

リニアークライダー用 CCD 高精度飛跡検出器の 電子による放射線損傷に関する研究

The Study of Electron Damage Effects for
CCD-based Vertex Detector

平成 18 年 3 月

March 2006

博士論文

Ph.D. Thesis

高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター

Computing Research Center, High Energy Accelerator Research Organization

岩井 剛

Iwai, Go

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1 高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター

Computer Building, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

Acknowledgments

本研究をこうして学位申請論文という形で完結させるまでに (私の自堕落な性格も災いして) あまりにも多くの時間が流れてしまいました。大学 4 年で研究室に配属されてからカウントすると実に 8 年の歳月を費やし、現在に至っております。本研究のテーマともなっている LC 実験崩壊点検出器に関する研究は私が新潟大学大学院の博士後期課程に進学してから始めたものですが、この研究を行うにあたって学部・博士前期課程で吸収した様々な技術・経験・知識が必要とされました。そしてそういった研究に必要な様々な要素を惜しみなく私に授けてくれたのは先生であり、先輩であり、時には後輩でした。したがって私はこの 8 年の間に私という人間に関わり直接・間接を問わず本研究を支えてくれた人々全てに感謝申し上げたいと思っております。なにしろ人の人生の 8 年分ですのでそれなりに長くなってしまいますが、少しずつ記憶を紐解きながら謝辞の言葉を書き綴っていきたいと思います。なお、8 年の間に所属機関や官職が変わってしまわれた方が多くおられますのでここでは所属・官職は省略させていただきます。

まずは指導教官であった田村詔生先生に深く感謝いたします。先生には学部時代から数えると計 8 年間にわたって、親身になってご指導していただきました。学部の卒業研究の課題であった Geant4 によるシミュレーション、修士論文の課題であったデータ収集ソフトウェア KONOE の開発と先生はその場、その場、の課題ではなく、常に先々の展開を見据えた上で課題を与えてくれました。学部・修士時代の研究テーマは一見すると本研究とは内容が大きく逸脱したものにも見えますが、今、こうして振り返ってみると各課題が一本の線で繋がっていることを確かに感じるすることができます。また先生は私という人間を性格も含めてよく理解した上で公私にわたって明確なアドバイスを長きにわたって根気よく与え続けてくれました。先生から与えてもらったものはあまりにも膨大でその対価を今後、何かの形で返せるとはとても思えませんが、せめて、ここに感謝の気持ちを込めて厚く御礼を申し上げたいと思います。

本研究の遂行にあたって必要不可欠であった CCD の運転や測定は杉本康博先生の努力なくして不可能でした。先生には CCD からのデータ読み出し機器を開発して頂き、開発者でなくては知りえない読み出しデータの非常に詳細な箇所に関する疑問点に対して明確な回答をして頂きました。また電子線照射の為のビームテストに於いては東北大学核理研へのプロポーザルからスケジューリングまで陣頭に立ってパーテックスサブグループを導いてくれました。先生の多大なる努力に対して感佩措く能わず、厚く拝謝いたします。

また共に研究に取り組んでくれた宮本彰也先生、阿蘇司先生、高山広也さん、藤原史和さん、藤原康平さん、阿部浩也先生、松井隆幸先生、及び JLC パーテックスサブグループの諸先輩方にも同様に感謝いたします。彼らの惜みない協力がどれほどの支えになったかわかりません。本当にありがとうございました。そしてビーム照射の機会を与えて頂いたことと、加速器の運転、その他の協力に対して、寺沢辰生先生をはじめとする核理研のスタッフの皆様方と本研究をサポートしてくれた日英科学協力事業に深謝いたします。

修士論文のテーマであった KONOE の開発では私を最大限信頼し、KONOE の重要な部分の開発を完全に私に任せてくれた坂本宏先生に大変お世話になりましたので、ここで謝辞を述べたいと思います。坂本先生の思想や目的実現のための手段は常に一貫しており、修士以降の私の研究姿勢に非常に大きな影響を与えてくれました。数年の時を経て、今、再び仕事を御一緒させてもらっていることに不思議な縁を感じずにはられません。今後もご迷惑をおかけすることがあるかもしれませんが、努力を惜しまず精一杯、仕事にあたりたいと思っておりますので今後とも公私ともに宜しく願います。

また共に KONOE の開発に携わったメンバーと諸先輩方にも深謝します。清水佳之さん、細井剛さん、内田桐日さん、溝内健太郎さんと共に長期間にわたって KONOE 製作にあたった日々は今も忘れられずこの胸に残っております。あの苦労の後に味わった昂揚感は私に共同研究のすばらしさというものを教えてくれました。本当にありがとうございます。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて KONOE の実働試験も兼ねて行われた T473 実験に参加したメンバー諸子にも感謝します。阿部耕平さん、飯盛康雅さん、谷本奈穂さん、山下智弘さん、橋崎徹さん、越野俊充さん、松尾武さん、乗松健治さん、阿部陵治さん、西恒幸さん、小貫良行さんには、根気よく頑張ってくれ、大変感謝しております。

T473 実験は実験を経験したことのない学生を主体に構成されたグループにより行われました。そういった背景もあり、実験の指揮をとり、現場で直接、学生の指導をしてくださった、稲垣隆雄先生、中野逸夫先生、田中礼三郎先生には本当にお世話になりました。そしてご苦労様でした。

私が学部4年の時に β 版がリリースされ、昨年で10周年を迎えたシミュレーションツールキット Geant4 の開発者、浅井慎先生、村上晃一先生、田中寛先生、蔵重久弥先生には Geant4 に関してインストレーションからアプリケーションの実装まで幾度となく教えて頂きました。今では私も教える側の立場の人間になりましたが、偏に先生方のご指導のお陰だと思っております。各地で開催されたワークショップを通じて、人に教えることの難しさと喜びを肌身をもって学び、人間として一回り大きく成長することができました。こういった機会を積極的に提供してくれた先生方に深く感謝いたします。

科学技術振興機構 (JST) 研究員として私に研究の場を提供してくれた佐々木節先生に感恩の気持ちを述べたいと思います。先生は最大限、私を評価してくれる数少ない先生です。実力以上に評価され、(私の実力不足が原因で) 時に重圧として感じるときもありますが、先生の期待に応えられるよう、今後も全力で精進して参りたいと思います。働きながら学位を取ることは本当に大変なことだと、我が身をもって経験しておりますが、先生は私の性格をよく理解した上で様々な手段で支援してくれ、時に寛大な配慮をしてくださいました。ご自身も非常に忙しい時期であるのに、余計な心労を与えてしまい、申し訳なく思っておりますが、この埋め合わせは必ず果たしたいと思っておりますので、どうか今後もご指導のほど、宜しく願います。

素粒子物理学実験分野に於ける GRID の環境整備作業を KEK で共に行っている渡瀬芳行先生にも大変お世話になりました。現在、共同で行っている GRID 環境整備作業は人手不足が深刻な状況ですが、私を学位取得に専念させるために、先生は本来、私がすべき仕事を全て代わりに引き受けて作業にあたってくれています。また、私の発表資料の添削や面接の指導もしてくれました。先生の豊富な経験に基づく、アドバイスや作業のスケジュールリングはいつも私に明確な指標を与えてくれます。先生と仕事を共に出来る時間は、もう残り少ないかもしれませんが、残された少ない時間内に先生の経験と知識を最大限吸収できるよう、作業にあたる覚悟でありますので、今後とも宜しく願います。

石原信弘先生をはじめとする DCBA 研究グループの皆様にも大変お世話になりましたので、ここに深謝します。私と石原先生は直接、研究や業務での接点がないのですが、修士の学生の頃から特に目をかけてくださって、研究所での慣れない生活で時に孤独に苛まされ、やる気を失ってしまうような時に大らかな心で精神面を温かく

支え続けてくれた、つくばに於ける父親のような存在です。先生の存在がなかったら到底、本研究の遂行は不可能だったと思いますので、ここに深く拝謝いたします。

KEK 計算科学センター (CRC) の仲間からも多大な支援を受けました。CRC はその性格上、雑多な業務が多く、その内容は多岐にわたります。そのような環境の中で私が本研究に集中し取り組むことが出来たのは、職員の皆様が CRC の業務を運営してくれたおかげです。皆様の押しつけることのない無償の優しさに対して、ここに深謝いたします。今後もご迷惑をおかけすることもあるかもしれませんが、一生懸命、貢献するつもりでありますので、宜しく願いいたします。

新潟大学高エネルギー物理学研究室のメンバー全員に感謝します。ほんの 1,2 年のごくわずかな期間であったり、出張の連続ですれ違いが続く日々ではありましたが、共に素粒子物理学の研究に打ち込み、時に研究室の運営に関して議論した仲間に支えられることによって研究を遂行することが出来たと思います。特に計算機アーキテクチャ、ソフトウェアデザイン、素粒子物理学に関してセミナーやミーティングで丁寧に指導して下さった宮野和政先生、川崎健夫先生、宮田等先生、高旗誠さん、高橋諭さん、坂本泰伸さん、佐治超爾さん、木村彰徳さん、そして研究室に配属されてから 6 年間にわたって後輩の指導や研究室の運営等で努力を共にしてきた同級生の満田史織さんに心より感謝いたします。

最後に本研究を精神面や物質面から長きにわたって支え続けてくれた人々に感謝します。郷里の秋田市土崎の幼なじみ達は私が精神的、あるいは物質的な困難に直面したとき、常にそばに来て励ましてくれました。私という人間は愚かな人間で、これほど多大な支援や協力を受けているにも関わらず、相手が親しいほどに、謝辞の言葉を直接、伝えることができない人間です (本来、逆であるべきはずなのに)。そういったわけですので、せめて、ここで謝辞の言葉を述べさせていただきます。本当にありがとう。かれこれ 30 年になろうかという、この関係を私は一生をかけて大事にしていきたいと思います。

また 19 歳で新潟に出てきて以来、私という人間を形成する上で多大な影響を与え、様々な角度から私をサポートしてくれたアルバイト先の仲間、大学の友人、趣味の車やスノーボードを通じて出会った友人達に心から感謝します。特に同級生の谷村賢一郎さん、後藤淳さんには 10 年以上の期間に渡って、公私共に多大なるご支援を頂きました。谷村さん、後藤さんも含め、彼らという存在がなかったら、なんとも味気のない大学生活になったに違いありません。ともすれば知り合いになることすらなかったであろう、この偶然としか表現のしようがない人脈はかけがえのない生涯の宝物です。

私が生まれたときから今日この日まで温かく、そして根気よく育ててくれた父と母に感謝します。決して優等生ではなかった私を育てる過程での心痛はいかばかりであったか慮られると同時に過去を顧みると申し訳ない気持ちで胸がいっぱいになります。これからは今まで以上に親孝行に励みたいと思いますのでどうか長生きしてください。とりあえず、一段落したら一緒に温泉でもいきましよう。

Abstract

崩壊点検出器は LC 実験の検出器群の中でビームラインの最も近傍に設置され、荷電粒子の飛跡を精密測定する測定器である。この検出器は、短寿命 (約 1ps) の質量が比較的重いことからヒッグスボソンとの強い結合が期待される B 中間子や D 中間子の崩壊点を測定してボトム (b), チャーム (c) クォークを同定する役割を担っている。この崩壊点検出器で b, c クォークのジェットの識別を精度良く行ない、 u, d, s のような軽いクォークを効率よく排除するためには、非常に高い飛跡再構成能力が要求される。したがって、検出器自体の位置分解能が高くなければならないことは勿論であるが、検出器は可能な限りビーム衝突点の近くに設置されなければならない。そのため、衝突点において W 対生成、 Z 対生成により発生する多数の粒子やバックグラウンド X 線などに曝されることになる。従って、崩壊点検出器にはこれらのバックグラウンドによる飛跡と目的とする粒子によるそれとを区別できる高い分解能が要求される。

崩壊点検出器に要求される機能をまとめると

- 短寿命粒子の崩壊点を精度良くするために十分な位置分解能を有すること
- 上記の性能を実現するために、ビームの衝突点の近傍で動作できること
- 多くのバックグラウンドの中で狭い領域に集中するジェットの構成する粒子を効率良く飛跡再構成するために、十分な飛跡分離能力を有すること

である。

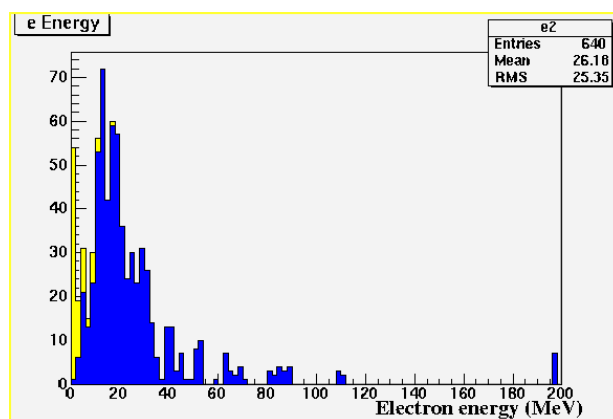


図 1 衝突点最近傍付近における電子・陽電子のエネルギー分布:衝突点付近に設置される崩壊点検出器への衝突粒子は 20MeV 付近にエネルギーが集中する。

CCD は特にリニアコライダー実験における崩壊点検出器として最適の性能を有しているデバイスの一つであるが、実際の使用にあたってはいくつかの解決されなければならない問題が残されており、その最大の問題の

一つが“放射線損傷”である。これまでの R&D でも ^{90}Sr を線源とした放射線損傷に関する研究は行われてきたが、実際の利用を考えた場合、CCD へのバックグラウンドは 20MeV 付近に集中することがよく知られている (図 1)。

そこで本研究では東北大学核理学研究施設にてビームテストを実施し、約 150MeV の電子線照射を CCD(S/N:8-2B3N-1) に対して行った。これとは並行して放射線損傷の比較検討のために ^{90}Sr による β 線照射も別の CCD(S/N:4-2B3N-3) に対して行われた。

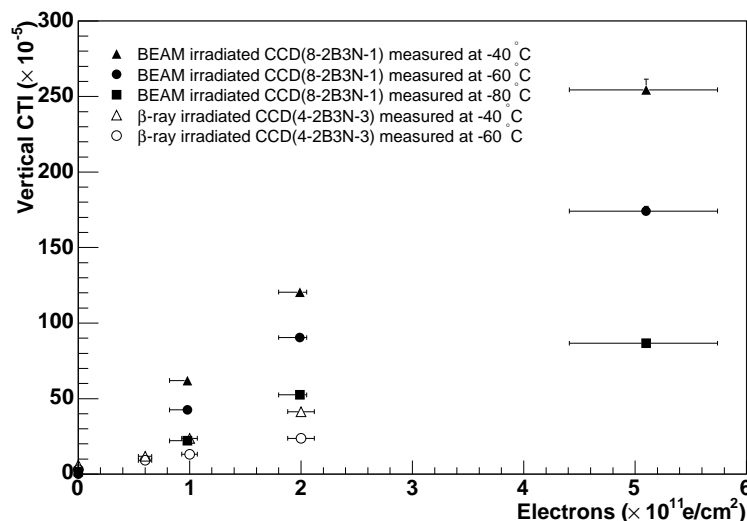


図 2 CTI と電子照射量の関係図: ^{90}Sr による β 線を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3)、ビームを照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) の測定結果。測定条件は 8-2B3N-1 が -40°C 、 -60°C 、 -80°C で 4-2B3N-3 が -40°C 、 -60°C の結果を使用した。

これまで高エネルギー電子線が転送効率等の CCD 特性へ与える影響は ^{90}Sr による β 線に比べて、約 10 倍大きいと見積もられていたが、これらの CCD の特性量を測定した結果、約 3 倍程度であることが示され (図 2)、これにより CCD はリニアコライダー実験における崩壊点検出器としてより強い放射線耐性を備えたデバイスであることが実験的に証明された。

表 1 に本研究によって示された高エネルギー電子線に対する CCD の放射線耐性に関する結果の一部をまとめる。

表 1 ^{90}Sr ($<2.28\text{MeV}$) による β 線と BEAM による高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) が Vertical CTI へ与える影響

温度 ($^\circ\text{C}$)	照射量 (e/cm^2)	BEAM ($\times 10^{-5}$)	β -ray ($\times 10^{-5}$)	$\text{VCTI}_{\text{BEAM}}/\text{VCTI}_{\beta\text{-ray}}$
-60	1.0×10^{11}	42.5 ± 1.0	13.2 ± 1.4	3.22 ± 0.35
-60	2.0×10^{11}	90.4 ± 1.4	29.3 ± 1.9	3.09 ± 0.22
-40	1.0×10^{11}	61.9 ± 1.0	23.7 ± 1.7	2.61 ± 0.20
-40	2.0×10^{11}	120.5 ± 1.6	41.3 ± 2.3	2.92 ± 0.17

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	電子・陽電子衝突型線形加速器	1
1.3	ヒッグスボソン	3
1.4	超対称粒子	4
1.5	トップクォーク	5
1.6	電弱相互作用	7
1.7	線形電子・陽電子衝突型加速器: JLC	8
1.8	JLC 検出器の概要	8
1.9	崩壊点検出器 (VTX)	13
第 2 章	CCD – Charge Coupled Device	15
2.1	シリコンストリップ型崩壊点検出器	15
2.2	CCD 崩壊点検出器	16
2.3	CCD の構造	18
2.4	電荷の読み出し過程	23
2.5	ポテンシャルの井戸内部での電荷の移動	27
2.6	これまでの R&D	32
2.7	Beam Background	33
第 3 章	Radiation Damage Effects in CCD	37
3.1	トラップと Dark Current と転送効率	37
3.2	Surface Damage	39
3.3	Bulk Damage	39
第 4 章	Experiments	41
4.1	CCD Description	41
4.2	β 線の照射	42
4.3	High Energy Electrons Irradiation	44
4.4	各特性量の測定	49
4.5	データ収集システム	52
4.6	測定結果	54
第 5 章	Radiation Damage Model	65
5.1	電荷転送とトラップと CTI	65

5.2	CTI Improvements	69
第 6 章	結論	73
6.1	NIEL の評価	73
6.2	電子のエネルギーの違いによる特性量の比較	74
第 7 章	Summary	77
付録 A	MPP – Multi Pinned Phase	79
付録 B	CLDAQ – An object oriented data acquisition framework	81
B.1	開発の背景	81
B.2	開発の目的	83
B.3	開発の方針	83
B.4	構成	83
B.5	機能と動作原理	84
B.6	技術的な特徴	92
B.7	性能評価	93
B.8	利用実績	94
B.9	まとめ	94
B.10	導入方法	95
B.11	開発の歴史	111
参考文献		113

第 1 章

序論

1.1 背景

電磁相互作用, 弱い相互作用, 強い相互作用を統一的に記述する素粒子の標準模型の基本粒子は, スピン $1/2$ を持つ 6 種類のレプトン, 6 種類のクォークである. また, これら 3 つの相互作用は全てゲージ粒子の交換によって行なわれる. この標準模型は, 予言されていたトップクォークの発見や, 殆どすべての実験結果を説明できることからわかるように, その正しさが詳細に検証されてきている. しかしながら, 一方で, 多数の予言できないパラメータを含んでいることを初めとする多くの問題を抱えていることから, 未だに不完全であると考えられている.

標準模型によれば, 電磁気力と弱い力は非常に高いエネルギー領域では同一な力として統一される. そこでは電弱理論の完全な対称性があり, ゲージボソン, クォーク, レプトンは質量を持たない. エネルギーが低くなるとともに, いわゆるヒッグス機構によりこの対称性は破れ, これにによってゲージボソン, クォーク, レプトンは質量を持つものと考えられている. この電弱理論の完全な対称性を破り, 物質に質量を与えたと予言されている素粒子がヒッグス粒子 (スピン 0 の粒子で, 以後単にヒッグスボソンと呼ぶ) である.

ヒッグスボソンは, LEP (スイスの CERN にある加速器) により質量が 115GeV 付近にあるという徴候が見られたが, 未だ確証に到っていない. ヒッグスの存在を確認することはもちろんのこと, 既に述べた標準模型自身が持っている実験から求めなければならない数多くのパラメータを実験で調べることは非常に重要である. そしてヒッグスを詳しく調べる事により全く新しい物理現象を調べられるようになる. また, 超対称性理論などの標準模型を超えた物理に関わる現象を調べることも, 強く求められている.

このような背景から重心系エネルギーが TeV 領域に達する衝突加速器実験が将来の重要な実験として考えられており, 大型で高いエネルギー領域を達成する陽子・陽子衝突型円形加速器や電子・陽電子衝突型線形加速器などの次世代加速器実験の計画されている.

1.2 電子・陽電子衝突型線形加速器

ひとつの荷電粒子が円軌道を一周するときに放出するエネルギー E_{LOSS} は

$$E_{LOSS} = \frac{4\pi m_0 c^2 r_e \gamma^4}{3\rho} \quad (1.1)$$

- r_e : 古典電子半径
- m_0 : 荷電粒子の質量
- γ : $\frac{E}{m_0 c^2}$
- E : 荷電粒子の全エネルギー
- ρ : 曲率半径

で与えられる。

従って、荷電粒子のエネルギーを上げようとするとき、 γ^4 (4乗) に比例して起こる損失に対して、リングの大きさを広げても、 $1/\rho$ (1乗) でしか効いてこないため、効率が悪く、同じエネルギーに対して質量が小さいために γ が大きい電子・陽電子を TeV 領域まで加速する電子・陽電子衝突型円形加速器の建設は極めて難しい。

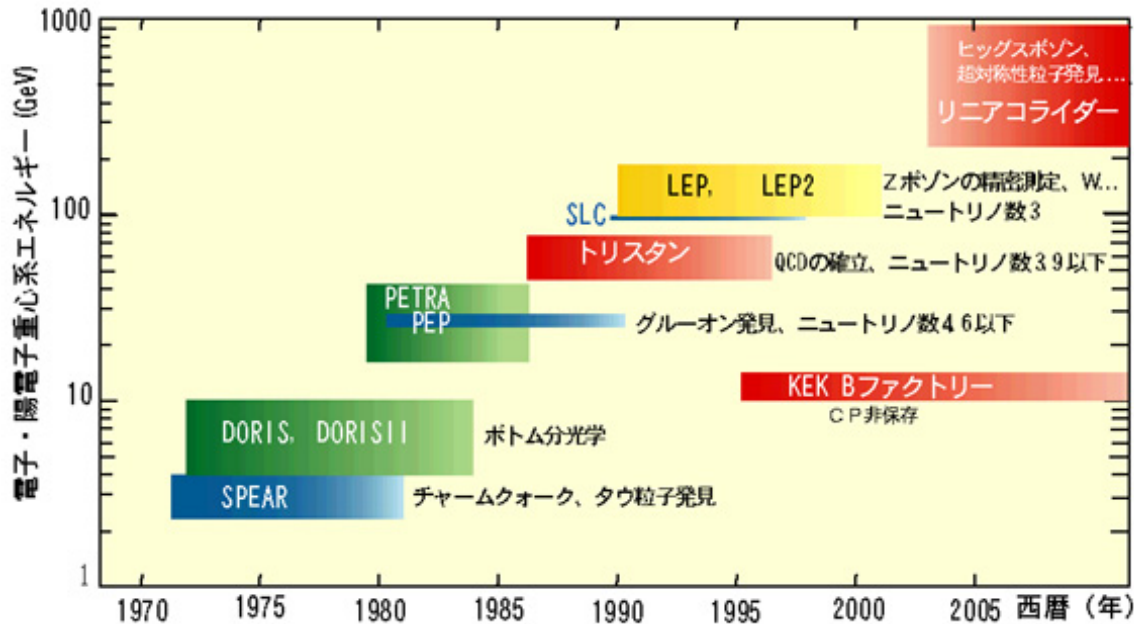


図 1.1 リニアコライダー実験のエネルギー領域

こうした円形加速器の弱点を克服する装置が線形加速器である。2013 年からの運転開始が期待されている電子・陽電子衝突型線形加速器 (以後、単に LC と記す) の計画は全長が 30km にも及ぶ大型の LC であり、ヒッグスボソンの発見や標準模型を超える超対称理論などの新しい物理を観測するための計画である。この計画においては、まずは 500GeV を目標にしてその後 1TeV を超えるエネルギーまで増強していくことが想定されている。LC 実験は電子・陽電子衝突型としてはこれまでのものに比べ、より高エネルギー領域での実験の実現を目指す (図 1.1)。

また、次世代の陽子反陽子衝突型円形加速器である LHC は 14TeV という、LC に比べると非常に高いエネルギーを予定しているが、いくつかの潜在的問題を抱えており、それらを以下に示す。

- 陽子はクォークとグルオンからなる複合粒子であるため、LHC ではバックグラウンドが非常に大きくなってしまい^{*1}、ヒッグスボソンの探索や W, Z ボソン、トップクォーク等の精密な検証が衝突エネルギーの一部分でしか行えない。
- 素粒子である電子・陽電子衝突では、その衝突に費やされるエネルギーはビームエネルギーのすべてである。それに比して陽子は複合粒子であるので、実際に素粒子として衝突するクォーク或いはグルオンが担うエネルギーは、陽子のエネルギーの一部 (〜1 割程度) に過ぎない。従って、電子/陽電子のエネルギーが低いことは、見かけほど大きな問題ではない。

LC 実験では、衝突する粒子自身が素粒子であることから、非常にバックグラウンドの少なく明かな精密測定が可能となることが期待される。

^{*1} 一粒の砂を粒子と考えて泥の塊同士を衝突させるようなものである。

LHC に関して、やや否定的な書き方をしたが、しかしながら、LC と LHC が同時に運転することは非常に重要なことである。LHC はエネルギー到達範囲の点で有利であり、その役割は新しい物理に特有な徴候を最高衝突エネルギーで探索し、発見することが期待される。一方、より精密な測定によって発見されるであろう素粒子の新しい原理を実験的に検証するためには LC が不可欠であるからである。

1.3 ヒッグスボソン

LC で発見すべき最も重要な粒子のひとつとしてヒッグス粒子がある。ヒッグスは前述のように物質の質量を与えたと予言されている。

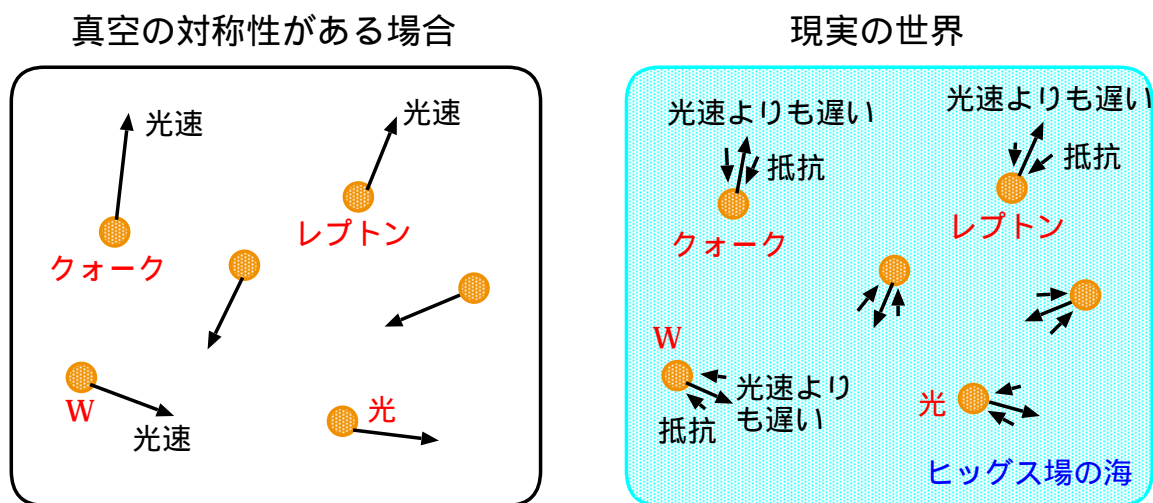


図 1.2 真空の対称性がある場合と現実の世界のイメージ

ビッグバン直後の高エネルギーで統一された世界の真空は蒸発したヒッグスボソンで満たされており、全ての素粒子が何の抵抗も受けることなく真空中を自由に運動できると考えられる。しかしビッグバンから約 10^{-13} 秒が過ぎ、低エネルギーになってくると、ヒッグスボソンが凝縮を始める。これは真空の相転移が起こったとも考えられる。この相転移によって真空のなめらかさ、つまり対称性が失われた。これはあたかもヒッグス場という水によって抵抗を受けて、粒子が魚のように泳いでいるような状況が考えられる (図 1.2)。

この現象を自発的対称性の破れという。自発的対称性の破れとはエネルギー最小をみたすような粒子の場所が、例えば 2 次元平面上の円周上にあるとすると、その円の上にいる限りはエネルギーが最小なのでそれらの場所に区別はない、つまり対称性が存在すると言える。しかしながら、粒子がたまたま円周上のどこかを選んだ時点で、円周上の何処でもよかったが特定の点が選ばれて対称性が破れることになる。真空の相転移が起こった時にそれまで高エネルギーに支えられていたヒッグスが円の最小点に落ちることで、“自発的に対称性が破れる” というわけである^{*2}。ゲージボソンはこの凝縮したヒッグスボソンと結合し、質量を獲得していると考えられている。

クォーク、レプトンは湯川力と呼ばれる力でヒッグスボソンと結合し、質量を獲得する。標準模型を担う素粒子はヒッグスボソン以外は全て発見されており、未発見のものはヒッグスボソンのみである。従って質量起原の謎解きはヒッグスボソンの発見が鍵となる。

軽いヒッグスボソンの生成過程は図 1.3 で求められている $e^+e^- \rightarrow Z^0 H \rightarrow \nu\bar{\nu} + b\bar{b}$ である^{*3}。

^{*2} 標準模型はこの自発的対称性の破れを仮定して作られたものである。

^{*3} 他にも $Z^0 H \rightarrow l^+l^- + b\bar{b}$, $Z^0 H \rightarrow q\bar{q} + b\bar{b}$ といった解析可能な生成過程がある。

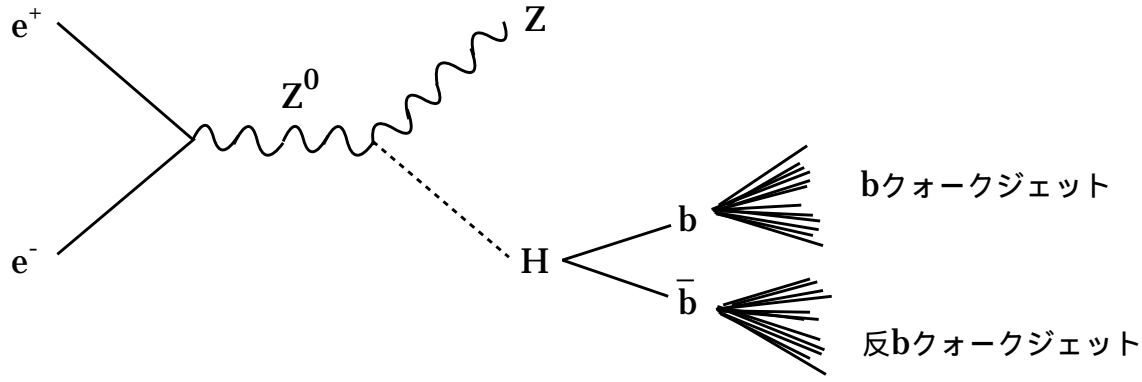


図 1.3 $Z^0 H \rightarrow \nu\bar{\nu} + b\bar{b}$ の生成過程

Z^0 , H ボソンからのボソンクォークジェット^{*4}を再構成することによってヒッグスボソンを発見できる。ヒッグスボソンも含めた LC 実験で発見されることが期待される様々な素粒子を図 1.4 に示した。

1.4 超対称粒子

標準模型を超えた理論として、フェルミオンとボソンの対称性に基づく超対象理論が期待されている。超対象理論では、表 1.1 に示してあるように、半整数のスピンをもつフェルミオンには整数のスピンをもつボソンが、また整数のスピンをもつボソンには半整数のフェルミオンが存在することを预言するものである。またこの理論を導入すれば弱い力、電磁気力、強い力の 3 つの力を統一的に導くことが出来る。

最小超対称模型としてヒッグス二重項を二つ仮定すると、表 1.1 よりヒッグス粒子が 8 個存在しなければならない。従って、 W と Z の縦波成分として使われる 3 自由度 (W^\pm, Z^0) を除いて、自発的対称性の破れの後にスカラーヒッグス h 及び H 、擬スカラーヒッグス A 、荷電ヒッグス H^+, H^- の 5 つの自由度が残る。

超対象理論の预言からの軽いヒッグス粒子 h が発見され、標準模型の破れが確立されたとしても、この理論を最終的に検証するためには、超対称性粒子を発見しなければならない。

超対称粒子とは超対象理論から期待される、ボソンとフェルミオンが常に対になって存在し、質量や電荷が等しい対の粒子の事をいう。例えば、電子にはスピン 0 のスカラー電子、チャージーノが存在し、光子にはスピン 1/2 のフォティーノが対をなして存在している。他にもニュートリノやクォークにはニュートラリーノ、スクォークが、ウィークボソン W, Z 、グルーオン、ヒッグス粒子にはそれぞれスピン 1/2 のウィーノ、ズィーノ、グルイーノ、ヒグシーノが存在すると考えられる。

超対称粒子は、通常の粒子と最も軽い超対称粒子 (LSP) に崩壊する^{*5}。この LSP は安定で物質とほとんど相互作用しないために検出されることはない。したがって超対称粒子生成のシグナルは終状態に運動量欠損のある折れ曲がった事象として観測されることとなる。例えば、図 1.5 に示したような事象では、LSP と $\tilde{\mu}$ (スカラーミューオン) はミューオンのエネルギー分布から求められことになる。

この超対称粒子探索のバックグラウンドとなるのは、LSP と同様に検出されないニュートリノを出す標準模型反応であるが、偏極電子ビームによる LC ならばこのバックグラウンドをほぼ完全になくすることが可能である。

^{*4} 発生したクォークは安定には存在できない。この時にクォークは複数個の中間子やハドロンを多重生成する。クォークのエネルギーが高ければ、その崩壊により生成されたハドロン等はクォークの運動の方向を軸とする狭い円錐状に発生し、これをジェットと呼ぶ。

^{*5} 通常、最も軽いニュートラリーノ $\tilde{\chi}_1^0$ が LSP だと考えられている。

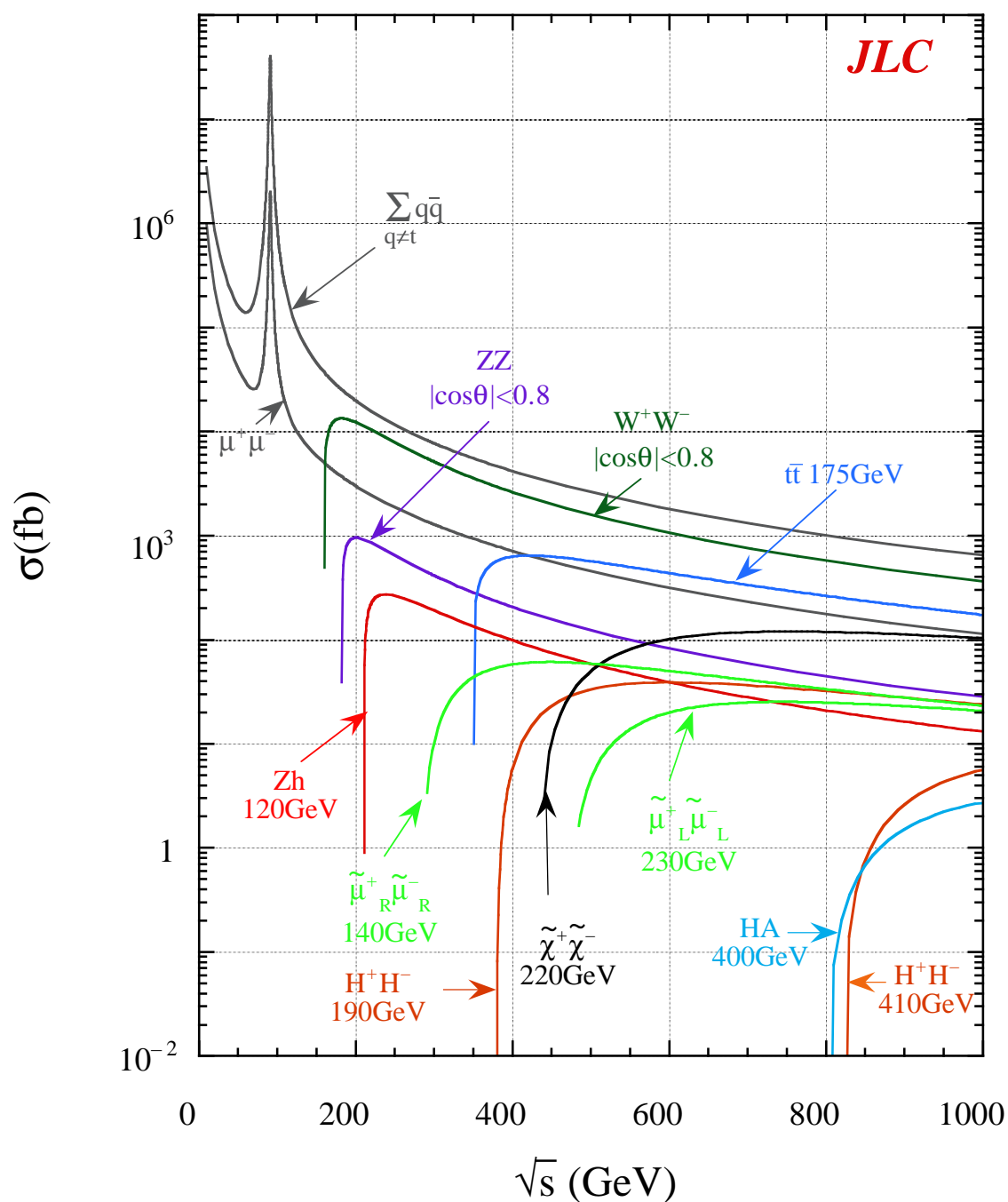


図 1.4 散乱断面積と重心系エネルギーの関係

1.5 トップクォーク

トップクォークは近年,TEVATRON(アメリカの FNAL) で発見され, その後のデータの蓄積により現在その質量は

$$m_t = 174.3 \pm 5.1 \text{ GeV}$$

と報告されている. クォーク属とレプトン属の粒子の質量を表 1.2 にまとめた.

表 1.1 主な超対称性粒子 (SUSY 粒子)

属性	スピン	超対称性粒子	
クォーク族	0	squark	$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{c} \\ \tilde{s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{t} \\ \tilde{b} \end{pmatrix}$
	1/2	quark	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
レプトン族	0	slepton	$\begin{pmatrix} \tilde{\nu}_e \\ \tilde{e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\nu}_\mu \\ \tilde{\mu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\nu}_\tau \\ \tilde{\tau} \end{pmatrix}$
	1/2	lepton	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$
ヒッグス粒子	0	Higgs boson	$\begin{pmatrix} \phi_1^0 \\ \phi_2^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1^+ \\ \phi_2^+ \end{pmatrix}$
	1/2	Higgsino	$\begin{pmatrix} \tilde{\phi}_1^0 \\ \tilde{\phi}_1^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\phi}_2^+ \\ \tilde{\phi}_2^0 \end{pmatrix}$
ゲージ粒子	1/2	Gagino	$\tilde{\gamma}, \tilde{Z}^0, \tilde{W}^\pm, \tilde{g}$
	1	Gauge boson	γ, Z^0, W^\pm, g

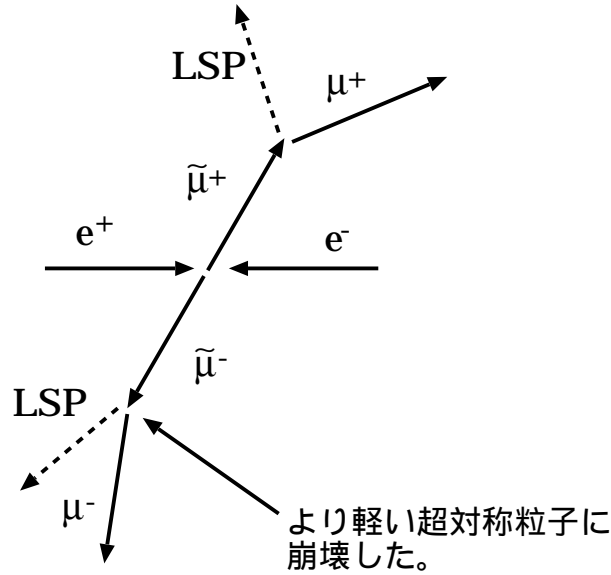
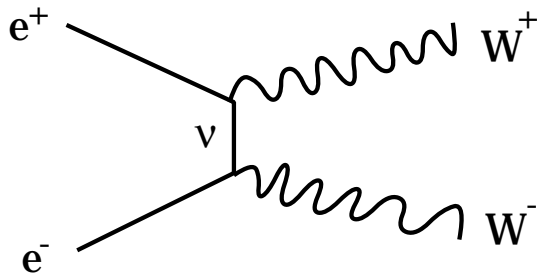
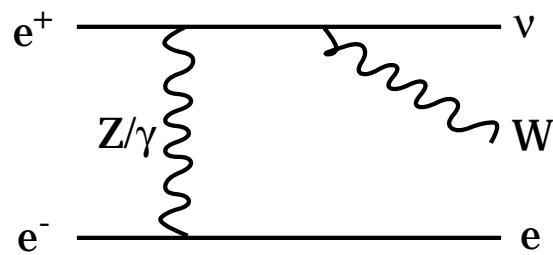


図 1.5 超対称粒子の生成事象の典型的な形

トップクォークの質量が他の素粒子に比べて圧倒的に大きな質量を持つことは、それが素粒子の質量生成の鍵を握る粒子であることを示唆している。また、超対称性の場合には、トップクォークとヒッグスボソンの結合定数である湯川結合は超対称性のパラメータに強く依存しており、ヒッグスが 120GeV より軽いとき湯川結合定数を 16% の精度で測定することが可能となり、湯川結合を初めて直接検証することが期待されている。

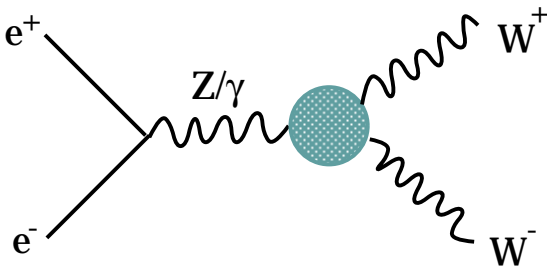
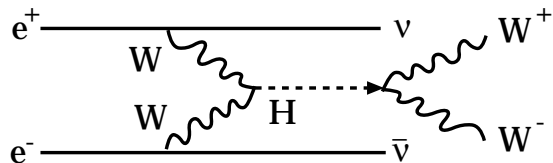
表 1.2 クォークとレプトンの質量 [1]

クォーク	質量 (MeV)	レプトン	質量 (MeV)
アップ	3	電子ニュートリノ	~0
ダウン	6	ミューニュートリノ	~0
ストレンジ	120	タウニュートリノ	~0
チャーム	1200	電子	0.5
ボトム	4200	ミュー粒子	106
トップ	174000	タウ粒子	1777

図 1.6 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ の生成過程図 1.7 $e^+e^- \rightarrow \nu e W$ の生成過程

1.6 電弱相互作用

ウィークボソン ($W \cdot Z$) は電子・陽電子衝突反応を観測する LC 実験では図 1.6,1.7 に示す生成過程で最も大量に生成される。これらのバックグラウンドが少なくなし、(バックグラウンドが少ないという) 電子・陽電子衝突反応の特長を生かして精密測定することは、他の加速器では実現することのできない、LC 実験特有の課題のひとつである。これらの測定はヒッグスボソンが、LC の第一段階のエネルギー領域である 500GeV までの重心系エネルギーにおいて発見できなかったときに特に重要になる。

図 1.8 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ のカップリングによる生成過程図 1.9 WW フュージョンプロセス

標準模型では、ヒッグスボソンは W 粒子、トップクォークの質量と関連付けられており、トップクォークと W 粒子の質量の精密測定を組み合わせることにより高い精度でヒッグスボソンの質量を推定できる。そしてその推定値が 1TeV 程度以下であれば、LC 加速装置のエネルギーアップを行ない、 W^\pm フュージョン反応:

$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}W^+W^-$ (図 1.9) を利用して、ヒッグスを確認できる^{*6}。

一方、推定値が 1TeV 程度以上であればヒッグスボソンの崩壊巾は“粒子”というには大きくなり過ぎ、“ヒッグスボソンの自発的対称性の破れによりゲージ粒子が質量を獲得する”という標準模型の考え方の訂正が必要になる。この場合、 $W \cdot Z$ 粒子の精密測定が特に重要になる。さらに重心系エネルギーが 1TeV 程度以上になるとトップクォークに交換される W や Z 粒子の散乱振幅のスピン・アイソスピン構造の研究が可能となるので、かつてハドロン粒子の研究過程で散乱振幅の解析を行うことより強い相互作用の力学を明らかにしたように、LC における W や Z 粒子の散乱の研究は、新しい相互作用の解明の端緒となると考えられる。

図 1.10 は検出器と荷電粒子がどのような過程のときに、検出できる最も一般的な生成過程の起こり易さを表している。例えばトップクォークの $t\bar{t}$ はビームストラングによって起こりやすいことを示している。

1.7 線形電子・陽電子衝突型加速器: JLC

本節以降の議論は加速器のパラメータに強く依存するので、ここでは JLC(Japan Linear Collider)^{*7} について述べる。JLC の加速器 (図 1.11) は、前段加速、主加速そして最終収束システムより構成され、地下トンネル内に設置される。前段加速システムの電子銃で大強度で安定なビームが生成される。その後、電子は入射用リニアックで加速された後、ダンピングリングに入射され、細く平行な質の高いビームに仕上げられる^{*8}。こうして得られた超高質のビームは、より高い周波数の主リニアックで効率よく加速できるよう、そのパンチ長をパンチ圧縮器 (図 1.11 BC1, BC2) で数 mm から約 0.1mm へと順々に短くし、主加速システムで超高質を保ったまま一気に加速する。主リニアックは、30MeV/m 以上の加速勾配の電場で満たされる加速管と、加速電場を作り出す大出力マイクロ波増幅管 (クライストロン) などから構成されており、加速最終段階で、ビームエネルギーは 250GeV (重心系で 500GeV) に達する。

