

修 士 学 位 論 文

大口径EBCCDの性能評価

2009年2月6日

専攻名 物理学専攻  
学籍番号 076s117s  
学籍番号 田村 直樹

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期過程





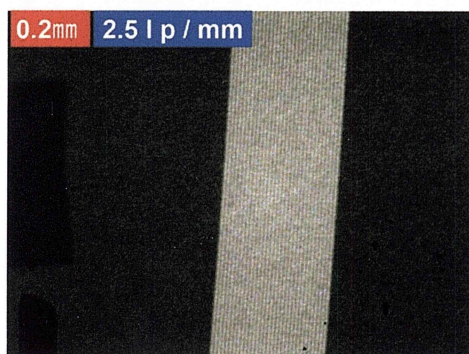
## 概要

現在長期線ニュートリノ実験である T2K 実験をはじめとする多くの高エネルギー粒子物理実験において、プラスチックシンチレータの一種である Scintillating Fiber 飛跡検出器が使われている。この Fiber からの光の読み出しは Image Intensifier Tube (以下 IIT) を使用している。IIT は Micro Channel Plate を搭載しており、非常に高ゲインである一方で CCD (Charge coupled device) と結合して出力画像をメモリーに取り込む過程で結合光学系により解像度が低下するという欠点を持つ。そのために光電子を直接 CCD に入射させる電子打ち込み型 CCD (Electron bombardment CCD 以下 EBCCD) が IIT に変わる高ゲイン多チャンネル光検出器として注目されている。EBCCD は原理上、増幅過程での統計的な揺らぎを非常に小さくできるという特徴をもつことから、より精密な光量測定が可能となる。

今回の修士論文のテーマは上記の EBCCD の新型の試作機である大口径 EBCCD の性能評価を行い、今後の量産器へのフィードバックを一つの目的としている。且つ今後の高エネルギー物理実験に限らずその他の多分野での応用の指針となる基礎データの提供を目的としている。

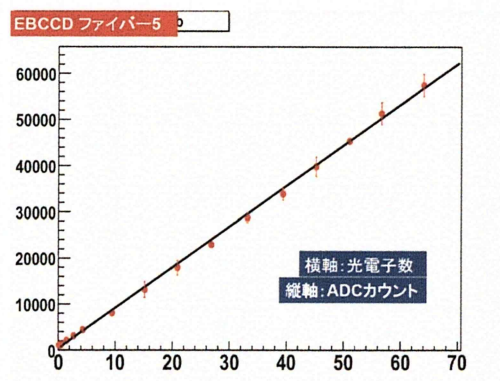
この論文では大口径 EBCCD の基本的な性能を評価することに重点を置いた。基本性能の評価としてベースライン特性・画像特性・空間分解能・入射光量に対する出力の線形性を評価の対象とした。特に IIT との性能比較により空間分解能と入射光量に対する出力の線形性の評価で大口径 EBCCD の性能が少なくとも IIT の性能と同等もしくはそれ以上の性能を持つことが確認された。

以下にこの論文で得られた大口径 EBCCD の性能の一例として空間分解能と入射光量の線形性の結果についての図を示す。



線幅 0.2mm 間隔の縦縞チャート図

大口径 EBCCD は 0.2mm 線幅の縦縞チャート図まで白黒の線が分離できた。



大口径 EBCCD のファイバー 5 での線形性

入射光量が 70 光電子数あたりまでの線形性が確認された。

# 目次

<b>第 1 章 序章</b>	<b>3</b>
1.1 素粒子物理実験と光検出器	3
1.1.1 光検出器に要求される特性	4
<b>第 2 章 イメージングデバイス</b>	<b>5</b>
2.1 PMT(光電子増倍管)	5
2.1.1 高エネルギー実験での PMT の使用例	6
2.2 CCD (charge coupled device)	7
2.2.1 CCD の動作原理	7
2.2.2 CCD の電荷転送の原理	7
2.2.3 CCD の走査方式	8
2.3 裏面照射型 CCD	9
2.4 IIT (Image Intensifire Tube)	10
2.4.1 IIT の概要	10
2.4.2 IIT の構造	11
2.4.3 IIT の使用例	12
2.5 EBCCD (Electron Bombardment Charge Coupled Device)	14
2.5.1 EBCCD の概要	14
2.5.2 EBCCD の構造	14
<b>第 3 章 大口径 EBCCD</b>	<b>15</b>
3.1 大口径 EBCCD の概要	15
3.2 大口径 EBCCD の構造	16
3.3 大口径 EBCCD の一般仕様	16
3.4 大口径 EBCCD の一般特性	17
3.4.1 分光感度特性	17
3.4.2 ゲイン特性	17
3.4.3 大口径 EBCCD の解像度	18
3.5 画像の滲み	19
3.5.1 CCD のチャージ漏れ	19
3.6 放電	19
<b>第 4 章 大口径 EBCCD の性能評価</b>	<b>22</b>
4.1 ベースラインの特性	22
4.1.1 セットアップ	22
4.1.2 実験 1	23
4.1.3 実験 2	24
4.2 大口径 EBCCD の空間分解能	26
4.2.1 実験内容 (セットアップと実験手順)	27
4.2.2 解析	27
4.2.3 評価	30
4.3 大口径 EBCCD の画像特性	32
4.3.1 実験内容	32

4.3.2	ドットチャートを用いた評価	32
4.3.3	格子チャートを用いた評価	35
4.4	大口径 EBCCD の入射光量に対する線形性	36
4.4.1	セットアップ	36
4.4.2	実験に用いる PMT の基本特性	37
4.4.3	EBCCD 用治具と PMT 用治具の入射光量のキャリブレーション	38
4.4.4	大口径 EBCCD への照射光量範囲の決定	40
4.4.5	入射光量に対する線形性実験	42
4.4.6	解析	42
4.4.7	評価	43
<b>第 5 章</b>	<b>大口径 EBCCD と IIT の性能比較</b>	<b>47</b>
5.1	概要	47
5.2	空間分解能	48
5.2.1	実験内容 (セットアップと実験手法)	48
5.2.2	解析	48
5.2.3	評価	50
5.2.4	大口径 EBCCD と IIT の空間分解能を比較	51
5.3	入射光量に対する線形性	52
5.3.1	実験内容 (セットアップと実験手法)	52
5.3.2	解析	53
5.3.3	評価	53
5.3.4	大口径 EBCCD と IIT の線形性を比較	55
<b>第 6 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>57</b>
<b>第 7 章</b>	<b>今後の課題</b>	<b>60</b>
	参考文献	61
	謝辞	63



# 第1章 序章

近年、科学技術の進歩に伴い、高エネルギー物理や宇宙物理の分野においてさまざまな発見がなされるようになってきた。そして、現在も Higgs 粒子やダークマターといった未知の粒子探索実験が世界中で進行中である。代表的な実験ではスイスの CERN で建設された LHC (Large hadron collider) を用いた Higgs 探索が挙げられる。日本でもダークマター探索実験 (XMass 実験)・長基線ニュートリノ実験の T2K 実験が準備中であり、2009 年は粒子物理実験が国内外を問わず活発な年になることが期待される。

粒子物理実験の分野で検出器は私たちの目としての役割を果たしており、この粒子のエネルギーや飛跡といった多くの情報を得ることのできる優れた目の開発・研究を行うことは粒子物理の進展には必要不可欠な要素となっている。

粒子物理実験ではこれらの粒子をいろいろな方法で検出を試みてきた。粒子を観測する方法としては写真乾板や泡箱・霧箱を撮影するという方法が粒子物理の初期には行われてきた。技術の進歩とともに光電子増倍管が発明されて、粒子検出のエレクトロニクス化が一気に加速された。(現在でも写真乾板は OPERA 実験 (伊) でも使用され、写真乾板を超える分解能をもつ検出器は現段階では現れていない) それとともに実験規模の巨大化が進み粒子検出も複雑化し、データの読み出しチャンネル総数が膨大な桁まで達している。この実験の巨大化・複雑化に伴い、より効率の良い・そしてコストパフォーマンスの優れた粒子検出機器の研究・開発がモチベーションの一つとなってきている。ここでの効率の良いとは時間分解能・エネルギー分解能に優れているなどの実験要請に合った検出器のことをさしている。

## 1.1 素粒子物理実験と光検出器

荷電粒子がシンチレータなどの物質中を通過する際にそのエネルギーを落としていく。その際に落としたエネルギーに比例した光を発する。この光を検出することで荷電粒子のエネルギー、速度、方向を知る手がかりとなる。これらの情報をいかに正確に短時間で検出することが素粒子物理実験では重要となってくる。この光を検出する機器のことを光検出器と呼び、素粒子実験では光電効果を利用した検出器が主流となっている。

これまでの素粒子物理実験では光検出器の役割はカロリメータに組み込むことで荷電粒子のエネルギーを電気信号として検出できる点やある事象を捉えるためのトリガーに用いることができる点で非常に重要な役割を果たしてきた。

しかし、近年の素粒子物理実験では実験規模の巨大化に加えて構造の細密化や光検出器に求める性能が細分化されており、次世代の光検出器の研究・開発が急務となっている。

### 1.1.1 光検出器に要求される特性

以下に素粒子物理実験に用いられる光検出器に要求される項目をいくつか列挙する。

1. 優れたエネルギー分解能  
：使用する発光波長に対しての感度が高いことが必要。
2. 入射光量に対する検出器からの出力の優れた線形性  
：入力と出力の線形性が保たれているほど良く、線形性が保たれる範囲が広ければ広いほど良い検出器となる。
3. 優れた時間分解能  
：入射光に対しての検出器の応答時間の揺らぎが短いほうが良い。TOF カウンタ (Time Of Flight) のような時間計測に使用する際には特に重要となってくる。
4. 長期安定性  
：素粒子実験では長期的な実験になることがほとんどなので、長期間の性能変化が小さいものを使用する必要がある。
5. 低ノイズ  
：信号頻度の小さな実験ではノイズ頻度も抑える必要がある。
6. 優れた磁場特性  
：加速器実験などでは検出器周りは磁場漏れが発生するため検出器の磁場特性も非常に重要となってくる。
7. 小型化  
：実験規模の巨大化と細密化に伴い、特に加速器実験での検出器による穴や粒子のエネルギー損失はなるべく抑えたい。
8. 省電力  
：実験規模の巨大化に伴い読み出し検出器の数が増加し、消費電力が膨大となり実験のランニングコストが高額になる。

今回の論文では光検出器の一つである EBCCD の光電面を大口径にした大口径 EBCCD について研究を行った。EBCCD とは Electron Bombardment Charge Coupled Device の略で入射した光が光電面で電子に変換され、電位差を利用して加速された電子を CCD に入射させる。入射された電子のエネルギーは半導体の空乏層中の電子・正孔の生成に使われ、CCD で電子の増幅が起こる。この電子を読み出すことで光を検出することができる。EBCCD は光電変換した電子の増幅過程が一度きりなので増幅に伴う統計的な揺らぎが小さい。その一方で電子の増幅は CCD に入射する電子のエネルギーに依存するため高ゲインを得るためには光電面と CCD の間に高電圧を印加する必要があるが、現時点では十分なゲインが得られていない。

この修士論文では大口径 EBCCD の試作器の性能を評価することで大口径 EBCCD の素粒子実験の分野での活躍の場を探すとともに、量産器へのフィードバックをかけることを大きな目的としている。大口径 EBCCD はシンチレーティングファイバーと組み合わせて多チャンネル読み出し可能なイメージングデバイスとして期待されているので、性能評価の際には従来の代表的な多チャンネル読み出し可能なイメージングデバイスである IIT との性能比較を行った。



## 第2章 イメージングデバイス

### 2.1 PMT(光電子増倍管)

PMT (光電子増倍管) は光電陰極と多段金属電極 (ダイノード) を組み合わせることで光量のある程度の大きさの電気信号に変換する光検出器である。高速応答で (nsec 単位)、高感度、高ゲインなデバイスで粒子物理実験の分野では広く使われている光検出器である。以下に PMT の基本的な構造 (図 2.1) とスーパーカミオカンデ実験で用いられた 20 インチ PMT の図 (図 2.2) を示す。

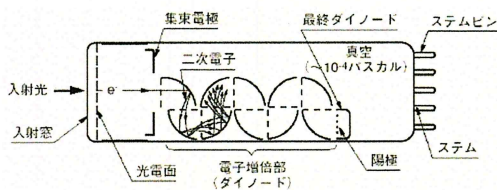


図 2.1: 光電子増倍管の構造 (ボックス型)

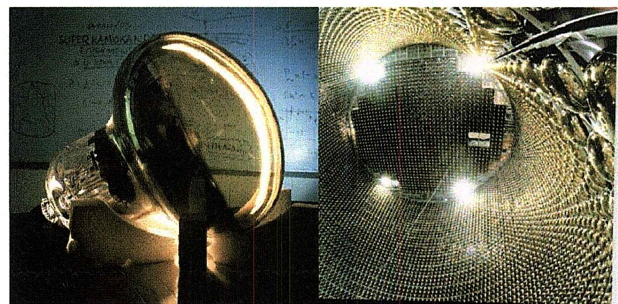


図 2.2: スーパーカミオカンデ実験で使用されている 20 インチ PMT

ガラスを通過した光子は光電陰極で光電効果により電子に変換される。光電面には可視光に感度があるバイアルカリなどが代表的な材質として使用されている。変換された電子はその後複数段のダイノードにて二次電子の放出を引き起こし、最初に光電面から発生した電子は  $10^7$  程度に最終的には増幅され、最終段のアノード (陽極) に到達し読み出される。ダイノードの形状・配置にはいろいろな種類がある。光電子の収集効率に優れたボックス型、磁場の影響を受けにくくし、さらに位置分解能を持たせたファインメッシュ型、コンパクトで応答性の良いサーキュラーゲージ型、時間特性やパルスリニアリティー特性が良いラインフォーカス型、大口径のものに使われユニフォミティの良いベネシアンブラインド型 (スーパーカミオカンデ実験に使われている)、応答速度が速く、磁場の影響を受けにくい MCP (Micro Channel Plate) 等がある。PMT の光電面の材質やダイノードの種類は実験目的に応じて選択される。PMT は 1 光電子数レベルの微弱光の検出は可能であるが電子の増幅過程での統計的な揺らぎが大きいのが欠点である。

- PMT の一例として MCP の概要について記す。

MCP は非常に細かいガラスパイプ ( $10 \mu\text{m}$   $\phi$ ) を多数重ねた構造をしており、各チャンネル内 (ガラスパイプ) に電子が入射した際にパイプ壁面に衝突するたびに二次電子を放出する。放出された電子はチャンネル内にかげられた印加電圧により加速され、再びパイプ壁面に衝突し、二次電子の放出が起こる。この現象が各チャンネルで起こるので、光電子の位置情報を保持しながらの電子増幅が可能となる。

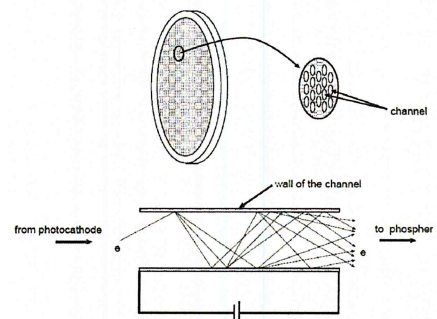


図 2.3: MCP 構造

### 2.1.1 高エネルギー実験での PMT の使用例

高エネルギー実験での PMT の使用例として Super-Kamiokande 実験（スーパーカミオカンデ、SK 実験）を挙げる。K2K 実験において後置検出器として使用したスーパーカミオカンデ水チェレンコフ型検出器は岐阜県神岡町の神岡鉱山の地下 1000m に設置されている。検出器は高さ 41.4m、直径 39.3m の円筒形をした水槽で、50,000 t の純粋が満たされている。SK 実験では K2K 実験のような長基線ニュートリノ振動実験のほかに太陽ニュートリノ観測、大気ニュートリノ観測、Kamiokande 建設当初からの実験目的である陽子崩壊観測や超新星爆発の観測などニュートリノ物理に関わる実験を主に行っている。ニュートリノは反応断面積が小さく、自然界で発生するニュートリノを観測するためには（長基線ニュートリノ実験のようにニュートリノの生成を調節できる場合以外は）、ニュートリノと反応するターゲットに大量の物質を用意する必要がある。そのため SK ではこのように大量の水をニュートリノのターゲットとして利用している。検出にはニュートリノの弱荷電準弾性散乱反応によるチェレンコフリングのリングパターン等から  $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$  によるものかを区別することが可能。 $\nu_e$  によって  $e^-$  が生成された場合は電磁シャワーを起こしながら走るためにチェレンコフリングは幾重にも重なったように観測される。 $\nu_\mu$  によって  $\mu^-$  が生成された場合は相互作用をあまりせず水中を通過するため  $\mu^-$  のみによるリングのみが観測される。このチェレンコフ光を PMT で検出する。SK 実験では 20 インチ（約直径 50cm）の半球型 PMT を 11, 146 本使用している。SK 実験のように大体積の検出器では PMT での検出範囲をカバーするために大口径（20 インチ）の PMT を使用している。ニュートリノ反応のように反応頻度の少ない現象を測定するために低ノイズの PMT が使用されている。

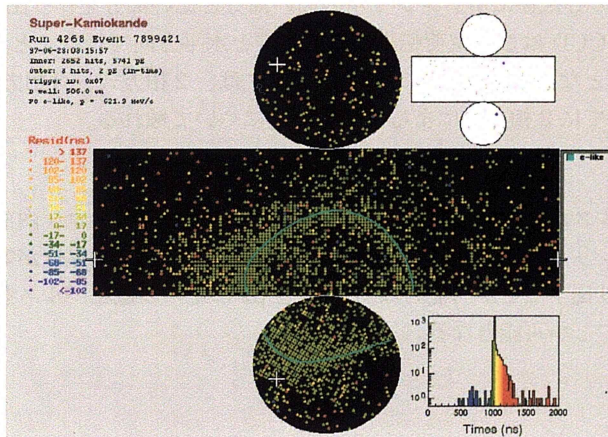


図 2.4:  $\nu_e$  イベントによるチェレンコフリング

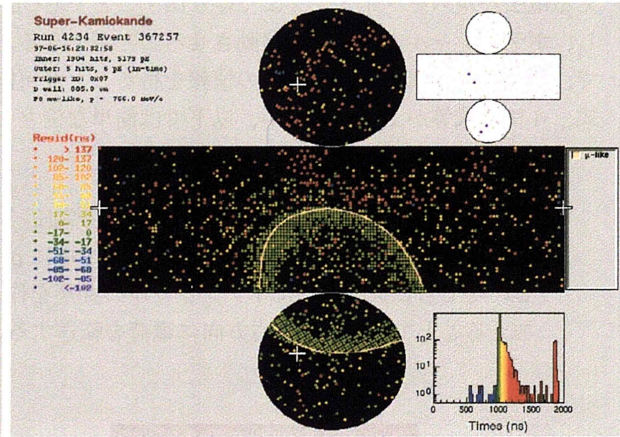


図 2.5:  $\nu_\mu$  イベントによるチェレンコフリング

上図はスーパーカミオカンデでのニュートリノイベントの例である。リングの形の違いからニュートリノタイプを識別することができる。20 インチの PMT を 11, 146 本使用することで巨大なイメージングデバイスとしての役割を果たしている。そのため読み出しチャンネルは膨大となり読み出しシステムが複雑で巨大なものとなる。



## 2.2 CCD (charge coupled device)

### 2.2.1 CCDの動作原理

CCDとはcharge coupled deviceの略称で、電荷結合デバイスとも呼ばれている。フォトダイオード（受光素子）で入射光を信号電荷に変換し、一定時間蓄積された後に電荷を読み出して転送を行う回路素子のことである。CCDはMOS構造半導体の一種でシリコン基板表面の酸化皮膜上に多数の電極を設け、各電極に隣同士で異なる電圧を与えることによりポテンシャルの井戸を作り出し、これを利用して電荷を保持できるようにしたものである。また各電極に加える電圧を適切に制御することにより各素子の電荷が隣の素子に一齐に転送することが可能となる。

以下に示す二次元CCDといわれるFT方式CCD、FFT方式CCDは垂直・水平シフトレジスタを用いることでCCD素子上の電荷を一定の読み出し順序で行うことができるため、電荷の位置情報が分かる。つまり入射光の位置情報を得ることとなる。CCDはPMTと比べて微弱光に対しての感度が小さく、微弱光による信号を読み出すことができないという点が欠点としてあげられる。

### 2.2.2 CCDの電荷転送の原理

CCD素子での電荷転送は各電極に異なる電圧を加えることにより、異なるポテンシャルを生み出している。与える電圧パルスをタイミングよく作り出すことでCCDの各電極にポテンシャルの高い部分と低い部分を作り出し、ポテンシャル内の電子を移動させることができる。CCDはこの電荷転送を垂直方向と水平方向で行うことで、すべての画素上での入射光の情報を得ることが可能となる。電極への電圧の加え方には、2相方式、3相方式、4相方式等が上げられるが、以下では簡単な例としてに2相方式による電荷の転送について触れる。

- 2相方式の電荷転送方式

2相方式での電荷転送には電極に加える電圧パルスが二種類必要となる。さらに各電極下のシリコン内部の電場に構造を持たせるためにnシリコン中にpシリコン帯を置く。これによってすべての電極の電位が等しい時でもピクセル内にポテンシャルの井戸を作り出すことが可能となる。p1とp2に逆相の電圧パルスを加えることで図2.6では右方向に電荷を転送することが可能となる。

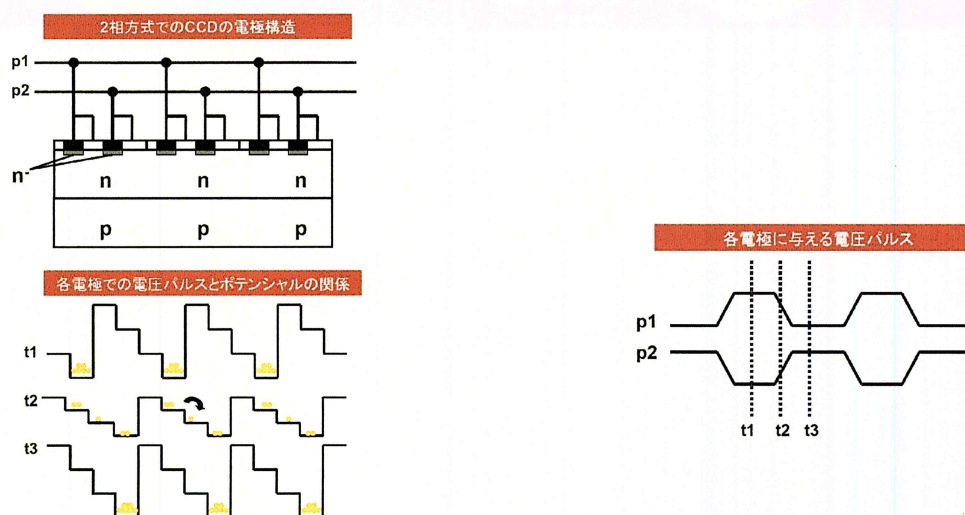


図 2.6: CCD 画素構造と電圧パルスによる 2 相方式での電荷転送



### 2.2.3 CCDの走査方式

各 CCD 画素の電荷をデジタル信号に変えて読み出すまで走査方式には Interline Transfer(IT) 方式、Frame Interline Transfer(FIT) 方式、Frame Transfer(FT) 方式、Full Frame Transfer(FFT) 方式などがある。それぞれの走査方式にはそれぞれの特徴を持っているが、この論文では FT 方式と FFT 方式について説明する。

- FT方式の走査方法

構造が簡単なため CCD の研究初期から使用されている。典型的な FT 方式は撮像領域と蓄積領域および水平 CCD と電荷検出部から成り立っている。撮像領域ではフォトダイオードによる光電変換と電荷の蓄積と電荷の転送を行う垂直 CCD で構成されている。縦方向には垂直 CCD をわける素子分離、横方向には転送電極が配置されている。撮像領域は転送電極で覆われているため、感度低下の原因の一つとなっている。蓄積領域も撮像領域と同様の構造をしているが、アルミニウム板などで遮光されている。

撮像領域の垂直 CCD では光電変換が常に行われているため、撮像領域での電荷転送を蓄積領域に転送する際に余分な光電変換による電荷が混じりやすくなる。特に入射光量が大きい場合には電荷転送の際に大きな影響を受けやすく、縦方向に白いスジを引く現象が見られる。これはスミアという現象で FT 方式の CCD では避けられないノイズの一つとなっている。

- FFT方式の走査方法

FFT 方式は FT 方式の走査方法の蓄積部分が省かれた構造を持っており、メカニカル・シャッターとの組み合わせることで、垂直 CCD の転送を停止した状態で露光し、シャッターを閉じてから垂直転送を行うことでカメラとして機能する。同一サイズの CCD では画素数を一番多く設計することができる。

図 2.7 と図 2.8 は FT 方式と FFT 方式の走査方法での電荷の転送を簡易的に説明しており、青色矢印が電荷が転送される方向を示している。

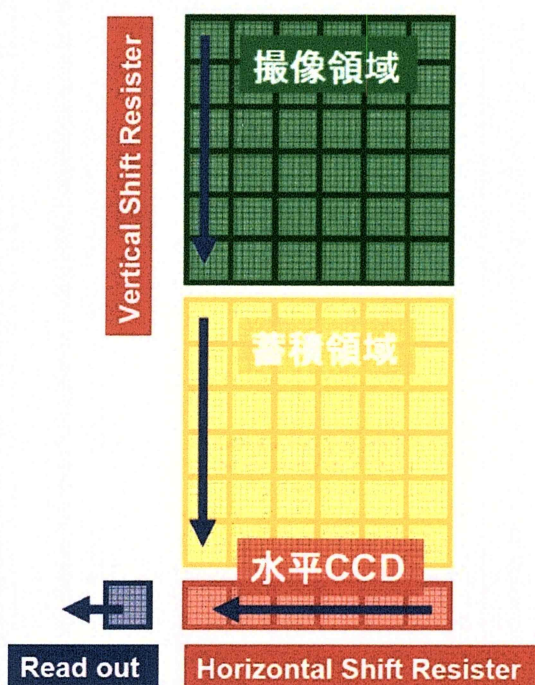


図 2.7: CCD の走査方式 : FT 方式

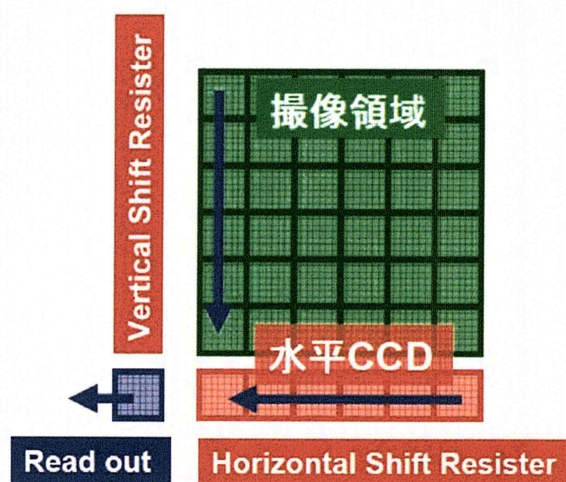


図 2.8: CCD の走査方式 : FFT 方式

## 2.3 裏面照射型 CCD

通常の CCD は CCD の転送電極のある面から入射した光がフォトダイオードで光電変換されてできた電荷を検出する事で光の検出を行っている。そのため光が転送電極部分を通過する際に光の一部が減衰してしまい、感度が低下してしまう。特に紫外光はほとんどフォトダイオードに到達することが出来ない。これに対して裏面照射型 CCD では転送電極のない裏面から光の入射を行うため、フォトダイオードに直接光が入射することが可能となる。裏面には転送電極がないので物理的に削られている。開口率も 100 パーセントに設定できるため、効率の良い光検出が可能となる。これらの利点の反面、製作工程が非常に難しいため高価になってしまう。

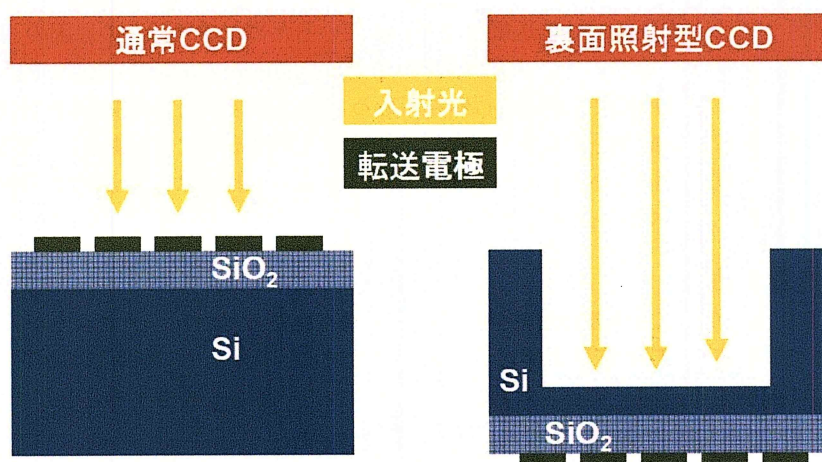


図 2.9: 通常 CCD と裏面照射型 CCD の違い



## 2.4 IIT (Image Intensifire Tube)

### 2.4.1 IIT の概要

IIT とは Image Intensifier Tube の略称で光電子増倍管と同様に微弱な光を光電子に変換し、高圧電場により増幅する装置である。しかし、光電子増倍管とは位置情報を保持できる点で異なる。そのため二次元の画像情報が得られ、微弱光に感度のあるイメージングデバイスとして使用することができる。

