

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654075

研究課題名(和文)メッシュ構造タングステン電極を用いた放射線検出器の開発

研究課題名(英文)Study of Tungsten mesh anode electrode gas detector

研究代表者

田中 秀治 (Tanaka, Shuji)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：80311124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではガスを用いた増幅機構を担う高電場を与えるためにメッシュ構造のタングステンワイヤーをアノード電極として使用することで多線式比例計数管の利点を生かしつつ既存の検出器に比べ低コストの放射線位置検出器の実現可能性を探った。電場計算、放電試験などを経て30メッシュ/インチの工業用メッシュを電極とした検出器を試作し、シンチレータと同期する信号を観察することで動作確認を行った。放電のため長時間の安定な動作には至らなかったため改善方法を電場計算により検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study, We explored the feasibility of radiation position detector by using Tungsten wire mesh as an anode electrode plane which can produce lower cost compared to existing detectors. The 30 mesh/inch by 30 um wire was selected as an anode electrode after electrical calculation, discharge test. The operation has checked by observing the signal synchronized with the scintillator. However, the stable operation for the discharge was examined by the electric field calculation how to improve because it did not reach stable condition.

研究分野：素粒子実験

キーワード：放射線検出器

### 1. 研究開始当初の背景

現在の開発の先端にある二次元読み出し用位置検出器として挙げられるのが、ガス増幅を利用するがワイヤーを使わないMPGD(Micro Pattern Gas Detector)と呼ばれる検出器である。このような検出器は、通常の荷電粒子の通過位置検出器をはじめ、TPC(Time Projection Chamber)の信号形成部分、高速中性子やX線検出器などその応用範囲は広い。

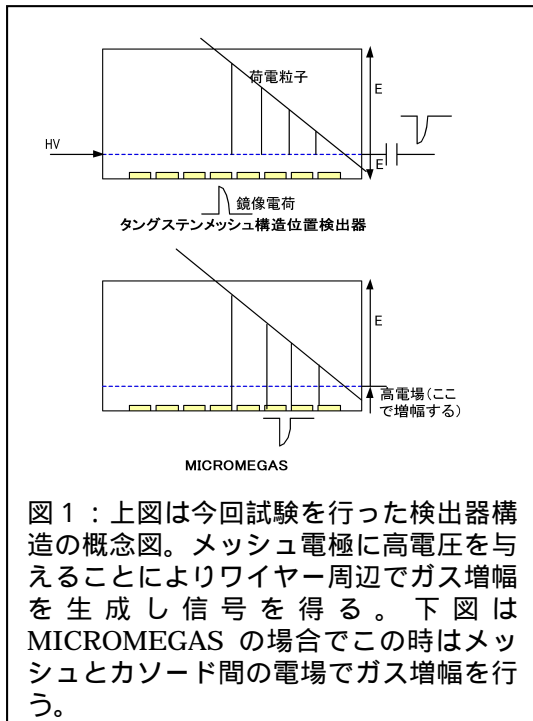


図1：上図は今回試験を行った検出器構造の概念図。メッシュ電極に高電圧を与えることによりワイヤー周辺でガス増幅を生成し信号を得る。下図はMICROMEegasの場合でこの時はメッシュとカソード間の電場でガス増幅を行う。

本研究では増幅機構を担う高電場はメッシュ構造のタングステンワイヤー周辺にのみ与えることでMWPC(Multi-Wire Proportional Chamber)の利点(主に長期安定性、電場構造の均一性)を保ちつつ既存のMPGDの性能を超える低コスト、高精度の面積検出器の実現可能性を探ることを目指した。

### 2. 研究の目的

ワイヤーを使ったガスチェンバーは、ガス増幅機構を利用することによって1万倍以上の増幅度を容易に得られることから、高エネルギー実験、原子核実験、医学応用などに広く用いられてきた。LHC加速器を用いた実験(ATLAS,CMS)では長期安定性、耐放射線性、コストなどの条件からワイヤーを用いた、今や traditional といえる MWPC, Drift chamber が主に使用されている。しかしながら現在の開発の先端にある二次元読み出し用位置検出器として挙げられるのが、ガス増幅を利用するがワイヤーを使わないMPGDと呼ばれる検出器である。このような検出器は、通常の荷電粒子の通過位置検出器をはじめ、TPCの信号形成部分、高速中性子やX線検出器などその応用範囲は広い。また、高集積FPGAを用いた読み出し回路の開

発とあいまって、ピクセル測定器へと発展しようとしている。さらには Photo Cathode との組み合わせによって、細分化された安価な光検出器の開発も期待されている。

