

修士学位論文
新型半導体光検出器 MPPC のための
電流積分器 ASIC の性能評価

神戸大学大学院 自然科学研究科
博士課程前期課程
物理学専攻
高エネルギー物理学研究室

061S112N
佐野 恵理

指導教官
川越 清以

平成 20 年 2 月 20 日

概要

高エネルギー物理学とは、物質の究極の構成要素を探求し、その間に働く相互作用を解明することを目的とする学問である。これまで高エネルギー物理学は加速器の進化とともに発展してきた。より高いエネルギーの加速器衝突実験はより小さな領域の探索を可能とし、我々の超極微の世界に対する理解を深めてきたのである。

現在計画中の ILC(International Linear Collider)実験は電子陽電子線型加速器実験であり、存在が予言されているが未発見であるヒッグス粒子の探索や精密測定、また標準理論を越える物理の探索を目的としている。ILC では宇宙の始まりであるビッグバンと同等の高エネルギー状態を実現することが可能であるため、その瞬間に発生する粒子について精密測定や研究を行うことは、宇宙の起源解明にも繋がる。これらの目的のため ILC の検出器には従来よりも高性能なものが要求されており、現在実現に向けて開発研究が進められている。

神戸大学では ILC の粒子検出器の中でもカロリメータと呼ばれる粒子のエネルギーを測定する検出器の研究を行っている。カロリメータに要求される性能にはジェット(発生粒子の束)の成分を分割するため **granularity**(細分割性)が高いこと、カロリメータ全体がトラッキングチェンバーに使用する 2~3T(テスラ)のソレノイドコイルの内部にあるため磁場に対する安定性が高いことが挙げられる。そのためカロリメータに使用するデバイスには、多チャンネルであるか安価であること、コンパクトであること、さらに磁場に対して耐性があることが要求される。これらの要求を満たし、カロリメータに使用する光検出器として現在浜松ホトニクス社製半導体光検出器 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)が候補に挙げられている。MPPC は複数のガイガーモード APD(アバランシェフォトダイオード)のピクセルから成り、増幅領域が極短距離であることから磁場の影響を受けることもなく、小型で優れたフォトンカウンティング能力を持つ。この MPPC の読み出しエレクトロニクスとして現在高エネルギー加速器研究機(KEK)測定器開発室で開発が進められているのが QVC-ASIC である。QVC-ASIC の特長には小型で安価なこと、動作速度が速く消費電力が低いこと、また磁場の影響を受けにくいことなどが挙げられる。このため高いグラニュラリティーが必要とされる ILC のカロリメータにおいて QVC-ASIC は MPPC の読み出し回路としての利用価値が非常に高い。しかし QVC-ASIC は現在開発途上の段階にあり、様々な課題を抱えている。

本研究ではこれまでに試作された 3 種類の QVC-ASIC について性能評価を行い、そこから問題点や今後の課題を導き出すことにより、MPPC の読み出し用エレクトロニクスとして使用可能な QVC-ASIC を開発することを目的としている。

目次

第 1 章 ILC 実験	5
1.1 加速器について.....	5
1.1.1 静止標的型と正面衝突型実験.....	5
1.1.2 円形加速器と線型加速器.....	6
1.1.3 ハドロンコライダーとレプトンコライダー.....	7
1.2 ILC 実験の物理	8
1.2.1 ヒッグス粒子とは	8
1.2.2 ヒッグス粒子の生成過程.....	9
1.2.3 ヒッグス粒子の崩壊過程.....	10
1.2.4 ヒッグス粒子の探索方法.....	12
1.2.5 超対称性理論.....	13
1.3 測定器構想.....	16
第 2 章 カロリメータ	19
2.1 カロリメータの原理	19
2.2 カロリメータの構造	19
2.3 カロリメータの性能	21
2.3.1 エネルギー分解能	21
2.3.2 粒子エネルギー分解能	22
2.3.3 ジェットエネルギー分解能	23
2.3.4 グラニューラリティー(細分割性)	23
2.4 カロリメータの動向	24
2.4.1 タイル型とストリップ型.....	24
2.4.2 Particle Flow Algorithm(PFA).....	26
2.4.3 デジタルハドロンカロリメータ(DHCAL).....	29
第 3 章 新型光検出器 MPPC	30
3.1 半導体光検出器.....	30
3.1.1 半導体	30
3.1.2 ダイオードとフォトダイオード.....	30
3.1.3 ブレークダウンとアバランシェ増幅.....	31
3.1.4 半導体光検出器	31

3.2	MPPC	32
3.2.1	MPPC の基本構造と原理	32
3.2.2	MPPC の一般性能	33
3.2.3	MPPC の読み出し回路	35
第 4 章	QVC-ASIC	36
4.1	ASIC	36
4.2	電流積分器(QVC)	36
4.2.1	電流積分器の基本構造と原理	36
4.2.2	電流積分器の検出器への応用	38
4.3	QVC-ASIC	38
4.3.1	QVC-ASIC の基本構造	38
4.3.2	QVC-ASIC の基本動作	39
4.3.3	QVC-ASIC に要求される性能	41
第 5 章	QVC-ASIC の性能評価	42
5.1	評価対象とした QVC-ASIC	42
5.2	測定項目	43
5.3	実験環境	44
5.4	測定結果	51
5.4.1	基本性能	51
5.4.2	QVC2005	55
5.4.3	QVC2006	57
5.4.4	QVC2007	62
5.4.5	MPPC との接合試験	70
第 6 章	まとめと今後の課題	75
6.1	測定結果のまとめ	75
6.2	今後の課題	76

図目次

1.1	ILC 加速器の構想図	8
1.2	真空の対称性があるビッグバン直後と対称性の破れた現在の様子	9
1.3	ヒッグス粒子の生成過程	10
1.4	ヒッグス粒子の質量とそれにもなう崩壊分岐比(Branching Ratio)	11
1.5	ヒッグス粒子の崩壊過程	11
1.6	超対称性粒子の崩壊の様子	14
1.7	粒子の反応断面積とエネルギーの関係	15
1.8	ILC の測定器概念図	18
2.1	電磁シャワーの様子	20
2.2	カロリメータにおける荷電粒子の反応	20
2.3	電磁カロリメータのモデル図	25
2.4	ハドロンカロリメータのモデル図	25
2.5	MPPC を用いたカロリメータの構想図	25
2.6	モンテカルロシミュレーションによる $Z \rightarrow q\bar{q}$ イベント	28
3.1	MPPC の全体像	33
3.2	MPPC における 1 ピクセルの基本構造図	33
4.1	積分器における積分モード、ホールドモード、リセットモードの様子	37
4.2	QVC-ASIC のレイアウト	39
4.3	QVC-ASIC の入力信号に対する出力信号の様子	40
5.1	テストパルスを用いた性能評価における実験環境	45
5.2	テストパルスを用いた測定の回路図	45
5.3	MPPC との接合試験における実験環境	46
5.4	QVC2005、QVC2006、QVC2007 のテスト基板	47
5.5	QVC2007 のテスト基板回路図	50
5.6	QVC-ASIC の基本動作の様子	51
5.7	QVC-ASIC の基本動作のタイムフローチャート	52
5.8	2 つの QVC セル間における出力信号の移り変わりの様子	53
5.9	入力信号のタイミング変化による 2 セル間での出力信号の移り変わり	54
5.10	QVC2005 におけるリニアリティ	55
5.11	QVC2005 におけるセル毎のオフセット電圧	57
5.12	QVC2006 における QVC セル毎のリニアリティ	59

5.13	QVC2006におけるQVCセル毎のダイナミックレンジ	61
5.14	QVC2006におけるセル毎のオフセット電圧	62
5.15	QVC2007におけるリニアリティ	64
5.16	QVC2007における4つのチャンネルのゲイン	66
5.17	QVC2007におけるチャンネル毎のダイナミックレンジ	69
5.18	MPPCとの接合試験における回路図	70
5.19	MPPCのノイズ波形	71
5.20	オシロスコープの画面で観測されたp.e.毎のピークの様子	72
5.21	データをヒストグラムに表すことで観測されたピーク	73

第1章 ILC 実験

ILC 実験はヒッグス粒子の精密測定や標準理論を越える物理の探索を目的にした次世代の電子陽電子衝突型線型加速器実験である。現在国際協力のもと実現に向けて開発研究が進められている。本章では ILC 実験に関するいくつかの事項について述べる。

1.1 加速器について

加速器実験には衝突の形態や加速方法、加速粒子の種類などにより様々なものが存在する。高エネルギー物理学分野における現在の課題は、ヒッグスなどの新粒子の発見や標準理論を越える物理の実現が可能な領域の重心系エネルギーを達成できていないことである。本節では電子陽電子衝突型線型加速器の建設が望まれる理由について述べる。

1.1.1 静止標的型と正面衝突型実験

衝突実験において、粒子の衝突のさせ方には静止標的型(fixed target)と正面衝突型(collider)がある。以下にそれぞれの衝突実験により得られる重心系エネルギーを示す。

- 静止標的型(fixed target)

$$\begin{aligned} E_{CM} &= \sqrt{(E_1 + m_2)^2 - \vec{p}_1^2} \\ &= \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2m_2 E_1} \\ &\sim \sqrt{2m_2 E_1} \propto \sqrt{E_1} \end{aligned} \tag{1.1}$$

E_{CM} : 重心系エネルギー E_1 : 入射粒子のエネルギー
 m_1 : 入射粒子の質量 m_2 : 標的粒子の質量

- 正面衝突型(collider)
重心系エネルギーを E_{CM} とし、
質量 m_1, m_2 の粒子をそれぞれエネルギー E_1, E_2 で衝突させたとする、

$$\begin{aligned}
E_{CM} &= \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} \\
&= \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 + 2\vec{p}_1\vec{p}_2} \\
&\sim \sqrt{4E_1E_2} \propto E_1
\end{aligned} \tag{1.2}$$

上記のように、重心系エネルギーは正面衝突型の場合には入射エネルギーに比例して増加するが、静止標的型の場合には入射エネルギーの平方根にしか比例して増加しない。従って、高エネルギー領域を目指す場合には静止標的型よりも正面衝突型の方が加速エネルギーを有効に利用することができる。近年の加速器実験において正面衝突型のコライダーが用いられているのはそのためであり、現在構想中の ILC も正面衝突型の形をとっている。

1.1.2 円形加速器と線型加速器

加速器には直線上を加速する線型加速器とマグネットを使用し円軌道上を加速する円形加速器がある。線型加速器と円形加速器の違いは質量の軽い電子や陽電子を加速する際には非常に重要になってくる。円形加速器ではシンクロトロン放射が起これ、次式

$$\Delta E = \frac{4\pi e^2}{3R} \beta^2 \gamma^4 \propto \frac{1}{m^4} \tag{1.3}$$

ΔE : シンクロトロン放射によるエネルギー損失 R : 加速器の半径

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{E}{mc^2} \quad m : \text{粒子質量} \quad c : \text{光速} \quad v : \text{粒子の速度}$$

のようにシンクロトロン放射によるエネルギー損失が生じるため、質量の軽い電子や陽子の場合には損失が大きく加速に使用できるエネルギーが減少してしまう。従って、電子や陽電子についてはシンクロトロン放射を起こさない線型加速器の方が効率よく加速することができ、高い衝突エネルギーを得ることができる。現在構想中の ILC が線型加速器の形をとっているのはそのためであり、今後の電子陽電子加速器も高エネルギーを目指すため線型加速器が主流になると考えられる。

但し線型加速器にもいくつか短所がある。それは、円形加速器のように衝突できなかった粒子を再利用することができないことや、次に述べるルミノシティ¹を上げることが困難なことである。ルミノシティとは反応断面積をかけることで反応数を表すパラメ

¹ (反応の起こる頻度) = $L\sigma$ [s^{-1}] L : ルミノシティ [$cm^{-2}s^{-1}$] σ : 反応断面積 [cm^2]

ーターであり、次式で表される。

$$L = \frac{N_{e^+} N_{e^-} f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} R_L \quad (1.4)$$

N_{e^+} : バンチ²に含まれる陽電子の数 N_{e^-} : バンチに含まれる電子の数

f : バンチの衝突頻度 R_L : 幾何学的な要因による補正項

σ_x : 衝突点での水平方向ビームサイズ σ_y : 衝突点での水平方向ビームサイズ

実験の測定精度を良くするためにはこのルミノシティを高め、統計データ量を上げる必要がある。現在稼働中の円形加速器は、蓄積リングにおけるビーム電流を大きくしたり衝突点におけるビームサイズを小さくしたりすることでルミノシティを高めることができる設計になっている。日本の高エネルギー加速器研究機構の KEKB やアメリカの SLAC の PEP2 がその例である。ILC においてもルミノシティは重要なパラメータであり従来の mm オーダーから nm オーダーへ高める必要があるが、それは技術的に非常に難しい課題の一つである。

1.1.3 ハドロンコライダーとレプトンコライダー

衝突型実験には加速粒子がハドロンであるハドロンコライダーと加速粒子がレプトンであるレプトンコライダーがある。ハドロンコライダーでは陽子(反)陽子衝突実験が、レプトンコライダーでは電子陽電子衝突実験が一般的である。陽子(反)陽子衝突実験の利点は円形加速においても非常に高い重心系エネルギーを達成できることである。しかし陽子は(u,u,d)+グルオンという内部構造を持つため、実際に反応を起こす粒子の持つエネルギーは全体の一部に過ぎない。また反応を起こす粒子の種類には陽子を構成しているクォーク(valence quark)、グルオンから対生成されるクォーク(sea quark)、グルオン自身など多数あるため、バックグラウンドが非常に多く目的とする反応を探し出すことは困難である。これに対し電子陽電子衝突実験は内部構造を持たない素粒子同士の衝突であるため、バックグラウンドが少なく非常に綺麗に反応を観測することができる。従って ILC のように精密測定を目的とする実験には電子陽電子衝突実験が適している。

² $\sim 10^{10}$ 個の粒子を一塊としている

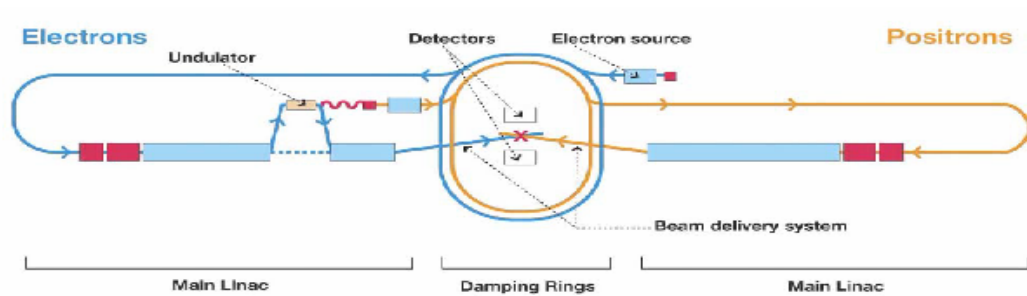


図 1.1: ILC 加速器の構想図

1.2 ILC 実験の物理

標準模型は電磁気力・弱い力・強い力を統一的に記述する理論であり、電磁気力と弱い力を記述するワインバーグ・サラム理論と強い力を記述する量子色力学(QCD)を合わせたものである。様々な実験における精密な検証により標準模型そのものの正しさは揺るがないものとなっている。しかし標準模型に登場する粒子の中で唯一ヒッグス粒子はその存在が確認されていない。また標準模型の枠内では説明しきれない事実も多く、明らかに標準模型は最終的な理論ではないためそれを越える理論が探究されている。

次世代線型加速器計画では TeV 領域のエネルギーに到達することによりヒッグス粒子の性質の精密測定や標準模型を越える超対称性(SUSY)粒子の発見など、これまでにない新しい物理現象を探索することを目的としている。

1.2.1 ヒッグス粒子とは

標準模型はその原理として素粒子の相互作用を記述するゲージ場理論を用いている。ゲージ場理論が成立するためには全ての素粒子の質量は厳密にゼロでなくてはならないが、現実の世界においてほとんどの素粒子はそれぞれ質量を持っている(光子やグルオンにはない)。この矛盾を説明するために理論的に予言されたのがヒッグス場の存在である。現在の宇宙はヒッグス場に満たされており、ヒッグス場から抵抗を受けることで粒子に質量が生じると考えるのである。宇宙の起源であるビッグバン直後には全ての素粒子が何の抵抗も受けることなく真空中を光速で運動していた。しかしビッグバンから 10^{-13} 秒後に自発的対称性の破れが生じて真空中に相転移が起こり、真空がヒッグス場で満たされるようになった結果、相互作用を受けた素粒子は質量を持つようになり光速では運動できなくなったと考えられている。光子やグルオンはヒッグス場と反応しないため光速で運動し、質量はゼロである。

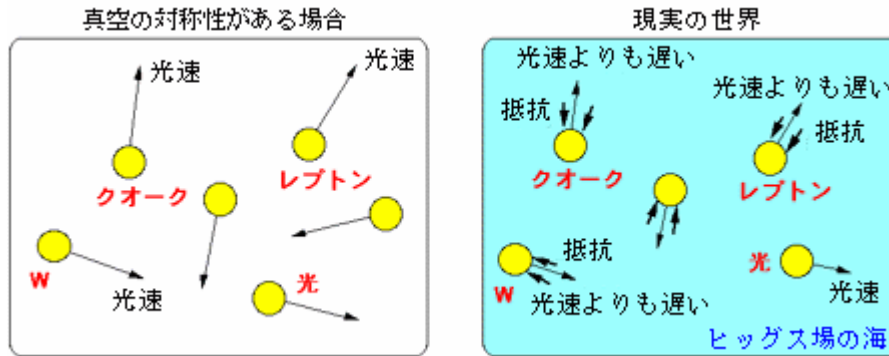


図 1.2: 真空の対称性があるビッグバン直後と対称性の破れた現在の様子

このヒッグス場を量子化して得られるのがヒッグス粒子である。ヒッグス粒子は発見されれば宇宙における粒子質量の発生も説明できるため、素粒子理論の観点だけでなく宇宙論の観点からも重要な役割を持つ。現在ヒッグス粒子の質量の上限、下限は LEP 実験や Tevatron 実験により、

$$114.4\text{GeV} < m_H < 144\text{GeV} \text{ (95\%C.L.)} \quad (1.5)$$

となっている。

1.2.2 ヒッグス粒子の生成過程

ヒッグス粒子を観測するためにはその生成過程を知り、バックグラウンドとの区別をつけることが重要である。電子陽電子衝突におけるヒッグス粒子生成反応の主なパターンは、

$$(a) e^+e^- \rightarrow Z^0 H^0$$

$$(b) e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu} H^0$$

$$(c) e^+e^- \rightarrow e^+e^- H^0$$

等がある。ここで H^0 は中性ヒッグス粒子を表す。(a)の反応は低エネルギーで断面積が大きくなることから軽いヒッグス粒子を探す際に重要になる。一方(b)や(c)の反応はベクトルボソンフュージョン過程と呼ばれ、1TeV を超えるようなエネルギーで衝突させて際に断面積が大きくなるので、重いヒッグス粒子を探す際に重要になる。図 1.3 にそれぞれの反応のファインマンダイアグラムを示す。

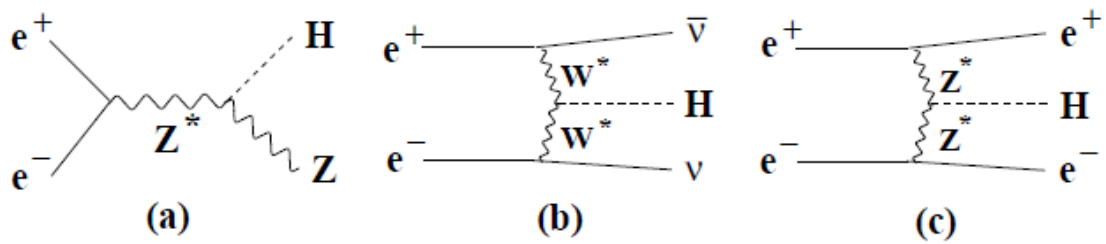


図 1.3: ヒッグス粒子の生成過程: *は仮想粒子を表す。

仮想粒子は実際の粒子と変わらない性質を持つが、観測されない粒子のことである。

1.2.3 ヒッグス粒子の崩壊過程

ヒッグス粒子はそれ自身不安定であり生成後はすぐに崩壊を繰り返すため実際検出器上でそのまま観測することができず、我々は崩壊後の安定になった粒子群を検出し、そのエネルギーからヒッグス粒子の質量を組み直さなければならない。従って、ヒッグス粒子の崩壊反応についても理解しておく必要がある。ヒッグス粒子のフェルミオン及びウィークボソンとの結合はその質量に比例し、崩壊の部分巾(崩壊確率)は、

$$\Gamma(H^0 \rightarrow f\bar{f}) \propto \left(\frac{gm_f}{2m_W}\right)^2 \quad (1.6)$$

$$\Gamma(H^0 \rightarrow V\bar{V}) \propto (gm_V)^2 \quad (1.7)$$

g : 結合定数 V : Vector Boson(W^\pm, Z^0) f : fermion

となる。よってヒッグス粒子は運動力学的に許される範囲内で最も重い粒子への崩壊巾が大きい。しかし 140GeV 以上ではウィークボソン対への崩壊巾は b クォーク対への崩壊巾より大きいので、仮想的な W 粒子を含めて、 $H^0 \rightarrow W^+W^-$ への崩壊巾が最も大きくなる。図 1.4 にヒッグス粒子の崩壊分岐比を、図 1.5 にヒッグス粒子の主な崩壊のファインマンダイアグラムを示す。

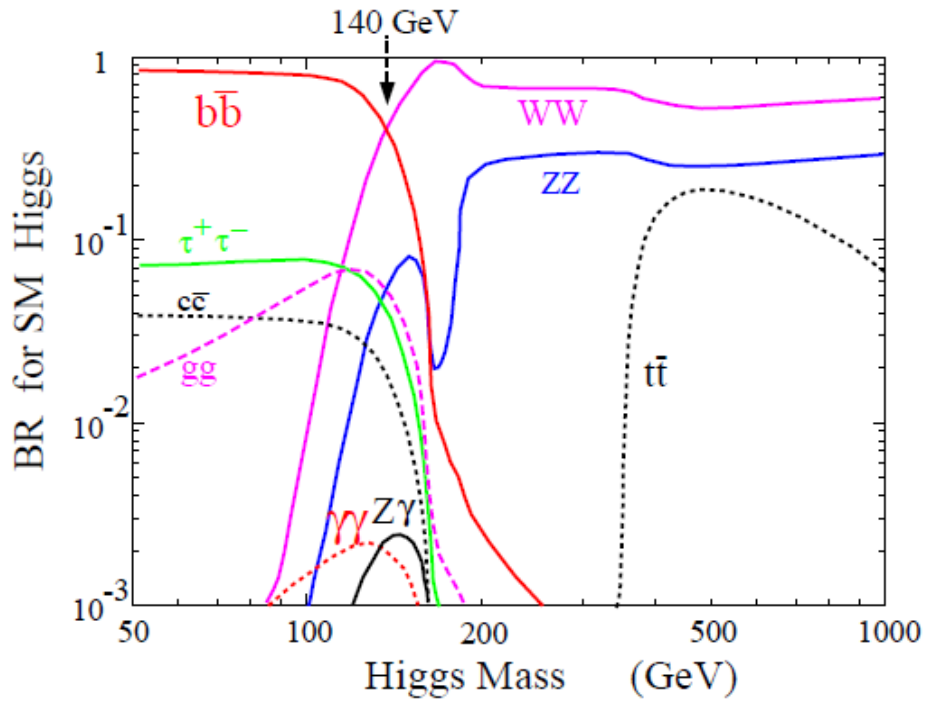


図 1.4: ヒッグス粒子の質量とそれにともなう崩壊分岐比(Branching Ratio)

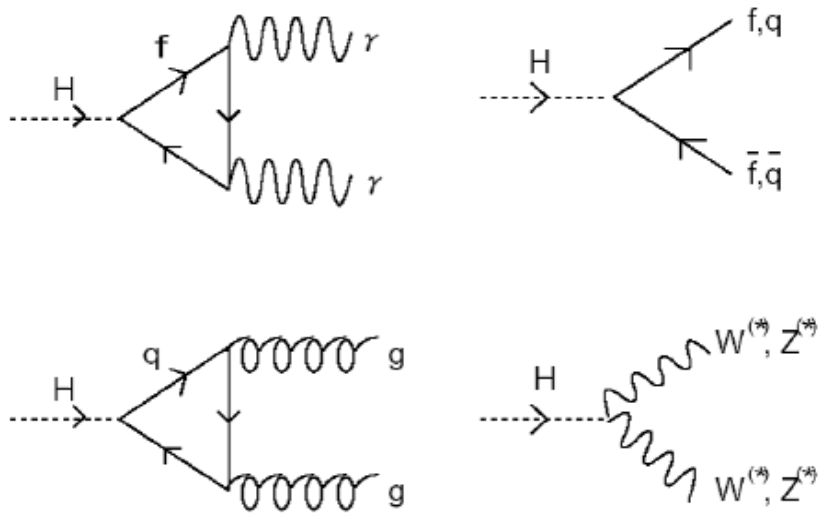


図 1.5: ヒッグス粒子の崩壊過程: *は仮想粒子を表す

1.2.4 ヒッグス粒子の探索方法

次に、次世代電子陽電子線型加速器計画でのヒッグス粒子の探索の方法について述べる。ヒッグス粒子を観測するためには運動学変数の分布特性などを利用し、大量のバックグラウンドの中からヒッグス粒子の崩壊事象を選別する必要がある。まずヒッグス粒子の質量が $2m_w$ より小さい場合であるが、このときの生成過程は上で述べたように $e^+e^- \rightarrow Z^0 H^0$ であり、ヒッグス粒子は図 1.4 より主に **b** クォークと反 **b** クォークに崩壊するので、その主な終状態は Z^0 粒子の崩壊モードによって

