

微細加工技術を用いたガス・マイクロパターン検出器 μ -PIC の開発とその応用

京都大学 大学院理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室
 永吉 勉、身内 賢太郎、窪 秀利、谷森 達
 nagayosi, miuchi, kubo, tanimori@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

1. ピクセル検出器開発の背景

最近、高エネルギー物理学の世界でも微細加工技術を用いたガス・マイクロパターン検出器の話がよく聞かれるようになってきた。マイクロパターン検出器という呼び名が広がったのはつい数年のことであるが、開発はすでに十年以上の歴史がある [1]。

従来のガス増幅検出器 (ワイヤーチェンバーや Multi Wire Proportional Chamber; MWPC) は細い陽極ワイヤーのまわりの高電場によるガス電子雪崩による増幅作用を用いた検出器である。ただし、ワイヤーを用いる限りは位置分解能、計数率、量産性などに限界がある。これを克服するために、基板の上に電極を形成するワイヤレスの検出器が開発された。1987年、フランスの ILL 研究所の Oed は、薄いガラス基板の上にリソグラフィの技術により幅 $10\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ の陽極、陰極を交互に $200\mu\text{m}$ 間隔で印刷した Micro Strip Gas Chamber (MSGC) を開発し、世界で初めてワイヤレス検出器を実現した。この狭い電極間隔により $100\mu\text{m}$ 以下の位置分解能、MWPC の 1000 倍以上の高計数率が簡単に実現でき、それ以降世界で多くの開発が行なわれた。

われわれは 1990 年代始めから最先端の高密度実装技術を用いて、厚さ $20\mu\text{m}$ のポリイミド薄膜を用いた 10cm 角 MSGC の開発を行ってきた。われわれの MSGC では、陽極と直交する方向に薄膜の裏面に配置したバックストリップ電極を用いて二次元読み出しを実現した。同時に X 線画像装置を開発し、世界で初めて MSGC を用いた X 線による結晶構造解析を行ないその高い能力を示した。これらは物理学会誌にまとめられている [2]。

このような優れた特性を持つ MSGC であるがいくつかの克服が困難な問題がある。MSGC は電極の端付近で電場が非常に強くなり、放電が起こりやすい。特に電離損失が大きい荷電粒子に弱く、安定動作可能なガス利得は数百程度であった。さらに MSGC の非常に繊細な電極は数度の放電で完全に破壊されてしまう。また、放射線が作る蓄積電荷による空間電荷効果で電場構造が時間的に変化し、利得の変化を起こす。このため、現在

では高エネルギー物理分野では MSGC の開発は下火となり、中性子検出器として使用されるのみである。

われわれも放射光の大強度 X 線ビームでは MSGC の放電が問題となり、実際の利用まで到達することは困難と判断した。しかし、MSGC の利点は捨て難く、われわれはこの利点と安定性を併せ持つ電極構造を模索した。ワイヤーチェンバーで放電が起こりにくいのは、強電場が陽極のみに集中し、陰極での電場が弱いためである。この特徴を生かすには、図 1 のような比例計数管を輪切りにしたような円筒形電極を形成するのがよいのはすぐにわかる。

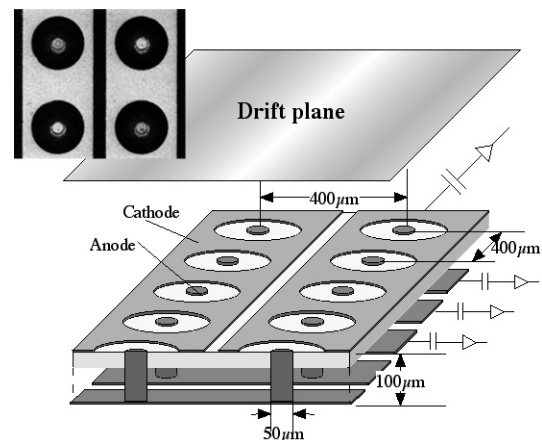


図 1. μ -PIC の構造。厚さ $100\mu\text{m}$ のポリイミド基板の両面に陰極、陽極ストリップが $400\mu\text{m}$ 間隔で互いに垂直に配されている。直径 $50\mu\text{m}$ の陽極がポリイミド基板を貫いて、陰極ストリップの円形の穴の中心に形成されている。電極の顕微鏡写真を左上に示す。

