

## 3次元収束型プラズマフォーカスダイオードのイオンビームの収束性の評価

今成 一雄・江 偉華\*・升方 勝巳\*\*・八井 淨\*\*\*

## Evaluation of focusing characteristics of spherical plasma focus diode

Kazuo IMANARI

Jiang WEIHUA\*・Katsumi MASUGATA\*\*・Kiyoshi YATSUI\*\*\*

## 1. はじめに

大強度パルス軽イオンビーム(Intense Pulsed Light Ion Beam:LIB)は、ターゲット内での飛程が短いために固体ターゲットとの相互作用によって高温・高密度のプラズマを生成する。それゆえ、慣性核融合(Inertial Confinement Fusion:ICF)のエネルギードライバー<sup>1)</sup>や材料科学<sup>2-4)</sup>への応用が期待されている。イオンビーム発生用ダイオードの開発においては、非常に小さいターゲット表面にLIBを収束させて、高電力密度を達成する事が大きな課題となっている。

ターゲット上で収束可能なビーム電力密度 $P$ は、

$$P = \frac{J_i V_d}{(\phi^2 + \delta^2)} \frac{\Phi}{4\pi}$$

で与えられる<sup>5)</sup>。ここで、 $J_i$ :陽極表面のイオン電流密度、 $V_d$ :ダイオード電圧、 $\Phi$ :ターゲットから見たビームの照射立体角、 $\phi$ :ビームの局所的発散角、 $\delta$ :ビームの軌道ずれ角、である。よって、ビーム電力の高密度化には、 $J_i$ や $V_d$ そして $\Phi$ の増大や、 $\phi$ 及び $\delta$ の低減が必要と成る事が判る。陽極より、より多くのイオン電流を引出し、かつ電子電流による陰極-陽極間の短絡を防ぐために、電極間には絶縁磁場が必要となる。イオンダイオードは、この絶縁磁場の印加方法により外部から磁場が供給される“外部磁場絶縁型”と電子電流が絶縁磁場を形成する“自己磁場絶縁型”とに大別される。また、ビームの照射立体角を増大させるために、イオンダイオードの陽極と陰極とを球面状にして、LIBを幾何学的に収束させる手段が取られ

る。しかしながら、外部磁場絶縁型のダイオードでは、ビームの照射立体角は絶縁磁場発生装置の配置により大きな制限を受けてしまい、任意の大立体角を得る事は難しい。我々は、大立体角を得るために、新しいタイプの自己磁場絶縁・3次元収束型球状プラズマフォーカスダイオード(Spherical Plasma Focus Diode:SPFD)を開発した。

ここでは、SPFDのLIB収束特性の実験結果とシミュレーション結果とについて報告する。2章では、SPFDの構造と特徴について、3章では実験装置及び測定装置について、そして4章では、実験結果とその検討について述べる。5章では、シミュレーションに使用したPIC(Particle in Cell)コードについて、6章では、その結果と検討について述べ、最後に7章でそれらを総括する。

## 2. SPFD

SPFDは、3次元収束型の自己磁場絶縁イオンダイオードである<sup>6-8)</sup>。本ダイオードは、図1に示すように半球形状を持つアノードとカソードとで構成されている。アノードのカソード側表面には、 $z$ 軸に対して同心円となるように溝(アノードグループ)が掘られており、そこにイオン源となるエポキシ樹脂が充填されている。このアノードグループは曲率中心に対して、回転( $\theta$ )方向に $0 \sim 2\pi$ 、仰角( $\psi$ )方向に $\pi/6 \sim \pi/2$ の立体角を持つ。標準的なカソードには、ビーム透過率が約5%となるように、直径1mmの穴が多数開けられている。基本的なセッティングでは、アノード半径は $R_a=25\text{mm}$ 、カソード半径は $R_c=20\text{mm}$ で、アノードとカソードの曲率中心が同一となるように配置される。

