



# 800GeV/c陽子・原子核反応におけるチャーム粒子の研究

樽磨, 和幸

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1989-03-31

(Date of Publication)

2008-03-14

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0810

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000810>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

800 GeV / c 陽子・原子核  
反応におけるチャーム粒子の研究

平成元年 1 月

神戸大学大学院自然科学研究科

樽 磨 和 幸

## 要 旨

米国フェルミ国立加速器研究所 ( F e r m i l a b )  
において、原子核乾板を固定標的とするハイブリッド実  
験 ( E 6 5 3 ) を行い、 $800 \text{ GeV} / c$  の陽子を乾板  
標的に照射した。

我々神戸大学グループは、この実験における原子核乾  
板解析のため新たな解析装置を開発し実用化した。本論  
文は、この装置の紹介、及び、原子核乾板解析方法を中  
心に実験全般に渡って報告している。

更に、現在までに乾板解析で得られたデータを基に、  
ハドロンの相互作用におけるチャーム粒子生成機構につ  
いて検討した。特に、チャーム粒子の二粒子相関に注目  
し、これらの方位角の差について検討した結果、E 6 5  
3 実験より低いエネルギー領域で行われた実験結果と一  
致しない結果が得られた。このことよりエネルギーが異  
なると違った生成機構が関与する可能性があることを示  
唆した。

## 目 次

	頁
要旨	- 1 -
目 次	- 2 -
図のリスト	- 5 -
表のリスト	- 9 -
第 1 章 序論	1
第 2 章 E 6 5 3 実験装置	6
2-1 ビーム	6
2-2 標準座標系	11
2-3 カウンターシステム	11
2-3-1 ビーム検出器	11
2-3-2 荷電粒子スペクトロメータ	15
2-3-3 飛行時間測定装置 (TOF)	22
2-3-4 カロリメータ	22
2-3-5 ミューオンシステム	25
2-4 原子核乾板標的	30
2-5 オンラインでの反応選別 (トリガー)	30
第 3 章 原子核乾板標的	34
3-1 標的の構造	34
3-2 ビーム照射	39
3-3 リファレンスマーク	43
3-4 ビーム照射後の乾板処理	48
3-5 乾板座標	53
第 4 章 原子核乾板解析装置	61
4-1 COCAP	61

4-2	ASVIS	78
第5章	崩壊候補探索	92
5-1	乾板解析用反応選別	92
5-1-1	オフライン処理による反応選別	92
5-1-2	有効領域等による反応選別	96
5-2	乾板中での崩壊の様相	98
5-3	崩壊候補反応探索	100
5-4	相棒崩壊候補探索	113
5-5	乾板測定データ	113
5-6	崩壊候補探索結果	115
第6章	チャーム・反チャーム粒子相関	121
6-1	現状の概観	121
6-2	データサンプル	125
6-3	方位角の差 ( $\Delta\phi$ )	130
6-4	結果の検討	133
第7章	まとめ	144
	謝辞	146
付録1	原子核乾板標的の作製と現像処理	147
A1-1	原子核乾板の特性	147
A1-2	原子核乾板標的の作製	147
A1-2-1	標的作製施設	147
A1-2-2	E653における乾板標的の作製	151
A1-3	貼付け	162
A1-4	原子核乾板の現像処理	163
A1-4-1	現像処理施設	166
A1-4-2	E653における実際の現像処理	172
A1-5	現像後のペリクルの性能	178

付録 2	データサマリーテーブル (D S T)	1 8 1
付録 3	運動学的フィットの方法	1 8 2
付録 4	運動量の推定法	1 8 3
	参考文献リスト	1 8 5

## 図のリスト

		頁
図 2. 1	フェルミ国立加速器研究所 ( F e r m i l a b ) の全景	7
図 2. 2	E 6 5 3 実験装置	8
図 2. 3	N E ビームラインの概略図	1 0
図 2. 4	原子核乾板標的上流面での入射粒子の位置分布	1 2
図 2. 5	入射粒子の角分布	1 2
図 2. 6	E 6 5 3 標準座標系	1 3
図 2. 7	ビームドリフトチェンバーの概略図	1 4
図 2. 8	ビームドリフトチェンバー ( X 及び X ' 層 )	1 4
図 2. 9	ビーム S S D の概略図	1 6
図 2. 1 0	S M C - 1 0 4 マグネット	1 8
図 2. 1 1	スペクトロメータドリフトチェンバーセルの概略図	2 0
図 2. 1 2	スペクトロメータドリフトチェンバーセルの詳細	2 0
図 2. 1 3	スペクトロメータドリフトチェンバーで得られた 典型的な反応例に対するヒットパターン	2 1
図 2. 1 4	飛行時間測定装置 ( T O F )	2 3
図 2. 1 5	液体アルゴンカロリメータ ( L A C ) セル	2 4
図 2. 1 6	L A C の概略図	2 4
図 2. 1 7	L A C のパッド読み出しボード	2 6
図 2. 1 8	ミュオンシステム	2 7
図 2. 1 9	ミュオンホドスコープ	2 9
図 2. 2 0	ビームシンチレータ	3 1
図 2. 2 1	トリガー論理図	3 3
図 3. 1	Hタイプ原子核乾板標的の構造	3 6
図 3. 2	ミニモジュールの構造	3 7
図 3. 3	Vタイプ原子核乾板標的の構造	3 8
図 3. 4	ターゲットムーバー	4 0
図 3. 5	Hタイプ標的の取り付け治具	4 1
図 3. 6	ターゲットムーバー制御用テーブルの一例	4 2

図 3. 7	乾板で測定したビーム照射密度	4 4
図 3. 8	ビーム照射マップ	4 5
図 3. 9	X線照射系の概略図	4 7
図 3. 1 0	X線コリメータ	4 9
図 3. 1 1	X線マーク照射位置	5 0
図 3. 1 2	ペリクルの端付近での歪み	5 1
図 3. 1 3	貼付け後のペリクル	5 2
図 3. 1 4	モジュール座標	5 4
図 3. 1 5	モジュール座標と標準座標の対応付けの概念図	5 5
図 3. 1 6	ペリクル座標	5 7
図 3. 1 7	ペリクル座標とモジュール座標の対応付けの概念図	5 7
図 3. 1 8	X線マークの交点の測定精度	5 9
図 3. 1 9	X線マークの傾きの測定精度	5 9
図 3. 2 0	入射粒子の乾板での測定位置と カウンターの予言位置の差 (補正後)	6 0
図 4. 1	C O C A P (写真)	6 3
図 4. 2	C O C A Pを含む測定装置のブロックダイアグラム	6 4
図 4. 3	改良型測定用顕微鏡の構造 (概略図)	6 5
図 4. 4	改良型測定用顕微鏡 (写真)	6 6
図 4. 5	ステージの駆動部分の構造	6 7
図 4. 6	各ステージの位置読み取り機構	6 9
図 4. 7	ステージ位置読み取り単位の場合によるばらつき	7 1
図 4. 8	$\theta$ -ステージの回転中心と光軸のずれ	7 2
図 4. 9	$\theta$ -ステージの読み取り単位の回転量による変化	7 2
図 4. 1 0	E 6 5 3 実験用に構築した測定プログラムのモジュール	7 4
図 4. 1 1	飛跡を追跡するのに要する時間と飛跡角度の関係	7 6
図 4. 1 2	角測定しなければ分離できないバックグラウンドの飛跡本数	7 7
図 4. 1 3	Dスタック内での崩壊の模式図	7 9
図 4. 1 4	Dシートでの角測定精度の推定値	8 1
図 4. 1 5	A S V I S の構成 (概略図)	8 3
図 4. 1 6	A S V I S (写真)	8 4
図 4. 1 7	映像信号コントロールボックスのダイアグラム	8 6
図 4. 1 8	A S V I S を用いた飛跡探索の概念図	8 7
図 4. 1 9	ビームパターン合わせの精度	8 8



図 4. 2 0	ASVISを用いた角測定精度と飛跡角度の関係	9 0
図 4. 2 1	ASVISを用いた角測定精度	9 0
図 5. 1	ペリクル部分の有効領域	9 7
図 5. 2	崩壊点の様相	9 9
図 5. 3	崩壊候補反応探索のアルゴリズム	1 0 1
図 5. 4	崩壊候補反応探索手順の概念図	1 0 2
図 5. 5	Dシートで測定したミュオン粒子の位置と カウンターの予言位置の差	1 0 4
図 5. 6	ミュオン粒子の角度による発見率	1 0 7
図 5. 7	ミュオン粒子の運動量による発見率	1 0 8
図 5. 8	ペリクル底面から測定した入射粒子の位置	1 0 9
図 5. 9	入射粒子の乾板での測定位置と カウンターの予言位置の差 (補正前)	1 1 1
図 5. 1 0	相棒崩壊候補探索のアルゴリズム	1 1 4
図 5. 1 1	チャーム粒子を対で含む反応の例	1 1 7
図 5. 1 2	崩壊長分布	1 2 0
図 6. 1	ハドロンの相互作用 ( $A + B \rightarrow C + D + X$ ) による重いクォーク生成	1 2 2
図 6. 2	最低次 ( $\alpha_s^2$ ) のオーダーでのfusionモデルのダイアグラム	1 2 3
図 6. 3	Flavour excitationモデルのダイアグラム	1 2 3
図 6. 4	(a) 陽子中のintrinsic charmと (b) intrinsic charm モデルにおける $\Lambda_c^+$ 生成のダイアグラム	1 2 4
図 6. 5	CERN-I SR実験におけるチャーム粒子の $X_F$ 分布	1 2 6
図 6. 6	エネルギーとチャーム粒子生成断面積の関係	1 2 7
図 6. 7	方位角の差 ( $\Delta\phi$ ) 分布。(生データ)	1 3 1
図 6. 8	方位角の差 ( $\Delta\phi$ ) 分布。(測定誤差を考慮したもの)	1 3 2
図 6. 9	NA 2 7 実験とWA 7 5 実験の $\Delta\phi$ に関する結果	1 3 4
図 6. 1 0	NA 2 7 実験及びWA 7 5 実験とE 6 5 3 実験の比較	1 3 5
図 6. 1 1	$\alpha_s^3$ でのダイアグラム	1 3 6
図 6. 1 2	(a) 擬ラピディティの差 ( $\Delta\eta$ ) の分布 (b) $\Delta\phi$ の値で分類した $\Delta\eta$ 分布	1 3 8
図 6. 1 3	$\Delta\eta$ の値で分類した場合の $\Delta\phi$ 分布	1 3 9
図 6. 1 4	チャーム粒子対のファイマンX ( $X_F(C\bar{C})$ ) 分布	1 4 1

図 6. 1 5	$X_F$ (CCbar) の値で分類した $\Delta \phi$ 分布	1 4 2
図 A 1. 1	グレインの見かけの大きさ	1 4 9
図 A 1. 2	グレインの飛跡の周りのばらつき	1 5 0
図 A 1. 3	原子核乾板作製施設の概観	1 5 2
図 A 1. 4	塗布後の乾板の重量変化 (乾燥曲線)	1 5 4
図 A 1. 5	E 6 5 3 一次実験で作製したベリクルの厚さ	1 5 6
図 A 1. 6	裁断機 (スリッター)	1 5 8
図 A 1. 7	裁断機で切り取ったベリクルの形状	1 6 0
図 A 1. 8	原子核乾板現像処理施設の概観	1 6 7
図 A 1. 9	冷却系統の概念図	1 6 9
図 A 1. 1 0	( a ) 現像液冷却系の冷却能力	1 7 3
	( b ) process装置の冷却能力	1 7 3
図 A 1. 1 1	乾板処理中の液温の変化	1 7 4
図 A 1. 1 2	E 6 5 3 実験での現像処理スケジュール表	1 7 6
図 A 1. 1 3	$I / I_0$ と $P \beta$ の関係	1 7 9
図 A 1. 1 4	グレイン密度とベリクル底面からの距離の関係	1 8 0

## 表のリスト

		頁
表 1. 1	現在までに存在の確認されているチャーム粒子とボトム粒子	3
表 1. 2	F e r m i l a b E 6 5 3 実験の協同研究機関リスト	5
表 2. 1	E 6 5 3 実験装置を構成する各検出器の性能	9
表 3. 1	一次実験でのビーム照射記録	4 6
表 4. 1	C O C A P 測定用顕微鏡のステージ位置読み取り単位	7 0
表 5. 1	オフライン反応選別状況 (第一段階)	9 3
表 5. 2	オフラインでの選別条件	9 3
表 5. 3	オフライン反応選別状況 (第二段階)	9 5
表 5. 4	Dシートでの崩壊候補反応探索結果	1 0 6
表 5. 5	ペリクルでの崩壊候補反応探索結果	1 1 2
表 5. 6	乾板測定データの一例	1 1 6
表 5. 7	トポロジー別崩壊例のまとめ	1 1 9
表 5. 8	E 6 5 3 実験全体での崩壊候補探索結果	1 1 9
表 6. 1	二粒子相関を調べるための反応選別状況	1 2 9
表 6. 2	データサンプルの崩壊トポロジー	1 2 9
表 6. 3	N A 2 7 実験及び W A 7 5 実験と E 6 5 3 実験の $\Delta \phi$ 分布の比較	1 3 5
表 A 1. 1	原子核乾板の組成	1 4 8
表 A 1. 2	原子核乾板の現像処理手順	1 6 4
表 A 1. 3	現像処理液の処方と E 6 5 3 実験において一回に用いる処理液の量	1 6 5
表 A 1. 4	原子核乾板現像処理施設に設置した各処理液タンクの大きさ	1 7 0
表 A 1. 5	冷却機の機種と冷却能力	1 7 1

## 第 1 章 序 論

1935年にY u k a w aが $\pi$ 中間子の存在を示唆した頃、存在が確認されていた素粒子は、光子( $\gamma$ )、電子( $e^-$ )、陽電子( $e^+$ )、陽子( $p$ )、及び、中性子( $n$ )の5つでしかなかった。その後、現在に至るまでに各種の高エネルギー実験によって種々の素粒子が発見された。それらを性質の違いによって分類すると、ゲージボソン、レプトン、そして、ハドロンに分けられる。ゲージボソンには、 $\gamma$ 、 $W^\pm$ 、 $Z^0$ が、レプトンには、 $e^-$ 、 $\nu_e$ 、 $\mu^-$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\tau^-$ 、 $\nu_\tau$ 、及び、その反粒子が属する。ハドロンは、更にメソンとバリオンに分類できる。前者に属する安定粒子には、 $\pi^\pm$ 、 $\pi^0$ 、 $\eta$ 、 $K^\pm$ 、 $K^0$ 、 $\bar{K}^0$ 、 $D^\pm$ 、 $D^0$ 、 $\bar{D}^0$ 、 $D_s^\pm$ 、 $B^\pm$ 、 $B^0$ 、 $\bar{B}^0$ がある。また後者には、 $p$ 、 $n$ 、 $\Lambda$ 、 $\Sigma^\pm$ 、 $\Sigma^0$ 、 $\Xi^0$ 、 $\Xi^-$ 、 $\Omega^-$ 、 $\Lambda_c^+$ 、 $\Xi_c^+$ 、 $\Omega_c^0$ 、 $\Lambda_b^0$ が含まれる<sup>(1.1)</sup>。これらの安定粒子以外にも数多くの不安定なハドロンが発見されている。

この分類の基礎をなす基本粒子間の相互作用には、強い相互作用、弱い相互作用、電弱相互作用、そして、重力相互作用の4種類があると考えられている。これ以外に第5の相互作用を示唆する報告がなされている<sup>(1.2)</sup>が、まだ確認されていない。M a x w e l l が、電氣的相互作用と磁気相互作用を一つの相互作用として理解できることを示したことは周知の通りである。その後、1964年にG l a s h o w、W e i n b e r g、S a l a mは、電磁相互作用と弱い相互作用を統一的に解釈し電弱相互作用として体系付けた<sup>(1.3)</sup>。それは、1983年ヨーロッパ原子核研究機関(C E R N)でR u b b i a等がウィークボソンを発見した<sup>(1.4)</sup>ことにより正当性が確認された。同様に、上記4つの相互作用は、一つの相互作用として統一できるのではないかという期待を抱かせることになった。

極端に多いハドロンに関して1964年、G e l l - M a n n、Z w e i gによってクォーク模型が提唱された<sup>(1.5)</sup>。これは、ハドロンが、クォークと呼ばれる更に基本的な粒子から構成されているという考え方である。この模型によると、バリオンは3つのクォークの束縛状態であり、メソンはクォークと反クォークの束縛状態である。1972年、K o b a y a s h i、M a s k a w aは、合計

6つのクォークの存在を予言した<sup>(1.6)</sup>。これら6つのクォークは、各々、u（アップクォーク）、d（ダウルクォーク）、s（ストレンジクォーク）、c（チャームクォーク）、b（ボトムクォーク）、そして、t（トッパークォーク）と呼ばれている。こうしてレプトンとハドロンは、次のように分類されるに至った。

$$\begin{array}{l} \text{レプトン} \\ \text{クォーク} \end{array} \quad \begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \end{array}$$

この考えは、その後実験的な裏付けが得られ広く受け入れられるようになっていく。

チャームクォークは、1974年、スタンフォード線形加速器センター（SLAC）でRichter等によって<sup>(1.7)</sup>、また、ブルックヘブン国立研究所（BNL）でTing等によって<sup>(1.8)</sup>チャーム・反チャームクォークの束縛状態（ $J/\psi$ ）という形で確認された。一方ボトムクォークは、1977年にフェルミ国立加速器研究所（Fermilab）でLederman、Yamanouti等によってボトム・反ボトムクォークの束縛状態（ $T$ ）が発見され<sup>(1.9)</sup>、その後、ボトムクォークを陽に含む粒子（ボトム粒子）も確認されている。特に、1985年にCERNで行われた原子核乾板を用いた実験では、ボトム粒子の崩壊が一例ではあるが直接観測されている<sup>(1.10)</sup>。また、トッパークォークは、今なおその存在が確認されておらず、日本の高エネルギー研究所（KEK）のトリスタン（TRISTAN）を初め各国の研究所で確認を目指して実験が進行中、もしくは計画されている段階である。最近、7番目のクォーク（ $b'$ ）の存在を示唆する実験報告がなされている<sup>(1.11)</sup>が、まだ確証はない。現在までに確認されたボトム、及び、チャーム粒子を表1.1に示す。

さて、 $J/\psi$ の発見以後、現在に至るまで、チャームクォークを陽に含む粒子（チャーム粒子）の質量や、その崩壊、生成に関する諸性質を明らかにしようとする各種の実験が行われている。我々神戸大学グループが参加して行った国際協同実験、Fermilab E531もその一つである。この実験は、1970年代後半から1980年代前半にかけて行われ、チャーム粒子の寿命に関する実験結果は、当時世界の標準値となった<sup>(1.12)</sup>。この実験では、空間分

表 1. 1            現在までに存在の確認されている  
安定なチャーム粒子とボトム粒子

チャーム粒子	質量 (MeV/c <sup>2</sup> )
D <sup>±</sup>	1869.3 ± 0.6
D <sup>0</sup> , $\bar{D}^0$	1864.6 ± 0.6
D <sub>s</sub> <sup>±</sup>	1970.5 ± 2.5
Λ <sub>c</sub> <sup>+</sup>	2281.2 ± 3.0
Ξ <sub>c</sub> <sup>+</sup>	2460 ± 25
Ω <sub>c</sub> <sup>0</sup>	2740 ± 20

ボトム粒子	質量 (MeV/c <sup>2</sup> )
B <sup>±</sup>	5271.2 ± 3.0
B <sup>0</sup> , $\bar{B}^0$	5275.2 ± 2.8
Λ <sub>b</sub> <sup>0</sup>	5425 ± 175

解能の非常に優れた原子核乾板を標的兼検出器とし、その上下流に電氣的検出器を配したハイブリッド・エマルジョン・スペクトロメータと呼ばれる装置を用いた。この種の装置を用いた実験は、歴史的には、1965年にBurhop等によって行われた実験<sup>(1.13)</sup>が最初のものである。E531実験が成功を納めた大きな原因は、この種の実験では必要不可欠な電氣的検出器と原子核乾板標的の位置の対応付けが精度良く行えたことにある。

E531実験の成功を機に、1981年、この実験グループを中心として、更に多くのチャーム粒子を収集することによりその生成、崩壊に関する精密な研究をすること、及び、当時情報が甚だ不十分であったボトム粒子を直接観測することを目的とした実験が計画された<sup>(1.14)</sup>。それが、本論文で報告する日・米・韓の3国による国際協同実験、Fermilab E653である。協同研究機関のリストを表1.2に示す。この実験もE531実験同様、ハイブリッド・エマルジョン・スペクトロメータを用いている。日本のグループは、主に原子核乾板部とそのすぐ下流に位置する飛跡検出器の一部を担当している。

ビーム照射は、1985年と1987年の二回に分けて行った。一次実験では、800 GeV/cの陽子を計32リットルの原子核乾板に照射し、約5百万の反応例を記録した。また、二次実験では、ビームを600 GeV/cの $\pi^-$ に変更し、計39リットルの原子核乾板に照射した。その結果、約9百万の反応例を記録している。この実験は現在進行中であり、一次実験の乾板解析の約30%を処理し終えた段階でチャーム粒子候補を含む反応を約650例収集している。

本論文では、著者の所属する神戸大学グループが新たに開発した原子核乾板解析装置、及び、乾板解析の方法を中心にE653実験全般に渡って報告する。そして、現在までに収集した反応例の内、特に2つのチャーム粒子を含む反応に注目し、チャーム粒子生成における二粒子相関について解析した結果を報告する。これは、強い相互作用を記述する色量子力学を検証する上で重要な情報を与えるものである。また、著者は、Fermilabにおいて上記二回のビーム照射に携わり、原子核乾板標的の製作、及び、現像処理等を行った。これら、Fermilabで行った仕事の詳細は、付録にまとめた。

表1. 2 Fermilab E653実験の協同研究機関リスト

AICHI UNIVERSITY OF EDUCATION, JAPAN (愛知教育大学)  
UNIVERSITY OF CALIFORNIA DAVIS, USA  
CARNEGIE-MELLON UNIVERSITY, USA  
CHONNAM NATIONAL UNIVERSITY, KOREA  
FERMILAB, USA  
UNIVERSITY OF GIFU, JAPAN (岐阜大学)  
GYEONGSANG NATIONAL UNIVERSITY, KOREA  
JEONBUG NATIONAL UNIVERSITY, KOREA  
KOBE UNIVERSITY, JAPAN (神戸大学)  
KOREA UNIVERSITY, KOREA  
NAGOYA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JAPAN (名古屋工業大学)  
NAGOYA UNIVERSITY, JAPAN (名古屋大学)  
OHIO STATE UNIVERSITY, USA  
OKAYAMA UNIVERSITY, JAPAN (岡山大学)  
UNIVERSITY OF OKLAHOMA, USA  
OSAKA CITY UNIVERSITY, JAPAN (大阪市立大学)  
OSAKA PREFECTURE SCIENCE EDUCATION INSTITUTE, JAPAN  
(大阪府科学教育センター)  
SOOKMYONG WOMANS UNIVERSITY, KOREA  
TOHO UNIVERSITY, JAPAN (東邦大学)  
UTSUNOMIYA UNIVERSITY, JAPAN (宇都宮大学)  
WONKWANG UNIVERSITY, KOREA  
YOKOHAMA NATIONAL UNIVERSITY, JAPAN (横浜国立大学)



## 第 2 章 E 6 5 3 実験装置

図 2. 1 に Fermilab の全景を示す。原子核乾板へのビーム照射は、NE ビームラインの最下流に位置する Lab D と呼ばれる実験室で行った。図 2. 2 は、E 6 5 3 実験装置の概略図である。原子核乾板標的の上流にビームドリフトチェンバーとビーム SSD からなるビーム検出器を配し、入射粒子の位置と角度を精度良く測定する。また、標的のすぐ下流に乾板中での反応や崩壊で作られた荷電二次粒子を検出するためのパーテックス SSD が置かれている。これとマグネット、及び、ドリフトチェンバーで荷電粒子スペクトロメータを構成し粒子の運動量を測定する。更に、飛行時間測定装置を用いて荷電粒子の速度を測定し、スペクトロメータで得られた運動量の情報と組合せ粒子を同定する。これらの下流には、液体アルゴンを用いた電磁シャワーカロリメータと、ハドロンカロリメータを配している。E 6 5 3 実験装置は、これらと最下流に置いたミュー粒子検出器とで構成されている。これらの検出器とデータ収集システム等の詳細は、参考文献 2. 1 に示してある。また、この章で述べる各々の検出器の性能を表 2. 1 にまとめた。

### 2 - 1 ビーム

主リングで  $800 \text{ GeV} / c$  まで加速された陽子は、NE ビームラインを通過し Lab D へ運ばれる。ビームの周期は、約 60 秒でフラットトップは 20 秒であった。この内約 10 秒分のビームが Lab D に供給された。

NE ビームラインでは、図 2. 3 に示すようなマグネット、及び、コリメータを用いビームの広がり、強度等を調整する。一次実験で使用したビームの典型的な強度は、 $10^4$  陽子/秒であった。

ビームは、直径約 3 mm に絞って使用した。この大きさは、以下の 2 つのことを考慮して決めた。

- 1) 標的の下流のパーテックス SSD を製作する場合、その大きさには技術的な限界がある。それ故、これを必要以上に大きくす

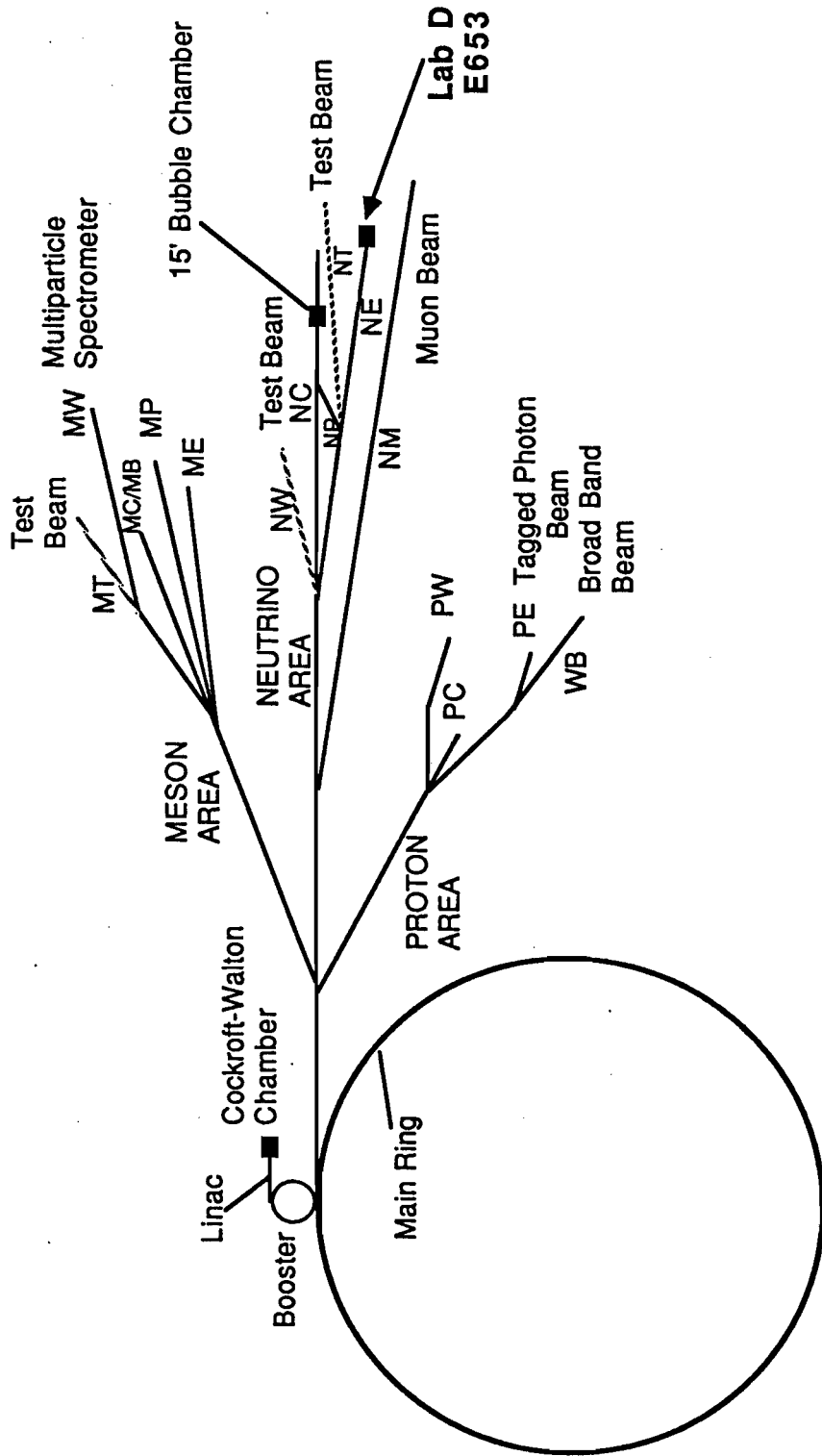


図2. 1 フェルミ国立加速器研究所(Fermilab)の全景

E-653 PLAN VIEW

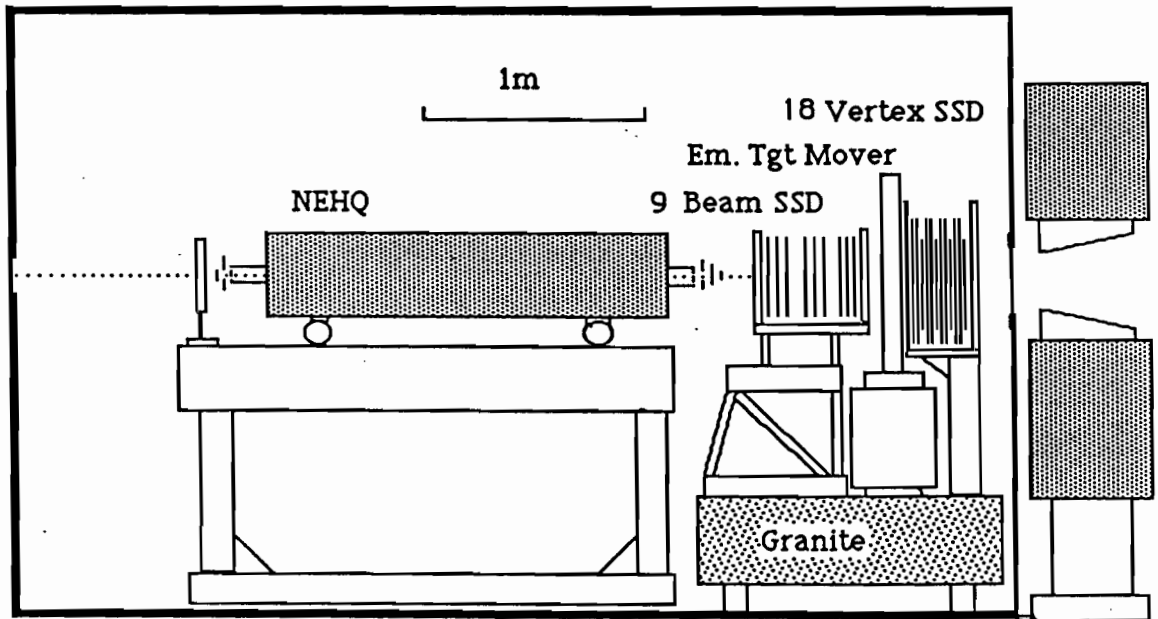
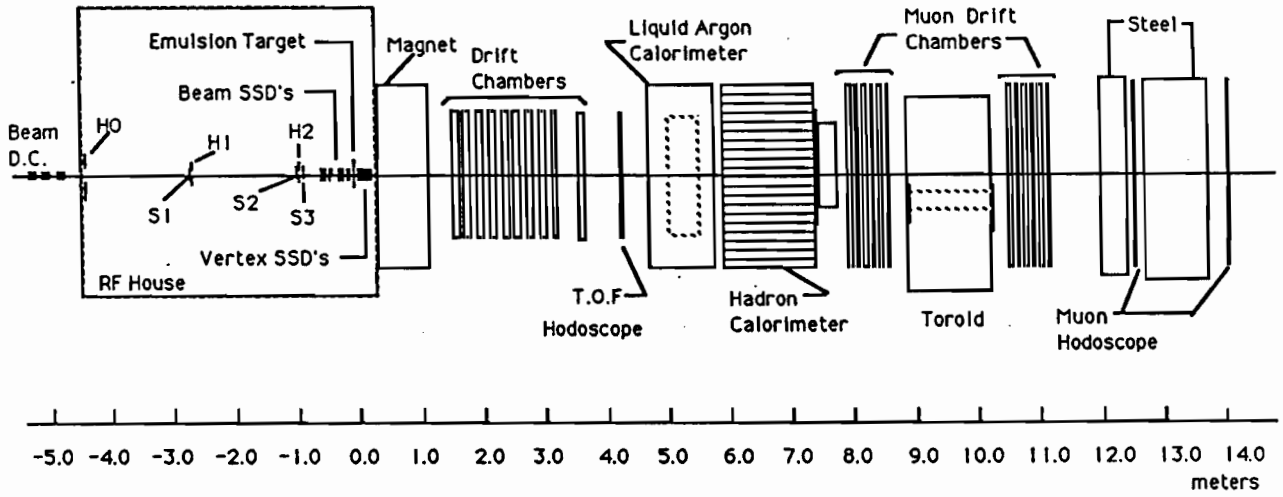


図 2. 2 E 6 5 3 実験装置  
 下図は、RF House 部分を拡大したもの

表2. 1 E653実験装置を構成する各検出器の性能

検出器	量	単位	分解能
原子核乾板	位置	$\mu\text{m}$	1- 10
	角度	$\text{mrad}$	1- 10
ビームSSD ビームドリフトチェンバー 両者の組合せ	位置/層	$\mu\text{m}$	17- 35
	位置/層	$\mu\text{m}$	150
	位置(Z=0)	$\mu\text{m}$	10
	角度	$\mu\text{rad}$	20
パーテックスSSD	位置/層	$\mu\text{m}$	9- 26
	位置(Z=0) <sup>a)</sup>	$\mu\text{m}$	10
	角度 <sup>a)</sup>	$\mu\text{rad}$	70
スペクトロメータ ドリフトチェンバー	位置/層	$\mu\text{m}$	50- 60
	角度 <sup>a)</sup>	$\mu\text{rad}$	35
一次反応点予言  二次反応点予言	位置(Z)	$\mu\text{m}$	300-400
	位置(X,Y)	$\mu\text{m}$	6- 10
	位置(Z)	$\mu\text{m}$	550-750
	位置(X,Y)	$\mu\text{m}$	11- 18
液体アルゴンカロリメータ	位置(X,Y)	$\text{mm}$	1.2
	エネルギー( $\delta E/E$ )	%	$12/\sqrt{E+2.5}$
荷電粒子スペクトロメータ	運動量( $\delta P/P$ )	P in GeV/c	$\sqrt{\{(0.01)^2+(0.00023P)^2\}}$
ミューオンスペクトロメータ	運動量( $\delta P/P$ )	P in GeV/c	$\sqrt{\{(0.19)^2+(0.007P)^2\}}$

a) 多重散乱による寄与は含んでいない。

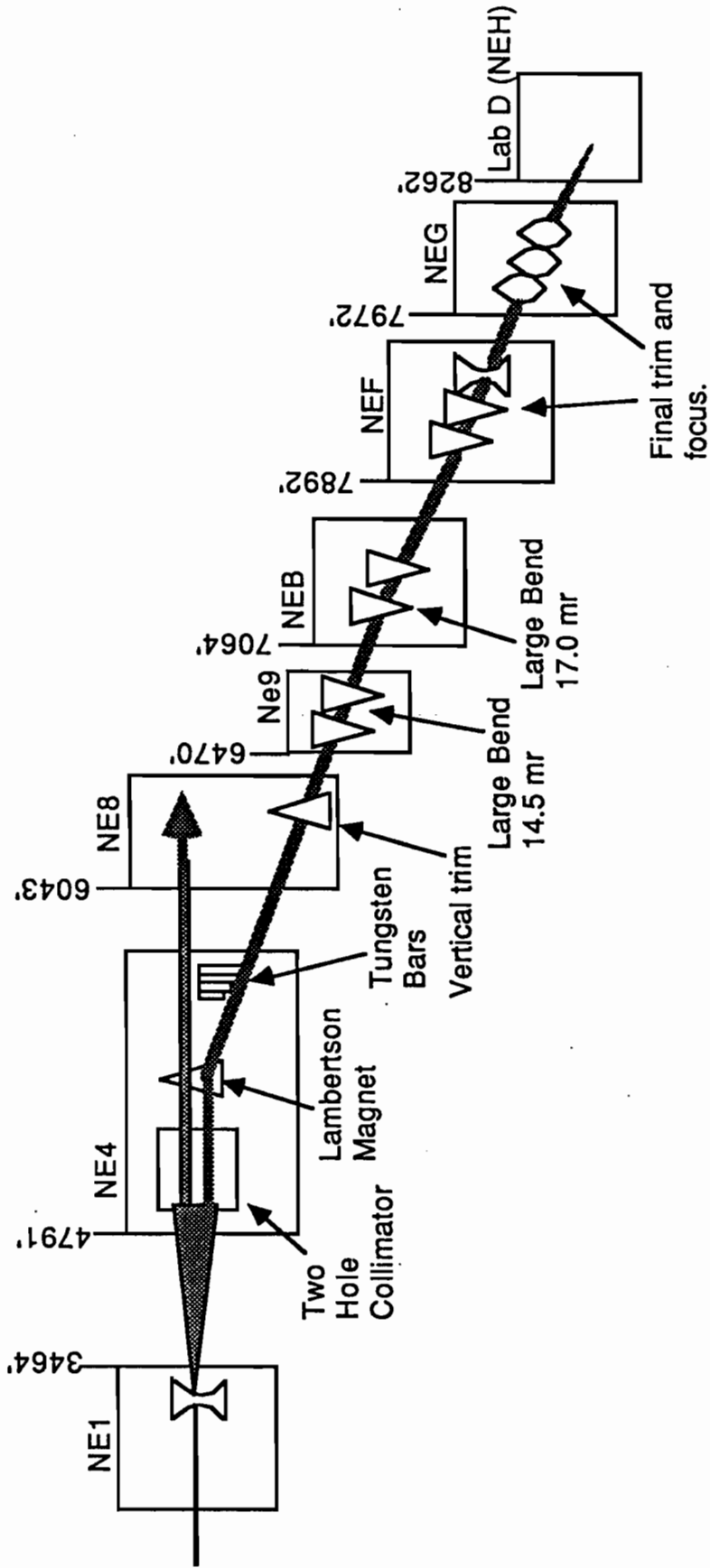


図 2. 3 NE ビームラインの概略図

ることなく十分なアクセプタンスを得るためには、ビームの広がりはいさいほど良い。

2) 一方、乾板標的に一様な密度でビームを照射するには、ある程度以上のビームの広がりがあることが望ましい。

図 2. 4 にビーム検出器で測定した乾板標的上流面での入射粒子の位置分布を示す。図よりわかるように水平方向 (X 方向) のビームの広がり、半値幅で約 2 mm、垂直方向 (Y 方向) では約 2.5 mm であった。また、ビーム検出器で測定した入射粒子の角分布を図 2. 5 に示す。X 方向の角分布の広がり、半値幅で 1.1 mrad、また、Y 方向では 0.2 mrad であった。角分布の X Y 方向による違いは、ビームのフォーカシングによるものである。

## 2 - 2 標準座標系

実験の基準となる座標系は、図 2. 6 のように Z 軸をほぼビーム軸の向きに、Y 軸を鉛直上方にとった右手系である。図 2. 5 よりわかる通り、実際にはビームの方向と Z 軸との間で Y 方向に約 2 mrad のずれがあった。Z 軸の原点は、原子核乾板標的の位置を基に決めた。具体的には、ビーム照射時に標的を登載する枠 (3 - 2 参照) の上流面とした。また、X、Y 軸の原点は、Z = 0 でのビームの設計通過位置とほぼ一致するようにとった。

## 2 - 3 カウンターシステム

### 2 - 3 - 1 ビーム検出器

ビーム検出器は、乾板標的のすぐ上流に設置された 9 層のビーム SSD (BSSD) と約 5 m 上流に置かれた 18 層のドリフトチェンバー (BDC) で構成されている。

ドリフトチェンバーは、図 2. 7 に示すように  $UU' - XX' - VV'$  の 6 層を 3 組、計 18 層よりなっている。U (U')、及び、V (V') 型のチェンバーは、X (X') 型のチェンバーに対し各々  $\pm 30^\circ$  傾けて置いてある。各チェンバーの有効面積は  $9 \text{ cm} \times$

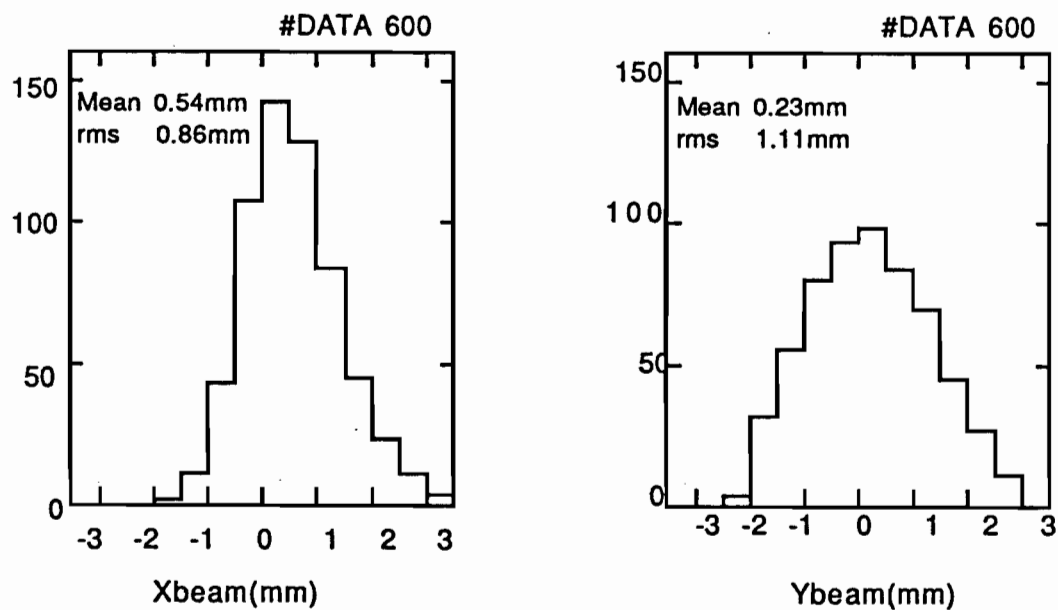


図 2. 4 原子核乾板標的上流面での入射粒子の位置分布

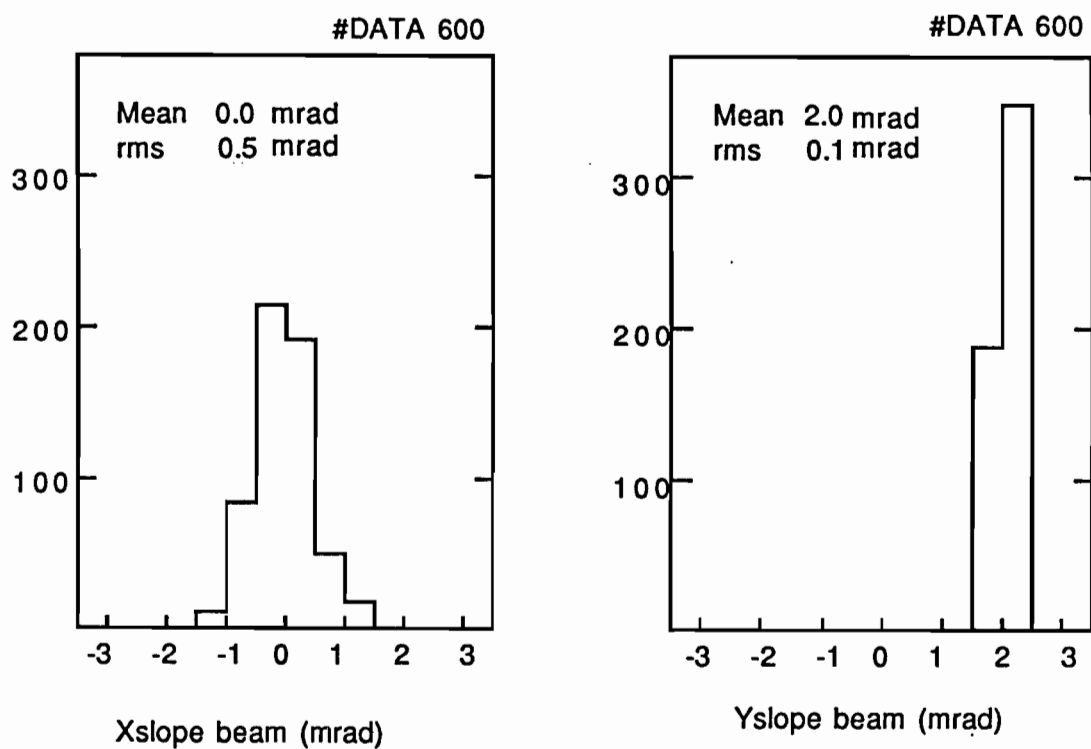


図 2. 5 入射粒子の角分布

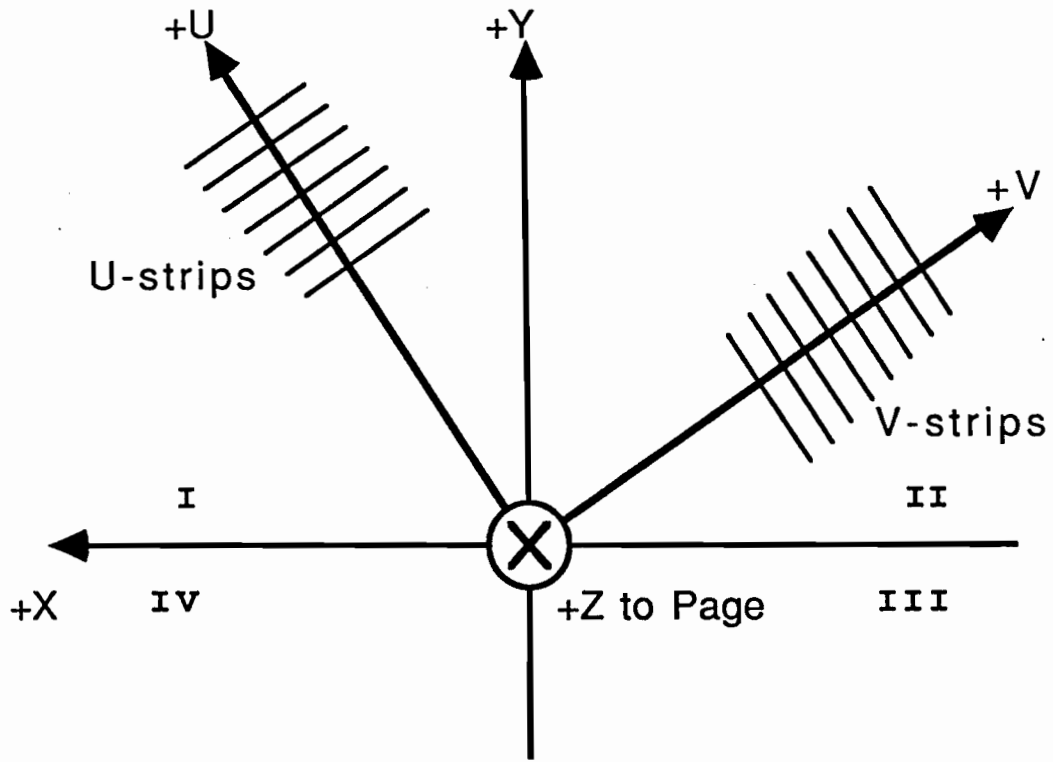


圖 2. 6 E 6 5 3 標準座標系



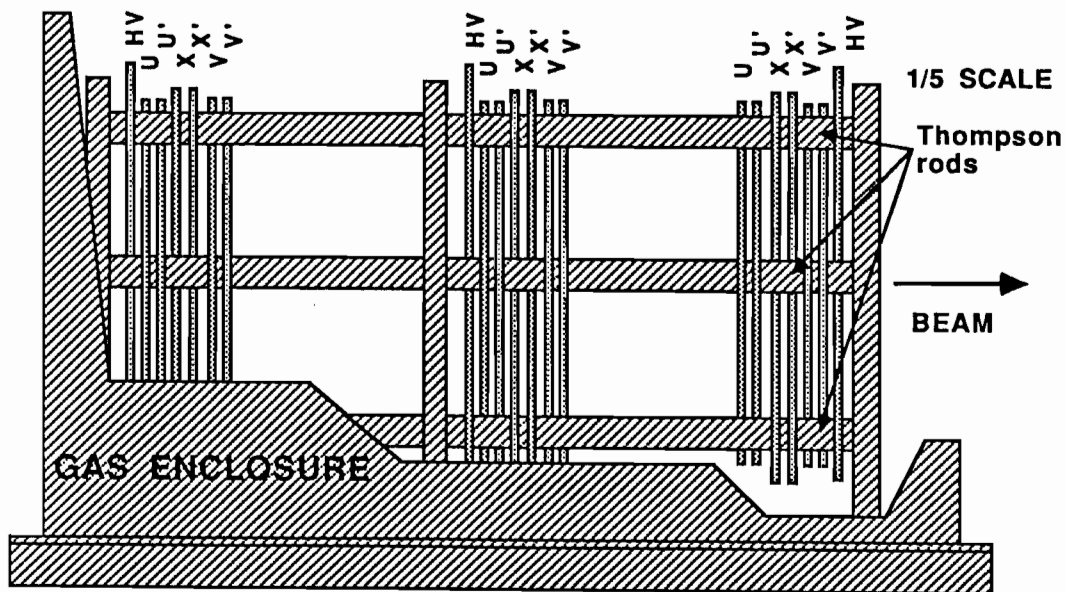


図 2. 7      ビームドリフトチェンバーの概略図

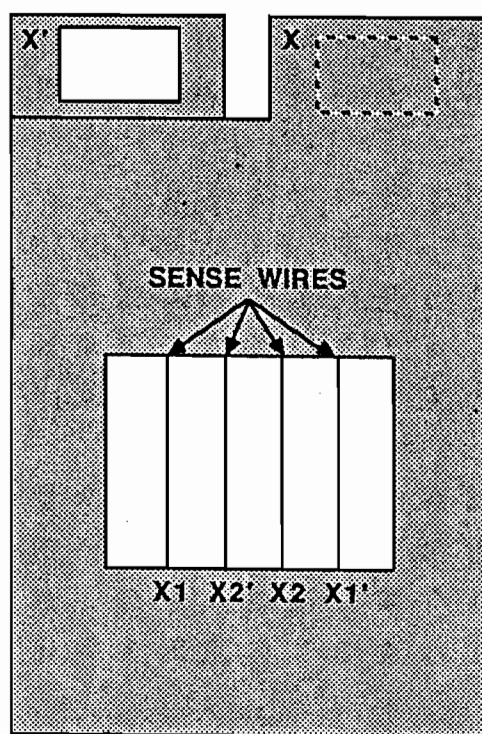


図 2. 8      ビームドリフトチェンバー (X及びX'層)

9 cm であり、各々 2 本のセンスワイヤーを張ってある。U と U'、X と X'、V と V' の対は、図 2. 8 のように同型のチェンバーを各々裏返して配したもので、センスワイヤーは互いに平行である。これら各対 (U U' / X X' / V V') 当りの位置分解能は、800 GeV / c の陽子ビームに対し 150  $\mu$ m であった。

SSD は、シリコン半導体を用いた検出器で、Silicon Strip Detector の略称である。我々が用いた SSD は、米国のオハイオ州立大と Micron Semiconductor 社が共同で開発したものである。ビーム検出用の SSD は、図 2. 9 に示すように 60° ずつ傾けて配置された U - X - V の 3 層を 1 組としたものを 3 組、計 9 層からなっている。最下流のプレートは、乾板標的の上流面からわずか 10 cm のところに置かれている。各層は、2.4 cm  $\times$  3.6 cm のシリコンウエハ上に 20  $\mu$ m ピッチで 10  $\mu$ m 幅のストリップを合計 1500 本エッチングしてある。シグナルは、中央の 80 ストリップについては 3 本毎 (60  $\mu$ m ピッチ)、その両側の各々 34 ストリップでは 6 本毎 (120  $\mu$ m ピッチ) で読み出した。各層当りの位置分解能は、中央領域 (60  $\mu$ m 毎の読み出し部) で 17  $\mu$ m、また、その両端 (120  $\mu$ m 毎の読み出し部) では 35  $\mu$ m であった。

ドリフトチェンバーと SSD の組合せで得られる入射粒子の角測定精度は、0.02 mrad であった。また、標的地点へ外挿した場合の入射粒子の位置測定精度は、XY 方向ともに約 10  $\mu$ m であった。ビーム SSD の位置測定精度が良いことと、ドリフトチェンバーと SSD の距離を長くしたことによりこのような高精度の測定が可能となった。

これらの検出器で測定した入射粒子の位置、及び、角度は、乾板中の一次反応点を立体再構成する時に利用される。また、チャーム粒子、及び、ボトム粒子の生成機構に関する情報 ( $X_F$ ,  $P_T$  等) を得る場合、入射粒子の角度を精度良く測定しておくことが必要となる。

### 2 - 3 - 2 荷電粒子スペクトロメータ

荷電粒子スペクトロメータは、原子核乾板標的のすぐ下流に置かれたパーテックス SSD (VSSD) と、その下流のマグネット、

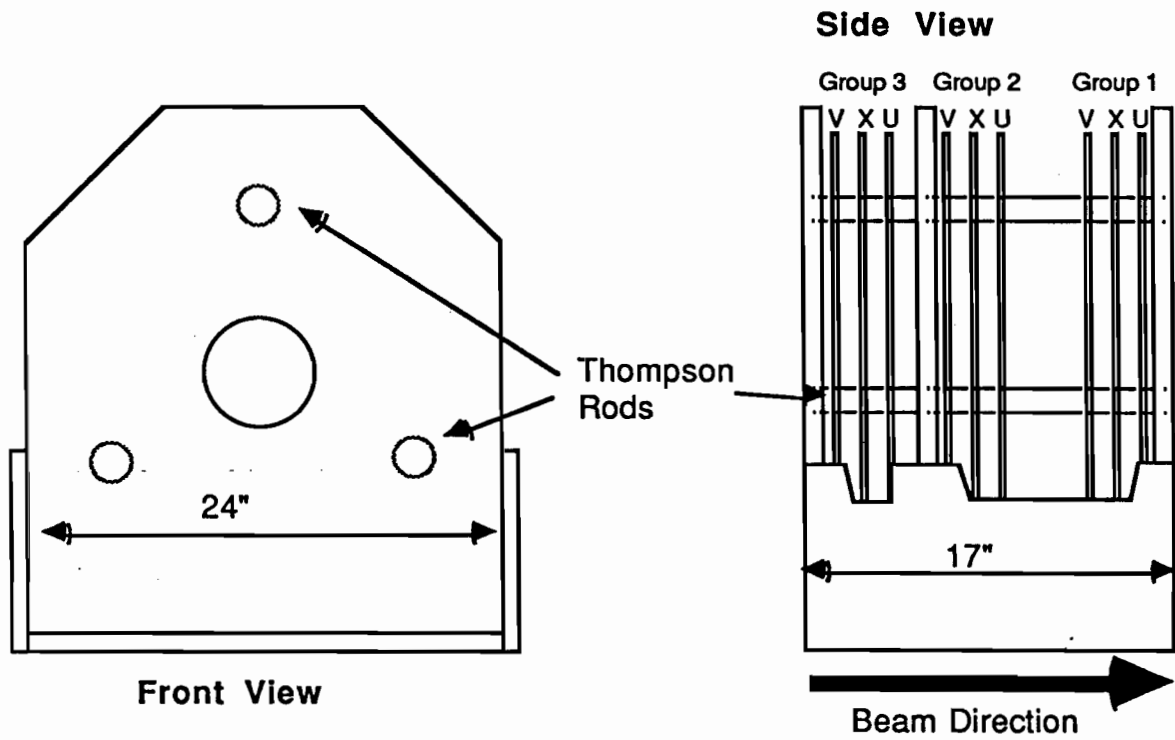


図 2. 9 . ビームSSDの概略図

及び、スペクトロメータドリフトチェンバー（SDC）によって構成されている。荷電粒子の運動量は、マグネットの磁場中での飛跡の曲率半径より求める。バーテックスSSDは、乾板中で起った一次反応からの二次粒子の飛跡を立体再構成し、反応点の位置を预言する役割を担っている。この情報を用いて乾板中で反応点を探索する。それ故、原子核乾板標的とバーテックスSSDの位置関係を精度良く保持する必要がある。このため、両者を一つのグラナイト台上に設置した（図2.2）。この実験では入射粒子のエネルギーが高いため一次反応から放出される二次粒子の数が多く、しかも、それらは前方に集中するという特徴がある。それ故、検出器には高い位置分解能、及び、二粒子分離能が要求される。

バーテックスSSDもビームSSDと同様に米国オハイオ州立大とMicron Semiconductor社が共同で開発したものである。この検出器の詳細は参考文献2.2に述べられている。

各々60°づつ回転した3層のSSDを1組とし、これを6組、計18層で構成されている。各層は、原子核乾板標的の下流71mmの所から9mm間隔で置かれている。バーテックスSSDのアクセプタンスは、最下流のSSDで110mradである。各層には、5cm×5cmで300μm厚のシリコンウエハ上に50μmピッチで計1000本のストリップがエッチングされている。ストリップの幅は、35μmである。読み出しは、通過する粒子数の多い中央部は1ストリップ毎、周辺部へ行くにしたがって2ストリップ毎、3ストリップ毎、そして、5ストリップ毎の領域に分かれている。粒子の通過位置はパルス高をもとにチャージシェアリング法によって決定される。SSD1層当りの位置分解能は1ストリップ毎の読み出し部では8.8μmであった。他の2、3、及び、5ストリップ毎の読み出し部では各々14.5、15.8、及び、26.1μmであった。また二粒子分解能は、約50μmであった。SSD全体での典型的な角測定精度は、約0.1mradである。このようにSSDは高い位置測定精度を持っているのでビームSSDとバーテックスSSDを用いた場合、乾板標的中の一次反応点をビーム（Z）方向では、300～400μm、また、X、Y方向では6～10μmの精度で预言することができた。

マグネット断面図を図2.10に示す。磁場をより強力にし運動量測定精度を上げるため50.8cmのギャップを持つダイポール

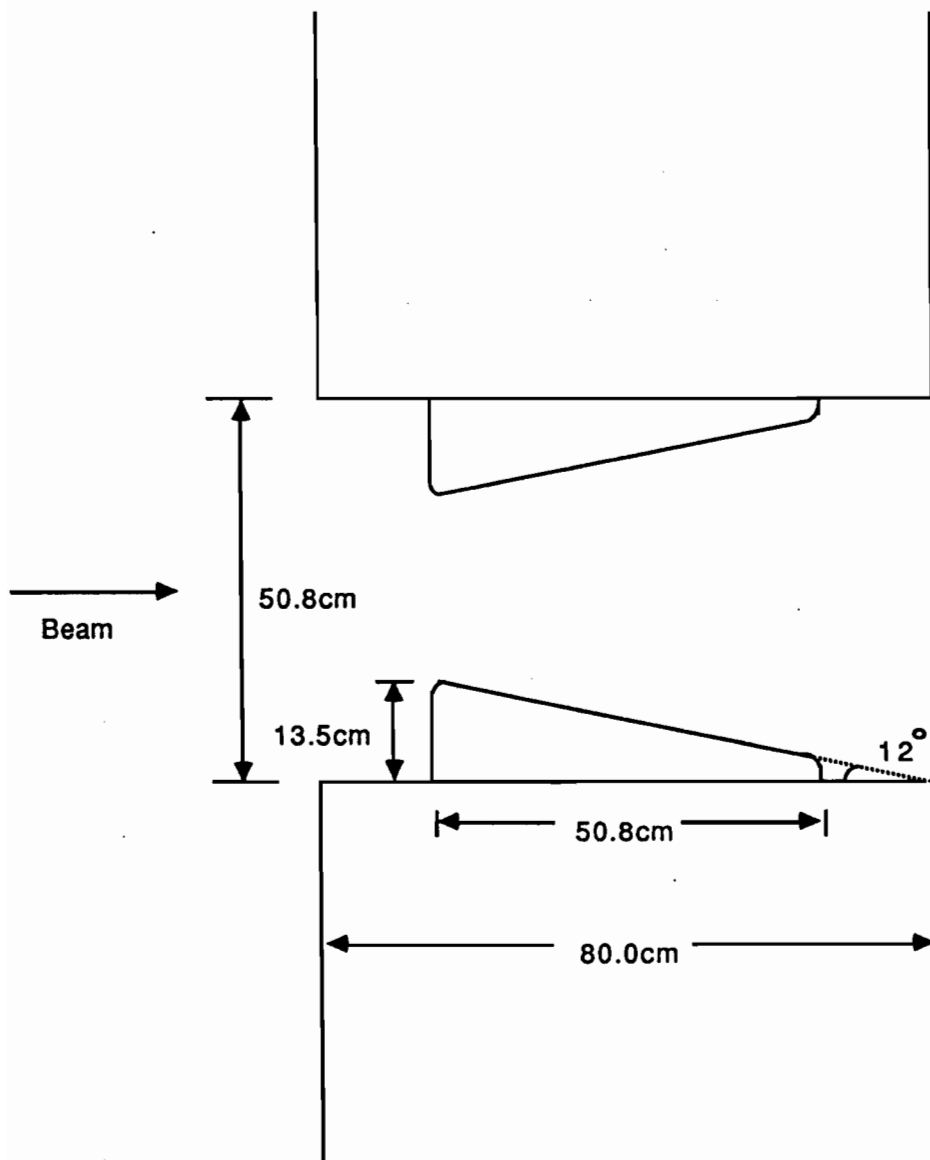


図 2. 10 SMC-104 マグネット

中にボールチップを挿入した。このボールチップは、実験装置全体のアクセプタンスを減らすことのないように設計されている。これにより2400 amp sで作動した場合のビームラインに沿った磁場の積分値  $\int B \times dl$  は、11.2 kG·m が得られた。これは、横方向の運動量キック0.336 GeV/c に相当する。

スペクトロメータドリフトチェンバーは、10層のマルチサンプリングベクトルドリフトチェンバーで構成されている。このドリフトチェンバーの構造、及び、性能は、参考文献2.3に詳しく述べられている。各層の有効面積は、1.7 m × 1.7 m で、これをX-U-Vの順に配している。各チェンバーは、図2.11に示すように計22個のセルに分けられている。チェンバーを通過する粒子の密度が高い中央の50.8 cmの部分は、10個のファインセルに、また、比較的粒子密度の低い両端の部分は、計12個のコースセルに分割されている。

セルの詳細を図2.12に示す。ファインセルでは、10本のセンスワイヤー(S)を5.1 mm間隔で張り、その間にカソードワイヤー(C)を配している。シグナルは、2本のセンスワイヤー毎にまとめられ計5点読み出される。図中のS'、S''、及び、Fは、フィールドシェイピングワイヤーである。コースセルでは、10.2 mm間隔で5本のセンスワイヤーを張り、1本毎、計5点の読み出しを行う。

このように粒子の通過位置をチェンバー毎に5点測定することにより粒子の飛跡に対応するベクトルを与える。典型的な反応例についてチェンバーからのシグナルを処理して得られたヒットパターンを図2.13に示す。

センスワイヤーは、直径30 μmの金メッキされたタングステンワイヤーを、その他のワイヤーには、直径160 μmもしくは250 μmの金メッキされたアルミワイヤーを用いた。

ドリフトチェンバーの位置分解能は、ファインセルを通過した800 GeV/cの陽子ビームに対しては、49 μm、また、二次粒子に対しては、63 μmであった。後者の値には多重散乱による誤差も含まれている。この位置分解能は、入射粒子について30~50 μrad、二次粒子については40~45 μradの角測定精度に相当する。また、二粒子分解能は、約500 μmであった。