MPGDの例としてGEMは、薄い絶縁膜の両面に金属電極があり、無数の穴が開けられている。両面に電圧をかけることによって穴内に高い電場が形成され、ガス増幅が起こる。穴ピッチが細かいため、 $10^5 \text{Hz/mm}^2$  ないしそれ以上の高レートでもチェンバーとして動作する。この測定器の最大の特徴は、複数枚重ねることによってそれぞれは比較的低い電場であるが全体で高い増幅度が得られることである。これによって、安定した動作が得られている。また、GEMは増幅だけを担っているので読み出しの部分は独立に設計できる利点もある。MICROMEegasは、金属メッシュと読み出しの基板の間に高電場を形成して、そこで一気にガス増幅を行うものである。平行な高電場を得るために、間隔は非常に狭く、信号形成過程で位置分解能を悪くするような余分な要素がないので、良い位置分解能を得られる可能性がある。

本研究では増幅機構を担う電場はメッシュ構造のタングステンワイヤー周辺にのみ与えることでMWPCの利点(主に長期安定性、電場構造の均一性)を生かしつつ既存のMPGDの性能を超える低コスト、高精度の面積検出器の実現可能性を探る。また読み出しはカソードストリップまたはピクセルを用いることで、アノードで生成される電荷による鏡像電荷を電気信号として得る。もちろんメッシュ構造型の電極を用いた検出器の開発は長年行われてきたが、近年スクリーン生産技術の進歩により現在では最小ワイヤー径では  $16 \mu\text{m}$  のタングステンメッシュが入手可能となっている。図1に今回試作した検出器の概念図および比較のためMICROMEegasの概念図を示す。

### 3. 研究の方法

主な試験としては金属メッシュのワイヤー径、開口率を変化させた場合のアノードにおける信号応答の違いを理解することで最適なメッシュ構造を求める。さらにはカソードストリップとメッシュ電極の距離の最適化を行った後に最終的な動作性能評価を行う。

まず金属メッシュをアノード電極として考える場合にワイヤー径とワイヤー間隔を変えたときの得られる性能の比較(ガス増幅可能な電場でかつ放電を避けられる)が研究主体となる。またMWPCの場合においてワイヤー径が小さい場合にはガス増幅によって形成される電場の影響でワイヤーが振動し、最終的に破断に至る可能性があるがメッシュ構造の場合では縦糸と横糸が互いに拘束しているため振動の影響は皆無であると期待される。またメッシュの場合にはもし部分的に破断したとしてもMWPCのようにワイヤーがグランド電極に直接導通することはない。

そのためまずガス増幅に必要な電場強度の見積もりおよび放電を回避するための許容電場強度を試作試験によって見積もる。また電場計算によりメッシュ構造によってどのような電場になるのか調べ動作可能に適切でかつ工業製品として確立しているメッシュの選定を行う。

メッシュ構造の最適化の後にメッシュ電極とカソード面の距離を変化させた場合の検出器動作の影響を考慮する。カソードにストリップ電極を設置する場合にはストリップ電極で得られる信号波高は電離電子がガス増幅の後にメッシュに吸収された場所とストリップとの距離に依存した波高が得られるため複数のストリップの波高の重心を取ることによってストリップ幅より良い位置精度と得ることが可能となる。これは直接増幅した電子をストリップで測定するGEMやMICROMEGASを用いた検出器より優位になる点と考えられる。またカソード面とアノード面の間隔が狭いと単位長さあたりの電離確率によっては検出効率を下げる原因となる。電場計算およびメッシュ選定のための試験の後にメッシュ形状およびアノード・カソード間隔を決定し実機の試作を行う。このときメッシュが設計どおりに製作できるか検討したうえで製作用部品なども準備する。

#### 4. 研究成果

##### (1) メッシュ部分の形成方法の研究

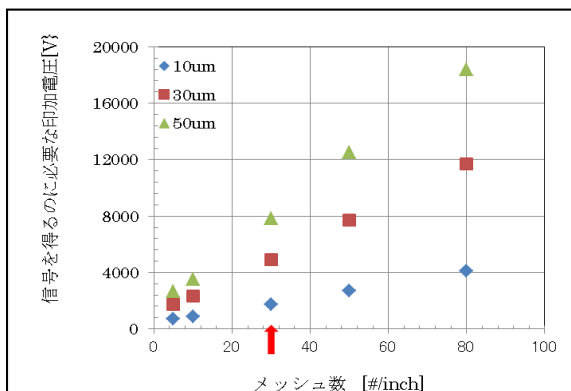


図2 メッシュ数(インチあたり)を変えた時の信号得るために必要な印加電圧(ワイヤー表面電場: 20万 V/cmとなるように)。またアノード・カソードのギャップはすべて2mmとした。