1. $Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu} \quad H^0 \rightarrow b\bar{b}$
2. $Z^0 \rightarrow l^+l^- \quad H^0 \rightarrow b\bar{b}$
3. $Z^0 \rightarrow q\bar{q} \quad H^0 \rightarrow b\bar{b}$

のように 3 つに分けられる。3 つの反応について 1 の場合は四元運動量欠損(ニュートリノは検出されない)ので単に 2 つの $b\bar{b}$ の不変質量を組む)、2 の場合は 2 つのレプトンの recoil mass(レプトンのエネルギーと運動量からヒッグス粒子のエネルギーと運動量が求まる)、3 の場合は $b\bar{b}$ に起因する 2 つのジェットの不変質量の分布にピークとなってヒッグス粒子は現れる。この時の主なバックグラウンドは

1. $e^+e^- \rightarrow Z^0 Z^0$
2. $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$
3. $e^+e^- \rightarrow e\nu W$

であるが、1、2 は反応後の角度分布において前方にピークを持ち、2、3 はヒッグス崩壊時に高い確率で発生する **b** クォークが含まれていない。従って、中心部に発生した事象を選び、そのイベントに 2 つの **b** クォークのジェットを要求することで効率よくヒッグス粒子の事象を選ぶことができる。次にヒッグス粒子の質量が $2m_w$ よりも重い場合であるが、この時はヒッグス粒子は 2 つの **W** 粒子に崩壊するのでその終状態の 6 つ、4 つあるいは 2 つのジェットや残りのトラックから Z^0 粒子に一致する組み合わせを見つけ、先程と同様にしてヒッグス粒子を見つけることができる。

このようにしてヒッグス粒子を発見することができた際には、崩壊分岐比やスピン、パリティなど、その性質について詳細に調べることが次の課題となる。特に、見つかつ

たヒッグス粒子が最小超対称性標準模型(MSSM)³で予言される粒子であることを調べることは超対称性理論を実証する上で重要である。ここで MSSM とは標準模型に超対称性の新粒子を最小限に導入することで標準模型を超対称性理論に最小拡張したモデルである。超対称性理論については下で述べる。

1.2.5 超対称性理論

超対称性理論は、標準模型の全ての粒子に対し Fermion には Boson が、Boson には Fermion が超対称パートナーとして存在することを予言する。超対称性理論を導入することの利点は、ヒッグス粒子の質量に対する Fermion と Boson の量子効果が逆符号であるため互いに打ち消し合い、量子補正の発散を抑えることができるということである。このことにより電弱相互作用のエネルギースケールと究極理論のエネルギースケールとの間のゲージ階層性問題を解決することができる。また超対称性理論ではあるエネルギースケールで電磁気相互作用・弱い相互作用・強い相互作用が一致するようになり、これは大統一理論(Grand Unified Theory)⁴とも整合する。さらに、最も軽い超対称性粒子 LSP(Lightest Supersymmetric Particle)⁵は多くの模型において安定で、宇宙の暗黒物質ダークマターの有力候補とされている。このように超対称性理論ではこれまでの標準模型で理解できなかったことが説明できるようになる。超対称性理論はまさに物理における究極理論のひとつであると言える。

ここで、超対称性粒子の反応について簡単に述べておく。対称性粒子は最も軽い超対称性粒子 LSP と通常の粒子とに崩壊する。LSP は多くの模型において安定で、物質とほとんど相互作用を起こさないため検出されない。そこで超対称性粒子の崩壊反応は終状態に運動量欠損のある折れ曲がった事象となる。

また標準模型を超対称性理論に最小拡張した MSSM においてはヒッグス二重項と呼ばれるものを仮定しており、次のように H_1 、 H_2 で表す。

$$H_1 = \begin{pmatrix} \Phi_1^0 \\ \Phi_1^- \end{pmatrix} \quad H_2 = \begin{pmatrix} \Phi_2^+ \\ \Phi_2^0 \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

³ 最も単純な超対称性理論。この理論においてヒッグス粒子は 5 種類(H^\pm, H^0, A, h)あるとされている

⁴ 非常に高いエネルギースケールでは電磁相互作用・弱い相互作用・強い相互作用の間に区別がないとしているものである

⁵ 通常最も軽いニュートラリーノが LSP だと考えられている。

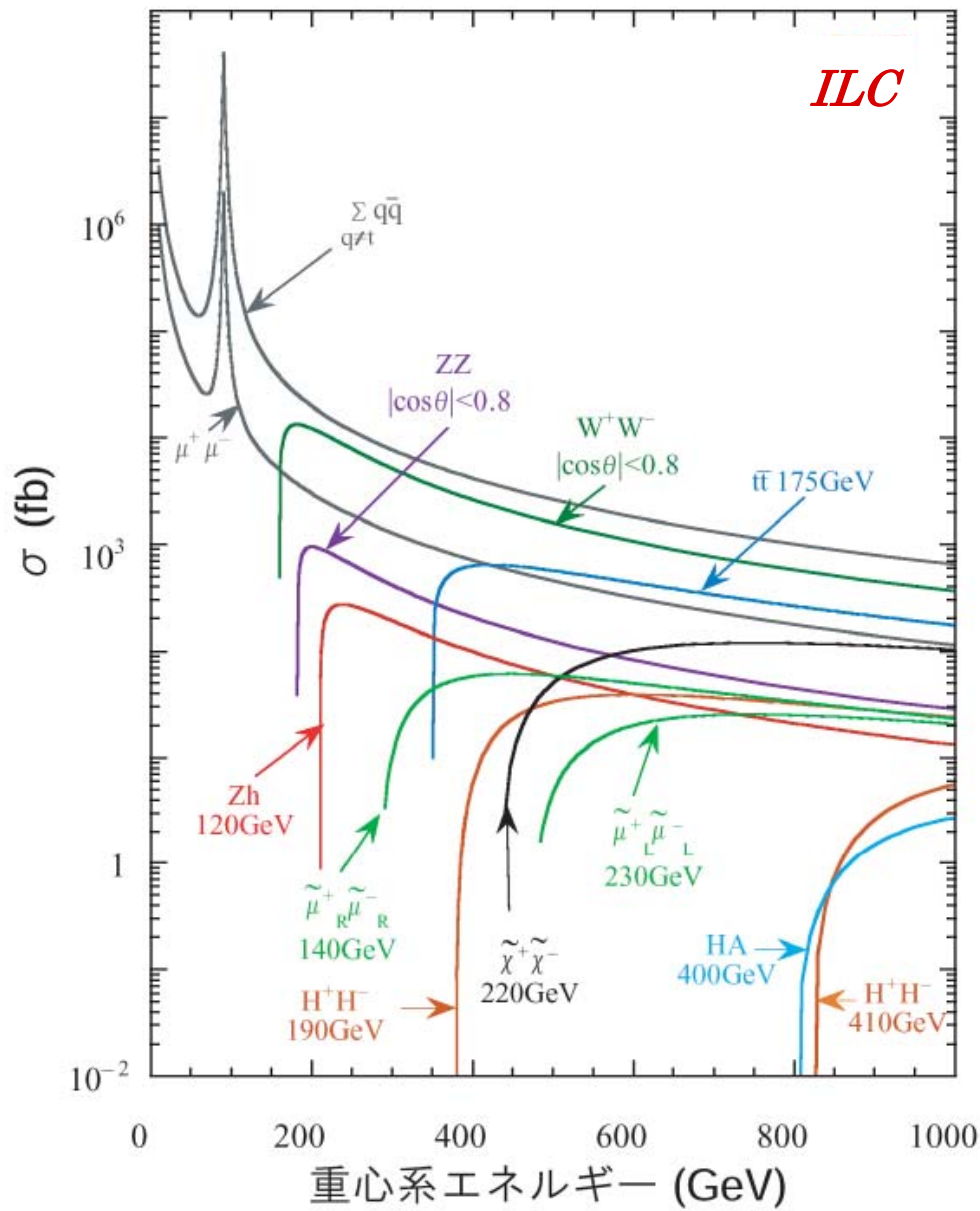


図 1.7: 粒子の反応断面積とエネルギーの関係

1.3 測定器構想

電子陽電子衝突型である ILC 実験はバックグラウンドが非常に少なくクリーンな反応を観測できるため精密測定を目的としている。そのため ILC の測定器には高分解能、高感度など、性能の高いものが望まれる。特にヒッグス粒子発見のためには Z 粒子や W 粒子から発生したジェットの再構成および b ジェットの識別は精度良く行えなければならぬ。そのためにはジェットエネルギー分解能は

$$\sigma_{E_{jet}} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E_{jet}}} \quad (1.9)$$

程度が必要であり、これが ILC 測定器開発の目標となっている。また超対称性粒子発見のためには超対称性粒子の崩壊等に特徴的な横運動量欠損のある事象を精度良く測定する必要があり、測定器は十分広い立体角を隙間なく覆うものでなければならない。ILC においては SiD、LDC、GLD、4th と呼ばれる 4 つの測定器コンセプトが提案されており、我々日本グループは GLD の設計を行っている(現在 LDC と GLD が統合され、ILD になりつつある)。

ILC の測定器は衝突点のある内側から順に以下のように構成される。

- バーテックス検出器

電子陽電子衝突点の極めて近傍に設置され、粒子の飛跡を高精度で測定することにより粒子の崩壊点を検出する。クォークの共鳴状態として生成された B 中間子や D 中間子の崩壊点を見つけ、ジェットが b クォークや c クォークから発生したことを識別する。特に b クォークの同定はヒッグス粒子探索において非常に重要である。バーテックス検出器に入射する粒子束は非常に高密度であるため高い位置分解能が必要とされる。そこでバーテックス検出器には CCD(電荷結合素子)のような二次元分解能の高いモジュールが想定されている。

- 中央飛跡検出器(トラッカー)

荷電粒子の飛跡を検出する。その曲率と磁場の大きさから粒子の運動量を測定することができる。現在 Time Projection Chamber(TPC)の使用が検討されている。ガス中を荷電粒子が通過すると電子とイオンの対が生成され、印加した高電圧によってドリフトする。TPC はそのドリフト時間から粒子の通過位置を測定するものである。

- カロリメータ

入射粒子のエネルギーを測定する。飛跡検出器で測定した運動量とカロリメータで測定したエネルギーから入射粒子の質量を求めることができる。カロリメータでは単に入射粒子ジェット全体のエネルギーを測定するだけでなく、個々の粒子のエネルギーに分解することで粒子ジェットの構成要素を同定できるものを考えている。詳しいことは次章で述べる。

- ミューオン検出器

μ 粒子の同定を行う。 μ 粒子は質量が電子よりも重いので電磁シャワーをおこしにくく強い相互作用を起こさないため、非常に透過能力が高くカロリメータも突き抜けて外側まで達してしまう。そこでミューオン検出器は測定器の最も外側を覆う形で設置される。 μ 粒子の運動量は内部の飛跡検出器で測定できるため、その飛跡情報とミューオン検出器のシグナルを繋げることで μ 粒子の識別を行うことができる。 μ 粒子は新粒子を探索する上で最も他の粒子と区別が付きやすく重要な信号であるため、ミューオン検出器は立体角を広く覆うとともに隙間のないように配置される。

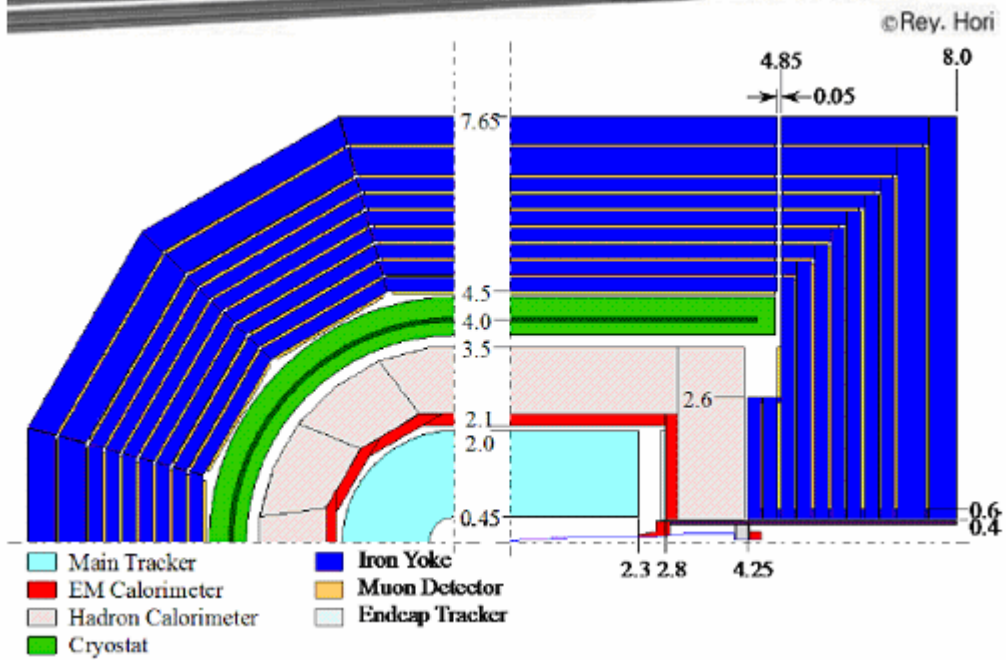
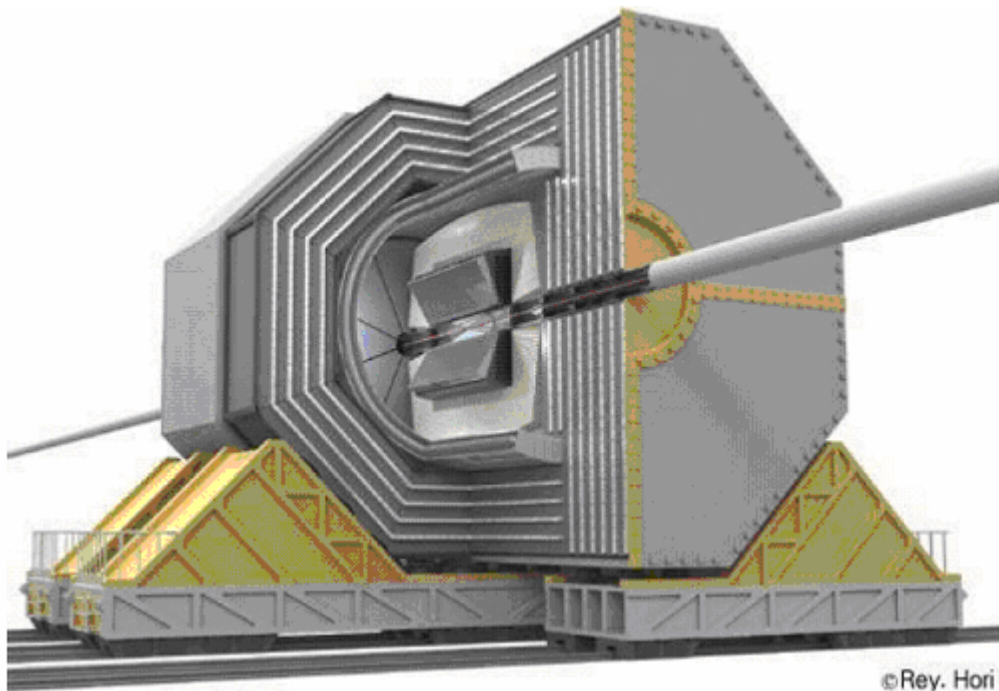


図 1.8: ILC の測定器概念図(上) 現段階での検出器のデザイン(下) 左が検出器の断面図(ビーム軸上から見たもの)、右が検出器を真横から見たもの

第2章 カロリメータ

前章でも述べたように、カロリメータとは入射粒子のエネルギーを測定するものである。現在神戸大学 ILC 実験グループでは次世代線型加速器におけるカロリメータの研究開発を行なっている。本章ではカロリメータについて詳しく述べる。

2.1 カロリメータの原理

カロリメータは入射粒子のエネルギーを測定器内で消失させることによりそのエネルギーを測定するものである。入射粒子のエネルギーを光に変換して光量を光検出器で測定する方法(シンチレーター、鉛ガラスなど)や、直接電気信号に変換して読み出す方法(液体アルゴンやシリコンタンングステンなど)がある。現在 GLD ではシンチレーターを用いたものを組み込む予定である。入射粒子が電子や光子である場合、これらの粒子は物質との相互作用により制動放射や電子陽電子対生成を繰り返し、電磁シャワーと呼ばれるカスケードシャワーを発生させる(図 2.1)。これに対し入射粒子がハドロンの場合、その粒子は物質中での弾性もしくは非弾性散乱により二次粒子を発生させ、これがイオン化または次なる弾性・非弾性散乱を発生させることでハドロンシャワーと呼ばれるカスケードシャワーを発生させる。電磁シャワーやハドロンシャワーはその全エネルギーを失ったところで終息し、最終的にカロリメータはこれらのシャワーのエネルギーを検出することで入射粒子のエネルギーを測定する。電子や光子のエネルギーを測定するカロリメータを電磁カロリメータ、ハドロンのエネルギーを測定するカロリメータをハドロンカロリメータと呼ぶ。

2.2 カロリメータの構造

上に述べたようにカロリメータには電磁カロリメータとハドロンカロリメータがある。ハドロンは電子や光子に比べ反応長が長く多くの物質質量が必要とされるため、ハドロンカロリメータは電磁カロリメータの外側に置かれる。カロリメータの構造としては、入射粒子の反応を促進する吸収体と粒子のエネルギーを光に変換する検出体が層になったサンプリング型カロリメータと、吸収体と検出体の両方の性質を持つ物質(CsI 等の

無機シンチレーターや鉛ガラス等のチェレンコフ放射体)を使用した全吸収型カロリメータがある。吸収体には鉄・鉛・タングステン・ウラニウム等が、検出体にはプラスチックシンチレーター・半導体・ガス・有機液体等が、目的に合わせて選択される。電磁カロリメータにおいては電子や光子は吸収体にて制動放射や電子陽電子対生成を起こし、発生した二次粒子(電子や光子)が検出体の電子を励起する。この電子がもとの基底状態に戻る際に発した光を光検出器で読み取ることによって光量を測定する。図 2.2 にカロリメータにおける荷電粒子の反応の模式図を示す。

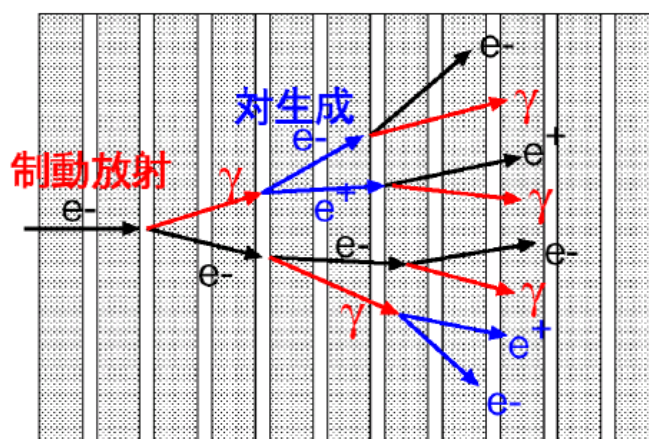


図 2.1:電磁シャワーの様子：制動放射と対生成の繰り返しである

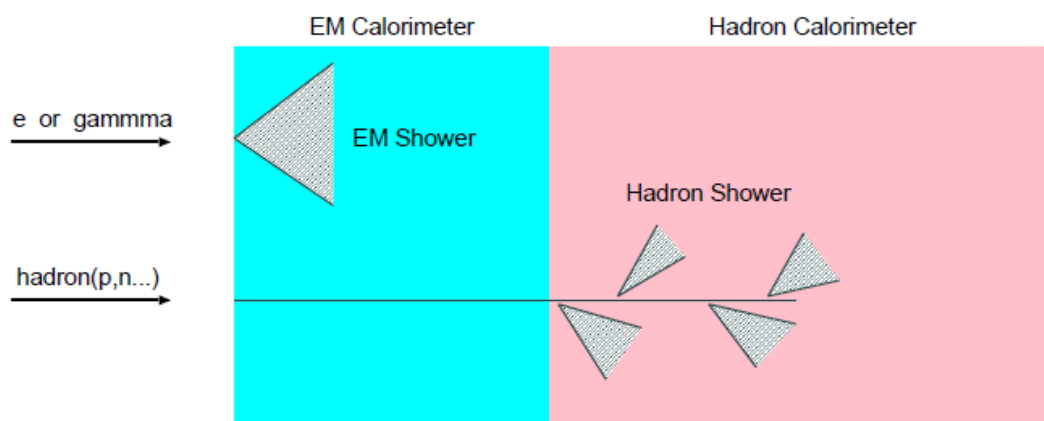


図 2.2:カロリメータにおける荷電粒子の反応:ハドロンシャワーは離散的に発生するのでシャワーの起源を特定することが難しい

2.3 カロリメータの性能

前章でも述べたように、ILC の測定器開発においては(1.9)式より

$$\sigma_{E_{jet}} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E_{jet}}}$$

のジェットエネルギー分解能を目標としている。ではそれによりカロリメータに要求される性能にはどのようなものがあるのであろうか。本節では以下に挙げるカロリメータの性能および概念について述べる。

- エネルギー分解能
- 1 粒子エネルギー分解能
- ジェットエネルギー分解能
- 補償の概念
- グラニュラリティー(細分割性)

2.3.1 エネルギー分解能

カロリメータに入射した粒子のエネルギーをどの程度正確に検出できるかを示すパラメータをエネルギー分解能と呼ぶ。エネルギー分解能は以下の式で表される。

$$\frac{\sigma_E}{E} = a \oplus \frac{b}{E} \oplus \frac{c}{\sqrt{E}} \quad (2.1)$$

E : 入射エネルギー σ_E : 分解能 a : 定数項 b : ノイズ項 c : 統計項

ここで $A \oplus B = \sqrt{A^2 + B^2}$ を表す

定数項は読み出しチャンネル毎のゲインの不均一性やカロリメータのエネルギーの漏れに起因するものである。これらは入射エネルギーに比例するためこの項は定数項となっている。またノイズ項は電気回路(読み出し回路等)などのノイズに起因する項である

ため入射エネルギーによらず一定である。従って上の式では $1/E$ に比例する。統計項については次の3つの寄与に分類できる。

- σ_{int} : シャワーそのものの (intrinsic) 揺らぎ
- σ_{photo} : 検出される光子数の揺らぎ
- σ_{sampling} : サンプルングによる揺らぎ (サンプルング型カロリメータにのみ存在)

ここで σ_{int} はカロリメータに入射したシャワー自身の揺らぎである。 σ_{photo} は検出体 (シンチレータや鉛ガラス等) からの光量を光検出器が検出する光電子数の揺らぎであり、次式で表される。

$$\frac{\sigma_{\text{photo}}}{E} = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{p.e.}}}} \quad N_{\text{p.e.}} : \text{光電子数} \quad (2.2)$$

また σ_{sampling} はサンプルング型カロリメータにおける有感層 (検出体の層) に落ちるエネルギーの揺らぎであり、サンプルング型カロリメータのエネルギー分解能に寄与する。

2.3.2 粒子エネルギー分解能

1粒子エネルギー分解能はカロリメータに1粒子が入射した際のエネルギー測定精度である。サンプルングカロリメータでは統計項のサンプルング揺らぎがこれに大きく寄与する。サンプルング揺らぎは検出体と吸収体の構成に依存するため、分解能を上げるにはシュミレーションやビームテストでの調査が必要である。また光子数揺らぎは光学系の設計の良し悪しによって決まるため、現在最新の設計開発が行われている。ILC 実験においてはこれまで電磁カロリメータとハドロンカロリメータに次のようなエネルギー分解能が要求されていた。

- 電磁カロリメータ :
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{15\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\% \quad (2.3)$$

- ハドロンカロリメータ :
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{40\%}{\sqrt{E}} \oplus 2\% \quad (2.4)$$

これは PFA の適用を前提としていない場合に要求される値であり、PFA の適用を前提

とするとハドロンカロリメータの 40%という値は実現する必要がなく、1 粒子のエネルギー分解能よりもむしろ次に述べるジェットエネルギー分解能が良いことが重要になる。PFA については後で述べる。

