付 録D　SFT system

D.1　SFTの構造

DONUTの原子核乾板ターゲットとSFTの組み合わせは、CERNのニュートリノ振動実験CHORUSの方式[11]を踏襲し改良したものである。

D.1.1　SFT 配置

SFTは4つの原子核乾板モジュールの後方にu,v,x の3projectionの組のstationを設置した。図D.1に原子核乾板モジュールとSFT station の位置関係を示す。各stationはu,v projectionが4plane または6plane、x projectionが1planeの組から成り立っている。u,v projectionのfiber planeは紙ハニカム板の両面に、x projectionは片面に、エポキシ接着剤で張り付けて作製した。それぞれのハニカム板は三方の角をstation単位で固定した。

CHORUSではu,v projectionにあたる直交したplane(y,z)と約8度傾けたplane(y',z')を原子核乾板モジュールの後方に1組ないし3組が設置された。DONUTでは少なくとも4組を設置したため、各原子核乾板モジュールのすぐ下流のstation だけでニュートリノ反応からの飛跡の構成が可能である。

u,v軸はビーム方向からみて図D.2の様に垂直から45度傾けてある。この理由はビームダンプ後方の電磁石で跳ね飛ばされたミュー粒子がターゲットボックスの左右を大量に通り抜けているので、これが読み出し部を貫いてノイズとなるのを防ぐためである。

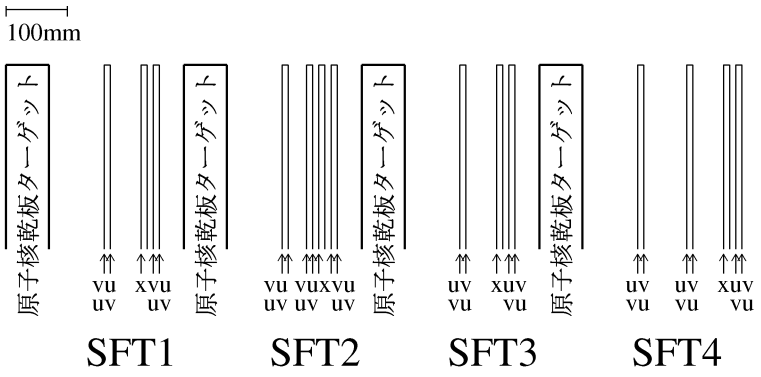

図 D.1: ビーム方向の SFT の配置（u,v,x projection）

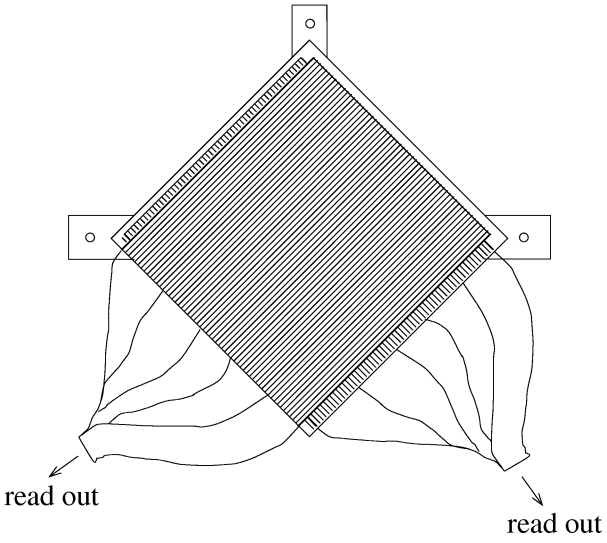

図 D.2: ビームに垂直方向からみた SFT の構造（u,v projection）電磁石で左右に曲げたミュー粒子が読み出し部を通過するのを防ぐために 45 度傾けた。

D.1.2 SFT plane

SFT plane は直径 495μm のシンチレーションファイバー (クラレ SCSF78) を白色ペンキで固めたファイバーシートから作った。u,v projection の SFT plane は 2 層俵積みで、紙ハニカム板に 2 枚のファイバーシートを並べてエポキシ接着剤で貼り付け、その上に別の projection を同様に貼った (図 D.3)。x projection は 4 層俵積みで、紙ハニカム板に 9 枚のファイバーシートを並べた (図 D.4)。SCSF78 は CHORUS で使用した SCSF38 と比べて光量が 15%程度高い (図 D.5)。2 層俵積みは不感領域のない最低の層数で CHORUS の 7 層俵積みに比べて大幅に線材を節約し、読み出しのイメージインテンシファイアーの数を減らすことができた。光電子増倍管 (PMT) で測定した MIP(Minimum Ionizing Particle) による発光量は約 120cm の所で平均 7 光電子 (アルミニウム反射膜付き) となっており検出効率の面でも問題ないことが確認された (図 D.6)。しかし薄くなった分ファイバーシートは機械的に弱く取り扱いは慎重に行わなければならなかった。

u,v projection の SFT plane を 2 枚のファイバーシートに分けたのは、ファイバーシート製造機が CHORUS のものを流用したため一度に 600mm 幅のものができなかった為で、x projection に関しては形状の関係で更に細かく分けた。

SFT 製作途中、大型ステージを使ってハニカム板のリファレンスホールに対するファイバーシート貼り付け位置を記録した。u,v projection の SFT plane は 200 本毎にファイバーに沿って 5 点の位置を測定した。2 枚のファイバーシートの端のファイバーは必ず測定した。貼り付けたファイバーシートの直線性について、同じファイバーに沿って測定した 5 つの点の両端を結んだ直線からの残りの 3 点のずれを図 D.7 に示す。測定精度は約 20μm である。平均 40μm の広がりで直線性に優れたものが出来た。CHORUS と比べて大きさが半分弱であることが有利に働いている。

このデータから SFT plane を構成するファイバーの傾きが求められる (図 D.8)。ファイバー傾きを u,v それぞれ全 20plane に対して図 D.9 に示した。$\pm 0.1 \times 10^{-2}$[rad] の程度の幅の間でばらついており、この影響はファイバーに沿って両端で、最大 $0.2 \times 10^{-2} \times 600$[mm]=1.2[mm] の位置のずれに相当する。また 2 枚のファイバーシートはお互いに角度をもっていることが分かるが、一枚のファイバーシート内のばらつきに比べると小さな値である。このばらつきはファイバーシートが扇型になってしまっていることを示している。1,2 の例外を除き読みだし部につながっている側でなくアルミニウム反射面を付けた側が広がっており、反射面をつける為に端面を研磨した際、水でファイバーシートを固めているペンキがふやけて幅が広がってしまったことが考えられる。

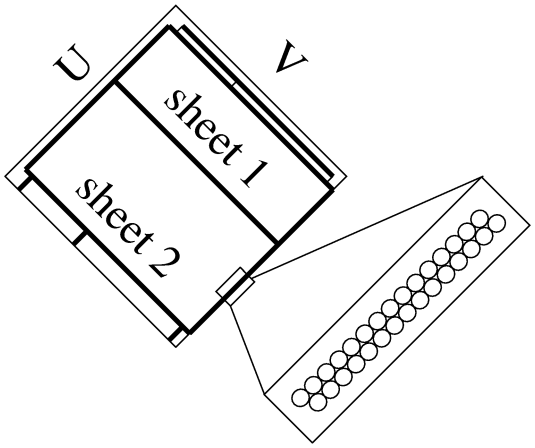

図 D.3: u,v plane の紙ハニカム板への貼り付け。2 層俵積みのファイバーシートを二枚一組で 1plane とし、紙ハニカム板に重ねて貼り付けた。

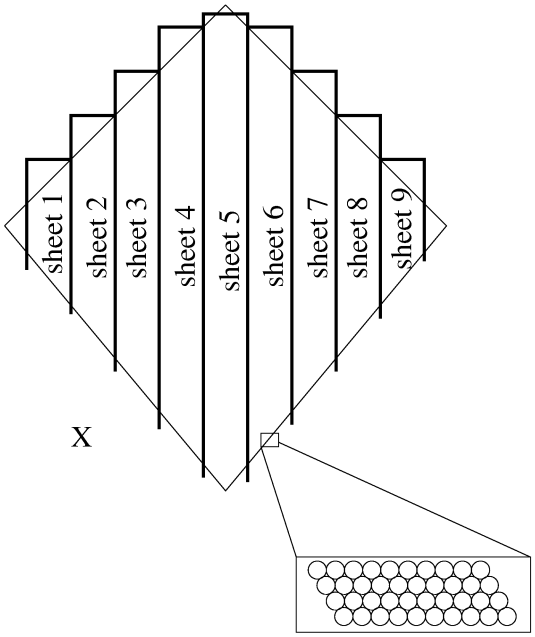

図 D.4: x plane の紙ハニカム板への貼り付け。4 層俵積みのファイバーシートを 9 枚貼り付けた。

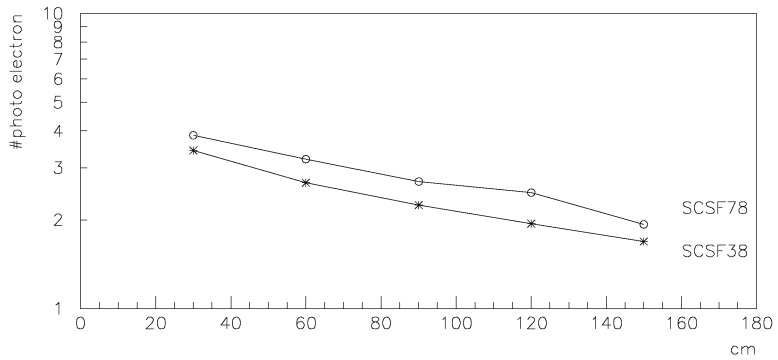

図 D.5: 線材の MIP による発光量の比較。SCSF38 は CHORUS で使用したもの。SCSF78 は DONUT で使用。(横軸は伝播距離で減衰を評価している)

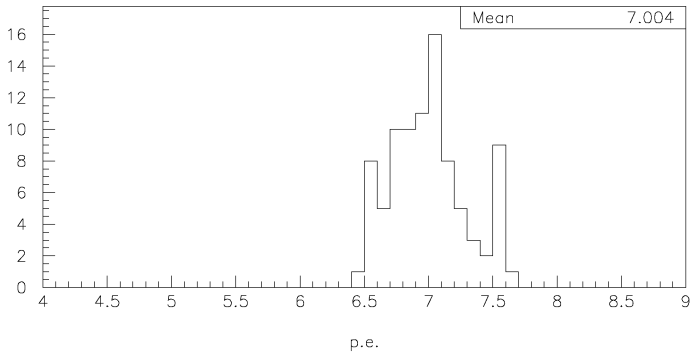

図 D.6: 2 層俵積みファイバーシート (u,v) の約 120cm の位置の MIP による発光光電子数 (アルミニウム反射膜付き)