一般的な IIT にはインバータ型 (ピンホールカメラ)・近接型 (ベタ焼き) の二種類がある。インバータ型は入射光を光電面で光電変換して発生した電子を静電レンズで加速と軌道収束を行い、加速された電子を蛍光面に照射し光に再変換する。近接型は入射光を光電面で光電変換して発生した電子を平行電場による静電加速を行い、蛍光面に照射し光に再変換する。IIT には第一世代と第二世代が存在し、MCP を増幅時過程に含む IIT は第二世代と呼ぶ。現在では MCP を二段加えた第三世代も登場している。MCP を増幅過程に使用しているのが高ゲインを得られるが、増幅に伴う統計的な揺らぎがつかまとう。MCP と蛍光面での空間分解能の低下も避けられない。

図 2.10 において IIT の種類と世代の対応を図にまとめている。

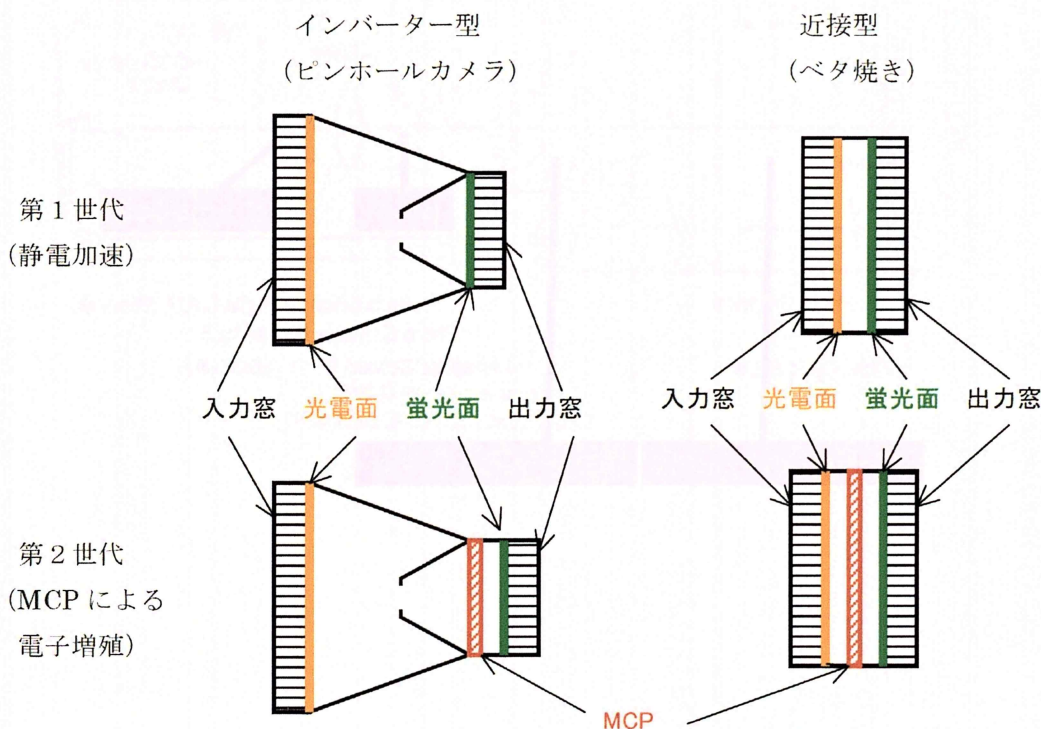


図 2.10: IIT の分類 (KEK サマーチャレンジ 07 課題番号 4 から引用)

### 2.4.2 IIT の構造

今回の実験で用いられた IIT-CCD チェーンの構造について説明する。IIT-CCD チェーンとは前段 IIT・後段 IIT・光学レンズ・CCD カメラを一連に組み合わせた光検出器のことをさしている。

第一世代と第二世代の IIT をそれぞれ前段後段に使用し、前段の出力蛍光面で保持している画像に対して、後段で高速シャッターをかけることによって宇宙線が通過した瞬間の画像だけを可視化するようにし、熱電子によるノイズをカットしている。

以下に IIT-CCD チェーンの構造について図を示す。

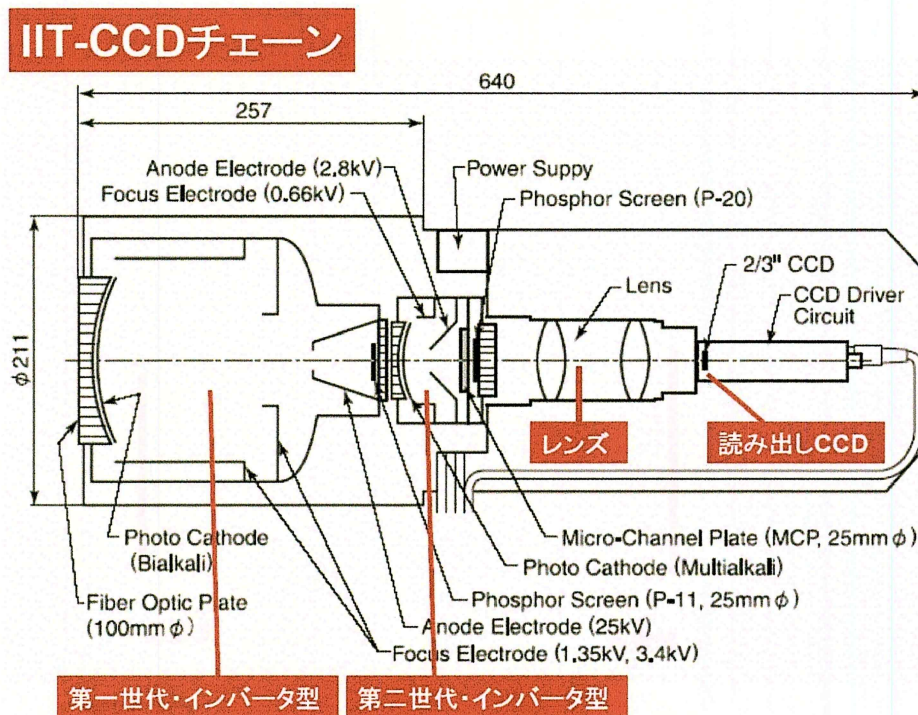


図 2.11: IIT-CCD チェーンの構造

- IIT 前段

この論文で用いた IIT-CCD チェーンでは前段は第一世代のインバータ型 IIT を装備している。入射した光は光電面で電子に変換される。変換された電子は電場による軌道収束を受け静電加速されながら IIT 後方の蛍光面に入射し、再び光に再変換され入射窓から IIT 後段に入射される。

- IIT 後段

IIT 後段は第二世代のインバータ型 IIT を装備している。入射された光は再び光電面で電子に変換され、電子は電場による軌道収束を受けながら IIT 後方の MCP で増幅される。増幅された電子は蛍光面に入射し、再び光に変換され入射窓から光学レンズを通り CCD に照射されて位置情報を保持した光のデータが読み出される。

- IIT-CCD の欠点

IIT-CCD チェーンの欠点として IIT の光検出過程で蛍光面と MCP を用いている点が上げられる。IIT-CCD チェーンでは入射した光は光電子に変換され前段 IIT・後段 IIT で蛍光面に入射され光学レンズを通して CCD に光として入射する。この過程で光電変換を二回、蛍光面での二回の蛍光過程と一回の MCP による増幅を受ける。光電変換と MCP での増幅過程での統計的な揺らぎと蛍光過程での画像の滲みやぼやけが付きまとうこととなる。



- 高速ゲート機能

IIT-CCD チェーンの特徴として高速ゲート機能がある。ゲートには MCP ゲートと静電ゲートの二種類が存在する。MCP ゲートは MCP が組み込まれた第二世代以降の IIT に対して MCP の電源を ON/OFF することで IIT より下流に光を入射させないという手法をとっている。今回用いた IIT-CCD チェーンでのゲートとは MCP ゲートのことを表している。静電ゲートとは初段の IIT に対して光の入射などに対応させて静電加速部分の電場の向きを変えることで電子の加速する向きをコントロールしてゲートとして機能させている。ゲートをかける時間幅は蛍光面による残光の制限を受けるため今回の IIT-CCD チェーンでは 100  $\mu$  sec 程度でかけられる。

この論文では IIT-CCD チェーンのことを IIT と表記している。

### 2.4.3 IIT の使用例

IIT の高エネルギー実験での実績として、IIT とシンチレーティングファイバーを組み合わせた SciFi 検出器が上げられる。SciFi 検出器とは K2K 実験の前置検出器として用いられ、ニュートリノ反応事象により発生した粒子の飛跡を検出する。SciFi とは Scintillating Fiber の略称。Scintillating Fiber を並べてシート状にしたものを Scintillating fiber sheet といい、何層にも重ねられた Scintillating fiber sheet を IIT で撮影することで荷電粒子の飛跡を検出することが可能となる。

SciFi 検出器では 11000 本の Scintillating fiber を IIT 一台で読み出すことが可能である。このように IIT が他の光検出器と比較して優位な点は一台で多チャンネルの読み出しが可能にある。特に高エネルギー実験のような大型検出器を必要とする実験では、このような利点を持ったデバイスを使用することで読み出しデバイスの数が少なくできる分スペースが大幅に省略できるという大きな利点も生まれる。さらに K2K 実験で示されたように微弱光から大光量に感度をもち (10 から 100 光電子)、長期間の実験 (1999 から 2005 年) にも耐える長期安定性も確認されている点も大きな利点だといえる。

この修士論文のテーマで IIT に変わる次世代イメージングデバイスとして期待されている大口径 EBCCD はこれらの IIT の利点を引き継いだ上で、IIT の構造上の欠点である解像度・光量測定の分解能の向上が目標とされている。

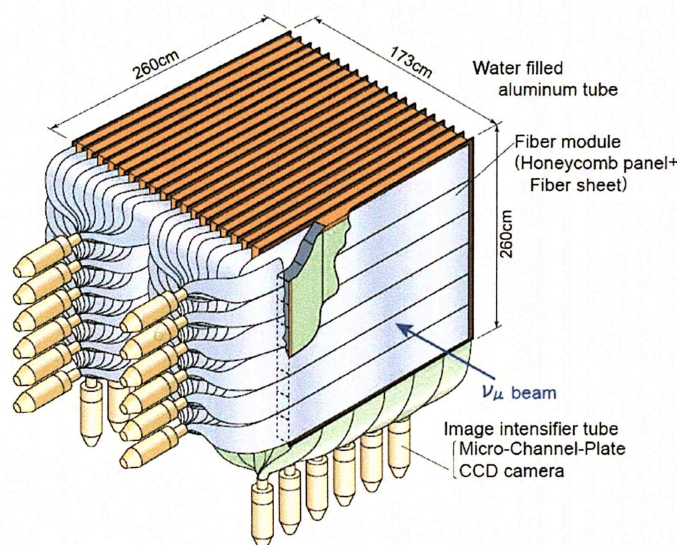


図 2.12: SciFi 検出器

IIT の使用例として Scintillating fiber と IIT を組み合わせて宇宙線検出の一例を以下に示す。Scintillating fiber sheet を何枚も重ねてブロックにしたものを IIT で撮影する。これは KEK (高エネルギー加速器研究機構) で行われたサマーチャレンジ 07 での課題「地球に降りそそぐ宇宙線を視る！」の実験内容を引用する。

詳細は KEK サマーチャレンジ 07 (課題番号 4) に載っている。シンチレーティングファイバーシートを重ねてブロック状にしたものの端面を IIT で観測している。ブロックを宇宙線が通過した例を図 2.13 に示す。

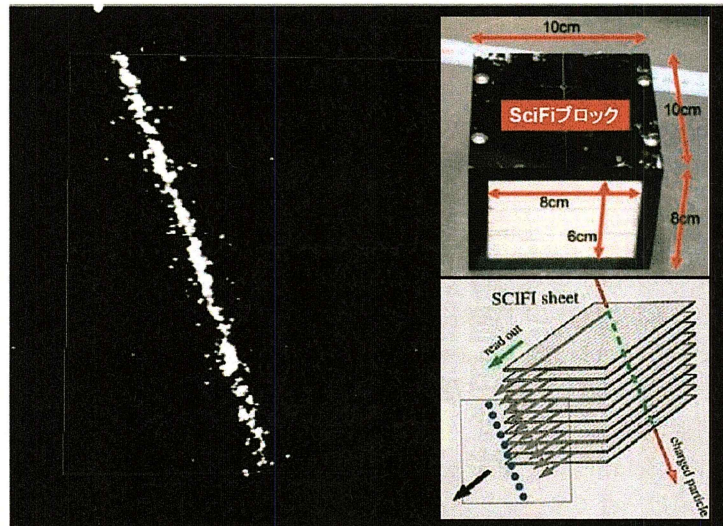


図 2.13: SciFi ブロックと IIT で宇宙線観測



## 2.5 EBCCD (Electron Bombardment Charge Coupled Device)

### 2.5.1 EBCCDの概要

EBCCDとはElectron Bombardment Charge Coupled Deviceの略称。EBCCDは光電面に入射した光子を電子に変換し、印加電圧で電子を加速し裏面照射型CCDに直接入射させることでCCD画素上の転送電極によるエネルギー損失を受けず、入射時の電子のエネルギーがすべて正孔・電子対の生成に使われる。増幅された電荷はCCDによって読み出される。電子に対する有感部はCCDの画素（ピクセル）にあるため、画素は非常に小さく且つ多数に出来ることから、多チャンネルファイバー読み出しに適している。IITのようにMCPを用いた増幅過程ではないため非常にシンプルな原理・構造でしかも増倍による統計的な揺らぎによるS/Nの劣化が原理上なく、次世代の光検出器として期待されている。

EBCCDにはIITと同様に近接型EBCCD（ベタ焼き型）とインバータ型EBCCD（ピンホール型）が存在する。今回の論文の研究対象である大口径EBCCDはインバータ型EBCCDでピンホールカメラ構造により光電面の大口径化を実現した。従来のEBCCDの光電面と比較して大口径EBCCDは2倍以上の直径10cmの光電面を有している。

### 2.5.2 EBCCDの構造

EBCCDでは電子の増幅過程がCCD上での正孔・電子対生成のみなので、増幅の揺らぎが一度しか発生しないため統計的なふらつきが小さい。そのため各光電子の分布のピークが顕著に観測できると期待されている。光電変換された電子は電場によって加速され直接CCDに入射して増幅された電子をCCDで直接読み出すため、画像の滲みが少ない。つまりイメージングの際の解像度も良い。また構造上CCDの開口率は100%に設定できる。非常に解像度の高い撮像デバイスが製作可能である。

近接型EBCCDは光電面とCCDまでの距離が短いため光電面の大きさはCCDのサイズによる制限を受けるが、インバータ型EBCCDでは光電面とCCDの間は静電レンズで電子の収束を行うためCCDのサイズによる光電面の大きさが制限を受けにくいので大口径化が実現した。近接型に比べてインバータ型は構造上高電圧を与えやすくなっており、ゲインも稼ぎやすくなっている。

以下に従来のEBCCDの構造（近接型）と大口径EBCCDの構造（インバータ型）を以下に示す。

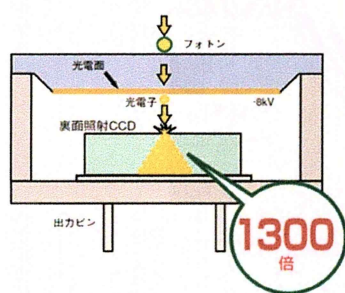


図 2.14: 近接型 EBCCD の構造

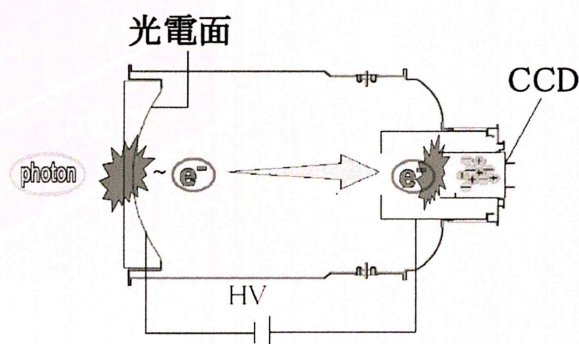


図 2.15: インバータ型 EBCCD の構造

## 第3章 大口径EBCCD

### 3.1 大口径EBCCDの概要

大口径EBCCDとは静電型電子レンズとCCDを組み合わせたインバータ型（ピンホールカメラ型）EBCCDのことをさしている。大口径EBCCDでは光電面の有効面積を従来のEBCCDから格段に大きくしたことにより、従来のIITの代替機として期待される。従来のIITと同様に多チャンネルの光情報を一台で取得できる有利な点を保持しつつ、光量測定の精度と時間分解能の向上を目指して大口径EBCCDの開発と性能評価を行う。

従来のIITは蛍光面やMCPを利用しているため時間・空間分解能や光量測定に制限が生じている。時間分解能は蛍光体の残光時間で制限され、光量測定の精度は蛍光体やMCPの光の変換・増幅過程の飽和や統計的なゆらぎにより制限がかけられる。それと対照的に大口径EBCCDでは入射光に対して光電面での光・電子の変換の際の不定性しか生じないためにIITより高解像度・光量の線形性に優れていることが期待される。

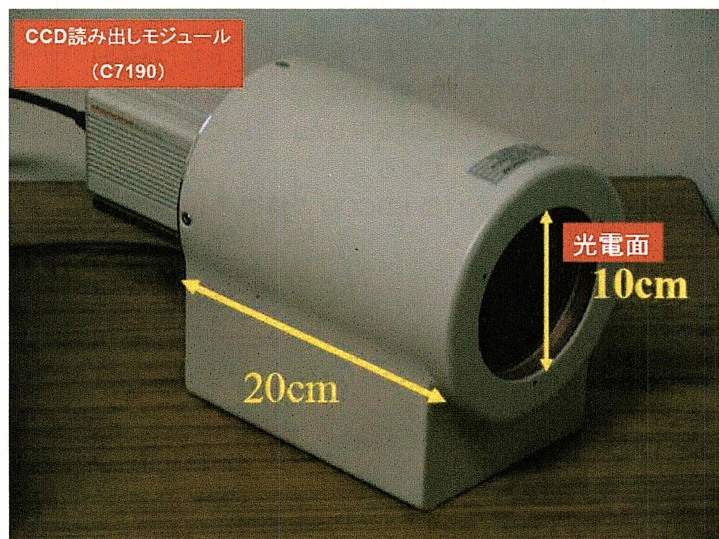


図 3.1: 大口径EBCCDの写真



### 3.2 大口径 EBCCD の構造

今回使用した大口径 EBCCD は光電子加速部分に静電型電子レンズとしての役割も持っており、光電面の広範囲を使用することが可能となる。光電面で発生した光電子は CCD 前部に設置されたアノードに向かって加速し、一度クロスオーバーした後に CCD に入射して CCD 上に像を結ぶ。読み出しは CCD 読み出しモジュール C7190 (浜松ホトニクス製) で行う。読み出された画像データの加工と記録は Hipic (浜松ホトニクス製) で行い、解析は ROOT を用いて行う。

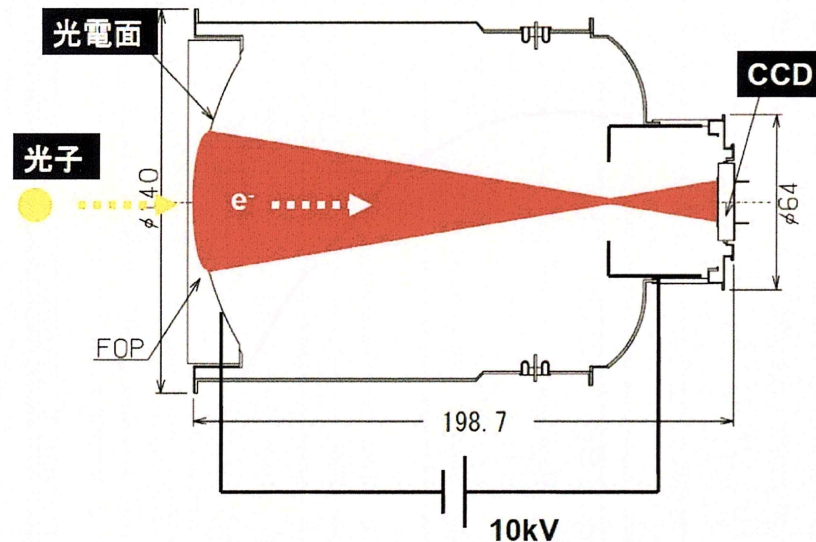


図 3.2: 大口径 EBCCD の構造

### 3.3 大口径 EBCCD の一般仕様

以下に大口径 EBCCD の一般仕様について一覧で示す。これは浜松ホトニクスからの仕様書を参考にしている。

光電面波長感度	350nm-650nm
光電面材質	バイアルカリ
光電面有効面積	46mm × 36mm
入射窓材質	Fiber Optic Plate(FOP)
縮小率	1/5
CCD 素子の読み出し方法	FT-CCD (Frame Transfer 型)
CCD 素子の有感面積	6.7mm(縦) × 9.0mm(横)
CCD 素子の画素数	480(縦) × 640(横) ピクセル
CCD 素子の画素サイズ	14 μ m × 14 μ m
光電面への印加電圧 (最大)	-12kV

表 3.1: 大口径 EBCCD の一般仕様

### 3.4 大口径 EBCCD の一般特性

#### 3.4.1 分光感度特性

大口径 EBCCD の分光感度特性を図 3.3 に示す（浜松ホトニクス仕様書を参考）。ここでの分光感度特性は光電面での量子効率と入射光の波長の関係を示している。分光感度は光電面の材質に起因する。光電面に使われている材質はバイアルカリなので分光感度は可視光領域で最大値をとる（350nm-650nm）。

波長 420nm に対して 15 % の量子効率を得ている。

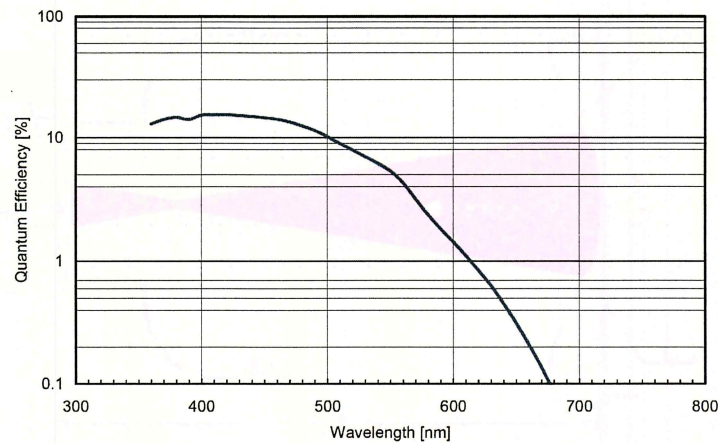


図 3.3: 大口径 EBCCD の分光感度特性

#### 3.4.2 ゲイン特性

大口径 EBCCD のゲイン特性を図 3.4 に示す（浜松ホトニクス仕様書を参考）。浜松ホトニクスでの高電圧への耐電圧試験として-12kV までの耐電圧を確認している。-12kV の時に 2400 倍のゲインが確認されている。

今回の論文では光電面には-10kV の電圧を与える（約 2000 倍のゲイン）。

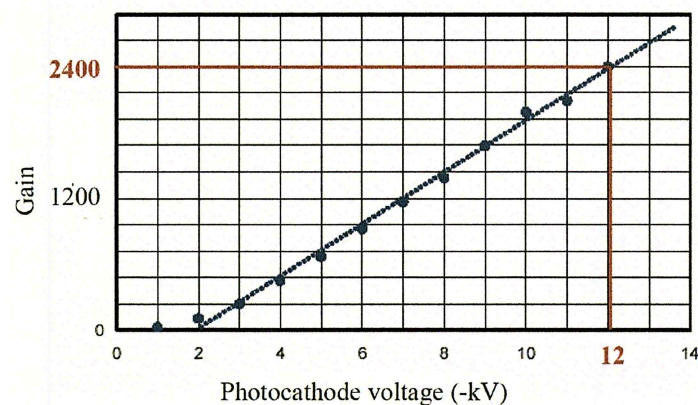


図 3.4: 大口径 EBCCD のゲイン特性



### 3.4.3 大口径 EBCCD の解像度

大口径 EBCCD の解像度を以下に示す（浜松ホトニクス仕様書を参考）。浜松ホトニクスで行われた解像度評価では EIAJ 解像度チャートが用いられた。EIAJ 解像度チャートとは（株）電子情報技術産業協会が画像評価を定量的に表すために導入したテストチャート。（この論文では第四章にて独自に解像度を定義し、大口径 EBCCD の解像度の評価を行っている。）

浜松ホトニクスでは EIAJ 解像度チャートを用いた評価で光電面中央付近の解像度評価と微弱光を用いた評価も行っている。

結果として CCD 上で光電面中央付近で解像度は CCD 上で 400 TV 本（291 p/mm、半値幅に換算して約 3.4 μm 相当）。電子光学系の縮小率が 1/5 のため、光電面上での解像度は 5.81 p/mm（目標仕様 6.1 p/mm、Typ）に相当する。

図 3.8 の微弱光での撮影画像ではシングルフォトンレベルの光を検出しているとはいえない結果となっている。

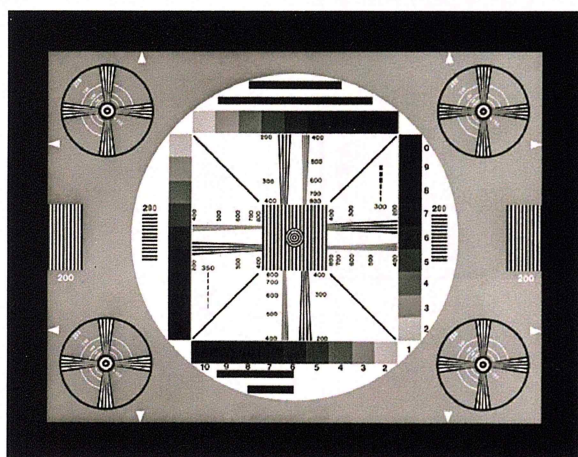


図 3.5: EIAJ 解像度チャート

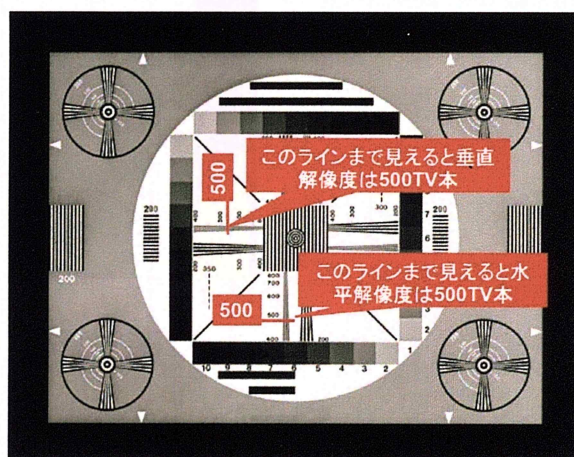


図 3.6: EIAJ 解像度チャート（読み取り方法）

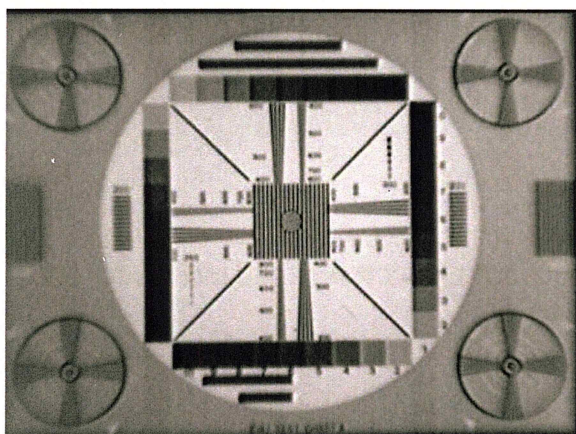


図 3.7: EIAJ 解像度チャートの撮影画像 (12kV)



図 3.8: 微弱光での EIAJ 解像度チャートの撮影画像 (12kV)



## 3.5 画像の滲み

### 3.5.1 CCDのチャージ漏れ

CCD素子のチャージ漏れとはCCD素子のピクセル間でショートが起こり、電荷が周りのピクセルに漏れ出している状況を示している。図3.9にその実例を挙げる。図3.9は光の入射していない状態で100frame分の積分画像を示している(1frame=32msec)。

