

リングイメージ型チェレンコフ検出器のための 電子回路の開発とその性能評価

首都大学東京大学院 理工学研究科
物理学専攻 修士課程 2年
07879305 植木泰生

概要

今日、高エネルギー物理学では素粒子物理学の標準理論（以降では標準理論と呼ぶ）の検証、標準理論を越える物理事象の観測を目標に様々な実験が行われている。その中で B 中間子系での CP 非保存現象を研究する Belle 実験が 1999 年より開始された。Belle 実験では、非対称エネルギー電子・陽電子衝突型加速器 (KEKB) を用いて、B 中間子・反 B 中間子対を大量に生成し、それらの崩壊事象を詳細に観測することにより CP 非対称性に関する新しい結果を得ている。

Belle 実験では希崩壊事象の検出や崩壊前の B 中間子のフレーバー同定のために、K 中間子と π 中間子の粒子識別が欠かせない。現在 Belle 検出器では K/ π 中間子の識別を CDC (中央飛跡検出器)、TOF (飛行時間測定器)、ACC (シリカエアロジェル・チェレンコフ・カウンター)で行っている。このうち ACC では高運動量領域における K/ π 中間子識別を、それら粒子が輻射体であるエアロゲル通過した際に放射するチェレンコフ光の発生の有無により実現している。しかし現在の Belle 検出器の endcap 部においては、その空間的制約から ACC と TOF を同時に搭載することが困難であるため、ACC のみを搭載している。そのため endcap 部においては高運動量領域での K/ π 中間子識別が行えていない。しかしデータの蓄積により新事象を含む希崩壊現象を検出するには、統計量を稼ぐことが必要であり、そのためにはさらなる endcap 部での粒子識別能力の向上が求められる。そこで endcap 部での粒子識別能力向上に向けて、現在 ACC のアップグレードとして A-RICH 検出器 (Aerogel-Ring Imaging Cherenkov Counter) の開発、導入を進めている。

A-RICH 検出器は荷電粒子が輻射体であるエアロゲルを通過した際に円錐状に放射されるチェレンコフ光を光検出器によって捉え、チェレンコフ光の放出角を再構成しその荷電粒子の速度を測定し、その速度と他の検出器から得られた運動量の情報から質量を割り出し粒子識別を行う。この A-RICH 検出器の構成要素である光検出器に要求されるのは、「十分な有効面積」「高い検出効率」「位置分解能」「1.5T の磁場中での動作」という条件である。我々はこれらの要求を満たす光検出器として (株) 浜松ホトニクスと共同で新型マルチアノード型光検出器である HAPD (Hybrid Avalanche Photo Diode) を研究・開発している。現在試作されている HAPD は 144ch の読み出しをもつものである。

Belle 検出器に設置される A-RICH 検出器全体では 144ch の HAPD を約 600 台用いる予定であり、このときの信号読み出しは 10 万チャンネル以上となる。そこで膨大な量になる配線を抑え、多チャンネルに対応し、低ノイズで高利得な読み出しのできるシステムが必要となってくる。そのため我々は HAPD 信号処理用の集積回路 (ASIC) を開発している。

本論文では A-RICH 検出器の研究・開発において、読み出し電子回路として開発された

ASIC「Sシリーズ」の改良版である SA01 についての試作経緯と性能評価、また 2008 年に KEK 内の Fuji test beamline の電子ビームを用いて行われた、プロトタイプ A-RICH 検出器の beamtest の概要とその結果、今後の課題を報告する。

目次

第 1 章	序論	9
第 2 章	Belle 実験	11
2.1	B 中間子系での CP 対称性の破れ	11
2.1.1	Unitarity triagle: ϕ_2 、 ϕ_3 の測定	12
2.2	KEKB 加速器	14
2.3	Belle 検出器	15
2.3.1	Silicon Vertex Detector(SVD)	16
2.3.2	Central Drift Chamber(CDC)	16
2.3.3	Aerogel Cherenkov Counter(ACC)	17
2.3.4	Time-of-Flight Counter(TOF)	17
2.3.5	Electromagnetic Calorimeter(ECL)	18
2.3.6	K_L/μ Counter(KLM)	18
2.4	K/π 粒子識別	18
2.4.1	フレーバータギング	19
2.4.2	Belle 検出器の K/π 識別能力	20
第 3 章	Aerogel Cherenkov Counter	23
3.1	ACC の概要	23
3.1.1	チェレンコフ光検出器	23
3.1.2	シリカエアロジェル	24
3.1.3	ACC の動作原理	25
3.1.4	ACC の問題点	27
第 4 章	A-RICH 検出器	29
4.1	Ring Imaging CHerenkov counter	29
4.1.1	A-RICH 検出器の原理	31

4.1.2	A-RICH 検出器に対する要請	32
4.1.3	シリカエアロジェル	32
4.1.4	光検出器	33
4.1.5	光検出器用読み出し電子回路	33
4.2	A-RICH 検出器の K/π 識別能力	33
第 5 章	HAPD	35
5.1	HAPD 概要	35
5.2	HAPD 動作原理	36
5.2.1	半導体:PN 接合	36
5.2.2	APD	36
5.2.3	HAPD	37
5.2.4	HAPD と光電子増倍管との比較	38
第 6 章	HAPD 用読み出し電子回路:ASIC	41
6.1	ASIC 概要と信号処理過程	41
6.1.1	Analog part	42
6.1.2	Digital part	43
6.2	S シリーズ ASIC 開発経緯	45
6.3	4th version ASIC:S04	46
6.4	S04 の性能評価	47
6.4.1	アナログ出力の線形性	48
6.4.2	OFFSET 調節	49
6.4.3	ノイズレベルと検出器容量依存性	50
6.5	新型 ASIC:SA01	51
6.5.1	S04 からの変更点	51
6.6	SA01 の性能評価	53
6.6.1	データと解析方法:Threshold scan	54
6.6.2	アナログ回路の線形性	56
6.6.3	ノイズレベルと検出器容量依存性	57
6.6.4	OFFSET 調節	58
6.7	HAPD と接続した状態でのデータの読み出し	59
6.7.1	Set-up	60
6.7.2	threshold scan による光電子測定	61
6.7.3	SA01 の性能評価のまとめと課題	62

第 7 章	プロトタイプ A-RICH 検出器の Beam test による性能評価	65
7.1	目的	65
7.2	Beam test Set up	65
7.2.1	Fuji test beam line	66
7.2.2	プロトタイプ A-RICH 検出器	66
7.2.3	データの読み出しシステム構成	68
7.2.4	ビームテストで使用した HAPD 及び ASIC	69
7.2.5	測定用カウンター	70
7.3	測定項目	70
7.4	Beam test 解析	74
7.4.1	入射 Beam tracking	74
7.4.2	検出光電子数、BG 数、角度分解能の導出	74
7.5	Beam test 結果	76
7.5.1	Noise level	76
7.5.2	Threshold run	77
7.5.3	Standard data	78
7.5.4	Aerogel study	79
7.5.5	Angle study	81
7.5.6	Realistic configuration	82
7.6	Beam test の解析結果と評価	84
7.6.1	Background study	84
7.6.2	HAPD のガラスでのチェレンコフ光	86
7.6.3	HAPD の端チャンネルにおける動作	88
第 8 章	まとめと今後	89
8.1	新型 ASIC:SA01 について	89
8.2	ASIC についての今後	89
8.3	プロトタイプ A-RICH 検出器のビームテストによる性能評価について	90
参考文献		93

第 1 章

序論

現在、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において、KEKB という非対称エネルギー電子・陽電子衝突型加速器を用いて Belle 実験が行われている。この実験の主な目的は、CP 対称性の破れの検証であり、B 中間子を大量に生成し、それが崩壊した後の 2 次粒子を Belle 検出器で捉えている。

CP 対称性の破れとは一つの物理現象とそれを C (Charge)、P (Parity) を反転させた現象の間に違いがあるというものである。現在の宇宙論によれば、宇宙は粒子優位の物質世界であり、反粒子で出来た反物質の存在は極めて小さいとされている。これは粒子と反粒子の生成過程の揺らぎによるものとされている。この揺らぎは Sakharov が指摘する 3 条件 [1]、1) バリオン数の非保存、2) C 対称性及び CP 対称性の破れ、3) 非平衡状態の実現により説明できるとされている。

実験的に CP 対称性の破れが観測されたのは 1964 年の BNL ブルックヘブン国立研究所で行われた、Fitch、Cronin らによる中性 K 中間子の弱い相互作用による崩壊過程においてである [2]。この CP 対称性の破れは小林・益川理論によれば B 中間子系で大きく現れるとされている [3]。そこで KEBB 加速器を用いて大量の B 中間子を生成し、その崩壊過程を調べているのが Belle 実験である。Belle 実験は 1999 年に開始され、現在加速器は世界最高のルミノシティ $1.7 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を誇っている。その後もデータの統計量を増やし、実験結果も 2001 年夏に $B \rightarrow J/\psi K_S$ への崩壊過程において CP 対称性の破れが発見され、標準理論において小林・益川理論の導入による CP 対称性の非保存の正しさが示されたと言える。

Belle 実験では、B 中間子のフレーバー同定や稀な崩壊事象の探索に高い粒子識別装置が重要な役割を担っている。これは後述する CKM 行列のユニタリー性からくるユニタリー・トライアングルの内角を測定する上で重要である。それに関係する崩壊として $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 、 $B^{\pm} \rightarrow D^0 K^{\pm}$ は、その再構成には前者で $3.8 \text{GeV}/c$ 、後者で $3.5 \text{GeV}/c$ の運動量領域での K/ π 識別が必要とされる。しかし現在の Belle 検出器では endcap 部におい

ては運動量領域 $3\text{GeV}/c$ 以上になると識別不能であり、 B 中間子の稀有な崩壊事象を効率的に検出するには、Belle 検出器の改良が課題となる。

現在の Belle 実験は、その積分ルミノシティーが 1ab^{-1} を超える 2009 年には終了する予定である。そしてその後継実験計画として、Super-KEKB 計画が 2012 年の稼働を目指して検討されている。Super-KEKB 計画では Belle 実験よりも統計精度を上げて、CKM 行列のさらなる精密測定や、標準モデルを超えるような事象を観測することを目指している。そのため K/\bar{K} 識別検出器の改良が必要不可欠になってくる。

本論文では、第 2 章に Belle 実験の概要とその検出器について、また Belle 実験において重要な粒子識別について述べる。第 3 章では、現在 Belle 検出器に搭載されている ACC の概要と問題点について、第 4 章では Endcap ACC のアップグレード版で現在開発中の A-RICH 検出器の原理とその構成要素であるエアロジェル、光検出器 HAPD、その読み出し電子回路 ASIC について述べる。第 5 章では、光検出器 HAPD の概要と原理について述べる。第 6 章では HAPD 用読み出し電子回路 ASIC の概要と開発経緯、また現在開発中の新型 ASIC:SA01 についての性能評価について述べる。第 7 章では、Belle 検出器への搭載に向けプロトタイプ A-RICH 検出器を構成し、そのビーム照射試験による性能評価について述べる。第 8 章では、これまで述べてきた HAPD や AISC についてのまとめ、及びプロトタイプ A-RICH 検出器のビームテストのまとめ、そして A-RICH 検出器開発についての今後の課題を述べていく。

第 2 章

Belle 実験

2.1 B 中間子系での CP 対称性の破れ

CP 対称性の破れは 1964 年に中性 K 中間子の崩壊によって初めて観測された。この破れを理論的に説明したのが小林誠、益川敏英である。小林・益川は、弱い相互作用におけるクォーク間の固有状態と質量の固有状態とが一致せず、複素位相角を持った行列で混合していれば 3 世代のクォークで CP の破れが説明できることを示した。

クォークの 3 世代標準理論において、弱い相互作用による世代間混合を表す行列は一般的に以下のように表わされる。

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

d' 、 s' 、 c' は弱い相互作用の固有状態であり、 d 、 s 、 c は質量固有状態である。この 2 つの固有状態を結びつけている行列 V_{KM} を Cabibbo Kobayashi Maskawa 行列 (CKM 行列) と呼ぶ。

ここで、この CKM 行列を 4 つのパラメータ (A, λ, ρ, η) を用いる Wolfenstein 表示で表わすと、

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - in) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda \\ A\lambda^3(1 - \rho - in) & -A\lambda & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} + \theta(\lambda^4) \quad (2.2)$$

となる。

CKM 行列の各要素は、ある世代から他の世代への遷移確率を表している。式 2.1、式 2.2 より、第 3 世代から第 1 世代への遷移を表す V_{td} と V_{ub} には複素位相の成分があり、これが CP の破れを説明しているのである。

また CKM 行列はユニタリー行列であるという要請より各行列要素に対して次の関係を満たす。

$$\sum_i V_{ij}^* V_{ik} = \delta_{jk} \quad (2.3)$$

このうち、複素数因子を含む V_{td} と V_{ub} に関しては、

$$V_{tb}V_{tb}^* + V_{cd}V_{cd}^* + V_{ud}V_{ud}^* = 0 \quad (2.4)$$

という関係が成立する。この式 2.4 から複素平面上に Unitarity triangle と呼ばれる三角形を描くことができる (図 2.1)。この三角形を用いて CP 対称性の破れと CKM 行列の複素位相の関係幾何学的に理解することができる。この Unitarity triangle の内角は、CKM 行列の各要素を用いて、

$$\phi_1 = \arg\left(\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}}\right), \phi_2 = \arg\left(\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{td}V_{tb}}\right), \phi_3 = \arg\left(\frac{V_{cd}V_{cd}^*}{V_{ud}V_{ub}}\right) \quad (2.5)$$

のように表わされる。Belle 実験では、この Unitarity triangle の 3 つの辺と 3 つの角度を決定すべく測定を行っている。

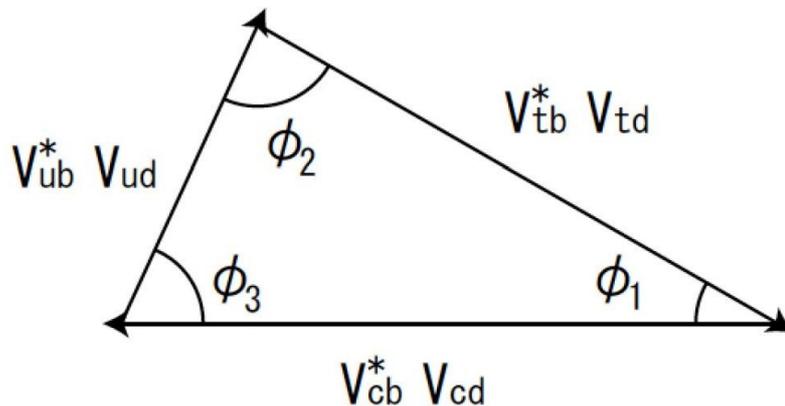


図 2.1 Unitarity triangle

2.1.1 Unitarity triangle: ϕ_2 、 ϕ_3 の測定

Unitarity triangle の内角、 ϕ_2 、 ϕ_3 を測定する場合にも K/π 識別は欠かせない。 ϕ_2 を測定するためには $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ に注目するが、 B^0 中間子はほぼ同程度の割合で $K^+\pi^-$ にも崩壊する。 ϕ_3 の測定では $B \rightarrow DK$ と $B \rightarrow D\pi$ を区別する必要がある。これらのことが

表 2.1 Unitarity triangle 要素と観測事象

要素	観測事象
$V_{cb}^* V_{cd}$	$ V_{cd} $:known, $ V_{cb} $:semi-leptonic decay($b \rightarrow cl\nu_l$)
$V_{ub}^* V_{ud}$	$ V_{ud} $:known, $ V_{ub} $:semi-leptonic decay($b \rightarrow ul\nu_l$)
$V_{tb}^* V_{td}$	$B \bar{B}$ mixing($b \leftrightarrow t \leftrightarrow d$)
ϕ_1	Mixing-induced ^{*1} :($B^0(t) \rightarrow J/\psi K_s$ and $B \bar{B}^0(t) J/\psi \bar{K}_s$)
ϕ_2	Mixing-induced:($B^0(t) \rightarrow \pi^0 \pi^0$ or $\pi^+ \pi^-$ and $\pi^0 \pi^0$ or $\pi^+ \pi^-$)
ϕ_3	DCPV ^{*2} :($B^\pm \rightarrow \{D^0, \bar{B}^0, D_{CP}\} K^\pm$ or $B^0(\bar{B}^0) \rightarrow \{D^0, \bar{B}^0, D_{CP}\} K^s$)

らも、KEKB ファクトリー実験において K/π 識別が重要であることが言える。 K/π 識別が必要な崩壊モードと識別に必要な運動量領域、及びリジェクトすべき崩壊モードを表 2.2 に示す。

表 2.2 K/π 粒子識別が必要な崩壊モードその運動量領域

物理事象	崩壊モード	運動量領域 [GeV/c]	Rejection mode
Flavor tagging	$b \quad c \quad s$	$0.2 < p < 1.5$	-
ϕ_1	$B \quad J/\psi K_s$	-	-
ϕ_2	$B \quad \pi\pi$	$1.8 < p < 3.8$	$B \quad K\pi$
ϕ_3	$B \quad DK$	$1.5 < p < 3.3$	$B \quad D\pi$

2.2 KEKB 加速器

Belle 実験で使用される電子・陽電子非対称衝突型円形加速器 (KEKB)[4] は、B 中間子 ($5.28[\text{GeV}/c^2]$) を大量に生成することができ、B-factory と呼ばれている。KEKB では、電子を $8.0\text{GeV}/c$ 、陽電子を $3.5\text{GeV}/c$ に加速することで、重心系での衝突エネルギーが $10.58\text{GeV}/c$ となるように設計されている。この衝突により b 、 \bar{b} の共鳴結合粒子である $\Upsilon(4s)$ が生成される。さらに $\Upsilon(4s)$ から $B\bar{B}$ の B 中間子対が作り出される。また、電子と陽電子の運動量を非対称とすることで衝突により生成される $\Upsilon(4s)$ に実験室系で $4.5\text{GeV}/c$ 程度の運動量を与え、 $\Upsilon(4s)$ の崩壊に伴い生成される $B\bar{B}$ 中間子にそれぞれ $2\text{GeV}/c$ 程度の運動量を持たせている。電子と陽電子は筑波実験棟にて衝突するように交差されている。衝突点では正面衝突ではなく、各ビームを角度 $22[\text{mrad}]$ で交差させている。

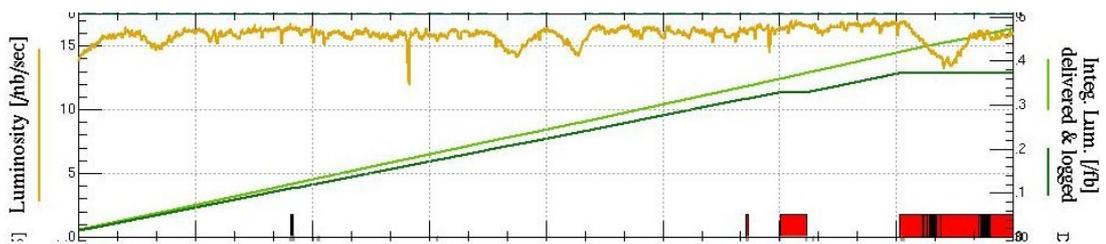


図 2.2 ピークルミノシティ

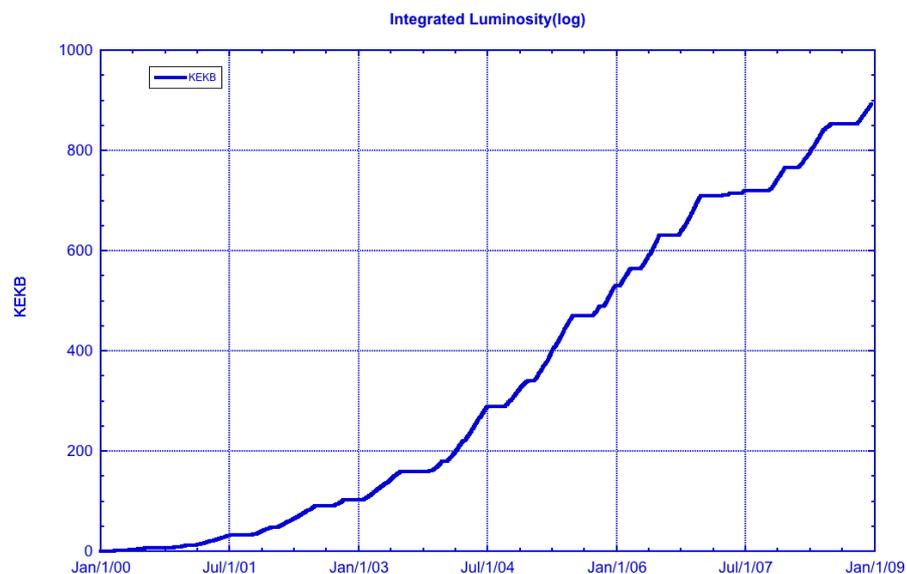


図 2.3 積分ルミノシティ

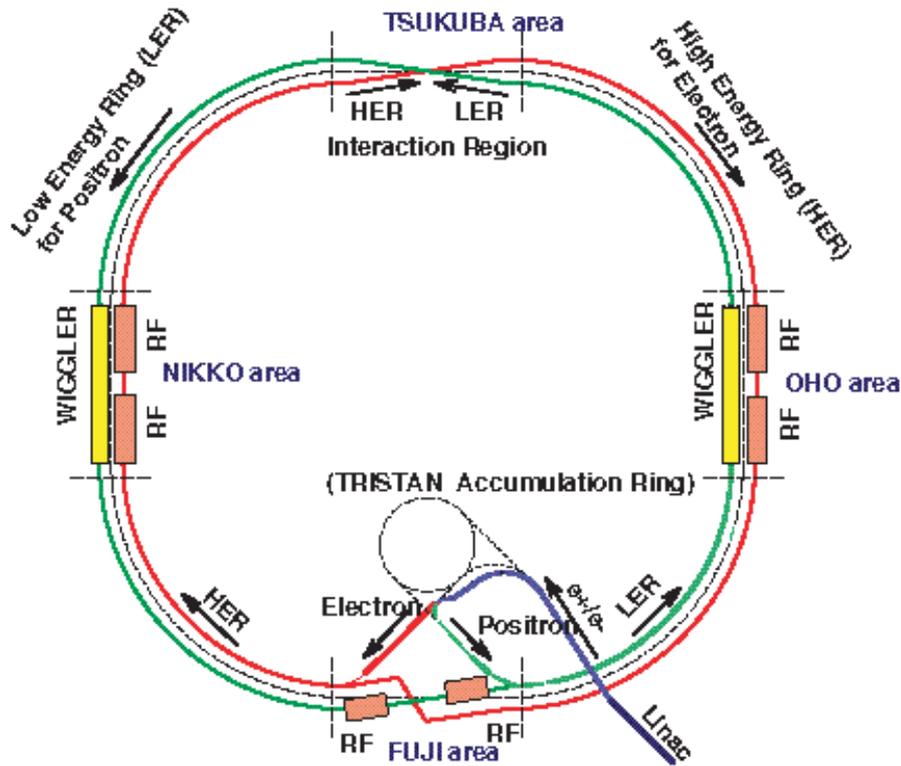


図 2.4 KEKB 加速器

2.3 Belle 検出器

Belle 検出器 (ビーム軸方向:7.24m、外形 7.70m、総重量 2000t) [5] は、電子陽電子衝突に伴い生成した粒子が、様々に崩壊した二次粒子を検出できるように設計された検出器群である。それら崩壊二次粒子を再構成し、CP 対称性の破れを観測する上で Belle 検出器には以下のような性能が要求される。

1. B 中間子の崩壊点を平均崩壊長 50% [$\leq 100[\mu\text{m}]$] 以下で測定する
2. 多岐に及ぶ終状態を正しく識別できる
3. $\Upsilon(4s)$ のブースト方向に対応した広い検出器領域
4. 高ルミノシティに対応できる高速なトリガー・データ収集システム

Belle 検出器はビームに平行して、ビーム衝突点を囲むように円筒形の形状をして配置されている。円筒形側面部分を barrel 部、その両端の円筒形の筒の底にあたる部分を endcap 部と呼んでいる。このビームパイプのすぐ外側には衝突点に近い方から SVD、CDC、ACC、TOF、ECL、KLM の順に層を成すように配置されている。以下ではそれら副検出器群の簡単な説明をする。以降出てくる θ は電子陽電子の衝突点を原点として、