最高エネルギーを得たビームは、最終収束システムで、垂直方向に数 nm、水平方向に百数十 nm の大きさまで絞られ、これら 2 つの扁平なビームが交差すると、電子と陽電子が相互に作用し易く、持ち込んだ全部のエネルギーを費やして素粒子反応を引き起こし、測定器で観測される。

JLC の加速器で電子・陽電子の衝突エネルギーの 500GeV を得るためには前述の通り、1メートルあたり 30MeV 以上の加速電場が必要になる。これは従来より数倍高い加速勾配である。このため従来の 2 倍から 4 倍の周波数の大出力マイクロ波を作り出すクライストロンが必要不可欠である。JLC では 11.4GHz のクライストロンの開発を行なっているが波長が短いためにクライストロンの内部構造も細くなり大電流を取扱うことが難しく、動作が不安定となってしまう。しかしながら、永久磁石などを用いて大幅な省エネルギー化を実現させるなどの開発も進んでおり、要求される性能を十分に満たすものが開発されると期待される。

JLC の加速器はパンチという電子 (陽電子) の塊を 1.4ns 毎に 192 発打ち出す。ここで 192 個のパンチの塊をトレインと呼び、1 トレインが 270ns である。そしてこのトレインの間が 6.7ms ある (図 1.12)。

1.8 JLC 検出器の概要

JLC は反応の初期状態が明確であることと、陽子・反陽子衝突型加速器に比べてバックグラウンドが極めて少ないことにより、物理の精密測定を行なう上で理想的な実験環境を提供する。このような好条件の実験環境

^{*6} ヒッグスボソンが重いとき、 WW フュージョンプロセスでヒッグスが生成される。

^{*7} JLC – Japan(or Joint) Linear Collider: プロジェクト発起当初、JLC と呼ばれていた日本を中心とする LC 実験推進プロジェクトは GLC(Global Linear Collider) を経て現在では ILC(International Linear Collider) と呼ばれており、より国際色の強いプロジェクトとなっている。

^{*8} 陽電子ビームラインには、陽電子生成のための 10GeV のリニアック、及び金属標的で生成された陽電子に対して十分に入射間口の広い前段ダンピングリングが加わる。

Reference Reactions		Experimental Features								
		Parton ID via jet invariant mass								
		Angular analysis (prod/decay)					Beamstrahlung			
					E _{BM} spread				Pol-e	
						γ pointing			Particle ID	
										θ _{min}
										VTX
Top	$t\bar{t}$	○	○	◎	◎	○		○		○
	$t\bar{t}H$	○	○			○		○		○
Higgs	ZH	○	○	◎				○		◎
	$\tilde{\mu}_R^+ \tilde{\mu}_R^-$					◎			○	
SUSY	$\tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$	◎	○			◎		◎	○	○
	$\tilde{\tau}^+ \tilde{\tau}^-$		○			◎			◎	○
	$\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0$ (GMSB)						◎			
W/Z	evW	◎	○			○				○
	γZ	◎								○

Machine

Tracking/Calorimetry

Hermeticity

図 1.10 検出される粒子と検出方法 [2]

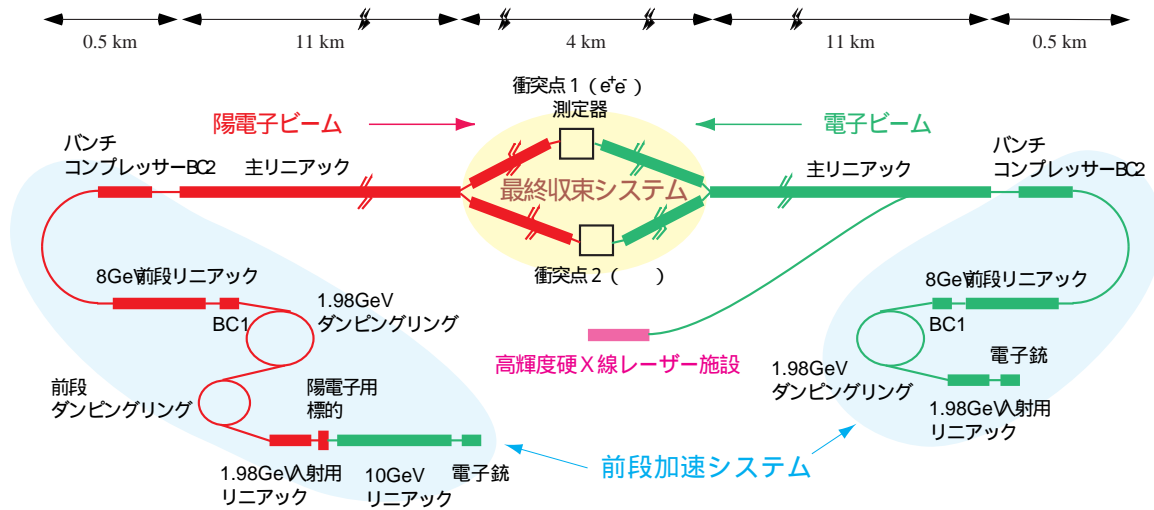


図 1.11 JLC(Japan Linear Collider) 加速器のデザイン

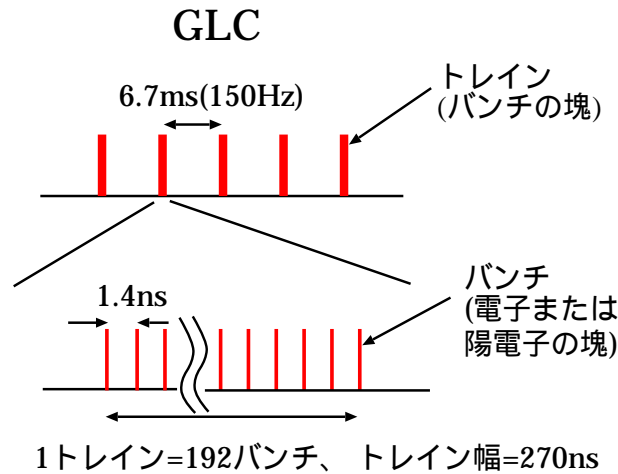


図 1.12 JLC のビームタイミング

を 100% 生かすためには、終状態に生成されるニュートリノを除く全ての粒子を精度良く検出する高性能の測定器が必要になる。特にヒッグス粒子は電子・陽電子衝突によって、 Z ボソンとヒッグスボソンが出来る反応 ($e^+e^- \rightarrow Z^0 H$) によって生成されるが、この生成は全ての粒子生成過程の 7% 程度でしかない。従って統計精度の高い測定を行なうためには、 Z ボソンとヒッグスボソンが生成される反応のうち 70% 程度を占める Z ボソンのジェットに崩壊する反応を測定すること、すなわちジェットを精度良く測定することが不可欠である。

このような背景を踏まえつつ、JLC は測定器の満足すべ条件として以下のような性能を要求した [2]。

- まず、測定可能な角度領域を、ビームパイプとバックグラウンド対策用の保護システムの設置される前後方向の領域を除く領域 ($|\cos\theta| < 0.98$) とする。高エネルギーになればなるほど 3 体以上の終状態の過程が増すこと、および超対称粒子の崩壊などに特徴的な横運動量欠損の測定精度を向上させるためにはできるだけ多くの立体角を測定器で覆うことが重要になる。これはまたニュートリノのような直接検出不可能な粒子の運動量の間接測定の可能性を保証することにもなる。

- 次に W ボソンと Z ボソンは主要な崩壊モードであるクォークジェットへの崩壊においても識別可能であることを要求する。 Z ボソンは W ボソンより 10GeV 程度重く、それぞれ 2.5GeV と 2.0GeV の崩壊巾をもつ。従って W と Z が 2 ジェット不変質量で分離可能であるためには、その分解能はこれら崩壊巾と同程度でなければならない。
- また終状態を再構成をするためにはクォークジェットの種類の識別も行なうべきである。特にチャームやボトムクォークジェットの識別は重要であり、これについては、崩壊点検出器 (VTX) の項で詳しく述べる。
- 最後に、 $e^+e^- \rightarrow Z^0 H$ の生成過程において発生するヒッグスボソンの質量がビームエネルギーの拡がりの 200MeV と同等であることを必要条件とする。ヒッグスボソンの質量が Z ボソンの質量とほぼ等しい時にはジェット不変質量法によるヒッグスボソン探索には Z ボソン対生成反応からの大きなバックグラウンドがあるが、標準模型で期待されるヒッグスボソンの崩壊巾は数 MeV 程度と非常に小さいため、質量分解能が十分小さければ不定性のない発見が可能となる。これはヒッグスボソンの巾が実際に小さいことを確認する意味でも重要である。

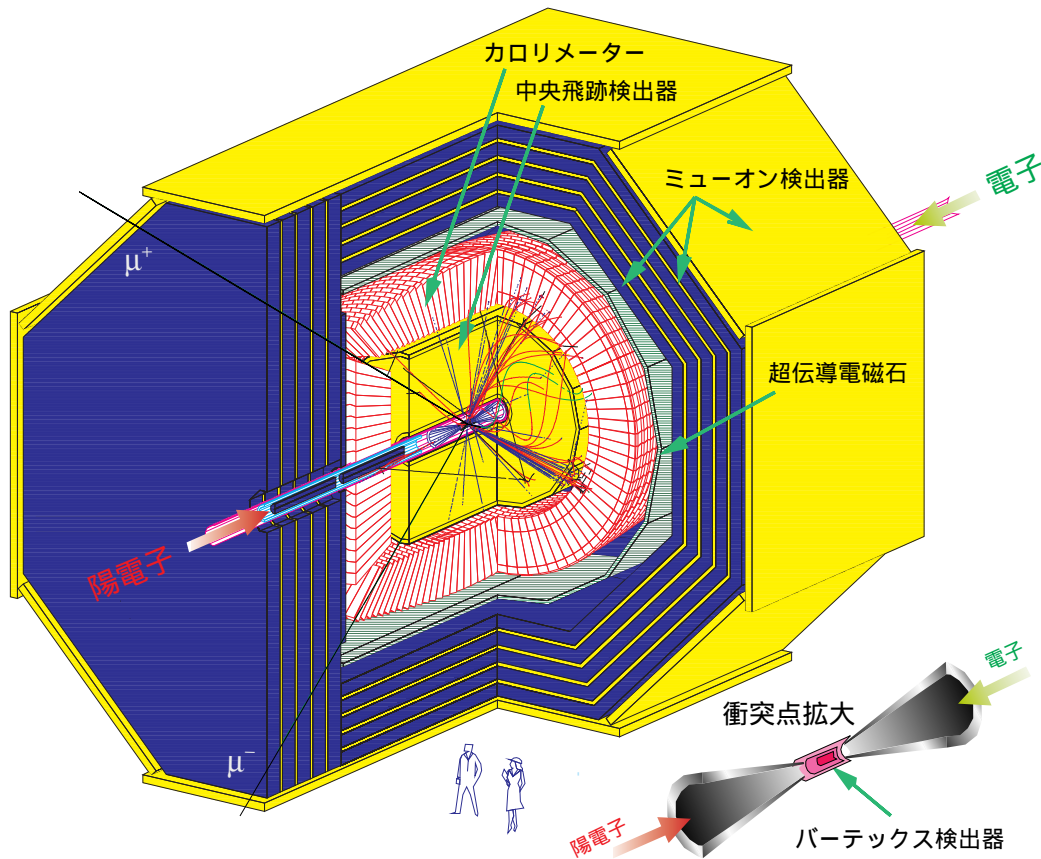


図 1.13 JLC の検出器と崩壊点検出器

このような要求を考慮して提案された検出器の概観を図 1.13 に示す。この測定器は崩壊点検出器 (VTX)、中間飛跡検出器 (IT)、中央飛跡検出器 (CDC)、カロリメータ (CAL)、ミューオン検出器 (MUON) が主だった測定器である。検出器全体の体積は $14\text{m} \times 14\text{m} \times 13\text{m}$ で総重量は 13000 トンである。各検出器の諸性能については表 1.3 にまとめた。

以下では、本研究に直接つながることから各検出器の概要について述べる。

表 1.3 JLC 測定器のパラメータと性能 [2]

検出器	構成	性能	チャンネルとデータ
VTX	ピクセルの大きさ ; $24\mu\text{m}$ 4 レイヤーのそれぞれの半径 $r_{1\sim 4}$; $r = 2.4, 3.6, 4.8, 6.0\text{cm}$ 厚さ ; $300\mu\text{m}/\text{Layer}$ $ \cos\theta < 0.90$	位置分解能 ; $\sigma = 4.0\mu\text{m}$ 衝突係数分解能 $\delta\mu\text{m}$; $\delta^2 = 11.4^2 + (28.8/p)^2 / \sin^3\theta$	ピクセル数 = 320M 読み出し口の数 = 2.4k データの大きさ = $1.4\text{MB}/\text{train}$
IT	$ \cos\theta < 0.90$ ストリップ幅= $100\mu\text{m}$, 厚さ = $300\mu\text{m}$ 5 レイヤーのそれぞれの半径 $r_{1\sim 5}$; $r = 9, 16, 23, 30, 37\text{cm}$	$\sigma_{r\phi} = 3.0\mu\text{m}$ $\sigma_z = 30\mu\text{m}$	ストリップ数 = 1.0M 読み出し口の数 = 1.0K
CDC	半径 ; $r = 0.3 - 2.3\text{m}$ 幅 ; $1 = 4.6\text{m}$ サンプル数 = 50 $ \cos\theta < 0.70$ (全サンプリング 数) $ \cos\theta < 0.95$ (1/5 サンプリング) $r = 45 - 155\text{cm}$, $L = 310\text{cm}$	位置分解能 ; $\sigma_{r\phi} \leq 100\mu\text{m}$ $\sigma_z = 1\text{mm}$ 2-トラックの幅 = 2mm 運動量分解能 ; $\sigma_{Pt}/Pt = 3 \times 10^{-4}Pt + 0.1\%$	200MHz FADC メモリの深さ = $10\mu\text{sec}$ 読み出し口の数 = $4.1\text{K} \times 2$ データの大きさ= $3.3\text{MB}/\text{train}$
CAL	EM = $27X_0$ (3 区画) HAD = $6.5\lambda_0$ $\Delta_{\theta,\phi} = 24\text{mrad(EM)}, 72\text{mrad(HAD)}$ $ \cos\theta < 0.966$ (全ての厚さ) $r = 160\text{-}340\text{cm}$, $z = \pm 190\text{cm}$	$\sigma/E = 15\%/\sqrt{E} + 1\%$ (EM) $\sigma/E = 40\%/\sqrt{E} + 2\%$ (HAD) $e / \pi \text{ID} = 1/1000$	セル数 = 144k 読み出し口の数 = 5k データの大きさ = 3k bytes/train
MUON	$ \cos\theta < 0.998$	$\sigma = 0.5\text{mm}$	

1.8.1 CDC(中央飛跡検出器)

中央飛跡検出器は小型ジェットセル構造を持つ円筒型ドリフトチェンバーからなる検出器で、飛跡再構成による比較的低エネルギーの荷電粒子の運動量の測定、粒子識別など多くの目的に使われる検出器である。 $\sigma_{PT}/PT \sim 10^{-4} \times PT$ (GeV) の運動量分解能が要求されている。

1.8.2 CAL(カロリメータ)

Z 対生成チャネルにおける $ZZ \rightarrow b\bar{b}$ の崩壊は、2 ジェットの不变質量分布によってのみ $H \rightarrow b\bar{b}$ の崩壊と区別する事が出来る。カロリメータは、ガンマ線、電子、高エネルギーハドロン等のエネルギーを測定し、ジェットの不变質量の高精度測定や粒子識別に非常に重要な役割を果たす検出器である。カロリメータは、プリシャワー部 (PS)、シリコンパッド部 (Si)、電磁カロリメータ部 (EM)、ハドロンカロリメータ部 (HAD) から構成され、PS 部と Si 部により電子と π 中間子の高い識別能力と高精度のシャワー位置測定、2 クラスター認識を行なう。EM 部は $27X_0$ 、HAD 部は $6.5\lambda_I$ の厚さを持つ。ここで X_0 は輻射長、 λ_I は相互作用長である。EM 粒子、HAD 粒子に対するエネルギー分解能はそれぞれ $15\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$, $40\%/\sqrt{E} \oplus 2\%$ が要求されている。また測定器の不感領域を小さくするためにカロリメータの全体はソレノイドコイル中に置かれ $|\cos\theta| < 0.98$ の領域を覆っている。

1.8.3 μ 粒子検出器

μ 粒子検出器は μ 粒子の同定を行なう。 μ 粒子は多くの場合、新粒子探索における最も明解な信号であるため、立体角を出来るだけ広く覆うとともに隙間のないように配置されなければならない ($|\cos\theta| < 0.997$)。このため、 μ 粒子検出器はシングルセル・ドリフトチェンバーのスーパーレイヤー 6 層とプラスチックシンチレータ 1 層から成る構成を用いる。

1.9 崩壊点検出器 (VTX)

崩壊点検出器は LC 実験の検出器群の中でビームラインの最も近傍に設置され、荷電粒子の飛跡を精密測定する測定器である。この検出器は、短寿命 (約 1ps) の質量が比較的重いことからヒッグスボソンとの強い結合が期待される B 中間子や D 中間子の崩壊点を測定してボトム (b)、チャーム (c) クォークを同定する役割を担っている。この崩壊点検出器で b, c クォークのジェットの識別を精度良く行ない、 u, d, s のような軽いクォークを効率よく排除するためには、非常に高い飛跡再構成能力が要求される。したがって、検出器自体の位置分解能が高くなければならないことは勿論であるが、検出器は可能な限りビーム衝突点の近くに設置されなければならない。そのため、衝突点において W 対生成、 Z 対生成により発生する多数の粒子やバックグラウンド X 線などに曝されることになる。従って、崩壊点検出器にはこれらのバックグラウンドによる飛跡と目的とする粒子によるそれとを区別できる高い分解能が要求される。

荷電粒子の運動量の測定においても崩壊点検出器は重要な働きをする。CDC に比べて崩壊点検出器ははるかに高い空間分解能 (約数 μm) を持っているため、CDC 単独で運動量を測定した場合に比べて崩壊点検出器からの情報を加えた場合では、JLC において、約 2 倍の運動量分解能を有することが予想される。

崩壊点検出器に要求される機能に関してここまでの議論をまとめると

- 短寿命粒子の崩壊点を精度良くするために十分な位置分解能を有すること
- 上記の性能を実現するために、ビームの衝突点の近傍で動作できること

- 多くのバックグラウンドの中で狭い領域に集中するジェットを構成する粒子を効率良く飛跡再構成するために、十分な飛跡分離能力を有すること

以上のような機能が崩壊点検出器に要求されることとなる。

CCD(電荷結合素子)を用いた崩壊点検出器は、これらの飛跡検出器としての諸要求を満足する検出器として非常に期待されている。CCD については、特に崩壊点検出器としての利用と関係しつつ、第 2 章で詳述する。ここで示されるように、CCD は特に LC における崩壊点検出器として最適の性能を有しているが、実際に使われるためにはいくつかの解決されなければならない問題が残されており、その最大の問題の一つが“放射線損傷”である。これは本研究に於ける最重要課題であるので、第 3 章で詳細に述べられる。

また本研究の中心である、放射線源、及び加速器からの異なったエネルギー領域の電子による放射線損傷の比較検討から、その機構を定量的に評価し、今後の CCD を用いた検出器の放射線耐性についての見通しに関する記述が、第 4 章以後で議論される。

第2章

CCD – Charge Coupled Device

LC 実験では重心系のエネルギーが高いために、ジェットは強く絞られる。そのため衝突点最近傍に設置される崩壊点検出器で検出される粒子は超高密度となる。このような状況ではシリコンストリップ検出器 (Silicon Strip Detector; 以下,SSD) のような基本的に 1 次元の情報しか得ることの出来ない検出器ではいわゆるゴーストと呼ばれる事象が生じ、多数の粒子の 2 次元平面内での通過位置を求めることは不可能である。

これに比して、電化結合素子 (Charge Coupled Device; 以下,CCD) は、単位となるセンサーが 2 次元的に配置されたピクセル型検出器であるが故に、高密度の飛跡の再構成を高い分解能で行うことが可能である。また、薄くできるために物質量を小さく、即ち多重散乱を抑えることが可能である。

本章では LC 実験に於ける崩壊点検出器デバイスの最有力候補のひとつである CCD に特に焦点をあてて議論する。

2.1 シリコンストリップ型崩壊点検出器

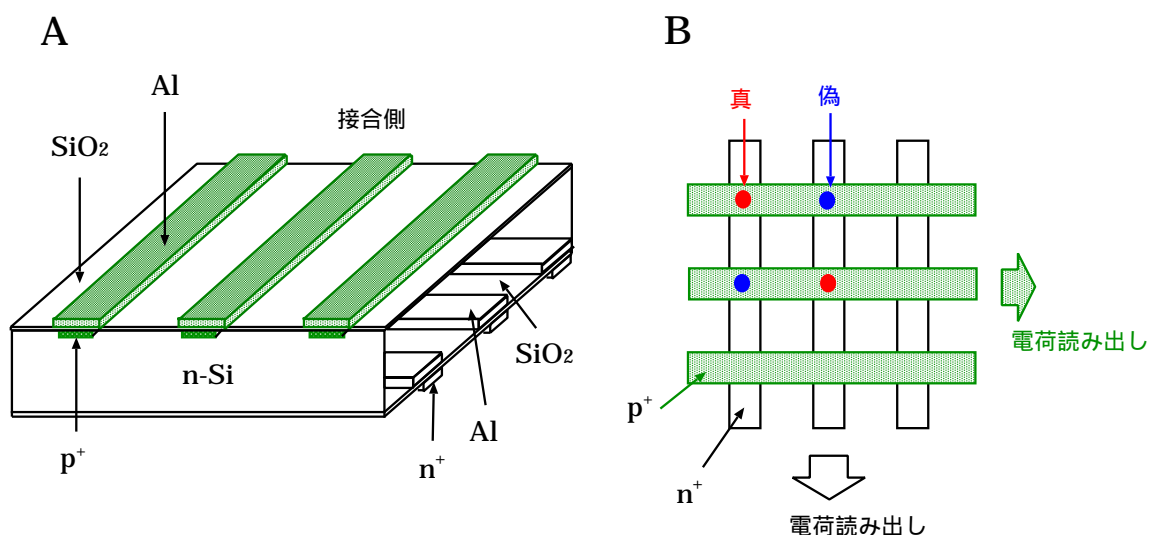


図 2.1 シリコンストリップ検出器の概略図

SSD は半導体検出器の一種で、電極 (p,n 極) を電氣的に分離した多数の帯にすることにより、放射線の衝突した位置を 1 次元的に測定する測定器である。実際には、電極の方向を組み合わせ、2 次元的な情報を得られるよう

にして使用されることが一般的である。その一例を、概略図 2.1 により簡単に説明する。

図 2.1-A は SSD の概略図である。このように p,n の両極がストリップ状に構成されることがシリコンストリップと呼ばれる所以である。p,n 極の間は空乏化しており、荷電粒子が入射すると電子・正孔対を生成する。そして電子は p^+ 側に、正孔は n^+ 側に収集される。図 2.1-B は図 2.1-A を真上から見た図で、信号が検出された位置を真とし、電荷の読み出しは各ストリップ毎に行なわれる。しかしながら、入射粒子の密度が高い場合、図 2.1-B のような状況となってしまう、真の信号の正確な位置を識別することができなくなってしまう（これをゴーストと呼ぶ）。従って、LC 実験で想定されるようなジェット密度の高い環境下で利用した場合はどこに荷電粒子が入射したのかほとんどわからなくなってしまう。さらに崩壊点検出器の最内層 ($r \sim 2\text{cm}$) においては、ビーム-ビーム相互作用によって生じる低エネルギーの電子/陽電子が検出器に衝突し、この割合が 1 回のビームトレインの衝突当たり約 $100e/\text{cm}^2$ もあるため、SSD を LC 実験で使用した場合、ほぼ全ストリップが衝突してしまうことになり信号識別は不可能である。

2.2 CCD 崩壊点検出器

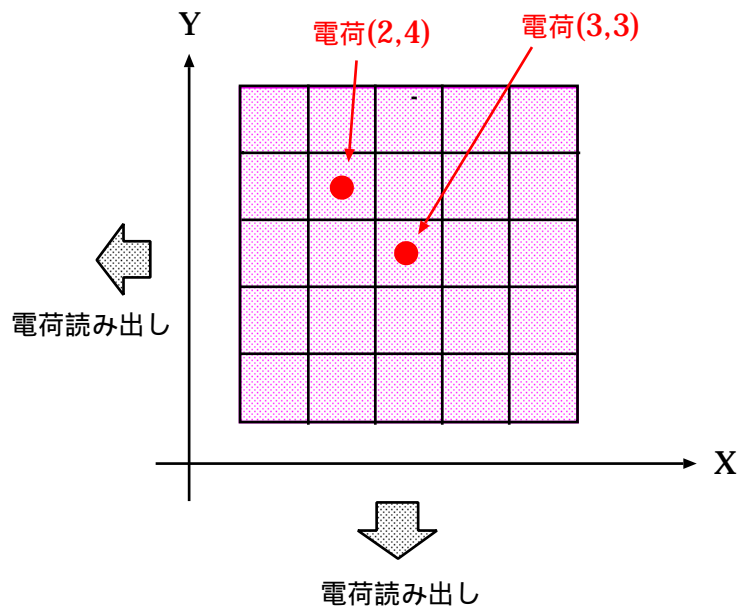


図 2.2 ピクセル型検出器の概略図

図 2.2 はピクセル型検出器の概略図である。ピクセル型検出器はストリップ型検出器とは違い、電荷の発生した位置の二次元情報 ((2,4) や (3,3) など) を保持出来るため、ストリップ型の時に見られたゴーストは生じない。従って LC 実験のようなジェット密度の高い実験には、極めて適していると言える。

LC 用の崩壊点検出器としては、優れた 2 次元位置分解能と小さな物質質量を実現できることから、CCD を用いた検出器が精力的に研究開発されている。

CCD は電荷を内部に蓄積し、それを位置情報を含む信号電荷として転送する機能をもつ素子が多数結合したピクセル型デバイスである。デジタルカメラなど、一般によく知られている CCD の画素数とはこの素子の数を指す。

検出器デバイスとして CCD の最も優れている点は、その高い位置分解能である。例えば今回の研究に使用した CCD について言えば、 $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ という非常に小さい面積の素子が多数結合しているためそれだけで約 $7\mu\text{m}$ という高い位置分解能を実現できる。さらに隣り合うピクセル間の電荷分配量を解析するにより、 $\sim 3\mu\text{m}$ と

いうさらに高い位置分解能が得られる。この点から, CCD は崩壊点検出器デバイスとして極めて好ましい性質を有していると言える。

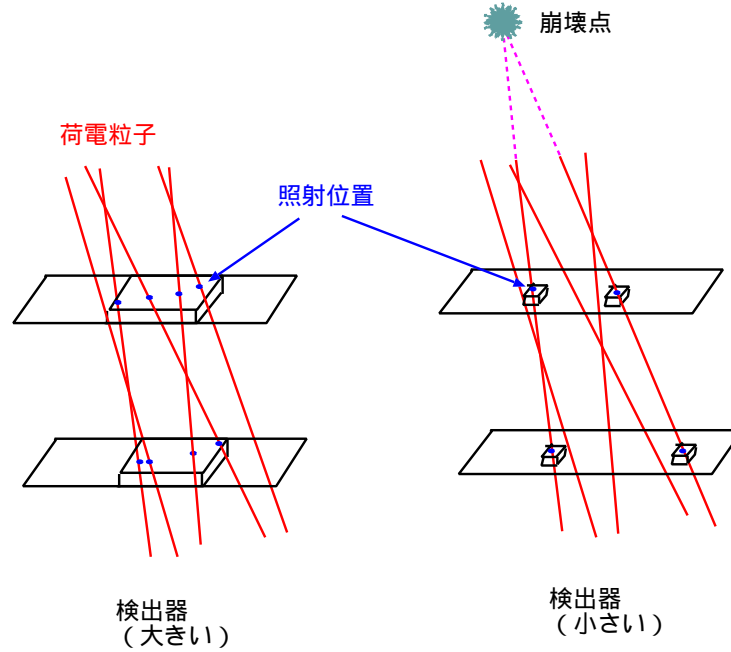


図 2.3 粒子の飛跡再構成

図 2.3 は大面積ピクセルから構成される検出器と小面積ピクセルから構成される検出器がそれぞれ同じ飛跡を持つ粒子を検出した時の様子を模式的に示したものである。大面積ピクセルによる検出器では同じピクセルに 4 つもの粒子が入射し、飛跡再構成による崩壊点の同定は不可能であるが、小面積ピクセルによる検出器では、検出された粒子の信号電荷からエネルギーや運動量、入射位置を調べ、飛跡を結ぶことにより正確に崩壊点を決定することが可能である。LC においては、ビーム衝突点付近の粒子密度は非常に高い。そのため多くの小面積ピクセルから構成される CCD 崩壊点検出器が非常に有利である。他にも, CCD の素子自体が物理的に薄くできるため、多重散乱が起こりにくいことも大きな長所として挙げられる。

2.2.1 JLC における CCD 崩壊点検出器

JLC における CCD 崩壊点検出器は衝突点の周りを同心円筒状に囲む 4 層 (レイヤー) からなり、その時の衝突係数分解能 σ_b は

$$\sigma_b = \frac{\sigma r_{\text{OUT}}}{r_{\text{OUT}} - r_{\text{IN}}} \oplus \frac{\sigma r_{\text{IN}}}{r_{\text{OUT}} - r_{\text{IN}}} \oplus \frac{0.014 r_{\text{IN}}}{p\beta} \sqrt{\frac{X_r}{\sin^3 \theta}} \quad (2.1)$$

ここで σ はピクセルサイズで決まる位置分解能, r_{IN} , r_{OUT} はそれぞれ内層及び外層の半径, X_r は放射長で測った内層の厚さ, p は粒子の運動量 (GeV), θ は粒子の入射角である。はじめの 2 項は測定誤差によるもので、最後の項は内層での多重散乱によるものである。式 (2.1) から分解能 (σ_b) を良くするには r_{IN} を小さく、つまりビーム衝突点に近づけ、 r_{OUT} を大きくすると良いことが分かるが、 r_{IN} をあまり小さくするとバックグラウンドが増えること、 r_{OUT} をあまり大きくするとコストが飛躍的に増加する、などの制約がある。こうした諸条件を考慮しつつ、JLC VERTEX サブグループは以下のような値を設定し、検出器のデザインを行った (図 2.4)。

- 4 層のそれぞれの半径: $r_{1,2,3,4} = 24, 36, 48, 60 \text{ mm}$

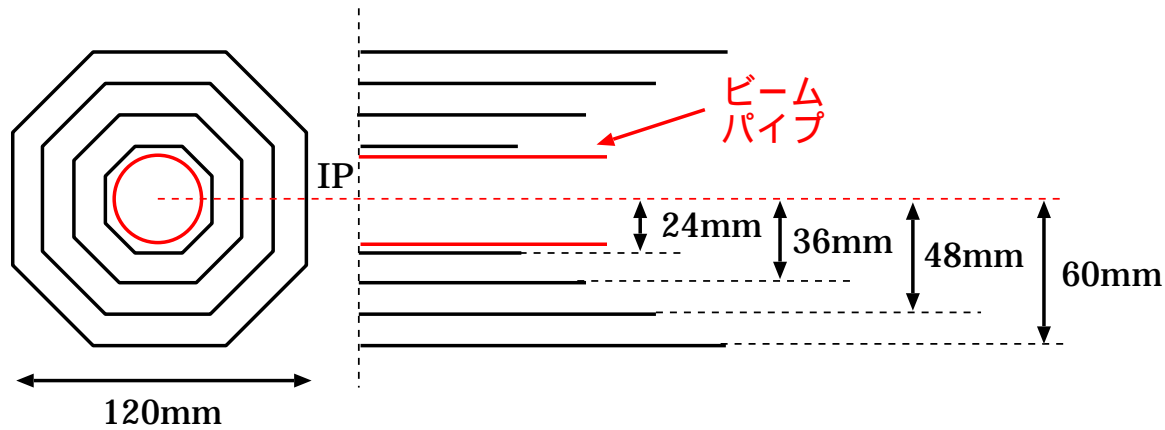


図 2.4 崩壊点検出器のレイアウト

- 各層のカバー率: $|\cos \theta| < 0.90$
- CCD のピクセルサイズ: $25\mu\text{m}$ 以下
- 各層の ϕ 方向厚: $300\mu\text{m}$ 以下

2.3 CCD の構造

CCD は MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ) 構造を持つピクセルから構成される半導体デバイスである。CCD の転送は電極の 1 つに他と異なる電圧を加える事によりその電極下に対して部分的に異なるポテンシャルを展開することにより実現する。電極への電圧の加え方による電荷転送の方式の代表的なものに 2 相方式と 3 相方式とがある。

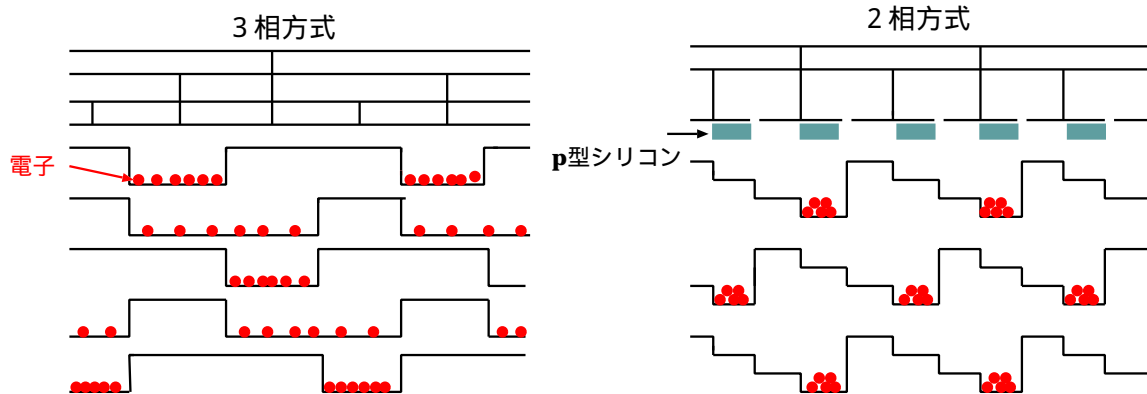


図 2.5 2 相方式, 3 相方式の電極への電荷の加え方による電荷転送の方式

図 2.5 に 2 相方式と 3 相方式の電荷転送の仕方を示した。2 相方式は電荷転送に用いる 2 種類の位相の異なるクロックパルスがあり、Si-SiO₂ 接合面に p 型のシリコンをドーピングすることにより電場に構造を持たせている。これにより、4 相構造の電場を形成することが可能となる。3 相方式は 3 種類の異なるクロックパルスを用いて転送を行なう。他にも 4 相方式や 5 相方式など色々な転送の仕方がある。

クロックパルスの数が 2 種で良いこと、電荷の高速転送が可能であるという利点から本研究で使った CCD の転送方式には 2 相方式を採用した。

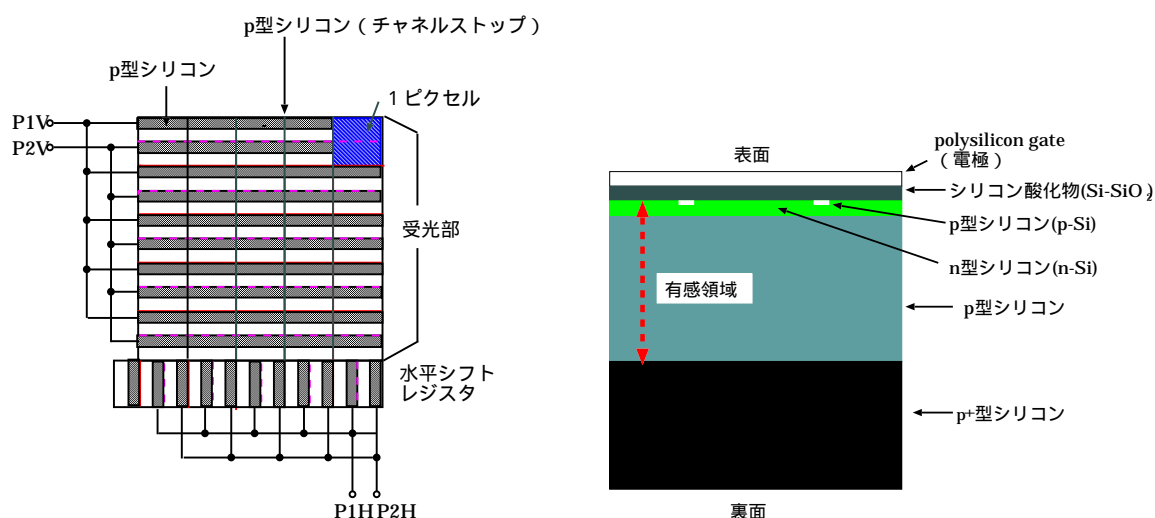


図 2.6 HPK 社製 CCD:左側が受光部に対して真上から見た図で右側は断面図である

本研究に用いた CCD の概略図を図 2.6 に示した。左側の図は受光部に対して真上から見た図で右側の図は断面図となる。粒子が CCD のピクセル内部に入射されると有感領域と呼ばれる領域で入射粒子は電子・正孔対をつくる。有感領域には電場がほとんど生じていない中性領域と呼ばれる領域と、電場が強く^{*1} 生じている空乏領域と呼ばれる領域からなる。中性領域で発生した生成された電荷は電場がほとんど発生していないため緩やかに拡散する。一方、空乏領域の電荷は強い電場に吸い寄せられ、即座にポテンシャルの井戸に収集される。

p^- (主に中性領域) 領域と p^+ 領域の境界にはバリア層と呼ばれる領域があり、この領域にはドーパ量の違いに起因して大きなポテンシャル差が生じる。したがって、 p^- 領域で発生した電荷が p^+ 領域へ収集されることはない。

P1V,P2V,P1H,P2H に電圧を掛けることにより、電荷の転送を実現しており、電荷転送を行うために CCD に印加している電圧は、高レベルの場合で 4V、低レベルの場合が -8V という仕様となっている。

2.3.1 CCD の仕様

本研究において使用した CCD の放射線損傷を受けていない状態の諸元値と構造に関する値をまとめたものをそれぞれ表 2.1、表 2.2 に示す。

表 2.1 CCD の諸元値 [3]

ピクセル数 (H×V)	ピクセルサイズ ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	有感領域 (μm)	変換効率 ($\mu\text{V}/e^-$)	読み出しノイズ (e^-_{rms})	飽和電荷量 (e^-)	転送効率
256×256	24	10	1.0	50	3.0×10^5	0.99995

変換効率、読み出しノイズ、飽和電荷量は温度 -40°C で測定した値で、転送効率は 25°C で測定したものを示した。読み出しノイズは動作周波数 150kHz で読み出しを行った時のものを示してある。またここで示した変換効率は発生した電荷と電圧の変換効率を指しており、飽和電荷量は画素が蓄積できる最大の電荷量のことである。

^{*1} 電場の強さはバイアス電圧に比例し、その領域の長さに反比例する。

表 2.2 CCD の構造

酸化物の厚さ (μm)	n-Si の厚さ (μm)	n-Si のドーピング量 ($/\text{cm}^3$)	p-Si のドーピング量 ($/\text{cm}^3$)	p ⁺ -Si のドーピング量 ($/\text{cm}^3$)
100	1	1×10^{16}	1×10^{15}	300

2.3.2 埋め込みチャネル型 CCD

CCD には表面チャネル型 CCD(Surface channel type CCD; 以下 SCCD) と埋め込みチャネル型 CCD(Buried channel type CCD; 以下, BCCD) の 2 つがある。

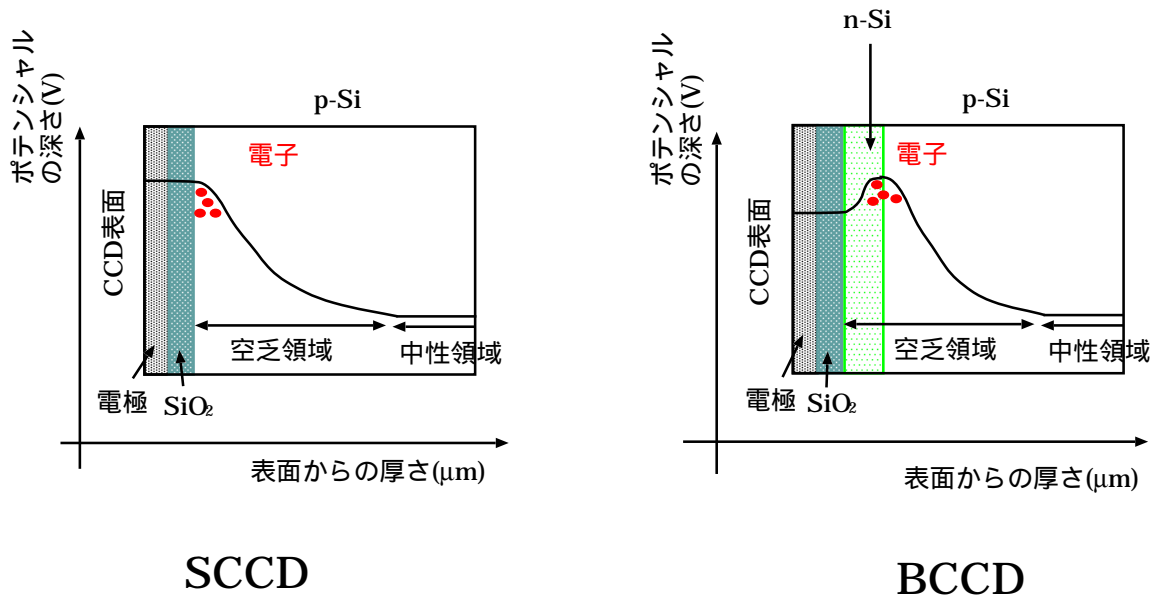


図 2.7 SCCD と BCCD に於けるポテンシャルの深さと受光部からの距離の関係図

図 2.7 に SCCD と BCCD それぞれに展開されるポテンシャルの深さと受光部からの距離の関係を模式的に示した。縦軸がポテンシャルの深さ (V)^{*2}, 横軸が CCD 受光部からの深さである。SCCD は Si-SiO₂ 接合面に多数の欠陥があり, 電荷がトラップされるため信号電荷が転送時に大きく失われる。一方, BCCD は n-Si を Si-SiO₂ 接合面にドーピングすることにより, ポテンシャルの井戸が Si-SiO₂ 接合面から離れた場所に展開されるため, 接合面に多数存在する格子欠陥による影響を受けることはなくなる。こうした理由から, 現在では, ほとんど全ての CCD が埋め込みチャネル型となっている。本研究で使用した CCD も BCCD で, その電荷転送非効率 (CTI: Charge Transfer Inefficiency) は 10^{-5} 以下である。

なお CTI とは 1 電荷転送あたりの電荷を失う割合を示す量で電荷の転送効率の劣化を評価する CCD の特性量であり本研究に於いて非常に重要な測定量である。CTI と CTE(Charge Transfer Efficiency) の間には式 (2.2) の関係が成り立つ。

$$CTI \equiv 1 - CTE \quad (2.2)$$

^{*2} ポテンシャルの深さは電場の強さに比例する。

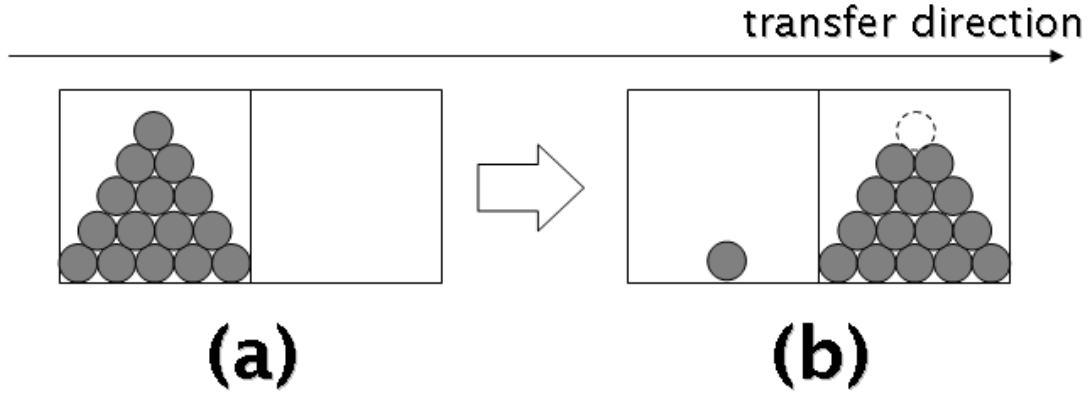


図 2.8 単純な CTI のモデル:(a) 転送前の状態 (b) 1 転送後の状態, 10 個の電子のうち 1 個は転送されず 9 個だけ転送された

図 2.8 のように 10 個の電子が 1 回の転送で 9 個しか転送されないとき, CTE は 0.9, CTI は 0.1 となる. ここでは簡単のため単純な 1 回の電荷転送効率を例にとったが実際は複数回の転送を経て電荷が検出されるため CTI の値は平均の値として求まる. 初期電荷量 Q_0 が n 回の転送を経て Q として検出された場合, CTI は式 (2.5) のように定義される.

$$Q = Q_0 \times CTE^n \quad (2.3)$$

$$Q = Q_0 \times (1 - CTI)^n \quad (2.4)$$

$$CTI = 1 - \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.5)$$

ここで, より現実に近い条件で CTI について考える. 1MIP に相当する 1000 個の電子が 500×500 ピクセルの CCD の中心付近で発生したとする. CTI の値が 10×10^{-5} であるとき, 500 回の転送を経て観測される観測量 Q は式 (2.4) より

$$Q = 1000 \times (1 - 10 \times 10^{-5})^{500} \quad (2.6)$$

$$\simeq 950 \quad (2.7)$$

である.

一方, 本研究で使用した CCD のエネルギー分解能 (FWHM, ^{55}Fe) は ~ 0.02 であることから [3], この $\Delta Q/Q_0 \sim 0.05$ という値は決して無視できない値であることがわかる.

CTI に関する詳細は第 3 章以降で議論される.

図 2.9 に各ゲート電圧に於ける BCCD のポテンシャルと接合面からの距離 (受光部からの深さ) の関係を示した. 縦軸は接合面からの距離, 横軸はポテンシャルを示している. SCCD ではゲート電圧以上のポテンシャルは存在しないが, BCCD では図 2.9 からわかるように, ゲート電圧が 0V の時でも 8V 以上の深さを持つポテンシャルの井戸が展開される.

