

## 論文の内容の要旨

### Study on Multi-grid-type MicroStrip Gas Chambers (マルチグリッド型マイクロストリップガス比例計数管の研究)

氏名 シリティブラッサミー プラシット

最近、大型放射光や大強度陽子線を用いた核破砕中性子源などの建設が各国で進められており、このような線源により得られる高強度ビームを用いた原子・分子の配列・構造・ふるまいに関する分析が盛んに行われている。特にこれまで研究用中性子源の強度はX線など他の線源に比較して極めて小さかったため、ビームラインにおいて  $10^8$  n/cm<sup>2</sup>/s 以上の中性子が取り出せる次世代核破砕中性子源の出現は画期的である。この中性子の能力を十分に引き出すためには、高計数率・高位置分解能をもった位置敏感型中性子検出器の登場が待たれるところである。表 1 に、大強度中性子源施設JSNSにおける中性子散乱実験用の代表的なスペクトロメータの性能と、そのスペクトロメータに要求される性能をまとめたものを示す。各スペクトロメータに共通して要求されるものは、 $10^{-6}$ 以上の高い線の抑制比、50%以上の高い検出効率、300kHz以上の高い計数率、などが必要である。また、位置分解能については、最高1mm程度までの位置分解能が要求されている。一方、現在広く用いられている円筒型のHe-3ガス比例計数管では、位置分解能は5mm程度、また、計数率特性にも厳しい制約があり、30kHz程度までしか利用できないなどの問題があり、一桁程度の性能改善が求められている。

表 1 次世代核破砕中性子源における中性子スペクトロメータの要求仕様

Instrument	Number of pixels	Pixel area (cm <sup>2</sup> )	Neutron capture efficiency (%)	Gamma efficiency	Peak pixel count rate (n/s)	Detector count rate (n/s)
Powder diffractometer	40000	2.4	50	$10^{-6}$	100	$3.5 \times 10^6$
Disordered materials diffractometer	150000	0.25	20	$10^{-6}$	300	$4.2 \times 10^7$
Single crystal diffractometer	$5 \times 10^6$	0.01	50	$10^{-6}$	$2 \times 10^4$	$3 \times 10^5$
Small angle diffractometer	40000	0.25	50	$10^{-7}$	1500	$2 \times 10^7$
Liquids reflectometer	40000	0.01	50	$10^{-7}$	$1 \times 10^6$	$7 \times 10^7$
Magnetism reflectometer	40000	0.01	50	$10^{-7}$	$1 \times 10^6$	$9 \times 10^7$
Wide angle spectrometer	70000	2.5	50	$10^{-7}$	$1 \times 10^6$	$5 \times 10^5$
Cold neutron spectrometer	15000	6.3	50	$10^{-7}$	$1 \times 10^6$	$5 \times 10^6$
High resolution spectrometer	70000	2.5	50	$10^{-7}$	$1 \times 10^6$	$4 \times 10^5$

マイクロストリップガス比例計数管(MicroStrip Gas Chamber: MSGC)は、微細加工技術を用いて製作された微細ストリップを用いた比例計数管であり、ガラス基板上に、数 $\mu$ m幅のアノードストリップと数100 $\mu$ m幅のカソードストリップを数100 $\mu$ mの間隔で交互に配置し、これらの間に高電圧を印加して、アノード近傍に集中した高電場を用いてガス増幅を行うものである。MSGCでは、高密度に電極を配置することで、アノード・カソード間に与えた高電場と相まって、電子なだれにより生成した陽イオンを速やかに取り除き高速動作を可能とする。このため、1900年代後半には、X線、電子線、イオンビームなど、さまざまな粒子線の入射位置を検出するためのデバイスとして期待され、世界各国で研

