

## タイミングを測る I (MCP 検出器)

足立純一 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学研究施設  
E-mail : jun-ichi.adachi@kek.jp

彦坂泰正 自然科学研究機構 分子科学研究所 極端紫外光研究施設  
E-mail : hikosaka@ims.ac.jp

### 1. はじめに

本シリーズにおいて、これまで強度・エネルギー・光子数を測るための検出器が紹介されています。そのような測定は、放射光実験において標準的な手法と言えるでしょう。一方、「タイミングを測る」ことを試みることは、あまりポピュラーに感じないかもしれません。「タイミングを測る」ことにより、ある現象の時間変化を観測することが可能になります。もちろん、時間変化のない試料を調べる際にはタイミング計測は必須ではないでしょう。しかし、この場合にもタイミングを利用することによりデータの質を向上させることができるかもしれません。今後の放射光実験を高度化させる手段として、タイミング計測が有効かどうかを考えてみてはどうでしょうか。ここでは、タイミングを測るための検出器としてマイクロチャンネルプレート (MCP) と呼ばれている検出器の利用法および適用例などについて解説いたします。そして、「タイミングを測る」ことを活用した実験法である、同時計測法についても簡単に説明します。

MCP は、電子を 2 次元的に検出し増倍する電子増倍素子です<sup>1,2)</sup>。電子ばかりでなく、イオン、真空紫外線、X 線、 $\gamma$  線などにも数%から数十%の検出感度を持つので、それらの検出素子としても利用できます。これらの粒子の検出のタイミング測定のみならず、フラックス測定等の幅広い用途にも用いられています。MCP を用いた粒子検出の本質的な特徴は、粒子到着位置付近で局所的に増幅された出力を、立ち上がりの速いパルス信号として取り出せることにあります。この特長を活かすことにより、タイミング計測および位置敏感計測 (併せて「3次元計測」と呼ぶことがあります) を行うことができます。また、パルス信号であることを直接的に活用することにより、微弱な信号の計測を高い S/N 比で行うことができます。

タイミングを測るため、検出器自体に求められるのは、どのような性能なのでしょう? それは、計測のための時間が、観測したい現象の継続時間あるいは必要とする時間分解能よりも短いことです。MCP の出力パルスはサブナノ秒の立ち上がりのタイミング信号として取り出すことが

できます。したがって、十分な精度の基準信号に対して、サブナノ秒までの時間分解能で「タイミングを測る」ことが可能です。

ここでは、まず、MCP の動作原理などについて解説します。つぎに、MCP の特徴である、パルス計測と位置敏感検出の使用法の概略を説明します。つづいて、目的に合った MCP の購入から使用までの注意点について述べます。そして、MCP を用いたタイミング計測の具体的な方法を説明し、その例として同時計測の研究を紹介します。

### 2. MCP の概要・動作原理<sup>1,2)</sup>

MCP は Fig. 1 に示したように、口径の揃った細孔 (チャンネル) が蜂の巣状に開いたガラスのプレートです。それぞれのチャンネルが、2 次電子増倍管として働きます。チャンネルの口径は用途に応じて数  $\mu\text{m}$  から数十  $\mu\text{m}$  程度のものが市販されており、いずれもプレート面の有効面積に占めるチャンネルの開口面積は 60% 程度となっています。チャンネル長さやチャンネル口径の比が一定の下では、2 次電子増倍管としての利得 (ゲイン) は一定となります。プレートの厚さはチャンネル口径の 40 倍程度に設定されていることが一般的であり、この場合には  $10^4$  くらい のゲインが得られます。プレートの表面はインコネル (非磁性・耐腐食性を有する材質) 等で金属コートされており、プレートの両面間に 1 kV 程度の電位差を設けて使 用します。粒子検出のタイミングを測る場合には、このような

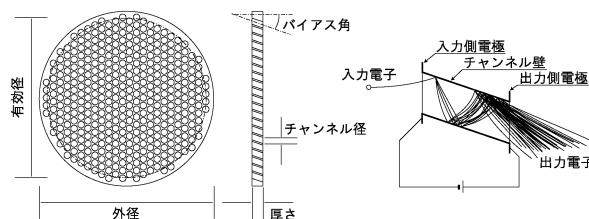


Fig. 1 MCP の概念図。正面から見ると、チャンネルが蜂の巣状に並んでいる。チャンネルの向きは、MCP 平面に対してある角度 (バイアス角) を持つ。それぞれのチャンネルが電子増倍管として働く。

MCP を 2 枚または 3 枚重ねて使用することが一般的です。このとき多くの場合において、重ねた MCP 間に電極を挿入せずに、最前面と最背面のみに電圧を与えて使用します。そのため、MCP 一枚あたりの電位差が均一になるように、同じインピータンスの MCP を用いる必要があります。

低電位側からチャンネル内に入射した粒子は、チャンネルの壁に衝突し 2 次電子を放出します (Fig. 1 の拡大図部分)。入射粒子が効率的に内壁に衝突するように、チャンネルの軸はプレートの垂直軸に対して  $10^\circ$  前後のバイアス角が設けられています。2 次電子は電場によって加速されて内壁にぶつかり、さらに 2 次電子を放出します。このような 2 次電子放出が多段階に繰り返されることにより、1 つの粒子の入射に応じて  $10^4$  個ほどの電子がチャンネルから出射してきます。MCP を複数枚重ねて使用することによって、より高いゲインを得ることができます。ただし、チャンネル出口近傍で大量の電子が生成されるため、その空間電荷によって 2 次電子生成の飽和が起こります。このために、ゲインは MCP の枚数の掛け算までは増加せず、MCP を 3 枚重ねて使用する場合のゲインは  $10^7$  から  $10^8$  程度となります。

MCP の個々のチャンネルが独立した電子増倍管として働くため、MCP は位置敏感型の検出器として利用できます。その位置分解能は、MCP のチャンネル径程度が得られると期待されます。しかし、通常は MCP を複数枚重ね合わせて使用するため、初段の MCP から次段の MCP へ増倍された電子が入射する際に複数のチャンネルに広がり、位置分解能は低下します。また、大きなゲインによって顕著となる出射部での電子間反発も位置分解能の低下に寄与します。実際には、出口表面からチャンネル内への金属コートの入り込みの深さや、位置検出を行なうアノードと MCP の距離、加速電圧等の条件にも空間分解能は左右されます。

