

レジスティブ プレート チェンバー (RPC) の原理と現状

大阪市立大学大学院理学研究科数物系専攻

寺本 吉輝

teramoto@hep.osaka-cu.ac.jp

2004年1月27日

1. はじめに

レジスティブ プレート チェンバー (Resistive Plate Chamber: RPC) の原理, 種類, 最近数年の進展について報告する. RPC は局所的スパークカウンターである Pestov カウンターをもとに, 1980年頃イタリアの Santonico [1] によって考案された荷電粒子の通過位置とその時間を測定する検出器である. Santonico が最初に作った検出器は2枚のベークライト板の間にアルゴン, イソブタン, フレオン 13B1 の混合ガスを流し, ベークライト板の外側の面に塗ったカーボン電極に正負の高電圧をかけた構造であった. これを荷電粒子が通過するとベークライト板間に放電が起こり, その信号をピックアップストリップで読み出すもので, 今日でもその基本原理は変わっていない. 初期のもの性能は 1 mm 程度の位置分解能と 1 ns 程度の時間分解能を持ち, 高いレートには耐えられないため, ミューオン検出器や宇宙線検出器など, 大型で価格が安いことが必要な検出器に用いられてきた. しかしここ数年性能の大幅な進歩があり, 最近ではマイクロストリップ検出器に匹敵する 30~50 μm 程度の位置分解能を持つものや, 50 ps 程度の時間分解能を持つもの, また, 3 $\text{kHz}/\text{cm}^2 \sim 10 \text{ MHz}/\text{cm}^2$ に至る高レートに耐えられるものなども作られるようになってきた [2].

日本では, KEKB ファクトリーの Belle 実験の最外部に位置するミュー粒子と K_L 検出器 (KLM とよぶ)[3] に RPC を使用するため, 東北大, 東北学院大, 大阪市大の3箇所から1993年から開発を始めた. KLM 検出器ではベークライトの代わりにガラスを電極に使っているが, 1999年の実験開始以来今日(2004年1月)まで順調に働いている.

2. 構造と動作原理

RPC の基本的な構造を図1に示す. レジスティブ・プレートの名前の由来となる高い電気抵抗率 ($10^{10} \sim 10^{13} \Omega\text{cm}$) を持つ平行平板電極 (抵抗電極) の間にガスを入れ, その両電極の外側にカーボン塗料 (またはカーボンテープ) など表面抵抗が $10^5 \sim 10^6 \Omega/\square$ 程度の高圧電極を塗り, それに数~十数 kV の電圧をかける. 荷電粒子がこれを横切ると, 通過場所のガスをイオン化し, それにより通過場所で放電が起こる. この放電による電流が高圧電極のさらに外側に貼り付けた信号電極に電流を誘導し, これを検出する

ことにより粒子の通過位置と時間を測定することができる. 抵抗電極には 2 mm 厚程度のベークライトやガラス板を用い, ガスには, アルゴン, (イソ)ブタン, $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$, SF_6 などを混合したものをを用いる. またガス・ギャップは 2 mm が標準である.

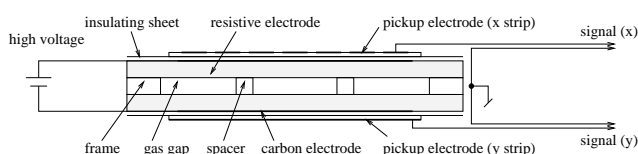


図1. RPC の断面図 (模式図)

RPC には比例計数管と違って複数の層を重ね合わせて信号を足し合わせることができるという特徴がある. このためにはすべての層にかける電場を同方向にして, それらの層をすべてはさんで信号ピックアップ電極を配置すると各層からの信号は加算されてピックアップ電極に誘起される. 実際 Belle 実験で使っているチェンバーは図2に示すような2層構造になっており, この2層をはさんで直交する2方向のピックアップ・ストリップをもつ信号電極を置いている. この方法で, それぞれの層のチェンバーをずらして配置することにより, フレームやスペーサー部分の不感領域をなくしている. この原理は後に述べるマルチギャップチェンバーで重要な役割をはたしている.

