示す。(a) は ASO-X だけで駆動した場合、(b) は POS も同時に駆動した場合である。写真の下にある波形はこれらの実験で観測された軟 X 線の信号とイメージコンバータカメラの動作信号で、この波形に示されている番号と写真横に示されてい

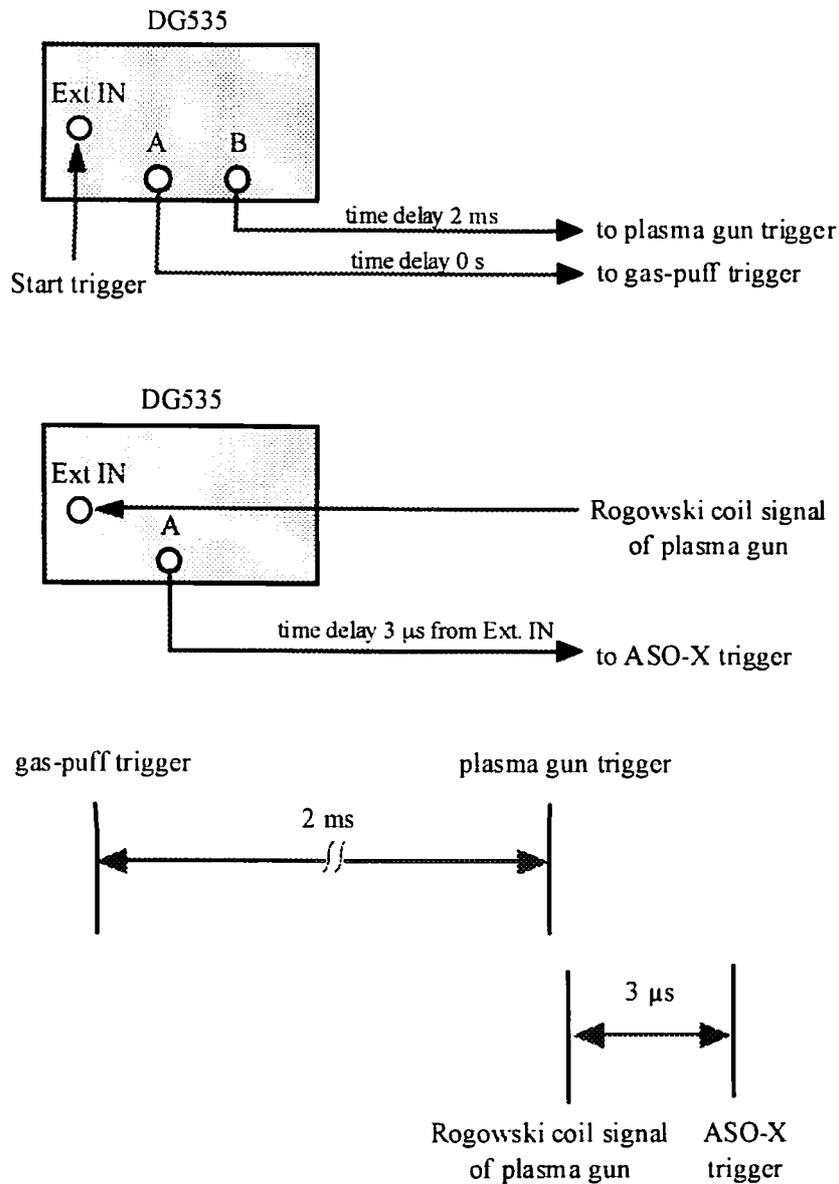


図 4.5 制御信号の流れ

る番号は一致している。ASO-Xだけで駆動した場合は写真①の様なプラズマ柱が生成された後、②の時刻においてソーセージ型不安定とキンク型不安定が発生しプラズマ柱が大きく折れ曲がっている上に、一部が分断していることがわかる。そしてこの時刻付近において軟X線が放射され、③の様にプラズマ柱が崩壊して拡散した後、電極付近が発光している様子が観測された。一方POSも同時に動作させた場合の結果を見ると、写真①のように電極間に生成されたプラズマが収縮しプラズマ柱が生成されるが、写真②においてはプラズマ柱が大きく湾曲するような目立ったキンク型不安定はみられず、アノード側にソーセージ型不安定がみられるだけで比較的安定した状態であった。その後はASO-Xだけで駆動した場合と同じように、プラズマ柱の一部が分断

されて軟X線を放射し、その後プラズマ柱が崩壊、拡散し電極からの発光が観測されている。

ASO-Xで駆動した場合は大きく折れ曲がったキंक型不安定が観測され、POSを動作させた場合はソーセージ型不安定は発生しているものの目立ったキंक型不安定は観測されなかったという結果が得られたが、その傾向を検証するため、各条件でプラズマの挙動を10放電分ずつ観測し、それらの挙動写真において、軟X線を放射した直