MCP の出射側にアノードを設けて、アノードへの電子の流入を計測することにより、粒子の検出が達成できます。タイミング測定の場合には、この電子流入を電位のパルス変化として計測します。高速応答型の MCP を使用すれば、立ち上がりが 100—数 100 ps のパルス信号の出力を観測できます。この優れた時間特性は、電子の増倍が短いチャンネル内で起こっているためです。チャンネルを短くすれば時間特性は向上するため、厚さの薄い MCP が高い時間分解能の測定に向いています。

### 3. 使用法<sup>2)</sup>

MCP の具体的な使用法を説明していきます。MCP 自体の駆動には、数 kV の電圧をかけて動作させるため、高電圧電源が必要です。MCP 前面および MCP 背面、アノード部の 3 ヶ所に、それぞれ異なる電圧を掛けること

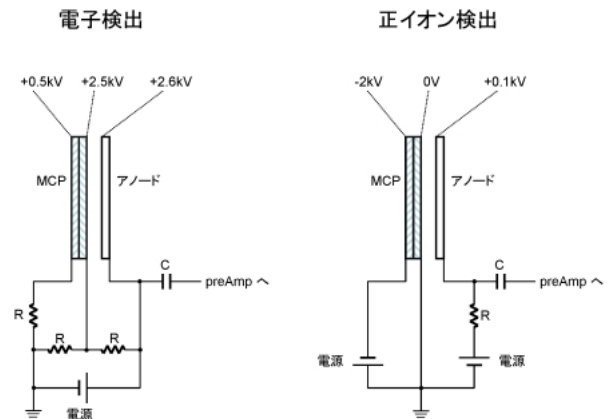


Fig. 2 電子または正イオンを検出する場合の典型的な結線図。MCP 前面が荷電粒子を引き込む極性になっている。MCP 背面から放出される電子がアノードに吸い込まれるよう、アノードには背面に対して  $10\sim 100$  V 程度の正の電圧をかけるようにする。

が必要になります。使用する高電圧電源の数を減らすため、1 台の高電圧電源からの出力を抵抗分割することによって、それぞれの部位に異なる電圧を供給する方法が広く行われています。高電圧電源を選定するときには、印加する電圧と外部抵抗や MCP の抵抗値から、あらかじめ必要な出力を見積っておくことが重要でしょう。非常に単純な例では、MCP 背面が接地され、MCP 前面に 2 kV をかけるとき、MCP の抵抗値が  $20$  M $\Omega$  しかないのであれば、少なくとも  $100$   $\mu$ A を流すことができる高電圧電源が必要です。抵抗分割を利用する場合には、用いる抵抗が並列に付け加えられている回路を構成していることを考慮に入れる必要があります。

MCP に印加する高電圧電源の表示が設定した値を示していたとしても、実際には出力表示どおりに電圧が供給されていないことも良く経験します。必要な出力の見積もりのためにも、使用している MCP の抵抗値を把握しておく必要があります。25 mm 径程度の MCP の抵抗値は 1 枚あたり 50 M $\Omega$  程度です。一方、80 mm 径程度の大きなものでは、1 枚あたり 10 M $\Omega$  程度の抵抗値しか持たないものもあります (個体差がある)。MCP の抵抗値が比較的小さい 20 M $\Omega$  程度しかないときには、用いる高電圧電源の内部抵抗を 2 M $\Omega$  とすると、実際に印加されている電圧は出力表示の 9 割程度しか掛かっていない状況となります。使用している MCP の抵抗値を知っておくことにより、真空槽中にある MCP への結線状況の調査、経時変化の診断 (使用するにつれて抵抗値は低下していく) を行うこともできます。

Fig. 2 に、電子または正イオンを検出する場合の典型的な結線図を示しました。いずれも MCP 1 枚当り 1 kV 程度の電位差と MCP 最背面とアノードの間に 100 V 程度の電位差が設けられています。ただし、電子検出と正イオン検出では全体の電位が異なります。これは、十分な 2 次

電子生成を起こすために MCP の前面に十分な衝突エネルギーで荷電粒子を衝突させ、さらに 2 次電子をアノードに向かって加速する必要があるためです。つまり、MCP による粒子検出では、ゲインに関する MCP に加えられる電位差だけでなく、MCP 前面の電位・コートにより決まる検出効率（参考文献 2 に効率についての表・グラフがあります）も重要な因子です。電子検出の場合には、電子の MCP への衝突エネルギーが 500 eV くらいのときに検出効率が最大となります。そのため、MCP 最前面の電位を +500 V 程度とします。一方、正イオンに対して十分な検出効率を得るためには、数 keV の衝突エネルギーが必要です。市販の正イオン検出用のアセンブリでは、2 枚組の MCP の最背面がグランドとなっており、そのため最前面を -2 kV とする仕様になっていることが多く見られます。2 keV の衝突エネルギーでの検出効率は一般的な用途には十分ですが、異なった価数や質量のイオン種に対するゲインは厳密には一定になっていません。それらのイオン種に対する相対強度を高精度で測るような目的においては、より大きな衝突エネルギーが得られるように、MCP 前面の電位を 4-5 kV 程度まで高くする必要があります。

電圧を供給する際には、出力信号をオシロスコープでモニターしながら徐々に電圧を上げていくことで、誤った操作により MCP を損壊してしまう危険性を下げることができるでしょう。低い真空下での使用は MCP の寿命を短くするため、MCP への電圧の印加は高真空下で行う必要があります。浜松ホトニクス社の MCP では、 $5 \times 10^{-4}$  Pa 以下の真空度で 24 時間以上排気したのちに行なうことが推奨されています。低真空下で使用すると、放電によって MCP が損壊してしまう恐れがあります。それに至らなくとも、 $10^{-3}$  Pa 程度の真空下では自己発生ノイズによる信号の乱れが顕著になってきます。自己発生ノイズは、チャンネル内での残留ガスと 2 次電子の衝突によって生成した正イオンが、電場により入力方向に加速されること（イオンフィードバック）によって起こります。