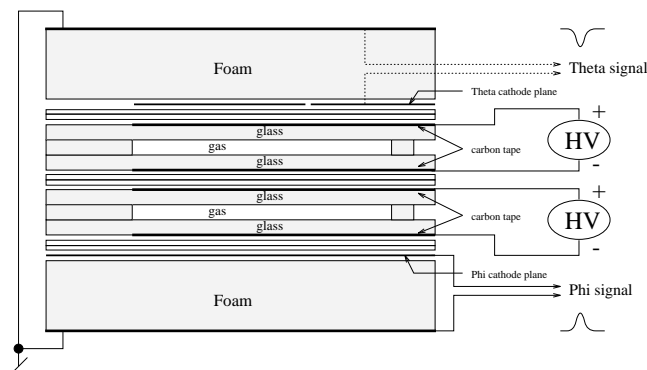


図2. 2層構造のチェンバーの断面図 (模式図)

RPC には2つの動作モードがあることが今日までわかっている. Santonico が最初に見つけたのはストリーマモード (またはスパークモード), それより信号電荷量が

1/100の動作モード[4]はアバランチモードと呼ばれている。ストリーマモードは混合ガスとしてアルゴンを主成分、もしくは、それに準ずる組成のガスを用いることにより実現できる。このモードでは、信号が大きく(信号電荷量 >100 pC)アンプも不要でノイズも少なく動作も安定している。ただし高レート(ベークライトの場合約 100 Hz/cm²以上)では検出効率が低下するので、レートの低い条件で使う大型で低コストが要求される用途に用いられる。主な使用例は、衝突型実験装置の最外部に位置するミュオン検出器、ニュートリノ反応の検出器、宇宙線検出器などである。KLM検出器のRPCもストリーマモードで使われている。アバランチモードは、通常混合ガスとしてC₂H₂F₄を主成分としたガスを用いることにより実現できる。このモードでは、信号電荷量が小さい(～1 pC)ため、入射粒子の頻度の高い(1～3 kHz/cm²)場合でも使用できる。このことからLarge Hadron Collider (LHC)の検出器として使用する計画で開発が進められている。

アバランチ発生のメカニズムは比例計数管の場合と基本的に同じであるが、信号の特徴は両者で異なる。アバランチが発生する機構は、まず荷電粒子がガスをイオン化し、電子とイオンのプラズマが粒子の飛跡に沿って生じる。このうち軽い電子が電場で加速され、ガス分子と非弾性衝突を起し、ガス分子のなかの電子をはじき飛ばす。この過程で自由電子の数が雪崩的に増えてゆく。この現象をアバランチと呼ぶ。比例計数管の場合、この結果生じたイオンの動きによりワイヤーに電流信号が誘電される。一方RPCの場合は電子の動きが信号電極(ピックアップ電極)に電流信号を誘電する。比例計数管の場合、アバランチが起るのはワイヤーの直径の2～3倍程度のごく狭い領域に限られていて、アバランチで発生した電子の運動する距離が短いこと、および、電場が2次元であるため誘電が距離の対数であり、電子の動きでは十分な信号をワイヤーに誘電できない。一方RPCでは、アバランチの発生する領域に明確な境界がなく、電場が1次元であるため誘電が距離に比例し、電子の動きが信号電極にガス増幅された電荷の1/10程度を誘電する。しかし比例計数管では誘電信号とノイズの分離が十分(99%程度)よいのに対して、アバランチモードのRPCでは誘電信号の大きさはノイズから連続的に分布し、両者の分離ができない。そのため、アバランチモードのチェンバーは1層だけでは実用的な検出器として使うのは難しく、普通は複数の電極層を重ね、その信号を加え合わせて使用する。これにより中心極限定理が適用でき、信号電流はガウス型になりノイズと区別できる[5]。なお、まえに述べたように、複数の電極層の信号を加えることはRPCにとって比例計数管よりはるかに簡単である。

チェンバーをアバランチモードで動作させる場合は、ア

バランチ過程が正電極表面に達した段階でそれ以上放電が進まないようなガスと動作電圧を選べばよい。ストリーマは、アバランチ過程が終わった後に、アバランチの先端(正電極表面と反対側)の高い電場部分で多量の励起分子からの紫外線の放出が光電効果を起させ、それにより電子が発生し、この電子の放電によりさらに紫外線が作られるサイクルが起る現象により発生する。これにより、負電極に向けて細いスパークが飛ぶ。これがストリーマである。ストリーマチューブのストリーマは普通カソードまで到達する前に消滅するが、RPCの場合はカソードまで到達する。

高抵抗電極の役割は、個々の放電が起った時にその場所での電場を低下させ、それにより連続放電を防ぐことである。放電が起ると、抵抗が高いため、放電が起った場所(数mm²)の電極表面の電荷が一時的に低下(ストリーマモードでは消滅)し、それにともない電場も低下(消滅)する。そのためイオンや励起されたガス分子がその付近に残っていても連続放電を起さない。電場の回復時間は電極の抵抗値によって異なり、ストリーマモードでは0.1～10 s程度である。これがストリーマモードで高レートに耐えられない原因になっている。なお、片側だけ高抵抗電極で、もう片側が導体電極のものもRPCとして作られている。両側が導体電極のものは平行板チェンバー(Parallel Plate Chamber (PPC))と呼ばれ、RPCとは別物である。