乾板解析用のデータを作る際、粒子の運動量は、薄レンズ近似で

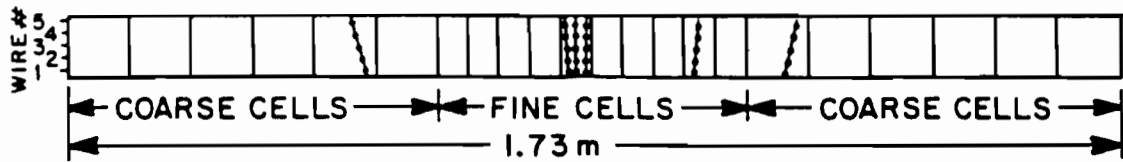


図 2. 11 スペクトロメータドリフトチェンバーセルの概略図

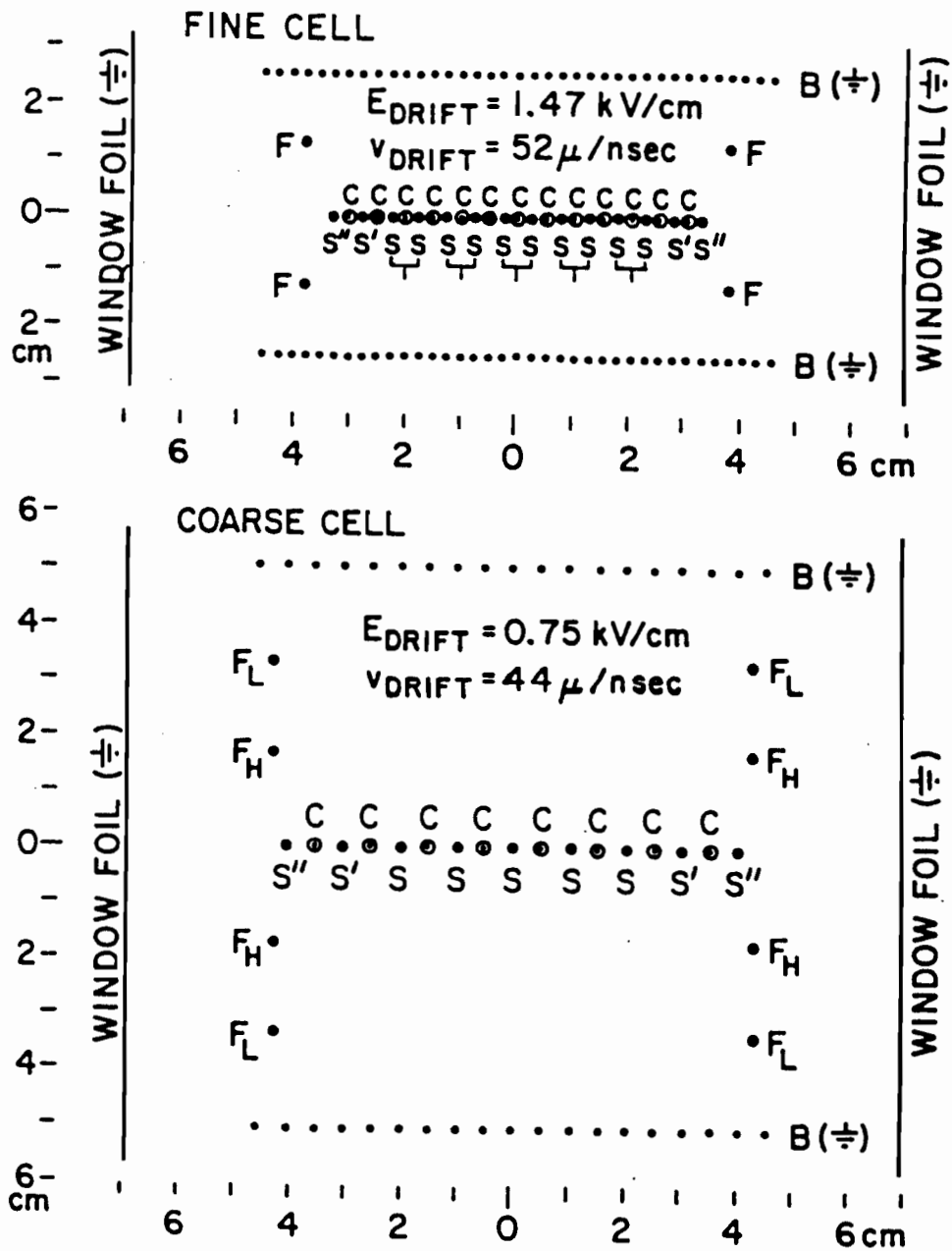


図 2. 12 スペクトロメータドリフトチェンバーセルの詳細

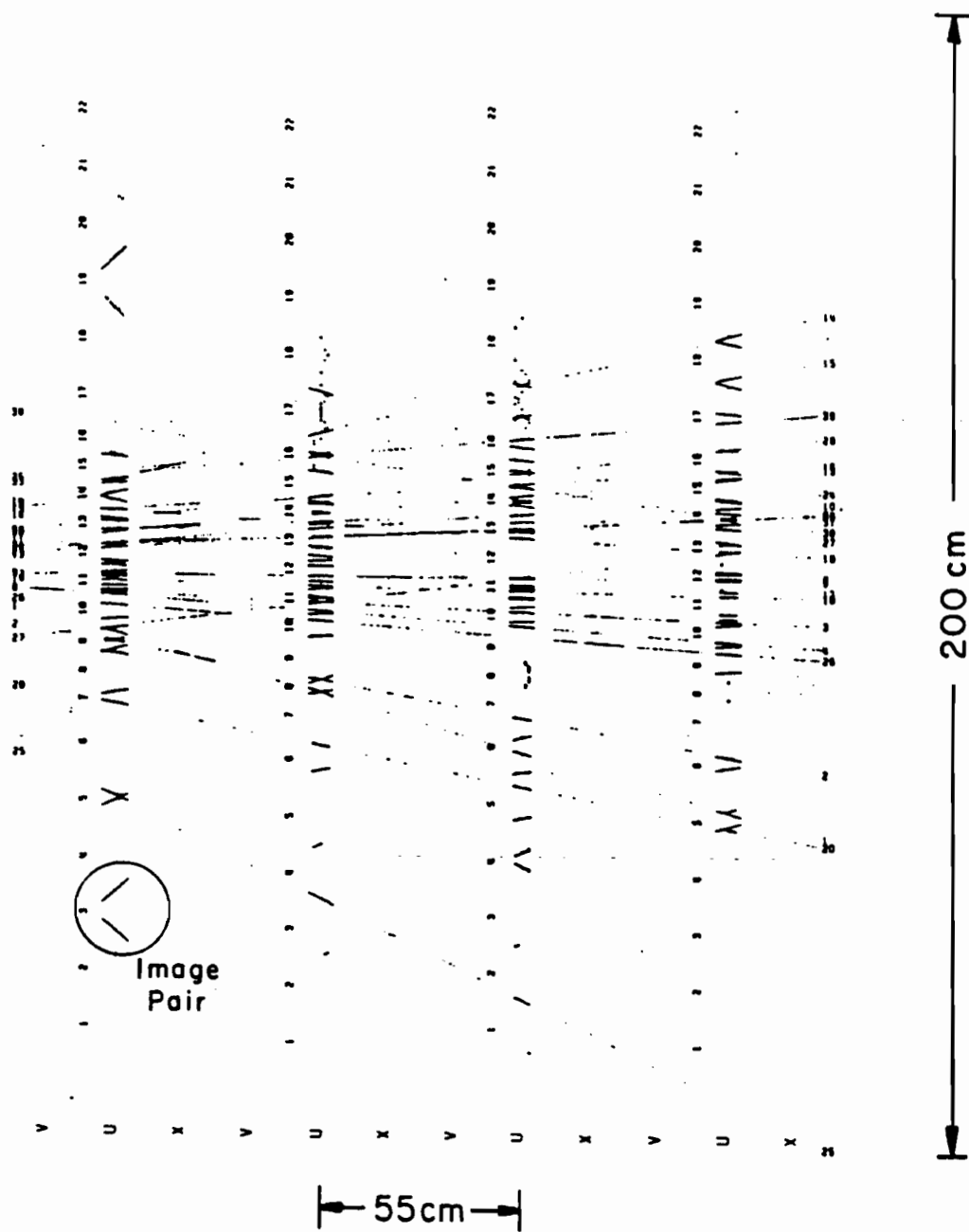


図 2. 13 スペクトロメータドリフトチェンバーで得られた典型的な反応例に対するヒットパターン



求める。この場合、運動量の測定精度は、

$$\delta P/P = \sqrt{\{(0.01)^2 + (0.00023P)^2\}}$$

(P in GeV/c)

である。一項目は、スペクトロメータ中での多重散乱に起因するものであり、二項目は、角測定精度によるものである。角測定精度の悪い部分を通じた大角度の飛跡については、二項目を  $(0.0004P)^2$  で置きかえた。

### 2-3-3 飛行時間測定装置

飛行時間測定装置 (TOF) は、荷電ハドロンを同定するためのシステムである。原子核乾板標的より 4.1 m 下流に置かれた断面 38.1 mm × 38.1 mm、長さ 1.68 m の大きさを持つ 48 本の角型シンチレータ (図 2.14) で二次粒子の通過時間差を測定する仕組みとなっている。この装置で、2.8 GeV 以下のエネルギーを持つ  $\pi$  中間子と K 中間子を  $2\sigma$  の確からしさに識別できる。また、K 中間子と陽子であれば、5.3 GeV のエネルギーを持つものまで同じ条件で分離可能である。

### 2-3-4 カロリメータ

高エネルギーの光子並びに電子の検出、及び、それらの位置とエネルギーの測定は、液体アルゴンカロリメータ (LAC) で行う。この装置の有効面積は、1.625 m × 1.625 m で、原子核乾板標的の下流約 5 m の所に置かれている。その構造は、液体アルゴンの中に鉛のシートと読み出し用ボードを交互に配したものである。1セル分の構造を図 2.15 に示す。LAC 全体は、3つの部分、即ち、フロント、ミドル、及び、バックセクションに別れており (図 2.16)、各々、15、18、及び、7セルで構成されている。読み出しボードは、X読み出し、Y読み出し、及び、パッド読み出しの3種類を併用している。X読み出しボードは、幅 5.1 mm で、長さ 1.63 m の銅のストリップを G10 ボード上にエッチングしたものである。但し、中央の 16.3 cm × 16.3 cm

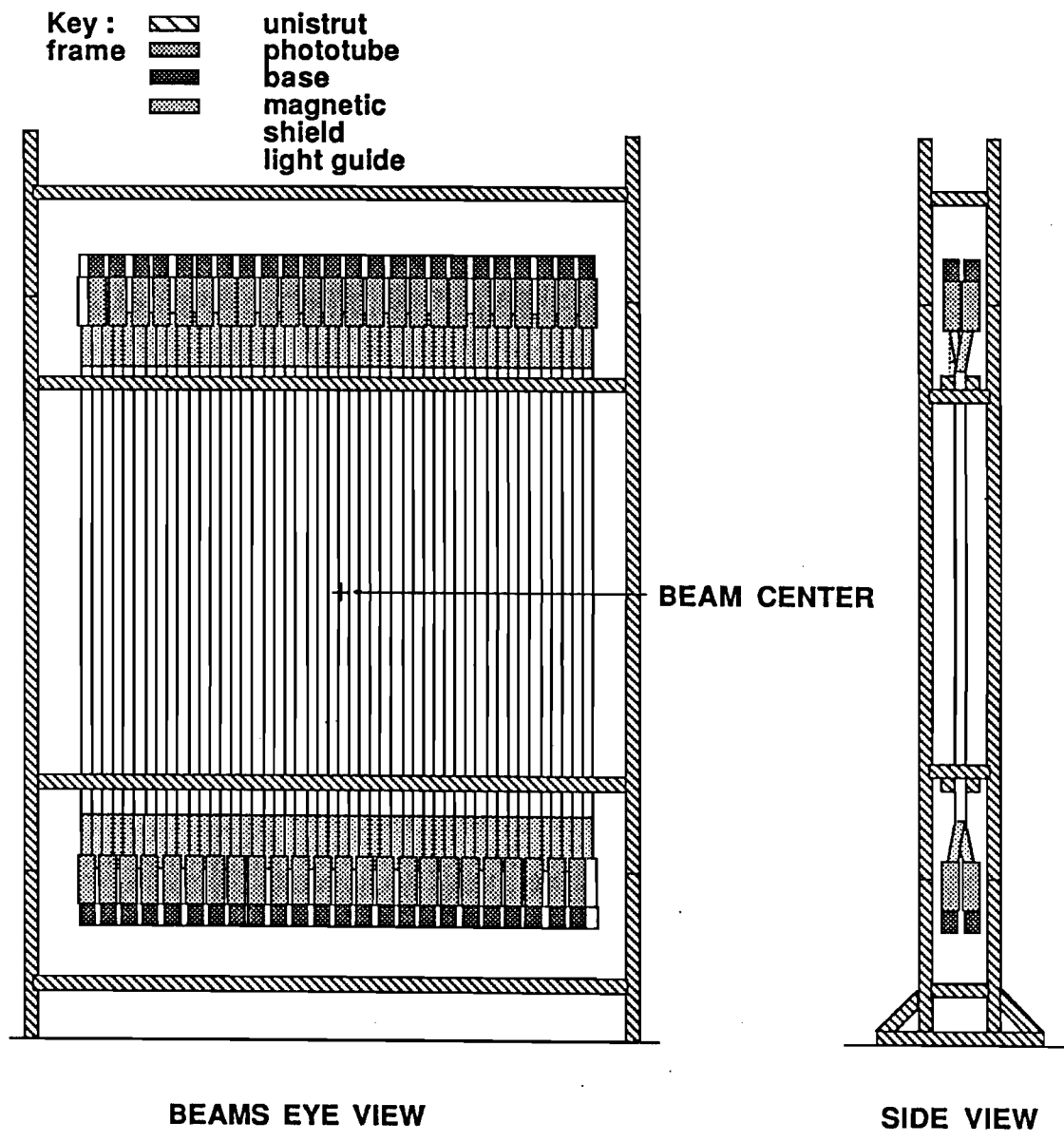


圖 2. 1 4 飛行時間測定装置 ( T O F )

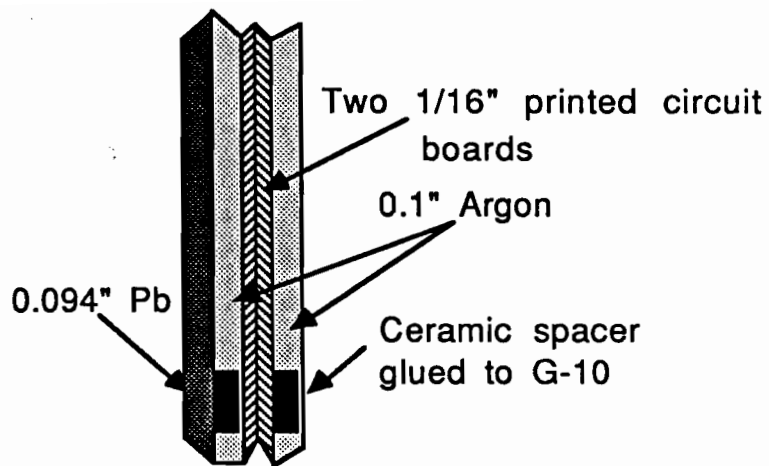


図 2. 15 液体アルゴンカロリメータ (LAC) セル

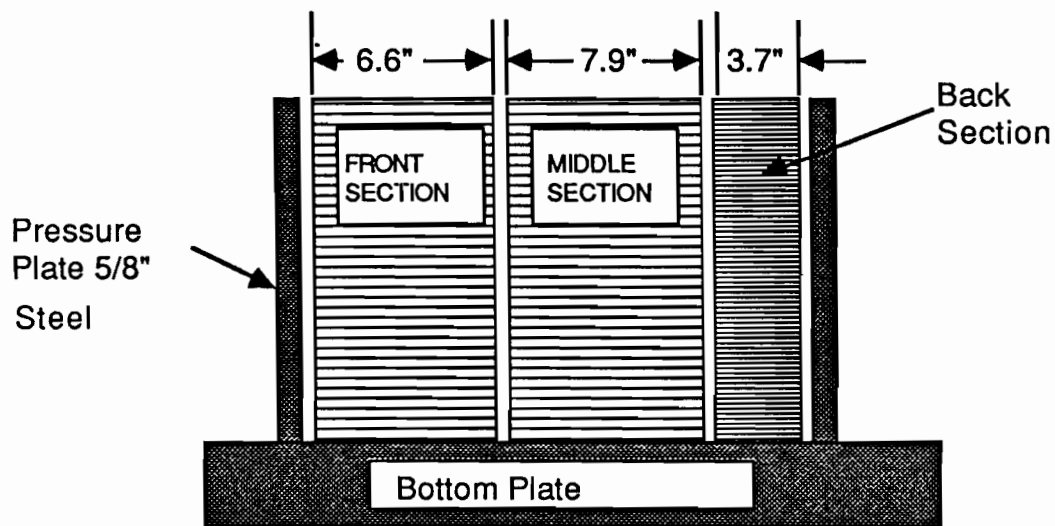


図 2. 16 LACの概略図

の部分は、 $5\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ のパッドを256個配している。これは、中央部で起こるシャワーの密度が高く、平均で1反応当り6シャワーになることを考慮したものである。Y読み出しボードは、X読み出しボードを $90^\circ$ 回転させたものである。パッド読み出しボードは、4つの大きさのパッドを図2. 17のようにエッチングしたものである。これらの3種のボードを1セルにつき2種類ずつ組み合わせて用いている。

鉛の厚さは、フロント、及び、ミドルセクションでは、 $2.54\text{ mm}$ 、また、バックセクションでは、 $4.67\text{ mm}$ である。従って各々のセクションは、7.2、8.6、及び、6.2放射長の厚さを持ち、合計22放射長である。

シャワーの位置分解能、及び、2本のシャワー分解能は、各々、 $\text{rms}$ が $1\text{ mm}$ 、 $8\text{ mm}$ であった。また、エネルギー測定精度は、 $(12/\sqrt{E} + 2.5)\%$ であった。

ハドロンカロリメータ(HADCAL)は、16層の鉄と読み出しパッドを貼付けたプラスチック比例計数管のサンドイッチ構造をなしている。計数管の有効断面積は、 $237\text{ cm} \times 237\text{ cm}$ である。また、鉄板は、大きさが $305\text{ cm} \times 244\text{ cm}$ で厚さが $5\text{ cm}$ である。この鉄板16枚の厚さは、4.8反応長に相当する。

ハドロンのエネルギーは、比例計数管のアノード信号波高から、また、位置はアノード信号とカソードパッドの情報とから求める。

## 2-3-5 ミューオンシステム

ミューオンシステムは、図2. 18に示すように、上流のスペクトロメータ部と、下流のホドスコープ部とから成り立っている。

スペクトロメータ部は、半径 $1.8\text{ m}$ 、厚さ $1.3\text{ m}$ のトロイダルマグネットを挟んで、上流と下流に各6層ずつ配置したドリフトチェンバーで構成されている。ドリフトチェンバーには、ワイヤーが水平に張られたY型と、鉛直に対して各々 $\pm 12^\circ$ ずつ傾けて張られたU、及び、V型の3種類がある。

マグネットは、中央にある半径 $12\text{ cm}$ の穴がビームから約 $50\text{ cm}$ 離れるように置かれている。このマグネットの横運動量キックは、 $0.76\text{ GeV}/c$ である。

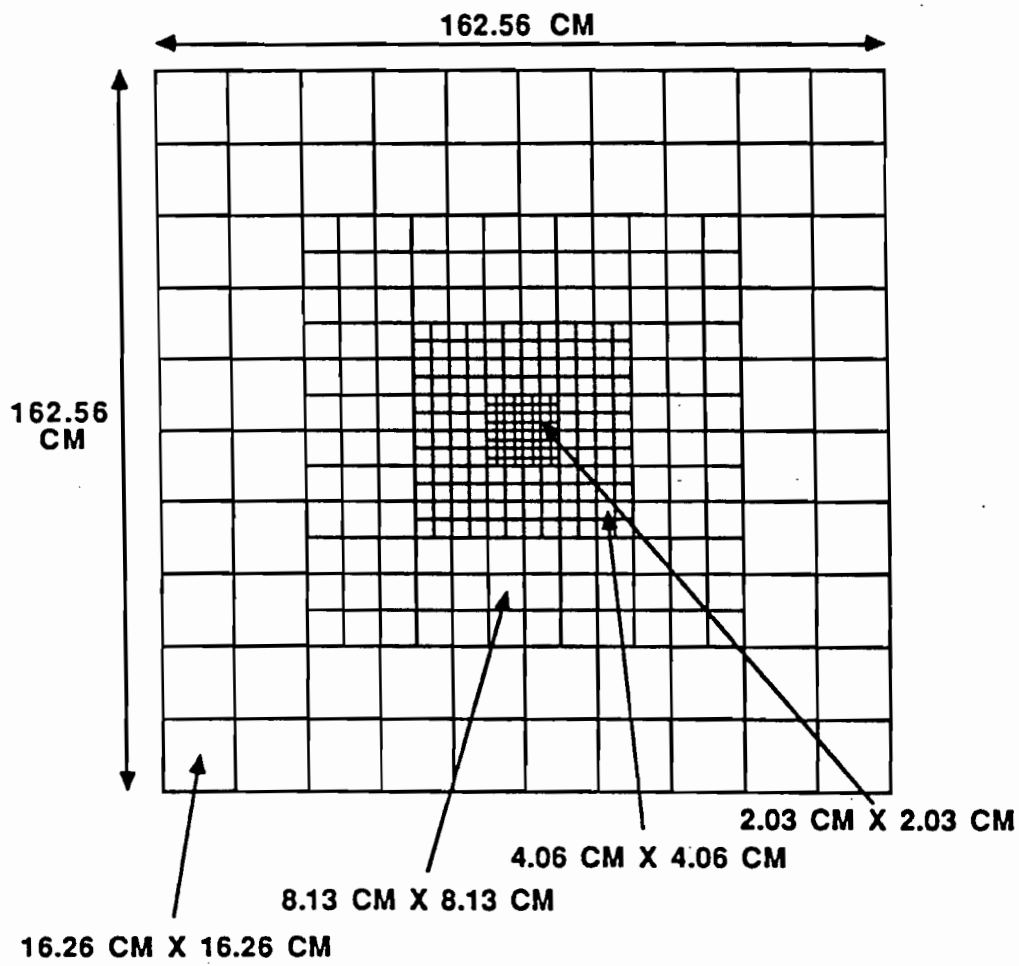


図 2. 17 LACのパッド読み出しボード

MUON SPECTROMETER

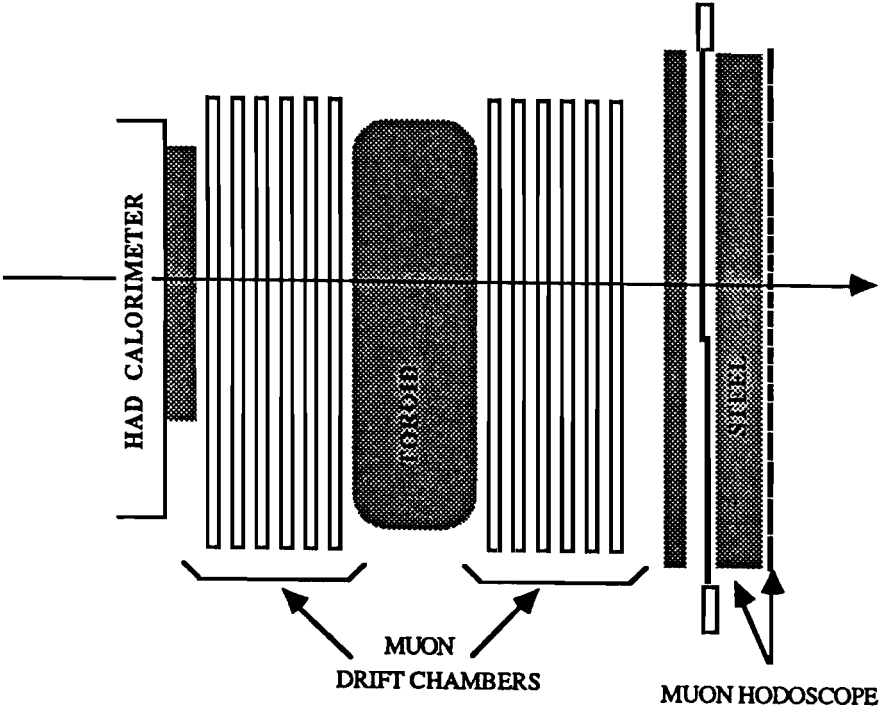


図 2. 18 ミューオンシステム

このシステムでは、上流と下流のドリフトチェンバーで測定された進行方向に対するふれ角、 $\delta\theta$  (rad) から、運動量  $P$  を次のように求めることができる。

$$P = 0.03 \times B(r) \times \delta Z / \delta\theta \text{ (GeV/c)}$$

ここで、 $B(r)$  は、トロイダルマグネットの中心線からの距離  $r$  の関数として表した磁場の強さで、単位を  $\text{K G a u s s}$  としたものである。また、 $\delta Z$  は、マグネットの厚さである。

このスペクトロメータで測定した運動量と上流の荷電粒子スペクトロメータで測定した結果を比較することにより運動量測定精度を評価したところ、

$$\delta P / P = \sqrt{\{(0.19)^2 + (0.007P)^2\}} \\ (P \text{ in GeV/c})$$

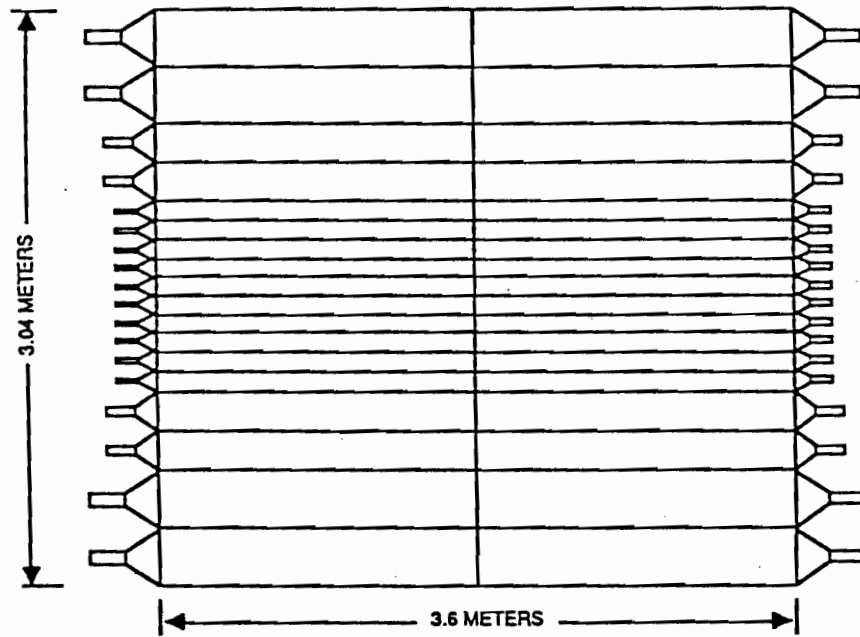
という結果が得られた。この式の右辺第一項は、多重散乱と磁場の決定誤差に起因するものである。また、第二項は、ドリフトチェンバーの位置測定誤差に由来するものである。

ミューオンスペクトロメータの情報は、ミュー粒子を上流の荷電粒子スペクトロメータで再構成された飛跡と結合するために用いる。

ホドスコープ部には、厚さ 1.1 m の鉄の吸収層をはさんで 2 組のシンチレータホドスコープ (図 2.19) が配置してある。上流側のホドスコープは、標的の下流 12.5 m の所にあり、縦長のシンチレーションカウンターを水平に 18 個並べたものを 2 列に配している。その有効面積は、高さ 2.9 m、幅 3.6 m である。このホドスコープの直前には、厚さ 0.4 m の鉄板を置いている。この鉄板を含めホドスコープの上流に配された物質の総計は、26 反応長で、258 放射長に相当する。下流側のホドスコープは、計 40 個のシンチレーションカウンターを垂直に 20 個ずつ 2 段に配している。有効面積は、高さ 3 m、幅 3.5 m であり、標的から 14.2 m 下流に位置している。上流側のホドスコープに到着できるミュー粒子の運動量は、約 4 GeV/c 以上であり、下流側まで到着できるのは約 5 GeV/c 以上である。

ホドスコープの位置と有効面積により決められたアクセプタンスは、水平方向約 250 mrad、垂直方向 210 mrad である。

MUON HODOSCOPE  
(FRONT COUNTERS)



MUON HODOSCOPE  
(BACK COUNTERS)

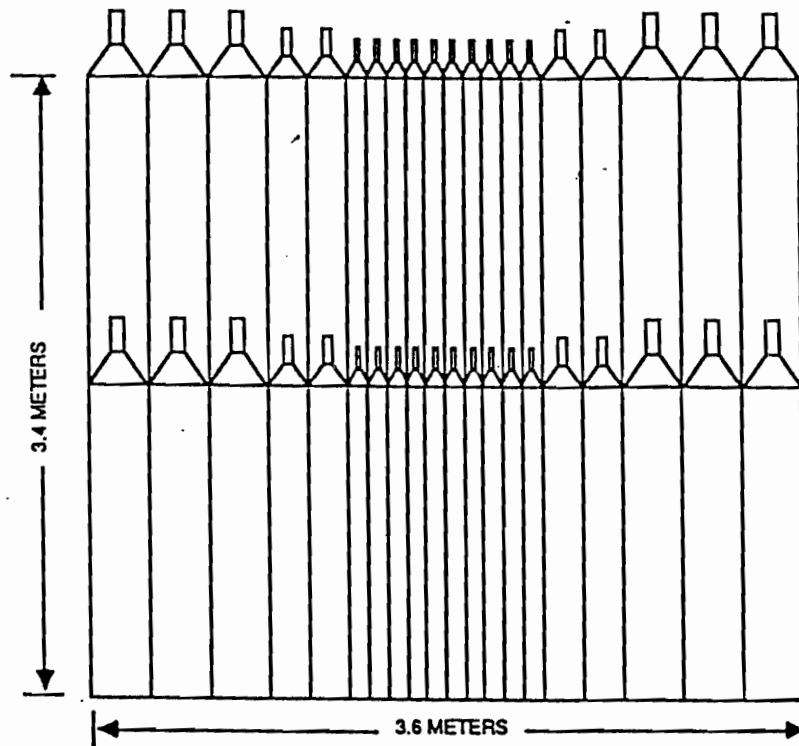


図 2. 19 ミューオンホドスコープ

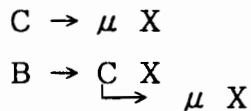


## 2 - 4 原子核乾板標的

一次実験では、合計32リットルの原子核乾板を使用して、垂直照射型（Vタイプ）と水平照射型（Hタイプ）の2つのタイプの標的を各々25、24モジュール作成した。Vタイプの標的は、名古屋大学グループが担当した。またHタイプの標的は、神戸大学と大阪府立大学グループが受け持ち、標的の設計は、著者が担当した。これら標的の構造、及び、ビーム照射等の詳細は次章で述べる。これらの乾板標的を作るためにFermilab内に標的作製施設を建設し、ここで、全ての標的を作製した。また、ビーム照射後、Hタイプの乾板は標的作製施設の隣に建設した現像処理施設で、Vタイプの乾板は名古屋大学で、現像処理を行った。Fermilabでの乾板の作製、及び、現像処理の詳細は付録1にまとめた。

## 2 - 5 オンラインでの反応選別（トリガー）

チャーム粒子、及び、ボトム粒子の崩壊過程には、次に示すようなセミミュオンニック過程がある。



このプロセスによって放出されるミュオン粒子は、他のプロセス、例えば、 $\pi$ 中間子やK中間子の崩壊で生じるミュオン粒子と比較して大きな横運動量を持つ。この特徴を利用することによってチャーム粒子やボトム粒子の崩壊例を効率よく選別することができる。しかも運動量の大きいミュオン粒子は、高速で同定することが可能である。我々は、このような点に注目し、次の条件で測定系のオンライントリガーを行った。

- 1) ビームが検出されていること
- 2) 乾板標的中で反応が起きていること
- 3) 大運動量のミュオン粒子が発生していること

具体的に、1)の条件は、図2.20に示した3つのビームカウンターS1、S2、及び、S3の全てにシグナルがあることと、3つ

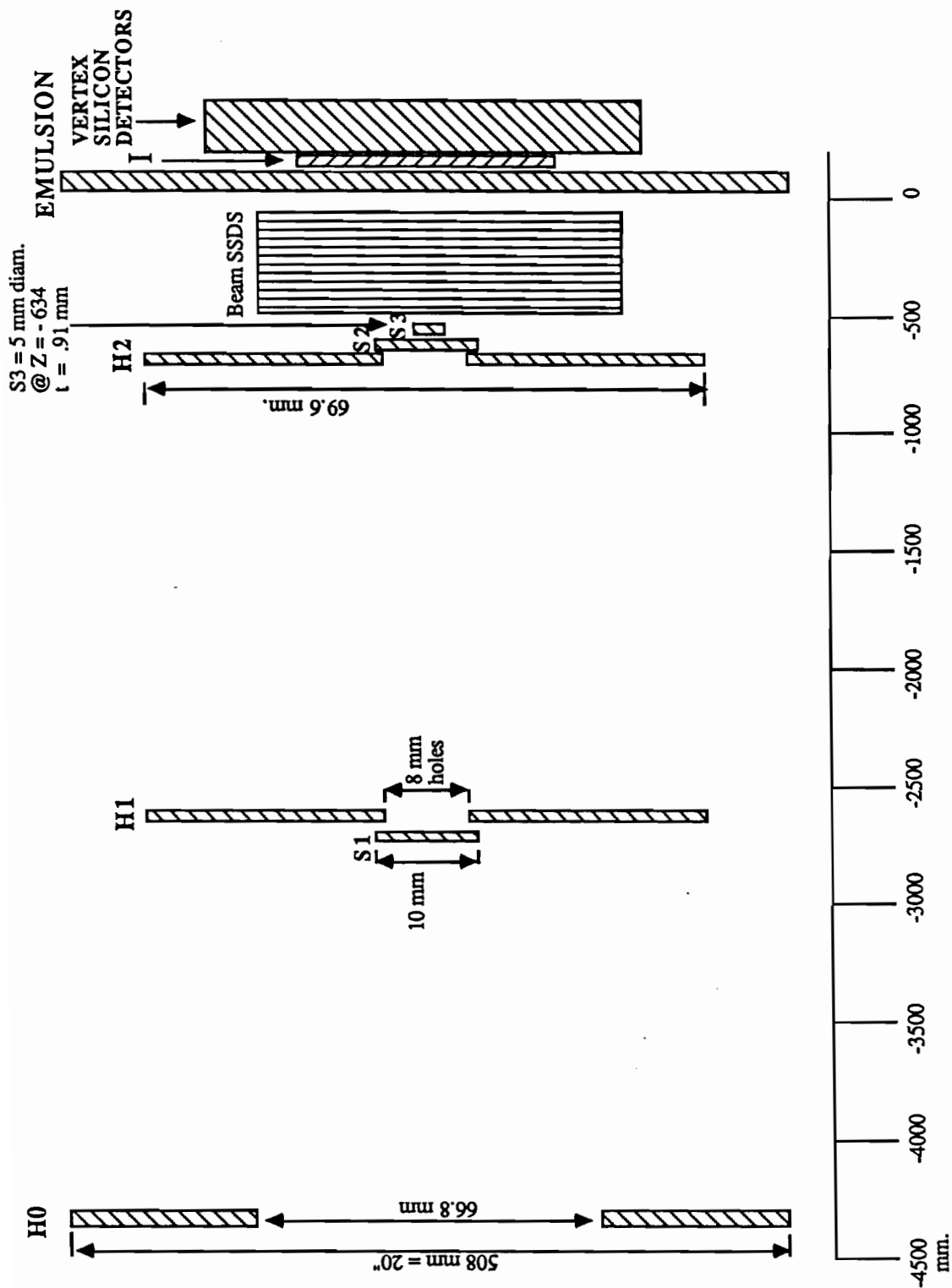


図 2. 20 ビームシンチレータ

のビームハーローカウンターH0、H1、及び、H2のいずれにもシグナルがないことによって判定した。また、2)の条件は、乾板標的のすぐ下流に置いたシンチレーションカウンター(I)から少なくとも最小電離粒子の場合の3倍以上のシグナルが出ていることとした。この条件では、シンチレータ内で反応が起きた場合を誤認するが、その割合は約12%であった。次に、3)の条件は、上流、及び、下流のミュオンホドスコープに各々少なくとも一箇所のヒットが認められることと定めた。トリガー論理の詳細を図2.21に示す。

一次実験では、照射した陽子ビームの数から、乾板中に約 $1 \cdot 0^8$ 例の反応が記録されているものと考えられる。この内で、上述の条件を満たし、各検出器からの情報を磁気テープに記録したものは、約 $5.2 \times 10^6$ 例である。トリガー比にして約 $1/20$ であった。簡単な概算によれば、その選別された反応中にチャーム粒子、及び、ボトム粒子が含まれる割合は、約0.5%である。



### 第 3 章 原子核乾板標的

一次実験では、合計 32 リットルの原子核乾板を用いて 49 組の標的モジュールを作製した。使用した乳剤は、富士写真フィルム社製の E T - 7 B である。この乳剤は、数々の高エネルギー実験、例えば、F e r m i l a b の E 5 3 1 実験、C E R N の W A 7 5 実験等で使用された実績があり、性能が良く知られている。乳剤の加工方法や加工後の乾板の特性については付録 1 に述べる。

標的モジュールには垂直照射型 (V タイプ) と水平照射型 (H タイプ) の二種類がある。前者は、ポリスチレン膜の両面に乳剤を塗布したものをビームに垂直に堆積したものである。一方後者は、支持体のないベリクルをその表面がビームと平行になるように堆積したスタックである。V タイプの乾板の配置は、カウンター面と平行であるため乾板の情報とカウンターの情報を容易に対応させることができる。また、高密度のビーム照射を行っても解析に不都合が生じないという利点もある。しかし、顕微鏡を通して乾板を観察する方向がビームと平行であるため、ビームに沿って 50  $\mu$ m 程度以下しか隔たりのない現象は分離しにくいという難点がある。それに対して H タイプは、ビームに垂直な方向から観察するので接近した事象の分離に有利である。つまり、寿命の短い粒子の崩壊を見逃す恐れがない。しかし、乾板の配置がカウンターに垂直であることから両者の情報を対応させるときに不便を生じる。このように、V タイプと H タイプは、各々異なった長所と短所を持っている。そこで我々は、これらの欠点を相補うよう両タイプの標的を併用した。

#### 3 - 1 標的の構造

一定の入射粒子数に対するボトム粒子、及び、チャーム粒子の発生率を高めるには、厚い標的を用いるのが望ましい。しかし、標的を厚くすれば、二次粒子の引き起こす核反応や電磁シャワーによって粒子の増殖が起こり、下流のカウンターでの測定を困難にする。また、乾板の下流部分でもバックグラウンドの飛跡密度が増大し、

解析が著しく困難となる。これらの点を考慮し、Hタイプの標的の厚さは2 cmに、Vタイプの標的の厚さは1.5 cmとした。しかし、このように薄い原子核乾板標的のみでは、チャーム粒子、特に、ボトム粒子の崩壊によって生じるチャーム粒子は、乾板の外で崩壊する確率が高い。そこで、これを逃がさないために物質量を極力抑えた崩壊検出部を標的の直後に設けた。以下に、H、及び、Vタイプ標的の構造について説明する。

#### 1) Hタイプ標的

Hタイプ標的の構造を図3.1に示す。標的部分は、10個のミニモジュールからなる。各々のミニモジュールは、39枚のペリクルを精度良く積み重ねたもので、ポリメチルメタクリレート(PMM)製のホルダーに納めてスプリングで固定してある(図3.2)。一枚のペリクルの大きさは10 cm × 2 cm、厚さは約600 μmである。

標的の下流に薄塗乾板とスペーサーを交互に堆積したサンドウィッチ型のスタックが配置してある。これが、崩壊検出部である。この部分の乾板は、厚さ300 μmのPMM基板の両面に50 μmづつの厚さの乳剤を塗布したもので、その面積は23.5 cm × 23.5 cmである。以下では、これをDシートと呼び、崩壊検出部をDスタックと呼ぶ。一つのモジュールに納められたDシートの数は、9枚である。一方スペーサーは、厚さが2.14 mmの発泡ポリスチレンペーパー(PSP)で、密度は、約0.1 g/cm<sup>3</sup>である。Dシートは、ビームに垂直であるためカウンターとの情報の対応が付け易い。それ故、崩壊点の検出以外に標的部とカウンター部の情報を結合するインターフェースとしての役割も果たす。

Hタイプの1モジュールに用いた乳剤の総量は、約0.5リットルである。標的部と検出部は合わせて遮光用のアルミラミネート紙で包み、減圧密封してある。これによって、ペリクルとDシートの相対位置を固定すると共に、乾板の変質や変形を防止する。

#### 2) Vタイプ標的

Vタイプ標的1モジュールは、約1リットルの乳剤を用いて作製した。標的の構造を図3.3に示す。

標的部には、厚さ70 μmのポリスチレン膜の両面に各々厚さ

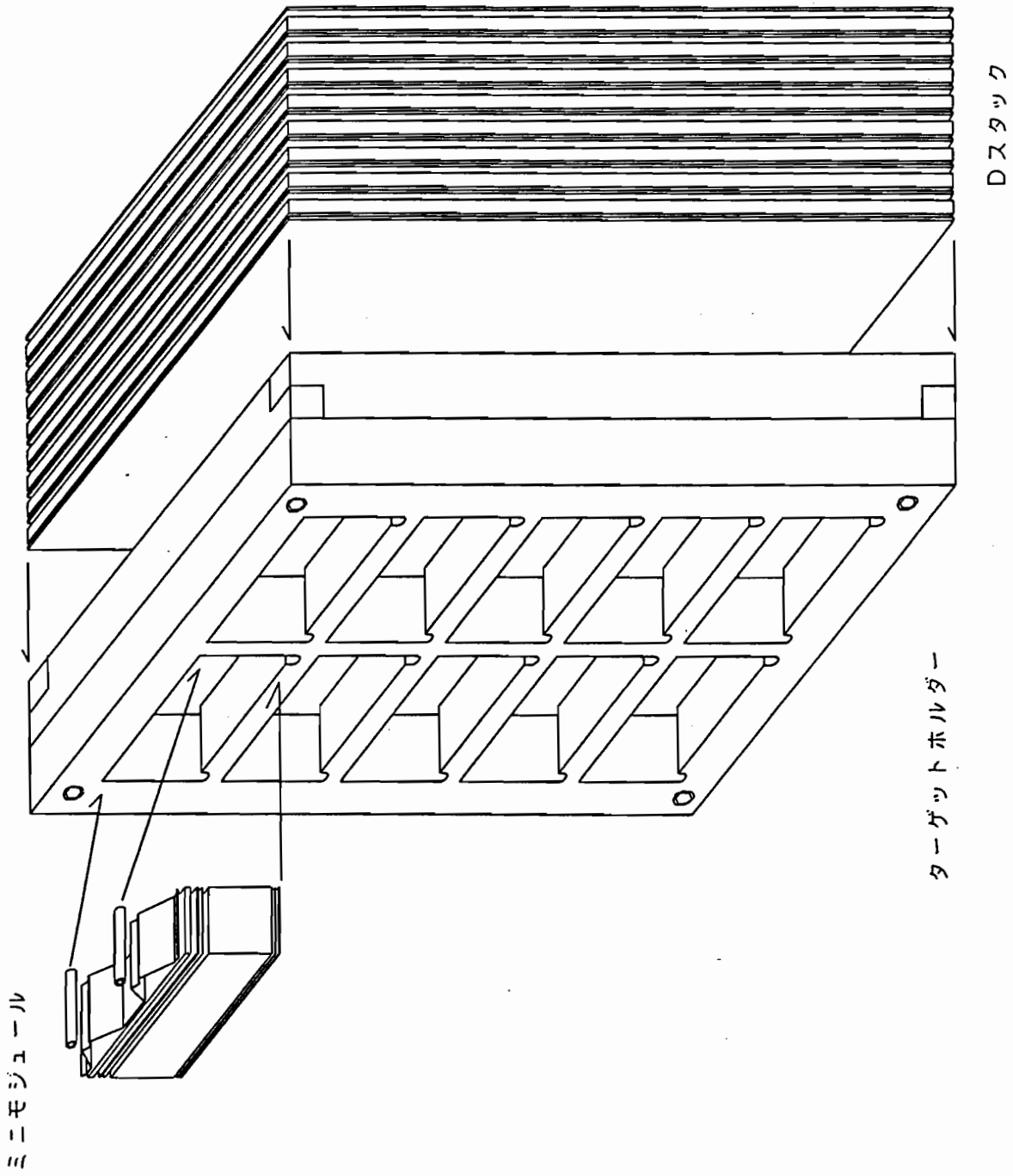


図3. 1 Hタイプ原子核乾板標的の構造

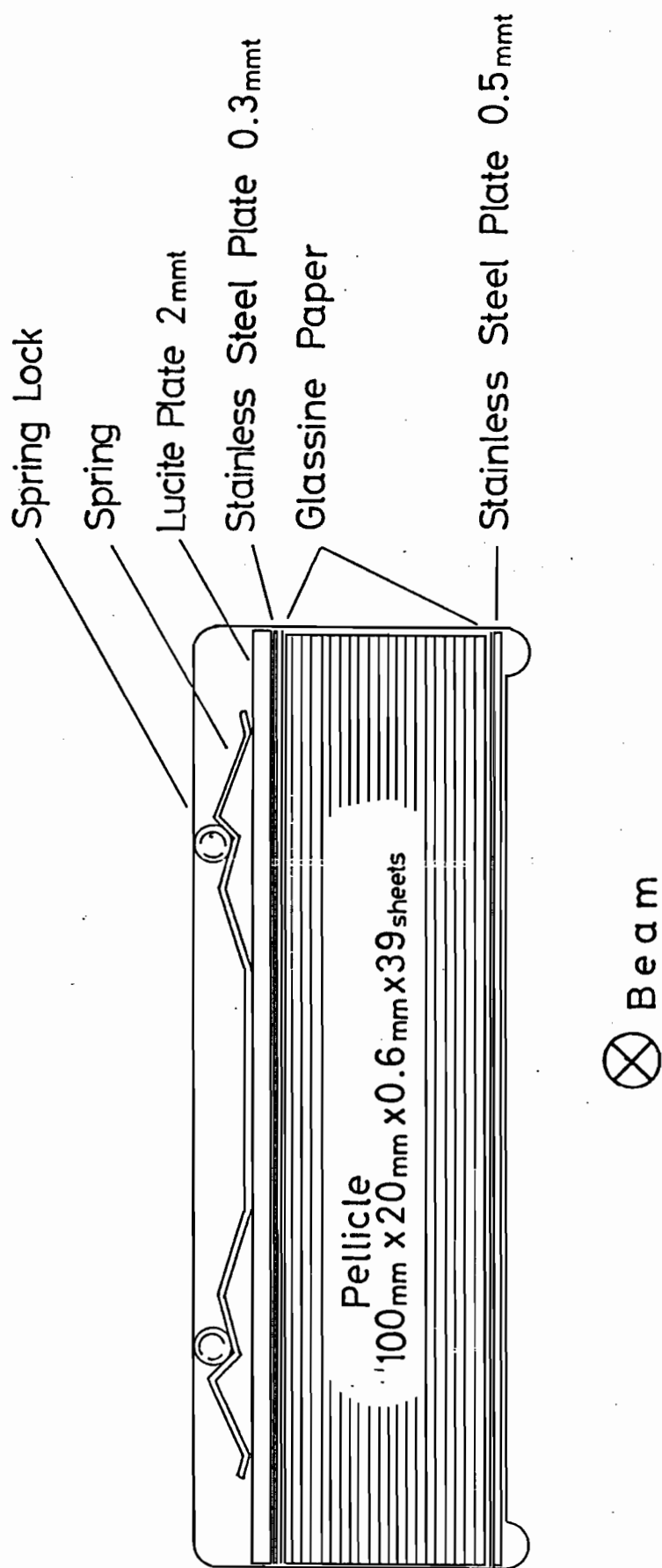


図 3. 2 ミニモジュールの構造



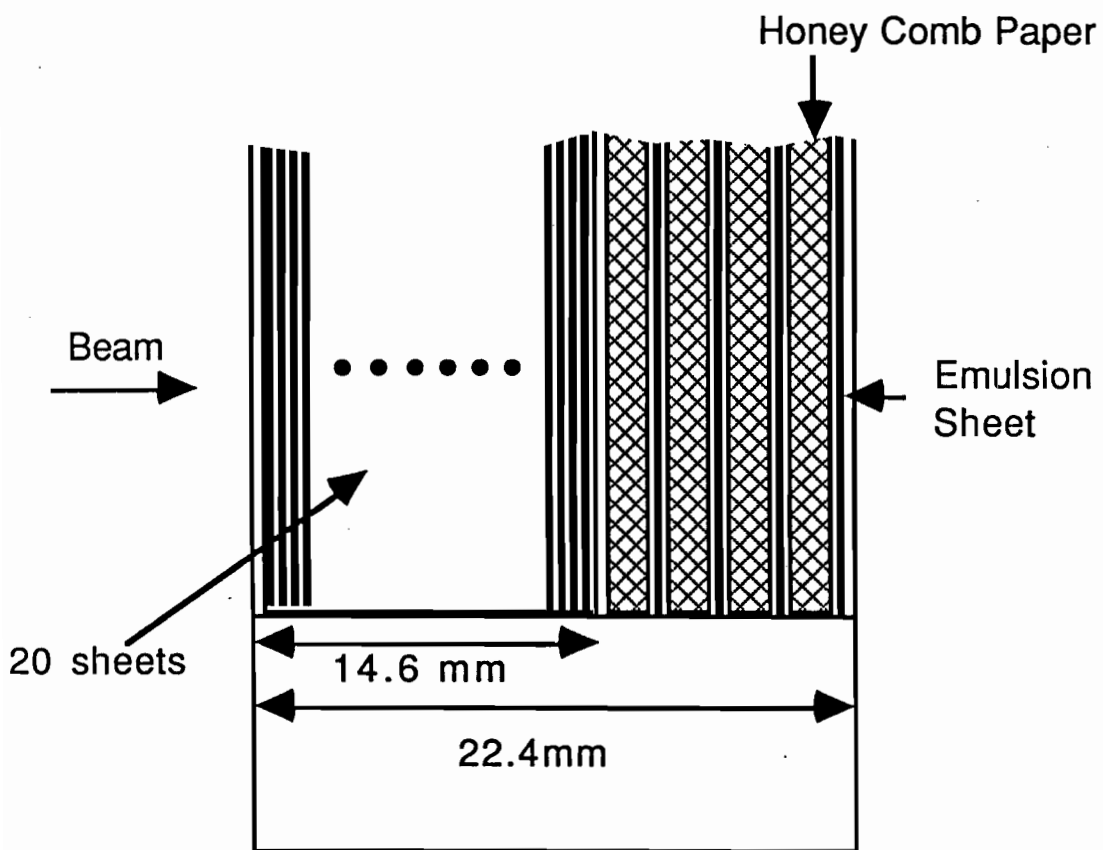


図 3. 3 Vタイプ原子核乾板標的の構造

330  $\mu\text{m}$  の乳剤を塗布した乾板を20枚堆積してある。乾板の大きさは、25 cm  $\times$  25 cm である。

この乾板標的の下流に、厚さ1.52 mm のペーパーハニカムボードで間隔を保って積み重ねた5枚の薄塗乾板がある。これが、崩壊検出部である。この部分の乾板は、PPM基板の両面に50  $\mu\text{m}$  ずつの厚さで乳剤を塗布したものである。基板の厚さは、最下流の一枚は300  $\mu\text{m}$ 、その他は100  $\mu\text{m}$  である。

これもHタイプの標的同様、標的部と崩壊検出部を一体化し遮光紙で包んで減圧密封してある。

### 3-2 ビーム照射

原子核乾板標的に一様な密度でビーム照射を行うために、標的モジュールを移動させるターゲットムーバーを使用した。図3.4にターゲットムーバーの概略を示す。可動フレームへの標的モジュールの取り付けは、ビームを停止して行う。それに要する時間を極力短縮するために専用の取り付け治具を用いた。図3.5にその一例としてHタイプ用の取り付け治具の構造を示す。この治具を使用することによって標的モジュールの交換に要する時間を2~3分にすることができた。フレームを移動させるモータの制御は、マイクロコンピュータからの制御信号によって行う。フレームの運動状態を指定する制御テーブルの一例を図3.6に示す。ビームを照射する位置、ビーム照射密度等を指定すると、ビーム強度モニターからの情報を考慮して運動速度と移動量が定まる仕組みになっている。この制御に必要なフレームの移動量の測定は、最小読み取り単位1  $\mu\text{m}$  のリニアエンコーダで行う。

標的モジュールは、乳剤の劣化を防ぐ目的で、作製後直ちに冷蔵庫へ入れて保管するが、ビーム照射のためにそれを取り出すと表面に結露が起これり包装紙が破損し易い。また、温度変化による変形も起こるので、照射開始の数時間前に取り出し、十分室温に馴染んでから使用した。

各モジュールへのビーム照射は、以下の5段階の手順に従って行った。

#### 1) スポット照射

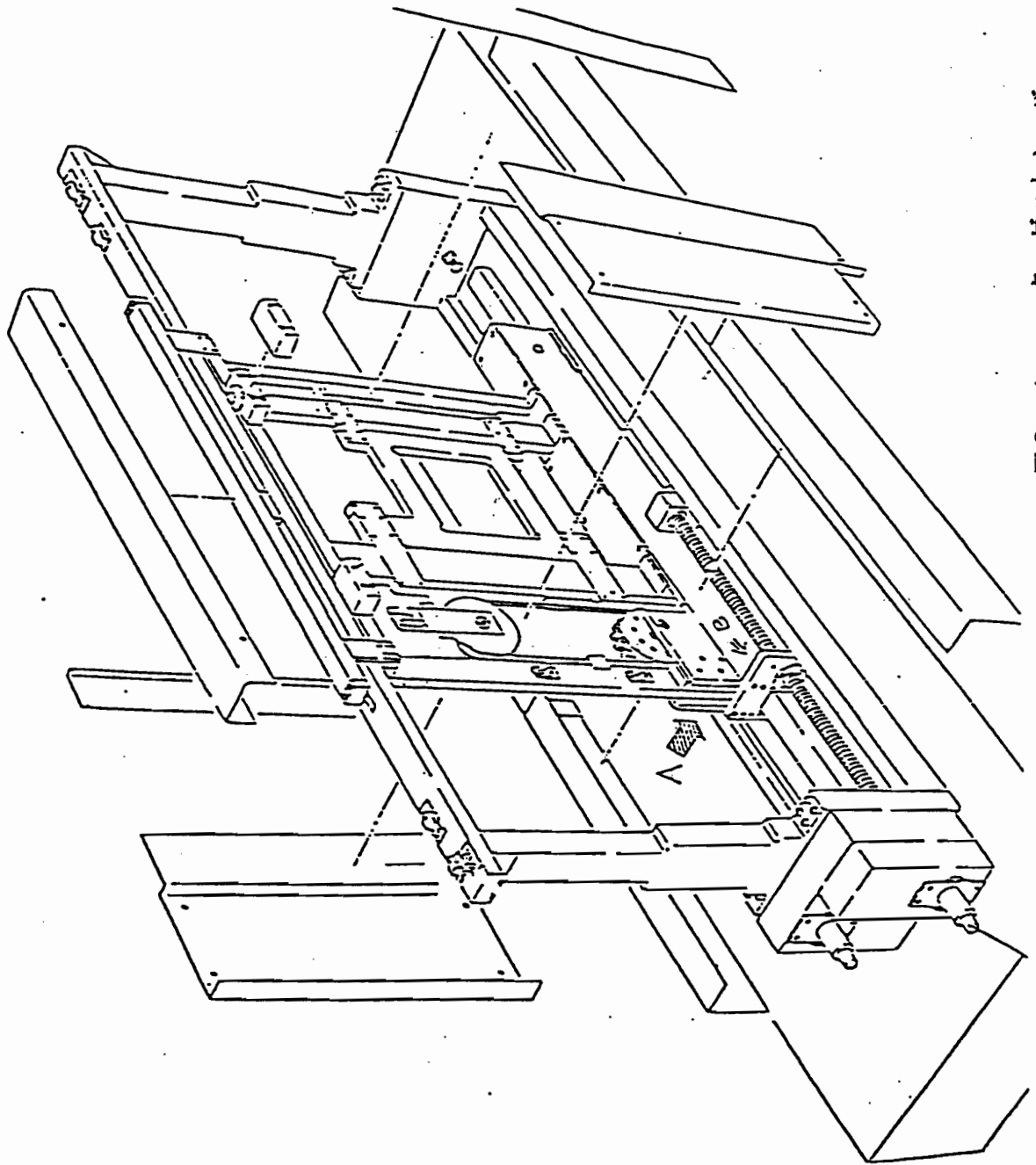


図 3. 4 ターゲットムーバー

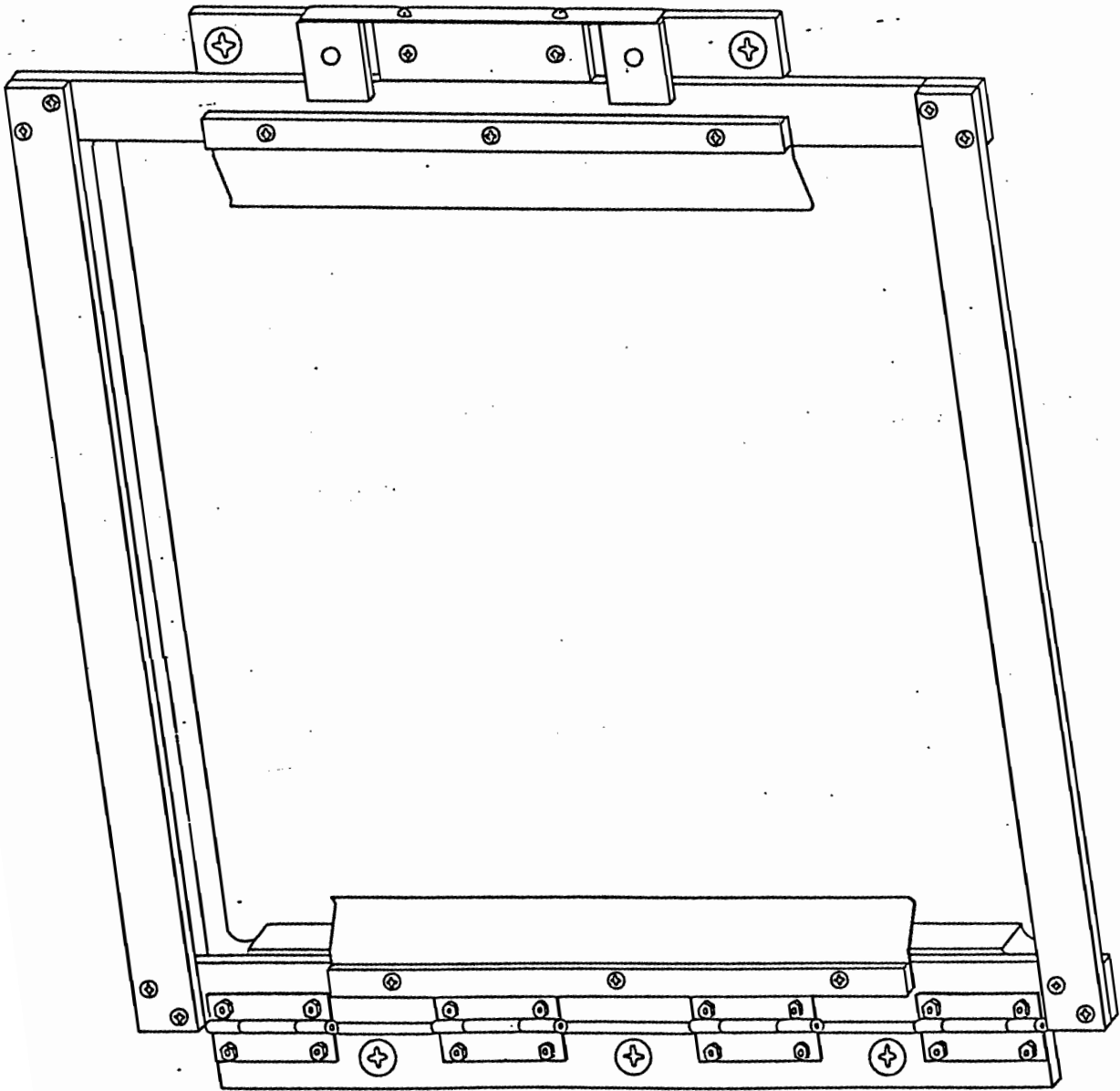
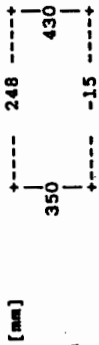


図 3. 5 Hタイプ標的の取り付け治具



Offset ( 90.0, -12.0)  
 Gage(-400, 200)  
 XRND = -100  
 YDRC = 50

! Direct Value  
 ! Indirect Value

Total Step --- 11

# 1 Spot	238	22
# 2 Spot	22	243
# 3 Normal Dens.	25 > 235	34 > 40
# 4 Normal Dens.	25 > 235	43 > 57
# 5 Normal Dens.	25 > 235	77 > 102
# 6 Normal Dens.	25 > 235	122 > 147
# 7 Normal Dens.	25 > 235	167 > 192
# 8 Normal Dens.	25 > 235	212 > 226
# 9 Normal Dens.	25 > 235	229 > 235
# 10 Spot	238	243
# 11 Spot	22	22

Step # 1 --- Spot Exposure  
 Darkness = 200\*1000 Beam  
 [mm] 238.00  
 10.00 ---  
 22.00 ---

Step # 2 --- Spot Exposure  
 Darkness = 200\*1000 Beam  
 [mm] 22.00  
 255.00 ---  
 243.00 ---

Step # 7 --- Normal Density Exposure  
 Density = 500 Beam/(mm\*mm)  
 Y(pitch) = 1200 micron  
 Dens.(X) = 600 Beam/mm  
 Y(abrdg) = 500 micron  
 Boeder Time = 8 sec  
 [mm] 10.00 25.00 235.00 250.00  
 157.50 ---  
 167.50 ---

Step # 3 --- Normal Density Exposure  
 Density = 110 Beam/(mm\*mm)  
 Y(pitch) = 6000 micron  
 Dens.(X) = 660 Beam/mm  
 Y(abrdg) = 3000 micron  
 Boeder Time = 8 sec  
 [mm] 10.00 25.00 235.00 250.00  
 10.00 ---  
 34.50 ---

Step # 8 --- Normal Density Exposure  
 Density = 500 Beam/(mm\*mm)  
 Y(pitch) = 1200 micron  
 Dens.(X) = 600 Beam/mm  
 Y(abrdg) = 500 micron  
 Boeder Time = 8 sec  
 [mm] 10.00 25.00 235.00 250.00  
 202.50 ---  
 212.50 ---

Step # 4 --- Normal Density Exposure  
 Density = 500 Beam/(mm\*mm)  
 Y(pitch) = 1200 micron  
 Dens.(X) = 600 Beam/mm  
 Y(abrdg) = 500 micron  
 Boeder Time = 8 sec  
 [mm] 10.00 25.00 235.00 250.00  
 42.50 ---  
 43.50 ---

Step # 9 --- Normal Density Exposure  
 Density = 110 Beam/(mm\*mm)  
 Y(pitch) = 6000 micron  
 Dens.(X) = 660 Beam/mm  
 Y(abrdg) = 3000 micron  
 Boeder Time = 8 sec  
 [mm] 10.00 25.00 235.00 250.00  
 227.50 ---  
 229.50 ---

Step # 5 --- Normal Density Exposure  
 Density = 500 Beam/(mm\*mm)  
 Y(pitch) = 1200 micron  
 Dens.(X) = 600 Beam/mm  
 Y(abrdg) = 500 micron  
 Boeder Time = 8 sec  
 [mm] 10.00 25.00 235.00 250.00  
 67.50 ---  
 77.50 ---