究が行われた。しかし、MSGC には、アノードとカソードの間でガラス基板に沿ってストリーマ放電が生じるという致命的な問題が見つかった。このため、3次元微細加工技術を用いた、新しい検出器として GEM(Gas Electron Multiplier)に代表されるマイクロパターンガス検出器の提案が相次いで行われた。一方、GEM は高圧ガス中で動作させた場合には極端にガス増幅度が落ちることが知られている。特に He-3 比例計数管などの中性子検出器では原子核反応を利用し、中性子を荷電粒子に変換して計測を行うため位置分解能を高く取るためには、荷電粒子の飛程を抑制する必要が生じ、高圧のストップングガスが添加される。つまり、中性子検出において、高い位置分解能を必要とする用途には GEM は適さない。本研究では、MSGC の電極構造、再度着目して、電極パターンを改良することを考え、アノードとカソードの間に電荷収集には直接は関与しない第三、第四の電極(グリッド)を挿入して電場を安定化させたマルチグリッド型 MSGC(M-MSGC)を対象として、新しい信号読み出し法の原理を探求し、高速、高位置分解能を可能とする新たな中性子位置検出器を開発することを目的におき、研究を行った。

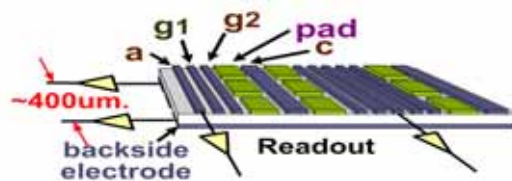


図1 フローティングパッドを用いた MSGC の信号読み出し手法

まず、M-MSGC の基礎特性を主に X 線照射により測定し、高いガス増幅度と良い均一性が得られることを示した。また、高強度のビームを照射した場合の長時間安定性も十分であった。M-MSGC では、アノードとカソードの間にもグリッド電極を挿入しているため、基板の上部における電場の変化を誘起電荷などを介して基板の下部から知ることは難しく 2次元の検出器では配線場所が大幅に制約を受ける。そこで、2次元 M-MSGC を可能とするために表面電極の役割から考え直す再検討を行った。表面電極が誘起電荷を遮るのは電極の存在自体が原因ではなく、その電極が接地または電源に接続されているからで、電極がフローティングの状態ならば誘起電荷はそのまま裏面に伝えられる。しかし、電極がフローティングであっても、連続したストリップ電極の場合、裏面には連続した誘起電荷が現れ、位置検出器としては利用できない。そこで、電極を無数の細かなフローティングパッドに分割し、ここに一時的に電荷をおく方法を考案した。これにより、裏面からの誘起電荷検出が可能である。本手法を用いた位置検出では上下基板から得られる信号に対して電荷分割法と組み合わせ、0.5mm 幅にコリメートした中性子ビームを用いて、表面、裏面共に 0.6mm FWHM の位置分解能を実現した(図 2)。この位置分解能は、He-3 比例計数管で得られた中性子検出器の位置分解能としては国内最高の値であり、世界でもブルックヘブン国立研究所で得られた 0.4mm FWHM の値につぐ値である。

