

JAERI-Tech  
98-029



## レーザーイオン源イオンビーム強度分布

1998年8月

足立 肇・田村浩司・岡崎哲治・柴田猛順

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

レーザーイオン源イオンビーム強度分布

日本原子力研究所東海研究所物質科学部研究部

足立 肇・田村 浩司・岡崎 哲治・柴田 猛順

(1998年7月1日受理)

平行平板電極板間で原子ビームにレーザー光を照射して共鳴電離により生成させたイオンを低電位側の電極板の開孔を通して引き出すレーザーイオン源からのイオンビームの断面強度分布を調べた。イオン引出し孔の直径、補助電極の使用の有無、引出し孔のメッシュの有無、各電極の印加電圧、イオン引出し電極からの距離等をパラメータとして二次元イオン強度分布を小型多チャンネルのファラデーカップを用いて測定し、ビーム広がりの少ない条件を把握した。

Intensity Distributions of Ion Beams Produced by Laser Ion Source

Hajime ADACHI, Koji TAMURA, Tetsuji OKAZAKI and Takemasa SHIBATA

Department of Materials Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 1, 1998)

Two-dimensional intensity distribution on ion beams produced with a laser ion source were measured under various conditions of the system. Ion beams were extracted through a hole with mesh on an electrode with lower potential from plasma produced by photo-resonant ionization of neodymium atoms, by irradiating laser pulse beams on atomic beams between parallel electrodes. Ion distributions were measured with a multi-channel Faraday cup with five small plates for ion detection as a function of the slit size, with or without an additional electrode, applied voltage on the electrodes, distance of the ion detector from extraction electrode, etc.. Conditions for obtaining narrower distributions of ion beam intensities were found.

Keywords : Laser Ion Source, Ion Beam, Intensity Distribution, Neodymium,  
Resonant Photo-ionization, Multi-channel Faraday Cup, Parallel Electrodes

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 測定方法および装置 .....	1
3. 測定結果 .....	3
4. 考 察 .....	6
5. まとめ .....	12
参考文献 .....	12

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Method and Apparatus .....	1
3. Experimental Results .....	3
4. Discussions .....	6
5. Conclusion .....	12
References .....	12

This is a blank page.

## 1. はじめに

原子とイオンの電荷移行断面積測定には、レーザーによる原子の光共鳴電離を用いたレーザーイオン源からの生成イオンビームを中性原子に衝突させて、電荷移行反応を起させその割合を求める方法がよく用いられる<sup>1), 2)</sup>。すなわち、平行平板電極板間で原子ビームにパルスレーザービームを照射し、光共鳴電離によりプラズマを発生させ、低電位側電極板に開けたイオン引出し孔よりイオンビームを引き出し（主イオンビーム）、測定対象中性原子に衝突させ、電荷移行により副次イオンビームを発生させる。直進した主イオンビームを正面のイオン検出器（ファラデーカップ等）で計測すると同時に原子およびイオンビームの流れに対し垂直方向に印加した電場により集めた副次イオンビームを側方に設置した別のイオン検出器（ファラデーカップ等）で計測する。副次イオン対主イオンビームの強度比より電荷移行の割合を求める。それぞれのイオンビームは数え落としなく全数計測できるように、ビームの広がりより大きな面積のイオン検出器で測定する必要がある。そこで、電荷移行断面積測定装置の改良にあたり、レーザーイオン源からのイオンビーム広がり分布等の特性を測定した。ビーム広がりはイオン引出し孔径、印加電圧、メッシュの有無、検出器までの距離、補助電極の使用の有無等をパラメータにして測定を行い、それらの依存性を把握した。

電荷移行断面積測定以外にも、上記の特性を把握しておくことは一般的なレーザーイオン源としての応用にも役立つ。平行平板電極の間に光電離により発生させた特定同位体のイオンを生成させ、必要とする断面寸法、強度分布等のイオンビームを得、対象物に照射したりして利用することができる。

## 2. 測定方法および装置

平行平板電極板の片方のスリット孔を通して取り出したイオンビームの強度分布の測定方法を示す概念図を Fig.1(a),(b)に示す。(a)は平面図、(b)は立面図である。

平行平板電極板の中央で下方から流入したネオジム（Nd）原子ビームに波長 442.2nm のレーザーパルス光を照射し、下記に示す 1 波長 2 段階励起により原子を電離させ電離プラズマを得た。

$$\text{Nd} \quad 0 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 22606 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 45211 \text{ cm}^{-1} (> \text{IP}_1 = 44562 \text{ cm}^{-1})$$

$$(J=4) \quad (J=5)$$

$$\lambda_1 = 442.4 \text{ nm} \quad \lambda_2 = 442.4 \text{ nm}$$

ここで、J は レベルの全角運動量 (J 値)、IP<sub>1</sub> はイオン化ポテンシャルである。

低電圧側のイオン回収電極板の中央に開けたイオン引出し孔を通して電極板の外に取り出されたイオンビームの正面に設置した多チャンネルファラデーカップ検出器によりイオ

ン電流量をオシロスコープにより測定する。多チャンネルファラデーカップ検出器は前面の水平方向に5 mm間隔で3 mm径または7 mm間隔で5 mm径の5ヶの入射孔を設け、それぞれの孔を通して入射するイオンを独立のイオン検出板で検出するものである。入射孔には透過率81%のメッシュを張った。イオンビーム強度の横方向分布はこの5個のイオン検出板によるイオン電荷量の分布より求め、縦方向分布はファラデーカップ検出器を上下方向に5 mmずつ移動して各位置でのイオン電荷量の分布より求めた。

また、低電圧側のイオン回収電極板の中央より少し離れた位置にもう一つのイオン引出し孔を設け、近接して設置した小型の別のモニター用ファラデーカップ検出器で同時にイオン電流をオシロスコープにより測定し、イオン引出し孔から引出される全イオン電荷量をモニタした。

測定装置全体の構成図をFig.2に示す。

銅製るっぽ内のネオジム(Nd)金属試料に電子ビーム照射により加熱蒸発させ得られたNd原子ビームを荷電粒子除去電極により荷電粒子を除いた後、蒸気スリットを通して正およびアース電位の平行平板電極間に導く。電極間の中央に波長442.2nmのレーザー光を照射し、Nd原子を1波長2段階励起により電離し、直径10mmのNdプラズマを発生させた。低電位側のイオン回収電極板に開けたメッシュ付きイオン引出し孔を通してイオンビームを引き出し、一定距離におけるイオンビーム強度分布を多チャンネルファラデーカップにより測定した。横方向に5個並べたイオン検出板により水平分布を得、多チャンネルファラデーカップを上下方向に移動して垂直方向分布を得た。多チャンネルファラデーカップの上下移動は真空容器上部に設けた位置移動装置により行った。位置移動装置の概念図をFig.3に示す。

電極部の構成は次の2ケースとした。

ケース1) 間隔20mmの2枚の平行平板電極板(厚さ各1mm)からなり、片方に正電圧を印加し、もう一方はアース電位とした。アース電極の中央部に開けたメッシュ付き円形孔(直径4mm)を通してイオンビームを取り出した。

ケース2) 3枚の平行平板電極板(厚さ各1mm)からなり、第1、2、3の順とする。第1、第2電極板は間隔20mmで、第2、第3電極板間隔は2mmである。第1電極には正の高電圧を印加し、第3電極(補助電極)はアース電位とし、第2電極には第1電極より低い正、負または0の電圧を印加した。第2、第3電極には中央部に同一寸法の円形のイオン引出し孔(直径7mm)を設け、第2電極の引出し孔にはメッシュを張り、第3電極の引出し孔にはメッシュ有りまたは無しとした。メッシュを通してのイオンの透過率は81%である。

アース電極板より50mmまたは60mm離れた位置に多チャンネルファラデーカップのイオン検出板が来るようとした。多チャンネルファラデーカップは中央高さ位置より上方に20mm、下方に35mmの範囲で連続的に位置可変で設定可能である。水平方向に等間隔に配置した5ヶのイオン検出板からオシロスコープ入力端子に接続し、また、

各入力端子とアース間に一定の抵抗（標準  $10\text{ k}\Omega$ ）を接続することにより、抵抗を通して流れるイオン電流による電圧波形をオシロスコープで測定した。オシロスコープで測定したファラデーカップ信号の電圧から電流に換算したイオン電流波形の測定結果例を Fig.4 に示す。Fig.4 中、上方の Ch1~Ch5 は多チャンネルファラデーカップの水平方向の 5 個所のイオン検出板のイオン電流で、図の下方には同時に測定したファラデーカップ側の電極板 2 の電流、モニター用ファラデーカップのイオン電流および水晶発振式膜厚計の蒸着速度の信号を示す。各イオン検出板の電荷量は得られた電流波形を時間積分して求めた。

### 3. 測定結果

#### 3. 1 補助電極なしの場合

##### (1) 電極電圧および蒸気（イオン）密度依存性

補助電極を用いず、電極板 1 および 2 の中央部で生成された光電離プラズマからアース電極 2 に開けた直径  $4\text{ mm}$  のイオン引出し孔（メッシュ付き）を通して引出されたイオンビームにつき、電極 2 からの距離が  $60\text{mm}$  の位置のイオン検出板で測定したイオンの強度分布の例を Fig.5(a),(b)、および Fig.6(a),(b) に示す。

Fig.5 は電極印加電圧を  $V_1=100\text{V}$ ,  $V_2=0\text{V}$  とし、光電離反応部の原子の蒸着速度を  $10, 20, 30\text{\AA/s}$  とパラメータとした測定結果で、Fig.5(a) は水平方向分布、Fig.5(b) は垂直方向分布である。なお、ここで蒸着速度に比例してイオン密度が変化する。縦軸のイオン強度は各パラメータでの測定ケースの最大値で規格化してある。

グラフより水平方向分布、垂直方向分布とともに蒸着速度（イオン密度）には殆ど影響なく、水平方向にはイオンビーム出射孔中心の左右に約  $\pm 10\text{mm}$  に分布が広がり、また垂直方向にはイオンビーム出射孔中心の下方に  $30\text{mm}$  以上、上方に  $10\text{mm}$  以上広がり、分布の中心がほぼ下方  $-15\text{mm}$  にあることがわかる。

Fig.6 は光電離反応部の原子の蒸着速度を  $20\text{\AA/s}$  とし、電極 1 の印加電圧  $V_1$  が  $300\text{V}$  および  $100\text{V}$  の場合で、Fig.6(a) は水平方向分布、Fig.6(b) は垂直方向分布である。グラフより水平方向分布は印加電圧が高い方がやや広がりが狭いが、垂直方向分布は印加電圧により殆ど変化しないことがわかる。

##### (2) イオン検出器、電極板間距離依存性

補助電極を用いず、電極板 1 および 2 の中央部で生成された光電離プラズマからアース電極 2 に開けた直径  $4\text{ mm}$  のイオン引出し孔（メッシュ付き）を通して引出されたイオンビームにつき、電極 2 とイオン検出板の距離が  $50\text{mm}$  と  $60\text{mm}$  の場合イオンの強度分布の測定結果例を Fig.7(a),(b) に示す。この図は電極 1 の印加電圧  $V_1$  が  $300\text{V}$ 、光電離反応部での原子蒸着速度は  $30\text{\AA/s}$  の例で、Fig.7(a) が水平方向分布、

Fig.7(b)が垂直方向分布である。

グラフより電極からの距離が 60mm より 50mm と近い方が、水平方向、垂直方向の分布とも広がりが狭いことがわかる。

水平方向分布の広がりは距離が 60mm の場合は約 ±8 mm に対し、50mm の場合は約 ±7 mm である。また、垂直方向分布は距離が 50mm の場合はイオンビーム出射孔中心の下方 (-) に 35mm、上方 (+) に 15mm に広がり、分布の中心が下方 (-) 約 10mm であるのに対し、距離が 60mm の場合は分布の中心が -15mm で、距離が 50mm の場合よりも全体の広がりが 10mm 程度広いことがわかる。

### (3) 電極間プラズマ生成位置依存性

平行平板電極間のレーザーによる光電離プラズマ生成位置が水平方向中央で垂直方向高さ位置がイオンビーム引出し孔（直径  $4\text{mm } \phi$ ）の中心から 0、-5、-10mm と下方の移動した場合のイオンビームの強度分布測定結果例を Fig.8(a),(b) に示す。この図は補助電極は用いず、電極 1 の印加電圧は 300V、光電離反応部の原子蒸着速度が  $30\text{\AA/s}$ 、電極 2・イオン検出板間距離が 50mm の場合で、Fig.8(a) が水平方向分布、Fig.8(b) が垂直方向分布である。Fig.8(a) より水平方向分布はプラズマ生成位置には殆ど依存しないが、Fig.8(b) より垂直方向分布はプラズマ生成位置が下方になるに従ってイオンビームの強度分布の中心位置は上方に移動し分布もやや広がることがわかる。プラズマ生成高さ位置が出射孔の位置と等しい場合には、イオンビームの強度分布の中心位置は約 -10mm であるのに対し、プラズマ生成高さ位置が出射孔中心より 10mm 下方 ( $LV=-10\text{mm}$ ) の場合には、分布中心位置は上方に約 10mm 移動し、ほぼ出射孔の高さに等しくなる。

次に、プラズマ生成の高さ位置は出射孔の位置に等しく、電極間の水平方向位置が中心の場合と、電極 2 側に 3mm 近づいた場合のイオンビームの強度分布の測定結果例を Fig.9(a)、(b) に示す。この図は電極 1 の印加電圧が 300V、光電離反応部の原子蒸着速度が  $30\text{\AA/s}$ 、電極 2・イオン検出板間距離が 50mm の場合で、Fig.9(a) が水平方向分布、Fig.9(b) が垂直方向分布である。Fig.9(a) よりプラズマ生成位置が電極間の中央から電極 2 側に 3mm 近づいた場合には水平方向分布がかなり広がり、Fig.9(b) より垂直方向分布もやや広がることがわかる。

### (4) 電極印加電圧パルス時間幅依存性

電極 1 に光反応直後一定時間幅 ( $10\sim50\mu\text{s}$ ) のパルス電圧を印加した場合のイオンビームの強度分布測定結果例を Fig.10(a),(b)、Fig.11(a),(b) に示す。これらの図は補助電極は用いず、電極 1 の印加電圧は 300V、光電離反応部の原子蒸着速度が  $30\text{\AA/s}$ 、電極 2 のイオン引出し孔径は  $4\text{mm } \phi$ 、電極 2 とイオン検出板間距離が 50mm の場合である。Fig.10、Fig.11 はそれぞれプラズマ生成高さ位置がイオン引出し孔中心に対し

て 0mm および -10mm の場合で、それぞれ、(a)が水平方向分布、(b)が垂直方向分布である。Fig.10(a)、Fig.11(a)より水平方向分布はパルス電圧印加時間幅には殆ど依存しないが、Fig.10(b)、Fig.11(b)より垂直方向分布はパルス電圧印加時間幅が短くなるにつれてイオン強度分布の中心の高さ位置が高い方向に移動することがわかる。