Step # 10 --- Spot Exposure  
 Darkness = 200\*1000 Beam  
 [mm] 238.00  
 255.00 ---  
 243.00 ---

Step # 6 --- Normal Density Exposure  
 Density = 500 Beam/(mm\*mm)  
 Y(pitch) = 1200 micron  
 Dens.(X) = 600 Beam/mm  
 Y(abrdg) = 500 micron  
 Boeder Time = 8 sec  
 [mm] 10.00 25.00 235.00 250.00  
 112.50 ---  
 122.50 ---

Step # 11 --- Spot Exposure  
 Darkness = 200\*1000 Beam  
 [mm] 22.00  
 10.00 ---  
 22.00 ---

図 3. 6 ターゲットムバー制御用テーブルの一例

- 2) 低密度照射
- 3) 標準照射
- 4) 低密度照射
- 5) スポット照射

スポット照射は、カウンターと乾板のおおよその位置関係を知るために行う照射である。標的を静止させた状態で、 $2 \times 10^5$ 本以上の入射粒子を照射した。この数は、現像後の乾板でスポット状の黒化部が認識できることとカウンターでスポットの中心位置を求めるのに十分な数が得られることを考慮して決めた。

また、低密度部分は、乾板解析の初期段階で、カウンターと乾板の位置関係を正確に決めるためのものである。照射密度は、標準照射部のそれよりほぼ一桁低く約  $1 \times 10^4 / \text{cm}^2$  とした。この程度の照射密度であれば、カウンターが捉えた反応の発生点近傍に紛らわしい別の反応が存在する確率は極めて低い。

標準照射の密度は、モジュールによって多少異なる。Hタイプでは、 $(0.5 \sim 1.5) \times 10^5 / \text{cm}^2$ 、Vタイプでは、 $(1.0 \sim 3.0) \times 10^5 / \text{cm}^2$  で照射した。図3.7は、標準照射部における照射密度を乾板で測定した一例であり、一様に照射されていることがわかる。

図3.8は、上記の5段階の照射を行った標的モジュール中の位置を示したものである。また、表3.1には、各モジュールのビーム照射に要した時間とカウンターデータを記録した反応数（トリガー数）をまとめて示した。

### 3-3 リファレンスマーク

Hタイプの乾板標的は、水平照射型のペリクルスタックと垂直照射型のDシートスタックを組み合わせている。これらのスタックの位置関係、及び、スタック内の乾板相互の位置関係、更に、乾板とカウンターの位置関係を容易に、しかも精度良く知る目的で、X線によるマーキングを行った。それに使用したX線照射系の概略を図3.9に示す。ターゲットムーバーの約3.5m上流にX線発生装置（東芝EX-220GH）が設置してある。このX線源の有効面積は、 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  である。そして、ここで発生したX線は、ピ

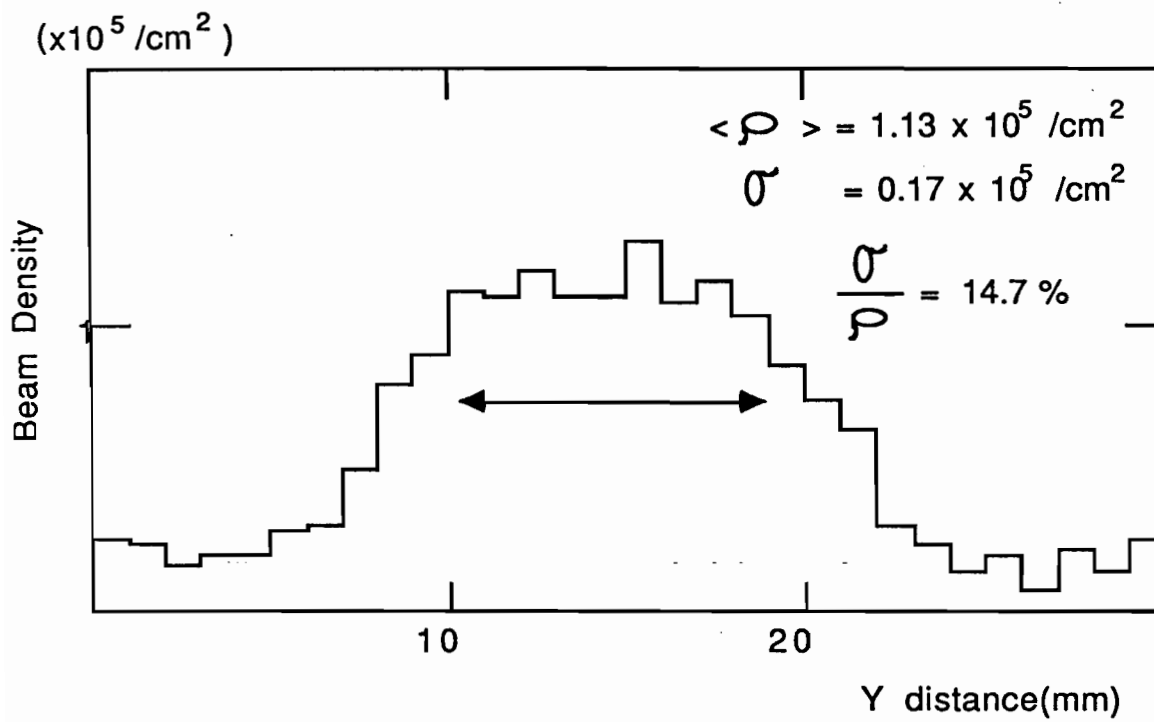
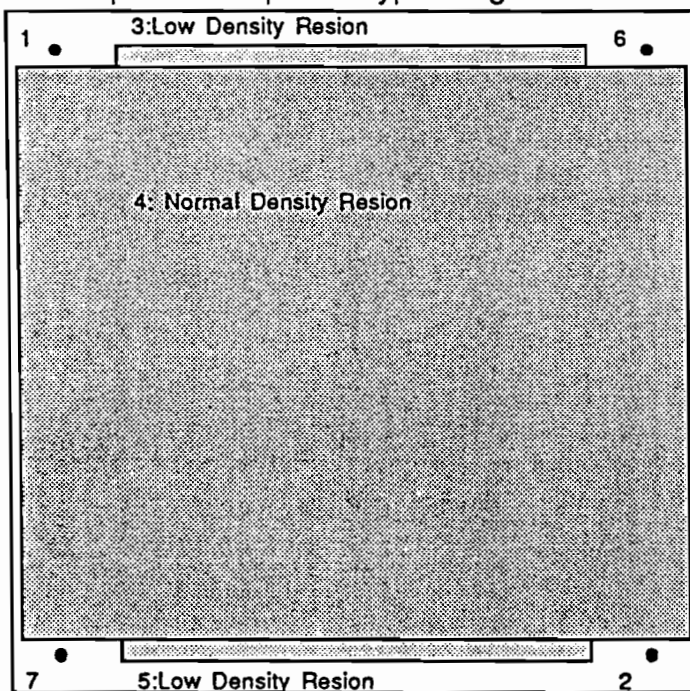


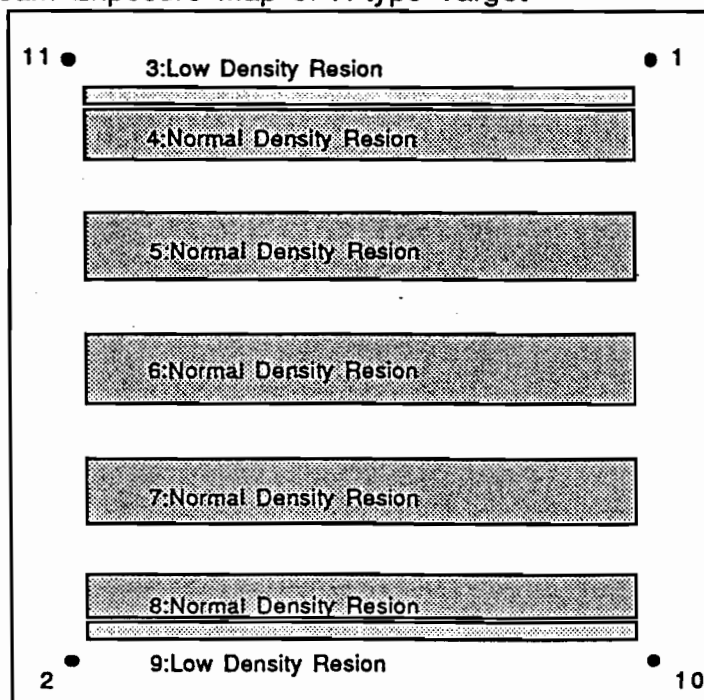
図 3. 7 乾板で測定したビーム照射密度

Beam Exposure Map of V-type Target



1,2,6,7:Beam Spot

Beam Exposure Map of H-type Target



1,2,10,11:Beam Spot

図 3. 8      ビーム照射マップ  
番号は、照射順を示している



表 3. 1 E 6 5 3 一次実験でのビーム照射記録

Mod#	Density ( $\times 10^5/\text{cm}^2$ )		#Trigger( $\times 10^3$ )				
		Target in		Target out		Run(tape#)	
V-01	0.5	05/26/85	0840	05/26/85	2345	1005-1030	45.2
	-1.0	05/27	0507	05/27	0809	1040-1043	9.4
H-01	0.5	05/26	2345	05/27	0507	1031-1039	22.7
V-02	1.5	06/02	2245	06/04	0815	1054-1092	152.8
V-03	1.0	06/04	2340	06/05	1505	1096-1117	106.9
V-04	1.0	06/05	1505	06/06	2230	1118-1143	115.2
V-05	1.5	06/06	2330	06/07	2305	1144-1178	161.0
H-02	1.0	06/07	2305	06/08	0652	1179-1193	68.0
H-03	1.0	06/08	0652	06/08	1812	1195-1207	58.0
H-04	1.0	06/08	1812	06/09	1518	1208-1221	70.2
V-06	1.5	06/15	2345	06/17	1745	1236-1275	170.0
V-07	1.5	06/17	1445	06/20	0500	1277-1316	178.0
H-05	1.0	06/23	1412	06/24	0432	1333-1347	74.1
H-06	1.0	06/24	0432	06/24	2030	1349-1364	69.9
H-07	1.0	06/24	2030	06/25	0810	1365-1379	72.5
H-08	1.0	06/25	1536	06/26	0525	1381-1395	71.1
H-09	1.0	06/26	0525	06/26	2229	1396-1409	66.9
H-10	0.5	06/26	2229	06/27	0210	1410-1415	29.4
V-08	3.0	06/27	0210	06/30	1538	1416-1484	327.4
V-09	1.5	06/30	1538	07/01	1710	1485-1516	156.9
H-11	1.0	07/01	1710	09/02	0045	1517-1530	66.4
H-12	1.0	07/02	0045	07/02	1030	1531-1533	14.0
		07/14	2042	07/15	2150	1676-1533	53.3
V-10	1.5	07/12	1728	07/13	1506	1543-1575	156.7
V-11	1.5	07/13	1506	07/14	0545	1576-1610	168.4
V-12	1.5	07/14	0545	07/14	2042	1611-1639	131.3
V-13	1.5	07/14	2042	07/15	2150	1640-1675	175.4
H-13	1.5	07/16	1612	07/17	0522	1689-1707	93.4
H-14	0.5	07/17	0552	07/17	1115	1708-1716	40.5
H-15	0.5	07/17	1115	07/17	2038	1717-1725	37.4
H-16	1.0	07/17	2038	07/18	0745	1727-1739	66.3
V-14	3.0	07/18	1705	07/20	2255	1742-1812	337.6
V-15	1.5	07/20	2255	07/21	2115	1813-1847	168.0
V-16	1.5	07/21	2115	07/22	1421	1849-1883	167.8
H-17	0.75	07/22	1421	07/22	2330	1884-1894	53.2
H-18	0.75	07/22	2330	07/23	0440	1895-1906	54.8
H-19	0.5	07/23	0440	07/23	0810	1907-1914	37.4
V-17	1.5	08/02	1500	08/03	0840	1931-2001	174.0
V-18	1.5	08/03	0840	08/04	0154	2003-2036	178.9
V-19	1.5	08/04	0154	08/04	1800	2037-2071	174.5
V-10	1.5	08/04	1800	08/05	1005	2072-2106	170.2
V-21	1.5	08/05	1005	08/06	0233	2107-2141	167.6
H-20	0.5	08/06	0233	08/07	0744	2142-2154	40.4
H-21	0.5	08/09	0243	08/09	1048	2171-2179	38.1
H-22	0.5	08/09	1048	08/09	2107	2180-2188	39.4
H-23	1.5	08/09	2107	08/10	0727	2189-2207	91.3
V-22	1.5	08/10	0727	08/11	1200	2209-2243	161.0
V-23	1.5	08/11	1200	08/12	0448	2244-2781	165.0
H-24	0.5	08/12	0448	08/12	2250	2282-2291	37.9
H-25	1.0	08/13	0534	08/14	0933	2303-2319	67.8
V-24	1.5	08/14	0933	08/15	0835	2320-2335	58.2

( 24V-module, 25H-module )

Total #Trigger:  $5.4 \times 10^6$

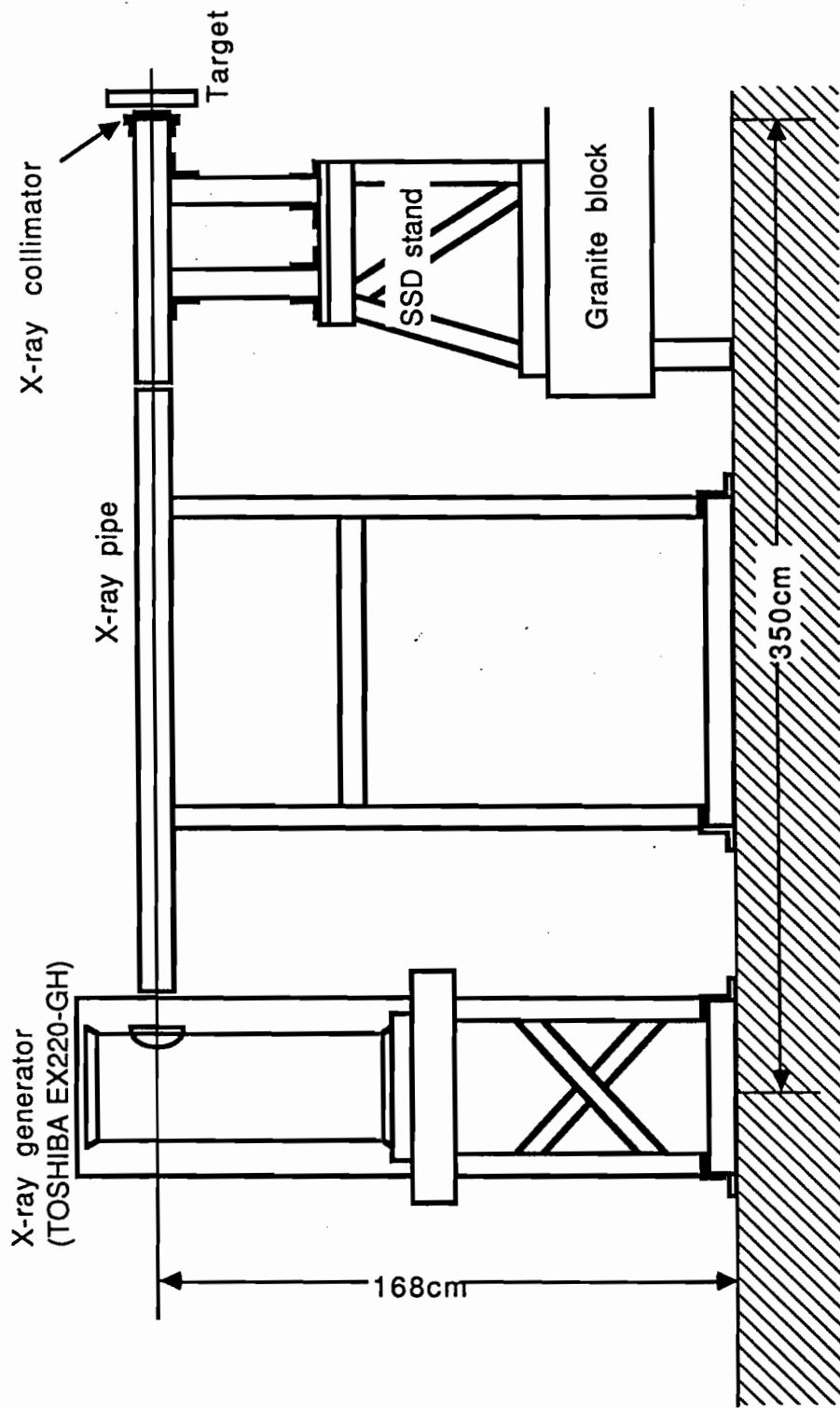


図 3. 9 X線照射系の概略図

ームとほぼ平行に導かれコリメータに至る。コリメータは、厚さ5 mmの鉛を加工して作った幅約20 μmのスリットをV字型に組み合わせたもので、一方のスリットは、ほぼ鉛直に、他方はそれに対して45°傾いた状態になっている(図3. 10)。このコリメータを通過したX線が乾板に吸収され、V字型の位置決めマークを形成する。X線の照射は、ビーム照射直後、標的をターゲットムーバーから取り外す前に行った。各ミニモジュールの図3. 11に示す位置に二箇所づつマークが付くように標的の位置を合わせ、一箇所当たり約20秒照射した。X線発生装置の作動条件は、130 kV、5 mAである。

### 3-4 ビーム照射後の乾板処理

我々は、この実験のために二つの新しい乾板処理法を開発した。その第一は、ペリクルの貼合わせである。我々が使用したペリクルは、10 cm × 2 cmの短冊状である。このように細長い乾板では、現像による周辺の変形が重大な問題となる。厚さ600 μmの乾板を現像した時の典型的な変形の例を図3. 12 (a)に示す。図から明らかかなように端から約0.6 mmの範囲は、変形が著しく解析は不可能である。このようにして失われる部分を極力少なくするために、図3. 13に示すように5枚のペリクルの辺と辺を互いに密着させて一枚の基盤上に貼合わせる方法を導入した。この方法によれば、周辺部の変形は、図3. 12 (b)に示すように抑えられ、失われる範囲は、0.3 ~ 0.4 mmに限定される。しかも、解析過程でペリクルからペリクルへと飛跡を追跡する際に、顕微鏡ステージ上のプレートを交換する手間が省ける。これは、解析時間の短縮に極めて有効である。

もう一つの新しい技術は、Vタイプの乾板解析を容易にするミニプレート法である。この方法の概略は次の通りである。まず、現像後の乾板を裁断し、3 cm × 3 cmの断面積を持つミニスタックに分割する。そして、各々のミニスタックに属する25枚のミニプレートを同一透明平板状に展開して接着する。こうすることによって、予測された反応点の探索や飛跡の追跡などの作業を顕微鏡ステージ上の乾板を交換すること無しに進められ解析速度を飛躍的に向上さ

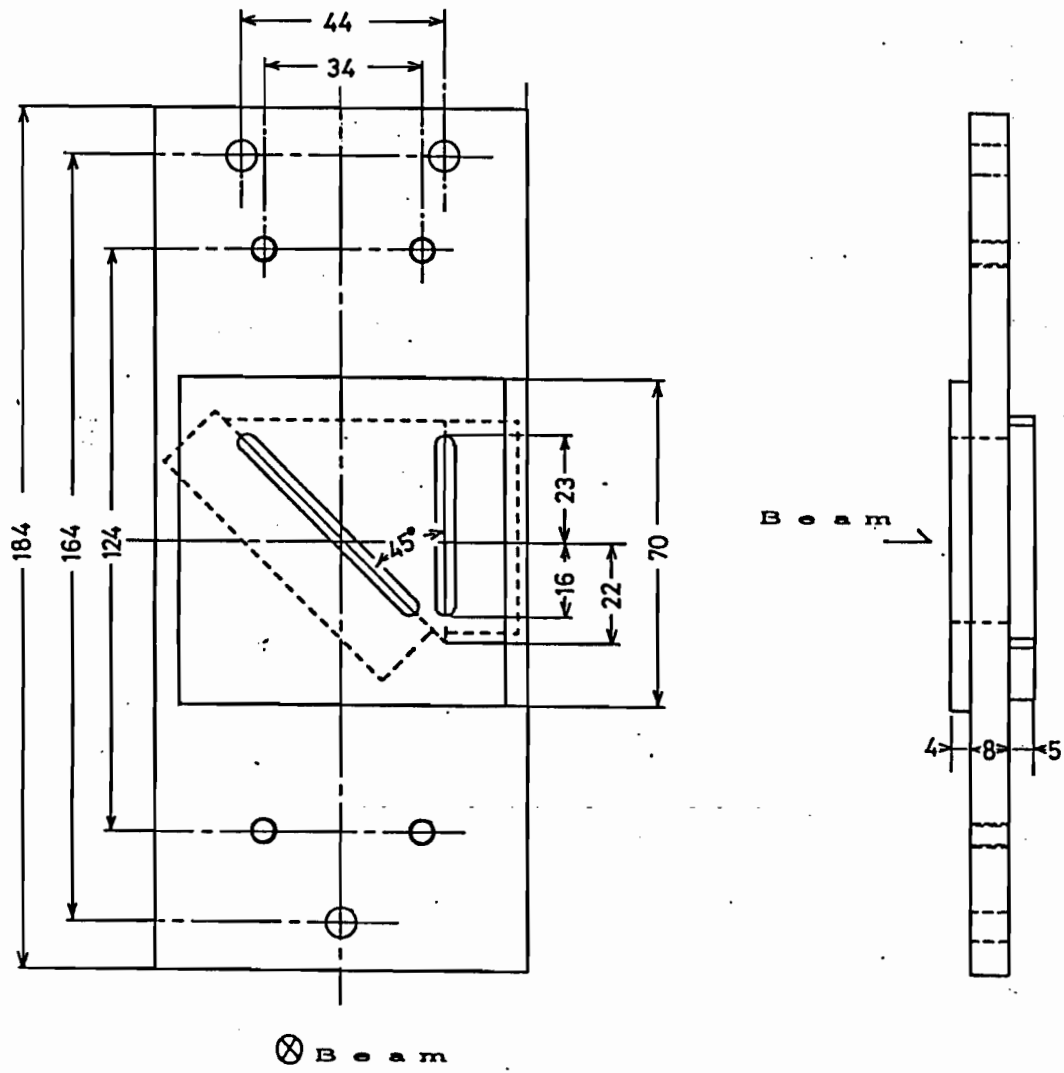
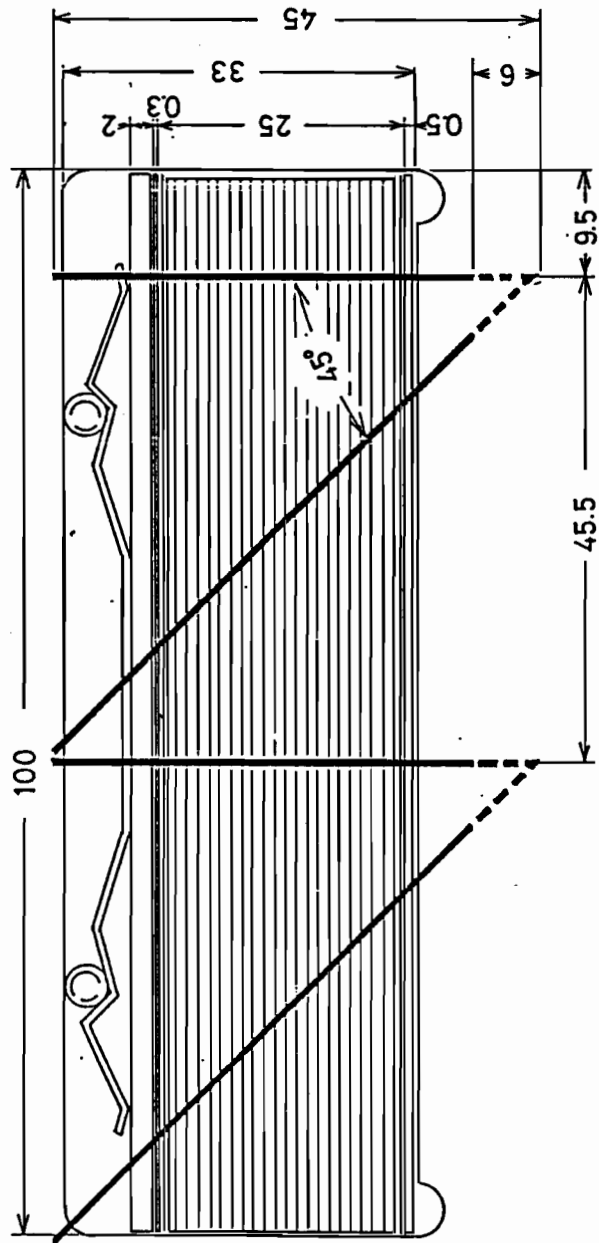


図 3. 10 X線コリメータ



⊗ Beam

図 3. 11 X線マーク照射位置

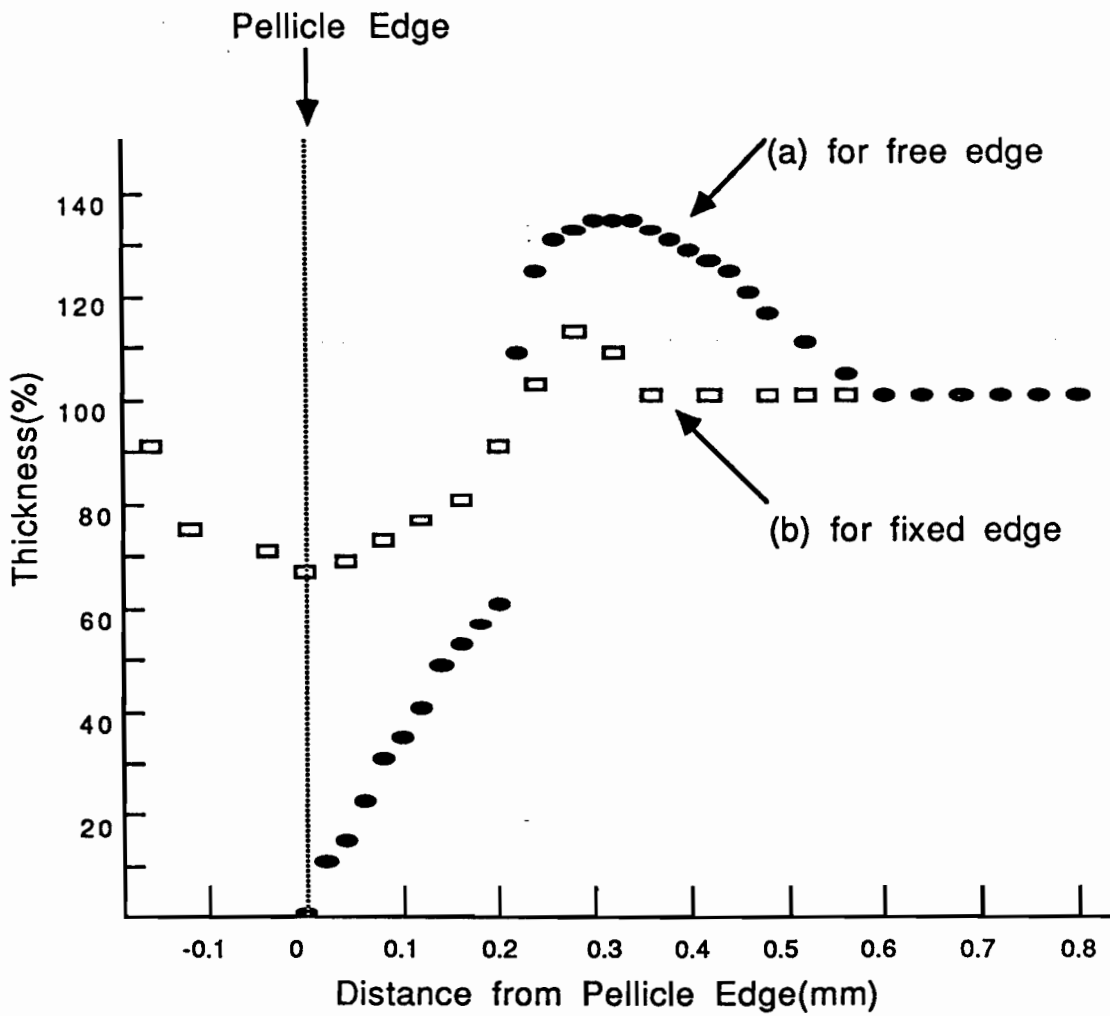


図3. 12 ペリクルの端付近での歪  
 (a) 一枚を単独で貼付けた場合  
 (b) ペリクルどうしを互いに密着させて張り合わせた場合

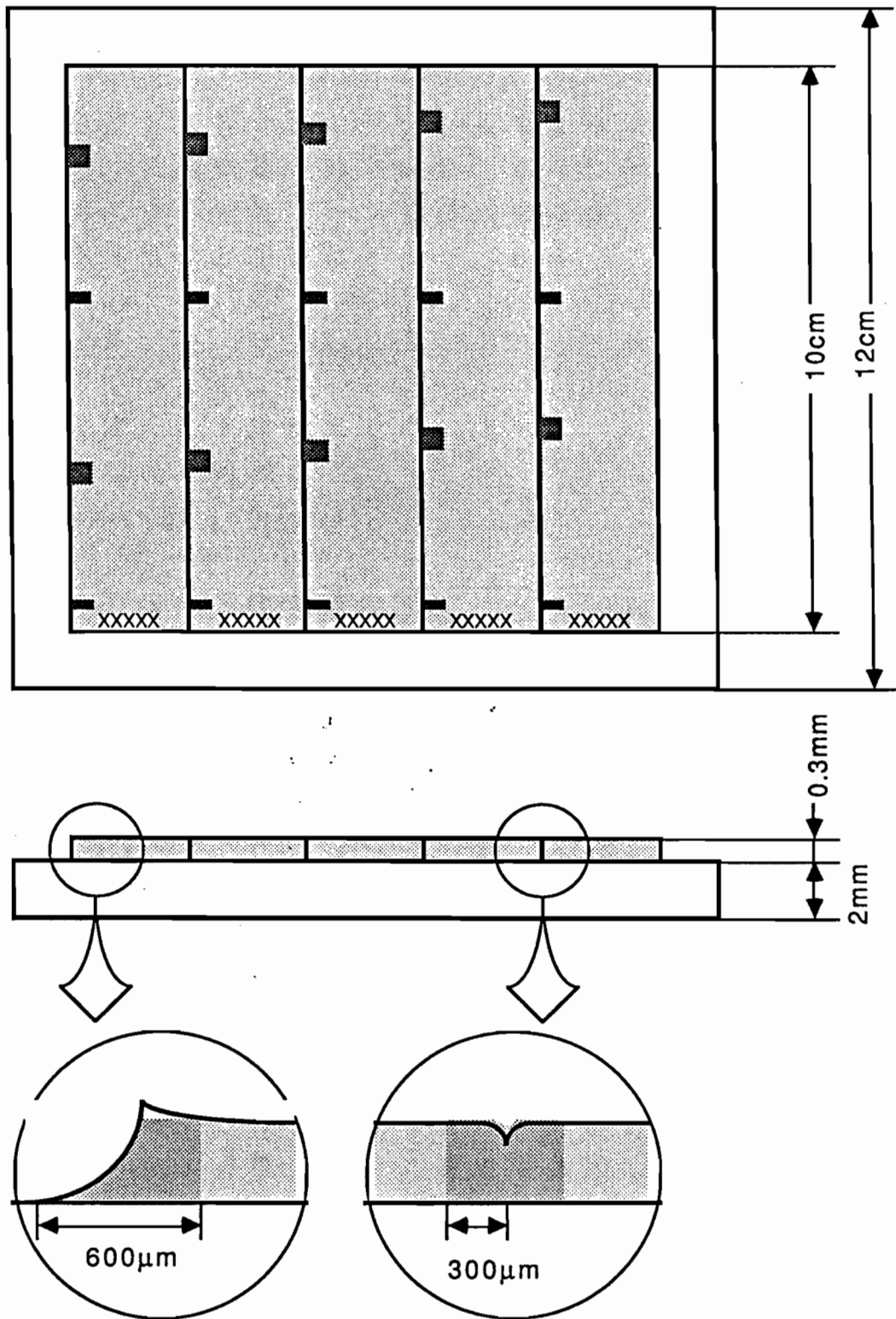


図 3. 1 3 貼付け後のベリケル

せることができる。

### 3 - 5 乾板座標

乾板解析の便宜上、各ミニモジュール毎に座標系（モジュール座標系）を設けた。この座標系は、図3. 14に示すように、ミニモジュール最上流面でのX線マークの交点を原点としている。また各軸の向きは、標準座標と平行にとった。以後、この座標系での位置を（ $X_{MOD}$ ,  $Y_{MOD}$ ,  $Z_{MOD}$ ）と称する。

標準座標系（ $X_{SPEC}$ ,  $Y_{SPEC}$ ,  $Z_{SPEC}$ ）とモジュール座標系は以下の手順で対応をつける。

ペリクル上流端の標準座標系でのZ座標は、 $-3.206\text{ mm}$ であるので、Z方向の変換式は、

$$Z_{MOD} = Z_{SPEC} + 3.206\text{ (mm)}$$

である。

XY平面での両座標系の変換は、ターゲットムーバー座標（ $X_{TM}$ ,  $Y_{TM}$ ）を共通座標として用い変換する。図3. 15に示すように、注目する位置*i*の標準座標系での位置ベクトルを $r^i_{SPEC}$ 、モジュール座標系での位置ベクトルを $r^i_{MOD}$ とする。また、モジュールのターゲットムーバー座標を $R^i_{TM}$ とすると、X線マークの照射時のモジュールのターゲットムーバー座標 $R^x_{TM}$ を用いて、

$$r^i_{MOD} = r^i_{SPEC} - (R^i_{TM} - R^x_{TM}) - C$$

という関係式が得られる。ここでCは変換パラメータである。Cを求めるためにはまず、Cの情報がなくとも確実に標準座標とモジュール座標で同一点*i*がわかるビームスポットを用いる。Dシート上の四隅に照射されているビームスポットを乾板上で測定しモジュール座標を求める。この点の標準座標は、ビームSSDで測定した位置の分布より求めた。こうして得られたCの値の誤差は、約100 $\mu\text{m}$ であり、このまま実際の解析に適用するには大きすぎる。そこで、次の段階として低密度部分でカウンターが捉えた核反応に注目する。そして、その反応の乾板上での位置をビームスポットを基にして求めた変換パラメータを用いて計算する。この値は、パラメータの不定性に由来する誤差があるから計算値を中心として誤差の範囲で反応の探索を行う。そうするといくつかの核反応が見



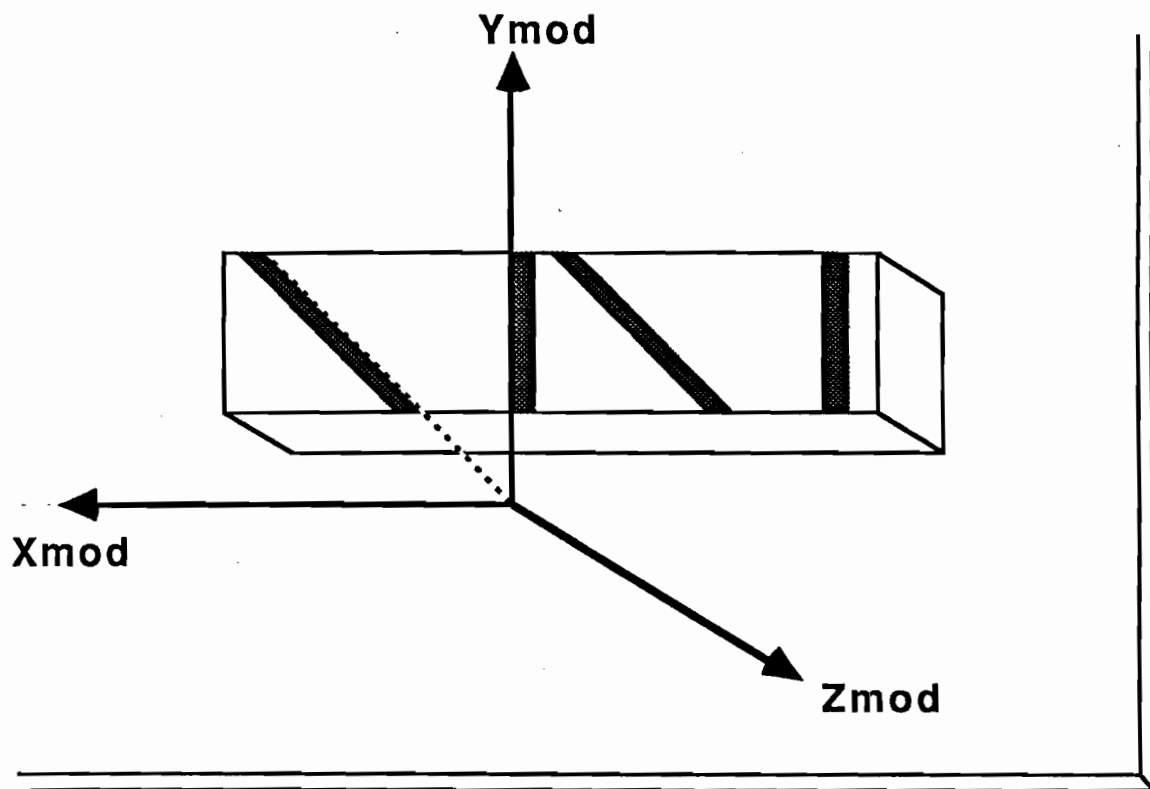


図 3. 1 4 モジュール座標

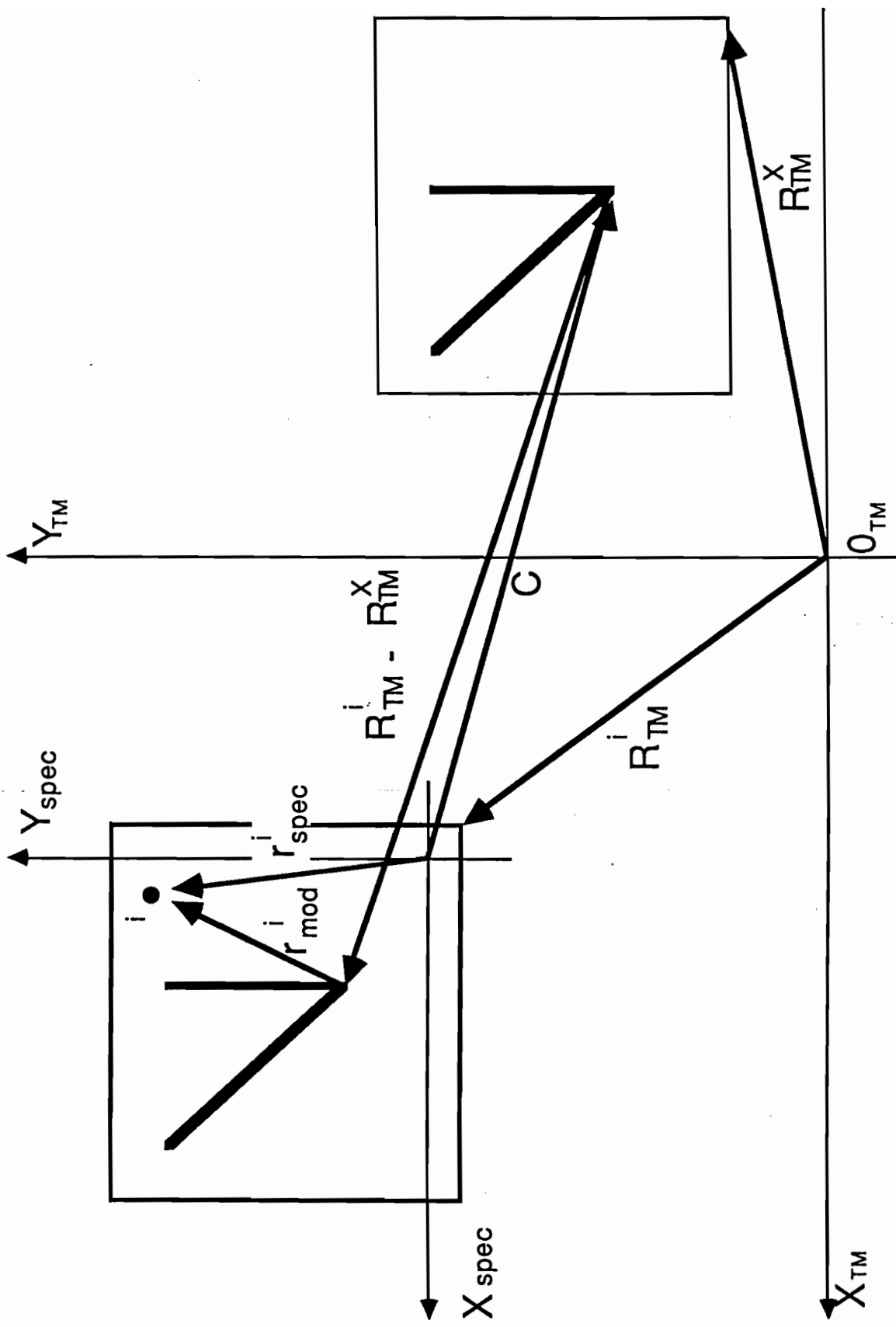


図3. 15 モジュール座標と標準座標の対応付けの概念図

い出される。しかし、この領域における各反応の密度が  $0.3$  反応 /  $\text{mm}^3$  と低いのでその数は多くない。それ故、二次粒子の放出角を参考にすればその中から注目する反応を困難なく選び出すことが出来る。これを基にして座標変換のパラメーターを計算し直せば、その精度は格段に向上しビーム SSD とパーテックス SSD の測定精度程度になる。そして、実際の乾板解析が進行して数多くの反応例についてビームの飛跡の位置と反応点の位置が求めれば、それを基にして更に精度の良い変換パラメーターを求めることが出来る。

モジュール座標とは別に、ペリクルの解析においては、ペリクル一枚毎にペリクル座標 ( $X_{PELL}$ ,  $Y_{PELL}$ ,  $Z_{PELL}$ ) を設定した。この座標系は、ペリクルの上流面とペリクル中央に入っている X 線マークの交点を X、Z 軸の原点とし、Y 軸の原点は、ペリクルの底面である (図 3. 16)。

モジュール座標とペリクル座標は、X 線マークを用いて以下のように対応付ける。

一組の X 線マークは、モジュール座標で

$$X = a_1 Y$$

$$X = a_2 Y$$

で与えられている。図 3. 17 に示すようにペリクル中の注目する点  $i$  が、ペリクル座標 ( $X^i_{PELL}$ ,  $Y^i_{PELL}$ ) の位置にある場合を考える。この点のモジュール座標 ( $X^i_{MOD}$ ,  $Y^i_{MOD}$ ) は、X 線マークの間隔  $L$  と  $X_{PELL}$  とから、

$$X^i_{MOD} = X^i_{PELL} + a_2 L / (a_2 - a_1)$$

$$Y^i_{MOD} = L / (a_2 - a_1)$$

と計算できる。実際には、各ペリクルの X 線マーク間隔は、事前に測定している。この時の測定値は、ペリクル底面での各 X 線マークの内側の間隔である。これを  $L'$  とすと、

$$Y^i_{MOD} = L' / (a_2 - a_1) + Y^i_{PELL}$$

となる。また、ペリクルは、現像処理によって収縮しているのでその補正值  $SF$  (shrinkage factor) を用いて実際の測定値であるペリクル底面から点  $i$  までの距離  $Y_{FB}$  は、

$$Y^i_{PELL} = Y^i_{FB} \times SF$$

と関係付けられる。ここで、 $SF$  は、

$$SF = T / t$$

で、 $T$ 、及び、 $t$  は、各々ビーム照射時、及び、測定時のペリクル

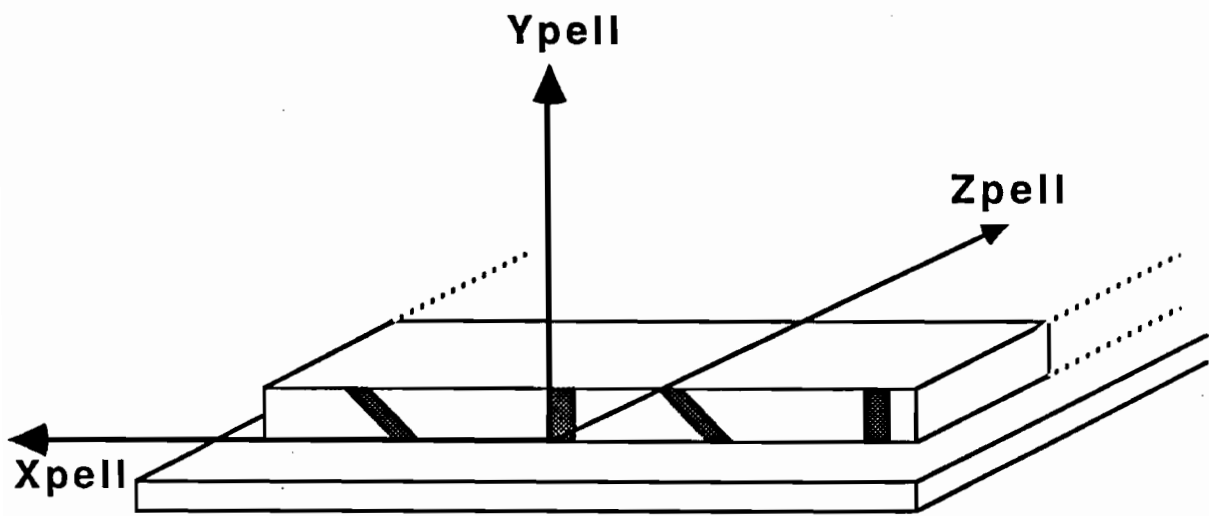


図 3. 1 6 ペリクル座標

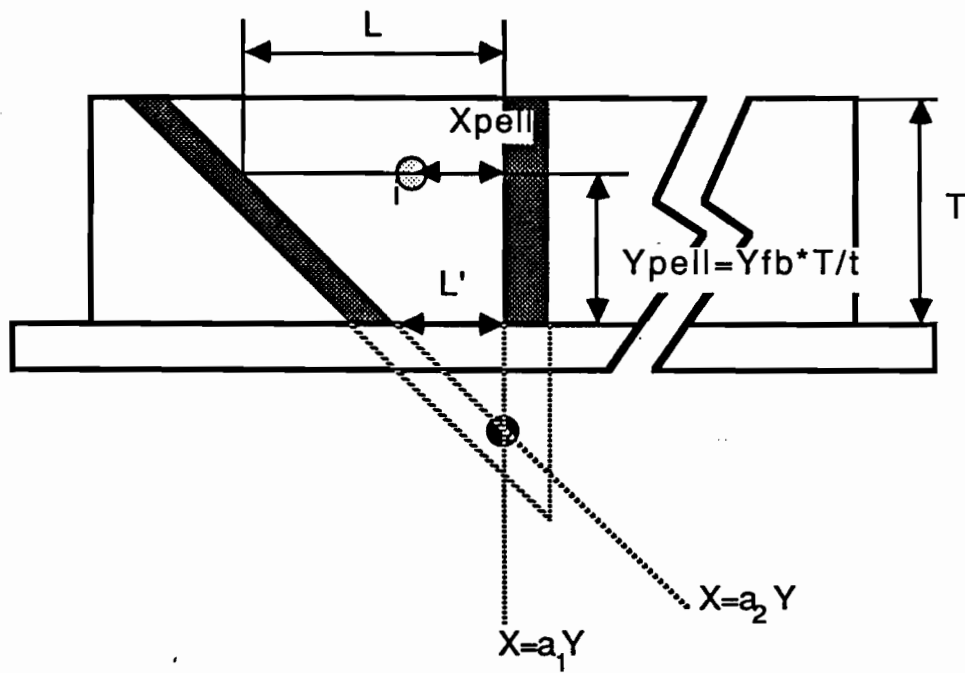


図 3. 1 7 ペリクル座標とモジュール座標の対応付けの概念図

の厚さである。

これら位置の対応付けの基本となる X 線マークの性能を以下のよう  
に評価した。まず、2本の X 線マーク上の点の位置を約 1 mm 間  
隔で各々約 10 点測定し、2本の直線の式を最小自乗法で求め交点  
を計算する。座標の回転は直線の傾きより求める。上流から 1、3、  
5、7、9 枚目の各々の D シート上の 1 つの X 線マークに付いて約  
10 回測定を行った。各々の D シート毎の X 線マークの交点と傾き  
の分散には有為な差異が認められなかったので測定結果をまとめた。  
図 3. 18 に全ての X 線マークの交点の X、Y 座標値の平均との差  
の分布を示す。X 方向に比べて Y 方向の分布が広がっているのは、  
2本の直線の間角度が  $45^\circ$  となっているためである。交点の X  
と Y の標準偏差は各々  $1.3 \mu\text{m}$  及び  $3.8 \mu\text{m}$  である。また、図 3.  
19 に X 線マークの傾きの分布を示す。これも平均値との差の分布  
である。鉛直な X 線マークと  $45^\circ$  の X 線マークの傾きの標準偏差  
は各々  $29 \mu\text{rad}$ 、及び、 $76 \mu\text{rad}$  である。ミニモジュール内で X  
線マークの交点からの距離が最大の点でもこの傾きの誤差に由来す  
る位置のずれは  $2 \sim 5 \mu\text{m}$  である。

図 3. 20 は、入射粒子の飛跡の位置をペリクル最上流で測定し、  
これを先に述べた方法で標準座標に変換したものとカウンターでの  
測定値とを比較したものである。分布のばらつきは、X 方向で約  $30 \mu\text{m}$ 、  
また、Y 方向では約  $40 \mu\text{m}$  であった。これらは、乾板、  
及び、カウンター各々の位置測定誤差に加えて、測定時の乾板の収  
縮、回転等による誤差、及び、ターゲットムーバース座標の誤差等  
を含んだ値である。Y 方向では、現像後のペリクルの収縮を補正す  
るため X 方向に比べてばらつきが大きい。これらの種々の要因による  
誤差に比べてこの X 線マークの性能に由来する誤差は小さく、位置  
対応付けの際のリファレンスとして十分な性能を有していることが  
わかる。

Measurement of X-ray Cross point

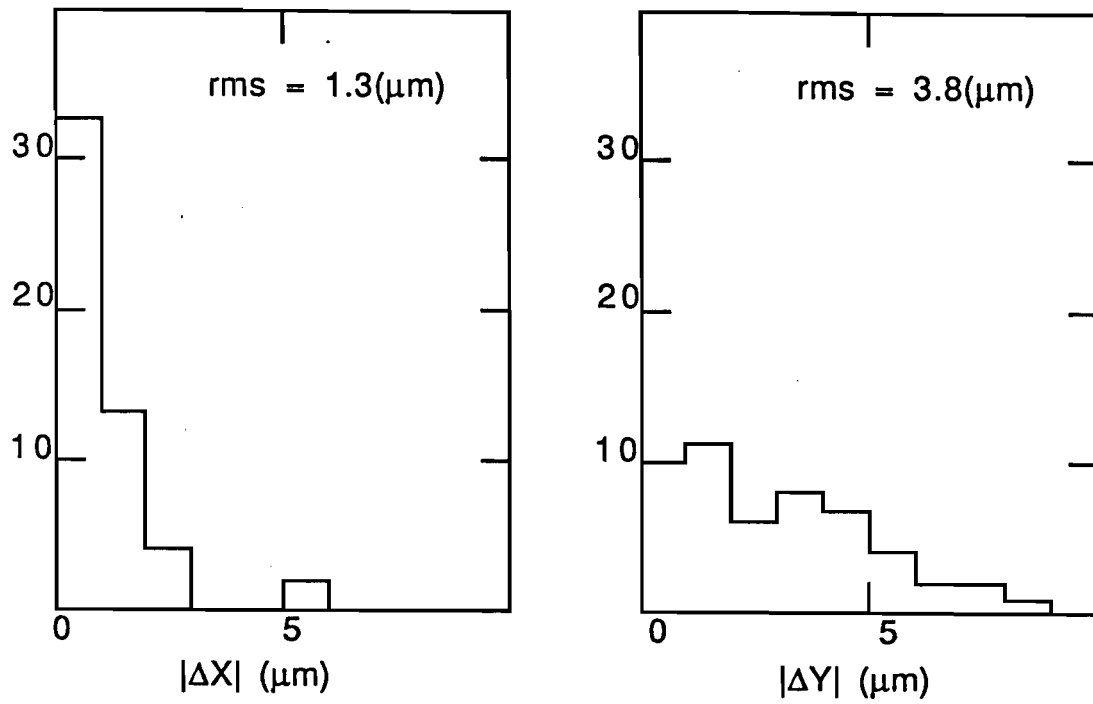


図 3. 1 8 X線マークの交点の測定精度

Measurement of X-ray inclination

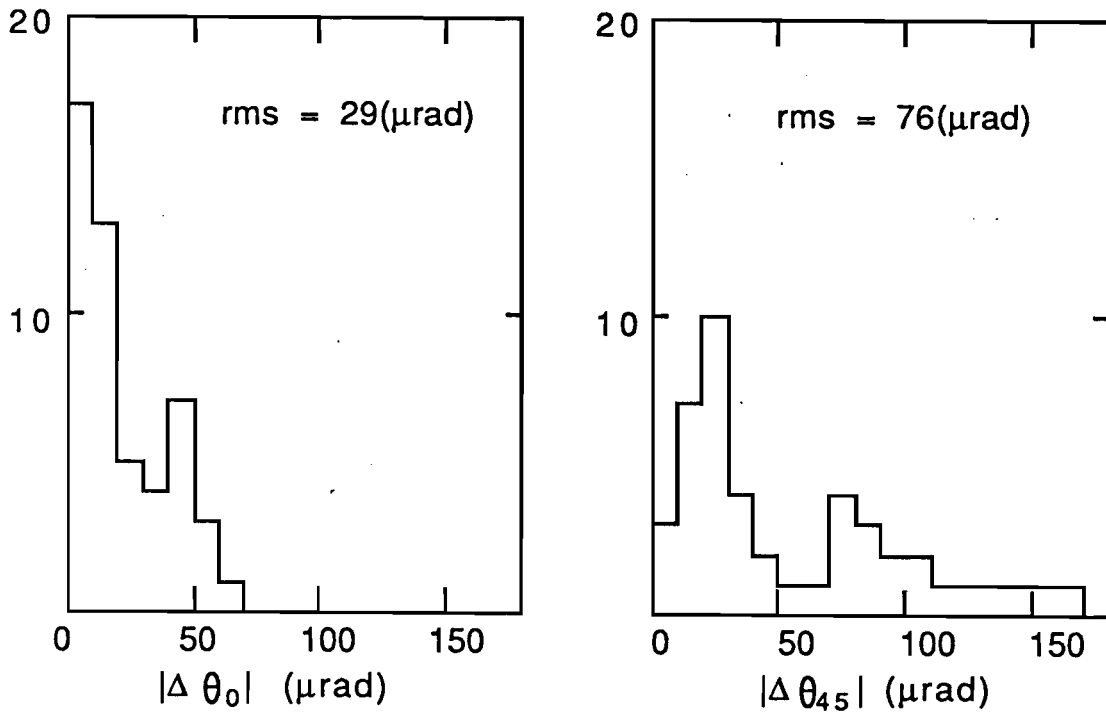
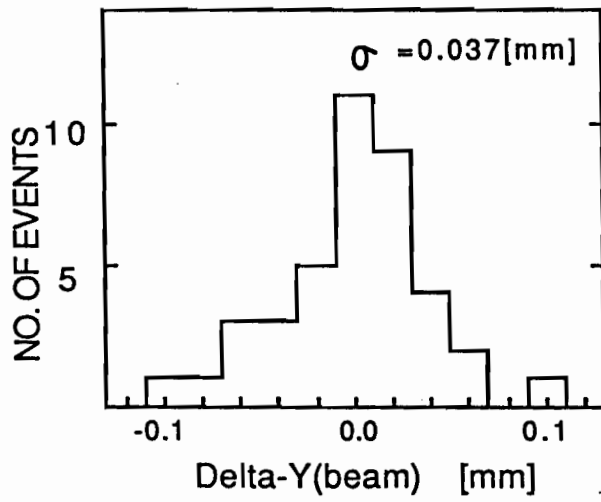
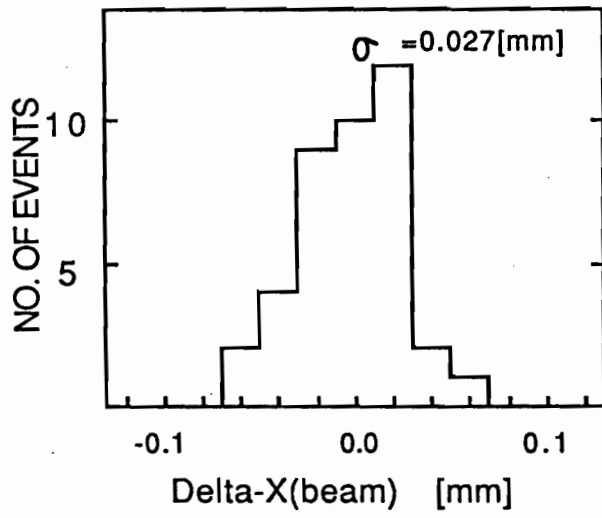


図 3. 1 9 X線マークの傾きの測定精度



TOTAL NO. OF EVENTS : 40

図 3. 20 入射粒子の乾板での測定値とカウンターの予言位置の差 (補正後)

## 第 4 章 原子核乾板解析装置

著者の所属する神戸大学グループでは、E 6 5 3 実験の乾板解析のために二つの新しい装置を開発した。一つは、ペリクル部分を解析するための C O C A P (Combined Cartesian and Polar Stage for Nuclear Emulsion Analysis)、もう一つは、Dシートを解析するための A S V I S (Analysis System for Emulsion Sheet with Video System)である。以下これらについて詳しく説明する。

### 4 - 1 C O C A P

次章で詳述するペリクルの解析過程の中で、解析時間を支配する主要な作業の一つは、一次反応で発生した荷電粒子の飛跡の角測定である。この実験で解析の対象となる一次反応では、平均約 10 本の飛跡が前方  $6^\circ$  の狭いコーン内に集中する。それを一本一本正確に分離して角測定しなければならないのだが、従来普通に使用される 3 軸可動ステージを持った顕微鏡では、多大な労力と時間を必要とする。まず第一に、アイピースの中のヘアーラインに飛跡を重ね合わせて特定の飛跡を確認するのに微調整が極めて困難である。また、一本の飛跡をヘアーラインに重ね合わせたまま視野を移動させることができない。従って正確な測定のためには、一視野毎に微妙な調整を繰り返さなければならない。この二つの制約が、作業時間の短縮の妨げとなっていた。

また、カウンターの情報を基に飛跡を下流から上流へ追跡する過程がもう一つの主要な作業である。そこではまず、特定の角度の飛跡をペリクルの下流端で選別する。この実験では、ビームの照射密度が高いため、ペリクルの下流部分でバックグラウンドの飛跡が極めて多い。その中から目的の飛跡を的確に取り出そうとするときにも、上述の二つの制約が重大な障害となる。更に取り出した目的の飛跡は、一般にステージの移動方向と平行ではない。従ってこれを追跡するためには、各軸の移動を少しづつ交互に繰り返す必要がある。この作業は煩わしく時間がかかるばかりでなく間違いを犯し易



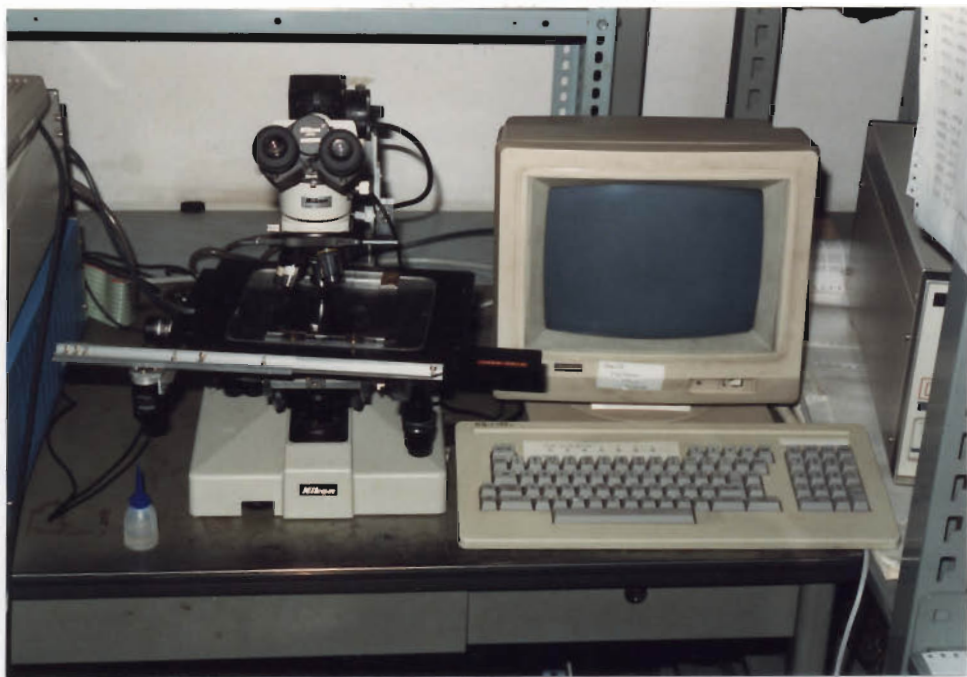
い。

このような問題を解決するために、従来の顕微鏡ステージに回転台と一軸移動台を付加した測定顕微鏡を製作し、マイクロコンピュータを用いて読み取り並びに制御を行うシステム、C O C A Pを開発した。図4. 1は、このシステムの全体写真である。また、データ処理等を行うホストコンピュータを含めた解析システムのブロックダイアグラムを図4. 2に示す。

測定顕微鏡の母体は、大型載物ステージを持つI Cマスク検査用顕微鏡、N i k o n オプチフォト66である。その上下方向（Y軸）の移動ステージと、前後方向（Z軸）並びに左右方向（X軸）の移動ステージの間に新たに回転（ $\theta$ 軸）、及び、一軸（R軸）直進ステージを挿入してある。ステージの概略を図4. 3に、また写真を図4. 4に示す。

ステージの駆動はいずれも手動で行う。X、Y、及び、Zステージはラック・ピニオンとギアの組合せで駆動させる。Rステージはワイヤーで動かす仕組みになっている。Rステージ駆動部分の構造を図4. 5（a）に示す。駆動ワイヤーをYステージに取り付けた駆動軸に一巻きし、同じくYステージに取り付けた二つの滑車にかけて両端をRステージに固定してある。ステージの動きを左右するワイヤーと駆動軸の間の摩擦は、ワイヤーの張力を変えることにより調節する。一方、 $\theta$ ステージの駆動は、図4. 5（b）に示すように、ステージの回転リングと駆動軸の間にかけたシンクロベルトを通して行う。駆動軸には、パーニヤダイヤルが装着してあり、回転比を約百分の一にしてある。これによって回転の微調整がスムーズに行える。

XステージとZステージの可動範囲は、いずれも150mmである。一枚のプレート上で解析の対象となる範囲は100mm×100mmであるから、任意の観察すべき点をこれらのステージを用いて視野の中央へ移動することができる。 $\theta$ ステージは、あらかじめRステージの運動方向と一致させたアイピース中のヘアーラインに注目する飛跡を重ね合わせる役割を持つ。ステージの可動範囲は最低 $\pm 0.2$  radである。カウンターのアクセプタンスの制約から、これ以上の角度を持つ飛跡が解析の対象となる機会は殆どない。 $\theta$ ステージで方向を合わせた飛跡は、Rステージの移動でそのまま追跡することができる。Rステージの可動範囲は、回転中心が光軸と



