

修士学位論文

TGC 量産における
検査システムとその評価

信州大学工学系研究科物質基礎科学専攻

00SA202K

大下英敏

目次

第1章	LHC 計画・ATLAS 実験	
1 - 1	LHC 計画	... 2
1 - 2	ATLAS 実験で期待される物理	... 5
1 - 3	ATLAS 検出器	... 6
1 - 4	ミュオンスペクトロメータ	... 8
第2章	TGC の構造・動作原理	
2 - 1	序論	... 1 1
2 - 2	検出器と動作領域	... 1 2
2 - 3	TGC の構造	... 2 0
2 - 4	TGC の出力パルスの形成	... 2 5
2 - 5	TGC の外観	... 3 0
第3章	TGC の量産	
3 - 1	TGC 量産の概要	... 3 2
3 - 2	マスキング(接着位置決め)・カーボン塗布工程	... 3 8
3 - 3	パーツ接着工程	... 4 5
3 - 4	ワイヤー巻き工程	... 4 7
3 - 5	閉じ前 HV 試験・TGC 閉じ・ガスシール工程	... 4 9
3 - 6	シングレット動作確認工程	... 5 8
3 - 7	D/T(ダブルット/トリプレット)接着工程	... 6 0
3 - 8	読出しボード・CO ₂ チャンネル作成工程	... 6 3
第4章	パルステストシステムによる量産品の評価	
4 - 1	シミュレーション	... 7 3
4 - 2	カーボン塗布方法の違いに対する評価	... 8 1
4 - 3	カーボン面抵抗値に対する評価	... 8 9
4 - 4	平面性の歪みに対する評価	... 9 7
4 - 5	ワイヤー断線に対する評価	... 1 0 0
第5章	まとめ	
5 - 1	まとめ・今後予定	... 1 0 1
	参考文献	... 1 0 2
	謝辞	... 1 0 3
	表一覧	... 1 0 5
	図一覧	... 1 0 6

第 1 章 LHC 計画・ATLAS 実験

1 - 1 LHC 計画

1 - 1 - 1 加速器について

素粒子の性質は、高エネルギー粒子同士を衝突させ、その衝突の生成 2 次粒子の反応パターンを検出することで得られる。相対論において $E = mc^2$ (m : 粒子の質量、 c : 光速) はエネルギーが質量に転移することを示しており、より質量の重い新粒子探索のためには、より高いエネルギーでの衝突実験が必要になる。2006 年の稼動開始を目指して、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)の建設が始まっている。LHC 加速器の最大の特徴は重心系で 14TeV という高エネルギー衝突と粒子の衝突反応事象数を示すパラメータであるルミノシティが高いことである。表 1-1 に LHC 加速器の主要パラメータを示した。

主リング長	26658.87 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 μ m
鉛イオンビームエネルギー	574 TeV	ビーム衝突角度	200 μ rad
ビーム寿命	22 時間	バンチ内陽子数	10^{11} 個
ルミノシティ	10^{34} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$		

表 1 - 1 LHC 加速器の主要パラメータ

1 - 1 - 2 高エネルギーを実現するために

高エネルギーを実現できる加速器の形状は、加速器が固定標的型か衝突型で大きな差が生じる。これは、それぞれの重心系でのエネルギーを比較した場合、明らかである。

固定標的型と衝突型を比較した場合

二体衝突の重心エネルギー E^2 は以下の式で与えられる。

$$E^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 c + \mathbf{p}_2 c)^2$$

ここで、衝突型の重心エネルギーは、 $\mathbf{p}_1 = -\mathbf{p}_2$ であるので $E = (E_1 + E_2)$ である。

固定標的型の場合、 $\mathbf{p}_2 = 0$ であり、 $E_1 \gg m_1 c^2$ 、 $m_2 c^2$ とすると、その重心エネルギーは

$$E = \{(E_1 + m_2 c^2)^2 - (\mathbf{p}_1 c)^2\}^{1/2} \approx (2 E_1 m_2 c^2)^{1/2}$$

となる。この場合、重心系のエネルギーはビームエネルギーの平方根でしか増えないので、衝突型に比べて効率が悪い。したがって、より高いエネルギーでの衝突実験を実現するためには衝突型の方がふさわしいことがわかる。

電子衝突型と陽子衝突型を比較した場合

電子衝突型の場合、衝突粒子である電子自体が素粒子であるので重心系の全エネルギーが有効に使われる。一方、陽子はクォークの複合体であるので、衝突に寄与するエネルギーは反応に関与する各 1 個のクォーク対のもつエネルギーだけである。したがって、実効エネルギーとしては重心系の全エネルギーの 10% ~ 20% 程度であることが知られている。

さらに、内部構造をもつために衝突時に多くの素粒子を放出し、その結果、検出したい物理の素過程に対してバックグラウンドを増加させることになる。その一方で、円形電子加速器においてはシンクロトロン放射による損失が問題となる。シンクロトロン放射とは、荷電粒子が磁場によって曲げられると光を放出してエネルギーを損失する現象のことである。シンクロトロン放射による 1 周当りのエネルギー損失 ΔE は以下の式で与えられ、

$$\Delta E = \frac{4\pi\hbar c \beta^3 \gamma^4}{3R}$$

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} = \frac{E}{mc^2}$$

エネルギーの増大とともにその損失量はエネルギー E の 4 乗で増加していく。ここで、 m は粒子の質量である。したがって、シンクロトロン放射によるエネルギーの損失は電子の方が陽子に比べて $(m_p/m_e)^4 \sim 10^{13}$ も大きい。このことが電子衝突型が陽子衝突型に比べて、高エネルギーを実現できない理由である。したがって、LHC は 14TeV という高エネルギーを実現するために陽子衝突型の形状となっている。

1 - 1 - 3 高ルミノシティを実現するために

ルミノシティとは衝突によって生成する粒子の反応事象数を示すパラメータであり、希少反応の場合、統計的に十分な事象数を集めるために高ルミノシティである必要がある。ルミノシティ L (単位は $1 / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) は反応事象数と反応断面積の関係で定義されている。

$$N (\text{反応事象数} / \text{sec}) = L \times$$

ここで、 σ は反応断面積 (単位は cm^2) であり、反応各種によって決定される。一方、ルミノシティ L は人為的に変更することのできるものであり、高ルミノシティの実現のためには L を変更する。より具体的にはルミノシティ L は以下のように与えられる。

$$L = f \times \frac{1}{A}$$

ここで、 f は粒子の回転周波数であり、 A は衝突点での面積に相当する。したがって、高ルミノシティを達成するために、LHC では衝突間隔が 25ns という極めて高頻度に衝突を起こして、ルミノシティを稼いでいる。他にも衝突点での面積を小さくするために、ビーム束の大きさを小さくして粒子密度を高くしている。

1 - 2 ATLAS 実験で期待される物理

ATLAS 実験の目的の 1 つは Higgs 粒子の探索である。Higgs 粒子は標準模型の基本粒子であり、電弱相互作用での自発的対称性の破れのメカニズムを理解するために必要である。Higgs 粒子は標準理論においてその存在が予言されており、さらに、真空の安定条件より、その質量は $\sim 1\text{TeV}$ 以下であることが期待されている。標準理論を考えた場合、ATLAS 検出器の Higgs 粒子発見の能力を図 1 - 1 に示す。図 1 - 1 より 100 fb^{-1} の積算ルミノシティがあれば、Higgs 粒子を 5 以上の確からしさを発見が可能であることがわかる。これは高ルミノシティで 1 年間 LHC を稼動した場合に相当する。

ところで、Higgs 粒子からの崩壊 2 次粒子を測定する場合、最終的にレプトンに崩壊する反応を検出する。これはレプトンのうち、物質の透過力の強いミュオンでトリガーをかけることで効率の良い測定が可能になるからである。

Higgs 粒子質量に応じて検出しやすい崩壊モードとして、

H				($80 < m_h < 120\text{GeV}$)
H	ZZ*	4		($120 < m_h < 180\text{GeV}$)
H	ZZ	4	, 2 \pm 2	($180 < m_h < 800\text{GeV}$)
H	WW, ZZ	\pm	2jets, 2 \pm 2jets	($m_h \sim 1\text{TeV}$)

があげられる。このために、Higgs 粒子探索においてレプトンに対する高精度測定が重要になる。ATLAS 検出器では最外部にミュオンスペクトロメータを配置しており、ミュオンでトリガーをかけることにより、LHC の膨大なバックグラウンドの中から必要な Higgs 生成崩壊イベントを選別することができる。

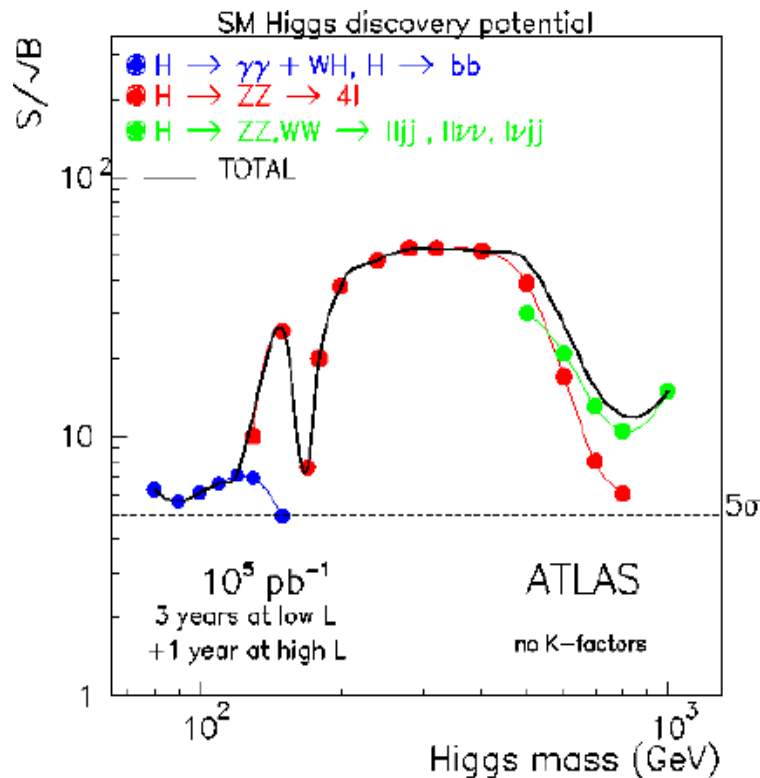


図 1 - 1 Higgs 粒子発見能力

1 - 3 ATLAS 検出器

LHC の衝突点の 1 つに設置される ATLAS 検出器は内側から図 1 - 2 のような配置で複数の測定器が設置され、粒子と検出器の物質との相互作用を測定して粒子の分別ができるようになっている。

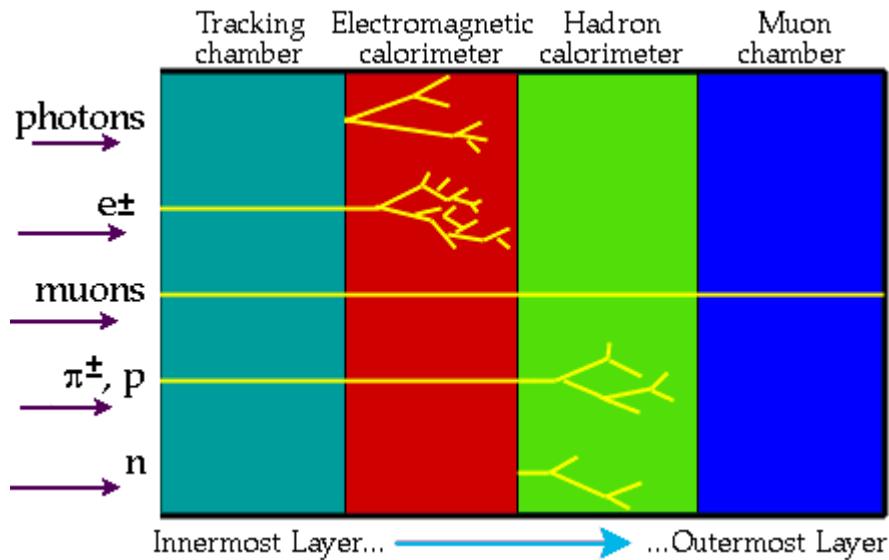


図 1 - 2 粒子の同定の仕方

衝突点に最も近い所にトラッキングチェンバーとして、ピクセル検出器、シリコンストリップ検出器(SCT)の半導体検出器と透過遷移ストロー検出器(TRT)をビーム軸に対して同心円状に設置する。ここでは荷電粒子である電子・陽電子・陽子・ π^\pm ・ミューオンが軌跡を残すので、それらの運動量測定をおこなう。また、ストロー検出器で電子・光子選別をおこなう。電磁カロリメータとしては、液体アルゴンカロリメータを設置し、電磁相互作用を起こしてカスケードを起こす粒子とそうでない粒子とに分別する。カスケードをおこす粒子についてはエネルギー測定をおこなう。電磁相互作用をしてカスケードを起こす粒子は光子・電子・陽電子である。他の π^\pm ・陽子・ミューオンなどはカスケードを起こさず、飛跡を残す。そして、ハドロンカロリメータとして、バレル部分にタイル型カロリメータ、エンドキャップ部分には液体アルゴンカロリメータを設置する。そして、強い相互作用をする粒子とそうでない粒子の分別をする。強い相互作用をする粒子は、 π^\pm ・陽子・中性子などである。ミューオンは透過力の強い荷電粒子であるので、最外部のミューオンチェンバーまでカスケードを起こさず、飛跡を残す。ミューオン検出器としてはガスチェンバーを設置し、ミューオンの運動量測定だけでなく、トリガーシグナルの生成をおこなう。他には内部検出器の外側に超伝導ソレノイド磁石を設置して、荷電粒子を編曲する。また、ミューオンの運動量を測定するために、ハドロンカロリメータの外側には空芯トロイド磁石を設置する

実際の ATLAS 検出器は図 1-3 に示す。

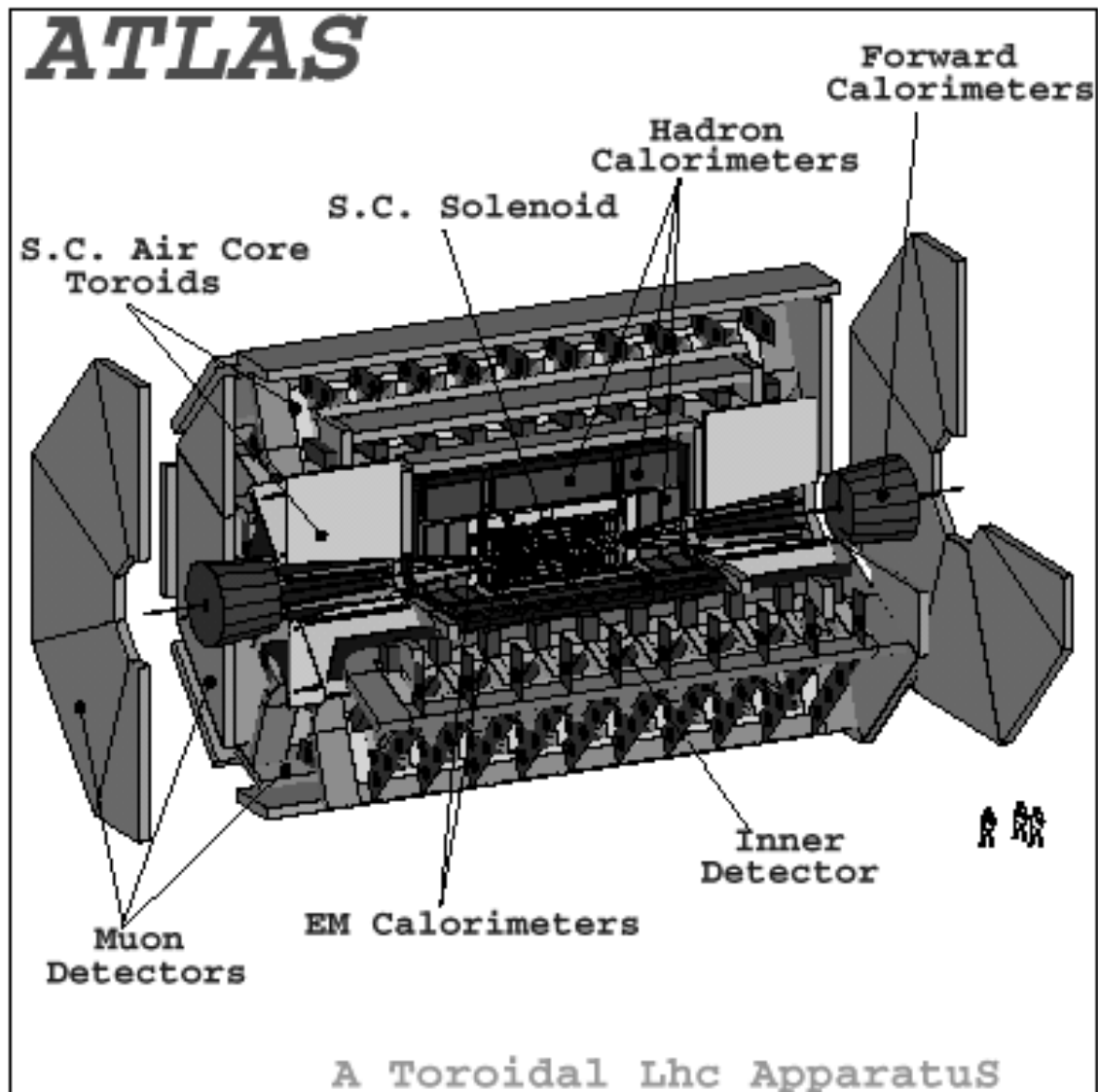


図 1 - 3 アトラス検出器

1 - 4 ミューオンスペクトロメータ

ミューオンスペクトロメータは ATLAS 検出器の最外部に設置し、ミューオンの飛跡を検出することで、その運動量測定とトリガーシグナルを生成する。運動量測定は $|\eta| < 2$ の領域を Monitored Drift Tube(MDT)、 $|\eta| > 2$ の領域を Cathode Strip Chamber(CSC)がおこなう。そして、トリガーシグナルを生成するための検出器としてバレル部分 ($|\eta| < 1.1$) で Resistive Plate Chamber(RPC)、エンドキャップ部分 ($1.05 < |\eta| < 2.40$) で Thin Gap Chamber(TGC)を使用する。以下にミューオンスペクトロメータの外観を図 1 - 4 に示す。

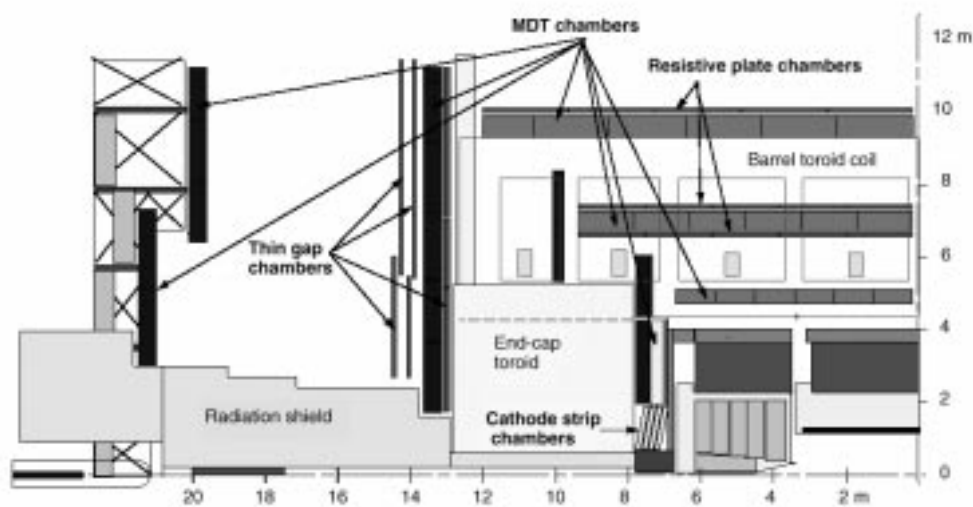


図 1 - 4 ミューオンスペクトロメータ

ラピディティ η は、入射ビームに対する角度 θ をとして $\eta = \ln(\tan(\theta/2))$ で定義されている

1 - 4 - 1 トリガー検出器

トリガー検出器には LHC の高ノイズ環境で動作して、さらに大面積を検出領域としてカバーする必要がある。このため、トリガー検出器である TGC、RPC は優れた高頻度特性、反応時間特性を備えた大型の検出器でなければならない。トリガー検出器として TGC と RPC の役割としては、

衝突間隔(25ns)の同定ができること

通過ミューオンの弁別と荒い精度での測定ができること

である。具体的に高頻度特性についてはともに $\sim 1\text{kHz}/\text{cm}^2$ の環境でも動作することが求められる。そして、TGC は RPC に比べて、高頻度特性に優れているので、入射粒子頻度が大きいエンドキャップ領域に設置する。次に反応時間特性について、TGC は 25ns 以下、RPC は 10ns 以下である。これによって、LHC の衝突間隔(25ns)を同定することが可能である。そして、検出効率について TGC は 99%以上、RPC についても 98.5%以上である。また、Pt(横方向の運動量)測定の精度として $\sim 1\text{cm}$ の位置分解能が求められる。

トリガースキームについて図 1 - 5 に示す。具体的なスキームは横方向の運動量 Pt が 6GeV 以上である low Pt に対する条件として 3 層のステーションの内、外側の TGC2、TGC3 ステーションに設置する 4 層のモジュールに対して、 $3/4$ のヒットがあることを求める。一方、Pt が 20GeV 以上である high Pt に対する条件は low Pt の条件に加えて、さらに残りのステーション TGC 1 に設置する 3 層のモジュールに対して、 $2/3$ (陽極側読出し)または、 $1/2$ (陰極側読出し)のヒットがあることを求める。

そして、これらの性能をもち RPC はバレル部分の 3650m^2 を検出領域として、一方の TGC はエンドキャップ部分の 6200m^2 をカバーする。そして、この面積を全 3968 枚の台型 TGC でまかなう予定である。TGC の量産は日本グループの他に共同研究者であるイスラエルと中国のグループで分担する。そして、日本グループだけでも ~ 1000 台の量産を予定しており、実験開始までにインストールを終了しなければいけない。この時間的制約の他に、1台1台の TGC が上記の性能を持つようなものを量産しなければいけない。それには1台1台の品質を検査するシステムが必要となる。本稿ではこの検査システムの立上げとそれを用いた TGC 量産品の評価をおこなった。

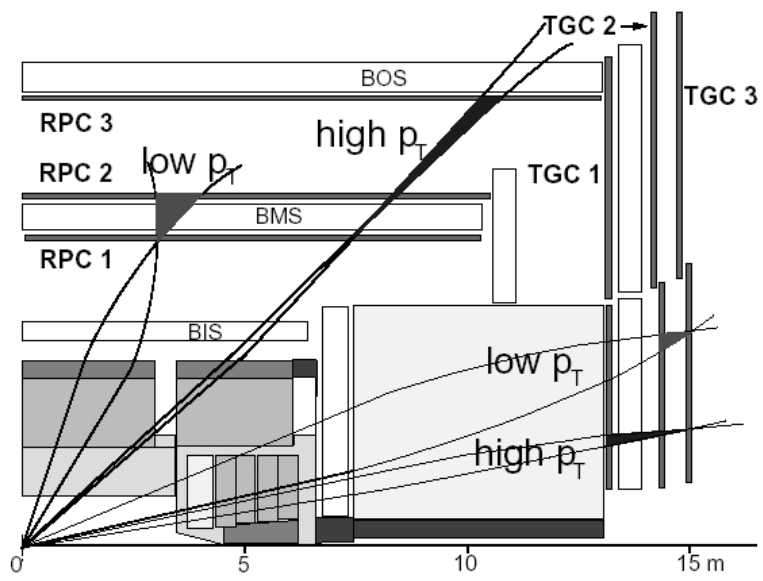


図 1 - 5 トリガースキーム

第 2 章 TGC の構造・動作原理

2 - 1 序論

TGC はガス入り検出器の 1 つである。ガス入り検出器は放射線がガス中を通過するときに起こす電離作用を利用した検出器である。もっとも簡単な構造は空間を隔てて配置された 2 枚の電極から成るイオンチェンバーである。この電極間には電圧を印加して、その間の空間にはガスが充填してある。放射線はこの空間を通過するとき、エネルギーを消費してガス粒子を励起・電離する。この結果、電極間にイオン対が生成する。イオン対は電極間の電場からクーロン力を受けて移動し、電極で収集される。ガス入り検出器はこれらのイオン対を信号情報源として用いる。ところで、ガス入り検出器は電極間で生成したイオン対の読出しの仕方で電流型検出器とパルス型検出器に分別できる。前者は入射放射線により電離生成したイオン対をそのまま電極で収集する。そして高精度の電流計の使用により、電極にイオン対が収集された場合に流れる微弱な電流を検出する。後者は電離生成した電子を高電場領域でガス増幅して収集する。出力シグナルとしてはガス増幅で生成した陽イオン群が陰極に向かって流動するとき、電極に誘起した電荷を読み出す。なお信号情報源になるイオン対は 1 つの入射放射線の透過で生成するので、個々の入射放射線に対してシグナルを検出することが可能である。ATLAS でトリガー検出器の 1 つとして設置する TGC はパルス型検出器である。

2 - 2 検出器と動作領域

2 - 2 - 1 ガス増幅

パルスモードで動作する検出器はガス中で最初に電離生成した自由電子をガス増幅して信号情報源とする。ガス増幅するために、出力パルスの大きさは電流型検出器に比べるとかなり大きい。出力パルスが大きい場合、その波高分布はノイズレベルと明確に分別できるので、検出器の雑音による計数とシグナルによる計数の比である S/N を改善する。さらに、前置増幅器を含むシグナル伝送回路の単純化にも役立つ。一般に検出器の構造は変更できないので、動作モードの変更は印加電圧を変えることや充填ガスを変えることでおこなう。

ガス増幅過程としては、

まず、入射放射線との 1 次電離によって、イオン対が生成される。イオン対は通常、電子と陽イオンのペアである。

生成された 1 次電子は電場から他の中性粒子を電離させるのに十分なエネルギーを電場から受け取る。

エネルギーを受け取り加速した 1 次電子が他の中性粒子を電離させる 2 次電離を起こす。

一方、1 次電離で生成した陽イオンは電子に比べ質量が重いので、容易に加速しない。したがって、通常は 2 次電離を起こさない。

2 次電離で生成された 2 次電子も電場からエネルギーを受け取り、他の中性粒子を電離する。

～ の過程が連続的に起こることによってなだらかにイオン対が生成する。

このように、なだれの電離が起こる空間領域をガス増幅領域といい、電場の閾値は 1 気圧のガスで $\sim 10^6$ (V/m) である。このような電離過程はタウンゼント型電子なだれと呼ばれ、カスケードの形をしている。カスケード形をする理由は 2 次電離のタネになるのが 2 次電子であり、質量の重い陽イオンは電子の流動の間、ほとんど動かないためである。定量的には、電子が陽極に向かって距離 x 動いたときの電子数の増加量はタウンゼントの式に従う。

$$n = N_0 \exp(\alpha x)$$

ここで、 N_0 は最初の電子数、 α はタウンゼント第一電離係数であり、ガス増幅の閾値以下ではゼロである。また、 α は電場とともに増加する。すなわち、 $n = N_0 \exp(\alpha(E))$ であるから、電子なだれ中の電子数は指数関数的に増加することが予測できる。

2 - 2 - 2 パルス検出器の動作モード

次に、パルス検出器の動作モードについて説明する。パルス検出器の動作モードを決定するのは電場の強さである。検出器の幾何条件を変更しない場合、電場を強くするために印加電圧を上げるとそれとともに、ガス増幅領域が大きくなる。パルス検出器の動作領域の違いを印加電圧 - パルス波高の関係として図 2-1 に示す。図 2-1 は 6 つの領域に分別することができる。

それぞれ、

再結合領域

電離領域

比例領域

制限比例領域

ガイガーミュラー領域 (GM 領域)

連続放電領域

と呼ばれる。

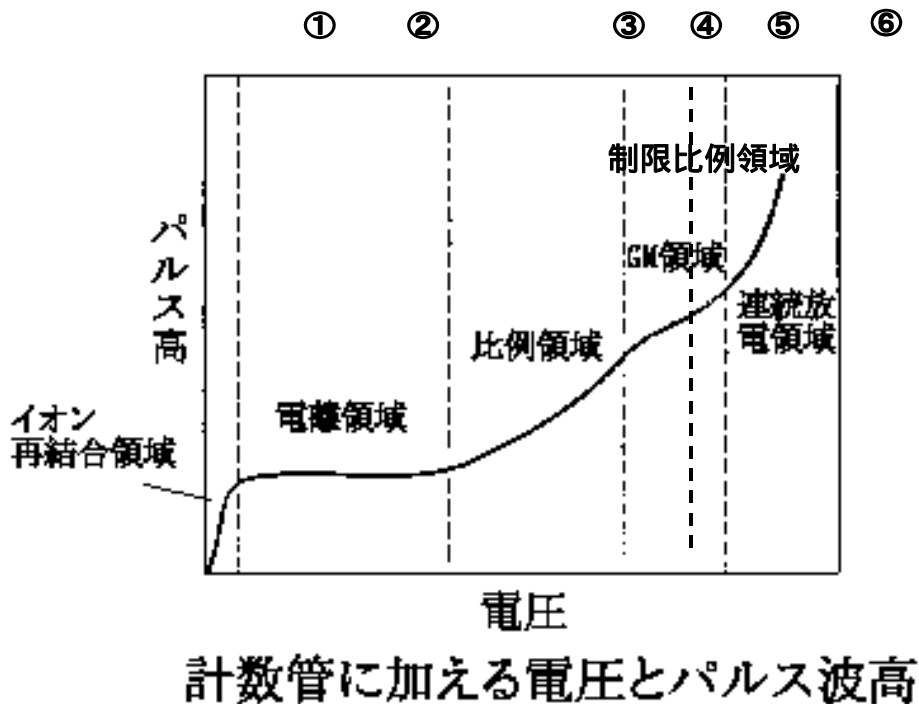


図 2 - 1 印加電圧とパルス波高の関係

、 の領域でガス増幅は起きない。このとき、入射放射線で生成したイオン対は電場に沿って、極板に移動するだけである。 の動作モードでは生成イオン対はガス中性粒子との衝突や再結合、拡散によって電極に収集されずに消滅する。この領域をパルス検出器の動作モードとして用いることはできない。一方、印加電圧を上げると収集電荷量が増加する。これは、途中で消滅するイオン対の数が減っているためである。この比例関係は 1 次電離で生成したすべてのイオン対が電極で収集されるまで続く。 の動作モードは電流型検出器である電離箱の動作モードである。1 次電離で生成したすべてのイオン対が電極で収集されることが特徴である。飽和状態が続く理由は印加電圧を上げて、1 次電子が電場から受け取るエネルギーが増えても、他のガス中性粒子を電離するまでに至っていないからである。印加電圧を上げてガス増幅の閾値を越えると、検出器はパルス型検出器として動作する。

の動作モードでは電極で収集する電荷量は 1 次電離で生成したイオン対数に比例する。ここではタウンゼントの式が成立する。比例モードでの電子なだれの成長の様子を図 2 - 2 に示す。図 2 - 2 より、ガス増幅領域が狭いため、電子なだれの成長は電子が陽極ワイヤーに収集されて終結する。電子なだれは陽極ワイヤーの周囲から限られた範囲に存在し、ガス増幅領域に入射する電子の方向に配位する。 の領域では 2 次電離で生成した陽イオンのために、1 次電子数に対する収集電荷量の線形性がくずれる。制限比例モードでの電子なだれの成長の様子を図 2 - 3 に示す。

この動作モードでは 1 次電子なだれの成長は電子なだれ内部の電場 E_2 が外部電場 E_1 と等しくなるまで続く。 $E_1 = E_2$ の平衡状態が保たれるので、1 次電子なだれの陽極に向かう動きも止まる。そして、1 次電子なだれ前方の電子群と陽極ワイヤーの間で 2 次電子なだれが生成する。2 次電子なだれのタネになるのは 1 次電子なだれ内で生成した紫外線光子である。2 次電子なだれが陽極ワイヤーに達すると、1 次電子なだれを含めてプラズマ状態を生成する。この中の電子は陽極ワイヤーにすばやく収集される。一方で、陽イオンは電子の収集時間内で移動しないと見なされるので、陽極ワイヤーの周りには高密度の陽イオン群が残る。この陽イオン群は密度が高いため、空間電荷としてその存在が無視できず、電極間の電場を著しく歪ませる。このため、後続の電子なだれの成長が阻害され、収集電荷量は 1 次電子数によって増大するが線形性は失う。

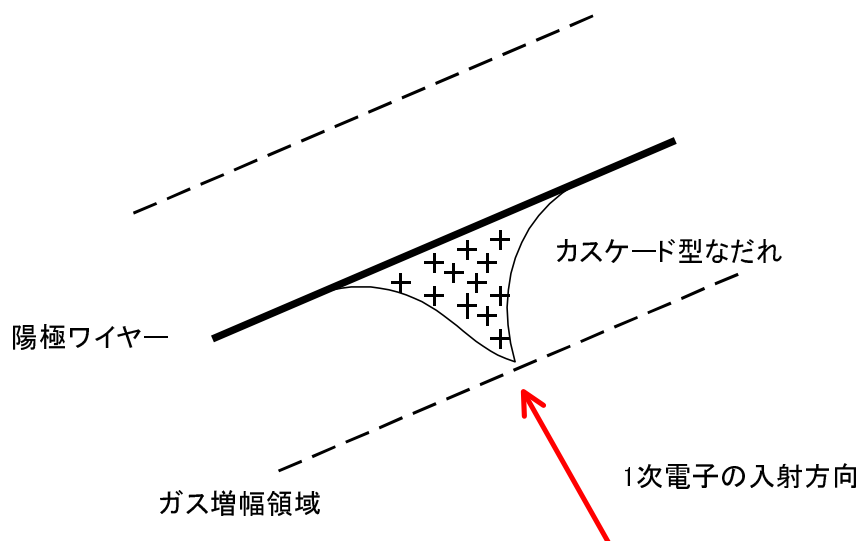


図 2 - 2 比例モード

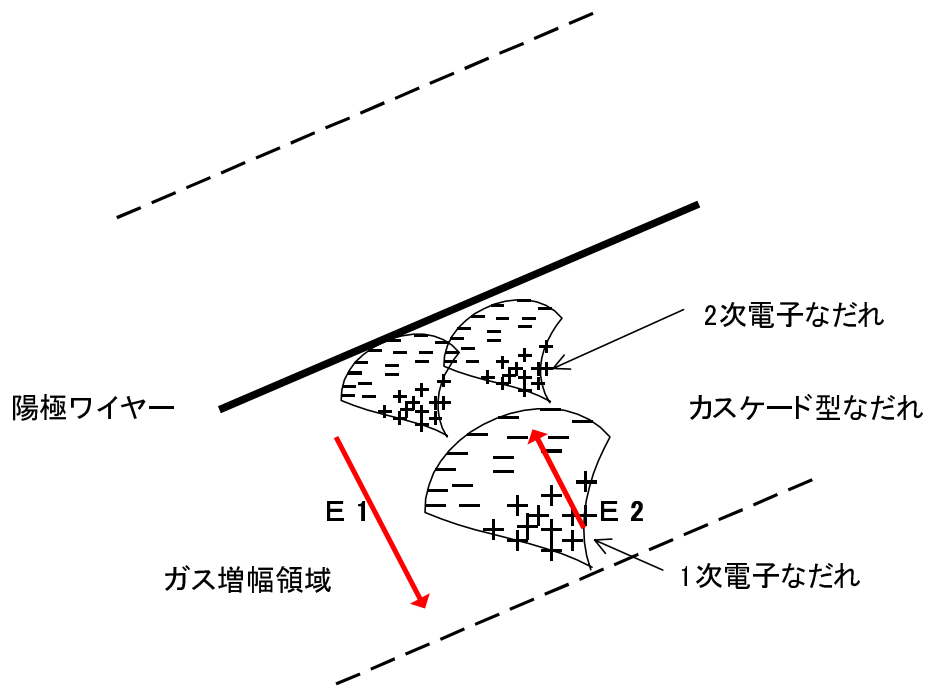


図 2 - 3 制限比例モード

の領域、ガイガーミュラーモードでの電子なだれの成長の様子を図 2 - 4 に示す。1 次電子なだれの成長は の動作モードと同様に外部電場と電子なだれの内部電場が平衡状態に達したときに収束する。この 1 次電子なだれ中には多数の励起粒子が存在し、基底状態に戻るときに紫外線光子を放出する。ガス増幅領域は十分に強い電場で形成されているので、放出した紫外線光子は 1 次電子の生成場所とは別のガス領域で中性粒子を電離することや陰極表面で光電作用を起こして光電子を叩き出すことが可能になる。そして、十分に広いガス増幅領域を持つので、この紫外線光子をタネとするガス増幅が管全体で起こり、ガイガー放電と呼ばれる持続放電状態になる。ガイガー放電は陽極ワイヤー全体を包み込むように広がる。ガイガー放電自体は、一定高密度の空間電荷ができるまで持続する。高密度の空間電荷が電極に電荷を誘導するとき、ガス増幅領域をなくす程の電圧降下が HV 電源に直列に接続した高抵抗で起こり、ガイガー放電の成長を止める。このため、ガイガー放電では常に一定の電荷量を収集し、もはや収集電荷量が 1 次電子数に依存しなくなる。

