

JAERI - M
94-033

MeVイオンマイクロビーム技術の開発

—原研・早稲田大学共同研究成果報告—
(共同研究)

1994年3月

神谷 富裕・水橋 清・峰原 英介
宇都宮伸宏^{*1}・田中 隆一・丸山 優夫^{*2}
黄 明植^{*3}・則武 克誌^{*4}・松川 貴^{*3}
杉森 正章^{*5}・滝口 吉郎^{*6}・石川 正嗣^{*7}
中田 康裕^{*8}・清水 博明^{*3}・後藤 誠^{*3}
大泊 巍^{*3}

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

JAERI-M 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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1994
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

MeVイオンマイクロビーム技術の開発
—原研・早稲田大学共同研究成果報告—

日本原子力研究所高崎研究所放射線高度利用推進室

神谷 富裕・水橋 清・峰原 英介⁺
宇都宮伸宏^{*1}・田中 隆一・丸山 優夫^{*2}
黄 明植^{*3}・則武 克誌^{*4}・松川 貴^{*3}
杉森 正章^{*5}・滝口 吉朗^{*6}・石川 正嗣^{*7}
中田 康裕^{*8}・清水 博明^{*3}・後藤 誠^{*3}
大泊 嶽^{*3}

(1994年1月31日受理)

早稲田大学と原研はMeV領域のマイクロビーム技術の開発を目的として、マイクロビーム形成装置を共同で設計製作し、同大学理工学研究所の1.7MVタンデム加速器のビームラインに設置した。同加速器から引出された3MeV, He⁺のビームを用いてビーム集束化の実験を行い、ターゲットにおいて $1.7 \times 1.9 \mu\text{m}^2$ のサイズのビームスポットを得た。また、ビーム集束研究の基盤技術として、加速器、特にイオン源の電流安定化の検討、精密二連四重極電磁石レンズ(Qレンズ)の磁場解析、振動測定等を行うとともに、マイクロビーム技術開発研究に必要な実験の基礎となるデータを得た。本報告は本装置の概要及び共同研究の成果について述べる。

本報告は早稲田大学との共同研究の成果である。

高崎研究所：〒370-12 群馬県高崎市綿貫町1233

+ 東海研究所原子炉工学部

*1 日新ハイボルテージ株式会社

*2 ビームオペレーション株式会社

*3 早稲田大学

*4 日本電信電話株式会社

*5 東京電力

*6 日本放送協会

*7 野村証券

*8 キヤノン株式会社

Development of MeV Ion Microbeam Technique

+

Tomihiro KAMIYA, Kiyoshi MIZUHASHI, Eisuke MINEHARA
Nobuhiro UTSUNOMIYA^{*1}, Ryuichi TANAKA, Michio MARUYAMA^{*2}
Meishoku KOH^{*3}, Katsushi NORITAKE^{*4}, Takashi MATSUKAWA^{*3}
Masaaki SUGIMORI^{*5}, Yoshio TAKIGUCHI^{*6}, Masatugu ISHIKAWA^{*7}
Yasuhiro NAKATA^{*8}, Hiroaki SHIMIZU^{*3}, Makoto GOTOH^{*3} and Iwao OHDOMARI^{*3}

Department of Advanced Radiation Technology
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received January 31, 1994)

A MeV ion microbeam apparatus was constructed for development of microbeam technique including beam focusing and beam positioning in a joint research of Waseda University and JAERI. This apparatus was installed on a beam line of a 1.7 MV tandem accelerator in Waseda University. The minimum beam spot size of $1.7 \times 1.9 \mu\text{m}^2$ at the target was achieved in beam focusing experiments using 3 MeV He ion beams. The stability of beam energy and current in the injection and the extraction

This research report is the result of the joint study with Waseda University.

+ Department of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment

*1 Nissin High Voltage Co., Ltd.

*2 Beam Operation Co., Ltd.

*3 Waseda University

*4 NTT

*5 Tokyo Electric Power Company

*6 NHK

*7 Nomura Shokan

*8 Cannon

system of the accelerator, magnetic field distribution in the doublet quadrupole magnets and natural vibration of the whole system were analyzed as basic studies of beam focusing technique. Various data obtained from these experiments were expected to be a basis for the further development of microbeam technique. This report outlines the accelerator, microbeam line systems and results of the joint research.

Keywords: MeV Ion, Microbeam, Tandem Accelerator, Beam Focusing, Beam Spot, Target, Stability of Beam Current, Magnetic Field, Doublet Quadrupole Magnets, Vibration

目 次

1.はじめに	1
2.加速器系の概要	2
2.1 全体構成	2
2.2 イオン源および加速器とその制御系	2
2.3 オートアラインシステム	5
3.マイクロビームライン	16
3.1 集束レンズ系	16
3.2 マイクロビームライン構成機器	16
4.ビーム計測実験	26
4.1 マイクロビーム形成	26
4.2 SEMを用いたビーム照準	27
4.3 リング型SSD	28
5.加速器安定化の検討	43
5.1 測定の目的	43
5.2 測定の方法	43
5.3 測定結果	43
5.4 まとめ	45
6.レンズの磁場解析	54
6.1 はじめに	54
6.2 磁場分布の測定	54
6.3 磁場計算	55
6.4 多重極磁場成分	55
7.防振システム	60
7.1 はじめに	60
7.2 防振を施さない系の振動測定の結果と考察	60
7.3 防振処理	61
7.4 防振処理後の振動測定の結果と考察	65
8.今後の展望	81
8.1 シングルイベント実験への応用	81
8.2 大気中照射実験	82
9.まとめ	85
謝 辞	85

参考文献	86
付 錄	87

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Accelerator System	2
2.1 System Constitution	2
2.2 Ion Source, Accelerator and Their Controlling System	2
2.3 Auto-alignment System	5
3. Microbeam Line	16
3.1 Focusing Lens System	16
3.2 Constitution of the Microbeam Line	16
4. Beam Measurement Experiments	26
4.1 Microbeam Focusing	26
4.2 Beam Positioning using SEM	27
4.3 Annular SSD	28
5. Study for Stabilizing the Accelerator	43
5.1 Purpose of Stability Measurement	43
5.2 Method of Stability Measurement	43
5.3 Results of Stability Measurement	43
5.4 Summary	45
6. Field Analysis of Quadrupole Magnet	54
6.1 Purpose of Field Analysis	54
6.2 Measurement of Field Distribution	54
6.3 Calculation of Field Distribution	55
6.4 Multi-pole Field Components	55
7. Anti-vibration of Microbeam Apparatus	60
7.1 Necessity of Anti-vibration System	60
7.2 Vibration Measurement without Anti-vibration System	60
7.3 Construction of Anti-vibration System	61
7.4 Vibration Measurement with Anti-vibration System	65
8. New Applications	81
8.1 Single Event Upset Experiment	81
8.2 In-air Irradiation Experiment	82
9. Summary	85
Acknowledgement	85
References	86
Appendices	87

1. はじめに

MeVイオンマイクロビーム技術は、核子当たり 1 MeV程度のエネルギーのイオンビームを集束して $1 \mu\text{m}$ 程度のスポットを形成する技術である。従来この領域のエネルギーの水素あるいはヘリウムイオンビームは、特性X線励起（PIXE）あるいは後方散乱（RBS）等による微量元素分析プローブとしてよく用いられてきた。マイクロビームは、それを一步進めて微小サイズのビームをスキャンすることにより、試料の局所微量元素分析を可能にした¹⁾。現在は半導体工学、生物学、医学、あるいは考古学、冶金学等様々な研究分野へ応用されている²⁾。

日本原子力研究所高崎研究所では、マイクロビーム技術の開発を放射線高度利用研究計画³⁾の中の重要なテーマの一つとみなしている。その目的は従来の軽イオンによる局所分析だけではなく重イオンマイクロビームによる新しい応用である。シングルイオンヒット技術との組合せにより、半導体の集積回路あるいは生物細胞の任意の微小領域への 1 個の高エネルギーの重イオン入射の影響を評価する研究が計画された。一方早稲田大学においても、マイクロビーム装置を用いた新たな研究の展開が計画された。半導体素子の微小領域への高エネルギーイオン入射によるソフトエラー耐性評価手段の確立を目指す研究である。

両者は、それぞれの目指す研究の基盤となる技術を確立するために、1987年10月から共同研究を開始した。ここでは $2 \mu\text{m}$ 以下のマイクロビーム形成、狙った位置へのビーム照準及びそれにともなうビーム計測技術等を確立することを目標とした。使用した加速器は、早稲田大学が理工学研究所内に所有する 1.7 MV タンデム型静電加速器（NEC社製 5SDH型）である。マイクロビーム装置の設計に当たっては世界すでに稼働して実績のある装置^{4) 5) 6)}を参考にした。これらのうちレンズ系の構成が最も単純なハイデルベルグタイプの二連四重極電磁石を使用するシステム⁶⁾を採用することにした。製作されたマイクロビーム装置はタンデム加速器の 15 度ビームライン上に設置し、約 3 年間、ビームラインのアライメントから 3 MeV の He イオンビームを用いたビームサイズ計測及びビーム照準の実験へと研究を進め、1991年3月、目標の達成をもって共同研究を終了した。

本研究において、今後のマイクロビーム技術の開発のための幾つかの有用な基礎データを得た。精密 Q レンズは、2つの極性の異なる四重極磁場を発生し、イオンビームをターゲット上に集束するためのものである。しかし、実際に得られる磁場は、理想的な四重極磁場に高次の多重極成分が混入したものとなる。それは磁極形状の幾何学的制約や、工作時の不揃いによるものである。この特性を電磁石の磁場分布の測定及び計算機シミュレーションの双方から解析した。装置の振動は、マイクロビーム走査によるマッピング像の分解能及びビーム照準の精度に直接影響を与える。振動源の特定や防振のために精密な測定器による振動解析及び対策を施した。マイクロビーム光学系のアクセプタンスは、加速器から引出されたビームのエミッタンスと比較して極めて小さい。その結果加速器ビームの電流プロファイル及び軌道のわずかな変動がマイクロビームターゲットでの電流の変動に大きく影響する。加速器イオン入射系に使用されている電源の電圧安定度がこれに直接影響すると考えたので、これらのビーム電流安定度への影響を測定した。

本報告では、装置の概要、ビームサイズ測定やテストサンプルの二次電子マッピングの方法及び測定結果について述べる。また、ビーム照準の原理及び実験についても述べる。その他の特性解析のための実験及び結果、この研究で新たに開発されたソフトウェアについても付け加える。

2. 加速器系の概要

2.1 全体構成

Fig. 1に示すように、早稲田大学重イオンビーム応用研究施設のタンデム加速器は、R F イオン源、低エネルギービーム輸送系、タンデム加速器本体、高エネルギービーム輸送系によって構成されている。スイッチングマグネットによる15度ライン上にイオンマイクロビーム装置が設置された。マイクロビームラインについては、次章で詳細に述べる。また、この上流には、スリット電流フィードバックによるオートビームアラインシステム (Auto beam align system) を加速器のスリットフィードバックシステムとは別に付加し、ビーム軌道を安定化させて安定したビーム電流の確保を可能にした。

本章では、イオン源および加速器とその制御系、オートアラインシステムについて説明する。

2.2 イオン源および加速器とその制御系

2.2.1 イオン源^{7) 8) 9)}

本システムで用いているイオン源は荷電変換型R F型イオン源である。このイオン源は真空中に引いた石英管のなかに気体 (H_e または H_2) を流入させ、高周波放電により発生するプラズマ中から、正イオンを抽出するものである。後述のように本システムの加速器はタンデム型であるため、負イオンを注入する必要があり、R F型イオン源より得た正イオンをルビジウム (Rb) 雾囲気中に通過させ、 Rb 蒸気とイオンの衝突による荷電変換によって負イオンを得ている¹⁰⁾。

Fig. 2に本装置のイオン源の断面図を示す。高圧電界がガスを入れた石英管を囲むリングに加えらる。R F発振周波数は 100 MHz である。管内で発生したプラズマに対して Ta カナルと陽極との間に引出し電圧～6 kVを印加し正イオンを抽出する。引き出されるイオン電流は

$$I_F = F n v \delta / 4 \quad (1)$$

で表される。ここに F は引出し電極付近のプラズマ境界の表面積、 n はプラズマ密度、 v はイオンの平均速さ、 δ は引出し効率である。大きいイオン電流 I_F を得るには、プラズマ

本報告では、装置の概要、ビームサイズ測定やテストサンプルの二次電子マッピングの方法及び測定結果について述べる。また、ビーム照準の原理及び実験についても述べる。その他の特性解析のための実験及び結果、この研究で新たに開発されたソフトウェアについても付け加える。

2. 加速器系の概要

2. 1 全体構成

Fig. 1に示すように、早稲田大学重イオンビーム応用研究施設のタンデム加速器は、R F イオン源、低エネルギービーム輸送系、タンデム加速器本体、高エネルギービーム輸送系によって構成されている。スイッチングマグネットによる15度ライン上にイオンマイクロビーム装置が設置された。マイクロビームラインについては、次章で詳細に述べる。また、この上流には、スリット電流フィードバックによるオートビームアラインシステム（Auto beam align system）を加速器のスリットフィードバックシステムとは別に付加し、ビーム軌道を安定化させて安定したビーム電流の確保を可能にした。

本章では、イオン源および加速器とその制御系、オートアラインシステムについて説明する。

2. 2 イオン源および加速器とその制御系

2. 2. 1 イオン源^{7) 8) 9)}

本システムで用いているイオン源は荷電変換型R F型イオン源である。このイオン源は真空に引いた石英管のなかに気体（HeまたはH₂）を流入させ、高周波放電により発生するプラズマ中から、正イオンを抽出するものである。後述のように本システムの加速器はタンデム型であるため、負イオンを注入する必要があり、R F型イオン源より得た正イオンをルビジウム（Rb）雰囲気中に通過させ、Rb蒸気とイオンの衝突による荷電変換によって負イオンを得ている¹⁰⁾。

Fig. 2に本装置のイオン源の断面図を示す。高圧電界がガスを入れた石英管を囲むリングに加えらる。R F発振周波数は 100 MHz である。管内で発生したプラズマに対してTaカナルと陽極との間に引出し電圧～6 kVを印加し正イオンを抽出する。引き出されるイオン電流は

$$I_F = F n v \delta / 4 \quad (1)$$

で表される。ここに F は引出し電極付近のプラズマ境界の表面積、n はプラズマ密度、v はイオンの平均速さ、δ は引出し効率である。大きいイオン電流 I_F を得るには、プラズマ

密度 n を増すことが重要であるので、本システムでは励磁コイルを石英管の周りに巻き石英管の中心軸上でのプラズマ密度を高めるように工夫している。

引き出されたビームは次に R_b 変換槽において電荷変換を起こす。 R_b は変換槽の下にある容器の中に蓄えられており、その容器を $\sim 220^\circ\text{C}$ 程度に加熱することで気化させる。気化した R_b は変換槽まで上昇し、一時的にそのなかで留まっているが冷却されている変換槽の壁に衝突して温度が下がり液化して容器に戻って循環している。本システムの R_b によるイオンの電荷変換効率は $1 \sim 2\%$ である。冷却が不完全であると、気化した R_b が容器に戻らずに装置内に拡散し、カナルや後で述べるギャップレンズ等に付着し、カナルを腐食したり、ギャップレンズにおいて放電を誘発する。また、イオンの電荷変換効率も下がる。このため R_b 容器の十分な冷却が必要であり、空気のほか熱交換がよいフレオノンを用いている。本イオン源の基本性能を Table 1 にまとめた。

2. 2. 2 イオンインジェクタ

イオンインジェクタはイオン源で発生した負イオンを加速器に注入する機能をもち、2つの電界レンズ (Gap lens および Einzel lens)、 $E \times B$ 質量分析器および静電偏向板 (Steerer) から構成されている^{3), 6)}。その概略を Fig. 3 に示す。負の電位に置かれたイオン源 (Fig. 3 右側) より押出されイオンビームはギャップレンズと呼ばれる接地円筒によって、発散を抑えられるとともに、初段の加速がなされる。加速されたイオンビームはその後ギャップレンズの下流に設置された $E \times B$ 質量分析器により質量分析され、所望のイオンのみが加速管に注入される。質量分析は、イオンビームに縦方向に 1 kG の磁場、横方向にはヴェロシティーセレクターへ任意の電界を印加することにより行われる。 $E \times B$ 質量分析器はイオンの軌道を曲げることなく質量分析を行うことができるが、本装置では電荷を持ったイオンのみならず、中性粒子も存在するため、この中性粒子を取り除くためにイオンビームの軌道は、Fig. 3 に示すように 3° 曲げられている。 $E \times B$ 質量分析器により所望のイオンのみとなったイオンビームは、AINツェルレンズと呼ばれる 3 つの金属円筒からなる電界レンズによって焦点を加速管の入口に合うよう集束される。これは加速管に注入するイオンビームの電流量を大きくするためである。またこの後段にはステアラーが設置されており、上下方向のビームの軌道はステアラーによって補正可能となっている。本研究に用いられた He イオンの場合にはギャップレンズの電圧が $\sim 18 \text{ kV}$ 、ヴェロシティーセレクター $\sim 4 \text{ kV}$ 、AINツェルレンズ $\sim 15 \text{ kV}$ 程度印加している。

2. 2. 3 加速器および分析電磁石^{1), 2)}

本システムの加速器は、米国 NEC 社製ペレトロン - 5 SDH 型である。この加速器は、金属製のペレットを絶縁体でつないだチェーンで電荷を運び、加速管中央のターミナル電極を充電して高電圧を発生させて、イオンを 2 度加速させるタンデム型である。これを Fig. 4 に示す。イオン源側の加速段を 低エネルギー側、イオン出射側の加速段を 高エネルギー側と呼んでい

る。チェーンは高エネルギー側にあり、Fig. 4(a)で示したAの部分で電荷を受け取り、回転しているチェーンによりターミナルを帯電させる。ターミナルには三極管が取り付けられており、アノードに接続する針よりターミナルの電荷をわずかずつ逃がすことによりターミナル電圧の制御を行っている。高電位のターミナルの電位を直接測ることは不可能なため、間接的な G V M (generating voltmeter) で測定を行っている。このため、コントロールパネルでターミナル電圧をモニターしているが、その精度は 0.5 % である。加速管にはコロナプレートが取り付けられ、そのプレート間にコロナ電流を流すことによって加速管内の電位勾配を Fig. 4(b) のように安定させている。加速管での電荷の移動は次式のように表される。

$$I_{\text{chg}} = 2 I_c + I_b + I_{cp} + I_u \quad (2)$$

ここに I_{chg} : ベレットチェーンによる電荷運搬 (Charging current) 、 I_c : コロナ電流 (Corona point current) 、 I_b : ターミナルでの電荷変換に要する電荷、 I_{cp} : 三極管で逃がしている電流 (Corona probe current) 、 I_u : ビームによる加速管の帯電や放電による電流量である。ビームが加速管に当たると電荷の蓄積や放電を起こし I_u は定常的な流れを失うため、この変化によって加速電圧は不安定となる。加速電圧を安定化させるためには、イオンビームに対してイオン源と加速管の軸合せを正確に行うことにより I_u を安定化させることが肝要である。

イオン源より注入された負イオンはターミナル電極まで加速され、次に加速器中央部に置かれた電荷変換槽においてもう 1 度電荷変換を受けて正イオンとなって、さらに高エネルギー側で加速される。本加速器においては、N₂ガスにより電荷変換を行っているが、N₂の分圧によって変換効率が異なる。すなわち H e イオンの場合、H e⁺ および H e²⁺ の割合は N₂ 分圧によって制御できる。この加速器の特徴は、高電位部が加速器のタンク内のみにあって、イオン入射部および出射部をアース電位に保てることであり、イオン源側およびビームライン側での操作性が高い。本加速器の基本性能を Table 2 にまとめる。

加速管ではイオンビームあるいは加速管内の放電によって生じた電子が金属と衝突するときに軟 X 線が発生するので、その遮蔽のため、加速器の外容器全体を厚さ 5 cm の鉛のドームで覆っている。これにより、漏洩放射能は 20 mR / 月以下に留まっている。ドーム内部は高電圧による放電を防止するため 3 ~ 5 気圧程度の絶縁性のガス (六フッ化硫黄、S F₆) を充満させている。

加速器から出射されたイオンは二連四重極磁気レンズ (doublet quadrupole magnetic lens) に通って集束された後、分析電磁石としてのスイッチング電磁石³⁾ によって各ビームラインに振り分けられる。分析電磁石に磁場 B をかける時イオンは

$$r = M v / e z B = (2 M E)^{1/2} / e z B \quad (3)$$

なる半径 r の円運動をする。ここに、M はイオンの質量、v はイオンの速度、z はイオンの価数、E はイオンのエネルギーである。式(3)から明らかなように、加速器から出てきたイオン

のうち、所望のエネルギーのイオンのみをビームラインに入射するように分析電磁石に磁場Bを与えていた。

本システムのイオン源、加速器、二連四重極磁気レンズ、分析電磁石の写真をそれぞれPhot. 1~4に示す。

2. 2. 4 スリットフィードバックシステム

金属性のスリットにイオンビームが照射されるとそれは電流として検出できる。従ってイオンビームがスリットの中央を通っていない場合には、スリットのどちらかの極板から検出される電流が多くなり、それにより、ビームのビームライン管内の軌道の偏りがわかる。2. 2. 3節で述べたように、分析電磁石の磁場が一定であるとすると、この偏りはエネルギーのゆらぎによって発生することとなる。そこで、スリットの電流の差を出し、この差を加速器の電圧に帰還することによって、イオンビームを常にスリットの中央にとどめておくことができ、同時に加速器のターミナル電圧を安定化できる。

スリットフィードバックシステムをFig. 5に示す。

2. 3 オートアラインシステム^{1,2)}

2. 3. 1 オートアラインシステムの必要性

半導体メモリや生体細胞などの微細な試料の微小領域での放射線照射効果の解明のためには、小さなビーム径、マイクロイオンビーム照準技術を確立する必要がある。このためには、マイクロイオンビームの入射位置（オブジェクトスリットへの入射位置）の安定性が必須の条件となる。しかしながら本研究に用いられた加速器の加速電圧の安定性は約0.1%であり、これより本システムにおいて分析電磁石通過後のイオンビームはマイクロスリット上で約0.5mm程度の横方向の揺らぎ（数～数十Hz）を持つ。マイクロスリット入射前のイオンビームの電流密度分布は正規分布であると仮定できるので、イオンビームの電流密度分布の中心がマイクロスリットの中心から離れるほどスリット通過後のイオンビーム電流は減少する。これは加速器から出射したイオンビームの揺らぎによって、スリット通過後のビーム電流値がその揺らぎを反映したリップルを持つことを意味する。試料上でのマイクロイオンビームの電流値の揺らぎはビーム径の測定や照準（“4 ビーム計測実験”の章参照）の際に致命的な悪影響を及ぼす。したがって、マイクロスリット通過後のビームの電流値を常に安定に保つためにビームの軌道を常にマイクロスリットの中心に固定する必要がある。以上がオートアラインシステム導入の主目的である。

2. 3. 2 オートアラインシステムの基本構成

オートアラインシステムの基本構成をFig. 6に示す。ビーム軌道の位置の検出はビームライ

ン上に設置された金属スリットの両側に照射されるイオンビームによる電流の差を用いて行う。この信号をもとにイオンビームが常にスリットの中心に保持されるようにスリットより上流でビームを静電偏向する。これらは読み取った電流値をそれぞれ電圧に変換し、差動増幅器での差を読みとり、その出力を高圧アンプに介し偏向板に高電圧を印可することで可能となる。

2. 3. 3 オートアラインシステムの回路構成

先述のように、本システムはスリットに照射される微小ビーム電流値を読み、電圧に変換してフィードバックさせるという原理を用いている。スリットに照射されるビームの電流値は約数～数十 nA である。本研究ではイオンビームの軌道を補正するために約数百 V の電圧を印加する必要性があるので、約 10^{10} 倍の増幅率を持つ電流電圧変換増幅器を製作しなければならないことになる。そこで本研究では初段に 10^6 倍の増幅率をもつ電流電圧変換増幅器、次段には 10^2 倍の電圧増幅器、最終段で 10^2 倍の高圧アンプを組み合わせることにより三段の合計で 10^{10} 倍の増幅率を確保することにした。

電流電圧変換増幅器には比較的安価で高性能なエヌエフ社製の TI-76 を選択購入した。Fig. 7 に回路構成、Photo. 5 に本体写真を示す。この電流電圧変換増幅器の特徴は、回路図に示すように入力が演算増幅器の仮想接地点になっているから、高感度でありながら入力インピーダンスが極めて低いこと、また、小型でしかも電源内蔵タイプであるので AC ラインからのノイズを拾うことなく動作可能であることである。この電流電圧変換増幅器では 10^4 、 10^6 、 10^8 まで増幅率を 3 段階で可変である。ただし、この増幅器の性能上最大出力は 2 V と上限が決められる。スリットにあたるビームが 20 nA を超えると、出力電圧が飽和するので、実際に本装置を使用する場合は 10^6 倍で用いる。

差動増幅器、反転増幅器、ローパスフィルターの回路構成を Fig. 8 に示す。二台の電流電圧変換増幅器からの出力電圧の差（イオンビームの横方向の変位）を読み取り、この差の出力を増幅しフィードバックされることによってイオンビーム自身の揺れを抑えるのが本システムの基本原理である。この役目を初段の差動増幅器が果たす。差動増幅器の出力をオシロスコープで観察することによりイオンビーム自身の揺れを直接観察することもできる。差動増幅器には 2. 5 倍の増幅率をもたせている。

差動増幅器からの出力を差動増幅器の 2. 5 倍の増幅以外に 10^0 倍程度増幅させるために反転増幅器を用いる。反転増幅器は負帰還回路のため増幅率変動が少なく、安定して高倍率の増幅が得られる。また、回路中の抵抗値の比率が増幅率となっており、これを変化させることにより簡単に増幅率を変化させることができる。抵抗値の変化には 10 回転のポテンシオメータ ($100 k\Omega$) を用いた。ポテンシオメータは $0 \sim 100 k\Omega$ を 500 個の目盛りで刻んでおり、正確に増幅率を変えられるようになっている。これより、オートアラインシステムのフィードバックゲインが可変となり、オートアラインシステムをより安定的に動作させることができるようにになっている。

本研究で用いられたイオンビームは、加速器のエネルギー不安定性により、分析マグネット通過後に横方向の揺れを持っている。揺れの周波数の主成分は 50 Hz であり、これは商用電

源の変動に由来している。本システムはこのイオンビームの揺れを抑えることを主目的としている。ところが、フィードバックゲインが高いとシステムのループに高周波発振が生じる。この発振を防止するために高周波成分の高圧アンプへの入力を遮断する必要がある。高周波成分の通過を阻止し、ビームの揺れの主成分だけを通過させるために反転増幅器の後段にローパスフィルタを設置した。カットオフ周波数は 200 Hz に設定した。また、ローパスフィルタを二段とし、減衰量を -16 dB/oct 、増幅率を 1 に設定した。この結果、イオンビームの発振を防止することが可能となった。また、イオンビームがわずかに変位して安定しているとき、フィードバックスリットからの出力の差動成分は一定値となる。オートアラインシステムでは、イオンビームの左右への揺れを補正することが目的のため、安定して変位しているときは補正を行う必要はない。ローパスフィルタの特性として直流成分はカットして出力するため、上記のような場合、ローパスフィルタは好都合に働くことになる¹³⁾。

最終段の高圧アンプの性能を以下に示す。

入力	$-10 \sim +10 \text{ V}$
出力	$-1 \sim 1 \text{ kV}$
増幅度	100 倍

また、高電圧を印加し実際にイオンビームを偏向するディフレクターの構成は以下の通りである。

偏向板の長さ	$l_1 = 80 [\text{mm}]$
偏向板からスリットまでの距離	$l_2 = 1150 [\text{mm}]$
偏向板の幅	$d = 5 [\text{mm}]$

これより、加速電圧が 3.0 MeV、スリット位置におけるイオンビームの横方向変位が 0.5 mm の時、偏向板に印加する電圧は約 160 V となる。

Table 1 Specification of the ion source

Type	rf C-coupling negative ion source
Charge exchanging	Rb vapor
Ion species	He^- and H^-
Beam current	< 2 μA

Table 2 Specification of NEC model 5SDH

Type	Pelletron accelerator
Terminal voltage	0.3 ~ 1.6 MV
Stability	± 1 kV
Beam energy	H^+ , He^+ : 0.6 ~ 3.2 MeV He^{2+} : 0.9 ~ 4.8 MeV
Beam current	< 200 nA

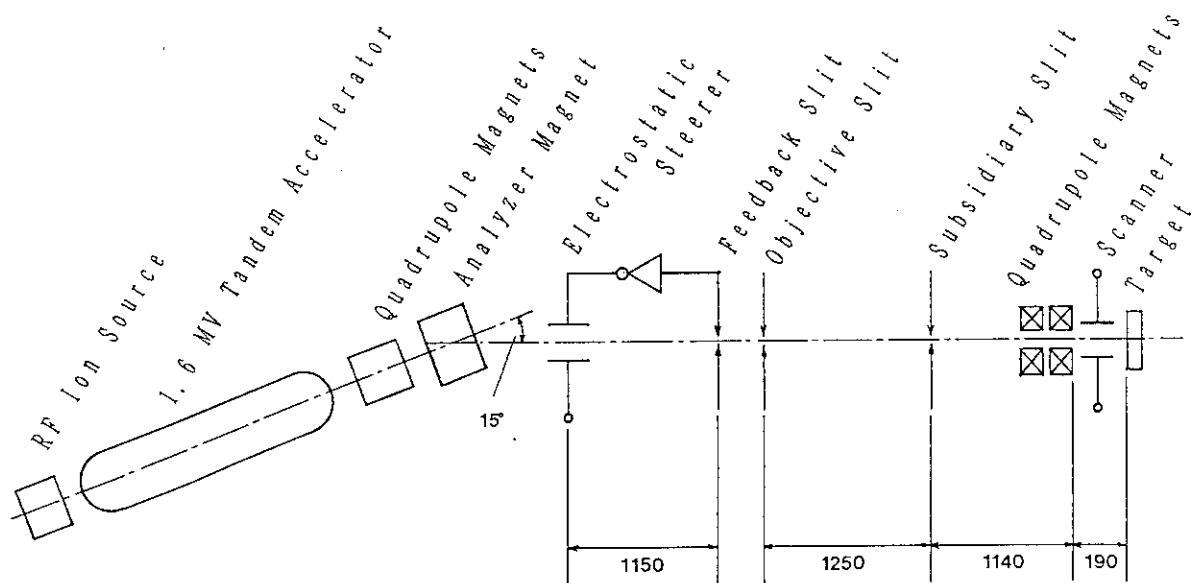


Fig. 1 Schematic diagram of an ion microprobe

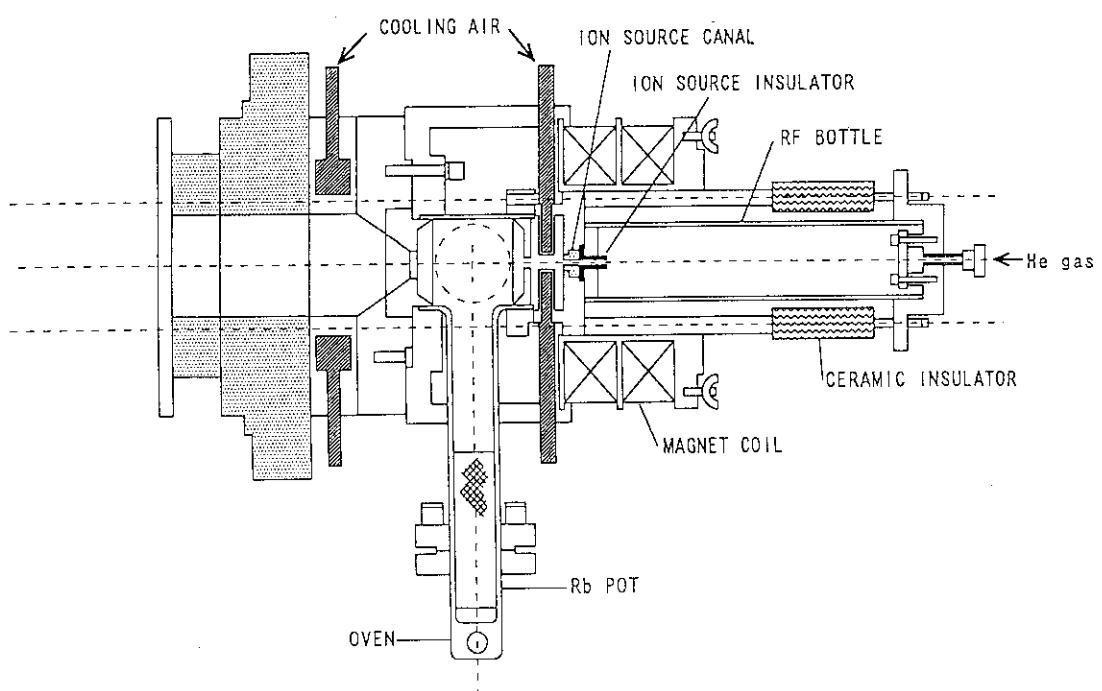


Fig. 2 Cross-sectional view of an rf ion source

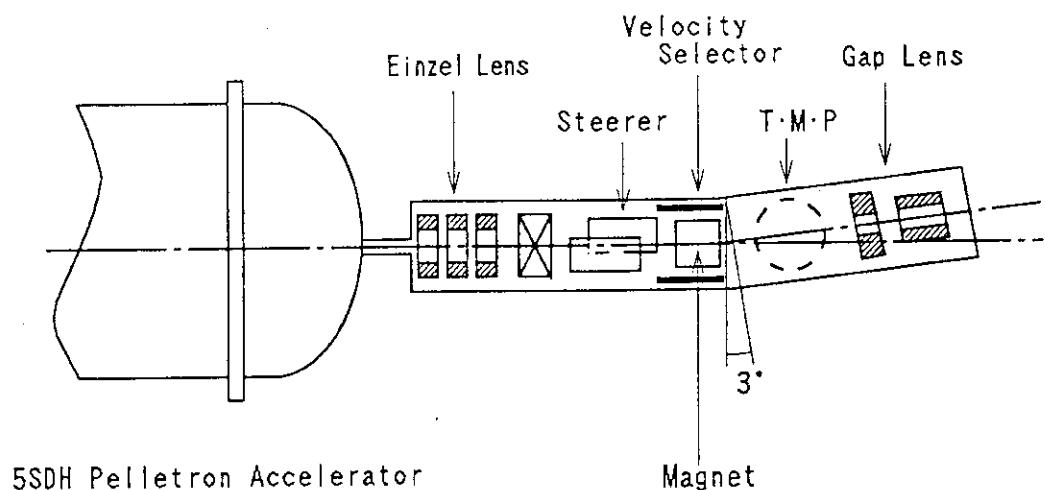
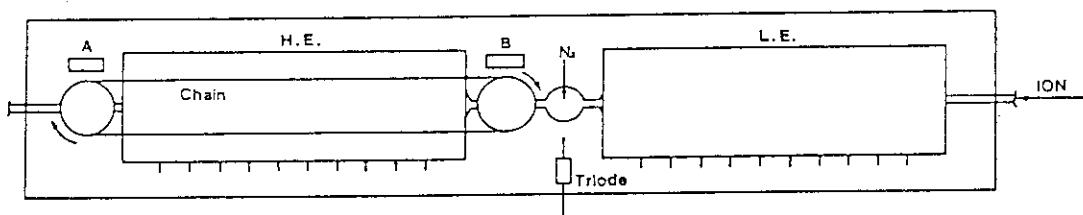
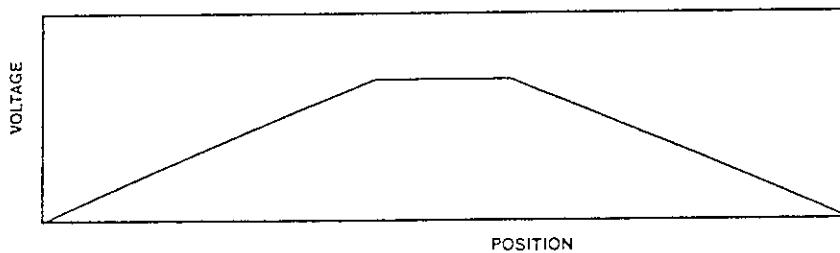