2.3.3 半導体の空乏領域

ここでは CCD 内部にある空乏領域の厚さ, 電荷の収集される時間, 移動速度について述べる. p 型半導体の MOS 構造の電極に正の電圧を掛けると半導体の表面付近から正孔が排除され空乏状態となり, e^- の電荷を持つ

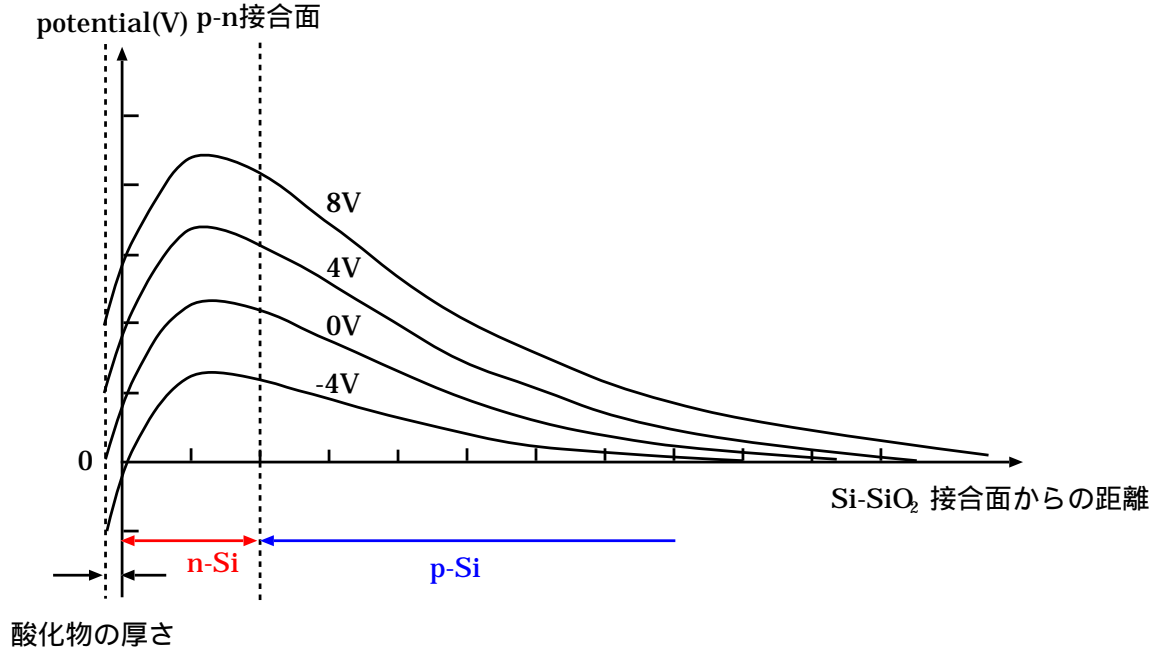


図 2.9 各ゲート電圧に於けるポテンシャルと接合面からの距離の関係図

アクセプタイオンが一様に分布する。従って、空乏領域の単位体積当りの電荷量 Q はアクセプタ濃度 N_A の関数として

$$Q = -eN_A \quad (2.8)$$

と表せる。これよりポテンシャルの深さ方向のポアソン方程式は

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{eN_A}{\epsilon_{Si}} \quad (2.9)$$

と書ける。空乏領域の厚さを x_d とすると

$$\frac{d\phi}{dx}(x_d) = 0 \quad (2.10)$$

$$\phi(x_d) = 0 \quad (2.11)$$

となる。この境界条件から式 (2.9) は

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \frac{eN_A}{2\epsilon}(x - x_d)^2 \\ &= \frac{eN_A}{2\epsilon}x_d^2\left(1 - \frac{x}{x_d}\right)^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

となる。従って式 (2.12) から空乏領域での電荷の移動速度 ν は

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{dz}{dt} \\ &= \mu E(z) \\ &= \mu \left(-\frac{d\phi(z)}{dz} \right) \\ &= \frac{e\mu N_A}{\epsilon_{Si}}(x_d - x) \end{aligned} \quad (2.13)$$

である. ここで $E(z)$ は受光面からの距離で表される電場の関数, x_d は空乏領域の厚さである. 式 (2.13) から x について積分し, 空乏領域上面の $x = 0$ において発生した電荷は移動時間 $t = 0$ であるとする, ある深さ x で発生した電子の移動時間 t は

$$t = \frac{\epsilon_{Si}}{e\mu N_A} \ln \left(\frac{x_d}{x_d - x} \right) \quad (2.14)$$

と表せる.

2.4 電荷の読み出し過程

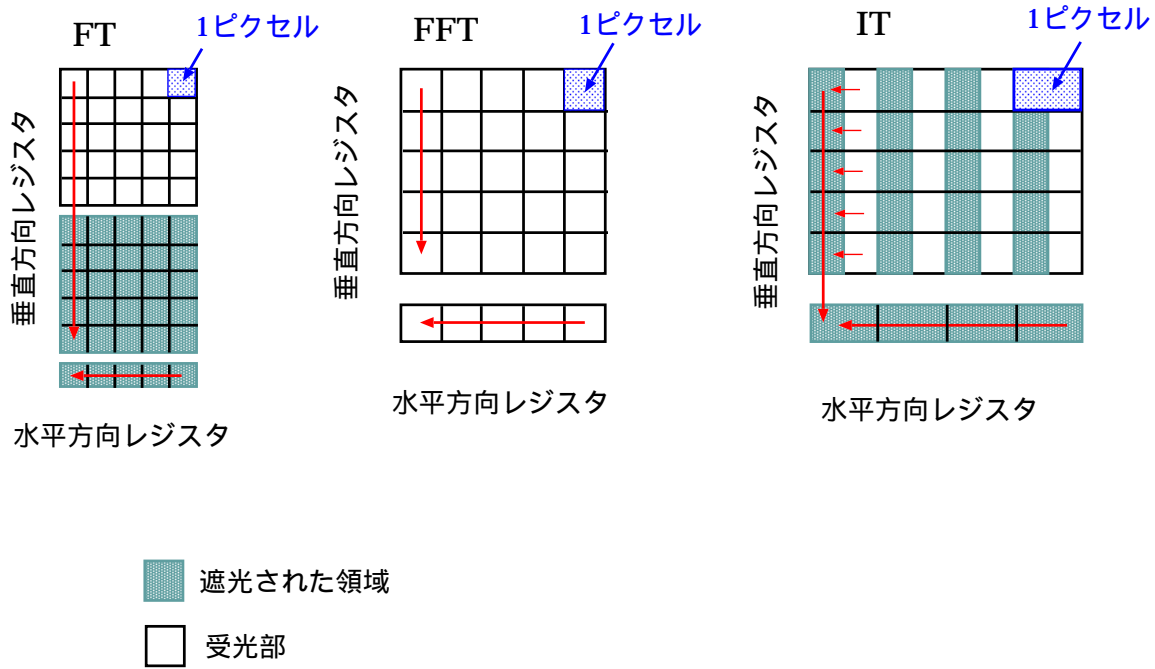


図 2.10 電荷転送の方式

図 2.10 に CCD に於ける, いくつかの異なる電荷転送方式の例を示した. CCD はフォトダイオード (PD) などの場合とは違い, 電荷を直接収集し, 読み出すのではなく, 発生した電荷を一時的にピクセル内のポテンシャルの井戸に収集・蓄積し, ゲート電圧による制御の下, 信号電荷を転送することにより, 信号電荷を読み出す. 電荷の読み出しと転送の方式には以下のようなフレーム転スファ (FT), フルフレーム転スファ (FFT), インターライン転スファ (IT) などがある.

- FT

この方式は撮像用の 2 次元領域 (撮像領域) と遮光された転送用の領域 (蓄積領域) から構成されており, 撮像領域で発生した電荷は蓄積領域に移動し, 撮像領域が次の蓄積動作を始めると蓄積領域の電荷が転送される. 常に電荷を溜めて読み出せるが, 蓄積領域が必要なため, CCD のサイズが大きくなってしまふ.

- FFT

FT 方式の蓄積領域を持たないものがこの方式である. 常に露光状態にあるためになんらかの外部シャッター, または電荷を蓄積して読み出すための時間が必要となる. 全範囲が受光部であるため, ほとんどの光を捕える撮像領域として使用することができ, CCD のサイズも小さくてすむ. ここで対象とされている飛

跡検出器用デバイスとしての CCD は、通常、この方式の CCD が用いられ、本研究でもこの方式の CCD を使用している。

- IT

この方式は 1 次元的な撮像領域と遮光された転送用の領域が平行に何本も並んでいる。撮像領域には暗電流の少ないフォトダイオードが用いられている。一定時間 PD で電荷の蓄積を行なった後、信号電荷は転送用の領域へと転送される。この方式の CCD は家庭用ビデオカメラやデジタルカメラに現在、最もよく使われている。

2.4.1 電荷の収集

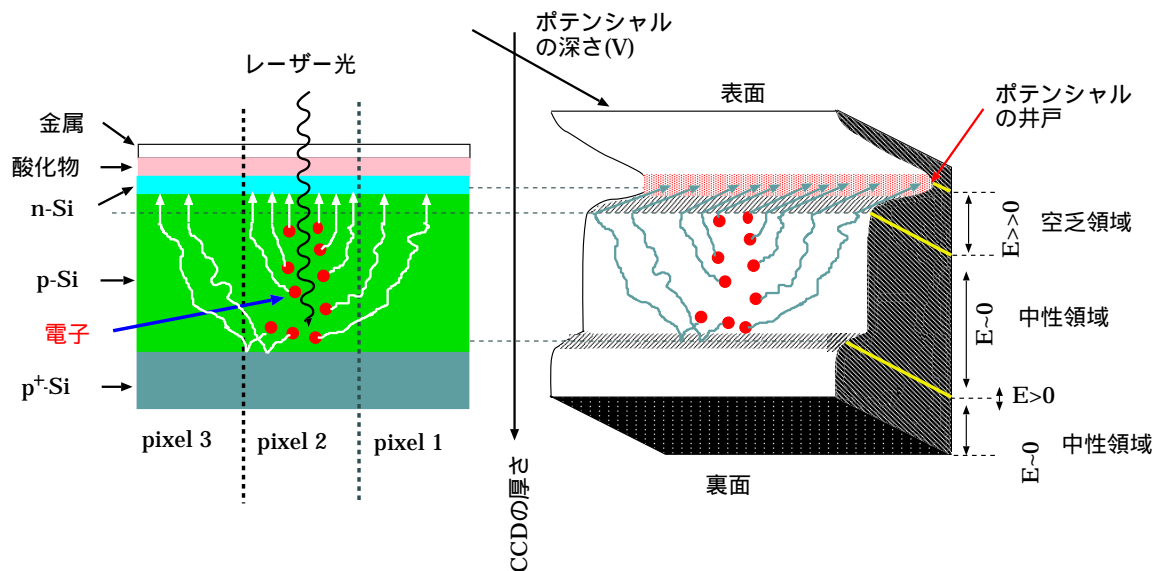


図 2.11 有感領域で発生した電荷の収集と展開されているポテンシャルの様子

CCD の有感領域で発生した電荷は電場によって形成された、ポテンシャルの井戸に収集される。図 2.11 に電荷の収集とポテンシャルの様子を示した。図 2.11 の左の図は CCD の内部構造と電荷が収集される様子を表したもので、図 2.11 の右の図は CCD 内部のポテンシャルの様子と電荷が収集される様子を表したものである。ポテンシャルの最深部は n-Si 内部にあり、中性領域方向に空乏領域が広がっている。

中性領域で発生した電荷はほとんど電場が生じていないために拡散し、空乏領域に達すると即座にポテンシャルの井戸に収集される。また中性領域には存在していないが、空乏領域には隣り合うピクセルに電荷が拡散するのを防ぐためにチャンネルストップという仕切りが存在する。

一定時間後にポテンシャルの井戸に収集された電荷は FFT 方式で読み出し口に向かって転送される。本研究では 2 相方式を採用したため、信号電荷の転送は P1V, P2V, P1H, P2H の 4 つのクロックパルスによる制御で行なわれる。P1V, P2V が垂直転送用のゲート電圧で、P1H, P2H が水平転送用のゲート電圧を示している。

2.4.2 電荷の転送

電荷の転送の様子を真上から見た様子を時系列に図 2.12 に示した。電荷は (2 相方式の場合) 2 つの電極を周期的に変えることで垂直方向の隣のピクセル、即ち 1 行下のピクセルに転送される。水平方向転送レジスタ部へは垂直方向とは異なる位相のクロックパルスを電極に印加し、水平方向の隣のピクセルに転送される。この時、垂直

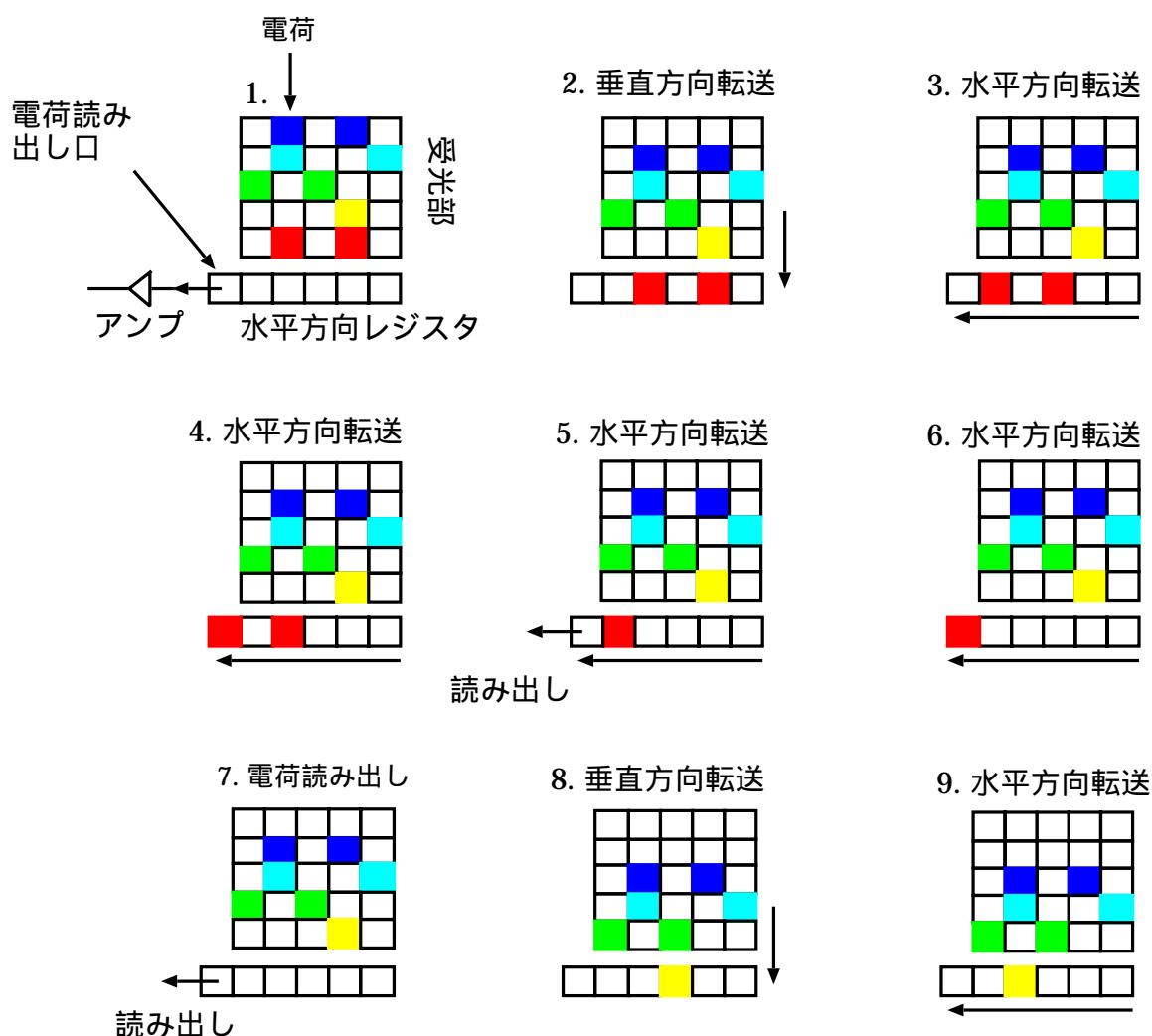


図 2.12 電荷の転送方式

方向の電荷転送は行われず、水平方向転送レジスタ部以外に滞在する信号電荷は全ての水平方向転送が行われるまで同じピクセルに滞在する。信号電荷の読み出し口（図 2.12 の左下部）は 1 ヶ所のみで、そこから逐次、読み出しが行われる。以上のように信号電荷の転送は“垂直方向転送 → 水平方向転送 × N 回”の行程を繰り返すことにより行われる。

1 フレームの転送方法は上述したように垂直転送と水平転送を繰り返すことにより行われるが、次にピクセル間の転送について述べる。図 2.13 は P1V, P2V によるピクセル間の転送を示しており、図 2.14 はゲート電圧とピクセルの関係を示している。

図 2.13(a) は P1V と P2V の時間とクロックパルスの状態を示しており、それぞれパルスが高レベルである時間は $4\mu\text{s}$ である。図 2.13(b) は P1V, P2V の A, B, C の状態におけるポテンシャル井戸の状態を表している。まず時刻 A に於いて、電荷が蓄積され、その後、時刻 B で P1V のクロックパルスが 1 になるとピクセル内でさらに低いポテンシャル勾配が形成される。これにより信号電荷はよりポテンシャルの低い箇所へ収集される。そして、時刻 C で P1V のクロックパルスが 0, P2V のクロックパルスが 1 となるとポテンシャルが再び切り替わり、信号電荷は隣のピクセルへと転送される。

図 2.15 は P1V, P2V, P1H, P2H に入力されるクロックパルスのタイムチャートである。P1V, P2V とクロッ

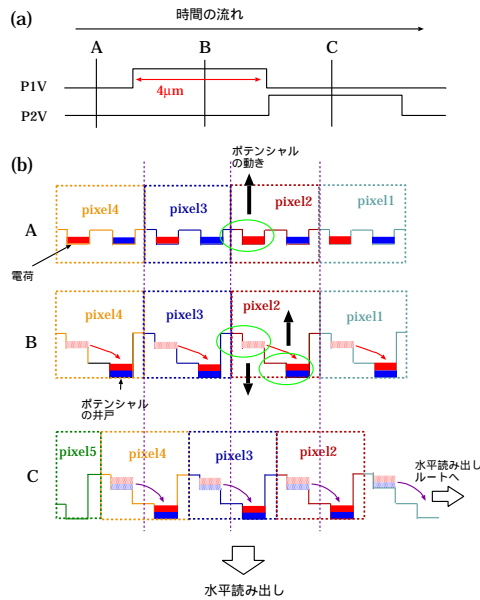


図 2.13 ピクセル間の電荷転送の様子

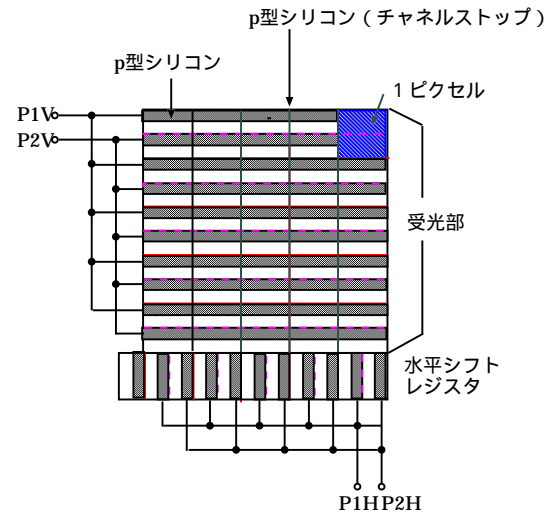


図 2.14 ピクセルと P1V, P2V の位置の関係図

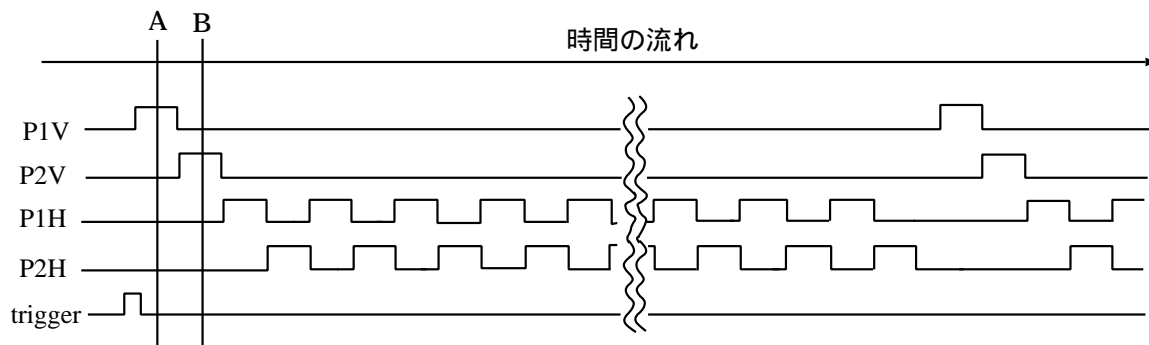


図 2.15 クロックパルスのタイムチャート

クパルスが入力されてから水平方向の P1H, P2H にそれぞれ水平方向のピクセル数分のクロックパルスが入力される。1 行分のピクセル転送を全て終えたら、また垂直方向 P1V, P2V にクロックパルスが入力される。

図 2.13 で B と C の間には水平方向の電荷の読み出す長い待ち時間が存在する。この時間は CCD の水平方向に配列するピクセル数によるもので、本研究に於いて使用した CCD の水平方向に配列されるピクセルの数は 256 である。

2.4.3 電荷の読み出し

ここまで述べてきたように CCD 有感領域で発生した信号電荷の読み出しは、ただひとつの読み出し口を通して 1 ピクセルずつ行われる。これにより CCD1 フレーム分の信号電荷読み出しには長い読み出し時間が必要とされ、転送効率劣化の原因のひとつとなっている。これを改善するためにいくつかの新しい読み出し方式が提案され、図 2.16 にそれらの読み出し方式を示した。

図 2.16 には左図から順に 1 ヶ所からの電荷読み出し (Classic 読み出し)、数ヶ所からの電荷読み出し (Multi-Port 読み出し)、水平方向のみの電荷読み出し (Column-Parallel 読み出し) を示した。

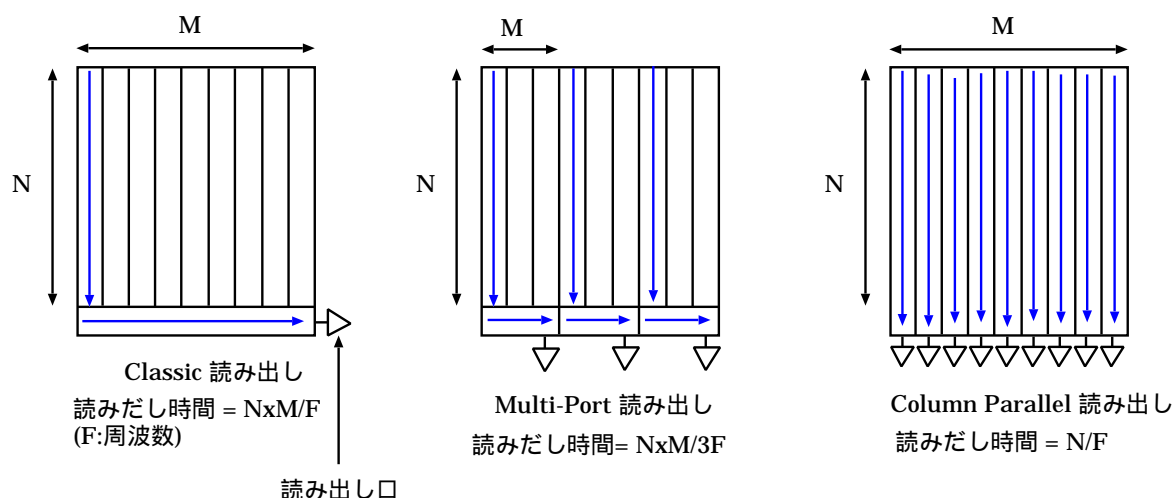


図 2.16 様々な読み出し方式

まず Classic 読み出しであるが、これは前述したように垂直読み出しを行った後に水平読み出しを行い、1ヶ所の読み出し口から1ピクセルずつ読み出しを行うため、CCD1フレームの電荷転送としては非常に長い時間が必要とされる。

それを改善するための1手法として、Multi-Port 読み出しでは読み出し口の数を増やすことにより、転送時間の短縮を狙った手法である。図 2.16(中図)では3ヶ所の読み出し口を設け、電荷の読み出しを行なうことにより、Classic 読み出しに比して3分の1に短縮される。

最後に Column Parallel 読み出しは電荷の読み出し口を全ての垂直方向に設け、1列毎に読み出すことにより、転送時間の短縮を狙った手法である。基本的には Multi-Port と同じアプローチではあるが読み出し口を増やすことにより、全体の面積が増大してしまうこと、開発コストの増大、消費電力や発熱量の増大、アンプ特性のばらつきが生じたときに信号電荷の評価が困難になるといった問題も併せ持っている。

現在 JLC では Multi-Port 読み出しの CCD を使用して、1つの読み出し口から6万ピクセルを読み出す予定である。電荷の読み出し速度は 10MHz/pixel なのでちょうどトレイン間隔の 6ms 内に全ての信号電荷を読み出すことが可能となる。これらの読み出し口の数や電荷の読み出し速度、CCDのピクセル数などは加速器の仕様をもとに、最も適切で最善のオプションが選択される。

2.5 ポテンシャルの井戸内部での電荷の移動

既に述べたように蓄積された信号電荷は、ポテンシャルの低いところへと移動を繰り返しながら転送されるが、この時の信号電荷の移動には以下のような3種類の過程がある。

- 自己誘導ドリフト
- フリンジングフィールド
- 電荷の温度による拡散

以下では各過程について述べる。

2.5.1 自己誘導ドリフト

自己誘導ドリフトはポテンシャル内部に於ける電荷密度が高いときに発生し、その時の電荷転送非効率 ϵ は式 (2.15) のような時間 t の関数で記述される。

$$\epsilon(t) = \left(1 + \frac{t}{\tau_{\text{Si}}}\right)^{-1} \quad (2.15)$$

ここで τ_{Si} は、

$$\tau_{\text{Si}} = \frac{2L^2 C_{\text{eff}}}{\pi \mu_n e N_0} \quad (2.16)$$

N_0	(cm^{-2})	:	単位体積あたりに存在する電荷量の初期状態
L	(μm)	:	ゲート電圧の幅
μ_n	(cm^2/Vs)	:	電荷の移動度
C_{eff}	(F)	:	単位面積あたりのキャパシタンス

BCCD の場合、ポテンシャルの井戸内部で発生するキャパシタンス C_{eff} は式 (2.17) で表される。

$$C_{\text{eff}} = \left(\frac{d_{\text{Si-SiO}_2}}{\epsilon_{\text{Si-SiO}_2}} + \frac{d_{\text{n-Si}}}{\epsilon_{\text{Si}}} - \frac{N/N_D}{2\epsilon_{\text{Si}}} \right)^{-1} \quad (2.17)$$

$\epsilon_{\text{Si-SiO}_2}$	(F/cm)	:	Si-SiO ₂ の誘電率	ϵ_{Si}	(F/cm)	:	Si の誘電率
$d_{\text{Si-SiO}_2}$	(μm)	:	Si-SiO ₂ の厚さ	$d_{\text{n-Si}}$	(μm)	:	n-Si の厚さ
N_D	(cm^{-3})	:	n-Si のドーパ率	N	(cm^{-3})	:	n-Si の単位面積あたりの電荷量

2.5.2 フリンジングフィールド

ゲート電圧によってポテンシャルの井戸の内部で発生している電場のことをフリンジングフィールドといい、空乏領域と同じように電場の勾配が発生しているため電荷はドリフトし、ポテンシャルの最も低いところへ移動する。

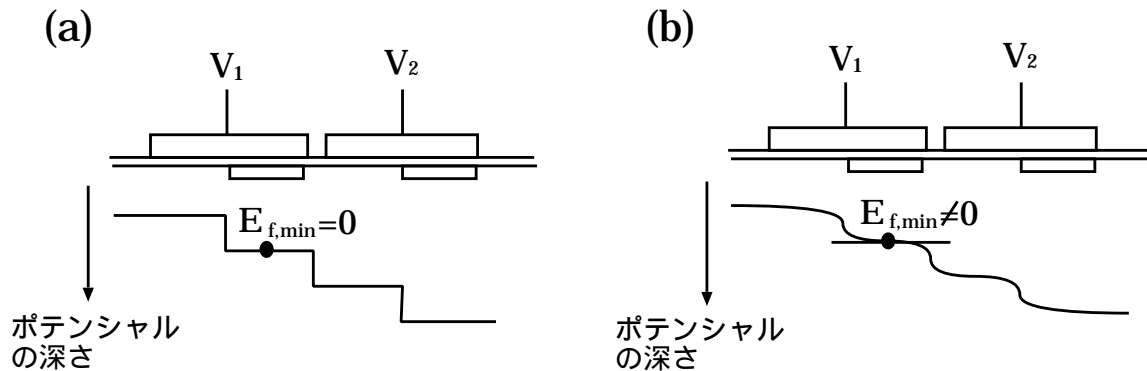


図 2.17 ポテンシャルの深さ方向に対するポテンシャルの展開の様子

図 2.17 に 4 相構造^{*3} のポテンシャルがピクセル内部に展開される様子を示した。

^{*3} 本研究で使用した CCD は 2 相構造であるが、イオン注入型 CCD を使用することにより 4 相構造を実現している。

図 2.17(a) は (b) に比べて、浅い位置にポテンシャルが展開されている。この場合、ゲート電圧の影響を直接受け、ポテンシャルの構造は直方体の型を形成する。従って、Si-SiO₂ 接合面と水平方向の電場は 0 になり、電荷の移動は温度による拡散と自己誘導ドリフトのみで行なわれる。逆に図 2.17(b) は深い位置にポテンシャルが展開されるため直上のゲート電圧だけでなく、隣り合うゲートからも電圧の影響を受ける。さらに直上のゲートからの電圧も弱まるため、図のような境界がカーブを描いたポテンシャル構造になる。

フリンジングフィールドによるでの電荷の拡がりには式 (2.18) で表される。

$$\epsilon(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ff}}\right) \quad (2.18)$$

ここで、 τ_{ff} は

$$\tau_{ff} \leq \frac{L}{\mu_n E_{ff}} \quad (2.19)$$

であり、フリンジングフィールドの最も電場が弱い箇所での電場 E_{ff} は

$$E_{ff} = \frac{2\Delta V \pi \epsilon_{Si}}{3L^2 C_{eff}} \quad (2.20)$$

である。ここで ΔV は隣接する電極により変化した電圧である。またキャパシタンス C_{eff} は

$$C_{eff} = \left(\frac{d_{Si-SiO_2}}{\epsilon_{Si-SiO_2}} + \frac{d_{n-Si}}{\epsilon_{Si}} \right)^{-1} \quad (2.21)$$

と表せる。

2.5.3 電荷の温度による拡散

中性領域で発生した信号電荷の移動は電場がほとんど発生していないため、拡散による影響が大きいことは 2.3 で既に述べたが、ポテンシャルの井戸で電荷が発生していない場合も同様に拡散で電荷は移動する。しかしながら、前述した 2 つの過程でほとんど電荷は移動するのでこれは微量の自由電荷が温度の関数で移動するのみである。

拡散の式による電荷の移動は以下の式 (2.22) で表せる。

$$\epsilon(t) = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th}}\right) \quad (2.22)$$

ここで、 τ_{th} は

$$\tau_{th} = \frac{4L^2}{\pi^2} D \quad (2.23)$$

であり、また

$$D = \frac{kT\mu}{e} \quad (2.24)$$

である。

2.5.4 ポテンシャルの井戸

ここまでの議論を元に、 $\tau_{Si}, \tau_{ff}, \tau_{th}$ を求め、電荷転送非効率 $\epsilon(t)$ と時間 t の関係式を求める。

式 (2.16),(2.17) から

$$\begin{aligned}\tau_{Si} &= 2.47 \times 10^{-3} \times C_{eff} \\ &= 2.47 \times 10^{-3} \times 0.97 \times 10^{-8} \\ &= 2.4 \times 10^{-11}\end{aligned}\tag{2.25}$$

$$= 24(\text{ps})\tag{2.26}$$

$$C_{eff} = 0.97 \times 10^{-8}\tag{2.27}$$

となり, これから

$$\epsilon(t) = \left(1 + \frac{t}{2.4 \times 10^{-11}}\right)^{-1}\tag{2.28}$$

を得る.

次に式 (2.19),(2.20), (2.21) から

$$\begin{aligned}E_{ff} &= 7.5 \times 10^{-5} \times C_{eff}^{-1} \\ &= 7.5 \times 10^{-5} \times 8.20 \times 10^9 \\ &= 9.1 \times 10^3 \text{V/cm} \\ C_{eff} &= 8.20 \times 10^{-9}\end{aligned}\tag{2.29}$$

これから

$$\begin{aligned}\tau_{ff} &\leq 4.5 \times 10^{-10}(\text{s}) \\ &\leq 0.45(\text{ns})\end{aligned}\tag{2.30}$$

となる. 従って,

$$\epsilon(t) = \exp\left(-\frac{t}{4.5 \times 10^{-9}}\right)\tag{2.31}$$

となる.

最後に式 (2.23),(2.24) から

$$\begin{aligned}\tau_{th} &= 4.0 \times 10^{-9} \\ &= 4.0(\text{ns})\end{aligned}\tag{2.32}$$

$$D = 3.7 \times (\text{cm}^2/\text{s})\tag{2.33}$$

となり, これから

$$\epsilon(t) = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{t}{4.0 \times 10^{-9}}\right)\tag{2.34}$$

を得る.

式 (2.28), (2.31),(2.34) の結果を図 2.18 に示す. 図 2.18 は縦軸が各過程による電荷転送非効率 (CTI) 横軸が経過時間を示している. 図から約 $2\mu\text{s}$ までのほぼ 99% の電荷が自己誘導ドリフトによる移動で, その後はフリッピングフィールドによる移動に依存する.

ここでの計算に使用した CCD の構造上及び物性上の数値を表 2.3 に示す.

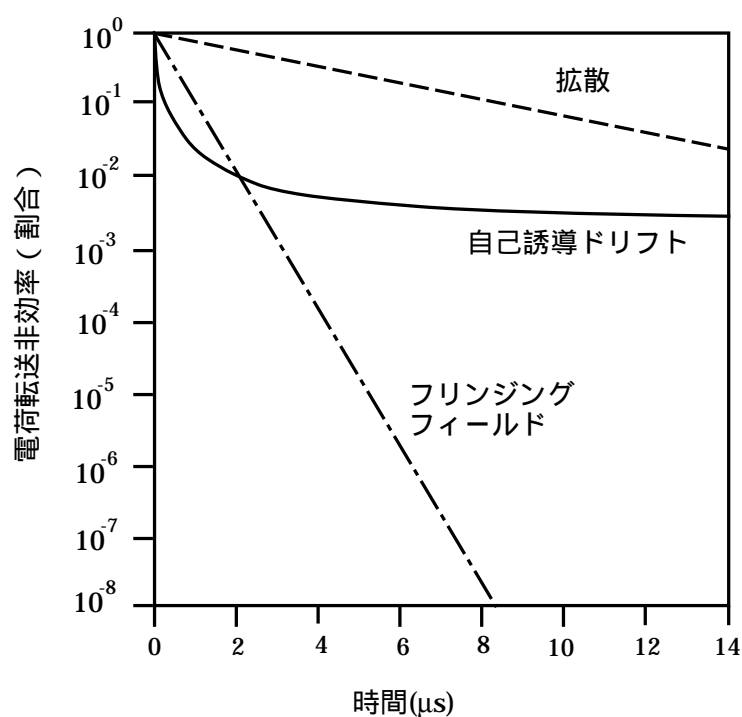


図 2.18 各過程による電荷転送転非効率と時間の関係式 [4]

表 2.3 今回使用した CCD とその他のパラメータ

パラメータ	記号	量
温度	T	295K (273K)
シリコンの誘電率	ϵ_{Si}	1.07×10^{-12}
シリコン酸化物の誘電率	ϵ_{SiO_2}	3.45×10^{-13}
ゲートの幅	L	$6\mu\text{m}$
酸化物の厚さ	d_{SiO_2}	100nm
n-Si の厚さ	$d_{\text{n-Si}}$	$1.0\mu\text{m}$
n-Si のドーブ量	N_D	$1.0 \times 10^{16}/\text{cm}^3$
p-Si のドーブ量	N_A	$1.0 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ (有感領域 $10\mu\text{m}$) $1.0 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ (有感領域 $50\mu\text{m}$)
電子の移動度	μ_n	$1.45 \times 10^3 \text{cm}^2/\text{Vs}$
電気素量	e	$e = 1.6 \times 10^{-19}$
ボルツマン定数	k	$1.38 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$
電子数	N_0	$4.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$
ゲートに掛ける電圧の大きさの幅	ΔV	11V

2.6 これまでの R&D

本節ではこれまでに行われてきた CCD 崩壊点検出器に関する R&D の結果について議論する.

2.6.1 分解能

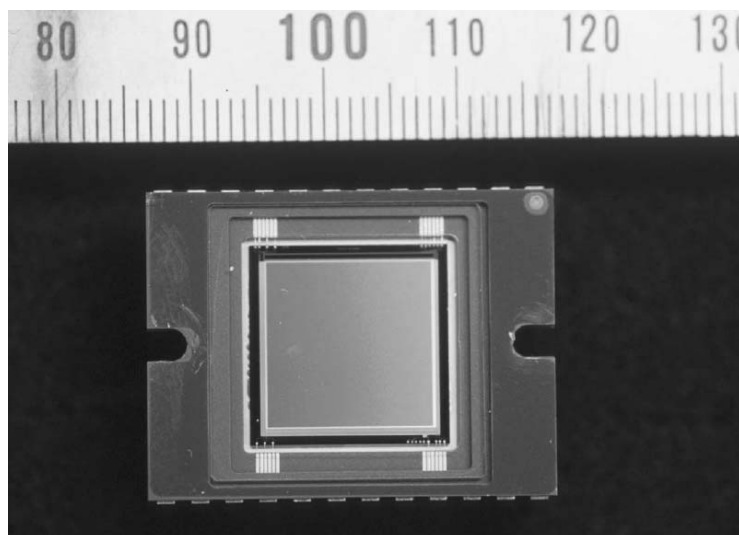


図 2.19 浜松ホトニクス社製 CCD(S5466) の外観

CCD の位置分解能特性についてはこれまでに JLC Vertex サブグループによって調べられてきており, AC 法 (Analog Centroid Method), RLM 法 (Ratio Location Mapping Method) によるそれぞれの解析結果とこのとき使用した CCD の仕様について表 2.4 にまとめた.

表 2.4 AC 法及び RLM 法により得られた CCD の空間分解能 (μm) と CCD 仕様の関係 [5–7]

	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	S5466(図 2.19)		CCD02-06
		HPK10	HPK50	EEV
AC 法	−15	3.39 ± 0.30	2.20 ± 1.22	3.62 ± 1.13
	5	3.59 ± 0.35	3.05 ± 1.31	3.91 ± 1.40
RLM 法	−15	2.48 ± 0.28	2.38 ± 0.80	2.80 ± 0.99
	5	3.45 ± 0.46	3.14 ± 1.51	2.80 ± 2.09
諸元	ピクセル数 (H×V)	512×512	512×512	385×578
	ピッチ ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	24×24	24×24	22×22
	有感層厚 (μm)	10	50	20
	ゲイン ($\mu\text{V}/\text{e}$)	2.0	2.0	1.0

また 3 秒周期で 250 kpixels/s で読み出したときの S/N は常温付近 (5°C) でも 10 以上であった (図 2.20).

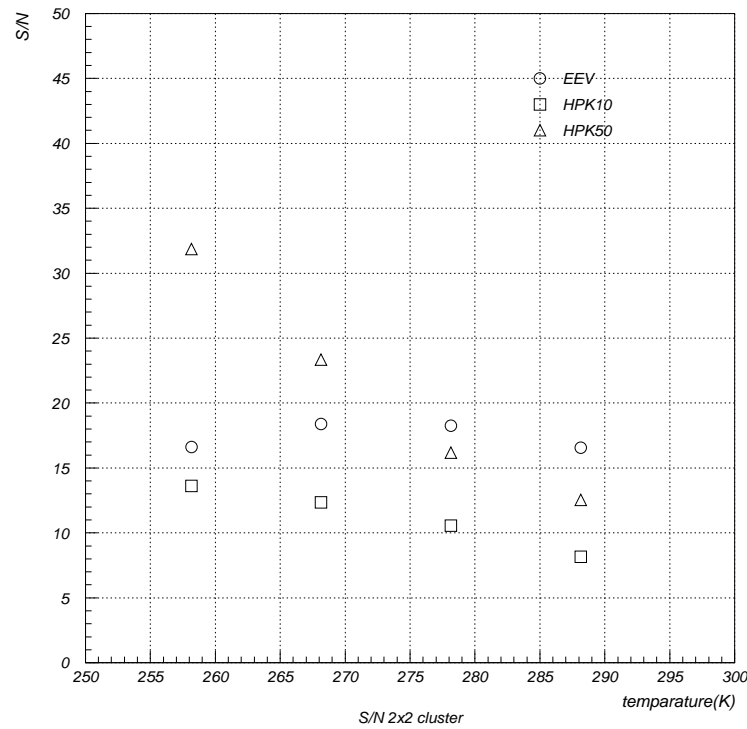


図 2.20 S/N 比と温度の依存関係 [5-7]

2.6.2 β 線による放射線損傷

ここでの研究の主要課題である放射線損傷の放射線被曝量及び温度に関する依存性についても, これまでにも ^{90}Sr を線源として定量的な測定がなされてきており, その結果の一部を図 2.21 に示す [8, 9].

2.7 Beam Background

ビーム衝突点の最近傍に配置される CCD 崩壊点検出器は高密度のバックグラウンド粒子にさらされることになる. バックグラウンド粒子のほとんどは 20MeV 程度 (図 2.22) の電子・陽電子に集中し, ビーム衝突点から 2.4cm 離れた場所に第一層を設置した場合, 第一層への衝突電子数は年間 $1.5 \times 10^{11} (e/\text{cm}^2)$ であると予測される.

これまでの放射線損傷の影響の研究は β 線源による比較的低いエネルギーの電子で行われてきたが, 実際の実験環境下では前述したとおり, この図でも示されているように, より高いエネルギーの電子による放射線損傷の影響を測定することが, LC 実験において CCD 崩壊点検出器を使用するために決定的に重要な課題である. これが本研究の主要課題であり, 次章以後その詳細について述べる.

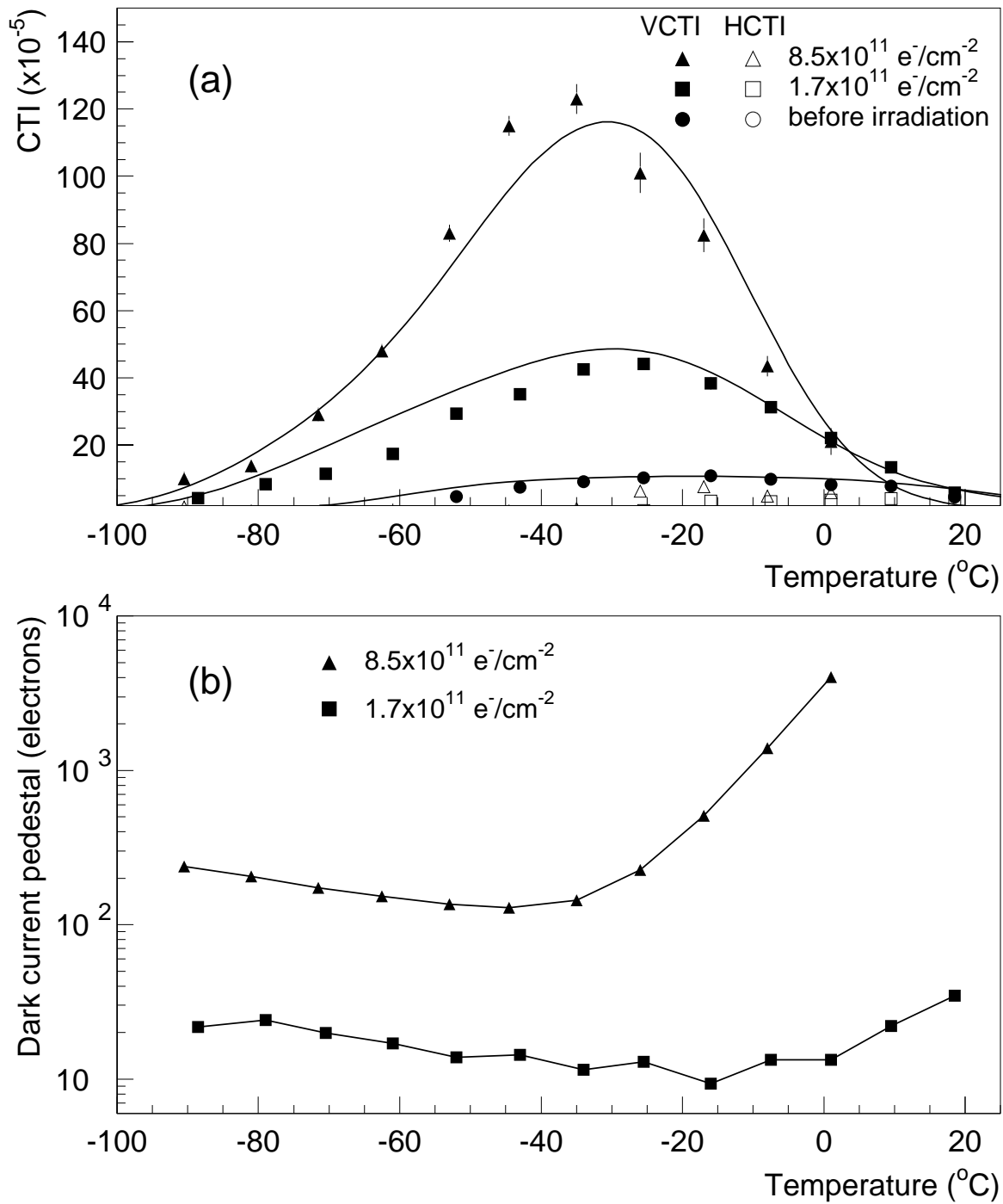


図 2.21 これまでの放射線耐性に関する R&D: (a)CTI の電子照射量及び測定温度との関係図 (b) ダークカレントペDESTALの電子照射量及び測定温度との関係図

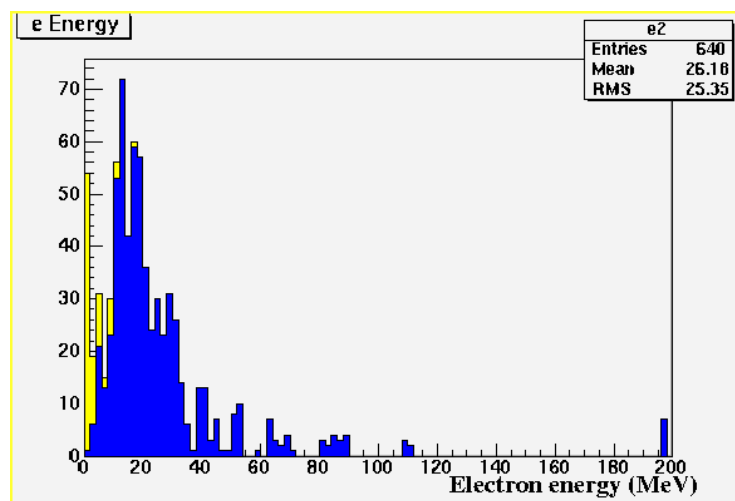


図 2.22 衝突点最近傍付近における電子・陽電子のエネルギー分布:衝突点付近に設置される崩壊点検出器への衝突粒子は 20MeV 付近にエネルギーが集中する [10].