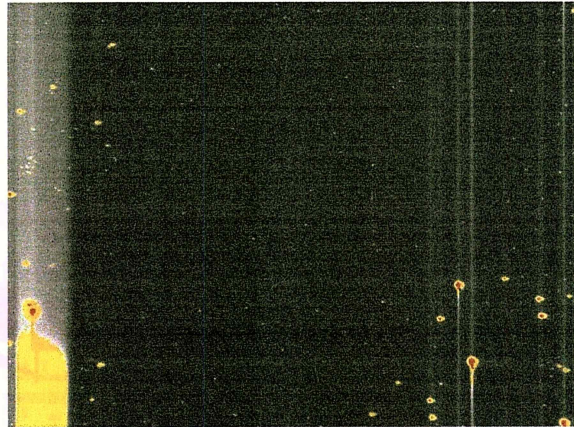


図 3.9: CCD 素子のチャージ漏れ

黄色い部分と赤い部分がチャージ漏れを起こしている部分で、赤色の方は1ピクセルあたりに転送できる電荷の最大値をオーバーしてサチレーションを起こしているピクセルを示している。読み出し時や解析時にベースラインの引き算を行うことができるが、フレーム数が重なると黄色い部分もサチレーションを起こし、チャージ漏れの部位は検出器としての感度を失うことになる。

開発時には見られなかった症状なので今後は原因究明と対策を講じる必要がある。原因の一つとして高電圧の印加による放電の影響が考えられる。開発から一年ほどで症状が現れているので、現在のままでは長期間の実験には向かない。

## 3.6 放電

大口径 EBCCD は光電面で発生した光電子を加速させる際に印加電圧で光電子にエネルギーを与える。この印加電圧が 10 k V と高電圧なため、光電面のガラスに接触する治具を用いて実験する際には放電対策が必要となる。以下放電の具体的な例と放電対策について示す。

### 放電の具体的な例

- 全体的な放電  
治具の絶縁（特に治具の内枠）が上手くいかずに放電してしまう。全体的な放電の場合は突発的な放電が多い。
- 局所的な放電  
Fiber 治具の接地が上手く行かない、凹凸部分がある等の原因により起こる。局所的な放電は継続的に放電が続く。

全体・局所的な放電の具体例として図 3.10 に実際の放電の際の CCD からの出力画像を示す。局所的な放電はファイバーの接地点や治具の角や端で起こりやすい。全体的な放電は画面上いっばいに黄色の斑点が飛び散るような症状が出る。

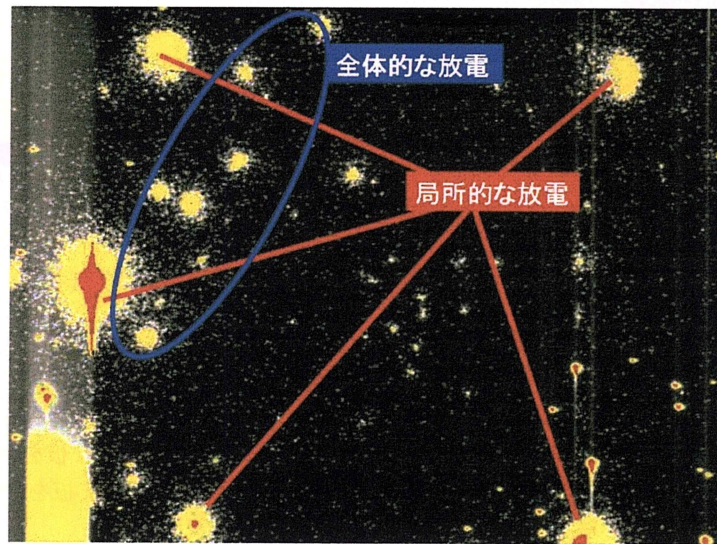


図 3.10: 放電の具体的な例

### 放電対策

- 大口径 EBCCD と治具の絶縁

光電面のガラスに接触するファイバー治具を用いて実験する場合にそれを支える治具と大口径 EBCCD を絶縁する。絶縁には絶縁テープとテフロン板の二種類で対策を行った。以下の図 3.11 の赤いテープが絶縁テープ。図 3.12 の白い部分がテフロン板。絶縁テープの貼ってあるほうが光電面側となる。



図 3.11: 絶縁テープ

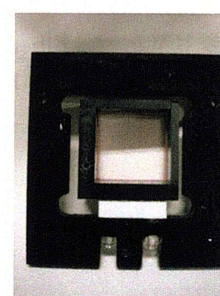


図 3.12: テフロン板





図 3.13: 銅線の接地



図 3.14: ファイバー治具 (光電面と接地する面)

- 光電面のガラスとファイバー治具の接地

光電面のガラスに接触するファイバー治具を用いて実験する場合にそれを支える治具 (図 3.11 と 3.12) の場合と異なりファイバー治具を大口径 EBCCD の光電面のガラス部分と接地する。これにより光電面のガラスに直接接触するファイバー治具とを等電位に揃える。接地には銅線とアルミ板を用いた。銅線はガラス面と内枠を接地し (内枠のガラス面側は絶縁テープで絶縁されている)、アルミ板を用いて Fiber 治具の固定と内枠と接地を行う。



図 3.15: 銅線と内枠の接地点

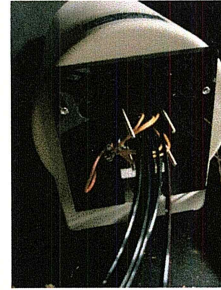


図 3.16: ファイバー治具固定後の全体図

- 局所的な放電対策

局所的な放電対策として Fiber 治具のガラスと接地する面の研磨を行う。研磨は紙やすりで研磨したのち、水やすりで仕上げた。この際 Fiber 治具の角もしっかり落とした。Fiber とそのカバーもしっかり接地するためにボンドで接着した。

## 第4章 大口径EBCCDの性能評価

この論文で評価する大口径 EBCCD は試作器段階のために高速ゲート機能が付加されていない。そのため評価の対象を画像の特性と光量測定に絞って行った。時間分解能は frame 単位 (32msec 単位) でしかデータが取得できない以上は評価の対象とすることができない。大口径 EBCCD の性能評価としてベースライン特性・空間分解能・画像特性・入射光量に対する出力の線形性の4つの項目について評価する。

### 4.1 ベースラインの特性

大口径 EBCCD の性能評価としてベースラインの特性を調べる。ここで表記したベースラインとは光の入射がない状態での大口径 EBCCD からの出力のことを示している。このベースラインの特性を評価することで、大口径 EBCCD の必要な動作環境を理解するとともに、これ以降の大口径 EBCCD の実験の基本的な性能として理解することを目的としている。

実験時には HV の上げ下げと暗箱の開け閉めなど温度環境の急激な変化等が考えられるためにこの不確定要素が大口径 EBCCD の性能評価に与える影響を最小限に抑えたいという目的もこの実験は持つ。HV とは High Voltage の略で大口径 EBCCD の電源のことを示している。

#### 4.1.1 セットアップ

暗室内に設置した大口径 EBCCD に温度センサー (エスペックミック RT-12) を4箇所につける。CH 1 は CCD 読み出しモジュールの前面部 (CCD 画素に一番近い場所)、CH2 は CCD 読み出しモジュールの背面部分、CH3 は暗室の設置されている実験室の室温をモニター、CH4 は暗室内部に設置した。

温度センサーの設置位置と CCD 読み出しモジュールの位置関係は図 4.1 に示す。

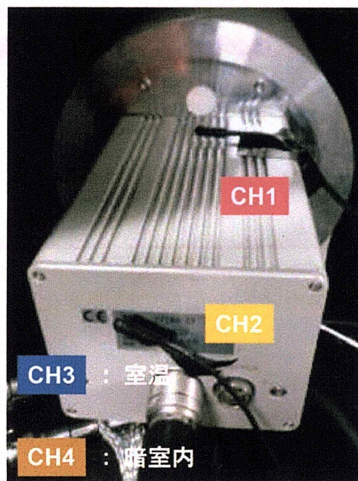


図 4.1: 温度計の設置箇所



## 4.1.2 実験1

実験は暗箱内に設置された大口径 EBCCD の HV を上げた後からのベースラインの時間変動をモニターした。HV をあげる前は大口径 EBCCD は暗箱内で安静状態で保管されていた。大口径 EBCCD の HV は 10kV とする。ベースラインの変動データとして HV を上げた直後から 5 分後ごとに 100frame(1frame=32msec) の画像データを足し上げたものを取得する。温度のデータは HV を上げた直後から 15 秒ごとに取得した。これらのデータは約 40 時間分取得した。

大口径 EBCCD からの出力は Hipic (浜松ホトニクス製) によって処理された画像データを用いる。画像データはピクセルの位置とそのピクセルでの電荷量の情報を持っている。この時の電荷量はデジタル処理されて数値化されているため単位は任意。ピクセルでの電荷量は入射光量に比例するため、電荷量のデジタル化された数値をそのまま解析に用いる。この数値を以下 ADC カウントとする。

大口径 EBCCD から出力されたベースラインのデータは解析用ツール ROOT を用いて解析した。480 × 640 ピクセルある CCD の中心付近の点から上下左右 15 ピクセルの合計 31 × 31=961 ピクセルの ADC カウントの総和の時間変化を見る。(961 ピクセル分の総和で評価するのは後の線形性評価実験の解析方法に対応させるため)

ベースラインの時間変動は横軸を HV を上げてからの時間、縦軸は 1frame961 ピクセルあたりの ADC の総和をグラフにプロットする。温度変動は横軸を HV を上げてからの時間、縦軸は各チャンネルの温度をグラフにプロットする。グラフにはベースラインの時間変動と温度変動を一緒にプロットした。それぞれスケールが違うので、左縦軸に ADC の総和を右縦軸に温度を表記している。

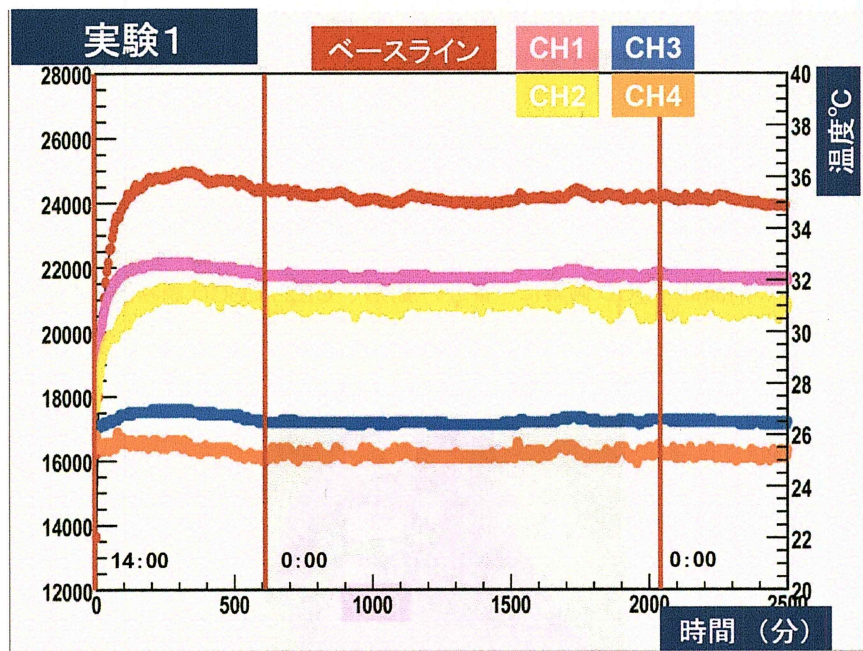


図 4.2: ベースラインと温度の時間変化 (実験 1)

グラフから最初の 10 時間ほどはベースラインの変動はすべての CH に対応して変動しているように見える。これから CCD の読み出しモジュールからの発熱が安定するまではベースラインが安定しないことが読み取れる。測定開始 5 時間から 10 時間の時間帯に温度の落ち込みに対応してベースラインが落ち込んでいる。これは実験室から人がいなくなったため室温が下がり、連動して暗箱内の温度と CCD 周りの温度が下がったことによるベースラインの変動だと考えられる。この変動以降は土、日曜で測定を行っているので人の出入りがほぼなかったのでベースラインは安定しているようだが、細かく見ていくと暗箱内の温度 (CH3) の上下に対応してベースラインも上下していることが読み取れる。暗箱内の温度は室温の温度変化に対応して少しの時間差で変動を起こしている。室温はエアコンで一応一定に保っているが、時間帯から外気温の影響を受けている可能性が大いにある。

以上からベースラインの特性と温度との関係が少なからずあるように考えられる。特に大口径 EBCCD の読み



出しモジュール自身の温度が安定するまではベースラインは安定しないという結果が得られた。室温の変動に対してもベースラインの変動はあるようだが、短時間での急激な変動ではないようなので今回は問題とはしない。

実験1の結果として大口径 EBCCD の安静状態から安定動作に移るまでには10時間程度必要であることがわかった。安定動作後の大口径 EBCCD のベースライン変動は10%以内で推移しており、且つ短時間での急激な変化は見られないため、測定に大きな影響を及ぼすことは少ないと考えられる。室温変化によるベースラインの変動の影響も確認されるが、温度環境を整えれば大きな影響にならないと考えられる。

### 4.1.3 実験2

次に実験2として実験1の長時間の安定動作後にHVを下げた後、暗箱を3分間開放して実験1と同様にHVを再度上げてベースラインをモニターした。これは実際の実験の際に大口径 EBCCD のHVの上げ下げとそれに伴って暗箱を開放しての作業を行うため、この条件でのベースラインの変動をモニターし特性を理解することを目的として行った。3分という時間は実際の暗箱を開けての作業時間を意識した。

ベースラインの変動データとしてHVを上げた直後から15分後ごとに100frame(1frame=32msec)の画像データを足し上げたものを取得する。温度のデータはHVを上げた直後から30秒ごとに取得した。これらのデータは約100時間分取得した。大口径 EBCCD のHVは10kVとする。

ベースラインの評価方法は実験1と同じように961ピクセルあたりのADCカウンットの総和の時間変動を評価する。

ベースラインの時間変動は横軸をHVを上げてからの時間、縦軸は1frame961ピクセルあたりのADCの総和をグラフにプロットする。温度変動は横軸をHVを上げてからの時間、縦軸は各チャンネルの温度をグラフにプロットする。実験1と同様にベースラインと温度の関係を一緒にプロットしている。

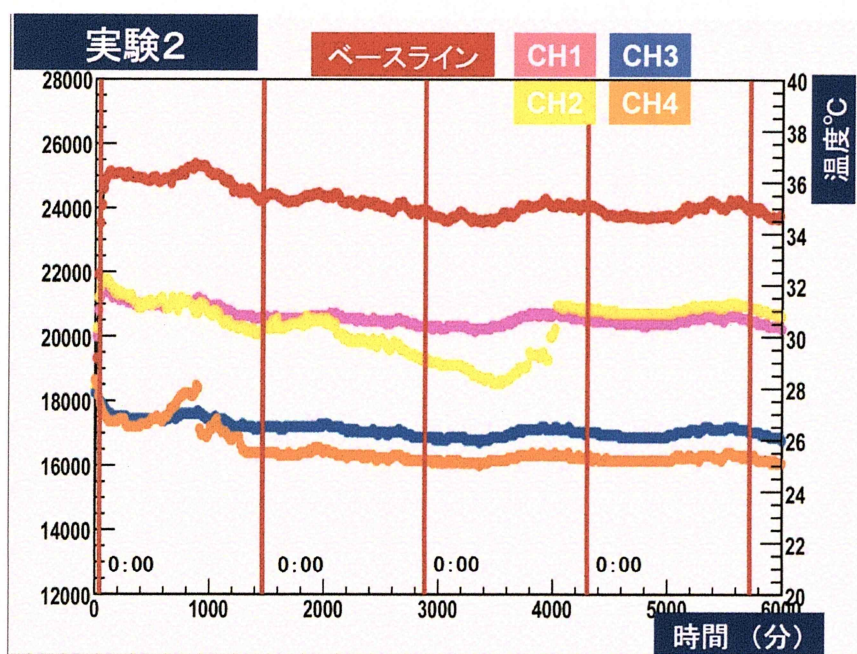


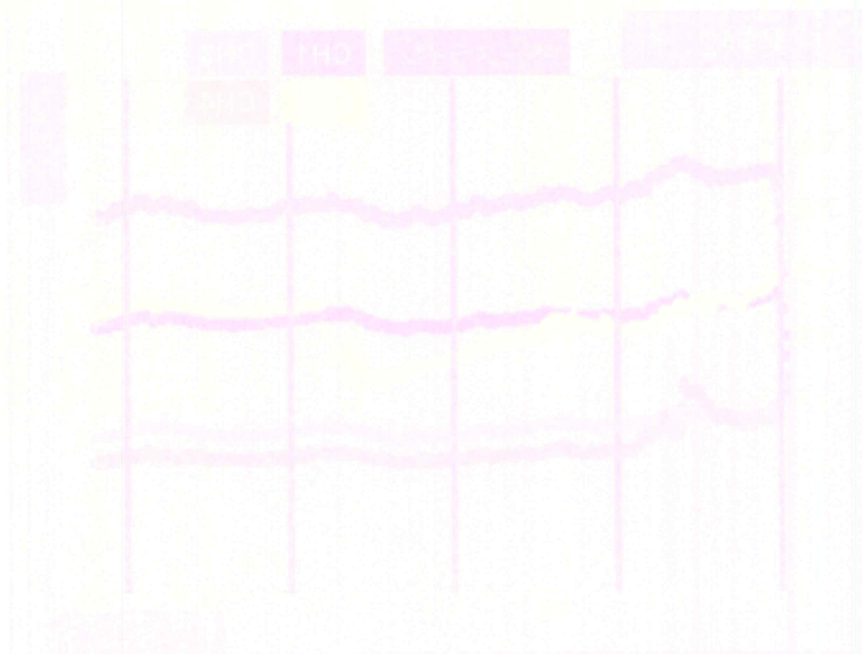
図 4.3: ベースラインと温度の時間変化 (実験2)

グラフから最初の100分ほどはベースラインの変動はCH1、CH2に対応して変動しているように見えるが、同時にCH3、CH4も変動している。これ以降はベースラインは安定しているようだが、温度モニターのほうは大きな変動点がいくつか確認される。まずCH4で測定開始14時間後くらいに大幅な温度上昇が見られる。昼の時間帯なので実験を行っていたための温度上昇が考えられるが、室温に大きな変動が見られないため、理由があまり

わかっていない。次に CH2 の大幅な温度変化を起こしている時間のベースラインには大きな変動は見られない。CH2 では2から3℃の局所的な上昇が見られる。CH1 は大きな温度変動が見られないことから、ベースラインの変動に大きく寄与するのは CH1 まわり、つまり大口径 EBCCD の読み出し CCD 付近となる。これからベースラインは読み出し CCD の画素での熱電子に起因しているとも言える。CH3 から暗室内の温度は小さな変動を繰り返しながらもほぼ1度以内の変動しかしていない。

ベースラインの変動は初めの数時間は自身の温度に起因するするところが大きいですが、一度安定すると暗室内や室温などの周りの温度環境によるところが大きくなることがわかった。

実験2の結果として大口径 EBCCD の電源の上げ下げと3分間の暗箱を開放しての作業をする場合は安定動作まで100分かかることがわかった。安定動作後の大口径 EBCCD のベースラインは10%以内で推移しており、且つ短時間での急激な変化は見られないため、測定に大きな影響を及ぼすことは少ないと考えられる。大口径 EBCCD の実験環境として実験内容に応じて恒温槽等を使う必要があると思われる。





## 4.2 大口径 EBCCD の空間分解能

空間分解能の評価として、大口径 EBCCD の解像度を評価する。この実験での解像度とはどれくらい細かいパターン（縦縞）まで識別できるかを示す。よく使われている一例として EIAJ 解像度チャートがある。このチャートを用いた解像度測定は浜松ホトニクスで行われているため、今回の実験では白と黒の縦縞が交互に並んだ縦縞チャートを用いて独自に解像度を定義し、評価することとする。

チャートの線幅が狭まってくると光を照射した際にチャートによって遮光されている部分とそうでない部分が CCD から山と谷のようになって出力される。線幅が狭くなるにつれて山と谷が次第につぶれていき、最後には区別がつかなくなってしまう。この山と谷の区別がつかなくなる線幅は絶対解像度と呼ばれ、イメージングデバイスの解像度を表す一つの指標となっている。山と谷のつぶれの説明として簡単な概念図を図 4.5 に示す。一般的に解像度を評価する際には楔や縞チャートを用いて人間の目で区別できるかどうか判断している。この方法では判断の際に個体差が伴うため、独自に定義した解像度を用いて評価することとした。この実験では大口径 EBCCD の絶対解像度を評価することと、独自に定義した解像度を持ちいて IIT との性能比較することを最終目的としている。

実験で用いた縦縞チャートを図 4.4 に示す。

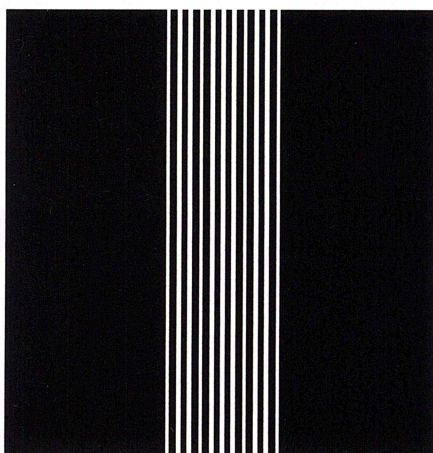


図 4.4: 縦縞チャート (0.8mm 間隔)

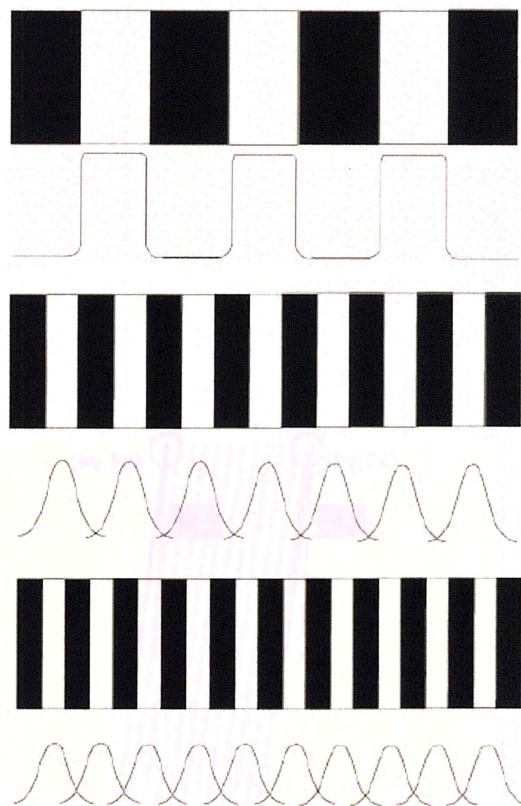


図 4.5: 山と谷のつぶれ

### 4.2.1 実験内容 (セットアップと実験手順)

線間隔の異なる縦縞チャートを用意し、大口径 EBCCD の光電面中心付近に貼り付け、青色 LED で照射した。データは 100frame を重ね合わせたものを使う。縦縞チャートの線間隔は 2mm、1mm、0.8mm、0.6mm、0.5mm、0.4mm、0.3mm、0.25mm、0.2mm 間隔のものを用意した。チャートは OHP シートにレーザープリンターで印刷した。プリンターの精度により 0.15mm 以下のチャートは潰れてしまい作成できなかった。縦縞チャートを用いた実験では水平解像度しか見ていない。水平解像度とはディスプレイ上で水平方向に白と黒の縦縞を交互に敷き詰めて白黒の垂直の線が何本まで見分けられるかというもの。つまり、どの程度細かな線が判別できるかということを表している。垂直解像度は垂直方向に横縞を敷き詰めて同様に評価することで得られる。

実験手順としては大口径 EBCCD の電源を 10 k V に設定し暗箱内で 10 時間安定動作させた後に、大口径 EBCCD の電源を落とし、暗箱を開けてガラス面にチャートを貼り付ける。暗箱を閉めて電源を 10 k V に設定し、100 分間安定動作させる。その後青色 LED をガラス全面に照射する。データ取得用プログラム Hipic (浜松ホトニクス製) を使って 100frame 重ねた画像データを取得する。上記の操作をすべての縦縞チャート (2mm、1mm、0.8mm、0.6mm、0.5mm、0.4mm、0.3mm、0.25mm、0.2mm) について行い、解析に移る。

### 4.2.2 解析

- チャートの回転補正

チャートは固定する治具を使わずにテープで貼りつける。そのため少なからずチャートが回転してしまうので解析時にデータに回転補正をする。補正には角の 4 点の座標から回転角 ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ) を求め、それらの角度の平均を回転角としてデータに反映させる。角の座標は画像処理ソフト Hipic 上でカーソルを角に合わせた際の座標を用いた。この作業を経たものを解像度解析に用いる。

図 4.6 で回転角を求めるための端の 4 点の座標関係と回転角の関係を示している。

図 4.7 の上の図は回転前の縦縞、下の図が回転後の縦縞。

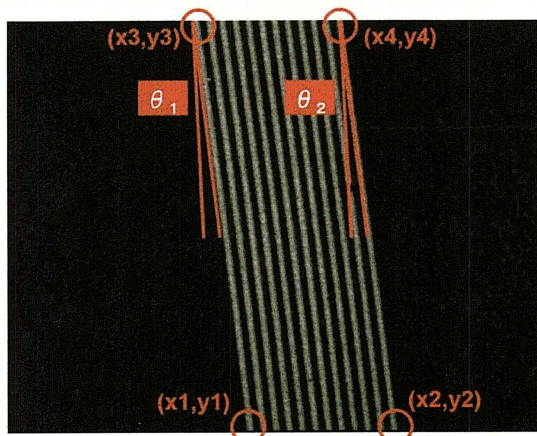


図 4.6: 縦縞チャートの撮影図

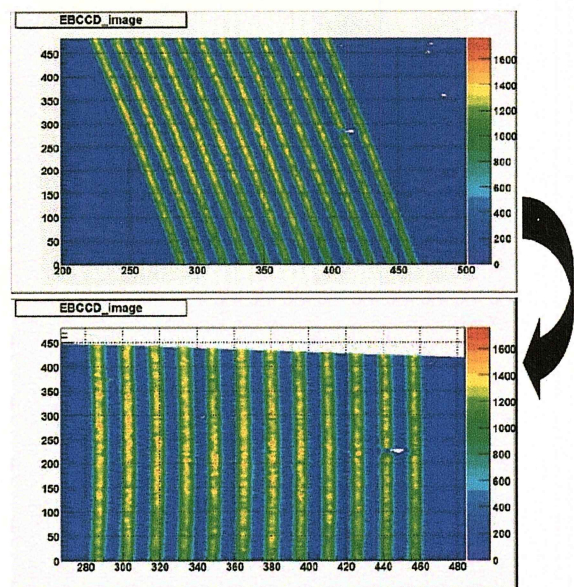


図 4.7: 解析時の回転前後図



● 縦方向への足し上げ

縦縞チャートを照射して得られたデータを縦方向に足し上げることで 100frame の積分画像では得られない統計をカバーする。縦縞チャートのデータを解析する際に以下に示す 3 次元図のような座標を図 4.8 に記しているような (X,Y,Z) 座標として定義する。各 X 座標において  $100 < y < 350$  の範囲で Y 軸方向に足し上げを行う。Z 方向は CCD カメラからの出力値 (ADC カウント) を表しており、値が大きいほど入射光量が多い。

図 4.10 は図 4.9 の赤線区間で足し上げを行いプロットしたもので、縦軸が大口径 EBCCD からの出力 ADC の総和、横軸は X 座標を表している。

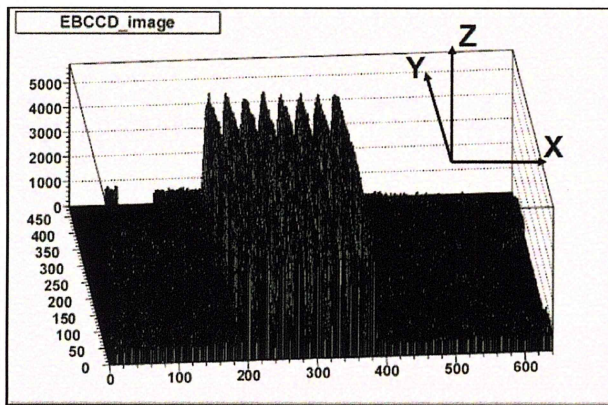


図 4.8: 1mm 間隔縦縞チャートの解析図 (3D)

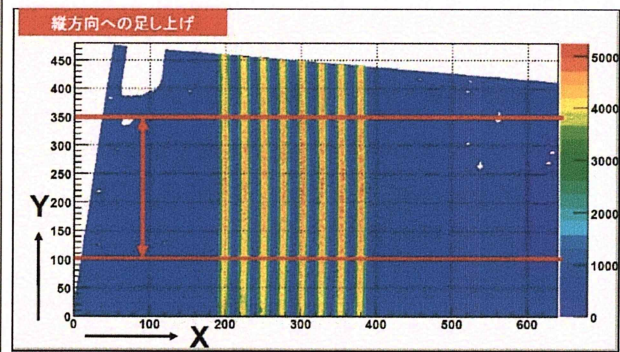


図 4.9: 1mm 間隔縦縞チャートの解析図 (2D)