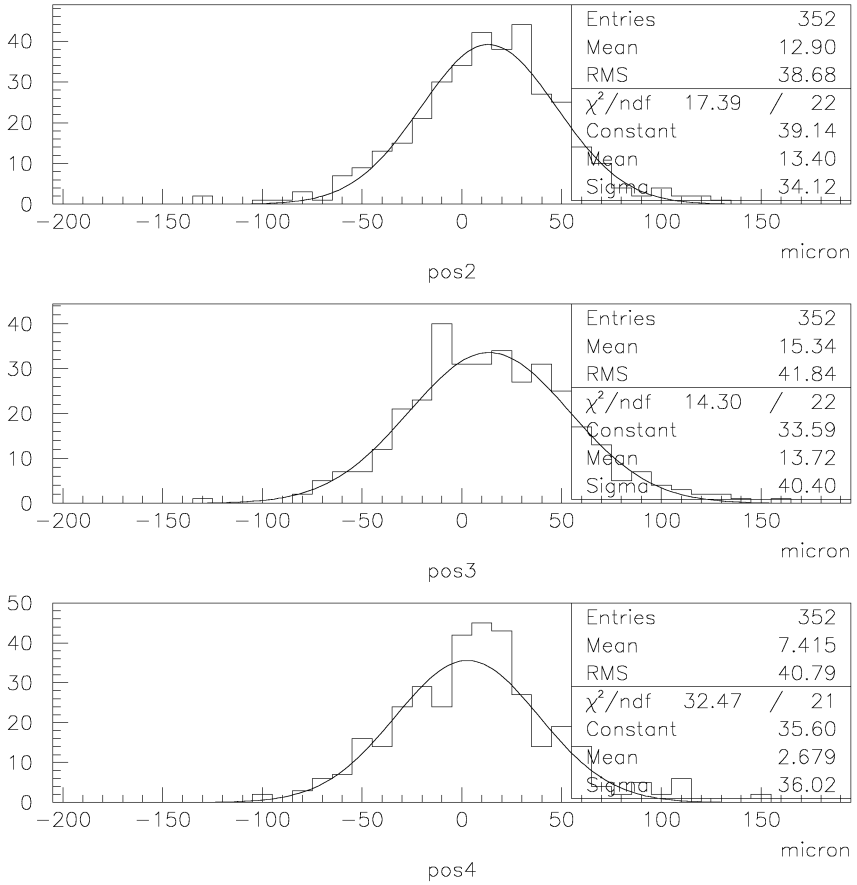

図 D.7: ファイバーシート直線性。ファイバーに沿って約 15cm 毎の 5 点の測定点の両端を結んだ直線からの中央の 3 点 (pos2、pos3、pos4) の歪みを示す。

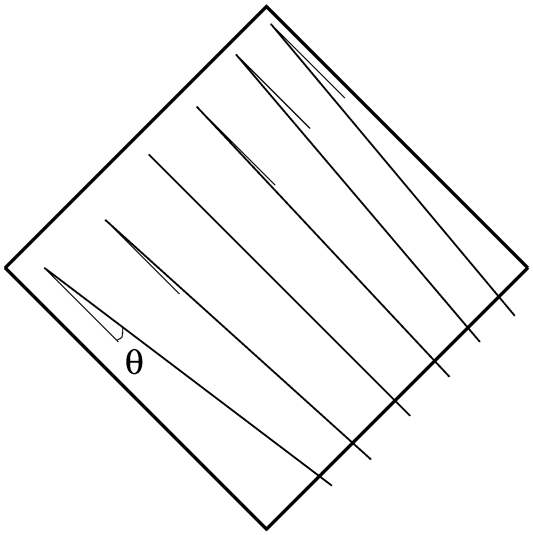

図 D.8: 測定 fiber の貼り付け角度の定義。各プレーンあたり約 10 本のファイバーについての傾きのデータが得られる。

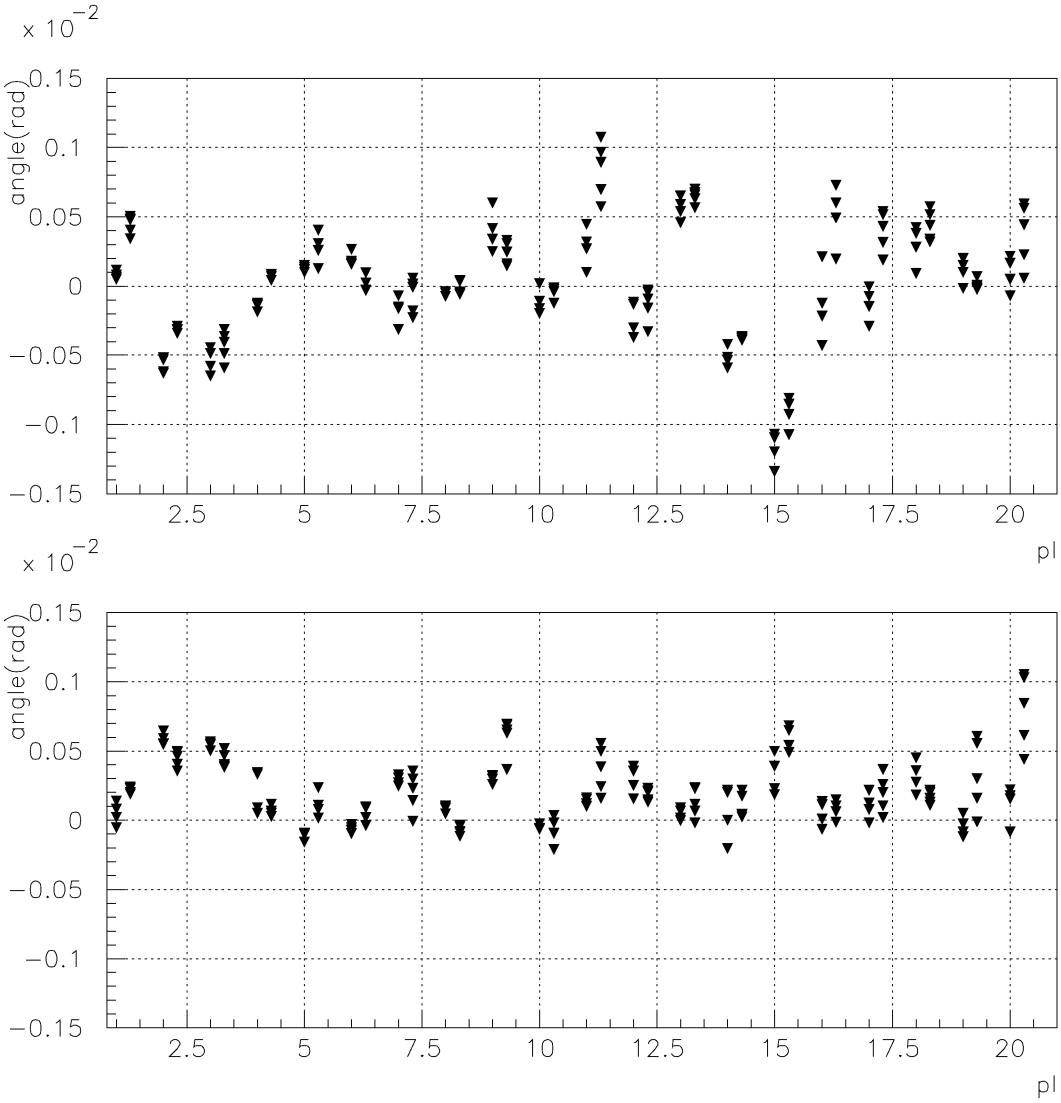

図 D.9: ファイバーの貼り付け角度。2 つのファイバーシート分を少しずらして表してあり、縦に並んでいる点は同一ファイバーシートの異なるファイバーについての測定値。同一ファイバーシート内のばらつきはシートが扇型になっていることを示している。

D.1.3 読みだし部

SFT は直径 100mm の入力窓の Image Intensifier chain(II-chain) で読みだした。紙ハニカム板に固定された SFT の検出部から一本一本のファイバーが自由に動かせる部分を経て、束ねて固定し読みだし部とした。それぞれの層の間はアクリルシートを挟んで接着した (図 D.10)。読み出し部の形状は CHORUS では幅 8cm の長方形であったのに対し、階段状に様々な長さのものを組み合わせて II の入り口の円に近い形状にすることで、II-chain 一本あたりの読み出すファイバー本数を約 20% 増やした。また読み出し部の接合位置と II-chain の映像の歪みを知り補正するため CHORUS では 100μm 径の別のファイバーを埋め込んだ 500μm 厚の板を II 一本あたり 5 枚挿入していたが、DONUT では後述の新方式を採用したため必要なく、読みだし面の全てを飛跡検出用ファイバーの読みだしに使用することができた。II-chain への接続は読み出し部にアルミ板のつばを接着し、II 窓に直接取り付けた器具で固定した (図 D.11)。全ての SFT は 6 つの読みだし部に集約される。

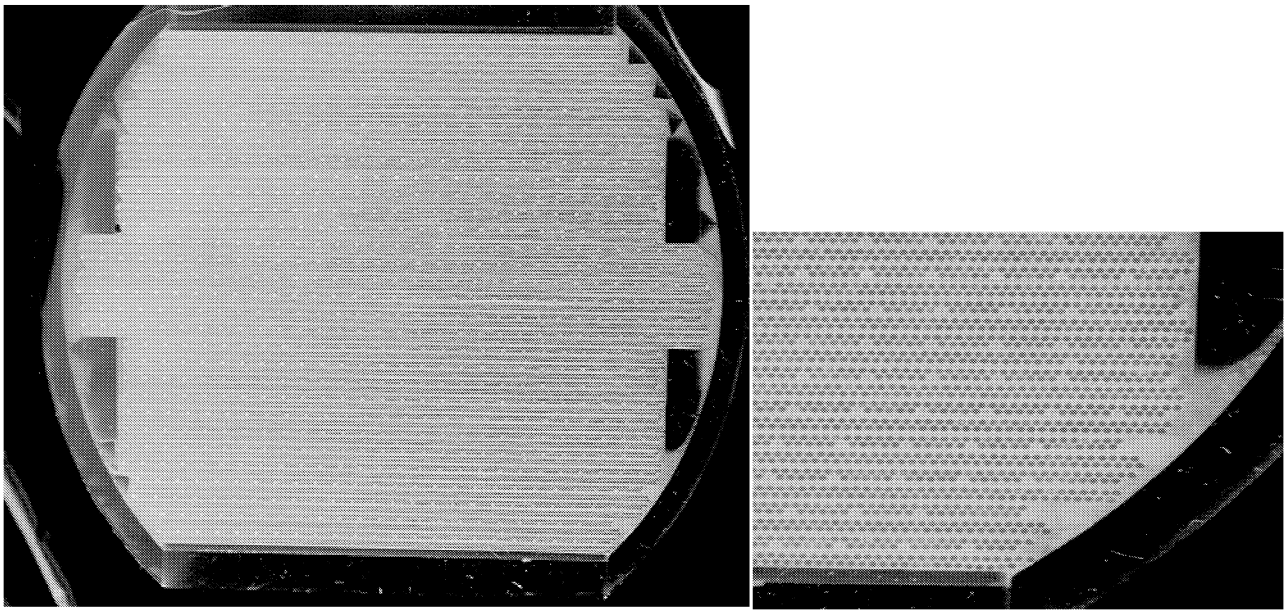

図 D.10: SFT 読み出し部。直径約 100mm。(規則正しく数本毎に並んでいるのは後述のキャリブレーションシステムを光らせているもの)