この電極構造を実現するためにわれわれが目をつけたのがプリント回路基板技術である。最近では LSI の高密度実装のために $100\mu\text{m}$ 直径以下のスルーホール技術が開発されている。 $50\mu\text{m}$ 直径が実現できれば $100\mu\text{m}$

の厚い基板とそれを貫く陽極の柱が形成できると考え、この Micro Poxel Chamber (μ -PIC) の開発を 1999 年から始めた [3]。プリント基板技術は IC 技術と異なり 30cm 角程度の大型化が可能であり、基板自体の耐久性にも優れている。基板であるため回路との接続性も抜群である。さらに開発、製作コストが IC 用リソグラフィと比べかなり安いという大きな利点もあり、量産コストも大幅に下がると思われる。

われわれはこれらの利点を生かし MSGC では実現が困難であった利得 10000 以上 (サブミリピッチで最小電離粒子を検出するのに必要な利得) で安定に動作し、30cm 角程度の大型検出器を実現することを目標として開発を進めている。この検出器はプリント基板一枚のみでできている。非常に薄く、操作も簡単で量産可能な二次元ガス放射線検出器を実現できれば、今までのワイヤーチェンバーでは想像出来なかった新しい応用が色々出てくると期待できる。今回は、この目標にかなり近付いた開発状況と興味ある応用を紹介する。

2. μ -PIC の構造と基本性能

2.1. 電極構造と特徴

μ -PIC は、厚さ $100\mu\text{m}$ のポリイミド基板の両面に互いに垂直に $400\mu\text{m}$ 間隔で配置した陰極・陽極ストリップからなる。陰極ストリップには $400\mu\text{m}$ 間隔で円形の穴があり、その中心に基板を貫いて $50\mu\text{m}$ 径の陽極ピクセルを形成している (図 1)。

われわれがこれまで開発してきた MSGC では、バックストリップ電極に誘起した電荷を利用して二次元読み出しを行っていたが、この電荷は陽極で収集される電荷の 20~30% 程度しかないため、ガス利得を陽極から十分な信号を得るのに必要な値より高くせざるを得なかった。また、このバックストリップ電極は前述の誘電体表面への電荷蓄積をもたらす。これに対して μ -PIC では垂直に配置した陽極と陰極でガス電子雪崩による電子・イオンを直接収集するので、両極からほぼ等しい大きさの信号が得られる。また、バックストリップ電極を必要としないので、原理的に誘電体表面への陽イオンの蓄積は起こらない。ピクセル状の電極構造は、90 年代半ばに Micro-Dot という検出器で提案されている [4]。この検出器は IC の技術でシリコン基板上に電極を形成するため、非常に薄い絶縁層を持つ。これに対して μ -PIC はプリント基板の技術で厚いポリイミド基板を使用するという大きな違いがある。このタイプの検出器には必ず裏面の読み出し電極が必要であるが、絶縁層が薄いとこれによる電場の影響が大きくなる。われ

われは、三次元電磁場解析プログラム “Maxwell” [5] とワイヤーチェンバーのためのシミュレーションプログラム “Garfield” [6] を用いて基板の厚さを変化させながら μ -PIC における電子のドリフトを計算した。その結果、図 2 のように基板が薄い場合は多くの電子が陽極で集められないことがわかった。このとき電子収集効率、即ち入射粒子によって電離された電子のうち陽極で収集されたものの割合は約 40% となっている。これは、実際に測定されるガス増幅率は印加電圧から計算される値の約 40% になることを意味する。これに対して、基板の厚さが $100\mu\text{m}$ あれば 90% の電子を集めることができる。