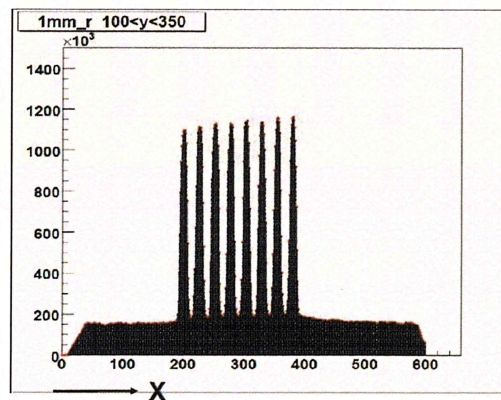


図 4.10: 1 間隔縦縞チャートの足し上げ図 (1 D)

- 解析手順

1. 解析用にデータ処理を行う（回転補正、縦方向への足し上げ）
2. 縦方向へ足し上げたデータから山の最大値と最小値のそれぞれの平均を出す。この平均値からの山・谷の最大最小値のふらつき  $1\sigma$  を誤差としてこれ以降扱う。（図 4.11 での赤線が山を表しており、この山の最大値の平均を求める。青線が谷を表しており、谷の最小値の平均を求める。）
3. **山の最大値の平均値** - **谷の最小値の平均** を計算し、この振幅の絶対値を求める。誤差については上記の誤差を伝播させたものを振幅の誤差としている。
4. 2mm、1mm、0.8mm、0.6mm、0.5mm、0.4mm、0.3mm、0.25mm、0.2mm で同様に解析行う。
5. 2mm 間隔チャートの振幅を 1 と置いて他の線間隔のチャートでの振幅の相対値を求める。
6. グラフにプロットする際に縦軸を振幅の相対値、横軸を lp/mm（line pair / mm）でプロットする。line pair/mm とは 1 mm の間に白黒の線のペアがいくつ入るかを示しており、2 mm の線間隔なら 0.25line pair/mm となる。

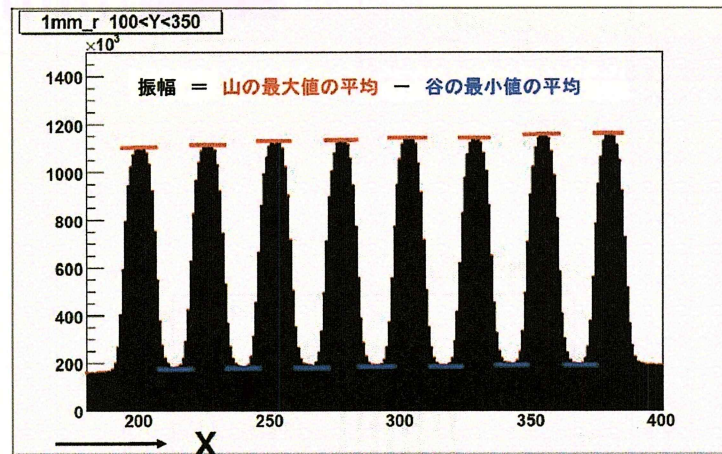


図 4.11: 1 間隔縦縞チャートの解析図（振幅計算）



## 4.2.3 評価

- 縦縞チャートの各線幅での CCD 画像からの出力画像についての評価を行う。図 4.12 に各線幅とそれに対応した (line pair/mm) を書いてある。図中の濃い黒色はチャートを貼り付ける際に使用した黒テープだとと思われる。

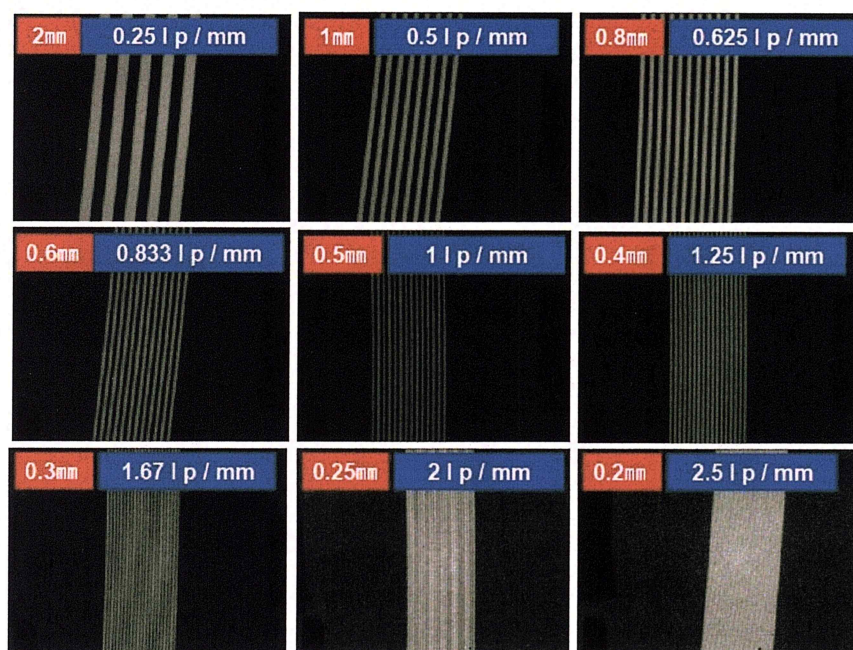


図 4.12: 各線間隔の CCD 画像

図 4.12 のすべての線幅で白黒のラインがはっきり区別することができた。今回の実験では大口径 EBCCD の絶対解像度を見積もることはできなかったが、0.2mm 線幅 (2.5 line pair/mm) のチャート図まで白黒のラインを区別することができた。つまり大口径 EBCCD は光電面上で 2.5 line pair/mm 以上の解像力を有するイメージングデバイスだと言える。(0.2mm より狭い線幅の縦縞チャートは大学で使用しているプリンターの精度の関係で作ることが出来なかつたため、絶対解像度の見積もりは今後の課題として残ることとなる。)

● 山・谷の振幅の相対値による評価

図 4.10 のようにすべての線幅の縦縞チャートの CCD からの出力画像び対して縦方向への足し上げを行った。すべての出力画像に対して図 4.11 の解析を行い、横軸を line pair/mm、縦軸を 2mm 線間隔の山・谷の平均値を 1 とした時の各線幅での相対値をプロットした (図 4.14)。

図 4.14 についての考察は第 5 章で IIT との性能比較の際に行う。

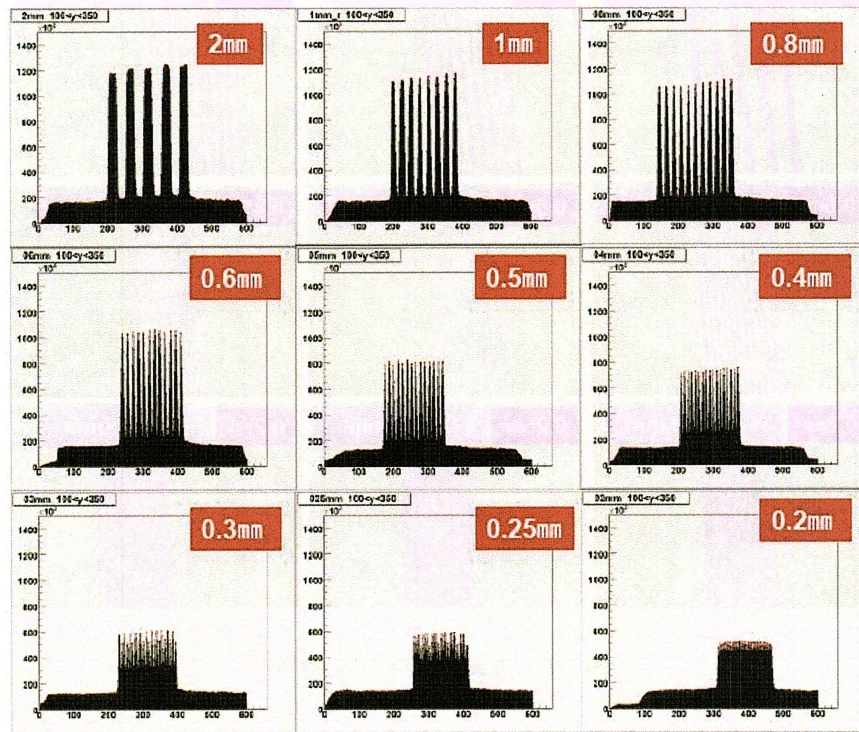


図 4.13: 縦方向重ね合わせ図

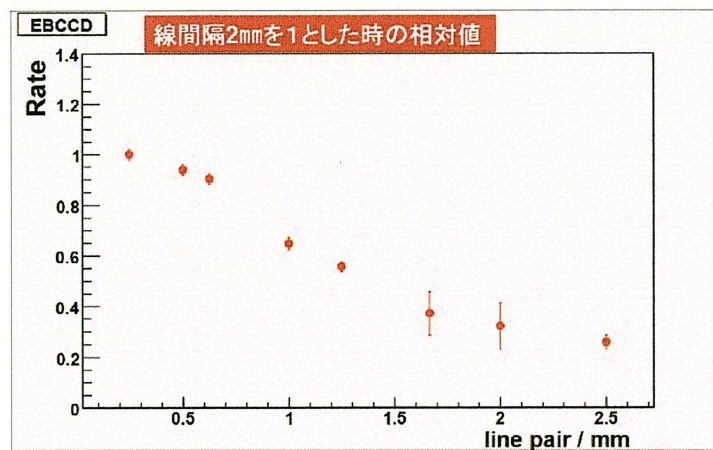


図 4.14: 振幅の相対値図



### 4.3 大口径 EBCCD の画像特性

大口径 EBCCD の性能評価として画像特性を調べる。この実験で画像特性とは光電面の画像が読み出し CCD でどのように振舞うかを確認する目的で行った。大口径 EBCCD の光電面面積は広く、そのため光電面から発生した光電子が CCD で像を結ぶまでの光学系（静電場によって制御されたもの）でいかに影響を受けるかを評価する必要がある。

#### 4.3.1 実験内容

評価の方法としては大口径 EBCCD にチャート図を貼り付け、暗箱内で青色 LED で照射した。100frame 積分されたデータを解析に用いた。大口径 EBCCD に与える電圧は 10kV。OHP シートにレーザープリンターを用いて印刷したチャート図を大口径 EBCCD のガラス面の円形にあわせて作成した。チャート図は 2mm 間隔にドットが並んだチャート図（以下ドットチャート）と縦方向、横方向に直角に交わるような線を引いたチャート図（以下格子チャート）を用意した。

大口径 EBCCD の実際の有効面積は読み出し CCD の大きさに依存するので、現在の大口径 EBCCD のセットアップでは CCD の性能より中心の  $480 \times 640$  ピクセル（光電面上でほしい  $3.6\text{cm} \times 4.6\text{cm}$ ）の有効面積しかない。なので今回の実験で得られた結果は大口径 EBCCD の光電面の中心部分に限られた性能評価になる。

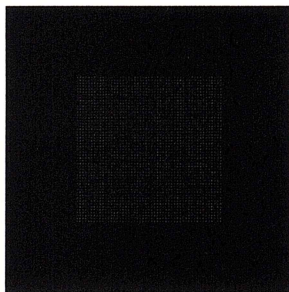


図 4.15: ドットチャート図

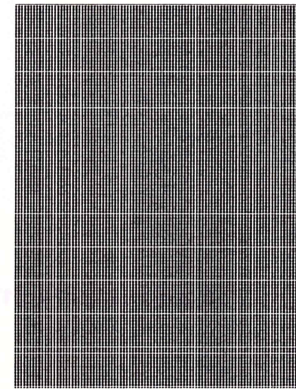


図 4.16: 格子チャート図

#### 4.3.2 ドットチャートを用いた評価

ドットチャートを大口径 EBCCD の光電面に貼り付けて、青色 LED で照射した。ドットは 2mm 間隔で敷き詰められている。解析には 100frame 分（1frame=32ms）を積分したデータを用いる。各ドットの座標からそのドットに近接するドットとの縦・横方向の距離を求めることにより、各行・各列でのドット間の距離の位置依存性を見ることができる。

ドット座標は得られたデータから各ドットの光量の重心座標とする。ドット間の距離は二点間の距離を三平方の定理から求めた。これらの解析には解析用ツール ROOT を用いた。

- 光量の重心座標の求め方

光量の重心座標は画像処理ソフト Hipic で表記される際に画像ソフト上のカーソルから一応のドット座標が求まる。実際の画像データを用いて図 4.17 にあるようにカーソル座標から上下左右 10 ピクセル（合計  $21 \times 21 = 441$  ピクセル）を用いて光量の重心座標は計算した。そのため端の一点は光量重心が計算できない点があるので、図 4.18 に描かれている白線の内側のドットを解析に用いた。

- 行・列方向のドット間隔

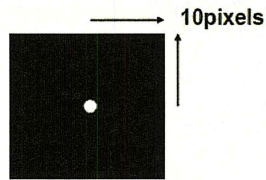


図 4.17: 重心計算範囲 (白点が Fiber による光の照射地点)

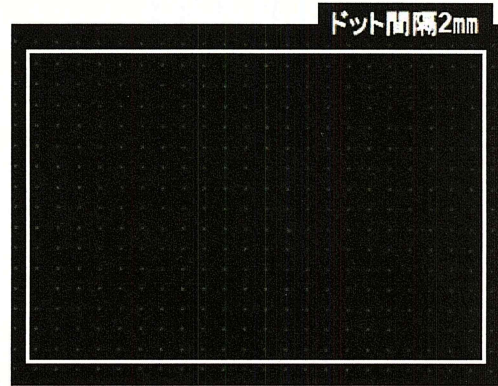


図 4.18: ドットチャートの CCD での画像 (白線内のドットを解析に用いた)

求めた光量の重心座標からドット間の距離を求めてプロットした。図中では以下のように表記している (行 (line) 図 4.19・列 (column) 図 4.20)。

行 (line) : 横軸は左端のドットからのドット間の順番を示している。縦軸は距離をピクセル数で表している。

列 (column) : 横軸は上端のドットからのドット間の順番を示している。縦軸は距離をピクセル数で表している。

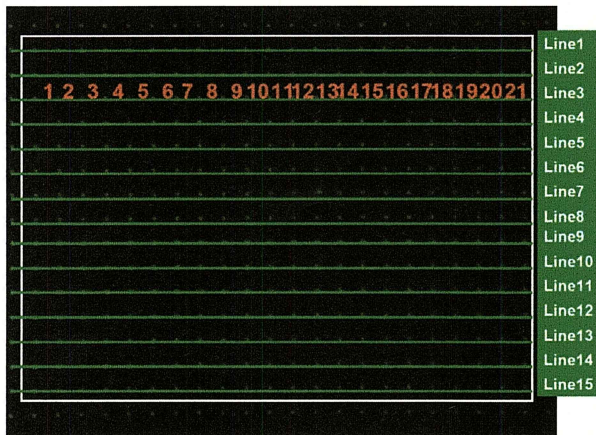


図 4.19: 行 (Line) のドット間隔

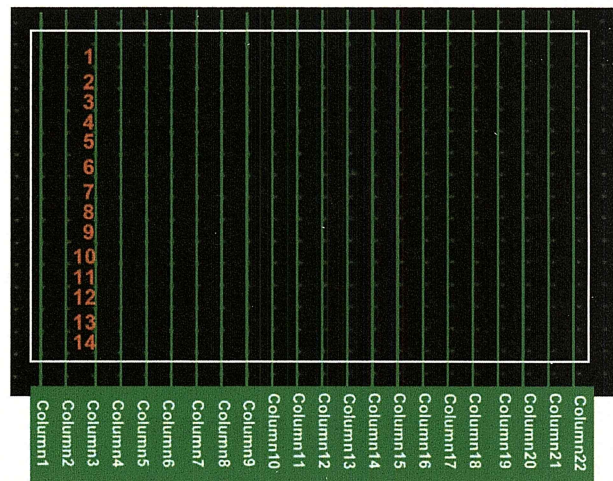


図 4.20: 列 (column) のドット距離



行方向のすべてのプロット図 4.22 のうち Line6 のグラフを拡大して以下に示す (図 4.21)。縦軸・横軸のスケールはすべてのグラフで同じになっている。

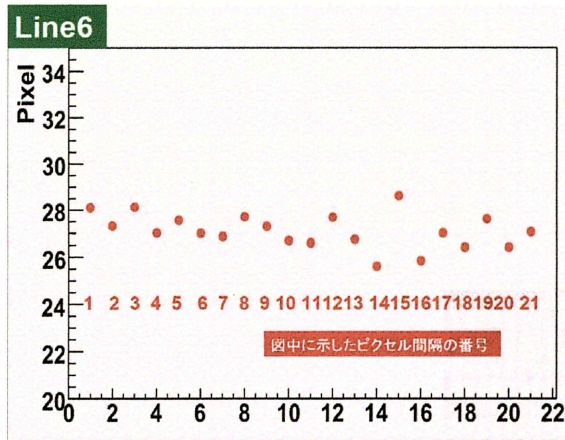


図 4.21: Line6 のドット間隔

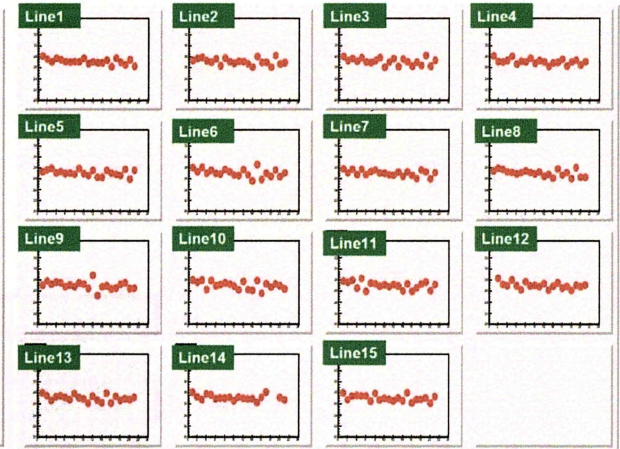


図 4.22: Line 方向のすべてのグラフのドット距離

列方向のすべてのプロット図 4.24 のうち Line6 のグラフを拡大して以下に示す (図 4.23)。縦軸・横軸のスケールはすべてのグラフで同じになっている。

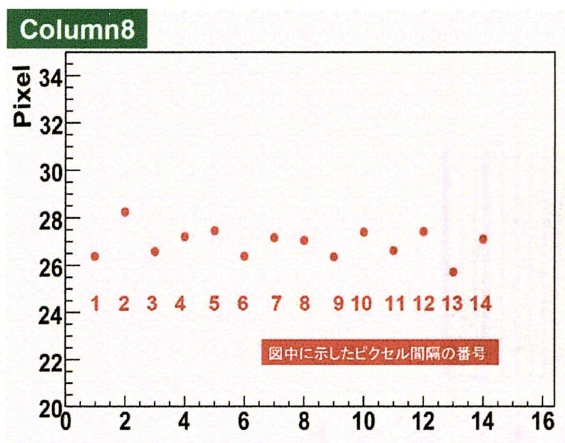


図 4.23: Column8 のドット間隔

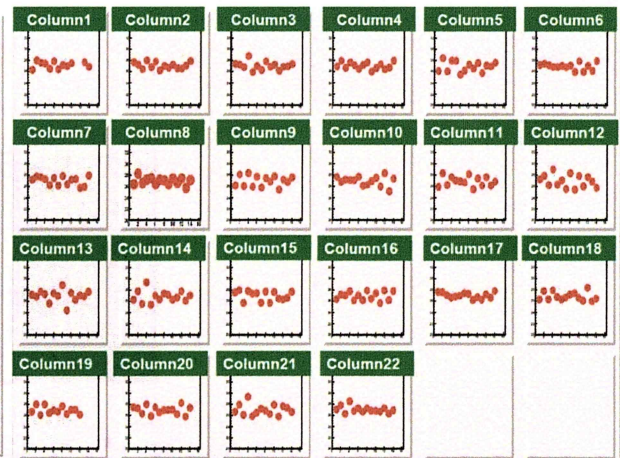


図 4.24: Column 方向のすべてのグラフのドット距離

次に得られたドット間のピクセル数から整合性を確かめる。各ドット間は行方向、列方向ともに平均 27 から 28 ピクセルあり、ピクセルから光電面上でのドット間隔を計算すると、 $28 \text{ ピクセル} \times 14 \mu\text{m} \times 5$  (縮小率を考慮した)  $= 1960 \mu\text{m}$  となりドットチャートのドット間隔 2mm と一致する。

行 (Line) 方向はすべての行で右下がりの傾向が出ており、左端で歪みが生じていることを示している。列 (Column) 方向はほぼ横ばいで、全体的にほぼひずみは見られない。今回の大口径 EBCCD では読み出し CCD のカバーしている部分は光電面の中心まわりのみなので、光学的な理由で端部分の歪の影響が大きく現れることも考えにくい。行方向の結果としては最も左のピクセル間隔と最も右のピクセル間隔は 1 から 2 ピクセル程度の違いが生じている。しかしチャートに用いたドットの大きさから CCD 画素上での 1 ピクセル程度のずれは誤差との区別が難しいように考えられる。



### 4.3.3 格子チャートを用いた評価

この実験はドットチャートの左端の歪を確認するために行った。よってこの実験では結果に対して定量的な評価は行っていない。用いた格子チャートは 2mm 間隔に縦・横に線が引かれている。実験では大口径 EBCCD からの出力を確認してチャート図の縦線がほぼ垂直になるようにチャート図を光電面に調節して貼りつけた。青色 LED で照射し、解析には 100frame 分 (1frame=32ms) を積分したデータを用いる。

以下にチャート図照射時のデータを解析ツールで拡大した図を示す。垂直方向では左端、中央、右端を拡大した (図 4.25)。水平方向では上端、中央、下端を拡大した (図 4.26)。縦方向の左端の解析画像で見られるようなデータがない場所は、CCD 画素でのチャージ漏れによりサチレーションを起こしたためである。

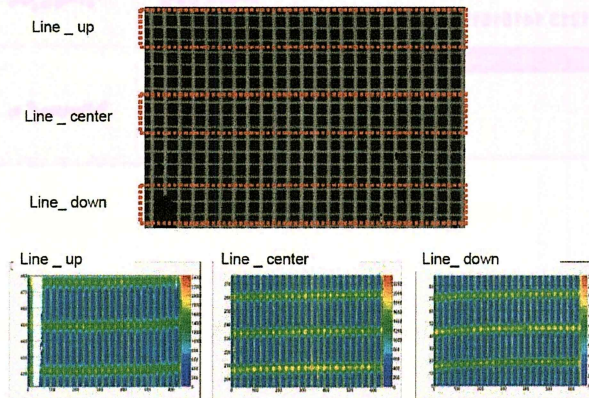


図 4.25: 格子チャートでの行 (Line) 行方向の振る舞い

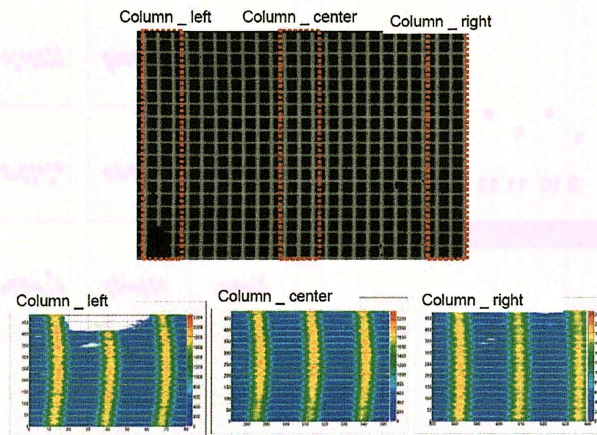


図 4.26: 格子チャートでの列 (column) 方向の振る舞い

ドットチャートを用いた結果とほぼ一致した。行方向では歪はあまり見られないが、列方向では左に行くほど歪が大きくなっている。これにより列方向の歪みが軸対象ではないことが分かった。

原因の一つとして光学系による像の結ぶ中心点と読み出し CCD の中心点が水平方向にずれている可能性があるが、現在のところ確認できていないため、中心点のずれは今後検証する必要がある。

## 4.4 大口径 EBCCD の入射光量に対する線形性

高エネルギー実験での使用を想定した場合に大口径 EBCCD は、微弱光（1 光電子）からある程度強い光まで同時に計測する必要がある。この時、より広い範囲での入射光量に対しての大口径 EBCCD からの出力の線形性が求められる。この線形性の精度はエネルギー分解能の精度に大きく影響し、最終的には実験結果の精度も左右することとなるため、検出器として最も重要な性能の一つとなる。

この章では大口径 EBCCD の入射光量に対する出力の線形性について最初の実験セットアップを示し、その後実験に使用する PMT の特性と実験で用いる治具に関わるキャリブレーション、大口径 EBCCD への入射光量の上限值を設定した後に本題の線形性の内容について示す。

### 4.4.1 セットアップ

大口径 EBCCD の入射光量に対する線形性を評価するために、PMT を用いて大口径 EBCCD に入射する光と大口径 EBCCD からの出力の関係を見る必要がある。そこで大口径 EBCCD 用のファイバー治具と PMT 用のファイバー治具を作成し、LED 照射用治具を用いて大口径 EBCCD と PMT に同時に光を入射するという実験方法を考えた。ファイバーの長さはともに 35cm で周りをプラスチック製のパイプで保護している。ファイバーは 0.8mm  $\phi$  のシンチレーティングファイバー。照射に使う LED は青色。LED にはパルスジェネレータを用いて電圧を与える。大口径 EBCCD、PMT ともにファイバーをしっかりと固定する治具を装着している。

以下に実験セットアップの概要図と LED 照射治具、ファイバー照射用治具について示す。

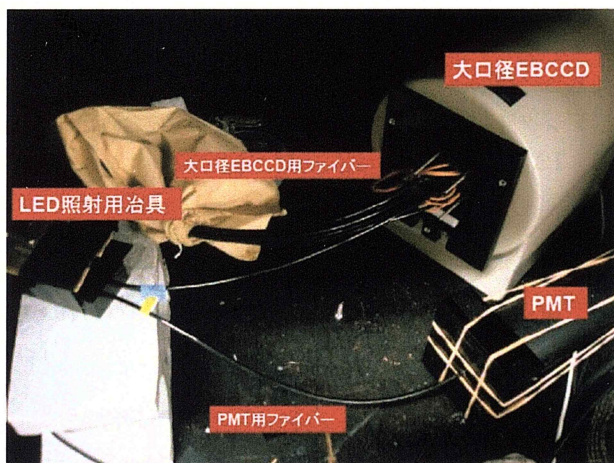


図 4.27: 大口径 EBCCD の線形性実験セットアップ (写真)

図 4.28 の LED 照射用治具には LED 用ファイバーと大口径 EBCCD 用ファイバーが 1 センチの間隔で接続されており、ファイバーの固定されている面から LED までは 1.5cm の間隔がとってある。図 4.29 の大口径 EBCCD 用ファイバー治具 (4cm  $\times$  4cm) にはファイバー用の穴が 5mm 間隔で開けられている。PMT 用ファイバー治具は後に記述するが治具間での入射光量の校正をおこなうために大口径 EBCCD 用ファイバー治具と同じ大きさに設計されている。

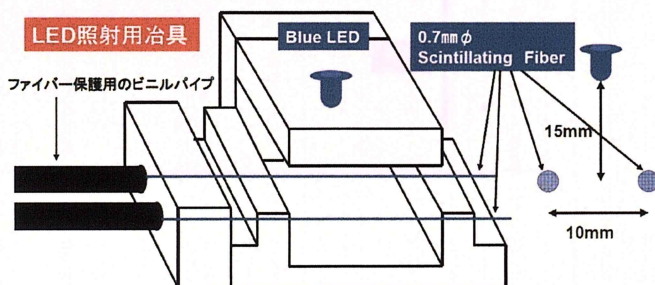


図 4.28: LED 照射用治具の概要

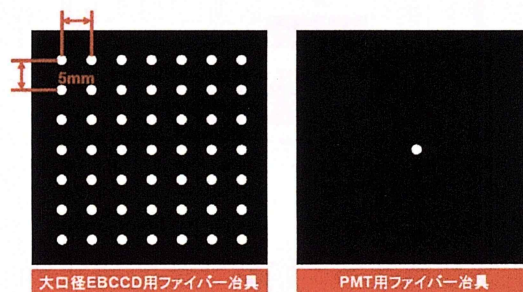


図 4.29: ファイバー照射用治具



### 4.4.2 実験に用いる PMT の基本特性

この実験では大口径 EBCCD 用の Fiber 治具と PMT 用の Fiber 治具を用いることで、大口径 EBCCD に入射している光量を PMT を用いて評価している。そのため実験で用いる PMT の特性を評価する必要がある。以下に使用した PMT の基本性能を以下に示す。



図 4.30: PMT の写真 (H7195P)

名称	H7195 -P (Hamamatsu 製)
ゲイン	$3 \times 10^6$ @ 2000V
光電面材質	バイアルカリ

表 4.1: 実験で用いる PMT の諸特性

- PMT からの出力の時間変動

大口径 EBCCD の入射光量に対する線形性を測定時には何度も暗箱の開け閉めを行う。その際 PMT の HV の上げ下げも何度も行う。HV を上げた直後からの PMT からの出力の変動を評価した。実験内容としては線形性評価をする際に用いる LED 照射用治具で照射された PMT 用ファイバーからの光を PMT で読み取る。PMT からの出力はデジタル化され、デジタル化された値は大口径 EBCCD からの出力の ADC と区別するために CAMACADC として表記する。PMT からの出力は CAMAC の ADC モジュールを用いてデジタル情報に変換されるため CAMACADC と表記する事とした。CAMAC とは Computer Automated Measurement and Control の略称で、計算機によるデータ収集・制御を目的として規格化された高速な転送速度を持つ I/O バスのことである。PMT の HV を上げてから 1 分ごとに 10000event のデータを取得した。