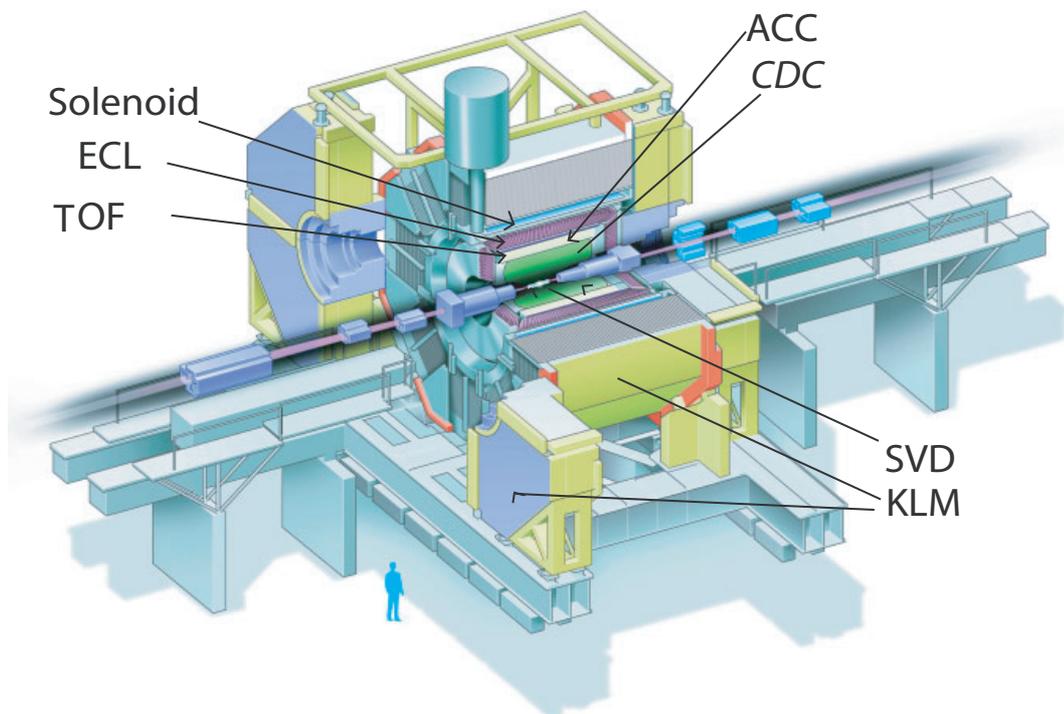


図 2.5 Belle 検出器

電子ビーム軸方向からの極角である。

2.3.1 Silicon Vertex Detector(SVD)

SVD[6] はシリコンマイクロストリップ検出器と呼ばれる半導体検出器を複数層にわたり円筒形状に設置したもので、Belle 検出器の中でビーム衝突点に最も近い場所に位置し、粒子の崩壊点を高精度で測定している。SVD の位置分解能は宇宙事象や 2 光子事象を用いた解析からもとめることができ、現在約 $80\mu\text{m}$ という高い精度を実現している。

2.3.2 Central Drift Chamber(CDC)

CDC[7] は SVD の外側に位置する飛跡検出器用のドリフトチェンバーである。センスワイヤに直径 $30\mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤを、フィールドワイヤに直径 $126\mu\text{m}$ のアルミニウムワイヤを用いている。充填ガスとしては He-C₂H₆(50:50) を使用することにより物質量を低下させ、クーロン多重散乱の効果を抑えている。CDC はソレノイド電磁石によって作られた 1.5T の磁場中での荷電粒子の飛跡を 3 次元で検出し、飛跡の曲率から運動量を測定することができる。また 1 本の飛跡に対する総電荷量はチェンバー内の荷電粒子のエネルギー損失に比例している。エネルギー損失は粒子の速さによって決まるの

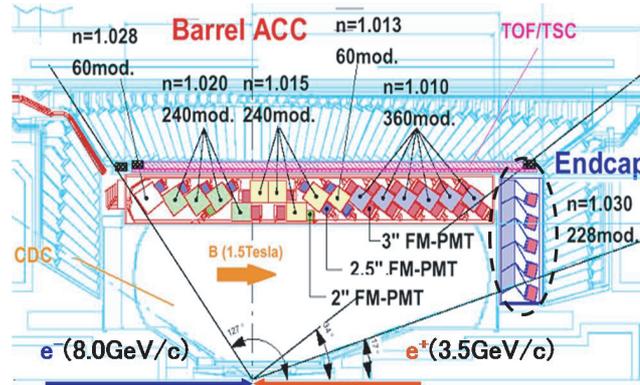


図 2.6 ACC の構成

で、運動量と速度から粒子の同定を行うことができる。飛跡分解能は $\sigma_p = 0.3\% \sqrt{1+p^2}$ であり、エネルギー損失分解能は $\sigma_{dE/dx} = 6\% E \text{ GeV}$ である。また CDC はこのエネルギー損失の測定により低運動量領域での K/π 識別も行っている。

2.3.3 Aerogel Cherenkov Counter(ACC)

ACC[8] はシリカエアロジェルをチェレンコフ光の発光体として用いた閾値型のチェレンコフカウンターで、高運動量領域 ($1.2 \text{ GeV}/c \sim 3.5 \text{ GeV}/c$) での K/π 識別を行う測定器である。荷電粒子がシリカエアロジェルを通過したときのチェレンコフ光の発生の有無により粒子識別を行っている。これは荷電粒子が輻射体であるエアロジェルを通過した際のチェレンコフ光の発生条件 $\beta > 1/n$ (β : 荷電粒子の速度、 n : エアロジェルの屈折率) を利用し、エアロジェルの屈折率を適当に選べば π 中間子に対してのみチェレンコフ光を発生させ、 K 中間子に対しては発生しないというような運動量領域を作ることができる。ACC は CDC の外側に位置し、現在 barrel 部、endcap 部の両方に設置されている。barrel 部においてはビームの衝突点からの角度に応じてエアロジェルの屈折率を 1.010 ~ 1.028 の範囲で選択している。これに対し endcap 部では一様に屈折率 1.03 のエアロジェルを用いている。ACC の詳しい構造、原理は後の章で述べる。

2.3.4 Time-of-Flight Counter(TOF)

TOF[9] は、barrel 部の ACC の外側に位置する $1.2 \text{ GeV}/c$ 以下の運動量領域で K/π 識別を行っている測定器である。また、高い時間分解能を持つことから Belle 検出器全体のデータ読み出しのためのトリガー信号を提供する。荷電粒子がビーム衝突点から TOF を通過するまでおよそ 1.2m の距離の飛行時間を 100[ps] の時間分解能で測定することにより K/π の粒子識別を行っている。TOF は 2 種のプラスチックシンチレータを用いたシ

ンチレーションカウンターである。128本の両側読み出しのシンチレーションカウンター (TOF) と、64本のトリガー信号生成用シンチレーションカウンター (TSC) で構成されている。TOFは40mm × 60mm × 2550mmの、TSCは5mm × 120mm × 2630mmの直方体のプラスチックシンチレータを用いており、 $34^\circ < \theta < 120^\circ$ の測定可能領域をもつ。

2.3.5 Electromagnetic Calorimeter(ECL)

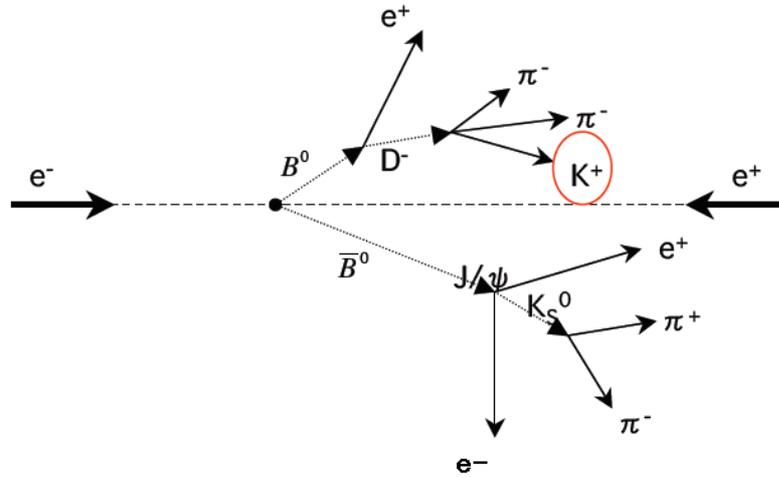
ECL[10]は、電磁シャワーを利用して光子と電子のエネルギーを測定する測定器である。輻射体として十分に分厚いシンチレータを用いることにより、光子、電子・陽電子は輻射体内で全エネルギーを損失するため、粒子の全エネルギーを測定することができる。この際、電磁シャワーの形状、荷電粒子の飛跡の有無、検出エネルギーと飛跡検出器で求めた運動量との比を調べることにより、電子または光子を同定することができる。この検出器ではシンチレータとして30cm × 5.5cm × 5.5cmのタリウム活性化ヨウ化セシウム (CsI) を利用する。CsIの結晶はbarrel部、endcap部と共に設置されており、 $12^\circ < \theta < 155^\circ$ の測定可能領域をもっている。またエネルギー分解能は $\sigma = 1.3\% \sqrt{E}(\text{GeV})$ である。

2.3.6 K_L/μ Counter(KLM)

KLM[11]は、Belle検出器の最外部に位置する測定器で、0.6GeV/c以上の K_L 粒子と μ 粒子の検出を行っている。高抵抗ガラス平行板 (RPC) と鉄板とのサンドイッチ構造になっており、鉄板を通り抜けた粒子の飛跡をRPCで検出する。KLMはbarrel部とendcap部に分かれており、barrel部でRPCと鉄板の15層 × 14層、endcap部で14層 × 14層の構造になっている。barrel部で $45^\circ < \theta < 125^\circ$ 、endcap部で $20^\circ < \theta < 45^\circ$ 、 $125^\circ < \theta < 155^\circ$ の測定可能領域をもつ。鉄板の厚さ(4.7cm)は、ほぼ全てのハドロンがシャワーを起こすように設定されている。RPCにはアルゴン、ブタン、HFC-134aガスが30:8:62の割合で充填されている。貫通力の強い μ 粒子のみが全ての鉄板を突き抜けてRPCに飛跡信号を残す。CDCで測定した飛跡情報を外挿し、KLMに残した信号をマッチングを行うことによって μ 粒子を同定する。

2.4 K/π 粒子識別

これまで述べてきたように、CKM行列要素に含まれる複素位相項より作られるUnitarity triangleの辺、及び角の大きさを調べることで、CP対称性の非保存及びその非対称度の大きさを観測することが可能である。その際、B中間子系の崩壊過程を詳細に調べることが必要であることがわかる。

図 2.7 \bar{B}^0 から生じた J/ψ の崩壊事象例

この節では、親 B 中間子の同定のためのフレーバータギング、及び Unitarity triangle の内角を求めるための崩壊モードについて説明し、その際の K/π 粒子識別の重要性について述べる。

2.4.1 フレーバータギング

B 中間子系の崩壊事象において Unitarity triangle の内角 ϕ_1 の観測をするためには B^0 、 \bar{B}^0 から $J/\psi K_S$ への崩壊モードを詳しく調べる必要があるが、その崩壊過程の終状態の粒子を観測したとしても、それが B^0 から生じたのか、 \bar{B}^0 から生じたのかを知らなければならない。そこで、B 中間子系の崩壊過程において親粒子が B^0 、 \bar{B}^0 のどちらかであるかを決定する必要があり、このことをフレーバータギングという。Belle 実験における $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S$ の崩壊図を 2.7 に示す。

フレーバータギングでは B 中間子から $J/\psi K_S$ への崩壊事象に対し、もう一方の B 中間子の崩壊事象について注目する。この崩壊事象において b クォークがカスケード崩壊 ($b \rightarrow c \rightarrow s$) という崩壊を行うことにより、B 中間子として $B \rightarrow D \rightarrow K$ という崩壊事象として観測される。これを考慮すると親粒子が B^0 なら $B^0 \rightarrow D^- \rightarrow K^+$ となり、 \bar{B}^0 なら $\bar{B}^0 \rightarrow D^+ \rightarrow K^-$ という崩壊モードが与えられることになる。したがって、実験では崩壊事象中に K^+ が見つかったならば、その崩壊事象の親粒子は B^0 であると同定され、注目する $J/\psi K_S$ への崩壊の親粒子は \bar{B}^0 であると観測される。そのため、Belle 実験ではカスケード崩壊に伴う K^\pm を大量の π^\pm から効率よく識別することが非常に重要であり、それによりフレーバータギングの正確な観測が可能になるのである。

2.4.2 Belle 検出器の K/π 識別能力

これまで述べてきたように、Belle 実験において K/π 中間子を正確に識別することは非常に重要な意味を持つ。Belle 実験では、 K/π 中間子の識別を精度よく行うために、Belle 検出器の中の CDC、TOF、ACC を用いて識別を行っている。図 2.8 に CDC、TOF、ACC 検出器が Belle 実験で担う通過粒子の運動量に対する K/π 中間子の識別能力のグラフを示す。これらの検出器は互いに識別能力の低い部分を補い、全体として運動量 $3.5\text{GeV}/c$ 以下の通過粒子に対して 3σ 以上の K/π 識別が可能となっている。

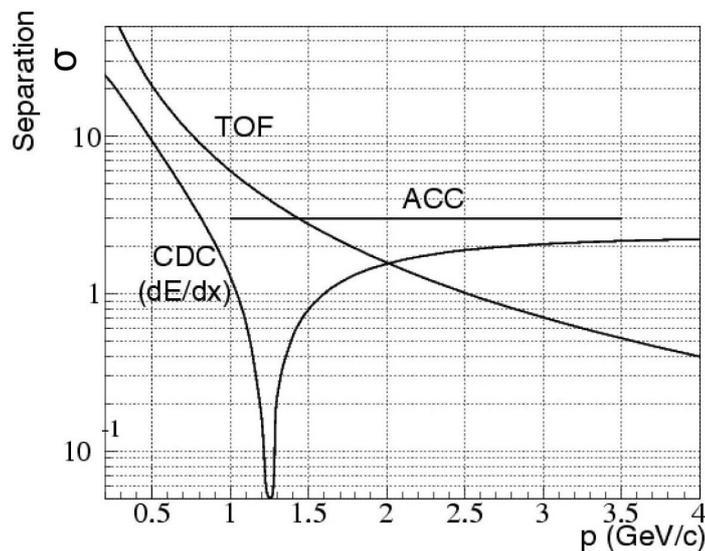


図 2.8 CDC、Barrel 部 ACC、TOF の K/π 識別能力

ここで、Belle 検出器を barrel 部と endcap 部に分けて考える。両者で決定的に違うことは endcap 部には TOF が設置されていないことである。barrel 部において TOF は $1.5\text{GeV}/c$ 以下の運動量領域で K/π 識別を行い、主にフレーバータギングに有用な情報を得ているが、endcap 部ではその空間的制約から ACC と TOF の両方を搭載することが困難であった。そこで、endcap 部には屈折率 1.03 のシリカエアロジェルを用いた ACC を搭載することにより、フレーバータギング用の K/π 識別（運動量領域： $0.2 < p < 1.5\text{GeV}/c$ ）にしぼることにした。

図 2.9 に $B \rightarrow \pi\pi$ における π 中間子の運動量とビーム軸から角度 θ との関係を示す。endcap 部の領域はビーム軸から $17^\circ < \theta < 34^\circ$ であるが、図 2.9 からわかるように、 $\theta < 40^\circ$ の領域で $3.5\text{GeV}/c$ を上回る高運動量の π 中間子が飛来する。endcap 部では低運動量領域しか識別できないので、このような高運動量を持つ π 中間子は識別できない。このことは $B \rightarrow \pi\pi$ の検出効率に関して問題である。このように、現在の Belle 検出器の

endcap 部の K/π 識別能力は高運動量領域において対応できていない。Belle 実験でより精密に CP 対称性の破れを測定するためには高運動量領域における Belle 検出器の K/π 識別能力を向上させることが必要となってくる。

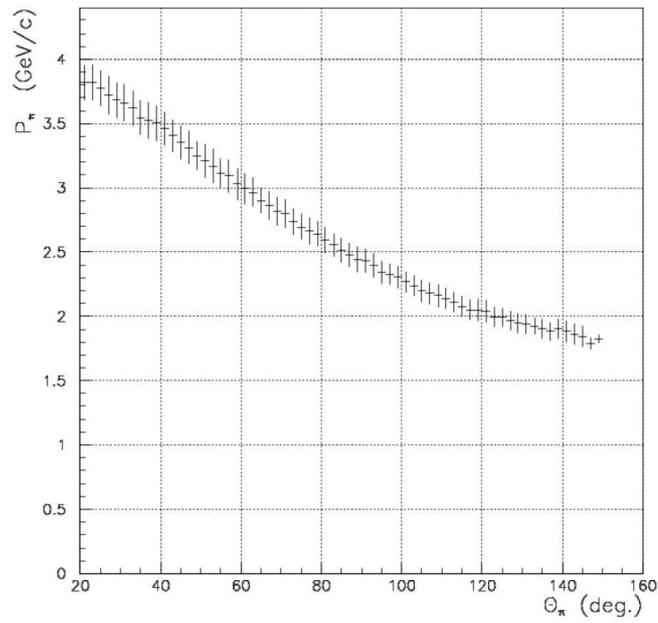


図 2.9 B 中間子の 2 体崩壊における運動量分布

第 3 章

Aerogel Cherenkov Counter

この章では現在 Belle 検出器に導入されているシリカエアロジェルを輻射体に用いた閾値型 Aerogel Cherenkov Counter(ACC) について詳しく説明する。

3.1 ACC の概要

チェレンコフ光の発生条件は、輻射体である媒質を通過する荷電粒子の速度 β と輻射体の屈折率 n によって決まる。そこでこの発生条件を利用し粒子識別を行う検出器が、現在 Belle 検出器に搭載されている閾値型 Aerogel Cherenkov Counter(ACC) である。

3.1.1 チェレンコフ光検出器

ACC は荷電粒子が輻射体を通過する際に放射するチェレンコフ光を利用した検出器である。チェレンコフ光発生条件は速度 β の荷電粒子が屈折率 n の媒質中を通過するとき、

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (3.1)$$

となる。チェレンコフ光は荷電粒子がつくる電場により、その行路付近の媒質が分極を起こすことで発生する。このとき行路上の各点で放出された光子の波面はホイヘンスの原理により直線上に並ぶ。(図 3.1)

このため、放出されたチェレンコフ光と荷電粒子の進行方向とのなす角 θ_c (チェレンコフ角) は次の式 3.2 で表わされる。また、微細構造定数を α 、輻射体の屈折率を n 、光の波長を λ 、荷電粒子の電荷を z 、荷電粒子の通過する輻射体の厚さを L とすると、そのときの発生するチェレンコフ光の光子数は式 3.3 となる。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n} \quad (3.2)$$

$$\frac{d^2N}{d\lambda dL} = \frac{2\pi\alpha z}{\lambda^2} \sin^2 \theta_c \quad (3.3)$$

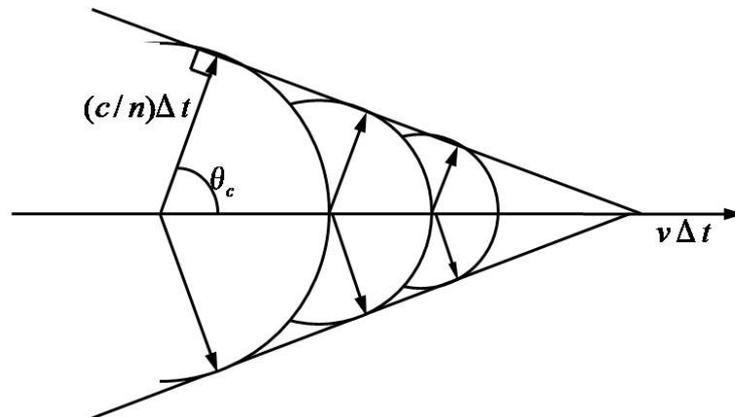


図 3.1 チェレンコフ光輻射

3.1.2 シリカエアロジェル

エアロジェルは、ゲル状の物質を乾燥させることによりできる多孔質の固体であり、その大部分が空気で占められている。そのうちシリカ (SiO_2) が主成分であるものがシリカエアロジェルと呼ばれ、個体としては極めて低密度、低屈折率である。シリカエアロジェルは SiO_2 の特異構造をもっており、チェレンコフ可視光に対して透明度が高く、ガスなどの気体物質より安定な物質である。

シリカエアロジェルは図 3.2 のように、二酸化ケイ素 (SiO_2) が直径 1~2nm の無孔性の 1 次粒子を形成し、さらにそれらが集合し最大で 50nm の大きさになる 2 次粒子が形成されるという構造をしている。この SiO_2 を基本構造とした 1 次及び 2 次粒子の径の大きさがエアロジェルの光学的性能を特徴づける重要な要因として考えられている。1 次、2 次粒子中の SiO_2 の密度はガラスと同程度の $2.4 \sim 2.6 \text{g/cm}^2$ 程度である。さらに 2 次粒子は 3 次元的な鎖状に結合し合い、固体構造中の 90% 以上の空孔からなる高多孔質構造を持つことにより、固体であるにもかかわらず低密度、低屈折率を可能にしている。表 3.1 にシリカエアロジェル及びその他の固体・液体・気体の屈折率を示す。

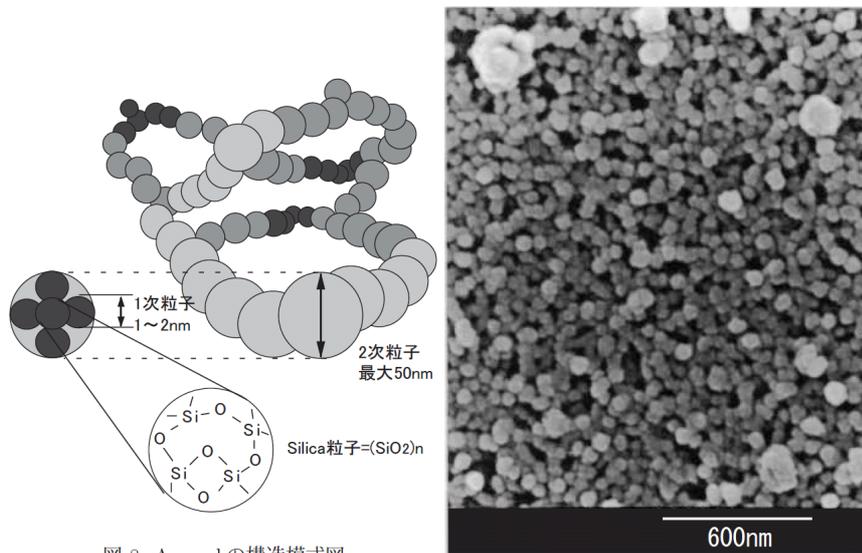


図 8: Aerogel の構造模式図

図 3.2 エアロジェルの構造

	物質	屈折率:n
固体	ガラス	1.47
	ポリエチレン	1.58
	シリカエアロジェル	1.006 ~ 1.06
液体	水	1.33
	液体水素	1.112
	液体ヘリウム	1.024
液体	二酸化炭素	1.000450
	イソブタン	1.001900
	空気	1.000292

表 3.1 シリカエアロジェルとその他の物質の屈折率

3.1.3 ACC の動作原理

ある粒子が運動量 p を持って運動しているとき、その粒子が持つ運動量は粒子の速度 β と粒子の質量 m を用いて、

$$p = \frac{\beta m}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (3.4)$$

と表わされる。この式 3.4 に式 3.1 を代入すると、通過粒子の運動量 p と質量 m であるときのチェレンコフ光の発生条件式が 3.5 と表わすことができる。

$$p > \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (3.5)$$

この式 3.5 より粒子の質量 m 、輻射体の屈折率 n におけるチェレンコフ光発生の際の閾値運動量が求まる。

この式 3.5 より、輻射体の屈折率が n が決まっているとき、粒子の質量 m によってチェレンコフ光が発生する運動量領域が異なる。この違いを利用することにより、2つの識別対象粒子が輻射体を通過した時、片方の粒子のみがチェレンコフ光を発生させることができ、このチェレンコフ光の有無により通過粒子の同定を行うことが可能となる。このような方法を用いて K/π 識別担っているのが Aerogel Cherenkov Counter (ACC) である。ACC では π 中間子のみがチェレンコフ光を発生するように輻射体の屈折率を設定し、 K/π 識別をおこなっている。図 3.3 に輻射体の屈折率に対する K/π 中間子のチェレンコフ光発生閾値運動量を示す。図 3.3 のそれぞれの閾値運動量曲線に囲まれた領域で K/π 識別が可能となっている。