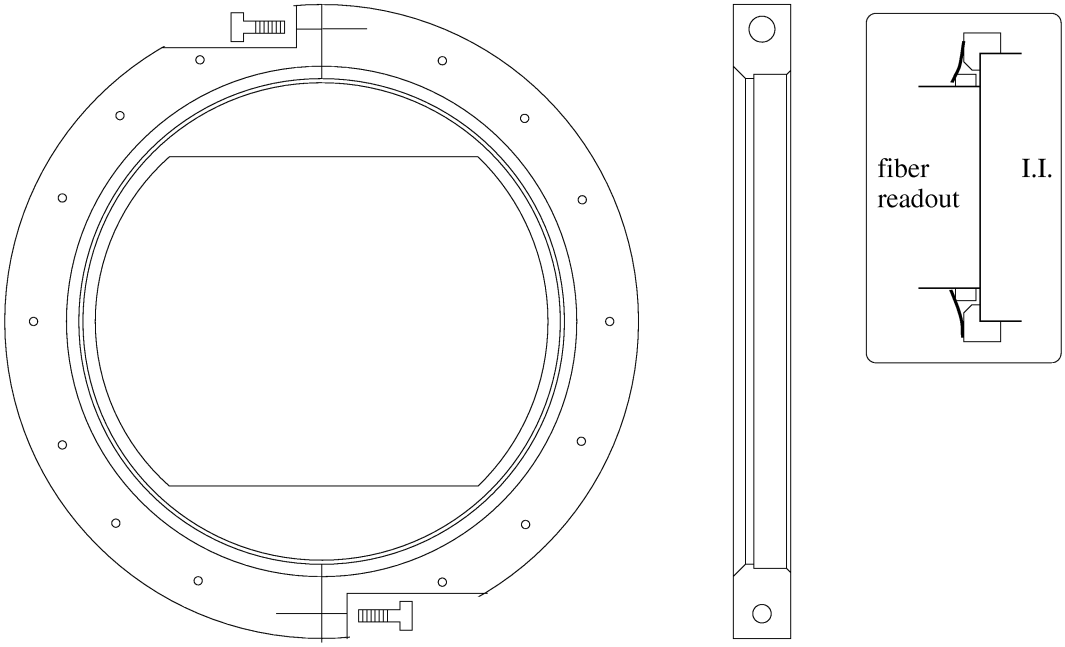

図 D.11: SFT 読み出し部と II の接合の機構。アルミ製で外側の輪を II の窓に固定、内側の部分はファイバー読み出し部に接着し、外側の輪にネジ止めしたリン青銅の板ばねでお互いを密着させた。

D.1.4 II-chain

SFT から 6 つにまとめた読みだし部は 6 つの Image Intensifier chain(II-chain) で読みだした。II は光子を光電効果で電子に変換し、その電子を蛍光体にぶつけることでまた光子にする。電子の通り道は真空で電場がかけてあり、そこで運動エネルギーを与えることにより光子数を増やすしくみである。CHORUS 実験で使用した II-chain の構造を図 D.12 に示す。増幅率を稼ぐために 4 段にして直径 100mm の入力部を 2/3 インチ CCD に投影するために各段で像を縮小している。1,2,4 段目は静電型の II である。3 段目は MCP タイプの II で光電面から出た光電子はマイクロチャンネルプレート (MCP) と呼ばれる直径数 μm の穴を開いたプレートを通る際壁にぶつかる度に増幅される。MCP による増幅は入力に対する応答が比例していないため、位置分解能が静電型に比べて劣ると言われていた。そこで DONUT では II-chain の改良として全て静電型の II で chain を組んだ (図 D.13)。1 光電子レベルの入力に対して、輝点の広がりは入力面に換算して半値幅 500μm と同程度 (図 D.14)。位置分解能は $\sigma = 100\mu$m 弱から 50μm 弱へと向上させることができた (図 D.15)。ここで CHORUS のデータは直径 100μm の fiber による解析、DONUT は 50μm のピンホールを使って解析した。

CHORUS で分解能が悪いにも関わらず MCP タイプの II を使用した理由のひとつはゲートが容易にかけられることによる。CCD はデータ蓄積時間 1/30 秒の間に通過した粒子の SFT の信号、II 自身が出すノイズなどを全て記録してしまい、反応に関係する粒子の信号がそれらに埋もれて見えなくなってしまうのでカメラのシャッターにあたるゲート機能が必要である。。ゲート時間はいくらでも短くできる訳ではなく、II の蛍光体の時間特性 ($\sim 100\mu$s) 以下では目的の信号が小さくなってしまう。信号以外のものを 1/300 程度にするのが目標である。

MCP では数百ボルトの比較的低い電圧を制御する事でゲートをかけることができる。DONUT の II のゲートは加速電圧を on、off することでかけた。高電圧の速い on、off は技術的に難しく 6kV が限界であった。II の中で真空中を加速されて飛んできた電子は直接蛍光体ではなく、まず蛍光体の光が逆方向に進んで光電面をたたく事のないようにつけられたアルミニウム膜を通る。ここにポイントがあって 6kV しか on、off できないが、もともとアルミニウム膜を通り抜けるぎりぎりの電圧をゲタとして履かせておくことによって δV = 6kV を最大限、光量のゲインに使うことができる。ゲタの電圧は約 3kV である。このゲートの方法はスクリーンゲートと呼び浜松ホトニクス（株）と共同で開発した。

II は電子を長い距離 ($\sim$ 数百 mm) 加速するという構造上、磁場の影響を大きく受ける。電子の軌道に対して垂直に磁場がかかると像は平行移動し、平行な磁場は像

の回転、ゆがみ、視野の縮小を引き起こす (図 D.16)。図 D.17 は平行磁場を様々に変えて像の回転を調べたものである。三回異なる場所で行った結果を示してある。回転角度は磁場の弱いところで 20degree/gauss という影響がある。 2gauss 以上の磁場では周辺部が欠けてしまう。

DONUT では SFT のすぐ後方にスペクトロメータの空心磁石を設置したので、SFT の位置で約 300gauss のもれ磁場が存在する。そこで II-chain を磁気シールドすることで使用した。図 D.18 に磁気シールドの構造を示す。これは鉄と透磁率の高い金属の管の二重構造にした。ファイバーの読み出し面を開ける必要性から軸に平行な磁場成分のシールドが困難であるが、入射面から 200mm 前まで管を設ける事で必要な磁気シールドの効果 (1gauss 以下) が得られた。

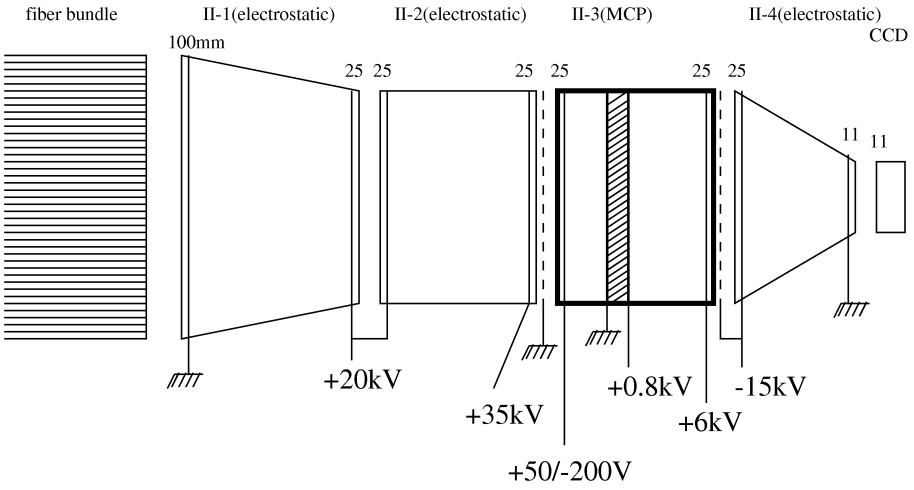

図 D.12: CHORUS II chain。II-3 が MCP タイプで数百ボルトのオンオフでゲートがかけられる。

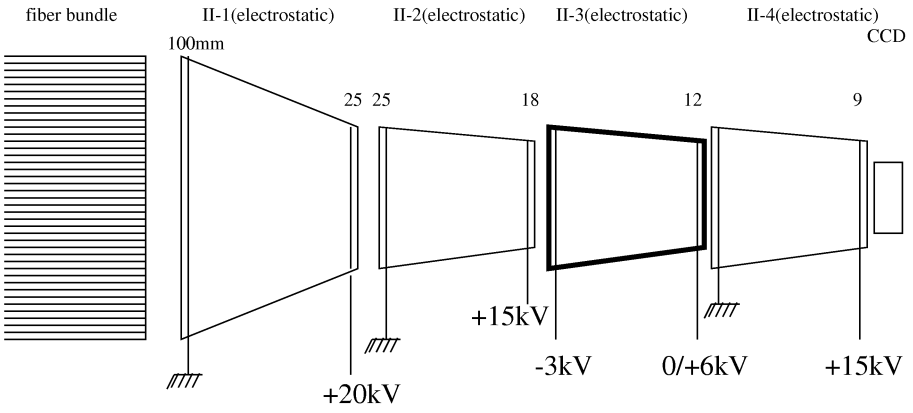

図 D.13: DONUT II chain。全て静電型。

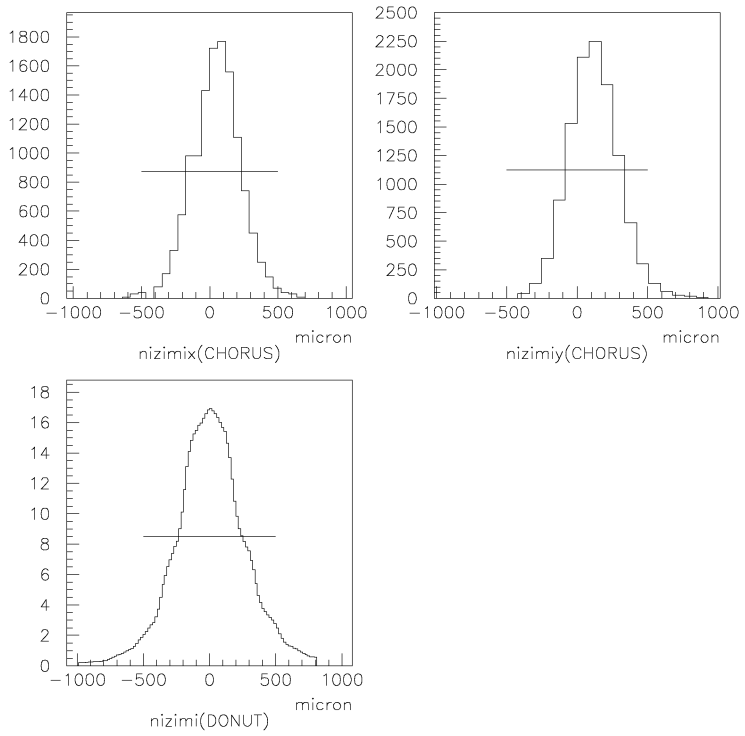

図 D.14: 1 光電子入力の出力のにじみ (縦軸は任意)