本ダイオードは、パルスパワー発生装置からアノード・カソード間(電極間ギャップ)に高電圧パル

\* : 長岡技術科学大学電気系講師

\*\* : 長岡技術科学大学電気系助教授

\*\*\* : 長岡技術科学大学電気系教授

ス(数MV, 数+ ns)が印加される事により動作する。カソードより放出された電子は自己磁場によって $v \times B_0$ 方向のローレンツ力による偏向を受け、その軌道はダイオード下流方向(図中、右方向)へとピンチしてアノードから絶縁される。アノードから放出されたイオンは、電極間ギャップで加速され、エネルギーを得てLIBとなり、ダイオードの幾何学的な収束点(Focusing Point, 曲率中心に一致する)に収束する。このとき、イオンは電子と比較して質量が十分に重い為、自己磁場による偏向をほとんど受けない。

SPFDは、外部磁場絶縁型のダイオードと比較して、以下の特徴を持つ。

- 1) 外部磁場コイルが不要なので、非常にシンプルでコンパクトな構造である。
- 2) 非常に大きなビーム収束立体角が確保できる。
- 3) 対称構造であるため、ビームを収束させ易い。

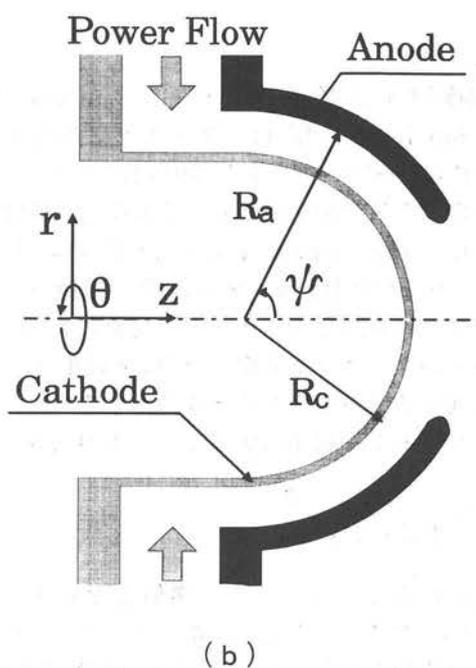
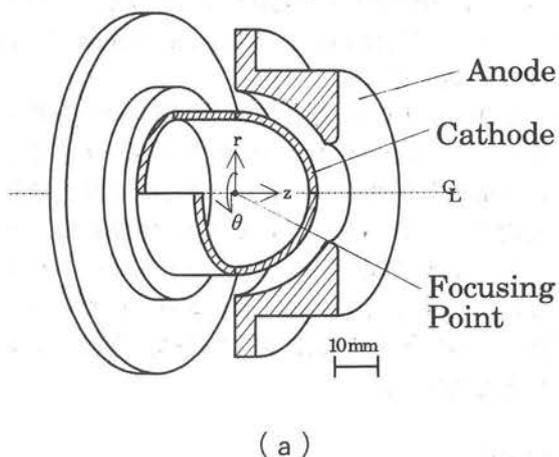


図1 3次元収束型プラズマフォーカスダイオード概略図

### 3. 実験装置・測定系

実験は長岡技術科学大学 粒子ビーム工学センターに設置されたパルス発生装置"ETIGO-II"で行われた<sup>9)</sup>。図2に"ETIGO-II"の概略図を、表1に各部パラメータを示す。本装置は、マルクス発生器(Marx Generator), エネルギー蓄積コンデンサー(Energy Storage Capacitor:ESC), 同軸型パルス整形線路(Pulse Forming Line:PFL), インピーダンス変換器(Impedance Conversion Line:ICL), から構成される。マルクス発生器のコンデンサを並列に充電した後、直列に接続・放電させる事で、高電圧パルスが発生する。