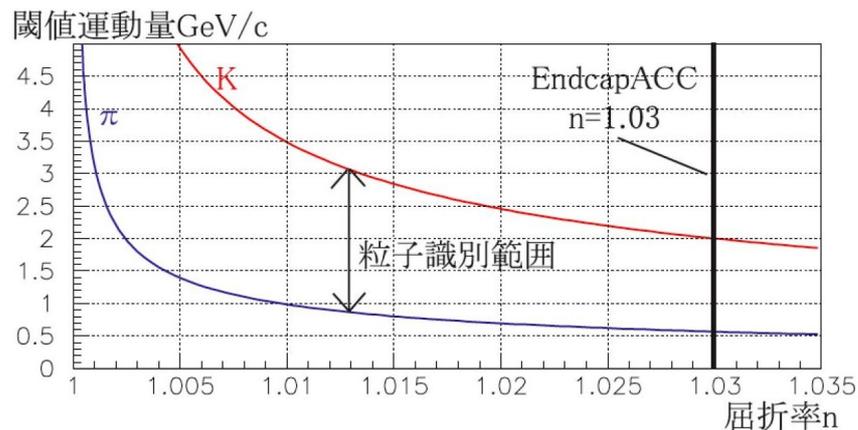


図 3.3 輻射体の屈折率に対する K/π 中間子の閾値運動量

現在の Belle 検出器に挿入されている ACC は図 2.6 で示すように、barrel 部で屈折率 $n = 1.10 \sim 1.028$ 、endcap 部で屈折率 $n = 1.03$ のエアロジェルが用いられている。これにより barrel 部では $p < 3.5[\text{GeV}]$ までの高運動量領域での粒子識別を行っている。しかし、一方で endcap 部では $0.5 < p < 2.0[\text{GeV}/c]$ の運動量領域でしか粒子識別ができて

いない。これは endcap 部の空間的制約から、本来低運動量領域の粒子識別を担うべき TOF を設置できないために ACC の識別運動量領域を低運動量側にシフトさせているからである。(図 2.8 参照)

3.1.4 ACC の問題点

閾値型による粒子識別では、 π 中間子の通過時のみチェレンコフ光が発生される運動量領域での信号の有無から粒子の識別を行っている。しかし、その中には K 中間子が輻射体を通る際、エアロジェル中の電子をたたき出し、その電子 (knock-on 電子) によりチェレンコフ光が発生するイベントの信号が観測されてしまうことがある。閾値型ではこのような信号と本来の π 中間子による信号とを区別することは困難である。また、前小節で述べたように endcap 部での高運動量領域での粒子識別も現在の ACC では不可能である。

そこで endcap 部でのより高運動量領域 ($p < 4[\text{GeV}/c]$) までの粒子識別を可能とする新たな装置が必要であり、それが現在我々が開発している A-RICH 検出器である。A-RICH 検出器については次章で述べる。

第 4 章

A-RICH 検出器

この章では、endcap 部での ACC の粒子識別における問題点を受け、Belle 検出器のアップグレードに向けて現在開発中の A-RICH 検出器について説明する。

4.1 Ring Imaging Cherenkov counter

A-RICH 検出器は、輻射体としてエアロジェルを用いたリングイメージ型チェレンコフ光検出器である。ここでは、一般的なリングイメージ型検出器の粒子識別方法を説明する。

3.1.1 で説明したように、媒質中の荷電粒子が発するチェレンコフ光の放射角度は式 3.2 のように表わされる。すなわち、このチェレンコフ角 θ_c が求めれば、式 4.1 から粒子の速度 β が求まる。

$$\beta = \frac{1}{n \cos \theta_c} \quad (4.1)$$

さらに、この他に CDC 検出器を用いて荷電粒子の飛跡を検出することにより、運動量が $p = 0.3\rho B$ と求められるので、式 3.5、4.1 から、

$$m = p \sqrt{(n \cos \theta_c)^2 - 1} \quad (4.2)$$

というように通過荷電粒子の質量 m を決定することができる。

RICH 検出器では、この通過粒子に対するチェレンコフ角の決定による粒子の同定が粒子識別の原理となる。輻射体による円錐状に放射されたチェレンコフ光をリングイメージで捉え、その半径からチェレンコフ角を求めるのである。この方法では ACC の問題点であった knock-on 電子の信号や、endcap 部でのより高運動量領域での粒子識別を可能としている。RICH 検出器は大きく分けて、下記の 2 タイプがある。

Mirror focusing RICH

Mirror focusing 型とは、放出されたチェレンコフ光をミラーにより集光し、光検出器で捉えるというものである。(4.1) このタイプの利点としては、輻射体内でのチェレンコフ光放出点の不定性を抑えることにより、チェレンコフ角の精度が上昇することや、また容易に多光量を得られるということが挙げられる。しかしその反面、集光ミラーを用いるため検出器のサイズが大きくなってしまいうという欠点がある。

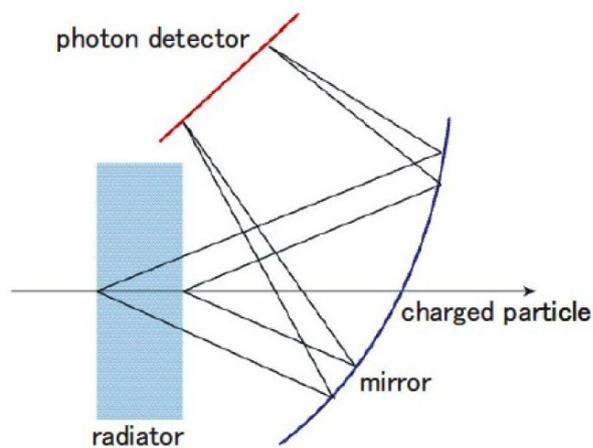


図 4.1 Mirror focusing

Proximity focusing RICH

Proximity focusing 型は、放出されたチェレンコフ光をそのまま捉えるタイプの光検出器である。(4.2) 欠点として、集光ミラーを用いないためチェレンコフ角の精度が Mirror focusing 型には及ばないということがあがるが、利点としては検出器自体をコンパクトに構成できるということがあがる。そのため光検出器には高い位置分解能が必要となってくる。

我々が開発している A-RICH 検出器は Belle 検出器の endcap 部での使用を想定している。その空間的制約上、A-RICH 検出器の構成をコンパクトにできる Proximity focusing 型を採用した。

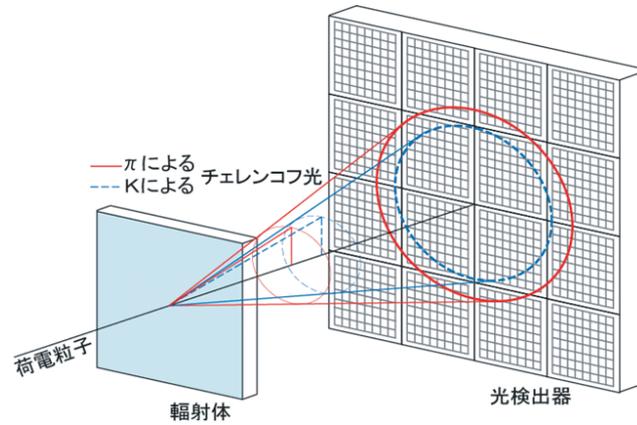


図 4.2 Proximity focusing

4.1.1 A-RICH 検出器の原理

Proximity focusing 型 A-RICH 検出器を荷電粒子が通過した際、エアロゲルの上流表面から光検出器表面までの距離を L 、チェレンコフリングの半径を r とすると、求めるべきチェレンコフ角 θ_c は次式 4.3 のようになる。しかし実際には、チェレンコフリングにはエアロゲルの厚さによる誤差や、光検出器のピクセルサイズの誤差が含まれる。

$$\theta_c = \tan^{-1}\left(\frac{r}{L}\right) \quad (4.3)$$

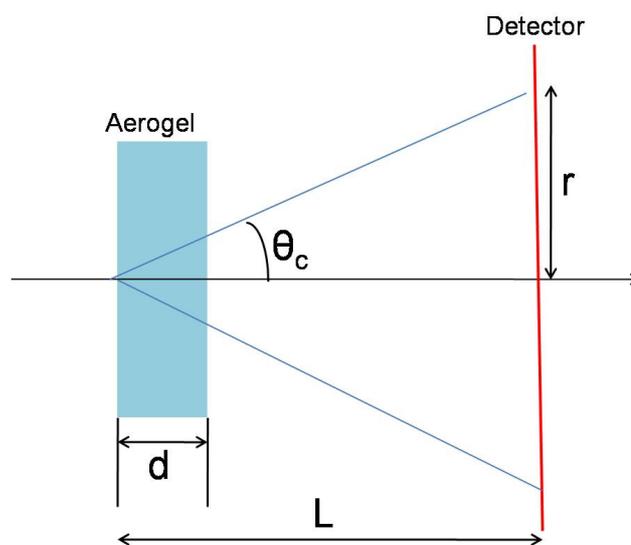


図 4.3 A-RICH 検出器の概念図

4.1.2 A-RICH 検出器に対する要請

現在想定している A-RICH 検出器に対する要請は以下のようなものがある。

輻射体

- 低屈折率かつ検出光量を損なわない程度の薄さのエアロジェル

光検出器

- 1.5T の磁場中でも動作
- チェレンコフの 1 光子検出
- 十分な有効面積
- 位置分解能 (~5 mm)

光検出器読み出しシステム

- 高利得・低雑音なアンプ
- 設置空間
- 計 10 万チャンネル以上の同時読み出し
- 高いイベントレートに対応

これらを満たす A-RICH 検出器の構成要素として、我々はシリカエアロジェル、マルチアノード型光検出器 HAPD、光検出器用読み出しシステム ASIC を開発している。

4.1.3 シリカエアロジェル

シリカエアロジェルは 4GeV/c 付近の運動量領域で K/π 識別を行うのに最適な低い屈折率を持っている。チェレンコフ角の決定精度を上げるためには、より光量が多く、よりチェレンコフ角が大きいことが望ましい。しかし、光量を多くするためにエアロジェルを厚くしてしまえば、前述したように放出点による不定性が大きくなってしまふ。また、チェレンコフ角を大きくするために屈折率を大きくしてしまうと、 K 中間子と π 中間子に対するチェレンコフ角度差が小さくなってしまふ。よって、シリカエアロジェルに対してこれらのことを考慮した上で厚さと屈折率を決定しなくてはならない。

4.1.4 光検出器

A-RICH 検出器は発生したチェレンコフ光 1 つ 1 つの検出器上の位置情報から、チェレンコフ角を再構成することで輻射体を通過した荷電粒子の速度を求めるため、光検出器に対しては、十分な有効面積と高い検出効率、そして高い位置分解能を持つことが要求される。また、Belle 実験にはソレノイド電磁石により検出器全体に 1.5T の磁場がかかっているために、その中で安定して動作することも要求される。

これらの要求を満たす光検出器として、我々は浜松ホトニクス社と共同で新しいタイプのマルチアノード型光検出器：HAPD (Hybrid Avalanche Photo Diode) を研究・開発している。詳細は第 5 章にて述べる。

4.1.5 光検出器用読み出し電子回路

上述した HAPD の全チャンネルからの信号を同時に処理するためには汎用の回路系では対応できない。よって、多チャンネルの同時読み出しが可能であること、endcap 部の設置空間の制約上からコンパクトなサイズであることが要求される。また、HAPD の gain が通常の光検出器よりも低いため、全チャンネルに対して低雑音・高利得な増幅器が必要となる。そこで、我々は HAPD 用多チャンネル同時読み出し用集積回路：ASIC (Application Specific Integrated Circuit) の開発を行っている。第 5 章にて述べる。

4.2 A-RICH 検出器の K/π 識別能力

式 4.2 から、4GeV/c における K/π のチェレンコフ角度差は、輻射体の屈折率が $n=1.05$ の時には 23mrad と計算される (輻射体の全面から光検出器表面までの距離を 20 cm とすると、光検出器の表面上で π 中間子のチェレンコフ光リングの半径は約 60 mm)。A-RICH 検出器では角度分解能 σ の値で 4σ (求められる角度分解能は約 5.75 mrad) を目指して開発・研究が進められている。第 7 章にてプロトタイプ A-RICH 検出器の K/π 識別の評価を行う。

第 5 章

HAPD

この章では A-RICH 検出器において、チェレンコフ光を検出するための光検出器として有力な候補である、マルチアノード型光検出器 HAPD (Hybrid Avalanche Photo Diode) についての概要と、検出原理、さらに試作されているサンプルの性能評価について説明していく。

5.1 HAPD 概要

我々が現在開発している A-RICH 検出器は、ビーム軸方向に 1.5T の磁場がかかった Belle 検出器中に設置される。そのため光検出器はこの磁場中でも安定に動作することが要求される。さらに前章でも述べたように、A-RICH 検出器にはチェレンコフ光つまり 1 光電子が検出可能であること、位置分解能、十分な有効面積をもつということもまた必要とされてくる。しかし、これらの要求を既存の市販されている光検出器で満たすことは難しい。そこで我々はこれら要求を満たす光検出器として浜松ホトニクス株式会社と共同で、Hybrid Avalanche Photo Diode(HAPD) という新しいタイプのマルチアノード型光検出器を研究・開発している。HAPD は真空管により電場加速された光電子を APD(Avalanche Photo Diode) に打ち込む。そしてダイオードで生成された電子・正孔対はダイオードに印加された逆バイアス電圧により Avalanche 効果でさらに増幅され、シグナルとして検出される。この HAPD は従来の光電子増倍管のような複雑な増幅部を用いないため、増幅揺らぎが非常に少なく、電子分解能や安定性において光検出器として優れた性能を示す。

5.2 HAPD 動作原理

先で述べたように HAPD は電場による増幅のための真空管と、PN 接合を利用した Si 半導体素子である APD (Avalanche Photo Diode) を合わせた新型の光検出器である。以下に簡単な一般的な半導体の特性、APD の原理、また APD と電場増幅を合わせた HAPD について述べる。

5.2.1 半導体:PN 接合

PN 接合とは、p 型半導体と n 型半導体を接合したものである。pn 接合では接合部で p 型と n 型のフェルミ準位が等しく、エネルギーバンドに傾きを持つ (図 5.1)。ここに、p 型に +、n 型に - の電圧 (順バイアス電圧) を印加すると、n 型のフェルミ準位が上昇し、このエネルギーバンドの傾きが小さくなるため pn 間で電流が流れる。逆に、p 型に -、n 型に + の電圧を (逆バイアス電圧) を印加すると、n 型のフェルミ準位が下降し、図 5.1 のようにバンドの傾きも大きくなるため電流は流れない。このとき、接合付近にはキャリアが存在しない領域：空乏層が形成される。

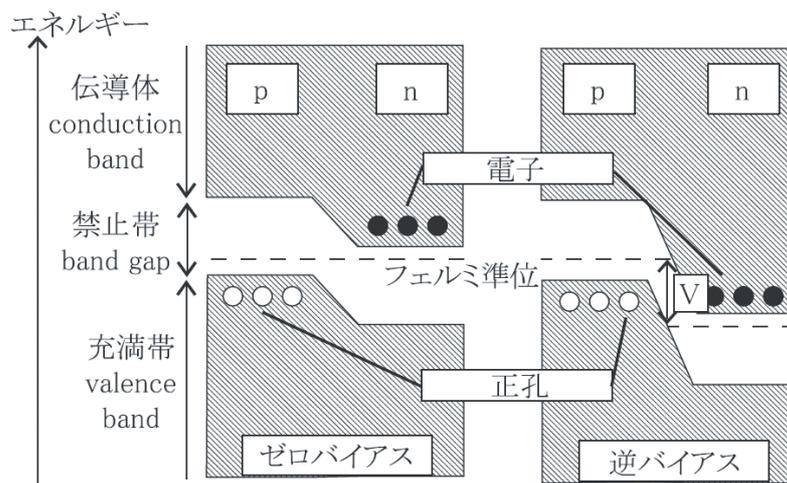


図 5.1 半導体:p-n 接合

5.2.2 APD

前述のように PN 接合へ逆バイアス電圧を印加すると、空乏層が形成される。この空乏層に光子が入射すると価電子帯の電子を励起させ、入射エネルギーに比例した電子・正孔

対が生じる（Si 半導体の場合、1 対の電子・正孔対を生成するのに約 3.64 eV が必要）。この電子・正孔対は逆バイアス電圧によりそれぞれの電極へ向って移動する。したがって、入射した光子のエネルギーに比例した信号が読み出すことができる。このようなデバイスを Photo diode (PD) という。HAPD に使われている半導体素子 PD ではキャリアを光電子の入射エネルギーによって得ている。

PD は光電子増倍管に比べ、量子効率が高い、小型化が容易、磁場に影響されない、ダイナミックレンジが広いといったメリットがある。その一方で、得られる信号に対してノイズが大きい、増幅率が低いというデメリットがある。

そこで HAPD の PD では、p 型半導体に混ぜる不純物を調節することで、Avalanche 増幅という効果により増幅率の低さを補っている。Avalanche 増幅は、キャリアを電界で加速することにより、半導体素子の格子（電子）に衝突させ、電子を励起することで電子-正孔対の 2 次キャリアをつくり、さらにその 2 次キャリアも同様にして電子-正孔対を作るといった具合に雪崩的にキャリアが増えていく効果である（図 5.2）。この Avalanche 効果を持ち合わせた PD を Avalanche Photo Diode (APD) という。この Avalanche 効果による増幅率は約 10 倍である。

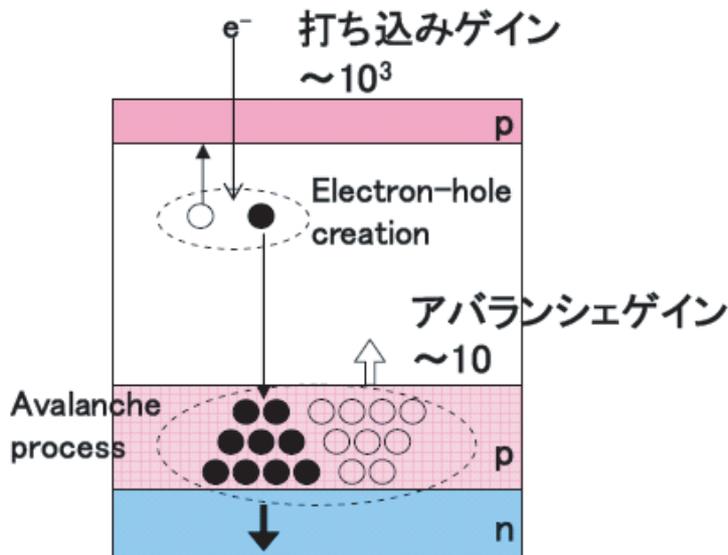


図 5.2 APD 内での avalanche process

5.2.3 HAPD

この APD と、電場による増幅のための真空管を合わせたものが Hybrid Avalanche Photo Diode (HAPD) である（図 5.3、図 5.4）。HAPD に入射した光子は光電面で光電

子となり、HAPDの真空管に印加された高電圧により約 10^3 倍に増幅される。このようにして、電場による電子打ち込みゲインと、APD内でのAvalanche効果によるゲインから、HAPDの最終的なゲインは $10^4 \sim 10^5$ のオーダーとなる。

しかし、これは一般的な光電子増倍管のゲイン 10^7 オーダーに比べると低い。また、APDの出力容量は80pFに達する。そこでHAPDを読み出しのためには高利得で低雑音なシステムの開発が必要とされる。

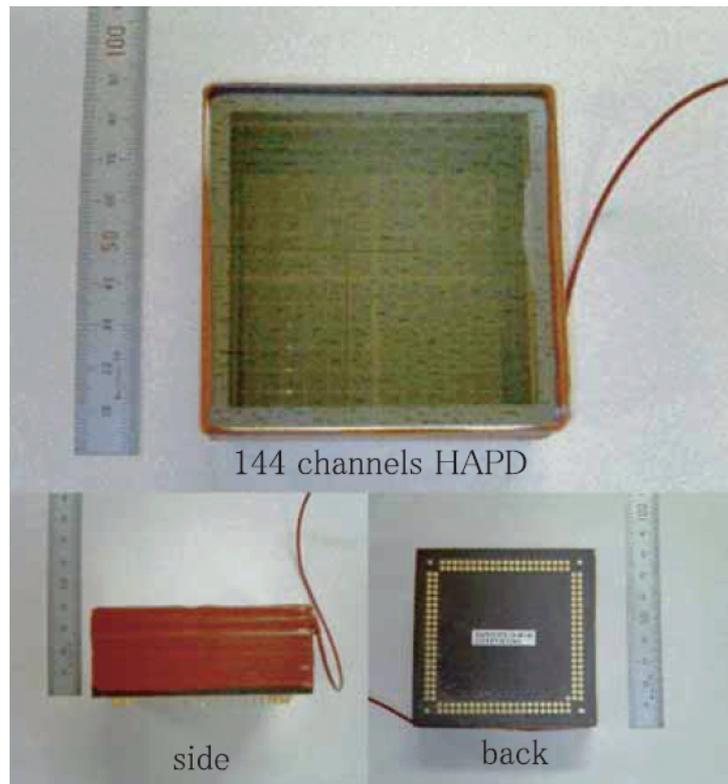


図 5.3 HAPD 外観

5.2.4 HAPD と光電子増倍管との比較

HAPDの検出器構造との比較のために、最も一般的に使用されている従来型の光電子増倍管の構造を図5.5に示す。

従来型の光電子増倍管では、光電子は収束電極で第一dynode上に収束され、二次電子(5~6個)を放出して増幅された後、引き続くdynodeでさらに二次電子放出により増幅される。dynodeはおよそ8~19段で構成され、最終的なゲインは $10^7 \sim 10^8$ に達する。

一方、HAPDは真空管による増幅と半導体による増幅を組み合わせで構成されている。APD内での増幅過程は前節で示した通りで、最終ゲインは $10^5 \sim 10^6$ 程度である。

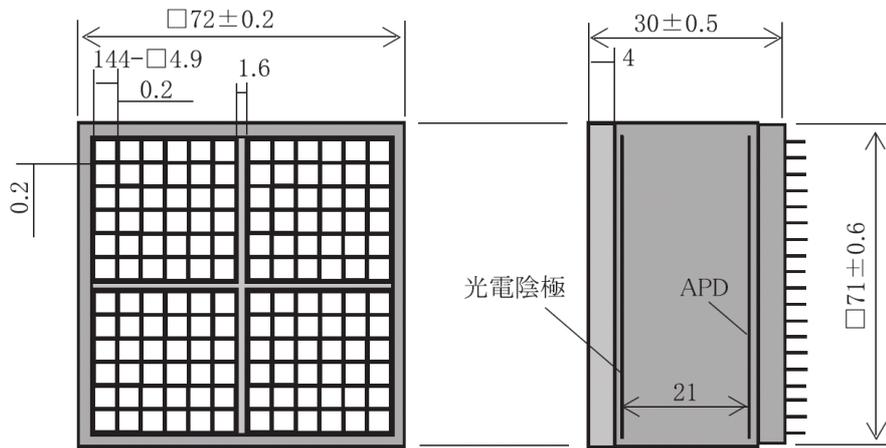


図 5.4 HAPD 外寸

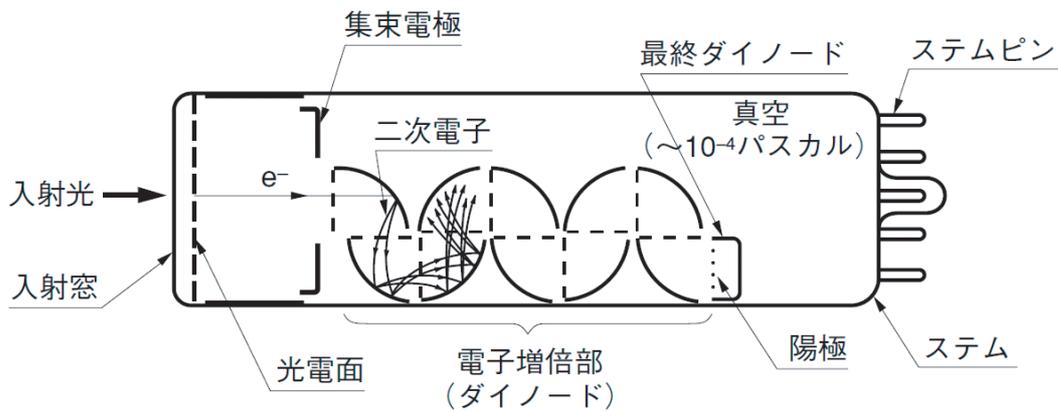


図 5.5 光電子増倍管の構造

第 6 章

HAPD 用読み出し電子回路:ASIC

前章で述べたように HAPD は一般的な光検出器と比べると利得が低く、また出力容量が大きいため、その信号読み出しのためには高利得・低雑音の増幅器が必要となってくる。また HAPD は 1 台当たり 144ch の読み出しをもち、さらに A-RICH 検出器全体としては約 600 台が Belle 検出器にインストール予定であるので、計 10 チャンネル以上の信号の読み出しを同時に行うシステムの開発が必要となってくる。このシステム開発のために、我々は HAPD 専用多チャンネル信号処理用 ASIC(Application Specific Integrated Circuit) を開発している。これまでに 2003 年に初めて 1st version である「S01」を開発し、ほぼ 1 年ごとに 2nd、3rd、4th version である「S02」, 「S03」, 「S04」(通称 S シリーズ) の試作を行ってきた。この章ではこれら S シリーズと 2007 年に試作された、より実用的な ASIC である SA シリーズ(「S」-Advanced) の 1st version 「SA01」の開発経緯、性能評価に関して述べていく。

