

Belle 実験における PID 検出器のアップグレードの為の
エアロゲル RICH に用いる 2 層一体型エアロゲル輻射体
の研究開発

東邦大学大学院 理学研究科
物理学専攻
大竹 晋造

平成 17 年 3 月 11 日

目次

第 1 章 Belle 実験	3
1.1 CP 対称性の破れの理論	3
1.2 KEKB	5
1.3 Belle 検出器	6
1.4 Belle 検出器における粒子識別	9
第 2 章 シリカエアロゲルチェレンコフカウンター	12
2.1 チェレンコフ輻射	12
2.2 チェレンコフカウンター	13
2.2.1 チェレンコフカウンターの種類	13
2.3 Belle 実験における現行の ACC と RICH 検出器の概要	14
2.3.1 Belle 実験における現行の ACC	14
2.3.2 RICH 検出器	15
2.3.3 検出器の原理性能確認テスト	17
2.3.4 デュアル・ラディエーター (及びマルチ・ラディエーター)	19
第 3 章 シリカエアロゲル	21
3.1 シリカエアロゲル	21
3.1.1 シリカエアロゲルとは	21
3.1.2 シリカエアロゲルの変遷	22
3.1.3 シリカエアロゲルの特徴	22
3.2 エアロゲル製作	24
3.2.1 シリカエアロゲルの製作	24
3.2.2 2 層一体型エアロゲルの製作	28
第 4 章 2 層一体型エアロゲル輻射体の性能評価	35
4.1 光学的特性からの性能評価	35

4.2	製作した2層一体型エアロゲル	38
4.2.1	製作したエアロゲルの屈折率の比較	40
4.2.2	製作したエアロゲルの透過長の比較	56
4.3	ビームテストによる2層一体型エアロゲルの性能評価	59
4.3.1	目的	59
4.3.2	セットアップ	59
4.3.3	解析方法	60
4.3.4	ビームテストにおけるこれまでの成果	61
4.3.5	実験結果	61
4.4	表面(境界面)散乱からみる2層一体型エアロゲルの性能評価	68
第5章 結論		73

目次

1.1	unitarity triangle	4
1.2	KEKB	6
1.3	Belle 検出器の断面図	7
2.1	チェレンコフ輻射	12
2.2	acc module	15
2.3	EACC 断面図	16
2.4	Barrel ACC	16
2.5	Barrel ACC	16
2.6	RICH のイメージ図	17
2.7	運動量 $4\text{GeV}/c$ の粒子の屈折率とチェレンコフ角の関係	18
2.8	RICH setup in Belle detector	18
2.9	デュアル・ラディエーターの種類 (左: focusing タイプ、右: defocusing タイプ)	20
2.10	マルチ・ラディエーターの種類 ((a)focusing タイプ、(b)focusing タイプ)、 (c)focusing&defocusing タイプ	20
3.1	シリカエアロゲルの構造	21
3.2	ヘキサメチルジシラザンによるシリカ表面の疎水化反応	25
3.3	疎水化処理されたエアロゲルに水を垂らした様子	26
3.4	メスニカスによる応力	26
3.5	物質の状態図	28
3.6	2層一体型エアロゲルの製作	29
3.7	2層一体型エアロゲルのイメージ図	30
3.8	エアロゲルの調合	31
3.9	アルコゲル内に出来た気泡	32
3.10	疲弊したエアロゲルのケース	32

3.11 アルコゲルに出来た溝	32
3.12 2層一体型エアロゲル	33
4.1 分光光度計	35
4.2 透過率測定の設定アップ図	36
4.3 実際に測定した2層一体型エアロゲルの透過率	36
4.4 フラウンホーファー法による屈折率の計測	38
4.5 分離しかけている2層一体型エアロゲル	40
4.6 分離してしまった2層一体型エアロゲル	40
4.7 vol.1で製作した単層のエアロゲルでの屈折率 (target index $n=1.030$)	41
4.8 vol.1で製作した2層一体型エアロゲルでの target index $n=1.030$ の屈折率	42
4.9 vol.1で製作した単層のエアロゲルでの屈折率 (target index $n=1.050$)	42
4.10 vol.1で製作した2層一体型エアロゲルでの target index $n=1.050$ の屈折率	43
4.11 vol.1で製作した単層のエアロゲルでの屈折率 (target index $n=1.055$)	43
4.12 vol.1で製作した2層一体型エアロゲルでの target index $n=1.055$ の屈折率	44
4.13 vol.1で製作した単層のエアロゲルでの屈折率 (target index $n=1.060$)	44
4.14 vol.1で製作した2層一体型エアロゲルでの target index $n=1.060$ の屈折率	45
4.15 vol.2で製作した単層のエアロゲル	46
4.16 vol.2で製作した2層一体型エアロゲルの各層での屈折率	47
4.17 vol.3で製作した単層のエアロゲル	48
4.18 vol.3で製作した2層一体型エアロゲルの各層での屈折率	49
4.19 single layer と2層一体型の up(bottom) layer のイメージ図	50
4.20 vol.1の single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較	51
4.21 vol.2の single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較	52
4.22 vol.3の single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較	53
4.23 vol.3の single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較	54
4.24 1.0cmで製作したエアロゲルと2層一体型エアロゲルの為に製作したエアロゲルの屈折率の比較 ($n=1.050$ について)	55
4.25 ゲル化時間の透過長への寄与	56
4.26 2層一体型エアロゲルを目的に製作したエアロゲルの透過長の比較 ($n=1.050$ について)	57
4.27 2層一体型エアロゲル (target index= $1.050&1.055$) を目的に製作したエアロゲル透過長の比較	58

4.28 エアロゲルとフラットパネル PMT のセットアップ図	59
4.29 ビームテストのセットアップ	60
4.30 2層一体型エアロゲル	62
4.31 1層×2枚を用いたエアロゲル	63
4.32 2層一体型エアロゲル	64
4.33 1層×2枚を用いたエアロゲル	65
4.34 表面散乱の測定のセットアップ図	68
4.35 表面 (境界面) の散乱を測定したときのエアロゲル稼動可能なエアロゲル 設置台	68
4.36 表面散乱の測定のイメージ図	69
4.37 エアロゲルを設置しないで見たレーザー光の強度分布 (1点のみ)	70
4.38 2層一体型エアロゲルを透過したレーザー光の強度分布	70
4.39 2枚×1層のエアロゲルを透過したレーザー光の強度分布	71
4.40 2層一体型エアロゲルの表面散乱 (一体型という意味で 1layer と表記した)	71
4.41 1層×2枚のエアロゲルの表面散乱	72

表 目 次

1.1	粒子識別に必要な崩壊モードと運動量領域	10
2.1	各カウンターモジュールごとのエアロゲルの屈折率と使用 PMT	17
2.2	12 × 12 HPD 目標仕様	19
3.1	シリカエアロゲルの特性	23
3.2	物質の臨界点データ	28
3.3	製作した 2 層一体型の (target index) 想定屈折率	34
4.1	2004 年 6 月 (vol.1) に製作したエアロゲルの詳細	39
4.2	2004 年 9 月 (vol.2) に製作したエアロゲルの詳細	39
4.3	2004 年 11 月 (vol.3) に製作したエアロゲルの詳細	40
4.4	それぞれの検出器の役割	60
4.5	ビームテストに用いた 2 層一体型エアロゲル及び 1 層 × 2 枚のエアロゲル のデータ (focusing タイプ)	66
4.6	focusing タイプの結果	66
4.7	ビームテストに用いた 2 層一体型エアロゲル及び 1 層 × 2 枚のエアロゲル のデータ (defocusing タイプ)	66
4.8	defocusing タイプの結果	67
4.9	境界面の測定に用いた 2 層一体型エアロゲル及び 1 層 × 2 枚のエアロゲル のデータ	69

序論

2001年7月に Belle 実験の大きな目的の一つであった。B 中間子の $B_0 \rightarrow J/\psi K_S, \bar{B}_0 \rightarrow J/\psi K_S$ の崩壊において、間接的ではあるが CP 対称性の破れがあることがわかったことがローマで開催された高エネルギー学の国際会議で報告された。また、2004年1月には $B_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 、 $\bar{B}_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ の崩壊において直接的な CP 対称性の破れがある事がわかった。

これらから、標準理論の中での CP 対称性の破れを予言している小林-益川理論のたまた、より詳細な小林-益川理論を確立するだけでなく、新しい物理を見つける為にもより高いルミノシティーを獲得し、またそれを検出できるだけの性能を持つ検出器が要求されてくる。

Belle 実験ではより高いルミノシティーを目指し KEKB 加速器をアップグレードが計画されており、それと同じく Belle デテクターもアップグレード計画がある。そのサブデテクターグループである ACC では現行の閾値型のアロゲルチェレンコフカウンターから一部分を proximity focusing リングイメージ型チェレンコフカウンターに変更し、より広い運動量領域での粒子の識別を可能にする予定である。また、その際、輻射体であるシリカアロゲルを屈折率の違う2枚(デュアル・ラディエーター)若しくはそれ以上の枚数のシリカアロゲル(マルチ・ラディエーター)を用いることでリングイメージを focus、defocus する事で検出光子数を落とさずに角度分解能を上げられる事が、今まで行われてきたビームテストで確認された。更に、そのデュアル・ラディエーターやマルチ・ラディエーターをシリカアロゲルの製作の段階で一体化させてしまう事で表面の数の減少から表面散乱の軽減が期待できる。本論文では、その proximity focusing リングイメージ型チェレンコフカウンターの輻射体であるシリカアロゲルを違う屈折率を持つアロゲルをその製作の段階で一体化させてしまうことで輻射体としての性能の変化をみてみたので、その結果について報告する。

第1章では、Belle 実験について、CP 対称性の破れと B ファクトリー、Belle 検出器について、最近の結果を踏まえて述べる。

第2章では、第1章で説明した Belle 検出器の1つであるシリカアロゲルチェレン

コフカウンター (ACC) について述べる。また、現在の Belle 検出器の閾値型シリカエアロゲルと 2006 年の Belle 検出器をアップグレードする時に採用を予定しているリングイメージ型チェレンコフカウンター (RICH) について。

第 3 章では、チェレンコフカウンターの輻射体として用いられているシリカエアロゲルについて述べる。この章では本論文で、研究した 2 層一体型エアロゲル

第 4 章では、製作した 2 層一体型エアロゲルの性能を透過長、屈折率を

第 5 章では、結論を述べる。

第1章 Belle実験

1.1 CP対称性の破れの理論

Bファクトリー実験はK中間子以外の系でCP対称性の破れを観測して、しかもそれを精密に測定する事でK-M理論の詳細なチェックを行う事を目的としている。最近では、だけでなく $B \Rightarrow$ といったペンギン崩壊と呼ばれる崩壊モードでもCP対称性の破れは観測されている。CP対称性の破れとは、粒子・反粒子のChargeとParityを合わせた反転（電荷と空間の同時反転）に対する対称性（CP対称性）が破れていることである。現在の宇宙が物質のみで形成されているのは宇宙の初期段階で共存していた粒子・反粒子がある理論にのっとなって対消滅していった結果であると考えられている。標準理論においてCP対称性の破れはK-M行列に複素位相成分が入り込む事によって生じる。小林-益川行列（K-M行列）は、

$$V_{KM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Wolfensteinの方法で表示すると

$$V_{KM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & \lambda^3 A(-i) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda^2 A \\ \lambda^3 A(1 - i) & -\lambda^2 A & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

これは $\lambda = |V_{us}|$ の3次までの展開となっており、 λ は本質的にカビボ角である。この行列において対角要素から最も遠い要素に現れるパラメータ $\lambda^3 A$ がCPを破る複素位相を作り出すのである。K-M行列のユニタリー性から以下のような関係を得ることが出来る。

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \quad (1.3)$$

このユニタリー性から複素平面上に unitarity triangle と呼ばれる三角形、図?? を形成出来る。式 (1.3) が正しい、すなわちこの三角形が閉じた物である事を示す事が出来ればこの理論の正しさを実証できる。標準理論 (K-M 理論) によれば、 $t=0$ に純粋に $B^0 \cdot \bar{B}^0$ であった物がそれぞれ $t=t$ に同じ固有状態 f_{CP} に崩壊する頻度 $\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP})$ の間に CP の破れの為に違いが生じる事が予想される。ここで t は固有時間を示している。 $f_{CP} = (c\bar{c})K^0$ の場合は $\Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})$ と $\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP})$ 非対称パラメータ $A(t)$ は以下のように与えられる。

$$A(t) \equiv \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})} = -\xi_f \sin(2\phi_l) \sin(\Delta m_d)t \quad (1.4)$$

ここで ξ_f は f_{CP} の CP 固有値、 Δm_d は 2 つの B^0 の質量固有状態の質量の差、 ϕ_l はユニタリティ三角形の 3 つの内角の内 1 つであり K-M 行列の成分により表される。

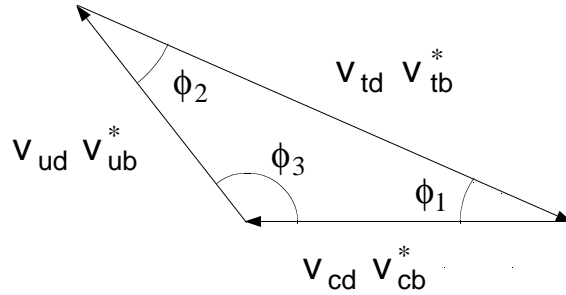


図 1.1: unitarity triangle

unitarity triangle の三角形の内角は、

$$\phi_1 \equiv \frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}, \phi_2 \equiv \frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{td}V_{tb}^*}, \phi_3 \equiv \frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*} \quad (1.5)$$

と表され、三角形の三辺 $|V_{td}|$ 、 $|V_{cb}|$ 、 $|V_{ub}|$ と 3 つの内角 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 により CP の破れの大きさを精密に決定できる。これらのパラメータは B 中間子の崩壊事象を測定する事により求められる。以下の崩壊モードは unitarity triangle の辺と角度を決定する為には重要である。

- $\phi_1 : B^0 \rightarrow J/\psi K_S$
- $\phi_2 : B^0 \rightarrow \quad or$
- $\phi_3 : B^0 \rightarrow DK$

- $|V_{ub}|$: $b \rightarrow u$ transition ($B \rightarrow \pi \ell \nu, \rho \ell \nu$)
- $|V_{cb}|$: $b \rightarrow c$ transition (B の *life-time*, $B \rightarrow D^{0*} \ell \nu$)
- $|V_{td}|$: $B\bar{B}$ mixing

これらの測定結果からユニタリティー・トライアングルが閉じているかどうかを調べることにより、K-M モデルの検証を行うことになる。

1.2 KEKB

CP の破れを観測する為の様々な崩壊モードの中で特に注目されているのは $f_{cp} = c\bar{c}K^0$ の場合である B^0 あるいは \bar{B} が J/ψ と K_S^0 に崩壊する過程である。 $f_{cp} = (c\bar{c})K^0$ の場合は強い相互作用による影響が非常に小さく且つ崩壊過程振幅自身の CP の破れ (直接的 CP の破れ) の寄与が非常に小さいと予想されるので式 (1.4) の非対称度 $A(t)$ を測定する事により、 $\sin(2\phi_1)$ の値を精度良く成立する。したがってこの $A(t)$ を測定することで、 $\sin(2\phi_1)$ の値を良い精度で決定することが出来る。しかし、B 中間子は質量が $5.28\text{Gev}/c^2$ と大きく様々な崩壊モードを有する為、 $J/\psi K_S^0$ に崩壊する確率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ と非常に低い。この為、CP の破れを観測する為には大量の $B\bar{B}$ を作り出す必要があり、年間 10^8 と大量の B 中間子対を生成できる様に設計された、非対称型エネルギー・2 リング型の衝突型加速器が KEKB ファクトリーである。B ファクトリーでは電子陽電子衝突により b クォークと反 b クォークの共鳴結合粒子である $\Upsilon(4S)$ をつくる。 $\Upsilon(4S)$ の質量は $10.58\text{Gev}/c^2$ で 1ps 程の寿命の後、主に $B\bar{B}$ に崩壊する。生成された B 中間子が静止していると ψK_S^0 に崩壊するまでの時間情報が得られず CP の破れを観測する事が出来ない。そこで電子・陽電子のエネルギーをそれぞれ $8\text{Gev}/c^2$ 、 $3.5\text{Gev}/c^2$ とする事によって $\Upsilon(4S)$ に $4.51\text{Gev}/c^2$ の運動量を持たせる。これで崩壊した B 中間子は運動量を持つことができ、電子ビームの進行方向へローレンツブーストされて約 $140\mu\text{m}$ 進んだ後崩壊する。図 1.2 に B ファクトリーの全体図を示す。電子と陽電子のエネルギーが等しい場合には加速器の中で同一の軌道を反対側に周回するので 1 リングを用意すれば良い。しかし、B ファクトリーのような非対称エネルギー型の衝突型加速器では、電子と陽電子は異なるリング内に蓄積されねばならず、2 つのリングが必要になってくる。実際には、既存の周長 3km あるトリスタントンネルに、電子を蓄積する $8\text{Gev}/c^2$ のリングと陽電子を蓄積する $3.5\text{Gev}/c^2$ のリングを一緒に設置している。電子と陽電子はそれぞれのリングの中を互いに反対の方向に周回している。2 つのリングは 2ヶ所で交差するがそのうち筑波実験棟中の 1ヶ所を衝突点とし、他の交差点 (富士実験棟) ではリングを上下に設

置することですれ違わせている。

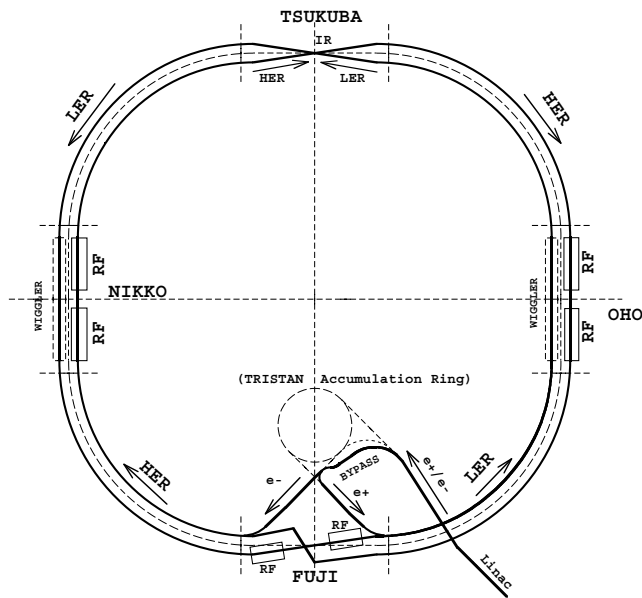


図 1.2: KEKB

現在までに、デザインミノシティー (design luminosity) である $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成し、積分ミノシティーでは 340fb^{-1} を供給した。

1.3 Belle 検出器

Belle 検出器はビーム軸方向の長さが 7.24m、外径 7.70m、総重量 2000t の巨大な検出器の集合体であり KEKB の衝突点である筑波実験棟に設置されており、内部で電子と陽電子が衝突するようになっている。前述の様に、B 中間子の検出は電子・陽電子衝突で作られ出される B 中間子対の崩壊で生まれる粒子の検出をすることである。B 中間子は様々な終状態に崩壊する為、Belle 検出器は高い検出効率で種々の粒子の識別に対応する様に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の 2 分の 1 より良い精度 ($<70\mu\text{m}$) で測定可能であること。
2. π_{\pm} 、 K_{\pm} 、 $p(\bar{p})\mu_{\pm}$ 、 e_{\pm} など多岐に及ぶ終状態を正しく識別することが可能な装置をもつこと。
3. γ 線などの電荷を持たない粒子を伴う B 中間子の崩壊を測定する為の高性能カロリメーターがあること。

4. 効率良く特定のある事象を選別して取り込む為のトリガーと高速のデータ収集システムがあること。

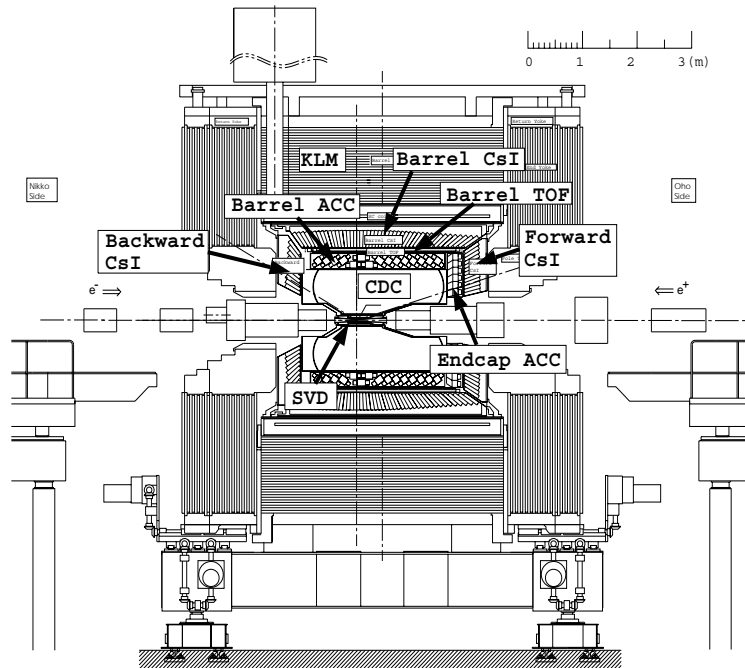


図 1.3: Belle 検出器の断面図

Belle 検出器の断面図をに示す。検出器の座標系は円筒座標であり、衝突点を原点にとり電子ビームの進行方向を Z 軸とし、 Z 軸と垂直方向に r 軸をとる。また r 軸に対する回転を θ 、 Z 軸に対する回転を ϕ としている。Belle 検出器は6種類の検出器と超伝導ソレノイドの7つの部分に大別され、これらは衝突点を覆うように同心円筒形に設置される。また非対称エネルギー衝突であり、電子のエネルギーの方が大きいので生成粒子は主に $+Z$ 軸方向に走る。したがって、検出器は電子進行方向に広い立体角を持つことから衝突点に対して非対称な形をしたものになっている。以下に、個々の測定器について衝突点に近い順から説明する。

1. シリコンバーテックス検出器 (SVD)

B 中間子崩壊により生成する荷電粒子の飛跡位置を $25\mu\text{m}$ の精度で測定する装置。これと後述する CDC の飛跡情報から B 中間子の崩壊点を $70\mu\text{m}$ 以下の精度で再構成する。N 型シリコン板の両面に電圧をかけるとキャリアの空乏層が生じ、荷電粒子がここを通過すると電子とホール対が出来る。この電子ないしホールを電気信号

に変えて検出し粒子を感知する。Belle グループでは、粒子の飛跡の 2 次元座標を 1 枚のシリコン板で観測する為に、シリコン板の両面に薄い電極線を $25\mu\text{m}$ 間隔で付けた物を用いる。SVD は 2003 年 2 月にアップグレードされ、SVD2 にはこのようなシリコン検出器がビームパイプの周りに 4 層設置されている。これにより、中央ドリフトチェンバー (CDC) では再構成しにくい、低い運動量を持った粒子に対する検出効率が改善されていることが期待されている。新しく採用された LSI チップは従来のものよりも放射性耐性が高く、衝突点からの反応を選別する能力も備えており、データ収集能力は以前の 5 倍となっている。

2. セントラルドリフトチェンバー (CDC)

1.5 テスラの磁場中での荷電粒子の曲率半径から運動量に関する情報を $\frac{\sigma_{P_t}}{P_t} \sim 0.5\% \times \sqrt{P_t^2 + 1}$ (P_t はビーム軸に対して垂直方向の運動量で GeV を単位とする) の精度で求める装置。検出する粒子の運動量領域は $P_t \geq 100\text{MeV}/c$ であり、カバーする polar angle は $17^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$ である。また、ヘリウム-エタンガスを用いたエネルギー損失法 (dE/dx 法) によって $0.8\text{GeV}/c$ 以下の運動量領域での π/K 識別も行う。ヘリウムとエタンガスの混合ガス中に細い電極線を多数本張り巡らし、これにプラスとマイナスの電圧をかけ、ガス中で荷電粒子により電離される電子をプラス極線にイオンをマイナス極線に集め荷電粒子を検知する。電子やイオンがガス中を飛散して電極線に到達するまでの時間を測定する事により荷電粒子の飛跡を正確に知る事が出来る。Belle グループの場合は内半径 28.1cm 、外半径 86.3cm の円筒状のガス容器の中に、容器の軸方向に Anode が 50 層同心円状に配置されている。測定可能領域は $-77 \leq Z \leq 160\text{cm}$ である。

