



ISSN 1349-1113  
JAXA-RR-05-009

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

磁気圏プラズマ観測用MCPマルチアノードの開発研究

齋藤実穂・齋藤義文・向井利典・浅村和史

2005年 11 月

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency

# 磁気圏プラズマ観測用MCPマルチアノードの開発研究

齋藤実穂\*・齋藤義文\*・向井利典\*・浅村和史\*

## Development of MCP mutianode for Plasma Observation in Magnetosheres

By

Miho SAITO\*, Yoshifumi SAITO\*, Toshinori MUKAI\*, Kazushi ASAMURA\*

**Abstract :** The goal of this research is to develop a new detector system for in-situ measurements of hot plasmas with a high time resolution to study electron dynamics in the magnetosphere. The new system consists of microchannel plates (MCP) and a position sensitive multi-anode detector, based on ASIC (Application specific integrated circuit) techniques. The combination of the multi-anode and the ASIC techniques is expected to make the fastest position signal processing with small size, light weight and low power consumption, compared to other position detection techniques that have ever been used. The key technology is to accommodate the ASIC with the rear side of the anode (ceramic) plate, in which a multiple discrete anode pattern is printed on the front side. Capacitive coupling between the anode pattern on the front side anode and the signal pickup pattern on the rear side is used instead of discrete capacitors, which are usually required to insulate a high voltage applied to the anode. The anode plate is made of Alumina with thickness of 1 mm, and the capacitance for each anode is about 3 pF, which is smaller by two orders of magnitude than those of discrete condensers conventionally used. This anode condenser of low capacitance had been considered to be critical to whether the ASIC is applicable to the electron detector. However, our experimental result showed that the attenuation of signals due to the low capacitance was about 50 % at most, and hence our new concept is useful.

Next, effects of electrostatic coupling between the discrete anodes have been measured. This is important, since our new detector consists of many adjacent anodes with small gaps to increase the detection areas. Our experimental results show about the coupling effect of about 10% from the adjacent anodes for the anode condenser used, whereas the coupling effect without using the anode condenser is negligible. This is also understood in terms of the effect of low capacitance of the anode plate. Although the effect of 10% coupling can be effectively avoided with a suitable discrimination level in the signal processing circuit, it is highly preferable to increase the capacitance of the anode plate in future developments. Finally we present the performance of the test model of ASIC on board MCP multianode, though the ASIC has been developed for an application with SSD by Lawrence national Berkley Laboratory. The ASIC chip includes preamplifiers followed by its discriminator and counter and the size is  $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ . Based on

---

\*宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 ISAS/JAXA

the experiment with the use of ion beam as incident on the MCP of the test model, we conclude that our new multi-anode detector system is applicable (though further studies are still necessary) to future missions for high-time resolution measurements of hot plasmas in the magnetosphere.

## 概 要

本研究の目的は、磁気圏 in-situ 高温プラズマ観測において、電子ダイナミクスを解明する高い時間分解能を得ることができる、新しい方式による検出部の開発である。MCP (microchannel plates) と位置検出マルチアノードからなり、ASIC (Application specific integrated circuit) 技術を取り入れるところが新しい。ASICとマルチアノードの組み合わせは、最も高速な信号処理を可能にするだけでなく、同時に小型、軽量、低消費電力な検出部になると期待が持てる。これを可能にする基盤技術は、ASICをアノード基板（セラミック）の裏面へ直接搭載することである。アノード表面は、多数の個別アノードを構成する導体パターンが、プリントしてある。このアノード基板をはさんだ、表と裏の導体パターンによる静電容量を、信号検出に用いる。これは、アノード表面の高電圧と信号処理系を絶縁する、高電圧絶縁コンデンサーの代用である。アノード基板は、厚さ1 mmのアルミナであり、導体パターンでつくる。基板利用コンデンサーの静電容量は3 pFである。これは通常、信号検出に用いられる、高電圧絶縁コンデンサーの静電容量より2桁小さい。高電圧絶縁コンデンサーを、この極めて小さい静電容量で代用できるかというのは、小型化を目的とした電子検出部として、ASICを採用できるかどうかの決定要素であった。しかしながら、われわれの実験結果は、低静電容量による信号の減衰はあっても約50%であることを示した。厚さ1 mmというのは、構造強度の要求を満たすので、この基板利用コンデンサーは、衛星搭載機器に利用できる設計概念である。次に個別アノード間の静電カップリングを測定した。多くの個別アノードが有効面積を大きくとれるように互いに隣接した構造をとる。マルチアノードシステムでは、重要な検討項目である。その結果、基板利用コンデンサーを使用するアノードは、隣接する個別アノード間に10%のクロストークがあった。一方で、アノードと処理系を直結させる場合では、電気的クロストークは無視できるレベルである。よって、電気的クロストークも、基板利用コンデンサーの低い静電容量の影響である。10%のクロストークは、アノード運用時、信号レベルの適切な設定により十分回避できる大きさであるが、将来的には、静電容量を大きくとるほうが望ましく、今後の課題である。今回、ASICはローレンスパークレー研究所が開発してきたSSD用の荷電アンプ、ディスクリミネータ、カウンターまでを含むチップを用い、マルチアノードを試作した。このチップのサイズは、およそ1.2 mm×1.2 mmである。実際に、イオンビームを照射し、試験した結果、われわれの新しいタイプのマルチアノードは、さらに研究を進める必要があるものの将来の磁気圏ミッションで、高時間分解能な高温プラズマ観測へ適用可能できると結論する。

## 1. Introduction 磁気圏のプラズマ観測

### 1.1. 磁気圏プラズマ観測

本論文で取り上げるMCPマルチアノードは、磁気圏プラズマで電子ダイナミクスを検出できる時間分解能の向上を目的に開発を行っている。

#### 1.1.1. はじめに

宇宙空間は、主にイオンと電子で構成されるプラズマで満たされている。地球のまわりの惑星間空間も例外ではなく、太陽から常に高速のプラズマ流が吹きだしている。地球には固有磁場があり、それが直接はいつてこれない希薄なプラズマの領域、磁気圏を形成するが、その姿は定常的なものでなく、観測されるプラズマも様々な様相をもっている。

その代表は磁気リコネクション領域で観測される加熱、加速されたプラズマではないかと考えている。磁場のつなぎ変えにより磁場変化と同時にプラズマへエネルギーを与える宇宙プラズマの重要な素過程である。しかしこのミクロな素過程は磁気圏全体にもおよぶ大きな構造に影響を与えられられている。たとえば、サブストームは地球上空100 kmの電離層から地球半径Reの200 Re尾部まで、その磁場構造、しいては電流系が変化する。このとき地球から反太陽方向へ20～30 Reでは強い高速イオン流の観測が確認されており、磁気リコネクション領域の存在を示唆する [Nagai, 1998]。磁気リコネクション領域におけるプラズマダイナミクスの解明は重要な手がかりを与えられられている。

#### 1.1.2. プラズマ観測における時間分解能

時間分解能は、1つの分布関数取得に要する時間であり、3次元（速度ベクトル）と2次元の分布の取得にわけることができる。60年代から現在まで、ロケット及び人工衛星によって、磁気圏のプラズマは、観測されてきている。そのプラズマ観測における時間分解能の一部を図1.1に示した。地球近傍、極域など磁場の強いところではプラズマは磁場に凍結しているため、磁場に平行方向と垂直方向の2次元分布でもよいので、高い分解能を可能である。3次元分布では、時間分解能は77年のISEE 1/2による120 sから2000年のClusterまでに2 sになっている。

磁気圏での観測対象により、その必要な時間分解能は大きく異なる。たとえば、IMF（惑星間磁場）と磁気圏の応答を見ようとしたとき、そのIMF変動のスケールは10 min程度である。それに対して、サブストームの応答は始めから終わりまで1 hrのスケールである。このとき観測されるプラズマは、磁気圏の磁場構造に伴う変化を観測しているので、MHD（電磁流体）で記述される。

磁気圏内の現象の中でもっとも高い時間分解能が要求されるものの一に、磁気リコネクション領域が挙げられる。薄い電流層や磁場の拡散領域を記述するのはプラズマのダイナミクスである。地球からおおよそ20 Re～30 Reの尾部領域ではイオンの高速流が観測されるが、通常その継続時間は10 s以下である [Baker et al 1996] このとき衛星は10 sの間に磁場が0になる拡散領域（＝イオンの慣性長程度の空間）を横切ったとおもわれるのである。詳細なダイナミクスを観測するには10 sより高い分解能が必要であると予想される。さらに電子ではその慣性長はイオンのその $\sqrt{\frac{1}{m_e}}$ であるので電子の拡散領域に必要な時間分解能はさらに高く、10 ms程度ではないだろうか。これは、これまでの分解能から2桁以上の向上を必要とする。

磁気リコネクションは地球磁気圏だけでなく、太陽や天体のプラズマでも重要なエネルギー変換過程であると考えられている。その中で直接観測のできる磁気圏プラズマでのリコネクション領域における電子のダイナミクスの解明は、広い応用範囲と強いインパクトを持つ。

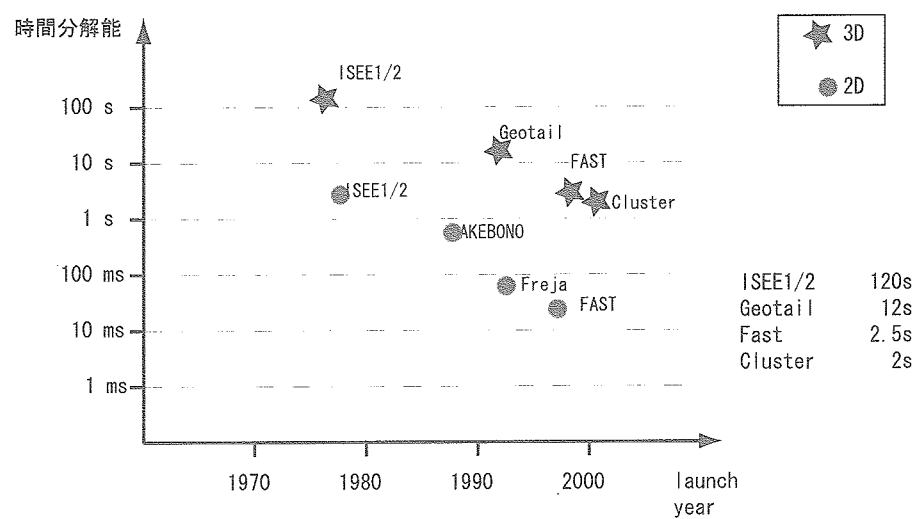


図1.1 過去のプラズマ観測における時間分解能

1.2. 低エネルギー荷電粒子観測器

本文で単にプラズマ観測器とよんだ場合、この低エネルギー荷電粒子観測器を指すこととする。本研究開発はここで示す原理のプラズマ観測器のアノードを想定しているので、その概要と時間分解能の決定要因について述べたい。

1.2.1. 概要と原理

低エネルギー荷電粒子観測器は、エネルギー/電荷量と飛来方向、カウントモードで検出することでプラズマの分布関数を得る。プラズマ観測器（図 1.2）はトップハットと呼ばれる形状で飛来方向を 360° の視野が得られ

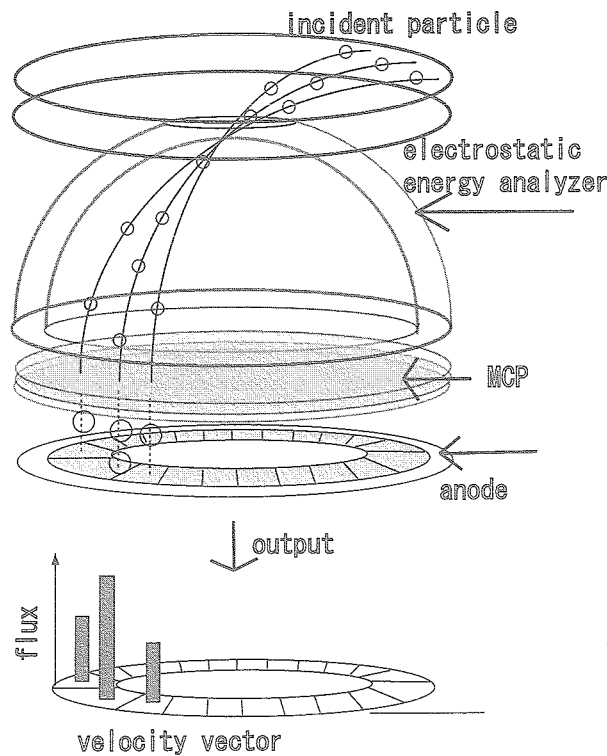


図1.2 低エネルギー荷電粒子観測器の概要，トップハット型であり 360° の視野がある。



ることが大きな利点であり、しばしば使われる構造である。プラズマ観測器は2つの構成要素、エネルギーを選択して荷電粒子を通すところと飛来方向を測定し、1粒子毎カウントするその検出部からなる。