第 3 章

Radiation Damage Effects in CCD

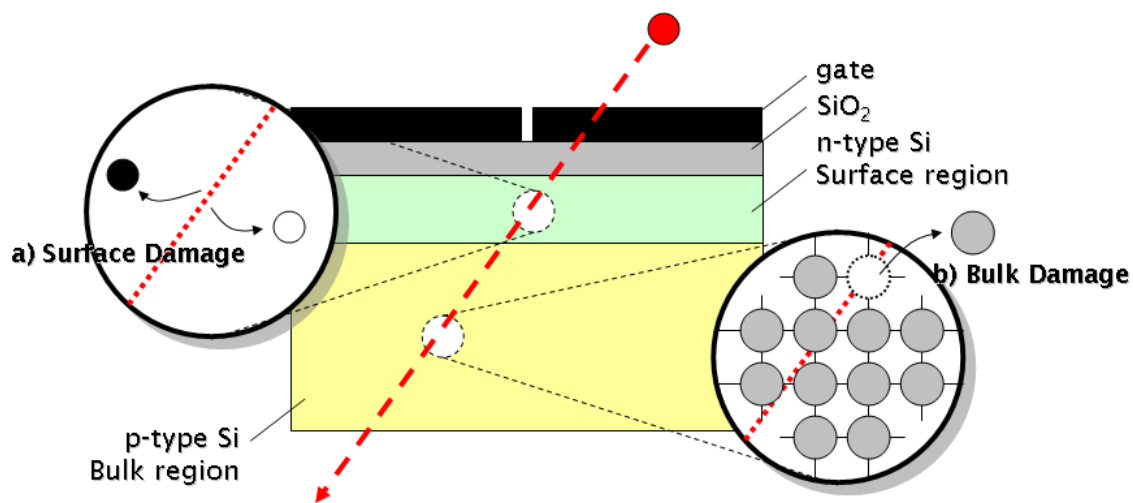


図 3.1 CCD に於ける放射線損傷:(a) 荷電粒子が CCD を通過することにより Si-SiO₂ 境界面付近で発生する Surface Damage と (b) 放射線が Si 原子と衝突することにより発生する格子欠陥に起因する Bulk Damage がある。

CCD に於ける放射線損傷は Surface Damage(図 3.1(a)) と Bulk Damage(図 3.1(b)) に分類される。本章ではこれらの損傷が及ぼす影響を定量的に測定するための現象について議論する。

3.1 トラップと Dark Current と転送効率

MOS 構造をとる CCD は表面から裏面に向かって電極・絶縁体・半導体という構造になっている。(図 3.2)

シリコンのバンドギャップは約 1.15eV(温度の関数) であるがひとつの信号電荷を得るためにはこのギャップ(禁止帯)を電子が越えなければならない。温度が高い場合、熱エネルギーにより励起された電子がバンドギャップを越え、信号電荷と区別がつかなくなってしまう。この電子を我々は通常、暗電流 (dark current, ダークカレント) と呼ぶ。言うまでもなく、この暗電流は CCD の性能を著しく悪化させる。

暗電流の主な発生原因は以下に挙げた 3 つの理由による。

1. 空乏化していない領域での熱励起とその拡散 (熱拡散により空乏層に侵入して暗電流となる)
2. 空乏層内での熱励起
3. Si-SiO₂ 酸化物 (半導体-絶縁体) 境界面での表面準位による熱励起

これらのいずれにおいても、熱励起された電子が暗電流増加の原因になる。従って、暗電流を小さくするためのひとつの有効な方法は、CCD を冷却して駆動することである。

理想的な半導体では価電子帯と伝導帯の間にエネルギー順位は存在しないが、実際にはこのバンドギャップに準位をもつ (CCD の場合) ピクセルが存在する。

この準位をトラップと呼ぶ。トラップは特に、絶縁体と半導体の境界面に集中することが知られておりこれは、製造工程上格子欠陥が出来やすいことに起因する。また表面付近に発生するトラップを特に表面準位と呼ぶ。

電子はこのトラップを介して、あたかもハシゴをかけ上るかのようによ励起される。つまりトラップは暗電流増加の原因 (3 の原因がまさにこれであり、最も支配的である) となりうる。

またトラップは電荷転送効率を悪化させる原因ともなる。第5章で詳しく議論するが、空のトラップが存在するピクセルを信号電荷が通過するときにトラップに信号電荷が集まり、信号量が減少する。

ここまでをまとめると、表面準位 (トラップ) は暗電流発生の原因となると同時に、転送効率をも悪化させ、CCD の性能を著しく悪化させる。

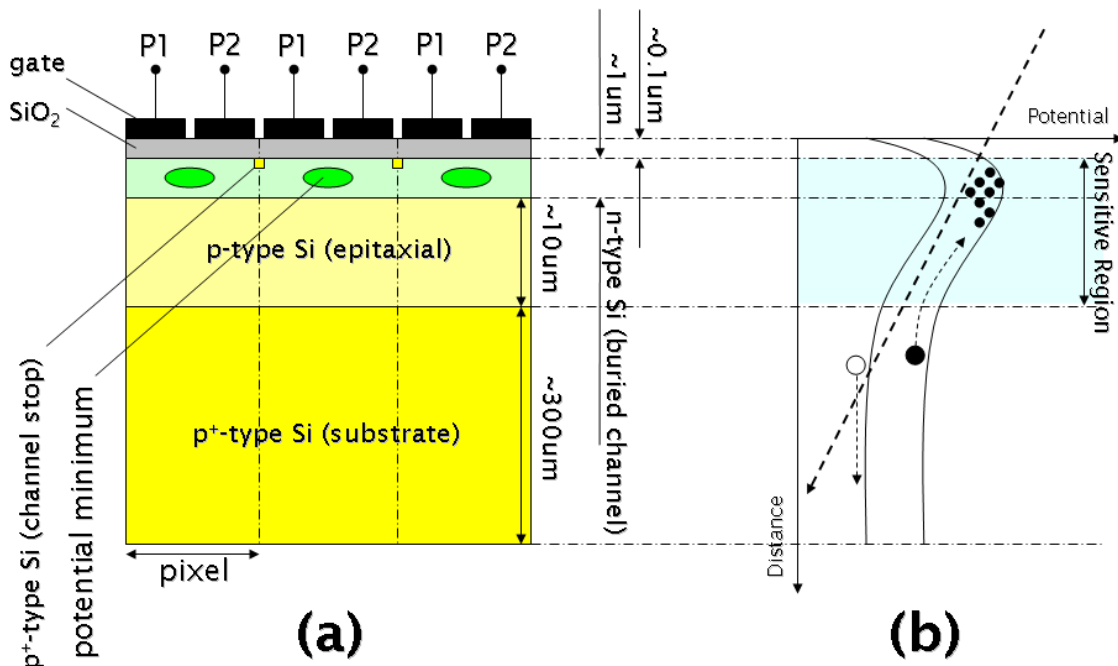


図 3.2 埋め込みチャネル型 CCD(BCCD) の構造: (a)BCCD(3 ピクセル) の断面図。ただし図中に示してある寸法はスケールされていない。(b)BCCD 中の電位と受光部からの距離の関係図。ポテンシャルの井戸を Si-SiO₂ 境界面より離れた領域に展開することにより表面準位の影響を減らすことができる。

前章では、本研究で使用した CCD は埋め込みチャネル型 CCD(BCCD) であることについて触れた。図 3.2(a) にあるように有感層と酸化鉄の間に n 型シリコンをドーピングすることにより、ポテンシャルの井戸を Si-SiO₂ 境界面より離れた領域に展開することができる。(図 3.2(b)) その分、蓄えることが出来る電子の数は少ないが、蓄えられた電子を絶縁体面に触れることなく、転送できる。(つまり表面付近のトラップに遭遇することなく、効率良く転送することができる。) したがって、転送効率へ影響を及ぼす原因のほとんどをバルク部 (シリコン有感層部) に限定して駆動することができる。

また、本研究で使用した CCD は MPP モード (付録 A) という特殊な駆動方式を採用している。この駆動方式は絶縁層 ~n 型半導体のごく狭い領域のエネルギーバンド状態を反転させ (故に inverted mode とも呼ばれている) あたかも p 型半導体のような振る舞いをさせる。これにより自由正孔は絶縁層直下に蓄積され、表面準位に起

因する暗電流 (電子) は正孔とすぐに再結合し [11–13], 既に列挙した 3 に起因する暗電流は限りなくゼロに抑えることができる。

3.2 Surface Damage

CCD における 2 つの放射線損傷のうち, まずはまず Surface Damage について考える. この呼び名は, この現象が荷電粒子が CCD を通過することにより対生成された電子と正孔のうち, 正孔の幾つかが Si-SiO₂ 境界面に蓄積されることにより引き起こされる現象であることに起因する. この現象は入射粒子による電離によって起こる現象である. したがって, Surface Damage の原因となっている素過程は電離であり, イオン化をともなうエネルギー損失 (dE/dx) に比例するものと考えられる.

3.2.1 Flat-band Voltage Shift

我々は通常, CCD を運転する際, Si-SiO₂ 境界面から発生する暗電流の量, すなわちバックグラウンドを極小にするために, 特殊な電圧を印加することにより MPP モードと呼ばれる特殊な状態で CCD を駆動することは既に述べた. この印加電圧により絶縁層直下に形成されるエネルギー準位の溝にイオン化により発生した正孔が蓄積され, MPP モードで運転するためにより大きな電位差が必要となる. ある電圧を越えたところから急激に (MPP モードになることにより) 暗電流の量が減少する. このことから我々はこの現象を flat-band voltage shift と呼び, この現象を測定することにより Surface Damage の評価を行った.

3.3 Bulk Damage

Bulk Damage はその名から想像できる通り, CCD バルク部 (p 型半導体有感層領域) における放射線損傷のことである. 十分なエネルギーを持つ放射線が Si 原子と衝突することにより, シリコン結晶中での格子欠陥が発生する. 素過程としては displacement であり, イオン化をともなわないエネルギー損失であることからこれを Non-Ionizing Energy Loss (以後, NIEL) と呼び, Bulk Damage は NIEL に比例すると仮定している [14]. なお NIEL については 3.3.2 で改めて言及する.

格子欠陥は, Si 結晶中のバンドギャップ中に新たなエネルギー準位 (トラップ) を作る. 既に述べたようにこのトラップは暗電流増加の原因となると同時に転送効率悪化の現象も引き起こす.

3.3.1 Dark Current と CTI

本研究では MPP モードで BCCD を運転したため, 境界面付近を起源とする暗電流はほとんど観測されない. したがって, ここで観測される暗電流のほとんどはバルク部を起源とするものである. この特性を利用し逆の捉え方をすれば, 暗電流を測定することによりバルクダメージの評価を行うことができる.

電荷は転送中に複数のピクセルを通過することになるが, 途中で空のトラップを持つピクセルを通過するとき, 信号電荷がトラップに捕獲される. このため, 信号電荷は真の信号量に比べ小さな量として観測される. したがって, この CTI の増大, あるいは CTE の減少を測定することにより, バルクダメージの評価を行うことができる. Bulk Damage によりトラップを持つピクセルの数が増加するため, 信号電荷の捕獲確率が高くなり, CTE は小さく, CTI は大きくなる.

このバルクダメージは格子欠陥を作る主要な原因として, 電離をともなわないエネルギー損失 (Non-Ionizing Energy Loss, NIEL) が考えられている.

3.3.2 Non-Ionizing Energy Loss by High Energy Electron

実際の JLC 実験に於いて CCD 崩壊点検出器として使用される場合, これまでの研究からその耐性はおよそ 3 年程度であると, 報告されている [15].

これまでの測定 (3.3) で使用された放射線源は $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$ であるが, $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$ から出る β 線の最大エネルギーは 2.28MeV 程度である. それに対して, JLC ビームバックグラウンドはおよそ 20MeV 程度であると見積もられている [5].

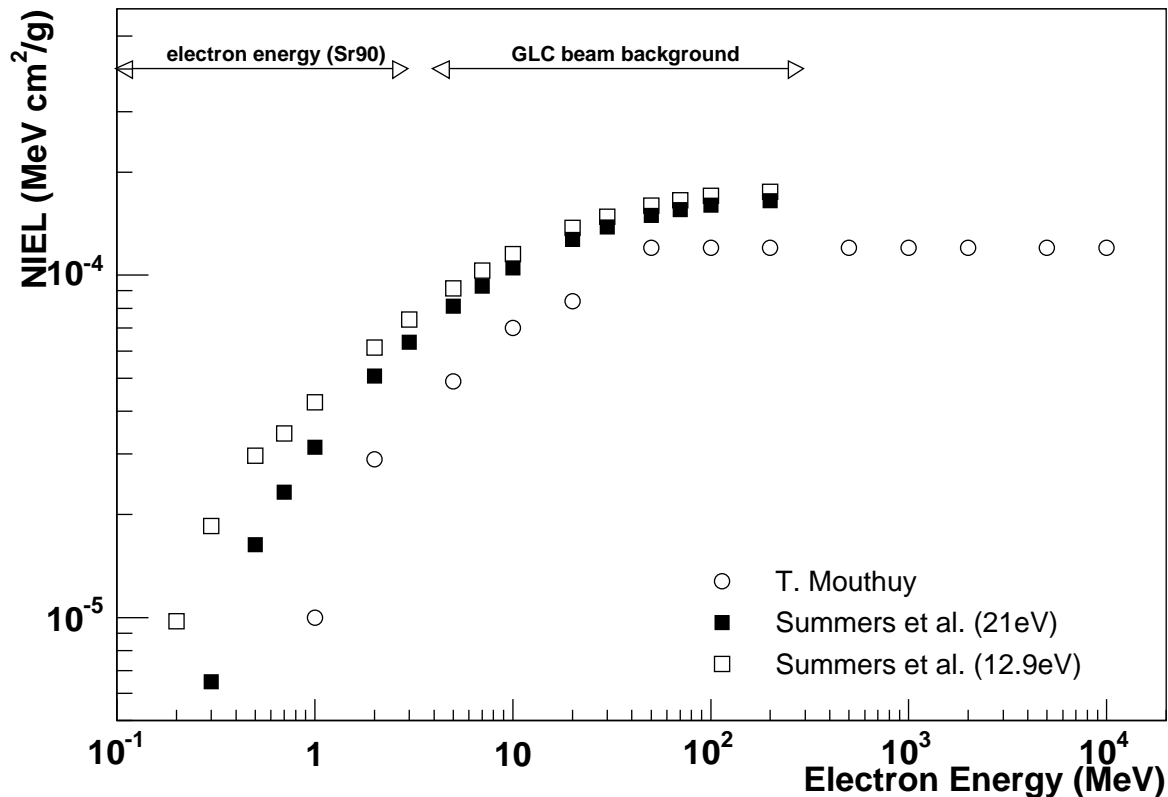


図 3.3 シリコン中の NIEL と電子のエネルギーの関係図: ○ は文献 [16] より引用した. ■ と □ は文献 [17] からの引用でそれぞれ閾値 21eV, 12.9eV を計算条件として適用したものである.

上述の見積もりは, バルクダメージの影響すなわち CTI の値は, 放射線源を用いた放射線損傷の測定と計算による NIEL (図 3.3) に比例するという仮定に基づく見積もりである. 即ち, 図 3.3 によると, ^{90}Sr と JLC ビームバックグラウンドとでは NIEL がおよそ 10 倍となることから, バルクダメージつまり CTI の増大もそれに比例すると仮定し, CCD の動作限界を 3 年と見積もったものである.

NIEL に関するこの仮定の妥当性が, JLC に於ける CCD の放射線被爆に関する寿命の評価に決定的に重要であることから, 我々は高エネルギー電子線による CCD に対する放射線損傷の影響を実験的に検証することを行った. これが本研究の目的である.

第 4 章

Experiments

前章まで LC 実験で崩壊点検出器として CCD を使用した場合の可能性と問題点について議論してきた。問題点の特に重要な項目はその放射線耐性 (surface damage, bulk damage) であり, それを定量的に測定するための特性量として以下のようなものがあることについて述べた。

- Flat-band voltage shift
- Dark current
- CTI

本章ではこれらの特性量を測定するための測定環境及び測定結果について議論したい。

4.1 CCD Description

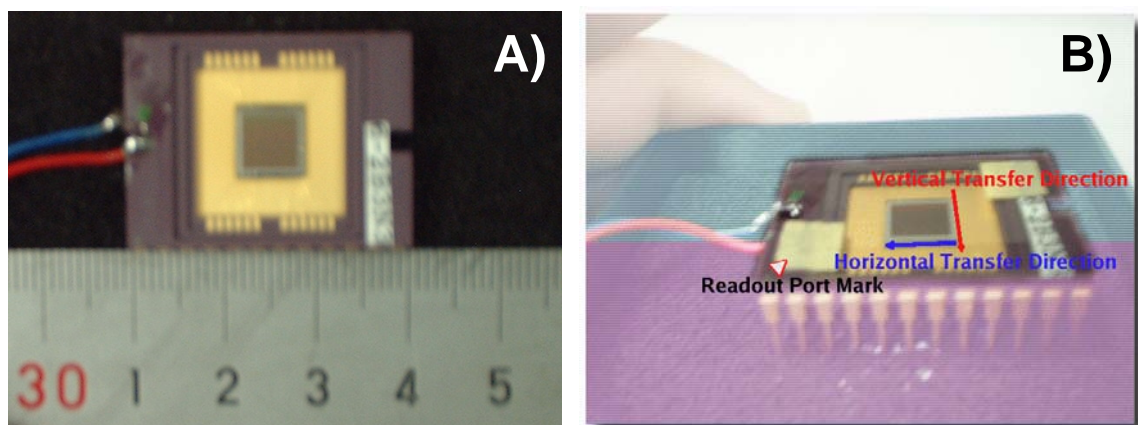


図 4.1 浜松ホトニクス社製 CCD:(A) 実際に実験に使用された CCD と同型の CCD を真上から撮影した写真 (B) 奥から手前に向かう方向が鉛直転送, 左から右方向が水平転送である。読み出しポートは左手前に設置されている。

測定は浜松ホトニクス社製の CCD サンプル (図 4.1) を 2 枚使用し, それぞれ以下のような測定点について各特性量の測定を行なった。

- 150MeV の電子線 (BEAM) を照射した CCD(S/N: 8-2B3N-1)

測定点としては以下の 4 点

1. 照射前

2. $1.0 \times 10^{11} e/cm^2$ 照射後
 3. $2.0 \times 10^{11} e/cm^2$ 照射後
 4. $5.0 \times 10^{11} e/cm^2$ 照射後
- ^{90}Sr を線源とした β 線を照射した CCD(S/N: 4-2B3N-3)

測定点としては以下の4点

1. 照射前
2. $0.6 \times 10^{11} e/cm^2$ 照射後
3. $1.0 \times 10^{11} e/cm^2$ 照射後
4. $2.0 \times 10^{11} e/cm^2$ 照射後

なお, この CCD は特注品につき型番はなく, 重要だと思われる諸元値については表 4.1 にまとめた.

表 4.1 測定に使用した浜松ホトニクス社製 CCD の諸元値

Format	256 × 256
Pitch	24 μm × 24 μm
Gain	1.0 $\mu\text{V}/e$
有感層厚	10 μm
読み出し周波数	250kHz
読み出し周期	2 ~ 16sec

CCD のシグナル領域は表 4.1 に示したとおり, 256 × 256 であるが, 読み出されるデータのフォーマットは driver board 上の読み出し回路^{*1}に依存しており, 実際は図 4.2 のようにシグナル領域以外に 1 ラインを同定したり, 基準レベルとなる空読み部分など数種類のヘッダーを含むため実際に読み出されるデータフォーマットは H320 × V296 のフォーマットを持つ. これはあくまで読み出されたデータのフォーマットであり, CCD 自らが出力している信号はあくまで 256 × 256 である.

4.2 β 線の照射

CCD(S/N:4-2B3N-3) に対する β 線の照射は, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) PF-AR 実験棟にて 3 回にわたって行われた.

セットアップ図 4.3 に示したように, 強度が 324Mbq の線源 ^{90}Sr を CCD から 2.7cm 離して設置したので単位時間に単位面積の CCD に衝突する電子数 Φ は式 (4.3) より 1 時間あたり 1.27×10^{10} 個である.

$$\Phi = 324 \times 10^6 (e/s) \times \frac{1}{4\pi \times (2.7\text{cm})^2} \quad (4.1)$$

$$= 3.54 \times 10^6 (e/s \cdot \text{cm}^2) \quad (4.2)$$

$$= 1.27 \times 10^{10} (e/h \cdot \text{cm}^2) \quad (4.3)$$

各回の照射はそれぞれ 4 時間 44 分, 3 時間 13 分, 8 時間ずつ行い, 照射量については表 4.2 にまとめた.

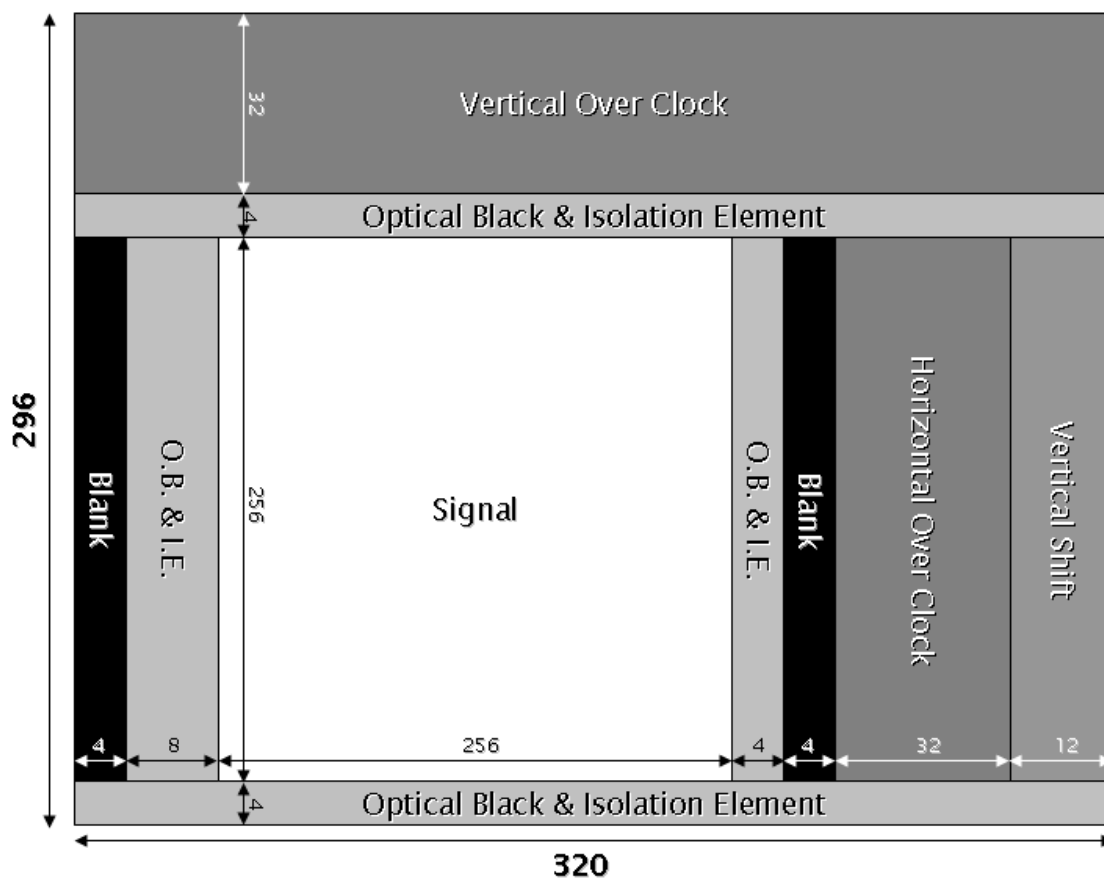


図 4.2 CCD からの読み出しデータのフォーマット: 読み出されるデータには実際の信号以外に基準レベルなどの数種類のヘッダーが含まれる。

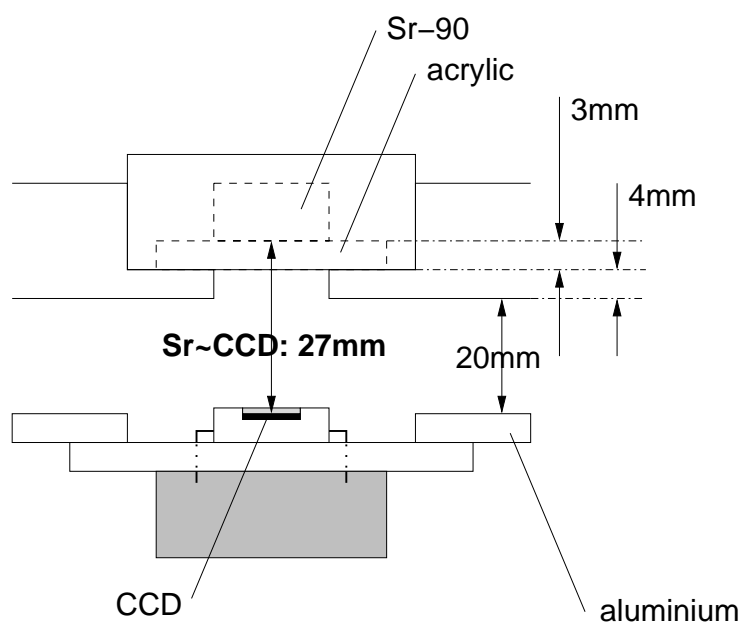


図 4.3 ^{90}Sr 照射セットアップ: 照射時の線源強度は 324MBq であった。 β 線源は CCD から 27mm 離れた位置に設置され照射が行われた。

表 4.2 CCD(S/N:4-2B3N-3) への照射量の推移: ^{90}Sr による CCD への β 線照射は 3 回にわたって行われた. 特性量の測定は未照射の時点を含め計 4 点について行われた.

実験実施日	照射電子数 (e/cm^2)	照射電子数合計 (e/cm^2)
2003-03-22	$0.6 \pm 0.2 \times 10^{11}$	$6.0 \pm 0.2 \times 10^{11}$
2003-08-22	$0.4 \pm 0.1 \times 10^{11}$	$1.0 \pm 0.2 \times 10^{11}$
2003-08-27	$1.0 \pm 0.3 \times 10^{11}$	$2.0 \pm 0.3 \times 10^{11}$

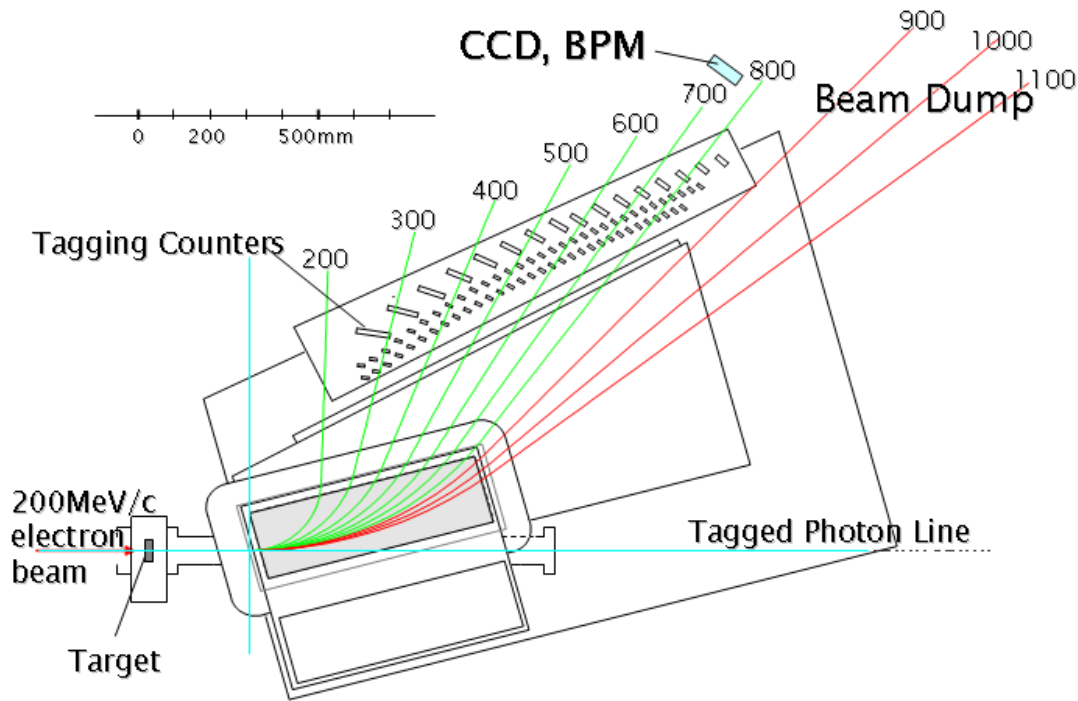


図 4.4 LNS ビームライン下流付近を真上から見た図: ターゲットと CCD の間には磁場が設定されているため高エネルギー電子は CCD より奥の方へ抜け, 低エネルギー電子は CCD より手前の方へ曲げられるため CCD には衝突せず 150 MeV 程度のエネルギーを持つ電子のみが CCD に衝突する.

4.3 High Energy Electrons Irradiation

CCD(S/N:8-2B3N-1) に対する $\sim 150\text{MeV}$ [18] の電子線照射は東北大学核理学研究施設 (LNS) にて 3 回にわたって行われた.

CCD への照射実験に先だってビームエネルギー測定のための実験が行われた. その実験の結果に基づき CCD は図 4.4 の位置に設置された. ターゲットと CCD の間には磁場が設定されており, 高エネルギー電子は CCD より奥の方へ抜け, 低エネルギー電子は CCD より手前の方へ曲げられるため CCD には衝突せず 150 MeV 程度のエネルギーを持つ電子のみが CCD に衝突する.

*1 KEK 杉本氏による製作.

4.3.1 セットアップ

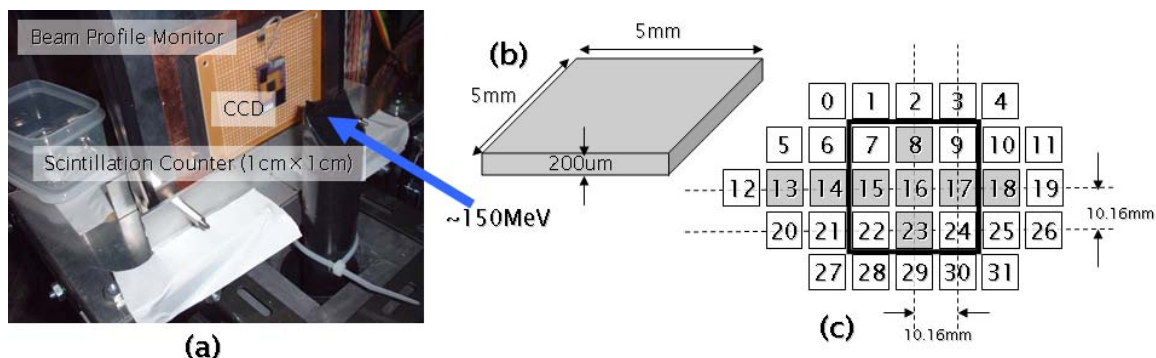


図 4.5 CCD とビームプロファイルモニター (BPM) の設置図:(a) ビーム上流から下流にむかってシンチレーションカウンター (1cm × 1cm)・CCD・BPM が設置された。(b)BPM は $1/4\text{cm}^2$, 200 μm 厚の PIN ホトダイオード, 32 個から構成される。(c)PIN ホトダイオード全 32 チャンネルのアサイメント.PIN ホトダイオードから出力される電流を電圧に変換しマルチメーターで読み出すことによりビームのモニタリングを行った.CCD は太線付近に設置された。

CCD への電子線照射量はビームプロファイルモニター (BPM) を用いて測定された。セットアップは図 4.5(a) に示すようにビーム上流から下流にむかって 1cm × 1cm のシンチレーションカウンター・CCD・BPM の順に設置された。ただし、シンチレーションカウンターはキャリブレーションのために使用したものであり、実際の照射ランではシンチレーションカウンターはビーム経路からは取り除かれた状態で照射が行われた。図 4.5(b) に示した $1/4\text{cm}^2$, 200 μm 厚の PIN ホトダイオードは図 4.5(c) に示すようにように配列され BPM を構成する。BPM は CCD の背面に設置され、各チャンネルから出力される電流を電圧に変換しマルチメーターで連続的に読み出すことにより、照射量のモニタリングを行った。

図 4.6 における Beam Irradiation Area で BPM が出力する電流は KEITHLEY 社製マルチメーターで読み出され、読み出し電流を変換した電圧が RS232C 経由で Hardware Access PC(H/A PC) によって読み出される。

H/A PC は図 4.6 における Beam Control Area にある DAQ Control PC からネットワーク越しに制御され、取得データは共有ストレージデバイスに保存される。Online Analysys PC(O/A PC) は共有ストレージデバイスに保存された取得データにアクセスし、照射量の見積もりに必要な値を表示する。(図 4.7)

O/A PC により解析され意味のある物理量に変換された結果は図 4.6 における Beam Control Area にある Beam Monitorin PC からモニタリングされ、この解析結果を元にビーム強度等の調節を行いながら CCD への電子線照射が行われた。

なお、これらのデータ収集システムを構成するソフトウェアについては 4.5 でさらに詳しく述べる。

4.3.2 測定方法

前節でも触れたが CCD に対する照射量は BPM の測定電圧 (V) に読み出し間隔 (sec) をかけたものを積算した値 (Vsec) から見積もった。使用したマルチメーター (KEITHLEY 7702 型) からの読み出し電圧 1mV は 100pA に相当する。(電圧 × 時間) の量を電子数へ換算するための換算係数を求めるために照射の直前にキャリブレーションが行われた。キャリブレーションは 1cm × 1cm のシンチレーションカウンターを CCD の前方 (ビーム上流方向) に設置し、その粒子通過数をスケーラーで計測した。このスケーラー計測値とそのときの BPM の値

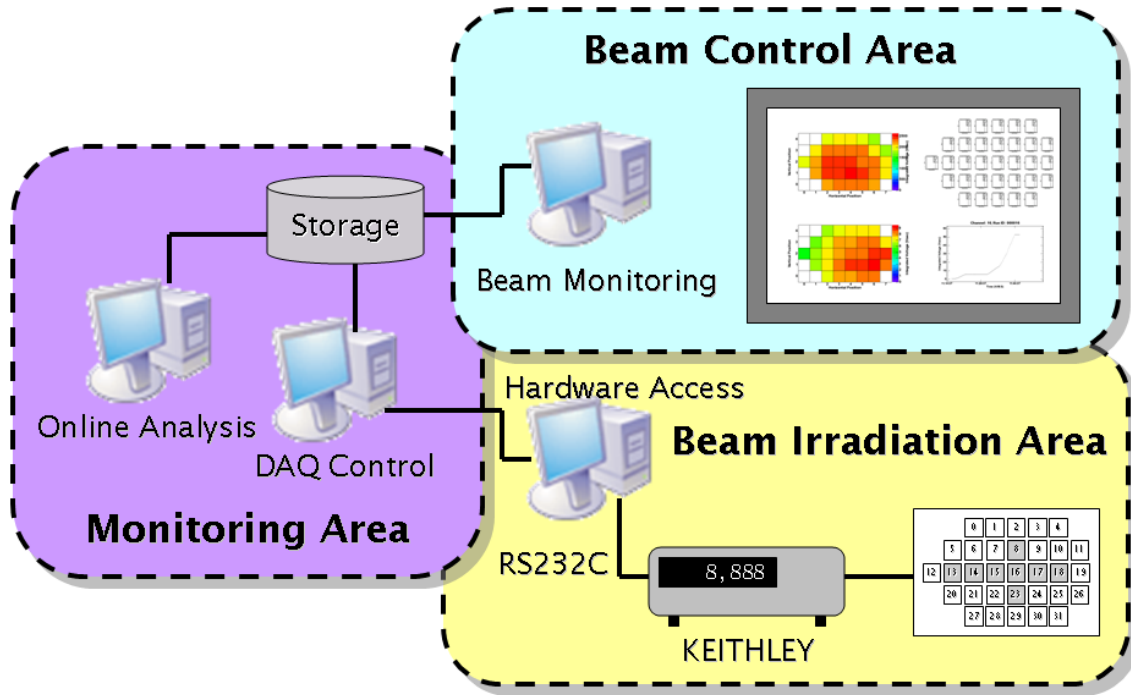


図 4.6 ビームテストでのネットワーク構成:ビームテストは Beam Control Area・Monitoring Area・Beam Irradiation Area の 3 エリアに分かれて実施された. 各エリアには PC が設置され, 各 PC はネットワークで接続されている. データは PC 間共有され, 各 PC でデータ収集・解析・モニタリングが行われた.

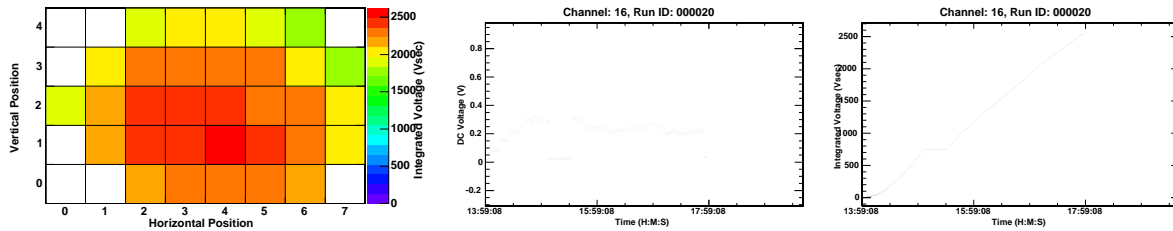


図 4.7 ビームプロファイルモニターの一例:各チャンネルの測定電圧に読み出し間隔をかけたものを積算した値を表示してある. 各マスは図 4.5(c) の配列に対応している. 中央と右の図はそれぞれ時刻に対する読み出し電圧と電圧に測定間隔をかけた積分値の関係図. どちらもチャンネル ID16(中心) のもの.(実験実施日:2003-10-20)

から積分値 (Vsec) から通過電子数 (e/cm^2) への換算係数が決定された.

単位面積あたりの通過電子数を σ としたとき

$$Q = \sigma \times S \times q \quad (4.4)$$

- Q : 積分値 1Vsec に必要な電子数
 S : PIN ホトダイオードの断面積
 q : 1 粒子あたりに発生する電子数

と書ける. 使用したマルチメーターは 100pA を 1mV に変換するため積分値 1Vsec に必要となる電荷量は 1×10^{-7} (C) であり, これを電子数に換算した Q の値は式 (4.5) から得ることが出来る.

$$Q = \frac{1 \times 10^{-7}(\text{C})}{1.6 \times 10^{-19}(\text{C}/e)} = 6.25 \times 10^{11}(e) \quad (4.5)$$

1 粒子あたりに発生する電子数 q は物質の密度を ρ , イオンホールペアを対生成するために必要なエネルギーを w , 物質の厚さを d としたとき, 式 (4.6) のように書ける.

$$q = \frac{\frac{dE}{dx} \times \rho}{w} \times d \quad (4.6)$$

シリコンの場合 $dE/dx, \rho$ および w の値はそれぞれ以下の値である. また今回使用したダイオードの厚さは $200\mu\text{m}$ (図 4.5(b)) であるから 1 粒子あたりに発生する電子数 q の値は 2.12×10^4 と求まる.

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dx} &: 1.664 \left(\frac{\text{MeV}}{\text{g}/\text{cm}^3} \right) \\ \rho &: 2.33 (\text{g}/\text{g}/\text{cm}^3) \\ w &: 3.65 (\text{eV}) \end{aligned}$$

ダイオードの断面積 $S = 1/4\text{cm}^2$ とここまでで求まった Q と q の値を式 (4.4) に代入することにより単位面積あたりの通過電子数 σ が求まる.

$$\sigma = \frac{Q}{S \times q} = \frac{6.25 \times 10^{11}}{1/4 \times 2.12 \times 10^4} = 1.18 \times 10^8 (e/\text{cm}^2) \quad (4.7)$$

キャリブレーションでスケーラー計測値とそのときの BPM の積分値から求めた換算係数は式 (4.7) から得た σ の値と全ての照射に於いて矛盾しなかった.

BPM のダイオードはペDESTALを持っており, 照射量を増やすごとに増加する. この量は無視できない値であったので, 照射の前後でペDESTALを測定するために電子線を照射しないで空読みを続けるペDESTALランを設けた. したがって CCD への電子線の照射は基本的には以下のサイクルで行われた.

1. キャリブレーションラン
2. 照射前のペDESTALラン
3. 照射ラン
4. 照射後のペDESTALラン

4.3.3 一様性

図 4.8 は 2003 年 10 月 20 日に CCD に対して $1 \times 10^{11} e/\text{cm}^2$ の電子線照射が行われたときの PIN ホトダイオードの積分値を水平転送方向・鉛直転送方向にスキャンした結果をプロットしたものである. ただし, ここで扱う水平方向・鉛直方向は CCD の読み出し方向という意味で, く, BPM でのダイオードの配列の方向ではない. BPM の水平方向は CCD の鉛直転送方向に相当する.(図 4.1 と 4.5 を参照)

これらのプロットから得られた結果に基づき CCD が BPM 3×3 の範囲 (図 4.5(c) の太線枠内) に設置されていたものとして CCD への照射の一様性は照射ごとに評価された. その結果, CCD の両端に於ける照射量の差は全照射に於いて 10% 以内であることが確認された. これらの一様性の評価結果については表 4.3 にまとめた.

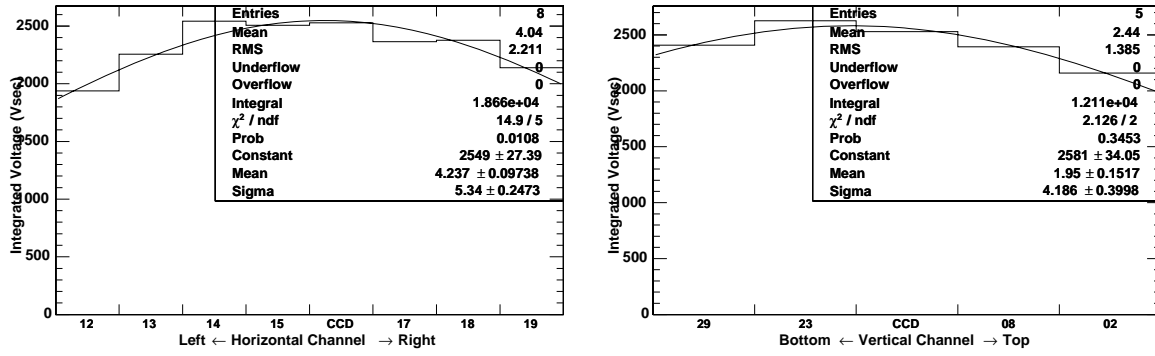


図 4.8 一様性の評価:(左) 水平方向 (チャンネル ID 12,13,14,15,16,17,18,19) の PIN ホトダイオードの積分値と各チャンネル ID の関係図 (右) 鉛直方向 (チャンネル ID 2,8,16,23,29) の PIN ホトダイオードの積分値と各チャンネル ID の関係図 (実験実施日:2003-10-20)

表 4.3 CCD(S/N:8-2B3N-1) への照射量の一様性の評価結果: 値は CCD 両端に於ける照射量の最大差である. 全照射に於いてその値は 10% 以内であった.

実験実施日	水平転送方向 (%)	鉛直転送方向 (%)
2003-07-08	9.1	5.2
2003-10-17	5.2	2.8
2003-10-20	5.6	3.0

4.3.4 照射量

取得データを元に CCD に対する電子線の照射量が求められた. オフラインの解析では照射の前後で行ったペダスタランから得たは各ダイオードのペダスタル値が照射量に比例して増加するものとして扱われた.

したがって n 回の測定点をもつ照射ランに於ける照射量合計 $I[\text{Vsec}]$ は式 (4.8) から得ることが出来る.

$$I = \sum_{i=0}^n dT_i \times (V_i - P_i) \quad (4.8)$$

dT : 読み出し間隔

V : 測定電圧

P : ペダスタル電圧

なお i 回目の測定に於ける測定間隔 dT_i およびペダスタル P_i はそれぞれ, 式 (4.9) と式 (4.10) から求めた.

$$dT_i = T_{i+1} - T_i \quad (4.9)$$

$$P_i = \frac{P_n - P_0}{n} \times i + P_0 \quad (4.10)$$

照射ランに於ける 3×3 チャンネル (図 4.5(c) の太線枠内) の測定間隔 dT を図 4.9 に示す. 測定間隔は全てのチャンネルでほぼ一定で 6.2 秒であった. この結果はマルチメータから取得するデータサイズと RS232C のボーレートの関係に矛盾せず, ランを通じて測定が正しく行われたことを示す.

