

TSUBAME 衛星搭載硬 X 線偏光計データ処理部の
開発

小林 光吉

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科

2008 年 3 月

要旨

小型衛星を開発する利点として、低予算、開発期間の短期化、そして少ないマンパワーで開発が可能ということが挙げられる。大型衛星開発に対するこのようなアドバンテージから、近年多くの機関で小型衛星の開発が行われるようになった。

本研究室では工学系機械宇宙システム専攻・松永研究室と共同開発を行い、Cute1.7の1号機から理学ミッションとして荷電粒子モニターを開発してきた。そして次期開発衛星「TSUBAME」は、本研究室で長年開発を行ってきたアバランシェ・フォトダイオードを検出器として用い、その測定の難しさからほとんど行われてこなかったX線やγ線といった高エネルギー領域における電磁場の偏光観測を目的とするものである。さらに、衛星の高速姿勢制御を可能とするコントロールモーメントジャイロの採用によってガンマ線バースト等の突発天体の直接偏光観測も目指している。

本論文では、偏光計のアナログデータをデジタル処理するデータ処理部についてその特徴を述べた後、データ取得ロジックについて説明する。それからテストパルスを入力してのデータ処理部の特性評価、ならびに各種設定の最適化を行った。これらの試験結果から、現時点で目標とするデータ処理部の性能を満足することが分かった。そこで実際にプロトタイプ偏光計を製作し、高エネルギー加速器研究機構において偏光X線を用いたビーム照射試験を行った。実験結果にはプロトタイプ偏光計の内部のずれによると考えられる影響が映し出されており、これだけでは偏光計の性能評価をすることは難しい。しかし、偏光光子のコンプトン散乱異方性による影響を見ることが出来るため、さらなる改良を加えれば正確に偏光方向を観測することが出来ると考えている。

目次

第1章	はじめに	6
1.1	東工大小型衛星プロジェクト	6
1.1.1	Cute プロジェクト	6
1.1.2	TSUBAME 衛星	7
1.2	TSUBAME 衛星で目指すサイエンス	8
第2章	硬 X 線偏光計の概要	10
2.1	X 線偏光の検出原理	10
2.1.1	コンプトン散乱	10
2.1.2	偏光度	11
2.1.3	コンプトン散乱を利用した偏光計	12
2.2	TSUBAME 衛星偏光検出部	14
2.3	TSUBAME 衛星データ処理部	14
2.3.1	フロントエンドカード	16
2.3.2	インターフェースカード	18
2.3.3	I/O ボード	18
2.4	データ取得シーケンス	19
2.4.1	データ取得までの流れ	19
2.4.2	CPU プログラム	21
2.5	オフラインでのデータ処理方法	22
第3章	エレクトロニクス部の性能評価	24
3.1	線型性試験	24
3.1.1	セットアップ	24
3.1.2	実験方法	24
3.1.3	実験結果・考察	25
3.2	高計数試験	26
3.2.1	セットアップ	26

3.2.2	実験方法	26
3.2.3	実験結果・考察	27
3.3	t_{hold} 時間の最適化	29
3.3.1	セットアップ	29
3.3.2	実験方法	31
3.3.3	実験結果・考察	31
第 4 章	プロトタイプ検出器のビーム性能試験	33
4.1	検出器プロトタイプ概要	33
4.2	CsI ユニット性能評価	36
4.2.1	セットアップ・実験内容	37
4.2.2	実験結果	38
4.3	ビーム照射試験	41
4.3.1	実験環境	41
4.3.2	セットアップと実験内容	41
4.3.3	データ処理	43
4.3.4	データ解析結果と考察	47
第 5 章	まとめ	52
付 録 A	その他のデータ取得ロジック	54

目 次

1.1	TSUBAME 衛星外観	7
1.2	突発天体発生から偏光観測までの流れ	8
2.1	コンプトン散乱	10
2.2	偏光光子のコンプトン散乱	11
2.3	100%偏光度光子の散乱異方性	12
2.4	無偏光光子のコンプトン散乱時偏光度	13
2.5	散乱型偏光計で偏光を捉える原理	13
2.6	TSUBAME 偏光検出器の概要	15
2.7	データ処理部	15
2.8	フロントエンドカード	17
2.9	VATA チップ	17
2.10	インターフェースカード	18
2.11	I/O ボード	19
2.12	データ処理の流れ	20
2.13	t_{hold} 時間遅延	21
2.14	データ処理シーケンス	23
3.1	線型性試験セットアップ	25
3.2	線型性試験の結果	25
3.3	高計数試験セットアップ	27
3.4	高計数試験の結果	28
3.5	t_{hold} ・サンプルホールド概略図	30
3.6	t_{hold} 試験セットアップ	31
3.7	APD 系統と MAPMT 系統の実験結果	32
3.8	APD 系統と MAPMT 系統の同時プロット	32
4.1	プロトタイプ偏光計表面と裏面の写真	33
4.2	プラスチックシンチレータと MAPMT	34

4.3	CsI(Ti) シンチレータユニット写真と概略図	35
4.4	CsI ユニット読み出し回路	35
4.5	偏光計プロトタイプ内部写真	37
4.6	偏光計プロトタイプ概要	37
4.7	CsI ユニット性能評価セットアップ	38
4.8	CsI ユニット実験結果 1	39
4.9	CsI ユニット実験結果 2	40
4.10	ビームライン 14A 外観	41
4.11	ビームラインセットアップ	42
4.12	ビーム照射試験の様子	42
4.13	オフセット値の決定	43
4.14	イベントのカウンtr範囲比較	45
4.15	APDNo15 (赤) 除去前 (緑) 除去後	46
4.16	APDNo15 バックグラウンド (赤) 除去前 (緑) 除去後	46
4.17	筐体内部シンチレータ群のずれ方向	47
4.18	シンチレータ部分の傾き	48
4.19	シンチレータ群が傾いている状態でのビーム照射位置	49
4.20	プロトタイプ偏光計解析結果	50
4.21	解析結果と APD の位置対応	51
A.1	FPGA 割り込みによるデータ取得シーケンス模式図	54
A.2	10 イベントのデータ取得シーケンス模式図	55

表 目 次

2.1	RAM 領域に確保される主な変数群	21
3.1	各入力レートでのバイナリーデータサイズ	29
4.1	各 APD 基礎特性	36
4.2	各角度でのカウントレート	45

第1章 はじめに

1.1 東工大小型衛星プロジェクト

近年の天文観測衛星は高性能・多目的衛星を目指した結果、大型化の道を辿ってきている。大型衛星は宇宙の姿、その成り立ちについて詳細な知識を人類にもたらしてきた、しかし、衛星の大型化には長期に渡る開発期間と高コスト化が伴うため、様々な弊害が生まれるのも事実である。まず、開発期間の長期化は最先端技術のフィードバックを難しくすると同時に、それは観測成果を得るまでの時間が長期化するのと等しい。大型衛星の開発には多大なマンパワーを必要とし、長期に渡る開発期間はそのまま高コスト化に直結する。そして高コストであるがゆえに搭載する機器は自然とリスクの少ないものとなり、さらに打ち上げ機会も少なくならざるをえない。これに対して小型衛星は重量や電力などの制約もあるが、少人数かつ短期間で開発を行うことが出来るというメリットがあり、それによって大幅なコスト削減が可能であるという特長を持つ。また、最先端技術でも軌道動作実証衛星を兼ねて用いることが可能であり、その成果を大型衛星にフィードバックすることも期待できる。そして、小さいがゆえにピギーバック衛星として打ち上げる機会も増え、打ち上げ費用の削減にもつながる。このように大型衛星には無いメリットがあるため、小型衛星の開発は多くの教育機関・民間団体によって始められている。この章では本研究室におけるこれまでの小型衛星開発について述べるとともに、次期開発計画として進めている TSUBAME 衛星について説明する。

1.1.1 Cute プロジェクト

東京工業大学では、2002年より工学系機械宇宙システム専攻・松永研究室において小型衛星開発プロジェクトである Cute シリーズの開発が始まり、翌年の2003年6月には1号機として Cute-I が打ち上げられた。Cute-I は 10 cm 立方、1 kg の小型衛星であり、内部には通信機器の他に加速度などの各種センサが搭載されている。予定されたミッションは全てクリアし、2008年2月現在も運用が続けられている。

そして Cute シリーズ 2号機である Cute-1.7+APD からは本研究室も開発に加わり、理工学共同による科学ミッションが可能な小型衛星開発が始まった。Cute-1.7 では本研究室

がこれまで開発に携わってきたアバランシェフォトダイオード (APD) の宇宙動作実証を確認するとともに、軌道上での低エネルギー荷電粒子測定を目指している。Cute-1.7 の 1 号機は 2006 年 2 月に打ち上げられ、Cute-1.7 の 2 号機は 2008 年中の打ち上げを予定している。

1.1.2 TSUBAME 衛星

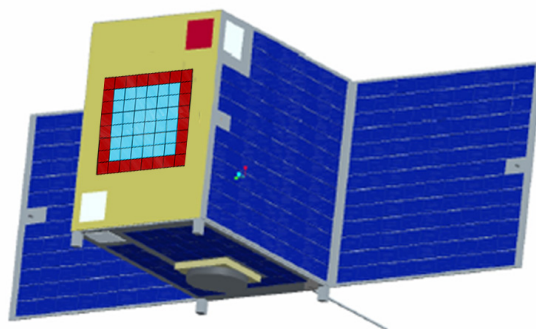


図 1.1: TSUBAME 衛星外観

天体を観測する手段は大きく分けると測光、分光、撮像、偏光の四つに分けられる。しかし、X 線・ γ 線といった高エネルギー領域における電磁波の偏光に関しては、その測定の難しさからほとんど行われていないのが現状である。しかし、新技術を取り入れ、これまで難しかった偏光観測を科学ミッションとするのが、現在開発を行っている TSUBAME 衛星である。これまでの Cute シリーズ開発で得られた技術を基に大学主導で開発が行われている小型衛星であり、2004 年には衛星設計コンテストにおいて設計大賞を受賞している。概念設計では、大きさ $50 \times 50 \times 40 \text{ cm}^3$ 、重量を 50 kg 程度とする予定である。

TSUBAME 衛星の特徴として、

- 突発天体の発生位置を特定する位置検出器
- 偏光 X 線のコンプトン散乱異方性を利用する散乱型偏光計
- コントロールモーメントジャイロ (CMG) を用いた高速姿勢制御

の三点が挙げられる。位置検出器はガンマ線バースト (GRB) などの突発天体発生時にその方向を計算するための検出器であり、CsI(Tl) シンチレータと APD によって構成され TSUBAME 衛星の 5 面に取り付ける。この 5 対のカウントレートを比較することにより、

突発天体の発生方向を約 10 度の精度で求める。通常運用時はパルサーなどの定常天体の偏光観測を行うが、突発天体が発生した場合この位置検出器を用いて発生方向を特定する。その後 CMG の高速姿勢変更により衛星の指向方向を変更することで突発天体発生直後から偏光を観測するという運用が可能である。特にこのような高速姿勢制御は大型衛星では難しく、小型衛星を用いる大きな利点である。



図 1.2: 突発天体発生から偏光観測までの流れ

1.2 TSUBAME 衛星で目指すサイエンス

先に述べたように TSUBAME 衛星では定常天体以外にも突発天体の偏光観測を想定しているが、その一つに GRB がある。GRB とは 10 ~ 100 億光年という宇宙論的距離から、非常に短時間 (数秒 ~ 数十秒) のうちに X 線、 γ 線を強烈に放射する現象であり、宇宙最大の爆発現象の一つである。GRB の起源として「中性子星の合体」、「宇宙初期の大質量星の崩壊」等が挙げられているが、未だ決着してはいない。さらに、この強い X 線・ γ 線の放射機構についても不明であり、シンクロトロン放射とする説やジッター放射とする説があげられている。[2] この点に関して、GRB の直接偏光観測を行うことでその偏光度からこれら放射機構に制限を与えることが出来ると考えられている。これまでの観測では、GRB は全天で一日一回程度発生していることが分かっているが、発生分布に偏りが無いために前もってその位置を予測することが出来ず、また先に述べたように短時間で減光するため、GRB の直接偏光観測はほとんど行われていないのが現状である。そこで TSUBAME 衛星ではその高い機動性を活用し、GRB 発生直後からの直接偏光観測を通してその放射機構の解明を狙う。

この論文では、まず TSUBAME 衛星に搭載予定の硬 X 線散乱型偏光計の原理について説明し、偏光計からのアナログデータをデジタル処理するデータ処理部の基本概念と基礎

特性評価を行う。さらに検出器のプロトタイプと組み合わせた上で実際に偏光 X 線を入射し、データ取得試験ならびに実験結果の考察を行う。

第2章 硬X線偏光計の概要

2.1 X線偏光の検出原理

偏光方向を調べる場合、可視光領域等では偏光板が用いられることが多い。これに対してX線領域では波長が短過ぎるため、偏光板を用いた観測を行うことが出来ない。そこで、X線がコンプトン散乱するときに偏光方向によって散乱されやすい方向が異なるという性質を利用した散乱型X線偏光計を製作することとする。以下の章ではまず、偏光観測の鍵となるコンプトン散乱について示し、その後実際にどのような仕組みで偏光データを得るかについて説明する。

2.1.1 コンプトン散乱

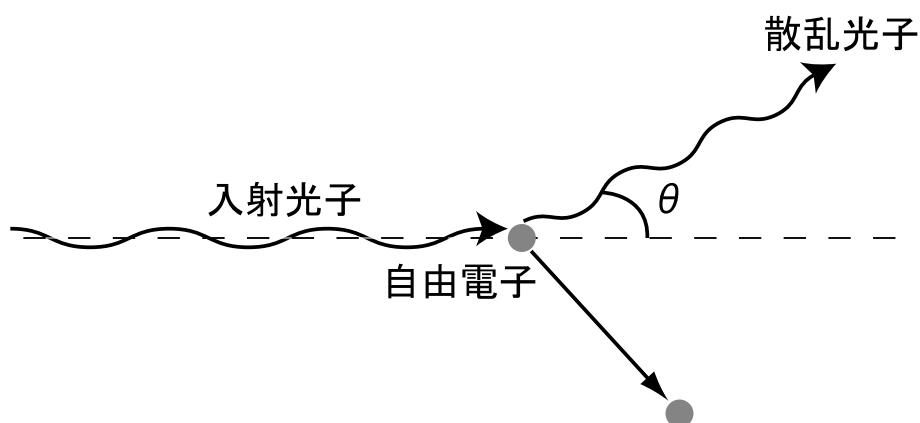


図 2.1: コンプトン散乱

コンプトン散乱とは、図 2.1 のように光子と電子が衝突し両者の間でエネルギーと運動量の交換が起こる過程をいう。

無偏光光子の散乱 無偏光の光子が電子とコンプトン散乱する場合の微分散乱断面積は Klein-Nishina の式として式 2.1 のように表せる。[1]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \epsilon^2 [\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2 \theta] \quad (2.1)$$

ここで r_0 は電子の古典半径、 θ は光子の散乱角であり、 ϵ は光子の入射エネルギー E_0 と光子の散乱後のエネルギー E' 、さらには電子の静止質量 m_e 、光速 c を用いて

$$\epsilon = \frac{E'}{E_0} = \frac{1}{1 + \frac{E_0}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

のように表すことが出来る。

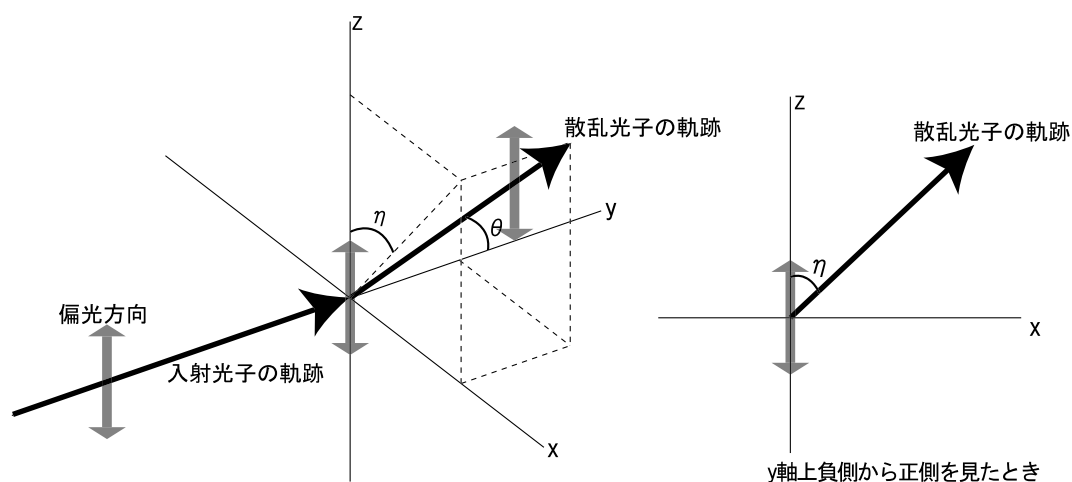


図 2.2: 偏光光子がコンプトン散乱する模式図。 θ は入射方向に対する散乱角であり、 η は偏光面と散乱光子との間の角度である。

偏光光子の散乱 次に 100%偏光した光子のコンプトン散乱について述べる。図 2.2 にあるように偏光した光子がコンプトン散乱をした場合の微分散乱断面積は以下の式 2.3 で表される Klein-Nishina の式によって与えられる。[1]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \epsilon^2 [\epsilon + \epsilon^{-1} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \eta] \quad (2.3)$$

この η は偏光面に対してなす散乱方位角であり、式 2.3 より $\eta = \pm \frac{\pi}{2}$ のとき微分散乱断面積は最大になる。すなわち、偏光光子は偏光面に対して直角に散乱されやすいことが分かる。また、散乱角 $\eta = \pm \frac{\pi}{2}$ のときはさらに異方性が顕著に現れる。これを表したのが図 2.3 である。入射光子のエネルギーが小さいほど偏光度の異方性が顕著になる。

2.1.2 偏光度

放射に含まれる光子の偏光面の揃い方を 0~1 の間の値をとる直線偏光度 Π (以降偏光度と呼ぶ) で定義する。 $\Pi=1$ のときは 100%偏光を表し、 $\Pi=0$ のときは無偏光に対応す