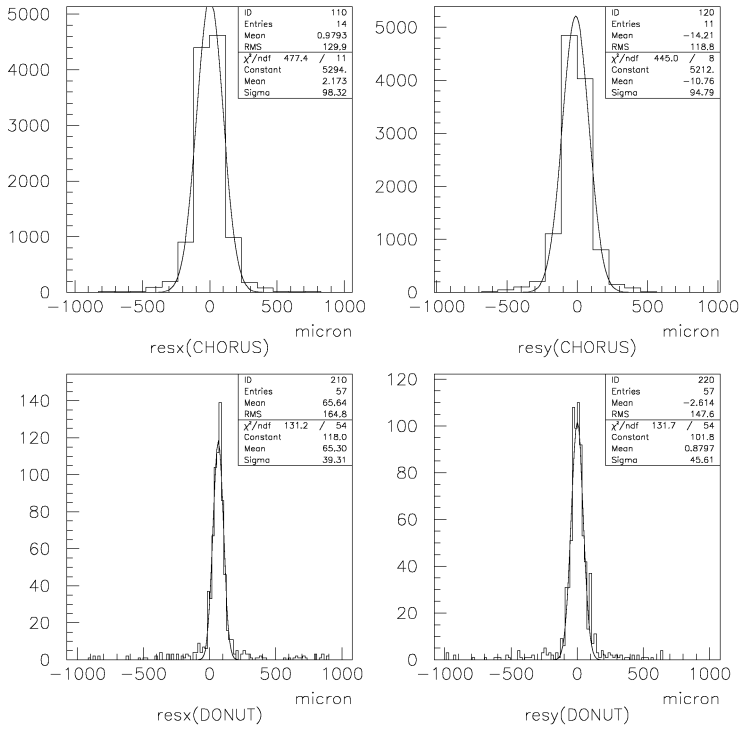

図 D.15: 位置分解能

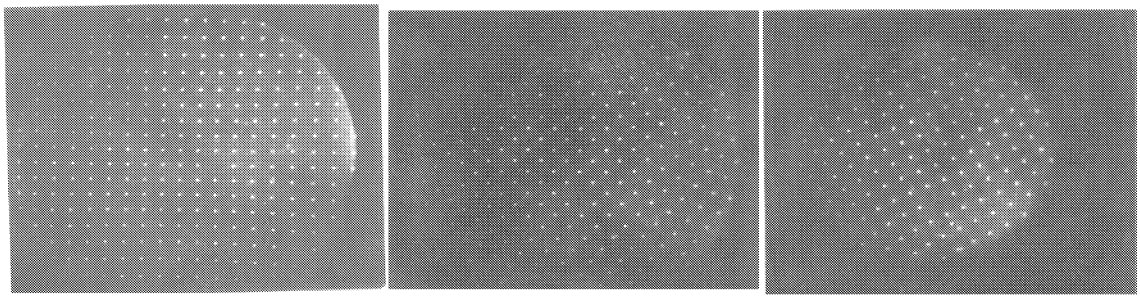

図 D.16: 平行磁場による画像への影響、左から右にいくに従って強い影響 (像の回転、視野の縮小) を受けている。

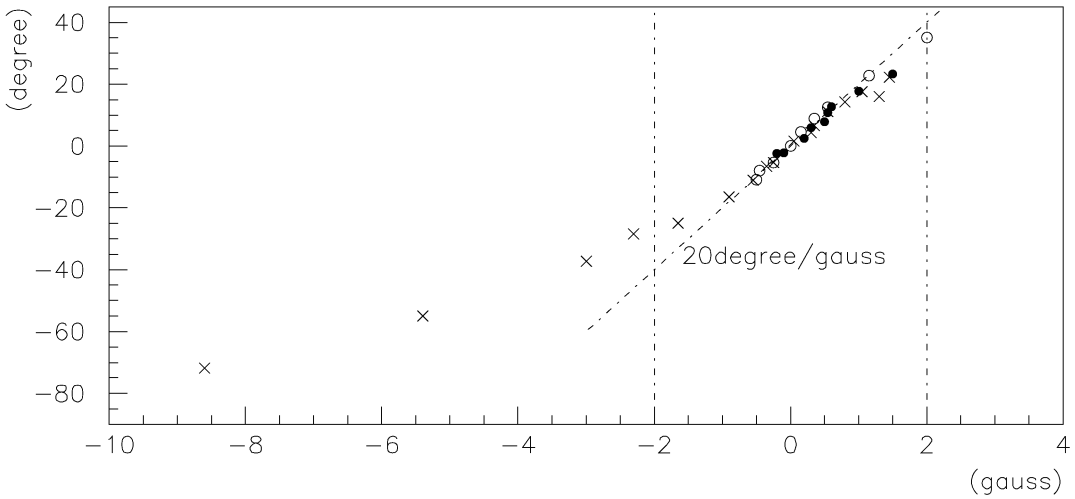

図 D.17: 平行磁場の大きさと直径 30mm の位置の像の回転角の関係 (data)。2gauss よりも大きいところでは視野の縮小があって使用不可。

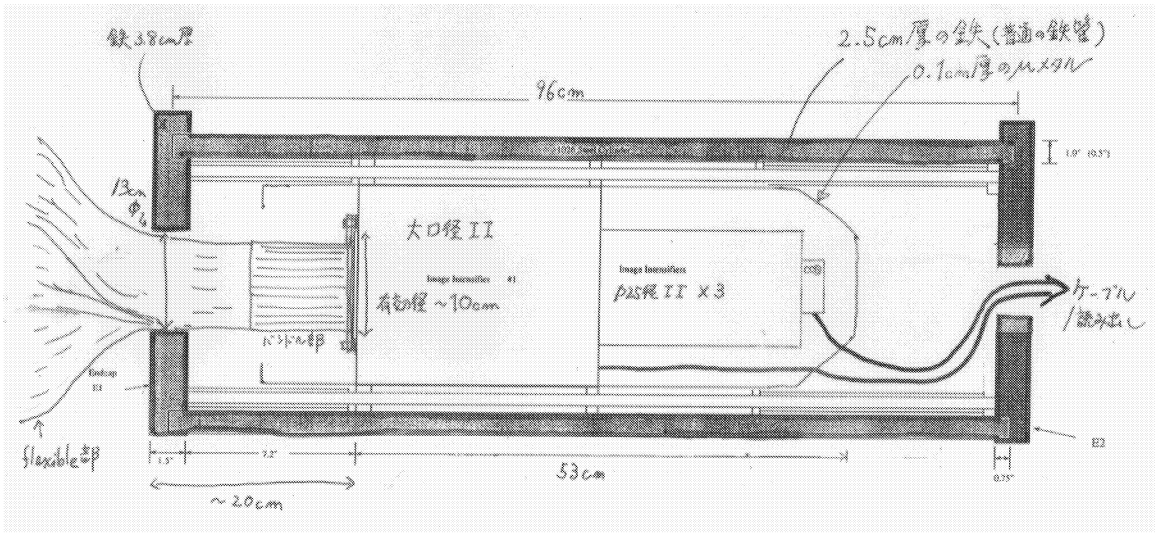

図 D.18: II-chain の磁気シールド。二重の管の構造

D.2 Image data decoding

読みだし部の画像情報として取り込まれたデータから、粒子が通過したファイバーを特定する作業 (decoding) が必要である。

D.2.1 キャリブレーションシステム

画像上のファイバーの位置を知るために、ニュートリノビームの来ていないタイミングでファイバー自身を発光させる方法を採った。しかし全てのファイバーを光らせてしまうと、II-chain によるにじみ、CCD のピクセルの粗さのために区別が付かなくなってしまうので、約 12 本に 1 本のファイバー (フィジシャルファイバー) を選び出して光らせた。フィジシャルファイバー全ての位置を一回の発光で得るためには強い励起が必要であるが、光が強すぎると II の光電面の電荷分布に偏りができるため、通常のニュートリノ反応の時と画像がずれてしまう。そこでフィジシャルファイバーの光はニュートリノ反応の時程度に弱くしておいて何度も画像をとって積分することにした。データをとるタイミングは Tevatron の加速時で、3 パターンのフィジシャルファイバー画像を毎回取り込んだ (図 D.19)。

ファイバーの励起は面発光のエレクトロルミネッセンスプレートを用い、黒テープを使ってフィジシャルファイバー以外を遮光した (図 D.20)。図 D.10 で 1 パターンを光らせたところが分かる。

CHORUS では 1 本の II-chain 当たり 45 本の 100μm のファイバーを特別に用意し、II-chain の歪みを点対称と仮定して関数形を仮定して補正した。100μm のフィジシャルファイバーと飛跡検出用のファイバーの位置関係はコンタクトプリントを使って求めた。これに対し DONUT の方式は一本の II-chain 当り平均 1300 本のフィジシャルファイバーがあることと、その位置がそのまま飛跡検出用のファイバーの位置であるという点で優れている。

画像上のフィジシャルファイバーの位置 (ファイバーマップ) は 1 つのパターンについて 100 以上の画像の積分を行って、光量で重心をとって求めた。再現性を求めるために、一連のフィジシャルファイバー画像を 2 つに分け（偶奇）それぞれから作ったファイバーマップを比べた。6 つのうちの 1 つについての結果が図 D.21 である。横軸に偶奇の 2 つのファイバーマップの対応するフィジシャルファイバーの位置の差を CCD ピクセル単位で表してある。これの分布の広がりは $1\sigma \sim 0.2$pixel で、読みだし面に換算すると 1pixel は約 150μm に相当するのでひろがりは 30μm、1 回の測定の再現性は $30/\sqrt{2} = 20\mu$m 程度だと求められる。これは 500μm の直径のファ