Fig. 3 に、2 または 3 枚の MCP を使用したときに得られる信号パルスの波高分布を模式的に示します。波高分布は、MCP の枚数が増えるに従い、高波高側にシフトするとともに分散が小さくなります。図に示しているように、低い波高領域には、粒子の検出とは無関係なノイズが見られることが常です。ディスクリミネーターにより適当な波高以下の信号を取り除くことにより、信号からノイズ成分を除去することができます。MCP の暗電流は非常に少ないため、適切なディスクリミネーターの設定により、数 cps 以下のノイズ条件下で粒子検出を行なうことが可能です。冷却することにより暗電流をさらに低減することができますが知られていますが、通常用途では常温での使用で十分です。

検出される粒子数が増加すると、MCP のゲインは低下します。つまり、出力の電荷量は検出粒子数の線形に比例

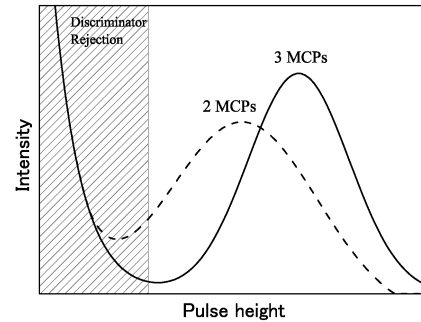


Fig. 3 MCP 2 枚または 3 枚のときに得られる信号パルスの波高分布の概念図。横軸はパルス波高、縦軸は計数率を表す。

せず、電荷量測定をしているときには線形性が失われることとなります。また、パルス計測時には、ゲインが下がると信号の波高分布が低い方向にシフトし、ディスクリミネーターのしきい値を超えられなくなる信号が出てくるため、信号の計数率の線形性が失われるだけでなく、計数率の見かけの低下を招くこともあります。例えば、吸収スペクトルをパルス計測しているとき、強い吸収ピークの頂上付近で信号の落ち込みが現れることがあります。ゲインは、MCP にかける電位差を上げることにより向上します。しかしながら、MCP の寿命は、出力した総電荷量に依存するため、不必要に高い電位差を設定することは、さらなる寿命の低下を招きます。信号の波高分布を適宜測定して、適正な電位差に設定することが望ましいと考えられます。MCP にかける電圧差の簡便な決め方には、実際の信号を観測しながら電位差を増加させ、信号強度が大きく変化しない領域（プラトー領域）に入ったところで用いるやり方があります。十分なゲインを得るために MCP にかける電位差を上げつづけていくと、いずれノイズが顕著になってきます。このノイズ量が測定に耐えられなくなったときには、MCP の交換が必要となります。

### 3-a. MCP によるパルス計測

MCP を検出器として用いたとき、その計測法の特徴の 1 つはパルス計測です。パルス計測では、個々の粒子検出に対応するパルス信号を数えます。この点が、多くの粒子からの増幅により得られた全電荷量を計測する電流値測定とは大きく異なります。

パルス計測のためには、MCP からの出力をパルス信号処理し、記録するためのいくつかの機器（利用情報 1）を準備しておく必要があります。まず、インピーダンス適合とノイズに埋もれないだけのパルス波高への増幅のため、プリアンプを用います。そして、信号処理に必要なパルス波高・パルス形状にするためのアンプが必要となります。アンプされたパルス信号をノイズ信号と弁別するため、ディスクリミネーターを用います。このとき、高い精度でのタイミング測定では、コンスタントフラクションディスク

リミネーター (CFD) を使用します。このパルス信号を、カウンター (例えば、ORTEC 974 など) に入力すれば、計数率測定を行うことができます。適切にノイズ信号との弁別を行うことができれば、電流値測定では不可能であるような高い S/B 比測定が実現できる可能性があります。電流値測定は電流計の精度に加えグラウンドのノイズレベルに測定限界が制約されます。一方、このノイズの時間変動がディスクリミネーターのしきい値以下ならば、パルス測定ではこのノイズを取り除くことができます。そのため、理想的なパルス測定では、数 cps 以下のノイズ条件で「1 つ」の粒子の計測が可能です。

適切に処理されたパルス信号について、そのタイミング情報を記録するためには、次の 2 つの方法があります。1 つは、基準となる信号と MCP からの信号の時間差を測るため、時間-波高変換器 (TAC) を利用する方法です。この方法では、非常に高い時間分解能が得られることが特徴です。TAC は 2 つの入力信号の時間差の情報をアナログ信号であるパルス波高として出力する機器です。この時間差情報の信号をマルチチャンネルアナライザー (MCA) で記録することにより、「タイミングを測る」ことができたこととなります。もう 1 つは、時間-デジタル変換器 (TDC) を利用する方法です。TDC を利用すると、時刻あるいはある基準信号からの時間を記録することができます。以前は、TAC と比べると時間分解能が劣っていましたが、最近の高性能なものでは 100 ピコ秒の分解能が得られています。

### 3-b. MCP による位置検出

MCP による増幅は、個々のチャンネルが独立した 2 次電子増倍管として働くことにより行われます。したがって、MCP からの 2 次電子群の出力位置は、粒子の到達位置を反映しています。この 2 次電子群の出力位置を観測することにより、位置検出が実現できます。MCP のチャンネル径は 10  $\mu\text{m}$  オーダーであり、複数枚の MCP を用いるときにも、原理的にはチャンネル径の数倍程度の位置分解能が期待できます。しかし、観測の位置分解能が、MCP 自体の位置分解能に及ばないケースもあります。これらの条件を適切にすることにより、数十  $\mu\text{m}$  の空間分解能も達成できています。この位置検出を実現するためには、大きく分類して 2 つの方法があります。1 つは、MCP により増幅された電子を蛍光スクリーンに当て、光に変換することにより測定する方法です。もう 1 つは、アノードを多チャンネルとし、それらから得られる複数の信号を処理することにより、位置の情報を得る方法です。