6.1 ASIC 概要と信号処理過程

A-RICH 検出器の読み出しシステムとして要求される仕様は以下の様なものが挙げられる。

1. HAPD の全チャンネルの信号に対して処理が可能
2. 1 光電子の信号処理可能(高利得・低雑音)
3. 設置空間の問題上からコンパクト化
4. 高いイベントレートに対応

実際に A-RICH 検出器が設置される endcap 部は奥行きが約 30cm と設置空間が限られており、1 つの 1 つの信号を波高値で処理していたのでは膨大な数の信号ケーブルが要求され、また約 10 万チャンネルの信号処理に膨大な時間と費用が必要となってくる。そこ

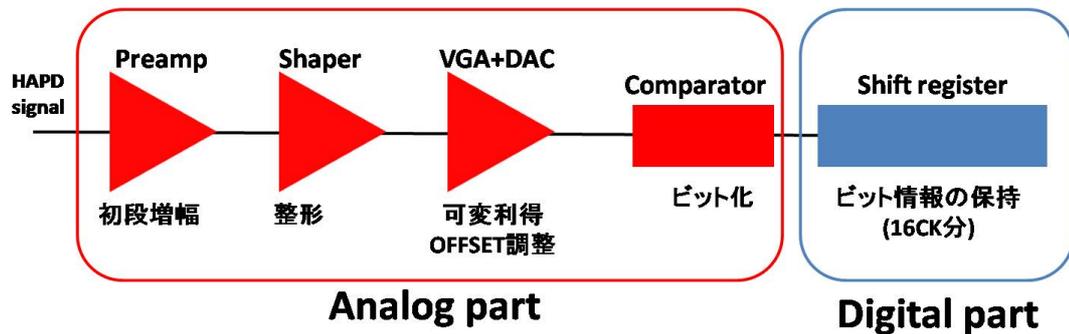


図 6.1 信号処理過程の模式図

で、ASIC は増幅器を集積化することによりコンパクト化し、さらに信号を波高値ではなくのビット情報で処理することで高いイベントレートに対応できるように設計された。

A-RICH 検出器は放出されたチェレンコフ光の位置情報（リングイメージ）から放出角を再構成し、入射粒子の同定を行うものである。すなわち重要となってくるのは「HAPD のどの位置に光が入射したか」ということである。そのため信号を波高値で処理する必要はなく、ビット化された情報で十分である。しかし、それを精度良く測定するためには HAPD からの信号に対して良い S/N 比を保持したまま処理する必要がある。また、ASIC で HAPD からの信号を処理した後、外部から読み出しが始まるまでにある程度の時間だけ、信号を保持しなければならない。

これらの信号処理を行うために、我々は図 6.1 に示すような信号処理回路を持つ ASIC を設計した。これは、HAPD 信号の増幅部である analog 部と、それをビット化し保持する digital 部の 2 つに分けられる。以下の小節では、S シリーズのアナログ部とデジタル部の主な回路構成について説明する。

6.1.1 Analog part

アナログパートは前置増幅器、整形増幅器、可変利得増幅器の計 3 段の増幅器と、それらからのアナログ出力からデジタルビット信号を生成するコンパレータから構成されている。その主な目的は HAPD からの信号を前置増幅器として処理し、後段にあるデジタルパートにその信号を伝えることである。

前置増幅器

増幅初段として前置増幅器が配置され、これは電荷積分型の前置増幅器であり、外部スイッチにより $10[\text{V/pC}]$ と $5[\text{V/pC}]$ の 2 つの増幅率を選択できるようになっている。また、入力信号として検出器からの信号以外に、性能評価のためにテストパルスを入力できるようになっている。

整形増幅器

増幅第 2 段として整形増幅器が設置されている。ここは、Pole-Zero 補償回路、そして非反転増幅器で構成されている。前者は前置増幅器の減衰時定数を短縮する効果がある。後者は後段増幅部及びデジタル部への雑音対策のために設置している。

可変利得増幅器 (VGA)

増幅第 3 段として可変利得増幅器が設置されている。これは HAPD の total gain が低いことを受けて設置したものである。外部スイッチにより 1.25 ~ 20 倍の範囲で利得を調整できるようになっている。さらに付随した DAC 回路により、出力される信号を $\sim \pm 150$ [mV] の範囲でオフセット調整できる。

Comparator

コンパレータ部 (図 6.2) では、各 ASIC ごと印加される threshold 電圧が参照用電圧として送られており、VGA からの出力信号の波高値が、この threshold 電圧を超えた際にビット信号を出力する。

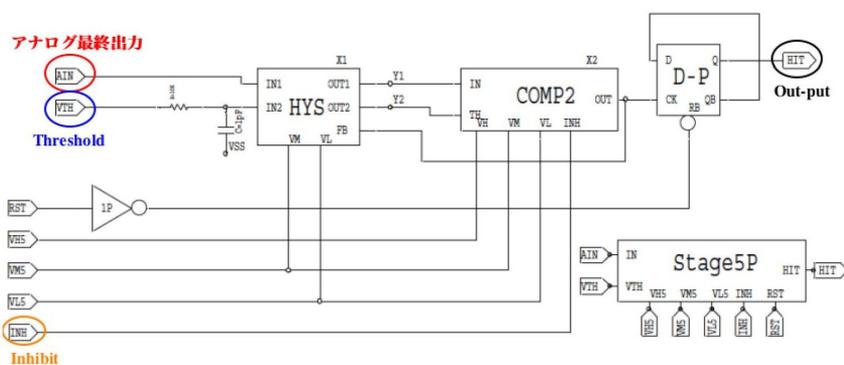


図 6.2 コンパレータ部の回路ブロック

6.1.2 Digital part

デジタル部分はアナログ部分を通った有意な信号に対して処理を施し出力をデジタル化する。デジタル部分はデジタル情報を保持しておくシフトレジスタで構成されている。

Shift register

シフトレジスタ部(図6.3)では、コンパレータ部により送られてくるビット信号からトリガー信号を出力するとともに、16個のDFF(D-type flip-flop)回路によりチップ動作周波数の16クロック分だけビット信号を保持するようになっている。チップ動作周波数は1~10[MHz]を想定しているため、シフトレジスタ部では約1.6~16[μ sec]だけデータの保持が可能となっている。

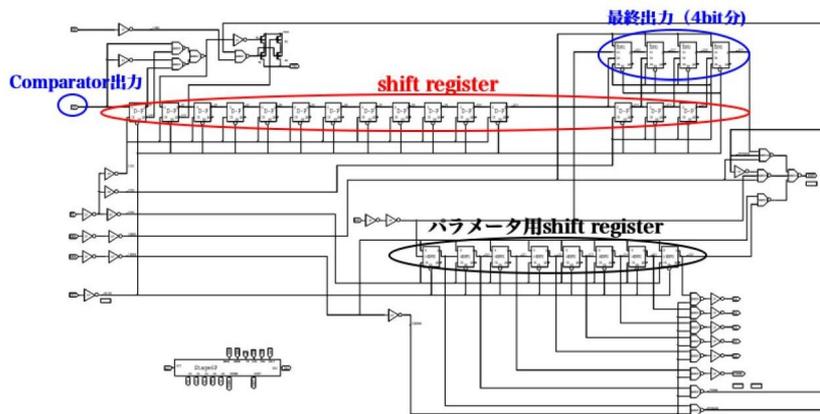


図 6.3 シフトレジスタ部の回路ブロック

6.2 S シリーズ ASIC 開発経緯

この節では、SA シリーズの前バージョンである S シリーズの開発経緯を説明する。HAPD 信号処理用 ASIC としては、2004 年に S01、同年に S02、2005 年に S03、2006 年に S04 が試作されている。いずれのチップも構成概念は同じである。それぞれの ASIC の概要と問題点を簡単に述べる。

S01

S01 は HPD (APD ではなく Avalanche 領域を持たない PD を配置したもので、ゲインは $\sim 10^3$) 処理用 ASIC として開発されたものであり、問題となった点は以下の 2 点である。

1. 1 つのチャンネルあたりの OFFSET が大きい
2. analog-digital 間で信号の干渉がある

1 つ目はアナログ信号処理回路の DC 結合部において、直流成分が増幅されることにより各チャンネル間のオフセット値が大きくなってしまい、オフセット調節可能範囲 (± 30 [mV]) を超えていたという問題である。この対策としてアナログ信号処理回路を AC 結合方式に変えることにより、直流成分を取り除くということがある。2 つ目はパッドに使用されている静電保護用トランジスタのソース-ドレイン間を通じて、デジタル回路からアナログ回路への干渉が雑音として寄与してしまったという問題である。この対策として新たなパッドの導入をということがある。

S02

「S01」の課題・対策を受け、新たに試作されたのが「S02」である。しかし「S02」においても以下の点において課題が見られた。

1. 電子ノイズレベルが検出器容量 $C_d=80$ [pF] において設計上より大きい
2. 検出器容量が増大するにつれ、VDD、VSS 変動に対する感度が低周波側へ著しく拡大する
3. 検出器容量の増大に伴い、出力波高が減少する
4. オフセット調整がほとんど効いていない

1 つ目に関しては、設計上は $1800[e]@82$ [pF] であるが、測定された値は $4000[e]$ であった。2 つ目の課題の対策として、トランジスタ用バイアス回路に対電源レベルに向けて 10 [pF] の容量を入れることにより改善させることがある。さらに、プリアンプ回路の

トランジスタのゲート電圧に MOS トランジスタを用いた RC 回路を追加させることにより安定させることもある。3 つ目に関しては、前置増幅器におけるオープンループゲインが足りないことが原因であった。4 つ目に関しては、オフセット ADJ 信号生成用の負荷抵抗の間に問題があり、この抵抗を $1k\omega$ から $20k\omega$ へ変更することで対策とした。

S03

S01、S02 の問題点を改善し、試作されたのが S03 である。S03 は HAPD の信号処理回路としては概ね設計通りの動作を確認することができた。しかし、以下の点においていくつか課題が見られた。

1. 低容量におけるゲインブースト回路による発振
2. 安定化までの時間

まず 1 つ目に関して、ゲインブースト回路は前置増幅器においてオープンループゲインを上げる目的で S03 で新しく付け加えられた回路である。しかし、副作用として検出器容量の低下に伴って、ゲインブースト回路が安定領域を逸脱するという現象が見られた。2 つ目に関しては、S03 では回路の安定化を図るために、前置増幅器のバイアス回路に非常に大きな RC 回路を設置した。このため回路が安定に動作するまでの充電時間が 1~2 時間必要となってくる。

S04

S04 は S03 の問題点を改良し、2006 年に試作された ASIC である。この性能評価については次節で述べる。

6.3 4th version ASIC:S04

この節では「S シリーズ」の 4th version である S04 の性能評価について簡単に説明する。S04 の製造プロセスは以下の表 6.2 で示した通りである。また、ASIC への設計仕様を表 6.2 に示す。

以降ではまず後述する改良型 ASIC:SA01 との比較のためと、第 7 章で述べるプロトタイプ A-RICH 検出器のビームテストでは S04 (一部の除き) であるため、過去に測定された S04 の主な性能評価を示す。

プロセス	ROHM CMOS 0.35[μm]
パッケージ	セラミック QFP160
PolySI 層	2 層
Metal 層	3 層
電極電圧	2.0/-1.3[V]
パッド数	144
サイズ	4.93 × 4.93[mm^2]

表 6.1 IC 製造プロセス

ノイズレベル	1200[e@80[pF]]
標準入力信号	12000[e]
チップあたりの実装チャンネル数	18[channel/chip]
読み出し方式	シリアル・デジタル
S/N	10
ヒットレート	10[kHz/channel]
トリガーレート	5[kHz]
消費電力	3[mW/channel]

表 6.2 ASIC への要求仕様

6.4 S04 の性能評価

前節の設計仕様のもと S04 が試作された。本節では、第 7 章のプロトタイプ A-RICH 検出器のビームテストにおいて S04 が用いられているため、また後述する SA01 との比較のために、過去に行われた S04 の性能評価を述べる (評価法は後の 6.6 節を参照)。その主な測定項目は以下のものが挙げられる。

1. テストパルス入力を用いたアナログ出力の線形性
2. OFFSET 調節
3. ノイズレベルと検出器容量依存性

6.4.1 アナログ出力の線形性

テストパルスを用いて信号を入力し、ASIC のアナログ出力の線形性を示す。S04 は前置増幅器の増幅率を二段階に切り替えることができる。増幅率を高く設定した場合は、図 6.4 で示すように、HAPD のゲインが 12000 程度の低ゲインタイプでは、0.5 光電子から光電子相当の範囲で線形性を保っていることがわかる。また増幅率を下げた場合にはさらに広い範囲で線形性を確認でき、これらの結果から HAPD の読み出しシステムとして十分な性能を持っている。

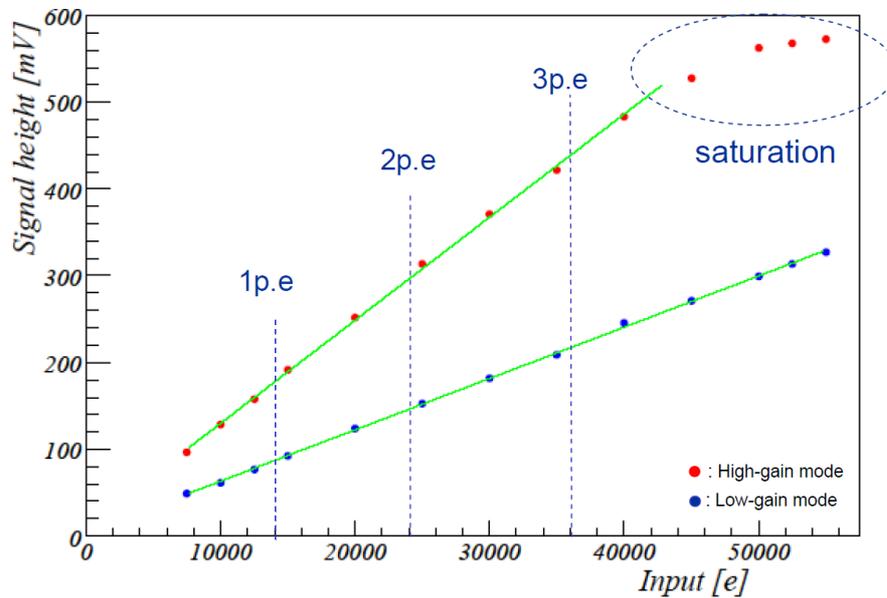


図 6.4 S04 の線形性

6.4.2 OFFSET 調節

S04 は従来のシリーズと同様、各チャンネルに設けられているコンパレータ回路の threshold 電圧はチップ単位での設定となっている。そのため、1 チップにおけるチャンネル間のオフセットを調節する必要がある。そのオフセット調節の機能の確認を示す。

図 6.5 は横軸にオフセット調節設定番号、縦軸に信号のグランドレベルからの変動をとった、オフセットの線形性を測定されたものである。この図よりオフセット値を約 11[mV] 間隔で設定可能であることがわかる。図 6.6 は 1 チップの各チャンネルをオフセット調整されたものである。この結果より各チャンネル間のオフセット値のばらつきを約 20[mV] 以内に収めることができている。

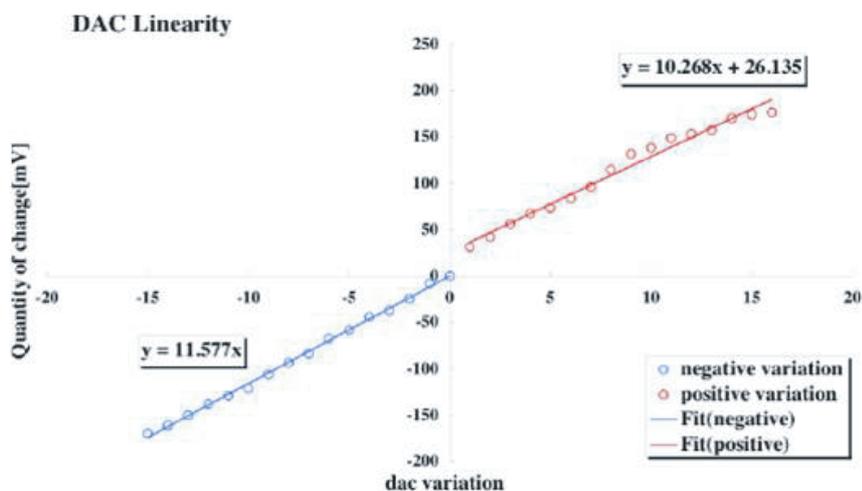


図 6.5 OFFSET 調整の線形性

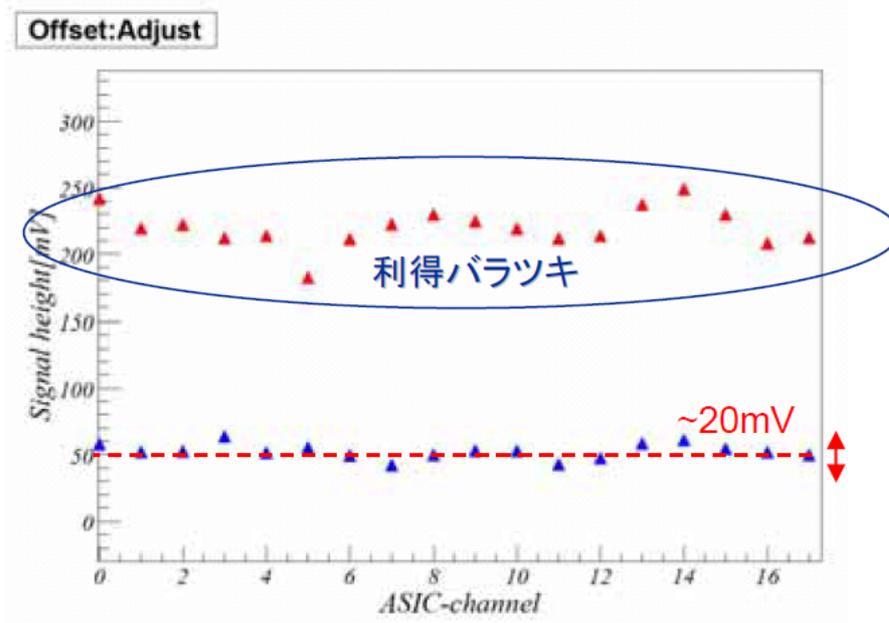


図 6.6 OFFSET 調整後

6.4.3 ノイズレベルと検出器容量依存性

電荷増幅器の基本特性として、入力容量の増加に伴うノイズの増加がある。その測定のために入力端子と接地点の間に一定の容量のコンデンサーを疑似検出器容量として接続し、1光電子相当のテストパルスの入力におけるノイズレベルが測定された。結果は図6.7である。HAPDの検出器容量80pFにおいてはノイズレベルは約1800[e]となっている。1光電子相当の信号は典型的なゲインのHAPDで約60000[e]であるため、S/N比は単純に見積もって約33である。

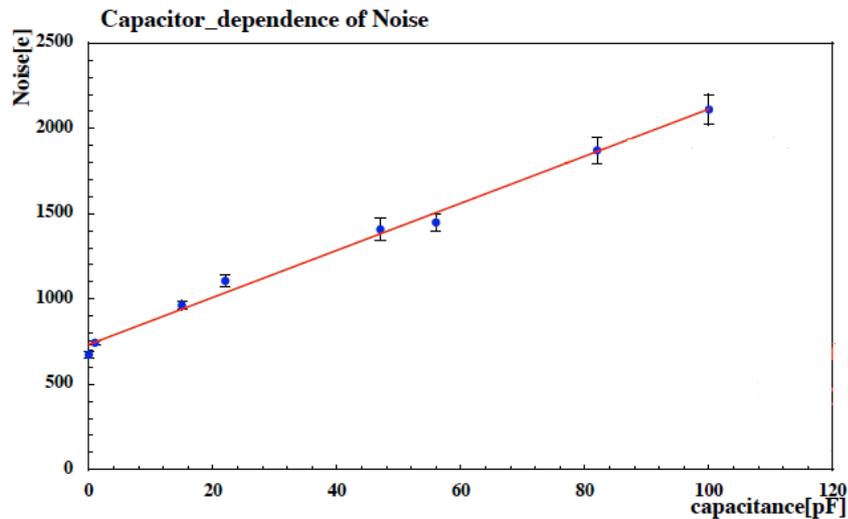


図 6.7 S04 の Noise Level

6.5 新型 ASIC:SA01

S04 においてほぼ目標とするノイズレベルでの読み出しを達成できた。これにて「S シリーズ」の試作を一区切りし、より実用に向けて機能を追加し、性能を改善させた新型 ASIC「SA シリーズ」(“S” Advanced series)の開発と性能評価をしていく。

「S シリーズ」は、3つの増幅器からなるアナログ部、コンパレータとシフトレジスタからなるデジタル部で構成されていたが、「SA シリーズ」では Belle 実験共通のデータ読み出し方式に対応可能なように、アナログ部とデジタル部を分離させたものとなっている。また、「S シリーズ」は S01 から S04 までローム株式会社の $0.35\mu\text{m}$ プロセスを用いて試作されていたが、「SA シリーズ」の 1st version の SA01 では台湾の TSMC 社の $0.35\mu\text{m}$ Mixed mode(MOSIS)にて試作を依頼することになった。

6.5.1 S04 からの変更点

SA シリーズの 1st version である SA01 の S04 からの主な変更点は、以下のものが挙げられる。

1. アナログ部に設置されていた VGA を廃し、アンプを一段にした
2. 整形増幅回路部で shaping time を調節できるようになった
3. shiftregister を IC 外部に置くことにより、デジタル・アナログ混在を解消した
4. 各チャンネルに対するオフセット調節を 5bit から、coarse オフセット調節 4bit、

fine オフセット調節 4bit へと増やした

5. チャンネル数が 12

1 つ目に関しては、HAPD のゲインが当初予想されていた値より上がってきたために VGA による後段増幅が必要なくなったということである。また、前置増幅器では 4 段階でゲインを設定できるようになった。1 つ目に関しては、整形増幅回路において shaping time を約 250ns ~ $1.0\mu\text{s}$ の間で調節することが可能となった。3 つ目に関しては、shiftregister を IC 外部の PTS モジュールに置くことにより、ノイズの原因となりうるデジタル・アナログの混在をやめ、読み出しシステムとしてより柔軟な構成にされている。将来的には IC のすぐ直後に FPGA を置き、デジタル信号の処理を行う予定である。4 つ目に関しては、オフセット値のより細かい調節ができるようになった。5 つ目に関しては、SA01 では 12 チャンネルであるが、将来は 36 または 72 チャンネルまで増やす予定である。