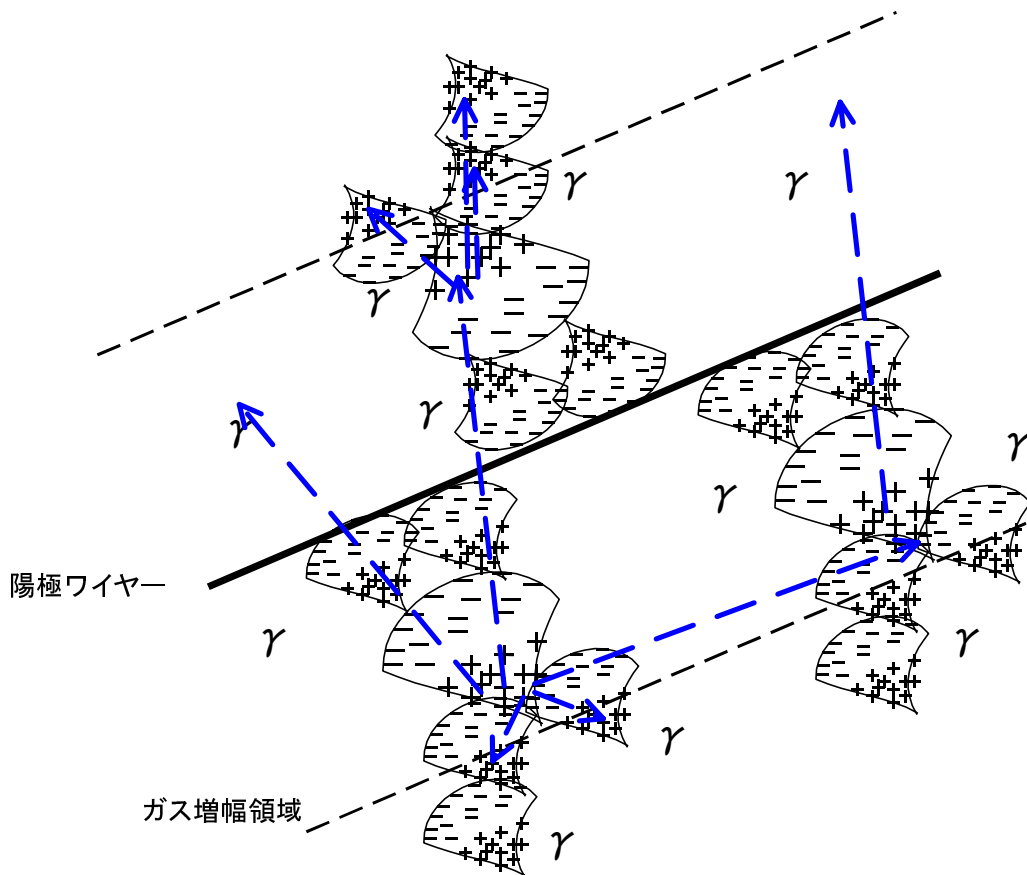


図 2 - 4 GM モード

この他に、 と の間に制限ストリーマモードが存在する。この動作モードは の動作モードを局所的にしたものである。つまり、充填ガスとして紫外線吸収断面積の大きいガスを添加することで、ガイガー放電が管全体に広がるのを阻止する。したがって、2次電子なだれの生成場所も1次電子なだれの近傍になる。制限ストリーマモードでの電子なだれの成長の様子を図2-5に示す。図2-5のように、2次電子なだれは1次電子なだれの前後方向で成長する。これは消滅ガスの作用で2次電子なだれの成長が1次電子の周りに制限され、さらに1次電子なだれ内の電荷分布からその前後で高電場領域ができるからである。このように2次電子なだれが1次電子なだれの前後で成長し、陽極側から陰極側にジグザグに成長する放電をストリーマと呼ぶ。ストリーマの成長で瞬時に陽極と陰極が導通した状態をスパーク放電と呼ぶ。スパーク放電はHV電源に直列に接続した高抵抗で電圧降下が起こることで止まる。ストリーマの成長は2次電子なだれから放出する紫外線光子のエネルギーが下がった場合に電離相互作用を起こさなくなり収束する。

また、制限ストリーマモードの動作はGMモードを局所的にしたものなので、管内の内圧を上げて平均自由行程を短くした場合や印加電圧を下げてガス増幅領域を小さくした場合にGMモードからの変更が可能である。

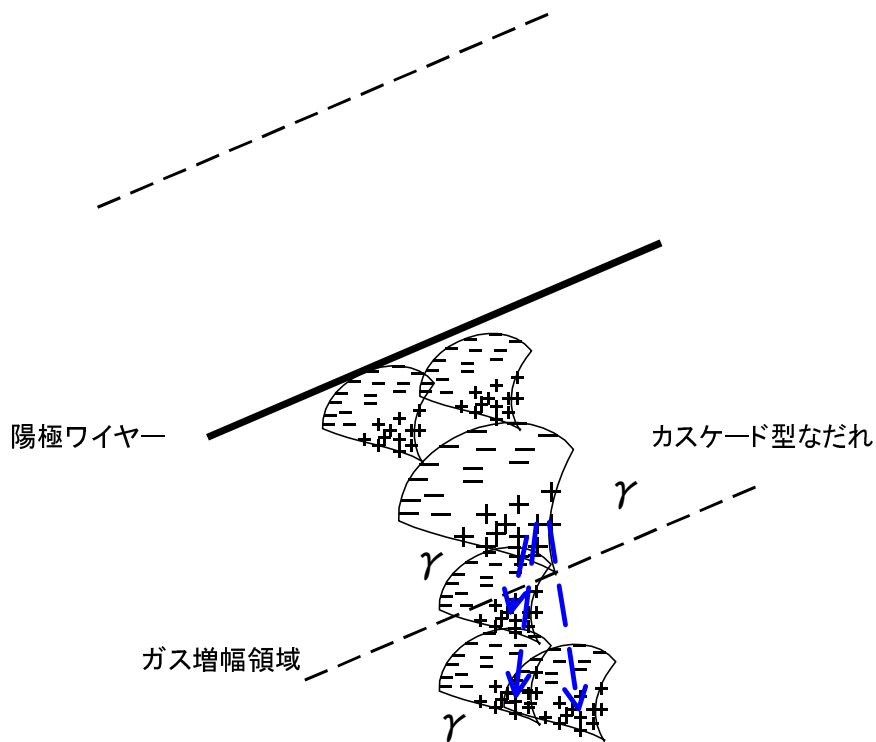


図 2 - 5 制限ストリーマモード

2 - 2 - 3 TGC の動作モードと充填ガス

TGC はトリガー検出器として、検出効率 99%以上を実現しなければいけない。検出効率を上げるためには、例えば、1次電子を高利得で増加させて、ノイズレベルとの差分を大きくする。1次電子を高利得で増加させる場合は、印加電圧を上げて、動作モードを変えていく。このとき、極板における収集電荷量が増加する。収集電荷量の増加によって、波高弁別器の閾値を上回る確率が大きくなり、検出効率を増加させる。TGC の場合、検出効率を高くするために比例モードで動かさない。一方で、LHC 環境下でも動作するように $1\text{kHz}/\text{cm}^2$ という入射粒子頻度特性が要求されているので、不感時間の大きい GM モードや制限ストリーマモードではなく、制限比例モードで動かす。そして、この動作モードでガス増幅率 10^6 を実現している。なお、実際の動作電圧としては $\sim 3\text{kV}$ を予定している。他にも TGC は 1 次電子が電子付着を起こし消滅して検出効率を下げないように、電子親和力の低いガスを用いる。表 2 - 1 に電子捕獲率の比較をまとめた。表 2 - 1 より TGC に使用する CO_2 は負イオンになりやすく、検出効率を上げるのに役立つ。また、自然界に大量に存在するので、経済性に優れている。一方で、TGC はワイヤー径 $50\ \mu\text{m}$ のワイヤーを使用しているため、広いガス増幅領域をもつ。このため、ストリーマが発生しやすく、それを抑えるために消滅ガスを添加する。消滅ガスは多原子有機ガスであり紫外線光子を吸収し、例えば、自身は低価分子に解離するという性質を持つ。TGC で使用する pentane は一般式 $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ の構造を持つメタン系炭化水素で図 2 - 6 に示すように紫外線吸収断面積が大きく消滅ガスとして働く。図 2 - 6 より、炭素数にしたがって紫外線吸収断面積が高くなっている。なお n - pentane より高い炭素数をもつメタン系炭化水素は室温で液体または固体であるため、TGC には取り扱いを懸念して使用をさけている。そして、TGC ではこれらのガスの混合比を最適化して、現在では $\text{CO}_2 + n$ - pentane を 55 : 45 の体積比で使用している。

気体	電子捕獲率
CO_2	6.2×10^{-9}
O_2	2.5×10^{-5}
H_2O	2.5×10^{-5}
C l	4.8×10^{-4}

表 2 - 1 電子捕獲率の比較

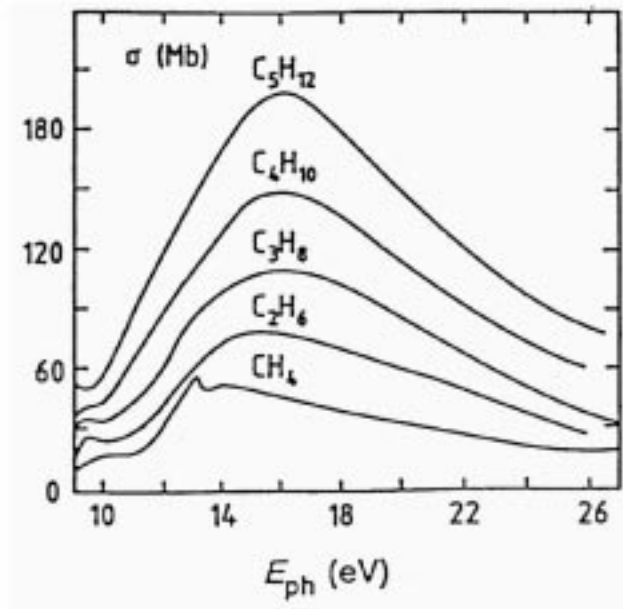


図 2 - 6 メタン系炭化水素の紫外線吸収能力

2 - 3 TGC の構造

構造的に TGC は MWPC (マルチワイヤー比例計数管) と呼ばれる。図 2 - 7 に MWPC の一般的な構造を示す。その構造的特徴は 2 枚の平行陰極板の間に等間隔に並んだ陽極線ワイヤーが配置されているというものである。MWPC 構造の電場 $E(x, y)$ 、電位 $V(x, y)$ 、静電容量 C は以下の式で与えられる。

$$V(x, y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2\pi l}{s} - \ln 4 \left\{ \sin^2 \left(\frac{\pi x}{s} \right) + \sinh^2 \left(\frac{\pi y}{s} \right) \right\} \right]$$

$$E(x, y) = \frac{CV_0}{2\epsilon_0 s} \left\{ 1 + \tan^2 \left(\frac{\pi x}{s} \right) \tanh^2 \left(\frac{\pi y}{s} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \left\{ \tan^2 \left(\frac{\pi x}{s} \right) \tanh^2 \left(\frac{\pi y}{s} \right) \right\}^{-\frac{1}{2}}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\frac{\pi l}{s} - \ln \left(\frac{2\pi a}{s} \right)}$$

ここで、 $V(0, a) = V_0$ 、 $V(0, 0) = 0$ である。また、 a はワイヤー半径、 l は陽極・陰極間隔、 s はワイヤー間隔である。

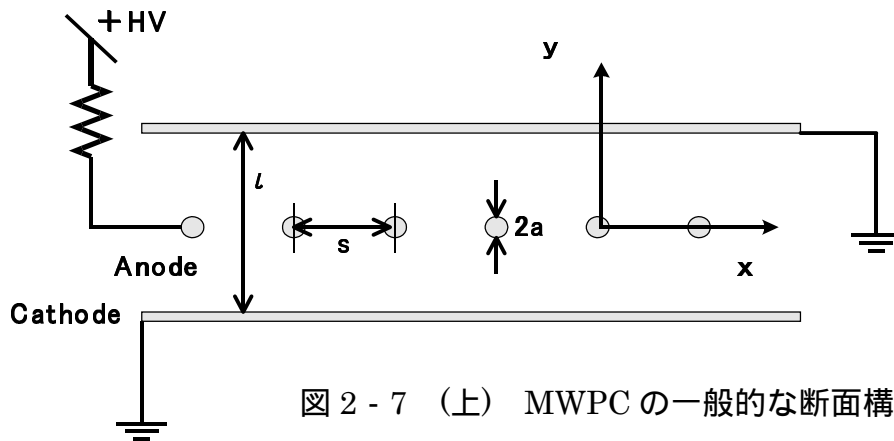


図 2 - 7 (上) MWPC の一般的な断面構造

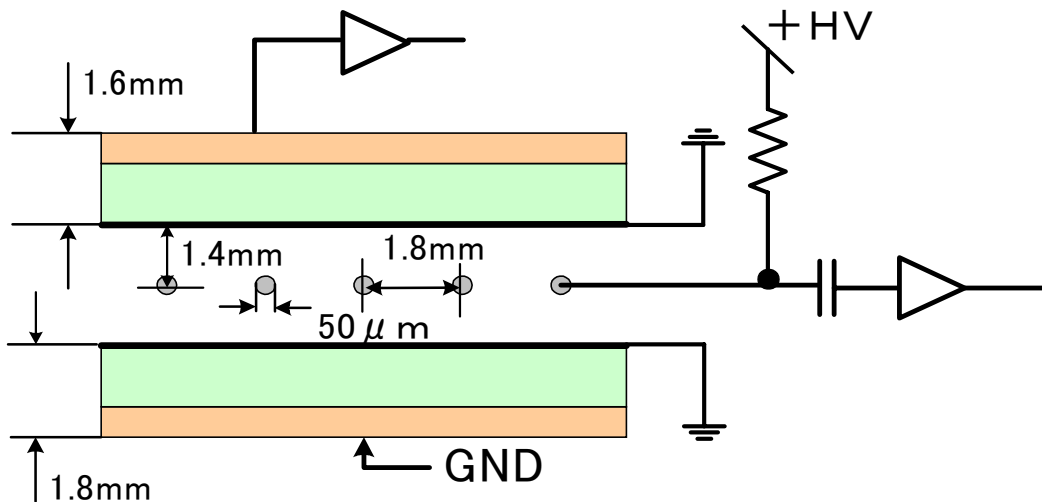


図 2 - 7 (下) TGC の断面構造

TGCの電場構造を図2-8に示す。電場はワイヤー近傍において $1/r$ で増加する。さらに、高エネルギー紫外線光子に対する処置として消滅ガスを添加するなど適切におこなえば、パルス出力は一本の陽極ワイヤーに限定される。したがって、MWPC構造は単体のガス入り検出器を横に複数個並べたのと同様に機能する。陽極どうしを遮るものがないので、不感領域がない。この構造は経済的に大面積検出器を達成することが容易である。さらに、この構造の特徴として、出力パルスの応答時間特性が良いことがあげられる。応答時間特性とは放射線が入射してからパルスが出力されるまでの時間特性のことである。出力パルスの応答時間は1次電子がガス増幅領域に到達するまでの時間に依存するので、MWPC構造のように、多数の陽極ワイヤーを並べることは、1次電子がガス増幅領域に到達しやすくなり、応答時間特性を良くする。

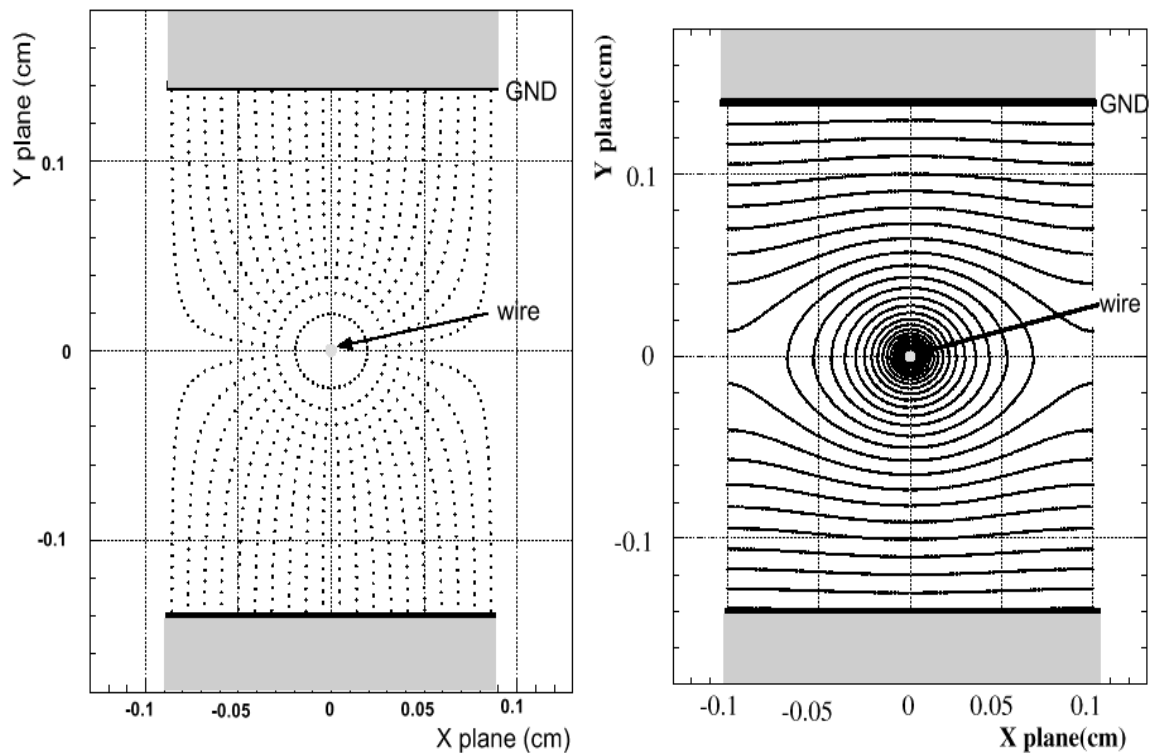


図2-8 TGCにおける電場構造(左) 等電位面(右)

TGC の構造は MWPC 構造にさらに改良を加えたものである。TGC と一般的な MWPC の構造パラメータを比較したものを表 2 - 2 にまとめた。構造的に比較すると TGC は MWPC に比べて、ワイヤー径が大きく、陽極 - 陰極間間隔およびワイヤースペースが狭くなっている。陽極 - 陰極間間隔が狭い場合、ガス増幅領域は広くなり、出力パルスも大きくなる。これによって、S/N が改善され、前置増幅器などの計数回路の単純化に役立つ。さらに間隔が短いことは、陽イオンが陰極面まで到達する流動時間が短いことを意味する。陽イオンをすばやく陰極で収集できれば、高密度の陽イオン群からなる空間電荷による電場の歪が速く回復する。これによって検出器の不感時間を減らし、高頻度検出を可能にする。次に、陽極ワイヤー間隔が狭い場合、出力パルスの応答時間が速くなる。そして、ワイヤー径が大きい場合は、上記の陽極ワイヤー間隔をより狭くすることができる。これはより強い張力でワイヤーを張ることができるためである。さらに、この場合、ワイヤーが細い場合に比べて、低い印加電圧で同じ動作モードを達成することができる。したがって、TGC は MWPC の特徴である大面積検出器、良好な経済性、高速応答型検出器という長所をさらに推し進めたものとなっている。

同じ印加電圧(3kV)における TGC と MWPC の陽極 - 陰極間方向(y 方向、図 2 - 7 参照)における電場を図 2 - 9 に示す。典型的な MWPC のガス増幅領域は $\sim 300 \mu\text{m}$ であるのに対して、TGC はほぼガスギャップ全体(1.4mm)がガス増幅領域である。これにより、出力パルスの大きさに違いが出る。さらに、陽極 - 陰極間間隔が短いことが高頻度特性に効くのは前述のとおりである。次に、同じ印加電圧(3kV)でワイヤー径を変更した場合の y 方向における電場を図 2 - 10 に示す。なお、陽極 - 陰極間間隔は 5.0mm、ワイヤー間間隔は 2.0mm である。同じ印加電圧でワイヤー径を大きくした場合、ガス増幅領域が少しだけ大きくなる。この場合はそれよりも、ワイヤー径を太くすることで、ワイヤー間間隔を短くできることや同じ動作モードで動かす場合、印加電圧を低くできる点が重要になる。そして、陽極 - 陰極間間隔を変更したときの y 方向における電場を図 2 - 11 に示す。なお、ワイヤー径 $20 \mu\text{m}$ 、ワイヤー間間隔 2.0mm である。陽極 - 陰極間間隔を小さくした場合には、ガス増幅領域が大きくなる。したがって、S/N の改善と陽極 - 陰極間間隔の長さから高頻度特性に効く。

	ワイヤー径	陽 - 陰極間間隔	ワイヤー間間隔
MWPC	20 ~ 30 μm	5.0mm	2.0mm
TGC	50 μm	1.4mm	1.8mm

表 2 - 2 MWPC と TGC の比較

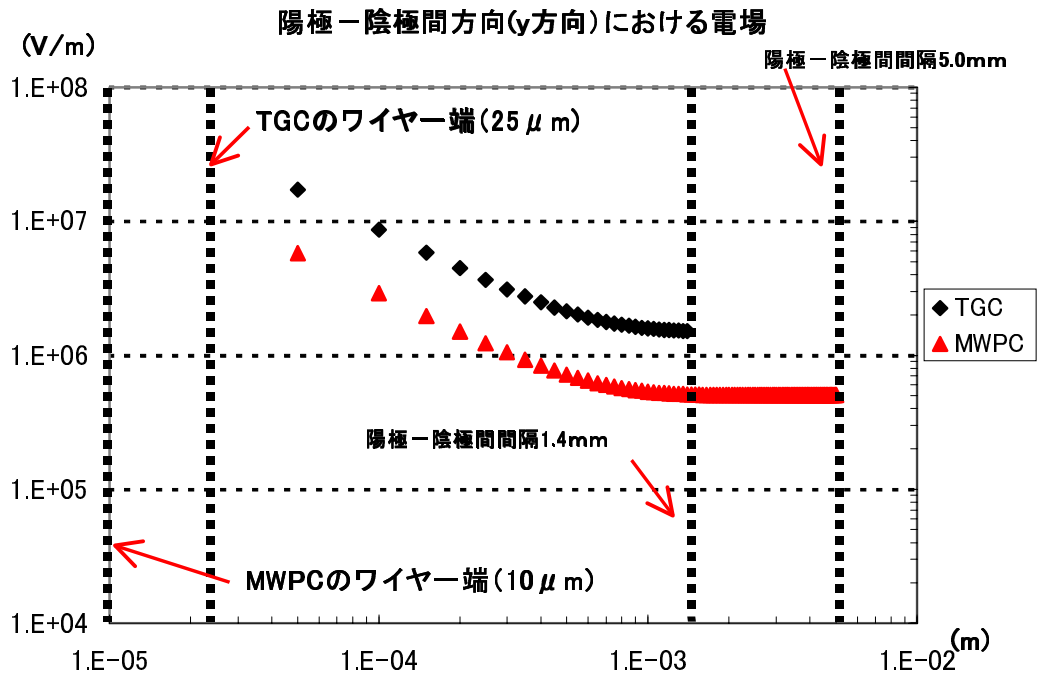


図 2 - 9 y 方向における電場
TGCとMWPCの比較

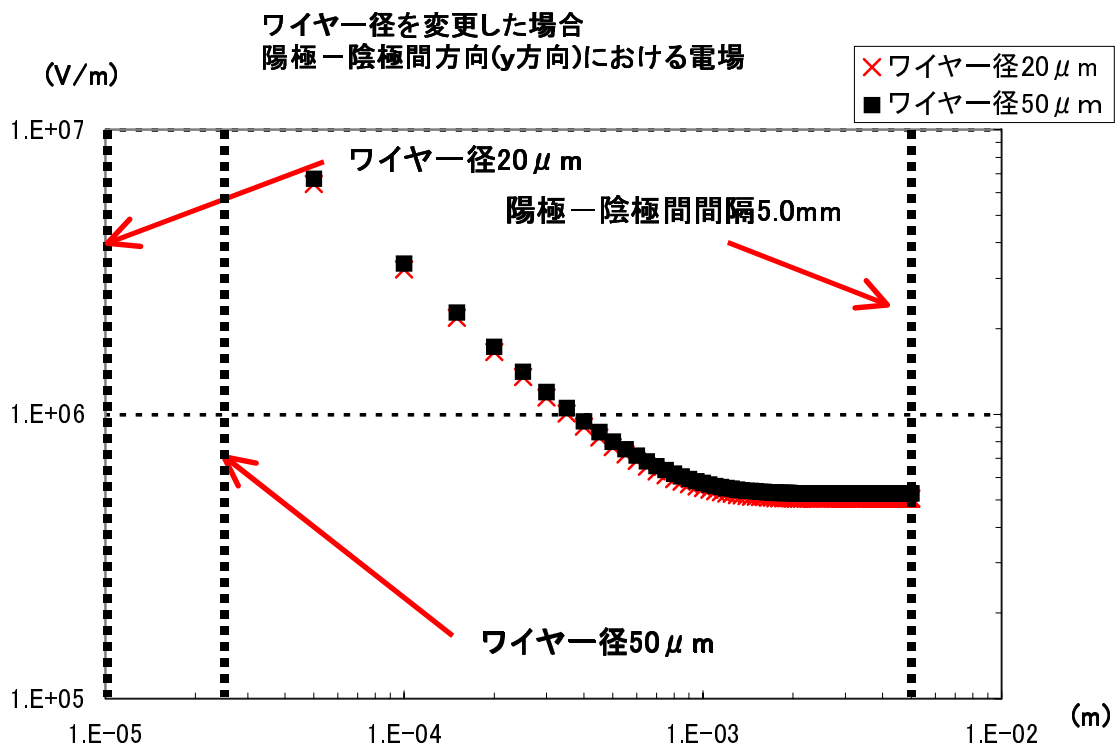


図 2 - 10 y 方向における電場
ワイヤー径を変更したときの比較

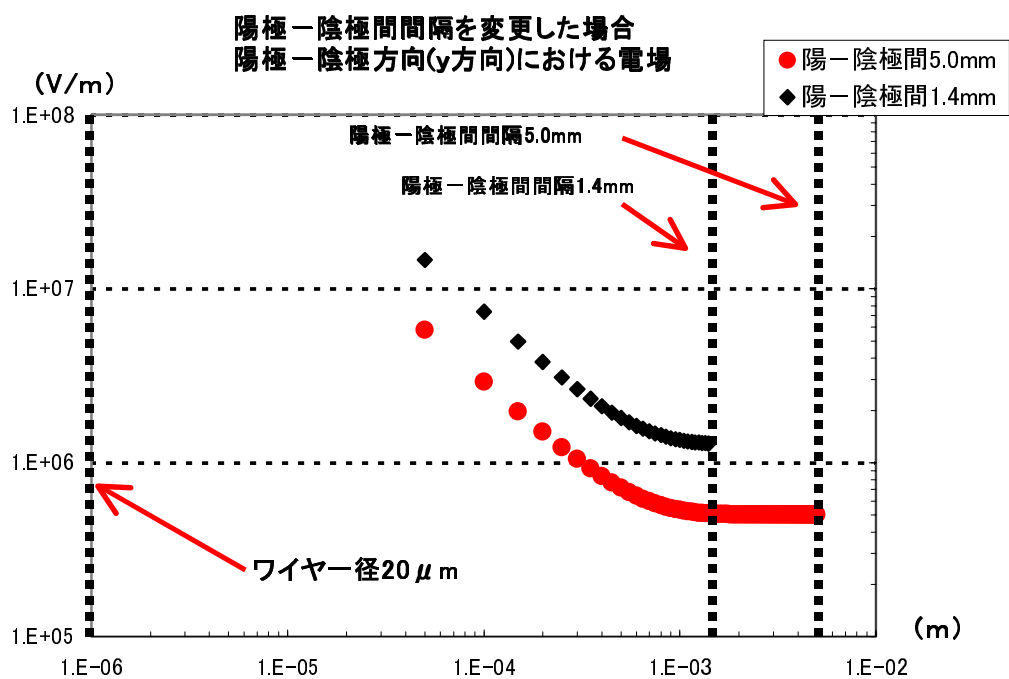


図 2 - 11 y 方向における電場
陽極 - 陰極間隔を変更したときの比較

2 - 4 TGC の出力パルスの形成

MWPC を位置敏感型検出器として使用する場合、陽極からの読み出しだけでなく、陰極からもシグナルを読み出して第 2 座標測定を可能にすることができる。例えば、位置敏感型検出器の形状として、MWPC の陰極を形成する面が、細く切られた短冊状の銅版を並べたものになっているとする。この場合、陽極および陰極からのシグナルは空間電荷の流動による誘導電荷として現れる。しかし、陰極に銅板があるので、紫外線光子との光電作用や陽イオンの衝突で自由電子が放出される作用が起こり、アフターパルスを発生させ、長い不感時間の原因になる。

次に光電作用や作用を避けるために、この陰極面上にある誘電率を持った絶縁体をのせた場合を考える。空間電荷が絶縁体の表面まで流動する間に、陰極板には絶縁体越しに生じる電場の変動分を打ち消すように電荷が誘導される。一方、空間電荷は絶縁体表面まで達した後も消失しないので、いずれ絶縁体上の空間電荷密度が高くなりガス領域の電場を弱める。こうして、チャージアップを起こした空間ではガス増幅が起らない。したがって、局所的に不感領域を形成して、検出器の検出効率を下げる。

ここで、絶縁体の代わりに導電性の物質に置き換えると流動してきた空間電荷を速やかに吸収することができる。ただし、この物質は光電作用や作用を起こす金属でないことはもちろん静電遮蔽の点からある程度、高抵抗のものでなければならない。静電遮蔽能力は遮蔽材の抵抗率や入射してくる電磁波の周波数に依存する。そして、遮蔽材の抵抗率が低い場合は遮蔽能力が高く、陰極からの読み出しができなくなる。TGC においては、この遮蔽材にカーボンを用いた構造となっている。カーボンの特徴としては仕事関数が高く光電作用を起こしにくく、原子番号が 6 であるので作用も起こしにくい。また静電遮蔽の点からカーボン被膜は $1\text{M} \Omega$ の高抵抗で塗布されている。

ところで、各チャンネルから読み出されるシグナルは、空間電荷の流動によって極板に誘導された電荷を各読み出しチャンネルのもつインピーダンスに応じて分配したものになる。通常、電極に誘導される電荷はいろいろな経路を経て補充されるので、極板に誘導された電荷の大部分は読み出されない。この損失を弾道欠損といい、その概念を図 2 - 12 に示す。

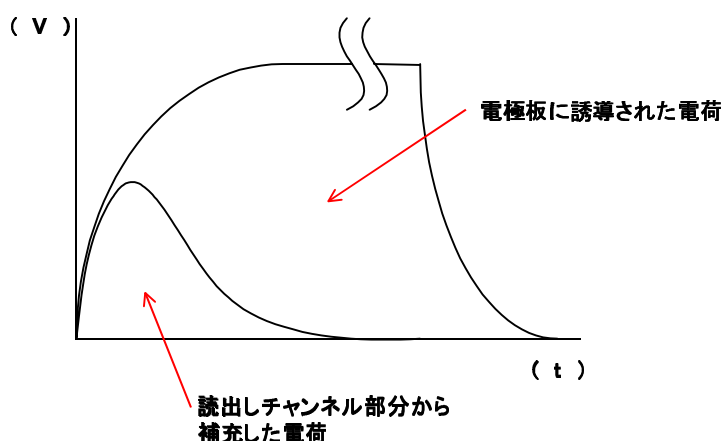


図 2 - 12 弾道欠損によるパルスの損失

陽極ワイヤーに誘導される電流

簡単のために TGC 内の電場を円筒型電場と考える。円筒型電場の電場、電位、単位長さ当たりの静電容量は以下のように与えられる。

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r}{a}\right)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

ここで、 V_0 は極板間の印加電圧、 a はワイヤー半径、 b は陽極 - 陰極間隔である。 r は中心軸からの距離である。ワイヤーの長さを L とすると、ワイヤー 1 本当たりの静電容量は CL で与えられる。ワイヤー近傍で生成した電荷 Q が距離 dr だけ動いたときワイヤーにおける電圧の変化 dv は

$$dv = \frac{Q}{CLV_0} \frac{dV}{dr} dr$$

である。ガス増幅がワイヤー表面から距離 ρ の位置で生じ、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、それぞれが引き起こす電圧変化は

$$v^- = -\frac{Q}{CLV_0} \int \frac{dv}{dr} dr = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln \frac{a+\rho}{a}$$

$$v^+ = \frac{Q}{CLV_0} \int \frac{dv}{dr} dr = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln \frac{b}{a+\rho}$$

$$v = v^+ + v^- = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln \frac{b}{a} = -\frac{Q}{LC}$$

$$\frac{v^+}{v^-} = \frac{\ln \frac{a+\rho}{a}}{\ln \frac{b}{a+\rho}} = 9.84 \times 10^{-3}$$

($a = 25 \mu\text{m}$ 、 $b = 1.4\text{mm}$ 、 $\rho = 1 \mu\text{m}$)

したがって、出力パルスに対する寄与は陽イオンの流動によるものがほとんどである。以後、陽イオンの流動による寄与だけを考える。陽イオンが時間 t だけ動いた場合の電圧の変化量は

$$v(t) = -\int dv = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln \frac{r(t)}{a}$$

陽イオンのドリフト速度は以下のように与えられるので、

$$\frac{dr}{dt} = \mu^+ \frac{E}{P} = \mu^+ \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0 P} \frac{1}{r}$$

ここで、P は圧力である。上式を積分すると、

$$r(t) = \left(a^2 + \mu^+ \frac{CV_0}{\pi\epsilon_0 P} t \right)^{-\frac{1}{2}}$$

これらより、陽極ワイヤーにおける電圧の変化は以下の式で与えられる

$$v(t) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 L} \ln\left(1 + \mu^+ \frac{CV_0}{\pi\epsilon_0 P} a^2 t\right) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 L} \ln \frac{1+t}{t_0}$$

ここで、 $t_0 = \frac{\pi\epsilon_0 P a^2}{\mu^+ C V_0}$ で固有時間と呼ぶ。

陽極ワイヤーに流れる電流 I は

$$I(t) = CL \frac{dv(t)}{dt} = -\frac{QC}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{t+t_0}$$

陰極(カーボン面)に誘導される電荷

カソードに誘導される電荷はアノードに誘導される電荷の映像電荷としてあらわれる。簡単のために空間電荷の幅は考慮せず、空間電荷の陽イオン群を平行極板型コンデンサの中間に置かれた線電荷密度 λ の線電荷と考える。このときの電場は図 2 - 13 のように z 方向に $D/2$ の間隔で正負の線電荷が交互に置かれたときと等しくなる。 $z = 0$ の面に対して、