蛍光スクリーンを用いる方法は簡便であり、例えば、CCD などを用いて画像観測することにより位置情報を得ることができます。このときには、CCD の読み出し時間がタイミング計測における時間分解能の律速段階となります。標準的な CCD では、読み出し速度が 10-100 Hz 程度

となります。高い時間分解能が必要ないのであれば (秒オーダーでのタイミング計測の場合)、この方法で充分といえます。また、MCP に印加する電圧をシャッターとして用いることにより、タイミング計測に時間ゲートをかけることができます (マイクロ秒オーダーまでであれば可能でしょう)。浜松ホトニクス社から、そのような用途のための立ち上がりの速い高電圧電源を購入することが可能です。また、荷電粒子が検出対象であるときには、MCP 自体ではなく、その前段に電場によるシャッターを設けることも時間ゲートをかけるための選択肢の 1 つです。

多チャンネルアノードを用いる方法では、位置検出と高い時間分解能を両立したタイミング計測が可能です。しかし、信号処理系は複雑となり、システム全体も高価なものとなります。位置情報を得るための多チャンネルアノードとして、様々な方式が提案されています。その方式は、大きく 2 つの方法に分類できます。1 つは電荷分割を利用する方法<sup>3,4)</sup>であり、もう 1 つは時間差を利用する方法<sup>5)</sup>です。どちらの方式についても、アセンブルされた MCP と信号処理系のセットが市販されています。粒子検出のタイミングとその検出位置を同時に計測する (「3 次元計測」) 場合には、時間差を利用する RoentDek 社 (利用情報 2) のディレイライン型アノード<sup>5)</sup>が広く使われています。

電荷分割方式の例として、バックギャモン型アノード<sup>4)</sup>を示しておきます。このアノードは、Fig. 4 に示しているように、電子を受ける表面にバックギャモンのゲーム盤のような電極があり、それぞれの端が裏面の電極へキャパシタ結合されるようになっています。MCP からの電子なだれが、表面の電極にあたる面積に応じて電荷分割され、さらに、位置に応じて変化するキャパシタにより結合された電極を通じて電荷が分割され、4 つの電荷出力が得られます。それらの電荷量の比から、検出器上での位置が決定されます。このアノードの長所は、電子なだれを均質に広げるような電場設計をすることにより、高い位置分解能が得られること、アノード自体は非常に安価であることです。短所は、電荷量の比をもとめるアナログ演算が必要となるため、処理時間に数  $\mu\text{s}$  が必要となることが多く、ほぼ同時に来た 2 つのイベント情報を処理できないことです。

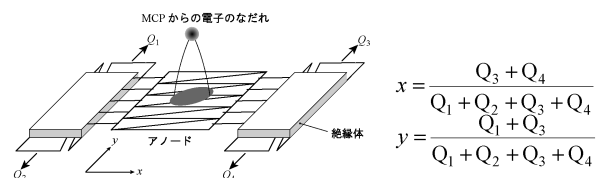


Fig. 4 バックギャモン型アノードの模式図。検出面の電極の面積に応じ、図の左右に電荷が分割され、絶縁体を挟んで結合されたキャパシタに応じて、さらに電荷が分割される。4 端子の出力を持ち、それぞれの端子からの電荷を  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  とすると、上式のようなアナログ演算から、位置が決定される。

(マルチヒット耐性が低いと表現することがある)。この方法でも、時間情報をMCPからのパルス信号として取り出すことにより、1 ns以下のタイミング分解能が達成できます。しかし、位置情報とタイミング情報が別々の信号処理系となるため、データの記録には工夫が必要となります。

時間差方式の例として、RoentDek社(利用情報2)のHEX型ディレイラインアノード<sup>5)</sup>の原理を、簡略化して紹介します。このアノードでは、MCPからの電子が3本のワイヤー(u, v, wと名付けます)へと流れ込みます。それぞれのワイヤーの両端に信号が到達する時刻をTDCにより記録し、それらを $t_{u1}, t_{u2}, t_{v1}, \dots, t_{w2}$ とします。

Fig. 5に示しているように、電子が流れ込んだ位置からワイヤーの端までには有限の時間( $\sim 0.3 \text{ m}/1 \text{ ns}$ )がかかることを利用し、 $t_{u1}-t_{u2}$ のような時間差から位置を決定することができます。このアノードの特長なことは、3本のワイヤーを用いて、ほぼ同時に来た複数のイベント情報を処理できることです。つまり、2次元の位置情報を得るためには、最低2本のアノードワイヤーがあればよいのですが、1つのイベントに起因する信号がアノードワイヤーを流れている間に、別のイベント信号が流れ始める状況では、2本のワイヤーだけでは対応できなくなります<sup>6,7)</sup>。そのような状況においても、3本のワイヤーの情報を用いることにより、一意的に位置を決定できるようになります。現状で入手できるアノードとしては、最も優れたアノードと言えるでしょう。以前は、TDCの時間分解能(分解能500 psのTDCが市販システムの標準品)がMCP自体の持つ位置分解能に追いついていなかったのですが、最近ではその短所も克服されつつあります。ただし、価格はそれなりに高額なシステムとなります。

#### 4. 選定・入手方法 (利用情報 3, 4)

MCPは浜松ホトニクス社、BURLE社(Photonis社)、El-Mul社などから購入することが可能です。BURLE社

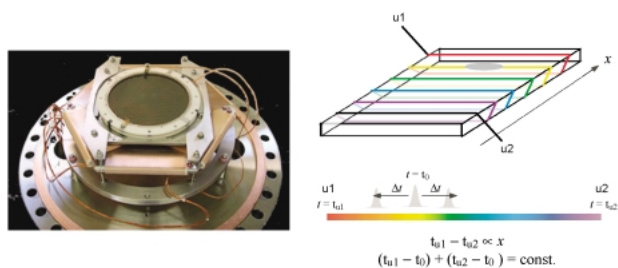


Fig. 5 HEX型ディレイラインアノードの外観写真およびディレイラインアノードの原理についての模式図。MCPの下部に、六角形の形状に3組のワイヤーが接触しないように巻かれている。そのうちの1本のワイヤー(u)に電子が当たったときの様子を展開して示している。時刻 $t_0$ においてワイヤーに当たった位置からu1端子とu2端子へ電荷が流れ、信号を得た時刻の差が位置の情報となる。