偏向型静電エネルギー分析部は2枚の電極から構成され、そこへ荷電粒子をとおす。この間には電圧をかけ、荷電粒子はエネルギー/電荷量に応じた軌道をとるのである。トップハットでは、1/4球の電極間の電場と粒子の遠心力がつりあうものが検出部へ到達できる。この原理では測定できる粒子のエネルギーはこの電極間の電圧の10倍程度である。電極間のギャップからエネルギー分解能と感度が決まる。

検出部は1粒子毎にカウントする。電気信号として検出するためには1粒子をまず電荷増幅する必要がある。これには有効面積が大きく低エネルギー粒子に感度のあるMCP (micro channel plate) がよく使用される。MCPで電荷増幅した電子雲を受けるものが、アノードである。プラズマ観測器において検出部が、このようなカウントモードではかることは、磁気圏の希薄なプラズマを測定することを可能にしている重要な点であることを強調したい。

### 1.2.2. 時間分解能の決定要素

プラズマ観測器は、プラズマのエネルギーと飛来方向を測定する。このとき、検出するカウントCは

$$C = \epsilon \cdot f \cdot g \cdot \delta t \quad (1.1)$$

と表され、ここで $\epsilon$ : 検出効率、 $f$ : エネルギーフラックス (differential energy flux)、 $g$ : 感度 (geometrical-factor)、 $\delta t$ : 積分時間である。検出効率 $\epsilon$ は0.6程度である。

$f$ は観測対象で決定されるが、地球磁気圏のイオンで $10^4$  (Lobe)  $\sim 10^7$  (Plasma sheet)  $\text{particles} \cdot \text{eV} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV})$ 、太陽風ではさらに3桁以上高い。一方、 $g$ はエネルギー分析部で決まり、通常 $g(E) = 10^{-3} \sim 10^{-7} (\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{eV} / \text{eV})$  [Mukai et al 1994, Johnstone et al 1997] である。これは観測対象と検出部の信号処理能力の兼ね合いで決定される。観測カウントレートCが、検出部の信号処理能力を上回らないようにする必要があるからである。

精度を落とさないで、高時間分解能観測を達成する。必要事項は2点があげられる。

1. 高い信号処理能力をもつ (高速な) 検出部の開発
2. 高い感度 (g-factor) エネルギー分析部の開発

本研究が目指すところは、前者の検出部の開発による、信号処理能力の向上である。信号処理能力 (カウントレート) は、1信号に対する処理時間とその処理系の数で決定される。これを決定するものは、検出部のアノードである。プラズマ観測器では、このアノードはMCPからの出力を電気信号に変えると同時にその落下方向を検出するため、位置検出を行う。アノードの位置検出原理により、信号処理時間が決定する。これまでの1信号処理の時間は、 $10 \sim 1 \mu\text{s}$  [付録A, Johnstone et al, 1997]、カウントレートで $10^5$ 程度である。本研究で取り上げるマルチアノードというシステムでは、これを $10^6$ 以上にすることが可能である。

プラズマ観測器に必要な検出部の位置検出の分解能は、トップハット型の場合、 $360^\circ$ の視野に対して、温度の低い太陽風で $5^\circ$ 、磁気圏で $20^\circ$ 程度の分解能が必要である。

また最終的には飛翔体搭載を目的とする機器であり、開発時にはその構造的強度、消費電力、重量の条件を留意する必要がある。

### 1.3. マルチアノードの今後の可能性

マルチアノードは原理的に最も高速な信号処理を可能にする位置検出原理である。現状でこのシステムは、重量が大きく、かつ消費電力も大きいので、衛星搭載機器に適していない。しかし、最近の電子回路技術であるASICと組み合わせることで、この問題は解決される可能性がある。そこで、本研究では、このASIC技術を取り入

れた。ASIC搭載型MCPマルチアノードというものを考える。

#### 1.3.1. 低エネルギー荷電粒子観測器への採用

ASIC搭載型MCPマルチアノードを低エネルギー荷電粒子観測器へ採用する利点は、以下のようにまとめられる。

1. 飛躍的な信号処理能力の向上
2. 大幅な重量の削減
3. 低消費電力化

信号能力はマルチアノードの位置検出の原理に起因する。詳しくは次章に述べる。重量、消費電力においては、マルチアノードだけではなく、他の原理によるどのアノードよりも小型化、低消費電力化を可能にする。この2つはASICを取り入れることの利点であり、衛星搭載機器にはこれだけでも十分な成果になる。

プラズマ観測の時間分解能をあげるには感度が重要であった。しかし、電子スケールの分解には、1台のプラズマ観測器の感度を上げるだけでは、足りない。よって、観測器の数を増やすことが必要である。ASIC搭載型MCPマルチアノードでは信号処理能力のみならず、重量、消費電力に優れており、磁気圏観測に最も適した検出部になりうる。

#### 1.3.2. 期待できる成果

ASIC搭載型MCPマルチアノードは、原理的に最も高時間分解能によるプラズマ観測ができる可能性がある（付録A参照）。特に高感度なエネルギー分析部と組み合わせることで、観測フラックスに対して、広いダイナミックレンジでの観測が可能になる。

#### 1.4. 本論文の構成

本論文では、ASIC搭載型MCPマルチアノードの実用化を目指し、必要な基盤技術の開発についてまとめた。

2章では、その背景を説明するため、MCPの性質、主にMCPの出力信号である出力電荷量の特性を述べる。他の種類のアノードについては、付録Aへまわした。その後、その信号処理を行う、マルチアノードの位置検出原理とASIC搭載型MCPマルチアノードの概念を示したい。3章は、ASICを用いないアノード単体試験の結果を示す。実際に試作したASIC搭載型MCPマルチアノード試験は4章で示す。この2つの実験で用いた実験系は、信号処理系を除いて同じであり3章の前半で述べる。5章は、全体のまとめである。

## 2. MCP原理とアノード

ここでは、始めにプラズマ検出部であるMCP (micro channel plate) の性質、特にマルチアノードで考慮すべき特性を簡単に示す。その上で、ASIC搭載型MCPマルチアノードを紹介し、その概念と開発条件を示したい。これらを踏まえ研究課題についてまとめる。

### 2.1. MCP (micro channel plate)

#### 2.1.1. 原理

##### 構造と電荷増幅原理

構造の模式図を図2.1に示すように、MCPのチャンネル、入力側と出力側に700 V程度の印加電圧をかける。チャンネルに入射した粒子はMCPのチャンネル壁面をたたき2次電子を放出させる。これはチャンネル内でMCPの印加電圧により加速を受ける。この加速された2次電子が、またチャンネル壁面をたたき2次電子を放出する。これを繰り返すことで、電子は指数関数的に増幅し利得を得る。1段のMCPの利得は印加電圧に依存するが、およそ $10^3$ である。これを2段、3段と重ねることで $10^6$ 、 $10^7$ の利得を得る。

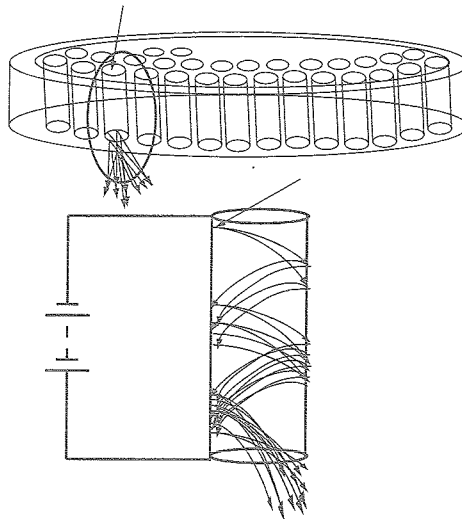


図2.1 MCPの構造と電荷増幅原理

##### MCP出力電荷量（利得）

1粒子入射に対して、MCPが出力する電荷量 $Q$ について考える。電圧 $V$ を長さ $L$ のチャンネルに印加すると内部にチャンネル軸方向の電場 $E$ を生じる。

$$E = V/L \quad (2.1)$$

チャンネル壁面から放出される2次電子はチャンネルの軸方向には加速度運動をし再びチャンネル壁面へ衝突をする。この衝突と衝突の間の軸方向の距離 $S$ は

$$S = \frac{1}{2} E \frac{e}{m} t^2 \quad (2.2)$$

となる。 $t$ は衝突までの時間であり、軸方向の初期速度は無視している。 $t$ は、水平方向へ2次電子放出時の初期速度でチャンネル径 $D$ 程度を進む時間である。



$$t = D \sqrt{\frac{m}{2eV_0}} \quad (2.3)$$

$V_0$ は電子の初期エネルギー放出された電子は内部電場Eで加速されエネルギー $V_c$ を得る.

$$\begin{aligned} V_c &= ES \\ &= \frac{V^2}{4V_0\alpha^2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで $\alpha = L/D$ である. Wiza [1979]によれば, 2次電子放出係数 $\delta$ は衝突電子のエネルギー $V_c$  ( $V_c < 200$  V)により以下のように仮定できる.

$$\delta = A\sqrt{V_c} \quad (2.5)$$

Aは確率係数である. MCP内での衝突回数  $n$  は

$$n = \frac{L}{S} = \frac{4V_0\alpha^2}{V} \quad (2.6)$$

と書ける. MCP出力電荷量Qは

$$\begin{aligned} Q &= \delta_0 \times \delta^{n-1} \\ &\sim \delta^n \\ &= (A\sqrt{V_c})^{\frac{4V_0\alpha^2}{V}} \\ &= \left(\frac{AV}{2\alpha\sqrt{V_0}}\right)^{\frac{4V_0\alpha^2}{V}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

と表すことができる.  $\delta_0$ は入射粒子の2次電子放射係数である. これより, MCP出力電荷量は印加電圧Vと $\alpha$ によって特徴付けられる. Qの $\alpha$ に対する極大値は $\alpha \sim 45$ 程度で得られる.  $\alpha \sim 45$ 程度では, 電荷量Qは $\alpha$ の依存が少ない. 通常 $\alpha$ は40～60である. よって出力電荷量を決定するのは印加電圧である. 印加電圧が高ければ2次電子放出効率が高くなり, Qは指数的に増加する. 一方, チャンネル内の滞在時間が少なくなり, 衝突回数が減少することでQの増加は制限を受ける. またこれ以外の要因ではチャンネル内に電荷がたまると空間電荷効果で2次電子放出が抑えられ, 飽和状態となる. 出力電荷量Qは, 入射粒子に対する2次電子放出係数 $\delta_0$ に比例する. 式(2.5)から考えても, MCPは入射線種とそのエネルギーに依存する検出感度を持つ.

### 2.1.2. 波高分布

MCPの出力電荷量Qは確率係数Aに依存する. 電荷増幅の統計的な揺らぎにより, 検出される波高(波高 $\alpha$ 電荷量)はポワソン分布をする. その分散の度合いは波高分布の広がり(半地幅: full width at half maximum = FWHM)とピークの波高の比(FWHM/ピーク)であるPHR(pulse height ratio)で表される. PHRは2段MCPで120%, 3段で80%程度と大きい. MCP印加電圧が高いほど(出力電荷量が多いほど)PHRは小さくなる. MCPの出力電荷量を検出, 信号処理するとき, このPHRの大きさを必ず考慮する必要がある.

### 2.1.3. 時間分解能

プラズマ観測器の時間分解能を高くするためには十分なカウントレートが必要なのは言うまでもない. ここではMCPのカウントレートと応答時間(出力のパルス時間)について考える.