### 3. 2 補助電極ありの場合

平行平板電極の低電位側の電極板（電極 2）の外側に補助電極板（電極 3）を配置した場合についてイオンビームの強度分布の各電極板の印加電圧依存性および補助電極のイオン引出し孔にメッシュが無い場合と有る場合の効果について測定した。

ここで、電極 1 と電極 2 の間隔は 20mm、電極 2 と電極 3 との間隔は 2mm、電極 2 および電極 3 のイオン引出し孔の直径は  $7\text{mm}\phi$  で、電極 2 にはメッシュが張ってあり、メッシュのイオン透過率は 81 % である。

#### (1) 補助電極孔メッシュ無しの場合の電極電圧依存性

補助電極のイオン引出し孔にメッシュが無い場合の電極 1, 2, 3 の印加電圧をパラメータとしたイオンビーム強度分布の測定結果例を Fig.12(a),(b) に示す。同図は補助電極（電極 3）とイオン検出板との間隔が 50mm の場合で (a) は水平方向分布で、(b) は垂直方向分布である。

Fig.12(a) の水平方向分布では、電極 2 と電極 3 が同電位  $V_2=V_3=0\text{V}$  の場合に比べて、電極 2 の電圧  $V_2$  を電極 3 のアース電位 ( $V_3=0\text{V}$ ) より低くして電極 2, 3 間でイオン減速した場合には分布幅はほぼ同程度で、 $V_1 > V_2 > V_3 = 0\text{V}$  として電極 2, 3 間でイオンを加速した場合には分布幅が広がることがわかる。Fig.12(b) の垂直方向分布でもほぼ同様な傾向が見られる。また、 $V_2 < 0$ ,  $V_2 = 0\text{V}$ ,  $V_2 > 0$  の順、すなわち、電極 2, 3 間で減速、等速、加速の順に垂直方向分布の中心位置が高い方に移動していくことがわかる。

#### (2) 補助電極孔メッシュ有りの場合の電極電圧依存性

補助電極のイオン引出し孔にメッシュが有る場合の電極 1, 2, 3 の印加電圧をパラメータとしたイオンビーム強度分布の測定結果例を Fig.13(a),(b)、Fig.14(a),(b)、Fig.15(a),(b) に示す。ともに補助電極（電極 3）とイオン検出板との間隔が 50mm の場合である。それぞれ(a)は水平方向分布で、(b)は垂直方向分布である。

Fig.13(a),(b) は電極 3 のアース電圧に対して、電極 2 の電圧  $V_2$  が  $0\text{V}$  および負電圧の場合の分布を比較したもので、水平方向、垂直方向の分布とも、 $V_2 < 0$  の方が分布が広がっており、補助電極にメッシュが有る場合には無い場合と逆の傾向となることがわかる。

Fig.14(a),(b) は電極 3 のアース電圧に対して、電極 2 の電圧  $V_2$  が  $0\text{V}$  および  $V_1 > V_2$

$>0$  なる正電圧の場合の分布を比較したもので、水平方向、垂直方向の分布とも、V2  $>0$  の場合の方が分布が顕著に狭くなっていることがわかる。

Fig.15(a),(b)は Fig.14(a),(b)と同様な場合で、電極印加電圧が Fig.14 よりも低い場合である。分布の傾向は Fig.14(a),(b)の場合と同様な結果が得られている。

### (3) 補助電極使用時イオン分布測定結果のまとめ

補助電極使用時のイオン引出し孔のメッシュの有無、各電極印加電圧をパラメータとしたイオンビームの強度分布の広がり幅およびイオン量の測定結果をまとめて Fig.16 に示す。ここで、補助電極・イオン検出板間距離は 50mm、光電離反応部の原子蒸着速度は  $30\text{ \AA/s}$  で、V1、V2 は電極 1、2 の印加電圧、電極 3（補助電極）はアース電位とした。電極 2 および電極 3 のイオン引出し孔の直径は  $7\text{ mm } \phi$  で、電極 2 にはメッシュが張ってあるが、補助電極（電極 3）のメッシュ有りが○印、無しが×印で示してある。水平方向および垂直方向の分布幅はイオン量がほぼ零になる全幅を mm 単位で示してある。イオン電荷量はイオンビーム強度分布測定用のイオンビーム引出し孔の隣に設けた  $7\text{ mm } \phi$  のモニタ用イオン引出し孔の外側で別のファラデーカップで測定した全イオン電荷量である。グラフより次のことがわかる。

- (a) 補助電極孔にメッシュを張り、 $V1 > V2 > V3$  なる電圧を印加した場合(Case1,2)が水平および垂直方向イオン強度分布の広がり幅が最も狭い。
- (b) 補助電極孔にメッシュを張り、 $V1 > V3 > V2$  なる電圧を印加した場合(Case10)には水平および垂直方向イオン強度分布がやや広がる。
- (c) 補助電極孔にメッシュを張らずに、 $V1 > V2 > V3$  なる電圧を印加した場合(Case15)は水平および垂直方向イオン強度分布の広がり幅が最も広い。
- (d) 補助電極孔にメッシュを張らずに、 $V1 > V3 > V2$  なる電圧を印加した場合(Case13,14)には、水平および垂直方向イオン強度分布の広がり幅は  $V1 > V2 = V3$  の場合(Case11,12)と殆ど同じである。

## 4. 考 察

### イオンビームの電流量については

- (a) プラズマから電極に引出されるイオン電流の空間電荷による制限がある。  
また、イオンビームの発散、収束に関しては次の原因が考えられる。
- (b) 径方向の空間電荷力によるイオンビームの発散
- (c) イオン（プラズマ）生成部位置の移動によるビームの発散
- (d) イオン放出面の形状によるビームの発散、収束

(1) イオン電流量の空間電荷制限<sup>(3),(4)</sup>

プラズマからのイオンの引出で、引出し電圧に対してプラズマの電子温度が無視できる場合、引出されるイオンの電流密度  $J_i(A)$  は下記のチャイルド・ラングミュアの空間電荷制限電流の式から導かれる。

$$\begin{aligned} J_i &= \frac{4}{9} \epsilon_0 \cdot \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \cdot \frac{V^{3/2}}{d^2} \\ &= 5.45 \times 10^{-8} \cdot \frac{1}{\sqrt{M_i}} \cdot \frac{V^{3/2}}{d^2} \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで、

$J_i$  : 引出しイオン電流密度 [A/m<sup>2</sup>]

$V$  : プラズマと引出し電極間のイオン引出し電圧 [V]

$d$  : プラズマと引出し電極間の間隔 [m]

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  : 真空中の誘電率 [C/V/m]

$e = 1.602 \times 10^{-19}$  : 素電荷 [C]

$m_i$  : イオンの質量 [kg]

$M_i$  : イオンの質量数

である。

正電極とアース電極の中央に生成したプラズマがアース電極のイオン引出し孔からイオンビームとして引出される場合、プラズマの電位は正電極の印加電位に等しくなり、引出し電圧は  $V=300[V]$  である。円形断面 (10mm  $\phi$ ) のプラズマを面積が等しくなる高さ幅 10mm の矩形断面とすると横幅は 7.8mm となり、電極板 (間隔 20mm) との距離は最短で  $d=6.1\text{mm}$  と一次元で近似できる。 $M=144$  (Nd イオン) とすると、(4.1) 式より  $J=0.63$  [A/m<sup>2</sup>] となり、イオン引出し孔の直径 7mm  $\phi$  (面積  $S=3.85 \times 10^{-5}$  [m<sup>2</sup>]) およびメッシュの透過率  $\eta=0.81$  を考慮するとイオン引出し孔引出されるイオン電流量は  $I=J \times S \times \eta^2 = 16$  [ $\mu A$ ] と算出される。平行平板電極の外側に補助電極を設けた体系で測定した Fig.4 の場合、7mm  $\phi$  のイオン引出し孔を通過しモニタ用のファラデーカップ検出器で得られたイオン電流のピーク値は約 9  $\mu A$  で、検出器入口のメッシュの透過率  $\eta$  を考慮すると  $I_{max}=11 \mu A$  となり、上記算定値より少し小さい。これは算定の際のプラズマとイオン引出し電極間の距離  $d$  の近似に依存し、 $d=7.0\text{mm}$  とすると  $I=12$  [ $\mu A$ ] となり、測定結果とほぼ一致する。また、引出しイオン電流量は  $V^{3/2}$  に比例するので  $V=300[V]$  の場合に比べて  $V=100[V]$  の場合は 0.19 倍、 $V=30[V]$  の場合は 0.032 倍と電圧が小さくなるにつれて小さくなる。この傾向は Fig.16 のイオン電荷量の傾向とほぼ一致する。

(2) 径方向の空間電荷力によるイオンビームの発散<sup>(3),(4)</sup>

無電磁界中を運動するイオンビームの場合、外半径が  $r_0$ 、イオンの速度  $u_i$ 、イオンの電流  $I_i$  のイオンビームの空間電荷によってできる半径  $r$  の径方向への電界  $E_r$  は次式で与えられる。

$$E_r = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{I_i r}{2\pi\epsilon_0 u_i r_0^2} \quad (4.2)$$

ここで、 $q$  は半径  $r$  内の単位長さ当たりのイオンの電荷量で電流密度  $J_i$  と次の関係であることを用いた。

$$q = \frac{J_i \pi r^2}{u_i} \quad (4.3)$$

$$J_i = \frac{I_i}{\pi r_0^2} \quad (4.4)$$

ビームの包絡線運動は、径方向の運動方程式

$$m_i \ddot{r} = e E_r \quad (4.5)$$

およびビームが一定速度で運動していることによる

$$\ddot{r} = u_i^2 \frac{d^2 r}{dz^2} \quad (4.6)$$

により次式が導かれる。

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1}{r} \frac{I_i}{V^{3/2}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{m_i}{2e}} \quad (4.7)$$

ここに、 $V$  はビームの加速電圧、 $m_i$  はイオンの質量を表わす。

この式を解くことによりビームの進行に対する径方向の運動を評価することができる。一様に分布するイオンビームの空間電荷による発散の様子を、ビームの最小径の位置を起点にして、下記式で定義した規格化距離  $Z_N$  に対する規格化包絡線半径  $R_N$  の関係を計算した図を Fig.17 に示す。

ここで、ビームの最小半径を  $r_0$  (cm)、距離  $z$  (cm) 進んだ場所での包絡線半径を  $r$  (cm)、イオンの質量数を  $M$ 、イオン電流を  $I_i$  (A)、加速電圧を  $V$  (V) で表わし、規格化距離  $Z_N$  は、

$$Z_N = 1140 \cdot \left( \frac{I_i}{V^{3/2}} \right)^{1/2} \cdot (M)^{1/4} \cdot \frac{z}{r_0} \quad (4.8)$$

規格化包絡線半径  $R_N$  は、

$$R_N = \frac{r}{r_0} \quad (4.9)$$

である。

例として、Fig.4 のモニタ用ファラデーカップイオン電流測定値から求めたイオン

ビームのピーク電流  $I_p = 11 \times 10^{-6}$ (A)、ネオジムイオンの  $M=144$ 、 $V=300(V)$ 、 $2r_0=7(mm)$  を用いると、距離  $z=50(mm)$  では (4.8) 式より  $Z_N=2.6$  となり、また、Fig.17 より、 $R_N=2.3$  となる。従って、 $r=R_N \cdot r_0=8.1(mm)$ 、すなわち距離 50cm の位置で直径 16mm にビームが広がることになる。

Fig.13、Fig.14、Fig.16 に示した加速電圧が 300V ( $V_1=300V$ ,  $V_2=0V$ ) で補助電極イオン引出し孔 (径 7mm  $\phi$ ) にメッシュがある場合のイオンビームの水平方向強度分布の広がり幅測定結果は 16~20mm であり、空間電荷力による上記計算結果とほぼ一致する。電極印加電圧が  $V_1=300V$ ,  $V_2=V_3=0V$  で補助電極イオン引出し孔にメッシュがない Fig.12 場合、水平方向強度分布の広がり幅測定結果は 20~22mm 程度で、メッシュがある場合よりやや広いが、メッシュが無い分、電流値が大きいことを考慮すると、やはり空間電荷力による広がりとほぼ一致する。

次に、電極印加電圧が  $V_1=600V$ ,  $V_2=300V$ ,  $V_3=0V$  の場合、電極 1, 2 間の電圧は 300V であるためプラズマからの引出しイオン電流は上記ケースとほぼ等しいが、イオン引出し孔通過後のイオンの加速電圧が 600V と高い。この場合、(4.8)式より  $Z_N=1.6$ 、Fig.17 より  $R_N=1.6$ 、距離 50mm の位置でのビームの直径は  $D=11mm$  と算定される。Fig.14、Fig.16 のメッシュのある場合の水平方向分布の広がりの測定結果はこの空間電荷力による広がりとほぼ一致する。しかし、Fig.12 に示す同一電極電圧で補助電極にメッシュがない場合の測定結果はこの値より大きく、次章に示す電極形状の影響と考えられる。

また、電極印加電圧が  $V_1=150V$ ,  $V_2=-150V$ ,  $V_3=0V$  の場合、電極 1, 2 間の電圧は 300V であるためプラズマからの引出しイオン電流は上記ケースとほぼ等しいが、イオン引出し孔通過後のイオンの加速電圧が 150V と低い。この場合、(4.8)式より  $Z_N=4.5$ 、Fig.17 より  $R_N=4.4$ 、距離 50mm の位置でのビームの直径は  $D=31mm$  と算定される。Fig.13、Fig.16 のメッシュのある場合の水平方向分布の広がりの測定結果は  $D=20\sim22mm$  であり、この場合はこの空間電荷力による広がりよりやや小さい。Fig.12、Fig.16 に示す同一電極電圧で補助電極にメッシュがない場合の測定結果もこの値より小さく、空間電荷力による広がりだけでは説明できない。

加速電圧 300V、イオン引出し孔径 7mm および 4mm で同一イオン電流密度 (7mm 径でイオン電流  $12 \mu A$ 、電流密度で  $30 \mu A/cm^2$ ) とした場合の、引出し電極からの距離  $z$  と空間電荷力による広がりを考慮したビーム径  $D=2r$  との関係を Fig.18 に示す。

Fig.7 に示す補助電極なしでイオン引出し孔径が 4mm で距離が 50mm と 60mm の位置におけるイオンビームの水平方向の強度分布の場合は、広がり幅の測定結果はそれぞれ 15mm および 17mm で、上記空間電荷力によるビーム広がりの Fig.18 に示す計算結果 (それぞれ、ビーム径 10 mm および 12 mm) よりは少し大きい。これはイオン引出し孔のメッシュや孔径の違いによりイオン電流量が計算条件値と異なるためと推定される。ビーム径の距離依存性の傾向は測定と計算でほぼ一致している。

### (3) イオン引出し電極の形状によるビームの発散、収束

イオン引出し電極（電極2）の外側に同じ大きさと形状の引出し孔を持つ補助電極（電極3）を設け、その引出し孔に（a）メッシュの無い場合と（b）メッシュのある場合の水平方向のイオンビームの流れを Fig.19 に模式的に示す。図の上段（1）電極1, 2, 3 の印加電圧が  $V_1=300V, V_2=V_3=0V$  の場合、中段（2）は  $V_1=600V, V_2=300V, V_3=0V$  で電極2, 3 間で加速のある場合、下段（3）は  $V_1=150V, V_2=-150V, V_3=0V$  で電極2, 3 間で減速のある場合である。それぞれ、電極3から 50mm 離れた位置における水平方向分布の広がりの測定値を示している。