とEl-Mul社の製品も日本の代理店があり、容易に購入できます。

MCPとアノード、リード端子や信号読み出し系などを、用途に応じてアSEMBルしたものが市販されています。各社から選択ガイドが示されており、使用目的に応じた製品が選択できるようになっています。標準的な利用のためには、製品として、サイズや形状、検出種が何であるのか、パルスカウンティング測定か電流値測定か、位置検出が必要か等の条件を基に、適切なアSEMBリを選択することができます。真空フランジにマウントされたアSEMBリもあります。アSEMBリの形状等が使用する環境に適当ならば、それを購入することが簡便でしょう。特に、高速応答タイプのアSEMBリは、タイミング計測に有用です。これは、このタイプでは、パルス波形のうなり(リングング)が殆ど抑制されているためです。分析器の内部に検出器を組み込む場合などには、市販されているアSEMBリの形状等が上手く適合しないこともあります。この場合にも、希望の仕様をメーカーに提示して、それに沿ったアSEMBリを製作してもらうことが可能です。

一方、MCPのみを単体で購入し、自作のホルダーにマウントすることもそれほど難しくはありません。新しい検出法の試みあるいは自作測定装置を製作するときには、既製品として組み立てられたものでは不十分な場合もあるでしょう。MCPのみを購入し、自作の検出器を作るという選択肢も考慮してみてはいかがでしょうか。例えば、MCPの自作アSEMBルの例をFig. 6に示しています。同様な例が、J. Stohr著の“NEXAFS Spectroscopy”<sup>8)</sup>にも載せられています。参考にしてみてください。また、ホルダーの設計時には、電圧を印加するためのリード線の取り回しに注意を払っておく必要があります。静電分析器に組み込む用途では、高圧が掛かったリード線が作ってしまう電場が、分析器に影響を及ぼさないようにする必要があります。

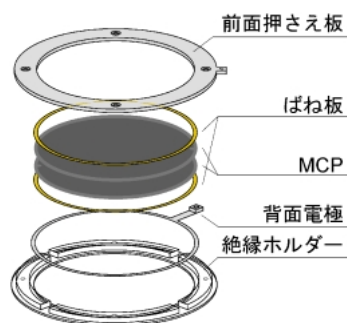


Fig. 6 MCPの自作アSEMBルの例。マシナブルセラミックス(利用情報4)を用いて、MCPの絶縁が確保されている。前面部は絶縁体の使用を避けるため、MCP前面への電極部と押さえ板を共通なものとしている。MCP背面の電極は薄い金属板で作製し、接続部にはネジ穴を開けて、接続できるようにしている。MCPの前後には、ばね板としてやわらかい金属を挟んでいる。この例では、アノードは描かれていない。

複数枚の MCP を用いて自作のホルダーに組み込む際には、インピーダンス適合が実現されるように、購入したときの組合せで使用します。また、通常用いられるバイアス角がついた MCP を重ね合わせる際には、その方向が互い違いとなるよう、つまり、Chevron または Z-stack となるように気をつける必要があります。バイアス角の方向は、MCP の表面に印がつけられています。例えば、BURLE 社のものであれば、三角の印がついており、その記号の位置が $180^\circ$ 回った方向で重なるようにします。バイアス方向が互い違いになるように重ねるのは、この重ね方により自己発生ノイズを抑制することができるためです。チャンネルの軸の方向が互い違いに重ねられているときには、チャンネル内で生成した正イオンが接合部において中和されるため、自己発生ノイズが軽減されます。そもそも、1枚の MCP の厚さがチャンネル口径の40倍程度に設定されているのも、この比率を大きくすると自己発生ノイズが増大してしまうからです。

MCP 単体での購入時には、用途が何であるのかに応じて、それに適した MCP を選定することが重要です。また、市販のアセンブリの MCP が劣化したときに、MCP のみを購入して取り替えることもよく行なわれます。選択に必要な事項は、測定対象と形状です。

まず、検出する対象が荷電粒子（電子あるいはイオン）であるのか、光（VUV あるいは X 線、 $\gamma$  線）であるのかを決めておく必要があります。それは、MCP の表面に特殊なコートをしないう通常のものは、荷電粒子の計測には適していますが、光子に対しては感度が低いからです。そのため、光子を検出する場合には、対象とするエネルギー領域に応じた表面コートを施します。これとは逆に、感度を高めるためではなく、フィルターをかけるために金属をコートする場合があります。BURLE 社のカタログでは、CsI, CuI, MgF<sub>2</sub>, MgO, KBr, Cu, Au のコートが示されています。

次に MCP の形状です。標準的なものは、円形・長方形であり、15–120 mm 程度の大きさです（120 mm よりも大きな MCP を製造可能かどうかをある会社に問い合わせたところ、製造工程上の問題のため断られた経験があります）。また、中心に穴が開いた形状や台形なども入手可能です。

MCP は、真空内（ $10^4$  Pa 程度以下）または乾燥窒素中に保管することが推奨されています。実際、大気中に放置したために、反ったり、割れてしまうことがあります。また、購入時の脱気封止した梱包であっても、数ヶ月単位で放置すると、大気中に放置したのと同様な影響が現れることがあります。特に、光検出のため、アルカリハライドをコートしたものは、湿気に非常に弱く、量子効率の変動も非常に大きいので、大気にさらす時間をできる限り短くする必要があります。MCP を扱う場合には、素手で触ることは避け、特にチャンネルの開いている有効部には触らな