解析では 1 分ごとの 10000event をヒストグラムで表した後に gaussian でフィットし、得られた中心値を縦軸、横軸を HV を上げてからの時間としてプロットした (解析ツール ROOT を用いて解析を行った)。

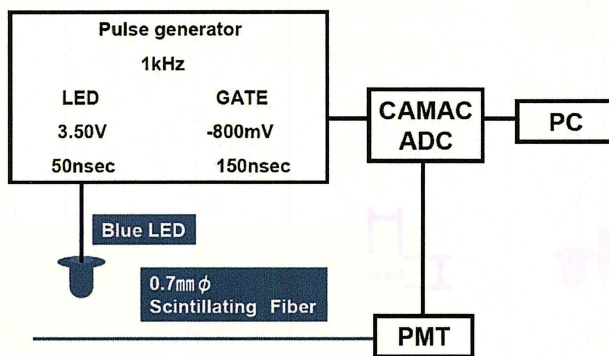


図 4.31: PMT の時間特性 (フローチャート)

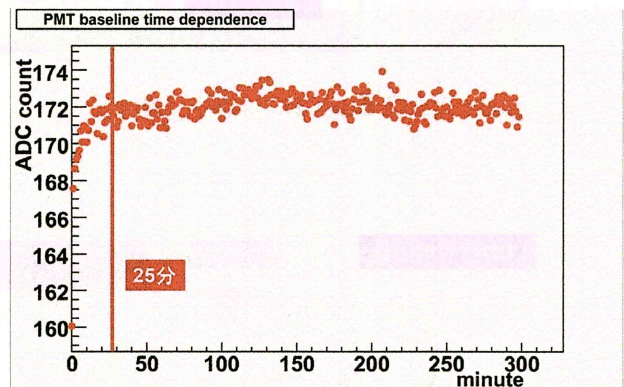


図 4.32: PMT の CAMACADC 値の時間変動

CAMACADC と HV を上げてからの時間の関係図から 25 分程度で PMT からの出力が安定している。よって PMT を用いた実験では PMT の HV を上げてから 30 分待ってから測定を行うこととする。

### 4.4.3 EBCCD 用治具と PMT 用治具の入射光量のキャリブレーション

大口径 EBCCD の入射光量に対する出力の線形性を正確に評価するために実験で用いられる大口径 EBCCD 用ファイバー治具と PMT 用ファイバー治具での入射光量の違いを把握しておく必要がある。前述のように大口径 EBCCD の入射光量に対する出力の線形性を評価する実験では大口径 EBCCD に入射する光量を PMT でモニターする。LED 照射治具は PMT ファイバーに対して一つのファイバーしか照射できないため、実験中に 8 本のファイバーの付け替えを行わなければならない（付け替えるファイバーは大口径 EBCCD 用ファイバーのみ）。そのためこの実験では治具の違いを評価すると同時に入射光量のファイバーの付け替え作業に伴う再現性の誤差も含めて評価する。

以下にファイバー治具と LED 照射用治具を示す。大口径 EBCCD 用治具には 8 本のファイバーが装着されている。ファイバーには番号がつけられておりファイバー 1、2、3、5、7、8、9、10 の 8 本ある。ファイバー番号と位置関係は後に図で紹介する。

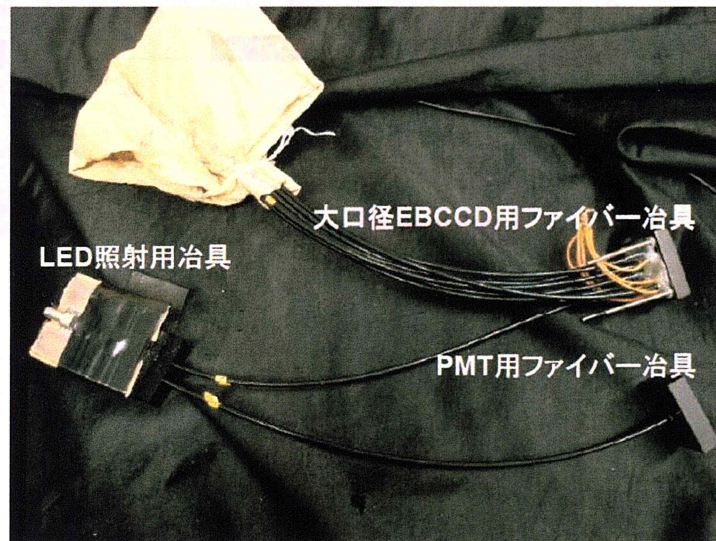


図 4.33: ファイバー治具と LED 照射治具

- 実験内容と手順

LED の電圧と LED から光の関係は常に一定と仮定する。大口径 EBCCD 用ファイバー治具、PMT 用ファイバー治具を PMT に設置して同じ LED 電圧のときのそれぞれのファイバーから PMT への入射光量（平均光電子数）を評価する。LED 電圧を変えてそれぞれ測定し、最終的には大口径 EBCCD 用ファイバーと PMT 用ファイバーの光量の関係をプロットする。このプロットしたグラフを用いてファイバー間の入射光量の校正直線を求める。

手順としては LED 照射用治具に PMT 用ファイバーと大口径 EBCCD 用ファイバーを設置し、PMT で各ファイバーの光量を評価する。PMT の電源を上げてから 30 分の安定動作の後に測定を開始する。大口径 EBCCD 用ファイバーは 8 本と PMT 用ファイバーのすべての測定が終わると LED 照射治具、PMT 固定用治具などすべての治具を取り外してから再び同様の測定を行う。この作業を合計 3 回行い解析することで再現性を含めた各ファイバーの入射光量のキャリブレーション直線を描く。

- 解析

LED 電圧と照射される光が常に一定の関係にあると仮定して、各ファイバー・各 LED 電圧ごとに 3 回の入射光量のデータを PMT で取得している。3 回のデータから各 LED 電圧で L 照射した場合の入射光量の平均と誤差（再現性を含む）を評価することができる。データの解析は解析ツール ROOT を用いて、PMT からのデータ（CAMACADC で PMT からの出力をデジタル数値に変換している）をヒストグラムにつめてフィッティング関数を用いてフィットして入射光量を評価した。誤差は 3 回の測定から得られた平均を求めた際の標準偏差  $1\sigma$  とした（この誤差に再現性の誤差が含まれていると考えている）。



横軸を PMT 用ファイバーから得られた平均光量、縦軸を大口径 EBCCD 用ファイバーから得られた平均光量としてプロットし、直線 ( $Y=aX+b$ ) でフィッティングした。このフィッティングのパラメータ a、b を用いて PMT 用ファイバーの光量から大口径 EBCCD 用ファイバーの光量を評価する。以下にパラメータと各大口径 EBCCD 用ファイバーのまとめた表を示す。グラフは横軸を PMT 用ファイバーを用いた時の PMT への入射光量、縦軸を大口径 EBCCD 用ファイバーを用いた時の PMT への入射光量を表している。数値は平均光電子数を示している。

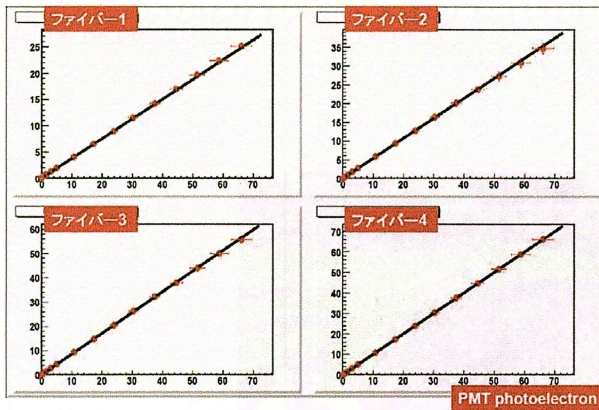


図 4.34: ファイバー 1 から 5 の校正直線

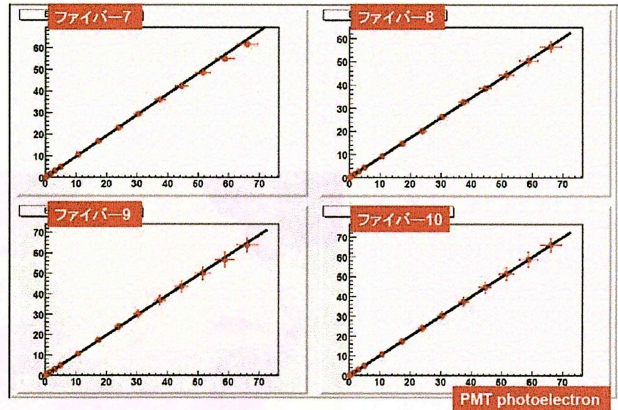


図 4.35: ファイバー 7 から 10 の校正直線

パラメータ\Fiber番号	1	2	3	5	7	8	9	10
a	0.376	0.536	0.855	1.000	0.966	0.861	0.982	1.000
error(a)	0.003	0.007	0.003	0.003	0.006	0.010	0.020	0.020
b	0.039	0.013	0.008	0.000	0.032	0.002	0.074	0.000
error(b)	0.018	0.009	0.017	0.017	0.008	0.019	0.045	0.045

表 4.2: 各ファイバーの校正直線のパラメータ

ファイバー 1、2 の光量が極端に小さい値を示している。これは実験中のファイバーの取替えによるファイバーが傷ついたことが原因と考えられる。特にファイバー 1 の使用率が高いのも傷が付きやすい原因と考えられる。ファイバー 7 から 10 は後から増設したため光量が多い。

以後 PMT への入射光量はこの校正パラメータを用いて大口径 EBCCD への入射光量に変換する。

### 4.4.4 大口径 EBCCD への照射光量範囲の決定

この論文で使用している大口径 EBCCD はゲート機能がないため、1frame(32msec) の時間分解能がない。ゲート機能がある場合より入射光量の上限に対して制限が厳しくなり、検出器の性質上強い光の入射を避ける必要があるため、1frame の間にどれだけの光を入射することができるかの評価が必要となってくる。1 ピクセル・1 frame あたりの値の最大値は 1023 チャンネル（単位は任意）のためこの値を越さない光量を決定する必要がある。

● 実験内容と手順

ファイバー治具を大口径 EBCCD に固定し、LED 照射治具にファイバー 5 をセットする。治具をセット後 10 時間の安定動作後に測定を開始する。この LED の電圧を徐々に上げていき、その LED 電圧ごとの画像データからファイバー付近の 1 ピクセルあたりの最大値（大口径 EBCCD の出力）を求める。画像データは 1frame × 10 回で撮る。この時の 1 ピクセルあたりの値が 1024 を超えない LED 電圧の最大値からその LED 電圧でのおおよその入射光量を予想し、大口径 EBCCD に入射する光量の上限を予想する。LED 電圧と入射光量の関係は治具のキャリブレーションの際に評価している。LED には 5.00V、5.30V、5.60V、5.90V の電圧を与えてその時の 1frame 画像を解析した。LED に与えるパルス幅は 50nsec。

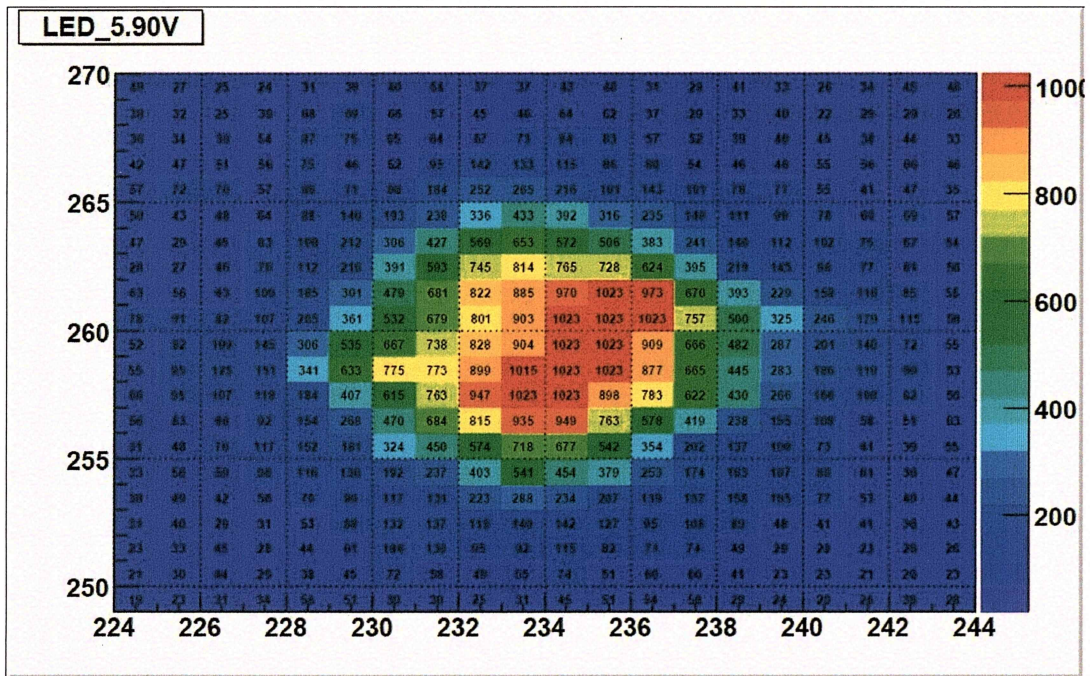


図 4.36: LED 電圧 5.90V での大口径 EBCCD1frame 解析画像



- 解析と評価

各 LED 電圧での 1frame 画像からファイバー付近の大口径 EBCCD からの出力の最大値を求める。各 LED 電圧で 1frame 画像を 10 回撮っているため、以下に各 LED 電圧での大口径 EBCCD からの出力の最大値を表にする。大口径 EBCCD からの出力の一例として図 4.36 に LED 電圧 5.90V でファイバーに照射した時の出力画像を示す。

LED 電圧 \ 撮影番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5.90V(出力の最大値)	1023	1004	1023	1023	969	977	1023	1023	1023	1023
5.60V(出力の最大値)	913	886	939	1009	1023	910	989	906	931	948
5.30V(出力の最大値)	911	988	930	961	846	825	863	950	937	937
5.00V(出力の最大値)	772	883	764	973	806	875	824	788	807	832

表 4.3: LED 電圧と大口径 EBCCD からの出力の最大値の関係

表から LED 電圧 5.90V で出力の最大値 1023 チャンネルが多く見られる。ベースラインの変動・放電の影響も考えてファイバー 5 を用いた場合には 5.00V を入射光量の上限として設定する。平均光電子数の場合には 60 から 70 光電子数の光が入射する LED 電圧を上限とおく。



#### 4.4.5 入射光量に対する線形性実験

大口径 EBCCD にファイバーを用いて光を照射し、その時の入射光に対しての大口径 EBCCD からの出力との間に線形性が保たれているかを確認する。LED 照射治具で大口径 EBCCD 用ファイバーを照射すると同時に PMT 用ファイバーにも照射しているので大口径 EBCCD に入射している光量をモニターすることができる。ファイバー間の校正は「EBCCD 用治具と PMT 用治具の入射光量のキャリブレーション」の項で評価した。大口径 EBCCD 用ファイバーは8本あり、図 4.38 にあるような配置をしている（光電面に接地する面）。穴と穴の間隔は5mm で工作しているが多少のずれはある。ファイバー1 から10 は2cm × 2cm の範囲をカバーしているので、各ファイバーの線形性を確認するとともに線形性の位置依存性も大まかに確認することとする。

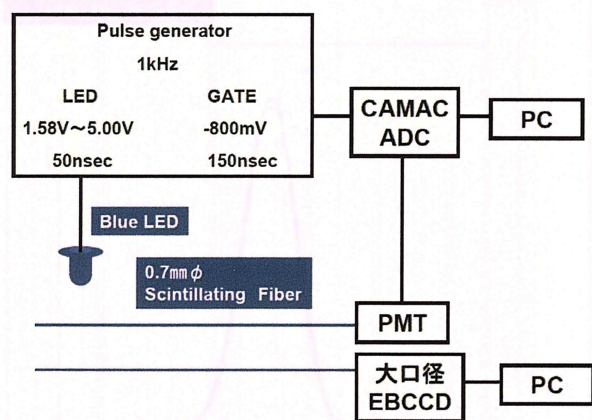


図 4.37: 大口径 EBCCD の線形性実験フローチャート 図 4.38: ファイバー番号と位置関係（大口径 EBCCD 用）

暗箱内で大口径 EBCCD 用、PMT 用ファイバー治具をそれぞれ固定し、ファイバー1 と PMT 用ファイバーを LED 照射用治具に固定する。大口径 EBCCD には 10kV、PMT には 2350V の電圧をかける。電圧をかけた後は大口径 EBCCD のために 10 時間以上の安定動作を行う。LED を照射して大口径 EBCCD は 1frame(32msec) の画像データを 30 回、PMT は 15000 イベントを同時に取得する。この作業を LED の測定電圧ごとに行う。LED 電圧は 1.62、1.70、1.80、1.90、2.00、2.30、2.60、2.90、3.20、3.50、3.80、4.10、4.40、4.70、5.00V について測定を行った。ファイバーを交換した際には暗箱の開放時間に気をつけ、再び電圧を与えてから 100 分間の安定動作後に測定を行う。これらの作業をすべての大口径 EBCCD 用ファイバーについて行う。

#### 4.4.6 解析

大口径 EBCCD からの出力はファイバーからの光の光量重心を中心地とし、中心地から上下左右 15 ピクセル分の ADC カウントを合計した値を出力と定義する（中心地から上下左右 15 ピクセルなので合計  $31 \times 31 = 961$  ピクセル）。図 4.39 に大口径 EBCCD の出力の定義範囲を示す。大口径 EBCCD にはゲート機能は付いていないため、1 frame 分の積分画像データを解析に用いることとする。（実際の測定では 1 frame の画像を 30 回撮ってその出力の平均と誤差  $\sigma$  を求めた）。

以上の解析を大口径 EBCCD 用ファイバー 8 本について行う。

PMT の出力データは LED の照射周波数と同期させて取っている。合計 30000 イベントの PMT からの出力データを解析ツール ROOT を用いてヒストグラム化して、その分布にたいして関数でフィッティングを行う。このフィッティングの際のパラメータから入射光量を評価する。図 4.40 にフィッティングの様子を示す。最終的には PMT の入射光量から各ファイバーの校正曲線のパラメータを用いて大口径 EBCCD の入射光量に変換して評価する。

PMT の解析に用いるフィッティング関数を以下に示す。フィッティングにはポアソン分布に重みをつけたガウス分布で行った。N と  $\mu$  をパラメータとしてフィッティングを行った。 $\mu$  が平均光電子数に対応する。



$$PMT\ fitting\ function = N \sum_n^{n+50} \frac{\mu^k}{k!} \cdot Gk$$

$\mu$  : 平均光電子数       $Gk$  : ガウス分布       $N$  : 規格化定数

縦軸を大口径 EBCCD からの出力 (ADC カウント)、横軸を PMT からの出力 (平均光電子数) としてプロットする。このグラフに直線でフィッティングをかけて線形性の評価を行う。

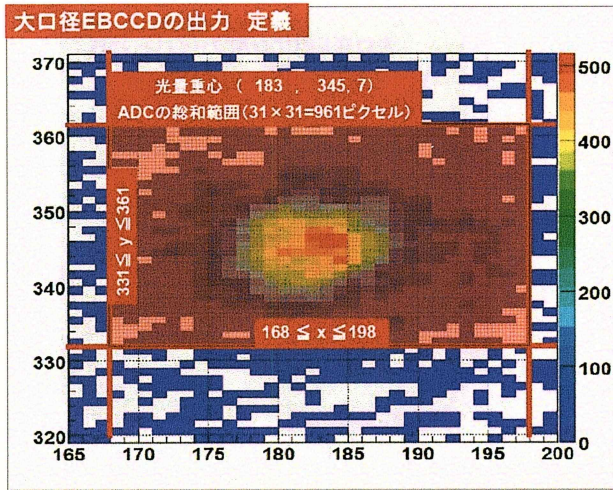


図 4.39: 大口径 EBCCD の出力の定義範囲

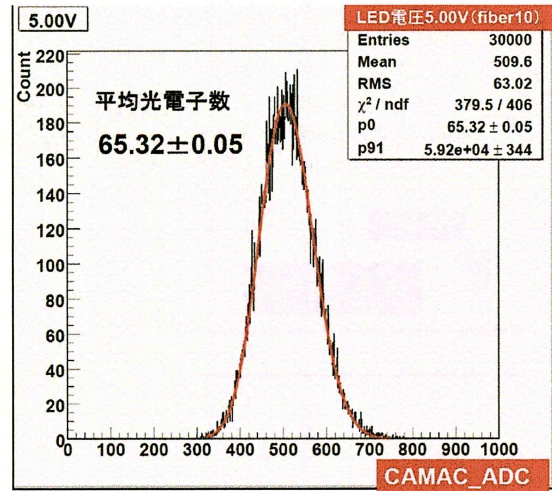


図 4.40: PMT の光量のフィッティング

#### 4.4.7 評価

縦軸を大口径 EBCCD の出力、横軸を入射光量としてプロットする際にフィッティング範囲はプロットしたグラフ全域にかける。このフィッティングからの実測データのずれを評価する。横軸を光電子数、縦軸をフィッティングからのずれ (%) としてプロットした。すべてのファイバーに対してこの評価を行った。線形性の実測値とベストフィットからのずれのグラフでは ± 20% の範囲でプロットした。

$$\text{このフィッティングからの実測データのずれ} = \frac{[data] - [fit]}{[fit]} \times 100\%$$

data : 実験で得られた実測値      fit : ベストフィットから予想される値

● 実験 4.43 の結果との整合性

まず最初に実験 4.43 の大口径 EBCCD 用治具と PMT 用治具の入射光量のキャリブレーション実験の結果との整合性を確認するために、縦軸を大口径 EBCCD からの出力、横軸を PMT への入射光量としてプロットした図を以下に示す。

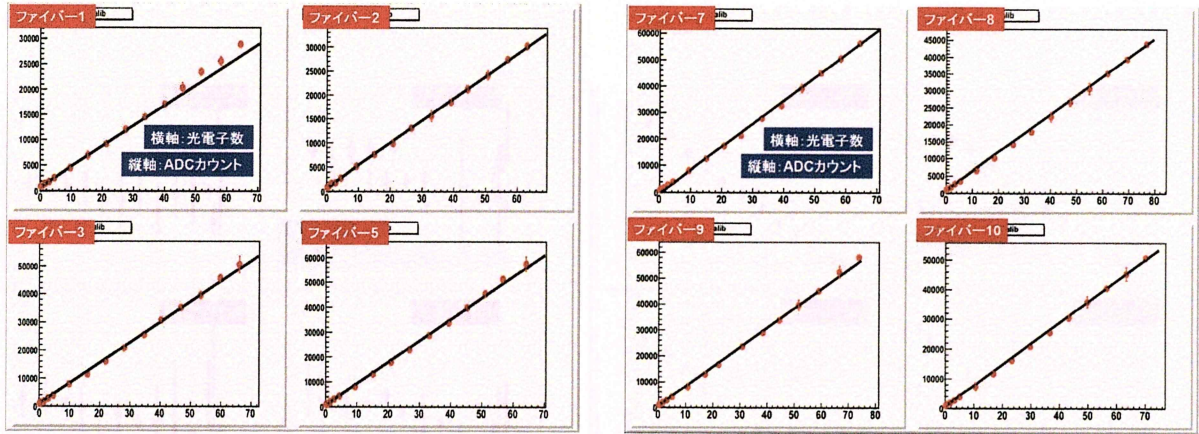


図 4.41: PMT への入射光量と大口径 EBCCD からの出力 (ファイバー 1 から 5)

図 4.42: PMT への入射光量と大口径 EBCCD からの出力 (ファイバー 7 から 10)

各グラフを直線  $Y=aX+b$  でフィッティングしたときのフィッティングパラメータを以下に表にまとめた。

パラメータ\ファイバー番号	1	2	3	5	7	8	9	10
a	401	462.9	726.7	859.5	875.5	617	751.3	705.7
error(a)	2.04	4.3	2.53	2.62	0.23	0.435	0.183	0.192
b	807	799.1	1000	718.1	-416.6	822.8	782.2	730.1
error(b)	25.9	28.57	11.8	11.8	10.83	13.86	10.61	10.65

表 4.4: 図 4.41、4.42 のフィッティングパラメータ ( $Y=aX+b$ )

実験 4.43 と同様のファイバー 1、2 の光量が他のファイバーに比べて極端に小さいことが表から読み取れる。特にファイバー 1 の光量が小さく、実験 4.43 と同様の結果となった。ファイバー 8 の傾きが実験 4.43 の結果から予想するとファイバー 3 と同じくらいの値になるはずだが、予想より小さい値となっている。治具のキャリブレーション中か今回の実験の最中にファイバーに傷がついた可能性があり、予想される光量より少なくなったと考えられる。ファイバー 8 については他のファイバーと同様に解析を行うが、光量をプロットしている値は実際に入射した光より過大評価していることをここで断っておく。



- 大口径 EBCCD の入射光量と出力の線形性評価

図 4.41 と図 4.42 の横軸の PMT への入射光量を大口径 EBCCD への入射光量に校正してプロットし直した。縦軸は同様に大口径 EBCCD からの出力 (1frame・961 ピクセルあたりの ADC カウントの総和) としている。フィッティングには直線 ( $Y=aX+b$ ) を使い、ベストフィットからのずれを評価しプロットした。ベストフィットからのずれは%で表記し、プロットした範囲は± 20%とした。

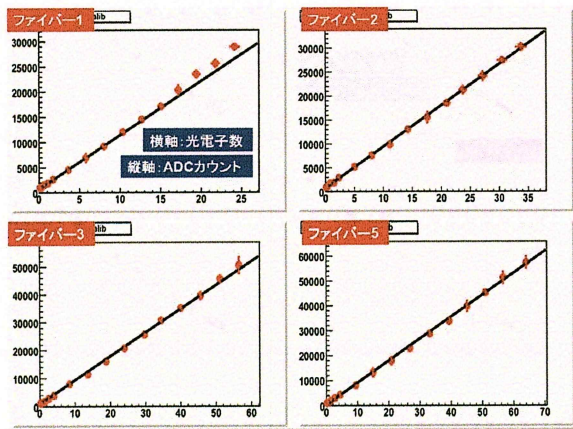


図 4.43: 大口径 EBCCD の入射光量と出力の線形性 (ファイバー 1 から 5)

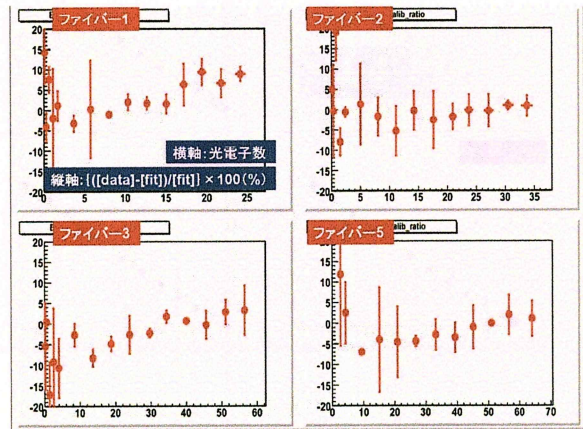


図 4.44: 大口径 EBCCD の入射光量と出力の線形性 (ファイバー 7 から 10)

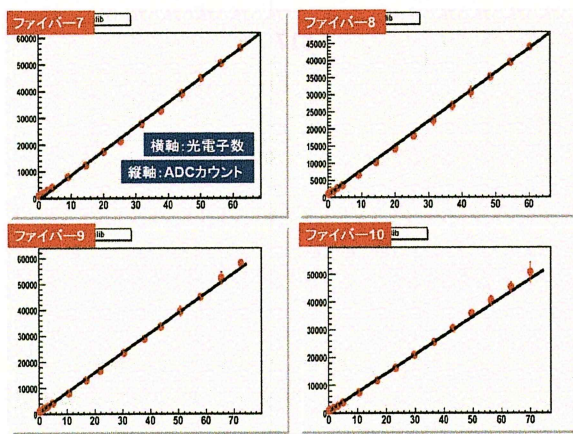


図 4.45: 大口径 EBCCD の入射光量と出力の線形性 (ファイバー 7 から 10)

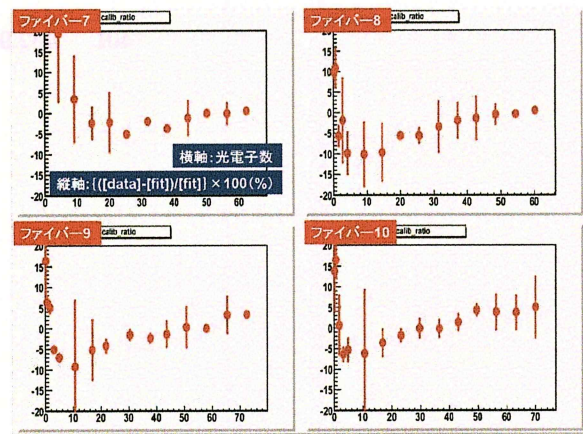


図 4.46: フィッティングからのずれ (ファイバー 7 から 10)