3. シリカエアロゲルチェレンコフカウンター (ACC)

崩壊で生成される π 中間子と K 中間子を $1.2\text{GeV}/c \sim 3.5\text{GeV}/c$ の運動量領域において 90% 以上の効率で識別する装置。屈折率が 1.01 ~ 1.03 のシリカエアロゲルを輻射体とする閾値型チェレンコフカウンターである。このシリカエアロゲルは $0.7\text{GeV}/c$ 以上の運動量を持った π 中間子には発光し、 $4\text{GeV}/c$ 以下の運動量の K 中間子には発光しないので 2 つの粒子の識別が可能になる。チェレンコフ光の検出には高磁場用光電子増倍管 (ファインメッシュ型) を使用。検出器は CDC の外側に円筒状に設置されている。内半径 85cm 、外半径 115cm である。同様の検出器はエンドキャップ部にも設置されている。バレル部には 960、エンドキャップ部には 228 個のシングルカウンターが配置されている。

4. 飛行時間測定カウンター (TOF)

粒子の識別と反応のトリガー信号を発する装置。100ps 以下の精度を持ったプラスチックシンチレーションカウンターで、崩壊生成粒子の飛行時間を測定しその速度を求める。CDC で測定された運動量と組み合わせて荷電粒子の質量を算出する。1.2GeV/c 以下の運動量領域での π/K 識別も行う。また各事象が発生した時間を決めるにも使用される。Belle 検出器は厚さ 4cm、長さ 300cm のプラスチックシンチレーションカウンター 128 台を ACC の外側に設置している。

5. 電磁カロリメーター (CsI)

CsI 結晶を用いて γ 線や電子のエネルギーを正確に測定する装置で、全ての結晶モジュールは結晶の正面がビームの衝突点を向く様に並べられほぼ全立体角を覆うように設置されている。長さ 30cm の CsI 結晶を円筒部に 6624 本、前方部に 1216 本、後方部に 1040 本配置してある。各 CsI は 2cm \times 1cm のフォトダイオード 2 本によって読み出される。 $(\Delta E/E(\text{GeV 単位}) = 0.67\%/\sqrt{E} \oplus 1.8\%)$ エネルギー分解能は 1GeV の γ 線に対し 2% である。

6. K_L, μ チェンバー (KLM)

運動量 600MeV 以上の K_L 及び μ 等の粒子識別を行う装置。厚さ 4.7cm の鉄を 14 層重ね、各層の間に荷電粒子を検出する高抵抗並行板チェンバー (RPC) を挟み込んだ構造をしている。高抵抗並行板チェンバーは、ガラス等の非常に高い電気抵抗を持つ平らな板を数 mm の間隔を保って並行に設置し、この間をアルゴンとイソプタンの混合ガスで満たし、高抵抗体にプラスとマイナスの高い電圧を印加する。このガス中を荷電粒子が通るとガスが電離して電子とイオンを作り、これらが電極と薄い絶縁膜を介して取り付けられた信号用電極板に電気信号を誘発する。この信号を検知する事により粒子を検出する。

KLM より内側の検出器は厚さ 30cm、長さ 4.4m の円筒形ソレノイド磁石により中心磁場強度 1.5 テスラ内に置かれている。ビームに対する、ソレノイド磁場の影響を最小にする為にソレノイド磁場の方向はビームの走る方向と同じになっている。

1.4 Belle 検出器における粒子識別

CP 対称性の破れを調べるにあたって必要な、 B^0 、 \bar{B}^0 中間子が同じ終状態に崩壊する時の時間分布の違いを得る為には、粒子識別が重要である。

CP 対称性の破れを調べるにはバックグラウンドの少ない以下の様な CP の固有状態である $f_{CP} = (c\bar{c})K^0$ への崩壊過程を使用する事が最も基本的な解析である。その例を

下記に挙げる。

- $\xi_f = -1 : J/\psi K_S, \psi(2S)K_S, \chi_{cl}K_S, \eta_c K_S$
- $\xi_f = +1 : J/\psi K_L$
- $B \rightarrow J/\psi K^{*0}, K^{*0} \rightarrow K_S \pi^0$

(終状態では CP の値が +1 と -1 の状態が混合するが、81% の確率で CP=+1 状態であるので、その状態を利用)

この中でも最も確実に捕らえられるモード (gold plated モード) として $B \rightarrow J/\psi K_S$ が挙げられる。この時、CP 固有状態 $J/\psi K_S$ に崩壊しないもう一方の B^0 (または \bar{B}^0) は通常カスケード崩壊と呼ばれる $b \rightarrow c \rightarrow s$ の崩壊形式に従い、B 中間子は $B \rightarrow D \rightarrow K$ のように崩壊する。 B^0, \bar{B}^0 については $B^0 \rightarrow \bar{D} \rightarrow K_+, \bar{B}^0 \rightarrow D \rightarrow K_-$ の崩壊をする。ゆえに、もし K^+ が見つければその親粒子は B^0 であり K^- であれば \bar{B}^0 である確率が高い。これをフレーバー同定 (フレーバータギング) と言う。正確にフレーバータギングを行う為には、終状態中において B 中間子から生成された大量の π^\pm からカスケード崩壊による K^\pm を効率良く識別する事が必要である。また ϕ_2 の測定では $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ の崩壊に注目するが、 B^0 は同じくらいの割合 (1.7×10^{-5}) で $K^+ \pi^-$ にも崩壊する。 ϕ_3 では $B \rightarrow DK$ を $B \rightarrow D\pi$ から区別しなければならない。このように π/K 識別は CP の破れを実験で観測する上で重要である。 π/K 識別を必要とする崩壊モードと識別に必要な運動量領域、及びバックグラウンドとして取り除くべき崩壊モードを表 1.1 に示す。

表 1.1: 粒子識別の必要な崩壊モードと運動量領域

物理現象	崩壊モード	運動量 GeV/c	リジェクションモード
Tagging	$b \rightarrow c \rightarrow s$	$0.2 < p < 1.5$	-
ϕ_1	$B \rightarrow J/\psi K_S$	-	-
ϕ_2	$B \rightarrow \pi\pi$	$1.8 < p < 3.8$	$B \rightarrow K\pi$
ϕ_3	$B \rightarrow DK$	$1.5 < 3.3$	$B \rightarrow D\pi$

一般に粒子の識別はその質量 m を求める事で行われる。質量 m は運動量 p と速度 β を用いて、次式で表される。

$$m = p \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1} \quad (1.6)$$

運動量 $p[\text{GeV}/c]$ は CDC で測定された粒子の飛跡の曲率半径 $\rho[\text{m}]$ より $p = 0.3\rho\beta$ を用いて求められる。ここで B は磁場の大きさ [Tesla] である。速度 β に対しては CDC において荷電粒子が電離損失を測定することにより失うエネルギーを求める dE/dx 法と TOF による飛行時間測定法が挙げられる。荷電粒子が物質中で電離損失により失うエネルギーは、単位長さあたり

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left\{ \ln \left(\frac{2m_e \beta^2 \gamma^2 E_{max}}{I} \right) - \frac{\beta^2}{2} - \frac{\delta}{2} \right\} \quad (1.7)$$

と表され、この測定により δ を求める事が出来る。ここで K は比例係数 ($0.307 \text{MeVg}^{-1} \text{cm}^{-2}$)、 z は荷電粒子の電荷数、 Z は媒質の原子番号、 A は媒質の質量数、 I は物質の ionization potential、 E^{MAX} は maximum measurable energy、 $\delta/2$ の項は density effect による補正項である。Belle 実験では、エネルギー分解能が $\frac{\rho dE/dx}{dE/dx} \cong 5\%$ である。CDC 内部での電離損失を測定する事により、低運動量領域 ($p < 0.8 \text{GeV}/c$) での粒子識別が行われる。飛行時間測定法では、荷電粒子が衝突点から、シンチレーターで検出されるまで実際に飛行した距離 L と飛行時間 (TOF) を測定することにより速度 β が式 (1.8) により求められる。

$$\beta = \frac{L}{c \cdot TOF} \quad (1.8)$$

Belle の TOF は 100psec の時間分解能で $p < 1.2 \text{GeV}/c$ の運動量領域の粒子識別を行う。表 (1.1) より π/K 識別が必要な領域は $0.2 \sim 3.8 \text{GeV}/c$ であるが CDC、TOF 法による測定では、エネルギー分解能、時間分解能の問題から $1.2 \text{GeV}/c$ 以上の高運動量領域での粒子識別は出来ず、この領域の測定にはシリカエアロゲルチェレンコフカウンターが用いられる。

第2章 シリカエアロゲルチェレンコフカウンター

シリカエアロゲルについては次章にて詳しく述べる。

2.1 チェレンコフ輻射

荷電粒子の速度が、その物質中での光の速度より大きい場合に、粒子のエネルギーの一部がチェレンコフ輻射として光になって輻射される。図(2.1)はその様子を表したもので $\beta c(\beta=v/c)$ は荷電粒子の速度、 n は物質の屈折率、 θ_c は荷電粒子とチェレンコフ光のなす角である。高速度で走る荷電粒子のまわりの電磁場は、ちょうどその粒子が電磁波をまわりにもなっているような形である。別の言い方をすれば高速度の荷電粒子は、そのまわりに光子の郡をぶら下げて走る。光子が荷電粒子のまわりにある様子は定性的に光子が荷電粒子の近傍を出たり入ったりしていると考えてよい。

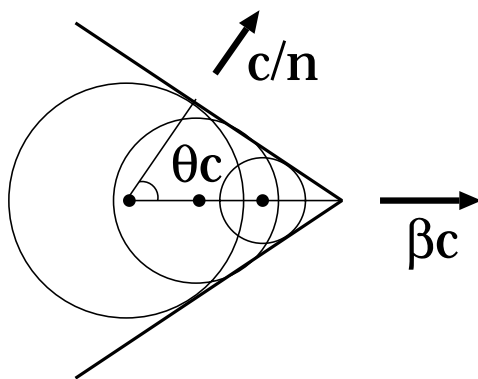


図 2.1: チェレンコフ輻射

チェレンコフ光が放出される条件は

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (2.1)$$

の時で、図 2.1 からわかるように、粒子の進行方向に対して

$$\theta = \cos^{-1} \frac{1}{n\beta} \quad (2.2)$$

の角度でチェレンコフ光は円錐状に放出される。

チェレンコフ放射が起こり得る最小の粒子速度 $v_s = c/n$ を閾値速度 (threshold velocity) と呼び、この時のチェレンコフ放射が放出される荷電粒子の進行方向からの角度 θ はチェレンコフ角と呼び、 θ_c と表される。光は原子の集団に対して持つ性質から、この放射は屈折率という巨視的な量だけに依存し、個々の原子の性質にはよらない。

また、発生するチェレンコフ光の光子数は、

$$N = 2\pi\alpha L \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\sin^2 \theta_c}{\lambda^2} d\lambda \quad (2.3)$$

で与えられる。ここで N は発生する光子数、 α は微細構造定数、 L は粒子が通過する物質の厚さ、 λ は光子の波長を示す。

2.2 チェレンコフカウンター

チェレンコフカウンターはチェレンコフ放射の性質から次の様な特質を持っている。

1. チェレンコフ放射が出るための $\beta > \frac{1}{n}$ という条件からわかるように低いエネルギーの粒子には感じない。たとえば、ガラスの中で、粒子は下に示すエネルギーよりも高いエネルギーを持たなければチェレンコフ放射は出さない。

電子 : 0.2MeV π 中間子 : 50MeV 陽子 : 330MeV

この点はシンチレーションが低いエネルギーほど強くなるのと対称的である。

2. 光はいつも前方に出て θ と β との関係に一定の関係があることから、検出器に粒子の走る向きに選択性を持たせたり、粒子のエネルギーの測定に用いたりすることが出来る。

2.2.1 チェレンコフカウンターの種類

チェレンコフカウンターには、閾値型とリングイメージ型の 2 種類のタイプがある。

1. 閾値型 閾値型のチェレンコフカウンターではチェレンコフ光を放射する放射体の屈折率 n を決めることによって運動量 P_{th} を決める。 P_{th} を越える運動量を持つ粒子に対してはチェレンコフ光が出るが P_{th} 以下の運動量を持つ粒子ではチェレンコフ光が出ない。これから粒子の速度 β が $1/n$ 以上かどうか判断でき CDC で測定し

た運動量情報がと合わせて荷電粒子を同定することが可能になる。ACCが求められている粒子識別能力は、約 $1.0\text{Gev}/c \sim 2.8\text{Gev}/c$ の運動領域で π 中間子と K 中間子を識別することである。よって屈折率は $1.010 \sim 1.030$ にすることでこの事を可能にしている。

2. RICH(リングイメージ型チェレンコフカウンター) リングイメージ型チェレンコフカウンターは、輻射体で発生したチェレンコフ光のチェレンコフ角から粒子を識別する事が出来る。従来は、ミラーなどを用いて大掛かりな検出器だが、Proximity Focusing RICH はコンパクトな検出器になっていて制限された空間での使用が可能になっている。

2.3 Belle 実験における現行の ACC と RICH 検出器の概要

2.3.1 Belle 実験における現行の ACC

Belle 検出器のエアロジェルチェレンコフカウンター (ACC) は、CDC と TOF の間に電子陽電子衝突点を取り囲むように外半径 1165mm 、内半径 885mm の円筒状に配置されてる Barrel ACC(BACC) と衝突点+Z 方向にある Endcap ACC(EACC) からなる。BACC は円筒上で ϕ 方向に 60 セグメント (Cell) に分割され、1Cell あたり 16 個、60Cell で 960 個のカウンターモジュールからなる。モジュールはエアロジェルの屈折率、読み出し系の PMT の口径・数量の違いから A~I カウンターの 9 種類が存在する。EACC は 12 セグメントに分割されており (1Cell あたりのモジュール数は 16 個) 各 Cell ごとに同一中心の 5 つのレイヤーを持ちカウンターモジュールの総数は 228 個になる。EACC の断面図を図 (2.3) に示す。各カウンター毎のエアロジェルの屈折率と PMT の組み合わせは表 (2.1) の様になる。各カウンターの Belle 検出器における配置を図 (2.2) に示す。EACC は衝突点からの角度 $17 \sim 34^\circ$ をカバーするように設置されている。BACC において設置場所によりエアロジェルの屈折率が変えてあるのは、ローレンツブーストされた $B \rightarrow \pi\pi$ モードにおける π 中間子の運動量が θ 方向に依存して異なるからである。KEKB は非対称エネルギーを持つ為、生成された π 中間子は +Z 方向に大きな運動量を持つ。故に屈折率は前方側 (+Z) が低いものとなっている。EACC では BACC と同じく $B \rightarrow \pi\pi$ モードを調べる為に屈折率の低い ($n \sim 1.008$) エアロジェルを使用しなくてはならないが、フレーバー・タギング用には TOF 又は高屈折率のエアロジェルカウンターが必要である。しかし空間的制限があるの為、両方の実現は不可能であるので EACC は低運動量の $B \rightarrow Ds \rightarrow K$ (flavor tagging) と $B \rightarrow \pi\pi$ 以外の崩壊モードのみに限定して測定を行う

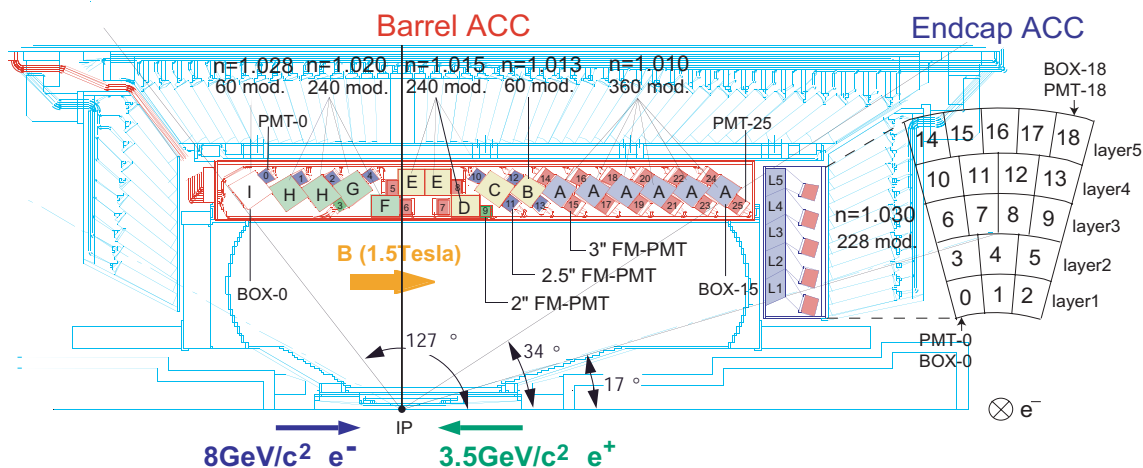


図 2.2: acc module

ている。エアロジェルカウンターは配置の為、図のように立方体ではなく ϕ 方向に角度のついた形状をしている。ボックスの材質は 0.2mm 厚のアルミニウムで、内壁は発生したチェレンコフ光を効率よく反射させ PMT に導けるように Goretex と呼ばれる乱反射材で覆われている。この内部に 24mm 厚のエアロジェルがカウンターの種類に応じて 4 ~ 6 枚挿入されている。また、ボックスの側面にはリニアリティに優れ高磁場中での影響を受けにくいファインメッシュ型の光電子増倍管が、セグメントへの効率良い設置を考慮して 1 本ないし 2 本が非対称に取り付けられている。光電子増倍管の口径および本数は発生するチェレンコフ光の光量に応じて決められている。図 (2.5) に BACC の概念図を示す。EACC のカウンターは基本的構造は BACC と同様であるが、材質は CFRP (炭素繊維強化複合材料) になっている。またエアロジェルへの入射粒子が直接、光電子増倍管の入射窓を通過しチェレンコフ光を発生する (Glass hit) を防ぐために図 (??) の様にカウンターと PMT の間に Air light guide を設けている。

2.3.2 RICH 検出器

図 2.6 に開発を目指している Proximity Focusing 型のエアロジェル RICH 検出器の概念図を示す。空間的制約の厳しい衝突型加速器実験での使用を想定して、厚さ 2cm ほどの薄いエアロジェル (輻射体) を用いてミラーなどの光学系を省いた近接型ジオメトリーを有するのが Proximity Focusing 型である本検出器の特徴である。光検出器を磁場内で動作させる制限から、磁場方向が光検出器内の電場方向と揃うエンドキャップ部での実用化を想定している。輻射体にエアロジェルを使用する事で得られる利点は、液体や固体の輻

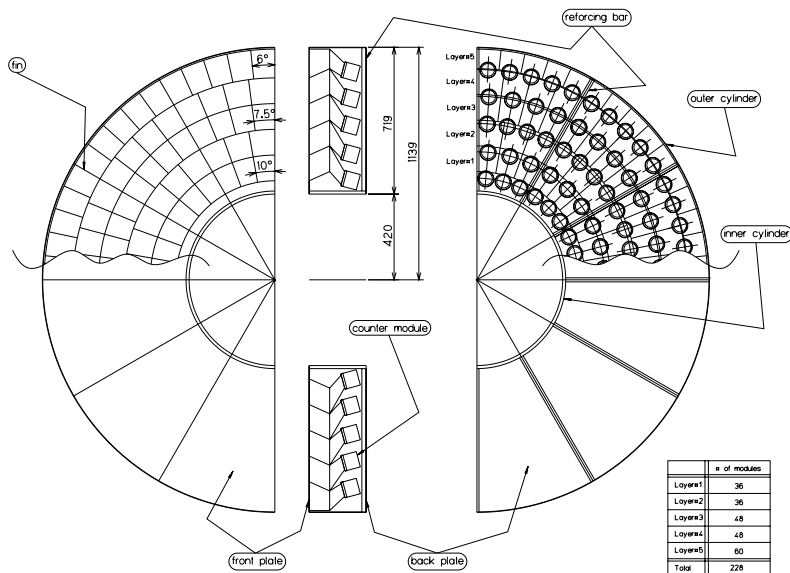


図 2.3: EACC 断面図

射体と比較して屈折率が極端に低い為に以下の項目が挙げられる。

- π と K のチェレンコフ角の開きが大きい。
- リング像がコンパクトでぼやけが少ない。
- 輻射体内での全反射による光量の損失が少ない。

RICH 検出器では、リング像のぼやけを抑える為に、位置分解能の良い光位置検出器が必要になってくる。

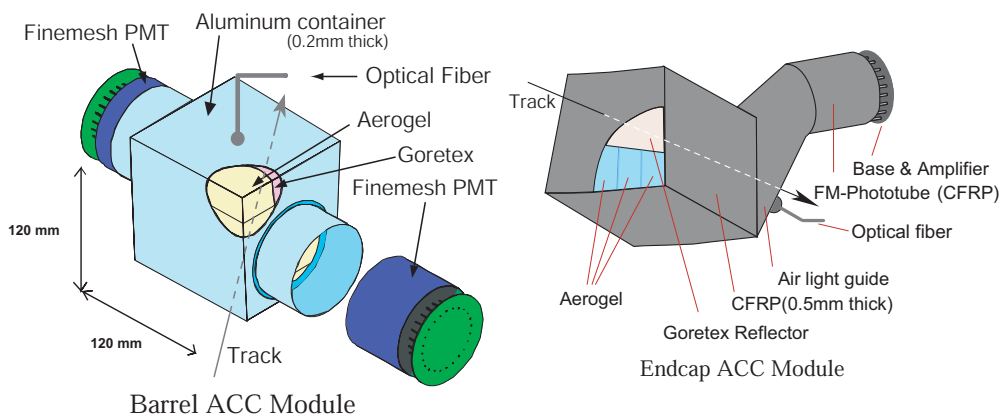


図 2.4: Barrel ACC

図 2.5: Barrel ACC

表 2.1: 各カウンターモジュールごとのエアロジェルの屈折率と使用 PMT

カウンター名称	数量	屈折率	FM-PMT
BACC A	360	1.010	3" × 2
B	60	1.013	2.5" × 2
C	60	1.015	2.5" × 2
D	60	1.015	2.5" + 2"
E	120	1.015	3"
F	60	1.020	3"
G	60	1.020	2.5" + 2"
H	120	1.020	2.5"
I	60	1.028	2.5"
EACC	228	1.030	3"

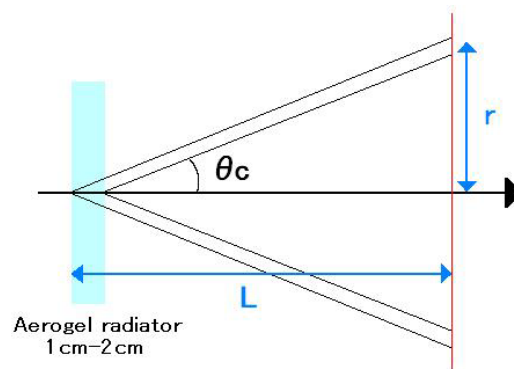


図 2.6: RICH のイメージ図

図 2.7 に運動量 $4\text{GeV}/c$ の π 中間子、K 中間子の輻射体の屈折率とチェレンコフ角の関係を示す。 π 中間子と K 中間子のチェレンコフ角の差は屈折率が $n=1.05$ のとき 23mrad 、屈折率が 1.03 の時に 31mrad となっている。エアロゲル RICH の 1 光子に対する角度分解能が 10mrad 以下であり、1 イベントの検出光子数が 4 個以上であれば、運動量 $4\text{GeV}/c$ の π 中間子と K 中間子が 4σ 以上の πK 分離が可能であり、このことから Endcap 部分に十分適用可能である。図 2.8 は Belle 検出器のアップグレードで RICH カウンターが適用される場所を示したものである。

2.3.3 検出器の原理性能確認テスト

開発の経緯としては、

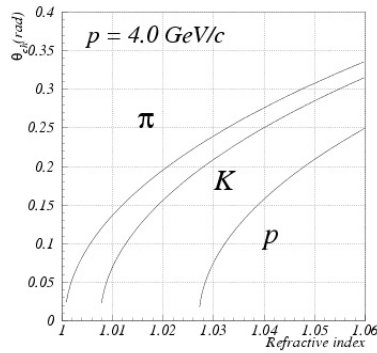


図 2.7: 運動量 $4\text{GeV}/c$ の粒子の屈折率とチェレンコフ角の関係

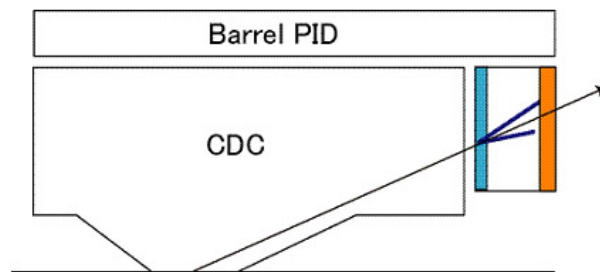


図 2.8: RICH setup in Belle detector

1. イメージインテンシファイヤー (IIT) を用いた基礎実験 (~平成 10 年度)
2. マルチアノード PMT (hamamatsu R5900-M16) を用いた宇宙線及びビームによる実証実験 (~平成 13 年度)
3. フラットパネル型マルチアノード PMT [64 channel] (Hamamatsu H8500) を用いた定量的測定

