修士学位論文

ATLAS実験ミューオントリガー用
Thin Gap Chamberの量産と動作検証

東京大学大学院　理学系研究科
物理学専攻

96094
長島 壮洋

平成13年1月17日

概 要

2005年に欧州素粒子物理学研究所（CERN）において実験開始が予定されている、世界最高エネルギー大型陽子・陽子衝突型加速器（LHC）計画がある。LHCに設置される検出器の一つに、主にHiggs粒子、SUSY粒子の探索を目指したATLAS測定器がある。我々のグループはこの中で、ミューオントリガー検出器であるThin Gap Chamber（TGC）の製作を1056台分担当している。

今回このような大規模な検出器の量産を目指し、量産設備の建設とTGCの試作を行なった。実際に建設された量産設備を用い、かつ実際に本番で使われる材料を使って、試作を重ね、その製作工法を確立した。さらに、そこで作られたTGCはビームテストを行ない、確実な動作を検証した。その結果、要求された条件を充分満たすような検出器であることが確認され、2000年9月より開始された量産が確かなものであることを保証することができた。

目 次

1 序論 1
1.1 LHC 計画 . . . 1
1.2 LHC の物理 . . . 2
1.3 ATLAS 検出器 . . . 4

2 Thin gap chamber 7
2.1 TGC の構造 . . . 7
2.2 TGC の動作原理 . . . 10
2.2.1 動作原理 . . . 10
2.2.2 充填ガス . . . 11
2.2.3 信号の形成 . . . 12

3 TGC の製作 14
3.1 TGC 試作 . . . 14
3.2 製作工程 . . . 16
3.2.1 位置決め . . . 16
3.2.2 カーボン塗布 . . . 16
3.2.3 パーツ接着 . . . 17
3.2.4 ワイヤー巻き . . . 17
3.2.5 チェンバー接着前 HV テスト . . . 18
3.2.6 チェンバー閉じ、ガスシール . . . 18
3.2.7 モジュール接着 . . . 19
3.3 改善点 . . . 20

4 TGC の量産 23
4.1 量産計画 . . . 23
4.2 量産システムの立ち上げ . . . 24
4.2.1 カーボン塗布系 . . . 24
4.2.2 ワイヤー巻きとはんだ付け . . . 29

5 TGC の動作検証 31
5.1 目的 . . . 31
5.2 セットアップ . . . 33
5.2.1 配置 . . . 33
5.2.2 検出器 . . . 33
5.2.3 ガス系 . . . 34

5.2.4 データ収集系 35
5.3 結果と考察 36
5.3.1 評価基準 36
5.3.2 TGCの個性とワイヤー・ストリップの出力について 43
5.3.3 印加電圧依存性 45
5.3.4 入射位置依存性 53
5.3.5 入射粒子頻度依存性 53
5.3.6 入射角度依存性 53
5.3.7 内圧依存性 57
5.3.8 カソード面の面抵抗依存性 59

6 まとめと今後の予定 60

1　序論

ここではLHC計画、ATLAS検出器について解説する。

1.1　LHC計画

スイスにある欧州原子核研究機構（CERN）において、大型陽子陽子衝突型加速器LHC（Large Hadron Collider）が、2005年に稼働開始を予定している。LHC加速器は、重心系のエネルギーにして14TeVの世界最高のエネルギーを持つ円形加速器である。現在稼働中の大型電子陽電子衝突型加速器LEP-2（Large Electron Positron Project）のトンネル内（周長約27km）に建設される予定である。LHC加速器の主要なパラメータを表1に示す。

LHC計画の目的は、標準模型の基本粒子であるHiggs粒子の探索や、超対称性粒子の探索、トップクオークの物理、B中間子でのCP非保存の研究等である。LHC加速器は、最大の特徴である14 TeVの重心エネルギーと$10^{34}cm^{-2}s^{-1}$の高ルミノシティによって、TeV領域の物理の開拓を可能にしている。

陽子陽子衝突型加速器は、陽子の質量が重いため、電子の場合と比較して、円形加速器におけるシンクロトロン放射光の損失が小さく、高エネルギーを得るのに適している。反面、陽子は内部構造を持つため、複合粒子同士の散乱が生成するジェット等のバックグラウンドが非常に多く、その中から注目する事象を選別することは困難を伴う。このため、LHCの検出器は、入射粒子数が高頻度な環境に耐え、研究目的の物理事象の選別を可能とするものであることが要請される。

主リング周長	26,658.87 m	バンチ間隔	25 ns
入射エネルギー	450 GeV	バンチ長さ（陽子）	75 mm
陽子エネルギー	7.0 TeV	衝突点でのビーム半径	16 μm
鉛イオンビームエネルギー	574 TeV	ビーム衝突角度	200 μrad
ビーム寿命	22時間	バンチ内陽子数	1 $\times 10^{11}$ 個
ルミノシティ	$10^{34}\ cm^{-2}\ s^{-1}$		

表1: LHCの加速器の主要パラメータ

1.2　LHCの物理

LHC実験の目的は、前章でも触れたが、標準模型の基本粒子であるHiggs粒子の探索及び超対称性粒子の探索、topクオークの物理、B中間子でのCP非保存の研究等と多岐にわたっている。なかでもLHCは、世界最大の高エネルギーを誇るハドロンコライダーであるので、特に未発見粒子の探索に大きな期待が寄せられる。

電弱相互作用での自発的対称性の破れの機構を説明する為にその存在が必要とされるHiggs粒子は、質量起源を解明する手がかりと期待されるため、その発見に非常には重要な意味がある。Higgs粒子の崩壊モードは、その質量により異なるが、標準模型(Standard Model)で予想されているSM Higgs boson(H^0)の崩壊モードの中で、以下に示すようなレプトンを含むモードは、広いエネルギー領域（120 GeV∼1 TeV）にわたって有効である。そのためLHC実験で使用される検出器はレプトンを高精度で測定出来るように設計されている。

また、LEP-2においての探索の限界は$m_{H^0} \simeq 110GeV$であると予想されるが、LHCでは、探索可能な質量領域は、$m_{H^0} \simeq 1TeV$に及び、SM Higgs粒子の可能な質量領域をすべてカバーすることが出来ると考えられている[1, 2]。

- $H^0 \to \gamma\gamma$　　$80 < m_{H^0} < 120GeV$
- $H^0 \to ZZ^* \to 4l^\pm$　　$120GeV < m_{H^0} < 180$
- $H^0 \to ZZ \to 4l^\pm, 2l^\pm 2\nu$　　$180GeV < m_{H^0} < 800$
- $H^0 \to WW, ZZ \to l^\pm \nu 2jets, 2l^\pm 2jets$　　$m_{H^0} \simeq 1TeV$

さらに、自然は超対称であるという理念に基づく超対称性理論（SUSY）において、予言される超対称性粒子の探索についても、期待が寄せられている。

スクオークの探索について、SUSYで、Rパリティが保存されているとすると、SUSY粒子は必ず対生成されなければならないので、最終的に最も質量の軽いSUSY粒子（LSP）にまで、連鎖崩壊していく。このLSPは、ニュートラリーノと予想されるので、直接観測にはかからない。よって、大きな消失エネルギーE_t^{miss}とhigh-Ptジェットの測定により判断する。もしくは、LSPへの崩壊前の単体レプトンの探索及びbクオークジェットの観測による。但し、Rパリティーが破れているならば、E_t^{miss}の情報は使えない。

また、最小超対称性標準理論(Minimal Supersymmetry Standard Model)では5つのHiggs states($H^\pm$,h,H,A)が予想されている。探索モードは、以下に示すようなものがある。

- $H \to \gamma\gamma$

- $H/A/h \rightarrow \tau\tau$
- $H^+ \rightarrow \tau\nu$

また、LHCでは、bクォークの生成断面積が大きい(0.1 ~ 0.7mb)ので、例えば$B^0_d \rightarrow J/\psi K^0_s$のようなB崩壊でのCPの破れの測定も可能であり、B中間子でのCP非保存の研究も進めることができる。さらに、LHCでは、低ルミノシティー時($10^{33} cm^{-2} s^{-1}$)で、1日約60,000個のトップクオークを生成するので、トップクオークの質量の精密測定や、荷電Higgs粒子の探索により、トップクオークの物理の研究も可能となる。

1.3 ATLAS検出器

LHC加速器において用いられる検出器のひとつに、ATLAS(**A** **T**oroidal **L**HC **A**pparatu**S**)検出器がある。ATLAS検出器は、全長46 m、高さ22 m、重量15,000トンと巨大なものであり、ハドロンコライダー用の検出器として、高頻度入射粒子環境に耐え、その中から目的の事象を選別できる設計となっている[3]。図??にその全体図を示す。

ATLAS 検出器は、大きく分けると次の 4 つのパートから構成されている。

- 超伝導磁石 ··· ATLAS 検出器の超伝導磁石には、Solenoid と Air Core Troids がある。Solenoid は、内部飛跡検出器（Inner Detentor）のまわりに設置され、ビーム軸方向に 2.6 T の一様磁場を発生させるものである。Air Core Troids は、ATLAS の胴体部に沿って配置される Barrel Toroid とバレルの両端に設置される Endcap Toroid があり、それぞれ 3.9 T と 4.1 T の円形磁場を発生させる。

- 内部飛跡検出器 ··· 内部飛跡検出器は最もビームライン近くに設置され、荷電粒子の飛跡による運動量の測定等を行なう検出器である。バレル部（$|\eta| < 1$[1]）では、ビーム軸の周りに同心円状に、ピクセル検出器、シリコンストリップ検出器（SCT）、遷移輻射ストロー検出器（TRT）が層構造をなして設置される。エンドキャップ部では、ビーム軸と垂直に円盤状に設置される。半導体検出器（ピクセル検出器とシリコンストリップ検出器）は、運動量、衝突パラメータ、vertex の位置測定を行ない、ストロー検出器は、遷移輻射を用いて、電子、光子の同定、飛跡検出を行なうものである。

- カロリメーター ··· カロリメーターは、バレル及びエンドキャップ部に設置され、電子、光子の同定とエネルギー測定、ハドロンのエネルギー及び消失エネルギーの測定を行なう。内側には電磁カロリメーター、外側にはハドロンカロリメーターがあり、前者は電子と光子、後者はハドロンのエネルギーを測定する。電磁カロリメーターは、液体アルゴンを用いたカロリメーターである。ハドロンカロリメーターは、バレル部 $|\eta| < 1.7$ では、鉄の吸収体とタイル状シンチレーター及び波長変換ファイバーからなるタイル型カロリメーター用い、放射頻度がより高いエンドキャップ部には、（$1.5 < |\eta| < 3.2$）では、銅の吸収体を持つ液体アルゴンカロリメーター用いている。

- ミューオン検出器···前節で述べたようにレプトンの検出は ATLAS 実験において非常に重要であり、そのためミューオン検出器は内部飛跡検出器とは独立に、広範囲にわたってミューオンの運動量を測定し、また、トリガーをかけられるようになっている。ミューオン検出器は、ミューオンの飛跡を精密測定する Monitored Drift Tube(MDT) 及び Cathode Strip Chamber(CSC)、とミューオンのトリガー信号を出す Thin Gap Chamber(TGC) 及び Resistive Plate Chamber(RPC) からなる。MDT は、$|\eta| < 2$ の領域に設置され、CSC は、$|\eta| > 2$ に設置される。また RPC は、$|\eta| < 1.1$、TGC は、$1.05 < |\eta| < 2.2$ に設置される。

---

[1] η は、ラピディティーと呼ばれるもので次のように定義されている [14]。
$\eta = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{E+P_L}{E-P_L}\right) \simeq -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right)$
ここで P_L は、ビーム軸に沿った縦方向運動量であり、θ は、ビーム軸からの角度である。

本論文は、ATLAS のエンドキャップ部にあり、ミューオンのトリガー用及び第 2 座標の位置情報の測定に使用される Thin Gap Chamber について行なった研究に関して述べる。

TGC は、1 層が 2 重構造のもの（ダブレット）が 2 組と 3 重構造のもの（トリプレット）が 1 組で構成されており、MDT をはさんで設置される。ビームの相互作用点から外側に向かってトリプレット（TGC1）、ダブレット（TGC2、TGC3）の順に配置される（図??）。

ミューオンのトリガーシステムとして、最も基本的な条件は

- $P_t > 20$GeV のミューオンが 1 つ存在
- $P_t > 6$GeV のミューオンが 2 つ存在

である。low $P_t = 6$GeV に対して、外側の 4 層の検出器 (TGC2,TGC3) の内、少なくとも 3 層の検出器に hit がある (3-out-of-4) とき、hit の位置からミューオンの運動量を測定する。high $P_t = 20$GeV に対しては、low P_t のトリガーロジックにおいて大きな運動量を選別し、さらに内側の 3 重層の内少なくとも 2 層の hit(2-out-of-3) があることを要求する。

TGC に対する要請は、以下のようなものである。

- ~1 KHz/cm^2 の高頻度入射粒子状況下（表 2 参照）で、10 年間安定に動作すること。
- LHC のビームの衝突間隔（バンチクロッシング）の 25ns 以下の時間分解能 (Time Jitter)。
- 検出効率 (Efficiency) が、98%以上。
- P$_T$(横方向運動量) をトリガー条件に組み込むため、~1cm の位置分解能。

これらの条件に関することは、既に様々な研究が行なわれている [4][5][8][?][9]。

粒子	n	γ	μ	$hadrons^{\pm}$	e^-, e^+
rates(kHz/cm^2)	4.1	2.7	2.1×10^{-3}	2.8×10^{-3}	1.2×10^{-2}

表 2: エンドキャップ部におけるバックグラウンドレート ($1.44 < |\eta| < 2.3$)

2 Thin gap chamber

Thin Gap Chamber は、高エネルギー実験においてよく使用される Multi Wire Propotional Chamber（MWPC）型の検出器の一つである。ただ、アノードワイヤーとカソード面の間隔（ギャップ）が MWPC と比べて非常に狭いため、Thin Gap Chamber、略して TGC と呼ばれており、LEP の OPAL 実験でも使用されている [17]。TGC は、Majewski,Charpak らによって、高頻度入射粒子状況下でも動作できるチェンバーとして提唱された [16]。アノードワイヤーとカソード面の間隔を狭くすることにより、入射粒子によって形成された陽イオンが早くカソード面に到達し、チェンバーの不感時間が短くなるように設計されている。ATLAS 実験に用いられる TGC は、アノードとカソードのギャップが 1.4 mm、ワイヤー間隔は 1.8 mm に最適化されている（図??）。以下に、その構造と、動作原理を解説する。

2.1 TGC の構造

図??は、TGC のワイヤー方向に垂直な断面図である。TGC は 1.6mm の FR4（ガラスエポキシ樹脂）を基板とし、その片面にカーボンを塗装することによって、カソード面を形成している。アノードワイヤーは直径 50 μm の金メッキタングステンであり、アノードワイヤーのそれぞれの間隔は 1.8mm である。アノードワイヤーとカソード面（カーボン面）との間隔は 1.4mm と非常に狭い。また、ワイヤーと垂直にストリップが形成されており、カソード面であるカーボン面の面抵抗を大きくさせることにより、ストリップ読みだしを実現している。ワイヤーとストリップ両方の情報を収集することにより、TGC は 2 次元の情報を得ることができる。

ここで、TGC の各パラメーターについて解説する。ワイヤー直径 50 μm は（一般に MWPC の場合ワイヤー径は、ワイヤー・ワイヤー間隔の $\sim$1 %程度）、チェンバーの内部電場の高電場領域を広くする（電子のドリフト時間を早める）ためとチェンバーとしての機械的強度を高めるため（TGC は非常に薄くて大きい）である。ワイヤー・ワイヤー間隔 1.8 mm は、25 ns のビームのバンチクロッシング間隔に対応できるように電子のドリフト距離を短くするためであり、ワイヤー・カソード間隔 1.4 mm は、高頻度入射粒子状況下において検出効率が低下しないように、空間電荷の原因である陽イオンのドリフト距離を短くするために、それぞれ最適化されている。

高抵抗（$\sim$1 MΩ）のカーボン面である理由は、陽イオンがカーボン面に到達した際、局所的な電圧降下を起こすようにするためである。カーボンは、自由電子を多く持っており、カソード面に陽イオンがたまらないようにできる。また、陽イオンが（カーボン面に）衝突した際に電子がチェンバー内に飛び出さないように仕事関数が大きく、そして、紫外線によって光電効果をおこさないように原子番号が小さい物質になるようにカーボンが選ばれた。面抵抗は、ストリップのクロストークを避けるため高抵抗の方が都合がよい

が、あまりに高抵抗だと局所的な電圧降下の影響が大きくなり、チェンバーの動作に影響を及ぼすので、$\sim$1 MΩ の値がとられている。

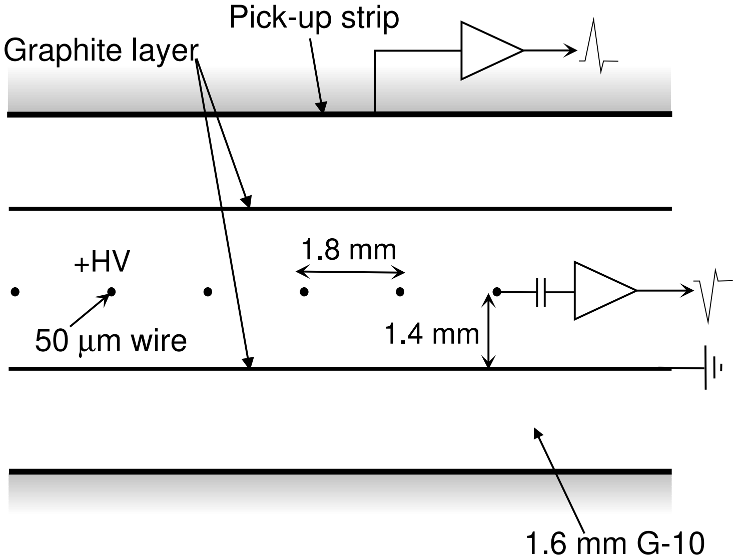


図 1: TGC の構造（断面図）

さらに、TGC は非常に大きく、ギャップが狭いため、ワイヤーのたるみ、およびカソード面の平面性が深刻になってくる。このための補強材として、ワイヤーサポート、ボタン型サポートが入っている。ワイヤーサポートは、ワイヤーを支えるばかりでなく、ガスの流路を一定にし、TGC 全体にガスが行き届くように配置されている。このようにして、1.5m× 1.2m の大きさで 1.4mm というギャップを保つように設計されている。

ミューオントリガーのところでも述べたが、TGC は 4 層（2 層 + 2 層）、3 層で 1 単位とされ、トリガー情報を出す。このため、TGC は製作時に 2 層（doublet）、3 層（triplet）を単位として作られる。TGC と TGC の間および、外側には強度を保つため、ハニカムが接着される。また、このときにチェンバー全体として不感領域ができるのを防ぐために、2 つのチェンバーの内部構造（図??）が全て半ピッチ（ワイヤーグループ、ワイヤーサポートの間隔）ずつずれるような構成がとられている。トリプレットでは 3 つのチェンバーが 1/3 ピッチずつずれるように構成されている。