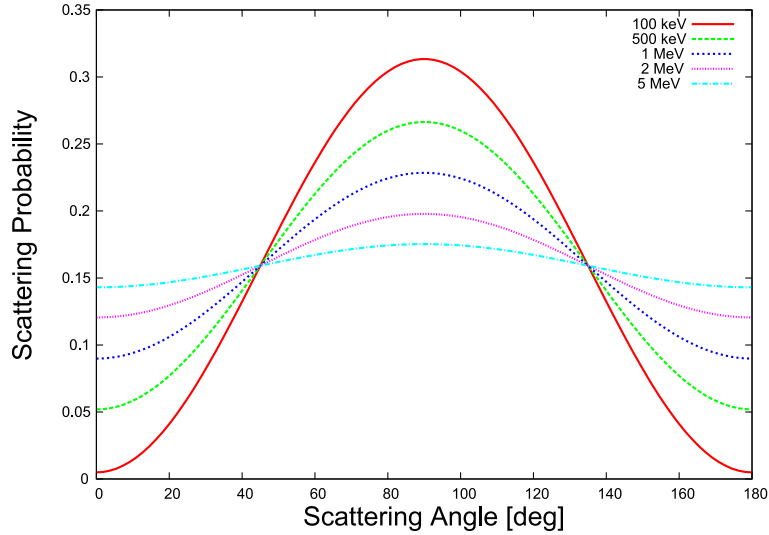


図 2.3: 偏光度 100%、 $\theta = 90$ 度の際の散乱光子異方性、横軸は η [deg] である

る。ここに述べたコンプトン散乱された散乱光子の偏光度を求めると、入射光子が無偏光の場合

$$\Pi = \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2 \theta} \quad (2.4)$$

となる。これに対して入射光子が 100% 偏光だった場合は

$$\Pi = 2 \frac{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \eta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \eta} \quad (2.5)$$

と表せる [1]。式 2.4 からもとの放射が無偏光でも、散乱された放射は偏光をもつことが分かる。また、式 2.5 を表したのが図 2.4 であり、100% 偏光した放射でも散乱光の偏光度は 1 以下になることが分かる。

2.1.3 コンプトン散乱を利用した偏光計

TSUBAME 衛星では偏光光子によるコンプトン散乱異方性を利用した偏光計を採用する。ここではその原理について述べる。図 2.5 のような微小検出器 A と B で構成される理想的な散乱偏光計を仮定する。入射光子は検出器 A (散乱体) でコンプトン散乱されたのち、検出器 B (吸収体) で捉えられるものとする。 η は入射光子と偏光面との間の角であり、コンプトン散乱異方性から η の値によって検出器 B で捉えられる散乱光子の数は変調される。 $\eta = 90$ 度の際捉えられる散乱光子の数は最大になり、これを N_{\perp} と表す。同様に $\eta = 0$ 度の際捉えられる散乱光子の数は最小になり、これを N_{\parallel} と表す。変調の度合を表す値 Q を N_{\perp} 、 N_{\parallel} を用いて表すと

$$Q = \frac{N_{\perp} - N_{\parallel}}{N_{\perp} + N_{\parallel}} \quad (2.6)$$

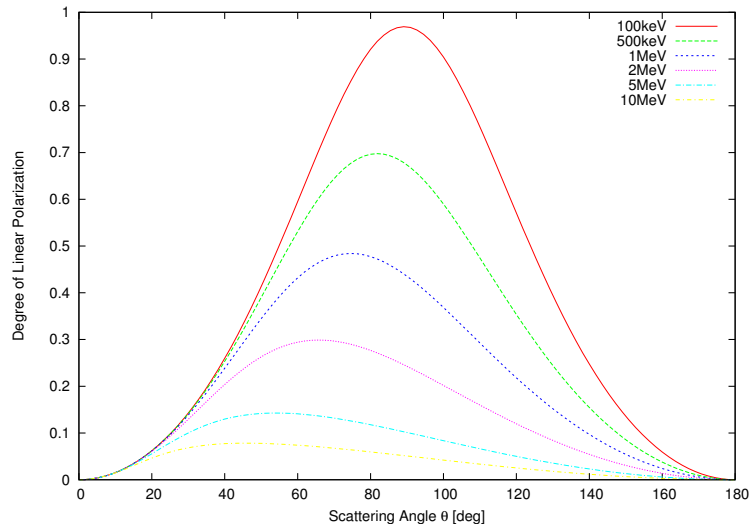


図 2.4: 無偏光光子がコンプトン散乱する際の散乱光子の偏光度。

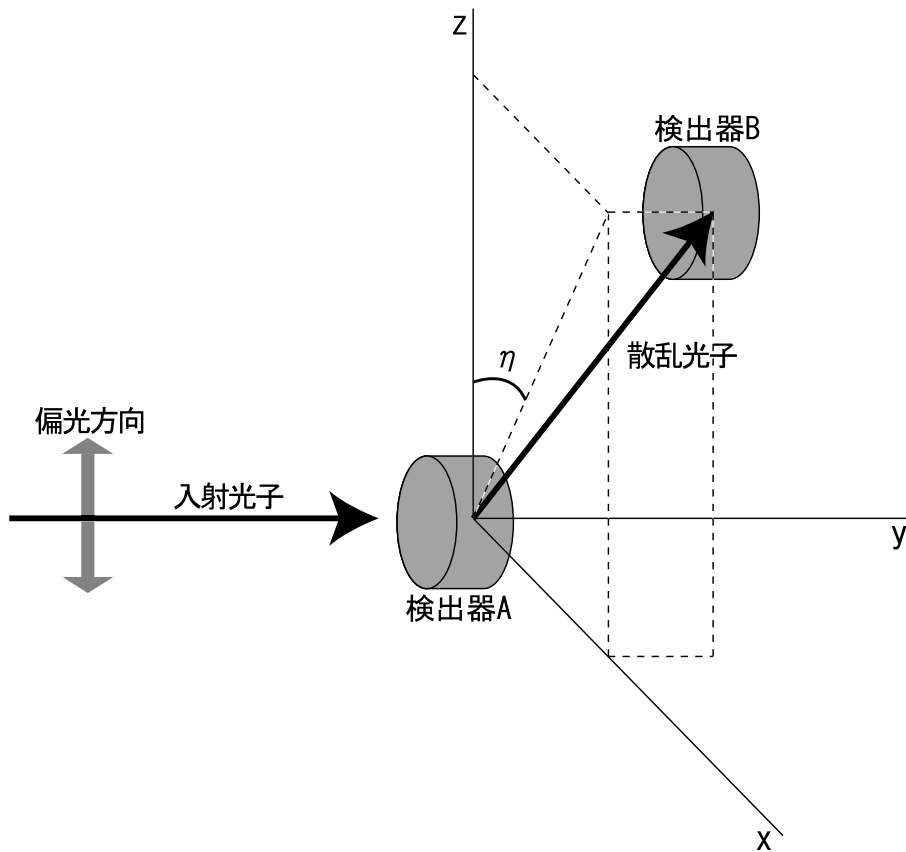


図 2.5: 散乱型偏光計で偏光を捉える原理。入射光子は z 軸方向に偏光しているものとする。

であり、 N_{\perp} と N_{\parallel} の値は微分散乱断面積に比例するため式 2.6 は以下の式 2.7 と表せる。

$$Q = \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}_{\eta=90} - \frac{d\sigma}{d\Omega}_{\eta=0}}{\frac{d\sigma}{d\Omega}_{\eta=90} + \frac{d\sigma}{d\Omega}_{\eta=0}} \quad (2.7)$$

これより

$$Q = \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2 \theta} \quad (2.8)$$

という式が与えられるが、これは式 2.4 と同じである。 θ は散乱光子の入射光子進行方向に対する角度であり、この式と図 2.4 より出来るだけ大きい偏光度を得たければ $\theta = 90$ 度に検出器を設置すれば良いことが分かる。

最後に偏光計の性能として用いられるモジュレーションファクター (MF) の定義をする。任意の偏光計に偏光度 P の光子を入射したとき、変調の度合いが Q で得られたとする。この場合同じ偏光計に 100%偏光の光子を入射して得られる変調は $M = Q/P$ で与えられ、MF は 100%偏光時の M の値である。 $M = Q/P$ の関係より、MF と Q が得られれば偏光度 P の値を求めることが出来る。

2.2 TSUBAME 衛星偏光検出部

TSUBAME 衛星に搭載する、偏光を捕える検出部は図 2.6 のようにプラスチックシンチレータ+マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) の周りを CsI(Tl) シンチレータ+APD が取り囲んでいる構造の散乱型硬 X 線偏光計である。コンプトン散乱の微分散乱断面積は散乱体の原子番号に比例し、光電吸収の吸収断面積は吸収体の原子番号の 5 乗に比例する [8]。このため、原子番号が比較的小さいプラスチックシンチレータ (炭素 C : 原子番号 6) の周りを原子番号の比較的大きい CsI(Tl) シンチレータ (セシウム Cs : 原子番号 55) で取り囲む構造により、プラスチックシンチレータ部でコンプトン散乱した X 線を、CsI(Tl) シンチレータ部で光電吸収することが可能となる。検出部に入って来た X 線はまず内側のプラスチックシンチレータでコンプトン散乱された後、外側の CsI(Tl) シンチレータで光電吸収され、それぞれ反跳電子と光電子を発する。この二つの同時イベントを検出することにより X 線のコンプトン散乱方向を求め、統計的に X 線の偏光方向を知ることが出来る。

2.3 TSUBAME 衛星データ処理部

偏光検出部から出力される電荷信号を処理し、計算機に取り込めるようデジタル化するのがデータ処理部である。データ処理部は大別して、電気信号をアナログ信号のまま多系統読み出すフロントエンドカード、二つのボードを接続し、アナログ信号をデジタル信号に変換するインターフェースカード (80038A 型)、データを処理しパソコンとの通信を行う I/O ボード (CP-3556N:以上全てクリアパルス製)、と三つの部分から構成される。小型

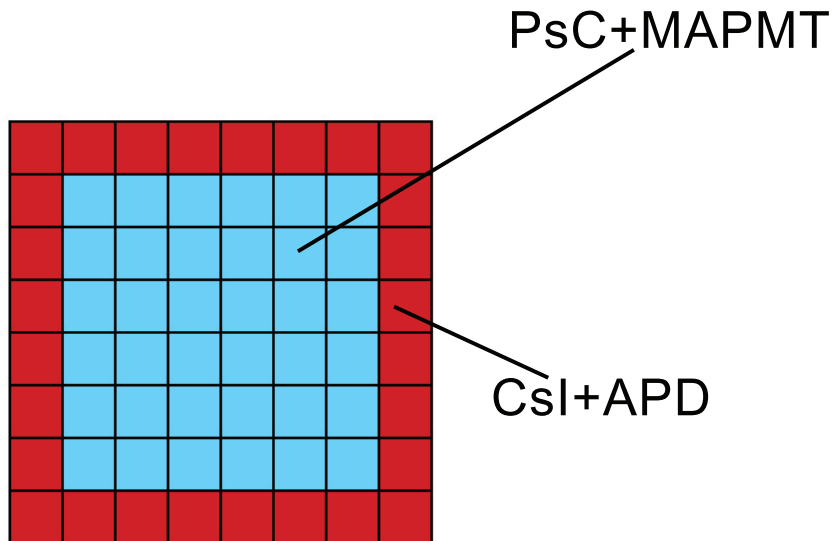


図 2.6: Tsubame 偏光検出器の概要

衛星ではしばしば、使用電力が問題となる。これらのボード群の消費電流は以下の通りである。

	+5 V 端子	+3 V 端子	-3V 端子
消費電流	69 mA	94 mA	-137mA

この章ではそれぞれの役割について詳しく述べる。

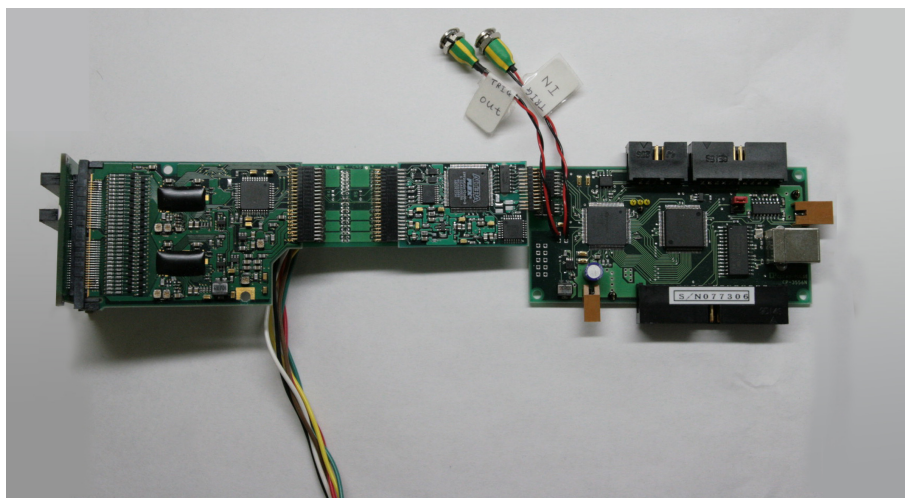


図 2.7: データ処理部

2.3.1 フロントエンドカード

本ボードは多チャンネル読み出しが可能な VA32_HDR14A チップ (IDEAS 製; 以下 VA チップ)、トリガー信号を生成する TA32CG2 チップ (IDEAS 製; TA チップ) そしてこれらのチップを制御するための FPGA で構成されている。

VA チップには電荷積分型増幅器と時定数 $1.85 \mu\text{sec}$ の波形整形増幅器 (slow shaper)、そしてサンプルホールド機能、マルチプレクサ回路が搭載されており一個で 32 系統の電荷読み出しが可能である。[11] そして図 2.9 のように TA チップには時定数 75 nsec のトリガー用高速波形増幅器 (fast shaper) とディスクリミネータ (波高弁別器) が搭載されており、VA チップに入って来たシグナルからトリガー信号を生成する。[12] この際、ディスクリミネータの可変抵抗を変えることにより電圧閾値を任意に変更することが出来る。VA・TA チップはボード上には計 2 個搭載されているため最大 64 系統の電荷データ取得が出来、マルチプレクサから 1 系統ずつ読み出された電荷データは順次インターフェースカードへ送られる。VA・TA 両チップのデータの処理を制御しているのが FPGA であるが、電源投入時には FPGA のレジスタマップが不定のため、まず各レジスタの値を書き込む初期化作業が必要である。今回レジスタの設定として 64 系統全てのデータを読み出すために normal mode¹ かつトリガーを有効にしている。[13]

¹ フロントエンドカードのデータ取得方法には (1)normal mode :トリガーを検知すると VA・TA チップ 2 個からデータを読み出す (2)SDS mode :トリガーを検知すると、トリガーを生成した VA・TA チップ 1 個のみからデータを読み出す、という 2 つの方法がある。データ量を削減する場合には SDS mode の方が適しているが、本フロントエンドカードには実装されていない可能性がある。また、レジスタ設定を SDS mode にしてデータ取得を行った場合でも、出力データは normal mode と同じであった。未搭載の可能性がある機能に設定した場合、不具合が発生する可能性を排除出来ないためデータ取得は normal mode に設定して行う。



図 2.8: フロントエンドカード

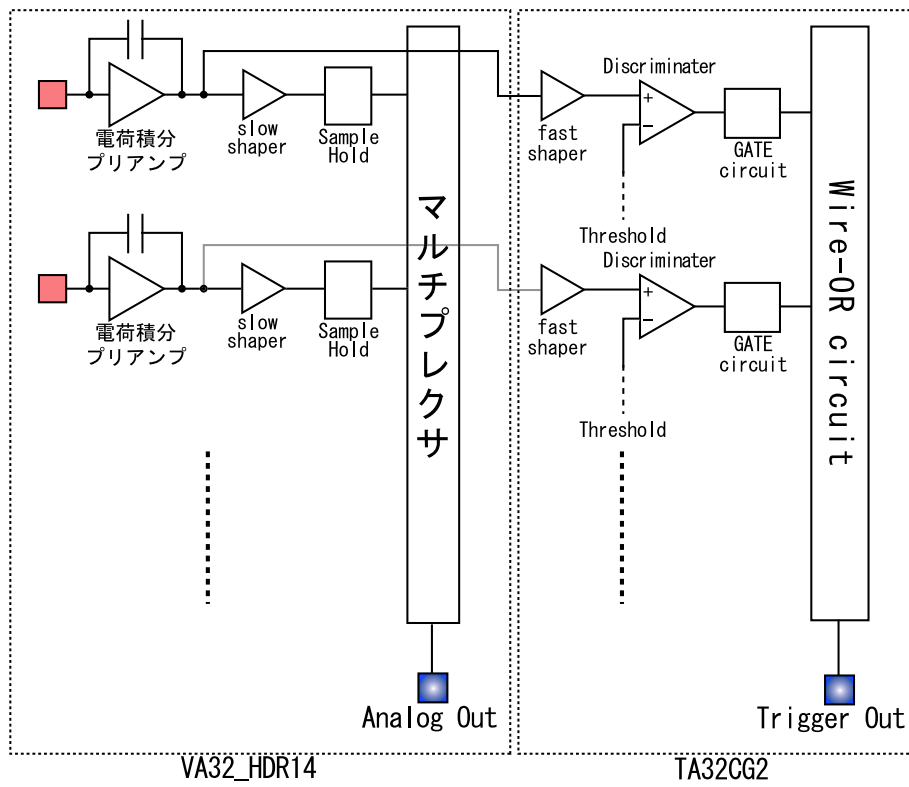


図 2.9: VATA チップ

2.3.2 インターフェースカード

インターフェースカードには ADC 変換器が搭載されており、分解能 12 bit (4096 ch)、ダイナミックレンジ 0 ~ 30 pC である。[14] インターフェースカードの機能としてさらに二つの役割が挙げられる。一つはデータ取得シーケンスを始めるため、フロントエンドカードから I/O ボードへ出力されるトリガー信号の制御、そしてもう一つはフロントエンドカードのレジスタ書き込みである。このように両ボード間のデータの流れを双方向とも担っているのがこのインターフェースカードである。

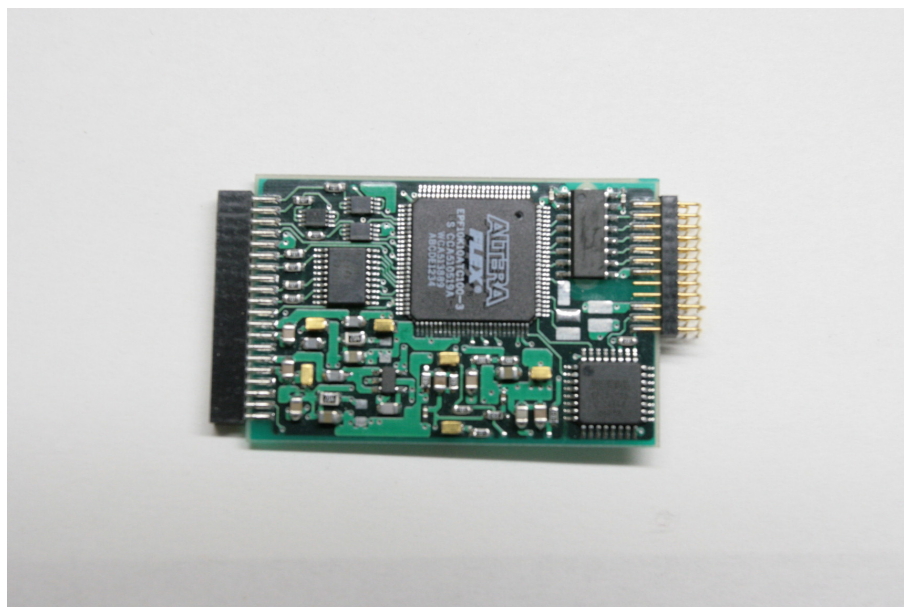


図 2.10: インターフェースカード

2.3.3 I/O ボード

このボードは主に、LinuxPC 間で USB 通信を行うための USBN9604 (National Semiconductor 製) と ADC データを保持する FPGA (ALTERA 製 EP1C3T100)、そしてデータの取得・処理・通信を司る H8 マイコン (ルネサス テクノロジ製 H8HD64F3048BF) で構成されている。データ取得に関しては 2.4 章で詳しく述べるが、データ取得シーケンスの際にトリガーを出力する外部トリガー出力端子、逆にトリガーを入力してデータ取得シーケンスを走らせる外部トリガー入力端子も実装している。まずデータの流れを追って見てみると、インターフェースカードから送られて来る ADC データは一旦 I/O ボード上の FPGA に格納される。この FPGA の FIFO メモリサイズは 4096 Byte であり、1 系統の ADC データ量が 2 Byte、さらに時刻情報やトリガー情報などのヘッダーが 4 Byte で