が進められている。2002 年のビームテストではフラットパネル型 PMT アレーを用いたプロトタイプ型検出器を用いて、屈折率 $n=1.05$ 、厚さ 2cm の輻射体を用いた際のチェレンコフ角度分解能として約 15mrad 、通過粒子あたりの光量として約 8 個が得られている。これより $4\text{GeV}/c$ での K/π 分離性能は 4σ に達すると見込まれ、エアロジェル RICH 検出器の動作原理や基本性能の確認が行われた。

次段階としては Belle 実験などでの実用化に際しては磁場中で動作可能な位置検出型光検出器が必要である為、候補としてハイブリッド型光検出器 (HPD or HAPD) があがり、シングルアノード型の試験器では 3photon までのピークが明瞭に識別され、原

理的にエアロジェル RICH 検出器用光検出器として理想的な性能を持つ事が確認された。現在、パッケージに対する有効面積が 70% 程度のマルチアノード型の HPD(HAPD) とその多チャンネル信号 (約 12 万 ch) を処理する為の ASIC(Application Specific Integrated Circuit) の開発が行われている。実装予定は以下のようなものである。

表 2.2: 12 × 12 HPD 目標仕様

項目		記述 / 値	単位
感度波長範囲		160 ~ 850	nm
光電面	材質	マルチアルカリ	-
	有効光電面サイズ	64 × 64	mm
入射窓		合成石英	-
ターゲット	種類	電子照射用アバランシェダイオード	-
	サイズ	4.9	mm
ピクセル数		12 × 12	Pixel
外形寸法		73 × 73 × 30	mm
有効面積率		65	%

2.3.4 デュアル・ラディエーター (及びマルチ・ラディエーター)

RICH 検出器において、光量を増やす為には輻射体であるエアロゲルの厚さを大きくすれば良いのだが、その際には位置分解能が悪化してしまう。また、逆に位置分解能を良くしようとエアロゲルを薄くすると光量が減少してしまう。この事を解決する為に位置分解能を悪化させず更に光量を多くすることが輻射体として、異なる屈折率を持つ 2 枚のエアロゲルを輻射体 (デュアル・ラディエーター) とする方法が考案された。

デュアル・ラディエーターには focusing タイプと defocusing タイプの 2 種類にある。(図 2.9)

focusing タイプは、粒子の入射方向に対し上流側に屈折率の低いエアロゲルで下流側に屈折率の高いエアロゲルを用いる事で、リングイメージをフォーカスする事が出来る。エアロゲルを 2 枚用いる事で、光量が増えるが、リングイメージの角度分解能は悪化しない。defocusing タイプは、粒子の入射方向に対し上流側に屈折率の高いエアロゲル、下流側に屈折率の低いエアロゲルを用いる事で、2 つのリングイメージを作る事が出来る。こちら、エアロゲルを 2 枚用いる事で光量が増えるが、2 枚のエアロゲルから 1 枚分ずつの角度分解能を得る事になるので、角度分解能は悪化しない。

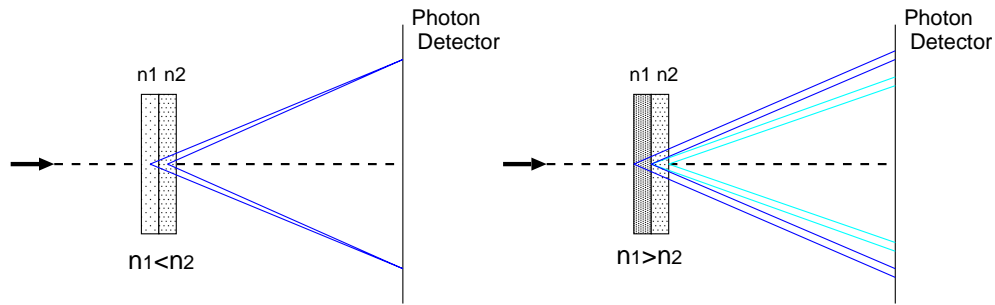


図 2.9: デュアル・ラディエーターの種類 (左: focusing タイプ、右: defocusing タイプ)

さらに、放射体として複数枚のエアロゲルを用い、マルチ・ラディエーターにすることで検出器としてさらに位置分解能を良くし、光量を上げる事が可能になる。マルチ・ラディエーターの種類は図 2.10 の様なものがある。図 2.10 の (a)、(b) については粒子の入射方向に対して屈折率が徐々に大きくなるようなエアロゲルを用いる事でリングイメージをフォーカスする事で位置分解能を悪化させず光量を増加させる。また図 2.10 の (c) は focusing タイプで 2 組の focusing タイプのデュアル・ラディエーターを用いてそれぞれリングイメージをフォーカスしそれらをあたかも 1 枚ずつのエアロゲルからのリングイメージとしてデュアル・ラディエーターの defocusing タイプのように 2 つのリングイメージと捉える事で位置分解能を悪化させず光量を増加させる。

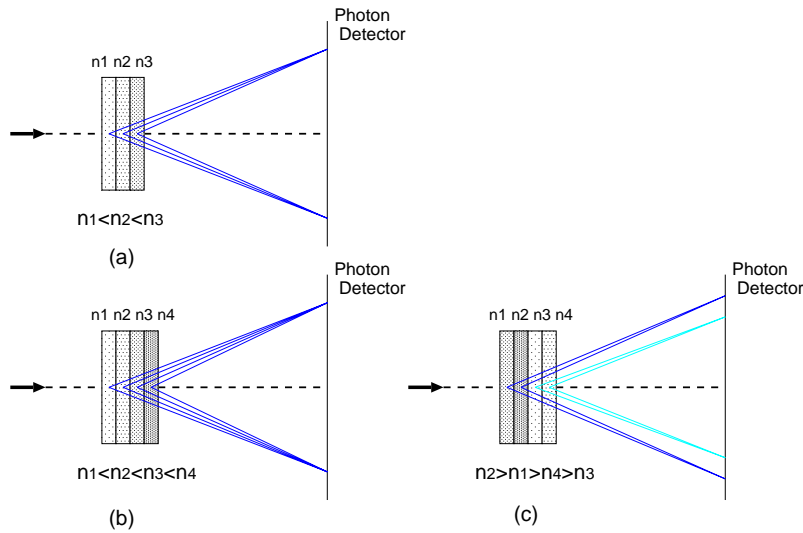


図 2.10: マルチ・ラディエーターの種類 ((a)focusing タイプ、(b)focusing タイプ)、(c)focusing&defocusing タイプ

第3章 シリカエアロゲル

3.1 シリカエアロゲル

3.1.1 シリカエアロゲルとは

シリカエアロゲルとは、高い空隙率を持つ多孔質体でありながら、透明性を持つという稀有な物質である。1930年代にスタンフォード大学の Kistler が、水ガラスと呼ばれるケイ酸ナトリウム水溶液のゲル化物質を超臨界乾燥することで多孔質シリカを得るとして提案したのが最初である。その後数十年に渡って、欧米において様々な物性研究と応用研究がなされてきた。その構造は、図 3.1 に示すように nm のオーダーで一次粒子が化学結合し、10nm 程度の二次粒子を形成し、さらにこれらの二次粒子が 90% 以上もの高い空隙率を有しながら数珠状に三次元的に連結することで一体化したものである。

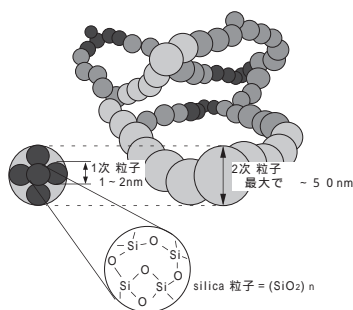


図 3.1: シリカエアロゲルの構造

そして、この超微細構造ゆえに以下のような性質を持つ。

- 高い断熱性
- 気体に近い屈折率
- 気体に近い誘電率
- 防音性

しかし、物質がシリカからなっている事と高い空隙率 (構造が弱い) からなることにより、以下のデメリットも持ってしまう。

- 水などの吸着による特性の経時劣化
- 取り扱いなどによって壊れ易い

このウィークポイントから長年の間実用化は実現されなかった。

3.1.2 シリカエアロゲルの変遷

先程にも述べたように、シリカエアロゲルとは1930年代にスタンフォード大学の Kistler が概念を提案したものである。Kistler は、まずケイ酸ナトリウムの水溶液に塩酸を混合し、24時間放置することで最初にアクアゲルを作製して、アクアゲルをメタノール中に沈めて水をアルコールと置換し、アルコゲルとした。そしてこのアルコゲルをオートクレーブを用いて、240℃、8MPa というメタノールの超臨界状態を経てメタノールを取り除くことで半透明状態のシリカエアロゲルと作製した。この時、Kistler が作製したシリカエアロゲルの密度は $30 \sim 300 \text{kg/m}^3$ であり、空隙率に直すと、86～98%に相当するものであった。この時点でシリカエアロゲルは光透過性を持ちながら、なおかつ、 $600 \sim 1000 \text{m}^2/\text{g}$ もの高い表面積、優れた断熱性など特殊な物性を有する多孔質体として材料研究者の間ではその応用性に期待を寄せた。Kistler がシリカエアロゲルを初めて作製してから30年を経て、リヨン大学の Teichner 等は、高エネルギー物理学分野の測定で素粒子の検出器としてシリカエアロゲルが有用なことを示した。Teichner らは、ケイ酸ナトリウムとは異なり、メチルシリケートのモノマー (TMOS、テトラメトキシシランとも呼ぶ) を原料としたゾルゲル反応によりシリカのアルコゲルを作製し、超臨界乾燥することでシリカエアロゲルを作製した。そして、このゾルゲル反応による作製方法が、以後のシリカエアロゲル作製方法の標準方法となった。

3.1.3 シリカエアロゲルの特徴

シリカエアロゲルは、非常に高い空隙率を持つシリカ多孔質体である。この物質の代表的な物理特性を最近のシリカエアロゲルホームページから抜粋し、表 3.1 に示す。

高い表面積と微細な空隙を持ち、その高い空隙率から、軽量、断熱性、そして低い屈折率や誘電率、透明性、吸音性などシリカエアロゲルは固体でありながらむしろ空気に近いような物性を示すことがわかる。さらには SiO_2 を主成分としていることから、当

表 3.1: シリカエアロゲルの特性

Property	Value
Apparent Density	3 ~ 350kg/m ³
Internal Surface Area	600 ~ 1000m ² /g
% Solids	0.13 ~ 15%
Mean Pore Diameter	~ 20nm
Primary Particle Diameter	2-5nm
Index of Refraction	1.01-1.05
Thermal Tolerance	to 500
Coefficient of Thermal Expansion	2.0-4.0 × 10 ⁻⁶
Poisson's Ratio	0.2
Young's Modulus	10 ⁶ -10 ⁷ N/m ²
Tensile Strength	16 kPa(Density=100kg/m ³)
Fracture Toughness	~ 0.8 kPa*m ^{1/2} (Density=100kg/m ³)
Dielectric Constant	~ 1.1(Density=100kg/m ³)
Sound Velocity Through the Medium	100 m/sec(Density=70kg/m ³)
Transmission	~ 90%(Visible wavelength range)
Thermal Conductivity	~ 0.015W/mK

然のことながら高い耐熱性を持つ。だが、強度という点では、軽量であることとシリカ骨格が微細なことから弱くなってしまう。

現行の Belle 検出器に使用されているエアロゲルチェレンコフカウンターは閾値型（粒子識別範囲：1 ~ 2.8GeV）であり、より高運動量領域の粒子が飛来するエンドキャップ部分では十分な粒子識別が行われていない。標準理論における KM 行列の物理的パラメータを決定するについて主崩壊モードとバックグラウンドとなるリジェクションモードの識別（表 2.1 参照）は重要であり、これらを $1.5\text{GeV}/c < p < 4\text{GeV}/c$ の高運動量領域を含む領域で行う事が可能な新たなチェレンコフカウンターが必要となっている。現在 ACC グループでは将来の Belle 検出器への組み込みを想定し、高屈折率シリカエアロジェルを輻射体とする衝突型加速器実験用リング・イメージ・チェレンコフカウンター（エアロジェル RICH）の研究開発を行っている。現行の検出器建設の際に低屈折率 ($n=1.01 \sim 1.03$) エアロジェルの製法が松下電工との共同研究で開発された。このエアロジェルは新しく開発された疎水化処理により経年変化が無く、従来品を格段に上回る高透過率（波長 400nm での透過率で約 3 倍）を有する。これを契機として将来の実験での応用を想定したエアロジェルを輻射体とするリングイメージ型チェレンコフカウンターの開発が可

能となった。

3.2 エアロゲル製作

3.2.1 シリカエアロゲルの製作

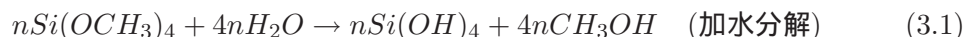
エアロゲルの製作方法

1. 1 ステップ法

従来の方法であった 1 ステップ法は水酸化珪素の縮重合反応をアルコール溶媒中で行うことにより、シリカメタノールゲルを製作するというものである。しかし、この方法では屈折率が 1.020 以下のエアロゲルを加水分解の逆反応が起こる為に製作する事が出来ない。

2. 2 ステップ法

この方法はローレンス・バリモア研究所開発された製法で最初に式 3.1 と式 3.2 の反応が少しずつ進んだシリカ溶液をつくり、その後このシリカ溶液からアルコールを蒸留して取り除きシリカオイルというものを作る。そして、このシリカオイルをアセトニトリルを溶媒にして、水、アンモニアを加えて最終的なゲル化反応を起こさせる。この方法だと 1 ステップ法で生じた加水分解式 3.1 の逆反応を回避できるという利点があり、低屈折率で高い透明度を持つエアロゲルが出来る。しかし、2 段階に分けて調合を行う上、アルコールを蒸留して取り除く等、複雑な過程を踏まなければならないというデメリットも併せ持つ。



3. KEK での製法

これは、KEK と松下電工 (株) との共同研究で考案されたもので上の 2 ステップ法で作られるシリカオイルの代わりにメチルシリケート 51 (常温常圧で安定な物質、且つ安価で市販されている) というオリゴマーを使用する物である。メチルシリケート 51 はその質量の 51% が SiO_2 である。これをメタノール (エタノール)、DMF を溶媒、アンモニアを触媒として水と反応させることにより 2 ステップ法で得られ

るものとはほぼ同じゲルが、1ステップ法と同じ過程を通して作る事が出来、より容易に透明度の高いエアロゲルを製作することが可能となった。

疎水化

シリカエアロゲルの骨格をなす SiO_2 微粒子は、その内部や表面に多くの $SiOH$ 基を含んでいる。この $SiOH$ 基が非常に水分を吸収してしまう事から、シリカエアロゲルの質量(重量?)が増し、その性質が変わってしまう。また、水分の吸着エネルギーによって SiO_2 の微細骨格がダメージを受けて構造が変化してしまうと考えられる。そこで、製作工程の1つである超臨界乾燥の前に、ヘキサメチルジシラザン(分子式: $(CH_3)_3SiNHSi(CH_3)_3$)を疎水化剤として用いることで、シリカの内部、表面に多く存在している $SiOH$ 基と反応して、アンモニアを発生しながら $-Si(CH_3)_3$ (トリメチルシリル:TMS) 基を形成することで、シリカ表面を有機修飾し、疎水性を発現させることが出来る。(図 3.2) チェレンコフカウンターの輻射体には疎水化処理されたシリカエアロゲルを用いることでシリカエアロゲルに耐湿性を与え、シリカエアロゲルの劣化を防ぐ事を可能にする。図 3.3

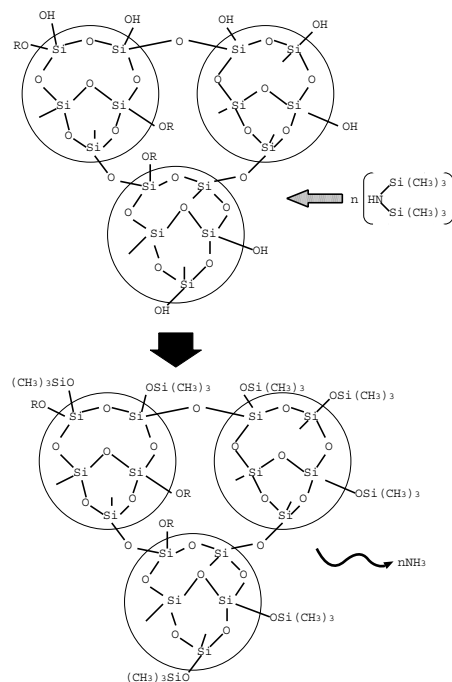


図 3.2: ヘキサメチルジシラザンによるシリカ表面の疎水化反応

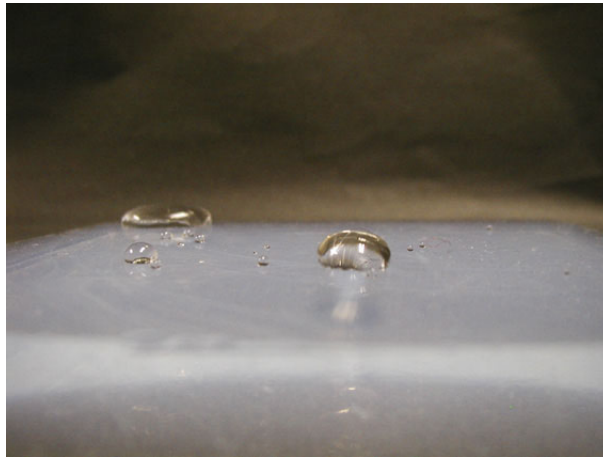


図 3.3: 疎水処理されたエアロゲルに水を垂らした様子

超臨界乾燥

アルコゲルからゲル中のアルコール成分を抜く方法として超臨界乾燥というものがある。超臨界乾燥の方法としては、メタノールやエタノールの臨界点以上の温度圧力以上状態を経由させて減圧するプロセスが古くから知られていた。シリカエアロゲルは通常の乾燥法の場合、アルコール成分がアルコゲルから蒸発し始めると表面張力によってゲルの細孔中に凹型のメニスカスが発生し収縮側に応力が働く。メニスカスというのは、試験管等の容器に液体を入れた時、表面に出来る三日月型の輪郭のことである。図 3.4 のように蒸発が進むとメニスカスはアルコゲル内部に入り込み、メニスカスとアルコゲル内の多孔体の壁の境界部分で圧縮力が大きくなり、壊れてしまう。超臨界乾燥という方法を用いる事で、この事態を抑える事が出来る。

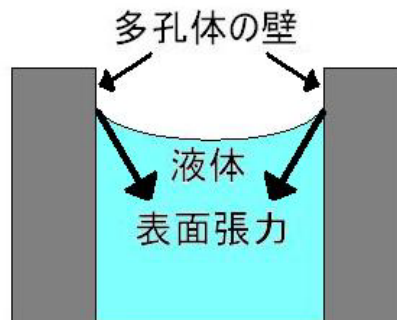


図 3.4: メニスカスによる応力

物質には温度や圧力によって気相、液相、固相といった3つの状態がある。図 3.5 は温度と圧力を変えていった時の物質の相の状態変化を示したものである。物質の温度と圧力を上げていき、ある温度、圧力(臨界点)を超えると液体とも気体ともつかない超臨界流体という状態になる。この状態では、密度が液体並、粘度は気体並、拡散係数は気体と液体の間といった気体液体両方の性質を持つ。また超臨界流体は化学的親和性のある物質を溶解する能力を持つのでこれを利用してアルコゲルからアルコール成分を取り除くことが出来る。しかも超臨界流体はそれ以上圧力を加えても液体にはならないのでメニスカスによる収縮力は起こらず、ゲルに余計な応力を与えない為もとのアルコゲルの形状を保ったままエアロゲルにすることが出来る。表 3.2 にそれぞれの物質の臨界点での温度、圧力を示す。アルコールを用いてアルコゲルから超臨界乾燥でシリカエアロゲルにする為には、高圧容器内にアルコゲルとアルコールを充填し、最初、温度を上げていく。温度の上昇と共に容器内の圧力も上昇していき、やがてアルコールの臨界点に達する。そこで、もう少し温度、圧力を臨界点より高いところまで上げる。そこから、温度を保持したまま減圧していくのが一般的である。しかし、これらの方法だと 240 以上の高温且つ 8MPa 以上の圧力にしなくてはならぬ危険な作業になってしまう。そこで、私達は炭酸ガスを用いて超臨界乾燥を行っている。炭酸ガスを用いることで、40 程度の低温でも超臨界乾燥が可能になっている。炭酸ガスを用いての超臨界乾燥は、まず、高圧容器中にアルコゲルとアルコールを充填した後、炭酸ガスを注入し、炭酸ガスの臨界圧力以上まで圧力を上げた後に温度を上げる事で炭酸ガスを超臨界状態にする。次に、超臨界状態の炭酸ガスにアルコール等の溶剤が溶解した状態を保ちながら、そこへ超臨界状態の炭酸ガスを流通させる事で溶剤を取り除いた後に減圧していく。炭酸ガスの臨界点は表 3.2 にもある通り、31 °C、8MPa である。このことから、40 °C での乾燥が可能であるが、実際に 40 °C で超臨界乾燥を行うと減圧工程において炭酸ガス中に残存する 1%未満の濃度のアルコールによって、シリカエアロゲルの透明度が劣化する事がわかっている。その問題を回避するために、温度を 80 °C に設定し、80 °C での炭酸ガス&エタノールの溶解度曲線から抽出時の圧力を 16MPa として超臨界乾燥を行っている。

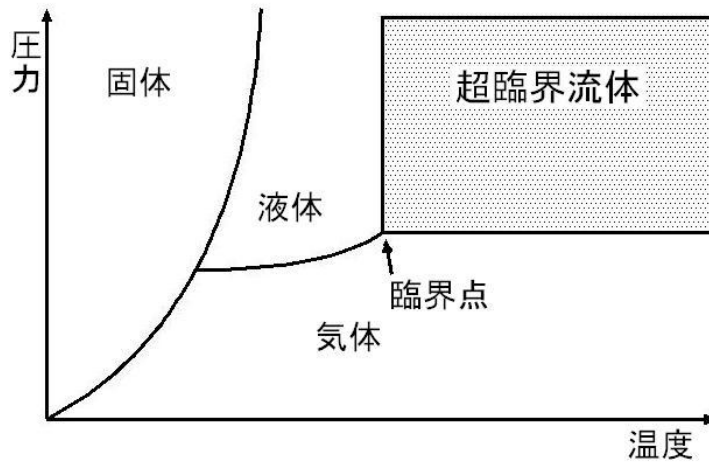


図 3.5: 物質の状態図

表 3.2: 物質の臨界点データ

移動相	沸点 ()	臨界点	
		温度 ()	圧力 (atm)
一酸化炭素	-89.0	36.5	71.4
二酸化炭素 (炭酸ガス)	-78.5	31.3	72.9
アンモニア	-33.4	132.3	111.3
水	100.0	374.4	226.8
メタノール	64.7	240.5	78.9
エタノール	78.4	243.3	63.0
エタン	-88.0	32.4	48.3
プロパン	-44.5	96.8	42.0

3.2.2 2層一体型エアロゲルの製作

2層一体型エアロゲル

従来デュアル・ラディエーターにする際に別々に取り扱っていたが、エアロゲルを調合の段階で一体化させてしまう事でもデュアル・ラディエーターにする事が可能である。2層一体型エアロゲルとは、調合の段階において、エアロゲルを2層にしてしまう(図3.6)ことで1枚で2層の構造を持つエアロゲルのことを言う。ACCではBelleアップグレー

ドに向けて、現行の EACC 部に Proximity Focusing 型のアロゲル RICH を導入しようとしているが、輻射体のエアロゲルを屈折率の異なる 2 枚のエアロゲルを用いることで検出光子数を落とさずに角度分解能を上げる事を 2004 年 3 月に行ったビームテストにて確認をした。また、2004 年 6 月には輻射体を一体型ではないマルチ・ラディエーターにすることによって検出光子数を落とさずに角度分解能を上げる事を確認した。(参照：4.3.4(p.61)) この 2 枚を重ね合わせるデュアル・ラディエーターを発展させた形として 2 層一体型エアロゲルがある。調合の際にエアロゲルを一体型にさせてしまう事で以下に挙げられるような 2 つのメリットがあると考えられる。

