

# 最近の TPC

## ~LC-TPC の現場から~

佐賀大学工学部

杉山 晃

sugiyama@cc.saga-u.ac.jp

on behalf of 日本 LC-TPC グループ

2007 年 12 月 5 日

### 1. はじめに

ここ数年、リニアコライダー (LC) 実験用の主飛跡検出器としてガスを用いた TPC の開発研究に携わる機会に接しております。高エネルギー実験では、計画の周期が長く、場合によっては測定器開発のフェーズにまったく出会うことなく大学院を終了してしまう人もいるかもしれません。また最近では、ガス検出器自体の将来を危ぶむ人も多いため、あまりガス検出器について知る機会がないかもしれませんので、ここで簡単に昨今の TPC 事情を説明できたらと思います。私自身も以前は、ガス検出器の開発は、前世紀で終わったのかと思っておりましたが、90 年代後半に出現した MPGD により、ワイヤーによる 1 次元の呪縛から解放され、息を吹き返しているようです。この中で、TPC も過去に比べ着実に進歩を遂げているので、LC 用 TPC の開発状況と合わせてこの機会に知っていただけたらと思います。

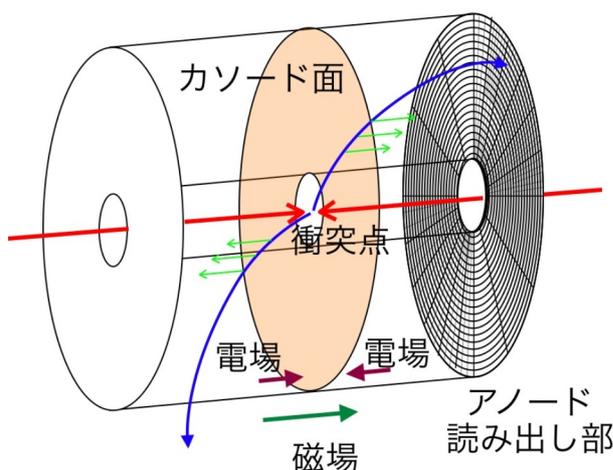
### 2. TPC とは

TPC はタイムプロジェクションチェンバー (Time Projection Chamber) の略称で、3 次元飛跡検出器として、D. Nygren (LBL) により 1978 年に、信号読み出し可能な泡箱として提案され、PEP-4 実験で初めて実際の実験に実用化された。その後、TRISTAN/TOPAZ, LEP/ALEPH, DELPHI, RHIC/STAR, LHC/ALICE のコライダー実験の大型汎用測定器に採用されてきた。コライダー実験だけではなく、最近では身近なところでは、T2K のニア測定器としても用いられようとしている。今日では、サイズ的には半径 2.5m 長さ 5m の TPC までが作られている。表にそれぞれの TPC の主要パラメータをまとめたので、技術的進歩の有様が推し量れるかと思う。

TPC に接したことのない読者は、付図の簡単な概念図を参考にその働きを理解してもらいたい。衝突点で発生した荷電粒子は、磁場中で helix を描きながら TPC のドリフト領域を通過するとき、荷電粒子の飛跡に沿ってエネルギー

損失 ( $dE/dx$ ) に従い、イオン対が電離により生成される。電離電子は、HV を印加されたカソード面により作られるドリフト電場に従って両端にあるアノード面を構成するセンサー部へと、拡散過程を伴いながらドリフトする。センサー部に到達した電子は、増幅され、読み出され 2 次元の位置情報を提供する。電子の到達時間を同時に取得することにより、ドリフト時間からドリフト距離を求め、通過した粒子の飛跡の 3 次元情報とすることができる。

	TOPAZ	ALEPH	STAR	ALICE
内半径(m)	0.36	0.31	0.5	0.85
外半径(m)	1.09	1.8	2	2.5
長さ(m)	3	4.4	4.2	5
パッドの幅(mm)	10	6.2	2.9-6.2	4-6
長さ(mm)	12	30	12-20	7.5-15
パッド列	10	21	45	159
総数	8192	20502	136608	557568
磁場(Tesla)	1.0	1.5	0.5	0.5



TPC がこれまで多くの実験に採用されてきた理由は、低物質密度でありながら、程よい位置分解能を持ち、ジェットのような高多重度粒子事象においても優れた粒子検出能力を持ち、粒子識別のために  $dE/dx$  情報も提供できることが