Fig.19において、電極2, 3間に電圧が印加されていない（1a）、（1b）の場合、電極2, 3間に電位分布はほぼ平坦であり、電荷力による発散によりほぼ説明できる。

電極2, 3間に加速方向の電圧を印加し補助電極（電極3）にメッシュがある Fig.19（2b）の場合、水平方向分布の広がり幅は空間電荷力による広がりとほぼ一致し、電極2, 3間に電位分布の影響は無視できる。補助電極（電極3）にメッシュが無い Fig.19（2a）の場合にはイオンビームの広がりが電荷力による広がり幅よりかなり広いが、これは同図に示すように電極3のイオン引出し孔の近傍で外側に凸の電位分布になっているため加速されたイオンビームが発散するものと考えられる。

電極2, 3間に減速方向の電圧を印加した Fig.19(3a), (3b)の場合には、電極2, 3間に電位分布は図のようにイオンビーム進行方向に対し電極2の近傍でやや凹、電極3の近傍でやや凸の形状をしている。イオンは電極2, 3間に減速し、速度の遅くなった電極3の近傍で収束方向の力を受けるため電荷力によるビーム広がりよりも狭くなるものと考えられる。

### (4) イオン（プラズマ）生成部位置の移動によるビームの発散

平行平板電極の間で下方から上方に流れる原子蒸気にレーザービームを水平方向に照射して光電離イオン化させた場合、生成プラズマは時間と共に周囲にイオン音速で膨張して広がりながら中心が原子ビームとともに上方に移動する。電子銃による照射で蒸発したネオジム原子の速度  $u$  は、るっぽから 420mm のレーザー照射部の高さで蒸着速度が  $30\text{ \AA/s}$  程度の場合、約  $800\text{ m/s}$  と推定され<sup>(5)</sup>、プラズマもこの速度で上方に移動しているものと考えられる。この場合、例えば時間間隔  $\Delta t=10\mu\text{ s}$  の間のプラズマの上方向への移動距離  $L_h$  は

$$L_h = u \times \Delta t = 8 \times 10^4 (\text{cm/s}) \times 1 \times 10^{-5} (\text{s}) = 8\text{ mm} \quad (4.10)$$

となる。

Fig.20 に補助電極のない体系での光電離生成プラズマの移動を考慮したイオンビームの流れの変化を模式的に示す。

イオン引出し孔のある電極2からファラデーカップのイオン検出板までの水平距離

は  $L=50\text{mm}$  であり、電極板からプラズマ中心までの水平距離は  $10\text{mm}$  である。プラズマ中心からイオン引出し孔を通り、直進してイオン検出板で検出されるとすると、垂直位置が  $10\text{mm}$  離れたイオン検出板で検出されるイオンは垂直方向位置が  $2\text{mm}$  異なる位置のプラズマ中心から飛来したと考えられる。Fig.8(b)より初期プラズマの生成垂直方向位置が  $LV=0\text{mm}$  の場合、イオン検出板の垂直方向位置  $VD=+10\sim-30\text{mm}$  の範囲でイオンが検出されているが、これは垂直方向位置  $VP=-2\sim+6\text{mm}$  の等価的プラズマ中心から飛来したものと考えられる。これは  $LV=0\text{mm}$  の位置から上方に移動するプラズマ領域（直径  $10\text{mm} \phi$ ）がイオン引出し孔（直径  $4\text{mm} \phi$ ）の水平方向から見え隠れする範囲にはほぼ相当する。

また、Fig.8(b)より初期プラズマの生成垂直方向位置が  $LV=-10\text{mm}$  の場合、イオン検出板の垂直方向位置  $VD=+30\sim-30\text{mm}$  の範囲でイオンが検出されているが、これは垂直方向位置  $VP=-6\sim+6\text{mm}$  の等価的プラズマ中心から飛来したものと考えられ、これはやはり  $LV=-10\text{mm}$  の位置から上方に移動するプラズマ領域（直径  $10\text{mm} \phi$ ）がイオン引出し孔（直径  $4\text{mm} \phi$ ）の水平方向から見え隠れする範囲にはほぼ相当する。

正電極板に  $300\text{V}$  の電圧を印加し、補助電極なしでアース電極板の  $4\text{mm} \phi$  のイオン引出し孔（メッシュ付）から  $50\text{mm}$  離れた中央のイオン検出板で計測した各垂直方向位置でのイオン電流の時間波形を Fig.21 に示す。Fig.21(a)はプラズマ生成垂直方向位置が  $LV=0\text{mm}$ 、すなわちイオン引出し孔の中心位置と同じ場合で、Fig.21(b)は下方で  $LV=-10\text{mm}$  の場合である。図の最下段は同時に測定したアース側電極板の電流波形である。図より、イオンはアース側電極に約  $46\mu\text{s}$  で回収されていることがわかる。このイオン回収時間の間にはプラズマは生成位置から約  $37\text{mm}$  ( $46\mu\text{s} \times 800\text{m/s}$ ) 上方に移動する。

Fig.21(a)および Fig.21(b)においてイオン検出器の垂直方向位置が下方になるに従ってイオン強度がピークになる時間が遅くなっていることがわかる。イオン検出器の垂直方向位置が下方で検出されたイオンほど上方のプラズマ位置から引出されたことになるので、プラズマが時間とともに上方に移動していることと対応する。

Fig.10、Fig.11 のイオン回収電極印加時間を  $50\mu\text{s}$  より  $15\mu\text{s}$ 、 $10\mu\text{s}$  と短くしたほどイオンビーム強度の垂直方向分布の広がり幅が狭くなり、強度のピークが上方に移動するのはこの理由による。これはビーム広がり幅を狭くする手段として効果的である。

Fig.21(a)でアース側電極にイオンが回収され始める時間と、垂直方向位置  $VP=0\text{mm}$  の位置でイオン検出板にイオンが回収され始める時間との時間間隔は約  $2.5\mu\text{s}$  であることからイオンの引出し孔から検出板間の飛行速度は約  $5\text{cm}/2.5\mu\text{s}=2 \times 10^6\text{cm/s}$  である。この値は加速エネルギー  $300\text{eV}$  のネオジムイオンの速度をイオン質量を考慮して次式により導いた値と一致する。

$$E(eV) \times 1.6021 \times 10^{-12} = \frac{1}{2} m_i(g) \cdot u(cm/s)^2 \quad (4.11)$$

$E(eV)$  : イオンの運動エネルギー

$u(cm/s)$  : イオンの速度

$m_i = M \cdot m_0$  : イオンの質量

$M = 144$  : Nd の原子量

$m_0 = 1.674 \times 10^{-24}(g)$  : 核子の質量

$$u(cm/s) = 1.153 \times 10^5 \times E(eV)^{1/2} \quad (4.12)$$

## 5.まとめ

平行平板電極板間で原子ビームにレーザー光を照射して共鳴電離により生成させたイオンを低電位側の電極板の開孔を通して引き出すレーザーイオン源からのイオンビームの断面強度分布と体系条件との関係を調べた。イオン引出し孔の直径、補助電極の使用の有無、引出し孔のメッシュの有無、各電極の印加電圧、イオン引出し電極からの距離等をパラメータとして二次元イオン強度分布を小型多チャンネルのファラデーカップを用いて測定し、ビーム広がりの少ない条件を把握した。

その結果、イオンビームの水平方向分布の広がりは主にビーム径方向の空間電荷力による発散により、また、垂直方向分布の広がりは主に光電離プラズマ領域の上方向への移動によることが分かった。さらにそれらの分布はイオン引出し電極形状にも依存し、補助電極の利用によるイオンビームの加速、減速用印加電圧の設定やイオン引出し孔部のメッシュの有無の選択によりイオンビームの広がりをある程度制御できることがわかった。

なお、本研究は科学技術庁からの受託研究「レーザー法ウラン濃縮技術開発」で得られた研究成果の一部である。

## 参考文献

- (1) Ogura K, Shibata T : J. Mass. Spectrom. Soc. Japan, **41**, 37 (1993).
- (2) 足立 肇、田村浩司、岡崎哲治、柴田猛順 : JAERI-Research 98-030, (1998).
- (3) Wilson R. G. and Brewer G. R. : " Ion Beams With Applications to Ion Implantation ", A Willey-Interscience Publication, (1973).
- (4) 石川順三 : "イオン源工学"、アイオニクス叢書、(1986).
- (5) 松本英也、池畠隆、真瀬寛、小倉浩一、柴田猛順 : JAERI-Research 97-025 (1997).

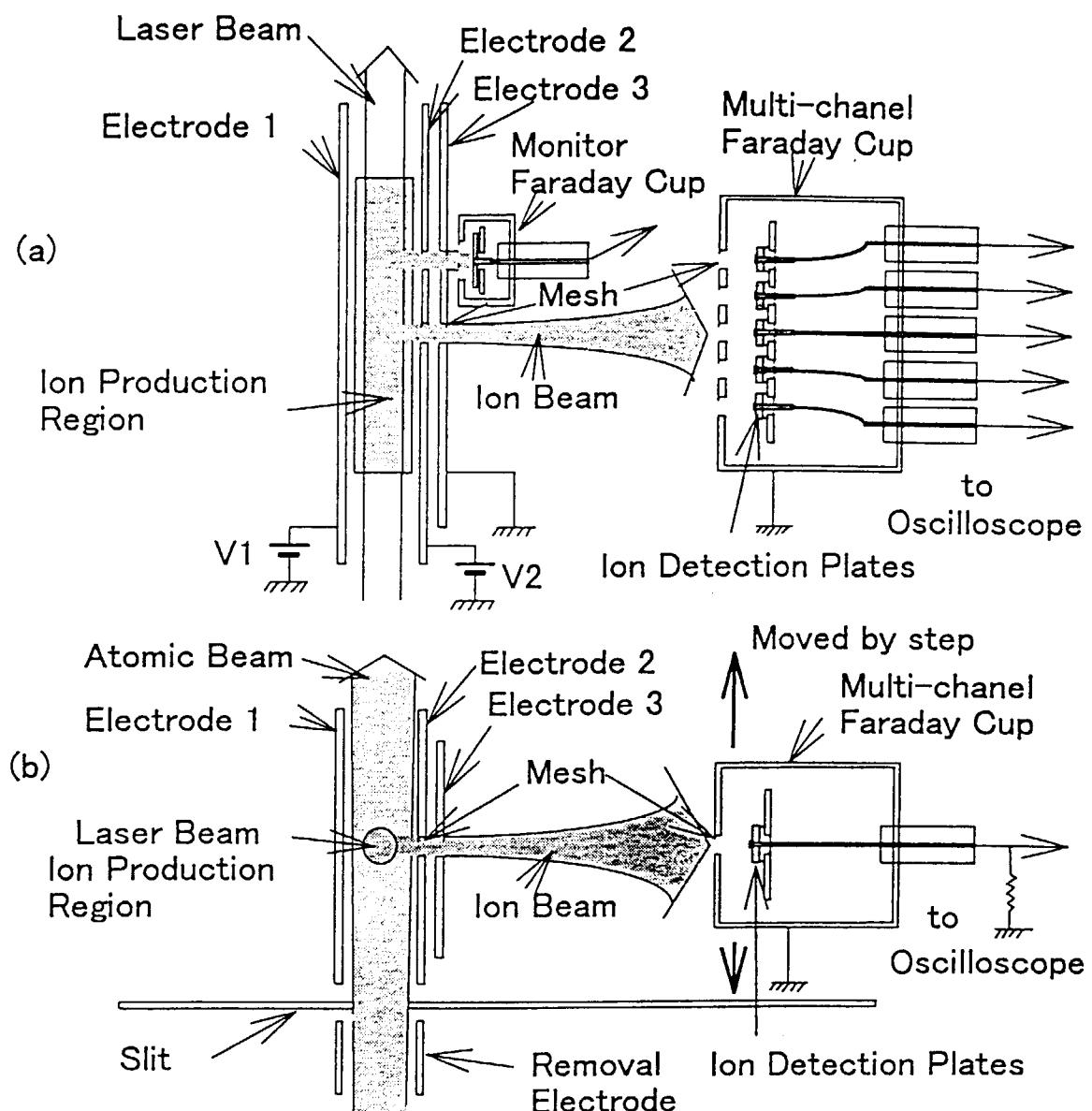


Fig.1 A schematic drawing of the intensity distribution measurement on ion beam

(a) top view, (b) front view

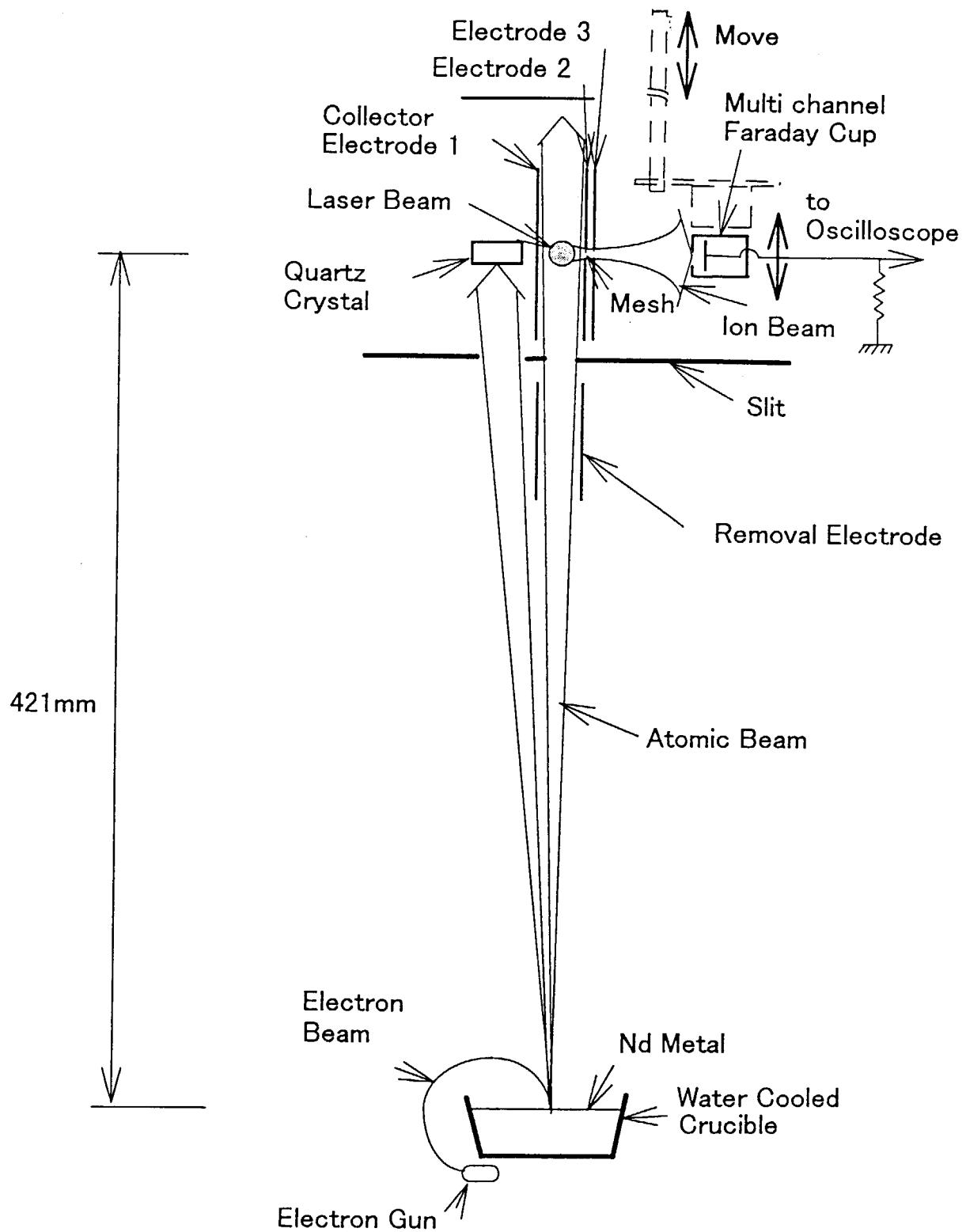


Fig.2 A schematic view of the experimental apparatus.