☒ 4 . 1 C O C A P

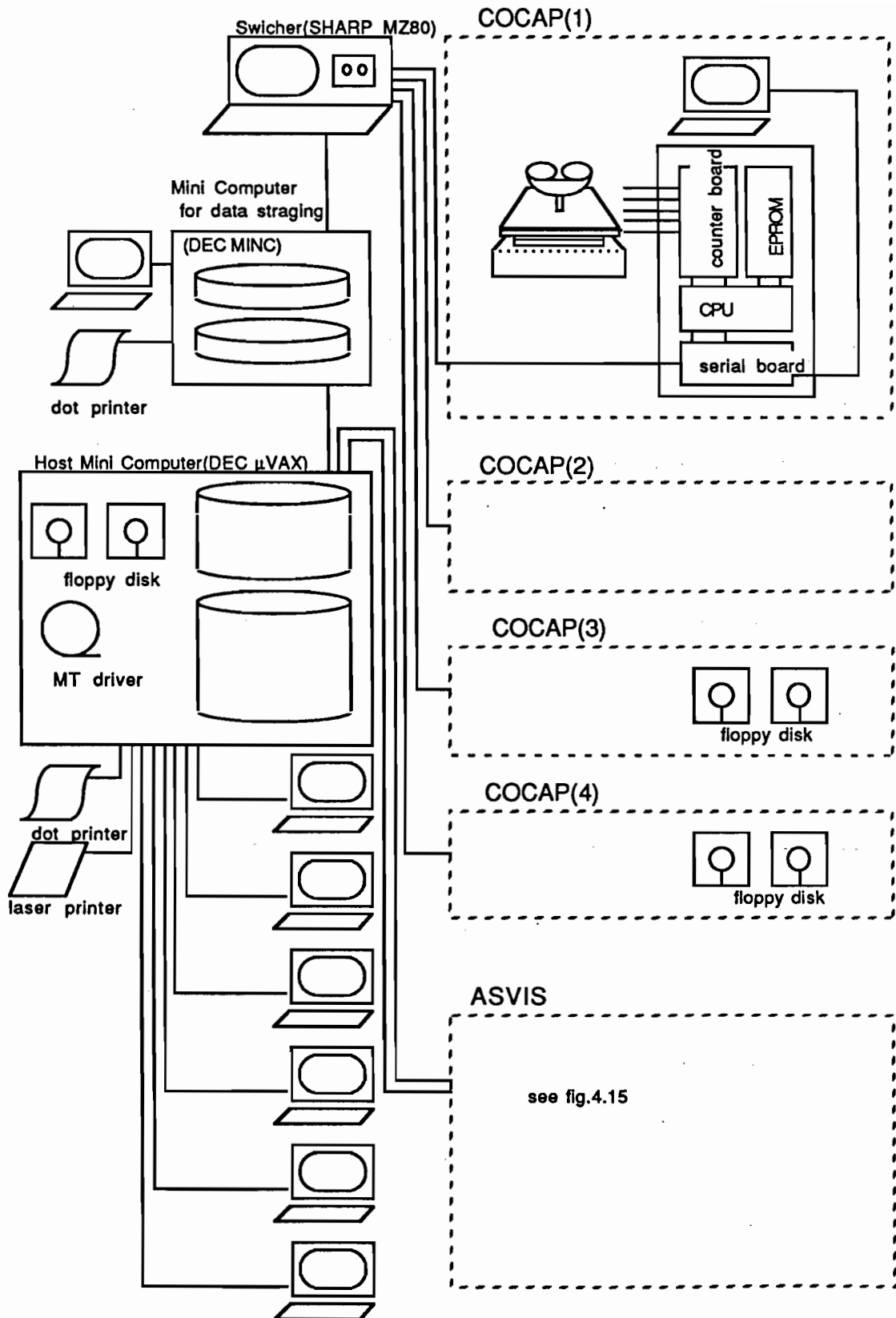
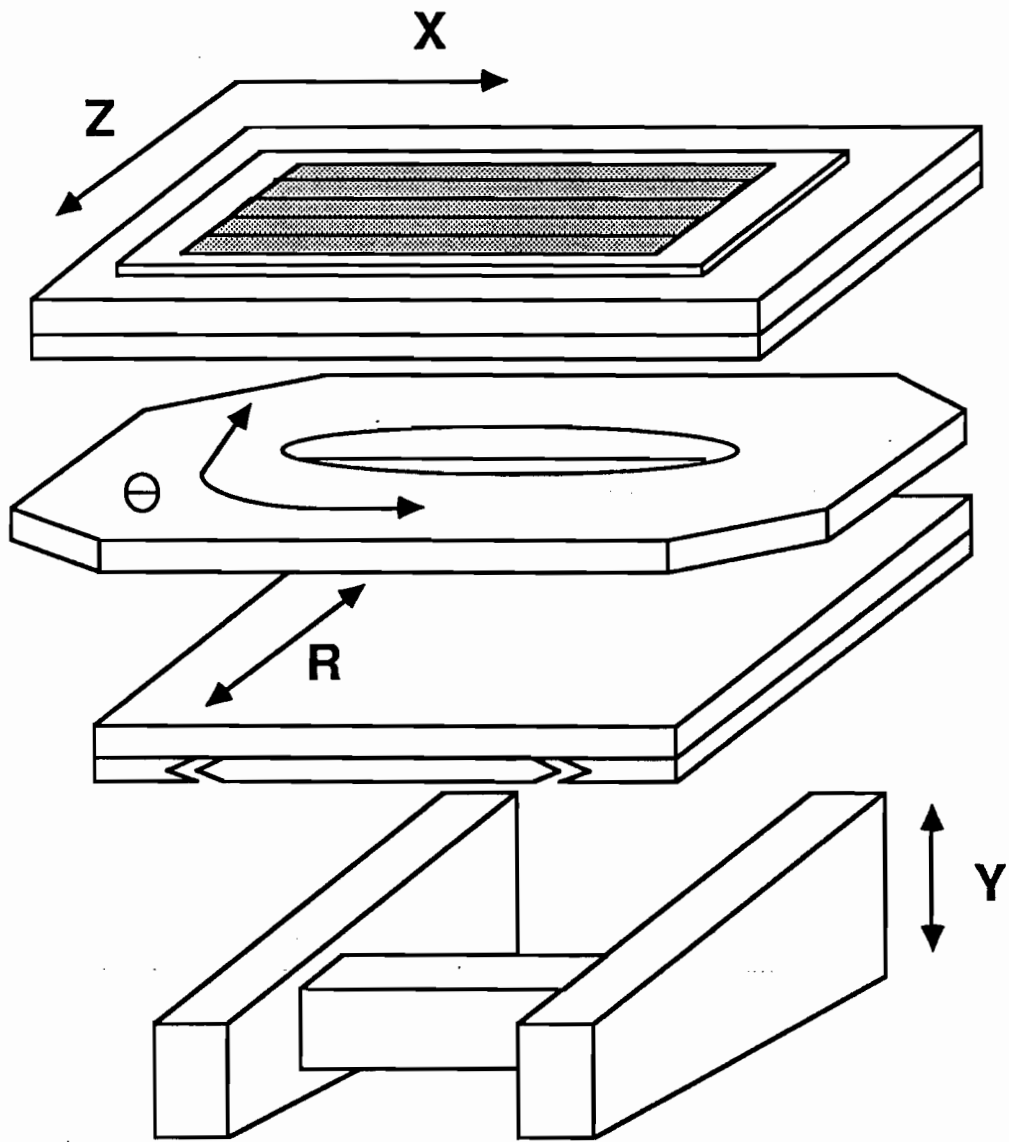


図 4. 2 COCAPを含む装置全体のブロックダイアグラム



**COCAP**

図 4. 3 改良型測定用顕微鏡の構造 (概略図)

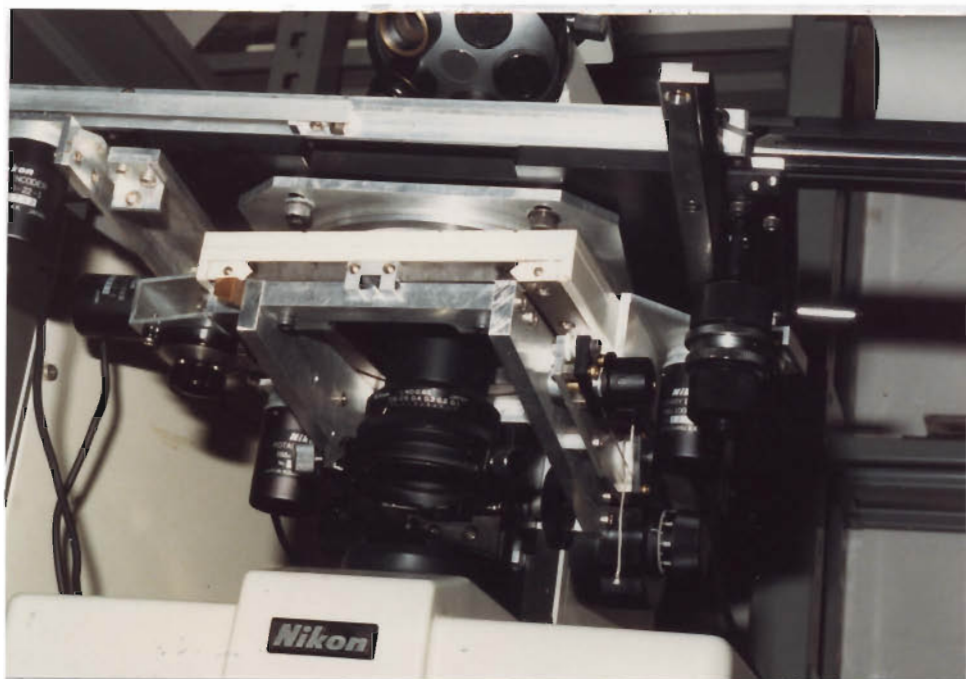
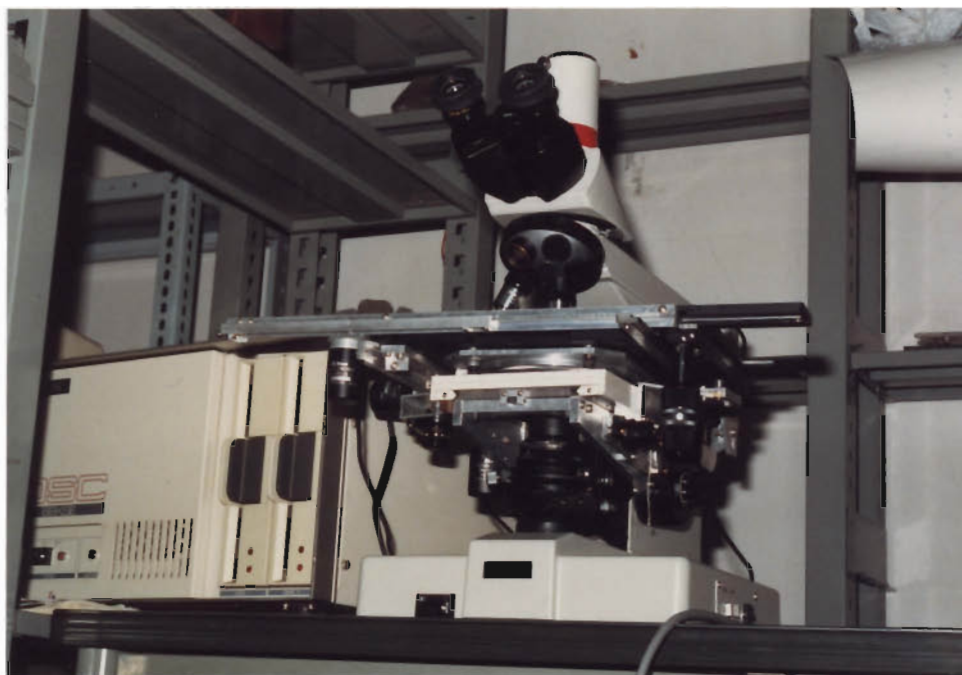


図 4. 4 改良型測定顕微鏡

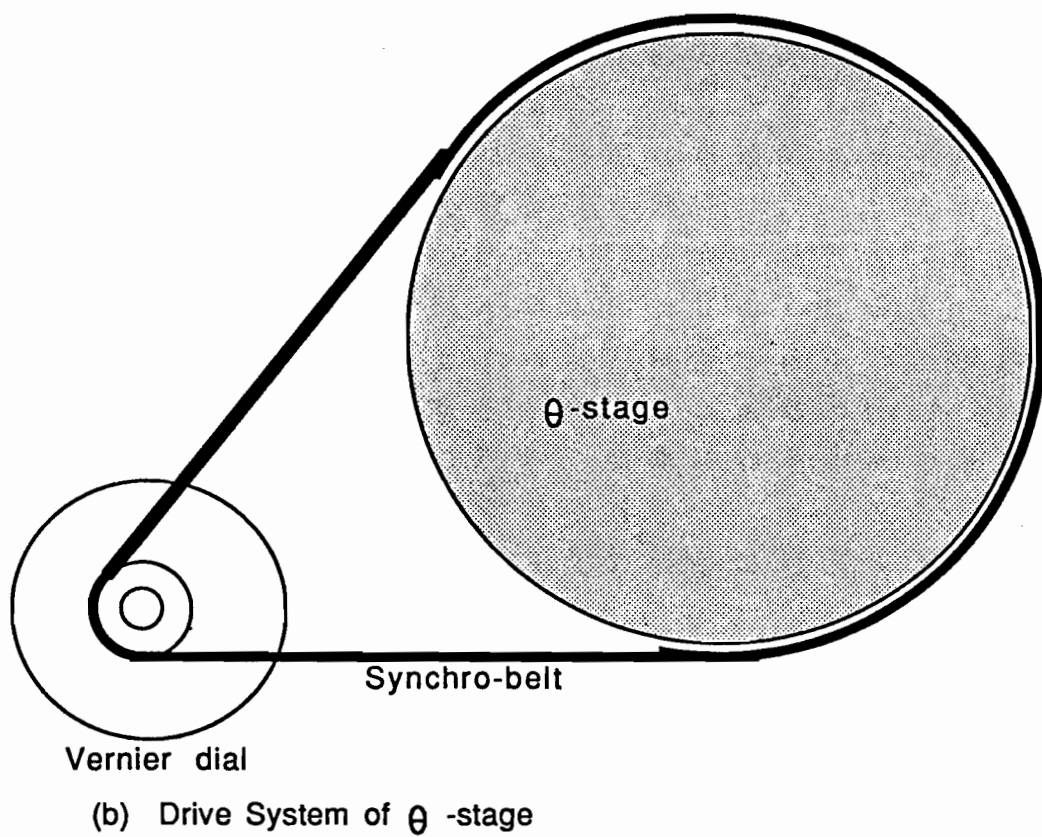
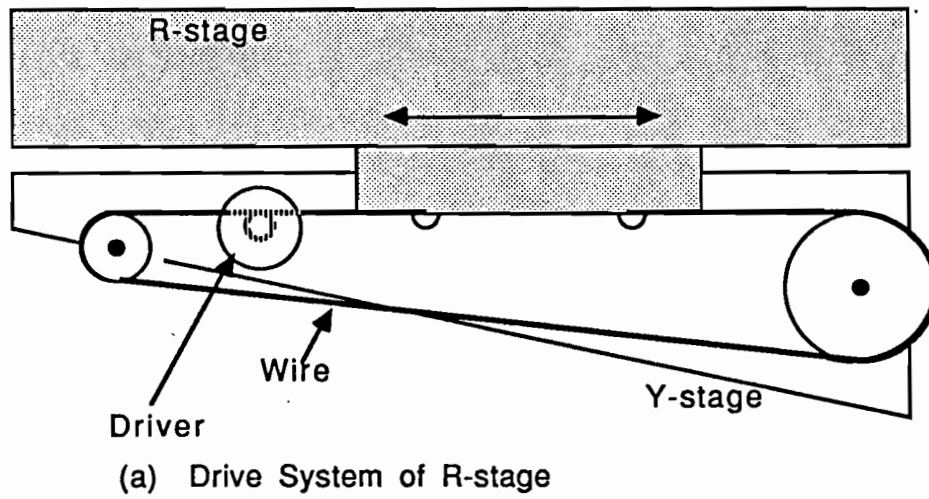


図 4. 5 ステージの駆動部分の構造

一致する位置から $+20\text{ mm} \sim -2\text{ mm}$ としてある。

ステージ移動量は、デジタルゲージもしくはロータリーエンコーダを用いて読み取る。各ステージの位置読み取り機構を、図4.6に示す。X、Z、及び、Rステージの移動量は、ロータリーエンコーダの軸に一巻きした直径 $0.1\text{ mm}$ のタングステンワイヤーをステージに固定したもので、直線運動を回転運動に変換して読み取る。また、 $\theta$ ステージの回転量は、ロータリーエンコーダの軸に一巻きした直径 $0.1\text{ mm}$ のタングステンワイヤーを回転リングにほぼ半周巻きつけて固定したもので読み取る。一方、Yステージの動きは、最小読み取り単位が $1\text{ }\mu\text{ m}$ のデジタルゲージで読み取る。

デジタルゲージ、及び、ロータリーエンコーダからの出力パルスはカウンター回路を經由してシステムコンピュータへ送られる。

ロータリーエンコーダによるステージ位置の読み取り単位は、エンコーダの軸径、及び、出力パルス幅によって決まる。X、Z、及び、Rステージの位置読み取り単位を測定した結果を表4.1に示す。いずれのステージについても読み取り単位は $2.5\text{ }\mu\text{ m}$ 弱である。また、典型的なステージについて、読み取り単位のステージ位置によるばらつきを測定した結果を図4.7(a)に示す。これより、読み取り値にわずかではあるが周期的偏差があることがわかる。この周期的偏差をより明らかにするために $5\text{ mm}$ 毎のrunning meanをとったものを図4.7(b)に示す。周期は約 $1\text{ cm}$ であり、ロータリーエンコーダの回転軸の円周に相当する。それ故これは、ロータリーエンコーダ内のコードディスクの偏心に起因すると考えられる。これによる読み取り値の誤差は全てのステージにおいて $0.3\%$ 以下であった。

$\theta$ ステージを回転させた時の回転中心軸と光軸の間のずれは角度と位置の測定結果に直接影響を及ぼす。図4.8は、このずれを測定した結果の一例である。平均値は、 $0.35 \pm 0.05\text{ }\mu\text{ m}$ 、測定値のばらつきの標準偏差は $0.36\text{ }\mu\text{ m}$ であった。我々が実際に測定の対象とするのは、ペリクル中の飛跡であり、基本となるグレインの大きさが $1\text{ }\mu\text{ m}$ 弱であることから、この中心軸のずれが測定値に及ぼす影響は無視できる。 $\theta$ ステージの位置読み取り単位は、エンコーダの軸径とパルス幅、及び、回転リングの外径によって決まる。我々の用いた回転リングの外径は $12.5\text{ cm}$ であり、読み取り単位は、約 $0.04\text{ mrad}$ であった(表4.1)。また、ステー

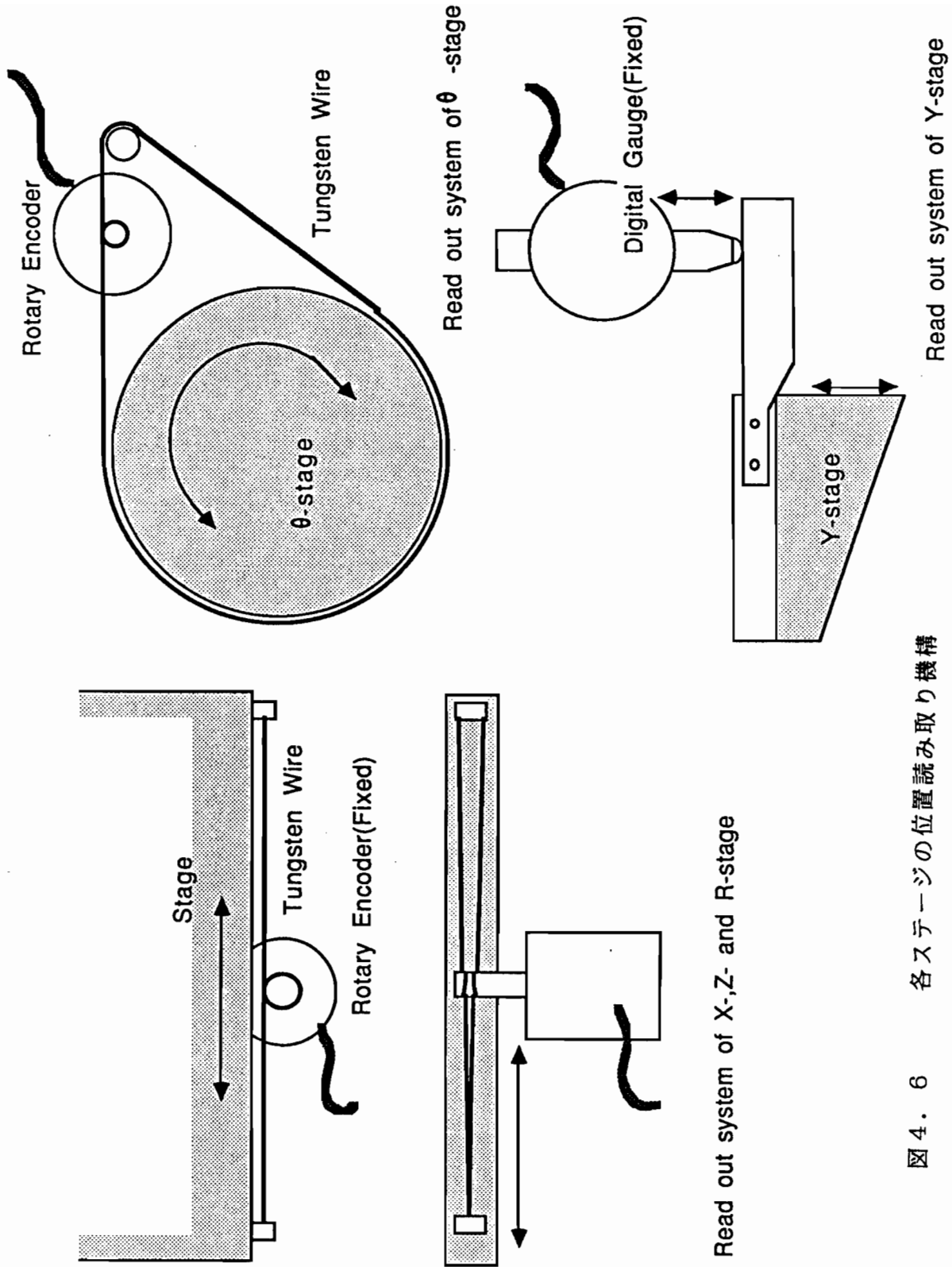


図 4. 6 各ステージの位置読み取り機構



表 4. 1 ステージ座標読み取り単位

	読取単位	ステージ位置による 読取単位のばらつき
X - ステージ		
#1	2.46874 ± 0.00001	0.0041
#2	2.46651 ± 0.00001	0.0041
#3	2.46733 ± 0.00003	0.0057
#4	2.46807 ± 0.00002	0.0074
Z - ステージ		
#1	2.46849 ± 0.00001	0.0038
#2	2.46497 ± 0.00002	0.0039
#3	2.46440 ± 0.00001	0.0078
#4	2.46998 ± 0.00003	0.0071

単位 (  $\mu\text{m}/\text{dig.}$  )

	読取単位
R - ステージ	
#1	2.4740 ± 0.0002
#2	2.4666 ± 0.0001
#3	2.4675 ± 0.0001
#4	2.4640 ± 0.0003

単位 (  $\mu\text{m}/\text{dig.}$  )

	読取単位
$\theta$ - ステージ	
#1	0.037465 ± 0.000002
#2	0.036612 ± 0.000004
#3	0.036685 ± 0.000004
#4	0.036687 ± 0.000002

単位 (  $\text{mrad}/\text{dig.}$  )

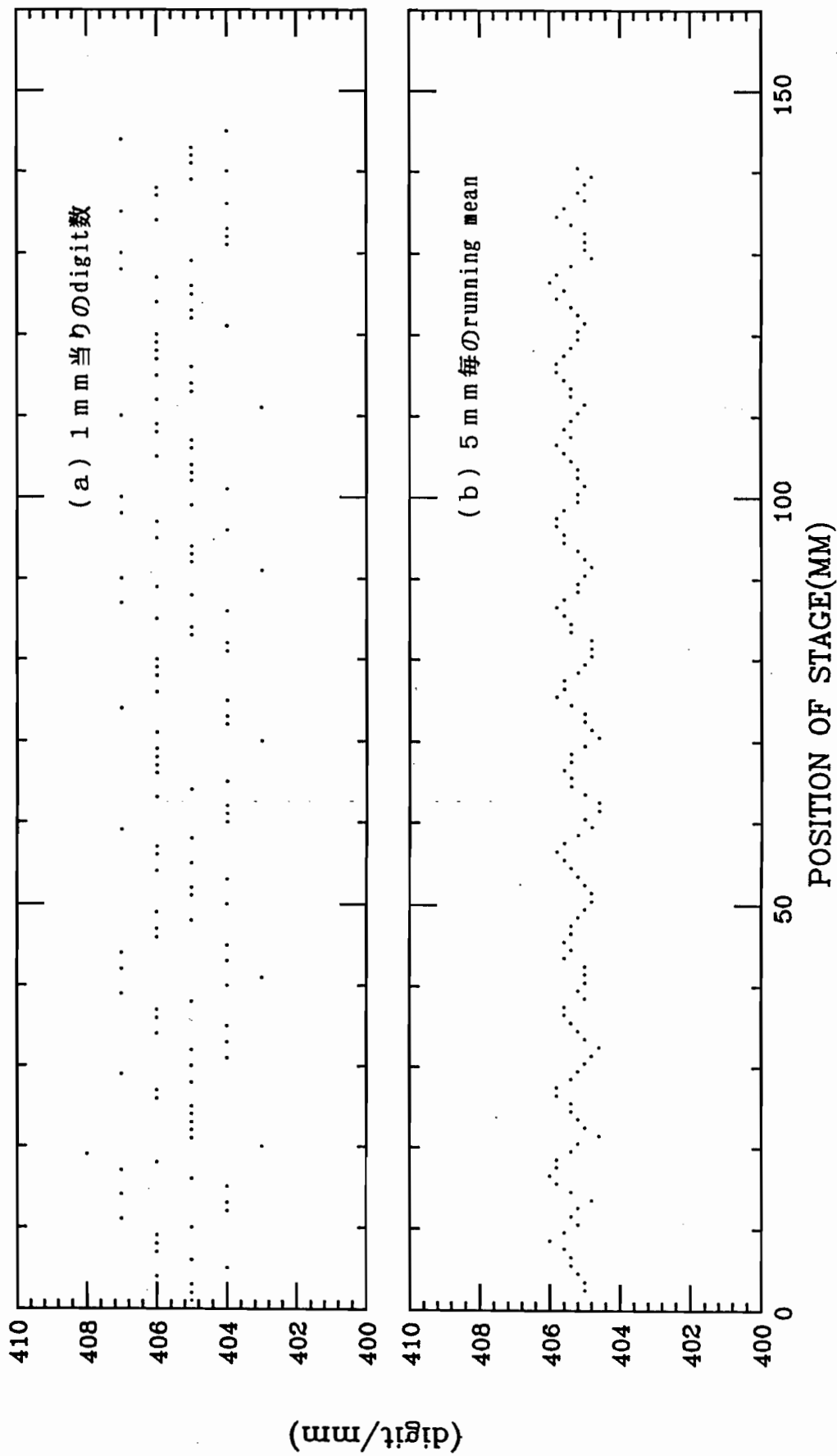


図 4. 7 ステージ位置読み取り単位の場所によるばらつき

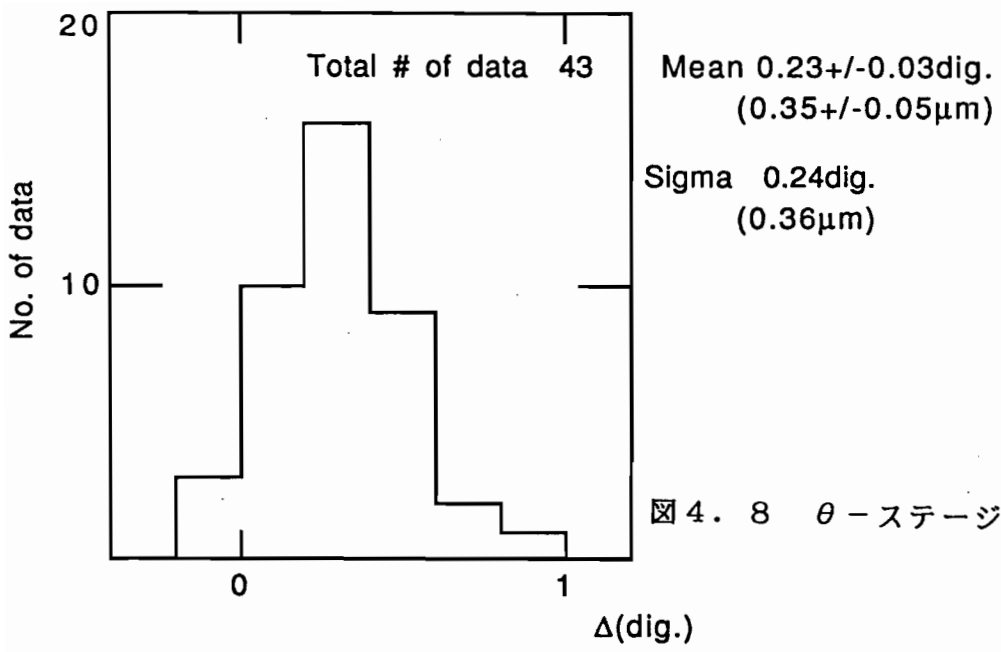


図 4. 8 θ-ステージの回転中心と光軸のずれ

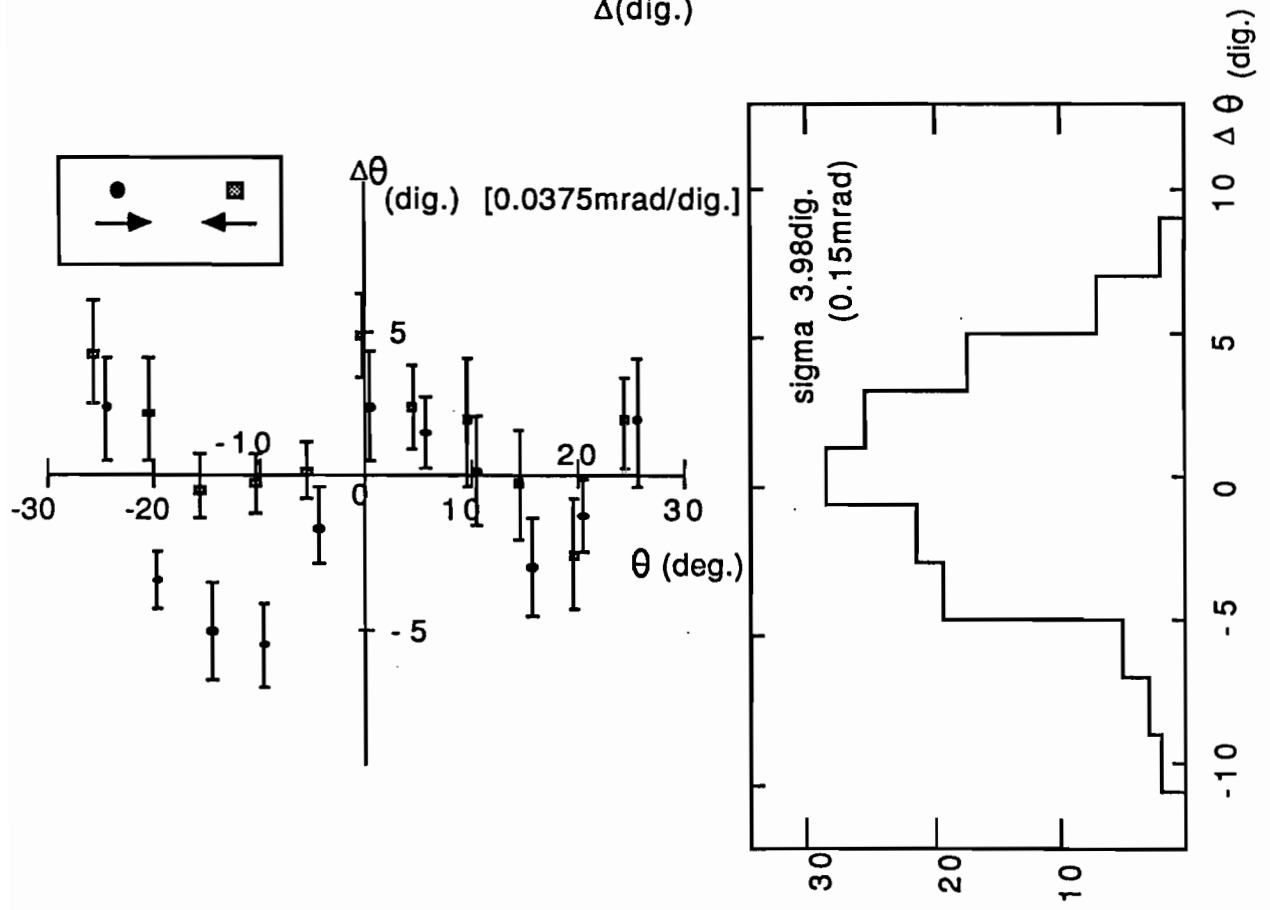


図 4. 9 θ-ステージの読み取り単位の回転量による変化

ジの回転量による読み取り値の変化量を測定した結果を図4.9に示す。回転方向によってわずかなヒステリシスが認められるが、これらを総合しても $\pm 25^\circ$ の範囲で読み取り値のばらつきの標準偏差は $0.15 \text{ mrad}$ であった。この値には、先に述べた中心軸のぶれによる効果も含まれている。それ故、この値が $\theta$ ステージでの角測定の限界と考えて良い。

システムコンピュータは、測定に必要な種々の制御並びにデータ処理を行うと共に、通信ライン(RS-232C)を通してデータをホストミニコンピュータに送るようになっている。使用したコンピュータは、マルチバス規格の16ビットコンピュータである。ハードウェアは、CPUボード、メモリーボード、及び、エンコーダ座標読み取り用カウンターボード等を取納した本体と、キーボード、及び、CRTディスプレイより構成されている。ソフトウェアは、この構成に合わせて独自のリアルタイムモニターを開発し、測定プログラムは、このモニターの管理下で動作するようになっている。プログラムは大別して、ステージ座標読み取りとCRTへの表示をする部分、及び、ホストコンピュータとの通信を行う部分、そして実際に角度や位置の測定等を行う部分の3つよりなっている。測定処理部分は、将来予想される測定手順の変更や、機能の拡張等に容易に対応できるように各種測定手続きをできる限りモジュール化し、かつ柔軟な構成になるようにしてある。図4.10に、これらのモジュールの例を示す。測定は、システムコンピュータと対話形式で行なえるようになっている。また、ステージ座標の取り込み等は、定められたキー操作で行える。これらのプログラムは、モニターの一部を除いてすべてC言語で記述してある。このシステムコンピュータは、プログラム開発用のものを除いて補助記憶装置を持っておらず、上記のプログラムは、本体メモリーボード上のROMに記憶する方式を採っている。測定データはすべてホストコンピュータに転送し、各種集計処理やその他の細かいデータの補正を行いデータファイルとして保存する。

ペリクルを解析する上で、この解析装置の導入によって得られた主な利点は次の三つである。

#### 1) 大角度の飛跡を追跡する時間の短縮

$\theta$ ステージを回転することにより注目する飛跡をR軸に平行に合わせることができる。この結果、飛跡の追跡に要する時間は、乾板

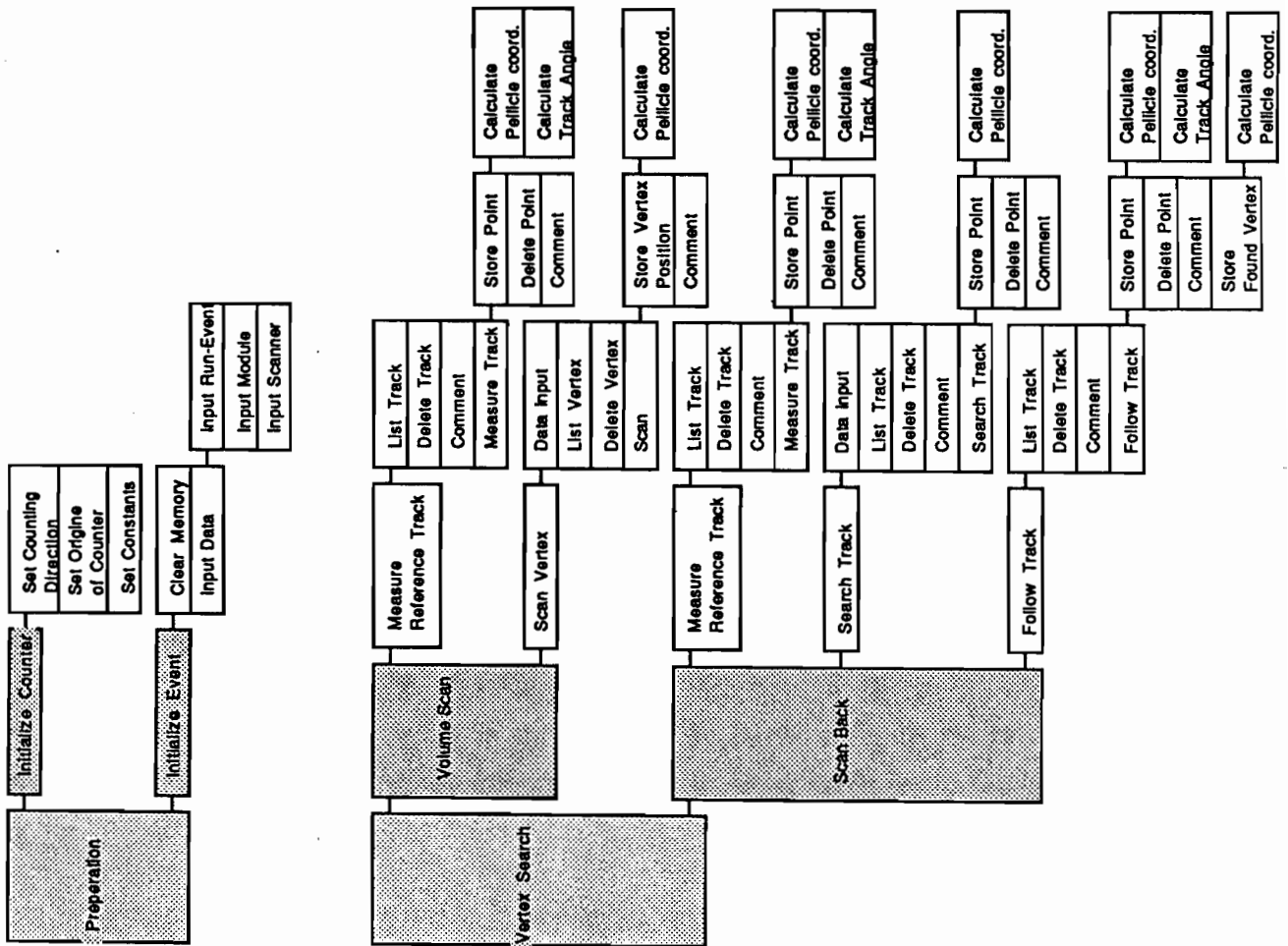
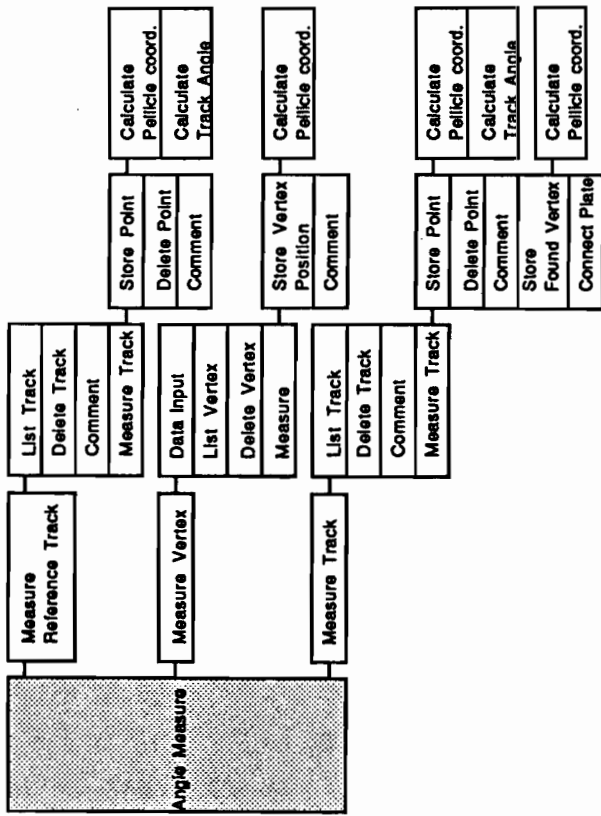


図 4. 1 0 E 6 5 3 実験用に構築した測定プログラムのモジュール

平面に射影した飛跡角度によらなくなる。図4. 11は、飛跡を追跡するのに要する時間を飛跡の角度に対してプロットしたものである。図は、0～10 mradの飛跡追跡時間を1とした場合の比率で表している。これより、大角度の飛跡を追跡する場合でも時間的な損失がないことがわかる。逆に、小角度の飛跡を追跡するのに時間がかかっているのは、似た角度のバックグラウンドの飛跡が多くなりより慎重な追跡が必要になるためである。

## 2) 飛跡選択能の向上

カウンター情報を基に立体再構成された飛跡と乾板中で観測された飛跡の対応は、主として角度のデータに基づいて決定される。従って飛跡選択の能率は、角測定の速さと精度によって支配される。従来の測定方法では、まずアイピース内に組み込まれた分度器によって角測定を行う。この方法で得られる精度は、7 mradが限度である。それ故、この誤差の範囲内に含まれる全ての精度の飛跡各々について、X、及び、Zステージを小刻みに移動し、飛跡上の点の座標を少なくとも二箇所以上測定する。こうして1 mrad程度の精度を持つ角度データを収集して対応を決めなければならない。それに対して新しい装置では、アイピースのヘアーラインに飛跡を重ね合わせRステージを動かすことによってたちどころに必要な精度を持つ角度データが得られる。従って、飛跡選択の能率は大幅に向上する。図4. 12は、従来の装置を用いた場合とCOCAPを用いた場合各々について、角測定しなければ分離できないバックグラウンドの飛跡本数を比較したものである。ここでは、ビーム照射密度が、 $1 \times 10^5 / \text{cm}^2$ の乾板を例に取った。COCAPの導入によって角測定しなければ排除できないバックグラウンドの飛跡の数を大幅に減らすことができたことがわかる。また、COCAPを用いることによって従来の装置を用いてでは解析対象とすることのできなかつた小角度の飛跡をも解析対象にできるようになった。例えば、現実的な条件として一本の飛跡を探すために角測定しなければならない飛跡の本数を二本に限定したとすると、COCAPを用いれば5 mrad程度まで解析対象とできる。それに対して従来の装置を用いた場合には50 mradが限度である。このような利点は、一次反応点で注目する飛跡の存在を確認する作業においても有効であり、解析方法を考える上で選択の幅が広がったことも見逃せない効果の一つである。

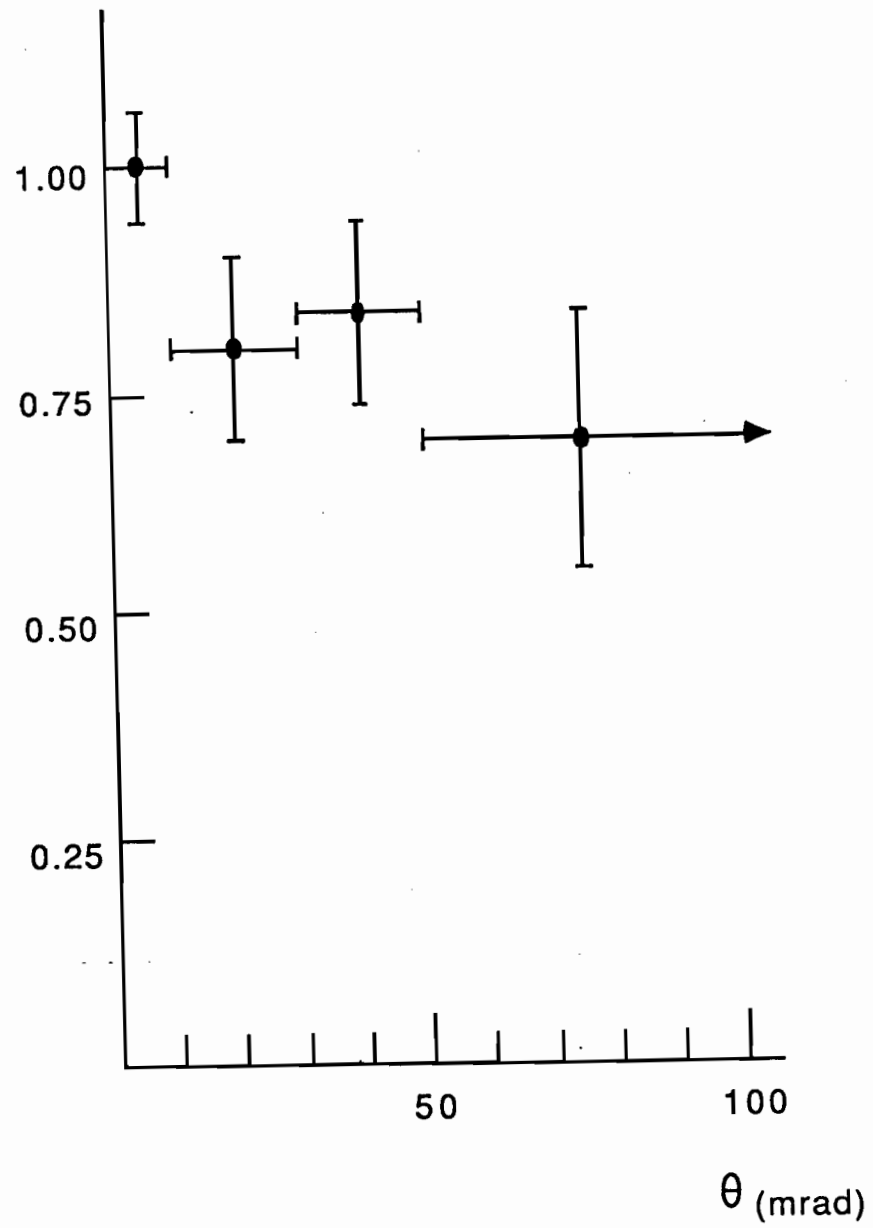


図4. 1.1 飛跡を追跡するのに要する時間と飛跡角度の関係  
 0 ~ 10 mradの飛跡追跡時間を1としてプロットした

#BG in  $100\mu\text{m}^2$  ( Beam density =  $1.0 \times 10^5 / \text{cm}^2$  )

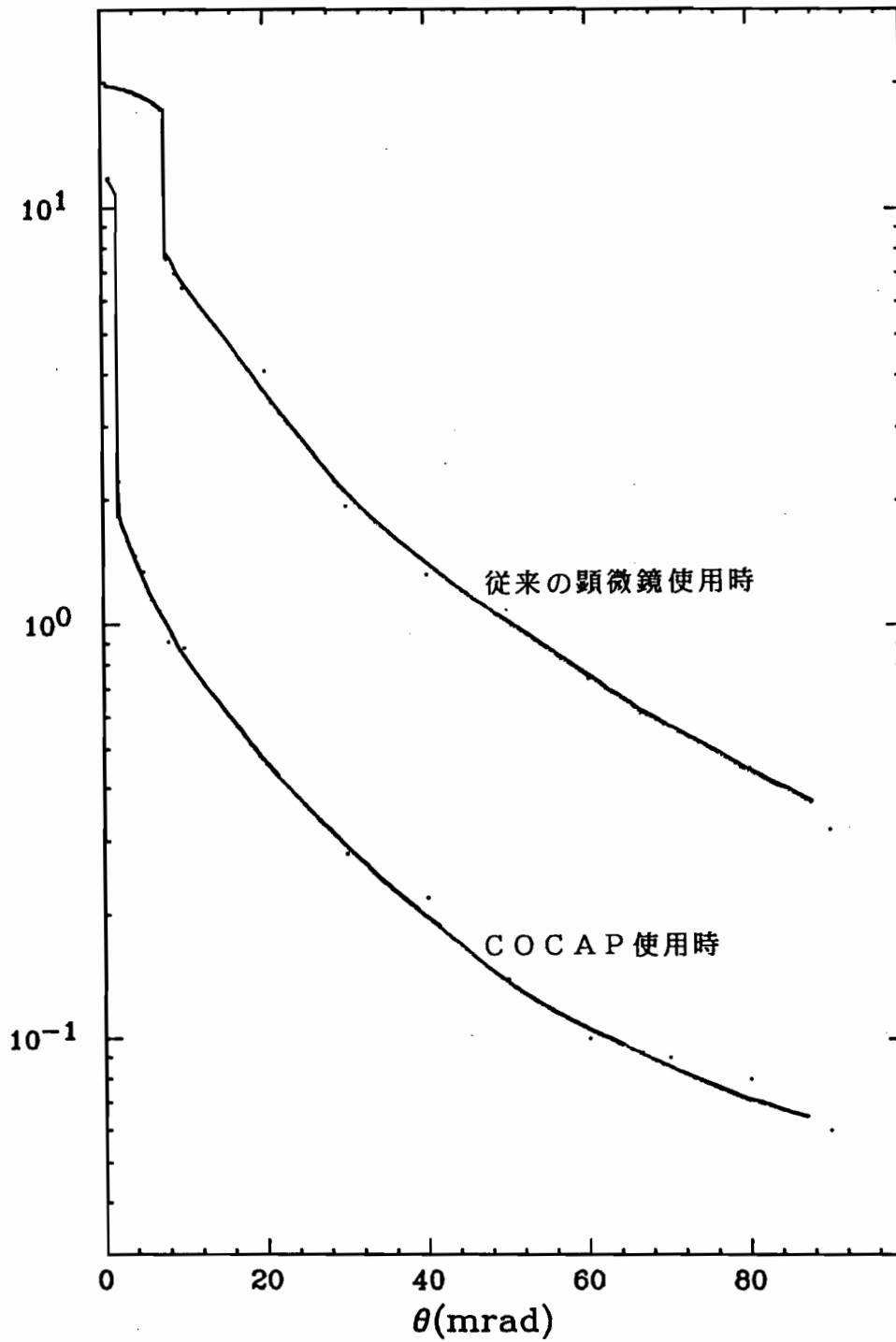


図4. 12 角測定しなければ分離できないバックグラウンドの飛跡本数  
(  $1 \times 10^5 / \text{cm}^2$  で照射されたベリクルについて、最下流で  
 $100\mu\text{m}$  四方をスキャンした場合 )



### 3) 飛跡分離能の向上

回転ステージを用いることにより、一次反応点付近で密集している二次粒子の飛跡を分離する際の負担が大幅に軽減された。従来の装置を用いた測定では分離能が劣るためこれを補う意味でも角測定の前に反応の様相をスケッチしておくなどの原始的な作業が必要であった。新しい装置を用いることでそのような煩わしい作業を完全に省くことができた。

## 4 - 2 A S V I S

図4. 13にDスタック内における崩壊の様子を模式化して示す。このような崩壊は、次に示す方法で見出すことができる。まず、カウンターで再構成された娘粒子の飛跡の角度と位置のデータを基に最下流のDシート(#9)上の通過位置を計算する。そしてその付近で角度がカウンターで指定された値と一致する飛跡を選び出す。次に、それを順次上流へと追跡する。その飛跡が真に崩壊の娘粒子のものであれば、崩壊点より上流のシートには下流からの延長線上に飛跡が存在しない。従って、追跡が不可能になり崩壊が認識される。荷電粒子の崩壊の場合には、もう一つの方法が可能である。それは、ペリクルで測定した親粒子の飛跡の角度と位置を基に最上流のDシート(#1)から順次下流へ親粒子の飛跡を追跡する方法である。いずれにせよ崩壊点の前後で一直線につながる飛跡がないことが、崩壊点検出の基礎となる。それ故、角測定の精度が極めて重要である。十分な角測定精度が得られないと、追跡すべき真の飛跡とその近くにある偽の飛跡とを区別できず、それら全てについて確認作業を行わなければならない。また、真の飛跡を追跡したとしても、親粒子と娘粒子の飛跡の角度が小さければ崩壊を見落とすことになるし、付近にある無関係の飛跡を親もしくは娘粒子の飛跡と誤認する可能性が高い。

Dシートの観察から飛跡の角度を求めるには、いくつかの可能性が考えられる。最も簡単な方法は、Dシートの片面の乾板部分のみから求める方法である。しかしこの方法では、乾板の厚さが50  $\mu\text{m}$ しかないことと現像による乾板の横滑りによる変形が大きいことから100 mradの測定精度しか期待できない。それに対して、一

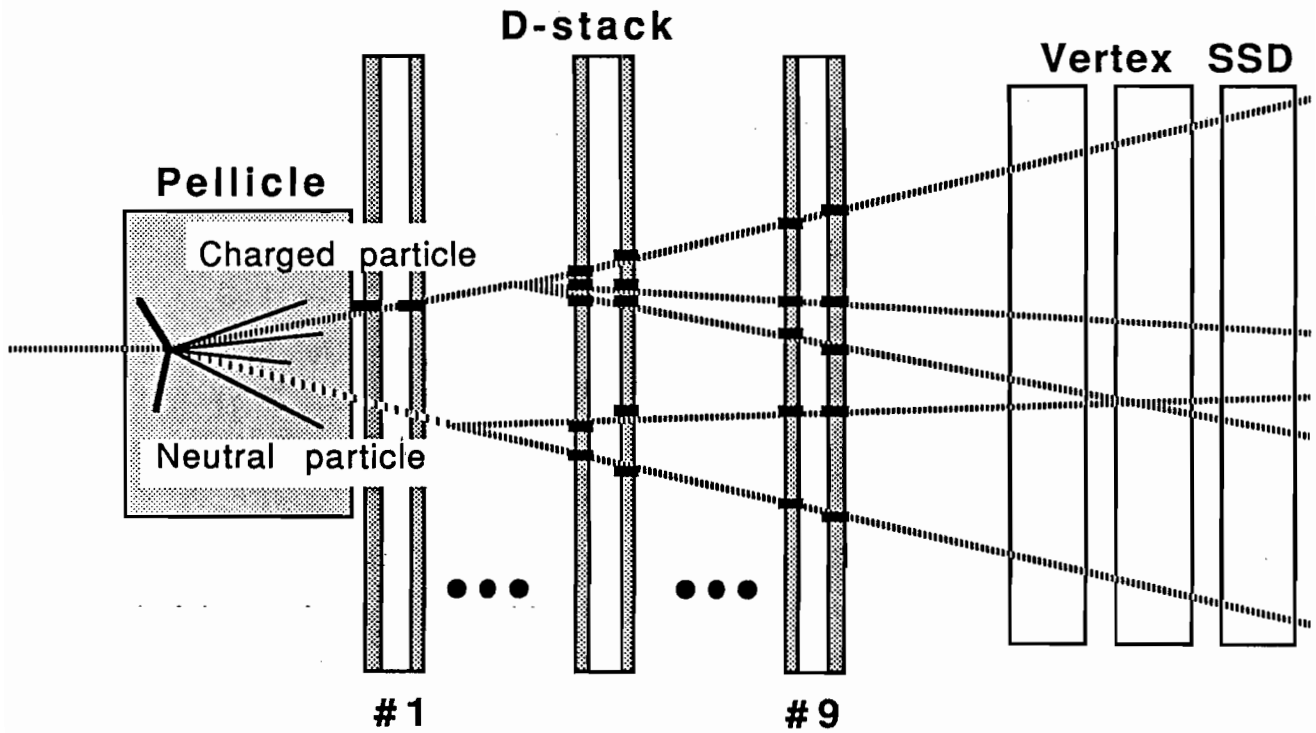


図 4. 1 3 Dスタック内での崩壊の模式図

枚の D シートの表裏両面を観察すれば、角測定精度は大幅に向上する。乾板と基板の接着部分は現像による変形が無視できるから、飛跡の通過点の X、及び、Y 座標は  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  の精度で測定できる。基板の厚さは、実測せずにその平均値を用いれば 10% 程度の誤差を含む。従って、角度を計算した時の誤差は、図 4. 14 の点線のようにになる。一方、各測定毎に基板の厚さも測定すれば、角度の精度は更に向上する。図 4. 14 の実線に示したのが、厚さを実測した場合の誤差である。角度の広い範囲に渡って  $3 \sim 4 \text{ mrad}$  の精度が実現できることがわかる。我々の目的からは、この精度でも一応実用的レベルと考えて良い。但し厚さの実測には時間がかかるので、更に優れた測定法が望まれる。

D シートの間に挿入したスペーサーの厚さは約  $2 \text{ mm}$  で、厚さむらは 1% 程度にすぎない。従って、隣接するシートの XY 面内での位置関係を正確に割り出すことができれば、角測定の精度は格段に向上する。異なる D シート間の相対位置は、3 - 5 で述べたように X 線マークをリファレンスとして求めることが可能である。X 線マークの基準点の測定精度は、 $1 \sim 4 \mu\text{m}$  である。しかし、実際に測定の対象となる部分は、この基準点から数 cm 離れている。従って、シートの回転や収縮による影響で相対位置の測定精度は  $10 \mu\text{m}$  程度に劣化し、 $5 \text{ mrad}$  程度の角測定誤差は避けられない。もちろんこれらの影響は補正可能であるが、その補正を行うための資料を得るのに余計な時間がかかってしまい非現実的である。ところが、E 6 5 3 実験では、都合の良いことに入射粒子の飛跡をリファレンスとして利用することができる。入射粒子の角度のばらつきは、 $0.5 \text{ mrad}$  であるから厚さ  $2 \text{ mm}$  のスペーサーを通過する間の変位は  $1 \mu\text{m}$  程度である。しかも入射粒子の飛跡は、顕微鏡の一視野に数本以上含まれている。従って、入射粒子の配置パターン（ビームパターン）を重ね合わせることにより隣接する D シート上の相対位置を  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  の精度で知ることができる。但し、ビームパターンを重ね合わせるのに、各シート上で一本一本の飛跡の位置を測定するのでは時間がかかりすぎて意味がない。それを省略して短時間に重ね合わせを実現するために、我々は以下に述べる方法を導入した。

まず、一枚の D シートの顕微鏡像を TV カメラで撮影し、その映像を VTR で記録する。次に、ステージ上の D シートを交換し同様にして顕微鏡映像を撮影する。この TV 画面と先に記録しておいた

$\delta\theta$  (mrad)

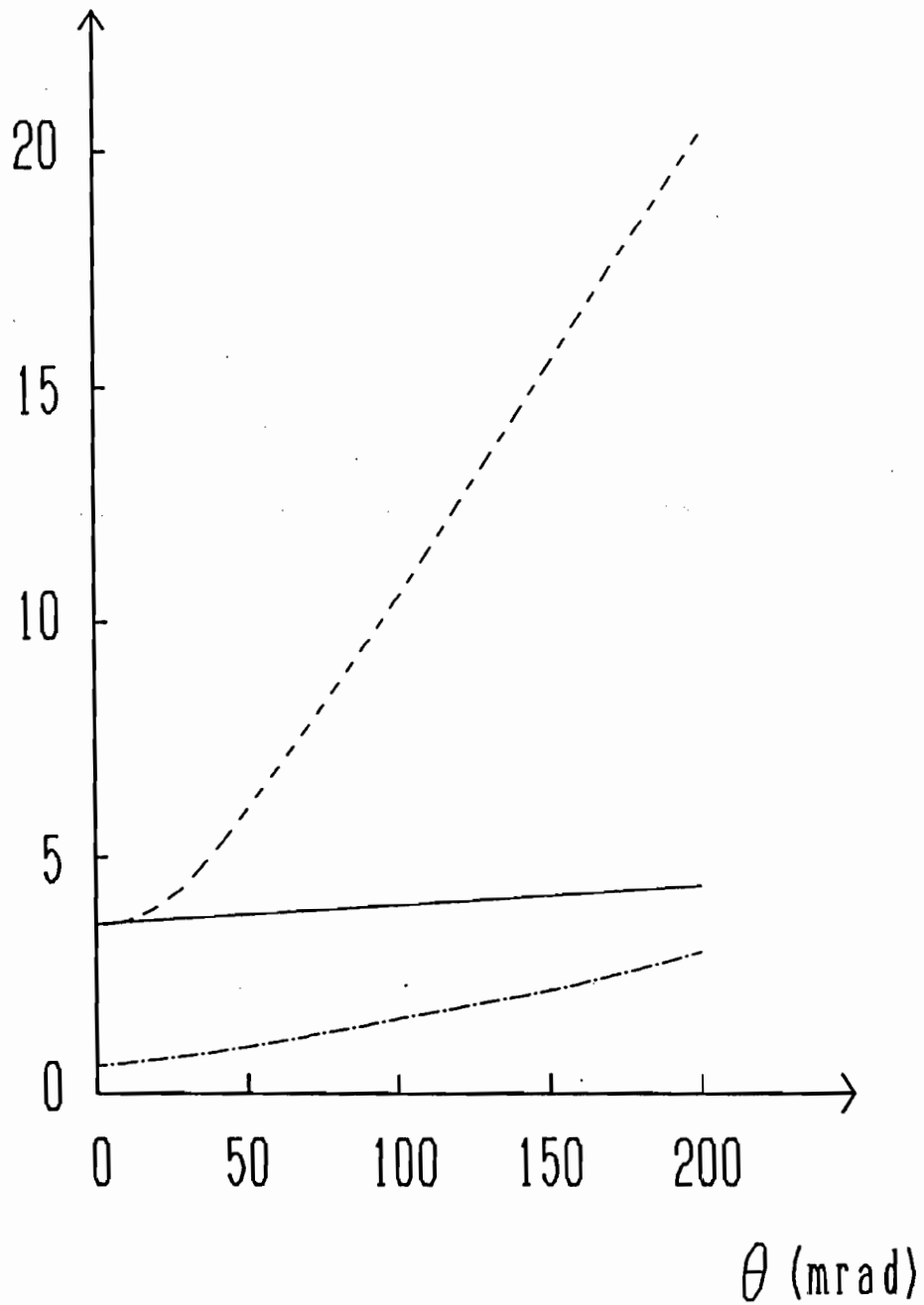


図4. 14 Dシートでの角測定精度の推定値  
破線：一枚のDシートの表裏両面を測定した場合  
実線：更に基盤の厚さも測定した場合  
一点鎖線：スペーサーをはさんだ二枚のDシートをASVISで測定した場合

VTRの画像を同一のTVモニター上で随時切り替えて比較し、ピームパターンが重なるようにステージを移動する。こうすることによって短時間に2~3 $\mu$ mの精度で二枚のDシートの相対位置を割り出すことが可能となる。VTRに記録する際、顕微鏡の焦点面を移動させて動画を撮影することによって位置の情報のみならず、粗い方向の情報も得ることができ後の作業が容易になる。また、ゴミ等の静止画像では除去しがたいノイズも簡単に排除できる。

このような方法でDシートの比較を行うために、我々が開発したシステムがASVISである。システムの構成を図4.15に、また、全体写真を図4.16に示す。システムの中心となる大型電動顕微鏡ステージは、三鷹精機社の精密座標測定機である。ステージのX、Y、及び、Z軸の移動量の読み取りはリニヤエンコーダで1 $\mu$ mの精度で行うことが出来る。この顕微鏡ステージはマイクロコンピュータで制御する。また、同時にスイッチボックスによりマニュアルによる移動量と移動速度の制御も可能である。これは測定中の位置の微調整に使用した。顕微鏡像は浜松フォトリニクスのカメラコントローラC1522とカルニコンTVカメラC1000-01を用いて撮影する。このカメラコントローラは、TV画面上の位置測定、及び、文字やマークの表示などの機能も有している。この機能は、飛跡の位置測定、及び、測定者への測定手順の指示を行う際に利用した。50倍の対物レンズを用いた場合、一視野は150 $\mu$ m四方である。そして、TV画面上の位置読み取り単位は0.6 $\mu$ mに相当する。画像記録用のVTRは、ソニー社製のSLHF900を用いた。これらの装置の制御と測定用のソフトウェアの開発とその実行には、NECのPC-9801を用いた。この装置を用いて顕微鏡像をVTRで録画する際には、図4.15に示した<1>の経路をたどる。この時、撮影時の焦点面の移動方向の情報を同時に残しておくために、ピープ音も録音した。ピープ音は焦点面が上がる時にはオンに、下がる時にはオフにした。映像の再生時には測定者がこのピープ音を聞いて焦点面の移動方向を知る。一方、顕微鏡像を直接TVモニターに映す際には、図中<2>の経路をたどる。同時に、VTRに記録されている映像信号を再生し映像コントローラを経由しTVモニターに映し出すことができる(図中<3>の経路)。しかし、TVモニターにそのまま2つの信号を重ねて表示したのでは映像が二重写しの状態となり、2つの映像の区