最後に、TGC のパラメーターを表 3 にまとめる。

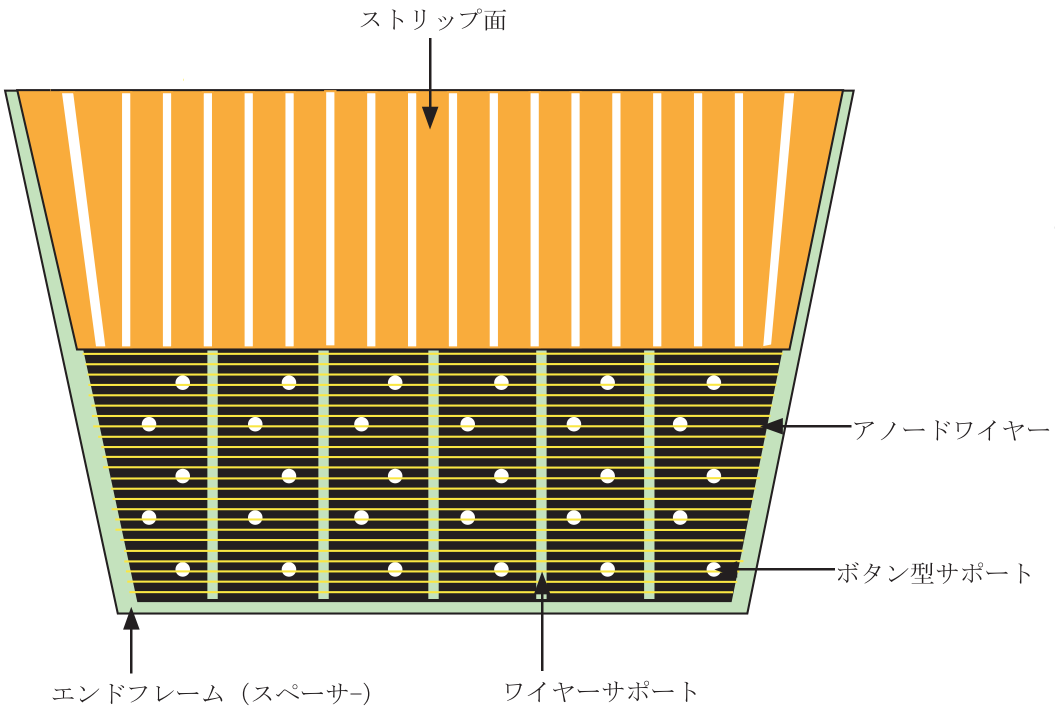

ストリップ面
アノードワイヤー
ボタン型サポート
エンドフレーム（スペーサ-)
ワイヤーサポート

図 2: TGC の構造（平面図）

ワイヤー直径	50 μm
ストリップ幅	$\sim$ 40 mm
ワイヤー・ワイヤー間隔	1.8 mm
ワイヤー・カソード間隔	1.4 mm
カーボン面抵抗	$\sim$ 1 MΩ/square
ワイヤー張力	350 g 重
読み出しチャンネル数（アノード)	32
読み出しチャンネル数（カソード）	32
HV	3.1 kV
充填ガス	CO_2+n-C_5H_{12}（55：45）

表 3: TGC のパラメータ

2.2 TGCの動作原理

2.2.1 動作原理

TGCに入射した荷電粒子は、その飛程に沿ってガス中の分子と多数衝突し、イオン化させる。電離された電子（1次電子）は、陽極へドリフトしながら、印加電場によって加速され、高いエネルギーを持つようになる。それがガス分子の電離エネルギーを超えると、ガス分子をイオン化し、2次電子を生成する。一般に、その閾値は1気圧で約10^6 V/m程度である。2次電子も電場によって加速され、それが次々と衝突、電離を繰り返し、′タウンゼント型電子なだれ′と呼ばれるカスケードの形の電子なだれを形成する。この過程をガス増幅という。TGCはこの電子なだれを信号としてアノードワイヤーから読み取り、アノードワイヤーの位置から、位置情報を得る。ここで、単位長さdx当りに電子の数nが増加する割合は、

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \tag{1}$$

で、nに比例する。この式をタウンゼント（Tawnsend equation）の式という。αは第1タウンゼント係数である。空間的に一定の電場であれば、αは定数であり、

$$n = n_0 \exp(\alpha x) \tag{2}$$

のように、電子の数nが初期の電子数n_0に比例した関係にあることが分かる。

よって、HVとチェンバー内の圧力をある範囲に設定すると、収集電荷を入射放射線によって生成された最初のイオン対数に比例させることができる。この領域を比例モード（propotional mode）という。一方、電離によって生じた陽イオンは、移動度が電子に比べて非常に小さいため、電子を収集する間にはほとんど動かない。したがって、チェンバー内には、陽イオンの雲ができ、それがゆっくり陰極に向かって、拡散していく。HVを上げていくと、この陽イオン雲の濃度が高くなり、空間電荷を形成してチェンバー内の電場をゆがめ、電子なだれの成長を抑制するようになる。収集電荷が最初のイオン対の増加によって増大するが、直線性を示さないことより、この領域の動作モードを制限比例モード（limited propotional mode）という。

さらにHVを上げていくと、陽イオンによる空間電荷が完全に支配するようになる。電子なだれとともに生成された陽イオンの濃度が高くなると、ガス増幅を起こす閾値以下に電場が下がってしまい、そこで、電子なだれの生成は終了する。この過程は、自己制限型で収集電荷は最初に生成するイオン対の数に関係なく一定である。ここで、入射放射線は分子を電離すること以外に励起も起こす。励起した分子は、可視、あるいは紫外線を放射して基底状態に戻る。これらの紫外線もエネルギーが充分高ければ、電離能力を持ち、別の電子なだれを生成する。HVが高くなると紫外線光子数も増加し、連続的に電子なだれが形成され、やがて、チェンバー全体で放電するようになる。この連続放電は、電場が

ガス増幅の閾値以下になったときに止まる。このときの収集電荷は、最初に生成するイオン対の数に無関係で一定である。これをガイガーミュラー動作モード（Geiger-M*ü*ller mode）という。

このとき、紫外線吸収能力の高い混合ガスを使用すると、最初の電離（励起）が起こった位置から離れた場所のなだれの生成を抑制することができる。紫外線光子は電子なだれのすぐ近傍で、追加的な電子なだれを形成し、アノードからカソードの方向に電子なだれが成長すると、先端部の電子なだれから陽極に達し、この部分から急激に電流が流れ、後方の電子なだれと柱状に伝わり、スパーク放電する。これが、制限ストリーマー（limited streamer）、または、自己消滅型ストリーマー（self-quenched streamer）モード[?] である。

TGC は、充填ガスが CF_4 + iso-C_4H_{10}（後述）の場合、制限ストリーマーモードで動作させていたが、CO_2+n-C_5H_{12} の場合、制限ストリーマーモードは存在しないことが明らかとなり [7]、現在、制限比例モードで動作していると考えられている。

2.2.2 充填ガス

TGC はトリガーチェンバーであるため、入射粒子のエネルギーに関係なく入射粒子を全て検出できなければならない。それには制限比例モードで動作させるのが望ましい。制限比例モードで動作させることは、比例モードと比べてガス増幅によって得られる電荷量が 10∼100 倍と大きく、また、S/N 比も高くなり、有利である。ここで、高いガス増幅率を得るためには、チェンバーの充填ガスとして、電子捕獲確率の小さいものを選ばなくてはならない。そして、高いガス増幅率の場合、紫外線による電離の影響が無視できなくなるので、紫外線吸収能力の高いクエンチガスも必要である。TGC の充填ガスの候補として、CF_4 + iso-C_4H_{10}（イソブタン）（混合比 80 : 20）と CO_2+n-C_5H_{12}（n-pentane）（混合比 55 : 45）が検証された。時間分解能では CF_4 + iso-C_4H_{10} のほうがすぐれていたが、結局、検出効率が CO_2+n-pentane では、99.9 %、CF_4 + iso-C_4H_{10} では、97.8 %と本質的限界が見つかり、トリガーチェンバーとして致命的な欠陥が明らかになったため、CO_2+n-pentane を使用することにした [15][5]。

CO_2 は、電子捕獲確率が非常に小さく（表??参照）、1 次電子がアノードワイヤーにドリフトしていく途中で、ガス分子に捕獲されにくい。また、n-C_5H_{12} は、非常に大きな紫外線吸収能力を持ち、吸収した紫外線のエネルギーを分子自身の回転エネルギーやラディカル等の低分子への解離エネルギーに使用し、2 次電子の放出を抑える働きをする。通常ガスチェンバーに使用されるアルカン系のガスの中で、n-C_5H_{12} は、紫外線の吸収断面積が最大である（図??参照）[14]。このことから、CO_2+n-pentane の充填ガスを用いると、高い検出効率を得ることができる。

2.2.3 信号の形成

TGC は、アノードワイヤーとカソードストリップの両方から信号を読み出すことによって、トリガーチェンバーとしての機能を果たすと共に、r-ϕ の位置情報を出すことができる。

アノードの読み出しの場合、ワイヤー近傍の電場は、以下に示す円筒電場として近似できる。よって、円筒型比例計数管 (図??) とみなして考えると、アノードワイヤーから距離 r の位置の電場 E(r)、電位 V(r) 及び単位長さあたりの静電容量は、次式で表される。

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r} \tag{3}$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r}{a} \tag{4}$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(b/a)} \tag{5}$$

但し、V_0 は HV、a はワイヤー半径、b はアノードワイヤーとカソード面との距離である。ワイヤーの長さを l としたとき、ガス増幅によって生じた電荷 Q が距離 dr 動くことによって誘起される電圧の変化は、

$$dv = \frac{Q}{lCV_0}\frac{dV}{dr}dr \tag{6}$$

となり、ワイヤー表面から距離 λ の位置での電子と陽イオンの電荷がそれぞれ Q であると仮定すると、各々の電圧の変化は、

$$v^- = -\frac{Q}{lCV_0}\int_a^{a+\lambda}\frac{dV}{dr}dr = -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 l}\ln\frac{a+\lambda}{a} \tag{7}$$

$$v^+ = \frac{Q}{lCV_0}\int_{a+\lambda}^{b}\frac{dV}{dr}dr = -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 l}\ln\frac{b}{a+\lambda} \tag{8}$$

となる。

よって、アノードワイヤーに誘起される全信号は、

$$v = v^+ + v^- = -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 l}\ln\frac{b}{a} = -\frac{Q}{lC} \tag{9}$$

である。

ここで、TGC の場合、a = 25 μm、b = 1.4 mm、λ = 1 μm とすると、電子と陽イオンの信号への寄与の比率は、$v^-/v^+ = 9.84 \times 10^{-3}$ となり、電子の寄与は 1 %にも満たない。よって、アノードワイヤーの信号はほとんど陽イオンの移動によるものであると言うことができる。

陽イオンが時間 0 から t の間移動したときの信号は、

$$v(t) = -\int_0^t dv = -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 l}\ln\frac{r(t)}{a} \tag{10}$$

となり、陽イオンのドリフト速度

$$\frac{dr}{dt} = \mu^{+}\frac{E}{P} = \frac{\mu^{+}CV_0}{2\pi\varepsilon_0 P}\frac{1}{r} \tag{11}$$

より、（但し、P は圧力）

$$r(t) = (a^2 + \frac{\mu^{+}CV_0}{\pi\varepsilon_0 P}t)^{1/2} \tag{12}$$

となるので、

$$v(t) = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 l}\ln(1 + \frac{\mu^{+}CV_0}{\pi\varepsilon_0 Pa^2}t) = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 l}\ln(1 + \frac{t}{t_0}) \tag{13}$$

となる。ここで、$t_0 = \frac{\pi\varepsilon_0 Pa^2}{\mu^{+}CV_0}$ で固有時間と呼ぶ。
よって、アノードワイヤーに流れる電流は、

$$i(t) = Cl\frac{v(t)}{dt} = -\frac{QC}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{t+t_0} \tag{14}$$

となり、これが、TGC のアノードの信号として検出される。

次にカソードの読み出しの場合、図??にあるように、グランド面であるカーボン面があり、FR4 を挟んで銅のストリップ読み出しがある。ワイヤー近傍にできた陽イオンは、カーボン面に向かってドリフトしてくるが、カーボン面は高抵抗（$\sim$1 MΩ/square）のため、瞬間的には電流は流れなく、時間とともにゆっくり負の電荷が誘起される。FR4 は誘電体なので、コンデンサーとみなすと、カーボン面側には正の電荷が誘起され、ストリップ面側には負の電荷が誘起される。よって、ストリップ面には、正の電流が流れることになる。図 12 にその等価回路を示す。

3　TGC の製作

ここでは、TGC の量産時における製作工法について述べる。その製作工法を確立するにあたり、実機サイズでいままで数回に渡り試作が行なわれてきた。試作 4 回目において、製作した TGC が確実に動作したことによって、その製作工法は確立された。まず、これら試作のまとめを行なう。その後に確立された製作工法を簡単に報告する。最後にまとめとして、TGC 製作において改善された点を例をあげながら紹介し、製作工法の確立に至った過程を概観する。

現在（2000.9～）は、この製作工法によって量産が開始されており、その詳しい製作工法はマニュアル化（TGC construciton memo ver.4）されている。

3.1　TGC 試作

いままでに、実機サイズの大きさの試作は 4 回行なわれた。そこで製作工法は確立したが、さらにその信頼性を確実なものとするため、また量産設備にフィードバックを行なうために、さらに 4 回に分けてテスト製作が行なわれた。ここでは、それぞれの試作の目的とまとめを報告する。

- 試作 1 ～ 3 回目 (～**1999.2**)

  ＜目的＞　はじめて行なう TGC 製作の経験を積み、製作した TGC が動作するようにすること。さらに、精度のよい TGC を製作し、効率の良い製作工法を見い出すこと。

  ＜まとめ＞　効率良く製作するために、治具が用いられたり、工程そのものの検討がなされ、大型の実機 TGC を製作するための大枠の製作法は確立した。試作の回数を経る毎に、効率化ははかられ、製作の経験も増した。TGC の精度もかなり良く作られたが、出来上がった TGC の動作は不安定であり、本番に用いるべき動作電圧がかからなかった。

- 試作 4 回目 (**1999.5～1999.8**)

  ＜目的＞　大枠の製作工法は確立したが、実際に確実に動作するにはなにが足りないのか、放電に関わる製作工程はどこで、それをどう改善すべきか、が検討された。同時に、さらに効率の良い製作を目指すために必要なものは何か、工法は良いのかなども一から考えられた。また、製作未経験者が作っても動作するような製作工法、設備、道具を用意することも目的の一つであった。

  ＜まとめ＞　製作未経験者が製作に携わり、各工程じっくり検討し製作したため、時間はかかったが、精度のよい TGC が完成した。放電に寄与するフラックスの

超音波洗浄や、接着前のHVテストでその動作を確認した後、チェンバーを閉じるなど製作工法が改善された。また、カーボン自動塗装装置が初めて使われ、効率もさらに良くなった。完成したTGCの動作は安定で、動作電圧も本番で用いるべき電圧よりはるかに上までかけることができた。ここに、その製作工法が確立した。

- テスト製作（全４回）(**1999.11 ~ 2000.7**)

  <目的> 本番で使われる材料を使って製作し、その正常な動作を確認し、製作工法の正しさを強固にする。またそれまでに築かれていた量産設備を実際に使いながら、量産体制を完成させるにあたって、何が足りないのか、量産ペースで製作することは可能かなどを検討する。さらに、量産を行なう業者に製作に参加してもらい、技術の継承を行なう。

  <まとめ> 全４回の製作で、TGC doublet ４台、triplet ２台を製作した。どのTGCも本番で用いるべき電圧がかかり、製作工法の正しさが確認された。量産設備で足りない部分がさらに明確にされ、また新しい量産設備のチェックを行なった。モジュール（doublet,triplet）接着の工程を簡略化し、さらに精度のよいTGCモジュールを作ることができた。量産を行なう業者も経験を積むことができ、スムーズに量産が開始されることとなった。

3.2 製作工程

試作で完成した TGC が確実に動作し、またさらにその後に行なわれた量産設備を用いた製作でも、その TGC は動作し、量産時での製作工法は確立された。

TGC は薄い FR4 (ガラスエポキシ樹脂) の板二枚の間に、ワイヤー・カソード Gap の間隔と同じスペーサーをいれて、両面を重ねて接着することによって形作られている。ワイヤーはそのスペーサーにはんだ付けされる。この TGC の製作法を各工程ごとに順番に説明していく。

3.2.1 位置決め

上に述べたように、TGC は大きな (1.5m× 1.2m) 2 枚の板を非常に狭い間隔 (1.4mm) で、かつその精度は数 100 μm で重ねあわせなければならない。ここでスペーサーを接着する位置や、カーボンを塗装する領域を決める。この決めた位置によって TGC は出来上がるので、位置決めは重要である。だが、実際の量産ではいちいち 1 台の TGC ごとに位置決めの仕方が異なっていたのでは、効率が悪い。そのため系統だった位置決め法が必要になる。

基板となる FR 4 板には、位置決めのための穴が開けてあるが、この穴の精度が良い場合は、その穴を基準にして位置を決めていけばよい。しかし、この穴の精度は全てが良いとは限らず、その穴の精度をたよらなくてもいいような製作法も必要であった。その位置決め方を以下に示す。

1、スペーサー、ワイヤーサポート、ボタン型サポート (まとめてパーツと 呼ぶ) が接着される場所のみがくり抜かれたような治具を用いて、FR 4 板上にのせる。

2、その治具のまわりに、スペーサーとなる基板を沿わせ、全体が FR 4 板内に収まるようことを確認して、治具を固定する。

3、その治具に沿ってけがきをし、パーツが接着される場所 (カーボンを塗装しない場所) をマスキングする。

3.2.2 カーボン塗布

TGC は第 2 章でも述べたが、そのカソード面には高抵抗に調整されたカーボンを塗装する。塗装面がそのままカソード面になるので、その塗装面は均一で、かつその面抵抗は 1 MΩ/square にならなければならない。またカーボン塗料は有機系溶剤が使われており、人体に有害であるため、塗装は自動化された。その塗装装置を使ってカーボンは塗装される。

0、導電性塗料（Graphit33）と絶縁性塗料（PLASTIK70）を調合する。

$$Graphit33 : PLASTIK70 = 13 : 10 \quad （重量比） \tag{15}$$

調合した塗料を塗料タンクに入れ、循環させておく。

1、マスキングされた FR 4 基板を塗装台の上にのせ、塗装面をアルコールできれいに拭う。

2、塗装ブースに FR 4 板をのせた塗装台をいれ、塗装装置をスタートさせ、塗装する。表面が乾くまで待った後、塗装面をワイパーで磨き、面抵抗を測定する。

3、面抵抗が OK なら、マスキングをはずす。（面抵抗が高い場合はワイパーでさらに磨き、面抵抗を落す。）

3.2.3　パーツ接着

スペーサー、ワイヤーサポート、ボタン型サポートそれぞれを決められた場所に接着する。接着剤は室温硬化のため、接着時間は限られてくる。また、基板から接着剤がはみだしたりすれば、放電の要因になったり、ワイヤーを切る原因になるので、その量は定量で、かつ均一に塗らなければならない。そのため、スクリーンメッシュを使ったり、ディスペンサを用いたりして、定量の接着剤を均一に、かつ効率良く塗れるようにした。

1、カーボンが塗装された FR 4 板の上で決められた位置に治具をおき、パーツが板からはみ出さないことを確認する。治具が動かないように、おもりで固定する。

2、スペーサーのエッジに接着剤がはみ出さないように、エッジ近くはマスキングした後、接着剤を塗る。ワイヤーサポートはスクリーンメッシュを用いて接着剤を塗る。ボタン型サポートには、ディスペンサを用いて接着剤を塗る。

3、それぞれのパーツを決められた位置にのせる。

4、均一に力がかかるように、メッシュをかぶせた後、シリコンラバーで全体を覆い、真空ポンプで中を減圧する。接着剤のはみ出し等がないことを確認した後、約 1 日待つ。

3.2.4　ワイヤー巻き

ワイヤーは 1.8mm ピッチで TGC 1 台につき、約 700 本も巻かれる。さらに、ワイヤー径は 50 μm で、そのうち一本でも切れてはいけない。これだけ多く、かつ精度良くワイヤーを巻くのは非常に難しく、専用の装置が用いられた。

1、パーツを接着した板をワイヤー巻き機上にのせ、巻き機上に吸着させることによって平面を得る。

2、ワイヤー巻き機をスタートさせ、ワイヤーを巻いていく。

3、全て巻き終ったら、最後のワイヤーを巻き機上にはんだ付けし固定する。その状態で基板上のエッチングパターンに、ワイヤーをはんだ付けする。

4、はんだ付けし終ったら、はんだ付けしたエッジのところでワイヤーを一本一本切断していく。

5、巻き機上から板を取り外し、洗浄機のところに運び、ワイヤー、カーボン面を洗浄する。このとき、はんだつけした部分は超音波洗浄を行なう。

3.2.5　チェンバー接着前 HV テスト

TGC は前述のように 2 枚の板を接着して作るが、両板を接着した後に中をみるようなことは非常に手間がかかるし、開けなければならない状況になれば修復も大変である。もし、接着する前にその動作を確認することができれば、安心して接着ができるし、また何か問題があれば中をみて調べることができる。そこで、接着剤は塗らないが 2 枚の板を重ね合わせ、シリコンラバーで全体を覆い、CO2 雰囲気にし、接着後と同じ状態を作り出した。その状態で高電圧 (HV) を印可させることによって、接着後の動作を保証することができる。そのとき HV がうまくかかれば接着しても良く、もしかからなければ板を洗浄し直したり、工程を戻ってチェックし直すという方法がとられる。