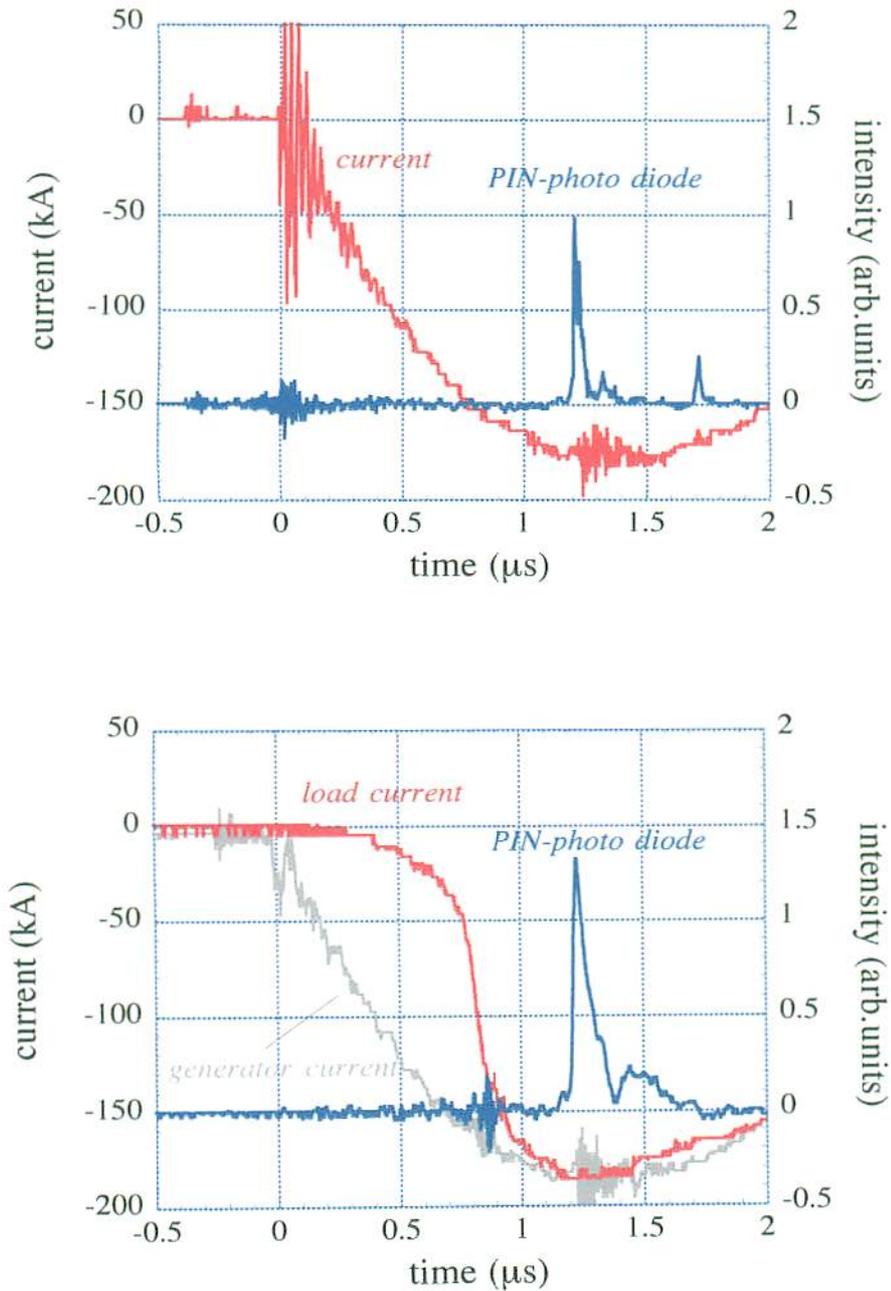
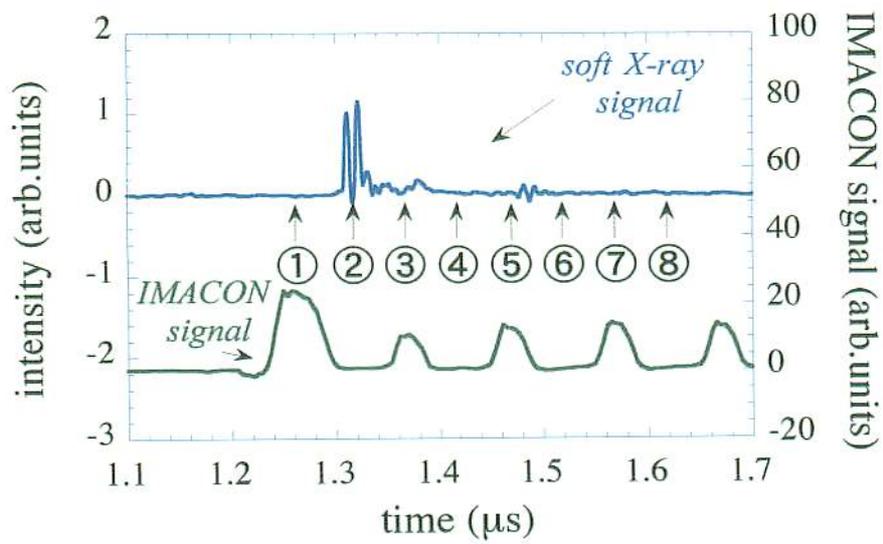
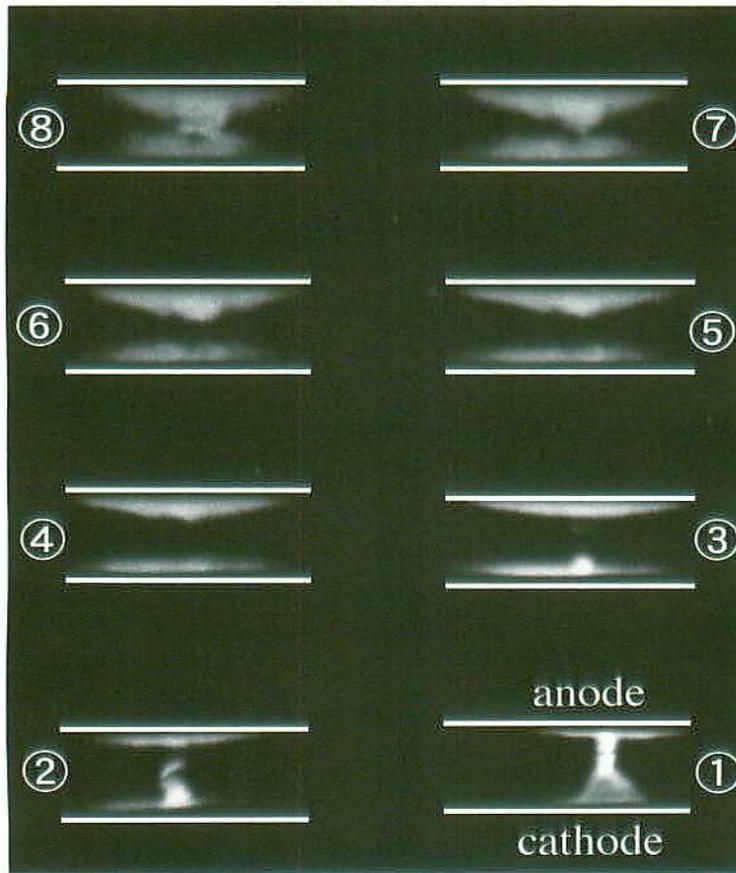
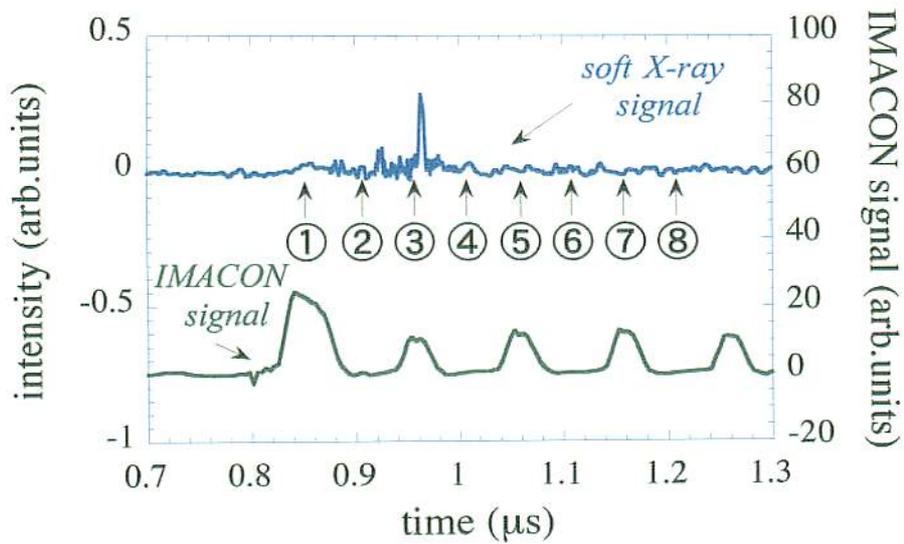
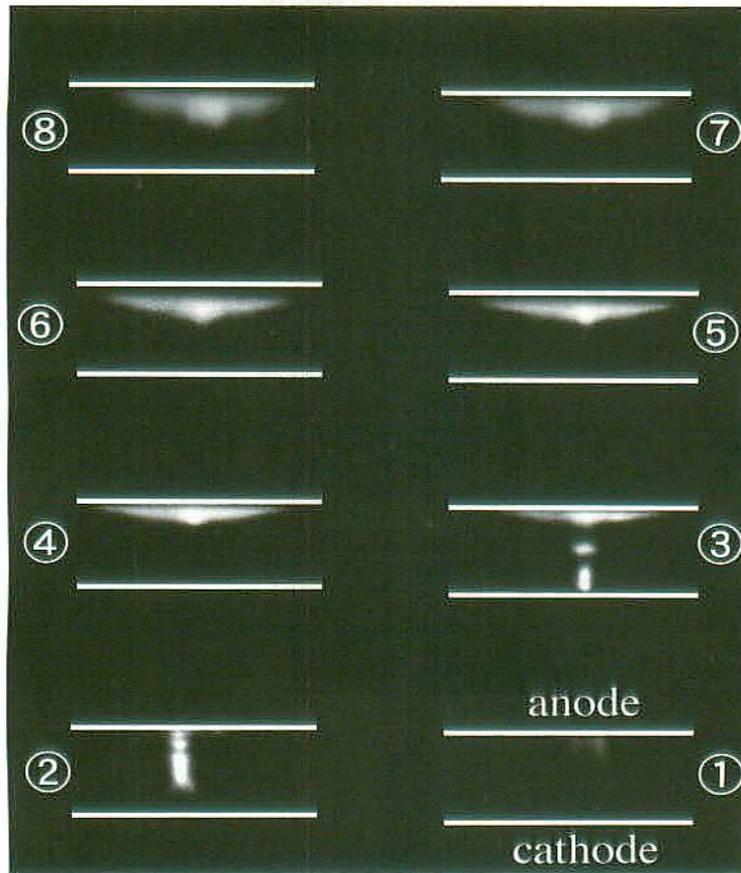


図 4.6 典型的な電流と軟X線波形



(a) ASO-Xモード

図 4.7 典型的な電流と軟 X 線波形



(b) POSモード

図4.7 プラズマの挙動と軟X線及びイメコン信号

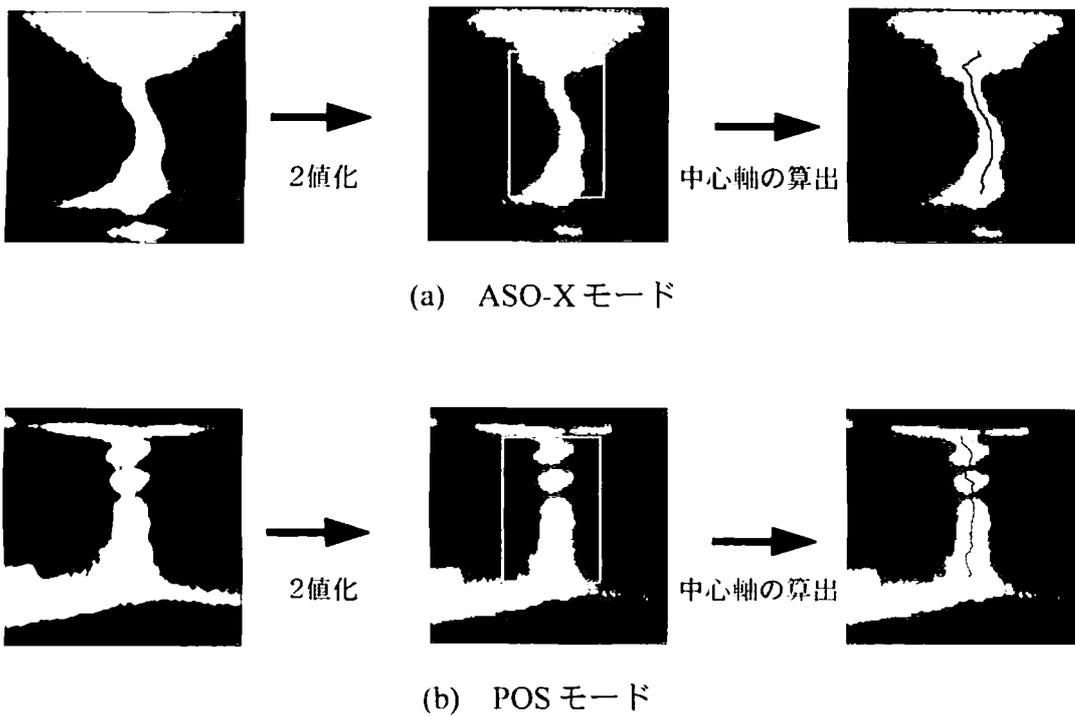
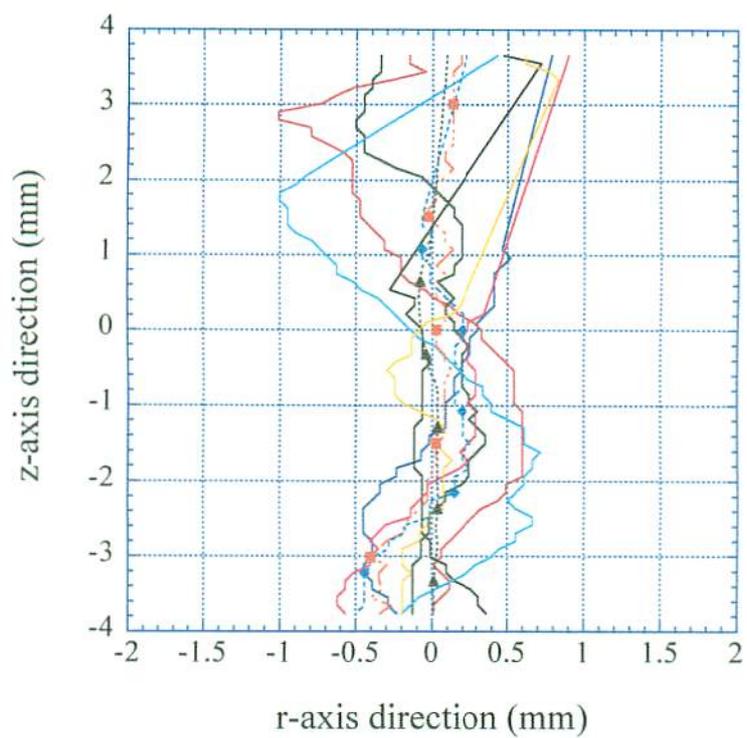