- 一つのゲルとして管理することが出来る事や、ゲルを配置し易くなる。
- 2 枚のエアロゲルを重ね合わせると僅かながら、ゲルの間には空間が出来て表面の数が増える。この時、表面の数が増える事で表面散乱の影響を受けることが考えられ、エアロゲルを製作する段階で 2 枚のエアロゲルを一体化させてしまう事で、この影響を軽減することが出来ると考えられる。

この事から、2 層一体型のエアロゲルを製作しその評価をする事は少なからぬ意義がある。そこで 2 層一体型エアロゲルを製作した。

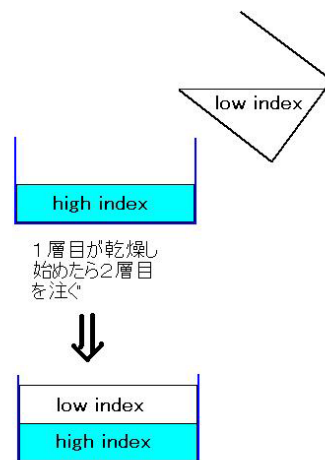


図 3.6: 2 層一体型エアロゲルの製作

図 3.7 は 2 層一体型エアロゲルのイメージ図になっている。

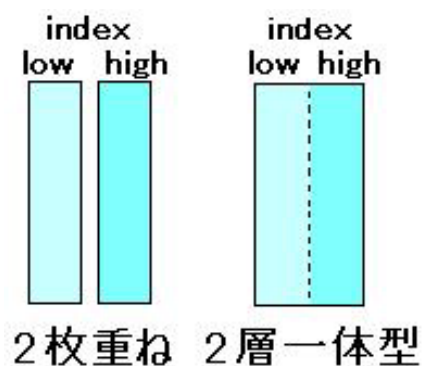


図 3.7: 2層一体型エアロゲルのイメージ図

2層一体型エアロゲルの製作

エアロゲルを製作するのに実際使用する薬品は、MS51、MtOH、DMF($\text{HCON}(\text{CH}_3)_2$)、 H_2O 、 NH_3 水(28%)である。ケースは持ち運びが容易なようにスチロールケース(96*64*28mm)を使用した。2層一体型エアロゲルを製作するに当たり、厚さは各層が7.5mmにし全体として15mmになるようにした。また、2層一体型エアロゲルと比較する為に単層(single layer)で、7.5mmや15mmのエアロゲルも併せて製作した。(持ち運ぶ際はワイヤーで6*3cm程の大きさにする)

この薬品を、図(3.8)のように、ビーカーを用いてA液ではMS51、MtOH、DMFを調合しB液ではMtOH、DMF、 H_2O 、 NH_3 を調合しておく。これを1層目のアルコゲルに使う。2層目のアルコゲルの使う為、もう1組のA液、B液を調合しておく。この後、大きめのビーカーに1層目に使うA液、B液を入れて攪拌する。攪拌時間は60秒を目安にした。攪拌した後の調合液は時間をおくとゲル化してきてしまう為、すばやく、ケースへ注ぐ。ケースへ注いだ調合液は数分経つとゲル化しアルコゲルとなる。(この時、ゲル化時間を把握しておく事が好ましい)ゲル化する時間から逆算してゲル化する少し前に2層目に使うA液、B液をビーカーに入れて攪拌する。攪拌した後の調合液をゲル化している1層目のアルコゲルが入っているケースに注ぐ。そして、数分後にゲル化し、2層一体型のアルコゲルとなる。1層目と2層目が違う屈折率の2層一体型エアロゲルを製作する場合は、1層目に屈折率が高いアルコゲルを持ってきたほうが、ケース中で密度の大きいアルコゲルが下にくるので都合が良いように思われる。実際、そのようにして製作した。また、1層目をup layer、2層目をbottom layerと呼ぶ事にする。

この時、ケースの中でゲル化してる溶液から気泡が出てくる事がある。この気泡は図3.9様にケースの底の方に多く現れる。気泡が出た場合はゴムベラなどでその気泡をな

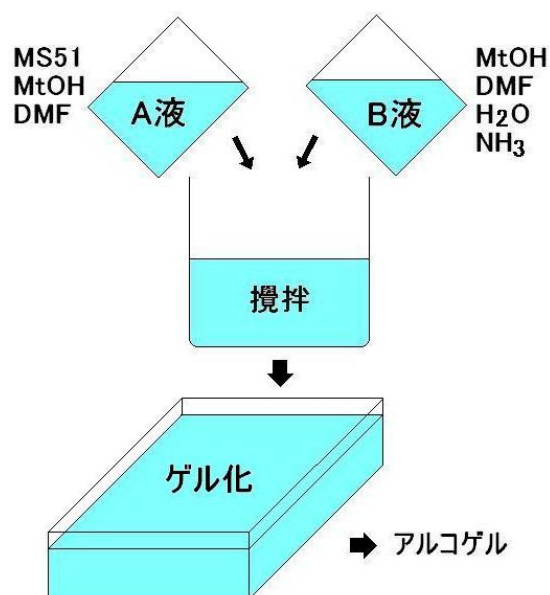


図 3.8: エアロゲルの調合

ぞってやり気泡を溶液中から取り除いてやる。ゲル化する時間を考えると素早くするのが好ましい。また、この図 3.9 の様に気泡が目立つ場合はケースが何回も使われていく内に疲弊して図 3.10 の様になっている場合が多いので出来るだけ、溝が見られるケースを使用しないようにした方が好ましい。また、溝が見られるケースだと、図 3.11 の様にアルコゲルの底面に溝がケースの溝に対応した溝が出来てしまうので、その点からも溝が見られるケースは避けるべきである。

アルコゲルからエアロゲルになるまでには次の工程を必要とする。

1. 出来たアルコゲルをアルコール蒸気中に保存し、ゲルの構造を強固にさせる。(熟成期間：10 日間)
2. アルコゲルをエタノール液中に浸し反応後に出てくる水やアンモニアを取り除く。(洗浄 1：3 日間)
3. アルコゲルをケースから取り出し、疎水化処理を行う。洗浄 1 のエタノール液中に疎水化剤であるヘキサメチルジシラザンをエタノールの 10～20%くらい入れてやる。(疎水化：3 日間)
4. 疎水化液中から取り出したアルコゲルを新しいエタノール液に浸しアルコゲルを洗浄する。(洗浄 2-1：3 日間)
5. 再び、新しいエタノール液を用意してその液中にアルコゲルを浸す。(洗浄 2-2：3

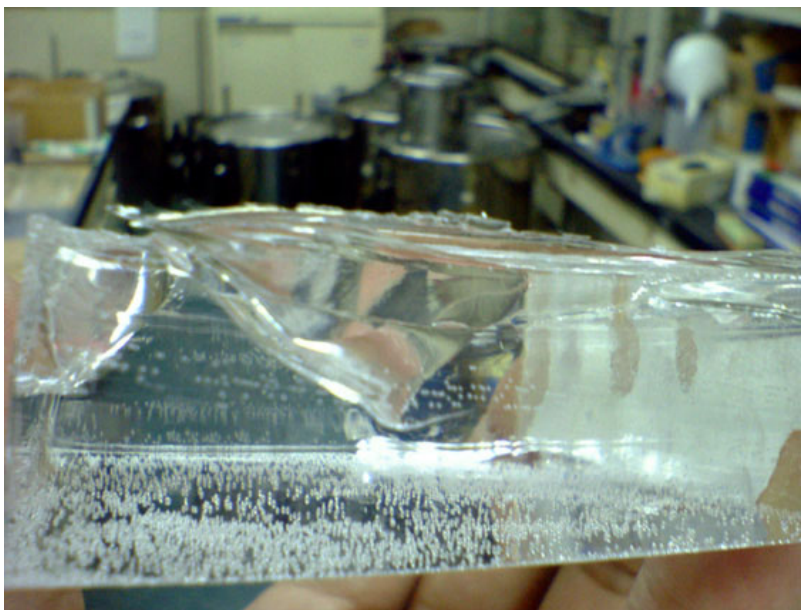


図 3.9: アルコゲル内に出来た気泡

日間)

6. 最後にもう一度、新しいエタノール液を用意してその液中にアルコゲルを浸す。(洗浄 2-3 : 3 日間)
7. 洗浄 2-3 後のアルコゲルを CO₂ オートクレーブで超臨界乾燥することで晴れてエアロゲルとなる。

調査してから、エアロゲルになるまでの全工程期間はおよそ 27 日間になる。図 3.12 に実際に製作した 2 層一体型エアロゲルの写真を示す。



図 3.10: 疲弊したエアロゲルのケース

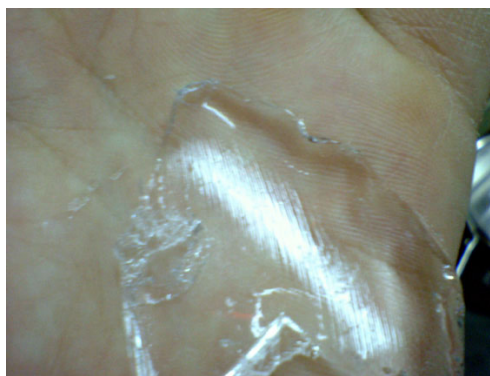


図 3.11: アルコゲルに出来た溝

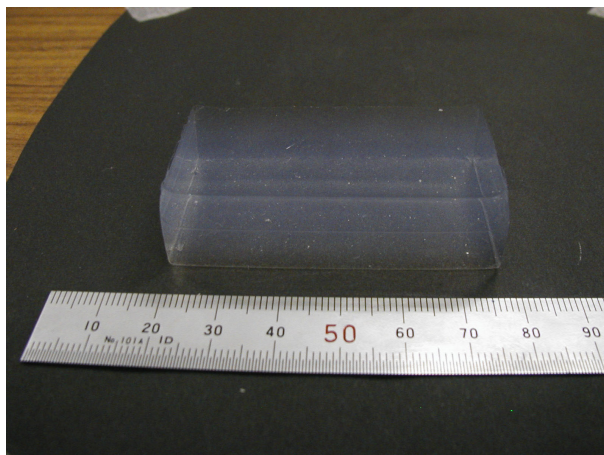


図 3.12: 2層一体型エアロゲル

スケジュール

現段階では、2004年の6月、9月、11月の3回、2層一体型エアロゲルを製作している。

2004年6月 → 2004年9月 → 2004年11月 →

製作した2層一体型の target index(エアロゲルになった時に想定される屈折率)を表3.3にした。Belle detector にエアロゲル RICH を配置する際に、photon detector とエアロゲルの間を含め約30cm くらいのスペースしか与えられない。このことから、20cm くらいを photon detector からエアロゲルまでのスペースに使う事が出来る。その事を考慮した場合、focusing タイプとしてのエアロゲルの組み合わせとしては、 $n=1.050&1.055$ が挙げられる。焦点距離は厚さを1.5cm(各々が0.75cm)とした場合、およそ14cm くらいになる。屈折率が1.050のエアロゲルに関しては既に最適化されている。最適化した調合比を得るにはまず、屈折率を決めるのに重要になってくるMS51の量を変えてエアロゲルを製作する。その際の他の薬品はある程度変えずに製作する。そして、大体想定した屈折率が出来るとなったらその他の薬品の調合比を変えて、想定した屈折率により近いもので透過長が良い調合比を選択する。

実際の調合比は過去に経験則より求められたMS51に対するMtOHの量を算出する式(3.3)

$$MtOH[mol] = 316.41 \times \exp \left\{ \frac{-16.485 \times (n - 1)}{0.258} \right\} \quad (n : \text{目標とする屈折率}) \quad (3.3)$$

よりMtOHの量を算出し、それに加えてH₂O、NH₃の量を変えていく。出来上がりの屈折率は溶媒としてMtOHだけを使う分にはこの式のnに代入した値になるのだが実際にはここで求めたMtOHの量を体積比でMtOH&DMFの使用量を決めている。(ちなみにMtOHとDMFの割合を表記する際は、百分率を用いる。)その為に、DMF

を溶媒に用いた場合には式 (3.3) に代入した目標とする屈折率とは違った屈折率を持つ屈折率になってしまう。実際に出来上がったエアロゲルの屈折率が $n=1.050$ の時の最適化された調合比は、MS51 を 1mol とした時、MtOH=3.68mol、DMF=15.72mol(85%)、H₂O=28mol、NH₃=0.065mol になっている。

ここで、出来上がったエアロゲルの屈折率が $n=1.050$ より高いものを想定する場合は MS51 の量を増やし、 $n=1.050$ よりも低いものを想定する場合は MS51 の量を減らして屈折率を予想してエアロゲルを製作する。この時、調合比を変えるのは主に MS51、MtOH、H₂O である。そして、その $n=1.050$ から違う屈折率のエアロゲルを作る為に変えた調合比で触媒である NH₃ の量を調節して、ゲル化時間が数分になるようにする。

表 3.3: 製作した 2 層一体型の (target index) 想定屈折率

エアロゲルの製作時期	focusing 用	defocusing 用	左記以外
2004 年 6 月	$n=1.050\&1.055$	$n=1.030\&1.060$	
2004 年 9 月	$n=1.050\&1.055$	$n=1.030\&1.050$	$n=1.050\&1.050$
2004 年 11 月	$n=1.050\&1.055$		$n=1.035\&1.050$ 、 $n=1.040\&1.050$ $n=1.045\&1.050$ 、 $n=1.050\&1.050$

次章では製作した 2 層一体型エアロゲルの性能を評価する。

第4章 2層一体型エアロゲル輻射体の性能評価

2層一体型のエアロゲルを評価するには、製作した2層一体型エアロゲルの屈折率、透過長を測定してやることでわかる光学的特性面からの評価と製作した2層一体型エアロゲルを輻射体としたRICHに実際にビームに当てることで得られるチェレンコフリングイメージからの評価がある。

4.1 光学的特性からの性能評価

透過率の測定

RICH 検出器の開発において、輻射体に用いるエアロゲルの透明度(透過率)は重要になってくる。透過率とは、ある輻射体に対して入射したある強度をもつ光(レーザー)が輻射体を通った後、どれだけその強度を残しているかを見た割合である。RICHに関して言えば、エアロゲルを通過する光が多ければリングが鮮明に観測でき検出器の性能向上に大きく貢献することが出来る。透過率の測定には分光光度計(HITACHI U-3210)を用いた。(図4.1)この分光光度計はタングステンランプ及び、重水素ランプを光源とし、200~800(nm)の波長領域でのエアロゲルの透過率を測定する事が出来る。透過率を測定する時のセットアップ図を図4.2に示す。測定した透過率は図4.3の様になる。



図 4.1: 分光光度計

実際に、エアロゲルの透過率を評価する際はエアロゲルの厚さが個々のゲルで変わって

Light Source : Iodine-Tungsten Lamp,
: Deuterium Lamp
Range of Wavelength : 250-800nm

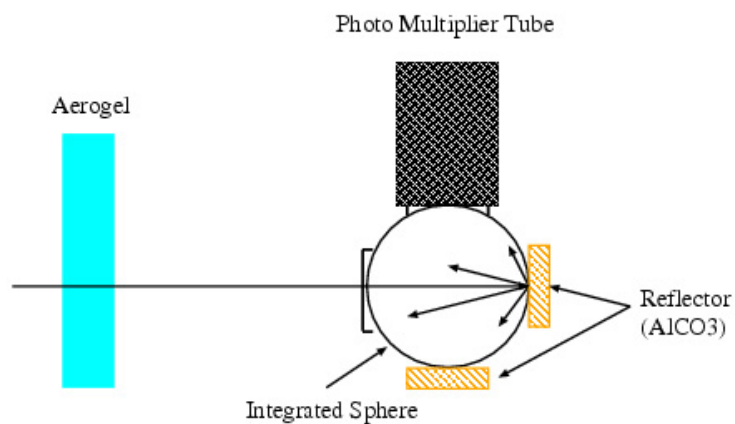


図 4.2: 透過率測定の設定アップ図

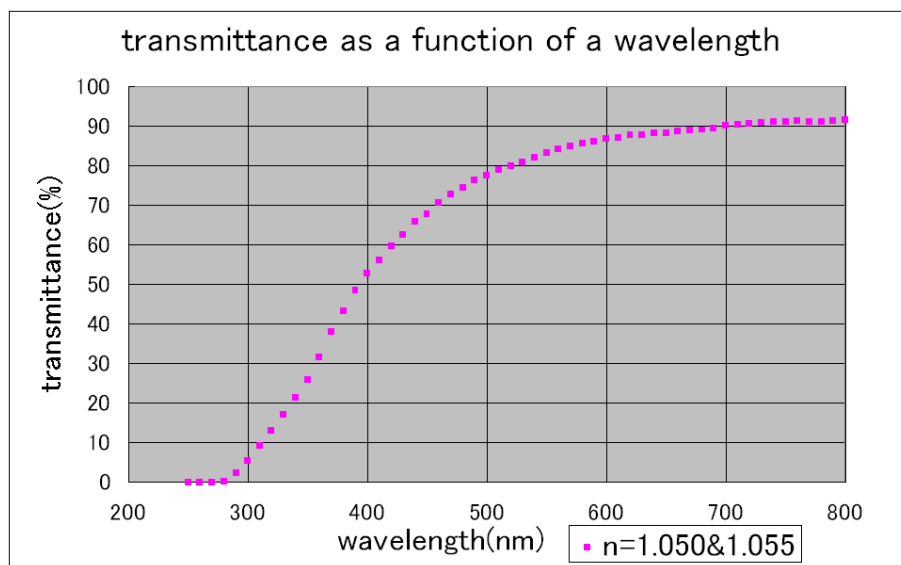


図 4.3: 実際に測定した 2 層一体型エアロゲルの透過率

くるので波長領域 400nm での透過率を用い透過長 (Λ) を求めて評価の対象としている。
透過長の式は以下のようにになっている。

$$\frac{T}{T_0} = \exp\left(-\frac{d}{\Lambda}\right) \quad (4.1)$$

ここで、 T_0 はエアロゲルを分光光度計内に入れていないときの光の強度、 T はエアロゲルを入れたときの光の強度、 d はエアロゲルの厚さを表している。この時、我々が従来、透過長 Λ と呼んでいる物は、正確に言うとエアロゲル内での Rayleigh 散乱による散乱長を表している。Rayleigh 散乱とは、均一でない物質中を波長 λ の光が通過する時、物質中の構成粒子の大きさと波長が同じ様な時に起こる散乱の事である。本来ならば、式 4.1 で表される透過長は散乱長と吸収長の重ね合わせであるが分光光度計による測定では、散乱長と吸収長をそれぞれ別個に測定を行う事が容易ではなく、実際は散乱長と吸収長の重ね合わせとして透過長を測定している。実際には我々の分光光度計による透過率の測定では、散乱による影響が大概を占めており、吸収はほとんど影響しない事が知られている。また、2層一体型エアロゲルに関しては up layer、bottom layer を併せて透過率を測定してそこから透過率を出した。

フラウン・ホーファー (Fraunhofer) 法による屈折率の測定

屈折率の測定はフラウン・ホーファー法により測定する。図 4.4 に測定の様子を示す。

405(nm) の紫色半導体レーザーと回転台を設置し、回転台中央からスクリーンまでの距離 L を測る。その後エアロゲルを回転台の上に乗せレーザー光を照射し、スクリーン上のレーザースポットの原点からの偏差 x を求める。エアロゲルを回転させた時の最小の偏差 x を x_{min} とすると、以下の式で屈折率が計算できる。

$$\theta \cong \tan^{-1}\left(\frac{x_{min}}{L}\right), n = \frac{\sin\left(\frac{\theta+\delta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (4.2)$$

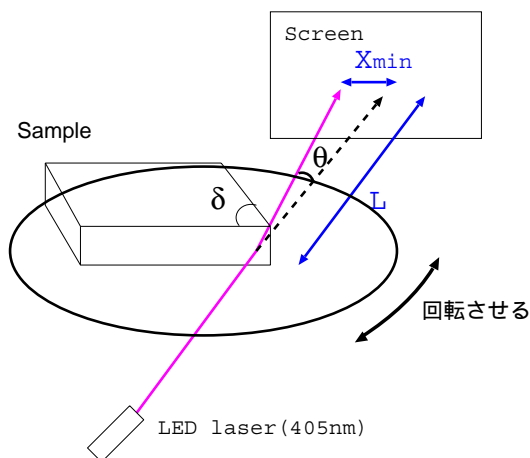


図 4.4: フラウンホーファー法による屈折率の計測

4.2 製作した2層一体型エアロゲル

前章でも記したが、2004年6月、9月、11月の3回にわたり、2層一体型エアロゲルの製作を行った。ここで、簡単の為に製作したエアロゲルの時期を追って vol.1、vol.2、vol.3 と呼ぶ事にする。製作したエアロゲルの詳細は以下の様になる。

- vol.1(2004年6月) 2層一体型エアロゲルとして初めて、表(4.1)にのような focusing タイプと defocusing タイプ 2種類の2層一体型エアロゲルを製作した。defocusing タイプの $n=1.030\&1.060$ の組み合わせの2層一体型エアロゲル(超臨界乾燥@松下電工)は94%(17/18個)ほぼ完全に分離してしまっていた。かろうじて残った1つをビームテストに用いた。出来上がったエアロゲルは透過長、及び屈折率とも満足いくものではなかった。

2004年6月	target index	
focusing タイプ	1.050(式 3.3 で n=1.040)	1.055(式 3.3 で n=1.045)
	H2O:28mol,DMF:75%	H2O:27mol,DMF:75%
		H2O:24mol,DMF:75%
		H2O:21mol,DMF:75%
defocusing タイプ	1.030(式 3.3 で n=1.030)	1.060(式 3.3 で n=1.060)
	H2O:36mol,DMF:100%	H2O:24mol,DMF:0%
	H2O:32mol,DMF:100%	H2O:22mol,DMF:0%
	H2O:28mol,DMF:100%	H2O:19mol,DMF:0%

表 4.1: 2004 年 6 月 (vol.1) に製作したエアロゲルの詳細

2004年9月	target index	
focusing タイプ	1.050(式 3.3 で n=1.040)	1.055
	H2O:27mol:DMF:80%	H2O:24mol,DMF:85%(式 3.3 で n=1.044)
		H2O:27mol,DMF:80%(式 3.3 で n=1.044)
	H2O:28mol:DMF:85%	H2O:24mol,DMF:85%(式 3.3 で n=1.043) H2O:27mol,DMF:85%(式 3.3 で n=1.043&n=1.044)
defocusing タイプ	1.030(式 3.3 で n=1.030)	1.050(式 3.3 で n=1.040)
	H2O:36mol,DMF:0	H2O:28mol,DMF:80%
etc	1.050(式 3.3 で n=1.040)	1.050(式 3.3 で n=1.040)
	H2O:28mol,DMF:80	H2O:28mol,DMF:80

表 4.2: 2004 年 9 月 (vol.2) に製作したエアロゲルの詳細

- vol.2(2004年9月) 製作した2層一体型エアロゲルは、表 4.2 のようになっており vol.1 の defocusing タイプ (n=1.030&1.060) のほとんどが2層一体型エアロゲルが超臨界乾燥後に分離してしまっていたので、その結果を踏まえ defocusing タイプとして n=1.030&1.050 の組み合わせの物を製作する。がこの組み合わせにおいても完全な分離まではいかないが 2/2 個で分離しかけていた。vol.1 よりは透過長、屈折率とも向上しているが、以前に同じ調合比で製作したエアロゲルの水準に透過長、屈折率共に及ばなかった。
- vol.3(2004年11月) 全体として、想定した屈折率よりも少し低い屈折率で出来ては来たが focusing タイプとして製作した target index n=1.050&1.055(実際にの屈折率は n=1.0450&1.0478) の2層一体型エアロゲルで透過長=41.13mm を達成した。また、vol.2 での defocusing タイプ (n=1.030&1.050) の2層一体型エアロゲルも超臨界乾燥で分離しかかってしまったので、どのくらいの屈折率の差まで2層が超臨界乾燥をしたときに分離しないで耐えられるかというのを見る為に、表 (4.3) にもあるように target index が n=1.035&1.050、n=1.040&1.050、n=1.045&1.050 の2層一体型エアロゲルを製作した。その結果、サンプル数は少ないが n=1.035&1.050 では 100%(2/2 個)、n=1.040&1.050 では 67%(2/3 個) で残る 1 つについても分離しかかっていない。n=1.045&1.050 に関しては 0%(0/3 個) であった。この事から、defocusing タイプ (屈折率が離れているもの) では、2層の間に、2層の屈折率の中間くらいの層を加えるなどの新しい製作方法を考える必要がある。また、今回製作