$\pm z_k = \pm \frac{2k+1}{2} \times D$ ($k=1,2,3,\dots$ 。ただし、 $z_0 = -D/2$ であり、 D は平行平板間の距離である)にある正負の映像電荷がつくる電場 $E_k^{(n)}(x)$ は面に対して垂直で、

$$E_k^{(n)}(x) = -\frac{\lambda}{\pi\epsilon_0} \frac{z_k}{x^2 + z^2}$$

である。ここで $z = 0$ の面に対してガウスの法則を適用すると、 $z = 0$ での電場を $E^{(n)}$ とすれば、 $z = 0$ 面上での電荷密度 ρ は

$$\rho = \epsilon_0 E^{(n)}$$

とかけると、

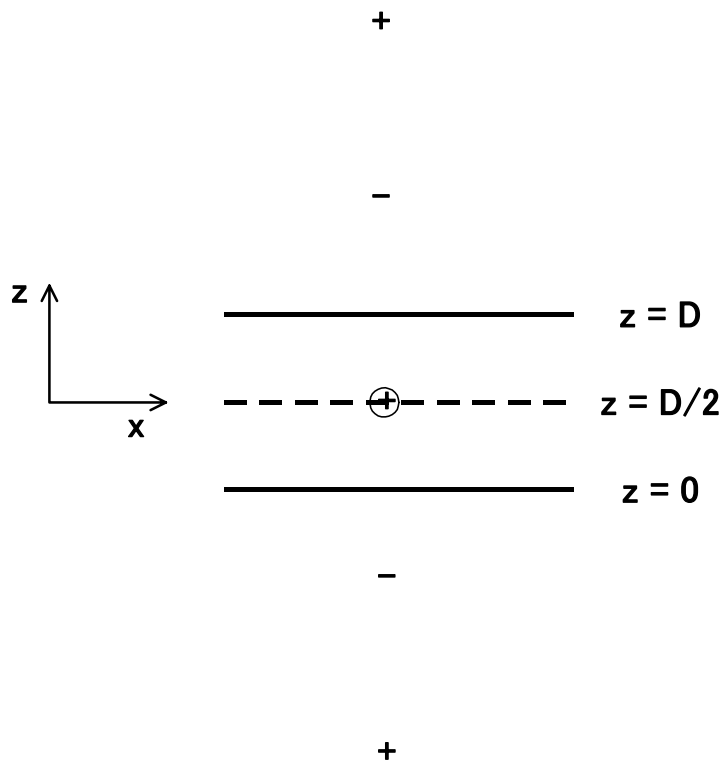


図 2 - 13 平行平板コンデンサの中心に電荷があるときの映像電荷

すべての映像電荷群によってできる電場を重ね合わせて $E^{(n)}$ を求めて、これに z_k を代入することで、

$$\sigma(x) = -\frac{\lambda}{\pi} \sum (-1)^k \frac{(2k+1) \frac{D}{2}}{x^2 + (2k+1)^2 \frac{D^2}{4}} = -\frac{\lambda}{2D} \frac{1}{\cosh \frac{\pi x}{D}}$$

を $-\infty$ から ∞ まで積分してやると、

$$\int \sigma(x) dx = -\frac{\lambda}{2}$$

となり、2枚ある陰極面には陽極に誘導される電荷がそれぞれ半分ずつ誘導されることがわかる。

2 - 5 TGC の外観について

現在製作中の T7 型 TGC の外観について説明する。T7 型の設置場所については図 3 - 1 に示す。図 2 - 14 には単体の TGC(シングレット)を示す。図 2 - 15 には 3 枚組のモジュール(トリプレット)、2 枚組のモジュール(ダブレット)の断面図を示す。T7 型の大きさは TGC 本体部分で上底 1365mm、下底 1200mm、高さ 1245mm、厚さ 6.2mm である。これを図 2 - 15 のように機械的強度を出すためのハニカムパネルをはさんで接着する。TGC 間にはさむハニカムパネルは ~20mm 厚、モジュールの外側に接着する薄いハニカムパネルは ~5mm 厚である。TGC 本体の基板部分はガラスエポキシ樹脂製で 2 枚のうち 1 枚はシグナルを読み出すためにストリップが切っている。ストリップは 32 チャンネル分切っており、ストリップ幅は片端のチャンネルだけが ~20mm で他のチャンネルは ~35mm である。もう片方の基板は銅ベタ板でグランドになる。ただし、トリプレットの真中の TGC ではストリップからの読出しはせず、両面とも銅ベタ板でグランドになっている。このストリップ方向に対して、ワイヤーは直行するように巻かれている。これによって、2 次元座標測定を可能にする。ワイヤー側の読出しは T7 型で 23 チャンネルあり、6 ~ 30 本程度グルーピングしたものを 1 チャンネルとして読み出す。グルーピングの幅は下底側の端チャンネルが ~36mm、上底側の端チャンネルが ~11mm、その他のチャンネルが ~55mm になっている。ところで、ガスギャップを一定に保つためにガス領域内に 2 種類のスペーサーが入っている。棒型スペーサーは長さ ~1200mm、幅 ~7mm で 5 本入っている。これによって、ガス領域は 6 つのセルに区切られる。ボタン型スペーサーは直径 7mm で 1 セル当りに 10 個入っている。ただし、面積の狭いセルには入っていない。TGC1 枚当りでは 50 個(トリプレットの外側の TGC)または 60 個(トリプレットの真中の TGC)入っている。これらのスペーサーはガス領域内で不感領域になる。モジュールにしたときにこれらの不感領域が重ならないように、モジュール内の TGC 間でワイヤーサポートの位置は半ピッチずつずれている。このため、トリプレットの外側 2 枚の TGC はストリップ読出しの位置関係が互いにミラー対称になっている。

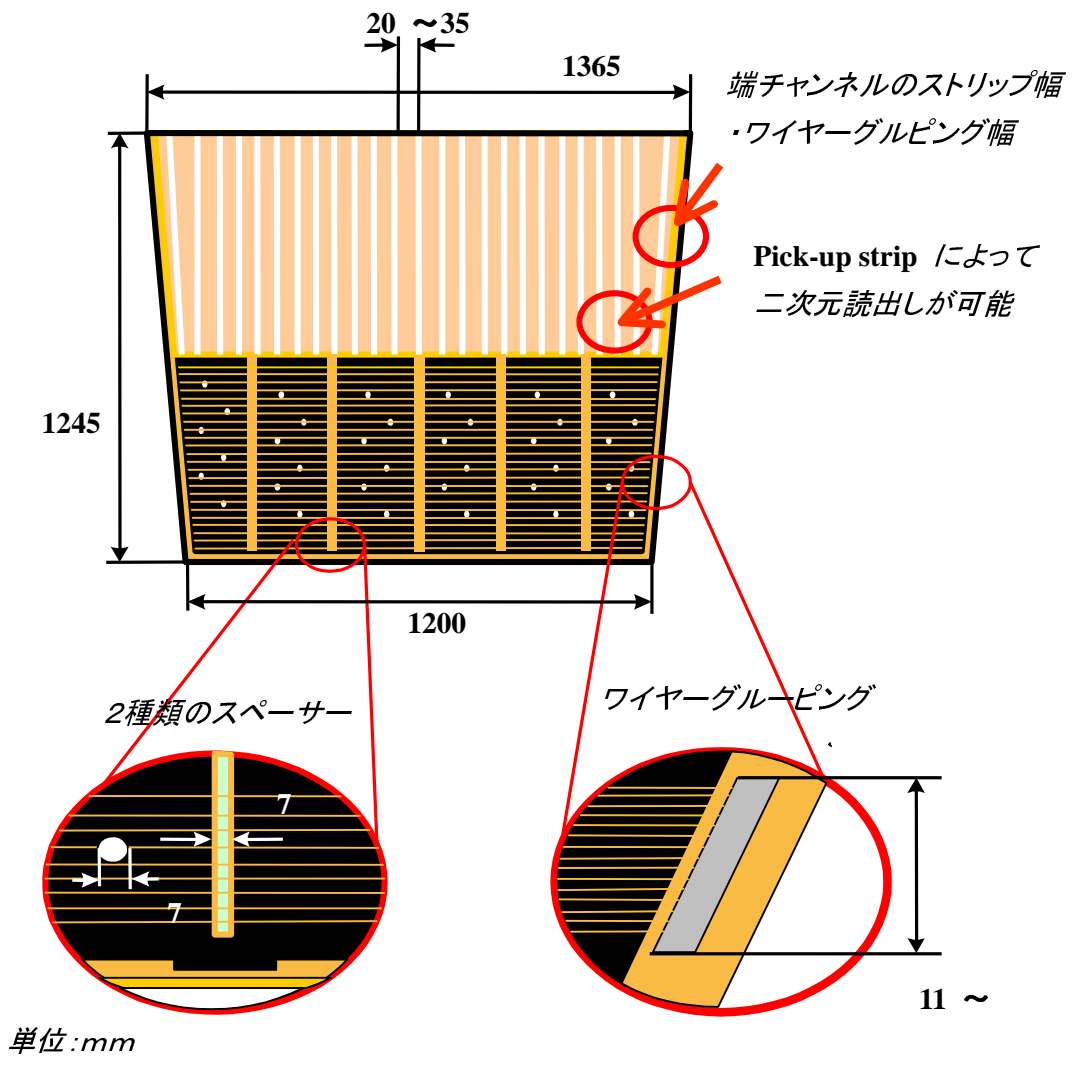


図 2 - 14 T7 型 TGC の外観

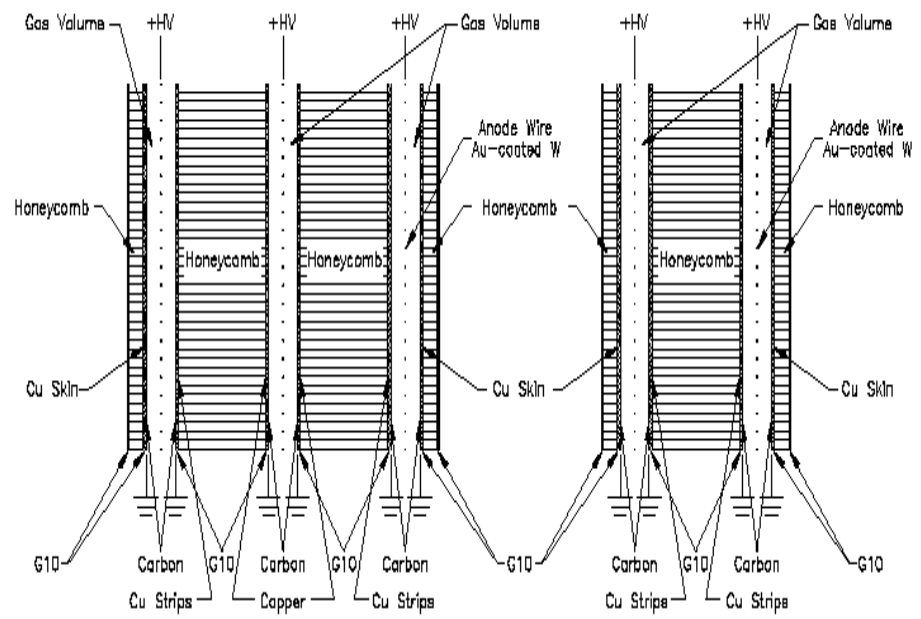


図 2 - 15 モジュールの断面図 (左)トリプレット(右)ダブルレット

第 3 章 TGC の量産

3 - 1 TGC 量産の概要

日本グループは T4、T5、T7 型と呼ばれる 3 種類の TGC を全部で 1056 台量産する予定である。それらの内訳を表 3 - 1 に示す。また、それらの設置場所について図 3 - 1 に示す。

	ダブルット台数	トリプレット台数	TGC 台数	外寸(上底+下底)×高さ mm ¹⁾
T7 型	192 台	96 台	672 台	(1484+1320) × 1355
T5 型	96 台		192 台	(957+725) × 1874
T4 型	96 台		192 台	(1020+763) × 2062

表 3 - 1 TGC 量産台数の内訳

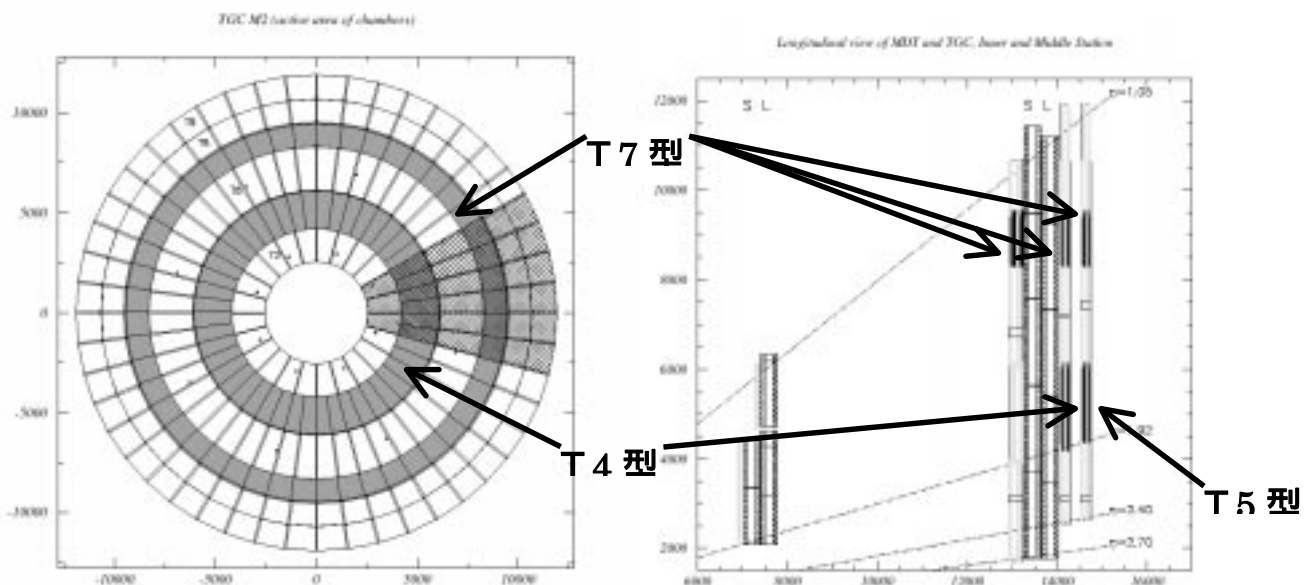
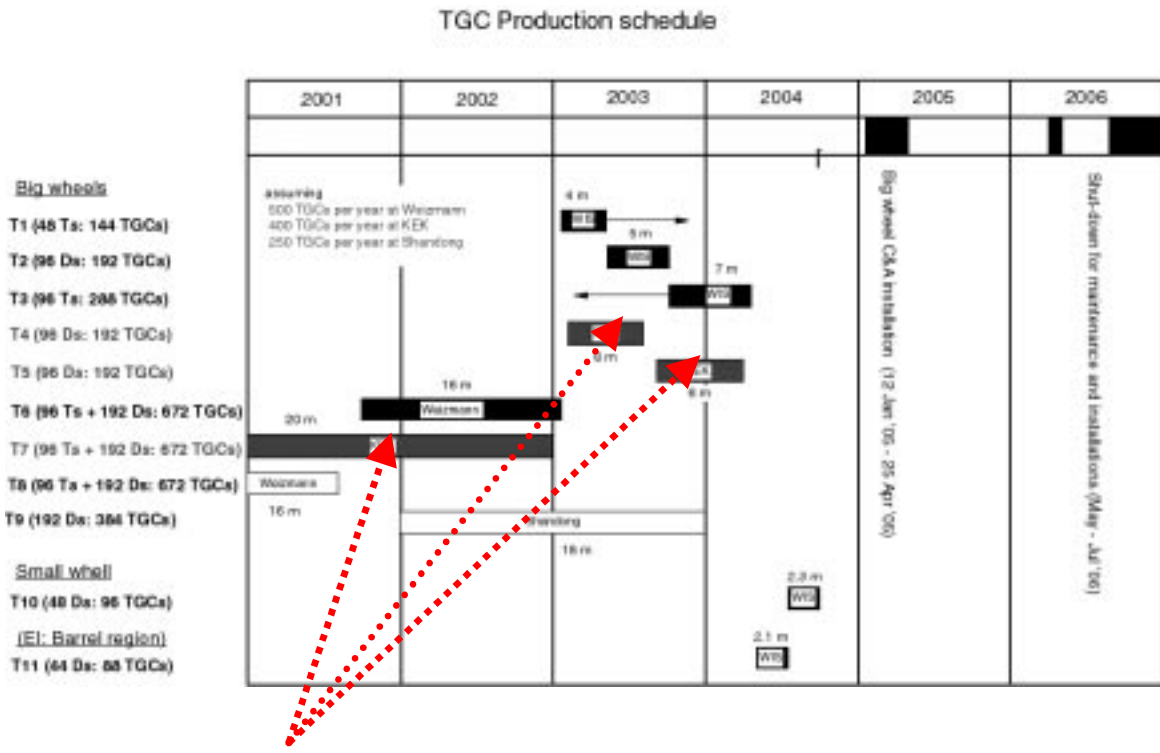


図 3 - 1 TGC の設置場所
(左)M2 ステーション正面図 (右) ミューオンスペクトロメーター側面図

¹⁾ 小型 TGC の外形は台形である

日本グループの量産は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)でおこなわれている。2000年9月よりプレ量産が開始され、除々に設備面を拡張し、2001年4月からは作業人員、量産設備を完全にそろえた本格的量産がはじまった。量産規模は作業人員~13人、1週間当り10枚のTGCの閉じ工程ができる設備である。この規模で量産をおこなえば、日本グループの予定量産台数1056台を2004年春までに終了できる。量産計画としては図3-2に示されているように、日本グループが量産する3種類のTGCのうち2002年末までT7型を製作、2003年よりT4、T5型の量産をおこなう予定である。



日本グループの量産予定分

図3-2 TGC量産計画

作業工程の大まかな流れを図3-3に示した。TGCの製作は陰極を形成するFR4の板材にカーボン塗布することから始まる(カーボン塗布)。次にガス領域を形成するサイドフレームなどのパーツを接着する(パーツ接着)。そして、グランド側のFR4板にワイヤーを巻く(ワイヤー巻き)。それと対になるFR4板を重ね合わせて接着する(TGC閉じ)。ガスシール作業をおこない単体モジュール(シングレット)にする(ガスシール)。このようにして作られたTGCを2枚、3枚と重ね合わせて、モジュールにする(ダブレット/トリプレット接着)。なお、TGCの間にモジュールの機械的強度を上げるためにFRPのフレームとペーパーハニカムをはさんで接着する。そして、シグナル読出し用のボードを取付け、TGC周辺をCO₂雰囲気にするためCO₂チャンネルの作成をする(読出しボード取付け、CO₂チャンネル作成)。

TGC 作業工程

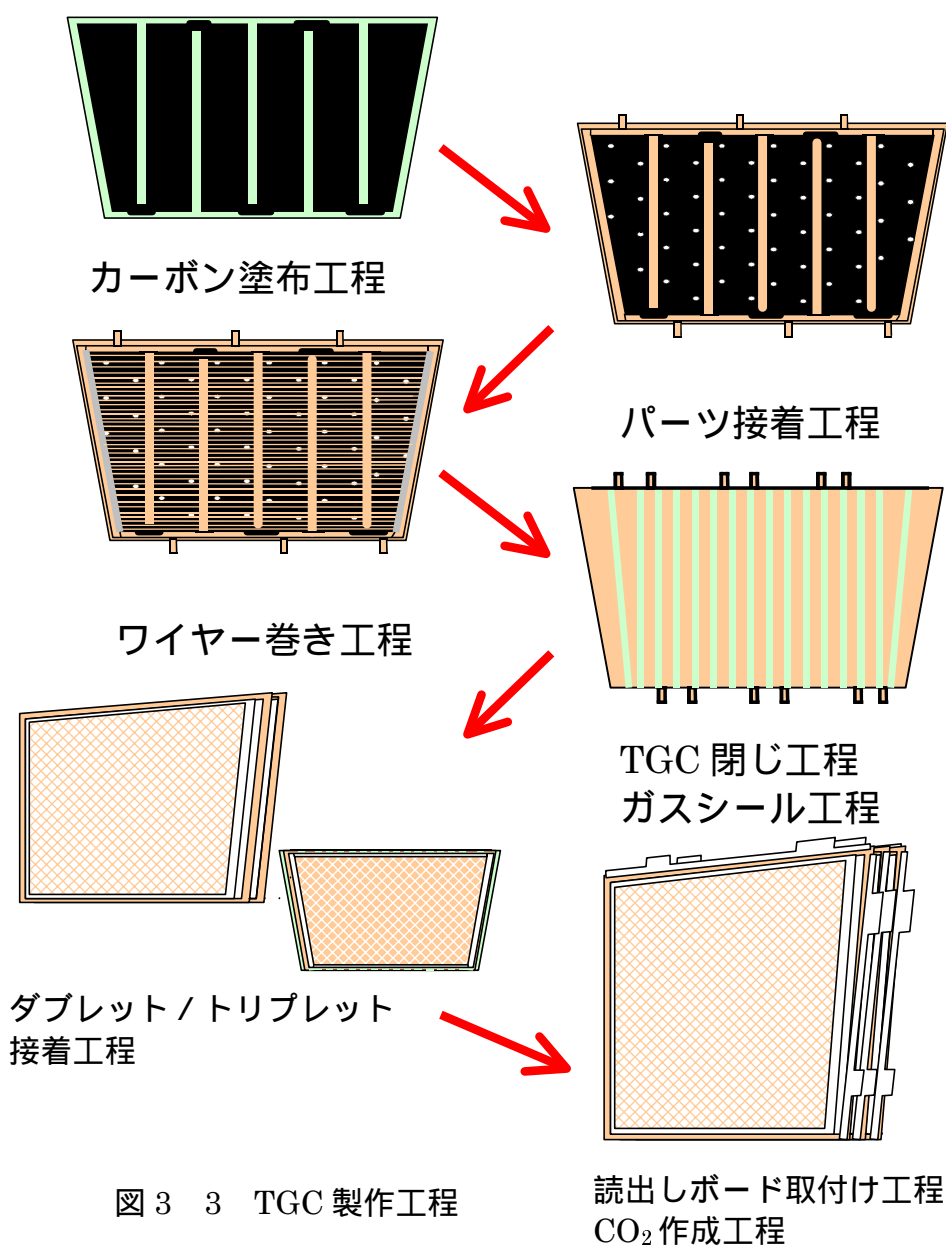


図3-3 TGC 製作工程

実際に量産をおこなっている場所は KEK 富士実験室内の B4 フロアとその周辺である。富士実験室 B4 フロアの間取りを図 3 4 に示す。B4 フロアにはいくつかパネルハウスが建てられ、その室内は空調管理およびクリーンルーム化されている。これは、よりクリーンな環境で TGC を量産することはもちろん、治具素材の体積膨張率の温度依存性、接着硬化時間の温度依存性、湿度の影響によるリークカレントの増加などを抑えるためである。各工程で部屋を分けることによって作業集約をはかっている。また、保管場所としては各工程間で生産調整できるように数カ所設けている。

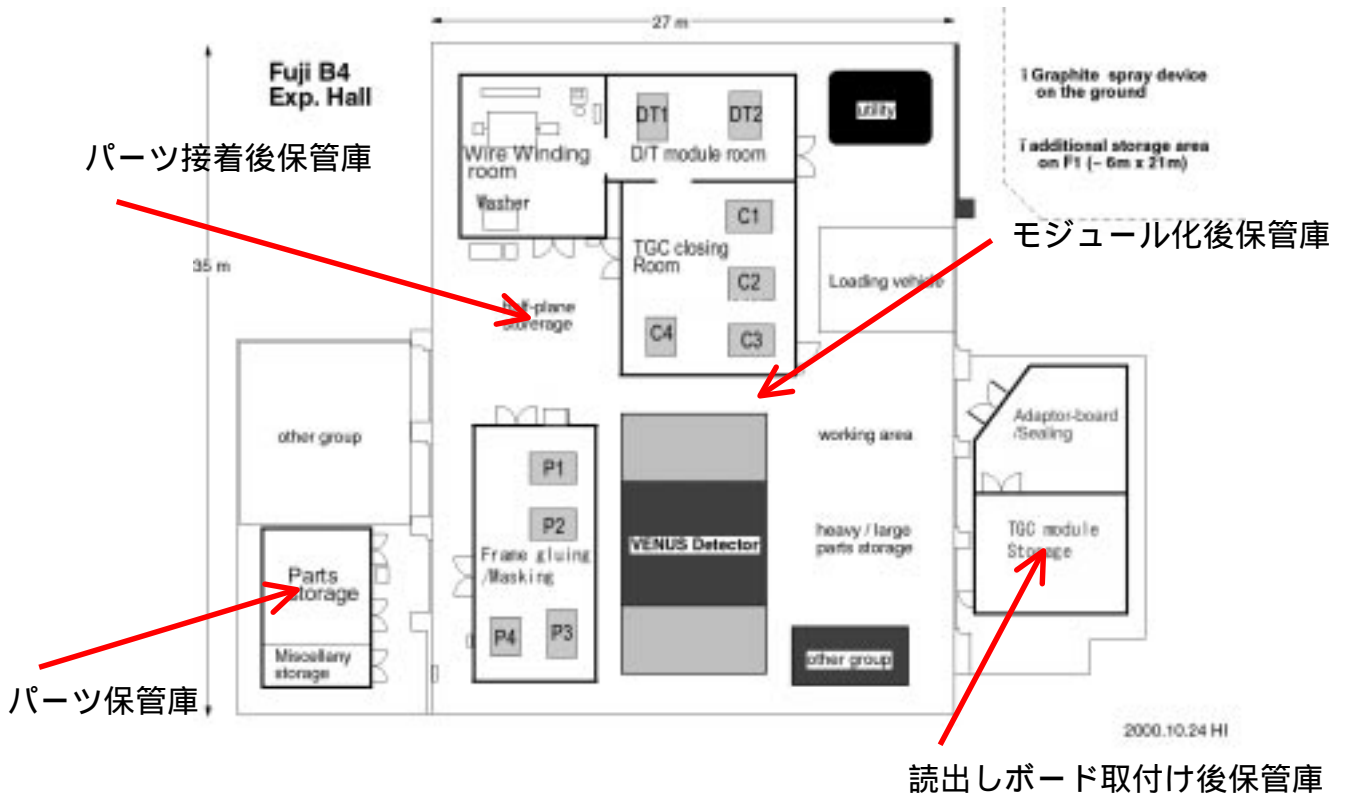


図 3 4 富士実験室 B4 フロア

工程ごとの量産能力を表 3 2 にまとめた。各工程には 1 週間当り 10 枚の TGC を量産できるように作業人員を配置している。表中の α は作業状況に応じて作業を支援する作業者をあらわす。作業に関しては、その方法を指示するだけでなく、1 日の時間割を作り、時間毎の作業内容まで指示する。時間管理をしているフォーマットを図 3 5 に示す。作業者はこれに従い、いつ、どこで、なにをするのか把握できるようになっている。さて、量産の現状を図 3 6 に示す。これより、2001 年 12 月までに量産予定の 25 % に相当する 244 台のシングルレットが完成した。量産ペースに関しても、2000 年秋からのプレ量産開始以来、2TGC's / week が昨年の上には 7TGC's / week に上がった。これは、作業者の熟練だけでなく、量産設備の改善を常におこなってきた結果である。以下では、量産工程ごとにおこなった改善点を中心に工程の説明をおこなう。

量産工程	作業場所	作業人数	1日当りの作業量
カーボン塗布	屋外	スタッフ	30枚/日
パーツ接着	パーツ接着室	3人 + α	2 TGC分/日
ワイヤー巻き	ワイヤー巻き室	1人	2 TGC分/日
TGC閉じ	TGC 閉じ室	3人 + α	2 TGC分/日
D/T接着	D/T 閉じ室	1人 + α	3日で2トリプレット分
読み出しボード取付	側室	2人	6 TGC分/2日

表 3 2 TGC 量産能力

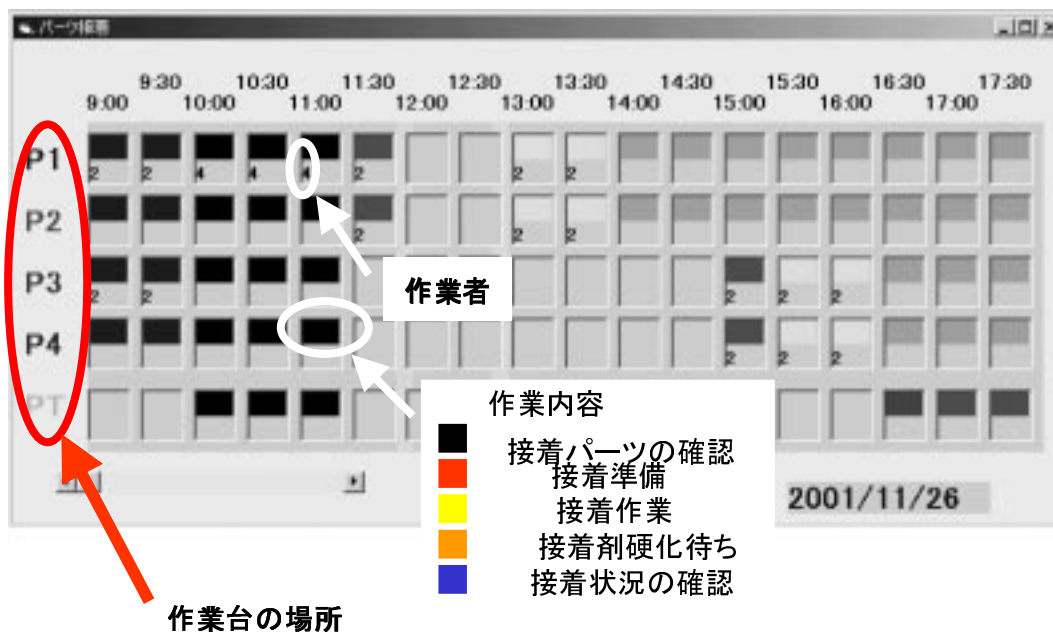


図 3 5 量産における時間管理(パーツ接着室の例)

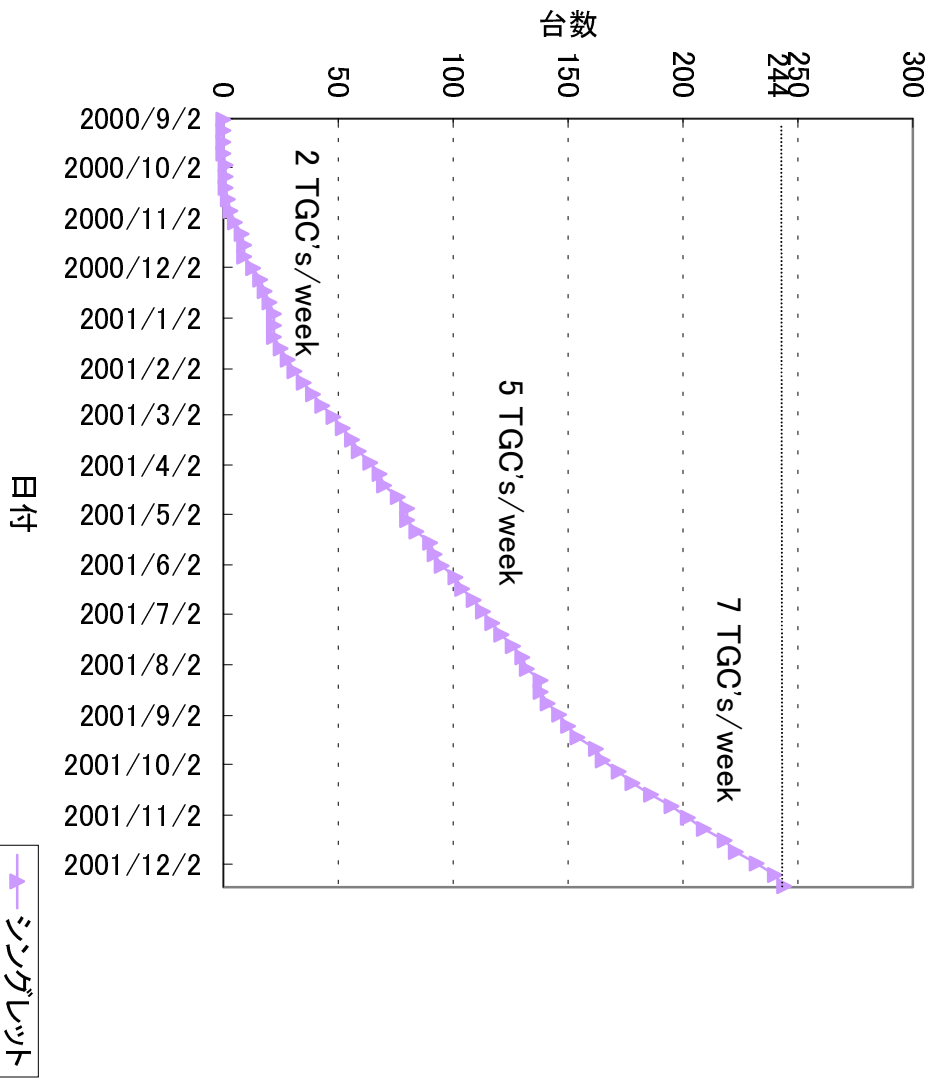


図 3 6 TGC 量産達成状況

3 - 2 マスキング(接着位置決め)・カーボン塗布工程

3 - 2 - 1 工程の概要

TGC ガス領域の陰極側にはカーボンを塗布している。これによって、ガス領域内を陰極側に流動してきた陽イオンを吸収するとともに、紫外線光子による光電作用や陽イオンの衝突による作用をさけている。この工程の目的はそのカーボンをガラスエポキシ樹脂の板材(FR4 板)に塗布することである。また、塗布したカーボン面はその面抵抗が高過ぎると陰極側に流動してきた陽イオンを吸収することができなくなり、その場所で局所的に電場を弱めて不感領域を形成する。具体的には、 $10 \text{ M} / \square$ のカーボン面の場合、 $1 \text{ kHz} / \text{cm}^2$ の入射頻度に対して $\sim 50 \text{ V}$ の電圧降下が生じる。逆に低過ぎると、静電遮蔽により、カソード読出しである銅ストリップ板に電荷を誘導することができなくなる。また、近隣チャンネル間のクロストークも問題になる。したがって、カーボンは $0.5 \sim 2.0 \text{ M} / \square$ の面抵抗で、できるだけ一様に塗布する必要がある。図 3 - 7 に塗布の様子を示す。

ところで、パーツを接着する位置は対になる FR4 板で同一のポリプロピレン製の型を使用して決定する。そして、その部分に塗料がつかないようにマスキングする。この位置決め作業を適切におこなうことで、パーツ位置のずれによるワイヤーの断線を最小限にする。ただし、ボタン型スパーサーについてはマスキングの手間を考慮して、カーボンを塗布した後に接着箇所のカーボンを剥がす方法をとる。ところで、ポリプロピレンは熱膨張率が 11×10^{-5} ($1 / \text{C}$) と高く、温度に対する体積変化が大きい。具体的に、 $1200 \times 200 \times 1.4 \text{ mm}$ の板材を考えると 1 C の温度上昇で体積は $\sim 30 \text{ mm}^3$ 増加する。これは単純に長さ当り $\sim 100 \mu\text{m}$ の膨張を意味しており、位置決め精度を悪くする。したがって、位置決め作業は 25 C に空調管理された場所でおこなう。

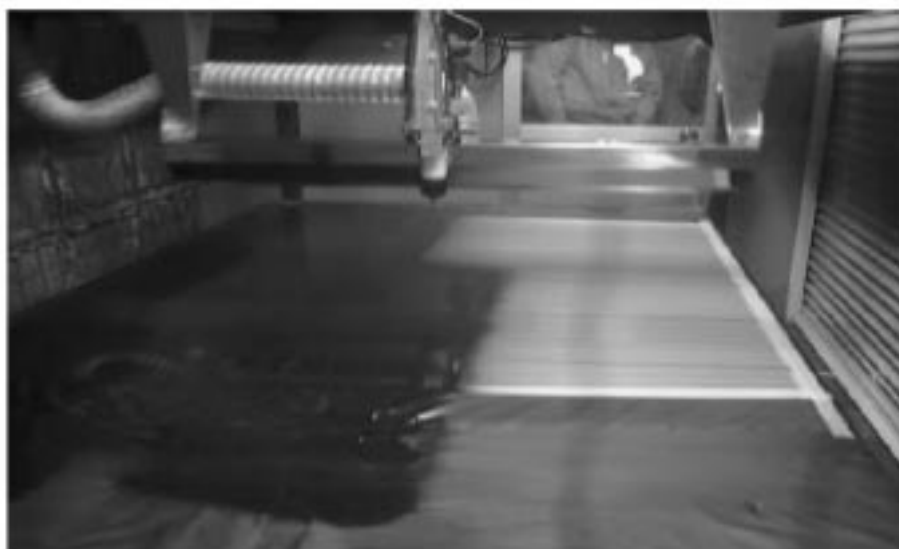


図 3 7 カーボン塗布

3 - 2 - 2 カーボン塗布システム

量産で使用しているカーボン塗布システムを図 3 - 8 に示す。カーボン塗布システムは二次元方向に可動するアクチュエータの先に空気圧制御のスプレーガンを取付けたもので、PC によって制御されている。塗布そのものは換気のできるブース内でおこなっている。さらに乾燥用のドライヤーとカーボン塗料の温度を一定に保つための恒温槽を備えている。また、塗布は空気圧制御により、開閉エア、霧化エア、パターンエアの各電磁弁を開閉させておこなう。各制御エアを ON にしたときの塗装パターンを図 3 - 9 に示す。霧化エアを ON にすると塗料は霧状になり、このエア圧力を上げるとキメの細かい塗布ができる。パターンエアを ON にすると塗装パターンは楕円形となり、広い面積を塗布できる。