本研究では安価な装置開発を主眼においているため工業用メッシュをアノード電極として用いることを想定している。そのためメッシュの目の大きさ(一般にメッシュ数はインチあたりの数)とワイヤー径をパラメータとして電場計算により検討を行った。まず信号を得るためにガス増幅を十分得られるワイヤー表面での電場強度をMWPCの試作・試験により調べた。この時の検出器の主なパラメータはワイヤー径: 30um, ワイヤー間隔: 2.5mm, アノード・カソードギャップ: 6 mm, ガス: Ar(90)+C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10)、前置アンプの増幅率

を0.8 V/pCのものを使用した。この試験によ

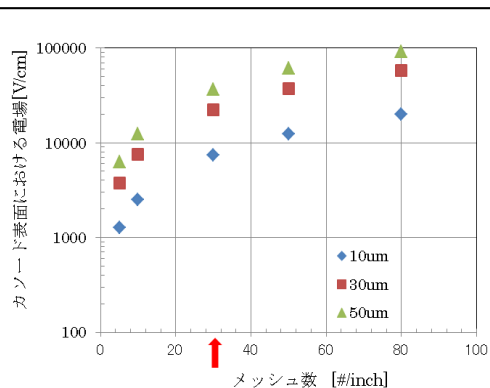


図3: ガス増幅が近似的に同様になるようメッシュワイヤーの表面電場を20万 V/cm、アノード・カソードギャップを2mmとしたときのカソード表面における電場[V/cm]のメッシュ数による依存性。

りワイヤー表面における電場は約18-20万 V/cmあれば十分MIPの信号を確認できることを確かめた。この結果を踏まえてメッシュ数、ワイヤー径を変えた場合の動作に必要な印加電圧を図2に示す。ただし実際にはワイヤー径が大きくなるとガス増幅可能な高電場領域(面積)が増えるがこの影響は考慮していない。

さらに放電の影響を避けるためにカソード表面における電場強度のメッシュ形状による違いを調べた。図3に示すようにメッシュ数(ワイヤー径)が多く(大きく)なるとカソード表面での電場が大きくなる傾向があることが理解できる。またこの図と比較できるようギャップを2mmに固定する前提で印可電圧の最大許容値を決定する試験を行った。この試験には2mm間隔に設置した平行電極版を用い、そこに高電圧を印加して連続放電(アーク放電)開始電圧を調べた。この結果放電を避けて安定的に動作させるには印可電圧を4kV以下、つまり20kV/cmの電場以下を目安するのが良いことが理解された。ただしこの試験では電極表面はアルミ板を用いたためガス増幅時に発生する紫外線による光電効果の影響は大きいと考えられる。またこれより高い電場で使用する場合には高抵抗のカーボン塗料で被膜を生成するなど対応で紫外線による光電効果を避けて放電開始電圧を上げることは可能であると考えられる。この放電試験と図3からわかることは50um以上のワイヤー径は電極として使用するには10メッシュ以下でないと不向きであること。また10um径のワイヤーを用いたメッシュで100メッシュ以下は製作されていない。このため入手可能なガス検出器として現実的なメッシュとしてはワイヤー径30umでメッシュ数30以下のものであると考えた。

##### (2) 検出器試作および動作確認



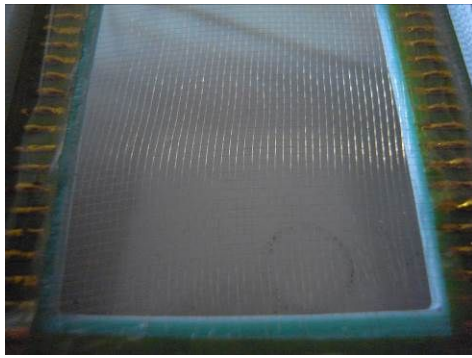


写真1：検出器のメッシュ電極部の様子。両脇部分はハンダによる基板との電氣的接続でさらにすべての線との接続のためにこの外側に導電性銀ペーストによる接合を行った。

メッシュ形状と印加電圧の関係のスタディを基に検出器のアノード電極は金メッキタングステン 30 メッシュ/inch でワイヤー径 30 $\mu$ m、メッシュの開口率 93%のものを使用することとした。これは電場計算により現在工業用メッシュとして入手可能なもので最も検出器として実現可能な物の候補として選定した。一般に工業用メッシュはメッシュ数が小さい(ワイヤー間隔が小さい)ものは太いワイヤーを用いることが多いがこれはメッシュ形状を維持するために織り目が入るようにするためである。しかしながら今回使用したメッシュはメッシュ数が少なくても