Fig. 3 Schematic diagram of an ion injector system



(a) Principle of Pelletron accelerator



(b) Potential distribution

Fig. 4 Accelerator

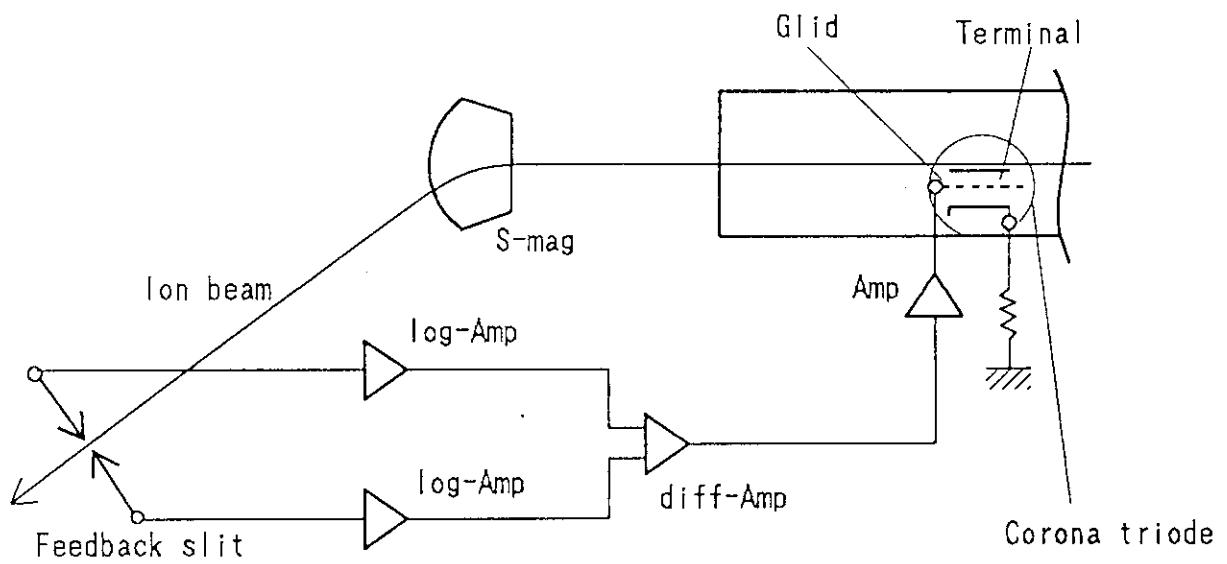


Fig. 5 Schematic diagram of a slit feedback system for energy stabilization

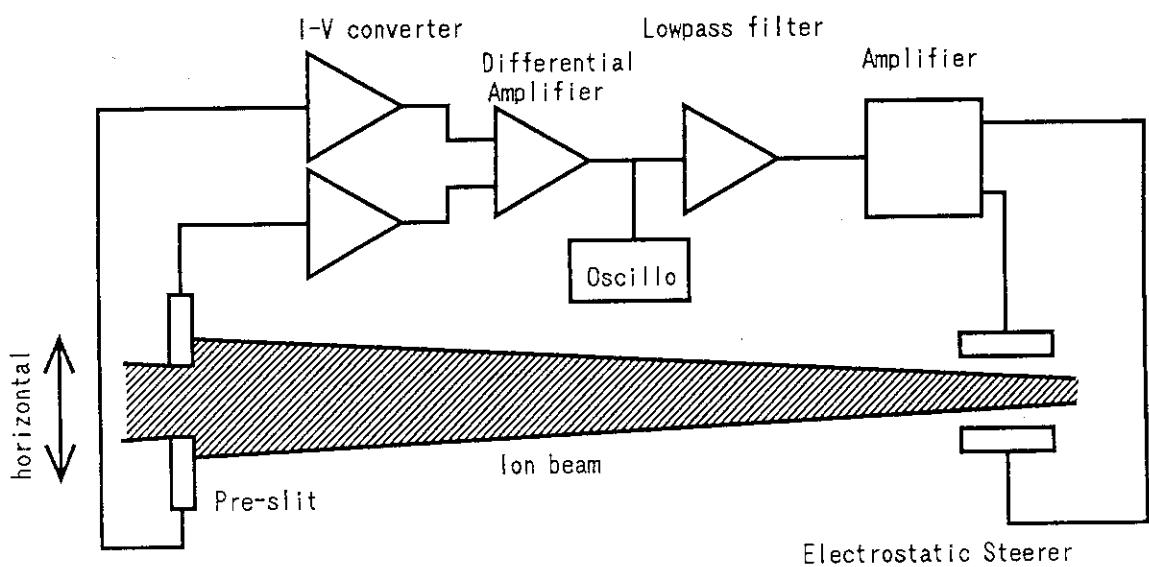


Fig. 6 Schematic diagram of an auto beam alignment system

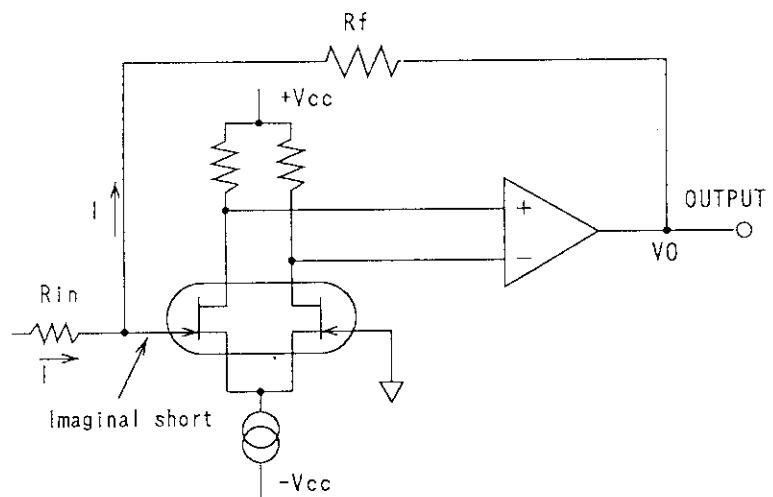


Fig. 7 Circuit diagram of Ti-76 pre-amp

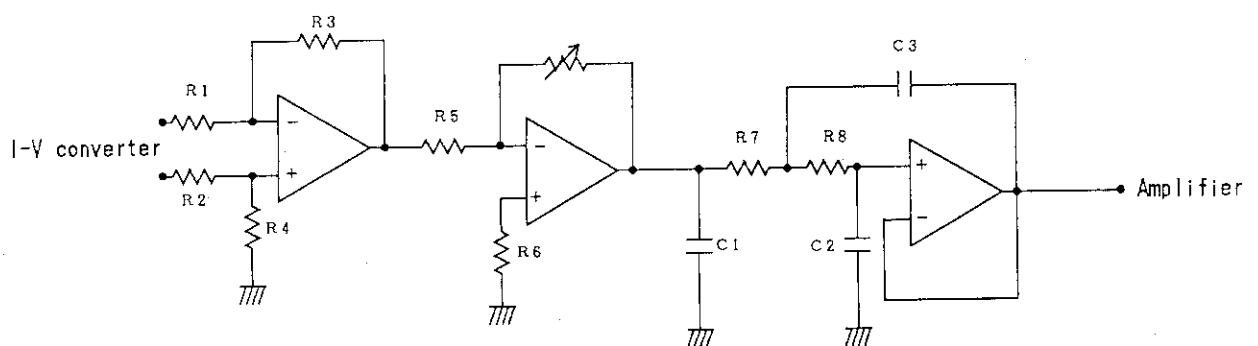


Fig. 8 Circuit diagram of an auto beam alignment system

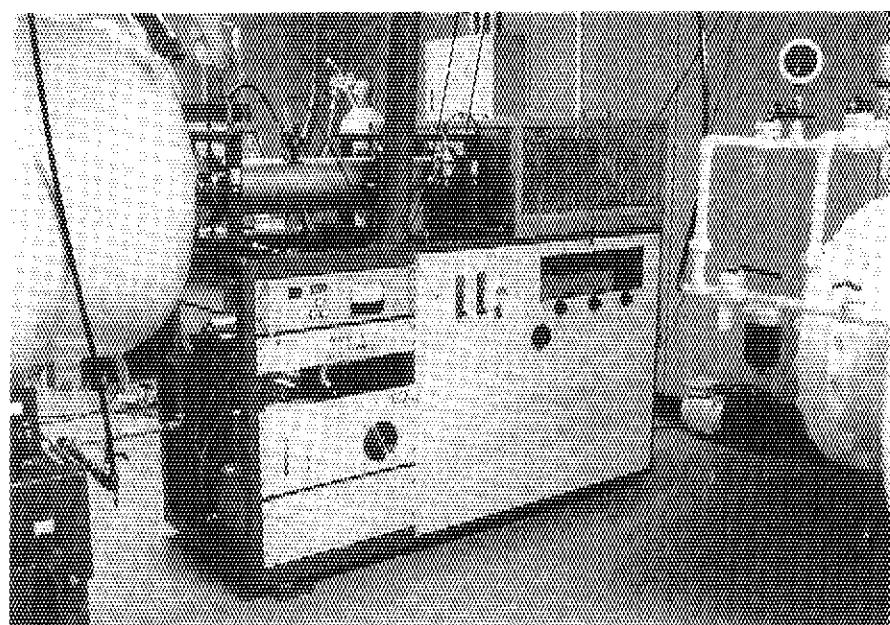


Photo. 1 rf ion source

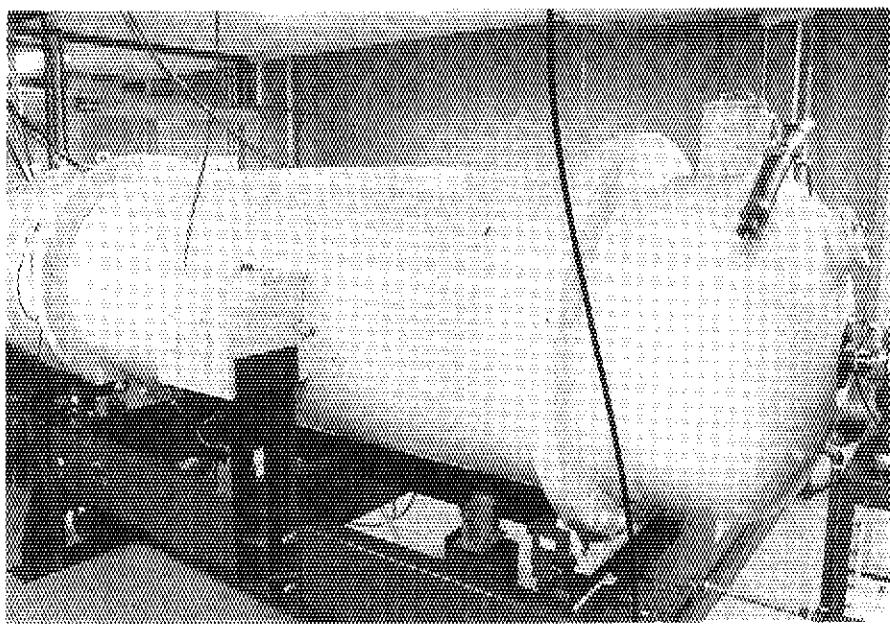


Photo. 2 Accelerator

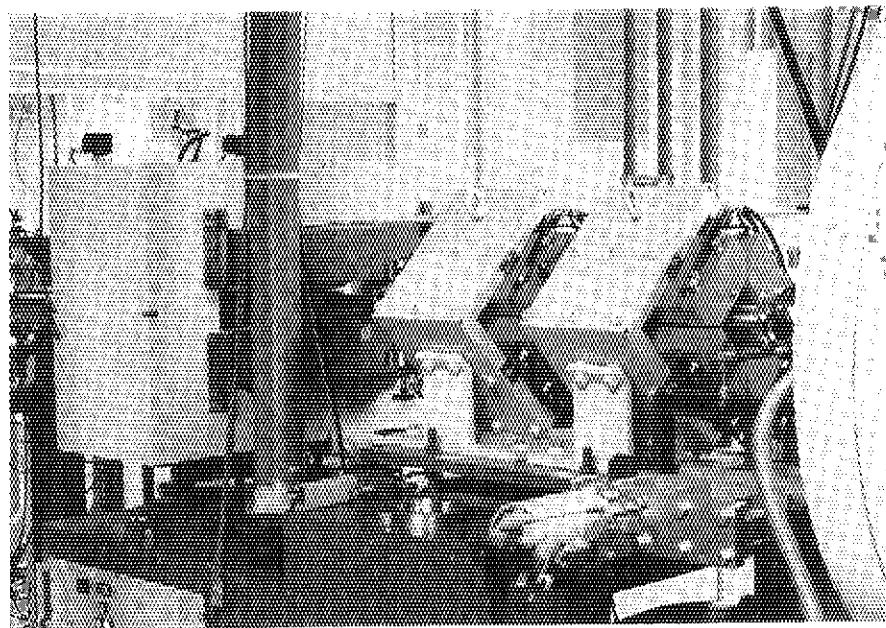


Photo. 3 Doublet quadrupole magnetic lens

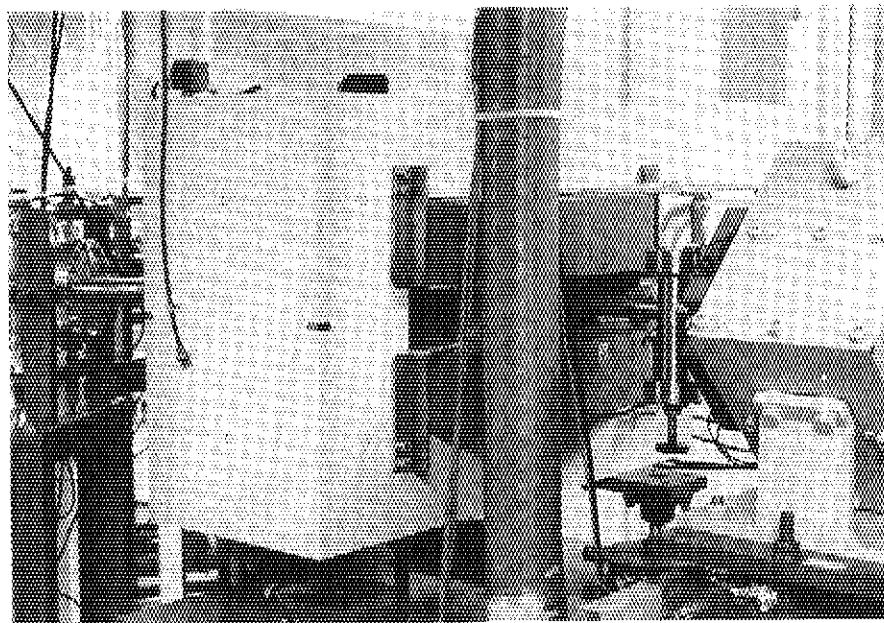


Photo. 4 Switching magent

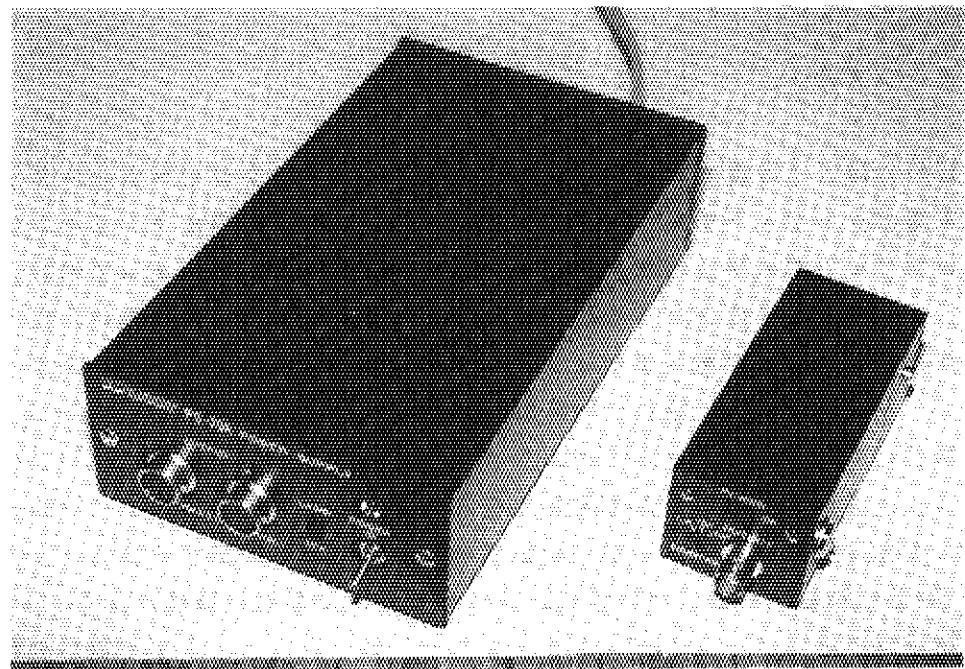


Photo. 5 TI-76

3. マイクロビームライン

3. 1 集束レンズ系

マイクロビームは、15度ビームライン上に設置されたマイクロビームレンズ系によってビームライン末端のターゲットチャンバー内に形成される。ビームのオブジェクトは、 $1 \mu\text{m}$ 精度のマイクロスリットの水平及び垂直方向からのビームの絞り込みによって形成される。マイクロスリットを通過したイオンビームは、物点距離、 2200 mm だけ離れた位置にある精密Qレンズで集束され、像点距離（またはワーク長）、 200 mm だけ離れた像点にオブジェクトの縮小イメージを形成する。また、Fig. 9に示す様に、この他にマイクロビーム光学系の重要な構成要素として発散制限スリットがあり、マイクロスリットと精密Qレンズの間にあって、マイクロスリットを通過したビームの発散角をこれによって規定する。マイクロビームレンズ系のビームの挙動は、行列法によって二次までのビーム軌道を計算するプログラム TRANS PORT¹⁴⁾により模擬することができる。プログラムには最適化機能があり、一次の計算結果からオブジェクトとイメージのビームサイズの比、縮小率として水平垂直のそれぞれの方向で4と24が求められた。したがって、ターゲットにおいて $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ のビームスポットを得るにはマイクロスリットによるビームのオブジェクトサイズが $4 \times 24 \mu\text{m}^2$ であることが必要である。実際は、ビームエネルギーの広がりとビームの発散角による収差、すなわち固有収差とレンズの磁場の軸ずれなどが原因となる寄生収差によってビームサイズは $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ より広がる。

3. 2 マイクロビームライン構成機器

Photo. 6にターゲットチャンバー側から見たマイクロビームラインの写真を示す。マイクロビームラインは、スリットおよびレンズからなるビーム光学系、ファラデーカップやビームビューアなどからなるビーム診断系、ビームスキャナーを含むターゲットシステム、真空系、架台、およびこれらに付随する電源制御系からなる。以下に各系毎の主要な構成機器の概要を述べる。

3. 2. 1 ビーム光学系

マイクロスリットの写真をPhoto. 7に示す。ビーム軸に対して垂直に上下左右方向に滑動するマイクロメーターの先端に半円筒形（枕型）のタンタル（Ta）チップが取り付けられており、手動によってその間隔を変化させてビームのオブジェクトサイズを調整する。スリットチップの材質をTaとしたのは耐スパッタリングを考慮したことであり、半円筒断面形状としたのはエッジにおけるビームの散乱および透過を軽減するためである。また、マイクロスリットの上流にプレスリットを置きマイクロスリットのビームによる熱変形を防いでいる。

発散制限スリットは、マイクロスリットの下流 1260 mm の位置に置かれ、4枚のTa製

のナイフエッジスリットチップによってビームの発散角を規定する。スリットチップの位置は、最小目盛 $2 \mu\text{m}$ のマイクロメータによって手動制御される。

精密集束レンズには、二連の四重極電磁石を用いる。その概念図をFig. 10に、写真をPhoto. 8に示す。磁極の断面の輪郭は双曲線であり、中心軸から見た打切り角は約 83 度である。また磁極の内径は 10 mm、磁極長が 80 mm、2つの電磁石の間隔は 50 mm である。外形が正方形の四重極電磁石の純鉄製のポールとヨークは、4分割の数値制御放電加工によって製作された。計 8 個のポールにコイルが巻かれた後、太い 4 本のステンレス鋼シャフトを介して組み上げられ、二連四重極電磁石が構成された。2つの電磁石間及びそれぞれの電磁石における磁極間の相対位置の調整機構は全く無い代りに、電磁石の磁極およびヨークの幾何学的な軸ずれから起る 4 重極磁場の乱れを最小にするため、その機械工作精度および組立精度が $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下になるように製作されている。これはハイデルベルグの K. Traxel 等の製作したマイクロビーム用精密 Q レンズ⁶⁾ の設計概念に基づいている。レンズの位置調整は、レンズを包む円筒内における水平方向の回転、マイクロジャッキによる垂直方向の変位及び傾き、及び直進ステージによる水平方向の並行移動がそれぞれ調整可能となっている。各磁極毎の最大のコイルのアンペアターンは 1000 であり、これによって 3 MeV の He⁺ が集束可能な設計となっている。

3. 2. 2 ビーム診断機器

マイクロビームラインに入射する前のビームをモニターするためにマイクロスリットの上流 600 mm の位置にビームビューアーを設置した。ビーム軸に対して 45 度に傾けた水晶板を圧空駆動によりビーム軸上に挿入しビームのプロファイルを観察するもので、水晶板の帯電防止のために表面を金属メッシュで覆っている。またモニター部は電気的に絶縁されており、電流計を接続することによりビーム電流のモニターとしても使用する。

マイクロビームラインに入射したビーム電流をモニターするためにファラデーカップ (FC) を精密 Q レンズ上流に設置した。これは 90 度回転カップ方式で、ロータリソレノイドによって駆動される。

3. 2. 3 ターゲットシステム

半導体大規模集積回路や細胞などの微細構造をもつ試料にマイクロイオンビームを照射し、特定部位の分析、照射効果を調べる際には、あらかじめ試料形状を十分な分解能をもって観察する必要がある。通常の光学顕微鏡では $1 \mu\text{m}$ 以下の精度で試料を観察することはできない。高分解能の光学顕微鏡を用いることによっても $1 \mu\text{m}$ 程度の精度で試料を観察することは可能であるが、レンズの焦点深度が浅いため、対物レンズが試料に接近しすぎてイオンビーム照射の妨げとなる。そこで、我々は本装置最終段のターゲットチェンバーに走査型電子顕微鏡 (SEM = Scanning Electron Microscope) を設置し、SEM による試料観察を実現した。本装置のターゲットチェンバーを Fig. 11 に示す。

ターゲットチェンバーに取り付けられている各種機器は走査型電子顕微鏡とイオンマイクロ

プローブの測定機器とに大別できる。マイクロイオンビーム用の測定機器としては、後方散乱粒子検出器（リング型SSD）、二次電子検出器（二次電子増倍管）が設置されている。二次電子増倍管を設置している場所にはPIXEのSi(Li)半導体検出器が取り付けられるようになっていて、測定用途によってこれらのどちらかを備えつけている。二次電子増倍管を用いた二次電子測定システムをFig. 12に示す。現在、イオンによる二次電子の検出はこの二次電子増倍管か、SEMの光電子増倍管（Photomultiplier）を用いて検出することも可能となっている。走査型電子顕微鏡部分は、電子ビーム照射のための鏡塔部、二次電子検出部、試料ステージとしてのゴニオメータにより構成されている。また試料の振動を減らすためチャンバーはできるだけ小さくする必要があり、そのため、照射チャンバーはSEM本体から鏡塔のみを取り外して装着可能となっている。SEM本体も最もコンパクトな日本電子機のJSM-100を用いている。本走査型電子顕微鏡同時測定装置の仕様をTable 3にまとめる。試料ステージのゴニオメータはSEMに取り付けられていたものをアームだけを伸ばして使用し、その最小目盛は $10\text{ }\mu\text{m}$ である。この試料ステージをFig. 13に示す。

イオンマイクロプローブと走査型電子顕微鏡とを組合せる利点は、同一チャンバー内で電子とイオンという2種類の荷電粒子を照射できることにある。このため、2種類の荷電粒子の照射に伴う二次粒子、電磁波を同位置で測定できる。すなわちSEM像とマイクロイオンビームによる二次電子像との照合によって、マイクロイオンビームの照射位置を正確に同定することが可能となった。マイクロビームの走査はターゲットチャンバーと四重極磁気レンズの間に設置されたスキャナーに電圧を印可することにより行う。また、イオン走査による二次電子像もSEMの表示画面上に表示できるように、SEMとイオンマイクロプローブの測定装置を一体化させてある。SEMと一体化させたこの二次電子検出システムの構成をFig. 14に示す。SEMのシンチレーション検出器によって、放出された二次電子の量が検出され、増幅されて電流信号として出力される。ビームのスキャンによる二次電子発生量の変化は、プリアンプで電圧に変換された信号をSEMに入力すればSEMのCRT画面上で観察可能であり、またローパスフィルタを介してコンピュータのA/D変換モジュールに入力すれば、数値データとして収集可能である。本施設でのイオンビームには50Hzのリップルがあるため、遮断周波数20Hzのローパスフィルタを通して高周波のビームによる影響を遮断している。SEM画面上で像を見るとときにはSEMから発せられる走査信号をスキャナー電源に入力しSEM画面との同期を取っている。またコンピュータで制御する時はD/A変換ボードより走査信号をスキャナ電源に入力している。スキャナー電源は $-10\sim+10\text{ V}$ の入力電圧に対し $-1\sim+1\text{ kV}$ に増幅された出力が得られる。

SEM画面上でのイオンによる二次電子像の表示は通常のSEMと同じで、走査速度も同じで2秒で1画面が形成される。この時のイオンビームの走査範囲は3MeVのHe⁺で $100\times100\text{ }\mu\text{m}^2$ である。

コンピュータを用いるとき、D/A変換ボードでは16ビットの分解能で $-10\sim+10\text{ V}$ の出力が得られ、3MeVのHe⁺で $300\times300\text{ }\mu\text{m}^2$ を走査できる。得られたデータは0~10Vの電圧を12ビットA/D変換ボードに入力する。A/D変換時間は5μsecである。現在、1画面 128×128 ピクセルをおよそ30秒で測定でき、16階調でイメージを表示

している。

ターゲットチャンバー及び試料ステージの写真をそれぞれPhoto. 9、Photo. 10に示す。

3. 2. 4 その他の構成要素

マイクロビーム形成のために補助的な役割を果たすその他の機器についてその概要を述べる。垂直方向ビームステアラーが加速器フィードバックスリットとマイクロスリットとの間に設置された。これによってマイクロビームラインの中心軸に対して上下方向のビームの角度を補正する。

マイクロスリットの開き幅を目視で観察するためのオブジェクトモニターとモニター光源がマイクロスリットを挟んで設置された。マイクロスリットを両側から徐々に挿入しながら45度傾けた鏡に映るマイクロスリット中心部を観察する。豆ランプからの透過光が見えなくなる位置がマイクロスリットの開き幅0の位置である。オブジェクトモニターはマイクロスリットを透過したビームモニターとしても使用できる。ただし、鏡表面には帯電防止処置が施されていないので長時間大電流のモニターには敵さない。

ビームライン及びターゲットチャンバーにはそれぞれ排気速度150リッター／秒の磁気浮上型ターボモレキュラポンプと排気速度50リッター／秒のロータリーポンプによる真空排気系が使用されている。ビームラインの振動を考慮して、ポンプとビームラインおよびターゲットチャンバーの架台は切り離し、溶接ベローズによって真空ダクトを通しての振動の伝達を防ぎ、さらにロータリーポンプについては防振ゴムシート上に設置して床を通しての振動の伝達を防ぐようにした。なお、振動の対策については“7 防振システム”の章で詳しく述べる。

Table 3 Specification of scanning electron microscope(JSM-100, JOEL)

Performance	
Resolution	25 nm (24 kV. W.D. 20 mm)
Magnification	× 35 ~ × 75,000 (21 steps)
Images	Secondary electron
Electronic	
Accelerating voltage	5, 15, 25 kV (3 steps)
Astigmatic compensation	8 poles. electro-magnetic
Specimen stage	
X, Y movement	10 ~ 20 mm
Tilting angle	-30° ~ +90°
Rotating	360° endless
Specimen exchange	Stage open