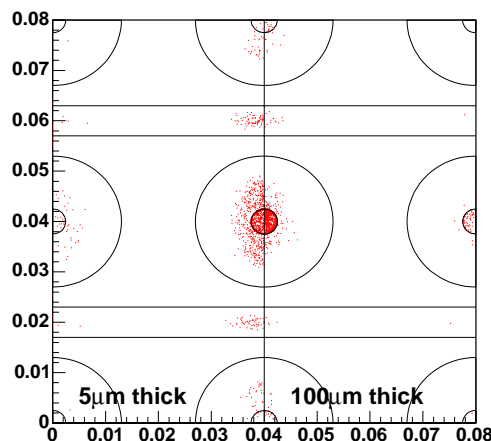


図 2. 電子ドリフトの終端点の分布。左半分は基板厚さが $5\mu\text{m}$ の場合、右半分は基板厚さが $100\mu\text{m}$ の場合を表す。基板厚さが $5\mu\text{m}$ の終端点は基板裏面に縦に走る読み出しストリップに引っ張られているのが分かる。

また、検出器の安定性を考える上では電極周囲の電場強度が重要である。基板が薄い場合、厚い場合それぞれについて基板表面付近の電場を計算した結果を図 3 に示す。薄い基板では基板表面の陰極と基板裏側の読み出し線との距離が短くなり、ここに強い電場ができる。特に陰極・基板・ガスの境界では誘電率の不連続によって局所的に非常に電場が強くなる。このような強電場のもとでは、電界電子放出によって金属から電子が飛び出す。この電子は直ちに電子雪崩を起こし、これが放電の一因となると考えられる。これに対して基板厚さが電極間距離より大きければ電場構造はワイヤーチェンバーに近付き、陰極エッジ付近でもあまり電場が強くならず、陰極からの電子放出による放電は起こりにくくなる。

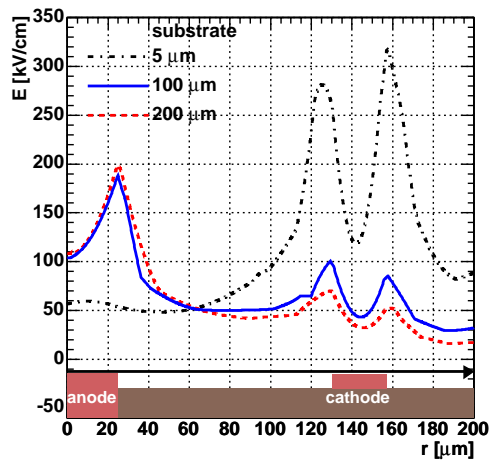


図 3. 陽極・陰極間に 600V の電圧を印加した場合の電極表面近くにおける電場強度の基板厚さによる違い。一点鎖線、実線、破線がそれぞれ基板厚さが $5\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ の場合を表す。

以上のように、 μ -PIC は陽イオン蓄積などの問題の他、放電などマイクロパターン検出器の宿命とも思われていた問題をも解決し得る検出器である。われわれは、陰極・陽極がそれぞれ 256 本ずつ (陽極ピクセル数は 65536 個) ある検出面積 $10 \times 10 \text{cm}^2$ の μ -PIC を開発し、基本性能試験および様々な応用への基礎実験を行なっている [7, 8, 9]。

2.2. 基本性能

大気圧のアルゴン-エタン混合ガスを使用し、 ^{55}Fe 線源 (5.9keV) を照射したときのガス利得の電圧依存および位置依存性を図 4 に示す。ここでは、検出面を 8×8 の領域に分割し、その領域ごとにガス利得を測定している。この試験の結果、約 7% 以内の一樣性が得られた。これは、全検出面積にわたってきわめて様な電極が形成されていることを意味する。また、最高ガス利得は 1.6×10^4 に達し、やや抑えたガス利得 (~ 6000) では、一ヶ月を越える連続動作を達成した。この連続動作の間、陽イオンの蓄積によるガス利得の変動は見られなかった。ほとんどの応用にはこのガス利得で十分であるが、目標とする 10^4 以上のガス利得を得るにはあと少しの改良が必要である。これについては第 4 節で述べる。

μ -PIC の位置分解能の評価には、X 線による光電子の飛程が短いキセノンガスを使用した。また、電子の拡散を最小限に抑えるためにドリフト層の厚さを 1mm に制限した。図 5 に約 10keV の X 線による基準プレート