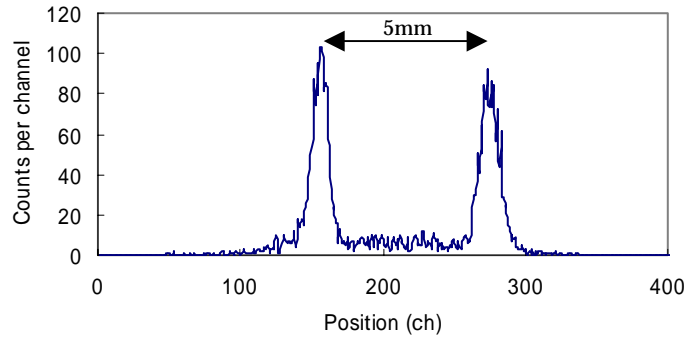


図2 フローティングパッド法により裏面から得られた信号による位置分解能

一方、誘起電荷を用いる欠点は、空間に等方に広がり伝達する方向を制御できないという点である。たとえば0.3mm厚のガラス基板を通して得られる誘起電荷は、半値幅で2.4mm程度広がってしまう。すなわち位置分解能1mm程度を達成しようとする、重心演算など近傍のストリップを用いた信号処理が必要で、高速動作や位置分解能などの性能を追及する上で問題となると考えられる。そこで、本研究では、位置検出器における新たなアプローチとして、多層配線技術を用いて、パッドの電荷を直接読み出すGLG:Global Local Grouping法を考案した。GLG法の原理は図3に示すようなものである。まず、アノードを挟む2つのカソード電極（黄色）を細かいパッド、粗いパッドに分割する。そして、細かいパッドは複数の電極を周期的に共通の読み出し線へ多層配線を用いて接続し読み出しを行う。また粗いパッドの方は、直接読み出し線に接続する。粗いパッドからは大局的な位置が、細かいパッドからは局所的な位置が求まる。また、アノード側についても同様の原理を適用することを考え、アノードストリップの中央に細いスリットを入れて2つの電極に分割した。これにより、個々のアノードから2つの信号線が得られ、同様にして大局的な位置情報と局所的な位置情報を得ることができる。本方法によれば、 $M$ 本の局所的信号線と $N$ 本の大局的信号線を用いて、 $M \times N$ の異なる位置情報が得られる。このために必要な信号線は $M+N$ 本であるので、結局 Figure of Merit としては、 $M \times N / (M+N)$ となる。