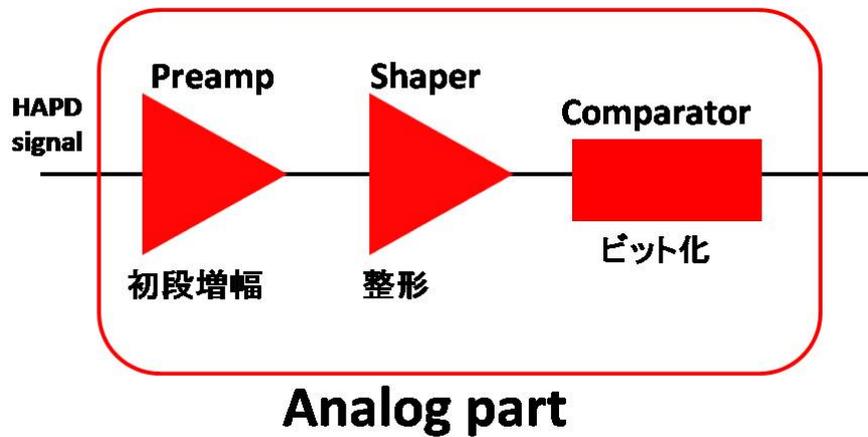
回路構成

図 6.8 SA01 の回路構成

6.6 SA01 の性能評価

この節では、ASIC:S04 の性能評価について述べていく。その主な測定項目は以下の通りである。

1. テストパルス入力を用いたアナログ出力の線形性
2. ノイズレベルと検出器容量依存性
3. OFFSET 調節
4. HAPD と接続した状態でのデータの読み出し

これらの測定では、入力信号は全てテストパルスを用いている。テストパルスを用いた SA01 の性能評価テストベンチのブロック図を図 6.9 に示す。

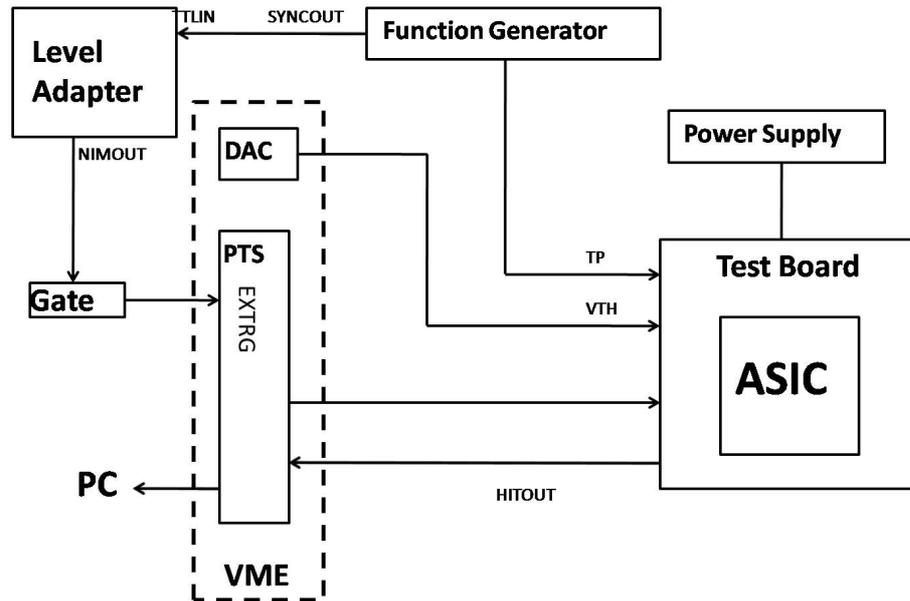


図 6.9 テストパルスによる性能評価の Set up



図 6.10 SA01+Test board

6.6.1 データと解析方法:Threshold scan

ASIC:SA01 は 1 チップあたりにつき 12 チャンネルの読み出し回路をもつが、shaping amp のアナログ波形出力はモニター用に 1 チャンネル分しか同時には外部出力できない。また、最終的に得られる情報はそれぞれのチャンネルからのビット化されたオンオフ信号のみであるため、ASIC 内部のアナログ部の出力波形の評価を、以下の閾値電圧（以下 threshold 電圧）を変化させた時のトリガー出力のスキャン（Threshold scan）にて

行った。

SA01 での入力信号が一定の時、アナログ部の出力の波高値のばらつきはガウス分布に従っている。すなわちビット化された出力頻度はガウス分布において threshold 電圧以上が得られる確率に等しく、これはガウス関数の threshold 電圧以上の積分値に他ならない。すなわち、threshold 電圧とビット出力の出力割合の関係から波高分布でいうところの平均値と分散を見積もることができる。そのために、図 6.9 の VME-DAC の設定により SA01 のコンパレータに送る threshold 電圧を変化させ、各 threshold 電圧でのトリガー出力頻度を得た。図 6.11 に左からそれぞれ、アナログ波形出力、Threshold scan、ADC 分布を示す。

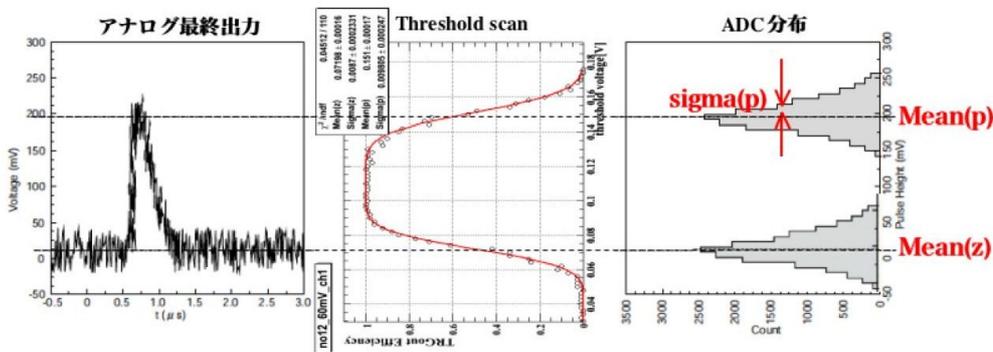


図 6.11 Threshold scan 図

得られた threshold scan のデータを以下の式 6.2 で fitting することで、mean(p)、mean(z)、sigma(p) を fitting したガウス分布から求め、この値を使って以降の測定では評価を行っている。

$$\frac{1}{2} \operatorname{Erfc} \left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}}^{\infty} \exp(-t^2) dt \quad (6.1)$$

$$\left(\left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{Erfc} \left(\frac{x - \mu_z}{\sqrt{2}\sigma_z} \right) \right] + \frac{1}{2} \operatorname{Erfc} \left(\frac{x - \mu_z}{\sqrt{2}\sigma_z} \right) \right) - 1 \quad (6.2)$$

Threshold scan により見積もることができる値は以下の式の通りである。

$$\text{信号の波高} = \text{mean}(p) - \text{mean}(z) \quad (6.3)$$

$$\text{オフセット値} = \text{mean}(z) \quad (6.4)$$

$$S/N \text{ 比} = \frac{\text{信号の波高}}{\text{sigma}(p)} \quad (6.5)$$

$$\text{ノイズ [e]} = \frac{\text{input[e]}}{\text{S/N 比}} \quad (6.6)$$

6.6.2 アナログ回路の線形性

入力信号に対する整形増幅器後のアナログ最終出力の線形性を測定した。入力信号としてはテストパルス信号を用いた。前置増幅器は電荷増幅型であるため、テストパルスの信号を SA01 内のテストパルス用入力容量 0.1 pF で電荷に変換した。このようにして入力したテストパルス信号を前置増幅器、整形増幅器を通し、アナログ最終出力を得る。このアナログ最終出力を threshold scan で、その波高値を見積もった。図 6.12 にその結果を示す。横軸は入力電子数 [mV]、縦軸は Threshold scan により見積もられた波高値 [mV] である。SA01 では前置増幅器の gain 設定を 2bit のフラグ設定で 4 段階に調節できるため、それぞれの設定での出力波高値を測定した。それぞれ図中の表の gain 設定の数字が小さい順に gain が大きくなる。またその括弧の中の値が出力値の入力信号に対する gain となっている。

現在の HAPD の平均的な gain が約 60,000 であるとする、その時のアナログ最終出力の波高値は、前置増幅器の gain 設定が一番低いものであっても、1 光子相当の HAPD からの信号 (約 60000[e] 相当) ですでに saturate していた。しかし A-RICH 検出器では 1 光子信号を検出できればいいので、HAPD の読み出しシステムとしては十分な性能である。

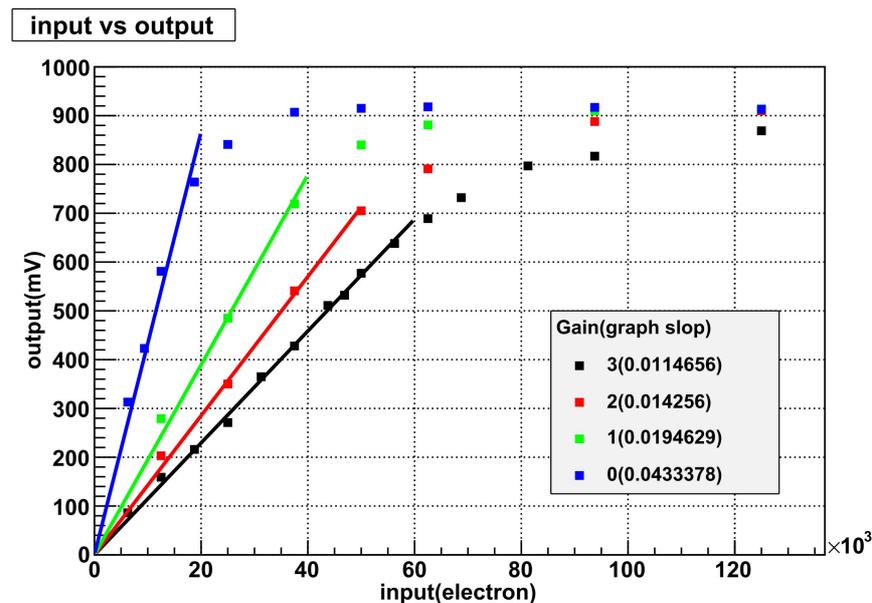


図 6.12 SA01:出力信号の線形性

6.6.3 ノイズレベルと検出器容量依存性

電荷増幅器の基本特性として、入力容量の増加に伴うノイズの増加がある。HAPD の読み出しシステムとして適性を調べる上では、この検出器容量に対する読み出し回路のノイズ特性を測定することが必要である。

そのために各チャンネルの増幅器の入力端子と GND との間に一定の容量のコンデンサーを疑似検出器容量として接続し、テストパルスの入力におけるノイズレベルを測定した。ノイズレベルは threshold scan により求められたガウス分布の標準偏差 σ の値から見積もった (式 6.6)。その結果を図 6.13 に示す。横軸に接続したコンデンサーの容量 [pF]、縦軸にノイズの電子数 [electron] となっている。測定は 0pF (コンデンサー無し) から 220pF の間の 10 個で行った。

HAPD の検出器容量は約 80pF である。このとき SA01 のノイズレベルは図 6.13 から約 1175[e] となった。現在用いられている平均的な HAPD のゲインは約 60000 であるため、このときの 1 光電子信号と比べると S/N 比は 51 となる。また前シリーズの S04 のノイズは 1800[e] (@80pF) であるため、大幅に改善していることが確認できた。この結果より目的としているノイズレベルでの読み出しに達しているといえる。

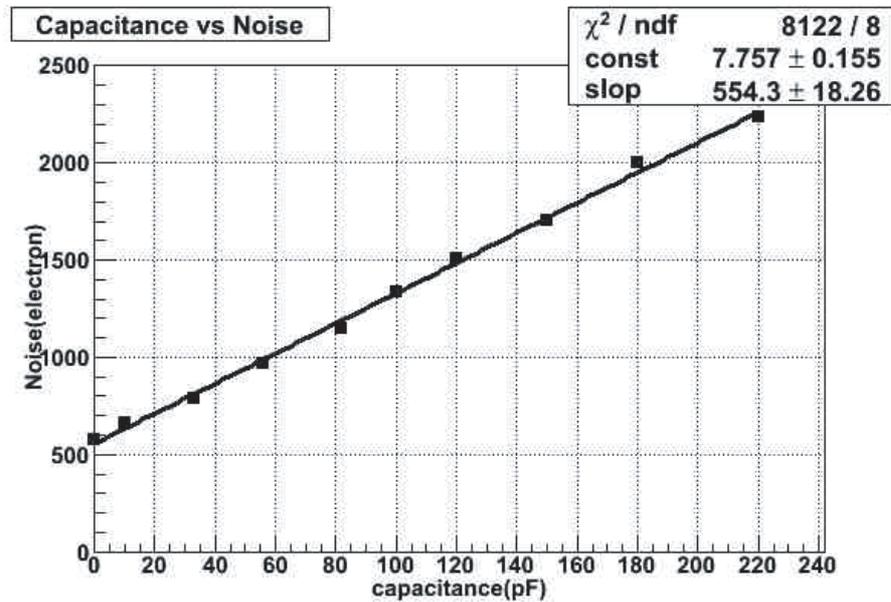


図 6.13 SA01:ノイズの検出器容量依存性

6.6.4 OFFSET 調節

SA01 は前バージョンの「S シリーズ」と同様に、各チャンネルに設けられているコンパレータ回路の threshold 電圧はチップ単位でしか設定できない。そのため各チャンネルごとのオフセット調整用設定フラグ (DAC) が設けられている。このオフセット調節機能を確認した。

SA01 では「S シリーズ」とは異なり、オフセット調節用に coarse offset が 4bit と fine offset が 4bit の二つのパラメータがあり計 8bit、256 段階に調節が可能となっている。図 6.14 に coarse offset 調節、図 6.15 に fine offset 調節の線形性を示した。横軸はそれぞれパラメータの段階、縦軸は基準点からの pedestal 位置のずれを示している。この結果から coarse offset では約 58.7mV 間隔、fine offset では約 5.4mV 間隔で調節が可能であることが確認できた。

これら機能で ASIC の各チャンネル間のオフセット調節を行うことにより、各チャンネルのコンパレータの threshold 電圧を適切に設定することが可能となる。

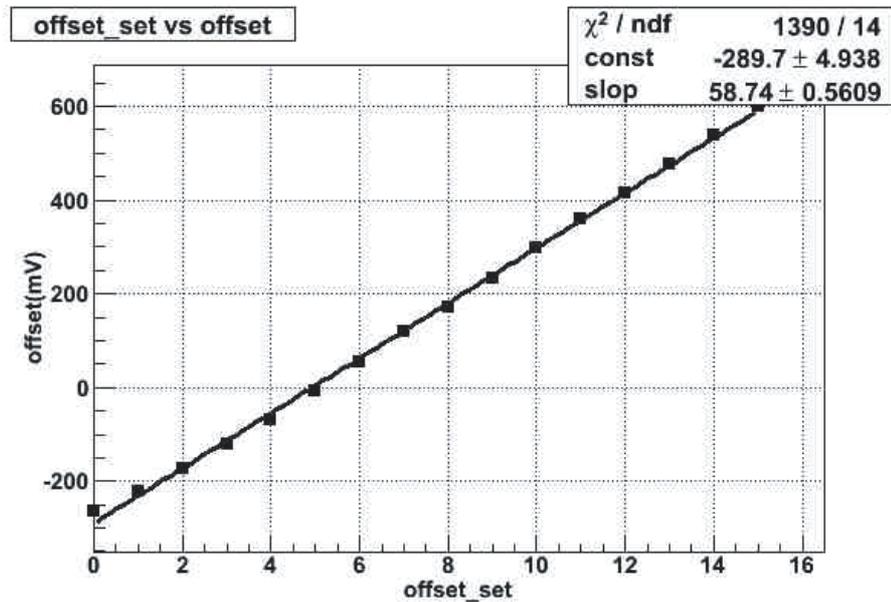


図 6.14 SA01:coarse offset 調節の線形性

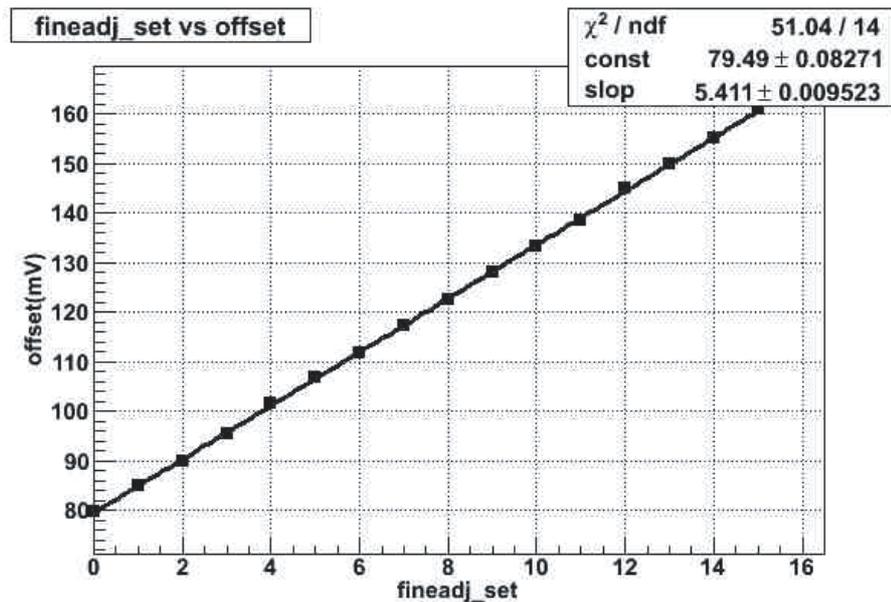


図 6.15 SA01:fine offset 調節の線形性

6.7 HAPD と接続した状態でのデータの読み出し

A-RICH 検出器において重要となってくるのは、HAPD での十分な光電子増幅と ASIC での良い S/N を保った状態でのアナログ処理である。これによって、光電子入射による信号とそうでない信号を threshold により効率よく分離し、目的とする光電子の正確な入

射位置情報を得ることができる。

ここまで HAPD と ASIC の性能評価を各々行ってきた。ここでは、HAPD と ASIC を接続し、HAPD 信号の ASIC による読み出しをすることにより、読み出し系全体としての動作試験および性能評価を行う。

6.7.1 Set-up

基本的なセットアップは各々の性能評価におけるセットアップを合わせたものである。(図 6.16) しかし、HAPD と ASIC Test board の各チャンネル入出力端子を接続する Mother board が存在する。Mother board は 1 つの HAPD につき 1 枚接続でき、ASIC が 1 チップ搭載された Test board が 4 枚接続できる。今回の測定では HAPD の 1 つの APD chip (36 チャンネル) を 1 つの ASIC (SA01 は全 12 チャンネル) により読み出すことで性能評価を行った。なお今回の動作試験では HAPD (SHP076) は高電圧 8 kV で APD の逆バイアス電圧 290V でゲインは約 32000 にて測定し、ASIC は SA01 の ch7 を主に使用している。

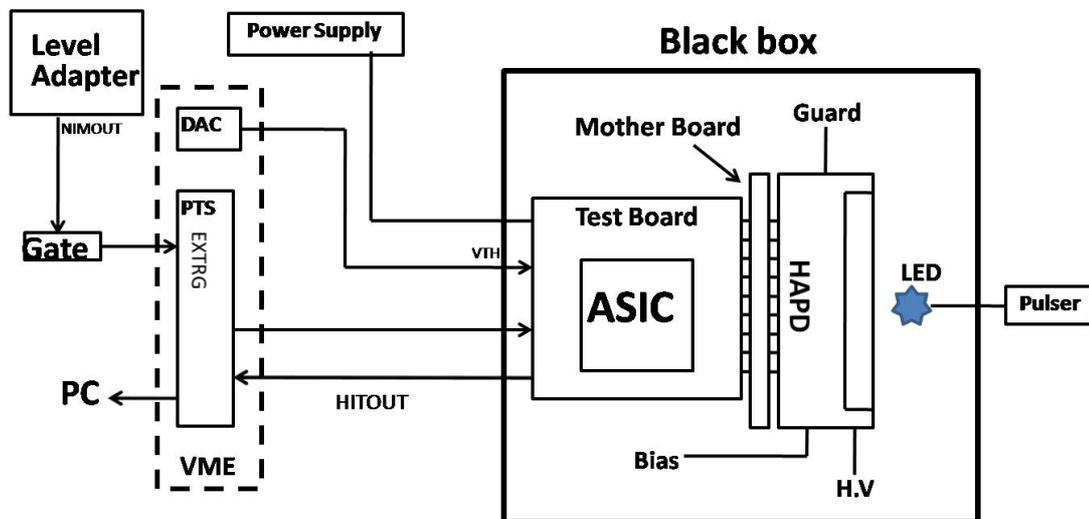


図 6.16 HAPD+ASIC 測定 Set-up

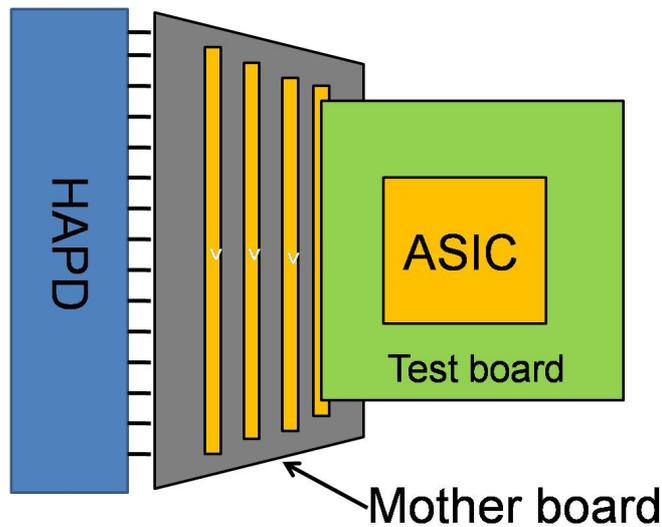


図 6.17 HAPD と ASIC との接続部

6.7.2 threshold scan による光電子測定

上記のようなセットアップにて LED の照射による光電子測定を行った。なお LED の光量は 1 パルスあたり平均 1~2 光子に相当し、そのアナログ出力のオシロスコープによる波形は図 6.18 となっている。

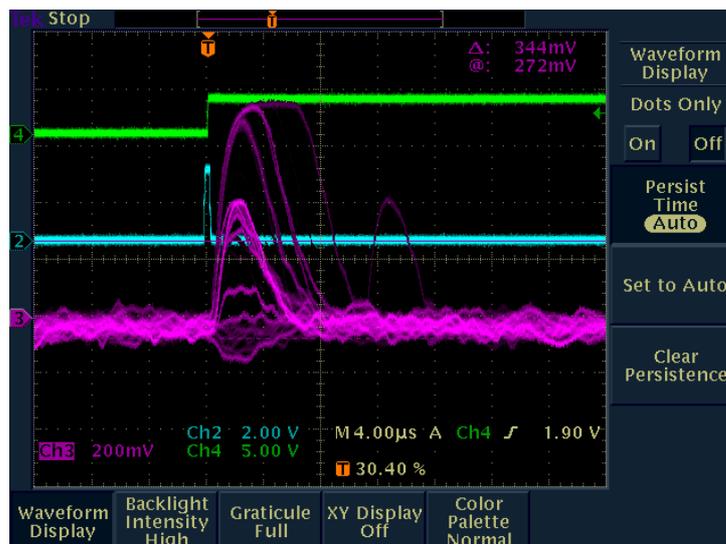


図 6.18 1~2 光電子のアナログ出力波形

図 6.19 は数光電子相当の光量を入れたときの 6.6.1 小節の方法で取られた threshold scan の結果である。横軸は threshold 電圧、縦軸はコンパレータでのヒット数である。