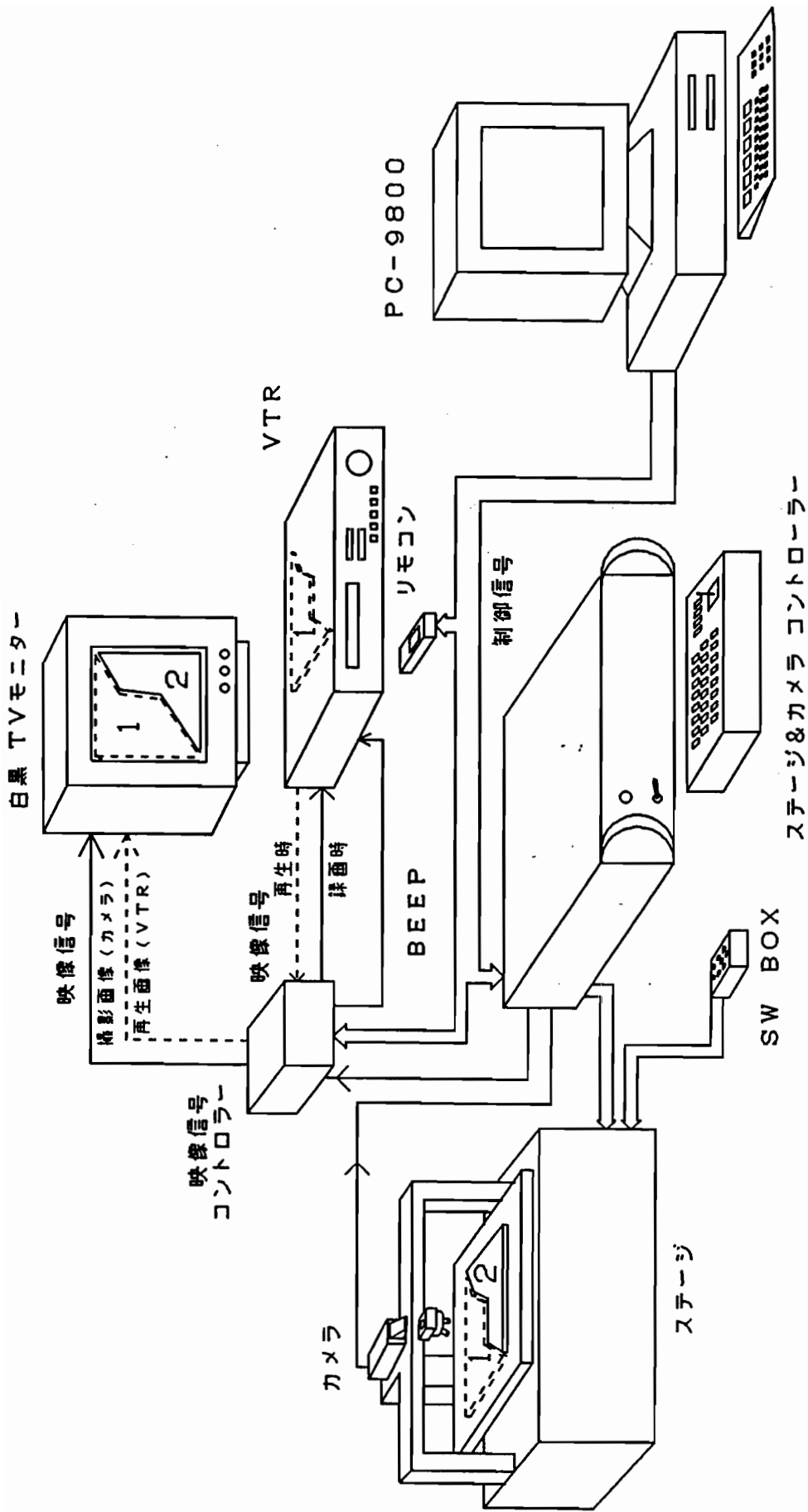


図4.15 ASVISの構成(概略図)



图 4. 1 6 A S V I S

別がつかなくなる。そこで映像信号コントロールボックスによってこの2つの信号の切り替えを行う。測定者がキーボード操作によってコンピュータを通して映像の切り替えを行いながら2つの乾板映像の比較を行い、ビームパターンの確認や飛跡の拾い出しを行う。図4. 17に、我々が独自に開発した映像信号コントロールボックスのダイアグラムを示す。これは、VTRとTVカメラの映像信号の同期をとることと、2つの映像信号の切り替え、そして、VTRに録音する音声信号（ビープ）の発生を行う。

ASVISを用い、注目する飛跡を探す方法の概念を図4. 18に示す。詳細は以下の通りである。まず一枚のDシートを顕微鏡ステージに設定する。そして、X線マークを測定し座標系の決定を行い、Dシート上の顕微鏡映像の録画を行う。録画は、片側の乾板部分の表面からアクリル基板面まで焦点面を往復させながら行う。これによって、通常観測者が顕微鏡を使って測定するときと同様の動画が得られる。次に、二枚目のDシートを顕微鏡ステージに設定し、X線マークの測定を行い二枚目のDシートの位置を10 $\mu$ m程度の精度で対応付ける。そして、録画したDシート上の位置に対応する位置の映像をTVカメラで撮影する。そして撮影された画像とVTRの画像をキー操作により切り替えながら、ビームパターンが精度良く重なるように顕微鏡ステージの微調整を行う。ビームパターンを一致させた後、注目する飛跡の角度を基に一枚目と二枚目のDシート上の通過位置の差を求め、その分更にステージを移動する。こうすることによって注目する角度の飛跡を探す作業は、画面上でほぼ重なった位置にある飛跡を探すだけでよくなる。一致する飛跡が存在すれば、その飛跡の画面上の位置と顕微鏡ステージの座標を読み取る。これで飛跡の角度と位置の測定が完了する。引続き次のDシートへ飛跡を接続する場合には、更にこの場所での映像を録画し、上記の操作を繰り返す。

先に述べたように、飛跡の角度は、スペーサーを挟む二枚のDシート上の共通のビームパターンをリファレンスとして測定する。それ故、ビームパターンを重ね合わせる精度が角度の測定精度を支配する可能性がある。そこで、 $5 \times 10^4 / \text{cm}^2$ のビーム密度で照射されたDシートで、ビームパターンの重ね合わせの精度を調べた。一視野には平均10本の入射粒子が含まれる。これを実際に重ね合わせた時の位置のずれは図4. 19に示す通りであった。X、及



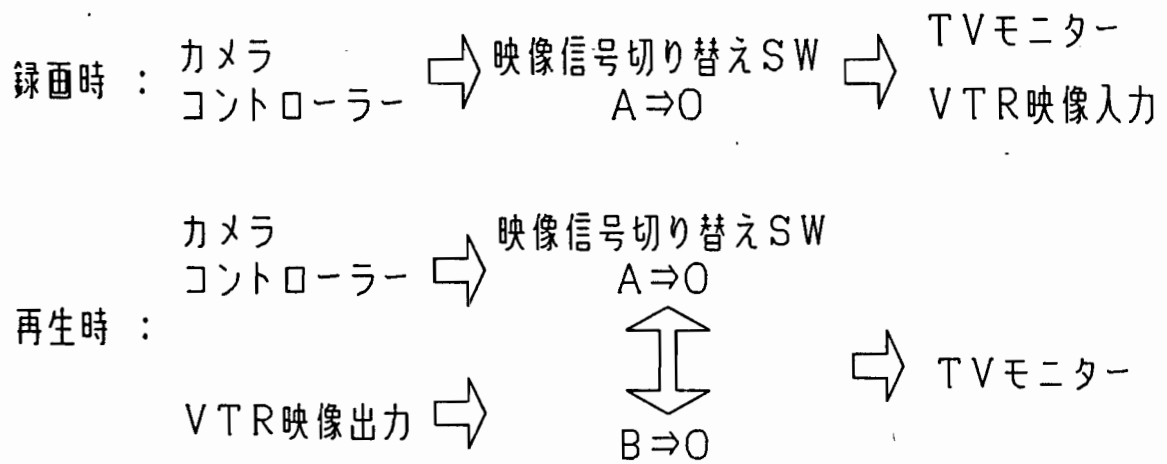
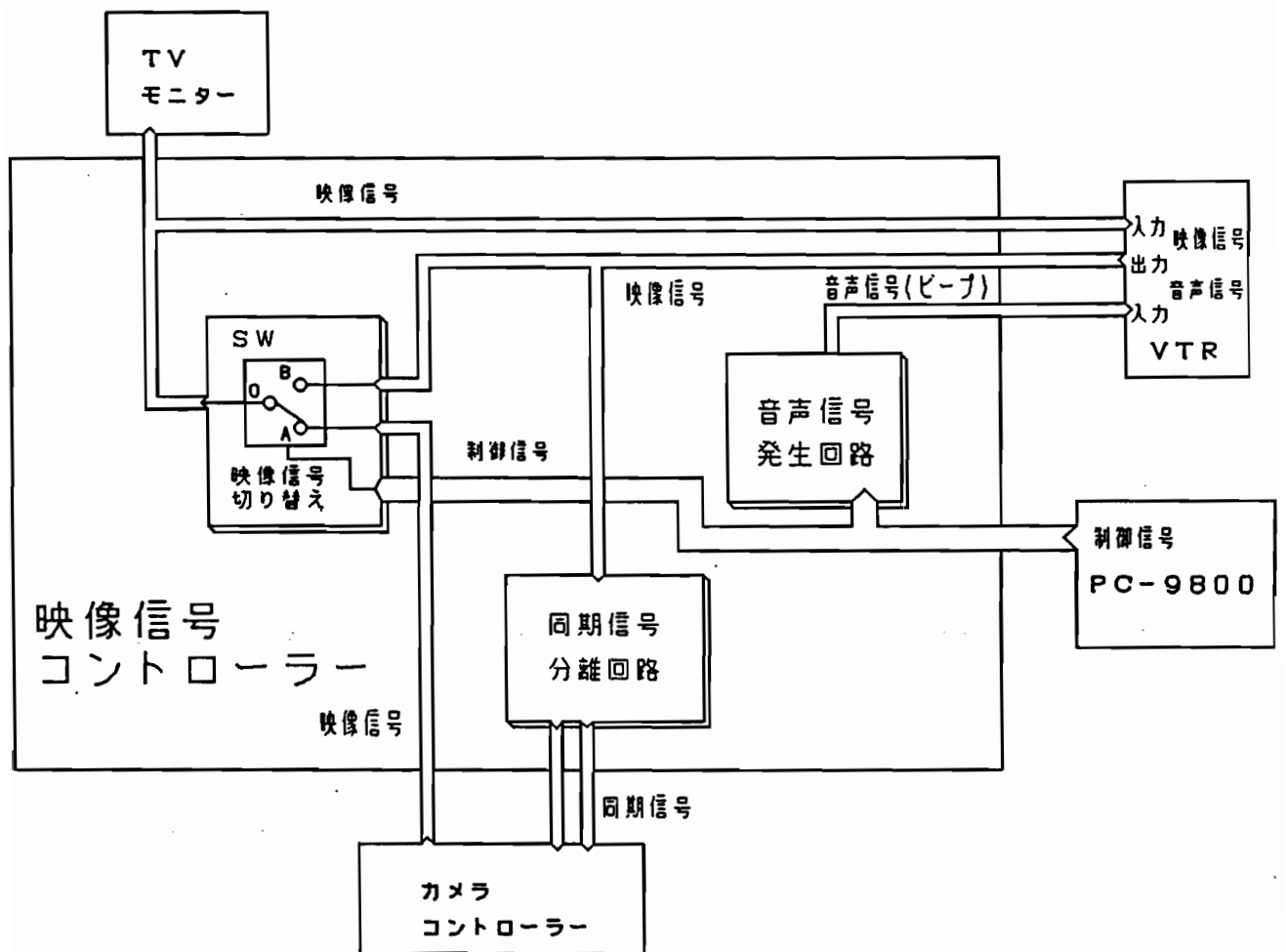


図4. 17 映像信号コントロールボックスのダイアグラム

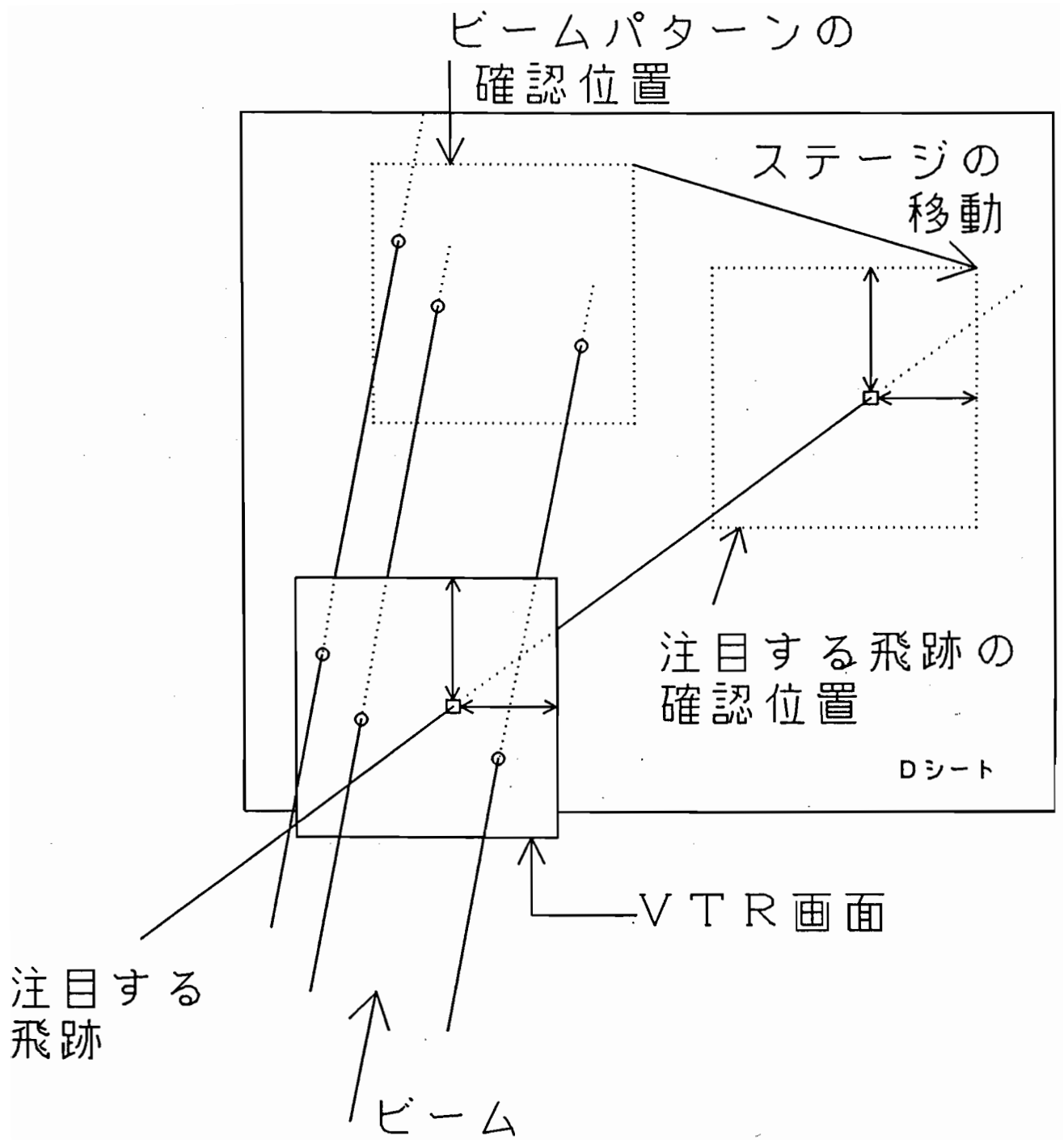


図4. 18 ASVISを用いた飛跡探索の概念図

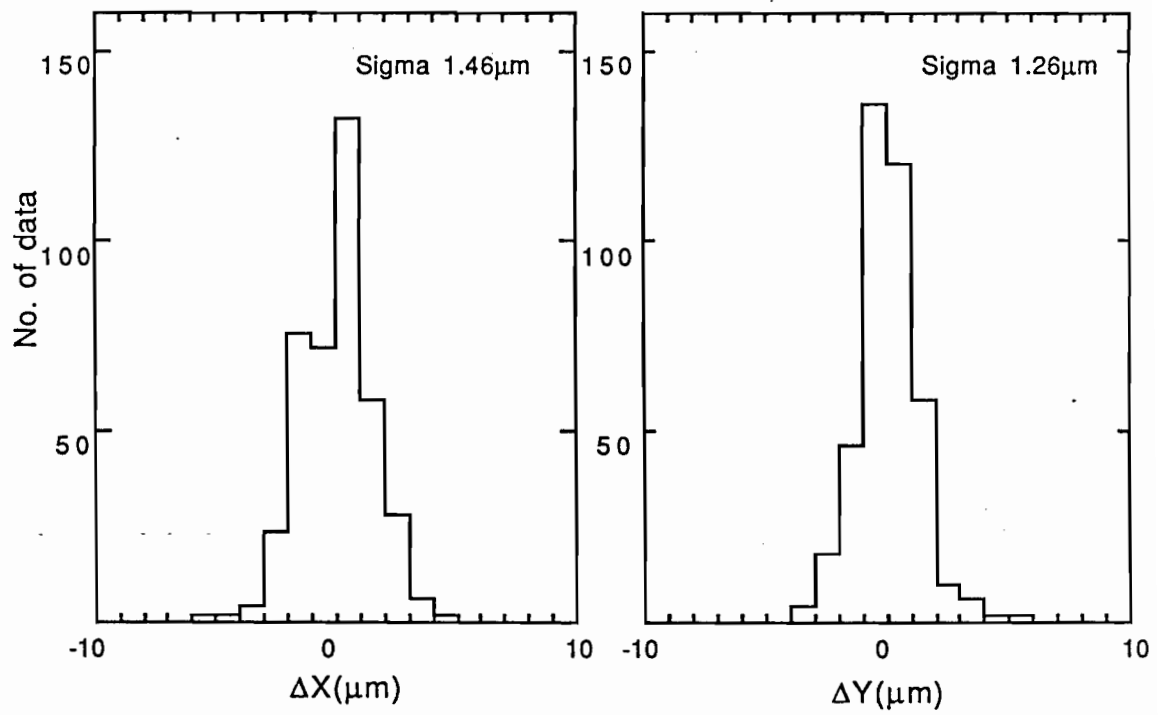


図4. 19 ビームパターン合わせの精度

び、Y方向のずれの広がり標準偏差で $1.5\mu\text{m}$ 、及び、 $1.3\mu\text{m}$ であった。この値は、入射粒子の角度分布と一視野内の入射粒子の飛跡本数、及び、ステージ座標の読み取り単位を考慮して計算した値とほぼ一致している。

ASVISを用いた角測定精度と飛跡の角度の関係を図4.20に示す。これは、図4.14に一点鎖線で示した推定誤差とほぼ一致する。これら全ての角度を総合した角測定精度は、図4.21に示すように $dX/dZ$ 、及び、 $dY/dZ$ について各々 $0.56\text{mrad}$ 、及び、 $0.51\text{mrad}$ である。

ASVISを用いた飛跡探索の効率を求めるため、一本の飛跡について同じ範囲を二回探索した。探索した範囲に本当に存在する飛跡の数を $N_{\text{TOTAL}}$ とし $F_{\text{SCAN}}$ を飛跡の探索効率とすると、一回目の探索で見つけた飛跡の数 $N_1$ は、

$$N_1 = F_{\text{SCAN}} \times N_{\text{TOTAL}}$$

である。また、一回目には見つけることができなかった飛跡の内、二回目に見つかった飛跡の数 $N_2$ は、

$$N_2 = F_{\text{SCAN}} \times (1 - F_{\text{SCAN}}) \times N_{\text{TOTAL}}$$

と表される。従って、この2式を用いて探索効率 $F_{\text{SCAN}}$ は、

$$F_{\text{SCAN}} = 1 - N_2 / N_1$$

と計算できる。295本の飛跡について二回の飛跡探索を試みた結果、一回目の飛跡探索で発見した飛跡本数( $N_1$ )は144本であった。そして残りの151本中、二回目の探索で発見できた飛跡の本数( $N_2$ )は10本であった。この結果から計算した飛跡探索効率( $F_{\text{SCAN}}$ )は93.1%であった。

一方、飛跡接続の効率( $F_{\text{CONN}}$ )を以下のように求めた。5章で述べる乾板解析において870本の飛跡を最下流のDシートから最上流のDシートまで追跡した。接続回数是一本の飛跡について7回であるので合計6000回の接続操作を行ったことになる。また、追跡段階で次のシートに飛跡を確認できなかったものについて再度追跡をやり直した結果、飛跡接続の失敗によるものが一本あった。これより、飛跡接続の効率 $F_{\text{CONN}}$ は、

$$F_{\text{CONN}} = 1 - 1/6000$$

として計算でき、99.98%である。

神戸大学グループでは、COCAPを4台有しており、ペリクル

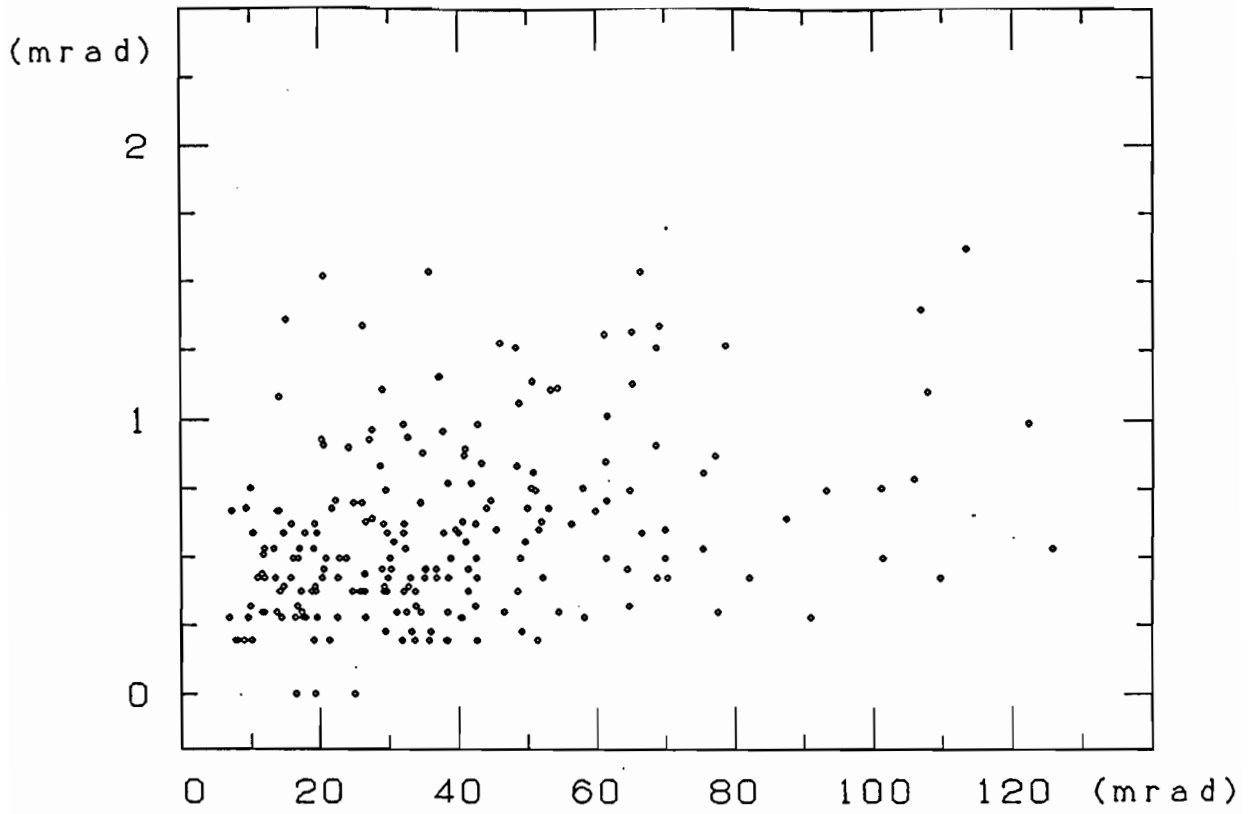


図4. 20 ASVISを用いた角測定精度と飛跡の角度との関係

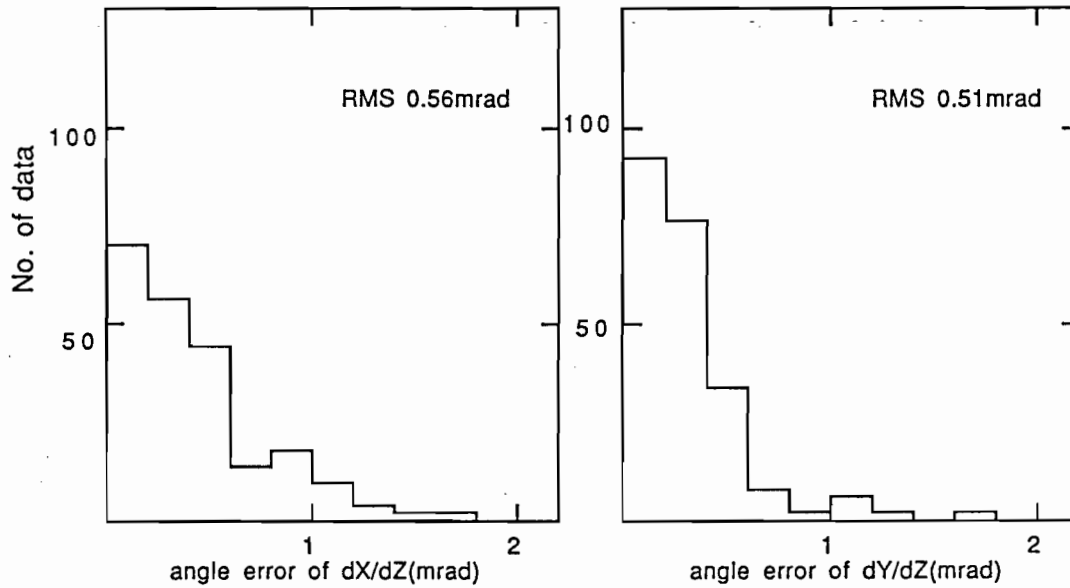


図4. 21 ASVISを用いた角測定精度

の解析に十分威力を発揮している。また A S V I S は 1 台しかないが、E 6 5 3 実験の乾板解析を通じてその有効性が保証されたこともあり、現在これを更に増強した装置の開発に取り組んでいる段階である。

## 第 5 章 崩壊候補探索

### 5 - 1 乾板解析用反応選別

#### 5 - 1 - 1 オフライン処理による反応選別

2 - 5 で述べたように、オンライントリガーによって磁気テープに記録された反応中、チャーム粒子、及び、ボトム粒子の崩壊を含む反応の割合は、約 0.5% と見積られる。従って、磁気テープに記録のある反応を全て乾板で解析すると、1 つのチャーム粒子を得るために約 200 もの不要な反応を解析しなければならない。それでは効率が悪すぎるので、これらの反応例について更にオフライン処理による選別を行い、チャーム粒子、及び、ボトム粒子の崩壊を含む反応の割合を全体の約 5% にまで濃縮する。

オフライン処理による反応選別の第一段階では、磁気テープに記録された反応例の内、検出器の情報が入正しく記録されていないものとビームの再構成が正しく行えなかったものを除く。更に、再構成された一次反応点が乾板標的外にあるものも除く。約 4 万個の反応例についてこの処理を行った結果を表 5. 1 示す。この表からわかる通り、H 型の原子核乾板標的では約 40%、また、V 型では約 30% の反応例がこの段階で除かれる。

オンラインで選別された反応中、バックグラウンドの大半を占めるのは、 $\pi$  中間子の崩壊により生成されたミュオン粒子が検出されたものである。 $\pi$  中間子は、チャーム粒子、及び、ボトム粒子に比して長い寿命を持つ。それ故、オフライン処理の第二段階では、荷電粒子スペクトロメータで測定されたミュオン粒子の運動量とミュオンスペクトロメータで測定された運動量に変化のないものを選ぶ。これによってスペクトロメータのマグネットより下流で  $\pi$  中間子が崩壊したバックグラウンドの大半が除かれる。しかし、通常のハドロン反応と、チャーム粒子、及び、ボトム粒子を伴う反応の数に圧倒的な差があるため、この選別だけでは不十分である。そこで、ミュオン粒子の運動量、横運動量、及び、再構成された飛跡の延長線と一次反応点との最短距離（インパクトパラメータ）等の情報を用い

表5. 1 オフライン反応選別状況 (第一段階)

標的タイプ	Framing errors <sup>c)</sup> (%cut)	Upstream interactions (%cut)	Bad beam <sup>d)</sup> (%cut)	Fiducial X-Y loss <sup>e)</sup> (%cut)	Good triggers (%kept)
H <sup>a)</sup>	3. 2	10. 2	5. 8	28. 0	59. 4
V <sup>b)</sup>	2. 9	17. 3	13. 7	0. 0	69. 9

a)Based on 25143 triggers

b)Based on 17450 triggers

c)Spurious words inserted by hardware that corrupted the event structure.

d)Poor beam fit:  $\chi^2 > 6$ , SSD hits  $< 3$ , or no fit.

e)Beam track not in the fiducial X-Y boundaries of target.

表5. 2 オフラインでの選別条件

量	単位	クラス3	クラス2	クラス1	クラス4
ミュー粒子の運動量 ( $P_\mu$ )	GeV/c	8. 000	8. 000	8. 000	0. 000
ミュー粒子の横運動量 ( $P_T\mu$ )	GeV/c	0. 200	0. 800	0. 250	0. 000
ミュー粒子のインパクトパラメータ	$\mu\text{m}$	50	100	100	0
ハドロン <sup>a)</sup> の運動量 ( $P_{\text{hadron}}$ )	GeV/c	5. 000	0. 000	0. 000	0. 000
ハドロン <sup>a)</sup> のインパクトパラメータ	$\mu\text{m}$	50	0	0	0
崩壊長	mm	2. 000	0. 000	0. 000	0. 000
二次反応の不変質量	GeV/c <sup>2</sup>	0. 250	0. 000	0. 000	0. 000

全ての値は、選別の際に課した下限値



て更に反応の濃縮を行った。その際に課した条件は、表 5. 2 に示す 4 種類 (クラス) である。いずれの場合にもミュー粒子の運動量が  $8 \text{ GeV}/c$  以上あることを要求した。実際の手順を以下に示す。

まず最初に一次反応点から  $2 \text{ mm}$  以上離れて二次反応点が再構成されており、二次反応点再構成に用いた飛跡の内、少なくとも一本がミュー粒子であるものを選ぶ (クラス 3)。再構成時には、運動量が  $5 \text{ GeV}/c$  以上で、インパクトパラメータが  $5.0 \mu\text{m}$  以上の飛跡のみを用いた。これにより、ある程度の確からしさで崩壊点を含む反応を選んだことになる。この時、ミュー粒子の横運動量が  $0.2 \text{ GeV}/c$  以上あるという条件を同時に課した。

ところで、このような条件を満たす反応例のみを選ぶと、例えば、荷電一体崩壊 (kink: 5-2 参照) のように二次反応点を再構成できない反応例、あるいは、一次反応点と二次反応点の距離が短すぎるなどの理由から実験装置の性能上うまく二次反応点を再構成できない反応例は除外される。そこで、上の条件を満たさなかった反応例について、二次反応点に関する制限を取り除き、更に反応選別を行った。この段階では、まず、運動学的に計算して得たボトム粒子崩壊の特徴を基に、ミュー粒子の横運動量が  $0.8 \text{ GeV}/c$  以上で、かつ、インパクトパラメータが  $100 \mu\text{m}$  以上の反応を選ぶ (クラス 2)。次に、ミュー粒子の横運動量に関する条件を  $0.25 \text{ GeV}/c$  に緩め、更に反応を選別した (クラス 1)。

上のいずれの条件をも満たさなかった反応例の内、原子核乾板標的とパーテックス SSD の間で二次反応点が組まれているものをクラス 4 としたが、これは実際の乾板解析の対象としていない。

計 17450 個の反応例について行ったオフライン選別の状況を表 5. 3 に示す。

こうして選別された反応例についてのカウンターデータは、DST 形式に整理される (付録 2 参照)。乾板解析はこれらのデータに基づいて行う。以下に、崩壊候補探索時に必要となる主な情報を示す。

1) RUN #、EVENT #

これは、反応が記録された磁気テープ番号とそのテープに記録された反応の通し番号である。トリガーされた反応個々につけられたもので、反応の名前に相当する。

2) クラス番号

表5. 3 オフライン反応選別状況 (第二段階)

# events <sup>a</sup> before cut(s)	Applied cut(s)	% of events cut
17450	Non physics cuts for "good" triggers	30.1
12093	Require good muon link to spectrometer	71.3
3469	No primary vertex	3.0
3364	< 2 tracks from primary	1.0
3331	Z of primary $\leq -12\text{mm}$	1.9
3268	Z of primary $>$ emulsion edge	12.8
2849	No secondary vertices found	39.1
1735	Muonic secondary vertex cuts <sup>b</sup>	89.7
178	Muon physics cuts and mass cut <sup>c</sup>	41.0
105	Number of class 3 events left	

Number of events passed for all classes of cuts.

Class 3 -	105	Class 2 -	23
Class 1 -	116	Class 4 -	113

<sup>a</sup> Based on data from vertical emulsion modules.

<sup>b</sup> Z of secondary in bounds and decay length  $> 2\text{mm}$ .

<sup>c</sup> p,  $p_{\perp}$ , and impact parameter of muon cuts along with invariant mass cut.

これは、上記の反応選別条件の内、どの条件によって選別された反応かを示す番号である。

3) トリガー時のターゲットムーバフレームの位置

この情報は、標準座標とモジュール座標の変換、及び、ミニモジュールを決定する際に用いる。

典型的な反応例一つ当たり一次反応点を含め約2.5個の反応点が再構成されている。その各々について、

4) 反応点の位置とその誤差

また、一つの反応例当たり、入射粒子を含め平均35本の飛跡が再構成される。その各々について、

5) 飛跡の角度とその誤差

6) 標準座標で $Z = 0$ の点での飛跡の位置(X、Y)とその誤差

7) 飛跡の再構成時に用いたドリフトチェンバー、及び、SSDのヒット数

8) 荷電粒子スペクトロメータで測定された運動量とその誤差、及び、電荷

9) ミュー粒子あるいは電子であると判断されたもの、及び、入射粒子についてはその印

10) 反応点再構成に用いた飛跡については、再構成した反応点の通し番号

これらのデータを全てホストミニコンピュータ( $\mu VAX$ )のディスクに保管し、乾板解析の各段階で必要な情報をすぐに引き出せるようにした。

## 5-1-2 有効領域等による反応選別

乾板解析の技術的制約から解析に有効な領域が限定される。図5.1に、我々が設定したペリクル部分における有効領域を示す。乾板解析の対象とする反応は、カウンターで予言された一次反応点の位置がこの有効領域内にあるものに限った。その理由は次の通りである。まず、各ミニモジュールの上下一枚ずつのペリクルは、一次反応点もしくは崩壊点がミニモジュールの外に出てしまう可能性があるのを除いた。更に、各ペリクルの周辺部分は、歪みが大きく測定値の補正等が難しいのでこれを除いた。下流側をペリクル端から2

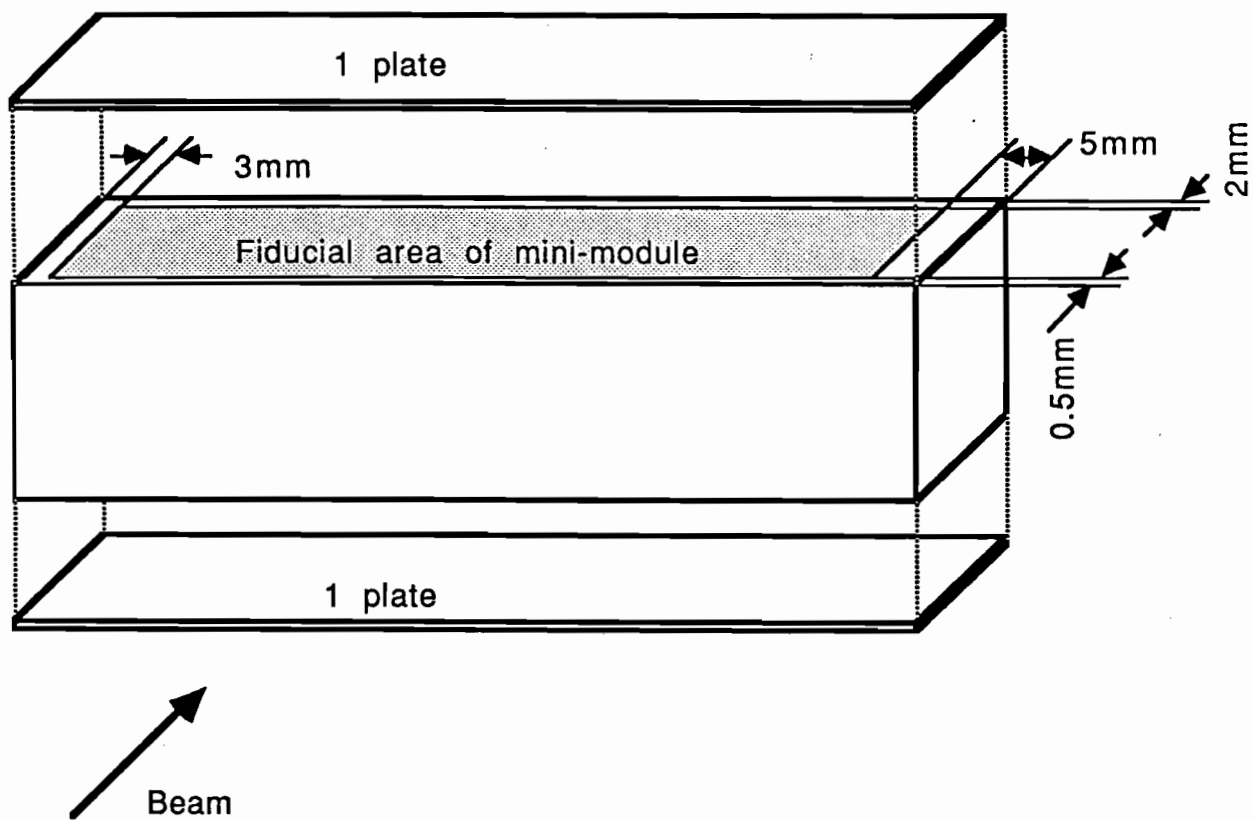


図 5. 1      ペリクル部分の有効領域

m m 除いたのは、見つけた反応に対して十分な測定領域を確保するためである。

また、4章で述べたように、あまり小角度の飛跡を扱うのは、解析に時間がかかり非能率的である。そこで、解析対象とする反応を選ぶ際、ミュー粒子の角度に制限を設けた。具体的には、 $|dX/dZ|$  が 5 mrad 以上、もしくは、 $|dY/dZ|$  が 10 mrad 以上のミュー粒子を伴う反応のみを乾板解析の対象とした。

これらの条件を満たす反応例の割合は、全体の約 60% であった。上記のように有効領域を限ったことにより全体の約 35% が、また、ミュー粒子の角度を制限したことにより約 5% が、乾板解析の対象から除かれた。

## 5 - 2 乾板中での崩壊点の様相

二次粒子が乾板内で崩壊した場合、核反応とは異なった様相を示す。即ち、崩壊点からは核反応に特徴的な核破片の飛跡が出ていない。核破片は一般にグレインの密集した太い飛跡 (heavy track: 付録 1 参照) として観測されるので容易にそれと判断できる。更に、崩壊では親粒子と全娘粒子の電荷が保存するので、親粒子が荷電粒子であれば荷電娘粒子の本数は必ず奇数になる。また、中性親粒子の崩壊の場合には、荷電娘粒子の数は偶数である。

原子核乾板中での崩壊点の様相を崩壊によって生成される荷電娘粒子の数によって以下のように分類する (図 5. 2 参照)。

### 1) 荷電親粒子の崩壊

荷電一体崩壊 (俗名 k i n k、改名 C 1)

荷電三体崩壊 (俗名 t r i d e n t、改名 C 3)

荷電五体崩壊 (俗名 5 p r o n g s、改名 C 5) 等

### 2) 中性親粒子の崩壊

荷電二体崩壊 (俗名 v e e、改名 N 2)

荷電四体崩壊 (俗名 4 p r o n g s、改名 N 4) 等

例えば、 $D^+ \rightarrow K^0 \mu^+ \nu_\mu$  の崩壊は、k i n k (C 1) として、また、 $D^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$  では、v e e (N 2) として観測される。中性親粒子が全て中性娘粒子に崩壊するような現象は、乾板中では観測されない。

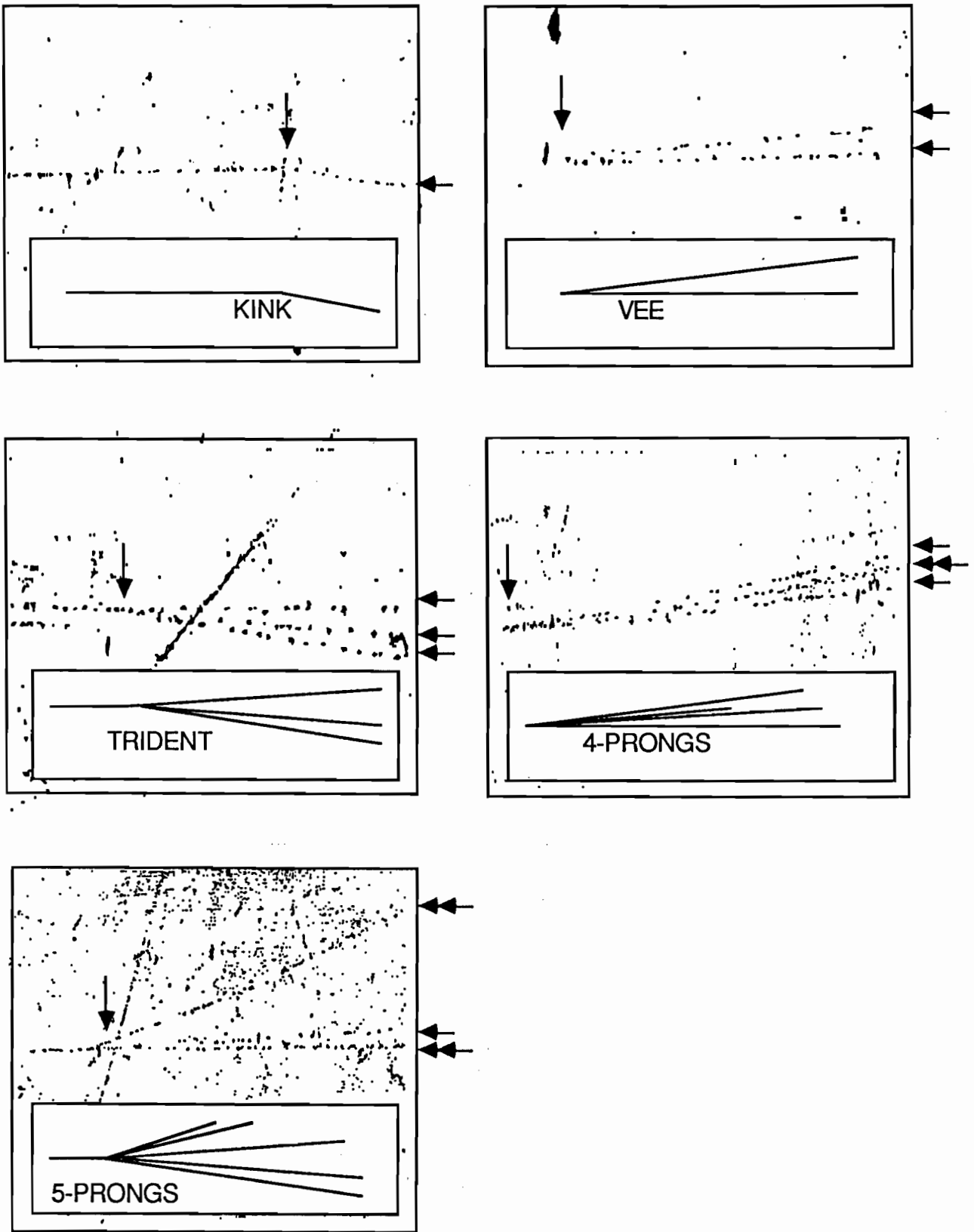


図 5. 2 崩壊点の様相

乾板解析の段階では、上記のようにトポロジカルな様相により崩壊点を認識している。それ故、核反応であるにも関わらず核破片が放出されず、しかも、反応前後で荷電粒子の数のつじつまが合うものは、崩壊との区別ができない。また、ストレンジ粒子、主に、 $K$ 中間子の崩壊とチャーム粒子の崩壊との区別も困難である。更に、わずかではあるが、電子対生成を荷電二体崩壊と誤認する可能性もある。最終的には、運動学的なフィット（付録3）を行い親粒子の種類を同定することによってこれらのバックグラウンドを除く。本論文で扱った崩壊例に含まれるバックグラウンドについては、6-2で検討する。

### 5-3 崩壊候補反応探索

チャーム粒子、及び、ボトム粒子を効率よく選択するため、それらの崩壊によって放出される高運動量のミュオン粒子に注目し、オンライントリガーを行った（2-5）。そして、得られた反応例についてオフライン処理を行い、試料の濃縮を行った（5-1-1）。このことについては既に述べた通りである。しかし、それでもなお90%以上のバックグラウンドが含まれている。それ故、乾板解析では、まずそのバックグラウンドを除く作業、言い換えれば、チャーム粒子、及び、ボトム粒子を含む反応を選ぶ崩壊候補反応探索作業から始めなければならない。既に述べたように、これらのバックグラウンドの大半が $\pi$ 中間子の崩壊によって作られたミュオン粒子を検出したものである。そこで、オンライン、及び、オフライン処理の手順を引き継ぎ、このミュオン粒子の発生源を確認することから崩壊候補探索を始める。この探索手順のアルゴリズムを図5.3に、また、その概念図を図5.4に示す。Dスタック内に崩壊点がある場合を上図に、ペリクル中にある場合を下図に示した。以下、この図に基づいて崩壊候補反応探索の方法を説明する。

まずカウンターで予言されたミュオン粒子の角度と通過位置を頼りにし、乾板の最下流、即ちDシート#9上でミュオン粒子の飛跡を探す（1: Muon track search）。この段階でミュオン粒子の飛跡が見つからなかった反応は、以後の乾板解析の対象から除外する。

Dスタックでの探索には、4-2で述べた解析装置（ASVIS）

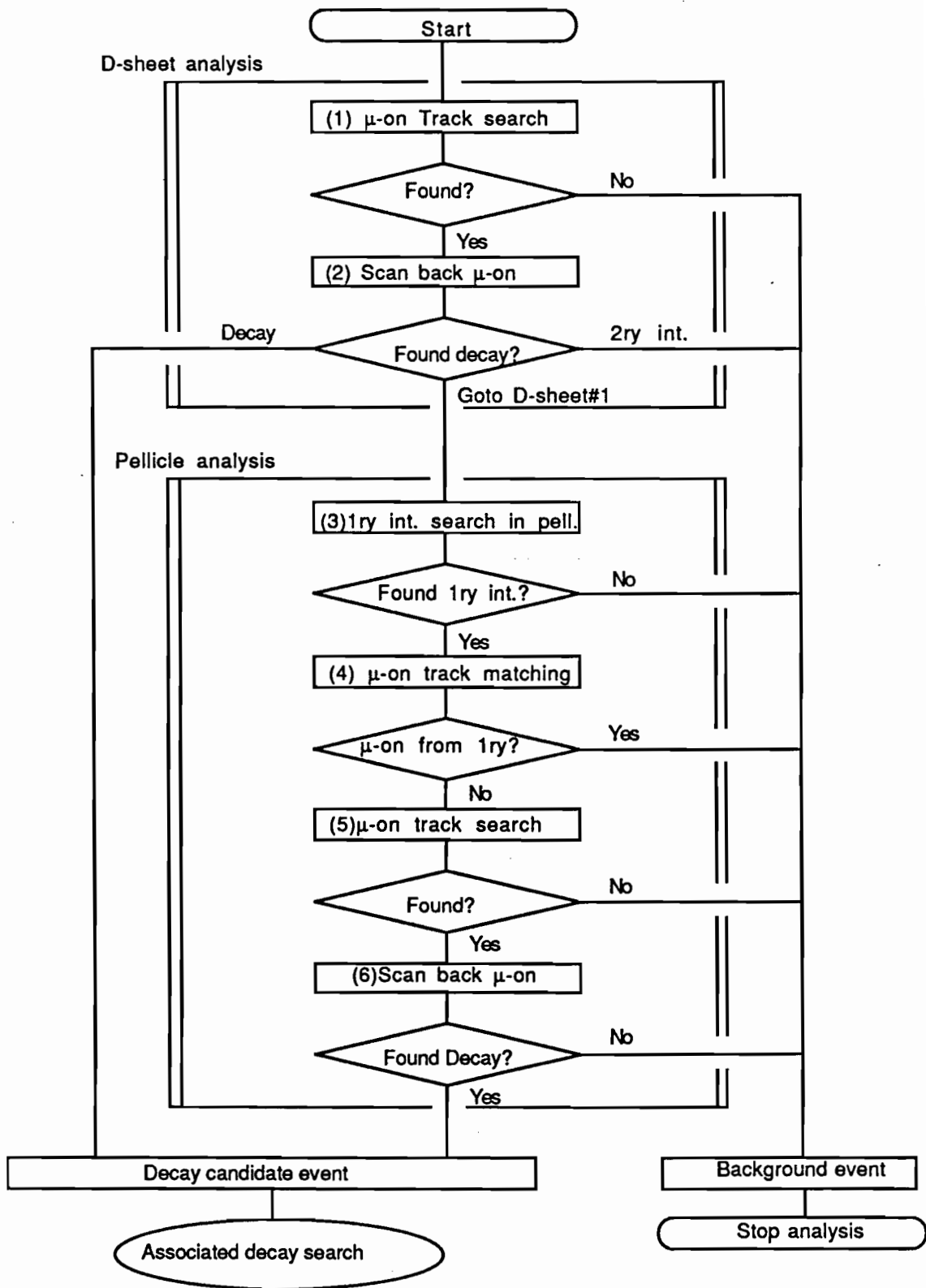


図 5. 3 崩壊候補反応探索のアルゴリズム



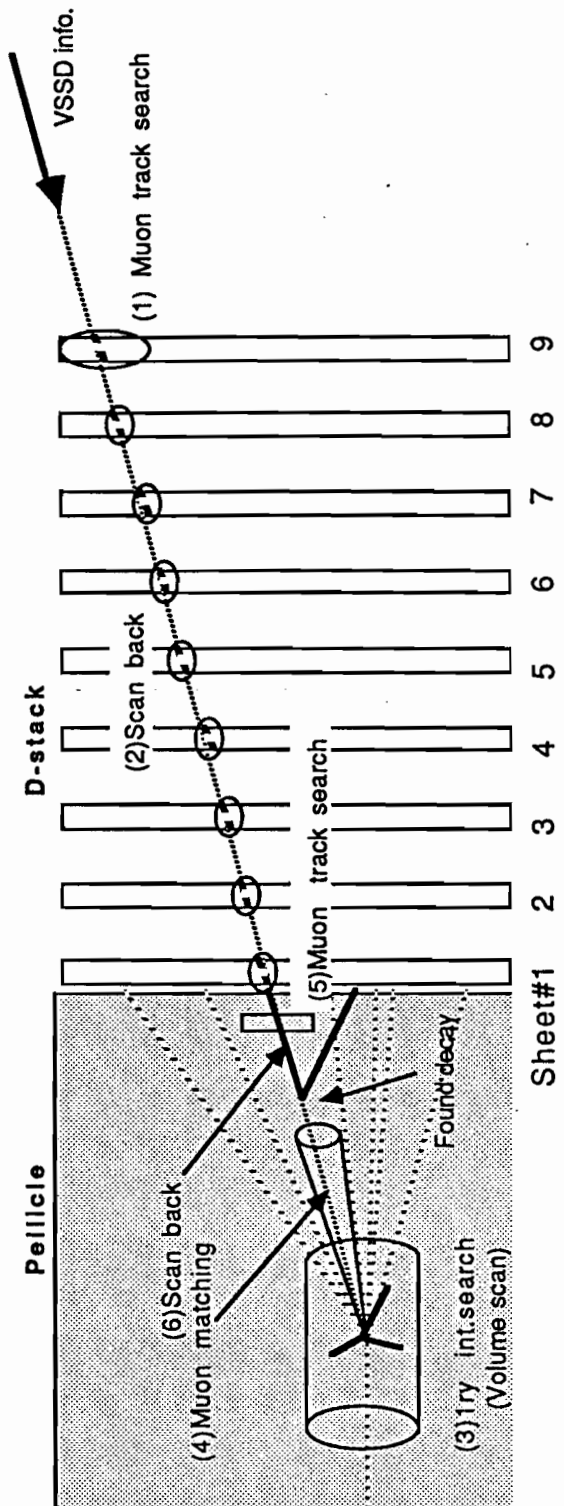
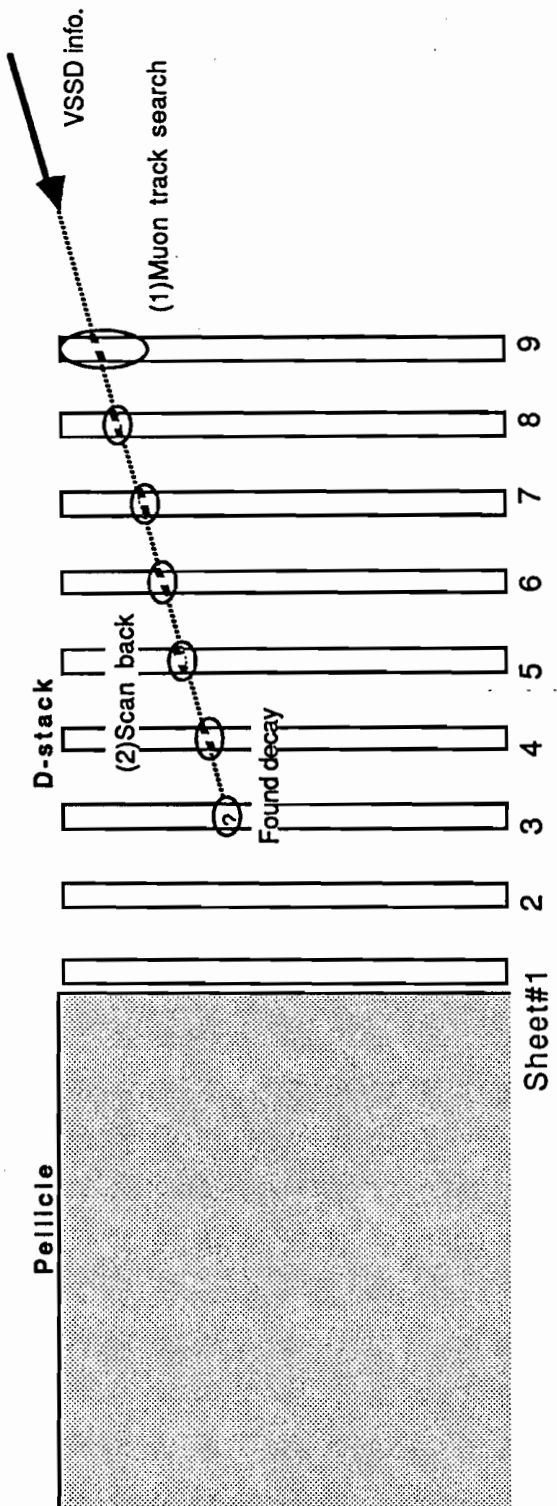


図 5. 4 崩壊候補反応探索手順の概念図

を使用する。まず、最下流のDシート#9を顕微鏡ステージにセットし、カウンターで予言された位置を中心にX、Y両方向とも±150μmの範囲、即ち、顕微鏡の4視野分の映像をVTRで記録する。実験の初期段階で発見したミュー粒子について、カウンターで予言された位置と実際に乾板上で測定した位置のずれの分布を調べた結果、その標準偏差は、X、Y方向ともほぼ同じで40μmであった(図5.5)。このことを考慮し、ミュー粒子を探す領域を±150μmとした。

次に、一枚上流のDシート#8に取り替え、ビデオ映像上、即ちDシート#9のビームパターンとシート#8のそれが一致する位置にまでステージを移動させる。そして、カウンターの予言した飛跡の角度と事前に測定しておいたスペーサーの厚さの測定値を用いて、二枚のシート間でこのビームパターンに対し注目する飛跡の位置がどれだけずれるかを計算する。そして、その分だけ更にステージを移動させる。こうすると、探している飛跡は、ビデオ映像上(シート#9)での位置と顕微鏡映像内(シート#8)での位置が良い精度で一致することになる。それ故飛跡の探索は、一つの画面でこれらの映像を瞬時に切り替えながらその位置がある許容範囲で一致している飛跡を探すだけでよい。この操作は言い換えると、カウンターで予言された飛跡の角度とある許容量内で一致する角度の飛跡を選び出すことである。具体的には、カウンターで予言された角度と乾板中で見つけた飛跡の角度の差が測定誤差の4倍以内であるものを選んだ。この測定誤差は4-2で述べたもので、飛跡の角度の関数として与えられる。ほとんどの角度にわたって測定誤差は1mrad前後であるから、この角度の許容量は3~4mradに相当する。そしてそれは実際のTV画面上では10mm程度の範囲内で重なる飛跡を探せば良いということである。

こうして選んだ飛跡をほぼ同じ手順に従って順次上流のシートへ追跡していく(2: Scan back)。その際には、カウンターの予言した飛跡の角度の代わりに、実際に測定した角度を用いる。この飛跡の追跡過程で偶然近くにある別の飛跡を誤認することがある。そのような飛跡の乗り換えが起こると、各シート上で測定した飛跡の位置を比較した時、直線からのずれが認められる。そこで、随時、隣接する二枚のシートの測定値から角度を計算し、角測定誤差の2倍以上の偏差を持つデータは除外する。この方法で飛跡の乗り換えの

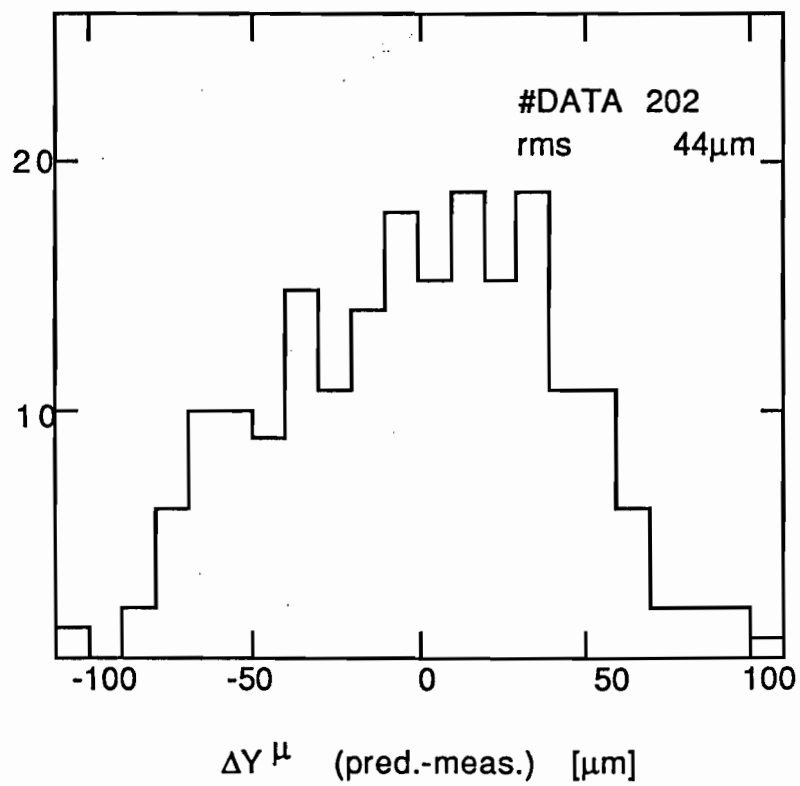
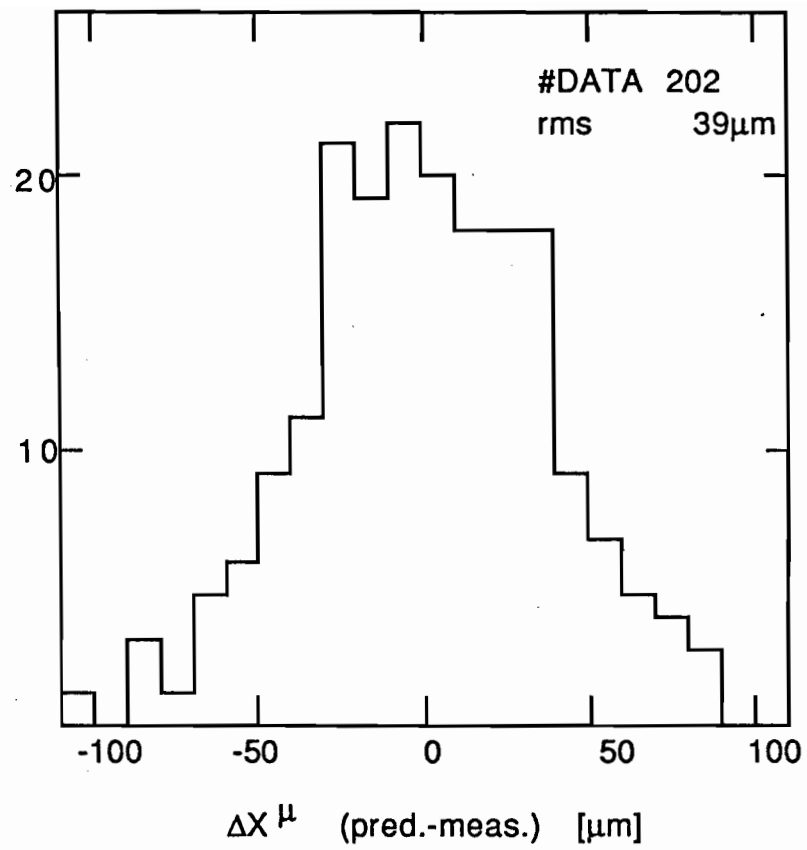


図5. 5 Dシートで測定したミュー粒子の位置とカウンターの予言位置の差

危険性は十分回避できる。

追跡段階で、次のシート上に上述の条件を満たす飛跡が確認されなければ、そのシートと一枚上流のシート間で崩壊を起こしている可能性がある。このような飛跡については、再度追跡をやり直し、測定ミスによる飛跡接続の失敗ではないことを確認することとした。一方、Dシート内で起きた二次核反応がミュー粒子の発生源である場合も有り得る。その場合には、一点に集束する二次粒子の飛跡から反応点が確認できることが多い。もし、Dシート内に反応点が認められればバックグラウンドとして解析を打ち切る。

Dシートでの探索の中間結果を表5.4に示す。総計約1400本のミュー粒子について探索を試みた結果、約70%弱を発見した。30%強のミュー粒子は発見できなかった。その内の1/3は、飛跡の探索効率が93%であることによる。また、残りは乾板標的下流にミュー粒子の発生源があるものとカウンターで正しく再構成できなかったものであると考えられる。図5.6に、ミュー粒子の角度と発見率の関係を、また、図5.7に運動量と発見率の関係を示す。見つけたミュー粒子980本の内、その発生源が解析層内にあると考えられるものは83本、その割合は、約8%であった。この中には、スペーサーにおける二次核反応が含まれる可能性がある。簡単な計算によるとその割合はこれら83本の内の5~10%である。また、見つけたミュー粒子の約90%弱は、最上流のDシート#1まで追跡したもので、これらは引き続きペリクルでの処理を行う。