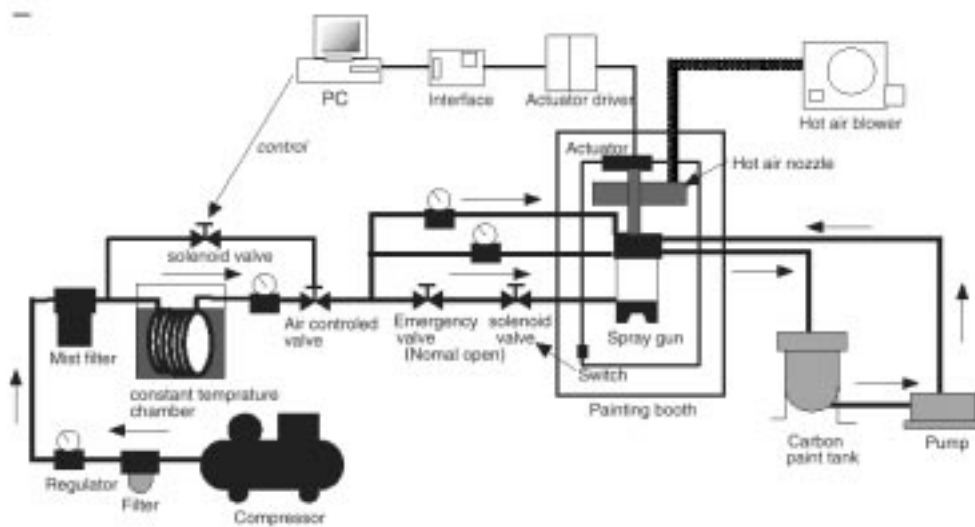


図 3 8 カーボン塗布システム

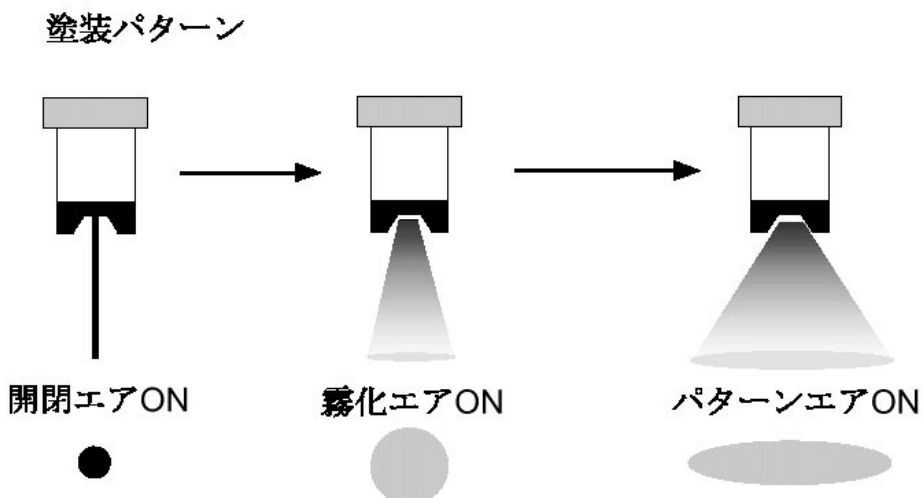


図 3 9 カーボン塗装パターン

3 - 2 - 3 カーボン塗布工程における改善点

これまでおこなってきた塗布方法は 1 枚当りの塗布量が多く、厚く塗っていたために、マスキングを剥がした部分にカーボンのバリができた。他にも、ボタン型スパーサーを接着するためにおこなうカーボン塗料を剥がす作業に時間がかかった。これらはいずれも接着不良の原因となるだけでなく、パーツ接着工程の作業効率を悪化させていた。したがって、これを改善するために塗布量を少なくした薄塗りの方法を開発した。この新しい方法に求められる条件は

マスキングを剥がした跡にカーボンのバリができないこと

ボタン型スパーサーを接着するためにおこなうカーボン塗料を剥がす作業が容易であること

カーボン面抵抗が 0.5 ~ 2.0 M の範囲であること

カーボン塗布作業の効率が良いこと

である。 、 の条件を満たすためには 1 枚当りの塗布量を減らすことで達成できる。具体的な塗布方法は 、 の条件からある程度高めの面抵抗値(3 ~ 10 M)で塗布しておいて、ランダムサンダーで磨くことで機械的にカーボン面上の凹凸をならし、面抵抗値を適切な値に調整するという方法をとる。さらにこの凹凸の少ない塗布をするためにはスプレーする塗料のキメを細かくすることで達成できる。

さて、 、 の条件を満たす塗布量を減らす方法としては

・吐出圧を下げ、ガン先から出る塗料の絶対量を減らす

・アクチュエータのスピードを上げて、塗料が出ている時間を減らす

ことが考えられる。 . の方法については適切な面抵抗値をだすための調整法として、普段からおこなっているもので、今回は . の方法を試した。他にもキメの細かい塗布をするために霧化エア圧を変更したものも試した。

1 回のテストにおける塗料の使用量はわずかであるので、使用量は塗装パターン断面の膜厚を測定することで判断した。そして同時に面抵抗値の測定もおこなった。まず、吐出圧、霧化エア圧を適当に変更して塗布したパターンの膜厚と面抵抗値の関係を図 3 - 10 に示す。図 3 - 10 より膜厚が厚ければ、面抵抗値が下がり、逆であれば、上がるという関係がみえる。

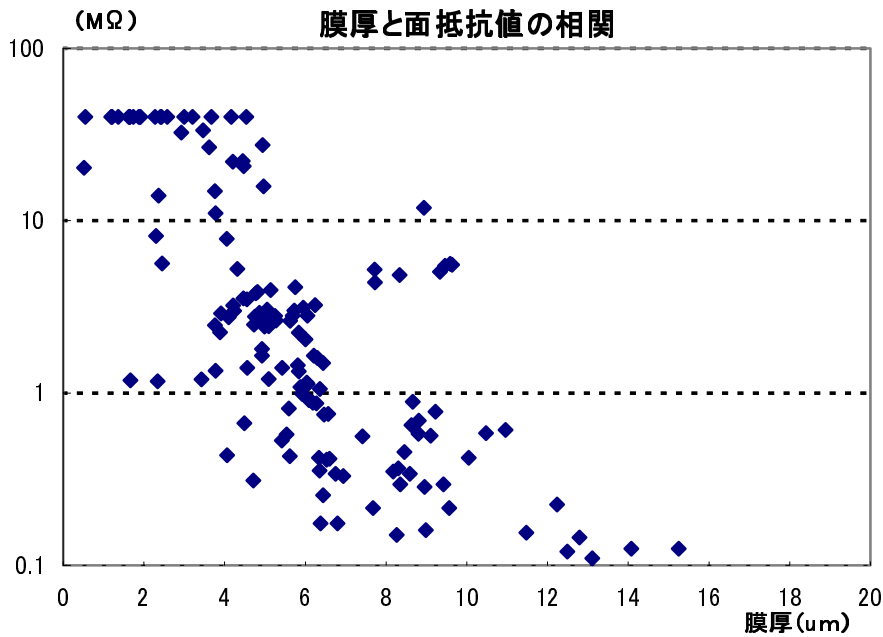


図 3 10 膜厚と面抵抗値の関係

図 3 - 11 に示すように従来の方法では膜厚を 8~10 μm で塗布していた。この時の吐出圧は 3.0V である。(膜厚の測定値はスムージングしてあり、点線間が視覚的に塗布パターンと確認できた領域である) 図 3 - 10 より、塗料の使用量を減らした上で、ある程度高めめの面抵抗値(3~10 M)を出し、ランダムサンダーで磨くという方法をとるためには 4~7 μm の膜厚で塗布すれば良い。膜厚を 4~7 μm で塗布している場合を図 3 - 12 に示す。この時の吐出圧は 2.0V である。そして、吐出圧を 2.0V にすることで膜厚はこれまでの方法の約半分になり、塗料の使用量が減っている。またこのとき、マスキング跡に残るカーボンのバリがなくなり、塗料を剥がしやすくなることも確認した。

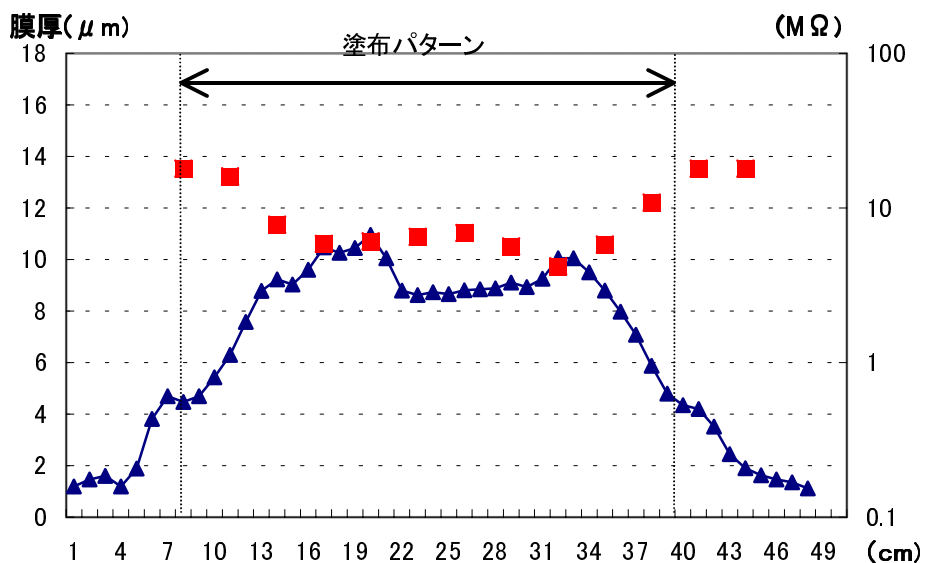


図 3 11 吐出圧 3.0V、霧化エア圧 ~ 100kPa(これまでの方法)
 ...カーボン面抵抗値(右軸、M)、 ...膜厚(左軸、 μm)

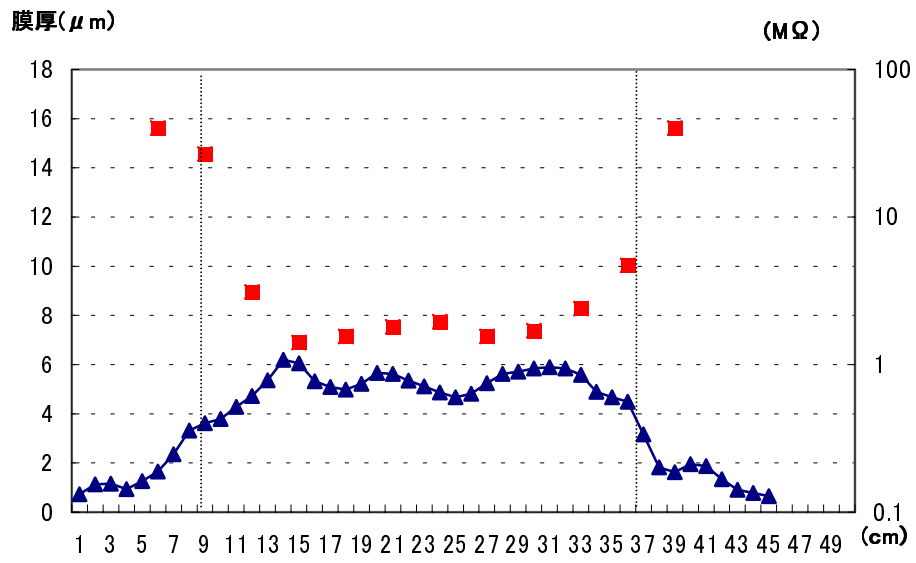


図3 12 吐出圧 2.0V、霧化エア圧 ~ 100kPa
 ...カーボン面抵抗値(右軸、MΩ)、...膜厚(左軸、μm)

さらに、カーボン面抵抗値も 2~10 M でランダムサンダーを使って磨く方法をおこなうことができる。(図 3 - 11 において面抵抗値は~1M、これは面抵抗値が高めにでた例である) 次にキメの細かい塗布をするために霧化エア圧を上げた場合の塗装パターンの膜厚と面抵抗値を測定した結果を示す。図 3 - 13 で霧化エア圧がこれまでのもの(霧化エア圧~100kPa)とこれまでより高くしたもの(霧化エア圧~150kPa)を比較した。なお、吐出圧は両方とも 2.0V である。キメの細かい塗布をすることによる膜厚の変化はほとんどない。一方で、面抵抗値はキメの細かい塗布をした場合にばらつきが小さくなっている。したがって、塗布量の多さが原因であるカーボンのバリや剥がしにくさの問題を悪化させることなく、キメの細かい塗布ができることがわかる。これらの結果を考慮して、新しい方法は吐出圧 2.0V、霧化エア圧~150kPa で塗布する。

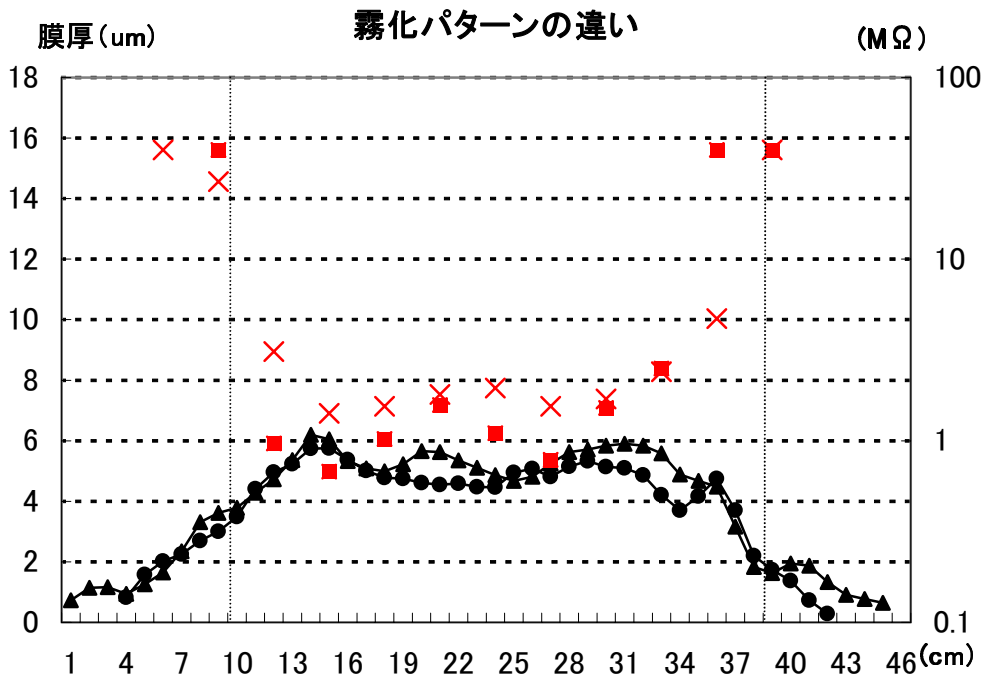


図 3 13 霧化エア圧の違いによる膜厚と面抵抗値の変化

膜厚...左軸

○ : これまでのもの(霧化エア圧~100kPa)

□ : 霧化エア圧を上げたもの(霧化エア圧~150kPa)

面抵抗...右軸

○ : これまでのもの(霧化エア圧~100kPa)

× : 霧化エア圧を上げたもの(霧化エア圧~150kPa)

これまでの方法で厚塗りした場合の面抵抗値と新しい方法で薄塗りした場合を比較した。FR4板1枚当りの塗料使用量はこれまでの~300gから新手法の導入により150~200gに減少した。これにともなって、カーボンのバリや剥がしにくさの問題が解決した。次に、カーボン面抵抗値の分布をそれぞれ図3-14、3-15に示す。薄塗りはある程度高めの面抵抗値(3~10M Ω)を出してからランダムサンダーによって磨くので、面抵抗値の分布はわずかに高い方へずれる。ただし、最近では、念入りにランダムサンダーで磨いているので、面抵抗値は低くなっている。パルステストにおける塗布方法の違いの比較は第4章で述べる。

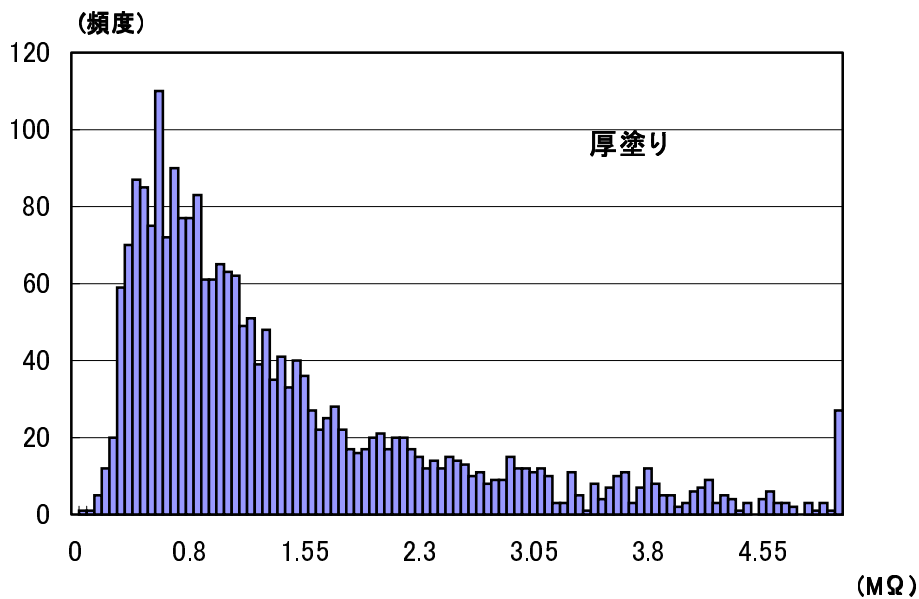


図3 14 厚塗りをした場合の面抵抗値の分布

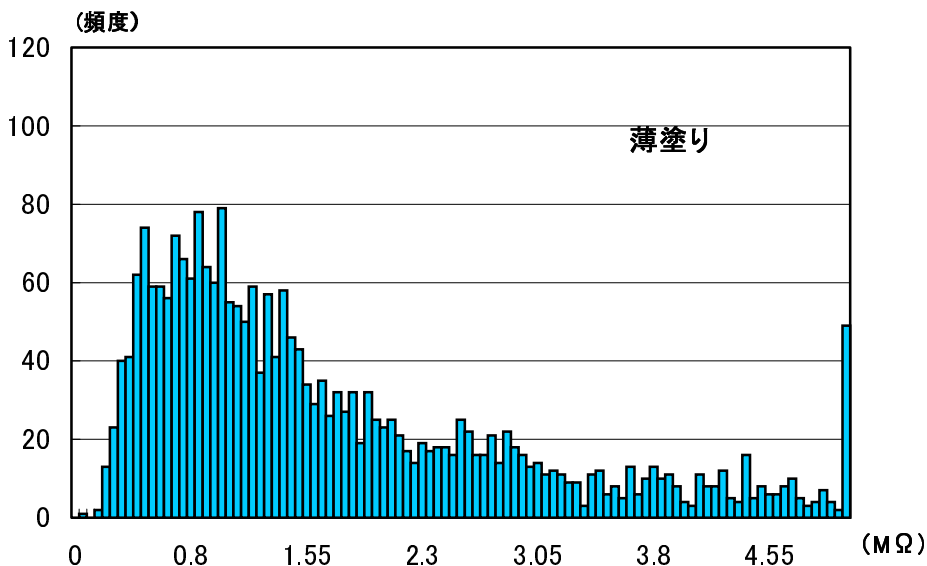


図3 15 薄塗りをした場合の面抵抗値の分布

3 - 3 パーツ接着工程

この工程ではガス領域の境界を形成するサイドフレームやガス領域間隔を一定に保つためのスペーサーを接着する。サイドフレームおよび棒型ワイヤーサポートはFR4できている。もう1つのスペーサーであるボタン型サポートはセラミックス製 (Al_2O_3) である。これらの外形は図3-16のように、それぞれが沿面放電を避ける形状になっている。また、接着剤はエポキシ系接着剤のアラルダイトを用いる。

この工程で重要なことは接着後にパーツの面位置が合っていることである。前述のようにカーボンのバリによって浮いて接着した場合など、TGCを閉じる際にワイヤー切断のおそれがあるので、次の工程には進めない。また、アラルダイトはフィレット形状に成り易く、各パーツの放電よけ部分にはみ出して放電開始電圧を下げる原因になる。この工程では接着剤の塗りを一定にする治具を揃えている。それらを図3-17、3-18、3-19に示す。棒型ワイヤーサポートはスクリーンメッシュを利用した治具、ボタン型サポートに対しては吐出量を調整できるオートディスペンサーを使用する。サイドフレームはマスキングテープの高さを目安にすることで100um以下の接着剤厚を実現している。接着時間は25に保たれたパネルハウス内で、16時間程取られている。アラルダイトは25の硬化温度で最低硬化時間は12時間である。また、接着時間後に目視検査によって、接着パーツの浮きがないか、接着剤のはみ出しはないかをチェックする。このチェックで問題が見つかった場合は接着したパーツおよび塗布したカーボン塗料を剥がしてやり直す。

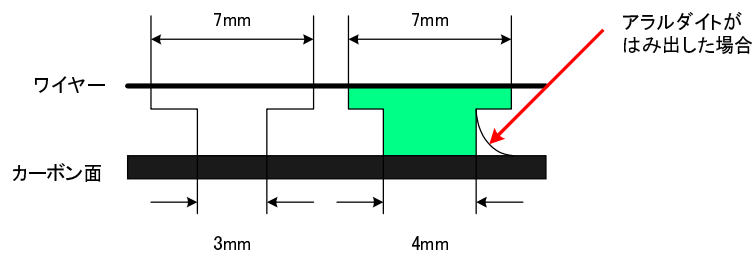


図3-16 スペーサー (左)ボタン型 (右)ワイヤーサポート



図3 17 パーツ接着工程
サイドフレームの接着準備
両側をマスキングして、適量の接着剤を塗る



図3 18 パーツ接着工程
ワイヤーサポートの接着準備
スクリーンメッシュを利用した治具を用いる



図3 19 パーツ接着工程
ボタン型サポートの接着準備
オートディスペンサーを使用する

3 - 4 ワイヤー巻き工程

この工程ではパーツを接着した FR4 板にワイヤーを巻く。ワイヤーを巻く FR4 板はグラウンド側に使用する。その厚みはワイヤーテンションに耐えられるように 1.8mm となっている。対になる銅ストリップのついた FR4 板は 1.6mm 厚である。作業は吸盤のついた天板の上にワイヤーを巻く FR4 板を固定し、吸盤で吸着することでこの平面性を確保する。ワイヤー巻き作業は自動化されており、 $\sim 1.8\text{mm}$ の間隔を保って、数時間で ~ 700 本のワイヤーを巻き上げる。作業の様子を図 3 - 20 に示す。

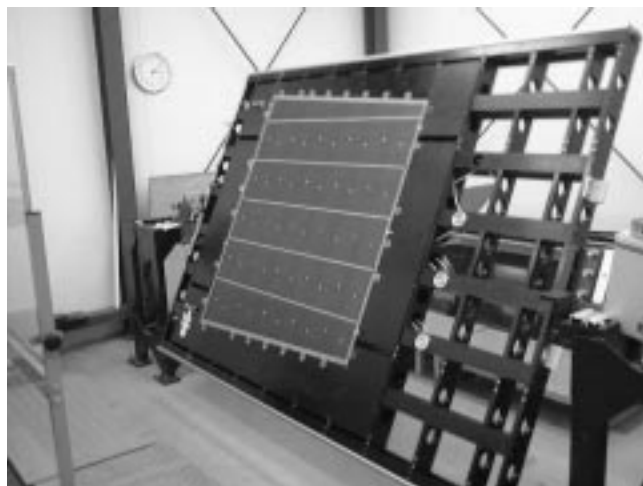


図 3 20 ワイヤー巻き作業

MWPC 構造はワイヤーに高電圧を印加すると、ワイヤー間のクーロン相互作用によってワイヤーは細かく振動する。このときワイヤーテンションが低過ぎれば、大きく振動し極板間に形成されている電場をひどく歪ませる。この場合、放電を起こして検出器としての性能を落とす。したがって、ワイヤーがある程度のテンションで張られることが必要になる。

検出器の時間応答性は陽極ワイヤー間距離に依存するので強いワイヤーテンションでワイヤーを張れる場合、このワイヤー間間隔を小さくすることができる。このとき、問題になるのはワイヤーを巻く板材の強度、ワイヤーを留めるはんだ付け強度、さらにはワイヤー自体の伸び弾性率などであり、これらによってどれだけワイヤー間間隔を小さくできるかは制限される。TGC は LHC の衝突間隔である 25ns を同定しなければならないので、ワイヤー間隔としては一般的な MWPC の 2.0mm に比べて、 1.8mm と小さい。使用するワイヤーも強度的な理由からワイヤー径 $50\mu\text{m}$ 、伸び弾性率の大きいタンゲステンワイヤーに金メッキを施したものを使用する。はんだについても一般的な錫 - 鉛の共晶はんだではなく、はんだ付け強度の高い錫 - 亜鉛の非共晶はんだを使用する。また、使用するフラックスは水溶性のものを使用し、それがカーボン面に付着しても水で洗浄できる。このようにして、TGC においては 350g 重/wire という強いワイヤーテンションで巻くことができる。巻き上げ後、抑えを外すと FR4 板はワイヤーテンションのために図 3 21 のように弓形にしなる。この工程のチェックとして、ここでワイヤーテンションが弱い箇所がないか目視検査をおこなう。テンションの弱い箇所についてはそのワイヤーを切断する。閉じ工程前のワイヤーの異常についてはこのような目視検査が重要になる。

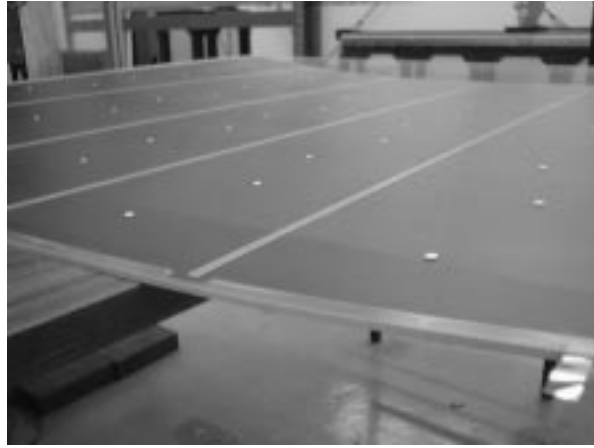


図 3 21 ワイヤーテンションにより湾曲した FR4 板

3 - 5 閉じ前 HV 試験・TGC 閉じ・ガスシール工程

3 - 5 - 1 HV 試験システム

ここではワイヤーを巻いた FR4 板と対になる FR4 板を重ね合わせて接着する TGC 閉じ工程をおこなう。そして、その前に HV がかかるか動作試験をおこなう。この動作試験を HV 試験と呼ぶ。HV 試験は TGC 閉じ前に HV がかかることを確認するためにおこなう。HV 試験をおこなうシステムは接着にも使用する。このシステムの優れている点は接着工程をするしないにかかわらず、仮想的に良い平面性をもった TGC の状態が実現できることにある。このシステムを図 3 22 に示す。ワイヤーを巻いた FR4 板と対になる FR4 板の 2 枚の FR4 板は定盤と吸着板で吸引され、それぞれの面は平面となる。このシステムはこの部分の良い平面性を保証する。そして、これ全体を上からバギングフィルムで覆い、バギングフィルムで覆われた空間を減圧する。バギングフィルムはシリコンラバーでできていて、密封状態を保つ。減圧が進むと図 3 - 23 のようにバギングフィルムは吸着板の上から FR4 板を押え付ける。~ 40mmHg 減圧するので、これと大気圧の差圧でバギングフィルムを押え付けることになる。こうして、2 枚の FR4 板の上下面は良い平面性をもち、重なり合う部分はぴったりと付いた状態が実現できる。

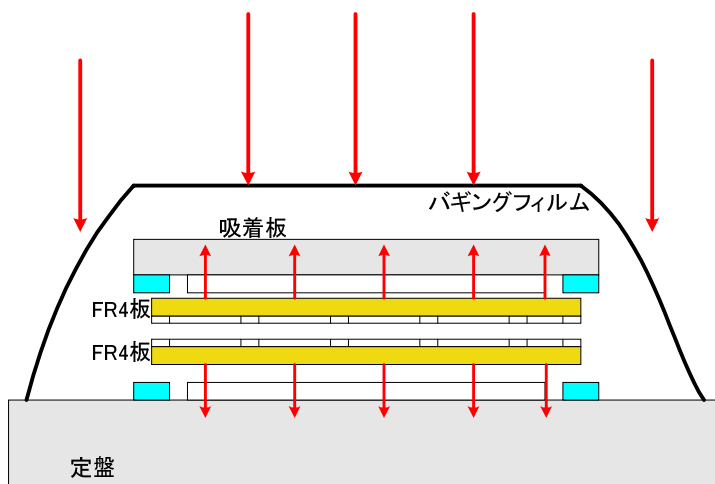


図 3 22 HV 試験システム



図 3 23 HV 試験セットアップ

3 - 5 - 2 HV 試験

HV 試験でかける HV の目安は TGC を制限比例モードで動かすのに必要な高電圧が基準となる。この動作モードで動かすためには CO₂ 雰囲気では 2.8kV がかかる必要がある。したがって、2.8kV でリークカレントが安定であるものを HV 試験合格とする。しかし、TGC ははじめて HV をかけた時、一般に放電開始電圧が低く 2.8kV までかけることができない。これは、極板がよく乾燥していない場合や極板上のゴミのために放電しやすくなっている場合である。他にも FR4 板に塗布したカーボン面の状況にも依存する。時間的経過として、しばらく HV をかけ続けると徐々に放電開始電圧が高くなり、最終的に 2.8kV の電圧がかかるので、しばらくの間、HV をかける必要がある。この HV をかけ続けることで放電開始電圧が上がる効果を化成(コンディショニング効果)という。

TGC の量産が開始されて以来、この HV 試験にも多くの時間を費やしてきた。この工程の作業効率は悪く、早急な改善が求められた。したがって、作業性を改善するために新システムの導入をおこなった。以下では、その方法について説明する。

3 - 5 - 3 HV 試験における改善点

まず、HV 試験の新システム導入のために、TGC の化成に関する理解を深めた。TGC は化成の時、構造的にコロナ放電によって焼入れがおこなわれる。

これは TGC の陽極ワイヤー表面において、コロナの発生条件を満たすからである。具体的には、コロナ発生による電場の変分が増加傾向でさらに放電を発達させるのか、逆に減少傾向で安定な放電に移行するのかを考えることで導く。まず、TGC 内の電場構造を同軸円筒型と仮定し、簡単のためにコロナ内部で電場は 0、コロナ外部の空間電荷の影響も無視する。円筒内の電場 $X(r)$ は次の式で与えられる。

$$X(r) = \frac{V}{r \ln \frac{R}{r_0}}$$

ここで、 V は極板間に印加された電圧、 r は中心軸からの距離、 R は外側電極の半径、 r_0 は内側電極の半径である。ところで、コロナの発生は電場が最大の所で起こるので、はじめは内側電極上から起こる。また、そのときの電場は、 $X(r_0) = V/r_0 \ln R/r$ である。そして、コロナ発生によって、内側電極のまわりに新たな電荷の分布ができるが、コロナ内の電場はゼロという仮定に基づけば、次にコロナが発生する電場が最大の場所はコロナの先端 r' になり、その電場は $X(r') = V/r' \ln R/r'$ になる。そして、この時の電場の変分が増加傾向なのか減少傾向なのかを判定することがコロナの発生を判断することと同値になる。

$$X = \frac{V}{r \ln \frac{R}{r}} = \frac{V}{r \log R - r \log r}$$
$$dX = - \frac{V}{r \log \left(\frac{R}{r}\right)^2 \left\{ \log \frac{R}{r} - 1 \right\}} dr$$

$$\frac{dX}{dr} = \frac{V\{1 - \log \frac{R}{r}\}}{r \log(\frac{R}{r})^2}$$

式は中心軸からの距離が r のところの電場をあらわす。ここで、電位が 1 番高い内側電極表面上における電場が負ならば、コロナが発生する。また、正であれば、コロナが発生することなく火花放電を起こす。したがって、式を $= 0$ とおいて、分子部分の大小関係を考えれば、

$$1 - \log \frac{R}{r_0} = 0$$

$$\frac{R}{r_0} > 2.718$$

ここに 式を満たす場合、式が負になる。 $R = 1.4\text{mm}$ 、 $r_0 = 0.05\text{mm}$ とおけば、 $R / r_0 = 28$ となり、TGC の構造でコロナが発生する。したがって、TGC の化成はコロナ放電によっておこなわれる。図 3 - 24 に実際の HV 試験開始直後の電圧 - 電流特性を示す。

ヒステリシス曲線

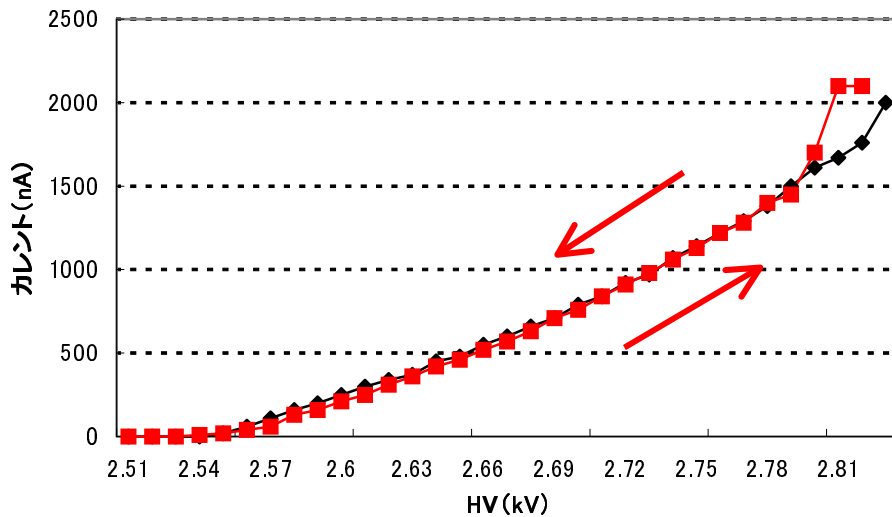


図 3 24 TGC の焼入れの電圧 - 電流特性

HV が低い範囲ではリークカレントはほぼ 0 A である。~2.54kV よりリークカレントの上昇が始まっている。そしてリークカレントは非常に安定している。この時、TGC 内部では膜状コロナのように安定な部分放電が起こっていると考えられる。経験的に 500 nA 程度以下の低いカレント量でなければ、この状態で HV をかけ続けてもカレント量は下がらず変化しないことが多い。さらに電圧を上げると~2.79kV で、電流値を示す針が細かく振れるようになる。この状態から電圧を下げるとヒステリシスが観測される。このときも部分放電を起こしているが、もはや膜状コロナではなく、ストリーマーコロナのように脈動的に変化するコロナ放電に移行したと考えられる。ヒステリシスが現れる理由は電圧を下げても脈動的な放電がしばらく続くからである。経験的に、針が細かく振れる状態でしばらく HV をかけ続けるとカレント量が減って安定した後、より高い電圧までかけることができる。

次に、積極的に針の振れる状態で、化成を促して HV がかかるようにする方法を試した。はじめ手動でおこなって、手応えをつかんだので、システムの自動化を図った。HV 試験のシステムを図 3 - 25 に示す。HV モジュールに付属の電圧、電流モニターの値を AD 変換ボードによって PC に取込むと同時にディスプレイに表示している。また、この時に電流モニターの値を判定して、TGC にかける HV の値にフィードバックをかける。このときのモニター画面を図 3 - 26 に示す。図 3 - 26 の が HV モニターであり、 がカレントモニターである。それぞれの縦軸のフルスケールは HV が 3kV、カレントが $2\mu\text{A}$ である。また、横軸のフルスケールは 6 時間である。図 3 - 26 より、システムは放電によって大きな電流が流れると、放電を止めるために設定電圧値を下げる。逆に、電流が流れない場合は目標電圧値に向かって少しずつ設定電圧値を上げる。