1、洗浄が終り、乾燥させた後、ワイヤーが張られた板を石定盤の上にのせ、吸着させることによって、平面を得る。

2、もう一枚の板も、平らな板に吸着させることによって平面を得た上でワイヤー面にかぶせられる。

3、これら 2 枚の板全体をシリコンラバーで覆い、CO2 を流し、シリコンラバー内 (TGC 全体) を CO2 で満たす。

4、その状態で、HV を印加し、HV が安定にかかるまで行なう。HV がかからない時には、もう一度開け、どこかおかしなところがないかチェックしたり、再洗浄を行なう。

3.2.6　チェンバー閉じ、ガスシール

HV テストによって、HV が安定にかかることが確認されれば、同じ set up で接着剤を塗り、同様な手順で接着を行なう。TGC をガスタイトにするために、TGC の周囲を接着

剤で固める。

1、HV テストの結果が OK ならば、接着の準備を行なう。

2、パーツ全てに接着剤を塗り、2 枚の板を重ねる。全体をシリコンラバーで覆い、中を減圧し、約 1 日待つ。

3、接着が終ったら、周囲のすき間全てに接着剤を流し込み、ガスシールをする。

3.2.7 モジュール接着

TGC 単体は以上の工程でできるが、前述のように実際には単体で使用されることはなく、2 台 (doublet) または 3 台 (triplet) で接着して、１モジュールとしなければならない。それぞれの TGC はハニカムで両面挟まれ、モジュール化することによって、構造を保ち、強度を強くする。

1、TGC1 台を石定盤の上に乗せ、吸着させる。

2、その状態で、TGC 上面と、ハニカムに接着剤を塗り、ハニカムを TGC 上面に置く。

3、ハニカムの反面と、もう 1 台の TGC の下面に接着剤を塗り、平面を出した状態で、ハニカムの上に乗せる。

4、これら全体をシリコンラバーで覆い、いままでと同様、中を減圧して接着する。

5、さらに、TGC の両外面には、薄いハニカムを同様の方法で接着する。

3.3 改善点

ここでは、試作で行なわれた改善点を例を挙げて紹介する。主に著者が携わった試作 4 回目以降に改良が加えられたものを挙げる。ここで挙げるような改善点により、作業性は非常に向上し、TGC も個性が少なく、精度の高いものとなった。このようにして 2000 年 9 月から量産を開始することができた。

- カーボン自動塗装装置
  TGC のカソード面となる塗装面は均一で、かつその面抵抗は 1 MΩ/square（一面 0.5 ~ 2.0MΩ/square の範囲）でなければならない。また、塗料は人体に有害である。そのため、自動塗装装置が導入された。
  導入されたことにより、塗装面の均一さは以前より良くなり、個性の少ないカーボン面ができるようになった（塗装面のバラツキがなくなった）。また、塗装時間は 1 枚につき 5 分（乾燥 10 分、測定 5 分）と効率がよくなり、1 日につき約 20 枚塗装ができるようになった。今後の課題としては、カーボンの性質をさらに研究して、面抵抗の調整（テスト塗装）に時間がかかることを改善する必要がある。

- スクリーンメッシュ、オートディスペンサ
  パーツのエッジから接着剤がはみ出したりしていれば、沿面放電の原因や、ワイヤーを切断してしまう危険性を増やす。そのため接着剤は定量で、均一に塗られなければならない。そこで導入されたのが、スクリーンメッシュとオートディスペンサである。
  スクリーンメッシュは、決められた領域（接着領域）にメッシュが張られ、そのメッシュを通して接着剤を塗ることができる。メッシュは接着剤（アラルダイト 2011）が水で洗い流せるという性質をもつため、再利用できる。オートディスペンサは、ボタン型サポートのような狭い領域に微量の接着剤を定量吐出できる。
  これらを用いることによって、接着時間は 30 分と短縮され、作業も簡単になり、また誰が行なっても均一に接着剤が塗れるようになった。

- ワイヤー
  TGC は 1 台あたり、1.5m × 700 本と約 1 km もワイヤーを使う。さらにワイヤー張力は 350mg（弾性限界 380mg）と非常に強く張られながら、10 年間 1 本も切れてはいけなく、その張力を保っていなければならない。このように TGC において、ワイヤーの出来、性質は非常に重要である。
  我々は、3 社のワイヤーを比較するべく、その弾性限界、張力測定、熱加速試験を行ない、結果の良いものを選択した。その結果、以前のワイヤーに比べ、はんだ付け後のワイヤーのたるみがなくなり、作業性が向上した。

- はんだ
  TGC のワイヤーは上にも挙げたように 350mg という強い張力で張られるため、は

んだ付けの強度が重要になる。しかし、一般に使われているような Sn+Pb の共晶はんだは、あいにくワイヤーをはじいてしまい強度は保てなかった。
そこで我々は様々なはんだを集め、実際にはんだ付けをしたところ、強度もよく（熱加速試験）、作業性もよいことから、Sn+Zn(80:20) の非共晶はんだを選択した。その結果、はんだ付け作業の作業性が良くなり、信頼性が向上した。

- 超音波洗浄
  ワイヤーのはんだ付けではフラックスが使われる。フラックスにはイオンが含まれるため、それらが残ると放電の原因（マイグレーション）にもなりうる。そのため、この洗浄は TGC の動作を保証する上で、非常に重要である。
  このため、はんだ付けされたところは超音波洗浄を行なった。さらに、イオンの析出を防ぐため、はんだの上には接着剤を塗った。その結果、それまでに作られた TGC は HV がかかりにくかったが、超音波洗浄を行なって以来、安定に HV がかかるようになった。

- チェンバー接着前 HV テスト
  TGC は接着によって、形作られている。そのためその接着は念入りに行なわれるが、逆に何か問題があった場合その修復（中を開ける）は困難である。 もし、接着をしないでその後の TGC の動作が確認できるようなことができれば非常に都合が良い。
  そこで、TGC 全体を密封し、CO2 雰囲気にすることによって、TGC 接着後の状況をつくることにした。その状態で HV をかけて、その動作が安定であれば、接着しても動作は安定であることが保証されるだろうし、もし問題があれば中をみて対処できる。こうしたことで、早く問題を解決できるし、能率が良くなった。

- モジュール接着
  前述のように、TGC は doublet,triplet で 1 モジュールとされ使用される。以前の製作工程では、先（パーツ接着の前）にハニカムを接着した上で、TGC を製作していた。その後ハニカムのついた TGC と、付いていない TGC を接着して 1 モジュールとしていた。しかし、このため製作工程が一つ増えることになり、また製作上異なる TGC が存在することになり、量産を考える上でも面倒であることが予想された。
  そこで、TGC 単体を 2 台作ってから、まとめてその 2 台を（ハニカムを間に）接着した。これはモジュール接着の慣れと、設備（ガス系）の完成度が上がったためにできたといえる。この結果、完成した TGC は精度もよく、工程としても一本化されたので、製作の効率が上がった。

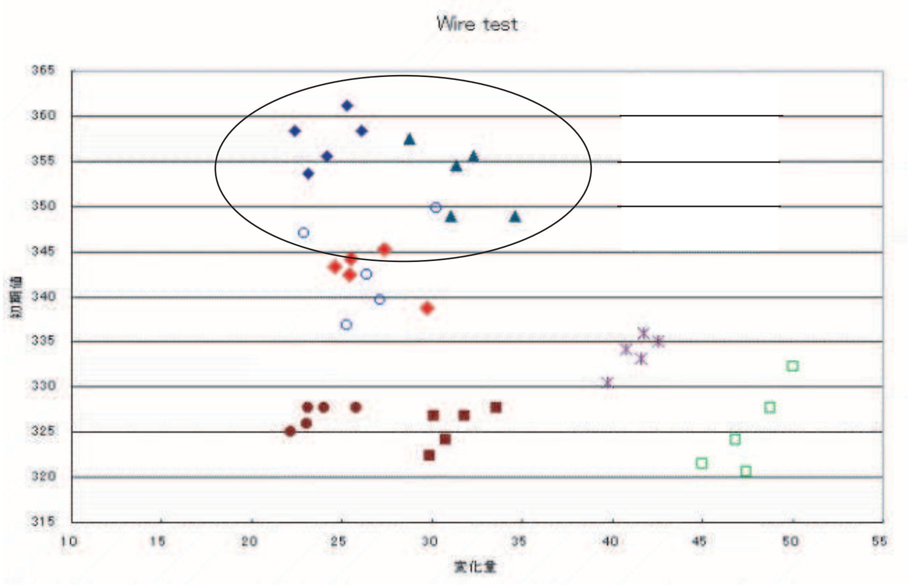

Wire test
365
360
355
350
345
340
335
330
325
320
315
初期値
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
変化量

図 3: ワイヤーテスト

4 TGCの量産

日本において、TGCは1056台（doublet 384台、triplet 96台）量産される。まず、日本でのTGC量産の流れを簡単に説明する。TGCは、KEK富士実験室にて製作される。そこで、HVが安定にかかることを確認した後、神戸大学に搬送される。神戸大学には、大型の検査設備が整えられており、そこでTGCは精密な動作検証をされる。ガスリークチェック、HVテスト、宇宙線による検出効率の測定など、本番に用いるべき条件を満たしているかをチェックする。その条件をみたしたTGCのみ、セルンに送られ、そこでも動作確認が行なわれた後インストールとなる。このようにTGCは数々の工程を経て、かつ量が非常に多い。そのため、製作時にいかに優れたTGCを作るかが重要になってくる。

神戸大学での検査設備も並行して建設されているが、ここでは、KEK富士実験室で開始されたTGCの量産の計画と量産設備の現状を述べる。2000年9月より開始されたTGCの量産は、2001年4月から本格的に量産ペース（2 TGC／日）を目指す。現在は量産を行なう業者の教育と、設備のさらなる拡充を行なっている。

4.1 量産計画

図??にTGC量産のスケジュールを挙げる。このように、2003年までと長い期間に渡り量産は行なわれる。目標としている量産ペースは2 TGC／日であり、年間200日生産を行なうとすれば、約2年半で量産は完了するという計画である。

2 TGC／日という厳しい目標をクリアするために、製作の効率化が計られ、製作工法は確立した（第2章）。さらにそれを実現するためには、製作は流れ作業的に行なわなければならず、そのため製作は各工程で分けられて考えられた。その工程分けが、第2章でも示したが、

- カーボン塗装
- パーツ接着
- ワイヤー巻き
- チェンバー閉じ
- モジュール接着
- HVテスト

である。そのため、量産設備も各工程で分かれて考えている。それぞれの工程で部屋が決められており、TGCは各部屋での工程を経ることで完成する。作業員も各工程で分けられ、各人が各工程に集中して行なうことで効率化が計られている。図 に量産が行なわれ

ているKEK富士実験室（地下4階）の見取図を示す。この他に、KEK富士実験室一階（備品庫）、KEK富士実験室脇小屋（カーボン塗装ブース）がある。（各工程の部屋とは別に、1000台のTGCの材料置き場や、完成したTGCの保管のための備品庫も用意されている。）

これだけの設備を完成させる作業も大変なことであるが、設備を建設する上で重要なことは、その信頼性、耐久性である。もちろん使いやすいことは前提であるが、設備に故障があれば、量産はストップしてしまい、計画は滞ってしまう。それも約3年と長い期間量産を行なう訳で、その期間中安定に動かなければいけない。このように、量産設備は、使いやすく、かつ耐久性にすぐれているという条件がかされている。

4.2　量産システムの立ち上げ

前節でKEK富士実験室での量産計画について概説したが、ここでは実際にその量産システムの立ち上げについて述べる。主に、カーボン塗装とワイヤー巻き（およびはんだ付け）の工程について詳しく解説する。量産を行なうには、設備そのものの建設も重要であるが、材質の選定も重要な課題である。カーボン塗装の工程では、主にその設備の建設について解説し、ワイヤー巻きの工程では、ワイヤー（およびはんだ）の選定について述べる。

4.2.1　カーボン塗布系

（１）塗料と塗装方法

TGCのような大面積を、素早く、均一に塗装するには、どのような塗装方法で、また塗料としてはどのようなものが適当であるかを検討した。塗装方法にもいろいろあり、刷毛、ローラーでの塗装、スプレーを用いた塗装、さらには電磁気力を利用した静電塗装、粉体塗装などさまざまである。中でも一般的で、大がかりな設備のいらない刷毛またはローラーでの塗装と、スプレーを用いた塗装が検討された。しかし、刷毛またはローラーでの塗装では、均一な塗装はできず、また大面積を塗装するには向いていないことが分かった。そこで、スプレー塗装という塗装方法で塗装を行なうことに決定した。

カーボン塗料は１ $\mathrm{M\Omega/square}$ という抵抗を得るために、導電性のカーボン塗料と、絶縁性の塗料を混合している（１ $\mathrm{M\Omega/square}$ を得るような1種類の塗料はない）。こうしたことから、カーボン塗料は簡単に調合ができて、かつ塗装しやすいものを選ぶ必要があった。そこで、数種類の塗料を、実際に塗装した上で検討した。条件としては、

- 塗装のしやすさ
  塗料は扱い易いか、有害でないか、洗浄は容易かなど。
- n-pentaneに対する耐久性

n-pentane に浸しても、塗装面に変化はないか。

- 塗着力
  塗装後にはがれにくいか。

- 面抵抗の調整のしやすさ
  塗装時に面抵抗が得易いか、またバラツキはすくないか。

が挙げられる。さらに、実際にTGCのカソード面として動作するかをチェックした後（小型のTGCを製作してHVを印加して、安定である）、現在使っている塗料（Kontakt Chemie社製）に決定した。またその調合比は、重量比にして、式15のように13：10にした。

尚、この塗料の成分に関して調べたところ[2]、表4のようであることが分かった。これら塗料はそれぞれ、溶剤（イソプロパノール、酢酸ブチル）に顔料（カーボン、アクリル樹脂）が含まれており、溶剤が揮発することにより、顔料が塗着され塗装が完了する。（カーボンはそれだけでは塗着力がないため、シリコン樹脂が「のり」の役目をしている。）

導電性塗料	Graphit33 （Kontact Chemie社）	カーボン シリコン樹脂 イソプロパノール
絶縁性塗料	PLASTIK70 （Kontact Chemie社）	アクリル樹脂 n-酢酸ブチル

表4: カーボン塗料の成分

（２）量産に向けたカーボン塗装

上記のように、カーボン塗料とその塗装方法が決定されたが、1日に30枚塗装するという目標のためには（1枚あたり15分）、どうしても手動による塗装では限界があった。またTGCのような大面積を均一に塗装する場合、塗りムラができてしまう。さらに、塗料は有機系溶剤を含むため、人体には有害である。そのため、自動塗装装置を導入する必要があった。

（３）カーボン自動塗装装置

自動塗装装置に要求される条件として、

1. 効率のよい塗装ができること
2. 人体に安全であること
3. 扱い易いこと

---

[2] KEK化学部の協力による

4. 耐久性があること

5. 環境に左右されないこと

が挙げられる。これらの条件をふまえて自動塗装装置の建設を行なった。

＜塗装方法＞

まずその塗装方法だが、我々が用いた吹き付け塗装では、塗料を圧縮空気を用いて霧状にしたのち、適当な形になるようにさらに圧縮空気を用いて整形して塗装する。この塗装方法の利点は、扱い易い空気で塗装を制御しているため、塗装にムラができにくく、また簡単に扱える。また、整形も容易にでき、整形された塗料は楕円形になり、大面積を塗装するのに適している。こうして整形した塗料を一定の速度で動かして塗装すれば均一な塗装面ができる。このような塗装を行なうことで、TGC の 1.5m×1.2m の大きさの面を数分で塗装ができるようになった。

＜塗装ブース＞

有毒な溶剤を作業者が吸わなくてもいいように、排気しなくてはいけない。そのための専用のブースがあり、給排気できるような換気ダクトが必要である。排気には、有機溶剤を吸着するようなフィルターを取り付け、外には有害な気体を排出しないようにしている。

＜アクチュエーター＞

スプレーガンを一定の速度で動かすために、またそれを PC で制御するためのインターフェースが必要である。さらに、モータは塗装ブース内にあるが、塗料は可燃性ガスを含むため、その爆発には注意しなくてはならない。そのため、モータは防爆仕様[3]のモータを選んだ。

＜配管＞

塗料に使われている酢酸ブチルは侵食性があるため、塗料の配管に使われる材質にはその耐薬品性が重要であった。文献でその耐薬品性をしらべて、さらに実際に塗料の中に浸して、その安全性を確かめた上で配管行なった。その結果、配管のチューブはナイロン製、シールするパッキン等はテフロン等の耐薬品性が良いものを選んだ。

また、塗料は凝固性があるため、配管は塗料を循環させるように作った。配管の経路としては、塗料タンクから、塗料ポンプで吐出し、スプレーガンの中を通り、タンクに戻ってくる。

＜塗料タンク＞

調合された塗料はタンクに入れられる。塗料温度が面抵抗に影響を及ぼすため、その制御をしなければならない。そこで、塗料タンクにはウォータージャケット[4]がついており、塗料温度を制御することができるようになった。

---

[3] スイッチイングなどによる火花を原因として可燃性ガスが一気に燃焼しないように、回路部が密閉されている。さらに、万一爆発が置きても、全体に広がらないように耐圧構造になっている。

[4] タンクが二重構造になっており、回りに水を流すことができるため、タンク内の温度をその水の温度で制御できる。

また、塗料は凝固性があり、時間とともに沈澱し、固まってしまう性質がある。そのため、塗装が終った後には、配管から塗料すべてを取り除かなければ、つまってしまいそれ以降使いものにならない。そのため、塗料タンクも洗浄が必要であり、その洗浄のしやすさを考慮して、口が広いものを用意した。さらに耐久性から、その材質はステンレスにした。

＜塗料ポンプ＞

塗料がスプレーガンの先から出るときに脈動していたら塗装面も均一にならない。そのため、なるべく脈動の少ないポンプを選んだ。上にも述べたが、塗料の回収を行なう時に、回収が簡単にできるような (分解も可能な) ポンプである必要があった。その結果、構造が簡単で、かつ脈動の少ないポンプを選定した[5]。

＜圧縮空気配管＞

上にも述べたが、可燃性ガスを含むため電気的な制御では、爆発の危険が多い。そのため、カーボン塗装は全て圧縮空気で制御している。その使い道としては、以下に挙げるものがある。

- 塗料開閉エア
  スプレーガンは、空気圧の開閉で塗料を開閉できるような弁 (空気作動弁) を持っており、圧縮空気の ON OFF を制御することで、塗料の ON OFF を制御できる。

- 霧化エア
  上述のように、塗料はスプレーガンの先から吐出した後、圧縮空気によって霧状にされる。そのための圧縮空気である。この圧縮空気の圧力を制御することで、霧化の程度を変えられる。(一般に圧力が高ければ、霧の微粒子が細かくなる。)

- パターンエア
  霧化エアによって霧状にされた塗料は、さらにこのパターンエアによって楕円形に広げられる。この圧力を制御することで、塗装パターンの形や大きさを変えることができる。(一般に圧力を高くすれば、塗装パターンは楕円形の長軸が伸びていった形になる。)

これらの圧縮空気はすべて電磁弁[6]を用いて制御しているため、PC およびリレー回路を用いて、自動制御が出来る。(これらの電磁弁がある場所は塗装ブースの外であり、スイッチングによる爆発の危険性はない。)

＜乾燥装置＞

塗装ブースは外にあるため、外環境に影響を受けやすい[7]。そのため、冬場などは気温

---

[5] 一般にプロペラポンプと呼ばれるようなポンプと原理は同じであるが、さらに「つまり」ができにくいような構造になっている。サニタリーや汚水処理等の産業で使用される。