3. 種類別の特徴と性能

RPCは、動作モード(ストリーマモードとアバランチモード)、抵抗電極材料(ベークライト、ガラス、その他)、使用目的(ミュオンなど用、TOF用)の3つによって分類できる。このうち、使用目的のミュオン用はたいていストリーマモードで、TOF用は必ずアバランチモードである。

3.1 ストリーマモード

ストリーマモードのチェンバーは製作、使用ともに簡単で、従来RPCと言えはこのモードのチェンバーを意味した。L3, Belle, BaBar, ARGO-YBJ(Tibet)などで使われている(われた)チェンバーはこのモードである。位置分解能の基になるストリーマの直径は数100 μmで、信号電極のストリップ幅を十分細かくして誘電信号分布をフィットすれば、この直径以下の位置精度が得られると考えられる。しかしこの種のチェンバーは大型で低コストが最大の特徴であるため、ストリップ幅の狭いチェンバーは現実には製作されていない。たとえば、Belleのチェンバーの場合ストリップ幅は5 cm(パレル部分)であり、位置分解能はこれで決まっている。時間分解能は1 ns程度である。時間分解能はガスギャップを小さくすれば向上するが、ストリーマモードになるためには0.7 mm以上必要である(ガラスRPCでBelleで使用しているガスを用いた場合の実測値)。

ストリーマモードではチェンバーの電極損傷に注意する必要がある。ベークライト電極の場合は温度による抵抗率の変動が大きいため温度コントロールをする必要がある。ガラス電極の場合はガス中に水蒸気が混入すると、ガス成分にフロンが使用されている場合、電極損傷が起る。

3.2 アバランチモード

RPC はストリーマモード用のガスを使っても印加電圧が低いとアバランチ信号が観測されるが、不安定であり、アバランチ信号に遅れてストリーマ信号が高い頻度で現れる。安定してアバランチ信号だけを発生させるためには、 $C_2H_2F_4$ を主成分 (85~95% 程度) として、これにイソブタンを数%, SF_6 を 0.5~10% 混合したガスを用いる。アバランチモードはもともと高レートでチェンバーを働かせるために開発されたが、現在では時間分解能が良い (50 ps) ものや位置分解能が良い (50 μm) ものなどが作られている。また、ストリーマモードでは起こり得る電極損傷や寿命の問題も観測されていない。

3.3 ベークライト RPC

ベークライトは体積抵抗が $10^9 \sim 10^{11} \Omega cm$ でガラスより 2 桁程度低いいためストリーマモードではガラスより高いレートまで使える (最高 300 Hz/cm²)。しかし、ベークライトのチェンバーはノイズレートがガラスより高く、これを下げるために電極内面に熱処理した亜麻仁油 (linseed oil) を塗って使用される。亜麻仁油を熱処理したものはオイル油と呼ばれ、塗布後に硬化するが、ここで使う油はオイル油より低温で熱処理されたもので、完全には硬化しないものがノイズをよく下げ、検出効率を上げる (ストリーマモードで 99%) とされている。ただし、完全には硬化しないものは高温 (25°C 以上) になると軟化して剥離が起る (BaBar の RPC の説明参照)。亜麻仁油の製造と塗布は長い間イタリア以外では成功していなかったが、最近 CMS のチェンバーを共同製作している韓国でも塗布されるようになった。亜麻仁油の問題が主な理由となって、イタリア以外の国では主にガラス電極が使われている。

ベークライトの抵抗は温度と湿度に敏感である。抵抗の温度係数は 4 倍 /10°C であるので 2~3 度以内に実験室の温度を保つのが望ましい。またベークライトは乾燥すると抵抗が最大 2 桁上昇する。そのためガスに水蒸気を加えたり、実験室の湿度を適度に保つなどの対策が試みられている。

3.4 ガラス RPC

ガラス RPC は普通の窓ガラスに使われている板ガラスを用いる。ガラスの体積抵抗率は $10^{12} \sim 10^{13} \Omega cm$ で、

生産国によって気候 (主に湿度) が異なるため、それに合わせて原材料も違ったものが配合され、抵抗率も異なる。日本のガラスは普通 $5 \times 10^{12} \Omega cm$ 程度である。これは RPC として使える抵抗率の上限に近く、そのためストリーマモードでは宇宙線の 10 ~ 20 倍程度のレートで検出効率の低下がみられる。ただし、アバランチモードで使う場合には 1 kHz/cm² 程度までのレートに耐えられる。また抵抗の温度係数は 3% /deg 程度である。

