

0099049711

城西大学
水田記念図書館

10 eV 領域での多価イオンの関与する
電荷移行反応の微分断面積測定

(研究課題番号 08454115)

平成 8 ~ 10 年度科学研究費補助金
基盤研究 (B)(2)

研究成果報告書

平成 11 年 3 月

伊 藤 陽

10 eV 領域での多価イオンの関与する 電荷移行反応の微分断面積測定

課題番号 : 08454115

0099049711

城西大学
水田記念図書館

平成8年度~平成10年度科学研究費補助金 基盤研究 (B)(2) 研究成果報告集

平成11年 3 月

研究代表者 伊藤 陽
(城西大学 理学部 助教授)

10 eV 領域での多価イオンの関与する 電荷移行反応の微分断面積測定

課題番号 : 08454115

平成8年度~平成10年度科学研究費補助金 基盤研究 (B)(2) 研究成果報告集

平成11年3月

研究代表者 伊藤 陽
(城西大学 理学部 助教授)

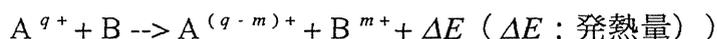
城西大学
水田記念図書館

0099049711

は し が き

この報告書は、平成8年度～平成10年度の3年間にわたって行われた、文部省科学研究費補助金 基盤研究(B)(2)「10eV領域での多価イオンの関与する電荷移行反応の微分断面積測定 (課題番号:08454115)」の研究成果報告書である。

これまで、研究例の少ない10eV以下のエネルギー領域でビーム法を用い、多価イオンの関与する電荷移行反応:



を対象としての測定を行うことを目指し、実験装置の開発・研究を進めてきた。本研究の主たる目的は、断熱ポテンシャル曲線と、それらの交叉点近傍での遷移確率について知見を得、これからイオンと原子・分子衝突に於ける非弾性反応の機構を理解することである。

今回の補助金を用いることで、位置敏感型検出器を新たに設計・製作し、既存の交叉ビーム型原子衝突実験装置に設置した。このことにより、検出効率を大幅に向上させることができ、また信号・雑音比も改良することができたため、ビーム実験がほとんど行われていない低エネルギー領域での二重微分断面積測定に成功した。以下に、研究経過と到達点を述べる。

研究組織

研究代表者: 伊藤 陽 (城西大学 理学部 助教授)

研究分担者: なし

研究経費

平成8年度	3,800 千円
平成9年度	3,000 千円
平成10年度	500 千円
計	7,300 千円

研究発表

(1) 口頭発表 (Yoh Itoh: STATE-SELECTIVE DIFFERENTIAL CROSS SECTION MEASUREMENTS FOR ONE-ELECTRON CAPTURE PROCESSES AT 10 eV REGION: THE XXI INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PHYSICS OF ELECTRONIC AND ATOMIC COLLISIONS (XXI ICPEAC) Sendai, Japan July 22 -- 27, 1999.

1. 序

1-1. これまでの研究経過との関連：

10 eV 程度の衝突エネルギー領域での多価イオンと原子衝突の二重微分断面積測定実現のためには、種々の技術開発が必要とされた。本研究以前には、以下の補助を受けたこともその実現を促進した。ここにそれらを記し、改めて感謝したい。

科学研究費：奨励研究(A) (昭和59年度) 低エネルギー領域でのイオン・原子衝突の二重微分断面積測定(研究代表者：伊藤 陽 1,000千円) 電子衝撃型イオン源の製作などから研究を開始した。

科学研究費：一般研究(C) (昭和60～61年度) 低エネルギー領域でのイオン・原子衝突の二重微分断面積測定(研究代表者：伊藤 陽 1,700千円) 表題のテーマの実現のために、小型の電子衝撃型イオン源を用いたごく小規模な実験装置を建設し、特に10 eV 以下の低エネルギーイオンビーム生成とエネルギー分析の技術開発に着手した。

科学研究費：奨励研究(A) (研究期間：昭和63年度) 低エネルギー多価イオン衝突における電荷移行反応の二重微分断面積測定(研究代表者：伊藤 陽 900千円) 永久磁石を用いた電子ビーム型イオン源の試作を行い、電子ビーム発生等の基礎データを得た。

科学研究費：一般研究(C) (平成6～7年度) 10 eV 領域での電荷移行反応の微分断面積測定(研究代表者：伊藤 陽 2,000千円) 電子ビームイオン源(EBIS) の開発を行い、従来用いたイオン源では生成できなかった多価イオンが生成できるようになり、10 eV 以下までの減速にも成功した。電荷移行生成物の角度分布の測定を行い、電荷移行反応の機構解明に着手した。

科学研究費：重点領域研究・公募(平成6～7年度) 多次元同時計測システムの開発(研究代表者：吉野 益弘 分担者：伊藤 陽 田中 直彦 3,600千円) 極微弱な信号検出のため、汎用位置敏感型検出器および計測系のハード・ソフトウェアの開発を行い、実用に供した。

科学研究費：重点領域研究・公募(平成6～7年度) 希ガス多価イオンの光電離(研究代表者：伊藤 陽 分担者：小泉 哲夫 3,600千円) 希ガス多価イオン源の開発・種々の測定器の開発を行い、放射光による極希薄標的の光イオン化の測定に成功した。この過程では静電型レンズ等におけるイオンや電子の軌道シミュレーションに基づく詳細設計が可能となり、装置開発が効率的に行えるようになった。また原子構造解析コードも導入され、エネルギーレベルの精密同定も可能となった。多価イオンは、そのイオン化ポテンシャルも未知なものが多く、このコード利用は衝突過程で生成される励起状態の解析にも重要である。

本研究に於いては、これらの準備・成果の上に、電子ビームイオン源(EBIS)・標的ビームの改良・強化を行い、高感度の位置敏感型検出器の導入を行った。これらによって、従来より目指してきた本来の研究目的の実現の first step を踏み出すことが

出来た。

1-2. 研究目的

イオンと原子・分子衝突に於ける電荷移行反応は、その反応断面積が大きく、反応生成物には高励起状態が含まれることがある等、非常に多彩な素過程である。それ故に、実験室プラズマの理解・モデリング、上層大気中の化学反応、惑星大気からの発光過程の理解等のためにも、その研究は継続的に行われてきている。最近はその機構解明のために、特に低エネルギー領域での微分断面積測定が注目されつつある⁽¹⁾。その理由の一つは、反応は空間に局在するポテンシャル曲線の交叉する近傍で起こり、衝突過程に形成される準分子状態間のポテンシャル交叉点近傍での非断熱遷移の研究を行うための典型例となっているからである。

これまでに報告された微分断面積測定の例としては

- (1) $C^{4+} + He \rightarrow C^{2+} + He^{2+}$ 系で量子論的な干渉効果が微分断面積に観測され、これらはシュテュッケルベルク型の振動構造と同定された⁽²⁾。また、
- (2) エネルギー分解能はまだ低いが $Ar^{4+} + Ar$ 系で 20 eV の衝突エネルギー領域での 1 電子・2 電子移行過程について、二重微分断面積測定が開始されていること⁽³⁾、
- (3) $Ar^{6+} + He$ 系での 2 電子移行過程の二重微分断面積測定 ($E_{cm} = 55 - 110$ eV)⁽⁴⁾

などがあげられよう。

二重微分断面積測定が注目されているのは、例えば、電子相関に基づく二電子同時移行過程であるのか、それとも連続した2回の一電子移行過程によるものなのかの議論が行われている二電子移行過程の反応機構の解明には、従来行われてきた反応の始状態・終状態の分析のみでは不十分で、反応経路を直接に反映する散乱角度測定（微分断面積測定）が必要であるからである。Andersson らは⁽⁴⁾ $Ar^{6+} + He$ 系での 2 電子移行過程の微分断面積測定において、前方方向と散乱角度の大きな所に構造があることを見だし、multi-channel Landau-Zenner 計算結果との比較より、前方方向の構造が二電子同時移行過程に対応し、また、散乱角度の大きな所の構造が連続した2回の一電子移行過程によるものであることを明らかにした。

本研究では多数の衝突系について、より低エネルギー領域での測定を目標とした。10 eV 領域の低エネルギー衝突を研究対象とする理由は、

- (1) この領域でのビーム実験がほとんど行われていない、
- (2) 散乱現象の相互作用ポテンシャルの形状依存性が衝突エネルギーの低下と共に顕著となり、その効果が明確に微分断面積に反映されること、
- (3) 量子論的な干渉効果の観測が期待されること、
- (4) 主な遷移機構はエネルギーの低下とともに純粋な動径結合になり、このモデルに基づいた理論結果との比較することにより実験結果の解析

が詳細に行なえる,

等である。また、実験技術的にも、このエネルギー領域での微分断面積測定は、低エネルギービームの強度に起因する技術的困難より、非常に挑戦的な試みともされている。

2. 実験装置

2-1. 交叉ビーム法実験装置

本研究で用いた交叉ビーム法実験装置を図1に示した。実験装置実験装置は、電子ビームイオン源・Wien-filter型質量選別器・2連半球型エネルギー選別器・超音速ノズルビーム・イオン検出器より構成されている。また、電子ビームイオン源(EBIS: *Electron Beam Ion Source*; Yoh's EBIS という意味で Y's EBIS と命名した)を図2に示した。このY's EBISにより、C, N, Oについては1~5価イオンが、またArについては1~8価イオンがこれまでの所得られている。運転は、イオンを連続的に引き出すモードで行っている。Y's EBISで生成された多価イオンは2 kVで引き出され、静電レンズを用いてWien-filter型質量選別器に入射する前に $250 * q$ eV (q : 価数)まで減速される。質量選別されたイオンはさらにエネルギー選別器に到達するまでに、その通過エネルギーまで減速されエネルギー選別される。エネルギー選別される前のイオンビームのエネルギー幅は、半値幅でおよそ $0.8 * q$ eVであった。

質量分析した直後のイオン強度は、 O^{2+} , O^{3+} については0.1 nA程度であったが、エネルギー選別・コリメートし、更に10 eV領域まで減速すると、実験に用いることのできるビーム強度は1 pA程度まで減少してしまう。しかしこの強度は、同種の実験に於いて多く使われている、加速を用いた反跳イオン源によって生成されるビームの強度と同程度かそれ以上であり、Y's EBISにより低エネルギー多価イオン衝突実験が小規模の施設でも可能となったことの実験的な意義は大きい。また、一般にEBISによって得られたイオンビームは、その内部状態がほとんど基底状態にあることが知られており、この点も反跳イオン源を用いた実験よりも優れていると言えよう。

2-2. 予備実験の目的

これまでに、低エネルギービーム発生方法・その操作方法といった実験手法の確立と、電荷移行反応のデータ解析方法の開発および機構解明のために、予備実験として

- (i) Ar^{2+} - He系で掃引型エネルギー分析器を用いた終状態決定⁽⁵⁾,
- (ii) He^+ - He系における弾性散乱微分断面積に現れる量子論的干渉効果の測定⁽⁶⁾,
- (iii) Ar^{2+} - Ne系での一電子移行過程の全微分断面積測定⁽⁶⁾

などを行ってきた。

二重微分断面積を求める時の重要なファクターは、

- (1) 用いられるイオンビームに含まれる準安定状態種の見積もり、
- (2) 検出器の見込む衝突体積の角度依存性、および、
- (3) 衝突エネルギーの精密決定である。

検出器の見込む衝突体積の角度依存性は、構造の良く知られている $\text{He}^+ - \text{He}$ 系における弾性散乱微分断面積を $E_{\text{lab}} = 10 \text{ eV}$ ($E_{\text{cm}} = 5.0 \text{ eV}$)で測定した。このときには、Nier 型の電子衝撃型イオン源が用いられた。衝突エネルギーの正確な決定のため、衝突領域後設置した検出器で一次イオンビーム強度をモニターしながら、それが完全に0となるまでイオン加速電圧を減少させ、その時の値とイオン源に印加した電圧との差を真の加速電圧とした。

測定結果（黒丸）と *ab initio* potential⁽⁷⁾ を用いたReinig とLinder⁽⁸⁾ による計算結果（曲線）を図3に示した。この図で、測定結果は重心系で 0.8° だけ正の方向に平行移動して表示してある。実験結果はMorse とBernstein⁽⁹⁾ の方法で重心系の微分断面積に変換し、断面積の絶対値は $\theta_{\text{cm}} = 30^\circ$ 近傍で理論値に規格化した。散乱角度については測定値を実験室系で 0.4° だけ全体を移動させることで、理論計算結果と非常によく一致することがわかる。このことより、上記の方法で衝突エネルギーは一次ビームのエネルギー幅 $\pm 0.1 \text{ eV}$ 程度の精度で決定できること、および、散乱角度の測定精度も $\pm 0.5^\circ$ 以下であることが判明した。また、検出器の見込む衝突体積も一定であり補正の必要のないことも分かった。

Y's EBIS を用いた今回の測定でも、イオンビームのエネルギー決定には同様の方法が採られた。しかし、十分なイオン強度を得るためエネルギー選別器を $36 * q \text{ eV}$ で通過させたため、そのエネルギー幅は $\pm 0.2 * q \text{ eV}$ 程度と見積もられ、同程度のエネルギーの誤差が含まれるものと考えられる。

2-3. 位置敏感型エネルギー分析器の設置

高品位のデータを得るために、用いるイオンビームのエネルギー選別・コリメーションを行わざるを得ず、これらは強いイオンビームを実現することと相反するものである。微弱な散乱信号を効率よく検出するために、マイクロチャンネルプレート（MCP）を用いた位置敏感型エネルギー分析器を新たに設計し、設置した。

設計方針は、

- (1) エネルギー分析器は将来2次元読み出しを可能として散乱角度とエネルギーの同時決定を行うために、エネルギー分散について1方向のみ収束性を持つ 90° 偏向の静電円筒型とする、
- (2) MCPの検出効率の高さは、迷走イオンに対しても機能するために、できる限り目的のイオン以外は検出器から遠ざける、
- (3) 価数やエネルギーの異なるイオン種に対しても等しい検出効率を持つものとする、