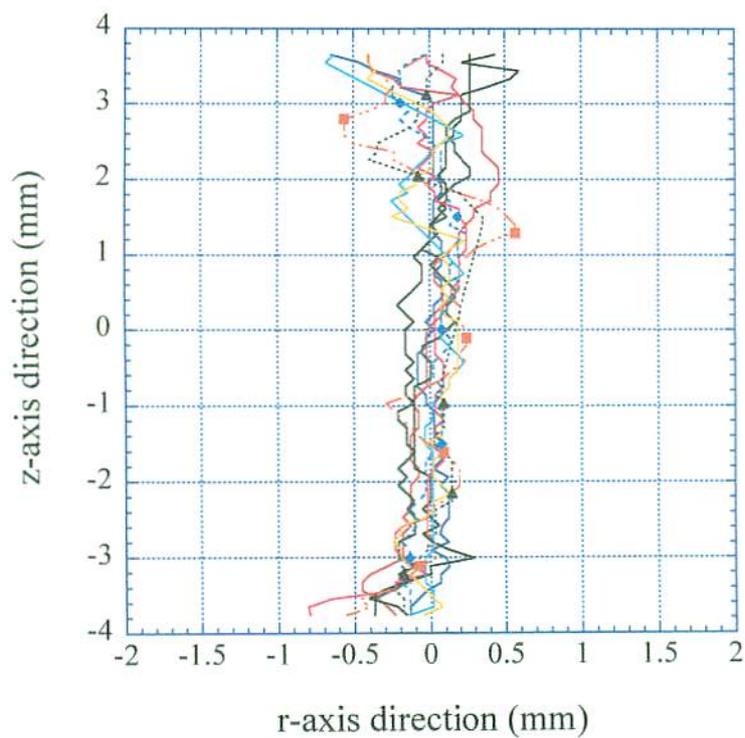
図 4.8 プラズマ柱中心軸の算出手順

後まででもっとも不安定な状態にあるプラズマ柱についての中心軸をそれぞれ算出した。具体的には図4.8に示すように、プラズマ柱の写真のスキャンした後、画像処理により濃淡の50%を閾値として2値化して、その値からプラズマ柱の中心軸を算出している。ただしこれらの写真においては電極の発光も撮影されており、かつプラズマが分断している状態の写真もあるため、そのままではプラズマ柱の中心軸を求めることが困難である。そこでアノードとカソードの中間を中心とした上下3.5 mmの高さについてのみ画像処理をおこない、プラズマ柱が分断している場合は、その両端においての中心の値から補完して求めた。これらの結果をグラフにした図4.9を見てみると、ASO-Xだけで駆動した場合においてはキック型不安定を示す低い周波数の振動が顕著で、その振幅も大きいものに対し、POSを駆動させた場合は低い周波数の振動が押さえられ、振幅も小さくなっていることから、キック型不安定が抑制されてソーセイジ型不安定の方が顕著になるという傾向が確認された。

図4.10は図4.7と同時に撮影されたZピンチプラズマ1放電分のホットスポットのピンホール写真で、(a)はASO-Xで駆動した場合、(b)はPOSも動作させた場合である。なお(c)は、3章のコンデンサバンク型の電源で生成したZピンチプラズマにおけるピンホール写真で、この場合は1放電につき1点しかホットスポットが観測されないのに対し、ASO-Xを電源とした場合はともに複数のホットスポットが観測されている。しかし(a)の場合は、その一部が電極の中心軸からははずれた場所に存在しているが、(b)では中心軸に沿って電極間全体にホットスポットが発生している。

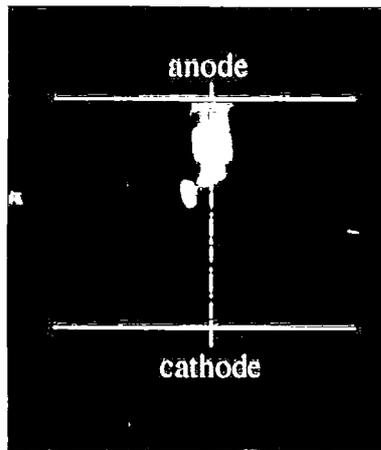


(a) ASO-Xモード

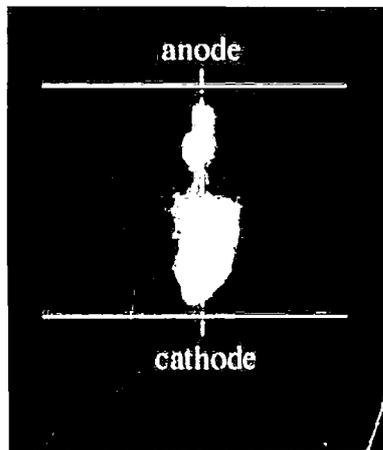


(b) POSモード

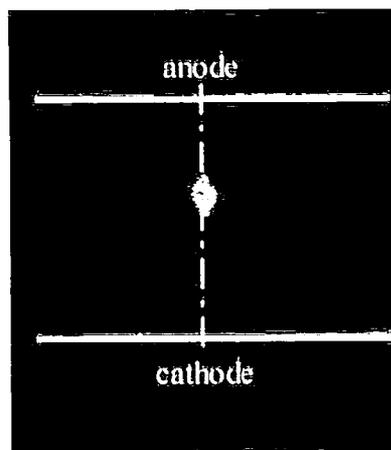
図 4.9 プラズマ柱中心軸の波形



(a) ASO-Xモード



(b) POSモード



(c) コンデンサバンク電源

図 4.10 ホットスポットのピンホール写真

ASO-Xは第3章の実験で用いられた電源と比較して装置自体のインダクタンスが小さいため、負荷に供給される電流の立ち上がりが改善されている。そのため瞬時にプラズマ柱の崩壊につながるような不安定性が押さえられた結果、ASO-Xでは複数個のホットスポットが観測されたと考えられる。ただしプラズマの挙動写真や、ホットスポットの一部が電極中心軸からずれていることからわかるように、ASO-Xを電源と

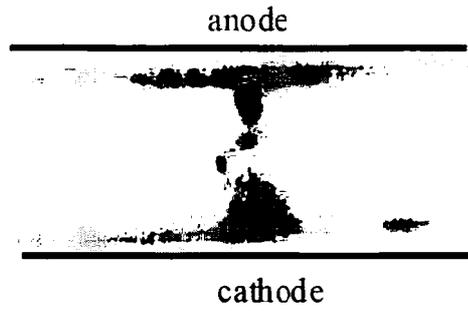


図 4.7(a) ② + 図 4.10(a)

(a) ASO-Xモード

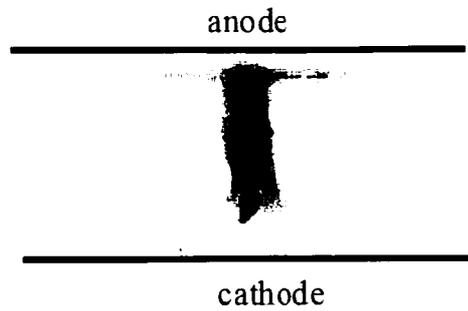


図 4.7(b) ② + 図 4.10(b)

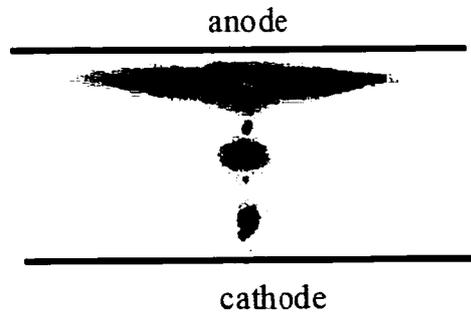


図 4.7(b) ③ + 図 4.10(b)