2.3.3 ジェットエネルギー分解能

ILC の測定器において特に重要なことはクォークの 4 元運動量を正確に測定することである。ヒッグス粒子発生のイベントにおいてはトップクォーク対生成など多くの終状態にいくつものクォークジェットが含まれるため、ジェットエネルギー分解能の違いは全体としての測定器の性能に大きく影響する。上に述べたように、4 ジェット終状態で W 粒子と Z 粒子を識別するためには測定器全体に対し

$$\sigma_{E_{jet}} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E_{jet}}}$$

のジェットエネルギー分解能が要求されている。

2.3.4 グラニュラリティー(細分割性)

ILC 実験においては非常に多くのハドロン・レプトンからなるジェットを精度良く捉えることが重要である。カロリメータではジェットを 1 つ 1 つの粒子に分解できるように読み出し単位を非常に細かいものにする。このことよりトラックとクラスタ(カロリメータのヒット郡)の対応付けやバックグラウンドの除去も容易になる。GLD カロリメータでは総チャンネル数が 1 千万チャンネルを超える予定である。カロリメータの読み出し単位の細度をグラニュラリティーと呼び、細かいほどグラニュラリティーが良いという。ここでグラニュラリティーの良いカロリメータを実現するには以下のことが問題になる。

- 読み出しのチャンネル数が膨大になるためコストが非常にかかる
- 均一な応答を保持するのが難しい(均一性(uniformity)の問題)
- ファイバー読み出しの場合、不感部分(デッドスペース)が大きくなる
- 読み出し単位を小さくするため得られる光量も小さくなり、ノイズとの区別がつかなくなる(S/N 比の問題)

- カロリメータ全体が飛跡検出器に使用する 2~3T(テスラ)のソレノイドコイルの内部にあるため、磁場に対する安定性が高い検出器が必要であること

従ってこれまで高エネルギー実験において広く使用されてきた光電子増倍管は、磁場の影響を受けやすいためカロリメータからの信号読み出しには適しておらず、新たに安価でかつ光電子分解能・量子効率が高く、磁場に耐性のある光検出器が必要となる。これまでに様々な光検出器について研究がなされてきたが、現在これらの要求を満たす光検出器として MPPC(Multi Pixel Photon Counter)を採用する予定である。MPPC については次章で述べる。

2.4 カロリメータの動向

日本の GLD-CAL はこれまで様々なタイプのカロリメータについて研究を重ねてきた。ここでは近年のカロリメータの動向について述べる。

2.4.1 タイル型とストリップ型

カロリメータにおいてはタイル型カロリメータとストリップ型カロリメータの 2 つのサンプリングカロリメータが研究されており、それぞれがサイズや形状を最適化すべく検討されている。現在電磁カロリメータとハドロンカロリメータの構造はそれぞれ以下のようにになっている。

- 電磁カロリメータ
ストリップ型のプラスチックシンチレーターとタンゲステン吸収層からなる積層構造を持つ。1cm×4.5cm×2mm のストリップ型シンチレーターを並べた層を X-Y 方向に交差させて設置することにより細分割を可能にし、1cm 角のピクセル検出器を再現することができる。
- ハドロンカロリメータ
ストリップ型、タイル型のプラスチックシンチレーターと吸収層からなる積層構造を持つ。電磁カロリメータと同様にストリップ型シンチレーターを交差させ、その上にタイル型シンチレーターを設置する。ストリップ型シンチレーターの大きさは 1cm×20cm×5mm、タイル型シンチレーターの大きさは 4cm×4cm×

5mm である。

図 2.3、図 2.4 に電磁カロリメータおよびハドロンカロリメータのモデル図を載せる。これらストリップ型カロリメータとタイル型カロリメータには MPPC+Fiber Red Out のタイプも構想されている。これは小型の MPPC を Fiber に直付けすることでファイバーの取り回しによるデッドスペースの問題を解消するものである。図 2.5 に MPPC を用いたカロリメータの構想図を載せる。

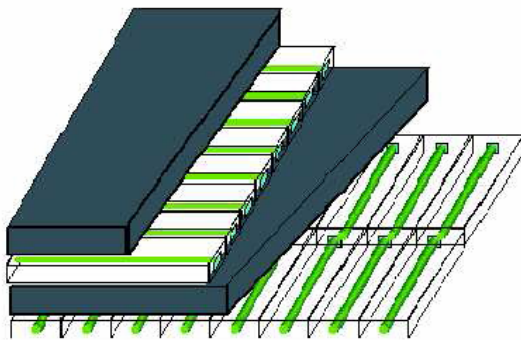


図 2.3: 電磁カロリメータのモデル図

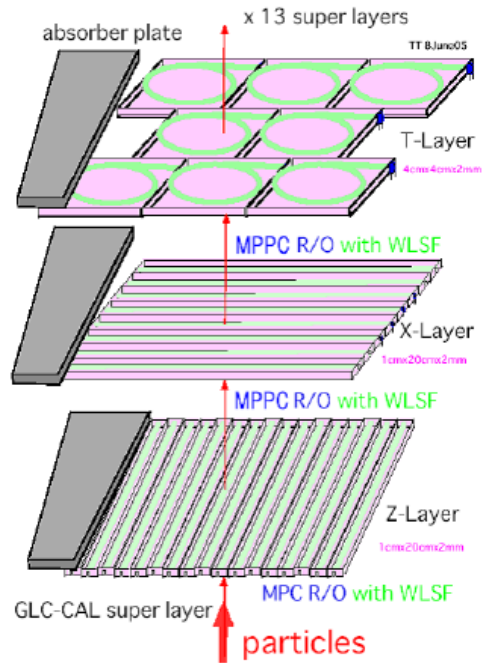


図 2.4: ハドロンカロリメータのモデル図

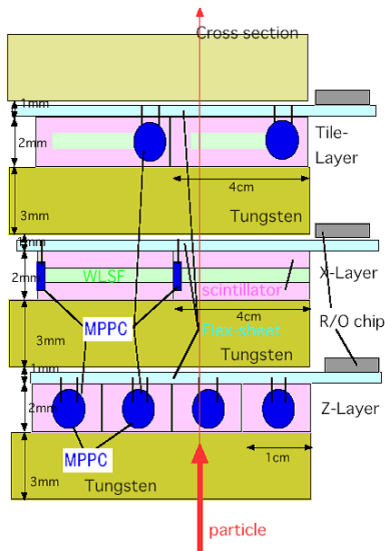


図 2.5: MPPC を用いたカロリメータの構想図

2.4.2 Particle Flow Algorithm(PFA)

これまで何度か述べたように ILC におけるジェットエネルギー分解能は(1.9)式より

$$\sigma_{E_{jet}} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E_{jet}}}$$

が目標とされている。しかし単にカロリメータで測定されたエネルギーを較正しただけでは分解能は 60%程度にしかならない。そこでこの目標を達成する上で有望と考えられているのが Particle Flow Algorithm(PFA)である。これは飛跡検出器でトラッキングできる荷電粒子についてはエネルギーを飛跡検出器で測定し、トラッキングできない中性粒子のエネルギーについてはカロリメータで測定を行うというものである。荷電粒子のエネルギーを飛跡検出器で測定できる理由は以下のとおりである。ジェット中の荷電粒子のエネルギーは相対論より

$$E = \sqrt{m^2 + p^2} \quad (\text{自然単位系}) \quad (2.5)$$

E : 粒子のエネルギー m : 粒子の質量 p : 粒子の運動量

である。実際の実験においては質量に比べ運動量が非常に大きい($m \ll p$)ことから $E \cong p$ と考えられるため、粒子の運動量はエネルギーに等しいといえる。ここで飛跡検出器の運動量分解能はカロリメータのエネルギー分解能に比べてずっと良いこと、さらに ILC で予想されるジェットのエネルギー内訳が荷電粒子 65%、光子 26%、中性ハドロン 9%であることから、荷電粒子については飛跡検出器によるエネルギー測定が有効であることがわかる。

ジェット中の粒子	エネルギー成分比	エネルギー測定に用いる検出器	GeV 単位での Resolution
荷電成分	65%	Tracker	Negligible
光子	25%	ECAL	$0.05^2 E_{jet}$
中性ハドロン	10%	ECAL+HCAL	$0.16^2 E_{jet}$
これらの合成については 30%の Resolution が要求される			

表 2.1: ジェット中の粒子成分: これらは平均の値である

またカロリメータのジェットエネルギー分解能 σ_{jet} は

$$\sigma_{jet}^2 = \sigma_{charge}^2 + \sigma_{\gamma}^2 + \sigma_{hadron}^2 + \sigma_{confusion}^2 \dots \quad (2.6)$$

で表される。ここで σ_{charge} は荷電粒子のエネルギー分解能、 σ_{γ} は光子のエネルギー分解能、 σ_{hadron} はハドロンのエネルギー分解能である。 $\sigma_{confusion}$ は荷電粒子と中性粒子がカロリメータにエネルギーを落とすことによる揺らぎであるため、正確にシャワーを分別し、カロリメータから荷電粒子由来の成分を除くことで小さくすることができる。また粒子を分離するためにカロリメータとバーテックス検出器の距離を十分にとることで $\sigma_{confusion}$ は小さくできる。上式からも、PFAを用いて荷電粒子のエネルギー分解能を良くすることでカロリメータのエネルギー分解能を格段に向上できることが予想される。PFAの基本的な手順は以下のとおりである。

1. 飛跡検出器による荷電粒子の飛跡の再構成
2. MIP⁶シグナルおよびインタラクションレイヤー(IL⁷)の同定
3. ミューオンの再構成
4. 光子の再構成
5. 電子の再構成
6. 荷電ハドロンの再構成
7. 中性ハドロンの再構成
8. Satellites hits の除去

Satellites hits とはハドロン粒子のシャワー内の粒子の反跳などによりもともとの粒子の飛跡方向から大きく外れた部分に作られるヒットのことである。PFA においてはどのようにクラスターを生成するか、光子をどのように再構成するか、飛跡とクラスターをどう対応付けるかが考えるべきところである。カロリメータのみの情報を用いた場合と PFA を用いた場合における $Z \rightarrow q\bar{q}$ イベントに関するトータルエネルギーの分布を図 2.6 に示す。

⁶ $v/c > 0.95$ (v : 粒子の速度 c : 光速) で入射した荷電粒子は一定のエネルギーを物質に落とす。このような粒子を最小電離損失粒子(MIP: Minimum Ionizing Particle)と呼ぶ

⁷ カロリメータ内での荷電ハドロンシャワーの始点

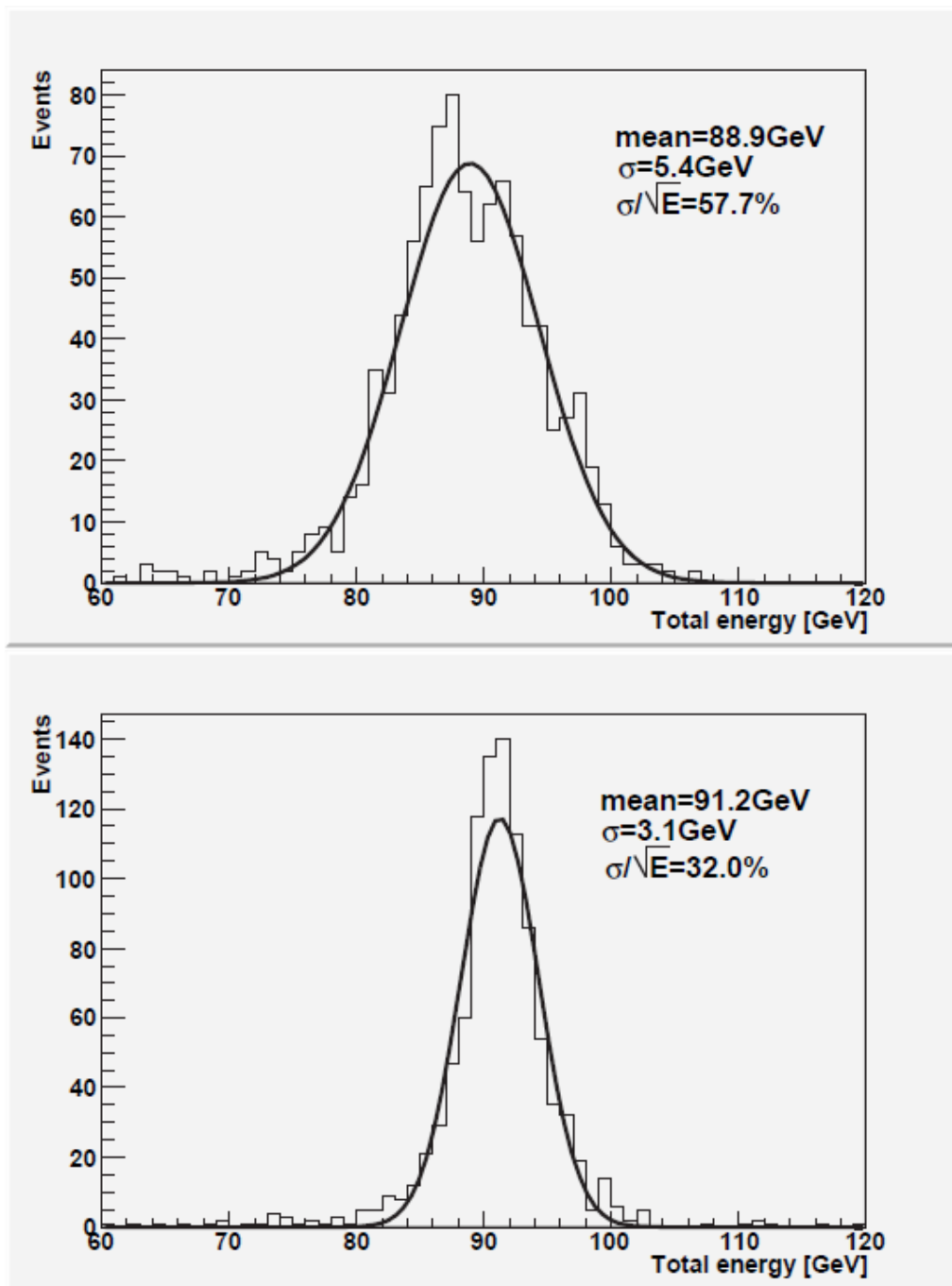


図 2.6:モンテカルロシミュレーションによる $Z \rightarrow q\bar{q}$ イベント ($\sqrt{s} = 91.2 \text{ GeV}$) に関する
 トータルエネルギーの分布:(上)カロリメータのみの情報を用いた場合(下)PFA を用いた
 場合

2.4.3 デジタルハドロンカロリメータ(DHCAL)

これまで述べてきたように、カロリメータにはジェットを精度良く測定することが求められており、高いグラニュラリティが必要とされている。しかしこれを実現するには大変コストがかかるほかデータ量も非常に膨大なものになる。そこで GEM(Gas Electron Multiplier)もしくは RPC(Resistive Plate Chamber)を使用することにより 1cm 角程度の高精細化を実現し、エネルギー情報は粒子通過のある・なしのみを判断する、すなわち 1 ビットで読み出すという方法が考えられている。このようなカロリメータはデジタルカロリメータと呼ばれる。デジタルカロリメータはハドロンカロリメータのみに使用が考えられており、電磁カロリメータには適さないとされている。それは電磁シャワーにおいては 1 読み出し単位に落とすエネルギーのふらつきが大きいためである。デジタルカロリメータにおいてガス検出器を使用することの利点は、Landau Tail による分布の広がりが少ないことやコストが低いことである。しかしエネルギー分解能については中性粒子の分が回収できなくなるという短所もある。DHCAL がアナログハドロンカロリメータ(AnalogHCAL)に比べ優れているかどうかは今のところまだわかっておらず、現在も研究が進められている。

第 3 章 新型光検出器 MPPC

MPPC(Multi Pixel Photon Counter)は浜松ホトニクス株式会社が現在研究開発中の新型半導体光検出器であり、ILC のカロリメータにおける信号読み出し用光検出器として採用される予定である。本章では MPPC の基本構造や原理および諸特性について述べる。

3.1 半導体光検出器

MPPC の理解には半導体光検出器の知識が欠かせない。本節ではまず半導体デバイスの構造や原理、性質について述べる。

3.1.1 半導体

固体の電子デバイスのほとんどは半導体の単結晶で作られる。半導体とは電気を通す「導体」と電気を全く通さない「絶縁体」の中間の性質を持つ物質であり、Si(シリコン)などが主に用いられる。一般の電子デバイスでは純 Si をそのまま使用するということは少なく、不純物を混入させる(ドーピングという)ことで半導体内の電子と正孔の濃度を大幅に変化させて用いることが多い。純 Si に 3 価の原子をドーピングすると Si の共有結合を取り込んで正孔が作り出される。このような半導体を p 型半導体といい、3 価の原子はその働きからアクセプタと呼ばれる。これに対し、純 Si に 5 価の原子をドーピングすると共有結合に使用されない電子が自由電子として半導体内を運動する。このような半導体を n 型半導体といい、5 価の原子はその働きからドナーと呼ばれる。それぞれ不純物の量が多い場合には p^+ 、 n^+ 型、少ない場合には p^- 、 n^- 型と呼ぶ。また電子や正孔は半導体中の電荷の担い手であることからキャリアと呼ばれる。

3.1.2 ダイオードとフォトダイオード

p 型半導体と n 型半導体は単独で用いられることは少なく、これらを組み合わせて用いられることがほとんどである。p 型半導体と n 型半導体を接合させた最も基本的な素子がダイオードである。p 型半導体と n 型半導体をつなぎ合わせるとそれぞれのキャリ

アが互いに相手の領域に移動し、接合部付近ではキャリアが打ち消し合うことで電子も正孔も存在しない空乏層(Depletion layer)が生まれる。この領域では陰イオンがアクセプタ、陽イオンがドナーとなることで電界が形成されてポテンシャルに傾斜が起り、この傾斜とキャリアの拡散がつり合ったところで空乏層は広がり止める。ダイオードはこの電位勾配を打ち消す方向に電圧をかけると(順方向電圧)電流が流れ、電位勾配がさらに大きくなる方向に電圧をかけると(逆方向電圧)電流はほとんど流れないという性質を持つ。このことからダイオードは整流作用を持つ素子として知られている。ここでダイオードの空乏層に光が入射すると電子が励起され、共有結合のエネルギーを振り切って自由電子となることにより電流が流れる。この光起電力からの電気信号を高感度かつ高速の応答性で検出する目的で作られる pn ダイオードがフォトダイオードである。

3.1.3 ブレークダウンとアバランシェ増幅

フォトダイオードにかける逆方向電圧を大きくしていくと、やがてある電圧で急激に大きな電流が流れ始める。これはブレークダウンと呼ばれ、このときの電圧をブレークダウン電圧あるいは逆方向耐圧などという。逆方向電圧による高電界で加速されたキャリアは空乏層中をドリフトする際にそのエネルギーで結晶格子の結合を切り、そこに新たな電子と正孔を作り出す。ここで生成された電子と正孔は再び高電界によって加速されさらに新たな電子や正孔を作り出すということを繰り返すので、電子・正孔対の数はネズミ算式に増え、結果として大電流が流れるのである。このような増幅機構をアバランシェ増幅(なだれ増倍現象)という。このような増幅が起こる領域では光電流がなだれ増倍によって数十～数百倍になり、増倍利得を持ったフォトダイオードとして動作することが可能になる。この動作を目的として作られたものがアバランシェフォトダイオード(APD)である。

3.1.4 半導体光検出器

半導体は上に述べたような性質を利用することにより光検出器として用いることができる。フォトダイオードにおいて動作領域は逆バイアス領域に設定され、通常光は pn 接合面に垂直に入射する。Si などのフォトダイオードでは基礎吸収が起こる波長領域においても光が μm オーダーの深さまで侵入する。従ってダイオードに逆バイアス電圧をかけ空乏層を広げることにより、空乏層内の励起キャリア数を増幅することが可能である。逆バイアス電圧をかけたフォトダイオードは暗状態ではわずかな逆方向飽和電流しか流れないが、光が入射すると光電流が流れ光検出器として動作する。

また pn 接合ダイオードにおいて励起キャリアは空乏層と中性領域の両方で発生し、空乏層では高電界により大きなドリフト速度で移動するが、中性領域の発生キャリアは空乏層端までは拡散で移動する。そのため中性領域が厚いとこの領域の走行時間が大きくなり、応答速度は遅くなる。そこで p 層と n 層の間に i 型半導体⁸(真性半導体)を挟んだ pin 型ダイオードが使用されている。この構造では広い範囲にドリフト電界がかかり、光電流の大部分を高速でドリフトさせることができるため高速応答性に優れる。また応答速度を決める要因には CR 時定数もある。ダイオードは接合容量を持つためダイオードの内部抵抗や外部回路の抵抗成分との時定数で応答特性は劣化する。従って逆バイアス電圧により空乏層を広げる、もしくは pin 構造をとることが接合容量を低減させ、応答速度の向上につながる事がわかる。この他に接合面積を小さくすることでも応答速度は向上させることができる。

フォトダイオードは加える逆電圧を大きくするにつれ、入射光量と出力信号が比例関係にある領域から入射光量に関わらず一定の信号を出す領域へと変化していく。このように入射光量に関わらず信号が一定になる状態を Geiger Mode といい、ブレークダウン電圧から 10~20%上の電圧領域を Limited Geiger Mode(限定ガイガー領域)という。

3.2 MPPC

3.2.1 MPPC の基本構造と原理

MPPC は図 3.1 のように 1mm 角の正方形センサー内にピクセルが並んだ構造を持つ。また内部における基本構造は図 3.2 に示すように 1 枚の n^{++} 型基礎半導体の上にダイオードのピクセルを設けたものとなっている。

各ピクセルは Limited Geiger Mode で駆動し、入射光量に関わらず一定の信号を放出する。このことにより放電したピクセルの計数が可能となり、その合計から入射光量を知ることができる。すなわち入射光量をデジタルに検出することができる。また高い p.e.(photoelectron:光電子)分解能を得ることも期待される。MPPC の 1 ピクセルにおいて電荷増幅は p^- 、 n^{++} ダイオードの空乏層で起こり、 p^+ から読み出される仕組みになっている。

⁸ 不純物を加えていない 100%シリコンのこと

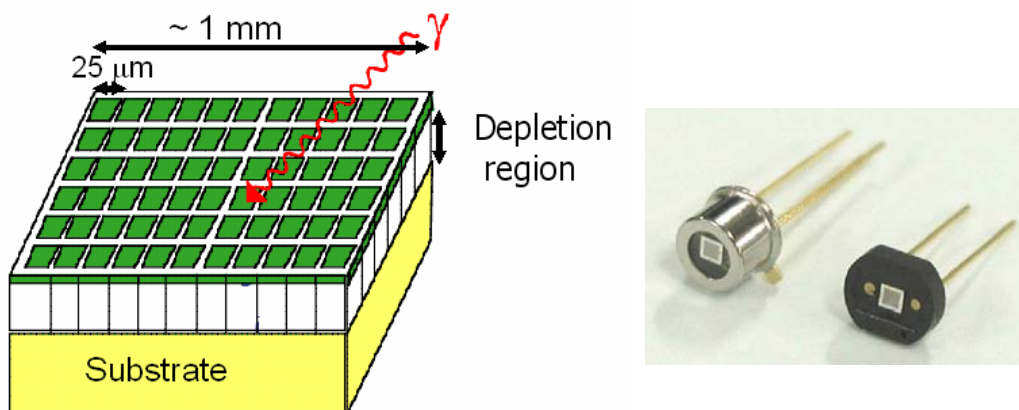


図 3.1: MPPC の全体像

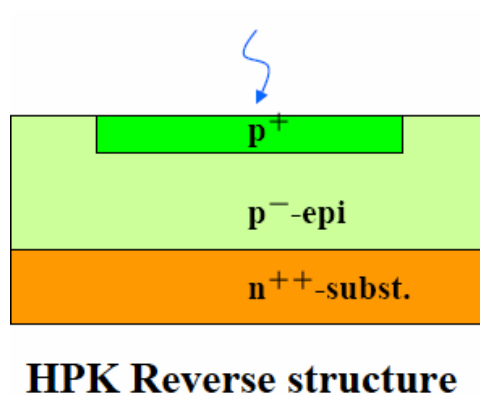


図 3.2: MPPC における 1 ピクセルの基本構造図

3.2.2 MPPC の一般性能

MPPC における一般的な性能は次のようになる。

- Gain(増幅率)

ガイガーモードでは入射光量に関わらず出力信号は一定である。そこでゲインを G 、出力信号を Q_{out} とすると

$$G = \frac{Q_{out}}{e} \quad (3.1)$$

と表すことができる。ここで e は素電荷 ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) である。またピクセル接合容量を C_{pixel} 、印加電圧を V とすると、1 つのピクセルで増幅され出力される電荷は

$$Q_{out} = C_{pixel}(V - V_0) \quad (3.2)$$

と表される。 V_0 はガイガーモードが開始する電圧値、すなわちブレイクダウン電圧である。 C_{pixel} の値はピクセルの大きさや半導体の誘電率によって決まる。従ってこれらの関係より、ゲインの測定を行うことで各ピクセルにおける接合容量とブレイクダウン電圧を求めることができる。MPPC を ILC のカロリメータで使用するためには、アンプを用いずに使用できること、また信号とノイズをはっきり区別できることが求められるため、MPPC のゲインは $G > 10^5$ が望まれる。