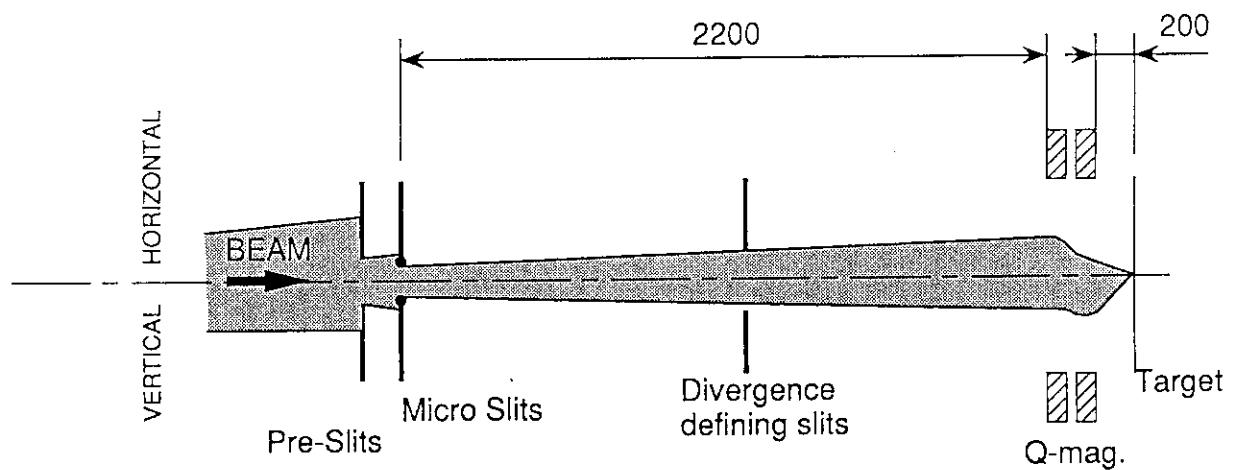


Fig. 9 Schematic diagram of a microprobe lens system

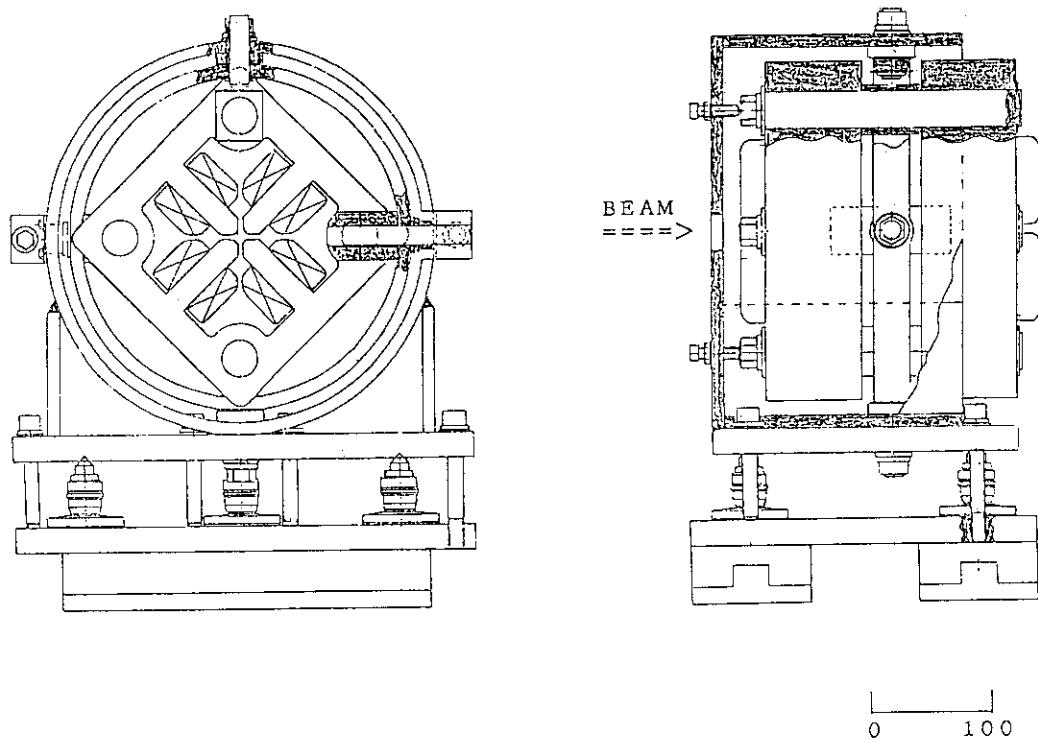


Fig. 10 Schematic view of the doublet quadrupole magnet

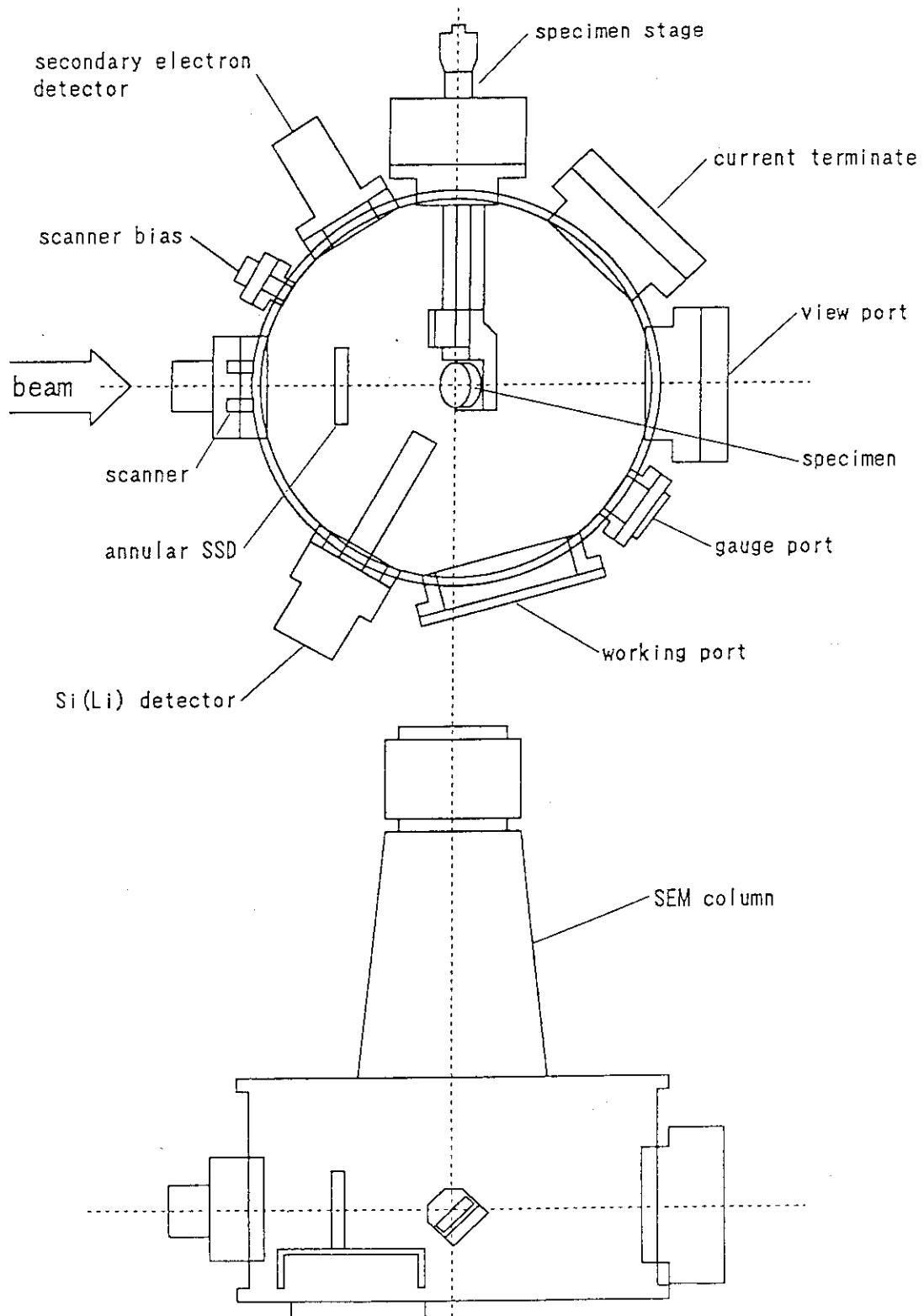


Fig. 11 Target chamber with SEM

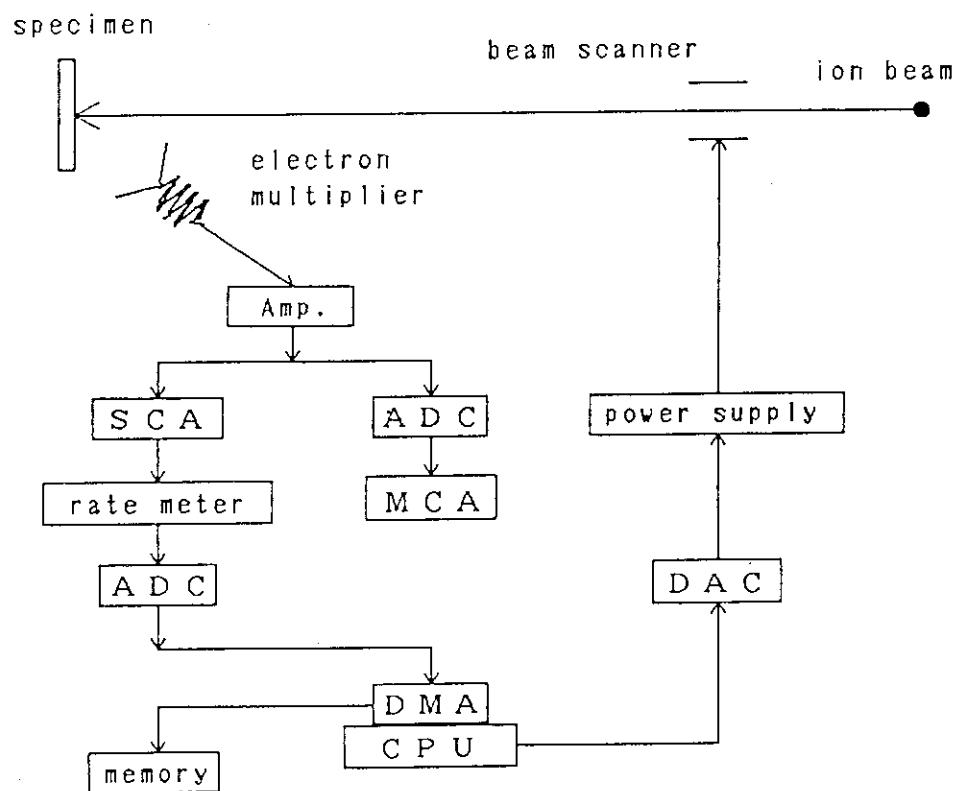


Fig. 12 Block diagram of secondary electron data acquisition system

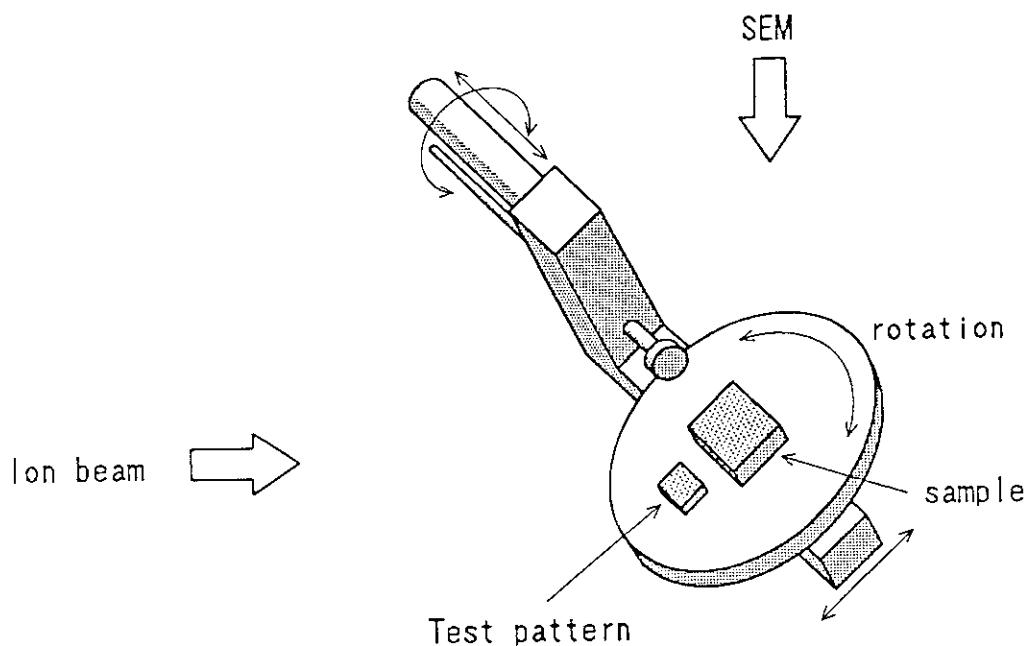


Fig. 13 Schematic view of a specimen stage

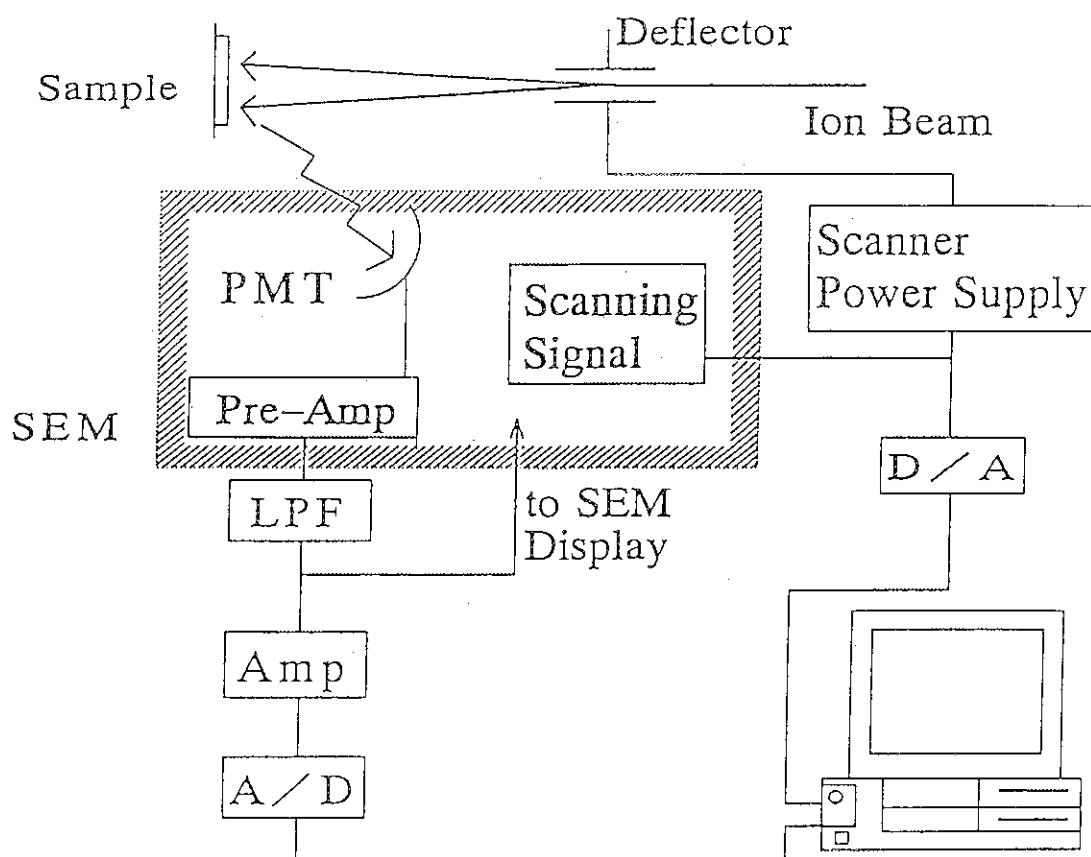


Fig. 14 Block diagram of secondary electron data acquisition system with SEM

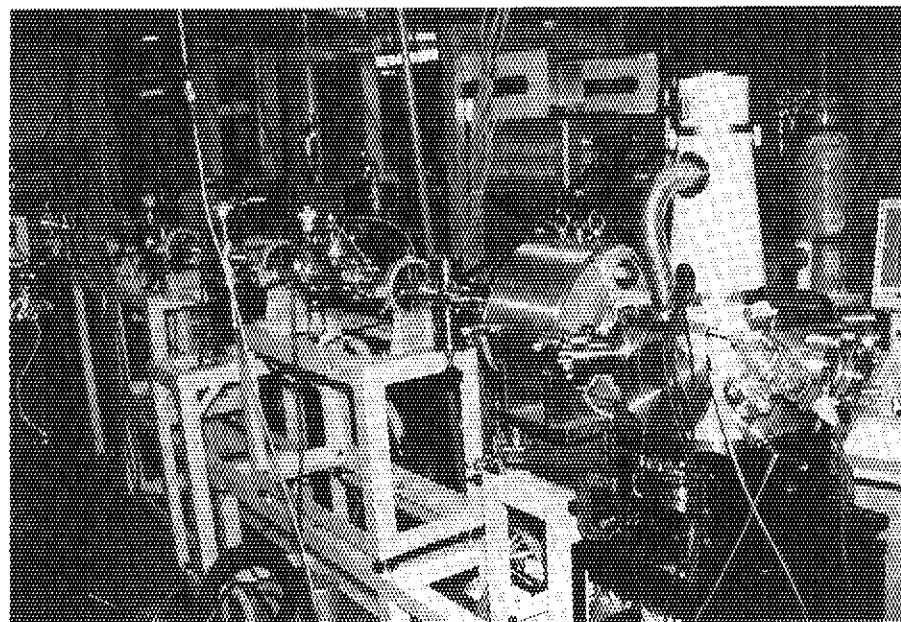


Photo. 6 Microbeam line

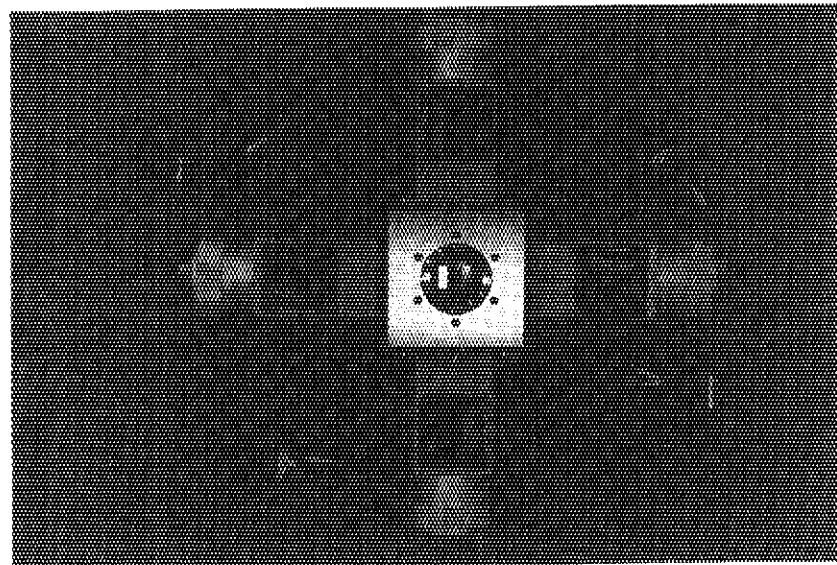


Photo. 7 Microslit system

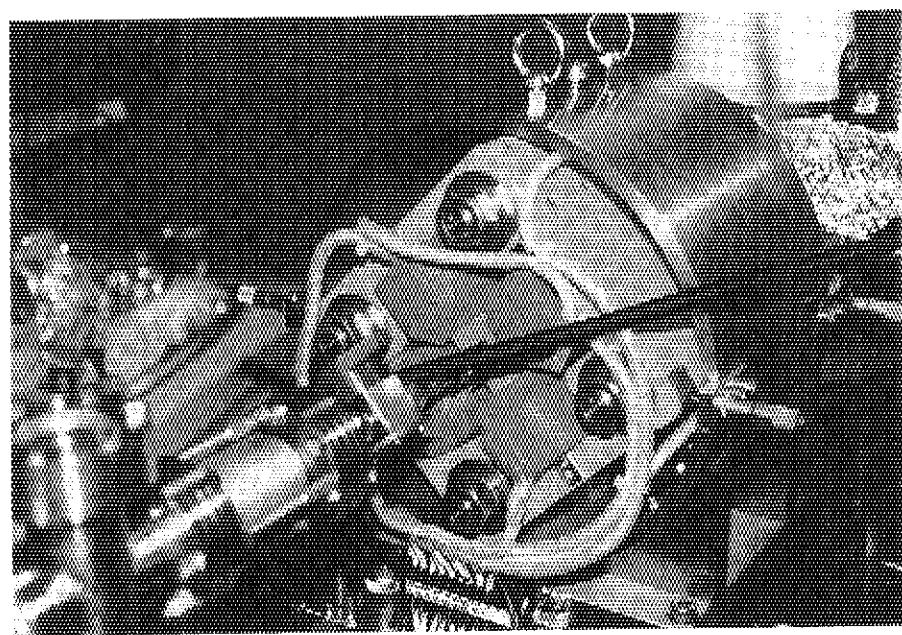


Photo. 8 Doublet quadrupole magnet as precise focusing lens

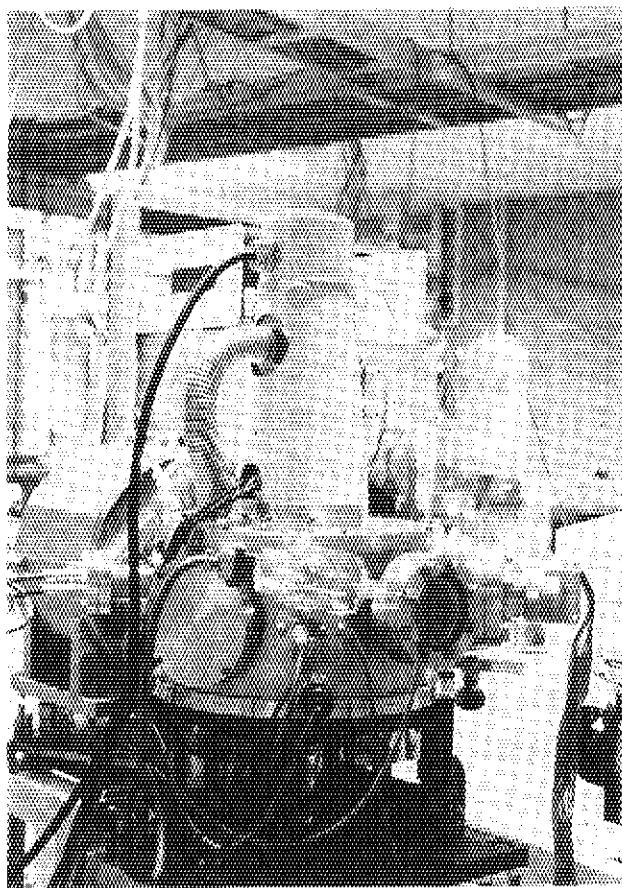


Photo. 9 Target chamber with SEM

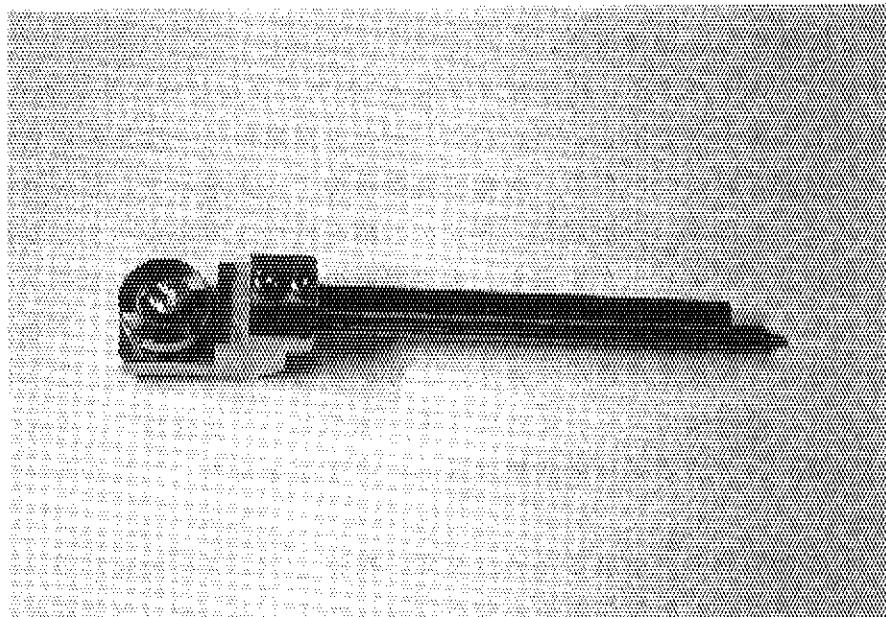


Photo. 10 Specimen stage

4. ビーム計測実験

4. 1 マイクロビーム形成

マイクロビームにおいてターゲットでのビームスポットサイズは、最も重要な性能の一つである。それを正確に計測するために様々な方法がとられている^{15) 16) 17) 18)}。通常、金属類のシャープなエッジまたはメッシュにマイクロビームをスキャンして、発生する二次電子、後方散乱粒子あるいは特性X線を検出し、ビームがエッジを通過するときの収量曲線の立上がり幅からビームサイズを求めている。我々は、より簡便なビームサイズ観測法を目指して、石英ガラスや酸化シリコン膜にビームを照射しそのスポット発光を光学顕微鏡を用いて観測する方法を検討した。しかしガラス板の場合、 $1 \mu\text{m}$ オーダーのビームスポットでは乱反射によりビームスポットがぼやけ、正確なサイズの評価が困難であった。また、横方向のぼやけを防ぐために薄い酸化シリコンを形成して同様の観測を行おうとしたが目的を満足するほどの薄い酸化膜を形成する事が技術的に出来なかった。またターゲットに到達するビームの強度が極めて低い($\sim p\text{A}/\mu\text{m}^2$)ことも発光によるビーム径の評価を困難にした。

最終的には半導体微細加工技術によるFig. 15の様な碁盤目状に並べられたセルの中に規則的な縦横の線幅と線間隔をもつシリコンレリーフテストパターンを使用した。隣接した4つのセルが一組で縦横に描かれている線状のレリーフの線幅と線の繰り返し周期が決められている。最も太い線幅が図の左上のセルにあり、 $5.5 \mu\text{m}$ 、右周りの渦巻き方向に次第に線幅が狭くなって最も狭いものが中央の4つのセルにある $0.5 \mu\text{m}$ である。ビームサイズの評価のためにその左上のパターンにマイクロビームをスキャンし、エッジ部での二次電子発生量のピークの幅からビームサイズを求めた。また、このパターンを使用する利点として二次電子像がどこまで細い線を分離して観測することが出来るかによってかなり正確に、しかも短時間にビームスポットサイズを評価することである。

Fig. 16にシリコンテストパターンに 3MeV He^+ のマイクロビームを二次元的にスキャンしたときの二次電子像を示し、Fig. 17にビームを同試料に一次元的にスキャンした場合の水平方向および垂直方向についての二次電子発生量のデータを示す。ピークは線パターンのエッジに対応し、データは 4.5 から $5.5 \mu\text{m}$ の幅を持つ3本の線パターン線に対して垂直にスキャンして現れる6個のピークを示す。水平方向のデータの7本のピークのうちの左端のものは、隣のセルの水平方向の線パターンのエッジに対応する。このデータからビームスポットサイズを求める場合、非線形の最小二乗法により、2つのガウス曲線と二次曲線との和の曲線を、1本のパターンの両側のエッジに対応する2個のピークを含むデータにフィッティングさせる(Fig. 18参照)。2つのガウス曲線は等しい半値幅を持ち、これがビームスポットの半値幅に相当する。

ビームスポットの最小サイズを得るためにまず、精密Qレンズの励磁パラメータの最適化を行った。2つの四重極電磁石の励磁電流を変化させながら、ターゲット使用に付加されているSEMの操作信号に依りビームを操作してSEMの表示画面での観測によりビームが水平方向及び垂直方向にそれぞれ最も集束する時の電流値を求めた。Fig. 19に示したように2つの電磁

石の励磁電流をそれぞれ横軸と縦軸にして、得られた値の点をプロットし、水平方向および垂直方向が集束する点を結ぶ曲線を求めるとき、その交点が最もビームスポットが小さくなるパラメータを示す。

次いで、レンズ系の集束特性を得るために、オブジェクトサイズを決めるマイクロスリットの開き幅を少しずつ変化させながらビームスポットサイズを計測した結果の一例をFig. 20およびFig. 21に示す。どちらの場合もターゲット電流が数 pA 程度で少なく二次電子発生量が少なかったため、データの統計誤差が大きく、ビームサイズの値の誤差もまた大きくなっている。前者の測定で最小ビームスポットサイズ、 $1.3 \times 1.9 \mu\text{m}^2$ が得られた。後者の測定で最小ビームスポットサイズの X 方向が前者よりも大きくなっているのは、レンズパラメータの違いによるものである。

4. 2 SEMを用いたビーム照準

マイクロビームを利用して、微小領域の分析及び照射効果を調べるためにには、ビーム径と同等またはそれ以上の精度でイオンビームの入射位置の制御を行う必要がある。このことを可能とするための照準技術についてここでは述べる。

まず、イオンビームを照射しようとする場所の、試料上の位置を明らかにするためには、ターゲットチャンバ内で試料の観察を行う必要がある。このために 2. 5 で述べたように、ターゲットチャンバには SEM の鏡筒が設置されており、照射する試料をチャンバに入れたまま電子ビームスキャンによる二次電子像の観察を行えるようになっている。

また、試料上のイオンビームが照射されている位置を知るためにには、イオンビームスキャンによる二次電子像を得る必要がある。3. 2. 1 で述べたイオンビームスキャン及び二次電子データ収集を行うシステムと SEM との結合はこの目的のために極めて有効である。ビーム径計測に使用した Si テストパターンを試料として、イオンビームによる二次電子マッピングを行った。Fig. 22 に示したように、Si テストパターンの SEM 像と、同試料の He⁺, 3 MeV のマイクロイオンビームによる二次電子像とを比較観察すると、どちらの場合もレリーフパターンが鮮明に現れ、パターンの間に存在する塵の存在も確認できる。このように、電子ビームによる二次電子像 (SEM 像) と、イオンビームによる二次電子像を比較することによって、イオンビームが照射される位置と試料上の位置との関係を直接知ることができるようにになった。

これらの技術を利用して、我々は以下に示す照準技術を考案した。

- 1) SEM によって、同一試料ステージ上に設置されたターゲットと基準点（前述の Si レリーフ）との位置関係 (X, Y) を正確に把握する (Fig. 23(a))。
- 2) イオンビーム走査による二次電子像により基準点を見つけだし、イオンビーム照射位置の中心を基準点に合わせる (Fig. 23(b))。
- 3) 1) で求めたターゲットと基準点の位置関係 (X, Y) に従って試料ホルダーを移動させ、ターゲット上の照射目標位置がイオンビーム照射位置に来るようとする (Fig. 23(c))。

この方法を用いる利点は、照準を行う過程でターゲットにイオンビームが照射されないことであり、照射損傷を受けやすい試料において特に有効であると考えられる。ところで、現在使

用されている試料ホルダーの機械的な移動精度は $10 \mu\text{m}$ 程度であり、従って照準精度も $10 \mu\text{m}$ 程度にとどまっている。 $1.7 \times 1.9 \mu\text{m}^2$ のビーム径が達成されている現在、より細かい照準精度が要求され、そのためには試料ホルダーの改良が必要であると考えられる。

4. 3 リング型 S S D

4. 3. 1 リング型 S S D の必要性

マイクロ化したイオンビームでは従来のビームに比べ、ターゲットに到達する荷電粒子数が少ない。これは、マイクロ化に際してスリットを絞りビームを削るという過程による。ターゲットに到達する荷電粒子の減少は、R B Sにおいては後方散乱粒子数の減少へとつながり、結果としてイオンビームのマイクロ化はR B Sデータの収率低下をもたらす。ビーム径を小さくすることが目的である以上、何等かの方法を用いてR B Sデータの収率低下を防止する工夫が必要になる。リング型 S S D (Solid State Detector) は、同一散乱角のイオンを方位角 360° にわたって検出するので、この目的に最適である。

4. 3. 2 リング型 S S D による収率向上の原理

S S Dは、R B Sなどに用いられる荷電粒子のエネルギー検出器である。従来のS S Dは円形をしている。散乱角が等しいイオンは同じエネルギーを持っているので、円形のS S Dでは、Fig. 24に示すように、データの一部しか検出していないことになる。リング型S S Dでは、等しい散乱角のイオンを全て検出できるので、散乱収率は飛躍的に向上する。

R B S解析における重要な要素として、後方散乱粒子の収率の他にS S Dのエネルギー分解能がある。荷電粒子の収率は、上述のようにS S D受光面の立体角にのみに依存し、そのほかの構造等には依存しない。一方、エネルギー分解能は、静電容量、暗電流、感応面における接合(p-n、ショットキー)の均一性、ならびに基板の種類(比抵抗、キャリア移動度、結晶性など)に依存し、立体角の増加により低下する。従って散乱収率の向上と分解能の向上とは、受光面の立体角に関しては互いに矛盾する要求となるので、分解能の向上は他の要因をも考慮して総合的に検討する必要がある。以下S S Dの測定原理に立ち返ってエネルギー分解能に影響する要因を簡単に考察してみる。

S S Dは、p-n接合またはショットキー接合ダイオードの構造をしている。この接合部に逆バイアスをかけることにより、接合部付近に空乏層を生じる。S S Dに荷電粒子が入射されると、粒子は、S S D内の電子を励起し、エネルギーに比例した数の正孔-電子対を作る。この様子をFig. 25に示す。この電子、正孔は空乏層内に存在する電界により掃引され鋭いパルスとなり出力される。このパルスの高さを整形することによって、荷電粒子のエネルギーの測定を行う。

S S Dはこのようにダイオードに逆バイアスをかけ使用するため、原理的に静電容量を持ち、熱的な発生、再結合による暗電流が流れる。静電容量が大きいと鋭いパルスが得られないので、

エネルギー分解能は低下する。また暗電流の増加は出力信号のS/N比を悪化させる。さらに感応面内の電気的特性の不均一さは入射粒子の位置によるエネルギーのばらつきを生じる。これらの中で最も影響の大きいものは、ダイオードの静電容量である。

p-n接合を持つSSDの静電容量Cは次の式により表される。

$$C = \epsilon \cdot A / X$$

- e : 基板の誘電率
- A : SSDの感應面積
- X : 検出器の空乏層幅

従って、SSDの感應面積の大きさが、エネルギー分解能を決定する一番大きな要因であるといつて良い。感應面積の増大は、暗電流を増加させる原因となるが、その影響は小さい。

以上より、リング型SSDを設計するにあたり、感應面積の増加と立体角の増加によって引き起こされるエネルギー分解能の低下を抑えながら、測定系の収率を上げる必要がある。つまり、(収率) / (エネルギー分解能) をフィギュア・オブ・メリットにえらび、これを最大になるようにすればよい。設計したリング型SSDをFig. 26に、写真をPhoto. 11に示す。リング型SSDのフィギュア・オブ・メリットをまとめるとTable 4が得られる。SSDを、試料から20mm離れたところに置き、散乱角150°、散乱角からの広がりを2.3°とするとき、従来型のSSDの立体角は $5 \times 10^{-3} \text{ sr}$ であるので理論的に収率は50倍に増加する。

4.3.3 リング型SSDによるRBSスペクトル

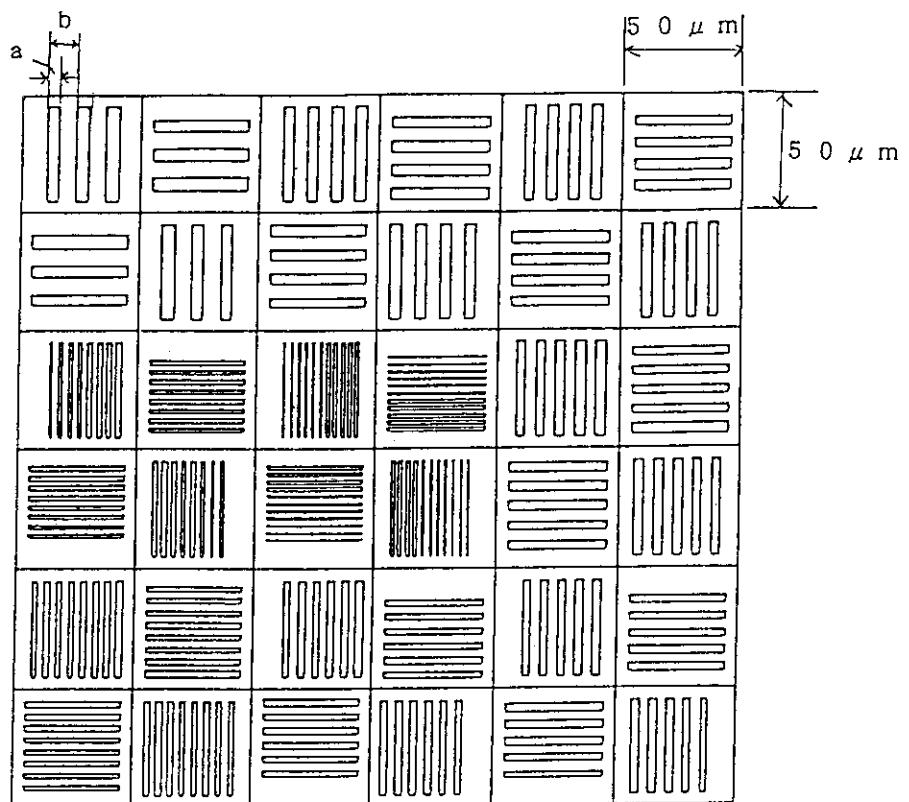
Si基板上にAuを150nm蒸着した試料をプローブイオンのドーズを等しくしてRBS測定した。従来のSSDにより得られたスペクトルをFig. 27に、リング型SSDにより得られたスペクトルをFig. 28に示す。Auのカウント数は従来のもので450カウント、リング型SSDで1700カウントとなり約4倍の収量を得た。理論収率との差は、波高分析器(MCA)でのデッドタイムによるものと考えられる。

また、このリング型SSDを用いてアメリシウム(^{241}Am)からの α 線エネルギー測定を行い、Fig. 29に示すようなペクトルを得た。380チャンネル付近の3本の本来のピークよりも低エネルギー側にも幾つか低いピークが現れた。この原因を究明するにあたり、常に同じエネルギー・シフト量の不明ピークが生成される事から、リング型SSDの構造に原因があると考えられた。リング型SSDの断面構造をFig. 30に示す。ポリイミド層での α 線のエネルギー損失があることがこの断面構造から判断された。そこでFig. 31のようなマスクをステンレス板により作成し、リング型SSDの表面に置きポリイミドに入射される荷電粒子を遮断することを試みた。その結果得られたRBSスペクトルはFig. 32に示すとおり低エネルギー側のピークをほとんど除去することができた。これによる収率の減少は約34.2%であり、全体として従来型SSDに比べて2.5倍の収率増加を達成できたことになる。

Table 4 Figure of merit of the annular type SSD($d=20\text{mm}$, $\phi=2.308^\circ$)

Scattering angle θ [deg]	Relative yield	Detector area [mm ²]	E. R. [keV] ^a	Yield/E. R. ^b
140	63.8	1041	49	18.2
145	56.9	730	40	19.9
150	49.6	503	24	29.0
155	41.9	335	20	29.4
160	33.9	212	19	25.0
165	25.7	122	17	21.2
170	17.2	60	14	17.2
175	8.7	21	14	8.7

^a Ortec guaranteed energy max resolution.^b Yield/energy resolution ratio.



Pattern Width

Pattern	a : Width [μm]	(Step [μm])	$n \times b$: Repetition [μm]
Wide	4.5	5.5 (0.5)	3×12.0
	4.2	4.8 (0.2)	4×10.0
	3.8	4.4 (0.2)	4×9.0
	3.2	4.0 (0.2)	5×8.0
	2.6	3.4 (0.2)	5×7.0
	2.4	2.9 (0.1)	6×6.0
	1.8	2.5 (0.1)	8×5.0
	1.3	2.0 (0.1)	8×4.0
	0.5	1.5 (0.1)	11×3.0
Narrow			

Fig. 15 Si relief test pattern

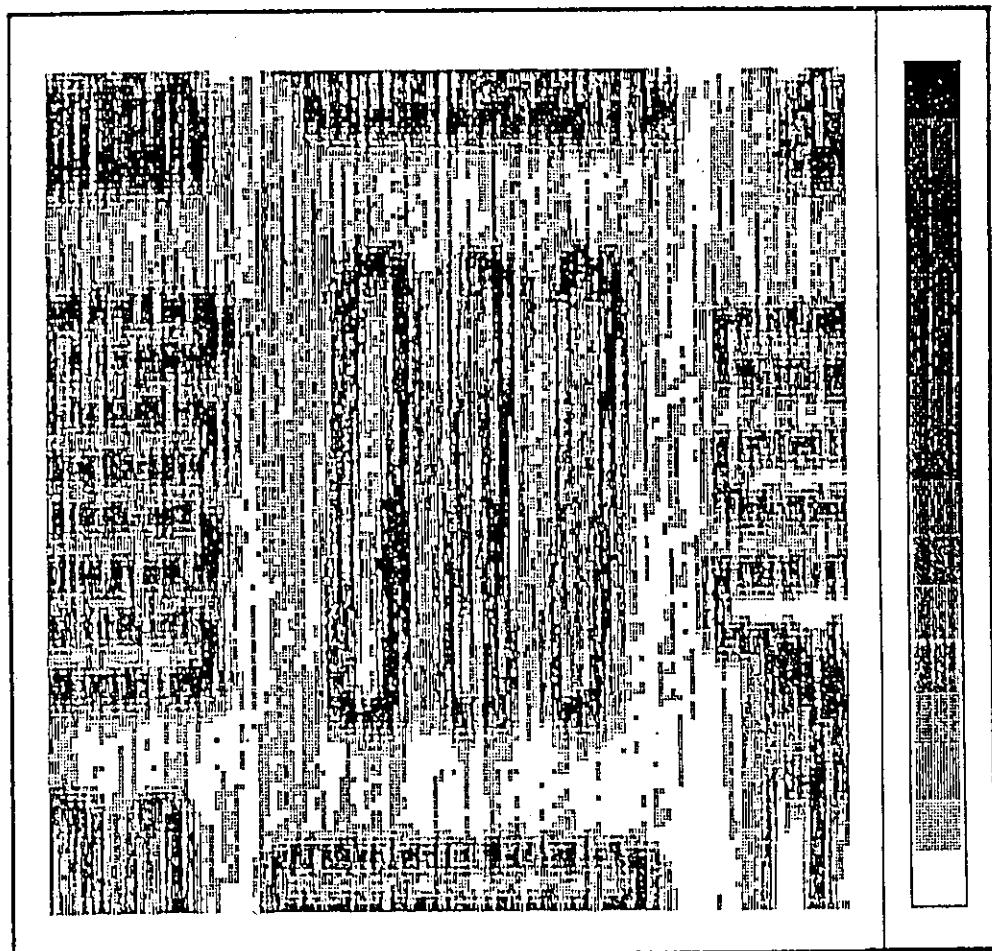


Fig. 16 Two-dimensional secondary electron image
of the Si relief test pattern

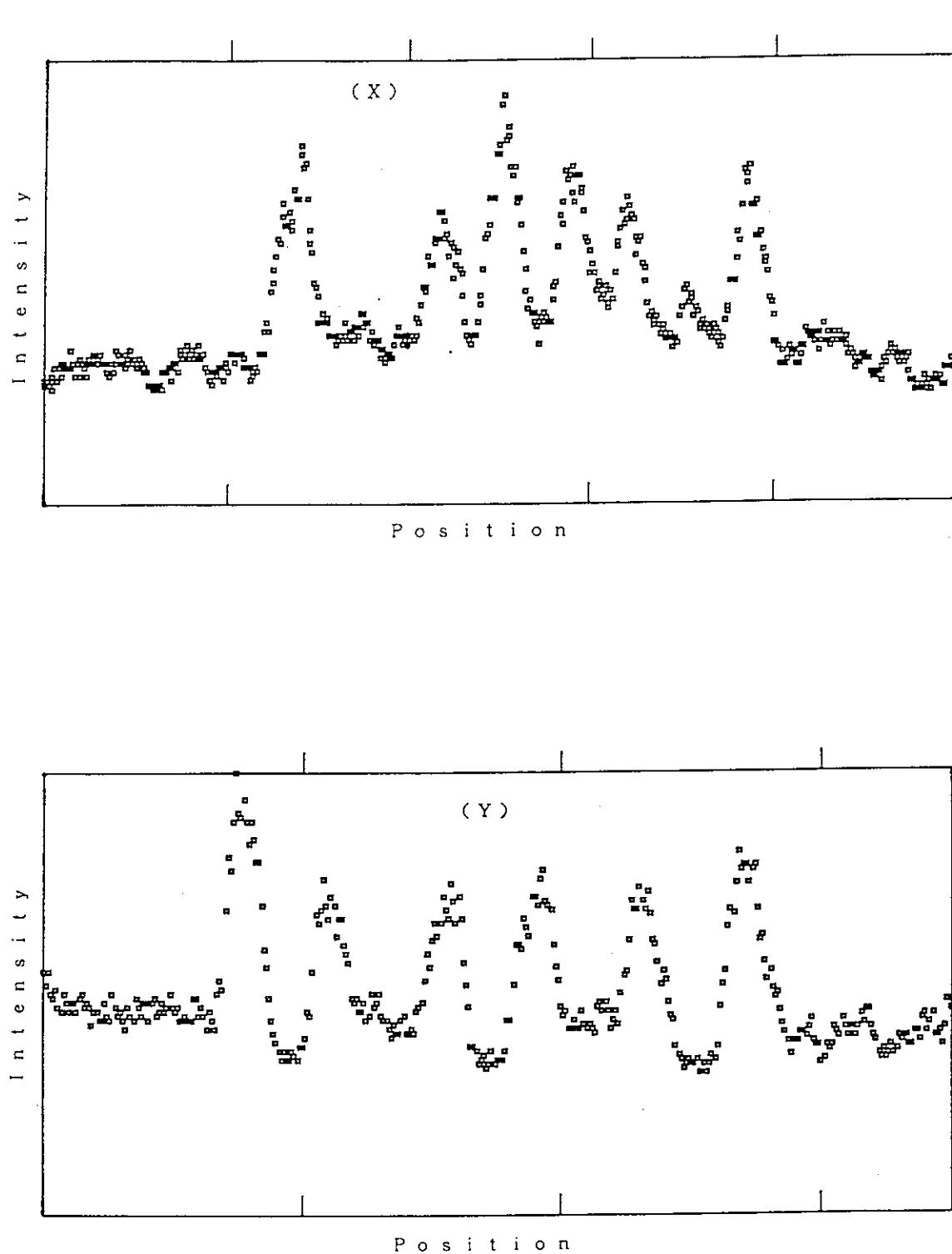


Fig. 17 Secondary electron yield data by one-dimensional microbeam scanning for horizontal (upper) and vertical (lower) directions

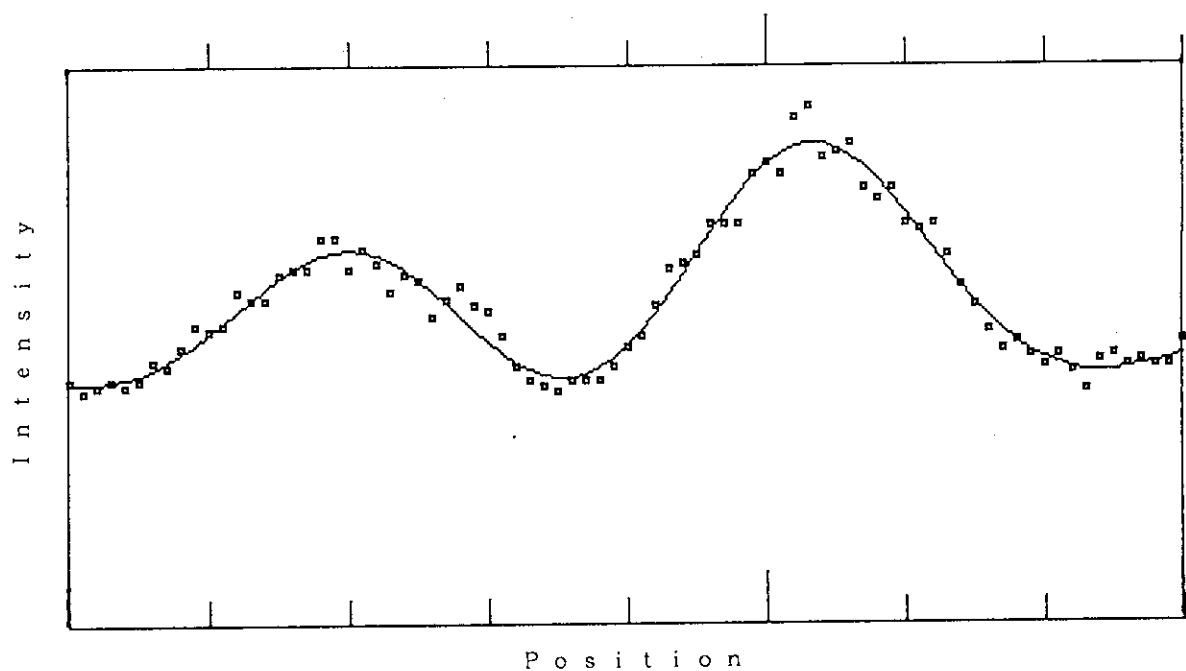


Fig. 18 Peak fitting

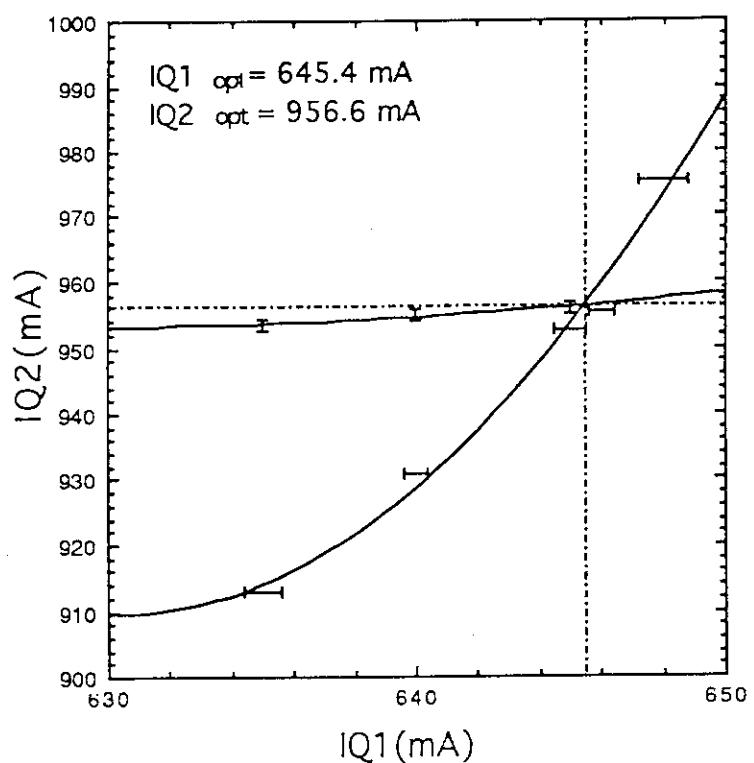


Fig. 19 Optimization of Doublet Quadrupole magnet parameters

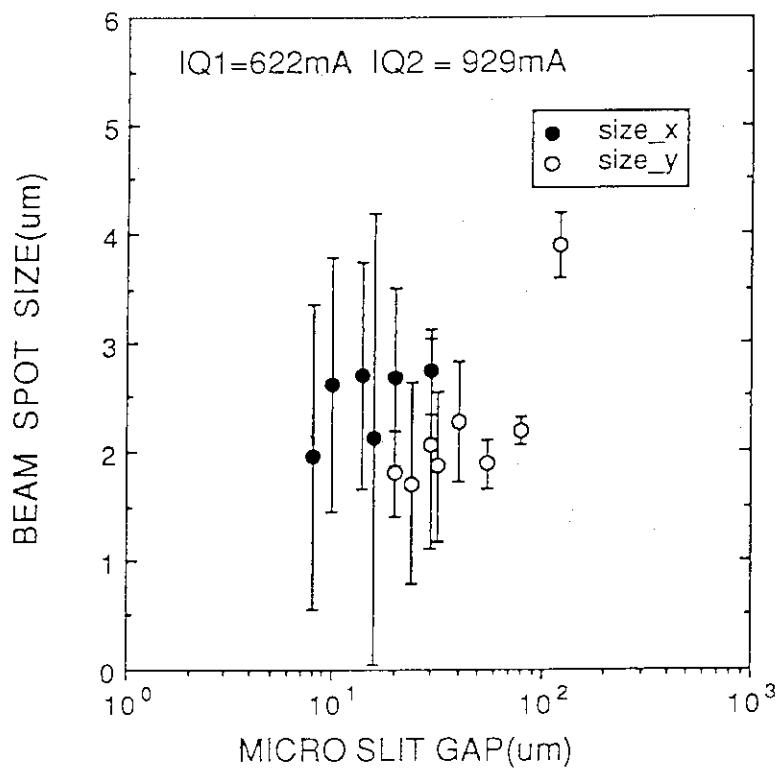


Fig. 20 Beam spot sizes in X and Y directions as functions of the micro slit gaps

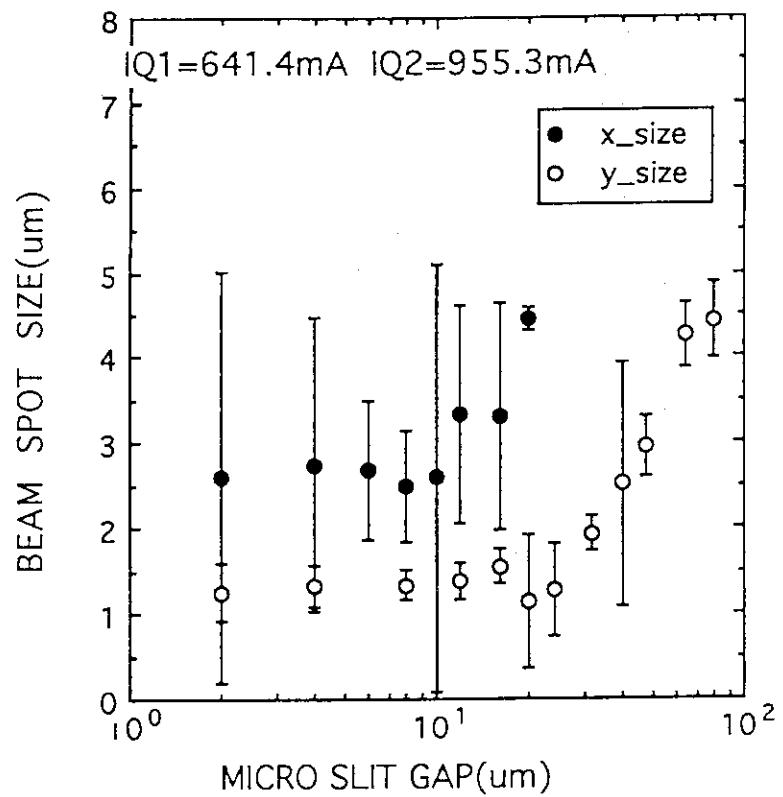
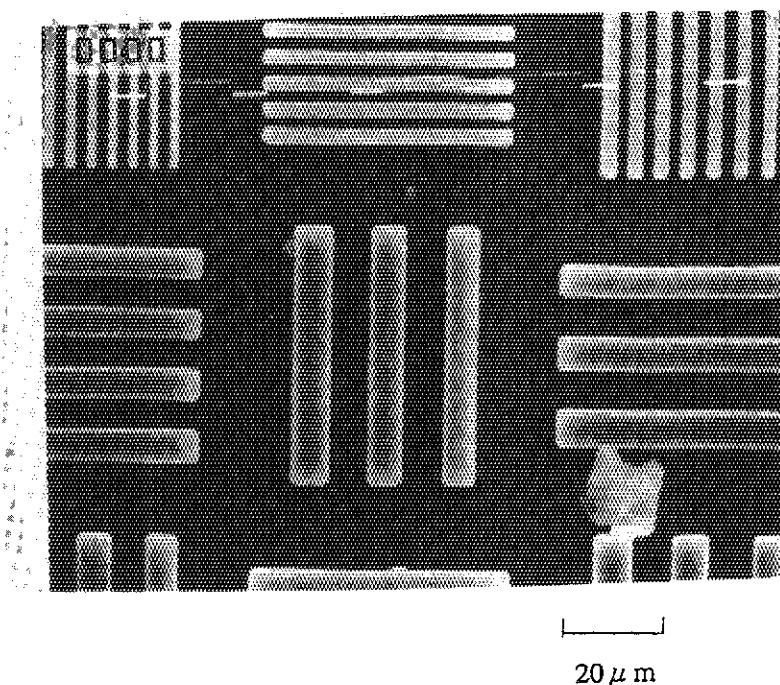
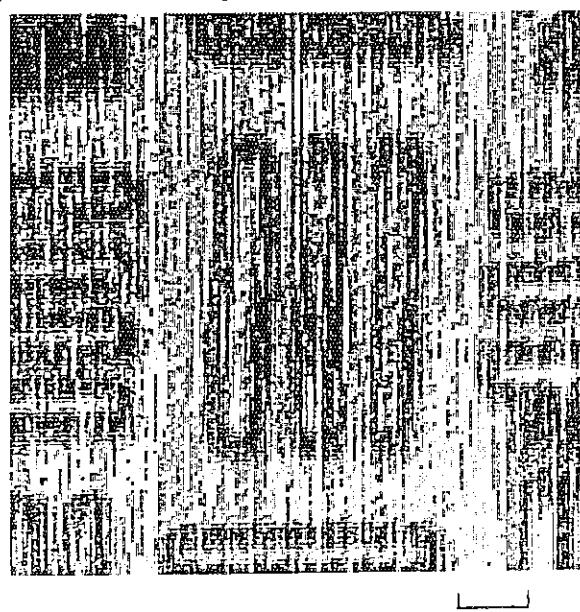