(b) POSモード

図 4.11 プラズマ柱とホットスポットの位置関係

した場合でもキンク型の不安定は発生している。しかしPOSも同時に動作させると、Zピンチプラズマに供給される電流の立ち上がりがさらに改善されるため、電極間全体に渡って中心軸上に複数個のホットスポットが観測され、キンク型不安定の発生も抑制されていると考えられる。電磁流体理論においては、同一波数のプラズマの不安定性に対してはキンク型不安定の方がソーセージ型不安定よりも成長率が遅いとされており、電流の立ち上がりに対しての効果が大きいとされるキンク型不安定はPOSを動作させることで抑制できたが、ソーセージ型不安定の抑制についてはさらなる研究、解析が必要である。

図4.11(a), (b)はASO-Xだけで駆動した場合と、POSを用いた場合それぞれについて、図4.7のプラズマ柱の写真と図4.10のホットスポットのピンホール写真を重ねてその位置関係を示したものである。この結果から、ホットスポットはプラズマ柱に沿って発生しているが、それぞれの場所について細かく見てみると、プラズマ柱が分断した部分で発生しているマイクロピンチモードと、プラズマがある程度のボリュームで存在している部分で発生しているコラムモードの2種類が存在している。これらについてはLebertらの論文[49]の内容と一致しており、それぞれのモードにおけるプラズマのパラメータや、放射スペクトルの支配的な波長も異なっている可能性がある。

4.4 誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置ASO-X及びプラズマオープニングスイッチを用いたガスバフZピンチプラズマの軟X線分光

4.4.1 実験装置

Zピンチプラズマ発生装置や測定装置については前節4.3の実験で使用したものと同様で、さらに軟X線分光器 (Ecopulse, Inc. とクルチャトフ研究所の共同開発によるYogansson type 07-200)を取り付けて実験をおこなった。分光器は直径500 mm, 高さ100 mm, 重さ20 kgのステンレス製半円容器に、撮影用フィルムを取り付けるためのフィルムバッグと、結晶格子として石英結晶が設置されたフランジが取り付けられている。なおこの石英結晶の格子定数は $2d=6.68 \text{ \AA}$, 分光器としての測定レンジは0.7-14 keV(18-0.9 \AA)で、分光器とZピンチプラズマ生成用チャンバの接続部分にはアルミを蒸着したマイラーフィルターを設置して、可視光によるフィルムの露光を防いでいる。図4.12にこの分光器の外観と配置図を示す。

4.4.2 実験方法

4.3.1節で説明した方法によりガスバフZピンチプラズマを生成し、軟X線分光[50][51]とホットスポットのピンホール写真の撮影をおこなった。ASO-Xの充電電圧、POSや電界歪型スパークギャップスイッチの動作タイミングなどのパラメータは4.3章と同じ値で実験をおこなったが、分光写真及びピンホール写真を撮影するためのフィルムには、より高感度のDEF-392(Eastman Kodak)を使用し、さらにピンホール写真の空間分解能を向上させるため、カメラのピンホールは直径300 μm のものに変更している。

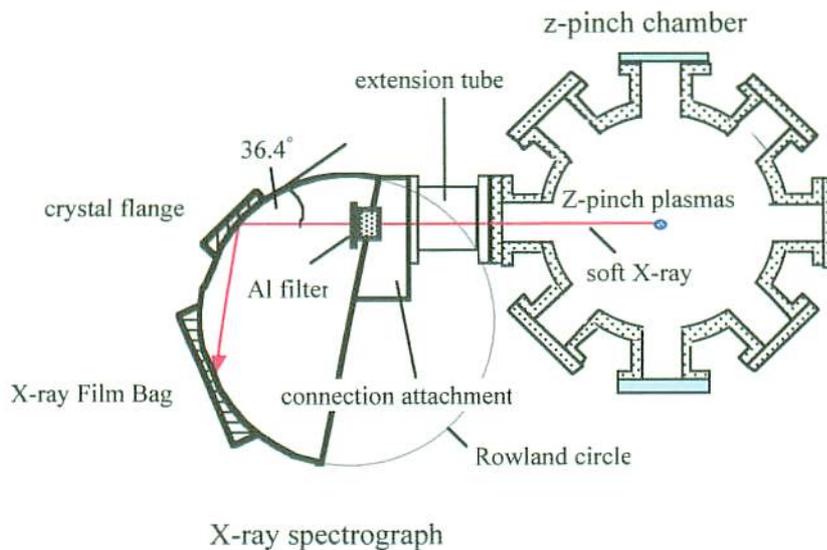
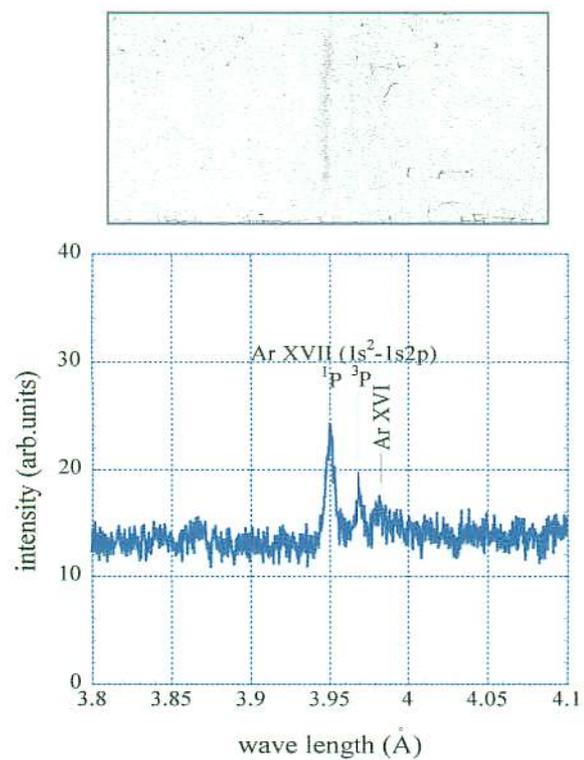


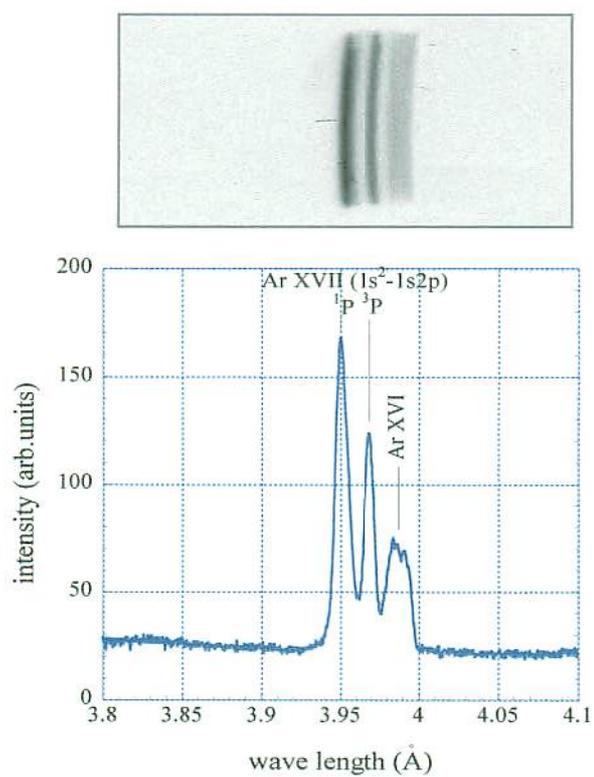
図 4.12 分光器の外観と配置図

4.4.3 実験結果及び検討

図4.13(a)にASO-Xのみで駆動させた場合、及び図4.13(b)にASO-XにPOSを導入して駆動した場合の軟X線分光写真と、波長に沿ったその写真の露光強度プロファイルを示す。なおこれらの分光写真は、Zピンチ10放電分を重畳して露光させたものである。この結果を見ると、どちらの場合とも3本の線スペクトルが観測されており、左側の線スペクトルから順に露光強度が弱くなっていて、右側の線スペクトルは他の線スペクトルに較べて線幅が太い。これらをアルゴンのK殻放射の線スペクトルと照らし合わせてみると、一番左から Ar XVII の共鳴 (reonance) 線 ($3.948 \text{ \AA } 1s^2S_0-1s2p \ ^1P_1$), Ar XVII の異重項間遷移 (intercombination) 線 ($3.966 \text{ \AA } 1s^2S_0-1s2p \ ^3P_1$) 及び Ar XVI の電子性衛星 (dielectric satellite) 線群に相当していて、これは他の論文におけるアルゴンの



(a) ASO-Xモード



(b) POSモード

図 4.13 分光写真と強度プロファイル

軟X線分光の結果と一致している [52][53][54]. しかし露光強度については, POSを導入した場合の方がASO-Xだけで動作させた場合と比較して強く, 大きな差を生じている. 図4.14は電流がZピンチプラズマに流れ始めてからPINフォトダイオードのピーク信号が観測されるまでの時間 T_p とそのときの強度の関係を, また図4.15はPINフォ