2004年11月	target index	
focusing タイプ	1.050(式 3.3 で $n=1.040$)	1.055(式 3.3 で $n=1.043$)
	H2O:28mol:DMF:85%	H2O:24mol,DMF:85%
etc	1.035(式 3.3 で $n=1.028$)	1.050(式 3.3 で $n=1.040$)
	H2O:30mol,DMF:85%	H2O:28mol:DMF:85%
	1.040(式 3.3 で $n=1.031$)	
	H2O:30mol,DMF:85%	
	1.045(式 3.3 で $n=1.036$)	
H2O:30mol,DMF:85%		

表 4.3: 2004年11月 (vol.3) に製作したエアロゲルの詳細

した2層一体型エアロゲルは $n=1.050$ について特に透過長について言えば過去に製作されたエアロゲルに肩を並べるぐらいの値を記録した。

表 4.1、4.2、4.3 は製作してきた2層一体型エアロゲルの組み合わせを調合比ごとに分けて記したものになっている。

また、図 4.5、4.6 は分離しかけている2層一体型エアロゲルと分離してしまっている2層一体型エアロゲルになっている。

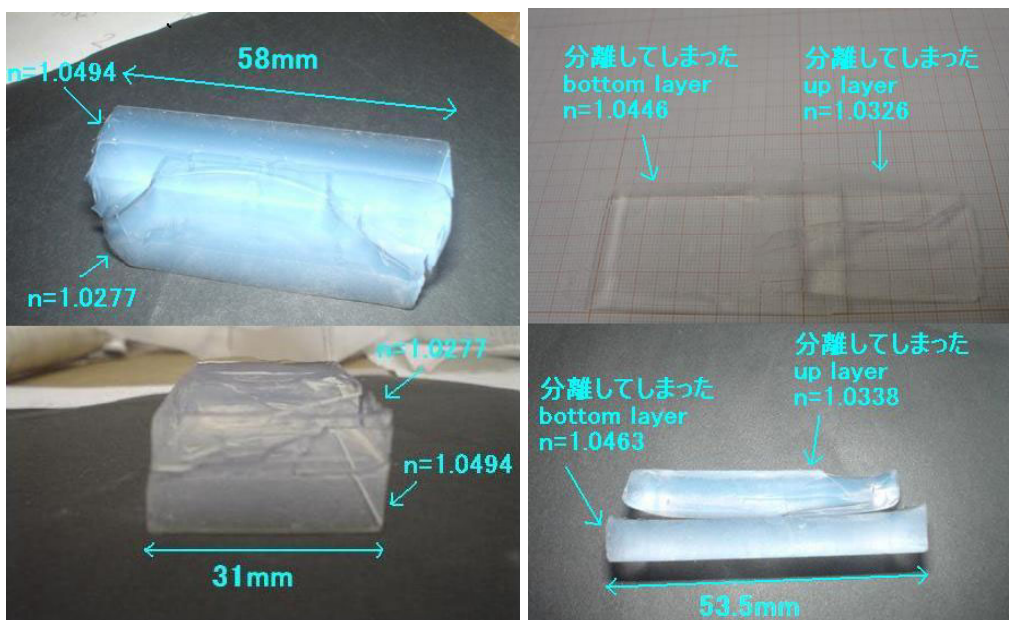


図 4.5: 分離しかけている2層一体型エアロゲル

図 4.6: 分離してしまった2層一体型エアロゲル

4.2.1 製作したエアロゲルの屈折率の比較

図 4.7、4.8、4.9、4.10、4.11、4.12、4.13、4.14 は2004年6月に製作したエアロゲルの、図 4.15、4.16 は2004年9月に製作したエアロゲルの、図 4.17、4.18 は2004年11

月に製作したエアロゲルの想定屈折率 (target index) と実際にフラウンホーファー法により求めた屈折率 (measured index) の関係を示したものである。これらのグラフのデータの調合比の前に書いてある文字 (数字) は 2:2 層で製作した、S(single): 単層で製作した、M: 松下電工で超臨界乾燥した、C: 千葉大学で超臨界乾燥をした。という事を表している。(例えば、2M(H₂O:32mol&DMF:0%) なら松下電工で超臨界乾燥をした 2 層一体型エアロゲルという事になる。) また、図 4.15、4.16 で同じ調合比でも式 3.3 を変えているので、調合比の後にそれを記した。

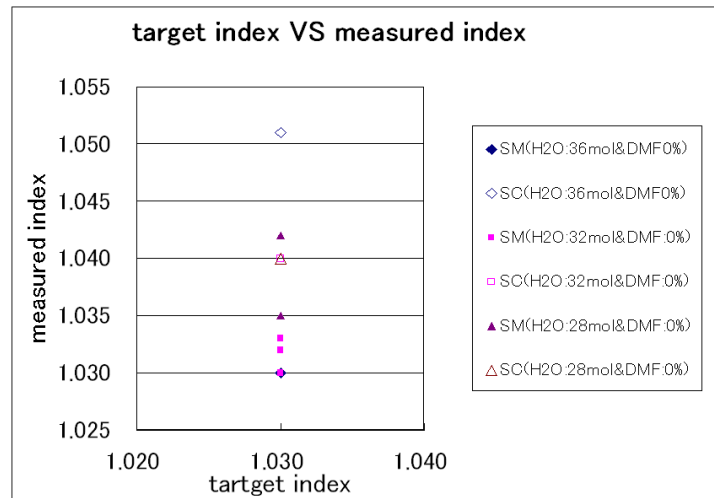


図 4.7: vol.1 で製作した単層のエアロゲルでの屈折率 (target index $n=1.030$)

図 4.7、4.8、4.9、4.10、4.11、4.12、4.13、4.14 は vol.1 のエアロゲルの target index $n=1.030$ 、1.050、1.055、1.060 と実際に測定した屈折率の関係を表した図になる。($n=1.050$ に関してはほぼ調合比の最適化が出来ている。) この時のエアロゲルは、松下電工と千葉大学の 2ヶ所のオートクレーブを使用して 2 層一体型エアロゲルを超臨界乾燥させた。図 4.7、4.9、4.11、4.13 は単層のエアロゲルの target index と測定した屈折率の関係を示したものである。この図から見てとれるように全体的に target index よりも高い屈折率となってしまった。また、図 4.8、4.10、4.12、4.14 は 2 層一体型の各層の target index と屈折率の関係を表した図になる。単層と同じく全体的に想定した屈折率よりも測定した屈折率が多い事が見てとれる。また、同じ target index でなおかつ同じ調合比だと、単層で製作したエアロゲルよりも 2 層一体型として製作したエアロゲルの各層の屈折率の方が、わずかなが小さくなっている事が伺える。

図 4.15、4.16 は vol.2 の単層のエアロゲル及び 2 層一体型エアロゲルの各層の target index $n=1.050$ 、1.055 とその屈折率の関係を表した図になる。この時、主に $n=1.055$ の調合比を変えてエアロゲルを製作した。図 4.15 を見ると target index $n=1.050$ に関して



図 4.8: vol.1 で製作した 2 層一体型エアロゲルでの target index $n=1.030$ の屈折率

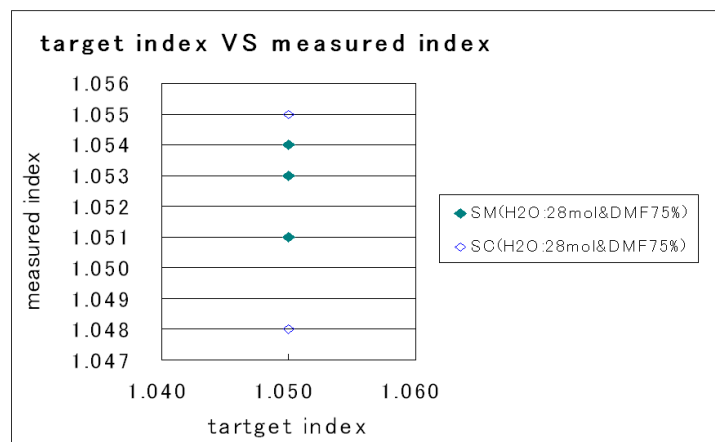


図 4.9: vol.1 で製作した単層のエアロゲルでの屈折率 (target index $n=1.050$)

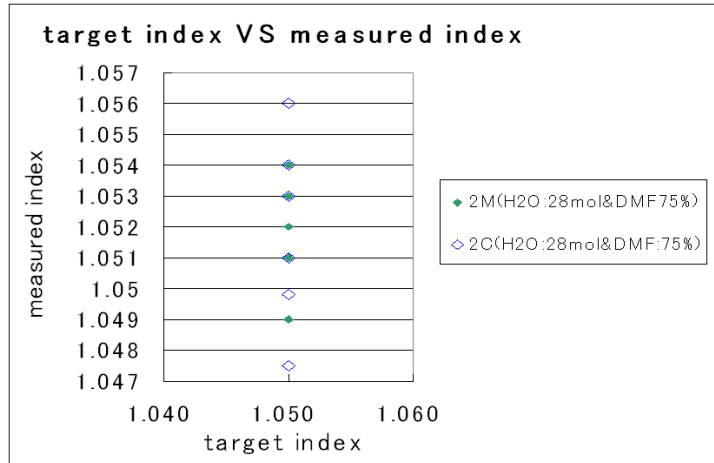


図 4.10: vol.1 で製作した 2 層一体型エアロゲルでの target index $n=1.050$ の屈折率

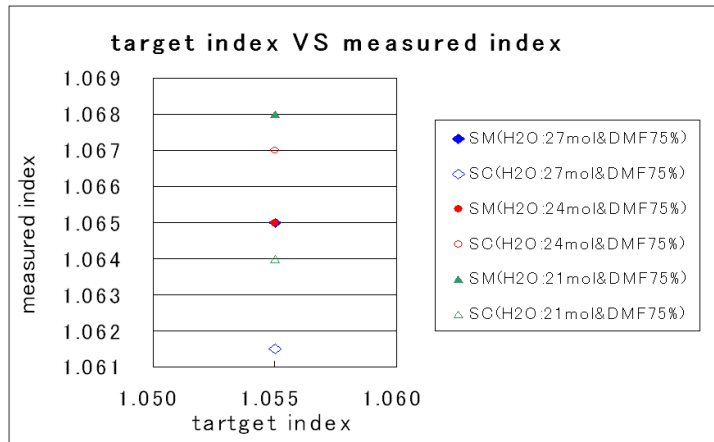


図 4.11: vol.1 で製作した単層のエアロゲルでの屈折率 (target index $n=1.055$)

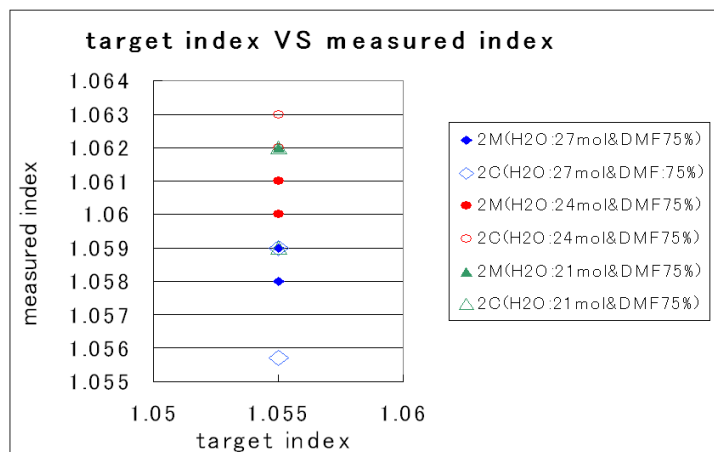


図 4.12: vol.1 で製作した 2 層一体型エアロゲルでの target index $n=1.055$ の屈折率

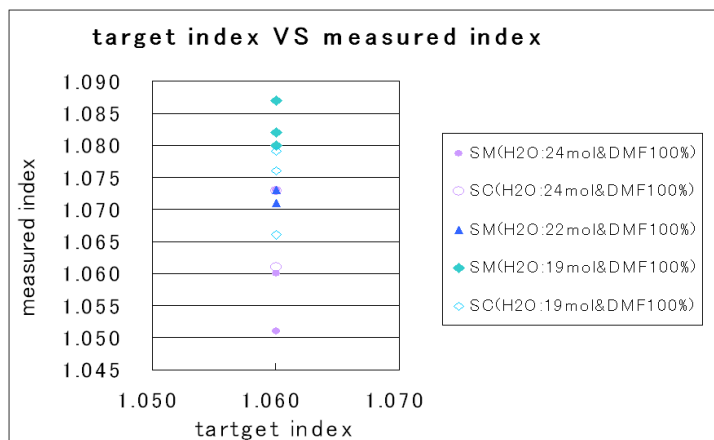


図 4.13: vol.1 で製作した単層のエアロゲルでの屈折率 (target index $n=1.060$)

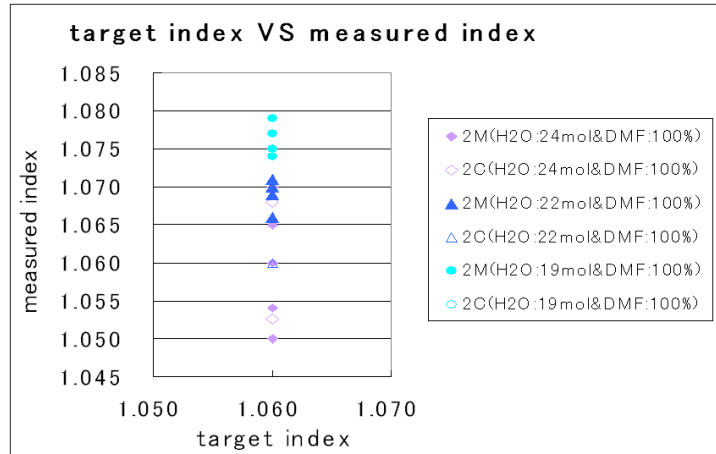


図 4.14: vol.1 で製作した 2 層一体型エアロゲルでの target index $n=1.060$ の屈折率

は大体その通りの屈折率になっているが、想定屈折率 $n=1.055$ に関して言えば、vol.1(図 ??) の時よりも target index に近づいてはいるもののまだ屈折率は高くなっている。図 4.16 に関しては屈折率のバラつきはあるものの target index に近い屈折率になっている。vol.2 のエアロゲルについても、同じ target index でなおかつ同じ調合比だと、単層で製作したエアロゲルよりも 2 層一体型として製作したエアロゲルの各層の屈折率の方が、わずかだが小さくなっている事が伺える。

図 4.17、4.18 は vol.3 の単層のエアロゲル及び 2 層一体型エアロゲルの各層の target index $n=1.035$ 、 1.040 、 1.045 、 1.050 、 1.055 とその屈折率の関係を表した図になる。2 つの図を比較すると、ここでも、やはり全体的に同じ target index でなおかつ同じ調合比だと、単層で製作したエアロゲルよりも 2 層一体型として製作したエアロゲルの各層の屈折率の方が、わずかだが小さくなっている事が伺える。図 4.17 の target index $n=1.050$ のエアロゲルをみると過去に大体屈折率が $n=1.050$ になっていて、最適化がほぼ出来ているのにも係わらず、やや低い屈折率として出来上がってしまっている。このことは、超臨界乾燥を行う時の動作が関係とあると思われる。

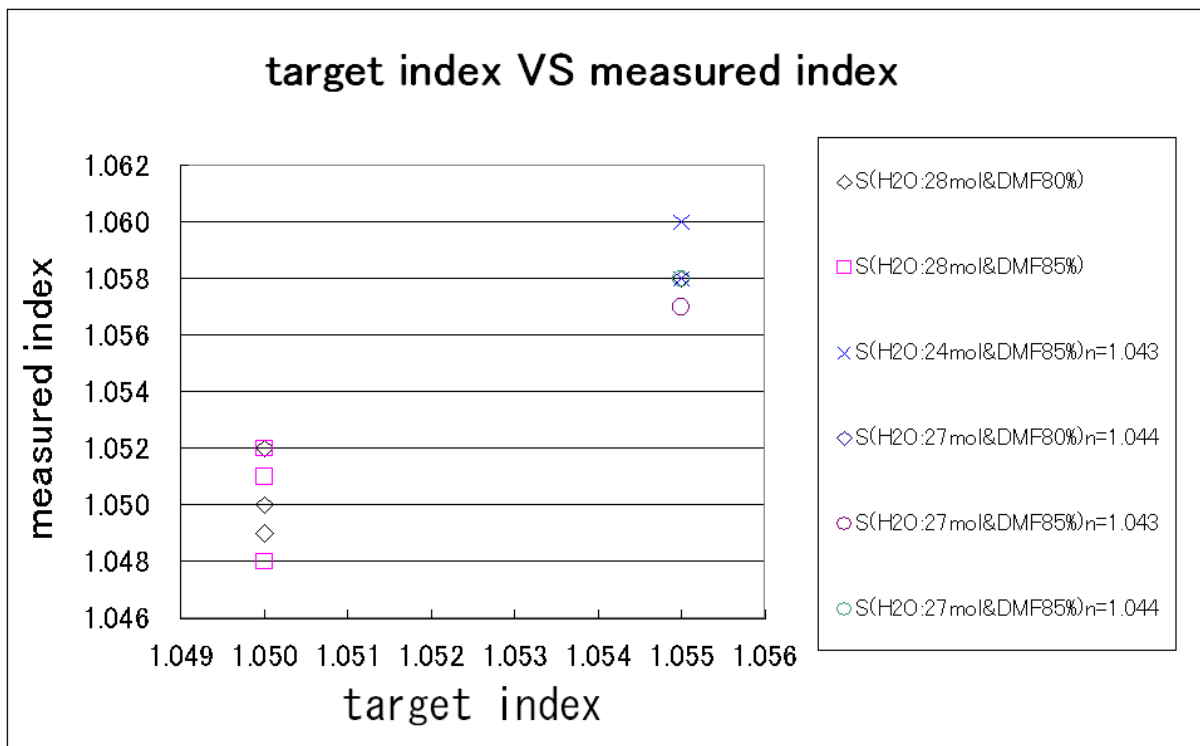


図 4.15: vol.2 で製作した単層のアエロゲル

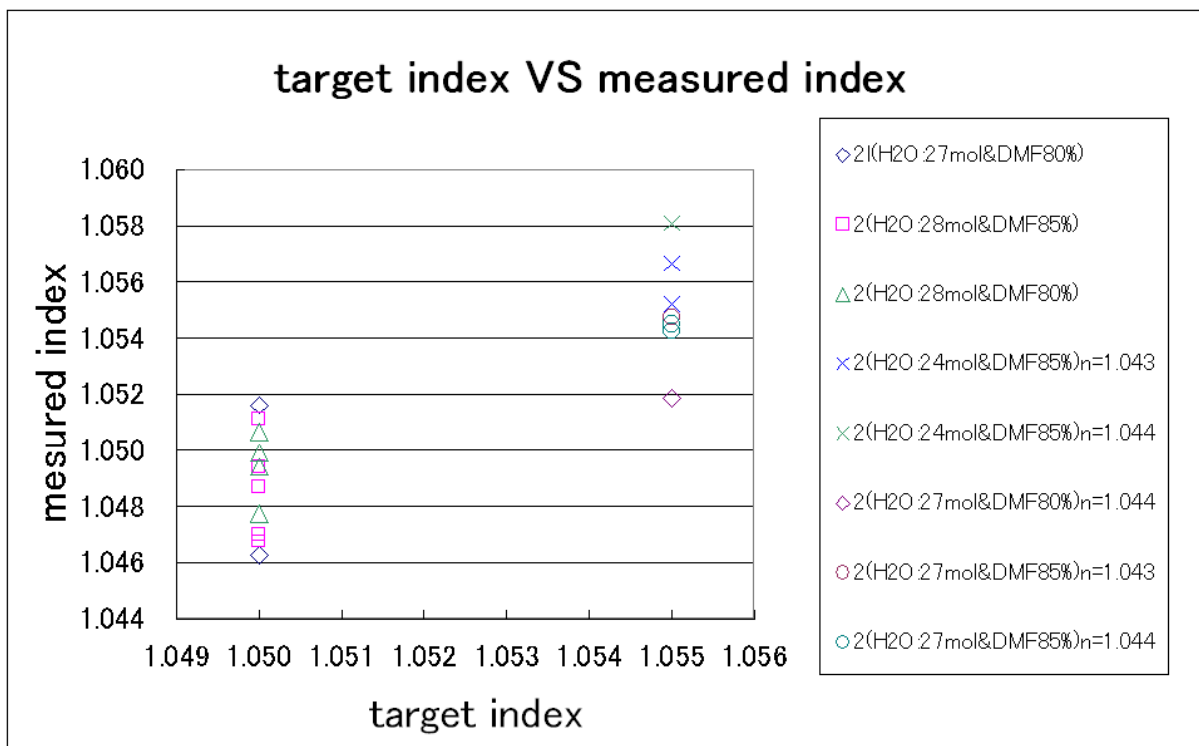


図 4.16: vol.2 で製作した 2 層一体型エアロゲルの各層での屈折率

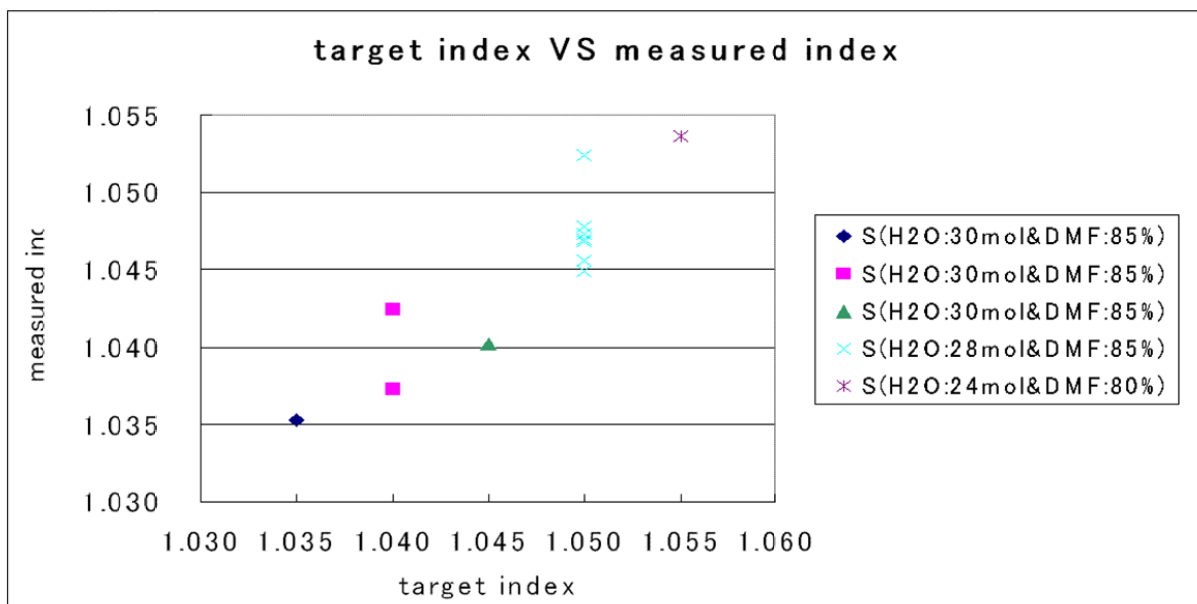


図 4.17: vol.3 で製作した単層のエアロゲル

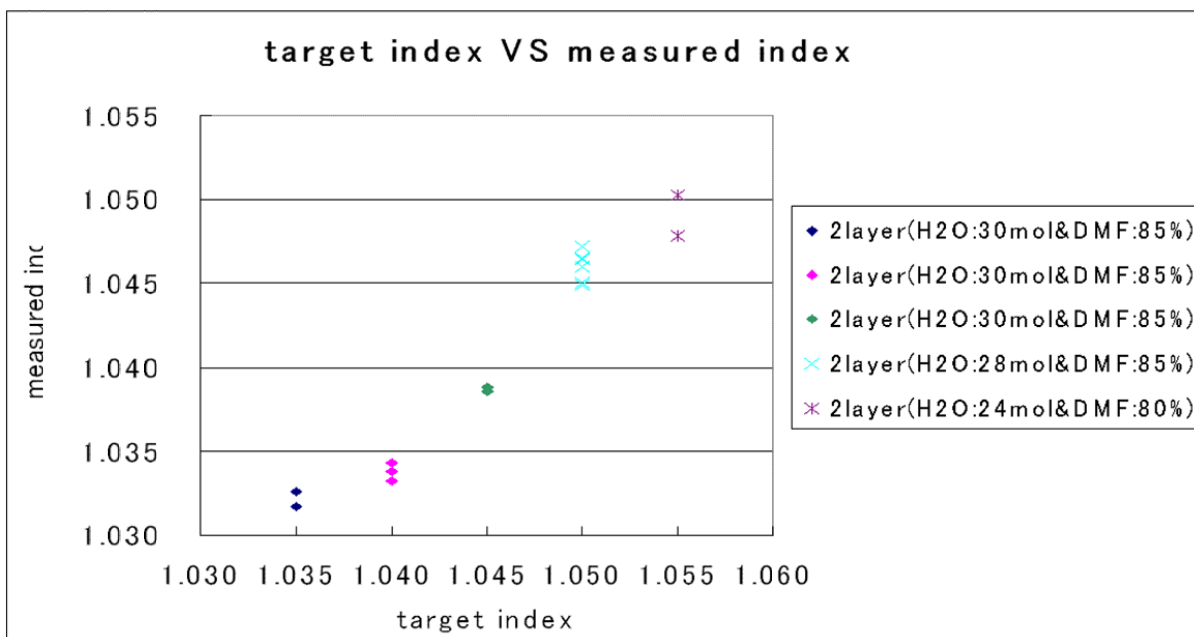


図 4.18: vol.3 で製作した 2 層一体型エアロゲルの各層での屈折率

次に、製作してきた厚さ 7.5mm の single layer のエアロゲルと 2 層一体型エアロゲルの up layer、bottom layer の屈折率を調合比による区別をしないで比較したグラフを (図 4.20、4.21、4.22、4.23) に示す。また、図 4.19 に single layer のエアロゲルと 2 層一体型エアロゲルの up layer、bottom layer のイメージ図になっている。