- ノイズ

MPPC のノイズは主に熱励起によるものである。熱的に励起されたキャリアが空乏層内で増幅されることにより生成されるものがほとんどである。ノイズレートは 1MHz 以下が目標とされている。

- Photon Detection Efficiency(PDE)

単一の光子入射に対し、それを検出する確率を光子検出効率(Photon Detection Efficiency:PDE)と呼ぶ。MPPC の PDE は次の式から求まる。

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_q \mathcal{E}_{geiger} \mathcal{E}_{geometry} \quad (3.3)$$

\mathcal{E} : MPPC の PDE

\mathcal{E}_q : 半導体の量子効率(単一光子入射に対し電子-正孔対の生成が起こる確率)

\mathcal{E}_{geiger} : 単一光電子がアバランシェ増幅を起こす確率

$\mathcal{E}_{geometry}$: MPPC の構造による量子効率(有効受光面積の割合など)

ILC のカロリメータにおいて 1 つの MIP からの信号を検出するには、MPPC の PDE は 30%以上が理想的である。

- ダイナミックレンジ

MPPC は Limited Geiger Mode で駆動するため、1つのピクセルにおいて出力信号は、複数の光子が入射した場合も単一光子入射の場合に等しい。そのためある程度以上の光量を MPPC に照射すると、複数の光子が同じ 1つのピクセルに入射する確率が高くなる。従って MPPC は非線形な応答を示し、ダイナミックレンジはピクセル数によって決まる。MPPC において実際に応答を示すピクセル数 N_{fired} は以下のような式で表される。

$$N_{fired} = N_{pixel} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon N_{photon}}{N_{pixel}}\right) \right\} \quad (3.4)$$

N_{pixel} : MPPC のピクセル数 N_{photon} : MPPC に入射する光子数

これは次のように理解することができる。1つのピクセルには平均 N_{photon} / N_{pixel} 個の光子が入射していると考えられる。ここで、少なくとも 1つの光子が入射し放電する確率はポアソン分布より $1 - \exp(-\varepsilon N_{photon} / N_{pixel})$ となる。これが N_{pixel} 個のピクセルについて成り立つので、全体的な期待値は式(3.4)のように表される。ILC のカロリメータにおいては 1000 個の光電子までを線形の領域で検出することが望まれており、少なくとも 2500 以上のピクセル数が必要とされている。

3.2.3 MPPC の読み出し回路

高いグラニューラリティーが必要とされる ILC のカロリメータにおいては MPPC と同様、MPPC の読み出し回路にも多チャンネルであるか安価であること、コンパクトであること、さらに磁場に耐性があることが要求される。これらを満たし、MPPC の読み出しに使用する目的で開発が進められているのが QVC-ASIC である。QVC-ASIC は本研究において評価対象としたデバイスであり、次章以降で詳しく述べる。

第4章 QVC-ASIC

現在高エネルギー加速器研究機構(KEK)の測定器開発室では我々と共同で MPPC からの信号読み出しに使用するためのエレクトロニクス QVC-ASIC の開発が進められている。ここでは本研究でも扱った QVC-ASIC の基本構造や原理、諸特性について述べる。

4.1 ASIC

トランジスタやダイオード、抵抗器、コンデンサなど、多数の回路素子を数ミリ角のシリコンチップ上に組み込んだものは集積回路(IC: Integrated Circuit)と呼ばれ、今日ではコンピュータや家電製品、産業用機械、IC カードに至るまであらゆる場面に応用されている。ICには様々な種類が存在するが、特定の用途向けに製造されるICのことをASIC(Application Specific Integrated Circuit)と呼ぶ。回路をASIC化することには実装面積の小型化、動作速度の向上、消費電力の低減、コストダウンなどの利点がある。

4.2 電流積分器(QVC)

本節では QVC-ASIC を理解する上で重要な電流積分器(QVC)の知識について述べる。

4.2.1 電流積分器の基本構造と原理

電流積分器とは入力電流の積分値、すなわち入力電荷量に比例した出力電圧を得ることのできる回路である。電流積分器には入力電荷(=入力電流の積分値)を蓄積する積分モード、蓄積電荷を保持し電圧を出力するホールドモード、蓄積電荷を放電し初期状態に戻すリセットモードの3つのモードがあり、これらのモードを順に経ることにより入力電荷に比例した電圧が出力される仕組みとなっている。それぞれのモードにおける電流積分器の回路の様子を図4.1に示す。

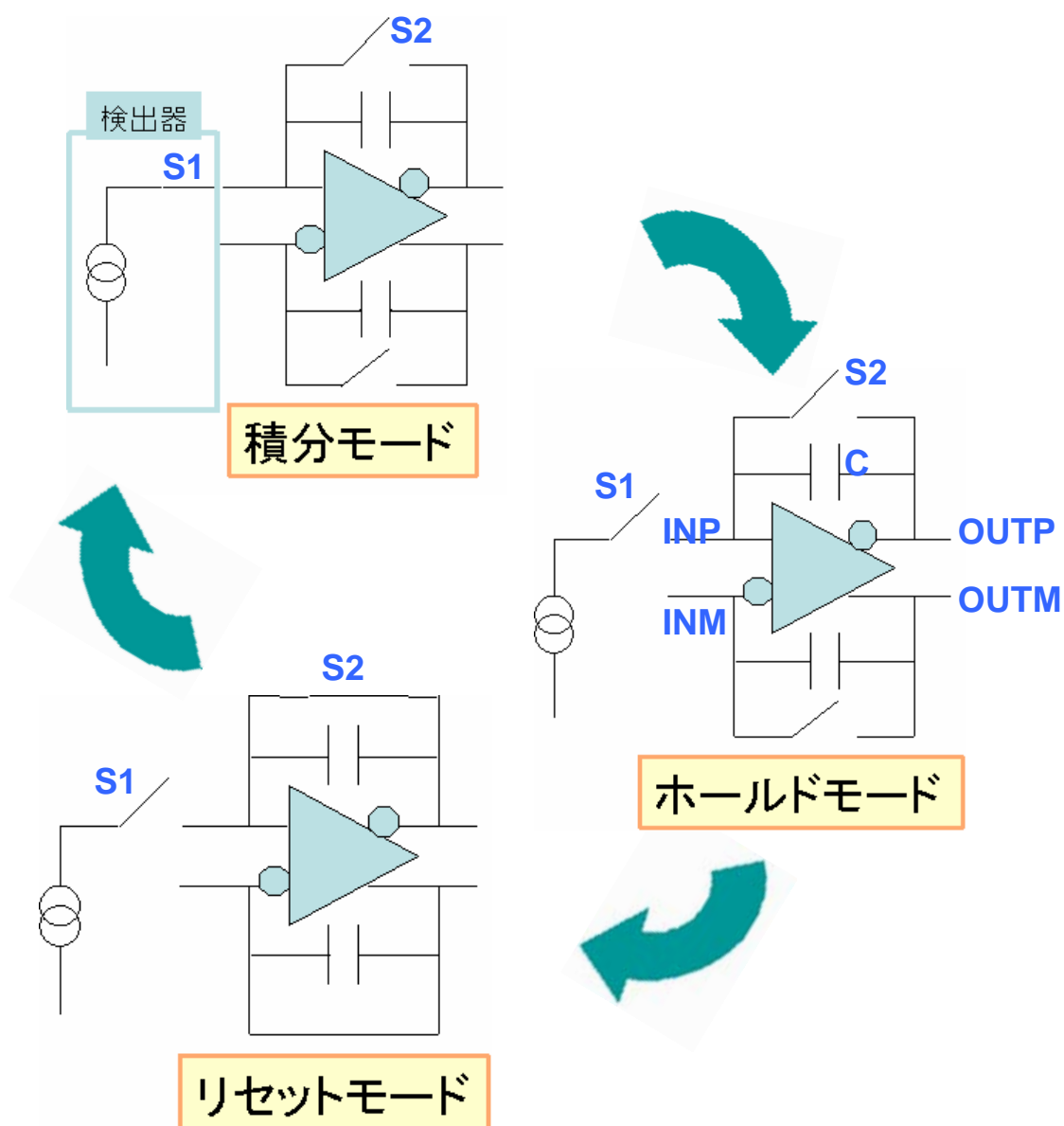


図 4.1: 積分器における積分モード、ホールドモード、リセットモードの様子

電流積分器は差動入出力形式をとっており、2つの入力 INP、INM の差分に対して 2つの出力 OUTP、OUTM の差分が出力信号として観測される仕組みとなっている。

ここで INP、OUTP 側の入出力に注目して動作を見てみる。積分モードではスイッチ S1 が ON、S2 が OFF となり、検出器からの信号が INP に入力されることによりコンデンサ C には電荷が蓄積される。その後ホールドモードに切り替わると S1 が OFF となることにより積分モードで蓄積された電荷はコンデン C で保持され、この間 OUTP からは電圧が出力されることになる。さらにリセットモードではホールドモードの状態

から S2 が OFF となることでコンデンサ C に蓄えられていた電荷が放電され、回路は初期状態へとリセットされる。電流積分器はこれら 3 モードを 1 周期として繰り返すことで動作する。この動作は INM、OUTM 側の入出力についても同様である。

4.2.2 電流積分器の検出器への応用

スイッチトキャパシタ回路およびその応用としての電流積分器の用途は広く、低消費電力で CMOS ロジックとの親和性も良いためアナログデジタル混在システム ASIC の一部として頻繁に使用されている。例として以下のようなものが挙げられる。

- 電荷有感型 ADC(チャージセンシティブ ADC)
- ウィルキンソン型低消費電力 ADC
- サンプルホールド回路
- フィルタ
- パイプライン ADC
- チョップスタビライズドアンプ

通常電流積分器が単体で使用されることは少なく、信号処理回路の一部として組み込まれることが多い。このため実際の使用環境では仕様に応じて積分時間、スイッチング速度など、いくつかのパラメータを最適化して製作される。

4.3 QVC-ASIC

上にも述べたように QVC-ASIC は MPPC の信号読み出しエレクトロニクスとして使用するため現在開発が進められているデバイスである。

4.3.1 QVC-ASIC の基本構造

QVC-ASIC は 3 つの電流積分器からなり、それぞれのフェーズを $1/3$ ずつずらして使用することにより、常にいずれかの電流積分器が積分モードで働いていることになる。すなわち QVC-ASIC はデッドタイムなしで動作することができる。図 4.2 に QVC-ASIC のレイアウトを示す。

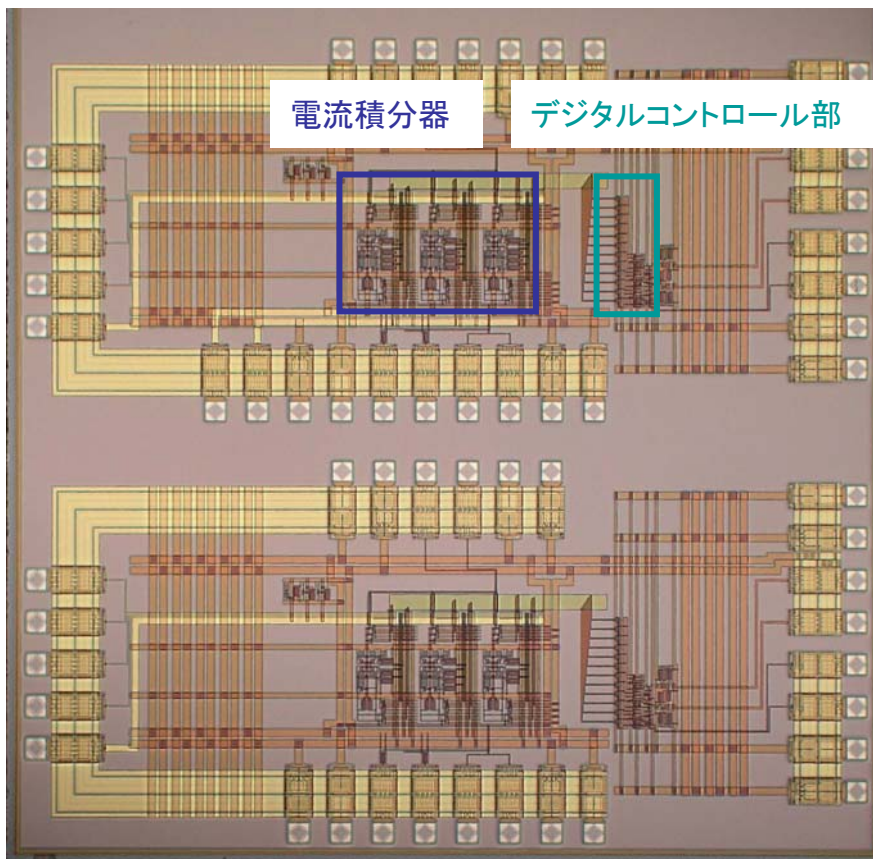


図 4.2: QVC-ASIC のレイアウト: QVC2006 のものである

4.3.2 QVC-ASIC の基本動作

一般に電子回路の動作にはまず電源電圧が必要で、QVC-ASIC においては+5V の電源電圧を加えて使用する。また QVC-ASIC の動作には電源電圧のほかクロックパルスとリセットパルスを入力することが必要である。クロックパルスとは回路が動作する際に同期をとるための周期的な信号のことで、クロック周波数の値が大きければ大きいほど処理速度は速い。QVC-ASIC においては CMOS ロジックレベルの矩形波をクロックパルスとして用いている。一方リセットパルスはデジタル回路の内部状態を初期状態に戻すための信号である。電子回路においては電源入力後一瞬にして電気が行き渡るように見えるが、実際は電源電圧が規定値に達するまでに時間がかかっている。この間電源や信号を伝える配線の長さの微小な差や素子の個体差などにより、素子間でリセット動作の起こるタイミングが一致しないということが起こる。このように一部の素子がリセットを完了していない状態で信号が入力されると誤った処理がなされ正しい出力信号

は得られない。リセットパルスはこの問題を解決するために用いられ、回路の全内部状態は同時に確実にリセットされる。前述のように QVC-ASIC 内には 3 つの電流積分器が内蔵されており、リセットパルスによるリセット後は必ず決まった電流積分器から動作が始まる仕組みになっている。ここで QVC-ASIC の動作の様子をタイムフローチャートに表したものを図 4.3 に示す。

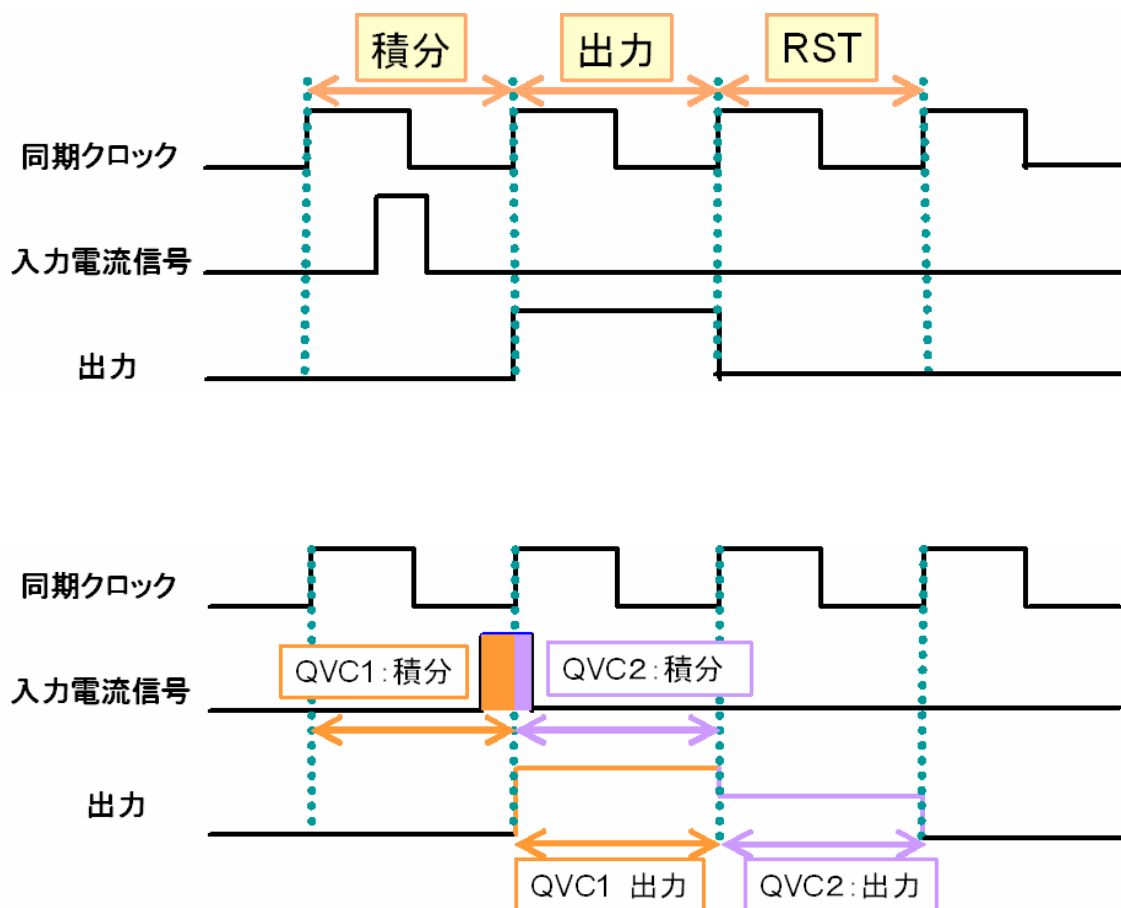


図 4.3: QVC-ASIC の入力信号に対する出力信号の様子: (上) 入力信号が 1 つのクロックに収まっている場合 (下) 入力信号が 2 つのクロックにまたがっている場合

図 4.3 のうち上図は入力信号が 1 つのクロックに収まるように入力された場合を示し、下図は入力信号が 2 つのクロックにまたがるように入力された場合を示す。上図の場合、入力信号は 3 つの電流積分器(QVC)のうち信号が入力された時点で積分モードとして働いている QVC によって処理される。この QVC はクロックの周期に合わせて積分モード→ホールドモード→リセットモードと変化するため、信号の入力されたフェーズが積分フェーズとなり、その次のフェーズが出力フェーズとなる。このため出力信号は入力信号の入ったフェーズの次のフェーズに現れる。一方下図のように 2 つのクロックに

またがって信号が入力された場合、入力信号のうち前方のクロックに入った部分はこのフェーズで積分モードとして働く QVC1 によって処理され、後方のクロックに入った部分はこのフェーズで積分モードとして働く QVC2 によって処理される。従って出力信号はそれぞれの出力フェーズに分かれて現れる。

出力信号の大きさについては上図と下図の入力信号が等しい場合、下図の出力信号の合計は上図の出力信号に等しくなる。また下図において入力信号が一定ならば、入力信号のまたがり方に関わらず出力信号の合計は一定となる。

4.3.3 QVC-ASIC に要求される性能

MPPC は浜松ホトニクス(株)により開発が進められているが、現在のところ MPPC のピクセル数は最大のもので 1600 ピクセルとなっており、ゲインは 10^5 程度である。この MPPC の出力信号は 1600 ピクセル全てが反応した場合に最大となり、その値は素電荷が $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ であることから $1.6 \times 10^{-19} \times 1600 \times 10^5 = 25 \text{ pC}$ である。そのため 1600 ピクセルの MPPC の読み出しに使用するには QVC-ASIC のダイナミックレンジは 25pC が必要とされる。また MPPC は今後さらにピクセル数を増やし、5000~10000 ピクセルを達成することが目標とされている。従って QVC-ASIC のダイナミックレンジは 125pC 程度が最終目標とされる。高エネルギー加速器研究機構(KEK)測定器開発室では QVC-ASIC の広ダイナミックレンジ化を目指し、現在研究開発が進められている。

第 5 章 QVC-ASIC の性能評価

本研究の目的は QVC-ASIC の基本性能を確認し性能を向上させ、ILC のカロリメータにおいて MPPC の読み出し回路として使用できるような QVC-ASIC を完成させることである。QVC-ASIC の特徴としては、

- 通常の電流積分器が外部からのゲートに同期し入力電流を積分するのに対し、本 ASIC はクロック同期で動作すること
- 3つの電流積分器が交互に動作することで不感時間ゼロである 1つの電流積分器として使用できること
- その他 ASIC の一般的な特徴として多チャンネル化が可能であること、大量生産の際は単価が安く済むこと、動作速度が速く消費電力が低いこと

などが挙げられる。このため高いグラニュラリティーが必要とされる ILC のカロリメータにおいて QVC-ASIC は MPPC の読み出し回路としての利用価値が非常に高い。本研究では QVC-ASIC の性能評価を行い、そこから導き出される問題とその解決や将来の課題について述べていく。

5.1 評価対象とした QVC-ASIC

本研究では当研究室と高エネルギー加速器研究機構(KEK)測定器開発室との共同研究により開発された QVC2005、QVC2006、QVC2007 について評価を行っている。一般的に集積回路の開発はコストが高くつくため開発にマルチチッププロジェクトを使用した。また VDEC の使用は可能であったが、アナログ設計用トランジスタパラメータが提供されていなかったため使用していない。これらを考慮し TSMC 社 $0.5\mu\text{m}$ CMOS プロセスを使用した。このプロセスはアナログ用途で実績があり且つ 4mm 角チップが 100 万円未満で製作できるため、モジュールを新規製作するコストと同じ額で ASIC が製作できる。

QVC2005 は電流積分機能による基本動作を確認するために作成された、初期の QVC-ASIC である。測定結果については後に詳しく述べるが、QVC2005 の評価ではノイズとセル(個々の電流積分器のことを以後このように呼ぶ)毎のオフセット電圧ばらつきという 2 点の問題が見つかった。そこでこれらを解決するため QVC2005 に修正が加えられたものが QVC2006 である。QVC2006 ではまずノイズ対策としてバイアス回

路のローパスフィルター周りのレイアウトが変更され、それ以外の容量についても電源や GND からの分離が行われた。またノイズの原因を特定するため TEG(Test Element Group)⁹も数種用意された。さらにセル毎のオフセット電圧ばらつきに関しては、デジタル-to-アナログクロストークを最小にするため積分容量が電源や GND から分離され、トランジスタのマッチングを考えたレイアウト(特にコモンモードフィードバックおよびペアトランジスタに関して)が行われた。これらの修正により QVC2006 の評価では 2 点の問題が解決されたことを確認することができた。そこで次なる課題を広くダイナミックレンジ化に対する問題点を洗い出すための試作としてその後作成された 4 チャンネルの QVC-ASIC が QVC2007 である。ゲインの違いはダイナミックレンジに影響を及ぼすため、それぞれのチャンネルは異なるゲインを持つようデザインされた。QVC2007 の評価では各チャンネルが異なるゲインを持つこと、またそれによるダイナミックレンジの違いを確認することを目的とした。

5.2 測定項目

本研究では QVC2005、QVC2006、QVC2007 それぞれに対し、以下の項目について評価を行っている。

- QVC2005
 - ◇ リニアリティ
 - ◇ ダイナミックレンジ
 - ◇ ノイズ
 - ◇ セル毎のオフセット電圧ばらつき

- QVC2006
 - ◇ リニアリティ
 - ◇ ダイナミックレンジ
 - ◇ ノイズ
 - ◇ セル毎のオフセット電圧ばらつき

- QVC2007
 - ◇ リニアリティ
 - ◇ ゲイン

⁹ 回路の一部にのみ違いを持たせたサンプル。違いによる効果を比較するために用いられる

- ◇ ダイナミックレンジ
- ◇ ノイズ
- ◇ MPPC との接合試験

MPPC との接合試験以外の項目についてはパルスジェネレータにより出力させた信号を ASIC への入力テストパルスとして用い、測定を行った。オフセット電圧についてはテストパルスを入力するためのケーブルを基板から抜くことで入力信号が入らないようにして測定を行っている。テストパルスは電圧で入力しており、テストパルスの立上がりや立下り、すなわち電圧の変化に対して信号が出力される仕組みとなっている。また QVC2007 について行った MPPC との接合試験では MPPC からの信号を ASIC へ入力し、出力信号を観測した。

5.3 実験環境

実験を行った環境については以下のとおりである。まずテストパルスを用いての性能評価における実験環境を図 5.1 に示す。入力信号の大きさはパルスジェネレータ 1 から出力させたパルスをアテネータで調節することにより変化させ、測定は全てオシロスコープで行っている。QVC-ASIC においてはテスト入力端子にコンデンサがシリーズに接続されその容量は 1pF であることから、その端子にステップパルスを入れた場合の変化が 1V のテストパルス入力に対しては 1pC の電荷入力に等しい(図 5.2 参照)。またクロックのタイミングできちんと動作させるため、クロックと同期する信号をパルスジェネレータ 2 からパルスジェネレータ 1 のトリガーインに入力することで 2 つのパルスジェネレータから出力される信号の同期をとっている。テストパルスを用いた性能評価では以下の実験機器を使用した。