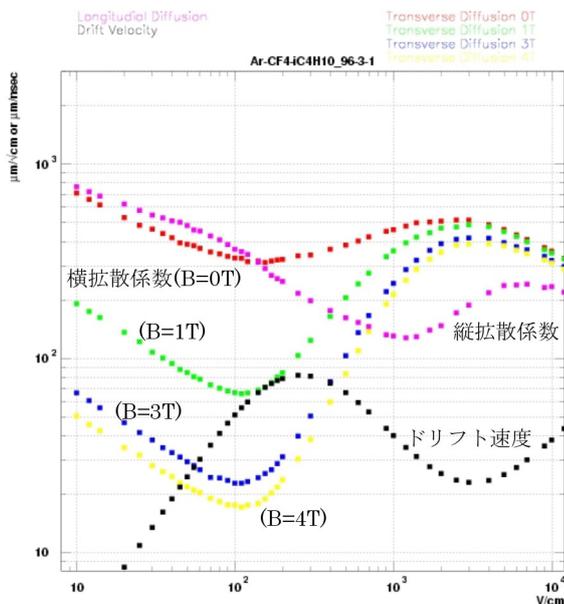
あげられる。低物質量が実現される理由は、粒子が通過するドリフト領域にワイヤーなどの物質が一切置かれていないことによる。しかしながら、 $dE/dx$  を重視していた初期の頃は、加圧状態で使用したため圧力容器が厚くなり、この利点をあまり享受できなかった面もあったようだ。また、長いドリフト距離でもよい位置分解能が保証される最大の理由は、ドリフト電場と平行に磁場が存在することにより横方向の電子の拡散を抑制するためである。位置分解能を左右する電子の拡散やドリフト速度は、ガスの組成や電場、磁場の強さ方向により大きく左右される。

### 3. TPC の性能を決めるガス特性

ドリフト距離の長い TPC ではドリフト中の拡散が位置分解能を決定するといっても過言ではない。荷電粒子により生成された電離電子（群）はカソード面に印加された高電圧によりアノード信号読み出し面へとドリフトしていく。このとき電子はガス中の分子と衝突を繰り返すため、縦方向、横方向に拡散を受けることになる。拡散は、本来生成された電子の位置に曖昧さをもたらすため位置測定のための邪魔者になる。TPC では磁場を用いてこの横方向への拡散をローレンツ力により抑制することで、長いドリフト距離でもよい分解能を達成することができる。図は、 $\text{ArCH}_4 \text{ isoC}_4\text{H}_{10}$  混合ガスのドリフト速度、横拡散、縦拡散特性の電場依存性を示す。横拡散定数に関しては、

$$C_D(B, E) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} C_D(0, E)$$

の磁場依存性を持つため  $\omega\tau$  の値により著しい抑制効果を



Ar:CF<sub>4</sub> : isoC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (96 : 4 : 1) ガス中での電子ドリフト速度と縦拡散、横拡散定数の電場依存性 (Magbolts を使い石川氏が作成)

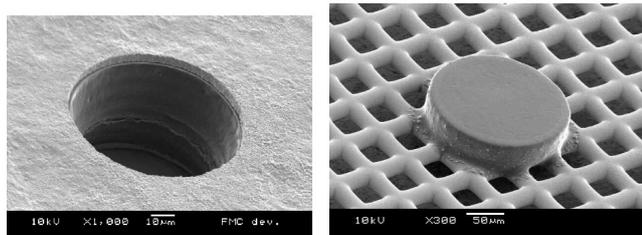
もたらす。ここで  $\omega = eB/m$  はサイクロトロン振動、 $\tau$  は電子の衝突までの平均時間 ( $mv/eE$ ) をあらわす。従って、ドリフト速度が電場に比例する領域で、 $\omega\tau$  は電子のモビリティと磁場の積になる。言い換えれば、モビリティの大きなガスを使えば磁場による大きな横拡散の改善を得ることができる。図に示す CF<sub>4</sub> 混合ガスは  $\omega\tau$  の大きなガスの一つで、高磁場下では拡散が一桁抑制されることがわかる。しかし、高電場 (kV/cm) の領域では、電子の衝突断面積が急激に大きくなり平均衝突時間  $\tau$  が減少して磁場の効果は急激に薄れる。一方、ドリフト速度、縦拡散は磁場の影響を受けない。CO<sub>2</sub> 混合ガスのように磁場なしの状態でもよい拡散特性を持つものは、一般的に衝突断面積が大きいいため大きな  $\omega\tau$  を持てないため磁場による抑制効果は小さい。LC-TPC で必要とするガスの特性としては、ドリフト速度がある程度早く、横拡散の小さい、まさしく  $\omega\tau$  の大きなガスということができる。