あるため、normal mode の場合 1 イベントで 132 Byte のデータ量となり計 31 イベント分のデータを保存出来る。次にこのデータ処理を行うのが H8 マイコンである。H8 マイコンはプログラミング可能な組み込み型マイクロコンピュータであり、動作周波数は 25 MHz、4.5 ~ 5.5 V の電源電圧で動作する。また、128 kByte の ROM と 4 kByte の RAM を内蔵しているのも特徴である [16]。CPU は複数の処理を同時に実行することが出来ないため、インターフェースカードの ADC データ収集と ADC データ処理とを同時に行うことは出来ない。しかし、この I/O ボードでは ADC データ収集を FPGA に、ADC データ処理を CPU で行うというように分業することで、効率的にイベントを処理することが出来るようになっている。最後に、今回用いる USBN9604 は USB1.1 対応 IC であり [17]、今回はフルスピードモードでバルク転送を行う。

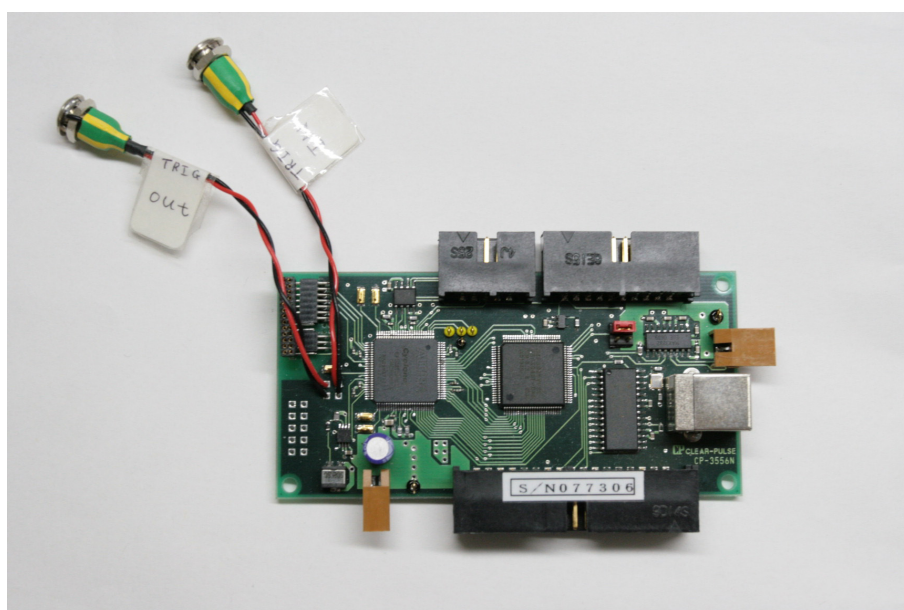


図 2.11: I/O ボード

2.4 データ取得シーケンス

2.4.1 データ取得までの流れ

まずフロントエンドカードに入力した電荷は VA チップに入る (①)。図 2.9 にあるようにアナログ信号は途中で分岐し、片方は TA チップに入る (②)。TA チップの中にはディスクリミネータと GATE 回路が内蔵されており、ここで生成されたトリガーはインターフェースカードへ送られる。図 2.12 の様に、インターフェースカード上の FPGA にはトリガーロジックが存在し、H8 によって制御している。この出力が有効の時のみトリガー

はI/OボードのFPGAに入力される(③)。その後、外部トリガー出力端子から外部機器にトリガーを出力出来るようになっているが今回の実験では外部機器を用いないため、出力端子を入力端子に結線する。外部トリガー入力端子から入ってきたトリガーはFPGAでホールドされ、 t_{hold} 時間分遅れてインターフェースカードを介しフロントエンドカードへ戻る(④)。ここで言う t_{hold} 時間とは、上記の様にTAトリガーがI/Oボードからインターフェースカードへ戻るときに、I/Oボード上のFPGAが管理する時間遅延のことである(図2.13)。VAチップは戻って来たトリガーを検出すると各システムのシグナルをサンプルホールドし、マルチプレクサで順に電荷を読み込む。その後プリアンプで電荷を電圧ステップに変換し、インターフェースカードへこの電圧ステップを送る(⑤)。送られて来た電圧ステップはADCでデジタル信号化され、I/OボードのFPGAに保存される(⑥)。この後H8マイコンはFPGA内のデータを確認すると不要な部分を削除し、データ量の圧縮をした上で自身のRAM内に格納する(⑦)。そしてこの圧縮データをUSBN9604がホスト側(パソコン等)にUSBで転送する(⑧)という仕組みになっている。LinuxPCから定期的にH8へアクセスすることで割り込み処理を生じさせ、H8内のリングバッファに保存されたデータがあればLinuxPCへ送信するようになっている。H8への命令コマンドはUSB通信を用いて送信することが可能である。

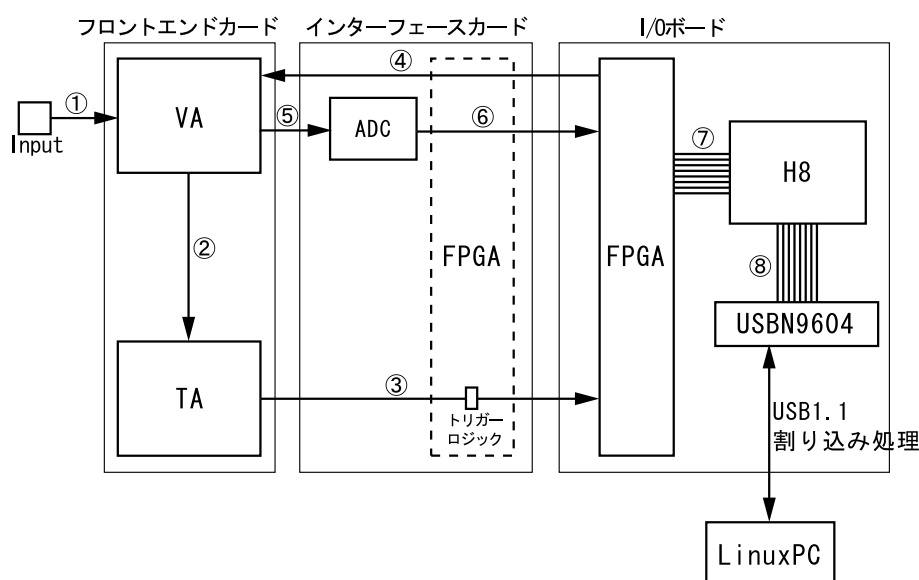


図 2.12: データ処理の流れ

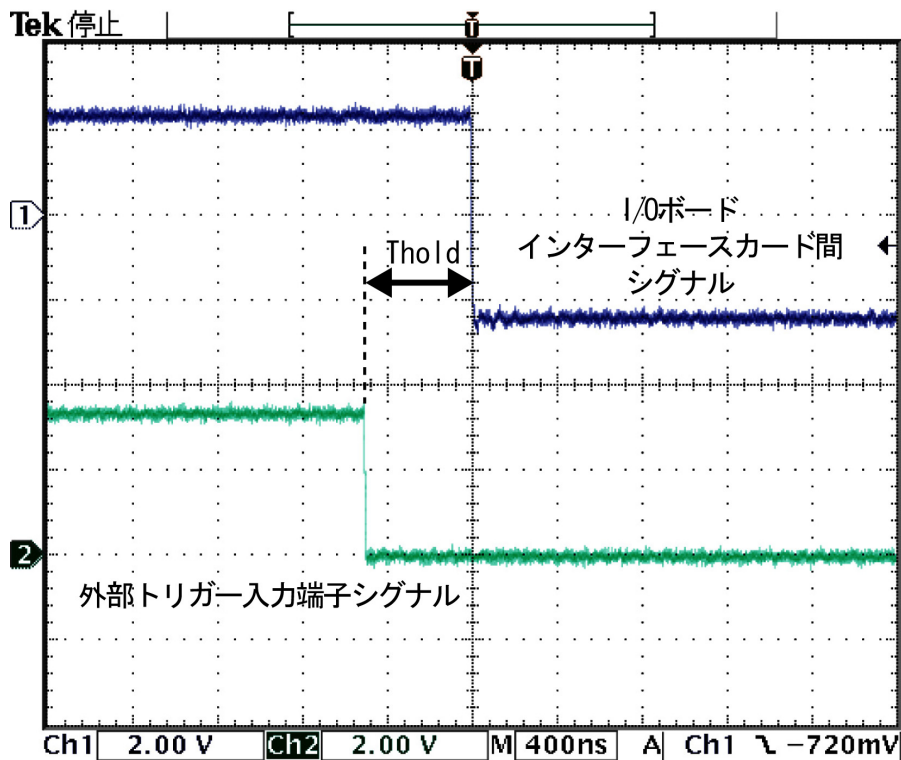


図 2.13: t_{hold} 時間遅延

2.4.2 CPU プログラム

電源投入時、H8 マイコンはまず RAM 領域にグローバル関数や計算領域を確保する。プログラムで RAM 領域に確保される主なものを表 2.1 に書く。

表 2.1: RAM 領域に確保される主な変数群

名称	使用 byte 数	用途
event_data3	75	送信リングバッファへの書き込み
送信リングバッファ	1575	処理データを USB 転送するまで保存
受信リングバッファ	100	PC から送られてくるデータの保存
スタック領域	512	計算や割り込み処理 ² 時にデータを一時保管

² 割り込み処理：あるフラグを検出すると、それまで行っていた作業を一時中断して他の作業に移る処理のことである。通常の処理以外で必要な不定期なイベントを処理したい時などに活用する。例としてテレビゲームのボタン入力処理などが挙げられる。[9] [10]

プログラムではまず H8 自身の初期化を行い、さらに。その次に USB やインターフェースカード、フロントエンドカード等の周辺機器を初期化する。特にインターフェースカードの設定、フロントエンドカードのレジスタ書き込みには各ボード上の FPGA で処理に時間がかかるため、その間 H8 は待機させている。全ての初期化を終えた後、データ取得のためのデータ処理ループに入っていく、全体の流れを表したのが図 2.2 である。まず H8 マイコンは FPGA のフラグを見に行き、1 イベント以上データがあることを確認すると処理のため FPGA からデータを取り出す。FPGA の FIFO には 1 イベント 132 Byte ずつデータが貯められていくのであるが、今回は 32 系統しか読み出しを行わないため 132 Byte 中後半 64 Byte は不要なデータとなる。FPGA のメモリは FIFO であるため、H8 でアクセスすることに 1 Byte ずつデータを取得することが出来、また取得したデータは FPGA のメモリから順次消去されていく。したがって FPGA から時刻データと 32 系統分の ADC データ計 68 Byte を読み出した後、不要な 64 Byte を消去するために 64 回 FPGA のメモリにアクセスし H8・FPGA 両メモリのデータ量を調節する。有意な 68 Byte のデータの前に 5byte、後に 2 Byte と、オフライン作業のための識別子を置き計 75 Byte を送信用リングバッファへ書き出したらイベント 1 つの処理は完了である。以上の作業を FPGA の FIFO メモリにデータがある限りループする。問題点として現状では送信用リングバッファ全てにデータを詰め込むと、データ列に欠損が起こることが分かった。また、FPGA の内部メモリがオーバーフローして停止した場合も欠損が起こる場合がある。送信用リングバッファでのデータ欠損を回避するために毎回データ取得処理を行う前に送信用リングバッファのデータ量を確認し、余裕のある 19 イベント分 1425 Byte 以下の時のみ実行されるよう、図 2.14 に表されるような条件分岐をするようにした。また FPGA の内部メモリがオーバーフローした場合、データの取得が中断するのでそのような場合は最初からデータを取り直すこととした。

2.5 オフラインでのデータ処理方法

現状のシステムを組み上げた直後から判明した問題点として、数イベント中に 1 イベントの割合でデータ配列が途中から壊れて記録されることが挙げられる。また現状のシステムではトリガー信号のノイズによってさらにトリガー信号が出力されると考えられるダブルトリガーイベントが時折見受けられる。このトリガーのタイミングでは何も電荷のない場合を読み出すのに等しく、ノイズとしてエネルギーの低い ADC データが記録される。そこでバイナリーを崩す際にデータの前後フラグを検出し、前後とも揃っていないデータは削除する。さらにダブルトリガーによるデータを削除する場合、全系統の ADC データ

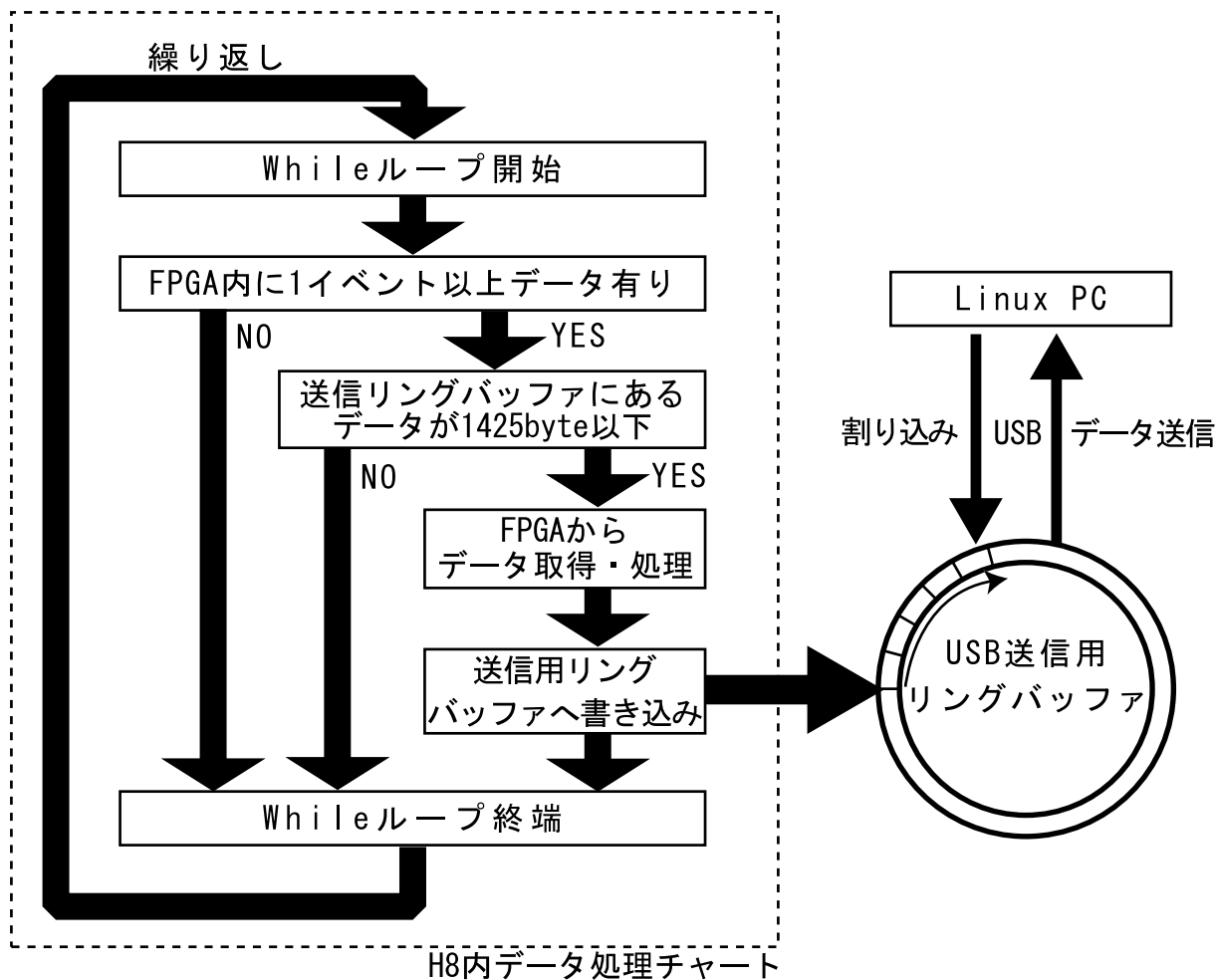


図 2.14: データ処理シーケンス

にスレッシュホールドを設けそれ以上に反応しているデータがあるもののみ有意なデータとして採用する。データ破壊が起きる原因については、3.3.3章で考察する。

第3章 エレクトロニクス部の性能評価

3.1 線型性試験

今回我々が製作する散乱型硬 X 線偏光計に必要な基本性能として、まず入射 X 線エネルギーに対する ADC データの線型性が挙げられる。対象天体の特徴を分光を行って確認するために、TSUBAME 衛星では偏光観測と同時に分光観測も行う。したがって、分光観測を可能とするためには ADC データの線型性を確認することが重要である。そこで、X 線の代わりにテストパルス電荷に変換し、電荷の値を変えて取得した ADC データが線型性を持っているか確認する実験を行った。

3.1.1 セットアップ

今回 X 線の代わりに入力するのは電荷である。そこで図の様にパルスジェネレーター (Berkeley Nucleonics Corp 製 型番 MODEL PB-4) とフロンドエンドカードの途中に 51 の抵抗と 100 pF のコンデンサーで作った RC 回路を組み込み、電圧変化を電荷に変換する手法を採用した。パルスジェネレーターの設定として、立ち上がり時間を 0.05 μsec 、立ち下がり時間を 500 μsec 、Delay time を 0.5 とし、 t_{hold} 時間は 0.7 μsec 固定とした。さらに I/O ボード上の FPGA がオーバーフローする時等のデータ欠損を極力抑えるため、30 Hz ほどの低レートで電荷を入力した。

3.1.2 実験方法

パルスジェネレーターから出力する電圧ステップの大きさを変えることで、 $Q = CV$ の関係から様々な値の電荷を入力することが出来る。電圧ステップはパルスジェネレーターの Amplitude つまみを変更することで行い、70 mV ~ 323 mV まで 6.5 mV 刻みで計測を行った。なお、各電圧ステップでの計測時間は 30 秒である。入力電荷の値を変え、得られる ADC データの波形ピークがどのように変化するかを調べた。