ペリクルでの解析は、まず、カウンターで予言された一次反応を探す(3:1ry interaction search)。この作業は、予言位置の近傍を三次元的に探索するボリュームスキャン法で行う。探索範囲は、カウンターで予言された位置を中心に、X、Y方向は $\pm 100 \mu\text{m}$ 、また、Z方向は $\pm 2 \text{mm}$ とした。但し、ビーム照射時にペリクルが傾いていたことにより、Y方向の位置のずれは、Z方向による位置に強く依存する。その様子を図5.8に示す。図は、ペリクル底面から測った入射粒子の位置で、ビーム照射時のペリクルの傾きとたわみを示すものである。3-5で述べたように、カウンターのデータを用いてペリクル内での反応位置を計算するにはペリクル上流に記されたX線マークを参照する。そこで、予言された反応点位置の近傍を通過する入射粒子の飛跡を測定し、このようなペリクルの傾

表 5. 4 Dシートでの崩壊候補探索結果

	ミュー粒子の数	反応例の数
探索を行ったミュー粒子	1 4 2 4	1 2 5 6
発見したミュー粒子	9 8 0 ( 6 9 %)	8 8 2
追跡結果		
最上流のシートまで追跡したもの	8 7 0 ( 8 9 %)	7 8 3
発生源が崩壊であると考えられるもの	8 3 ( 8 %)	8 3
発生源が二次核反応であったもの	2 5	2 5

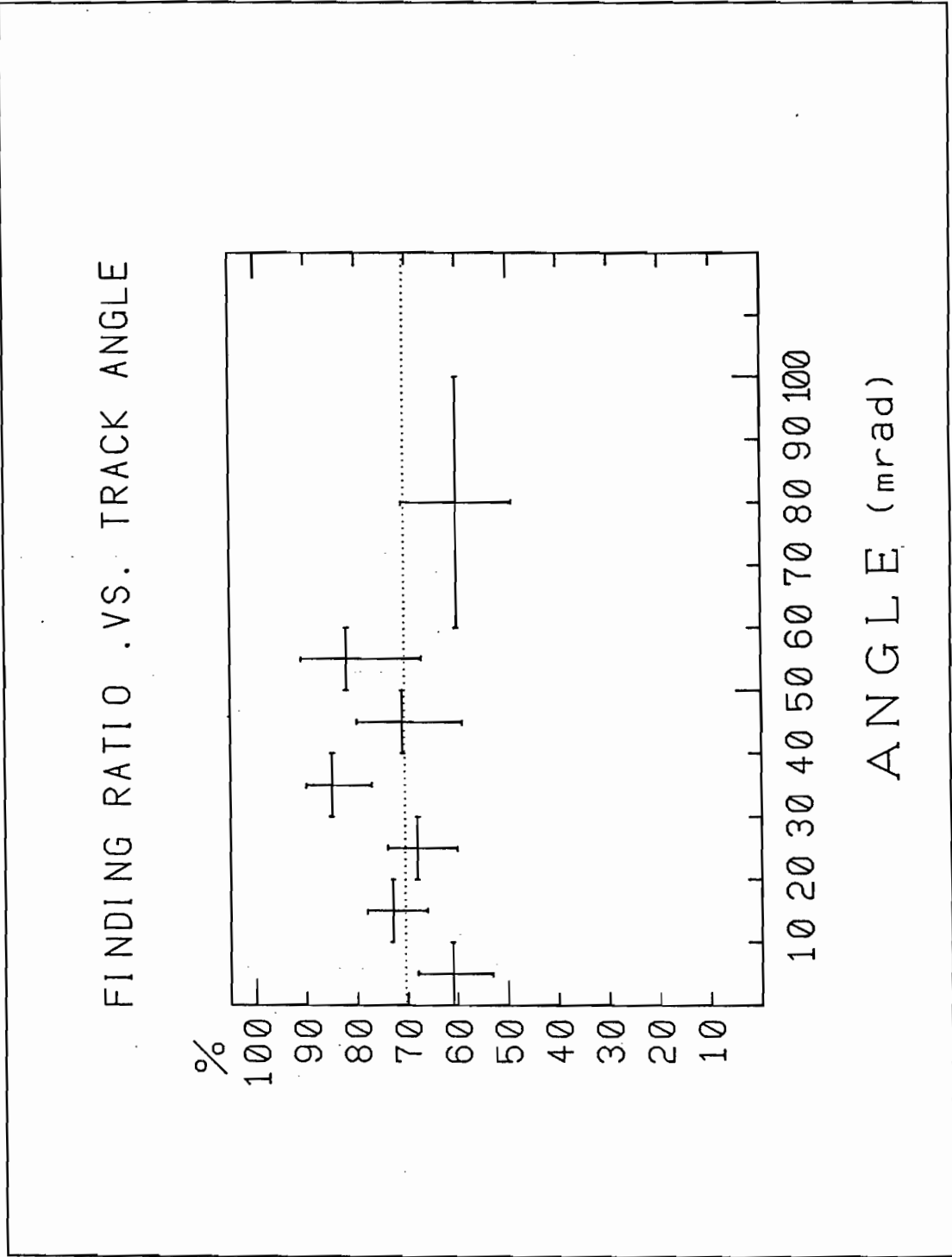


図 5. 6. ミュー粒子の角度による発見率

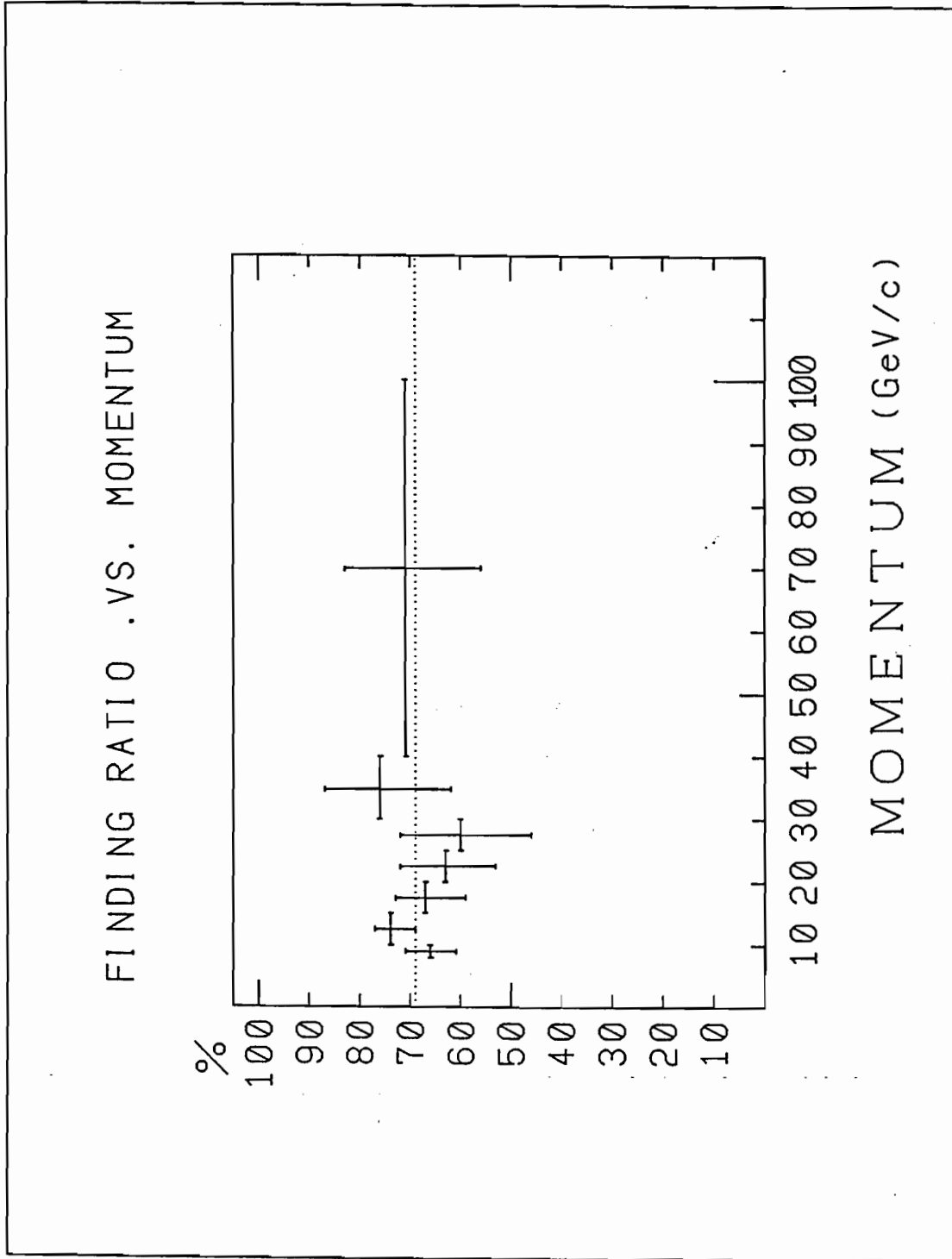


図5.7 ミュー粒子の運動量による発見率

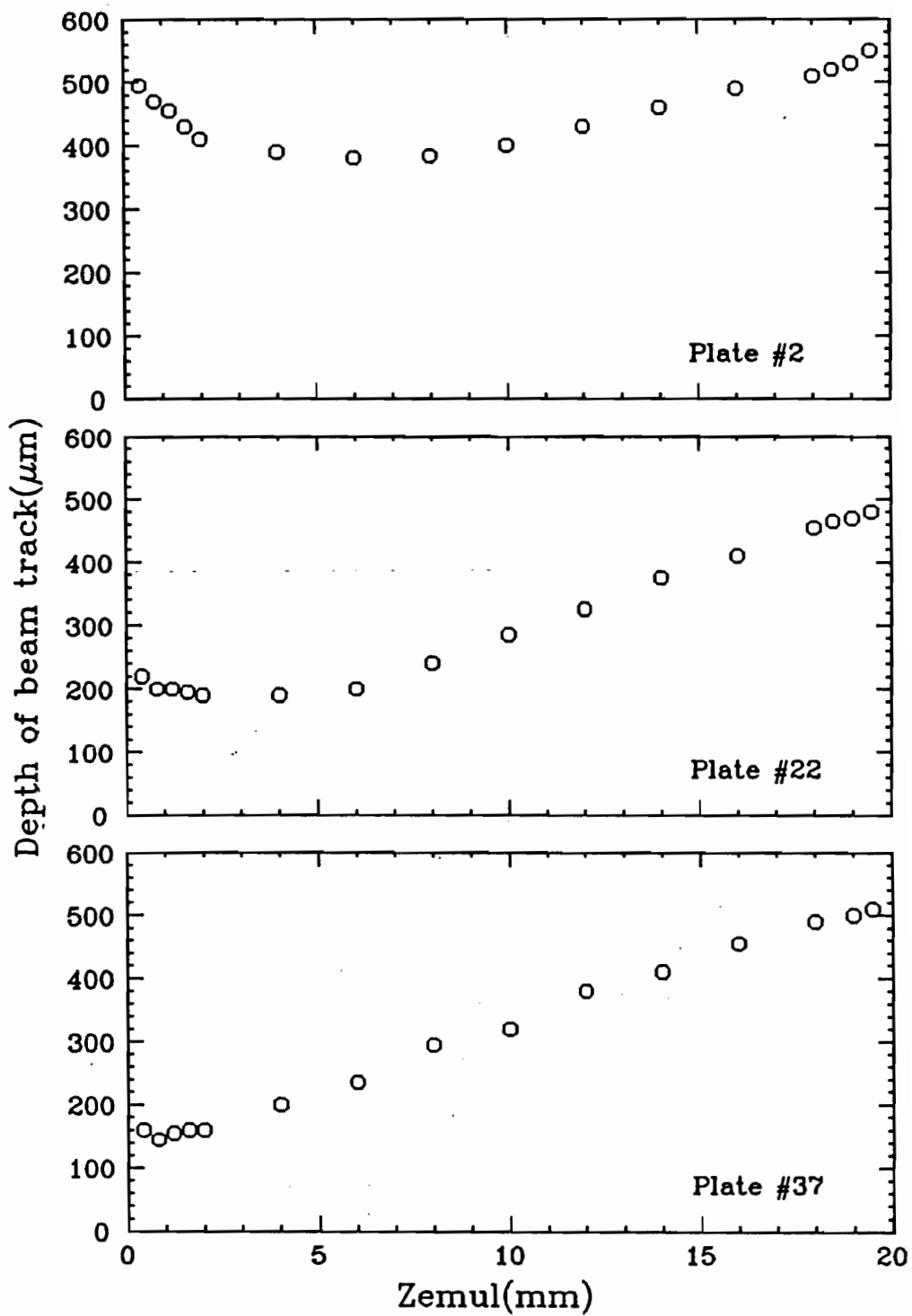


図5. 8 ペリクル底面から測定した入射粒子の位置



きとたわみに由来する位置のずれを補正した。更に、X方向についてもカウンターの予言位置と実際の測定位置の間にX位置による系統的なずれがみられた。その様子を図5. 9に示す。この系統的なずれは、X線マーク照射後のペリクルの収縮によるものと考えられる。これも、実際に探索する位置を計算する際に補正した。

この段階で探索領域にはいるトリガー反応以外の反応数  $N_{BG}$  は、

$$N_{BG} = \rho V / \lambda$$

で与えられる。Vは探索した体積、 $\lambda$ は反応長、また、 $\rho$ はビーム照射密度である。例えば、 $1 \times 10^5 / \text{cm}^2$ の密度でビームを照射した乾板の場合、 $N_{BG}$ は約0.4となる。これら不要な反応を弁別するため、探索領域内にある全ての一次反応について、カウンターで予言された特徴的な飛跡、即ち高運動量でかつ大角度のものを2~3本選び、一次反応からその飛跡が出ているか否かを確認した。

こうして注目する反応と確認できたものについて、次に、ミュオン粒子とカウンターが予言した飛跡が反応点から出ているかどうかを調べる(4: Muon track matching)。そしてもしXZ面に投影した角度が、Dシートでの測定値と $\pm 4 \text{ mrad}$ の範囲内で一致するものがあれば、それをペリクルの最下流まで追跡しそこでの位置(X、Y)を測定する。この位置とDシートでの測定値から計算した位置との差が、X、Y共に $\pm 60 \mu\text{m}$ 以内であれば、このミュオン粒子の飛跡は、一次反応から出ている、即ちバックグラウンドであると判断し処理を打ち切る。もしこのような飛跡が一次反応点で確認できなかった場合、Dシートでの測定値を基にペリクルの最下流から1mmの点でミュオン粒子の飛跡を探し(5: Muon track search)上流へ追跡して発生源を確認する(6: Scan back)。この時の探索領域は、X、Y共に $\pm 60 \mu\text{m}$ とした。

ペリクルでの探索の中間結果を表5.5に示す。一次反応の発見効率は99%であり、同種のハイブリッド実験の中では最高の発見効率である。これはSSDの使用で反応点の予言精度が向上したこととX線マークによりカウンター系と原子核乾板標的系の位置を精度良く対応付けられたことによっている。

ペリクル中で崩壊点を確認したものは33例であった。これは、ペリクルでの探索を試みた反応例の数に対して4.7%である。

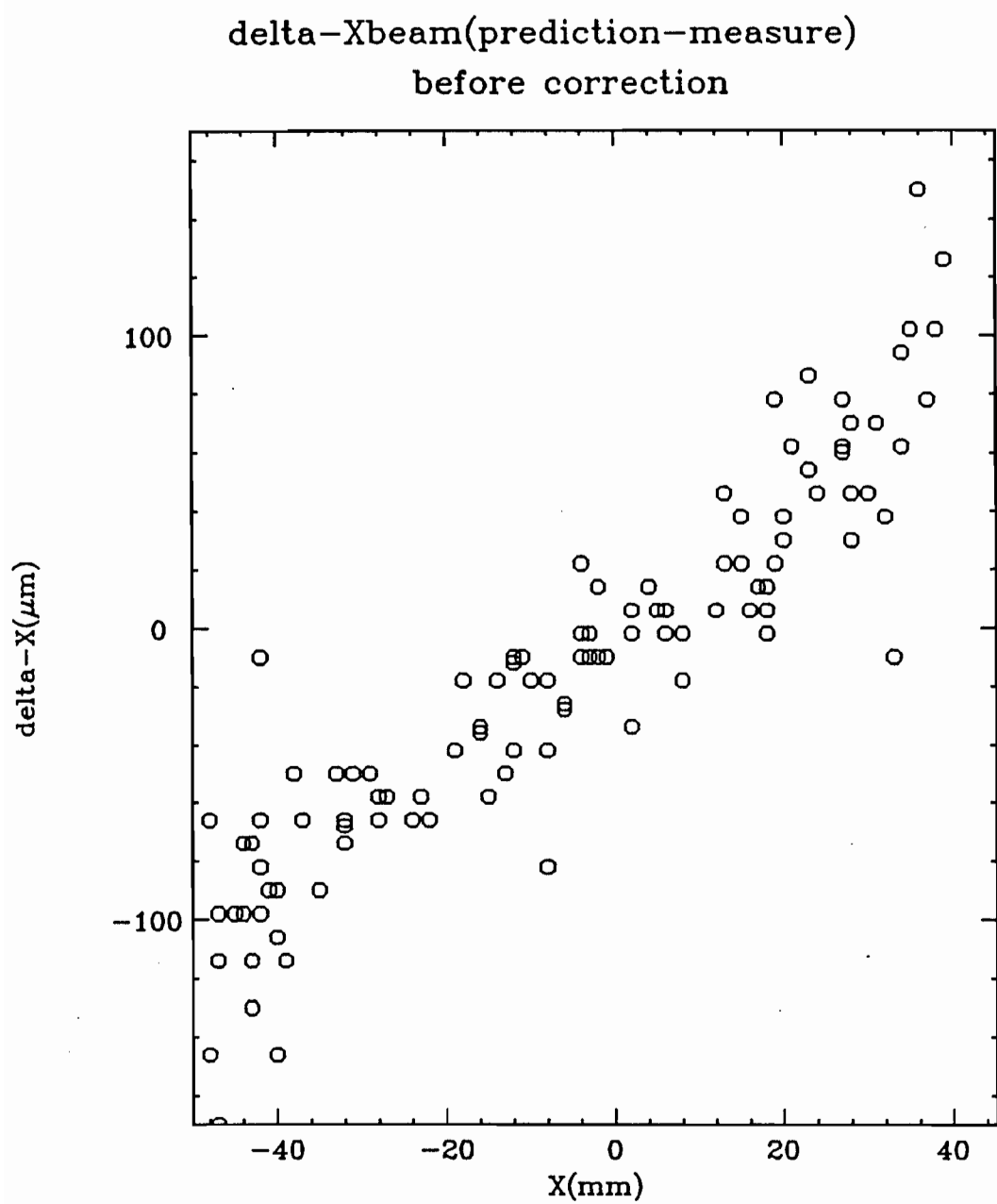


図5. 9 入射粒子の乾板での測定位置とカウンターの予言位置の差（補正前）

表 5. 5      ベリクルでの崩壊候補探索結果

	ミュー粒子の数	反応例の数
一次反応探索を行った反応例	802	721
発見した反応例	791	711 (99%)
一次反応からでているか否かを		
確認したミュー粒子	775	699
一次反応点で確認できたミュー粒子	562 (73%)	518
一次反応点で確認できなかった		
ミュー粒子	213	207
スキャンバックを行ったもの	204	199
崩壊点を確認できたもの	33	33

#### 5 - 4 相棒崩壊候補探索

強い相互作用でチャーム粒子が作られる場合、チャーム粒子と反チャーム粒子が対で作られる。そこで、先に述べた処理によって得られた崩壊候補反応について、更に相棒となる崩壊の探索を行う。現時点では、この作業を開始したばかりなので方法はまだ確定していない。そこで、以下には、現在テスト的に行っている方法を述べる。相棒崩壊候補探索のアルゴリズムを図5. 10に示す。

まず、各崩壊候補反応について、一次反応点から出ている二次粒子の飛跡を下流へ追跡し、荷電親粒子の崩壊を探す。追跡する飛跡は、カウンターのアクセプタンスを考慮して、放出角が、X、Y方向共に200 mrad以内のものに限った。また、ペリクルでの追跡は、測定に要する時間と崩壊点発見効率を考慮して一次反応を含むプレートの上下一枚以内とした。

次に、中性親粒子の崩壊を探す。そのために、荷電粒子追跡時に測定した二次粒子の飛跡の角度と乾板最下流での位置をカウンターデータと比較する。その結果、カウンターで再構成された飛跡の内、乾板で測定した飛跡と対応するものがなかったものは、乾板中の崩壊からの飛跡である確率が高い。そこで、これらの飛跡を乾板最下流で探し上流へ追跡する。但し、追跡の対象とする飛跡は、カウンターでの飛跡再構成の効率を考慮し、運動量が2 GeV/c以上のものに限った。また、この内、電子であると予言されている飛跡については、電子対生成による飛跡を極力除くため一次反応点に対するインパクトパラメータが40  $\mu$ m以上あることとした。この条件で選んだ飛跡の数は、典型的な反応一つ当たり2~4本であった。

#### 5 - 5 乾板測定データ

崩壊候補各々についての測定量の内、以後の解析に必要な量は、

- 1) 一次反応点、及び、崩壊点の位置
- 2) 荷電娘粒子の角度と乾板最下流での位置
- 3) 親粒子の角度
- 4) 入射粒子の角度

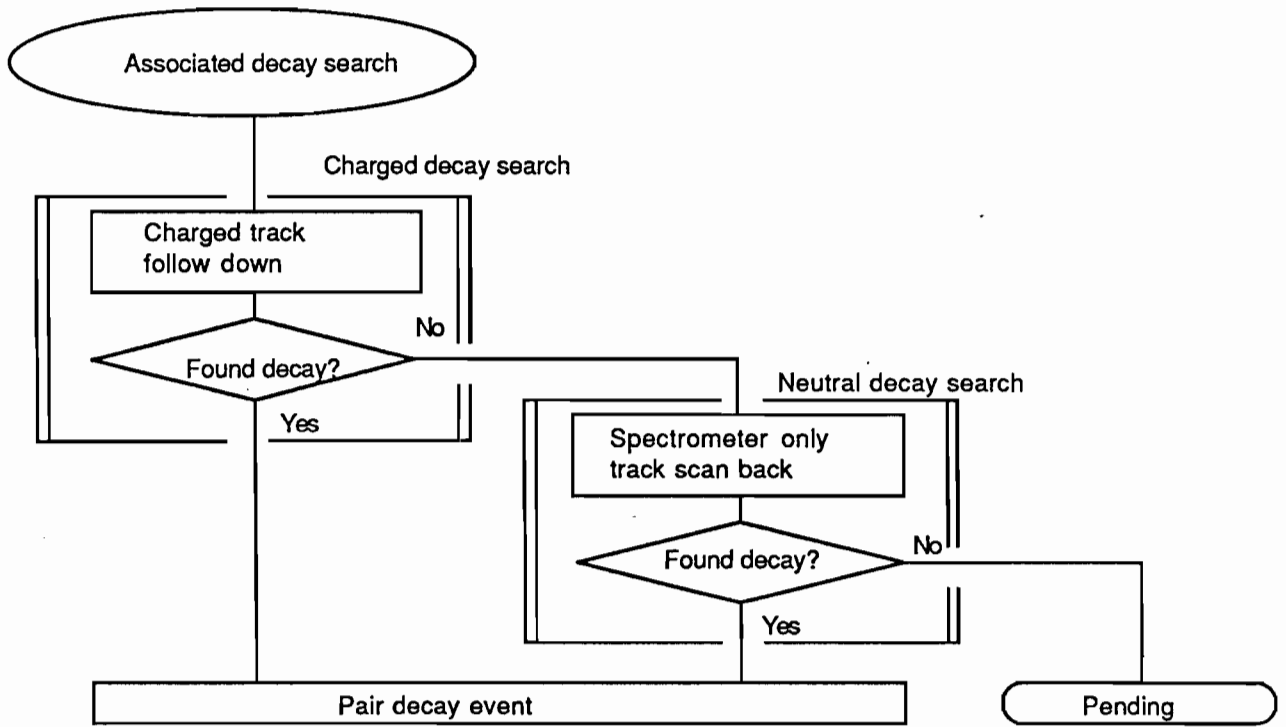


図 5. 1 0 相棒崩壊候補探索のアルゴリズム

である。

ペリクルでは、2.5 mm 間隔をおいた2点の位置測定で角度を求めた。典型的な飛跡についてペリクルで測定された角度の誤差は、測定後の種々の補正等によるものを含め、X方向で2 mrad、Y方向では約5 mradであった。Y方向の誤差が大きいのは、現像後のペリクル収縮の補正によるものである。角測定は、反応点もしくは崩壊点の付近とペリクル最下流の二箇所で行った。後者のデータは、飛跡をDシートへつなぐために用いる。一方、Dシートでは4-2で述べたように1 mrad以下の精度で角測定ができる。

測定データは、カウンターデータと併せてDST形式で保存する。乾板での測定データの一例を表5.6に示す。以後、このDSTデータに基づいて種々の解析を行い目的とする物理量を導き出す。

## 5-6 崩壊候補探索結果

神戸大学グループでは、現在までに約1300例のDST反応についてこの章で述べた方法により崩壊例探索を行った。その結果、崩壊候補を含む反応を116例収集した。これらについてテスト的に相棒崩壊候補の探索を行っている。現時点で複数個の崩壊候補を含む反応を32例収集している。崩壊候補を対で含む反応の例を図5.11に示す。また、ペリクル内で発見した67例の崩壊候補のトポロジカルな種類を表5.7に示す。図5.12は、ペリクル内で発見した崩壊候補についてその崩壊長をプロットしたものである。ペリクルのビーム方向の長さは有限であるため、崩壊長の長いところでは傾斜が急になっている。この部分を除いた傾きより求めた平均の崩壊長は約6 mmであり、チャーム粒子の平均寿命と高エネルギー領域での寿命の相対論的な伸びとから計算した値と矛盾しない。また、荷電親粒子に対する傾きの方が、中性親粒子のそれに比べて緩やかであることは両者の寿命の違いを反映している。

E653実験全体では、約1万5千の反応例について探索を行っている。表5.8は、上流の標的部分のみで発見された崩壊候補の数を各研究機関別にまとめたものである。崩壊候補反応の数は、656例である。このうち現在までに確認できているチャーム粒子を対で含む反応は145例である。

SUM PROGRAM VERSION 9 870311  
 DST CREATED BY K.TARUMA AT KOBE UNIV. ON 860929 190308  
 EVENT SCANNED AT KOBE UNIV. ON 860628

RUN# 2282 EVENT# 4153 (1) NEMLVTX : 1 (2) NEMLTRK : 3 (3) NEMLVTX : 20 (4) TRGT MVR : 270.533 37.449

\*\*\* EMULSION VERTEX SUMMARY \*\*\*

(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)			
VTX#	PLATE	TR#	TYPE	NH	NS	SV#	X (ERR)	Y (ERR)	Z (ERR)	PST	SCN	VERTEX	TYPE
1	24115	16	69	0	15	4	-0.303 (0.045)	1.530 (0.045)	-0.752 (0.506)	MM(ABS)	0	1	EM PR IN
2	24115	4	107	0	3	5	-0.053 (0.002)	0.010 (0.005)	1.518 (0.002)	MM(REL)	0	4	EM SC DC
3	24114	3	39	14	2	0	-0.196 (0.005)	-0.205 (0.008)	5.032 (0.034)	MM(REL)	0	2	EM SC IN

\*\*\* EMULSION TRACK SUMMARY \*\*\*

(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)
TR#	ID	SV#	EV#	SP#	DX/DZ (ERROR)	DX/DZ (ERROR)	X:EXIT (ERROR)	Z:EXIT (ERROR)	DX/DZ:E (ERROR)	DY/DZ:E (ERROR)	FOLL.L TYPE
1	1	1	99	0	-0.0671 (0.0015)	0.0326 (0.0021)	-2.934	2.785	-0.0689 (0.0008)	0.0328 (0.0004)	38.841
2	1	1	99	4	-0.0594 (0.0015)	0.0320 (0.0021)	-2.748	2.736	-0.0646 (0.0008)	0.0310 (0.0004)	38.827
3	1	1	3	0	-0.0338 (0.0007)	-0.0408 (0.0021)	-0.491	1.335	-0.0093 (0.0214)	-0.0406 (0.0620)	5.041
4	1	1	2	0	-0.0321 (0.0011)	0.0032 (0.0035)	-0.362	1.550	0.771 (0.0011)	0.0032 (0.0035)	1.525
5	1	1	99	5	-0.0142 (0.0015)	0.0011 (0.0021)	-0.863	1.539	-0.0145 (0.0002)	0.0001 (0.0005)	38.735
6	1	1	99	8	-0.0064 (0.0015)	0.0216 (0.0021)	-0.609	2.454	-0.0083 (0.0005)	0.0246 (0.0004)	38.743
7	1	1	99	12	0.0029 (0.0015)	0.0002 (0.0021)	-0.251	1.542	0.0002 (0.0003)	0.0018 (0.0003)	38.730
8	1	1	99	0	0.0049 (0.0012)	0.0146 (0.0020)	-0.176	2.020	0.0022 (0.0004)	0.0134 (0.0005)	38.734
9	1	1	99	15	0.0057 (0.0015)	0.0054 (0.0021)	-0.101	1.790	0.0053 (0.0004)	0.0072 (0.0003)	38.732
10	1	1	99	14	0.0065 (0.0015)	0.0013 (0.0020)	-0.087	1.646	0.0047 (0.0003)	0.0038 (0.0004)	38.731
11	1	1	99	17	0.0106 (0.0015)	0.0050 (0.0020)	0.087	1.885	0.0094 (0.0003)	0.0104 (0.0003)	38.734
12	1	1	99	19	0.0120 (0.0015)	-0.0101 (0.0020)	0.131	1.279	0.0107 (0.0003)	-0.0058 (0.0004)	38.734
13	1	1	99	20	0.0285 (0.0015)	-0.0128 (0.0021)	0.807	1.116	0.0288 (0.0007)	-0.0097 (0.0002)	38.748
14	1	1	99	21	0.0326 (0.0014)	0.0178 (0.0020)	0.897	2.247	0.0307 (0.0004)	0.0098 (0.0004)	38.755
15	1	1	98	0	0.3270 (0.0013)	-0.1882 (0.0039)	0.127	1.293	0.586 (0.0013)	-0.1882 (0.0039)	1.425
16	0	0	1	1	0.0022 (0.0012)	0.0041 (0.0037)	-0.309	1.539	-2.207 (0.0012)	0.0041 (0.0037)	1.454
17	1	2	99	2	-0.1071 (0.0013)	0.0207 (0.0020)	-4.388	2.372	0.797 (0.0012)	0.0226 (0.0004)	37.440
18	1	2	99	6	-0.0109 (0.0014)	0.0096 (0.0020)	-0.818	1.920	-0.0133 (0.0002)	0.0108 (0.0004)	37.217
19	1	2	99	9	-0.0053 (0.0014)	0.0367 (0.0021)	-0.609	3.071	-0.0072 (0.0002)	0.0423 (0.0006)	37.244
20	4	3	97	0	-0.0024 (0.0016)	-0.5974 (0.0052)	-0.500	0.727	-0.0024 (0.0016)	-0.5974 (0.0052)	1.183

Header module

(1) EVNT TYP: オフライン反応選別のクラス番号 (2) NEMLVTX, (3) NEMLTRK: 測定した反応点、及び、飛跡の数  
 (4) TRGT MVR: トリガーター時のターゲットーム座標 (m m)  
 Vertex module  
 (5) PLATE: 反応点のあるペリクル、もしくは、Dシート番号 (6) TR#: 各反応点について測定した飛跡本数  
 (7) TYPE: 反応点の種類 (一次反応、核反応/崩壊等) を示す番号  
 (8) NH, (9) NS: heavy track、及び、thin trackの本数  
 (10) SV#: 対応するものがある場合、カウンタで再構成された反応点の番号  
 (11) X, (12) Y, (13) Z, (14) UNIT: 反応点の位置とその単位  
 (15) VERTEX TYPE: 反応の種類を示す記号 (VTX#1は、一次(PR)核反応(IN)、また、VTX#2は、崩壊(DC)である事を示す)

Track module

(16) ID: 飛跡の種類を示す番号 (17) SV#: 何番目の反応点からでている飛跡かを示す  
 (18) EV#: 何番目の反応点の親粒子であることを示す (19) SP#: 対応するものがある場合、カウンタで再構成された飛跡番号  
 (20) DX/DZ(21) DY/DZ: 反応点付近で測定した飛跡の角度とその誤差  
 (22) X:EXIT(23) Y:EXIT(24) Z:EXIT: 乾板の出口付近で測定した飛跡の位置 (m m)  
 (25) DX/DZ:E(26) DY/DZ:E: 乾板の出口付近で測定した飛跡の角度 (26) FOLL.L: 飛跡を追跡した距離 (m m)  
 (27) TYPE: 飛跡の種類

表 5. 6 乾板測定データの一例

RUN 1715 EVENT 183 TYPE (VEE+VEE)

TYPE (VEE+VEE)

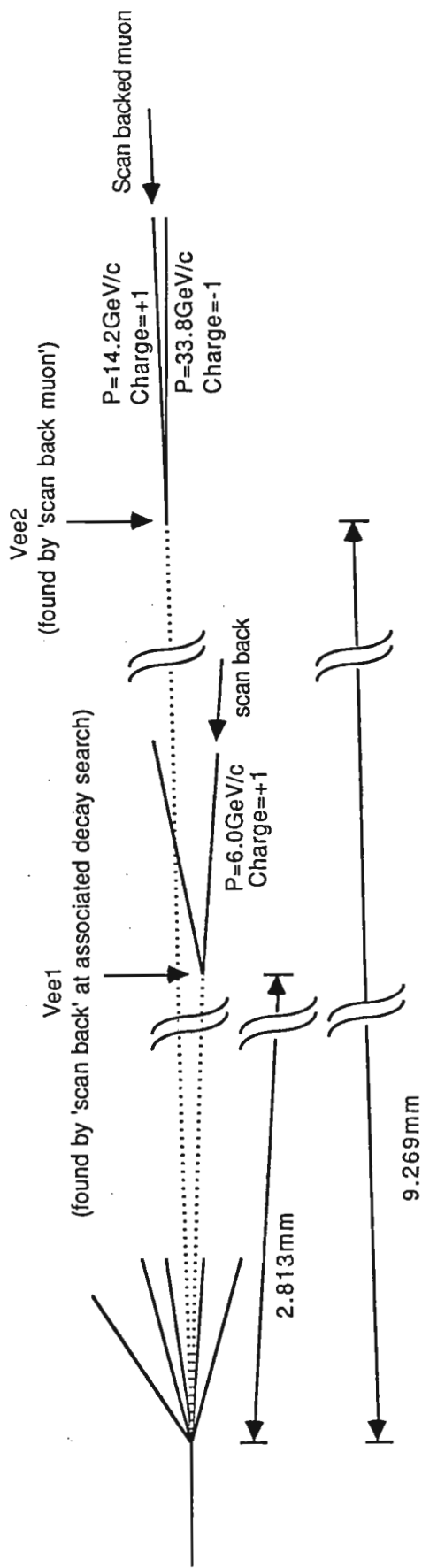
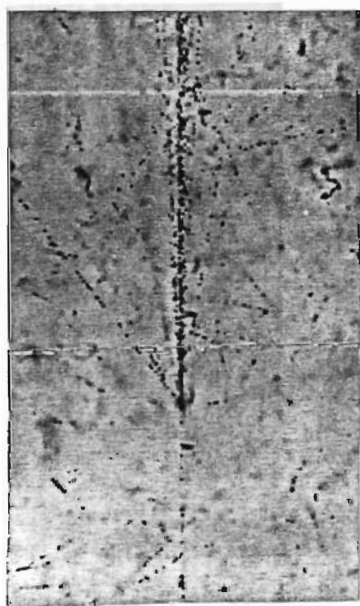
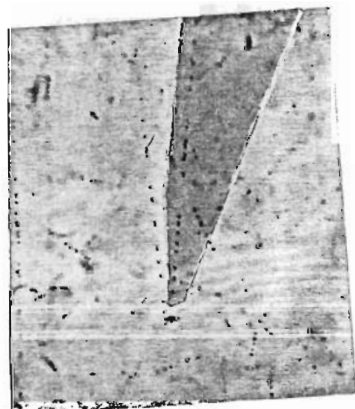
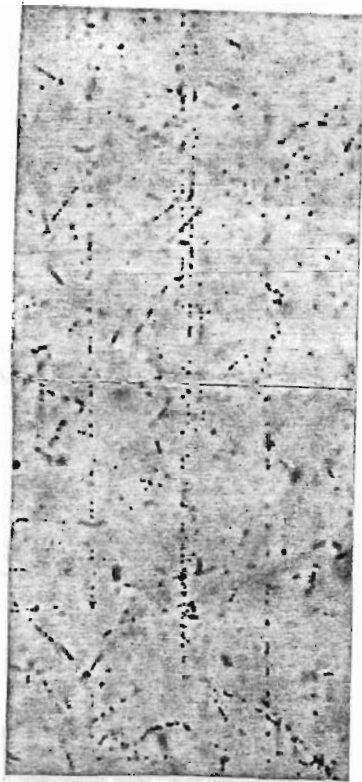


図5・11 a) チャーム粒子を対で含む反応の例



RUN 1715 EVENT 156 TYPE (VEE+VEE)

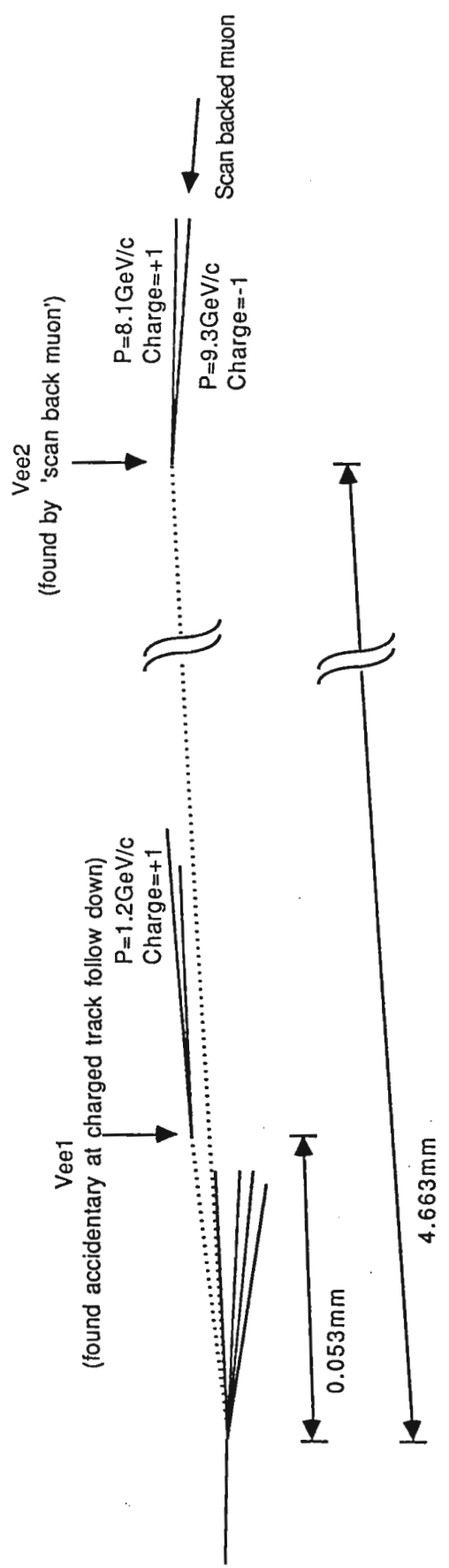
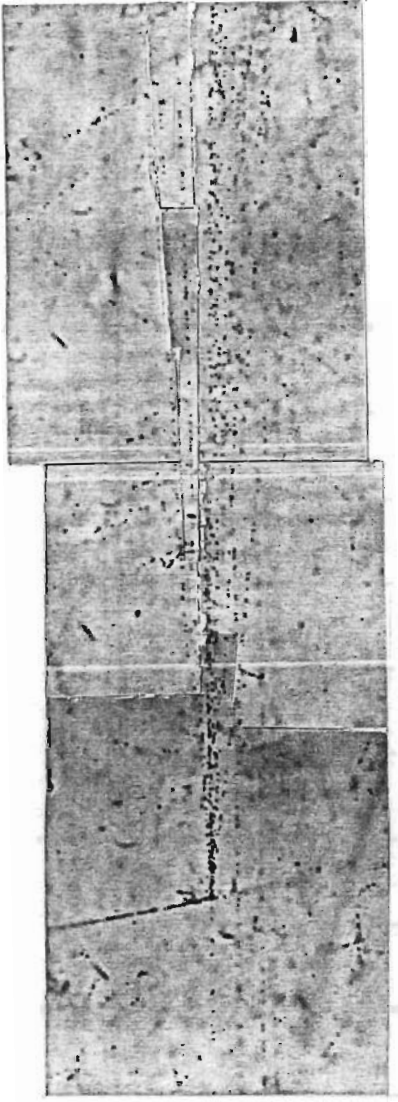


図5・11 b) チャーム粒子を対で含む反応の例

表 5. 7 トポロジー別崩壊例のまとめ

Kink	26 (内ミュー粒子を伴うもの 8)
Trident	19 (内ミュー粒子を伴うもの15)
5-prongs	2 (内ミュー粒子を伴うもの 1)
Vee	18 (内ミュー粒子を伴うもの11)
4-prongs	2 (内ミュー粒子を伴うもの 0)

表 5. 8 E653実験全体での崩壊候補探索結果

標的 タイプ	協同研究機関名	single		pair	
		$\mu$ ナシ	$\mu$ 付	$\mu$ ナシ	$\mu$ 付
V型	名古屋大	171	130	27	85
	宇都宮大	5	18	0	2
	岐阜大	18	11	0	2
	東邦大	16	14	0	2
	愛知教育大	7	1	0	1
	大阪市大 大阪府科教センター	38	17	3	5
H型	岡山大	2	25	1	3
	神戸大	12	26	3	11
	合計	269	242	34	111

### Integrated Decay Length Distribution

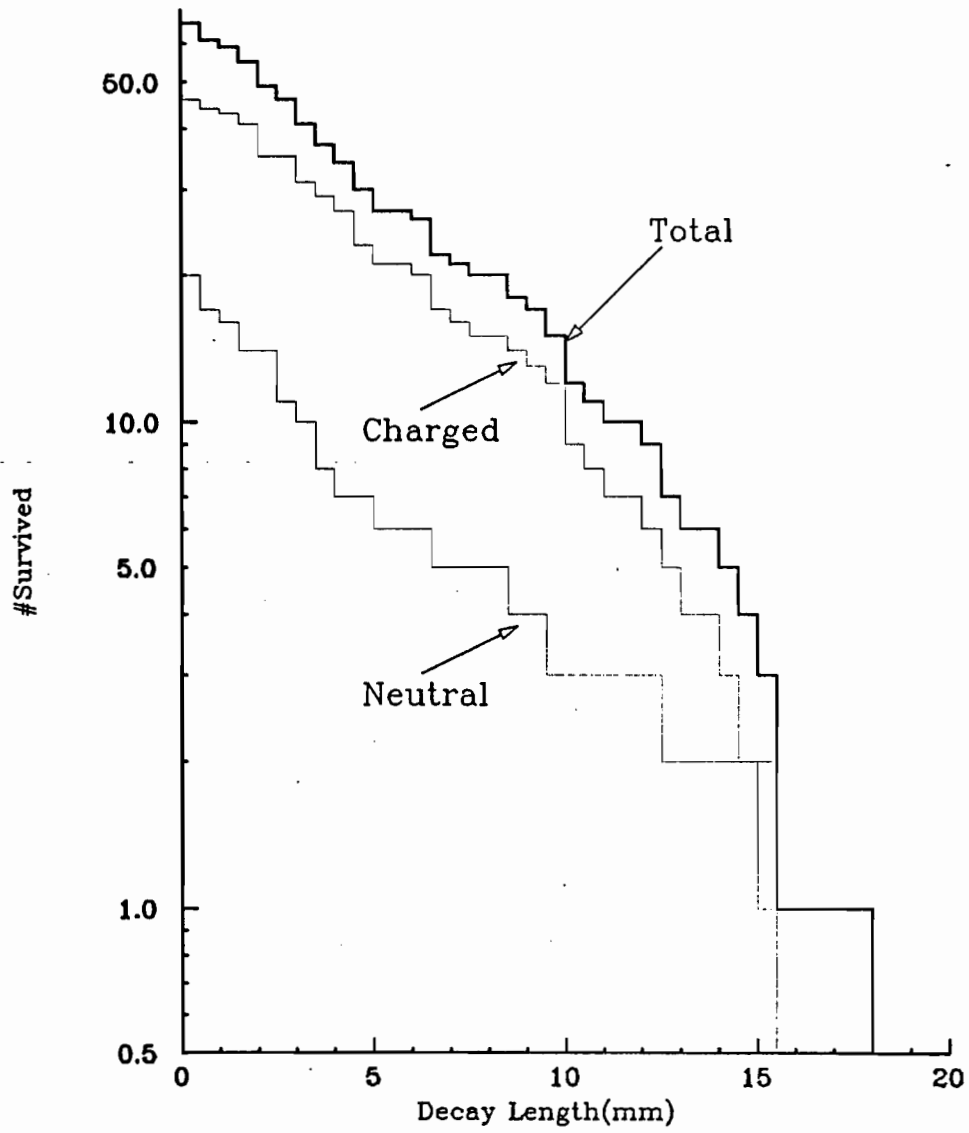


圖 5. 1 2 崩壞長分布

6 - 1 現状の概観

ハドロンの相互作用による重いクォークの生成を研究することは、ハドロンの内部構造や、クォークまたはグルーオン相互作用の機構を解明する上で重要である。この観点から多くの実験が行われ、それに基づいて種々の理論的考察がなされている<sup>(6.1)</sup>。

ハドロン相互作用によるチャーム粒子の生成機構を記述する有力な理論的モデルの一つに fusion モデルがある。fusion モデルは図 6.1 に示すように、クォークまたはグルーオンの分布を与える部分、及び、それらのハードプロセスによりチャームクォーク対が生成されるサブプロセス部分、そして、生成されたチャームクォークが反クォークもしくは 2 つのクォークと結び付いてハドロンとなるハドロン化過程の部分からなっている。サブプロセスの最低次のオーダーのダイアグラムを図 6.2 に示す。このプロセスによってチャーム粒子が生成されるなら、その断面積は標的核の質量数  $A$  に比例する。また、ファイマン  $X$  ( $X_F$ ) 分布は、 $X_F = 0$  にピークを持ち (central production)、チャーム粒子対のラピディティー差 ( $\Delta Y$ ) は、0 にピークを持つという特徴がある。

チャーム粒子の生成機構を記述するモデルとしてこれ以外にも flavour excitation モデル<sup>(6.2)</sup> や intrinsic charm モデル<sup>(6.3)</sup> 等が提唱されている。Flavour excitation というのは、short scale で存在するチャームクォーク対をハードプロセスにより励起するというプロセスで、 $X_F \sim 1$  の領域のチャーム粒子生成に寄与する (forward production) という特徴がある。このモデルのダイアグラムを図 6.3 に示す。また、intrinsic charm モデルは、long time scale でハドロンの中に存在するチャームクォーク対が、ハドロンの相互作用によってチャーム粒子になると考える。従って、チャーム粒子の forward production が主なものになり、断面積の標的核依存性は  $A^{2/3}$  に比例すると推定される。図 6.4 にこのモデルにおける  $\Lambda_c$  生成のプロセスを示す。

実験的には、個々のチャーム粒子の振舞い、即ち  $X_F$  分布や  $P_T^2$  分

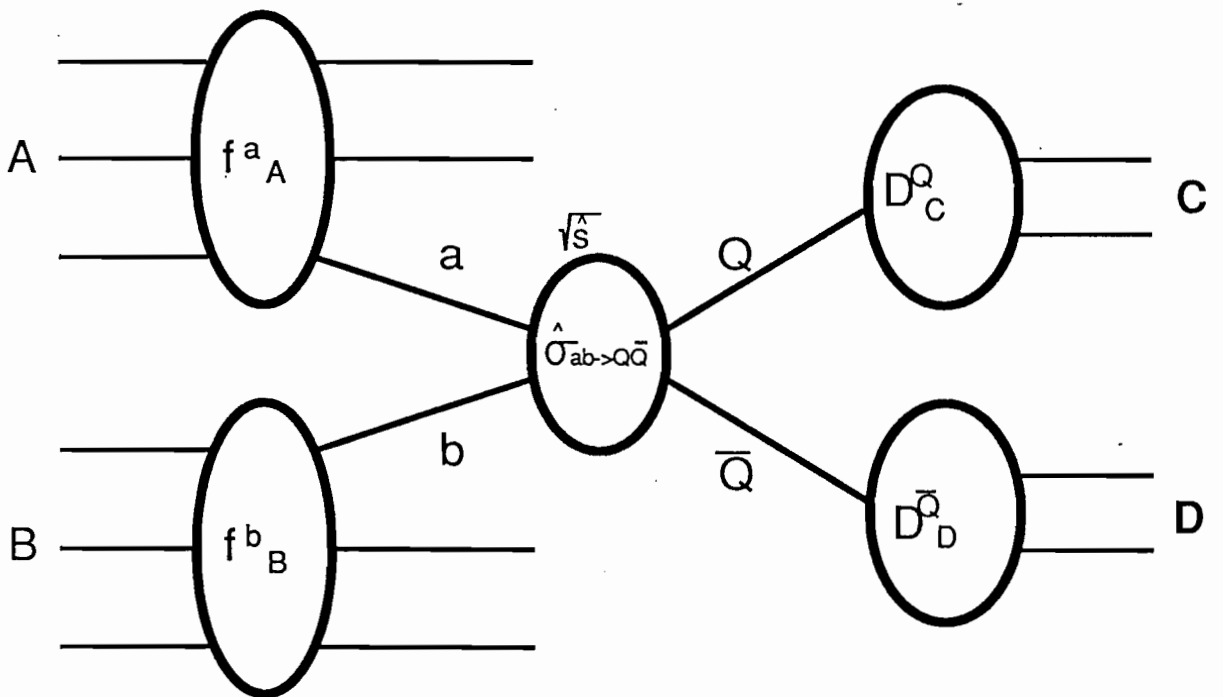


図6. 1 ハドロンの相互作用 ( $A+B \rightarrow C+D+X$ ) による重いクォーク生成

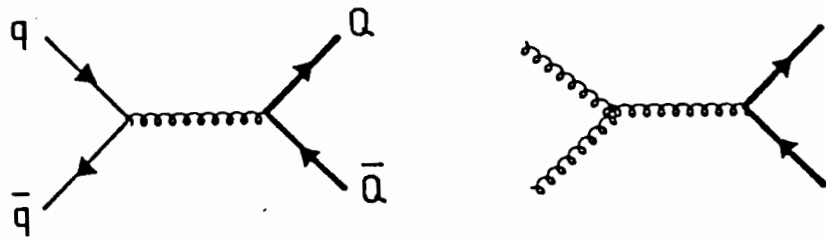


図6. 2 最低次 ( $\alpha_s^2$ ) のオーダーでのfusionモデルのダイアグラム

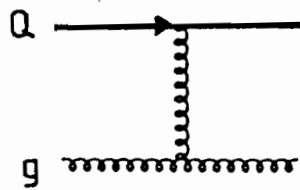
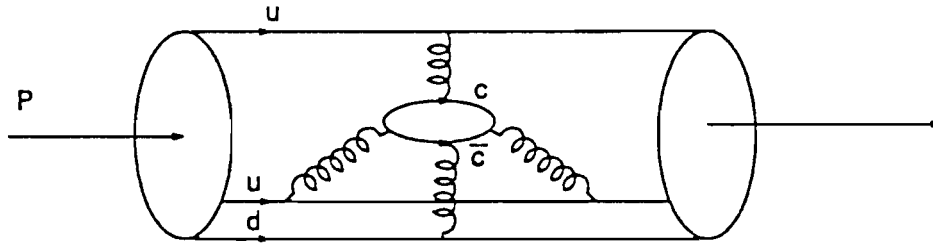
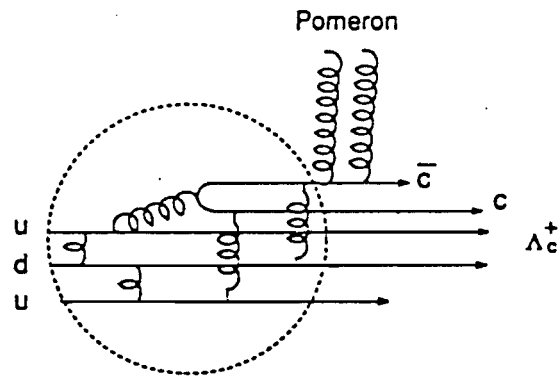


図6. 3 Flavour excitationモデルのダイアグラム



(a)



(b)

図 6. 4 (a) 陽子中のintrinsic charm  
 (b) intrinsic charmモデルにおける $\Lambda_c^+$ 生成のダイアグラム

布等と、チャーム粒子の生成断面積は比較的良く調べられている。例えば、CERN - ISRの陽子・陽子反応におけるチャーム粒子生成実験<sup>(6.4)</sup>の結果は、図6.5に示すように $\Lambda_c$ はforward production、そして、D中間子はcentral productionが支配的であることを示している。このことは、上述の理論的モデルで示唆されるプロセスのどれもがチャーム粒子の生成に寄与していることを示している。その他に、生成されたチャーム粒子が入射粒子の情報を担っていること(leading particle effect)を示す実験結果も報告されている<sup>(6.5)</sup>。生成断面積の標的核依存性をAに比例するとして各実験の結果とエネルギーの関係を見ると図6.6に示すように $\sqrt{s}$ が30 GeV以下の領域では、fusionモデルに基づく計算値と矛盾しない。一方、二粒子相関についても調べられてはいるが、統計量が少ない。それのみならず、異なったエネルギー領域での実験結果がない等不十分な点が多く、さらなる実験結果が待たれている状況である。

この章では、E653実験の乾板解析の結果得られた崩壊候補反応の内、チャーム粒子を対で含む反応に注目し、チャーム粒子生成における二粒子相関について調べた結果を報告する。

## 6 - 2 データサンプル

5章で述べた通り、E653実験の乾板解析は現在進行中であり、これまでにチャーム粒子候補を含む反応を合計656例収集している。これらから二粒子相関を調べるための反応例を以下のように選択した。

まず、崩壊点を直接観測することのできる標的部分に2つの崩壊候補を伴う反応例を選ぶ。但し、崩壊検出部で、更に崩壊候補が確認されている反応は、標的部分の崩壊候補が真の崩壊か否か疑問が残るので除外した。次に、より確実なサンプルを得るために、トリガーに用いたミュー粒子が崩壊点で確認できた反応例を選ぶ。更に、中性親粒子の崩壊に対しては、それが注目する一次反応からのものであることを保証するために、少なくとも一本の娘粒子の飛跡がカウンターで再構成されていることという条件を課した。また、ストレンジ粒子、主に、K中間子の崩壊によるバックグラウンドを極力



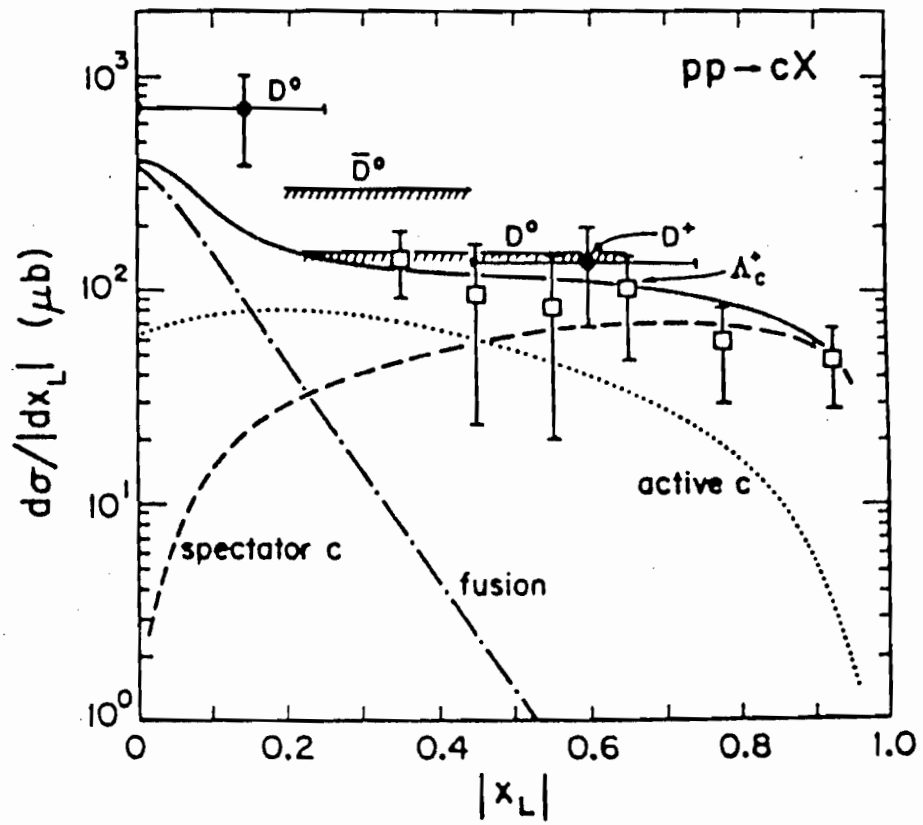
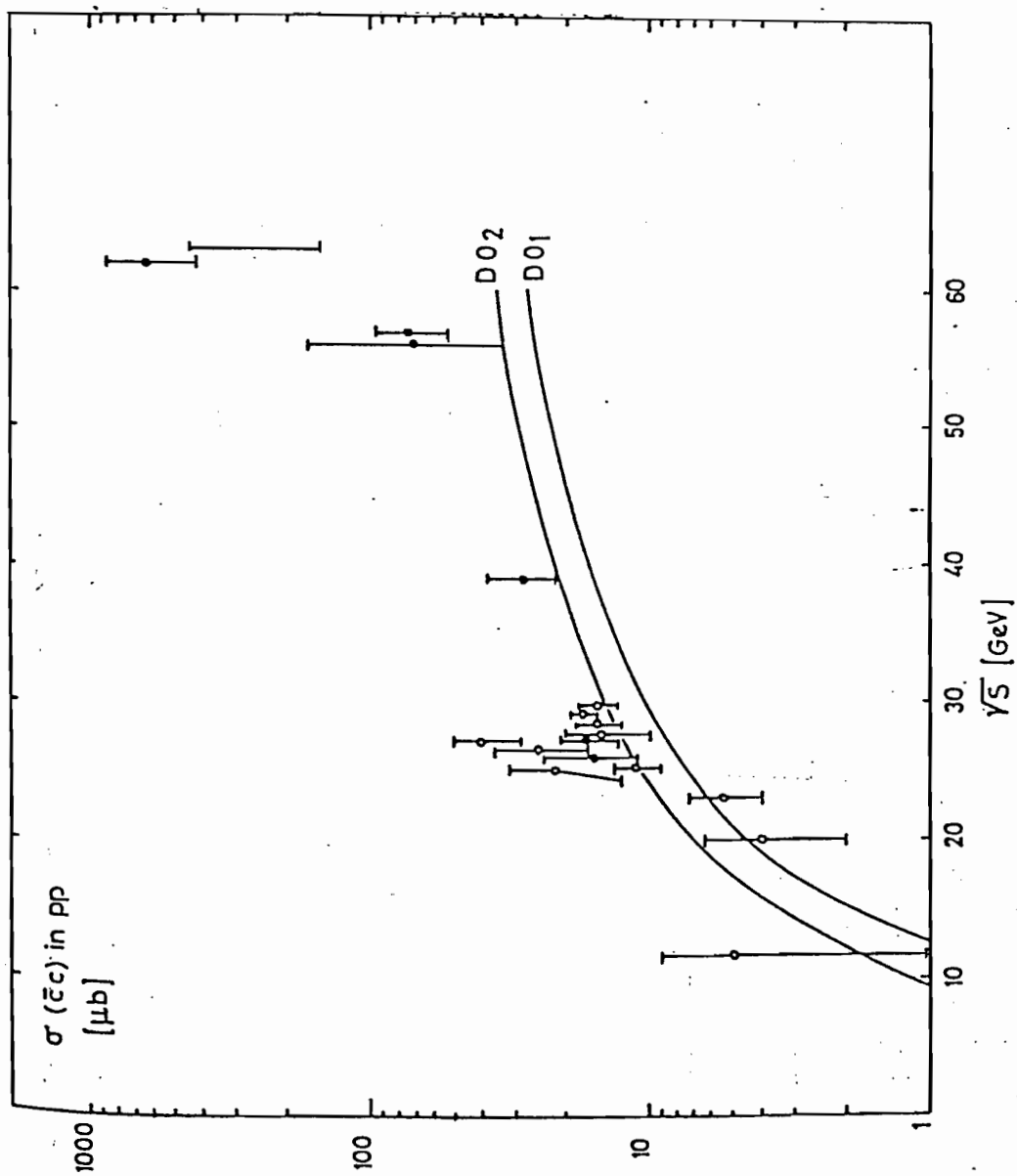


図6.5 CERN-ISR実験におけるチャーム粒子の $X_F$ 分布



Total charmed pair production cross-sections in pp or pn interactions. The curve is a QCD parton model prediction with  $m_c = 1.3$  GeV and the structure function proposed by Duke and Owens(1984) with  $\Lambda=200\text{MeV}$  and with  $Q^2=2m_c^2$  in the gluon fusion term.