### 4. ワイヤーの欠点と MPGD

これまでの TPC は、センサーとしてワイヤー増幅装置を使用してきた。ワイヤーは、円柱であるという幾何学的に非常に優れた利点を持っている。ワイヤー回りでは電気力線が放射状に広がり電場は  $1/r$  で急激に弱くなるため、生成されるイオン群もたちまち電荷密度が下がり放電の原因となるストリーマーの発生を抑える効果を自然に備えていた。一方、ワイヤーを空間的に一定位置に保持するためには一定の張力で引っ張ることが必要になると同時に 1次元の束縛条件が常につきまとうことになる。TPC においても、電場と磁場に平行にドリフトしてきた電子は最終的に増幅されるワイヤーに近づく時点で、磁場と角度を持つためローレンツ力の影響を受けてしまい分解能への悪化を引き起こすことになる。

MPGD の出現は、この 1次元の束縛から解放することを可能にした。もちろん MPGD の場合も電子が孔に吸い込まれる時は  $E \times B$  の影響を受けるが、ワイヤー間隔が mm オーダーであるのに比べ MPGD では、一桁少ない 100  $\mu\text{m}$  オーダーでの現象にすぎない。GEM (Gas Electron Multiplier) は F. Sauli 氏 (CERN) により 1997 年に開発されたガス増幅装置で、50  $\mu\text{m}$  厚のポリイミドを電極用の 5  $\mu\text{m}$  の銅箔でラミネートしたシートに直径 70  $\mu\text{m}$  の孔を 140  $\mu\text{m}$  ピッチで無数に開けたものである。両電極に電位差を設けることで、孔中に高電場を生成し、そこを通過する電子にガス増幅をさせる。一方 Micromegas は、Y. Giomataris 氏 (Saclay 研究所) が 1996 年に開発したもので、マイクロメッシュを読み出し電極と 50  $\mu\text{m}$  程度のギャップで保持させることによりガス増幅に必要な高電場を形成する装置であ

る。共に G. Charpack 氏の弟子であり、ほとんど時を同じくしてワイヤーに続く増幅装置の開発に成功したことになる。GEM は電極間がポリイミドシートにより精度よく保持されているが、誘電体を導入するため一枚当たりの増幅率を抑え、多段構造にすることで必要な増幅率を稼ぐ必要がある。Micromegas は誘電体を持たず 1 段で高増幅率を得られるが、 $50\mu\text{m}$  というギャップをどのように高精度で維持するかが問題となる。これら MPGD の製作や動作条件の研究、また応用開発に関しては別の機会が適切なので、ここでは省略する。

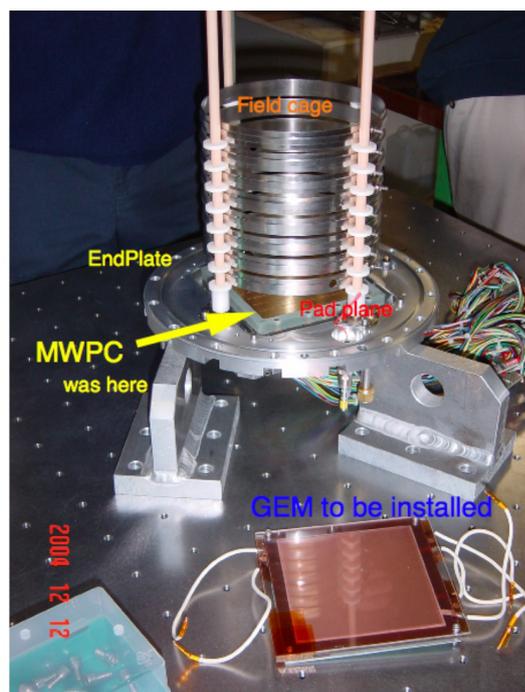


写真左：サイエナジー (株) 製のレーザーエッチング GEM の孔部分の SEM 画像 (理研玉川氏から借用)