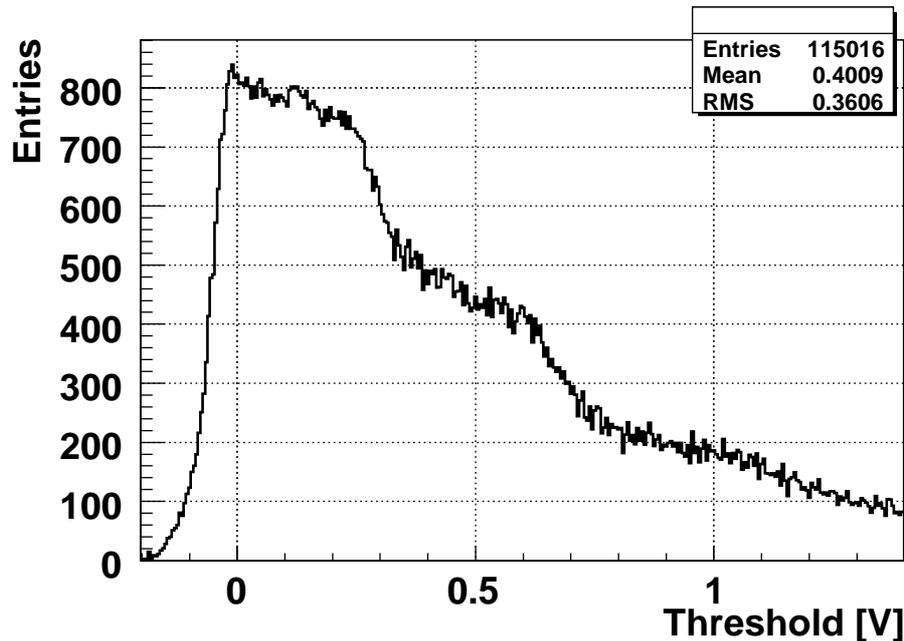


図 6.19 SA01:threshold scan による 1~2p.e 測定

この図において、比較的フラットな部分である threshold 電圧 0~250 mV 付近が 1 光電子相当で、350~650 mV 付近が 2 光電子相当であると考えられ、一応の 1、2 光電子の分離ができています。しかし、これは S04 の同じ測定するときよりも分離が不十分である。理想的には最初は 1 光電子と 2 光電子相当の領域で完全にフラットになり、その他ではほぼ垂直に小さくなるような、階段状になるはずである。実際は、ノイズが予想していたときよりも大きかったため、アナログ波形に揺らぎが生じて、threshold scan 分布は全体的になだらかな傾斜のついたものになってしまった。これは、6.6.3 小節で示したよう SA01 は S04 に比べ検出器容量にノイズが小さくなっているが、VME モジュールの接地などが適切にとれていなかったため、また予想以上に HAPD からの漏れ電流が大きかったことなどがこのノイズの原因と考えられる。よって 1、2 光電子の分離を良くするためには、そういったノイズのさらなる除去が必要である。

6.7.3 SA01 の性能評価のまとめと課題

アナログ出力の線形性について

HAPD の total gain が $10^4 \sim 10^5$ とすると、SA01 では前置増幅器の gain 設定を最小にしても、1 光子相当の信号がすでに saturate していた。A-RICH 検出器は 1 光子の観測ができればいいので、これで十分ではあるが、今後前置増幅器の gain を下げてダイナ

ミックレンジを拡張することも考えられる。

OFFSET 調節について

SA01 ではオフセット調節は coarse 4bit と fine 4bit の計 8bit で調節可能である。この測定ではオフセットを、coarse 設定で約 58.7mV、fine 設定で約 5.4mV で調節可能であることが確認できた。また、S04 で見られたオフセット調節におけるギャップも改善されている。

ノイズレベルと検出器容量依存性について

SA01 では、ノイズレベルが約 1175[e] (@80pF) 相当となり、S04 のノイズレベル約 1800[e] (80pF) 相当から大幅に減少していることが確認できた。

HAPD との接続における読み出しについて

光電子測定に関しては、1 光電子と 2 光電子相当の観測が確認できた。しかし HAPD との接続の際、Test board を Mother board に接続しただけで信号に大きなノイズがのってしまった。そのためにノイズの影響から 1 光電子と 2 光電子のきれいな判別までは至っていない。今後、さらなるノイズの低減が必要となっていく。

第 7 章

プロトタイプ A-RICH 検出器の Beam test による性能評価

これまで Belle 検出器のアップグレードにともなう A-RICH 検出器の説明、またその光検出器 HAPD、読み出しシステムである多チャンネル同時処理用 ASIC の原理と性能評価を述べてきた。そのテストとして 2008 年の 3 月と 6 月にプロトタイプ A-RICH 検出器を作り、これに対する KEK 内の Fuji test beamline の電子ビーム ($2.0\text{GeV}/c$) を用いたビーム照射試験を行った。この章ではそのビームテストの目的及びセットアップ、取得したデータの種類について述べる。

7.1 目的

プロトタイプ A-RICH 検出器に対して電子ビーム ($2.0\text{GeV}/c$) を照射し、エアロジェルから放射されるチェレンコフ光を HAPD と ASIC でリングイメージとして観測する。またエアロジェル、HAPD、ASIC の種類を代えて、観測されたチェレンコフ光の角度分解能、 N_{pe} などがどのように変化するかを見て、それら結果から現在のプロトタイプ A-RICH 検出器の問題点を将来の装置開発にフィードバックしていく。

7.2 Beam test Set up

この節では 2008 年 3 月、6 月に行われたプロトタイプ A-RICH 検出器へのビーム照射試験で用いた電子ビーム、プロトタイプ A-RICH 検出器のセットアップ、及びトリガーカウンター、ビーム tracking に使う MWPC 等について説明していく。

7.2.1 Fuji test beam line

今回のビームテストは KEKB 加速器内にある Fuji test beamline にて行われた。Fuji test beamline は、KEKB 加速器で周回している 8.0 GeV の電子が曲がる際の制動放射をターゲットにぶつけることにより、さらに 2.0 GeV の電子ビームを取り出している。トリガーレートは数 Hz 程度である。

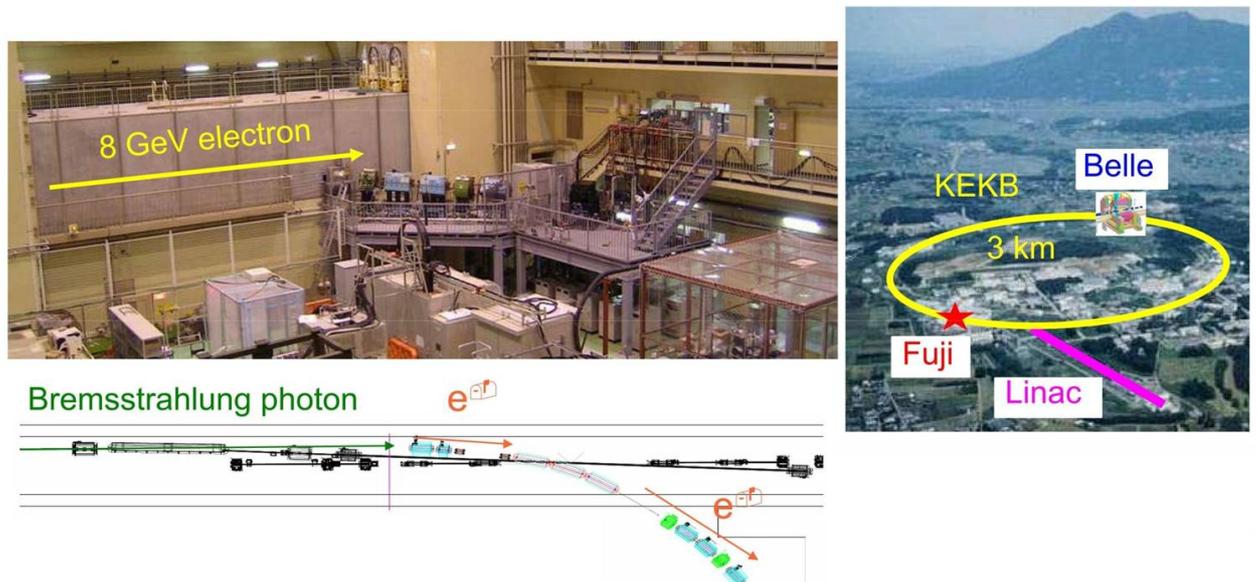


図 7.1 Fuji test beam line@KEK

7.2.2 プロトタイプ A-RICH 検出器

実際に Belle 検出器にインストールされるために、試験用であるプロトタイプ A-RICH 検出器を作り、これに電子ビームを照射することによってその性能を評価した。

プロトタイプ A-RICH 検出器のビームテストのセットアップは図 7.2 のように構成されている。プロトタイプ A-RICH 検出器は暗箱内に設置され、さらに暗箱の前にはトリガー信号用シンチレーション検出器 (SC) とビーム入射位置測定用の検出器 MWPC が各 1 基ずつ設置されている。各検出器については 7.2.5 にて説明する。

暗箱内のプロトタイプ A-RICH 検出器自体は、輻射体であるエアロジェル、HAPD が 6 台、さらに ASIC が HAPD1 台につき 8 枚の計 48 枚で構成されている。HAPD は写真 7.3 のように縦 2 台、横 3 台に並べられ各 HAPD 間の隙間は 13mm となっている。電子ビームがこの HAPD の 2×3 array のほぼ中心にくるようにプロトタイプ A-RICH 検

出器は配置されているが、HAPD 面での入射座標は MWPC により測定される。

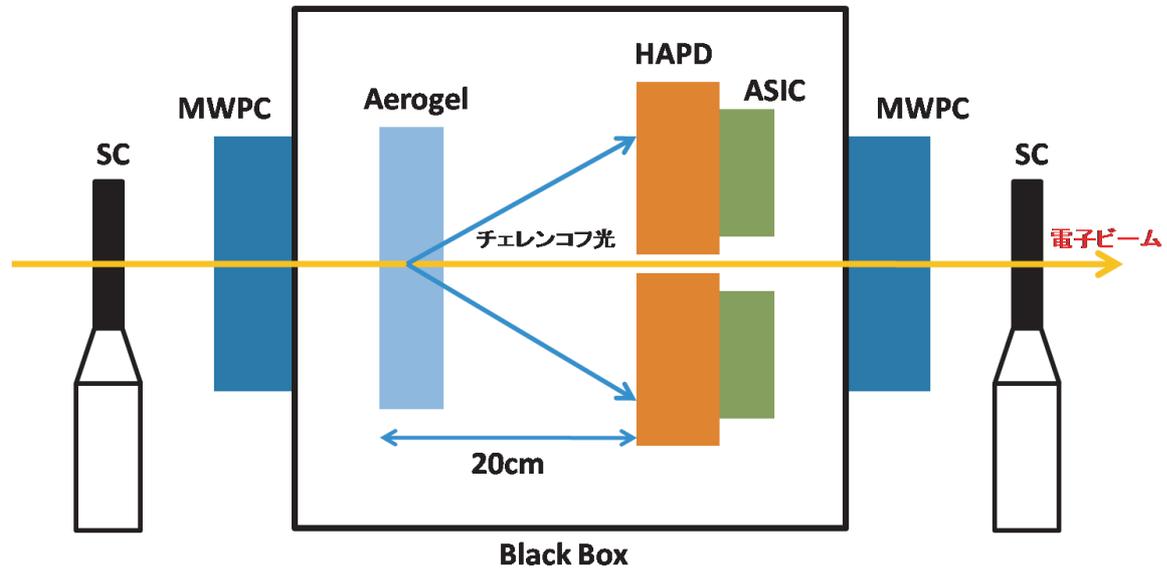


図 7.2 プロトタイプ A-RICH 検出器 Setup

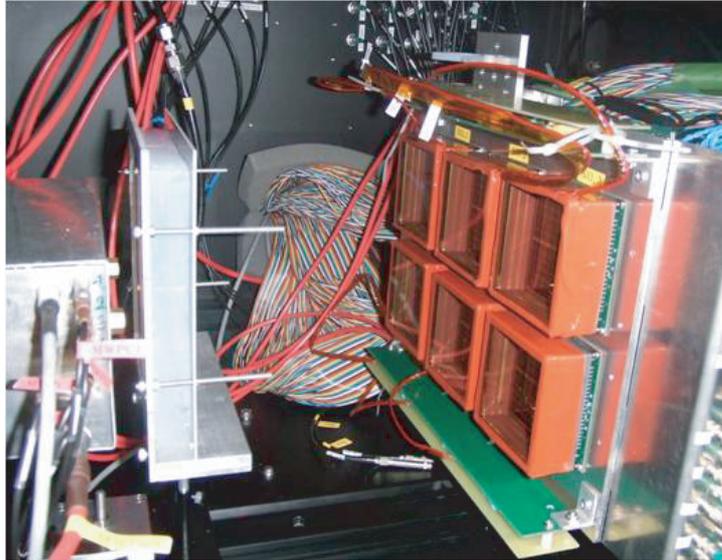


図 7.3 プロトタイプ A-RICH 検出器



図 7.4 HAPD1 台に対する ASIC の接続

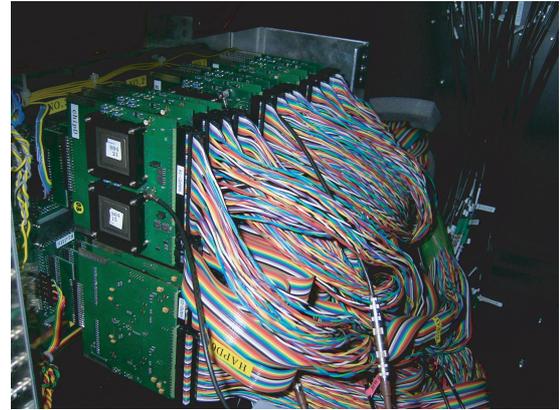


図 7.5 プロトタイプ A-RICH 検出器背面

7.2.3 データの読み出しシステム構成

プロトタイプ A-RICH 検出器により取得されたデジタルデータは次の図 7.6 のように読みだされる。まず、VME モジュールからは、データを読み出すためのクロック信号が各 ASIC に送られる（図中の黒矢印）。このクロック信号により各 ASIC 内のシフトレジスタに保持されていたデジタルデータが次々に押し出されてシリアルに読み出され、VME モジュールに送られていく（図中の赤矢印）。

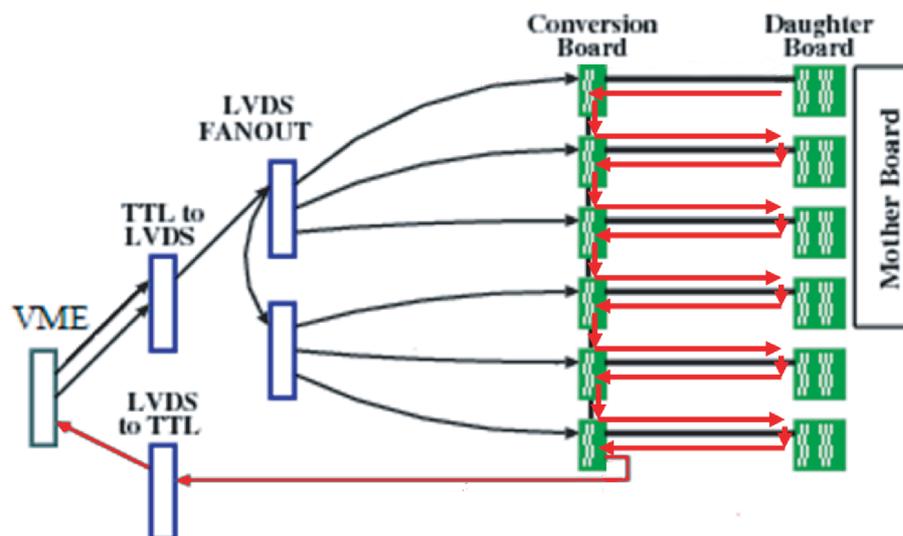


図 7.6 データの読み出しシステム構成の概念図

7.2.4 ビームテストで使用した HAPD 及び ASIC

図 7.7 にビームテストでのプロトタイプ A-RICH 検出器における 6 台の HAPD No.1 から No.6 までのビーム入射側から見た配置を示す。各 HAPD は図 7.7 の赤線で示すように 4 つの APD チップ A、B、C、D に分かれており、各 APD チップは 6×6 チャンネルを持つ。また、これまでに述べたように HAPD1 台につき 8 枚の ASIC (S シリーズ) が必要である。すなわち、HAPD の 1 チップにつき ASIC は 2 枚必要であるということである。今回のビームテストは、HAPD 用読み出しシステム ASIC を基本的に S04 を用いて測定された。しかし S04 は正常に動く ASIC の数が足りないため、数か所に S02、S03 を用いている。それらを使用した箇所を表 7.1 に示す。

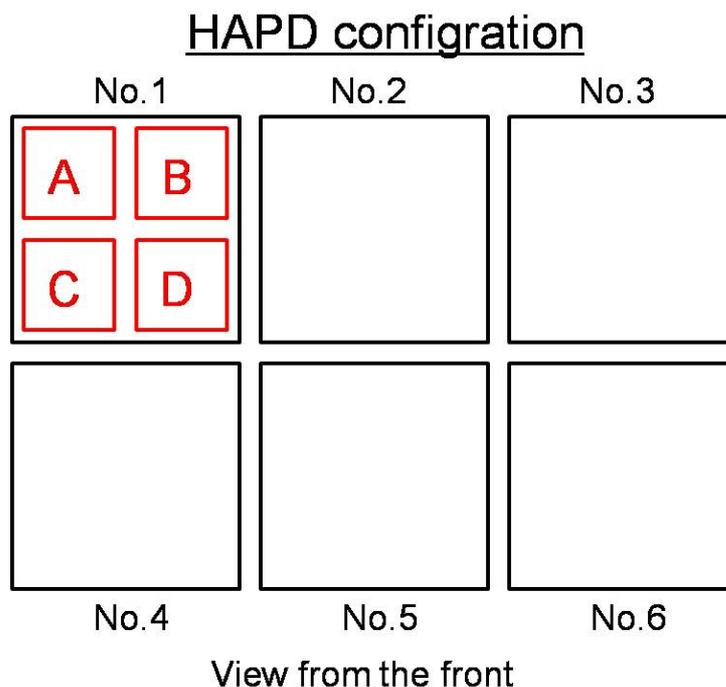


図 7.7 ビームテストにおける HAPD の配置

HAPD	HAPD chip	ASIC
1	B	S03 2 枚
	C	S02 2 枚
3	A	S02 2 枚
4	A	S02 2 枚
	D	S02 2 枚
6	C	S02 1 枚

表 7.1 使用された S02 及び S03 の配置

7.2.5 測定用カウンター

トリガーカウンター

ビーム通過に同期した信号を作り、プロトタイプ A-RICH 検出器にトリガー信号を提供する。トリガーカウンターは図 7.2 に示してあるように (SC)、検出器の配置されている暗箱の前後に 2 機設置されており、プラスチックシンチレーションカウンターを用いている。トリガー信号は前後のトリガーカウンターの coincidence を取ることにより生成されている。

MWPC(Multi Wire Proportional Chamber)

MWPC は、入射粒子の飛跡を測定するワイヤーチェンバーである。ワイヤーチェンバーの基本的な構造は陰極と陽極の電極間に高電圧が印加されており、その間にガスが封入されているものである。MWPC は互いに垂直に縦方向と横方向にワイヤーが張られ、2次元で飛跡を測定することができる。この MWPC も図 7.2 でわかるように暗箱の前後に 2 機設置されており、それぞれのカソード読み出しを行って入射粒子の位置情報を得る。こうして得られた位置情報は粒子の飛跡情報としてプロトタイプ A-RICH 検出器の解析に使用する。

7.3 測定項目

Beam test では、A-RICH 検出器が実際に Belle 検出器にインストールされる状況を考慮し、その際に問題となるであろういくつかの状況についてプロトタイプ A-RICH 検出

器の試験を行った。この節ではデータを取得した条件について説明する。

Noise level

まず、エレクトロニクスのノイズレベルを見るためにビームを照射せずにデータを取得した。このデータからプロトタイプ A-RICH 検出器の各チャンネルにおいてノイズの大きさを見積もり、適切な threshold 電圧を各 ASIC に設定する。また各チャンネル間の OFFSET 値もここで調整する。

Threshold run

これは前述の Noise level から各チャンネルの OFFSET 値を調整した後、各 ASIC のコンパレータに与える threshold の値を変え、そのときの Npe、BG がどのように変化するかをみていく。これにより HAPD からの信号を適切に ASIC 内部で増幅し、ノイズも少なく処理されているかを確認する。この結果より Npe が十分に多く、BG も小さい threshold の値を決定し、その後のデータテイクを行っていく。

Standard data

最も典型的な条件の下でのデータテイクである。その条件は、エアロジェルには屈折率 1.0455 である KMD4-1、入射角度 0° （後述する Angle study で説明）、整体配置（Realistic configuration で説明）、HAPD にガラスの板を付けない（Background study で説明）、というものである。

Aerogel study

チェレンコフ光の輻射体として用いられるエアロジェルについて、いろいろな屈折率や条件のもとで、Npe やチェレンコフ角度分解能がどのように変わるかを見る。表 7.2 に主に用いられたエアロジェルの種類と屈折率を示す。特に本論文では単一屈折率のエアロゲルを用いた場合（Same index type）と、違う屈折率を 4 層重ねた場合（Focusing type）についての比較を行っていく。

図 7.8 の左図のように単一の屈折率のエアロゲルを用いた場合、エアロゲルには厚さがあるためにチェレンコフ光が幅をもってしまい、角度分解能が悪くなってしまう。そのため今回は、図 7.8 の右図のように屈折率を徐々に小さくして HAPD 上で収束させるようにエアロジェルを重ね、角度分解能の向上を図った。

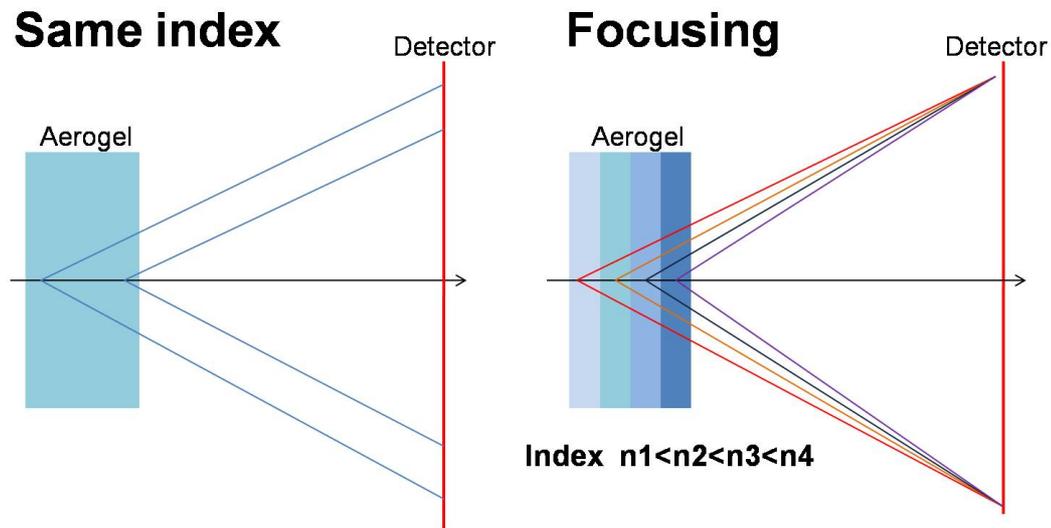


図 7.8 エアロジェル:Same index type と Focusing type

用途	Aerogel ID	屈折率	厚さ [mm]
Standard 1 層	KMD4-1	1.0455	40.8
Focusing 4 層	J07-A2	1.0462	10.0
	J07-B2	1.0501	10.0
	J07-C2	1.0560	10.0
	IS-12	1.0657	9.1
Gradient refraction index	DG1-1	1.0469 - 1.0556	42.8
	DG1-2	1.0479 - 1.0560	36.0
	DG1-4	1.0458 - 1.0470	44.5

表 7.2 使用したエアロジェル

Angle study

実際の Belle 検出器中では粒子は A-RICH 検出器に対して垂直に入射してくるものはほとんど無く、ある角度を持って入射してくる。この Angle study では図 7.9 のようにエアロジェルと HAPD を 15°、30° と傾けることにより上記の条件を再現し、そのときの性能評価を行う。エアロジェルは focusing 型 3 層 (J07-A2、J07-B2、J07-C2) を用いた。

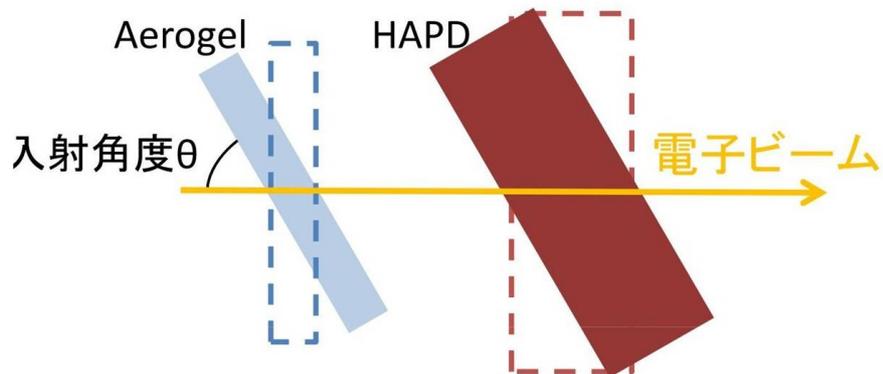


図 7.9 角度をつけてビームを入射

Realistic configuration

さらに実際の Belle 検出器 endcap 部における A-RICH 検出器の配置は図 7.10 の左図のように同心円状になるため、これを再現するために図 7.10 の右図のように HAPD を扇型に配置し実験を行う。