などである。

この方針に基づき、Manchester 大学の F. Read 等によって開発された C P O 3 D⁽⁴⁰⁾というイオン軌道シュミレーションプログラムを用いて、最適化を計った。特に、分析器に設置するレンズに関して、見込み角度を決定するコリメータ直後に一次ビームを静電的に追いつく工夫を行い、前方方向での一次ビームのエネルギー分析器への侵入を防ぐものとした。また、分析器全体は、入り口レンズの直径 1 mmの穴・直径10 mmの排気穴のみが開いた金属製の遮蔽箱に納めた。排気効率が低下することを考慮して、吟味した材料を用いて製作してある。分析器表面での散乱・迷イオンを出来る限り減少させる意味で、偏向電極は金属板を積層したものとした。

シュミレーションの例とそれに基づいた設計図を図4～6に示した。また、このシュミレーションにおける入力データの例を付録1に示した。

散乱イオンはMCPで検出・増倍され、エネルギー分散は溝川ら⁽⁴¹⁾によって開発された「荷重結合容量バックギャモン法 Modified Backgammon method with Weited Coupling capacitors technique」を用いた位置検出器で読み出される。このMCP, MBWCを最適化するためにもC P O 3 Dを用いた。この検出器は城丸らによって用いられたことがあり、その設置例も示されているが、そこで提案されている配置をシュミレートしたところ、MCP周辺から放出される電子軌道がかなり歪められるようであり、これを防ぐような電極配置・電圧配置を求めた。シュミレーション結果を図7に、それに基づいた設計図を図8に示した。

2-4. 計測システムの製作

将来は、散乱イオンのエネルギーと散乱角度が同時に決定できる2次元検出器とすることを目指しているが、その時の信号の校正を可能とするような基礎データを求めることも考慮して、本研究では位置敏感型分析器を1次元で機能させている。実際の測定では、エネルギー分散は、図9に示した計測回路でパルス波高に変換され、これを波高分析器で分析することからエネルギースペクトルが得られる。2重微分断面積は本研究の段階では分析器の設置角度を変化させて求める。

このような、散乱角度を変化させながらパルス波高分析を行うようなシステムは市販されておらず、以下の方法で自動測定システムを製作した。製作した測定系のブロックダイアグラムを図10に、全体回路図を図11に示した。

NIMモジュールのアナログ・デジタル変換器の出力は、CPUの介在なしに一度 First In First Out (FIFO) バッファに蓄積され、FIFO バッファがあふれないうちにこれをマイクロコンピュータボードの平行ポートから随時読み出し、適当な処理をしたのちに、ホストコンピュータに転送する。ホストコンピュータの役割は、測定開始の信号を送り、一定の測定時間後に波高分布データを受け取り、表示・蓄積することである。一つの散乱角度での測定が終了すると、ホストコンピュータは図には示していないが、他のポートよりステッピングモーターに信号を送り、次の

測定の準備も行う。

用いたマイクロコンピュータは、68000系の CPU を搭載したもので、本来ならば FIFO バッファをメモリー空間上に配置して、まさに一つのメモリー素子として活用できるのであるが、用いたボードコンピュータの限られた拡張性ゆえに今回のような配置となっている。制御ソフトはほとんどをアッセンブラーで記述しているために、たかだか 2 k Byte の容量のバッファの存在だけで、35,000 cps まで追従することを確かめた。今回用いた素子と全く同様のピン配置の素子で 64 k Byte の容量のものまで入手が可能である。必要に応じて大容量の FIFO バッファを選択することにより、さらに高速な信号取り込みも可能であろうし、また、並列に素子を配列することにより、多数の A/D 変換器からのデータ収集も簡単に実現することができよう。マイクロコンピュータ・ホストコンピュータを制御するプログラム例を付録 2, 3 に示した。

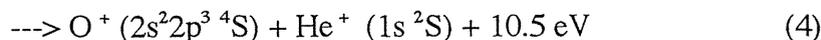
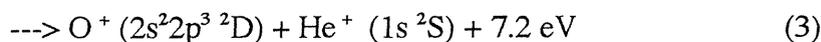
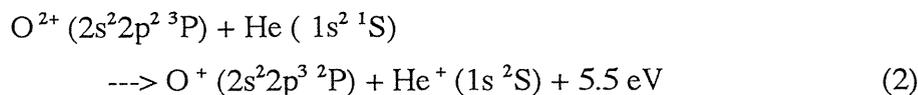
本研究でこれらのシステムを開発している間にも計算機の性能は CPU 性能、バス構造共に大きく進歩して行った。今後、同様な測定系には、A/D 変換器とホストコンピュータの間に入っているマイクロコンピュータは不要になると思われる。

3. 測定結果

3-1. 対象とした $O^{2+} + He$ 系での一電子移行過程について



で表される電荷移行反応は、実用的な意味では、地球の電離層や火星・金星の大気中での O^{2+} の崩壊過程、準安定状態の O^+ や、 He^+ の供給源として注目されている。この反応を電子状態を区別すると、以下のチャンネルが考えられる。



Dalgarno らは⁽¹²⁾ 300K における反応係数を *ab initio* 計算によって分子間ポテンシャルを用いて理論的に求め、(図 12)、反応(2)が主に寄与していることを示した。また、衝突エネルギーの増加と共に反応(3)の寄与が大きくなることが示された。Heil と Sharma⁽¹³⁾ は、同様の手法を用いて、これらの反応について重心系エネルギー 1 - 100 eV の領域での二重微分断面積を計算している。

これらの計算においては、動径結合が主であるとして、

入射チャンネルで形成される $^3\Sigma^-$, $^3\Pi$,

反応 (2) で形成される $^3\Sigma^+$, $^3\Pi$,

反応 (3) で形成される $^3\Sigma^+$, $^3\Pi$, $^3\Delta$,

反応 (4) で形成される $^3\Sigma^-$

の対称性を持つ分子軌道のうち、 $^3\Pi$ の対称性を持つ分子軌道間のみで遷移が起こるものとしている。すなわち、遷移則分子軸方向の角運動量・反転対称性・スピンをそれぞれ保存するという動径結合での遷移則を満足するものとなっている。これに基づいて求められた微分断面積を図13に示した。Heil と Sharma によれば、これらの $^3\Pi$ 状態が強く結合しており、通常の状態近似は適用できないために、単純な解釈は与えられないとされており、通常使われる意味でのシュテュッケルベルク型の振動構造とは異なるものである。しかし、一つの終状態を導く多数の反応経路が存在するときの干渉効果であることには違いはない。

実験的には数 keV での測定は多くあるが、実験室系でのエネルギーが100 eV 程度で行われた微分断面積測定の結果は Kamberら⁽¹⁴⁾によってのみ報告されている。Kamberらは反跳イオン源と位置敏感型検出器を組み合わせ、前方方向での生成イオンのエネルギー分析とエネルギー分析を行わないでの全散乱イオンの角度分布測定を行った。その結果、測定したエネルギー範囲内では、反応 (2) が主であることがわかり、理論結果を支持した。しかし、彼らの測定したエネルギー領域で直接に比較できる理論結果はなく、その振る舞いはまだ実験的には明らかにされていない。

本研究では、Y's EBIS により得られたOの2価イオンビームを用いて、Heil と Sharma によって計算された結果 (図13) と直接に比較することのできる測定を行った。

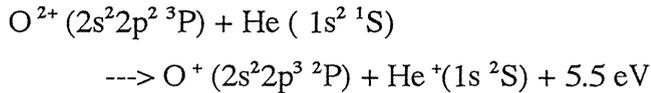
3-2. 測定結果および考察

実験は2-2. 予備実験の項で述べた方法を用いた。衝突エネルギーの決定方法も同様であるが、電子衝撃型イオン源とY's EBIS の実験的なパラメータに大きな相違点があった。電子衝撃型イオン源を使用した場合には、イオン源への印加電圧と実際の衝突エネルギーとの間に大きな差がなかったのにくらべ、Y's EBIS の場合には補正值がおよそ6-8Vと大きく、これ以上の正の電圧を印加しないと衝突領域へビームを輸送できなかった。また、この値が価数依存性を持っていることもわかった。これは、磁場により強く収束された電子ビームの作る負の空間電位内でイオンが生成されるためであり、また、価数依存性を持つことから、価数の異なるイオンの生成される場所が別であることが想像される。

本研究で、新たに製作された位置敏感型エネルギー分析器のエネルギー校正は以下のように行った。まず、衝突エネルギーを上記の方法で決定し、その一次ビームを若干角度を振ったところに設置した検出器で測定し、位置スペクトルのエネルギー原点を決定した。その後、エネルギー分析器の電位を変化させ、位置スペクトル上でのピークの移動を観察し、イオンエネルギーとピーク位置の関係を求め、結果を図14に示した。この結果より、直線性が非常に良い・位置スペクトルをそのままエ

エネルギースペクトルと換算して良いこと、が判明した。

今回の $O^{2+}(2s^2 2p^2 \ ^3P) + He(1s^2 \ ^1S)$ での一電子移行過程の測定で得られた散乱イオン O^+ のエネルギー分布の角度依存性のデータを図15に示した。一つのスペクトルの蓄積時間はそれぞれ5分である。 0° 近傍のピーク位置は、 1° 以降のピーク位置・形状と大きく異なっており、またこれに対応すると思われる反応経路は同定できない。 1° 以降のピーク位置は、反応(2)



に正確に一致してる。また、反応(3)はKamber等の報告と同様に観測されていない。同定の困難な 0° 近傍に見られる O^+ 信号は一次ビームの角度分布とも一致していることから、衝突領域で生成されたものではないと考えられている。今後、散乱槽内に一樣な圧力の試料気体を導入して、雑音であることを検証する予定である。図15に見られるピーク強度を積分したものの散乱角度依存性を図16に示した。上に述べたように、 0° 近傍の信号は雑音である可能性が高く、これを無視するとHeilとSharmaによって求められた理論結果とよく一致する角度分布となっていることが初めて示された。

4. 今後の計画

本研究において、実現が困難視されている、ビーム法を用いた低エネルギー多価イオン衝突実験を小規模な実験室で開始することができた。また、位置敏感型の検出器を用いて、 $O^{2+} + He$ 系での一電子移行過程を報告されている理論値と直接に比較することのできる測定を、開始することができた。今後、C, N, Oなどのいろいろな価数のイオンを用いて更に低エネルギー領域まで測定を拡張する予定である。

<謝 辞>

本実験装置の建設の一時期には、妻・千峰、長男・雄、次男・量が実質的に手助けをしてくれた。精神的な支えと共に、この手助け無しでは完成させることが更に遅れたことであろう。記して感謝する。