Fig. 21 Other data of beam spot size measurement

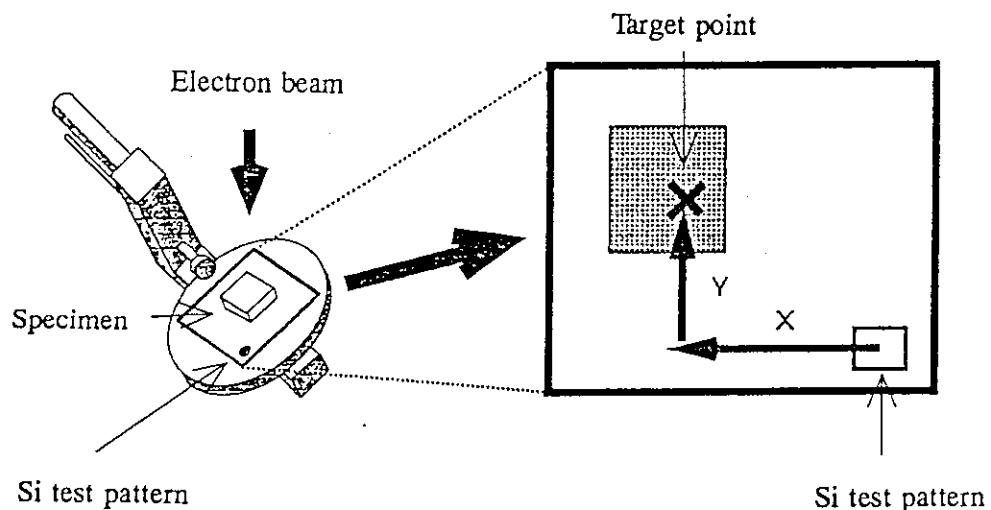


(a) SEM image

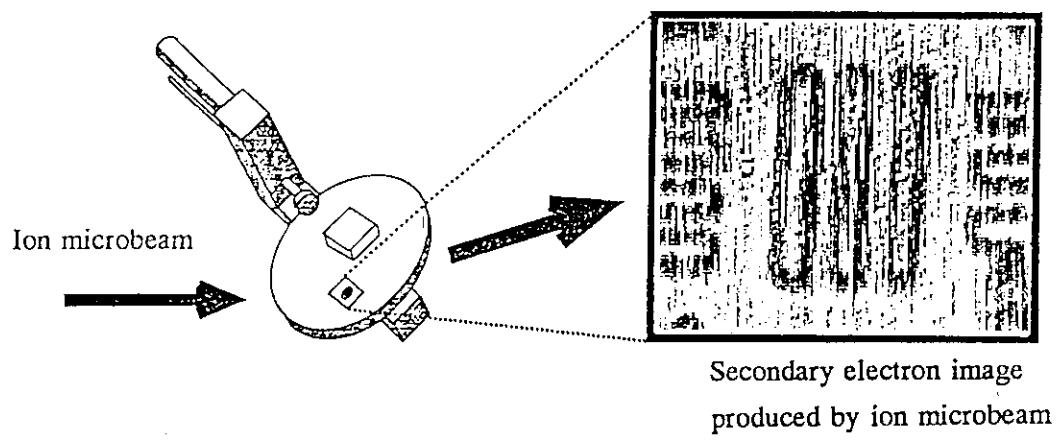


(b) Secondary electron image produced with
3 MeV He^+ microbeam

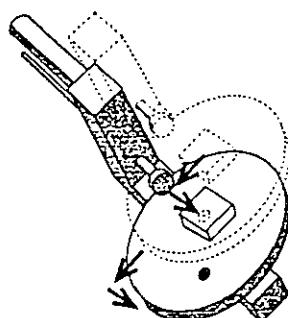
Fig. 22 SEM and secondary electron image of Si relief test pattern



(a) Measurement of relative location of the two samples with SEM



(b) Imaging of the Si test pattern with the ion-induced secondary electrons



(c) Adjustment of specimen position so as to be hit by the ion microbeam

Fig. 23 The aiming technique

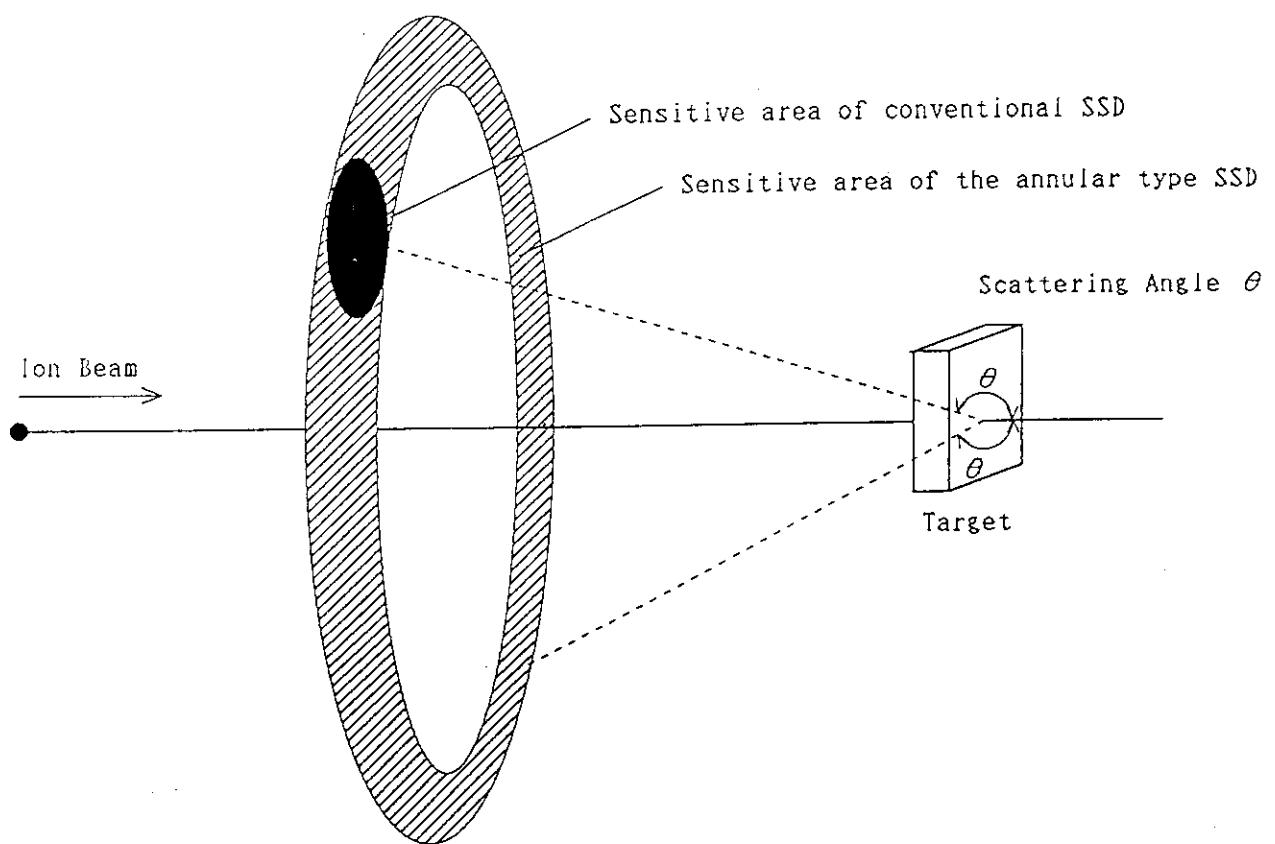


Fig. 24 Comparison of solid angle for a conventional and an annular type SSD

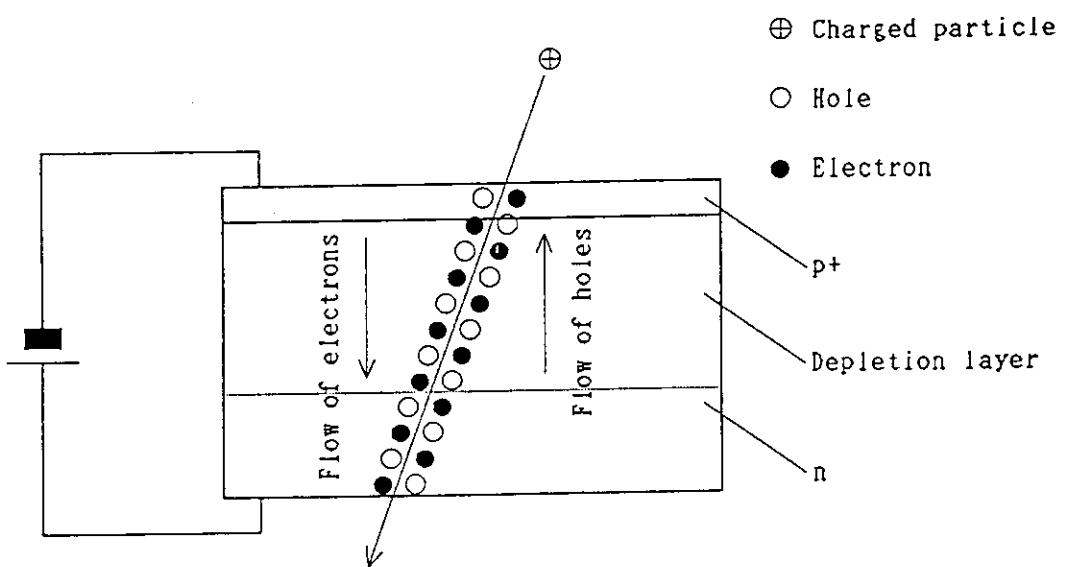


Fig. 25 Hole-electron pair produced by a charged particle

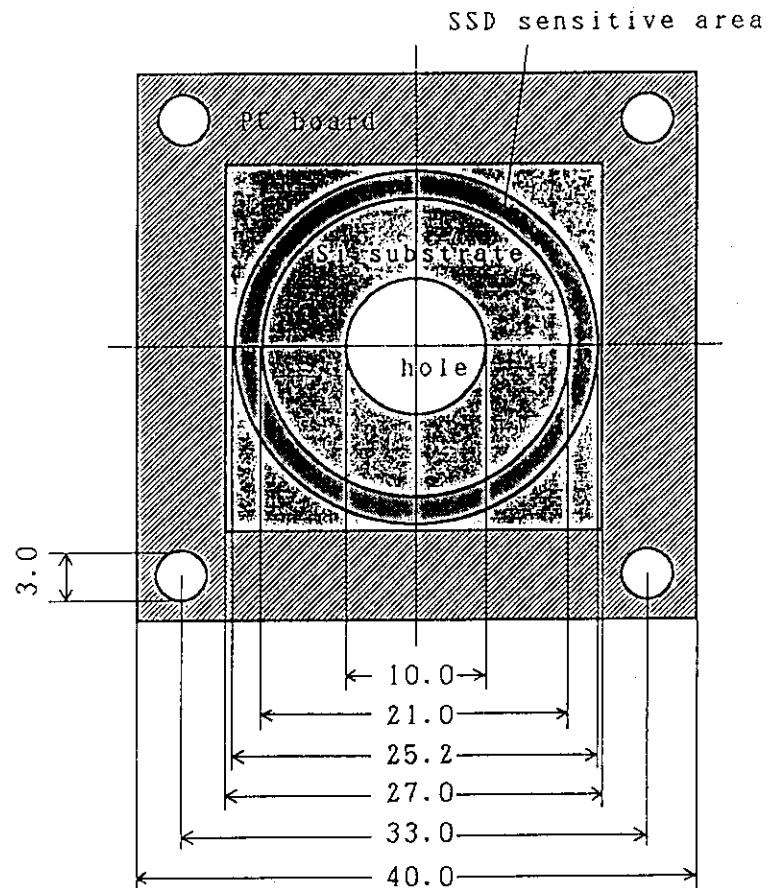


Fig. 26 Drawing of the annular type SSD.
Dimensions are shown in mm.

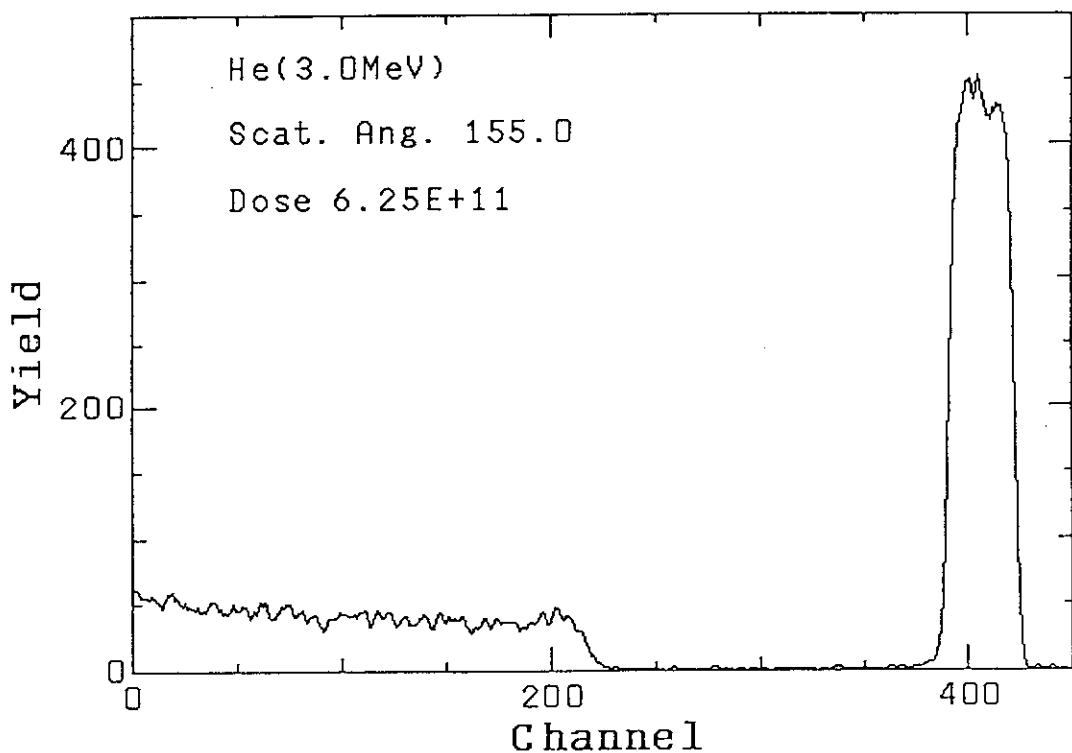


Fig. 27 RBS spectrum obtained by conventional SSD

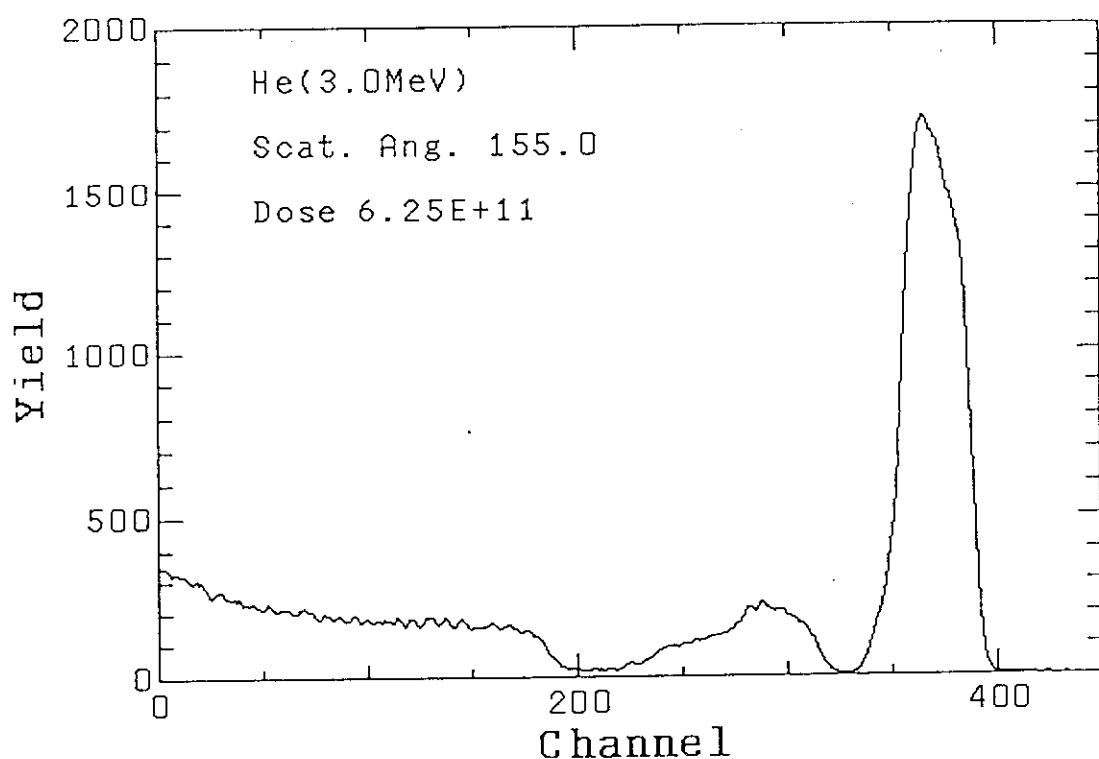


Fig. 28 RBS spectrum obtained by the annular type SSD

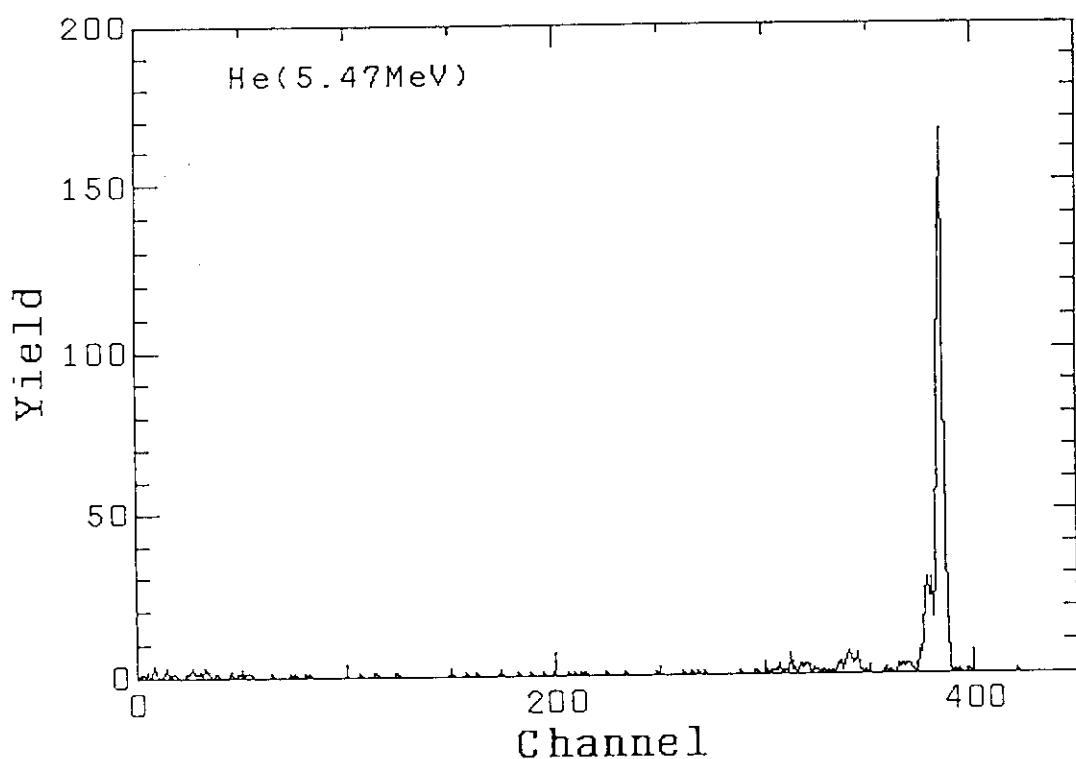


Fig. 29 Undefined peak detected by the annular type SSD

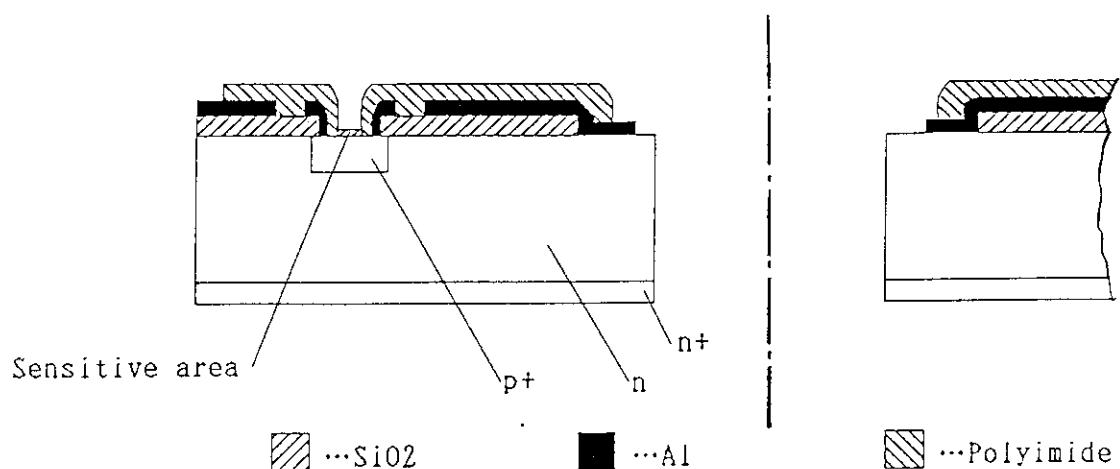


Fig. 30 Cross sectional structure of the annular type SSD

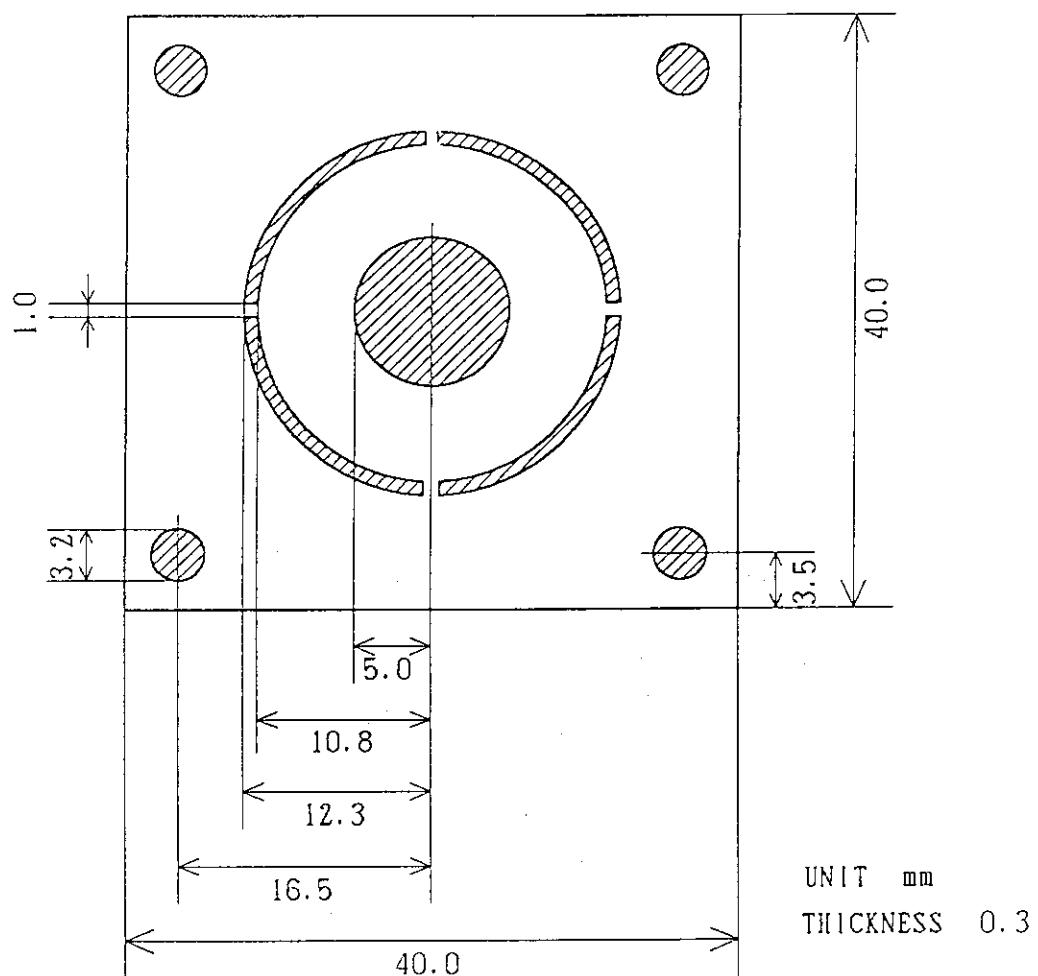


Fig. 31 Drawing of a stainless steel mask

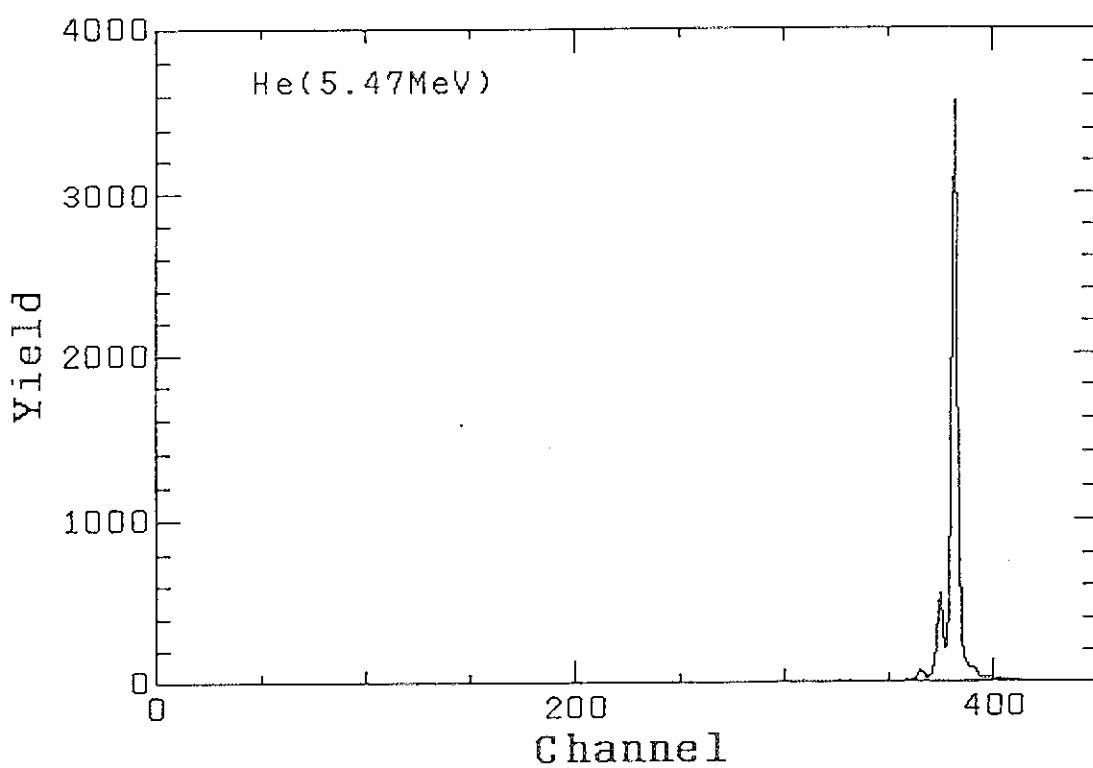


Fig. 32 RBS spectrum obtained by the masked annular type SSD

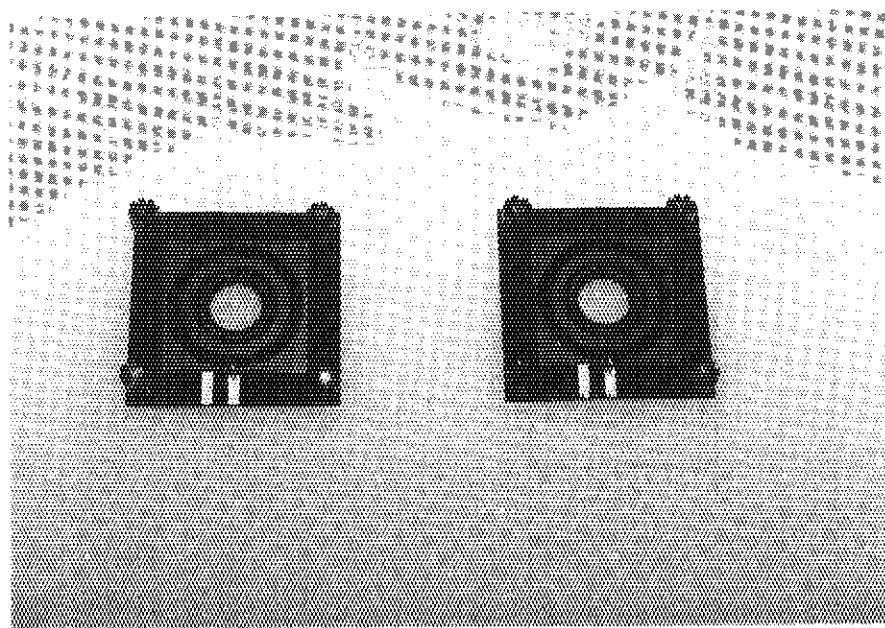


Photo. 11 Annular type SSD

5. 加速器安定化の検討

5. 1 測定の目的

マイクロビームの形成においても利用においてもマイクロビームラインの微小なアクセプタスへのビームの安定した輸送が要求される。それには第一に、加速器から引き出されるビームのエネルギーおよび電流のより高い安定性が必要である。ところが、ビーム計測実験において加速器から引出されたビーム電流が不安定になり測定不能となる場合がしばしば有った。その原因として、我々は当初、イオン源および低エネルギー入射系のギャップレンズ、プローブ、ベロシティーセレクタ及びAINツェルレンズに使用されている現有の高圧電源が安定化回路を持たず、商用電源の交流を直接昇圧して整流する方式であるための高電圧の不安定性を考えた。そこで、それらをスペルマン社製の電圧安定化回路をもった電源に試験的に交換し、現有のオリジナル電源を使用した場合とで、ビーム電流の安定性をリップルとドリフトについて比較し、それをビーム電流の安定化の方向を見出そうとした。

5. 2 測定の方法

イオン源およびイオン入射系の高電圧の測定には高電圧プローブを使用し、ファラデーカップ（FC）におけるビーム電流の測定には前述の電流電圧変換増幅器（TI-76）を使用した。それぞれの出力は、リップル測定の場合にはオシロスコープに入力して、波形を写真に撮り、ドリフト測定にはペンレコーダーに入力して時間的な変動を記録した。ビーム電流を測定したFCの位置は、Fig. 33に示すように（A）イオン入射系、（B）加速器の高エネルギー側の0度方向および（C）15度偏向されたマイクロビームライン上の3ヵ所で、それぞれリップルとドリフトについてオリジナル電源と交換した電源との組合せを変えて測定を行った。交換電源はイオン入射系の筐体に組込めないためそれを使用する場合は別置きで測定した。なお、リップルについてはビームが出ている間の短時間で測定が済むため比較的容易であったがドリフトについては1時間以上ビームが安定である頻度が少ないので30分間の測定とした。

5. 3 測定結果

5. 3. 1 リップル

まず、全てオリジナル電源の状態でオシロスコープによる電流リップルの測定を行った。Fig. 34にギャップレンズの電圧を0V、プローブ電圧を5kVとした時の入射系FC電流リップルを示す。0.2mA程度の電流に、rfによるものと思われるノイズと100Hzのリップルが見えた。Fig. 35にギャップレンズの電圧を15kV、プローブ電圧を5kVとした時の入射系FC電流リップルを示す。平均電流は1.7mAで、p-pで0.3mA程度のリップルが乗っている。Fig. 36にこの時のマイクロビームラインのFCにおける電流リップルを示す。

最大で 13 nA の電流であるが 50 Hz の周期で 100% 近い変動が起きている。

次に、ギャップレンズの電源を安定化電源に交換し、その電圧を 15 kV として入射系、高エネルギー側直線コースおよびマイクロビームラインの FC における電流リップルの測定を行った。Fig. 37、Fig. 38 および Fig. 39 にそれについて観測したオシロスコープの画面の写真を示す。また、Fig. 40 にプローブ電圧 6 kV の場合のリップルを示す。電流リップルに関してはギャップレンズ電源の交換によっても変化しない事がわかった。

次にプローブ電圧のリップルに対する影響を調べるためにギャップレンズの電源を安定化電源にし、プローブの電源をオリジナルとした時のプローブ電圧と入射系 FC における電流及びリップルの関係を測定した。プローブ電圧はメーターの読みで 1 から 6 kV まで変化させ、ソレノイドマグネット及びベロシティーセレクターに関しては電流が最大となるように最適化させた。Table 5 にこの測定の結果をまとめて示す。プローブ電圧を大きくするにしたがってイオン電流は大きくなるが電流リップルの割合も大きくなるのが分る。特にプローブ電圧 6 kV の場合、プローブ電圧安定度をオシロスコープ用高圧プローブ ($1/400$) を用いて測定した結果 (Fig. 41)、リップルが 0.67% と測定の大きさは異なるが、ビームのリップルと類似の波形であった。このことはリップルの発生原因がプローブにあることを示唆していると思われたが、プローブ電源を安定化電源に交換してもまったく同様の 100 Hz の電流リップルが依然として存在し、プローブ電源が原因でも無い事がわかった。

5. 3. 2 ドリフト

イオン入射系の各電源についてオリジナルのものとテスト用の交換電源とを交換して入射系の FC での電流ドリフトの比較をしてみたところ、ほとんど有為な差は見出されなかった。

たとえばギャップレンズの電源を交換した場合、出力電圧のドリフトを比較するとオリジナル電源 (Fig. 42) の方には交換電源 (Fig. 43) の場合には見られない小幅な変動が絶えずあるが、これが電流の時間的な変動の要因とはいえないかった。放電はどちらの電源を使用しても時として発生し、電圧に無関係に電流値は、徐々に増加あるいは減少し、また安定したり不安定になったりした。さらに、ギャップレンズとベロシティーセレクターの電源についてオリジナルの電源と安定化電源の組合せを変えて、入射系 FC における 30 分間のビーム電流ドリフトを測定した。オリジナルの電源の場合商用電源の電圧変動の影響を受けると思われる所以、ギャップレンズの電圧とモニターしながら時間帯を変えて測定した。なおプローブ及びAINツェルレンズの電源は、オリジナルのものを使用した。Table 6 にこれらの結果をまとめて、30 分間のドリフト値を測定した時間帯を区分して示す。この測定において、オリジナル電源を使用した場合のギャップレンズ電圧の 12 時から午後 1 時の間の昼休み時においての変動が観測されたが、ビーム電流のドリフトに関してはその影響は見られなかった。結局この結果はギャップレンズとベロシティーセレクターの電圧変動がビーム電流の変動に大きく影響を与えていないことを示す。

またその他の電源 (プローブおよびAINツェルレンズ) の評価や、他の FC におけるビーム電流についての測定は、イオン源および加速器本体のトラブルもあり充分に行なうことが

出来なかった。

5. 4 まとめ

我々がマイクロビーム装置を製作し、早稲田大学のタンデム加速器施設に設置してビームを用いた実験を進める上で最初の障害となったのがこのビームの安定性であった。そこで、引出されるイオンビーム電流の安定度に対するイオン入射系の高圧電源の安定度の依存性を調べるために不十分ではあるがイオン源および低エネルギー入射系の高圧電源の安定度とビーム電流のドリフト及びリップルの測定を行った。測定の結果を見る限り、高圧電源を電圧安定化回路をもたないオリジナルのものと別の安定化電源を使用した場合でビーム電流の安定度に関しては両者の場合に有意な差はなかった。したがって考えられるビーム電流の不安定の原因是、今回測定した電源ではなく、rfイオン源のプラズマの変動、あるいは加速器本体の昇圧回路の不安定性による加速電圧の変動、もしくはそれ以外と、結局特定出来ずに終わってしまった。しかしこの経験を通して加速器特にイオン源の重要性を充分認識できた。

幸いなことに我々は、ビーム計測実験時における対策として、前の章で述べたように、リップルに関しては、測定系に高周波成分をカットするローパスフィルターを付加する事により、その影響を取除き、ドリフトに関しては、オートアラインシステムを用いてマイクロビームラインに入射するビーム軌道を補正する事により安定なビーム電流を確保することができている。

Table 5 Results of measuring ripple of beam current at FC (A) varying probe voltage from 0 to 6 kV.

Probe volatage [kV]	Beam current [nA]	rippple (p-p)[%]
1	4 0 × 1 0 ⁶	3 . 7 5
2	2 1 0	7 . 1 4
3	8 0 0	2 . 5 0
3 . 5	1 3 0 0	6 . 1 5
5	1 9 0 0	1 5 . 8
6	2 7 0 0	2 2 . 2

Vacum to indicate He gass flow rate: 4×10^{-6} , Gap-lens: 18 kV

Table 6 Results of beam current drift measurement(%/30min), changing combination of power suppliers original (O) or exchanged (E) for the gap-lens (G) and the velocity-selector (V).