- 直流電源 : KENWOOD PW18-1.8Q
- オシロスコープ : Tektronix TDS5054
- パルスジェネレータ 1 : PHILIPS PM5715
- パルスジェネレータ 2 : SONY / Tektronix DG2030
- アテネータ : Hewlett Packard 355C / 355D

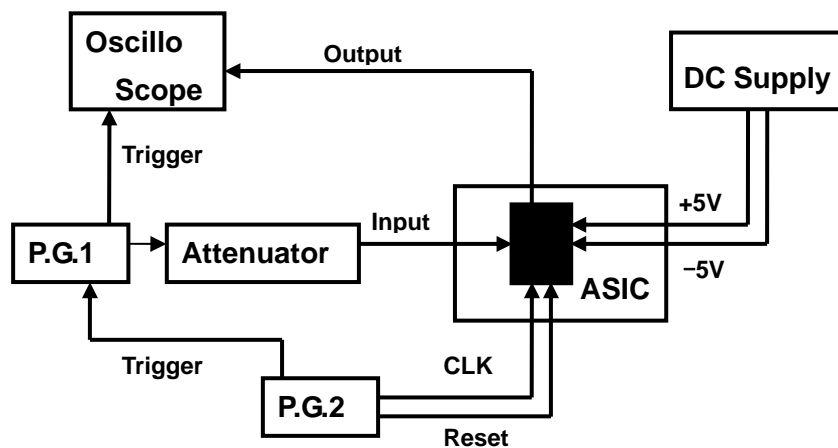


図 5.1: テストパルスを用いた性能評価における実験環境

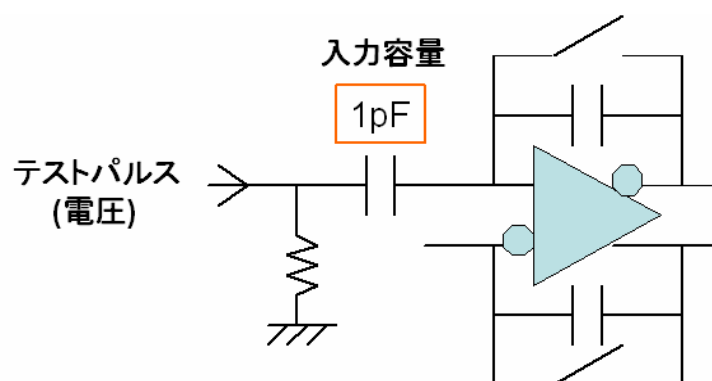


図 5.2: テストパルスを用いた測定の回路図

次に QVC2007 に関して MPPC との接合試験を行った際の実験環境を図 5.3 に示す。MPPC との接合試験においてはノイズを軽減するため測定基盤全体をシールドボックス

スに入れており、それを暗箱内に暗幕で覆って設置している。また MPPC の照射に使用した Blue LED(青色発光ダイオード)はシールドボックスの内側上面に取り付けており、パルスジェネレータから出力させた短パルスを与えることにより発光させた。

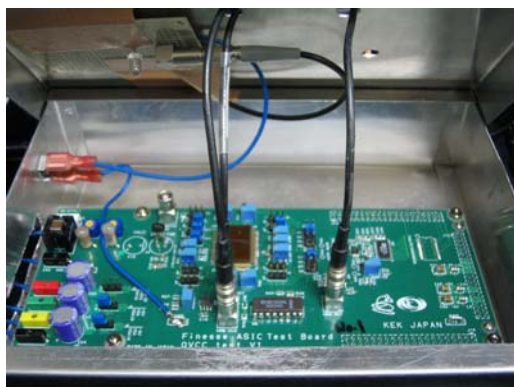
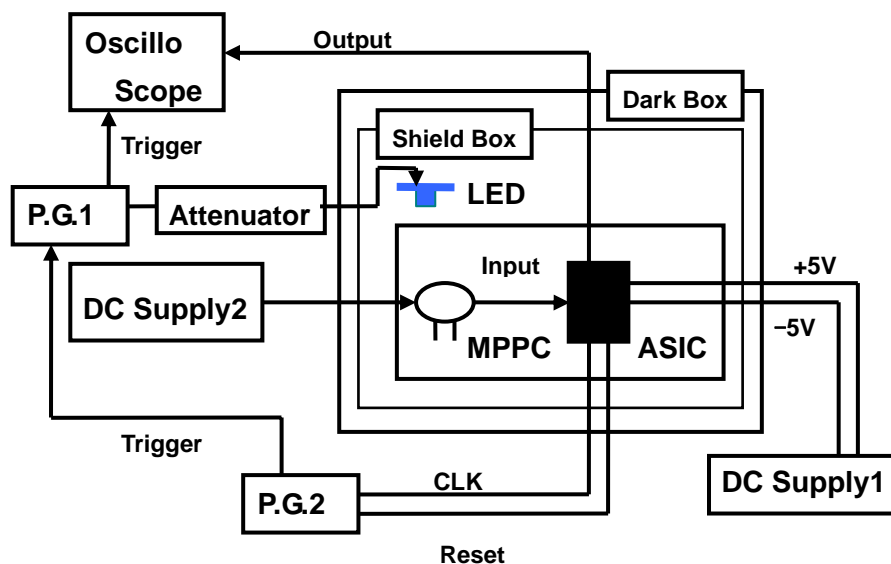


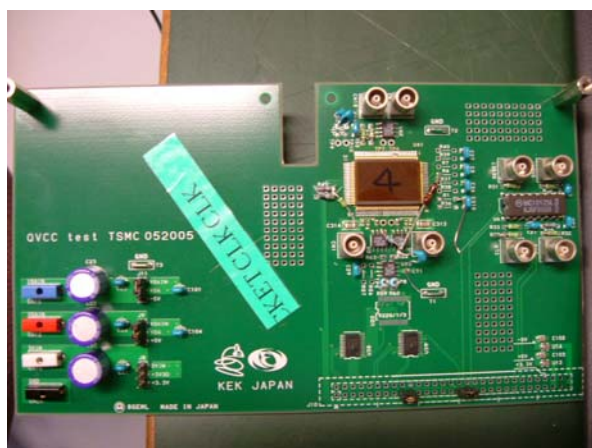
図 5.3: MPPC との接合試験における実験環境

MPPC との接合試験では次の実験機器を使用した。

- 直流電源 1(ASIC 用) : KENWOOD PW18-1.8Q
- 直流電源 2(MPPC 用) : MATSUSADA PL-120-0.6
- オシロスコープ : Textronix DPO7054
- パルスジェネレータ 1 : PHILIPS PM5715
- パルスジェネレータ 2 : SONY / Textronix DG2030
- アテネータ : Hewlett Packard 355C / 355D
- LED : 青色 LED

なお MPPC については京都大学よりお借りした浜松ホトニクス社製の 100 ピクセルのサンプル(Type No.:S10362-11-100MOD、Sample No.:100-21)を使用した。

ここで QVC2005、QVC2006、QVC2007 それぞれの測定に使用したテスト基板の写真を図 5.4 に載せておく。



QVC2005、QVC2006 のテスト基板



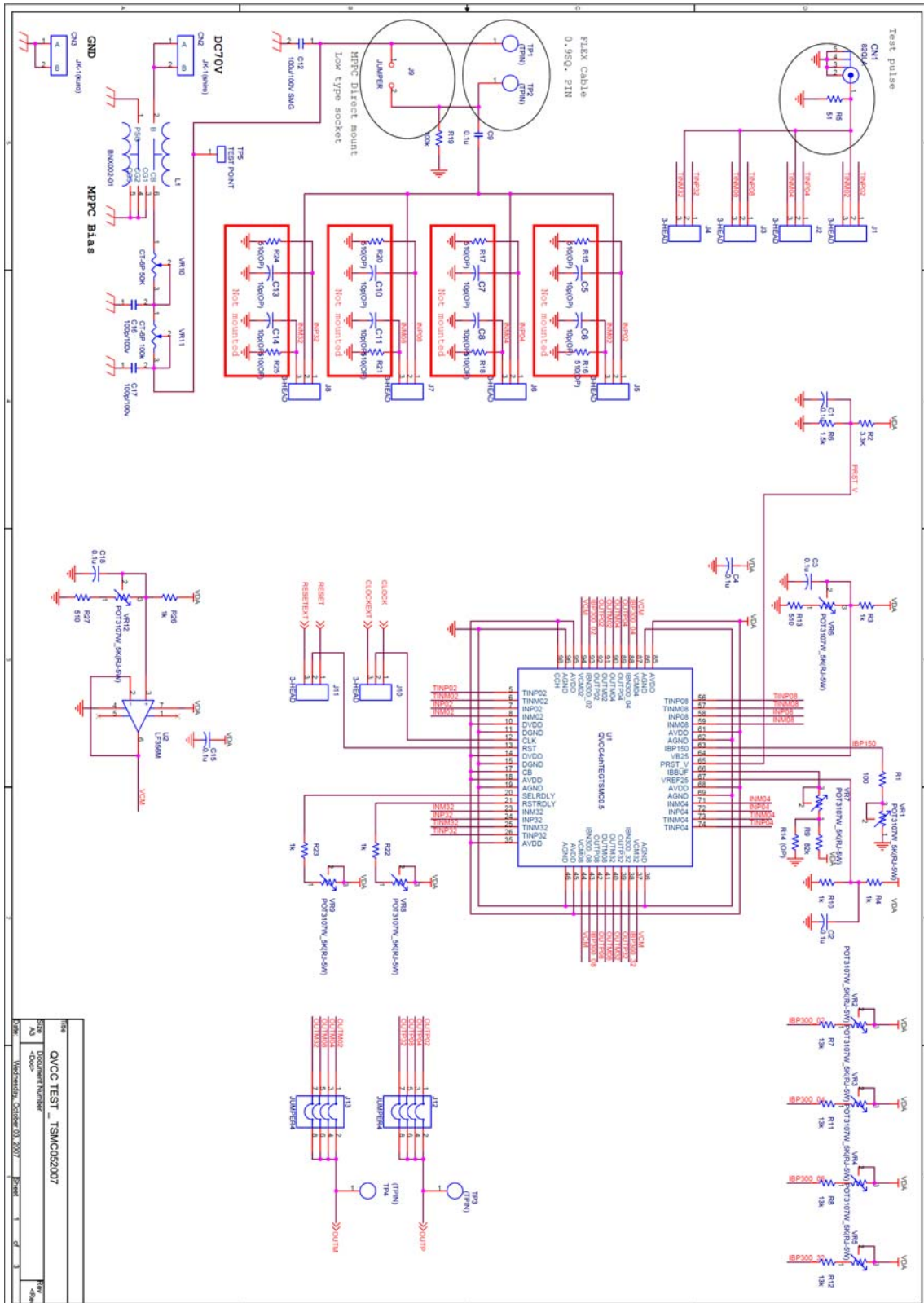
QVC2007 のテスト基板

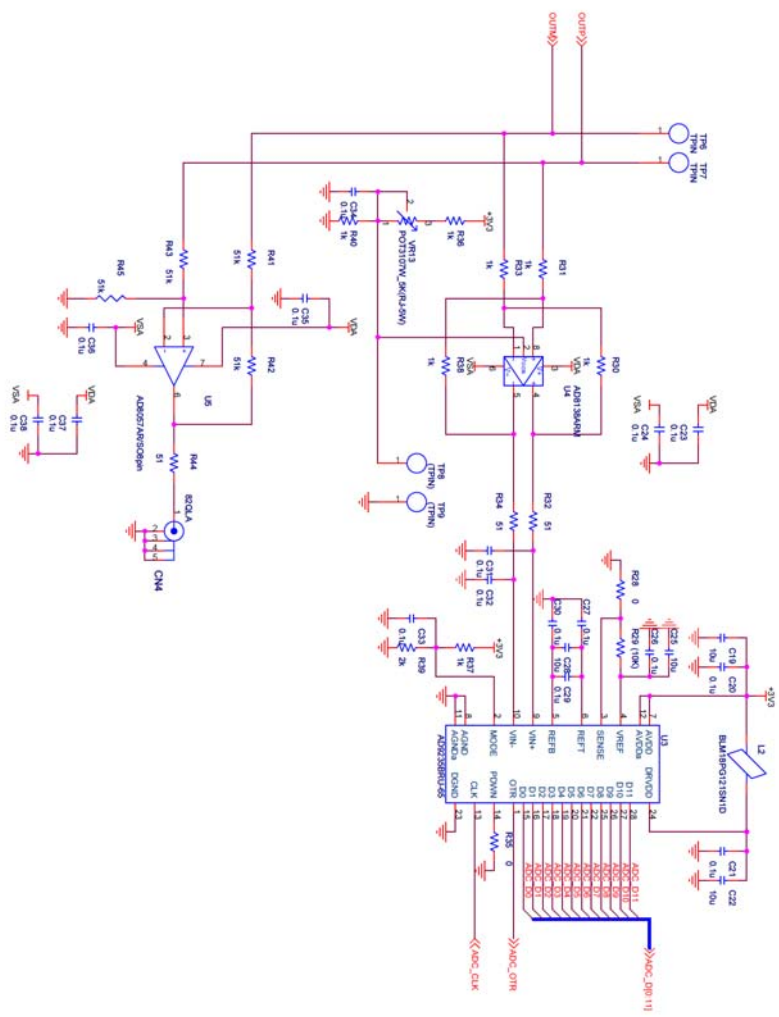
図 5.4: QVC2005、QVC2006、QVC2007 のテスト基板

QVC2007 においては基板上の可変抵抗を変化させることによりバイアス¹⁰条件が調節できるようになっている。

¹⁰ ASIC へ入る入力信号に加える電流や電圧のこと。ASIC は定格内の電流と電位差を設定しないと動作しないため、バイアスを加えることにより入力信号を ASIC が正常動作する電流や電圧にかさ上げ（オフセット）する。

また参考として QVC2007 の測定に使用した基板の回路図を図 5.5 に示す。





REV	01	01	01
Doc No	AD9258	01	01
Document Number	QVCC TEST _ TSMC052007		
Doc	AD9258		
Version	1.0	1.0	1.0
Worksheet	October 03, 2007	Sheet	2 of 3

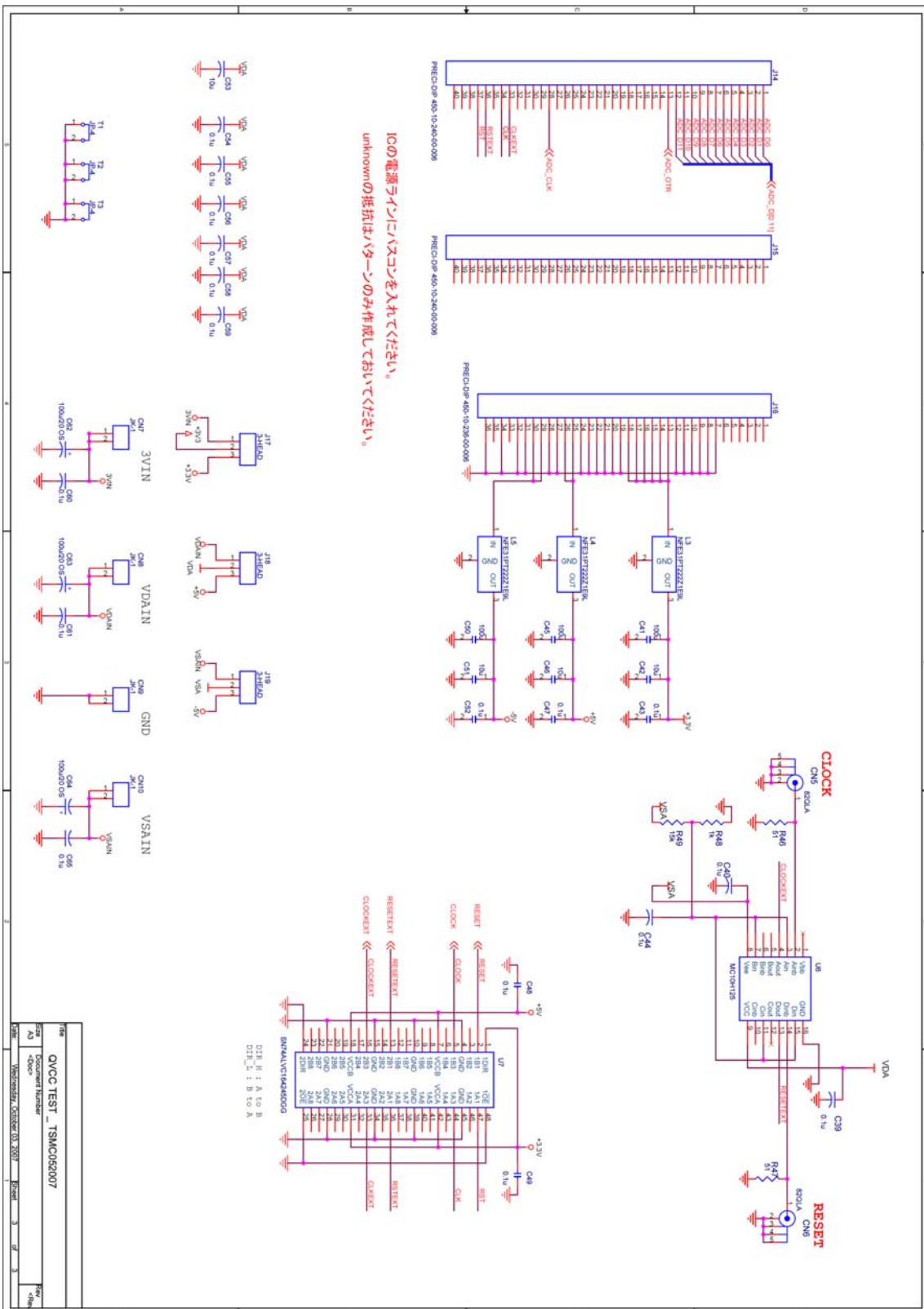


図 5.5: QVC2007 のテスト基板回路図

5.4 測定結果

5.4.1 基本性能

まずテストパルスを用いて QVC-ASIC の基本動作について確認を行った。テストパルスの立ち上がりや立ち下がりそれぞれに対して信号が出力される様子を図 5.6 に示す。

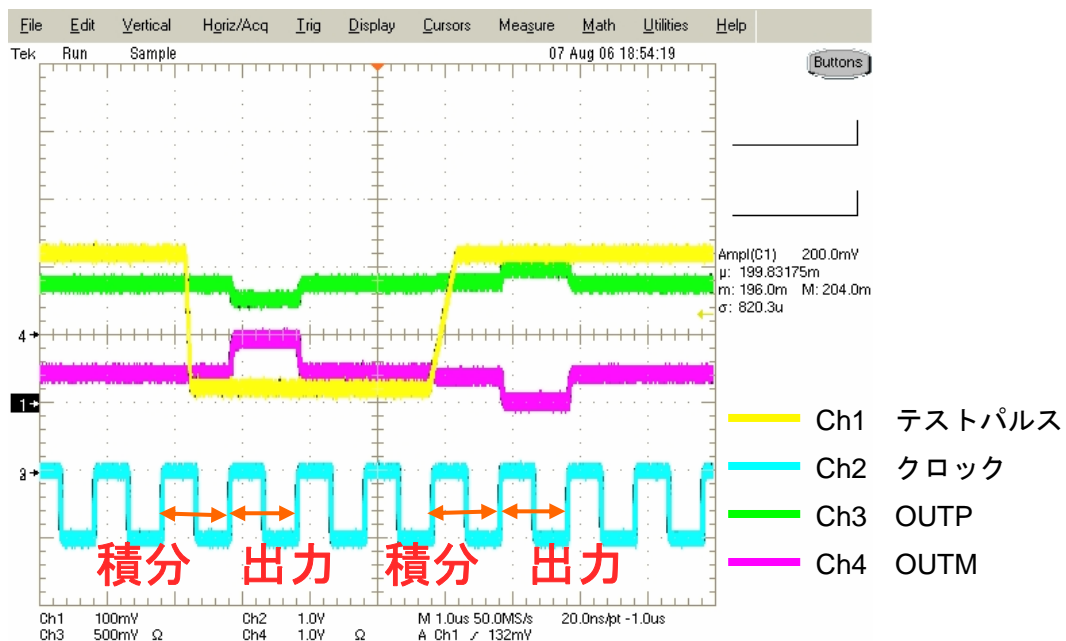


図 5.6: QVC-ASIC の基本動作の様子(QVC2005)

図 5.6 は QVC2005 におけるスクリーンショットであり、Ch1 はテストパルス、Ch2 はクロック、Ch3 と Ch4 は差分入出力形式における 2 つの出力信号(プラス側出力とマイナス側出力)を表す。QVC-ASIC が最終的に出力する信号は Ch3 と Ch4 の差分、すなわち Ch3-Ch4 の信号である。テストパルスは電圧で入力しており、電圧の変化はコンデンサに電荷が蓄積されていく様子を表していると考えられる。そのため電圧の変化、つまりテストパルスの立ち上がりや立ち下がりに対して信号が出力されることになる。上図でもテストパルスの立ち上がりや立ち下がりが入ったクロックが積分フェーズとなり、その次のフェーズに出力信号が現れている。上図をタイムフローチャートに表したものを図 5.7 に示す。この図からは入力テストパルスの立ち上がりや立ち下がりに対して信号が出力される様子がよくわかる。

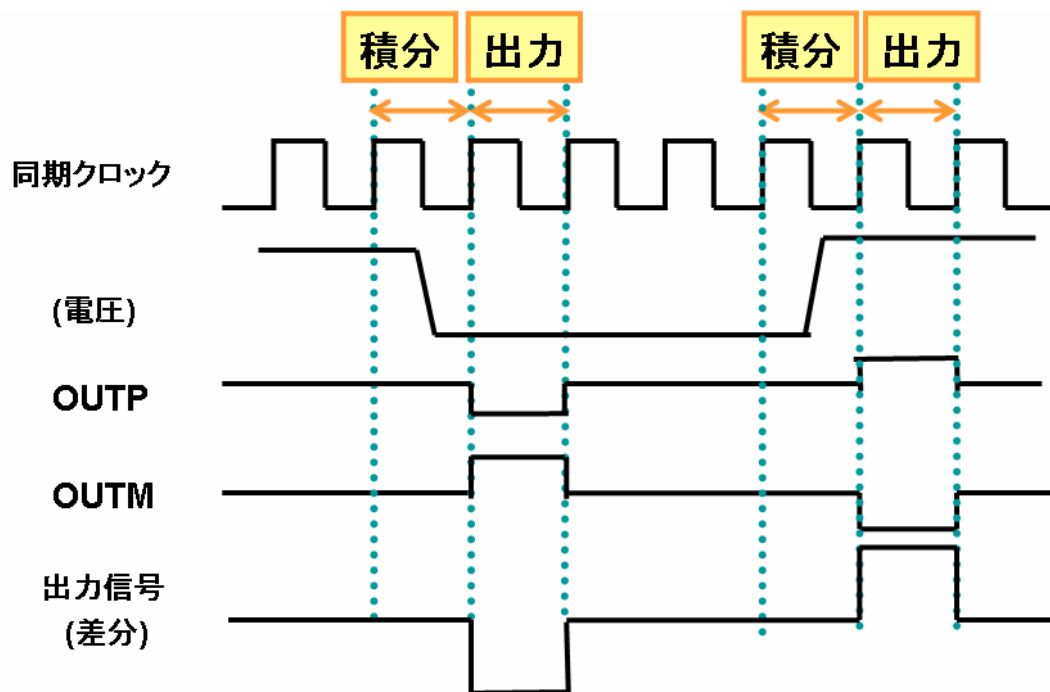


図 5.7: QVC-ASIC の基本動作のタイムフローチャート(QVC2005)

次にクロックに対する入力パルスのタイミングを変化させることにより、2つの QVC セル間における出力信号の移り変わりの様子を観測した。ここではまず入力信号が 1 つのフェーズに収まっている状態から始め、クロックに対する入力信号のタイミングを少しずつ変えながら入力信号が隣のフェーズに完全に移動するまでを見た。出力信号の変化の様子を図 5.8 に示す。図の 3 つのスクリーンショットはそれぞれ最初 1 つのフェーズに入力信号が収まっている状態、途中入力信号が 2 つのフェーズにまたがっている状態、入力信号が隣のフェーズに完全に移動した状態を示す。入力信号のタイミング変化にともない、最初は 1 つの出力フェーズのみに出力されていた信号が徐々に隣のフェーズへ移動を始め、途中 2 つのフェーズに分かれて信号が出力されながら、最後は隣のフェーズへ完全に出力信号が移り変わる様子がわかる。