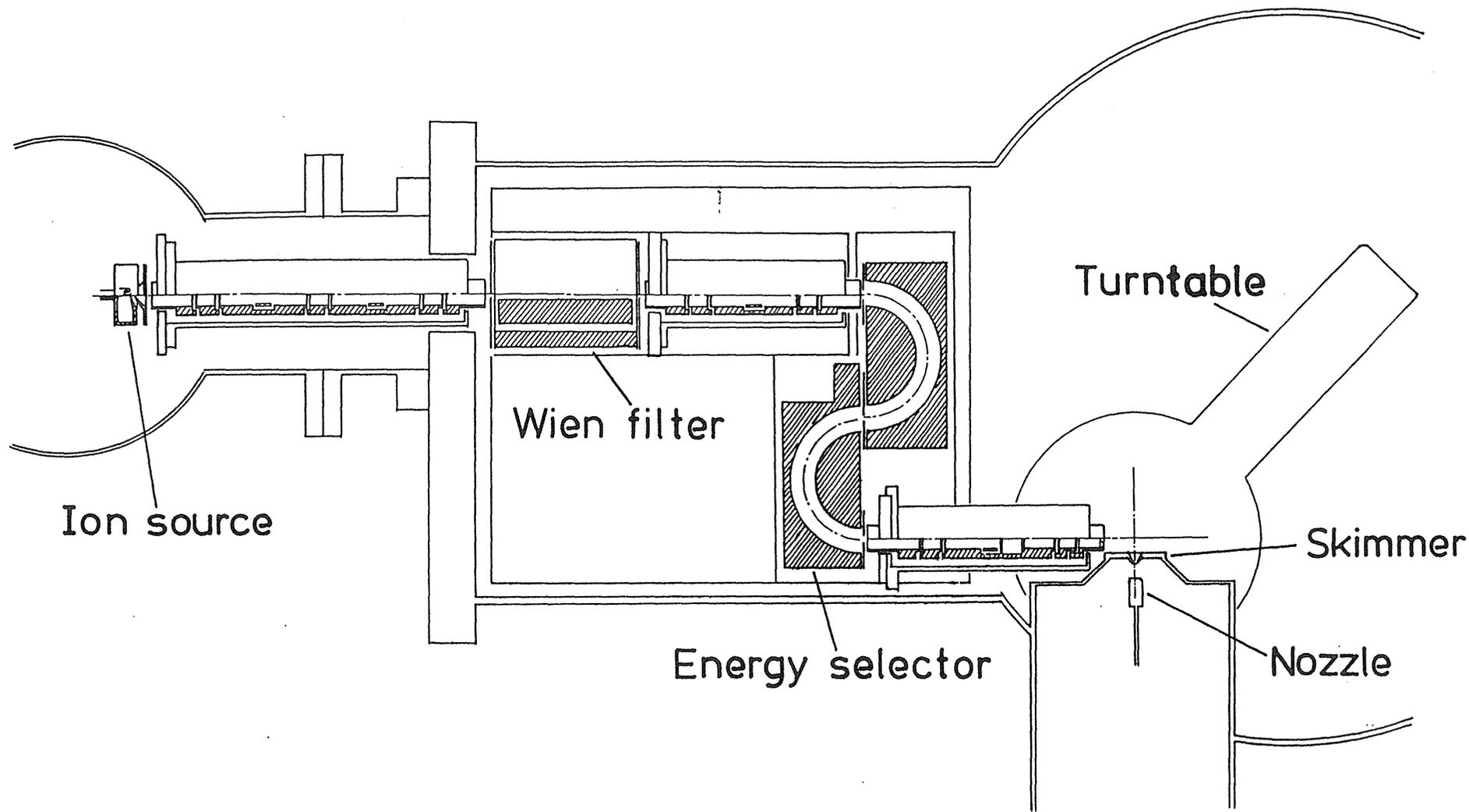
5. 参考文献

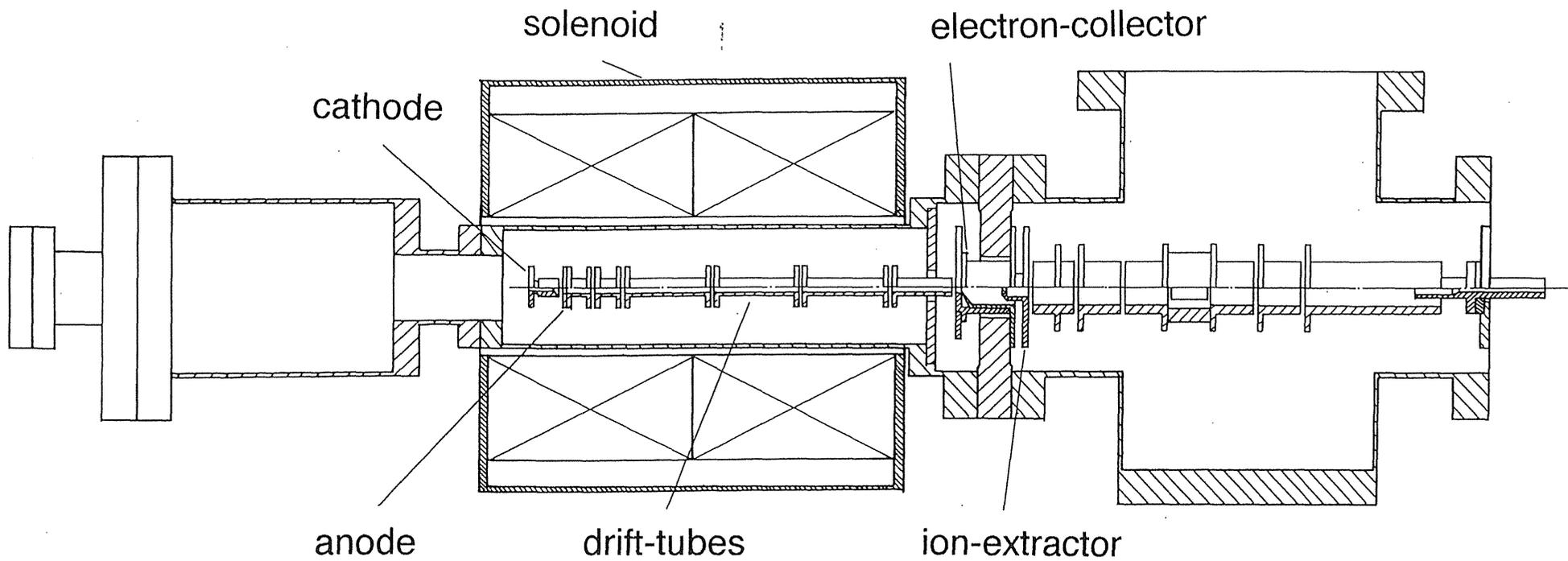
- (1) M. Barat and P. Roncin: J. Phys. B25 (1992) 2205.
- (2) A. Bárány, H. Danared, H. Cederquist, P. Hvelplund, H. Knudsen, J. O. K. Pedersen, C. L. Cocke, L. N. Tunnell, W. Waggoner and J. P. Giese: J. Phys. B 19 (1986) L427.

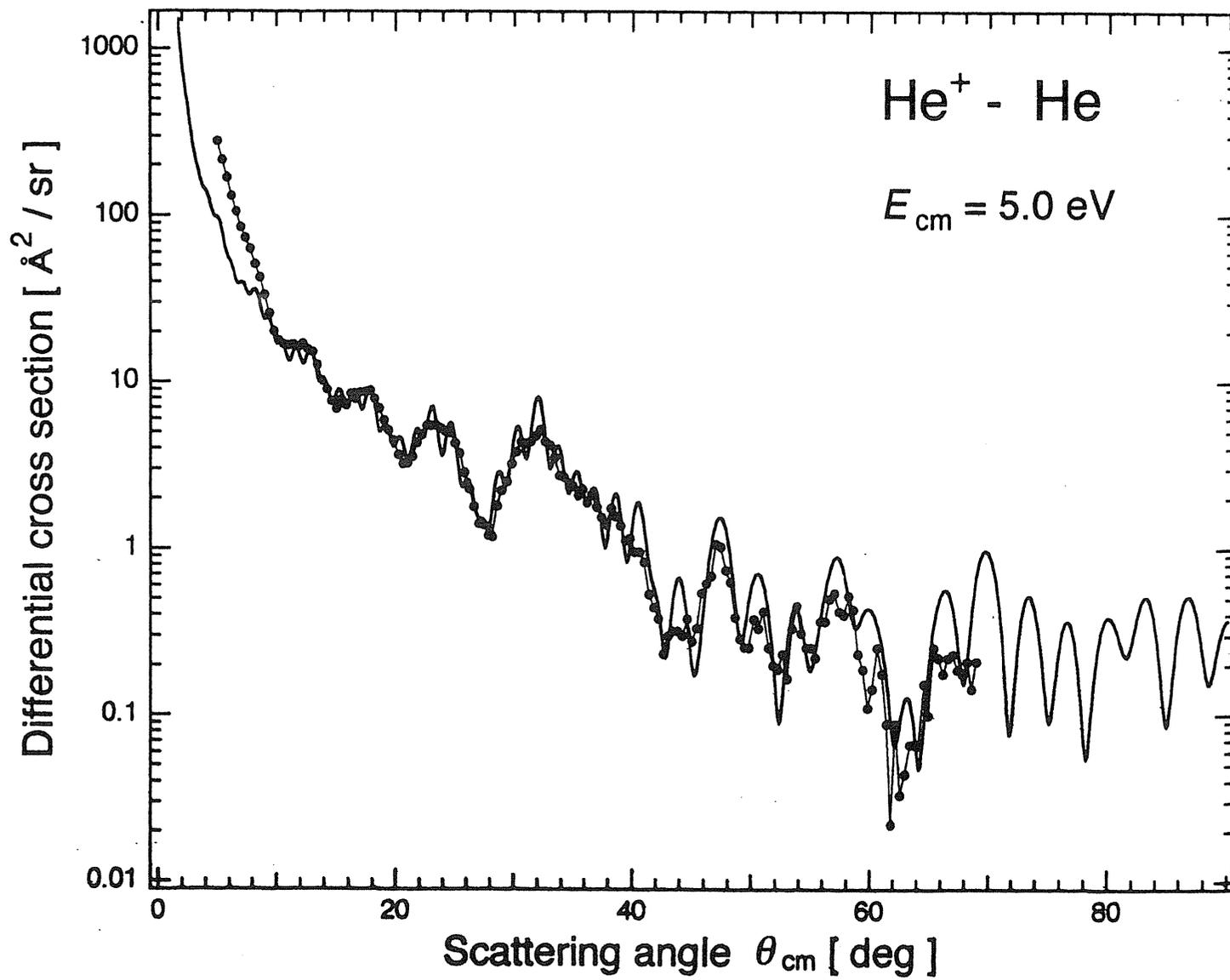
- (3) C. Biedermann, H. Cederquist, L. R. Andersson, J. C. Levin, R. T. Short, S. B. Elston, J. P. Gibbons, H. Andersson, L. Liljeby, I. A. Sellin: Phys. Rev. A 41 (1990) 5889.
- (4) L. R. Andersson, H. Cederquist, A. Bárány, L. Liljeby, C. Biedermann, J. C. Levin, N. Keller, S. B. Elston, J. P. Gibbons and I. A. Sellin: Phys. Rev. A 45 (1992) R4.
- (5) Y. Itoh: J. Phys. Soc. Jpn. 58 (1989) 1871.
- (6) Y. Itoh: J. Phys. Soc. Jpn. 63 (1994) 941.
- (7) A. Khan and K. D. Jordan: Chem. Phys. Lett. 128 (1986) 368.
- (8) P. Reinig and F. Linder: private communication. P. Reinig: Diploma Thesis, University of Kaiserslautern, 1983.
- (9) F. A. Morse and R. B. Bernstein: J. Chem. Phys. 37 (1962) 2019.
- (10) <http://cpo.ph.man.ac.uk/>
- (11) T. Mizogawa, M. Sato, M. Yoshino, Y. Itoh and Y. Awaya: Nucl. Instr. and Meth. A **387** (1997) 395-400.
- (12) A. Dalgarno, S. E. Butler and T. G. Heil: J. Geophys. Res. 85 (1980) 6047.
- (13) T. G. Heil and J. B. Sharma: Phys. Rev. A 36 (1987) 3669.
- (14) E. Y. Kamber, C. L. Cocke, J. P. Giese, J. O. K. Pedersen and W. Waggoner: Phys. Rev. A 36 (1987) 5575.

図の説明

- 図1 : 用いた交叉ビーム法原子衝突実験装置
- 図2 : 電子ビームイオン源 (EBIS: *Electron Beam Ion Source*; Y's EBIS)
- 図3 : He⁺ - He 系における弾性散乱微分断面積 $E_{\text{lab}} = 10 \text{ eV}$ ($E_{\text{cm}} = 5.0 \text{ eV}$)
- 図4 : CPO3Dによるシュミレーション結果 (鳥瞰図)
- 図5 : CPO3Dによるシュミレーション結果 (平面図)
- 図6 : 位置敏感型エネルギー分析器の工作図面
- 図7 : 位置検出器の読み出し系のシュミレーション結果
- 図8 : 位置検出器の読み出し系の工作図面
- 図9 : イオンの位置検出の為の回路構成図
- 図10 : 測定回路構成図
- 図11 : FIFOバッファを用いたインターフェース回路図
- 図12 : Dalgarno らが *ab initio* 計算によって求めた分子間ポテンシャル
- 図13 : Heil と Sharma が求めた二重微分断面積
- 図14 : 位置敏感型エネルギー分析器のエネルギー校正
- 図15 : O²⁺ + He で生成された O⁺ のエネルギー分布の角度依存性
- 図16 : O²⁺ (2s²2p² ³P) + He (1s² ¹S) ---> O⁺ (2s²2p³ ²P) + He⁺ (1s ²S) + 5.5 eV の散乱過程についての二重微分断面積.