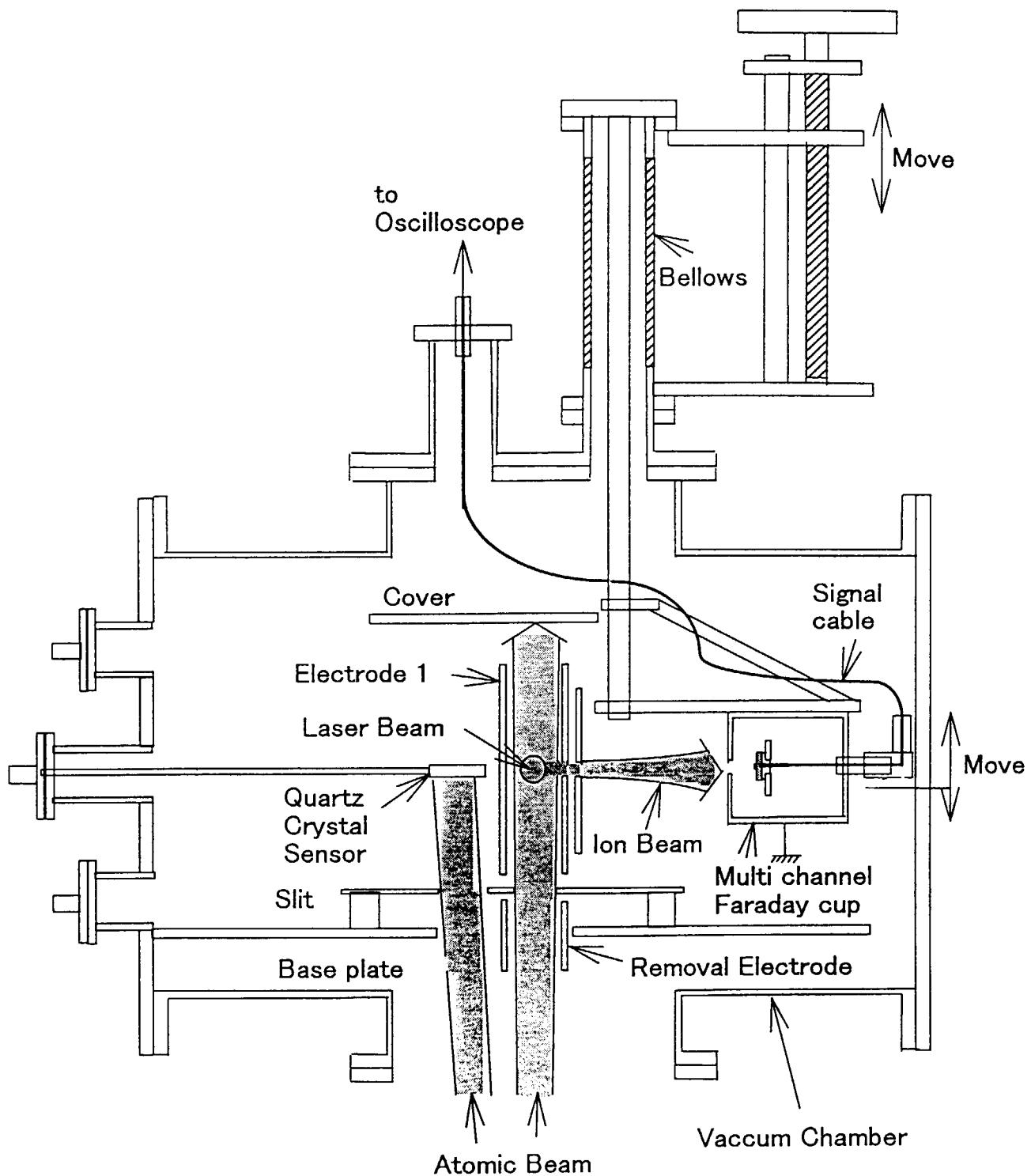


Fig.3 A schematic drawing of intensity distribution measurement system on ion beam

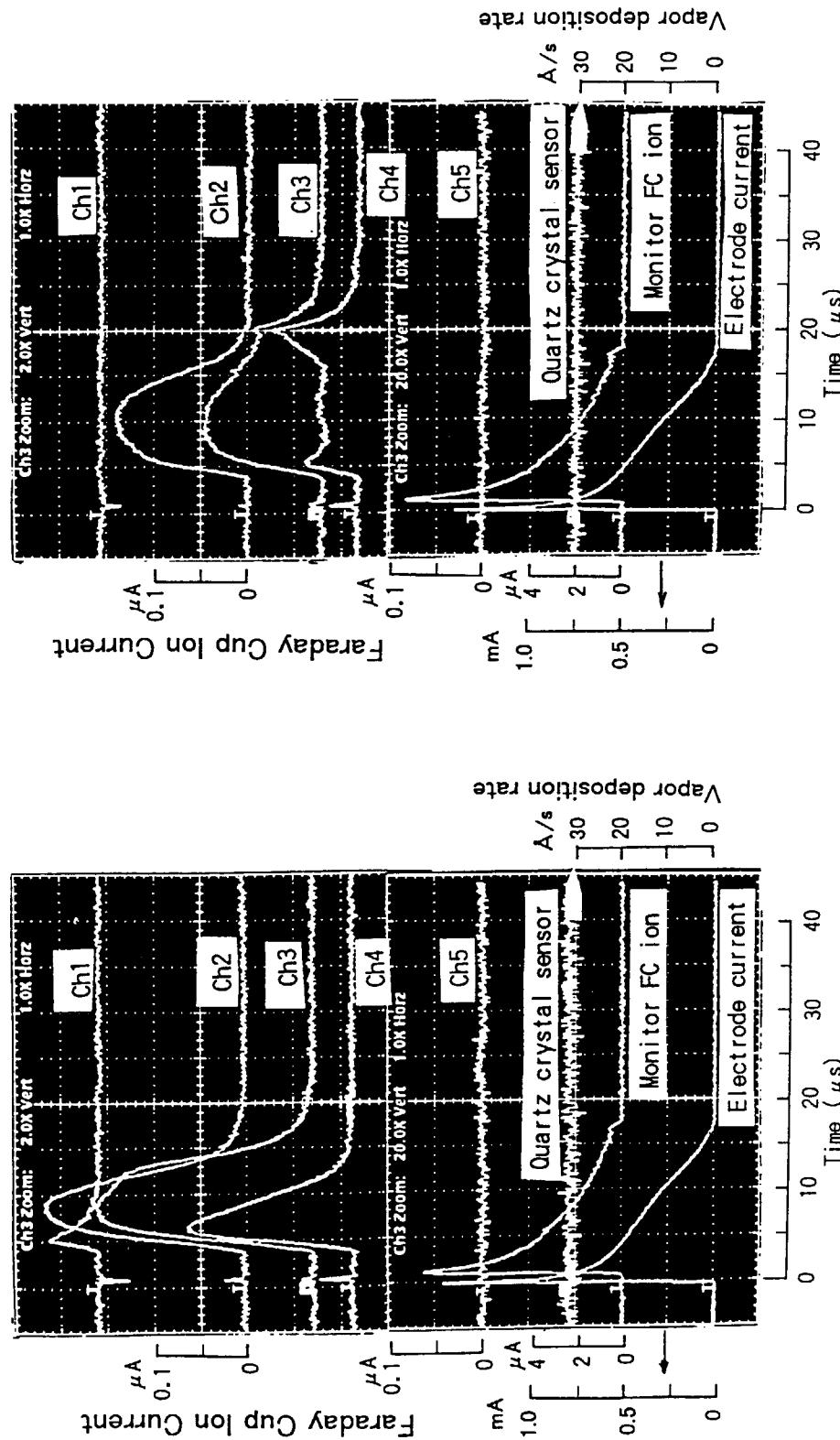


Fig.4 Examples of ion current wave form of faraday cups measured with digital oscilloscope.  
 In case of 7mm  $\phi$  hole with mesh, with supplemental electrode 3.  
 Distance between ion detector and electrode 3 : 50mm.  
 Vapor deposition rate : 30 A/s      Applied voltage on electrodes : V1=300V, V2=V3=0V

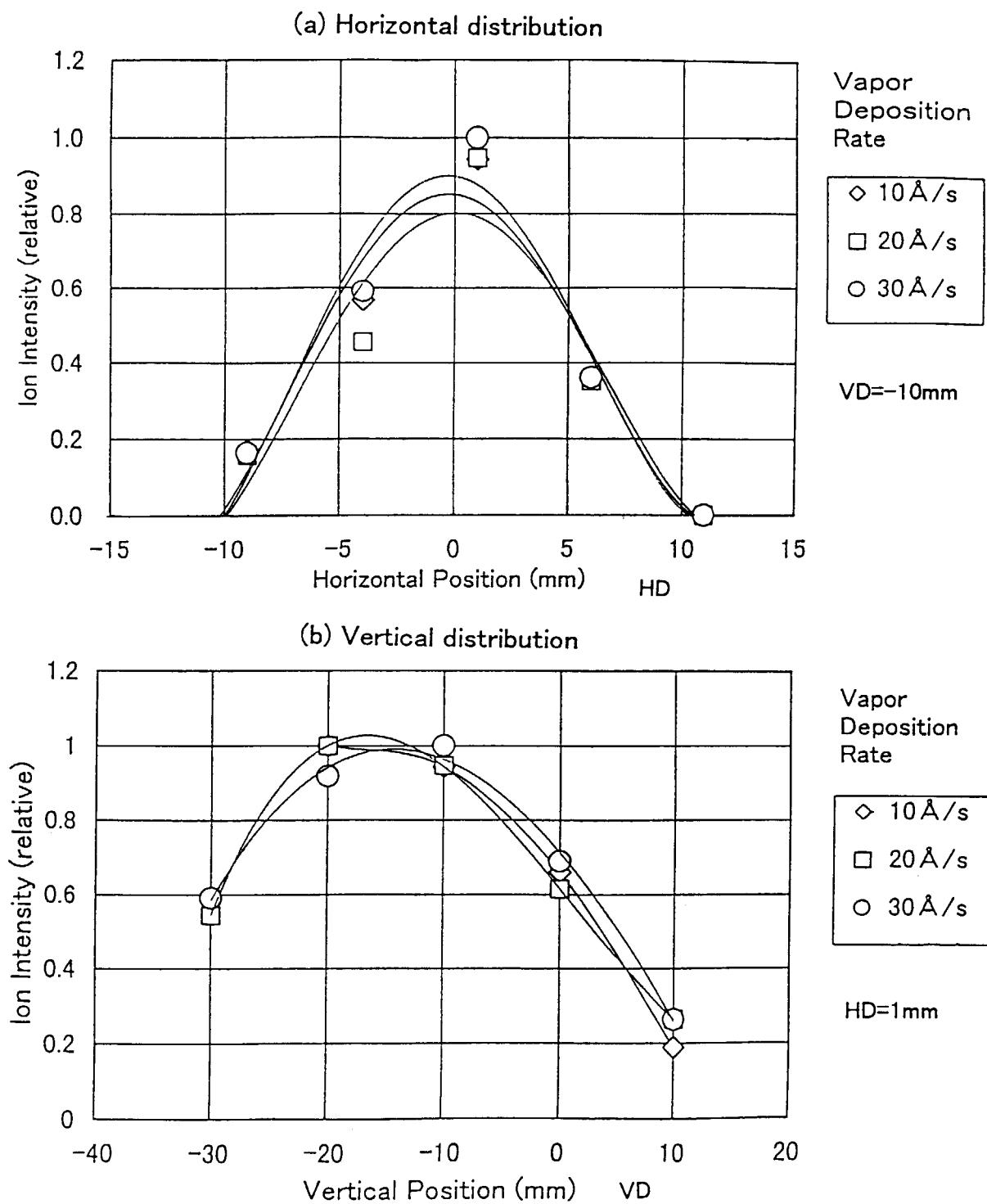


Fig.5 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.

Dependence on vapor deposition rate ( ion density ) .

In case of 4mm  $\phi$  hole with mesh, without supplemental electrode .

Distance between ion detector and electrode 2 : 60mm.