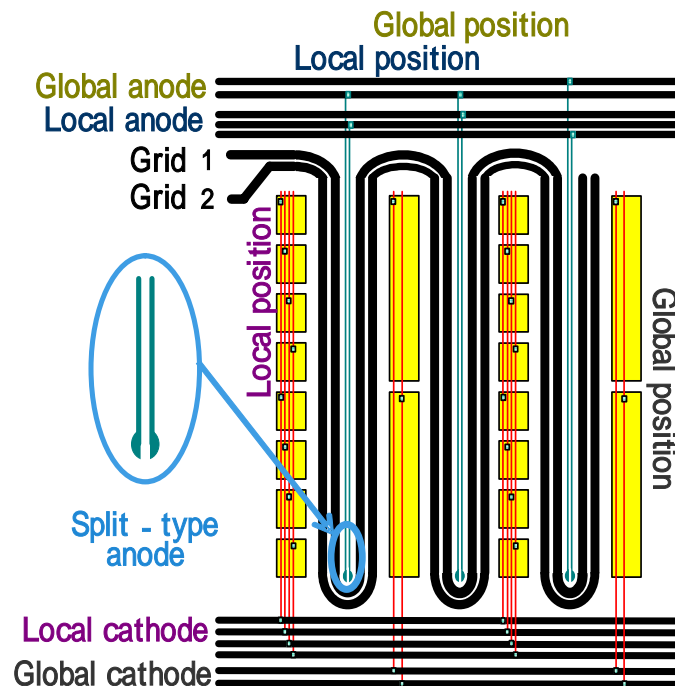


図3 GLG法の原理図

GLG 法のテストのために 256 × 256 の位置を X、Y それぞれ大局的位置と局所位置に展開し、16 × 16 により表現し、その結果 64 本の読み出し線を用いて、655356 のピクセルを扱うことができるようなプレートを試作した。本プレートのテストは高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 X 線(BL14A)を用いて行い、局所位置、大局的位置ともに、良好に同定できることが分かった。一方、本手法では、大局的位置と局所的な位置が必ずしも一対一対応しないので、境界部においてミスコーディングが生じる。この点を改善するためには、境界部のみ別扱いとし、余分な信号線を用いて読み出せばよい。また、多層配線において、上層と下層の間の静電容量を下げるには、パッドの下の配線が通る部分の金属を取り除き、櫛の歯状のパッドにすればよい。一方、このような 2 次元の MSGC を歩留まり良く製作することは、非常な困難が伴うので、よりシンプルな構造で、大きな面積をカバーするために更に研究を進めた。ここでは 1 次元の長尺検出器を並べて配置することを考え、この検出器を MSTube と名づけた。MSTube においても GLG の考え方をカソード部分に持ち込むものとした。図 4 のカソードは 2 つの導電体に細かく分割されており幾何学的な電荷分割法が適用される。従来バックギャモン型などのカソード電極を試作した例はあったが、信号収集時間の差や信号生成位置による電荷収率変化の直線性に問題があった。そこで、MSTube では収集電極に斜め部分は設けないよう配慮した。有感領域 64cm 長のプレートを試作し、本プレートについて基礎的な試験として、X 線を用いてガス増幅度やプレート全体にわたる位置分解能の評価などを行った(図 5 参照)その結果、ガス増幅度としては、6000 以上の値が得られ、3.7mm FWHM の位置分解能が得られた。以上をまとめるに、本研究では、中性子散乱実験への適用を主眼として、マルチグリッド型 MSGC を開発し、その基本特性を明らかにし、電荷分割法との組み合わせで中性子線に対して 0.6mmFWHM の位置分解能を得るなど、十分な性能を有することを実証した。また、これと同時に、更に高い性能を有する新たな信号読み出し手法の探求を行い、信号電荷をわざと 2 つの部分に分けて計測する GLG 法を考案し、この基本的な特性を求めた結果、特に大面積検出器において極めて高い性能が実現できる可能性を示した。

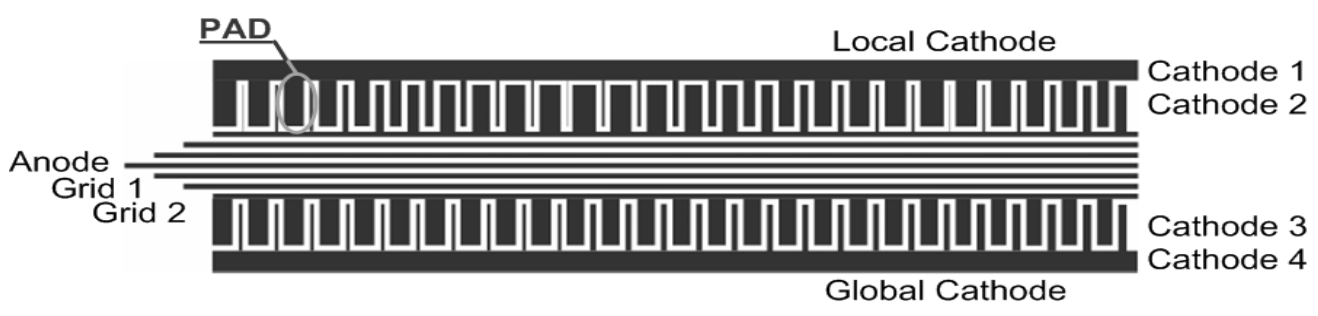


図 4 GLG 法を用いた MSTube の電極構造

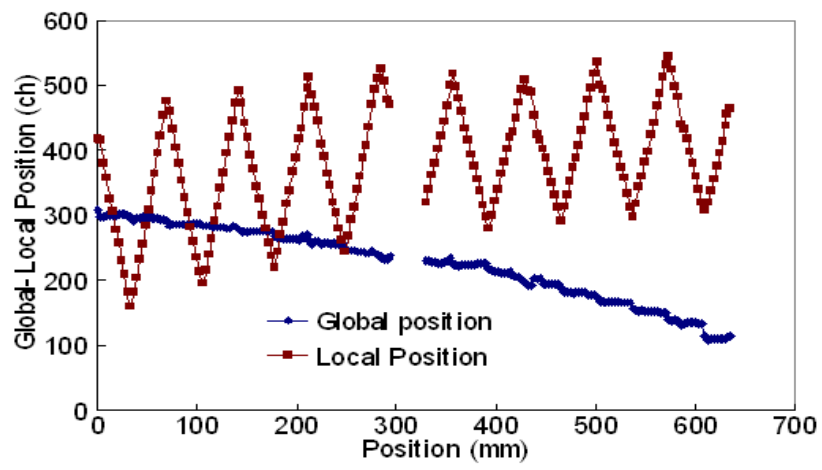


図 5 MSTube の位置検出特性