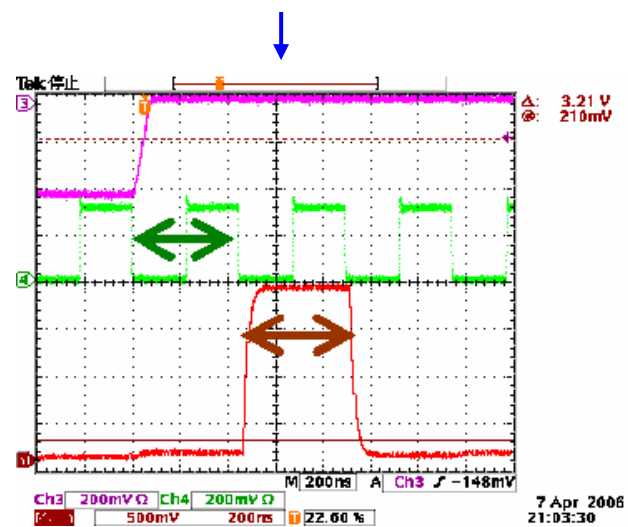
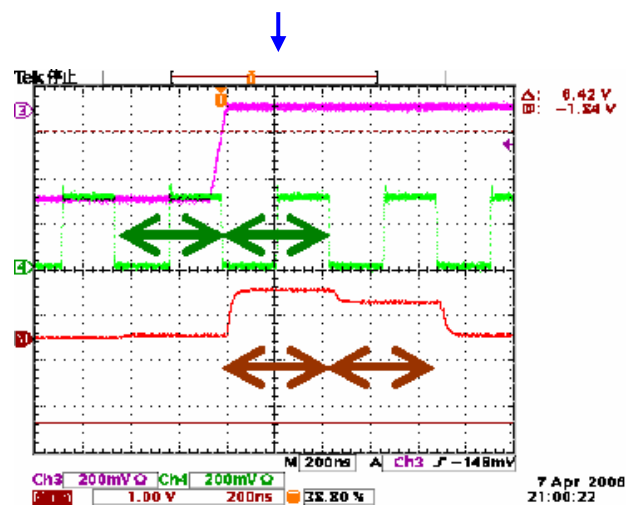
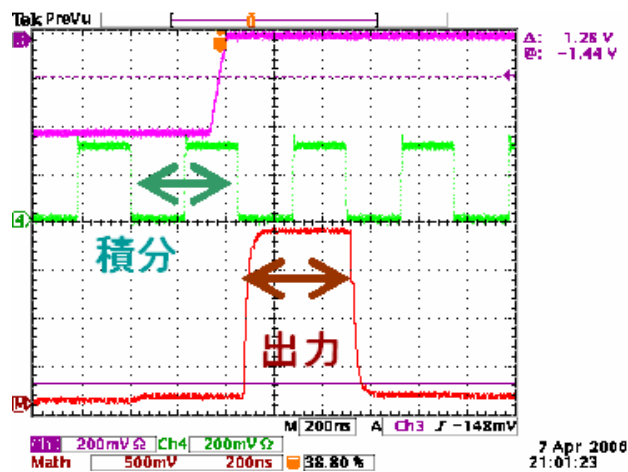


図 5.8: 2つの QVC セル間における出力信号の移り変わりの様子

QVC2006 においては Cell1 から Cell2、Cell2 から Cell3、Cell3 から Cell1 の全ての変化について測定を行っており、その結果を図 5.9 に示す。

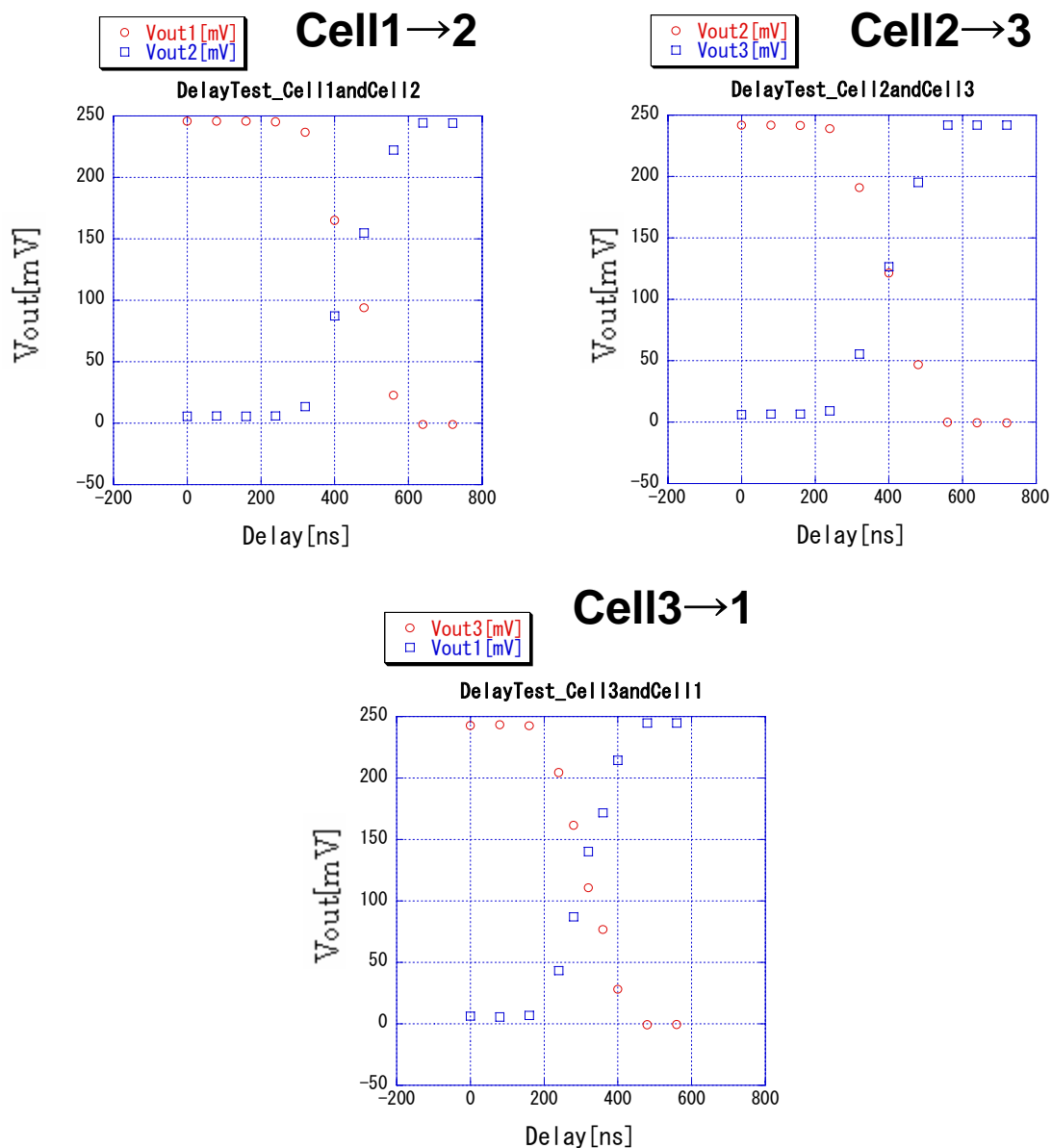


図 5.9: 入力信号のタイミング変化による 2 セル間での出力信号の移り変わり (QVC2006)

測定はクロックの周波数を 1MHz として行った。グラフにおける赤色のプロットはそれぞれタイミングを変化させる前に入力信号が入っていたセルの出力信号を表し、青色のプロットはタイミングを変化させた後に移動したセルの出力信号を表す。これらのグラフからも、入力信号のタイミング変化にともない 2 セル間で出力信号が移り変わっていく様子がよくわかる。QVC2006 においては 3 つの QVC セル間でオフセット電圧に

違いがあるため、測定値から各セルのオフセット電圧値を引くことによりオフセットの影響をなくした値をプロットしている。セル毎のオフセット電圧の違いについては後に述べる。

5.4.2 QVC2005

QVC2005 の測定結果について述べる。QVC2005 に関する測定は全てクロックの周波数を 1MHz として行った。

- リニアリティとダイナミックレンジ

QVC2005 のリニアリティとダイナミックレンジに関する結果を図 5.10 に示す。グラフからもわかるように QVC2005 ではリニアリティを確認することができた。

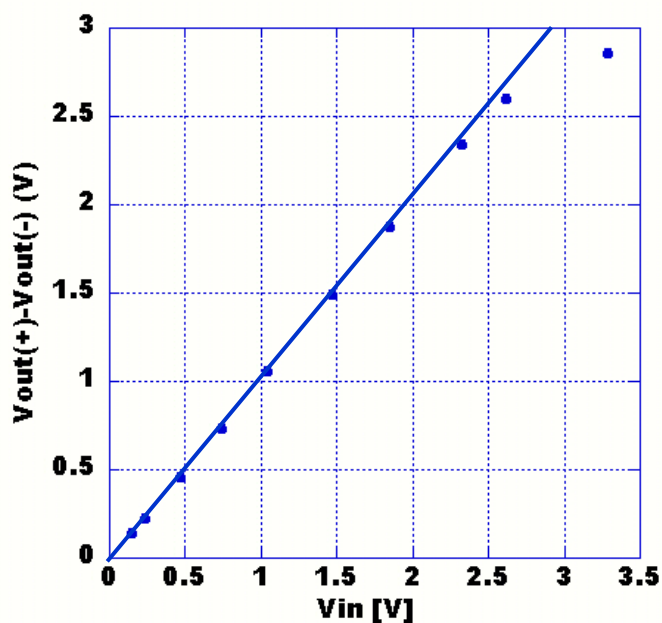


図 5.10: QVC2005 におけるリニアリティ

上図において QVC2005 のリニアリティが保たれているのは出力電圧がおよそ 2V までの範囲である。従って QVC2005 のダイナミックレンジは出力で 2V 程度である。QVC-ASIC のダイナミックレンジは電源電圧とアンプの構成によって決まるが、QVC2005 においては出力でおよそ 2V のダイナミックレンジを持つアンプが使用されている。従ってダイナミックレンジの測定結果は設計と一致していることが確認された。

- ノイズ

ノイズは次の2つに分類できる。

- ▶ イントリンシックノイズ

検出器、トランジスタ、抵抗などの計測システム内から発生されるノイズで理論計算が可能であり、このノイズ以下で測定誤差を小さくすることはできない。

- ▶ イクスターナルノイズ

外部から混入する雑音であり、具体的な例に電波、電源、グラウンド(GND)¹¹からの混入などがある。通常シールド、パソコン、場合によってはアナログ回路とデジタル回路の電源及びグラウンドを分離するなどしてこれらの効果を低減する。

QVC2005 においては測定環境により誤差が大きく変化してしまうということが起こり、値としては 10mV～500mV という大きなものであった。これは理論計算でのイントリンシックノイズと比較すると 10 倍以上大きいものであり、このノイズは電源や GND の外来雑音が関係していると考えられる。

- セル毎のオフセット電圧ばらつき

QVC2005 におけるセル毎のオフセット電圧の様子を図 5.11 に示す。ここではオシロスコープの代わりに National Instruments 社製 LabVIEW7.0 を用いて出力信号の観測を行った。使用した LabVIEW のモジュールは次のとおりである。

Digitizer : NI PXI-5122

シャーシ : NI PXI-1031

図 5.11 のスクリーンショットからもわかるように、QVC2005 においてはセル間のオフセット電圧の差は大きいところで 200mV 程度となっており、オフセット電圧には大きなばらつきがあることがわかった。

¹¹ 電気回路において常に 0V のレベルを与える部分

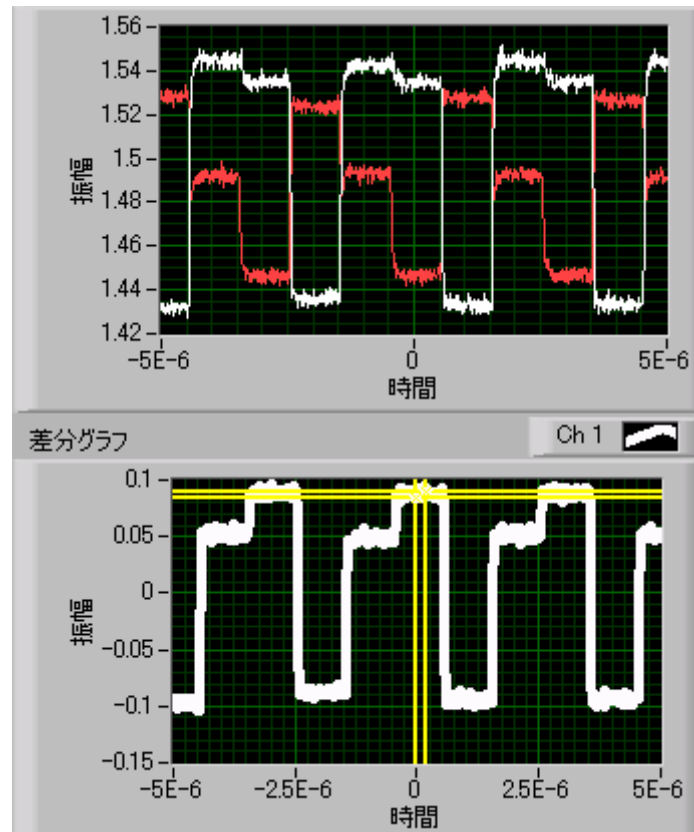


図 5.11: QVC2005 におけるセル毎のオフセット電圧:(上)差動入出力
による 2 つの出力信号(下)上における 2 つの出力の差分信号

5.4.3 QVC2006

QVC2006 は QVC2005 の性能評価により明らかとなったノイズとオフセット電圧ばらつきという 2 つの問題点を改善するため、QVC2005 に修正が加えられた QVC-ASIC である。まず QVC2005 のノイズが大きいという問題に対しては電源や GND の外来雑音に関係していると推察し、QVC2006 ではバイアス回路のローパスフィルター周りのレイアウトが変更された。またローパスフィルターの容量の WELL についても電源や GND からの分離が行われ、ノイズの原因を特定するため TEG も数種用意された。さらに QVC2005 のもうひとつの問題点であるセル毎のオフセット電圧ばらつきに関しては、QVC2006 においてデジタル-to-アナログクロストークを最小にするため積分容量のレイアウト及び容量の WELL 電位が電源や GND から分離され、さらにトランジスタのマッチングを考えたレイアウト (特にコモンモードフィードバックおよびペアトランジスタに関して)が行われた。

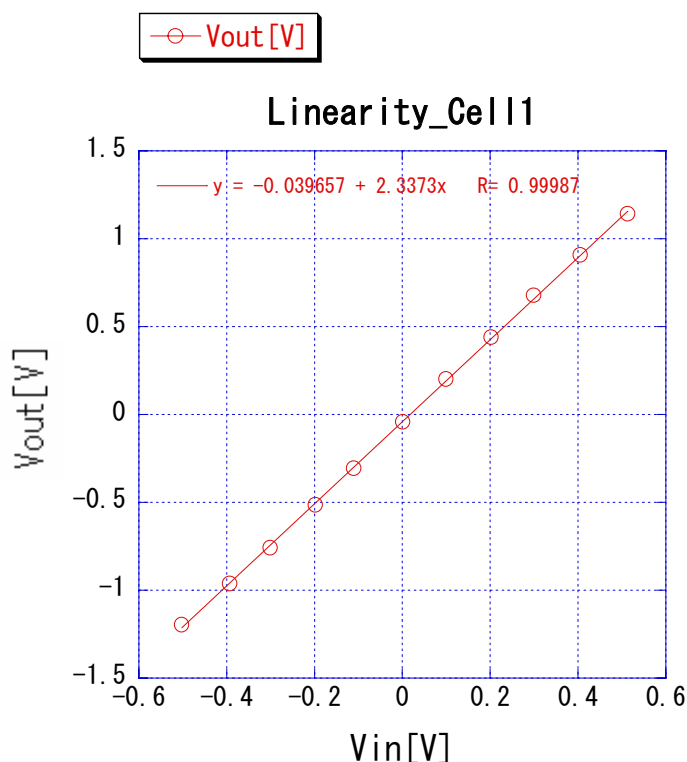
QVC2006 の測定結果を以下に示す。QVC2006 の評価は 3 つの QVC セル毎に行い、セル間で結果を比較した。なおクロックの周波数は全て 1MHz として測定を行った。

- リニアリティー

セル毎のリニアリティー測定結果を図 5.12 に示す。これらのグラフからもわかるように QVC2006 においては 3 つの QVC セル全てについてリニアリティーがあることが確認された。またフィットした直線の傾きはそれぞれ 0.5%以内で一致することから、Cell1、Cell2、Cell3 のゲインはほぼ一致することがわかった。

- ダイナミックレンジ

セル毎のダイナミックレンジの測定結果を図 5.13 に示す。全てのセルについて入力信号がおよそ $-1.0 \sim 1.0\text{pC}$ の範囲でリニアリティーが保たれているのがわかる。従って各セルのダイナミックレンジはいずれも $-1.0 \sim 1.0\text{pC}$ であることがわかった。



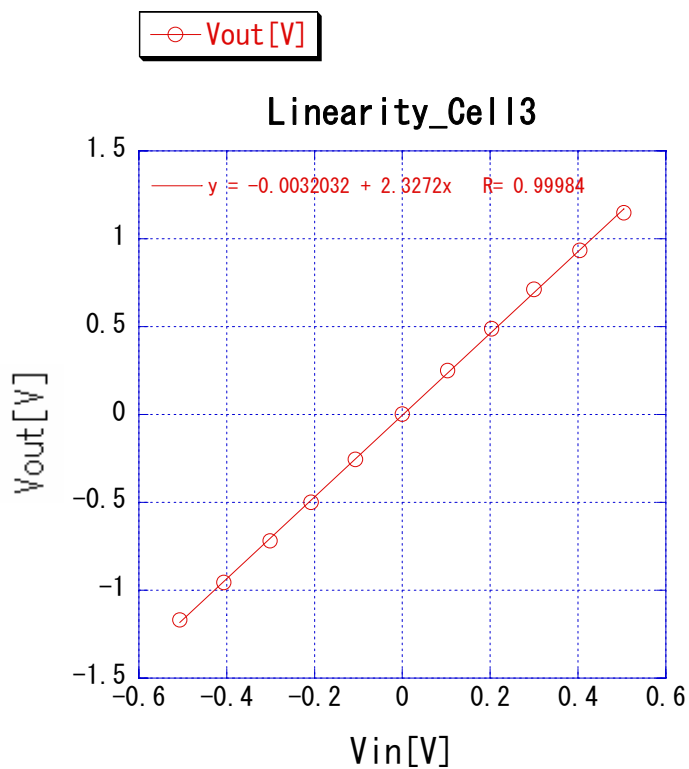
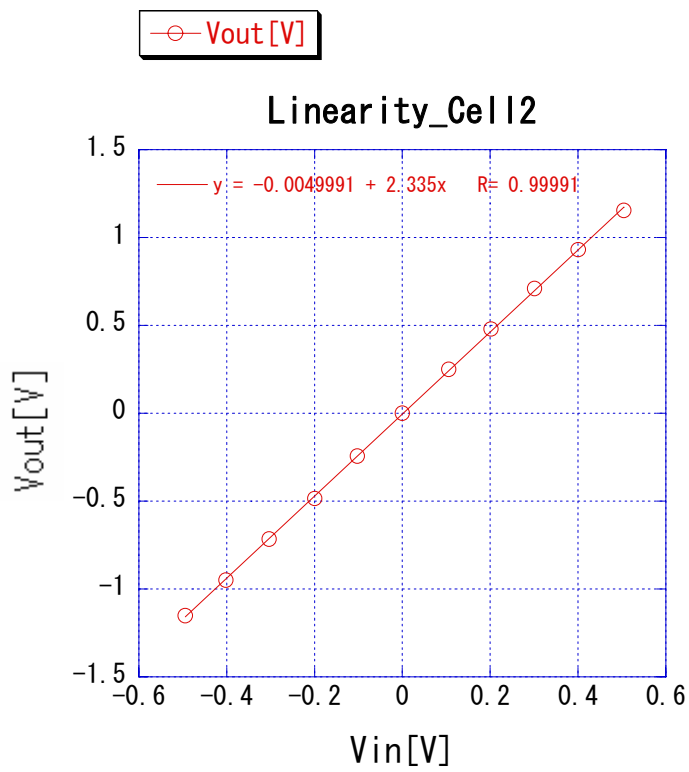
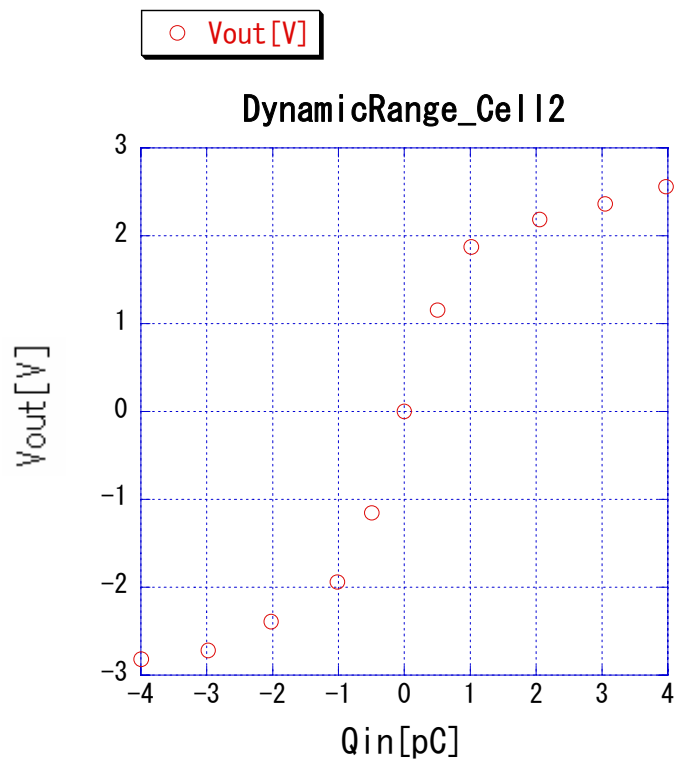
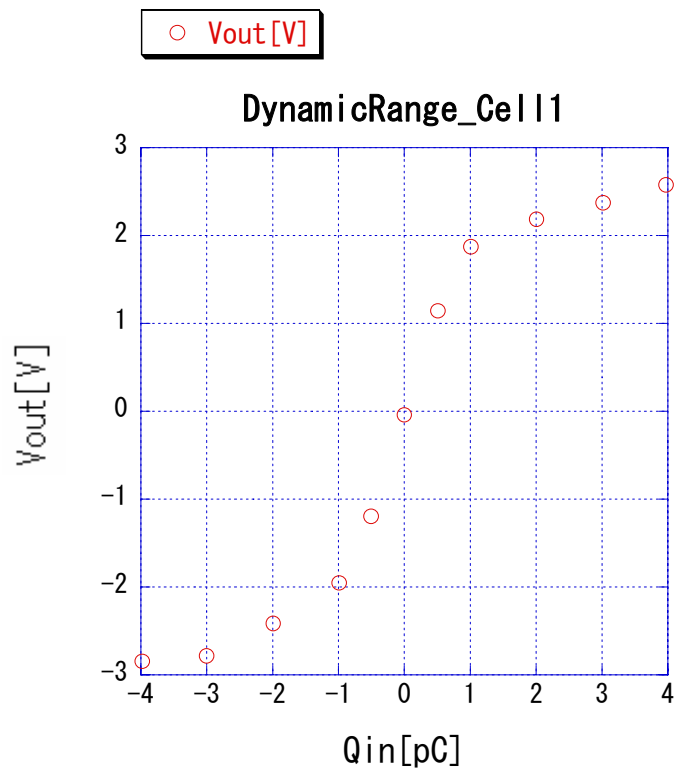


図 5.12: QVC2006 における QVC セル毎の線形リティ



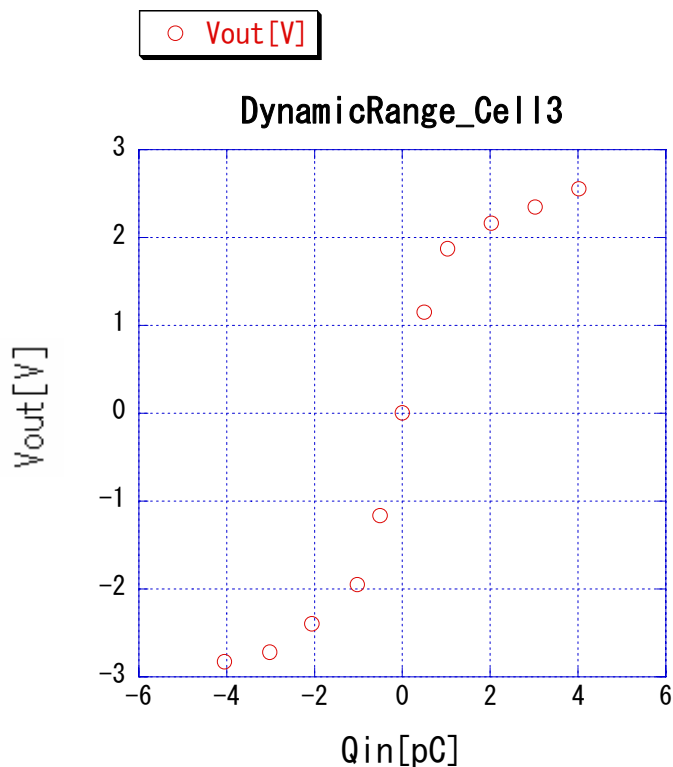


図 5.13: QVC2006 における QVC セル毎のダイナミックレンジ

- ノイズ

QVC2006 における測定誤差は 0.2~0.5mV の範囲であった。QVC2005 では測定環境により誤差が大きく変化し、10~500mV という大きな値を示すことが問題であったが、QVC2006 では修正が加えられることによりノイズがなくなったといえる。TEG を比較したところ、このノイズはバイアス回路のフィルターが原因であることがわかった。