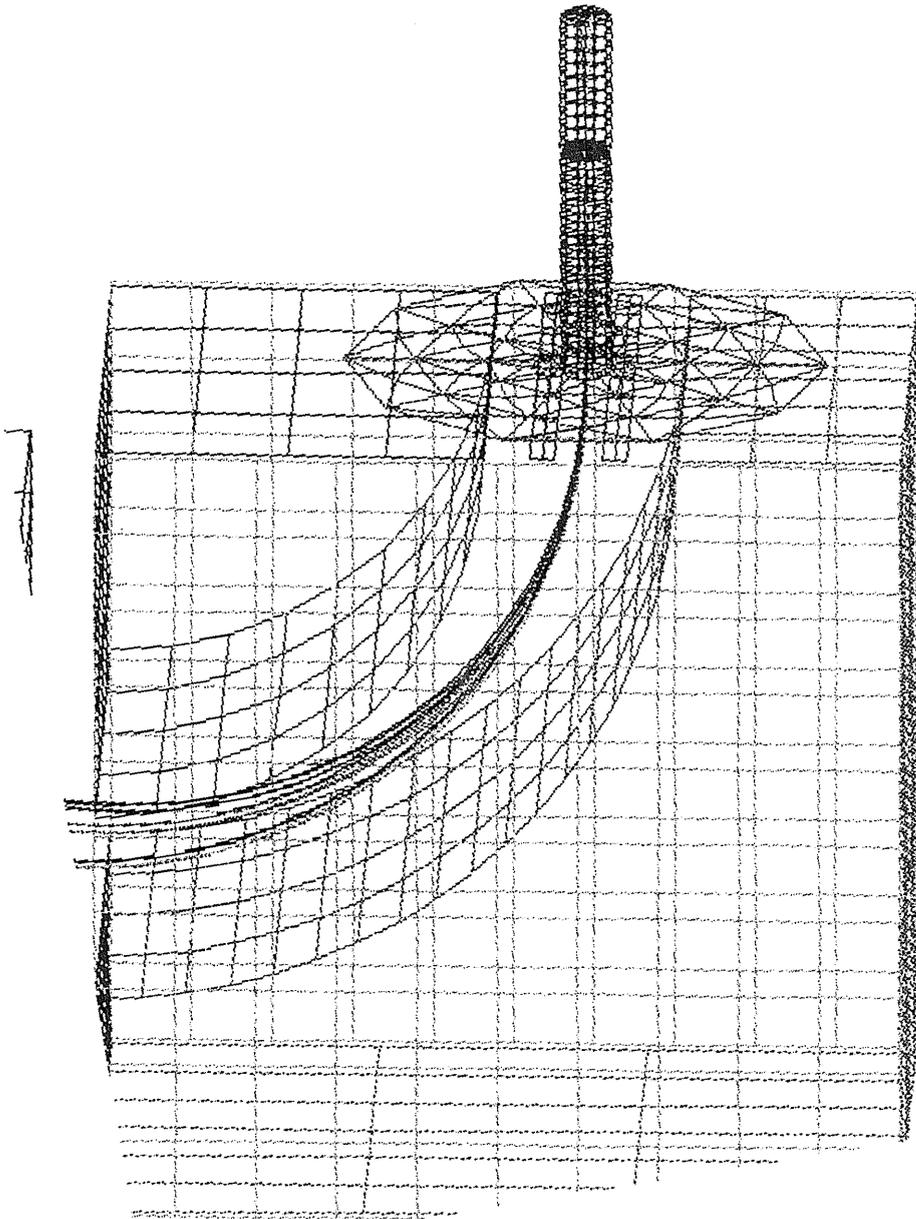


图 4

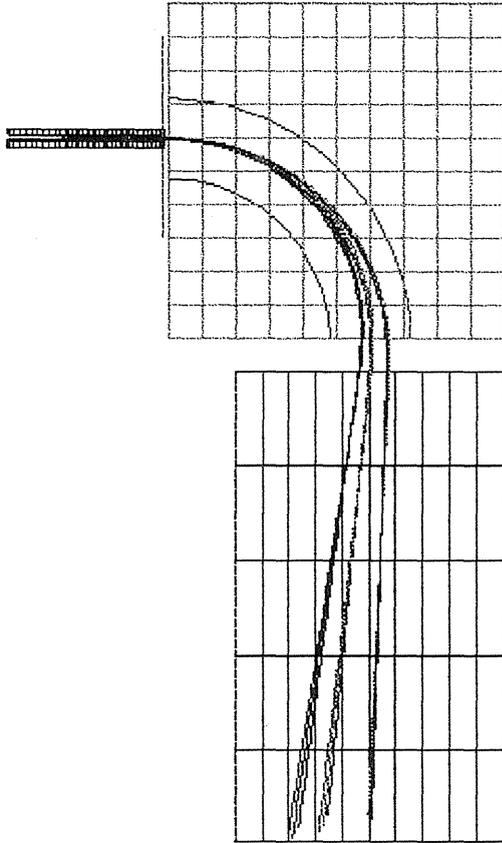
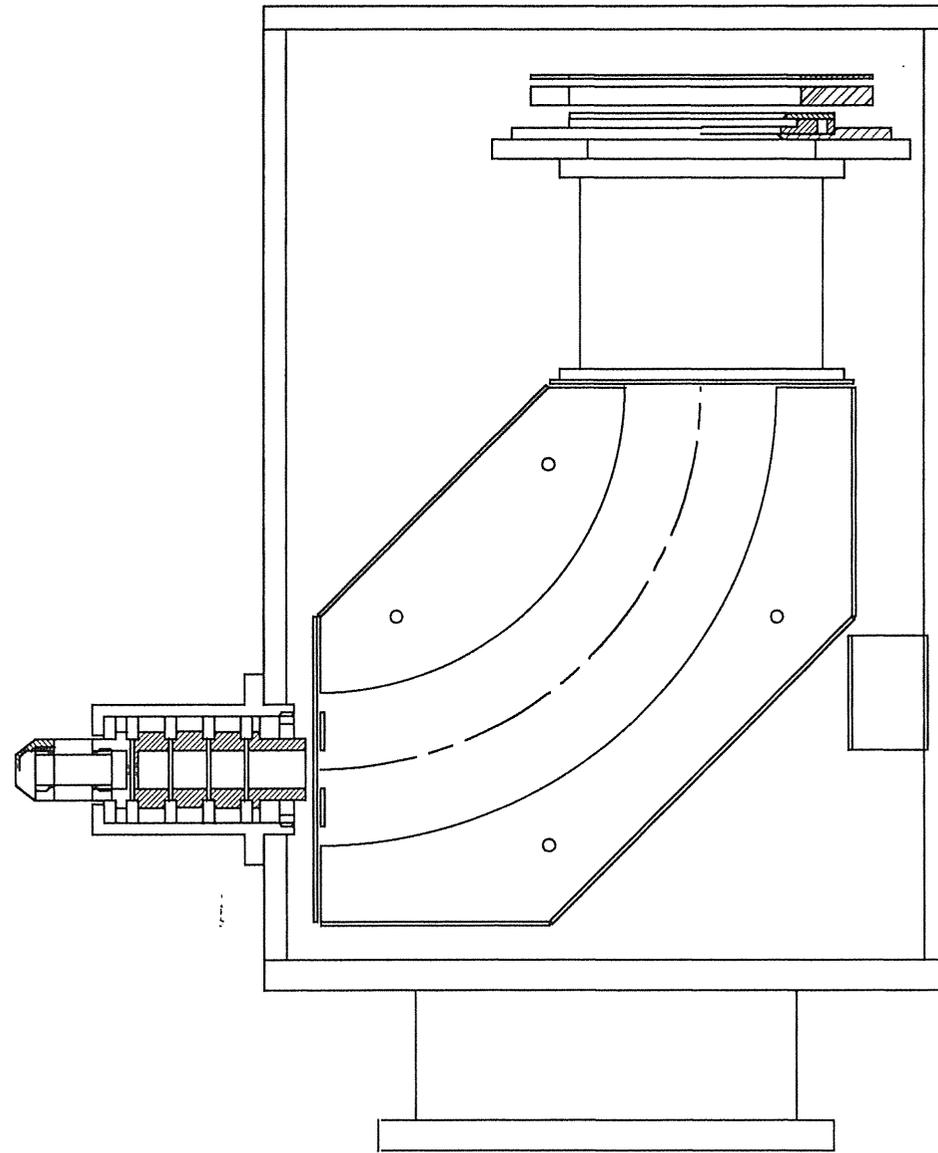
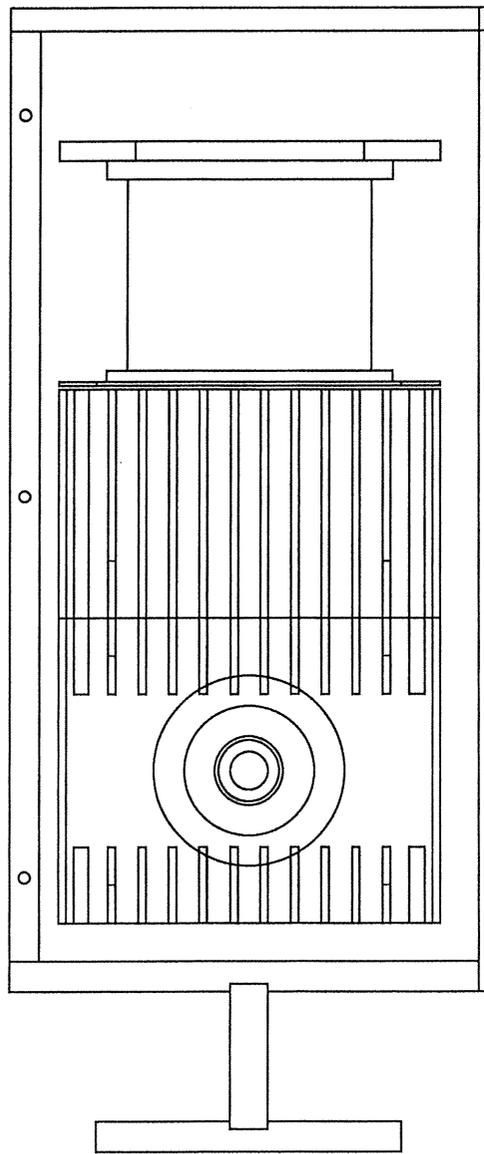
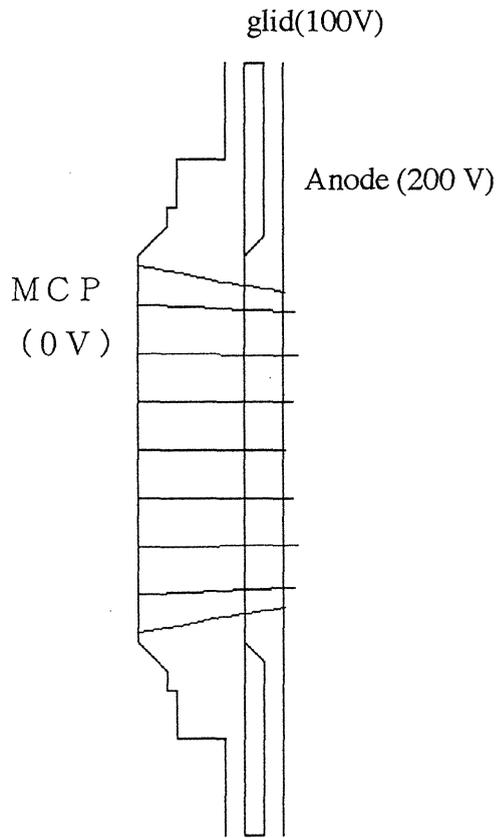