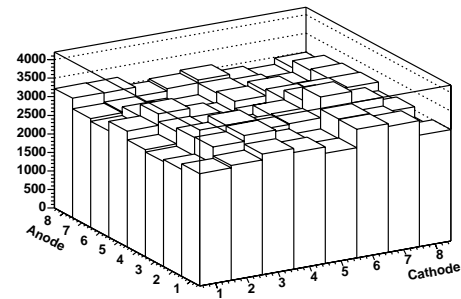
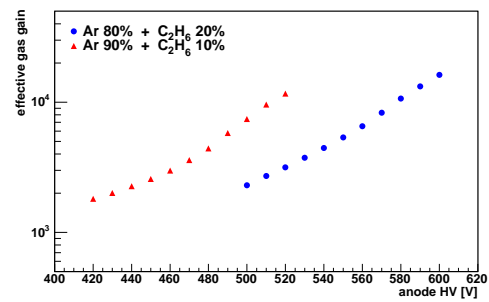


図 4. ガス利得の印加電圧による変化 (上) および場所による分布 (下)。利得の場所分布はアルゴン-エタン (20%) 混合ガスでの測定。

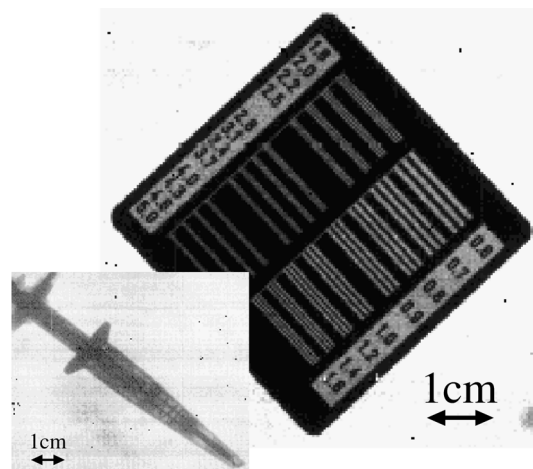


図 5. 基準プレートとオシロスコープのプロープの X 線透過像。基準プレートの数字は 1mm 当りのスリットの本数を示す。プローブ内のスプリングもはっきりと見える。

の透過像を示す。この図から 0.5mm 間隔のスリットが分離できる程度の像が得られていることがわかる。さらに、基準プレートの端の像で評価すると $120\mu\text{m}$ (RMS) の位置分解能が得られた。この値はデジタル式画像処理システム [10] の理論的限界 $\frac{d}{\sqrt{12}} \simeq 115\mu\text{m}$ (d は電極間隔) に非常に近い値である。

3. μ -PIC の応用

3.1. マイクロ TPC [11]

われわれは開発した μ -PIC に 8cm のドリフト層を取りつけ、 $10 \times 10 \times 8\text{cm}^3$ の検出容積を持つマイクロ Time Projection Chamber (TPC) を製作した。マイクロ TPC を用いた測定で図 6 に示すような荷電粒子の飛跡が検出され、電子の多重散乱の様子がはっきりと検出可能であることを示した。陽子の飛跡を直線フィットすることで一点当りの三次元的空間分解能 $260\mu\text{m}$ を得た。現在この分解能を改善すべく位置算出回路のクロックアップ ($20\text{MHz} \rightarrow 50\text{MHz}$) を行っている。

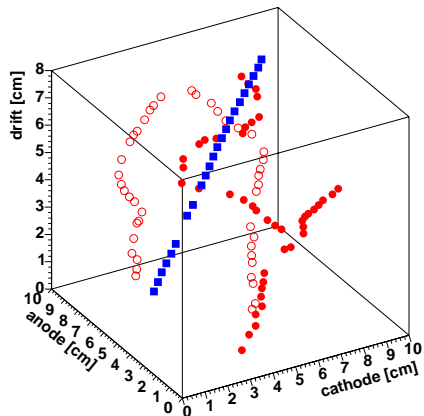


図 6. マイクロ TPC で検出された荷電粒子の三次元飛跡。丸印で 100-500keV の電子、四角印で 0.8GeV の陽子を示す。

3.2. ガンマ線カメラ [12]

われわれはマイクロ TPC での電子の飛跡検出を応用したガンマ線カメラの開発を進めている。ガンマ線カメラの概念図を図 7 に示す。従来開発されてきたガンマ線カメラでは、コンプトン散乱の反跳電子の飛跡に関する情報が失われていたため、事象毎のガンマ線到来方向は真の方向を含む円錐上にしか制限できなかった。