写真右：同社製ピラー付きのマイクロメッシュ (500LPI) の SEM 画像 (サイエナジーから借用)

## 5. 日本での LC-TPC 開発

日本における MPGD を用いた TPC の開発は、独自技術の MPGD である  $\mu\text{PIC}$  を使った京都大学グループ、日本製 GEM の開発を成功させた東大 CNS グループ、理研グループなどが進めてきた。日本での LC 実験のための TPC 開発



写真は MP-TPC のセンサーをワイヤーから GEM へ載せ換えるところで、奥がフィールドケージになる。

研究は、2004 年より KEK を中心に Ron. Sttles 氏 (MPI) が進めてきた LC 用プロトタイプ TPC (MPI 製: MP-TPC) の PS でのビームテストから始まった。以後 MP-TPC を用いて LC に最適な TPC を探るために、センサー部をワイヤー増幅から GEM 増幅, Micromegas 増幅へと改造しビームテストをおこない、PS シャットダウン以降は、KEK 低温グループの好意のもと 1 テスラ電磁石中での宇宙線テストを継続しておこなっている。Micromegas-TPC のテストには、ドイツ、フランス (サクレ研究所, Orsay), カナダ (Carlton, Monreal), フィリピングループなど世界の LC-TPC グループ入り乱れてのビームテストとなった。

LC で要求される TPC の性能としては、高いトラック再構成効率と高精度な運動量分解能があげられる。再構成効率は、ジェット質量分解能による  $Z$  ボソンと  $W$  ボソンの識別には不可欠な能力といえる。ヒッグスとフェルミオンの結合定数を調べるためには、ヒッグスの崩壊過程によるバイアスを受けないヒッグス粒子の特定が重要である。 $Z$  ボソン・ヒッグス放出過程で、 $Z$  による欠損質量分布のみによるヒッグス粒子の選別を可能にするためには、運動量分解能として  $5 \times 10^{-5}$  程度が必要になる。これは、TPC の性能としては  $5 \times 10^{-4}$  程度を持つことになり、位置分解能として  $100\mu\text{m}$  の測定点が 200 箇所あれば達成できる。

## 6. 位置分解能

一連の TPC の性能評価においてもっとも重要なことは、ドリフト距離により、信号の広がりや位置分解能がどのように変化するかを詳細に調べ、なぜドリフト距離や磁場によって分解能がどのように変化するかを定量的に理解することである。これができて初めて、われわれは小型プロトタイプでの測定結果を元に実機サイズでの性能を自信をもって見積もることが可能になると考えている。適用限界がどこにあるかもわからず、よく理解できていないナイーブな依存性をそのまま未知の領域へと外挿することの危険性を極力避けるように努力している。

信号の広がりや位置分解能はナイーブに、

$$\sigma_{ss} = \sqrt{\sigma_{ss0}^2 + C_D^2 z}, \quad \sigma_{r\phi} = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{C_D^2}{N} z}$$

として理解されてきた。ここで、 $\sigma_{ss}$  はパッド上での信号の広がり、 $\sigma_{ss0}$  はドリフト距離 0 での信号の広がり、 $\sigma_{r\phi}$  は  $r\phi$  方向での位置分解能、 $\sigma_0$  はドリフト距離 0 での分解能、 $C_D$  は拡散定数 (1cm ドリフト時の拡散)、 $N$  は測定に寄与する電子の総数、 $z$  はドリフト距離を示す。

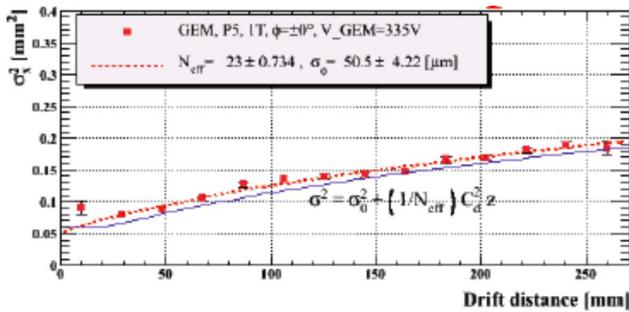
TPC では  $r\phi$  方向でのトラックの位置は、複数の読み出しパッドに跨る電荷分布の加重平均を取り決めている。複数のパッド列の測定によりトラックを再構成し、トラック