Applied voltage on electrodes : V1=100V, V2=0V

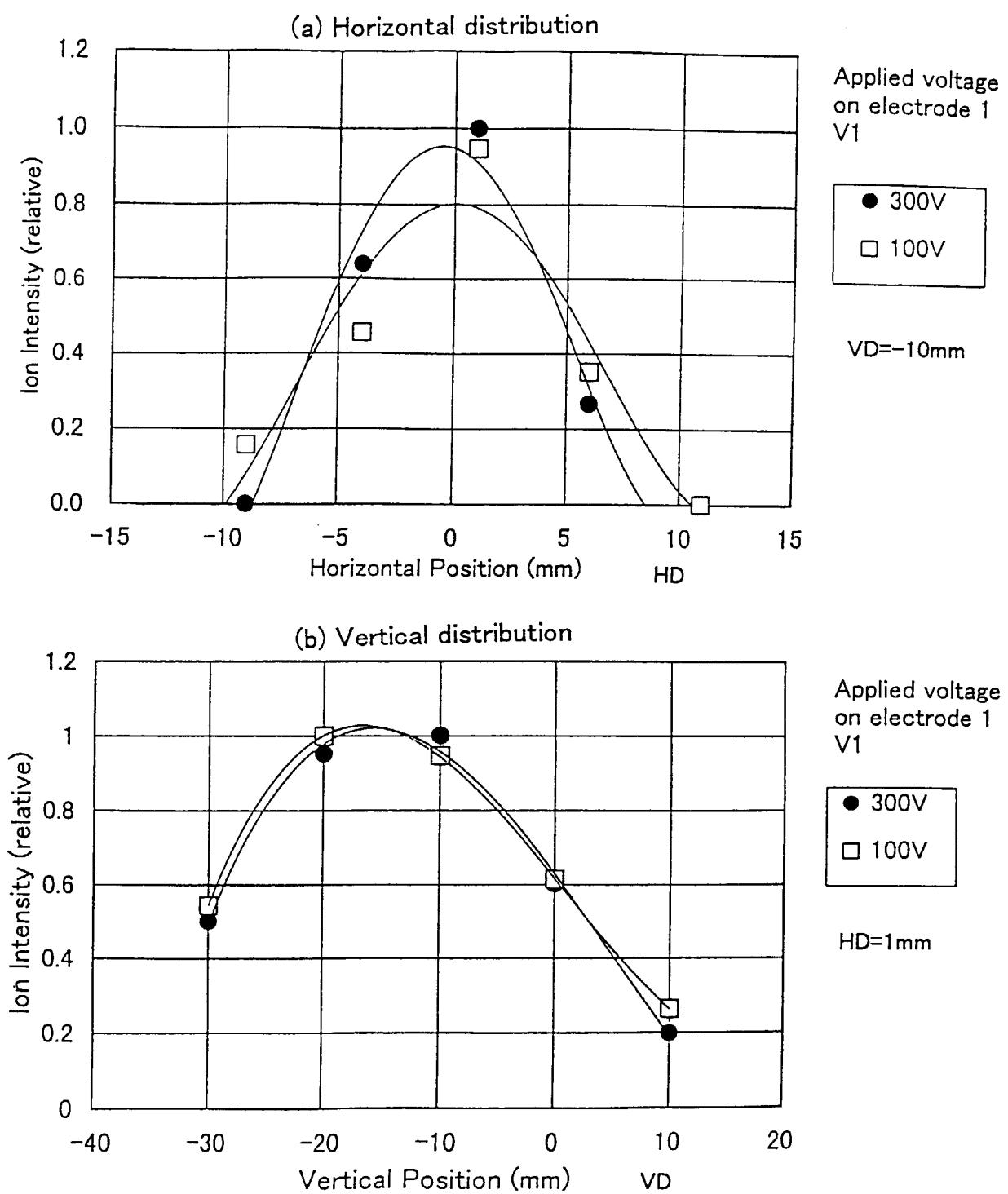


Fig.6 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.

Dependence on applied voltage on electrode 1.

In case of 4mm $\phi$  hole with mesh, without supplemental electrode .

Distance between ion detector and electrode 2 : 60mm.

Vapor deposition rate : 20Å/s

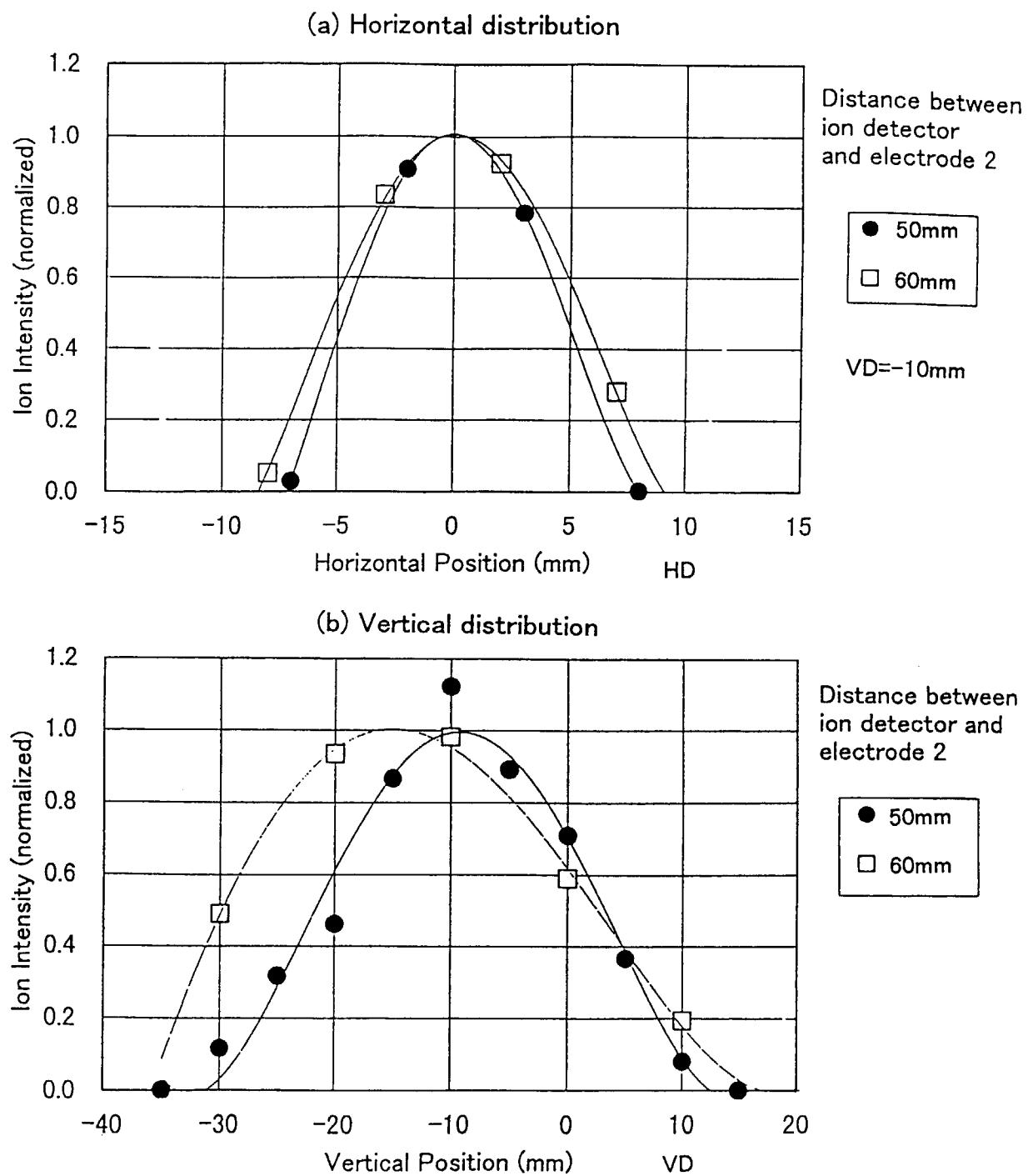


Fig.7 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.  
Dependence on distance between ion detector and electrode 2.  
In case of 4mm $\phi$  hole with mesh, without supplemental electrode.  
Applied voltage on electrodes : V1=300V, V2=0V  
Vapor deposition rate : 30Å/s

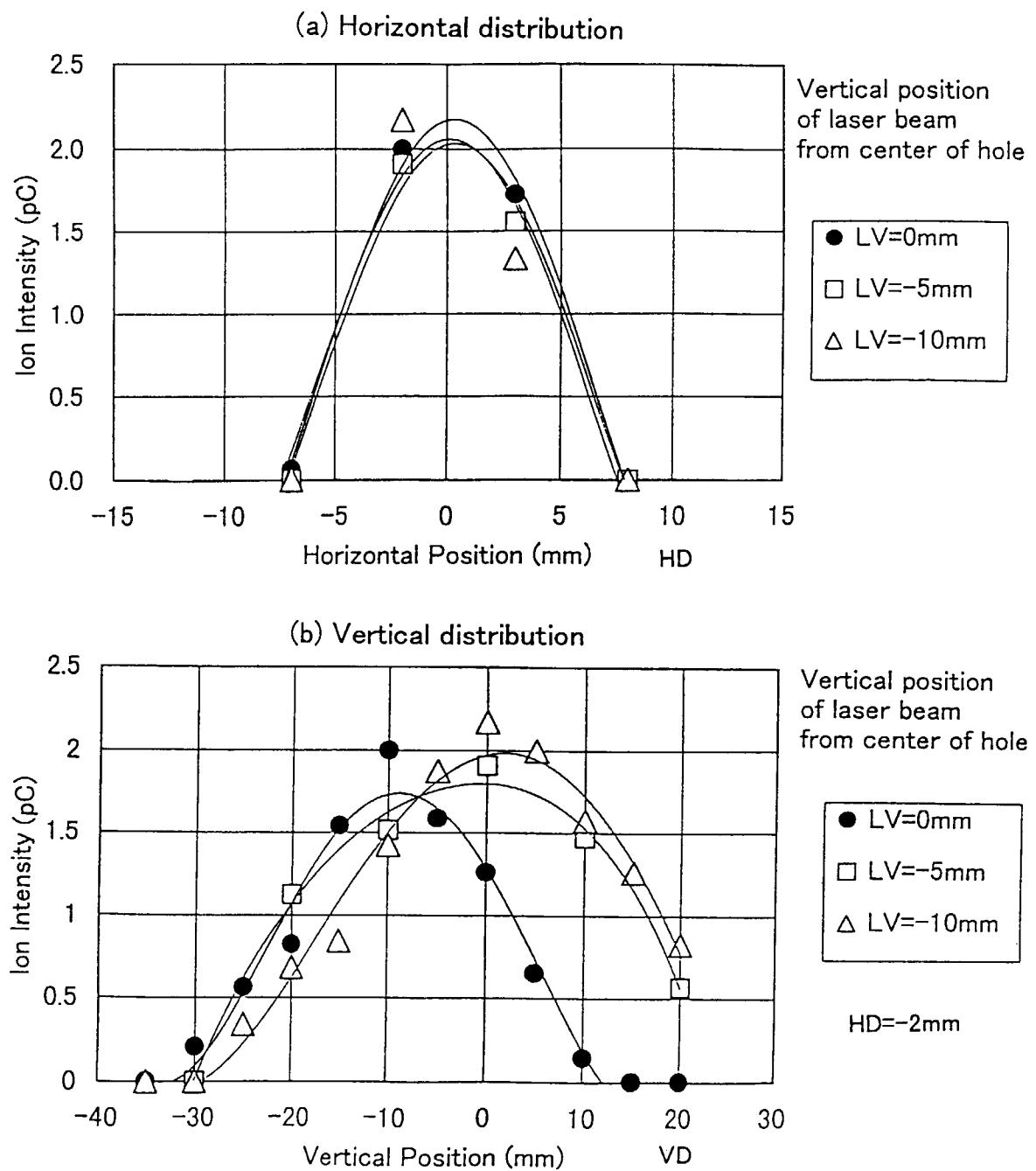


Fig.8 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.  
 Dependence on vertical position of laser beam ( plasma region ).  
 In case of 4mm  $\phi$  hole with mesh, without supplemental electrode.  
 Distance between ion detector and electrode 2 : 50mm.  
 Applied voltage on electrodes : V1=300V, V2=0V  
 Vapor deposition rate : 30Å/s

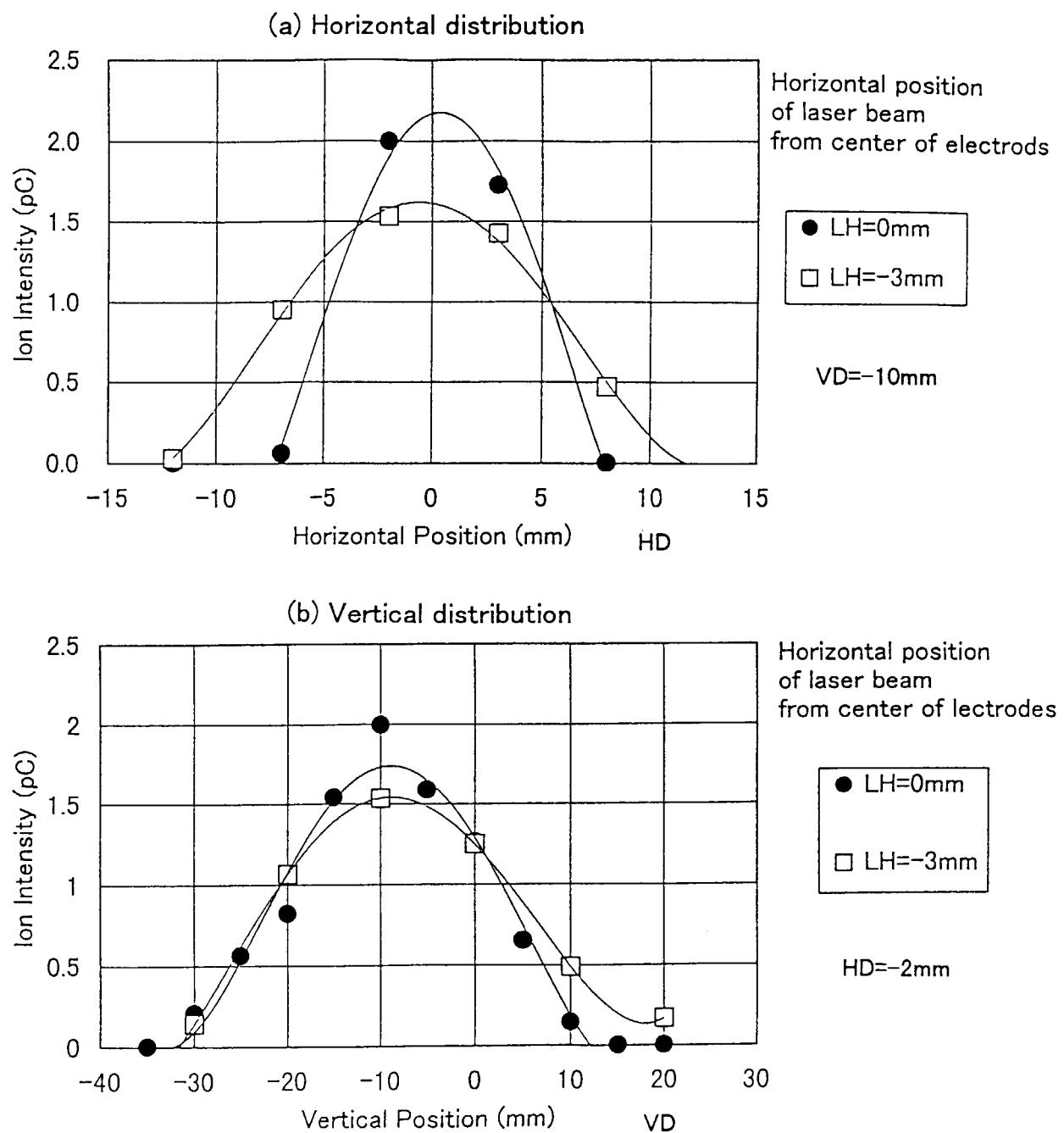


Fig.9 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.  
 Dependence on horizontal position of laser beam ( plasma region ).  
 In case of 4mm  $\phi$  hole with mesh, without supplemental electrode.  
 Distance between ion detector and electrode 2 : 50mm.  
 Applied voltage on electrodes : V1=300V, V2=0V  
 Vapor deposition rate : 30 Å/s