いように注意が必要です。表面に塵等が付着してしまった場合には、乾燥空気等を吹き付けて取り除いておかないと、暗電流の増加や位置検出での欠損の原因になります。

## 5. 計測の実際

ここまで、抽象的にタイミング計測を考えてきました。ここでは、タイミング計測を用いた放射光実験の具体例を簡単に説明します。

### 5-a. 放射光施設でのタイミング計測

放射光は擬似的な連続波的光源とみなされることが多く、その繰返し周波数は100~500 MHz です。つまり、2~10 ns 間隔でパルス光がやってきます。比較的簡単な実験スキームでタイミング計測を行うためには、1つのパルス光がやってきてある事象が起これ、次のパルス光がやってくる前までに検知を行うことが理想的です。したがって、通常マルチバンチ運転では、理想的な条件を達成することは多くの場合には困難であり、シングルバンチまたはセベラルバンチモードにて実験を行うこととなります。

ここでは、KEK の Photon Factory (PF) のシングルバンチモードを例にして説明します。放射光のマスターオシレーターの RF 信号 (500.1 MHz) をディバイダー (PF では貸出機器として用意されています) を用いて、シングルバンチに適合した1.6 MHz 周期の信号とします。この信号を時間基準として、検出器からのパルス信号をタイミング計測することになります。このとき、放射光が到達してから観測する事象が起これるまでの時間を計測するためには、放射光が到達した時刻を決定する方法を考えておく必要があります。放射光そのものを別の MCP に入射して計測し、時間基準信号との時間差を測定することにより、比較的容易に放射光が到達した時刻を高い時間精度で決定することができます。このとき、信号処理系で有限の時間（数十ナノ秒からマイクロ秒）が掛かるため、同じ処理系を用いておく必要があります。

MCP を用いたタイミング計測は、様々な実験に利用されています。シンプルな利用法として、寿命測定（蛍光強度の減衰を測る）<sup>9)</sup>や飛行時間測定（検出器までの粒子の飛行時間を測ることにより、その質量や運動エネルギーを決定する）<sup>10)</sup>が挙げられます。これらは、放射光パルスと粒子検出の時間差を観測することにより実現できます。また、フラックスの測定をする際でも、タイミングの情報が有用な場合もあります。例えば、観測したい粒子の信号は放射光のパルス構造に同期しているのに対し、バックグラウンドとなる信号は時間的にランダムな場合を考えてみます。このときには、放射光のパルス構造に同期している信号のみを抜き出せば、フラックス測定の S/N の向上が得られるでしょう。

### 5-b. 同時計測法とは

粒子検出のタイミング情報を最も高度に利用した実験手法は、同時計測でしょう。同時計測とは、単一の光吸収イベントに起因して生成する複数の粒子を観測する手法です。観測された粒子が、単一イベントに起因していることを、粒子検出の時間相関から検知します。この時間相関を知るために、必然的にタイミング計測が必要となるわけです。観測する粒子の種類や得たい情報に応じて、様々な同時計測が行われており、特に、原子分子物理・物理化学の研究分野で高度な測定法が開発されています<sup>11-18)</sup>。

### 5-c. 同時計測法による“分子座標系光電子角度分布”の測定例

ここでは、同時計測法の例として、気相分子について“分子座標系光電子角度分布”<sup>19)</sup>を測定 (Fig. 7) するシステムを、2種類紹介いたします。1つは、MCPの位置敏感型検出器としてバックギャモン型アノードを用いた例であり、もう1つは、先進的な“3次元計測”のシステムであるRoentDek社の同時計測用システムを利用した例です。

#### 5-c-1. 原理

気体分子に放射光を照射することにより、内殻軌道（あるいは深い価電子軌道）から電子が放出される光イオン化を起こすことができます。生成した光電子と光イオンを角度分解して同時計測することにより、分子座標系光電子角度分布を測定することが可能です。これは、軽元素から構成される分子の内殻軌道に空孔が生成したときの性質を利用しています。1)内殻空孔状態は非常に短い寿命（10 fs程度）しか持たず、2)ほとんどがさらに電子を放出するAuger過程により脱励起し、3)その終状態はCoulomb反発が強い2価以上の解離性イオン状態（大きな運動エネルギーを持つ光イオンを放出）に至るためです。内殻空孔生成から解離イオン放出までの時間が、分子の回転周期よりも十分に短いので、解離イオンを観測した方向が光電離

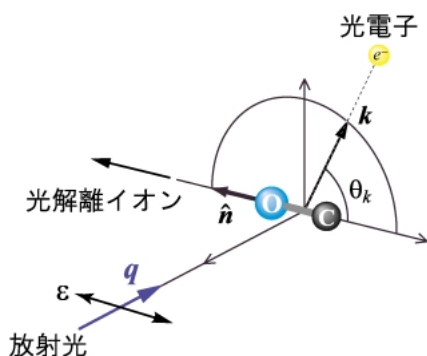


Fig. 7 分子座標系光電子角度分布。光電子と光解離イオンを同時計測することにより、分子軸に対する光電子の角度分布が測定できる。放射光の電気ベクトルに対して分子軸が平行方向を向いている状況を模式的に示した。

時の分子軸の向きに一致 (axial recoil 近似が成立) します。このようにして、直線分子の内殻光電離過程について光イオンをある方向で観測するとき、同時計測される光電子の角度分布は、“分子座標系光電子角度分布”になります。

#### 5-c-2. 角度分解 2次元位置敏感光電子-光イオン同時計測

ここで紹介する同時計測では、MCPによる2次元位置敏感情報とタイミング情報を別々に処理して測定しました。それは、アノードにバックギャモン型を使用したため、位置情報の演算に時間を要するからです。Fig. 8に、検出器の配置の模式図を示しています。この装置は、繁雑らにより開発された角度分解光電子-光イオン同時計測装置<sup>20)</sup>を改造して、分子の振動準位を分離できるように高分解能化したものです。光の進行方向に対して垂直面内で回転する光電子検出器と、同じ面内に励起光の電気ベクトルに対して0°方向と90°方向に固定された2台の光イオン検出器を用いています。光電子検出器には、2次元位置敏感型であるバックギャモン型アノードを使用しました。光電子と光イオンとの同時計測信号は、Fig. 9のダイアグラムに示したような信号処理系を用いました。電子とイオンの到達時刻を記録するとともに、電子について検出器位置の演算結果 (x, y) を時刻情報と結び付けてデータ積算コンピュータに送り込むため、ADC Bridgeと名付けた回路を利用しています。この信号の取り込みの要となるADC Bridgeは特注にて製作しました。このような方法により、CO分子のC 1s光電離過程について、振動準位を分離して分子座標系光電子角度分布の測定が可能になりました<sup>21)</sup>。この測定法では、電子エネルギー分析器を用いて、比較的高い分解能の測定と、2次元位置敏感型の検出