Time	Gap-lens Voltage		Beam Current at FC in the injection line			
	O	E	G-O, V-O	G-O, V-S	G-S, V-O	G-S, V-S
11	1.13				8.9	
		0.52				9.8
12	0.62					11.1
		1.38	0.49	12.2		9.4
13	1.26	0.49		9.6		18.3
14	0.86			14.9		
		0.99		9.1		
15	1.2		8.1			
16	0.37				8.2	
		1.1		12.8		

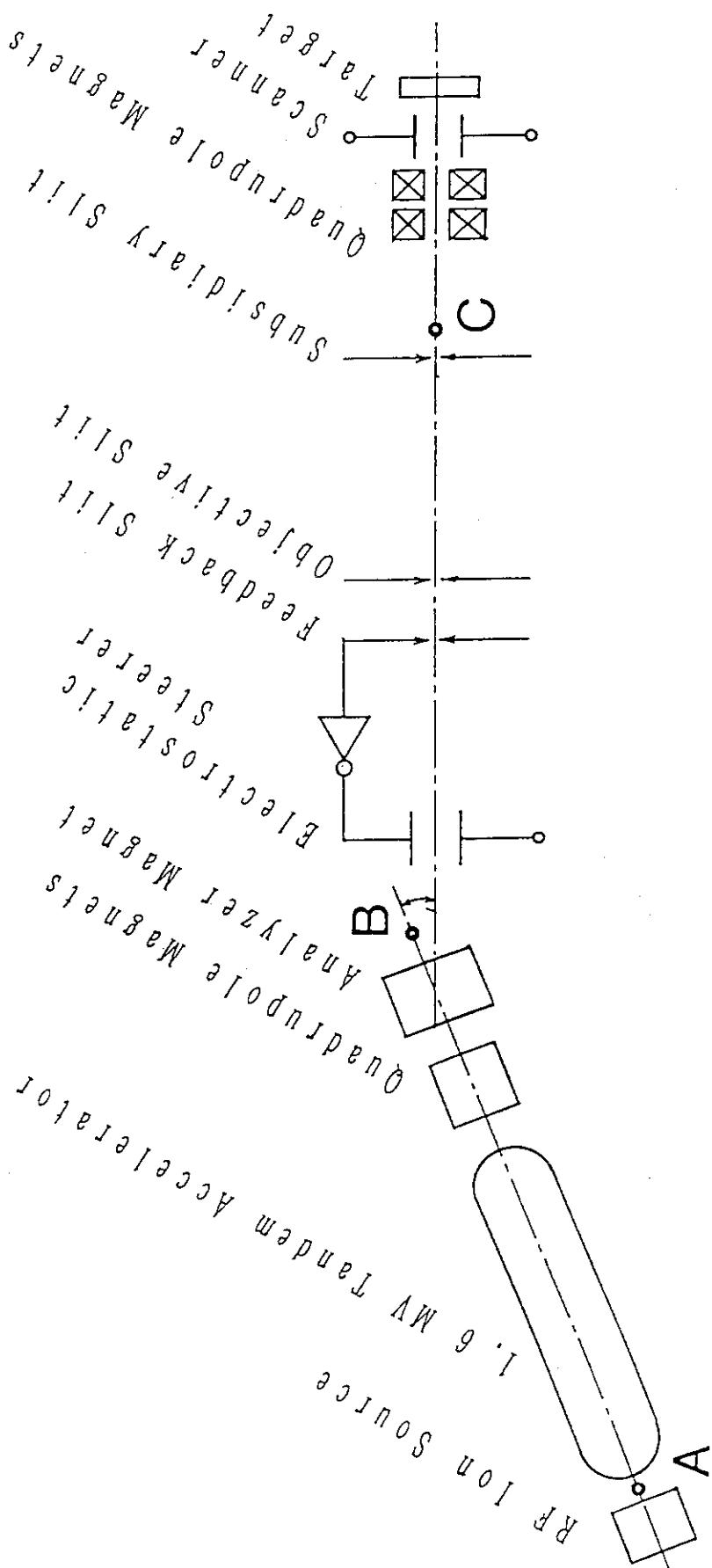


Fig. 33 Position of FCs; in the injection line (A), in the high energy straight line (B) and in the microbeam line (C)

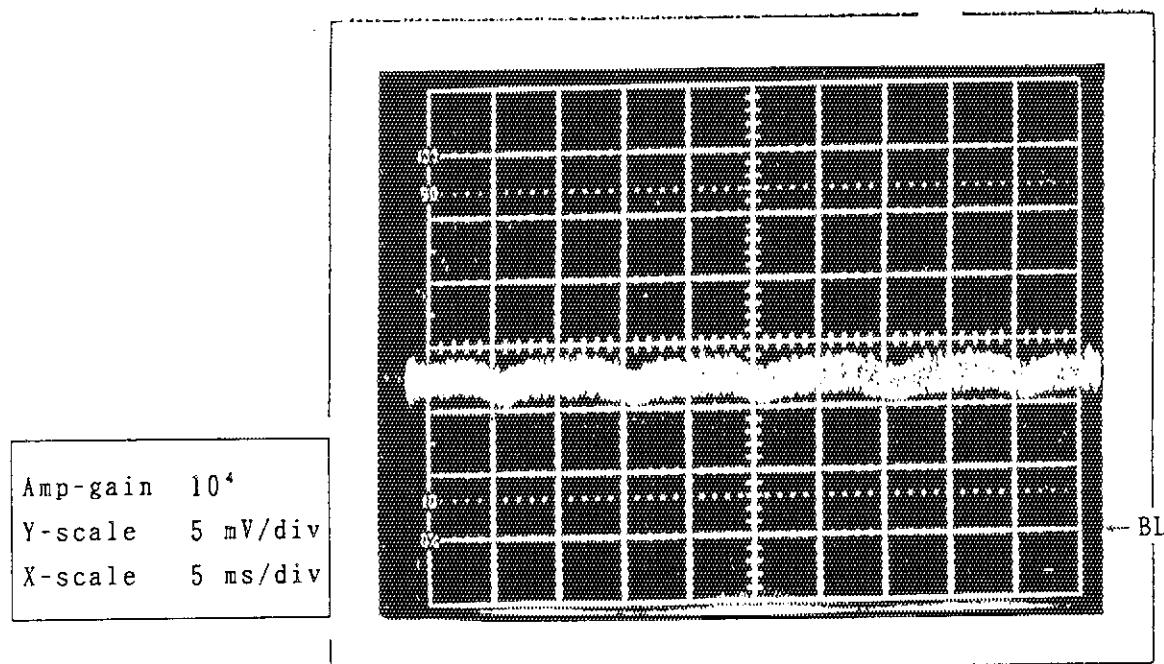


Fig. 34 Observed current ripple at FC (A) under condition that the gap-lens bias voltage is 0 and the probe voltage is 5 kV supplied by the original power supplier

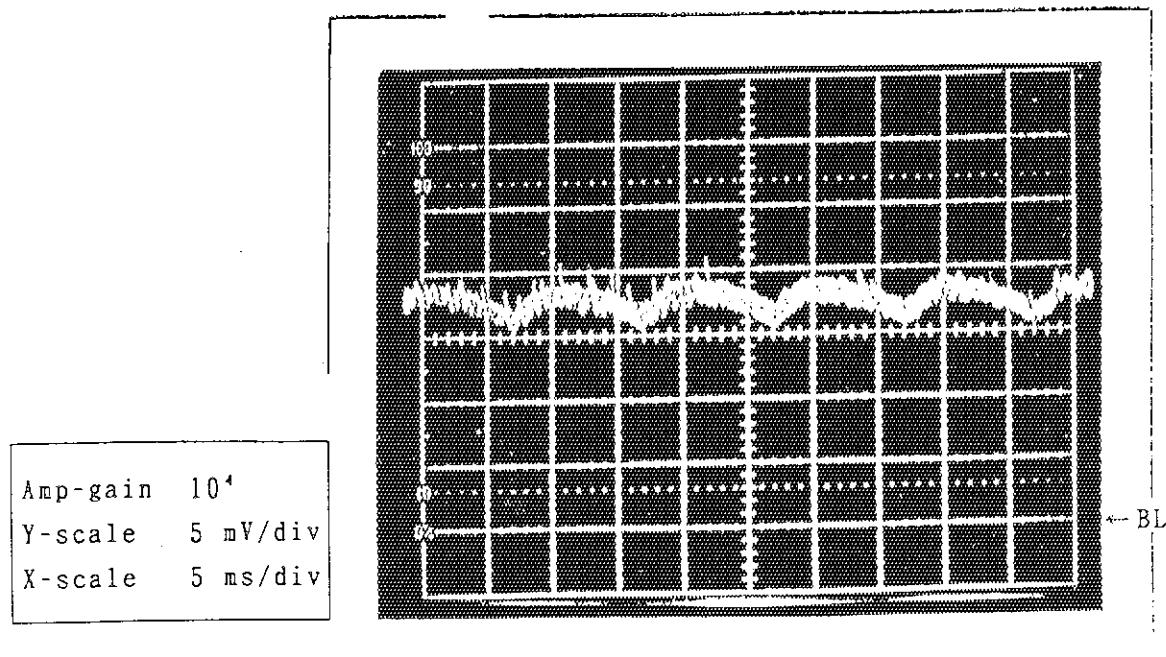


Fig. 35 Observed current ripple at FC (A) under condition that the gap-lens bias voltage is 15 kV by the original power supplier and the probe voltage is 5 kV supplied by the original power supplier

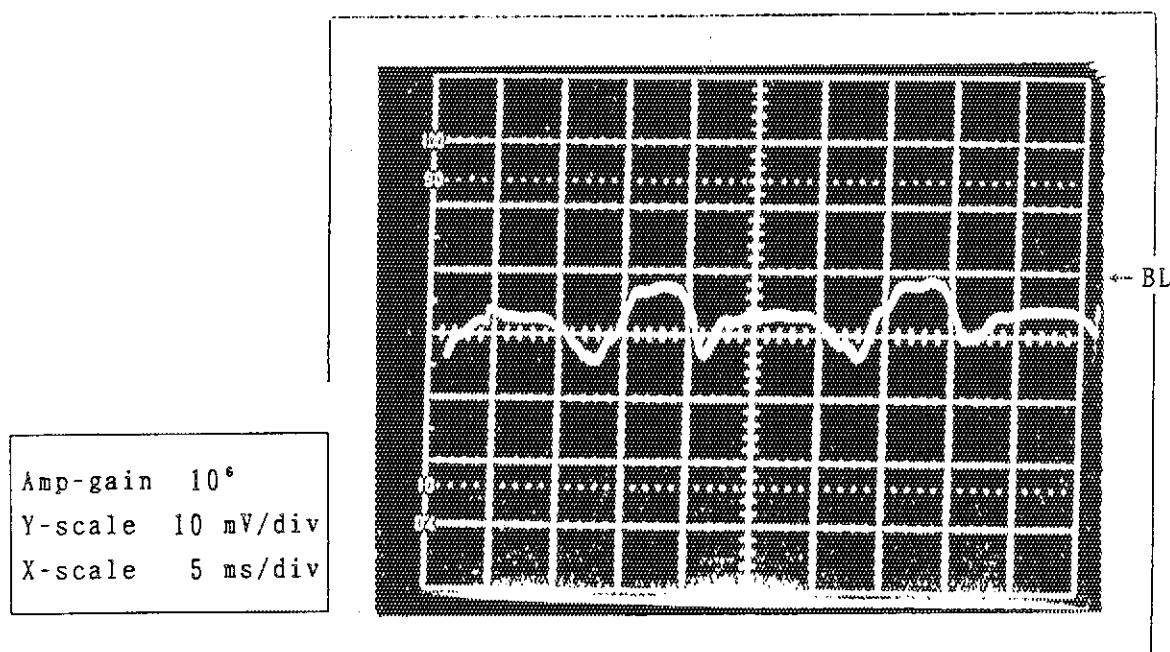


Fig. 36 Observed current ripple at FC (C) under condition that the gap-lens bias voltage is 15 kV by the original power supplier and the probe voltage is 5 kV supplied by the original power supplier

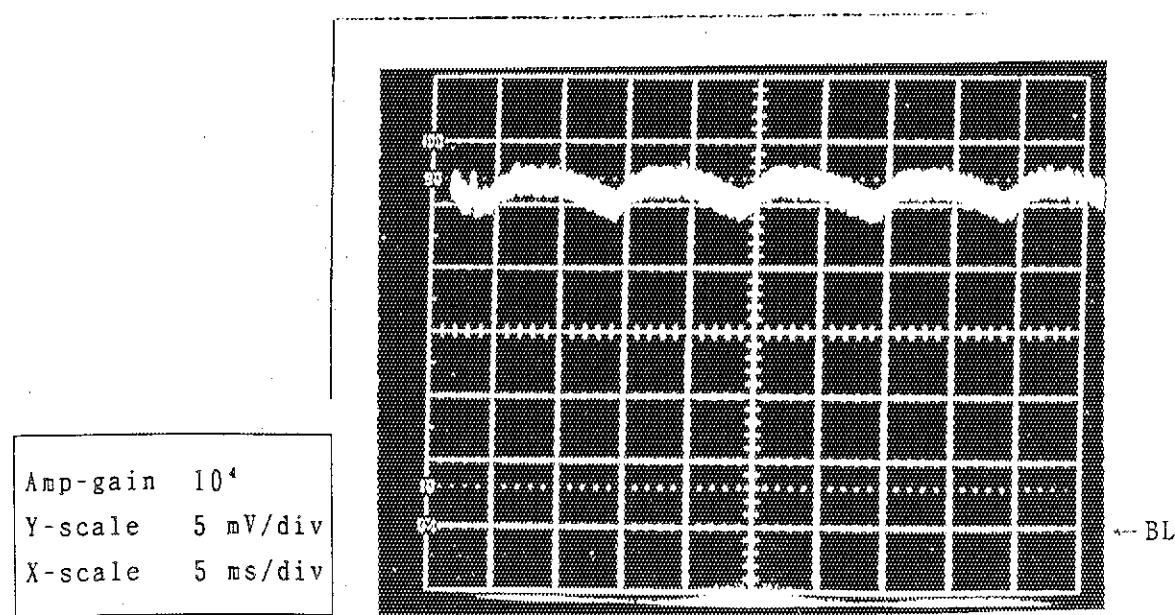


Fig. 37 Observed current ripple at FC (A) under condition that the gap-lens bias voltage is 15 kV by the exchanged power supplier and the probe voltage is 5 kV supplied by the original power supplier

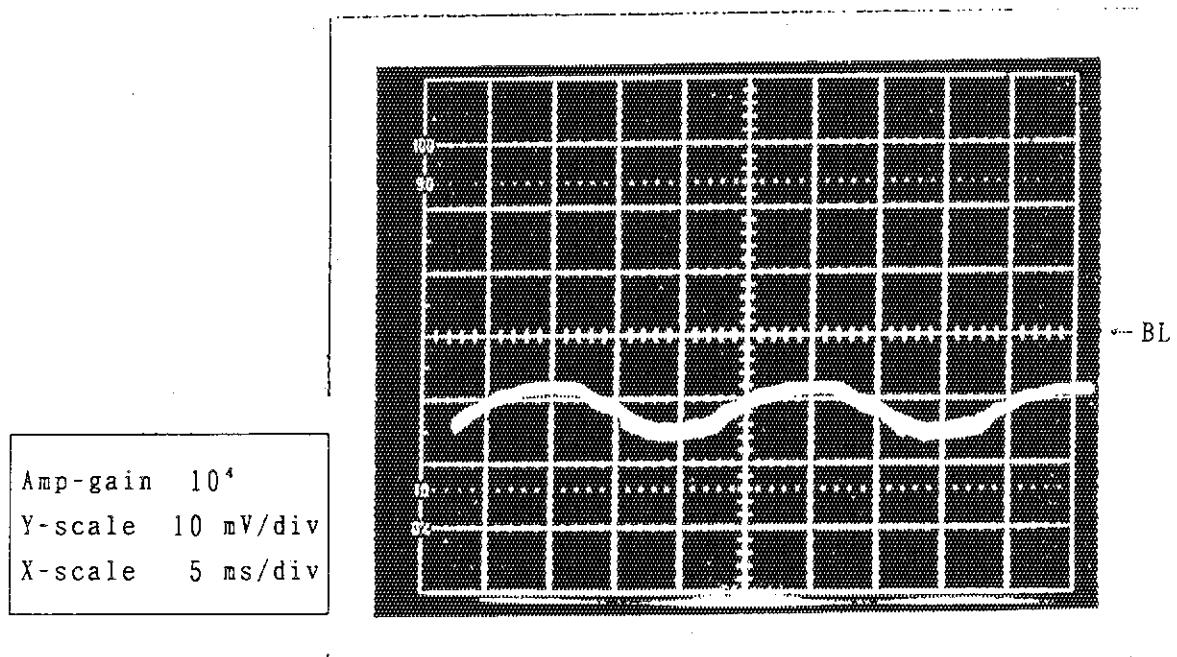


Fig. 38 Observed current ripple at FC (B) under condition that the gap-lens bias voltage is 15 kV by the exchanged power supplier and the probe voltage is 5 kV supplied by the original power supplier

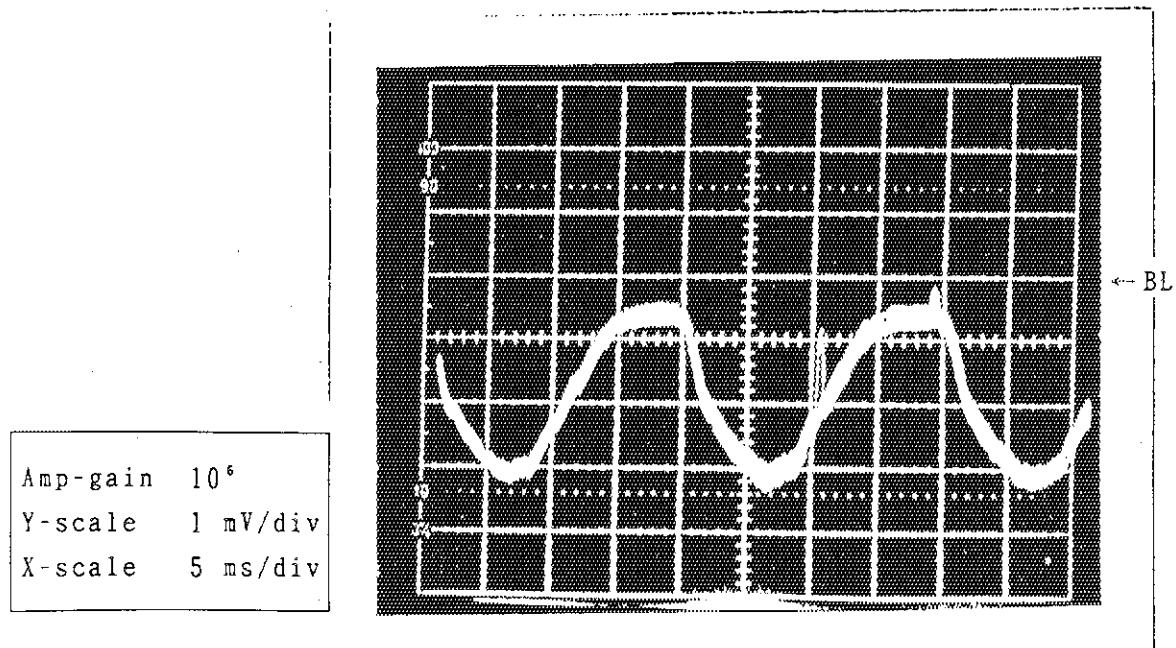


Fig. 39 Observed current ripple at FC (C) under condition that the gap-lens bias voltage is 15 kV by the exchanged power supplier and the probe voltage is 5 kV supplied by the original power supplier

Amp-gain 10^4
Y-scale 5 mV/div
X-scale 5 ms/div

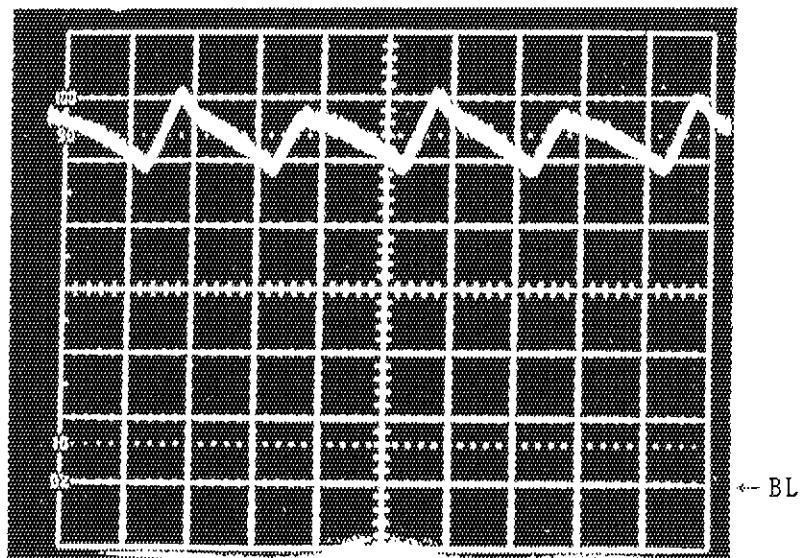


Fig. 40 Observed current ripple at FC (A) under condition that the gap-lens bias voltage is 15 kV by the exchanged power supplier and the probe voltage is 6 kV supplied by the original power supplier

Y-scale 40 V/div
X-scale 5 ms/div

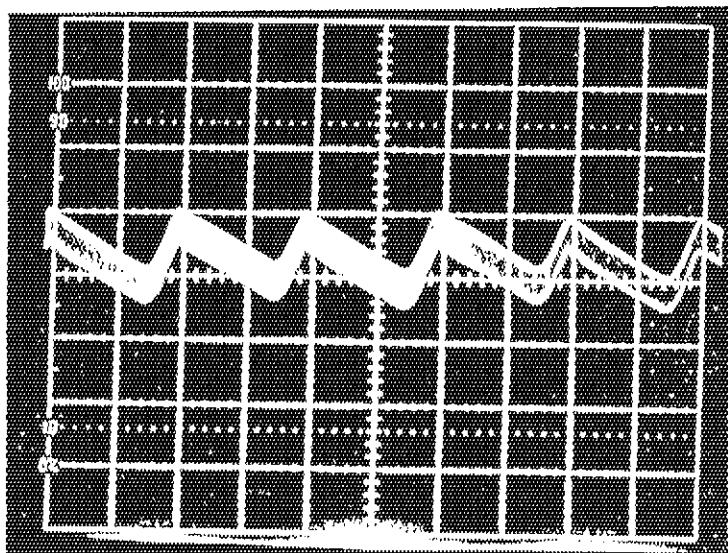


Fig. 41 Observed ripple of the probe voltage at supplied voltage of 6 kV by the original power supplier

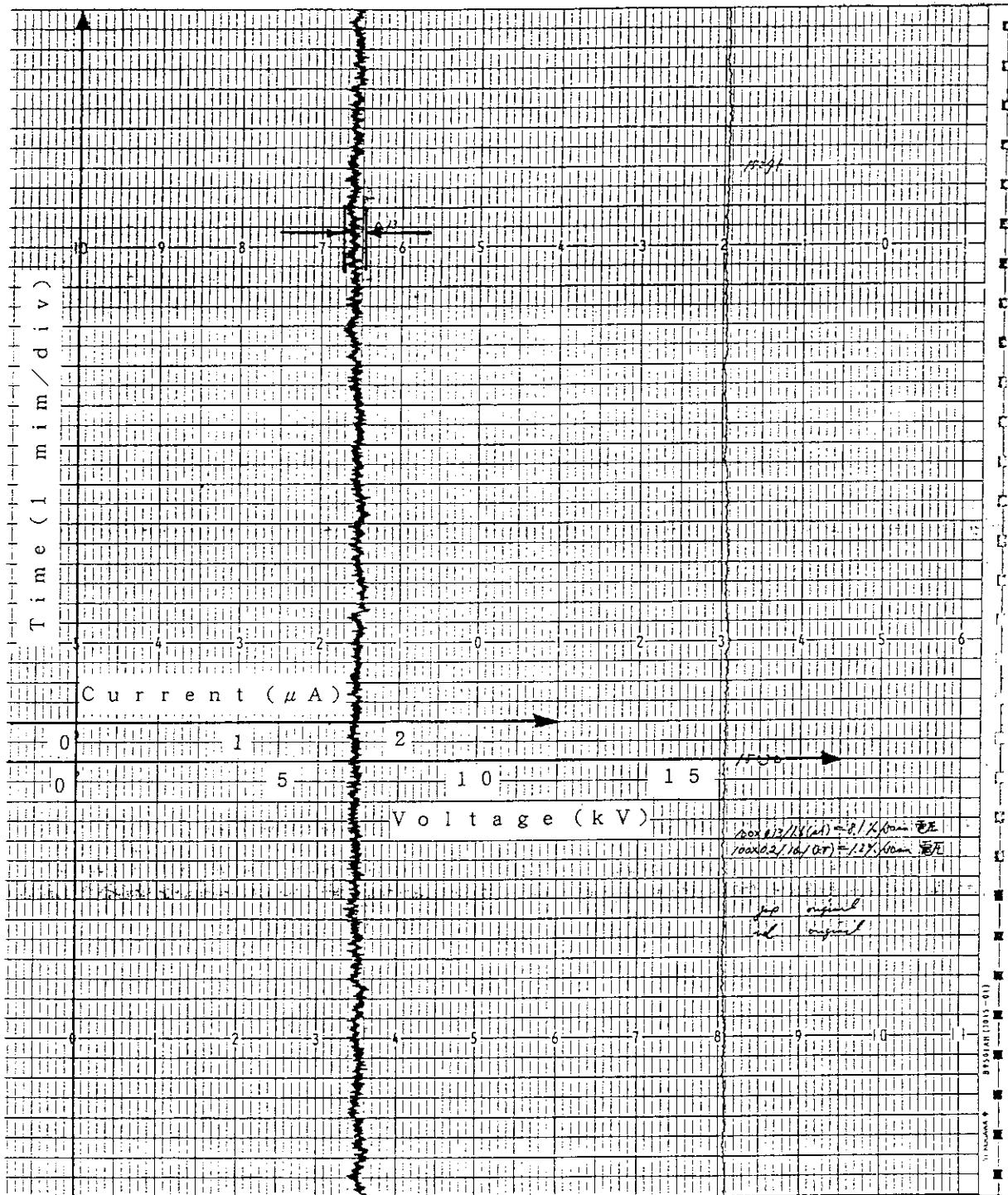


Fig. 42 Result of the drift test measuring the voltage of the gap-lens (right) and the beam current at FC (A) (left), using the original power supplier for the gap-lens

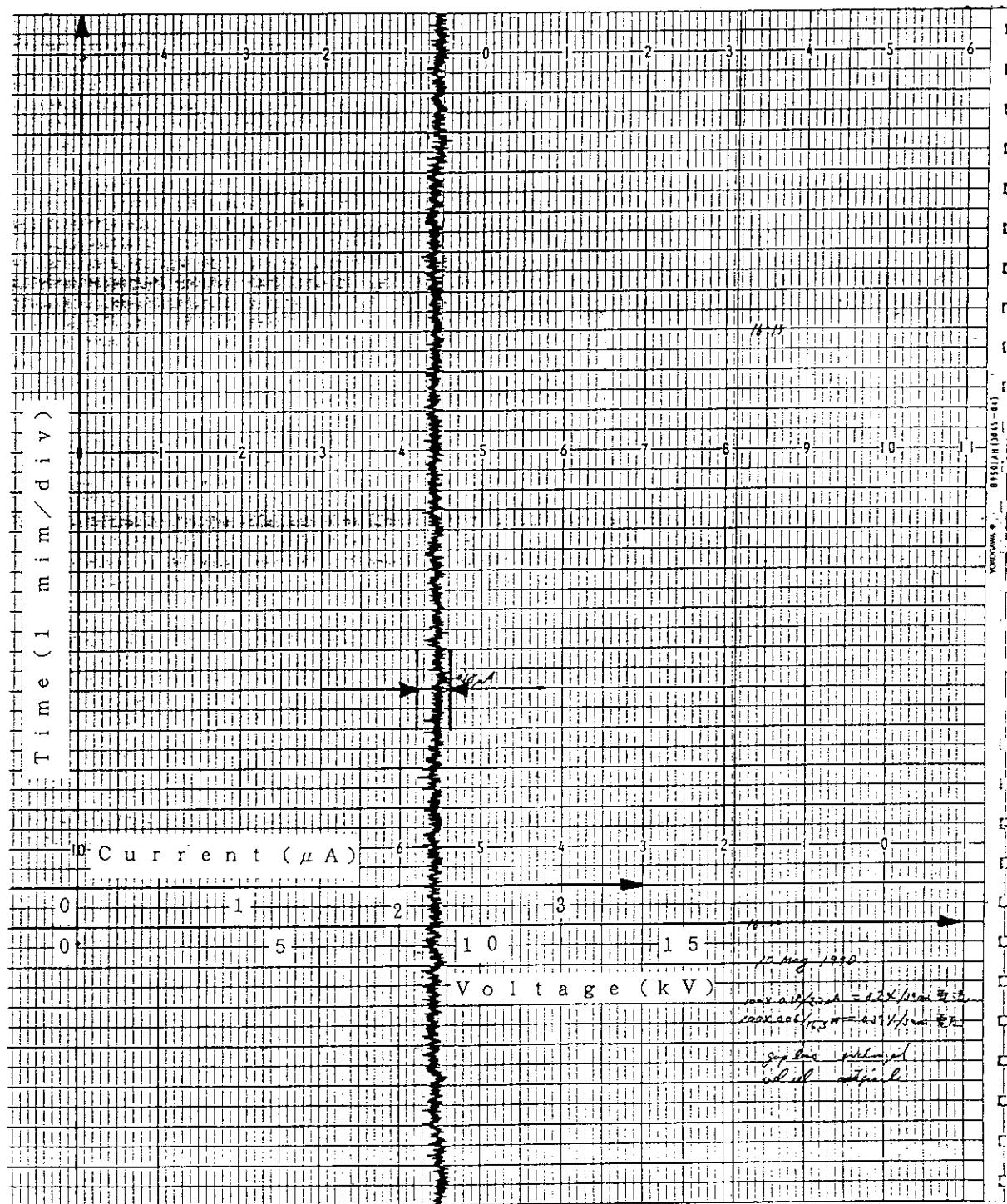


Fig. 43 Result of the drift test measuring the voltage of the gap-lens (right) and the beam current at FC (A) (left), using the exchanged power supplier for the gap-lens

6. レンズの磁場解析

6. 1 はじめに

本装置においては精密レンズとして二連四重極電磁石を使用している。ビームを集束するのは四重極磁場であり、それを形成するのに理想的な磁極の形状はその断面が双曲線である。しかし、現実の電磁石においてはコイルを巻く必要上、曲線は途中で打ち切られ高次の多重極磁場が混入する¹⁹⁾。また、軸方向の磁場分布においては磁極端周辺に磁場強度がなだらかに立ち下がるフリンジング領域が現れる。峰原等は、磁場測定データから最小二乗法により分析電磁石の多重極磁場成分やフリンジング形状のパラメータを求め、電磁石設計にフィードバックする、フィールドマッピングの方法を開発した²⁰⁾。我々は、それをマイクロビーム用Qレンズの磁場特性に関する知見を得るとともに、それを将来製作するマグネットの最適設計のための基礎データとするために応用した。今回製作された二連四重極電磁石の中心平面内の垂直方向の磁場分布を小型のホールプローブを用いて測定した。1つのモデル関数を設定し、フィッティングプログラムを用いて、測定データから多重極磁場成分、磁極端のフリンジング領域の磁場の形状等のパラメータを導き出した^{21) 22) 23) 24)}。ここでは各多重極磁場成分の割合が磁極内部とフリンジング領域とで同じであると仮定した。しかし、フィッティングの結果得られたパラメータによって再現した磁場分布と測定データとを比較した場合、フリンジング領域において大きく食違った事が明らかになった^{21) 22) 23) 24)}。そこで、中心平面における二次元の磁場分布のデータから、中心軸と垂直な方向の一次元の磁場データに分割し、各データ毎に多重極磁場成分のみによるフィッティングを行った結果、4重極磁場成分以外の高次の多重極磁場成分がフリンジング領域に局在している事が明らかになった。また、この事を計算により確かめるために三次元磁場計算プログラム E L F / M A G I C²⁵⁾を用いてこの電磁石の中心平面の磁場分布をシミュレーションし、同様の解析を試みた。ここでは、磁場測定および計算の方法及び結果、そして多重極磁場成分に関する解析の結果について述べる。

6. 2 磁場分布の測定

Photo. 12に示した様に電磁石を専用測定架台に固定し、電磁石の水平中心面内の垂直(Y方向)磁場成分を二次元的に測定した。磁場計測には、小型のホールプローブ(F. W. Bell社製FTJ-0145)およびガウスマータ(F. W. Bell社製811)を用いた。プローブのセンサー部を長いジュラルミン製のスライディングシャフトの中央に組込まれた薄い固定板上に固定し、シャフトを中心軸(Z軸)方向に手動でスライドすることによりZ軸方向の磁場分布を測定した。また、ホールプローブを斜に彫った固定板の溝に沿って変移させることにより、横方向(X方向)の位置を約±6.5 mmの幅で変化させた。プローブのZ方向の位置は、シャフトに連結されたリニアポテンショメータによって計測した。

計測系の概略をFig. 44に示す。ここで、ガウスマータおよびリニアポテンショメータからの電圧出力は、デジタルボルトメータによってそれぞれデジタル量に変換され、GPIBイン

ターフェースを経由してマイクロコンピュータに読み込まれ、磁場強度と位置のデータに変換されて磁気ディスクに記憶される。

2つの電磁石にそれぞれ最大定格電流2.0 Aを極性を反対にして通電して励磁した。磁場分布測定の前に精密Qレンズとシャフトの軸合せを行った。ホールプローブをX = 0の位置に固定し、プローブの感度を高くした状態でシャフトをスライドさせ、磁場強度がどの位置でも0になるように電磁石の位置を調整した。二次元分布は、Z方向が約2 mmステップ、約300 mm長さ、およびX方向が1 mmステップ、約±6.5 mm幅の領域で測定した。測定の結果得られた二次元のフィールドマップをFig. 45に示す。2つの相反する極性の四重極磁場領域がX方向に直線的に変化する磁場分布として表れている。

6. 3 磁場計算

プログラム' ELF/MAGIC'は、(株)エルフによって開発され、改良された積分方程式法による、三次元、非線形、静磁場解析ソフトウェアである²⁵⁾。電磁石における磁性体及びコイルの磁気特性及び電流値をそれぞれ入力しさらにそれらの形状をメッシュデータとして入力する事により、磁性体中の磁気モーメントや空間の磁場強度が計算できる。また四重極電磁石の様な回転対称性をもつ場合は1磁極のみのメッシュデータ入力によって全体の磁場が計算できるので、今回製作した二連四重極電磁石のうちの一つの四重極電磁石についてFig. 46の様なメッシュ(断面)によって計算した。幾何学的にほぼ忠実に実際の電磁石を再現しているが、ヨークや、コイルの形状は若干簡略化されている。また、電磁石の軸ずれや、対称性の崩れは無いと仮定して、水平中心平面に於ける二次元の磁場分布を計算した。

計算の結果得られた二次元のフィールドマップをFig. 47に示す。

6. 4 多重極磁場成分

測定及び計算の結果得られた二次元の磁場分布のデータから中心軸方向の多重極磁場成分の分布を調べるために、二次元のデータから中心軸に対して垂直な方向の一次元のデータを分割して取り出し、それぞれに最小二乗法により次の様な6次の多項式、

$$B_y = B_1 x + B_2 x^2 + B_3 x^3 + B_4 x^4 + B_5 x^5$$

をフィットさせ、n = 1 ~ 5 の 2(n+1) 重極成分を求めた。なお、測定データに関しては、軸方向の測定点の位置、すなわち、Z座標が水平方向の位置で異なっているので、それを揃えるために内挿を行った。

この解析によって得られた多重極磁場成分のZ方向の分布を測定データと計算結果についてそれぞれFig. 48とFig. 49に示す。ここで、四重極成分(n = 1)以外の成分については、分かりやすさのために10倍している。測定データの場合、四重極磁場成分以外の多重極磁場成分が磁極端領域に局在した分布を示しているのがわかる。計算結果の場合は、6重極と10重極

を除く多重極磁場成分が磁極端領域に局在した分布を示している。高次の成分が磁場端領域に局在して分布している点で両者は、よく一致していると思われる。ただし、計算の場合対称的な電磁石の形状を仮定したため、6重極および10重極成分の分布が見られないのに対し、測定データの場合にそれらの成分が磁場端においてピークを持つのは位置の測定精度によるものと、データの磁極端の磁気特性の非対称性の効果もあると考えられる。この電磁石の磁極端は、直角に切取られたままの形状をしており、局部的な磁束の密集が生じて、磁場の対称性が崩れやすくなっていると考えられるので、今後製作する電磁石については、磁極端を適当な極率半径で丸める必要があると考えられる。

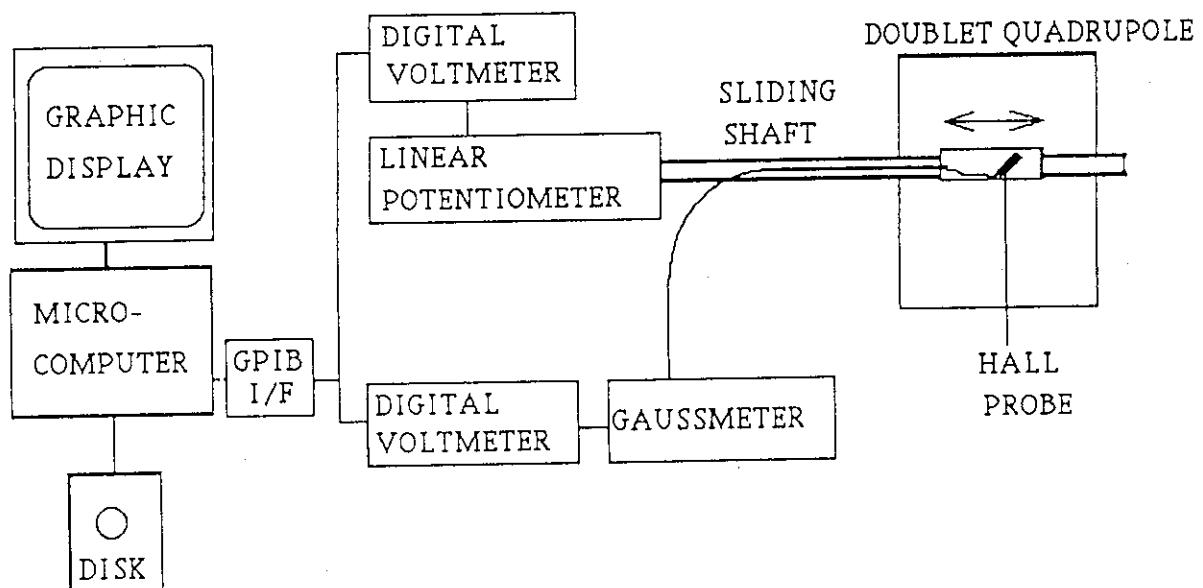


Fig. 44 Block diagram of the measurement

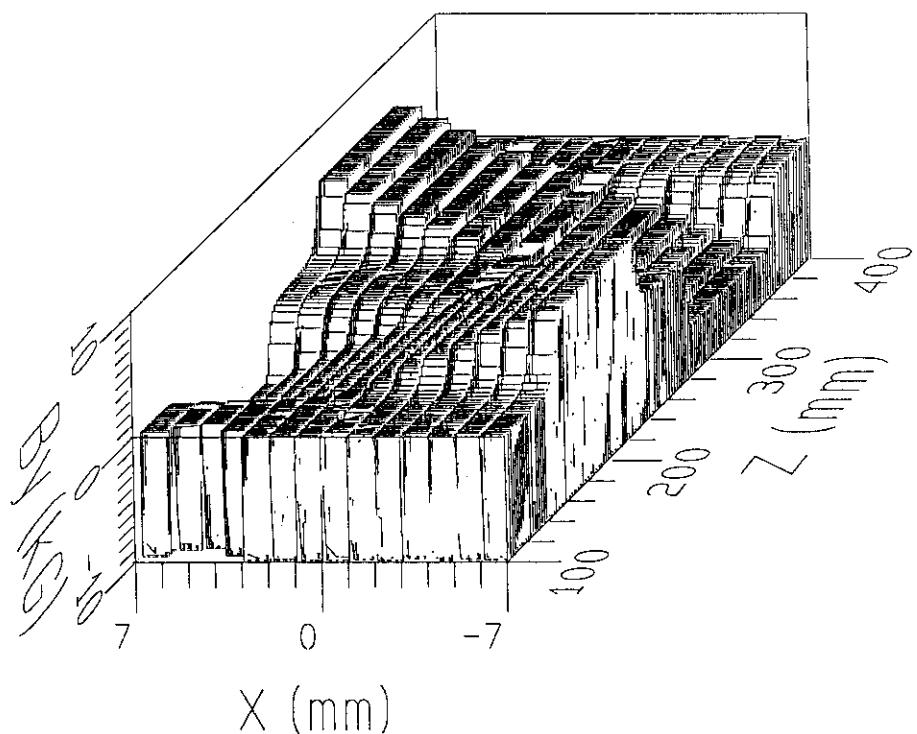


Fig. 45 Measured field map. X and Y indicate the lateral and longitudinal position of Hall probe in the median plane of the Q-lens, respectively.