われわれが開発しているガンマ線カメラはガンマ線到来方向を事象毎に一意に決定することが可能となる上、到来方向決定に必要なでない測定角を用いて運動学的にカットを施し、バックグラウンドフリーなイメージを得ることが可能である。

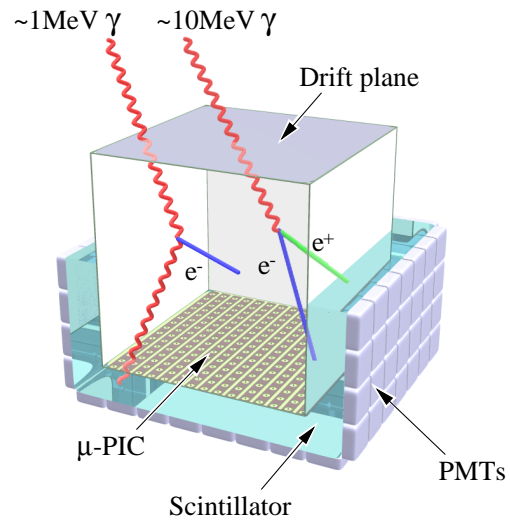


図 7. ガンマ線カメラの概念図。反跳電子の三次元飛跡とエネルギーをマイクロ TPC で、散乱ガンマ線の方向とエネルギーを取り囲むシンチレータで検出する。

われわれはマイクロ TPC を $10 \times 10 \times 2.5\text{cm}^3$ の NaI(Tl) アンガーカメラと組み合わせたガンマ線カメラのプロトタイプを開発、原理実証試験を行った。図 8 にプロトタイプで得られたガンマ線のイメージを示す。今後、 μ -PIC およびシンチレータの性能向上、30cm 立方のガス容積を持つ実機の製作を行い、気球実験で実際の天体からのガンマ線を観測する予定である。

3.3. 時分割型中性子検出器 [13]

時分割可能な中性子検出器は、今後 J-PARC などのパルス中性子ビームで必須となる。われわれは ^3He の熱中性子反応 $n + ^3\text{He} \rightarrow p + ^3\text{H}$ で生成される陽子とトリトンの飛跡を取得するという原理に基づいた検出器の開発を進めている。従来の中性子検出器は気圧を高くして飛跡を短くし、反応点の位置分解能を追求するものがほとんどだが、本検出器はブラッグカーブから陽子とトリトンの粒子識別が可能であることを利用、1 ~ 2 気圧程度の簡単な装置となる点が新しい。

われわれは概念実証試験として、気密容器をアルゴン- $\text{CF}_4(20\%)$ - $^3\text{He}(2\%)$ で 1.1 気圧に加圧、ガス利得 1000

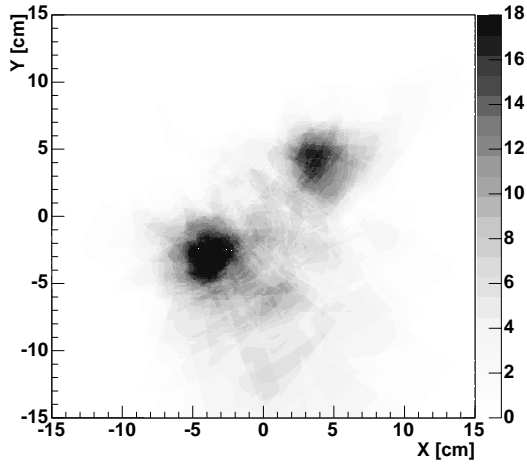


図 8. プロトタイプガンマ線カメラで得られたガンマ線画像。検出器から 5cm 離れたところに置かれたコリメートなしの 2 個の ^{137}Cs 線源 (662keV) がはっきりと分離されている。