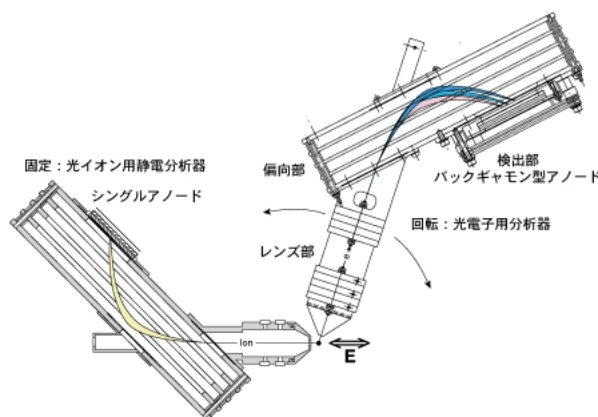


Fig. 8 角度分解電子-イオン同時計測法における検出器の配置の例。放射光の電気ベクトルEに対して平行方向に光イオン検出器、放射光の進行方向に対して垂直面内で回転する光電子検出器を備えている。光電子検出器にバックギャモン型アノードを取り付け、分析器により分散された光電子を位置敏感検出するようにした。

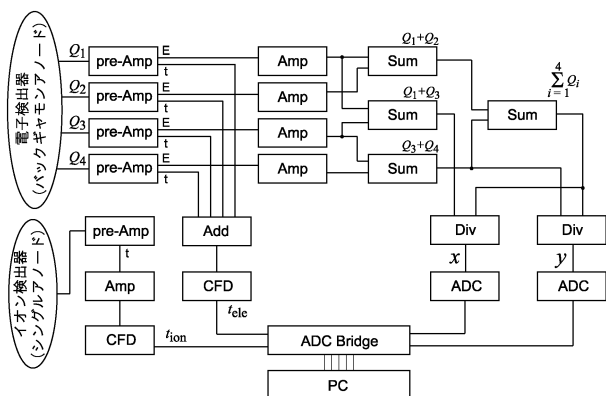


Fig. 9 2次元位置敏感検出器を備えた角度分解光電子-光イオン同時計測のための信号処理ダイアグラム。pre-Amp：前置増幅器（タイミング信号tと電荷量信号Eの2出力），Amp：増幅器，Sum：和演算回路，Div：除算回路，ADC：波高-デジタル変換器，CFD：コンスタントフラクションディスクリミネーター。

器を活用してあるバンド幅の領域（イオン化状態の振動準位  $v=0, 1, 2, 3$ ）を同時に観測することにより効率のよい測定とを両立しています。一方、光電子はある立体角（ $\pm \sim 5^\circ$ ）に制限しているため、角度分布全体を測定するためには、時間を要しています。

### 5-c-3. 多重同時計測運動量画像測定法

より高度な“3次元計測”（検出された2次元的位置+時間情報）システムを用いて、分子座標系光電子角度分布を測定した例を示します。ここでは、多重同時計測運動量画像測定法<sup>6,7)</sup>を用いました。Fig. 10に測定装置の模式図を示しています。この装置は、EppinkとParkerが提唱した荷電粒子の運動量画像測定装置<sup>22)</sup>を、より利用しやすい電場形状に改良した装置<sup>23)</sup>を参考にして、穂坂らにより設計された装置<sup>6)</sup>です。衝突領域で生成した荷電粒子を、均一な静電場により引き出し、MCPとディレイライン型アノードを備えた検出器により測定しています。MCP自体からのタイミング信号とディレイラインアノードからのタイミング信号を、すべてリスト形式にて記録しています。このような測定では、測定終了後に時間相関情報と検出器での位置情報を解析することが可能となります。この方法により、1つの分子から放射光により飛び出した光電子の方向と分子軸の向きが得られます。こうして、CO<sub>2</sub>分子のO 1s光電離過程について、分子座標系光電子角度分布が測定されました（Fig. 11）。この方法は、電子の運動エネルギーについての分解能は低いのですが、比較的大きな運動エネルギーの荷電粒子を全立体角検出できるため、非常に効率の高い測定を行うことができます。タイミング情報をすべて記録しているため、データ量が膨大になり、解析にも時間を要することには注意が必要です。実際の測定では、リムーバブルハードディスクを用い、1つの測定が終わると、解析用コンピュータに移し変えるや

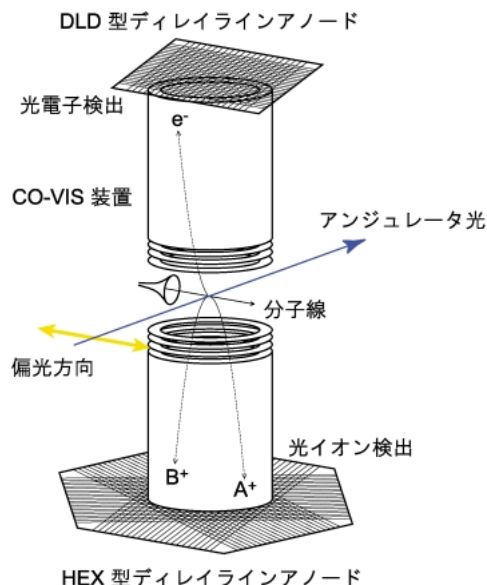


Fig. 10 コインシデンス運動量画像装置の模式図。衝突領域には均一な平行電場が作られており、電子とイオンはそれぞれ図の上下に引き出される。均一電場の後に、運動量画像を形成するよう、不均一な電場をつくる電極が備えられている。そして、飛行管中を通り抜けた電子やイオンは、MCPに到達し、ディレイラインアノードにより検知される。