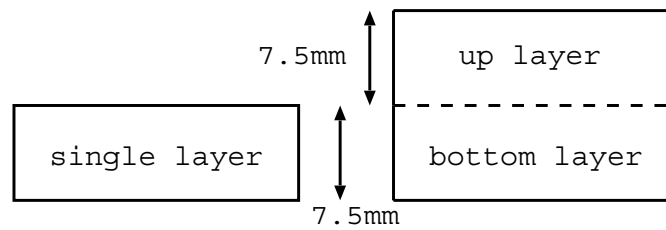


図 4.19: single layer と 2 層一体型の up(bottom) layer のイメージ図

図 4.20 は、vol.1 での single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較になっている。左側は single layer で、右側は up(bottom) layer になっている。

図 4.21 は、vol.2 での single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較になっている。

図 4.22 は、vol.3 での target index $n=1.035$ 、 1.040 、 1.045 の single layer と up layer の屈折率の比較になっており、図 4.23 は、vol.3 での target index $n=1.050$ 、 1.055 の single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較になっている。

図 4.20、4.21、4.22、4.23 から、target index の間での差はあるものの 2 層一体型エアロゲルの各層 (up layer、bottom layer) の屈折率が single layer の屈折率よりも低く出てしまう傾向がある事がわかった。この事については、現在、single layer のエアロゲルで $n=1.050$ 以外の屈折率について最適化が行われているので、最適化された調合比をうまく調節する事で、2 層一体型エアロゲルの屈折率を最適化する事が可能になると思う。

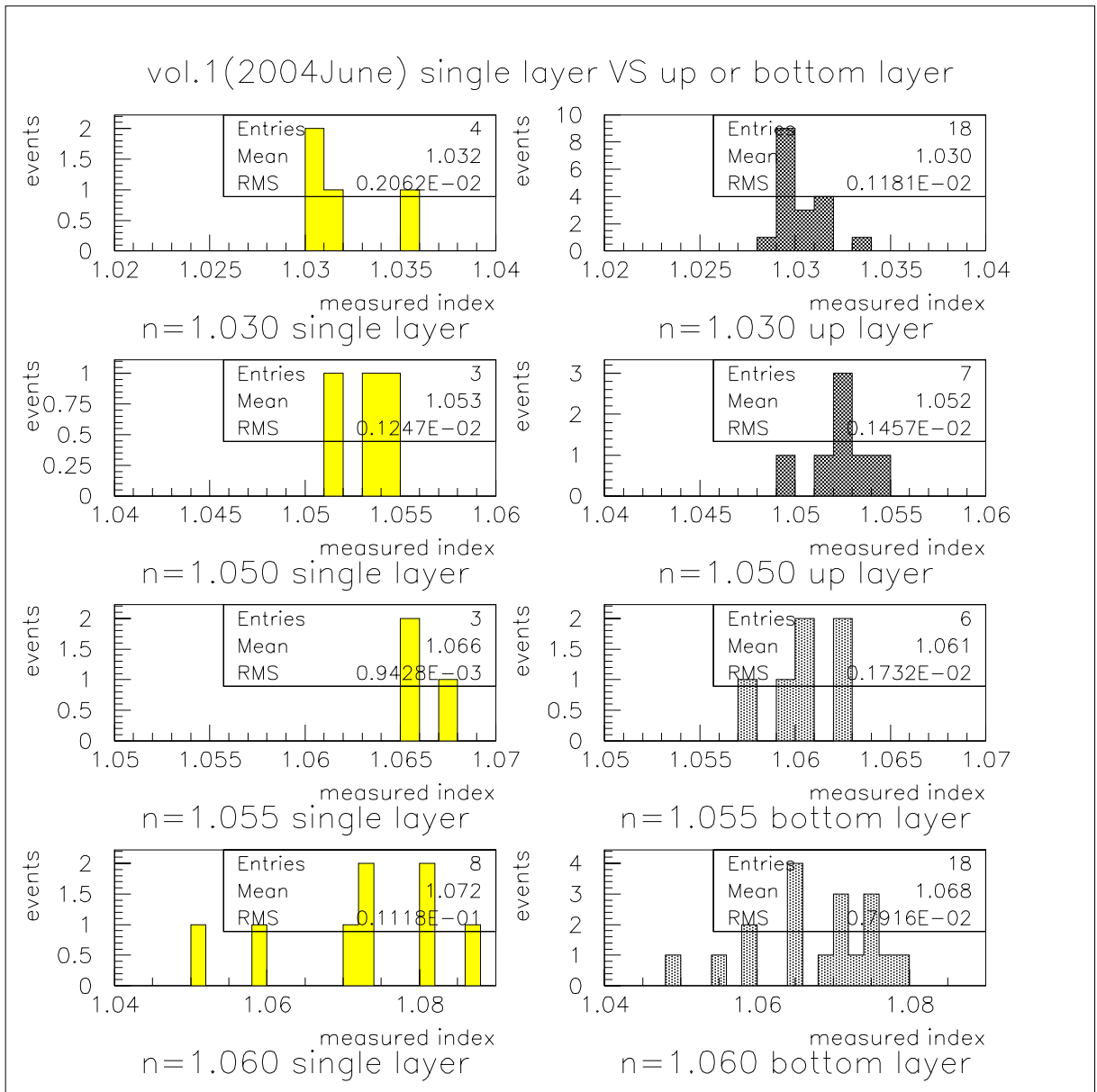


図 4.20: vol.1 の single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較

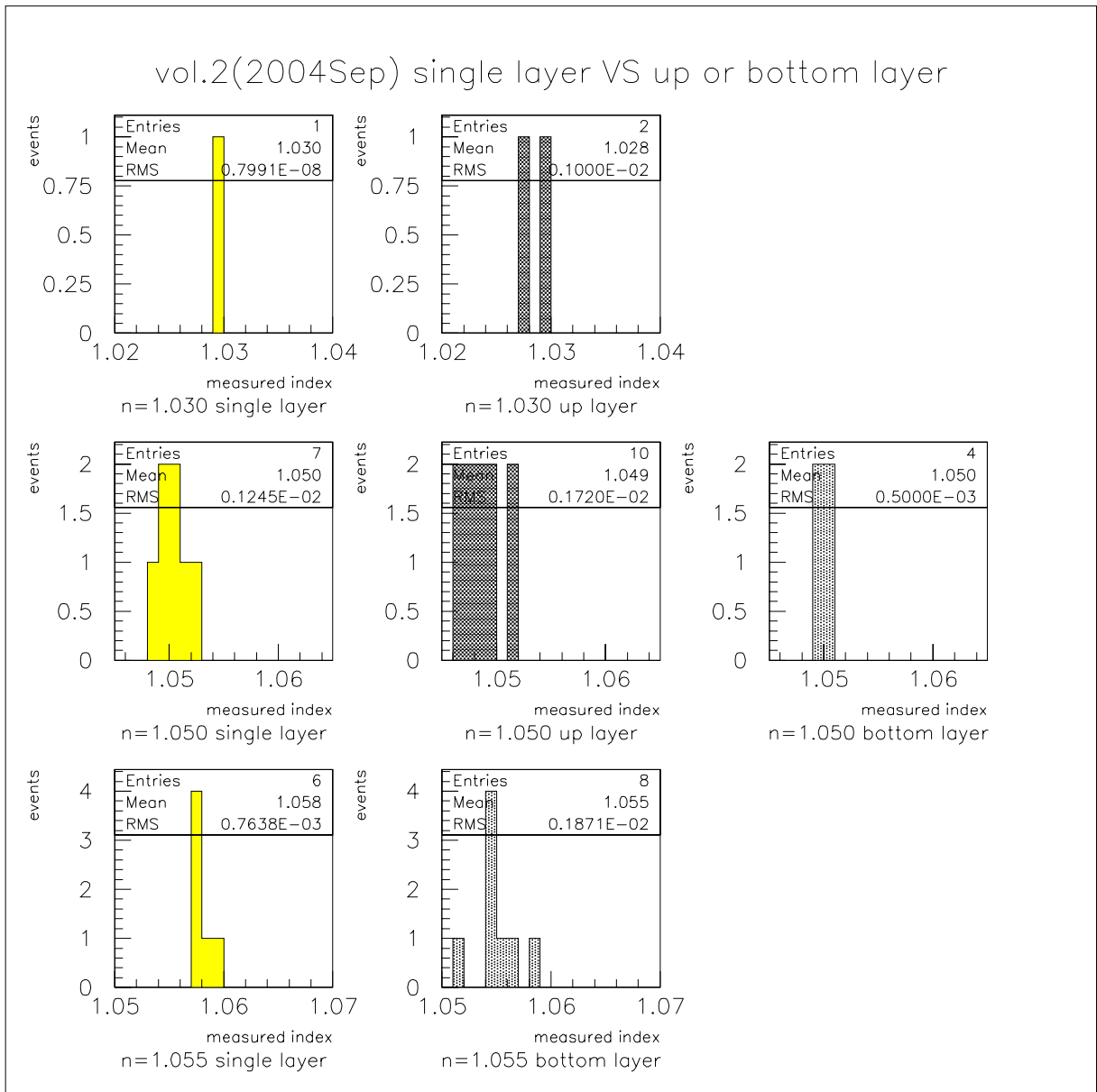


図 4.21: vol.2 の single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較

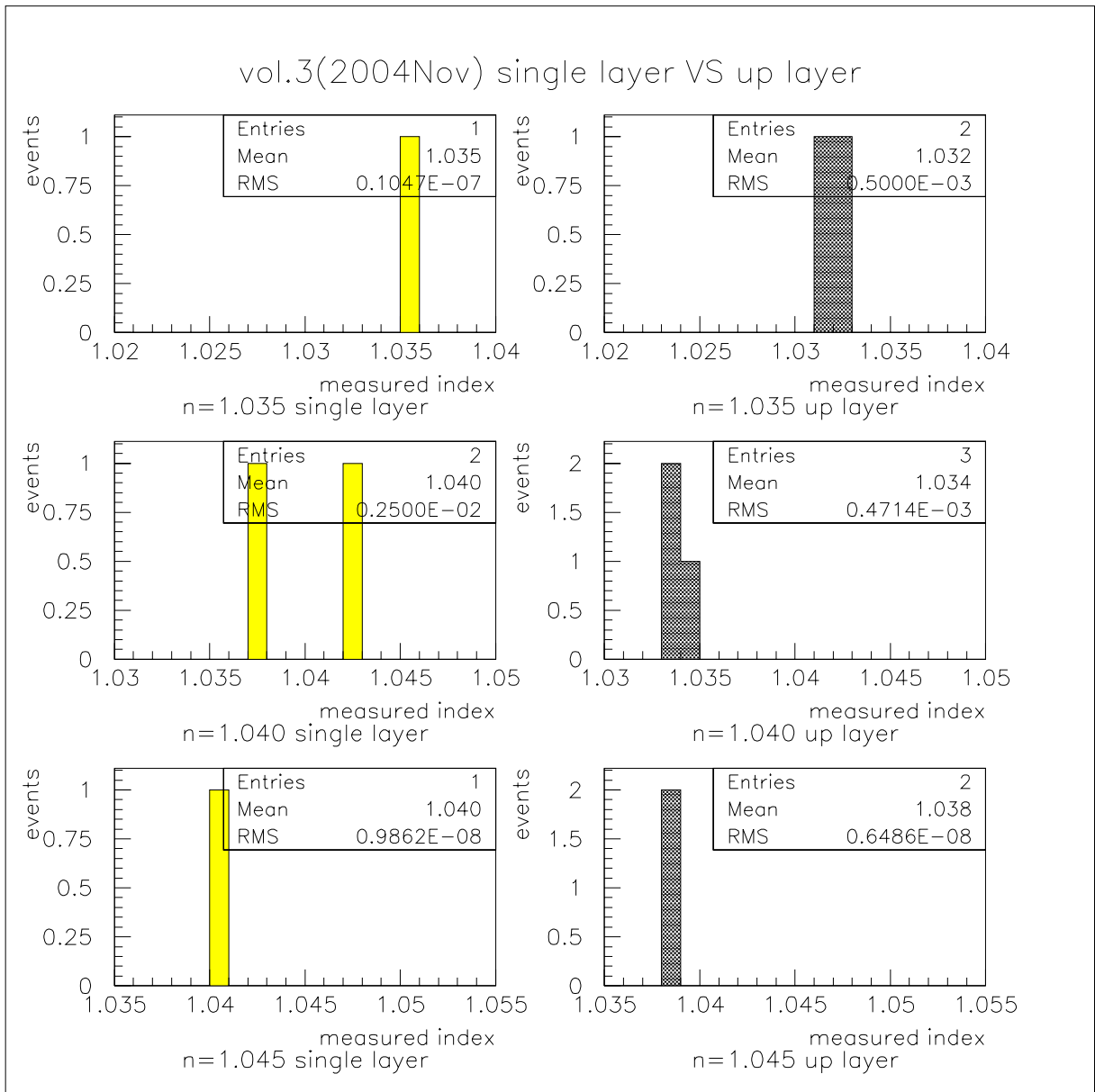


図 4.22: vol.3 の single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較

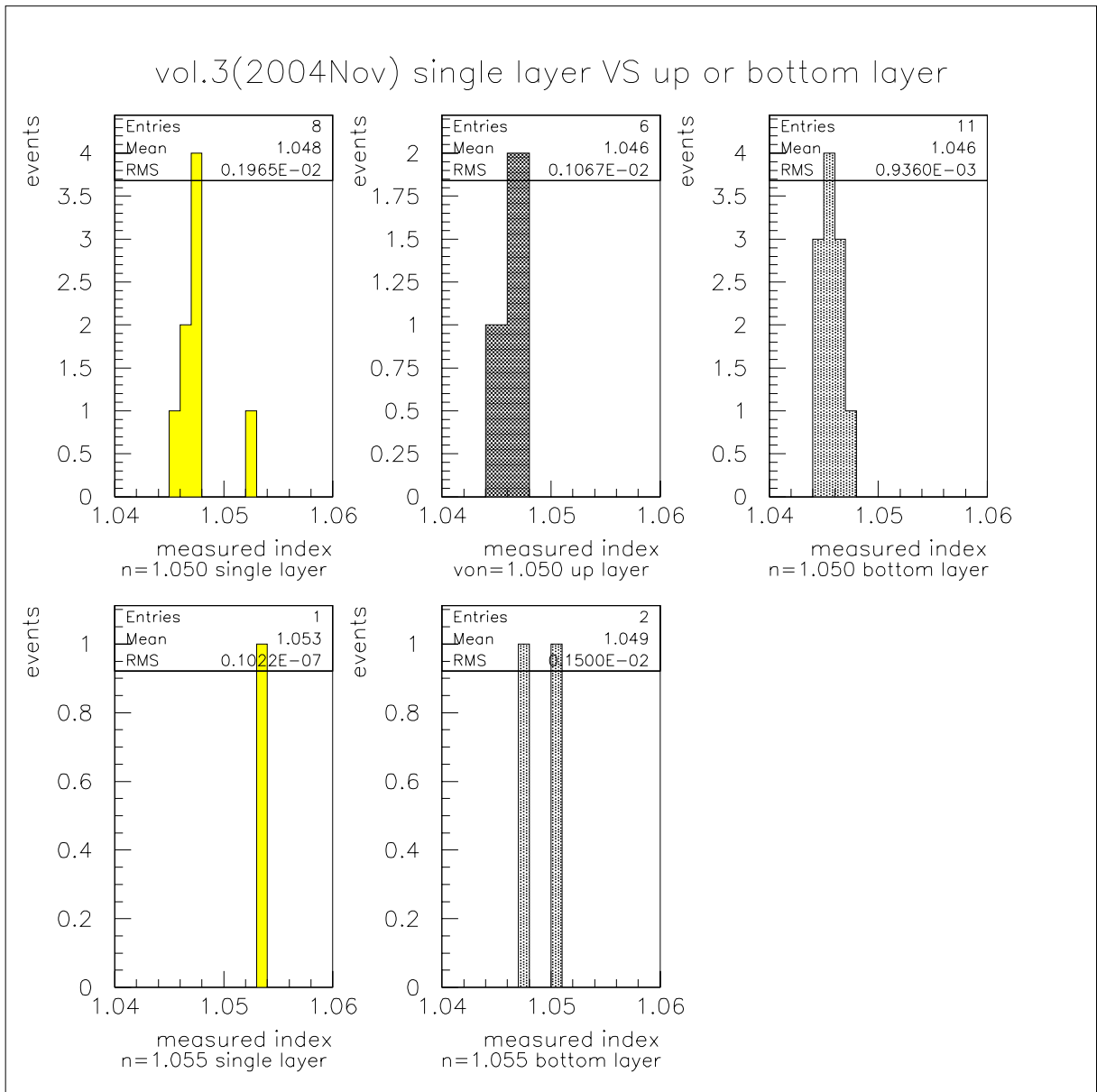


図 4.23: vol.3 の single layer と up(bottom) layer の屈折率の比較

また、図 4.24 に屈折率 $n=1.050$ に関するのこれまで製作してきたエアロゲル (vol.1、vol.2、vol.3) の屈折率の変化を示す。

図 4.24 は 2004 年 6 月に製作された厚さが 1.0cm のエアロゲルと製作してきた 2 層一体型一体型の為に製作した target index $n=1.050$ のエアロゲル (厚さ : 0.75cm) の屈折率を表したものである。vol.1(6 月に製作) は、千葉大で超臨界乾燥をしたエアロゲルも含まれており、屈折率の平均は 1.050 よりも高くなっている。vol.2(9 月に製作) では、target index に近いものになっているが、vol.3(11 月に製作) では target index よりも全体として低い屈折率になっている。これは、松下電工にて超臨界乾燥を行ったときに起因するものと思われる。

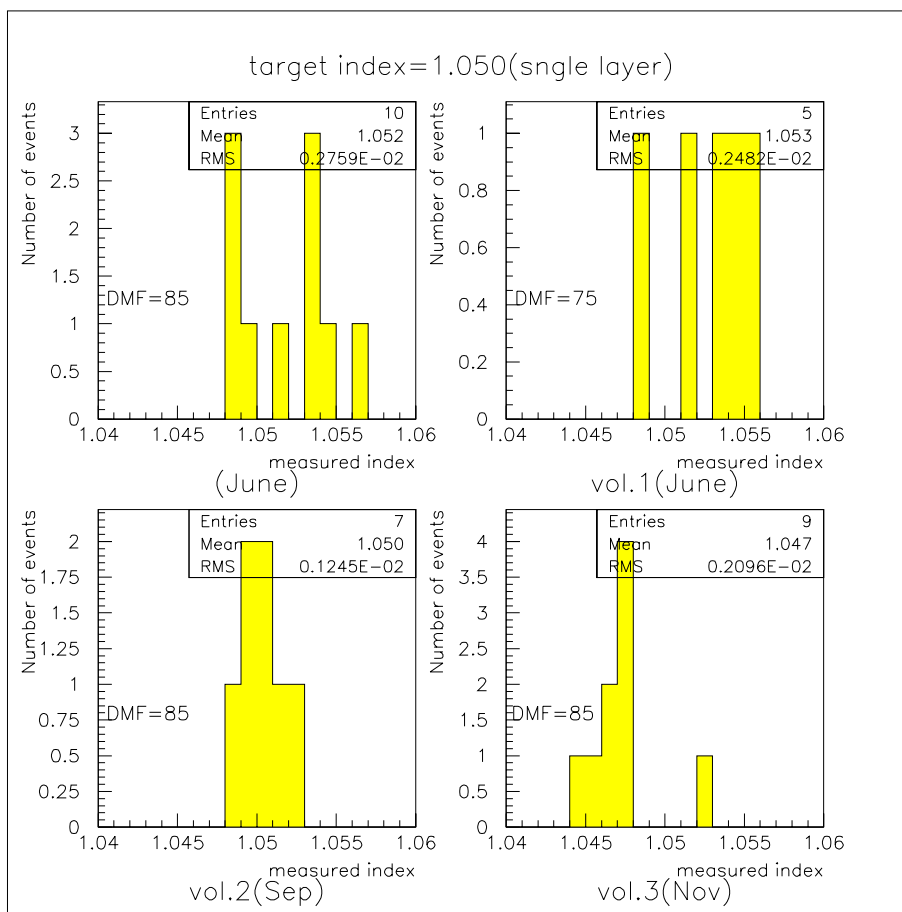


図 4.24: 1.0cm で製作したエアロゲルと 2 層一体型エアロゲルの為に製作したエアロゲルの屈折率の比較 ($n=1.050$ について)

4.2.2 製作したエアロゲルの透過長の比較

図 4.25 は、vol.2 と vol.3 で同じ調合比で製作した厚さ 7.5mm の single layer の透過長をゲル化時間で比較したものになっている。ゲル化時間を 6 分程度から 3 分程度にすることで飛躍的に透過長が改善されているのがわかる。但し、ゲル化時間を短くする事で内部に密度の斑みみたいなものが出来てしまうことがあるのでこの点は注意しなければならない。

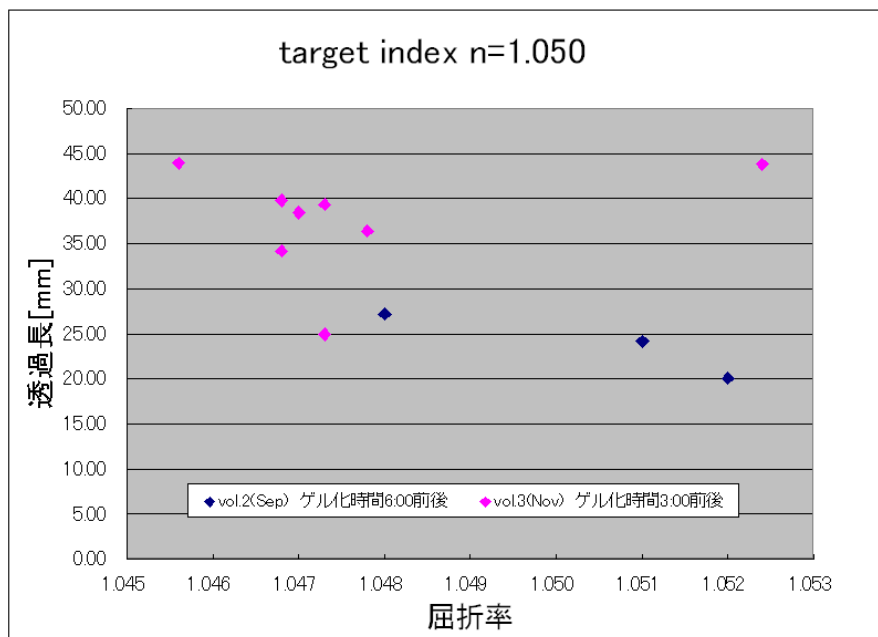


図 4.25: ゲル化時間の透過長への寄与

図 4.26 は target index を $n=1.050$ にした時の製作したエアロゲルの透過長を製作した時期ごとに表したものになっている。(June) は 2004 年 6 月に製作された透過長が良かったエアロゲルでこの時の調合比を参考にしてエアロゲルを製作した。ゲル化時間を出来るだけ短くする事や、アルコゲルの熟成期間を少し長めにした事で製作回数を重ねる毎に透過長の改善が見られる。