イバーの decoding に対して十分な値である。

またこのファイバーマップを別の日にとったものどうし比べてみると最大 300μm の程度で変化していることが分かった (図 D.22)。しかも画面の場所毎に向きが違って非線形なので、1 つのファイバーマップを使うのではなく解析する反応毎に別のファイバーマップを用意した。前述のとおり II-chain は非常に敏感に磁場の影響を受けるので、まわりの物体の配置や、空心磁石の on、off による II-chain の周りの鉄管の磁化のヒステリシス等によってファイバーマップが変化するのは理解できる。

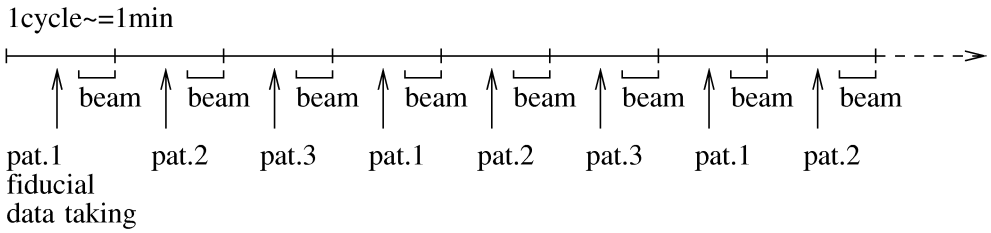

図 D.19: fiducial map data taking のタイミング。3 パターンを各ビームサイクル毎に読み出した。

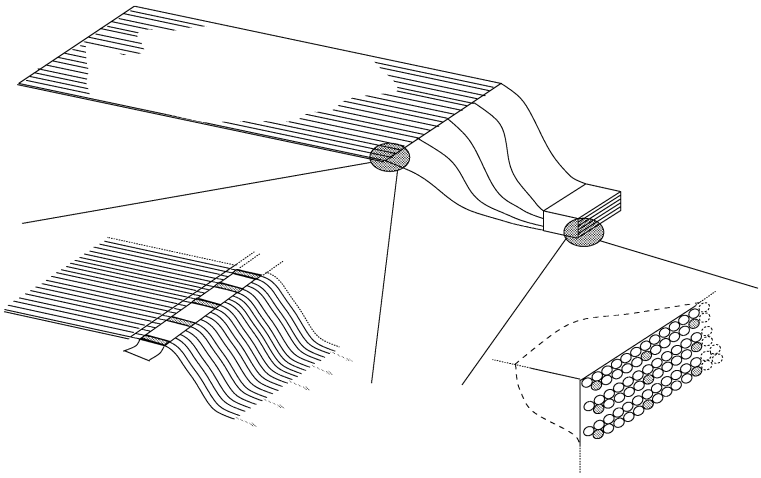

図 D.20: fiducial fiber の励起。遮光用の黒テープをファイバーフレックス部に編み込んだ。光源はエレクトロルミネッセンスプレートで編み込んだ位置でファイバーを励起した。

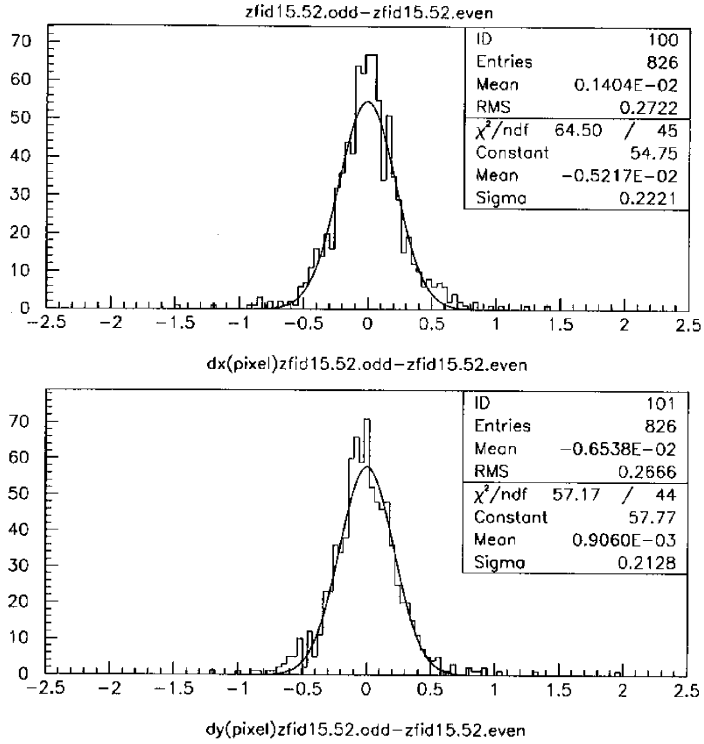

図 D.21: ファイバーマップの再現性 (一つの run の偶奇それぞれで求めた fiducial map の差で 1pixel は 150μm)

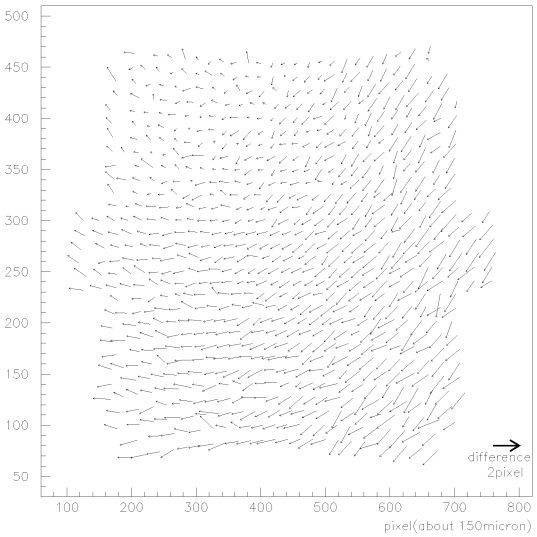

図 D.22: ファイバーマップの変化 (4 月 27 日と 8 月 27 日の map の比較)

D.2.2 ハニカム両面の SFT plane の解析

u、v projection の SFT plane は 11mm の厚さの紙ハニカム板の両面に貼り付けられてあり、紙ハニカム板に対する位置は測定しているので、両面のファイバーヒットを比較するのは decoding の確認に都合が良い。使用したサンプルは u,v projection の各 20plane を貫いている 4343 本のミュー粒子のデータで、158005plane に hit があった。これにより 1plane の検出効率は 91%である。ファイバーシート製作時に光電子増倍管で測定したデータは平均 7 光電子/plane だったが、なぜ検出効率がここから予想される値よりも低くなっているのかは不明である。

不確実性を取り除くためにハニカム板両面の plane で独立 hit であるものを選びだした。独立 hit の定義は 1plane 2 層俵積みの中にミュー粒子による hit のみで ±10 本のファイバーに他の hit がないものである。1plane 2 層俵積みの内 1 層だけに hit があるものを single hit、2 層に hit があるものを double hit と呼ぶことにする (図 D.23)。独立 hit は 97753 あり、全 hit に対する割合は 62%であった。ハニカムの両面とも独立 single hit のものは 16552 組、独立 double hit のものは 2036 組あった。ハニカムの片側の hit の位置から全 plane から求めたミュー粒子の角度 (≤ 1[mrad]) を使って反対側の次の plane に延長し、そこの hit の位置との距離を求めた (図 D.24)。独立 single hit どうしに対する分布は図 D.25 となった。中央の部分をガウス分布で fitting すると、$1\sigma = 192\mu$m で、この値は 2 枚の差である事を考慮すると 1 枚の精度は $192/\sqrt{2} = 136\mu$m となる。

ここで分布の形について考察する。まず粒子がファイバーを通過したとき読み出される光子の位置が単純に $\pm 250\mu$m に一様に分布していると仮定する (図 D.26-a) と、次の plane に延長した点との差はこの組み合わせで図 D.26-b で与えられる。データの中央の山の幅は明らかにこれより狭いので、この仮定は不適。次にファイバー断面円の面積に比例すると仮定する (図 D.27-a)。実際の分布は decoding の際に真実のファイバーを選択している割合 r により、別の層のファイバーに割り当ててしまったもの (図 D.27-b) と同じ層のファイバーに割り当ててしまったもの (図 D.27-c) の和となる。延長点との差の分布は正答率によって図 D.28 となる。正答率がどのくらいかは decoding の方法による。この解析では hit ファイバーの決定を CCD pixel で pulse height がまわりより高いものがあったら 1hit として選び、ファイバーマップによって中心の座標が直径 500μm 以内で最も近いファイバーにその hit を割り当てた (単純 peak 法)。CCD pixel サイズによって、無限に細かければ正答率は 1 に近づくが、粗ければ下がる。図 D.29 に横軸にファイバー直径を単位にした CCD pixel size の逆数、縦軸に正答率をモンテカルロシミュレーションで求めた結果を示す。DONUT の II-chain の縮小率は 3 ∼ 4pixel/fiber に相当するので図から約 84%と求められる。

この値でデータと重ねたものを図 D.30 に示す。すそ野の部分がピークの位置を別のファイバーに割り当ててしまったために現れたと解釈できる。図 D.31 は逆に正答率をパラメータとして minimum χ^2 fit したものである。この時正答率は 82%と妥当な値になっている。

以上により、単純 peak 法による decoding の位置精度の限界は CCD pixel のサイズによって決まっているといえる。ただしこれは 1 ファイバーからの光子が 1 つのものが主である場合で、もし大量に光子がある場合には重ね合わさって peak はファイバーの中心に集中してくるので、ファイバー断面に一様に分布するとの仮定が成り立たず、正答率が上がる。今回 hit の 0 確率から計算すると平均 2.4hit/plane となり、1 層だけの hit を選んだ場合 1peak/1 光電子の仮定がほぼ成り立っている。