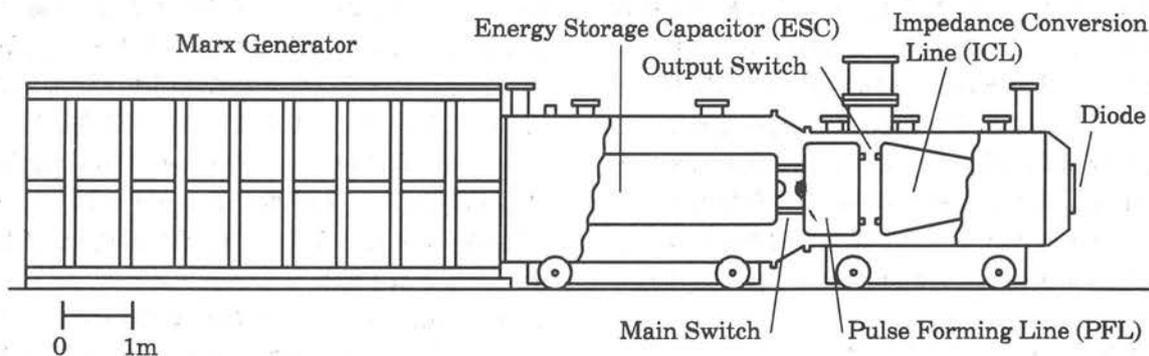


図2 大強度パルス発生装置 "ETIGO-II"

表1 ETIGO-IIのパラメータ

Marx Generator Capacitor Gap Switch	3MV, 160kJ, 40Stage $\pm 75\text{kV}$ , $1.42\mu\text{F}$ Field Distortion Type Gas Gap Switch(SF <sub>6</sub> , Air)
Energy Storage Capacitor Main Switch	3MV, 24nF, 5Ω 1ch Self Breakdown Gas Gap Switch(SF <sub>6</sub> )
Pulse Forming Line Output Switch	3MV, 1.7Ω Water 12ch
Impedance Conversion Line	1.7Ω→6.5Ω
Output Parameter	3MV, 460kA, 50ns, 70kJ, 1.4TW
Dimension	19 <sup>h</sup> ×2.9 <sup>w</sup> ×3.1 <sup>d</sup> , 110 ton

この出力は一旦 ESC で蓄積され、立ち上がりのより急峻なパルスとなって、PFL に送られ、さらに短パルスに波形整形される。そして、ICL を通して昇圧された大強度パルスが、ダイオードに供給される。マルクス発生器の充電電圧が  $V_a = \pm 75\text{kV}$  の時、最終的な出力として、出力電圧  $V = 3\text{MV}$ 、出力インピーダンス  $Z = 6.5\Omega$ 、出力電力  $P = 1.4\text{TW}$ 、パルス幅  $\tau = 50\text{ns}$ 、出力エネルギー  $E = 70\text{kJ}$ 、が得られる。ダイオードに供給される電圧(ダイオード電圧:  $V_d$ )は、ICL 出力端に取り付けられた容量分圧器(Capacitive Divider)で、ダイオードに流れる電流(ダイオード電流:  $I_d$ )は、ETIGO-II 終端に取り付けられたピックアップコイル(Pickup Coil)で、各々測定される。電極間ギャップに印加される正味の電圧は、ダイオード電圧をダイオードでの電圧降下で補正(インダクタンス補正)する事によって得られる。