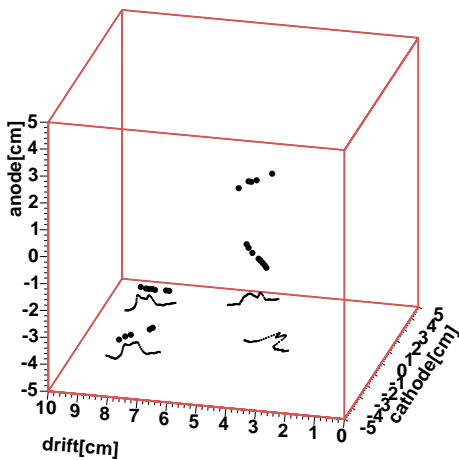
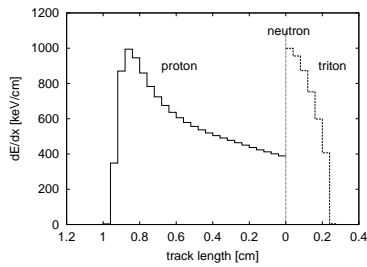


図 9. (上) ブラッグカーブのシミュレーション結果。(下) 典型的な熱中性子吸収による三次元飛跡と得られたブラッグカーブ。

程度での測定を行った。マイクロ TPC に ^{252}Cf 源からの中性子を照射、陽子とトリトンの三次元飛跡を取得した。得られた飛跡と各飛跡に対応するブラッグカーブをシミュレーション結果と合わせて図 9 に示す。シミュレーションで見られる特徴的なブラッグカーブが実際に観測され、マイクロ TPC を用いた時分割可能な中性子検出器の原理が実証された。今後、位置分解能、検出効率などの性能評価を行い、実用化へと開発を進める予定である。

3.4. 暗黒物質探索実験 [14]

ガス検出器を用いた暗黒物質の直接探索実験は、大質量の検出器で計数率の数 % の季節変化を捉えるという現在の手法と比較して、確度の高い信号が期待されるため、非常に有力な手法であると言われている。銀河中をランダムな方向に運動すると考えられている暗黒物質と太陽系の相対的な運動によって、地球には「暗黒物質の風」が吹き付けている。ガス検出器を用いた実験では、暗黒物質との弾性散乱で原子核が前方に片寄って反跳を受けることによってこの風を直接検出することが可能となる。われわれは開発したマイクロ TPC の性能に基づいて暗黒物質探索の感度を計算した [14]。マイクロ TPC で観測が期待される原子核反跳事象は図 10 に示すように前方に大きく寄ることが期待され、確度の高い暗黒物質検出が可能となると考えられる。今後、長期間安定動作、低圧での動作試験の後、大容積 (1m^3 級) の検出器を製作、地下実験を行う予定である。

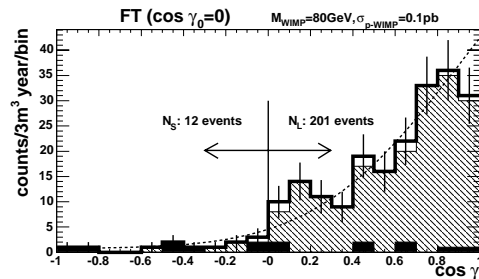


図 10. 暗黒物質による原子核反跳の角度分布。単純に前後の比較をするだけで十倍以上の違いがある。網掛け部が暗黒物質で期待されるシグナル、黒が中性子バックグラウンド。

4. 今後の開発と展望

上記のような様々な応用のために、現行の9倍の検出面積を持つ $30 \times 30 \text{ cm}^2$ の大面積 μ -PIC の開発を進め、これまでに図 11 に示す様な μ -PIC が製作された。現在は基板と電極材料の熱膨張率の違いによって検出面の端に近いところでは裏面の陽極パターンと表側のピクセルパターンがずれるという問題があるが、製作技術の向上が進んでおり、この問題が解決され $30 \times 30 \text{ cm}^2$ の大面積 μ -PIC がまもなく完成すると考えている。