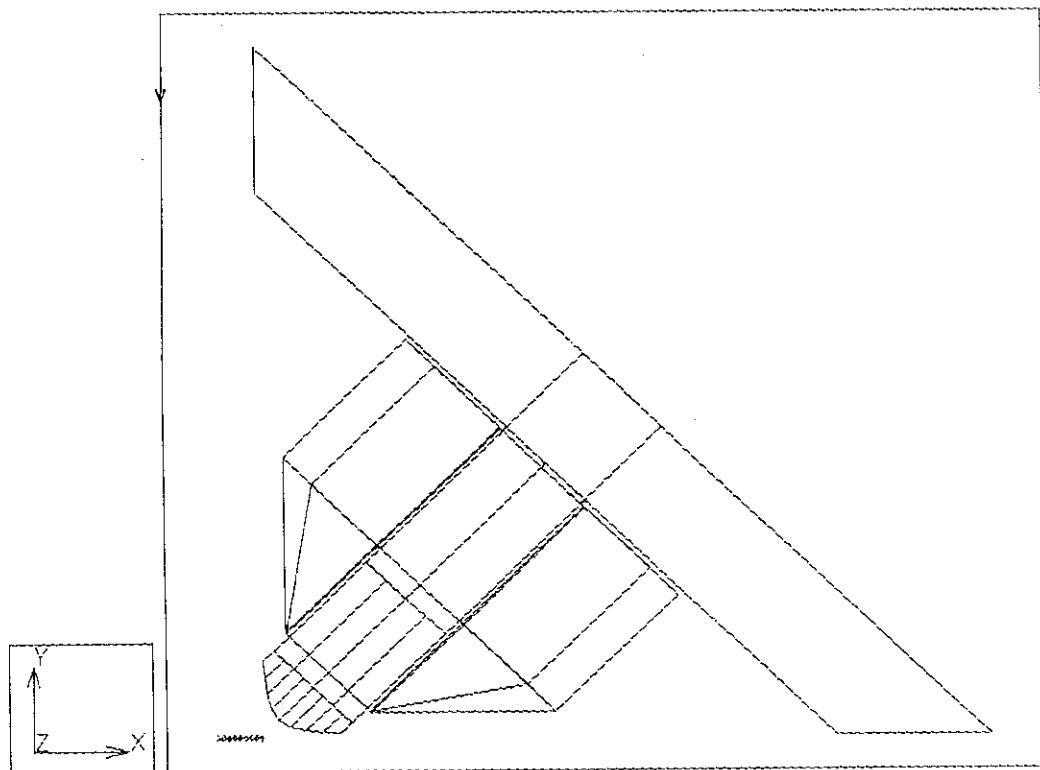


Fig. 46 Mesh for calculation of field distribution of precise Q-lens

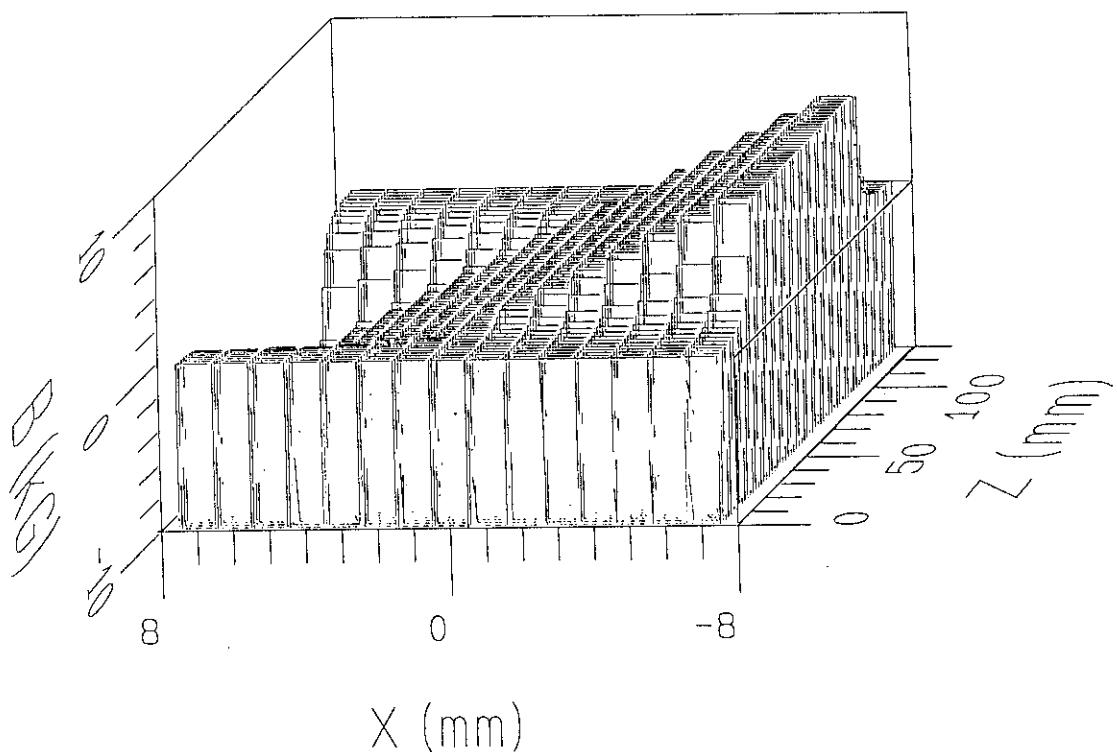


Fig. 47 Calculated field map. X and Y indicate the lateral and longitudinal position of Hall probe in the median plane of a Q-magnet, respectively.

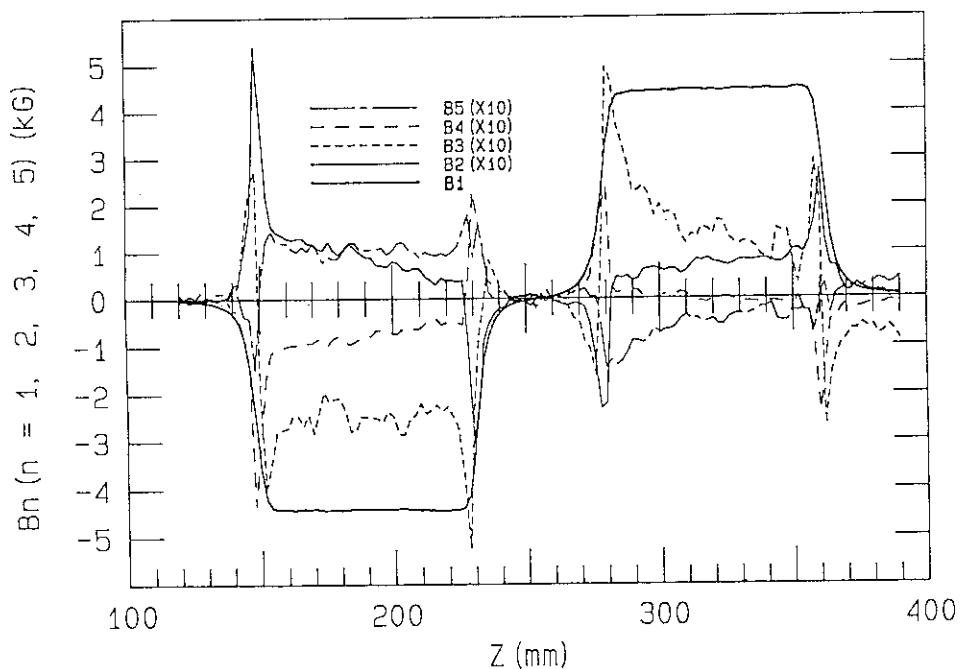


Fig. 48 Longitudinal distribution of multipole field components obtained from the measured data

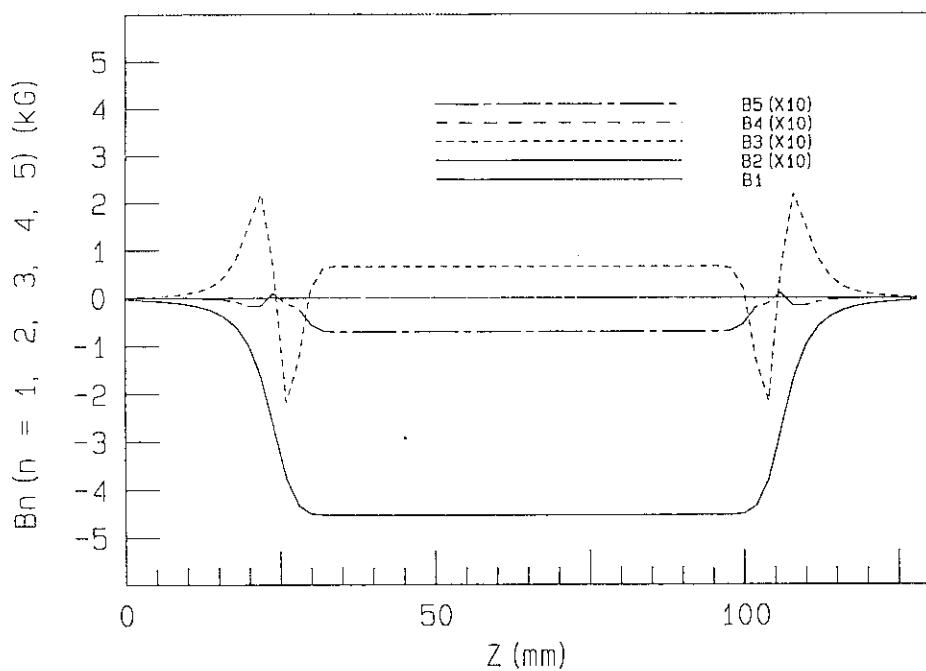


Fig. 49 Longitudinal distribution of multipole field components obtained from the calculated data

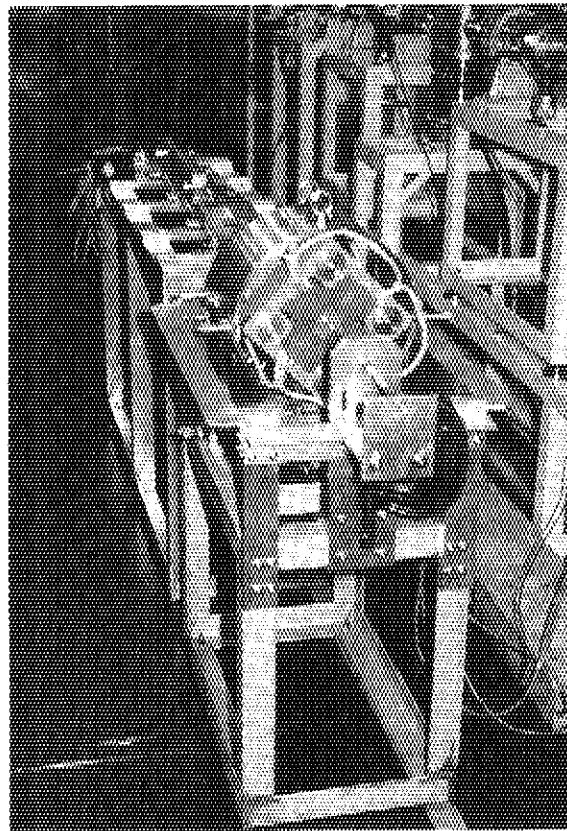


Photo. 12 Setup for measurement of field distribution of the Q-magnet

7. 防振システム

7. 1 はじめに

通常のRBSやPIXE等の分析においてはビームラインやターゲットチャンバーの振動はあまり問題とならないが、マイクロイオンビームによる分析や、ミクロンオーダ以下の特定微小部位へのイオン照射実験などにおいては無視することはできなくなり、システム全体の防振は必須の条件となる。しかし現実には、ラインを設置している床の上にはターボポンプ、ロータリーポンプ、コンプレッサー、作業要員の動き、等多くの振動源が存在する。この章では、これら振動源の影響と防振対策について述べることにする。

7. 2 防振を施さない系の振動測定の結果と考察

7. 2. 1 測定方法及び測定箇所

振動測定は、レーザー加速度計（リオン（株）製、LA-50）を使用して行った。レーザー加速度計の仕様をTable 7に示す。また、測定箇所は以下の5カ所である。

- 1) ターゲットチャンバー
- 2) ターゲットチャンバー下の架台
- 3) マイクロスリット
- 4) マイクロスリット下の架台
- 5) 床

7. 2. 2 測定結果

レーザー加速度計からの信号を高速フーリエ変換（FFT）スペクトルアナライザーに通して得られたスペクトルをFig. 50～52に示す。ただし、横軸は周波数、縦軸は振幅をdB（振幅 $1 \mu\text{m}$ が0 dB）で表示してある。またそれぞれのピークの振幅をTable 8～10に示す。ただし、ターゲットチャンバーの垂直方向の振動、マイクロスリット及びその架台の水平方向の振動はレーザー加速度センサーの測定限界（振幅 $10 \mu\text{m}$ ）を超えていたため、振動スペクトル及び各振動周波数での振幅は測定できなかった。

7. 2. 3 考察

まず、個々のピークの原因を考えてみる。振動の周波数特性における鋭いピークは、機械的振動が直接表れているものと考えられる。またなだらかなピークは架台などの共振によるものであると考えられる。

1) 16. 8 Hz のピーク

コンプレッサーを停止するとこのピークが消えることから、これはコンプレッサーによるものと考えられる。

2) 24. 8 Hz のピーク

これはロータリーポンプによるものであると考えられる。ロータリーポンプの回転数は 1420 rpm で、周波数に換算すると 23.7 Hz となりこのピークの周波数と一致している。

3) 低周波 (15 Hz 以下) のなだらかなピーク

この範囲のピークは、床の振動スペクトルには見らないので、架台の共振を含むいくつかの原因によるものと考えられる。まず、架台全体（防振ゴムの上）の重量が、初期に設置された防振ゴムの許容荷重をオーバーしていることが判明し、そのため、防振の効果を十分に発揮していなかったことが明らかになった。Table 8~10 に見られるように、ターゲットチェンバー付近に大きな振幅の振動がある。ターボポンプはいわばターゲットチェンバーにぶら下がるような形で取り付けられており、これに問題がある。また、ビームラインの排気系から振動を遮断する目的でターゲットチェンバ上流に挿入されているソフトベローズが十分に効果を発揮していない可能性も考えられる。

7. 3 防振処理

7. 3. 1 防振処理の考え方

Fig. 53 に振動源から受振体までの系統図を示した。

防振処理とは、この振動発生源から受振体までの経路のどこかに防振機構を入れて、振動の発生を停止または軽減し、その伝搬を阻止する方法を実施することである。図に従って考えると 1) まず振動源の外部または内部に発生する起振力をなくするか、軽減することによって、振動源の振動を停止または軽減する。

- 2) 振動源自体の重量を含め、基礎構造を適切に設計し、基礎構造の振動を小さくする。
- 3) 基礎構造から基礎地盤への振動の伝達を防ぐ。すなわち振動絶縁である。
- 4) 地盤の中を伝わる波動を何らかの形で減衰させる。距離を離すことなどが考えられる。
- 5) 受振側の基礎部分に振動の入ることを防ぐ。つまり、受振部の振動絶縁である。
- 6) 受振側構造体を適切なものにする。

以上のような防振の手段が考えられるわけだが、本実験施設において、可能でかつすぐに出来る手段を考えると、3)、4) の振動の絶縁という方法が有力である。この場合、もっとも多く取られる方法は弾性支持である。

弾性支持にはバネが用いられるが、使われる材料とその特徴を次に示す。

1) 金属バネ

もっとも古くから使われているものに金属バネがあり、中でもコイルバネは設計も使用も容易で、大重量のものからきわめて軽いものを支えるものまで多種存在する。物理的にも化学的にも安定であり、固有振動数を1～2 Hzぐらいまで下げられる。ただし抵抗はほとんど無いので、制動装置を使用しなければならない。

2) 防振ゴム

使用が簡便なのは防振ゴムである。いろいろな形のゴムを金属の板や筒などの間にはさんで丈夫に固定した上で、金属の板や筒に支持体を取り付けるためのボルトやネジ孔がつくりつけられており、しかも小は数グラムのものから大は1トン程度まで支えるものがあり、単に1自由度ではなく2～3自由度に作用するものもある。極めて多種類の形とバネ定数のものが既製品として用意されており、利用する側からすれば便利であるといえる。ただ、あまり柔らかいものは得られず、固有振動数も7～8 Hz以上で使われることが多く、せいぜい5 Hzぐらいまでしか下げられない。

3) 空気バネ

最近多く利用されるようになったのものに空気バネがある。これは、丈夫なゴムの袋に数気圧の空気を押し込んで、この空気の体積弾性のバネ作用を使うもので、別に金属タンク等の固定容器とコンプレッサーを併用し、振動による空気の移動を利用した抵抗も利用される。1 Hz以下まで固有振動数を下げられ、大重量にも耐えるものがあり、大型機械や車両の防振に広く利用されるようになった。しかし、一般に高価である。

4) その他のバネ

その他、単純な板バネ、フェルト、ゴムシート、スポンジ等の類も、軽い受振体に用いることは出来るが、重い受振体に使って固有振動数を下げる事は困難で、振動源側に利用しても効果は期待できない。

このなかで、簡単に用いることができ効果が期待できる防振ゴムを採用することにする。

次に弾性支持の原理を述べる。機械を弾性支持した場合基礎に伝えられる力をF、弾性支持しない場合の力をFOとすると、振動伝達率TRは次式で表される。

$$TR = F / FO = 1 / | 1 - u^2 | \quad (4)$$

FO：機械から発生する加振力

F：機械から基礎に伝えられた加振力

$$u = f / f_N \quad (5)$$

u：振動数比

f：機械から発生する振動数

f_N : 機械を弾性支持したときの固有振動数

式(4)をグラフ化したのがTR-u図表(Fig. 54)である。十分な防振効果を得るには $TR < 1$ にすればよく、従って $u > \sqrt{2}$ にすればよい。一般には $u = 2 \sim 3$ とすれば防振の目的を達成できる。振動伝達率は振動数比、すなわち機械の振動数と固有振動数の比によってきまる。この振動数比と防振効果の関係をTable 11に示す。

固有振動数は機械の重量と防振ゴムのバネ定数によって決まり、

$$f_N = 1 / (2\pi) \times (Kg/W)^{1/2} \quad (6)$$

f_N : 固有振動数 (Hz)

K : バネ定数 (kgf/cm)

M : 機械の重量 (kgf)

g : 重力加速度 (= 9.80 cm/sec²)

で求められる。

7. 3. 2 防振処理

以上の検討を踏まえて、早大-原研イオンマイクロプローブに対する防振処理として次の対策を施した。

- 1) ロータリーポンプに防振ゴムを取り付けた。
 - 2) コンプレッサーに防振ゴムを取り付けた。
 - 3) ターゲットチャンバー下のターボポンプの架台をより高い剛性をもつよう作り直した。
 - 4) ビームラインの架台の下の防振ゴムを取り替えた。
- 1)、2)は振動源側の振動絶縁で、4)は受振体側の振動絶縁にあたる。また3)は受振構造体の改良にあたる。以下に個々の内容について説明する。

1) ロータリーポンプ及びコンプレッサーへの防振ゴム装着

実験室の振動源、ロータリーポンプおよびコンプレッサーの仕様をTable 12に示す。

各支持点における静荷重の大きさは

$$WRP1 = 80 / 4 = 20 [\text{kgf}]$$

$$WRP2 = 40 / 4 = 10 [\text{kgf}]$$

$$WCOMP = 60 / 4 = 20 [\text{kgf}]$$

振動伝達率 $TR = 25\%$ 以下を目標とすると(4)式より振動数比 u は

$$u = f / f_N = 2.24$$

となり、固有振動数 f_N は

$$f_{NRP} = f_{RP}/u = 1420/2.24 = 633 \text{ [cpm]}$$

$$f_{NCOMP} = f_{COMP}/u = 1000/2.24 = 446 \text{ [cpm]}$$

となる。必要バネ定数は(6)式より

$$\begin{aligned} K_{RP1} &= (2\pi f_{NRP})^2 \times W_{RP1}/g \\ &= (2\pi \times 633/60)^2 \times 20/980 \\ &= 89.6 \text{ [kgf/cm]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{RP2} &= (2\pi f_{NRP})^2 \times W_{RP2}/g \\ &= (2\pi \times 633/60)^2 \times 10/980 \\ &= 44.8 \text{ [kgf/cm]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{COMP} &= (2\pi f_{NCOMP})^2 \times W_{COMP}/g \\ &= (2\pi \times 446/60)^2 \times 20/980 \\ &= 44.5 \text{ [kgf/cm]} \end{aligned}$$

となる。

以上より次の条件にあうゴムを選定する。

ロータリーポンプ1

- a) バネ定数 89.6 kgf/cm以下
- b) 荷重 20 kgfに耐えるもの
- c) たわみ 20/89.6 = 0.22 cmに耐えるもの

ロータリーポンプ2

- a) バネ定数 44.8 kgf/cm以下
- b) 荷重 10 kgfに耐えるもの
- c) たわみ 10/44.8 = 0.22 cmに耐えるもの

コンプレッサー

- a) バネ定数 44.5 kgf/cm以下
- b) 荷重 20 kgfに耐えるもの
- c) たわみ 20/44.5 = 0.45 cmに耐えるもの

そこで、ロータリーポンプ2、コンプレッサーにKLB-3530、ロータリーポンプ2にKLB-3545を採用した（倉敷化工製）。Table 13にこれらのゴムの仕様を示す。ほぼ前述の条件を満足していることがわかる。

2) 架台の変更

変更前の架台と変更後の架台をFig. 55に示す。

改良前の架台ではターボポンプを支えているのが3本のステンレスの棒で、この構造では横方向の振動に対しては無防備であり、重心も高いためにかなりゆれていたと考えられる。そこで、ビームラインの架台をまたぐようにターボポンプの架台を製作した。これによってターボポンプは床にしっかりと固定され、チェンバー付近の振動をかなり抑えることが出来ると思われる。

3) ビームラインの架台の下の防振ゴムの取り替え

架台の下にはすでに防振ゴムが取り付けられてあったが、たわみが許容量を越えており、防振ゴムとして正常に機能していない状態であった。そこで、適切な防振ゴムを新たに取り付けることにした。できるだけ、固有振動数を小さくするため、バネ定数の小さいものを採用した。Table 14に採用した防振ゴムの仕様を示す（倉敷化工製）。

次にこの防振ゴムを用いる際の固有振動数がどの程度になるかを、以下に見積もってみる。まずビームラインと架台の重さは、加重用の鉛ブロック1800kg程を加えて全体で約2500kg程度になる。支持点は14カ所としたので、各支持点における静荷重の大きさは

$$W = 2500 / 14 = 179 [\text{kgf}]$$

固有振動数は(6)式より

$$f_N = (1 / 2\pi) \times (370 \times 980 / 179)^{1/2} = 7.16 [\text{Hz}]$$

この共振周波数の $\sqrt{2}$ 倍以上つまり、

$$7.16 \times \sqrt{2} = 10.1 [\text{Hz}]$$

以上の周波数にならないと防振効果は現れてこないことになる。これ以上共振周波数を下げるには防振ゴムでは難しく、金属バネや空気バネ等を用いなくてはならないであろう。

7. 4 防振処理後の振動測定の結果と考察

7. 4. 1 測定箇所

測定箇所は以下の5カ所である。

- 1) ターゲットチェンバー
- 2) ターゲットチェンバーアー下の架台
- 3) マイクロスリット
- 4) マイクロスリット下の架台
- 5) 床

7. 4. 2 測定結果

前回同様に、レーザー加速度計からの信号をFFTスペクトルアナライザーを通して得られたスペクトルをFig. 56、Fig. 57に示す。またそれぞれのピークの振幅をTable 15~17に示す。

7. 4. 3 考察

1) 振動源側の防振について

床におけるコンプレッサーによる16.8 Hzの振動が、振幅0.216 μmから防振後の0.009 μmへと著しく減少している。同様に、ロータリーポンプによる24.8 Hzの振動も著しく減少している。これは振動源側の振動絶縁がうまくいったことを示している。

2) 防振処理前の測定では振幅が過大で測定不可能であった以下の箇所の測定を行うことが出来た。

ターゲットチェンバー（垂直）

マイクロスリット（水平）

マイクロスリット下の架台（水平）

これは、振動源側の振動絶縁に加えて受信体側の振動絶縁の効果をあげたためと考えられる。

3) 受振体側の防振について

架台の下の防振ゴムの共振周波数の $2^{1/2}$ 倍にあたる10.1 Hz以上の振幅は減少しているのがわかる。しかし共振周波数以下の振幅については逆にやや増加している。このような低周波の振動を取り除くのは現時点では困難であるといえる。

4) 最大振幅

最大振幅は水平方向で

ターゲットチェンバー 2.4 μm (4.8 Hz)

マイクロスリット 1.2 μm (4.8 Hz)

垂直方向で

ターゲットチェンバー 0.385 μm (4.8 Hz)

マイクロスリット 0.242 μm (4.8 Hz)

となった。水平方向の振動が大きいのは、架台の構造によるものと考えられる。縦に長く横に細い構造物である架台は、水平方向に揺れやすい。

この振幅は、イオンビームをサブミクロンまで絞ろうとした時には無視できないかもしれない。しかし、ターゲットチェンバー、マイクロスリットとともに同じ周波数で最大振幅となっているので、揺れが同期していることがわかる。したがって、この振幅の大きさだけビーム径が太くなるとは言えない。

全体としては目的としていた防振の効果はある程度得られている。これ以上の防振効果を得るためにには、受振体の構造を根本的に考え直す必要があると考えられる。

Table 7 Specification of LASER acceleration sensor (LA-50)

Light source	GaAlAs semiconductor LASER (wave length $0.78\mu\text{m}$)
Range of measurement	$1\times 10^{-7} \sim 1\times 10^{-1}\text{G}$
Frequency range	0.1 ~ 200Hz -1dB (-3dB at 0.03Hz)
Sensitivity	$10\text{V}/\text{ms}^{-2}$ ($100\text{V}/\text{G}$)
Noise level	$1\mu\text{V}/(\text{Hz})^{1/2}$
Operating Temperature	-5 ~ 40°C
Manufacturer	Rion &Co., ltd.

Table 8 Peak amplitude of vertical vibration

Position	Amplitude [μm]						spectrum no.
	3.6Hz	6.0Hz	15.0Hz	16.8Hz	24.8Hz	49.5Hz	
Beam line base under target chamber	0.105	0.058	0.106	0.376	0.101	0.007	Fig. 50 (a)
Micro-slit	-	-	0.095	0.336	0.030	0.020	Fig. 50 (b)
Beam line base under micro-slit	-	-	0.096	0.289	0.030	0.008	Fig. 50 (c)
Floor	-	-	-	0.216	0.102	0.074	Fig. 50 (d)

- : peak was not observed in the spectrum

Table 9 Peak amplitude of horizontal vibration

Position	Amplitude [μm]						spectrum no.
	3.6Hz	6.0Hz	15.0Hz	16.8Hz	24.8Hz	49.5Hz	
Target chamber	1.51	0.536	0.153	0.073	0.004	0.018	Fig. 51 (a)
Beam line base under target chamber	1.92	0.331	0.115	0.376	0.108	0.078	Fig. 51 (b)

Table 10 Floor vibration due to compressor and pellet chain

Condition		Amplitude of floor [μm]			Spectrum no.
Compressor	Pellet Chain	16.8Hz	24.8Hz	49.5Hz	
on	off	1.51	0.536	0.153	Fig. 52 (a)
off	off	1.92	0.331	0.115	Fig. 52 (b)
off	on	0.306	0.818	0.029	Fig. 52 (c)

Table 11 Relation between frequency and efficiency of vibration insulation

Normalized Freq.	Transmissibility	Exciting force	Efficiency
$u = 0$	$TR = 1$	$F_o = F$	no effect
$u = 1$	$TR \rightarrow \infty$	$F_o < F \rightarrow \infty$	resonance
$u = \sqrt{2}$	$TR = 1$	$F_o = F$	no effect
$u > \sqrt{2}$	$TR < 1$	$F_o > F$	effective

Table 12 Vibration sources

	Weight[kgf]	Rotational freq. [rpm]	Support points
Rotary pump 1	80	1420	4
Rotary pump 2	40	1420	4
compressor	80	1000	4

Table 13 Specification of rubber mounting for rotary pump and compressor

Code no.	Standard weighting (Z-direction) [kgf]	Permissible weighting (Z-direction) [kgf]	Elastic constant [kgf/cm]	Rigidity ratio Kx/Kz
KLB-3530	15	30	45	0.18
KLB-3545	30	60	85	0.18

Table 14 Specification of rubber mounting for microbeam line

Code no.	Standard weighting (Z-direction) [kgf]	Permissible weighting (Z-direction) [kgf]	Elastic constant [kgf/cm]	Rigidity ratio Kx/Kz
KLB-8060	200	400	370	0.15

Table 15 Peak amplitude of vertical vibration

Position	Amplitude[μm]						spectrum no.
	4.75Hz	11.7Hz	16.8Hz	19.9Hz	23.3Hz	29.9Hz	
Target chamber	-	-	0.385	0.061	0.087	-	Fig. 56 (a)
Beam line base under target chamber	-	-	0.334	0.376	-	-	Fig. 56 (b)
Micro-slit	-	-	0.242	0.050	0.082	0.024	Fig. 56 (c)
Beam line base under micro-slit	-	-	0.199	0.399	0.053	0.012	Fig. 56 (d)
Floor	0.197	-	0.009	0.012	0.005	-	Fig. 56 (e)

- : peak was not observed in the spectrum

Table 16 Peak amplitude of horizontal vibration

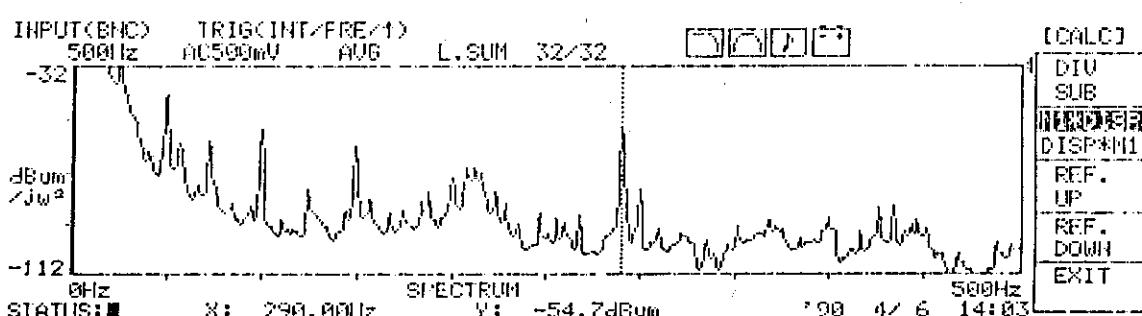
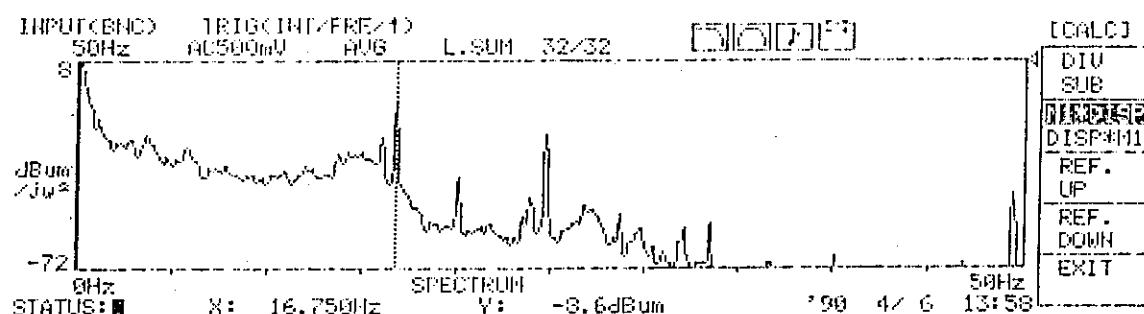
Position	Amplitude[μm]						spectrum no.
	4.75Hz	11.7Hz	16.8Hz	19.9Hz	23.3Hz	29.9Hz	
Target chamber	2.45	0.047	0.135	0.026	0.031	0.026	Fig. 57 (a)
Beam line base under target chamber	2.04	0.008	0.024	0.015	0.024	0.007	Fig. 57 (b)
Micro-slit	1.20	-	0.238	0.029	0.020	0.021	Fig. 57 (c)
Beam line base under micro-slit	0.822	-	0.040	0.028	0.020	-	Fig. 57 (d)
Floor	0.197	-	0.009	0.012	0.005	-	Fig. 57 (e)

- : peak was not observed in the spectrum

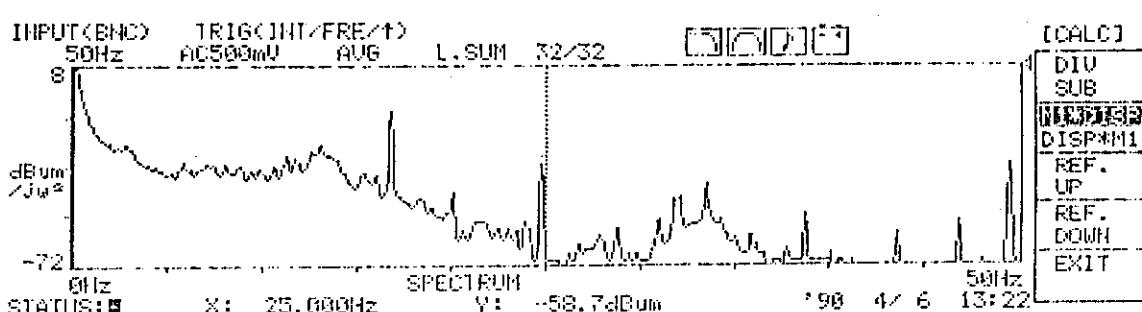
Table 17 Change in peak amplitude by the vibration insulation

Position	Without vibration insulation		With vibration insulation	
	Max. amplitude [μm]	Frequency [Hz]	Max. amplitude [μm]	Frequency [Hz]
Target chamber (vertical)	>10.0	***	0.385	16.8
Beam line base under target chamber (vertical)	0.376	16.8	0.334	16.8
Micro-slit (vertical)	0.366	16.8	0.242	16.8
Beam line base under micro-slit (vertical)	0.289	16.8	0.199	16.8
Floor (vertical)	0.216	16.8	0.080	1.9
Target chamber (horizontal)	1.95	3.6	2.45	4.8
Beam line base under target chamber (horizontal)	1.92	3.6	2.04	4.8
Micro-slit (horizontal)	>10.0	***	1.20	4.8
Beam line base under micro-slit (horizontal)	>10.0	***	0.822	4.8
Floor (horizontal)	***	***	0.197	3.5

*** : not measured

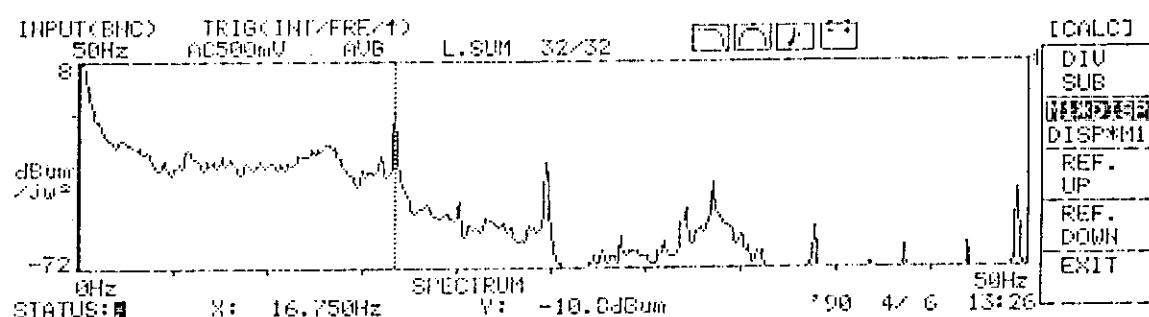


(a) Beam line base under target chamber

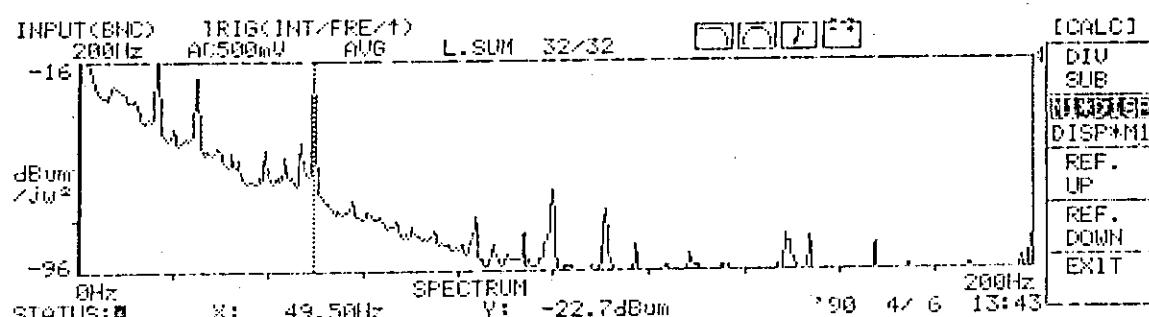
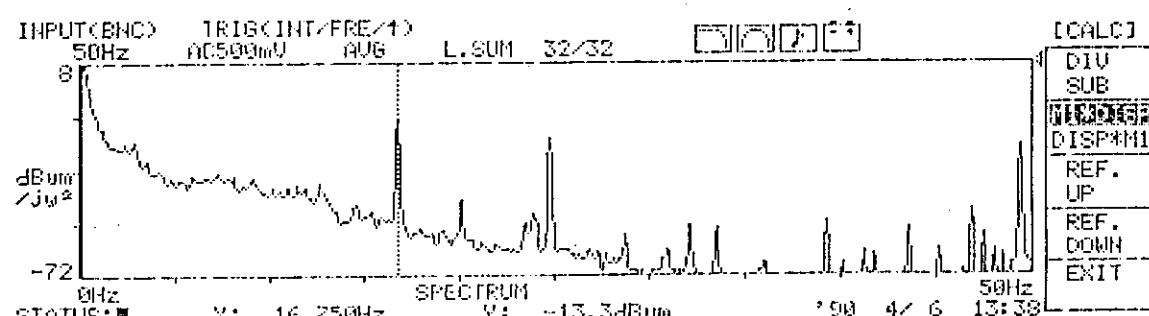


(b) Micro-slit

Fig. 50 Spectra of vertical vibrations

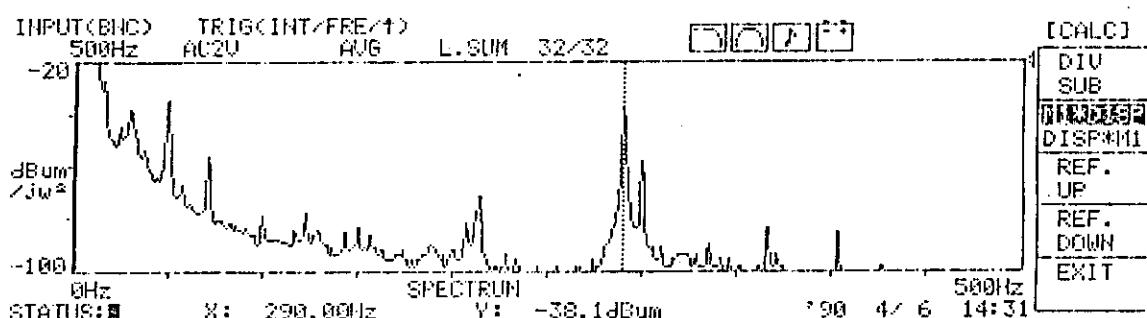
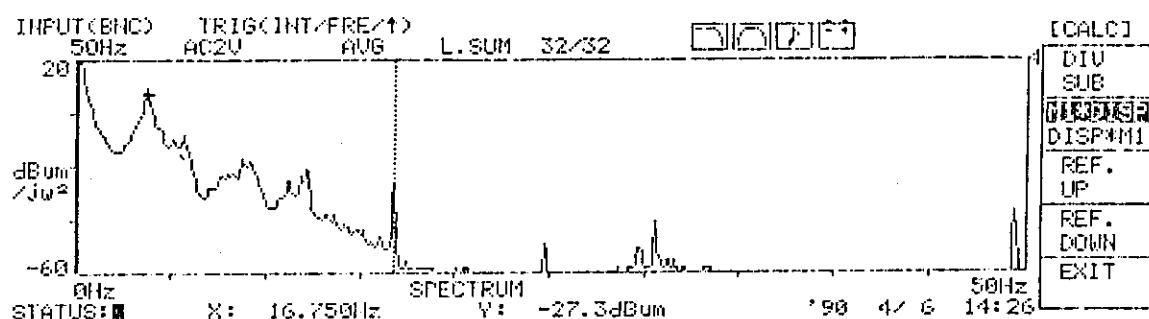


(c) Beam line base under micro-slit

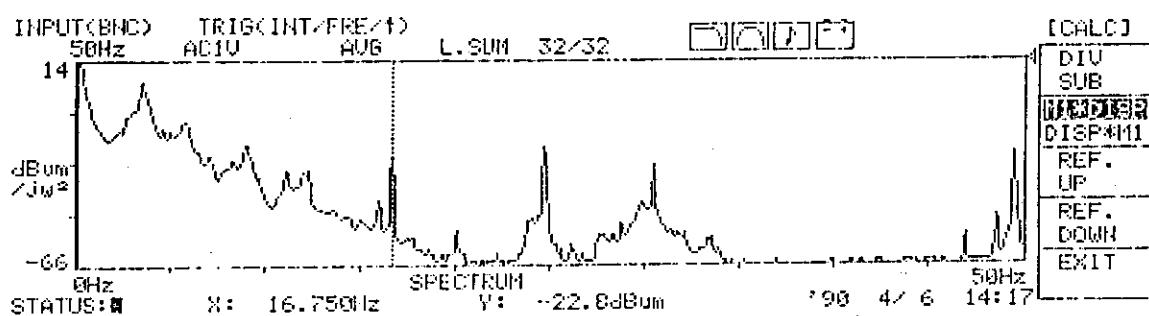


(d) Floor

Fig. 50 (continued)

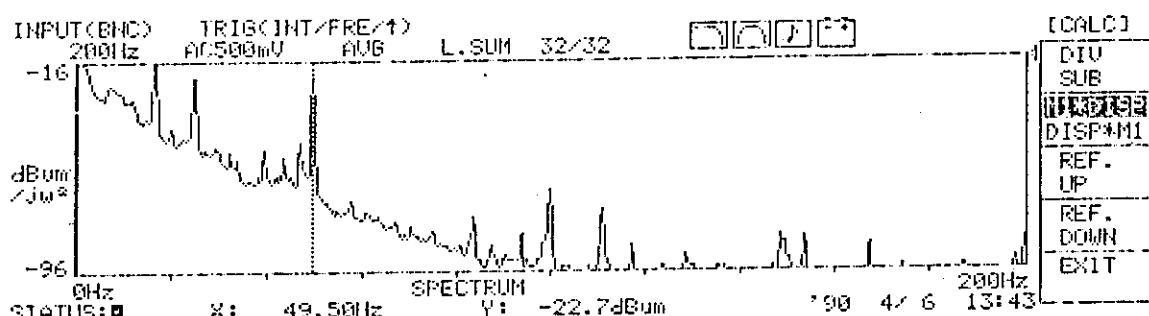
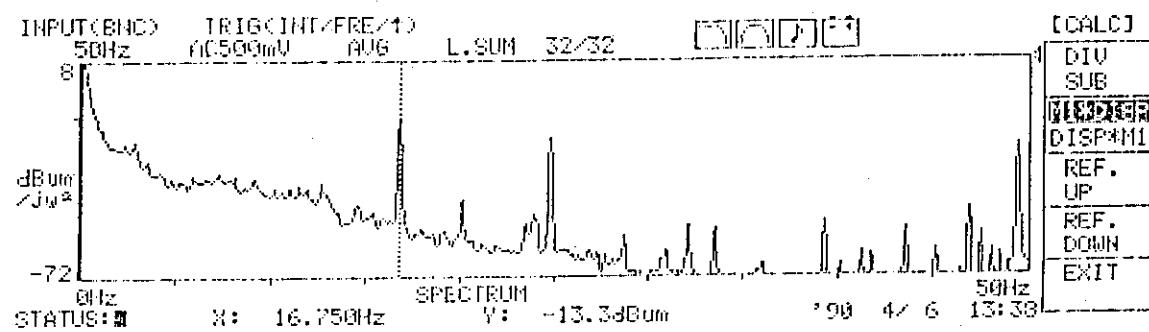


(a) Target chamber

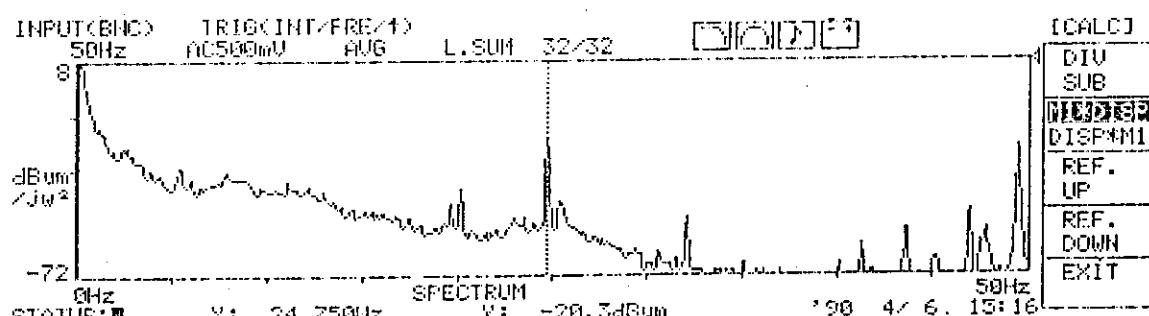


(b) Beam line base under target chamber.