図 4.27 は target index を $n=1.050$ & 1.055 にした時の 2 層一体型エアロゲルの透過長を 2 層をあわせて測定したものになっている。やはり single layer のゲル化時間を出来るだけ短くする事や、アルコゲルの熟成期間を少し長めにした事で透過長の改善が大幅に見られる。vol.3 の 2 層一体型エアロゲルでは、屈折率が $n=1.0450$ & 1.0478 (target index $n=1.050$ & 1.055) の 2 層一体型エアロゲルでの透過長で 41.13mm が得られた。

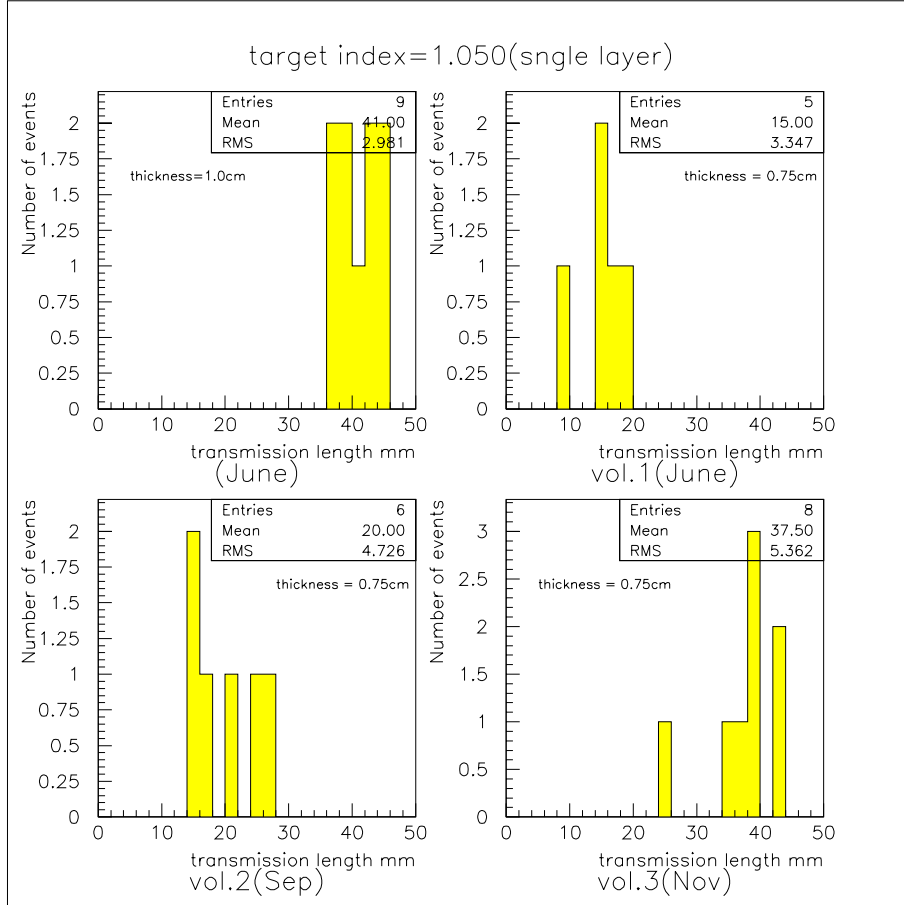


図 4.26: 2層一体型エアロゲルを目的に製作したエアロゲルの透過長の比較 (n=1050 について)

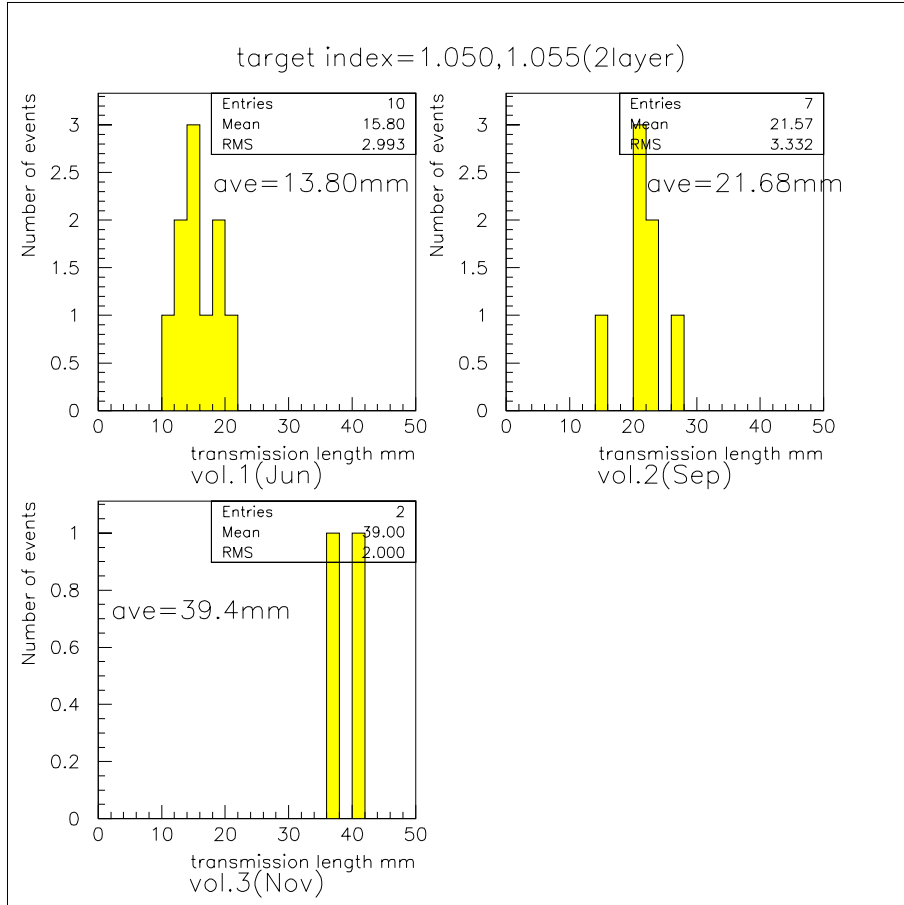


図 4.27: 2層一体型エアロゲル (target index=1.050&1.055) を目的に製作したエアロゲル透過長の比較

4.3 ビームテストによる2層一体型エアロゲルの性能評価

2004年6月に行った2Gev/cのIIビーム@KEK(T1 beam-line)を用いたビームテストで製作した2層一体型エアロゲル(vol.1)を評価することで、配置のし易さ以外の実用的なメリットがあるかを見てみた。図4.28にその時のエアロゲル、フラットパネルPMTを配置した様子を示す。

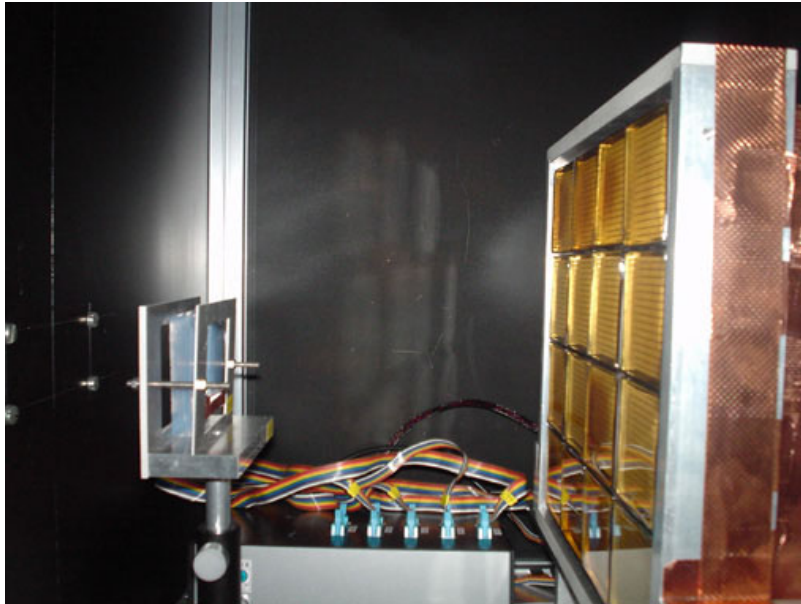


図 4.28: エアロゲルとフラットパネルPMTのセットアップ図

4.3.1 目的

このビームテストでは、focusingタイプ、defocusingタイプとして製作した2層一体型エアロゲル(厚さ:1.5cm)と単層のエアロゲル(厚さ:0.75cm)を2枚重ね合わせたものRICHの輻射体として用いた。まず、製作したfocusingタイプ、defocusingタイプの2層一体型エアロゲルが機能するかを確認し、そして、2層一体型エアロゲルと2枚重ね合わせたものとの間に違いを見ることを目的として行った。具体的に挙げると、角度分解能の良し悪しをみてやる。

4.3.2 セットアップ

実際の実験のセットアップを図4.29に示す。

ブラックボックスは光を遮蔽する為に用い、そのブラックボックスの中には輻射体であるエアロゲルとphoton detectorであるフラットパネルPMTを配置する。ビームの入射方向に対して上流側のPMTにはフラットパネルPMT(Hamamatsu H8500)を用い、下流側にはマルチ・チャンネル・プレートPMTを配置した。今ビームテストでは2層

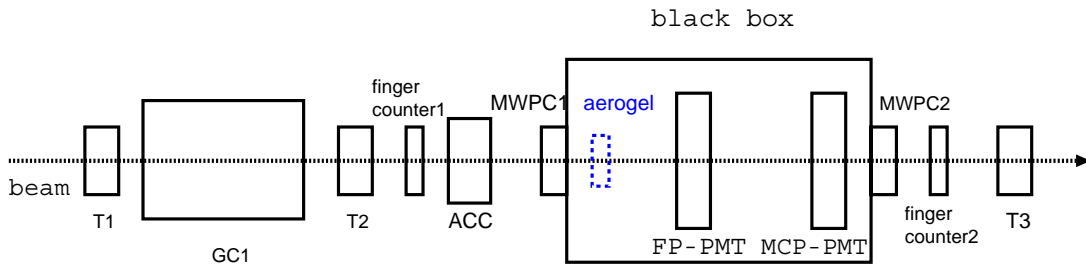


図 4.29: ビームテストのセットアップ

表 4.4: それぞれの検出器の役割

ディテクター	使用目的
T1,T2,T3	コインシデンスをとり、イベントのトリガーとする為
GC	π^- ビーム中に混入している電子を除去する為
ACC	高運動量領域での陽子を除去する為
finger counter1,2	MWPC が動かなくなった時の予備
ACC	π^- ビーム中に混入している μ^- と除去する為
MWPC1,2	ビームの飛跡情報を取る為とイベントのトリガーとする為

一体型エアロゲルを用いる際に使用した PMT は上流側に配置したフラットパネル PMT である。注意する点としては入射するビームに対してエアロゲル、フラットパネル PMT の光電面は垂直に置く様にする事である。また、今まではエアロゲルのビームの入射する面から検出器の光電面までの距離を 20cm としてビームテストを行ってきたのだが、製作した 2 層一体型エアロゲルの屈折率の組み合わせから、焦点距離が変わってくるので focusing タイプのものに関しては屈折率の組み合わせを考慮してエアロゲルとフラットパネル PMT の光電面の距離を適当に選んだ。一方、defocusing タイプのエアロゲルに関しては焦点距離を考慮する必要がないので従来通りの 20cm という距離をとった。

4.3.3 解析方法

チェレンコフ角の分布は、図 4.30 の左上の図の様になる。0rad 付近のピークは入射粒子によるものである。0.3rad 辺りにある山は輻射体であるエアロゲル中で発生したチェレンコフ光が検出されたものが蓄積されたもので、その周りには輻射体中で発生したレイリー散乱によるものとノイズによるバックグラウンドが広がっている。

1 光子に対する角度分解能を求めるには、図 4.30 の左上の分布にあるようなガウシアンと 1 次関数で fitting をまず行う。そこから得られた標準偏差 σ を角度分解能とする。また、1event 当りの検出光子数を求めるには、チェレンコフ角の平均から 3σ 以内に入ったものを有効なカウント数とし、fitting した結果から求めた 3σ 以内の数からバックグラウンドの数を差し引いたものとバックグラウンドの数の比を求め、カウント数にその

比を掛けて検出光子数とする。この分布は、図 4.30 の左下の様な分布になる。この時、このヒストグラムで 0 カウントの event 数の値でポアソンによる fitting を行い、その mean の値からバックグラウンドを引いた値が検出光子数 (N_{pe}) となる。

4.3.4 ビームテストにおけるこれまでの成果

2001 年 (KEK-PS π^2 beam line において実施)

エアロゲルは $n=1.05$ 、厚さ=20mm、透過長=15mm のものを用いた。検出光子数 (N_{pe})=約 2.7 個、角度分解能=約 10mrad

2002 年 11 月 (KEK-PS π^2 beam line において実施)

エアロゲルは $n=1.05$ 、厚さ=20mm、透過長=45mm のものを用いた。エアロゲル製作の際、溶媒に DMF も用いた事で透過長の大幅な改善が見られた。検出光子数 (N_{pe})=約 6 個、角度分解能=約 14mrad となり、前回のビームテストの結果よりも向上した。これは、運動量 4GeV/c での π/K separation が 4σ くらいで行えると予測される。課題としては、1.5 テスラもの強磁場中での使用に耐えうる PMT の開発が残る。

候補として、挙がっているのは Hybrid photodiode(HPD)、hybrid avalanche photodiode(HAPD) がある。また、エアロゲルの大量生産に関する問題も挙げられた。

2004 年 (KEK-PS π^2 及び T1 beam line において実施) エアロゲル RICH のさらなる改良を目指して、デュアル・ラディエーター (マルチ・ラディエーター) エアロゲルを使用した。

focusing タイプ : $n=1.046$ (透過長=45mm)& 1.057 (透過長=27mm) で 2 枚併せた厚さは 20mm で検出光子数 (N_{pe})=約 9.1 個、角度分解能=約 14.6mrad

defocusing タイプ : $n=1.057$ (透過長=27mm)& 1.027 (透過長=mm) で 2 枚併せた厚さは 20mm で

inner ring : 検出光子数 (N_{pe})=約 4.1 個、角度分解能=約 15.5mrad

outer ring : 検出光子数 (N_{pe})=約 1.2 個、角度分解能=約 15.1mrad

結果から、デュアル・ラディエーター (マルチ・ラディエーター) を用いると期待通りに分解能を落とさず、光量を増加させることが出来た。また、focusing タイプで従来通りに評価するとこれは、運動量 4GeV/c での π/K separation が 4.8σ くらいで行えると予測される。

4.3.5 実験結果

図 4.30、4.31 に実験で得られた focusing タイプの結果を示す。また、それぞれの run で用いたエアロゲルの諸々のデータは表 4.5 の様になり、結果を表 4.6 に示した。

次に、defocusing タイプの結果を図 4.32、4.33 に示す。また、それぞれの run で用いたエアロゲルの処々データは表 4.8 の様になっており、結果を表 4.8 に示した。

まず、focusing タイプの 2 層一体型エアロゲルを用いた結果 (図 4.30) を見ると、チェレンコフ角分布において、ピークが 1 つになっていることがわかる。このことから、focusing タイプとして機能している事がわかる。表??を見ると検出光子数は 2 層一体型エアロゲルの方が良いが、角度分解能はその逆になっている。また、defocusing タイプの 2 層一

Run0000157

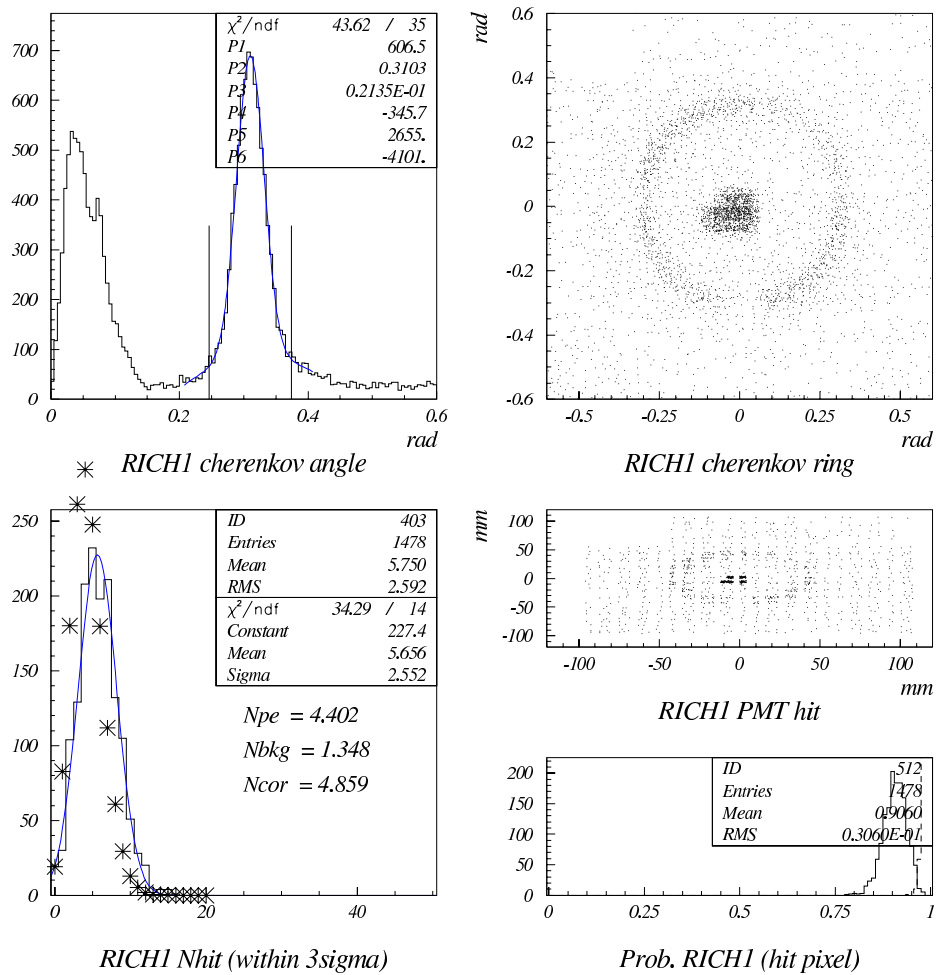


図 4.30: 2層一体型エアロゲル

Run0000165

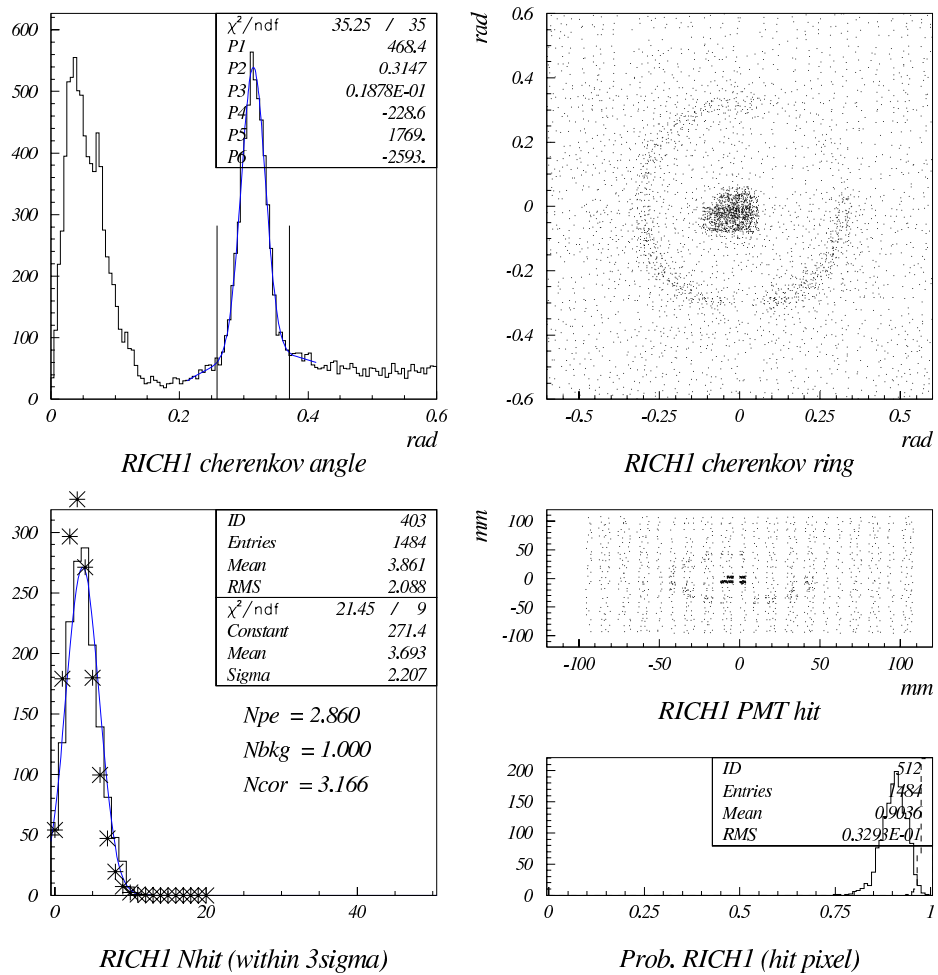


図 4.31: 1層 × 2枚を用いたエアロゲル

RICH1 run0000158 (defocusing)

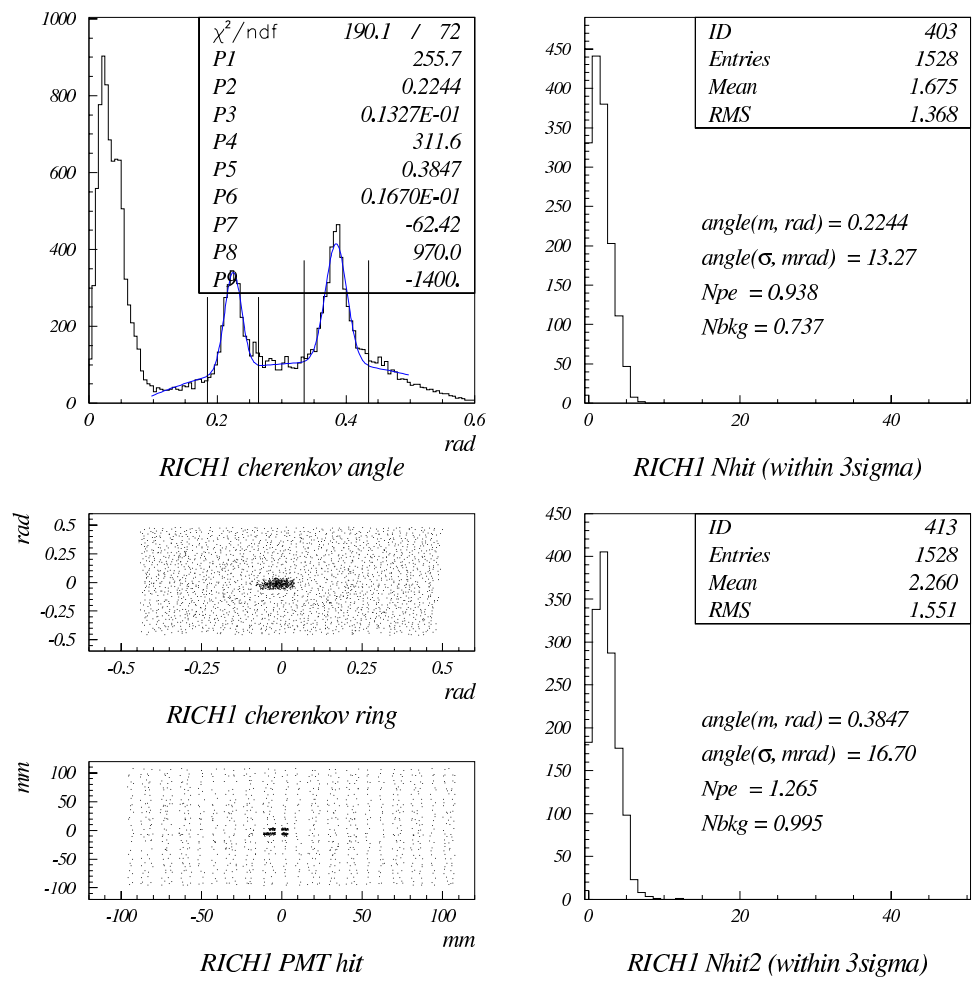


図 4.32: 2層一体型エアロゲル

RICH1 run0000161 (defocusing)