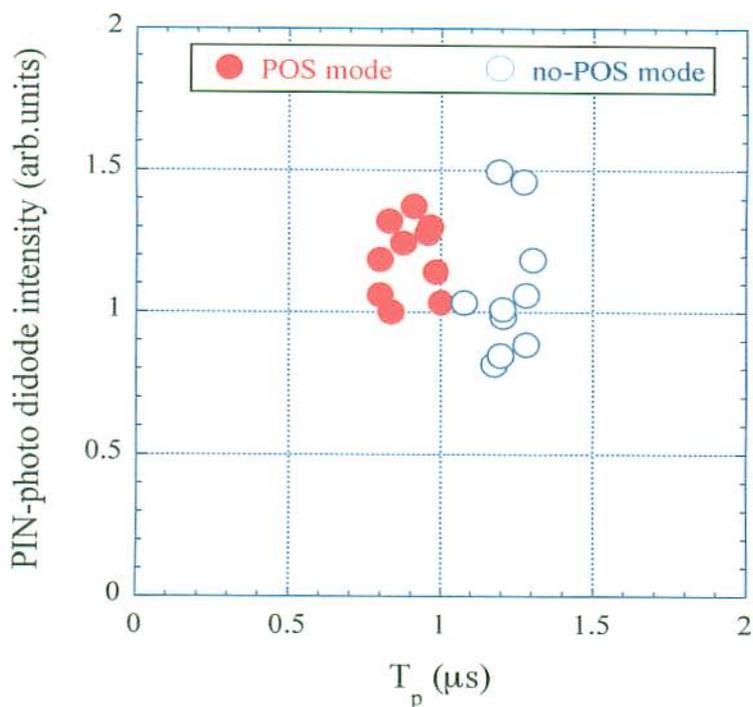


図4.14 PIN フォトダイオード出力と T_p の関係

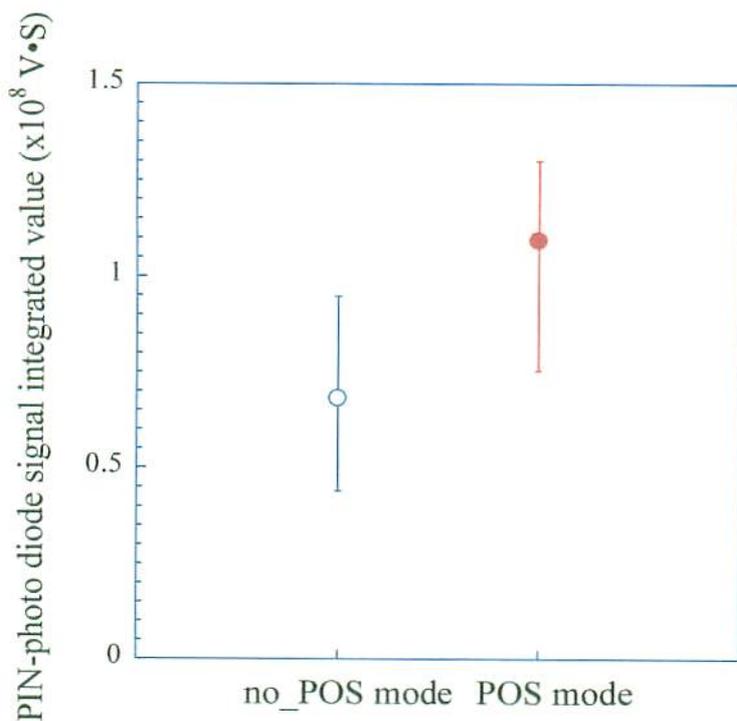


図4.15 PIN フォトダイオード出力波形積分値

トダイオード信号を時間積分した値の平均値を示したものである。図4.14を見ると、POSを導入した場合は軟X線が放射されるまでの時間が短縮され、強度も若干増加の傾向がある。さらに図4.15から、PINフォトダイオードの信号を時間積分した値の平均値は、POSを導入した場合の方がASO-Xだけで駆動させた場合と較べて約2倍程度高くなっているが、これはPINフォトダイオード信号のパルス幅がASO-Xだけの場合に較べて増加しているためである。これらPINフォトダイオードの信号はアルミフィルターを透過する約1 keV以上のエネルギーをもったX線[55]すべてについての重畳的な値であるため、アルゴンのK殻放射[56]における分光写真の露光強度とは多少の差異があると思われるが、POSを導入した場合は不安定性の発生と成長が抑制され、その結果として軟X線の強度と放射時間も増加していることが確認された。フィルムにおける露光量は光強度とその時間幅の積分値で決まることから、図4.13の分光写真での露光強度の差も、軟X線強度とその放射時間に起因したものであると考えられる。

図4.16に分光実験と同時に撮影されたホットスポットのピンホール写真を示す。4.3節でも説明したが、(a)のASO-Xだけで駆動させた場合よりも(b)のPOSを導入した場合の方がホットスポットの径方向への分散が少なくなっている。そこでPOSによる径方向への分散の改善量を求めるため、図4.16のそれぞれのピンホール写真を径方向に走査して露光強度のプロファイルを求め、正規化して重ねたものを図4.17に示す。このグラフから分散の度合いを示すため式(4.1)

$$kurtosis = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 \quad (4.1)$$

で定義される尖度(kurtosis)を求めると、(a)のASO-Xだけで駆動した時は12.898に対し、(b)のPOS導入時は19.476となり、尖度の値からは約51%の空間的安定性の改善が確認された。

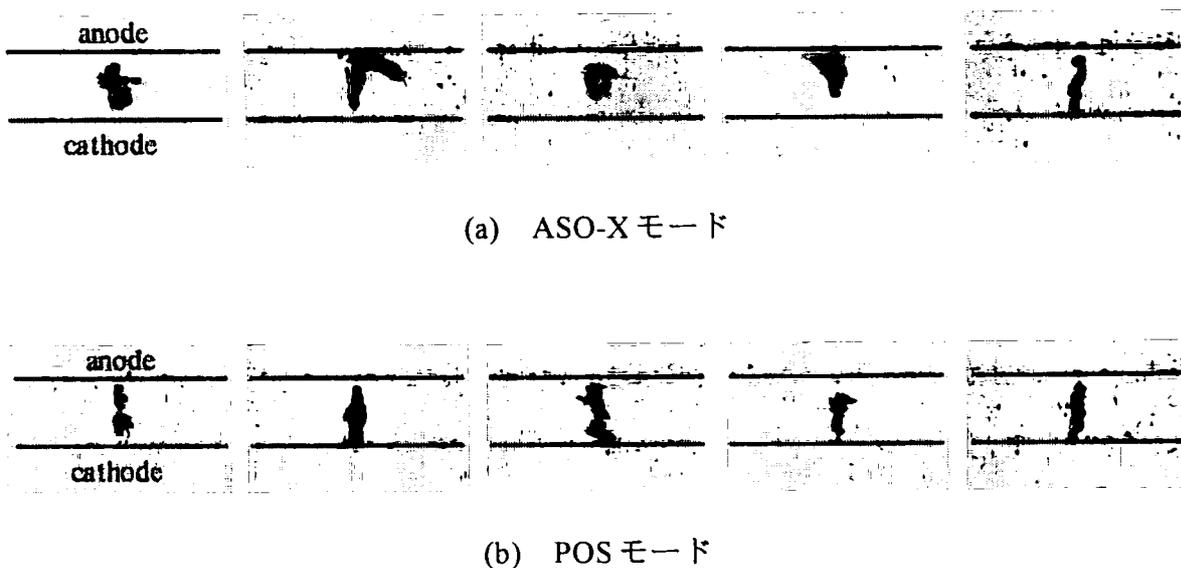
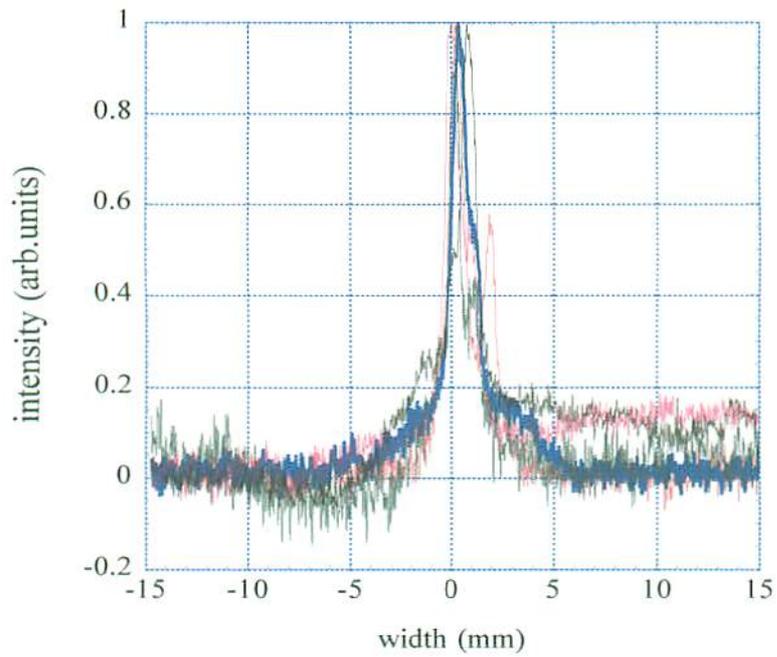
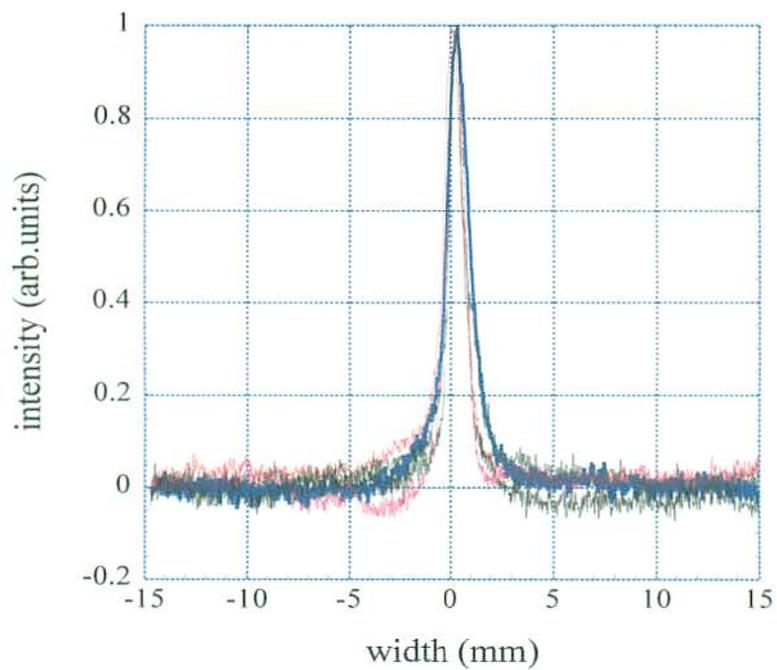