から予測される位置とパッド分布から決まる位置の残差から分解能を見積もることができる(注)。これらの分解能やパッド上の電荷の広がりをドリフト距離ごとに測定することにより、上記の式が測定結果を満足しているかを検証することができる。これら一連の試験の中で、TPCの性能を調べるうちに、これまでによく理解されていなかった問題が浮き上がってきた。

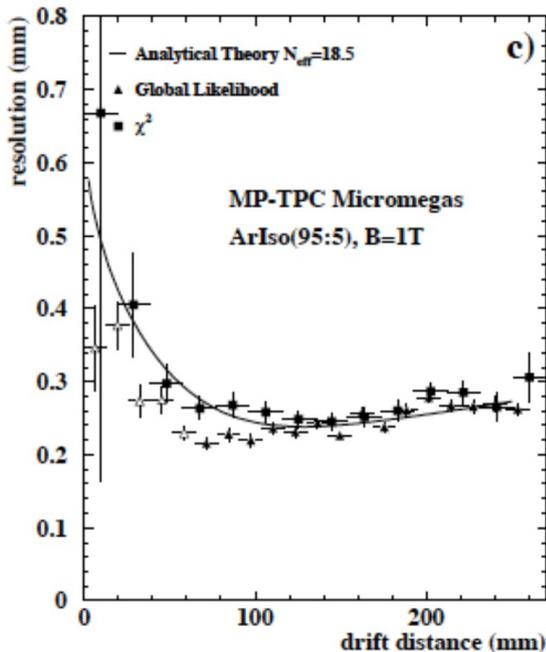
注：以前は位置分解能を求める場合に、トラックフィットから着目データを除いた状態で残差を見積もり、そこからトラックの分解能を差引くという面倒な手続きを踏んできたが、幾何平均(geometric mean)を用いてもバイアスのかからない分解能を見積もることが可能であることはご存知でしょうか。幾何平均を使うと求めたい標準偏差は{(すべてのデータを入れたトラックフィットとの残差の標準偏差) × (着目データを除いたトラックフィットとの残差の標準偏差)}で求まる。これは割と便利です。

### 6-1 イオン統計

一つはイオン統計の分解能への影響のしかたである。



GEM-TPCでP5ガスを使用したときの位置分解能のドリフト距離依存性



Micromegas-TPCでAr-イソプタン混合ガスを使用したときの位置分解能のドリフト距離依存性(パッドピッチは2.3mm)

MP-TPCのパッドは縦方向に6.3mmのピッチを持ち、 $N$ としては、約60個を期待していた。しかしながら、測定結果はいつも20~25程度に過ぎず理解に苦しんでいた。他グループの結果を見ても同様の数値を示すことが判明してくるにつれ、 $N$ の寄与が何によって決まっているのかを真剣に理解する必要に迫られてきた。結論としては、統計的に寄与する $N$ は $\langle N \rangle$ ( $\langle \rangle$ は平均)ではなく、 $1/\langle 1/N \rangle$ なるものであることがわかった。ガウス分布であれば $\langle N \rangle$ と $1/\langle 1/N \rangle$ は同じになるが、ランダム分布に従う $dE/dx$ の場合は両者に大きな違いを生じ、P10ガスでは、6mmのサンプリング時で $1/\langle 1/N \rangle$ は $\langle N \rangle$ の7割程度に減少する(heedによる計算結果)。また、個々の電子のガス増幅における揺らぎの効果は、 $N$ の値をさらに減少させるため、測定結果が20程度になる現象を引き起こしていた。

### 6-2 パッド幅の効果

ワイヤー時代は、アノードワイヤー近傍でガス増幅により生成するイオン対の誘起信号をパッド面で測定してきたが、MPGDの場合は直接電子の信号をパッドで検出することになる。この時の信号の広がりにはMPGDの構造による誘起信号に比べ、遥かに狭くなることは容易に想像できる。(少ないがMPGDの場合も誘起信号は存在する。ただし電子がパッドに到達することにより打ち消され電荷としては残らない。)点電荷が増幅後にどれくらい広がるかはパッド応答関数(PRF)として定義され、GEMの場合、典型的な3段構造で $100\mu\text{m}$ 程度(GEM間での拡散による)、Micromegasの場合は実測できていないが $20\mu\text{m}$ 程度と予測される(もちろん両者ともガスに依存する)。