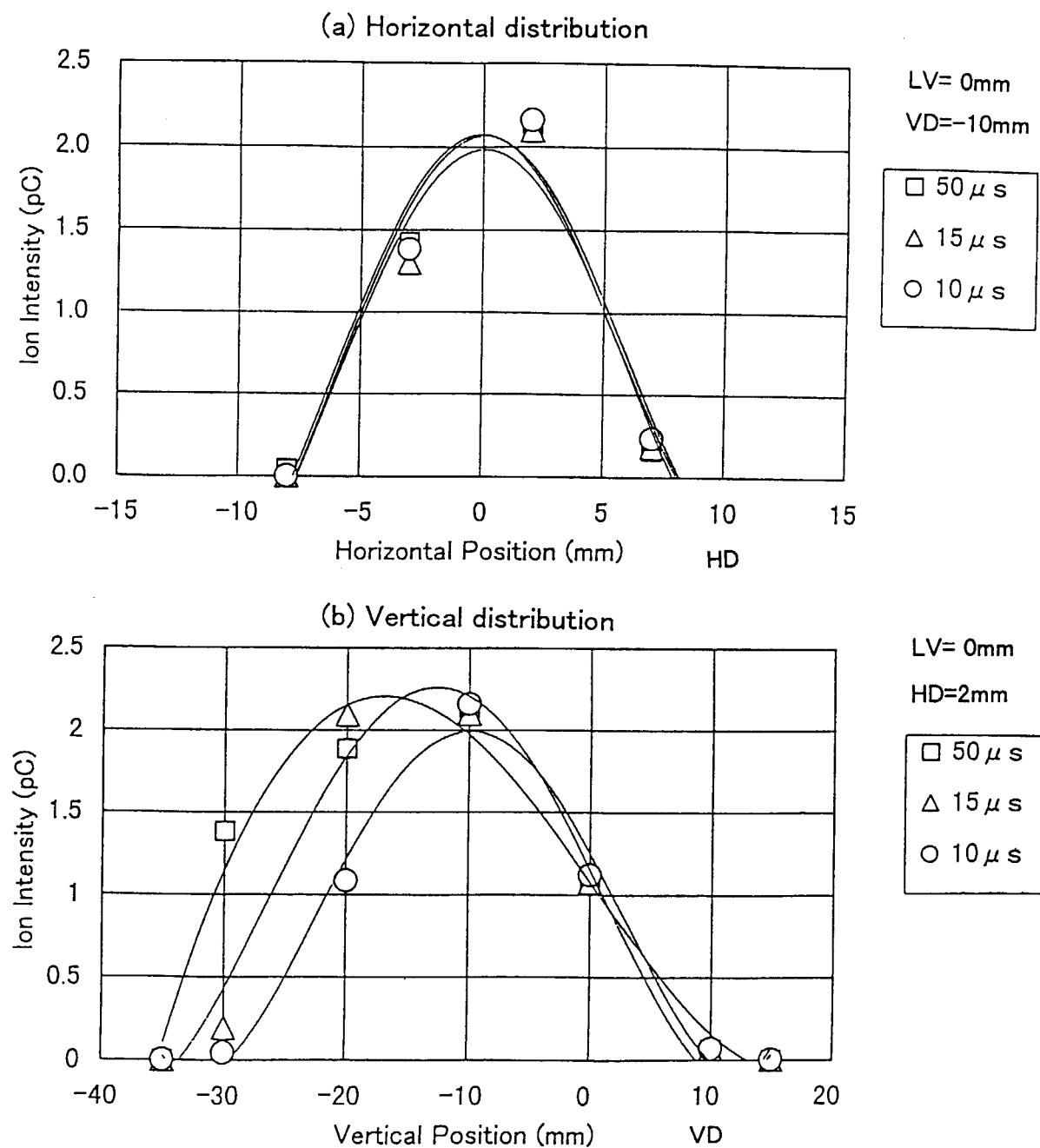


Fig.10 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.  
Dependence on time duration of applied pulse voltage on electrode 1.  
In case of 4mm  $\phi$  hole with mesh, without supplemental electrode.  
Distance between ion detector and electrode 2 : 50mm.  
Applied voltage on electrodes : V1=300V, V2=0V  
Vapor deposition rate : 30Å/s  
Vertical position of laser beam (plasma production region) : 0mm

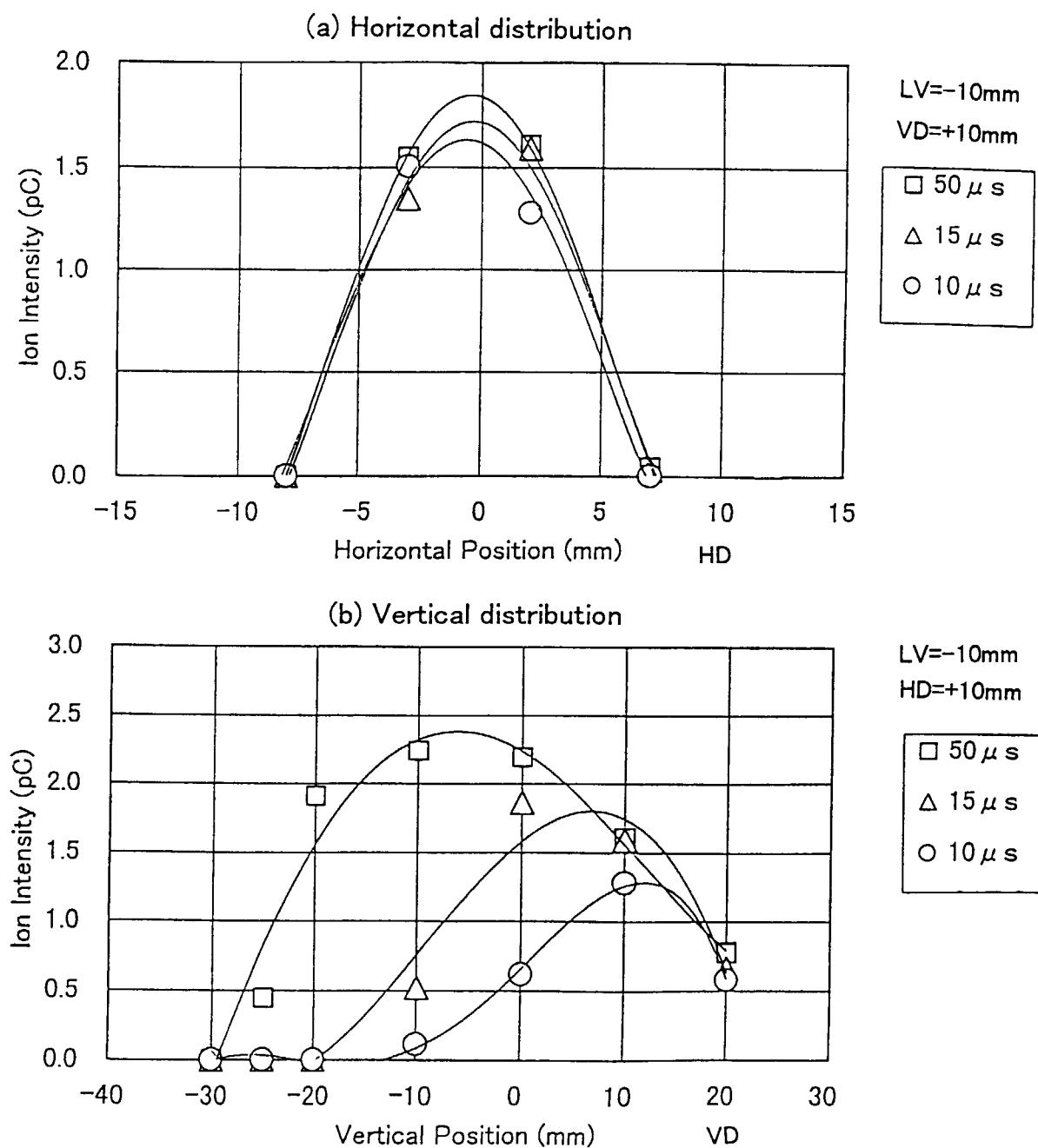


Fig.11 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.  
Dependence on time duration of applied pulse voltage on electrode 1.  
In case of 4mm  $\phi$  hole with mesh, without supplemental electrode.  
Distance between ion detector and electrode 2 : 50mm.  
Applied voltage on electrodes : V1=300V, V2=0V  
Vapor deposition rate : 30 Å/s  
Vertical position of laser beam (plasma production region) : -10mm

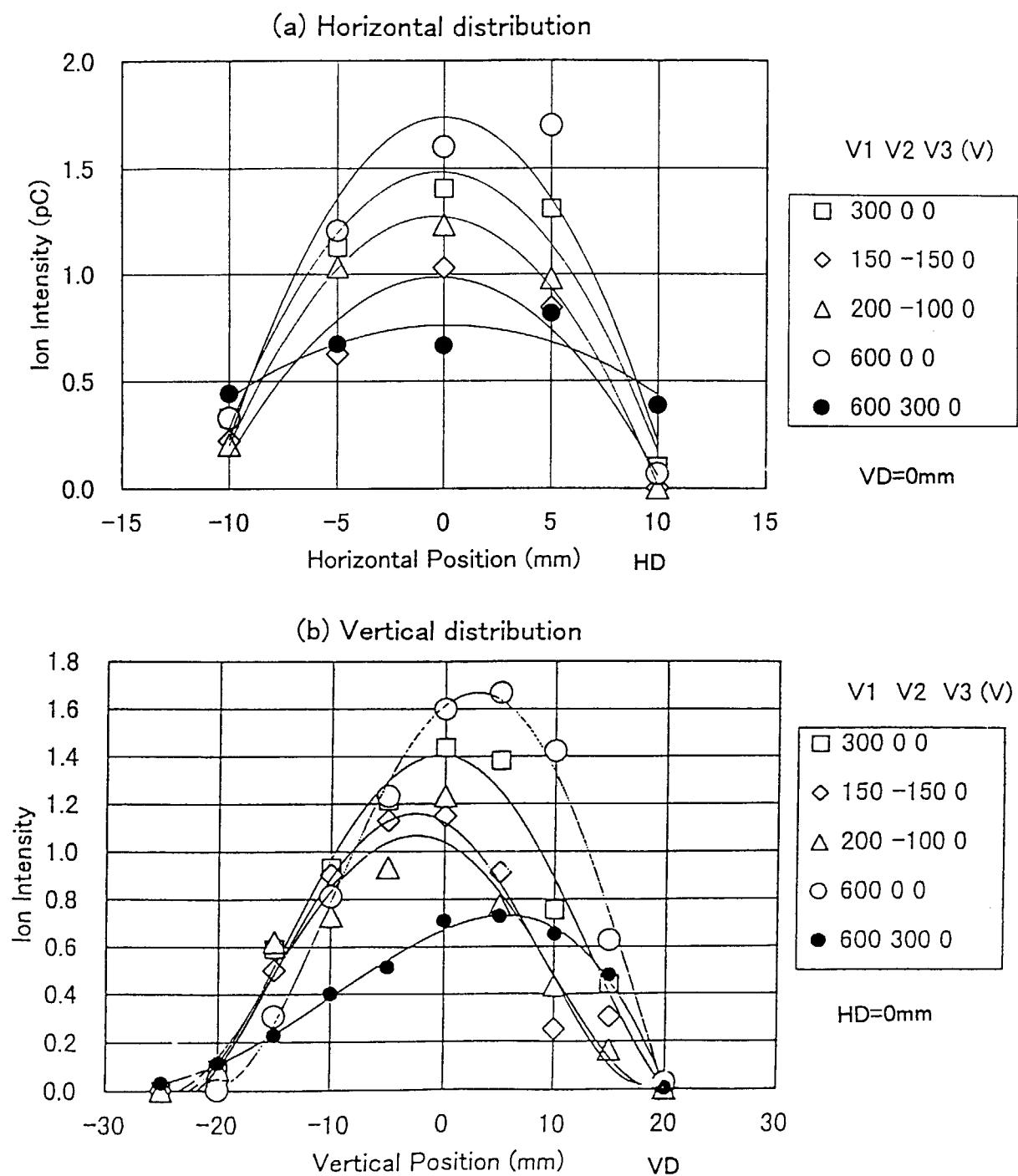


Fig.12 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.  
 Dependence on applied voltage on electrodes.  
 In case of 7mm  $\phi$  hole without mesh, with supplemental electrode 3.  
 Distance between ion detector and electrode 3 : 50mm.  
 Vapor deposition rate : 30 Å/s

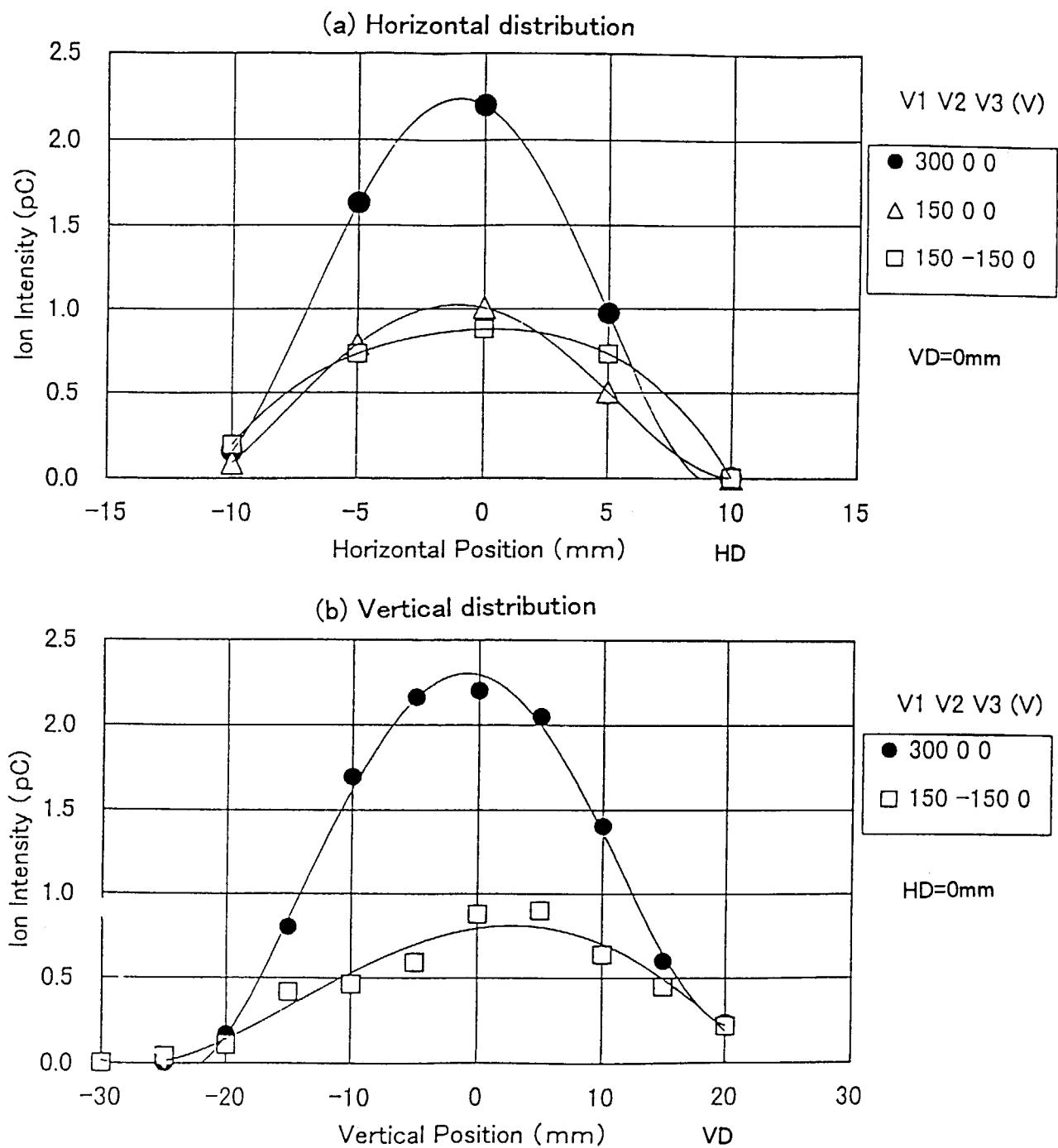


Fig.13 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.  
Dependence on applied voltage on electrodes.  
In case of 7mm  $\phi$  hole with mesh, with supplemental electrode 3.  
Distance between ion detector and electrode 3 : 50mm.  
Vapor deposition rate : 30 Å/s