グラフからファイバー 1 以外は大口径 EBCCD の出力と入射光量の線形性は保たれているように見える。図 4.43 の左上図のファイバー 1 の線形性が保たれていない理由はまだ良く分かっていないが、傷、劣化による光量の減少が著しいファイバーであることは理由の一つに上げられる。ファイバー 1 以外は後に増設されたファイバーなのでファイバーの付け替え回数が少ない。ファイバーの個体差はあるが、光量の多いほうでは 70 光電子数程度まで線形性が保たれており、このレンジでのサチレーションは見られない。

ベストフィットからのずれのグラフからすべてのファイバーにおいて光量の低い範囲以外ではおおそベストフィットからのずれが± 10%の範囲に収まっている。大口径 EBCCD の使用目的をシンチレーティングファイバーと組み合わせて多チャンネル読み出しデバイスと仮定した場合に、シンチレーティングファイバーからの平均光量はおおよそ 10 光電子数からとなるため、ベストフィットからのずれはこの範囲でほぼすべてのファイバー

が±10%の範囲に収まっていると言える。特にファイバー10では2から70光電子数のレンジで±6%の範囲に収まっており、広い光量範囲での線形性が確認されたと言える(図4.46の右下)。

低光量部分ではほとんどのファイバーで線形性が保たれていない。線形性が保たれていない理由として低光量部分でノイズと入射光による信号の分離が出来ていない可能性がある。原因として大口径 EBCCD のハード自体の問題と解析方法の二点が考えられる。ハード自体の問題として CCD の読み出しの際の電子のダブルカウントや熱電子による影響が考えられる。これらは大口径 EBCCD 自体の問題なので今後の量産化に向けてしっかり考察する必要があり、大きな課題であると思われる。解析の問題としてベースラインの扱いについてももう少し丁寧な処理が必要と思われる。現在のベースラインの処理方法は1frameの画像データを30回取得した後にベースライン処理用の画像データを取得し、解析の際に30回分のすべての画像データに対してベースライン画像の引き算を行っている。ベースライン画像データは1frame分を1度しか取得していないため熱電子など統計的な影響が大きく出ている可能性があり、今後はベースラインの画像データの統計数を考えた解析をする必要がある。

ベストフィットからのずれのグラフでの誤差にばらつきがみられるが、これは大口径 EBCCD からの出力値の誤差の影響が大きく、現在の口径 EBCCD のセットアップでは放電やゲート機能がないことからこの程度の誤差のばらつきが現れてしまうと考えられる。

ファイバー1から10の線形性の結果からすべてのファイバーで同程度の性能が確認できた。多少のばらつきは見られるが、ファイバーの個体差を大きく逸脱する結果も確認できないので、大口径 EBCCD の光電面の中心付近の2cm×2cmの範囲での入射光量に対する出力の線形性はだまかに一様であると言えると思われる。



## 第5章 大口径EBCCDとIITの性能比較

### 5.1 概要

大口径 EBCCD と IIT の性能評価として空間分解能と入力に対する出力の線形性の二点について比較評価する。この比較に用いた IIT は第二章で示した IIT-CCD チェーンを用いる。後段 IIT でゲートをかける事が可能。今回の実験では LED の照射タイミングに合わせてゲートを作る。ゲートは蛍光面の減光時間にあわせて  $100 \mu\text{s}$  のゲート幅に設定している。

CCD カメラからのビデオ信号は CCD 画面の画素ごとに Flash ADC によって輝度情報に変換され、CCG (Clock and Coordinate Generator) により座標情報を与えられる。この時の輝度に対して閾値 (threshold) を設定し、その値を超える輝度情報を持つピクセルデータのみを記録する。この閾値を超えてきたデータについて解析を行う。

実験で用いた IIT の感度は MCP に与える電圧で変化できるので、今回の実験では目的にあわせて MCP に与える電圧を変えた。与える電圧の違いを gain8、gain9 と表記する。

gain8 : 平均 20 光電子の光を入射した際に 961 ピクセル 1frame あたりの IIT からの出力が 4000ADC カウント

gain9 : 平均 20 光電子の光を入射した際に 961 ピクセル 1frame あたりの IIT からの出力が 10000ADC カウント

以下に IIT を用いた実験でのセットアップ例を示す。

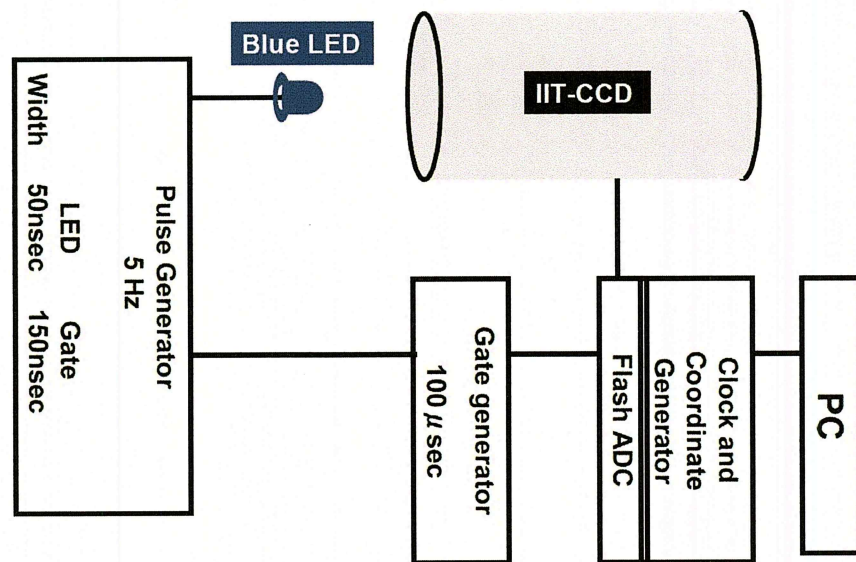


図 5.1: IIT 測定のセットアップ例

## 5.2 空間分解能

大口径 EBCCD の性能比較として IIT の空間分解能を評価する。空間分解能は大口径 EBCCD の性能評価と同様に縦縞チャートを用い、水平解像度の評価を行う。ここでの解像度とはどれくらい細かい縦縞の線幅まで識別できるかを示す。評価は大口径 EBCCD の空間分解能と同様の評価方法をとる。しかし、CCD で読み出している光電面の面積が大口径 EBCCD と IIT では違うので評価の際にはこの効果を考慮する必要がある。

### 5.2.1 実験内容（セットアップと実験手法）

線間隔の異なる縦縞を用意し、IIT の光電面中心付近に貼り付け、青色 LED で照射した。データは 8000 イベントを重ね合わせたものを使う。縦縞チャートの線間隔は 4mm、2mm、1mm、0.8mm、0.6mm、0.5mm、0.4mm 間隔のものを用意した。これは大口径 EBCCD と違い、CCD の表現できる光電面での有効面積を考慮したためである。詳しい理由は後に示す。（大口径 EBCCD の場合は線幅は 2、1mm、0.8mm、0.6mm、0.5mm、0.4mm、0.3mm、0.25mm、0.2mm）チャートは OHP シートにレーザープリンターで印刷した。縦縞チャートを用いた実験では水平解像度（縦縞での解像度）しか見ていない。

実験手順は IIT の電源を上げ暗幕内で 10 時間安定動作させた後に（ここでの電源は IIT 内の MPC の電源を表している。）、IIT の電源を落とし、暗幕を開けて光電面にチャートを貼り付ける。暗幕を閉めて電源を上げ gain を 8 に設定し、30 分間安定動作させた後に青色 LED を光電面全面に照射し、データ取得用プログラムを使って 8000 イベント重ねた画像データを取得。（5 Hz でゲートをかけているので 30 分程度のデータ取得時間）

上記の操作をすべての縦縞チャート（線幅 4mm、2mm、1mm、0.8mm、0.6mm、0.5mm、0.4mm）について行い、解析に移る。

### 5.2.2 解析

- チャートの回転補正

チャートは線形性実験で用いる治具を使いテープで貼りつける。しかし少なからずチャートが回転してしまうので解析時にデータに回転補正をする。補正には縦縞の端の 4 点の座標から回転角 ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ) を求め、それらの角度の平均を回転角としてデータに反映させる。角の座標は解析ツール ROOT 上の画面で目視により決めた。この作業を経たものを解像度解析に用いる。

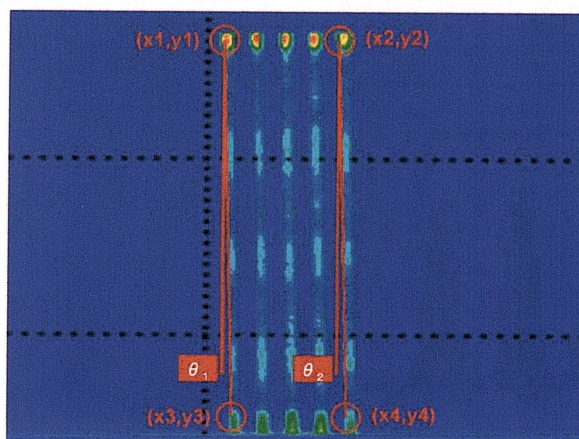


図 5.2: チャートの回転補正 (IIT)

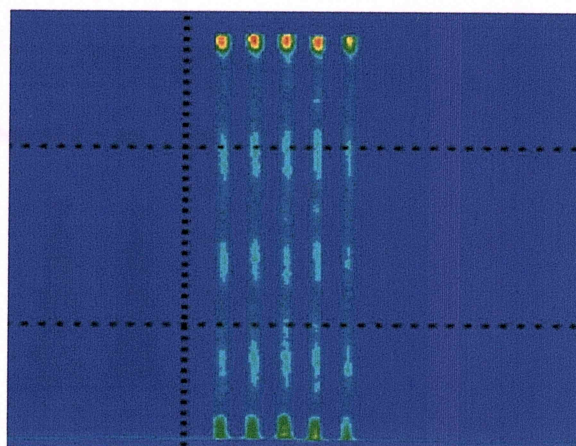


図 5.3: 解析時の回転後図

- 縦方向への足し上げ

縦縞チャートを照射して得られたデータを縦方向に足し上げることで 8000 イベントの積分画像では得られない統計をカバーする。縦縞チャートのデータを解析する際に以下に示す 3 次元図のような座標を定義す



る。各 X 座標において  $175 < y < 325$  の範囲で足し上げを行う。Z 方向は CCD カメラからの出力値（ADC カウント）を表しており、値が大きいほど入射光量が多い。

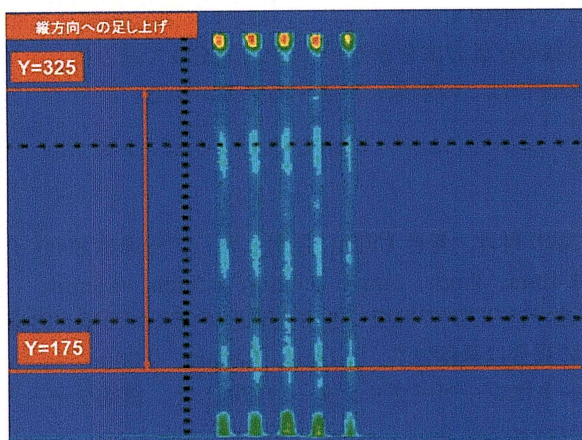


図 5.4: IIT での縦方向の足し上げ説明図

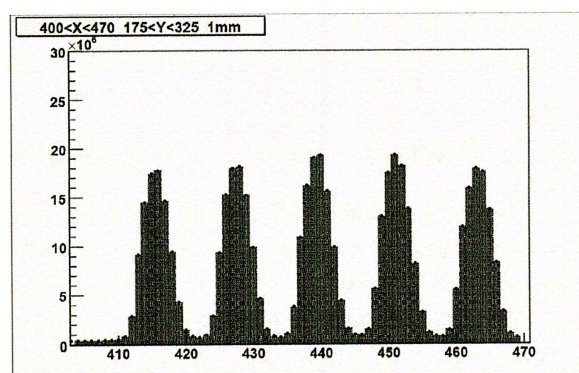


図 5.5: IIT での 1 間隔縦縞チャートの足し上げ図

● 解析手順

1. 解析用にデータ処理を行う（回転補正、縦方向への足し上げ）
2. 縦方向へ足し上げたデータから山の最大値と最小値のそれぞれの平均を出す。この平均値からの山・谷の最大最小値のふらつき  $1\sigma$  を誤差としてこれ以降扱う。
3. **山の最大値の平均値** - **谷の最小値の平均** を計算し、この振幅の絶対値を求める。
4. 4mm、2mm、1.6mm、1mm、0.8mm、0.6mm、0.5mm、0.4mm で同様に解析行う。
5. 4mm 間隔チャートの振幅を 1 と置いて他の線間隔のチャートでの振幅の相対値を求める。
6. グラフにプロットする際に縦軸を振幅の相対値、横軸を lp/mm (line pair / mm) でプロットする。

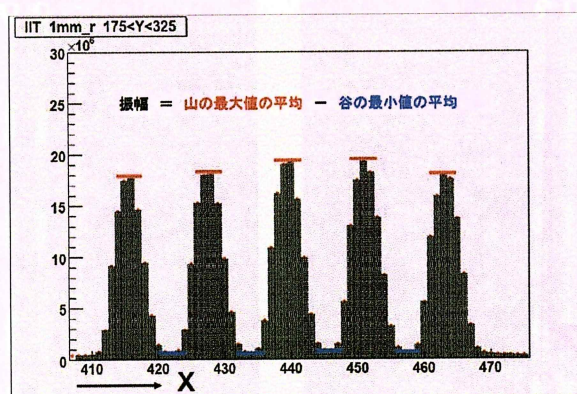


図 5.6: IIT での 1mm 間隔縦縞チャートの解析図（振幅計算）

5.2.3 評価

- 大口径 EBCCD と IIT の有効面積の違い

大口径 EBCCD と IIT では CCD 全画面で表現できる面積が違う。そのため大口径 EBCCD と IIT で測定したチャートの線間隔を光電面上の線間隔と同様に扱うことは IIT にとっては不利となる。縦縞チャートを用いた今回の実験では CCD の水平方向で評価できる縦縞の数が約 2 倍違うこととなる。これは以下の表に示したように CCD が評価できる光電面での有効面積の水平方向の長さと同様の線幅からおおよそ求めることが可能となる。例えば 0.5mm 線幅の縦縞チャートを用いた場合に大口径 EBCCD では光電面上で  $46\text{mm} \div 0.5 = 92$  本の縦縞を CCD で評価することが可能となる。しかし IIT の場合では  $100 \div 0.5 = 200$  となり一つの CCD で評価する縦縞の数が大口径 EBCCD の約 2 倍となる。そのため IIT の測定に用いた縦縞チャートは大口径 EBCCD の測定で用いた縦縞チャートの 2 倍の線間隔のものを用意した。

評価の際には IIT の線間隔を大口径 EBCCD の線間隔に対応させて評価する。IIT において 2mm の線間隔のチャートで測定したデータは解析時には大口径 EBCCD の線間隔に対応させるために 1mm 線間隔のデータとして扱う。つまり IIT で 2mm 間隔 (0.25 line pair / mm) のデータは大口径 EBCCD で 1mm 間隔 (0.5 line pair / mm) のデータとして扱う。

	大口径 EBCCD	IIT
光電面での有効面積	36mm(V) × 46mm(H)	75mm(V) × 100mm(H)
CCD の画素数	480pixel × 640pixel	512pixel × 1024pixel
0.5mm 幅 (1lp/mm) の縦縞チャートを CCD 全画面で表現できる数	92 本 (48line pair)	200 本 (100line pair)

表 5.1: 大口径 EBCCD と IIT の光電面での有効面積の違い

- 山・谷の振幅の相対値による評価

大口径 EBCCD で行った評価と同様の評価を行った。横軸を line pair/mm、縦軸を 4mm 線間隔 (大口径 EBCCD に対応させて 2mm 線間隔 = 0.25 line pair / mm とする) の山・谷の平均値を 1 とした時の各線幅での相対値を表している。

以下図では大口径 EBCCD に対応させた線間隔で評価している。

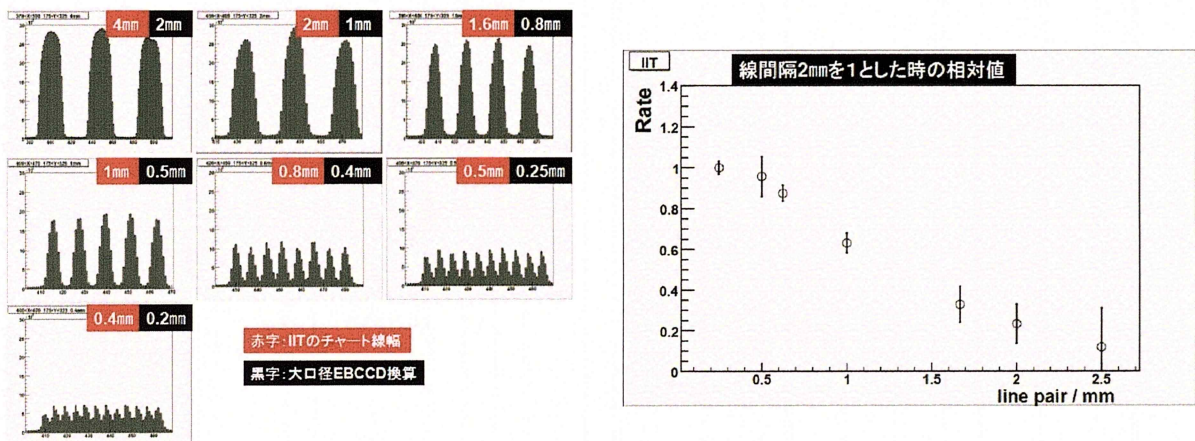


図 5.7: 縦方向重ね合わせ図

図 5.8: 振幅の相対値図 (IIT)



### 5.2.4 大口径 EBCCD と IIT の空間分解能を比較

大口径 EBCCD と IIT の空間分解能の評価としてチャートを用いた線幅と振幅の相対値の関係をプロットした。振幅の相対値図から大口径 EBCCD の空間分解能は IIT と同程度以上の分解能を持つことが示された。

今回の実験ではプリンターの精度から線幅が 0.2mm 以上について空間分解能の評価を行ったが、より狭い線間隔の場合にはプロット図より振幅の相対値の減少度合いから（落ち方が大口径 EBCCD のほうが IIT よりゆっくり）はっきりした違いが現れると予想されるため、今後の実験で確認する必要と考える。

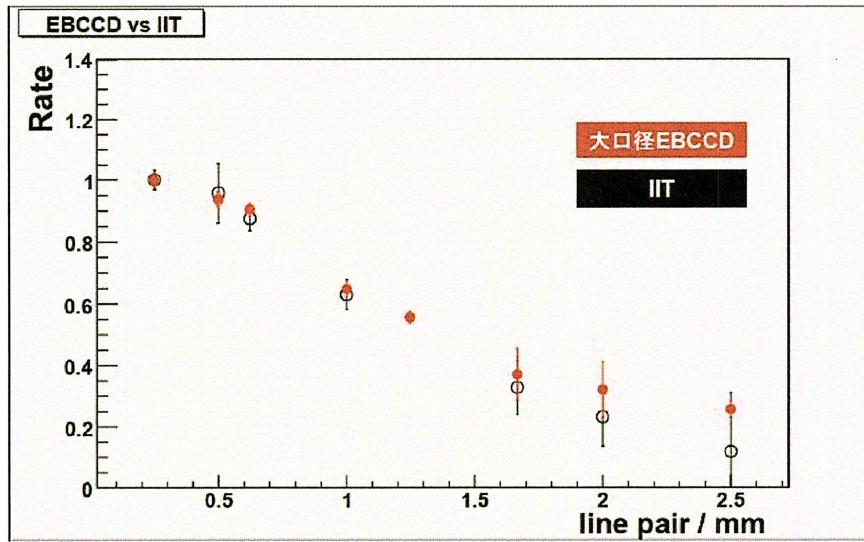


図 5.9: 振幅の相対値 (IITvsEBCCD)

## 5.3 入射光量に対する線形性

### 5.3.1 実験内容 (セットアップと実験手法)

大口径 EBCCD の入射光量に対する出力の線形性実験と同様に LED 照射治具に大口径 EBCCD 用ファイバーと PMT 用ファイバーをセットして、同時に LED で光を照射する。ファイバーの長さともに 35cm で周りをプラスチック製のパイプで保護している。ファイバーは 0.8mm  $\phi$  のシンチレーティングファイバー。照射に使う LED は青色。LED にはパルスジェネレータを用いて電圧を与える。大口径 EBCCD、PMT ともにファイバーをしっかりと固定する治具を装着している。IIT の実験ではファイバーは一本 (ファイバー 5) のみの測定を行った。



図 5.10: IIT の線形性実験セットアップ

LED 照射したファイバーを IIT と PMT で同時に測定。PMT で IIT に入射する光電子数を評価し、IIT から出力 (ADC カウント) との線形性を評価する。IIT の MCP の gain を 8 と 9 に設定して gain の違いによる線形性の違いも評価した。

実験では IIT の線形性実験セットアップ図のように IIT、PMT の入射光用ファイバーと LED 照射用ファイバーをセットする。暗幕を閉めて IIT と PMT の電源を入れる。IIT は gain9、PMT は 2350 V に設定し、10 時間以上の長期安定動作を行う (安定動作とは電源を上げただけの状態を意味する)。IIT はゲート機能がついているため LED の光にゲートを同期させてデータを取得した (LED の光はパルスジェネレータを用いた)。大口径 EBCCD の線形性実験との結果の比較を行うためにおおよその統計数を合わせた。大口径 EBCCD の場合は LED の周波数が 1 k Hz で  $32\text{msec} \times 30 = 960\text{msec}$  の時間に入射する光量での線形性を評価したので、統計数を合わせる意味で IIT では 1000 イベントのデータを取得した (IIT の場合の LED の照射周波数は 5 Hz)。この測定作業を LED の電圧を徐々に上げていながら行う (LED 電圧は 1.62V から 5.00V まで、電圧を与える時間幅は 50nsec、周波数は 5 Hz)。gain9 の測定後は IIT の MCP の gain を 8 にして 30 分安定動作した後に上記と同様の測定を行った。gain8、9 の測定が終わると PMT への入射光量を測定する。LED の周波数を 1 k Hz に設定し、各 LED 電圧で 30000 イベントのデータを取得する。測定が終わると解析に移る。



### 5.3.2 解析

画像データは大口径 EBCCD と同様にピクセルの位置とそのピクセルでの電荷量の情報を持っている。ピクセルでの電荷量は入射光量に比例するため、電荷量のデジタル化された数値をそのまま解析に用いる (IIT のデータは既にベースラインの引き算が行われている)。IIT からの出力はファイバーからの光の光量重心を中心地とし、中心地から上下左右 15 ピクセル分の ADC カウントを合計した値を出力と定義する (中心地から上下左右 15 ピクセルなので合計  $31 \times 31 = 961$  ピクセル)。1000 イベント分の IIT からの出力の各ピクセルでの電荷量を足し上げて、1 イベントあたりの平均を IIT からの出力として求める。

PMT からの出力は CAMACADC として評価される。PMT の出力データは LED の照射周波数と同期させて取っている。IIT のデータ取得中は周波数が 5 Hz だが、PMT の解析をするためには統計的に足りないため、IIT のデータ取得後に周波数を 1 k Hz に上げて PMT のデータ取得は行う。合計 30000 イベントの PMT からの出力データを解析ツール ROOT を用いてヒストグラム化して、関数でフィッティングを行う。この時のフィッティング関数は大口径 EBCCD の解析で用いたフィッティング関数と同様。このフィッティングの際のパラメータから入射光量を評価する。最終的には PMT の入射光量から IIT の入射光量を評価する。

上記の解析をすべての LED 電圧のデータで行う (LED 電圧: 1.62、1.70、1.80、1.90、2.00、2.15、2.30、2.45、2.60、2.75、2.90、3.05、3.20、3.35、3.50、3.80、4.10、4.40、4.70、5.00V)。縦軸を IIT からの出力 (ADC カウント) 横軸を IIT への入射光量 (平均光電子数) としてプロット、グラフに直線でフィッティングをかけて線形性の評価を行う。測定に関わる誤差は時間の都合上評価することが出来なかった。

### 5.3.3 評価

解析して得た IIT の出力 (ADC カウント) と PMT ファイバーの入射光量から求めた大口径 EBCCD ファイバーの入射光量をグラフにプロットしプロットしたグラフを直線でフィッティングをかける。フィッティングは目視で直線が確認される範囲でフィッティングをかける。このフィッティングからの実測データのずれを評価する。横軸を光電子数、縦軸をフィッティングからのずれを  $([\text{ベストフィットからの値}] - [\text{実測データ}]) / [\text{ベストフィットからの値}] \times 100\%$  としてプロットした。

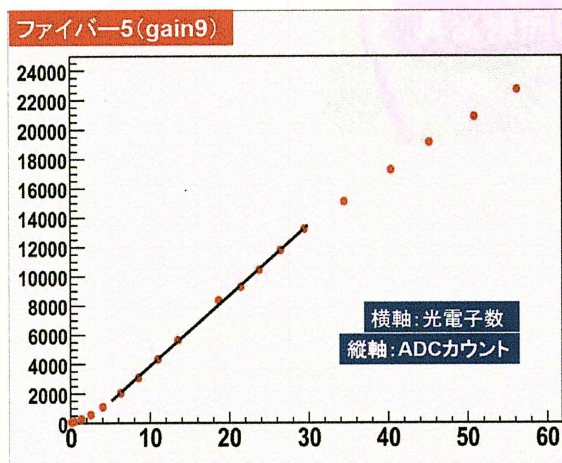


図 5.11: MCP の gain9 での線形性 (IIT)

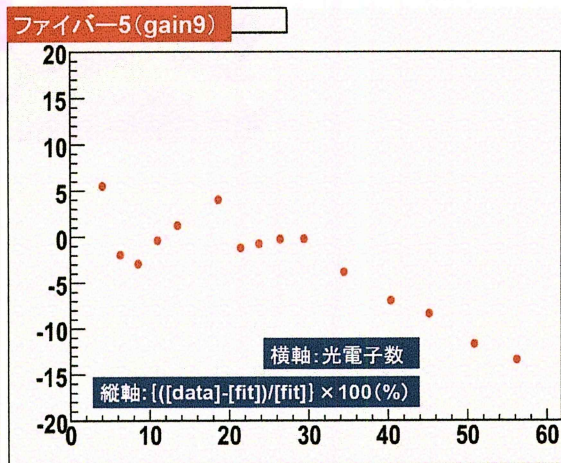


図 5.12: フィッティングからのずれ (MCP の gain9)



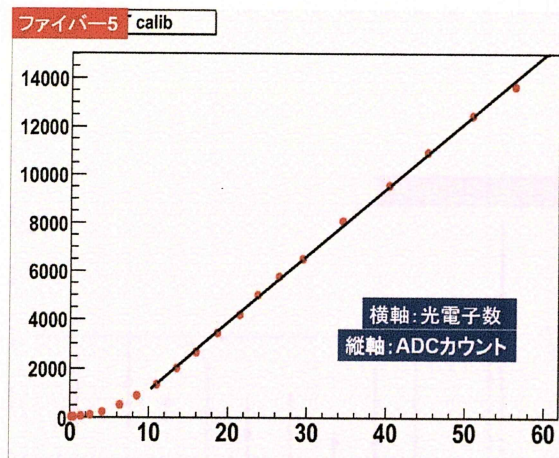


図 5.13: MCP の gain8 での線形性 (IIT)

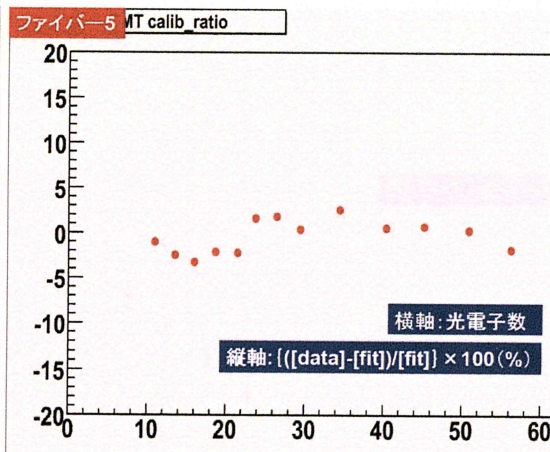


図 5.14: フィッティングからのずれ (MCP の gain8)

MCP の gain9 のグラフから 4 から 35 光電子数の範囲で線形性が保たれている用に見えるが、光量の低い部分と高い部分で線形性が保たれていない。光量の高い範囲ではサチレーションが起こっていると考えられる。MCP の gain8 のグラフから 10 から 60 光電子数の範囲で線形性が保たれているように見える。光量の低い部分では線形性が保たれていない。この低光量での線形性の振る舞いについて少し考察する。