図4.16 ホットスポットのピンホール写真



(a) ASO-Xモード



(b) POSモード

図4.17 ホットスポットのピンホール写真の強度プロファイル

4.5 まとめ

不安定性の抑制を目指し、これまでに使用してきた電源よりも更に立ち上がりの速い電流を負荷に供給することのできる誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置ASO-X及びプラズマオープニングスイッチ (POS) を用いたガスバフZピンチプラズマにおいて、プラズマの挙動観測と軟X線分光をおこなった。

ASO-Xを電源とした場合、最大電流値が約180 kA、立ち上がり時間が1/4周期で約1.4 μ sの電流がZピンチプラズマに供給され、プラズマに電流が流れ始めてから約1.3 μ s後に軟X線が検出された。一方POSも同時に動作させた場合は、800 ns程度の導通時間の後に急峻な負荷電流がZピンチプラズマに供給され、軟X線が放射されるまでの時間も、負荷電流が流れ始めてから約400 nsと大きく短縮された。

Zピンチプラズマの時間的な挙動をイメージコンバータカメラで撮影したところ、ASO-Xだけで駆動した場合はプラズマ柱にソーセージ型不安定とキック型不安定が発生して、大きく折れ曲がっている様子が観測された。一方POSも同時に動作させた場合は、プラズマ柱の上部にソーセージ型不安定が見られるものの、プラズマ柱自身が大きく湾曲するような目立ったキック型不安定は観測されず、比較的安定した状態であった。さらに複数の観測写真におけるプラズマ柱の中心軸を算出することで、それぞれの場合における上述のような不安定性の発生傾向を確認した。

プラズマの挙動写真と同時に撮影されたホットスポットのピンホール写真については、両条件ともに複数個のホットスポットが観測された。しかしASO-Xだけで駆動した場合は、一部のホットスポットが電極の中心軸から大きくずれた位置で観測されたのに対し、POSを導入した場合は中心軸に沿って電極間全体にホットスポットが発生していた。これらの結果から、ASO-Xは第3章の実験で用いられた電源と比較して電流の立ち上がりが改善されているため、瞬時にプラズマ柱の崩壊につながるような不安定性が押さえられて複数個のホットスポットが観測されたが、プラズマ柱でのキック型不安定を抑制できるほど十分では無かったと推察される。しかしPOSを導入することで、さらに立ち上がりの速い電流をZピンチプラズマに供給することができるため、キック型不安定を抑制することが可能となった。なおプラズマ柱の写真とホットスポットのピンホール写真を重畳したところ、ホットスポットの発生部位は、マイクロピンチモードと呼ばれるプラズマ柱が分断した場所と、コラムモードと呼ばれるプラズマがある程度のボリュームで存在している場所の2種類が存在していることがわかった。

軟X線分光については、アルゴンのK殻放射のスペクトルであるAr XVIIの共鳴線、異重項間遷移線及びAr XVIの電子性衛星線群に相当する3本の線スペクトルが観測された。しかしASO-Xだけで動作させた場合よりも、POSを導入した場合の方が露光強度は強く、大きな差が生じていた。PINフォトダイオードにより観測した軟X線信号において強度及びパルス幅が増加していることから、POSを導入することで不安定性の発生と成長が抑制され、その結果として軟X線の強度と放射時間も増加し、それが分光写真での露光強度の差として現れたものと思われる。

またPOSによるホットスポットの径方向への分散の改善量を調べるため、ピンホール写真から露光強度のプロファイルを求めてその尖度を算出したところ、ASO-Xだけで駆動した場合の12.898に対してPOS導入時は19.476と、尖度の値からは約51%の空間的安定性の改善が確認された。

第5章 総括

Zピンチプラズマは核融合からその研究の歴史が始まったが、高強度の軟X線を放射できるという点から軟X線源としての可能性も見いだされ研究が進められてきた。しかし現在まで実用レベルに達していない要因の1つに、軟X線源として満足のいくところまでプラズマの不安定性を抑制できていないことがあげられる。そこでプラズマ不安定性の抑制を目指して、誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー電源を用いたガスパフZピンチプラズマについて、プラズマの挙動やホットスポットの空間的再現性について観測し、その有用性を検討した。またその実験結果をふまえて、電極間の入射ガスの密度分布と、コンパクトなコンデンサバンク型電源を用いたガスパフZピンチプラズマにおける不安定性の発生機構を明らかにした。さらに誘導電圧重畳方式パルスパワー電源及びPOSを用いたZピンチプラズマでの挙動観測や分光実験をおこない、その結果について検証した。

以下にその結論を記す。

誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー発生装置ASO-IIにより駆動したガスパフZピンチプラズマ

誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー発生装置であるASO-IIにおいて、ワイヤーヒューズオープニングスイッチを設置した場合と、ヒューズを設置せずにファーストバンク方式の電源として駆動させた場合のガスパフZピンチプラズマについて実験をおこない、メッシュとソリッド2種類の電極をカソードとして用いた時のプラズマの挙動とホットスポットの空間的再現性について観測した。ソリッド電極の場合は電極間で生成されるプラズマに偏りができ均一な収縮ができないため、結果的に軟X線が出力される遅延時間の幅が狭く、ホットスポットの分散も大きかったのに対しメッシュ電極の場合は、アノード側から入射したガスがカソード側に拡がってプラズマ化し、そのプラズマが電極間全体にわたって収縮することでプラズマ柱を形成しており、かつホットスポットの径方向の分散が改善されていた。このことから、カソードの形状がプラズマの挙動やホットスポットの空間的再現性に影響を及ぼしていることがわかった。またワイヤーヒューズを設置しASO-IIを誘導性の電源として駆動すると、パルス圧縮された高電圧の誘導電圧が電極間に印加され、かつ立ち上がりを改善された電流がZピンチプラズマに供給されるため、ファーストバンク方式の電源として駆動させた時よりもプラズマの不安定性を低減でき、ホットスポットの空間的再現性も向上できることが確認された。

高感度マルチチャンネルシートマイケルソン干渉計による入射ガスの密度分布計測

ASO-IIでの実験結果から電極間に入射されるガスの空間分布もプラズマの不安定性

に大きく関与していることが示唆された。そこで、ソリッド電極とメッシュ電極の2種類のカソードを用いた場合についての入射ガスの密度分布を、マルチチャンネルシートマイケルソン型干渉計により測定した。実験結果から、電磁弁のコイルに電流が流れ始めてから電極間にガスが入射されるまでに1.2 ms程度の時間を要し、入射されたガスはおよそ2.4 msまで密度が増加した後減少していくことがわかった。またそれぞれの電極を用いた場合の入射ガスの線密度分布については、両電極共にアノード側にある噴出口の傾斜のため一端中心軸方向に向かってガスが流れ、その後径方向外側に拡散していた。しかしソリッド電極の場合は、入射ガスの電極表面上での反射による澱みのため、カソード表面付近での線密度が高い値であったのに対し、メッシュ電極の場合は電極間全体の密度勾配が小さく、ソリッド電極と比較して入射ガス密度の均一性において優れていることが確認された。また、線密度分布の時間推移を見ると、ソリッド電極の場合はカソード表面付近にあるガス密度の高い部位が径方向外側へと拡大していき、それに併せて線密度の変動も大きかった。一方メッシュ電極の場合は噴出口付近においての変動が大きかったが、その度合いはソリッド電極に比べて小さく、線密度の時間的変化においても優れていることがわかった。これらの結果から、ソリッド電極の場合と比較して入射ガスの密度勾配、時間的変動共に小さいメッシュ電極を用いることで、ホットスポットの空間的再現性が改善されたと考えられる。