ガラス RPC は、ストリーマモードで使う場合、ガスの水蒸気が混入すると電極損傷を起すため、ガス配管には金属パイプを主に使う。プラスチック部分は最小限にし、もし使う場合にはテフロンチューブなどを用い、 H_2O を 100 ppm 程度以下にする必要がある。

3.5 TOF 用 RPC (Timing RPC)

RPC の時間分解能は電極のギャップ間隔に比例する。しかしギャップ間隔を狭めればガスの電離のタネが減り、検出効率の下がる。ここで再び登場するのがマルチギャップである。4 層以上のマルチギャップにすることにより、250 μm のギャップでも 99% の検出効率を得ることが出来る。また、マルチギャップにすることにより、時間分布のテールがなくなりガウス分布型になる。この結果、時間分解能は 50 ps 程度まで得ることが出来る。このようなチェンバーを Timing RPC と呼ぶ。Timing RPC はコロンビア大学の Fonte と CERN の Williams らによって開発され、最終的に Williams の 5 層 \times 2 段型マルチギャップ RPC が LHC の ALICE 実験の TOF カウンターとして採用されている。

3.6 マイクロ RPC

マイクロ RPC [2] は Fonte, Peskov などによって開発されたマイクロストリップ・チェンバーの一種で (図 3)、シリコン (抵抗率 $10^5 \Omega cm$) などを高抵抗電極として用いた検出器で、高い位置分解能 (30 μm) と時間分解能 (50 ps) を同時に兼ね備える。また、高レート特性を犠牲にせず (10 MHz/cm²)、普通のマイクロストリップ・チェンバーに比べて、放電に対する安定性が向上している。

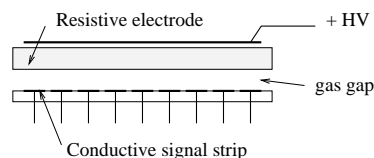


図 3. マイクロ RPC の断面図 (模式図)

4. 使用例

使用例を表 1 に示す。

表 1. 使用例. BK: ベークライト, GL: ガラス, AV: アバランチモード, ST: ストリーマモード.

現在または過去に使用			
実験名	用途	構造	特徴と備考
L3 (CERN)	ミュオン・トリガー	2 mm BK (ST)	最初の本格的実験使用
GREX/COVER_PLASTEX	宇宙線空気シャワー検出器	2 mm BK (ST)	宇宙線粒子検出
MINI (Bari 大学)	宇宙線ミュオン検出器	2 mm BK (ST)	下からのミュオン検出を試みた
ARGO-YBJ (Tibet)	宇宙線空気シャワーのコア検出器	2 mm BK (ST)	気圧が低い所での使用
BaBar (SLAC)	ミュオンと K_L 検出器	2 mm BK (ST)	最初の大規模 BK RPC 使用実験
Belle (KEK)	ミュオンと K_L 検出器	2 mm GL (ST)	最初の大規模 GL RPC 使用実験
今後使用予定			
実験名	用途	構造	特徴と備考
CMS	前方ミュオントリガー	2 mm BK (AV)	Williams らのデザイン
Atlas	ミュオンスペクトロメーター	2 mm BK (AV)	
ALICE	TOF カウンター	マルチギャップ GL (AV)	
ALICE	ミュオントリガー	2 mm BK (ST)	ALICE のチェンバーを参考 Belle のチェンバーを参考
LHCb	ミュオントリガー	2 mm BK (AV)	
STAR	TOF カウンター	マルチギャップ GL (AV)	
NuMI off axis	$\nu_\mu - \nu_e$ 振動	2 mm GL (ST)	