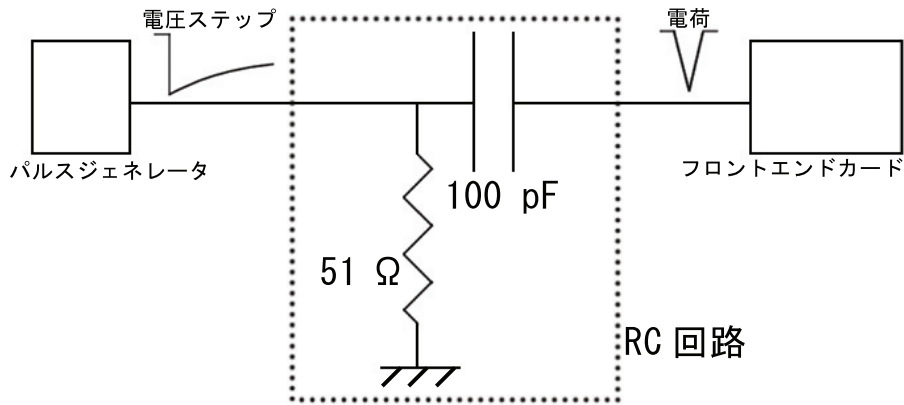


図 3.1: 線型性試験セットアップ

3.1.3 実験結果・考察

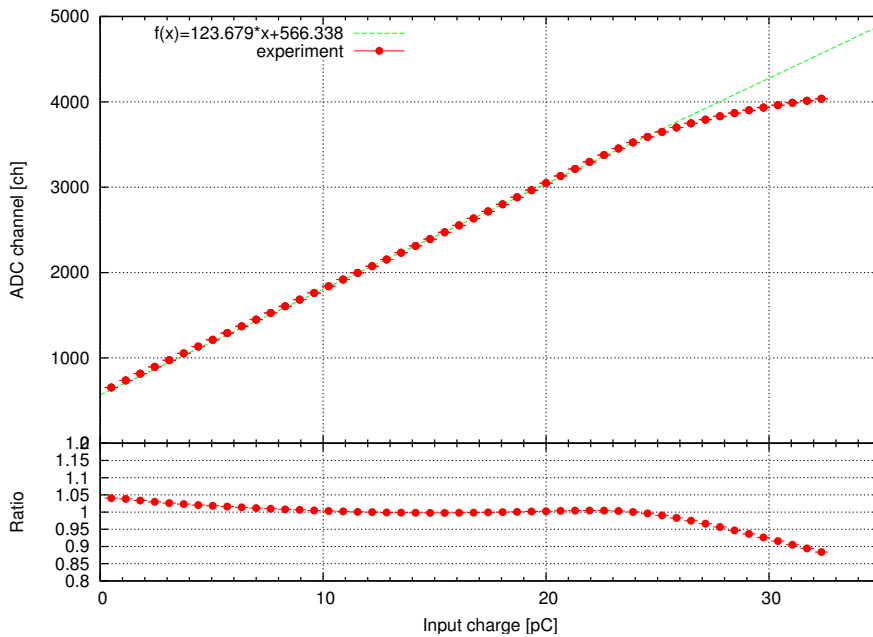


図 3.2: 線型性試験の結果

実験結果は図 3.2 のようになった。ここで用いた直線は式 3.1 で表される。

$$ADC[ch] = 123.679Q + 566.338 \quad (3.1)$$

図 3.2 の横軸は入力電荷であり、縦軸は上グラフがピークチャンネルの値、下グラフでは直線フィットからの値のずれる割合を表している。なお、直線フィットは 10 pC ~ 20 pC の間で行った。この図から、直線から $\pm 5\%$ を誤差の範囲として許容すると、28 pC

ほどまでは線型性を保持していることが分かり、これは仕様書 [13] に書いてある「ダイナミックレンジ約 30 pC」とほぼ合致している。後の章で述べるプロトタイプ偏光計には 50 keV の X 線を照射するのであるが、プラスチックシンチレータ+850 V 印加状態での光電子増倍管の場合、フロントエンドカードに入力される電荷は 20 pC ほどである。CsI(Tl+)APD の場合はこれよりもずっと少ない電荷放出であるため、今回確認出来た線型性は十分な性能であるが分かる。

3.2 高計数試験

衛星に搭載する偏光計は得られたデータから統計的に偏光の方向を求める機構となっているため、収集したイベント数が多いほど偏光方向を正確に決めることが出来る。しかし、一つのイベントを処理する時間には H8 マイコンでのデータ処理時間以外にも USB の通信速度などが複合的に影響すると考えられるため、事前に不感時間を概算することが難しい。GRB などでは予想を上回る高レートになる可能性があるため、出来るだけ高計数となる回路が望まれる。現状のシステムでどこまでレートの高いシグナルを取得できるか実機で評価を行う。

3.2.1 セットアップ

実験で用いるセットアップを図 3.3 に示す。今回はデータ取得状況を実際の観測条件に近づけるためにランダムパルスジェネレーター (Berkeley Nucleonics Corp 製 型番 MODEL DB-2) を用いる。電圧ステップを RC 回路で電荷に変換するのは線型性試験と同じであるが、電圧ステップを途中で分岐させ片方はフロントエンドカードへ、もう片方はディスクリミネータ (テクノランド社製) とゲートジェネレーター (テクノランド社製) を介した後デジタルスケーラー (テクノランド社製) に入力する。ランダムパルスジェネレーターの設定としてランダムモード・立ち上がり時間 $0.1 \mu\text{sec}$ ・立ち下がり時間 $20 \mu\text{sec}$ であり 100 mV 程度の電圧ステップを生成するよう調節してある。またゲートジェネレーターの調節は幅を $100 \mu\text{sec}$ としてある。さらにデジタルスケーラーにはゲートジェネレーターを介してクロックが接続されており、計測開始からの時間をこれで測定する。

3.2.2 実験方法

ランダムパルスジェネレーターの出力周波数を変えて測定を行う。デジタルスケーラーの測定を始めると同時に USB からのデータ取得も開始し、30 秒経過したのち同時に計数

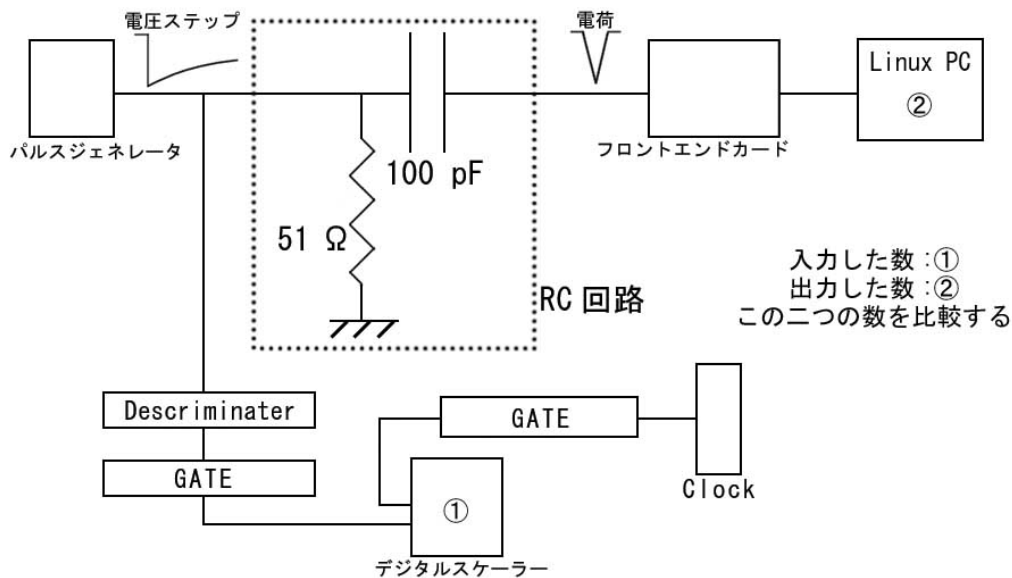


図 3.3: 高計数試験セットアップ

を止める。デジタルスケーラーのカウント値, すなわち入力レートに対し、どれだけの出力レートでデジタルデータを得られているか求めた。計測した入力レートは、30、50、70、100、150、200、300、400、500、600、700、800、1000、1200、1500 counts/sec である。

3.2.3 実験結果・考察

結果を図 3.4 に示す。横軸が入力レート、縦軸が出力レートであり、両軸とも対数プロットである。図から分かるように、低レート側では入力レートと出力レートがほとんど変わらず正しく計数出来ている。しかし、500 count/sec を過ぎた頃から出力レートがほぼ一定値で飽和してしまっていることが見受けられる。ちなみに測定時は LinuxPC から USB で H8 にアクセスする間隔を 0.1 msec としているが、これを遅めても早めても出力レートは高くならなかった。出力レートの低下は取得データ中の破損データ量の増加と、H8 マイコンのデータ処理速度の限界が主な原因だと考えている。まず、データの破壊について考える。オフラインでのデータ処理の際、正常なフラグのついていないデータ以外は破棄されるが、高入力レートになるほど出力されるデータ中にフラグの無いデータが多くなる。データ破壊が起きる部分として考えられるのは以下の所が考えられる。

- ①I/O ボード上の FPGA
- ②H8 マイコンの内部メモリ
- ③USB 通信上

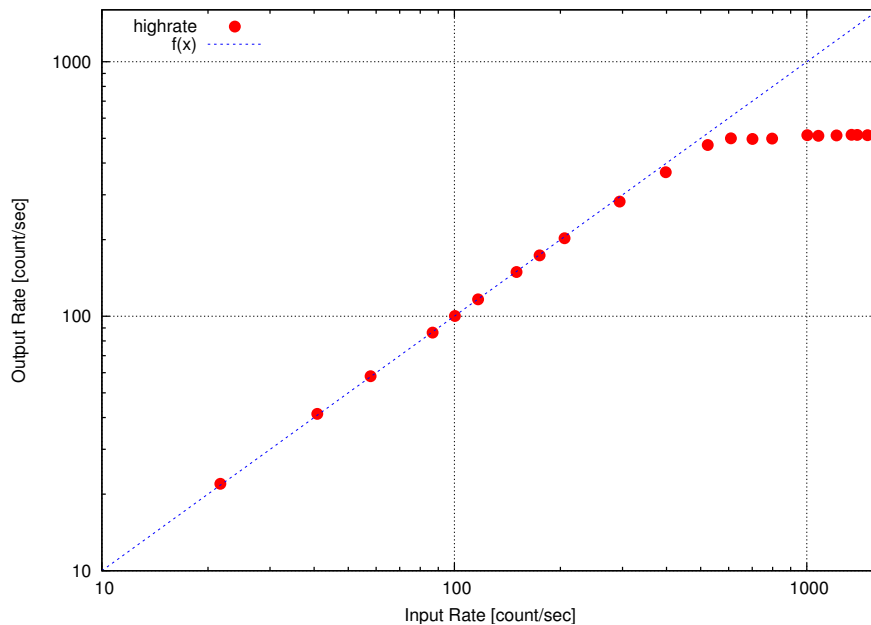


図 3.4: 高計数試験の結果

まず①であるが、現在 FPGA の FIFO メモリがいっぱいになるとデータ破壊等が起きてデータの信頼性が無くなると考えている。しかし、現状では FPGA のメモリが一杯になると以降 FPGA はデータ取得が出来なくなり、H8 からリセット命令を出さない限り復帰出来なくなる。さらにオフライン上で破壊されたデータを見ると FIFO メモリが一杯になる 32 イベント目より前にデータが壊れているものもあり、FPGA でデータ破壊が起こっているとは考えにくい。

次に②であるが、こちらは内部 RAM に USB 送信様リングバッファや計算領域が確保されているため、ここでデータの上書き等でデータ破損が起こることも考えられる。しかし、プログラムに関して変数を確保する領域と計算領域はそれぞれ独立に分けている事を確認している。さらに、使われている中で最大の計算領域を用いる関数であっても、算出したその計算領域はあらかじめ確保された領域をオーバーしないことも確認している。したがって原因はここでもないと考えている。

最後に③であるが、USB N9604 以降の通信処理が何らかの影響を及ぼしている可能性が否めない。また、データ処理速度の限界という可能性も USB 通信で得られたデータから考えることが出来る。以下の表 3.1 は高計数試験と同じセットアップで 20 秒間測定を行い取得したデータである。

表 3.1: 各入力レートでのバイナリーデータサイズ

入力カウントレート [counts/sec]	200	400	600	800	1000	1200
バイナリーデータサイズ [Byte]	298494	588048	779262	756657	789582	745818

バイナリーデータサイズに注目すると、カウントレートが一定値になる状態からバイナリーデータのデータ量もほぼ一定となっていることが分かる。もし入力したテストパルスを含めて通信処理出来ているならば、入力レートが高くなるほど得られるバイナリーデータのデータ量も増えるはずである。データ量が一定となる理由として、USB 通信時にバグがありデータを消失してしまうことや、もしくは H8 マイコンの 1 イベント処理時間に最低でも 2 msec 必要であることが考えられる。仮に、1 イベントの処理時間に 2 msec かかるという処理速度の問題であれば、TSUBAME 衛星ではもっと高速な CPU を搭載する必要がある。

大規模な GRB では単位面積あたりのカウントレートがおおよそ $1000/\text{cm}^2/\text{sec}$ であり、なおかつ TSUBAME 衛星搭載予定の偏光計では有効面積が $3\sim 4\text{cm}^2$ であるため、現状のシステムでは到底全イベントを計数することは出来ない。今回問題の解決には至らなかったが、以上の問題は H8 マイコンの性能や通信処理・速度によって起因していると考えており、今後他の高性能な CPU、高速通信なバスの採用を検討していく中で解決されるものと考えている。少なくとも現状の実験では出力レートが低くなるもののデータを得るシステムには問題が無いため、入力する信号のレートを 1000 Hz 程度以下までにするよう工夫して今後の実験を行うこととする。

3.3 t_{hold} 時間の最適化

2.4 章で説明した t_{hold} 時間は、フロントエンドカードに電荷が入ってから実際に電荷を保持して読み出すまでの時間差に直結している。図 3.5 の様に VA チップで電荷を保持するまでも信号は変化しており、必ずピークの値が読み取られる訳ではない。ADC データ取得の際には出来るだけ波形のピークに近いところでデータをホールドするのが望ましい、したがってプロトタイプ偏光計で用いる各シンチレータでの t_{hold} 最適値を求める必要がある。 t_{hold} は $0.4\sim 3.0\ \mu\text{sec}$ まで変更出来るようになっており、この値を変えて実験を行った。

3.3.1 セットアップ

実験セットアップを図 3.6 に示す。プロトタイプ偏光計では、光子を

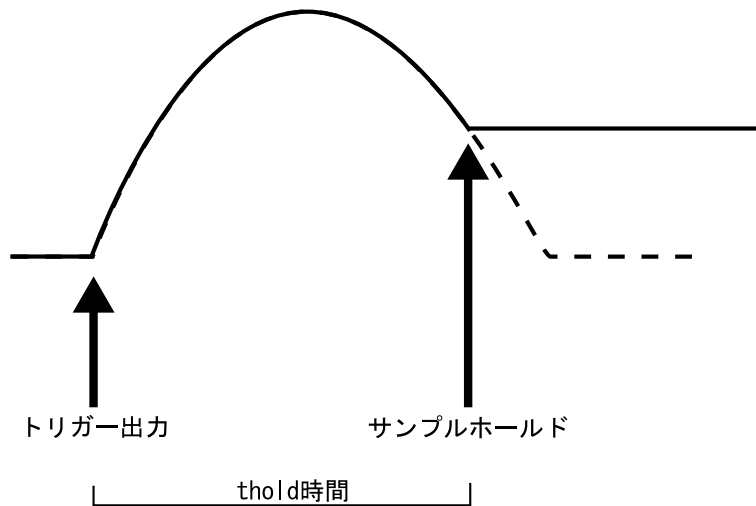


図 3.5: t_{hold} ・サンプルホールド概略図

- ① プラスチックシンチレータ (減衰時定数約 2~10 nsec) を、受光面が 16 区画に分かれていてそれぞれシグナルを読み出すことが出来る MAPMT(R8900-03-M16:浜松ホトニクス製) で受光する
- ② CsI(Tl) シンチレータ (減衰時定数 ~1000 nsec) を APD で受光する

という 2 系統で読み出す。以降、①の読み出し系統を MAPMT 系統、②の系統を APD 系統と呼称する。

まず①について、プラスチックシンチレータ 16 本を束ねたものを MAPMT の受光面にシリコングリスを用いて接着し、アノード出力のうち 1 系統をフロントエンドカードに入力する。

次に②についてであるが、CsI(Tl) シンチレータは四個を一行に並べており、一つずつ遮光のために ESR¹ で覆っている。こちらも CsI(Tl) と APD をシリコングリスで接着しており、APD からの信号を 32ch プリアンプ (クリアパルス製: 5027 型 32chAPD 用前置増幅器) で増幅し、RC 回路を介してフロントエンドカードで読み出す。MAPMT には -800 V の電圧を、APD には 380 V の電圧を印加している。

今回 X 線源として ²⁴¹Am を用い、59.5 keV の X 線を照射した。また以上二つの方法で測定する際シンチレータ等を含めて検出器はブラックシートで覆い、遮光してある。

¹ 住友スリーエム社製、可視光範囲において高い反射率を有する反射材である。

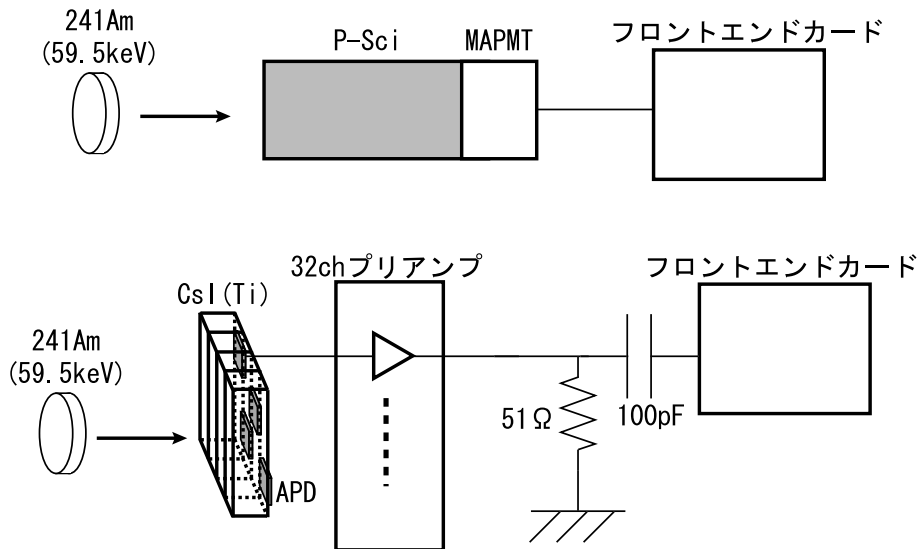


図 3.6: t_{hold} 試験セットアップ

3.3.2 実験方法

プラスチックシンチレータ + MAPMT と CsI(Tl) + APD をそれぞれ読み出す場合について測定を行った。測定する t_{hold} 時間としては $0.4 \sim 1.4 \mu\text{sec}$ までは $0.1 \mu\text{sec}$ 刻みで行い、それ以降は $0.2 \mu\text{sec}$ ごとに行う。各試行とも 5 分間の計測を行い、それで得られた波形データのピークチャンネル値がどのように変化するかを調べる。