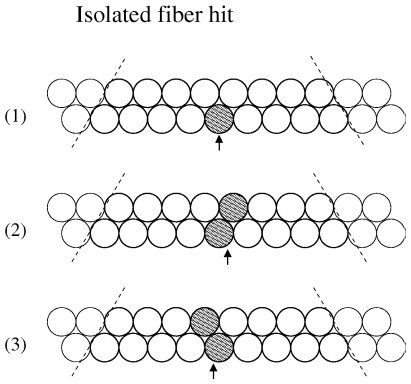

図 D.23: 「独立 fiber hit」の定義

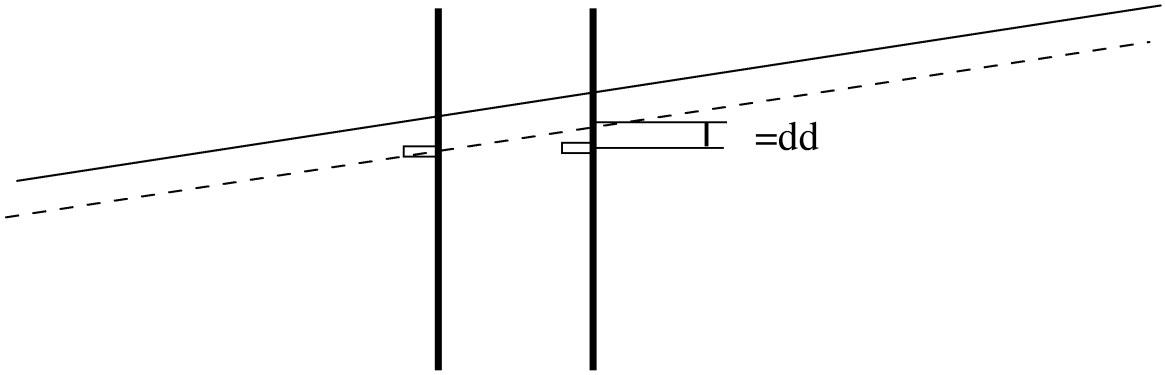

図 D.24: ハニカム両面の解析で評価する値

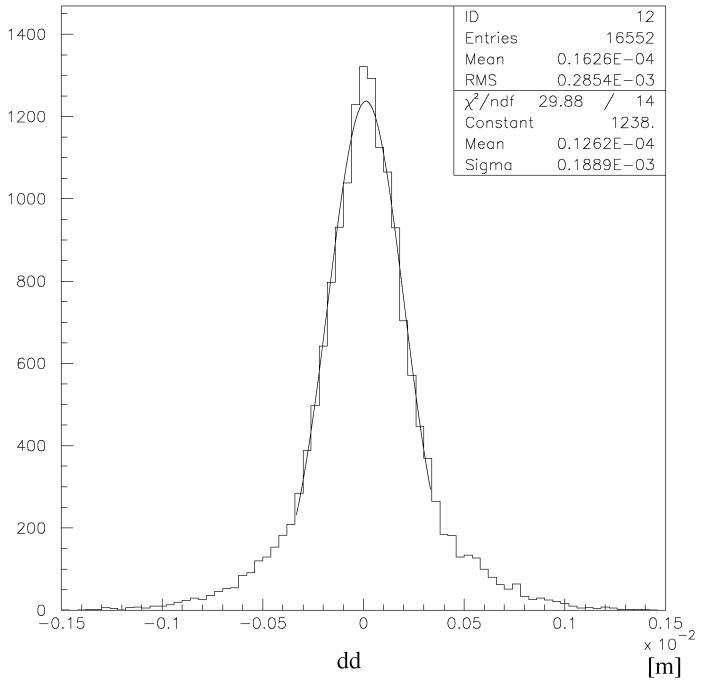

図 D.25: ハニカム両面独立 single hit の延長点との距離 (「dd」) の分布

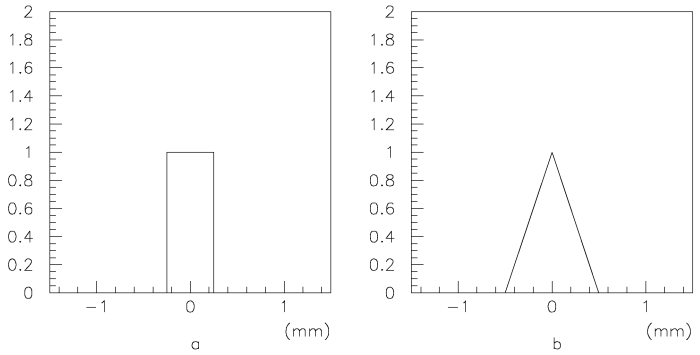

図 D.26: fiber 径 500μm の一様確率分布を仮定した場合 (a) の「dd」の分布 (b)

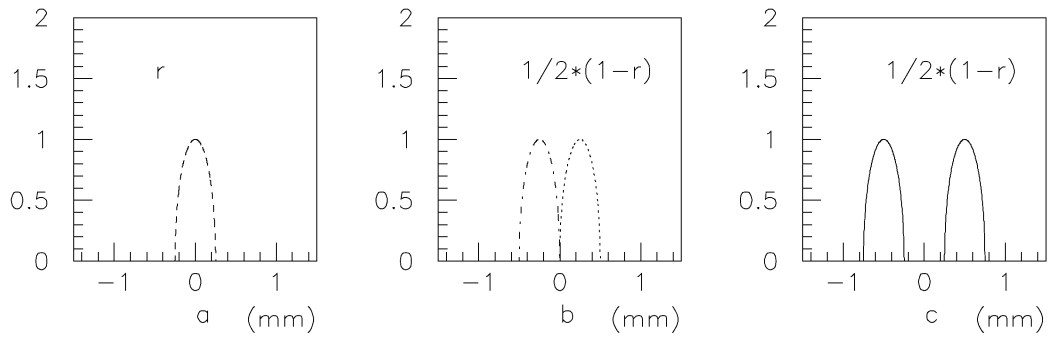

図 D.27: fiber 径 500μm の面積に比例した確率分布を過程した場合の「dd」の分布 (b,c は fiber hit の割り当てを誤った場合の分布。)

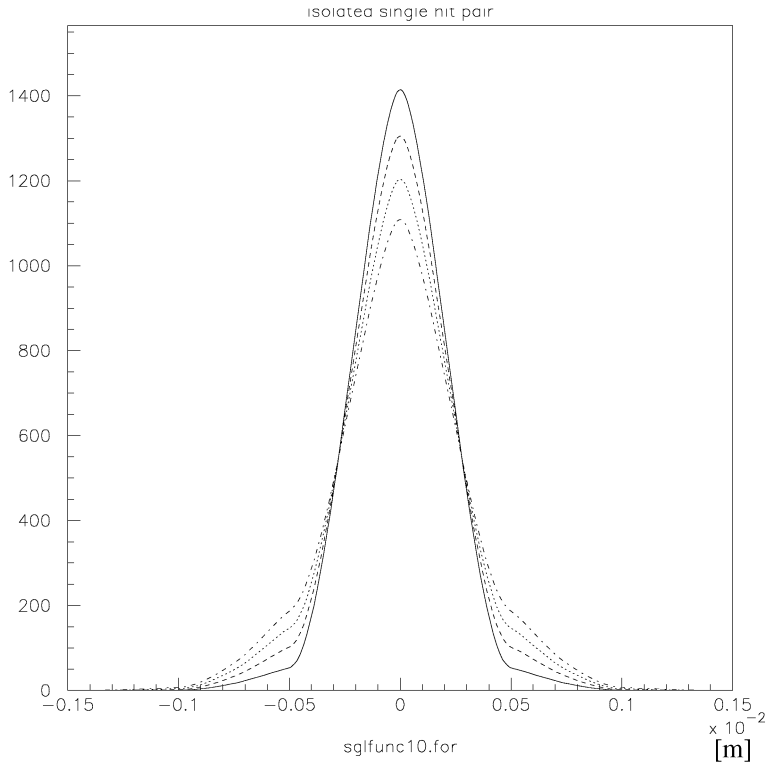

図 D.28: ファイバーの割り当ての各正答率に対して得られる「dd」の分布。(ピークの高い方から 93,86,79,73%)