PRFが狭くなったことにより、ワイヤー時代には考えもなかった影響が位置分解能に現れてくることわかってきました。個々のドリフト電子がパッド上に作る増幅後の電荷分布が複数のパッドに跨らない場合、この電子の位置分解能への寄与はパッド幅の $1/\sqrt{12}$ になってしまう(ホドスコープ効果)。この効果は、個々の電子に対してドリフト距離に関係なく起こる効果なので拡散が効く領域にも、

$$\sigma_{r\phi} \approx \sqrt{\frac{1}{N_{\text{eff}}} \left( \frac{w^2}{12} + C_D^2 z \right)}$$

の形で効いてくる( $w$ はパッド幅)。もちろンドリフト距離の短い場合は、すべての電子が1枚のパッドに収まってしまい完全なホドスコープ状態となり $\sigma$ は $w/\sqrt{12}$ にしかない。これらの寄与を回避するためには、読み出しパッドの幅をガス増幅による電荷の広がりの3倍程度以内に収めることが必要になることがわかった。標準的なGEMの場合には1mm程度のパッド幅が位置情報を効果的に取得できることになる。Micromegasに関しては、 $100\mu\text{m}$ 以下

のオーダーになり大面積を覆うための通常のパッド読み出しには適さないことになる。これを解決すべく、カナダチームは絞られた電荷分布を分散させる高抵抗皮膜に覆われた読み出しパッドの開発をおこなっている。Micromegas でもこの方法により電荷の広がりや任意の大きさに広げることが可能になり、原理的にホドスコープ効果を回避できる。これまでのところ、GEM、Micromegas いずれのセンサーを使っても、TPCはLCが要求する $100\mu\text{m}$ の位置分解能を達成できるとの結果がでている。

## 7. 大型プロトタイプ

このように、MP-TPCのテストを通して、MPGD-TPCの動作と適切に使用するための条件が理解できてきた。同様に世界中のグループがTPCの研究を進め、様々な新しい結果を出してきている。現在、これらの知識をもとに実際のLC-TPCを想定した大型プロトタイプ試験が、国際共同研究として進められている。ビームテストを行う施設はEUDETというヨーロッパの(LC含む)測定器開発プロジェクトの一環としてDESYに建設されており、日本からはKEK低温グループの貢献により薄型超伝導電磁石(PCMAG)を提供している。プロトタイプTPCの各パーツは、グループごとに分担し製作を進めている。日本グループはGEMのセンサーパネルの製作を担当している。

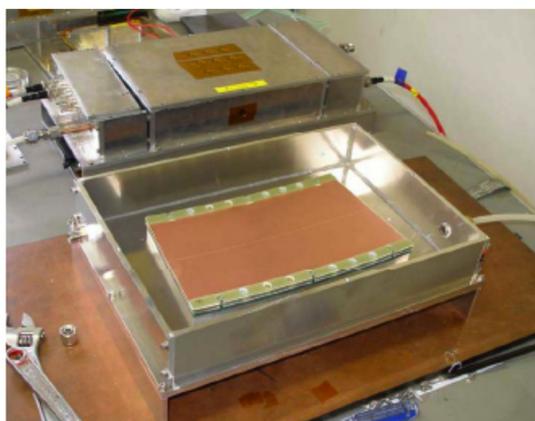
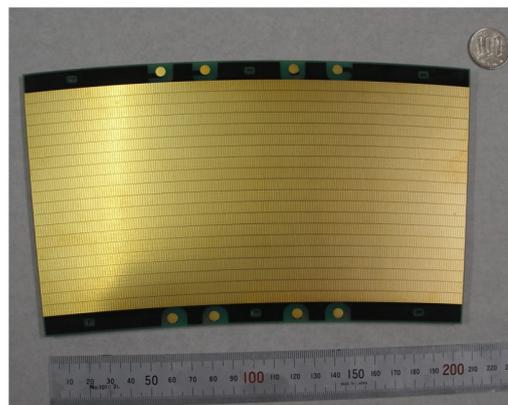
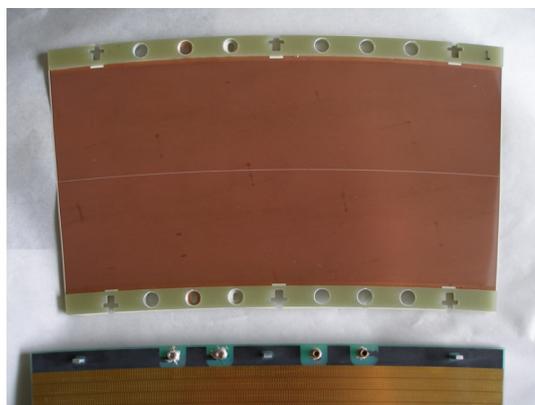
### GEMパネル