3.3.3 実験結果・考察

両系統の実験結果とそれらの同時プロットを図 3.7 ~ 3.7 に示す。まず APD 系統について、 $1 \mu\text{sec}$ 付近に波高ピークがあるがこれは CsI(Tl) シンチレータの減衰時定数 $\sim 1000 \text{ nsec}$ と一致している。これに対して MAPMT 系統では t_{hold} 時間の最小値 $0.4 \mu\text{sec}$ に波高ピークがあり、 t_{hold} 時間が大きくなるほど光量は減少していることが分かる。以上の結果から、APD 系統では $1 \mu\text{sec}$ 付近に、MAPMT 系統では t_{hold} の設定最小値 $0.4 \mu\text{sec}$ 付近に t_{hold} 時間を設定すれば良いことが分かる。両系統によって得られたデータを同時プロットした図を見ると、MAPMT 系統で得たデータに比べて APD 系統で得られたデータの方が、光量の変化、さらに光量自体が少ないと分かる。第 4 章で述べるプロトタイプ偏光計の実験では、偏光測定に加えて APD を用いた偏光光子の分光測定も行う。したがって APD + CsI(Tl) シンチレータを分光検出器として用いる場合、ペDESTAL 値からピーク値まで光量差の少ない APD 系統のピークを優先すべきである。以上の考察から、 t_{hold} 時間を $0.8 \sim 1.2 \mu\text{sec}$ の間に設定する。

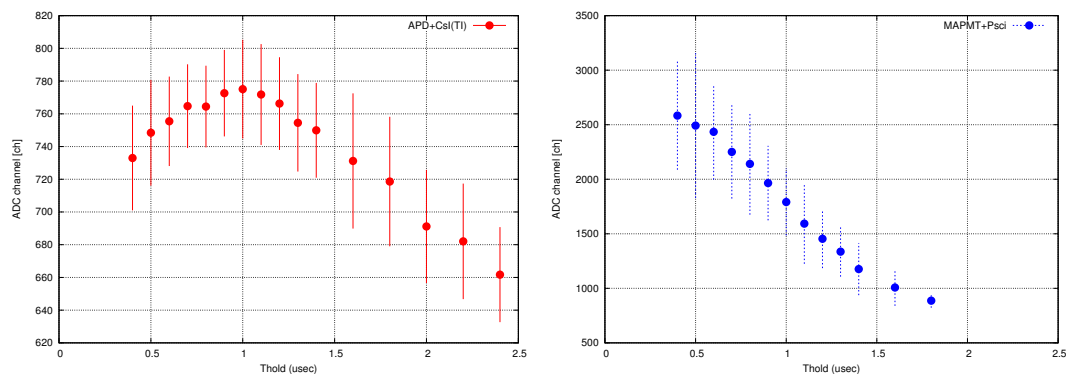


図 3.7: 左図:APD 系統実験結果 右図: MAPMT 系統実験結果 (横軸は測定した t_{hold} 時間 [μsec] であり、縦軸は測定して得られたスペクトルの波高ピーク ch 値である。)

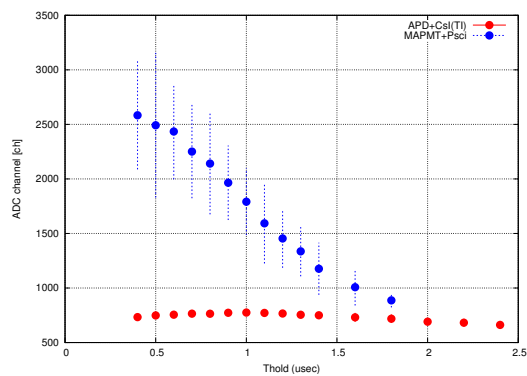


図 3.8: APD 系統と MAPMT 系統の同時プロット

第4章 プロトタイプ検出器のビーム性能試験

4.1 検出器プロトタイプ概要

これまで述べたように、衛星に搭載するのは散乱型の硬 X 線偏光計である。そこでまずは実物と近い構成を模擬したプロトタイプ検出器を作成し、どの程度の偏光情報を得ることが出来るか、またシステムで改善すべき所などを確認する必要がある。設計中の偏光計と同じ様に中央に散乱体としてのプラスチックシンチレータ+MAPMT を配置し、その周りを吸収体としての CsI(Ti) シンチレータ+APD で取り囲んだ構造とした。概要を以下に述べる。

筐体 検出器プロトタイプはノイズ除去のために筐体の中に入れてある。筐体は厚さ 5 mm のアルミ (株式会社シーアイ工業製) であり、内径 130 mm、奥行き 150 mm の円筒形をしている。筐体表面には X 線を入射するため直径 30 mm の穴が開けてあり、散乱体束の中心をこの穴の中心に合わせる。裏面には各受光素子からのシグナルを取り出すケーブルを通すため直径 20 mm の穴が開けてあり、さらに+HV、-HV を接続する端子も取り付けられている。表面裏面とも円盤の隅に 15 度刻みで穴が開けてあり、これらの穴と床板をネジで固定することで入射光線に対して検出器を回転させることが出来る。ノイズ除去のため、これらは一部塗装を剥してあり、電位が一致するようにした。

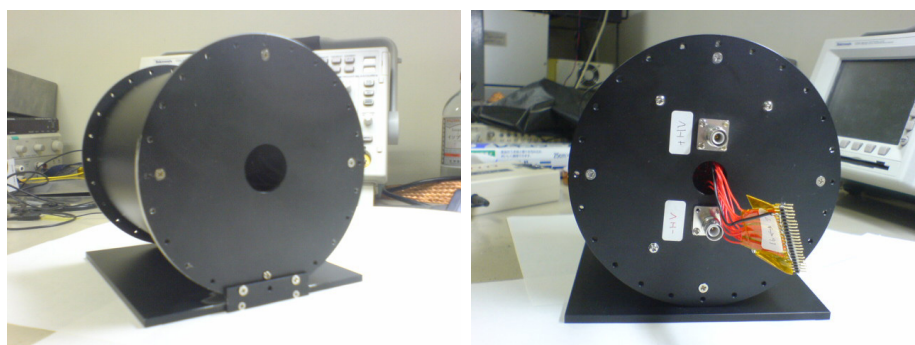


図 4.1: 左図：プロトタイプ偏光計表面 右図：プロトタイプ偏光計裏面

散乱体部分 散乱体は $6.5 \times 6.5 \times 49$ mm のプラスチックシンチレータを 16 本束ねて構成されている。そしてそれらは一つずつ ESR で覆っており、光子をそれぞれ独立に取り出すことが出来る。以上を 16 面読み出せる MAPMT(浜松ホトニクス製 R8900-03-M16) にシリコングリスで接着させ、テフロンテープで固定した。

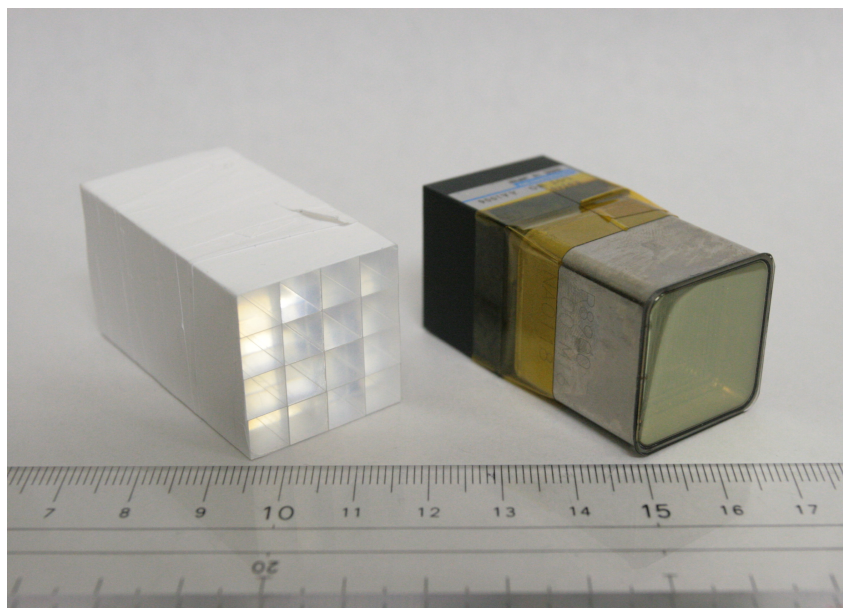


図 4.2: プラスチックシンチレータ (左) と MAPMT(右)

吸収体部分 吸収体は $6.5 \times 10 \times 49$ mm の CsI(Tl) シンチレータを四個並べた物を 1 ユニットとし、計 4 ユニット用いている。こちらもシンチレータは別々に ESR で覆っており、それぞれ 5×5 mm の Reverse Type APD¹ で受光する。読み出しをしやすいように、写真ではガラス・エポキシ基板上に以上の構成を作っている。

各 APD の基礎特性を測定した結果は表 4.1 である。電圧と暗電流は増幅率 50 の時の値であり、エネルギー分解能 FWHM は APD への印加電圧 380 V かつ ^{241}Am を用いて 59.5 keV の X 線を照射した時の値である。ID 番号は図 4.6 と対応させてある。FWHM は式 4.1 によって表され、この中で μ は光電ピークの中心値であり、 σ は光電ピークにフィットした正規分布の標準偏差を表している。また、Pedestal は APD から各系統に入力した時のオフセットの値である。

$$FWHM[\%] = \frac{2.3548\sigma}{\mu - Pedestal} \times 100 \quad (4.1)$$

¹ シンチレーション光の検出に特化した APD である。通常、シンチレーション光は表面から $1 \sim 3 \mu\text{m}$ で電子正孔対に変換されるが、このタイプの APD は増幅領域が表面から数 μm のところにあるため、ほぼ全ての光を増幅出来る。さらに、300 V 程度の電圧で十分な増幅率を得られるところも特長である。[7]

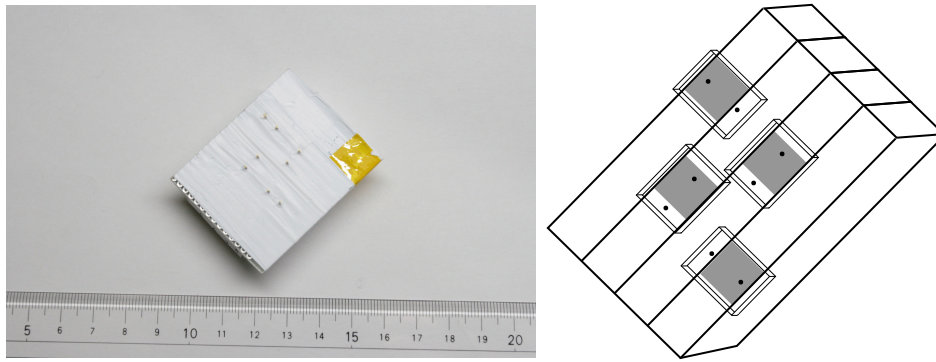


図 4.3: (左図)CsI(Tl) シンチレータユニット写真 (右図)CsI(Tl) シンチレータユニット概略図

CsI(Tl) シンチレータユニットは以下図 4.4 のような読み出し回路で構成した。

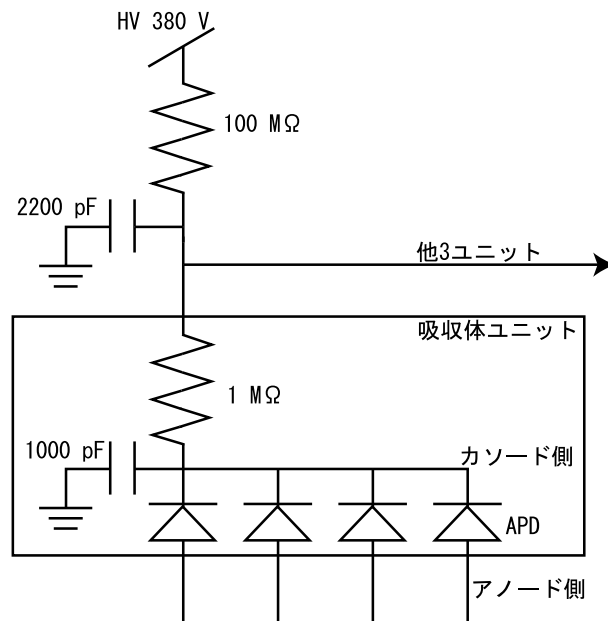


図 4.4: CsI ユニット読み出し回路

表 4.1: 各 APD 基礎特性

ID 番号	フロントエンドカード入力番号	APD 番号	電圧 [V]	暗電流 [mA]	FWHM ³⁷
1	17	2	363	1.59	24.86
2	18	14	370	1.52	13.22
3	19	16	379	1.61	14.13
4	20	15	386	1.63	23.12
5	21	13	378	1.62	17.36
6	22	11	376	1.67	11.47
7	23	29	386	4.08	12.33
8	24	27	386	2.55	16.89
9	25	24	370	5.02	33.51
10	26	22	368	4.04	23.78
11	27	4	367	1.61	19.48
12	28	5	386	1.68	13.13
13	29	7	372	1.71	12.22
14	30	9	372	1.66	26.12
15	31	10	378	1.58	18.55
16	32	26	373	4.41	14.58

上記の散乱体と吸収体は図 4.5 のように筐体に収められている。吸収体の周りには検出部が動かないようにスポンジを敷き詰めてある。

4.2 CsI ユニット性能評価

図 4.3 にあるように、CsI(Ti) シンチレータ同士は ESR を挟んで密着してある。もし CsI の一部に ESR で覆われていない部分があれば、そこから他の CsI に光が漏れ出し分解能が悪くなる恐れがある。他にも、APD と CsI の間が密着していない箇所があればそこから光が漏れ出し、やはり分解能が悪くなる。以上の事が起こっていないか、それと後のビーム照射試験でノイズと有意なシグナルを分離出来るかを確認する必要がある。そこで各ユニットごと、一度に 4 系統同時スペクトル計測を行った。

¹ 380 V 印加時に ²⁴¹Am を用いて 59.5 keV の X 線を照射した時の値

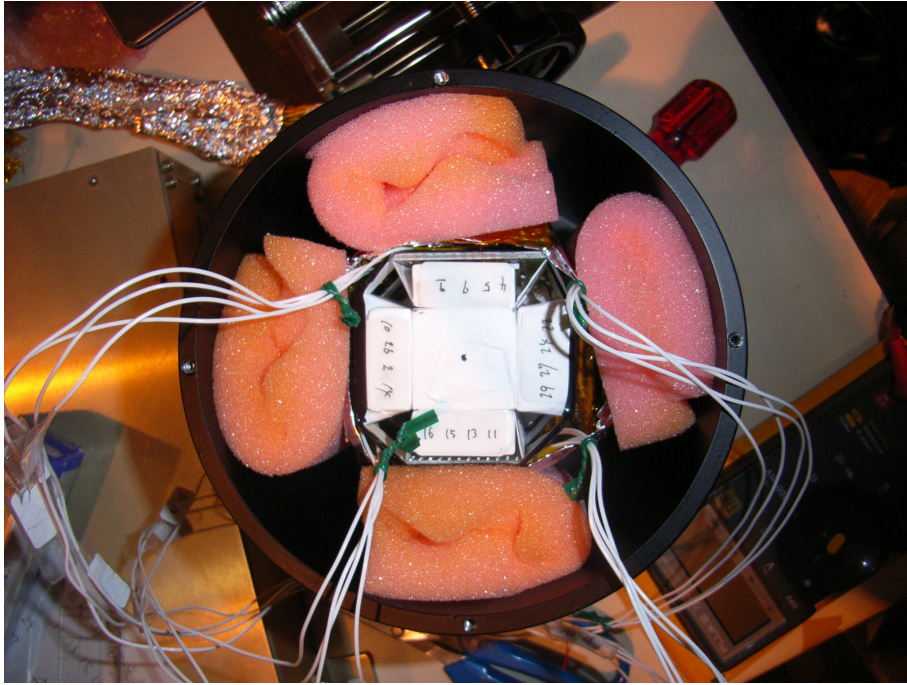


図 4.5: 偏光計プロトタイプ内部写真

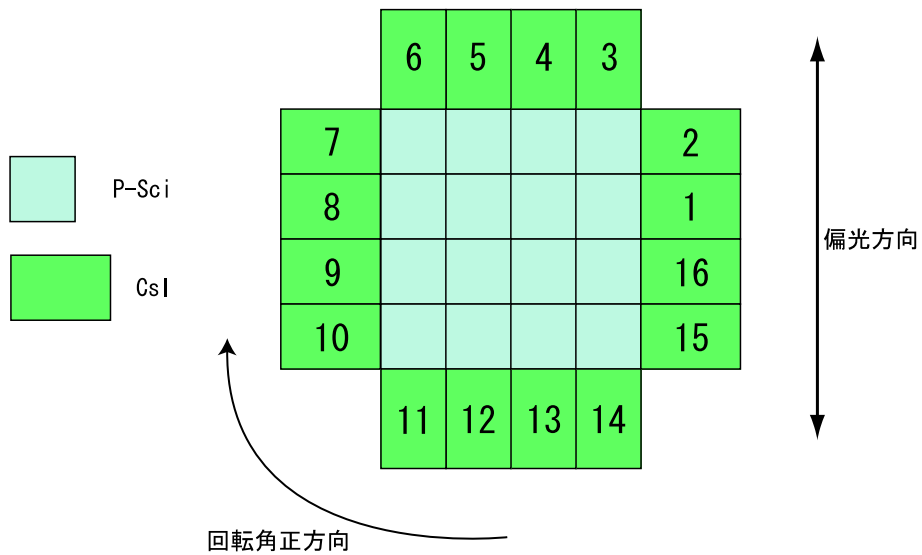


図 4.6: 偏光計プロトタイプ概要 (各 CsI の数字は ID 番号である)

4.2.1 セットアップ・実験内容

実験セットアップを表したのが図 4.7 である。CsI(Ti) シンチレータユニットは APD の端子をそのまま 32ch プリアンプに差し込むことが出来る構造になっている。32ch プリアンプはただユニットを取り付けただけでは様々なノイズを拾ってしまうため、開口部をアルミケースとアルミホイールで遮蔽し、さらに光が入らないようブラックシートをかぶせ

である。このシートの外側から ^{241}Am を用いて 59.5 keV の X 線をユニットに入射する。APD には 380 V を印加し、計測時間は 30 秒とした。