[6] 電磁誘導によって生じた力を用いて弁を開閉する。コイルに流す電流を制御する。

[7] 塗料が可燃性ガスであり、かつ有害なため、実験室内に塗装ブースを建設することは安全上禁止されている。

が非常に下がり、乾燥に時間がかかってしまう。しかし、1 年中 1 日 30 枚のペースを目標としており、乾燥時間の短縮が望まれた。そこで、塗装後に温風を吹きかけることによって、乾燥時間の短縮を実現した。約 40 度で $3m/s$ の温風が均一に吹き出るようなノズルと、温風発生装置（送風器とヒーター）を取り付けた。その結果、1 枚あたりの乾燥時間が 5 分以上短縮された。

（４）塗装技術の現状と課題

上述のように、カーボン塗装において外環境は変化する。一方、どの時期においても 1 日 30 枚のペースで、均一な塗装（面抵抗 1 $M\Omega/square$）ができなければならない。そのためには、外環境が変化したら、面抵抗がどのように変化するのかを知らなければならず、かつその対処を素早く行なわなければならない。

そこで、面抵抗に影響を及ぼすであろう塗装パラメターについて考える。まず、外環境とともに変化する塗装パラメターを以下に挙げる。

- 気温
- 湿度
- 塗料温度

我々がとるべき方針としては、これらのパラメターが変化することで（もちろん除湿や冷暖房等の制御は行なっている）面抵抗が変化したときに、以下の制御可能なパラメータを変えることによって、面抵抗を再調整するという方針である。以下に制御可能なパラメータを挙げる。

- 塗料吐出圧力
  圧力が大きければ、単位時間あたりに吐出される量が増えるため、塗装面の膜厚が大きくなる。面抵抗は膜厚に反比例するので、吐出圧力を上げれば、面抵抗は小さくなる。
- 塗料調合比
  絶縁性塗料の比を大きくすれば面抵抗が上がる。
- 霧化エア圧力
  上に述べたように、圧力が上げれば微粒子の大きさが小さくなる。一般に微粒子化すればするほど、乾燥も早くなる。しかし、面抵抗には大きな変化を及ぼさない。
- パターンエア圧力
  上にも述べたように、圧力を大きくすればパターンの大きさが大きくなり、単位面積あたりに塗られる量が少なくなる。そのため、面抵抗は大きくなる。

- ガンスピード
  スプレーガンの動くスピードを早くすれば、単位面積あたりに塗られる量が少なくなる。そのため、面抵抗は大きくなる。

この内変化させ易いパラメターとしては、ガンスピード、塗料吐出圧力が挙げられる。しかも、霧化エアやパターンエアは適正な圧力範囲は限られており（約 0.1MPa から 0.5MPa まで）、その範囲内で圧力を変化させても大きな変化を及ぼさない。また調合比は、塗装のたびに変えるのは量産向きではないので、固定する方がよい。そのため、主にガンスピード、塗料吐出圧力を変化させてちょうどよい面抵抗を目指すことにした。

いままで行なわれた製作では、これらのパラメターを変化させてテスト塗装を行なった。そこで面抵抗が得られたら、そのパラメターを固定して本塗装を行なった。現在まででで、このテスト塗装での面抵抗調整に時間がかかっているが、本塗装では 1 枚 15 分のペースで塗装ができるようになっている。

今後の課題としては、このテスト塗装の時間短縮を目指すことである。気温（塗料温度）、湿度の変化と面抵抗の値の対応をつけて、その時のパラメターの値を決定することによって、これを実現する。

4.2.2 ワイヤー巻きとはんだ付け

第 3 章でも述べたが、1 TGC あたり 1 km（700 本分）もワイヤーを使用する。これらの内、1 本でも切れたりたるんだりしてはいけない。350g という非常に強い張力でワイヤーは張られているため、ワイヤーの出来に大きく左右される。また、350g という非常に強い張力で、かつ 20 本くらいまとめてはんだ付けを行なうため、はんだ付けの強度も重要になってくる。これらの理由から、ワイヤーおよびはんだの選定が必要であった。

（１）ワイヤーの選定

ワイヤーを選定する際に、必要な条件としては、切れないことと、たるまないことが挙げられる。（もちろん量産をする上で、その価格も重要である。）これらのワイヤーの性質は、ワイヤーの製作時に決まる。我々が用いるワイヤーは、金メッキされたタングステンであるが、タングステンの物性（引っ張り強さ、柔らかさなど）は製作時のアニーリング（焼き鈍し）の仕方等によって異なる。このため、$50\mu m$ の金メッキタングステンワイヤーといっても、メーカーによってその性質は異なっている。

そこで、我々は 3 社のワイヤーを比較してみた。行なったテストとしては、引っ張りテスト、クリープテストの 2 つである。

- 引っ張りテスト
  ワイヤーに加重を掛けていって引っ張りながら、その伸び、切れた時の加重を求める。結果を図に示す。それぞれのワイヤーの弾性限界（ワイヤーが切れる最大加重）

は350gより大きく、余裕があることが分かった。また、1社のワイヤーが他に比べ、柔らかいことが分かった。

- クリープテスト
  ワイヤーをはんだ付けした上で、高温多湿の環境（温度50度、湿度100％）に置く。はんだ付けして1日後の張力と10日後の張力の変化量を測定した。その結果が図である。これから、1社のワイヤーが優れていることが分かる。

以上から、1社のワイヤーが弾性限界も余裕があり、はんだ付け後にたるまないことが分かった。さらに、価格もこのメーカーが一番安いこともあり、このメーカーのワイヤーを使用することに決定した。

（２）はんだの選定

はんだの選定基準としては、ワイヤーとの接合強度が強く、ワイヤーが抜けないこと、操作性がよいこと（はんだ付けしやすい）が挙げられる。これらの基準を満たすべく、3種類のはんだで実際にはんだ付けを行なって比較した。

一般に広く使われているはんだといえば、Sn+Pbの共晶はんだである[8]。しかし、Sn+Pbのはんだは接合強度が低く、また共晶はんだでもあるため粘度が低く、ワイヤーを弾いてしまいはんだつけが困難であった。Sn+Agのはんだは接合強度は良かったが、操作性が悪かった。（粘度が低く、ワイヤーをはじいてしまう。）Sn+Znのはんだが接合強度も強く、操作性の点でも悪くなかった。さらに操作性をよくするため、SnとZnの比率を変えたものでも試してみたところ、共晶はんだではやはりワイヤーをはじいてしまい、操作性が良くなかった。共晶から少しはなれた非共晶はんだ（$Sn : Zn = 80 : 20$）の粘度が、ちょうどはんだつけには適していた。（それ以上の比率になると、溶け分かれ[9]がおき、操作性が悪くなる。また、はんだつけの温度も高温になってしまい、基板の破壊につながってしまう。）

こうして、Sn+Znの非共晶はんだ（$Sn : Zn = 80 : 20$）が、接合強度も良く、操作性も良いことが分かり、このはんだを使用することに決定した。

---

[8] 共晶とは合金の性質で、その温度とともに固相と液相の変化が一気に起こるものをいう。一方、非共晶とは固相と液相の間に固液共存の状態を生じるものをいう。（図参照）

[9] 固液共存の状態で時間が経つことによって、固体が凝縮してしまうこと。

5 TGCの動作検証

日本において本格的なTGCの量産を開始する前に、その確実な動作を検証するため、2000年11月28日から12月9日までKEK PS π 2ラインにてビームテストを行なった。ここでは、その実験について解説する。

5.1 目的

日本におけるTGC量産は、2000年9月よりKEK富士実験室にて開始され、今後2003年までかけて1056台を製作する。今までにイスラエルで製作されたTGCは詳細な動作検証が行なわれているが、日本独自の製作工法で作られたTGCはその動作は確認されているものの、系統だったテストは行なわれていない。そこで、本格的な量産を開始するにあたり、

> 日本独自の製作工法で、実際の量産設備を用いて製作された**TGC**が確実に
> 動作することを確認する

ことにより、日本でのTGC量産が確かなものであることを保証する。同時に、TGCの基本的な動作の理解を深める。このテスト実験では、以下の項目が調べられた。

- 印加電圧依存性
  TGCに印加する電圧（HV）を変化させた時に、TGCの動作がどのように変化するか調べる。これにより、適正なHVを決定することができ、動作を確認できる。

- 入射位置依存性
  ビームが入射する位置を変化させ、TGCのどの部分でも一様に動作しているか調べる。

- 入射粒子頻度依存性
  入射する粒子の頻度（rate）を変化させたときに、その動作を確認することによって、LHCのHigh rateな環境での動作を保証する。

- 内圧依存性
  TGC内部の圧力を変化させ、その動作を比較することにより、どこまで圧力に耐えうるか、構造は保てるのかを調べる。

- 入射角度依存性
  ビームが入射する角度を変化させたときに、信号の到着時間がどのように変化するか調べる。

- カソード面の面抵抗依存性
  TGC のカソード面の面抵抗が異なる場所でのカソード信号の違いを検討し、面抵抗の影響をみる。

5.2 セットアップ

2000年11月28日から12月9日まで、KEK PS π 2ライン（$\pi^- \ 4GeV/c$）[10] で行なわれたビームテストのセットアップを解説する。

5.2.1 配置

ビームライン上に置かれた検出器の配置図を以下に示す。
ここで、ビーム上流からビームラインに沿って、Z軸をとり、さらに右手系にX軸（水平方向）、Y軸（鉛直方向）をとる。尚、TGCはX軸とワイヤーが平行（Y軸とストリップが平行）になるように、また、TGCにビームが入射する位置を変えられるように、電動ステージ上に置かれている。[11] さらに、TGCに流すガスの成分であるn-pentaneが液化しないように、TGC全体を覆うようにテントが立てられ、テント内は温度管理された（20度以下にならないように調整した）。

5.2.2 検出器

（１）シンチレーションカウンター

シンチレーションカウンターを3台置き、ビーム上流から、Scinti 1、Scinti 2（両読み）、Scinti 3と呼ぶ。それぞれの大きさ、厚みは以下の表5に示す。これら、3層のAND（coincidence）をとり（Scinti 2は両読みのため4つのcoincidenceをとる）、トリガー信号を出して、データを収集する。今回のテストではこのcoincidenceの頻度が約 $2000/spill$[12] という条件で行なった。

名前	X	Y	Z
Scinti 1	100	100	5
Scinti 2（両読み）	40	40	5
Scinti 3	50	60	5

表5: シンチレーションカウンターのサイズ（単位はmm）

（２）ドリフトチェンバー

TGCの前後に各2台ずつ計4台のドリフトチェンバー（DC）が置かれ、TGCに入射した粒子の飛跡を描く。全てのDCは同じ外形で、同じ構造をもち、その構造は図 に示す。直交した二つのセル（セル構造は図 に示す。）をもち、それぞれのセルは独立に1本

---

[10] ビームには電子も含まれるが、とくに粒子の弁別はしていない。

[11] 全てのTGCはステージ上でまとめて固定されており、同時に動かされる。

[12] ビームは蓄え、吐き出しを繰り返しており、周期性をもつ。その周期を1 spillとし、約4秒。

ずつ読み出すことができる。DC 本体にアンプが固定されており、その出力信号はディジタル（NIM レベル）に変換されて出てくる。

DC の各パラメターの値は以下の通りである。ガスは P10 ガス（$Ar : C_2H_6 = 90 : 10$ ）、センスワイヤー、ポテンシャルワイヤー径はそれぞれ $50\mu m$、$100\mu m$ であり、印加電圧はそれぞれ、2.2kV、$-2.0kV$ である。（ポテンシャルワイヤーはそれぞれ等しい抵抗でつながれ、センスワイヤーから一番離れたワイヤー（$-2.0KV$）から、一番近いワイヤー（GND）まで等分配された電圧がかけられる。）

（３）TGC

TGC は、ビーム上流から、doublet、triplet と置かれ、各 TGC を D 1、D 2、T 1、T 2、T 3 と呼ぶ。各 TGC は図 のように、ビーム上流から見て右下を基準点とし、X、Y 軸方向に従って CH の値が（Ch0 から）増えていくように決めた。（triplet の wire 方向のみ、CH 数は 24CH であり、他は 32CH である。）

また、前述のように TGC はその構造を保つためにサポートをいれているが、その領域は不感領域になる。そういった不感領域を減らすために、それらの位置は doublet、triplet で stagger されている。今回製作した TGC も同様に doublet、triplet でそれぞれ stagger されている。（ただし、今回の triplet においては T 1、T 2 は同じ配置になっている。）さらに、ボタン型サポートのテストのため、その数を減らして製作したものもテストした。D 2、T 1 がそれぞれ、ボタン型サポートの数が各辺 0 個、3 個（普通は 10 個）である。T 1 の 3 つのボタン型サポートの位置と、stagger された T 3 のサポートの位置を図 に示す。

さらに、実際のアトラスにおいてもそうだが triplet に関しては、真中の TGC（T 2）のストリップはなく、T 1 と T 3 のみである。

今回の実験での標準 HV、Vth は、今までのテスト実験の結果を考慮して、それぞれ 3.1kV、100mV で行なわれた。（この値は、後述するように TGC の検出効率が 99 ％以上得られるような HV と Vth の値である。）また、前述のように TGC には preamp（ASD）が取り付けられ、ディジタル出力（LVDS 出力）される。（今回のテスト実験ではアナログ出力付きの ASD を用いた。）

5.2.3　ガス系

（１）ドリフトチェンバー

DC のガス系は図 に示すようである。Ｐ１０ガスボンベから、レギュレーターで減圧し、ニードルバルブで流量を調節している。安全のため、DC の前にはセーフティーバブラーが取り付けられ、DC に圧力がかからないようにしてあり、後段のバブラーでガスが流れていることを確認できる。

（２）TGC

TGC のガス系は図 に示すようである。CO_2 ボンベから減圧され、流量調節された CO_2

がn-pentaneの液体中を通る。このとき、全体の温度を17度に調節しておくと、n-pentaneの蒸気圧曲線から、そこから出てくる気体はCO_2 :n-pentane= 55 : 45の混合気体であることが分かる。このようにしてちょうどいい比率で混合された、CO_2+n-pentane混合気体はTGC内に流される。しかし、配管の途中で温度が17度以下になるとn-pentaneが液化して、異なった比率の混合気体が流れることになり、放電の原因になる。また、配管内に液体がたまると気体の流れが滞り、TGC内部の圧力をあげてしまう恐れがある。このため、配管は断熱材を巻き、温水をともに配管し、温めた。(TGC全体は前述のようにテント内に入れられ、17度以下にならないように調節された。)

5.2.4　データ収集系

データ収集系（ＤＡＱ）の全体図は図 に示すようである。各カウンターからのアナログ出力をディジタル信号に変換し、４つのcoincidenceをとる。そのcoincidence出力をトリガー信号とし、ADC[13]（1カウント~0.25pC）のgate 、TDC[14]（１カウント 0.78ns）のcommon stopに用いる。TDCによる時間情報はカウンター、DC、TGCとも全てのCHを同時に読みだす。しかし、ADCによるチャージ量の情報は、カウンターは４つとも全て読むものの、TGCにおいてはあわせて32CH分しかデータをとらない。(ADCはCAMACのため、1サイクルの収集時間が長く、時間短縮のためには読み出すCHをしぼる必要があった。) 後述するようにTGC上でビームがあたったと考えられるのは、3chもみれば充分であるため、ビームタイム中に効率良くADC値がとれるように繋ぎ変えを行なった。今回のテスト実験では最終的に、$400 events/spill$が実現された。

各パラメーターの値は以下に示す通りである。ADCのgate widthはScintiが120ns、TGCが300nsである。(TGCのアンプからのアナログ出力はベースラインを調節するため、長いテールを引く。) TDC (TMC) のfull rangeはScinti、DCが$3.1\mu s$、TGCが$1.0\mu s$にしてある。(DCはドリフト距離が長いため、最大$3\mu s$かかる。) 尚、TDC (TMC) は上記の時間幅内のデータを全て収集することができる。(Multi hitに対応。) しかしTGCのTDC情報は、解析時には (ノイズ等を除くため) 420nsから500nsの時間幅に限定した。

---

[13] 16ch Charge Sensitive　ADC (CAMAC) 豊伸電子製

[14] 32ch TMC (VME) KEK製

5.3 結果と考察

ここではビームテストで調べられた項目について、その項目ごとに結果を報告する。まず、結果を評価する上での用語の説明を行なう。その後に、そこで定義した評価基準に従って、各項目について検討する。

5.3.1 評価基準

（１）ヒットチャンネル

TGC 上でビームが当っている領域について考える。どのチャンネル（CH）にヒットがあるかを示したものとして、典型的なものをワイヤー、ストリップ両方について挙げると、図4のようになる。これから、ワイヤー、ストリップとも１ ch（または２ ch）をピークにほぼ３ ch 分ヒットしているのが分かる。このため、ここでは特別な場合を除きこの３ ch 分を用いて評価する。

（２）検出効率

TGC はトリガーチェンバーであることからも分かるように、その検出効率はほぼ100％を要求されている。このため、TGC にとって検出効率は重要なパラメターである。ここでは、検出効率は簡単に、

$$\text{検出効率（％）} = \frac{TGC\,\text{にヒットがあった回数}}{Event\,\text{数}} \times 100 \tag{16}$$

と定義し、評価する。ここで、Event 数とはカウンターの coincidence があった回数（coindicidence があったときに１ Event としている。）であり、これで TGC にヒットがあった回数を割ればよいことになる。（カウンターの coincidence があれば、TGC にビームは通過したとみなせるので、検出効率のよい TGC であればヒットがある（信号が出る）はずである。）

またここで、TGC がヒットしたというのは以下の条件を満たすものをいう。TGC のワイヤーについて（ストリップもほぼ同様）信号到達時間（TDC）分布を図5、6に挙げる。（注：TDC が common stop でデータを収集しているため反転されており、値の大きい方が実際には早く来た信号である。）これから分かるように TGC の TDC 分布は約25ns の時間幅の中に入る。（前述したように TGC はそのように設計されている。また、後に測定結果を述べる。）よって、ノイズ等を除くため、この25ns の間に信号が入った時のみを TGC がヒットしたとすればよい。（例えば、450ns から475ns の間に入ったときなどとする。）しかし、TGC の種類によって TDC 分布のばらつきがあることが見受けられ、また CH によっても多少のばらつきがあった[15]。このためもう少し制限を甘くし、ばらつきが収まり（吸収し）、かつノイズ等を拾わない程度の時間幅（time gate）である、50ns に決めた[16]。