- セル毎のオフセット電圧ばらつき

QVC2006 におけるセル毎のオフセット電圧の様子を図 5.14 に示す。スクリーンショットにおける青色の信号はクロックを表し、赤色の信号は QVC2006 の出力信号を表している。この結果から Cell2 と Cell3 についてはオフセット電圧の値が等しく、Cell1 のみが異なる値となっていることがわかる。これは Cell2 と Cell3 に関してはトランジスタのマッチング且つコモンモードフィードバック回路の修正が行われ、Cell1 に関してはこれらと異なるようにレイアウトされたことによると考えられる。実際観測された 36mV というオフセット電圧の差はトランジスタのばらつきで想定できる範囲であった。

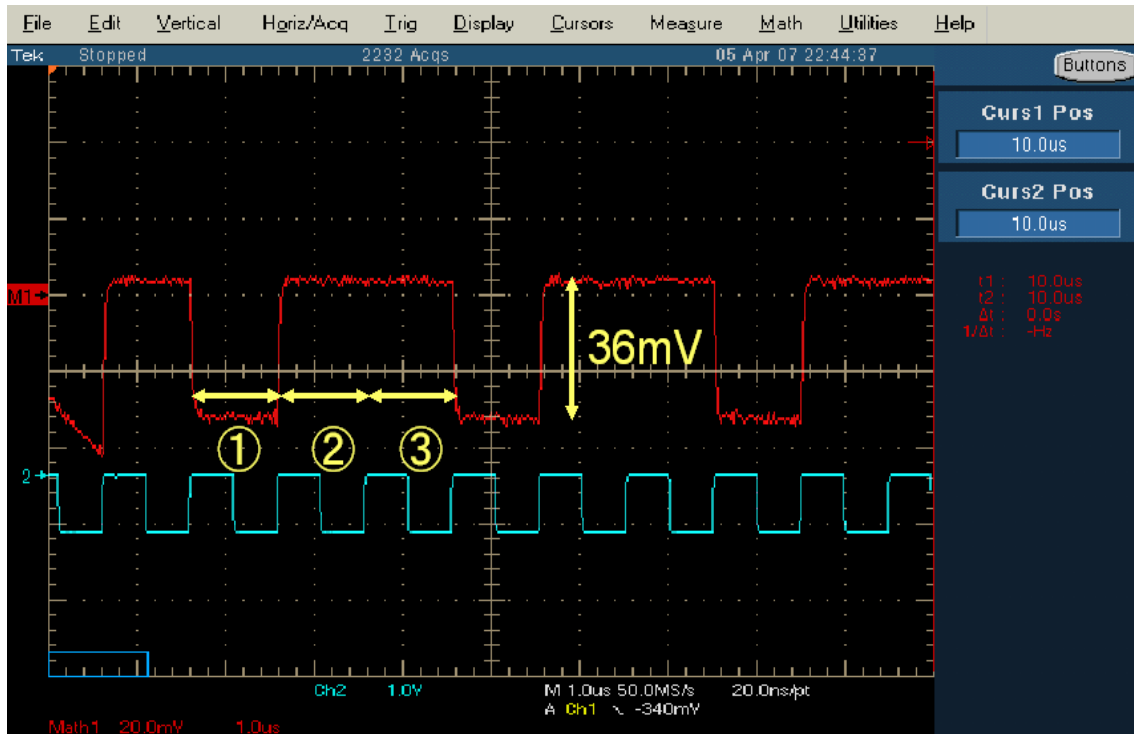


図 5.14: QVC2006 におけるセル毎のオフセット電圧: 青はクロックを、赤は QVC2006 の出力信号を表す。

以上の測定結果から、QVC2006 では QVC2005 におけるノイズの問題を解決でき、またセル毎のオフセット電圧ばらつきの問題に関して原因を理解することができたといえる。さらにゲインやダイナミックレンジがセル間で一致していることも確認することができた。これらの結果を踏まえ、QVC-ASIC の新規デザインにおいては次の課題として広ダイナミックレンジ化が目指されることとなった。そこで広ダイナミックレンジ化に対する問題点を洗い出すための試作として作成された 4 チャンネルの新バージョン QVC-ASIC が QVC2007 である。

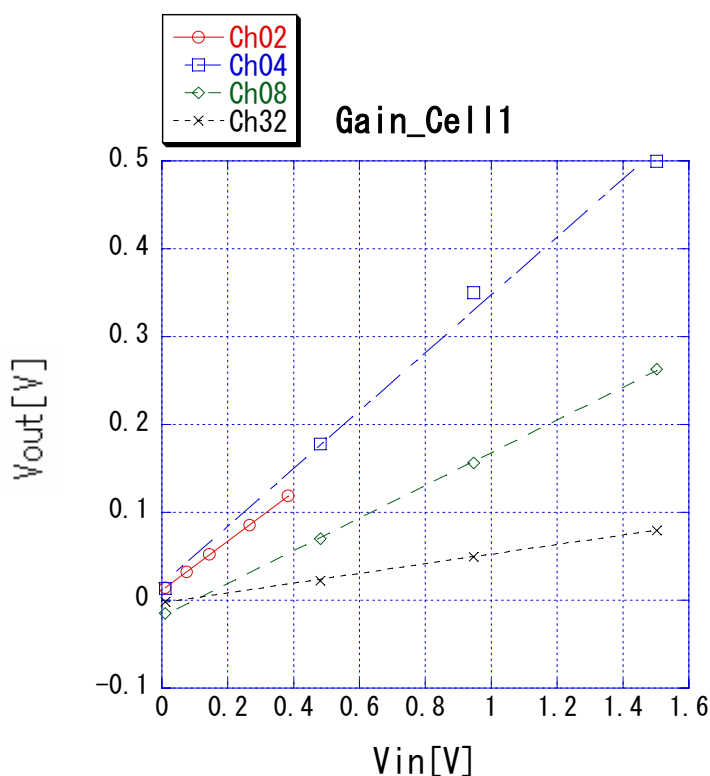
5.4.4 QVC2007

前述のように QVC2007 は広ダイナミックレンジ化に対する問題点を洗い出すための試作として作成された 4 チャンネルの QVC-ASIC である。ゲインの違いはダイナミックレンジに影響を及ぼすため、それぞれのチャンネルは異なるゲインを持つようデザインされている。QVC2007 の評価では各チャンネルが異なるゲインを持つこと、またそれによるダイナミックレンジの違いを確認することを目的とした。

QVC2007の測定においては基板上のジャンパーを切り替えることで2つの入力(INPとINM)のうちいずれか一方のみに信号が入るようになっており、片方の入力に対する出力信号を観測することができる。QVC2007の測定に関してはINMを入力に選んで行った。また測定は4つのチャンネルについて行い比較をしているが、全てのチャンネルにおいてセル毎に行った。またクロックは周波数を5MHzとして測定している。QVC2007に関する測定結果を以下に示す。

- リニアリティとゲイン

QVC2007におけるリニアリティの測定結果を図5.15に示す。3つのグラフはそれぞれCell1、Cell2、Cell3毎の測定結果であり、各グラフにおける4種類のプロットはそれぞれ4つのチャンネルCh02、Ch04、Ch08、Ch32の結果を表す。これらのグラフからすべてのチャンネル、QVCセルにおいてリニアリティがあることがわかる。フィットした一次関数の傾きはチャンネル間でそれぞれ異なることから、各チャンネルは異なるゲインを持つことがわかる。



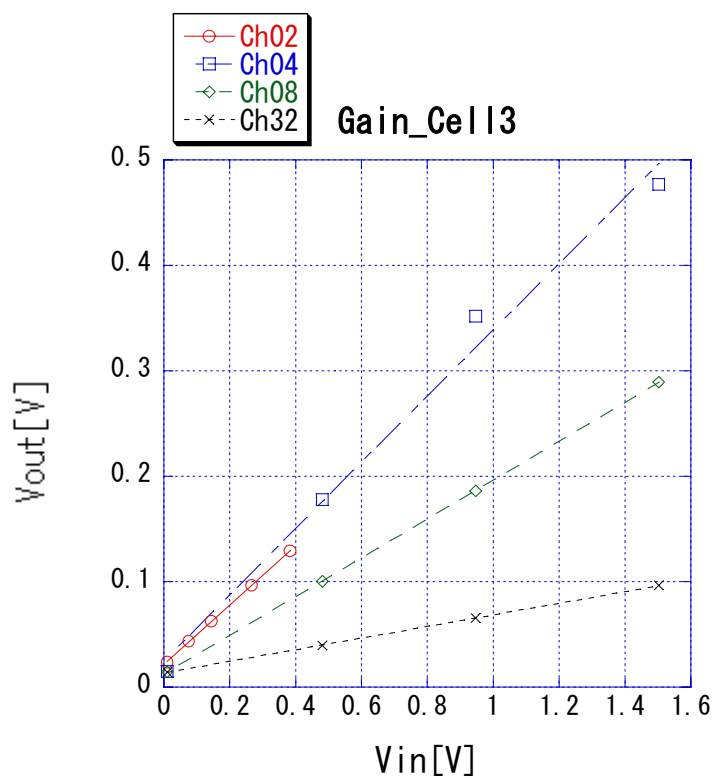
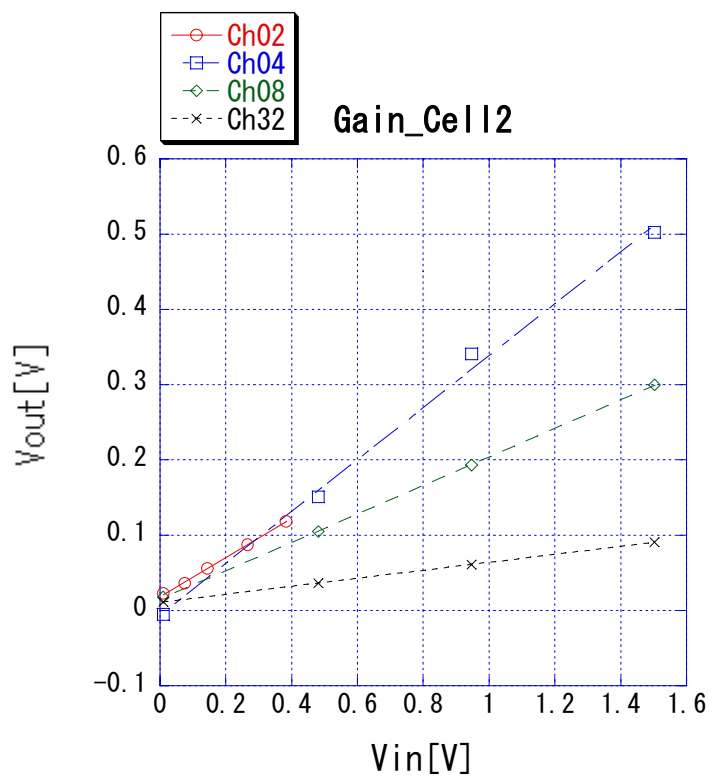
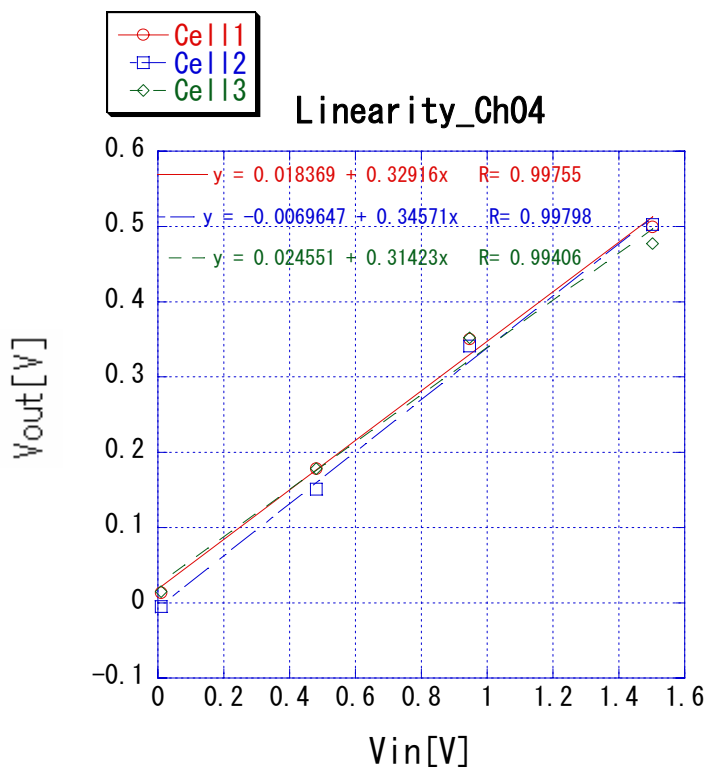
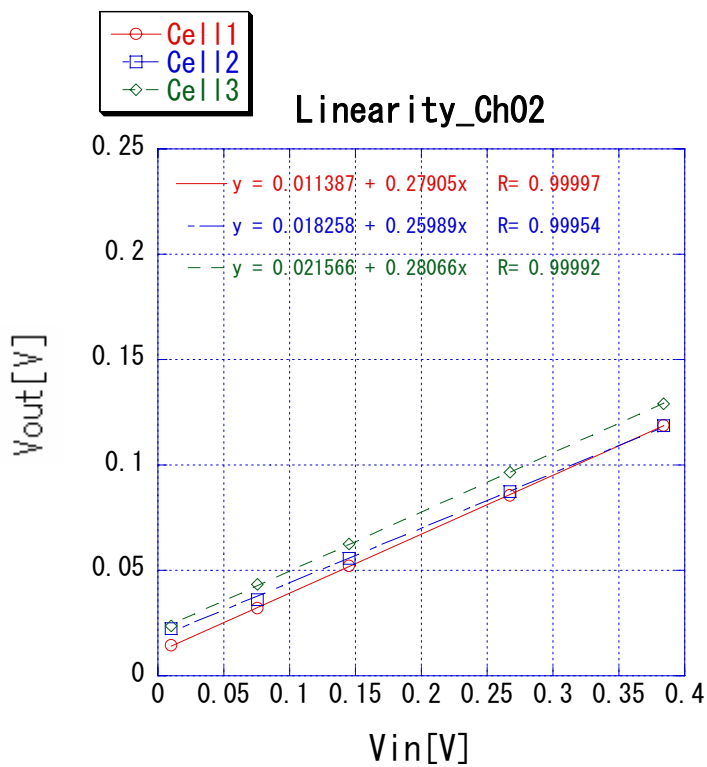


図 5.15: QVC2007 におけるリニアリティ

またセル間でゲインに違いがないか確認するため、チャンネル毎にグラフを書いたものを図 5.16 に示す。同一のチャンネルにおいては QVC セル間で直線の傾きに大きな違いはなく、ゲインはほぼ一致している。



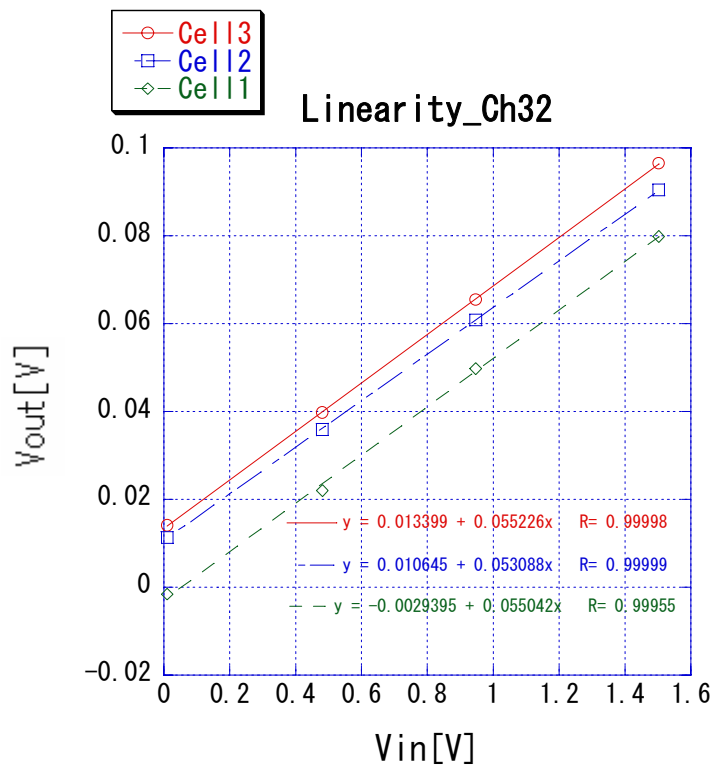
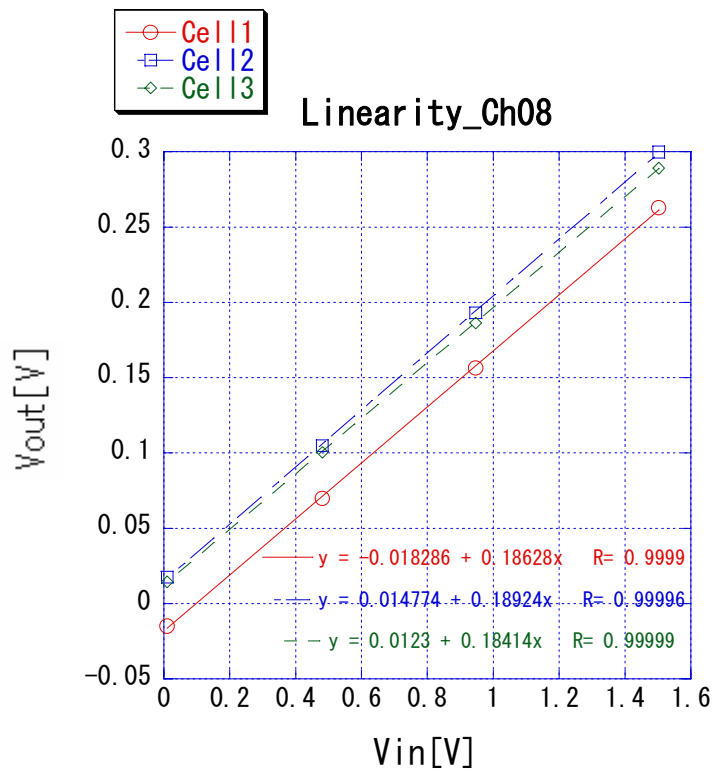


図 5.16: QVC2007 における 4 つのチャンネルのゲイン

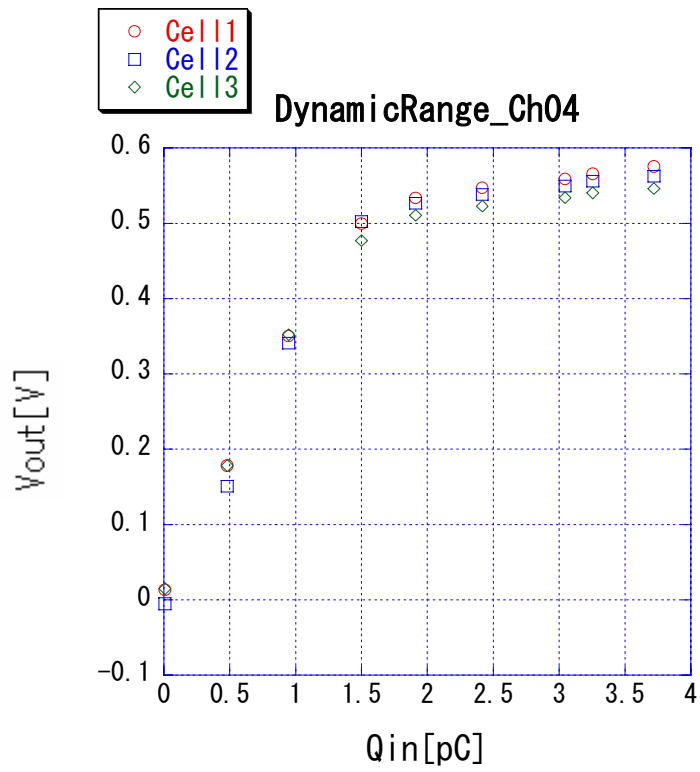
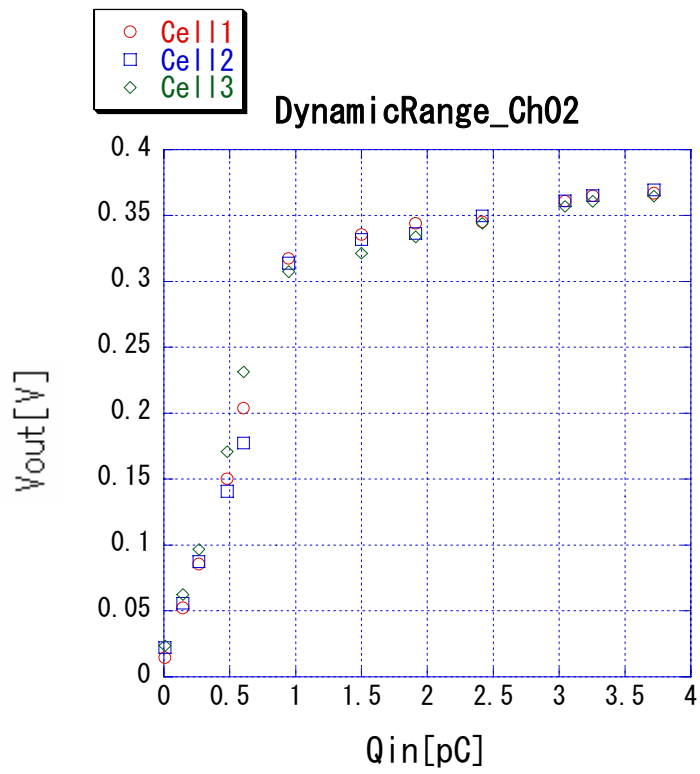
ここで、QVC2007 のデザインにおいては Ch02、Ch04、Ch08、Ch32 の積分容量はそれぞれ 0.2pF、0.4pF、0.8pF、3.2pF となっており、入力容量は 1pF である。従って各チャンネルのゲインの理論値はそれぞれ 5 V/pC(Ch02)、2.5V/pC(Ch04)、1.25V/pC(Ch08)、0.1325V/pC(Ch32)となる。しかし測定結果では、各チャンネルのゲインはグラフの直線の傾きよりそれぞれ 0.28V/pC(Ch02)、0.35V/pC(Ch04)、0.18V/pC(Ch08)、0.05V/pC(Ch32)となっており、理論値よりも大幅に小さいことがわかった。この原因としては以下のことが考えられる。

- ✧ 積分容量値が設計値よりも大きめにできている
- ✧ 入力容量値が設計値よりも小さめにできている
- ✧ テスト環境において ASIC のバイアス条件が最適でなく、これによりオープンループゲインが低くなりゲインがさらに小さくなっている

上記の 3 つの原因のうち、特に 3 つ目の可能性は高いと考えられる。QVC2007 の測定では基板上の可変抵抗を変化させることによりバイアス条件を調節して行ったが、測定の際出力されていた信号が突然出力されなくなるということが何度も起こり、その度にバイアス条件を少しずつ変更した。その結果バイアスを調節しても一番最初に出力信号が確認された時より小さい信号しか出力されなくなり、その状態で測定を行わなければならなかった。従ってバイアス条件が最適でなくなった可能性は高いと考えられる。なぜこのようなことが起きたかは現段階では不明であり、現在原因を究明中である。一方 Ch02、Ch04、Ch08、Ch32 のゲインの比はデザインによると 16 : 8 : 4 : 1 であるが、測定結果では Ch04、Ch08、Ch32 の比がこれにほぼ一致している。Ch02 だけがデザインと異なる相対ゲインを示している原因としては絶対ゲインが理論値よりも大幅に小さい値を示す原因と同様、テスト環境において ASIC のバイアス条件が最適でないことが考えられる。

● ダイナミックレンジ

チャンネル毎のダイナミックレンジの測定結果を図 5.17 に示す。それぞれのグラフにおける 3 種類のプロットはセル毎の測定結果を表している。ダイナミックレンジはセル間で大きな違いはなく、ほぼ一致していることがわかる。グラフのリニアリティが保たれている範囲から各チャンネルにおけるダイナミックレンジを求めると、Ch02、Ch04、Ch08、Ch32 の結果はそれぞれ 0.5pC、1.5pC、2pC、2.5pC であった。従ってデザインにおいて各チャンネルの積分容量を大きくする、つまりゲインを小さくすることによりダイナミックレンジを広げられることが確認できた。