IIT の gain8 と gain9 のセッティングの違いは MCP の印加電圧を変えているだけで、前段の静電加速部分に印加される電圧に変化はない。gain8 と gain9 で MCP に入射する光電子数はほぼ同じ数となるはずなので、MCP によって増幅されて蛍光面に入射する電子の数のみに違いが出てくると考えられる。つまり低光量範囲では gain8 と gain9 では縦軸のスケールが違うだけの形の似通ったグラフになると考えられるので確認することとする。

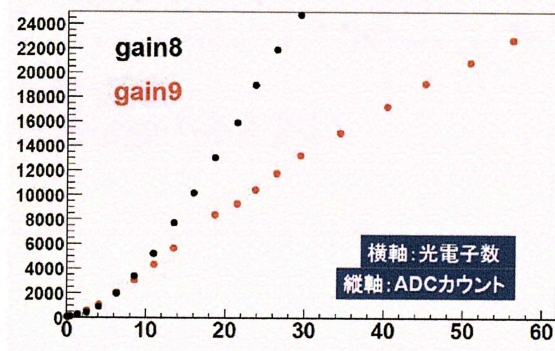


図 5.15: MCP 構造

左図は gain8 のグラフの値を 4 倍して gain9 のグラフと重ねて描いた図である。このグラフから低光量部で gain8 と gain9 のグラフが重なっており、図 5.11 や図 5.13 の低光量部分での振る舞いが違うように見えたのは縦軸のスケールの違いが原因である。つまり IIT の特性として低光量部分では MCP の gain に関係なく線形性は保たれないということが分かった。これは IIT が電子から光への再変換に蛍光板を使用しており、この蛍光板の低光量部分で線形性が保たれていないことが原因だと考えられる。

gain8 で測定した時のベストフィットからのずれは 10 から 56 光電子数で ±4% 以下となっており、線形性の良い検出器だということが改めて示された。gain9 のグラフからサチレーションを起こしていないであろう 4 から 35 光電子数の範囲でベストフィットからのずれは ±6% 以下という結果となった。十数光電子数あたりで測定点に間が空いているが、この点は明らかに異常な値を示していたのでこの評価には加えなかった。測定ミスによる可能性もあり、再度測定した後に gain9 での IIT の線形性を評価しなおす必要があると考える。測定の精度とダイナミックレンジを考慮して、この論文では IIT の gain8 での線形性と大口径 EBCCD の線形性について比較評価していくこととする。



### 5.3.4 大口径 EBCCD と IIT の線形性を比較

大口径 EBCCD と IIT それぞれの入射光量に対する出力の線形性の関係グラフを比較する。IIT の線形性実験には大口径 EBCCD のファイバー 5 のみを用いたためこのファイバーについて評価を行う。

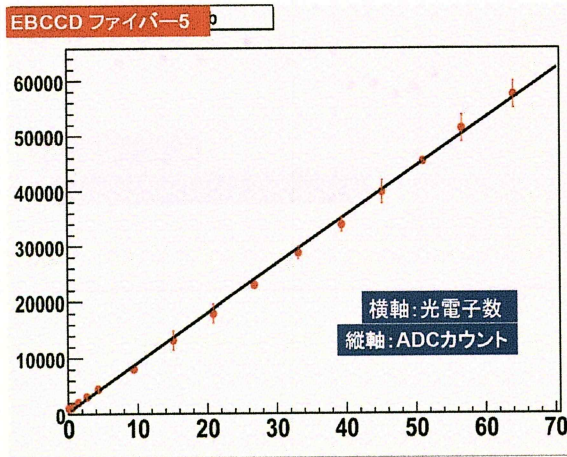


図 5.16: 大口径 EBCCD のファイバー 5 での線形性

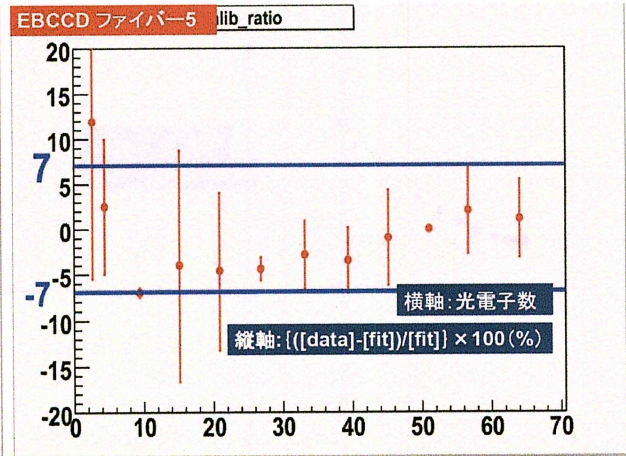


図 5.17: フィッティングからのずれ (大口径 EBCCD)

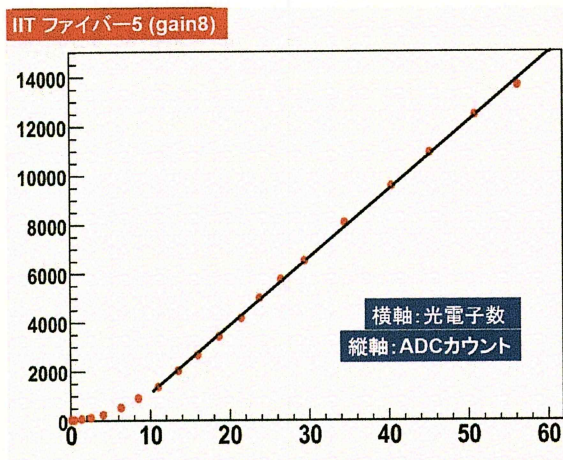


図 5.18: MCP の gain8 での線形性 (IIT)

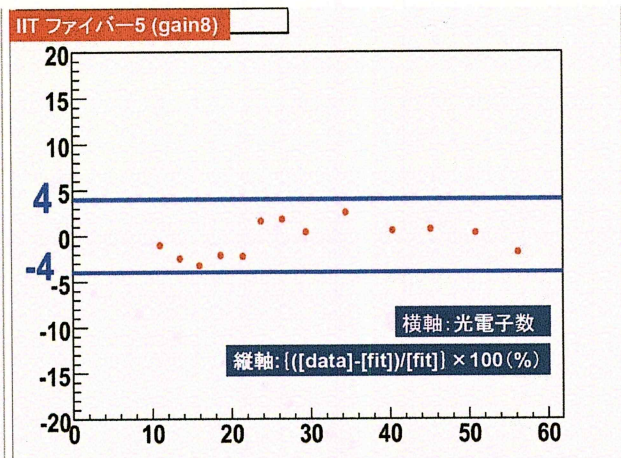


図 5.19: フィッティングからのずれ (MCP の gain8)

光量のダイナミックレンジは IIT(gain8) は 10 から 56 光電子数あたりまで線形性が確認された。大口径 EBCCD の方は入射光量が 70 光電子数あたりまで線形性が保たれていた。IIT の gain9 の場合は検出器のゲインの上昇とともに低光量の範囲で線形性が保たれる一方で 30 光電子付近でサチレーションを起こしている。ベストフィットからのずれに関しては IIT の gain8 のほうが ±4% 以内に収まっており、大口径 EBCCD の数光電子数の低光量部分を考慮しない場合の ±7% 以内のずれに比べて優れている結果となった。

次に大口径 EBCCD のフィッティング範囲を IIT に対応させて 10 光電子付近からに設定して、IIT の gain8 との線形性を比較する。

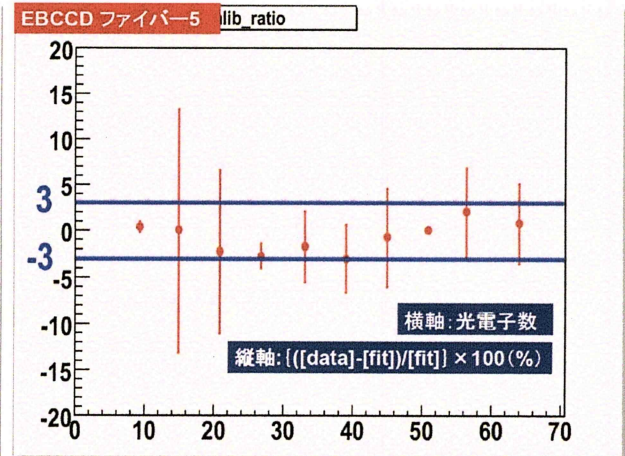
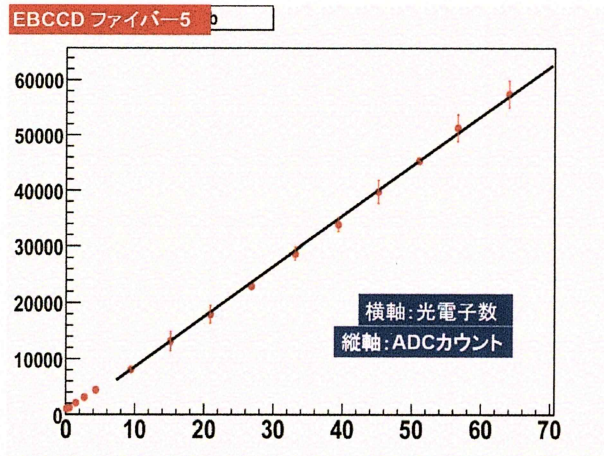


図 5.20: 大口径 EBCCD のファイバー 5 での線形性      図 5.21: フィッティングからのずれ (大口径 EBCCD)

10 光電子数付近からのフィッティングの場合ではベストフィットからのずれは± 3%以内に収まり、IIT と同程度の性能が示された。大口径 EBCCD と IIT の性能差の一つとしてゲート機能の有無が挙げられるため、現段階での線形性の明確な優劣はつけることはできないが、大口径 EBCCD は IIT と入射光量に対する出力の線形性は同程度の性能があることが示された。加えて大口径 EBCCD は電圧 10kV の設定で広いダイナミックレンジをカバーしているのに対して IIT の場合は MCP のゲインによってダイナミックレンジが大きく変わっており、IIT より大口径 EBCCD のほうがいろいろな実験環境への適用性が大きいこともこの結果から言える。



## 第6章 まとめ

この論文では大口径 EBCCD の性能評価としてベースライン特性、画像特性、空間分解能、入射光に対する出力の線形性についての評価を行った。特に空間分解能と入射光量に対する線形性について IIT と性能比較を行った。結果として大口径 EBCCD の性能は IIT の性能と比較して同等もしくはそれ以上の性能を持つことが示された。浜松ホトニクスでの性能評価と一般仕様とあわせて現段階で得られている大口径 EBCCD の性能を以下にまとめる。

### ● 大口径 EBCCD の一般仕様

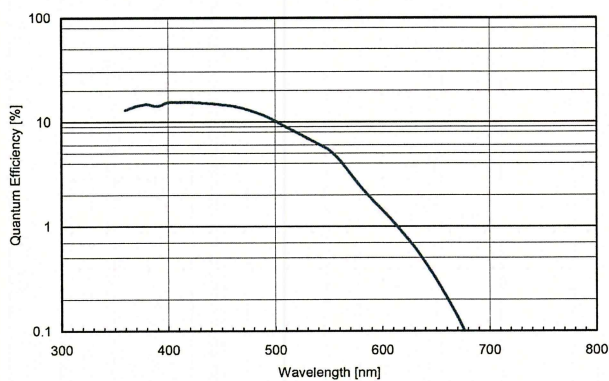
浜松ホトニクスからの仕様書に記された一般仕様を以下に示す。



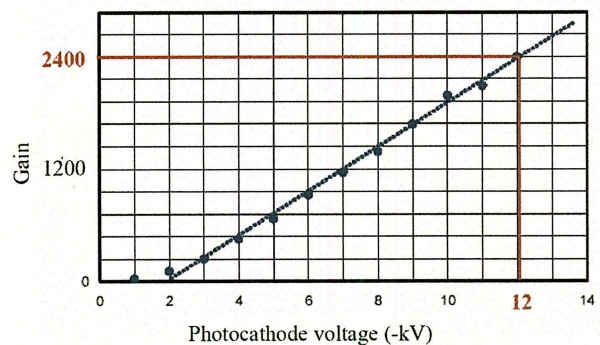
大口径 EBCCD の写真

光電面波長感度	350nm-650nm
光電面材質	バイアルカリ
光電面有効面積	46 × 36
入射窓材質	Fiber Optic Plate(FOP)
縮小率	1/5
CCD 素子の読み出し方法	FT-CCD (Frame Transfer 型)
CCD 素子の有感面積	6.7 (縦) × 9.0 (横)
CCD 素子の画素数	480(縦) × 640(横) ピクセル
CCD 素子の画素サイズ	14 μ m × 14 μ m
光電面への印加電圧 (最大)	-12kV

### ● 浜松ホトニクスでの性能評価

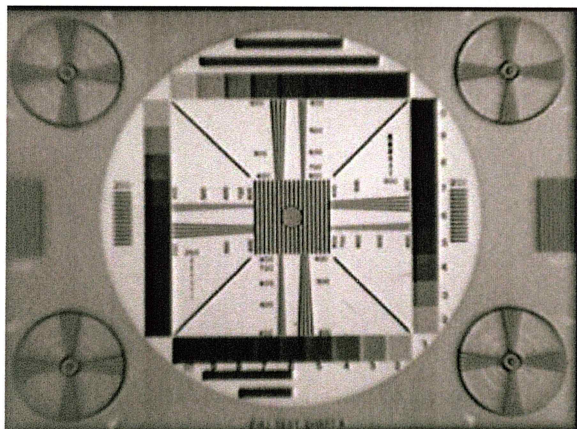


大口径 EBCCD の分光感度特性  
量子効率 15%@420nm

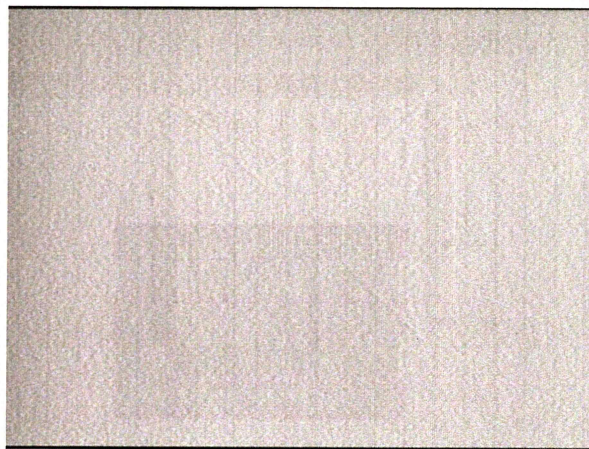


大口径 EBCCD のゲイン特性  
gain 2400@12kV





EIAJ 解像度チャートの撮影画像 (12kV)  
 CCD 上で 400TV 本 (29lp/mm)=光電面上で 5.8lp/mm



微弱光での EIAJ 解像度チャートの撮影画像 (12kV)  
 シングルフォトンレベルの光を検出できてない

● ベースライン特性

安静動作から電源を入れてからのベースラインの振る舞い (実験 1) と安定動作後の電源の上げ下げ後のベースラインの振る舞いを評価した (実験 2)。

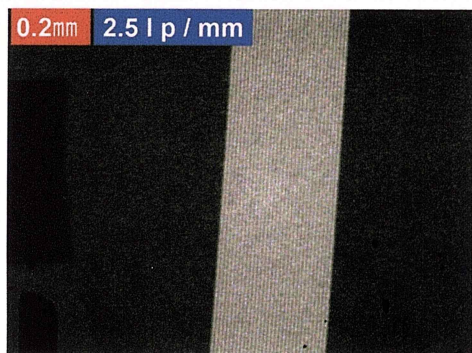
実験 1 : ベースラインが安定するまでに電源を上げてから 10 時間以上の安定動作が必要。

実験 2 : 電源の上げ下げ後にベースラインが安定するまでに 90 分以上の安定動作が必要。

外気温の変動にベースラインが引っ張られる現象が確認されたが、大口径 EBCCD が一度安定してしまえば短時間での急激なベースラインの変動もなく、± 10%以内の変動なので実験への影響は小さいと考えられる。より精密な測定を行いたい場合は恒温槽内などでの温度環境が整った状態で測定を行う必要がある。

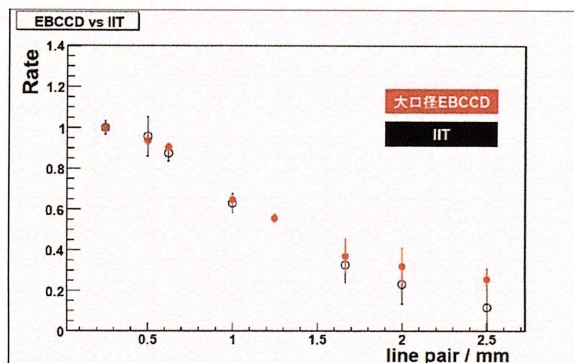
● 空間解像度

縦縞チャートを用いて大口径 EBCCD と IIT の水平解像度を比較評価した。



線幅 0.2 間隔の縦縞チャート図

大口径 EBCCD は 0.2 線幅のチャート図まで白黒の線が分離できた。



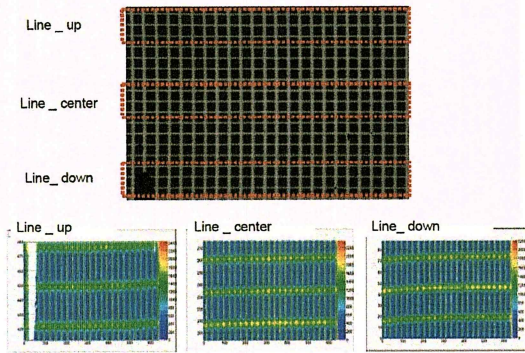
振幅の相対値 (IITvs 大口径 EBCCD)

IIT と同程度の空間分解能が示された。線幅の小さい範囲では相対値の減少具合から大口径 EBCCD のほうが分解能が高い。

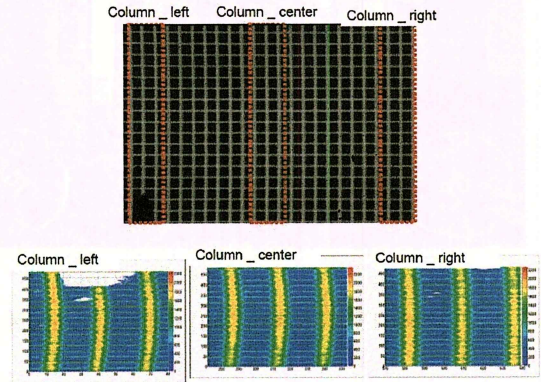


● 画像特性

出力画像の歪が確認された。歪は左右非対称に現れており、光電面の中心と CCD の中心のずれが予想されるため、今後確認する必要がある。



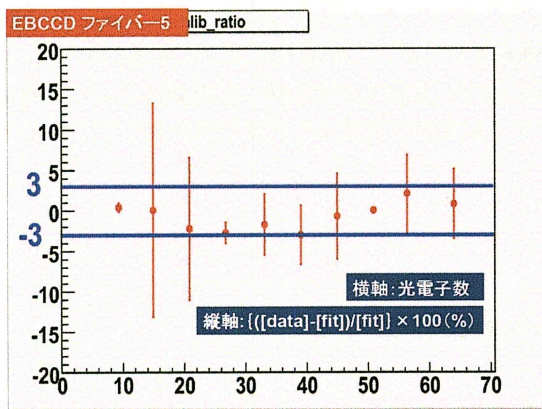
格子チャートでの行 (Line) 行方向の振る舞い



格子チャートでの列 (column) 方向の振る舞い

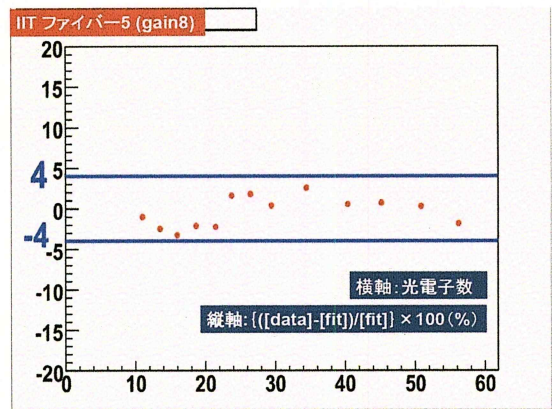
● 入射光量に対する線形性

大口径 EBCCD と IIT の入射光量に対する出力の線形性についてベストフィットからのずれを用いて評価した。フィッティングの範囲は 10 光電子数付近からとした図を以下に示す。



フィッティングからのずれ (大口径 EBCCD)

8 から 64 光電子数の範囲でベスト  
フィットからのずれが ± 3% 以内



フィッティングからのずれ (MCP の gain8)

10 から 56 光電子数の範囲でベスト  
フィットからのずれが ± 4% 以内

## 第7章 今後の課題

### ● 大口径 EBCCD の今後の課題

#### 1. 高電圧に対する対策

：高電圧が印加されているため放電が起こる可能性があり、この放電によって大口径 EBCCD の破損の恐れや長期的な動作をする場合には寿命自体も短くなる可能性もある。なにより高ゲインを得るためには EBCCD の構造上印加電圧を上げることが簡単で確実な方法となるために高電圧への対策は課題となっている。

#### 2. 読み出し CCD の変更（問題と課題）

：問題として現在使用中の大口径 EBCCD では読み出し CCD にチャージ漏れと思われる症状が起きており、この部分は検出器としては感度がなくなっているため、原因の特定と CCD 自体の付け替えなどの必要があるように思われる。大口径 EBCCD の長期的な実験での使用を想定しているのであれば、高電圧に対する対策を含めて原因の特定は大変重要な課題となる。課題としては大口径と名前がついているが、実際には光電面の中心部の  $4.6\text{cm} \times 3.6\text{cm}$  しか CCD が読み出せる範囲がないので、読み出し CCD の大型化もしくは電子レンズの再設計などの対策が必要だと考えられる。

#### 3. ゲート機能の追加

：現在の大口径 EBCCD ではゲート機能がついておらず、 $1\text{frame}=32\text{msec}$  の時間分解能で測定を行っているが、ゲート機能をつけることで IIT と同様に様々な用途への応用が効くと考えられる。特に素粒子実験の分野ではシンチレーティングファイバーと組み合わせて多チャンネル読み出しデバイスやリングイメージングチェレンコフ検出器などイメージングデバイスとして応用用途が多岐にわたって存在する。

### ● 大口径 EBCCD の性能評価実験の課題

#### 1. 放電対策

：放電対策をしっかりとすることで印加電圧を  $12\text{kV}$  に設定して実験を行いたい。印加電圧  $10\text{kV}$  の場合の  $1.2$  倍のゲインが得られるので、 $1$  光電子レベルの微弱光に対しての大口径 EBCCD の感度についても追求する必要がある。

#### 2. 線形性のダイナミックレンジの拡大

：現在はゲート機能がついていないために  $70$  光電子程度の光までしか入射していないが、ゲート機能が追加された場合に現在の CCD の飽和電荷量からこの数倍程度の光の検出も可能になると予想される。

#### 3. 線形性の位置依存性

：今回の論文では  $5\text{mm}$  間隔でファイバーを設置して線形性の評価を行ったが、より細かくより広い範囲をスキャンできるような測定方法を考案する必要があり、測定の際にはシンチレーティングファイバーの取り外し作業を省けるような構造にすることでより精度の高い測定が実現すると思われる。

#### 4. 線形性の HV 依存性

：印加電圧による大口径 EBCCD の線形性について特性を理解しておく必要がある。

#### 5. 絶対ゲインの測定

：線形性の HV 依存性と同様に特性として理解する必要がある。

#### 6. 空間分解能の追求

：神戸大学の結果では縦縞チャートによる水平解像度は  $0.2\text{mm}$  の線を分離することが可能であることを確認した。しかし  $0.2\text{mm}$  という値は大学で用いたプリンターの精度によって決まったものであり、より幅の



小さい縦縞チャートで解像度を評価する必要がある。読み出し CCD による影響も考えて、横縞チャートを用いての垂直解像度の評価も必要な実験と考えられる。

#### 7. 微弱光を用いた空間分解能の評価

：この論文には間に合わなかったが、線源と蛍光板と銅版を用いての微弱光での解像度の評価が検討されている。これは蛍光板のような残光時間の長いぼやとした光を照射した場合の大口径 EBCCD の特性を確認したいという意図を持っている。実験は銅板で作られた楔を用いて解像度を評価したいが、工作の難しさなどの課題が残る。将来の多分野への応用を想定して押さえておく必要のある項目だと考える。

## 参考文献

- [1] 浜松ホトニクス（株）電子管事業部.『大口径 EBCCD カメラ取扱説明書 ver1.0』. 2005.
- [2] 浜松ホトニクス（株）電子管事業部.『大口径 EBCCD 試験報告書』. 2006.
- [3] 中川仁太. 卒業論文『大口径 EBCCD の性能評価』. 2008.
- [4] 田中康之. 修士学位論文『イメージインテンシファイアーのゲート方法に関する性能評価』. 1999.
- [5] 田村勇樹. 修士学位論文『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.
- [6] KEK サマーチャレンジ課題番号4「地球に降りそそぐ宇宙線を視る!」. 2008.
- [7] 米本和也.『CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用』. CQ 出版社. 2003.
- [8] 鈴木茂夫.『わかりやすい CCD/CMOS カメラ信号処理技術入門』. 日刊工業新聞社. 2005.
- [9] 渡辺徹.『学生・研究者・技術者のための L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X を用いた論文作成術』. プレアデス出版. 2008.
- [10] JOHN R.TAYLOR(著) 林茂雄・馬場涼(訳).『計測における誤差解析入門』. 東京化学同人. 2000.
- [11] GLENN F.KNOLL(著) 木村逸郎/阪井英次(訳).『放射線計測ハンドブック第3版』. 日刊工業新聞社. 2001.