---

[15] いわゆる T_0 といわれているもの。

[16] 実際のアトラスのトリガーシステムでもその時間幅は25ns から50ns の間と考えられている。

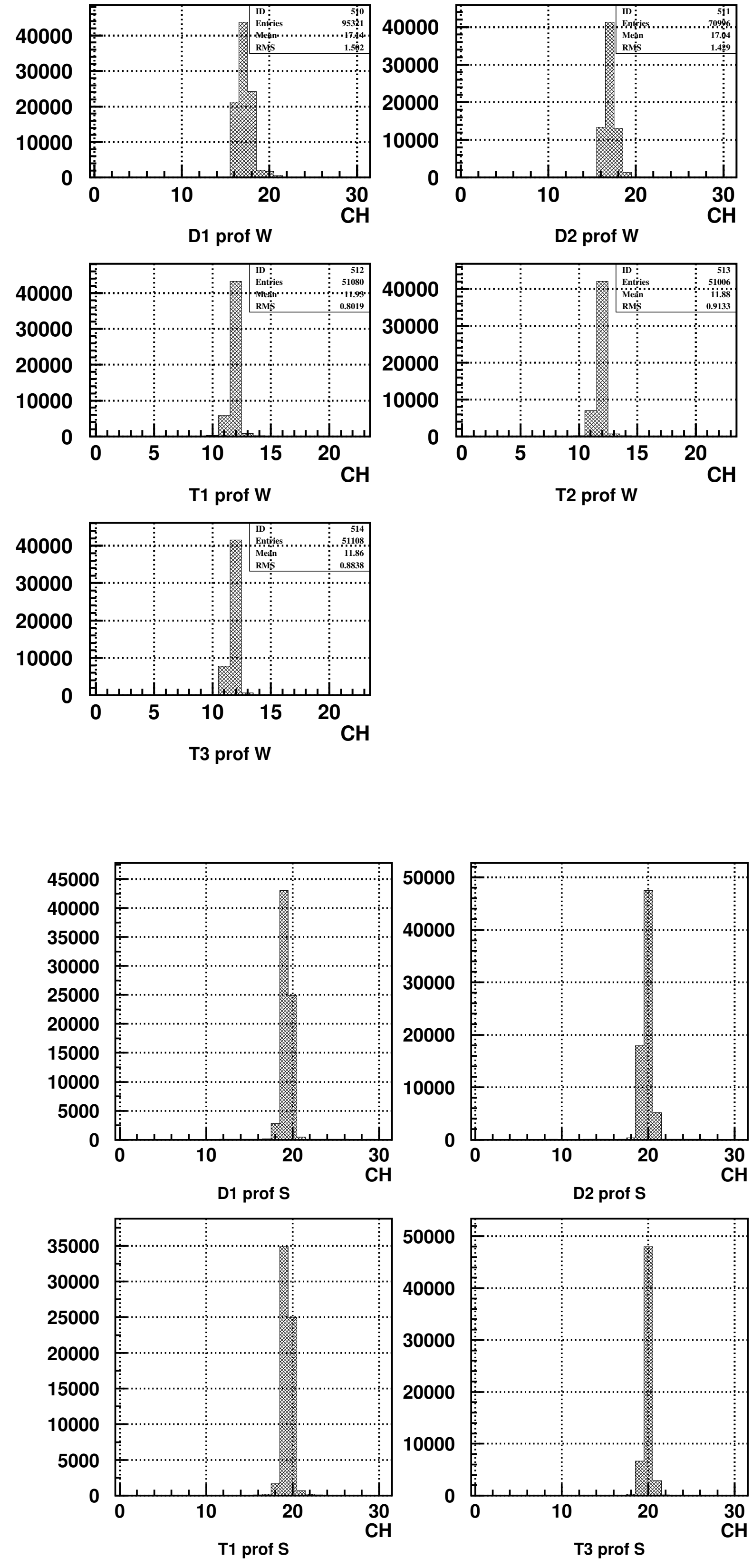


図 4: TGC の Hit した CH（上: ワイヤー、下：ストリップ）

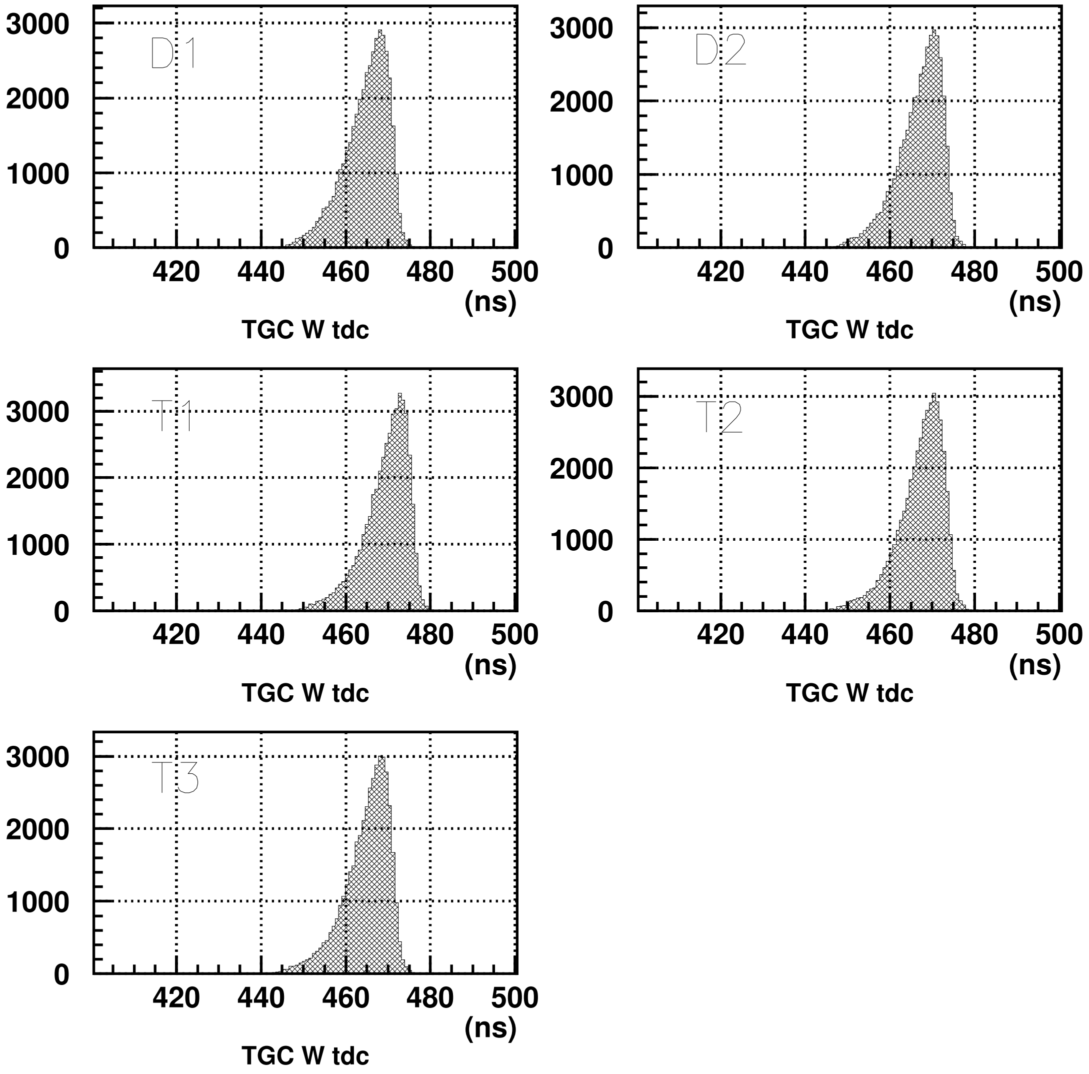


図 5: TGC wire 方向の TDC 分布（横軸は ns）（左上：D 1、右上：D 2、左中：T 1、右中：T 2、左下：T 3）

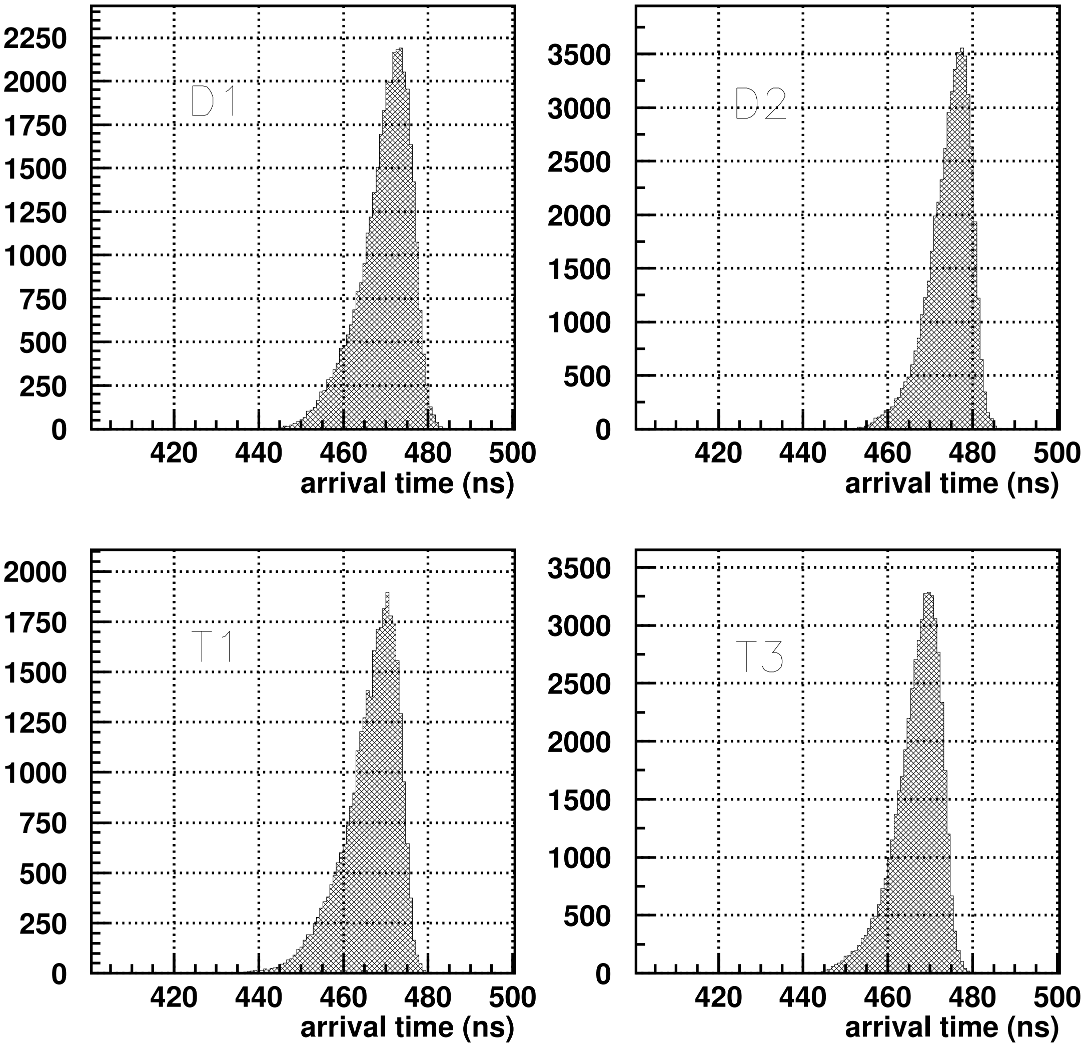


図 6: TGC strip 方向の TDC 分布（横軸は ns）（左上：D１、右上：D２、左下：T１、左下：T３）

さらに、この50nsのtime gateをどこからどこまでとるかを決める必要がある。（図7参照（ヒットが一番多いCHのTDC分布））

その開始時間を5nsずつ変えていって、検出効率を求めたものが図8である。（他のRunについてもほぼ同様である。）これから分かるように、435nsから485nsの時間の間に信号があった場合をTGCのヒットとすれば、ノイズ等も拾いにくく、かつ本当の信号を拾っているということになる。

検出効率は結局、

$$\text{検出効率（％）}= \frac{\text{ビーム領域３}\ ch\ \text{のどれかで}\ TDC\ \text{が}\ 435-485ns\ \text{に入った回数}}{Event\ \text{数}} \times 100 \tag{17}$$

と定義される。

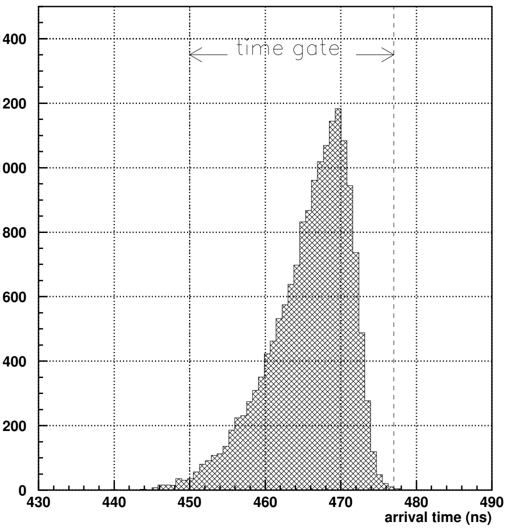


図 7: TGCの到着時間分布（time gate内に入ったもののみをヒットとする。）

（３）比検出効率とTime jitter

LHCのバンチクロッシング時間が25nsと非常に短いことから、TGCの信号到達時間分布が重要な要素となる。この時間分布が長ければ、バンチを決定することが難しくなる。TGCのヒットピークCHのTDC分布（図7）において、比検出効率を以下のように定義する。

$$\text{比検出効率（％）}= \frac{TDC\ \text{情報が}\ timegate\ \text{内に入った回数}}{\text{その}\ CH\ \text{の総エントリー数（ヒット数）}} \tag{18}$$

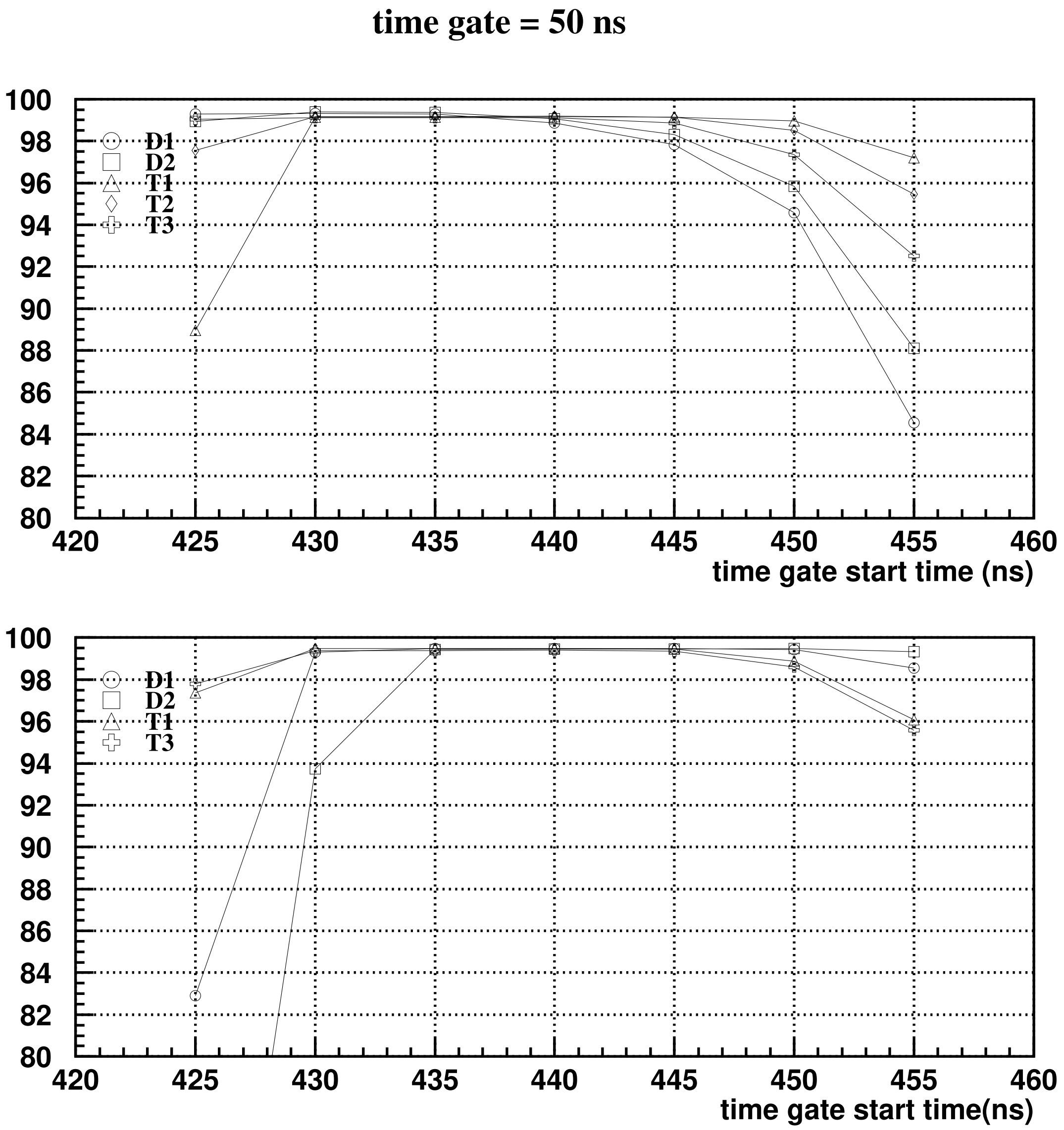


図 8: Time gate(50ns) の決定。(time gate を動かしたときに検出効率が一番高くなるところを選ぶ。ここで、435ns から 485ns の time gate に決定した。)(上：ワイヤー、下：ストリップ)

また、TDC分布の時間的広がりの指標として、以下のTime jitterという変数を定義する。

$$Time\ jitter(ns) = \text{比検出効率が}\,99\,\%\text{となるような最小の時間幅} \qquad (19)$$

（４）検出電荷量と積分電荷最頻値

TGCにおいてガスゲインに直結する積分電荷量を測定し評価することは、その動作を理解する上で重要なことである。前述のように、TGCにはアナログ出力が付いたASDを取り付け、その出力をcharge sensitive ADC(0.25pC/count)で測定した。ここで、charge sensitive ADCのカウント数を電荷量に直したものを、検出電荷量と定義する[17]。

またこの検出電荷量の代表値としては、検出電荷量分布を非対称ガウス分布

$$f(x) = \begin{cases} P_1 \times exp\left[-\frac{(x-P_2)^2}{2P_3^2}\right] & (x < P_2) \\ \\ P_1 \times exp\left[-\frac{(x-P_2)^2}{2P_4^2}\right] & (x > P_2) \end{cases}$$

でフィットした時の平均値（P_2）を用いる。（図9参照）さらに、この平均値をアンプ（ASD）のゲインで割った値を積分電荷最頻値と定義する。

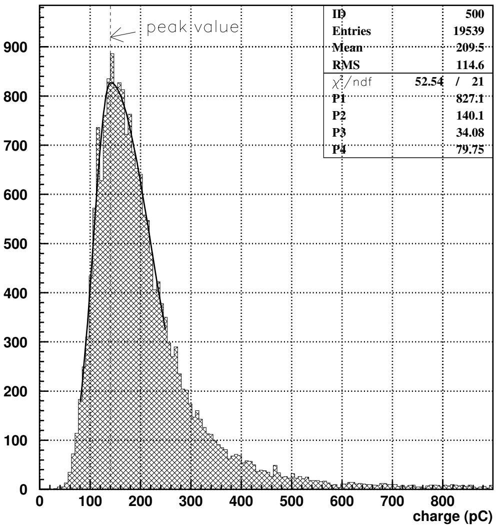


図9: TGCの検出電荷量分布を非対称ガウス分布でフィットした

---

[17] pedestalも引いてある。

5.3.2 TGCの個性とワイヤー・ストリップの出力について

ここではまず、各TGCの出力の違いおよびワイヤーとストリップの出力の違いについて述べる。TGCの量産において、なるべくTGCの個性があってはいけない。3000台のTGC全てに渡って同様な性能を持たなければ、場所によってトリガー条件が変わってしまい、正確な測定が出来なくなってしまう。このため、今回は5台のTGCを同じ条件で測定し、これについて評価する。

まず、その信号到達時間分布であるが、これは図5、6に示したように、ワイヤー、ストリップとも特に個性は見られない。この信号到達時間分布は主にそのワイヤーピッチに左右されるため、この結果から、ワイヤーピッチがきれいに張られていることが分かる。ワイヤーピッチは機械で制御しており、特にずれる理由がなく、これは今後量産で作られるTGCに違いが出ることはないと予想される。

次に、検出電荷量分布であるが、典型的なものを図10に挙げる。これらは後で述べるように検出効率には影響せず（HV 3.1kV、Vth100mVでの条件）、トリガー条件を変える程ではないことが分かっている。しかし、図10を見る限り、その分布は大きく異なっていることが分かり、さらに個性が大きくなってしまったときには、トリガー条件を変えてしまうかもしれない。後に挙げる検出効率の印加電圧依存性（図13、14）をみても分かるように、主にその傾向として、