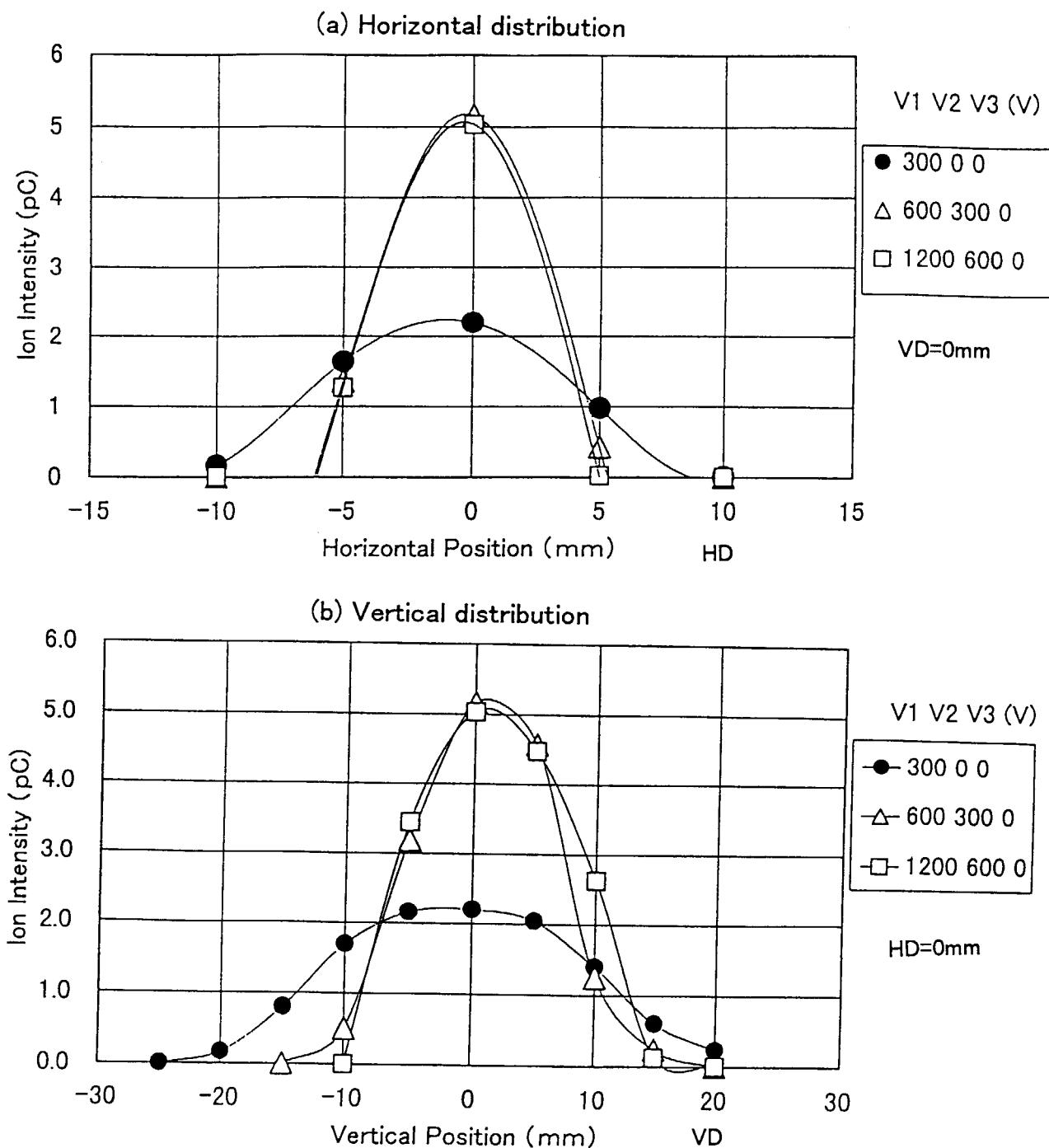


Fig.14 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.  
Dependence on applied voltage on electrodes.  
In case of 7mm  $\phi$  hole with mesh, with supplemental electrode 3.  
Distance between ion detector and electrode 3 : 50mm.  
Vapor deposition rate : 30Å/s

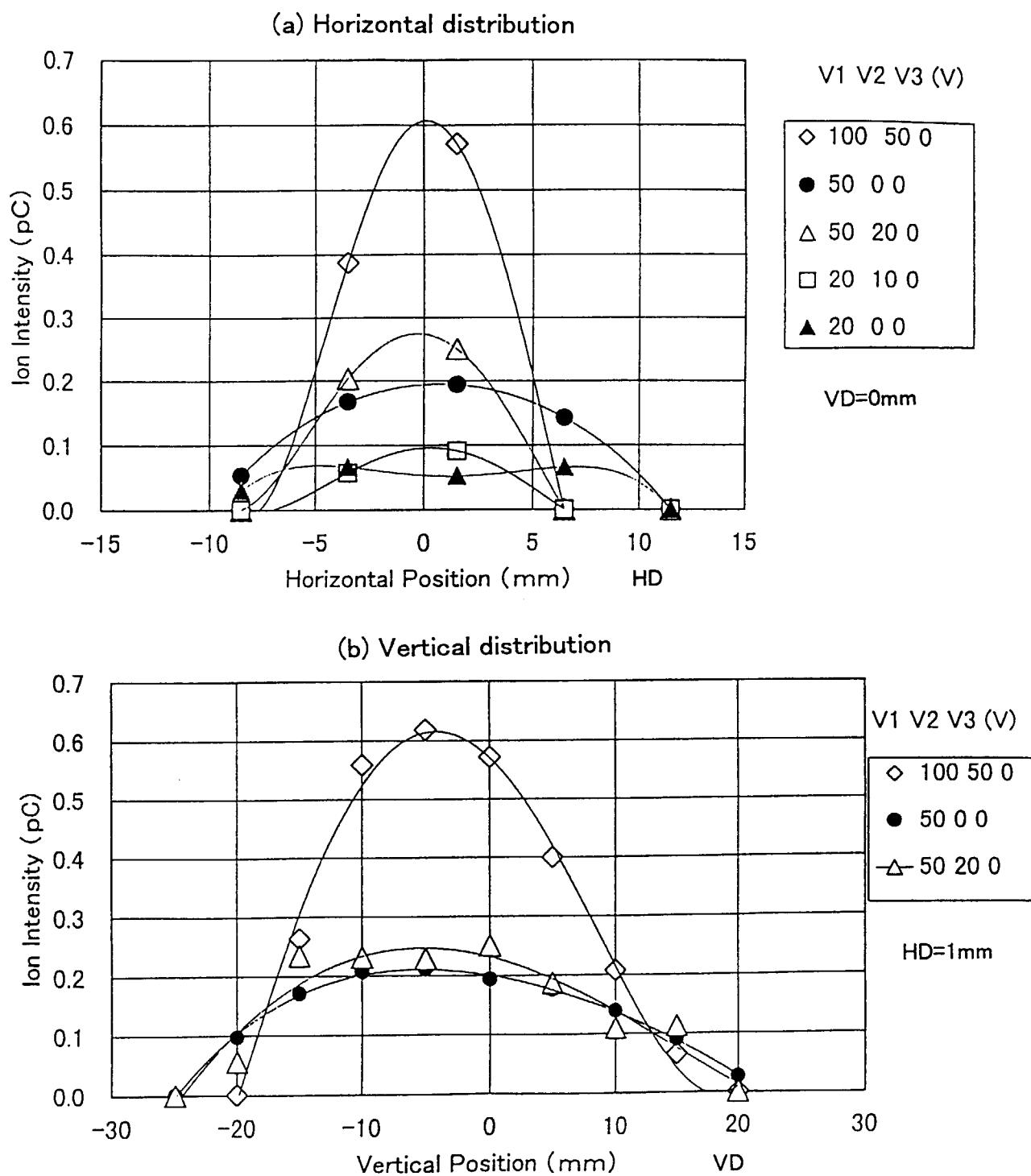


Fig.15 Ion intensity distribution. (a) Horizontal distribution. (b) Vertical distribution.  
Dependence on applied voltage on electrodes.  
In case of 7mm $\phi$  hole with mesh, with supplemental electrode 3.  
Distance between ion detector and electrode 3 : 50mm.  
Vapor deposition rate : 30Å/s

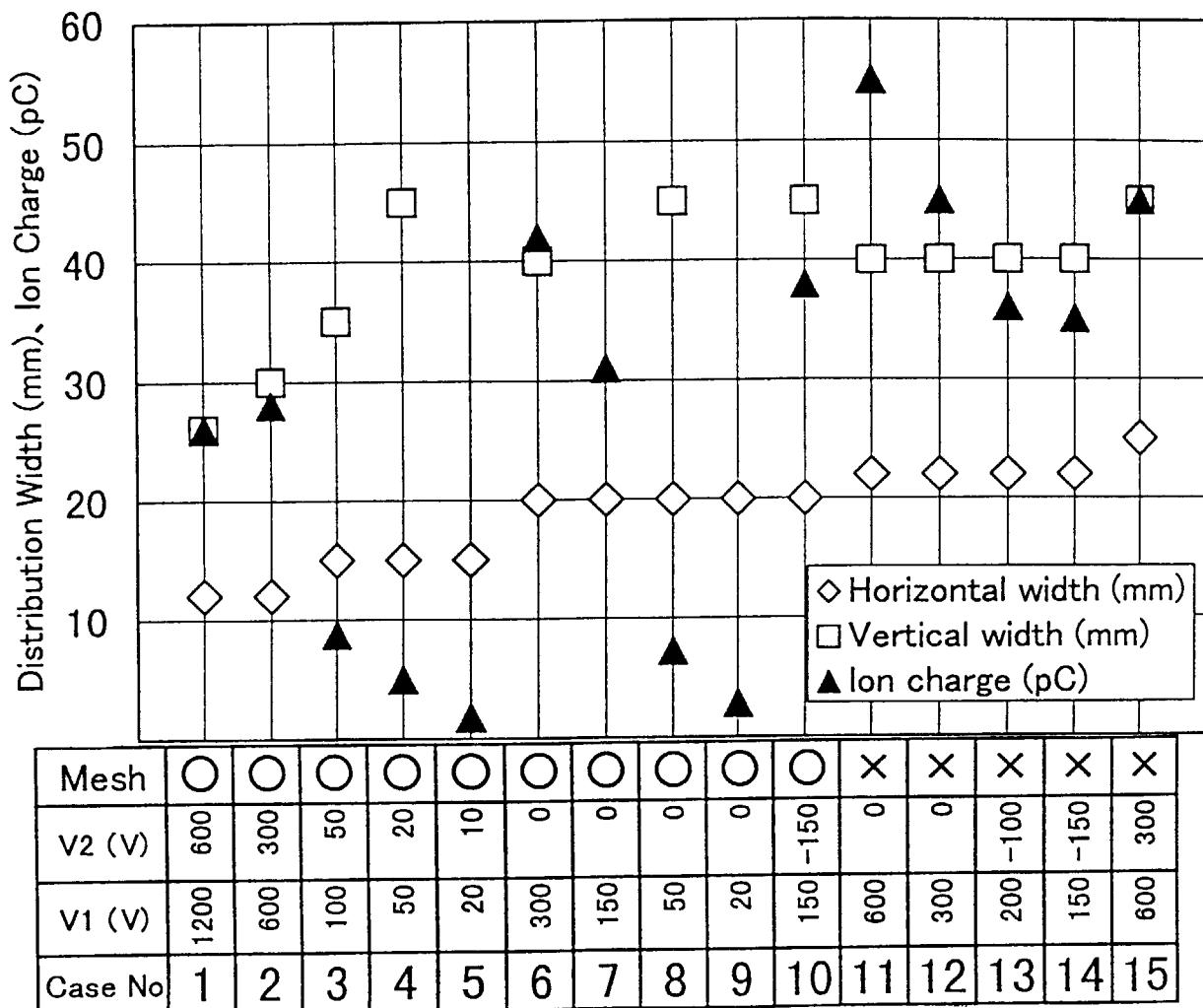


Fig.16 Summary of intensity distribution of ion beam.

Horizontal and vertical full width of distribution, and ion charge.

In case of 7mm $\phi$  hole, with supplemental electrode 3.

Distance between ion detector and electrode 3 : 50mm.

Vapor deposition rate : 30Å/s

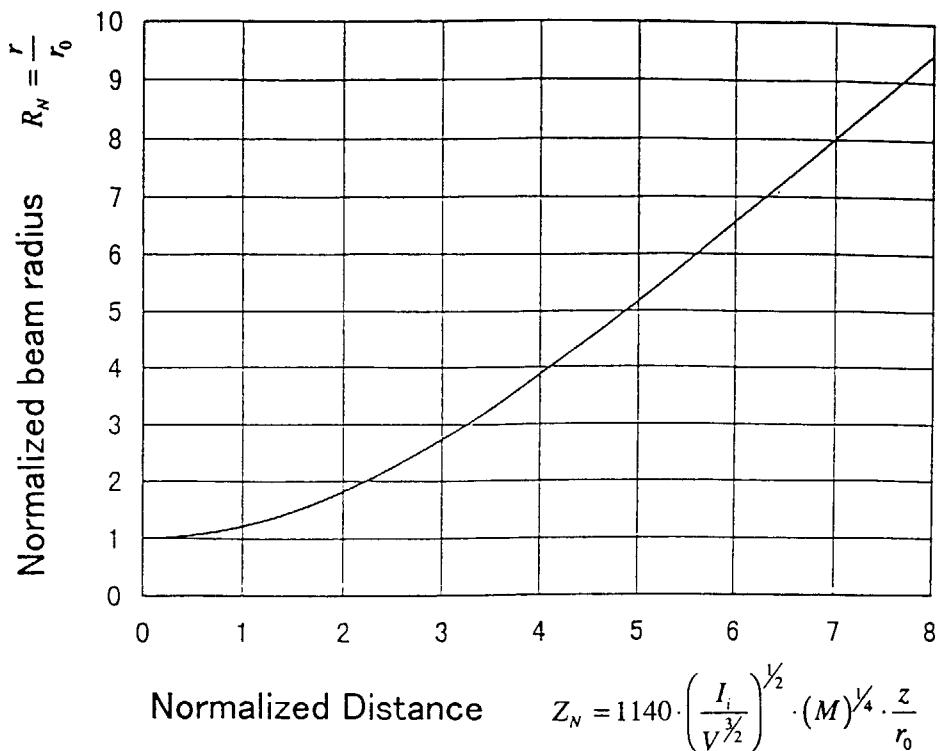


Fig.17 Plot of the beam-spread curve calculated for space-charge expansion of a uniform ion beam in laminar flow.