LIB の収束性を評価するために、時間積分型のラザフォード散乱ピンホールカメラを使用してビームの収

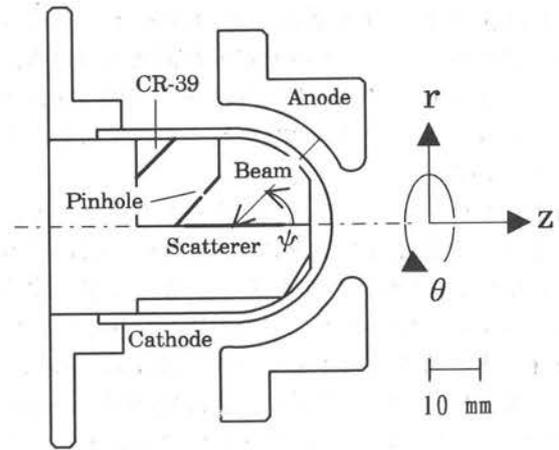


図3 ラザフォード散乱ピンホールカメラ配置図

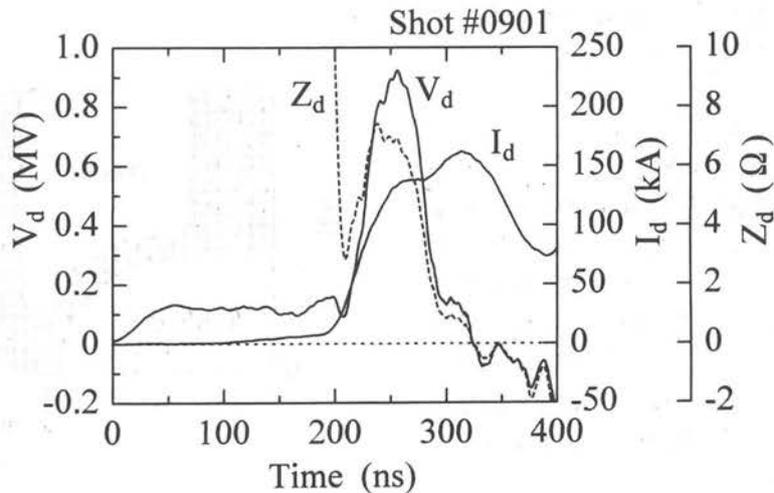


図4 典型的なダイオード動作波形

束サイズを測定した。図3は、測定装置を示す。カソードには、特定の入射角度( $\phi = 50, 60, 70, 80 \text{ deg}$ )にのみ穴が開けられ、アパーチャとして機能する。アパーチャから入射したLIBは、曲率中心を含むr-z平面に設置された散乱膜( $7\mu\text{m}^2 \text{ Al}$ )でラザフォード散乱され、ピンホールカメラ(ピンホール径 $0.1\text{mm}^2$ )を通して、後方のCR-39トラックディテクタ上に結像し、記録される。このとき、CR-39表面に $2\mu\text{m}^2$ のマイラーフィルムを設置することで、陽子のみが検出・評価される。

4. 実験結果・検討

図4は、ダイオードの典型的な動作波形を示す。ここで、 $V_d$ はインダクタンス補正されたダイオード電圧、 $I_d$ はダイオード全電流、 $Z_d$ はダイオードインピーダンスである。ダイオード電圧が最大値のとき、ダイオードインピーダンスは $6.8\Omega$ で、ETIGO-IIとSPFDとのインピーダンスマッチングが取れている事を示している。

図5は、ラザフォード散乱ピンホールカメラで計測されたトラック密度分布である。同図(a),(b)はそれぞれ、z方向とr方向の分布を示し、原点は曲率中心に一致している。LIBの入射角度が特定できないため、ラザフォード散乱確率によるデータの補正は行われていない。図5(a)より、z方向のLIBの収束長は $6.0\text{mm}$ (FWHM)で、ダイオード下流方向に $2.5\text{mm}$ ずれた位置に収束している事が判る。このずれは、自己磁場による偏向が原因であると考えられる。図5(b)より、r方向では曲率中心付近に最大値を持ち、収束径は $4.5\text{mm}$ (FWHM)である事が判る。また、ダイオードセッティングのずれが原因で、密度分布が2つの山を持つと推定される。以上の結果から、LIBはz軸上で、円柱形状に収束していると評価できる。

5. シミュレーションコード

SPFDが回転対称形である事を利用して、2次元モデルのPICコード<sup>10,11)</sup>を開発した。図6は、モデルを示す。モデルは2次元であるが、内部の計算では回転方向の運動も考えているので、コードは2.5次元と呼ばれる。空間メッシュは、1辺 $0.2\text{mm}$ の正方形、計算時刻の刻みは $0.3\text{ps}$ である。コードは電磁界コードでMaxwellの方程式と粒子の相対論的な運動を含む。シミュレーション粒子は電子と陽子とで、各々は空間の電磁場を発生させる源となる。