1. doubletよりtripletの方が、検出電荷量は大きい。
2. wireの方がstripに比べて、検出電荷量は小さい。

ことが挙げられる。

これらについてその理由を考えてみる。そのために、TGCの等価回路を図11、12に挙げる。（それぞれの静電容量を図に示すようにする。）TGCに荷電粒子が通過したことによって初期電荷を生じ、ガス増幅によって増幅され、ワイヤーに伝わる。そこから、C_{HV}を通ってアンプでさらに増幅され、信号として出力され、その出力をADCを用いて測定している。こうした流れで検出電荷は測定されるが、ワイヤーとストリップそれぞれについてその流れを考える。図12にあるように、ワイヤー方向では読みだし経路（２）の他に、静電容量が多く考えられる。（抵抗の大きいカーボン面を通る経路は影響が少ないため除外する。）ここで、それぞれの静電容量を挙げると、

$$C_{HV} = 235pF \quad C_{WW} = 6.5pF/m \quad C_{WS} = 11pF/m/wire \tag{20}$$

である。また、TGCでは図11にも挙げたが、ワイヤーをまとめて読み出している。その数はdoubletが約20本、tripletが約30本である。このため、ワイヤーグループ（読みだし１CH）で考えると、C_{WS}の値がdoubletで$220pF/m$にもなる。これは、読みだし経路（２）の静電容量に匹敵する大きさになる。同様にストリップとは反対のグラウンド面

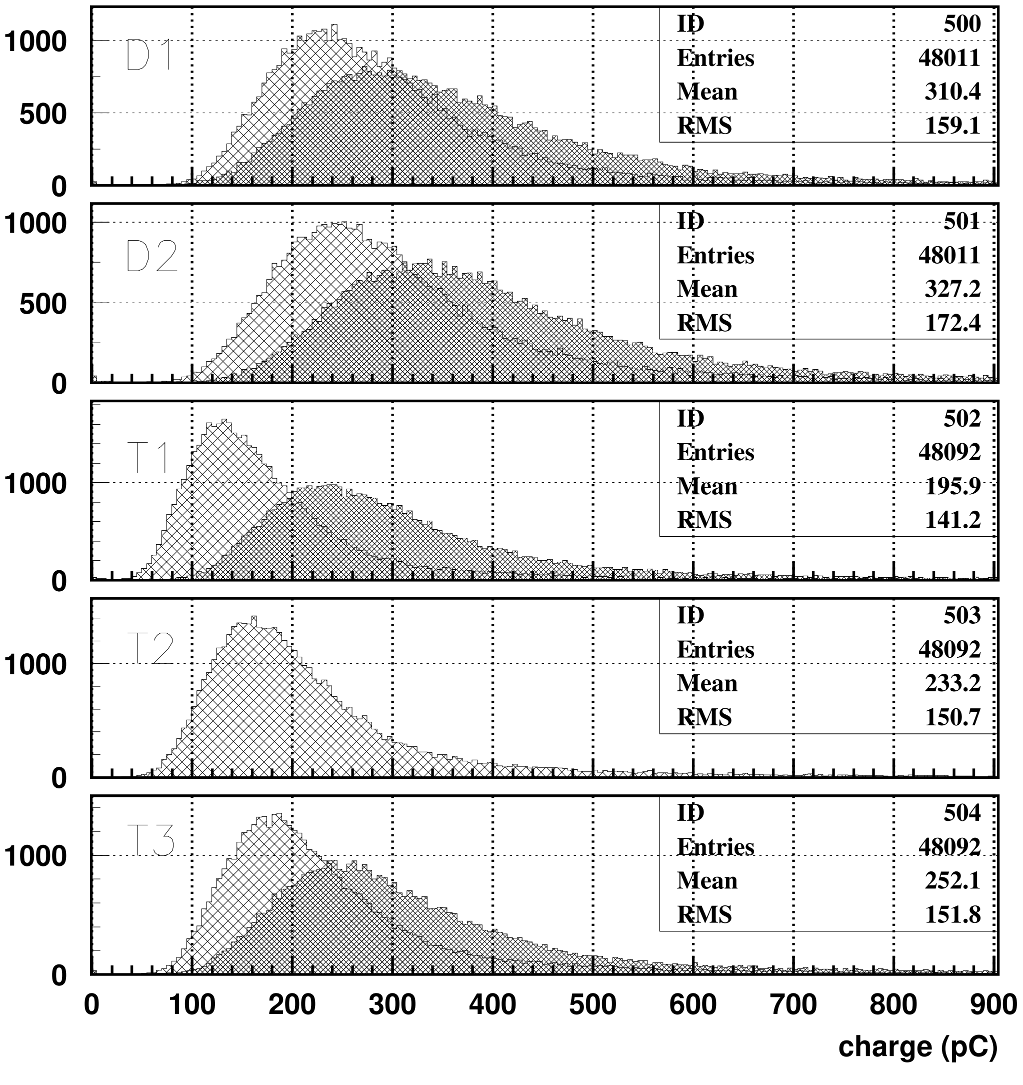


図 10: TGC の検出電荷量分布 (wire の方が strip に比べて検出電荷量が小さい)

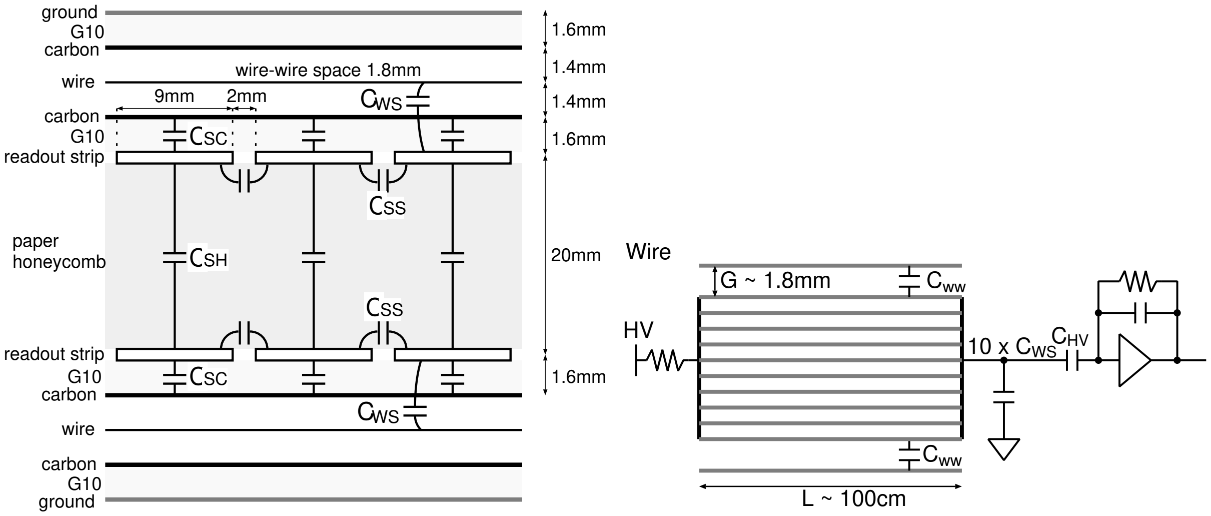

ground
G10
carbon
wire
wire-wire space 1.8mm
9mm
2mm
CWS
carbon
G10
readout strip
CSC
CSS
paper
honeycomb
CSH
CSS
readout strip
G10
carbon
CSC
CWS
wire
carbon
G10
ground
1.6mm
1.4mm
1.4mm
1.6mm
20mm
1.6mm
Wire
G ~ 1.8mm
Cww
HV
10 x CWS
CHV
Cww
L ~ 100cm

図 11: doublet と wire の等価回路

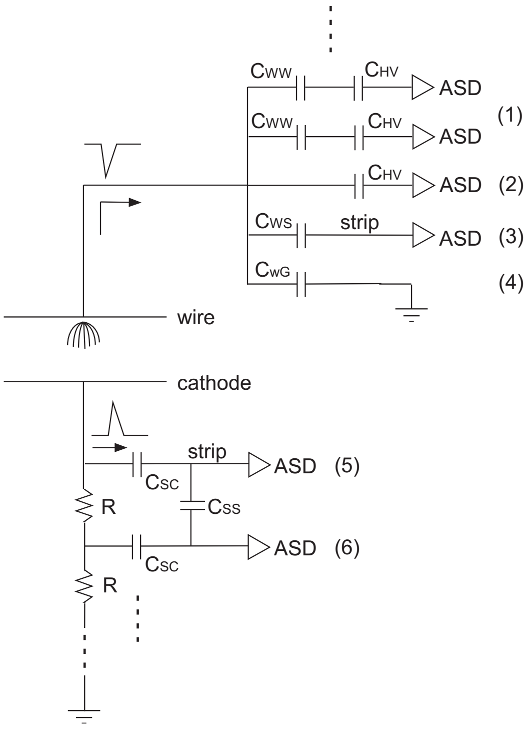

CWW
CHV
ASD
CWW
CHV
ASD
(1)
CHV
ASD
(2)
CWS
strip
ASD
(3)
CwG
(4)
wire
cathode
strip
ASD
(5)
CSC
R
CSS
ASD
(6)
CSC
R

図 12: TGC の等価回路（１ワイヤーグループ、１ストリップについて）

も大きくなる。このことによって、実際の信号よりも小さな信号が読み出されることになると考えられる。

一方、ストリップに関してはカーボン面の抵抗が大きいことから、そのままの電荷量で読み出されるため、信号が小さくならない。以上の理由から、ワイヤーの検出電荷がストリップ側よりも小さくなると考えられる。また、同様な考えから、triplet の方がまとめて読み出すワイヤーの本数が多いため、さらに読みだしが小さくなることが説明できる。

5.3.3　印加電圧依存性

TGC に印加する電圧を変化させた時に、TGC の検出効率、検出電荷量分布、信号到着時間分布がどのように変化するか調べた。いままでのテスト結果から HV は 3.1kV、Vth は 100mV がよいと考えられているが、今回製作した TGC が上の設定で、要求された検出効率および時間分布を持っているかを知る必要がある。また、さらに Vth をどこまで下げられ、またそのときに適正な HV がいくつであるかを求める。TGC の長期安定性を考えると HV は出来る限り下げることが望まれるが、今回の結果からそういった可能性を探ることができる。

（１）検出効率の印加電圧依存性

アナログ信号からディジタル信号に変換するための閾値（Vth）を、50、75、100mV と動かし、それぞれの値で印加電圧を変化させ、検出効率を求めた。ワイヤー、ストリップの出力から検出効率を評価した結果が、それぞれ図 13、図 14 である。

Vth を 50mV 以下にすると発振してしまい（回路的な限界）、これ以上 Vth を下げることはできなかった。しかし、今回のように環境がよい（ノイズがのらない）場合には、このように Vth を 50mV まで下げられることが分かった。また、Vth を 50mV まで下げると、（99 ％以上の検出効率が得られるという条件を満たす HV は）2.9kV まで HV を下げて使用することができる。同様に、Vth が 75、100mV ではそれぞれ 3.0、3.1kV が適正な HV であることが分かる。一方、TGC の長期安定性を考えると、HV を下げれば下げられるほど、放電の心配も減り、長期的な使用に耐えられることができる。いままでのテスト実験の結果等から、Vth を 100mV に設定し、HV は 3.1kV にするのがよいと考えられているが、こうした結果と長期安全性を考えると Vth をできる限り下げることが望まれる。

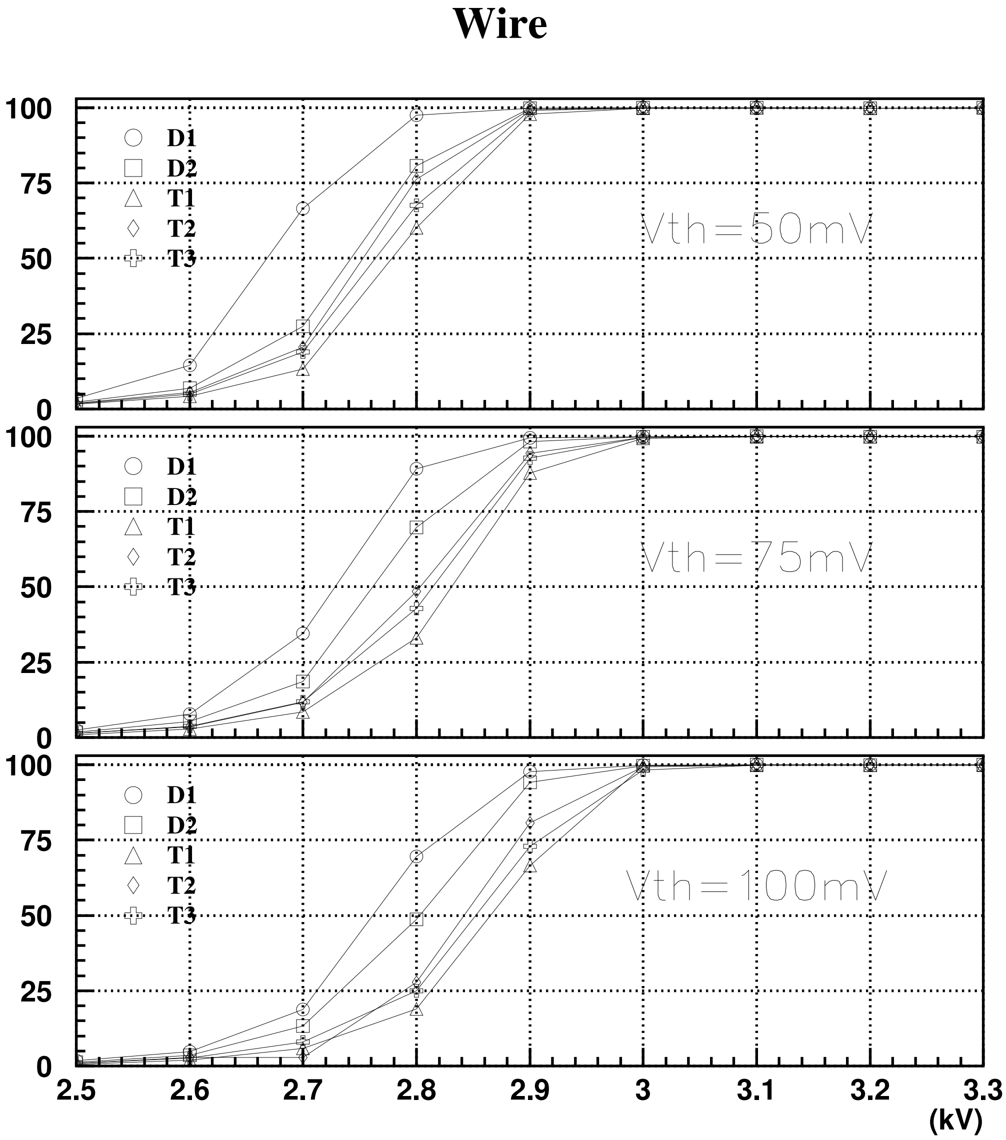


図 13: HV dependent（Vth=50mV）（上：ワイヤー、下：ストリップ）

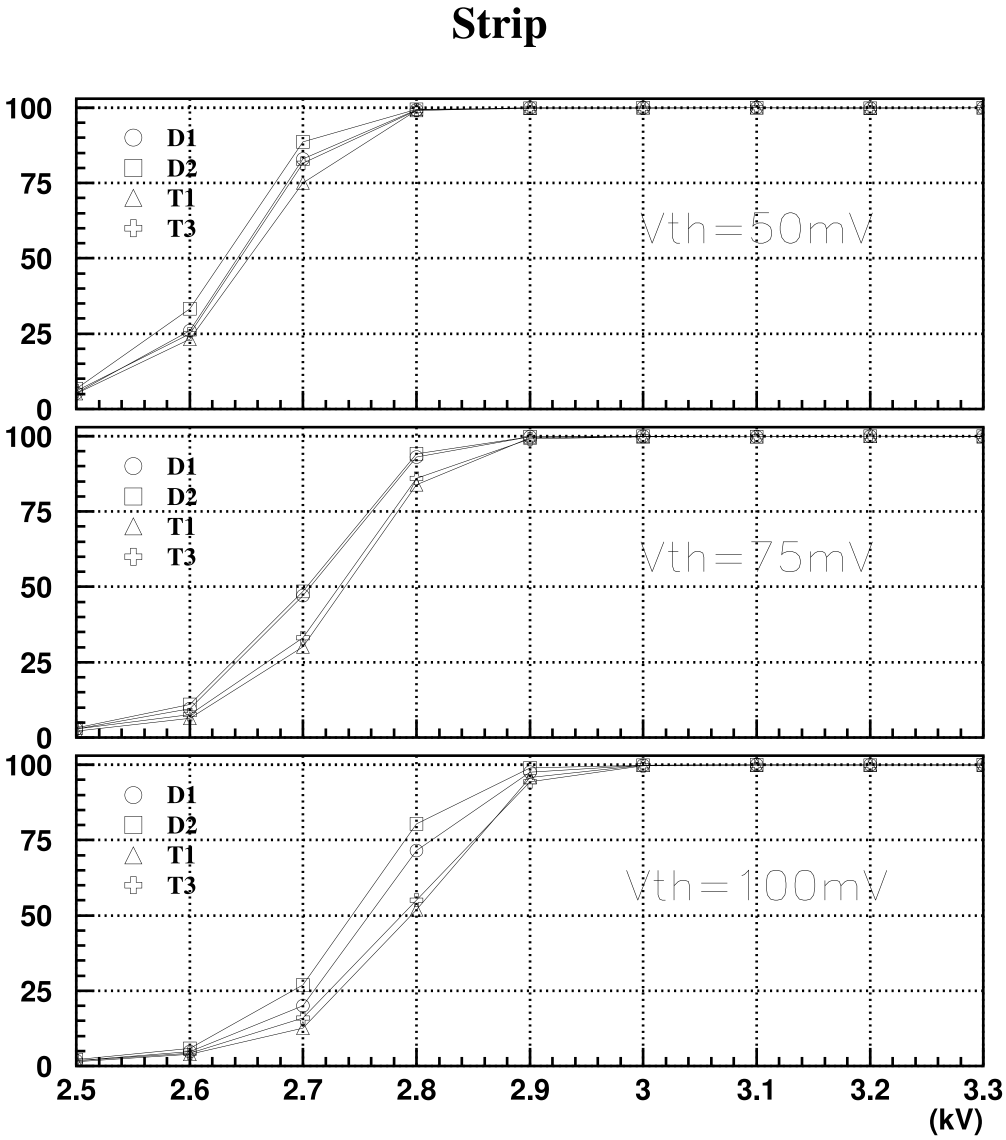


図 14: HV dependent（上図：Vth=75mV、下図：Vth=100mV）

（２）チャージ分布の印加電圧依存性

印加電圧を変化させたときにチャージ分布がどのように変化するか示したものが、図15である。また、ゲイン分布のピーク値と印加電圧の関係を示したものが、図??である。（Ｄ１のみ挙げる。）（チャージにはアンプのゲインが含まれている。）