図 6. 6 エネルギーとチャーム粒子生成断面積の関係  
 曲線は、fusionモデルに基づく計算値

除くため、親粒子に対する娘粒子の横運動量に制限を設けた。具体的には、 $kink$ については $0.3 GeV/c$ 以上、 $vee$ については $0.25 GeV/c$ 以上の横運動量を持つ娘粒子があることとした。これらの条件は、横運動量測定誤差と、 $K$ 中間子の崩壊で作られる娘粒子が取り得る最大横運動量が $kink$ では $0.24 GeV/c$ 、また、 $vee$ では $0.21 GeV/c$ であることを考慮して決めた。

これらの条件を満たした反応例の数は、63であった。表6.1に上述の各々の条件を満たす反応例の数を示す。また表6.2は、この63例を崩壊のトポロジーにより分類したものである。

こうして選り出した反応例中のバックグラウンドを以下に見積る。横運動量測定誤差を考慮すると、 $K$ 中間子の崩壊で生じた $kink$ と $vee$ の娘粒子の横運動量が、上述の制限より大きな値をとる可能性がある。そしてそれがバックグラウンドとなり得る。そこで、この可能性を計算したところ、データサンプルに含まれる28個の $kink$ と54個の $vee$ に対して1.2個であった。

二次核反応の内、標的核破片が認められず、親粒子と娘粒子の電荷のつじつまが合うものは、崩壊候補選別の条件を満足して崩壊との区別ができない。そのような反応は二次核反応の3%弱である。それが、63例のデータサンプル中に含まれるのは次のような場合である。

- (a) 二つの崩壊候補が共に上述のような二次核反応である場合。
- (b) 一方の崩壊候補が二次核反応で、他方が $K$ 中間子崩壊等の偽の崩壊候補である場合。
- (c) 一方の崩壊候補が二次核反応で、他方が真の崩壊である場合。

これらの可能性は次のように概算できる。

63例のデータサンプルを得るために乾板解析を行った約15000例の反応の内10%、即ち約1500例は、ミュー粒子の発生源が二次核反応である。その内で崩壊候補と誤認されるのは3%、即ち45例以下である。一方、二次粒子が標的乾板中で二次核反応を起こす割合は、平均多重度が20、平均の飛行距離が約1cm、そして平均の反応長が約45cmであることから、一次反応一例当たり0.4である。しかもそれが崩壊と誤認されるのは3%弱だから、0.012に過ぎない。以上より、(a)のタイプのバック

表 6. 1 二粒子相関を調べるための反応選別状況

条件	条件を満たす反応数
1) 全崩壊反応数	656
2) 2つのチャーム粒子候補を含むこと	145
3) ミュー粒子を伴うこと	102
4) 中性粒子の崩壊について：少なくとも一本の娘粒子がカウンターで再構成されていること veeについて： $P_T \geq 0.25 \text{ GeV}/c$ kinkについて： $P_T \geq 0.3 \text{ GeV}/c$	63
5) 両方の崩壊が2～4プロングであり $\delta P/P < 1$ であること	29

表 6. 2 データサンプルの崩壊トポロジー

	C 1	N 2	C 3	N 4	C 5
C 1 (kink)	2	13	6	5	0
N 2 (vee)		11	11	7	1
C 3 (trident)			4	1	2
N 4 (4 prongs)				0	0
C 5 (5 prongs)					0

クグラウンドは、0.54例以下と見積られる。(b)のタイプのバックグラウンドは、娘粒子の横運動量の制限を考慮すると無視し得ることがわかる。また、(c)のタイプのバックグラウンドは、63例のサンプル中高々1.2%、即ち0.76例に過ぎないことが計算できる。

以上を総合すれば、サンプル中のバックグラウンドは1例程度であり以下の検討に及ぼす影響は十分無視できる。

### 6-3 方位角の差 ( $\Delta\phi$ )

各チャーム粒子の放出角を入射粒子に垂直な平面に投影した成分、即ち方位角を $\phi_1$ ( $^\circ$ )、 $\phi_2$ ( $^\circ$ )としてそれらの差 $\Delta\phi$ を、

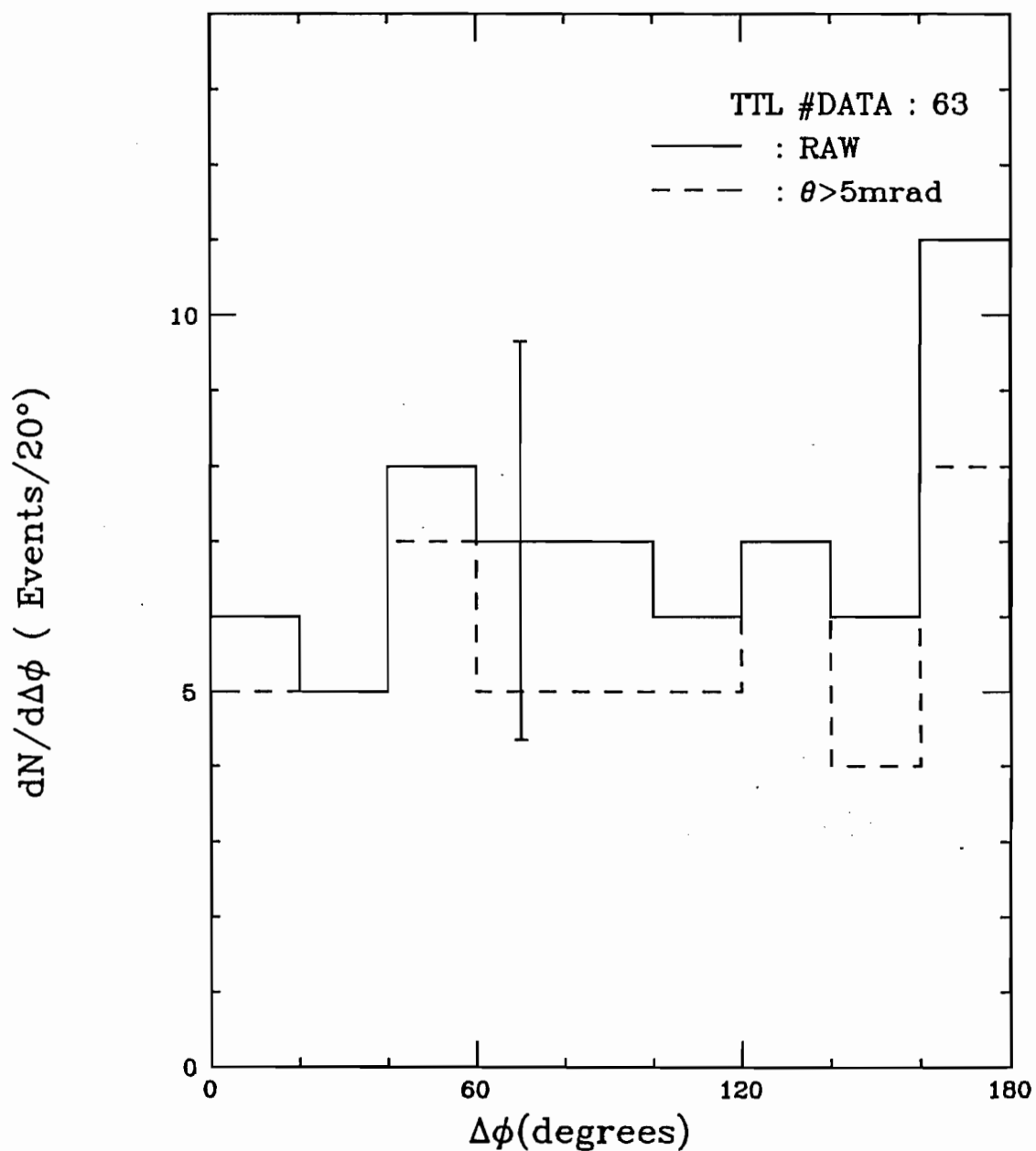
$$\begin{aligned}\Delta\phi(^\circ) &= |\phi_1 - \phi_2| \\ &\quad (0^\circ \leq |\phi_1 - \phi_2| \leq 180^\circ) \\ &= 360^\circ - |\phi_1 - \phi_2| \\ &\quad (180^\circ < |\phi_1 - \phi_2| < 360^\circ)\end{aligned}$$

と定義する。 $\Delta\phi$ は、角度の情報のみから得られるローレンツ不変量であり、カウンターのアクセプタンス、及び、探策効率による影響を殆ど受けない。クオーク・クオーク、もしくは、グルーオン・グルーオンのfusionプロセスでチャームクオーク対が生成されるならこの $\Delta\phi$ に関する頻度分布は、 $180^\circ$ 付近にピークをもつ分布をとると考えられる。

63例のサンプルについて $\Delta\phi$ 分布をプロットした結果が、図6.7の実線である。平均値は $(96 \pm 6)^\circ$ であった。また、 $\Delta\phi$ が $90^\circ$ 以上の反応例の数に対する $90^\circ$ 以下のものの数の比、即ちforward-backward ratioは、 $0.80 \pm 0.22$ であった。 $\Delta\phi$ は、測定誤差によって大きく変動する可能性がある。そこで、測定誤差による $\phi$ の値の変動が大きいと考えられる $\theta$ の小さい部分( $\theta < 5$  mrad)を除いた結果を図6.7に破線で示した。また、図6.8の実線で示したデータは、個々のデータをその値を中心に測定誤差を考慮してガウス型で分布させた結果得られたものである。何れの場合もほぼ同じ傾向を示している。

この物理量に関しては、現在までに二つの実験グループが3つの実験結果を報告している<sup>(6.6)</sup>。一つは、NA27実験グループで、

# $\Delta\phi$ - dist.



$$\langle \Delta\phi \rangle = (96 \pm 6)^\circ$$

$$\frac{\#(\Delta\phi < 90^\circ)}{\#(\Delta\phi > 90^\circ)} = 0.80 \pm 0.22$$

図 6. 7 方位角の差 ( $\Delta\phi$ ) 分布  
 実線は生データ、破線は  $\theta > 5\text{ mrad}$  のチャーム粒子のみを用いたもの

# $\Delta\phi$ - dist.

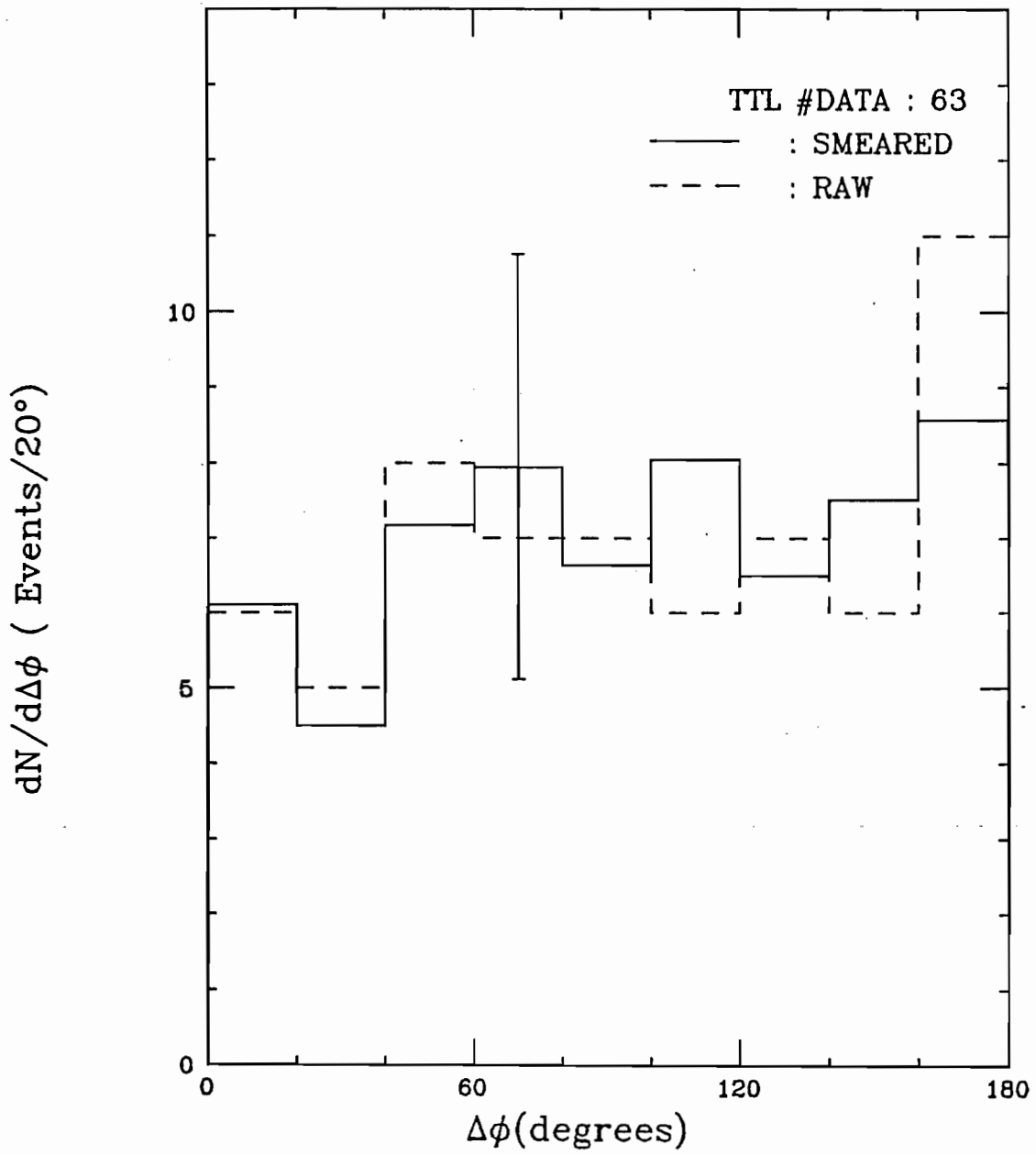


図 6. 8

方位角の差 ( $\Delta\phi$ ) 分布

破線は生データ、実線は各データの測定誤差を考慮してガウス型で分布させた結果得られたもの

360 GeV/c  $\pi^-$ ・陽子反応、及び、400 GeV/c 陽子・陽子反応で得られたデータである。またもう一つは、WA75実験グループで350 GeV/c  $\pi^-$ ・原子核乾板反応で得られたデータである。これらの結果は、図6.9に示すようにいずれも180°付近にピークを持つ分布を示しており、fusionモデルによる計算結果と矛盾しない。表6.3、及び、図6.10は上記3つの実験報告と我々の結果を比較したものである。我々の結果には、過去の実験結果のように180°付近の顕著なピークは見られない。

#### 6-4 結果の検討

前節で示した通り、 $\Delta\phi$ 分布に関して我々の実験結果と過去の3つの報告の間に相違が認められた。この相違の原因として最も可能性が高いのは、入射粒子のエネルギーである。過去の3実験は、350~400 GeVの領域で行われたのに対し、E653実験は、800 GeVで行われた。このことから、エネルギーの上昇と共に図6.11に示すような高次のプロセス、例えばgluon splittingのプロセスがより強く関与する可能性が考えられる。あるいは、fusionプロセス以外のプロセスがチャーム粒子生成に大きく寄与する可能性があるものと推論し得る。つまり、 $\Delta\phi$ の大きい部分に寄与する生成機構とは別に、 $\Delta\phi$ の小さい部分に寄与する何等かの機構がエネルギーと共に重要になることが予想されるのである。このような観点から、 $\Delta\phi$ 以外の測定量にも注目して更に詳しい検討を試みる。

##### 1) 擬ラピディティーの差 ( $\Delta\eta$ )

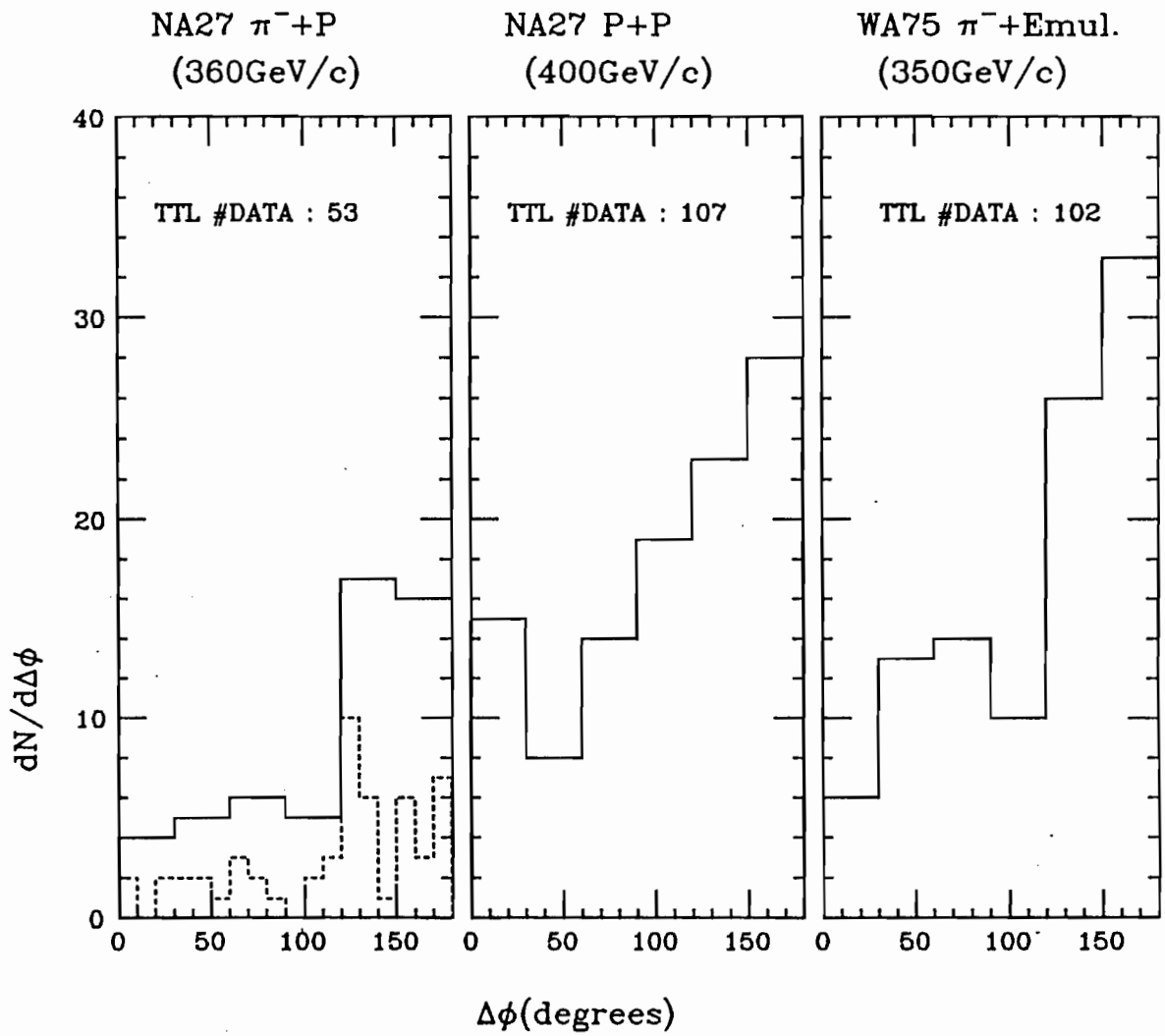
擬ラピディティー $\eta$ は、入射粒子に対する粒子の放出角を $\theta$  (rad) とすると、

$$\eta = -\log \{ \tan(\theta/2) \}$$

で与えられる。粒子の運動量が十分高くて質量が無視できる場合には、この量は、ラピディティー ( $Y$ ) の良い近似となる。それ故、粒子の発角度のみで計算できる便利さから、実験ではしばしば用いられる量である。ここでは、擬ラピディティーの差 $\Delta\eta$ を、チャーム粒子1と2の擬ラピディティーを $\eta_1$ 、及び、 $\eta_2$ として



# Δφ For Pairs -Other Experiments-



$\langle \Delta\phi \rangle$        $(115 \pm 8)^\circ$                        $(105 \pm 5)^\circ$                        $(115 \pm 12)^\circ$

$\frac{\#(\Delta\phi < 90^\circ)}{\#(\Delta\phi > 90^\circ)}$        $0.39 \pm 0.12$                        $0.63 \pm 0.10$                        $0.48 \pm 0.10$

$\langle \Delta\phi \rangle = (109 \pm 3)^\circ$

$\frac{\#(\Delta\phi < 90^\circ)}{\#(\Delta\phi > 90^\circ)} = 0.48 \pm 0.06$

図 6. 9

NA27実験とWA75実験のΔφに関する結果

表 6. 3 NA 2 7 実験及びWA 7 5 実験と E 6 5 3 実験の  $\Delta \phi$  分布の比較

実験名	NA 2 7	NA 2 7	WA 7 5	E 6 5 3
入射粒子	360GeV/c $\pi^-$	400GeV/cP	350GeV/c $\pi^-$	800GeV/cP
標的	P	P	Emulsion	Emulsion
Data 数	5 3	1 0 7	1 0 2	6 3
$\langle \Delta \phi \rangle^\circ$	$115 \pm 8$	$105 \pm 5$	$115 \pm 12$	$96 \pm 6$
$\frac{\#(\Delta \phi < 90^\circ)}{\#(\Delta \phi > 90^\circ)}$	$0.39 \pm 0.12$	$0.63 \pm 0.10$	$0.48 \pm 0.10$	$0.80 \pm 0.22$

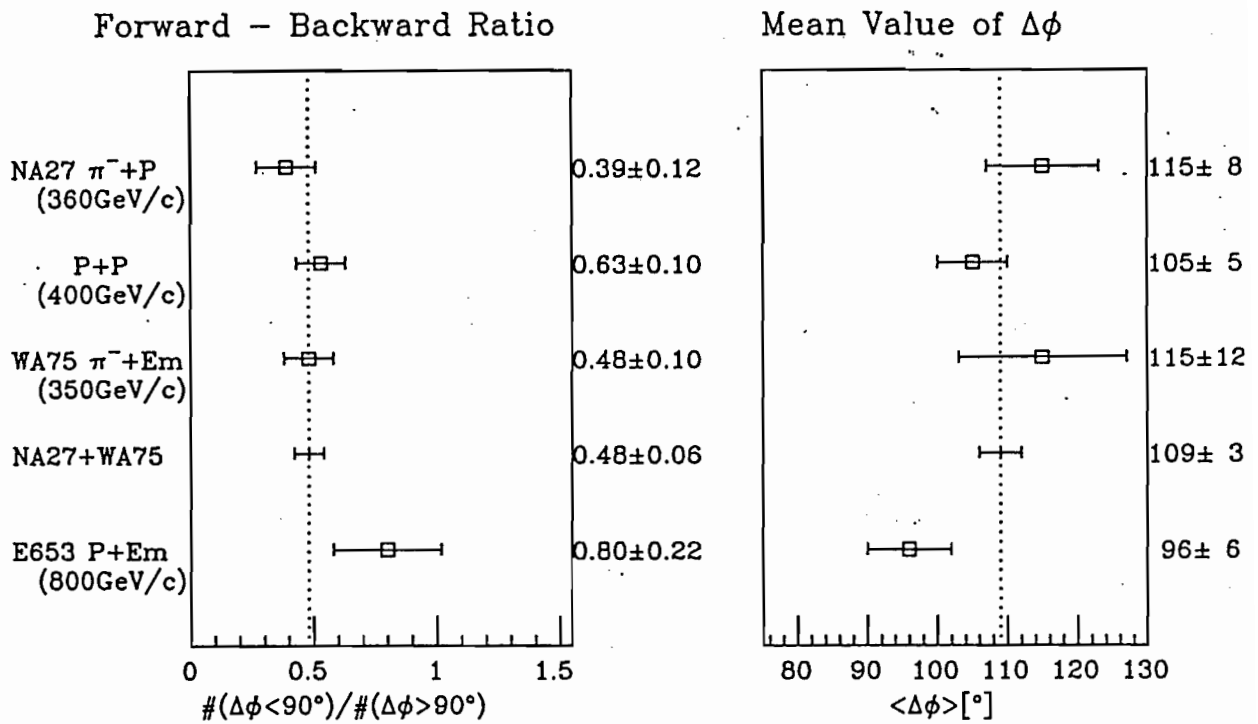
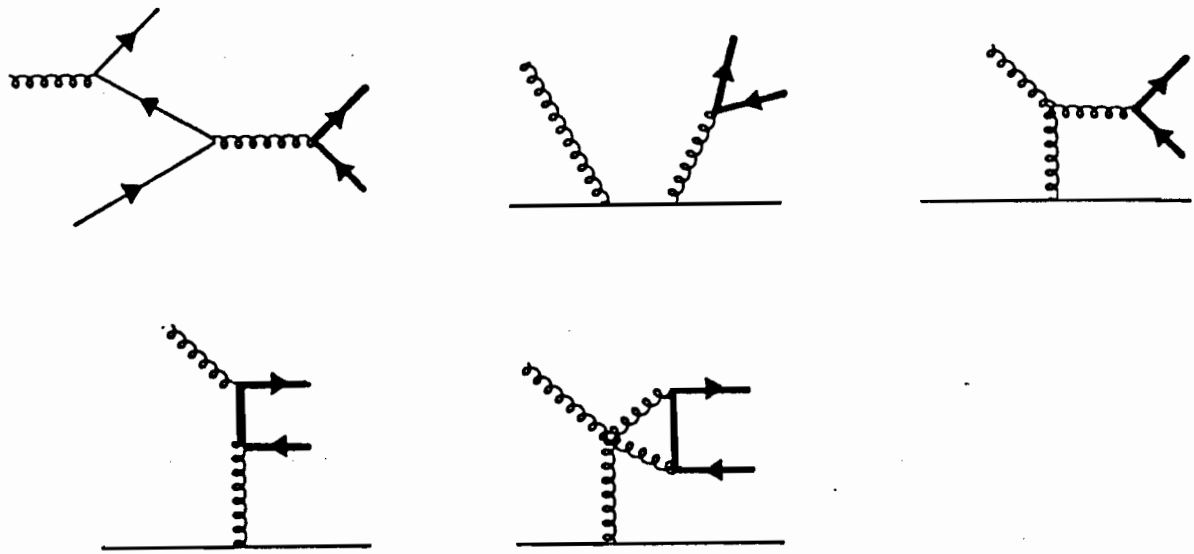
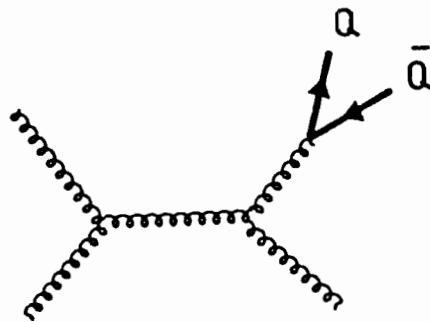


図 6. 1 0 NA 2 7 実験及びWA 7 5 実験と E 6 5 3 実験の比較



Complete set of Feynman diagrams at order  $\alpha_s^3$  for the process  $q + g + q + 0 + \bar{n}$ .



Production of heavy flavour by gluon splitting.

図6. 11  $\alpha_s^3$ でのダイアグラム

$$\Delta\eta = |\eta_1 - \eta_2|$$

で定義する。

$\Delta\phi$  分布と同様に 63 個の反応例について  $\Delta\eta$  分布をプロットしたのが図 6. 12 (a) である。擬ラピディティは、探索方法、カウンターのアクセプタンス等のバイアスがかかっていると考えなければならぬ。そこで、バイアスのない  $\Delta\phi$  との相関をとり検討した。図 6. 12 (b) は、 $\Delta\phi$  が  $90^\circ$  以上の反応とそれ以下のものとで分け、 $\Delta\eta$  分布をプロットしたものである。 $\Delta\phi > 90^\circ$  の反応の方が、 $\Delta\eta$  の大きい方向にかたよっている。これは、 $\Delta\phi$  の大きいものはチャーム粒子と反チャーム粒子が反対方向に放出され、 $\Delta\phi$  の小さいものは同方向に放出される傾向が強いことを意味する。そして、傾向の異なる複数のチャーム粒子生成機構が混在することを示唆するものと理解できる。このことは、 $\Delta\eta$  の相違によって反応例を分類した時の  $\Delta\phi$  分布の差を調べることにより確認できる。図 6. 13 は、 $\Delta\eta$  が 1 以上の反応例と、それ以下で分け  $\Delta\phi$  分布をとったものである。 $\Delta\eta$  の大きい反応例では、 $\Delta\phi$  が  $180^\circ$  付近の値をとるものが多いことがわかる。

## 2) チャーム粒子対のファイマン $X$ ( $X_F(CC\bar{c})$ )

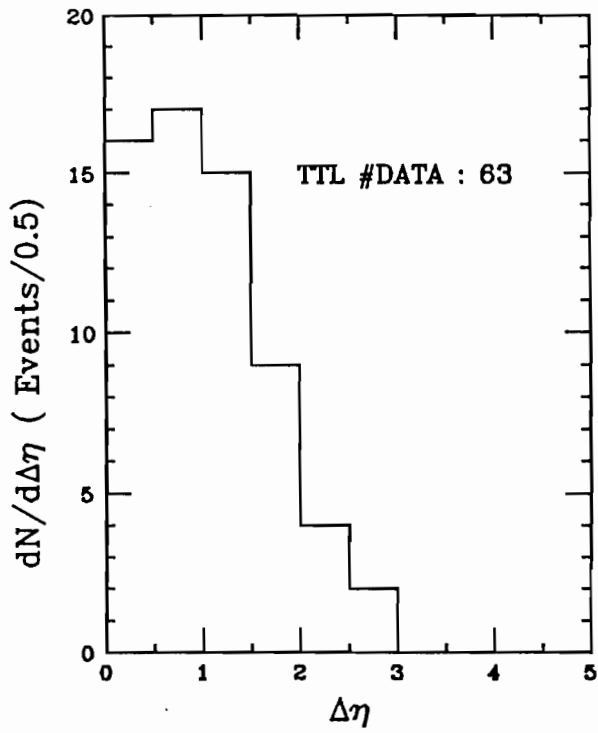
ファイマン  $X$  ( $X_F$ ) は、注目する粒子の重心系における縦運動量を  $P_{L^*}$ 、計算上実現可能な最大の縦運動量を  $(P_{L^*})_{\max}$  として

$$X_F = P_{L^*} / (P_{L^*})_{\max}$$

で定義される。これは、縦運動量、ラピディティと同様に粒子の縦方向の振舞いを記述するのに便利な量である。もし粒子の発生機構が同じであれば、 $X_F$  分布は、入射粒子のエネルギーに関係なく同じ形状になる。その点で理論的モデルの帰結や、他のエネルギー領域で行われた実験の結果と比較する際に都合がよい。そこで、チャーム粒子の  $X_F$  分布について調べてみた。チャーム粒子対のファイマン  $X$  は、チャーム粒子対の不変質量を用いて求めた  $(P_{L^*})_{\max}$  と二粒子の運動量のベクトル和から求めた  $P_{L^*}$  の比で与えられる。

$X_F$  を計算するためには、チャーム粒子の運動量を何らかの方法で求めておく必要がある。運動学的フィット (付録 3 参照) を行えば粒子の運動量を求めることができるが、その場合、荷電娘粒子の全てがカウンターデータで再構成されていることが要求される。従って、現段階では、運動量を求めることのできる数は限られる。だが、

(a) Pseudo-Rapidity Gap



(b) Pseudo-Rapidity Gap

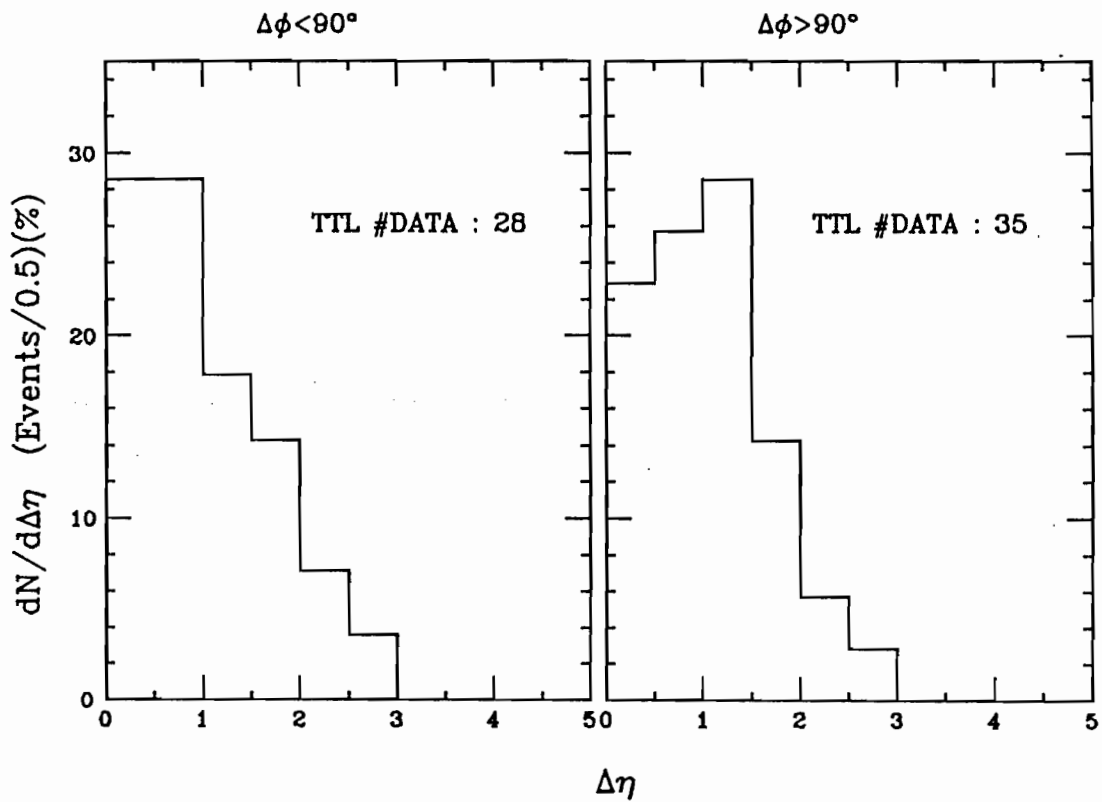


図 6. 1 2 (a) 擬ラピディティの差 ( $\Delta\eta$ ) の分布  
(b)  $\Delta\phi$  の値で分類した  $\Delta\eta$  分布

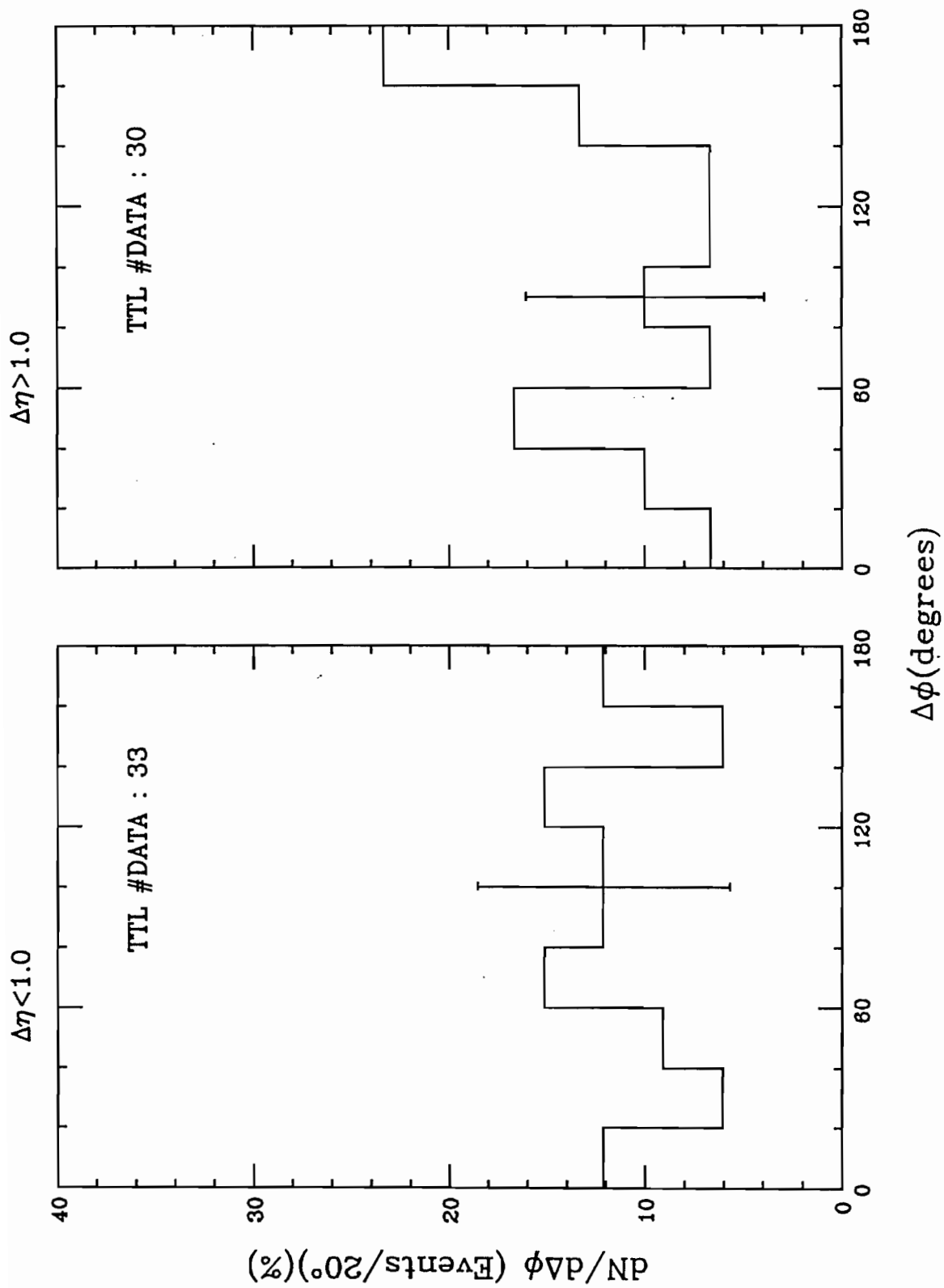


図 6. 1 3  $\Delta\eta$  の値で分類した場合の  $\Delta\phi$  分布

運動量の推定は、娘粒子と親粒子の角度の情報のみからも可能である。そこで今回は、運動量を求めるのに、この方法を採用した。この方法の詳細は付録4に示す。

$X_F$ を計算したサンプルは、上述の63例の内、運動量推定誤差の比較的小さい2~4プロングの崩壊のみに限った。更に、求めた運動量に対してその誤差が大きいもの、即ち $\Delta P / P > 1$ のものを除外した。その結果、解析対象となったのは29例である。これらについてチャーム粒子対のファイマン $X$  ( $X_F(\text{CCbar})$ )分布を $\Delta \eta$ の場合と同様に $\Delta \phi$ の違いによって分類したのが、図6.14である。 $\Delta \phi > 90^\circ$ の反応の方が $X_F(\text{CCbar})$ 分布は前後に広がった形状になっている。また、図6.15は、 $X_F(\text{CCbar})$ の違いによる $\Delta \phi$ 分布を比較したものである。ここでは、 $|X_F(\text{CCbar})|$ が、0.1以上の反応例とそれ以下の二つに分けて $\Delta \phi$ 分布をとった。

$|X_F(\text{CCbar})|$ の大きな反応では、 $\Delta \phi$ 分布は $180^\circ$ 付近にピークを持つ形状を呈している。

チャーム粒子と反チャーム粒子が独立に作られるのではなくてチャームクォークと反チャームクォークからなる一つの系からハドロ化するものであれば、運動学的に次のようなことがいえる。チャーム、反チャームクォーク対の系が、重心に対して大きな速度を持っているとき、その進行方向が衝突軸と平行に近い、即ち $0^\circ$ もしくは $180^\circ$ に近いなら、 $\Delta \phi$ は $180^\circ$ に近い値をとることができる。それに対してクォーク対の系が横方向に走っているなら $\Delta \phi$ は大きな値を取ることができない。換言すれば、 $|X_F(\text{CCbar})|$ の大きな場合は、 $\Delta \phi$ が $180^\circ$ に近い値をとり、 $|X_F(\text{CCbar})|$ が小さい場合には $\Delta \phi$ が小さな値となる。それに対して、クォーク対の系が重心に対してほぼ静止した状態で作られるなら、即ち、 $|X_F(\text{CCbar})|$ 、 $P_T(\text{CCbar})$ が共に0に近いなら、 $\Delta \phi$ は $180^\circ$ に近い値を持つことになる。

このような運動学的考察を基にして次の推論が可能である。

(a) 350~400 GeV領域では、チャームクォークと反チャームクォークの系が、重心に対してほぼ静止した状態でできるプロセスが主要部分を占める。

(b) 800 GeV領域では、チャームクォークと反チャームクォークの系が、重心に対して大きな速度を持って作られるプロセスが大きく寄与する。例えば、gluon splittingによるチ

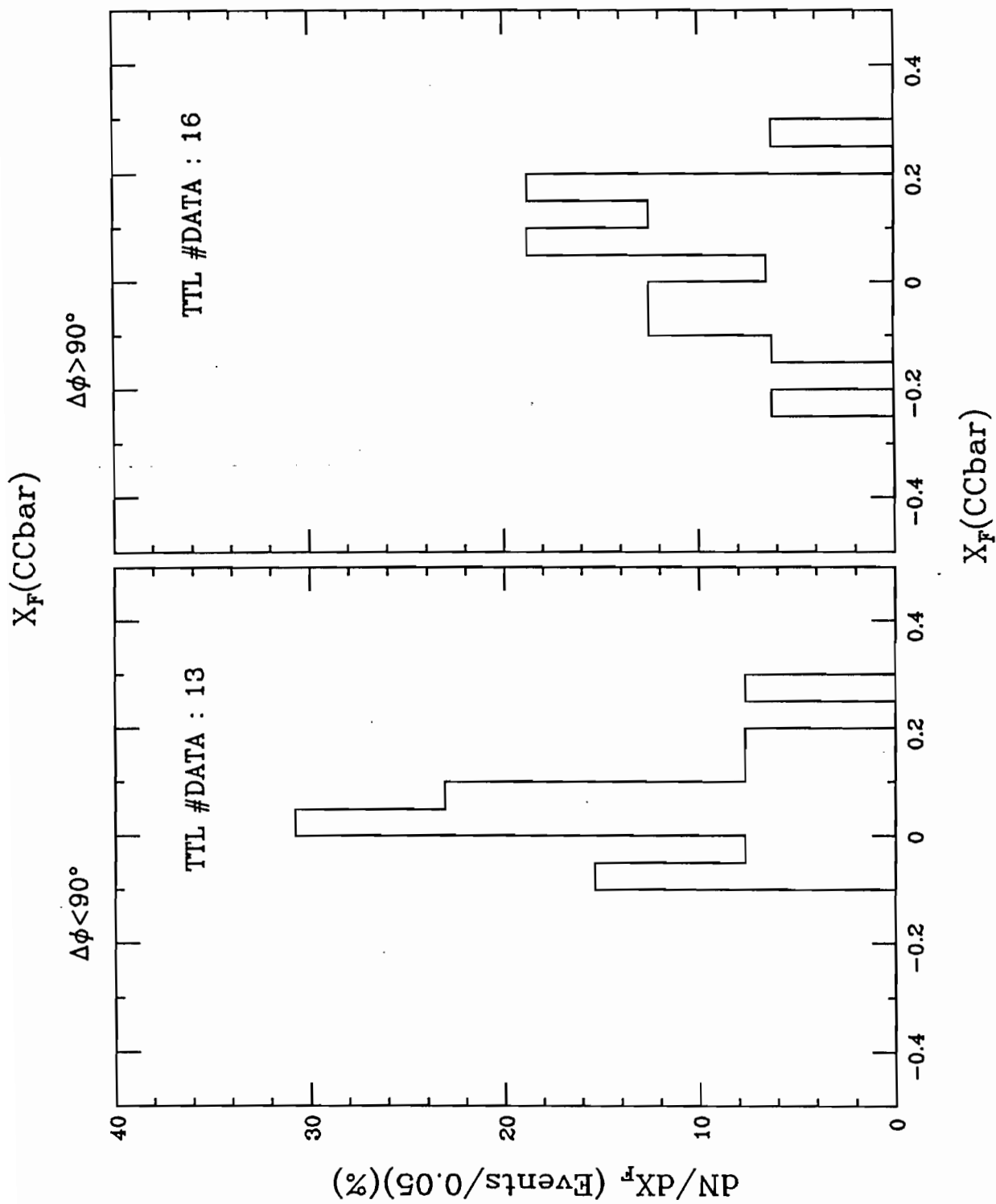


図 6. 1 4 チャーム粒子対のファイマン X ( $X_F(\text{CCbar})$ ) 分布  
 $\Delta\phi$  によって 2 つに分けた



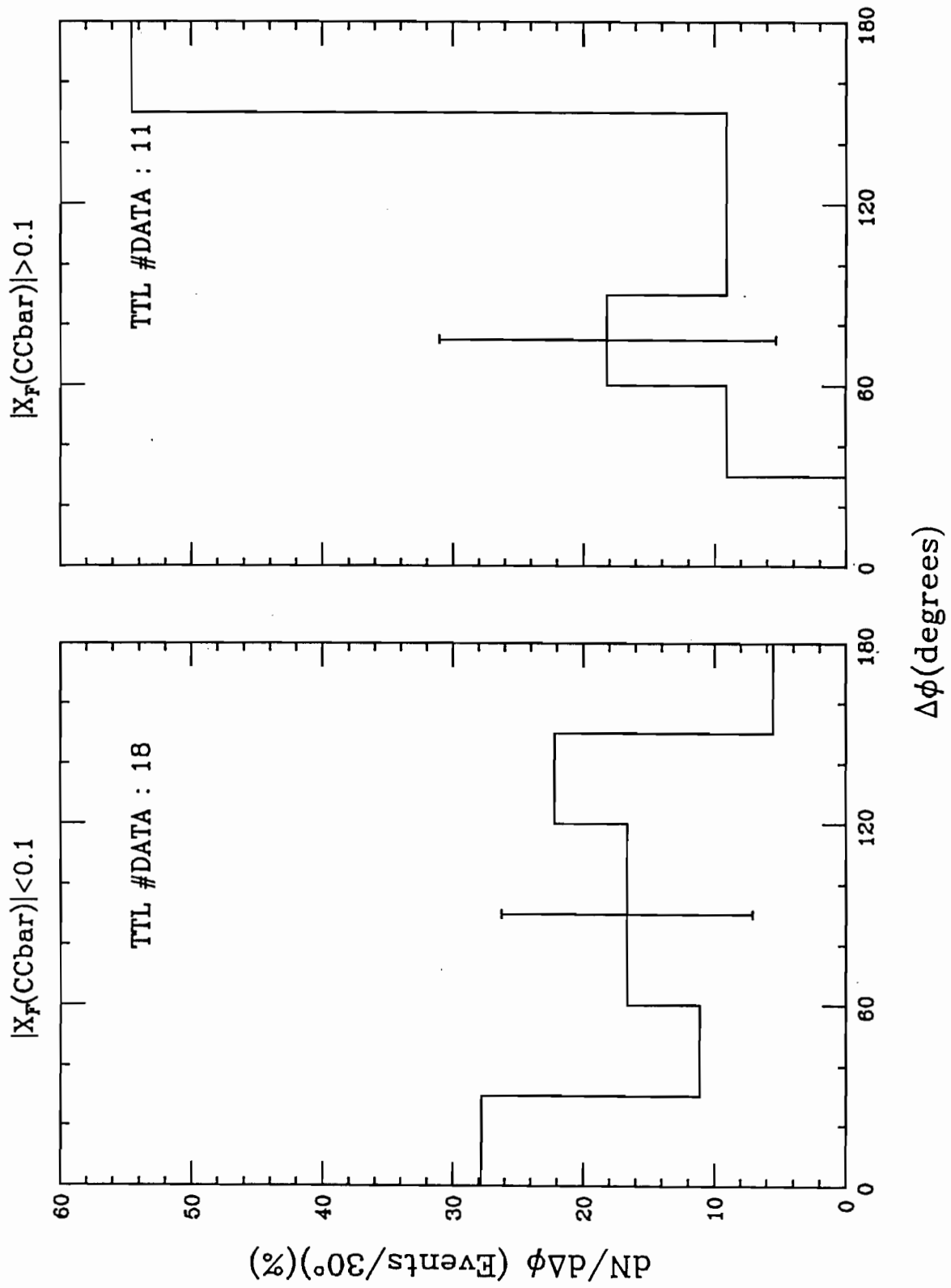


図6.15  $X_F(CCbar)$ の値で分類した $\Delta\phi$ 分布

charm粒子生成は、このプロセスの有力な候補である。こう考えれば過去のデータと我々のデータを矛盾なく説明することができる。

以上の検討結果をまとめると、次の通りである。

charm粒子の方位角の差、 $\Delta\phi$ に注目すると350~400 GeVのエネルギー領域で認められた180°方向へのかたよりが、800 GeVでは殆ど認められない。このことは、低エネルギーでのcharm粒子生成機構とは別の生成機構が高エネルギーで強く関与していることを示唆する。 $\Delta\phi$ の違いで分類して擬ラピディティの差( $\Delta\eta$ )を調べると、 $\Delta\phi$ が大きな場合は $\Delta\eta$ が大きく、 $\Delta\phi$ が小さな場合は $\Delta\eta$ も小さいという相関が認められる。これは、800 GeV領域において、傾向の異なる複数のcharm粒子生成機構が混在することを意味すると解釈できる。

charm粒子と反charm粒子が独立に作られるのではなく、charmクォークと反charmクォークよりなる一つの系からハドロ化するという考え方に基づいて、charm粒子対のファイマンXに関する相関を調べた。 $\Delta\eta$ の場合と同様に $\Delta\phi$ の違いによって分類して $X_F(CC\bar{c})$ 分布を比較した結果からも、複数のcharm粒子生成機構が、混在していることを支持する情報が得られた。そして簡単な運動学的考察から、charm、反charmクォーク対が重心系に対して大きな速度を持つような過程が高エネルギー領域で大きく寄与するものと考えれば、定性的には全ての実験結果を矛盾なく理解できることがわかる。

今回ここで報告したような $\Delta\phi$ と他の物理量とを結び付けて行った実験データの解析は、他に見られない。このような解析は、charm粒子の生成機構を同定する上で有効なことは明らかなので、追試が待たれるところである。なおE653実験では、今回の解析に用いたデータサンプルの約3~10倍の統計材料が得られるものと期待できる。しかも、カウンターデータと乾板からのデータの対応も明確となりデータの信頼度も高いものとなる。更に、 $\eta$ や $X_F$ 以外の物理量、例えば、横運動量やラピディティ、あるいはcharm粒子対の有効質量等を求めることが可能となり、他の実験結果、及び、理論的モデルに基づく計算とのあいまいさを排除した比較が可能となる。そしてそれによって、charm粒子生成機構に関する深い考察ができる。

## 第 7 章 まとめ

4 章で述べたように、我々神戸大学グループは、E 6 5 3 実験の乾板解析のために独自に解析装置を開発した。

E 6 5 3 実験のように高エネルギーのハドロンを高密度で照射した乾板標的を従来の装置で解析するのは、時間と労力の面で無理があった。それは、本実験で解析対象とする反応は、一次反応点における平均の飛跡本数が約 20 本と多く、しかもその約半数が前方  $3^\circ$  の狭いコーン内に集中するという特徴があるからである。更に、 $(0.5 \sim 1.0) \times 10^5 / \text{cm}^2$  という高密度のビーム照射を行っているため、乾板下流では、 $100 \mu\text{m}$  四方に約 20 ~ 30 もの多くのバックグラウンドの飛跡があることも解析を困難にする原因の一つであった。このような特徴を持つ乾板標的を効率よく解析するために、図 4. 1、及び、図 4. 4 の写真に示す乾板解析装置 (C O C A P) を開発した。これは、従来の 3 軸のみのステージに加え、回転と一軸移動、即ち、 $R - \theta$  方向の移動部分を付加した顕微鏡と、その周辺機器として、測定用システムコンピュータ、CRT、及び、キーボードを備えたシステムである。これを更に、データの詳細な解析、統計処理等を行うためのホストミニコンピュータ ( $\mu V A X$ ) と接続している。この装置について性能を評価したところ、我々の目的を十分満足するものであった。現在、神戸大学ではこの装置を 4 台有しており、E 6 5 3 実験の乾板解析用として十分威力を発揮している。

また我々は、原子核乾板標的の下流部分にバックグラウンドを極力抑え、かつ、チャーム粒子、及び、ボトム粒子の崩壊を効率よく検出するための崩壊検出層を配した。この部分は、標的部分とは異なる垂直照射型の乾板を用いており、解析の概念は、標的部分とは全く異なったものになる。崩壊検出部を解析する上で要求される点は、高精度の角測定ができることと高速に処理できることの 2 点であった。そこで、高精度の角測定を実現するために、乾板中を通過する入射粒子の飛跡をパターンとしてとらえこれをリファレンスとして用いることにした。また、測定速度を向上させる目的で、ビデオシステムを用い二枚のシートを同時に一つの TV 画面上で比較測

定することを考えた。このような発想の基に図 4. 16 の写真に示す解析装置 (ASVIS) を開発した。この装置を用いることにより、高速に、しかも 1 mrad 以下の誤差内で飛跡の角測定が行えるようになった。この装置は 1 台しかないが、E 6 5 3 実験の乾板解析でその有効性が保証されたこともあり、現在これを更に増強した装置を製作している段階である。

現在、これら装置を用いて、5 章で述べた解析方法に沿って乾板解析を行っており、既に我々のグループだけでも 100 例を超えるチャーム粒子の崩壊候補反応を収集している。

6 章では、現在までに乾板の解析が終了した約 30% のデータに基づいてチャーム粒子の生成機構について調べた結果を報告した。特に、2 つのチャーム粒子を含む反応に注目し詳細に検討した。

計 63 個の反応についてチャーム粒子対の方位角の差 ( $\Delta\phi$ ) を調べた結果、ほぼフラットな分布が得られた (図 6. 7)。一方、入射粒子のエネルギーが 350 GeV ~ 400 GeV での実験結果はいずれも、180° 付近にピークを持つ分布となっている。我々のデータは、これらとは異なる形状を示している。この相違の原因として最も可能性があるのは、ビームエネルギーの違いである。このことから、エネルギーが高くなると異なるチャーム粒子の生成機構が関与するのではないかという示唆を与えた。これを更に詳しく検討するため、擬ラピディティの差 ( $\Delta\eta$ ) 分布、及び、チャーム粒子対のファイマン X ( $X_F(\bar{c})$ ) 分布を調べた。これらをバイアスの殆どかかかっていない  $\Delta\phi$  との相関を見ることにより検討した。その結果は、図 6. 12 ~ 6. 15 に示す通りである。これらのデータに基づく考察から、E 6 5 3 のエネルギー領域では、重心系に対して速い速度を持つチャーム、反チャームクォーク対が生成されるような何等かの機構が、チャーム粒子生成に大きく寄与することが指摘される。このように、二つの物理量を比較した実験結果は報告されておらず、追試が待たれるところである。

将来、E 6 5 3 実験では、今回報告した反応数の約 3 ~ 10 倍の統計量で更に詳しい情報が得られることが期待される。また、本論文では余り触れていないが、二次実験では 600 GeV/c の  $\pi$  中間子を照射しており、これを解析することにより、エネルギー、入射粒子の違いによる生成機構の比較検討をより詳細に行うことができる。

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり御指導下さった宮垣盛男先生、福嶋裕先生をはじめ諸先生方に感謝いたします。また、高橋美貴先輩、阿部務君、伊藤奈津子さん、井上元子さん、綾井直樹君らE653グループのメンバーをはじめ当研究室の皆さんには、さまざまな面で御協力頂きました。ここに感謝いたします。

また、神戸大学以外の協同実験者の方々にも、ご協力を頂き、ここに感謝いたします。

## 付録 1 原子核乾板標的の作製と現像処理

### A 1 - 1 原子核乾板の特性

原子核乾板は、乳剤に含まれる臭化銀 (AgBr) の量を多くして、特に荷電粒子に対する感度を非常に良くし、その飛跡を記録できるようにした感光材料である。乳剤の組成は、製造会社、及び、製品によって少しずつ異なるが、一般に、臭化銀が重量比で 80% を占め、残りはゼラチンなどである。例として、富士写真フィルム社 ET-7A、及び、ET-7B の組成を表 A 1. 1 に示す。

荷電粒子は、原子核乾板中を走る時、乳剤中のハロゲン化銀、主に AgBr の結晶に衝突し、それをイオン化する。この時できた電子は、結晶内の感光核に捕らえられる。こうして負に帯電した核は、周囲の銀イオンを引き寄せて原子の集団を作り、ある大きさになると潜像核になる。これを現像処理すると、それが銀粒子 (グレイン) として見えるようになる。こうして荷電粒子の通過した跡が、線上に並んだグレインの集まり (飛跡) として観測される。

飛跡を構成しているグレインの見かけの大きさは、 $1\ \mu\text{m}$  以下である。図 A 1. 1 に、我々が使用した原子核乾板のグレインの見かけの大きさを示す。大きさは、約  $0.6\ \mu\text{m}$  である。また、グレインは、実際の粒子の通過位置の周りに分布している。このぼらつきの乾板面に投影した成分を測定した結果を図 A 1. 2 に示す。ぼらつきの程度は、標準偏差で  $0.09\ \mu\text{m}$  であった。この値は、乾板の位置分解能の限界を示すと考えて良い。

### A 1 - 2 原子核乾板標的の作製

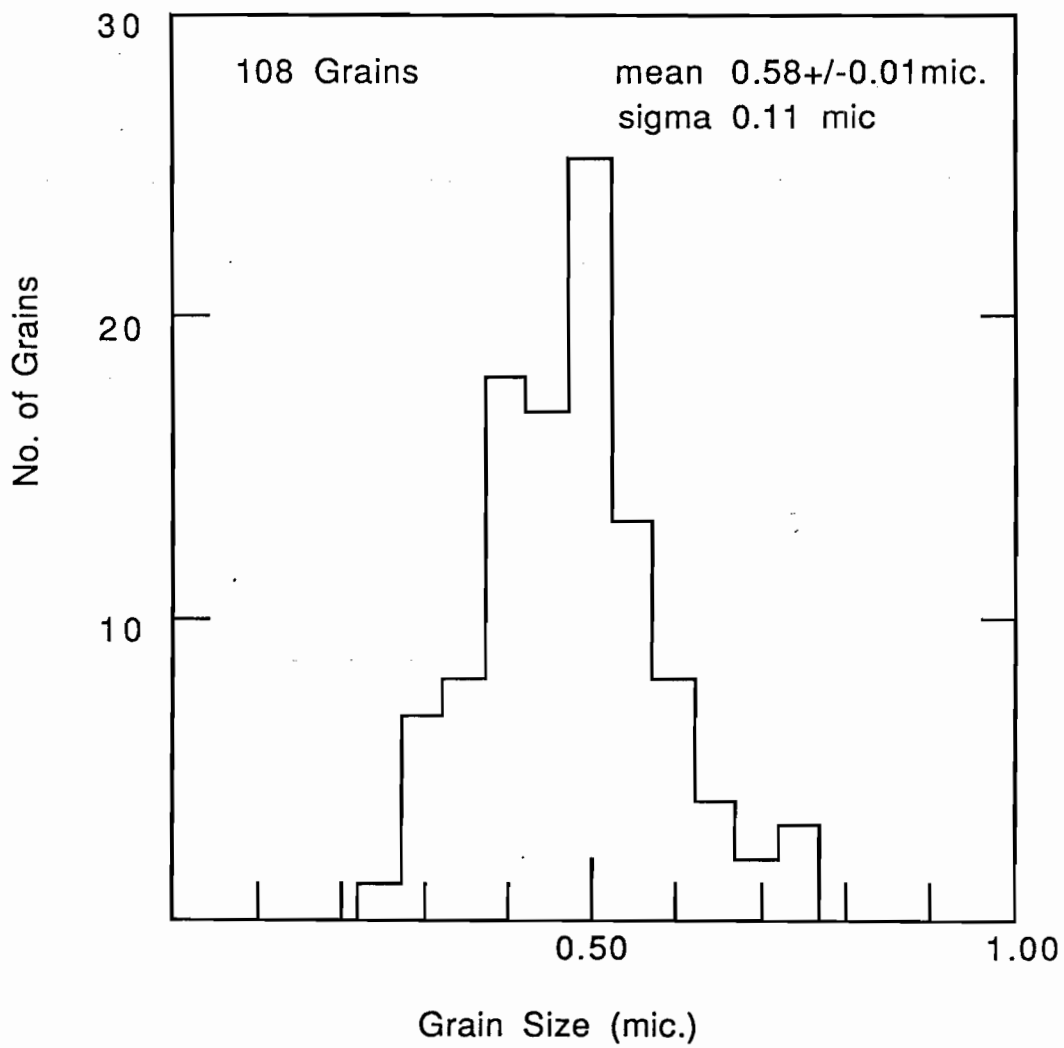
#### A 1 - 2 - 1 標的作製施設

E 6 5 3 の一次実験では、32 リットルの乾板を使って 25 モジュールの H タイプ乾板標的と 24 モジュールの V タイプ乾板標的を作製した。これだけ多量の原子核乾板標的を理にかなった時間内に

表 A 1. 1 原子核乾板の組成

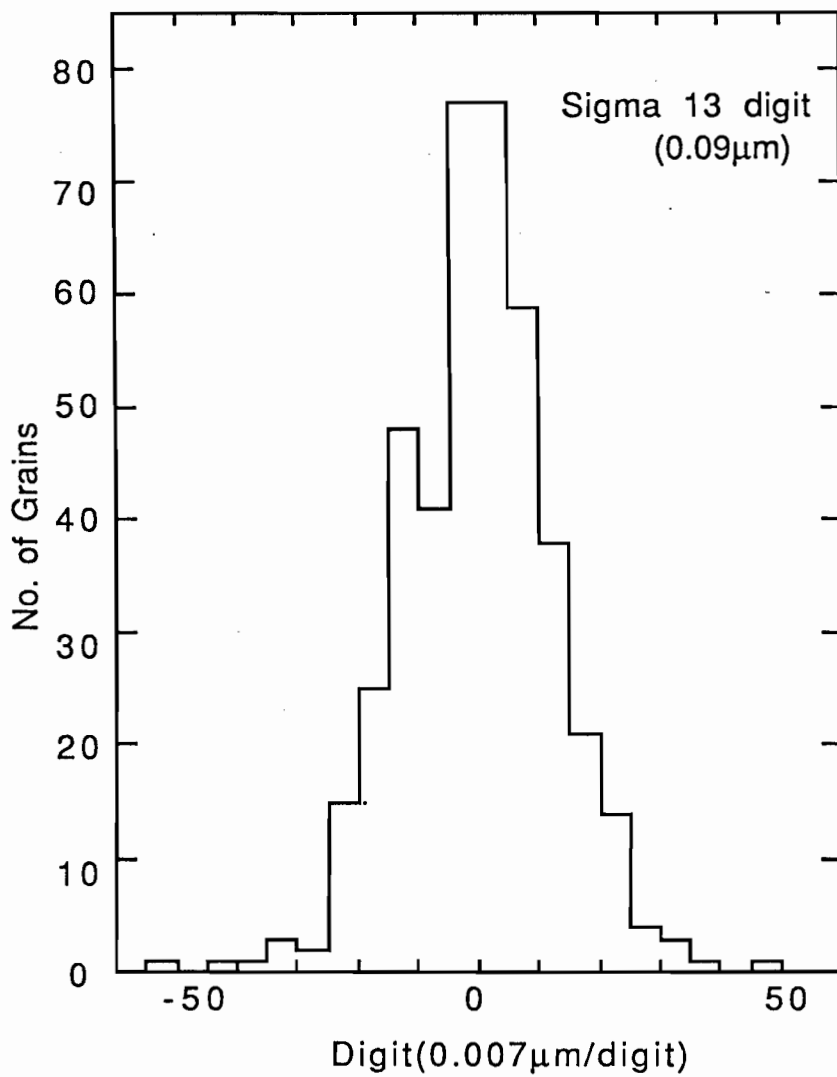
元素	質量数	重量 (%)	
		E T - 7 B	E T - 7 A
I	126.9045	0.3	0.53
Ag	107.8682	45.4	46.7
Br	79.904	33.4	34.4
S	32.066	0.2	0.2
O	15.9994	6.8	7.0
N	14.0067	3.1	2.3
C	12.011	9.3	7.55
H	1.0079	1.5	1.25

比重 (R. H. 68% のとき) は何れも 3.73 (g/cm<sup>3</sup>)



図A1.1 グレインの見かけの大きさ





図A 1. 2 グレインの飛跡の周りのばらつきを乾板底面に投影した成分

作製するために、大容量の処理が可能な原子核乾板標的作製施設を建設した。乾板作製後時間をおくと乾板の質の低下の原因になり、また、宇宙線によるバックグラウンドを被る。そこでこの施設は、実際にビーム照射を行う Fermilab の敷地内に建設し、標的の作製はビーム照射の直前に行えるようにした。図 A 1. 3 に標的作製施設の全体の様子を示す。同建物内には、施設の中心となる広さ約 26 m<sup>2</sup> の塗布室、及び、乾板の裁断や標的の組み立て等を行うスタック室の二つの暗室、そして、乾板の保存用大型冷蔵庫やその他紙類、標的部品等を置いてある物品室兼準備室、及び、乾板塗布ガラス洗浄用タンクを設置した洗浄室等がある。