個々のMPGDセンサーは、様々な観点から今のところ20cm四方程度の大きさに抑えられており、パネルと呼ばれている。このパネルを貼り合わせることでエンドプレートが構成される。大型プロトタイプ試験では、このパネルを2+3+2と7枚分配置しビーム試験を行い、位置分解能だけではなくすべてのキャリアレーションを加えた後の運動量分解能の観点からシステムとしての性能評価をおこなう。

現在日本で試作しているGEMパネルの設計コンセプトは、1)衝突点を向く方向の不感領域を最低限に抑え、2)パネル上に搭載されるGEMの構造を安定かつ単純にすることを主眼としている。1)を達成するためGEMをサポートするフレームは横方向を省き、上下からのみ引っ張る構造になっている。読み出しPCボードはフレームの部分以外は、約 $1\text{mm} \times 6\text{mm}$ のパッドで埋め尽くされる。GEMフレームをサポートするポストやHVのコネクターはすべてフレームの部分に収まるように設計されている。写真は、試作試験時のもので、大型プロトタイプ用パネルは部品を製作中であり、今後2008年夏のビームテストに向けて製作が始まる予定です。

### 読み出しエレクトロニクス

MPGDがガス測定器の主流になるにつれ、細密パッドによる読み出しへの要望が自然な流れになってきているが、現時点ではこれに対応する読み出しエレクトロニクスの開発が間に合っていないと思われる。LC-TPCの読み出しエレクトロニクスの場合にしても、従来型のコネクターによるFEエレクトロニクスの接続は困難が予想され、コネクターを廃しMPGDパネルの裏面にASICを表面実装することが現実的な解決策と期待されている。これは、エンドキャップカロリメータ前の物質量を低減するためにも、実現させなければならない課題である。ASICにおいて、パッドに相当する面積の中にアナログ回路とデジタル回路を組み込むことは容易である。しかし、デジタルデータをどうや



写真は試作のためのGEM(上)とPCボード(中)とそれらをGEMパネルにくみ上げ、テストガス容器に設置したところ(下)

って外に読み出すか、発熱をいかに抑え、必要に応じてどのように冷却を行うかは、取り組みを始めたばかりである。(大型プロトタイプの初期段階では、ALICE 用に開発された FE エレクトロニクスを改良し、コネクター接続で読み出す。)

## ピクセル TPC

ヨーロッパでは、LHC でのピクセル技術を医療などへの応用へ広げるためのプロジェクトとして MediPiX, MediPiX2 という  $55\mu\text{m}$  角のピクセル型読み出しチップを開発している。MediPiX を MPGD と組み合わせ、1 電子の検出が可能な高感度ガスピクセル測定器を目指している。電荷は TOT (Time Over Threshold) により AD 変換時間を最小に抑え、高ダイナミックレンジを確保している。これをさらに改造し、TOT を TOF として時間情報の収集を可能にした TimePiX も作られ TPC としての動作試験も進められている。Micromegas と TimePiX の組み合わせは、究極の電子霧箱と呼べるものに近く、真剣に LC-TPC の候補または将来のアップグレード候補としてピクセル TPC の研究を進めている。

## 7. LC 環境で TPC を使うために

実際に TPC を実験に使う場合は、その実験環境において本来の TPC の性能を発揮できるように考えなければならない。リニアコライダー実験の場合に注意しなければいけないこととして、特殊なビーム構造と予想される大量のバックグラウンドがある。