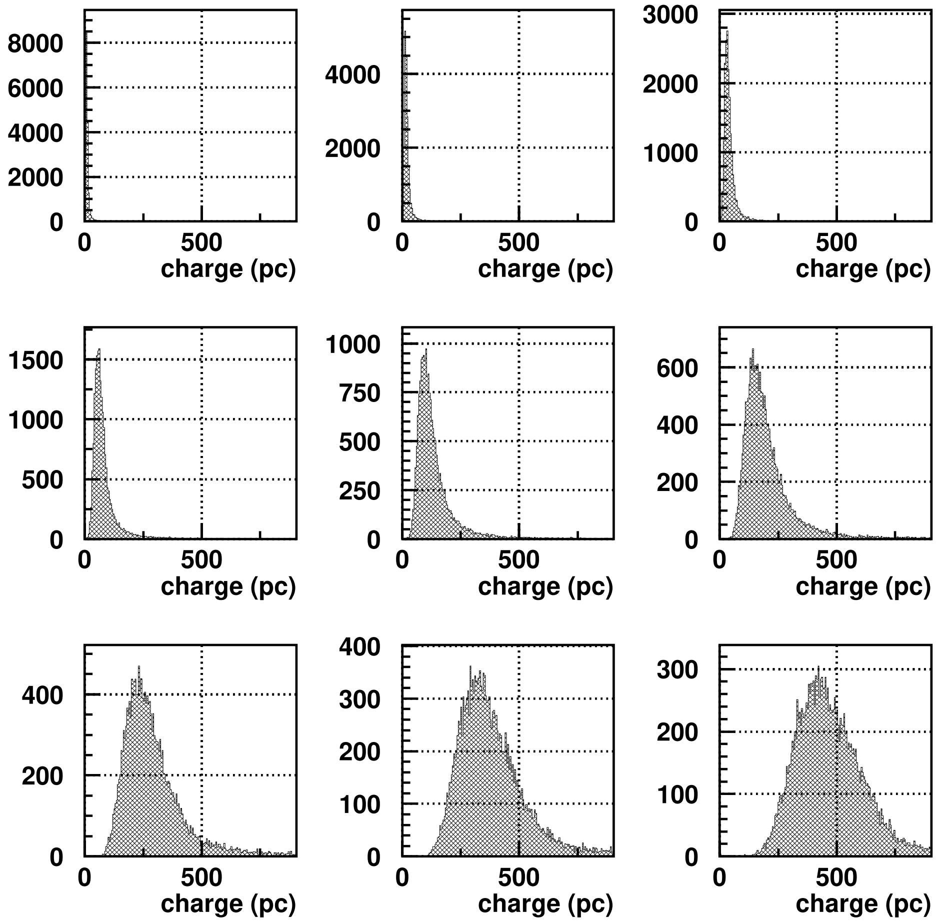


図15: チャージ分布（上段左から2.5、2.6、2.7kV、中段左から2.8、2.9、3.0kV、下段左から3.1、3.2、3.3kV。）

（３）信号到着時間（TDC）分布の印加電圧依存性

印加電圧を変化させたときに信号到着時間（TDC）分布がどのように変化したかを示したものが、図??である。（Ｄ１の最頻度CHのみ挙げる。）

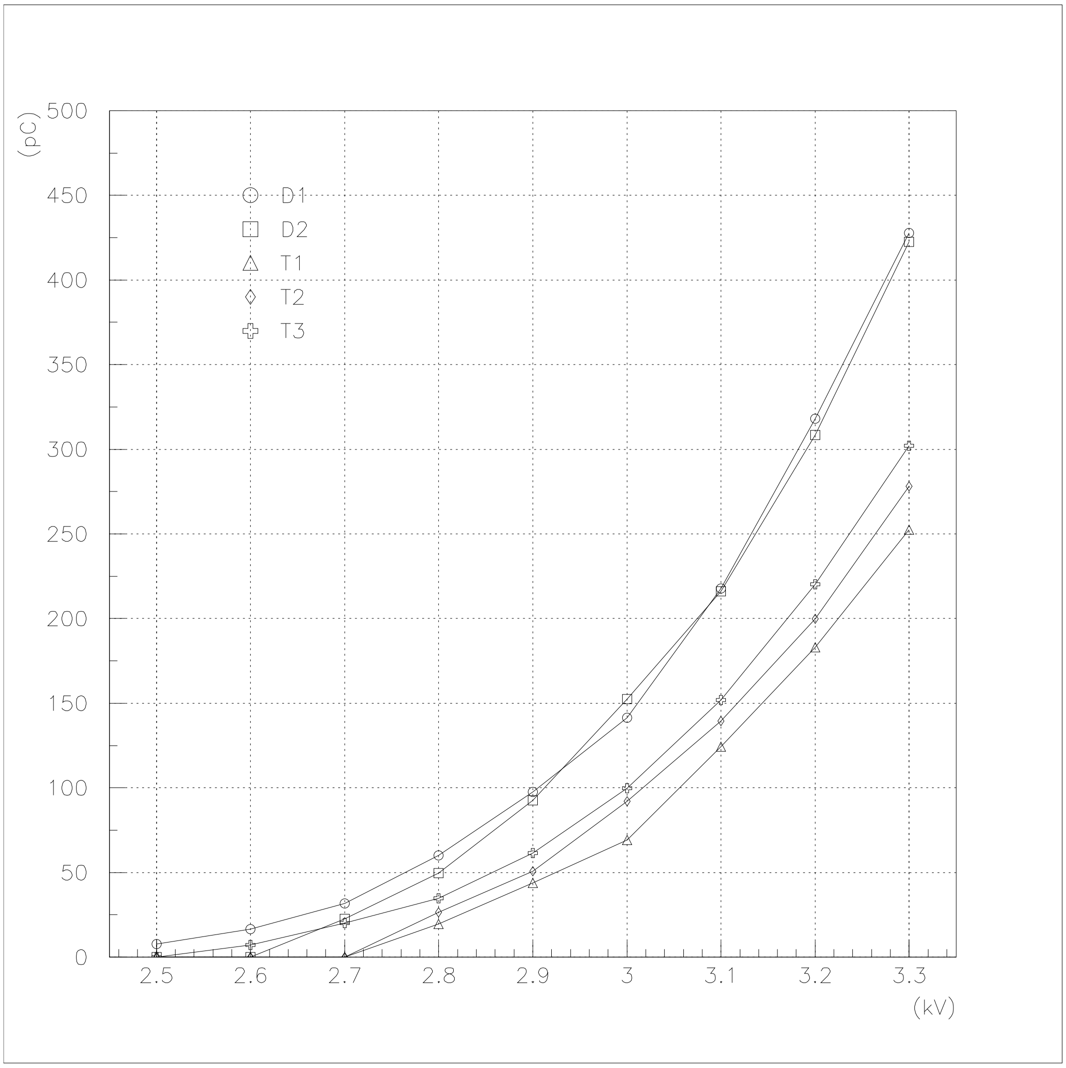


図 16: チャージ分布の HV dependent

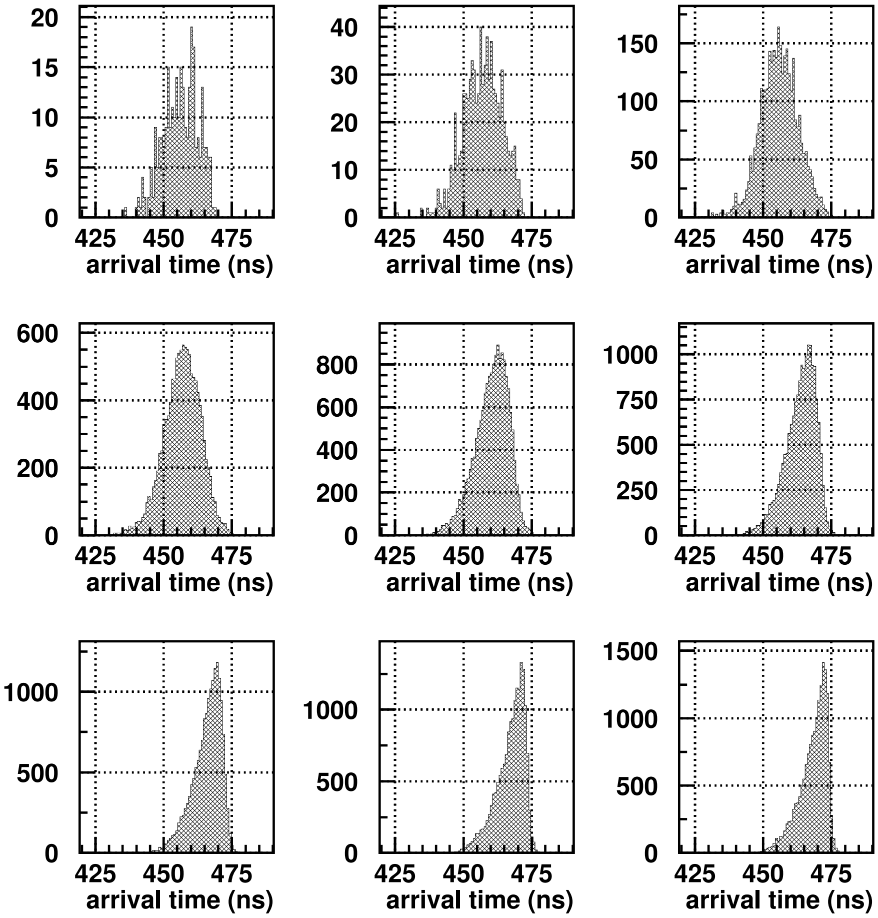


図 17: TDC 分布（上段左から 2.5、2.6、2.7kV、中段左から 2.8、2.9、3.0kV、下段左から 3.1、3.2、3.3kV。）

5.3.4　入射位置依存性

TGC の場所による性能の変化を見積もる。

5.3.5　入射粒子頻度依存性

TGC に入射する粒子の頻度が増えていくと、ワイヤーのまわりに電荷がたまり易く、その空間電荷の寄与のためワイヤー近傍の電場が弱められると考えられる。このため、TGC のゲイン（チャージ量）が小さくなる（と同時に信号到着時間も遅くなる）心配があり、その入射粒子頻度依存性を知ることは重要である。

そこで、TGC に入射するビームの入射粒子頻度（Rate）を変化させ、そのときに TGC のアナログ信号がどのくらい変化するか調べた。ビームの Rate は、両読みのシンチレーションカウンター（Scinti 2）（大きさ $40mm \times 40mm$）の coincidence した数を用いた。ビームの Rate を、$120Hz/cm^2$、$330Hz/cm^2$、$1600Hz/cm^2$ と変化させていったときの、チャージ分布を図 18 に、TDC 分布を図 19 に示す。（ここでは、T 1 のみについて挙げるが、他の TGC に関しても同様の結果が出ている。）

これから、Rate を数 Hz/cm^2 まで変化させても、チャージ分布、TDC 分布ともほとんど変わらない（もちろん検出効率も変化しない）ことが分かる。本番のアトラスにおいて TGC の領域での Rate は、大きく見積もっても数 Hz/cm^2 と考えられているので、この結果から考えると TGC は本番でも確実に動作することが分かる。

5.3.6　入射角度依存性

TGC はその電場構造から（図参照）、ワイヤーとワイヤーのちょうど真中を粒子が通った場合に、その信号到着時間が一番遅くなる。このため、TGC に入射する粒子の入射角度が垂直から傾けば傾く程、上に言ったようなワイヤー間の電場が弱いところを通ることが少なくなり、信号到着時間も早くなる。こうして、入射角度に比例して、信号到着時間（TDC）の分布の幅が狭くなることが予想される。

そこで、入射角度を 0°、16°、30°、45° と変化させたときに、TDC 分布がどのように変化するかを調べた。（入射角度は、ワイヤーの垂線とビーム（Z 軸）のなす角度である。）それが、図 20 である。（ここでは、D 1 についてのみ挙げる。）

これから、確かに入射角度に比例して、信号到着時間（TDC）の分布の幅が狭くなっていることが見受けられる。実際のアトラスにおいて、衝突点から生成された粒子は、TGC 上で角度がついて入射される。この結果から、TGC の TDC 分布は本番でも充分 25ns の時間幅に入ることが予想される。

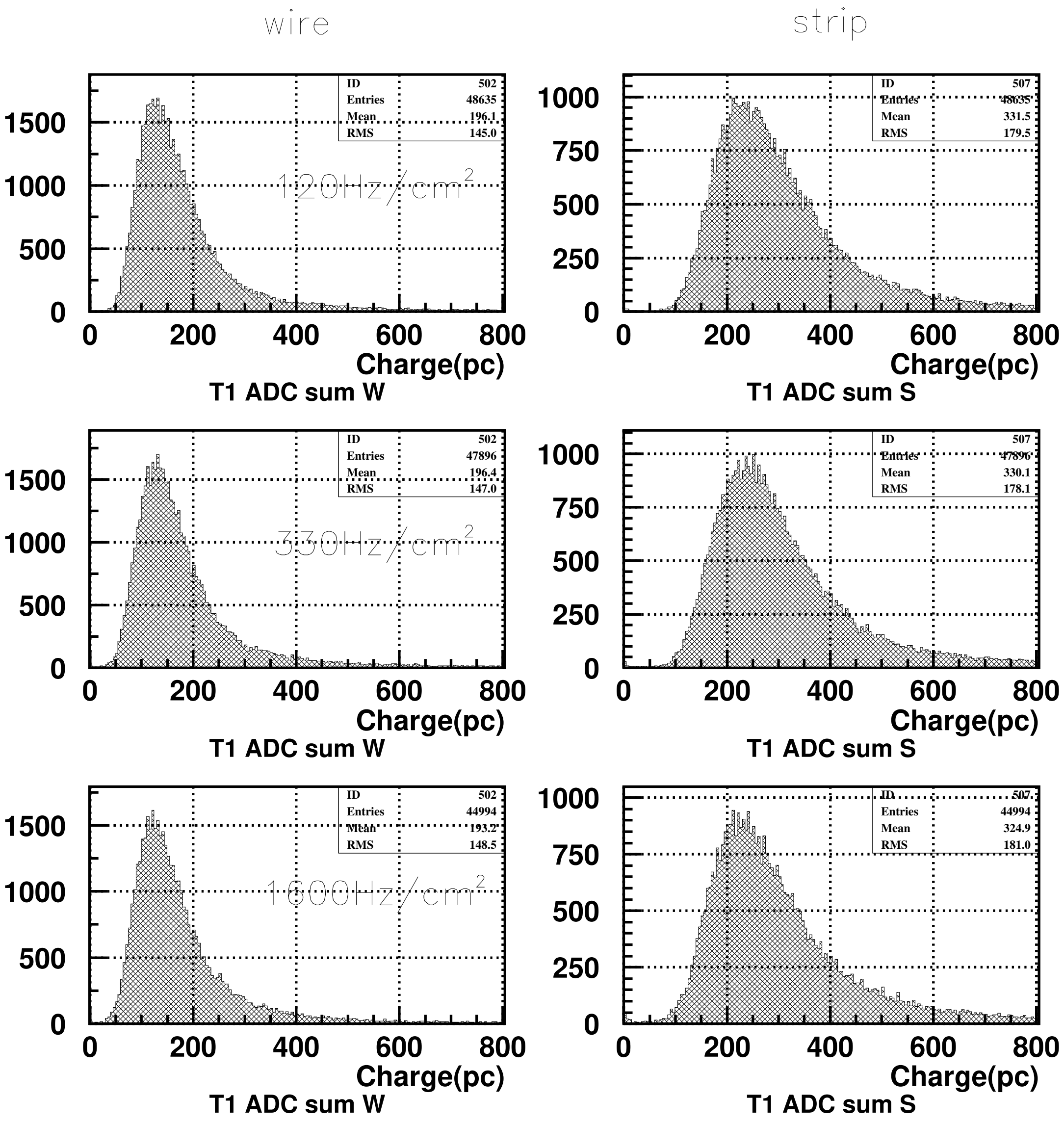


図 18: 入射粒子頻度依存性（ワイヤー（左）とストリップ（右）のチャージ分布）（上から順に、$120Hz/cm^2$、$330Hz/cm^2$、$1600Hz/cm^2$。）

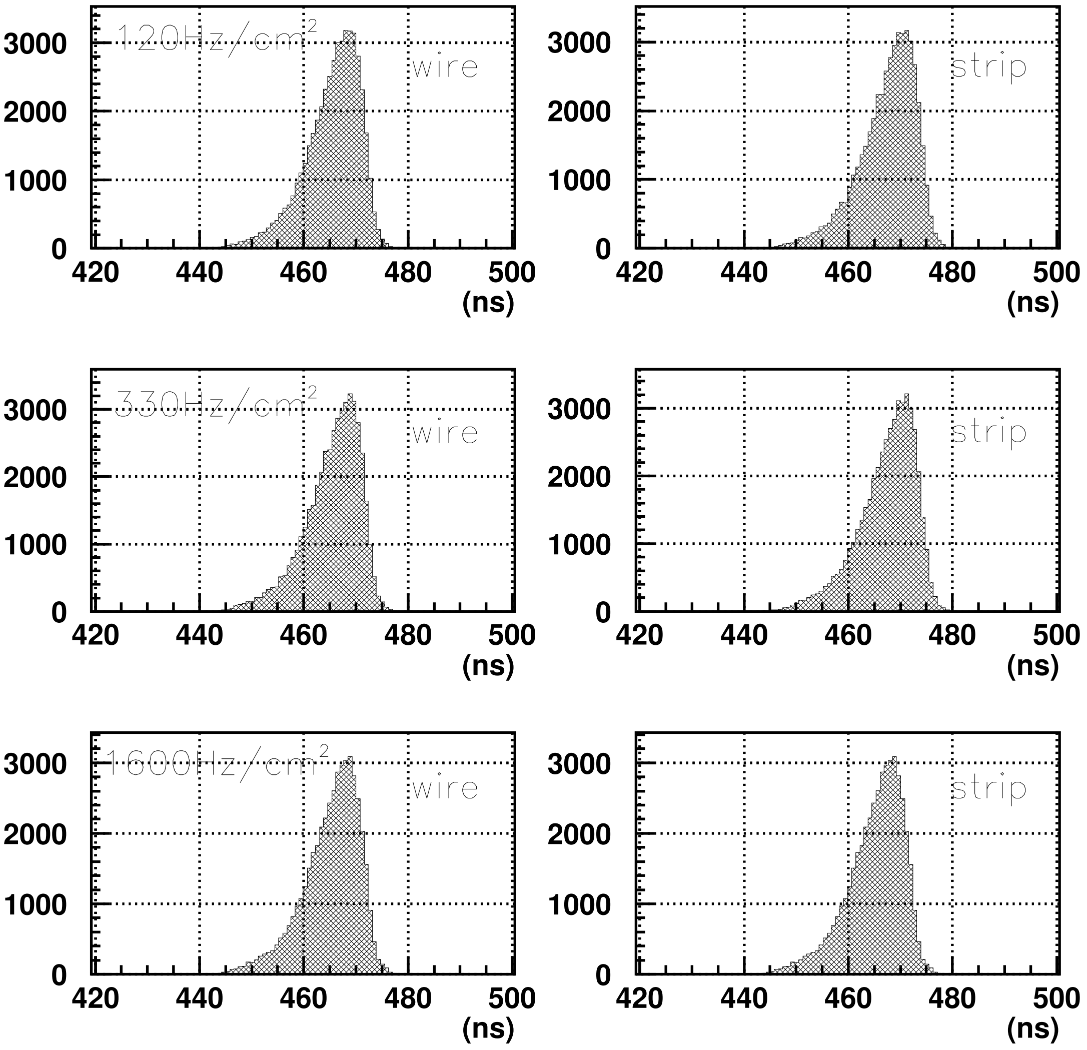


図 19: 入射粒子頻度依存性（ワイヤー（左）とストリップ（右）のTDC分布）（上から順に、$120Hz/cm^2$、$330Hz/cm^2$、$1600Hz/cm^2$。）

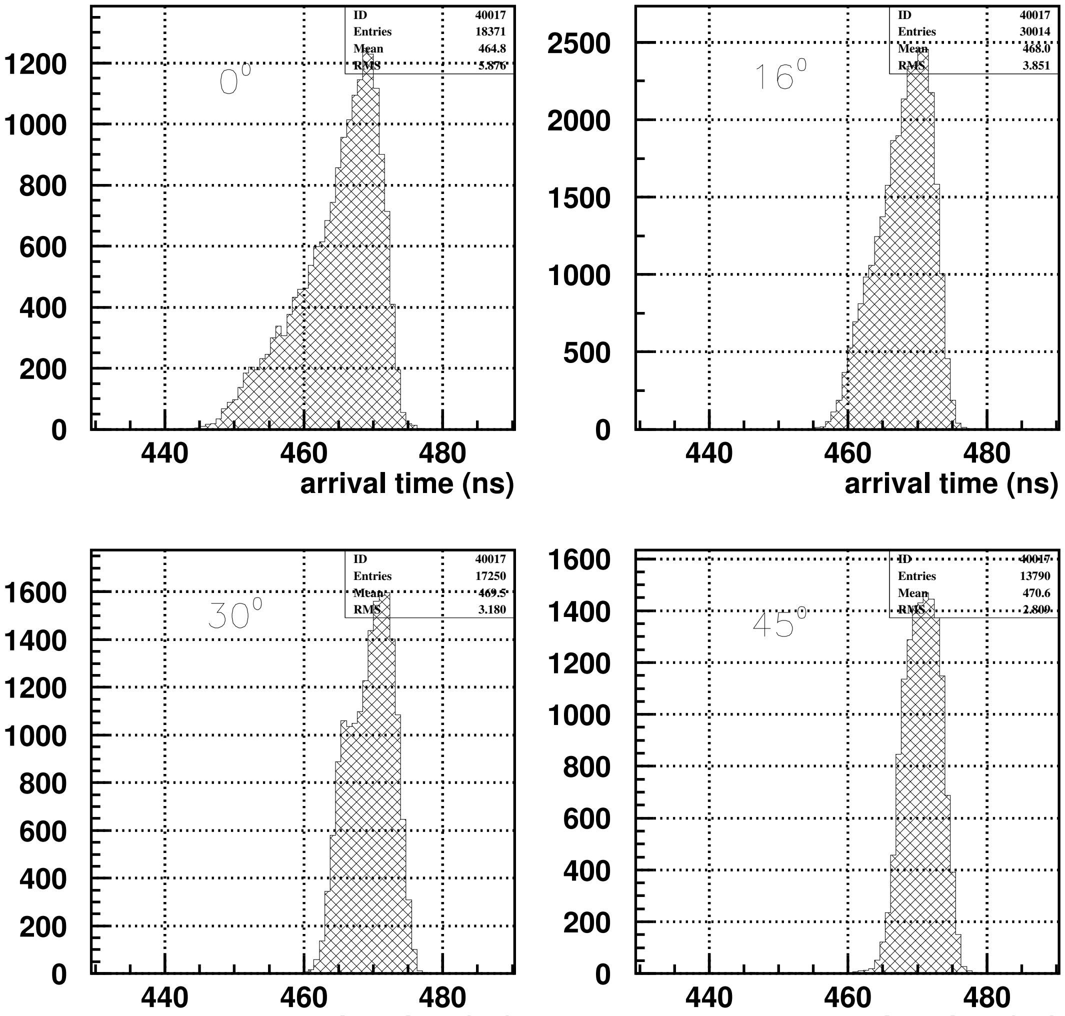

ID 40017
Entries 18371
Mean 464.8
RMS 5.876
0°
ID 40017
Entries 30014
Mean 468.0
RMS 3.851
16°
ID 40017
Entries 17250
Mean 469.5
RMS 3.180
30°
ID 40017
Entries 13790
Mean 470.6
RMS 2.800
45°
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
500
1500
2000
2500
440
460
480
arrival time (ns)