本コードでは、ビームの発散の原因として、初期熱エネルギーを考えている。図7は、初期熱エネルギー

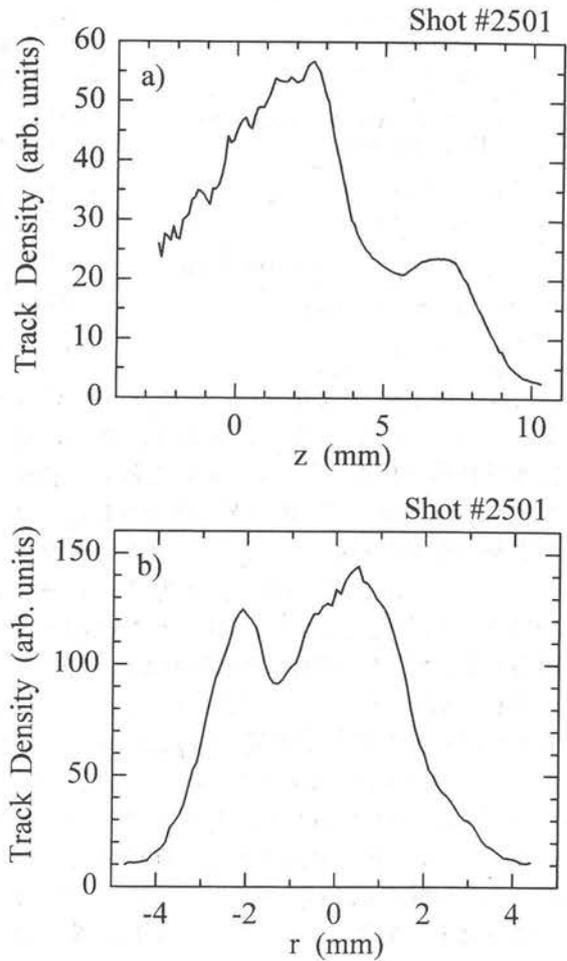


図5 a) z方向と、b) r方向のトラック密度分布

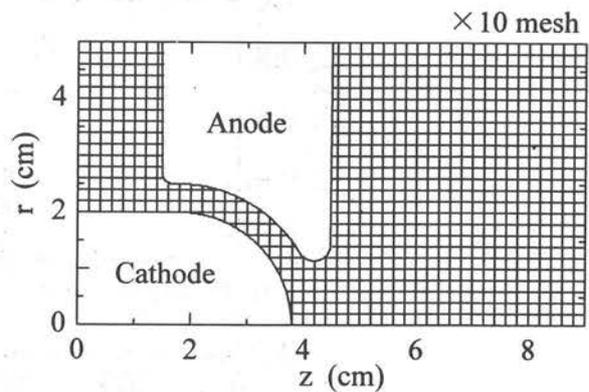


図6 ダイオードモデル

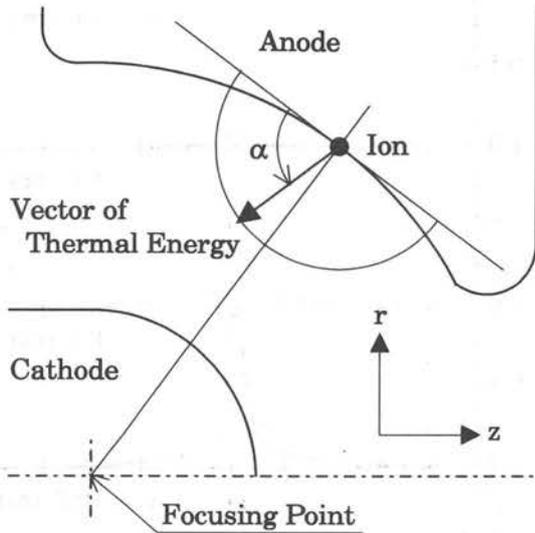


図7 初期熱エネルギーベクトル設定モデル

の設定モデルを示す。ベクトル空間は半分で、その境界は曲率中心迄の距離を半径とする円の接線である。ベクトルの大きさは一定値とされ、その方向 $\alpha$ は発生確率が一様な乱数によって決定されている。

SPFDのシミュレーションモデルには、実験装置と比較して以下の違いがある。

- 1) 実験で用いられているアノードにはイオン源となるエポキシが満たされたグループがあるが、シミュレーションではグループは存在しない。イオンはアノード表面から均等に発生するとされる。
- 2) 実験で用いられているカソードは、たくさんの穴が開けられ、有限のビーム透過率( $\sim 5\%$ )を持つが、シミュレーションではビーム透過率は100%として扱われている。
- 3) PICコードに依るシミュレーションであるため、プラズマの流体としての特性(例えば、プラズマ拡散)が含まれていない。
- 4) シミュレーションにおいて、アノードから引き出される粒子の量は、そこに掛かる電界強度のみによって決定され、イオン源に与えられるエネルギーは考慮されていない。つまり、プラズマの発生機構は含まれていない。