リニアコライダーのビーム構造は、RF として超伝導技術を選択したことにより繰り返しは 5Hz と低いが、 $300\text{nsec}$  ごとに約 3000 個のバンチ(ビームトレイン)が  $1\text{msec}$  の間立て続けにやってくることになる。TPC の場合、1 事象の飛跡情報を取得するためには、最低  $50\text{nsec}$  の間のデータを収集する必要がある、これは LC のビーム構造からすると実質的には、 $1\text{msec}$  のビームトレインが衝突する時間すべてのデータを読み込まなければならないことを意味する。もちろん大きいドリフト速度を持つガスの選択、電場の選択が必要になる。また、ナノメータに絞られるビームサイズのため、QED の高次効果として大量の電子やフォトンのバックグラウンド、またそれに付随した中性子が発生する。なかでも中性子は、局所的に大量の電離電子を生成する反跳原子核を発生させ、MPGD に致命的な損傷を与える可能性があるため最大限の注意が必要になる。これを避けるためには、水素を含まない混合ガスが望まれる。 $\text{CF}_4$  混合ガスは、その大きいドリフト速度と大きな  $\omega_T$  特性により LC-TPC 用ガスとして、非常に有力な候補となっている。

ただし、 $\text{ArCF}_4$  だけでは、ガス増幅時に発生するフォトンに対して十分なクエンチング効果がないため、少量のイソブタンを混ぜる必要があることがわかってきている。

## イオンフィードバック

もう一つ重要な問題は、イオンの問題である。イオンが生成される過程は、荷電粒子により電離をするときと、ガス増幅により電離が起こる場合になる。ビームバックグラウンドに加え 2 光子過程により生成されるのイオンが、ドリフト電場によりカソードに完全に吸収されるまでに 3 トレイン分の衝突が行われる。これらのイオンはその間ドリフト領域を漂うことになり、イオン密度の空間的異方性を形成する。イオンによって形成される電場がドリフト電場を乱すようであれば、TPC の性能に大きな悪影響を及ぼす。のイオン生成は不可避免的なものであるが、のイオンが混入するとさらに問題は複雑になる。1 トレインの衝突が最終的にガス増幅領域で生成するイオンは、そのドリフトの遅さのためドリフト領域において  $1\text{cm}$  程度のディスク状の固まりとして移動することになり、イオン密度の異方性を時間的に変化させることになる。このイオンフィードバックは TPC 開発当初からの問題であり、これまで、ゲーティングという手法によりイオンのドリフト領域への流出を防いできた。MPGD は、本来自発的なイオンフィードバックの抑制作用を持っており、Micromegas は 0.3% 程度、イオンフィードバック抑制に特化した 3 段 GEM 構成でも同程度の抑制をすることができる。しかし、この程度ではガス増幅率を 1000 としてものイオンの 3 倍のイオン流出を許すことになり、MPGD-TPC においてもゲート機構の検討を進めている。せっかく脱ワイヤーを進めている MPGD-TPC に、ワイヤーを使ったゲート機構は美的センスに合わないだけでなく、エンドプレートがワイヤーを保持し張力に耐える構造が必要になる。

## ゲーティング

そんな中、F. Sauli 氏は GEM を使ったゲート機構を昨年提案しました。これは、春に物理学会の特別講演の中で触れられましたので覚えている方もいらっしゃるかもしれませんが、氏はこれを  $10\text{V}$  程度の低電圧モードで使用することで電子の透過膜として使える可能性を提示した。イオンは低拡散のため電気力線に沿って運動するため、GEM に逆電圧を印加しゲートを閉じるだけで、100% イオンフィードバックを抑制できる。問題は、この条件で、拡散の大きい電子の透過率を充分確保できるかである。LC-TPC では磁場も加わるため、拡散と  $E \times B$  が電子の透過率へ複雑に影響を与えるため、様子を電場計算とシミュ

レーションを駆使して調べている最中である。LC-TPC に最適なゲート機構の開発も LC-TPC のかかえる課題になる。

## 8. 最後に

TPC の誕生が 1978 年なので、この号が皆様のお手元に届く頃には、生誕 30 周年を迎えていることになります。もはや、高エネルギー業界は少数ユーザーにすぎないほど成長してきた TPC ではありますが、MPGD との組み合わせにより、ますます応用分野の幅を広げております。もう調べ尽くされたと思っていた TPC も、MPGD を通してテストすると、ひと味違う性能を発揮したり、なかなか味わい深いものがあります。期限があまり明確でないリニアコライダーのための測定器開発を忌み嫌う人も居るかもしれませんが、測定器の基本原理にまで立ち帰りながら考える時間があることもそんなに悪いことではありません。