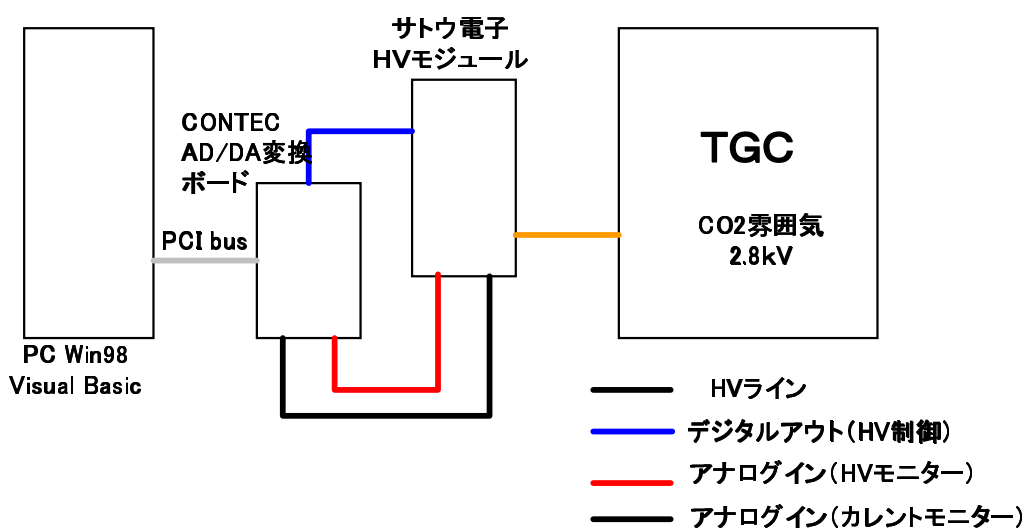


図 3 25 HV 試験システム

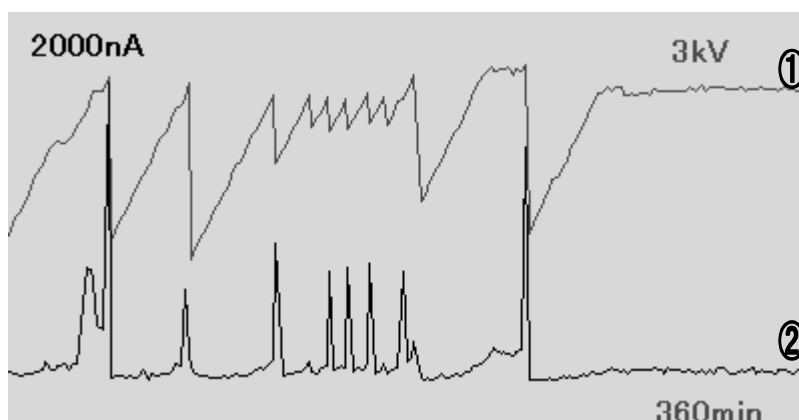


図 3 26 HV 試験モニター

このシステムで TGC の焼入れをした場合、HV がかかるまでの時間的推移を図 3 - 27 に示した。図 3 - 27 は 2001 年 12 月以降に HV 試験をおこなった 48 台の TGC に対するデータである。横軸に HV 印加時間の合計をとる。縦軸はその印加時間で 48 台中何台の TGC に 2.8kV かけることができたのかをパーセンテージで表す。図 3 - 27 より、HV 印加後、1 ~ 2 時間で 4 割程度の TGC に 2.8kV かけることができた。合計印加時間の増加とともに、2.8kV かかった TGC の枚数が緩やかに増加している。HV 印加後、1 ~ 2 時間の急激な増加の理由は 2.8kV でリークカレント値が安定なもの他に不安定なものも含むからである。印加開始 ~ 1 時間は HV が 2.8kV に達する前に HV 電源の設定限界値を超えた電流が流れて、HV 電源がおちる。このため、2.8kV にかかるのは ~ 10% (48 台中 5 台) ほどである。印加開始 ~ 2 時間になると不安定であるが 2.8kV の HV がかかるものが出てくる。そして、これ以後は不安定な状態から安定な状態になり HV が 2.8kV にかかる TGC の数が増加する。ところで、全体の ~ 25% (48 台中 12 台) は 17 時間 HV をかけ続けても 2.8kV まで達しない。これらの TGC は 2.8kV かけるために極板間に逆バイアスをつけるなど、他の方法をとる。なお、17 時間というのは、量産作業終了の 1 時間前にあたる午後 4 時に HV 印加を開始した場合、翌日の作業が開始される朝 9 時までの時間である。HV 試験は翌日の昼過ぎまでに達成すれば量産ペースを落とさないもので、17 時間を越えて 2.8kV かからないものでも、翌日の朝から他の方法を試すことで、午後にはだいたい 2.8kV がかかるようになる。したがって、HV 試験システムの 75% という実績は量産ペース的に問題はなく、このシステムの導入により 24 時間以内で HV 試験がおこなえるようになった。

図 3 - 28 に、HV 試験終了時のリークカレント値を示した。全体の 93% (~ 220 台) の TGC が 100 nA 以下で安定して 2.8kV かかっている。量産では基準を厳しく取り、HV が 2.8kV のとき、リークカレント ~ 100 nA 以下であることを合格の目安にしている。図 3 - 28 の 300 nA を越えた TGC についても、この状態で安定であるので、HV 試験をパスしている。そして、これまでに量産された TGC のうち閉じ前の HV 試験をパスできないものは出ていない。

焼入れ時間に対するHVのかかり方

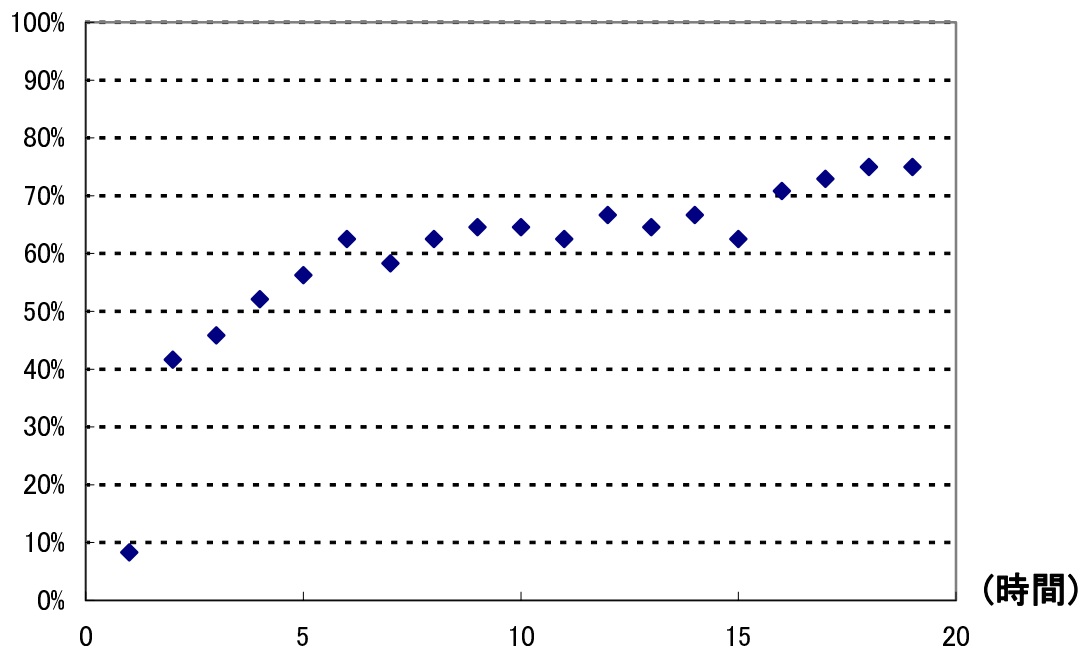


図 3 27 2.8kV かかるまでの時間
縦軸：48 台中何台が 2.8 k V かったのか
パーセンテージで示す

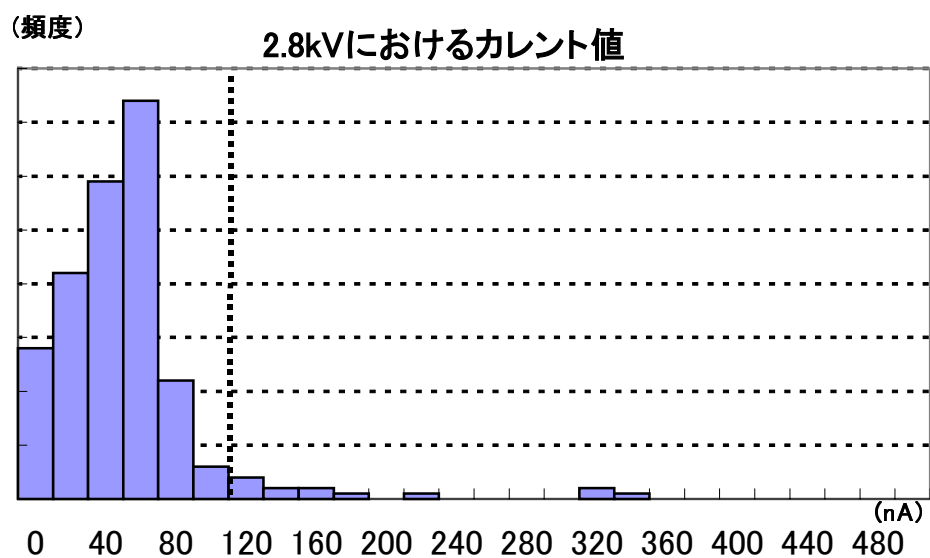


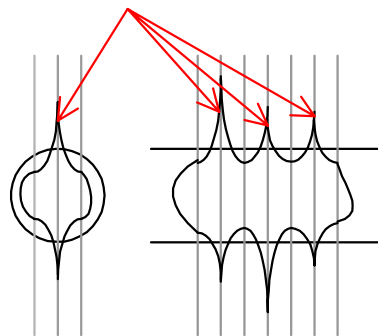
図 3 28 2.8kV におけるリークカレント

3 - 5 - 4 TGC 閉じ・ガスシール工程

TGC 閉じの接着作業は HV 試験と同様のセットアップでおこなう。ここでの問題はスペーサーに塗った接着剤がワイヤーに沿ってフィレット形状を形成することである。ワイヤーに沿ってできるフィレット形状のイメージを図 3 - 29 に示す。これは HV をかけた時、ワイヤーが振動して断線する原因になる。したがって、接着作業では接着剤の塗りを一定に保つための治具を使用する。これらの治具を図 3 - 30、3 - 31 に示す。

接着工程作業の確認として、浮いて接着された箇所がないか目視検査をおこなう。

ガスシール工程は TGC の周囲 4 辺をアラルダイトでモールドする。ガスシール作業をするために TGC を回転台にのせて、モールドする辺が上にくるようにする。図 3 - 32 に回転台を示す。この回転台は TGC を吸着できるようになっていて、平面を出した状態でのガスシールが可能になっている。なお、ガスシールで流し込むアラルダイトはそのまま使用しない。これはアラルダイトの粘性によって、作業性が悪くなるだけでなく、気泡ができやすくなるからである。したがって、アラルダイトは温めて、粘性を低くする。なお、アラルダイトは熱反応によって硬化するので、温めることで硬化時間も早くなる。



フィレット形状のイメージ

図 3 29 ワイヤーに沿ってできるフィレット形状のイメージ

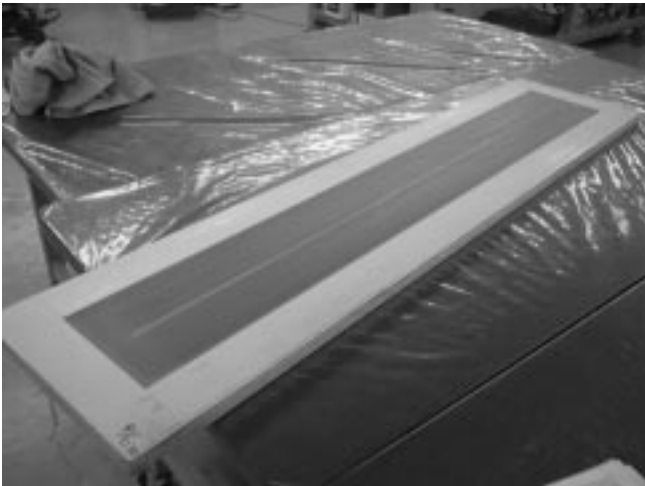


図 3 30 接着治具
スクリーンメッシュの利用により、一定量の
接着剤を棒型パーツに塗る



図 3 31 接着治具
オートディスペンサーの利用により、一定量
の接着剤をボタン型パーツに塗る



図 3 32 ガスシールのための回転台
TGCを吸着することで平面を出しながら
ガスシール工程ができる

3 - 6 シングレット動作確認工程

この工程では次の D/T 接着工程の準備として、2 枚組のモジュール(ダブルレット)、3 枚組のモジュール(トリプレット)にする単体の TGC(シングレット)の HV 試験とガスリークのチェックをおこなう。ここでおこなう HV 試験の様子を図 3 - 33 に示す。HV をかけたとき、湿度が高いと外部の配線部分で放電するので、除湿したビニールハウス内でおこなう。HV 試験をおこなうプログラムは閉じ前 HV 試験と同様のものを使い、2.8kV がかかることを確認する。

つづいて、ガスリークチェックをおこなう。これをおこなうシステムを図 3 - 34 に示す。TGC の内圧を 150Pa に保つように微差圧計の値でフィードバックをかけながら、ソレノイドバルブの開度を調節する。もし、TGC にガス漏れがある場合、内圧が下がるので、ソレノイドバルブの開度が大きくなり、TGC 内部に空気を送り込む。ガス漏れがない場合、内圧は下がらないので、ソレノイドバルブの開度は変化しない。なお、このシステムはガス流量を調節するために常に一定の流量を排気している。ガス漏れ量は TGC 内に送り込む流量を流量モニターで測定する。ガスリークの測定結果を図 3 - 35 に示す。図 3 - 35 より TGC 閉じ後のガスシールでしっかりとシールができています。



図 3 33 シングレット HV 試験

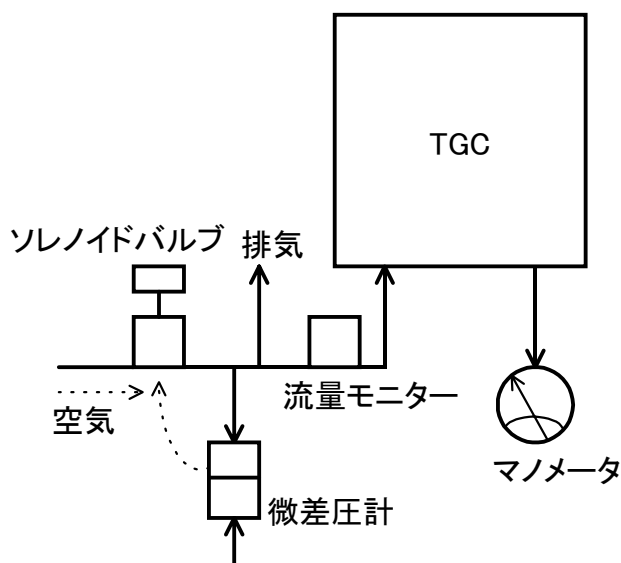


図 3 34 ガスリークチェックシステム

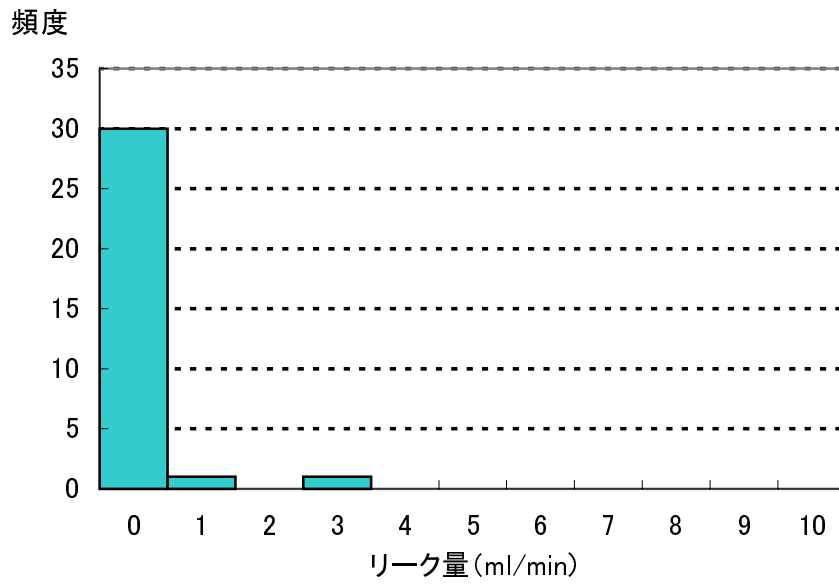


図 3 35 ガスリークテスト(注)

3 - 7 D/T(ダブルレット/トリプレット)接着工程

3 - 7 - 1 接着システム

ここで使う接着システムにも良い平面性をもつモジュールを製作することが要求される。その接着システムを図 3 - 36 に示す。定盤と吸着板で吸引することでモジュールの上下面の平面を保証するのは TGC 閉じの接着システムと同じである。そして、バギングフィルムによって全体を抑え付けることも同じである。一方、この接着システムの特徴は TGC の内圧を一定に保ちながら接着できることである。これによって、接着中に TGC が潰れるのを防ぐ。この内圧を一定に保つシステムは前のガスリークシステムと同じものである。システムは微差圧計によってモニターした TGC の内圧と大気圧の差が常に一定になるようにソレノイドバルブの開度を調整する。また、TGC を取り囲むように置いたスペーサ - は補強材である FRP フレームの接着位置を決めるだけでなく、TGC 本体に横方向の力がかかるのを防ぎ、上からの均一な力だけで接着できるようにする。3 枚組であるトリプレットの接着を完了するまでに 3 回の接着工程をおこなう。そして、ダブルレット接着後、トリプレット接着後には TGC 表面の平面性のチェックをおこなう。平面性のチェックでは TGC の測定面上に置いた平行(たわみや反りのない定規)との隙間間隔を測定する。平面性の精度は FR4 板の製品精度により、 $\sim \pm 100\mu\text{m}$ 程度である。一方、陽極 - 陰極間間隔が 1.4mm から 1.5mm に広がった場合(ガスギャップ 3.0mm)、実際の検出時における出力パルス波高で 35% 減少することがわかっている。歪みの大きいものに対しては、この後の製作を中止する。平面性測定結果の一例を図 3 - 37 に示す。測定面を 25 の格子に分けて測定した。図 3 - 37 より、TGC の中央部分に 100 μm の歪がある。

次に平面性測定の結果として、横軸に歪みの大きさ(μm)、縦軸に測定点の個数を対数軸でとったものを図 3 - 38 に示す。1 つの測定面に対し、12 箇所測定した。昨年 12 月までに量産した 70 トリプレット分の測定結果である。図 3 - 38 より、300 μm 以上の歪み箇所をもつ測定点は $\sim 1\%$ 程度である。そして、歪みの大きい測定点の全てが平面性の悪い 2 台のトリプレットで測定された。歪んだ原因は平面を出すための吸着板の不具合であることがわかっている。なお、500 μm の歪みを持つ TGC についてはパルステストからの考察を第 4 章で述べる。

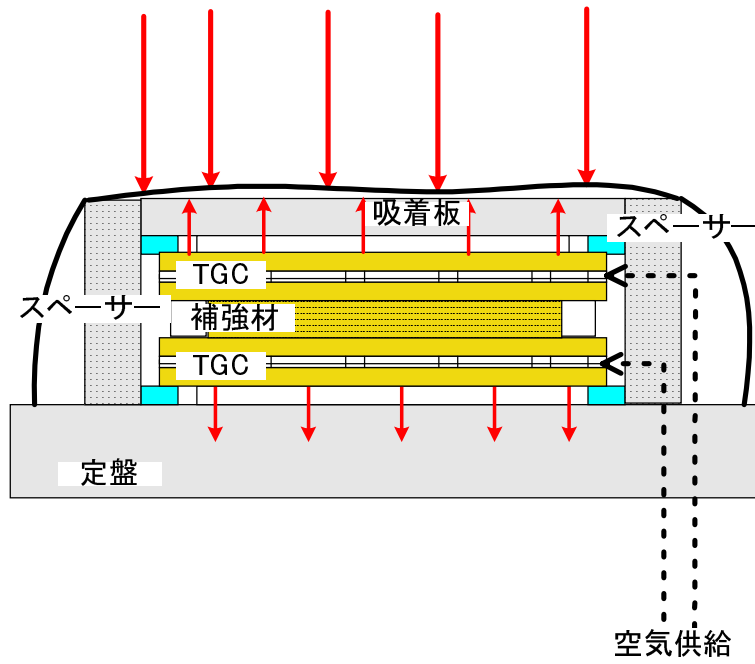


図 3 36 ダブレット閉じシステム

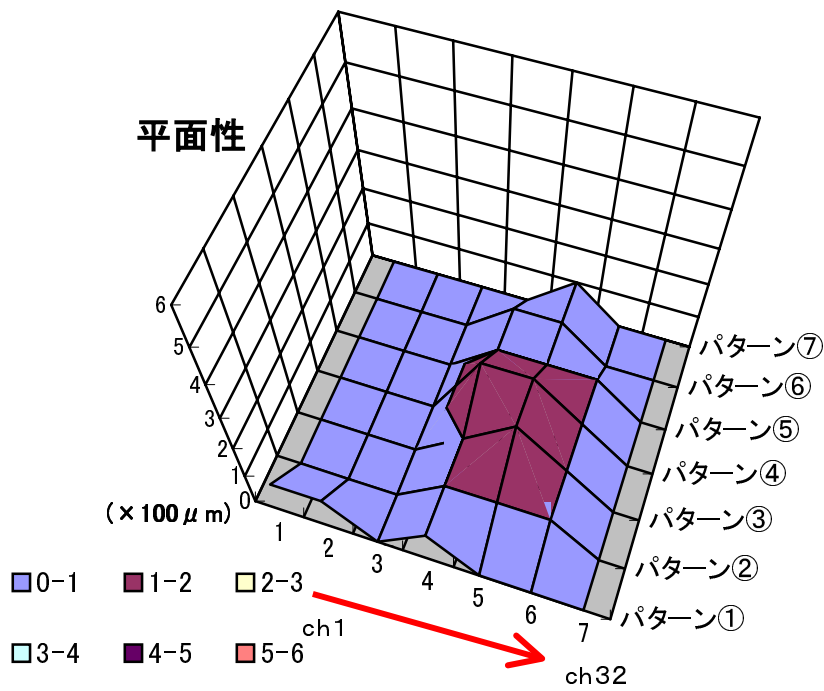


図 3 37 平面性測定 of 1 例

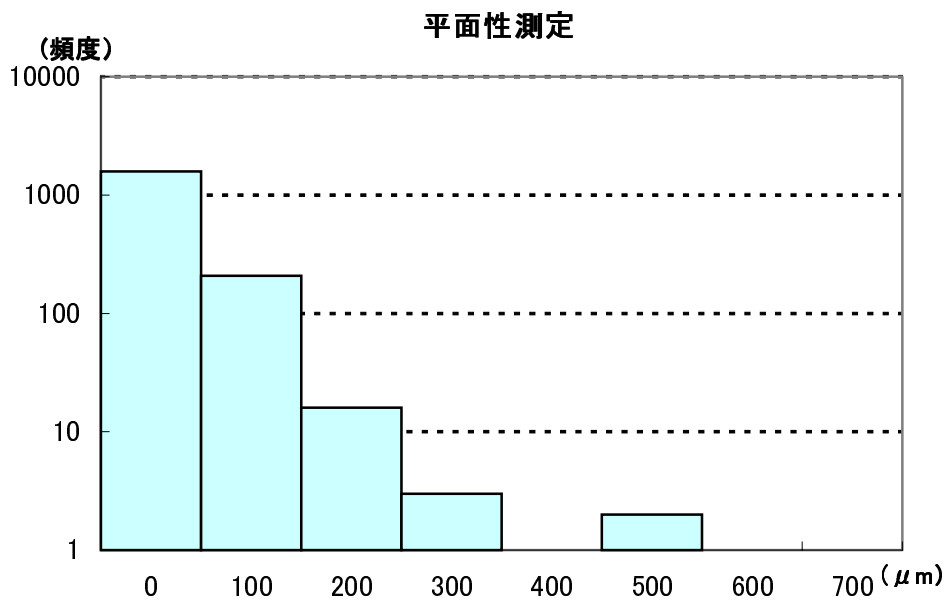


図 3 38 歪み箇所数の頻度

3 - 8 読出しボード・CO₂チャンネル作成工程

3 - 8 - 1 工程の概要

この工程で TGC のシグナル読出しボードを取付ける。ボード表面はエッチング加工されていて TGC 本体と前置増幅器である ASD (Amplifier-Shaper-Discriminator) の間を結ぶ配線となる。他にも湿気対策のため、図 3 39 のように、このボードにふたをして内部を CO₂ 雰囲気にする。これによって、高電圧をかけている配線部分や TGC のサイドフレームを接着しているアラルダイトが直接、外気に触れることを避ける。これは、高電圧をかけている配線部分が外気の湿度によって気体絶縁破壊を起こしたり、アラルダイトの吸湿性のために湿度の高い外気に長時間さらすことで通電したりするからである。この部分は CO₂ チャンネルと呼ばれ、モジュールの周囲 4 辺を取り囲むように取付ける。CO₂ チャンネルの他の役割として、静電遮蔽がある。CO₂ チャンネルを構成するパーツの外側は銅ベタ板となっており、これらはモジュールが外部電場の影響を受けないようにファラデーケージとして機能する。なお、CO₂ チャンネル作成はアラルダイトによるモールド作業であるので、CO₂ チャンネル作成後には断線部分の修復などおこなうことが困難である。したがって、この作業前に結線テストであるパルステストと HV 試験による動作確認をおこなう。さらに、HV 電源からの高周波成分をカットするローパスフィルタの取付けも CO₂ チャンネル作成前におこなう。



図 3 39 CO₂ チャンネル取付け

3 - 8 - 2 配線処理

読出しボード取付け作業の前準備として、配線処理をおこなう。具体的な配線処理としてはグラウンディング作業がある。グラウンドを共通にするためブリッジを渡す箇所は

カーボン面～TGC グラウンド間

モジュール内の TGC グラウンド間

読出しボード～TGC グラウンド間

である。 ～ を図 3 - 40 に示す。

はカーボン面に圧着されている銅箔リボンを TGC のグラウンドに落とす。これによって、カーボン表面に達した陽イオンに電子を与えることができる。 はモジュール内の TGC 間にブリッジを渡す。このときストリップ読出しを潰さないように図 3 41 のようにカプトンテープによる処理をする。 は読出しボード取付け後、銅箔リボンをはんだ付けする。

また、読出しボードは図 3 42 のようにスルーホール加工している。これはスルーホール部分で配線の接合強度が上がるだけでなく、回路素子の足をホールに入れてはんだ付け作業できるので、作業効率が上がった。また、読出しボードは CO₂ チャンネルのフタをはめ込むために図 3 43 のようなスペーサーを使用して直立に取付ける。読出しボードを取付けた後、配線が結線しているのか確認をする。この確認はパルステストによっておこなう。

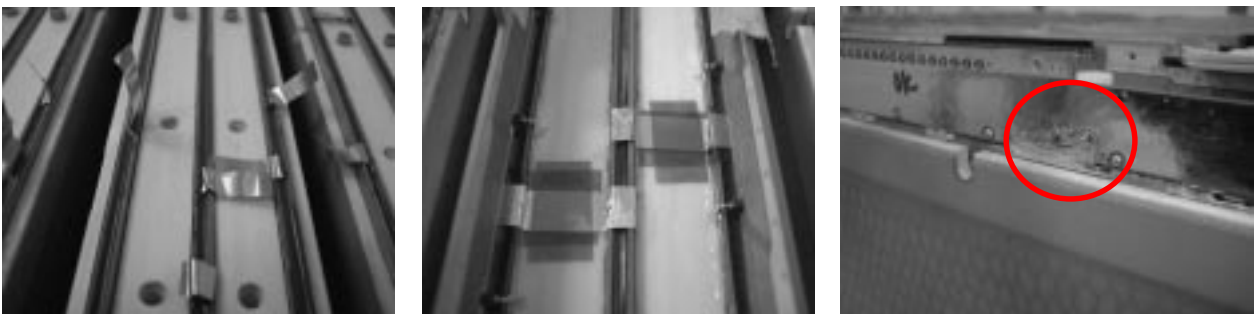


図 3 40 グラウンディング作業
(左)カーボン面～TGC グラウンド間
(中)モジュール内の TGC グラウンド間
(右)読出しボード～TGC グラウンド間



図 3 41
カプトンテープによるストリップチャンネルを潰さない処理

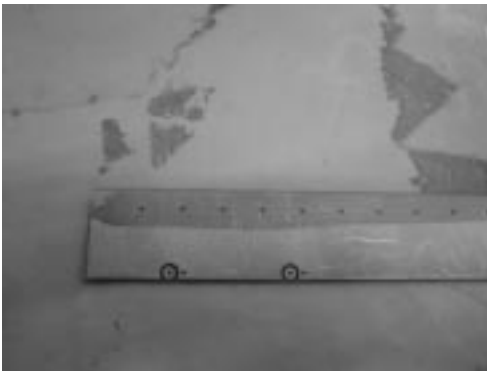


図 3 42
スルーホール加工された読出しボード

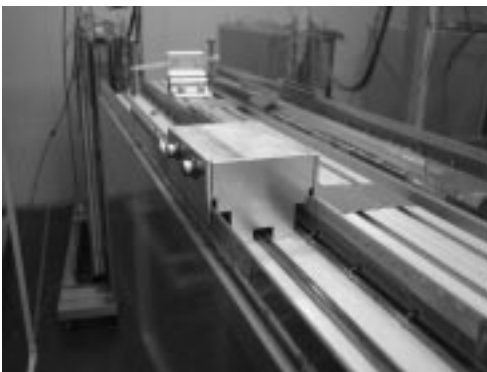


図 3 43
読出しボードの取付け間隔を一定にするためのスペーサー治具

3 - 8 - 3 パルステスト

パルステストによってTGCの各チャンネルがきちんと結線しているか確認する。パルステストはTGCの読出しがコンデンサで切られているので、これを通り抜ける矩形波のような高周波を入力しておこなう。実際に検出器として動作する場合も、シグナルとして高周波を扱うので、パルステストはTGCの高周波に対する応答性を評価できる。パルステストのシステムを図3-44に示す。

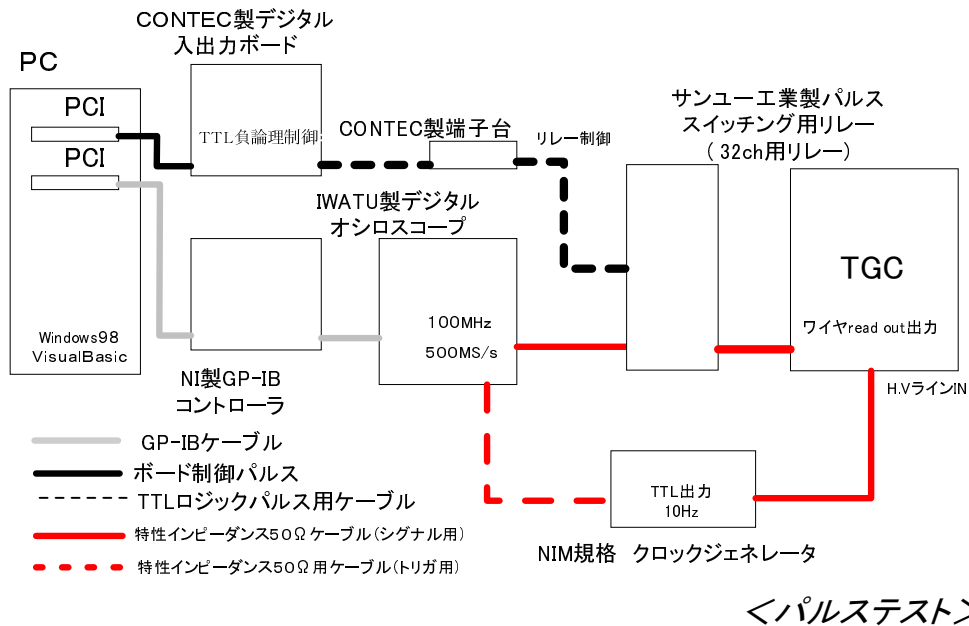


図 3 44 パルステストのシステム図

パルステストはTGCのHVラインに矩形波を入力し、各チャンネルからの出力パルスを測定する。矩形波はNIMモジュールのクロックジェネレーターによってTTLレベル、50ms、10HzでTGCに入力する。出力パルス波形の取込みはデジタルオシロスコープでおこなう。実際の取込み波形を図3-45に示す。図3-45には入力の矩形波と出力パルスが描かれている。出力パルスは32チャンネル分あるいは23チャンネル分重ね書きされている。そして、出力パルスは図3-45より $\sim 100\mu\text{s}$ のオーダーで立ち上がっている。取り回しのケーブル長に対して十分に遅く低周波として扱えるので、1Mの高インピーダンスでターミネイトする。さらに、デジタルオシロはGP-IBで制御する。そして、デジタル入出力ボードでリレー回路を制御して、チャンネルの変換をおこなうことで、ストリップ読出し32チャンネル分あるいはワイヤー読出し23チャンネル分の測定がPCによって自動的におこなわれる。なお、測定している読出しについてはすべてのチャンネルを1Mでターミネイトしている。

各チャンネルの典型的なパルス波高分布を図3-46、図3-47に示す。なお、これらの詳しい解析は第4章で述べる。この分布はTGCの構造とカーボン面抵抗値で決まる。そして、パルステストはこの典型的な分布から大きく外れたチャンネルを発見することで結線状態を判断する。例えば、チャンネルが断線の場合は何も出力されない。このようなチャンネルを持つTGCが150台中20台程度見つかった。原因は読出しボードのエッチング部分の加工不良、はんだ付け部分のはんだ不良である。そして、これらの不具合

は全て修復し、作業者の熟練とともにその数を減らしている。

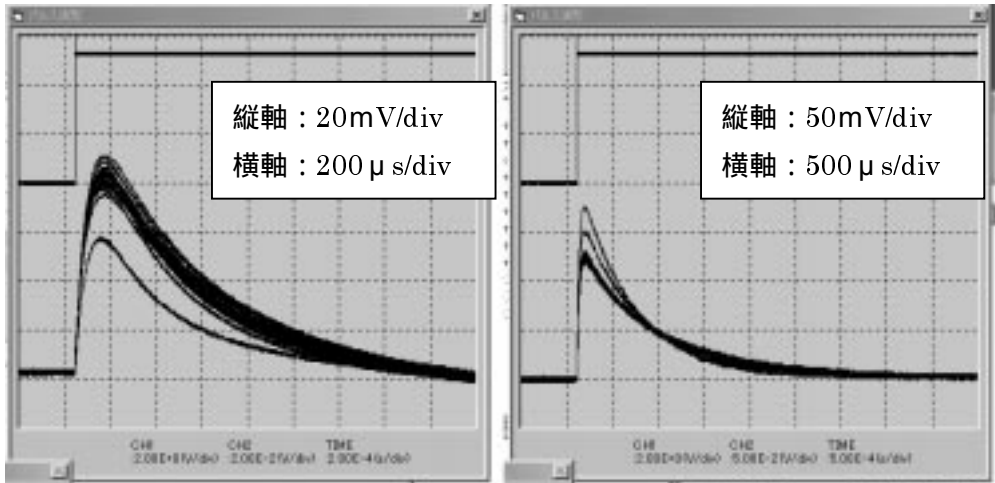


図 3 45 実際の取り込み波形 (左)ストリップ読出し (右)ワイヤー読出し

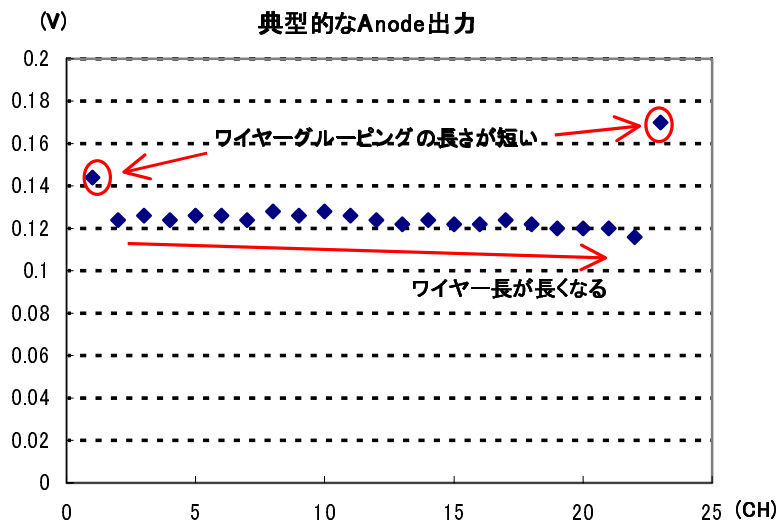


図 3 46 各チャンネルの典型的なワイヤー出力波高分布

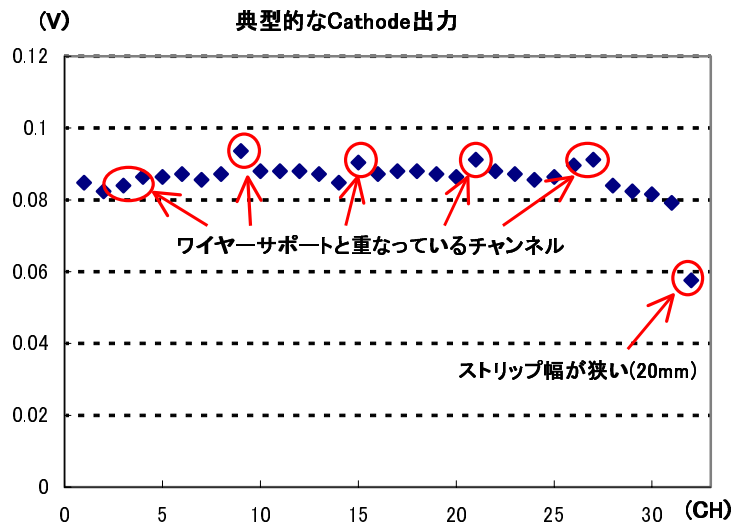


図 3 47 各チャンネルの典型的なストリップ出力波高分布

他の例として、パルステストした 150 台中 6 台の TGC で、隣どうしのストリップチャンネルの導通が見つかった。隣どうし導通したチャンネルは図 3 - 48 に示すように、他のチャンネルに比べてパルス波高が高くなる。導通の原因として銅ストリップ間をフライス加工した時の切り子がストリップ間をブリッジすることが考えられ、FR4 板を検査した。検査の結果、同じように切り子がストリップ間をブリッジしているものが見つかり、これ以後、マスキング工程前にこの切り子を取り除く作業を加えた。なお、この作業を加えた後に量産されたモジュールに関してはストリップ間の導通は見つかっていない。