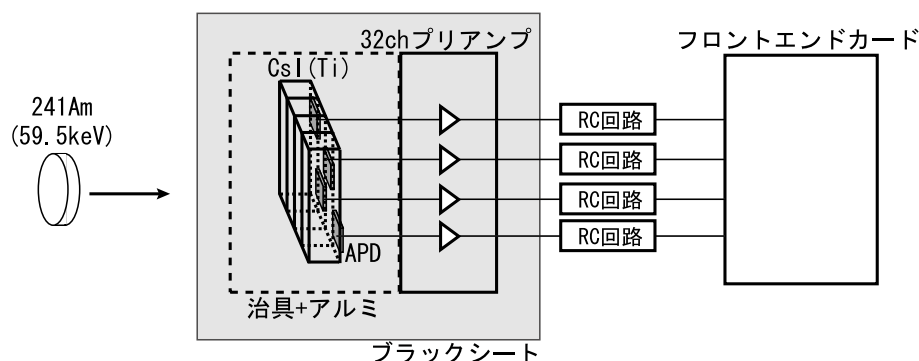


図 4.7: ユニット性能評価セットアップ

4.2.2 実験結果

実験結果を図 4.2.2、4.2.2 に示す。この中で比較的番号 5 と番号 26 の APD では光電ピークがゼロ点ピークに埋もれそうになっている。この理由として、まず番号 26 の APD は基礎特性として暗電流が大きいため、ノイズによりゼロ点ピークの幅が大きくなっていることが挙げられる。また、CsI を取り囲んでいる ESR の歪みや APD ~ CsI 間の接着にずれがあると光量が落ちる原因になり、これらの影響も両 APD には効いていると思われる。次にエネルギー分解能 (FWHM) について考える。エネルギー分解能が 20% 以上ある APD は番号 2、9、15、22、24 であるが、番号 9 と 15 以外はいずれも暗電流が多い、もしくは GAIN が 50 となる電圧値が小さいという特徴がある。暗電流が多ければ計測した ch ピークが揺らいで式 4.1 の分母にある Pedestal の値が大きくなり、FWHM は増加する。また、GAIN が 50 となる電圧値が小さいときは、それよりも高い電圧を印加すると結果として暗電流も増幅され、暗電流が多い時と同じ理由で FWHM は増加する。番号 9 と 15 については以上の理由に加えさらにさきほどの APD ~ CsI 間の接着等が複合的に影響したことで FWHM が高くなったと考えられる。各 APD の試験結果から、いずれもオフライン上での処理により有意なデータを抽出することができたためこのセッティングでビームライン試験を行うこととする。

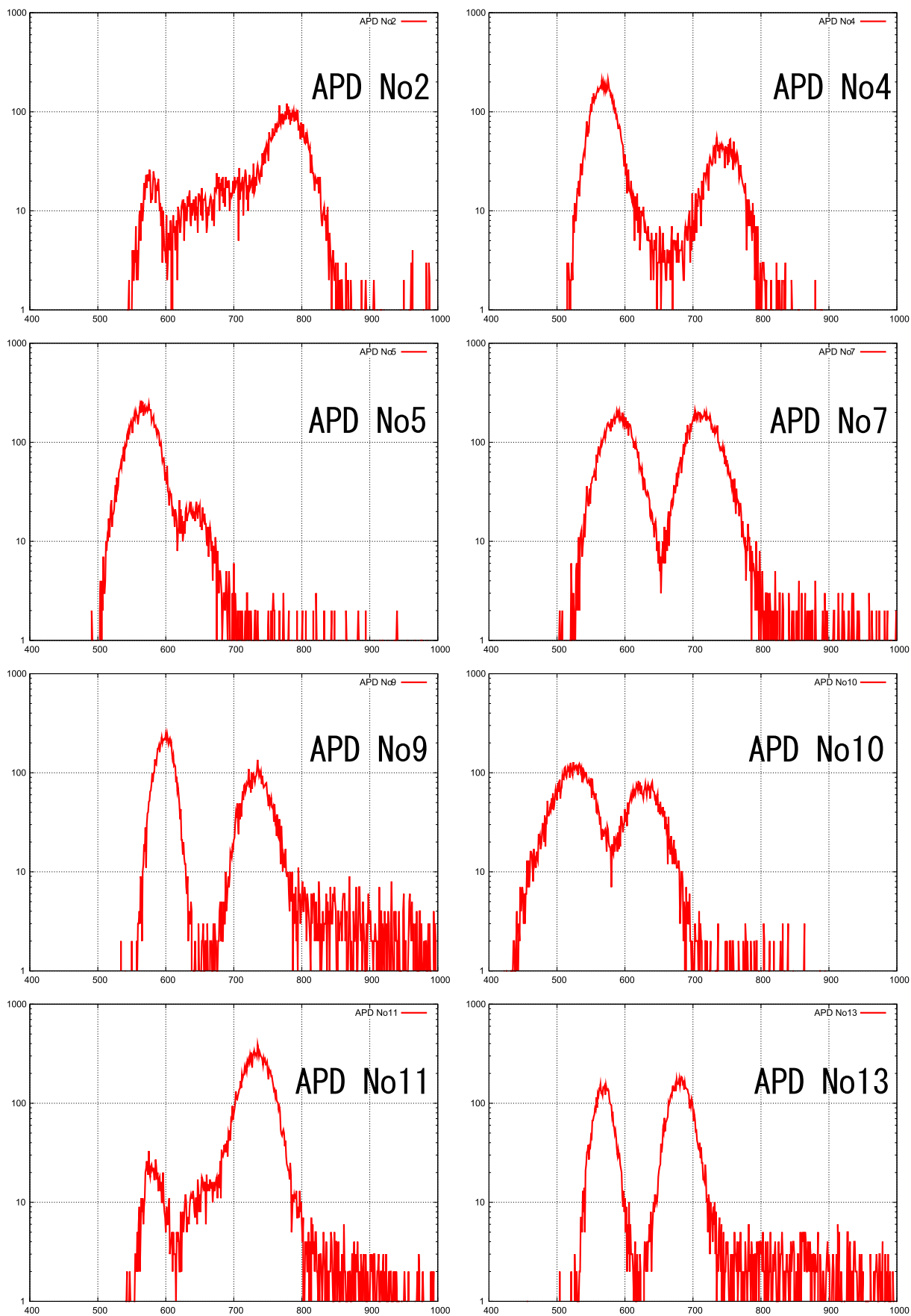


図 4.8: CsI ユニット実験結果 1 (横軸;ADC [ch] 縦軸; カウント数 [counts])

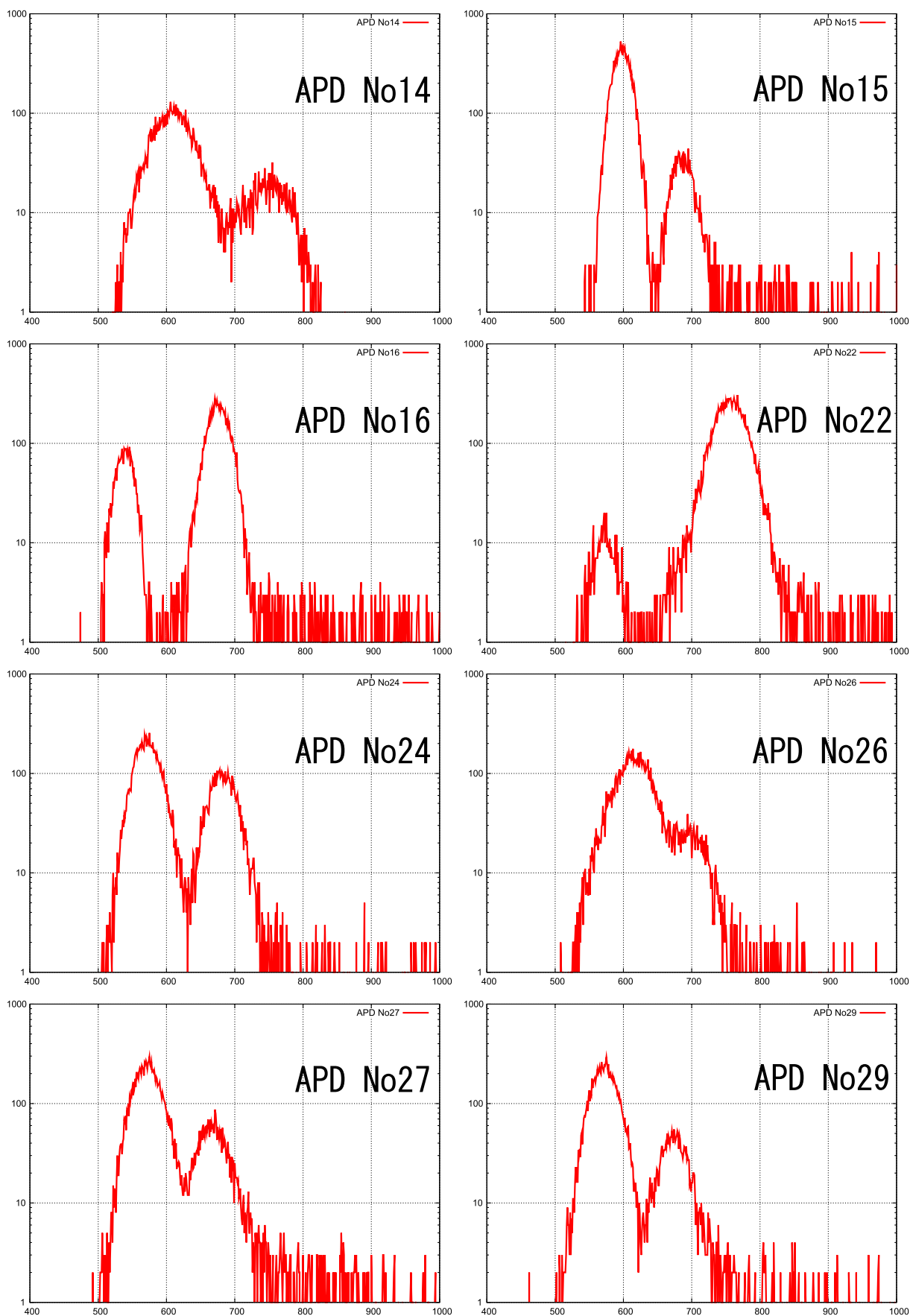


図 4.9: CsI ユニット実験結果 2 (横軸;ADC [ch] 縦軸; カウント数 [counts])

4.3 ビーム照射試験

製作したプロトタイプ偏光計の性能評価のため、実際に偏光 X 線を照射して計測を行う必要がある。そこで、2007 年 11 月 26 日から 12 月 1 日にかけて茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のシンクロトロン放射光施設 (Photon Factory) においてビーム照射試験を行った。この章では実験内容と結果について述べる。

4.3.1 実験環境

今回、ビームライン BL-14A にて実験を行った。ここでは垂直ウィグラーを光源として 5-80 keV の垂直方向に偏光した X 線を照射することが出来る。隔離室の中で X 線の照射が行われ、隔離室の外からは照射操作を行う他に室内カメラを使って内部の様子をモニターすることが出来る。

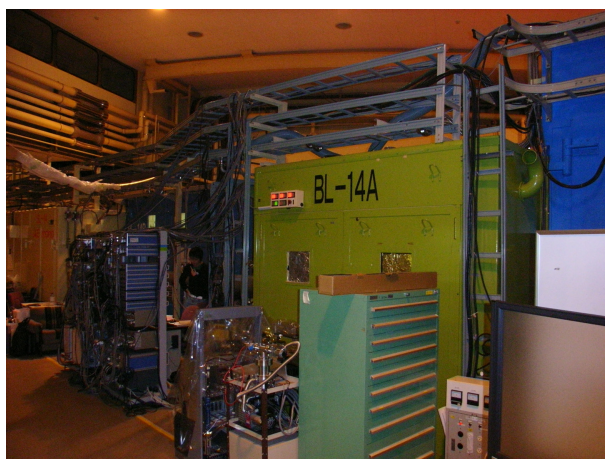


図 4.10: ビームライン 14A 外観

4.3.2 セットアップと実験内容

実験セットアップを模式的に表した図が図 4.3.2 である。隔離室内に入射した X 線をまずコリメータに通した後、減衰板でビームレートを 1000 Hz 程度に下げる。減衰板にはタングステンを用い、ビームレートを最適にする厚さが $600 \mu\text{m}$ だったため計測はこの厚さで行った。プロトタイプ偏光計はビームに出来るだけ平行になるよう設置し、かつプラスチックシンチレータの中心にビームが当たるよう X 線感光紙を用いて微調整を行った。データの取得は LAN を介して隔離室内部のパソコンを遠隔操作して行う。内部にはまた、オシロスコープを設置しており、これでトリガー信号をモニタリングすることによりデー

タ信号およびノイズ信号の状況をリアルタイムで監視する。今回の実験における目的は、プロトタイプ偏光計に入射する X 線の偏光方向を変えていった場合に各シンチレータの計数変化から偏光方向を得られるか確認することである。したがって実験ではプロトタイプ偏光計自体をビームに対して回転することで入射する X 線の偏光方向を変える。図 4.6 中の回転方向で -90 度 $\sim +60$ 度まで 30 度刻みで回転させた。当初の予定では APD16 系統、MAPMT16 系統の計 32 系統同時測定を行う予定であったが、MAPMT で多くのノイズを拾ってしまう事態となったため APD16 系統のみで測定を行うこととした。また、偏光計の APD ~ 32 ch プリアンプ間の経路が特にノイズに弱く、アルミフォイルで嚴重に遮蔽すると同時に、偏光計本体もアルミフォイルで覆った。APD には 380 V を印加し、 t_{hold} は $1.2 \mu\text{sec}$ で設定してある。計測は原則 10 分間連続して行うのであるが、周辺のノイズが激しく I/O ボード上の FPGA がオーバーフローするようなときは、データを取得出来なくなるまで測定し、それを複数回行ってデータを取得した。

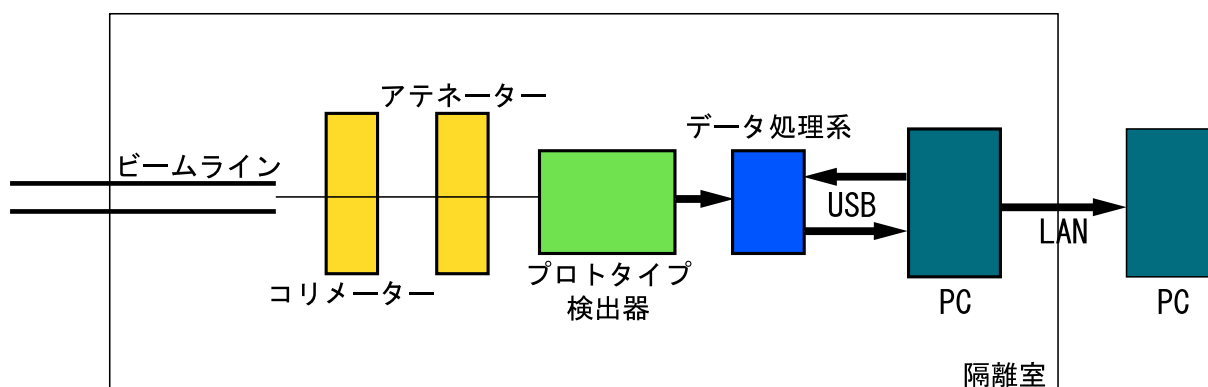


図 4.11: ビームラインセットアップ

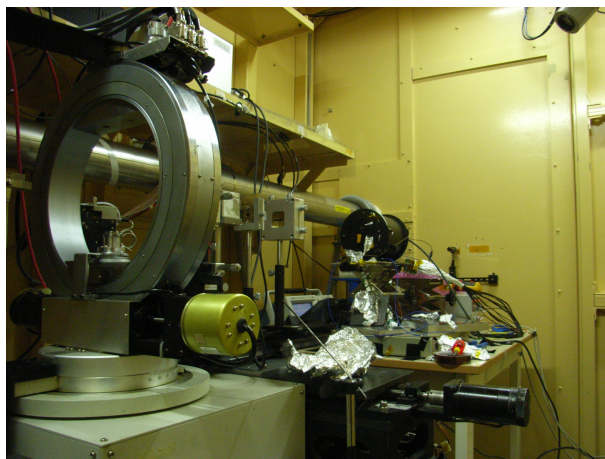


図 4.12: ビーム照射試験の様子

ビーム照射を行った後、同じセットアップのまま今度はビームを照射せずにバックグラウンドの計測も行う。さらに、照射するビームの強度は一日のうちで変化するため、各角度で計測した際に NaI(Tl) シンチレータと光電子増倍管 (PMT) で X 線の強度を計測している。

4.3.3 データ処理

実験で得たデータをまず有意なデータとそうでないデータに選別する必要がある。任意のシステムの ADC データには、シンチレータからの光によるデータと、他のシステムで読み出しが始まったために得られた無シグナル時の ADC データ (オフセット) の二種類がある。オフセットの値は各システムによって違い、測定によって得られる図 4.3.3 の矢印で示される波高ピークの ch をオフセットの値とする。そして、オフセットのゆらぎも考慮して各システムでオフセット値+50 ch 以上の ADC データのみ有意であるとする。そこでまず一つ目に次の操作を行う。

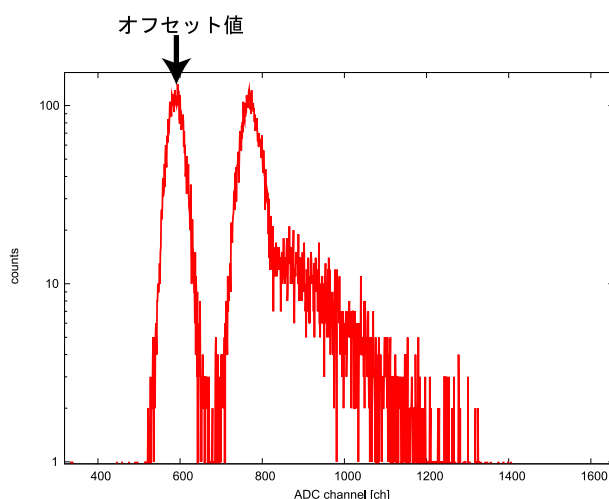


図 4.13: オフセット値の決定

- (1) 全てのシステムについてオフセット値+50 ch 以上を示す ADC データの無いイベントは除去する。

この操作によって各イベントに一つ以上有意な ADC データがあるデータのみ残るが、二つ以上有意な ADC データがあるということは二つ以上発光した CsI(Tl) シンチレータがあることである。これは一つの CsI(Tl) に入った X 線がコンプトン散乱され他の CsI(Tl) に再び入るといったダブルイベントであり、検出原理からこの検出器では二次散乱まで含め