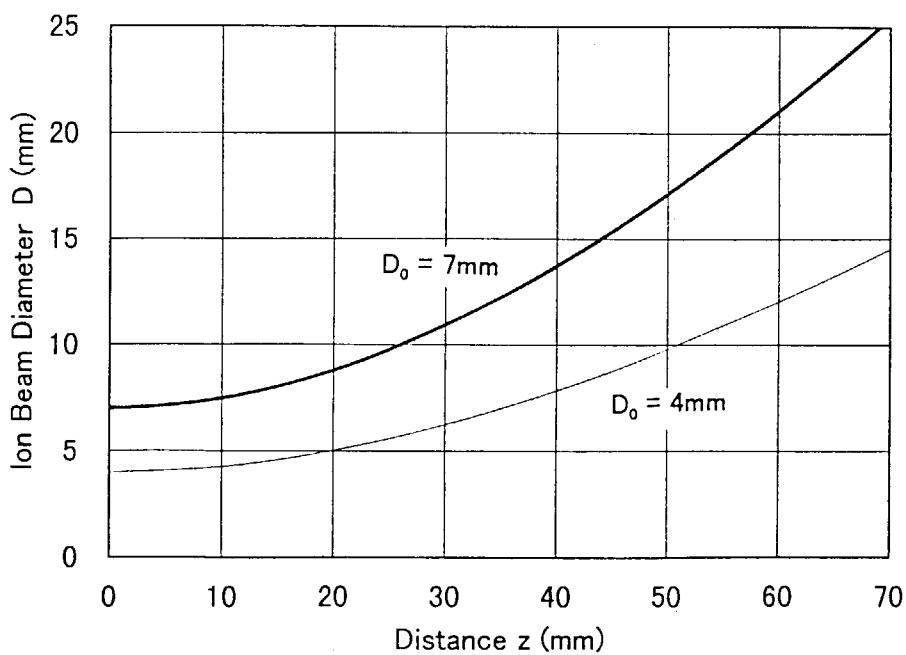


Fig.18 Plot of calculated ion beam diameter with space-charge expansion vs distance from the electrode 2.

Applied voltage on electrodes:  $V1=300\text{V}$ ,  $V2=0\text{V}$

Ion current density at the outlet hole:  $J_i = 30 \mu \text{A/cm}^2$

Diameter of the ion outlet hole:  $D_0 = 7\text{mm}$  and  $4\text{mm}$

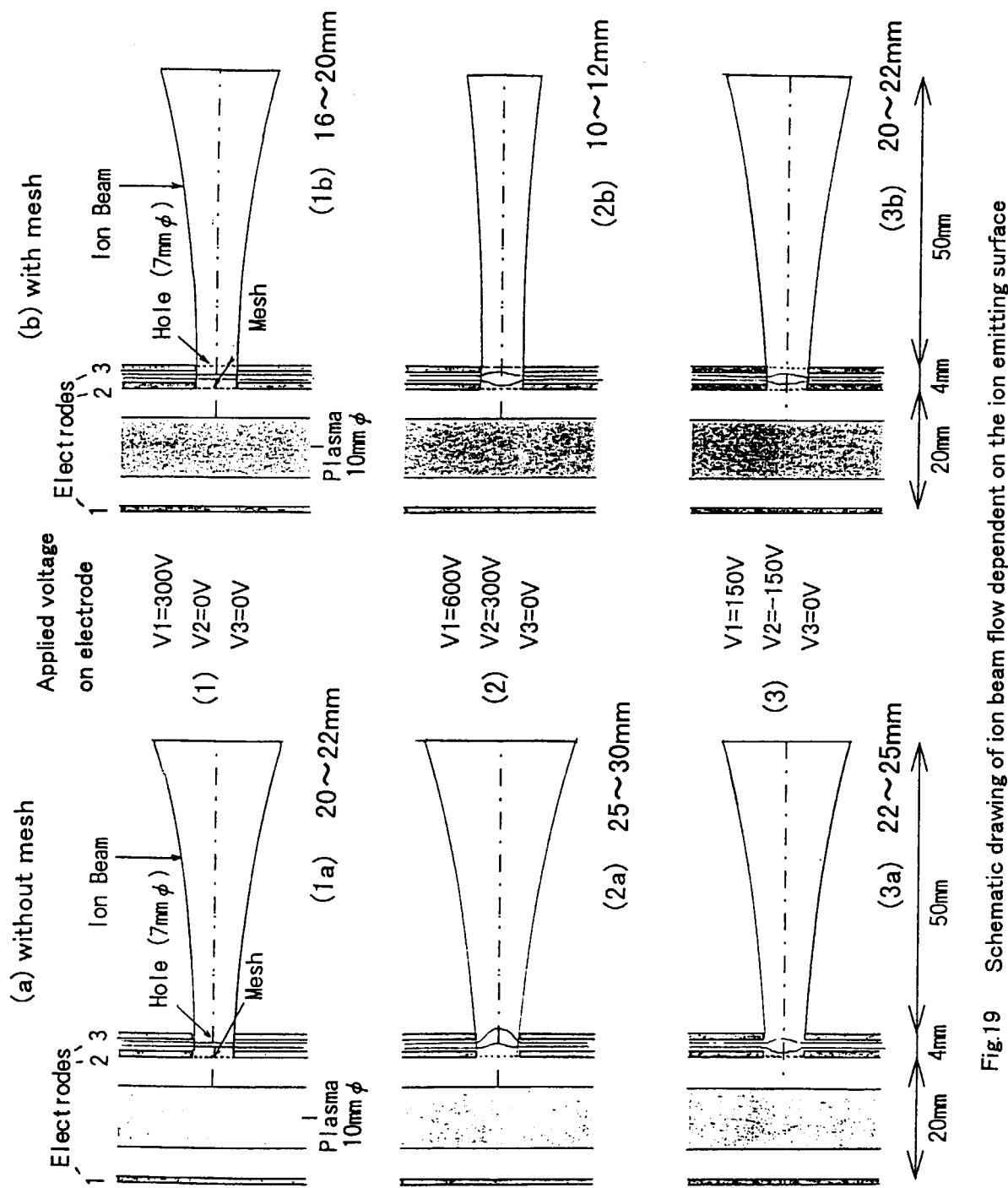


Fig.19 Schematic drawing of ion beam flow dependent on the ion emitting surface through a hole on electrode. (Horizontal view)  
With supplemental electrode, (a) without mesh and (b) with mesh

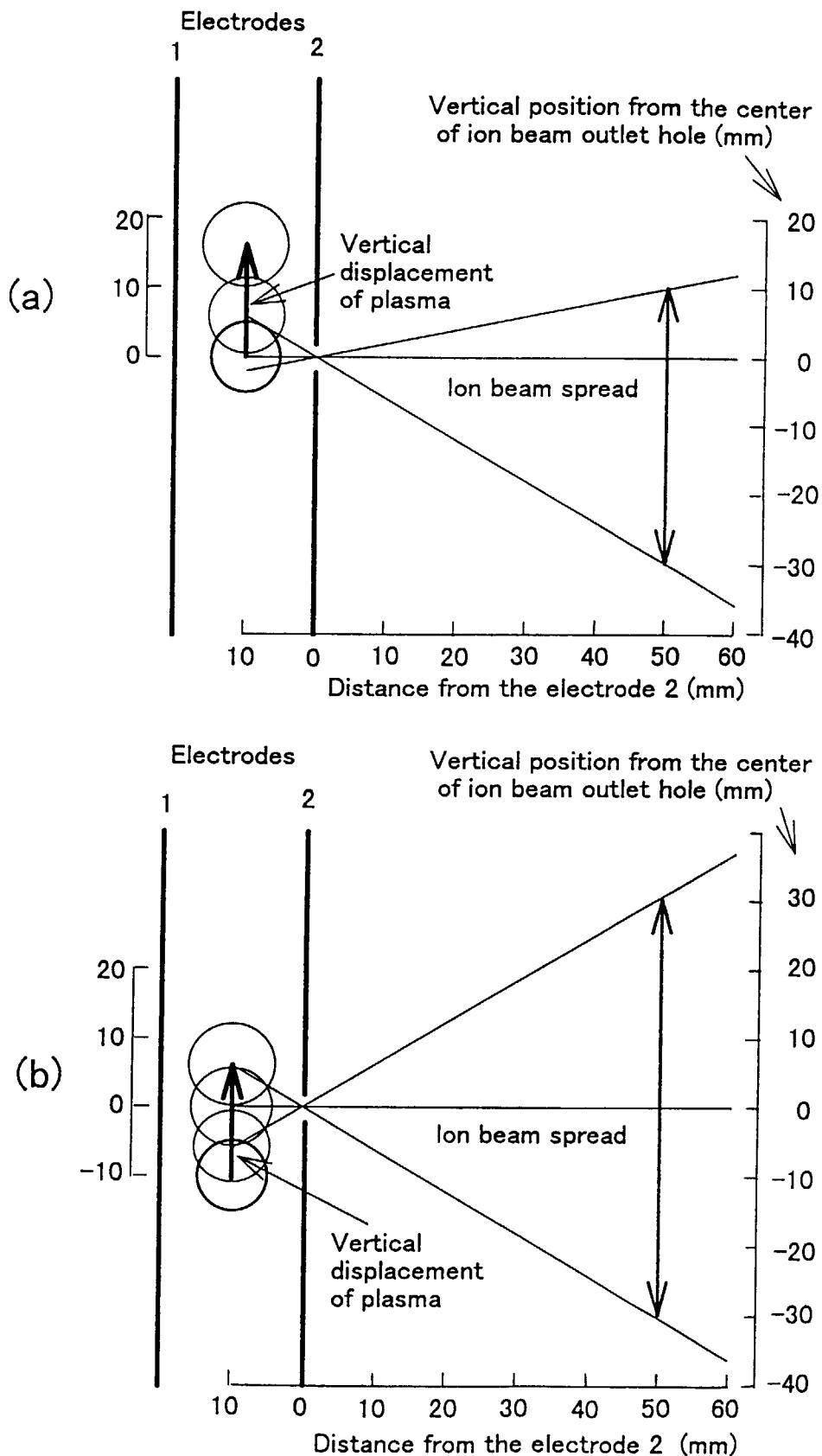


Fig.20 Schematic drawing of vertical flow of plasma region and ion beam.

(a) Vertical position of initial plasma center  $LV=0\text{mm}$

(b) Vertical position of initial plasma center  $LV=-10\text{mm}$

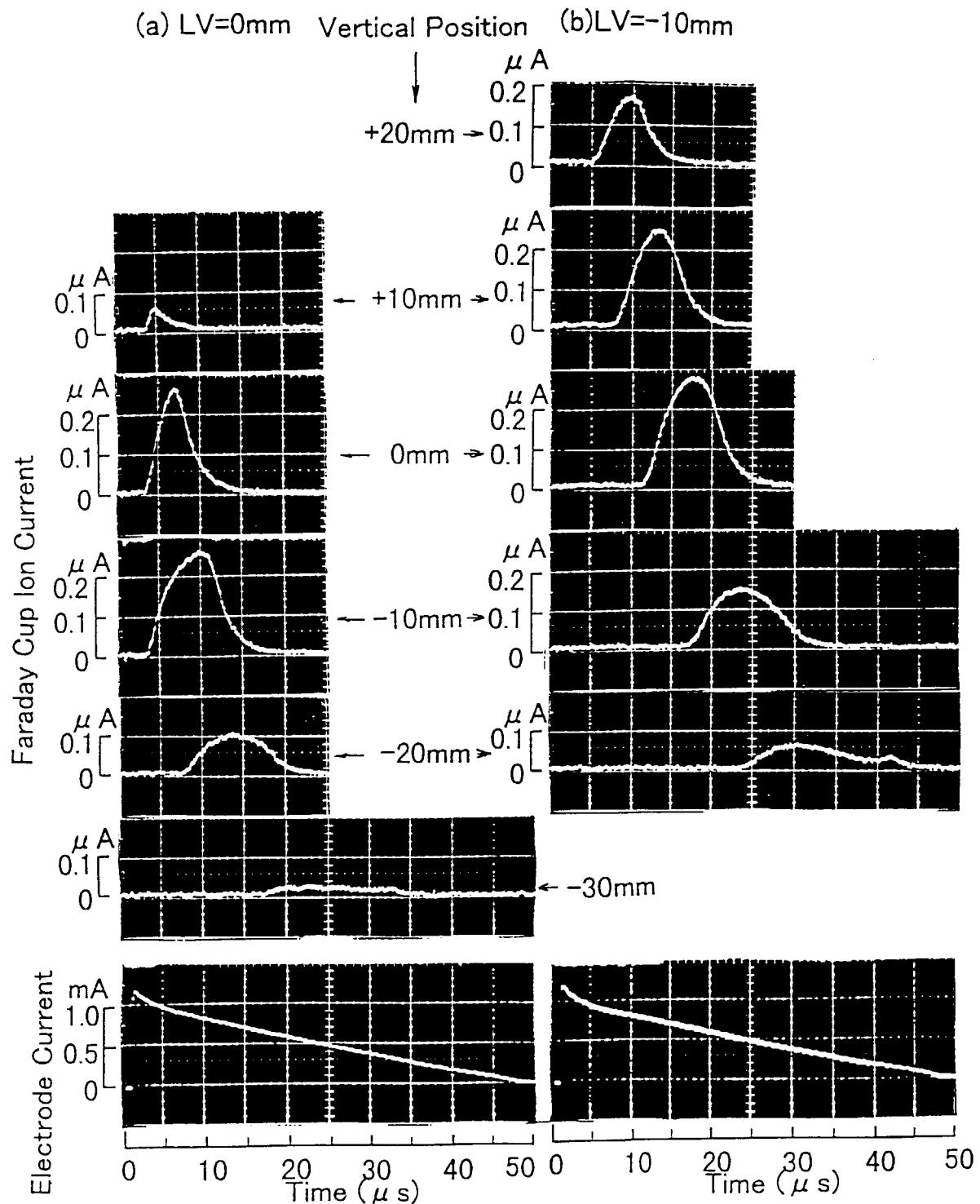


Fig.21 Example of variation of ion current wave-form with vertical position of ion detector.  
 In case of 4mm  $\phi$  hole with mesh, without supplemental electrode.  
 Distance between ion detector and electrode 2 : 50mm.  
 Applied voltage on electrodes : V1=300V, V2=0V  
 Vapor deposition rate : 30  $\text{\AA}/\text{s}$   
 (a) Vertical position of initial plasma center LV=0mm  
 (b) Vertical position of initial plasma center LV=-10mm

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
吸収線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量率	グレイ	Gy	J/kg
当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トント	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>	
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	= 4.1855 J(15 °C)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>		
9.80665		1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>		
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>			
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>			
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>			
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>			
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1			

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	$3.7 \times 10^{10}$	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

レーザーイオン源イオンビーム強度分布