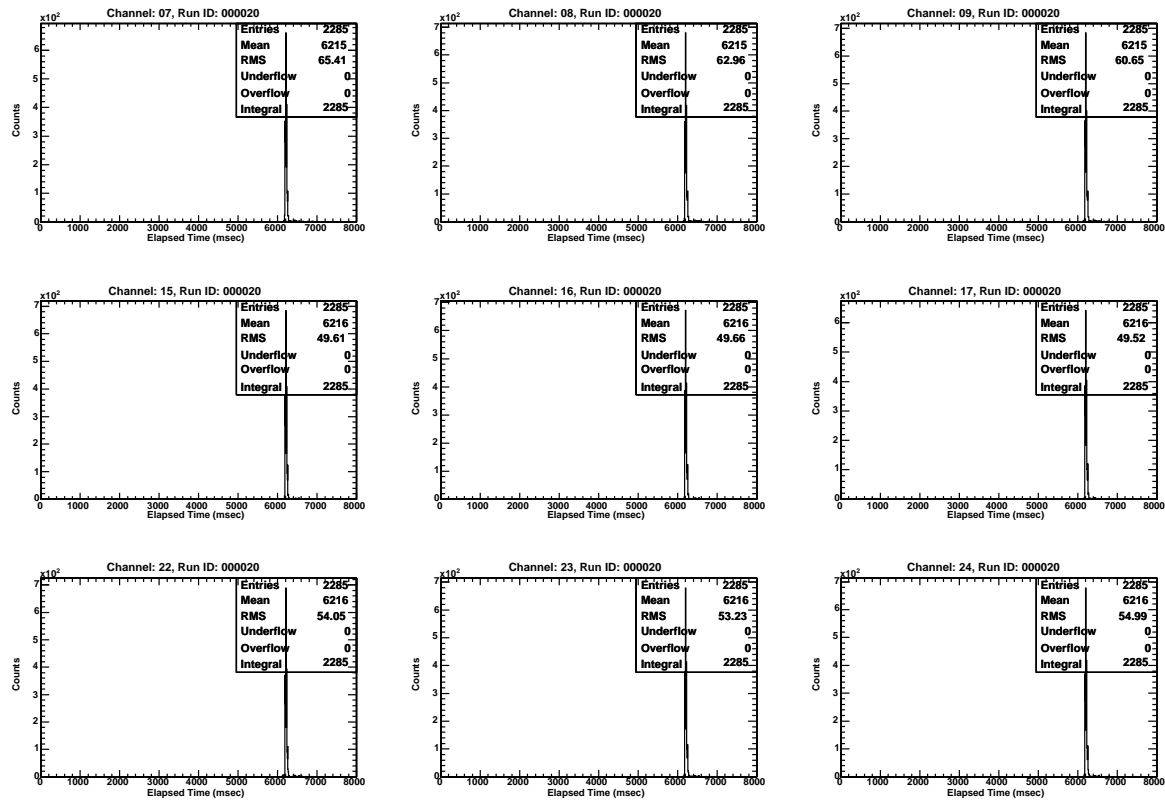


図 4.9 3 × 3 チャンネル分の測定間隔: 照射ランに於ける測定間隔 dT を全測定回数分プロットした. 全てのチャンネルで測定間隔は一定で 6.2 秒であった. (実験実施日:2003-10-20)

このようにして式 (4.8) から求められた電子線照射量に対する誤差の原因としては以下の 3 点が考えられる.

- タイムシェアリング方式に起因すると考えられる測定間隔のばらつき
- 測定電圧のノイズによるばらつき
- シンチレーションカウンターの位置とビームスポットのずれによる正しくない換算係数の設定

上記の要因のうち 3 番目の換算係数が誤差に対して最も大きく寄与すると考えるのが十分に妥当であることから照射量に対する誤差はシンチレーションカウンターは少なくとも 3 × 3 チャンネル (図 4.5(c) の太線枠内) の範囲には入っていたものとして中心のチャンネル (ID:16) からの読み出し値と最も大きくずれた値との差を誤差とした.

こうして求められた各回の合計照射量は RADFET [19] によるクロスチェックも行われた. 表 4.4 に照射量の評価結果をまとめた.

4.4 各特性量の測定

ここまでの内容を簡単にまとめたい.

同じ仕様の 2 枚の CCD に対して異なるエネルギーレンジの電子を照射した. 1 つ (S/N:4-2B3N-3) は ^{90}Sr による β 線照射で照射前, $0.6 \times 10^{11} e/\text{cm}^2$ 照射後, $1.0 \times 10^{11} e/\text{cm}^2$ 照射後, $2.0 \times 10^{11} e/\text{cm}^2$ 照射後の全 4 点で各

表 4.4 CCD(S/N:8-2B3N-1) への照射量の評価:ビームによる CCD への電子線照射は 3 回にわたって行われ, 電子のエネルギーはおよそ 150MeV であった. 特性量の測定は未照射の時点を含め計 4 点について行われた.

日付	照射電子数 (e/cm^2)	照射電子数合計 (e/cm^2)
2003-07-08	$0.98 \begin{pmatrix} +0.02 \\ -0.16 \end{pmatrix} \times 10^{11}$	$0.98 \begin{pmatrix} +0.02 \\ -0.16 \end{pmatrix} \times 10^{11}$
2003-10-17	$1.01 \begin{pmatrix} +0.06 \\ -0.10 \end{pmatrix} \times 10^{11}$	$1.99 \begin{pmatrix} +0.06 \\ -0.19 \end{pmatrix} \times 10^{11}$
2003-10-20	$3.11 \begin{pmatrix} +0.64 \\ -0.66 \end{pmatrix} \times 10^{11}$	$5.10 \begin{pmatrix} +0.64 \\ -0.69 \end{pmatrix} \times 10^{11}$

測定量の測定が行われた. もう 1 つ (S/N:8-2B3N-1) は 150MeV の電子線が照射され, 照射前, $1.0 \times 10^{11} e/cm^2$ 照射後, $2.0 \times 10^{11} e/cm^2$ 照射後, $5.0 \times 10^{11} e/cm^2$ 照射後の全 4 点で測定された.

これら全 8 点について, Dark Current, Flat-band Voltage Shift や CTI といった CCD の特性量測定が行われた.

4.4.1 セットアップ

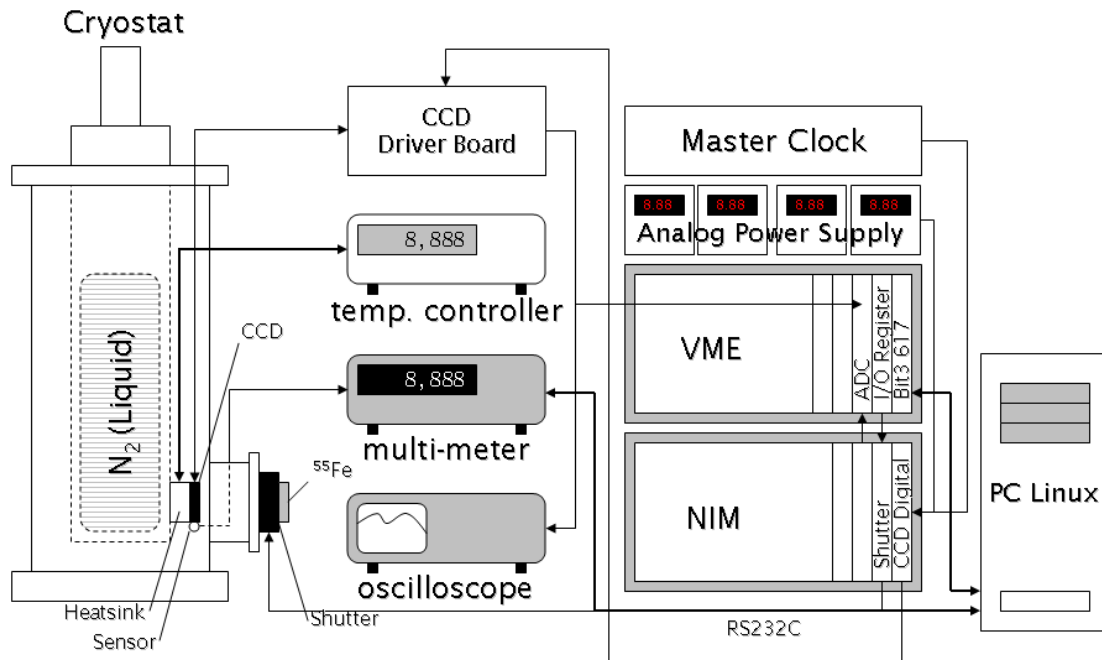


図 4.10 CCD 特性量測定のためのセットアップ: CCD はクライオスタットの中に納められており, 測定中の温度は一定に保たれながら行われた. CCD の信号電荷は Driver Board と VME Flash ADC を経由して PC に読み込まれる.

図 4.10 に示すとおり, CCD は Cryostat の中に納められており, 温度コントローラーと液体窒素でもって温度

を一定に保たれながら測定が行なわれる。CCD の基盤には白金センサーがとりつけられており、センサーの抵抗値をマルチメーターで測定し温度に換算することができる。測定は温度をモニターしながら行われた。CCD の前方にはシャッターが取り付けられており、さらに前方にはチェックソース ^{55}Fe 放射線源が取り付けられている。シャッターは VME-PCI controller(Bit3) と VME I/O Register を経由して PC からコントロールされる。

特性量の測定には主に Dark Current を求めるために行うダークランと CTI を求めるために行うソースランとがある。ダークランではラン中にシャッターが開くことはなく、空読みが行われる。対してソースランでは、シャッターが開いている間は ^{55}Fe の X 線が CCD に照射され、その間、VME~PC 間のデータ転送等の処理が行われ、閉じている間に CCD~ADC 間のデータ転送および AD 変換の処理が行われる。測定の処理手順については 4.4.2 で改めて議論する。ソースランではシャッターが開いている時間が CCD への電荷蓄積時間となるわけだが、今回は 2 秒以下となるように測定を行なった。ただし、ダークカレントの測定を行なう場合は蓄積時間を変化させて行なう。この理由については 4.6.1 で議論する。

4.4.2 測定回路とデータ収集のフロー

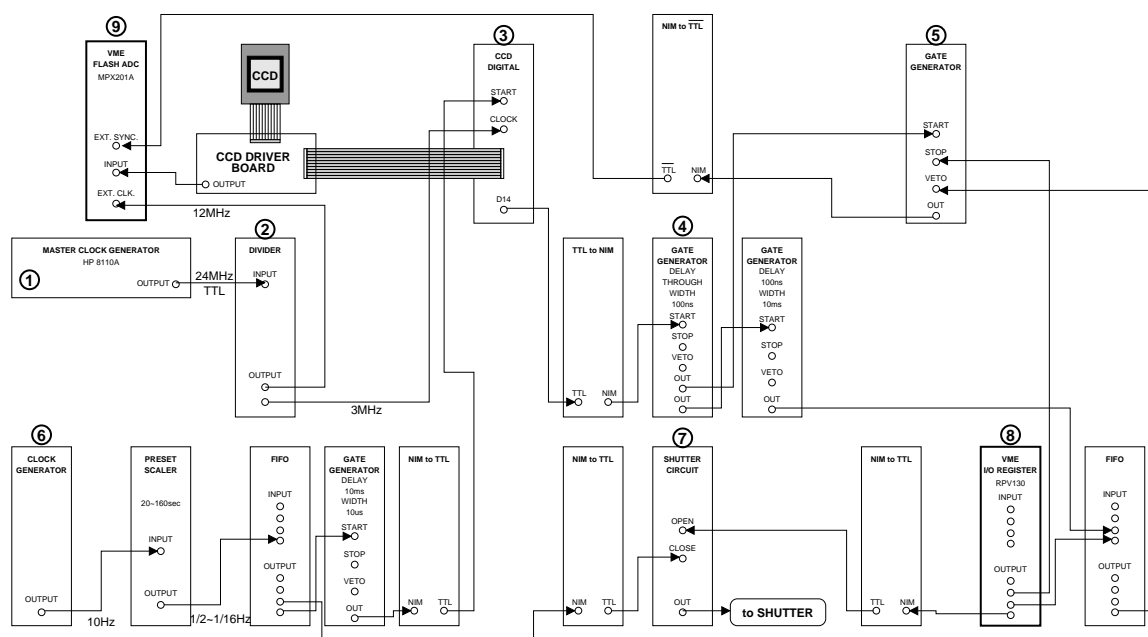


図 4.11 特性量測定のための回路図

図 4.11 に CCD 特性量を測定するための回路図を示した。MASTER CLOCK GENERATOR(①)により作られた 24MHz の TTL パルスは分周器 (②) により分周され一方は ADC(⑨) のサンプリングクロックに、もう一方は CCD DIGITAL モジュール (③) のクロックとなり CCD から信号を読み出すためのパルスとなる。このパルスを使用して CCD DRIVER BOARD によって読み出され増幅された CCD の信号電荷は ADC(⑨) に入力され AD 変換される。

ゲートやシャッター (⑦) を閉じるタイミングは CLOCK GENERATOR(⑥) と PRESET SCALER により作られる。可変周期 (2~16 秒) で発生するパルスは DIGITAL モジュール (③) を経由し GATE GENERATOR(⑤) のスタートとなる。即ちゲートの始まりとなる。細かいタイミング調整は GATE GENERATOR(④) の DELAY 調節により行われた。

シャッターを開くタイミング、VETO の解除 (⑤) やゲートを閉じるタイミング (⑥) は I/O REGISTER (⑧) によって制御される。

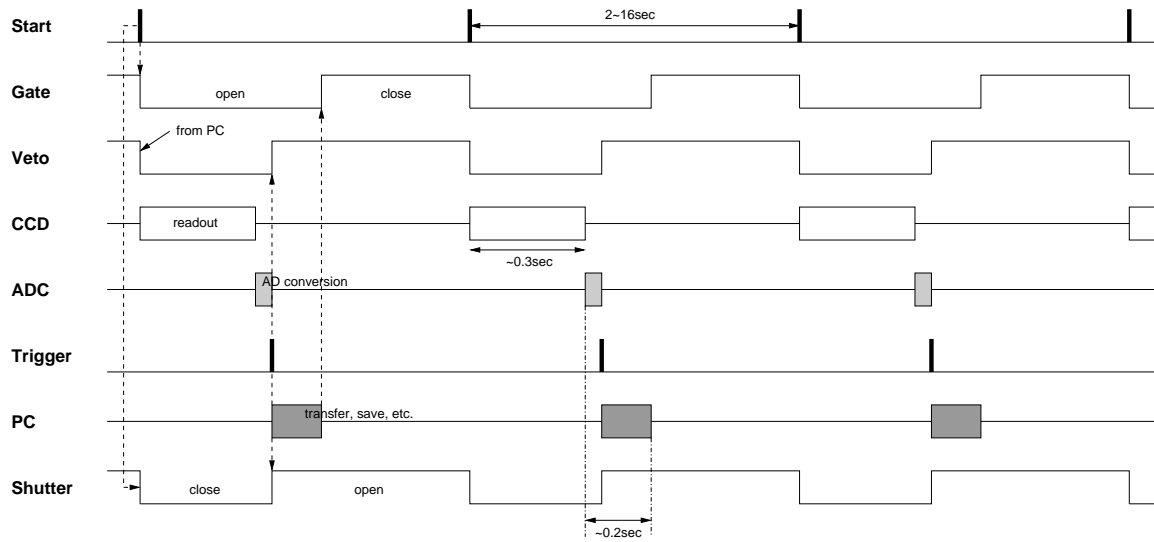


図 4.12 データ収集のタイミングチャート図

図 4.12 にはデータ収集のタイミングチャートを示した。可変周期 (2~16 秒) で発生する Start パルスにより Gate の open と Shutter の close が開始される。また同じタイミングで I/O レジスタで Veto の解除を行う。Gate が開いている間に CCD に蓄積された信号電荷は DRIVER BOARD によって読み出され ADC に転送される。ADC に転送された信号電荷は AD 変換される。Start パルスからこの AD 変換が終了するまでの時間は 0.3 秒程度である。ADC 内部で AD 変換が終わった時点で Trigger が発生し、Veto がかけられ、シャッターが open し、PC に AD 変換されたデータが読み込まれ保存される。ここで行われる PC による処理に必要なとされる時間は 0.2 秒程度である。この処理が終わり次第、Gate は close され、再び Start パルスが発生するまでシャッターの open が続く。

ここではソースランを例にとって説明したがダークランの場合も Shutter が close のままであること意外は基本的にフローは同じである。

4.5 データ収集システム

本研究を実施するにあたってデータ収集システムの構築は最も重要な課題のひとつであった。実験実施に先だって実験グループの DAQ に関する目的レベルでのユースケースが収集された。これをまとめた結果を表 4.5 に示す。^{*2}

表 4.5 に示したユースケースを元に DAQ に必要とされる機能要件が抽出された。これらを実現するためには各測定に特化したアプリケーション・ソフトウェアが必要不可欠であったが、マンパワーは少なく開発期間も短いという条件下でこれを実現することは極めて困難であった。そこでこうした問題を解決するための手段として KONOE プロジェクト [20] での経験を元に汎用データ収集ソフトウェア基盤 (CLDAQ – a Class Library for Data Acquisition [21]) が提案され、開発された。

図 4.13 はより高品位の DAQ システムを素早く、簡単に開発するために提案されたソフトウェアモデルを階層

^{*2} 一般的なユースケースには他にアクタやシナリオ等の項目があるがここでは特に重要ではないので省略した。

表 4.5 DAQ に関するユースケース

ユースケース	目的	事前条件
ビームテストを行う (1)	電子のエネルギーを測定する	読み出しデバイスには CAMAC 規格に準ずるモジュールを使用する。
ビームテストを行う (2)	CCD に対して電子を照射する	読み出しデバイスには RS232C を経由するモジュールを使用する。
CCD からデータを取得する	CCD の特性量を測定する	読み出しフォーマットは複数種類ある。 読み出しデバイスには VME 規格に準ずるモジュールを使用する。
温度センサーからデータを取得する	CCD の温度を測定する	読み出しデバイスには RS232C を経由するモジュールを使用する。
収集データの入出力を行う	保存された収集データの解析を行う	保存先や通信手段を限定してはいけない。 解析のためのソフトウェアを限定してはいけない。 解析の条件は頻繁に変更される。
入出力データのフィルタリングを行う	データの圧縮・解凍やカット	可逆なものと非可逆なものがある。 優先順位という概念が必要。
入出力データの可視化を行う	理解しやすい形でのデータの表示	可視化のためのソフトウェアを限定してはいけない。 可視化すべきデータや内容は頻繁に変更される。

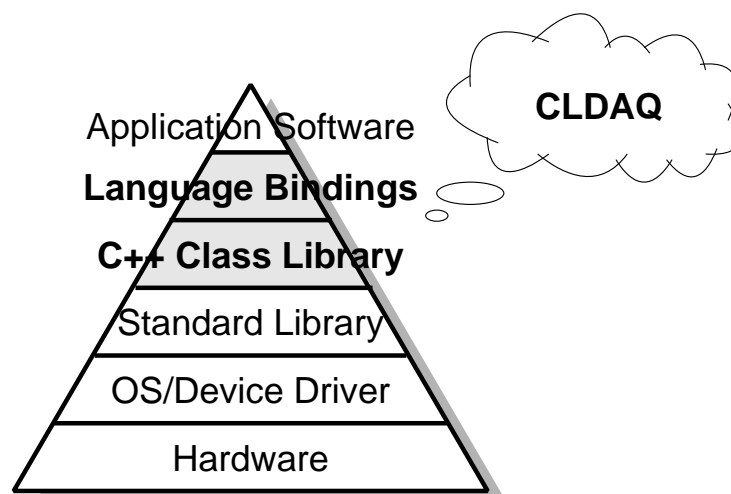


図 4.13 ユースケース分析を元に抽出された機能要件を実現するために提案されたソフトウェアモデル: 上位階層になるほど自然言語に近く人間が触れる機会が多くなる。CLDAQ は Standard Library と Application Software の中間層に位置する。

化して示したものである。当然のことながら例外は存在するが一般に上位階層になるほど自然言語に近く人間が触れる機会が多くなる。CLDAQ は Standard Library と Application Software の中間層に位置し、DAQ システム構築に必要となる機能・部品・フレームワークなどを提供する。

一度作成してしまえば二度と書き換える必要のない箇所に関しては Class Library 層から直接 Application Software の開発を行い、頻繁に変更要求のある解析やデータ可視化といったソフトウェアに関しては Language Bindings 層からスクリプトによる Application Software の開発を行う。

汎用 DAQ システム基盤 CLDAQ は安定したソフトウェアを低コストで開発することを実現し、また本研究で行われたデータ収集・解析は全てこの CLDAQ に基づいて行われた。

CLDAQ の技術的情報や性能等の詳細に関しては付録 B に記載した。

4.6 測定結果

2 枚の CCD に対してそれぞれ 4 点、合計 8 点において特性量測定が行われた。

- 4-2B3N-3(^{90}Sr による β 線が照射された CCD)
 1. 0 (e/cm^2) (未照射)
 2. $6.0 \pm 0.2 \times 10^{11}$ (e/cm^2)
 3. $1.0 \pm 0.2 \times 10^{11}$ (e/cm^2)
 4. $2.0 \pm 0.3 \times 10^{11}$ (e/cm^2)
- 8-2B3N-1(BEAM による高エネルギー電子線が照射された CCD)
 1. 0 (e/cm^2) (未照射)
 2. $0.98 \begin{pmatrix} +0.02 \\ -0.16 \end{pmatrix} \times 10^{11}$ (e/cm^2)
 3. $1.99 \begin{pmatrix} +0.06 \\ -0.19 \end{pmatrix} \times 10^{11}$ (e/cm^2)
 4. $5.10 \begin{pmatrix} +0.64 \\ -0.69 \end{pmatrix} \times 10^{11}$ (e/cm^2)

4.6.1 Dark Current

ダークカレントは通常単位時間あたりに CCD のピクセルから出力される電子数 ($e/\text{pixel}/\text{cm}^2$) で表現される。

したがってダークカレントを求める測定では、測定間隔 (ゲート開始パルスの周期または PRESET SCALER の設定値) を変化させ空読みを行う。図 4.14(a)~(e) ではそれぞれ 10 フレームの空読みを行い、行ごとに H.O.C から求めたゼロレベルの平均値を信号部の ADC チャンネルからひいた値を横軸にプロットし、ダークカレントの平均値を求めている。求めた ADC チャンネルの平均値と測定間隔の関係図が図 4.14(f) である。このプロットを 1 次でフィッティングし勾配を求めることにより、単位時間あたりに 1 ピクセルから出力されるダークカレントの ADC チャンネル平均値 ($\text{channel}/\text{pixel}/\text{sec}$) が求まる。その後、チャンネル数から電子数への変換を行う必要があるのだが、使用される換算係数の導出方法については 4.6.3 で議論する。

このようにして求めたダークカレントと温度の関係図を図 4.15 に示す。図 4.15(a) が ^{90}Sr による β 線 ($<2.28\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3) の結果で、図 4.15(b) がビームによる高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) の結果である。それぞれ丸いプロットが未照射、三角のプロット

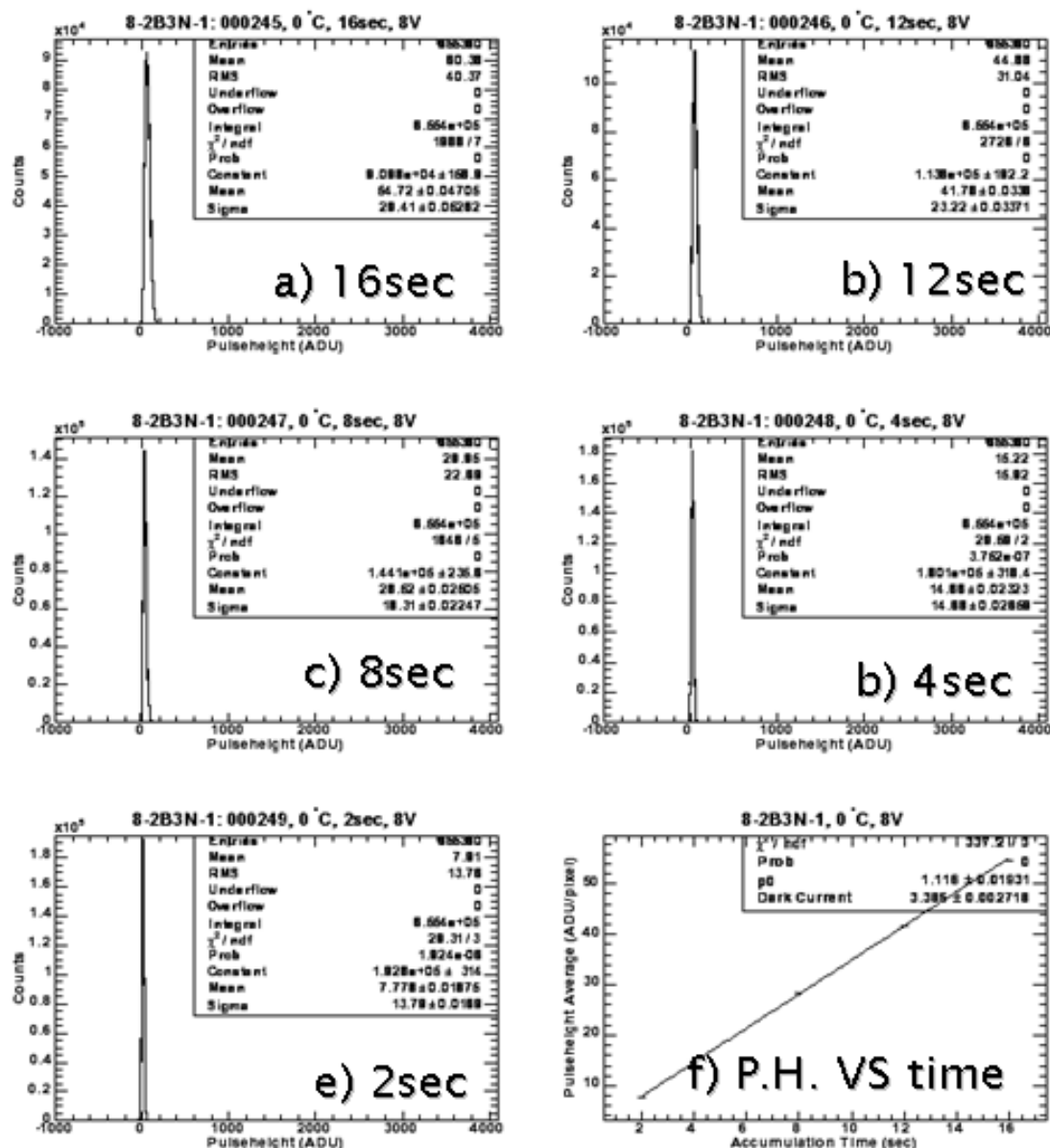


図 4.14 Dark Current の導出の例:(a)~(e) 空読みを 10 フレーム繰り返し取得したデータの ADC チャンネルを横軸にとったヒストグラム. 測定間隔はこの例では (a)16 秒,(b)12 秒,(c)8 秒,(d)4 秒,(e)2 秒に設定. (f) ダークカレントの平均値 (ADC チャンネル) と測定間隔の関係図. 1 次でフィッティングを行いその勾配がダークカレントとなる.

が $1.0 \times 10^{11} (e/cm^2)$ 照射, 星形のプロットは $2.0 \times 10^{11} (e/cm^2)$ 照射したときの測定結果である.

ダークカレントは熱雑音が回路に於ける電氣的雑音を上回りはじめる -40°C 付近から急激に増大する. 図 4.15 からも確認できるとおり等しい照射量で比較したときダークカレントは β 線を照射した場合に比べて, ビームを照射した時のほうが明らかに大きな値として観測された. この測定は Vertical Shift Register へ 8V の電圧を印可することにより MPP モード (付録 A) と呼ばれる CCD の表面から発生するダークカレントを極少にするような駆動方式で行われ, なおかつ本研究で使用した CCD サンプルは埋め込みチャンネル型であるため Surface Damage の影響は極めて小さいと考えられる. したがってダークカレント発生原因の大部分は Bulk

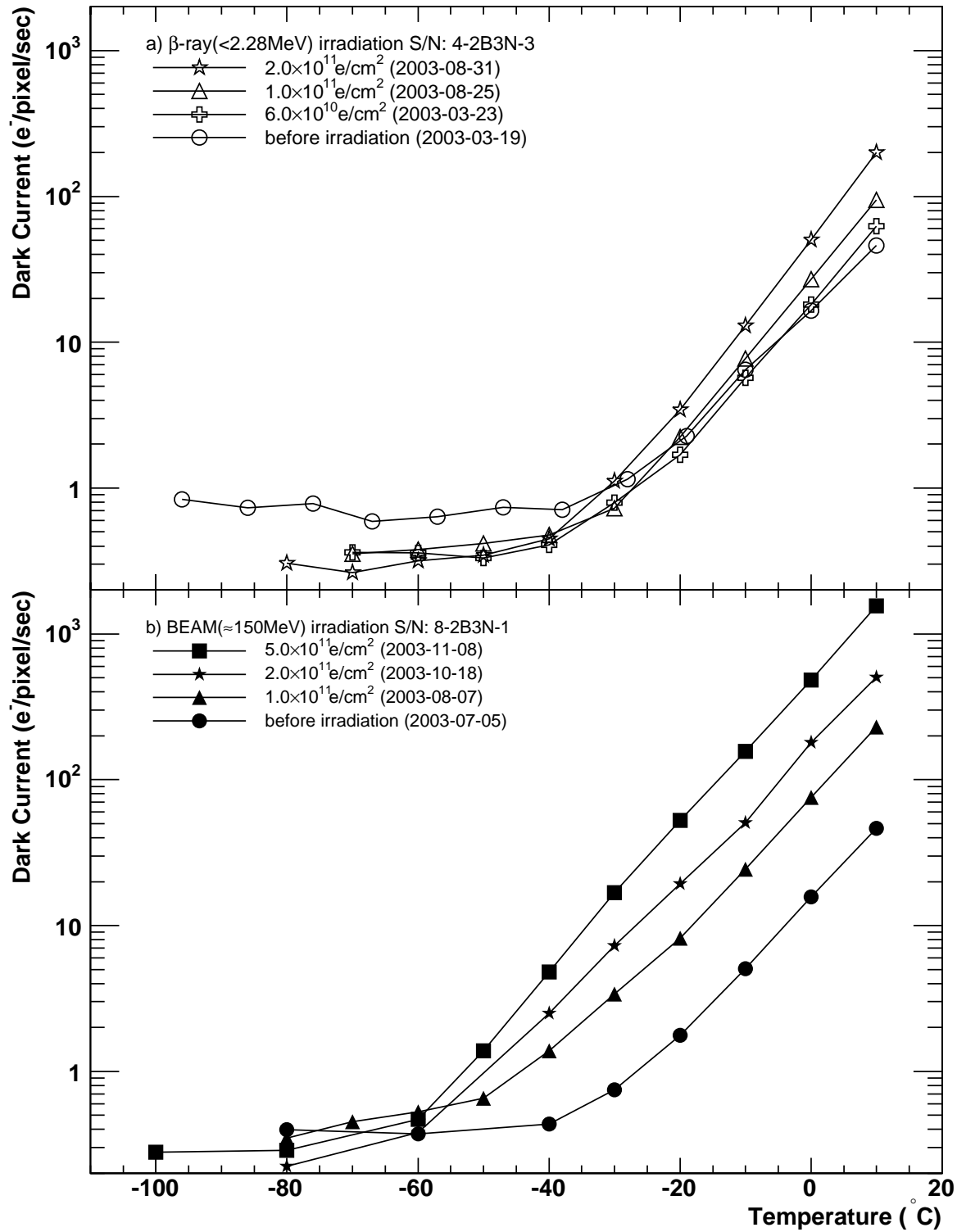


図 4.15 Dark Current と測定温度の関係図: (a)⁹⁰Sr による β 線 (<2.28MeV) を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3) (b) ビームによる高エネルギー電子線 (≈150MeV) を照射した CCD(S/N:8-2B3N-1)

Damage によるものだと考えられることから、電子による Bulk Damage が CCD のダークカレントに及ぼす影響にはエネルギー依存性があることが示され、この結果は [16, 17] に矛盾しない結果であると言える。

4.6.2 Flat-band Voltage Shift

ダークカレントと Vertical Shift Register への印加電圧の関係を図 4.16 に示す。図 4.16(a) が ^{90}Sr による β 線 ($<2.28\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3) の結果で、図 4.16(b) がビームによる高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) の結果である。それぞれ丸いプロットが未照射、三角のプロットが $1.0 \times 10^{11}(\text{e}/\text{cm}^2)$ 照射、星形のプロットは $2.0 \times 10^{11}(\text{e}/\text{cm}^2)$ 照射したときの測定結果である。

ダークカレントの導出方法は 4.6.1 で議論した方法と同じで、温度を -20°C に固定し駆動電圧を変化させて同様の測定を行った。いずれの CCD も 7V 付近で急激にダークカレントが減少し $\sim 10^{-3}$ 倍程度抑制されることが確認できる。この電圧が MPP モード境界電圧である。Surface Damage の影響で Si-SiO₂ 境界面にホールが蓄積されるため電子の照射量を増やすと境界電圧が高い方向へシフトしていくがシフト電圧の変化は図 4.16(a) と図 4.16(b) を比較すると共に 0.5V 程度で、Surface Damage には照射電子のエネルギー依存性が見られなかった。これにより Surface Damage は dE/dx に比例して起こる現象であるという理論は実験的に証明された。

なお、Vertical Shift Register 印加電圧を変化させるのは、この測定を行なう時だけで、通常は 8V が印可されるように運転装置は設計されている。

4.6.3 CTI

第 2 章 (2.3.2) で議論したとおり CTI とは、1 電荷転送あたりの電荷を失う割合を示す量であり、 n 回の転送により、初期電荷量 Q_0 が Q として検出された場合、CTI は

$$CTI = 1 - \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^{\frac{1}{n}}$$

として定義される。以下に CTI を決定するための解析手順を示す。

1. まず、ダークランによりピクセルごとにダークカレントの平均値を求める。(1 フレームの平均ダークカレントである 4.6.1 で議論した導出方法とは違う) CCD からの出力は Horizontal Over Clock(H.O.C.) 領域からの出力をゼロレベルとしているため 1 行ごとに H.O.C. の平均値を求め Signal 領域からの出力から引いてやる。

1 行分のデータフォーマットを図 4.17 に示す。したがって座標 (H, V) から検出された信号を $Q(H, V)$ としたときのピクセル (H, V) に於けるダークカレント $Q_{\text{DARK}}(H, V)$ は以下のように書ける。

$$Q_{\text{DARK}}(H, V) = Q(H, V) - \overline{\text{H.O.C.}(V)}$$

2. 1. の結果からピクセルごとに Root Mean Square(RMS) を求める。座標 (H, V) の RMS $\delta(H, V)$ は以下のように書ける。

$$\delta(H, V) = \sqrt{\sum \delta_i(H, V)^2} \quad ; \quad \delta_i(H, V) = Q_i(H, V) - Q_{\text{DARK}}(H, V)$$

3. 2. の結果からバッドピクセル判定を行う。バッドピクセルの定義を以下に示す。

- $\delta(H, V)$ の値が 30 チャンネル以上のピクセル

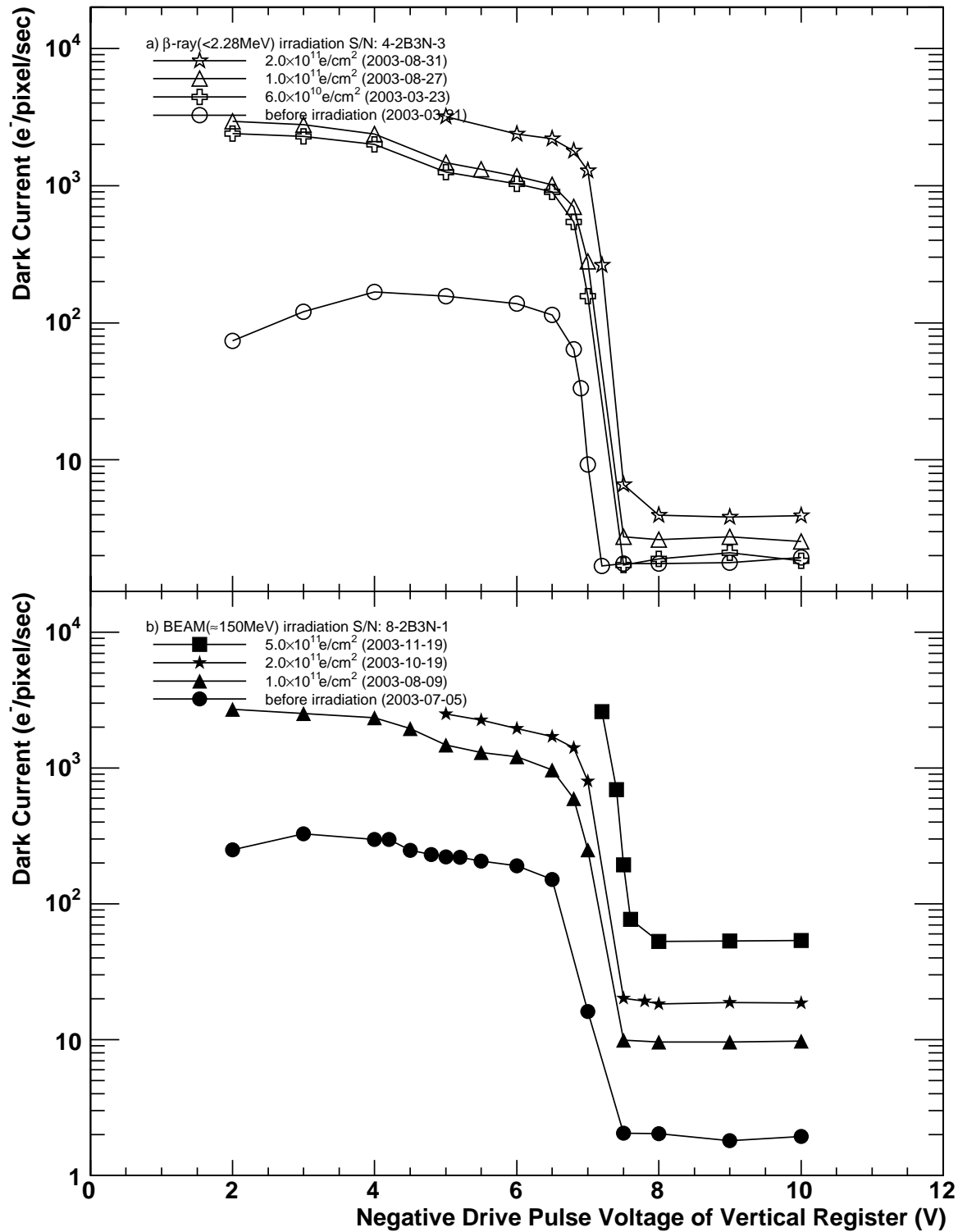


図 4.16 ダークカレントと Vertical Shift Register への印加電圧の関係図: (a) ^{90}Sr による β 線 (<2.28MeV) を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3) (b) ビームによる高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:8-2B3N-1)

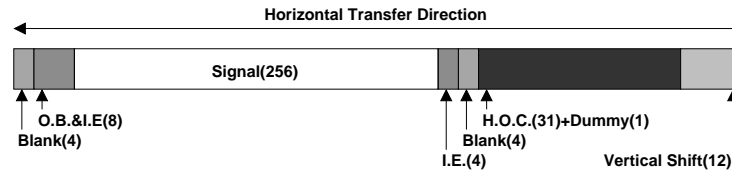


図 4.17 CCD から読み出されたデータの 1 行分のデータフォーマット

- 測定回数の半分以上がオーバーフローまたはアンダーフローしているピクセル
4. ソースランを行いシングルピクセルイベントの選定を行う. シングルピクセルイベントとは ^{55}Fe の X 線 (5.9KeV) が全てエネルギーを落としたピクセルのことである. 以下にシングルピクセルイベントの判定条件を示す.
 - (ダークカレントの平均値 $+20\sigma$) 以上のパルスハイトを持つピクセル
 - 周囲 8 ピクセルが (ダークカレントの平均値 $+3\sigma$) 以上のパルスハイトを持たない
 - 周囲 8 ピクセルと自分自身がバッドピクセルでない
 5. 4. で得られたシングルピクセルイベントを図 4.18(b) のように 16 ピクセルごとに鉛直座標に応じて 16 の領域に分割し, 図 4.18(c) のように横軸に ADC チャンネル数をとった 16 のヒストグラムを作成する. 転送回数が多いほど (座標 V の値が大きいほど) CTI の影響でシングルピクセルイベントは小さな値として計測される.

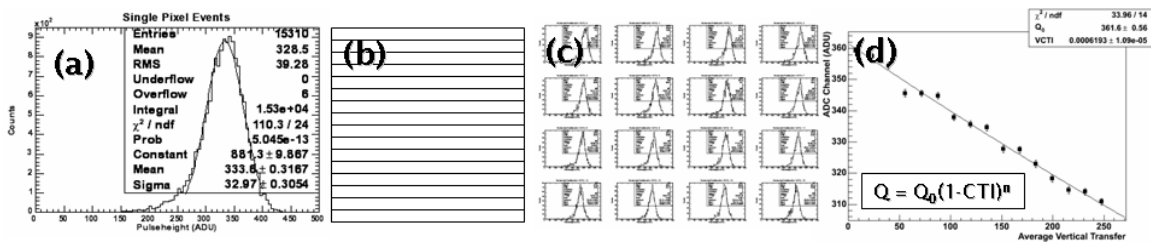


図 4.18 CTI の導出例: (a) シングルピクセルイベントのヒストグラム. (b) 鉛直座標に応じて 256 行を 16 領域に分割する. (c) 領域ごとのシングルピクセルイベントのヒストグラムを作成し中心値を求める. (d) ADC チャンネル数と鉛直方向の転送回数の依存関係. このプロットをフィッティングし CTI を導出する.

6. 図 4.18(c) より求められた各領域に於けるシングルピクセルイベントの ADC チャンネル数平均値を縦軸に転送回数を横軸にプロットし, $Q = Q_0(1 - CTI)^n$ でフィッティングを行うことにより CTI を求める. (図 4.18(d))
7. シングルピクセルイベントは ^{55}Fe の X 線 (5.9KeV) がひとつのピクセルで全吸収されたイベントである. 図 4.18(a) の中心値 (349ch) はこのときシリコン中で生成される電子 1620 個に相当する値であるから, この測定条件の結果に対しては $4.6(e/\text{ch})$ を換算係数として Dark Current の導出 (4.6.1) に使用される.

上述した解析手順にしたがって, Vertical CTI と測定温度の関係を図 4.19 に示す. 図 4.19(a) が ^{90}Sr による β 線 ($<2.28\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3) の結果で, 図 4.19(b) がビームによる高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) の結果である. それぞれ丸いプロットが未照射, 三角のプロットが $1.0 \times 10^{11}(e/\text{cm}^2)$ 照射, 星形のプロットは $2.0 \times 10^{11}(e/\text{cm}^2)$ 照射したときの測定結果である.

等しい照射量で比較したとき, β 線を照射した場合に比べてビームを照射した時のほうが 2 ~ 3 倍大きな値の CTI が観測された. 4.6.1 でも触れたが Surface Damage が CTI に与える影響は極めて小さいと考えられるため CTI の差が Bulk Damage の差であり, 照射電子のエネルギー依存性を示す.