ると偏光方向を決定する精度が落ちてしまう。そこで二次散乱以上しているイベントを除去するため、さらに次のリダクションを行う。

- (2) 各イベントにおいてオフセット値+50 ch以上を示す ADC データが二つ以上あるイベントは除去する。

これより、ミュオン等のバックグラウンドが同時に2個以上起こったイベントも同時に除去される。同様の作業をバックグラウンドデータにも適用し、同条件のイベントを除去する。こうして得られたグラフが図 4.15、4.16 である。このグラフから、これまでの操作によりダブルコンプトンなどによる余分なノイズ成分がかなり除去され、光電ピークがはっきりと見えるようになっているのが分かる。

今回の実験では実験データとバックグラウンドデータを測定した時間が異なっている。そこでまずそれぞれのデータ取得時間で割ってやり、カウントレート同士にして引くことで実験データからバックグラウンドデータを除去することにする。すなわち、 N を CsI(Tl)+APD でカウントしたイベント数、 T をイベントの計測時間、 M をバックグラウンド処理後のカウントレートとすると

$$M = \frac{N}{T} - \frac{N_{BG}}{T_{BG}} \quad (4.2)$$

である。

ここで光電ピークのどの波高値の範囲内にあるイベントを解析に使うかという問題がある。取得する波高値の範囲を大きくすればイベントも増え統計的なデータの精度が増えるが、元々イベントの少ないバックグラウンドデータを処理する時にカウント数のわずかな差がデータ解析に大きな影響を及ぼす可能性がある。したがってデータ解析に及ぼす影響を考慮するため、①光電ピークから \pm HWHM の幅にあるイベントをカウント②光電ピークから $\pm 3\sigma$ の幅にあるイベントをカウント、の二通りでデータを処理した。この結果 APD No15 (ID No4) を例として表したのが図 4.14 である。

これらの図から、データ取得の波高値幅は 3σ の方が HWHM よりもカウントレートが若干大きくなる以外は各角度での相対的なカウントレート比も含めほとんど差が出なかった。この結果はどの APD でも同じ様に見られたため、したがってデータ取得の範囲は統計的な精度を上げるため光電ピークから $\pm 3\sigma$ の幅で取ることにする。

- (3) 光電ピークから $\pm 3\sigma$ の範囲にあるイベントのみを X 線によるシンチレーション光とし、範囲外のイベントを除去する。

さらに、照射する X 線は一日に一回増幅された以降時間とともに減少する。カウントレートで偏光強度を求める今回の方法ではこの X 線強度の分を補正する必要がある。各角度で測定した際、X 線ビームを PMT で測定した値は表 4.2 の通りであった。

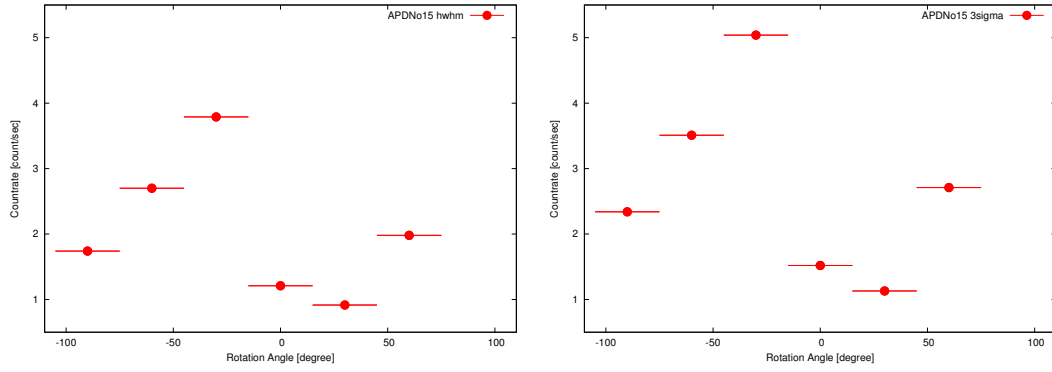


図 4.14: APD No15の実験プロット (左図) ピーク $ch \pm HWHM$ でイベントをカウント (右図) ピーク $ch \pm 3\sigma$ でイベントをカウント

表 4.2: 各角度でのカウントレート

角度	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°
カウントレート [count/sec]	62320.68	64747.4	65918.9	74286.7	71739.5	70107.1

この表から、以下の式 4.3 によって全角度の X 線強度を角度 0° の時を基準とした値に直す。

$$M'_{\text{補正後カウントレート}} = M_{\text{各角度 APD カウントレート}} \times \frac{P_{0^\circ \text{ 度での PMT カウントレート}}}{P_{\text{各角度での PMT カウントレート}}} \quad (4.3)$$

(4) PMT で測定した X 線強度からカウントレートを 0° の時の X 線強度基準に直す。

次に、統計的なデータ精度を出すため、プロトタイプ検出器の中心に対称な位置にある APD の成分を足し合わせる。これには原理にあるように、偏光面に対して面对称の確率でコンプトン散乱が起こることを利用するものである。ところで今回用いた APD はそれぞれ基礎特性が異なるため、同じ強度の X 線を当ててもカウントレートの値は様々な値を示す。したがって、ただ対角成分を足し合わせただけでは値の大きい APD の影響が大きくなってしまい、偏光による散乱結果というよりも APD の基礎特性に依存した実験結果となってしまふ。今回得たい重要な情報は、コンプトン散乱異方性に起因する各 APD のカウントレートの角度依存性であるため、対角成分を足し合わせる前に以下の式 4.4 によって各 APD の基礎特性を標準化する。この式を用いることにより、APD のカウントレート比率を指標として偏光を求めることになる。

例として 30° の時の IDNo1 と 9 の対角成分を足し合わせる時は

$$A_{IDNo1+9}^{30} = \frac{M_{IDNo1}^{30}}{\sum_{\text{全角度}} M'_{IDNo1}} + \frac{M_{IDNo9}^{30}}{\sum_{\text{全角度}} M'_{IDNo9}} \quad (4.4)$$

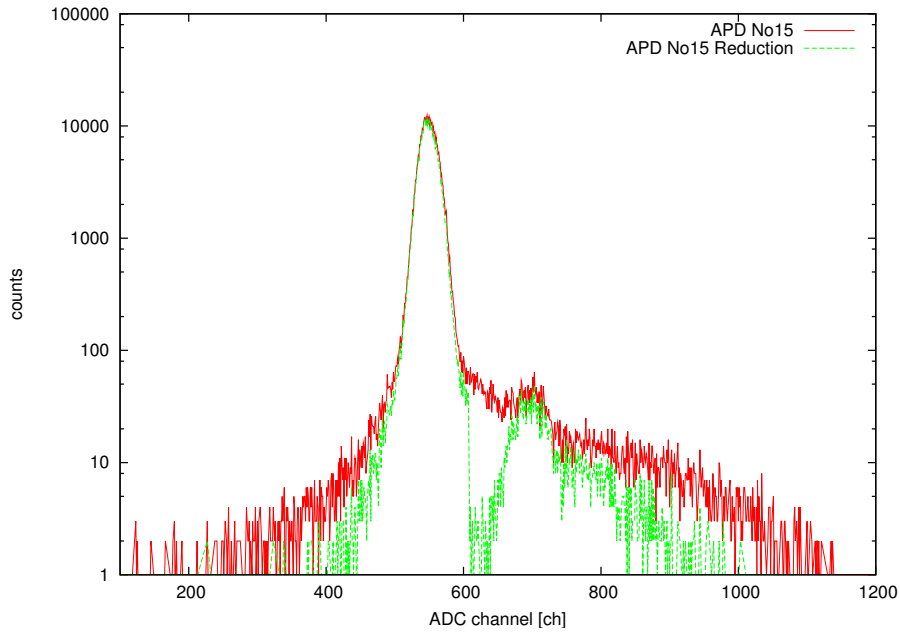


図 4.15: APDNo15 (赤) 除去前 (緑) 除去後

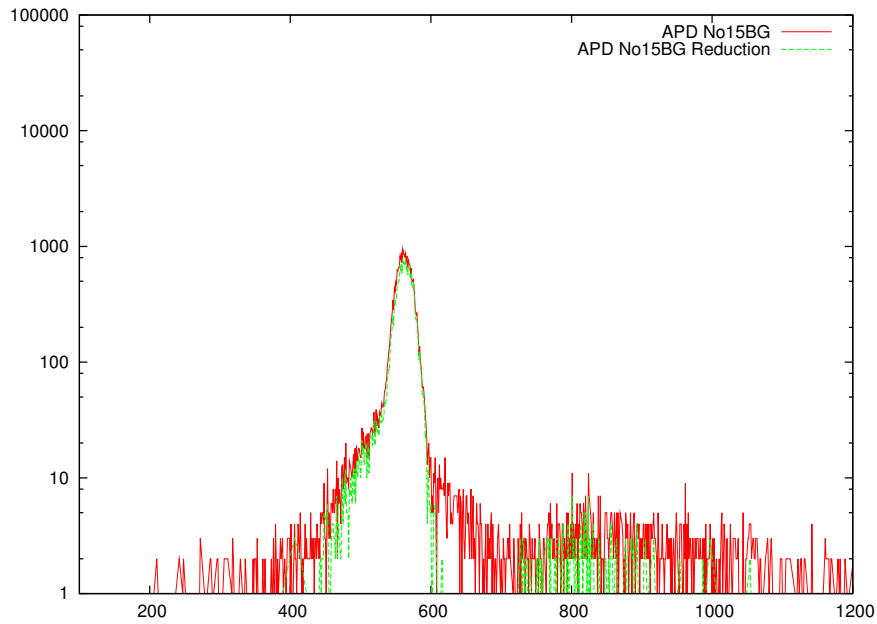


図 4.16: APDNo15 バックグラウンド (赤) 除去前 (緑) 除去後

と表される。こうして得られたグラフに次の式 4.5 を最小自乗法を用いてフィッティングし、モジュレーションファクター (MF) の値を求める。

$$f(\text{角度}) = AV \left(1 + MF \cos 2\left(\pi \times \frac{\text{角度}}{180} + \theta\right) \right) \quad (4.5)$$

θ はラジアンであり、三角関数の最大を N_+ 、最小を N_- としたとき、 $AV = (N_+ + N_-)/2$ 、 $MF = (N_+ - N_-)/2$ と表せる。

- (5) カウントレートを各系統ごとに全角度で標準化し、対角成分を合わせて MF の値を求める。

4.3.4 データ解析結果と考察

KEK で得られたデータ解析結果が図 4.3.4 であり、さらにこれらのグラフを APD の位置で並べたものが図 4.3.4 である。全グラフを総じて、三角関数でフィッティングしたモジュレーションカーブが本来考えられる波形よりも正方向にずれていることが挙げられる。この原因としてまず考えられることは、筐体に対して内部のシンチレータ群がわずかに回転して収められていたという状態であるが、内部構造上それは考えにくい。むしろ筐体の構造を考えるのであれば、シンチレータ群が自重で沈み込み、なおかつそれによってビームがわずかに中心からずれて入射していたとすればモジュレーションカーブのずれを説明出来る。筐体内部のシンチレータ群は、MAPMT を読み出す端子を基盤に差し込むことで支持しているが、図 4.3.4 のように端子を差し込む基盤は y 軸方向の幅が狭くなっており、 x 軸方向に対する加重耐性強い一方、 y 軸方向にはぐらつきやすくなっている。

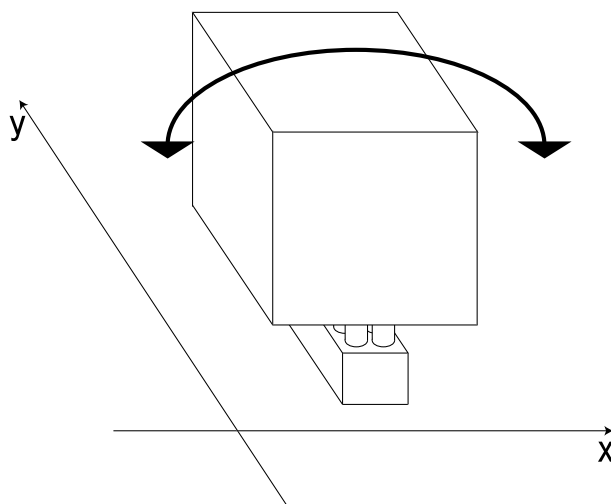


図 4.17: 筐体内部のシンチレータ群は基盤の狭い y 軸方向にずれやすい

実際、図 4.18 にあるように容易に y 軸方向へぐらついてしまう。このような内部のずれを生じさせないように実験時はスポンジを検出器内部に敷き詰めていた。しかし、もしスポンジが重さに耐えられず図 4.3.4 のようにシンチレータ群が傾いたと仮定すると、ビームの照射位置は中心よりも上方にずれると考えることが出来る。図 4.3.4 のグラフを見ると、30 度付近にモジュレーションカーブの最大値が存在するのは白抜き数字書かれた ID1、2、3、16 の対角成分であり、逆にモジュレーションカーブ最小値が存在するの

はIDNo4、13、14、15である。このようにグラフの特長が分かれるには次のことが考えられる。角度0度の時、上方にずれて入射してきたビームは白抜き数字で書かれたIDのCsIシンチレータ近くに入射する。それを30度回転させるとそれまで図4.18y軸方向のみに加わっていた自重がx軸方向にも分散され、スポンジの反発力によってずれていたシンチレータ群が幾分か偏光計中心部へ押し戻される。この場合、白抜き数字で書かれているCsIシンチレータは30度付近で最大値を持つと考える事が出来る。またこのことは、IDの黒数字13、14、15のCsIシンチレータのグラフについても30度付近のモジュレーションカーブ最小値を説明するものである。残るID番号4のCsIシンチレータの対角成分グラフについても、同様の理由で説明することが出来る。0度の際は偏光面に対して最もカウントレート比率が小さくなる位置であり、実験プロットを見ると30度、60度と偏光計を回転させるにつれてカウントレート比率が大きくなっていることが分かる。このことからシンチレータ群のずれを理由として説明することが出来る。また、Geant4と呼ばれる電磁相互作用シミュレータで以上の状況をシミュレーションした結果、同様の結果を得ることが出来た。[5]