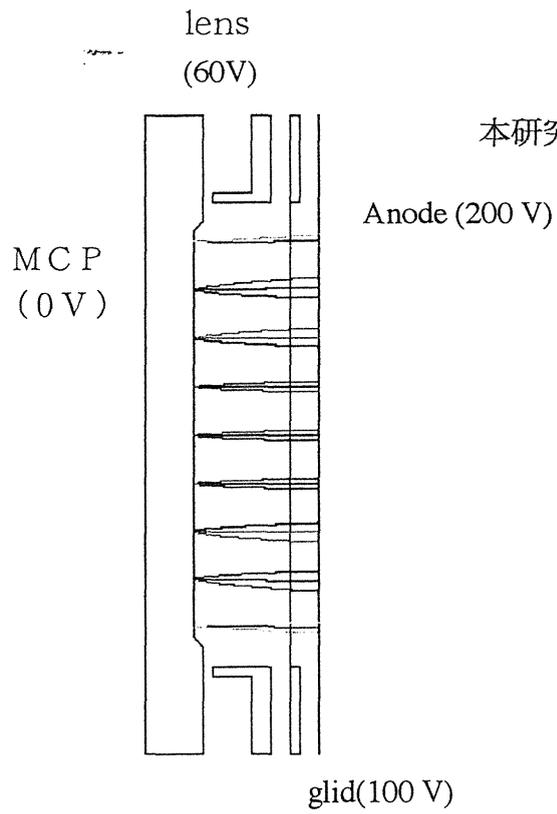
图 5



城丸らの方式



本研究での方式



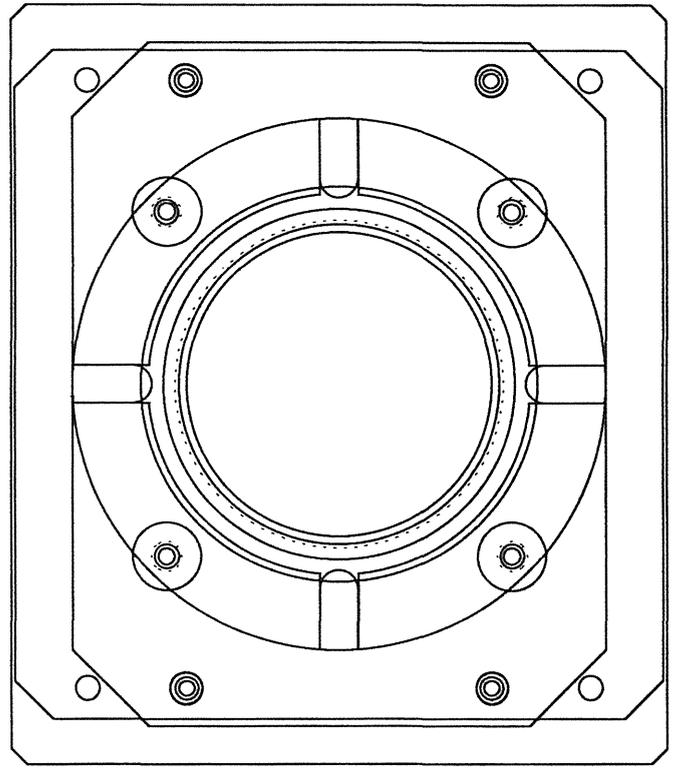
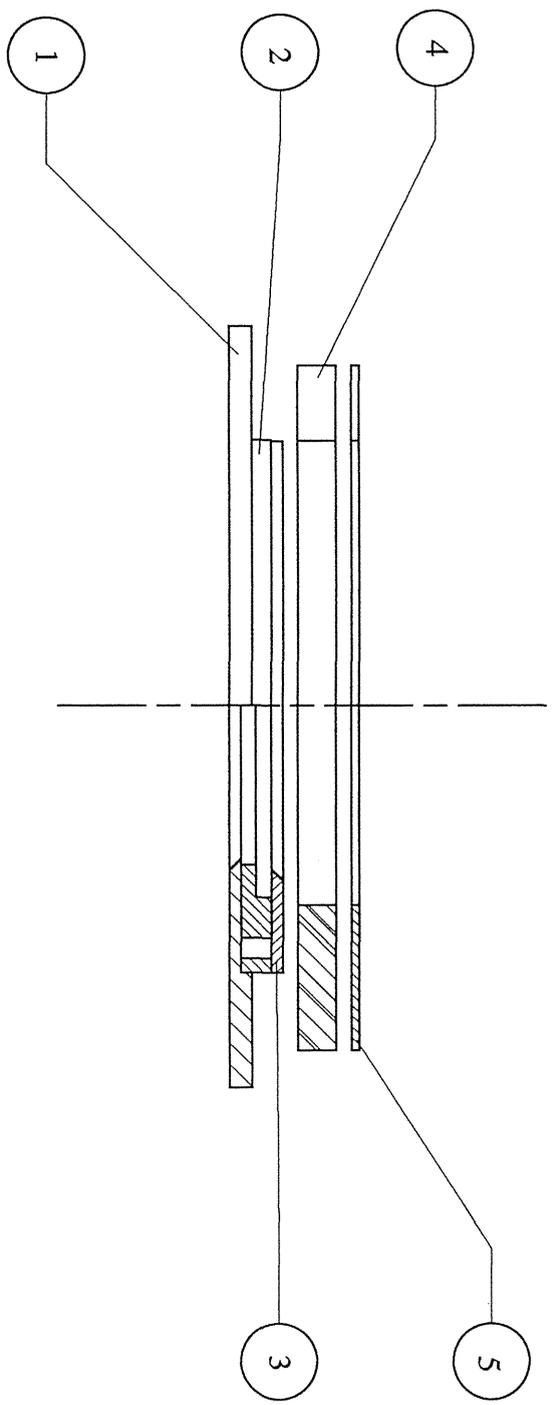
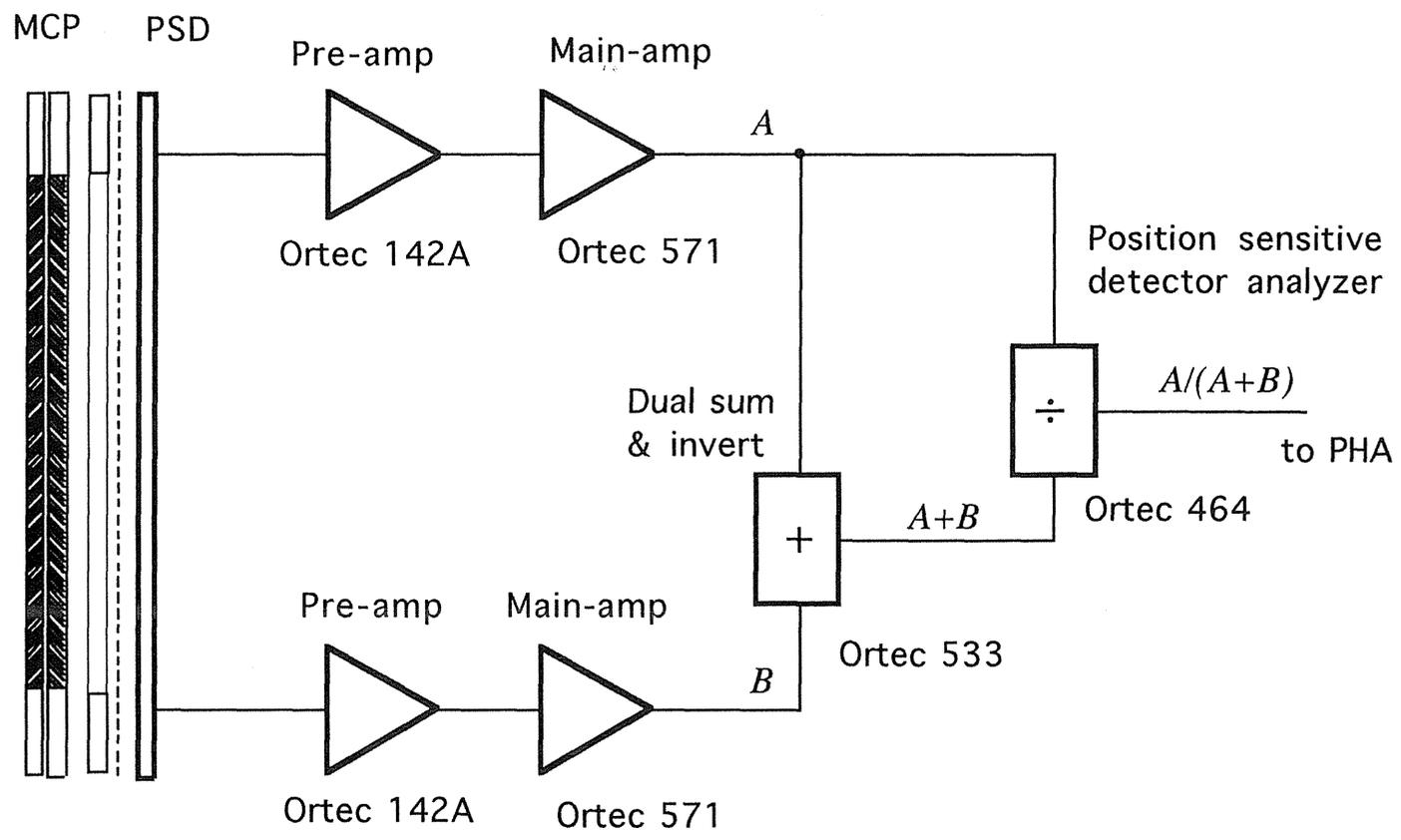
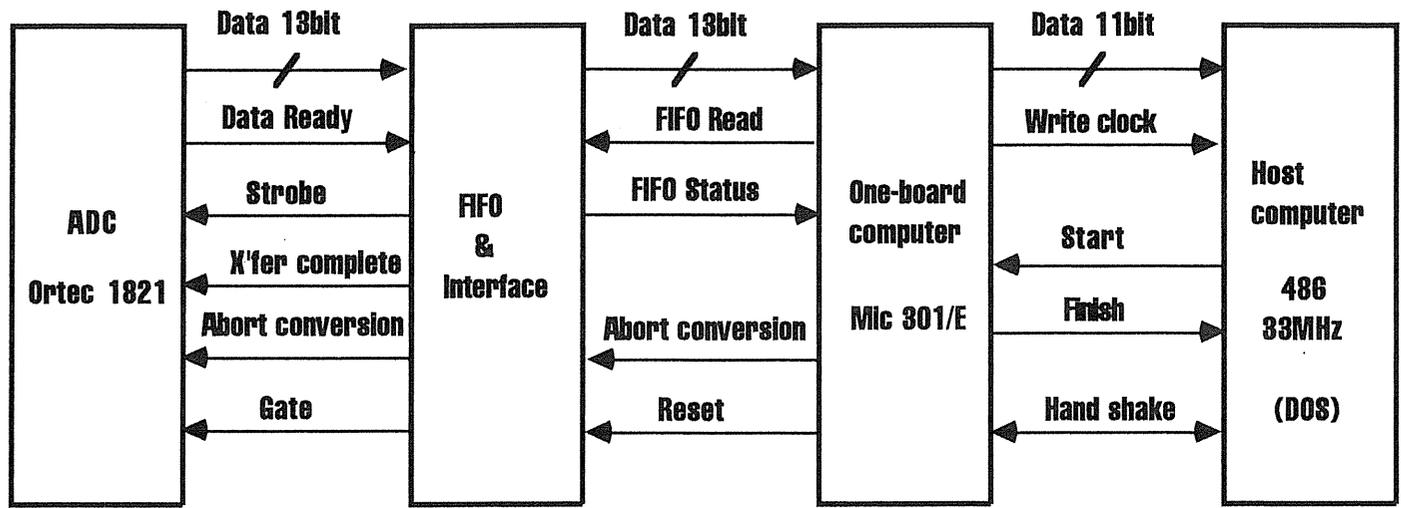
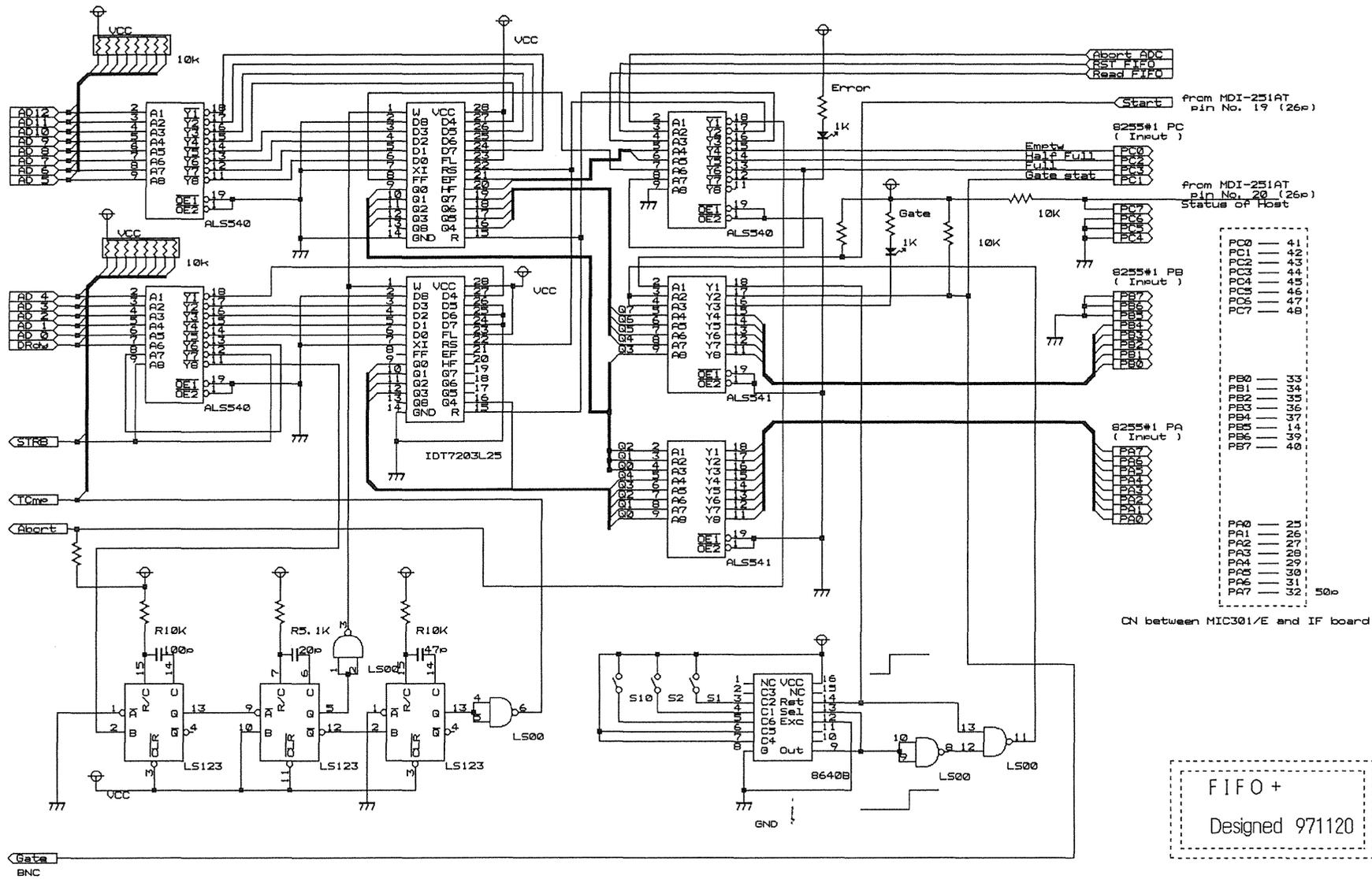
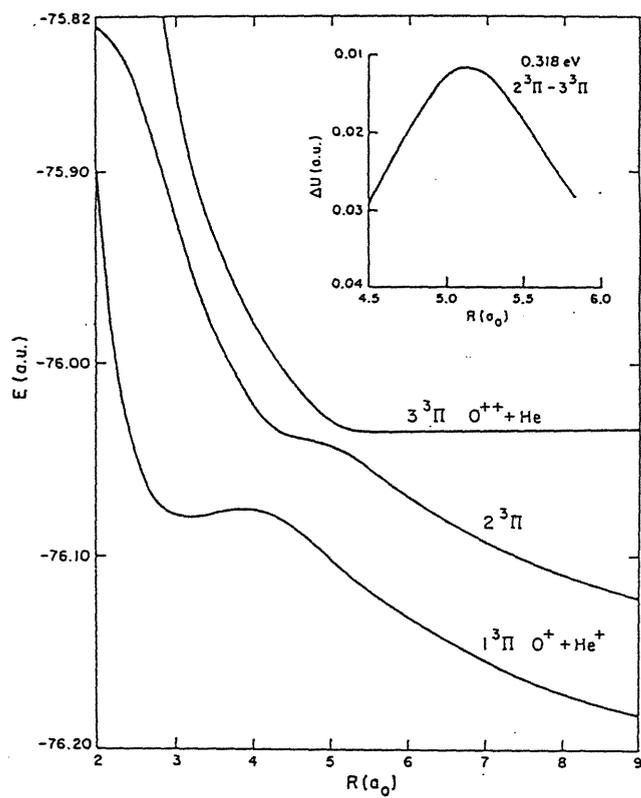