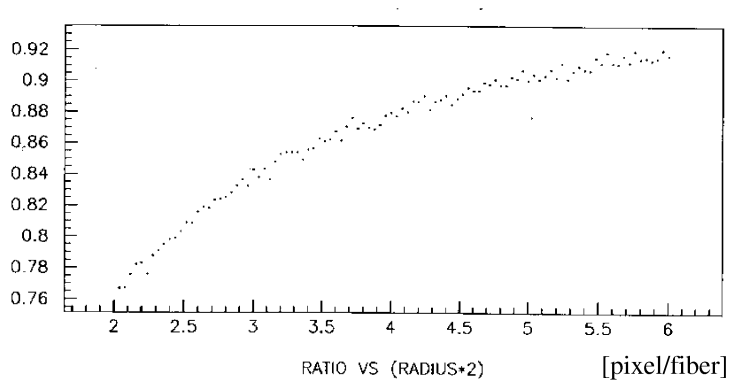

図 D.29: CCD pixel サイズに対する正答率

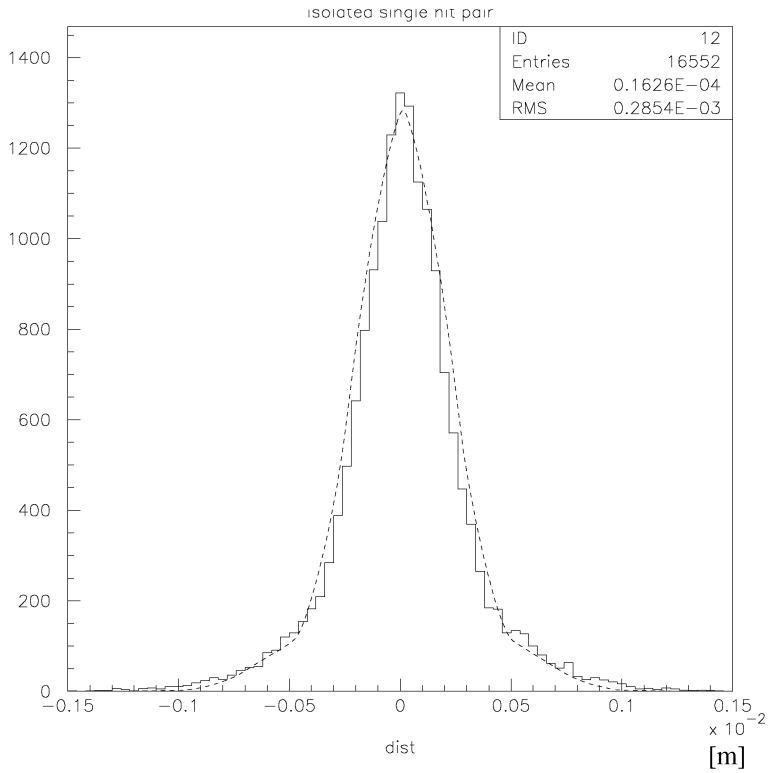

図 D.30: ファイバーの割り当ての正答率が 84%の分布をデータに重ねたもの

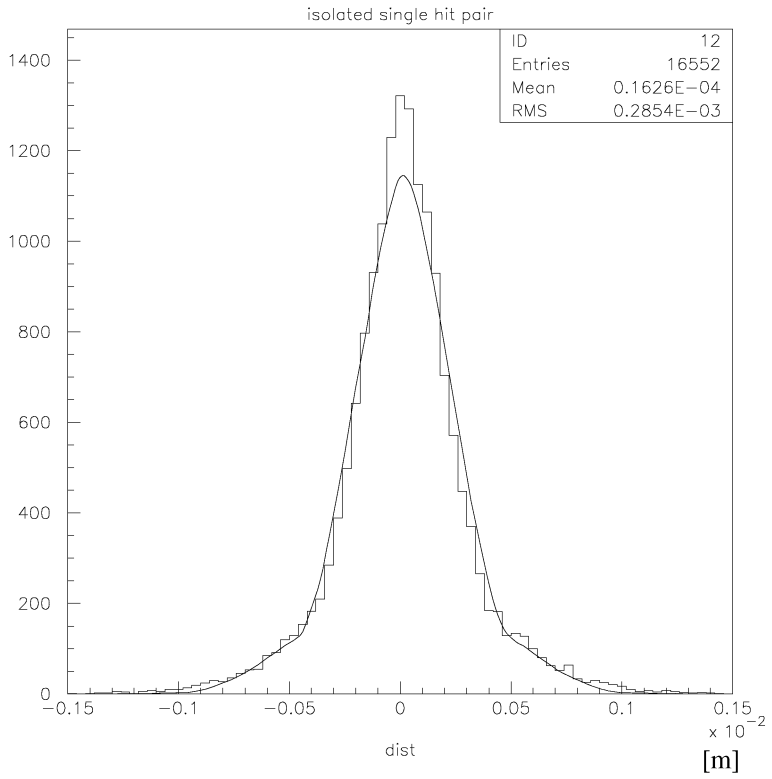

図 D.31: ファイバー割り当ての正答率をパラメータにして fitting した結果は 82%となった。

D.2.3 全 plane に対しての調整

ここではハニカム相互の位置調整について述べる。ニュートリノビーム照射の合間の 6 月 10 日と 8 月 27 日にミュー粒子のテストビーム照射を行った。それぞれのファイバーマップを使い、u,v 両 projection の 20 枚の SFT plane を貫いているミュー粒子を選び出した。

alignment 精度は u,v それぞれ 20 枚の SFT plane で作った直線と 1 枚の plane 上の hit との距離の分布をとって評価した。この時 plane に何点かの hit があった場合、直線に近い hit を優先して選択してしまうという不具合を除くため、前述の独立 hit のみを用いて分布を調べた。図 D.32 と図 D.33 は 2 つのテストビームの結果を示す。どちらも $1\sigma \sim 135\mu$m で 1 層 hit の限界近くまで alignment は追い込めている。alignment パラメータは同じものを使っており、その結果精度に差がないということは、2.5ヶ月間 SFT は同じ位置関係にあってサポート台のたわみ等の変化はなかったことが分かる。ただしここでのミュー粒子の角度は fiber plane に対してほぼ垂直なものばかり (図 D.34) なのでビーム方向の alignment に対してはものをいう事ができない。

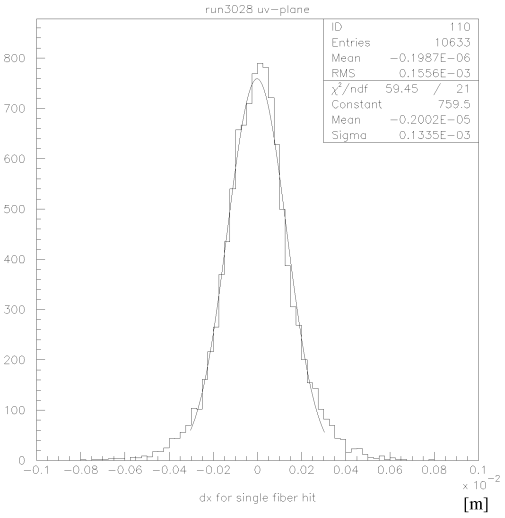

図 D.32: u、v 各プロジェクション 20 枚のファイバープレーンを貫いている飛跡に対し各プレーンのヒットと直線との距離 (1997 年 6 月 10 日のテストビームの結果)

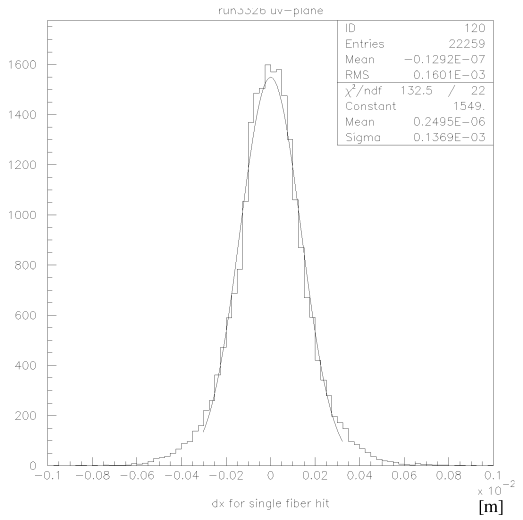

図 D.33: u、v 各プロジェクション 20 枚のファイバープレーンを貫いている飛跡に対し各プレーンのヒットと直線との距離 (1997 年 8 月 27 日のテストビームの結果)

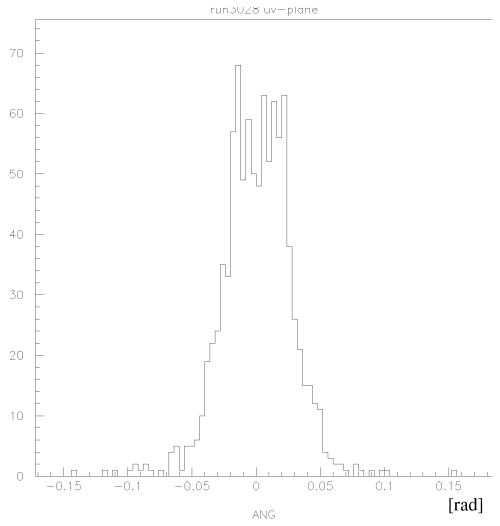

図 D.34: 使用した飛跡の角度分布（0 が fiber に垂直な方向）

D.2.4 原子核乾板ターゲットとの接続

原子核乾板ターゲットと SFT とは同じアルミニウム製の I ビームを支持体に用いてターゲットボックス内に設置されている。SFT で捕らえた飛跡の原子核乾板ターゲットへの接続の試験を宇宙線を使って行った。宇宙線を用いたのは、ビーム方向の情報を得るためにある程度角度が必要であった事と、原子核乾板の飛跡の蓄積密度を低くして不確実性を取り除く必要があったためである。

データの収集はニュートリノビーム照射終了後の 1997 年の 11 月に行った。原子核乾板モジュールは前後に 800μm 厚のプラスチックベースの両面に乳剤層のある原子核乾板を取り付けて設置した (図 D.35)。この原子核乾板は歴史的な理由で CS(Changeable Sheet) と呼んでいる。3 番目のターゲットには低運動量の宇宙線を排除する目的でステンレス板を入れた。他のターゲットは空とした。SFT で得られた飛跡の角度分布を図 D.36 に示す。宇宙線を使っているので、水平方向は上方から来るものに比べて少なく、全 SFT の貫通を要求したので上方から来るものも制限されている。

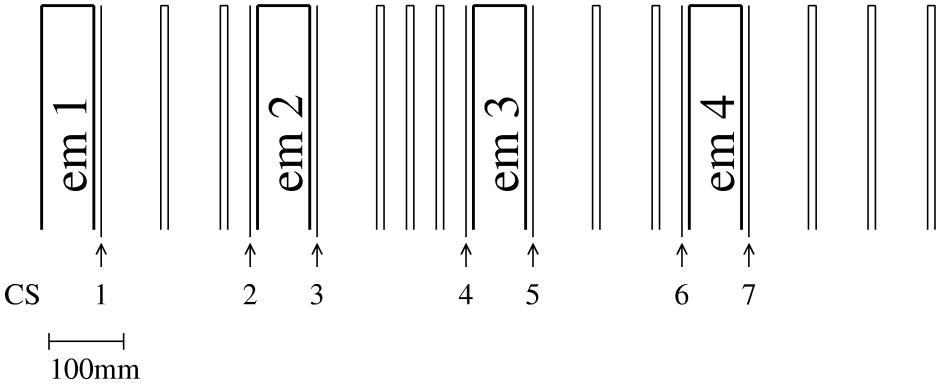

図 D.35: 宇宙線テストセットアップ

CS で図 D.36 の飛跡の探索を行った。その際 CS の座標系はハニカム板に取り付けた x-ray gun によって定めた (図 D.37)。x-ray gun の位置はハニカム板の基準点に対して測定した。CS1 から CS7 までの prediction 本数と飛跡候補数を表 D.1 に示す。候補数は、大半がただ 1 本でバックグラウンドはほとんどないと考えられる。

見つかった位置と SFT からの予測位置の違い、角度の違いの分布を CS1 について図 D.38 に示す。実際のニュートリノ反応点探索の際は全原子核乾板モジュールに中

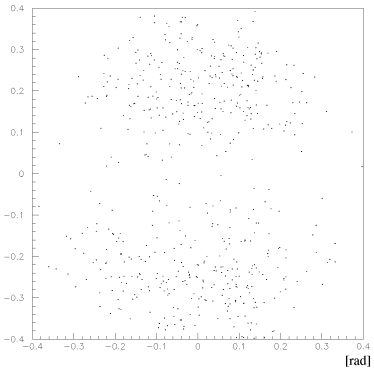

図 D.36: SFT で捕らえた宇宙線の角度分布

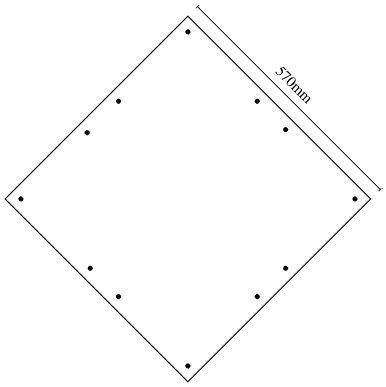

図 D.37: CS 上につけた X-ray mark の位置

身が入っているので、SFT は各 station 毎に飛跡の再構成をしなければならない。そこで CS1 に対して station 1 の SFT のみで作った飛跡の外挿値との位置ずれ、角度ずれを求めたのが図 D.39 である。他の CS の位置ずれの広がりについてガウス分布で fitting して求めた値を表 D.2 に示す。期待値は SFT 1plane の精度を 135μm とした時に期待される広がりである。図 D.40 に同じデータをグラフにしたものを示す。SFT 全体でひいた直線 (all) に対して期待値よりも大きくなっている理由が、全体がまだ調整不足のためか宇宙線の飛跡がそれぞれ曲がっているためなのか確認できていない。各 SFT station からの予測位置とは期待値通りの広がりかたをしていると言える。