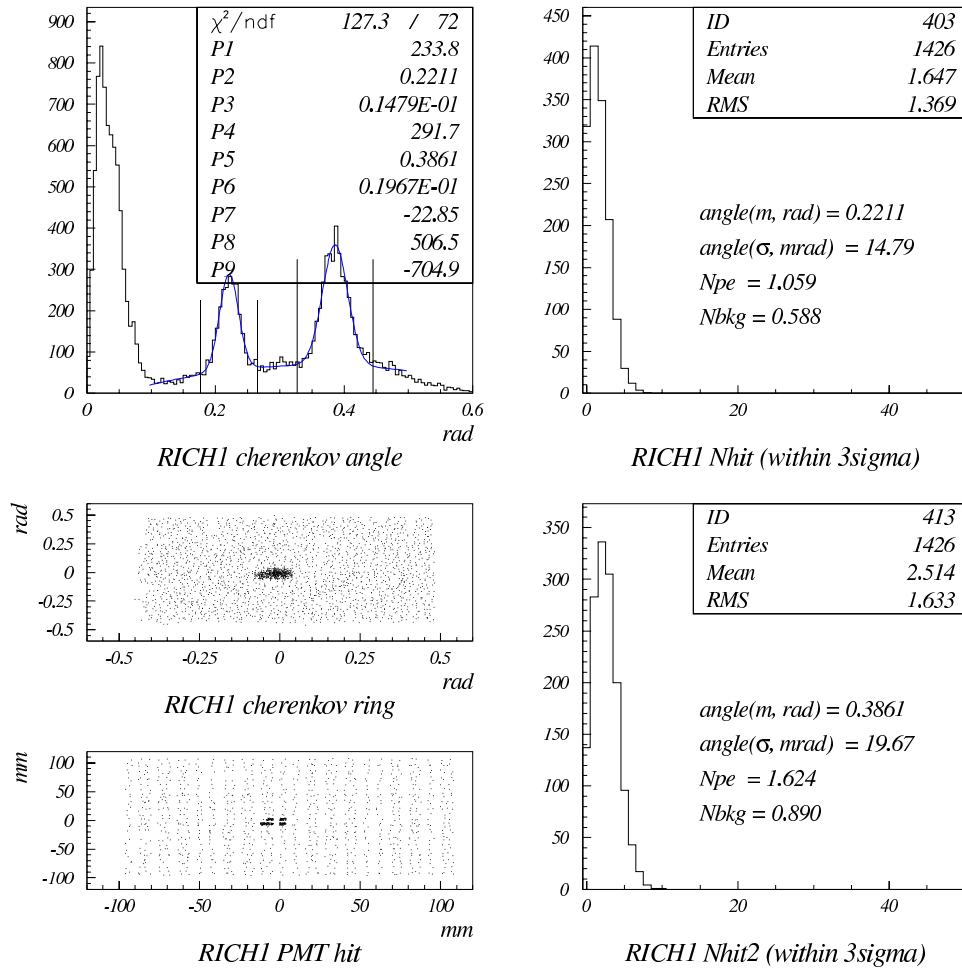


図 4.33: 1層×2枚を用いたエアロゲル

focusing タイプ	2層一体型エアロゲル	1層×2枚のエアロゲル	左に同じ
Run No.	run0000157	run0000163	run0000165
mesured index	1.056&1.062	1.054&1.055	1.055&1.06125
transmission length[mm]	19.09	14.54&18.88	18.88&8.752
thickness[mm]	14.63or14.5	14.75(7.25+7.5)	14.7(7.5+7.2)

表 4.5: ビームテストに用いた2層一体型エアロゲル及び1層×2枚のエアロゲルのデータ (focusing タイプ)

表 4.6: focusing タイプの結果

RICH	検出光子数 (N _{pe})	角度分解能 (σ)
2層一体型	4.4	21.4mrad
1層×2枚	2.9	18.8mrad

一体型エアロゲルを用いた結果 (図 4.32) を見ると、チェレンコフ角分布において、ピークが2つになっている事から、チェレンコフリングイメージが独立したものとなっており defocusing タイプとして機能している事がわかった。??では、内側、外側のリングとも2層一体型の方が角度分解能及び検出光子数が悪いものとなっている。しかし、そんなに多くのサンプルを使って試したものではない。今回のビームテストに使用したエアロゲルのサンプルは透過長が全体的に著しく低く、また、そんなに数を製作していなかったため2層一体型と1層×2枚のエアロゲルの屈折率、厚さが一致するもので行えなかった。次回のビームテストではそれらを合わせることで両者の違いがあるかどうかを見ることができると思う。

defocusing タイプ	2層一体型エアロゲル	1層×2枚 (b+a)	エアロゲル (a)	エアロゲル (b)
Run No.	run0000158	run0000161	run0000159	run0000160
mesured index	1.075&1.029	1.076&1.030	1.030	1.076
tl[mm]	21.16	23.83&24.42	24.42	23.83
thickness[mm]	13.5	14.5(7.5+7.0)	7.0	7.5

表 4.7: ビームテストに用いた2層一体型エアロゲル及び1層×2枚のエアロゲルのデータ (defocusing タイプ)

表 4.8: defocusing タイプの結果

内側	検出光子数 (N _{pe})	角度分解能 (σ)	外側	N _{pe}	σ
2層一体型	0.9	13.3mrad	2層一体型	1.3	16.7mrad
1層×2枚	1.1	14.8mrad	1層×2枚	1.6	19.7mrad

4.4 表面 (境界面) 散乱からみる 2 層一体型エアロゲルの性能評価

2004 年 12 月に名古屋大学において、11 月に製作した各層がほぼ同じ屈折率をもつ 2 層一体型と 1 層 × 2 枚のエアロゲルを用いて、表面 (境界面) 散乱の測定を行った。

セットアップ図は以下 (図 4.34) に示す。

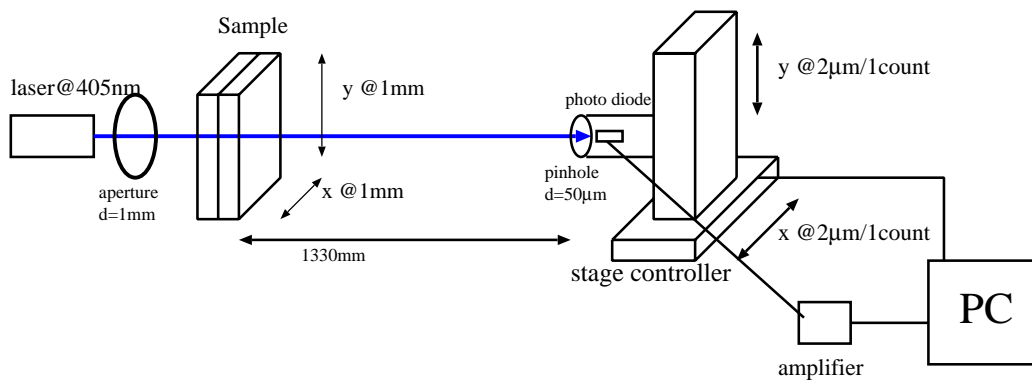


図 4.34: 表面散乱の測定のセットアップ図

エアロゲルに青色半導体レーザー ($\lambda=405\text{nm}$) を当てて、そのエアロゲルを通過したレーザー光をステージコントローラーで x, y 方向へ制御できる photo diode でみてやり、 4.8mm 四方でどのような強度分布を示すかみてみた。このとき、エアロゲルは図 4.34 に示しているように、レーザー光に垂直な x, y 方向に 1mm ずつ稼動可能な台に設置した。実際には図 4.35 のようになっている。また、ステージコントローラーは $2\mu\text{m}$ の精度で調節が出来る。

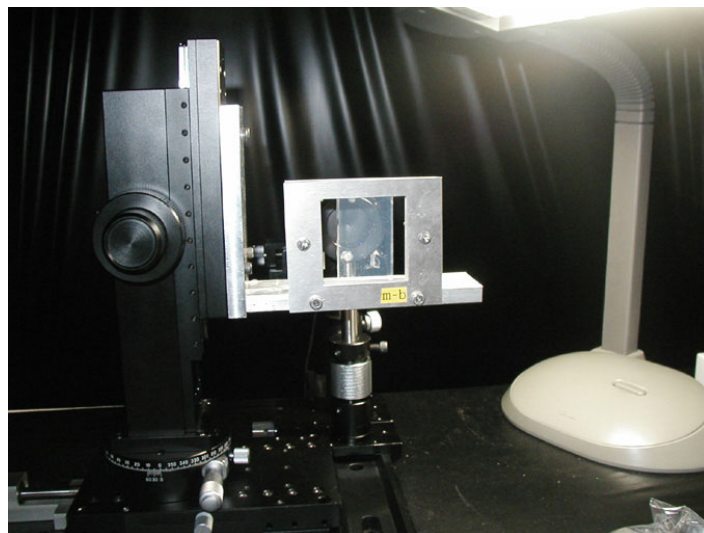


図 4.35: 表面 (境界面) の散乱を測定したときのエアロゲル稼動可能なエアロゲル設置台

この実験に使用したゲルは表に表す。

エアロゲルの種類	2層一体型エアロゲル	1層×2枚のエアロゲル
measured index	1.046&1.047	1.047&1.047
transmission length[mm]	44.0	39.8&39.4
thickness[mm]	15.3	15.2(7.2+8.0)

表 4.9: 境界面の測定に用いた2層一体型エアロゲル及び1層×2枚のエアロゲルのデータ

測定方法はまず、エアロゲルにレーザーを当てる点を固定してやり、その点を中心にステージコントローラーで制御したフォトダイオードをx、y方向に200 μm ずつ動かしてやり各点において強度を出す。また、エアロゲルは2mm四方、xy方向にそれぞれ1mmずつ動かしてやる。イメージとしては図4.36のようになる。

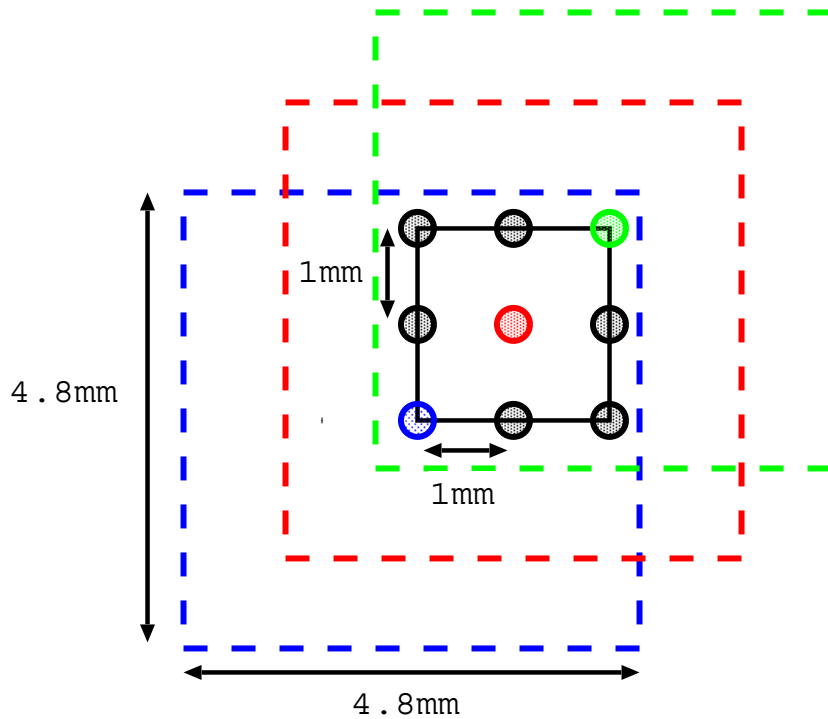


図 4.36: 表面散乱の測定のイメージ図

図 4.37 はエアロゲルを用いないで見たレーザー光の強度分布になっている。また、読み取った9点(9箇所)でのデータを合わせ、場所による依存性を少なくして出した強度分布が図 4.38、fig:extent1050to1058.eps になる。図 4.38 は2層一体型のもので、図 fig:extent1050to1058.eps は2枚×単層のエアロゲルの分布になっている。

その9点のデータを足し合わせたもので一番強度があった点を中心にして、その中心から0.1mrad毎に0.1mrad幅の円で強度分布を分割してやりその0.1mrad幅の円に入ったイベント数は強度分布から出した中心値を1となるようにし、それを基準点にしてy軸にその基準点からの角度をx軸にとりグラフにしたものが図 4.40、図 4.41 になる。そ

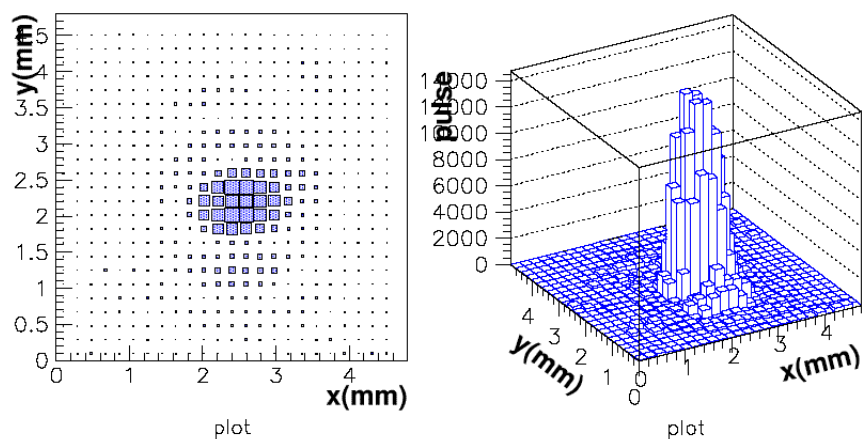


図 4.37: エアロゲルを設置しないで見たレーザー光の強度分布 (1点のみ)

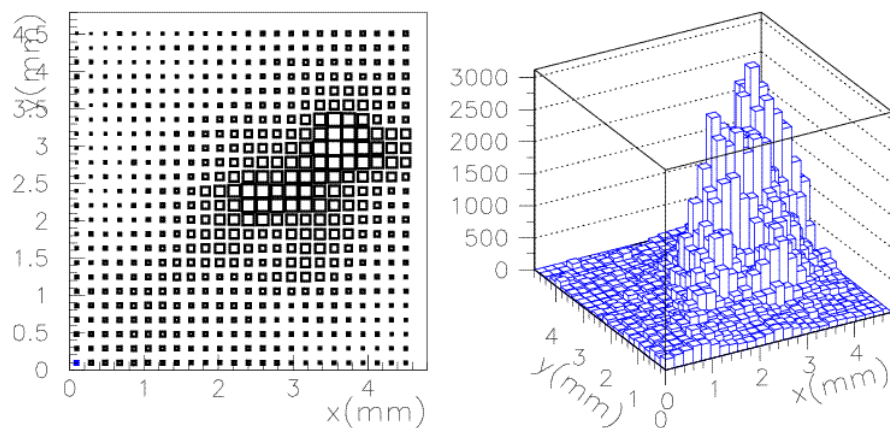


図 4.38: 2層一体型エアロゲルを透過したレーザー光の強度分布

それぞれの図の右側のグラフは左側のグラフの強度を log スケールにしたものである。レーザー光と散乱光が見られるので 2 つのガウシアンで fitting してある。

図 4.40、図 4.41 は一見すると、図 4.41 よりも図 4.40 の方が中心から離れていっても強度が大きく境界面での影響が大きくなっているように見える。しかし、これだけで 2 層一体型よりも 1 層 × 2 枚のエアロゲルの方が境界面での散乱による影響を受けにくいとは言えない。エアロゲル自体を肉眼で見たところ、2 層一体型のエアロゲルの上層部分にわかりづらいが密度の斑の様なものを確認する事が出来た。これが、レーザー光をエアロゲル中で散乱させているものと思われる。したがって、純粹に境界面の散乱の違いを見るには、少なくとも見た目では確認できないものを使う必要がある。また、2 つのグラフとも 0.1mrad で強度が 1 よりも少し大きくなっているが図 4.37 をみると中心付近にピークらしきものが 2 つ見えるのでそれが原因になっていると思われる。

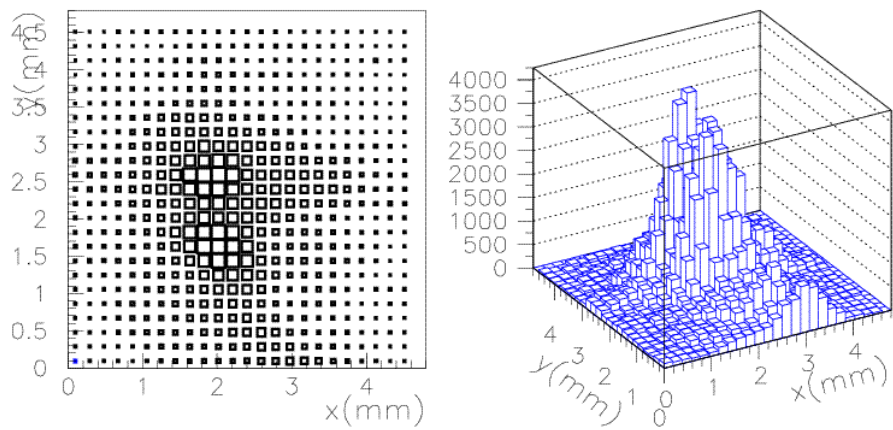


図 4.39: 2枚×1層のエアロゲルを透過したレーザー光の強度分布

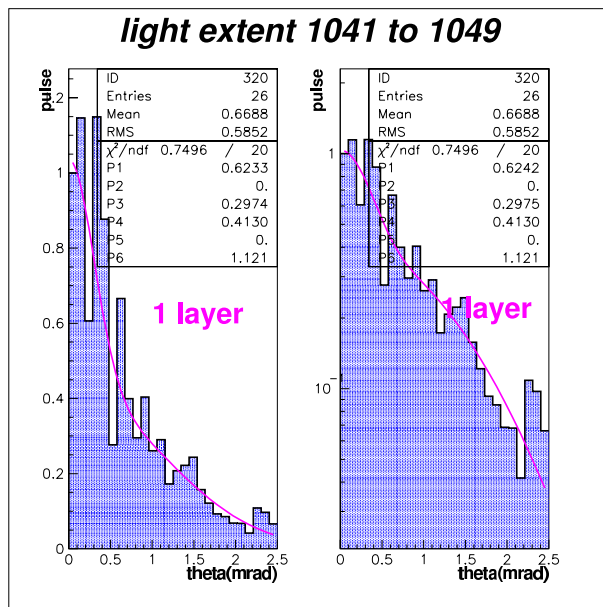


図 4.40: 2層一体型エアロゲルの表面散乱 (一体型という意味で 1layer と表記した)

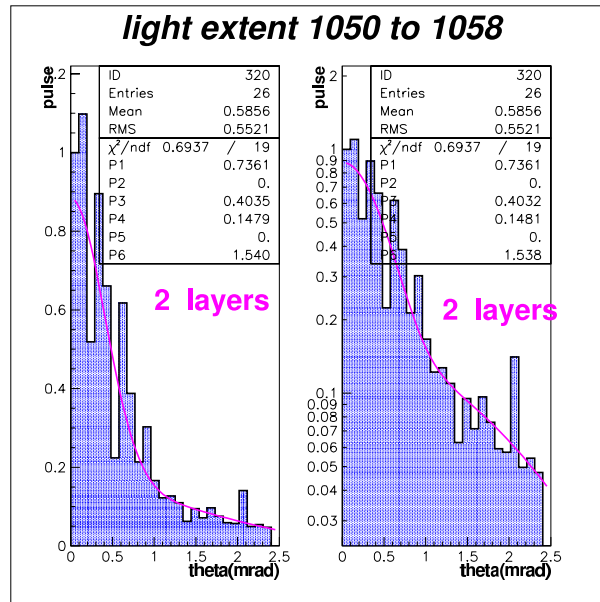


図 4.41: 1層 × 2枚のエアロゲルの表面散乱

第5章 結論

Belle 実験において、より詳細な物理現象を捉えるべく PID 検出器のアップグレードが予定されており、その内の一つである。現在の ACC より、より高い運動領域での πK 識別を行う事を目的として研究開発が行われている。proximity focusing Aerogel RICH の輻射体を屈折率の異なる組み合わせのエアロゲルを組み合わせるデュアル・ラディエーター及びマルチ・ラディエーターをにする事で検出光子数、角度分解能の向上がビームテストの結果から確認されている。そこで、デュアル・ラディエーターのエアロゲルを調合の段階で一体化させてしまう事で配置のし易さや表面の数の減少からエアロゲルでの表面(境界面) 散乱光の効果も抑えられると考えられる事から 2 層一体型エアロゲルを製作した。2004 年 6 月には疎水化処理をされたものとしての 2 層一体型エアロゲルを初めて製作した。2004 年 6 月に行ったビームテストでは、製作した 2 層一体型エアロゲルについて focusing タイプ、defocusing タイプ共に機能する事を確認した。2004 年 6 月、2004 年 9 月、2004 年 11 月に製作した focusing タイプ (target index $n=1.050$ & 1.055) の 2 層一体型エアロゲルの波長領域 400nm での透過長の平均は、16.01mm、20.49mm、39.4mm になった。この事から製作開始当初の透過長の値に比べ、2 層一体型エアロゲルの透過長は 2 倍以上に向上した。また、2004 年 11 月には focusing タイプとして target index を $n=1.050$ 、 $n=1.055$ の組み合わせで 2 層一体型エアロゲルを製作したところ、透過長 = 41.13mm を達成した。defocusing タイプの 2 層一体型エアロゲルに関しては、作ったサンプル数に対して 2 層一体型として出来上がる確立が極端に低いので、まだ未確認ではあるが 2 層の間にその中間の屈折率を持つものを入れるなどの対策を講じなくてはならない。ビームテストや境界面の散乱の測定では、2 層一体型エアロゲルと 1 層 \times 2 枚のエアロゲルとの間に違いを見ることは難しかったが、これから多くのサンプルを製作する事で屈折率、透過長、厚さなどのパラメータをなるべく近いものにする事で、2 層一体型と 1 層 \times 2 枚のエアロゲルの違いを見ることが出来るようになると思う。

関連図書

- [1] T.Matsumoto et al. Nucl.Instrum.Meth. A521 (2004) 367-377
- [2] 横川弘, 九州大学大学院, 博士論文 (2004)
- [3] 三田一郎 著 『CP 非保存と時間反転』 (岩波書店、2001 年)
- [4] 小林誠 他 『科学』 第 71 卷 12 号 (岩波書店、2001 年)
- [5] K. クラインクネヒト 著、高橋嘉右・吉城肇訳 『粒子線検出器-放射線計測の基礎と応用-』 (培風館、1987 年)
- [6] 渡邊靖 著 『素粒子物理入門』 (培風館、2002 年)
- [7] 内田裕美, 東邦大学, 修士論文 (2003)
- [8] 田端岳彦, 千葉大学, 修士論文 (2002)
- [9] 岩本光弘, 千葉大学, 修士論文 (2001)
- [10] 吉田祐一, 東邦大学, 修士論文 (1996)

謝辞

本研究を行えたのはでたくさんの方々の支えがあったからだと痛感しております。所属研究室である東邦大学基礎物理学教室の渋谷寛教授、また指導教官でありました小川了助教授には、研究の機会を与えて頂きまして心より感謝しております。

素核研の足立一郎助手、西田昌平助手、名古屋大学の飯島徹助教授、千葉大学の河合秀行助教授、東京都立大学の住吉孝之教授、東京都立大学学振研究員の松本崇博氏には本研究を行う上で指導及び有益な助言を頂きまして心より深く感謝いたします。特に、足立一郎助手には本研究の機会を与えて頂き大変感謝しております。

同じく、Belle-ACC グループの千葉大学の海野祐士氏、総合研究大学 D3 の斉藤真一氏、同じく総合研究大学 D1 の内田裕美さん、東京都立大学 D1 の関貴之氏には研究についてやグループ内での作業などについての教えて頂き非常に有意義に KEK での研究活動をする事が出来た事、拝謝します。

また、同じ修士課程 2 年という事で一緒にビームテストやその他諸々の事で行動を共にする事が多かった名古屋大学の小酒井良延氏、東京都立大学の山本俊吾氏、千葉大学の小西正信氏には色々とお世話になった事を感謝します。エアロゲル製作を共に行った千葉大学の福嶋智一氏、田端誠氏、ビームテスト時に少なからぬ助けを頂いた東京都立大学の中川尊氏にも感謝しています。

また、名古屋大学の大島隆義教授には有意義な名古屋での実験をさせて頂いた事、心よりお礼申し上げます。また、名古屋大学の馬塚さんには名古屋での 4 日間、お世話になった事を感謝いたします。

また、大学での生活を楽しいものにしてくれた粉川真咲さん、柴崎昌紀氏、福島知佳さん、安田雅弘氏に感謝いたします。

最後に、学生生活を支えてくれた両親に感謝します。