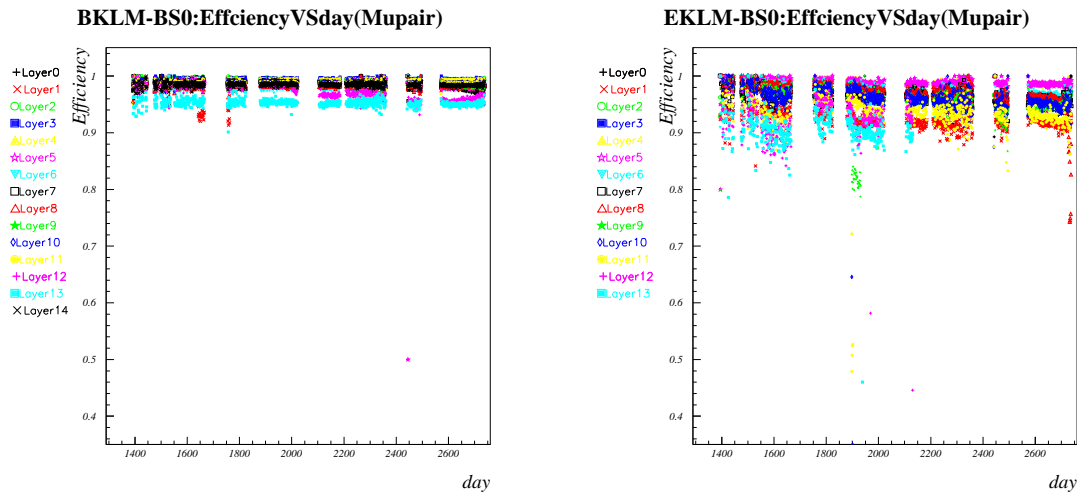


図 4. Belle 実験の RPC のバレル部分 (左) とエンドキャップ部分 (右) の 1 つのセクターの検出効率の変化 (1999 年 9 月から 2003 年 7 月).

5. Belle 実験の RPC

Belle 実験の KLM 検出器に RPC を使用するため東北大, 東北学院大, 大阪市大の 3 個所で 1993 年からチェンバーの開発を始めた. 当初 KLM を担当するもう 1 つの大学であるバージニア工科大学が既に帯電防止加工された塩ビ板をベークライトのかわりに使用したチェンバーを試作しており, 日本の 3 大学でもこれを参考にチェンバーを作ることから始めた. しかし塩ビのチェンバーは 2~3 ヶ月で電極が傷むことがわかり, ガラス, ベークライト, ABS など进行测试した結果, 最も検出効率が高く安定して動作するガラスの採用を決めた. また R&D の段階で, 東北大学と大阪市立大学が独立にガス中の水蒸気がガラス電極を損傷することを見つけた. 実験に使用するチェンバーの製作は, バレル部分はバージニア工科大学を中心にしたアメリカのグループ, エンドキャップ部分は東北大学を中心にした日本のグループが担当した.

1997 年からの宇宙線テストの後, 1999 年から B ファクトリー実験に使用されている. 2004 年初め現在のところ, 特に長期使用による劣化の症状はみられない (図 4). ただし, エンドキャップ最外部 2~3 層で, 中性子によるバックグラウンドのため検出効率の低下がある [6].

6. BaBar 実験の RPC

イタリアのグループがオーソドックスなストリーマモードの 2 mm ベークライトを用いたチェンバーを製作した. ノイズレートを出来る限り下げたため 3 層の完全硬化しない亜麻仁油処理をしたチェンバーを使用した. しかし, 使用初期は空調のない暑い実験室だったため, 亜麻仁油層が軟化し静電引力で両方の電極から剥離した. それがかくついて電極間が導通したため, 検出効率が著しく低下した [7]. BaBar の教訓として, 実験室の温度コントロールをすること, および, 完全硬化した亜麻仁油層を用いることの重要性が判った.

7. まとめと謝辞

RPC はここ数年大きな進歩がみられた。一つは Belle 実験で RPC が実用に耐えられる検出器であることが証明されたこと、もう一つは時間分解能が 50 ps, 位置分解能が 30~50 μm , レート耐性が 3 kHz/cm^2 (マイクロ RPC では 10 MHz/cm^2) まで達成できる高性能の検出器に発展したこと, などである。

最後に, RPC についていろいろ教えていただいたり議論したりして知識と経験を深めることができたことを Belle の KLM グループの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1]R. Santonico and R. Cardarelli, Nucl. Instr. and Meth. **187** (1981) 377.
- [2]P. Fonte, IEEE trans., **NS49** (2002) 881.
- [3]A. Abashian et al., Nucl. Instr. and Meth. **A491** (2002) 69.
- [4]R. Cardarelli, A.Di Ciaccio, R. Santonico, Nucl. Instr. and Meth. **A333** (1993) 399.
- [5]E.Cerron Zeballos, I. Crotty, D. Hatzifotiadou, J.Lamas Valverde, S. Neupane, M.C.S. Williams, A. Zichichi, Nucl. Instr. and Meth. **A374** (1996) 132.
- [6]K. Abe et al., IEEE trans., **NS50** (2003) 831.
- [7]F. Anulli et al., Nucl. Instr. and Meth. **A515** (2003) 322.