YAGレーザーの2倍高調波を光源とした2次元マッハツェンダー型干渉計によるプラズマの挙動観測

ガスを電極間に入射後、パルスパワーにより生成されたZピンチプラズマがどのような振る舞いをして不安定な状態に移行していくのかを調べるため、コンパクトなコンデンサバンク電源を用いたガスパフZピンチプラズマにおいて、2次元マッハツェンダー型干渉計によるプラズマの挙動観測をおこなった。実験から、放電により生成されたプラズマは衝撃波面と電流層に挟まれた3層構造となって収縮が進むが、ある時刻においてその衝撃波面は膨張に転じ、その後プラズマ内部より不安定性が発生している様子が観測された。これは観測した写真より求めた衝撃波面及び電流層の径の時間変化のグラフにおいて、衝撃波面の径が一度最小値となった後再度増加して、収縮を続けてきた電流層の径と交差する時刻にほぼ一致していることから、本実験におけるガスパフZピンチプラズマの不安定性は、収縮してきた衝撃波面がプラズマ柱の中心で反動し、2次的な衝撃波面が外側に伝搬して電流層との間で相互作用をおこすことで発生していると考えられる。

誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置ASO-X及びプラズマオープニングスイッチ(POS)を用いたガスパフZピンチプラズマの挙動観測

誘導電圧重畳方式パルスパワー電源ASO-Xと、さらにPOSを導入した場合のガスパフZピンチプラズマについて、その挙動観測とホットスポットのピンホール写真の撮影をおこなった。ASO-Xを単独で駆動させた場合は、1/4周期で1.33 μ s、最大400 kA

の電流を負荷に供給することが可能だが、さらに POS を導入することで、電流の立ち上がり時間を大きく改善することができる。この ASO-X を電源としたガスバフ Z ピンチプラズマについて、プラズマ柱の挙動を観測したところ、ASO-X だけではプラズマ柱が大きく折れ曲がったキंक型不安定が観測されたが、POS を導入した場合は、目立ったキंक型不安定は観測されずソーセージ型不安定のみが発生している比較的安定した状態が観測された。さらに複数の観測写真におけるプラズマ柱の中心軸を算出することで、それぞれの場合における上記のような不安定性の発生傾向を確認した。またプラズマの挙動写真と同時に撮影されたホットスポットのピンホール写真においては、ASO-X だけで駆動した場合は一部のホットスポットが電極の中心軸から大きくずれた位置で観測されたのに対し、POS を導入した場合は中心軸に沿って電極間全体にホットスポットが発生していた。

これらの結果から、ASO-X を電源として用い、さらに POS を導入することで、立ち上がりを改善した電流を Z ピンチプラズマに供給することができるため、キंक型の不安定性を抑制することが可能であり、その結果、ホットスポットの空間的安定性も向上できることが確認された。なおプラズマ柱の写真とホットスポットのピンホール写真を重畳して検証したところ、ホットスポットはマイクロピンチモードとコラムモードの 2 種類の部位から発生していることがわかった。

誘導電圧重畳方式パルスパワー発生装置 ASO-X 及びプラズマオープニングスイッチを用いたガスバフ Z ピンチプラズマの軟 X 線分光

ASO-X 及び POS を導入した場合のガスバフ Z ピンチプラズマにおいて軟 X 線分光をおこなった。ASO-X のみ、また POS を導入した場合ともに Ar XVII の共鳴線、異重項間遷移線及び Ar XVI の電子性衛星線群に相当する 3 本の線スペクトルが観測されたが、露光強度については POS を導入した場合の方が強く、大きな差があった。PIN フォトダイオードの信号からも、軟 X 線の出力及びパルス幅が ASO-X だけの場合に較べて増加していることから、POS を導入した場合は不安定性の発生と成長が抑制され、その結果軟 X 線の強度と放射時間も増加したと考えられる。また、POS による径方向への分散の改善量を求めるため、複数枚のホットスポットのピンホール写真から露光強度プロファイルを求め、その平均尖度を算出したところ、ASO-X だけで駆動した時の値は 12.898 であるのに対し POS 導入時は 19.476 となり、尖度の値からは約 51% の空間的安定性の改善が確認された。

以上を総括すると、誘導性エネルギー蓄積方式パルスパワー電源 ASO-II で駆動したガスバフ Z ピンチプラズマにおいて、ワイヤーヒューズオープニングスイッチを用いることでプラズマの不安定性を低減でき、またカソードにメッシュ電極を用いることでホットスポットの空間的再現性も向上できることがわかった。その結果を踏まえ、電極間の入射ガス密度分布を測定し、カソード形状の相違によるホットスポットの空間的再現性との関連性を確認した。また、コンパクトなコンデンサバンク電源による

ガスバフZピンチプラズマについて不安定性の発生機構を観測し、本実験でのZピンチプラズマは衝撃波面と電流層の相互作用により不安定性が発生しているとの結論に至った。そして、誘導電圧重畳方式パルスパワー電源ASO-X及びPOSを電源として用いることでプラズマ柱のキンク型不安定を抑制し、さらにホットスポットの空間的安全性も改善されることを確認した。

これらの結果をもとに、今後軟X線源としてのガスバフZピンチプラズマの発展が期待される。

参考文献

- [1] 秋山 秀典, 原 雅則, “高電圧パルスパワー工学”, 森北出版社, 1992
- [2] S. Katsuki, H. Akiyama, T. Sueda, Y. Koga, and K. N. Sato, “Performance of a 1.5 m augmented railgun using a permanent magnet”, *Rev. Sci. Instrum.*, 68(4), pp. 1908-1909, 1997
- [3] 川村啓介, 塚本俊介, 竹下智洋, 勝木淳, 秋山秀典, “誘導型パルスパワー電源を用いた NOx 除去”, *電気学会論文誌*, 117-A(9), pp.956-961,1997
- [4] F.Hegeler, H.Akiyama, “Ozone Generation by Positive and Negative Wire-to-Plate Streamer Discharges”, *Jan. J. Appl. Phys.*, 36(8), pp.5335-5339, 1997
- [5] K. H. Schoenbach, F. E. Peterkin, S. Beebe, D. Byars, R. Alden, P. Adolphson and T. Turner, “Effect of pulsed electric fields on micro-organisms: experiments and applications”, *Digest of Technical Papers of 10th IEEE International Pulsed Power Conference*, pp. 25-33, 1995
- [6] I. V. Lisitsyn, T. Muraki and H. Akiyama, “Wire induced flashover as a source of a shock wave for destruction”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 36(3A), pp. 1258-1263, 1997
- [7] T. Sueda, S. Katsuki and H. Akiyama, “Early phenomena of capillary discharges for an electrothermal gun”, *Appl. Phys. Letters*, 68(13), pp. 1766-1768, 1996
- [8] K. Imasaka, S. Hara, Y. Kawauchi, K. Kawazoe, J. Suehiro and M. Hara, “Soft x-ray emission from the gas-puff z-pinch plasma produced by an inductive pulsed power generator”, *Proceedings of 11th IEEE International Pulsed Power Conference*, pp. 845-850, 1997
- [9] J. Du, T. Ohata, K. Shimoda and K. Hirano, “Characterization of soft x-rays generated in gas-puffed z-pinch”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 64(11), pp. 4185-4190, 1995
- [10] H. Kitaoka, A. Sakurai, T. Yamamoto, K. Shimoda and K. Hirano, “Enhanced soft x-ray emission in a dense plasma focus with additional high z gas puff”, *Jour. Phys. Soc. Jpn.*, 64(11), pp. 4191-4195, 1995
- [11] K. Murayama, S. Katsuki and H. Akiyama, “Gas-puff z-pinch plasmas driven by inductive energy storage pulsed power generator”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37(5A), pp.2676- 2680, 1998
- [12] 平野 克己, “Z ピンチ・プラズマフォーカス研究の現状と展望”, *日本物理学会誌*, 49(4), pp.273-280, 1994
- [13] 宮本 徹, “Z ピンチと自己磁場閉じ込め核融合”, *プラズマ・核融合学会誌*, 74(8), pp. 855-876, 1998
- [14] J. Bailey, Y. Ettinger, F. Fisher and R. Feder, “Evaluation of the gas puff z pinch as an x-ray lithography and microscopy source”, *Appl. Phys. Lett.*, 40(1), pp. 33-35, 1982
- [15] J. Kirz and H. Rarback, “Soft x-ray microscopes”, *Rev. Sci. Instrum.*, pp. 1-13, 1985,
- [16] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner and D. Munchmeyer, “Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plasticmoulding (LIGA process)”, *Microelectronic Engineering*, 4, pp.35-56, (1986)