### カウントレート

本研究で使用したMCPを例に考える．直径は $\phi 86.7\text{ mm}$ である内，その有効面積は $\phi 77\text{ mm}$ 程度である．1段の抵抗はおよそ $33\text{ M}\Omega$ で一枚あたりおよそ $1\text{ kV}$ の電圧をかける．2段，または3段に重ねて使用し，1入射粒子に対して電子数（利得）で $10^6 \sim 10^7$ 個を出力する．この電子はMCP印加電圧によってチャンネル壁面を流れる電流から供給される．この電流のうち電子の衝突によりチャンネル壁面から放出される電子は全体の数%程度と考えられる．

このときMCPに流れる電流から，MCPのカウントレートを考える．単位時間に流れる電荷量から利得に使える電子数を求めることができる．ここではおよそ電流の1%を取り出せるとした．

$$\begin{aligned} I \times \frac{1}{100} &\sim \frac{1\text{ kV}}{33\text{ M}\Omega} \times \frac{1}{100} \\ &= 0.3\mu\text{ A} \\ &= 2 \times 10^{12} \text{ electrons/sec} \end{aligned} \quad (2.8)$$

1カウントに対し， $10^6 \sim 10^7$ 個の電子を出力する．

$$\text{MCP 全体のカウントレート} \sim 10^{5 \sim 6} \text{ count/sec} \quad (2.9)$$

これが原理的にMCPで得られる最大のカウントレートとなる．MCPへの入射粒子のカウントレートが高いとき，実際はこの値に達していなくても利得の低下が起こる．

### 出力パルス時間

MCPの応答時間は高速であり，オシロスコープで観察するとその立ち上がりは $150\text{ ps}$ ，立下りは $550\text{ ps}$ となる[浜松ホトニクス技術資料]．パルス時間は，チャンネル壁から出る，2次電子のエネルギーが幅を持つことによると考えられる．式(2.3)より，衝突と衝突の間隔は $1 \sim 10\text{ ps}$ ，衝突回数はおおよそ100程度なので，出力パルスは $0.1 \sim 1\text{ ns}$ の幅を持つと考えている．

## 2.2. マルチアノード

### 2.2.1. 位置検出原理

#### 原理と分解能

マルチアノードは独立な導体パッドを並べた構造をしている．それを図2.2へ示した．MCPの出力側に互いに独立の個別アノード（導体パターン）がありチャージアンプ（Charge sensitive amplifier=CSA）へつながっている．それぞれに信号処理系があり，個別のアノードとして働く．位置検出は，この導体パターンへの信号の有無で判断する．位置検出分解能は，チャンネル数（個別アノードの数）であり，その精度は導体パターンの大きさとその配置間隔で決まる．

しかし，MCP出力チャージは，空間的な広がり（＝チャージクラウド）を持っていることがわかっている．同時に隣接する個別アノードに入らない構造にする必要があり，MCP出力チャージクラウドの大きさはアノードの設計，しいては位置検出分解能を決定する．

#### 必要な分解能

磁気圏観測用プラズマ観測器の条件は，1次元の位置検出が64チャンネル程度行えることである．これはプラズマの運動方向を $360^\circ/64$ チャンネルの精度で検出できることに値する．観測対象にもよるが，一番高い位

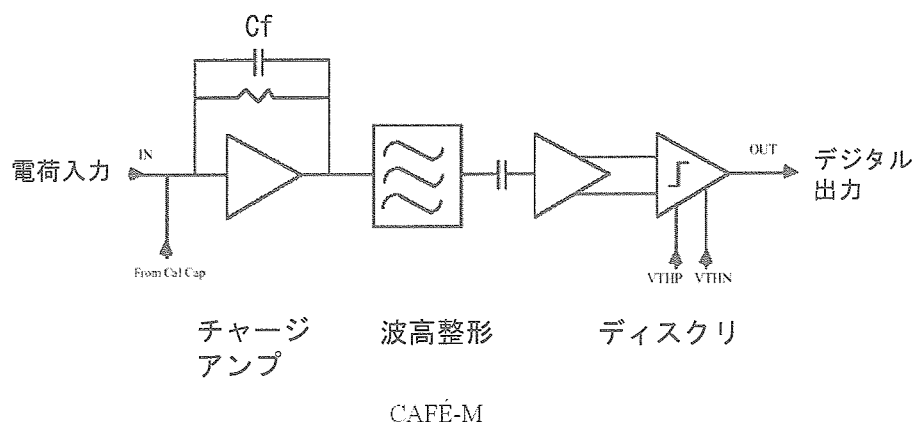


図2.3 アナログ信号処理部，ブロック図は1つの信号処理系，ASICでは128チャンネルを6 mm×12 mmの大きさに収まる。

置検出が必要なのは太陽風の計測で，このとき64チャンネル必要である。

### 2.2.2. 信号処理系

マルチアノードの信号処理系はチャージアンプとディスクリミネーター，カウンタから構成される。図2.3にその処理系を示した。左側が入力側でありチャージアンプが置かれる。ここのフィードバックのCfにためた電荷を電圧 $V$  ( $V = -Q/Cf$ ) で出力し。波形整形を行った後でディスクリミネーターにより，ある閾値を境に1か0の電気信号を出力する。これは最も単純な信号検出系の構成であり，それゆえに高速な信号処理（1信号処理～50 ns）が可能となる。それに加えてすべてのアノードが独立した信号処理系を持つため，高いカウントレートまで対応できる。この2つの要素より，マルチアノードは最も高時間分解能なアノードと言える。しかしこれまでの電子技術では，信号処理系の多さは，大きな重量，消費電力を要し，衛星搭載には大きな障害であった，一方で単純な信号処理回路であることから，次に述べるASICという可能性が考えられるようになった。

### 2.3. ASIC搭載型マルチアノード：試作モデル

信号処理系にASICを用いる，全く新しいタイプのMCPマルチアノードを考えている。ASICを直接アノード基板に搭載するところが新しい。

#### 2.3.1. ASICの概要

ASICはApplication Specific Integrated Circuitの略である。ここで使用するASICは，アナログ部とデジタル部の2つで構成される。アナログ部（図2.3）ではチャージアンプからディスクリミネーター（コンパレータ）までが入り，電荷量がある閾値を境に1か0を出力する。この処理系128個が，サイズ12×6 mmに収めることができる。アナログ部からの出力（1か0）はデジタル部（図2.4）のカウンタ（図では上部）で処理される。図の下部はアナログASICの制御を行うものである。サイズはアナログ部とおなじであり，同じく128チャンネルが同サイズ内に収まる小型なものである。消費電力は，この2つのASICをあわせて0.7 Wと省電力である。ASICはその小型さと低消費電力が魅力的である。単純な信号処理で済むマルチアノードならば，ASICが利用できることも，この研究の大きな動機のひとつになっている。しかし単純な信号処理のとき考慮すべきは，隣接チャンネル

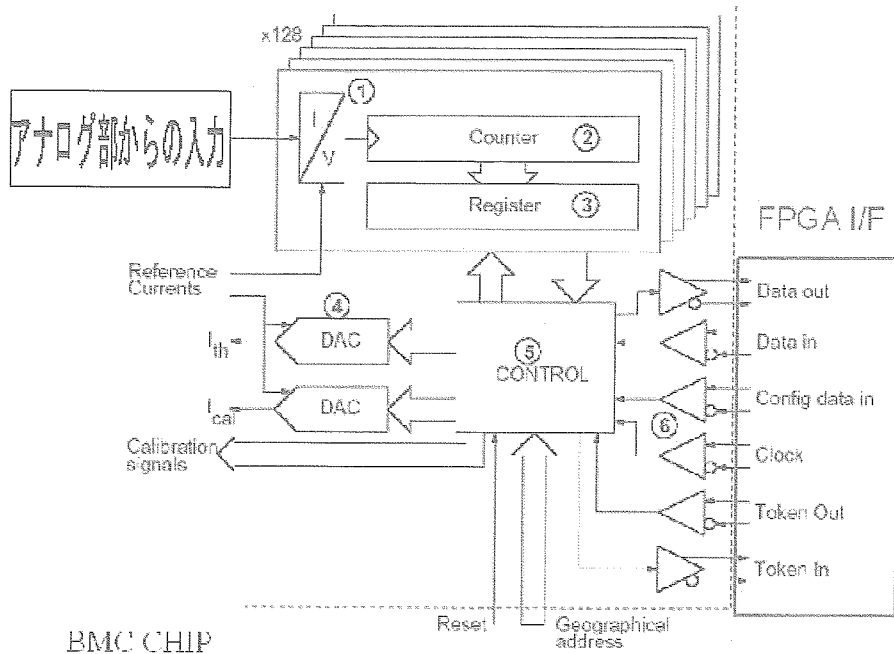


図2.4 デジタル信号処理部、ブロック図は1つの信号処理系、これもASICでは128チャンネルが6mm×12mmで収まる。カウンタとアナログ処理部の制御がありFPGAからカウンタのデータを読む。

間の電氣的クロストークである。特にMCPの波高分布が大きい広がりを持っていることから、この2つを考え合わせ、上の閾値を決定する必要がある。本試作モデルのASICは、ローレンスパークレー国立研究所がSSD用に開発したものであり、想定している入力電荷量がMCPのそれに比べて小さい。ディスクリミネーターで設定できる閾値の範囲は、0.5～10 fCであり、この間を255分割できる。10 fCは、電子数換算で $6 \times 10^4$  electronsである。

### 2.3.2. 全体の概要

#### 構造

ASICはアノードの裏面（表面はMCPに面している側）へ直接搭載することを想定している。本試作モデルでは、MCPの有効面積の径が77 mmである。位置分解チャンネルは、64であり360度の視野を持つ。角度分解能は $5.625^\circ$ となる。これはプラズマ観測器としての条件から設定したものである。アノード表面、MCPへ向く面、の模式図を図2.5へ、実際の写真を図2.5 (d) に示した。内径50 mm、外形76 mmの円周がアノードであり、64チャンネルに分割されている。個々アノードの間は幅0.15 mmのshieldのパターンが入っている。シールドと個別アノードの間隔は0.1 mmである。よってアノード間のギャップは、合計で0.35 mmである。

アノードの表面から裏面への信号伝達の方法は、大きく2つに分けることができる。一つは、スルーホールを用いて導体で直接つなげる方法、もう一つは、表と裏のパターン面積で形成されるコンデンサーを用いる方法である。それを示したのが、それぞれの個別アノードを拡大した図2.5 (b) (c) である。図2.5 (b) がアノード基板を利用したコンデンサーである。以下、この基板利用コンデンサーを介して信号検出を行うものを、アノード（基板C利用）と呼ぶ。この構造は電子検出用アノードを想定してつくられたものである。この必要性は、次の節で述べる。一方、図2.5 (c) が、スルーホールで裏面へ直接つながっている方で、アノードと処理系が直結している。以下では、これをアノード（直結型）と呼ぶ。これは、イオン検出モードで使える構造である。

アノード裏面の模式図を図2.6 (a) (b) に、写真を図2.6 (e) に示す。図2.6 (a) は横から見た図であり、アノード基板の裏面にASICを直接搭載する。アノード基板は、厚さ1 mmのアルミナを使用し、その比誘電率は

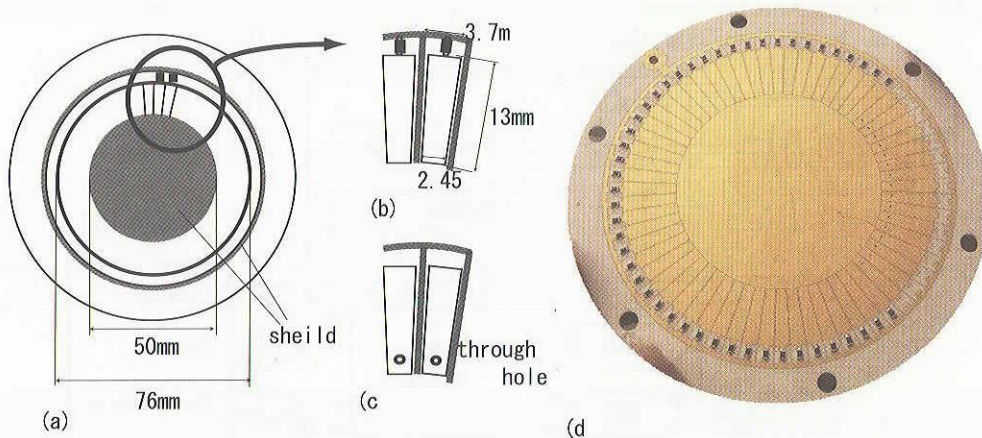


図2.5 ASIC搭載型マルチアノード表, MCPからの出力チャージを受ける側, (a) 内径 50 mm, 外形 76 mm の円周がアノードであり, 64 チャンネルに分割されている. (b) 基板利用コンデンサーを用いるアノード (基板C利用), (c) スルーホールで裏側パターンに直接つなげているアノード (直結型)

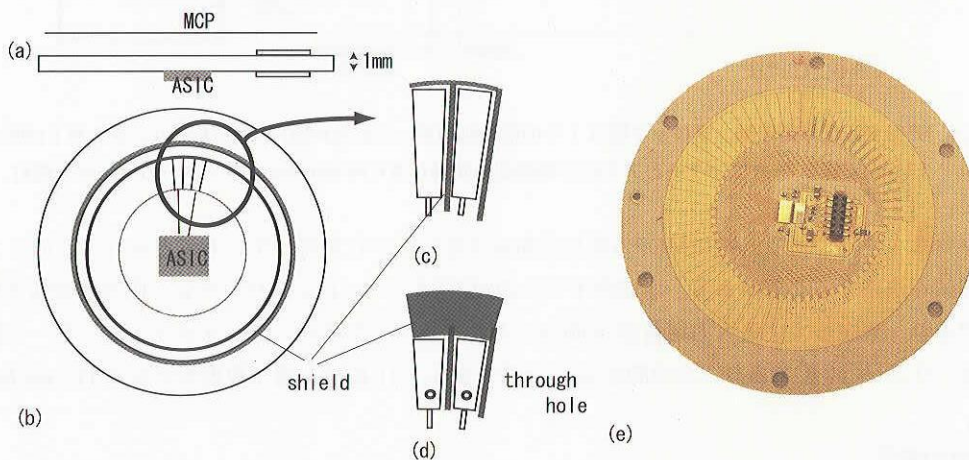


図2.6 ASIC搭載型マルチアノード裏面, (a) 横からみた図 (b) アノード裏面, 中央にASICを置く (c) 基板利用コンデンサーを用いるアノード (基板C利用), 図 2.5 (b) と静電容量をつくる (d) アノード (直結型), 図 2.5 (c) の裏面

よそ10と大きくなる. 図2.6 (b) は裏面の模式図であり, 中央にASICを置く. 図2.5 (c) は基板利用コンデンサーの裏面パターンであり, 図2.5 (b) にある表パターンと静電容量をつくる. 図2.6 (d) はアノード (直結型) の裏面であり, 図2.5 (c) からスルーホールによりつながっている.