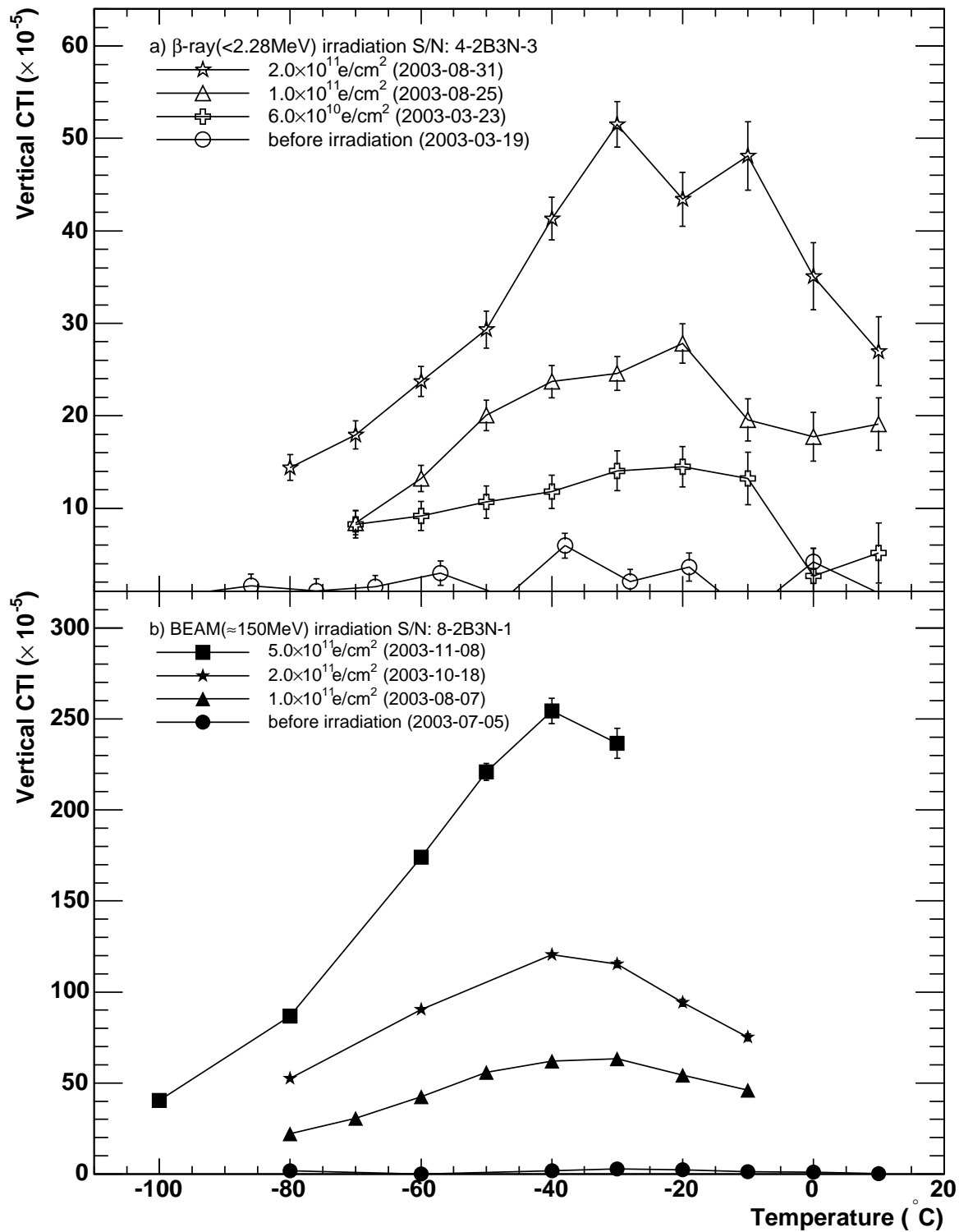


図 4.19 Vertical CTI と測定温度の関係図: (a) ^{90}Sr による β 線 (<2.28MeV) を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3) (b) ビームによる高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:8-2B3N-1)

なお、どちらの結果も -40°C 付近にピークがあり温度が高くなるほど CTI が改善するように見えるが、これは -40°C 以上で急激に増加するダークカレント (図 4.15) と読み出し速度に起因するものである。CTI 発生のメカニズムについては第 5 章で改めて議論する。

4.6.4 Dark Current Pedestal

単位時間あたりに CCD のピクセルから出力される電子数 ($e/\text{pixel}/\text{cm}^2$) として表現されるダークカレントは蓄積時間に比例して増加する。したがって蓄積時間が 0 の時、原理的にはダークカレントも 0 となるべきである。これは 4.6.1 で議論したダークカレント導出の過程で 1 次の式でフィッティングを行った場合、切片が 0 になることと動議である。ところが、浜松ホトニクス社製 CCD を MPP モードで駆動した場合のみ、誤差の範囲で説明のつかない切片が観測された。これを Dark Current Pedestal(DCP) と呼ぶ。

DCP と温度の関係図を図 4.20 に示す。図 4.20(a) が ^{90}Sr による β 線 ($<2.28\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3) の結果で、図 4.20(b) がビームによる高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) の結果である。それぞれ三角のプロットが $1.0 \times 10^{11}(e/\text{cm}^2)$ 照射、星形のプロットは $2.0 \times 10^{11}(e/\text{cm}^2)$ 照射したときの測定結果である。等しい照射量で比較したとき、 β 線を照射した場合に比べてビームを照射した時のほうが大きな DCP を持つ。

DCP は Si-SiO₂ 境界面に蓄積されたホールが駆動時に再加速されることにより発生した電子が原因であると考えられる。

4.6.5 Hot pixel

ダークカレントに対して明らかに大きなパルスハイトを持つピクセルをホットピクセルと呼ぶ。ホットピクセルの出現はこれまで中性子や陽子といった重い粒子を照射した場合のみ観測された [9]。

本研究で高エネルギー電子線を照射したところ、これまで電子による放射線損傷では観測されなかったホットピクセルが観測された。ダークカレントの分布図を図 4.21 に示す。斜線で描かれたものは β 線を照射したもので無地で描かれたものは高エネルギー電子線を照射したものである。左から順に -10°C , 0°C , 10°C 、上から順に未照射、 $1.0 \times 10^{11}(e/\text{cm}^2)$ 、 $2.0 \times 10^{11}(e/\text{cm}^2)$ を照射したときのダークカレントである。

高エネルギー電子線を照射した場合のみホットピクセルが観測され、照射量が増えるほど、測定温度が高くなるほどその数が増加することが図 4.21 から確認できる。

ダークカレント分布のピーク値から 5σ 離れたチャンネル Q_{HOT} 以上のパルスハイトを持つピクセルをホットピクセルと定義し、ホットピクセルの分布図を図 4.22 に示す。

$$Q_{\text{HOT}} = Q_{\text{PEAK}} + 5\sigma$$

図 4.22 から高エネルギー電子線を照射した CCD で大量のホットピクセルが出現したことが確認できる。うっすらと縦縞のようなものが見えるがこの原因はまだわかっていない。

CCD1 フレームに対するホットピクセルの割合の読み出し周期と温度依存性を図 4.23 に示す。左の図は 10°C での測定結果で右の図は 2 秒周期で測定を行ったときの結果である。どちらの図も黒抜きのプロットが高エネルギー電子線を照射したもので白抜きのプロットが β 線を照射したもので、三角のプロットは $1.0 \times 10^{11}(e/\text{cm}^2)$ 照射したもので、星形のプロットは $2.0 \times 10^{11}(e/\text{cm}^2)$ 照射したものである。

β 線の照射では全体の 1% 以下であったホットピクセルが高エネルギー電子線を照射した場合では全体の 20 ~ 70% ものピクセルがホットピクセル化し、またその割合は温度と蓄積時間へ依存することが確認された。

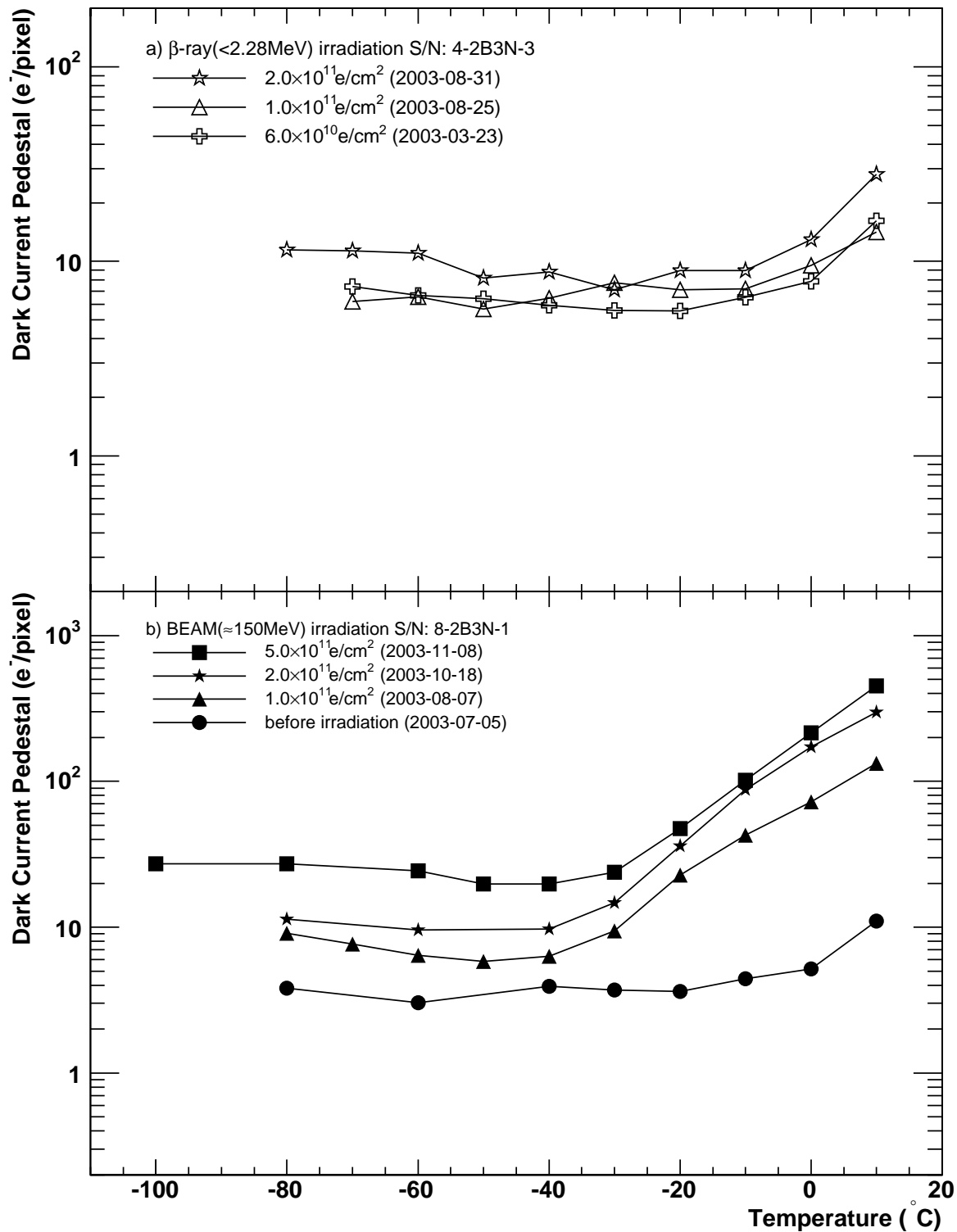


図 4.20 ダークカレントペデスタルと温度の関係図: (a) ^{90}Sr による β 線 (<2.28MeV) を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3) (b) ビームによる高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を照射した CCD(S/N:8-2B3N-1)

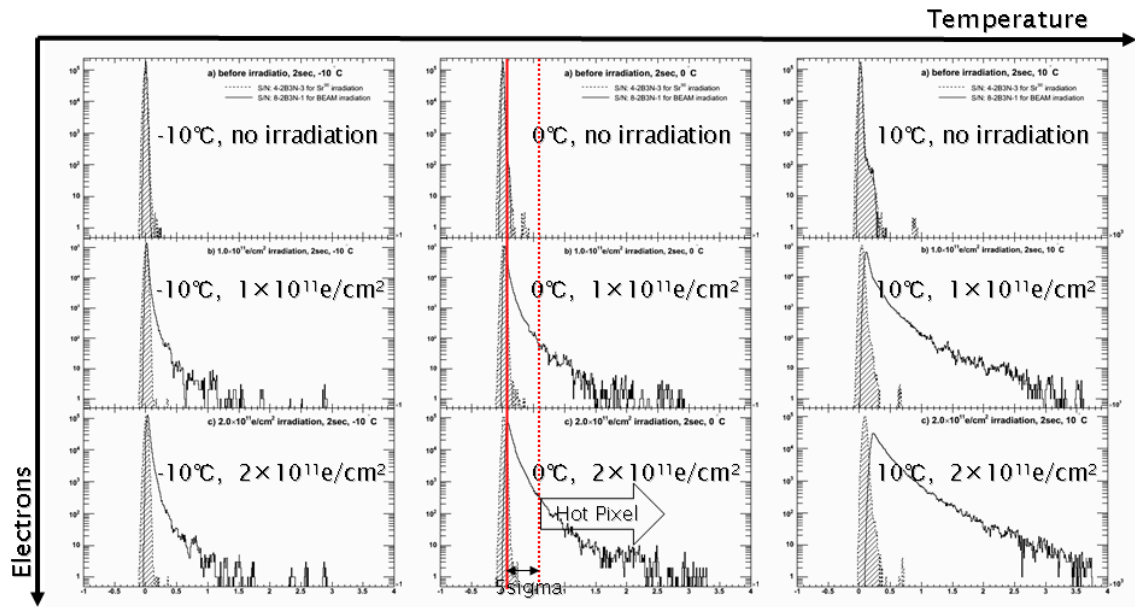


図 4.21 ダークカレントの分布図:斜線が β 線を照射したもので無地が高エネルギー電子線を照射したもの. 左から順に -10°C , 0°C , 10°C , 上から順に未照射, $1.0 \times 10^{11} (\text{e}/\text{cm}^2)$, $2.0 \times 10^{11} (\text{e}/\text{cm}^2)$ を照射したもの. 各分布図の縦軸はログスケールで表示してある.

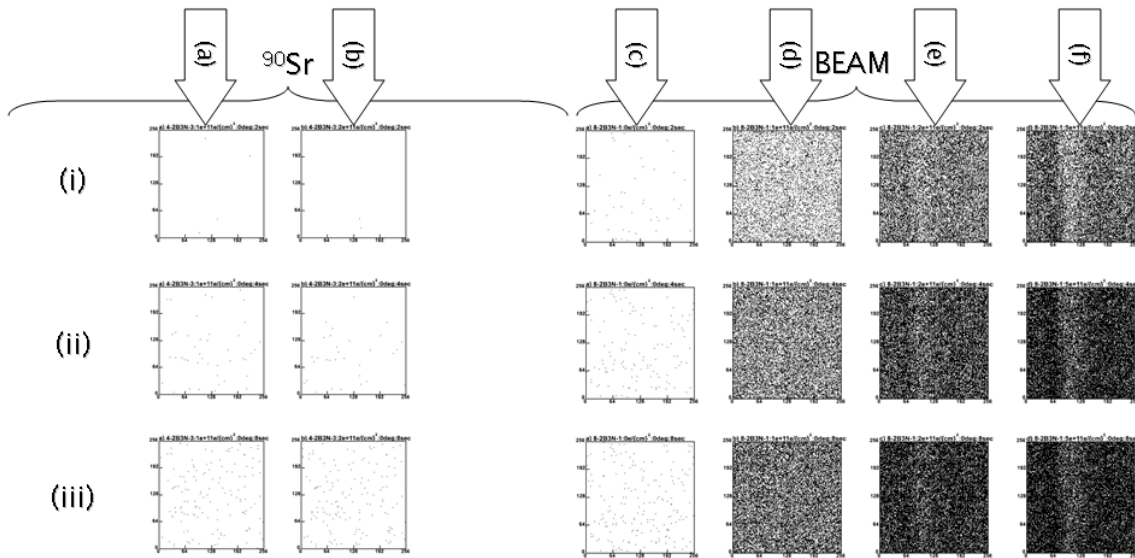


図 4.22 ホットピクセルの分布図: ホットピクセルと判定されたピクセルを黒で表示してある. (a)(b) の列は共に β 線を照射したもので, 照射量は (a) $1.0 \times 10^{11} (\text{e}/\text{cm}^2)$ (b) $2.0 \times 10^{11} (\text{e}/\text{cm}^2)$ (c)(d)(e)(f) の列は高エネルギー電子線を照射したもので照射量は (c) 未照射 (d) $1.0 \times 10^{11} (\text{e}/\text{cm}^2)$ (e) $2.0 \times 10^{11} (\text{e}/\text{cm}^2)$ (f) $5.0 \times 10^{11} (\text{e}/\text{cm}^2)$ (i)(ii)(iii) の行はそれぞれ (i) 2 秒 (ii) 4 秒 (iii) 8 秒周期で測定した.

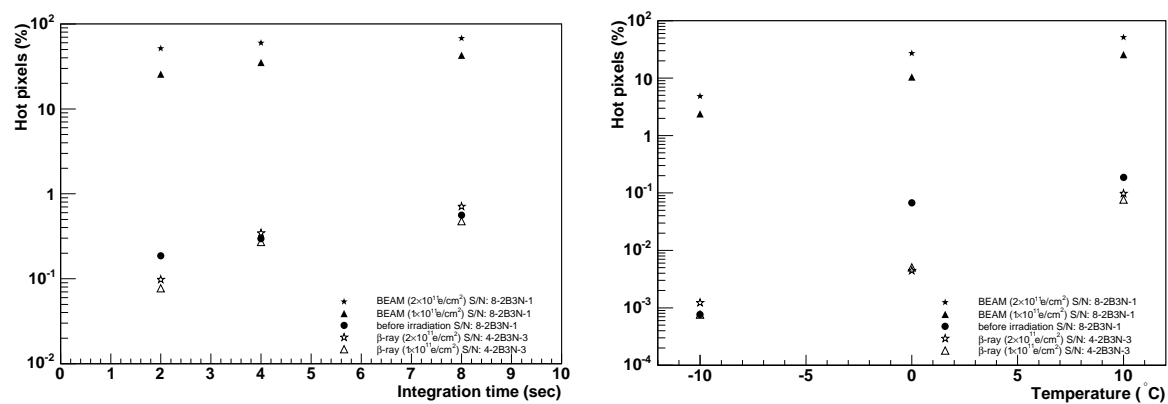


図 4.23 (左) ホットピクセルの割合と読み出し周期の関係図:測定温度は 10°C (右) ホットピクセルの割合と温度の関係図:読み出し周期は 2 秒

第5章

Radiation Damage Model

前章では CCD の電子による放射線損傷の影響を測定するために ^{90}Sr を線源とした β 線と高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を照射した同じ仕様の 2 枚の CCD を使用し, 各照射ごとに行った特性量の測定結果を示した. その結果, 高エネルギー電子線によってダメージを与えた CCD では等しい照射量で比較した場合, 著しく大きな影響が観測された.

本章では CCD 中での放射線損傷の発生メカニズムを明らかにし, 今回の測定で得られた結果について議論する.

5.1 電荷転送とトラップと CTI

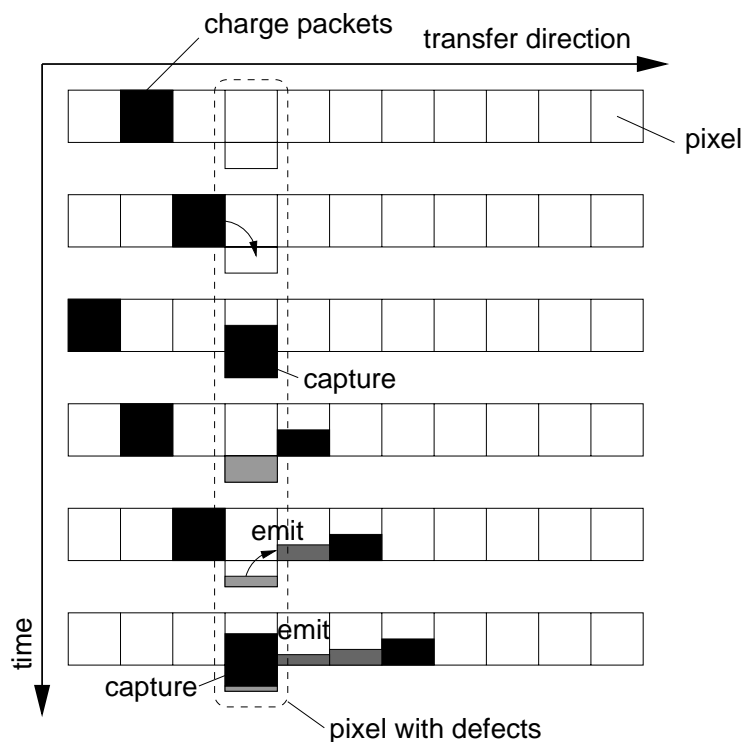


図 5.1 信号電荷が転送中にトラップに遭遇するとある確率で捕獲され, 信号電荷の一部を失い真の信号よりも小さくなる. また, トラップされたその電子は時間が経過すると解放されるため, あるピクセルの信号は真の値より大きな信号をもつことになる.

空のトラップが存在するピクセルを信号電荷が通過するとき、信号電荷が捕獲され、CTI 増加の原因になると同時に熱励起された電子、すなわち暗電流増加の原因になることは既に第3章で触れた。図5.1はその様子を簡単に示したものである。トラップは信号電荷の捕獲・解放、両方の原因になる。

信号電荷が捕獲・解放されるタイムスケール τ_c, τ_e について考える。これは Shockley-Read-Hall モデル [11] で与えられる。

$$\tau_c = \frac{1}{v_t n \sigma} \quad (5.1)$$

ここで、 v_t は電子の熱速度、 n は自由電子密度で σ は電子の捕獲断面積である。一方、トラップを埋めている電荷が解放されるタイムスケール τ_e は

$$\tau_e = \frac{1}{v_t N_c \sigma} \exp\left(\frac{E_c - E_t}{kT}\right) \quad (5.2)$$

- N_c : 伝導帯の状態密度
- E_c : 伝導帯の下端のエネルギー
- E_t : トラップのエネルギー
- k : ボルツマン定数
- T : 絶対温度

で与えられる。トラップ密度を N_t とすれば式 (5.1), (5.2) から時間あたりのトラップを満たしている電子密度 n_t の変化量として式 (5.3) が求まる。

$$\frac{\Delta n_t}{\Delta t} = \underbrace{\frac{N_t - n_t}{\tau_c}}_{\text{capture}} - \underbrace{\frac{n_t}{\tau_e}}_{\text{escape}} \quad (5.3)$$

1 転送の間に発生する転送モデルを図5.2に示した。ダークカレントを含む信号電荷 N_s の転送について考える。この信号電荷はトラップが n_t 存在するピクセルから隣のトラップ密度 N_t のピクセルに転送されようとしている。(図5.2(1)) 転送前に信号電荷のいくつかがトラップに捕獲され、いくつかの電子がトラップから解放される。これは隣のピクセルでも起こる。(図5.2(2)) 信号電荷は隣のピクセルに転送され、熱励起されたダークカレントと合流する。(図5.2(3)) 以上を繰り返すことによって信号電荷の量に増減が観測される。

時間あたりのトラップ中の電子密度 n_t が求まったので、これを踏まえて改めて CTI について考えていく。

トラップ占有率を $r \equiv n_t/N_t$ としたとき、占有率の変化量は

$$\frac{dr}{dt} = (1 - r) \frac{1}{\tau_c} - \frac{r}{\tau_e} \quad (5.4)$$

$$= -\left(\frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau_e}\right)r + \frac{1}{\tau_c} \quad (5.5)$$

ここで簡単のため、 $\alpha = 1/\tau_c$, $\beta = \alpha + 1/\tau_e$ とおいて、

$$\frac{dr}{dt} = -\beta r + \alpha \quad (5.6)$$

$$= -\beta \left(r - \frac{\alpha}{\beta}\right) \quad (5.7)$$

$$y = r - \frac{\alpha}{\beta} \quad (5.8)$$

とすれば式 (5.7) は式 (5.9) のように書ける。

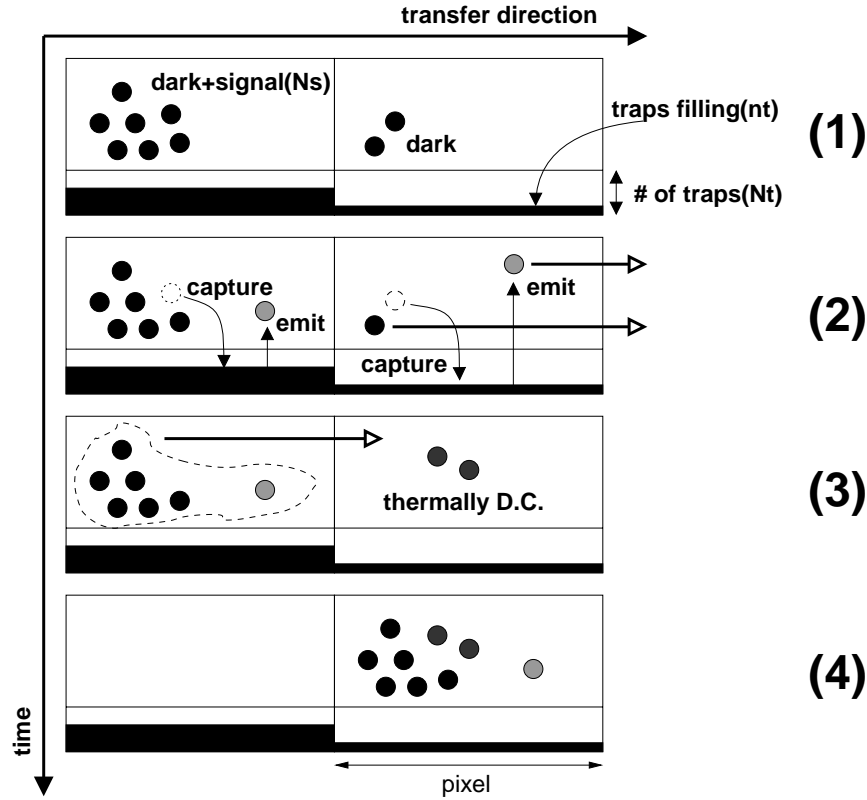


図 5.2 電荷転送モデル:(1) 信号電荷がダークカレントの滞在するピクセルへ移動しようとしている.(2) 転送前に捕獲・解放が起こる.(3) 転送先では熱励起されたダークカレントがすでに存在している.

$$\frac{dy}{dt} = -\beta y \quad (5.9)$$

式 (5.9) を解くと

$$y = \exp(-\beta t + \text{const.}) \quad (5.10)$$

を得る. $t = 0$ のとき $y = y_0 = r_0 - \alpha/\beta$ とすれば,

$$y = y_0 e^{-\beta t} \quad (5.11)$$

$$r - \frac{\alpha}{\beta} = \left(r_0 - \frac{\alpha}{\beta}\right) e^{-\beta t} \quad (5.12)$$

$$r = \left(r_0 - \frac{\alpha}{\beta}\right) e^{-\beta t} + \frac{\alpha}{\beta} \quad (5.13)$$

となる. したがって N_s の信号電荷が 1 回転送され, ピクセル中のトラップ占有率が r' から r に変化するとき CTI は式 (5.14) であらわされる.

$$CTI \equiv \frac{N_t}{N_s} (r' - r) \quad (5.14)$$

ここで今回使用した駆動方式を振り返る. 今回使用した CCD は 2-phase 駆動方式である. この駆動方式を採用した場合の 1 回の vertical transfer を図 5.3 に示す.

図 5.3 には 3 つのピクセルが描かれているが, 真ん中のピクセルにある信号電荷がひとつ隣の右側のピクセルに転送されるまでを時系列に表現されている. 各時刻のトラップ占有率を早い時間から順にそれぞれ

を得る. 式 (5.15) (5.16) (5.17) (5.18) (5.19) から $VCTI$ はトラップ占有率 r_B と信号電荷の捕獲確率 τ_c 及び, 解放確率 τ_e を用いて式 (5.20) のように書くことが出来る.

$$VCTI = \left(r_B - \frac{\alpha}{\beta} \right) (\exp\{-2\beta(t_H n_H + t_V)\} - 1) \quad (5.20)$$

5.2 CTI Improvements

ここで, ここまでの議論を振り返る.

本研究では CCD からの信号電荷は 250kHz で読み出された. これは 1 ピクセルあたり $4\mu\text{m}$ で読み出されることを意味するが, 1 回の鉛直転送は多くの水平転送の時間を含むため信号電荷は非常に長い時間 ($\sim 1\text{ms}$) ピクセルに滞在する.(図 5.3)

一方, 転送中に格子欠陥を持つピクセルに遭遇した時, 信号電荷がトラップされるタイムスケール τ_c は式 (5.1) で表される. これより本研究で使用した CCD に於ける τ_c は温度によらず $\sim 100\text{ns}$ と見積もることができ [14]. 即ち, 空のトラップに遭遇した信号電荷は必ずトラップされることを意味する.

次に式 (5.2) で表されるトラップされた電子が解放されるためのタイムスケール τ_e について考える. τ_e は温度とトラップのエネルギーの関数である. 格子欠陥の生成過程にもるが本研究で使用した CCD に於ける τ_e の値は -100°C で $0.5 \sim 1.0\text{s}$, -40°C で $0.4 \sim 2.0\text{ms}$, 0°C で $10 \sim 80\mu\text{s}$ 程度の値をとる. 温度が高くなるにしたがって τ_e は鉛直方向の転送時間 (1ms) に近づき, 空トラップが増加し CTI 増大の原因となる. ($-100 \sim -40^\circ\text{C}$ 付近) さらに温度が上がると当然のことながら空トラップはさらに増えるが熱励起されたダークカレントによりトラップはすぐに埋められてしまうため, 見かけ上は CTI が改善されるように観測される.

ここまで実際の CCD に照らし合わせて CTI 発生メカニズムを論じてきたがこれらの議論は CTI の改善に効果あると思われるいくつかのアプローチを導く.

1. トラップを既知の電子であらかじめ埋めてやり空のトラップを減らす.
2. τ_c より高速に読み出し信号電荷のピクセル滞在時間を短くする.
3. 低温駆動で τ_e を十分に長くとることにより空のトラップを減らす.

このうち, 1. の方法を用いて CTI の改善を試みたので次節以降で議論する.

5.2.1 Fat-zero Charge Injection

トラップを既知の電子であらかじめ埋めてやることにより空のトラップを減らし, CTI の改善を試みた. 既知の電子を Fat-zero charge と呼ぶ.

5.2.2 セットアップ

Fat-zero charge injection のために特性量測定のためのセットアップが若干, 変更された.(図 5.4) 基本的には図 Dec 5 05:05:02 2005 と同じセットアップであるが, シャッターと CCD の間に LED(図 5.4(b)) が設置された.(図 5.4(c)) LED の光量はアナログ電源により管理され, 測定中一様な光が CCD に対して照射される. これにより CCD には一様に信号電荷以外の電荷, 即ち Fat-zero charge が蓄積される.

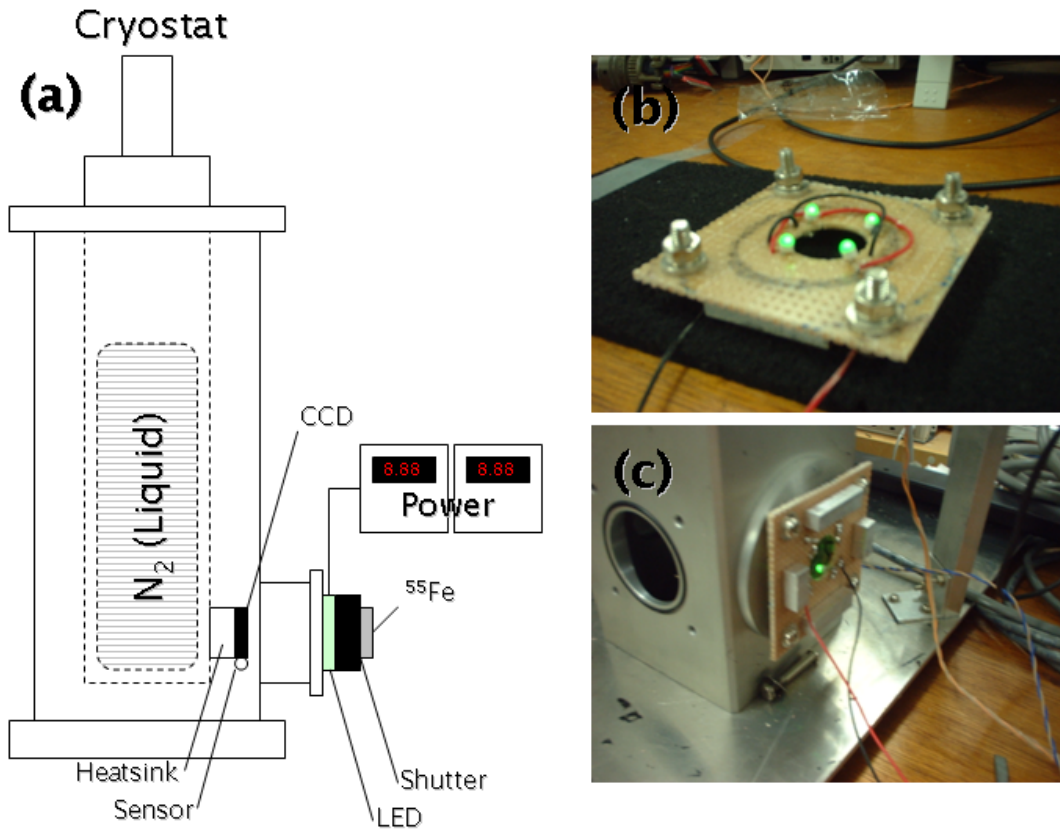


図 5.4 Fat-zero Charge Injection のためのセットアップ: (a) 基本的には図 Dec 5 05:05:02 2005 と同じセットアップであるが、シャッターと CCD の間に LED が設置され測定中、CCD には一様な光が照射される。 (b,c) 設置された LED。LED の光量はアナログ電源により管理された。

5.2.3 測定結果

高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を $5.0 \times 10^{11}(\text{e}/\text{cm}^2)$ 照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) に光を照射しながらダークランを行った結果を図 5.5(左) に示す。四角のプロットは光なしの測定結果でダークカレントである。これとの差分が Fat-zero charge と捉えることができるから、三角のプロットは $200\text{e}/\text{pixel}$ 、丸のプロットは $500\text{e}/\text{pixel}$ 、星のプロットは $1400\text{e}/\text{pixel}$ の Fat-zero charge が生成されたことになる。

LED による光を照射しながら行ったソースランの結果を図 5.5(右) に示す。Fat-zero charge なしのときに比べて、CTI の改善が確認でき、Fat-zero charge の量が多いほど CTI はより改善され、 -40°C 時、最大で 5.6 倍改善された。これにより Fat-zero Charge Injection が CTI の改善に有効な手段であることが実証された。

高エネルギー電子線を $5.0 \times 10^{11}(\text{e}/\text{cm}^2)$ 照射した CCD の CTI 改善率を表 5.1 にまとめた。

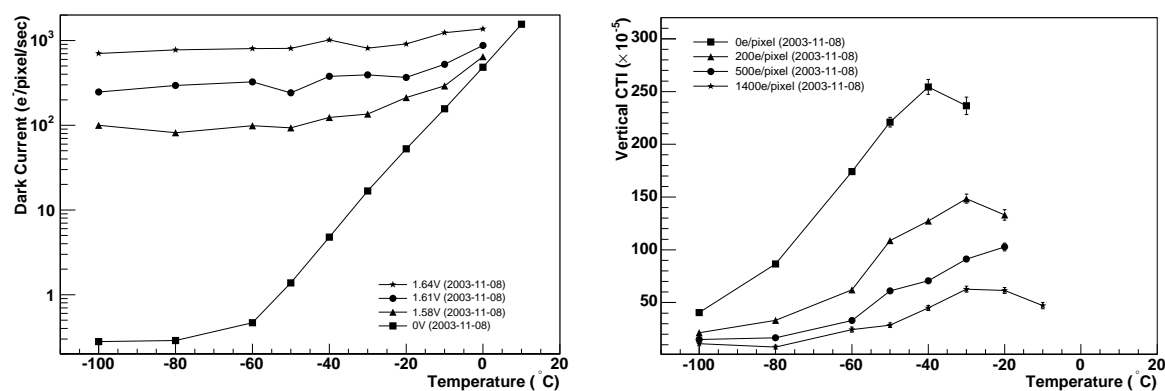


図 5.5 (左) ダークカレントと温度の関係図: 光源を設置したときのダークランを行った. あらかじめ測定してあるダークカレントを差し引いたものが Fat-zero charge となる.(右)Vertical CTI と測定温度の関係図: 高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) を $5.0 \times 10^{11}(\text{e}/\text{cm}^2)$ 照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) に光を照射しながら測定を行った.

表 5.1 Fat-zero charge injection による性能改善率: 結果は全て $5 \times 10^{11} \text{e}/\text{cm}^2$ を照射した CCD(S/N-2B3N-1) によるものである.

温度 (°C)	Fat-zero (e/pixel)	VCTI _{BEAM} ($\times 10^{-5}$)	VCTI/VCTI _{no fat-zero} (%)
-60	0	174±3	100
-60	200	62.0±1.7	36±1
-60	500	32.9±1.6	19±1
-60	1400	24.4±2.4	14±1
-40	0	254±7	100
-40	200	127±2	50±2
-40	500	70.7±2.0	28±1
-40	1400	44.9±2.3	18±1

第 6 章

結論

本章ではこれまでの議論を元に電子による CCD への放射線損傷の影響を結論する。

6.1 NIEL の評価

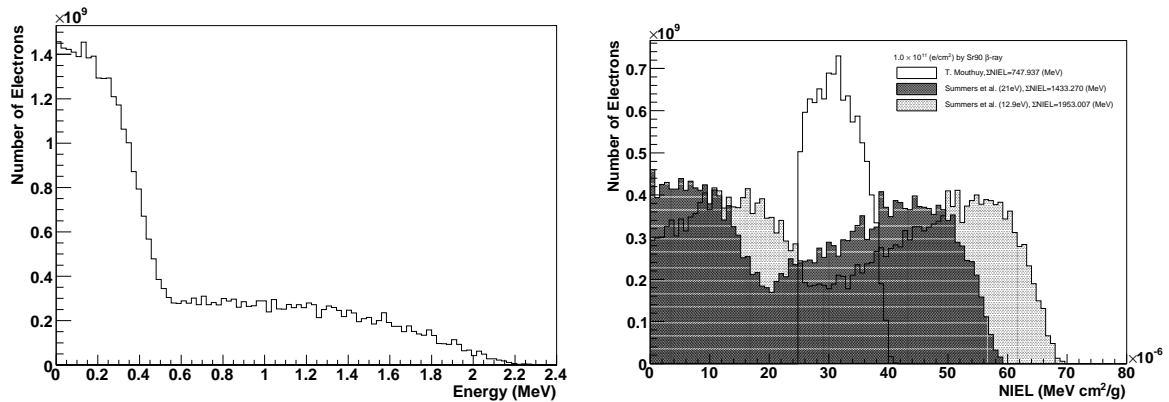


図 6.1 (左) ^{90}Sr による β 線の $1.0 \times 10^{11} (e/\text{cm}^2)$ に相当するエネルギー分布図 [22] (右) 左図の分布と NIEL の各モデルから求まる $1.0 \times 10^{11} (e/\text{cm}^2)$ に相当する NIEL の分布図

^{90}Sr は ^{90}Y に崩壊し, ^{90}Y は ^{90}Zr に崩壊する. 半減期は $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$ が 28.8 年で $^{90}\text{Y} \rightarrow ^{90}\text{Zr}$ が 64 時間である. また電子の最大エネルギーはそれぞれ 0.546MeV と 2.28MeV である. この線源を使用して CCD(S/N:4-2B3N-3) に $1.0 \times 10^{11} (e/\text{cm}^2)$ 照射したときの β 線のエネルギー分布を図 6.1(左) に示す.

この分布と第 3 章 (3.3.2) で図 3.3 に示した各モデルによる NIEL の分布を図 6.1(右) に示す. これより各モデルによる NIEL の積算値を求めた結果を表 6.1 にまとめた.

表 6.1 ビームと β 線によるシリコン中での NIEL の積算値: 数値は $1.0 \times 10^{11} (e/\text{cm}^2)$ 照射時の値を使用してある.

	T. Mouthuy	Summers (21eV)	Summers (12.9eV)
BEAM (MeV)	10541	14318	15196
^{90}Sr (MeV)	747	1433	1953
BEAM/ ^{90}Sr	14.1	9.99	7.78

6.2 電子のエネルギーの違いによる特性量の比較

6.2.1 CTI

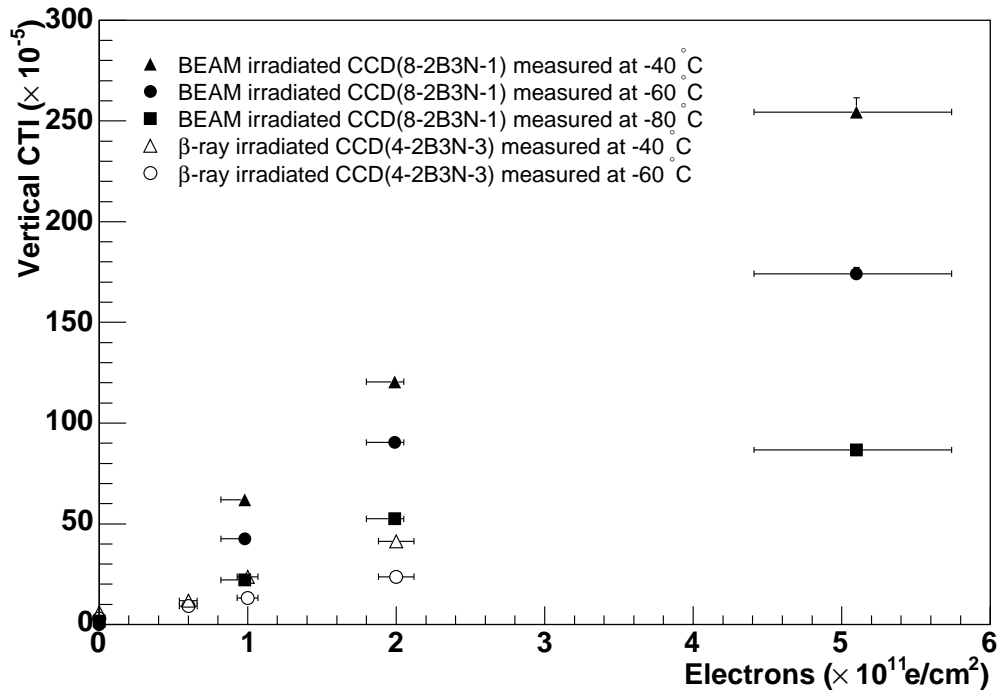


図 6.2 Vertical CTI と電子照射量の関係図: ^{90}Sr による β 線を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3), ビームを照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) の測定結果をプロットしてある. 測定条件は 8-2B3N-1 が -40°C , -60°C , -80°C で 4-2B3N-3 が -40°C , -60°C の結果を使用した.

Vertical CTI と電子照射量の関係図を図 6.2 に示す. β 線を照射した CCD の CTI に比べてビームを照射した CCD の CTI は 2.6 ～ 3.2 倍大きな値として観測された. この結果を表 6.2 にまとめる.

表 6.2 ^{90}Sr ($<2.28\text{MeV}$) による β 線と BEAM による高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) が Vertical CTI へ与える影響

温度 ($^\circ\text{C}$)	照射量 (e/cm^2)	BEAM ($\times 10^{-5}$)	β -ray ($\times 10^{-5}$)	$\text{VCTI}_{\text{BEAM}}/\text{VCTI}_{\beta\text{-ray}}$
-60	1.0×10^{11}	42.5 ± 1.0	13.2 ± 1.4	3.22 ± 0.35
-60	2.0×10^{11}	90.4 ± 1.4	29.3 ± 1.9	3.09 ± 0.22
-40	1.0×10^{11}	61.9 ± 1.0	23.7 ± 1.7	2.61 ± 0.20
-40	2.0×10^{11}	120.5 ± 1.6	41.3 ± 2.3	2.92 ± 0.17

6.2.2 ダークカレント

ダークカレントと電子照射量の関係図を図 6.3 に示す. β 線を照射した CCD の Dark Current に比べてビームを照射した CCD の Dark Current は 2.9 ～ 4.7 倍大きな値として観測された. この結果を表 6.3 にまとめる.

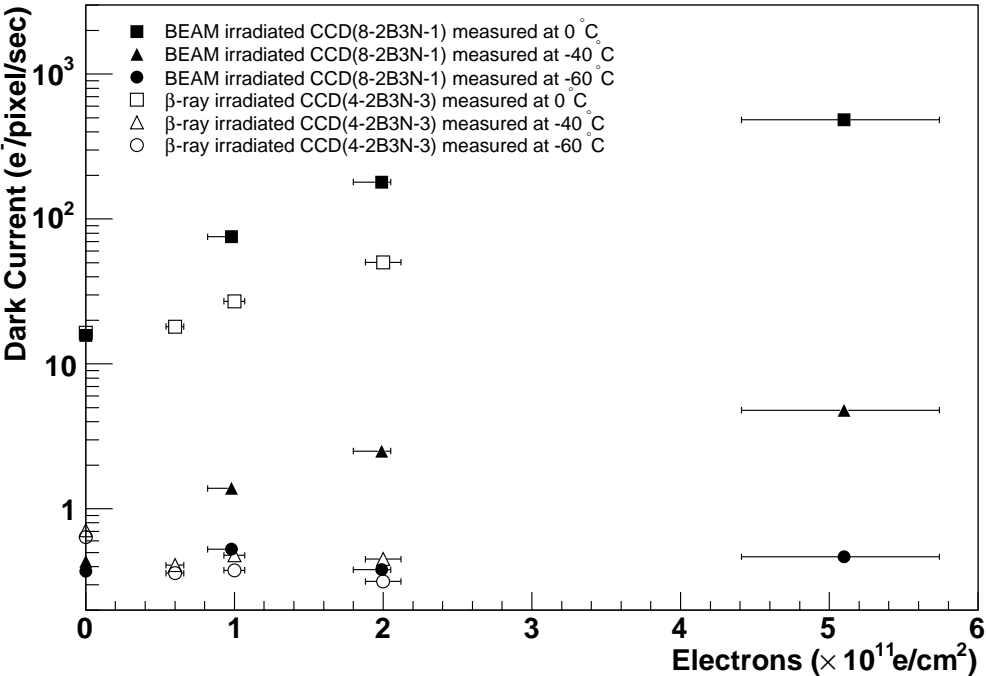


図 6.3 ダークカレントと電子照射量の関係図: ^{90}Sr による β 線を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3), ビームを照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) の測定結果をプロットしてある. 測定条件は共に 0°C , -40°C , -60°C の結果を使用した.

表 6.3 $^{90}\text{Sr}(<2.28\text{MeV})$ による β 線と BEAM による高エネルギー電子線 ($\sim 150\text{MeV}$) が Dark Current へ与える影響

温度 ($^\circ\text{C}$)	照射量 (e/cm^2)	BEAM($\text{e}/\text{pixel}/\text{sec}$)	β -ray($\text{e}/\text{pixel}/\text{sec}$)	D.C. BEAM/D.C. β -ray
-60	1.0×10^{11}	0.113 ± 0.002	0.0861 ± 0.0026	1.31 ± 0.05
-60	2.0×10^{11}	0.0751 ± 0.002	0.0709 ± 0.0025	1.06 ± 0.05
-40	1.0×10^{11}	0.285 ± 0.002	0.107 ± 0.003	2.66 ± 0.08
-40	2.0×10^{11}	0.469 ± 0.002	0.0982 ± 0.0028	4.78 ± 0.14
0	1.0×10^{11}	15.18 ± 0.03	5.794 ± 0.004	2.619 ± 0.006
0	2.0×10^{11}	33.35 ± 0.04	10.452 ± 0.004	3.191 ± 0.004

6.2.3 ダークカレントペデスタルとホットピクセル

浜松ホトニクス社製 CCD を MPP モードで駆動したときのみ DCP が観測された. また ^{90}Sr による β 線の照射では観測されなかったホットピクセルも高エネルギー電子線を照射することにより出現した. これらの電子線照射量との関係図を図 6.4 に示す.

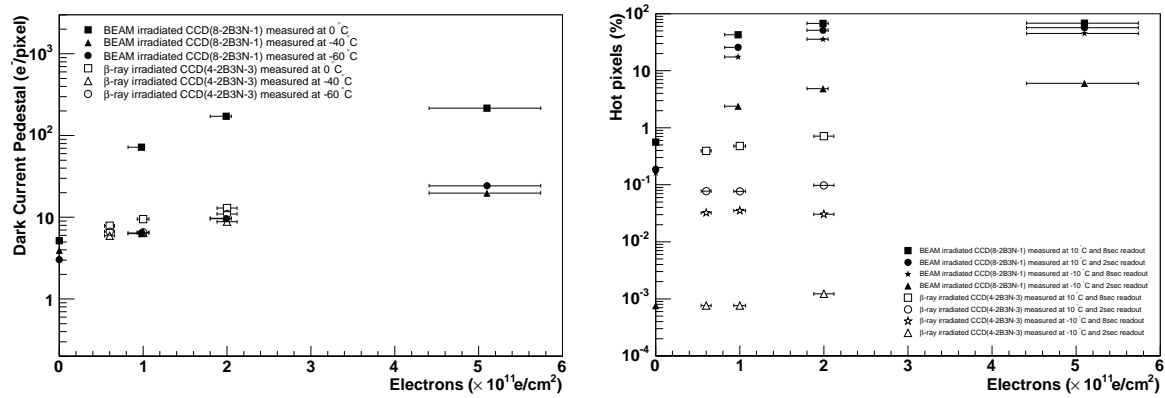


図 6.4 (左) ダークカレントペデスタルと電子照射量の関係図: ^{90}Sr による β 線を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3), ビームを照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) の測定結果をプロットしてある. 測定条件は共に 0°C , -40°C , -60°C での結果を使用した. (右) ホットピクセルの割合と電子照射量の関係図: ^{90}Sr による β 線を照射した CCD(S/N:4-2B3N-3), ビームを照射した CCD(S/N:8-2B3N-1) の測定結果をプロットしてある. 測定条件は共に 10°C , -10°C , 読み出し時間が 2 秒と 8 秒の結果を使用した.

第 7 章

Summary

本研究では CCD に ^{90}Sr の β 線 ($< 2.28\text{MeV}$) を照射した場合と, BEAM($\sim 150\text{MeV}$) を照射した場合の放射線損傷の影響の違いを調べるために 2 枚の CCD に対して異なるエネルギーの電子を照射し, 特性量の測定を行った.

CCD に於ける放射線損傷の影響は Surface Damage と Bulk Damage に分類されるが Bulk Damage の影響が支配的である.

Surface Damage の影響は本研究の測定 ($10^{11}e/\text{cm}^2$ オーダー) では確認されなかった.

以上の理由から Bulk Damage の影響が特に重要であることから本研究では特に NIEL の影響を調査するために Surface Damage の影響を極小にすることを目的とし, 電子線の照射を BCCD に対して行い, MPP 駆動による測定を行った. その結果として理論から求まる NIEL に比べて CTI や Dark Current といった CCD の特性量から求まる NIEL は小さかった.

高エネルギー電子線による Bulk Damage は ^{90}Sr による β 線照射に比べ, 理論では 7.8 \sim 14 倍と見積もられていたのに対して, Dark Current では 2.9 \sim 4.7 倍, CTI では 2.6 \sim 3.2 倍であった. また, 高エネルギー電子線を照射した CCD には多数のホットピクセルが出現したが, -10°C 以下まで温度を下げて CCD を駆動することにより十分に抑制されることが確認された.

ダークカレントの増大, CTI の増大はともに CCD バルク部への損傷の影響によるものとされているが, その根拠となる NIEL の理論計算では, 計算モデルによって結果が異なり, 不定性が大きく, 今回, 参照した 3 つのモデルは BEAM($\sim 150\text{MeV}$) による損傷は ^{90}Sr の β 線による損傷に比べて ~ 10 倍程度であると見積もられていた. しかしながら, CCD バルク部への損傷はこの見積もりよりも少なく, 3 \sim 4 倍程度であることが本研究により実験的に証明された.

また本研究は放射線損傷による CTI 劣化に対するひとつの可能性を与えた. Fat-zero charge をあらかじめ CCD に与えることにより, 最大で $14 \pm 1\%$ まで CTI を減少させ, CCD の性能回復に成功した. これは CCD の放射線耐性がこの手法により一桁程度増えたことを示す結果である.

付録 A

MPP – Multi Pinned Phase

ここでは MPP モードと呼ばれる CCD の駆動方式について述べる。

MPP モードとは Inverted モードとも呼ばれ, CCD の電極を構成する MOS 構造の全てのゲート下を反転状態になるようにバイアスすることによって, CCD を運転する駆動方式のことである。反転状態では SiO_2 界面で発生した自由電子は Si 表面に蓄積される自由正孔と再結合し, 暗電流には寄与しない。したがって, MPP モードで CCD を駆動することにより, 大幅に暗電流が抑制することが可能となる。

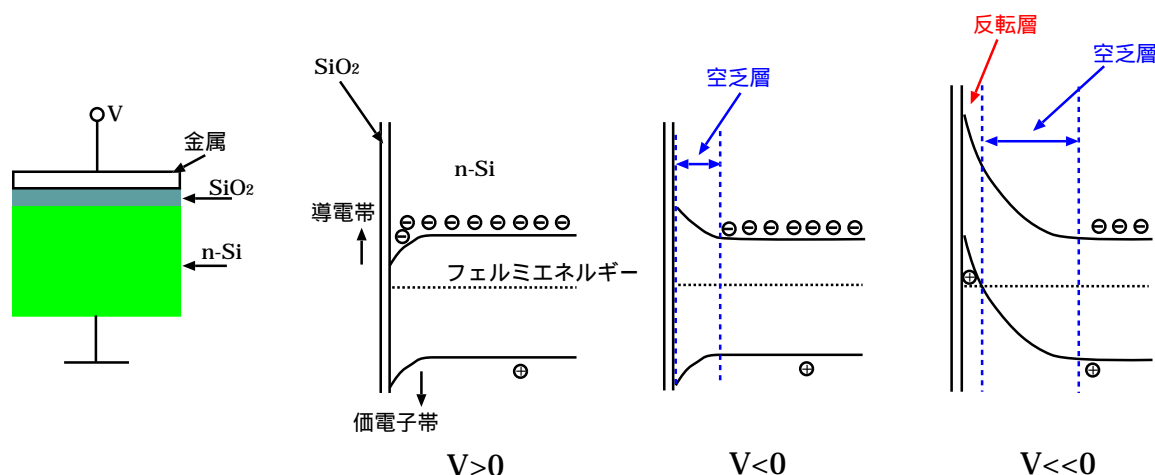


図 A.1 MPP モード: バイアス電圧 (V) に対する Si-SiO₂ 界面下に於けるエネルギーバンド状態の遷移図

図 A.1 はそれぞれのバイアスの掛け方によって Si-SiO₂ 界面下のエネルギーバンドの状態がどのようになっているのかを示している。

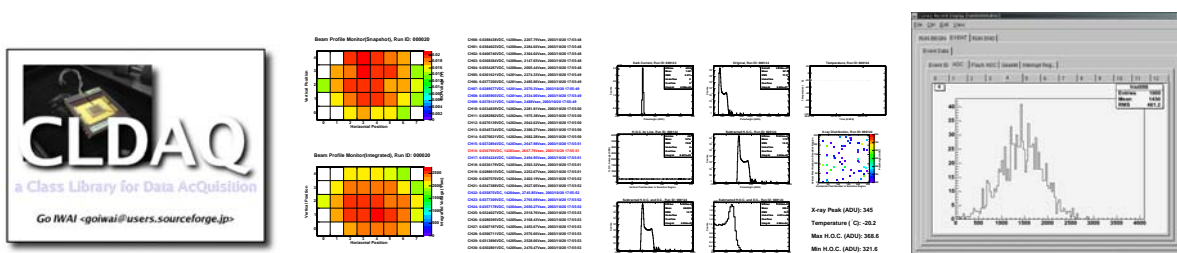
以下に各バイアス状態に於ける電子と正孔の振る舞いについて述べる。

- $V > 0$
順バイアスの電圧をかけると, Si-SiO₂ 界面下には自由電子が収集される。
- $V < 0$
逆バイアス電圧を印加すると, 自由電子は Si-SiO₂ 界面下から遠ざけられ, 自由電子の存在しない空乏層 (空乏領域) が広がる。
- $V \ll 0$

さらに大きな逆バイアス電圧を印可すると, Si-SiO₂ 界面下のエネルギー状態は価電子帯の方が伝導帯よりフェルミエネルギーに近づき, フェルミエネルギーを超える部分も出現する. フェルミエネルギーよりも高いエネルギーにあるバンドは伝導帯となっているため, その部分にある電子または正孔は自由に動くことが出来る. 従って Si-SiO₂ 界面下に自由正孔が蓄積され, p 型半導体と同様の状態が再現される. このような半導体の型が反転している層を反転層と呼ぶ. なお, 反転層が形成されると印可電圧 V を大きくしても, 空乏層の厚さが広がることはない.

付録 B

CLDAQ – An object oriented data acquisition framework



CLDAQ は *a Class Library for Data Acquisition* のアクリロニムで、データ収集 (DAQ) システムを構築するために必要となる機能やフレームワークを提供する汎用データ収集ソフトウェア基盤である。

B.1 開発の背景

素粒子物理学実験分野では CAMAC, VME, RS232C や GPIB といったおおよそ一般的とは呼べないようなデバイスが頻繁に利用されており、実験の都度、データ収集ソフトウェアの開発に多大なコストが必要とされてきた。

こうした歴史的背景も手伝って、汎用的なデータ収集 (DAQ) ソフトウェア基盤の登場が切望され、利用者の目的にフォーカスしたユースケースが収集された。収集されたユースケースの一部を表 B.1 に示す。

収集されたユースケースは多角的に分析され、DAQ に必要とされる様々な機能要件が抽出された。図 B.1 は抽出された機能要件を満たし、高品位 DAQ システムを素早く、簡単に開発するために提案されたソフトウェアモデルを階層化して示したものである。

当然のことながら例外は存在するが一般に上位階層になるほど自然言語に近く人間が触れる機会が多くなる。CLDAQ は Standard Library 層と Application Software 層の中間層に位置し、DAQ システム構築及び運転に必要な機能・部品・フレームワークなどを提供する。

一度作成してしまえば二度と書き換える必要のない箇所に関しては Class Library 層から直接 Application Software 層の開発を行い、頻繁に変更要請のあるであろう、例えば、解析やデータ可視化といったソフトウェアに関しては Language Bindings 層からスクリプトによる Application Software 層の開発を行う。

オブジェクト指向設計に基づき高度にデザインされた CLDAQ はアプリケーション開発者とフレームワーク提供者を強く分離し、保守・管理、及び開発のコストを大幅に削減する。

まとめると CLDAQ はライブラリ層とバインディング層から構成されるソフトウェアパッケージで、極めて短い開発期間で高品位のアプリケーションソフトウェアの作成を行うことを可能にする。

表 B.1 DAQ に関するユースケース

ユースケース	目的	事前条件
ビームテストを行う (1)	電子のエネルギーを測定する	読み出しデバイスには CAMAC 規格に準ずるモジュールを使用する。
ビームテストを行う (2)	CCD に対して電子を照射する	読み出しデバイスには RS232C を経由するモジュールを使用する。
CCD からデータを取得する	CCD の特性量を測定する	読み出しフォーマットは複数種類ある。 読み出しデバイスには VME 規格に準ずるモジュールを使用する。
温度センサーからデータを取得する	CCD の温度を測定する	読み出しデバイスには RS232C を経由するモジュールを使用する。
収集データの入出力を行う	保存された収集データの解析を行う	保存先や通信手段を限定してはいけない。 解析のためのソフトウェアを限定してはいけない。 解析の条件は頻繁に変更される。
入出力データのフィルタリングを行う	データの圧縮・解凍やカット	可逆なものと非可逆なものがある。 優先順位という概念が必要。
入出力データの可視化を行う	理解しやすい形でのデータの表示	可視化のためのソフトウェアを限定してはいけない。 可視化すべきデータや内容は頻繁に変更される。

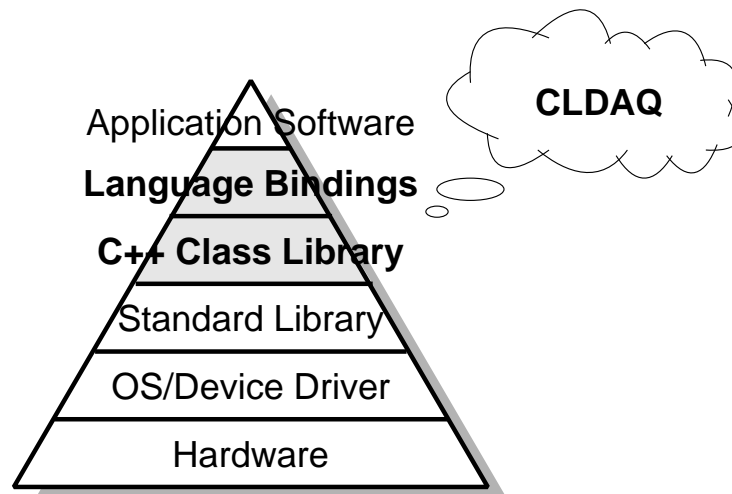


図 B.1 ユースケース分析を元に抽出された機能要件を実現するために提案されたソフトウェアモデル: 上位階層になるほど自然言語に近く人間が触れる機会が多くなる。CLDAQ は Standard Library と Application Software の中間層に位置する。

B.2 開発の目的

CLDAQ は聞いたこともない, あるいは使用したこともないハードウェアを使わなければならないのに DAQ ソフトウェア開発に割く時間や予算, マンパワーもない実験者 (達) が “素早く”, “簡単に”, “高品位の” データ収集システムの構築を行い, 速やかに実験結果の評価を行うことを可能とする汎用的な機能とシステム構築のためのフレームワークが実装されたソフトウェアパッケージを提供することを目的とする.

CLDAQ の開発目的を以下にまとめる.

- 利用者が素早く DAQ システムを構築できるようになること
- 利用者が特別な知識や経験を必要とせず, 簡単に DAQ ソフトウェアの開発を行うことができるようになること
- 開発された DAQ システムが実験での利用に耐える十分な品質を保持すること

B.3 開発の方針

CLDAQ の開発に先立って想定された主なユーザーは予算やマンパワーを大量に抱える実験グループのメンバーではなく, 大学の研究室で行うような中小規模の実験を PC1 台で賄っているユーザーであったため, CLDAQ は特に PC1 台でスロー制御からファスト制御まで行えるよう, 最適化された^{*1}.

また成果物であるソフトウェアパッケージは C++ 言語 [23] のみで記述され, 無保証かつ再配布可能な GPL (ライセンスの一形態 [24]) で配布され, ソースコードをインターネット上に公開することにより, 極めて広範囲にわたるユーザーからの要求が分析された. その結果として物理解析やデータの可視化といった分野ごとに異なるソフトウェアが採用されているカテゴリーに関しては解析ソフトウェアや可視化ソフトウェアへのインターフェースのみ提供し, 複数の異なるソフトウェアが接続可能になるように設計され, 開発が行われた.

CLDAQ の開発方針を以下にまとめる.

- 中小規模の実験を行うユーザーに最適化されたソフトウェア開発を行うこと
- GPL によるソフトウェア配布とソースコードの公開を行うこと
- 様々な分野・文化圏の実験者が利用可能となるように設計・開発を行うこと

B.4 構成

CLDAQ はいくつかのカテゴリーから構成されるソフトウェアパッケージである. 表 B.2 に CLDAQ を構成するカテゴリーとその説明を示す.

^{*1} ただし, オンライン分散環境の機能も提供するため分散 DAQ システムの構築も十分に可能である.

表 B.2 汎用データ収集ソフトウェア CLDAQ に含まれる各カテゴリの説明

カテゴリ (ディレクトリ名)	説明
system	CLDAQ により構築される DAQ システムの骨格となる部品やタイマーやクロックといった広く汎用的に利用可能な部品が格納される。
run	ランを制御するための機能を提供する部品が格納される。
event	イベントを制御するための機能を提供する部品が格納される。
readout	モジュールからの読み出し手順を記述するために必要となる部品が格納される。
modules	VME,CAMAC,RS232C といったハードウェアモジュールとこれらと似たような動作を行うソフトウェア代替モジュールなどが格納される。
persistence	複数のストリームに対してオブジェクト永続性を実現するための部品が格納される。
datarecord	CLDAQ により構築される DAQ システムで扱われる汎用データ形式に必要な部品が格納される。
interfaces	DAQ システムを対話式でコントロールするためのユーザーインターフェース群が格納される。
commands	DAQ システム制御用コマンドが格納される。
analysis	各解析ソフトウェアへのインターフェースやデータレコードを可視化するための部品が格納される。
random	乱数発生のために必要となるガウシアンや異なるアルゴリズムの乱数エンジンといった部品が格納される。
geometry	ジオメトリ記述のために必要となるベクトル表記や数学ライブラリといった部品が格納される。
bindings	複数の言語バインディングが格納される。

B.5 機能と動作原理

B.5.1 プロセスの状態とシステムの動作

既に述べたように CLDAQ はライブラリ層と言語バインディング層から構成されるソフトウェアパッケージであって、アプリケーションソフトウェアではない。これは利用者が自分自身でアプリケーションソフトウェアを実装しなければならないことを意味する。CLDAQ はアプリケーションソフトウェア実装に必要な部品やフレームワークを提供し、利用者にアプリケーションソフトウェアの実装を半強制する^{*2}。

したがって、具体的な実装方法については後述するが DAQ システムの振る舞いは利用者自身によって記述されなければならない。こういったプロセスの状態遷移やシステムコントロールの仕様部は最も煩雑になりがちな箇所のひとつであり、CLDAQ では DAQ システム開発者へこれらの筋道 (枠組みと手続き) を提供することにより、高品位 DAQ システムの開発を容易にした。

図 B.2(A) は CLDAQ により構築された DAQ プロセスの状態と動作の関係図を示す。プロセスは繰り返しラ

^{*2} これはオブジェクト指向プログラミングの技術的特徴のひとつであるポリモーフィズムにより実現される。

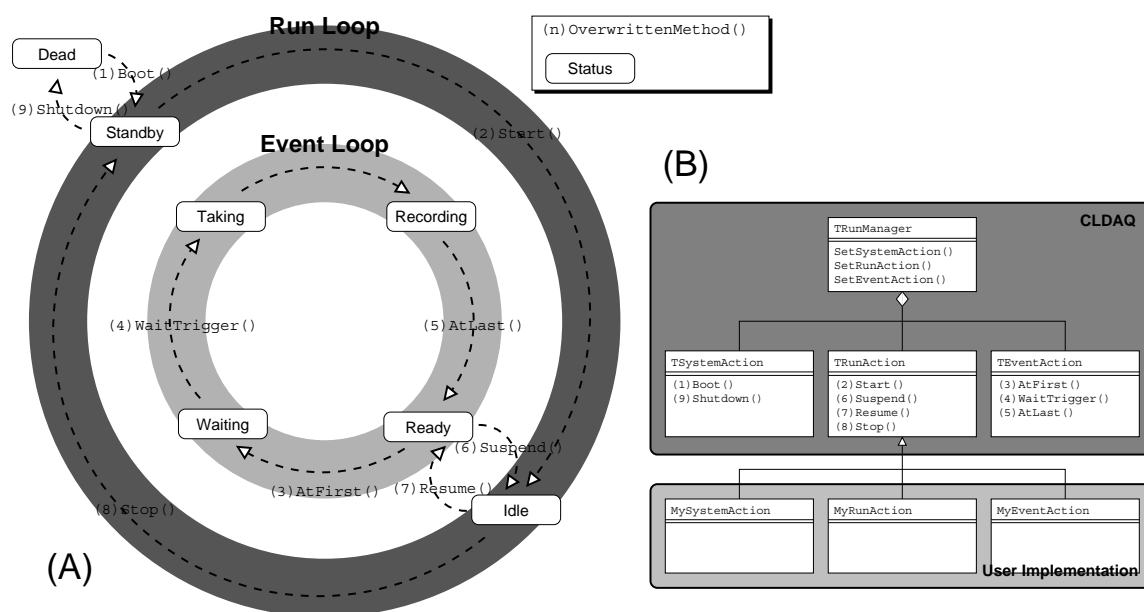


図 B.2 DAQ システム制御のためのフレームワーク:(A) プロセスの状態遷移とフックアクションの関係図
(B) フックアクションに関連する箇所のクラス図

ンを行う Run Loop とトリガーごとにイベントを収集する Event Loop から構成され、いくつかの状態へと遷移を行いながら各ループを繰り返す。典型的なランの流れを以下に時系列に示す。

1. **Dead** からプロセスは起動する
2. 起動時に利用者により定義された (1) Boot() メソッドが呼び出される (以下ここで挙げるメソッドは全て利用者により定義されたメソッドであるものとする)
3. **Standby** から (2) Start() により **Idle** を経由し **Ready** になる
4. (3) AtFirst() により **Waiting** となりトリガーを待つ
5. (4) WaitingTrigger() でトリガーを待つ
6. トリガーに応じた読み出しを **Taking** で行う
7. 読み出しを終えたら読み出しデータを **Recording** でスタック (後述) にプッシュする
8. (4) AtLast() が呼び出され 1 イベントが終了し、**Ready** に戻る
 - **Ready** でのみプロセスは **Idle** に遷移することを許し、そのとき (6) Suspend() が呼び出される
 - **Idle** でのみ **Ready** または **Standby** に遷移することを許し、そのとき (7) Resume() または (8) Stop() が呼び出される
 - (6) Suspend() されなかった場合は、**Idle** に遷移せず、次のイベントを収集するために再び **Waiting** へ遷移する
9. **Idle** を経由し (8) Stop() されたプロセスは再び **Standby** になる
 - プロセスの終了は **Standby** でのみ許され、そのとき (9) Shutdown() が呼び出される
10. 次のランを行いたければ (2) Start(), 終了したければ (9) Shutdown() を呼び出す

こうしたプロセス制御のためのフレームワークを提供するために CLDAQ は図 B.2(B) のように設計された。CLDAQ は利用者へのインターフェースとして TSystemAction, TRunAction, TEventAction クラスを提供する。ただし、これらのクラスのいくつかのメソッドは実体のない純粋仮想メソッドであり、利用者は

CLDAQ を利用するときこれらの仮想メソッドの実装を義務づけられる。そうして、利用者によって実装された `MySystemAction`, `MyRunAction`, `MyEventAction` クラスのオブジェクトは `TRunManager` クラスオブジェクトへそれぞれ `SetSystemAction()`, `SetRunAction()`, `SetEventAction()` メソッドを通じて登録される。

B.5.2 汎用データフォーマットとオブジェクト永続性

CLDAQ は汎用 DAQ システムを構築するためのソフトウェアであるので、専用データフォーマットを定義することはできない。同じ理由でデータの書き込み先と読み出し元を限定することはできない。

こうした理由から CLDAQ には“抽象ストリーム”という概念が導入され、オブジェクト永続性は汎用データフォーマットを用いたオブジェクトが抽象ストリームに対して行われることにより保証される。

C++ 言語は C 言語とのハイブリッド言語であるため、全てのオブジェクトに対して入出力を行うことは技術的に困難であるが対象となるオブジェクトを限定することにより、比較的容易に実現可能である。

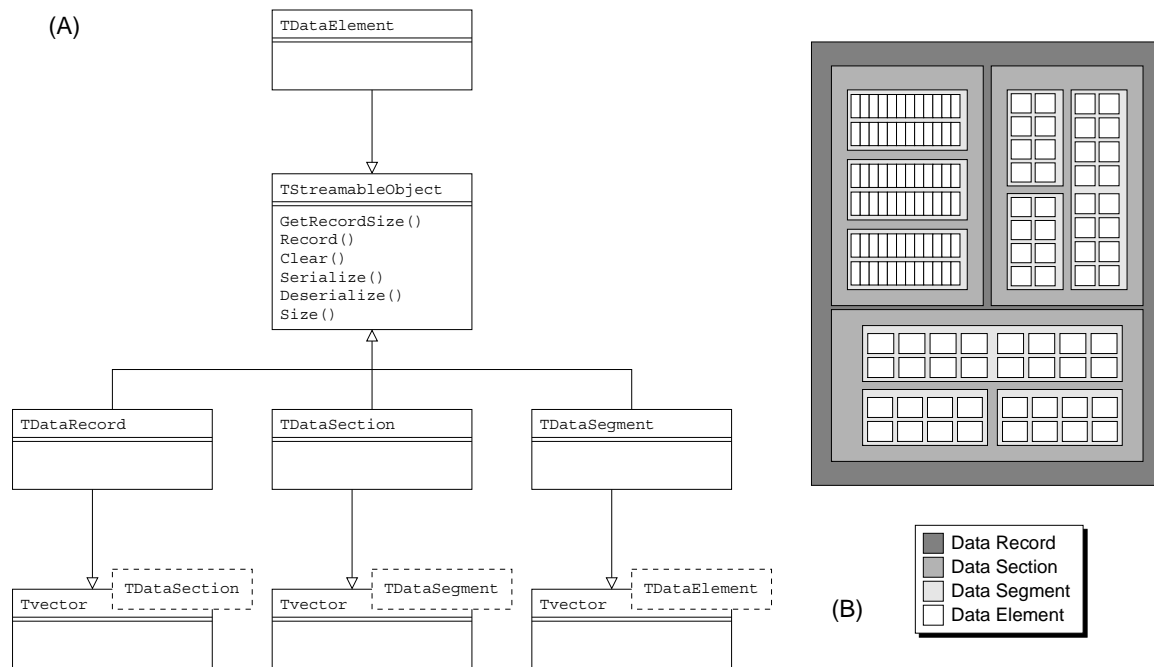


図 B.3 汎用データレコード:(A)CLDAQ で入出力されるデータ群の雛形となる箇所のクラス図 (B) データレコードの階層構造

図 B.3(A) は CLDAQ から構築されたアプリケーションで入出力の対象とされるオブジェクト (データ) の雛形である。

CLDAQ では抽象クラス `TStreamableObject` クラスから派生したクラスに対して実際の出力機能部 `Record()` メソッドの実装を義務づけ、`Record()` メソッド内で一定のルールにより抽象ストリームに対してデータを出力することにより、極めて自己記述性の高いデータ構造を形成する。 `TDataRecord`, `TDataSection`, `TDataSegment`, `TDataElement` クラスは全て `TStreamableObject` クラスを継承しているので、抽象ストリームに対する入出力が可能であるが、実際に実験等で利用される際は図 B.3(B) のような階層構造になっており、Data Record は 1 つ以上の Data Section を持ち、Data Section は 1 つ以上の Data Segment を持ち、Data Segment は 1 つ以上の Data Element を持っている。セグメントは 1 モジュールに相当し、エレメントは 1 つ以上の入力に相当している。複数のセグメントから構成されるセクションは例えば “Run Information”, “CCD”, “カロリメーター” といった具合に実験者が理解しやすい区切りでまとめられ、これらのセクションが複数集ま

ることによりデータレコード、即ち 1 イベント分のデータを構成する。

こうして生成されたデータレコードオブジェクトは抽象ストリームに対して入出力が行われるが、CLDAQ では対象となるストリームを以下の 3 つに分類する。

1. ファイル
2. ソケット
3. 共有メモリ

CLDAQ ではファイル・ソケット・共有メモリという具体的な記憶領域、または通信相手に対する入出力を実現する手段として抽象ストリームという概念が導入され、実験や解析に於ける利便性を追求するためストリームの前後に複数のフィルターが挿入できるように設計された。(図 B.4(A))

フィルターはソフトウェアによるデータのカット (非可逆) からデータの圧縮・解凍 (可逆) といったものまで多種多様なものが考えられることから、利用者により定義された複数のフィルターが利用者が定めた優先順位によって機能するようになっている。CLDAQ 側で提供するのは zlib 圧縮ライブラリを用いた圧縮・解凍フィルターのみである。

CLDAQ に於けるこれらのストリームとフィルターの関係は図 B.4(B) のようになっており、TOutputStream, TInputObjectStream クラスから派生した各ストリームクラスはそれぞれ、Write(), Read() メソッドの実装が義務づけられ、これにより、異なるストリームに対しても同じスキームによってデータレコードの入出力が可能となった。各ストリームへの入出力操作の例を図 B.5 に示す。

B.5.3 ハードウェアとクレート

CLDAQ はいくつかの規格 (VME, CAMAC, RS232C, GPIB) に基づいたモジュールへのアクセス機能を提供する。ハードウェアをプログラムから見た場合、単なるメモリ上のアドレスである。CLDAQ では全てのモジュールを一元管理できる図 B.6(A) のような Software Crate を提供する。InstallModule() メソッドにより挿入された各モジュールは自動的にスロット番号に相当する番号が割り当てられ、人間がより理解しやすい、例えば ADC や TDC といったタグを割り当てることが可能である。さらに、インストールされたモジュールをグループ単位で管理するための仕組みとして多重度を持ったグルーピング機能を提供する。EVENT と RUN というグループに所属する ADC と RUN グループに所属する SCALER があるとき、RUN グループに所属する全モジュールに対して同じ処理操作を行うことが出来るこの場合、この操作は ADC と SCALER、両モジュールに対して行われる^{*3}。

こうしたクレートの定義は TCrateDefinition クラスから派生したクラスの Define() メソッド内で行われ、ランマネージャーへの登録は TRunManager クラスの SetCrateDefinition() メソッドを通じて行われる。(図 B.6(B))

利用者の観点に立ってハードウェアを考えた場合、DAQ で使用するハードウェアというものは“信号を出力するもの”あるいは“データを発生するもの”あるいはその両方を満たすものであって、どの規格の何のモジュールでこういった手段でデータが発生されるかといった情報は興味のない箇所である。CLDAQ では図 B.6(B) のように設計され、派生先の具体的ハードウェアに対して以下のメソッドの実装を義務づける。

^{*3} EVENT グループに対する処理操作は、ここでの例では ADC にのみ行われることになる。

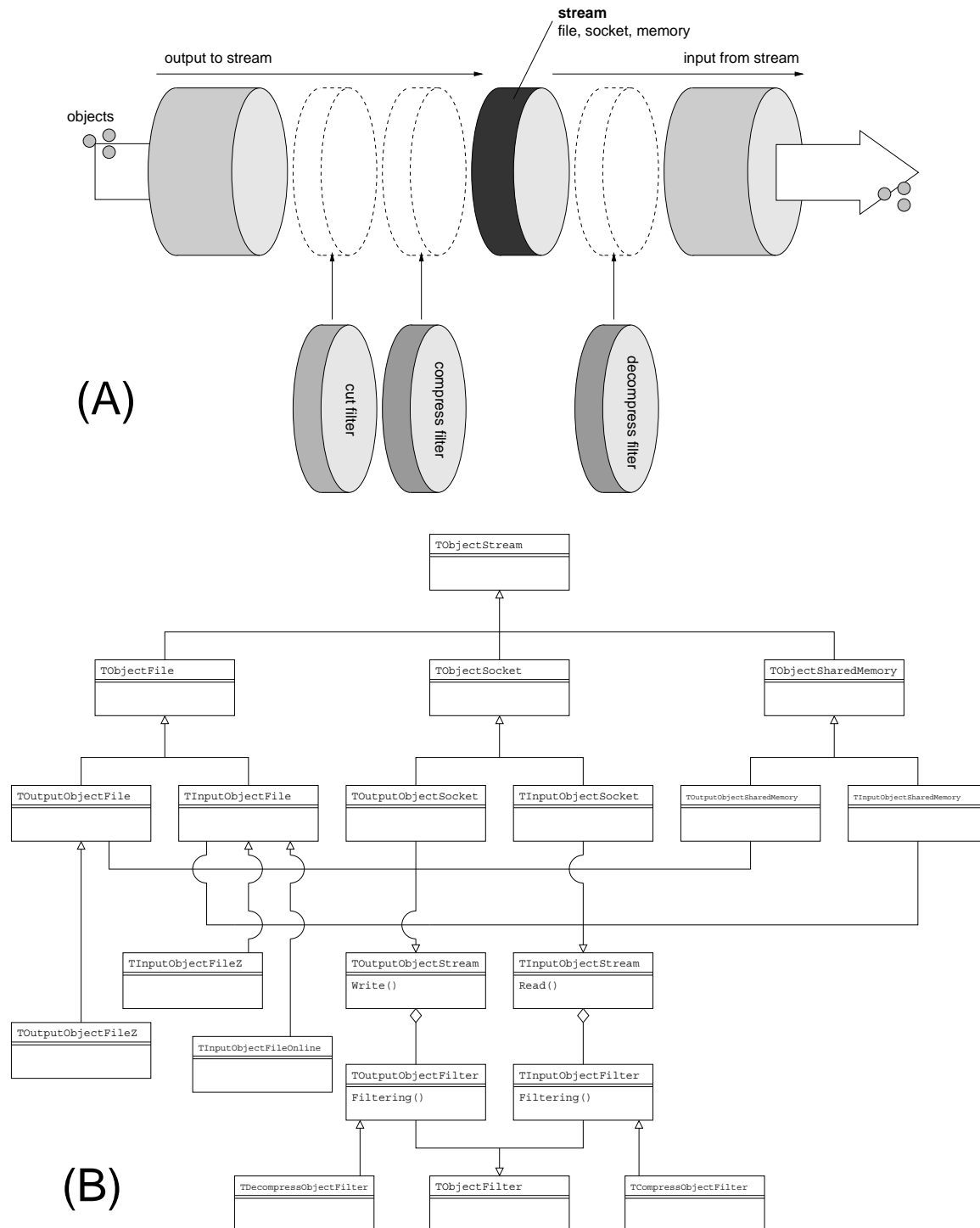


図 B.4 オブジェクト永続性を保証するための抽象ストリーム: (A) 抽象ストリームに対する入出力とその前後で挿入されるフィルタの関係図 (B) 抽象ストリームに対する入出力を行うために設計された抽象ストリーム関連箇所のクラス図

```

// ファイルへの書き出し
TOutputObjectFile output_file(path);
output_file.Write(record);
// ファイルからの読み込み
TInputObjectFile input_file(path);
input_file.Read(record);
// ソケットへの送信
TOutputObjectSocket output_socket(host, port);
output_socket.Write(record);
// ソケットからの受信
TInputObjectSocket input_socket(port);
input_socket.Read(record);
// 共有メモリへの書き出し
TOutputObjectSharedMemory output_memory();
output_memory.Write(record);
// 共有メモリからの読み込み
TInputObjectSharedMemory input_memory();
input_memory.Read(record);

```

図 B.5 共通のスキームによる各ストリームへの入出力

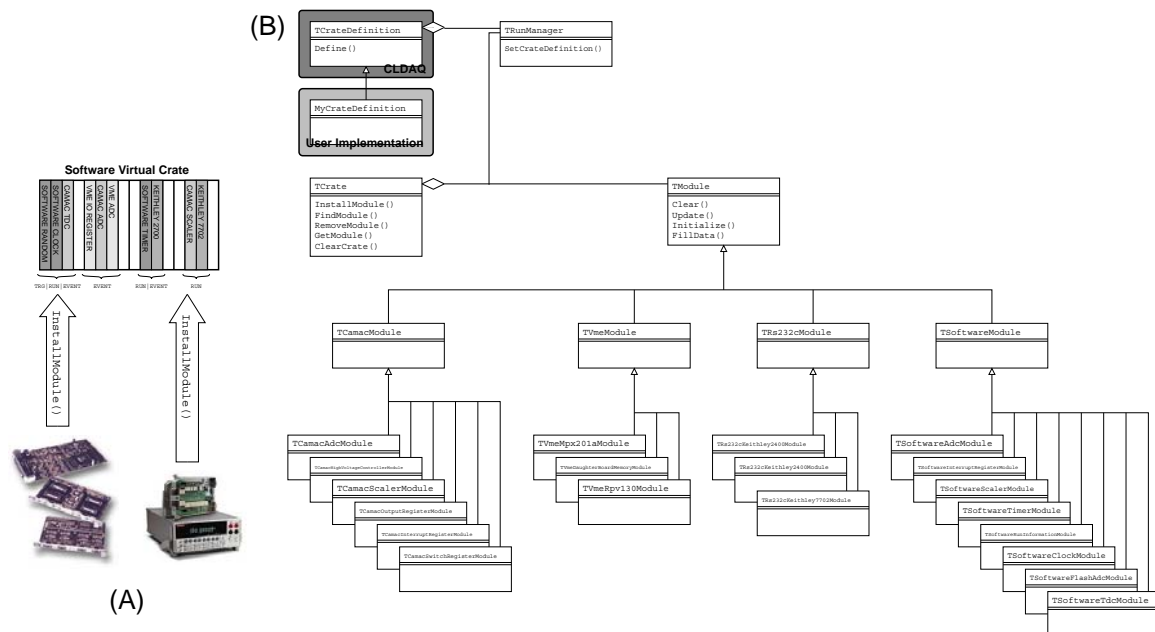


図 B.6 ハードウェアとクレート:(A)CLDAQ で提供されるソフトウェアとして実現された仮想クレートには異なる規格のハードウェアモジュールがインストール可能であり、適当なグループ名で一元管理可能である (B) クレートによるモジュールの一元管理と CLDAQ にサポートされていないハードウェアを容易に追加することを可能にするよう設計されたクレートとモジュールの関連箇所のクラス図

Readout Book の定義は TReadoutBookDefinition クラスから派生したクラスの Define() メソッド内で行われ, ランマネージャーへの登録は TRunManager クラスの SetReadoutBookDefinition() メソッドを通じて行われる (図 B.7(B)).

B.5.5 小まとめ

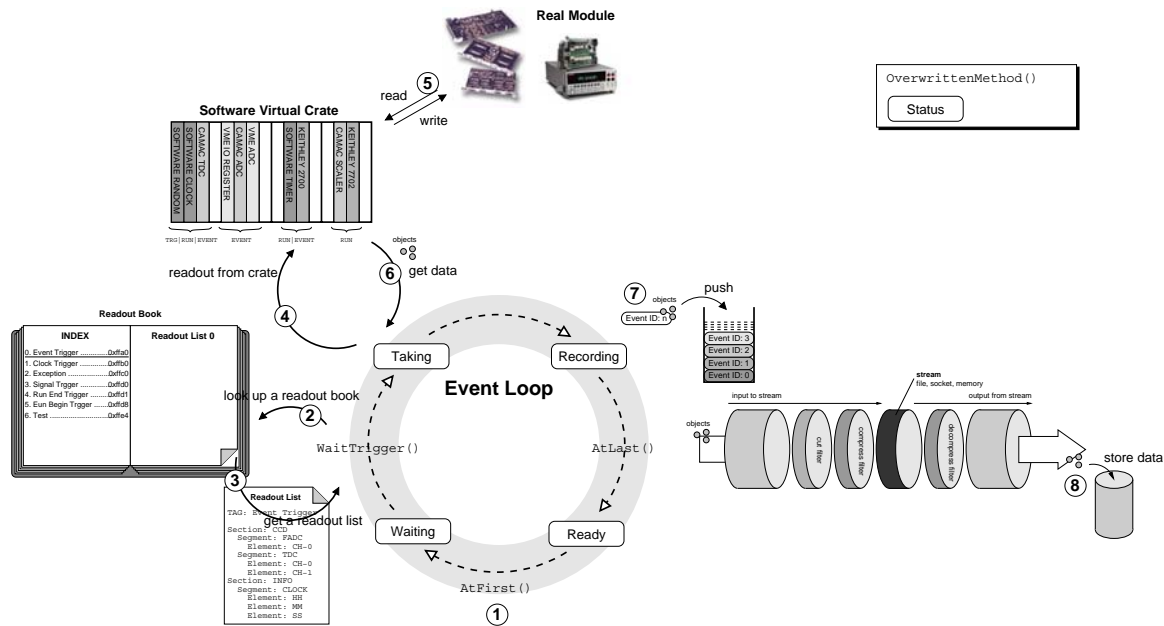


図 B.8 CLDAQ が提供するフレームワークで行われるデータ収集

ここまで示された CLDAQ が提供する機能の一部を Event Loop を例にとって図 B.8 にまとめた。

Ready ランが Start したとき, Resume されたとき, あるいは 1 イベントが終了したときのステータス

① AtFirst() メソッドが呼び出される

Waiting トリガーを待っているときのステータス

② WaitingTrigger() メソッドが呼び出され, トリガーに応じた Readout List が Readout Book から検索される

③ 適切な Readout List を取得する

Taking データを取得している最中のステータス

④ Readout List に記述されたハードウェアへのアクセスを行う

⑤ 実際のモジュールから読み出しが行われ, データが発生する

⑥ TDataRecord オブジェクトを取得する

Recording 取得したイベントデータを保存・送信しているときのステータス

⑦ スタック領域にイベントデータをプッシュする*4

⑧ TDataRecord オブジェクトをストリームに対して出力 (保存・送信) する

*4 CLDAQ では可変長プッシュ型スタックをデフォルトで用意している。イベント毎にイベントデータの処理を行うような場合はさほど意味を持たないが, 例えば PS 実験のように, イベントデータに対する処理をスビルごと一括して行うような場合は非常に有効である。このスタックを使用したくない場合 (例えばイベントデータのサイズが非常に大きい等の理由で), スタック長をあらかじめ 0 に設定しておけば良い。これはラン中にコマンドラインからも設定可能である。

DAQ システムの骨格となりうる機能はこれで全てであるが、CLDAQ はその他にも様々な機能を提供する。ここでは紹介しきれなかった機能のうち、利用頻度が高いと思われるものを以下に列挙する。

- 言語バインディング
- データの可視化
- タイマーや取得イベント数によるランの自動制御
- ランサマライザ
- `std::ostream` を継承した部品によるシステムロギング機能
- 標準出力・標準エラー出力・ログ出力の制御
- 選択可能なユーザーインターフェース
- 豊富かつ容易に追加可能なコマンド群

B.6 技術的な特徴

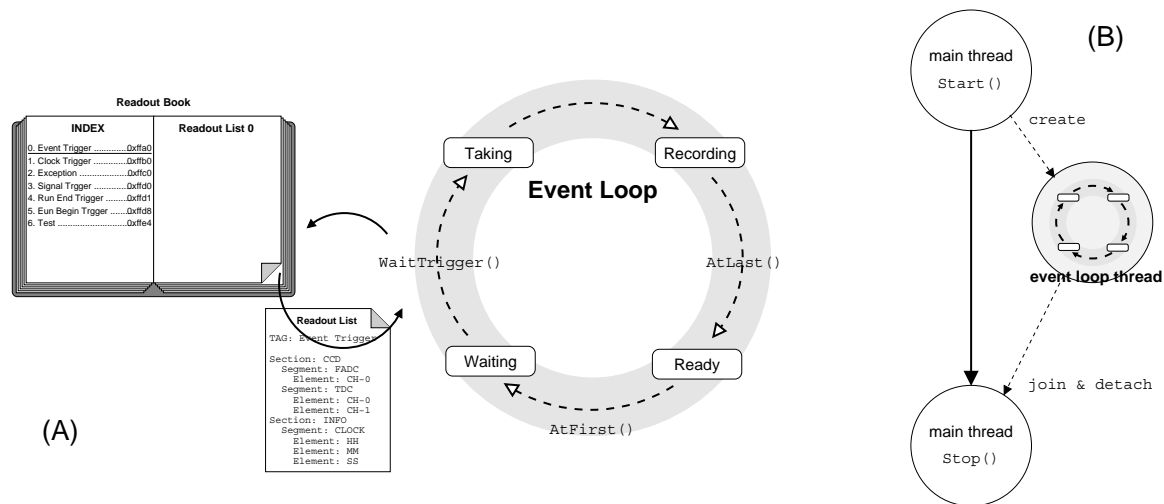


図 B.9 CLDAQ の技術的な特徴: (A) シングルプロセス型の DAQ アプリケーションではトリガー待ちの状態が最大遅延発生箇所となる (B) 遅延による問題を克服するために POSIX スレッドが採用された

シングルプロセス型の DAQ アプリケーションにとって最大遅延の発生箇所はたいていの場合、トリガー待ち受け箇所であり、CLDAQ ベースのアプリケーションに於いてそれは `WaitingTrigger()` メソッドの呼び出しを指す (図 B.9(A))。

ここで問題となるのは遅延の発生最中、長時間待たされる処理であり、対話制御型プログラムではインターフェースが長時間、制御不能に陥る。こうした問題を回避するために Linux 等の UNIX 系 OS 上で動作するシステムでよく用いられる手法は以下の 2 つの手段が挙げられる。

- 多重プロセスによる分散処理型の DAQ システムを構築し、プロセス間通信を行う
- `fork()` システムコールで作成された子プロセスにどちらかの処理を行わせる

いずれの手段を用いて構築された DAQ システムも煩雑になりがちでデバッグも困難であり、メモリ上の情報を共有するわけではないので、一方のプロセスの最新情報を同期するのは技術的にも困難である。

また、CLDAQ は中小規模実験を対象としたソフトウェアである。こうした観点からも上記のような対処は開

発方針にそぐわないため、全く新しい対策が求められた。

こうした技術的な困難を克服するために CLDAQ では POSIX スレッド [25, 26] を採用した (図 B.9(B)). CLDAQ ベースの DAQ プロセスはイベントループが発生する (Start() または Resume() 動作) たびにイベントループ専用サブスレッドを作成しメインスレッドから分離する。イベントループ終了後 (Suspend() 動作), 作成されたサブスレッドは消滅し, 再びプロセスはメインスレッドのみになる。

これにより, CLDAQ は利用者に対してコードの修正を要求しないインタラクティブな情報取得フレームワークを確立した。

B.7 性能評価

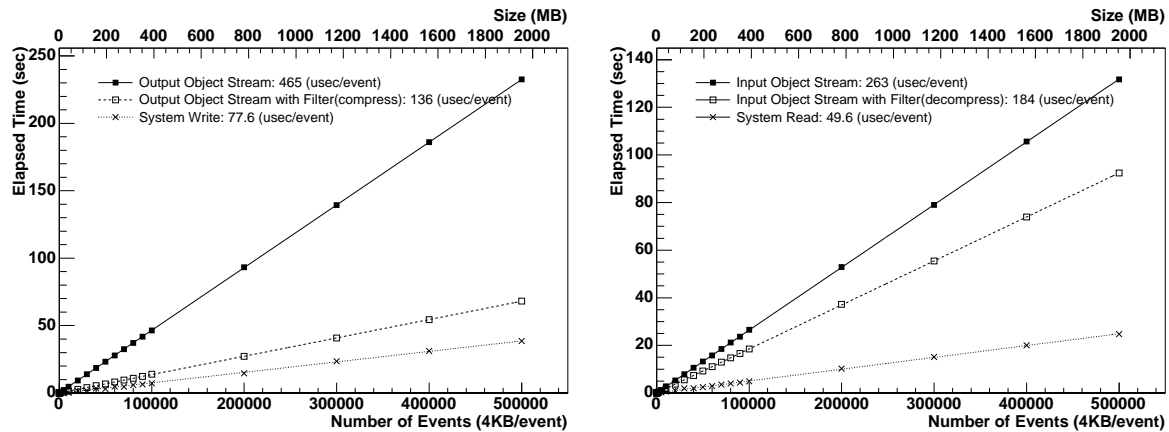


図 B.10 ファイル入出力に必要な時間とイベント数 (4KB/event) の関係図: (左)CLDAQ が提供するファイル出力機能 (■), フィルターつきファイル出力機能 (□), write システムコール (×) による結果 (右)CLDAQ が提供するファイル入力機能 (■), フィルターつきファイル入力機能 (□), read システムコール (×) による結果

1 イベント 4KB の TDataRecord オブジェクトを使用し, CLDAQ が提供するファイル入出力機能のベンチマークテストが行われた^{*5}。

B.10(左) はファイル出力に関する結果である。■ は TOutputObjectFile クラスオブジェクトによるファイルへの書き出し, □ は TCompressObjectFilter クラスオブジェクトを内部に持つ TOutputObjectFileZ クラスオブジェクトによるファイルへの書き出し, × はこれらと同等の条件で同様の処理を write() システムコールのみで実装したプログラムによるファイルへの書き出し結果である。1 イベントの書き出しに必要な時間はそれぞれ, 465, 136, 77.6 μsec であった。

B.10(右) はファイル入力に関する結果である。■ は TInputObjectFile クラスオブジェクトによるファイルからの読み込み, □ は TDecompressObjectFilter クラスオブジェクトを内部に持つ TInputObjectFileZ ク

^{*5} このベンチマークテストは 2003 年 12 月 7 日に IDE 接続された Seagate 社製ディスク (Model:ST340016A) に対して行われた。ディスク性能に関わる諸元として ATA100, 7200RPM, 2MB キャッシュが挙げられる。hdparm コマンドによるこのディスクへのテストではおよそ 40(MB/sec) の性能が得られた。Intel 社製 Pentium IV(2.4GHz, 512KB キャッシュ) と 256MB のメモリが実装された計算機が使用され, この計算機には Red Hat Linux release 9 がインストールされており, カーネルのバージョンは 2.4.20-28.9 であった。ソフトウェアは GNU コンパイラ (gcc バージョン 3.2.2) により, 最適化レベル 2 でコンパイルされたものが使用された。

ラスオブジェクトによるファイルからの読み込み, \times はこれらと同等の条件で同様の処理を `read()` システムコールのみで実装したプログラムによるファイルからの読み込み結果である. 1 イベントの読み込みに必要な時間はそれぞれ, 263, 184, 49.6 μ sec であった.