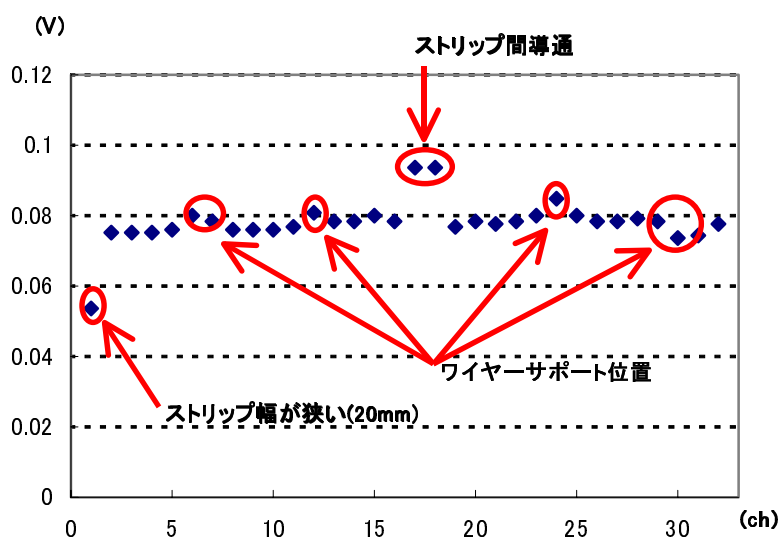


図 3 48 隣どうし導通している例(ストリップ出力)

3 - 8 - 4 CO₂チャンネル作成前 HV 試験

パルステストによる結線チェックで問題がなければ、再び HV 試験による動作チェックをおこなう。ここでの HV 試験の目的はモジュール化までの工程作業中や運搬中に問題が発生して、HV がかからないことがないか確認することである。現在まで、150 台中 2 台の TGC で HV がかからなくなっている。その原因としてはワイヤーの断線などが考えられ、実際に 1 台の TGC に関してはワイヤーの断線を確認した。断線の原因は現在、調査中である。1 つの推測としては、閉じ前 HV 試験の準備で FR4 板を重ね合わせる動作を繰り返す時にワイヤーとスペーサーが擦れ合うことで、ワイヤーのせん断強さが弱くなるケースが考えられる。そして、HV をかけたときのワイヤーの振動で断線するというものである。したがって、TGC 閉じ工程では FR4 板を重ね合わせる動作を少なくするように作業内容を変更した。

また、HV 試験と平行してチェックソースを用いてガス増幅によるシグナルが出ることを確認している。これらをおこなっている様子を図 3 - 49 に示す。また、この作業部屋は 1 度に 10 モジュール分の TGC(30 台)に HV をかけることができる。また、24 、 24%に空調管理しており、湿度が高くなって、TGC 外部で気体絶縁破壊が起こらないようにしている。図 3 - 50 にここでの HV 試験の結果を示す。2.8kV の HV に対してリークカレント 100 nA 以下で安定に動作している。これは TGC 閉じ前の HV 試験の結果からほとんど変化ない。また、HV 試験をパスしたモジュール全てにおいてガス増幅によるシグナルが出ていることを確認した。



図 3 49 CO₂チャンネル作成前 HV 試験

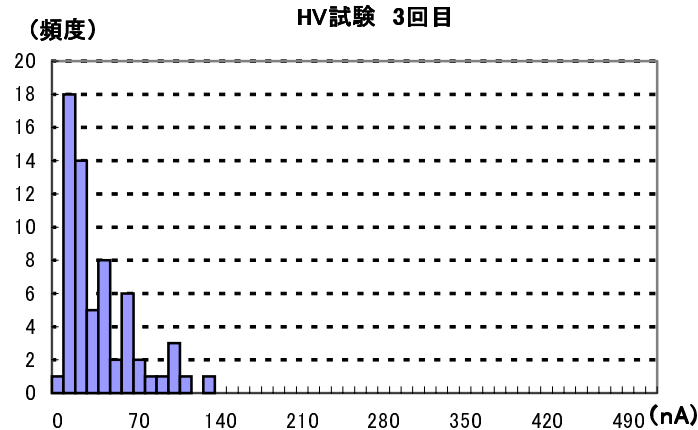


図3 50 CO₂チャンネル作成前 HV 試験結果

3 - 8 - 5 CO₂チャンネル作成工程

CO₂チャンネル作成の作業内容はアラルダイトを用いたモールド作業である。このモールド作業はモジュールの4辺全てについておこなうので、回転台を使用する。回転台にのせて、モールドしている様子を図3-51に示す。次に読み出しボードとTGC本体の間のモールド部分を図3-52に示す。図3-52より、配線部分も一緒にモールドすることで、これらが直接ガスに触れることがなくなる。これは腐食、劣化等を防ぐ一方で、モールド後に配線部分の修復が困難なことを意味する。また、アラルダイトを大量に使用しているため、硬化収縮などの問題が起きる。したがって、アラルダイトの使用量を減らすためにスペーサーが入っている。このスペーサーは硬化後に取り外せるようにテフロンブロックできている。他にも、フタの高さ位置を決めるスペーサーが入っている。フタ高さ位置を決めるので硬化後も取り外さない。

モールド作業が終わるとフタをして、CO₂チャンネル部分の銅板部分をTGCグラウンドに落とす。読み出しボードのスルーホール部分の外側に出ているシグナル線はカプトンテープとその上から銅箔テープを張ることでシールドする。その様子を図3-53に示す。こうして、CO₂チャンネル作成とともに、ファラデーケージとしての処理が終了するとKEKでの作業工程のすべてが終了する。



図3 51 CO₂チャンネル作成用回転台

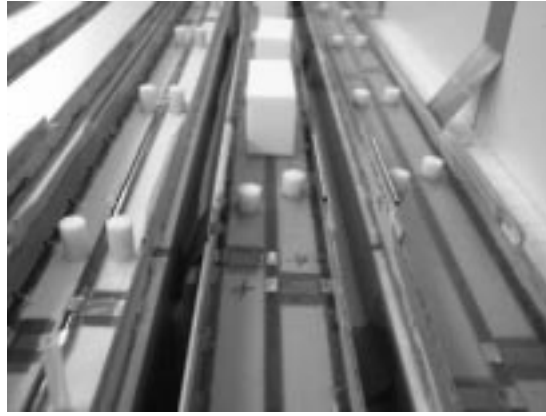


図 3 52 読出しボード～TGC 本体間のモールド作業

長方形のブロックはアルルダイトの使用量を減らすためのスペーサー治具(作業後、取り外し)
円筒形のスペーサーはフタの高さ位置を決定する
(そのまま埋めこみ)



図 3 61

スルーホール部分で外に出ているシグナル線の処理

第4章 パルステストシステムによる量産品の評価

4 - 1 シミュレーション

パルステストの目的は TGC の各チャンネルがキチンと結線しているかの確認をすることである。TGC の読出しは第3章3 - 8で述べたようにコンデンサーで切られているので、それに応答する矩形波のような高周波成分を含んだパルスを入力しておこなう。パルステストの簡単なモデルとして、TGC を図4 - 1のように RC - CR 回路に置き換えて、矩形波の入力に対する過渡現象を考える。ここで、 R_1 は入力抵抗で $10M$ 、 C_2 は読出し部分のキャパシタンスでワイヤー側であれば、 $470pF$ である。 R_2 は読出し抵抗に相当し、 $0.5M$ である。そして、 C_1 は TGC のキャパシタンスとみなす。微分方程式を立てて、一般解を求める。まず、キルヒホッフの法則より、

$$V = IR_1 + \frac{Q_1}{C_1}$$

$$\frac{Q_1}{C_1} = Q_2 + I_2 R_2$$

である。ここで、 I_2 は読出し抵抗部分を流れる電流である。そして、微分方程式は

$$R_1 R_2 C_1 \frac{d^2 Q_2}{dt^2} + \frac{R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2}{C_2} \frac{dQ_2}{dt} + \frac{Q_2}{C_2} = V$$

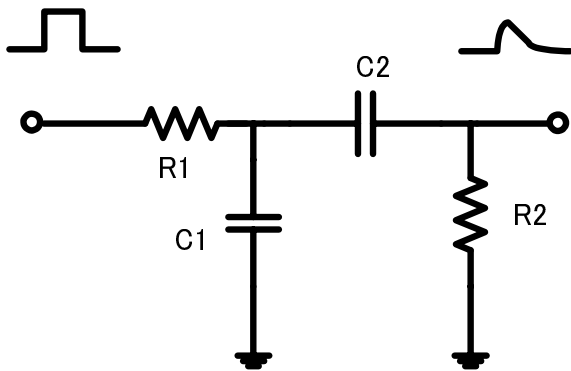
したがって、一般解は

$$Q_2 = C_2 V_0 + A \exp(\lambda_1 t) + B \exp(\lambda_2 t)$$

である。ただし、 A 、 B は積分定数である。初期条件として、矩形波の立ち上がりの部分すなわちステップ電圧を与えると読出しのコンデンサーに誘導される電荷 Q_2 による電圧変化は

$$V = R_2 C_2 V_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \{ \exp(\lambda_1 t) - \exp(\lambda_2 t) \}$$

で与えられる。



$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= -k_1 / 2 + ((k_1)^2 - 4 k_2)^{1/2} / 2 \\
 \lambda_2 &= -k_1 / 2 - ((k_1)^2 - 4 k_2)^{1/2} / 2 \\
 k_1 &= (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) / R_1 R_2 C_1 C_2 \\
 k_2 &= 1 / R_1 R_2 C_1 C_2
 \end{aligned}$$

R1: 10MΩ
 R2: 0.5MΩ
 C1: 不明
 C2: 470pF

図 4 - 1 RC CR 回路

これより、出力パルス $V = R_2 \cdot C_2 \cdot V_0$ である。ワイヤー側読出しではこれらの値は固定されている。また、 $(\lambda_1 - \lambda_2 / \lambda_1 - \lambda_2)$ および $\exp(\lambda_1 t) - \exp(\lambda_2 t)$ の変化の様子を図 4 - 2、図 4 - 3 に示した。 $(\lambda_1 - \lambda_2 / \lambda_1 - \lambda_2)$ のプロットは TGC の C_1 のオーダーである $\sim nF$ 近辺に限定した。これより、 C_1 の増加とともにパルス波高は減少する。これはワイヤーグルーピング幅の増加でパルス波高が減少することを予測している。また、 C_1 を増加させるということではストリップ読出しのターミネイト条件も重要である。ターミネイトなしの状態が読出しパルス波高としては一番大きい。時間変化は $(\exp(\lambda_1 t) - \exp(\lambda_2 t))$ に従う。なお、この項は無次元量である。図 4 - 3 は $C_1 = 1800 pF$ 、 $C_2 = 470 pF$ 、 $R_1 = 10M$ 、 $R_2 = 0.5M$ の場合である。これより、時間変化は $100 \mu s$ のオーダーで素早く立ち上がって、 $10ms$ のオーダーでゆっくりと立ち下がっている。

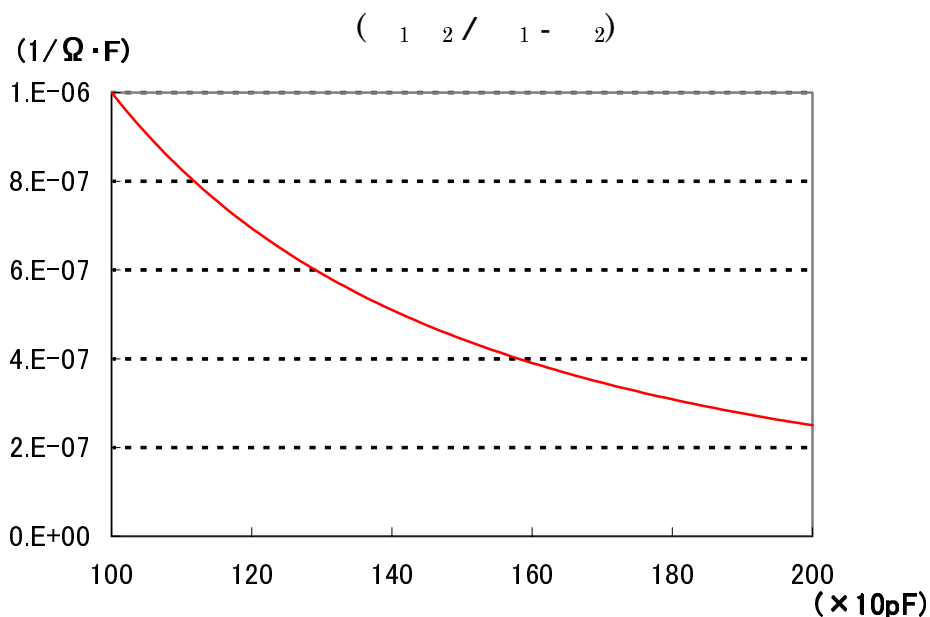


図 4 - 2 C_1 のキャパシタンスに対する 項の変化

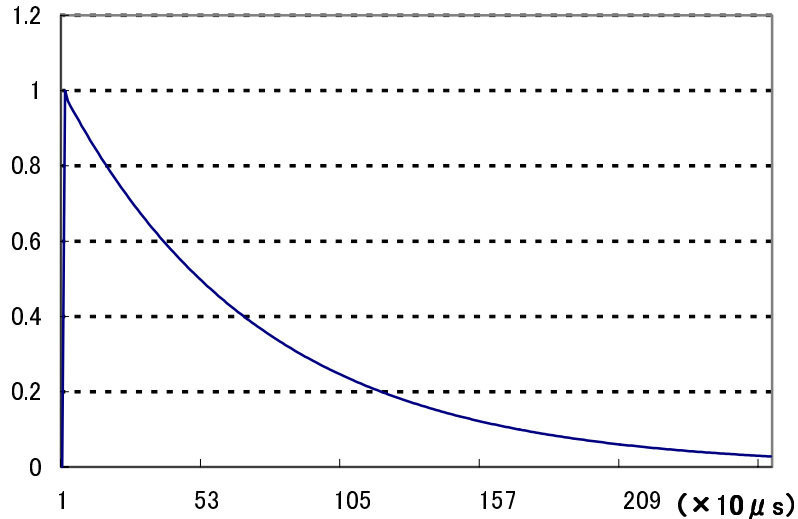
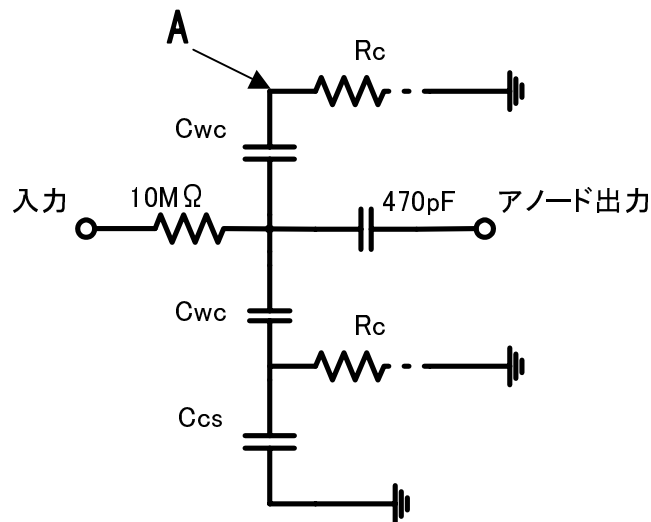
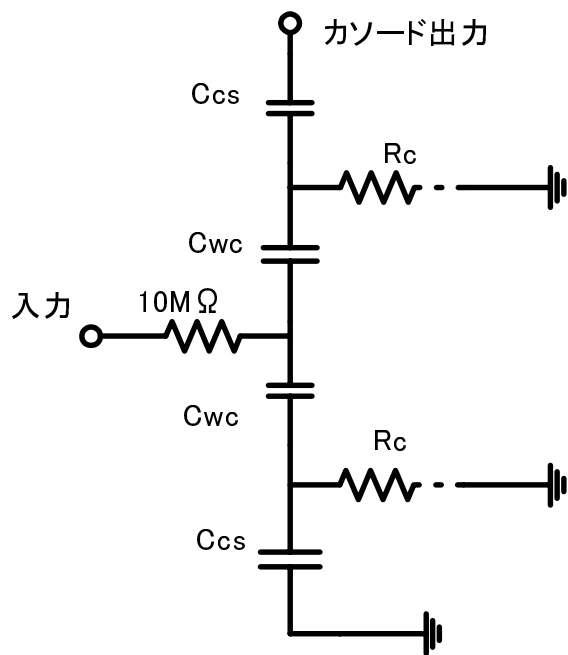


図 4 - 3 RC - CR 回路の時間変化

次により現実に近い等価回路を考えて、spice によるシミュレーションをおこなった。図 4 - 4 にワイヤー側およびストリップ側出力の等価回路を示す。このときのパラメータとその値を表 4 - 1 にまとめた。ここで、ワイヤー～カーボン面間は MWPC のワイヤー単位長さ当りでのキャパシタンスの式から求めた。また、カーボン面～銅板間は平行平板キャパシタに～3.9 の比誘電率をもつ FR4 が入っているとして求めた。なお、ワイヤー長は 1.3m とし、ワイヤー本数は 700 本とした。



Rc カーボン面抵抗
 Cwc ワイヤー・カーボン間キャパシタンス
 Ccs カーボン・ストリップ間キャパシタンス



R_c カーボン面抵抗
 C_{wc} ワイヤー・カーボン間キャパシタンス
 C_{cs} カーボン・ストリップ間キャパシタンス

図 4 - 4 等価回路

ワイヤー本数	30本	20本	6本
グルーピング幅	55mm	36mm	11mm
Cwc	225 pF	150 pF	45 pF
Ccs	1500 pF	980 pF	300 pF
ストリップ幅	35mm	35mm(サポート有)	20mm
Cwc	138 pF	222 pF	80 pF
Ccs	882 pF	882 pF	500 pF

表 4 - 1 シミュレーションに代入したパラメータ値

ところで、ワイヤー側読出しのグルーピング幅 36mm に該当するのは台形 (TGC の外形) の短辺側のチャンネル 1 である。逆に長辺側のチャンネル 23 がグルーピング幅 11mm に該当する。その他のチャンネルはグルーピング幅 36mm である。トリプレットの真中の TGC にかんしては両面銅ベタ面であり、ストリップ読出しがない。この場合の等価回路としては、ストリップ側にも Ccs を付けてターミネイトしたものを考える。(図 4 - 4 の A 点の部分に Ccs を接続する)

さて、トリプレットは 3 枚の TGC 内部で不感領域になるスペーサーの位置が重ならないように半ピッチずつずらして設計されている。トリプレットの外側の TGC は同一のものを向かい合わせに使用することで、これを実現する。これに関連して、外側の TGC はスペーサーの接着位置などが互いにミラー対象の位置関係になる。これはストリップ側読出しのチャンネルの幅にかんしても該当するので、一方の TGC のチャンネル 1 がストリップ幅 20mm であれば、向かい合う TGC のチャンネル 1 のストリップ幅は 35mm で、チャンネル 32 が 20mm になる。

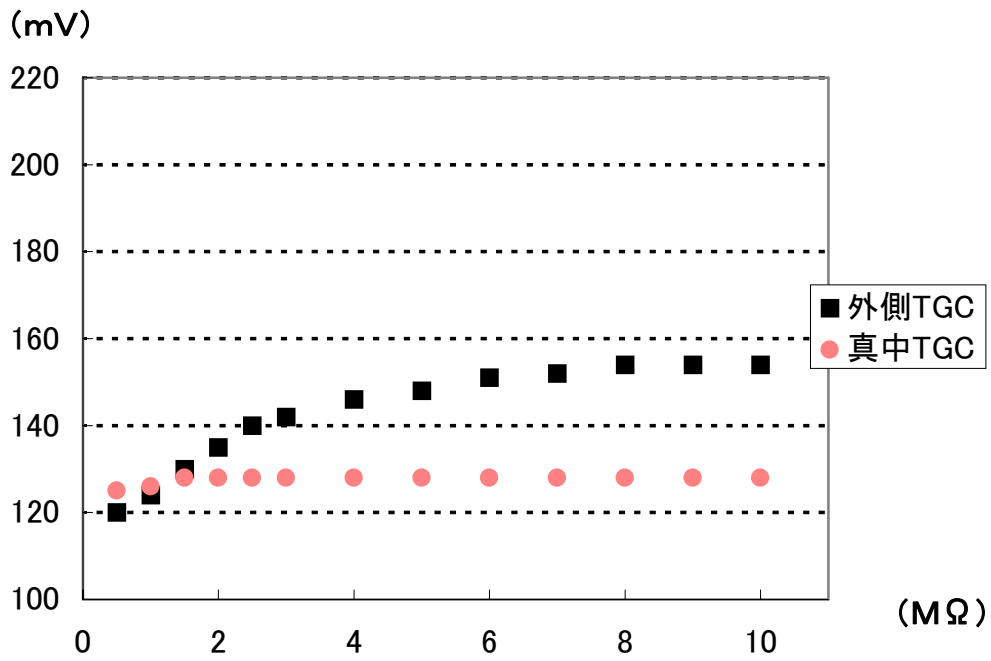


図 4 - 5 面抵抗に対するワイヤー側出力波高

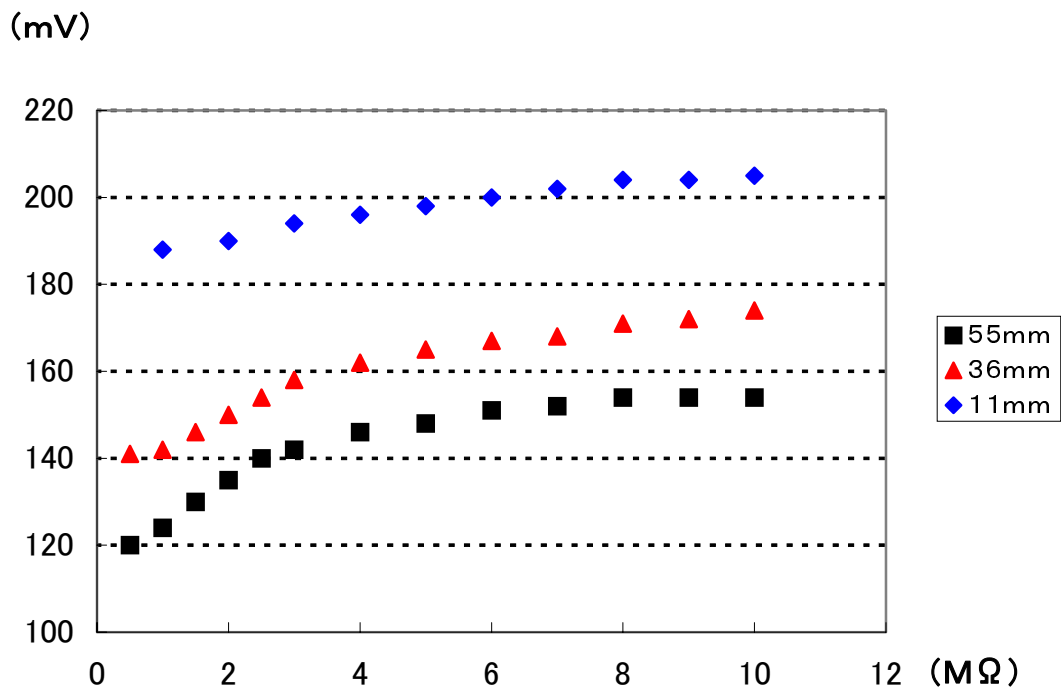


図 4 - 6 面抵抗に対するワイヤー側出力波高

まず、図 4 - 5 はトリプレットの真中 TGC と外側 TGC を比較したものである。図 4 - 5 よりトリプレットの外側の TGC はストリップ側 (図 4 - 4 の A 点側) のカーボン面抵抗に依存する。これは、パルステストでワイヤー側読出し測定の時、ストリップ側の読出し部分をターミネイトしていないからである。図 4 - 5 より、 $0.5 \sim 5M$ の範囲で ~ 30 mV 程度増加すると予測される。ところで、ストリップ読出しを持たない真中 TGC は両側の銅板がターミネイトされているために、出力パルス波高に対してカーボン面抵抗の影響をほとんど受けない。図 4 - 5 より、 $1 \sim 10M$ の範囲にわたって、 2 mV 程度増加するだけである。ところで、ここで用いているカーボン面抵抗は等価回路図より、1 つの抵抗 R_c で代用しているのが、実際のカーボン面抵抗測定値の値と必ずしも一致しないと考えられる。これについては、出力パルス波高値がカーボン面抵抗に依存しない真中 TGC と依存する外側 TGC の差を比較することでおおよその R_c が見積もれる。

次に、図 4 - 6 はワイヤーグルーピング幅を変更した場合の比較である。これよりワイヤーグルーピング幅が小さいほど出力パルス波高が大きくなる。これは、ワイヤーグルーピング幅の減少で読出し部分以外のキャパシタンスを減らすからである。その一方で、TGC が台形型のために長辺側のチャンネルでワイヤー長が長くなる。これによって、読出し部分以外のキャパシタンスが増加して、出力パルス波高の減少が予想される。読出し部分以外のキャパシタンスとは具体的にワイヤー～カーボン間、カーボン～ストリップ間のキャパシタンスである。なお、図 4 - 6 において、グルーピング幅 36 mm の $0.5 \sim 1.0M$ 付近、グルーピング幅 11 mm において、プロットの傾きが緩やかになるのは、ワイヤー～カーボン間のキャパシタンスが小さいために電荷の流れ込む量が飽和してしまうからである。

次にストリップ側出力のシミュレーション結果を図 4 - 7 に示す。図 4 - 7 は図 4 - 6 と同じく、横軸にカーボン面抵抗値、縦軸に出力パルス波高値をとる。図 4 - 7 よりストリップ側の出力はカーボン面抵抗の影響を強く受ける。ワイヤー側と比較した場合、面抵抗 R_c が $1 \sim 4M$ 変化すると、ワイヤー側では出力パルス波高が ~ 20 mV 変化する。一方、ストリップ側では ~ 30 mV 変化する。そして、これらを実測したパルス波高値でそれぞれ割ると、カーボンによる影響はパルス波高の絶対値に対して、ワイヤー側で $\sim 15\%$ 、カソードで $\sim 30\%$ になる。他にも、パルス波高値はストリップ幅の違い、ワイヤーサポートの有無によっても依存する。いずれの場合も読出し部分に直接影響する C_{wc} 、 C_{cs} の値が変化する。ストリップ幅の減少に対しては C_{wc} 、 C_{cs} の値が減り、逆に、ワイヤーサポートがある場合には C_{wc} の値が増える。以上のことから図 3 - 46、図 3 - 47 で示したチャンネルごとのパルス波高の違いが説明できる。

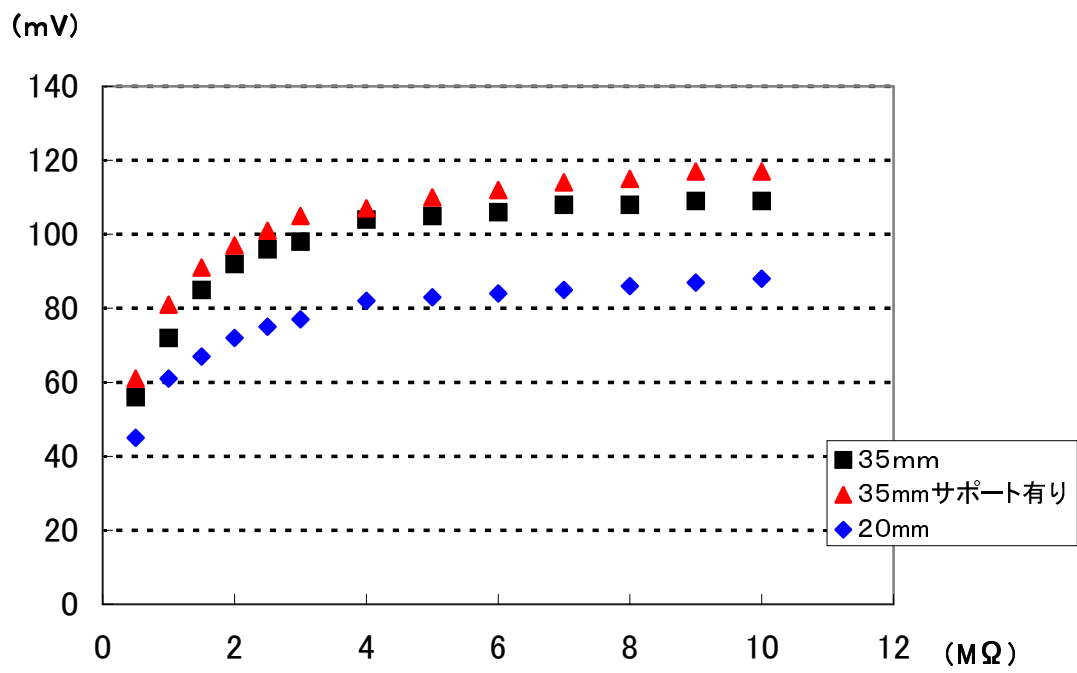


図 4 - 7 面抵抗に対するストリップ側出力波高

4 - 2 カーボン塗布方法の違いに対する評価

次に量産品 TGC の評価をおこなった。現在、量産された TGC には前述の厚塗りのものと薄塗りのものが存在する。これに対する評価をおこなう。シミュレーションの結果より、面抵抗値自体は薄塗りで若干、高めに分布していたことからパルス波高値の分布では薄塗りの方が高めに分布すると予想できる。この他にも、何か塗布方法で違いが出るのか比較した。結果を図 4 - 9 ~ 図 4 - 13 に示す。図 4 - 9 ~ 図 4 - 13 は TGC を型ごとに分けて、それをさらに塗布方法で厚塗りと薄塗りで分けてある。また、図中のプロットは複数枚の TGC に対して、各チャンネルで平均を求め、エラーバーとして測定値の最大・最小をつけた。つまりエラーバーを抽出してくると図 4 - 8(上)に示すように、平均値からのばらつき具合を示すヒストグラムになる。また、エラーバーとして、最大・最小値を取った理由は量産した TGC の精度を評価するためである。なお、測定した TGC 台数は厚塗りのものが 41 台、薄塗りのものが 6 台である。

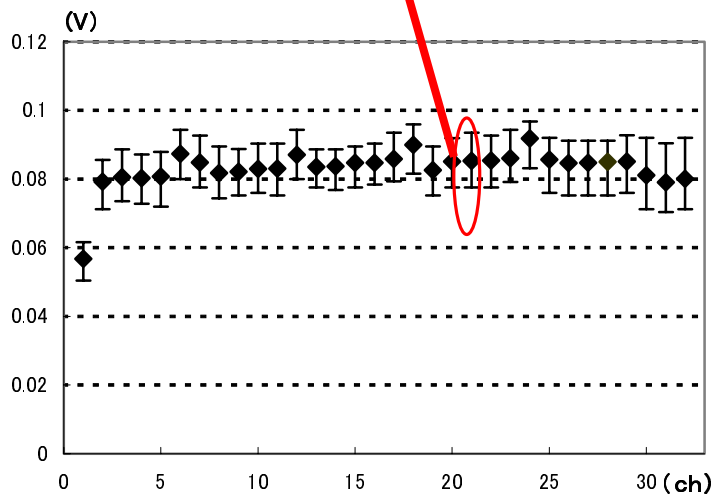
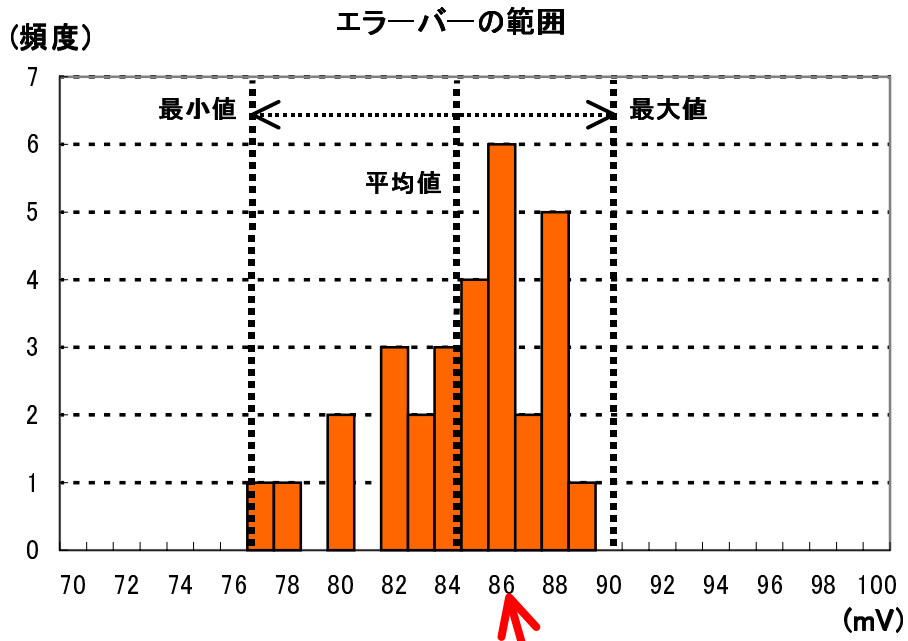


図 4 - 8 エラーバーのつけ方

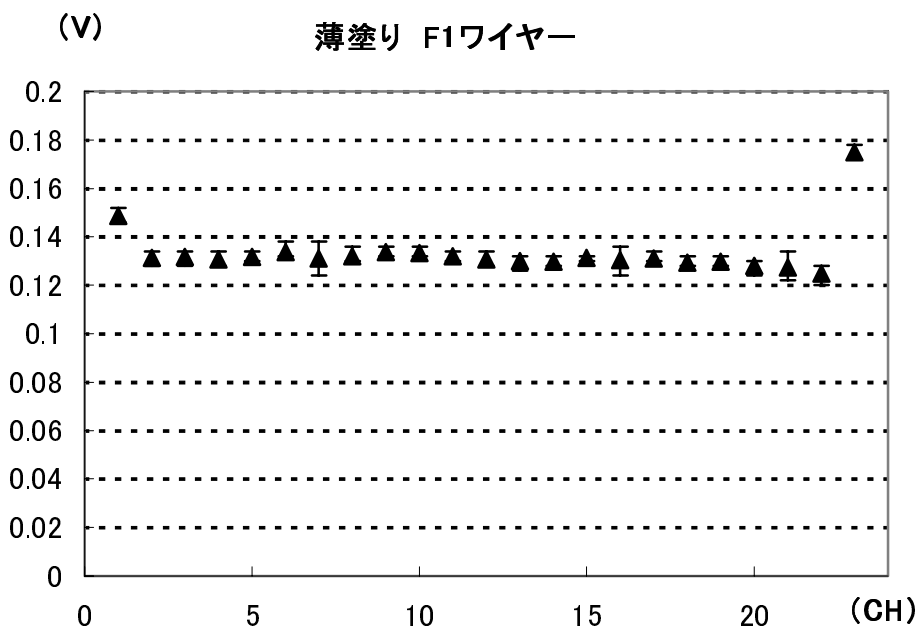
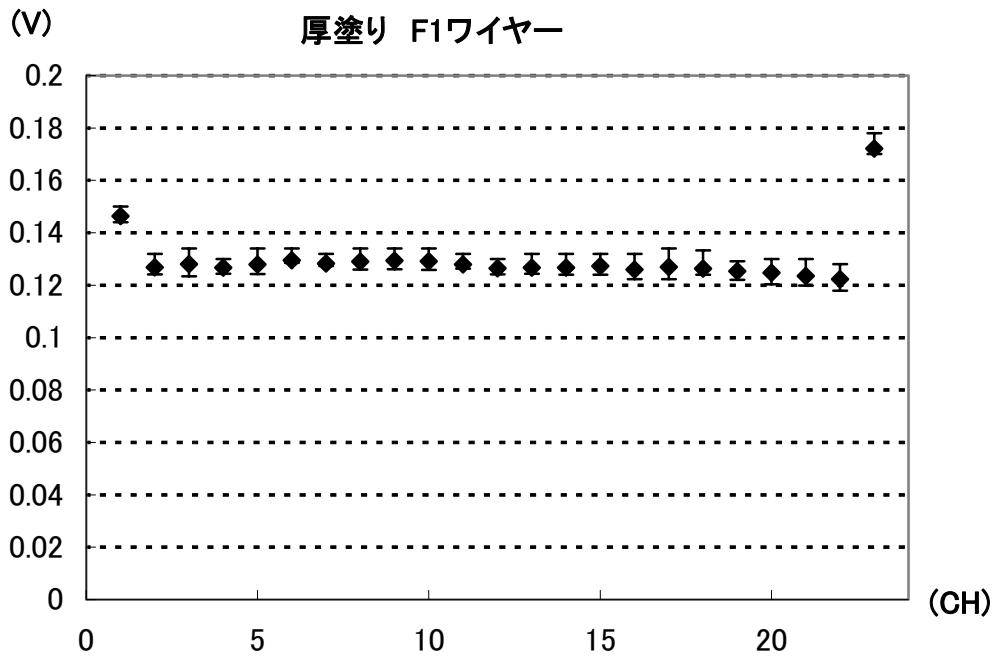