表面の64個のアノードパターンは, すべて同じであるが, 裏のパターンは, 試験用に4種類ある. 1種類は, スルーホールによるアノード (直結型), もう3種類は, 基板を利用したコンデンサーを用いる構造である. 3種類の違いは, 裏面のアノードパターンの面積であり, その表面との比は, 表2.1のようにまとめられる. 表パターンで受けた電荷量の一部をシールドとカップリングさせることにより, ASICへ入力される電荷量を調整することを考えた. ASICは, 一度設計, 製作を行うと仕様を変更するためには, はじめから作り直さなければならない. 今回, 用いるASICの仕様もMCPの信号検出には, 向いていない. これをアノード部で調整できれば, 将来的にも, その利点は大きい.

### 2.3.3. アノード基板を利用したコンデンサー：電子検出用

電子検出モードでは, アノード基板を利用したコンデンサーを考える必要があった. これは, 電子検出用アノ

表2.1 試作モデル：信号伝達の方法.

検出モード		構造
A	電子	基板利用コンデンサー（面積比 1:1）
B	電子	基板利用コンデンサー（面積比 1:0.7）
C	電子	基板利用コンデンサー（面積比 1:0.1）
D	イオン	スルーホールによる直結

ードの表面が，図 2.7 (a) に示すように，高圧（2 kV）になるためである．一方，イオン検出モードでは，アノード表面はグラウンド（シールド電位）である．これは，MCPへ印加する電圧の符号が異なるためである．通常，電子検出モードでは，チャージアンプとアノードを絶縁（DC的に）するため，大きい静電容量の（ $C=330\sim470\text{ pF}$ ）高電圧絶縁コンデンサーを間にいれる（図 2.7 (c)）．しかし，この高電圧絶縁コンデンサーのサイズは  $1\text{ cm}\times1\text{ cm}$  と大きくアノード基板の上にチャンネル数 64 個分，置く事ができない．これでは，ASICをアノード裏面へ搭載という構造が不可能になる．ASICをアノード裏面へ置かないという方法も，原理的には可能であるが，64 チャンネルのケーブルを引き出すのは現実的ではない．またそのときのケーブル，コンデンサーの重さが大きく，ASICが小型であっても全体が大型になり，ASICを用いる利点がない．

そこで，アノード基板の表と裏のパターンで形成されるコンデンサーをこの高電圧絶縁コンデンサーの代用にすることで，この問題を解決したい．アノード基板には，できる限り静電容量を大きくするため，比誘電率が高く，かつ耐圧に優れているアルミナを使用する．同時に，衛星搭載機器としては構造的な強度をみためアノード基板の厚みは，実績のある  $1\text{ mm}$  にする．この基板利用コンデンサーの静電容量は， $3\text{ pF}$  と，通常，信号検出に用いられる高電圧絶縁コンデンサーの 100 分の 1 程度と小さい．

よって，この低容量な基板利用コンデンサーで，従来の高電圧絶縁コンデンサーの代用として使用できるかは，このASIC搭載型マルチアノードが，電子検出モードで利用できるかを決定する重要な課題である．

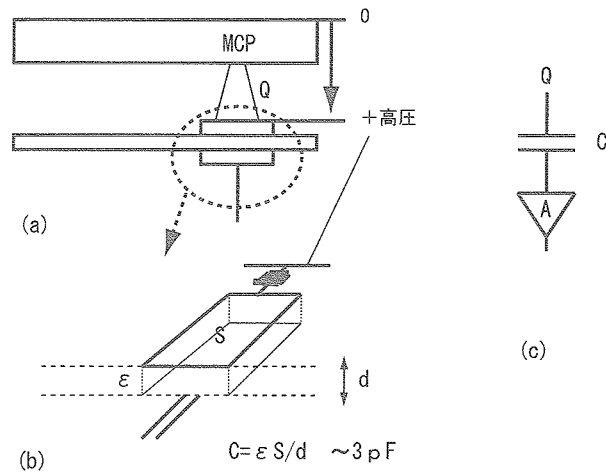


図2.7 アノード基板を利用したコンデンサー，(a) MCPとアノードを横から見た図，アノード表面は電子用で 2 kV程度，(b) 基板利用コンデンサー構成，アノード表面は抵抗でシールドにつながっている．裏にある同じ形状の導体パターンと静電容量を作る．(c) アノードとチャージアンプブロック図，イオン用ではCはない．



## 2.4. 本研究課題

ここで紹介したようなASIC搭載型MCPアノードを考えたとき、アノード単体で予想される要検討課題があり、それは以下の2つである。

1. 電子検出用アノードは可能であるか。  
アノード基板利用コンデンサーが信号検出に使用できるかによる。
2. 正しい信号検出ができるか。  
隣接アノードの電氣的クロストークの大きさによる。

この2点を定量的に調べるためには、アノード単体で特性試験を行う必要がある。ASICの出力では、カウンターまで含んでいるため中間の信号を調べることができないためである。次章では、アノード単体の特性を示す。アノード単体の特性を抑えた上で、ASIC出力が予想通りであるか試験を行う。また、ASICの試作モデルの試験から、MCPによるプラズマ検出に特化したASICの仕様、フライトモデル作成までの今後の課題を考える。

### 3. アノード単体の特性実験

2章で紹介した試作アノード基板を用い、その課題について、特性を試験した。入力信号は、MCPヘイオンビームを照射させることでその出力を測定した。これによって、より実際のアノード運用に近い条件にしている。

#### 3.1. 実験の概要

試作したアノード基板を用い、特に基板利用コンデンサー、隣接するアノードへの電氣的クロストークの特性を得ることを目的としている。MCP出力電荷がアノードで受け、荷電アンプとその後の波高分析により、荷電アンプに入力した電荷量を求めることができる。

##### 3.1.1. 実験系概観

図3.1にアノード基盤とMCPを組んだMCPアノードアッセンブリの模式図を示す。本実験では2段MCPを用いた（パイアス角： $8^\circ$ 、チャンネルの長さ $\alpha$ とチャンネル直径の比 $\alpha = 40$ 、チャンネル径は $25\mu\text{m}$ ）。これを真空チャンバー内にセットしたものを図3.2とその写真を図3.3に示す。MCPアノードアッセンブリをスリットを通したイオンビームの前に置き、イオンビームの当たるMCPの円直線上へMCPから $10^6$ 個程度の電子が射出される。これをMCPアノード間に加速電圧をかけ、アノード上へ落とし、チャージパルスと同軸ケーブルで引き出し、チャンバー外のチャージアンプへつなげる。MCPアノードアッセンブリは図のように回転軸に対し回転させることができ、アノードに対するイオンビームスリットの位置を相対的に動かすことができる。スリットの直径は $0.3\text{mm}$ 、ひとつのアノードの幅は $3\text{mm}$ 程度である。

##### 3.1.2. データ取得系

アノードからコンピューターまでのデータ取得系を図3.4に示す。隣接する2つのアノードからそれぞれ信号線と同軸ケーブルでチャンバー外へ引き出す。隣接2つのアノードをそれぞれアノードAとアノードBと呼ぶとする。図3.4左側がアノードでMCPからのチャージパルスを受ける。これはチャージアンプでチャージ量を電圧に変換する（図のCSA）。次にこれをアンプで増幅する（図のAmp）。

アノードAとBの波高の和をディスクリレベル以上（図のdiscriminatorで検出）ならこれをトリガーにして同時にそれぞれのパルスの波高値（ピークホールドしたもの）を波高分析（図のADC（Analog to Digital Converter）し、その値をコンピュータで記憶する。閾値は、MCPからのチャージ量換算でおよそ $9 \cdot 10^{-14}$ クーロン（ $= 5 \cdot 10^5 \text{ electrons}$ ）である。このようにすると隣接2チャンネルの信号波高の相関が取れる。

波高分析は、 $2048\text{ bits}$ で行うが、データ保存の際にこれを $128\text{ bits}$ へ圧縮している（相関図のデータは重い）。この $128\text{ bits}$ の値（波高分析値）と電荷量（MCPからの入力電荷量）の関係を図3.5に示す。2つのデータ取得系はほぼ同じ線形な特性を持っている。

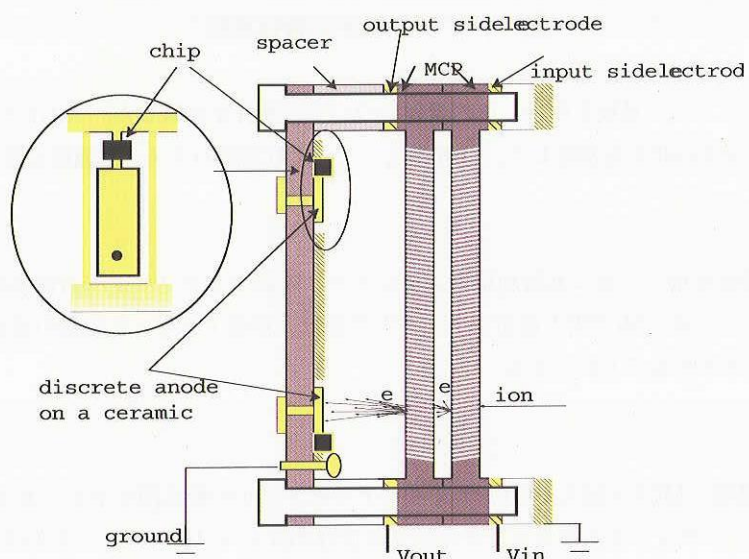


図3.1 MCPアセンブリの模式図

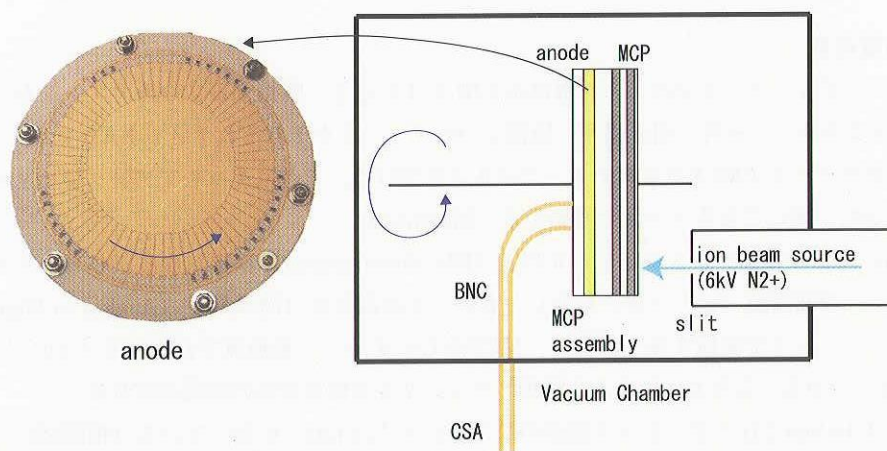


図3.2 実験系概観，イオンビームを直接MCPに当て，その電荷増幅されたものをアノードで受ける。  
図の矢印のように回転させることにより，イオンビームの当てる位置をずらすことができる