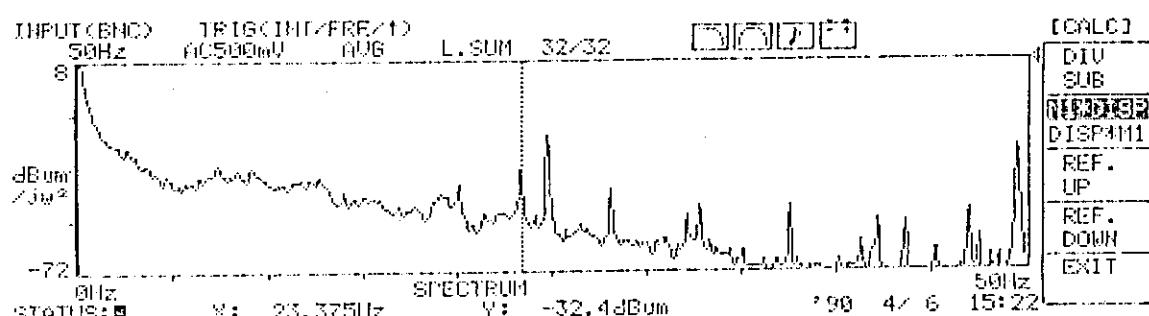
Fig. 51 Spectra of horizontal vibrations



(a) Compressor-on, pellet chain-off



(b) Compressor-off, pellet chain-off



(c) Compressor-off, pellet chain-on

Fig. 52 Spectra of vertical vibration of floor

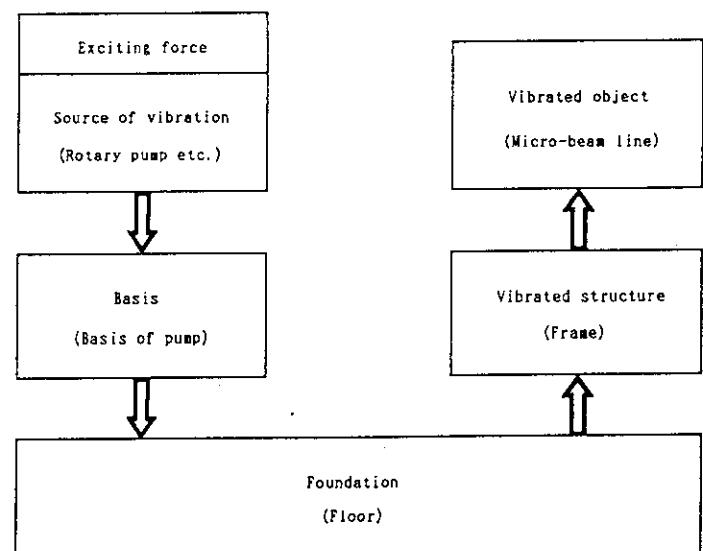


Fig. 53 Transmission of vibration

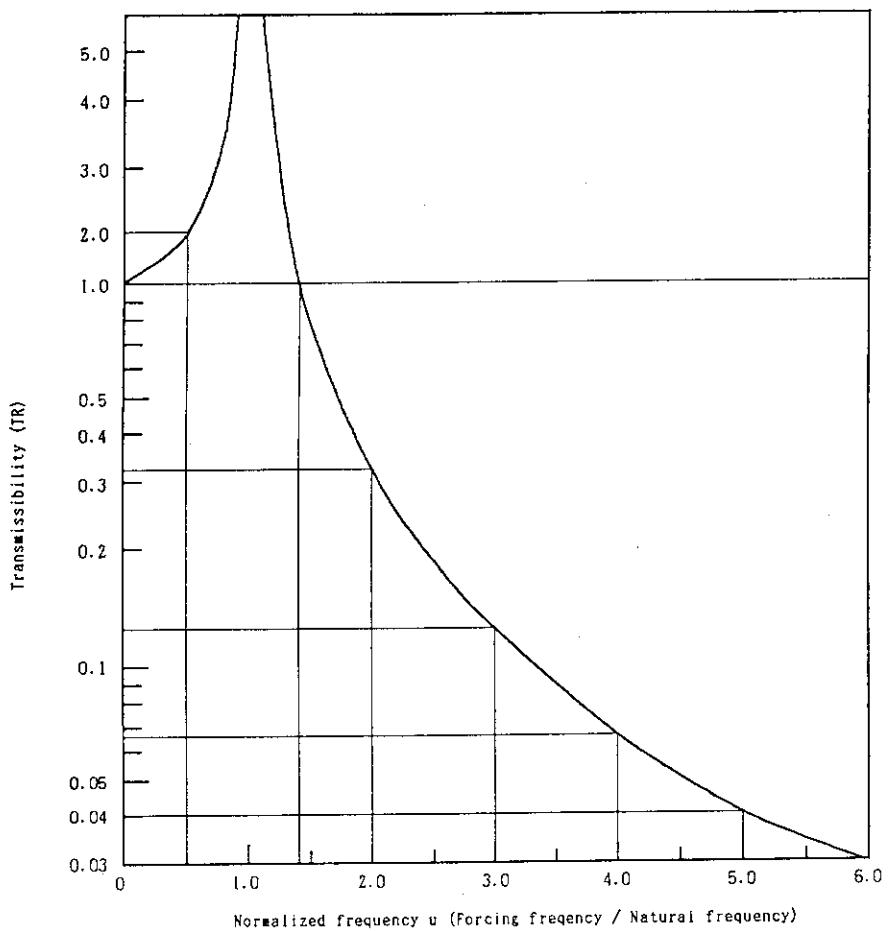


Fig. 54 TR-U diagram

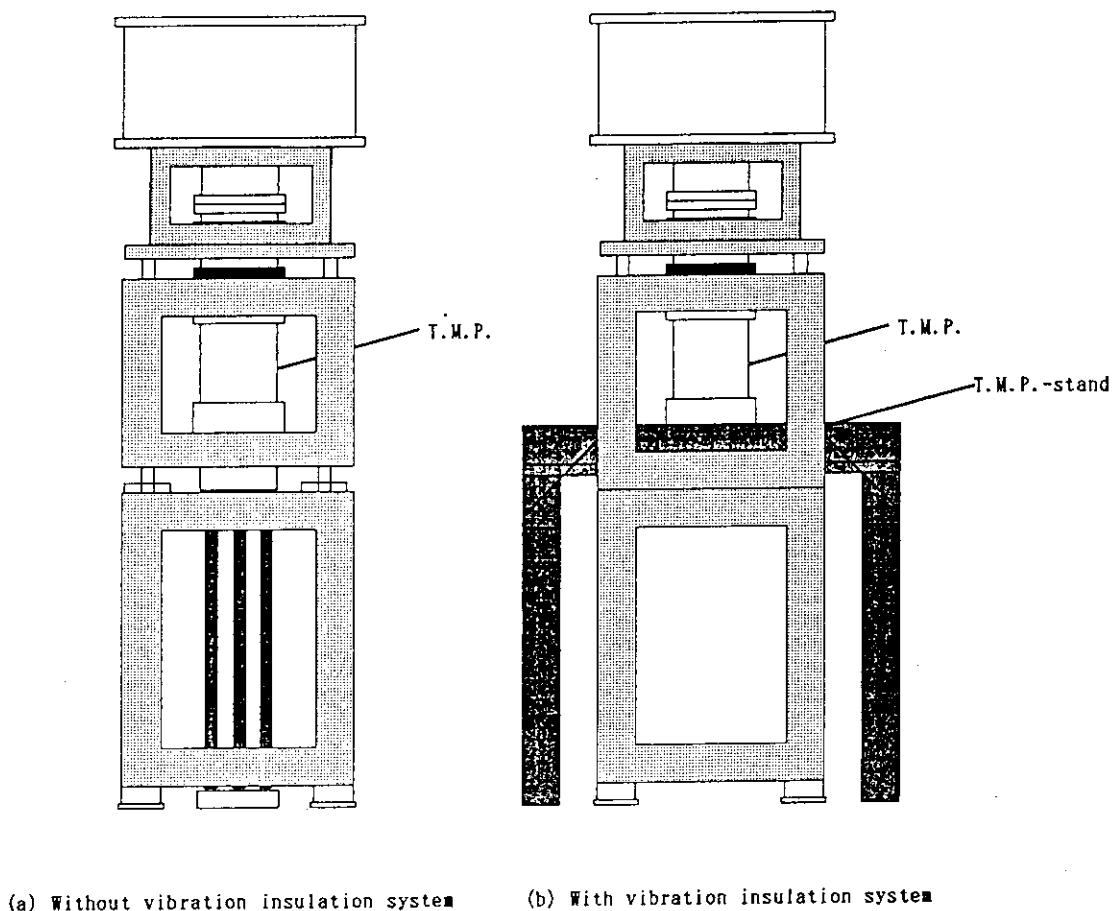
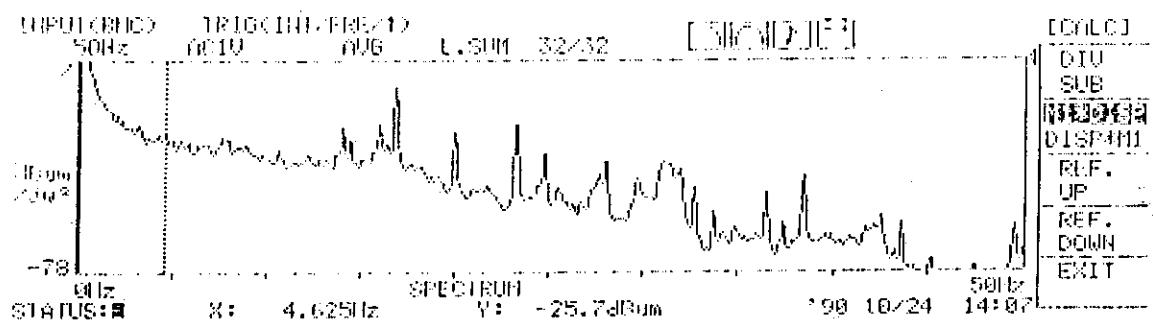
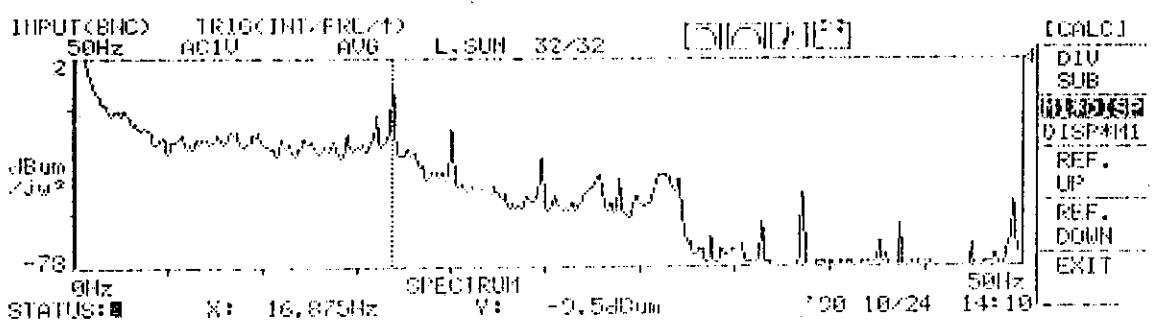


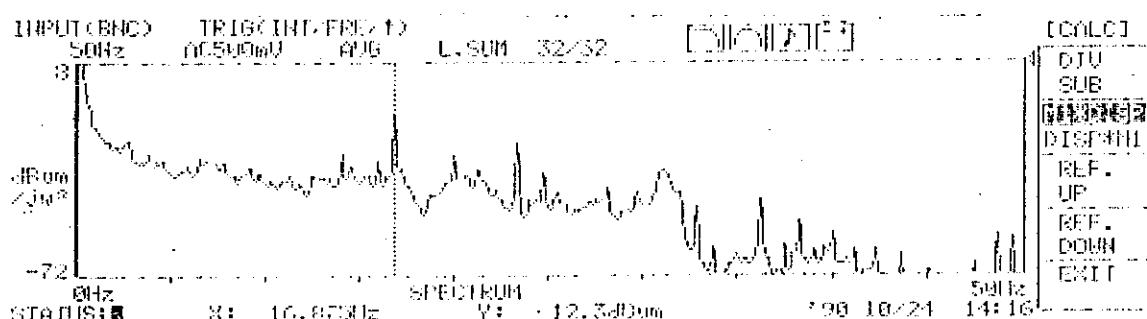
Fig. 55 TMP-base with vibration insulation



(a) Target chamber

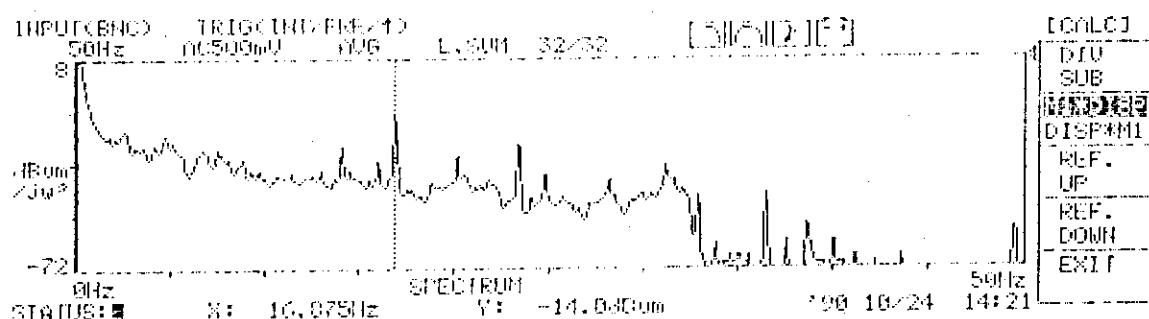


(b) Beam line base under target chamber

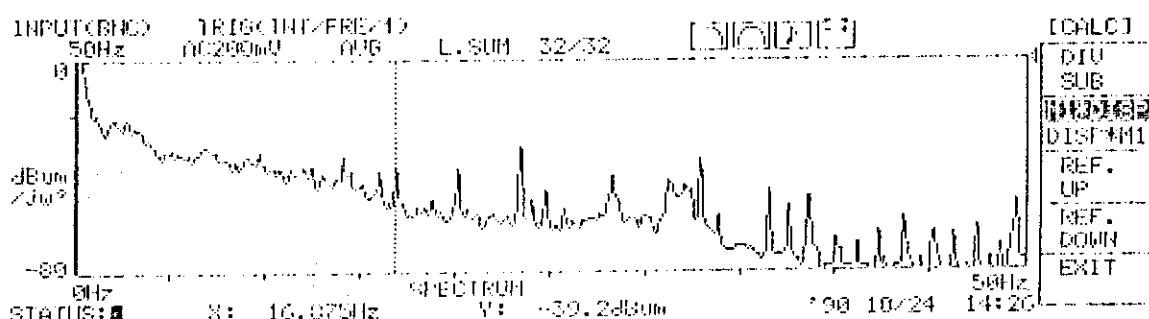


(c) Micro-slit

Fig. 56 Spectra of vertical vibrations

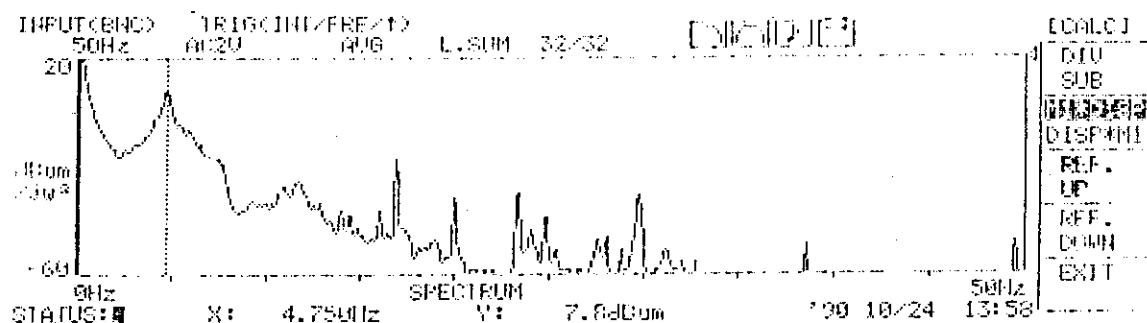


(d) Beam line base under micro-slit

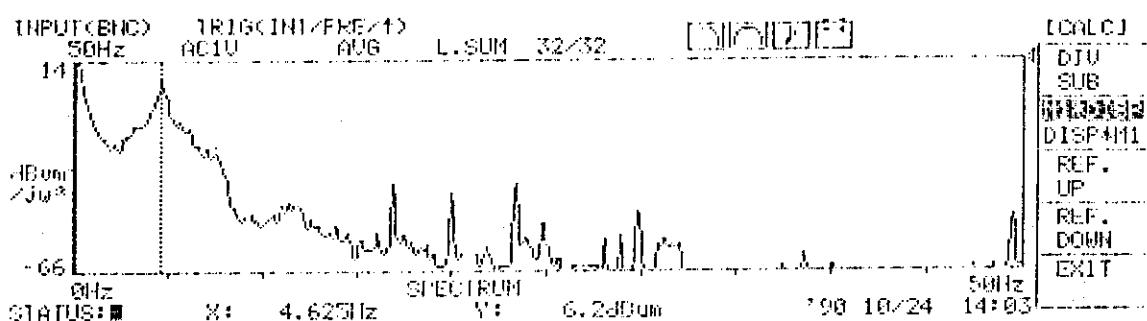


(e) Floor

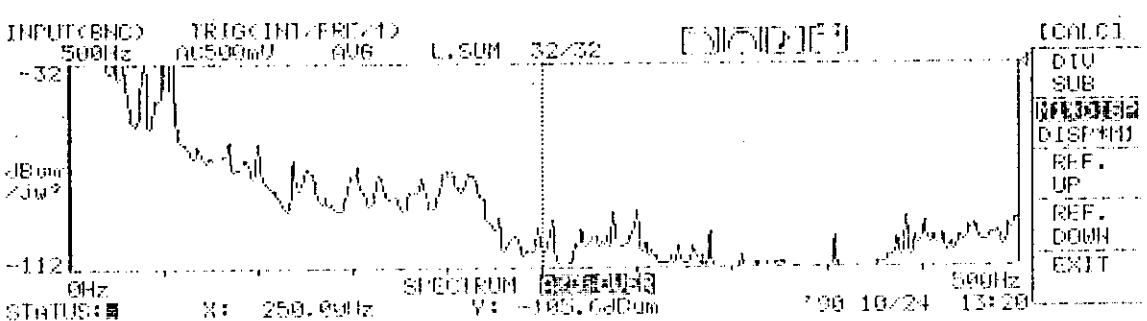
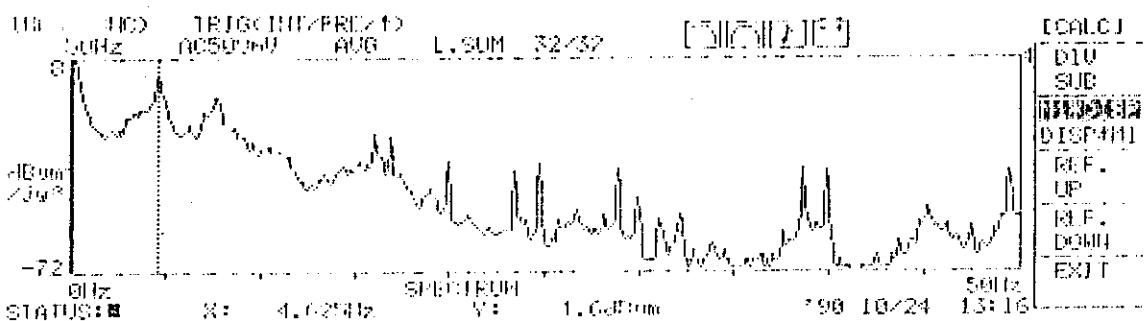
Fig. 56 (continued)



(a) Target chamber

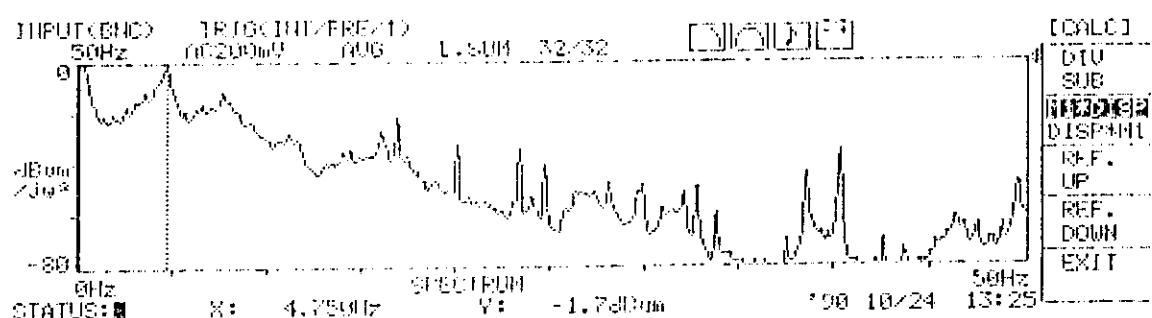


(b) Beam line base under target chamber

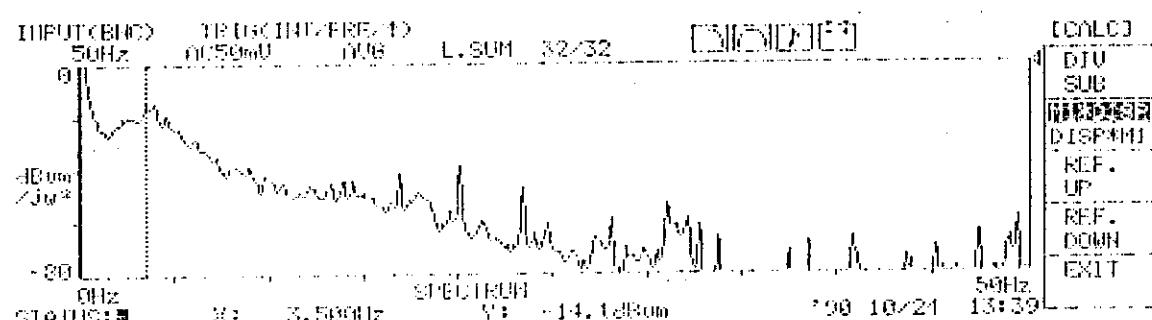


(c) Micro-slit

Fig. 57 Spectra of horizontal vibrations



(d) Beam line base under micro-slit



(e) floor

Fig. 57 (continued)

8. 今後の展望

8.1 シングルイベント実験への応用

高度情報化社会をむかえた現在、衛星通信の大容量化、高信頼度化は必要不可欠である。このためには、人工衛星に搭載される大規模集積回路（LSI）の放射線耐性を高めなければならない。LSIの放射線障害は、地球をとりまくヴァンアレン帯の陽子線および電子線の恒常的衝突による恒久的劣化（トータルドーズ効果）と、1個の高エネルギー重粒子の衝突による誤動作（シングルイベント効果、ソフトエラーおよびラッチアップの2つの現象がある）、とに分類される。大容量化のためにデバイスの微細化を進めるほど、LSIは放射線に対して脆弱になり信頼性が損なわれる所以、大容量衛星通信実現のためには、LSIの放射線耐性の強化が解決すべき大きな技術的課題となる。

これに対する従来の取り組みは、放射性同位元素よりランダムに発生する α 線等の放射線をLSI全面に照射し、全体的な機能劣化から間接的に故障部位の推測を行うというものであった。このため部位毎の放射線耐性に関する直接的な知見が得られず、放射線耐性強化のための決め手に欠けていた。

部位毎の放射線耐性、とりわけシングルイベント効果に対する耐性の評価を行うためには、以下の機能を持った放射線耐性評価システムが実現されなければならない。

(1) $1\text{ }\mu\text{m}$ オーダの位置決め精度で、放射線粒子（イオン）をLSI上の任意の位置に照射できること。

(2) 1個～任意の数のイオンを任意の時期に照射できること。

前述のように、(1)の機能は、これまでに実現されたイオンマイクロプローブ技術によって実現できる。そこで、本節では(2)の1個もしくは任意の数のイオンを照射するための技術について述べる。

我々は、Fig. 58に示すようなシングルイオン照射システムを考案した。このシステムは、デフレクター、スリット（マイクロスリット）、電子増倍管、電場制御装置によって構成される。以下、单一イオン抽出のプロセスを示す。

(1) デフレクターにバイアスをかけて、イオンビームを偏向させておく。この時、ビームはスリットにより遮られている。

(2) デフレクターにかかるバイアスの極性を瞬間に切り替える。イオンビームは逆向きに偏向され、再びスリットにより遮られるが、スリット中心の開口部を通過する瞬間にごく少量のイオンがスリットを通り抜ける。

(3) ターゲットから出てくる二次電子を電子増倍管によって検出することにより、イオン照射を確認する。

(4) イオンがスリットを通り抜ける確率が極めて小さく、1回のビームの偏向の反転(チョップ)でイオン照射が確認されない場合は、(1)～(3)を繰り返す。

この方法によれば、ビーム電流、スリット幅、およびチョップに要する時間を少なくすることによって、1回のチョップによってイオンが抽出される確率を少なくすることができる。これらの条件を適切に設定することによって、イオンが抽出される確率を1以下にすることができ、このときイオンを1個だけ抽出、照射することが可能となる。

また、このシステムを利用してシングルイベント現象の評価実験を行う際、照射試料には市販デバイスを用いるのが手軽である。しかし、市販デバイスについて照射実験を行う際、以下に示す点が問題となる。

- (1) デバイスの内部構造に関する情報が不足している。
- (2) 既に放射線に対する対策が施されている。
- (3) デバイスが既に1つのシステムとして完成されており、電荷収集におけるファネリングの寄与など基礎的な現象の評価には向いていない。
- (4) 最先端のデバイスの設計ルールでは、耐放射線デバイスの開発を目的とした評価対象としては小さすぎる。

以上の問題点より、シングルイベント現象の評価を行い、かつその結果を放射線耐性強化のための役立てるには、市販デバイスとは異なったTEG(テストデバイス)を設計、製作し、これを試料として照射実験を行う必要がある。

8. 2 大気中照射実験

イオンビームの大気中照射実験のニーズが高まりつつある。大気中照射実験の応用例としては生体試料や考古学試料といった真空中に入れることのできない試料等への照射が考えられる。これらの実験により生体試料に対しては照射効果の評価が、考古学試料に対しては微量元素分析が可能となる。イオンマイクロプローブシステムである本装置に大気中照射機能を付加すると、さらに高度な大気中照射応用実験が可能となる。例えば、生体照射に対しては細胞別にイオンビームを照射することが可能となり、個々の細胞の発生上の役割が調査できることになる。また考古学試料への照射に対してはPIXE分析法を用いて二次元微量元素マッピングが可能となる。このようなマイクロイオンビームの応用研究を目的として、大気中照射チャンバーを設計、製作した。

本大気中照射システムはミクロンオーダーで加工された微細な細管を通してマイクロイオンビームを取り出す方法を用いている。マイクロイオンビームは電流密度の高い非常に細く絞られたビームであるため、細管通過後も高い電流密度を確保できる。本研究のために用意され

た大気中照射用チャンバーをFig.59に示す。

しかしこのチャンバーを用いて実験を行うにあたり以下のような問題が生じる。

- (1) 極細のパイプからマイクロイオンビームを取り出すためには、チャンバーの位置を微調整してビームとパイプの平行性を保たなければならないが、その機能が備わってない。
- (2) 細いパイプからビームを取り出すためビーム自身は走査できない。そのためこのチャンバーの後段に試料自身を動作させる機構が必要となる。
- (3) 大気中であるために試料の照射位置合わせ用に電子顕微鏡を用いることが不可能となる。代用として光学顕微鏡を新たに設置する必要が生じる。
- (4) 大気中に取り出す際に、様々な気体が混合していてはビームの飛程および照射エネルギーの計算が複雑化してしまう。そのため照射の際、試料を密閉性の良い容器にいれ单一の気体雰囲気にする必要がある。

大気中照射実験によって得られる学術的成果は大きいと考えられる。しかも上で述べたような様々な問題点に伴う原理的な困難さは少ないので、今後の組織的な研究の発展に期待したい。

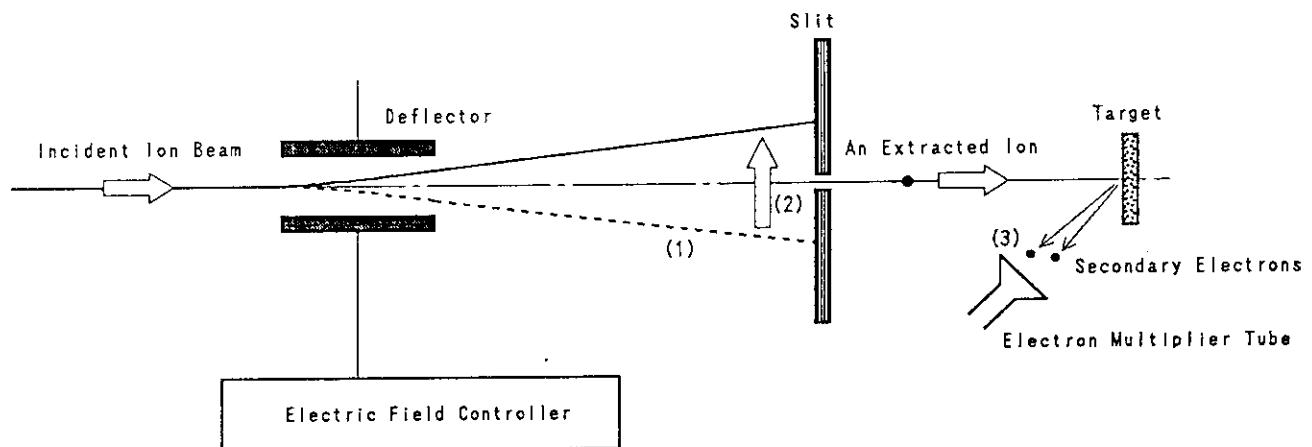


Fig. 58 Mechanism of single-ion production

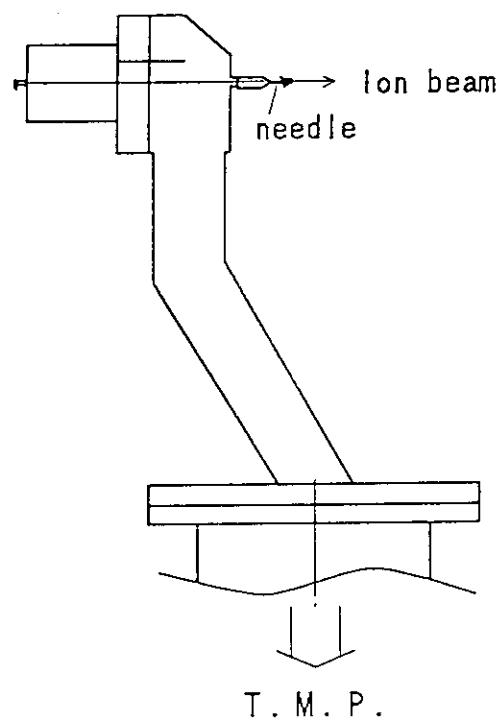


Fig. 59 Chamber for in-air-irradiation

9. ま と め

原研早稲田大学共同研究において早稲田大学の理工学研究施設の1. 7 MVタンデム解析のビームラインにマイクロビーム形成装置を設置し、3 MeV Heイオンビームを用いてマイクロビーム形成及びビーム計測実験を行った。そして最小ビームスポットサイズとして $1.3 \times 1.9 \mu\text{m}^2$ を達成し、ターゲット上の照射目標位置へのビーム照準技術も確立された。

これらの目標を達成する過程において、精密Qレンズの実験解析や、装置の架台やチャンバーおよび建物等の振動測定を行い多くの知見が得られた。さらにビームサイズ計測およびQレンズの実験解析のためのソフトウェアや、マイクロRBSによる三次元元素マッピングのためのソフトウェアも本研究において新たに開発された。

本装置の新しい応用のために生きている細胞や考古学試料の分析用のマイクロビーム大気中取り出しチャンバーの開発、および半導体素子のシングルイベントの研究のためのシングルイオンヒットシステムの開発を行った。

現在早稲田大学においては前述のシングルイオンヒットシステムを使用して実際に半導体素子の評価を行っており、原研においては本研究で確立したマイクロビーム集束、ビーム照準技術およびそれらに付随する成果が原研独自のマイクロビーム装置の開発に応用されている。いずれにおいても共同研究で得られた成果がマイクロビーム装置の新しい応用のための基礎となっている。

謝 辞

本研究は、岩本英司および大村三好の両氏を始めとする日新ハイボルテージ株式会社の方々のマイクロビーム装置の設計、製作および調整に対する全面的な貢献なくしては成し得ないものでした。深く感謝致します。また、本研究を始めるにあたり、特に精密レンズ系の設計において貴重な助言をいただいたK. T r a x e 1 氏と高井幹夫氏には特に深い感謝の意を表します。最後に、本報告書作成にあたり、石垣功氏の有意義な助言に対し深く感謝致します。

9. まとめ

原研早稲田大学共同研究において早稲田大学の理工学研究施設の1.7 MeVタンデム解析のビームラインにマイクロビーム形成装置を設置し、3 MeV Heイオンビームを用いてマイクロビーム形成及びビーム計測実験を行った。そして最小ビームスポットサイズとして $1.3 \times 1.9 \mu\text{m}^2$ を達成し、ターゲット上の照射目標位置へのビーム照準技術も確立された。

これらの目標を達成する過程において、精密Qレンズの実験解析や、装置の架台やチャンバーおよび建物等の振動測定を行い多くの知見が得られた。さらにビームサイズ計測およびQレンズの実験解析のためのソフトウェアや、マイクロRBSによる三次元元素マッピングのためのソフトウェアも本研究において新たに開発された。

本装置の新しい応用のために生きている細胞や考古学試料の分析用のマイクロビーム大気中取り出しチャンバーの開発、および半導体素子のシングルイベントの研究のためのシングルイオンヒットシステムの開発を行った。

現在早稲田大学においては前述のシングルイオンヒットシステムを使用して実際に半導体素子の評価を行っており、原研においては本研究で確立したマイクロビーム集束、ビーム照準技術およびそれらに付随する成果が原研独自のマイクロビーム装置の開発に応用されている。いずれにおいても共同研究で得られた成果がマイクロビーム装置の新しい応用のための基礎となっている。

謝 辞

本研究は、岩本英司および大村三好の両氏を始めとする日新ハイボルテージ株式会社の方々のマイクロビーム装置の設計、製作および調整に対する全面的な貢献なくしては成し得ないものでした。深く感謝致します。また、本研究を始めるにあたり、特に精密レンズ系の設計において貴重な助言をいただいたK. T r a x e 1 氏と高井幹夫氏には特に深い感謝の意を表します。最後に、本報告書作成にあたり、石垣功氏の有意義な助言に対し深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) F. Watt and G. W. Grime, "Principle and Applications of High-Energy Ion Microbeam", Adam Hillger, Bristol, (1987)
- 2) K. Traxel, Nucl. Instrum. Methods, B50, 177 (1990)
- 3) M. Maruyama, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Advanced Nuclear Energy Research, Mito, Japan, 63 (1990)
- 4) F. Watt, G. W. Grime, G. D. Blower, J. Takacs and D. D. T. Vaux, Nucl. Instrum. Methods, 197, 65 (1982)
- 5) G. J. F. Legge, D. N. Jamieson, P. M. J. O'Brien and A. P. Mazzolini, Nucl. Instrum. Methods, 197, 85 (1982)
- 6) H. Kneis, B. Martin, R. Nobling, B. Povh and K. Traxel, Nucl. Instrum. Methods, 197, 79 (1982)
- 7) 日本学術振興界、"マイクロビームアナリシス", 朝倉書店 (1985)
- 8) 玉川 元、放電", 共立出版 (1975)
- 9) 石川順三、"イオン源工学", アイオニクス (1986)
- 10) R. J. Girnius and W. Anderson, Nucl. Instr. and Meth., 137(1976) 373
- 11) 日本物理学、"加速器とその応用", 丸善 (1981)
- 12) R. P. Chaturvedi and H. Bakhru, Nucl. Instr. and Meth., B40/41 (1989) 702
- 13) 藤井信生、"演算増幅器回路の設計"、産報出版 (1977)
- 14) K. L. Brown, SLAC-91, 1977
- 15) R. M. Sealock, D. N. Jamieson and G. J. E. Legge, NIM B29(1987)557-566
- 16) M. Takai, K. Matsunaga, K. Inoue, M. Izumi, K. Gamo, M. Sato and S. Namba, JJAP26. 5(1987)550-553
- 17) G. W. Grime, M. Dawson, M. Marsh, I. C. McArther and F. Watt, NIM B54(1991)52-63
- 18) F. W. Martin and R. Groskie, NIM B54(1991)64-67
- 19) G. W. Grime and F. Watt, "Beam Optics of Quadrupole Probe-forming System", Adam Hilger, Bristol, 34 (1984)
- 20) E. Minehara, et al, Nucl. Instrum. Methods, A252, 101 (1986)
- 21) 神谷富裕、他、第1回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、東京、149 (1988)
- 22) T. Kamiya, E. Minehara, K. Mizuhashi and Y. Nakada, Proc. of the 12th Symp. on Ion Source and Ion-Assisted Technology, Tokyo, 151 (1989)
- 23) T. Kamiya, E. Minehara, Proc. of the 8th Symp. on Ion Beam Technology Hosei University, Tokyo, 45 (1989)
- 24) T. Kamiya, E. Minehara, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research, Mito, 337 (1990)
- 25) ELF Co., Ltd. Reference manual of ELF/MAGIC