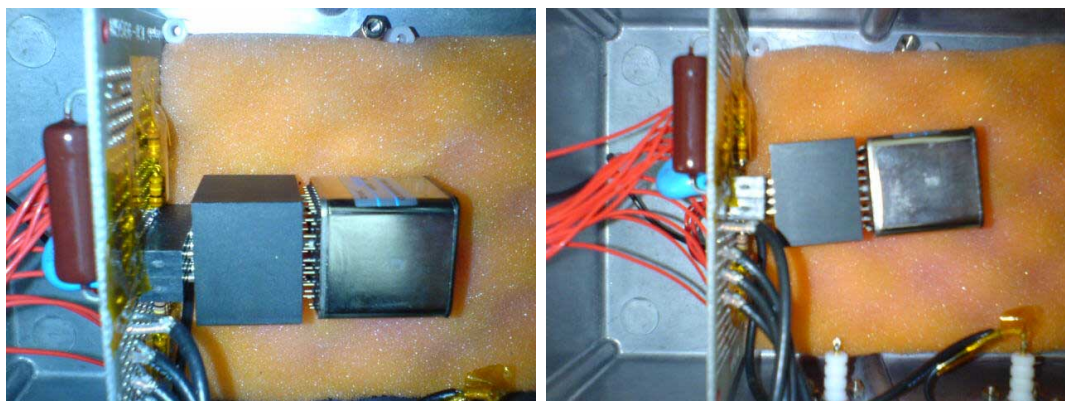


図 4.18: 左図はシンチレータ群を支持する端子がまっすぐ差し込まれている状態であるが、右図はシンチレータ群を支持する端子が傾き、片方浮いている

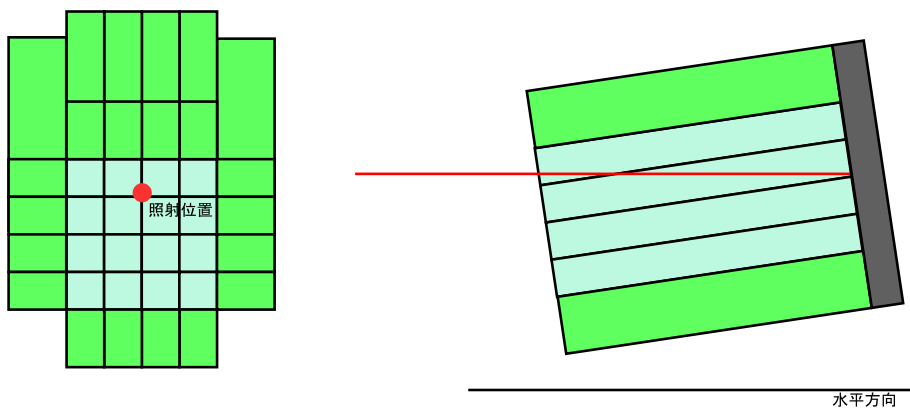


図 4.19: シンチレータ群が傾いている状態でのビーム照射位置は、中心より上方にずれる

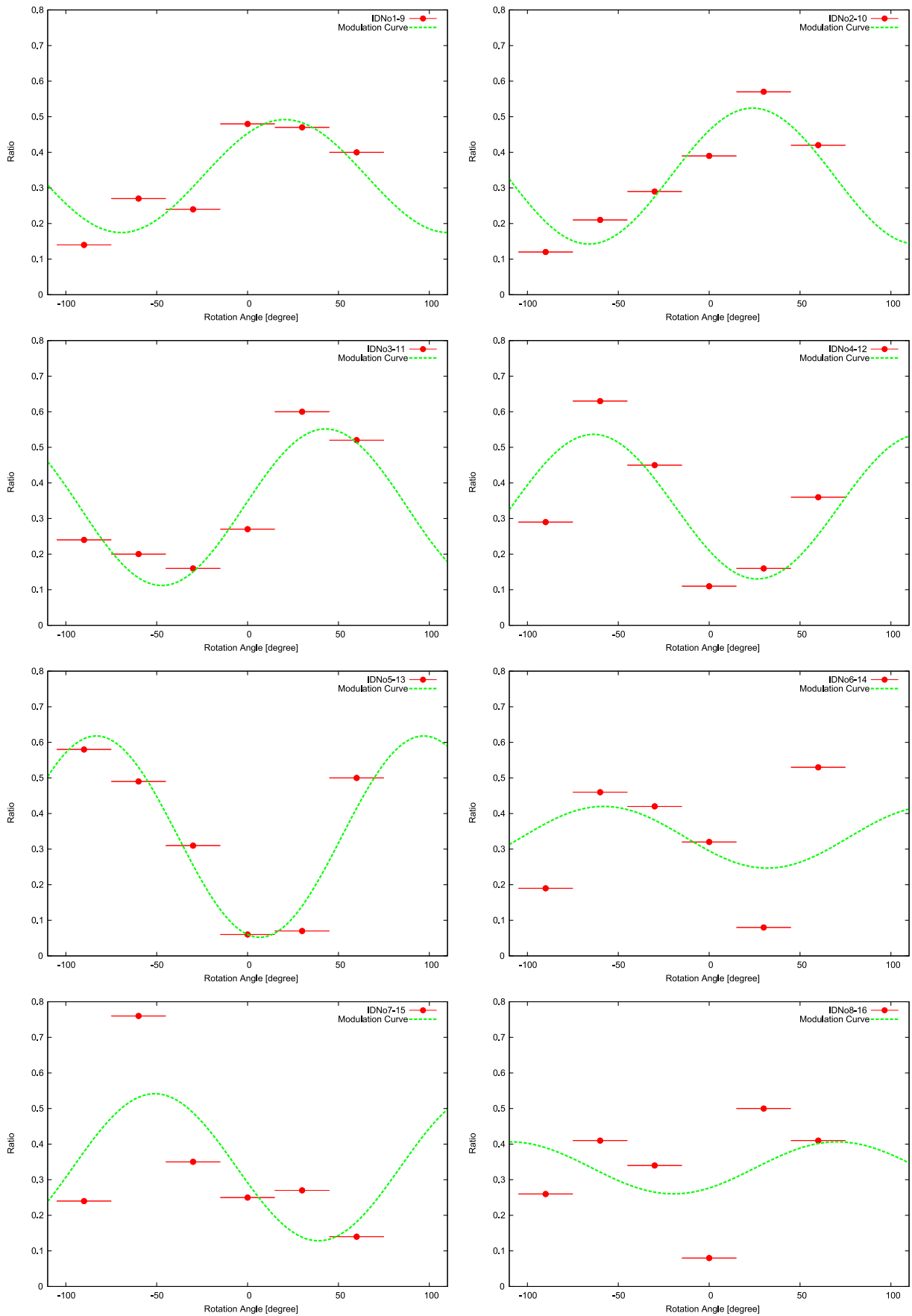


図 4.20: プロトタイプ偏光計解析結果

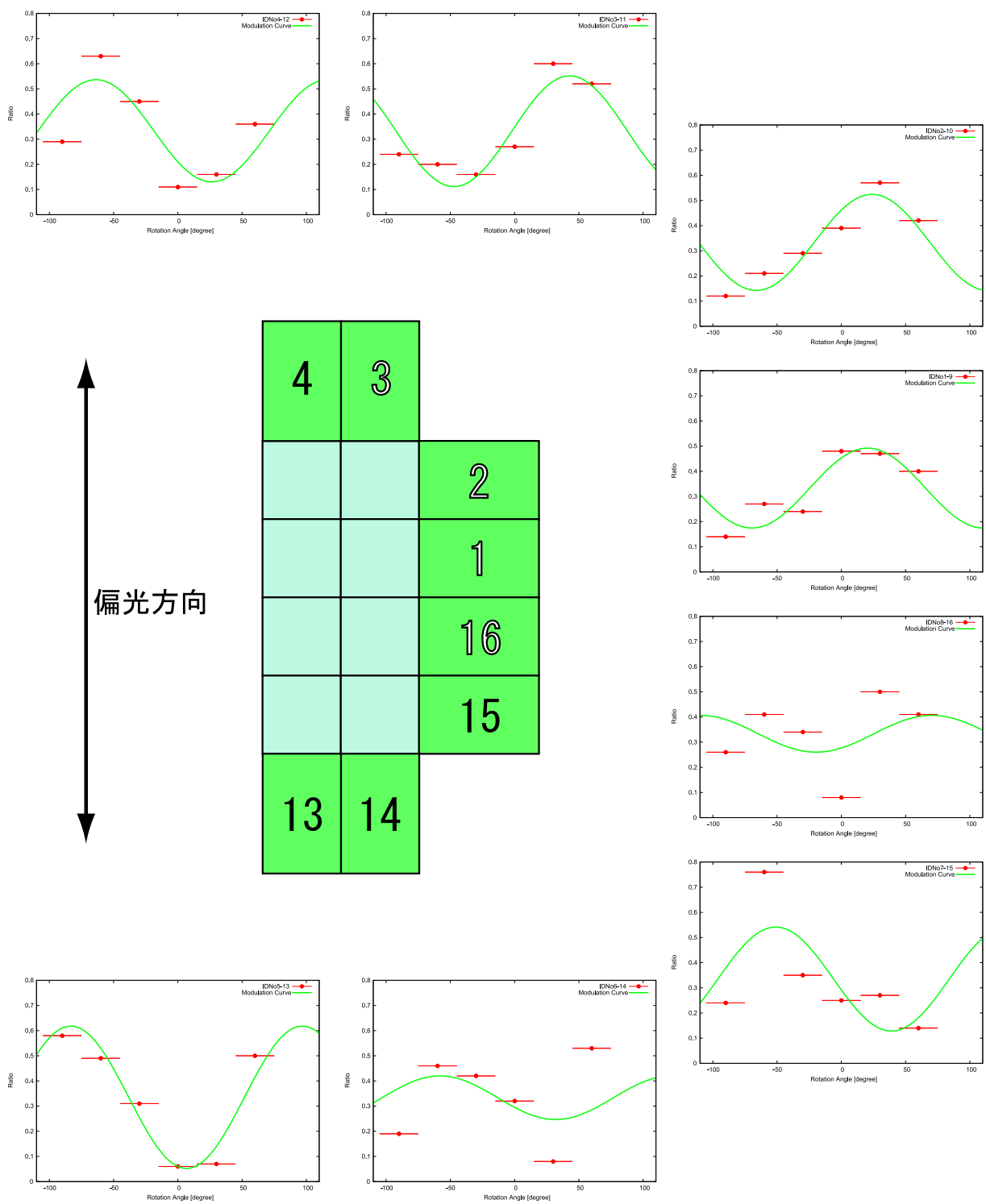


図 4.21: 図 4.3.4 の解析結果を測定した APD の位置に対応させて表示している。白抜き数字で書かれた ID 番号のグラフでは 30 度付近にモジュレーションカーブ最大値が存在し、黒数字では 30 度付近にモジュレーションカーブ最小値が存在していることを表している。

第5章 まとめ

エレクトロニクス部性能評価

TSUBAME 衛星に搭載するシステムを組み上げ、さらに実験した中では最もデータ取得率の高いプログラムを用いて性能評価を行った。

線型性試験では取得した ADC データが、プラスチックシンチレータ + MAPMT(以下 MAPMT 系統と呼称する)、または APD + CsI(Tl) シンチレータ (以下 APD 系統) どちらの場合で得られる電荷量に対しても線型性を持っていることを確かめた。また、高計数実験において現在のシステムでは、入力レートを高くしても 500 counts/sec ほどで頭打ちとなることが分かった。 t_{hold} 試験では、MAPMT 系統で ADC データを取得した場合と APD 系統で取得した場合とでそれぞれ最適な t_{hold} 時間が異なるという結果を得た。APD 系統で取得した ADC データは MAPMT 系統に比べて光量が少なく、さらに APD 系統で得た ADC データで分光観測を行うため、 t_{hold} の設定は APD 系統の最適値に近い値を用いればよいことが分かった。

プロトタイプ検出器を用いたビーム性能試験

TUSBAME 衛星に搭載する偏光計と同じ構成のプロトタイプ検出器を作成し、高エネルギー加速器研究機構において偏光 X 線ビームを用いたビーム照射試験を行った。実験セットアップには改善すべき点があったが、APD 系統のデータ解析を行った結果には偏光による異方性が見えていると考えている。

今後の課題と展望

様々な試行を行ったが、データ欠損の原因を特定することが出来ず、データ取得率を向上させることが出来なかった。TSUBAME 衛星に搭載する散乱型偏光計では統計的に偏光を求めるため、観測データの欠損によるデータ取得率の低下は克服すべき問題である。データ欠損の原因を見つけるため、以下に述べる方法でのデバッグを検討したが、どれも使用するには問題がありデバッグをすることが出来なかった。

まず最初にプログラムの処理をリアルタイムでモニタ出来るデバッグ機器を用いることを検討したが、価格が高価であり導入は難しかった。そこでマイコンのデバッグとしてしばしば用いられるデバッグモニタを用いることも考えたが、このデバッグは RAM メ

メモリにプログラム全体を読み込んで動作を模擬する方法であり、用いた H83048BF の内蔵 RAM メモリは 4 kByte しかないため、機能を絞り込んでも現状の処理を行わせるには RAM メモリの容量が足りない。また、ソフトウェアデバッガでは USB 通信処理などを模擬出来ないという問題がある。

TSUBAME 衛星では現在よりさらに多くのデータを処理しなければならないため、現在使用している H8 マイコンより高速な CPU が必要となる可能性もある。さらに、処理データ保存のために CPU の内部メモリだけでなく、外部メモリを増設する必要性も考慮しなくてはならない。

以上の事を踏まえて、データ処理システムの構成を刷新することを現在検討している。特に USB 以外の通信方式とそれに対応した CPU の採用により、現在 USB 通信時に起きている可能性のある不具合を回避する事が出来、データ取得率の向上につながる可能性がある。今後、工学部と検討を行い、システムに変更を加えることで現状起きている問題を克服出来ると考えている。

付 録 A その他のデータ取得ロジック

本論文データを取得するプログラムのロジック以外にも、以下のロジックでデータ取得を行った。ここではそれらロジックについて、データを取得する流れとデータ取得性能の考察を行う。以下で述べる FPGA は I/O ボード上のものを指す。

FPGA 割り込みによるデータ読み出し

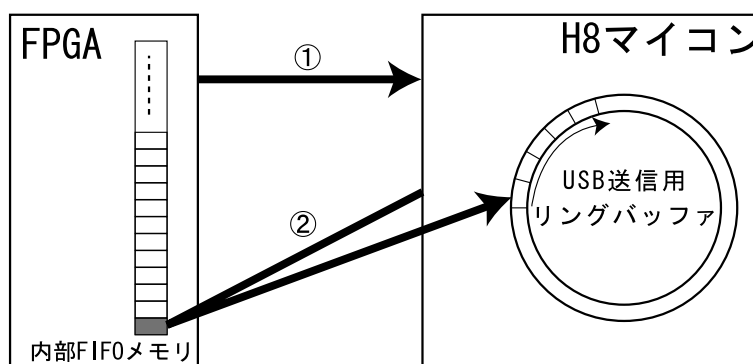


図 A.1: FPGA 割り込みによるデータ取得シーケンス模式図

2.4 章のロジックでは、FPGA が H8 マイコンからのステータス参照のコマンドを受けて返した値を H8 マイコンが判定し、データ取得が行われる。これに対し、本ロジックでは FPGA からの割り込みによってデータ取得が行われる。図 A.1 に示されるように、データ取得の流れは

- ①FPGA の内部メモリに 1 イベント以上データが存在する時、H8 マイコンへ割り込みシグナルを送る。
- ②H8 マイコンは割り込みシグナルを受けると FPGA から 1 イベント分のデータを取り出してデータ処理を行い、H8 マイコン内部メモリに保存する。

以上の処理を FPGA 内のメモリにデータが存在する限り繰り返す。

このロジックでは、動作テストとして行った 500 counts/sec でのランダムパルス入力では FPGA のメモリがオーバーフローし、データ取得が出来なくなった。この理由として、H8 への割り込みが重複する影響が考えられる。H8 には FPGA からの割り込み以外にも

USBからの割り込みが行われる。FPGAとUSBどちらか片方からの割り込み処理をしている最中にもう一方の割り込みが入った場合、後の割り込みに反応せず最初の割り込み処理を続けるというプログラムとなっている。この場合FPGAとUSBどちらの処理を行うかは割り込みのタイミングによって決まり、USBの割り込み処理が行われる間FPGAにはデータが溜まり続ける。このような状態が続いたため、FPGAのメモリがオーバーフローしたものと考えている。500 Hzほどでオーバーフローしてしまう状態ではプロトタイプ偏光計の試験には能力不足なので、このロジックではデータ取得を行わないこととした。

10 イベントのデータ連続処理

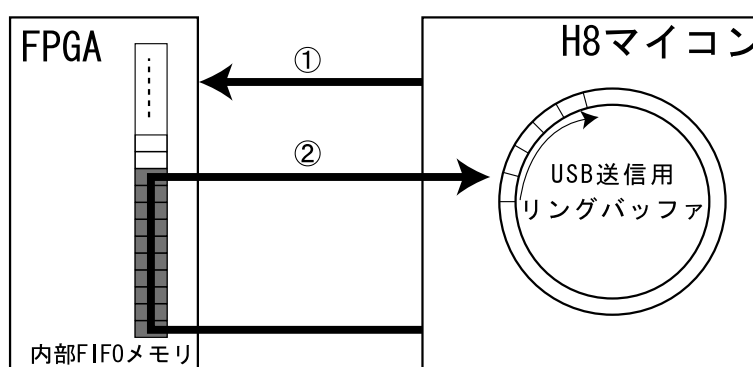


図 A.2: 一度に10 イベントを処理するデータ取得シーケンス模式図

このロジックでは、H8がFPGAの状態を確認してデータ処理を行うという同じであるが、データを取得する際1度に10 イベントを処理するという違いがある。図 A.2 に示したように、データ取得の流れは

- ①H8 マイコンは常にFPGA 内部メモリのデータ量を確認する。
- ②FPGA の内部メモリに半分以上データが溜まったことを確認すると、FPGA にデータ取得を中断させ、H8 は10 イベント分のデータを連続して処理してH8 マイコン内部メモリに保存する。FPGA のデータ取得再開は、FPGA の内部メモリが半分以下になってから行う。

としている。

本ロジックの場合、1000 counts/sec のランダムパルスを入力した時、バイナリデータを崩した段階で入力イベントの約30%しかデータを取得出来ていなかった。このロジックではH8 マイコン内部メモリにデータが残っている状態でさらにデータを10 イベント加えると、内部メモリとして確保している領域をオーバーしデータ破壊が起こる可能性がある

る。したがってそのようなことが起こらないよう、H8 マイコン内部メモリへデータを書き込む際にデータを書き込んだ場合の合計データ量がリングバッファのサイズを超過しないか毎回チェックを行う。そして超過する場合はリングバッファへの書き込みを行わないようにプログラムした。リングバッファ内にデータが存在する間、H8 マイコンはFPGA からデータを取得せず FPGA の内部メモリのデータも減らないため FPGA はデータの取得を行わない。USB 通信により、H8 マイコン内部メモリ及びFPGA 内部メモリ中のデータが順次送信され、両メモリの空き容量が確保されてから FPGA によるデータ取得を再開する。この USB データ通信処理中のデータ取得中断により、データ取得率の低下が起きていると考えている。このようなデータの取得中断による取得率低下を無くすために、FPGA 内部メモリに1 イベント以上のデータを確認するとそれらデータを1 イベントずつ処理し、H8 内部メモリ限界まで効率良くデータを保存できるようにしたのが2.4 章のロジックである。2.4 章のロジックにより取得率が改善出来たため、本ロジックは用いないことにした。

関連図書

- [1] F.Lei et al. Space Science Reviews,82,309-399(1997)
- [2] M.V.Medvedev, Astrophysical Journal,540,704(2000)
- [3] 有元 誠、修士論文「気球硬 X 線偏光計 PoGO のシミュレーションによる性能評価」東京工業大学 (2006)
- [4] 倉本 祐輔、修士論文「東工大衛星 Cute-1.7 搭載 APD 荷電粒子モニターの開発」東京工業大学 (2006)
- [5] 津布久 佳宏、修士論文「東工大小型衛星プロジェクトにおける理学モニター部の開発の性能評価」東京工業大学 (2008)
- [6] 戸泉 貴裕、卒業論文「硬 X 線偏光計用多チャンネルシンチレーション検出器の開発」
- [7] 斎藤 孝男、修士論文「2次元 APD array と VLSI を用いた X 線・線用撮像検出器の開発」東京工業大学 (2006)
- [8] 東京工業大学物理学科「物理学実験第一」東京工業大学 (2003)
- [9] 藤沢 幸穂「H8 マイコン完全マニュアル」オーム社 (2003)
- [10] 鹿取 祐二「C 言語で H8 マイコンを使いこなす」オーム社 (2004)
- [11] Ideas 社 製品資料「VA32_HDR14 Specification v1.02」
- [12] Ideas 社 製品資料「TA32CG2 Description」
- [13] クリアパルス株式会社「80068 型 MAPMT ヘッドアンブユニット取扱説明書」
- [14] クリアパルス株式会社「80038A 型 IFC 取扱説明書」
- [15] クリアパルス株式会社「CP-3556N I/O 基盤 取扱説明書」
- [16] ルネサステクノロジ「H8/3048B グループ ハードウェアマニュアル」

[17] National Semiconductor 社

製品資料 PDF <http://www.national.com/ds.cgi/US/USBN9604.pdf>

謝辞

本研究を行うにあたり多くの方々にお世話頂きました。この場をお借りしてお礼申し上げます、ありがとうございました。

指導教官の河合先生には、論文の書き方や発表の仕方を含め、自分に欠けているプレゼンテーションに必要な要素を多くご指導頂きました。また、ゼミでは自分の発した質問に対して大変分かりやすく説明をして頂きまして、理解を深めることが出来ました。多大なるご指導を頂き、誠にありがとうございます。助手の片岡さんには本文中のデータ処理システムを考えるとという役割をさせて頂き、その中でマイコンという面白いツールに出会うことが出来ました。また、実験がうまくいかない時には様々な解決策をアドバイスして頂き、その剽軽な性格で場を和ませて下さいました。実験をスムーズに進めることが出来、本当に感謝しております。

研究室の先輩方はユーモア溢れる方ばかりで、とても楽しい日々を過ごすことが出来ました。植野さんにはネットワークの設定をして頂き、さらに大学院入試の際にご自身が使われていた参考書を持ってきて下さいました。小谷さんには、統計ゼミで間違えて理解していた部分を詳しく教えて頂きました。谷津さんはマイコンのいろはを教えてくださいました。有元さんはいつも明るく、落ち込んでいるときには何度も元気を出させて下さいました。下河辺さんにはプログラムとUSB通信について、本当に多くの助言を頂きました。津布久さんはTSUBAMEについて多くを教えてください、実験でも多くの手解きを頂きました。石村さんには、これからの進路や人生についてよく相談に乗って下さいました。三枝さんとは机が隣り同士であり、Linuxで分からないことがあるとすぐに教えて下さいました。田中さんも席が近く、ユーモラスな冗談で雰囲気をも明るくして頂きました。戸泉さんには多くの悩みを聞いて頂き、メンタル面で何度も助けて下さいました、小泉さんの研究に打ち込む熱心さに、自己の反省と目標を頂きました。栗田さんには、大学院入試の際お薦めの参考書を教えてくださいました。和田君はとても気さくで話しやすく、研究以外の多くのことで相談に乗って下さいました。クリアパルスの久保様にはプログラムの修正などで何度も御尽力を頂き、松永研究室の藤原さんはH8について多くを教えてくださいました。そして、その他様々なの方々にお世話になりました。

多くの方々の御好意のおかげで、ここまで来ることが出来ました、ありがとうございます。

最後に、辛い時に何度も励ましてくれた母親と祖父母、生活面で手助けをしてくれた妹達、そして天国から見守ってくれている父親に対して、お礼申し上げます。この卒業論文は、家族の支え無しに生まれることは無かったです。

本当に、ありがとうございました。