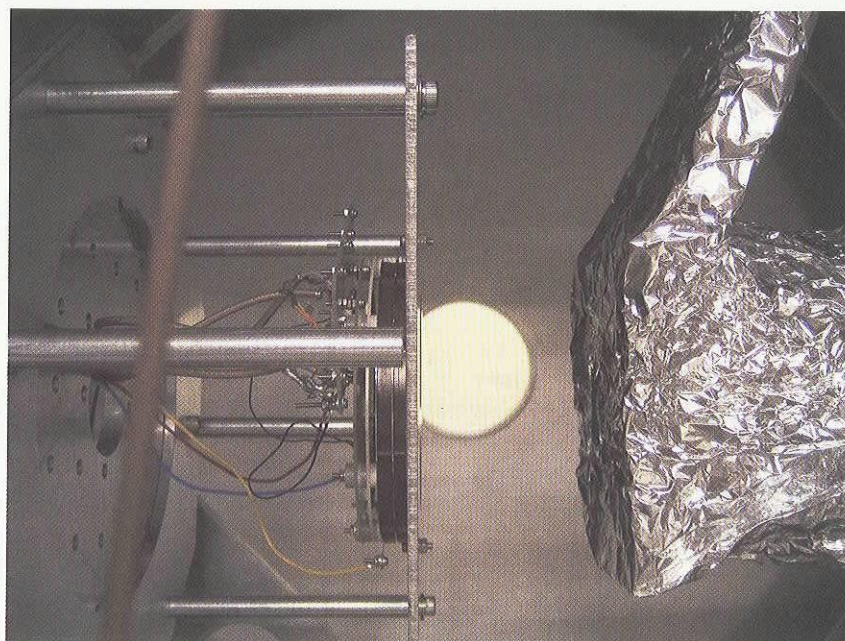


図3.3 アノードアッセンブリを真空チャンバー内、イオンソース前にセットしたときの写真、右がイオンソース、左がMCPアッセンブリであり、回転台に取り付けてある

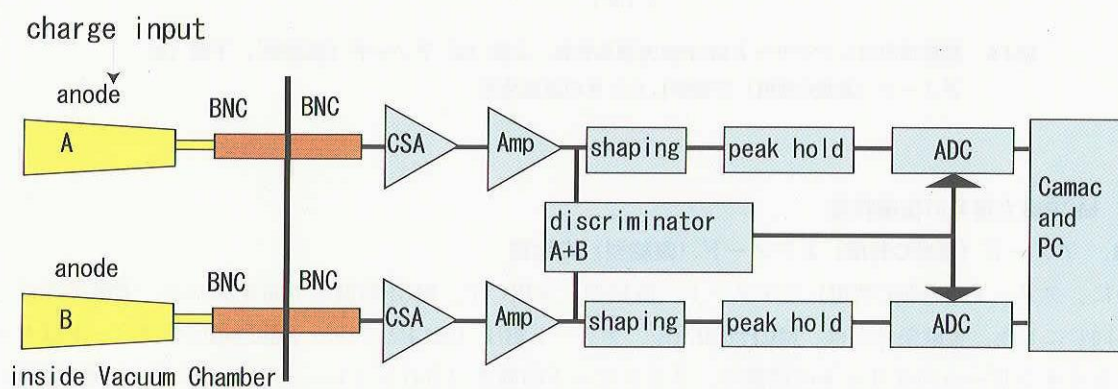


図3.4 データ取得系模式図，2チャンネル同時にADCすることにより隣接チャンネルの信号の相関をとる

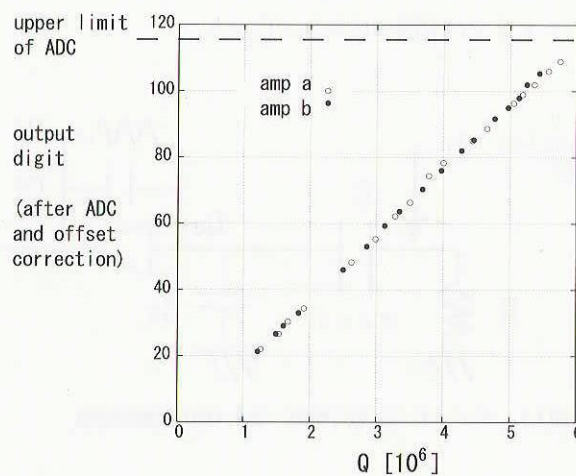


図3.5 入力電荷量とAD変換量，アノードAの処理系（amp a）とアノードBの処理系（amp b）は同じ線形性

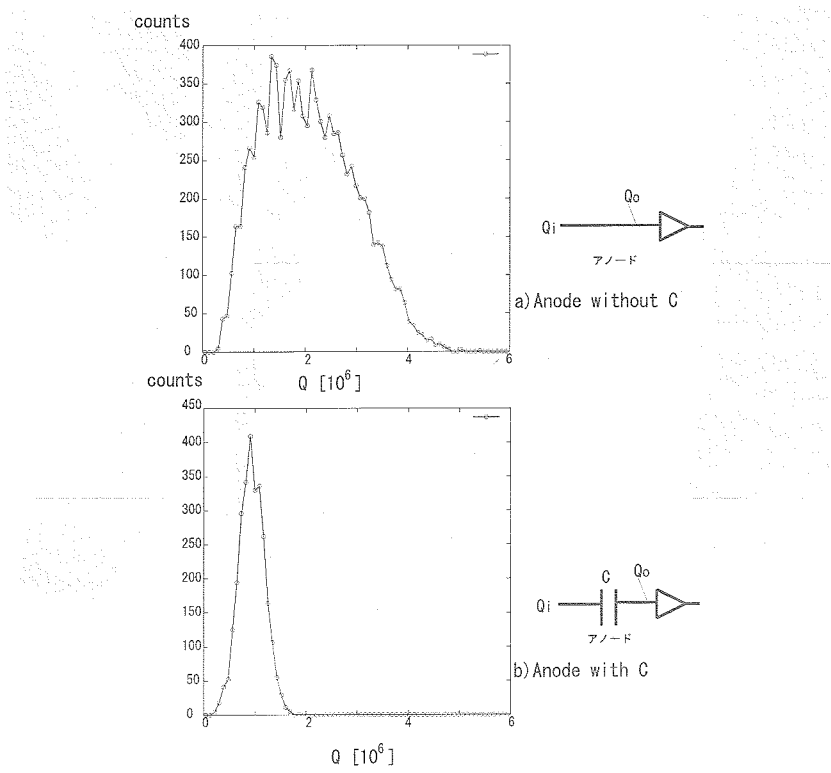


図3.6 基板利用コンデンサーとMCP出力波高分布，上図 (a) アノード（直結型），下図 (b) アノード（基板C利用）で観察したときの波高分布

3.2. MCP出力信号の伝達特性

3.2.1. アノード（基板C利用）とアノード（直結型）の比較

始めに、アノード（基板C利用）とアノード（直結型）を用いて、MCPの波高分布を調べた。実験条件は、それぞれ同じにした。実験条件とは、MCP印加電圧、アノード電圧（MCPとアノード間に電圧でアノードはグラウンド）とイオンビームのスリットの位置や、イオンビームの強さ（カウントレートとエネルギー）などを指す。MCPの波高分布は、ADCのレンジに比べて広い広がりを持つ。それを補うために、隣接する2つのアノードを用いて、MCP出力電荷量を分割して落とし、半分にした電荷量を2つの荷電アンプとADCでそれぞれ波高分析を行う。MCP出力電荷は、MCPとアノードまでの有限の広がり広がる。

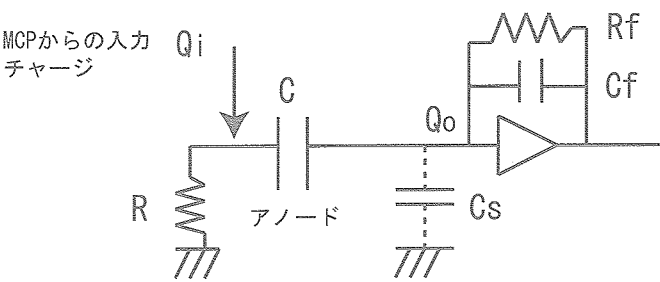


図3.7 アノード（基板C利用）まわりの等価回路図

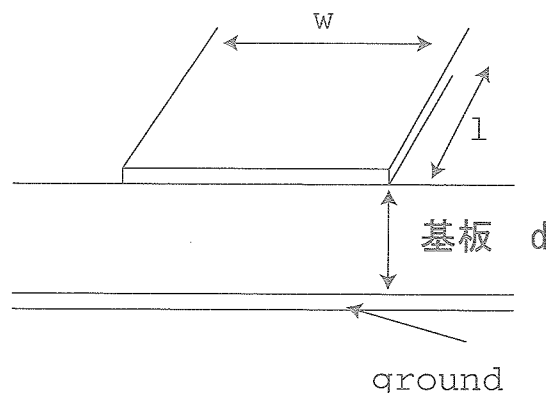


図3.8 信号線による浮遊容量

それを2つのアノードで受け、2つのアノードから得られた波高の和を取る。

図3.6は、MCP印加電圧が1.6 kVであるときの波高分布である。また、一つのアノードとチャージアンプでは、図3.5で表したように、電荷量は最大  $3 \cdot 10^6$  までしか測定できない。今は、2つのアノードに分割して測定させることにより、その2倍の  $6 \cdot 10^6$  まで測定できる。それが図の横軸であり、波高を電荷量に換算している。基板利用コンデンサーを用いたときの波高は、アノード（直結型）のその50%に減衰している。また波高分布の形も相似にならない。波高分布の広がりを表す  $PHR (= 2 \times FWHM/pulseheight)$  は、アノード（直結型）で120%、アノード（基板C利用）で70%である。

50%の減衰を、基板利用コンデンサーのCに原因を求めると、図3.7のような等価回路を考え、浮遊容量  $C_s$  によって分圧されるのではないかと考えられる。浮遊容量  $C_s$  は、アノード裏面で、アノードパッドからASICまで引き出している線が考えられる。そこに対応するアノード表面は、シールドになっているため、その間に  $C_s$  が生じる。

$$C_s = \frac{\epsilon w \times l}{d} \quad (3.1)$$

$C_s$  は、図3.8のように線の幅  $w$ 、長さ  $l$ 、厚さ  $d$  を用いて表される。

実験で観察される減衰から  $C_s$  は、基板のCと同じく3 pFと見積もられる。しかし、引き出している線による  $C_s$  は、面積からは1 pF以下である。実行的なCおよび、 $C_s$  について検討が必要である。

### 3.2.2. 面積比の利用

アノード（基板C利用）では、表2.1にあるように、アノード表面と裏面のパターン面積の比を変え、電荷量の一部をシールドとカップルさせることで、荷電アンプへの入力電荷量を調整することを考えている。実際に、試験を行い、荷電アンプへの入力電荷量を測定した結果が図3.9である。横軸は、MCP印加電圧である。Dの線は、アノード（直結型）を用いたものであり、最も入力電荷量が多い。Aの線が面積比が1:1であり、B、Cは、1:0.7と1:0.1である。それぞれ、入力電荷量は、Aの入力電荷量の0.8、と0.2倍である。これは、面積比から予想されるよりすこし大きい。が、ほぼ面積比を用いて調整できるといえる範囲内である。ASICは、一度製作すると物理的な回路内部の変更ができない。しかし、アノード（基板C利用）の表裏の面積比により、荷電アンプへの入力を調整することができる。



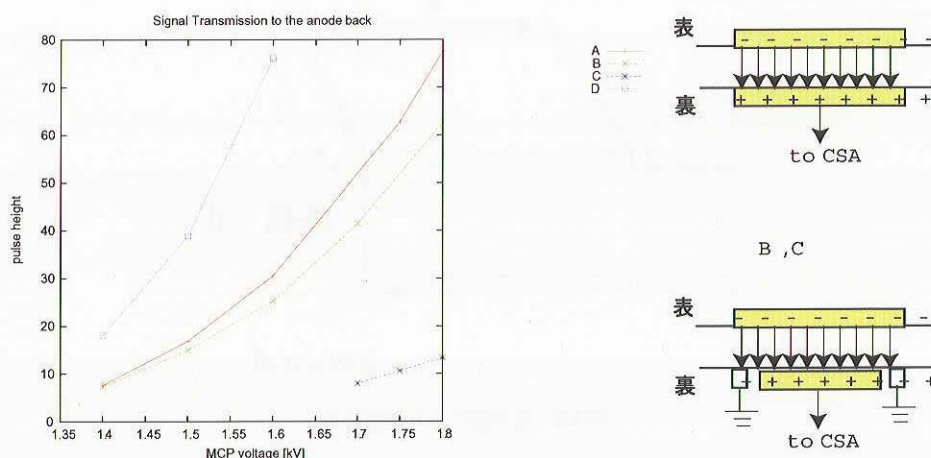


図3.9 面積比の利用, 表 2.1 を用いたときのMCP出力波高の平均値.