図 4 - 9 パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較 (F1ワイヤー)

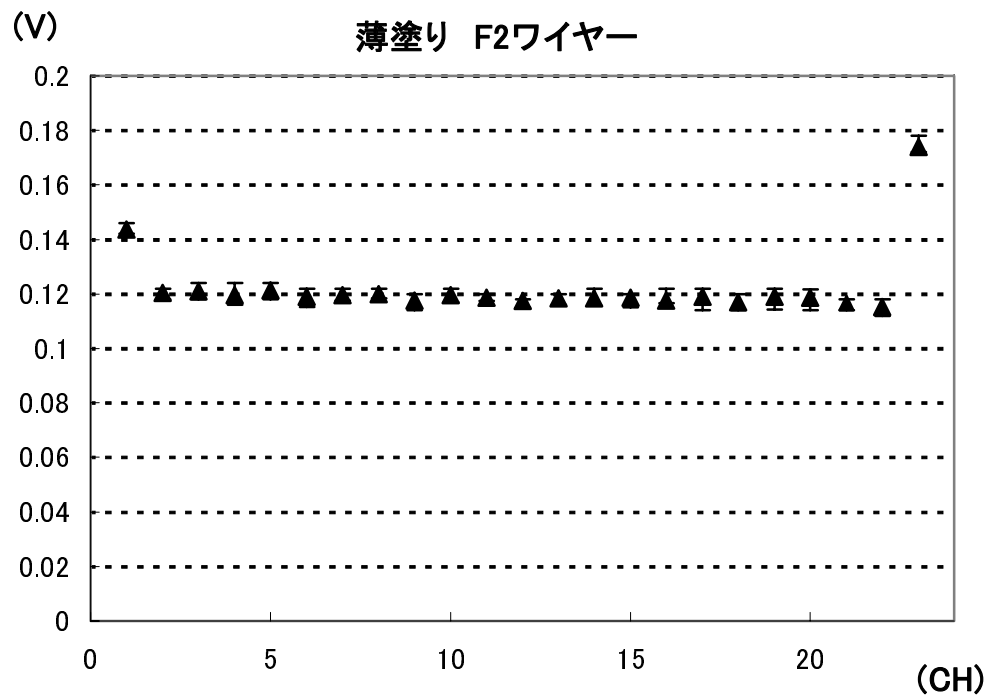
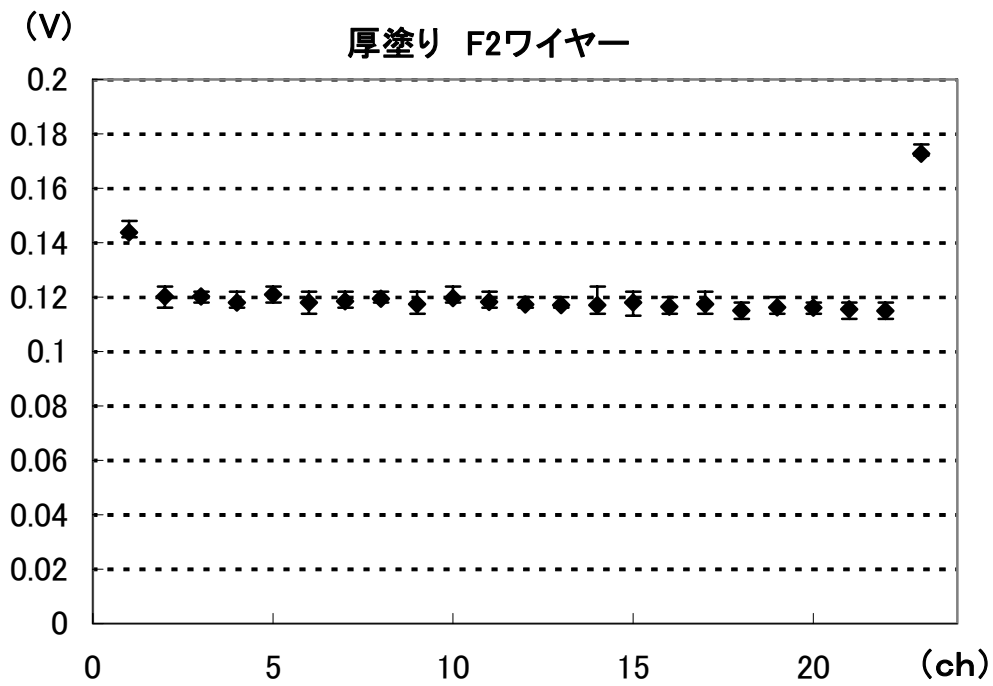


図 4 - 10 パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較(F2 ワイヤー)

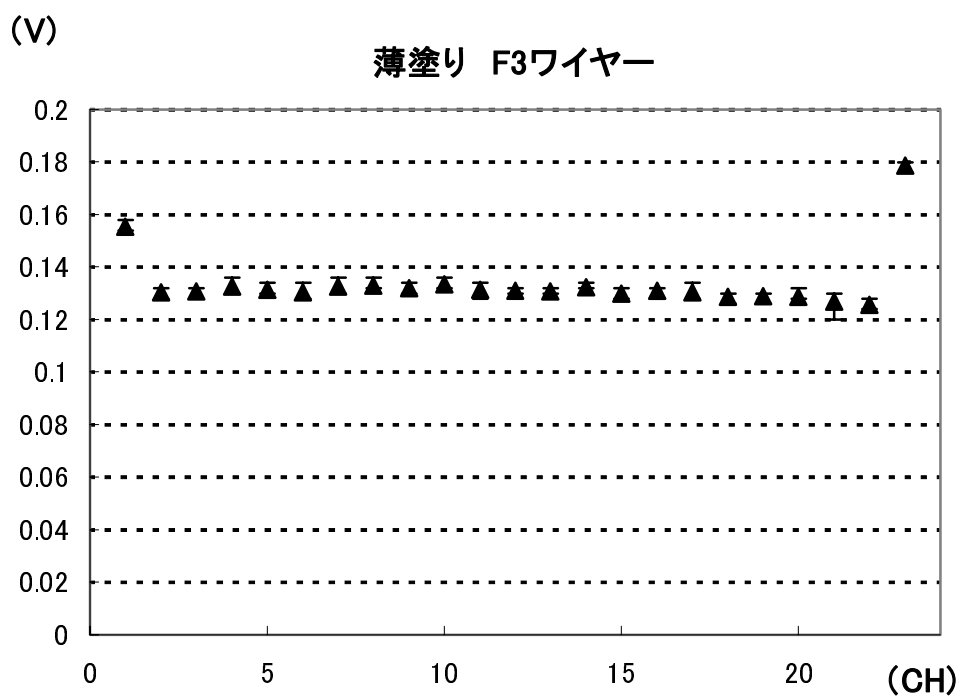
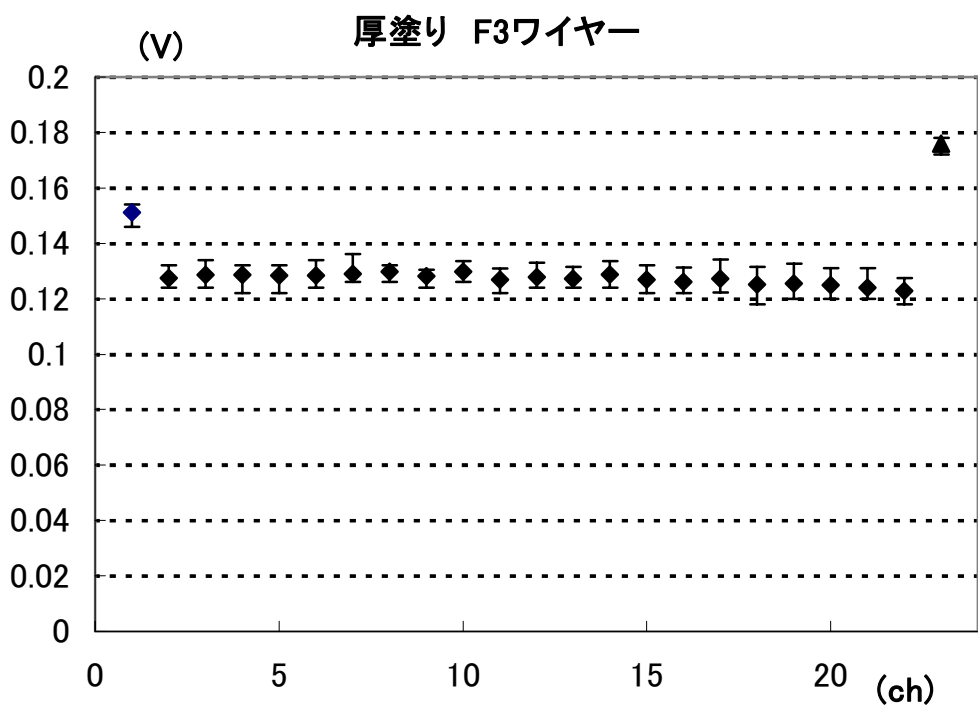


図 4 - 11 パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較(F3 ワイヤー)

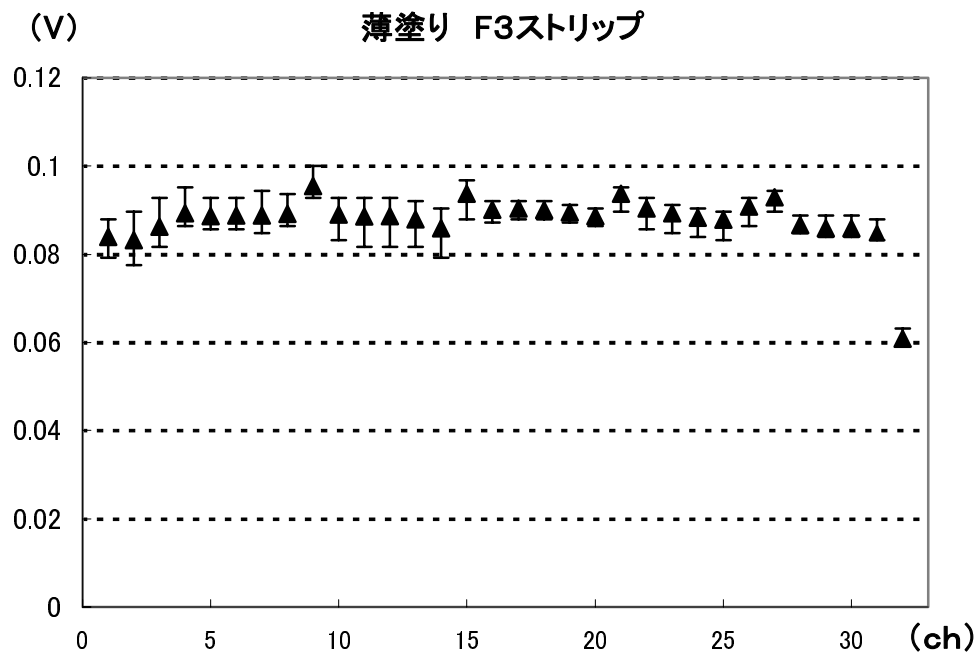
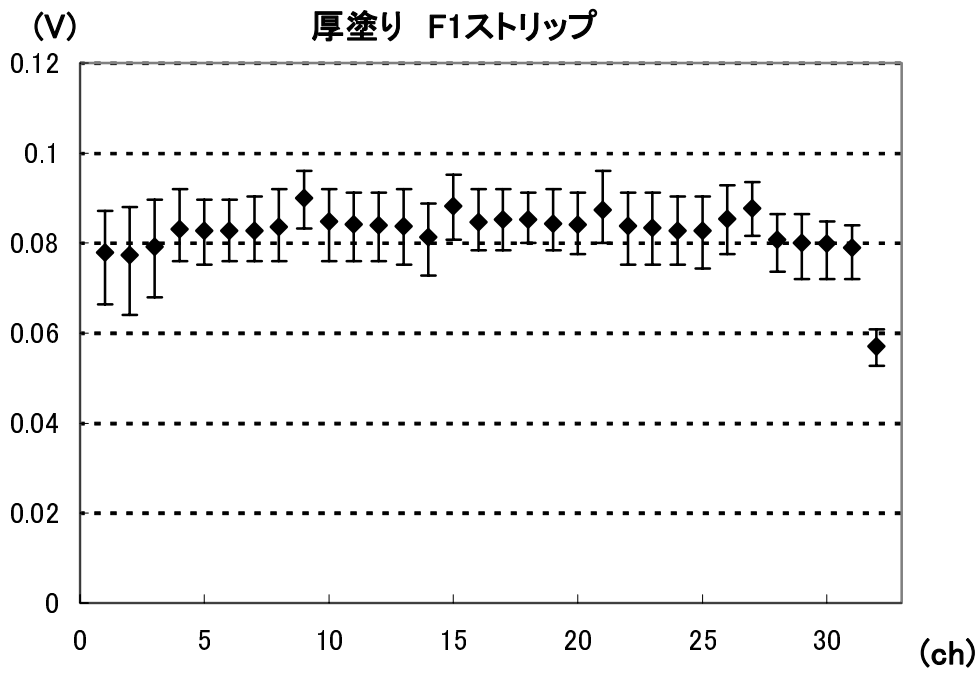


図 4 - 12 パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較(F1 ストリップ)

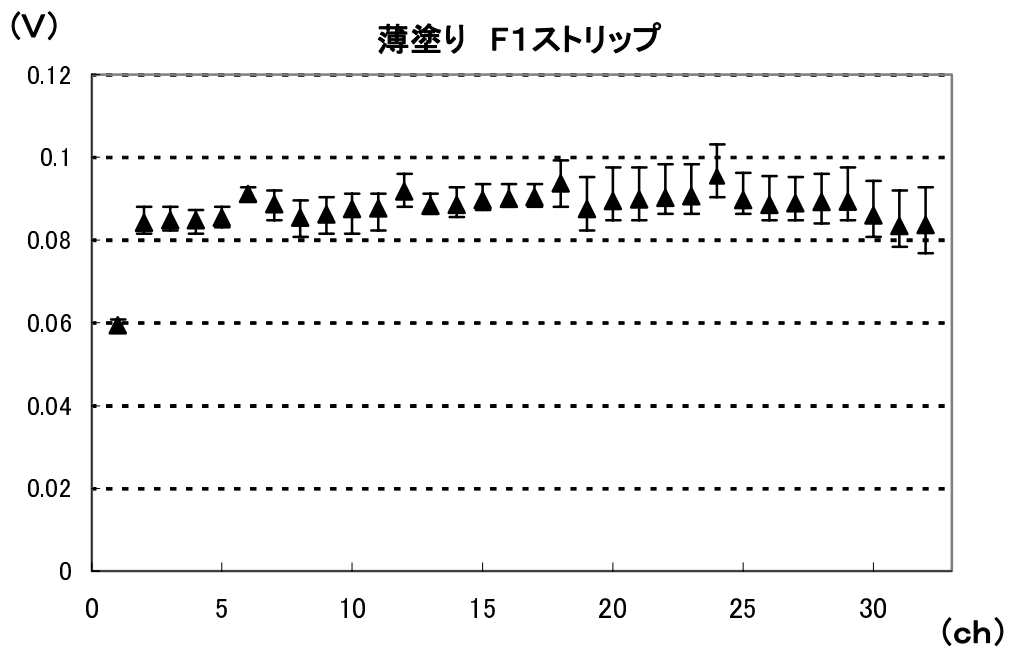
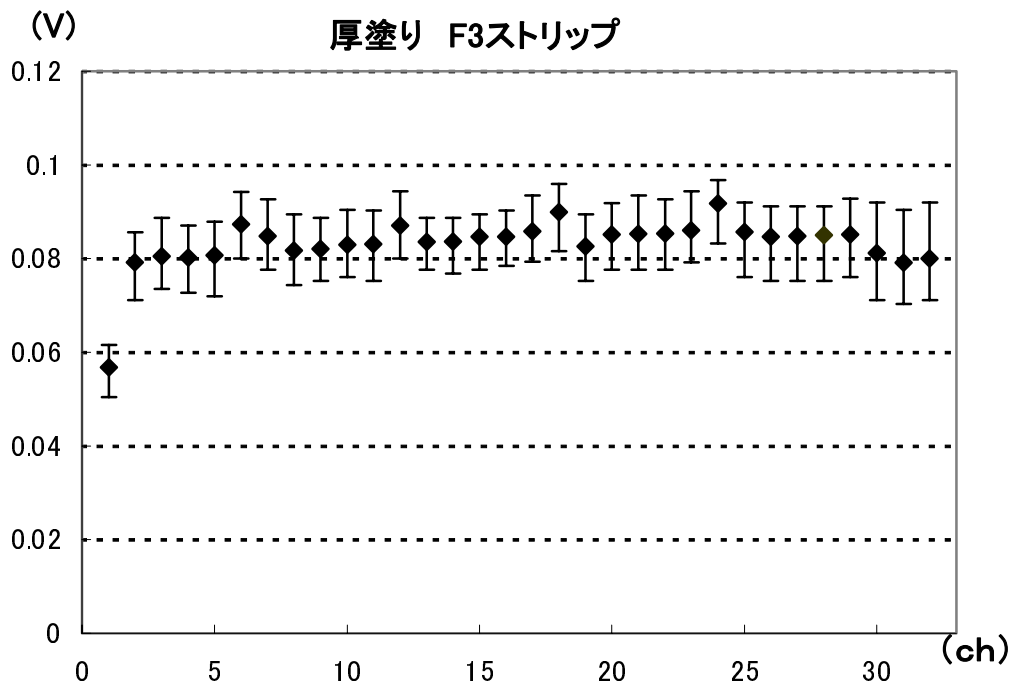


図 4 - 13 パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較(F3 ストリップ)

図 4 - 9 ~ 図 4 - 13 はすべて、厚塗りしたものと薄塗りしたものを並べてある。ストリップ読出しのプロットについては前述のように構造的条件が合うように並べた。したがって、バックワードモジュールの F1 ストリップに対応するのがフォワードモジュール F3 ストリップとなる。(バックワードモジュールとフォワードモジュールとはワイヤー側読出しの位置が左右対称である) これらのプロットの測定結果を表 4 - 2 にまとめた。表 4 - 2 は各型を厚塗りと薄塗りに分け、ワイヤー側なら 23 チャンネル、ストリップ側なら 32 チャンネル分のパルス波高の平均値と各チャンネルにおけるエラーバーの長さの平均値を列挙してある。

パルス波高の平均値

	F1 wire	F2 wire	F3 wire	F1 strip	F3 strip
厚塗り	127.8	121.2	130.3	82.5	83.2
薄塗り	133.3	122.2	133.7	87.5	87.9

パルス波高の最大値・最小値の差の平均値

	F1 wire	F2 wire	F3 wire	F1 strip	F3 strip
厚塗り	10.8	6.1	9.6	15.0	15.0
薄塗り	6.1	6.0	4.4	9.1	7.1

単位: mV

表 4 - 2 パルステスト パルス波高の平均値とエラーバーの平均値

厚塗りと薄塗りの比較において、まず、パルス波高の平均値で薄塗りの方がすべてのサンプルにおいて高くなっている。これは、薄塗りの方でカーボン面抵抗値が高いことを示唆しており、薄塗りの方が高めに分布していたカーボン面抵抗値分布と一致する。また、厚塗りと薄塗りの平均値の差は F1 ワイヤーからそれぞれ、5.5mV、1.0mV、3.4mV、5.0mV、4.7mV である。これは各型の最大・最小値の差の平均値よりも小さい。このことは厚塗りと薄塗りでパルス波高値の収束していく値が近いことを示す。一方で、パルス波高の最大・最小値の差の平均値を比較すると、薄塗りの方ではばらつきが少ない。検査台数が 41 台と 6 台で大きく異なるが、薄塗りの方がばらつきの少ない塗布になっている可能性がある。さらに、このことはカーボン面抵抗に依存しない F2 ワイヤーでパルス波高の平均値とそのばらつき具合(最大・最小値の差)が同じであるのに、薄塗りの他の型ではばらつきの少ない傾向がでていることから示唆されている。ところで、F1 ワイヤー、F3 ワイヤーの平均値は F2 ワイヤーに比べて、~10mV 程度高い。シミュレーションの結果から ~10mV の差が生じるのは R_c に 2~3 M を代入した場合に相当する。この R_c の範囲でワイヤーグルーピング幅 55mm のものは 135~145mV、ワイヤーグルーピング幅 36mm のものは 150~160mV、ワイヤーグルーピング幅 11mm のものは 190~198mV をとり、グルーピング幅 11mm のもの以外は実測値とも良く一致している。なお、グルーピング幅 11mm のものが大きくずれた理由としては等価回路において、 C_{wc} 以外に電荷を補充する系(例えば、隣チャンネルからの寄与など)を省略したからである。このことは C_{wc} のキャパシタンスが小さくなると顕著になる。また、このシミュレ

型については厚塗りを基準にしている

ーションにおける 135~145mV(差は 10mV)、150~160mV(差は 10mV)という変動分は F1 ワイヤー、F3 ワイヤーの最大・最小値の差の実測と同程度である。これはカーボン塗布において、ある程度のばらつきを容認していることを考慮すれば、良い精度での量産をおこなっていることを示す。ストリップ側についてはそのまま R_c に 2~3 M を代入するわけにはいかない。実測との比較では、 R_c : 2~3 M の範囲でパルス波高値は ~10mV 程度高い。また、実測でばらついて分布するカーボン面抵抗値が等価回路のモデルでは R_c : 2~3M と小さくなることから、カーボン面抵抗はある範囲内で平均化していることが考えられる。

4 - 3 カーボン面抵抗値に対する評価

パルステストにおけるカーボン塗布に対する評価をおこなった。実際にカーボン面抵抗値の大きなものと小さなものとを比較してみた。まず、それぞれがどのような面抵抗で塗布されているのかを図 4 - 14、図 4 - 15 に示す。用意したのは厚塗りの F3 型ストリップ板である。塗布はガンスタート位置からセンター オーバーラップ センター オーバーラップ ...の順番にスプレーガンが移動することでおこなわれる。そして、ガンの動きはワイヤー方向に沿っており、塗装板の特徴として横方向に同じ抵抗の領域ができるのはこのためである。スプレーガンの進行の様子を図 4 - 14 に示す。そして、マスキングを剥がすと塗装面はワイヤーサポートのマスキング跡で 6 つのセルに分かれる。セルの分割のイメージを図 4 - 17 に示す。それぞれの板について、面抵抗が高めのサンプルは全区画で 2M 以上である。オーバーラップ領域で高い抵抗値のところがある。一方、面抵抗が低めのサンプルはほとんど全区画で 2M 以下である。また、両方のサンプルに共通することとして、塗装板上でかなり面抵抗値がばらついている。では、これらの板をストリップ板として用いた TGC のストリップ側出力パルスのプロットを図 4 - 16 に示す。これらの極端な 2 台の TGC の他に比較用に平均的な面抵抗値の分布をもつことがわかっている ID:1028 もいっしょにプロットした。図 4 - 16 より面抵抗値が高いサンプルと低いサンプルの間で大きな差が生じた。この差の平均値は ~8.8mV である。前項の考察から、 R_c の範囲として、1~3 M を考える(R_c の値は確定的でないので、ワイヤー側での値を参考にした)とこれはおよそ 1~2 M 程度の差としてあらわされ、実測と一致する。したがって、ストリップ側の R_c にはこの範囲の値を代入すれば良いと類推できる。次に面抵抗値が高いサンプルと低いサンプルの分布図における面抵抗値のばらつきとパルス波高分布のプロットを見比べると、面抵抗値はばらばらに分布しているのに対して、パルス波高のプロットの方はちょうど平行移動したような分布を取る。これらから類推できることとして、

等価回路で考えている面抵抗値 R_c はある範囲で平均化したものである

出力パルス波高分布のたまかな外形は等価回路で考えている C_{wc} 、 C_{cs} で決まる

については 2 つのサンプルの比較から明らかであり、については、等価回路においてストリップ読出し側の C_{wc} 、 C_{cs} がチャンネルの場所で決まるからである。したがって、面抵抗値が低い場合は、この外形を保持したままパルス波高値が小さくなると考えられる。ところで、 R_c の平均化に対しては、マスキング跡によって形成される 6 つのセルの領域と相関があるように見える。したがって、この 6 つのセル毎に横軸カーボン面抵抗、縦軸ストリップ側出力パルス波高のプロットを取る。プロットする点は例えば、セルについてはチャンネル 2~チャンネル 4 までのパルス波高の平均値をとり、そのときのカーボン面抵抗はセル内にある測定点のカーボン面抵抗値の平均を取る。また、端のストリップ幅の狭いチャンネルとワイヤーサポートが入っているチャンネルは除く。

図 4 - 18 ~ 図 4 - 23 に各セルのカーボン面抵抗値に対するパルス波高値の分布を示す。

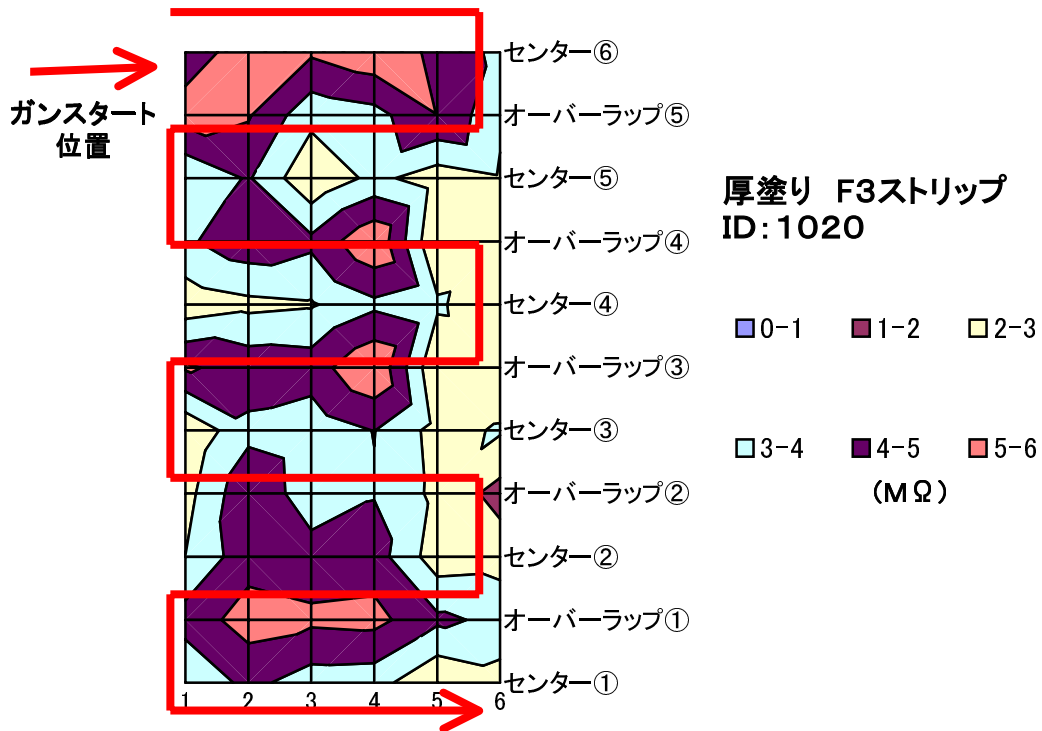


図 4 - 14 カーボン面抵抗分布

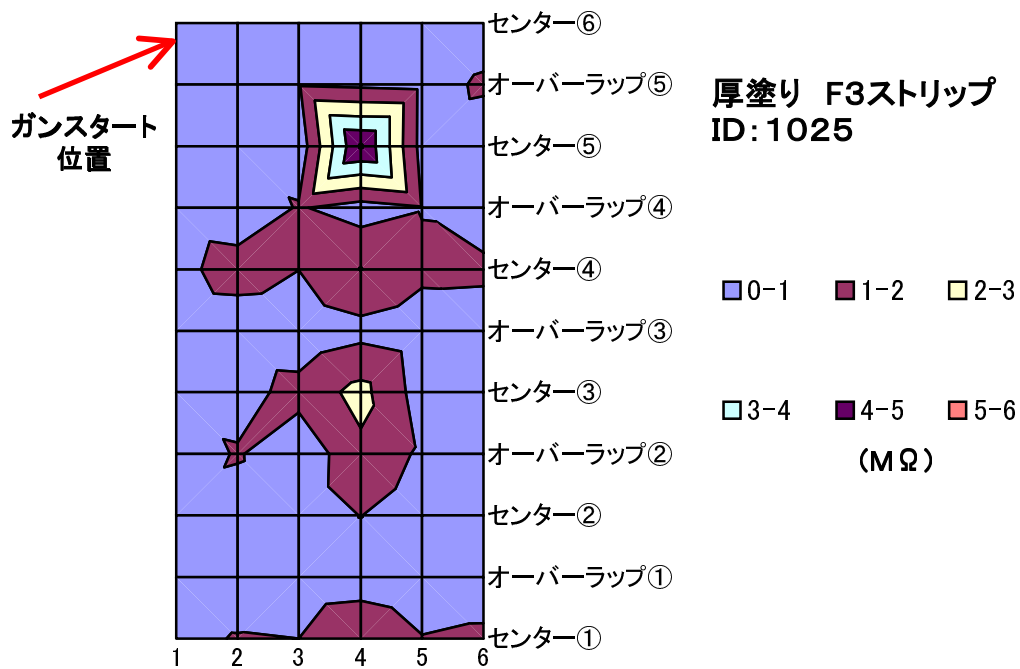


図 4 - 15 カーボン面抵抗分布

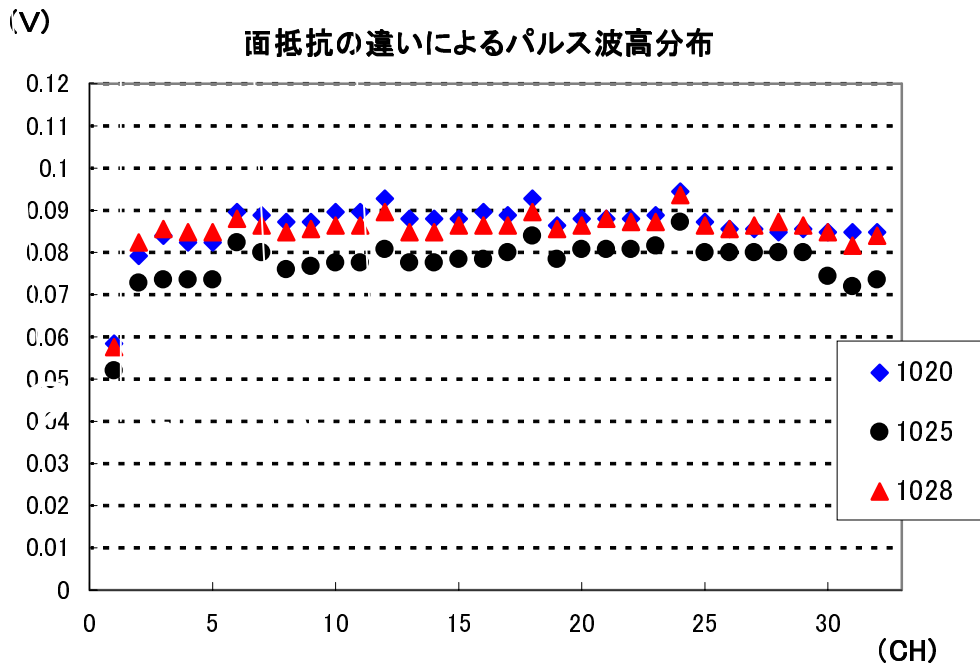


図 4 - 16 面抵抗に対するパルス波高分布

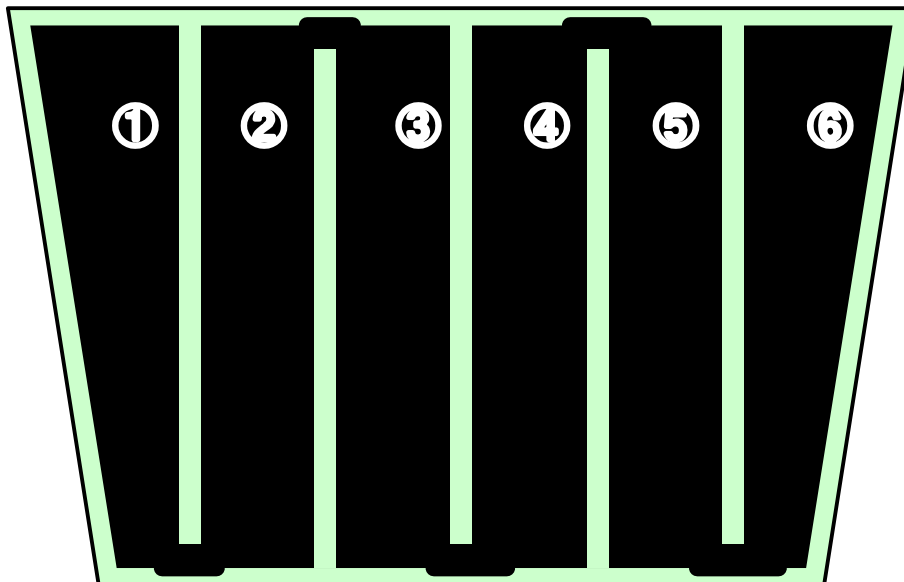


図 4 - 17 セルの分割

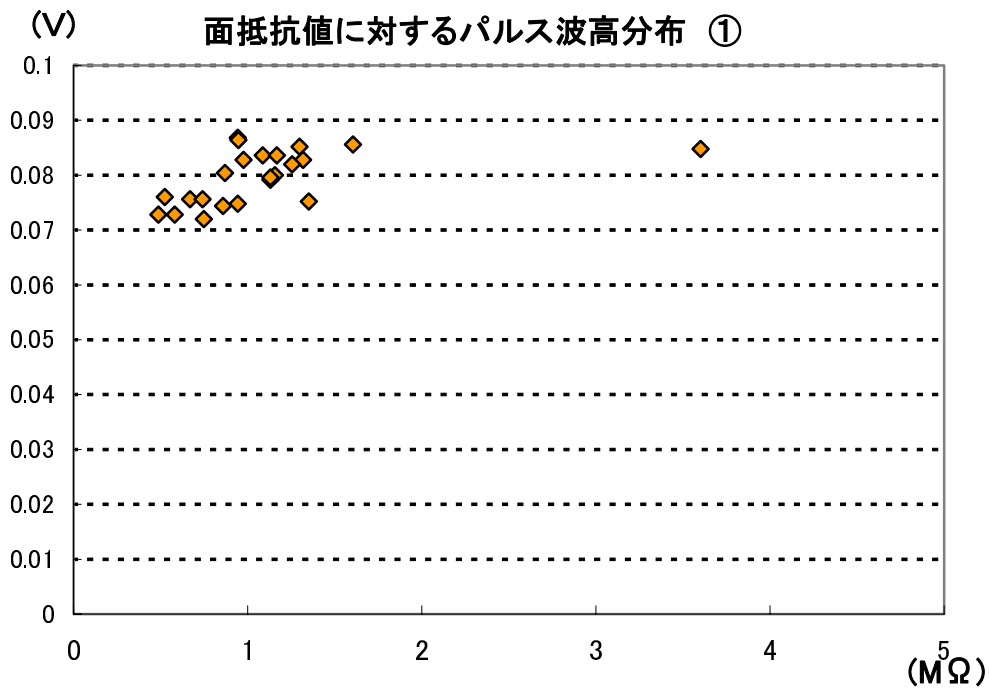


図 4 - 18 面抵抗に対するパルス波高分布(セル)