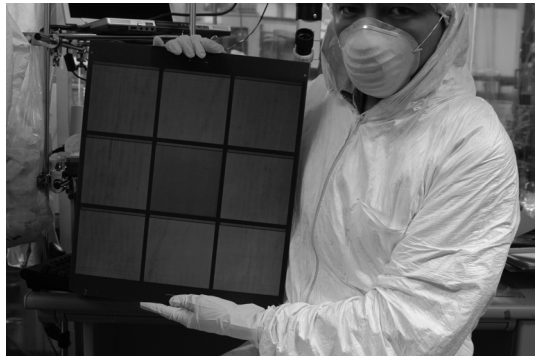


図 11. 開発中の $30 \times 30 \text{ cm}^2$ の検出面積を持つ μ -PIC (それぞれの部分での性能評価を行うため、9つに分割したマスクを使用している。)

また、 μ -PIC は MWPC と比較して複雑な構造をしているため、2 節で述べたように Maxwell を用いた三次元シミュレーションは性能の定量的評価、構造の改良に不可欠かつ有力な手段である。現在、これを用いてより安定に高いガス利得で動作させるための電極構造を設計している。これまでに開発した μ -PIC では 10^4 を越えるガス利得が得られているが、この条件で安定に動作させるためには若干の改良が必要である。2.1 節で述べたように、基板が厚いほど放電は起こりにくい。従って、現行の $100 \mu\text{m}$ よりも基板を厚くすれば陰極端での電場はより弱くなるのでより高い電圧が印加できるようになり、結果として高いガス利得が得られると予測できる。現行の μ -PIC で得られているガス利得 ($\sim 10^4$) のときの電場の条件をもとに、基板を厚くしたときに期待されるガス利得を計算すると、基板厚さが現行よりわずかに厚い $150 \mu\text{m}$ あれば、少なく見積もっても 10^5 になる [8]。これを実現するためには、直径 $50 \mu\text{m}$ 、深さ $150 \mu\text{m}$ の高アスペクト比のスルーホールを必要とするが、プリント基板技術の進歩によって近いうちにこれも可能になると期待している。

以上、微細構造を用いたガス検出器 μ -PIC の開発から性能評価、各種応用への基礎実験まで簡単に述べてきた。大面積、安定動作、簡単な構造などの特徴を持つ本検出器の応用はわれわれが現在進めている以上に遥かに幅広いものと考えている。この研究紹介を通じて、われわれの思いつかない様な応用が生まれれば幸甚である。なお、この研究は京都大学大学院理学研究科物理学第二教室宇宙線研究室所属、竹田敦氏、折戸玲子氏、植野優氏、高田淳史氏、岡田葉子氏との共同研究である。彼等の常日頃からの熱心な研究活動に敬意を表しつつ筆を置きたい。

参考文献

- [1] F. Sauli, Nucl. Instr. Meth. A **477** (2002) 1 and the references therein.
- [2] 谷森達、越智敦彦、西勇二、日本物理学会誌 **55** (2000) 420.
- [3] A. Ochi, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **471** (2001) 264, A. Ochi, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **478** (2002) 196.
- [4] S. F. Biagi, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **361** (1995) 72.
- [5] Maxwell 3D Field Simulator, Ansoft Corporation, <http://www.ansoft.com>
- [6] R. Veenhof, Nucl. Instr. and Meth. A **419** (1998) 726.
- [7] T. Nagayoshi, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **513** (2003) 277.
- [8] T. Nagayoshi, Doctoral thesis, Kyoto University, 2004.
- [9] T. Nagayoshi, *et al.*, submitted for the Proceedings of the "Imaging2003" July, 2003, Stockholm, Sweden, A. Takeda, *et al.*, submitted for IEEE Trans. Nucl. Sci.
- [10] A. Ochi, Doctoral thesis, Tokyo Institute of Technology, 1998.
- [11] H. Kubo, *et al.* Nucl. Instr. Meth. A **513** (2003) 94, K. Miuchi, *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., **50** (2003) 825, K. Miuchi, *et al.*, submitted for the Proceedings of "VCI 2004".
- [12] R. Orito, *et al.*, Instr. Meth. A **513** (2003) 408, T. Tanimori, *et al.*, New Astronomy Rev. **48** (2004) 263-268, R. Orito, *et al.*, submitted for the Proceedings of the "Imaging2003" July, 2003, Stockholm, Sweden, 高田淳史, 修士論文, 京都大学, 2004.
- [13] K. Miuchi, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **517** (2004) 219.
- [14] T. Tanimori, *et al.*, Phys. Lett. B **578** (2004) 241.