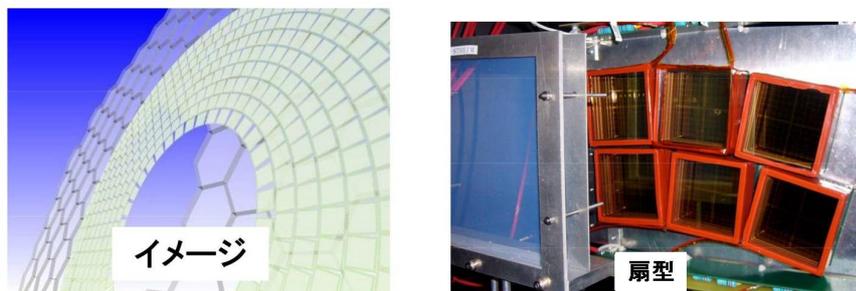


図 7.10 左図:Endcap 部のイメージ図 右図:扇型配置

Background study

チェレンコフ角度分布においてエアロジェルによるチェレンコフ光以外の構造の理解のために、HAPD のガラスの厚さを大きくするといったことを行う。これは後の Background study の小節にて詳細を説明する。

7.4 Beam test 解析

Beamtest で得られたチェレンコフ光のリングイメージを図 7.11 に示す。この結果からこの節では、入射する電子ビームに対する tracking の方法と、実験により得られたデータからのチェレンコフ光の角度分布、Npe、Background (以下 BG) の定義と導出法について説明していく。

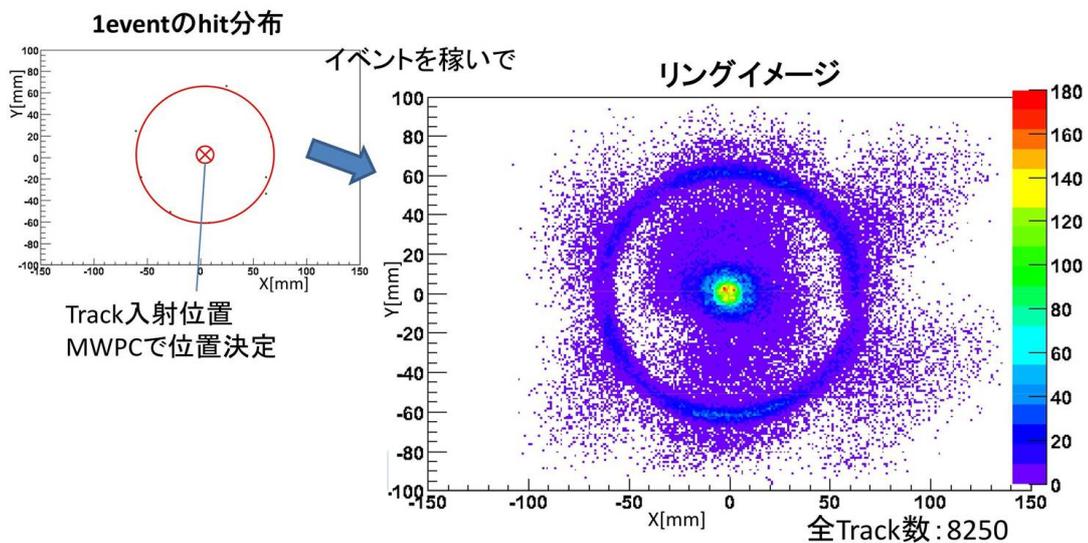


図 7.11 観測されたチェレンコフ光リングイメージ

7.4.1 入射 Beam tracking

入射してくるビームの tracking についての情報は MWPC にて測定されている。前方と後方の MWPC のそれぞれのビーム入射位置からプロトタイプ A-RICH 検出器 HAPD の表面でのビーム入射座標を評価し、その座標を座標 X、Y の原点とした。データの解析ではこの位置情報で様々なカットをいれ解析結果を出している。

7.4.2 検出光電子数、BG 数、角度分解能の導出

ここではプロトタイプ A-RICH 検出器により得られたデータからチェレンコフ光の角度分布を再構成し、さらにその角度分布よりエアロジェルからのチェレンコフ光の検出光電子数 (Npe)、Background 数、チェレンコフ光角度分解能を定義し、その導出法を説明する。

図 7.12 は図 7.11 で示された HAPD のヒット位置から再構成された合計イベントの典型的な角度分布である。横軸は検出された HAPD のチャンネルから再構成された角度で、縦軸はそのイベント数となっている。チェレンコフ角 θ_c は通過粒子の速度と、エアロジェルの屈折率、セットアップのジオメトリーから式 4.3 のように表わされ、今回のビームテストでは、セットアップのジオメトリーから約 0.3rad であると計算される。図 7.12 の角度分布では約 0.3rad 付近に立つピークが存在し、これがチェレンコフ光によるものであると考えられる。

このチェレンコフ各度分布から、エアロジェルから放出され HAPD に検出された光子数を見積もる。まず、このチェレンコフピークをガウス関数と一次関数を合わせたものでフィッティングする。一次関数を用いるのは、小角度 ($< 0.2\text{rad}$) のピークを除いた角度分布全体に広がる Background 成分は角度に比例して小さくなっていくと考えられるためである。Background の構造についての詳細は 7.6.1 で述べる。こうしてフィッティングより得られたチェレンコフピークの標準偏差 σ から、その $\pm 3\sigma$ の範囲でチェレンコフ光による光子数 (N_{pe}) 及び Background (BG) を積分することにより評価することができる。ここで求められた標準偏差 σ は、1 光電子当たりの角度分解能 σ_{photon} に相当する。ビーム 1track 当たりの角度分解能 σ_{track} は式 7.1

$$\sigma_{track} = \frac{\sigma_{photon}}{\sqrt{N_{pe}}} \quad (7.1)$$

で与えられる。

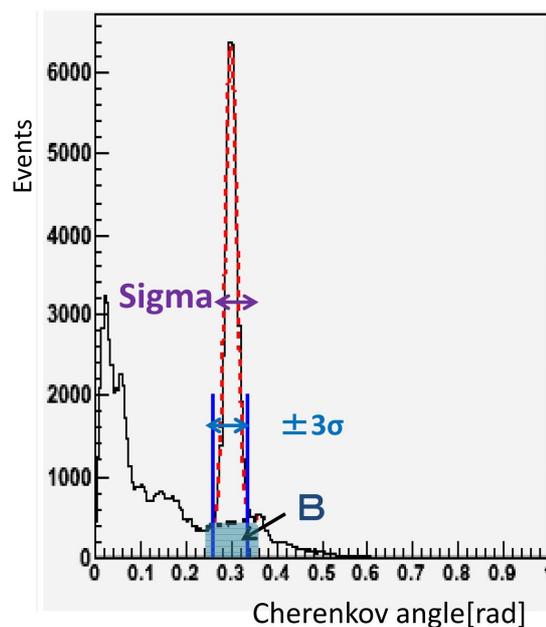


図 7.12 Cherenkov angle 分布からの N_{pe} 、角度分解能、BG の導出

7.5 Beam test 結果

この節では、前節での解析から様々な条件でのチェレンコフ角度分布や角度分解能、 N_{pe} 、BG の結果を示していく。ここで示していく Beam test の結果はつぎのようなものである。

- Noise level
- Threshold run
- Standard data
- Aerogel study
- Angle study
- Realistic configuration

7.5.1 Noise level

今回のビームテストに用いた各 ASIC に与える threshold 電圧は全 ASIC チップに対して共通の値である。しかし各チャンネルのベースラインのオフセット値は個別に設定可能であるため、実効的に各チャンネルの threshold 電圧を設定することができる。

そのためにまず、ビームを照射せずに、検出器に接続した各チャンネルのエレキノイズを hreshold scan により測定した。

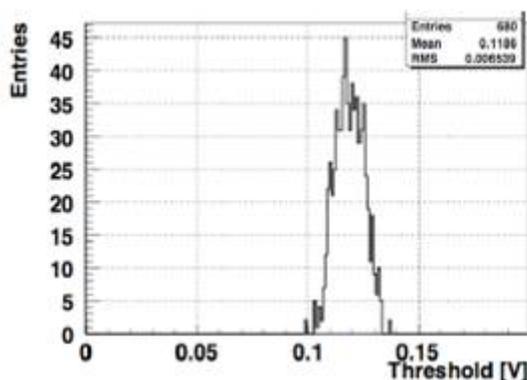


図 7.13 ある 1 チャンネルのノイズ分布

このノイズ分布を検出器の全チャンネルに対して、ノイズの大きい部分を赤く、小さい部分を青く表示したものが図 7.14 である。また各チャンネルのノイズのガウス分布の 4σ 分の位置に、threshold 電圧 200mV が相当するように OFFSET を調節したものが図 7.15 である。図 7.15 では、ほぼ全てのチャンネルのノイズの上限が 200mV に来よう

に調整されているのがわかる。しかし所々において、S02 や S03 のような古い ASIC を用いていたため適切にオフセットが調整できていないチャンネルや、noisy な daughter board を用いたためノイズが非常に大きくオフセット調節で対応できず帯状に観測されているチャンネルが存在する。

1 光電子相当の信号は各チャンネルにより違うが約 150mV であり、それに対してばらつきはあるが、各チャンネルのノイズレベルは 1 光電子に比べ十分に小さい。

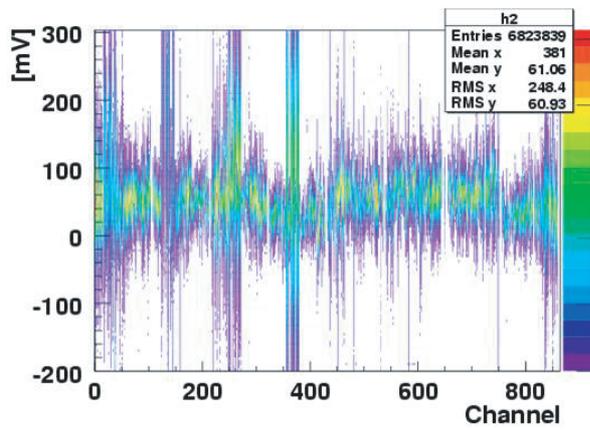


図 7.14 HAPD に光が入射されていない時の各チャンネルの信号レベルで、縦軸の幅はノイズレベルを表す

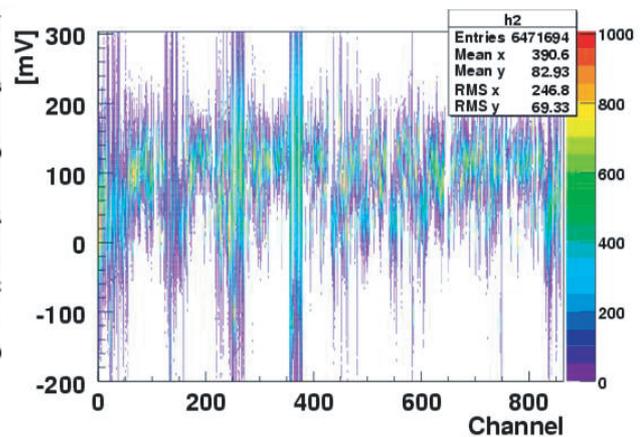


図 7.15 オフセット調整後、ノイズの 4σ が約 200mV になるように調整した

7.5.2 Threshold run

図 7.16 は前小節のノイズレベルにて、オフセット調節された各チャンネルに対して、threshold 電圧を変化させていったときの Npe と BG 数である。S02、S03、noisy な daughter board を使用したチャンネルがあるためか BG が大きく、Npe も理想的にフラットな値にならなかったが、threshold 電圧 200mV というのは観測していくに当たり、ほぼ適当であると言える。

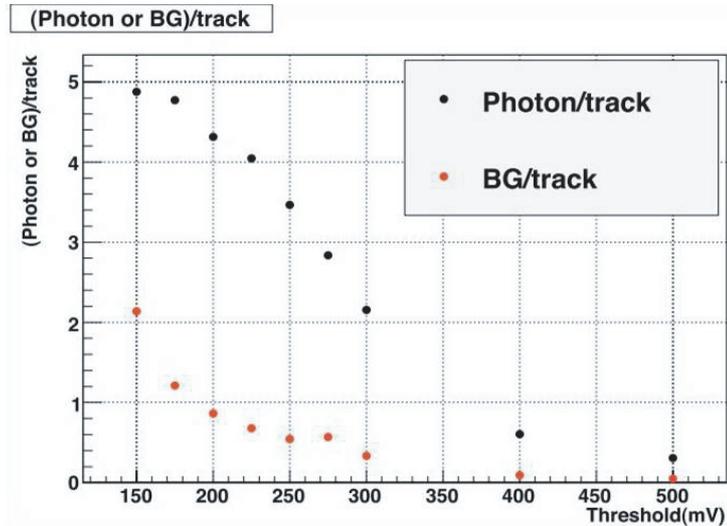


図 7.16 threshold 電圧を変えた時の Npe

7.5.3 Standard data

7.3 節の Standard data の所で説明した条件のもとで、観測されたチェレンコフ角度分布 (図 7.17) である。この結果から今回の Beam test の目的であるプロトタイプ A-RICH 検出器によってチェレンコフリングの角度が十分な S/N で測定できていることがわかる。

また、この結果から得られた Npe、BG 数、角度分解能、 K/π 識別を以下の表 7.3 に示す。このセットアップでの K/π 識別は 3.78 であり、目標である 4σ に近い値となった。

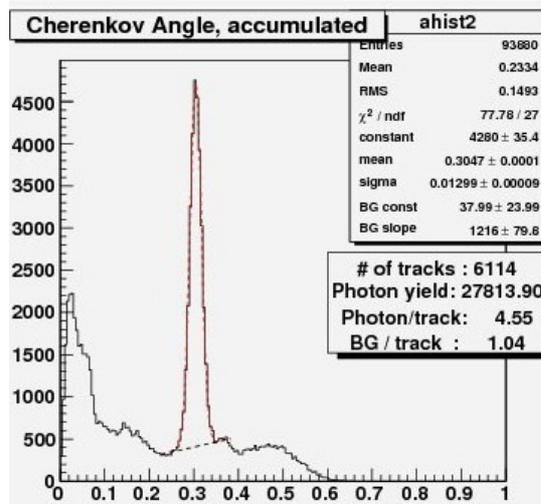


図 7.17 Standard data

Npe	4.55
BG/track	1.04
角度分解能/photon[mrad]	13.0
角度分解能/track[mrad]	6.09
K/ π 識別	3.78

表 7.3 Npe、BG 数、角度分解能

7.5.4 Aerogel study

単一の屈折率のエアロジェルを 1 層から 4 層まで重ねたものと、focusing 型の屈折率を持つエアロジェルとの Npe、角度分解能の比較をした。それぞれの角度分布図が図 7.18 と図 7.19 であり、Npe、角度分解能の比較の比較図を 7.20 に示す。

7.20 からわかるように Npe は両者ともエアロジェルの厚さにほぼ比例して増えている。1 光電子当たり、及び 1track 当たりの角度分解能は屈折率単一型 4 層ではやはりエアロジェルの厚さが大きくなるに従って大きくなっていくことがわかる。しかし focusing 型のもはエアロジェルの厚さが大きくなっても、1track 当たりの角度分解能は小さくなっており、3 層重ねたものが一番小さくなっているという結果を得ることができた。よって K/ π 識別も focusing 型エアロジェル 3 層のときに 4.09 となり、目標とする 4σ を達成できている。

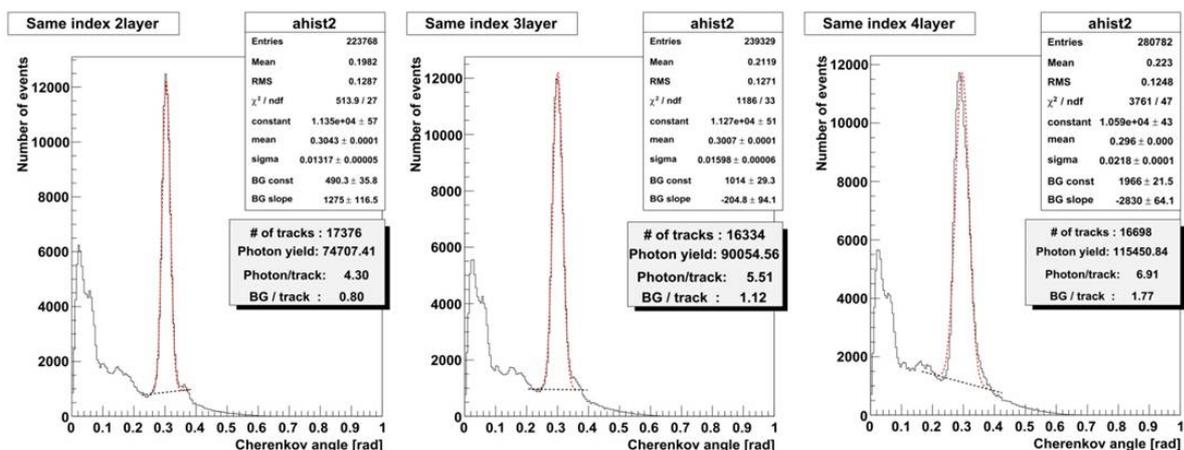


図 7.18 単一屈折率エアロジェルでの角度分布図 左から 2 層、3 層、4 層

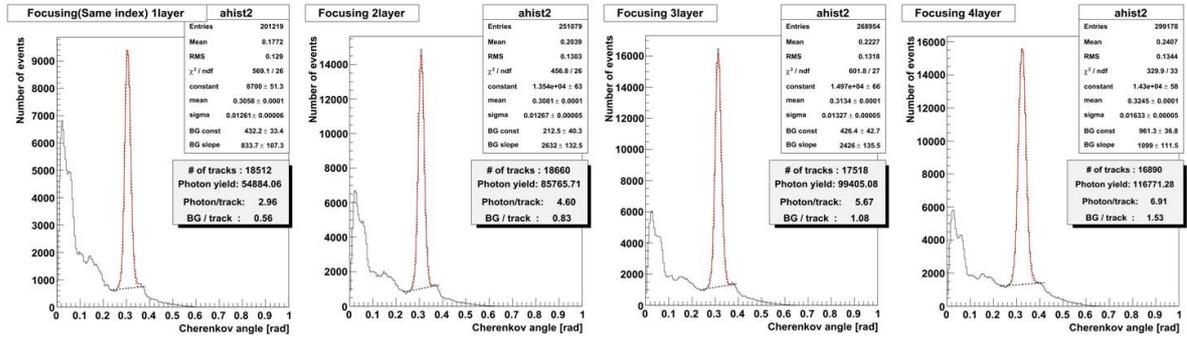


図 7.19 focusing 型エアロジェルでの角度分布図 左から (a) 1 層、(b) 2 層、(c) 3 層、(d) 4 層

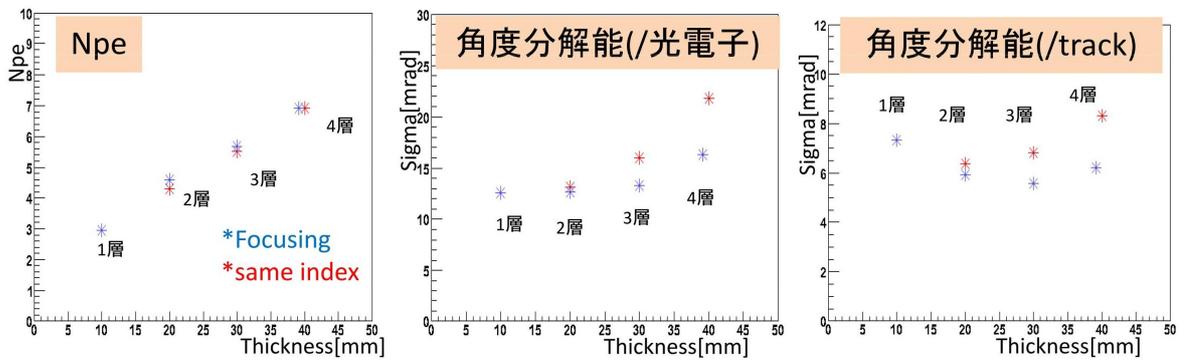


図 7.20 左図から (a) Npe、(b) 角度分解能/photon、(c) 角度分解能/track

	2 層	3 層	4 層
Npe	4.30	5.51	6.91
BG/track	0.80	1.12	1.77
角度分解能/photon[mrad]	13.17	15.98	21.80
角度分解能/track[mrad]	6.36	6.82	8.29
K/π 識別	3.61	3.37	2.77

表 7.4 単一屈折率エアロジェルでの Npe、BG 数、角度分解能、 K/π 識別

	1 層	2 層	3 層	4 層
Npe	2.96	4.60	5.67	6.91
BG/track	0.56	0.83	1.08	1.53
角度分解能/photon[mrad]	12.61	12.67	13.27	16.33
角度分解能/track[mrad]	7.33	5.92	5.63	6.20
K/π 識別	3.14	3.88	4.09	3.71

表 7.5 focusing 型エアロジェルでの Npe、BG 数、角度分解能、 K/π 識別

7.5.5 Angle study

Npe に関しては、エアロジェルを傾けるためにその厚さが実質大きくなるために放出される光子数も増える。実際に、図 7.22 の (a) から 15° 傾けたときの Npe は増えている。 30° において Npe が減少しているのは入射する角度が急になったために放出されたチェレンコフ光の一部が HAPD の検出領域外になってしまったためだと思われる。また 1track 当たりの角度分解能は 15° 傾けたときのものが最も小さい値になっており、よって K/π 識別も 4.44 となり 4σ を超えていることがわかった。

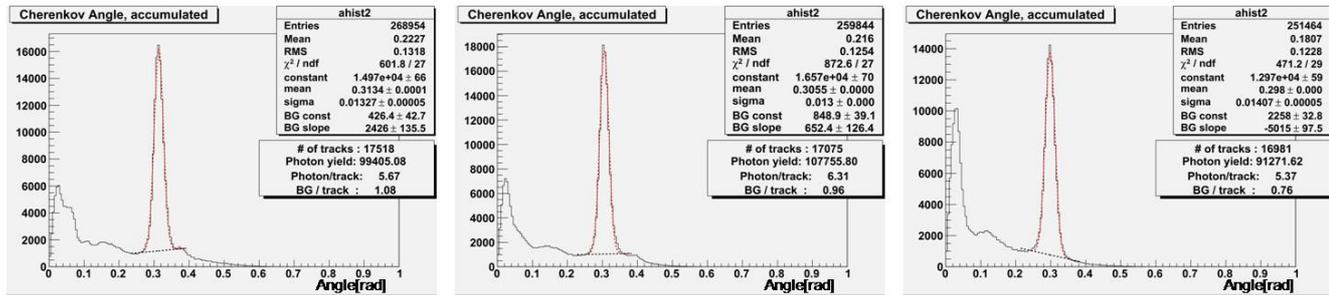


図 7.21 左図から検出器をビームに対して (a) 0°、(b) 15°、(c) 30° 傾けたときの角度分布図

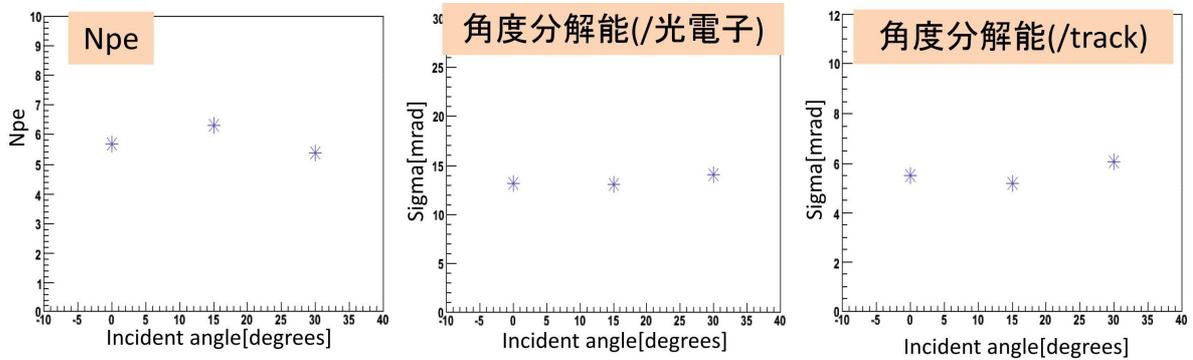


図 7.22 左図から (a) Npe、(b) 角度分解能/photon、(c) 角度分解能/track

	0°	15°	30°
Npe	5.67	6.31	5.37
BG/track	1.08	0.96	0.76
角度分解能/photon[mrad]	13.27	13.00	14.07
角度分解能/track[mrad]	5.59	5.18	6.07
K/π 識別	4.12	4.44	3.79