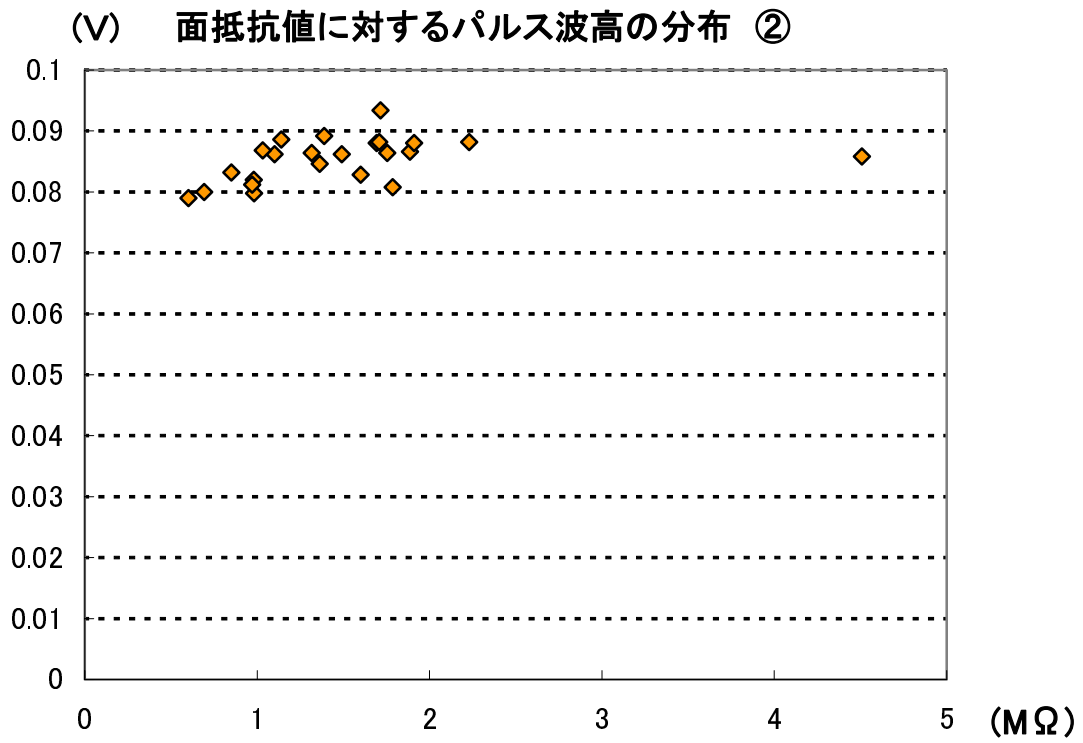


図 4 - 19 面抵抗に対するパルス波高分布(セル)

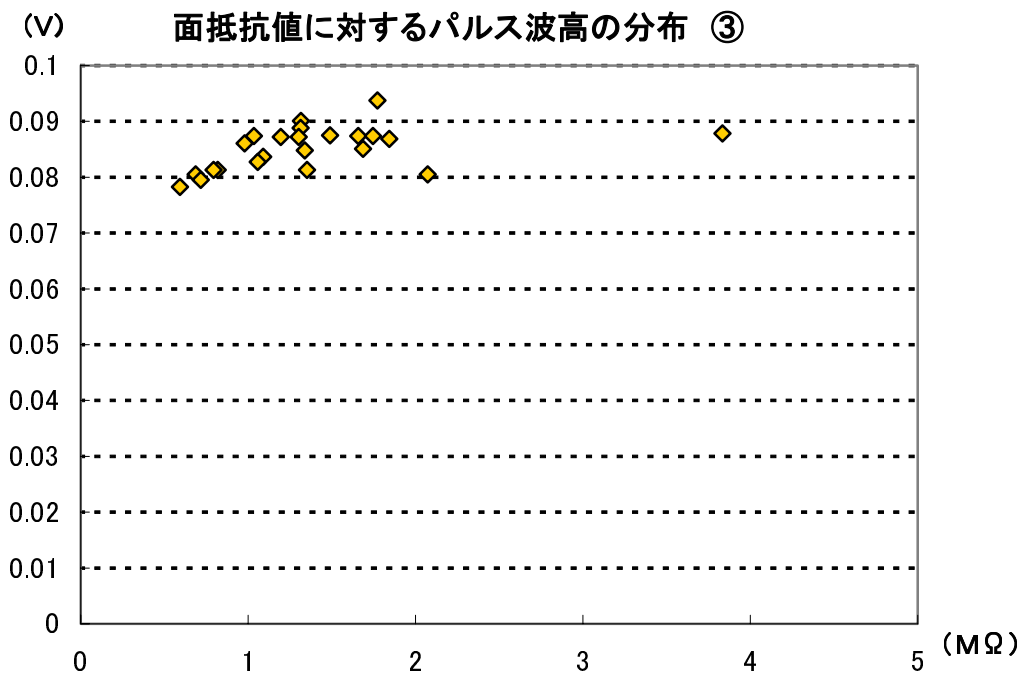


図 4 - 20 面抵抗に対するパルス波高分布(セル)

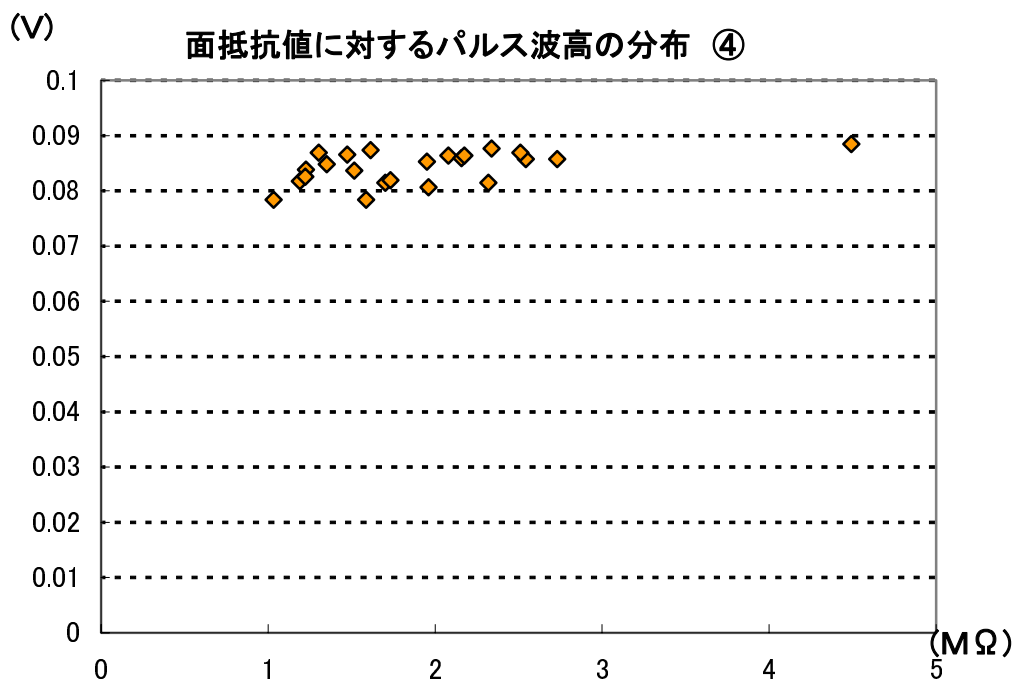


図 4 21 面抵抗に対するパルス波高分布(セル)

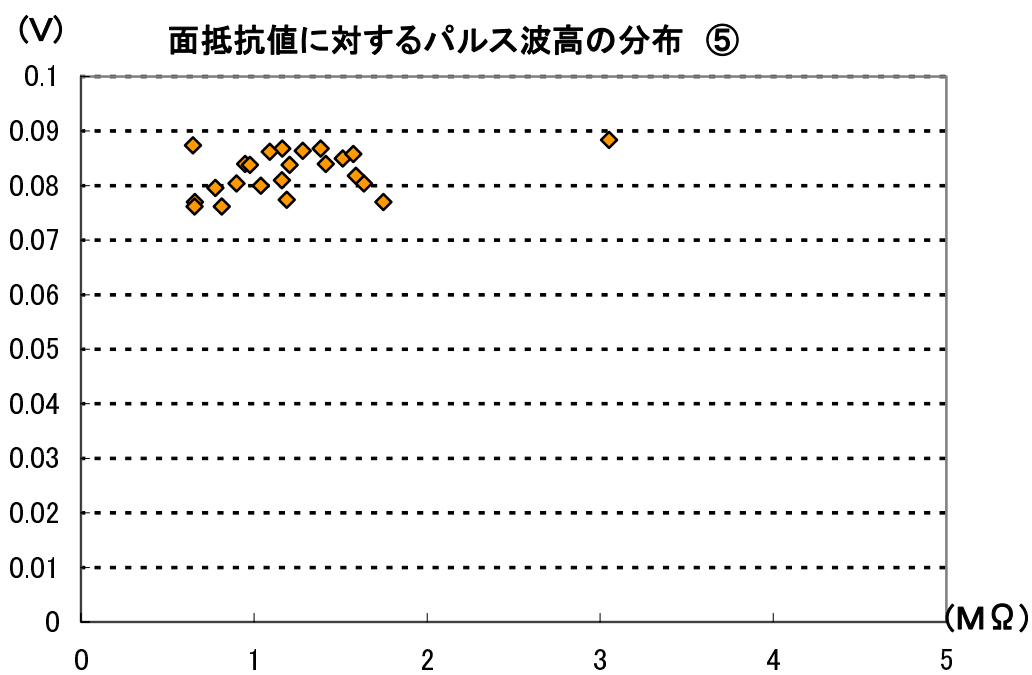


図 4 - 22 面抵抗に対するパルス波高分布(セル)

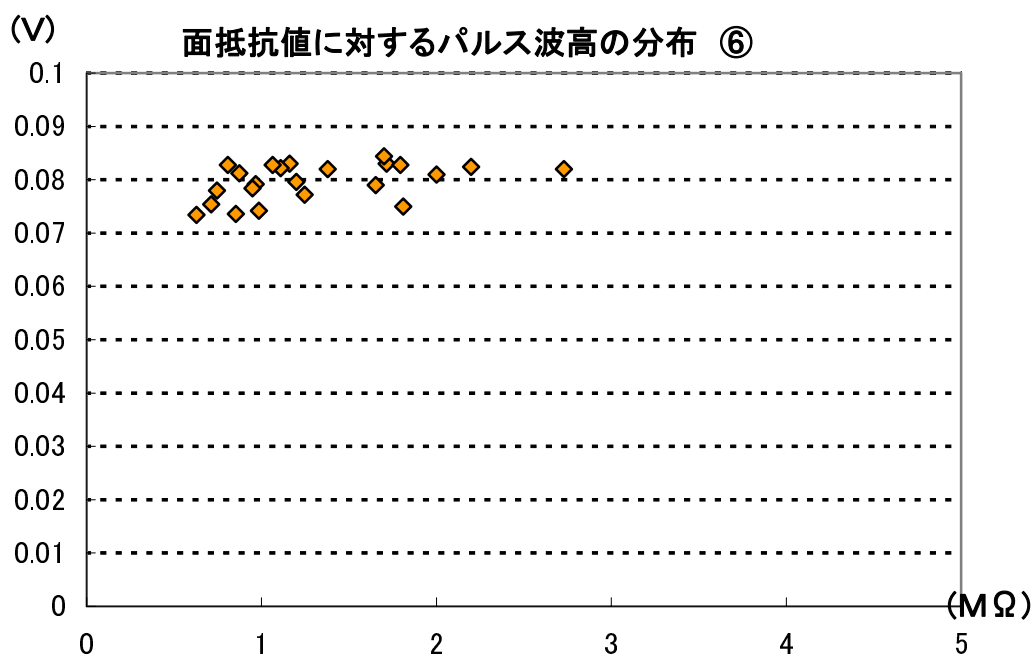


図 4 - 23 面抵抗に対するパルス波高分布(セル)

各セルでのパルス波高の平均値と面積の関係を図 4 - 24 に示す。図 4 - 24 より、パルス波高とセルの面積に特に相関はない。一方、パルス波高値にはセルの位置が端部分かセンター部分かに依っている。このときセル と を比較すると、セル面積の違いがパルス波高にほとんど効いていない。これから類推できることは、カーボン面抵抗値の平均化で重要なのはカーボン面抵抗がどの位置でグラウンドに落ちているのかである。カーボン面とのグランディングをおこなうグラウンドコンタクトは 6 箇所あり、台形の上底側に 3 箇所、下底側に 3 箇所ある。ここまでの距離が短い場合には等価回路で考えるカーボン面抵抗値が小さくなり、その結果カソード出力パルス波高を小さくする。また、グラウンドコンタクトの位置はサポート位置などと同じく固定されているので、両端のセル内のチャンネルはパルス波高が小さくなる。ところで、グラウンドコンタクトの位置依存性について、実際の検証にはグラウンドコンタクトの欠損した TGC についてパルステストをおこなえば良いのだが、現時点まで ~250 台の TGC 量産品のうちグラウンドコンタクトが欠損したものは 1 台もでていないので、テストできない。

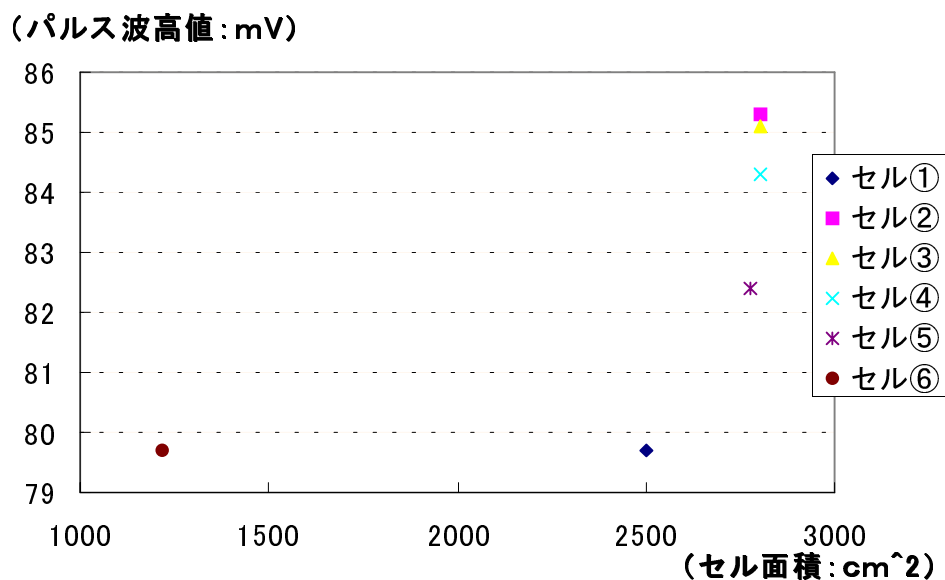


図 4 - 24 セルの面積とパルス波高の相関

4 - 4 平面性の歪みに対する評価

500 μm 以上の平面性の歪みを持つ場合、パルステストの結果がどのようになるか調べた。評価したストリップ板のカーボン面抵抗値が適切な範囲であることは確かめてある。(ID : 1082、面全体の平均値 0.83M Ω 、ID : 1075、面全体の平均値 1.2M Ω) 歪みの原因はモジュール接着工程において、平面を出すための吸着が弱かったことがわかっている。歪みの状態を図 4 - 25、4 - 26 に示す。測定面は T1 のグランド側の面である。どちらとも中央部分に 500 μm に達する大きな歪みがある。これらのモジュールに対するパルステストの結果を図 4 - 27 に示す。グラフはそれぞれの出力パルス波高値と、比較のために T1 ストリップの平均値もプロットしている。これより、1082 については全体的にパルス波高が高い。シミュレーションによれば、銅ストリップ側が 500 μm 歪んだ場合、ワイヤー～カーボン間のキャパシタンスは～1.5 倍となり、出力パルス波高としては～10 mV 程高くなる。逆に銅ストリップ側で 500 μm 膨らんだ場合、ワイヤー～カーボン間のキャパシタンスは～0.75 倍になり、出力パルス波高は～10mV 程度低くなる。これらのことから、1082 に対してはストリップ側に 500 μm 程度の歪みに相当する変形があると思われる。一方で、1075 については同じく 500 μm の歪みがあるが、こちらは 1082 にみられたパルス波高分布の大きなずれはない。いずれにしても、両方とも出力パルス波高の異常と歪み箇所が一致しない。これは、平面性測定が T1 表面の単純な歪み方を測定するのに対して、実際には TGC のガス領域内では複雑に変形しているためだと考えられる。

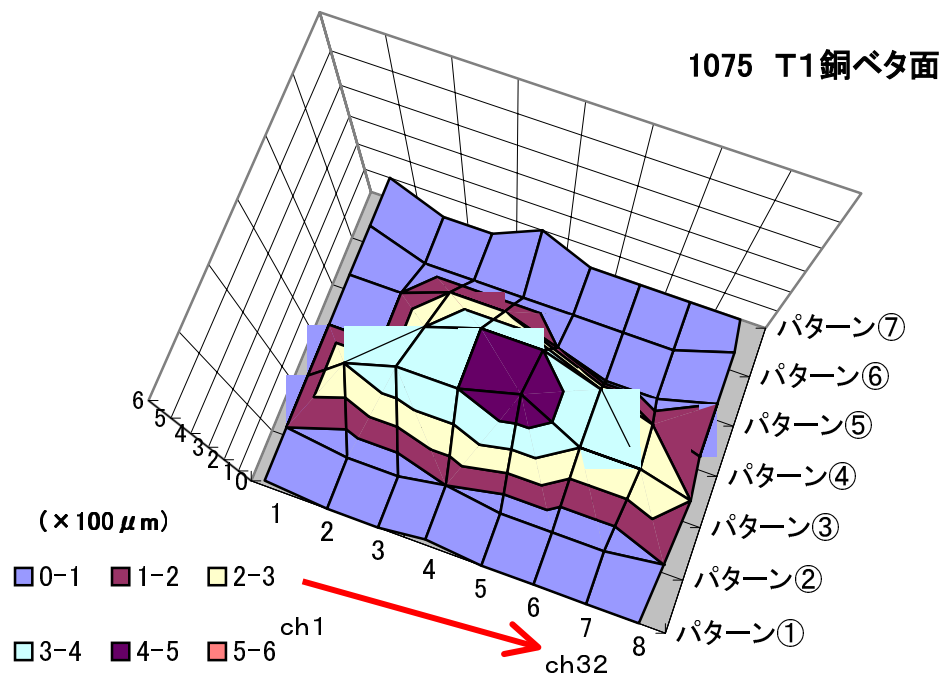


図 4 - 25 平面性

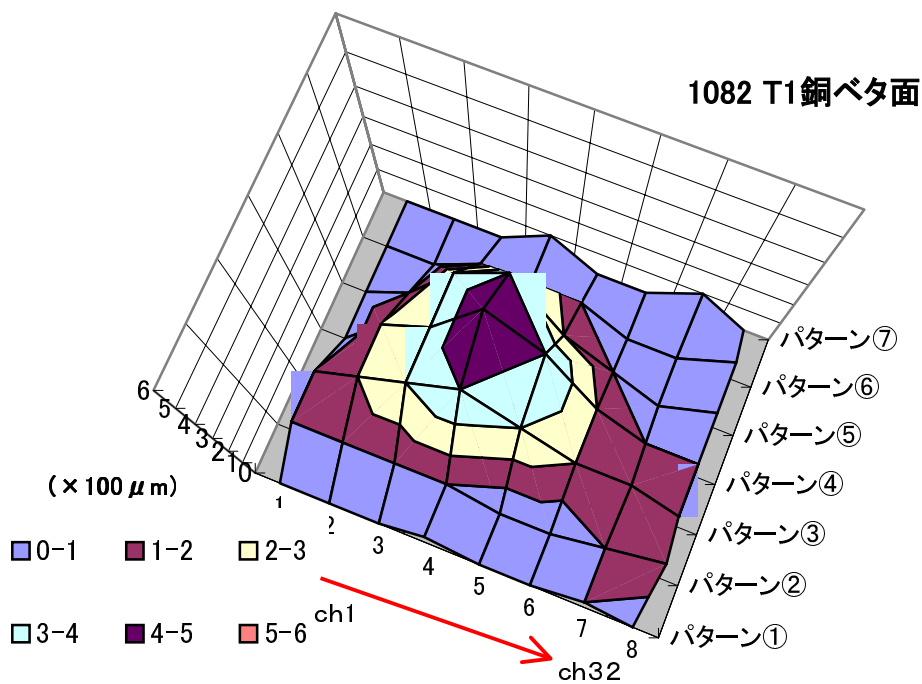


図 4 - 26 平面性

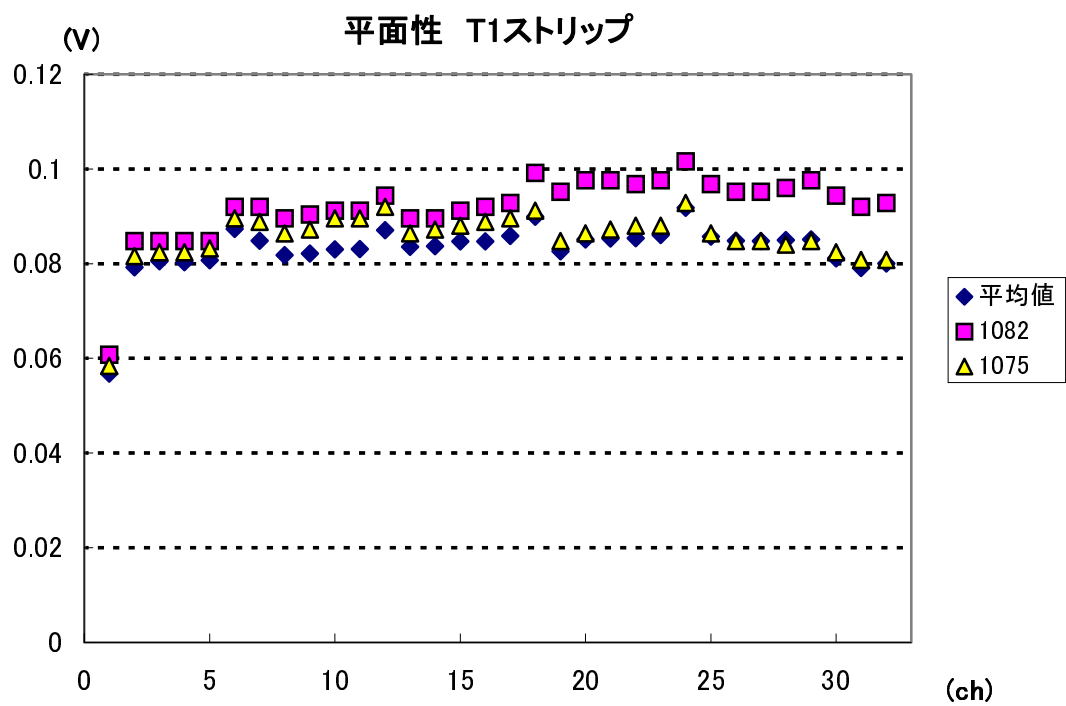


図 4 - 27 歪みのひどい TGC に対するパルステスト結果

4 - 5 ワイヤーの断線に対する評価

ワイヤーが断線した場合、パルステストの結果にどのような影響が出るか調べた。断線が発見されたとき、このモジュールは既に 1 回パルステストをしていたので、断線前後でのパルステストの結果の比較をした。また、断線箇所は高抵抗テストによって特定されており、それは T2 ワイヤー側読出しの 2 チャンネル目である。図 4 - 28 にパルステストの結果を示す。断線した 2 チャンネル目だけでなく、プロットの分布自体も異常のない結果である。これは切れたワイヤーの状態にもよるが、5V、50ms の矩形波の入力程度では、切れたワイヤーをカソードに付けるほどのクーロン力が働かないためだと考えられる。パルステストではこの場合のように、ワイヤーの断線を見逃すことがある。

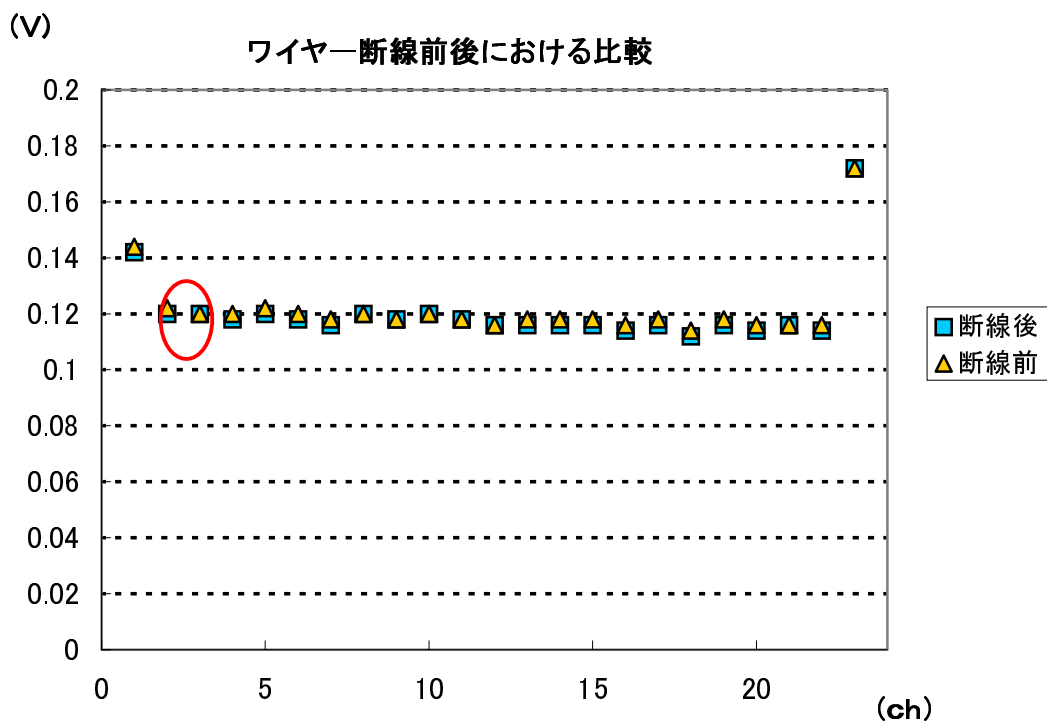


図 4 - 28 断線前後のパルステストの比較

第5章 まとめ

5 - 1 まとめ・今後予定

2001年9月より開始したTGCの量産は昨年未までに、量産予定台数のおよそ25%に相当する約250台分をモジュールの形にした。

その量産ペースは量産開始当初の2台/週から、およそ1年余りで7台/週に上がった。これは量産工程やそのシステムを常に改良してきた成果である。実際にこの半年間は量産ペースを上げるだけでなく、量産工程で未整備のものが整備され、KEKにおける量産工程の全てが出揃った。具体的にみると量産工程の改善としては量産ペースの足を引っ張っていたカーボン塗布に関するもの、そしてTGC閉じ前のHV試験に関するものが上げられる。そして、新たに整備されたものとして、CO₂チャンネル取付け工程が上げられる。カーボン塗布に関しては従来に比べおよそ半分の6 μ mの膜厚で塗布することにより、塗料の節約やパーツ接着工程の効率を上げるのに貢献した。実際に1枚当りの塗料使用量は従来の \sim 300gから150 \sim 200gに減った。この塗布方法をパルステストで評価すると、従来のものよりも品質が良い可能性がある。この判断についてはもう少し検査台数を増やす必要がある。また、HV試験システムに関しては夜間、自動的にHVをかけるシステムを導入した。これにより、夜の間 \sim 75%のTGCが2.8kVまでかかった。システムとして、この性能は量産ペースを落とさない。また、2.8kVかかった状態で \sim 93%のTGCがリークカレント100nA以下ととても品質が高い。そして、新しく導入されたパルステストシステムは当初の目的である結線のチェックだけでなく、シミュレーションをおこなうことで、TGCの様々な状態がわかる。パルステストの出力パルス波高値はワイヤーグルーピング幅、ストリップ幅、そしてワイヤーサポートの有無などの構造的なものに加えて、塗布されているカーボン面抵抗にも依存する。このときのパルス波高値は一部を除いて、シミュレーションと良く一致した。また、シミュレーションにおけるカーボン面抵抗値は1 \sim 3Mをとることが示唆され、実測のカーボン面抵抗値のばらつきに比べて、小さい。そして、カーボン面抵抗値の分布も考慮すると、シミュレーションにおけるカーボン面抵抗値はある範囲を平均化したものであることを示唆している。また、カーボン面抵抗値についてはグランドコンタクトとの位置的な相関も類推された。他にも、平面性のひどいものはパルス波高値に影響する。しかし、この歪みの度合いと波高値の分布の平均値からのずれは必ずしも場所的に一致しておらず、ガス領域内部ではさらに複雑な変形が生じていると予想できる。パルステストで発見できないものとして、ワイヤー断線がある。したがって、動作確認として最後にパルステスト、HV試験(RIテスト含む)をおこなう。なお、現在量産中のモジュールのほとんどがこの最終動作試験をパスしている。

今後の計画としてはT4、T5の量産にむけた準備が開始される。これに伴うサイズの変更がすべての工程で生じることとなり、いままでの手法が通用しなくなるかもしれない。したがって、量産工程の見直しが必要となる。

謝辞

本研究をおこなうにあたり、適切なご指導並びにご助言を与えてくださいました指導教官である竹下徹助教授に深く感謝いたします。また、様々な研究の指針を与えてくださり、研究活動を支えてくださった KEK の岩崎博行助教授、東京大学素粒子物理国際研究センターの小林富雄教授、神戸大学の蔵重久弥助教授に感謝いたします。

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、経験を与えてくださった KEK の田中秀治助手、神戸大学の石井恒次助手、越智敦彦助手、東京大学素粒子物理国際研究センターの石野雅也助手、信州大学の長谷川庸司助手、宮崎由之氏には、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ご協力に感謝いたします。

最後に、多くの助言や励ましをいただきました東京大学素粒子物理国際研究センターの南條創氏、長島壮洋(現在、東京大学)、中村佳央氏、坂東隆哲氏、神戸大学の中畝祐輔氏、美馬孝行氏、杉本拓也氏、奥村和恵氏、信州大学の中川義徳氏には感謝の言葉も尽きません。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE, TECHNICAL DESIGN REPORT, VOLUME 1, CERN/LHCC/99-14 ATLAS TDR 14(25 MAY 1999)
- [2] ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE, TECHNICAL DESIGN REPORT, VOLUME 2, CERN/LHCC/99-14 ATLAS TDR 15(25 MAY 1999)
- [3] ATLAS Muon Spectrometer, TECHNICAL DESIGN REPORT, CERN/LHCC/97-22 ATLAS TDR(28 MAY 1997)
- [4] F.Sauli, Principle of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chamber
- [5] 田中秀治 「大型陽子・陽子衝突に用いるための Thin Gap Chamber の性能評価」、修士学位論文、神戸大学、1994年3月
- [6] 三宅正明 「ミュ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
- [7] 吉田光宏 「ミュ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ニタリング IC の開発」、修士学位論文、東京大学、1997年3月
- [8] 深津吉聡 「ATLAS 実験ミュオントリガー用 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
- [9] 津野総司 「ATLAS 実験ミュ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] 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
- [12] 長島壮洋 「ATLAS 実験ミュオントリガー用 Thin Gap Chamber の量産と動作検証」、東京大学、2001年3月
- [13] 南條創 「アトラス実験ミュオントリガー用検出器の中性子バックグラウンドに対する動作研究」、東京大学、2001年1月
- [14] 福井崇時 粒子物理計測学入門、共立出版
- [15] Glenn F.Knoll 放射線計測ハンドブック、日刊工業新聞社
- [16] ニコラス ツルファニディス 放射線計測の理論と演習(上・下巻)、現代工学社

- [17] 長島順清 素粒子物理学の基礎 、朝倉書店
- [18] 長島壮洋他 「ATLAS TGC Construction Memo Ver.4」
<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~taka/tgc/index.html>
- [19] 大木正路 高電圧工学、槇書店

表一覧

1	LHC 加速器の主要パラメータ	2
2	電子捕獲率の比較	18
3	MWPC と TGC の比較	22
4	TGC の量産台数の内訳	32
5	TGC 量産能力	36
6	シミュレーションに代入したパラメータ値	77
7	パルステスト パルス波高の平均値とエラーバーの平均値	88

図一覧

1	Higgs 粒子発見能力	5
2	粒子の同定の仕方	6
3	アトラス検出器	7
4	ミュオンスペクトロメータ	8
5	トリガースキーム	10
6	印加電圧とパルス波高の関係	13
7	比例モード	14
8	制限比例モード	15
9	GM モード	16
10	制限ストリーマモード	17
11	メタン系炭化水素の紫外線吸収能力	19
12	MWPC の一般的な断面構造	20
13	TGC の断面構造	20
14	TGC における電場構造(左)、等電位面(右)	21
15	y 方向における電場 TGC と MWPC の比較	23
16	y 方向における電場 ワイヤー径を変更したときの比較	23
17	y 方向における電場 陽極 - 陰極間間隔を変更したときの比較	24
18	弾道欠損によるパルスの損失	25
19	平行平板コンデンサの中心に電荷があるときの映像電荷	28
20	T7 型 TGC の外観	31
21	モジュールの断面図(左)トリプレット (右) ダブレット	31
22	TGC の設置場所	32
23	TGC 量産計画	33
24	TGC 製作工程	34
25	富士実験室 B4 フロア	35
26	量産における時間管理(パーツ接着室の例)	36
27	TGC 量産達成状況	37
28	カーボン塗布	38
29	カーボン塗布システム	39
30	カーボン塗装パターン	39
31	膜厚と面抵抗値の関係	41
32	吐出圧 3.0V、霧化エア圧 ~ 100kPa(これまでの方法)	41
33	吐出圧 2.0V、霧化エア圧 ~ 100kPa	42
34	霧化エア圧の違いによる膜厚と面抵抗値の変化	43
35	厚塗りをした場合の面抵抗値の分布	44
36	薄塗りをした場合の面抵抗値の分布	44
37	スペーサー (左) ボタン型 (右) ワイヤーサポート	45
38	パーツ接着工程 サイドフレームの接着準備	46
39	パーツ接着工程 ワイヤーサポートの接着準備	46
40	パーツ接着工程 ボタン型サポートの接着準備	46
41	ワイヤー巻き作業	47
42	ワイヤーテンションがかかった FR4 板	48
43	HV 試験システム	49

44	HV 試験セットアップ	49
45	TGC の焼入れの電圧 - 電流特性	51
46	HV 試験システム	53
47	HV 試験モニター	53
48	2.8 kV かかるまでの時間	55
49	2.8 kV におけるリークカレント	55
50	フィレット形状のイメージ	56
51	接着治具 スクリーンメッシュの利用により、一定量の接着剤をパーツに塗る	57
52	接着治具 オートディスペンサーの利用により、一定量の接着剤を塗る	57
53	ガスシールのための回転台	57
54	シングレット HV 試験	58
55	ガスリークチェックシステム	58
56	ガスリークテスト	59
57	ダブルット閉じシステム	61
58	平面性測定の一例	61
59	歪み箇所数の頻度	62
60	CO ₂ チャンネル	63
61	グランディング作業	64
62	カプトンテープによるストリップチャンネルを潰さない処理	65
63	スルーホール加工された読出しボード	65
64	読出しボードの取付け間隔を一定にするためのスペーサー治具	65
65	パルステストのシステム図	66
66	実際の取り込み波形 (左) ストリップ読出し (右) ワイヤー読出し	67
67	各チャンネルの典型的なワイヤー出力波高分布	67
68	各チャンネルの典型的なストリップ出力波高分布	68
69	隣どうし導通している例 (ストリップ出力)	69
70	CO ₂ チャンネル作成前 HV 試験	70
71	CO ₂ チャンネル作成前 HV 試験結果	71
72	CO ₂ チャンネル作成用回転台	71
73	読出しボード ~ TGC 本体のモールド作業	72
74	スルーホール部分で外に出ているシグナル線の処理	72
75	RC - CR 回路	74
76	C1 のキャパシタンスに対する 項の変化	74
77	RC - CR 回路の時間変化	75
78	等価回路	75
79	面抵抗に対するワイヤー側出力波高	78
80	面抵抗に対するワイヤー側出力波高	78
81	面抵抗に対するストリップ側出力波高	80
82	エラーバーのつけ方	82
83	パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較(F1 ワイヤー)	83
84	パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較(F2 ワイヤー)	84
85	パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較(F3 ワイヤー)	85
86	パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較(F1 ストリップ)	86
87	パルステスト 薄塗りと厚塗りの比較(F3 ストリップ)	87

88	カーボン面抵抗分布	91
89	カーボン面抵抗分布	91
90	面抵抗に対するパルス波高分布	92
91	セルの分割	92
92	面抵抗に対するパルス波高分布(セル)	93
93	面抵抗に対するパルス波高分布(セル)	93
94	面抵抗に対するパルス波高分布(セル)	94
95	面抵抗に対するパルス波高分布(セル)	94
96	面抵抗に対するパルス波高分布(セル)	95
97	面抵抗に対するパルス波高分布(セル)	95
98	セルの面積とパルス波高の相関	96
99	平面性	98
100	平面性	98
101	歪みのひどいTGCに対するパルステスト結果	99
102	断線前後のパルステストの比較	100