图 8









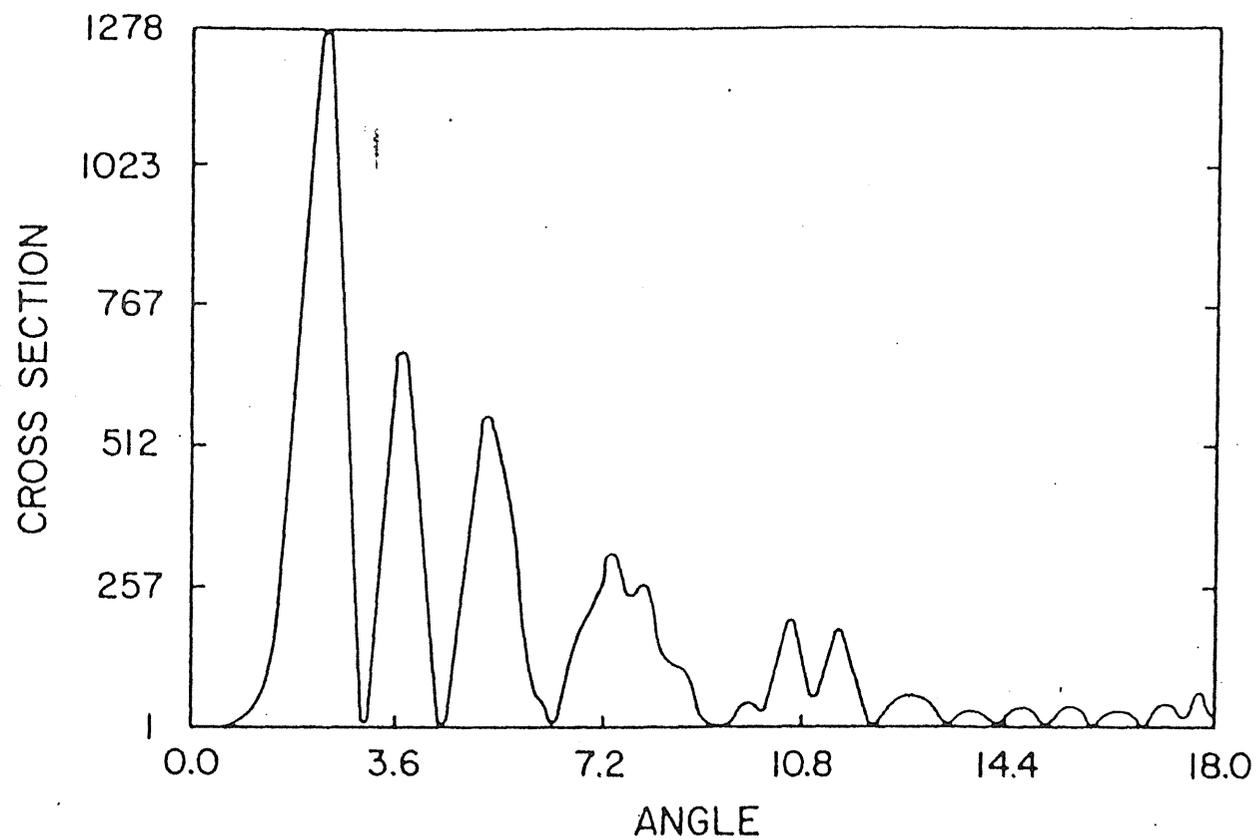
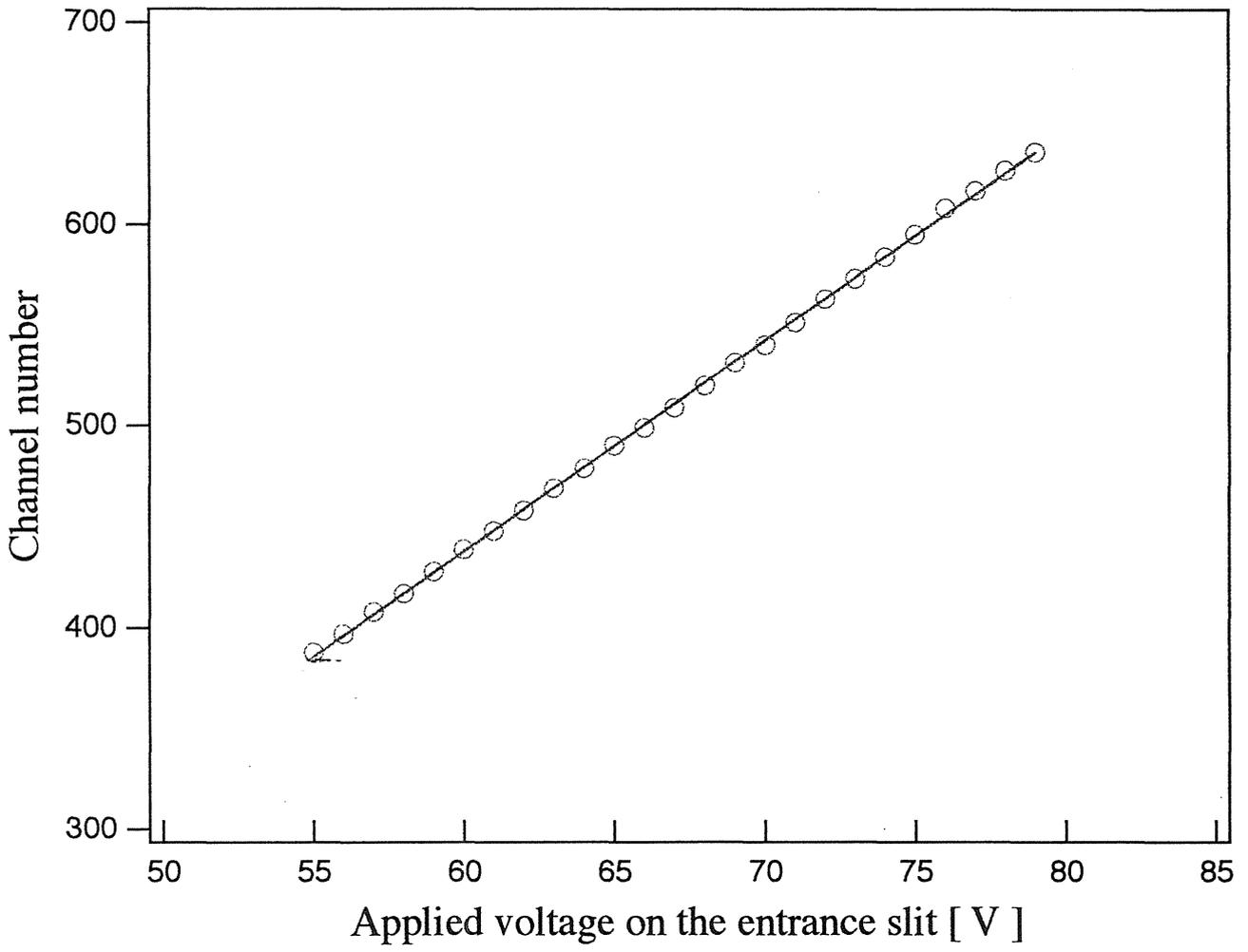
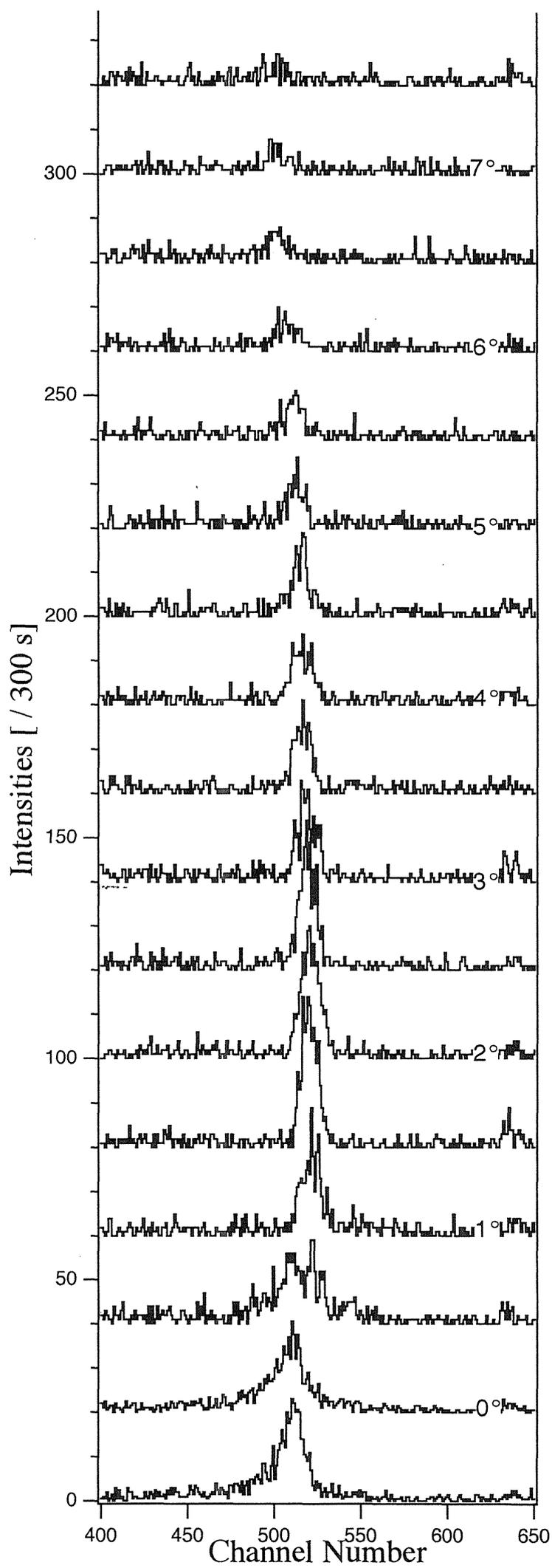
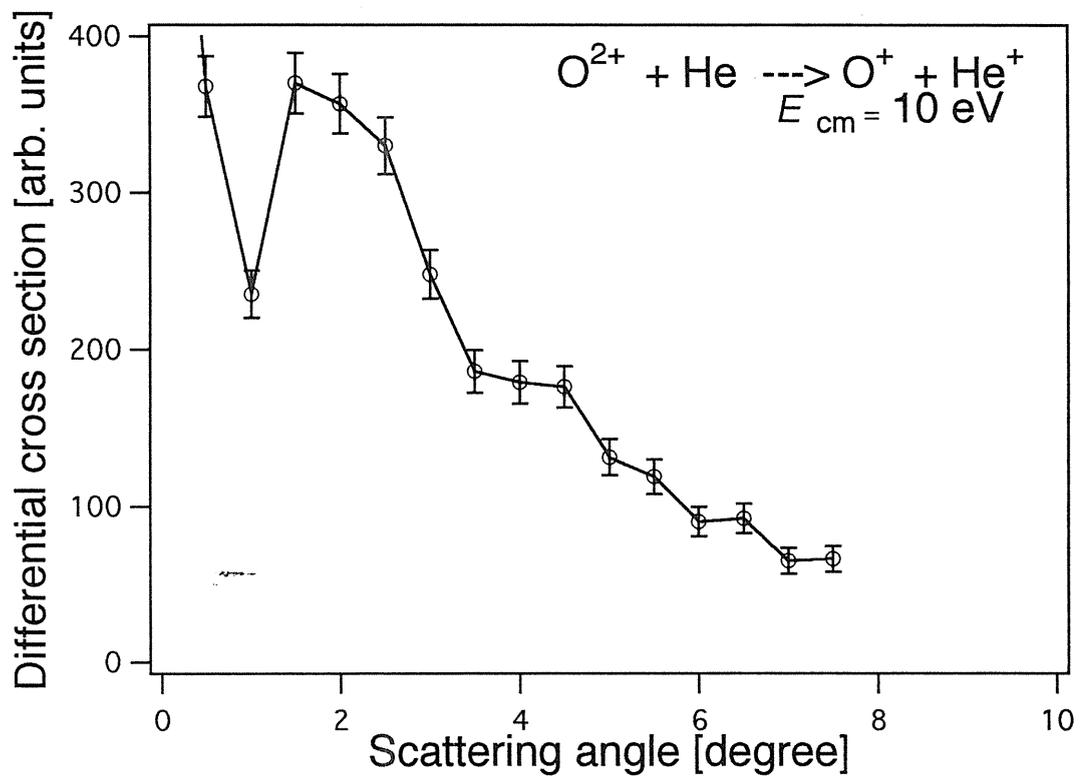


FIG. 2. Differential cross section ($10^{-16} \text{ cm}^2 \text{ sr}^{-1}$) for the production of $\text{O}^+(^2P^\circ) + \text{He}^+$ vs laboratory scattering angle (degrees) at a barycentric collision energy of 10 eV.







付録の説明

付録1：CPO3Dにより、位置敏感型エネルギー分析器をシュミレートする時の入力データの一例。

付録2：FIFOバッファを用いたコンピュータボードの制御プログラム例。ほとんどは68000系のアセンブラー（インライン）で記述されている。

付録3：自動測定プログラムの例。DOSをOSとして、QuickBasicで記述した。

付録4：THE XXI INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PHYSICS OF ELECTRONIC AND ATOMIC COLLISIONS (XXI ICPEAC) Sendai, Japan July 22 -- 27, 1999.への投稿論文。

付録 1.

```

accel. lenses & deflection: cylinder 90deg. 16 September 1998
l&a.dat name of output file, for processed data
l&a1.dat name of 2nd output file, for ray data
m n/p/m/a for nearlyzero/partial/most/all printing level
0 1 0 0 voltage reflection symmetries in x,y,z,x=y planes
10 number of different voltages, time dependence
0.01 5 allowed consistency error, side/length ratio check
a apply inscribing correction (a/s/n=always/sometimes/never)
rec -simple flat rectangle )
-0.15 1.5 0.6 corner 1
-0.3 1.5 0.6 corner 2
-0.3 0 0.6 corner 3
-0.15 0 0.6 corner 4
9 9 numbers of 2 applied voltages (can be same)
2 4 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle )
0.15 1.5 0.6 corner 1
0.3 1.5 0.6 corner 2
0.3 0 0.6 corner 3
0.15 0 0.6 corner 4
10 10 numbers of 2 applied voltages (can be same)
2 4 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
cre -rectangle on cylinder on a cylindrical surface
-0.6 1.5 0.6 corner 1
-3 1.5 3 corner 2
-3 0 3 corner 3
-0.6 0 0.6 corner 4
2.4 radius
-3 1.5 0.6 first point on axis
-3 0 0.6 second point on axis
6 6 numbers of 2 applied voltages (can be same)
2 10 total nr of subdivs and 0, or subdivs along and around axis
rec -simple flat rectangle on a cylindrical surface
-3 1.5 0.6 corner 1
-3 1.5 3 corner 2
-3 0 3 corner 3
-3 0 0.6 corner 4
6 6 numbers of 2 applied voltages (can be same)
4 2 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
-0.6 1.5 0.6 corner 1
-3 1.5 0.6 corner 2
-3 0 0.6 corner 3
-0.6 0 0.6 corner 4
6 6 numbers of 2 applied voltages (can be same)
4 2 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
cre -rectangle on cylinder on a cylindrical surface
0.6 1.5 0.6 corner 1
-3 1.5 4.2 corner 2
-3 0 4.2 corner 3
0.6 0 0.6 corner 4
3.6 radius
-3 1.5 0.6 first point on axis
-3 0 0.6 second point on axis
5 5 numbers of 2 applied voltages (can be same)
2 20 total nr of subdivs and 0, or subdivs along and around axis
rec -simple flat rectangle gle
2 1.5 0.6 corner 1
0.6 1.5 0.6 corner 2
0.6 0 0.6 corner 3
2 0 0.6 corner 4