表 7.6 入射角度を付けたときの Npe、BG 数、角度分解能、K/π 識別

7.5.6 Realistic configuration

扇型に配置した場合には、HAPD 間のギャップが広がり検出領域が小さくなるために Npe は減少するはずであるが、表 7.7 に示すようにやや増えるという結果になった。この

原因についてはよくわかっていない。角度分解能、BG 数については、整体配置に比べ悪くなっている。

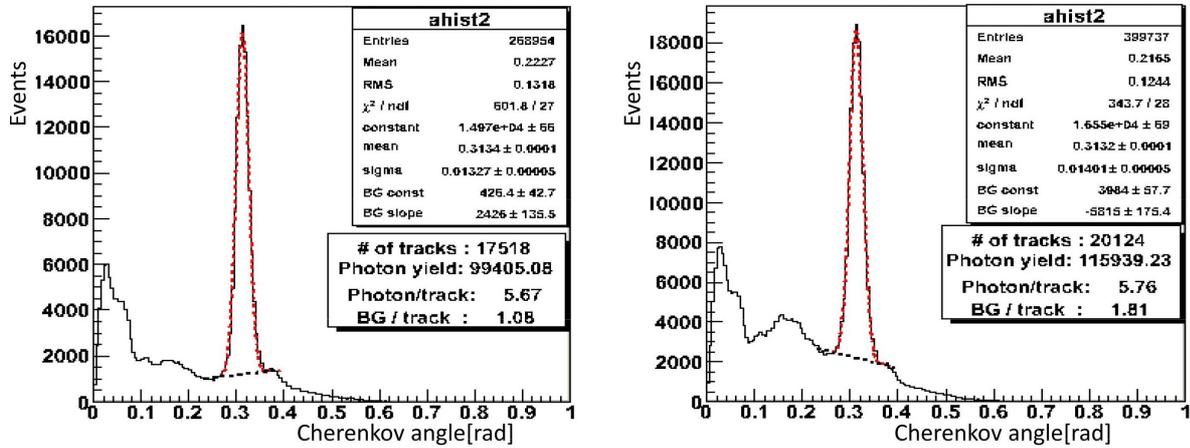


図 7.23 左図：整列配置の角度分布 右図：扇型配置の角度分布図

	整列配置	扇型配置
Npe	5.67	5.76
BG/track	1.08	1.81
角度分解能/photon[mrad]	13.27	14.01
角度分解能/track[mrad]	5.57	5.84
K/π 識別	4.13	3.94

表 7.7

7.6 Beam test の解析結果と評価

今回の Beam test では、これまで述べてきた解析手法により様々な条件の下でのプロトタイプ A-RICH 検出器のリングイメージ及びチェレンコフ角度分布等の結果を得ることができた。本節では、その結果からチェレンコフ角度以外の構造 (Background) について考察し、Beam test でのプロトタイプ A-RICH 検出器の性能評価を行い、それらから今後の開発・研究への課題を考察していく。

7.6.1 Background study

今回の Beam test では、エアロジェルからのチェレンコフピークの角度がスタンダードなもので約 0.3rad、1photon 当たりの角度分解能が約 13mrad という結果が得られた。しかしそれぞれのチェレンコフ角度分布を見ると、それら本来期待しているエアロジェルからのチェレンコフ光から期待される角度とは異なる角度にヒット (本節ではこれを新たに Background と定義する) が見られる (図 7.24)。これらは取られたデータの条件によらず、どの結果からもほぼ同じように観測されたものであり、それは今回用いたプロトタイプ A-RICH 検出器の本質的な問題であると考えられる。

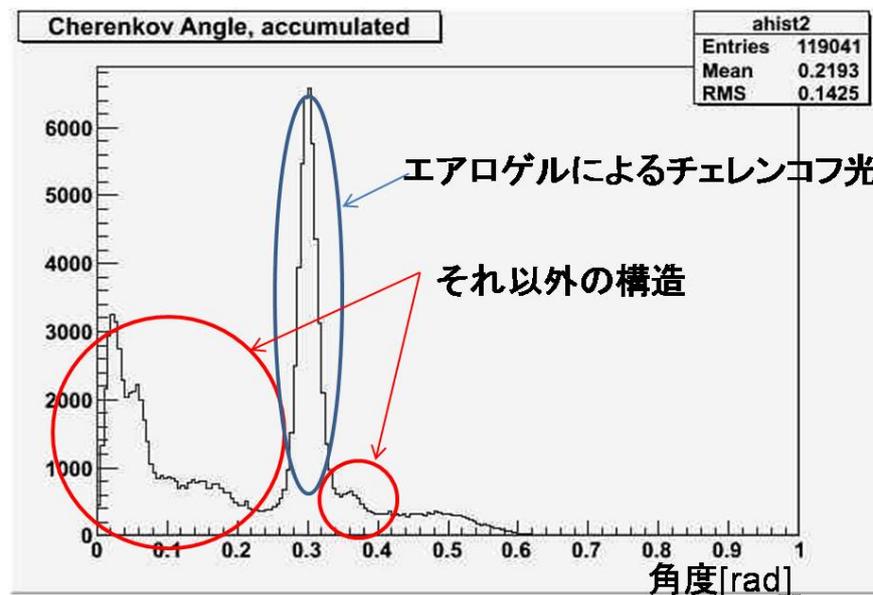


図 7.24 角度分布の Background

これら角度分布の Background の予想として次のようなものが挙げられる。

1. HAPD のガラスによるチェレンコフ光

2. エアロジェルのチェレンコフ光の APD 面での反射
3. 光電子の APD 面での後方散乱

まず 1 つ目の HAPD のガラスによるチェレンコフ光による効果について説明する。(図 7.25) チェレンコフ効果はほぼどんな物質に対しても起こりうる現象である。そのためエアロジェルを通過した電子ビームが HAPD のガラスに入射し、そこでチェレンコフ光を放射し光電面で光電子となり APD にて検出されるという効果が考えられる。また図 7.25 のように、HAPD ガラス内で放射された光子がガラスの境界面で複数回反射した後光電子となるものは、より角度が大きい位置に検出される。今回の Beam test では、この効果の検証のために HAPD のガラスに同じ屈折率のガラス板を装着することにより、ガラスの厚さを大きくして実験することにした。装着するガラスの厚さは HAPD のガラスと同じ厚さで 4mm であり、これを 1 枚、2 枚と付けて HAPD のガラスの厚さを 8mm、12mm として行っている。

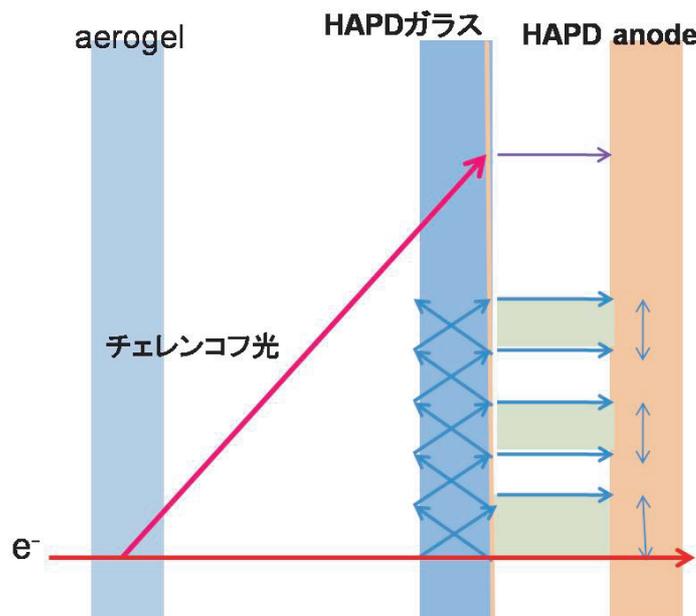


図 7.25 角度分布の Background

二つ目の BG は、エアロジェルによるチェレンコフ光が HAPD の光電面で光電効果を起こさずに通過し、APD 面に到達してそこで反射するというものである。(図 7.26) 反射した光子は再び光電面に達して光電効果を起こし、光電子となり電場加速され APD により観測される。このプロセスによる BG は、スタンダードな実験結果(図 7.17)において、約 0.3[rad] 付近にあるエアロジェルによるチェレンコフ角のピークのすぐ外側に見られる小さなピーク(約 0.36[rad])に相当すると考えられる。

三つ目の BG は、エアロジェルによるチェレンコフ光が光電面で光電子になり APD へ

入射される時、光電子が APD 面で図 7.27 のように散乱されるというものである。この効果による BG が実際にどの程度影響しているかは、現在 HAPD の磁場中での動作試験により検証中である。

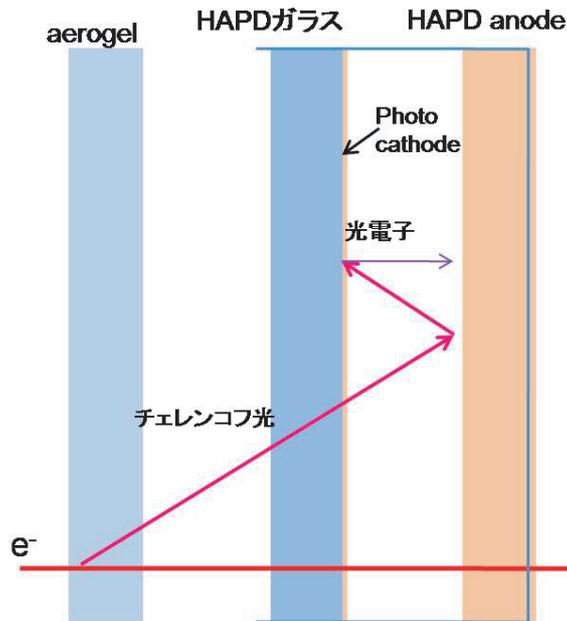


図 7.26 APD 面での光子の反射

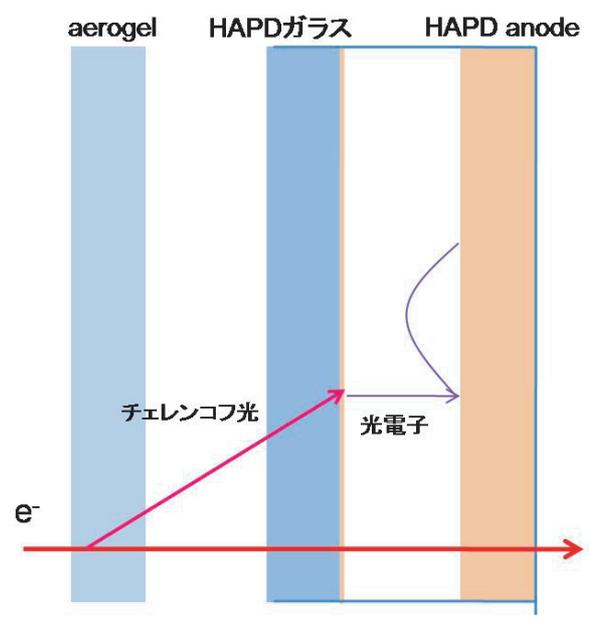


図 7.27 APD 面での光電子の散乱

7.6.2 HAPD のガラスでのチェレンコフ光

上記で説明した BG 予想の中で HAPD のガラスによるチェレンコフ光によるものを検証するため、HAPD のガラスの厚くして測定したときの角度分布を図 7.28 に示す。HAPD のガラスは 4mm 厚であるが、この外側に 1 枚 4mm のガラス板を、0 枚、1 枚、2 枚重ねた時のビーム入射位置からの距離によるヒット位置分布を全て重ねたもので、緑線がガラス板無し、赤線がガラス板 1 枚、黒線がガラス 2 枚の時である。この図から 60mm 付近のチェレンコフピークの位置はほぼ 3 つとも変わらず、それよりも小さい値の位置での分布の違いが見られる。この領域での分布の構造の予想として HAPD のガラスによるチェレンコフ光の影響を考察していく。

まず、図 7.28 において、距離 0~50mm における 3 つの分布図それぞれに共通する 2 つあるいは 3 つの BG ピークは、HAPD のガラスからのチェレンコフ光だと考えられる。そしてこの BG ピークを電子ビームが HAPD のガラスに入射し光子がガラス内で複数回反射したとして、モンテカルロシミュレーションによるものと比較した。その結果を図 7.29、図 7.30、図 7.31 に示す。

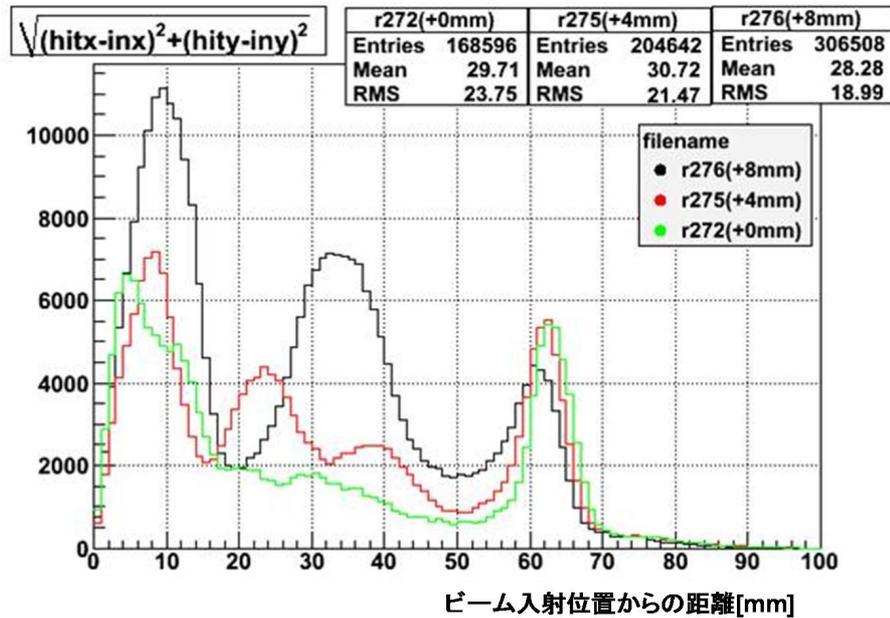


図 7.28 HAPD のガラスの厚さを変えたもの

以下の図中で赤矢印で表わされている範囲がシミュレーションにより計算された HAPD のガラスによるチェレンコフ光の範囲である。図中の ① で示されているのは、HAPD のガラスでのチェレンコフ光が光電面で反射せずにそのまま APD で観測される範囲であり、②、③ は同じく光電面で 1 回、2 回反射し APD で観測される範囲である。なおこのシミュレーションは MWPC の位置分解能やチェレンコフ光の光電面での透過率などは考慮に入れず、ただ HAPD によるチェレンコフ光の範囲の比較を行うものである。

この図を見ると、HAPD のガラスからのチェレンコフ光ピークの位置の範囲とそれぞれの幅がシミュレーションとほぼ一致していると考えられる。ガラス板を 2 枚付けたものに関しては の範囲はエアロジェルからのチェレンコフ光ピークと重なり埋もれてしまっている。

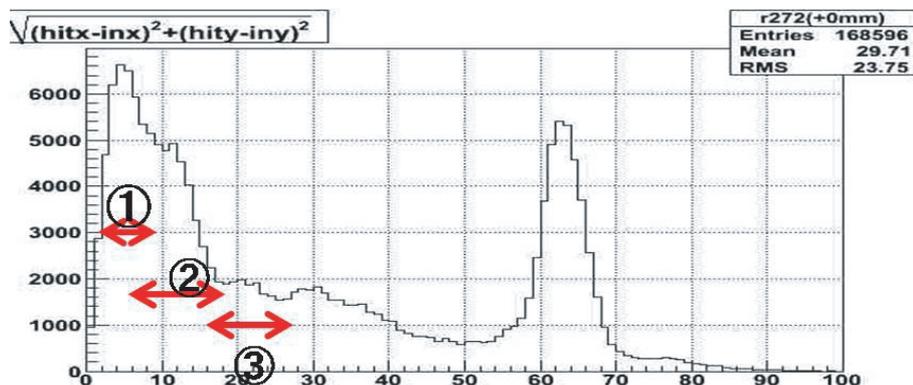


図 7.29 HAPD にガラス板を付けていない時のシミュレーションとの比較

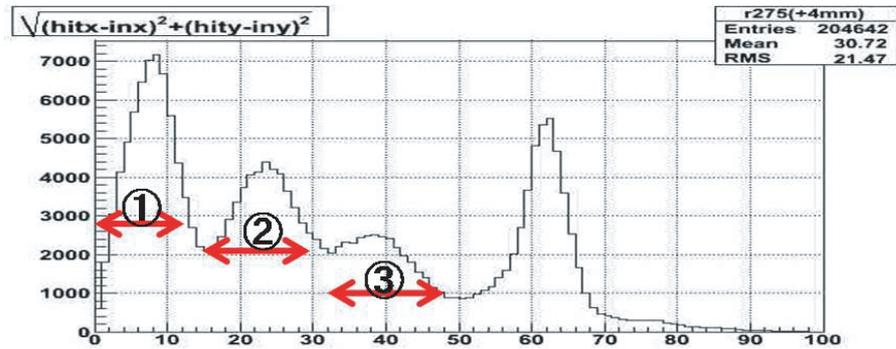


図 7.30 HAPD にガラス板を 1 枚つけた時のシミュレーションとの比較

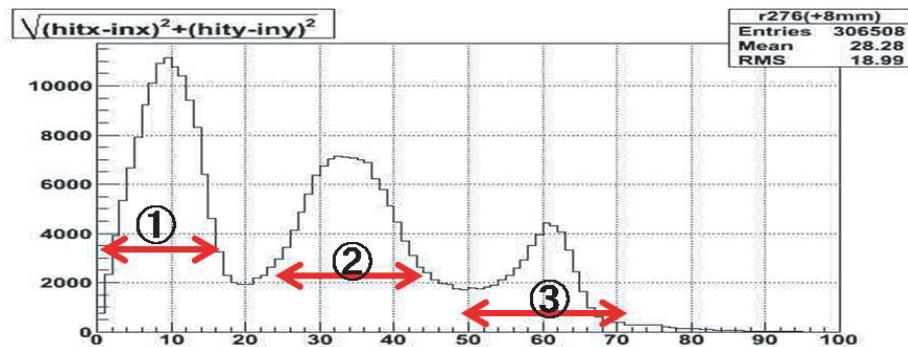


図 7.31 HAPD にガラス板を 2 枚つけた時のシミュレーションとの比較

7.6.3 HAPD の端チャンネルにおける動作

HAPD は 5 章において説明したようにその側壁は金属で覆われている。この側壁は光電面と同様に電場加速のための高電圧が印加されているため、高電圧を印加した場合にその側壁からの影響により、HAPD の端付近において本来光電面と APD 間の垂直な電場が HAPD の内側へ歪められてしまう。このとき HAPD の端付近のチャンネルに入射される光電子は歪められた電場によって、より内側のチャンネルに観測されてしまうことになる。現在、この効果による影響を検証するため HAPD の磁場中での動作試験を行っている。

第 8 章

まとめと今後

前章まで、Belle 検出器の endca 部の ACC のアップグレードとしての A-RICH 検出器に向けて、光検出器 HAPD 及びその読み出しシステム ASIC についての説明、またそれらから構成されたプロトタイプ A-RICH 検出器のビームテストによる性能評価を述べてきた。この章では、そのまとめと今後 A-RICH 検出器の導入に際し課題となってくる点について述べる。

8.1 新型 ASIC:SA01 について

本論文ではより実践にむけた ASIC である SA シリーズの 1st バージョン、SA01 についての性能評価を行った。基本的な信号処理については、設計仕様通りに動作していた。HAPD の信号を読み出し処理する際に重要となってくる雑音レベルは、前バージョンである S04 の約 1800[e] から、約 1170[e] となり大幅に減少された。

しかし、HAPD との接続での光電子観測では 1~2 光電子のセパレーションは一応できていたが、ノイズが予想よりも大きかったため、さらなるノイズ低減が必要である。

8.2 ASIC についての今後

現在 SA シリーズの 2nd version である SA02 を試作している。これは 1 チップ当たり 36 チャンネルを持ち、アナログ最終出力における線形性のダイナミックレンジを拡張するといった改良が成される予定である。

デジタル信号は現在、VME モジュールにて処理されているが、将来的にはより柔軟に対応するために FPGA(Field Programable Gate Arrey) にて処理される予定である。

8.3 プロトタイプ A-RICH 検出器のビームテストによる性能評価について

ビームテストでは ASIC はごく一部を除いてほぼ全てに S04 が用いられた。プロトタイプ A-RICH 検出器において S04 を用いたチャンネルでは、オフセットも適切に調節され、実効的に各チャンネルに threshold 電圧を与えての実験ができた。Npe も threshold 電圧を変えていくと、1 光子信号領域がフラットにこそならなかったが、BG 数に対して十分な値が得られた。

このプロトタイプ A-RICH 検出器のビームテストで得られた K/π 識別は standard なセットアップ下では 3.78σ となった。屈折率の異なるエアロジェルを 4 層重ねた focusing 型を用いての K/π 識別は 4.09σ と見積もられ、目標とする 4σ を達成することができた。

謝辞

本研究を進めるに当たり、多くの方からご協力、ご指導を承りました。この場を借りて深く感謝致します。特に、Belle 実験に参加する機会を与えてくださった、私の指導教官である首都大学東京の住吉孝行教授、回路の作成、評価にあたり数多くの助言を頂いた、宇宙航空研究開発機構の池田博一教授には心より感謝しております。また、Belle 実験グループの共同研究者である高エネルギー加速器研究機構の足立一郎准教授、西田昌平助教、海野祐土研究員には、多くの助言、示唆を頂き深く感謝しております。特に西田昌平助教には多くのご指導を頂きありがとうございました。

同じ実験グループに所属し苦楽を共にした、東邦大学の澤藤奈津子氏、千葉大学の石井良和氏にも感謝しております。

研究生を送る上では、首都大学東京 高エネルギー実験研究室の汲田哲郎助教、千葉雅美助教に支えてもらい、心から感謝しております。最後に私を修士課程に進学させて下さり、生活を支えて下さった私の家族と友人達に感謝の念を申し上げ、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] A.D.Sakharov, "Quark-Muonic Currents and Violation of CP Invariance", JETP Lett. 5, pp.27-30(1967)
- [2] J.H.Christenson, J.W.Cronin, V.L.Fitch and R.Turlay, "Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson", Phys. Rev. Lett.27, pp.138-140(1964)
- [3] M.Kobayashi and T.Maskawa, "CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction" , Prog. Theor. Phys. 49, pp.552-657(1973)
- [4] KEK B-factory, "Design Report", KEK Report 95-7 Aug. 1995 A (1995)
- [5] A.Abashian, "The Belle detector", KEK Report 2002-4
- [6] Y.Ushiroda, "The BELLE silicon vertex detector" , Nucl. Instrum. Meth. A511:6-10, September 2003
- [7] S.Uno, "The BELLE central drift chamber" , Nucl. Instrum. Meth. A379:421-423, September 1996
- [8] T.Iijima et al., "Aerogel Cherenkov counter for the BELLE detector " , Nucl. Instrum. Meth. A453:321-325, October 2000
- [9] H.Kichimi et al., "The BELLE TOF system", Nucl. Instrum. Meth. A453:315-320, October 2000
- [10] H.Sagawa, "The Belle CsI calorimeter" , Nucl. Instr. Meth. A453:259 October 2000
- [11] A.Abashian et al., "Muon Identification in the Belle Experiment at KEKB" , Nucl. Instrum. Meth. A491: 69-82, September 2002
- [12] H.Ikeda, "Electronics for Particle Measurement", KEK Report 2002-8
- [13] 関貴之 首都大学東京 修士論文 (2004)
- [14] 小酒井良延 名古屋大学 修士論文 (2005)
- [15] 中川尊 首都大学東京 修士論文 (2006)
- [16] 西澤勲 首都大学東京 修士論文 (2008)
- [17] 宮沢優一 東京理科大学 修士論文 (2008)