### 3.3. 隣接アノードへの電氣的クロストーク

マルチアノードは、個別のアノードが隣接する構造をとる、そのため、導体パターン間に必ず存在する、電氣的クロストークの特性を抑える必要がある。そして、信号検出の際に、隣接するチャンネルからの電氣的クロストークを無視できるだけ、ディスクリミネーターの閾値を設定する必要がある。しかし、プラズマ検出に用いるマルチアノードでは、この閾値をできる限り低くしたい。そのため、電氣的クロストークも十分に小さいことが望ましい。具体的には、15 %以下が望ましいと考えている（次章参照）。電氣的クロストークは大別して、電磁カップリングと静電カップリングであるが、ここで問題となるのは回路基板の線路が有限の長さ、厚み、面積をもつことで生じる静電カップリングである。

本実験では隣接2チャンネルの信号の相関が取れる。これを利用し、電氣的クロストークを求める。

#### 3.3.1. 波高の相関図

隣接するアノードA, Bがあるとき、Aが検出する波高A (=phA) を考える。図3.10 (a) 図にアノードA, Bの表面 (MCP側) を表した。(b) はx-y平面を横からみた模式図でありアノードA, Bにおちたチャージ量を表した。MCP出力チャージが落ちたとき、Aが検出する波高A (=phA) は、アノードAの導体パターン面積に落ちたMCP出力チャージ量と波高B (=phB) の電氣的クロストークの和になる。

$$phA = \int_{anodeA} n(x-c)dS + phB \times crosstalk \quad (3.2)$$

$n(x)$  は、チャージクラウドの電荷密度分布、 $c$  はチャージクラウドの中心位置でありスリット位置による、 $crosstalk$  は電氣的クロストーク、波高Bについても同様の式が成り立つ。波高Aと波高BはMCP出力チャージクラウドと電氣的クロストークの影響で一定の相関を持つことがわかる。電氣的クロストークをみるときはチャージクラウドの影響がないようにしてphAとphBの比を見ればよい。アノードBにだけMCP出力チャージが入るようにして比を取る。

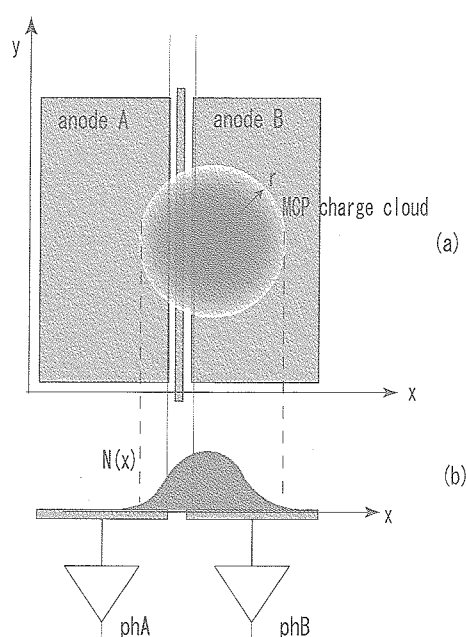


図3.10 MCP出力とアノードの検出波高，(a) アノード表面アノードAおよびBにMCP出力チャージが落ちている，(b) はx-y平面を横からみた模式図。

### 3.3.2. 実験結果

片方のアノードAからイオンビームのスリットを離していき，phBとphAの相関を調べた．隣接2チャンネルの相関図を図3.11（アノード（基板C利用）），図3.12（アノード（直結型））に示す，横軸，縦軸は波高A（phA），波高B（phB）である．相関の統計をとり，色はカウントを表している．イオンビームのスリットはちょうどアノードBのパッドの中央に位置するときである．よってアノードBは，波高BのばらつきはMCPの電荷増幅の統計的揺らぎによる．高い波高を検出しているのに対し，波高Aは小さくなっている．ここで重要なのは，基板利用コンデンサーを用いたアノード（図3.11）では，phAとphBが相関を持っていることである．これは電気的クロストークの影響である．一方，アノード（直結型）では強い相関はなく，電気的クロストークはほとんどないと言える．今，この相関図はアノードBの中央にMCP出力チャージが落ちているが，これよりスリットをアノードAから遠ざけても，AとBの波高の高さは変わるが，その比を表す直線の傾きは変わらない．また電気的クロストークは，MCP印加電圧にもほとんど依存しない．ダークカウント（MCPのノイズ）でも同じであることがわかった．

この実験結果より，電気的クロストークによる隣接するアノードへのカップリング量は，アノード（直結型）で1～2％，基板利用コンデンサーを用いた場合で10％であった（表3.1）．アノード（直結型）では，電気的クロストークなしと考えて差し障りない．基板利用コンデンサーでは10％のカップリング量があるが，マルチアノードの信号検出の際，ディスクリレベルを信号（予想される利得から想定される波高分布のピーク）の10％にすることで回避できる．ディスクリレベルが高いほど無視する信号が多くなるので，カウントミスが出るが，10％というのはそれを大きく損ねない．

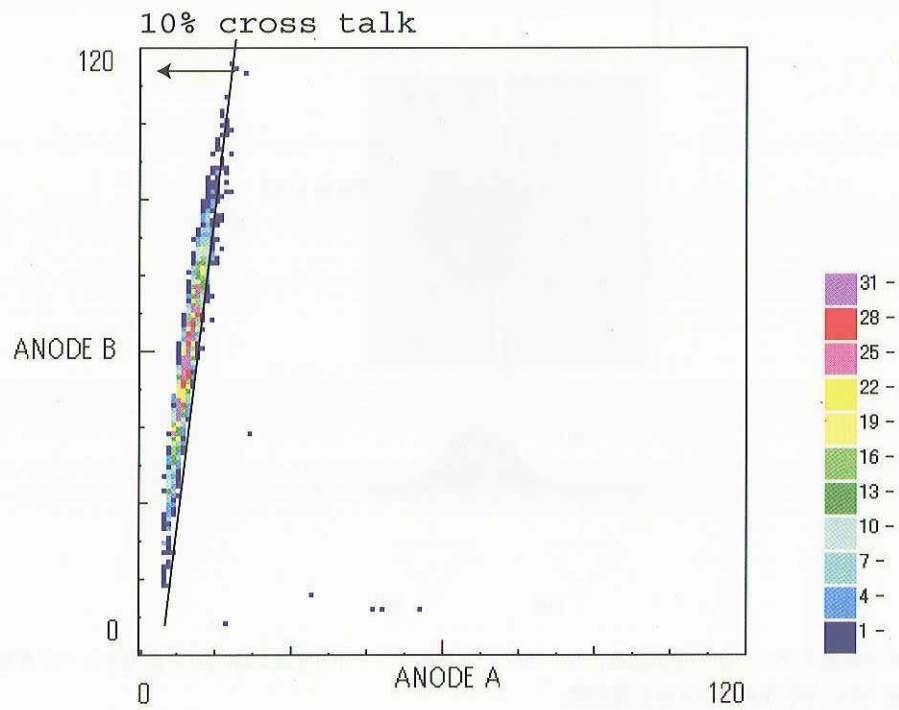


図3.11 隣接するアノード（基板C利用）が検出する波高の相関，イオンビームのスリット位置は、アノードBパッドの中央。

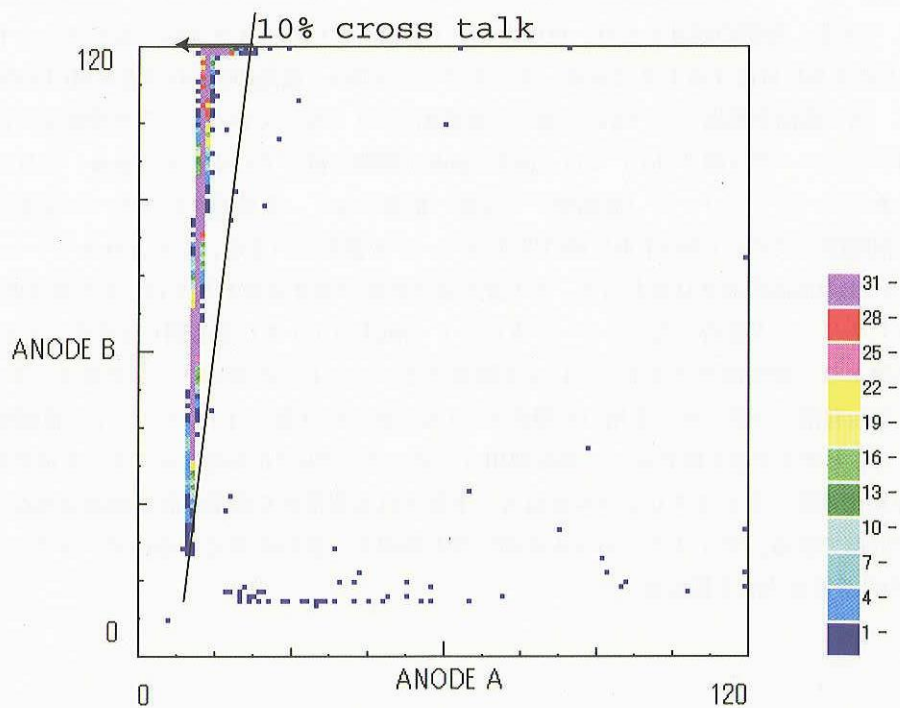


図3.12 隣接するアノード（直結型）が検出する波高の相関．イオンビームのスリット位置は、アノードBパッドの中央。

表3.1 電気的クロストーク測定結果

	カップリング量	電気的クロストーク
アノード（直結型）	1～2%	なし
アノード（基板C利用）	10%	小

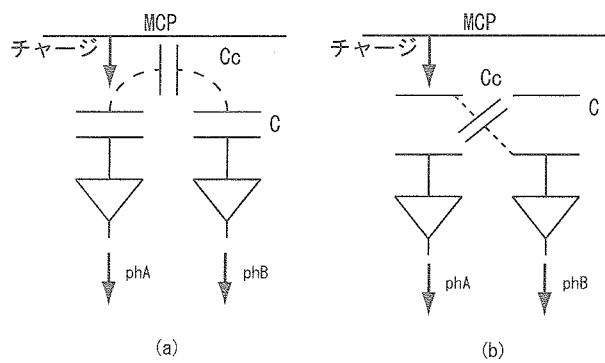


図3.13 隣接アノード間の静電カップリング，(a) 導体パターンが持つ有限の厚みによる影響，  
(b) 平行コンデンサーが持つ有限の面積による影響

3.3.3. 考察

アノード（直結型）で電気的クロストークがないことから、アノードの裏からチャージアンプまでの信号線による電気的クロストークはない。基板利用コンデンサーを用いるときの電気的クロストークは、この小さい静電容量Cの影響が出ていると考えられる。例えば、平行コンデンサーの導体パターンが、有限の厚みと面積（エッジ）を持つ影響による静電カップリングが考えられる。有限の厚みの影響を表したのが、図 3.13 (a) であり、カップリング量は、基板利用コンデンサーの静電容量Cと厚みによる静電容量Ccを用い、 $crosstalk = \frac{phA}{phB} = \frac{Cc}{Cc+C}$ で表される。有限の面積の影響は図 3.13 (b) のように表され、有限の面積による静電容量Ccを用い、カップリング量は、 $crosstalk = \frac{Cc}{C}$ で表せる。よって、基板利用コンデンサーの小さい静電容量の影響が原因と考えられる。実験結果より、このカップリング量、 $phA/phB$ が 10 %、 $C \sim 3 pF$ なので、隣接アノード間の静電容量はCc  $\sim 0.3 pF$ 程度あることにある。このときアノード面積Sは 13 mm× 2.5 mmアノード間距離gは 0.35 mm（うち 0.15 mmはシールド）、MCPーアノード間距離Zは 2.5 mmである。Cc $\sim 0.3 pF$ というのは大きく、有限の厚さと面積の影響だけで説明できない。MCPを介したカップリングの可能性も考えられるが、いずれの場合も 0.3 pFというのは大きく、実効的な基板利用コンデンサーの静電容量の大きさなど、検討が必要である。

3.4. まとめ

MCP出力チャージを入力に用い、基板利用コンデンサーと電気的クロストークの特性を得た。基板利用コンデンサーは信号検出において波高の減衰がみられたが、信号検出が十分可能なレベルである。また、パターンの表と裏の面積比を利用した荷電アンプへの電荷量の調整も可能である。その量は、面積比にほぼ一致する。基板利用コンデンサーは高電圧絶縁コンデンサーとして使用できるという貴重な結果を得た。

電気的クロストークは基板利用コンデンサーでは 10 %、アノード（直結型）の構造ではほとんどないといえた。10 %というのも決して大きくはなく、本マルチアノードでは電気的クロストークが問題にはならないだろうと言える。もちろん、この値は小さいほど望ましく、そのためには基板利用コンデンサーの静電容量を大きくすることが今後の課題である。

静電容量を小さくする方法は、個別アノードの面積を大きく取るか、基板の厚さを薄くするかの2通りである。しかし、現状の厚さ1 mmは構造強度の要求であり、衛星搭載機器として用いる場合、これ以上薄くはできない。よって静電容量を大きくするには、個別アノードの面積を大きく取ることが望ましい。または、アノード基板を層構造にして間にシールドを挟み、構造的な厚さを保ちながら、実質的に薄くすることなどが考えられる。

## 4. 試作モデルの試験

実際に試作した、ASIC搭載型MCPマルチアノード（設計の詳細は2章）の試験を行った。ASICは、SSD出力に合わせてある為、小さい入力電荷量が想定された仕様になっている。MCP電荷量は、この10倍であり（MCP2段の場合）、MCP出力を10分の1に減衰させることができる表2.1のタイプCのアノードを用いるのが適当である。適当というのは、位置検出アノードとしての最も良い性能が期待できるという意味である。試験にアノード単体の特性試験より、2章の表2.1のアノードで、MCP出力を10分の1に減衰させることができる。本章では、試作モデルの位置検出の特性試験の結果を紹介し、今後の課題を示す。

### 4.1. 試験の概要

実験系は、データ取得系を除き、3章と同じである。データ取得系であるASICは、荷電アンプからカウンターまでを含み、これをFPGAで読みPCでデータを得る。3章で行った特性試験では、同時に2つのアノードしか観察できなかったが、ASICでは、全64のアノードを観察できる。得られるのは、アノードごとのカウント値である。イオンビームは、スリットを通し、MCP上の1箇所へ当てる。MCPとアノードアッセンブリ全体を回転させることで、アノード上のスリット位置を移動させる。