```

```

5 5 numbers of 2 applied voltages (can be same)
3 3 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
2 1.5 0.6 corner 1
2 1.5 5.6 corner 2
2 0 5.6 corner 3
2 0 0.6 corner 4
5 5 numbers of 2 applied voltages (can be same)
3 3 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
-3 1.5 4.2 corner 1
-3 1.5 5.6 corner 2
-3 0 5.6 corner 3
-3 0 4.2 corner 4
5 5 numbers of 2 applied voltages (can be same)
3 3 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
-3 1.5 5.6 corner 1
-3 0 5.6 corner 2
2 0 5.6
corner 3
2 1.5 5.6 corner 4
5 5 numbers of 2 applied voltages (can be same)
3 3 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
2 1.6 0.6 corner 1
2 1.6 5.6 corner 2
-3 1.6 5.6 corner 3
-3 1.6 0.6 corner 4
7 7 numbers of 2 applied voltages (can be same)
10 10 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
-3.5 1.6 1.6 corner 1
-3.5 1.6 5.6 corner 2
-10.5 1.6 5.6 corner 3
-10.5 1.6 1.6 corner 4
8 8 numbers of 2 applied voltages (can be same)
10 5 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
-3.5 1.6 1.6 corner 1
-10.5 1.6 1.6 corner 2
-10.5 0 1.6 corner 3
-3.5 0 1.6 corner 4
8 8 numbers of 2 applied voltages (can be same)
5 1 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
-3.5 1.6 5.6 corner 1
-10.5 1.6 5.6 corner 2
-10.5 0 5.6 corner 3
-3.5 0 5.6 corner 4
8 8 numbers of 2 applied voltages (can be same)
5 1 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
-10.5 1.6 1.6 corner 1
-10.5 1.6 5.6 corner 2
-10.5 0 5.6 corner 3
-10.5 0 1.6 corner 4
8 8 numbers of 2 applied voltages (can be same)
5 1 total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec -simple flat rectangle gle
-3.5 1.6 1.6 corner 1
-3.5 1.6 3 corner 2
-3.5 0 3 corner 3
-3.5 0 1.6 corner 4

```

```

8 8          numbers of 2 applied voltages (can be same)
3 1          total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
rec         -simple flat rectangle   gle
-3.5 1.6 4.2   corner 1
-3.5 1.6 5.6   corner 2
-3.5 0 5.6     corner 3
-3.5 0 4.2     corner 4
8 8          numbers of 2 applied voltages (can be same)
3 1          total nr of subdivs and 0, or subdivs along sides 1-2 and 2-3
cylindrical electrode   gle
0.15 0 0 -1.78   radius, centre of 1st end
0 0 -0.915       centre of 2nd end
1 1          numbers of 2 applied voltages (can be same)
10 5          total nr of subdivs and 0, or subdivs along and around axis
edi         evenly-divided disc   le
0.15 0 0 -1.8   radius, centre of disc
0 0 0         any other point on axis
1 1          numbers of 2 applied voltages (can be same)
5           number of subdivisions
disc,       even radial division   gle
0.15 0 0 -0.9075 1st radius, centre of disc
0.015 0 0 0     2nd radius, any other point on axis
1 1          numbers of 2 applied voltages (can be same)
5 4          total nr of subdivs and 0, or subdivs along radius and around axis
disc        , even radial division   gle
0.15 0 0 -0.885 1st radius, centre of disc
0.02 0 0 0     2nd radius, any other point on axis
2 2          numbers of 2 applied voltages (can be same)
5 4          total nr of subdivs and 0, or subdivs along radius and around axis
cylindrical electrode   gle
0.15 0 0 -0.88   radius, centre of 1st end
0 0 -0.615       centre of 2nd end
2 2          numbers of 2 applied voltages (can be same)
5 5          total nr of subdivs and 0, or subdivs along and around axis
cylindrical electrode   gle
0.15 0 0 -0.585   radius, centre of 1st end
0 0 -0.315       centre of 2nd end
3 3          numbers of 2 applied voltages (can be same)
5 5          total nr of subdivs and 0, or subdivs along and around axis
cylindrical electrode   gle
0.15 0 0 -0.285   radius, centre of 1st end
0 0 -0.015       centre of 2nd end
4 4          numbers of 2 applied voltages (can be same)
5 5          total nr of subdivs and 0, or subdivs along and around axis
cylindrical electrode   gle
0.15 0 0 0.015   radius, centre of 1st end
0 0 0.56         centre of 2nd end
8 8          numbers of 2 applied voltages (can be same)
8 5          total nr of subdivs and 0, or subdivs along and around axis
disc,       even radial division   le
1.5 0 0 0.5     1st radius, centre of disc
0.2 0 0 0       2nd radius, any other point on axis
8 8          numbers of 2 applied voltages (can be same)
3 5          total nr of subdivs and 0, or subdivs along radius and around axis
end of electrode information
0 1 0.5        final number of segments, number of steps, weight
1e-05         fractional inaccuracy of charge evaluation
end of segment information
0            '1:lens1 applied voltages
7            '2:lens2 applied voltages
-80         '3:lens3
5           '4:lens4
-17.971     '5:outer cylinder +0.4VD VD=0.8109E/e
-60.543     '6:inner cylinder -0.6VD

```

```

-35          '7:top plate
-35          '8:lens5 & middle of the sector
-40.377      '9:inner guard-plate -0.1263VD
-30.134      '10:outer guard-plate + 0.1143VD
n            no more magnetic fields from menu
n n n        no more potentials and fields along a line
start of ray information
d            direct (d), or mesh (m) method and mesh spacing
p            'n/p/m/a' for 'nearlyzero/partial/most/all' printing level, rho/radius
-13 5        minimum and maximum x(mm) of screen 2D fields of view
-9 9         minimum and maximum y
-8 10        minimum and maximum z
-10 2        minimum and maximum x(mm) of rays
-3 3         minimum and maximum y
-10 6        minimum and maximum z
-1e+10 1e+10 minimum and maximum vx(m/s) of rays
-1e+10 1e+10 minimum and maximum vy
-1e+10 1e+10 minimum and maximum vz
0 10         minimum and maximum rho (=sqrt(x**2+y**2))
+ y          direction of time, stop ray if electrode crossed (+/-, y/n)
1e+10        final time (ms)
0.01 0.5 5   initial and max step length(mm) and interpolation points
0.001        fractional inaccuracy of ray tracing
0            nr of test planes, multiple crossing, iterate to focus, phase space
va           'el' for electron; or 'co' or 'va' for other particles
k            kinetic energy (k); or total energy (t) and potential

set of single rays:
0 0 -1 0.03 0 1 12 0 1 12      x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 -0.03 0 1 12 0 1 12     x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0 0.03 1 12 0 1 12      x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0 -0.03 1 12 0 1 12     x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0.03 0 1 15 0 1 12      x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 -0.03 0 1 15 0 1 12     x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0 0.03 1 15 0 1 12      x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0 -0.03 1 15 0 1 12     x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0.03 0 1 20 0 1 12      x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 -0.03 0 1 20 0 1 12     x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0 0.03 1 20 0 1 12      x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0 -0.03 1 20 0 1 12     x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0.03 0 1 10 0 2 12      x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 -0.03 0 1 10 0 2 12     x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0 0.03 1 10 0 2 12      x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q
0 0 -1 0 -0.03 1 10 0 2 12     x,y,z,vx,vy,vz,eV,I,m,q

last of this set of rays
n            calculate space-charges?
0 0 0 0      symmetries of rays in yz,zx,xy and x=y planes

```

cylindrical-lens is simply divided to the segment.

Ions are injected in x-z plane.

The outer analyzer-plate is divided so as to let the primary-beam pass through.

付録 2.

```

1' 7 MARCH 1998:
2' ADC - FIFO+ for MIC301/E
3'      Version 1.0
5'***** Initialize the System *****
10 NO = $D000          : ' beginning of Data area
20 N1 = 1024          : ' No. of channel
30 P0 = $220007       : ' Control address for PPI#0
40 P1 = $240007       : ' Control address for PPI#1
50 D0 = 0              : ' Data from ADC

60 / MOVE.B #_10000000,$220007      : ' SET PPI#0 ALL OUT
70 / MOVE.B #_10011011,$240007      : ' SET PPI#1 ALL IN
78 '*****
80 / MOVE.B #_00000111,$220007      : 'Not RDY, PC(3)=1 LED OFF

90 / JSR L1020                      : 'Erase Data_area

100 / BTST.B #1,$240005              : ' Check Gate 0=Open 1=Close
110 / BNE L130                       : ' Not Equal means bit1 = 1
120 / BRA L100                       : ' Wait until Gate close
130 / BTST.B #1,$240005              : ' Check again
140 / BEQ L100                       : ' Why here ?

200 / MOVE.B #_00000011,$220007      : ' PC(1)=1 Abort ADC-data
205 / NOP
210 / MOVE.B #_00000010,$220007      : ' PC(1)=0 reset
220 / MOVE.B #_00000101,$220007      : ' PC(2)=1 FIFO Clear
230 / MOVE.B #_00000100,$220007      : ' PC(2)=0
240 / BTST.B #0,$240005              : ' CHECK FIFO FLAG 0=NOT EMPTY, 1=EMPTY
250 / BEQ L220                       : ' must be 1, otherwise retry
260 / BTST.B #0,$240005              : ' CHECK FIFO AGAIN
270 / BEQ L220                       : ' must be 1, otherwise retry

300 / MOVE.B #_00010000,$220005      : ' PC(4)=1 Send RDY, PC(3)=0 LED ON
310 / BTST.B #1,$240005              : ' Check Gate
320 / BNE L310                       : ' Wait Until the gate open
330 / BTST.B #1,$240005              : ' Check Gate Again
340 / BNE L310                       : ' IF Open then Start measurement
350 / MOVE.B #_00001000,$220005      : ' PC(4)=0 Send BUSY, PC(3)=1 LED OFF

390'***** Start Measurement *****
400 / BTST.B #1,$240005              : ' Gate Check
410 / BNE L500                       : ' Gate seems to be closed
420 / BTST.B #0,$240005              : ' FIFO Check
430 / BEQ L600                       : ' FIFO seems to be not empty
440 / JMP L400                       : ' Back to Status Check

500 / BTST.B #1,$240005              : ' Gate Check Again
510 / BNE L710                       : ' Dwell time is OVER !
520 / JMP L400                       : ' Why come here ? By Error ??

600 / BTST.B #0,$240005              : ' FIFO Check Again
610 / BNE L400                       : ' Why come here ? By Error ??
620 / JSR L1100                      : ' Data is in FIFO
630 / JMP L400                       : ' Back to Status Check

690 '***** Dwell Time is Over *****
710 / MOVE.L #$4,D1                   : ' Dummy for timer; about 15 usec
720 / SUBQ #1,D1
730 / BEQ L750
740 / JMP L720

```

```

750 / BTST.B #0,$240005      :' FIFO Check, EMPTY=1
760 / BNE L800              :' FIFO seems to be empty
770 / JSR L1100             :' Read data from FIFO
780 / JMP L750

790 '***** Send data to Host ***** TESTED OK *****
800 / MOVEA.L @N0,A1
810 / MOVE.L @N1,D1
820 / MOVE.B (A1)+,$220003   :'Set Higher Byte of Data at Port B
830 / MOVE.B (A1)+,$220001   :'Set Lower Byte of Data at Port A
840 / MOVE.B #_00001111,$220007   :'Set Clk-bit for Host-FIFO
850 / MOVE.B #_00001110,$220007   :'Reset Clk-bit
860 / SUBQ #1,D1             :'Decrement Counter for the No. of Data-transfer
870 / BEQ L890              :'If ZERO Then transfer Completed
880 / JMP L820              :'X'fer Next Data
890 / MOVE.B #_00001011,$220007   :'PC(5)=1 Set Data_RDY

899'***** Hand Shake With Host *****
900 / BTST #$7,$240005      :'Get the Status of Host
910 / BEQ L900              :'Host is processing data: 0=Working,
l=Finished

912'***** For Next Step *****
920 / MOVE.B #_00001000,$220005   :' PC(4)=0 Send BUSY, PC(3)=1 LED OFF
930 / JMP L90

1000 '***** Clear Data_Area *****
1020 / MOVEA.L @N0,A1         :'Set the Beginning of Data-Area
1030 / MOVE.L @N1,D1         :'Set the No. of Data to Erase
1040 / MOVE.W #0,(A1)+       :'Clear Data and Increment Address
1050 / SUBQ #1,D1           :'Decrement Counter for the No. of Data-transfer
1060 / BEQ L1080            :'If ZERO then Clear finished
1070 / BRA L1040            :'Clear Next Region
1080 / RTS

1099 '***** Read FIFO routine *****
1100 / MOVE.B #_00000110,$220007:'LED ON
1104 / MOVE.B #_00000001,$220007:'FIFO Reas-Flag=1
1105 / MOVE.B $240001,@D0+3   :'Read low-byte of FIFO
1110 / MOVE.B $240003,@D0+2   :'Read High-byte of FIFO
1115 / MOVE.B #_00000000,$220007:'FIFO Read-Flag=0
1120 / ANDI.B #_00000011,@D0+2   :'Noise reduction for higher bits
1130 / ASL.W @D0+2           :'* 2 to have Two-byte data area
1140 / MOVEA.L @N0,A1         :'Set (A1) as $D000
1150 / ADDA.W @D0+2,A1        :'Calculate Address to increment
1160 / ADDQ.W #1,(A1)         :'Add 1
1170 / MOVE.B #_00000111,$220007:'LED OFF
1180 / RTS                   :'Return