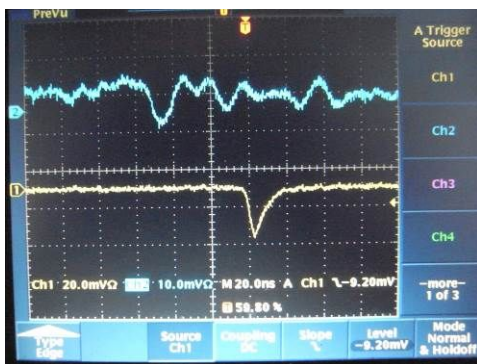


写真2：検出器から得られた信号(青色)、黄色の波形はシンチレータからの光を光電子増倍管より得たもの。ここで信号タイミングの差は主には光電子増倍管内での電子の走行時間(約 50ns)によるものである。

ワイヤー径が細いため構造体に設置する際ワイヤーが動いてメッシュ形状が不均一になる恐れがあった。このためメッシュをまず額縁形状のFR4板に接着してワイヤー位置を固定してから検出器の基盤部を押し付けるようにして接合部を接着した。これはメッシュに一定の張力をかけておかないとガス増幅によって信号を得る際に電荷の移動によりメッシュの振動が発生するからである。基盤部にメッシュを接合後電氣的な接続には導

電性ペーストおよびはんだを用いた。またメッシュには高電圧を印加するため読み出しには 470pC のカップリングコンデンサーを用いて高周波成分の信号だけを取り出し、前置増幅器に接続した。

写真1に試作した検出器を示す。カソード面はアルミ製で 2mm ガスギャップは FR4 板を用いて形成した。

試作した検出器の MIP(Minimum Ionizing Particle)による動作のためにシンチレータと同期した信号をオシロスコープで観察を行った。写真2は検出器からの出力パルスである。印加電圧を 4.3kV で同期した信号を得ることができたが信号波形が安定していない(オフセットのふらつき)ことが分かった。これはおそらくメッシュの張力が不足しており振動の影響があるのではないかと考える。また長時間動作させた場合に連続放電に至る事象が発生したため、カソードのアルミ電極部を高抵抗のカーボン塗料(LHC ATLAS 検出器に用いられている Thin Gap Chamber で使用しているカーボン塗料)によって塗装することおよびアノード・カソード間隔を 5mm に広げることを行ったが安定している状態にまで至らなかった。これはカソード表面での電場強度が 20kV/cm を超えているためだと考える。また連続放電による損傷について確認を行ったが 10 分以上連続放電させてもワイヤーの破断に至ることはなかった。ただしワイヤーには放電によるものと思われる煤の沈着は確認した。

### (3)今後の展望

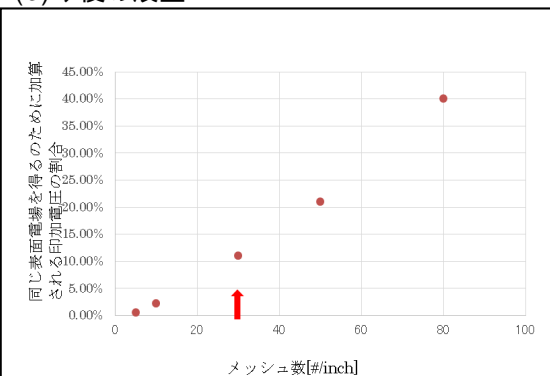


図4：50 $\mu$ m だけメッシュの間隔が大きくなった場合に同じ電場強度を与えるために加算すべき印加電圧の割合。

今回の試験では製作コストを抑えるために工業製品として入手可能なメッシュを優先して試験を行ったがメッシュを検出器に接着するときのワイヤー位置精度をコントロールすることが非常に難しかったためワイヤー張力のコントロールも含めさらなる工程の修正が必要である。またワイヤーの設置精度がガス増幅率にどのように影響するのか検討した。図4は、もし 50 $\mu$ m メッシュの間隔が大きくなったと仮定した場合(ワイヤ

ー設置位置がずれる)に同じ電場強度を与え  
るために加算すべき印加電圧の割合をメッ  
シュ数に応じた変化としてあらわしたもの  
である。

今回試作した 30um ワイヤーの 30 メッシュで  
は 50um 設置位置がずれると 10 %程度の印加  
電圧を変える必要が生じることがわかるが  
これは増幅率の不均一性に影響する。このた  
め今後は 30 メッシュのワイヤーを間引いて  
15または 10 メッシュ(この場合 50um のずれ  
で 2%) にすることでガス増幅率のワイヤー  
設置精度に対する影響を下げることを提案  
する。またこれによりカソード表面での電場  
強度が 10 kV/cm 程度に下げることが可能に  
なるため放電の影響は確実に下げることが  
できると考える。

## 5. 主な発表論文等

〔その他〕

ホームページ等

<http://bell.e.kek.jp/~stanaka/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 秀治 (TANAKA, Shuji)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核  
研究所・准教授

研究者番号：80311124