はじめに、イオンビームを照射していないときの試験モデルのカウントを調べた。ディスクリミネーターの閾値を下げていくと、より大きなノイズカウントが検出される。それが図4.1であり、アノードのタイプにより、異なるカウントが検出される。これは、アノード表面で受けた信号が、ASICへ到達するまでに減衰するためである。その減衰の大きさは、表2.1のC, B, A, Dの順（図3.9）であり、アノード表面で受けたノイズをそれぞれの減衰率で、減衰されASICへ入力していると解釈できる。図4.1は、各アノードの感度（sensitivity）のようなものを反映していると解釈できる。本来は、MCP全体へ一様なビームを照射することで、全アノードのsensitivityを試験することが望ましいが、MCPの径（80 mm）程度の広さを持つ一様ビームをつくるのが難しい。図4.1をanodeの感度と解釈するためには、すべてのアノードが受けるノイズの大きさは、同じであるという仮定が必要である。この例外は、ch 0とch 63であり、他より明らかに大きいカウントがでている。この2つは、ASICのチャンネル列の最も端に、位置することに起因（edge effect）すると考えている。これは、今後の設計時に、対処する予定である。

その他のアノードは、閾値を高くすることで、ノイズは、ほとんど無視できる大きさ（MCPのダークカウント程度）に抑えることができ、イオンビームの検出に用いることができる。また各アノードの感度も、C, B, Dではそれぞれ16つのアノードでほぼ、一様である。Aは、0ノイズカウントにトレンドがあり、今後、検討する必要がある。



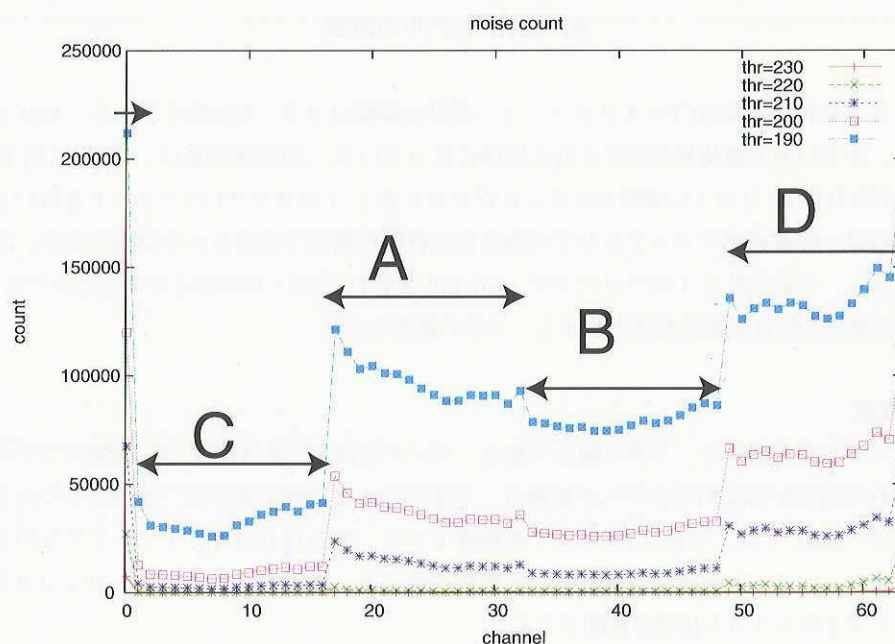


図4.1 全チャンネルのノイズカウント，各チャンネルの感度を反映している．色は，信号閾値の違い，A～Dは，表2.1にある4種類のアノードを表す．

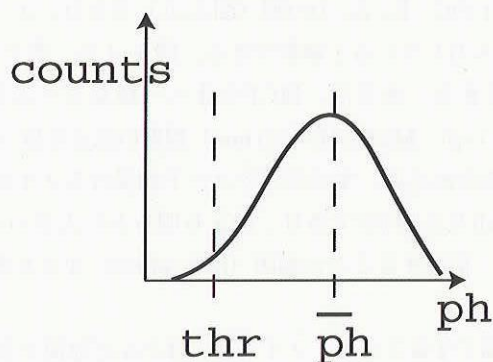


図4.2 MCPの波高分布とマルチアノードの信号閾値

#### 4.2. 位置検出特性

マルチアノードでは，荷電アンプへ入る電荷量が閾値 (thr) 以上の場合に，MCP信号をカウントする．MCP出力信号は，電荷増幅の統計的揺らぎが大きく，その波高分布は大きな広がりを持つ (図4.2)．十分に電荷増幅されず，閾値より電荷量が小さいとその信号は，無効となってしまふ．MCPから得られる最大のカウンtrateは， $\sim 10^{5\sim6} \text{ count/sec}$  (2章) 程度である．プラズマ検出器では，時間分解能をあげるため，できる限り高いカウンtrateにも対応できる必要がある．よって，MCPからの信号をできる限り，ロスなくカウントし，ダイナミックレンジを高くしたい．プラズマ検出器では，閾値 (thr) は，MCPの波高分布の平均値を  $\bar{ph}$  とすれば，その0.2倍程度に小さく取りたい．

$$thr = 0.2\bar{ph} \quad (4.1)$$

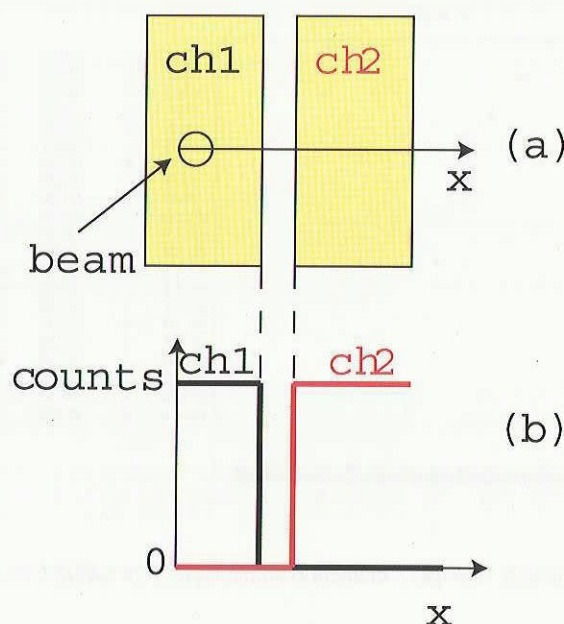


図4.3 理想の位置検出特性理想の位置検出特性, (a) アノードとビーム位置の模式図,  
(b) その時のアノードの理想的なカウントの変化

thrは、バックグラウンドノイズと隣接チャンネルからの10%の電氣的クロストークによるノイズより大きくとる必要がある。MCPの信号出力回数に対するアノード検出カウントの比率を、アノードのcollection efficiencyとして定義される。プラズマ検出では、collection efficiencyをできる限り高くしたい。

#### 4.2.1. 理想の位置検出特性

図4.3 (a) のような、個別アノードからなるマルチアノードを考える。実際は、これが円周上に並ぶ。個別アノードは、有限のgapをもって、並べる。そのとき、このアノードの位置検出特性は、図4.3 (b) のようになることが望ましい。ビーム（のフットプリント）が当たるアノードのみにカウントが出て、アノード上で一様となることが理想である。ビームの当たる位置がx軸方向へ動いたときのch1のアノードのカウント値を黒で、その隣のch2のアノードが検出するカウントを赤で示した、ビーム位置がアノード上にあるときのみ、カウントのロスなくMCP信号を検出することが理想である。実験では、スリットを通してビームの位置を移動させていき、そのときのカウントを得ることで、位置検出特性を得る。

#### 4.2.2. 結果

実際に、試験から得られた位置検出特性が、図4.4、図4.5である。横軸がビームの位置が角度で示してある。アノードのピッチは、 $5.635^\circ$ であり、図は、 $7^\circ$ を $0.5^\circ$ 間隔でビームをあてた。色は、アノードの違いであり、ノイズの多かったch0、ch63以外をすべて表示している。ビームが当たっているアノードのみ（黒がch7、赤がch8、両方とも表2.1のC）でカウントがある。x=5°で隣のアノードが入れ違いにカウントを検出し、位置検出アノードとして、実用可能であることがわかる。

ch7とch8では、ピークのカウント値が異なるが、これは実験系の問題であり、ASICやアノードの特性ではない。実験では、ビームをx=0°からx=7°へ動かしているが、その間にビームの強度が変化したためである。図4.4と図4.5では、MCPの波高分布に対するディスクリミネーターの閾値が異なる。図4.4では、MCP電圧が1.7kV、図4.5では、1.9kVであり、MCP電圧によって電荷量を変化させている。



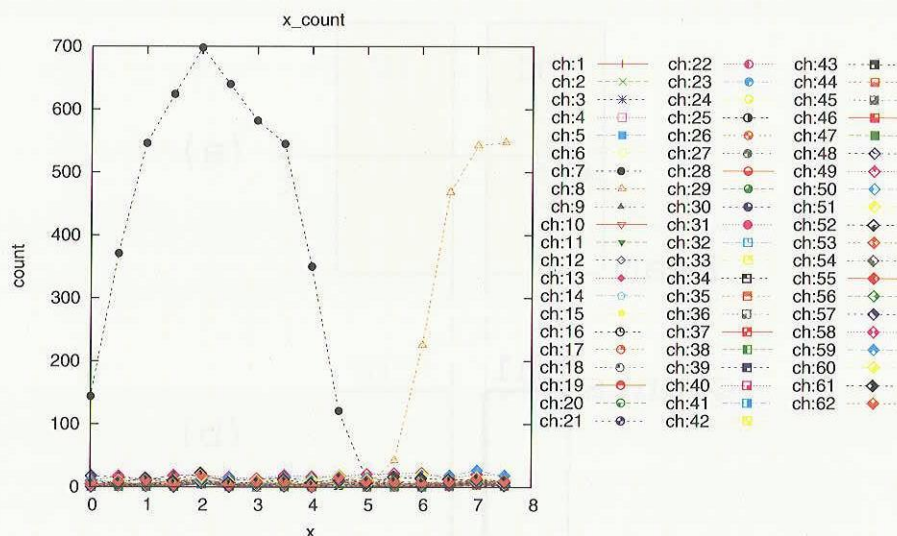


図4.4 試作モデルの位置検出特性 ( $thr=ph$ ), collection efficiencyは, 20 %程度だが, 位置検出は正確である.

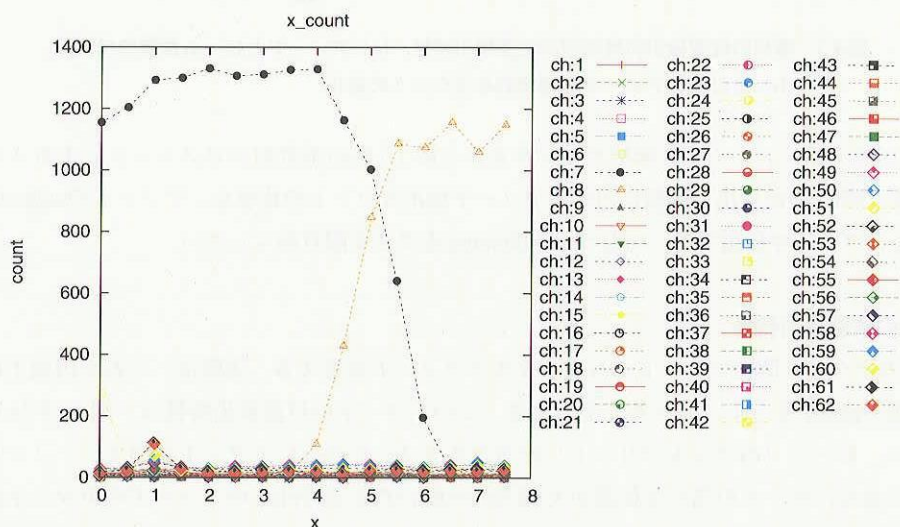


図4.5 試作モデルの位置検出特性 ( $thr=0.2 ph$ ), collection efficiencyは, 80 %程度で, 高いダイナミックレンジの測定が可能である. しかし, 同時に2チャンネルにカウントが出る領域が  $2^\circ / 5.625^\circ$  程度存在するため位置検出に不確実性が生じる.

図4.4では,  $thr=ph$ であり, 半分以上のMCP信号を無視している. カウントは, 10秒間の積分値である. 実際のイオンビームのカウントレートは, 120 cps程度であると予想される. アノード全体でのcollection efficiencyは, 20 %程度である. これは, MCP出力電荷量のアノード上での有限の広がりによるため, シールドや隣のチャンネルへまたがって落ちる場合,  $thr$ より電荷量が小さくなる比率が大きくなるためである. しかし, 隣接するチャンネルにまたがってカウントが出ないため, 位置検出の信頼性が高い. ディスクリミネーターの閾値を調整する(大きくする)ことによって, 高い位置分解能を得ることができる. その限界は, 個別アノードを並べるピッチで決定される.