## 付録.A 大口径 EBCCD の地磁気による影響

大口径 EBCCD の特性として地磁気による効果を調べる。大口径 EBCCD は電子を静電加速して画像データを取得しているため、磁気による影響が少なからず問題となる。今後の量産期に向けて一応の特性を調べておく必要があると思い、この実験を行った。この実験ではおおまかな特性を調べることを前提としているので定量的な評価は行っていない。実験は格子チャートを大口径 EBCCD の光電面に貼り青色 LED で照射する。大口径 EBCCD のセットしている向きを  $45^\circ$  ずつ動かして各方位での大口径 EBCCD からの出力を画像として取得した。セッティングはデジタルの方位磁石を用いて決めているため、図で表している角度には大した精度はない。この実験での方位と角度の対応図として図 2 に示す。

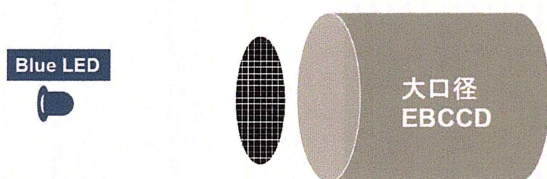


図 1: 地磁気特性の実験セットアップ

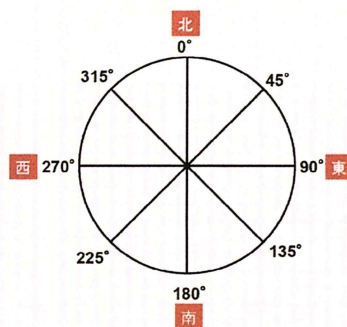


図 2: 方位と角度の対応図

北の方位を  $0^\circ$  として  $45^\circ$  ずつずらして LED を照射し、積分画像を取得した。積分する frame 数は各方位で LED の位置が動くため（暗箱のサイズが小さいため）、それぞれの方角で見やすいように変えてある。取得した画像は  $0^\circ$ （北）、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ （東）、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ （南）、 $225^\circ$ 、 $270^\circ$ （西）、 $315^\circ$  の 8 回測定を行った。以下に各角度での積分画像を示す。 $0^\circ$  と表記された画像は大口径 EBCCD の光電面に照射する LED の方向を  $0^\circ$  とし、大口径 EBCCD が LED と同一直線上で光電面を LED の方に向けるようにセッティングして得られた画像の事を表している（大口径 EBCCD の光電面は  $180^\circ$  の向き）。以下に各角度で得られた画像を示す。画像はベースラインの処理が行われている。画像は  $0^\circ$  の時に水平・垂直がでるようにチャートをセットした。チャートははがれないようにするために、黒テープで固定してある。

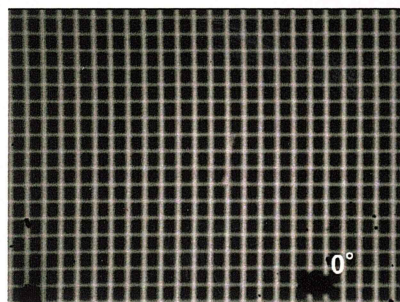


図 3:  $0^\circ$ （北）画像

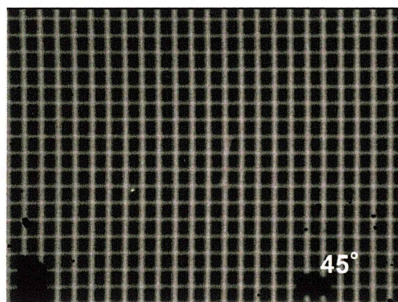


図 4:  $45^\circ$ （北東）画像

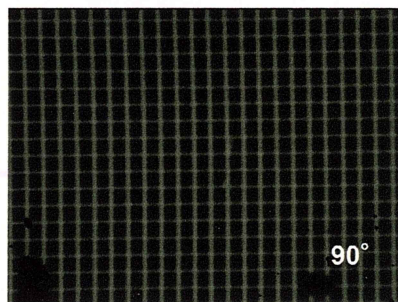


図 5:  $90^\circ$ （東）画像



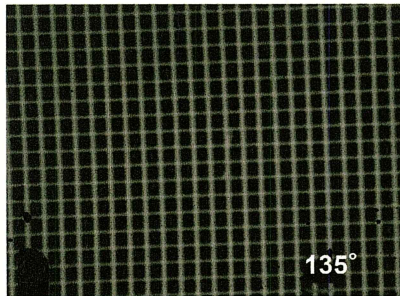


図 6: 135° (南東) 画像

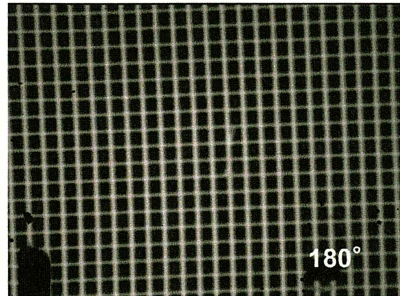


図 7: 180° (南) 画像

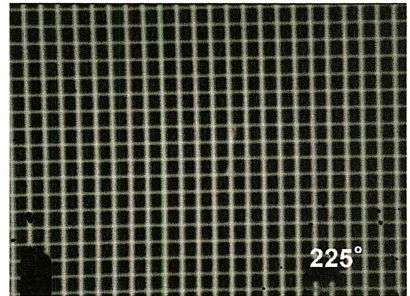


図 8: 225° (南西) 画像

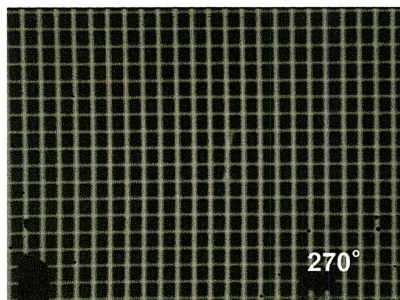


図 9: 270° (西) 画像

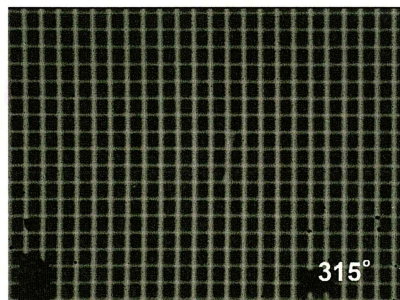


図 10: 315° (北西) 画像

90° (東:図 5) と 270° (西:図 9) の画像から地磁気の影響が見られる。すべての図中の右下に黒い点があるが、これはチャートに意図的に修正液をつけたものである。左下にある黒い部分はサチレーションを起こしている。90° の右下の黒点と 270° の右下の黒点では位置が上下に動いている。0° の画像と比較して 90° でチャートを撮影した画像では下に移動している。0° の画像と比較して 270° の画像は上に移動している。これらの結果は電子の進む向きと磁場の方向を考えればつじつまの合う結果となっている。以下に 90° と 270° での大口径 EBCCD に入射した光が光電変換されて電子を発生した時の磁場から受ける力の概略図を示す。青の矢印が電子の受ける力の方向。

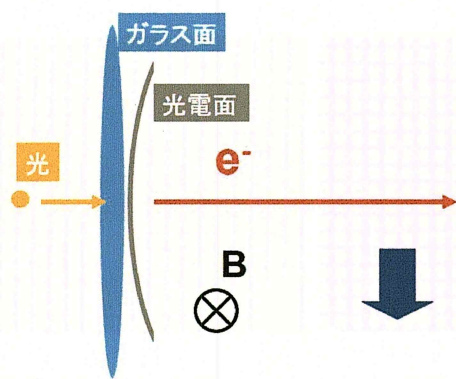


図 11: 90° でセッティングした時の磁場による影響

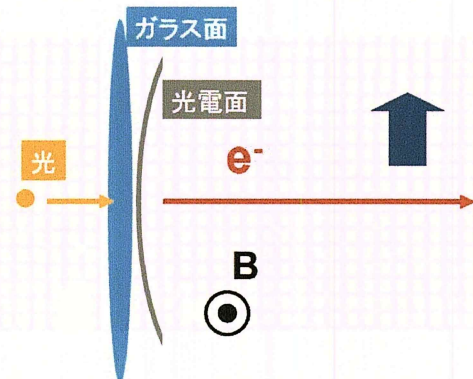


図 12: 270° でセッティングした時の磁場による影響

次に 0° の画像から順に見ていくと格子チャートが 180° までは左回転し、その後右回転していく様子が見られる。これは大口径 EBCCD は電子レンズで電子を収束しているため、電子の軌道は一度クロスオーバーするように入射していく。電子の入射を二次元で見ると電子は大口径 EBCCD のレンズ部分を横切るように進行していく。つまり磁場に対して垂直方向に横切ることとなり、磁場から力を受けることとなる。以下に 0° と 180° での大口径 EBCCD 内で電子が磁場から受ける力の概略図を示す。



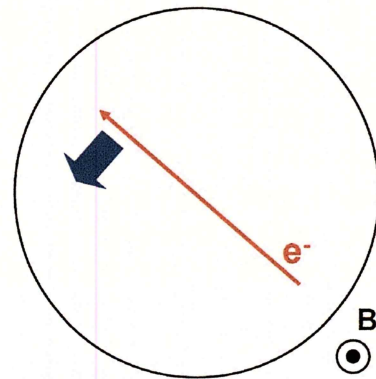
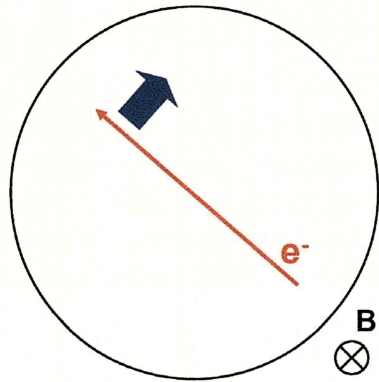


図 13: 90° でセッティングした時の磁場による影響

図 14: 270° でセッティングした時の磁場による影響

これらの結果から大口径 EBCCD は構造上磁場の影響を受けやすい検出器だということが出来る。確認は出来ていないが、 $\mu$  メタルなどの高透磁率磁性物質で磁気シールドが行われていない可能性があり、確認する必要がある。試作段階の大口径 EBCCD での加速器周りなどの高磁場下での使用は少し厳しいと思われる結果となった。

## 付録.B 大口径EBCCDとシンチレーティングファイバーブロック

大口径EBCCDのデモンストレーションとしてシンチレーティングファイバーブロックと組み合わせて宇宙線を観測する。実験はファイバーブロックを大口径EBCCDのガラス面に直接くっつけて宇宙線がブロックを通過した際のシンチレーション光を大口径EBCCDで読み取る。大口径EBCCDには高速ゲート機能がないため1frameの画像を連続的に撮り続けて、その中から宇宙線イベントを選び出した。ベースラインの処理はあらかじめ入射光のない状態での画像を用いて画像の引き算を行う。ここでベースラインは安定していて常に同じ状態と仮定してこの処理を行うため、10時間以上の安定動作後に実験を開始する。大口径EBCCDに与える電圧は10kVとする。

以下に実験のセットアップとファイバーブロック、宇宙線イベントを示す。

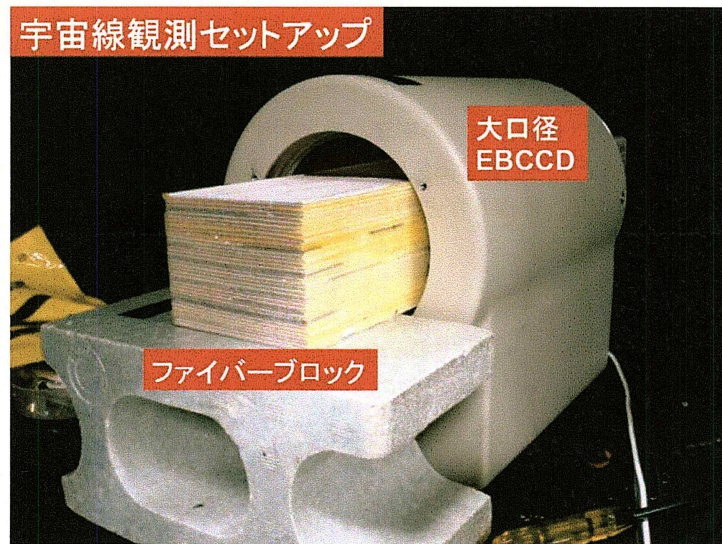


図 15: 宇宙線観測実験のセットアップ



図 16: シンチレーティングファイバーブロック



図 17: ファイバーブロックの断面





図 18: 宇宙線イベントその 1

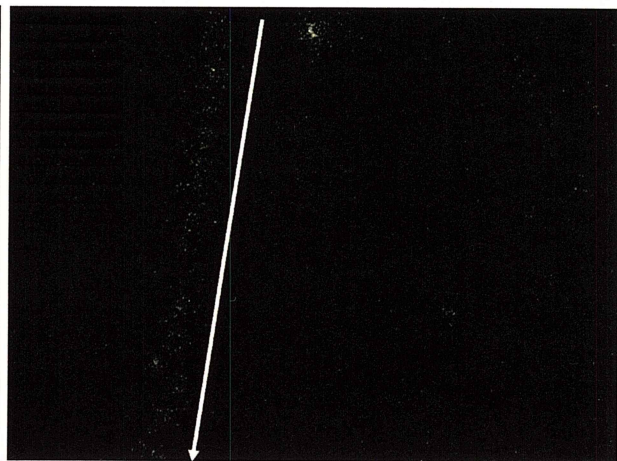


図 19: 宇宙線イベントその 2

高速ゲート機能のない大口径 EBCCD で宇宙線イベントの観測に成功した。本文 2.4.3 の IIT の使用例で挙げた IIT とファイバブロックとの組み合わせによる宇宙線イベントの画像と比較すると明らかに劣っているように見える。これは大口径 EBCCD のゲート 32msec の時間幅なので S/N 比が悪くなったことが大きな理由と考えられる。ゲインも IIT の  $10^4$  から  $10^5$  倍程度に比べて 2000 倍程度しか得られないことも理由と考えられる。

## 付録.C Hipic 使用方法

大口径 EBCCD の画像取得・加工・記録用プログラムの Hipic の使い方について書いておく。Hipic は浜松ホトニクス製のカメラの画像処理などのために開発されているプログラムである。使い方といっても実験で使う最低限について記すこととする。詳しくは大口径 EBCCD に付属の CD-ROM 内に Hipic の使用書が PDF ファイルで入っているのでそちらを参照する必要がある。

### 基本的な使い方

デスクトップ上の Hipic のアイコンをクリックして Hipic を立ち上げる。Hipic と大口径 EBCCD の CCD 読み出しは連動して作動するので、CCD カメラの電源は上げておく必要がある。



図 20: Hipic のデスクトップ上でのアイコン

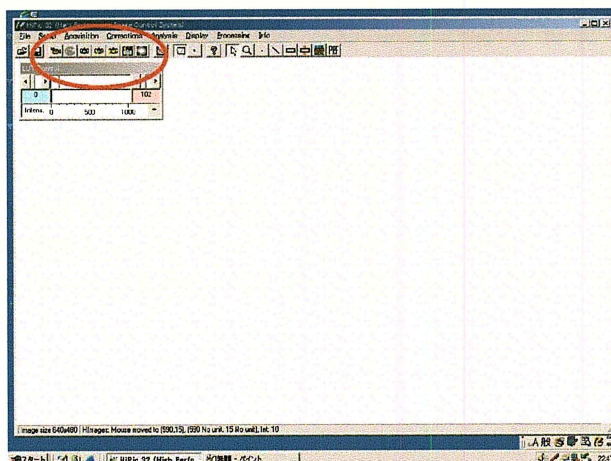


図 21: Hipic の立ち上げ画面

- Live モード

Hipic が立ち上げた後に画面上の『Aquisition』の中の Live を開いて『Aquisition control』を立ち上げる。『Aquisition control』で Live をクリックすると CCD からの生の映像を見ることが出来る。Single Exp. をクリックした場合は 1frame=32msec での積分画像を取得することが出来る。

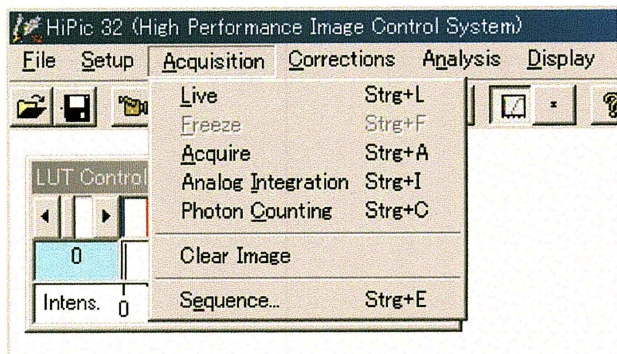


図 22: Aquisition control の立ち上げ

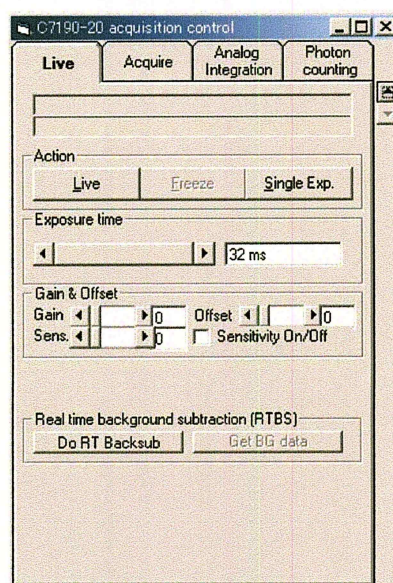


図 23: Aquisition control 画面



● Analog Integration モード

Analog Integration のタブを開いて frame 数を指定し、Integration と書かれた部分の数値を変え、Integrate をクリックするとその frame 分の積分画像が得られる。この時に LUT Control で画像の輝度調節が可能となる。薄緑色の枠内の数値を変えることで閾値を設定することができる。薄赤色の枠内の数値を変えることで輝度の最大値を設定することができる。

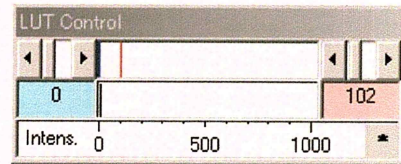
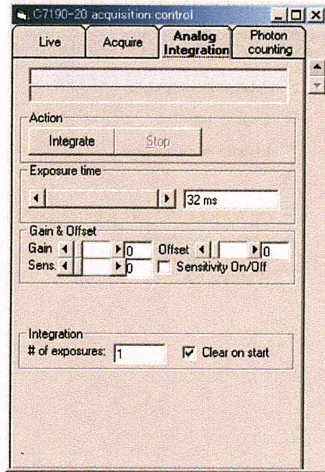


図 25: LUT Control

図 24: Aquisition control の Analog Integration のタブ

連続的なデータの取得

● Sequence モード

連続的なデータの取得方法として Sequence モードがある。Hipic 画面の上にある Aquisition の中の Sequence を開く。開くと『Sequence control』が開かれるのでそこで Aquisition のタブで Aquisition モード・画像をとる回数・画像をとる時間間隔とオプションを選択する。次に Data Storage のタブで Store to HD にチェックを入れてデータの保存場所を指定する。積分する frame 数は『Aquisition control』の Analog Integration のタブで指定することができる。Acquisition のタブにある Start Acquisition をクリックするとデータ取得が開始される。

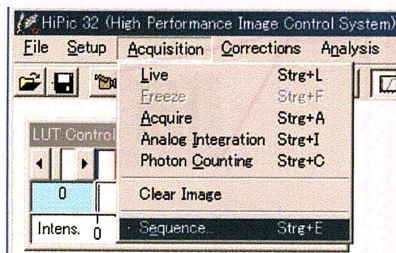


図 26: Sequence モードの立ち上げ

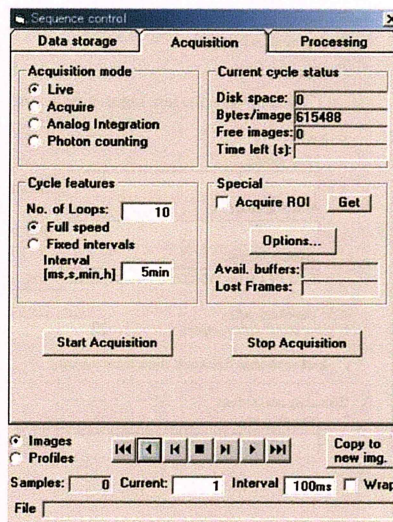


図 27: Sequence Control 画面

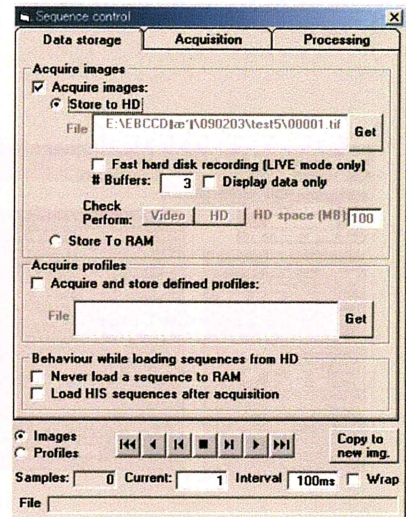


図 28: Sequence control の Data storage のタブ



## Back ground 除去

Back ground の除去には 2 つある。あらかじめ引き算を行う画像を指定しておく場合と撮影直後のベースラインの状態を引き算する方法が存在する。ここでは一例として連続的に画像を取得した場合に指定した画像の引き算を行う方法を示す。『Sequence control』の画像を取得する設定を決めた後に Acquisition のタブにある Option を開き、Do auto corrections after sequence にチェックを入れる。

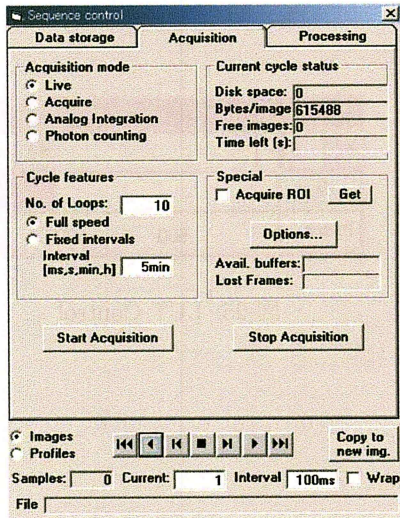


図 29: Sequence control の Acquisition のタブ

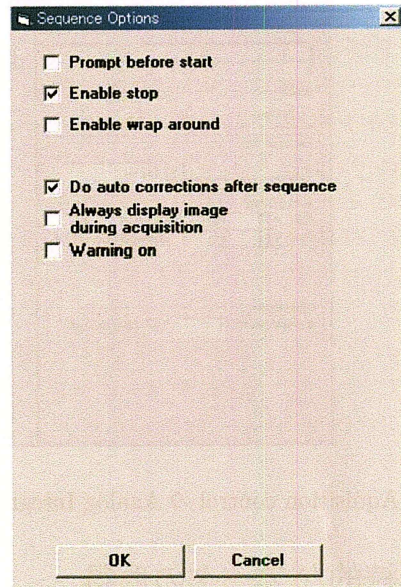


図 30: Sequence Option 画面

次に Hipic の立ち上げ画面上部のタブの中での Corrections の Correction Setup を開く。Correction setup (Background/shading) の File にチェックを入れ、各モードで引き算するファイル指定する。ここまでセットし終わると測定を開始する。測定が終わると LUT Control で輝度を調節した後に Hipic の立ち上げ画面上部の Background 除去用のカメラのマークを押すと自動的に取得したすべての画像からベースラインの引き算を行ってくれる。

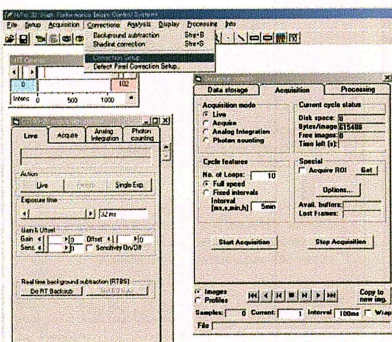


図 31: Correction Setup の立ち上げ

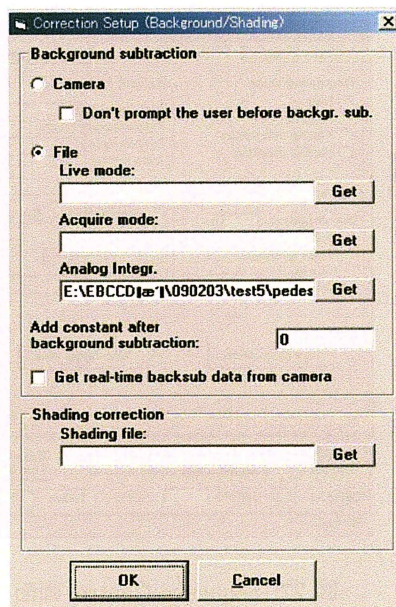


図 32: Correction Setup 画面

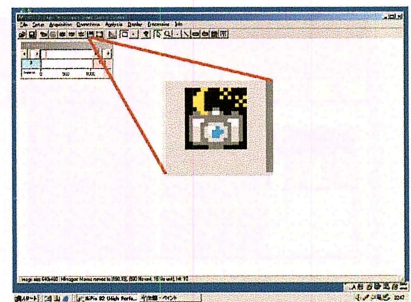


図 33: Background 除去のアイコン



# 目次

2.1	光電子増倍管の構造 (ボックス型)	5
2.2	スーパーカミオカンデ実験で使用されている 20 インチ PMT	5
2.3	MCP 構造	5
2.4	$\nu_e$ イベントによるチェレンコフリング	6
2.5	$\nu_\mu$ イベントによるチェレンコフリング	6
2.6	CCD 画素構造と電圧パルスによる 2 相方式での電荷転送	7
2.7	CCD の走査方式: FT 方式	8
2.8	CCD の走査方式: FFT 方式	8
2.9	通常 CCD と裏面照射型 CCD の違い	9
2.10	IIT の分類 (KEK サマーチャレンジ 07 課題番号 4 から引用)	10
2.11	IIT-CCD チェーンの構造	11
2.12	SciFi 検出器	12
2.13	SciFi ブロックと IIT で宇宙線観測	13
2.14	近接型 EBCCD の構造	14
2.15	インバータ型 EBCCD の構造	14
3.1	大口径 EBCCD の写真	15
3.2	大口径 EBCCD の構造	16
3.3	大口径 EBCCD の分光感度特性	17
3.4	大口径 EBCCD のゲイン特性	17
3.5	EIAJ 解像度チャート	18
3.6	EIAJ 解像度チャート (読み取り方法)	18
3.7	EIAJ 解像度チャートの撮影画像 (12kV)	18
3.8	微弱光での EIAJ 解像度チャートの撮影画像 (12kV)	18
3.9	CCD 素子のチャージ漏れ	19
3.10	放電の具体的な例	20
3.11	絶縁テープ	20
3.12	テフロン板	20
3.13	銅線の接地	21
3.14	ファイバー治具 (光電面と接地する面)	21
3.15	銅線と内枠の接地点	21
3.16	ファイバー治具固定後の全体図	21
4.1	温度計の設置箇所	22
4.2	ベースラインと温度の時間変化 (実験 1)	23
4.3	ベースラインと温度の時間変化 (実験 2)	24
4.4	縦縞チャート (0.8mm 間隔)	26
4.5	山と谷のつぶれ	26
4.6	縦縞チャートの撮影図	27
4.7	解析時の回転前後図	27
4.8	1mm 間隔縦縞チャートの解析図 (3D)	28
4.9	1mm 間隔縦縞チャートの解析図 (2D)	28

4.10 1	間隔縦縞チャートの足し上げ図 (1 D)	28
4.11 1	間隔縦縞チャートの解析図 (振幅計算)	29
4.12	各線間隔の CCD 画像	30
4.13	縦方向重ね合わせ図	31
4.14	振幅の相対値図	31
4.15	ドットチャート図	32
4.16	格子チャート図	32
4.17	重心計算範囲 (白点が Fiber による光の照射地点)	33
4.18	ドットチャートの CCD での画像 (白線内のドットを解析に用いた)	33
4.19	行 (Line) のドット間隔	33
4.20	列 (column) のドット距離	33
4.21	Line6 のドット間隔	34
4.22	Line 方向のすべてのグラフのドット距離	34
4.23	Column8 のドット間隔	34
4.24	Column 方向のすべてのグラフのドット距離	34
4.25	格子チャートでの行 (Line) 行方向の振る舞い	35
4.26	格子チャートでの列 (column) 方向の振る舞い	35
4.27	大口径 EBCCD の線形性実験セットアップ (写真)	36
4.28	LED 照射用治具の概要	36
4.29	ファイバー照射用治具	36
4.30	PMT の写真 (H7195P)	37
4.31	PMT の時間特性 (フローチャート)	37
4.32	PMT の CAMACADC 値の時間変動	37
4.33	ファイバー治具と LED 照射治具	38
4.34	ファイバー 1 から 5 の校正直線	39
4.35	ファイバー 7 から 10 の校正直線	39
4.36	LED 電圧 5.90V での大口径 EBCCD1frame 解析画像	40
4.37	大口径 EBCCD の線形性実験フローチャート	42
4.38	ファイバー番号と位置関係 (大口径 EBCCD 用)	42
4.39	大口径 EBCCD の出力の定義範囲	43
4.40	PMT の光量のフィッティング	43
4.41	PMT への入射光量と大口径 EBCCD からの出力 (ファイバー 1 から 5)	44
4.42	PMT への入射光量と大口径 EBCCD からの出力 (ファイバー 7 から 10)	44
4.43	大口径 EBCCD の入射光量と出力の線形性 (ファイバー 1 から 5)	45
4.44	大口径 EBCCD の入射光量と出力の線形性 (ファイバー 7 から 10)	45
4.45	大口径 EBCCD の入射光量と出力の線形性 (ファイバー 7 から 10)	45
4.46	フィッティングからのずれ (ファイバー 7 から 10)	45
5.1	IIT 測定のセットアップ例	47
5.2	チャートの回転補正 (IIT)	48
5.3	解析時の回転後図	48
5.4	IIT での縦方向の足し上げ説明図	49
5.5	IIT での 1 間隔縦縞チャートの足し上げ図	49
5.6	IIT での 1mm 間隔縦縞チャートの解析図 (振幅計算)	49
5.7	縦方向重ね合わせ図	50



5.8	振幅の相対値図 (IIT)	50
5.9	振幅の相対値 (IITvsEBCCD)	51
5.10	IIT の線形性実験セットアップ	52
5.11	MCP の gain9 での線形性 (IIT)	53
5.12	フィッティングからのずれ (MCP の gain9)	53
5.13	MCP の gain8 での線形性 (IIT)	54
5.14	フィッティングからのずれ (MCP の gain8)	54
5.15	MCP 構造	54
5.16	大口径 EBCCD のファイバー 5 での線形性	55
5.17	フィッティングからのずれ (大口径 EBCCD)	55
5.18	MCP の gain8 での線形性 (IIT)	55
5.19	フィッティングからのずれ (MCP の gain8)	55
5.20	大口径 EBCCD のファイバー 5 での線形性	56
5.21	フィッティングからのずれ (大口径 EBCCD)	56
1	地磁気特性の実験セットアップ	64
2	方角と角度の対応図	64
3	0° (北) 画像	64
4	45° (北東) 画像	64
5	90° (東) 画像	64
6	135° (南東) 画像	65
7	180° (南) 画像	65
8	225° (南西) 画像	65
9	270° (西) 画像	65
10	315° (北西) 画像	65
11	90° でセッティングした時の磁場による影響	65
12	270° でセッティングした時の磁場による影響	65
13	90° でセッティングした時の磁場による影響	66
14	270° でセッティングした時の磁場による影響	66
15	宇宙線観測実験のセットアップ	67
16	シンチレーティングファイバーストック	67
17	ファイバーストックの断面	67
18	宇宙線イベントその 1	68
19	宇宙線イベントその 2	68
20	Hipic のデスクトップ上でのアイコン	69
21	Hipic の立ち上げ画面	69
22	Aquisition control の立ち上げ	69
23	Aquisition control 画面	69
24	Aquisition control の Analog Integration のタブ	70
25	LUT Control	70
26	Sequence モードの立ち上げ	70
27	Sequence Control 画面	70
28	Sequence control の Data storage のタブ	70
29	Sequence control の Acquisition のタブ	71
30	Sequence Option 画面	71
31	Correction Setup の立ち上げ	71
32	Correction Setup 画面	71
33	Background 除去	71

# 表 目 次

3.1	大口径 EBCCD の一般仕様 . . . . .	16
4.1	実験で用いる PMT の諸特性 . . . . .	37
4.2	各ファイバーの校正直線のパラメータ . . . . .	39
4.3	LED 電圧と大口径 EBCCD からの出力の最大値の関係 . . . . .	41
4.4	図 4.41、4.42 のフィッティングパラメータ ( $Y=aX+b$ ) . . . . .	44
5.1	大口径 EBCCD と IIT の光電面での有効面積の違い . . . . .	50