```

付録 3.

```
' Status of the FIFO+ is read from the port &H1A9; fl% = INP(&H1A9).
'fl% = 255: FIFO+ is not ready or busy.
'fl% = 254: is ready to start measurements.
' fl% = 253: has transferred data to 251 ( time over )
'fl% = 252: Emergency ! Not designed to send this value.
' Host computer will send a start-signal to FIFO+ : OUT &H1A9, 1.
'     after checking that fl% = 254, then wait until fl% changes from 255 to 253.
' Host computer acknowledges to FIFO+ by sending the signal: OUT &H1A9,2.
' After receiving this signal, FIFO+ prepares for the next measurement.
' During the preparation, status is set as 255, then changed to 254; '14 March 1999
```

Initialize:

```
DIM DSIG(1023), RDBUF(1023)
SCREEN (12)
WINDOW (-100, -69)-(1178, 410)
ON KEY(1) GOSUB shrink
ON KEY(4) GOSUB enlarge
ON KEY(10) GOSUB MeasStop
FALSE = 0
True = NOT FALSE
PortNo = &H303
CLS
PRINT " The detector position must be set at the starting position."
COLOR 7
OUT PortNo, 255: 'Set port &H303 all high
GOSUB Ini251:    'Initialize host computer interface
GOSUB InimCS:   'Measurement Condition Set
GOSUB MkFiles:  'Make files for data-save
MsStop = FALSE: 'FALSE means, let measurements continue
DF = 1 / 8:    'full scale is 127
KEY(1) ON
KEY(4) ON
KEY(10) ON
```

Start:

```
NPMC = 0:      ' the Number of Points for Measurement: initial value
NTRC = 1:      ' the Number of Time for Repeating: initial value
GOSUB DispCondition
DO UNTIL NPMC = NPM
    GOSUB RdStoredData: 'Set stored data to DSIG
    NTRC = 1
    DO UNTIL NTRC = NTR + 1
        GOSUB StartM.Wt: 'Start Meas. and Wait Timeover
        GOSUB ReadData: 'Read Data from FIFO memory of 251, to RDBUF
        GOSUB AddData:  'DSIG <-- DSIG + RDBUF
        GOSUB DispData: 'Display data
        NTRC = NTRC + 1
    LOOP
    GOSUB SaveData: 'Data save on HD
    IF NPMC = NPM - 1 THEN
        EXIT DO
    END IF
    GOSUB AdvanceAngle: 'Step angle by (0.1 * SAM) degree
    NPMC = NPMC + 1
LOOP
GOSUB BkIniPos: 'Set detector at initial position
GOTO EndChk
END
```

InimCS:

```
OUT &H303, 255: 'Set PI/O all high
INPUT "Starting Position of Measurement in 0.1 deg unit  ", SPM
INPUT "Step Angle for Measurement in 0.1 deg unit ", SAM
```

```

INPUT "Number of Points for Measurement ", NPM
INPUT "Dwell Time for One-Measurement in S ", DTOM
INPUT "Number of Time for Repeating ", NTR
INPUT "Set the Number of Angular Scan. IF Not, set -1 ", PNAS
PRINT
PRINT "Starting position of Measurement ", SPM / 10
PRINT "Final position of Measurement ", (SPM + SAM * (NPM - 1)) / 10
PRINT "Dwell Time for One-Measurement "; DTOM
PRINT "Number of Time for Repeating "; NTR
PRINT "Preset Number of Angular Scan "; PNAS
INPUT "Check conditions (Y / N) "; fl$
IF fl$ = "Y" OR fl$ = "y" THEN
    CLS
    RETURN
ELSE
    CLS
    GOTO InimCS
END IF

```

Ini251:

```

res% = INP(&H1A7): 'RESET 251
OUT &H1A8, 2: 'select FIFO mode
OUT &H1A4, &H90: 'Outer clock, leading-edge
OUT &H1A7, 3
OUT &H1A6, &H36
OUT &H1A7, 0
OUT &H1A6, 1
OUT &H1A6, 0
OUT &H1A7, 3
OUT &H1A6, &H76
OUT &H1A7, 1
OUT &H1A6, 1
OUT &H1A6, 0
OUT &H1A2, &H80: '251AT Gate open
RETURN

```

MkFiles:

```

INPUT "Input the name of files ", FLNAME$
FOR I = 0 TO NPM - 1
    OPEN "C:\MYDATA\ " + FLNAME$ + LTRIM$(STR$(I)) FOR OUTPUT AS #1
        FOR J = 0 TO 1023
            DSIG(J) = 0
            WRITE #1, DSIG(J)
        NEXT J
    CLOSE #1
NEXT I
RETURN

```

DispCondition:

```

IF MsStop = True THEN
    mes$ = " STOP "
ELSE
    mes$ = "Continue"
END IF
LOCATE 1, 70
PRINT mes$
LOCATE 3, 65
PRINT " Angle : ";
PRINT USING "###.#"; (SPM + SAM * NPMC) / 10
LOCATE 4, 65
PRINT "No. of scan ";
PRINT USING "###"; NTRC
RETURN

```

StartM.Wt:

```

OUT &H1A9, 0: 'initialize communication with FIFO+
OUT &H1AA, 1: ' CLEAR FIFO-BUFFER OF 251

```

```

DO UNTIL fl% = 254:      'Wait until the FIFO+ RDY
    fl% = INP(&H1A9)
LOOP
fl% = INP(&H1A9):      'Check to open Gate
    IF fl% <> 254 THEN PRINT " Error before Gate open !": END
'PRINT "FIFO+ is Ready to Start."
OUT &H1A9, 1:      'GATE OPEN
DO UNTIL fl% = 253:      ' Wait until one measurement finished
    fl% = INP(&H1A9)
LOOP
RETURN

ReadData:      'Read Data from FIFO memory of 251
    sts% = INP(&H1AA)
    sts% = sts% AND 1
    IF sts% = 0 THEN PRINT "Flag Error": END
        FOR I% = 0 TO 1023
            sts% = INP(&H1AA)
            sts% = sts% AND 1
            IF sts% <> 1 THEN PRINT "Error, No.of data transferred": END
            dl = INP(&H1A0)
            dh = INP(&H1A1)
            RDBUF(I%) = 256 * dh + dl
        NEXT I%
    sts% = INP(&H1AA):      'Check whether the No. of data is 1024
    sts% = sts% AND 1:      '1 means more than 1024 data was in the FIFO
    IF sts% = 1 THEN PRINT "READ Error": END:      'otherwise it's OK !
    OUT &H1A9, 2:      'Tell FIFO+ that Transfer finished
    DO UNTIL fl% = 255:      'Wait until FIFO+ acknowledges
        fl% = INP(&H1A9)
    LOOP
RETURN

AddData:
    FOR I = 0 TO 1023
        DSIG(I) = DSIG(I) + RDBUF(I)
    NEXT I
RETURN

DispData:
CLS
KEY(1) OFF
KEY(4) OFF
FOR I = 0 TO 1023
    pys = DSIG(I) / DF
        IF pys > 400 THEN pys = 400
    PSET (I, pys), 14: 'yellow
NEXT I
GOSUB DispCondition
KEY(1) ON
KEY(4) ON
RETURN

FwdAngle:
    OUT PortNo, 254: 'Step angle forward direction (CW) by 0.1 degree
    OUT PortNo, 255
    FOR DUMMY = 0 TO 10000
    NEXT DUMMY
RETURN

BwdAngle:
    OUT PortNo, 253: 'Step angle backward direction (CCW) by 0.1 degree
    OUT PortNo, 255
    FOR DUMMY = 0 TO 10000
    NEXT DUMMY
RETURN

shrink:
    DF = DF * 2

```

```

RETURN
enlarge:
DF = DF / 2
RETURN
RdStoredData:
OPEN "C:\MYDATA\% " + FLNAME$ + LTRIM$(STR$(NPMC)) FOR INPUT AS #1
FOR I = 0 TO 1023
    INPUT #1, DSIG(I)
NEXT I
CLOSE #1
RETURN
SaveData:
OPEN "C:\MYDATA\% " + FLNAME$ + LTRIM$(STR$(NPMC)) FOR OUTPUT AS #1
FOR I = 0 TO 1023
    WRITE #1, DSIG(I)
NEXT I
CLOSE #1
RETURN
AdvanceAngle:
FOR I = 1 TO SAM
    GOSUB FwdAngle
NEXT I
RETURN
BkIniPos:
FOR I = 1 TO SAM * (NPM - 1) + 20
    GOSUB BwdAngle
NEXT I
FOR I = 1 TO 20
    GOSUB FwdAngle
NEXT I
RETURN
EndChk:
MeasCount = MeasCount + 1
IF PNAS = -1 THEN
    IF MsStop = True THEN
        GOTO WrtFinalDat
    ELSE
        GOTO Start
    END IF
ELSEIF MeasCount <> PNAS THEN
    IF MsStop = True THEN
        GOTO WrtFinalDat
    ELSE
        GOTO Start
    END IF
ELSE GOTO WrtFinalDat
END IF
MeasStop:
KEY(10) OFF
MsStop = NOT MsStop
IF MsStop = True THEN
    mes$ = "Stop"
ELSE
    mes$ = "Continue"
END IF
KEY(10) ON
RETURN
WrtFinalDat:
OPEN "C:\MYDATA\% " + FLNAME$ + ".cnd" FOR OUTPUT AS #1
WRITE #1, SPM, SAM, NPM, DTOM, NTR, PNAS, MeasCount
CLOSE #1
PRINT "Measurement finished !"
END

```

STATE-SELECTIVE DIFFERENTIAL CROSS SECTION MEASUREMENTS FOR
ONE-ELECTRON CAPTURE PROCESSES AT 10 eV REGION

Yoh Itoh*

Physics laboratory, Josai University, Saitama 350-0295, Japan

A crossed-beam apparatus connected to a small Electron-Beam-Ion-Source is described. The kinetic energy of O^+ ions produced in one-electron capture process in $O^{2+} + He$ collisions were measured at $E_{em} = 10$ eV, from 0 to 5 degree in the laboratory frame. Only a single peak which corresponds to the reaction, $O^{2+} (^3P) + He \rightarrow O^+ (^2P) + He^+ + 5.6$ eV, was observed in the energy spectra.

At low energy region, the charge-transfer processes are considered to take place at around the crossing point of the interaction potentials, the studies for state-selective differential cross section measurements are a powerful means to understand the mechanism of the reactions.

I have been developing a crossed-beam apparatus to measure the angular distribution of the scattered ions created by charge-transfer reactions. The first version of the apparatus¹ consisted of a Nier-type ion-source, double electrostatic hemispherical energy-selector, and a simple detector with an energy-filter for ion separation. To obtain good energy and angular resolution, a supersonic nozzle-beam was used to prepare the target. For testing the performance of the apparatus, I have measured the differential elastic cross section in $He^+ + He$ system at $E_{lab} = 10$ eV, then compared with the calculated one. The agreement was satisfactory to show that the accuracy of the method to determine the collision energy was better than 0.1 eV, and that of angular reading was about 0.5 degree.

The intensity and the charge state of the ion-beam created by the Nier-type ion-source is limited, I have constructed a small Electron-Beam-Ion-Source then connected to the crossed-beam apparatus. The ion-source consists of an ionization region and an ion-beam transportation region. The ionization region is surrounded by magnetic field of about 0.15 T which is prepared by a normal electromagnet. The required power for the magnet is only less than 1 kW. An example of the mass-spectrum of the ion-beam obtained from the source is shown in Fig. 1.

The ions were extracted from the source by the extraction potential of 2 kV, then decelerated to $250 \times q$ eV, where q denote the charge-state of the ions, then mass-selected by a Wien-filter. The mass-selected ions were decelerated to the transmission energy of the selector, about $30 \times q$ eV, then again decelerated to the desired collision energy using two sets of three-element lens.

The angular divergence of the primary beam was about ± 0.5 degree, and the energy spread was estimated to be $0.3 \times q$ eV, at FWHM. The intensity of the beam was in the order of pA at 10 eV. For the energy analysis of the product ions, a 90 degree electrostatic

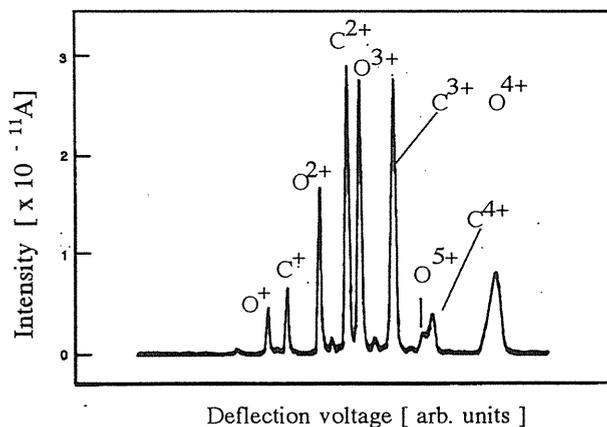


FIG. 1. Typical mass spectrum of the ion-beam obtained. The impact energy of the electron-beam was 1.2 keV and the current was 17 mA. The pressure was 3.8×10^{-9} Torr with target gas of CO.

cylindrical deflector was used, and a position-sensitive detector system² is attached to that.

The kinetic energy of O^+ ions produced in one-electron capture process in $O^{2+} + He$ collisions were measured at $E_{em} = 10$ eV, from 0 to 5 degree in the laboratory frame. Only a single peak was observed on the energy spectrum. This peak corresponds to the reaction, $O^{2+} (^3P) + He \rightarrow O^+ (^2P) + He^+ + 5.6$ eV; this agrees well with that reported by Kamber *et al.*³ Detailed measurement is now in progress.

Reference

1. Y. Itoh, J. Phys. Soc. Jpn, **63**, 941 (1994).
2. T. Mizogawa, M. Sato, M. Yoshino, Y. Itoh and Y. Awaya, Nucl. Instru. and Meth. **A387**, 395 (1997).
3. E. Y. Kamber, C.L. Cocke, J. P. Giese, J. O. Pedersen and W. Waggoner, Phys. Rev. **A36**, 5575(1987).

*yitoh@josai.ac.jp