一方, 図4.5では,  $thr=0.2 ph$ であり, ほとんどのMCP信号をカウントする. アノードのcollection efficiencyは, 80 %程度であり, 本研究のプラズマ検出により望ましいモードである.  $thr$ は, 10 %の電気的クロストークは, 無効にできる大きさであり, 図4.5でも, 電気的クロストークによるノイズは, 出ていない. しかし, MCP

出力電荷量の有限の大きさの影響で、ch 7 と ch 8 の間、 $x = 4^\circ$  から  $x = 6^\circ$  の間で、ch 7 と ch 8 両方にカウントが出ている。 $2^\circ$  は約 1 mm に相当する。これをなくすためには、アノード間の gap を物理的に空ける必要があり、今後のアノード製作時に考慮する必要がある。

#### 4.3. まとめ

イオンビームを用いて、ASIC搭載型MCPマルチアノードの試作モデル試験を行った。試験結果から、高いアノードの collection efficiency と、正確な位置検出ができる条件は、以下の様にまとめられる。

- ・ ディスクリミネータの閾値

閾値は、波高の平均値  $\overline{ph}$  の 0.2 倍で、電氣的クロストークによるノイズを防ぐことができる。

- ・ 個別アノード間の gap

MCP出力電荷のアノード上での広がり程度あける必要がある。ただ、空けるのではなく、シールドをはさんで電荷を吸収させる必要がある。しかし、gap が大きすぎるとアノードの有効面積が小さくなり、collection efficiency を下げるため、最適化が必要であり、今後の課題である。

- ・ ASIC

MCP出力電荷量にあわせた仕様で製作する必要がある。

このとき、ディスクリミネータの閾値は適切かつ、柔軟に設定できるような設計にする必要がある。

## 5. 結論

### 5.1. 全体のまとめ

磁気圏プラズマ観測において電子のダイナミクスを捉えられる時間分解能の達成には高い信号処理能力をもつ検出部が必要である。ASIC技術とMCPマルチアノードを組み合わせる新しいタイプの検出部は高い時間分解能だけでなく、小型、軽量、低消費電力となる期待が持てる。

はじめに、小型化およびASICの搭載上で重要な条件となる、高電圧絶縁部を、アノードの基板の表と裏の導体パターンで代用することを検討した。この基板を利用したコンデンサーを用いたアノード（基板C利用）では、検出する波高に50%の減衰がみられた。また、隣接する個別アノード間の電氣的クロストークは実験から10%あることがわかった。基板利用コンデンサーを用いないアノード（直結型）では、電氣的クロストークは、1～2%であり無視できる大きさであった。基板利用コンデンサーを用いたときの信号の減衰および電氣的クロストークは、伴に低い静電容量の影響で理解される。厚さ1mmのアルミナ基板を利用した3pFの基板利用コンデンサーは、高電圧絶縁コンデンサーとして代用できるという貴重な結果を得た。また表と裏の導体パターンの面積比を利用することで、荷電アンプへ入力する電荷量を調整することが可能である。一度製作すると、物理的に中の回路変更が出来ないASICでは、アノードを用いてこれを調整できることは、設計の変更に柔軟に対応でき、重要な特徴である。

次に、ASIC搭載型MCPマルチアノードの試作モデルを試験した。結果、位置検出の特性は、荷電アンプへ入る波高とディスクリミネータの閾値で決まり、設計から予想される性能を示す。具体的には、イオンビームの照射した位置のアノードのみカウントを検出し、他のアノードでカウントはなかった。閾値を波高平均値の0.2倍程度で、10%の電氣的クロストークは無視できた。波高平均値の0.2倍程度の閾値は、プラズマ検出器に必要なダイナミックレンジを可能にする。今後の課題は、個別アノードのgapの最適化、MCP検出に特化したASICの開発が挙げられる。また、高フラックス計測時のMCPの性能確認も必要である。

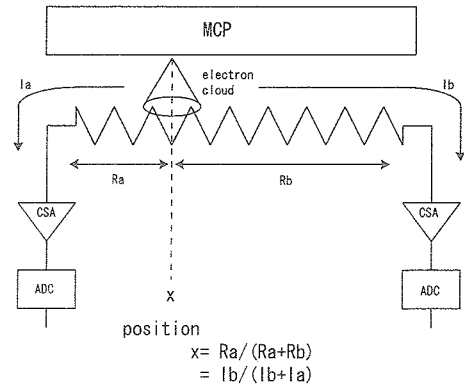
これらを踏まえ、われわれの新しいタイプのマルチアノードは、さらに研究を進める必要があるものの将来の磁気圏ミッションで、高時間分解能な高温プラズマ観測へ適用可能できると結論する。

付録A. MCPアノードのレビュー

様々な位置検出アノードがあり、それぞれ利点、欠点を持っている。ここでは、主な位置検出アノードの原理と特徴をまとめる。特に、時間分解能と衛星搭載適格性に注目した。重量、消費電力などのリソースが少ないものの衛星搭載機器として優れている。

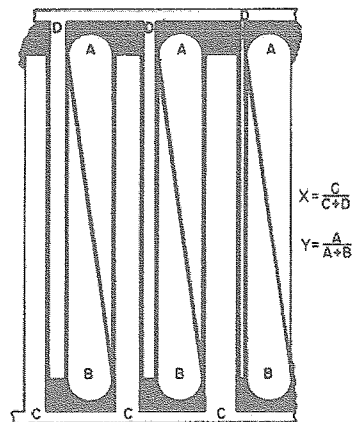
A.1. 位置検出原理

resistive anode



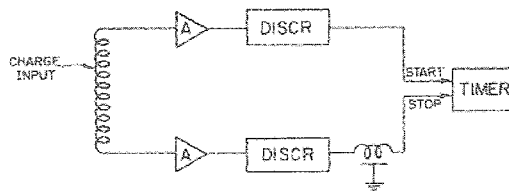
図A.1 resistive anodeの位置検出原理模式図，図は1次元アノード，重心位置  $x$  のMCP出力チャージは抵抗比により  $I_a$ ,  $I_b$  に分割される，それをチャージアンプ（CSA）で電圧に変換後，波高分析（ADC）を行う。

resistive anodeは抵抗による電荷分割により位置検出をおこなう。図A.1にあるように位置検出するところに抵抗体を置き，その両端へチャージアンプをつなぐ構造をしている。MCP出力電荷は，落ちた場所からアンプまでの距離に反比例した電流に分割される。このチャージアンプへ分割された電流量を求めると位置の情報に焼きなおす。1次元位置検出に必要なチャージアンプは2つ，2次元で4つである [Lampton and Carlson, 1979]。このアンプの少なさは，信号処理系規模，重量，消費電力などに有利である。欠点は，時間分解能を稼げないことである。チャージアンプで出力される電圧を波高分析（AD変換）するため，信号処理に要する時間が長いからである。また，MCPからのすべての信号処理をひとつの信号処理系で処理するため，ハイカウントレートに対応できない。さらに，アノードの大きさに応じたサイズの大きい抵抗を使うことは，その非一様性も問題になる。



図A.2 wedge and strip anode位置検出模式図，wedge（山形）とstrip（細長い長方形）の導体パターンからなる。図のA, B, C, DはそれぞれチャージアンプとADCにつながっている [Martin et al, 1981]。





図A.3 delay-line anode模式図, [Lampton et al, 1987] パルスの到達時間の差はMCP出力チャージの重心位置を反映する。

### wedge and strip anode

抵抗体を使用しないが、電荷分割して位置検出を行うところはresistive anodeと同じであり、利点、欠点もresistive anodeと似通っている。アノードの導体パターンに落ちたMCP出力電荷量を測る点で波高分析（AD変換）が必要である点がresistive anodeと主な共通点である。wedge and strip anodeでは、導体パターンに工夫があり、図A.1のような形状で2次元の位置検出ができる。これは、resistive anodeの欠点（抵抗体の非一様性など）を補う2次元アノードとして開発された経緯があり、抵抗体を使わないこと、アンプを最小3個で2次元の位置検出ができることなどがresistive anodeより優れている [Martin et al, 1982]。しかし、wedge and stripではMCP出力チャージクラウドの電荷密度分布の影響で検出される像に縞模様が出る [Smith et al, 1989] など一概にresistive anodeより優れているとも言えない。高い位置検出（または空間検出）ができるのが利点であるが、プラズマ観測器ではその利点はあまり重視されない。

### delay-line anode

delay-line anodeは前の2つとは異なり、AD変換をしない位置検出方法である。構造は図A.1にあるように、MCPからのチャージがはいるところは1つの導体線路であり、両端にチャージアンプとタイマーをつなぐ。導体線路に落ちたMCP出力パルス信号は、電磁波の伝播速度で線路両端にあるチャージアンプへ到達する。片方の信号をスタート信号とし、もう片方はdelay回路で遅らせ、ストップ信号としてタイマー（TDC）へ入力する。信号伝播時間の差は、MCP出力チャージの落ちた位置を反映する。

利点は、ADCを行わないため、信号処理時間が高速なことである。難点は、前の2つ同様、MCPへ落ちる信号はすべてこの1組の信号処理系で行うことで、カウントレートに不利である。またアノードへ同時に2箇所パルスが落ちると位置を誤検出する。

### A.2. 各アノードの特徴

これらの特徴を時間分解能と衛星搭載機器に重要なその重量や消費電力についてまとめたものが表A.1と、それを定性的にまとめなおしたものが表A.2である。表A.1の信号処理時間とは、1カウントを処理するのに要する時間である。カウントレートは、信号処理時間をdead timeとして、dead time以内にパイルアップする確率を1%としたときの値である。時間dead time  $\delta t$  内にパイルアップする確率は

$$1 - e^{-\delta t/t} \sim \frac{\delta t}{t} \sim \frac{1}{100} \quad (\text{A.1})$$

カウントレートは $\frac{1}{t}$ であり、以下の関係式に直すことができる。

$$\text{カウントレート} \sim \frac{1}{100} \times \frac{1}{\text{信号処理時間}} \quad (\text{A.2})$$

	信号処理時間	カウントレート	重量	消費電力
resistive anode wedge and strip	2 $\mu$ s	$5 \cdot 10^3$	○	0.2W
delay line anode	100ns	$10^5$	○	0.2W
マルチアノード	50 ns	$2 \cdot 10^5 \cdot$ チャンネル数	×	$0.1W \cdot$ チャンネル数

表A.1 MCP位置検出アノードの特徴，ここでマルチアノードはASIC以外の技術での値. resistive anodeとwedge and strip anodeはADCを行うという共通点があり，これらの項目では同じ特徴

	時間分解能	衛星搭載適格性
resistive anode	△	◎
delay line anode	○	◎
マルチアノード	◎	×

表A.2 表 A.1 をまとめ直したもの. 時間分解能と衛星搭載機器に適しているかについてまとめた. 衛星搭載適格性とは信号処理系の重量，消費電力のことを指している

参 考 文 献

[ 1 ] Mcp アッセンブリ技術資料，浜松ホトニクス.

[ 2 ] D.N. Baker, et al. neutral line model of substorms :past results and present view*J.Geophys.Res.*, Vol. 101, No. A6, 1996.

[ 3 ] M.L. Edgar, Robert.Kessel, J.S.Lapington, and Dvid.Walton. *Rev.Sci.Instrum*, Vol. 60, No. 12, 1989.

[ 4 ] A.D Jonstone, et al. Peace:plasma electron and current experiment. *Space Science Revies*, Vol. 79, , 1997.

[ 5 ] M. Lampton, O.Siegmund, and R.Ra{anti. Delay line anodes for microchannel-plate spectrometer. *Rev Sci Instrum*, Vol. 58, No. 12, 1987.

[ 6 ] J.S Lapington. the effect of secondary electron emissio n on the operation of position senseitive anodes. *Nucl Instru Meth A*, Vol. 392, , 1997.

[ 7 ] L.S. Lapington. *Nuc Instru Meth A*, Vol. 392, , 1997.

[ 8 ] C. Martin, P.Jelinsky, M.Lampton, R.F.Malina, and H.O.Anger. Wedge and strip anodes for centoroid-finding position-sensitive photon and particle detectors.*Rev.Sci.Instrum*, Vol. 60, No. 12, 1989.

[ 9 ] T Mukai, et al. the low energy particle(lep)experiment onboard the geotail satellite. *J. Geomag.Geolect*, Vol. 46, , 1994.

[ 10 ] H. Rene, et al. first multispacecraft ion measurements in and near the earth’ s magnetosphere with the identical cluster ion spectrometry(cis)experiment. *Ann.Geophysicae*, 2001.

[ 11 ] Andy Smith, Robert.Kessel, J.S.Lapington, and David.M.Walton. modulation effects in wedge and strip anode. *Rev.Sci. Instrum*, Vol. 60, No. 11, 1989.

[ 12 ] J.G Timothy and R.L.Bybee. One-dimensional photon-counting detector array for use at euv and soft x-ray wavelengths. *Applied Optocs*, Vol. 114, No. 7, July1975.

[ 13 ] J.L. Wiza. Microchannel plate detector. *Nuc Instru Meth*, Vol. 162, , 1979.

[ 14 ] J.L. Wiza, P.R.Henkel, and R.L.Roy. Improved microchannel plate performance with a resistive anode encoder. *Rev Sci*



宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-009

---

発行 平成 17 年 11 月 30 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL:<http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株)フジプランズ

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

---

© 2005 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。





宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency