大面積シリコンストリップ検出器の試験用赤外線レーザーシステムの製作

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻

長島研究室 博士前期課程2年

住澤 一高

平成9 年 5 月 13 日

概 要

現在高エネルギー物理学研究所で実験準備が進行中の非対称 B-factory 実験 (BELLE 実験) では、中性 B 中間子の崩壊点の精密測定のため、大面積両面シリコンストリップ検出器 (DSSD=Double Sided Silicon Detector) を使用する予定である。使用される DSSD のストリップの本数は約 10 万本もの膨大な量となるため、これらを高速で自動検査するシステムが不可欠である。

今回、この目的で赤外線レーザーシステムを製作した。そのシステムを用いて、実際に DSSD のストリップ毎の検査を行った。その結果、DSSD の全ストリップに対し、始点を決めれば自動的にデータを取得できるシステムを作る事に成功した。また、検出された不良ストリップの原因を分類する事が出来た。このシステムでは、ストリップの検査を P 面で 1.0 ストリップ/秒、N 面で 1.7 ストリップ/秒と非常に高速に行えることが分かった。これにより、この赤外線レーザーシステムは、大面積のシリコンストリップ検出器を試験するのに必要な性能を持つ事がわかった。

目 次

第 1 章　序論 **8**

1.1　KEK-B factory 計画について 8

1.2　CP 非保存と小林-益川行列 8

1.3　KEK B-factory とその目的 10

1.4　BELLE 検出器とシリコンバーテックス検出器 12

1.5　本論文のねらい 13

第 2 章　シリコンストリップ検出器 **20**

2.1　半導体検出器の一般論 20

2.1.1　半導体と半導体検出器 20

2.1.2　ダイオード型半導体検出器の基本特性 21

2.1.3　逆バイアス電圧の印加 22

2.1.4　信号の読み出し 23

2.2　シリコンストリップ検出器の構造 24

2.3　BELLE 検出器におけるシリコンストリップ検出器 26

2.3.1　両面型シリコンストリップ検出器 26

2.3.2　２重金属層構造 27

2.3.3　ギャンギング 27

2.3.4　信号の読みだし 28

2.4　ステレオ不確定性とスラント角 29

第 3 章　赤外線レーザーシステムの製作 **31**

3.1　目的 31

3.2 他の不良ストリップの検査の方法との比較 31
3.3 赤外線レーザーシステムの構成 35
3.3.1 Nd:YAG レーザーと減衰器 35
3.3.2 CCD カメラと顕微鏡システム 37
3.3.3 X-Y ステージ 39
3.3.4 赤外線レーザーシステムの設置 39
3.4 Nd:YAG レーザーの評価 40
3.4.1 レーザーの半径 40
3.4.2 レーザーのパルスの幅 42
3.4.3 レーザー強度の長期安定性 43

第 4 章 不良ストリップの検出試験 45
4.1 プロトタイプシリコンストリップ検出器の構造 45
4.1.1 P 面の構造 45
4.1.2 N 面の構造 48
4.1.3 読みだし方法 48
4.2 不良ストリップの原因 50
4.3 赤外線レーザーシステムを用いた不良ストリップの試験の概要 52
4.3.1 レーザー出力の較正 52
4.3.2 DSSD の水平の出し方と平行成分の回転の補正 53
4.3.3 レーザー照射のシークエンス 54
4.4 赤外線レーザーによるテストの結果 55
4.4.1 不良ストリップの定義 55
4.4.2 不良ストリップの有無の結果 56
4.4.3 不良ストリップの原因に関する考察 56
4.4.4 不良ストリップの捜索の所用時間 66

第 5 章 結論 67

付 録A ストリップ検出器のノイズ及びレーザーパルスの大きさの求め方 **69**
A.1 オフセット・コモンモードシフト・ノイズの定義 69
A.1.1 オフセット 69
A.1.2 コモンモードシフト 70
A.1.3 ノイズ 70
A.2 クラスター 71

付 録B 読み出しシステム **73**
B.1 読み出しシステムの概要 73
B.2 VA を用いた読み出しシステム 73
B.2.1 VA チップの読み出し 75
B.2.2 タイミングモジュール 75
B.2.3 VA リピータカード 77
B.3 フラッシュADC 78

付 録C XY ステージの性能の評価 **79**
C.1 真直度の評価 79
C.2 ピッチング・ヨーイングの評価 79
C.3 直交精度の評価 80
C.4 繰り返し位置決め精度の評価 80
C.5 上軸許容搭載重量の評価 81

謝辞 **87**

参考文献 **89**

図 目 次

1.1 小林–益川行列のユニタリー三角形 9
1.2 中性 B 中間子系での非対称崩壊 11
1.3 BELLE 検出器その 1 14
1.4 BELLE 検出器その 2 15
1.5 シリコンバーテックス検出器 (SVD) 16
1.6 シリコンバーテックス検出器の断面図 (その 1) 17
1.7 シリコンバーテックス検出器の断面図 (その 2) 18
1.8 シリコンバーテックス検出器 (SVD) の構成 19

2.1 p-n 接合の概念図 21
2.2 ダイオード型検出器の読み出し 23
2.3 P 型シリコンストリップ検出器 24
2.4 N 型シリコンストリップ検出器 25
2.5 両面型シリコンストリップ検出器 26
2.6 2 重金属構造 28
2.7 ステレオ不確定性 29
2.8 スラント角の効果の概念図 30

3.1 赤外線レーザーシステムの概略図 32
3.2 赤外線レーザーシステムの構成 33
3.3 赤外線の波長と吸収長 36
3.4 結晶内での Nd^{3+} イオンのエネルギー準位 36
3.5 減衰器の構造 38

3.6 赤外線レーザーシステムの概念図 40
3.7 N 側からレーザーを当てたときのシグナルの変化 41
3.8 赤外線レーザーのパルス幅 42
3.9 パワーメータのセットアップ図 43
3.10 パワーメータで測定したレーザー強度の安定性 44

4.1 プロトタイプ DSSD の実物写真 46
4.2 プロトタイプ DSSD の P 面の設計図 47
4.3 プロトタイプ DSSD の N 面の設計図 49
4.4 回転補正の方法の概略図 53
4.5 P 面の不良ストリップの捜索に用いたカット 57
4.6 N 面の不良ストリップの捜索に用いたカット 58
4.7 レーザーを当てたストリップのシグナルと隣のストリップのシグナルとの相関 59
4.8 典型的な不良ストリップの形 61
4.9 N 面の 118 番のストリップの断線の様子 62
4.10 2 本のストリップ間の電荷の共有の分布 64
4.11 P 面 561 ∼ 562 間の電荷の共有の分布 64

A.1 ストリップ毎のノイズの分布 71
A.2 典型的なクラスターの形 72

B.1 読み出しシステムの概念図 75
B.2 VA チップの内部回路 76
B.3 VA チップタイミングチャート 77
B.4 Viking Timing モジュール 78

C.1 真直度の測定結果 82
C.2 上軸のピッチング・ヨーイングの測定結果 83
C.3 下軸のピッチング・ヨーイングの測定結果 84
C.4 直交精度の測定結果 85

C.5 繰り返し位置決め精度の測定結果 86

表 目 次

3.1 レーザーの仕様 37
3.2 X-Y ステージの性能の評価 39

4.1 プロトタイプシリコンストリップ検出器のパラメータ 48
4.2 製造過程で確かめられた不良チャンネルの番号 52
4.3 今回のテストで確かめられた不良チャンネルの番号 60

B.1 VA チップの性能表 74

C.1 真直度の許容値と測定値のデータ 79
C.2 ピッチング・ヨーイングの許容値と測定値のデータ 80
C.3 直交精度の許容値と測定値のデータ 80
C.4 繰り返し位置決め精度の許容値と測定値のデータ 81

第1章　序論

1.1　KEK-B factory 計画について

現在、高エネルギー物理学研究所ですすめられている計画の一つとして B–factory 計画 (KEK B–factory) がある。この実験の最大の目的は、「中性 B 中間子系での CP 非保存検証」である。

1.2　CP 非保存と小林-益川行列

1964 年に V.L.Fitch, J.W.Cronin らが中性 K 中間子の崩壊の中に CP が保存しない事象を発見した [1]。その当時、中性 K 中間子は、π中間子 2 個に崩壊する寿命の短い K_s中間子と，π中間子 3 個に崩壊する寿命の長い K_L中間子に分けられると思われていた。π中間子 2 個の状態は CP 変換に対して偶，3 個の状態は奇であるので，K_s中間子、K_L中間子はそれぞれ純粋に CP の固有状態が偶，奇であると思われていたのである。しかし、K_L中間子の崩壊を調べてみると、約 0.3%が$\pi^+\pi^-$に崩壊することが発見された。この現象は我々の世界では CP が保存しないことを示す非常に衝撃的な事であった。それ以来数多くの実験がおこなわれ、$\pi^0\pi^0$への崩壊 [2, 3] 等でも CP 非保存が観測された。しかし現在でも中性 K 中間子系以外での CP 非保存現象は観測されていない。

現在、CP の破れを説明する理論として最も有力視されているのが「小林-益川理論」である。1973 年，小林 誠と益川 敏英とが発表した理論で [4]、標準理論の枠内で CP 非保存の現象を説明する一つの仮説として「クォークは少なくとも 3 世代必要である」と唱えた。これはクォークを 3 世代，つまり 6 個導入すると，クォーク間の混合の度合いを表す 3×3 の行列 (小林-益川行列) の要素をすべて実数にする

ことはできず、少なくとも一つの虚数位相を導入する必要があるというものであった。この虚数位相が CP 非保存を生じさせる要因となるのである。

小林-益川行列を具体的に，$\lambda = \sin\theta_c$ (θ_c：カビボ角~ 0.22) を用いてλ^3 まで展開した形で書くと (Wolfenstein 表示)

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{bmatrix} \tag{1.1}$$

となる。この行列はユニタリーでなくてはならないから

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \tag{1.2}$$

という関係を満たさなくてはならない。これを複素平面で表すと、図 1.1 のように書ける。この三角形の 3 辺と 3 つの角を精密に測定すれば小林-益川理論の検証にな

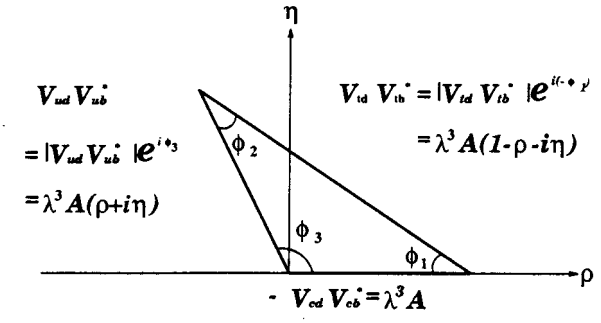

図 1.1: 小林–益川行列のユニタリー三角形

る。そのために、小林-益川行列の行列要素を精密に求めることが重要になる。ところが中性 K 中間子系ではこれらの行列要素を精密に測定することは難しい。なぜなら K 中間子を構成するクォークは質量が小さく、また小林-益川行列の要素のうち t クォークと b クォークの関係する 3 行目と 3 列目の要素は、高次の効果としてしか観測できないからである。

一方、B 中間子系では、b クォークを含むためにこの行列要素をあらわに測定することができる。したがって、B 中間子系での CP 非保存の有無を測定し、小林-益川行列の要素の精密測定を行うことは、小林-益川理論の検証さらには標準理論の検証という重要な意味をもつ。

1.3 KEK B-factory とその目的

現在、高エネルギー物理学研究所ですすめられている計画の一つとして B–factory 計画 (KEK B–factory) がある。KEK B-factory では、$\Upsilon(4S)$ を経由して生成される中性 B 中間子を用いて、中性 B 中間子系での CP 非保存を検証すること、小林-益川行列の行列要素、つまりユニタリー三角形の要素を測定することが重要な研究テーマのひとつとなっている。また、c クォークやτレプトンなど、数多くの重要なテーマがあるが、ここでは, 最も重要な目的である CP 非保存の検証、その中でも理論的な不確定性が小さく、実験的にももっとも有望視されている $\mathrm{B_d} \to \mathrm{J}/\psi\mathrm{K_s}$モードについて、詳細を述べる [5]。

中性 B 中間子系において CP 非保存は、B 中間子と反 B 中間子が同一の CP 固有状態 (ここでは $J/\psi\mathrm{K_s}$) に崩壊する際の非対称性として観測することができる。非対称度を表すパラメータとして、CP の非対称パラメータ

$$\begin{aligned} A_{CP} &= \frac{\Gamma(\mathrm{B^0} \to \mathrm{J}/\psi\mathrm{K_s}) - \Gamma(\overline{\mathrm{B^0}} \to \mathrm{J}/\psi\mathrm{K_s})}{\Gamma(\mathrm{B^0} \to \mathrm{J}/\psi\mathrm{K_s}) + \Gamma(\overline{\mathrm{B^0}} \to \mathrm{J}/\psi\mathrm{K_s})} \\ &= \sin 2\phi_1 \times \sin \Delta m \Delta t \end{aligned} \tag{1.3}$$

がある。ただしΔm は中性 B 中間子の質量固有状態 B_1と B_2の質量の差$\Delta m = M_{B_1} - M_{B_2}$である。したがって時間差$\Delta t$ の関数として A_{cp}を求めることができ、これから $\sin 2\phi_1$を求めることができる。ただし、ϕ_1は図 1.1 で定義した三角形の内角である。例えばどちらかの中性 B 中間子が準レプトン崩壊をし、もう片方の中性 B 中間子が $\mathrm{J}/\psi K_s$へ崩壊した場合、準レプトン崩壊から出てくるレプトン (電子またはμ粒子) の電荷を調べることによって、そのレプトンの起源の中性 B 中間子が $\mathrm{B^0}$ か$\overline{\mathrm{B^0}}$かがわかる。したがってこの時刻を基準にすれば、ある時刻に $\mathrm{B^0}$もしくは$\overline{\mathrm{B^0}}$であった粒子が $\mathrm{B^0} - \overline{\mathrm{B^0}}$混合をしながら、最終的に CP の固有状態である $\mathrm{J}/\psi K_s$へ崩壊すると

きの時間発展が観測できる (図 1.2)。

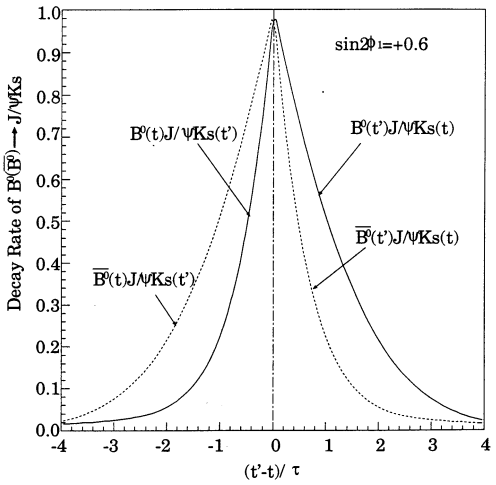

図 1.2: 中性 B 中間子系での非対称崩壊。横軸は対生成された中性 B 中間子の 1 つが CP の固有状態 $\mathrm{J}/\psi\mathrm{K_s}$へ崩壊し、他方がレプトンによってそのフレーバーを同定されたものについて、時間差Δt を中性 B 中間子の寿命τ_Bで割ったもので、縦軸は崩壊率である。CP の破れの大きさは $\sin 2\phi_1 = 0.6$ としてある。

このとき、中性 B 中間子は寿命が非常に短い (約 1.5×10^{-12}秒) ので、Δt を直接測定するのではなく、2 つの B 中間子の崩壊点の間の距離を精密に測ることにする。その距離差を時間差に換算する。

KEK B-factory では中性 B 中間子を$\Upsilon(4\mathrm{S})$ を経由して生成する ($e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4\mathrm{S}) \rightarrow \mathrm{B^0\overline{B^0}}$)。この$\Upsilon(4\mathrm{S})$ の質量は $10.58\mathrm{GeV}$、この粒子から生成する $\mathrm{B^0}$の質量は $5.28\mathrm{GeV}$ であるため、$\Upsilon(4\mathrm{S})$ の静止系に対して $\mathrm{B^0}$粒子の持つ運動量はわずか $346\mathrm{MeV}$ しかない。$\mathrm{B^0}$粒子の平均寿命は 1.5×10^{-12}秒であるため、この時の $\mathrm{B^0}$粒子の平均崩壊長は約 $29\mu m$ となり、現在考えうる検出器では測定は非常に難しい。

そこで KEK B-factory では非対称衝突型加速器を採用した。これは電子と陽電子を異なるエネルギーで衝突させることによって、実験室系での $\mathrm{B^0}$粒子の平均崩壊長を延ばすことがねらいであり、同様の計画はスタンフォード線形加速器センター (SLAC) の BaBar[6] がある。KEK B-factory の場合、電子のビームエネルギーが

8GeV、陽電子のビームエネルギーが 3.5GeV である。この場合、$\Upsilon(4S)$ は上流に向かって 4.5GeV の運動量を持つので、実験室系で見た B^0 粒子の平均崩壊長は約 $190\mu m$ となる。このとき Δt は

$$\Delta t \simeq \frac{\Delta z}{c\beta\gamma} = \frac{(z_1 - z_2)}{c\beta\gamma} \tag{1.4}$$

と決めることができる。ここで $\beta = c/v$、$\gamma = (1-\beta^2)^{-1}$ はローレンツ因子、$\Delta z = (z_1 - z_2)$ は 2 つの B^0 中間子の崩壊点の z 方向 (ビーム方向) の距離である。Δz の実験的分解能が悪いほど、CP 非保存を確立する為に必要な統計量が増えてしまう。この問題を回避する為には、Δz の分解能は平均崩壊長の約 $\frac{1}{2}(100\mu m$ 程度) かそれより良いことが要求される [7]。

KEK B-factory では、このような要求を満たす崩壊点検出器として、シリコンストリップ検出器を用いることとなった。

1.4 BELLE 検出器とシリコンバーテックス検出器

BELLE 検出器の概要を図 1.3、1.4 に示す [8]。KEK-B 加速器が非対称衝突型加速器であるので検出器も非対称で、e^- ビームの方向 (Z 軸) に対する角度 (θ) が $17 \sim 150^\circ$ の範囲を覆うよう構成させている。また、崩壊生成物の運動量が比較的小さいので、精度の良い測定を行う為に全体に物質量を減らすデザインとなっている。

先に述べたように BELLE 検出器にはシリコンストリップ検出器を崩壊点検出器として組み込むことになっている (シリコンバーテックス検出器, 以下 SVD と略) 。これは現存する検出器では、位置分解能が $\sim 10\mu m$ ともっとも高いものの一つである。SVD は、まず数 cm×数 cm のシリコンの板として製造される。これらは一枚一枚が 2 次元の荷電粒子の位置情報を得られる両面型シリコンストリップ検出器 (2.3 節) である。このような検出器を、検出面積を大きくするために長い板状につなぎ合わせる。これらが断面が四重の八角形の筒状に、ビームパイプを取り巻くように SVD を構成する (図 1.5、1.6、1.7)。このような検出器を構成するにあたって、荷電粒子の種類や入射角、運動量、ビームパイプからの距離やそのあいだの物質量を考慮し、最適な構造のシリコンストリップ検出器が選ばれている。特に、Z 軸方向

の位置を測定するストリップの間隔が、前後方で大きくなっているのが特徴である（図 1.8）。

1.5 本論文のねらい

以上で述べたように、CP 非保存現象を研究するにあたり、SVD、つまりシリコンストリップ検出器の果たすべき役割は大きい。

そこで本論文では、SVD で使用される広間隔シリコンストリップ検出器について、各々のストリップが正常かどうかをを迅速且つ確実にチェックするシステムを製作することを目的とする。この論文の具体的な構成は次のようである。

第 2 章で一般的なシリコンストリップ検出器の構造について述べた後、BELLE で用いるシリコンストリップ検出器について述べる。

第 3 章で今回製作した赤外線レーザーシステムについての説明、またその基本的な性能の評価について述べる。

第 4 章では、今回製作した赤外線レーザーシステムを用いて、BELLE 実験のためにプロトタイプシリコンストリップ検出器について検査を行った結果について述べる。それより、このシステムが、大面積の DSSD に対し、十分短時間のうちに不良ストリップを見つけ出せることを示す。。

最後に第 5 章で結論を述べる。

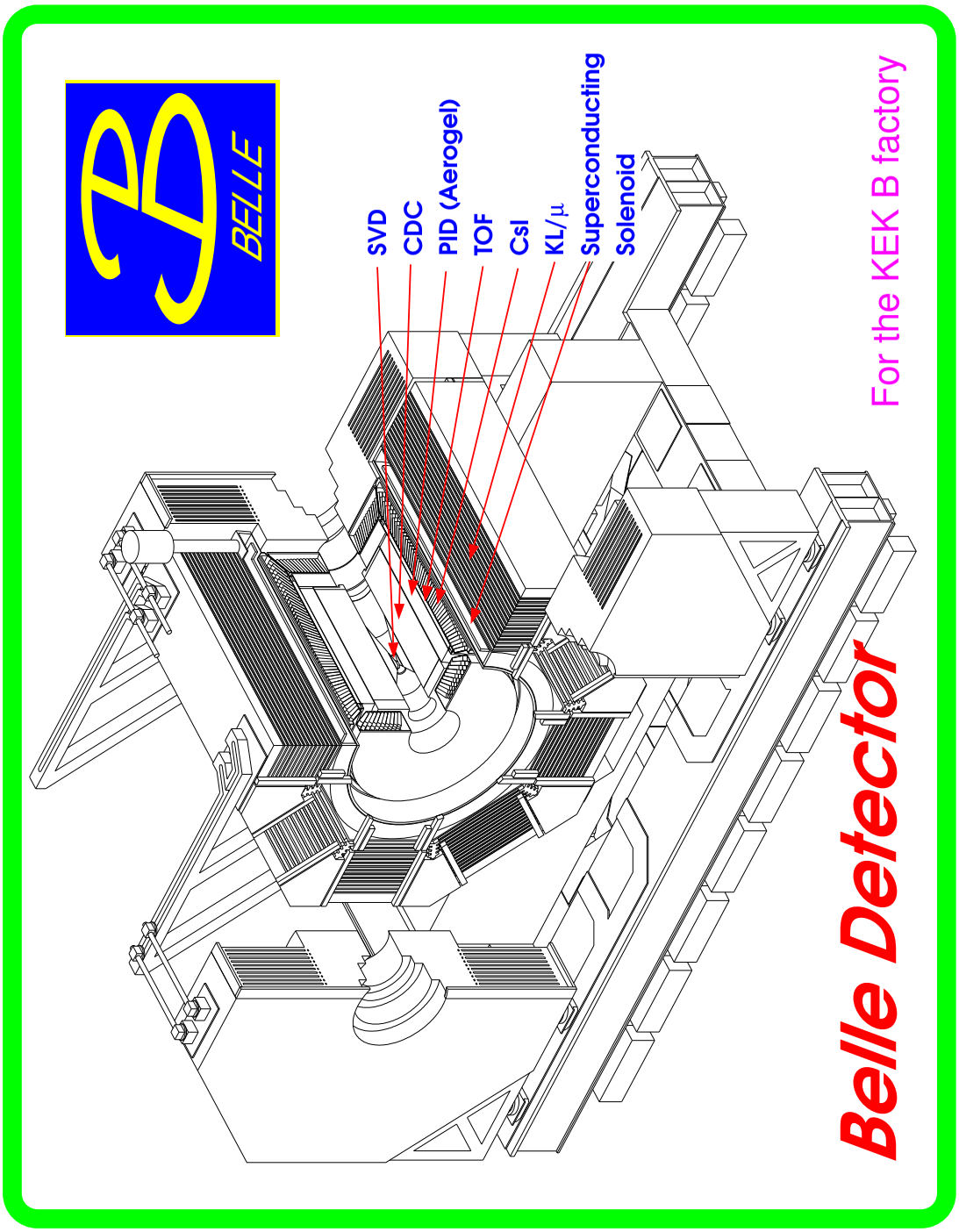

図 1.3: BELLE 検出器

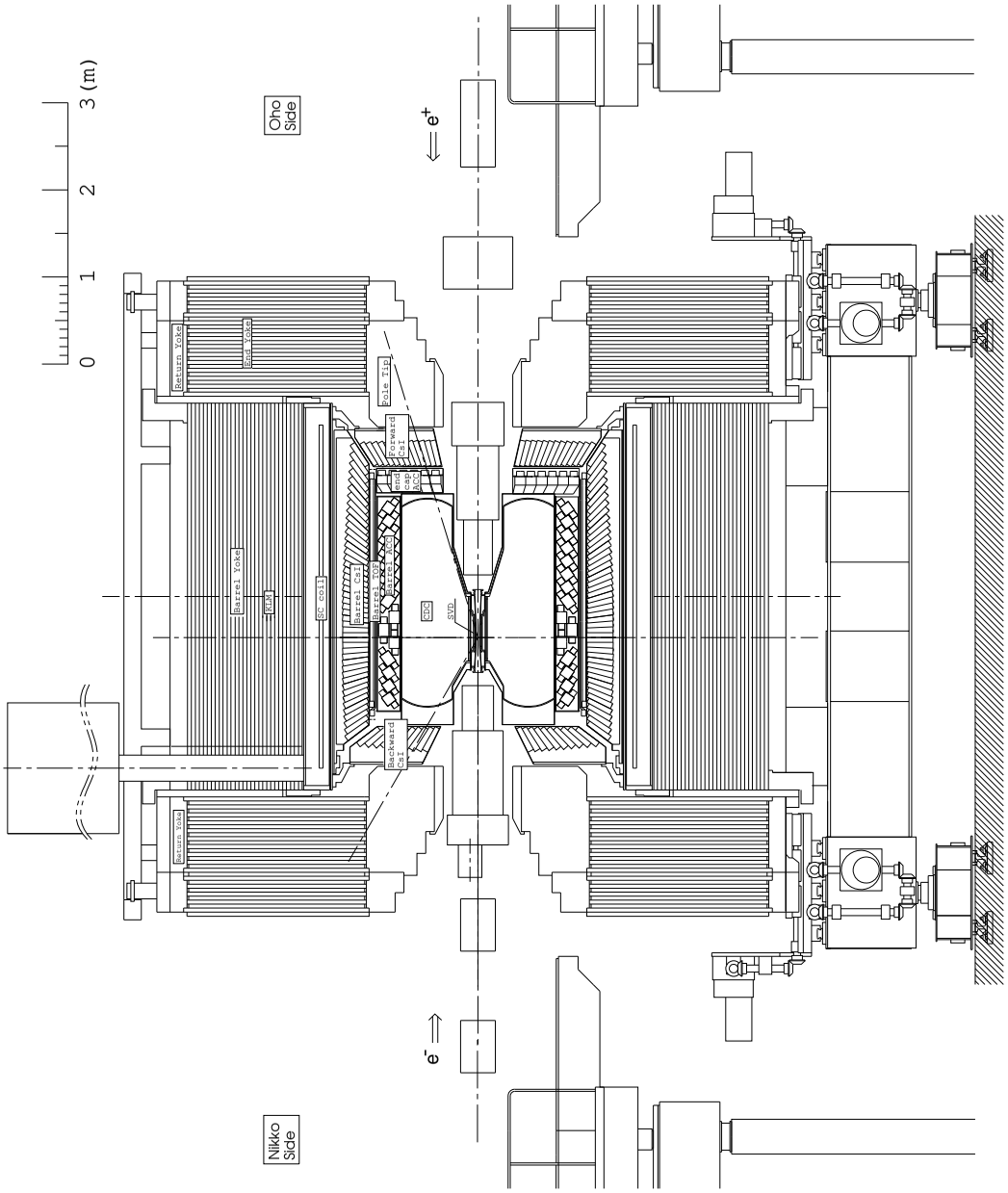

図 1.4: BELLE 検出器の断面図。中心の反応点付近にシリコンバーテックス検出器 (SVD) が位置する。

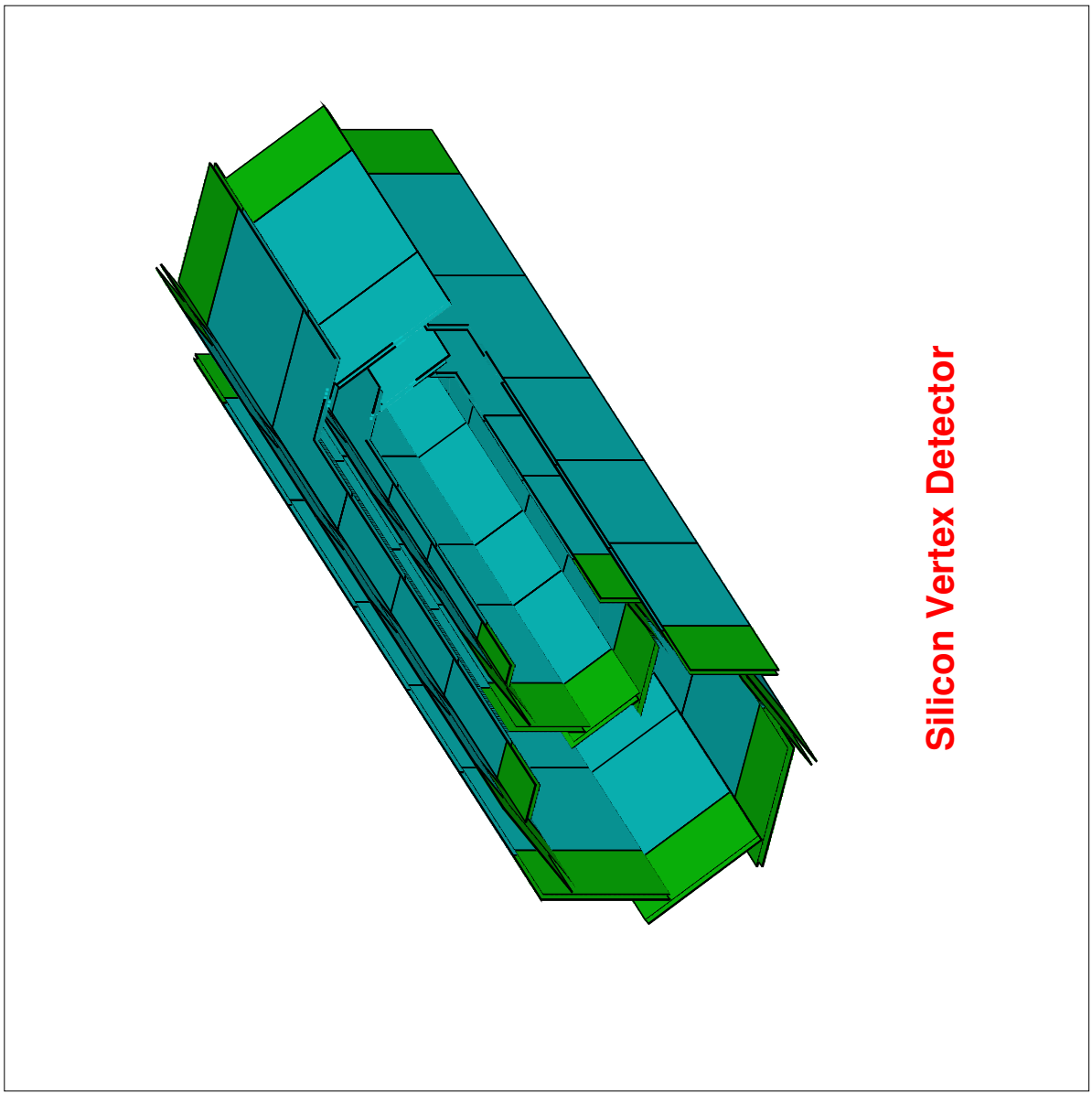

図 1.5: シリコンバーテックス検出器 (SVD)

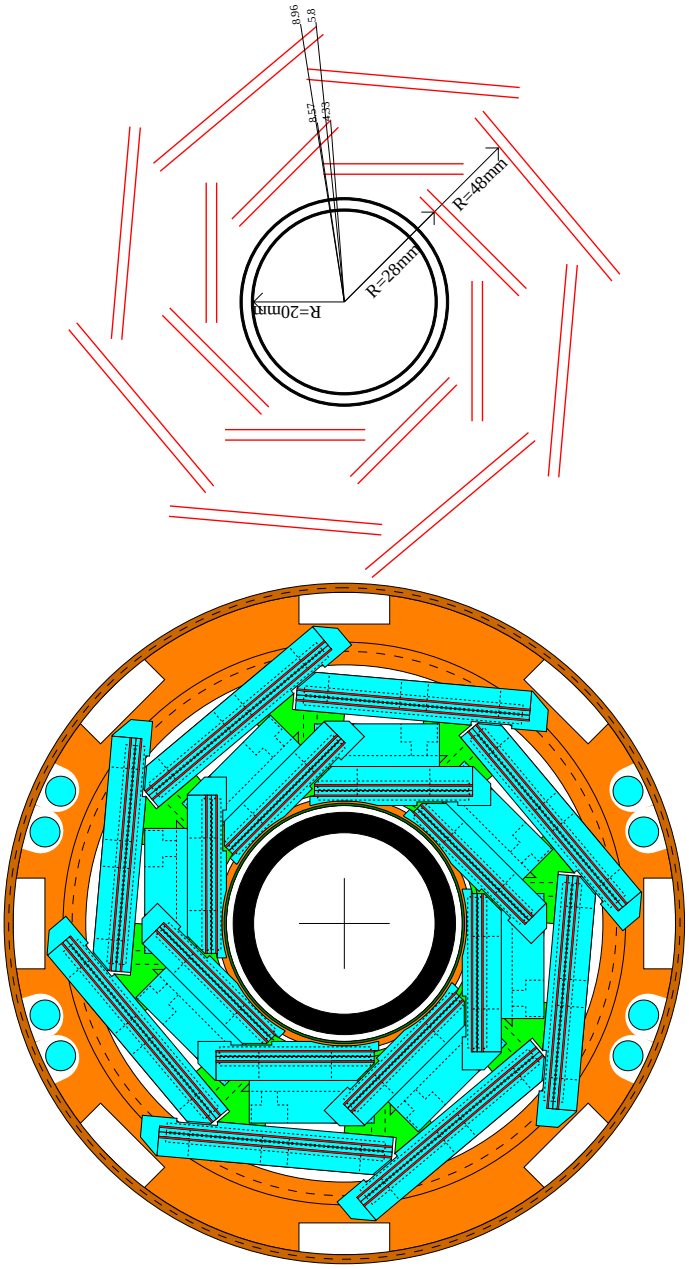

図 1.6: シリコンバーテックス検出器の断面図。ビーム軸に垂直に見た図。上側の図は、シリコンストリップ検出器とベリリウムビームパイプのみの図

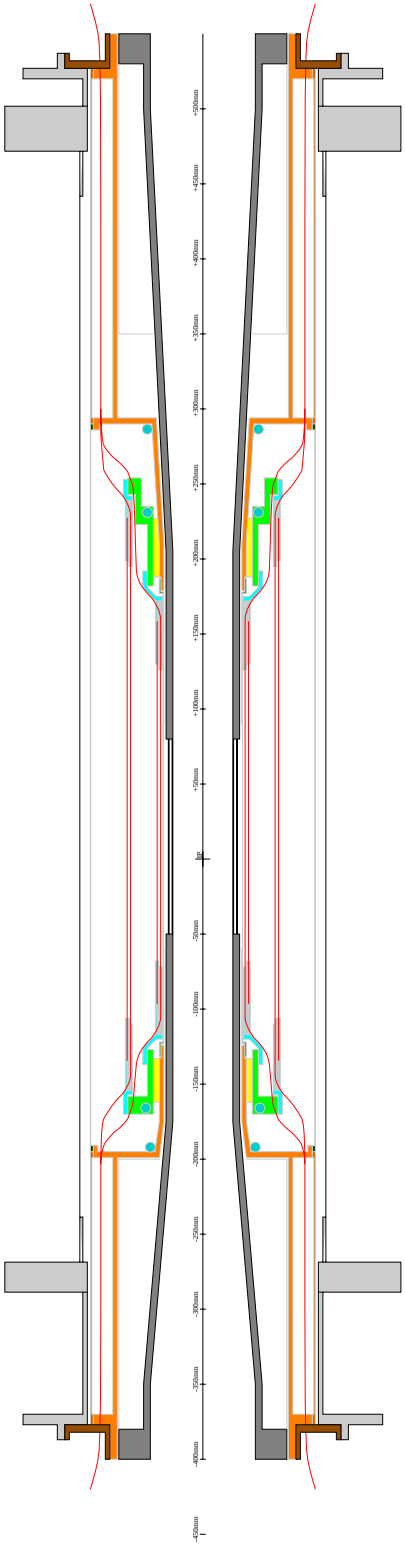

図 1.7: シリコンバーテックス検出器の断面図。ビーム軸に平行な面での断面。

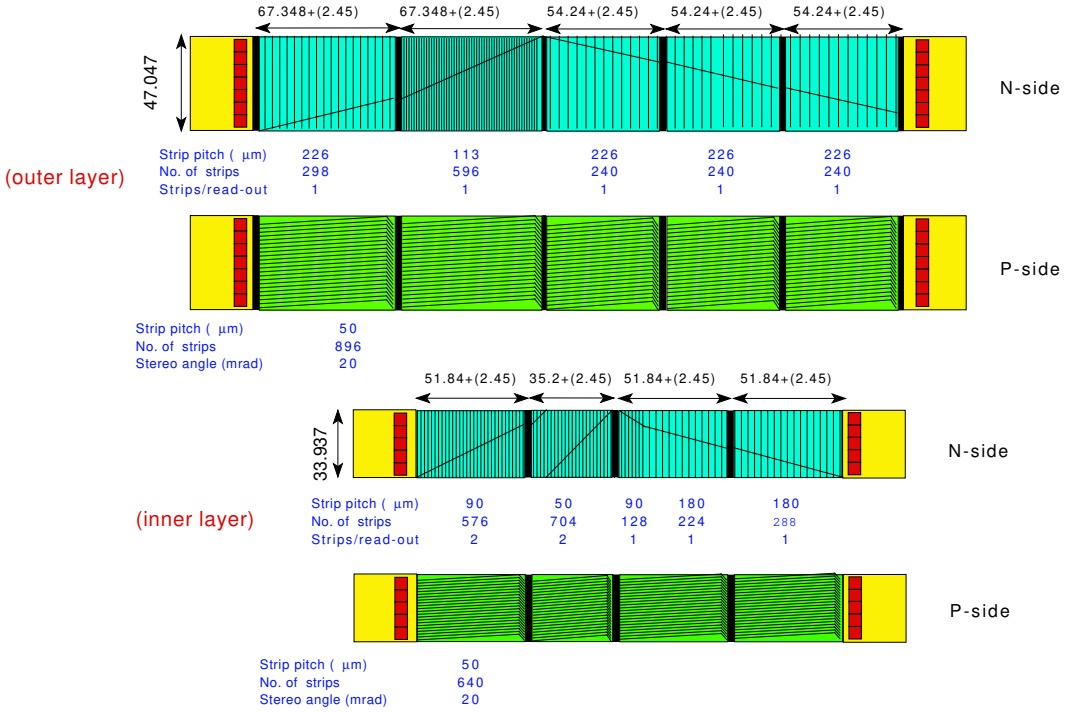

図 1.8: シリコンバーテックス検出器 (SVD) の構成。
(最近、P ストリップのストリップ間隔が $50\mu m$ から $54\mu m$ に変更された)

第2章　シリコンストリップ検出器

この章では、まず半導体検出器の基本的な原理と、シリコンストリップ検出器の構造等について説明する [9, 10]。さらに、BELLE 実験で用いるシリコンストリップ検出器の細部についても述べる。

2.1　半導体検出器の一般論

2.1.1　半導体と半導体検出器

半導体は、真性半導体、p 型半導体、n 型半導体の 3 種類に分類できる。真性半導体とは、シリコンやゲルマニウムなど 4 価の元素の単体結晶であり、絶縁体に比べて比較的低いバンドギャップを持っている。これにより、常温では伝導性を持っており、また比較的波長の長い光でも吸収する。p 型半導体とはシリコンやゲルマニウムなど 4 価の元素の結晶中にホウ素などの 3 価の元素を不純物として注入することによってつくられたものであり、自由な正孔 (ホール) が多数存在する。それに対して n 型半導体はリンなど 5 価の元素を不純物として注入してつくられ、自由な電子が多数存在している。また、不純物濃度が非常に高く、正孔や電子の濃度が非常に大きな半導体をそれぞれ特に p^+型半導体、n^+型半導体とよんでいる。半導体検出器は、p 型半導体と n 型半導体を接合して作られる。もっとも簡単な構造を持つシリコンフォトダイオードなどのダイオード型検出器が一般にはよく用いられる。

2.1.2 ダイオード型半導体検出器の基本特性

まずダイオード型検出器の最大の特徴である p-n 接合部分について述べる。p-n 接合部分は、接合部の両側の p 型半導体と n 型半導体の電子濃度及び正孔濃度が異なっている。このため正孔は n 型半導体中へ拡散してゆき、n 型半導体中の電子を捕獲する。逆に電子は p 型半導体中へ拡散してゆき、p 型半導体中の正孔に捕獲される。

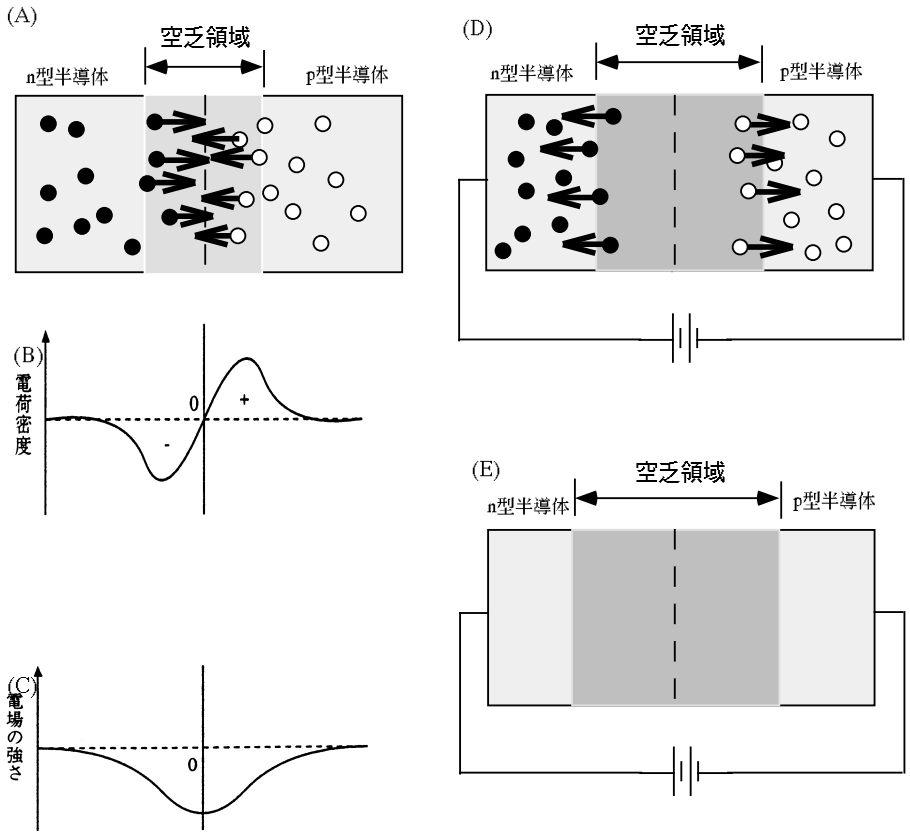

図 2.1: (A)p-n 接合。(B)(C)p-n 接合による電荷分布および電場の強さ (D)(E) 逆バイアス電圧の印加による空乏層の拡大

その結果、最初電気的に中性であった p 型半導体及び n 型半導体は、この正孔と電子の再結合により、n 型半導体中には正電荷が、p 型半導体中には負電荷が余分に存在することになる (図 2.1 (A))。これを空間電荷と呼ぶが、この電荷により、p-n

接合を横切る電場が形成される。この時の p-n 接合付近の電荷密度 (ρ) の分布及び電場の様子は図 2.1(B)、(C) の様になる。この時生じる電位差を p-n 接合の接合電圧と言い、この電位差は一般的には約 1V 程度である。図 2.1(B)、(C) の「空乏層」と呼ばれる領域は上に述べた過程により、自由な電荷及び正孔が存在していない。したがってこの領域内へ荷電粒子などが入射して電子及び正孔が作られると再結合することなく接合電場によって p、n 領域に引き寄せられる。また空乏領域内は自由な電荷が存在しないことから、電気抵抗の非常に高い状態である。空乏領域のこのような特徴は、放射線検出器として有用な特徴である。なぜなら、この領域内に入射した荷電粒子が電子正孔対を作ると、作られた電子及び正孔はこの領域に自由な電子及び正孔が存在しないので再結合によって失われることなく、接合電場によって領域外へ運び出されるからである。従って、空乏領域のすぐ外側に電極があれば、運ばれて来た電荷を取り出すことができ、この電荷量から放射線が空乏領域中に落としたエネルギーが測定できるのである。4 価の元素としてシリコンを用いた場合、一対の電子正孔対を作るために必要な荷電粒子のエネルギー損失は 3.6eV である。

2.1.3 逆バイアス電圧の印加

ここまでは外部電圧を与えていない状態の半導体ダイオード型検出器について述べた。このような検出器では、その性能は実用的とは言えない。何故なら上で述べたように p-n 接合電圧は約 1V で、これでは空乏層が非常に薄いため、放射線によって落されるエネルギーを効率よく収集することは困難であり、また、作られた電子や正孔を高速に電極に収集することも出来ない。

以上のような問題は p-n 接合部に外部から図 2.1(D) のように電圧を印加することによって解決される。このように p 側に較べて n 側の方が電位が高くなるような電圧を逆バイアス電圧という。このとき、図のように検出器内の自由な電子や正孔は逆バイアス電圧によってそれぞれの電極に引かれていき、空乏層が拡がる。十分な逆バイアス電圧を与えれば、検出器のほぼ全体が空乏化する (図 2.1(E))。検出器全体が空乏化されれば、空乏領域で作られた電子正孔対はそれぞれの電極に、再結合して失われてしまうことなく到達し、検出器を通過した粒子の情報を効率よく収集

することができる。従って検出器全体を空乏化することは検出器を使用する際には重要である。

2.1.4 信号の読み出し

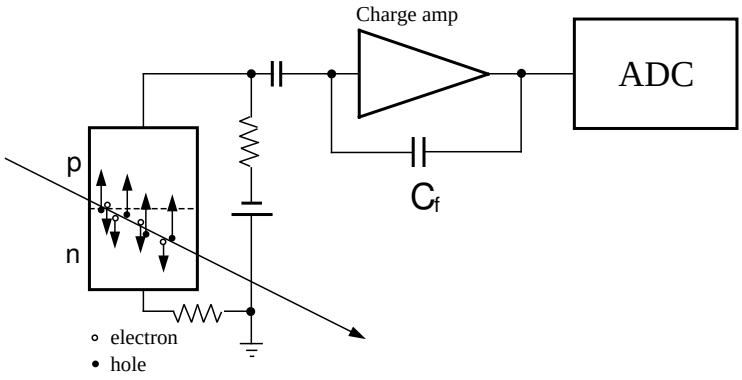

図 2.2: ダイオード型検出器の読み出し

半導体検出器からの信号は、電荷の量となって読み出される。厚みが $300\mu m$ のシリコン検出器の場合、最小電離粒子が垂直に入射したとき、荷電粒子が検出器に落とすエネルギーは約 $80\mathrm{keV}$ と見積もられている。シリコン中で一つの電子・正孔対が作られるために必要なエネルギーが約 $3.6\mathrm{eV}$ であるから、約 22000 個の電子が集められる。これはわずかに約 $4\mathrm{fC}$ の電荷量であり、信号としては非常に小さく、長い距離を伝送することができない。そこで、逆バイアス電圧によって電極に集められた電荷は、電荷増幅器 (チャージアンプ) によって電圧値に変換される。この時読み出された電荷 Q はチャージアンプの帰還コンデンサの容量 $\mathrm{C_f}$ によって

$$V = \frac{Q}{C_f} \tag{2.1}$$

と変換される。一般には、図 2.2 のように検出器とチャージアンプはカップリングコンデンサを介してつながっている場合が多い。また、バイアス電圧は数 $\mathrm{M\Omega}$ 以上の非常に大きな抵抗を通じて与えられる。

2.2 シリコンストリップ検出器の構造

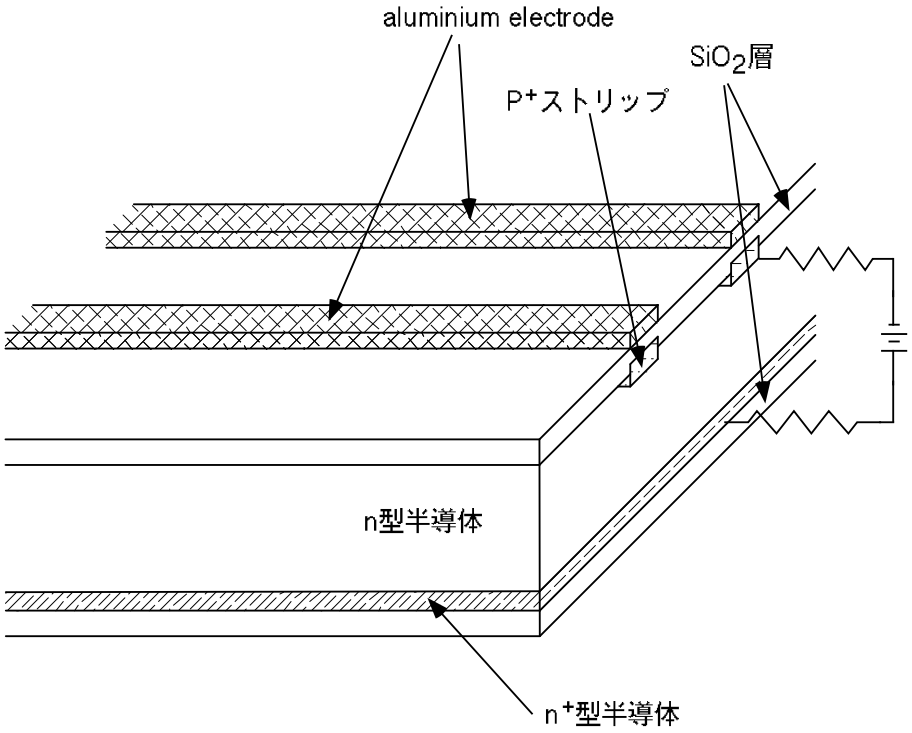

図 2.3: P 型シリコンストリップ検出器

図 2.3 に、基本となる片面型シリコンストリップ検出器の構造を示す。n 型半導体の表面に p^+型半導体をストリップ状に形成し、反対側は n^+型半導体となるように配置する。図 2.3 では、十分な逆バイアス電圧をかけることにより、n 型半導体の部分を空乏層にすることができる。このときストリップ状の p^+型半導体と n 型半導体が p-n 接合を形成し、ストリップ 1 本ずつが半導体検出器として機能する。このようにしてできた空乏層に荷電粒子が通過すると、荷電粒子の落としたエネルギーに比例した数の電子・正孔対が生じ、電子は p^+ストリップに、正孔は n^+型半導体面に引き寄せられる。つまりこれらの信号を読み出してやれば、荷電粒子の通過した位置と検出器に落としたエネルギーがわかる。これがシリコンストリップ検出器の動作原理である。

シリコンストリップ検出器の最大の特徴は、現在の半導体技術の進歩により、ス

トリップを最小で $25\mu m$ 間隔という、非常に狭い間隔で張ることが可能であるという点である。ストリップ間隔はシリコンストリップ検出器の位置分解能に大きな影響を与える。

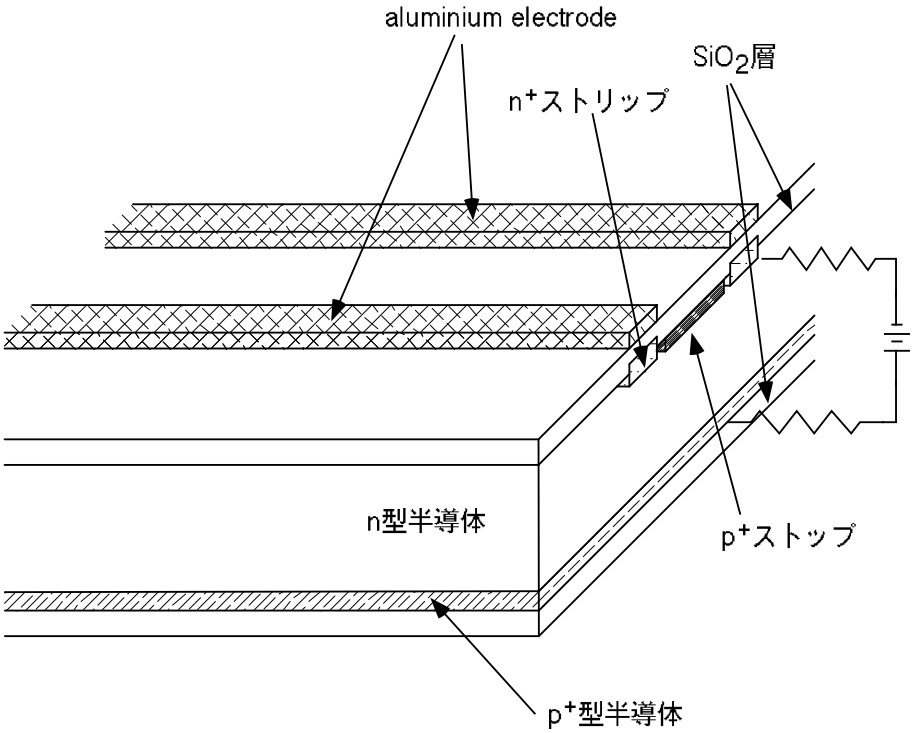

図 2.4: N 型シリコンストリップ検出器

次に、図 2.4 に N 型シリコンストリップ検出器を示す。これは読み出すストリップに p^+型半導体の代わりに、n^+型半導体を使用したものである。これも P 型シリコンストリップ検出器と原理は同じである。しかし、ただ単純に n^+型ストリップを張っただけであると、空乏層が p-n 接合部から発達していくことは P 型シリコンストリップ検出器と同じであるが、シリコンと酸化シリコン (SiO_2) の接合面が抵抗の非常に低い状態となる [11]。この結果、n^+ストリップは隣り合うストリップ間が電気的に結合したままになる。これでは荷電粒子がつくった電荷は、複数のストリップにわたって収集されるため、荷電粒子が通過した位置を正確に求めることはできなくなってしまう。したがって、n 側の隣り合うストリップを電気的に分離させる

ことが必要であり、その一つとして、図 2.4 の様に n^+型ストリップの間に p^+型のストリップを張る方法がある。この p^+型のストリップを P ストップと呼ぶ。

今回の実験では、このタイプの検出器を使用した。

2.3 BELLE 検出器におけるシリコンストリップ検出器

BELLE 検出器では、高い崩壊点検出精度を得るためにシリコンストリップ検出器を組み込むことになっていることは以前述べた。ただ、$B^0 - \overline{B^0}$対からの崩壊粒子はそれほど大きな運動量を持たない。したがって、多重散乱の影響を最小限にするため検出器の物質量自体を減らす必要がある。

2.3.1 両面型シリコンストリップ検出器

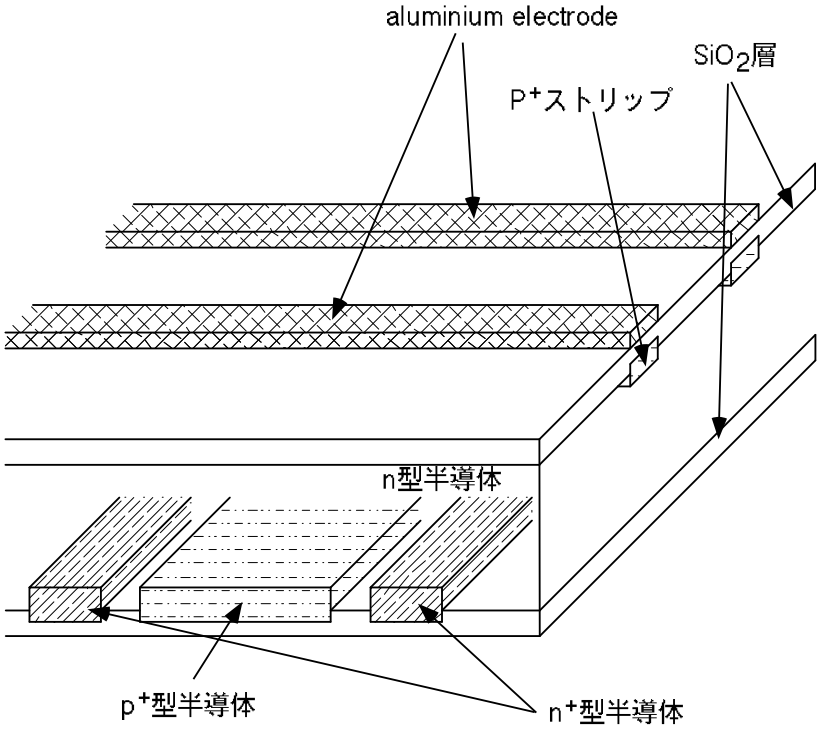

図 2.5: 両面型シリコンストリップ検出器

片面型のシリコンストリップ検出器では、ストリップが一方向にしか張られていないので、1 次元の情報しか得られない。また、2 枚の片面型シリコンストリップ検出器を用いて 2 次元情報を得る事もできるが、これでは物質量が大きくなる。そこで BELLE では、p^+型半導体だけでなく、反対の面の n^+型半導体もストリップ状にして、それぞれのストリップを互いに直交するように張ることにより、2 次元の位置情報を得る両面型シリコンストリップ検出器を用いる事になった。図 2.5 は両面型シリコンストリップ検出器の構造である。n 型半導体の両面に p^+型半導体と n^+型半導体のストリップを直交して張ってあり、それぞれ P ストリップ、N ストリップと呼ばれる。これに逆バイアス電圧をかけることによって、正孔は p^+のストリップへ、電子は n^+のストリップへ集められ、それぞれ電荷として読み出される。この場合、N 型シリコンストリップ検出器と同様に隣どうしの n^+のストリップを電気的に分離するために、n^+のストリップの間に p^+のストリップ (p ストップ) を張ってある。

2.3.2 2 重金属層構造

両面型シリコンストリップ検出器では、P ストリップと N ストリップが直交して張られている。BELLE-SVD 検出器では、DSSD を図 1.5 のように配置するので、ストリップからの信号の読み出しを同じ方向にする必要がある。そのため、2 重金属層構造 (double metal layer、以下 DML) を用いることが考えられている。DML は図 2.6 のように、ストリップからの信号を誘起するための金属線 (これを 1st-metal という) の上に、一様に薄い絶縁層を作り、その上にストリップと直交した読み出し用の金属線 (これを 2nd-metal という) を張る。そして、上下 2 つの金属線を対応させてつないでいく。この構造により、P ストリップと N ストリップは同じ方向に読み出すことができるようになる。

2.3.3 ギャンギング

2 重金属層構造を用いる場合、リードラインとなる 2nd-metal は技術上の問題から $40\mu m$ 程度以上の間隔でしか張れない。よって、正方形でない検出器の場合、ス

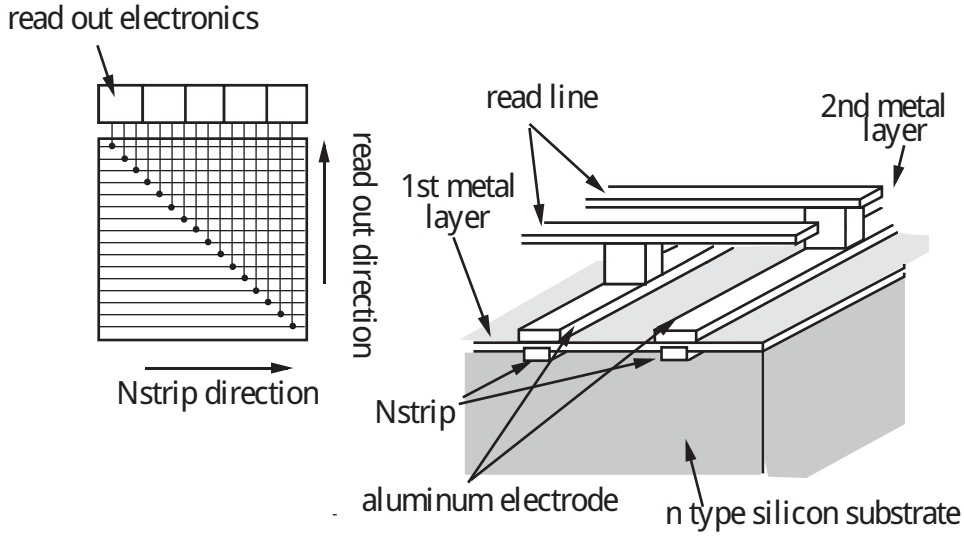

図 2.6: 2 重金属構造

トリップの数の方が、リードライン (読み出し線) よりも多くなってしまうことがある。このとき、1 本のリードラインで複数のストリップを読み出せざるを得ない。これを、ギャンギングという。ギャンギングは、1 つのプリアンプに対して、複数のストリップがつながるので、アンプからみる検出器の容量は増加することになる。また、単独の検出器では、複数のギャンギングのどこを粒子が通ったか特定することはできないという問題も起こる。

2.3.4 信号の読みだし

信号の読み出しは一般の半導体検出器とまったく同じである。しかし、シリコンストリップ検出器は高い位置分解能を要求されるため、数十μm という間隔でストリップが張ってあり、結果として非常に多くのストリップの読み出しをしなければならない。そのため、最近のシリコンストリップ検出器では、集められた電荷の信号をストリップごとに独立したチャージアンプによって電圧変換したのち、時間分割化して単一の信号線にのせる方法が取られている。そして、時間分割化された信号はフラッシュADC(詳細は付録 B) によってディジタル信号に変換され、コンピュー

ターに記録される。

この時間分割化回路は、検出器全体の性能を左右する重要なものであり、チャージアンプとともにマイクロチップ化されたものが開発されている。このようなチップには今回の実験で用いた VA[12]、また BELLE-SVD で使用される予定の SMA^2SH[13] などがある。

2.4 ステレオ不確定性とスラント角

一般に、1 次元測定器の組み合わせにより 2 次元を測定する検出器ではステレオ不確定性という不定性が常に存在する。図 2.7 のように 2 つの粒子が同時に両面検出器に入射し、ストリップ X1、X2、Y1、Y2 にその信号が現れた場合、粒子は A 点と C 点に入射したのか、B 点と D 点に入射したのか、区別がつかない。この不定性がステレオ不確定性である。

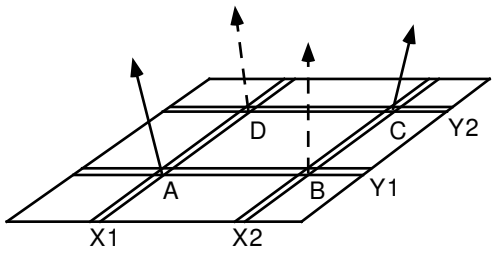

図 2.7: ステレオ不確定性

この不定性を解くために、P ストリップを完全に平行ではなく、各層毎に交互に傾斜角 (スラント角) を持たせる。これにより図 2.8 で分かるようにステレオ不確定性を解消することができる。

BELLE-SVD では、スラント角を P ストリップに N ストリップの垂線から $20mrad$ つけることになっている。

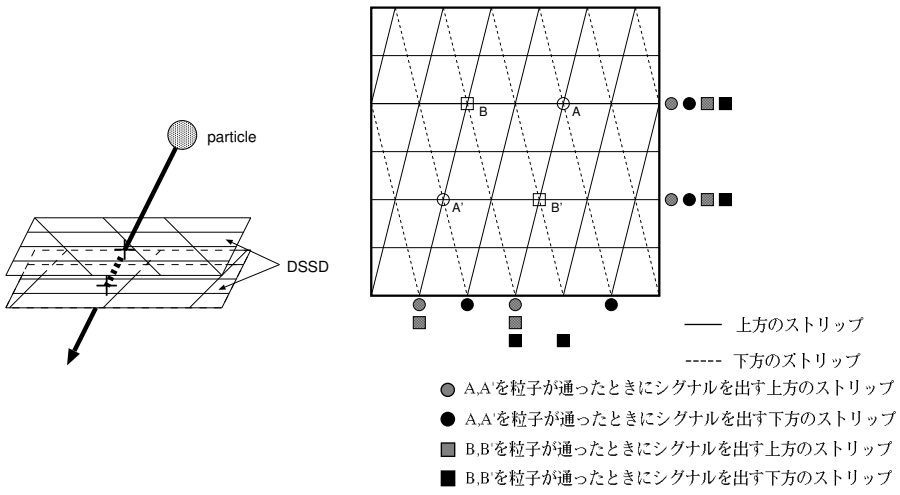

図 2.8: スラント角の効果の概念図

第3章　赤外線レーザーシステムの製作

3.1　目的

BELLE で用いられる SVD は、第 1 章で述べたように BELLE 検出器のなかでも最も重要な位置を占める。しかし、SVD にノイズの大きなストリップやシグナルのでないストリップがあると、それにより位置分解能や飛跡検出効率が下がり、要求される性能が得られなくなる。また、ノイズの大きなストリップによる偽のヒットを捕まえる事が多くなると、データ読み出しの不感時間が増える恐れがある。上記の理由により、実機の SVD ではこのような不良ストリップの割合が 3%以内であることを要求している。また、BELLE で使用する DSSD のストリップの本数は約 10 万本もの膨大な量となる。そのため、これらを高速で自動検査するシステムを製作する必要がある。

今回製作したシステムは図 3.1、図 3.2 のようなもので、これを赤外線レーザーシステムと呼ぶ事にする。

3.2　他の不良ストリップの検査の方法との比較

不良ストリップの検査を行う手段は、赤外線レーザーを用いる以外にも幾つかある。

1. 加速器を用いた粒子ビーム
2. β線源
3. γ線源

1 では、加速器の作る高い運動量の粒子線によって多重散乱の小さな測定が可能であり、位置分解能の高い測定が行えるが、実験設備が大掛かりで、限られた時間し

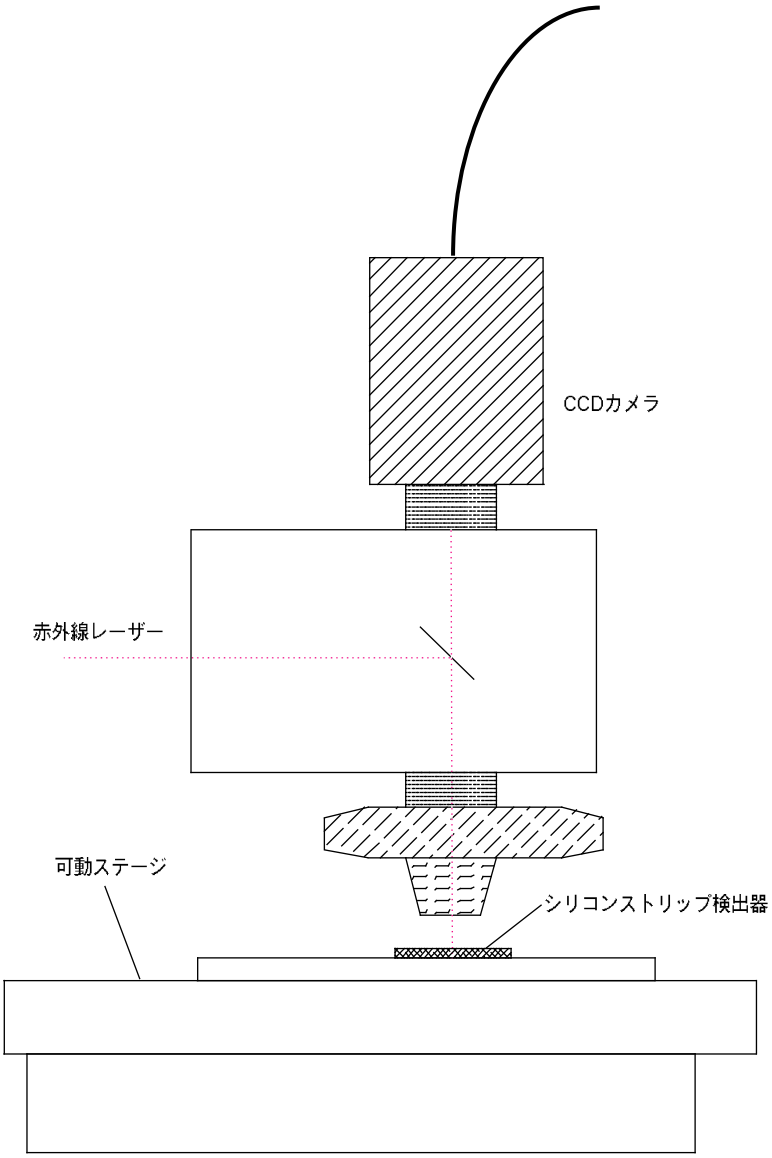

図 3.1: 赤外線レーザーシステムの概略図

図 3.2: 赤外線レーザーシステムの構成。上は全体図。下は正面図

か実験が行えないので、実機の SVD の全ストリップのチェックには向いていない。

2 では、簡単なセットアップで実験を行うことができ、また最小電離粒子に近いエネルギーのデータを得ることができるが、β線のエネルギーが単一なエネルギーではなく広がったスペクトル線をもっているので、最小電荷粒子の電荷量付近の事象をストリップ毎に行うには、時間がかかる。また、特定のストリップに当てると言ったことが難しい。

3 では、2 と同じく、比較的簡単な装置で実験が可能であるが、外部トリガーをかける事が難しい。それを補う為に強いγ線源が必要になり、取り扱いの困難が生じる。例えば、^{133}Ba を用いて外部トリガーを行えるシステム [14] の場合、それでも面積 $6.5 \times 2.56cm$、ストリップ数 512 本のシリコンストリップ検出器に対して、各ストリップにつき $30 \sim 40$ 事象集めるのに 118 時間を必要とするという結果だった。

赤外線レーザーによるテストは次のような特徴がある。

- 短時間で測定することができる
- レーザーのスポットの位置を正確に決定できる
- 自由にレーザーのエネルギーを調整できる
- 特定のストリップに限定して測定を行える

このシステムでは、レーザーと、シリコンストリップ検出器を動かすステージと測定装置があればよく、1 に比べるとはるかに小範囲な実験が行える。また、テストする検出器のセットアップを精密にすることによって、検出器と入射するレーザーパルスの角度を正確に直角に保つことができる。さらにステッピングモータなどで $1\mu m$ 程度の精度で移動できるステージを用意すれば、テストする検出器をステージに固定することによって、検出器上すべての位置について、精密に電荷収集のテストができる。更に、レーザーの強度を自由に調節できるので、最小電離粒子が検出器を通過した時と同程度の電子・正孔対を作り出すことが出来る。またパルス毎の光量が安定しているので、1 パルスごとの生成される電荷量の揺らぎが小さく、検出器の良・不良の試験に有用である。

これらの特徴から、赤外線レーザー用いたテストシステムは、目的の性能を持つと考えられる。

3.3 赤外線レーザーシステムの構成

今回開発した赤外線レーザーシステムは、

- Nd:YAG レーザー・減衰器
- CCD カメラ、顕微鏡システム
- X-Y ステージ

から構成されている。以下、各構成要素についての説明を行う。

3.3.1 Nd:YAG レーザーと減衰器

シリコンのバンド ギャップは約 $1.12eV$ である。よって、このバンド ギャップより大きなエネルギーを持つレーザー光をシリコンストリップ検出器に照射すると、内部光電効果により検出器内で、光子を吸収し電子を伝導帯に叩き上げ、正孔を生成する反応をおこす。これが荷電粒子による電子と正孔対の生成のかわりとなる。一般に赤外線の波長が短いほど物質中で吸収されやすいため、赤外線の吸収長は短くなる。これを示したのが図 3.3 である。今回 DSSD のテストを行う際、それに荷電粒子が通過した時と似たような状況を作りたい。そこで、シリコンの厚さ $300\mu m$ に対し、エネルギー損失が一様になるようにレーザーの波長を考える必要がある。この図 3.3 によれば、約 $1050 \sim 1100nm$ の赤外線では吸収長が約 $300 \sim 1000\mu m$ であるので、この領域だとエネルギーがシリコンの厚さ $300\mu m$ に対し、ほぼ一様におちることになる。そこで、我々は、Nd:YAG レーザーを採用した。

Nd:YAG レーザーは、希土類ランタノイドの Nd^{3+} イオンが $YAG(Y_3Al_5O_{12})$ の結晶中に不純物として入ったもので、図 3.4 で見られるように 4 準位系のレーザーである [15][16]。図 3.4 にあるような遷移で $940nm, 1050 \sim 1120nm, 1300 \sim 1400nm$ の波長のレーザーが発振するが、特に $1050 \sim 1120nm$ 中の $1064nm$ は強く発振する。

このシステムで使用した製品は、米国アモコレーザ社の 1064-EHQ で、PROGRAMMABLE POWER SUPPLY と LASER HEAD から成っている。これを、外部トリガーでパルスを発振するように設定して用いた。その仕様は表 3.1 に記してある。

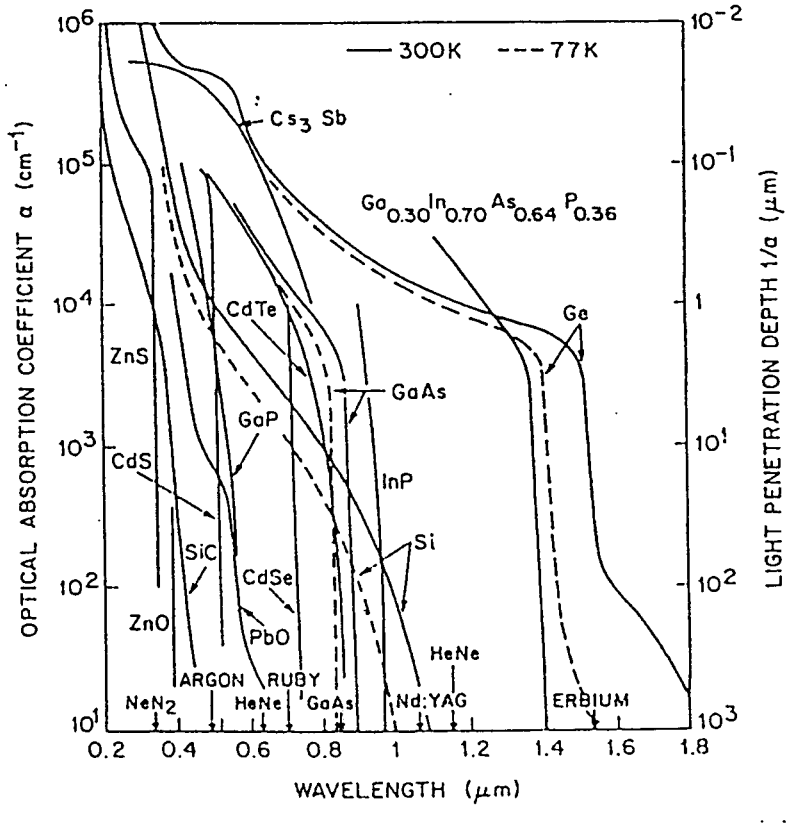

図 3.3: 赤外線の波長と吸収長

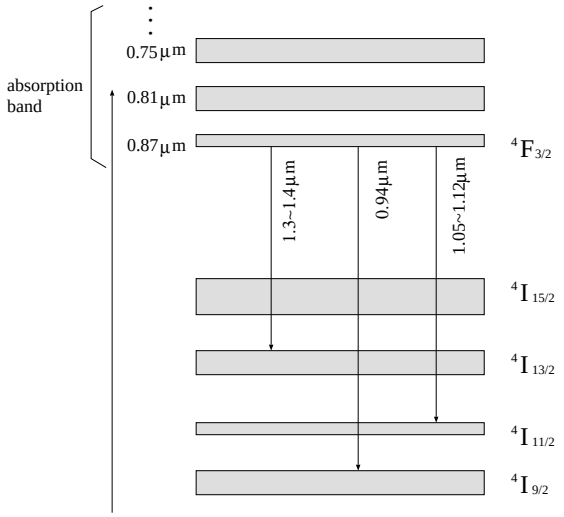

図 3.4: 結晶内での Nd^{3+} イオンのエネルギー準位

製品名	1064-EHQ
エネルギー	$25\mu J$
波長	$1064nm$
ピークパワー	$> 1.8kW$
Q-スイッチ PRF	$0 \sim 15kHz$
エネルギー [a]	$3\%rms$
ピークパワー[a]	$3\%rms$
パルス幅[a] $(nsec)$	$12 \sim 16$

[a] Q-スイッチ PRF0 $\sim 1kHz$

表 3.1: レーザーの仕様

発生したレーザーパルスは、レーザー強度を下げるため、減衰器で減衰される。減衰器として、図 3.5 のような装置を用いた。

これは、偏光していないレーザーをいったん偏光させてから、偏光板で減衰させ、また偏光を解いて光ファイバーに集光するようになっている。

3.3.2 CCD カメラと顕微鏡システム

CCD カメラは、レーザーの焦点を合わせる事と、レーザーの照射位置の特定に用いる。顕微鏡システムとしては、READY PRODUCTS 社の A-ZOOM microscope VSA-02 + option を用いた。これは、最大 8000 倍の倍率を有しており, 250 $\sim$ 8000 倍まで変える事ができるようになっている。減衰器からの出力は光ファイバーによってこの顕微鏡システムに入射され、内部のレンズ系を経て、ほぼ平行線 (直径 $10\mu m$ 程度) となり、最終的に対物レンズに到達する。対物レンズ (ミツトヨ製近赤外補正対物レンズ) の焦点距離は $10mm$ である。

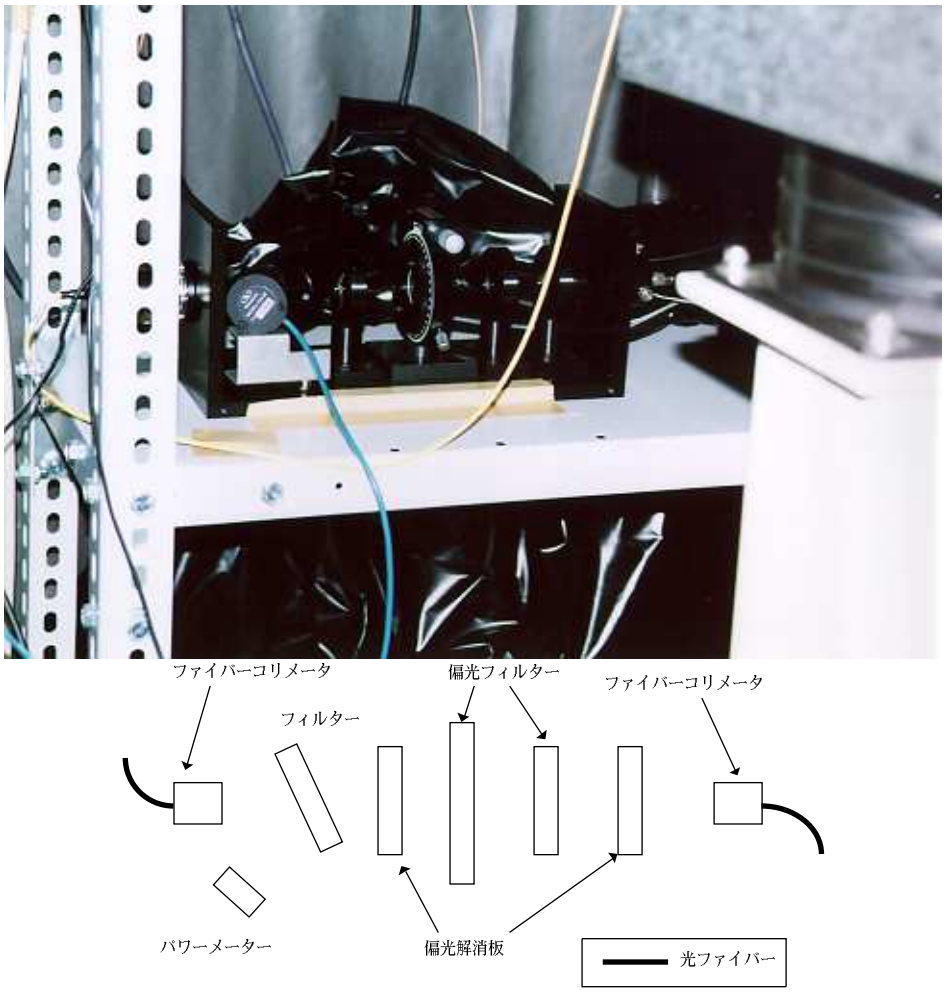
ファイバーコリメータ
フィルター
偏光フィルター
ファイバーコリメータ
パワーメーター
偏光解消板
光ファイバー

図 3.5: 減衰器の構造

3.3.3 X-Y ステージ

シリコンストリップ検出器のテストの際に、その検出器を移動させ各々のストリップにレーザーを当てるような機能を持つ移動システムが必要である。今回制作したシステムには、TOTO 社が組んだ VAKE1A と言う製品を用いた。これは、オリエンタルモーター製のステッピングモーター UFK569A を 2 つ用いる事により X 方向 Y 方向にそれぞれ $0.25\mu m$ の単位で動かす事ができるようになっている。また、最大 X 方向に約 $40cm$Y 方向に約 $8cm$ 移動させる事ができる。SVD に用いる大面積シリコンストリップ検出器の大きさが最大約 $34cm \times 5cm$ なので、これで SVD を X-Y ステージに固定したままで全ストリップに対してレーザーを当てる事ができる。

X-Y ステージの性能の評価は、詳しくは付録 C で述べるが、表 3.2 にまとめておく。この X-Y ステージを Melec 社製の C-820A という VME モジュールを用いて操

	上軸	下軸
真直度 (上下) (μm)	0.74	0.86
真直度 (左右) (μm)	0.39	0.33
ピッチング (秒)	1.31	1.31
ヨーイング (秒)	0.40	1.03
繰り返し位置決め精度 (μm)	± 0.08	± 0.31
直行精度 $(\mu m/200mm \times 80mm)$	0.36	
上軸許容搭載重量 (kg)	20	

表 3.2: X-Y ステージの性能の評価

作する。

3.3.4 赤外線レーザーシステムの設置

本番の検査の際には、約 10 万本のストリップに対して試験を行うので、できるだけ自動化しておくことが重要である。そこで、DSSD のシグナルの読み出し、タ

イミングモジュールとレーザーへのトリガー、X-Y ステージの操作等を統合して行えるようにした (読み出しシステムの説明は付録 B に記している)。このシステムの概念図を図 3.6 に示しておく。このシステムでは、CPU をもつコントロールボード (VME-Sparc) が全てを統括して操作できるようにしている。

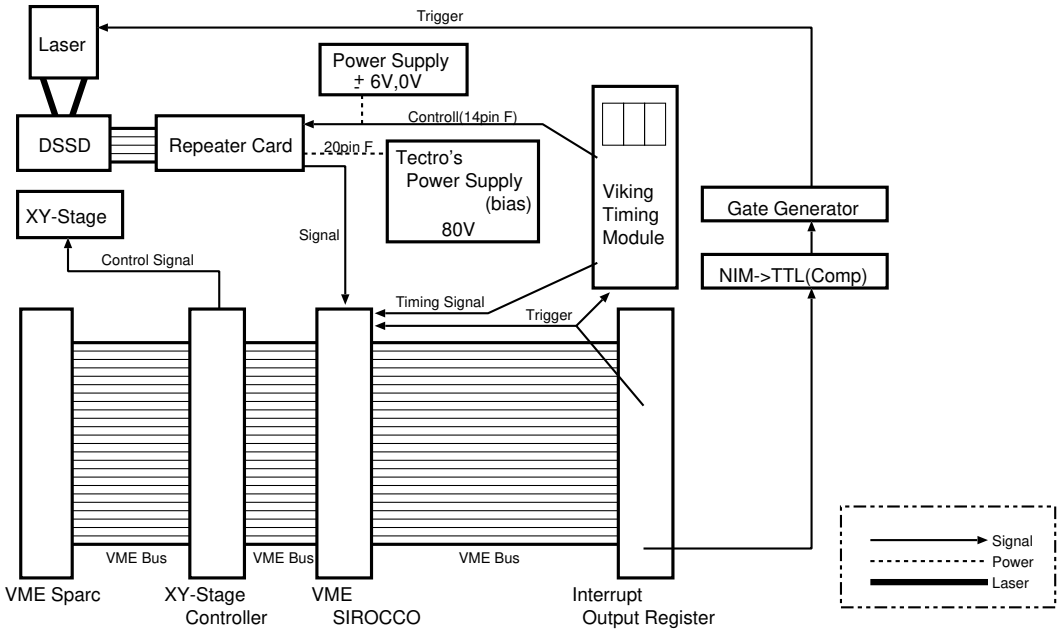

図 3.6: 赤外線レーザーシステムの概念図

3.4 Nd:YAG レーザーの評価

ここで用いるレーザーに対して、以下のようなテストを行い、基本性能を評価する。

3.4.1 レーザーの半径

レーザーによる実験では正確にレーザーを照射する位置を決めることができるが、荷電粒子の場合と大きく違う点として、照射位置が有限の広さを持つということが

ある。そこでここでは、レーザーの強度分布がどのようになっているか、評価してみた。

レーザーの半径を調べるためには、読み出し用アルミ電極による反射を利用して、遮光されている範囲の変化によって、シグナルがどう変わるか見ることにした。結果を図 3.7 に示す。

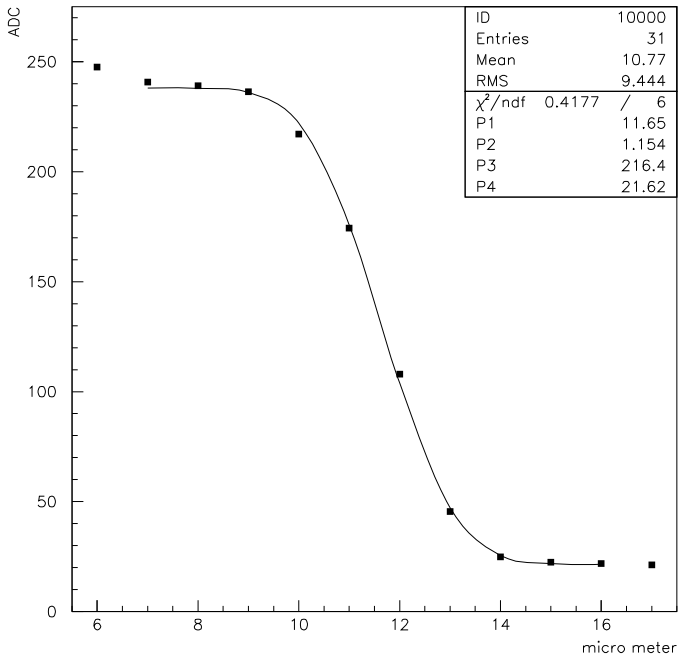

図 3.7: N 側からレーザーを当てたときのシグナルの変化。誤差関数で fit してある。

アルミニウムストリップによってほぼ完全に遮光されている位置ではレーザー光によるシグナルはほとんど存在しない。レーザーを徐々に移動させて、検出器にレーザーのプロファイルの一部が照射されるようにすると、シグナルは大きくなっていき、レーザーのプロファイルが遮光されない領域では、シグナル値が一定になる。レーザープロファイルは正規分布であると仮定すると、図 3.7 のように誤差関数で fit することができる。この関数を位置で微分してやることにより、強度分布が求まる。この誤差関数での fit から、試験するシリコンストリップ検出器と対物レンズと

の距離を正確に調整すれば、十分小さいスポット径を実現できる。図 3.7 では、レーザーの半径はだいたい$\sigma = 1.15 \pm 0.15 \mu m$ であることが分かる。毎回の測定による調整に差は生じるが、それでもσは $2\mu m$ 以内に収める事が出来た。

3.4.2 レーザーのパルスの幅

荷電粒子の通過によるシリコンストリップ検出器内での電子・正孔対生成に要する時間は、読み出し増幅器のもつ時定数 $(100ns \sim 1\mu s$ 程度) よりはるかに短い。従って、パルスレーザーによって荷電粒子をシミュレートする際にもその時間幅は十分に短くしなくてはならない。

このことを確かめる為に、浜松フォトニクス製のピコ秒フォトディテクタ C4258 を使用してパルス幅を測定した。その結果を図 3.8 に示す。

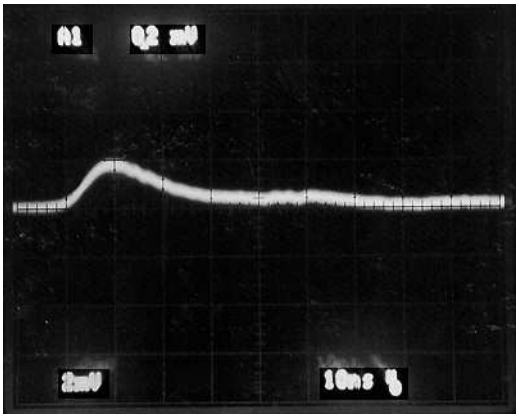

図 3.8: 赤外線レーザーのパルス幅 横軸の単位は $10nsec$

図 3.8 より、パルス幅が$\sim 20nsec$ である。これにより、レーザーのパルス幅が増幅器のもつ時定数より十分小さく、許容範囲内にある事が分かる。

3.4.3 レーザー強度の長期安定性

レーザー発振の際、その出力が不安定であると、DSSD 内にできる電子・正孔対の数が一定に保たれず、正確な測定を妨げる原因となる恐れがある。

レーザー強度の安定性を調べるために、Newport 社製の Photodiode Detecter 818-IR を図 3.5 のように設置して測定した。この検出器は、光をゲルマニウムのダイオードで検出して、その強さを電流として伝える。このシグナルを同じく Newport 社製の Optical Power Meter Model 840-C で、電圧に変換して ADC に信号を送る。ピークホールド ADC には豊伸電子社製の C011 を使用した。これは、ウィルキンソンピーク検出型の 12bitADC で、CAMAC モジュールになっている。そのセットアップを図 3.9 に示す。

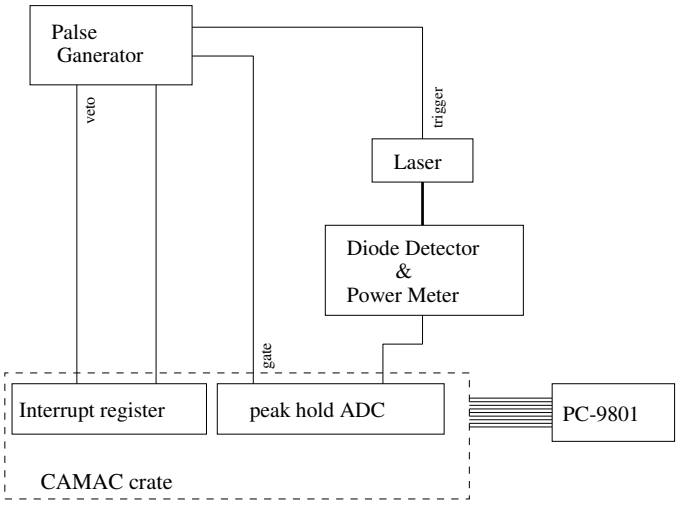

図 3.9: パワーメータのセットアップ図

これを用いて測定した結果を図 3.10 に示してある。これをみると、電源の入れ始めの $2 \sim 3$ 時間は多少不安定であるが、その後は 3%の範囲でレーザーは安定している事がわかる。

以上の基礎測定により、レーザーパルスは、その半径、時間幅、強度の 3 点について

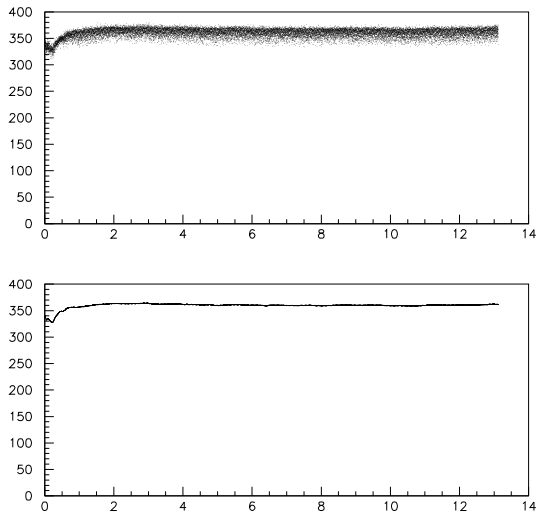

図 3.10: パワーメータで測定したレーザー強度の安定性。横軸は時間 (hours)、縦軸は ADC カウント。$500Hz$ でレーザーを出力している。上の図は 2 秒毎の値。下の図は 2 秒毎の平均の値

- レーザーの半径を $1 \sim 2\mu m$ にまで絞れる
- レーザーのパルス幅は約 $2.0nsec$ 以下
- レーザーの安定性は 3%以内である

と言うことが分かった。これにより、このレーザーパルスがシリコンストリップ検出器の試験に要求される特性を満たしていることがわかった。

第4章　不良ストリップの検出試験

この章では、第 3 章で説明した赤外線レーザーシステムを用いて、BELLE 実験用プロトタイプシリコンストリップ検出器の各ストリップに対して良・不良の判断を行った結果について述べる。

4.1　プロトタイプシリコンストリップ検出器の構造

今回のテストに使用したシリコンストリップ検出器は、浜松フォトニクス製の両面型シリコンストリップ検出器である。これは、BELLE 検出器の SVD の図 1.8 の第 4 層の下流から数えて 2 番目の DSSD のプロトタイプとして作られたものである。この検出器のデザインのパラメータは表 4.1 に写真は図 4.1 に示してある。

この DSSD の詳細な構造を以下で説明する。

4.1.1　P 面の構造

P 面には、幅 $10\mu m$ のストリップが 896 本存在し、そのストリップ間隔は、$50\mu m$ である。今回シグナルが読み出されたストリップは、そのうちの 640 本である。このストリップは、第 2.4 節で述べたように、ステレオ不確定性を解消するために、N 面のストリップの垂線からスラント角を $20mrad$ つけて張られている。これにより、１本のストリップが両端で $1.362mm$ ずれる事になる。P 面の設計図を図 4.2 に示す。

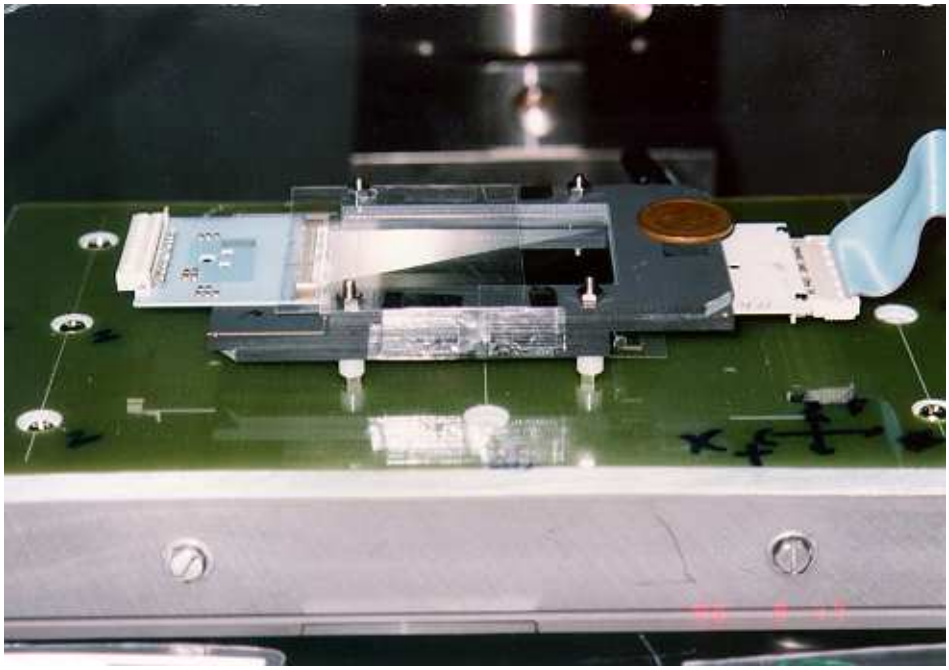

図 4.1: プロトタイプ DSSD の実物写真

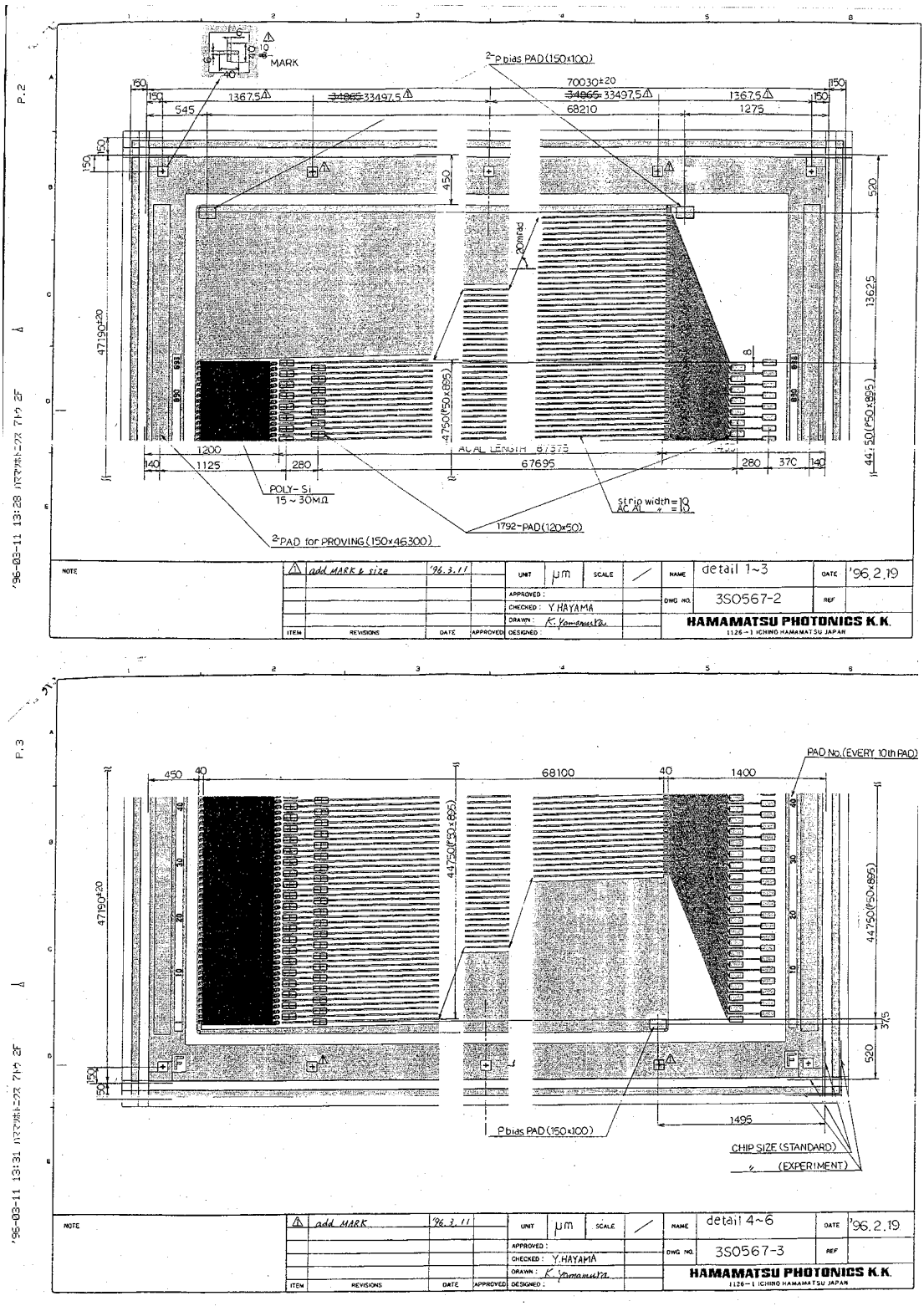

図 4.2: プロトタイプ DSSD の P 面の設計図

チップサイズ $[mm \times mm]$	70.3×47.19
シリコン厚 $[\mu m]$	300
ストリップピッチ (p,n) $[\mu m]$	50 , 113
ストリップ数 (p,n) [本]	894 , 596
ストリップの幅 (p,n) $[\mu m]$	10 , 20
読み出しピッチ (p,n) $[\mu m]$	50 , 113
読み出し数 (p.n) [本]	640 , 596
第 1 層アルミ電極のピッチ (p,n) $[\mu m]$	50 , 113
第 1 層アルミ電極の数 (p.n) [本]	640 , 596
第 1 層アルミ電極の幅 (p,n) $[\mu m]$	10 , 20
2 重金属層構造	N 面
第 2 層アルミ電極の幅 $[\mu m]$	8

表 4.1: プロトタイプシリコンストリップ検出器のパラメータ

4.1.2 N 面の構造

N 面は、幅 $20\mu m$ のストリップが 596 本存在し、ストリップ間隔は $113\mu m$ である。N 面で特徴的な事は、シグナルを P 面と同じ方向から読み出すために第 2.3.2 節で述べたような DML 構造を用いている事である。DML 用のアルミ電極は、$8\mu m$ の幅を持ち $50\mu m$ 間隔で N ストリップと垂直に張られている。DML のアルミ電極と P ストリップとは P ストリップのスラント角のために、DSSD を真上から見ると $2.5mm$ 毎に重なる。N 面の設計図を図 4.3 に示す。

4.1.3 読みだし方法

シグナルは VA チップで電流-電圧変換され読み出される (詳細は付録 B を参照)。チップあたり 128 チャンネルの読み出しが回路があり、このプロトタイプシリコンストリップ検出器には、P 面に 5 チップ、N 面に 5 チップが使用されている。従っ

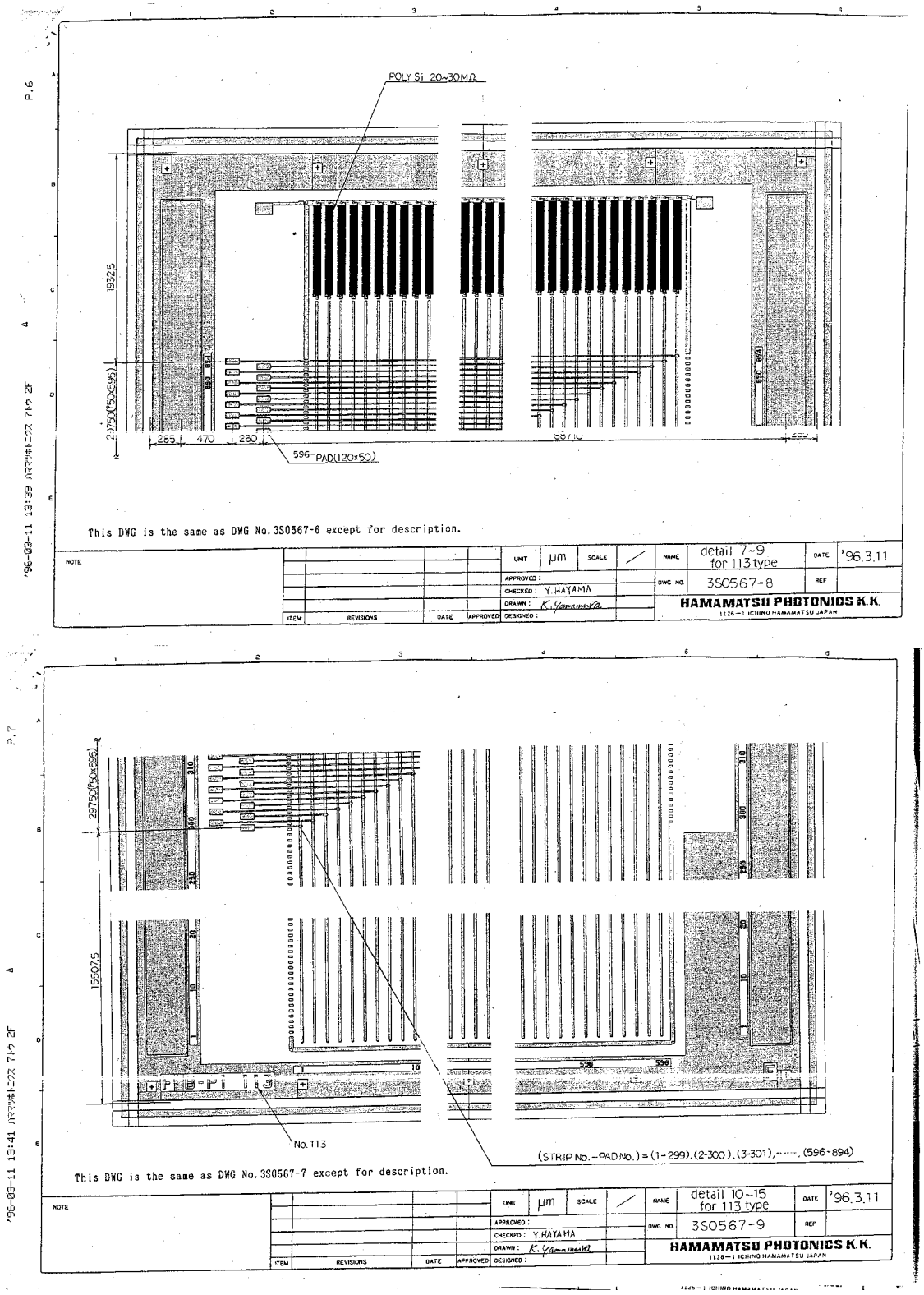

図 4.3: プロトタイプ DSSD の N 面の設計図

て、それらのチップに P 面は $1 \sim 128$、$129 \sim 256$、$257 \sim 384$、$385 \sim 512$、$513 \sim 640$ 番、N 面は $43 \sim 128$、$129 \sim 256$、$257 \sim 384$、$385 \sim 512$、$513 \sim 638$ 番のストリップが接続されている。

ここで、この章で用いるストリップ番号は、この VA チップからの読み出しの順番よりつけることにする。つまり、P ストリップの 640 本を $1 \sim 640$ 番、N ストリップの 596 本を $43 \sim 638$ 番と割り当てた。

4.2 不良ストリップの原因

不良ストリップの原因として、主に次のような事が考えられている。

1. 図 2.5 のストリップとアルミ電極の間の SiO_2層による絶縁が不完全又は破れている。
2. シリコンストリップ検出器上の読み出し用のアルミ電極、又はそれと読み出しチップをつなぐワイヤーボンディングが切れている。
3. 隣り合うストリップが、電気的につながっている。
4. 増幅器の不良。

1 は、主に製造段階で生じた、絶縁層のピンホールによるものである。このようなストリップでは、もれ電流が大量に流れる。もれ電流が大きいと、そのストリップのつながっている読み出しチップが使えなくなり、又ノイズ源となるので製造段階で読み出しチップと接続しないことにした。しかし空乏層を作る為に逆バイアス電圧はかけられていて、そのストリップが電気的に浮いている状態になっている。これによりその浮いているストリップに集まった電荷は、隣のストリップに誘起される。(これを意図的に作ったものをフローティングストリップと言い、ストリップ間隔の狭いシリコンストリップ検出器に対しては、その位置分解能の高さより多くの検出器で利用されている。)

また、読み出しチップに影響を与えるほどもれ電流が流れていない物や、製造の際見過ごした物、製造段階では確認されなかったが何らかの原因でその後絶縁が破れた又は弱くなった物なども存在し、これらは読み出し用のチップとつながってい

る。よって、シグナルはでると思われるが、ノイズが大きいので、不良ストリップとして削除する必要がある。

2 のうち、シリコンストリップ検出器とリピータカード (詳細は付録 B) とを接続する線 (ワイヤーボンディング) が切れたものは、1 の時と同様にこのストリップは読み出す事ができない。よってシグナルは出力されず、ノイズも小さい。また、アルミ電極が切れている場合には、その切れている先の情報は通常読み出し不能になる。しかし、アルミ電極はストリップ上全てに張られているので、電荷がストリップ上に沿って移動し、そのストリップ上の断線していないアルミ電極に電荷を誘起する可能性もある。DML 構造の場合には、ストリップ上のアルミ電極と DML との接点が正確に接続されていなかったり、DML それ自身が断線している事も考えられる。、この時には、シグナルは全くでなくなる。アルミ電極が切れている場合は、導体の領域が正常のストリップに比べて少ないので、通常はノイズが小さい。

3 は、隣り合うアルミ電極が電気的に結合 (ショート) している場合である。この場合、一方のストリップの近傍を粒子が通ったのにもかかわらず、2 本がシグナルを共有することになる。また、導通した複数のストリップはそれ自身が大きな導体となる。そのため、その付近のノイズが大きくなる。

4 は、チャージアンプのコンデンサの異常等の原因が考えられる。これが原因による不良ストリップは、シグナルはほとんどでないであろうし、ノイズも小さい。コンデンサの容量が小さいものに関しては、シグナルもノイズも小さい値を示すと思われる。

製造段階で浜松フォトニクスが確認した不良ストリップの番号を表 4.2 に記しておく。浜松フォトニクスがこれらの不良ストリップを試験した方法は次の通りである。絶縁層の破れは、P 面は $30V$、N 面は $100V$ の電圧をかけ、もれ電流を測定することにより調べた。アルミ電極の断線は、図 4.2 と図 4.3 の中に描いてあるアルミ電極の先にあるパッドと図 2.5 の n 型半導体のバルクとのキャパシタンスを測定して、これが小さすぎるものとした。そして、隣り合うアルミ電極のパッド間のキャパシタンスを測定して、これが小さすぎるものをショートと判断した。

	P ストリップ $(1 \sim 640)$	N ストリップ $(43 \sim 638)$
1.SiO_2の絶縁が破れている	153 358 554	142 152 192 271 335 380 418 517 556 623
2. 読み出し用のアルミ電極が切れている	42 73 147 278 578 594 596 602 612 638	115 147 424 436 497 633
3. 隣のストリップと電気的に分離されていない	49 50 51 52 83 84 548 549 561 562	330 331 494 495

表 4.2: 製造過程で確かめられた不良チャンネルの番号

4.3 赤外線レーザーシステムを用いた不良ストリップの試験の概要

4.3.1 レーザー出力の較正

赤外線レーザー 1 パルスによってシリコンストリップ検出器中で電離する電荷量を、荷電粒子が検出器を通過する際に電離する電荷量 $(22000e^-$程度$)$ と同程度に調整する必要がある。このため、プロトタイプの DSSD にレーザー及びβ線 (Sr^{90}) を照射して、得られたシグナルを比較し、レーザーによる電離量を、最小電離粒子の電離量付近に合わせた。

4.3.2 DSSD の水平の出し方と平行成分の回転の補正

DSSD を設置するとき、その位置精度が重要である。水平に設置しないと、レーザーの焦点がずれていく。これでは、特定ストリップのみにレーザーを当てることができない。そこで、DSSD の四隅で焦点が合うように DSSD の支持台を調整した。しかし、シリコンストリップ検出器のたわみがあるので X-Y ステージを移動させているとレーザーの焦点は多少ずれる。しかしこのずれは許容範囲であった。

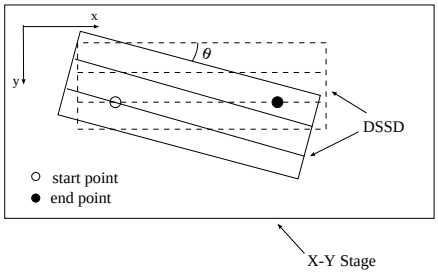

図 4.4: 回転補正の方法の概略図

DSSD の回転補正は、P ストリップの情報を用いておこなう。まず、始点を定めておき、そこから回転をしていないと仮定した時のその P ストリップのある位置に移動する。そこでのレーザーの照射位置を P ストリップを用いて測定する。この補正方法の概略図を図 4.4 に示した。レーザーの照射位置の計算には式 4.1 のように荷電重心を取る方法を用いた。

$$x_A = \frac{\sum_{i \in cluster} x_i Q_i}{\sum_{i \in cluster} Q_i} \tag{4.1}$$

ここで、x_iは i 番目のストリップの位置、Q_iは i 番目のストリップのシグナルの ADC カウントとする。これを数点行い、このデータより DSSD の回転角を決定する。

4.3.3 レーザー照射のシークエンス

レーザーをDSSDに当てる際、DSSDの読み出し用のアルミ電極は、レーザーを反射してしまう。これを避けるために、P面のストリップを試験するときは、レーザーをN面から当てるようにし、N面を試験するときにはレーザーをP面から当てるようにする。これらの試験はストリップの構造、配置がかなり違うため、別々に説明する。この後の説明では、第4.3.2節で述べた回転の補正はすでに入っているものとする。

P面ストリップ用のシークエンス

N面には、Nストリップ上のアルミ電極とDMLのアルミ電極の二つの反射物があり、レーザーの照射位置はこれらをずらしてPストリップに当てなくてはいけない。これを満たす為に、上で述べたようにPストリップの試験の時は、Nストリップに沿ってX-Yステージを動かして測定を行う。この時DMLの反射も考慮にいれる必要があるのだが、Pストリップは$50\mu m$毎に張ってあり、DMLも$50\mu m$ピッチで張っているので、最初にレーザーの照射位置を2本のDMLの丁度中点に合わせておけばこの効果は考えなくてよくなる。

測定方法は、まず始点を決定する。DMLの反射を考慮にいれる必要があるので、始点は、DMLのある側にする。この時、DMLとNストリップに対しては、だいたいそれらの中点に照射しているようになるようにする。ここから、Nストリップに沿ってステージを移動させ、全Pストリップにレーザーを照射し、そのストリップが正常かどうかを測定する。

N面ストリップ用のシークエンス

N面のストリップの検査は、Pストリップに沿ってステージを動かして行う。Pストリップ上のアルミ電極のみが反射物となるので、Pストリップの試験に比べてやさしい。

測定方法は、Pストリップの時と同じように、まず始点を決める。Nストリップ

側の試験の時はどちらの端を始点にしても問題はないのだが、今回はN ストリップのストリップ番号が 43 番のものを始点とした。レーザーの照射位置がN ストリップ上でP ストリップ間にくるように合わせる。そこから全N ストリップに対して試験を行う。

以上の方法でデータを取得した。取得したデータについて付録A で述べてある方法を用いて、ストリップ毎のノイズの大きさ、レーザーパルスの大きさを求めた。これらの情報を用いて不良ストリップを探す。具体的な方法を次節で述べる。

4.4 赤外線レーザーによるテストの結果

4.4.1 不良ストリップの定義

第 4.2 節で示した不良ストリップを判別するために、以下の条件にあてはまるストリップを探す。

1. レーザーがそのストリップに当たってるにもかかわらずシグナルが出ない。または、小さい。
2. レーザーが当たっている隣のストリップにもシグナルがでる。
3. ノイズが大きい。

1 の捜索は、ストリップ上にレーザーを当てた時に、そのストリップの典型的なシグナルの大きさよりもあまりに小さいものは不良ストリップとした。今回は、P 面に対しては、ADC で 200 カウント以下を不良ストリップとした。N 面に対しては、両端のストリップは、中央に比べて反射する量が少ないのでその分シグナルが低くなる。それで、前後 4 ストリップに対しては 160 カウント以下、それ以外には 210 カウント以下を不良ストリップとすることにした。

2 の捜索は、まずレーザーを当てたストリップの隣のストリップに対して、それらの大きい方のシグナルが典型的なものに比べて異常に大きいものを捜索して、そのレーザーを当てたストリップを不良ストリップとした。これは、隣のストリップ

にシグナルが誘起されているので、第 4.2 節で述べた原因 3 の候補となる。

3 の捜索は、各々のストリップのノイズの分布を正規分布でフィットして、その中央値から約 5σの所に閾値を設け、それより大きいものを探してそれを不良ストリップとする。

N 面のストリップに対しては、図 4.6 の下の図で見られるように、第 4,5 チップにつながっているストリップ (番号でいうと 385 番以降の 254 本) のノイズが大きい事がわかる。これは、製造時の問題であると思われ改善策も見当たらなかったので、今回はこのチップにつながっているストリップに対しては、ノイズを用いた不良ストリップの捜索は行わない。

4.4.2 不良ストリップの有無の結果

前の節で説明したカットを行った結果を図 4.5、図 4.6 に記しておく。図 4.7 は、レーザーを当てたストリップのシグナルを横軸に取り、縦軸は両隣のストリップのうち大きい方のシグナルを取って各々の試験のデータをプロットした。これを見ると、右下の領域に、正常なストリップが見られ、それ以外の不良ストリップは、4 つの領域に区分できるのが分かる。図 4.7 のようにそれぞれの領域に 1、2、3、4 と番号をつけて不良ストリップと判明したストリップを表 4.3 に記す。

それぞれの典型的な分布を図 4.8 に記しておく。

4.4.3 不良ストリップの原因に関する考察

本システムの目的は、BELLE 実験で用いる DSSD の 10 万本あまりのストリップの良非を迅速且つ確実に判断するところである。従って、今回新たに見つかった不良ストリップの原因を理解し、起こりうる事態を予想出来るようにしておくことは非常に大切である。そこで以下に図 4.7 の各領域毎の原因を考えてみた。

領域 1 は、シグナルが小さいかでていないストリップが集まっている。浜松フォトニクスの確認した絶縁が破れているストリップは、製造時に読み出しチップにつないでいないので、この領域に入る。これに関しては、全てを不良ストリップであ

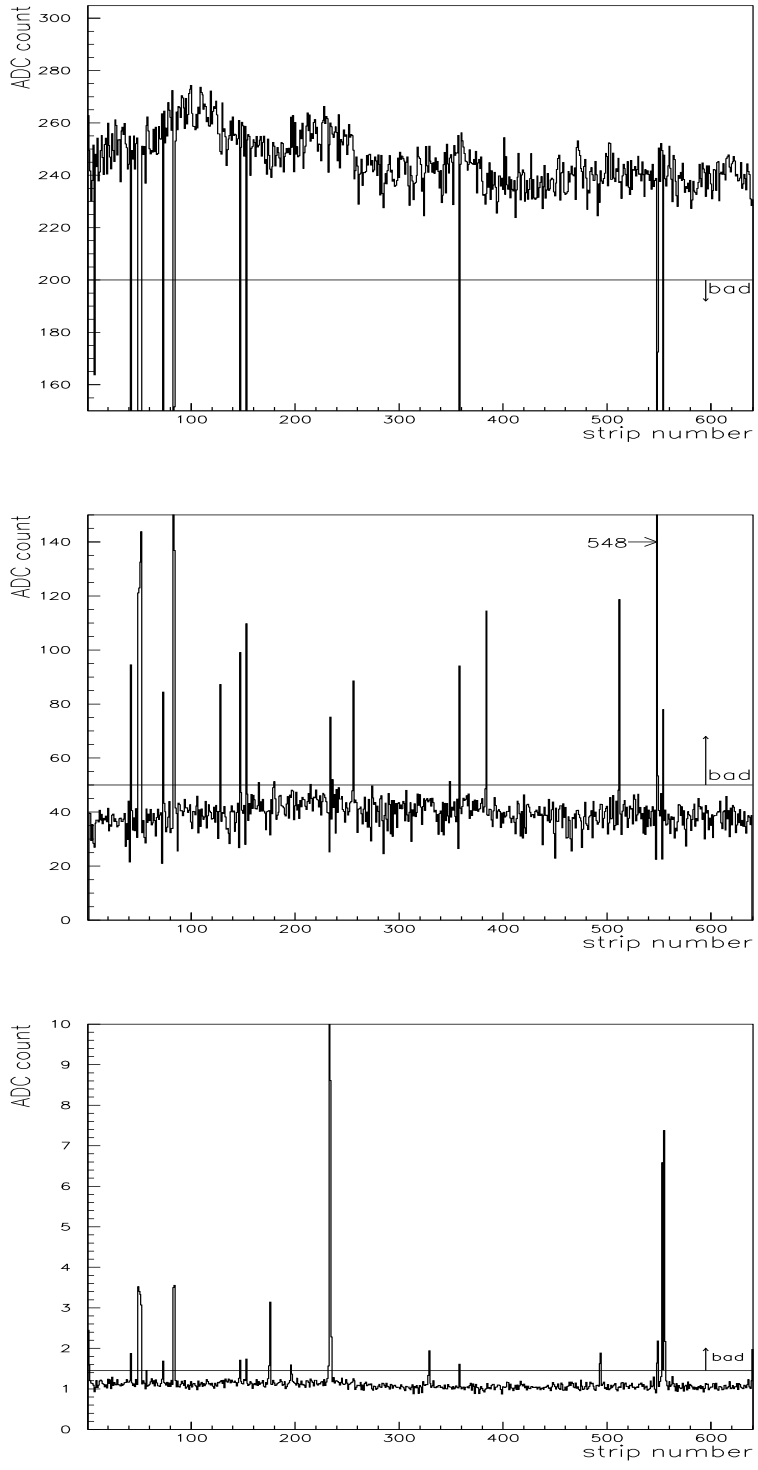

図 4.5: P 面の不良ストリップの捜索に用いたカット。横軸が検査対象のストリップのストリップ番号。縦軸が上から、検査対象のストリップのシグナルの ADC カウント、検査対象のストリップの両隣のもののうち大きい方のシグナルの ADC カウント、検査対象のストリップのノイズの ADC カウント。図中の線で良・不良のカットを行った。

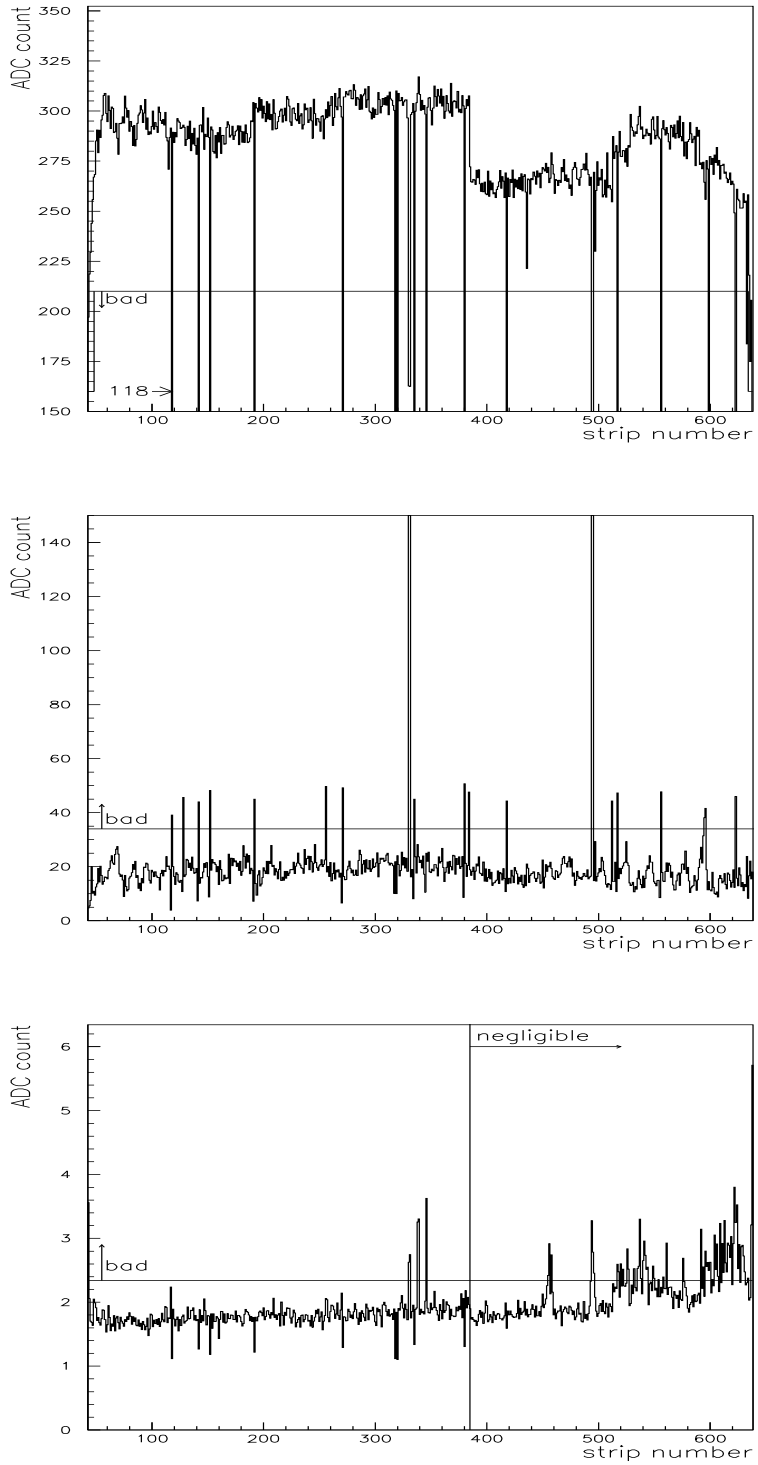

図 4.6: N 面の不良ストリップの捜索に用いたカット。横軸が検査対象のストリップのストリップ番号。縦軸が上から、検査対象のストリップのシグナルの ADC カウント、検査対象のストリップの両隣のもののうち大きい方のシグナルの ADC カウント、検査対象のストリップのノイズの ADC カウント。図中の線で良・不良のカットを行った。

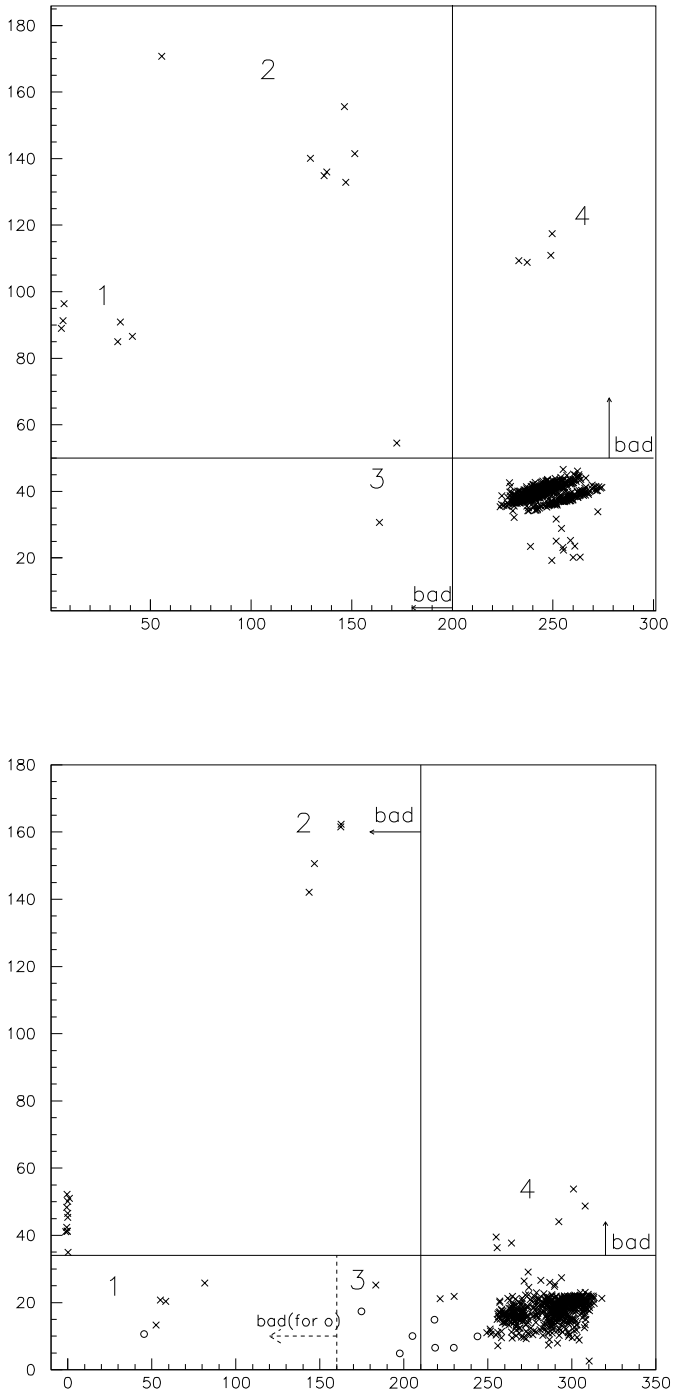

図 4.7: レーザーを当てたストリップのシグナルと隣のストリップのシグナルとの相関。横軸がシグナルの ADC カウント。縦軸が隣のストリップのうち大きい方のシグナルの ADC カウント。上が P 面、下が N 面.

	P 面			N 面		
領域 1 (シグナルがないか 非常に小さい)	42 153	73 358	147 554	118* 192 320* 380 556 638*	142 271 335 418 599*	152 318* 346* 517 623
領域 2 (ストリップ間が 導通している)	49 51 83 548	50 52 84 549		330 494	331 495	
領域 3 (シグナルが小さい)	7*	(549)		633		
領域 4 (VA チップによる原因)	128* 512*	256*	384*	128* 512*	256* 595*	384* 596*
ノイズが大きい	1* 176* 233* 329* 553* 640*	2* 196* 234* 493* 555*	175* 232* 235* 494* 556*	43*	338*	339*
				385 番以降の ストリップ 計 59 本		

表 4.3: 今回のテストで確かめられた不良チャンネルの番号。*は今回のテストで見つかった不良ストリップ。

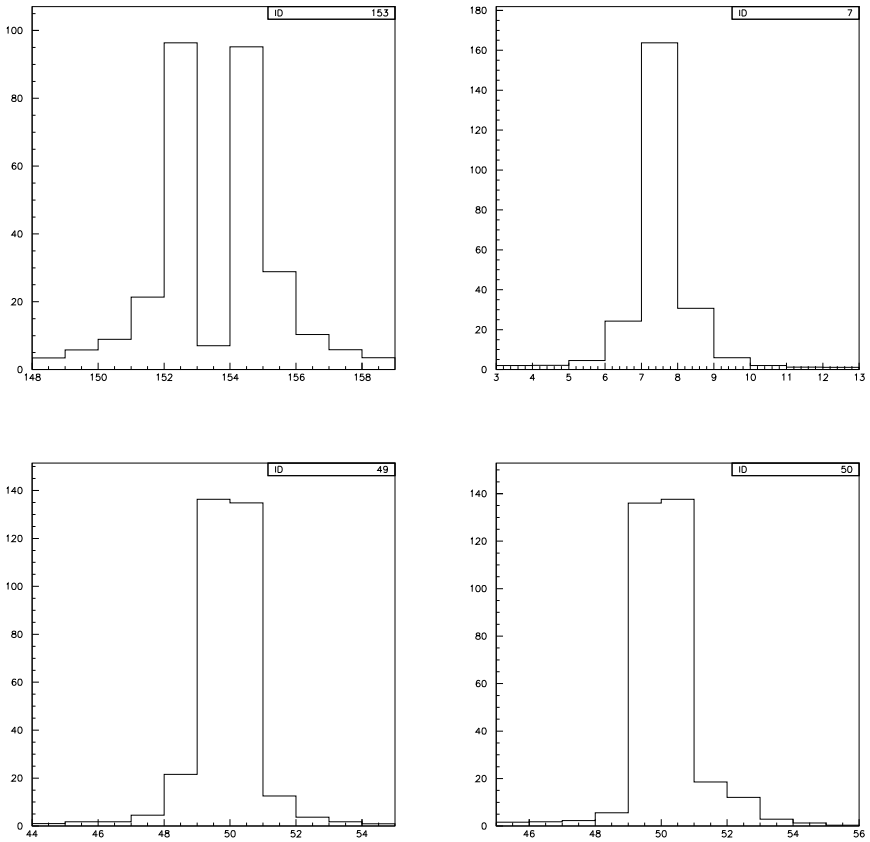

図 4.8: 典型的な不良ストリップの形。左上は領域 1 で、右上は領域 3 で、下の 2 つは領域 2 で、見つかったイベント

ると認識することができた。

アルミ電極が切れているストリップ (第 4.2 節の原因 2) も、この領域か領域 3 に入るものと思われる。しかし、P 面の 278、578、594、596、602、612、638 番、N 面の 115、147、424、436、497 番のストリップは正常なストリップとみなされた。これは、アルミ電極が切れているところまでは、正常に読み出し可能であるし、また、アルミ電極は切れているがストリップを通してシグナルがうまく伝わる可能性もあるので、今回の試験では、不良ストリップと見なせなかったものと思われる。

N 面の 118、318、320、346、599、638 番は、今回新たに見つかったシグナルの小さい不良ストリップである。例えば 118 番のストリップはノイズも小さく、しかし、ワイヤーボンディングの線が切れていなかったので、N ストリップの上に張っているアルミ電極か DML のアルミ電極が切れている可能性がある。顕微鏡でそのストリップを見て行くと、図 4.9 の様に DML が切れているらしいところがある。これが原因でシグナルが見えないものと思われる。318、320、346、638 番のストリップに

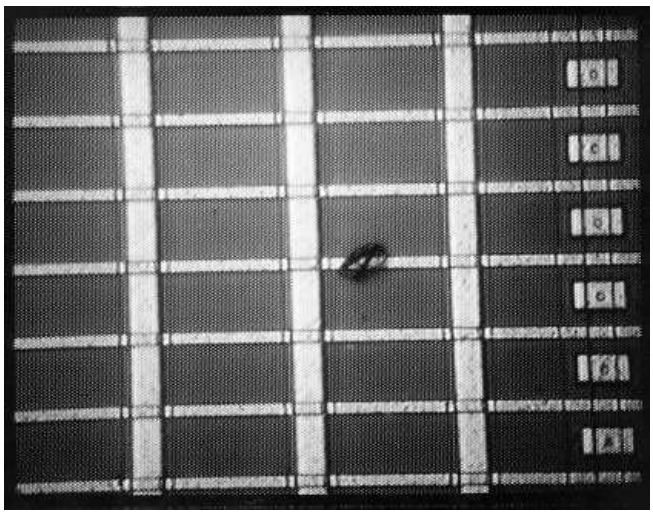

図 4.9: N 面の 118 番のストリップの断線の様子

ついては、シグナルは小さいが観測でき、ノイズは平均より小さい。よって、これらのストリップが不良とみなされる原因は 118 番と同じで、その読み出し線の切れている程度によって、この差が表れたと思われる。

559 番のストリップに関しては、後に述べるように、この周りの領域のストリップが正常でない可能性が高い。

領域 2 は、隣り合うストリップが電気的につながっていることが原因 (第 4.2 節の原因 3) と思われる。これらの 2 本のストリップの間の電荷の共有の分布をレーザーシステムを用いて $1\mu m$ 毎に調べてみた。これを図 4.10 に記す。

P 面の $548 \sim 549$ 番のストリップは、電気的につながっていて、さらに 548 番のストリップが正常に読み出されないものであると思われる。よって、548 番目にレーザーを照射しても、549 番のストリップに照射しても、549 番のストリップの方に大部分のシグナルが誘起される。それにより、図 4.7 で、548 番のストリップの情報は左上にあり、549 番のストリップのそれは右下で領域 3 にあるように見える。

P 面の $561 \sim 562$ 番のストリップは、浜松フォトニクスでは、電気的につながっていると確認されたのだが、今回用いた方法では、見つけられなかった。レーザーでは、レーザーの反射等によりシグナルがレーザーを当てたストリップ以外にもシグナルの様な物がでているので、隣のストリップどうしが非常に高い抵抗でつながっているような場合には判別できない。このストリップ間の電荷の共有の分布も調べてあり、これを図 4.11 に示す。この分布を見ても、図 4.10 の正常のストリップの分布と同じであるように見える。よって、このシステムを用いた試験では、このストリップを正常であるとみてしまう。

領域 3 は、電荷収集効率が低いストリップである。この領域にあるストリップはノイズも小さい。そのことから推測すると、原因はチャージアンプのコンデンサの容量が他の物より小さい場合と、読み出し用のアルミ電極がレーザーを当てた地点より先で切れている場合の 2 つが考えられる。このストリップは、それ以外には問題となるところがないので、ゲインを較正して使用する事ができる。

領域 4 のうち、128、256、384、512 番のストリップに関しては読み出し回路に原因があると思われる。以前記したように今回使用した読み出し用のチップは VA チップである。このチップは、データの取得を高速に行う際には、チップの両端につながっているストリップに対してはあまり正確にシグナルを伝えられない恐れがあることが知られている。これら以外の、2 つのストリップ、N 面の 595、596 番のストリップについては、その前後数ストリップにわたって不良ストリップがある。具体的には、

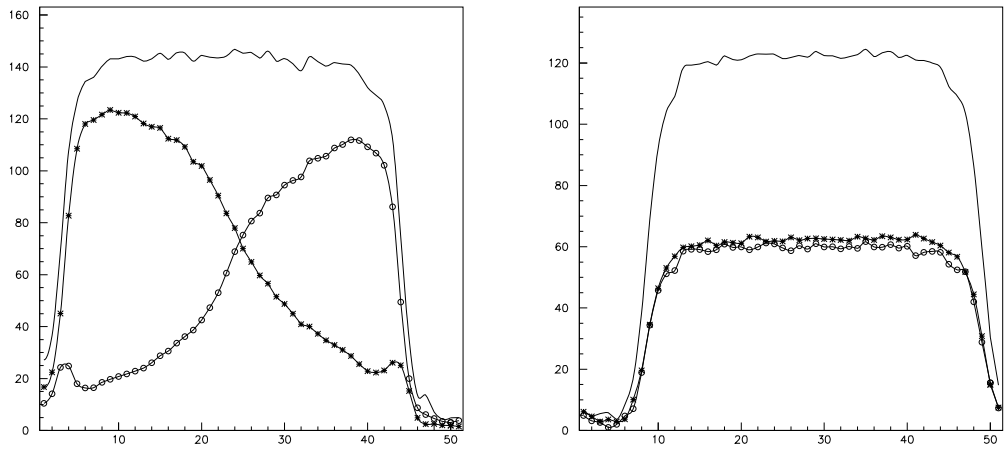

図 4.10: 2 本のストリップ間の電荷の共有の分布。横軸が長さ (μm)。$*$、$\circ$は各々のストリップの ADC カウントで、実線はその 2 本のストリップの ADC カウントの和。左が、正常なストリップ間の電荷共有の分布で、右が電気的につながっているストリップ間の分布。図の両端に P ストリップとアルミ電極が張ってあるので、レーザーの反射によりこの地点でシグナルがでなくなっている。

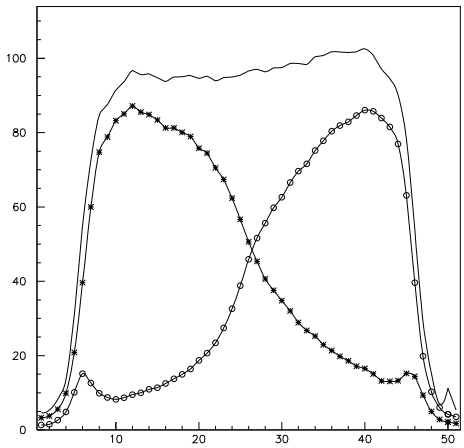

図 4.11: P 面 561 $\sim$ 562 間の電荷の共有の分布。図 4.10 の正常なストリップのものと同じ分布を示す。

595、596 番が隣のストリップにも大きな影響を与えている。592、594、596 ～ 600 番までは、ノイズの大きなストリップであり、599 番はシグナルが小さく領域 1 に含まれている。よって、この当たりのストリップは、何らかの原因で他の領域より空乏層が期待していたところまで広がっていないか、P ストップのドープが少なかったかでその周りのストリップにわたって異常をきたしているものと思われる。

ノイズが大きいとしてカットしたものの中には、両端のストリップが含まれている。これは、P 面については、読み出しているストリップ以外の物が、影響を及ぼしているものと思われる。N 面については、両端は空乏層の形が他の地域と違っていることが原因であると思われる。これ以外のものは、第 4.2 節で述べたように SiO_2 の絶縁が不完全か破れているため、ノイズが大きくなると思われる。SiO_2の絶縁の破れ具合い、範囲によって次のように振る舞いが変わると思われる。

- P 面の 553、555、556 番のストリップの様に、SiO_2の絶縁の破れている 554 番のストリップのノイズの影響を受けている。
- P 面の 175 と 176 番、232 ～ 235 番、493 と 494 番、N 面の 338 と 339 番の様に、SiO_2の絶縁の不完全さが複数のストリップに渡って影響を及ぼしている。
- P 面の 196、329 番の様にそのストリップの SiO_2の絶縁が不完全で、それが周りにそれほど影響を与えていない。

まとめとして、不良ストリップの原因として以下のものが考えられる事が判明した。

- SiO_2の絶縁が破れているため、読み出し不能。
- 読み出し用のアルミ電極やワイヤーボンディングの線が切れている。
- 隣り合うストリップが電気的につながっている。
- チャージアンプのコンデンサの容量が小さい。
- VA チップの高速読み出しによる不具合。
- DSSD の両端のストリップ。
- SiO_2の絶縁が不完全に破れているため、ノイズが大きい。

4.4.4 不良ストリップの捜索の所用時間

今回の測定で要した時間は、P 面で約 4 分、N 面で約 6 分であった。この赤外線レーザーシステムを用いた実験では、約 $400Hz$ でデータを取る事ができた。X-Y ステージを動かす時間も考慮すると P 面で約 $61Hz$、N 面で約 $34Hz$ であった。これは、P 面では 1.0 ストリップ/秒、N 面では 1.7 ストリップ/秒でストリップの検査が行われたことになる。このことより、この赤外線レーザーシステムを用いてのストリップの検査を高速に且つ自動的に行うことができることが分かった。

第5章　結論

大面積シリコンストリップ検出器試験用赤外線レーザーシステムを製作し、その性能の評価を行った。

まずレーザーパルスの特性については

- レーザーの半径を $1 \sim 2\mu m$ にまで絞れる
- レーザーのパルス幅は約 $2.0nsec$ 以下
- レーザーの安定性は 3%以内である

事がわかった。これにより、このレーザーパルスを用いることにより、荷電粒子のシリコン内での振る舞いをシミュレート出来ることが分かった。

このレーザーを用いて、DSSD の全ストリップに対して、始点を定めると後は自動でレーザー、読み出しシステム、$1\mu m$ の精度で移動可能の X-Y ステージ等を操作して不良ストリップを検出するシステムの作成に成功した。検出された不良ストリップについて考察を加えた結果、以下の原因によるものが存在することがわかった。

- ストリップと読み出し電極間の絶縁層の破れ、不良
- アルミ電極又はワイヤーボンディングの断線
- 隣り合うアルミ電極の電気的結合 (ショート)
- 読み出しエレクトロニクスの不良
- DSSD の両端のストリップ

以上の操作を、P 面で 1.0 ストリップ/秒、N 面で 1.7 ストリップ/秒と、非常に高速に行うことができた。

これにより、この赤外線レーザーシステムは、大面積のシリコンストリップ検出器を試験するのに必要な性能を持つ事がわかった。

今年の春から、このシステムを用い実機の BELLE-SVD の試験を開始する予定になっている。

付 録A　ストリップ検出器のノイズ及びレーザーパルスの大きさの求め方

ここでは、今回のシリコンストリップ検出器のストリップの試験で行ったデータの解析方法について述べる。

A.1　オフセット・コモンモードシフト・ノイズの定義

シリコンストリップ検出器の各読み出しストリップから得られる信号は、フラッシュADC に読み込まれ、ADC 値に変換される。この値は、時分割化マイクロチップの特性から、各ストリップごとのオフセット値と事象毎のコモンモードシフト値を持っているため、得られた ADC 値からシグナルおよびノイズの値を得るためには、これらを差し引かねばならない。

A.1.1　オフセット

オフセットとは荷電粒子が検出器を通らず、あるストリップにシグナルがない場合に得られる ADC 値の平均である。これは各ストリップについて、固有の値を持つ。このため、今回は、測定の最初の 200 イベントはレーザーを当てずにデータをとり、各々のストリップの ADC 値の平均としてオフセット値を求めた。この後のレーザーを当てたイベントの時にはこのデータが用いられ、更新はしない。i 番目の

ストリップのオフセット値$OFFSET^i$は

$$OFFSET^i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} ADC_j^i \tag{A.1}$$

として計算される。

A.1.2 コモンモードシフト

コモンモードシフトとは、あるイベントにおいて、すべてのストリップのADC値の平均値、つまりオフセット値が一斉に同じ量だけ変動することであり、原因としては、逆バイアス電圧の変動、マイクロチップへの電源電圧の変動などが考えられる。この値は、シグナルのないストリップのADCの平均値で定義する。これは事象毎に更新される。また今回用いたシリコンストリップ検出器には、P面に5枚、N面に5枚のマイクロチップを使用しているので、このチップ毎にコモンモードシフトを計算する。m番目のチップのn番目のイベントのコモンモードシフトCMS_{mn}は

$$CMS_{mn} = \frac{1}{N_{mA}}\sum_{i=1}^{N_{mA}} (ADC_n^i - OFFSET^i) \tag{A.2}$$

で計算される。ここでN_{mA}はシグナルのないその第mチップにつながっているストリップの数である。そして、最終的にADC値からこれらの値を引いたものを、シリコンストリップ検出器からの信号とする。

$$Q_n^i = ADC_n^i - OFFSET^i - CMS_{mn} \tag{A.3}$$

A.1.3 ノイズ

シリコンストリップ検出器からの信号は、そのストリップに集められた電荷量を表し、荷電粒子が検出器を通ったときは、その検出器の中で荷電粒子の落としたエネルギーを表す。しかし、ADC値からオフセット、コモンモードシフトを差し引いてもその値は0にならず、0を中心に揺らぐ。このシグナルのふらつきの標準偏差を

ノイズとして定義する。オフセット値の計算の時にしたように、レーザーの当たっていない最初の 200 イベントを利用して、ノイズを計算する。i 番目のストリップのノイズσ^iは

$$(\sigma^i)^2 = \sum_{j=1}^{l}(< Q^i > - Q_j^i)^2 \tag{A.4}$$

となる。

ストリップ毎のノイズ分布を図 A.1 に示してある。

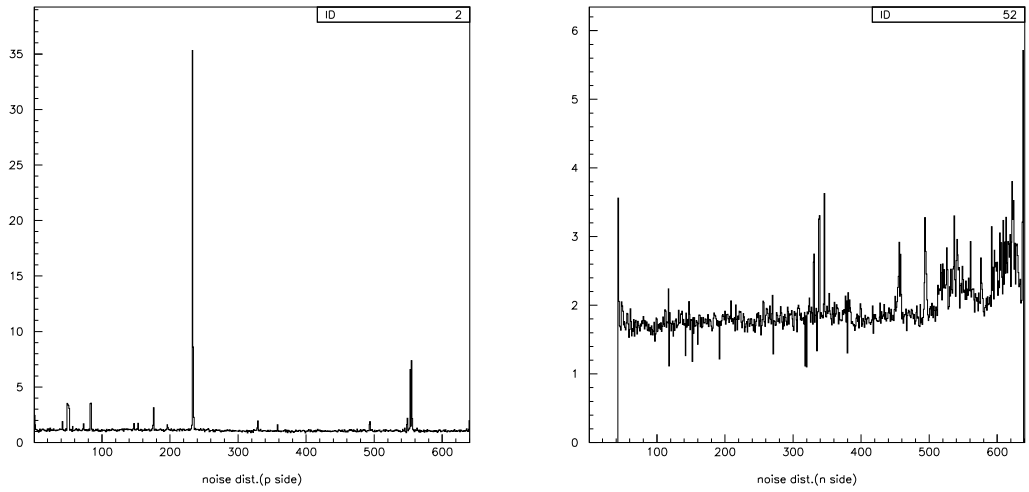

図 A.1: ストリップ毎のノイズの分布。左が P 面。右が N 面

ノイズの原因としては、検出器の容量、チャージアンプの帰還容量、検出器のバイアス抵抗の熱雑音、検出器の漏れ電流などが考えられる。

A.2 クラスター

荷電粒子が検出器内を通過すると、作られた電荷がその付近のストリップに、集められ、信号として読み出されることになるが、このときシグナルの得られるストリップは数本に渡った「クラスター」となる。データの解析ではまず、このクラス

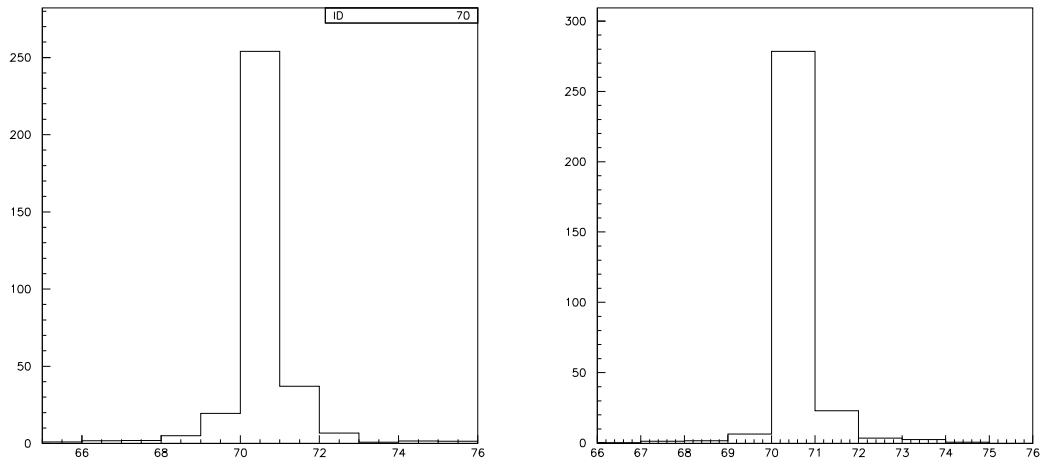

図 A.2: 典型的なクラスターの形。左が P ストリップ、右が N ストリップ

ターを見つけなければならない。図 A.2 に典型的なクラスターの形を示す。今回、クラスターを探すのに使用したアルゴリズムは、まず一番大きなシグナルの値を示したチャンネルをクラスターの候補とし、そのストリップのシグナルがノイズの 5 倍、つまり標準偏差の 5 倍以上あることを要求した。

付 録B　読み出しシステム

B.1　読み出しシステムの概要

ここでは、今回実験に使用したVAマイクロチップによる読み出しシステムについて説明する。

図B.1に示すように信号読み出しシステムは以下の4つの部分から構成されている。

1. 時分割化マイクロチップ･･･時分割多重化増幅器
2. マイクロチップを駆動するためのコントロール信号を作るモジュール
3. リピータカード･･･コントロール信号のマイクロチップへの受渡し及びマイクロチップから出てきた時分割多重化された信号の増幅を行なう
4. フラッシュADC ･･･時分割多重化された信号をデジタル値に変換する
5. コンピューター ･･･デジタル値に変換された信号を受けとる

各ストリップごとの電荷増幅及び時分割多重の役目を果たしているのが、時分割化マイクロチップであるが、まずこれらについて、VAを使用したシステムについて詳しく説明する。

B.2　VAを用いた読み出しシステム

VAは時分割化マイクロチップであり、、1つのチップで128ストリップの信号を読み出すことができる。VAチップの仕様を、表B.1に示す[12, 17]。

図B.2はVAチップの1ストリップの読み出し部分の回路図である。検出器を粒子が通過すると、発生した電荷は初段のチャージアンプによって、電荷-電圧変換さ

VA

FUNCTION	128 low noise Charge Amplifiers. Amplifier outputs multiplezed onto one line.
SIGNAL INPUTS	128 inputs to charge amplifiers. Each line has input protection.
FEEDBACK CAPACITANCE	Amplifier have 0.6pf feedback capacitors.
NOISE	80 electrons with 0pF load (1.0μSshaping).
NOISE SLOPE	15.0 electrons ENC RMS./pf load with 1.0μS.
SIGNAL CAPTURE SPEED	less than 100ns settling time.
LINEARITY	unknown
OUTPUT CIRCUIT	128 channels multiplexed onto one differential output.
READOUT CLOCK RATE	Better than 10MHz.
RESET	1 μs pulse
OUTPUT MULTIPLEXING OF MULTIPLE CHIPS	Up to 10 chips can be mutiplexed onto one differential bus
DC POWER SUPPLY	192mW at +2V and -4V
INPUT BONDING PITCH	128 pads on 48 micron pitch arranged in two rows of 64.
CONTROL PADS	28 pads on 200 micron pitch.
RADIATION TOLERENCE	135 krad beta.

表 B.1: VA チップの性能表。不明の部分は同等の性能と考えられる Viking チップのものを載せた。

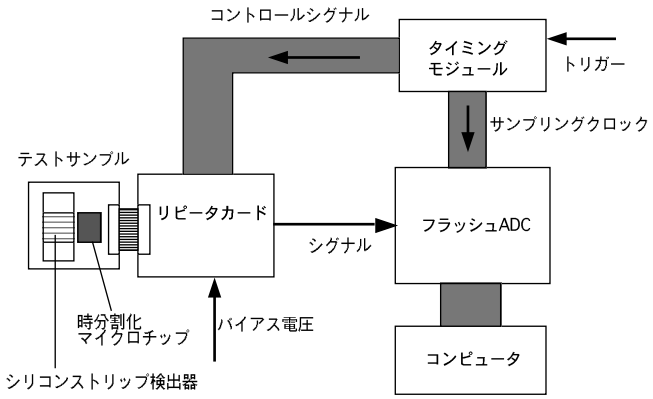

図 B.1: 読み出しシステムの概念図

れる。アンプからの出力は次のシェイパーで、ある時定数でシェイピングされ、その電圧値がコンデンサー C_h に保持される。その後、シフトレジスターによって、順番に各ストリップの信号が読み出されていく。

B.2.1 VA チップの読み出し

VA チップにはデータ捕獲サイクルというべきものが無く常に連続的にデータを捕獲しており、不感時間が無い。よって読みだしサイクルのみを考えればよい。

粒子が検出器を通過したとき、シェイパーからの出力は、ある時定数を持ったパルスとなる。欲しい情報はこのピーク値であるから、その時間だけ遅らせてシグナルをホールドする必要がある。ホールドするまでの時間はタイミングモジュールで変えられるようになっている。

B.2.2 タイミングモジュール

VA chip を動作させるコントロールシグナル、フラッシュADC へのトリガー、サンプルクロックを作るのが、このモジュールである。基本的な動作としては次のような流れとなっている。

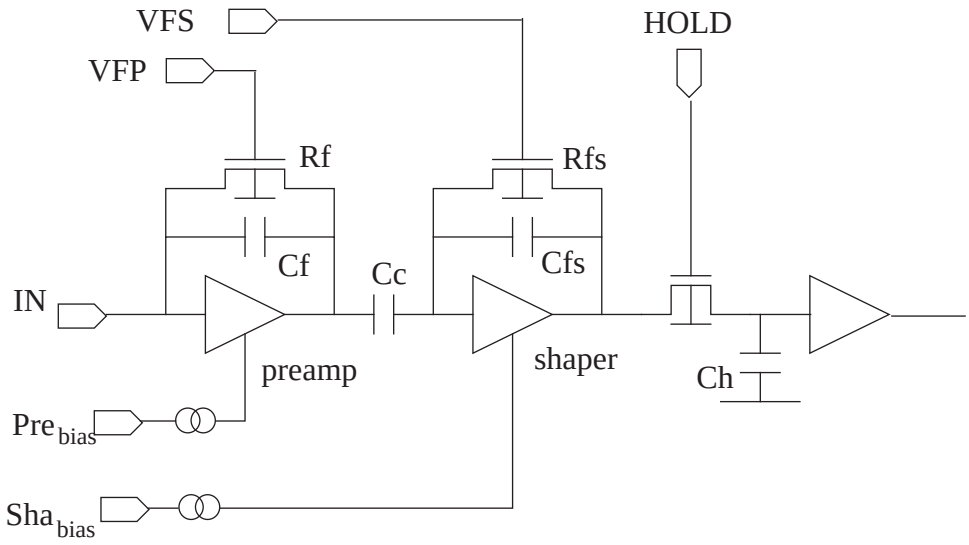

図 B.2: VA チップの内部回路

1. 外部からトリガーシグナルを受け取る。
2. 決まったディレイの後、ホールドシグナルを送る
3. VA chip、フラッシュADC にスタート信号を送る。
4. VA chip に読み出しクロックを送る。同時に、同期したサンプルクロックをフラッシュADC に送る。
5. 読み出しチャンネルが規定の数になったら、VA chip にクリアー信号を送り、再び待機状態に戻る。

ここで、それぞれに送る、クロックの数 (つまり、読み出すストリップの数) は、モジュール内部の DIP スイッチで変更できるようになっている。また、モジュール内部の 2 つのポテンショメータは、読み出し用のメインクロックを作るもので、その振動数とデューティーを決める。現在は 2.5MHz に合わされている。

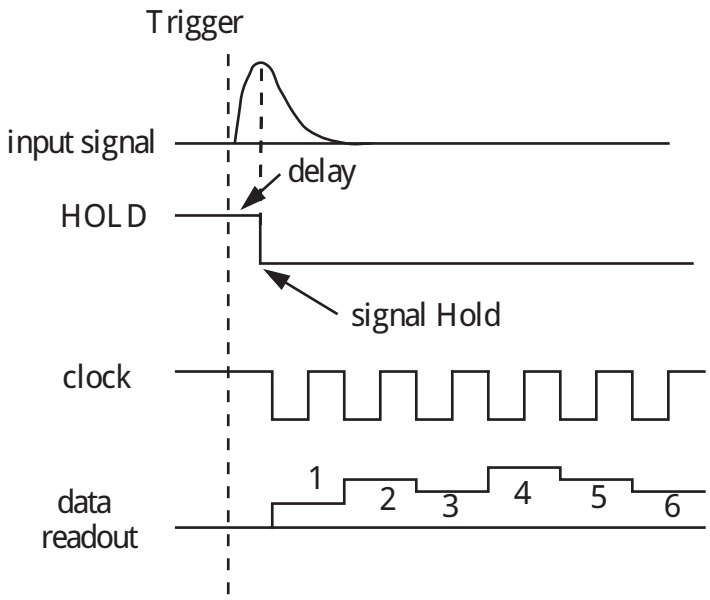

図 B.3: VA チップタイミングチャート

B.2.3 VA リピータカード

VA リピータカードは、次のような役割を持っている。

(1) タイミングモジュールからのコントロールシグナルを適正なレベルにして VA chip へ渡す。

(2) VA chip へ安定した電圧を供給する。

(3) ポテンショメータによって、VA chip の設定を変える。

(4) DSSD からの出力を増幅し、フラッシュ ADC へ送る。

(1) は差動で送られた、コントロールシグナルを、レシーバで TTL レベル (ただし+2,-4V) にして、VA chip へ渡すだけである。(2) はレギュレータによって、+2,-4,+6,-6,+5V の電源レベルが作られるが、安定電源の電圧は、8∼10V 程度が必要である。(4)VA chip は差動でシグナルを出力する。これをそのまま増幅して、入力調整部に送る。

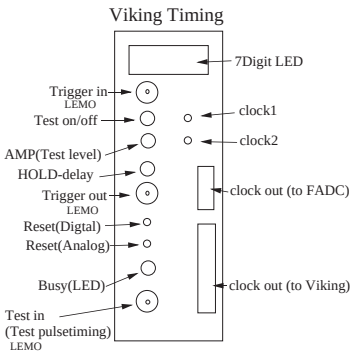

図 B.4: Viking Timing モジュール

B.3 フラッシュADC

フラッシュADC は SIROCCO モジュールを使用した。SIROCCO モジュールは CERN-DELPHI グループでシリコンストリップ検出器用に開発されたものである。これは、以下のような特徴を持っている。

- 10bits の分解能
- 外部トリガー可能
- 外部サンプリングクロック入力可能
- 最大サンプリング周波数 16MHz

このモジュールは VME モジュールとなっている。そこで VME-Sparc モジュールによりデータを取得した。

付 録C　XYステージの性能の評価

XY ステージの性能の評価は、これを製作した東陶機器 (TOTO 社) が行った。ここでは、その方法と結果をまとめておく。

C.1　真直度の評価

テーブルセンターにガラス原器を設置し、テーブルを上軸は$400mm$、下軸は$80mm$、送り速度はそれぞれに対して約$20mm/sec$で移動させ、電子マイクロメータで変移を測定する。

結果を図 C.1、表 C.1 に記す。

	上軸		下軸	
	上下	左右	上下	左右
許容値 (μm)	1.5	1.5	1.0	1.0
測定値 (μm)	0.74	0.39	0.86	0.33

表 C.1: 真直度の許容値と測定値のデータ

C.2　ピッチング・ヨーイングの評価

テーブルセンターにガラス原器を設置し、2 本の電子マイクロメータ ($200mm$ 間隔) にてスライダー移動時の変移を測定する。

結果を図 C.2、C.3、表 C.2 に記す。

	上軸		下軸	
	ピッチング	ヨーイング	ピッチング	ヨーイング
許容値 (秒)	2.0	2.0	2.0	2.0
測定値 (秒)	1.31	0.40	1.31	1.03

表 C.2: ピッチング・ヨーイングの許容値と測定値のデータ

C.3 直交精度の評価

電気マイクロメータを使って、直角マスターを、1 辺が上軸と平行になるように設置する。次に。他の 1 辺と、下軸との平行を測定し、その値を測定する。

結果を図 C.4、表 C.3 に記す。

許容値 $(\mu m/(200mm \times 80mm))$	5
測定値 $(\mu m/(200mm \times 80mm))$	0.36

表 C.3: 直交精度の許容値と測定値のデータ

C.4 繰り返し位置決め精度の評価

任意の 1 点に同じ方向から位置義目を 10 回繰り返して停止位置を測定し、読みの最大差の$\frac{1}{2}$を求める。この測定をストローク中央と両端のそれぞれの位置で行い、求めた値のものを測定値とする。最大差の$\frac{1}{2}$に$\pm$をつけて表す。

結果を図 C.5、表 C.4 に記す。

	上軸	下軸
許容値 (μm)	± 0.5	± 0.08
測定値 (μm)	± 0.5	± 0.31

表 C.4: 繰り返し位置決め精度の許容値と測定値のデータ

C.5 上軸許容搭載重量の評価

テーブル上におもりで負荷をかけ、テーブルとガイドが接触する事なく動作している事を確認する。結果は、許容値 $30kg$ を満たしていた。

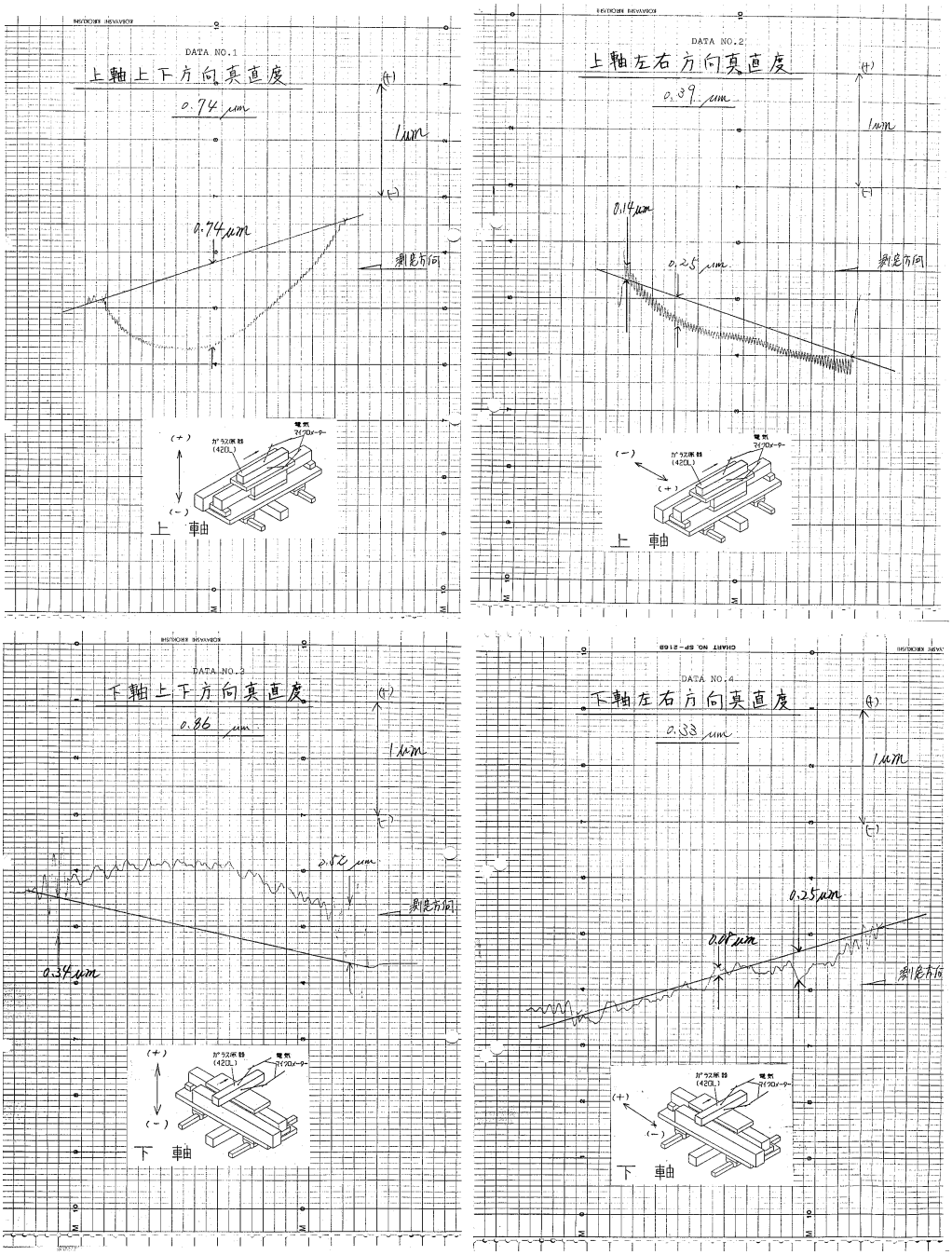

図 C.1: 真直度の測定結果

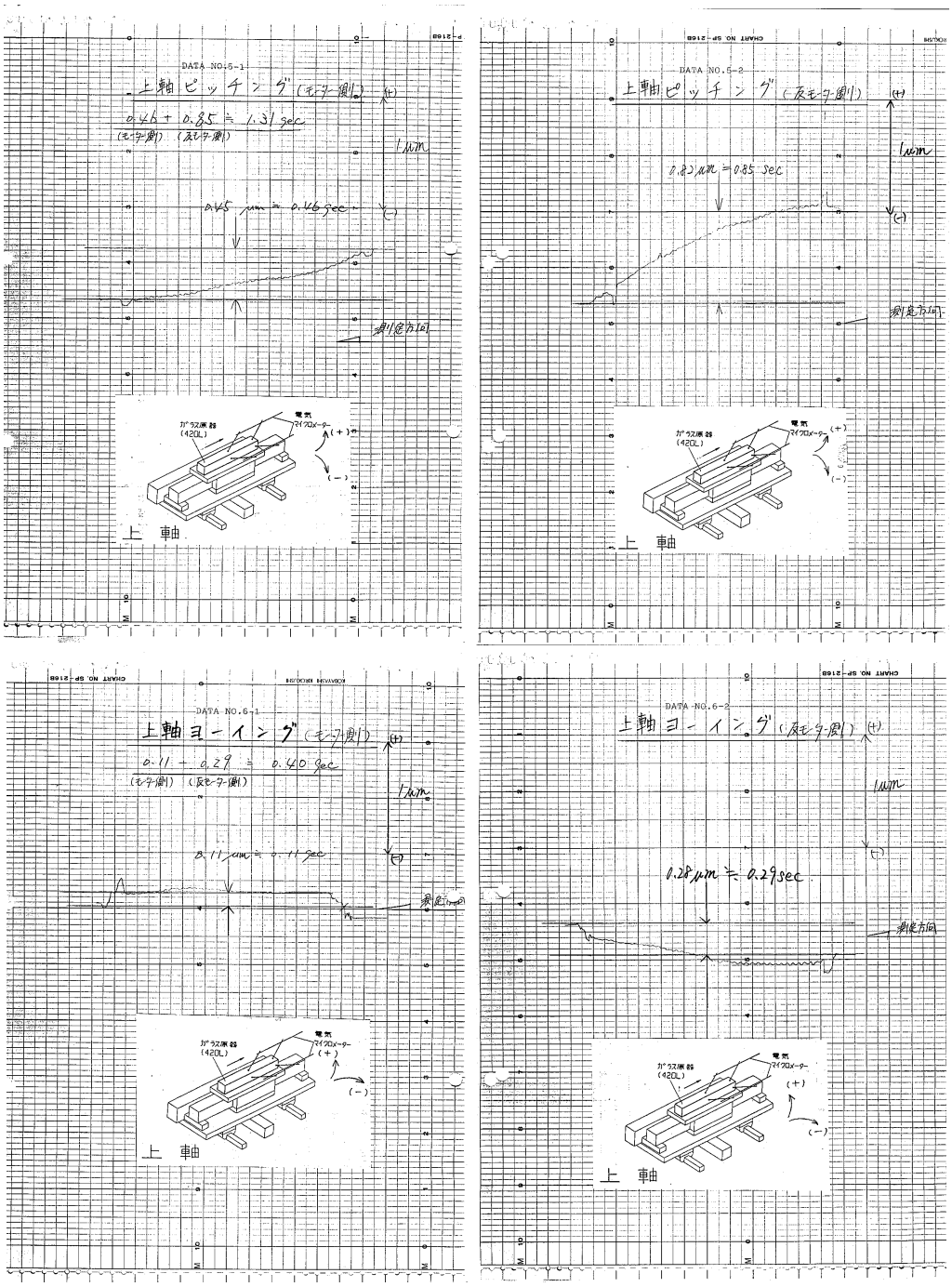

図 C.2: 上軸のピッチングの・ヨーイング測定結果

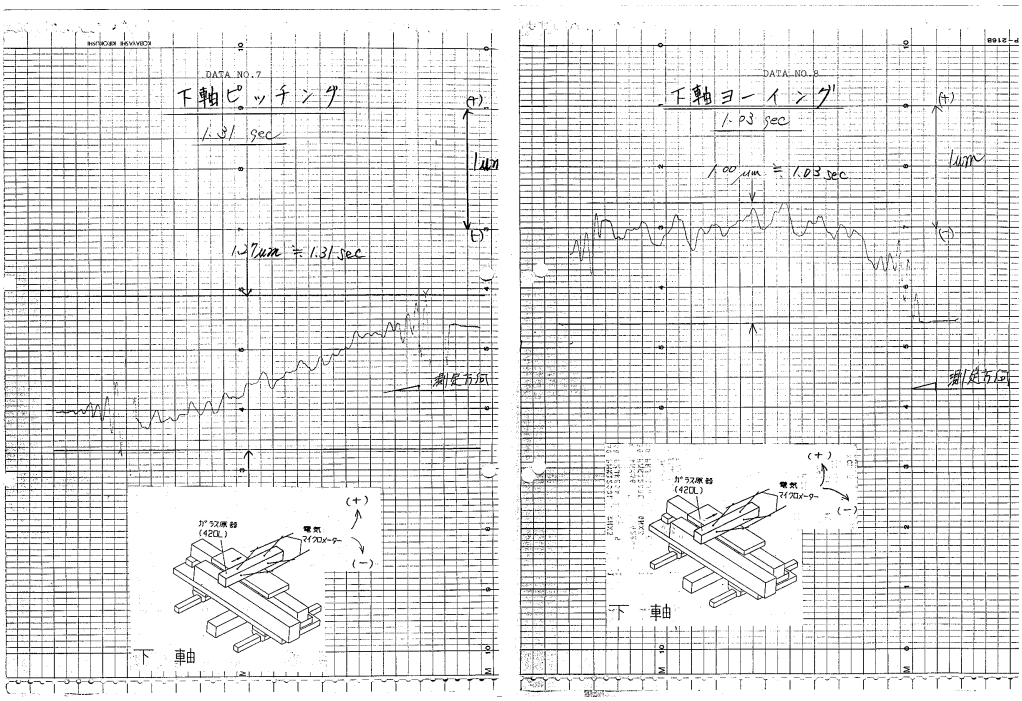

図 C.3: 下軸のピッチングの・ヨーイング測定結果

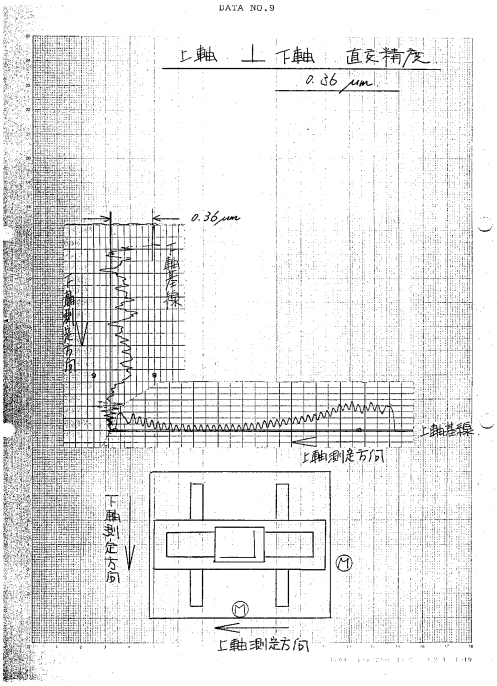

図 C.4: 直交精度の測定結果

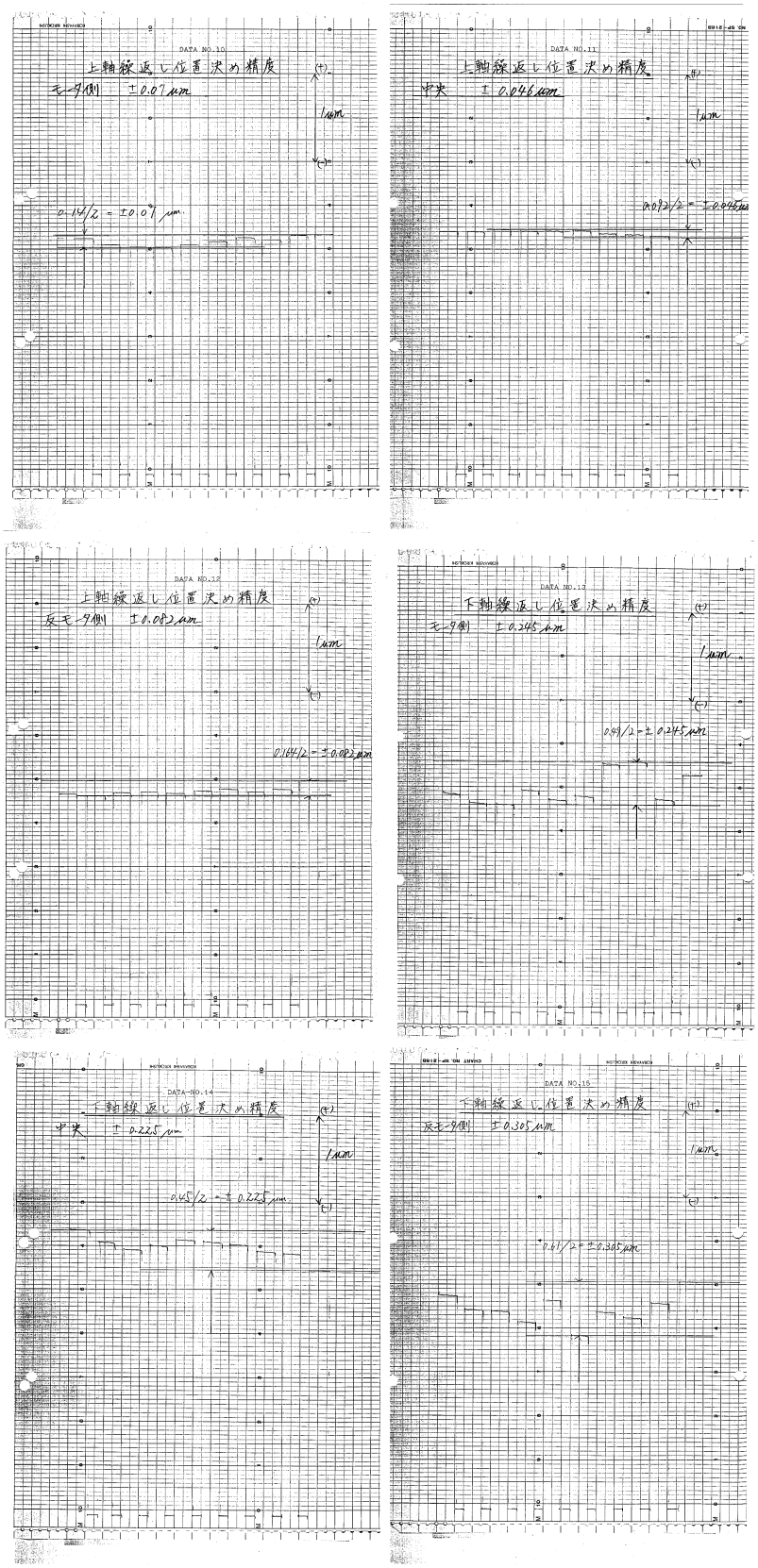

図 C.5: 繰り返し位置決め精度の測定結果

謝辞

本論文を書き終えるにあたり、お世話になった人々にお礼を述べたいと思います。

長島順清教授には、高エネルギーのみならず物理全般について学ぶ機会を与えてくださり、心から感謝いたします。また、経験と知識に裏打ちされた貴重なご指導、有り難うございました。

羽澄先生には、私の修士 2 年間にわたり常に研究を指導してくださり、実験や物理に対する姿勢を教えて頂きました。また、高エネルギー物理学を知らなかった私の見当違いな質問にも根気強く丁寧に答えて頂きました。ここに深くお礼申し上げます。

山中先生には、長島研究室のコンピュータの整備に力を尽くしてくださったおかげで非常によい環境で勉強をする事ができました。有難うございました。

瀧田先生には、私が研究で見逃していたり、理解していなかった点などを良く指摘してくださいりました。また、ゼミなどでも、具体的な例を用いて丁寧に教えてくださいました。有難うございました。

原先生には、計算機の操作に関する質問、物理全般に関する質問等に丁寧に答えてくださいました。有難うございました。

また、続木佐知子さんには事務上のことや、それ以外のことで何度もお世話になり、助けて頂いたこと感謝しております。

現在高エネルギー物理学研究所に在職中の幅先生には、阪大在職中から現在まで、常に研究を指導して頂きました。また、今回のシステムを制作するにあたって、豊富な知識でいろいろな質問や相談に助言して頂きました。有難うございました。また、松田先生、尾崎先生、池田先生、坪山先生、SVD グループの方々や、高エネルギー物理学研究所のみなさんにも大変お世話になりましたこと、心から感謝致します。

博士過程在学中の辰巳さん、川崎さん、花垣さん、貞本さん、千代さんには、計算機のこと、実験の事等をいろいろなことを教えていただきました。有り難うございました。特に、川崎さん、千代さんには、今回の実験で多大なご迷惑をおかけしました。ここでお礼を述べたいと思います。

また、2 年間ともに学んできた草野君、十河君、竹貝君、日高君にはいろいろご迷惑をお掛けしたとおもいます。この場をお借りしてお詫び致します。

さらに修士 1 年の香山君、持田君、柳幸君、吉田君には至らない先輩であったことをお詫びします。

もう一度、皆様に心からの感謝を述べ、 2 年間のお礼とさせて頂きます。

参考文献

[1] Chrustenson et al. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 13, p. 138, 1964.

[2] Gaillard et al. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 18, p. 20, 1967.

[3] Cronin et al. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 18, p. 25, 1967.

[4] M.Kobayashi and T.Maskawa. *Prog. Theor. Phys.*, Vol. 49, p. 652, 1973.

[5] The BELLE Collaboration. Letter of Intent for A study of CP Violation in B Meson Decays, April 1994.

[6] The BaBar Collaboration. Technical Design Report, 1994.

[7] B Physics Task Force. Physics and Detector of Asymmetric B Factory at KEK, February 1991.

[8] The BELLE Collaboration. Progress Report April 1995 - March 1996, To be published.

[9] G.F.Knoll. *Radiation Detection and Measurement.* 1989.

[10] W.R.Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments.* 1994.

[11] S.M.Sze. *Semiconductor Devices, Physics and Technology.* 1985.

[12] P.Weilhammer et al. *Nucl. Instr. Meth.*, Vol. 340, p. 572, 1994.

[13] H.Ikeda et al. KEK Preprint 95-89, 1995.

[14] D.Tatsumi. Master's thesis, Osaka Univ., 1994.

[15] 田幸敏治, 大井みさほ. レーザー入門. 1985.

[16] Dounald C. O'shea, W.Russell Callen, William T. Rhodes, 訳者, 望月仁, 姫野俊一, 浜本佳彦. レーザーの基礎と応用. 1986.

[17] IDE AS, 1995. Catalogue 95-96.