- [17] 外林 秀人, “LIGA プロセス”, 静電気学会誌, 17(5), pp. 309-316, 1993
- [18] 光応用先端リソグラフィ技術調査専門委員会, 電気学会技術報告第 770 号 先端リソグラフィ技術の開発動向, 電気学会, 2000
- [19] 那野 比古, “マイクロマシン驚異の極微技術”, 講談社現代文庫, 1993
- [20] 藤田 博之, “マイクロマシンの世界”, 工業調査会, 1992
- [21] J. Bryzek, K. Petersen and W. McCulley, “Micromachines on the march”, IEEE SPECTRUM MAY, pp. 2031, 1994
- [22] A. B. Frazier and M. G. Allen, “Metallic Microstructures fabricated using photosensitive polyimide electron molds”, Jour. Microelectromech. Sys. 2(2), pp. 87-94, 1993
- [23] 江刺 正喜, “微細加工とマイクロマシン”, 電気学会論文誌, 114(7/8), pp. 499-506, 1994
- [24] J. S. Pearlman and J. C. Riordan, “X-ray lithography using a pulsed plasmas source”, J. Vac. Sci. Technol., 19(4), pp. 1190-1193, 1981
- [25] I. Okada, Y. Saitoh, S. Itabashi and H. Yoshihara, “A plasma x-ray source for x-ray lithography”, J. Vac. Sci. Technol., B4(1), pp. 243-247, 1986
- [26] I. N. Weinberg and A. Fisher, “Elemental imaging of biological specimens using a z pinch”, Appl. Phys. Lett. 47(10), pp. 1116-1118, 1985
- [27] F. J. Wessel, B. Etlicher and P. Choi “Implosion of an aluminum plasma jet onto a coaxial wire: A z pinch with enhanced stability and energy transfer”, Phys. Rev. Lett., 69(22), pp.31810-3184, 1992
- [28] 山本 学, 村山 精一, “プラズマの分光計測”, 学会出版センター, 1995
- [29] 内田 岱二郎訳, “プラズマ物理入門”, 丸善株式会社, 1977
- [30] 電気学会, “プラズマ工学”, オーム社, 1997
- [31] 横山 昌弘, “プラズマ理工学”, 日刊工業新聞社, 1988
- [32] 岡崎 信次, “G ビット時代へのリソグラフィ技術”, リアライズ社, 1996
- [33] K. Imasaka, K. Kawazoe, K. Kawauchi, S. Hara, J. Suehiro and M. Hara, “Reduction of the source size of gas-puff z-pinch plasmas using an inductive pulsed power system”, Rev. Sci. Instrum., 71(12), pp. 4438-4444, 2000
- [34] I. V. Lisitsyn, S. Kohno, S. Katsuki and H. Akiyama, “Effect of laser beam deflection on the accuracy of interferometer measurement”, Rev. Sci. Instrum., 69(4), pp. 1584-1586, 1998
- [35] K. Murayama, T. Nishi, S. Katsuki, I. V. Lisitsyn and H. Akiyama, “Temporal observation of gas-puff z-pinch plasmas by using laser interferometer”, 電気学会研究会プラズマ研究会資料, EP-98-73-95, pp. 39-42
- [36] S. Katsuki, K. Murayama and H. Akiyama, “Optical observation of the instability in microsecond gas-puff z-pinch plasmas”, Jpn. J. Appl. Phys., 40(2B), pp. 999-1003, 2001
- [37] K. Murayama, T. Nishi, S. Katsuki and H. Akiyama, “Temporal observation of gas-puff z-pinch plasmas by using laser interferometer”, Research Report NIFS-PROC Series, Vol. 45, pp. 52-57, 1999

- [38] 大澤 敏彦, 小保方 富雄, “レーザ計測”, 裳華房, 1994
- [39] 平井 紀光, “実用レーザ技術”, 共立出版株式会社, 1987
- [40] 堤井 信力, “プラズマ基礎工学”, 内田老鶴圃, 1986
- [41] P. Choi, A. E. Dangor, C. Deeney and C. D. Challis, “Temporal development of hard and soft x-ray emission from a gas-puff z pinch”, *Rev. Sci. Instrum.*, 57(8), pp. 2162-2164, 1986
- [42] H. P. Stormberg, S. Murayama and Y. Watanabe, “Angular distribution of x-ray radiation from optically thick z-pinch plasmas”, *J. Appl. Phys.*, 62(10), pp.4090-4095, 1987
- [43] K. Takasugi, H. Akiyama, N. Shimomura, M. Sato and T. Tajima, “X-ray generation from a gas-puff z-pinch driven by a pulsed power generator with a self-crowbar switch”, *Rev. Sci. Instrum.* 64(8), pp. 2403-2404, 1993
- [44] S. J. Stephanakis, J. P. Apruzese, P. G. Burkhalter, J. Davis, R. A. Meger, S. W. McDonald, G. Mehlman, P. F. Ottinger and F. C. Young, “Effect of pulse sharpening on imploding neon z-pinch plasmas”, *Appl. Phys. Lett.*, 48(13), pp. 829-831, 1986
- [45] C. Deeney, P. D. LePell, I. Roth, T. Nash, L. Warren, R. R. Prasad, C. McDonald, F. K. Childers, P. Sincerny, M. C. Coulter and K. G. Whitney, “Neon gas puff implosions on a high-current microsecond generator with and without a plasma opening switch”, *J. Appl. Phys.*, 72(4), pp. 1297-3005, 1992
- [46] S. Kohno, Y. Teramoto, I. V. Lisitsyn, S. Katsuki and H. Akiyama, “High-current pulsed power generator ASO-X using inductive voltage adder and inductive energy storage system”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39, part 1, no. 5A, pp.2829-2833, 2000
- [47] K. Murayama, Y. Teramoto, S. Katsuki and H. Akiyama, “X-ray spectrum and spatial stability of hot spots in gas-puff z-pinch plasmas driven by inductive energy storage pulsed power generator with a plasma opening switch”, *Proceedings of 13th IEEE International Pulsed Power Conference*(in print), 2001
- [48] K. Murayama, T. Nishi, Y. Teramoto, S. Kohno, S. Katsuki, I. V. Lisitsyn and H. Akiyama, “Gas-puff z-pinch plasmas driven by inductive voltage adder - inductive energy storage pulsed power generator ASO-X”, *Proceedings of 12th IEEE International Pulsed Power Conference*, pp. 1082-1085, 1999
- [49] R. Lebert, A. Engel and W. Neff, “Investigations on the transition between column and micropinch mode of plasma focus operation”, *J. Appl. Phys.* 78(11), pp. 6414-6420, 1995
- [50] R. Arad, R. E. H. Clark, G. Dadusc, G. Davara, R. E. Duvall, A. Fisher, V. Fisher, M. E. Foord, A. Fruchman, L. Gregorin, Ya. Krasik, C. Litwin, Y. Maron, L. Perelmutter, M. Sarfaty, E. Sarid, S. Shkolonikova, R. Shpitalnik, L. Troyansky and A. Weingarten, “Visible-light spectroscopy of pulsed-power plasmas”, *Rev. Sci. Instrum.*, 63(10), pp. 5127-5131, 1992
- [51] H. Arita, K. Suzuki, Y. Kurosawa and K. Harasawa, “Soft x-ray emissions by high-current vacuum discharges”, *Trans. on Plasma Sci.*, 18(4), pp.695-698, 1990
- [52] G. Mehlman, P.G. Burkhalter, S. J. Stephanakis, F. C. Young and D. J. Nagel, “Quantitative x-ray spectroscopy of neon z-pinch plasmas”. *J. Appl. Phys.* 60(10), pp. 3427-3432, 1986

- [53] G. Nave, C. D. Challis, A. E. Dangor and G. Lunney, "Soft x-ray spectra from a gas-puff z pinch", *J. Appl. Phys.*, 65(9), pp. 3385-3390, 1989
- [54] P. G. Burkhalter, J. Shiloh, A. Fisher and R. D. Cowan, "X-ray spectra from a gas-puff z-pinch device", *J. Appl. Phys.*, 50(7), pp. 4532-4540, 1979
- [55] P. Lee, J. Gernhardt, C. J. Armentrout and R. T. Snider, "Vacuum ultraviolet and ultrasoft x-ray diode detectors for tokamak plasmas", *Rev. Sci. Instrum.*, 59(6), pp.883-888, 1988
- [56] F. C. Young, S. J. Stephanakis and V. E. Scherrer, "Filtered x-ray diodes for imploding plasma experiments", *Rev. Sci. Instrum.*, 57(8), pp. 2174-2176, 1986

謝辞

本研究は熊本大学大学院 秋山秀典教授の熱心な御指導と多大な御支援のもとに遂行したものであり、感謝の念を言い尽くせません。心より深く感謝いたします。

また本論文の作成に際して、適切な御助言を頂いた蛭原健治教授、檜山隆教授、松尾日出男教授に深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、卒業研究生時代から現在に至るまで様々な面で御世話を頂いた熊本大学工学部 勝木淳助教授に心より感謝いたします。

米国テキサステック大学 Mario Hagler教授(元熊本大学工学部客員教授)、米国New Mexico大学 Frank Hegeler助教授(元熊本大学工学部客員助教授)、米GE社 Igor Lisitsyn氏(元熊本大学工学部客員助教授)、熊本大学工学部 Elena Baronova客員教授からは研究促進に御教示と御討論を頂きました。

さらには本研究室OBである山形大学工学部 南谷靖史助教授、岩手大学工学部 高木浩一助教授、徳島大学工学部 下村直行助教授、佐賀大学理工学部 猪原哲講師、九州大学システム情報科学研究所 今坂公宣助手、有明工業高等専門学校 塚本俊介助教授、同 河野晋講師、熊本大学工学部 波平隆男助手、また熊本大学大学院博士後期課程2年 寺本雄介氏、同1年 小園和剛氏にはパルスパワー工学の専門家としての立場から貴重な御助言を頂きました。

実験の遂行にあたっては、熊本大学工学部 辻公輝技術官、日立造船(株) 新開利範氏、東京エレクトロン(株) 西孝典氏、九州工業大学大学院博士前期課程1年 福留巖氏、そして熊本大学工学部電気エネルギー応用講座の大学院生、卒業研究生及び八代工業高等専門学校機械電気工学科の卒業研究生にも多大な御協力を頂きました。心より感謝いたします。

最後に、八代工業高等専門学校の御理解と家族の支援なしでは本論文は完成為し得なかったことを切に感じていると共に感謝の意を表します。

平成14年3月 筆者