## 6. シミュレーション結果・検討

図8は、典型的なダイオード電圧波形( $V_d$ )とダイオード電流波形( $I_d$ )とを示す。各々の最大値は、 $V_d \sim 960$  kV,  $I_d \sim 160$  kAであり、ダイオードインピーダンス

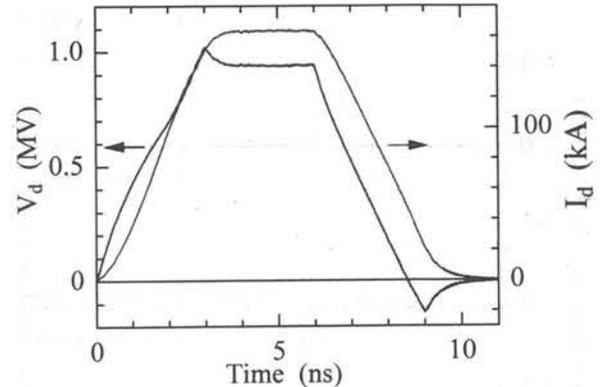


図8 典型的なシミュレーション波形

は $Z_d \sim 6.0 \Omega$ と計算される。これらの値は、実験結果と非常に良く一致している。シミュレーション時間が実験と比較して約1/10と短くなっているのは、シミュレーションでは粒子のライフタイムが約1nsと非常に短く、長時間のシミュレーションは本質的な意味を持たないためである。

図9は、 $z$ 軸に到達した粒子数の分布を示す。図において、縦軸は最大値で規格化され、原点 $z=0$ は曲率中心に一致している。時刻 $t$ は、シミュレーションを開始してからの時刻で、図8の時間軸に一致している。横軸の分解能は、0.1mmとなっている。また、初期熱エネルギーは、20eVである。ダイオード電圧がほぼ0Vとなる時刻 $t=8.1$ nsにおいて、粒子は2.5mm (FWHM)の幅で収束し、そのピークは下流方向に2.0mmずれている事が判る。ピークのずれは実験結果と良く一致しているが、収束幅は実験結果の約1/2の値となっている。この原因としては、シミュレーションコードにイオン源の揺らぎやプラズマ拡散が含まれていない事が挙げられる。

図10は、最大収束点( $z=2.0$ mm)における粒子の $r$ 軸方向分布を示す。縦横軸、時刻、分解能は、図9に準ずる。時刻 $t=8.1$ nsにおいて、粒子は0.4mm (FWHM)の直径で収束している事が判る。また分解能を考慮すると、それ以下である可能性もある。“5. シミュレーションコード”で述べたように、コードは2.5次元であり $r$ 方向の分布は直接観測できない。そこで、最大収束点を横切る粒子数からその分布を推定している。それ故に、実験結果と大きな差が出たと考えられる。図9、図10から、ビームは円筒状に収束している事が判る。これは実験結果に一致している。