位置ずれの平均値を図 D.41 に示す。全て 150μm 以内で収まっている。実際のニュートリノビーム照射時とは原子核乾板モジュールを交換しているのでこの値は当然変わるが、設計値とのずれはこの程度だと予想される。

角度差に関して表 D.3 と図 D.42 に示す。CS の角度測定精度は同じ飛跡に対する

CS#	試行数	候補 (内唯一候補)	検出効率 [%]
1	146	136(112)	93
2	147	147(110)	100
3	151	148(133)	98
4	147	144(118)	98
5	281	264(259)	94
6	162	157(153)	97
7	95	91(78)	96

表 D.1: 宇宙線 run CS の飛跡探索

CS5 と CS6 の角度差から、1 ∼ 1.4mrad と見積もられた。平均値のばらつきは原子核乾板モジュールの傾き、もしくは顕微鏡ステージの傾き（未確認）からくるもので、各原子核乾板モジュールでこの程度のばらつきがあることが示された。

宇宙線を用いた以上のテストで、SFT から原子核乾板モジュールにつなぐ時、または原子核乾板モジュールでの飛跡を SFT に延長するとき、位置ずれに関しては最大 150μm 程度、角度ずれは最大 2mrad 程度のオフセットが存在することが示された。

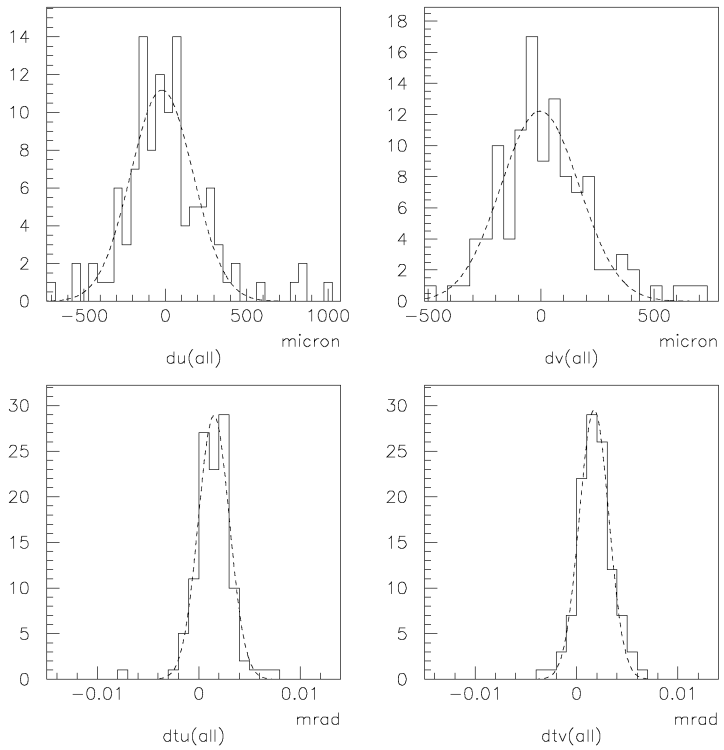

図 D.38: CS1 における SFT 全体でひいた直線との位置、角度の違い

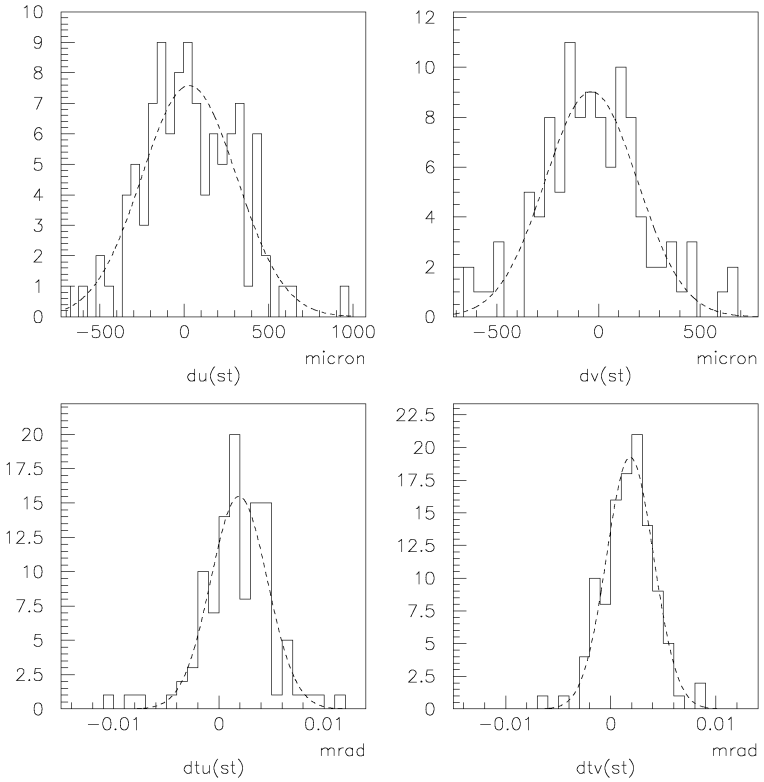

図 D.39: CS1 における近接 station でひいた直線との位置、角度の違い

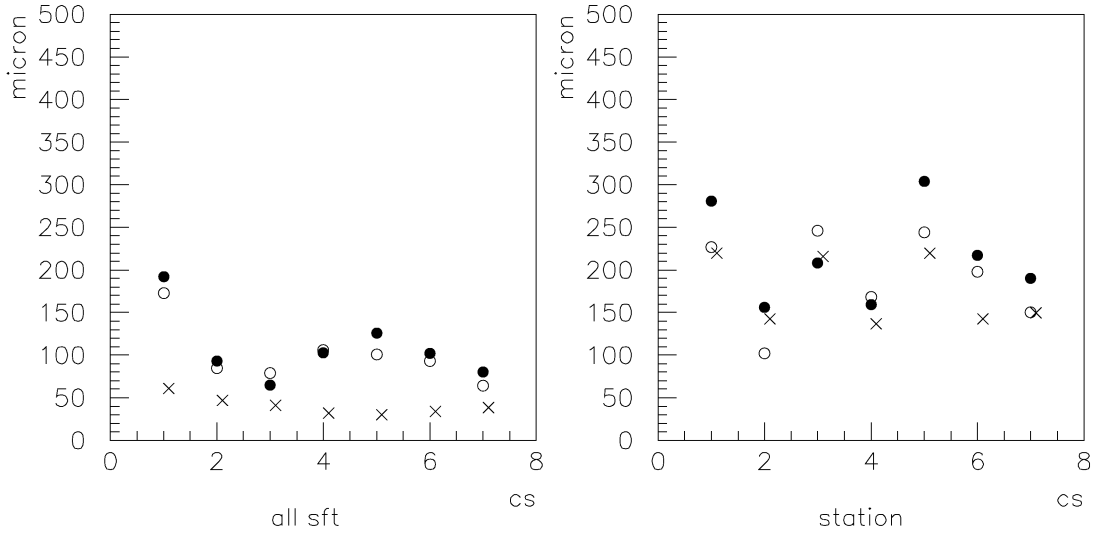

図 D.40: CS 位置ずれのひろがり (u,v, 黒白丸) と期待値 (x)

CS#	SFT fit	$\sigma_u[\mu\mathrm{m}]$	$\sigma_v[\mu\mathrm{m}]$	期待値
1	all	192	173	61.1
	station	281	227	219.9
2	all	93	85	46.5
	station	156	102	142.5
3	all	65	79	40.8
	station	208	246	215.7
4	all	103	106	31.8
	station	159	168	136.7
5	all	126	101	30.3
	station	304	244	219.9
6	all	102	93	34.1
	station	217	198	142.5
7	all	80	64	38.4
	station	190	150	149.4

表 D.2: CS 位置ずれの広がり。(期待値は SFT の位置精度を 135μm としたときの値)

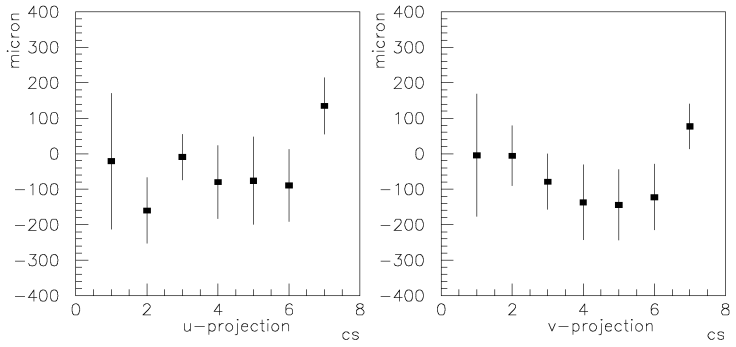

図 D.41: 位置ずれの平均値

CS#	SFT fit	σ_{θ_u}[mrad]	σ_{θ_v}[mrad]	期待値
1	all	1.5	1.4	1.4
	station	2.7	2.2	2.2
2	all	1.5	1.9	1.4
	station	2.5	2.6	2.2
3	all	1.3	1.8	1.4
	station	2.0	2.5	2.2
4	all	1.6	1.4	1.4
	station	2.3	2.8	2.2
5	all	1.3	1.7	1.4
	station	2.9	2.6	2.2
6	all	1.3	1.4	1.4
	station	3.0	3.1	2.2
7	all	1.4	1.7	1.4
	station	2.4	1.9	1.6

表 D.3: CS 角度ずれの広がり。(期待値は SFT の位置精度を 135μm、CS の測定精度を 1.4mrad としたときの値)

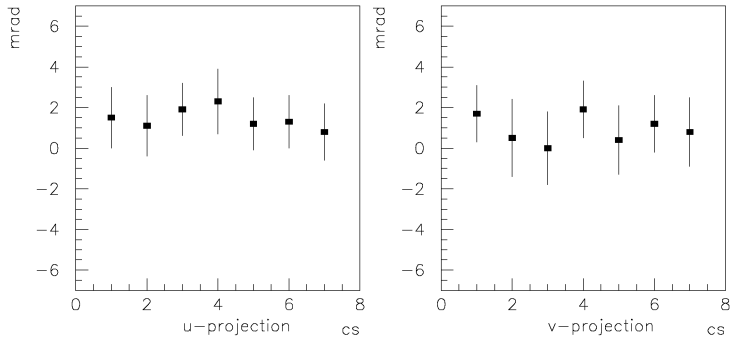

図 D.42: 角度ずれの平均値