図 20: 入射角度依存性

5.3.7 内圧依存性

TGCの内部の圧力を変化させると、一般的にはゲイン（ガス増幅率）は次のDiethornの式に従う。（借りにTGCを同心円筒型比例計数管で近似する。）

$$\ln M = \frac{V}{\ln(b/a)} \cdot \frac{\ln 2}{\Delta V} \left[\ln \frac{V}{pa \ln(b/a)} - \ln K \right] \tag{21}$$

ここで、M、V、a、b、pは、それぞれガス増幅率、印加電圧、陽極半径、陰極半径、ガス圧力である。

しかし、TGCにおいてそのガス圧力はcmAq（0.001atm）のオーダーでしか変動しないので、この式からくる圧力によるゲインの変化は無視出来るほど小さい。ここで考えるべきTGCの内圧依存性は、内圧の変化にともなってTGCの陽極 - 陰極間の間隔（Gap）が変化することの影響をみることである。実際のアトラス検出器において、TGCのガス配管は10モジュール（doublet、triplet）を数珠繋ぎで繋げることになると考えられる。アトラス検出器は地下に設置され、またその高さは22mもあるので、そのガス配管は非常に長くなる。こうしたことから、TGCでの圧力損失、配管内での圧力損失は無視のできない大きさになる。我々が試作したTGCでの圧力損失は（地下4階から地上までの配管の圧力損失を含む）、流量が100ml/minだとして約10mAqと測定された。このように考えると、それぞれにかかる内圧はTGCの耐圧[18]に近い値まで上がると予想される。このようにTGCには60mmAqまでの内圧がかかることが予想され、そのときに動作が変化するかを知ることは重要なことである。

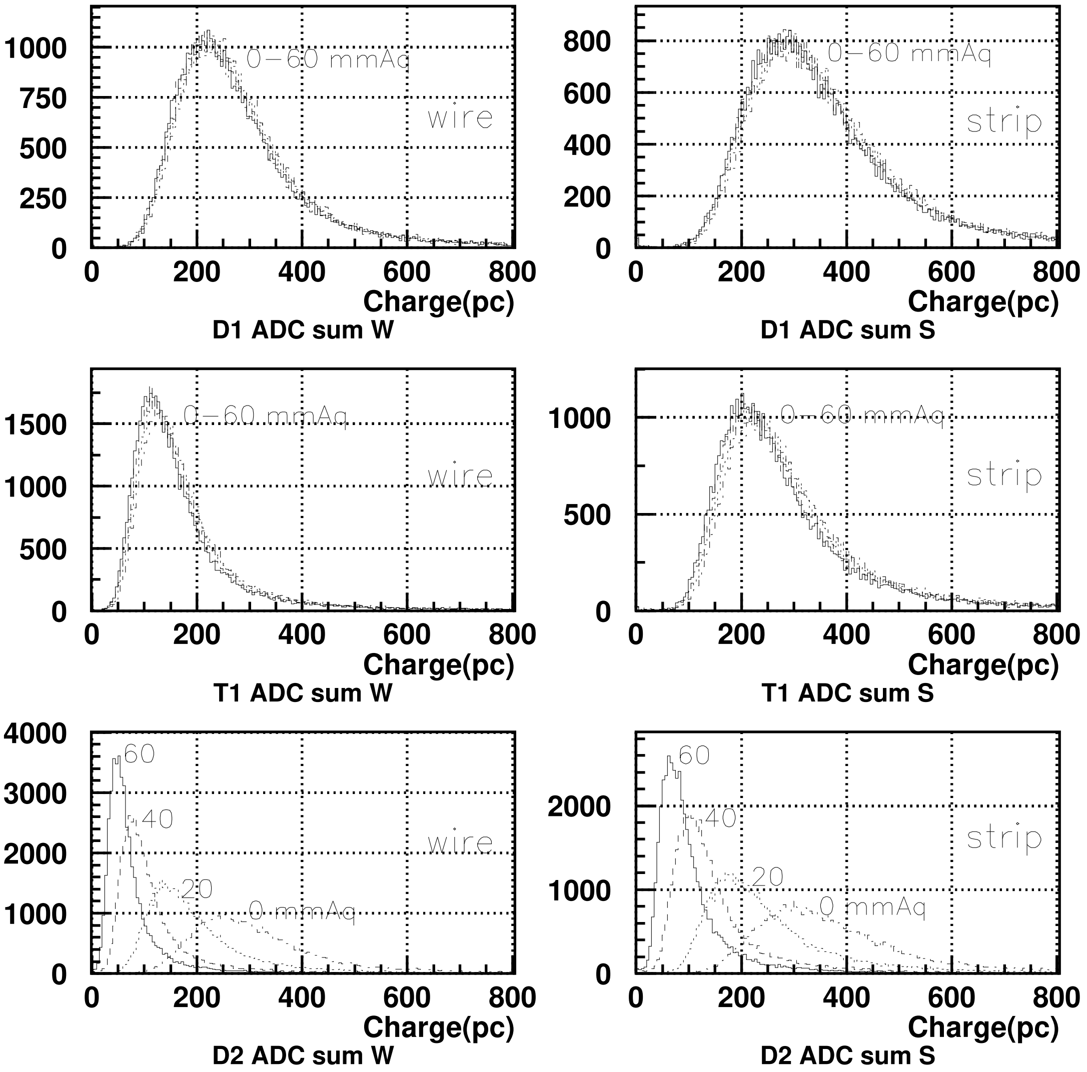
そこで、ワイヤーサポートやボタン型サポートがなく、一番膨らみやすいと思われる場所（ワイヤーサポート間の中央で、かつボタン型サポート間の中央でもある場所（図参照））にビームを当て、内圧を変化させた。内圧を0、20、40、60mmAqと変化させたときに、TGCのチャージ分布がどのように変化するかを示したものが図21である。ここで、前述のようにボタン型サポートの数がTGCの種類によって異なり、Ｄ１（Ｔ２、Ｔ３も同様）、Ｔ１、Ｄ２が、各辺それぞれ10個、3個、0個（なし）である。

これから、内圧の変動を考えると、やはりボタン型サポートは必要であることが分かる。（Ｄ２のチャージ分布が、内圧の増加とともに小さくなる。すなわち、Gapが広がっている。）しかし、いまのところ量産においては、ボタン型サポートは各辺10個入れるようにしているが、3個に減らしてもその動作は変わらないとこが分かった。接着不良等によって、ボタン型サポートが剥離する可能性を考えても、各辺5個くらいに減らすことは可能であることが分かる。

TGCの量産をする上で、ボタン型サポートの数を減らすことができれば非常に効率がよい。また、こういった不感領域、放電の原因をつくる領域はなるべく減らすことが望まれるので、至急ボタン型サポートの数を減らすべきである。

---

[18] 以前の耐圧テストでは、60mmAqまでかけることができた。また、TGCの検査での耐圧は60mmAqまで保証している。



D1 ADC sum W

D1 ADC sum S

T1 ADC sum W

T1 ADC sum S

D2 ADC sum W

D2 ADC sum S

図 21: 内圧依存性

5.3.8　カソード面の面抵抗依存性

6 まとめと今後の予定

TGC量産に向けて、その製作工法の確立、量産設備の拡充と材料の選定、試作機の動作検証を行なってきた。それぞれについて、以下にまとめる。

1. 製作工法の確立
   実際にATLAS検出器に搭載されるものと同様の大きさの材料を用いて、試作を行なった。1999年2月までに計3回の試作が行なわれ、大枠の製作工法と、効率化がはかられた。
   1999年5月から行なわれた4回目の試作では、いままでに培われた製作工法の再検討を行ない、安定なTGCを製作するということを目的とした。そこで試作されたTGCが、HV3.1kVで数時間安定に動作したことにより（リークカレントは100nA以下）、その製作工法が正しいことが確認された。
   さらにその正しさを確証するため、また量産設備の拡充のため、実際に本番で使われる材料を用いて、4回に渡り試作を行なった。ここで、製作されたTGCもHV3.1kVで数時間安定に動作し、ここに製作工法が確立された。

2. 量産設備の拡充と材料の選定
   製作工程を大きく5つに分けて、それぞれの工程で独立した量産設備を建設し、流れ作業的な量産を実現することを目指した。製作工法に基づいた治具や、設備を拡充した。カーボン塗装では、自動塗装装置の建設が終了し、その動作もテストされ、1枚あたり15分という塗装時間が実現された。また、ワイヤーの選定では、切れにくく、たるまなく、安価なワイヤーを選定することができた。さらに、はんだの選定では、作業性がよく、接合強度が強くなり、量産の効率が非常に向上した。

3. 試作機の動作検証
   テストビームを用いて、試作されたTGCの動作検証を行なった。それぞれのテスト項目で以下のことが分かった。

   - 印加電圧依存性
     Vth100mVのとき、HV3.1kV以上で検出効率100％を実現出来ることが分かった。また、Vthを50mVまで下げることができれば、HV2.9kVで検出効率100％が実現できることが分かった。
   - 入射位置依存性
     ワイヤーサポート、ボタン型サポート以外の場所では、どこもほぼ検出効率100％が得られた。
   - 入射粒子頻度依存性
     実際のアトラス検出器での最大入射粒子頻度1 kHz/cm^{2}の約2倍である、1.6kHz/cm^2

までテストを行なったが、チャージ分布、信号到着時間分布とも変化は見られなかった。

- 入射角度依存性
  実際のアトラス検出器での最大入射角度以上まで行なった。0°(垂直入射)から角度が増えるに従い、信号到着時間分布の時間幅が小さくなっていくのを確認した。LHCの25nsのバンチクロッシング時間より短い信号到着時間分布のばらつきであることが分かった。
- 内圧依存性
  60mmAqまでの内圧をかけて、その動作がどう変化するか調べた。参考のため、ボタン型サポートの数を減らしたものを製作したところ、現在の各領域10個から１／３の3個に減らしても、その動作は変わらないことを示した。しかし、全くボタン型サポートがないTGCでは、内圧の増加とともに、ゲインが小さくなることが分かり、ボタン型サポートの重要性も確認した。
- カソード面の面抵抗依存性

以上から、その製作工法は確立し、量産設備の拡充がなされ、それに基づいて製作されたTGCの動作が条件を満たすことが分かった。こうして、2000年9月より開始された量産によって製作されるTGCの動作は、間違いのないものであることを保証することができた。

また、今後の課題としては、

1. ボタン型サポートの検討
   上記の結果から現在のボタン型サポートの数は多過ぎることが分かったので、(量産の効率を考えても)ボタン型サポートの数を減らすことを検討する。
2. 読みだし等の製作の効率化
   TGC単体およびモジュールまでは効率もよく、精度の高いものを製作することができるようになった。しかし、アンプ取り付けのためのボード取り付け、シルード取り付け等の製作の経験が浅く、効率化がはかられていない。こうした経験を重ね、製作法の検討を行なう。
3. 量産設備の拡充
   2001年から2 TGC／日を目指すに当り、さらに量産設備の拡充が必要である。特にモジュール接着室の整備が整っておらず、至急これを整える。さらにまた、HV試験室でのガス系の完成、HVシステムの立ち挙げを行なう予定である。
4. ビームテストの解析とシュミレーション
   TGCのビームテストでは、その動作が検証された。さらに、行なうべき解析として

は、TGC の信号伝搬速度を求めること、精密な入射位置依存性を求めることである。ここで求めた結果は、シュミレーションと比較する必要があり、その動作の正しさを評価する。

が挙げられる。さらに、並行して神戸大学での検査ステーションの立ち上げを行なわなければならない。

図目次

1 TGCの構造（断面図） 8
2 TGCの構造（平面図） 9
3 ワイヤーテスト 22
4 TGCのHitしたCH（上：ワイヤー、下：ストリップ） 37
5 TGC wire方向のTDC分布（横軸はns）（左上：D１、右上：D２、左中：T１、右中：T２、左下：T３） 38
6 TGC strip方向のTDC分布（横軸はns）（左上：D１、右上：D２、左下：T１、左下：T３） 39
7 TGCの到着時間分布（time gate内に入ったもののみをヒットとする。） 40
8 Time gate(50ns)の決定。（time gateを動かしたときに検出効率が一番高くなるところを選ぶ。ここで、435nsから485nsのtime gateに決定した。）（上：ワイヤー、下：ストリップ） 41
9 TGCの検出電荷量分布を非対称ガウス分布でフィットした 42
10 TGCの検出電荷量分布（wireの方がstripに比べて検出電荷量が小さい） 44
11 doubletとwireの等価回路 45
12 TGCの等価回路（１ワイヤーグループ、１ストリップについて） 46
13 HV dependent（Vth=50mV）（上：ワイヤー、下：ストリップ） 48
14 HV dependent（上図：Vth=75mV、下図：Vth=100mV） 49
15 チャージ分布（上段左から2.5、2.6、2.7kV、中段左から2.8、2.9、3.0kV、下段左から3.1、3.2、3.3kV。） 50
16 チャージ分布のHV dependent 51
17 TDC分布（上段左から2.5、2.6、2.7kV、中段左から2.8、2.9、3.0kV、下段左から3.1、3.2、3.3kV。） 52
18 入射粒子頻度依存性（ワイヤー（左）とストリップ（右）のチャージ分布）（上から順に、$120Hz/cm^2$、$330Hz/cm^2$、$1600Hz/cm^2$。） 54
19 入射粒子頻度依存性（ワイヤー（左）とストリップ（右）のTDC分布）（上から順に、$120Hz/cm^2$、$330Hz/cm^2$、$1600Hz/cm^2$。） 55
20 入射角度依存性 56
21 内圧依存性 58

表目次

1 LHCの加速器の主要パラメータ 1

2 エンドキャップ部におけるバックグラウンドレート $(1.44 < |\eta| < 2.3)$ . . . 6

3 TGCのパラメータ 9

4 カーボン塗料の成分 25

5 シンチレーションカウンターのサイズ（単位はmm） 33

参考文献

[1] *ATLAS Letter of Intent for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN*, CERN/LHCC/92-4, LHCC/I2(1992).

[2] *ATLAS Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN*, CERN/LHCC/94-43, LHCC/P2(1994).

[3] *ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE, TECHNICAL DESIGN REPORT , VOLUME 1*, CERN/LHCC/99-14 ATLAS TDR 14(25 May 1999)

[4] 田中秀治、「大型陽子・陽子衝突実験に用いるための Thin Gap Chamber の性能評価」、修士学位論文、神戸大学、1994 年 3 月

[5] 三宅正明、「ミューオントリガーチェンバーの動作特性試験」、修士学位論文、東京大学、1996 年 3 月

[6] 吉田光宏、「ミューオントリガーチェンバーの信号特性の研究とフロントエンドモノリシック IC の開発」、修士学位論文、東京大学、1997 年 3 月

[7] 深津 吉聡、「ATLAS 実験ミューオントリガー用 Thin Gap Chamber の動作原理の研究」、修士学位論文、東京大学、1998 年 3 月

[8] 細田隆志、「アトラス・ミュー粒子検出用トリガーチェンバーの研究」、修士学位論文、信州大学、1998 年 3 月

[9] 津野総司、「ATLAS 実験ミューオントリガー検出器のバックグラウンド放射線に対する動作研究」、修士学位論文、東京大学、1999 年 3 月

[10] 鈴木修、「ATLAS ミューオントリガー用大型 TGC 制作と検査システム」、修士学位論文、神戸大学、1999 年 3 月

[11] 林健一、「ATLAS 実験ミューオントリガー用大型 Thin Gap Chamber 検査システムの開発」、修士学位論文、神戸大学、1999 年 3 月

[12] 宮島明里、「ATLAS 実験用 Thin Gap Chamber の材質に関する動作の検証」、修士学位論文、信州大学、2000 年 3 月

[13] 塚原知宏、「ATLAS ミューオントリガー用大型 TGC 検査ステーションの構築と性能評価」、修士学位論文、信州大学、2000 年 3 月

[14] K. クラインクネヒト、「粒子線検出器」、培風館.

[15] Y.Arai et al., *Timing Optimization of Thin Gap Chambers for the use in the ATLAS Muon Endcap Trigger*, KEK Preprint 95-1

[16] S.Majewski,G.Charpak,A.Breskin,and G.Mikenberg *A THIN MULTIWIRE CHAMBER OPERATING IN THE HIGH MULTIPLICATION MODE* Nucl. Instr. and Meth. 217(1983)265-271

[17] Israel OPAL Collaboration *A NEW HIGH GAIN THIN GAP DETECTOR FOR THE OPAL HADRON CALORIMETER* Nucl. Instr. and Meth. 252(1986)511-516

[18] H. Fukui et al. *Studies on ageing effects and rate dependence on Thin Gap Chambers* Nucl. Instr. and Meth. A419(1998)497-502

[19] 大木正路、「高電圧工学」、槙書店

[20] 副島啓治、柴田精三、今清水敏郎、「塗装実務読本」、日刊工業新聞社

謝辞

本研究を行なうにあたり、適切な御指導並びに御助言を与えて下さいました指導教官である指導教官である川本辰男助教授に深く感謝致します。また、様々な研究の指針を与えて下さり、研究活動を支えて下さったKEKの岩崎博行助教授、近藤敬比古教授、佐々木修助教授、及び東京大学素粒子物理国際研究センターの小林富雄教授、神戸大学の藏重久弥助教授、野崎光昭教授、本間康浩助教授、信州大学の竹下徹助教授、長谷川庸司助手に感謝致します。

そして、多くの時間を過ごしたKEKでの研究活動において、親身に指導し、多くの知識、経験を与えて下さったKEKの田中秀治助手と山内一夫氏(現在、島津製作所 勤務)、神戸大学の石井恒次助手、東京大学素粒子物理国際研究センターの石野雅也氏には、心から感謝し御礼を申し上げます。

さらに、他では学び得ない貴重な知識と経験を与えて下さった宇宙線研の横山千秋氏、林栄精器株式会社の坂井和彦氏の御協力に感謝致します。

最後に、共に研究活動を進めてきながら、惜しみない助力と助言を与えてくれ、励ましてくれた東京大学素粒子物理国際研究センターの南條創氏、香取勇一氏、中村佳央氏、信州大学の宮島明里氏(現在、東京工業大学)、大下英敏氏、神戸大学の鈴木修氏、中畝祐輔氏には、感謝の言葉もつきません。本当にありがとうございました。