付 錄

A 三次元元素分布分析システム

A 1 システムの概要

三次元元素分布分析システムは、マイクロイオンビームをスキャンしながら、二次元的にRBS測定を行い、深さ方向の情報から三次元的な元素分布分析を行うシステムである。RBS測定により得られたデータを、MCA(Multi Channel Analyzer)からGPIBを経由して、コンピュータにDMA(Direct Memory Access)転送する。ここで得られたデータを一次データという。一次データは、通常行われてきたRBS解析のデータフォーマットを踏襲している。これが、スキャンを行った数だけ取得される。 128×128 のマトリックスでデータを採取した場合、その総量は 128 メガバイトにも及ぶ。この中から、ROI(Region of Interest)を抽出し、三次元元素分布分析用のデータに加工する。ここで得られるデータを二次データと呼ぶ。この、一次データから二次データを作成するソフトウェアをフィルタと呼ぶ。

一次データと二次データのフォーマットはすでに仕様として決定済みのため、フィルタを入れ換えるだけで、どのようなデータにも、どのような実験系にも対応が可能となる。フィルタは、移植性確保のために必要な形式であり、全てのソフトウェアに標準入力－標準出力(`std::cout = standard in - standard out`)の形式を持たせることによって、様々な状況への対応を最も簡単に行える。このシステムの場合では、データ取得部分で一次データが得られ、二次データを画像処理部分の入力とするが、この一連の作業を单一のプログラムで作成した場合には、コンピュータを交換したり、新しいMCAを入れたりした場合には、全てを最初から書き直す必要が生じる。しかし、このように、フィルタによる仲介の方法を取れば、データ取得部分、即ち実験系に変更が発生じても、画像処理部分、即ち計算系に変更が発生しても、最小の手間での改良が可能になる。

解析部分の画像処理ソフトウェアは汎用に設計しており、どのようなデータであっても、フォーマットを踏襲している限りは解析可能である。ハードウェアへの依存が多少あるが、依存ができる限り少なくし、移植に備えている。

A 2 フォーマットとフィルタ

データフォーマットに関する規約に関して解説する。実験系から取得した生の実験データをMCA経由で得たものを一次データと呼び、コンピュータで解析する際に必要となるデータを二次データと呼ぶことは前述したが、この2つのフォーマットが確定している限り、後述するフィルタの設計のみで自由にデータを加工できる。

A 2. 1 一次データ

MCAが出力するデータは、1チャネルあたり24ビットになっている。このうち、2ビットはシステム予約であり、残りの22ビットにデータが入ることになる。しかし、実際には、各チャネルあたりのイールド数で16ビットデータの最大値(65536)を越えることはまず考えられない。よって、処理の高速化を考えると、データは整数(int)型で受け取ることが望ましい。しかし、過去の処理システムの柵を踏襲する形で、長い整数(long)型で受け取っている。

一次データは、MCAが各チャネルごとに出力する4バイトのデータをそのまま利用する。これは、前述したように、これまで利用してきたRBS解析システムでもこのデータを使用できるようにするためである。

データは1点のRBS計測で完結し、1つのファイルとなる。 10×10 点についてマイクロRBS計測をした場合には、100個のファイルができ、これらのファイルがそれぞれどの点のデータであるかはファイルネームで指定する。現在の仕様では、ファイルの拡張子でその位置を表すことにしている。拡張子の終わりの2文字を利用し、ここにHEXで位置を表す数字を書き込むことによって区別する。これによると 16×16 のマトリックスに対して計測を行うことができる。これらのデータがフィルタにかかることになる。

A 2. 2 二次データ

二次データは、画像処理システムが要求するデータフォーマットである。これは、画像表示する際の1ピクセルに対して1バイトを割り当てる。これで、1点のデータあたり256階調で表示でき、単色であれば256階調の濃淡表示ができることになり、パレットの変更で単色のみならず様々な傾向をつけられる。単にRGBのどれかの濃度差だけでは、あまり濃度差がない場合には単調になってしまないので、ある色からある色への傾向をつけ濃淡表示を行ってもよい。本システムのパレットはすべてある色からある色への中間的濃淡移行になっている。

要求されるデータフォーマットは、ビームのスキャン方向に沿って、各ピクセルをシリアルに並べた形になっている。これではどのようなマトリックスになっているのかわからないが、これは、解析システム起動時のオプションや、システムのコンフィグレーション・ファイルに指定することができる。もちろんデータごとに指定することができるようローカル指定も可能である。これに関しては、本体の解説の部分で詳説する。

今までに作成されている画像処理システムは、ハードウェアの制限から、1ピクセルあたり8ビットしか使用できない。よって、用意されているパレットは8階調に制限している。それによって、データの量も節約した形、すなわち、1バイトのデータの上位4ビットと下位4ビットをそれぞれ1ピクセルとして使用する仕様になっている。これによってデータ量が半分になり、多層に渡るアクセスが高速になる。現在のハードウェア性能を考えれば十分であるが、一般的な使用方法ではないので、データが散漫になろうとも1バイトを確保した方がよい。そのための処理ルーチンも準備してある。

二次データは、X Y, X Z, Y Z 平面のいずれか 1 面を基準とした平面 1 面分をファイル 1 つにし、深さ方向に対して順に番号を振ったファイルを用意する。M S - D O S 使用の場合は、ファイル名を統一的にサンプル名にし、拡張子に深さ方向の番号を持った形式となる。今、ファイル名が "sample" で、深さ方向に 64 層のデータをフィルタから採取したとすると、二次データとしては、"sample. 1" から "sample. 64" までの 64 個のファイルが作成されることになる。0 番は、表面状態のサンプルとしてシステム予約番号なので、使用できない。

A 2. 3 フィルタ

フィルタは、標準入力から受け取ったデータに何らかの加工を施し、それを標準出力に出力する。通常、標準入力はキーボードからの入力であり、標準出力は C R T への出力である。しかし、最近のほとんどのオペレーティングシステム (O S) が入出力に対してリダイレクト（キーボード以外のデバイス(ファイル)を標準入力として取り扱ったり、C R T 以外のデバイス(ファイル)を標準出力として取り扱える）やパイプライン処理（他のプログラムが標準出力當てに出力したデータを標準入力として取り込む）が行えるようになっており、多段のフィルタの組み合わせが可能である。フィルタの使用例を次に示す。

```
cat < file1 | sort | uniq > file2
```

この例で "cat" というコマンドは、ファイルを連結するコマンドである。引数に並べられたファイルを連結して 1 つのファイルにして標準出力に出力する。引数が 1 つの場合や、標準入力からの読み込みの場合には、単にそれらの情報を表示する機能を持つ。記号'<'は、そのファイル(デバイス)をリダイレクトにより標準入力から読み込むことを示し、"cat < file1" は、"file1" の内容を出力する。次の記号' | 'は、パイプライン処理を示し、"cat < file1" の標準出力をそのまま "sort" の標準入力として渡す。"sort" というコマンドは、標準入力のデータを行単位でアルファベット順に並べかえ標準出力するフィルターである。そしてそれを再び記号' | 'によってパイプラインに連結して "uniq" というフィルタに渡す。このフィルタは、同じ内容の行が連続した場合にそれらのうち 1 行だけを残して残りを削除する、つまりユニークな行だけにする。その結果はリダイレクト記号' >' により "file2" に出力される。

このようにフィルタを用いると、システムに柔軟性を持たせることができる。A というデータから C というデータを作成する場合、A → B → C という処理の形式にしておけば、C というデータの使用を変更したい場合には B というフィルタを変更すればよい。また、B の出力を D というデータを作成する処理系に掛けたい場合でも、A → B → D のように、C と D を差し替えればよいだけである。これが B A S I C のようにこれらの概念を持たないシステムであると、A, B, C は全てまとまった 1 つのプログラムで書かれなければならず、どこか 1 箇所の変更でも A, B, C 全てを書き直さなければならない。D にする場合も同様である。

以上のような理由により、システムに柔軟性を持たせるためにフィルタを設計した。これに

は、現実的な以下の理由がある。

1. 測定系の変更への対応
2. 必要なデータタイプの変更
3. 解析ソフトの変更

1は、実験装置の測定系のハードウェア的な変更も考えられるし、RBSやPIXE以外の測定を行うことも考えられる。また、3は、現在は三次元の元素分布を調べているが、これ以上の解析を後年する可能性があるということである。これらを全て一緒に作成した場合、どれか1つの変更に対して全てを設計し直さなければならないという手間を省くための設計であるとも言える。

データタイプに関しては、現在でも数種類のデータの要請がある。RBSとPIXEでは同じMCAからの出力でも欲しいところ(ROI)は全く異なるし、RBSでも、元素の分布を見るのか、それとも濃度分布が知りたいのか、また、いろいろな元素の濃度分布が同時に欲しいのか、など様々である。これらの要請に対して何種類もの解析システムを用意するような混乱を避け、フィルタの変更で全てを済ませる。

A 3 移植性の確保

移植性の高いプログラムを書くことは、C言語によるプログラミングでは容易である。移植性と性能は相反することもあるが、移植性を犠牲にするなら何らかの形でそのことを明示する必要がある。環境ごとに異なる名前を定義して、環境に依存する部分を#defineで囲む方法もある。移植上問題のある場所は関数かマクロとして分離し、まとめておくべきである。

C言語はマシンに密着した言語なので、CPUの違いによる差が結果に現れてしまうようなプログラムを書いてしまいやすい。性能を上げるためにCPUに依存したコードを書くこともあるが、これは本当に必要な場合に限り、そのことを十分意識下に置くべきである。CPUだけでなく、同じCPU下で動作するコンパイラによっても細部仕様が異なっているので注意が必要である。

データの内部表現はCPUに依存している。各基本データ型のビット数はCPUによって異なる。文字(char)型、短い整数(short)型、整数(int)型、長い整数(long)型はそれぞれ最低でも8, 16, 16, 32ビットはあると考えてよいと思うが、CPUによってまちまちであり、中にはlong型が24ビットしかないような処理系もあるので注意を要する。例えば、int型とlong型やポインタが同じ大きさと考えがちであるが、32ビットマシンではこれらはすべて32ビットが普通だが、i8086のモデルではint型が16ビットなのに対し、long型のポインタは32ビットであるので注意を要する。

2つのデータ型の内部表現が問題になるのは、関数の引数の他に、共用体と型変換演算子を用いた場合がある。例えば、ファイルから文字配列に読んできたデータを整数として見る場合など、1つの場所を2つの型で参照することになるので、細心の注意が必要である。例えば、

VAXと68000では各整数型のビット数は同じであるが、バイトの順序は異なっている。ビットフィールドが上位下位どちらから割り付けられるかも同様に処理系に依存する。文字配列の一部を整数として見るような場合、そのアドレスがアラインメントの条件を満たしているかという問題もある。多くのCPUでは2バイト以上のデータは偶数アドレスに置かれている必要があるし、4バイトなら4の倍数でなければならぬものもある。しかし、VAXのようにこの条件を満たしていないとも正常にアクセスできるものもある。

符号に関する注意が必要である。文字型が符号付きかどうかは処理系に依存するので注意する。ASCIIコードは7ビットの体系なので符号は無関係だが、8ビットをフルに使う文字コード体系では文字の値が負になってしまふこともあり、0xFFでマスクをかけるなどの処理が必要である。8ビットのコード体系を使用する場合には、符号なし文字（`unsigned char`）型が使える処理系を選択するのが望ましい。最近の処理系はほとんど`unsigned char`型を使用できる。

符号付き整数の右シフトは算術シフト（最上位ビットは元のまま保存される。）になるものが多いが、論理シフト（最上位ビットは0になる。）になるものもある。シフトについてはもうひとつ問題があって、例えば、整数（`int`）型型が32ビットの場合、シフト量が0から31までの間にない場合の効果はCPUによって異なる。つまり、負のビット数だけ左シフトすると右シフトになるかというと必ずしもそうではない。シフトの使用も慎重に行わないと移植性を殺ぐ結果になりかねない。

負数を含む整数の除算の結果もCPUに依存するので避けるべきである。しかし、大概のCPUでは、商は0に向かって切り捨てられ、剰余は被除数と同じ符号になる。

また、C言語では式の中での評価順序が不定である。よって、式の評価順序に依存するプログラミングは避ける必要がある。関数引数の評価順序も本当ならば不定であるが、実際には左からと右からの2通りしかない。評価された引数はその順にスタックに積まれてスタックフレームとの相対位置で参照されるのが普通の方法であり、このとき引数の個数が関数本体での宣言と合わなくても対応が取れるようになると評価順序は自然に決まってくる。“printf”のように不定個の引数を持つ関数では、引数を参照するために、引数のスタック上でのアドレスの順序を仮定することがあるが、これもCPUに依存すると考える。このため、最近では、不定個の引数を処理するための“varargs”というライブラリを用意している処理系が多い。

以上の点に留意してプログラミングを行い、移植性を確保する。

A 4 プログラムの使用法

ここでは、プログラム“map.exe”的使用方法と、改編の方法について述べる。内部の関数の使用や定数の意味を明確にすることにより、バージョンアップに備える。実際のヘッダファイル、ソースファイルを抄録する。また、メイクファイル（makefile）とリンクファイル（linkfile）も載せておくので、改編の際には参考にして欲しい。

A 4. 1 概要

三次元元素分布分析 (3D elemental mapping) では、物質の深さ方向(今後Z方向とする)にどのような元素分布があるのかを、二次元的(X方向とY方向とする)に解析することにより、併せて三次元と呼んでいる。

これまでのRBSのデータも、もちろん深さ方向の情報を持つておらず、我々は従来の解析システムを利用してその情報を知ることができる。しかし、それは横軸にエネルギー、縦軸にイールドを配したグラフであり、RBSに関する知識なしにはその情報を認識するのは難しい。誰がみても解るような形式で表示することに主眼をおいたものが今回作成したシステムである。

本システムは、X, Y方向がそれぞれ384ピクセルを持ち、そのXY平面をZ軸方向にスキャンすることによって三次元的な元素の分布を解析することができるものである。一般的な使用方法としては、試料表面をXY平面に見立てて、その平面をZ軸方向に掘り下げていくことによって三次元的な分布を調べることになるが、別にXZ平面を固定してもYZ平面を固定しても構わない。これは、フィルタにどのようなデータを出力させるかで決定されるだけであるから、二次データのフォーマットによる。

ただし、X軸とY軸の各ピクセルは、最大で384しか取れないので注意が必要である。XY平面以外の平面を固定するようなスキャンをする時は、最大でも384層しか見られないことになる。XY平面を固定した場合のZ軸方向の深さは、仕様では65, 536層まで取れるようになっているが、二次記憶の容量の問題より、実用上十分な深さとしている。

各ピクセルに割り当てられているフレームは、最大24ビット、通常4ビットである。各ピクセルあたり通常8階調で十分と判断したので普通のシステムでは8階調表示ということになっている。これをフルスケールに変更するには、大した手間はいらない。詳しくは移植の項で述べる。

概念としては、Z軸方向を今仮に384層とすると、XYZそれぞれの方向に384個の立方体を持つルービック・キューブがあり、それをX, Y, Z軸のどれかを法線として持つ任意の平面で切り、中身の様子を見ることができる。

A 4. 2 動作環境

”map.exe”を動作させたり、改編したりするために必要な環境を、Table A1にまとめた。

A 4. 3 環境変数と環境設定

”map.exe”を使用するためには、環境変数’MAP’が設定されていなければならない。

’MAP’には、システム起動に際して必要な各種のパラメータを記述した”map.cnf”というファイルが存在するディレクトリを指定する。この名前は起動時オプションの指定によって変更できる。変更の方法の詳細は起動時オプションの項で述べる。

この指定は、"autoexec.bat" の中で、

```
set map=a:/etc
```

のようにしておくとよい。独自にバッチを作つて指定してもよい。ディレクトリのセパレータはスラッシュでもバックスラッシュでもよいが、スラッシュが好ましい。

この' MAP' で指定されたディレクトリには、"map.cnf" と同様に、タイトル表示のためのイメージデータである" title.dat" も存在している必要がある。この名前も起動時オプションの指定によって変更することができる。詳しくは起動時オプションの項で述べる。

"map.exe" は、起動されると、引数で与えられた起動時オプションの評価よりも先に、環境変数' MAP' で与えられたディレクトリから、システムに関するコンフィグレーションをするためのパラメータを書き込んであるファイル、"map.cnf" を探し出してそれを読み込み、各種パラメータをセットする。"map.cnf" の中のパラメータのセットの仕方は、"palette =1" のように、イコールをセパレータとしてデータを与える方法である。'='の前後にはスペースがあってはいけない。スペースがあった場合には、スペースをはじいて評価する。"map.cnf" 中では1行は512バイト以内である必要がある。また、行の先頭が'#'である場合と'C R'である場合には読み飛ばすので、コメントを入れたりファイルを見やすくするための整形をしたりすることができる。

以下、各種パラメータの説明をする。

palette 使用するパレット番号を指定する。指定することができるのは、現在のシステムでは1から6までであるが、いろいろな組み合わせのパレットを用意できる。"palette.c" を書き換えるだけでよい。詳しい変更の方法は移植の項で述べる。

videomode 使用するビデオモードを指定する。これはPC-9801とその互換機のみで使用できる。ANSI規格には対応していない。指定することのできるビデオモードは1から8までである。このパラメータは、現在のところ、5でなければ正常動作しない。即ち、PC-9801およびその互換機の現行機種でなければ動作しない。

drive システムが置かれるドライブ名を指定する。"a:" のように、ドライブ名の後にコロンが必要である。ハードディスクにインストールして使用するような場合や、通常のシステムでフロッピーディスクから立ち上げるような場合には、いずれシステムのあるドライブがAになるので問題はないようと思えるが、いろいろな種類のフロッピーディスクが接続されているような場合に、そのフロッピーディスクが必ずしもAになると限らないような場合には指定しなければならない。指定がない場合にはカレントになる。

datadir データを置くディレクトリを指定する。セパレータはスラッシュで、ディレクトリはスラッシュで終わっている必要がある。終わっていないともきちんと処理はする。この指定を間違えるとかなりの確率で暴走するので注意する必要がある。

filename 解析をするデータのファイル名を指定する。ここで指定するのは不便なので、引数で処理することができる。

ext システムの環境設定や、後に解説するデータの各種パラメータの設定をするファイルは、一律に”cnf”という拡張子を持つ設定になっている。

mouseplane マウスカーソルを表示するプレーンを設定する。設定できるのは、0から3までの数字で、0, 1, 2がそれぞれR G Bに対応しており、3は拡張プレーンである。拡張プレーンが存在しないのに3を与えるとエラーを起こすが、拡張プレーンのない機種では動作しない。

titlefile タイトルを表示するためのイメージファイルの所在は、環境変数’MAPCNF’を指定しておけば、そこから探し出すのであるが、これは滅多に変更するものではないので固定しておいてもよい。タイトルファイルをフルパスで指定する。

これらのパラメータのほとんどは、起動時オプションの指定によって変更することができるという柔軟設計になっている。

以下は起動時オプションで変更できないパラメータである。これらはそれぞれのデータ固有の環境を設定するためのパラメータであり、起動時にどのデータを解析するか指定してから初めて読み込まれる、ローカル・コンフィグレーションである。

これらのパラメータは、データ名に拡張子”cnf”をつけたファイルに書き込んでおく必要がある。測定したいデータが”sample”という名前だとしたら、それらのデータが入っているディレクトリに”sample.cnf”というファイルがなくてはならない。

それでは、ローカル指定の各種パラメータについて説明する。設定に関する規則はシステム環境設定の場合と同様である。

samplename 画面上に表示された分布図につける名前を入れる。画面上にこの文字列が表示するだけで、何かを検索したりするものではないのでどのように書いても

よい。但し、8バイト以内である。ハードコピーを取ったときに何のデータなのか解ればよい。

xsize	画面上に表示される分布図のX方向の大きさ。どのようなサイクルでビームをスキャンさせたかによって指定する。最大は先述のように 3 8 4 である。
ysize	画面上に表示される分布図のY方向の大きさ。別に'xsize'と一致していなくともよい。一致していない場合には、大きい方の値を一边とする正方形を作成し、データがないところはパレットの0番で塗られる。パレットの0番は背景色と規定されているので、実際には長方形の領域に見える。
zsize	解析する立体のZ方向の大きさ。どのようなフィルタをかけたかによって異なるので、フィルタによって変更を要する。最大は9 9 9 である。
sample1~8	サンプルバーに表示するサンプル名称。このパレットに対応する元素が何であるとか、このパレットはどれくらいの濃度を示しているかなどを自由に設定できる。設定しなくても問題ない。

A 4. 4 起動時オプション

起動時オプションのほとんどは、map.cnfにある各種パラメータを変更する際に使用するもので、通常、ほとんど使用しない。fオプションだけは頻繁に使用する可能性がある。仕様は以下の通りである。

```
map [-d <directory>] [-e <extention>] [-f <filename>]
     [-h] [-m <n(0-3)>] [-p <n(1-6)>] [-t <filename>]
     [-v <n(1-8)>]
```

以下、各種起動時オプションについて説明する。

- d データの存在するディレクトリを指定する。通常、"map.cnf"の中の"datadir"パラメータで指定しておくのが好ましい。一時的な変更がある場合などに便利。
- e コンフィグレーションを行うファイルであることを示す拡張子"cnf"を変更する場合に指定するが、これも通常使用ではまず変更しないことを勧める。
- f データのファイル名を指定する。当初は"map.cnf"での指定を考えたが、不便なの

で起動時オプションで指定できるようにした。

- h ヘルプ・メッセージを表示する。
- m マウスカーソルを表示するプレーン番号を指定する。
- p パレット番号を指定する。
- t タイトルデータのファイル名を指定する。
- v ビデオモードを指定する。

文字定数とデータ型

ここでは、"defs.h" と "config.h" で設定されている各種文字定数の意味を説明する。

MATRIX_SIZE X, Y 方向のピクセルの最大値で、変更した場合の動作は保証しない。

TITLE_X タイトルデータを出力する位置のX座標。

TITLE_Y タイトルデータを出力する位置のY座標。

TSIZE_X タイトルデータの X 方向のサイズで変更できない。

TSIZE_Y タイトルデータの Y 方向のサイズで変更できない。

MENU_LX マウスカーソルが動ける範囲の左上隅の X 座標で、特に変更する必要はないが、変更しても問題はない。

MENU_LY マウスカーソルが動ける範囲の左上隅の Y 座標。

MENU_RX マウスカーソルが動ける範囲の右下隅の X 座標で、特に変更する必要はないが、変更しても問題はない。

MENU_RY マウスカーソルが動ける範囲の右下隅の Y 座標。

TEXT_LR テキスト画面にメッセージを出力する際の左上隅の行位置で、変更する場合

にはテキストウィンドウの大きさも変更する必要がある。

TEXT_LC	テキスト画面にメッセージを出力する際の左上隅の桁位置。
TEXT_RR	テキスト画面にメッセージを出力する際の右下隅の行位置。
TEXT_RC	テキスト画面にメッセージを出力する際の右下隅の桁位置。
TEXT_LX	テキストウィンドウの左上隅のX座標で、変更する場合にはテキスト画面の制御パラメータも同時に変更する必要がある。
TEXT LY	テキストウィンドウの左上隅のY座標。
TEXT_RX	テキストウィンドウの右下隅のX座標。
TEXT_RY	テキストウィンドウの右下隅のY座標。
WINDOW_LX	データを表示するためのウィンドウの左上隅のX座標。あまり変更すると他のウィンドウとラッピングしてしまうので、変更には注意を要する。変更する場合には、MATRIX_SIZEの値に注意する必要がある。
WINDOW LY	データを表示するためのウィンドウの左上隅のY座標。
WINDOW_RX	データを表示するためのウィンドウの右下隅のX座標。
WINDOW_RY	データを表示するためのウィンドウの右下隅のY座標。
SPLX	サンプルバーを表示する位置のX座標。
SPLY	サンプルバーを表示する位置のY座標。
SPLSIZ	サンプルのマトリックスの大きさ。単位は画面上のドット数。
SPLNUM	サンプル数。最大で256までのサンプルを取れる仕様になっているが、多いとサンプルバーは表示できなくなる。現在は8諧調仕様なので問題はない。16までなら現在の画面構成のままで変更してもよい。
SPLNAMSIZ	各サンプルにつけることのできる名前の最大値。単位はバイト。

MAXSPLTTLNAM	サンプルにつけることのできる名前の最大値。
CONFIGFILE	ディフォルトのコンフィグレーション・ファイルの名前。
TITLEFILE	ディフォルトのタイトル・ファイルの名前。
MAPENV	システムで使用する環境変数の名前の設定。変更しても構わないが、変更したことを忘れるとなつたく動作しなくなるので注意。
VERSION	バージョン番号。起動時のタイトル表示に使用される。
DATE	最終変更期日。
 " defs.h" で宣言している各種データ型について解説する。	
FILENAME	ファイル名をフルパスで持つための構造体。これは、MS-C標準関数の、_splitpath()や_makewpath()の標準ファイル名形式を踏襲している。各メンバの大きさの最大値は、" stdlib.h" に与えられている。
POINT	これが二次元座標を表しているのだということを明確にするための構造体。X座標とY座標の組。
RECTANGLE	長方形の大きさを持つ構造体。左上隅の座標と右下隅の座標をそれぞれPOINT型で持つ。
MODE	V R A M を初期化するためのパラメータを集めた構造体。
SIZE	データの三次元的な大きさを持つ構造体。縦、横、高さ。
BFLD	データ節約のためのビット・フィールド型。

A 5 ライブライリ解説

ここでは、マウス制御ライブラリとグラフィック関係ライブラリに関して解説する。これらはデバイスに密着した部分であり、本システムを他の処理系に移植する場合には全面的に書き直す必要がある。このような部分を1つのライブラリとしてまとめることにより、移植の際の便宜を図ることができる。それぞれの処理系に合わせた関数を作成することにより、本体部分

を書き直さなくとも移植作業が行える。本来ならば、処理系に依存しない共通規格で作成するべきであるが、そのような規格が存在しないのでこのような結果になった。

マウス制御は、MS-DOSのINT 33Hを利用している。バスマウス仕様になっているので、MS-DOSの動作する機種であってもシリアルマウスを使用している場合は動作しない。本システムでは、単なるメニュー操作にしかマウスを使用していないので、シリアルマウスでも特に問題はない。シリアルマウスを使用希望する人はマウス制御部の書き直しが必要となる。マウスドライバは、NECのPC-9801シリーズ用MS-DOSに標準添付されてくるマウスドライバを想定しており、これはマイクロソフト仕様である。

グラフィックライブラリは、Microsoft-C Ver. 5.1についてくるグラフィックライブラリを使いやすい形に変更したものである。これもマウスと同様に、処理系に合わせて書き直す必要がある。現在の形式は、Microsoft-Cの関数形式を一般的な関数形式に変更するという手間を掛けているので関数のオーバーヘッドがあるかもしれない。UNIXに移植するなら全面的にX-WINDOWなどに移植しなおすことを勧める。また、市販のフレームバッファを使用するような場合にも書き直す必要がある。

A 5. 1 マウスライブラリ

1. _mouseinit()

□書式

```
#include<stdio.h>
#include<dos.h>
void _mouseinit(void);
```

□戻り値

なし

□機能

マウスI/Fをイニシャライズする。マウスドライバがインストールされていない場合にはエラーとなる。イニシャライズに成功した場合には、マウスカーソルの位置検出をするためのイニシャライズを実行する。マウスを使用する場合には必ず最初にこの関数を呼び出さなければならない。

2. _setmousecursor()

□書式

```
#include <dos.h>
void _setmousecursor(void);
```

□戻り値

なし

□機能

マウスカーソルの形状を変更する。マウスドライバ標準のマウスカーソルの形状は大きすぎ

てかつ格好が悪い。そこで、この関数を呼び出すことによって変更できる。マウスカーソルの形状は、char mouse_cursor[64]/にセットする。16×32ドットのビットパターンで指定する。

3. _setmouseplane()

□書式

```
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
void _setmouseplane(plane);
unsigned int plane; プレーン番号
```

□戻り値

なし

□機能

マウスを表示するプレーンを設定する。通常の場合、プレーンはRGBいずれかに表示するが、VRAMが拡張してある場合、即ちアナログ16色対応になっているマシンでは第4プレーンにも表示できる。引数'plane'にはマウスカーソルを表示するプレーン番号を設定する。RGBに対して0、1、2が割り当てられており、拡張プレーンは3になる。3以上の値を与えた場合には強制的に3に設定されるが、VRAMが拡張されていないのに3を指定した場合にはエラーを発生するので注意が必要である。カーソルは、実際には関数_mouseon()で表示され、関数_mouseoff()で消去される。

4. _mouseon()

□書式

```
#include <dos.h>
void _mouseon(void);
```

□戻り値

なし

□機能

マウスの使用を許可する。この関数を呼び出すことによってマウスが使用可能になり、マウスカーソルが表示される。マウスを表示するプレーンを変更したり、マウスカーソルの形状を変更したい場合には、この関数_mouseon()を呼び出す前に、関数_setmousecursor()や_setmouseplane()を実行しておく必要がある。

5. _mouseoff()

□書式

```
#include <dos.h>
void _mouseoff(void);
```

□戻り値

なし

□機能

マウスの使用を終了する。この関数の呼び出しによってマウスは使用不能になり、マウスカーソルも消去される。この関数を呼び出さないでシステムを終了しても特にエラーにはならないが、意味をなさないマウスカーソルが画面上に残ってしまうことになる。

6. _getmouseposition()

□書式

```
#include <dos.h>
void _getmouseposition(left, right, x, y);
int *left;      左ボタンの情報
int *right;     右ボタンの情報
unsigned int *x; マウスカーソルのX座標
unsigned int *y; マウスカーソルのY座標
```

□戻り値

なし

□機能

現在マウスカーソルがある位置の情報を与える。左右ボタンの情報は、ボタンが押されていない場合には0が、押されている場合には-1となる。座標は、マウスカーソルの左上隅の座標となる。

7. _setxrange()

□書式

```
#include <dos.h>
int _setxrange(xmin, xmax);
unsigned int xmin; X座標の最小値
unsigned int xmax; X座標的最大値
```

□戻り値

実現不可能な値が与えられた場合にエラーとなり-1を返す。

□機能

マウスカーソルの動く範囲を限定する。この関数単体ではX座標の限定しかできないので、関数_setyrange()と組み合わせて使用することにより、画面上でマウスを移動させることでできる範囲を長方形の領域で限定できる。

8. _setyrange()

□書式

```
#include <dos.h>
int _setyrange(ymin, ymax);
```

```
unsigned int ymin; Y座標の最小値
unsigned int ymax; Y座標の最大値
```

□戻り値

実現不可能な値が与えられた場合にエラーとなり -1 を返す。

□機能

マウスカーソルの動く範囲を限定する。この関数単体ではY座標の限定しかできないので、関数_setxrange()と組み合わせて使用することにより、画面上でマウスを移動させることでできる範囲を長方形の領域で限定できる。

9. _getleftpushinfo()

□書式

```
#include <dos.h>
void _getleftpushinfo(status, count, x, y);
int *status;           左ボタンの状態
unsigned int *count;  押された回数
unsigned int *x;      カーソルのX座標
unsigned int *y;      カーソルのY座標
```

□戻り値

なし

□機能

左ボタンの情報を取得する。この関数を利用すれば、常時マウスの状態を監視していなくてもマウスカーソルの情報が取得できる。この関数は、前回に押されたときからの起算になるので、最初に空呼び出しをしておかないと、第1回目の呼び出しが成功しない。空呼び出しは関数_mouseinit()で行われる。

10. _getleftfreeinfo()

□書式

```
#include <dos.h>
void _getleftfreeinfo(status, count, x, y);
int *status;           左ボタンの状態
unsigned int *count;  押された回数
unsigned int *x;      カーソルのX座標
unsigned int *y;      カーソルのY座標
```

□戻り値

なし

□機能

左ボタンの情報を取得する。この関数を利用すれば、常時マウスの状態を監視していなくてもマウスカーソルの情報が取得できる。この関数は、前回に解放された時からの起算になるの

で、最初に空呼び出しをしておかないと、第1回目の呼び出しが成功しない。空呼び出しは関数_mouseinit()で行われる。

1 1. _getrightpushinfo()

□書式

```
#include <dos.h>
void _getrightpushinfo(status, count, x, y);
int *status;          右ボタンの状態
unsigned int *count; 押された回数
unsigned int *x;     カーソルのX座標
unsigned int *y;     カーソルのY座標
```

□戻り値

なし

□機能

右ボタンの情報を取得する。この関数を利用すれば、常時マウスの状態を監視していなくてもマウスカーソルの情報が取得できる。この関数は、前回に押されたときからの起算になるので、最初に空呼び出しをしておかないと、第1回目の呼び出しが成功しない。空呼び出しは関数_mouseinit()で行われる。

1 2. _getrightfreeinfo()

□書式

```
#include <dos.h>
void _getrightfreeinfo(status, count, x, y);
int *status;          右ボタンの状態
unsigned int *count; 押された回数
unsigned int *x;     カーソルのX座標
unsigned int *y;     カーソルのY座標
```

□戻り値

なし

□機能

右ボタンの情報を取得する。この関数を利用すれば、常時マウスの状態を監視していなくてもマウスカーソルの情報が取得できる。この関数は、前回に解放された時からの起算になるので、最初に空呼び出しをしておかないと、第1回目の呼び出しが成功しない。空呼び出しは関数_mouseinit()で行われる。

1 3. _getdistance()

□書式

```
#include <dos.h>
```

```
void _getdistance(x, y);
unsigned int *x; X 軸方向移動距離
unsigned int *y; Y 軸方向移動距離
```

□戻り値

なし

□機能

マウスカーソルの移動距離を取得する。最後にこの関数が呼び出された時から起算して、マウスカーソルがどれだけ移動したかを求める。最初に実行する場合には空呼び出しを実行しておく必要がある。空呼び出しは関数 _mouseinit() で行われる。

A 5. 2 グラフィックライブラリ

1. setpalette()

□書式

```
#include <stdio.h>
#include <graph.h>
void setpalette(i);
int i; パレット番号
```

□戻り値

なし

□機能

パレットを設定する。システムの性格上、色のグラデーションで濃淡を表示したりすることが多いので、最初から 6 種類のグラデーション・パターンを用意してある。これらは、16 色モードの PC - 9801 シリーズ及びその互換機でしか使用できない。ANSI 規格の VAX などでは書き換えが必要である。パレットは任意に追加してよい。また、フレームバッファなどを用いて、1670 万色対応などとした場合には、全面的に書き換えなければならない。パレットの 0 番は、背景色としてシステム予約なので、0 であることが望ましい。

2. setvideomode()

□書式

```
#include <stdio.h>
#include <graph.h>
void setvideomode(videomode);
int videomode; PC - 9801 の V R A M の状況
```

□戻り値

なし

□機能

PC - 9801 及びその互換機の V R A M の状況に応じて、ビデオモードを選択し設定する。

テキスト画面の表示の有無や、デジタルRGBのみかアナログRGBに対応しているのか、アナログRGBならば8色なのか16色なのか、などを指定する。各パラメータに関して説明を加えると、

- 1 : ディフォルト(テキストのみ)
- 2 : テキストのみ
- 3 : デジタル8色
- 4 : アナログ8色
- 5 : アナログ16色
- 6 : デジタル8色(テキストなし)
- 7 : アナログ8色(テキストなし)
- 8 : アナログ16色(テキストなし)

となる。本システムでは、5以外の値を与えた場合の動作を保証しない。

3. rect()

□書式

```
#include <graph.h>
typedef struct{
    int x;
    int y;
} POINT;
typedef struct{
    POINT left;
    POINT right;
} RECTANGLE;
void rect(p,color);
RECTANGLE p; 長方形の位置
int color; 表示する色
```

□戻り値

なし

□機能

長方形を表示する。長方形を表示する位置と大きさは、RECTANGLE構造体で指定する。RECTANGLE構造体には、長方形の左上隅の座標と右下隅の座標を与える。表示する色は、パレット番号を与える。長方形は与えられた色で内部を塗りつぶされて表示される。

4. line()

□書式

```
#include <graph.h>
typedef struct{
    int x;
    int y;
} POINT;
void line(start, end, color);
POINT start;
POINT end;
int color;
```

□戻り値

なし

□機能

POINT構造体で与えられた始点から終点に、引数'color'で与えられた色の線を引く。
エラー処理はしていないので、範囲外の値を与えた場合、責任は取れない。

A 6 付属ユーティリティの解説

A 6. 1 ハードコピー

画面のハードコピーを取るためのソフトウェアが用意されている。

画面のハードコピーを得るときにはパレットをタイルに塗り替えて印刷するわけであるが、画面と印刷との双方とも綺麗な出力を得られるようなタイル・パターンの設計は労力を要する。そこで、大泊研究室卒業生で、現在日本原子力研究所高崎研究所に勤務しておられる宮下敦巳氏にお願いして、キャノン社製のレーザーショットプリンタ（LBP）対応のハードコピー・ルーチンを提供していただいた。LISPモードで16階調の出力が得られる。

以下に使用方法の概略を示す。

□書式

```
hardc [-p] [-l] [-B4] [-B5] [-A4] [-A5] [-A6] [-mX[, Y]]
      [-dN] [-fX[, Y]] [-cCC...C] [-o<filename>]
      [-g<fontfile>] imagefile
```

□オプション

p ポートレートモードの指定

- l ランドスケープモードの指定(default)
- B4 用紙の大きさの指定(B4)
- B5 用紙の大きさの指定(B5)
- A4 用紙の大きさの指定(A4:default)
- A5 用紙の大きさの指定(A5)
- A6 用紙の大きさの指定(A6)
- m 1ピクセルをX×Yドットの疑似濃淡表現で表現(default:4×4)
- d 1ドットをN×Nドットに拡大(default:1×1)
- f 画面左上のピクセル位置を固定
- c 色と濃度の対応関係の指定(default:03579BDF12468ACE)
- o fileに対しての出力(default:printer)
- g fontfileの指定(default:内蔵カートリッジ)

□機能

画面やイメージファイルのハードコピー。LBPのLISPモード用。指定されたイメージファイルをLBPに出力する。指定がない場合には、画面をハードコピーする。

A 6. 2 簡易版

あるデータの正当性の確認、途中経過の確認、もしくは深さ方向の情報が必要なく二次元的な分布のみを問題にする場合のために、簡易版プログラム”smap.exe”を用意した。特徴は、軽量で高速であり、どのような環境でも動作する。環境変数の設定、起動時オプションは必要ない。”smap filename”とするだけで、二次元的な情報を瞬時に表示することができる。マウスも必要なく、マウスドライバがなくても動作する。ただし、16色対応に限定されており、8色しか表示できない機種では動作しなく、自然色対応フレームを登載していても16色しか使用しない。また、パレットも固定で、寒色系のパレットのみの仕様である。数値演算プロセッサもなく、フロッピーディスク1枚に十分本体とデータを収納できる大きさなので、デモにもよい。

画面構成は、タイトルやメニューバー、サンプルバーなど余計なものは一切なく、黒い背景の上に映像がでているだけであるので、写真に撮って反転してオーバーヘッドプロジェクタ用のシートに複写することも可能である。

A 7 移植の際の注意

移植作業を行う際の注意事項を簡単に述べる。

本システムはMS-DOS仕様であり、随所にMS-DOS独自の環境に対する対応がなされている。MS-DOSはファイル名やパス名に厳密な規約があるため、ファイルの取り扱い部分では他のOSとは全く違った処理をしている。例えば、関数_splitpath()や_makepath()などはファイル名に制限のないOSでは必要なく、そのままファイル名を渡せばよい。前出の関数はMS-Cの独自関数であるから、Turbo-CやLattice-Cなど、MS-DOS環境で動作するCコンパイラであってもこの点は変更する必要がある。

マウス制御とグラフィック関連についてはすでに移植の際の注意は述べたが、OSが同じであっても機種が違えばほとんどの場合異なるものがあるので、自分の環境に合わせて作りなおす必要がある。

移植の際にもっとも注意しなければならないのが、整数(int)型は16ビットであるとしてシフトやローテートを行っている点である。整数(int)型が32ビットである処理系では、全て短い誠意数(short)型に宣言し直すか、シフト処理などを改良する事が望まれる。これらはマップの表示の前処理の段階で多発する処理である。

ハードコピーはキャノン社製のレーザーショットプリンタ(LBP-A408/B406)にのみ対応している。他のドットマトリクスプリンタへのハードコピーは、各プリンタに対応したハードコピー・ドライバを作る必要がある。

A 8 他の実験系への対応

RBSおよびPIXE以外の実験系にも、解析部分を利用できる。大抵の測定は表面や界面の状況を観察するものであるから二次元的な分布を見られればよい。そのために、ある特定の平面図だけを表示することのできるプログラム"smap.exe"を用意したので、必要に応じて利用することを勧める。データフォーマットは二次データそのものである。

A 9 開発環境

本システムの開発の際のハードウェア環境、ソフトウェア環境などの開発環境をTable A2に記すので、再開発の際の参考にされたい。