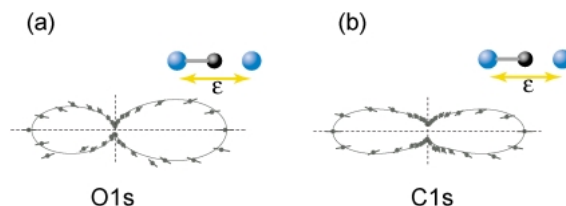


Fig. 11 CO<sub>2</sub>分子のフラグメントにより向きが決まった座標系での光電子角度分布。図の左側にCO<sup>+</sup>、図の右側にO<sup>+</sup>フラグメントが放出されたイベントを取り出すことにより、分子軸が決定される。酸素および炭素1s光電離過程について、運動エネルギーは50 eV、分子軸と偏光ベクトルが平行の条件にて測定した結果を示した。

り方で対応しました。

## 6. おわりに

ここでは、MCPを利用して「タイミングを測る」計測方法について紹介しました。筆者らが専門分野とする原子分子科学においては、タイミング計測は必須の実験技術となっています。とくに最近では、このタイミング計測を高度に利用した種々の斬新な同時計測法が開発されています。本稿ではその一例として、光電離過程の研究に利用されている高度な光電子・光イオン同時計測法を紹介しました。一方、原子分子科学以外の研究分野では、「タイミングを測る」こと積極的に利用することは、あまり多くは行われていないように思われます。本稿を機会に、タイミン



グ計測を行ったことがない方も、ご自身の実験にタイミング計測を導入するメリットの有無について検討してみたいかがでしょうか。また今後、現世代の放射光を超えた自由電子レーザー (FEL) やエネルギー回収型ライナック (ERL) が実用に供されるようになると、タイミング計測の考え方が重要になる場面がますます増えると考えられます。新しい光源での測定の実現においても、本記事が役に立ってことを望んでいます。

この記事の執筆するにあたり、特に、実験化学講座<sup>2,8,11,19</sup>)を参考にさせていただきました。それらの解説は、MCP の使用法および同時計測について参考になります。

#### 利用情報

1. 信号処理回路：SEIKO EG&G 社：  
<http://speed.sii.co.jp/pub/segg/hp/>;  
キャンベラジャパン株式会社：  
<http://www.canberra.jp/index.html>;  
林栄精器株式会社：<http://www.repic.co.jp/>
2. ディレイラインアノード：RoentDek 社  
(<http://www.roentdek.com/>)
3. MCP メーカー：浜松ホトニクス社  
([http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-etd/pd007/index\\_ja.html](http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-etd/pd007/index_ja.html))  
Burle 社 (<http://www.burle.com/advperfdet.htm>)  
El-Mul 社 (<http://www.el-mul.com/>)
4. MCP 代理店：  
有限会社オプティマ (<http://www.optimacorp.co.jp/>)  
有限会社イーオーアール (<http://www.eor.jp/>)
5. マシナブルセラミックス：  
ナラサキ産業株式会社 ([http://www.narasaki.co.jp/product/new01\\_hotoveil.html](http://www.narasaki.co.jp/product/new01_hotoveil.html)) ホトベールなどの加工

石原薬品株式会社 (<http://www.unicon.co.jp/business/ceramic/product/01.html>) マコールなどの加工

#### 参考文献

- 1) J. L. Wiza: *Nucl. Instrum. Meth.* **162**, 587 (1979). この文献は Burle 社のウェブサイト (<http://www.burle.com/cgi-bin/byteserver.pl/pdf/tp214.pdf>) で見ることも可能です。
- 2) 『第5版実験化学講座 第10巻 物質の構造Ⅱ 分光 下』第2.2.2項 (丸善, 2005).
- 3) C. Martin *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **52**, 1067 (1981).
- 4) T. Mizogawa *et al.*: *Nucl. Instrum. Meth. A* **312**, 574 (1992).
- 5) O. Jagutzki *et al.*: *Nucl. Instrum. Meth. A* **477**, 244 (2002).
- 6) K. Hosaka *et al.*: *Jpn. J. App. Phys.* **45**, 1841 (2006); 穂坂綱一, 博士論文 (東京大学理学系研究科, 2005年3月).
- 7) 『第5版実験化学講座 第10巻 物質の構造Ⅱ 分光 下』第5.3節 (丸善, 2005).
- 8) “NEXAFS Spectroscopy”, J. Stöhr (Springer-Verlag, Berlin, 1992), p. 132.
- 9) J. G. Lambourne *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **90**, 153004 (2003).
- 10) 『第4版実験化学講座 第14巻 核・放射線』第3.5.3項 (丸善, 1992).
- 11) 彦坂泰正, 伊藤健二: 放射光 **21**, 73 (2008).
- 12) D. Rolles *et al.*: *Nucl. Instrum. Meth. B* **261**, 170 (2007).
- 13) G. A. Garcia *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 053302 (2005).
- 14) K. Ueda and J. H. D. Eland: *J. Phys.* **B 38**, S389 (2005).
- 15) J. H. D. Eland: *Chem. Phys.* **294**, 171 (2003).
- 16) M. Lavollée: *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 2968 (1999).
- 17) S. Hsieh and J. H. D. Eland: *J. Phys.* **B 30**, 4515 (1997).
- 18) 『第4版実験化学講座 第14巻 核・放射線』第3.5.5項 (丸善, 1992).
- 19) A. Yagishita *et al.*: *J. Electron Spectrosc.* **142**, 295 (2005).
- 20) E. Shigemasa: *J. Electron Spectrosc.* **88-91**, 9 (1998).
- 21) J. Adachi *et al.*: *J. Electron Spectrosc.* **137-140**, 243 (2004); *Phys. Rev. Lett.* **91**, 163001 (2003).
- 22) A. T. J. B. Eppink and D. H. Parker: *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 3477 (1997).
- 23) M. Lebeck *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 1866 (2002); M. Takahashi *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 1337 (2000).