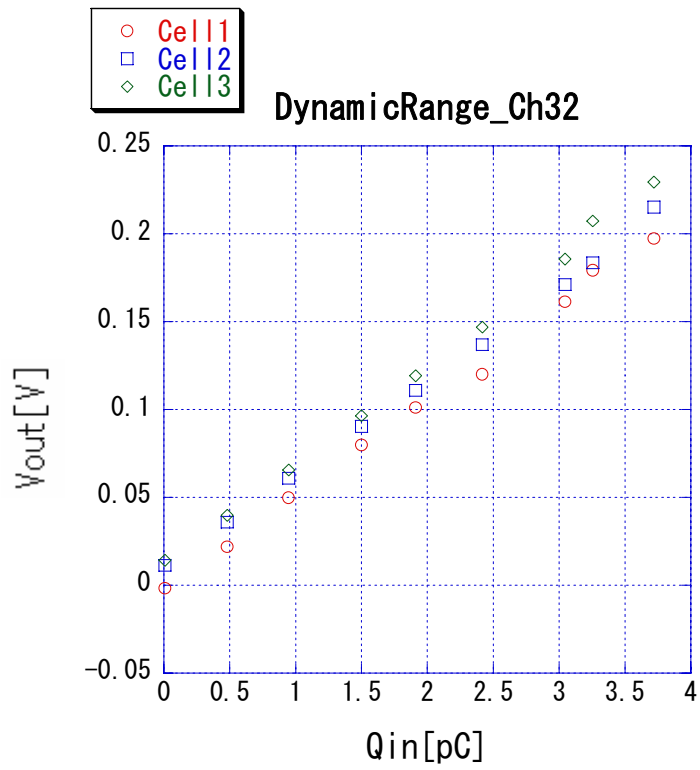
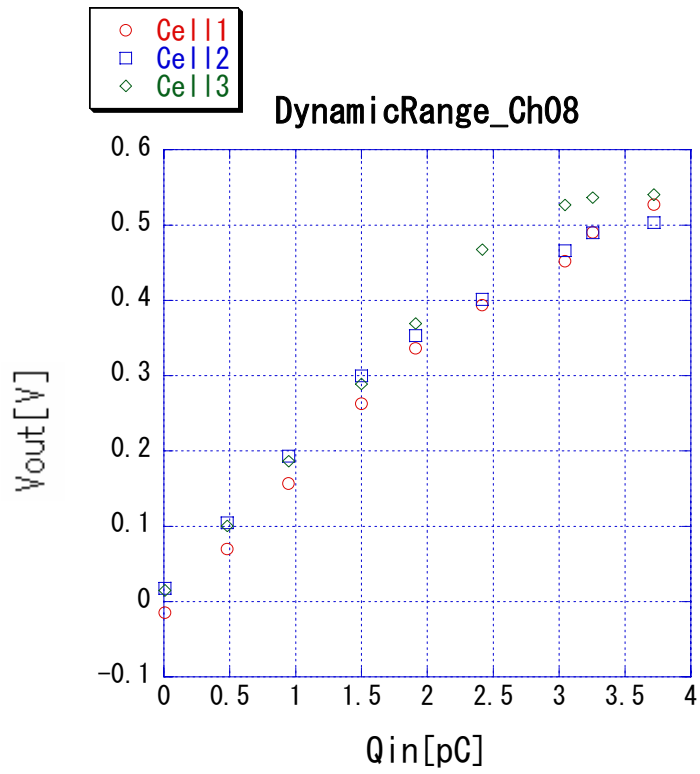


図 5.17: QVC2007 におけるチャンネル毎のダイナミックレンジ

- ノイズ

QVC2007 における測定誤差は $0.2\text{mV}\sim 0.8\text{mV}$ の範囲であった。QVC2006 と同様、QVC2005 に見られたような大きなノイズは観測されなかった。

以上の結果から QVC2007 では積分容量を変化させることによりゲインとダイナミックレンジが調節できることを確かめようとしたが、ゲインに関しては予想よりも大幅に小さい値となっていることがわかった。この原因については今後調査が必要であり、前述したような入力容量や出力容量、バイアスの問題についても確認する必要がある。しかしダイナミックレンジに関しては、積分容量を大きくすることにより問題なく広げられることが確認できた。またノイズについては QVC2006 と同様に収まっており、QVC2005 に見られたようなノイズの問題は完全に解決されたといえる。

5.4.5 MPPC との接合試験

最後に QVC2007 に関して実際に MPPC との接合試験を行った。ここでは Ch04 を使用して測定を行った。ノイズ対策としてはシールドボックスを使用し、電源や基板などの GND は全て共通にした。QVC2007 の電源、MPPC の電源、LED の光量を全て ON にした状態でのノイズは 10mV 程度であった。この測定における回路図を図 5.18 に示す。

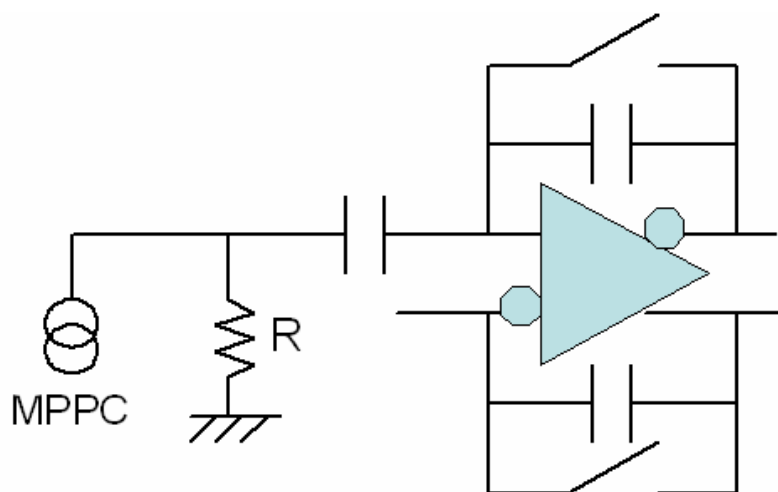


図 5.18:MPPC との接合試験における回路図

この測定では京都大学よりお借りした 100 ピクセルの MPPC を使用した。100 ピクセルの MPPC のノイズ信号において 1p.e.、2p.e.、3p.e.の出力波形が観測される様子を表したスクリーンショットを図 5.19 に載せる(京都大学 五味慎一氏測定)。これは 10 倍のアンプを用いた際の出力信号であるため、実際の信号はこの 1/10 の大きさであると考えられる。

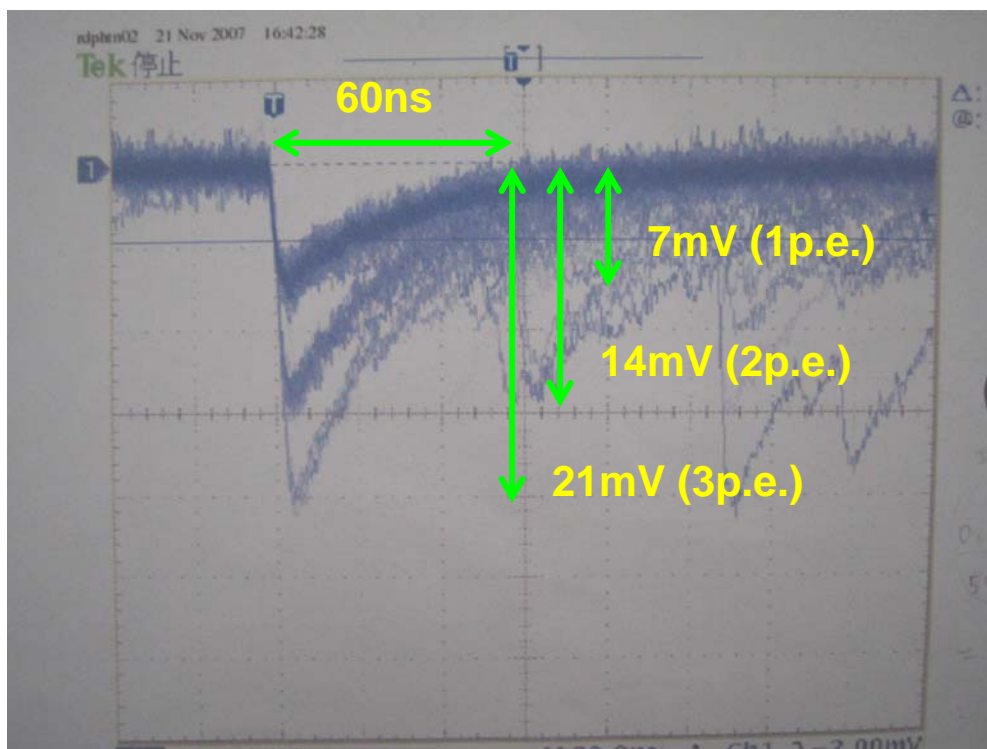


図 5.19:MPPC のノイズ波形(10 倍アンプ使用):1p.e.~3p.e.の信号が観測される

MPPC との接合試験において、まず MPPC に LED の光量を変化させて照射し QVC2007 からの出力信号を見たところ、光量の大きさに比例して出力信号が変化する様子が観測された。そこで LED を微小光量に設定し、オシロスコープでヒストグラムを描かせることにより MPPC から出力される 1p.e.毎のピークを QVC2007 の出力信号で観測することを試みた。その結果得られたオシロスコープのスクリーンショットを図 5.20 に、データからヒストグラムにしたものを図 5.21 に示す。それぞれの図において上図はペDESTAL¹²を、下図は LED を微小光量で照射させた時の様子を示す。

¹² MPPC に照射される光量がゼロの時の出力信号のことを言う

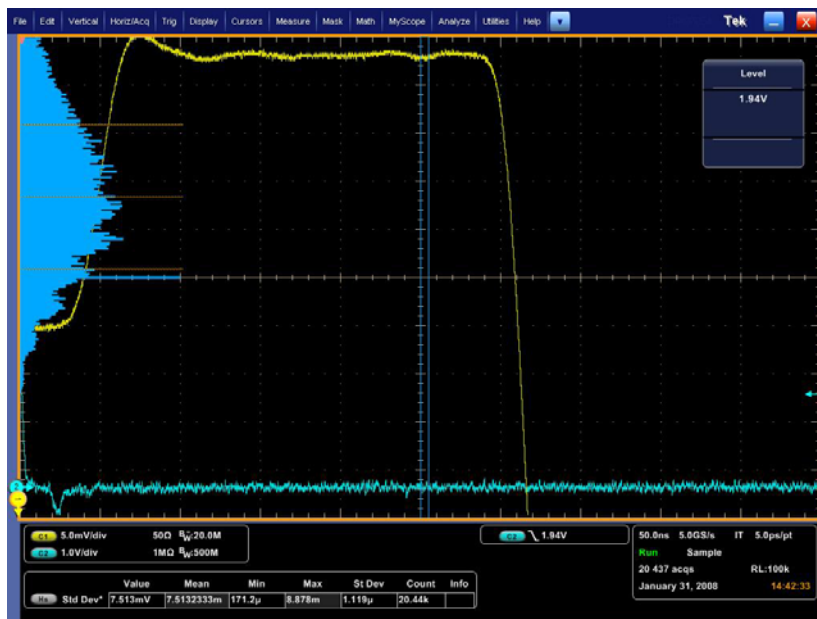
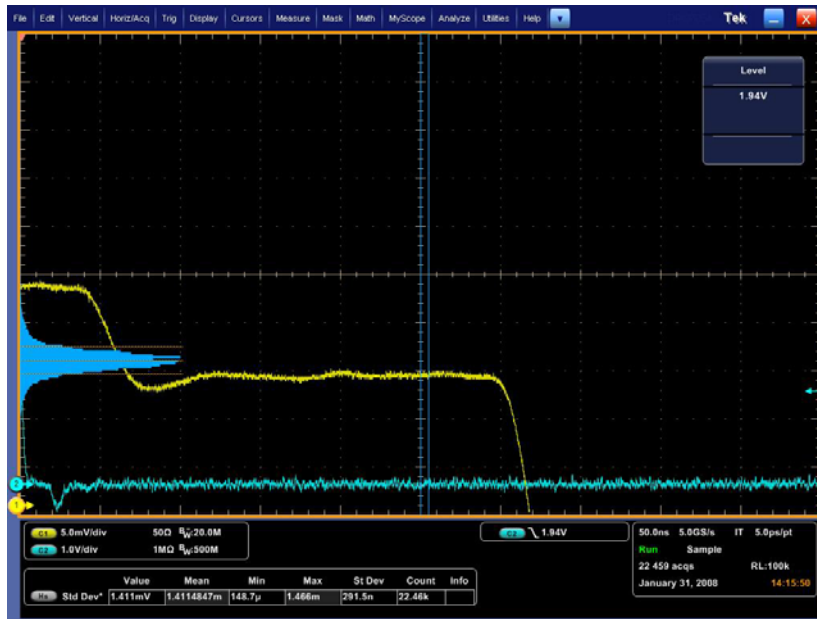


図 5.20: オシロスコープの画面で観測された p.e. 毎のピークの様子 ($R=200\Omega$):
 (上) ペDESTAL の様子 (下) LED を微小光量で照射させた時の様子
 黄色は QVC2007 の出力信号を、青色はヒストグラムを表す

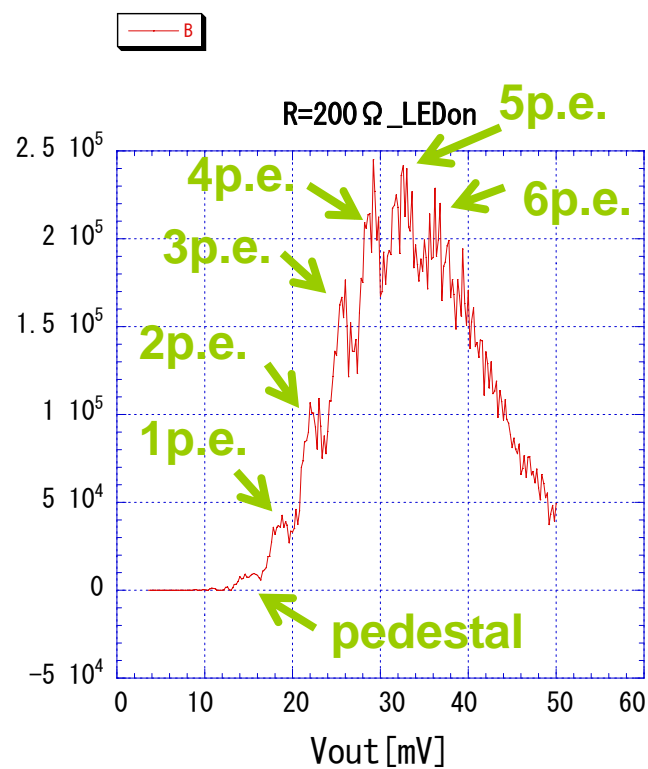
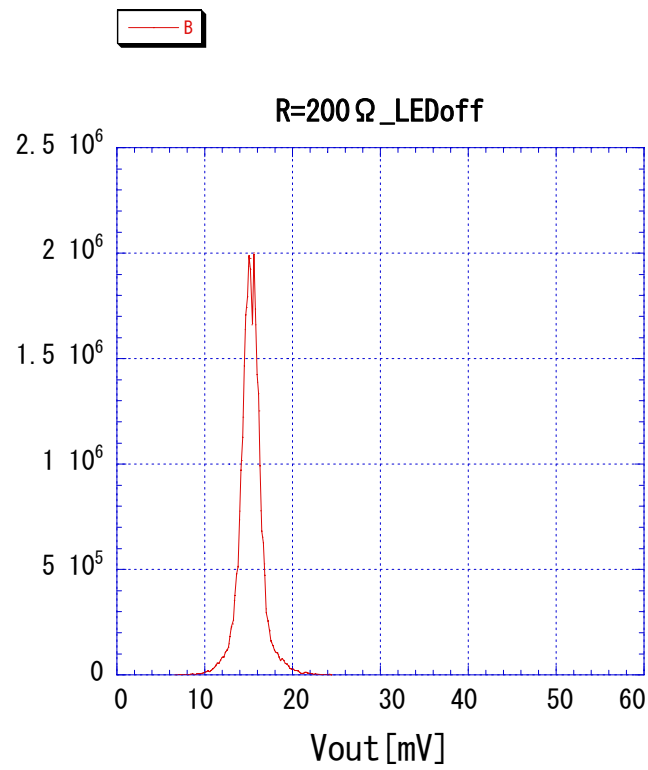


図 5.21: データをヒストグラムに表すことで観測されたピーク ($R=200 \Omega$):
 (上) ペDESTALの様子 (下) LED を微小光量で照射させた時の様子

図 5.22 でピークの分布を観察すると、およそ 15mV のところにペDESTALのピークが立ち、そこから約 3.5mV 間隔でピークが現れているのがわかる。この間隔は 1p.e.の違いに相当すると考えられる。ここで、図 5.19 よりアンプを通していない時の MPPC による 1p.e.の出力信号の波高は 0.7mV であり、MPPC から出力される 1p.e.の信号の電荷量は図 5.19 における 1p.e.の波形の三角形の面積に等しい。スクリーンショットは 50Ω のケーブルを通してオシロスコープで観測したものであるから、MPPC から出力される 1p.e 相当の電荷量 Q は

$$Q = \frac{0.7[mV] \times 6[ns]}{2 \times 50[\Omega]} = 0.042[pC] \quad (5.1)$$

となる。従って MPPC との接続試験により観測された QVC2007 の出力信号のピーク間隔は 3.5mV であることから QVC2007 のゲインは $0.0035 / 0.042 = 0.083V/pC$ と求められる。ここで、これは予定していた値の 1/5~1/10 の大きさであることがわかった。この原因としては

- 容量の絶対値が大きくなってしまっていること
- ASIC のバイアス条件が測定中に可変抵抗値を変更してしまったことにより最適値からずれてしまったこと

などが考えられるが、現段階では不明であり原因を究明中である。

以上より、MPPC との接合試験においては理論値よりもゲインがかなり低いという問題点が見つかったが、MPPC から出力される 1p.e.毎のピークを観測することには成功した。またノイズについてはクリーンな環境に比べ、MPPC との接合試験では多少大きくなっていることがわかった。今後は問題点解決のためさらに詳細な MPPC との接合試験を行う必要がある。そのためには以下のことが課題として挙げられる。

- 測定環境においてノイズを低減すること
- 今後は使用する MPPC の信号を前もって測定し、どのような信号が入力されているのか明確にしておく必要がある(今回は京都大学より頂いた情報をもとに実験や解析を行った)
- MPPC が LED から受ける光量を厳密に調節できるシステムを作り、再現性のある実験環境を整えること(今回は LED に与える電圧を厳密に調節できなかつたり、シールドボックスのフタの閉め方や MPPC の基板への挿し方のわずかな違いにより MPPC の受光量が変わってしまったたりするという問題があった)

第 6 章 まとめと今後の課題

本章ではこれまでの研究のまとめと今後の課題について述べる。

6.1 測定結果のまとめ

QVC-ASIC の評価については以下のように結論付けることができる。

- 評価に使用した全ての QVC-ASIC についてリニアリティがあることが観測され、電流積分機能による基本動作がきちんと行われていることを確認することができた。
- 初期の QVC2005 に見られたノイズの問題はバイアス回路のフィルターが原因であることがわかった。この問題に対してはバイアス回路のローパスフィルター周りのレイアウト変更や、ローパスフィルターの容量の WELL について電源や GND からの分離を行うことにより、QVC2006 や QVC2007 ではノイズは観測されなくなった。従ってノイズの問題は完全に解決されたといえる。
- QVC セル毎のオフセット電圧のばらつきはトランジスタのばらつきによるものであることが確認でき、トランジスタのマッチングを考えたデザインによりこのばらつきは抑えられることがわかった。
- QVC-ASIC のゲインやダイナミックレンジは入力容量と積分容量によって決まるが、QVC2007 の測定では実際のゲインがデザインから求められる理論値よりも大幅に小さいことがわかった。この原因はまだ特定されていないが、積分容量値が設計値よりも大きめであることや入力容量値が設計値よりも小さめであること、またバイアス条件が最適でなくこれによりオープンループゲインが低くなりゲインがさらに小さくなっていることなどが考えられる。一方ダイナミックレンジに関しては入力容量と積分容量の調節により、問題なく広げられることがわかった。
- MPPC との接続試験においては LED の光量に比例した出力信号が観測され、MPPC から出力される 1p.e.毎のピークを QVC2007 の出力において確認するこ

とができた。従って MPPC からの出力信号を電流積分機能によりきちんと処理できていることがわかった。しかしゲインの値がテストパルスを用いて測定されたゲインよりもさらに大幅に小さいことがわかった。この原因はまだ特定されていないが、容量の絶対値が大きくなってしまっていること、ASIC のバイアス条件が測定中に可変抵抗値を変更してしまったことにより最適値からずれてしまったことなどが考えられる。

6.2 今後の課題

今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- QVC2007 においてゲインが理論値よりも大幅に小さい値を示している理由について原因を究明する必要がある。現段階で理由として考えられる入力容量や出力容量の設計値とのずれのやバイアスの最適値からのずれについても確認する必要がある。
- MPPC からの信号を入力した際に QVC2007 のゲインが大幅に小さくなっていた原因を解明するため、さらに詳細な MPPC との接合試験を行う必要がある。そのため測定環境においてノイズを低減すること、使用する MPPC の信号を前もって測定し、どのような信号が入力されているのか明確にしておくこと、また MPPC が LED から受ける光量を厳密に調節できるシステムを作り、再現性のある実験環境を整えることが必要である。
- 上記の確認やテストを行った後は、新規デザインにおいて多チャンネル化に向けたレイアウトの修正とそのテストを行うことが課題となる。さらに TMC を組み込み、時間分解能 1nsec を出すことも目標となる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導を下さった川越清以先生に深く感謝致します。出張先でしか測定が行えない私の状況をいつも心配して下さり、多くの助言を頂きました。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)測定器開発室の田中真伸先生、村上武先生には直接熱心なご指導を頂き、大変感謝しております。不慣れな土地に出張し、何もわからず不安で一杯だった私に知識や技術を一から教えて下さいました。また訪問の際はスケジュールや宿舎の心配までして下さいるなど大変親切にして頂き、常に安心して研究を進めることができました。お二方の丁寧なご指導と多大なサポートなくして本論文を完成させることはできませんでした。心より感謝しております。また同じく KEK 測定器開発室の藤田陽一先生、児玉英世先生には実験の新システム立ち上げの際やネットワーク接続に問題が生じた時に何度も助けて頂きました。本当にありがとうございます。

本研究を進めるにあたって必要となる知識や技術を指導して下さい、また多くの助言を下さった田村勇樹氏には深く感謝しております。教わった知識が様々な場面で生かされ、私にとって大きな助けとなりました。

魚住聖氏には MPPC の知識や実験を行う際の技術についてご指導頂き、研究生としての考え方も学ばせて頂きました。大変感謝しております。

研究室で同期の岡田勝吾くん、門坂拓哉くん、楠本彬くん、新保直樹くん、丹羽正くん、松川陽介くんには困った時はいつも助けて頂き、大変心強かったです。とても感謝しております。

毎日楽しく研究生活を送ることができたのは上山敬五くん、池田紘子さん、金子敬宏くん、高崎耕平くん、松浦朋希くんが同じグループにいてくれたおかげです。本当にありがとう。

研究室の皆様には常に助けて頂き大変ご迷惑もおかけ致しました。本研究は皆様の支えがあってこそのものであります。楽しく充実した研究生活を送らせて頂き本当にありがとうございました。

最後に、常に私を支えて下さった両親、祖父母、弟妹、そして私を励まし味方となってくれた全ての方々に深謝致します。

参考文献

- [1] 田中真伸 “電流積分器” 2006 KEK
- [2] KEK 測定器開発室 ウェブページ <http://rd.kek.jp/>
- [3] KEK ASIC R&D group “ASIC 開発に関するプロポーザル” 2005 KEK
- [4] Satoru Uuozumi “Development and Study of the Multi Pixel Photon Counter” 2007
- [5] Koei Yamamoto “Newly Developed Semiconductor Detectors / Multi - Pixel Photon Counter (MPPC)” 2007 HAMAMATSU PHOTONICS K.K.
- [6] 田村勇樹 “次世代線型加速器実験へむけての新型光検出器の評価” 2006 神戸大学
- [7] 前田高志 “リニアコライダー実験用カロリメータのための光検出器 MPPC の開発研究” 2007 筑波大学
- [8] 須藤裕司 “リニアコライダー実験用カロリメータ読み出しに用いるマルチピクセル光検出器の開発研究” 2007 筑波大学
- [9] 河上陽介 “PFA に最適化した中性ハドロン同定の研究” 2007 信州大学