図 B.10(左) より 1 イベント 4KB の `TDataRecord` オブジェクトを `TOutputObjectFile` クラスオブジェクトを用いてファイルに対して書き出した場合, `write()` システムコールを使用して同じサイズのデータを同じ回数繰り返してファイルに対して書き出したときに比べて 17% の性能が得られ, `TOutputObjectFileZ` クラスオブジェクトを使用するとその性能は 3.4 倍向上する^{*6}.

また図 B.10(右) より 1 イベント 4KB の `TDataRecord` オブジェクトを `TInputObjectFile` クラスオブジェクトを用いてファイルから読み込んだ場合, `read()` システムコールを使用して同じサイズのデータを同じ回数繰り返してファイルから読み込んだときに比べて 19% の性能が得られ, `TInputObjectFileZ` クラスオブジェクトを使用するとその性能は 1.4 倍向上する.

これらの結果を表 B.3 にまとめた.

表 B.3 CLDAQ ストリームオブジェクトの入出力性能と同等の処理を行うシステムコールによる入出力に対する性能比

使用したストリームオブジェクト	時間 (μ sec/event)	システムコールに対する性能比 (%)
<code>TOutputObjectStream</code>	465	17
<code>TOutputObjectStreamZ</code>	136	57
<code>TInputObjectStream</code>	263	19
<code>TInputObjectStreamZ</code>	184	27

B.8 利用実績

CLDAQ は 2003 年 5 月の公開以来, 様々な実験や解析で利用された. その利用実績を以下に列挙する.

- 数回にわたるビームテスト
- 数千時間にわたる CCD オペレーション
- 上記の実験・測定で取得されたデータの解析

B.9 まとめ

データ収集システムを構築するために必要となる機能やフレームワークを提供する汎用データ収集ソフトウェア基盤 CLDAQ が開発された.

CLDAQ は C++ クラスライブラリ層と言語バインディング層の二層に分類されたソフトウェアパッケージであり, クラスライブラリ層で提供される機能のうちいくつかは言語バインディング層により他言語から利用可能となる. クラスライブラリ層のソフトウェアが提供する機能を以下に列挙する.

- DAQ システム制御のためのフレームワーク

^{*6} フィルターによる圧縮効率はデータ形状により異なるため常にこの性能が得られるわけではない.

- 汎用データの抽象ストリームに対するフィルタつき入出力によるオブジェクト永続性の保証
- 様々なハードウェアモジュールとそれらの代替品となるソフトウェアモジュール
- 異なる規格のモジュールを一元管理できる仮想ソフトウェアクレート
- トリガーと読み出しモジュールの関連を記述するための読み出しリスト
- ラン中であればいつでもイベントデータを取り出すことが可能な可変長プッシュ型スタック
- データの可視化
- タイマーや取得イベント数によるランの自動制御
- ランサマライザ
- `std::ostream` を継承した部品によるシステムロギング機能
- 標準出力・標準エラー出力・ログ出力の制御
- 選択可能なユーザーインターフェース
- 豊富かつ容易に追加可能なコマンド群

CLDAQ ベースで作成されたアプリケーションソフトウェアは制御フローとイベントループが POSIX スレッドによって分離されることによって利用者にコード修正を要求することなくイベントループの最中もインタラクティブに情報を取得することが可能である。

またファイル入出力機能の性能を評価した結果、低級関数による同等の操作に比べて、ファイル出力は 17%、ファイル入力では 19% の性能を有することが確認された。また、圧縮フィルターを通すことにより、出力に関しては 3.4 倍、入力に関しては 1.4 倍の性能が向上が確認された。

CLDAQ は公開以来、様々な実験や解析で利用され、全ての実験に於いて ~10 時間以内にシステム部の作成が行われ、全ての DAQ オペレーションは異常終了することなく、正常かつ安定して行われた。これにより CLDAQ 開発の目標であった“高品位の DAQ システムを素早く・簡単に構築すること”が達成されたことが実証された。

B.10 導入方法

本節以降では CLDAQ の導入方法と実際に動作するアプリケーションの作成方法を解説する。なお CLDAQ に関する全ての情報は下記 URL にて公開中である。

<http://cldaq.sourceforge.jp/>

CLDAQ で内容はハードウェアモジュールを実際に CAMAC や VME といったデバイスを使用する場合はデバイスドライバが必要である。CLDAQ が推奨するデバイスドライバはそれぞれ下記 URL にて公開中されている [27, 28]。

ハードウェアからの読み出し等を行うには事前にデバイスドライバをインストールしておく必要がある。CLDAQ が推奨する CAMAC・VME デバイスドライバはそれぞれ下記 URL にて公開されている [27, 28]。

<http://www.hep.sc.niigata-u.ac.jp/yasube/camac/>

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/sanshiro/kinoko/vmedrv/>

また CLDAQ は CLHEP [29] と ROOT [30] をライブラリとして使用するので、CLDAQ をインストールする前にこれらのインストールを済ませておくことが望ましい。CLHEP と ROOT はそれぞれ下記 URL にて公

開されている。

```
http://cern.ch/clhep/  
http://root.cern.ch/
```

B.10.1 ダウンロード

CLDAQ は HTTP 経由で下記 URL からダウンロードを行うことが出来る^{*7}。

```
http://sourceforge.jp/projects/cldaq/files/
```

開発版のソースコードは CVS 経由で取得可能である。cvs コマンドを使って取得するには以下のようにする。

```
% cvs -d:pserver:anonymous@cvs.sourceforge.jp:/cvsroot/cldaq login  
CVS password: (何も入力せずに ENTER キー)  
% cvs -z3 -d:pserver:anonymous@cvs.sourceforge.jp:/cvsroot/cldaq co CLDAQ
```

cvs コマンドが使えない場合は下記 URL から HTTP 経由で同等のものが取得可能である。

```
http://cvs.sourceforge.jp/cgi-bin/viewcvs.cgi/cldaq/
```

以降の作業はホームディレクトリに CLDAQ のソースツリーが展開されていることを前提として解説する。ソースコードの展開は以下のようにして行い、

```
% tar zxvf CLDAQ-1.14.6.tar.gz
```

\$HOME/CLDAQ 以下の階層が以下の様なソースツリーになっていることを確認する。

```
% ls $HOME/CLDAQ  
config  examples  source  tests
```

B.10.2 環境変数の設定

CLDAQ はライブラリ構築時、あらかじめ設定されている環境変数を参照する (表 B.4)。特に上位の 5 行は必須項目である。

これらの環境変数の設定には \$HOME/CLDAQ/config/scripts/cldaq-setup.sh または cldaq-setup.csh を参考に設定すると良い。必須項目の 5 行を .bashrc 等を書いておくことを強く推奨する (図 B.11)。

B.10.3 ライブラリの構築

環境変数の設定が終わったら以下のようにして CLDAQ ライブラリの構築を行う。

^{*7} 本論文執筆中に於ける CLDAQ のリリースバージョンは 1.14.6 である。本論文中で解説はこのバージョンを仮定する。

表 B.4 CLDAQ ライブラリ構築時に参照される環境変数とその設定例

環境変数	設定例	説明
CLDAQ_INSTALL	\$HOME/CLDAQ	CLDAQ の展開先
CLDAQ_CLHEP_BASE_DIR	/usr/local	CLHEP のルートパス
CLDAQ_CLHEP_LIB_NAME	CLHEP	CLHEP のライブラリ名 この場合 libCLHEP.a にリンクを試みる
CLDAQ_ZLIB_USE	1	zlib を使用するかどうか
CLDAQ_ROOT_USE	1	ROOT を使用するかどうか
CLDAQ_INCLUDES	-I/opt/include -I/net/include	その他のヘッダファイルへのパス
CLDAQ_LIBS	-L/opt/lib -lfoo -lbar	その他のライブラリパス
CLDAQ_SHAREDLIB	0	共有ライブラリを作成するかどうか
CLDAQ_STRIP	1	実行ファイルを strip コマンドにかけるかどうか
CLDAQ_WORK_DIR	\$HOME	作業ディレクトリ 通常, 設定する必要はない
CLDAQ_LIB_DIR	\$CLDAQ_INSTALL/lib	ライブラリを作成するディレクトリ 通常, 設定する必要はない
CLDAQ_BIN_DIR	\$CLDAQ_INSTALL/bin	実行ファイルを作成するディレクトリ 通常, 設定する必要はない

```

export CLDAQ_INSTALL=$HOME/CLDAQ
export CLDAQ_CLHEP_BASE_DIR=/usr/local
export CLDAQ_CLHEP_LIB_NAME=CLHEP
export CLDAQ_ZLIB_USE=1
export CLDAQ_ROOT_USE=1

```

図 B.11 環境変数の設定例

```

% cd $CLDAQ_INSTALL/source
% make

```

ライブラリの構築が正常に終了すると libCLDAQ.a と libcINT.so が作成されているはずなので以下のようにして確認する。

```
% cd $CLDAQ_INSTALL/lib
% ls
bindings  libCLDAQ.a
% ls bindings
libCINT.so
```

B.10.4 動作確認

ここでは CLDAQ パッケージに同梱されるいくつかのサンプルプログラムを動かしながら CLDAQ の動作確認の方法を示す。

\$CLDAQ_INSTALL/tests ディレクトリには動作確認用のテストプログラムがいくつかあるので、これを使用して CLDAQ のテストを行う。テストプログラムの実行ファイルを作成するには以下のようにして行う。

```
% cd $CLDAQ_INSTALL/tests
% make
```

全ての実行ファイルの作成が終わったら, TOutputObjectFile クラスの動作確認用プログラム ofile を実行する。

```
% $CLDAQ_INSTALL/bin/ofile
Start: 20XX/XX/XX HH:MM:SS
Stop:  20XX/XX/XX HH:MM:SS
Real=0.01s,User=0.01s,System=0s,Running=0.01s,Idling=0s
10 events, 40960/40960 byte data has been written down ofile.drec.
```

出力を見ると,10 イベント分のデータが ofile.drec に出力されたことがわかる。

次にこの ofile.drec を TInputObjectFile クラスの動作確認用プログラム ifile を実行し読み込んでみることにする。

```
% $CLDAQ_INSTALL/bin/ifile ofile.drec
Start: 20XX/XX/XX HH:MM:SS
Stop:  20XX/XX/XX HH:MM:SS
Real=0s,User=0s,System=0s,Running=0s,Idling=0s
10 events, 40960/40960 byte data has been read from ofile.drec.
```

出力を見ると,10 イベント分のデータが ofile.drec から読み込まれたことがわかる。さらに ofile.drec の内容を出力してみたければ ifiledump を実行すればよい。

次はより現実的なアプリケーションを使った動作確認を行う。以下のようにして実行ファイルを作成する*8。

```
% $CLDAQ_INSTALL/examples/software/sw01  
% make
```

実行ファイルが出来上がったら以下のようにしてプログラムを起動する。

```
% $CLDAQ_INSTALL/bin/sw01main
```

正常に起動した場合,CLDAQ のロゴが画面に表示され, プロンプトが切り替わる。1 ランを端末から実行するには以下のようにする。

```
CLDAQ-1.14.6> /run/start  
Run #0 start.  
CLDAQ-1.14.6> /run/suspend  
CLDAQ-1.14.6> /run/stop  
Save(): no implementation.  
2006/02/14 16:54:02  
Real=12.25s,User=0.01s,System=0s,Running=9.91s,Idling=2.34s  
Run #0: 7 events have been producted.  
CLDAQ-1.14.6> /system/shutdown
```

ランのデータは run000000.drec や run000000.root に, ランのサマリ情報は run000000.html に保存されているはずである。データの読み出しは例えば以下のようにして行くとよい。

```
% root  
root [0] .L sw01g4view.C  
root [1] g4view("run000000.drec")
```

B.10.5 アプリケーションの作成

CLDAQ ライブラリの構築, 及び動作確認が済んだら CLDAQ ベースのアプリケーションの作成を行う。ここでは以下の仕様を満たすものを作成することにする。

- 読み出しのハードウェアは ADC と SCALER だがハードウェアは開発環境に接続されていないためソフトウェア代替モジュールを使用する
- トリガーは INTERRUPT REGISTER モジュールから作られるが, これもソフトウェア代替モジュール

*8 ここで CLDAQ のフレームワークにしたがって作成されたアプリケーションは“ハードウェアを使用しない”という点以外は極めて現実に則したものである。

を使用する

- トリガーは ADC トリガーと SCALER トリガーの 2 種類あり,ADC トリガーが優先される
- 各読み出しデータは TIMER, CLOCK, INTERRUPT の情報を含む
- ランの最初に全モジュールが初期化される
- ランのデータは demo.drec に保存される
- ランの最初にファイルストリームをオープンする
- ランの最後にファイルストリームをクローズする
- イベント毎にイベントデータはファイルに追加書き込みされる
- ADC トリガーが発生したときはイベント取得後,ADC が更新される
- SCALER トリガーが発生したときはイベント取得後,SCALER が更新される
- TIMER, CLOCK,INTERRUPT は毎イベント更新される

まずは DAQ アプリケーションを作成するための雛形作成スクリプトを実行し,いくつかの設問に回答する(図 B.12).

このスクリプト (cldaq-build) を図 B.12 のように実行することにより DAQ ディレクトリが作成され以下のようなファイルが出来たはずである.

```
% cd DAQ
% ls
DaqCrateDefinition.cc  DaqReadoutBookDefinition.cc  DaqSystemAction.cc
DaqCrateDefinition.hh  DaqReadoutBookDefinition.hh  DaqSystemAction.hh
DaqEventAction.cc      DaqRunAction.cc               GNUmakefile
DaqEventAction.hh      DaqRunAction.hh               daqmain.cc
```

ファイルの中身を見れば明かだが,オーバーライドされるべきメソッドが記述されていないため,コンパイル,実行してもアプリケーションは何もしない.そこで各メソッドを仕様に見合うように実装していく作業を行う必要がある.なお,ここで取り扱う例題プログラムは比較的,単純なものであるため main() 関数を含む daqmain.cc の変更は必要ない.

それではまず最初にクレートの定義を行う.今回使用するモジュールは以下の 5 つである.

- TSoftwareScalerModule
- TSoftwareClockModule
- TSoftwareTimerModule
- TSoftwareAdcModule
- TSoftwareInterruptRegisterModule

これらに適当な名前をつけてクレートにインストールする作業を TCrateDefinition を継承した DaqCrateDefinition の Define() メソッドで行う(図 B.13).

クレートの定義を終えたら次はトリガー毎に読み出しリストを作成し,読み出しブックの定義を TreadoutBookDefinition を継承した DaqReadoutBookDefinition の Define() メソッドで行う(図 B.14).

クレートと読み出しブックの定義が終われば,残す作業はフックアクションによるプロセスの動作定義のみである. DaqSystemAction, DaqRunAction, DaqEventAction の 3 クラスがあるが,このうち DaqSystemAction

```
% $CLDAQ_INSTALL/config/scripts/cldaq-build
CLDAQ - a Class Library for Data AcQuisition
Copyright (C) 2000-2004 Go IWAI <goiwai@users.sourceforge.jp>
  This is free software with ABSOLUTELY NO WARRANTY.
  For details type "cldaq-build --warranty".
----
Enter project name [DAQ]: DAQ
Enter execution name(s) [no default]: daqmain
Add more (Y)es/(N)o?: [Y]: N
Enter library name [DAQ]: DAQ
Enter Prefix [Daq]: Daq

Making files for DaqSystemAction class ...
Making files for DaqRunAction class ...
Making files for DaqEventAction class ...
Making files for DaqCrateDefinition class ...
Making files for DaqReadoutBookDefinition class ...
Making daqmain.cc for daqmain ...
Making GNUmakefile ...

Summary: CLDAQ Project Builder (cldaq-build)
----
PROJECT NAME: DAQ
PROJECT DIR: DAQ
WORKING DIR: DAQ
BUILD LIB: libDAQ.a
BUILD EXE: daqmain

Now, you can build with following command:

% cd DAQ
% gmake
```

図 B.12 雛形作成スクリプト (cldaq-build) の実行

```
TCrate* DaqCrateDefinition::Define()
{
    TCrate* crate = new TCrate();
    crate->InstallModule(new TSoftwareScalerModule(), "SCALER");
    crate->InstallModule(new TSoftwareClockModule(), "CLOCK");
    crate->InstallModule(new TSoftwareTimerModule(), "TIMER");
    crate->InstallModule(new TSoftwareAdcModule(), "ADC");
    crate->InstallModule(new TSoftwareInterruptRegisterModule(), "INTERRUPT");
    return crate;
}
```

図 B.13 クレートの定義部 (DaqCrateDefinition::Define())

クラスはプロセス起動時と終了時に 1 度だけ呼ばれるメソッドで、通常は電源の ON/OFF といったハードウェアの準備や測定環境のチェック等に用いられる。今回の例題アプリケーションはソフトウェアのみで動作するプログラムであるから DaqSystemAction クラスは特に必要とされない。

それでは順に各フックアクションの定義を行っていく。ラン開始時の動作定義は TRunAction クラスを継承した DaqRunAction クラスの Start() メソッドで行う (図 B.15)。この例題プログラムでは 1 ランのデータはひとつのファイルにイベント毎に書き込まれるのでランの開始時にファイルストリームを作成する。またクレートにインストールされている全モジュールの初期化もここで行う。

ラン終了時の動作定義は TRunAction クラスを継承した DaqRunAction クラスの Stop() メソッドで行う (図 B.16)。ここでは不要になったファイルストリームを削除する。

トリガー待ち受け動作の定義は TEventAction を継承した DaqEventAction の WaitTrigger() メソッドで行う (図 B.17)。

まずはじめにクレートに挿入されているインタラプトレジスターを取得する。下位 2bit がトリガーを示すフラグで 1bit 目が ADC 用で 2bit 目が SCALER 用とする。洗練された方法は他にもあるが、ここではこのフラグを while ループによるポーリングで連続的に読み出すことによりトリガーの判別を行うことにする^{*9}。そして、ADC のフラグが立っていた場合は ADC 用の読み出しリストを返し、SCALER のフラグのみが立っていた場合は SCALER 用の読み出しリストを返す。

イベント開始時、つまりトリガー待ち受け直前の動作定義は TEventAction クラスを継承した DaqEventAction クラスの AtFirst() メソッドで行う (図 B.18)。

WaitTrigger() メソッドの時と同様にまずはじめにクレートに挿入されているインタラプトレジスターを取得し、適当なトリガーレートを設定する。ここでは 1~10 の範囲で乱数をふるることにより 1~10Hz のトリガーレートでの実験が行われているように見せかけている。

トリガーレートの設定が終わったら、インタラプトレジスターに対してマスク処理を行う。今回必要なトリガーは ADC と SCALER だけなので、ここでは上位 6bit に対してマスク処理を行っている。

^{*9} 実際のハードウェアを使用するとき、この手法でトリガー判別を行う場合はコンパイラによる最適化により判別フラグが定数化されてしまうことがあるので十分に注意する必要がある。

```

TReadoutBook* DaqReadoutBookDefinition::Define()
{
    TReadoutBook* book = new TReadoutBook();
    // 各モジュールに対応する読み出しセグメントの定義
    TReadoutSegment clock(theCrate->GetModule("CLOCK"), "CLOCK");
    TReadoutSegment timer(theCrate->GetModule("TIMER"), "TIMER");
    TReadoutSegment interrupt(theCrate->GetModule("INTERRUPT"), "INTERRUPT");
    TReadoutSegment adc(theCrate->GetModule("ADC"), "ADC");
    TReadoutSegment scaler(theCrate->GetModule("SCALER"), "SCALER");
    // ADC トリガーに対応する読み出しリストの定義
    TReadoutList* adc_trigger = new TReadoutList("ADC TRIGGER");
    TReadoutSection adc_event("ADC EVENT");
    adc_event.push_back(clock);
    adc_event.push_back(timer);
    adc_event.push_back(interrupt);
    adc_event.push_back(adc);
    adc_trigger->push_back(adc_event);
    // SCALER トリガーに対応する読み出しリストの定義
    TReadoutList* scaler_trigger = new TReadoutList("SCALER TRIGGER");
    TReadoutSection scaler_event("SCALER EVENT");
    scaler_event.push_back(clock);
    scaler_event.push_back(timer);
    scaler_event.push_back(interrupt);
    scaler_event.push_back(scaler);
    scaler_trigger->push_back(scaler_event);
    // 読み出しリストを読み出しブックに追加
    book->AddReadoutList(adc_trigger);
    book->AddReadoutList(scaler_trigger);
    return book;
}

```

図 B.14 読み出しブックの定義部 (DaqReadoutBookDefinition::Define())

イベント終了時、つまりイベントデータがクレートから読み出され、スタック領域にプッシュされた直後の動作定義は TEventAction クラスを継承した DaqEventAction クラスの AtLast() メソッドで行う (図 B.19)。

ここでは、まず DaqRunAction クラスオブジェクトを取得する。なぜなら、ファイル出力ストリームを取得するための GetOutputFile() メソッドは DaqRunAction クラスで追加定義されたメソッドだからである。

ファイル出力ストリームを取得したら、イベントオブジェクト anEvent が持つデータレコードをファイルに対して書き出してやる。

次に、トリガーに応じたモジュールの更新を行う。この例題プログラムではタイマー、クロック、インタラプトレジスターモジュールはイベント毎に更新され、ADC は ADC トリガー発生時、SCALER は SCALER トリ


```
Tvoid DaqRunAction::Start(TRun& aRun)
{
    // 全モジュール初期化
    theCrate->Initialize();
    // ファイルストリームの作成
    ofile = new TOutputObjectFile("demo.drec");
    return;
}
```

図 B.15 ラン開始時の動作定義部 (DaqRunAction::Start())

```
Tvoid DaqRunAction::Stop(TRun& aRun)
{
    // ファイルストリームの削除
    delete ofile;
    return;
}
```

図 B.16 ラン終了時の動作定義部 (DaqRunAction::Stop())

ガー発生時に更新される。

これで、プログラムの全ての動作定義が終わったので、これらを main() 関数内で TRunManager に対して登録すれば例題プログラムは完成する。

図 B.20 の main() 関数は CLDAQ ベースのアプリケーションでは非常に典型的な例でほとんどの DAQ プログラムはこの手順に沿って定義クラスの登録が行われる。

すでに GNUmakefile が作成されているはずなのでできあがったプログラムをコンパイル・リンクするには単に make コマンドを実行するだけでよい。

make が終了すると bin ディレクトリの下に実行ファイル daqmain が作成されているはずなので、これを以下のようにして実行する。

```
% ./bin/daqmain
```

プログラムが起動されると CLDAQ のロゴが画面に表示され、プロンプトが切り替わる。1 ランの実行例を図 B.21 に示す。ここでは /run/start, /run/suspend, /run/stop, /system/shutdown の順にコマンドを入力しているだけである。

図 B.21 のようにして 1 ランを実行すれば、取得データが dump.drec に保存されているはずなので、dump.C(図 B.22) を使って全イベントの出力を行う。このプログラムはコンパイルして実行することも出来るが CLDAQ の提供する言語バインディングライブラリを読み込むことにより CINT [31] から実行することも可能である。CINT を介してコマンドラインからこのプログラムを実行するには以下のようにして行う。

```

TReadoutList* DaqEventAction::WaitTrigger()
{
    // クレートに挿入されているインタラプトレジスターの取得
    TSoftwareInterruptRegisterModule* interrupt =
        (TSoftwareInterruptRegisterModule*)(theCrate->GetModule("INTERRUPT"));
    // フラグに対するトリガーの定義
    enum { NOSIGNAL = 0x0000, ADC = 0x0001, SCALER = 0x0002, BOTH = 0x0003 };
    // インタラプトレジスターをポーリングで見張る
    while (1) {
        Tint bit = interrupt->ReadInterruptRegister();
        if (bit == ADC || bit == BOTH) { // ADC または両方のフラグが立っていれば
            // ADC トリガー用の読み出しリストを返す
            return theReadoutBook->GetReadoutList("ADC TRIGGER");
        } else if (bit == SCALER) { // SCALER のフラグが立っていれば
            // SCALER トリガー用の読み出しリストを返す
            return theReadoutBook->GetReadoutList("SCALER TRIGGER");
        } else { // 何のフラグも立っていない場合はループを繰り返す
            continue;
        }
    }
}

```

図 B.17 トリガー待ち受け動作の定義部 (DaqEventAction::WaitTrigger())

```

Tvoid DaqEventAction::AtFirst(TEvent& anEvent)
{
    TSoftwareInterruptRegisterModule* interrupt =
        (TSoftwareInterruptRegisterModule*)(theCrate->GetModule("INTERRUPT"));
    // イベントループ開始時にトリガーレートを適当に設定 (1-10Hz)
    interrupt->SetFrequency(TRandomFlat::shootInt(1, 10));
    // マスク処理を行い 8bit 中の上位 6bit はフラグが立たないようにする
    // つまりチャンネル 0 (ADC) か 1 (SCALER) のみ有効
    interrupt->SetInterruptMaskRegister(0x00fc);
    return;
}

```

図 B.18 イベント開始時の動作定義部 (DaqEventAction::AtFirst())

```

Tvoid DaqEventAction::AtLast(TEvent& anEvent)
{
    DaqRunAction* action = (DaqRunAction*)(theRunManager->GetRunAction());
    TOutputObjectFile* ofile = action->GetOutputFile();
    // イベント毎に取得データを記録する
    TDataRecord record = anEvent.GetDataRecord();
    ofile->Write(record);
    if (record.GetID() == "ADC TRIGGER") {
        // ADC トリガーなら ADC を更新する
        theCrate->GetModule("ADC")->Update();
    } else if (record.GetID() == "SCALER TRIGGER") {
        // SCALER トリガーなら SCALER を更新する
        theCrate->GetModule("SCALER")->Update();
    }
    // TIMER, CLOCK は毎イベント更新する
    theCrate->GetModule("TIMER")->Update();
    theCrate->GetModule("CLOCK")->Update();
    // INTERRUPT は毎イベントクリアする
    theCrate->GetModule("INTERRUPT")->Clear();
    return;
}

```

図 B.19 イベント終了時の動作定義部 (DaqEventAction::AtLast())

```
% root -b -q -x -l dump.C
```

または, ROOT を起動した後でコマンドラインから以下のように実行しても同様の結果が得られるはずである.

```
root [0] .x dump.C
```

上記のようにして dump.C を実行すると図 B.23 のような内容が端末に出力されるはずである^{*10}. Tab による字下げは階層構造を示しており, 以下のような関係になっている.

```

TDataRecord
  TDataSction
    TDataSegement
      TDataElement

```

以下に図 B.23 の各行を例にとり出力内容の意味を示す.

^{*10} 出力内容は一部省略してある.

```

int main()
{
    // まずはランマネージャーを作る
    TRunManager* manager = new TRunManager();
    // システム動作定義の登録
    manager->SetSystemAction(new DaqSystemAction());
    // ラン動作定義の登録
    manager->SetRunAction(new DaqRunAction());
    // イベント動作定義の登録
    manager->SetEventAction(new DaqEventAction());
    // クレート定義の登録
    manager->SetCrateDefinition(new DaqCrateDefinition());
    // 読み出しブック定義の登録
    manager->SetReadoutBookDefinition(new DaqReadoutBookDefinition());
    // 対話モードの開始
    manager->SessionStart();
    // 最後にランマネージャーを削除する
    delete manager;
    return 0;
}

```

図 B.20 main 関数の記述 (daqmain.cc)

Data Record(0), ID: ADC TRIGGER, Capacity: 1, Entry: 1
 オブジェクトタイプは 0(TDataRecord) である
 “ADC TRIGGER” とタグされている
 セクション容量が 1 でそのエントリーは 1(データセクションを 1 持つ)

[0] Data Section(1), ID: ADC EVENT, Capacity: 4, Entry: 4
 0 番^{*11}のデータセクションである
 オブジェクトタイプは 0(TDataSection) である
 “ADC EVENT” とタグされている
 セグメント容量が 4 でそのエントリーは 4(データセグメントを 4 持つ)

[3] Data Segment(2), ID: ADC, Capacity: 16, Entry: 16
 3 番のデータセグメントである
 オブジェクトタイプは 2(TDataSegment) である
 “ADC” とタグされている
 エLEMENT容量が 16 でそのエントリーも 16(データELEMENTを 16 持つ)

[4] Data Element(3), ID: 4, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 2685
 4 番のデータELEMENTである

^{*11} 1 からカウントせずに 0 からカウントを開始するのは C 言語の習慣に由来する。

```

=====
CLDAQ 1.14.6 - a Class Library for Data Acquisition
Copyright (C) 2000-2004 Go IWAI <goiwai@users.sourceforge.jp>
  This is free software with ABSOLUTELY NO WARRANTY.
  For details type "warranty".
=====

BOOTING SOFTWARE DAQ DEMONSTRATION...
CLDAQ-1.14.6> /run/start (ランの開始)
Run #0 start.
CLDAQ-1.14.6> /run/suspend (ランのサスペンド)
Run #0 suspend.
CLDAQ-1.14.6> /run/stop (ランの終了)
Run #0 stop.
2006/02/11 22:48:08
Real=104.91s,User=0.52s,System=-0.04s,Running=104.91s,Idling=0s
Run #0: 500 events have been producted.
CLDAQ-1.14.6> /system/shutdown (プログラムの終了)
SHUTING DOWN SOFTWARE DAQ DEMONSTRATION...

```

図 B.21 例題プログラムの起動から終了まで

```

void dump()
{
    // 言語バインディングライブラリの読み込み
    gSystem->Load("$CLDAQ_INSTALL/lib/bindings/libCINT.so");
    // ファイル入力ストリームの作成
    TInputObjectFile file("demo.drec");
    // データレコードのバッファ
    TDataRecord record;
    // ファイルが終了するまでバッファに繰り返し読み込む
    while (file.Read(record)) {
        // 標準出力する
        std::cout << record << std::endl;
    }
}

```

図 B.22 全イベント出力プログラム (dump.C)

```

Data Record(0), ID: ADC TRIGGER, Capacity: 1, Entry: 1
  [0] Data Section(1), ID: ADC EVENT, Capacity: 4, Entry: 4
    [0] Data Segment(2), ID: CLOCK, Capacity: 10, Entry: 10
      :
      :
      [2] Data Element(3), ID: 2, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 0
      [3] Data Element(3), ID: 3, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 0
      [4] Data Element(3), ID: 4, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 2006
      [5] Data Element(3), ID: 5, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 2
      [6] Data Element(3), ID: 6, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 15
      [7] Data Element(3), ID: 7, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 12
      [8] Data Element(3), ID: 8, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 15
      [9] Data Element(3), ID: 9, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 48
    [1] Data Segment(2), ID: TIMER, Capacity: 5, Entry: 5
      :
      :
      [2] Data Element(3), ID: 2, Type: 2/Tdouble(8b), Data(1): 0
      [3] Data Element(3), ID: 3, Type: 2/Tdouble(8b), Data(1): 0
      [4] Data Element(3), ID: 4, Type: 1/Tstring, Data(1): ms
    [2] Data Segment(2), ID: INTERRUPT, Capacity: 2, Entry: 2
      [0] Data Element(3), ID: 0, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 1
      [1] Data Element(3), ID: 1, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 252
    [3] Data Segment(2), ID: ADC, Capacity: 16, Entry: 16
      [0] Data Element(3), ID: 0, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 2776
      [1] Data Element(3), ID: 1, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 3781
      [2] Data Element(3), ID: 2, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 2490
      [3] Data Element(3), ID: 3, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 1668
      [4] Data Element(3), ID: 4, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 2685
      :
      :
      [15] Data Element(3), ID: 15, Type: 0/Tint(4b), Data(1): 3838

```

図 B.23 dump.C の実行結果

オブジェクトタイプは 3(TDataElement) である
 “4” とタグされている
 データタイプは 0(Tint 型) でデータ長は 4 バイトである
 1 のデータを持ち, その値は 2685 である

```
void demo()
{
    gSystem->Load("$CLDAQ_INSTALL/lib/bindings/libCINT.so");
    TInputObjectFile file("demo.drec");
    ch4 = new TH1D("ch4", "ADC CHANNEL 4", 100, 0, 4096);
    // 高速ループ
    // while (file.Read(record)) {
    for (int i = 0; i < file.Size(); i++) {
        if (file[i] == "ADC TRIGGER") {
            // 低速だが可読性の高いデータアクセス
            TDataElement element = file[i]["ADC EVENT"]["ADC"]["4"];
            // 高速データアクセス
            // TDataElement element = file[i][0][3][4];
            int ch;
            element.StorePrimitive(ch);
            ch4->Fill(ch);
        }
    }
    cv = new TCanvas("cv", "CHANNEL-4 1D-HISTOGRAM");
    ch4->Draw();
}
```

図 B.24 イベントスキャンを行いヒストグラム表示するプログラムの例 (demo.C)

図 B.24 はファイル (demo.drec) に対しイベントスキャンを行い, 特定のデータをヒストグラム表示するプログラムの例である. 図 B.22 とはループの書式が異なるが, 処理結果は同じである.

このプログラム (demo.C) ではまずデータレコードのタグ判別を以下のようにして行い,

```
if (file[i] == "ADC TRIGGER") {
```

次に以下のようにしてデータエレメントを取得している.

```
TDataElement element = file[i]["ADC EVENT"]["ADC"]["4"];
```

上記の処理は各階層のタグがそれぞれ, “ADC EVENT”, “ADC”, “4” であるデータエレメントの取得することを意味するが, これは Section 0, Segment 3, Element 4 を取得する以下の操作と同義である.

```
TDataElement element = file[i][0][3][4];
```

データエレメントの取得後, StorePrimitive() メソッドを使用してプリミティブデータを取りだし, ヒストグラムにフィルしている.

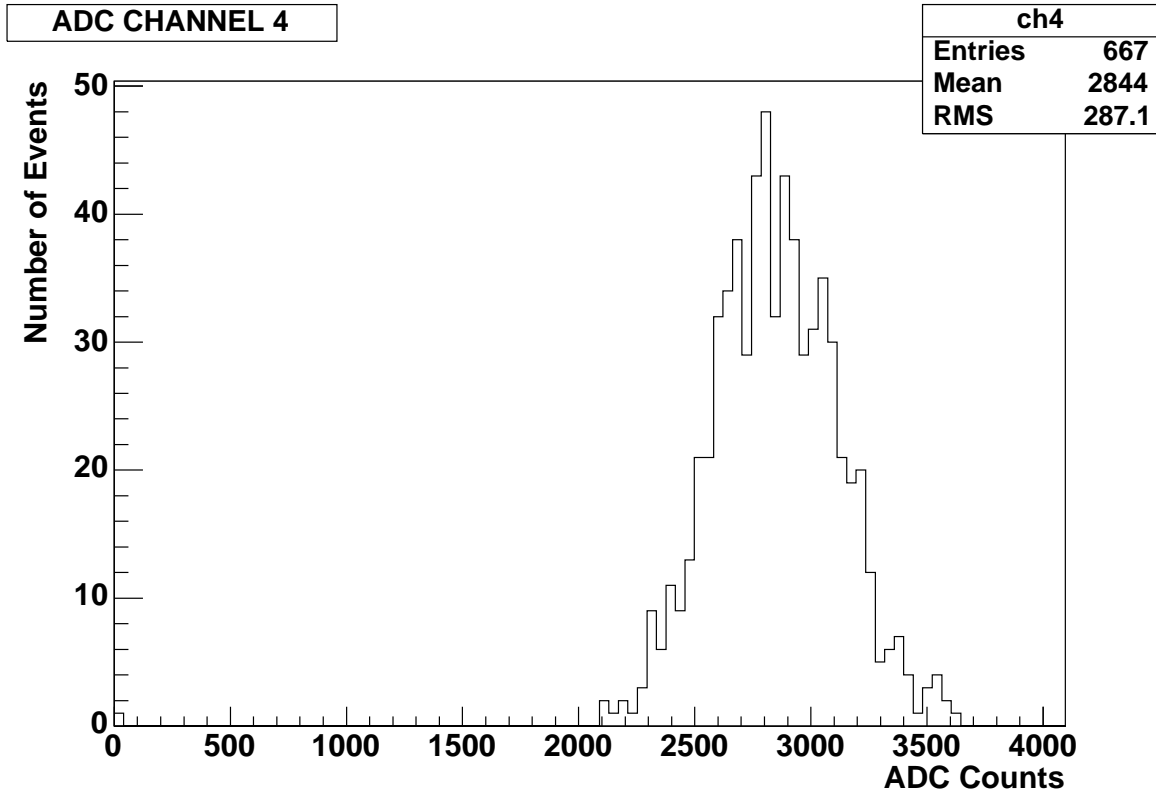


図 B.25 例題プログラム (daqmain) の実行後, demo.C(図 B.24) を実行した結果の例

このプログラム (demo.C) を実行すると図 B.25 のような結果が得られるはずである.

なお, ここで扱った例題プログラムは CLDAQ パッケージに同梱されているので, \$CLDAQ_INSTALL/examples/software/DAQ ディレクトリから完全なソースコードが参照可能である.

B.11 開発の歴史

図 B.26 にソースコード公開開始 (2003 年 5 月) から 2004 年 4 月までのソフトウェア規模の推移を示した. 図 B.26(左) は仕事量の推移を表している. 青い棒グラフはソースコードの改編量を示しており, 左側の縦軸にスケールされている. また赤いプロットはその積分量を示しており, 右側の縦軸にスケールされている. ビームテスト等のイベントの都度, CLDAQ に機能拡張がなされた為, 数本のピークが出現し, バージョン 1.12.0 のリリース以降はソフトウェアの修正や機能追加がある程度落ち着いたことがわかる.

図 B.26(右) はソースコードのサイズ (またはクラス数) のリリースバージョンに対する推移を示している.

青い棒グラフはソースコードのサイズを示しており, 左側の縦軸にスケールされている. また赤いプロットはライブラリ層で提供されるクラスの数を示しており, 右側の縦軸にスケールされている. 公開開始直後は 60 ク

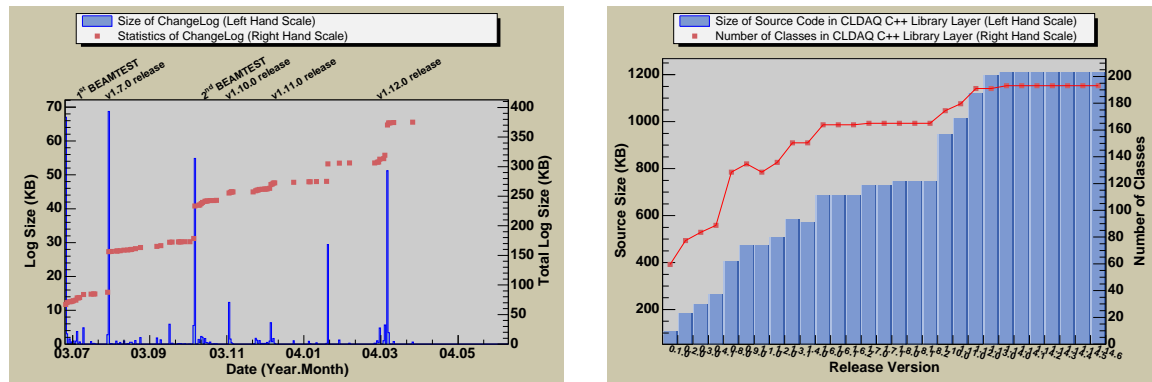


図 B.26 ソフトウェアの規模の推移 (2003 年 5 月 ~ 2004 年 3 月): (左) 修正ログの流量と開発時期の関係

図 (右) ソースコードの規模とリリースバージョンの関係図

ラス・100KB 程度であった CLDAQ は約 1 年後のバージョン 1.12.0 リリース時には 200 クラス・1MB^{*12} にまで増大した。

CLDAQ は公開開始から 1 年で 4000 回以上ダウンロードされ、プロジェクトホームページ (<http://cldaq.sourceforge.jp/>) には 40000 回以上のアクセスがあった^{*13}。

^{*12} ライブラリ部のソースコードが 4 万行程度で事例プログラムまで含めると 10 万行程度の規模である。

^{*13} <http://sourceforge.jp/projects/cldaq/stats/> 参照。

参考文献

- [1] K. Hagiwara et al. Review of particle physics. *Phys. Rev.*, D66:010001, 2002.
- [2] Glc project: Linear collider for tev physics. KEK-REPORT-2003-7.
- [3] Fft-ccd エリアイメージセンサの特性と使い方. Technical report, 浜松ホトニクス株式会社, 2003.
- [4] E.K. Banghart, J.P. Lavine, E.A. Trabka, E.T. Nelson, and B.C. Burkey. A model for charge transfer in buried-channel charge-coupled devices at low temperature. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 38:1162–1174, 1991.
- [5] T. Aso, , G. Iwai, et al. Ccd-based vertex detector for jlc. *Nucl. Instrum. Meth.*, A511:235–239, 2003.
- [6] S. Takahashi. A study of ccd properties for jlc vertex detector. Master's thesis, Niigata Univ., Jan. 1999.
- [7] T. Aso et al. Beam tests of a ccd sensor for vertex detector at jlc. Presented at 7th International Symposium on Solid State Detectors for the 21st Century (SSD 21), Nara, Japan, 4-6 Dec 1998.
- [8] K. D. Stefanov et al. A study of the radiation hardness of a two-phase ccd sensor. *Nucl. Instrum. Meth.*, A453:136–140, 2000.
- [9] K. D. Stefanov et al. Electron and neutron radiation damage effects on a two- phase ccd. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 47:1280–1291, 2000.
- [10] T. Aso, G. Iwai, et al. R & d status of ccd based vertex detector for jlc. *LCWS2002*, pages 430–434, 2002. Prepared for International Workshop on Linear Colliders (LCWS 2002), Jeju Island, Korea, 26-30 Aug 2002.
- [11] W. Shockley and W. T. Read. Statistics of the recombinations of holes and electrons. *Phys. Rev.*, 87:837–842, 1952.
- [12] R. N. Hall. Electron-hole recombination in germanium. *Phys. Rev.*, 87:387, 1952.
- [13] K.C. Gendreau et al. A technique to measure trap characteristics in ccd's using x-rays. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 42:1912–1917, 1995.
- [14] Konstatin D. Stefanov. *Radiation Damage Effects in CCD Sensors for Tracking Applications in High Energy Physics*. PhD thesis, Saga University, 2001.
- [15] Koh Abe et al. Particle physics experiments at jlc. 2001.
- [16] T. Mouthuy. Radiation dose expected in LHC inner detectors: an update. ATLAS Internal Notes INDET-No-28, CERN, Oct. 1993.
- [17] G.P. Summers, E.A. Burke, S.R. Messenger, and R.J. Walters. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 40:1372–1379, July 1993.
- [18] T. Terasawa et al. The 150-mev photon tagging system at sendai. *Nucl. Instrum. Meth.*, A248:429–428, 1986.
- [19] A. Holmes-Siedle. Notes on tot500/cc8 radfets: Response to gamma rays. Technical report, REM

- OXFORD Ltd., 2002.
- [20] Y. Sakamoto, G. Iwai, et al. Konoe: An object-oriented / network-distributed online environment. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 49:3254–3261, 2002.
 - [21] G. Iwai. Cldaq - a class library for data acquisition. <http://cldaq.sourceforge.jp/>.
 - [22] A. A. Kriss and D. M. Hamby. Beta spectroscopy with a large-area avalanche photodiode module and a plastic scintillator. *Nucl. Instrum. Meth.*, A525:553–559, 2004.
 - [23] B. Stroustup. *C++ Programming Language*. Addison-Wesley Professional, 1997. ISBN: 0-201-88954-4.
 - [24] Free Software Foundation Inc. Gpl - gnu general public license. <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>.
 - [25] ISO/IEC 9945-1.
 - [26] ANSI/IEEE Std 1003.1.
 - [27] Y. Sakamoto. Linux device driver for toyo's cc7x00 camac crate controller. <http://www.hep.sc.niigata-u.ac.jp/yasube/camac/>.
 - [28] S. Enomoto. Vme device driver for linux 2.x. <http://www.awa.tohoku.ac.jp/sanshiro/kinoko/vmedrv/>.
 - [29] Leif Lonnblad. Clhep: A project for designing a c++ class library for high-energy physics. *Comput. Phys. Commun.*, 84:307–316, 1994.
 - [30] R. Brun and F. Rademakers. Root: An object oriented data analysis framework. *Nucl. Instrum. Meth.*, A389:81–86, 1997.
 - [31] M. Goto. *C++ Interpreter - CINT*. CQ publishing, 1997. ISBN: 4-789-3085-3.