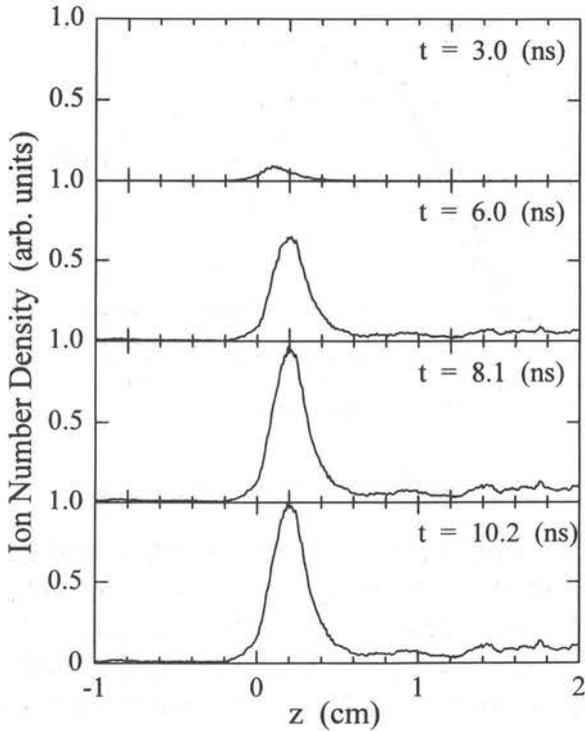


図9 r方向のイオン数密度分布図

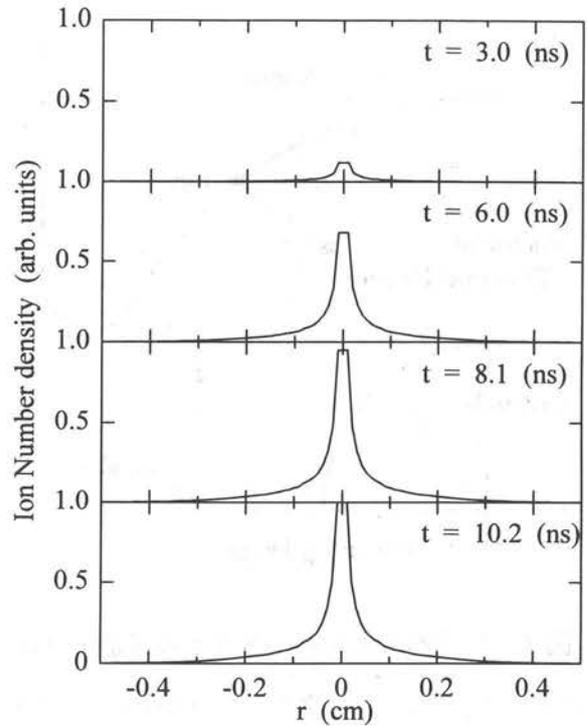


図10 z方向のイオン数密度分布図

7. まとめ

実験とシミュレーションとから SPFD のイオンビームの収束性を評価して、以下の結論が得られた。

1. ラザフォード散乱ピンホールカメラの実験結果より、SPFDのLIBの収束サイズは4.5mm<sup>φ</sup>×6.0mmで、そのピークはダイオード下流方向に2.5mmずれている事が判った。
2. 初期熱エネルギー 20 eVを仮定したPICコードシミュレーションでは、SPFDのLIBの収束サイズは0.4mm<sup>φ</sup>×2.4mmで、そのピークはダイオード下流方向に2.0mmずれている結果が得られた。
3. 初期熱エネルギーだけで、イオンビームの発散の発生機構を表現するには不十分であり、他の要因を考える必要がある事が明らかになった。
4. アノードプラズマの不均一性や、プラズマ膨脹現象を含んだPICコードの開発が必要であると言える。

最後に、本研究は文部省の“平成7年度情報処理関係内地研究員制度(平成7年5月1日～平成8年2月29日)”の下で行われた。

参考文献

- 1) J.P.VanDevender *et al.*: Science 232, 831(1986).
- 2) K.Yatsui *et al.*: Proc. 11th Int'l Conf. on Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Res. Kyoto, Japan IAEA-CN-47/B-III-9(1986).
- 3) K.Yatsui *et al.*: Phy. Plasma 1, 1730(1994).
- 4) K.Yatsui *et al.*: Appl. Phys. Letters 67, 1214 (1995).
- 5) J.P.VanDevender *et al.*: Laser and Part. Beams 3, 93(1985).
- 6) W.Jiang *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. 32, L752 (1993).
- 7) W.Jiang *et al.*: Phys. Plasmas 2, 325 (1995).
- 8) W.Jiang *et al.*: Laser and Part. Beams 13, 343 (1995).
- 9) A.Tokuchi *et al.*: Proc. 2nd Int'l Symp. on Inertial Confinement Fusion Res. by High-Power Particle Beams, ed. by K. Yatsui (Nagaoka Univ. of Technology), 430(1986).
- 10) C.K.Birdsall, A.B.Langdon: Plasma Physics via Computer Simulation, Adam Hilger(1991).
- 11) 田中 實, 山本良一: 計算物理と計算化学, 海文堂(1988).

(受理年月日 1996年9月24日)