#### A 1 - 2 - 2 E 6 5 3 における乾板標的の作製

以下に、著者が担当している H タイプの原子核乾板標的を中心にこの施設を用いた実際の標的作製手順の詳細を述べる。

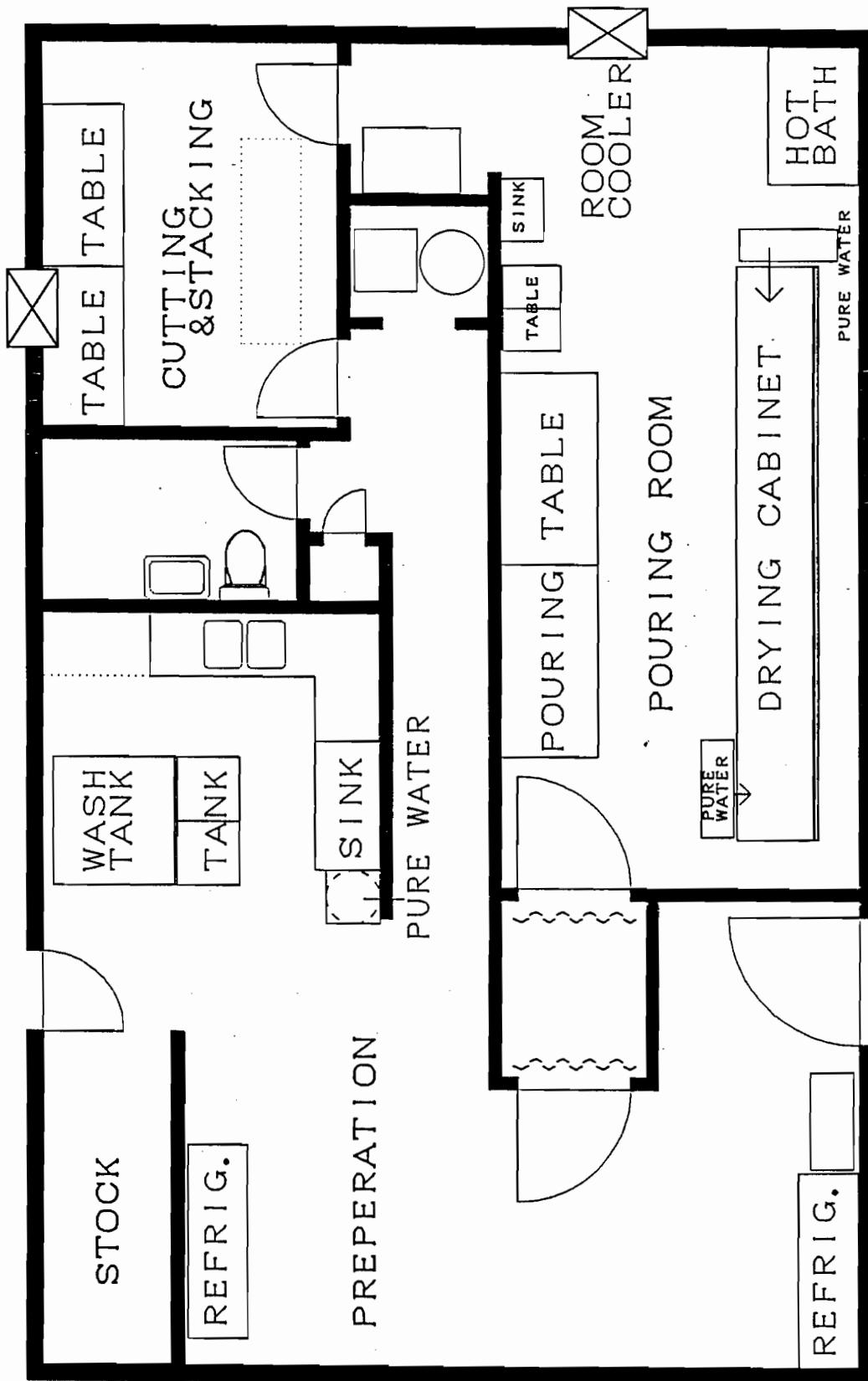
##### 1) 塗布・乾燥

ペリクルは、ゲル状の乳剤を融解して所定の厚さに塗布し、乾燥後に塗布板から引き剥して製作する。乳剤の塗布は、製造時間の短縮と材料の節約のため大面積で行い、それを実際に使う大きさに裁断する。一方、垂直照射型の薄塗乾板シートは、融解した乳剤を直接薄い基板の上に塗布する。

乾板乳剤を塗布する面積は、ガラス板上に金属の枠をおいて決める。乳剤の比重は、1.27 ~ 1.29 だから、面積  $S \text{ cm}^2$  の枠内に  $W \text{ g}$  の乳剤を流し込むと、厚さは、 $W / \{ (1.27 \sim 1.29) \times S \} \text{ cm}$  となる。この乳剤は、乾燥によって  $1 / 9.0 \sim 1 / 9.5$  に収縮する。従って、できあがる乾板の厚さ  $d \text{ (cm)}$  は、 $d = (W/S) / \{ (1.27 \sim 1.29) \times (9.0 \sim 9.5) \}$

となる。E 6 5 3 では、 $36.8 \text{ cm} \times 54 \text{ cm}$  で厚さ  $600 \mu\text{m}$  の大判のシートを塗布し、このシート 1 枚当り、実際に用いる  $10 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  のペリクルを 80 枚切り出した。1 枚のシートを作製するのに用いた乳剤の量は、上式より  $1430 \text{ g}$  とした。

塗布用のガラス板の大きさは、 $41 \text{ cm} \times 59 \text{ cm}$  で厚さ  $6 \text{ mm}$  である。塗布を始める前に、このガラス板をガラス洗浄液に約 1 日



図A1.3 原子核乾板製作施設の概観

つけておく。このために用いた洗浄タンクの大きさは、48”×48”×48”で一度に30枚のガラス板を収納できる。その後、蒸留水で洗い流し、十分に乾燥させて用いる。洗浄用純水は、400リットルのタンクで保管してある。

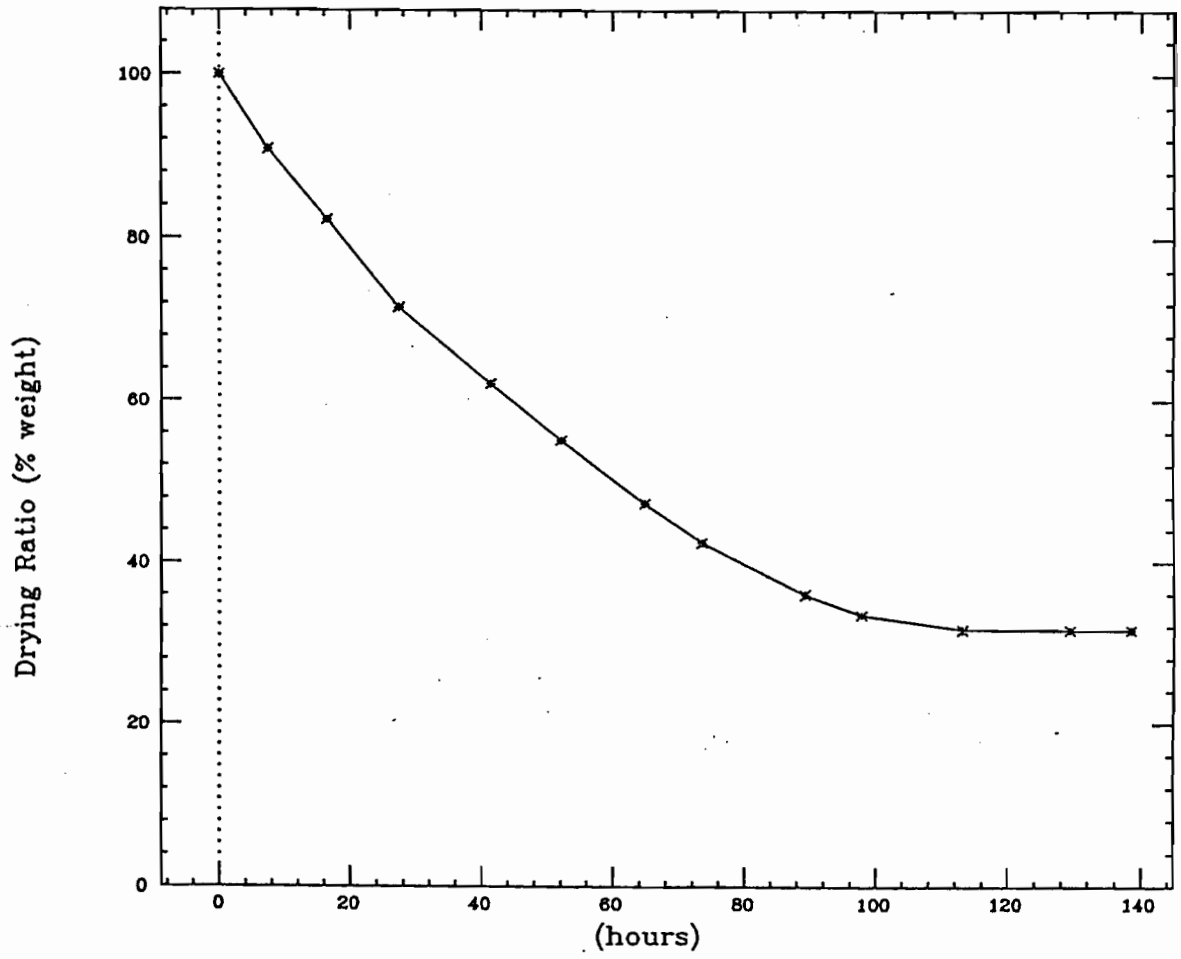
乳剤は、40～42°Cの恒温浴槽（ホットバス）中で、気泡を取り除きながら3～4時間融解する。恒温浴槽は、大きさ20”（W）×24”（L）×20”（D）のポリエチレンタンクで、その側面、及び、底面を保温用に2”厚のスチルフォームで囲ってある。1台につき容量2リットルのピーカを一度に6個入れることができる。これを2台使用した。

塗布台は一度に4台使用した。これらを72”×36”の大きさの塗布机を二台並べた上に水平を保たせて設置した。この上に塗布ガラスを置き、冷やした金属角棒で塗布面積を決める囲いを作る。この中に融解した乳剤を流し込み10数°Cの冷風を約10分送り、乳剤を持ち運び可能な程度にまで固める。冷風は、室内用冷房機からの風をフレキシブルチューブにより各塗布台まで引いてある。

乳剤の流動性がなくなれば、金属枠を取り除き恒温恒湿の乾燥箱（ドライングキャビネット）に入れて、ゆっくり乾燥させる。乾燥は、20°C、相対湿度80%、風速1～2m/秒で約4日間、更に、20°C、50%で1日行った。乾燥箱の大きさは、210”（W）×96”（H）×30”（D）で、大きさ18”×27<sup>3</sup>/<sub>4</sub>”の棚が75段、20<sup>1</sup>/<sub>2</sub>”×27<sup>3</sup>/<sub>4</sub>”のものが75段、計150段ついている。実際は風の吹き出しに近い30段の棚は使用せず120段を使用した。この乾燥箱全体の温度調節は、両端に配した二箇所のクーラーで行う。また、乾燥箱中に設置した3つの加湿器を用いて加湿することにより80%の湿度を確保した。しかし、乾燥箱の位置により乾燥速度に差があるので乾燥期間中に場所の入れ替えを行った。乾板の乾燥状況は、その重量を測定することで確認した。図A1.4に塗布後の乾板の重量変化を示す。約4日間ではほぼ乾燥が終了していることがわかる。乾燥終了後、乾板を塗布ガラスから引き剥し、これをポリエチレンラミネート紙で密封して約2日間保存する。これにより、乾板表裏の乾燥状態を一様にする。

上記の作業は、準備から最後の保存に至るまで約一週間の行程である。乾燥箱の容量から原理的には、一度の行程当り150シートを作製することができる。実際には、一回の行程当り24シートを

### Drying Curve



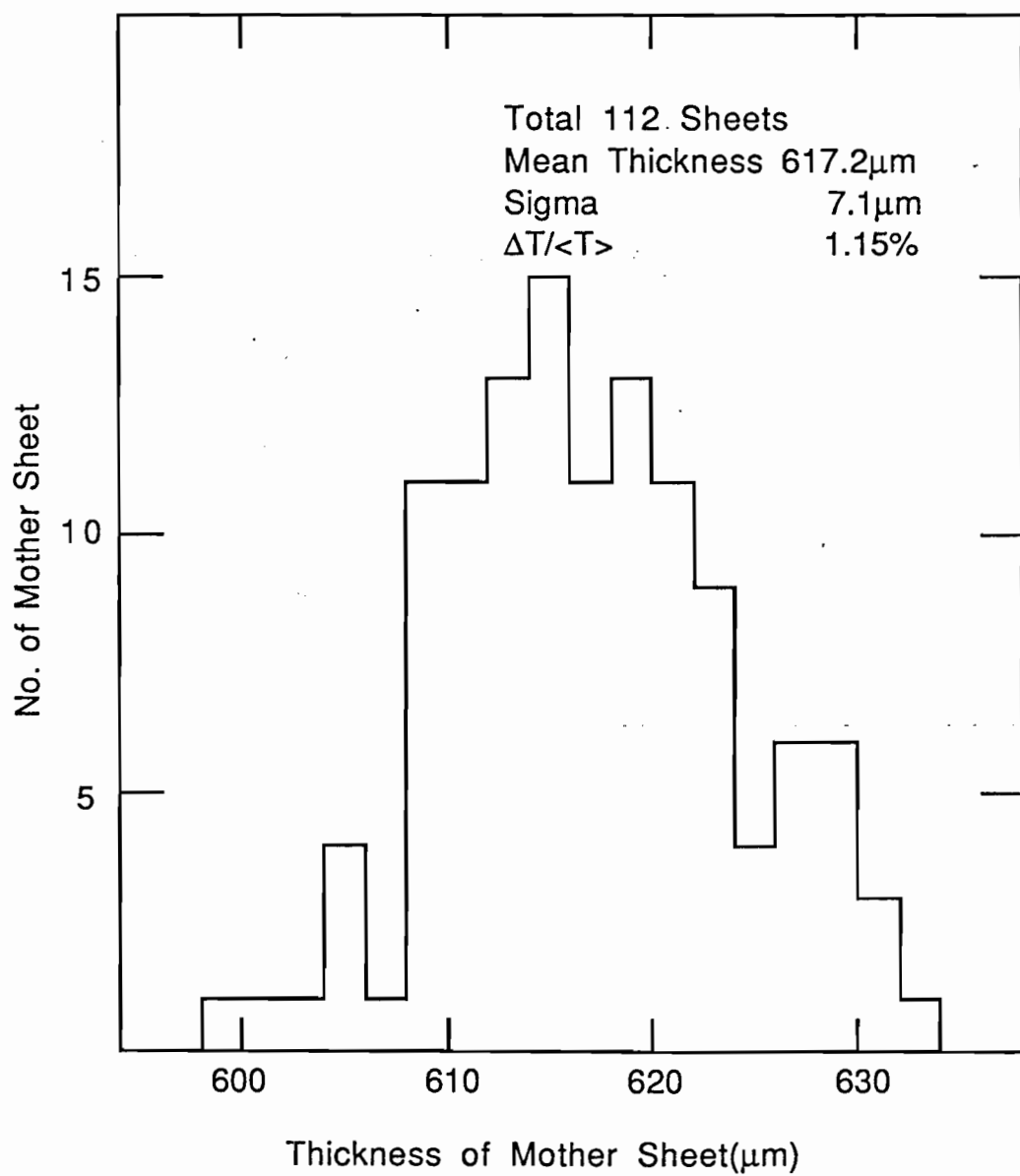
図A1.4 塗布後の乾板の重量変化（乾燥曲線）

作り、この行程を1日づつずらして3度行うことにより10日間で72枚のシートを作製した。その後さらに、54枚のシートを追加作製して合計126枚のシートを作製した。この塗布作業は、3～4人で担当した。

このようにして作った乾板には、普通1～2%の厚さむらがある。図A1.5に、E653一次実験で作った112枚の乾板シートについて厚さを測定した結果を示す。厚さの平均値が、617.2  $\mu\text{m}$ で、そのばらつきは、標準偏差で7.1  $\mu\text{m}$ であった。これは厚さの1.15%に相当する。この厚さのばらつきは、乳剤の比重、及び、塗布後の収縮率の不均一と場所による乾燥状態の違いによるものと考えられている。

また、上記のシートを乾燥させている間に薄塗乾板(Dシート)の塗布を行った。薄塗乾板は温浴にて溶融した乳剤を下塗り処理を施した基板に直接流し、これを薄く引き延ばして作る。従って使用する乳剤はペリクルに使用する濃縮可塑1/2処方 $\text{RF}-13$ 型ではなく、粘性の小さい標準可塑1処方 $\text{RF}-4$ 型を用る。しかし現在、富士写真フィルム社からは $\text{RF}-13$ しか供給されていないので我々の手で調整する必要がある。 $\text{RF}-13$ から $\text{RF}-4$ を作るには所定の量の蒸留水と可塑剤を加えれば良い。標準の処方では、先ず $\text{RF}-13$ 、100gに対し蒸留水30ccを加え標準可塑1/2の $\text{RF}-14$ を作り、これに3kg当り重量濃度25%可塑溶液を加え $\text{RF}-4$ とする。これでは手順が煩雑なので実際の作業では可塑溶液の比重を1として計算し、100gの $\text{RF}-13$ に対し2.29%可塑溶液33gを加えるものとした。

1枚の薄塗乾板の片面を塗るのに必要な乳剤の量はペリクルの場合と同様の式により計算できる。但し、収縮率は12.1で比重は1.21である。従って、面積23.5cm $\times$ 23.5cmで、仕上がりの厚さ0.005cmの乾板を作るには40gの乳剤を塗布すれば良い。40gの $\text{RF}-4$ を作るには30gの $\text{RF}-13$ に10g正確には9.9gの2.29%溶液を加えれば良いことになる。実際の塗布では1個のビーカで30面の塗布が可能な量の乳剤を用意し、さらに1面分を余分として加えた量の乳剤を作った。塗布に際して、一枚分毎に所定量を計量するのは時間がかかるので、所定量の乳剤を簡単に計量できる乳剤分配器を用意し、あらかじめ50cc程度の小型のビーカに分配し、溶融する方法をとった。分



図A1.5 E653一次実験で作製したペリクルの厚さ分布

配器は、大型の注射器に当りを取り付けた簡単なものであるが、非常に有効なものである。薄塗乾板の塗布に際しては、基板が良く塗布台に固定されていないと溶融された乳剤の熱によって基板が大きく変形してしまい、一様な厚さに塗布することが出来ない。そこで塗布台には、真空吸引機構のついたステンレス製のものを使用した。この台に基板を吸着させ小型のピーカに取り分けておいた乳剤を基板全面にわたるように流す。そして、乳剤引き伸ばし棒を用いてすばやく引き伸ばす。そして2～3分放置し、乳剤が一様な厚さになるのを待つ。その後、冷風を当てて固化させる。こうして片面の塗布が終われば、塗布台より取り外し乾燥箱に収納して1～2日乾燥させる。この面が十分乾燥した後、更にもう片方の面に乳剤を塗布する。乾燥したかどうかは、暗室光にかざした時に全体が一様に透けて見えることで確認できる。今回は、4台の塗布台を使用し、2～3人で1日60～90面の塗布を行った。

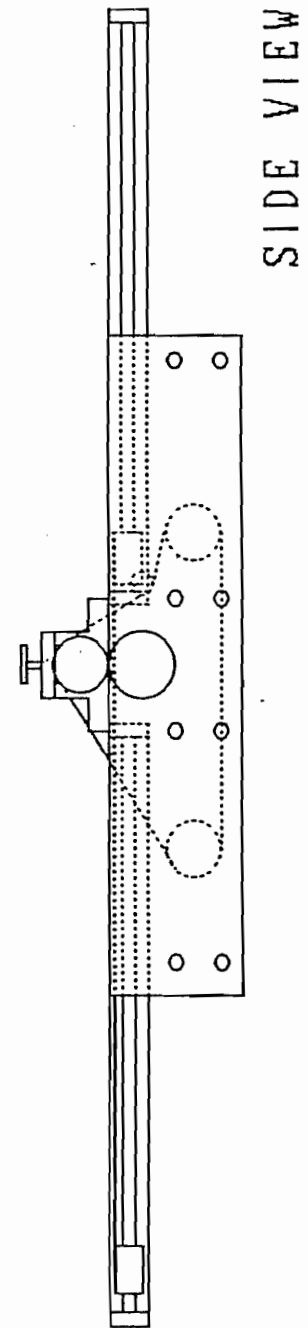
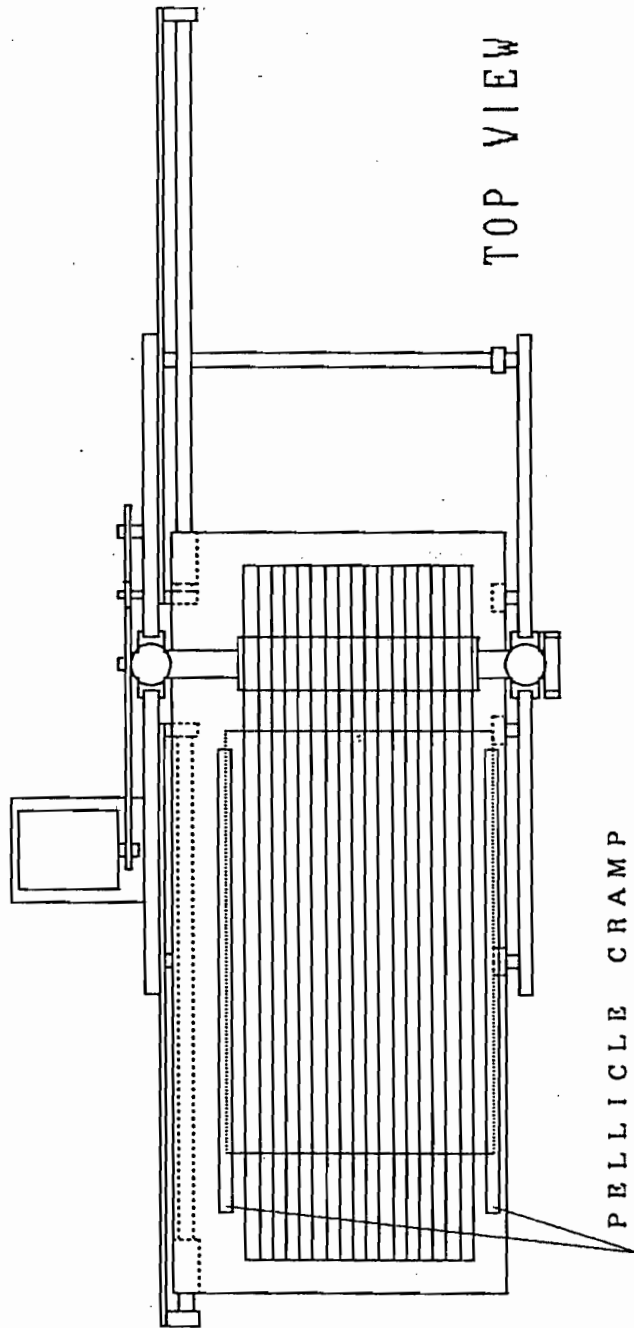
## 2) 裁断・スタッピング

本実験で用いたペリクルは、10cm×2cmの短冊状であり、その面積に比して周囲の長さが長いという特徴がある。それ故、大判のシートからペリクルを切り出す場合、なるべく材料を損失しないよう抜き型のようなものは使用しないことにした。また、2cmの方向は、乾板解析時にビーム方向の位置決め基準となるので、精度良く切り出せること、更に、一万枚以上のペリクルを切り出すのでその作業が高速で行えることが望まれる。これらを考慮して、大判のシートから、2cm幅のストリップを一度に16条裁断することのできる裁断装置を製作し用いた。この装置の概観を図A1.6の(a)と(b)に示す。図A1.7(a)は、この装置を用いて裁断したペリクルの2cm方向の長さを測定した結果である。また、表1.7(b)は、ペリクルの両端の直線性を示すものである。何れもばらつきの標準偏差は～10μmであり精度の良い切り出しができたことがわかる。また、この辺の切れ味が悪いと次節で述べる貼合わせの状態が悪くなる。それ故、しばしば刃の掃除をする必要がある。一次実験では、約半数の裁断が終わった時点で新しい刃と取り替えた。

こうしてストリップ状に切った後、各ストリップを10cmの長さに切り分けた。そして、このペリクル一枚一枚に番号を付け、標

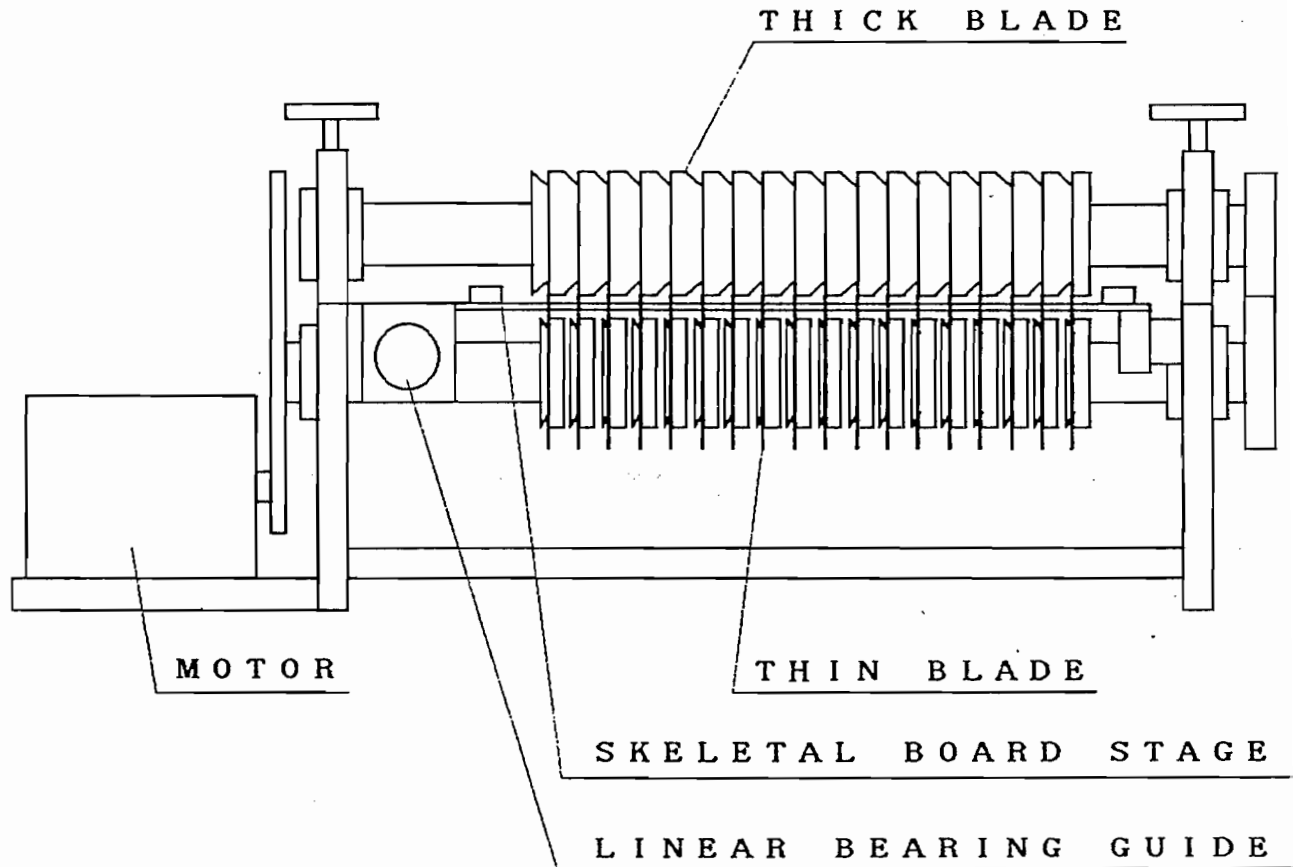


PELLICLE CUTTER



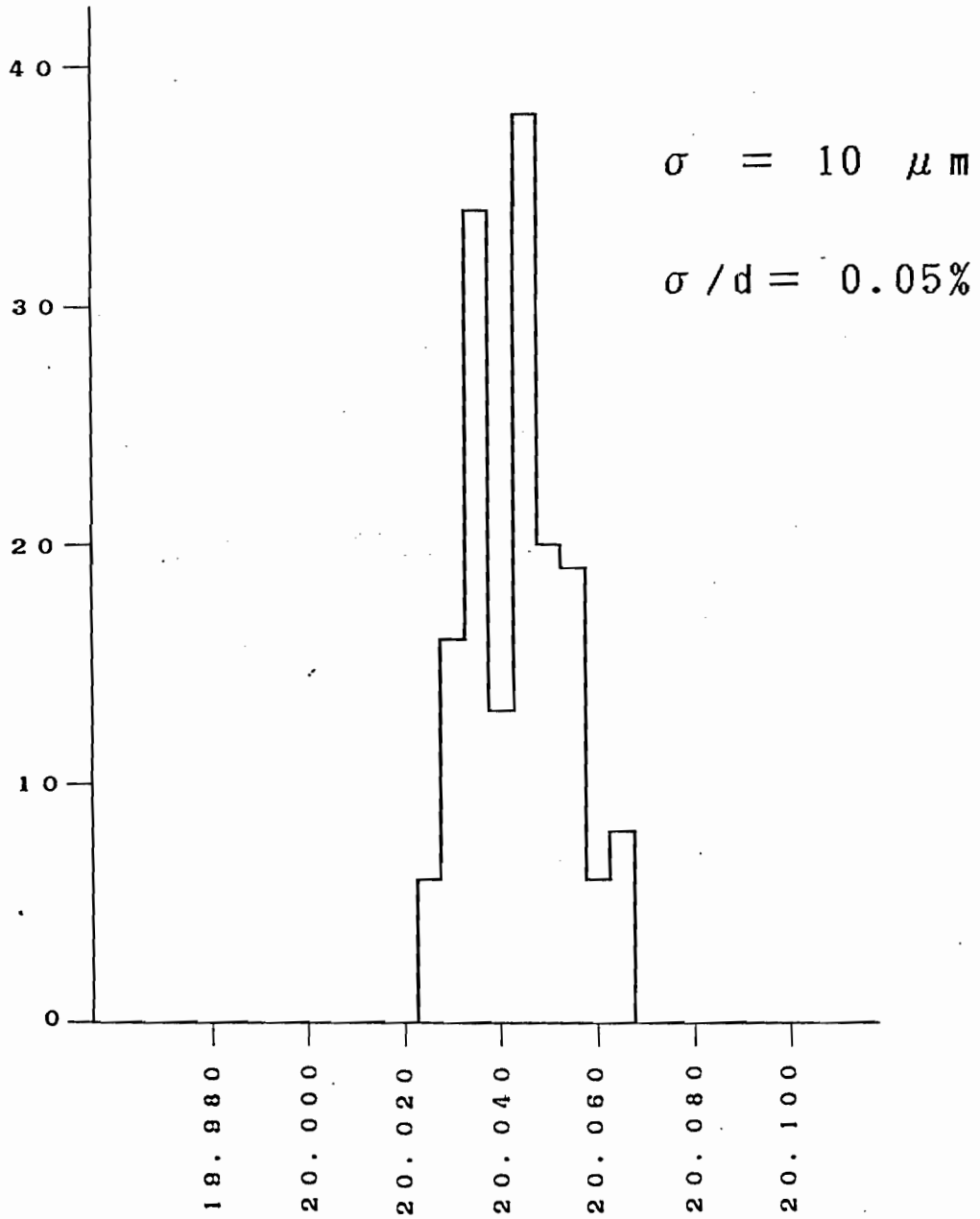
図A1.6 裁断機（スリッター）（a）top and side view

# PELLICLE CUTTER (FRONT VIEW)



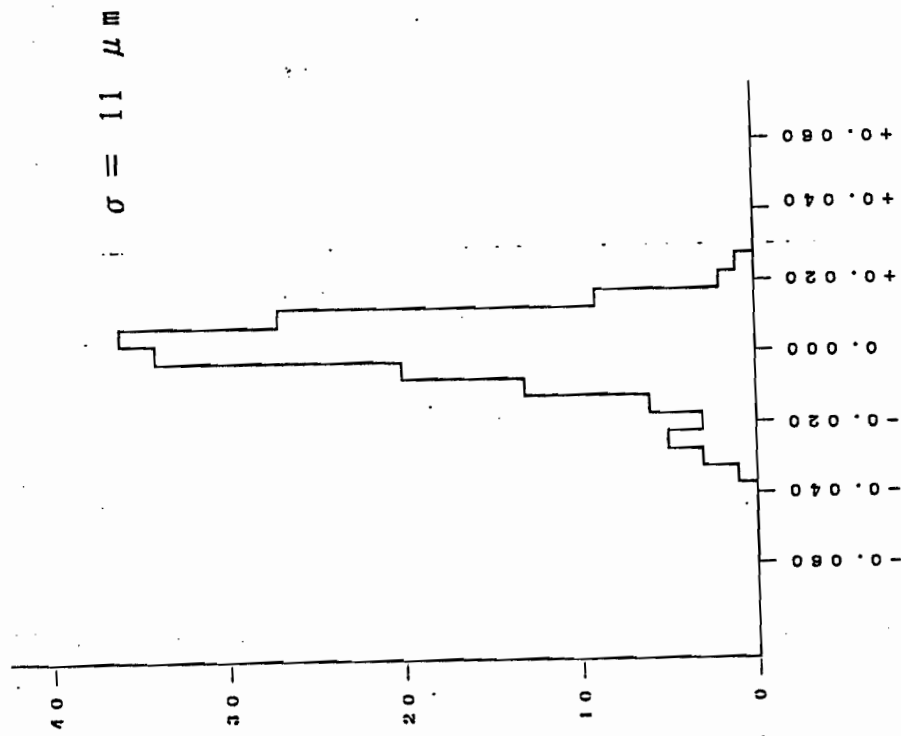
図A1. 6 裁断機 (スリッター) (b) front view

# WIDTH OF CUT PELLICLE

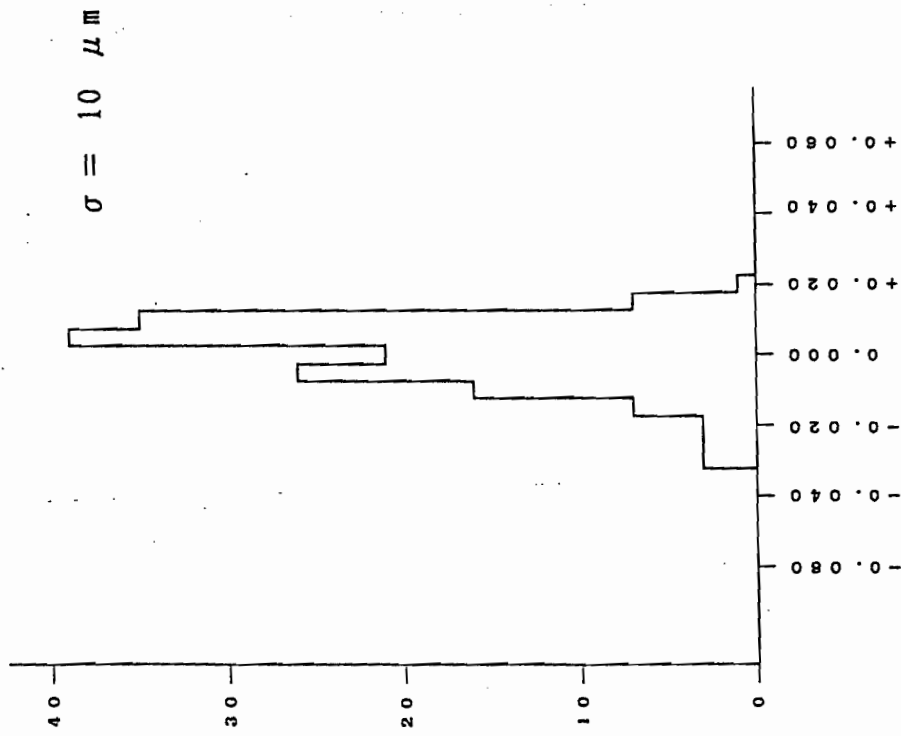


図A1.7 (a) 裁断機で切り取ったペリクルの2cm方向の幅

STRAIGHTNESS OF CUT EDGE (RIGHT)



STRAIGHTNESS OF CUT EDGE (LEFT)



図A1.7 (b) 裁断機で切り取ったベリクルの両端の直線性

的ホルダーの枠内に精度良く積み重ねる。一つのミニモジュール当たり約24mmの高さまで積み上げ、スプリングで固定する。10個のミニモジュール全てにペリクルを収納したら、下流側のDスタック部へDシートとスペーサーを交互に収納していく。最後に、上流面に、厚さ1mmの保護用のPSP（発泡スチロール）をあてがい、これら全体を、ポリエチレンラミネート紙で包み減圧した後、熱密封する。

### A 1 - 3 貼付け

ペリクルは通常、現像処理の前に特殊処理を施した基板に貼付ける。貼付け手法の詳細は、参考文献A 1. 1に述べられている。

貼付けが良くないと現像処理過程でペリクルと基板の間に水泡が発生する危険が非常に高くなる。水泡が発生した部分は、歪みが著しく大きくなり解析時に大きな支障となる。ペリクルを使用する場合、この貼付けがうまくできるか否かが非常に重要な点となる。本実験の前身であるE 5 3 1実験の計画がなされた当時は、十分安定した結果が得られる方法が確立されていなかった。そこで貼付け技術の開発を重点項目としてテストが重ねられ、アクリル基板を使用した方法が確立された。本実験でも基本的にはE 5 3 1実験における貼付け手法を採用した。但し、ペリクルの面積が小さいことに起因するいくつかの問題を解決するため、次に述べるような新しい手法を開発した。

大きさが2cm×10cmと小さく、しかも総数一万枚に及ぶ乾板を1枚ずつ単独の基板に貼付けることは、その取扱や作業の点からも実際的ではない。さらに、解析時においても頻繁に乾板の交換をしなければならぬなど種々の点で問題が生じる。また、現像処理後の乾板の周囲は通常大きく盛り上がり、端から約1mm程度、条件によっては数mmのところまで大きく歪む。従って、今回用いたような小面積の乾板は、この問題を解決しない限り実際上実験には使用できないことになる。そこで我々は、1枚の基板に何枚かの乾板を互いにその辺を密着させて貼付ける技法を開発した。この方法で貼付けることにより上に挙げたような問題点の殆どが解決できた。特に辺近傍の歪みについては、図3. 12に示したように辺の

盛り上がりの範囲、高さ共に大幅に小さくすることができ、辺より数100 $\mu$ mのところまで測定可能になった。

貼付けは、現像薬品に触れる恐れのある現像処理施設を避け標的作製施設内の塗布室で行った。1日2モジュールの貼付けを行い、貼付け後の乾燥には、乾板製作時に用いた乾燥箱を利用した。

#### A 1 - 4 原子核乾板の現像処理

原子核乾板の場合も現像処理は、基本的には通常の写真フィルムと同様に予浸、現像、停止、定着、水洗、乾燥という手順で行う。しかし、原子核乾板は、その厚さが非常に厚いこと、またそれ故に現像後の粒子の飛跡の歪みを極力少なくしなければならないことなどによりいくつかの点で通常の写真フィルムとは異なった取扱が必要となる。表A 1. 2にE 6 5 3実験で用いた厚さ600 $\mu$ mのペリクルと50 $\mu$ m両面薄塗シート(Dシート)の現像処理の流れと処理時間を、また、表A 1. 3に各処理液の処方をまとめてある。予浸段階からアルコール乾燥に至る液温7 $^{\circ}$ Cの低温一貫現像、段階的に液の濃度を変えて行う定着処理、そして最終段階のアルコールによる脱水処理等は全て、現像過程での乾板の膜厚変化を小さくすること、厚さによる各過程での処理の進行むらを極力抑えることなどを目的として施される処置である。液温を低くすることにより処理の進行速度を遅らせ、急激な膜厚変化を抑制する。また、厚さ600 $\mu$ mの乾板では、全体に液が浸透するのに約2時間もかかる。そこで、特に現像段階では、十分ゆっくりと処理が進行するようにその処理温度を設定してある。定着段階で乾板の膜厚が最も急激に変化する。従って、特にこの段階では、液の濃度を段階的に変化させるという方法をとる。最終の乾燥においては、水洗後すぐに空気中で乾燥をさせると表面の乾燥が速く進み歪みの大きな原因となる。従ってアルコール溶液を用い乾板内部からも一様に脱水し、その後空気中で最終的な乾燥を行う。このように厚塗り乾板の現像では、歪み、現像むら等が後の測定の支障とならないように特別な配慮が必要となり、更に処理に要する時間も非常に長いいため現像設備は低温の維持などについて特に考慮したものでなければならない。なお、ここに示した処理手法はE 6 5 3実験の前身であるE 5 3 1実験の

表A1.2 原子核乾板の現像手順

順序	操 作	厚さ600 $\mu$ mのペリクル		50 $\mu$ m両面薄塗シート	
		温 度	所 要 時 間	温 度	所 要 時 間
1	予浸	7° C	2時間	20° C	10分
2	現像	7° C	12時間		15分
3	停止	7° C	2時間		10分
4	定着 (濃度1/4)	7° C	2時間		(10分)
5	定着 (濃度2/4)	7° C	2時間		(10分)
6	定着 (標準液)	7° C	約 4日間		90~120分
7	定着 (濃度1/2)	7° C	2時間		(10分)
8	定着 (濃度1/4)	7° C	2時間		(10分)
9	水洗	7° C	約 7日間		約3時間
10	10%アルコール脱水	7° C	2時間		(10分)
11	30%アルコール脱水	7° C	2時間		(10分)
12	50%アルコール脱水	徐々に上げる	2時間		(10分)
13	75%アルコール脱水	室温	6時間		(10分)
14	空気中にて乾燥	室温	約 2日間	室温	約 2日間

表A1.3 現像処理液の処方とE653実験において一回に用いる処理液の量

Solution	Prescription	(Standard)	(/Tank)
現像液	Pure Water	1000 ml	60 l
	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	7.2 g	432 g
	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.913 g	54.8 g
	KBr	0.87 g	52.3 g
	Amidol	325.0 g	195.0 g
停止液	Pure Water	1000 ml	240 l
	CH <sub>2</sub> COOH	5 ml	1.2
定着液	Pure Water Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O (Hypo) Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1000 ml	227 l
		100 g	22.7 kg ( 50 lb )
		6.85 g	1555 g
1/4定着液	Pure Water Hypo Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1000 ml	227 l
200 g		45.4 kg ( 100 lb )	
13.7 g (Final 1090 ml)		3110 g (Final 247 l)	
2/4定着液	Pure Water Hypo Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1000 ml	227 l
400 g		90.8 kg ( 200 lb )	
27.4 g (Final 1200 ml)		6220 g (Final 272 l)	
標準定着液	Pure water Alcohol Glycerin	(by weight)	159.0 l
10 % 液		10 %	25.2 l
		10 %	15.8 l
30 % 液	Pure Water Alcohol Glycerin	(by weight)	113.2 l
		30 %	71.8 l
		10 %	15.0 l
50 % 液	Pure Water Alcohol Glycerin	(by weight)	71.8 l
		50 %	113.2 l
		10 %	14.2 l
75 % 液	Pure Water Alcohol Glycerin	(by weight)	29.1 l
		75 %	185.5 l
		10 %	15.4 l



実施に際して各種のテストを行い確立したもので、詳細は参考文献 A 1. 1 に報告してある。

#### A 1 - 4 - 1 現像処理施設

この現像施設も塗布施設と同様、F e r m i l a b の既存の家屋を改造したもので、広さなどは塗布施設の建物と同一である。施設内の部屋の配置、及び、冷却機、タンク等の設備の配置を図 A 1. 8 に示した。図に見るように建物は予浸から定着までのタンク等の各設備を収めた大暗室、及び、水洗室とアルコール乾燥室、そして、各処理液の調液等を行う作業準備室、それと事務室の4つの部屋に分かれている。なお各種の薬品類は事務室の一部、及び、本施設に隣接する倉庫に保存した。また建物内に現像用、及び、アルコール乾燥用の2機の冷却機、そして屋外に予浸から定着までのための冷却機と水洗用冷却機が設置されている。アルコール乾燥室には安全のため排気設備が設置してある。

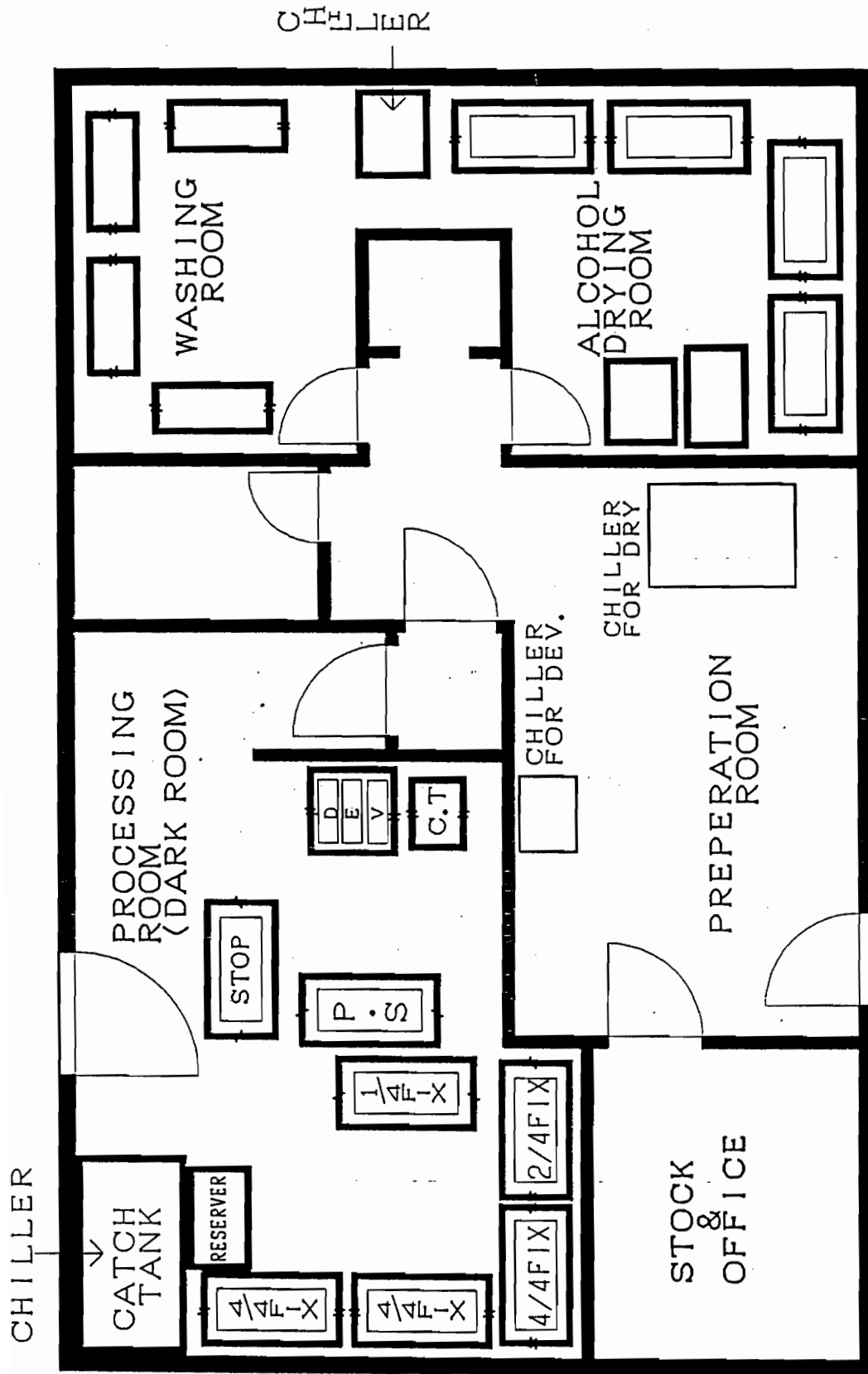
タンク等の設備の規模は建物、及び、部屋の大きさに制限があること、また、1モジュールの乾板量が0.5リットルであり、これを単位として効率よく現像できることなどを考慮し、一回の流れで2リットルの乾板の処理ができるものとした。以下に、この施設の主な装置について説明する。

##### 1) 純水精製装置

現像処理には大量の純水を必要とするため、一般上水道水を精製する設備を設けている。水洗用以外は、下記の6段階のフィルターを通して精製する。

- 1) 20  $\mu$ m フィルター
- 2) 5  $\mu$ m フィルター
- 3) 1  $\mu$ m フィルター
- 4) 活性炭フィルター
- 5) イオン交換
- 6) 0.4  $\mu$ m フィルター

この精製器により流量1.5リットルでは10メガオーム/cm程度の純度にすることが可能である。



図A1.8 原子核乾板現像処理施設の概観

一方、水洗用洗浄水はそれほど高い純度である必要はないので、次のように簡易なものとなっている。

- 1) 20  $\mu$ m フィルター
- 2) 活性炭フィルター
- 3) 5  $\mu$ m フィルター

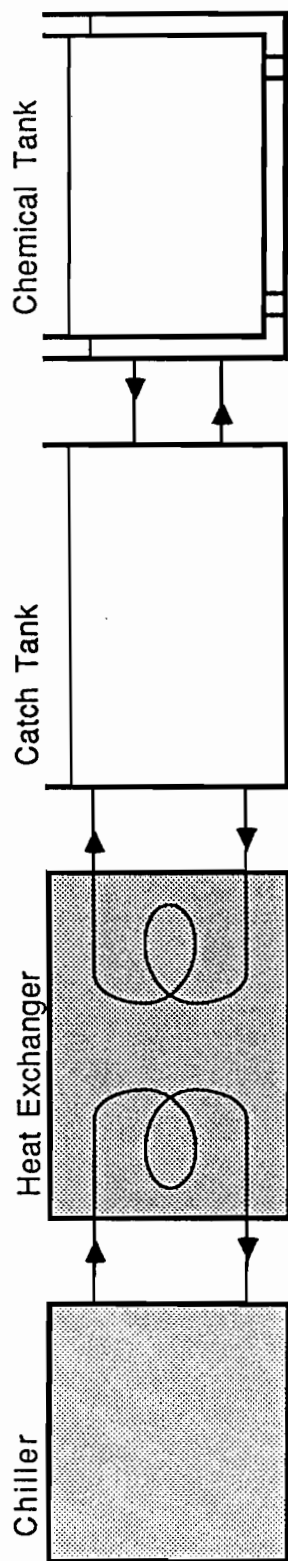
## 2) 冷却系、及び、処理液タンク

冷却系は、下記の4系統に分かれている。

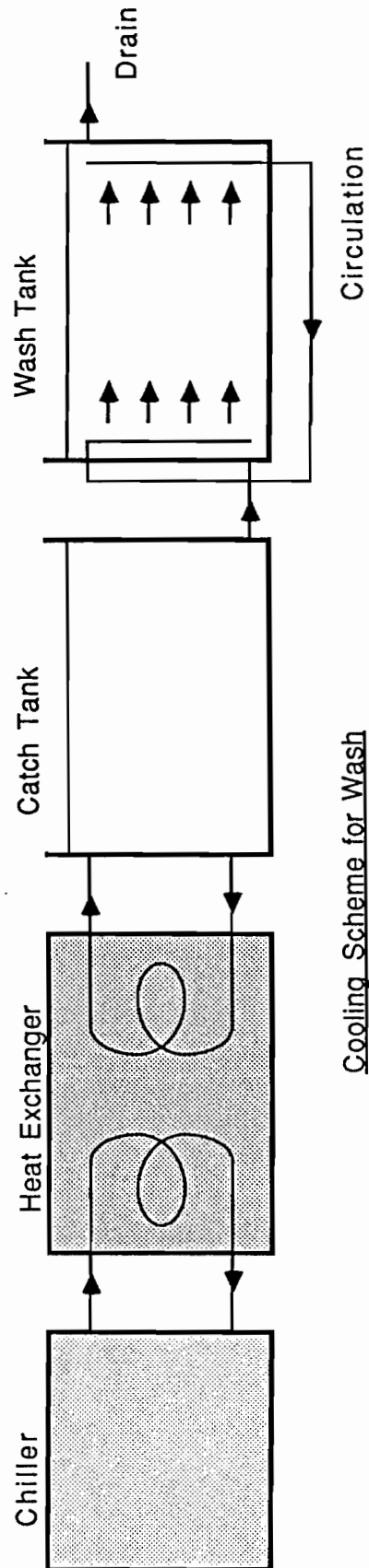
- 1) 現像
- 2) プロセス (予浸、停止、定着)
- 3) 水洗
- 4) アルコール乾燥

水洗用冷却系が多少異なる点を除いて各系とも基本的には同じ冷却方式になっている。図 1. 9 に概念を示したように冷却水は熱交換器を通り冷却機からの冷媒により冷やされる。冷えた冷却水は一旦キャッチタンクに貯められ、そこから改めて各タンクを循環するパイプに送り込まれる。各タンクは二重構造をしており処理液を入れる内側のタンクと外側のタンクの間には冷却水が貯るようになっている。タンク下方から入った冷却水は反対側上部の溢れ口より回収されキャッチタンクに戻される。水洗用タンクは一重で、冷却水をそのまま水洗用洗浄水として利用し溢れ口から排水され、回収はされない。配管はごく一部を除いて全て塩化ビニール製パイプを用い、外側を厚さ約 1/2" の断熱用チューブで被ってある。また、内側のタンクは全てステンレス製で、外側のタンクはポリエチレンのタンクの外壁を厚さ 2" の発泡スチロールで囲い、更にその外側を不燃シートで覆っている。水洗タンクはステンレスタンクに直接同様の断熱処理を施している。各処理液タンク、及び、その他のキャッチタンク等の大きさを表 A 1. 4 にまとめた。現像タンクは表にあげた小型のステンレスタンク 3 つを 1 つの冷却水タンクに収めるようになっている。また、標準濃度の定着タンク、及び、水洗タンクには液の攪拌装置を装着してあるため他のタンクよりやや大きめである。

冷却機の機種、及び、冷却能力を表 A 1. 5 にまとめてある。冷却機は E 5 3 1 実験の際にカナダのオタワ大学に作った同規模の現像設備を参考に今回の一回に 2 リットル程度の乾板を現像するのに



Cooling Scheme for Process



Cooling Scheme for Wash

図A 1. 9 冷却系統の概念図

表A1.4 原子核乾板現像処理施設に設置した各処理液タンクの大きさ

	Inner Tank ( L x W x D ) (litter)	Outer Tank ( L x W x D ) (litter)	Used Volume of Chemical Solution
予浸	40" x 16" x 26 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "(240)	48" x 24" x 30" (566)	240(litter)
現像	24 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> x 7" x 26 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "(60)	30" x 30" x 30" (442)	60
停止	40" x 16" x 26 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "(240)	48" x 24" x 30" (566)	240
1/4定着	40" x 16" x 26 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "(240)	48" x 24" x 30" (566)	240
2/4定着	40" x 16" x 26 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "(240)	48" x 24" x 30" (566)	240
標準定着	42" x 16" x 26 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "(272)	48" x 24" x 30" (566)	272
水洗	40" x 16" x 27" (240)	—	(270)
A. D.	40" x 16" x 26 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "(240)	48" x 24" x 30" (566)	272

リザーバー	36" x 20" x 20" (234)
-------	-----------------------

キャッチタンク

現像	24" x 18" x 30" (212)
プロセス	72" x 36" x 48" (2039)
A. D.	30" x 24" x 48" (566)
水洗	30" x 24" x 48" (566)

表 A 1. 5 冷却機の機種と冷却能力

	機 種	能 力
Processing	Trane CGAA-0104-CD	120000BTU/h at 10° C
Developping	FTS RC-100	11400BTU/h at 10° C
Washing	Trane CGAA-0154-HC	180000BTU/h at 10° C
Drying	FTS RC-500	42000BTU/h at 10° C

必要な量の処理液を冷却するのに十分な能力があること、そして、もしいずれかの冷却機に故障が生じた際に予備の冷却機として一時的に流用できる程度の能力を持つ機種を選定した。図 A 1. 10 (a) は、現像液冷却系の冷却テストの結果を示している。図に見るように 20°C、350リットル程度の液であれば10時間前後で7°Cまで冷却できる。また、図 A 1. 10 (b) は、プロセス系における冷却テストの結果である。プロセス系のキャッチタンクは容量が大きいため冷却には時間がかかる。

### 3) 液温制御、及び、モニター

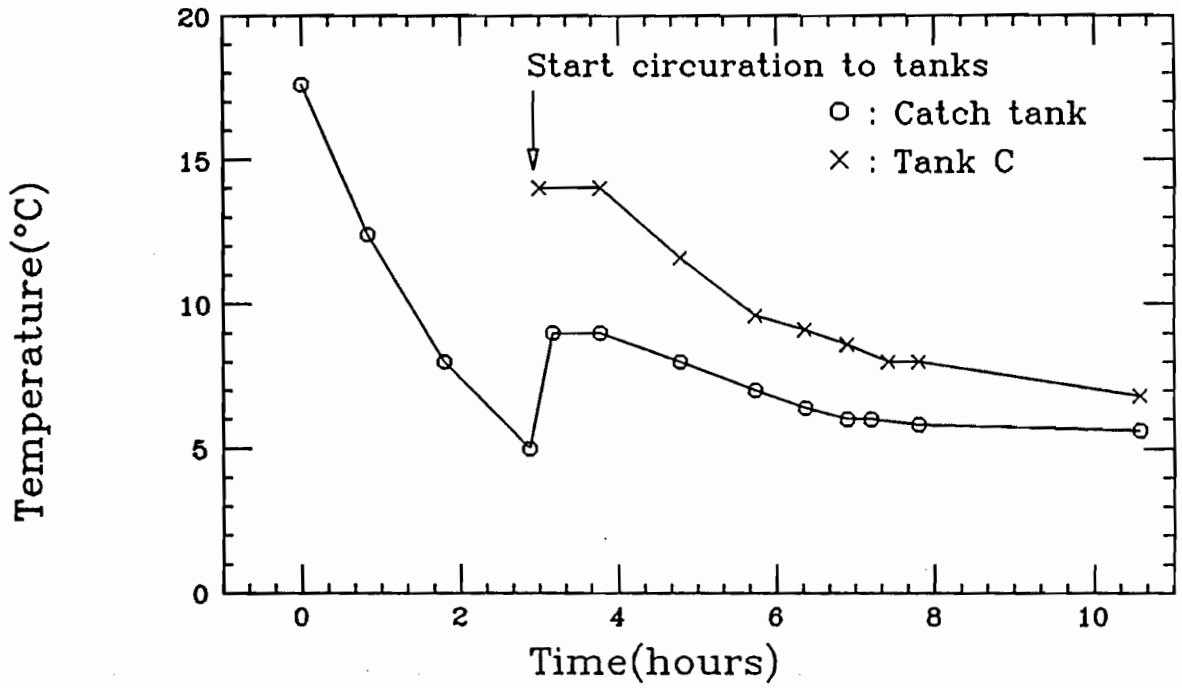
液温の調節、維持は基本的には各冷却器の温度調節機能を用いて行った。更に、微調用として各配管の途中にいくつかの小型ヒータを配しているが今回は利用しなかった。現像冷却系以外は数個のタンクを1機の冷却器にて冷却するためタンク毎に液温がばらつく恐れがある。そこで、各タンクの冷却水の入口近くに取り付けたバルブにより冷却水の流量を事前に調節することでばらつきを抑えた。配管系、タンクの断熱が予想以上に良かったことと、空調設備により建物全体の温度が常に20°C前後に保たれていたことからこの程度の調節で十分目標の温度範囲内に液温を維持できた。今回、冷却水は常時循環させていたが、外界との断熱が十分に良い場合、循環用ポンプが主要な熱源となり液温上昇の原因となる。従って冷却器の作動、休止を制御するのみでなく循環用ポンプの動作も併せて制御するような方式をとれば更に良好な液温の安定が達成できるものと思われる。

液温は、主要タンクに温度センサー（フェンオール社製 L T N - 2）を配し、データ収集装置（ヒューレットパッカート社製データロガー 3421型）を経由して同社製マイクロコンピュータ H P - 85により記録するようになっている。この温度モニターにより記録した実際の処理過程での液温変動の一例を図 A 1. 11の (a) と (b) に示した。

### A 1 - 3 - 2 E 6 5 3 における実際の現像処理

E 6 5 3 実験で実際に行ったペリクルの現像処理日程を図 A 1.

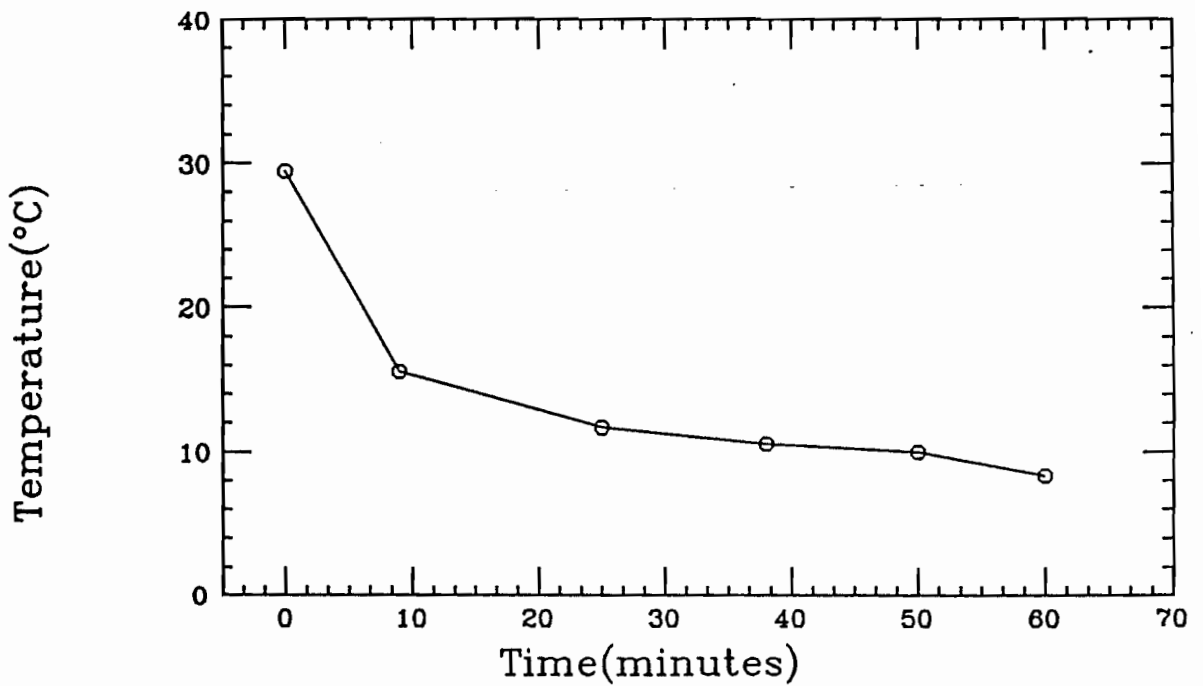
### Cooling test (Develop)



図A1.10 (a) 現像液冷却系の冷却能力

冷却機を作動してからの時間と液温の関係

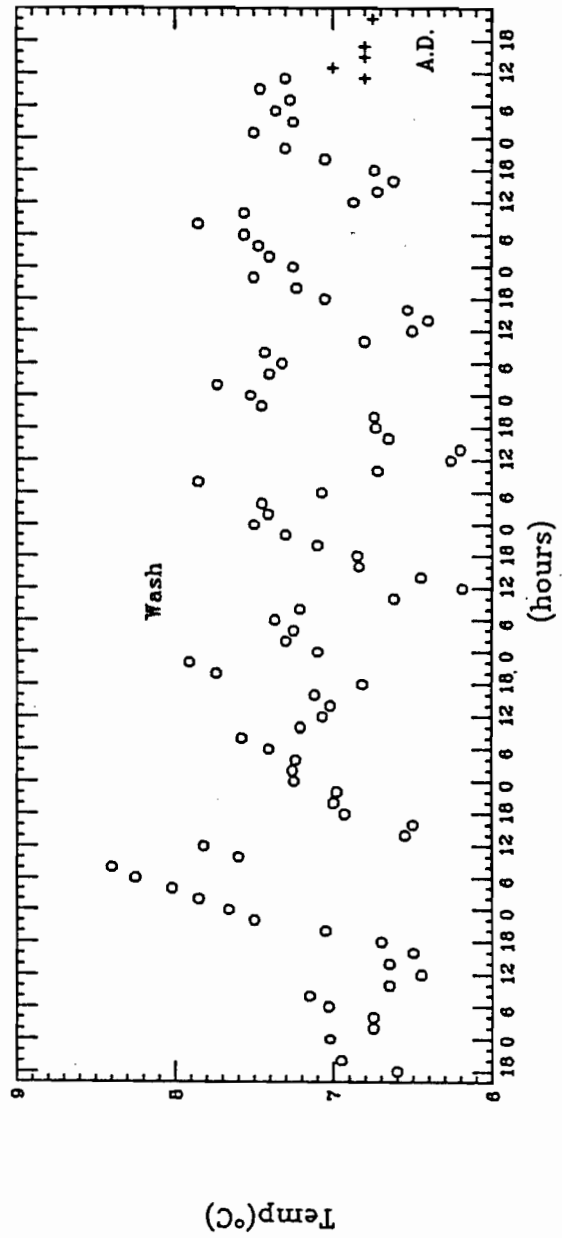
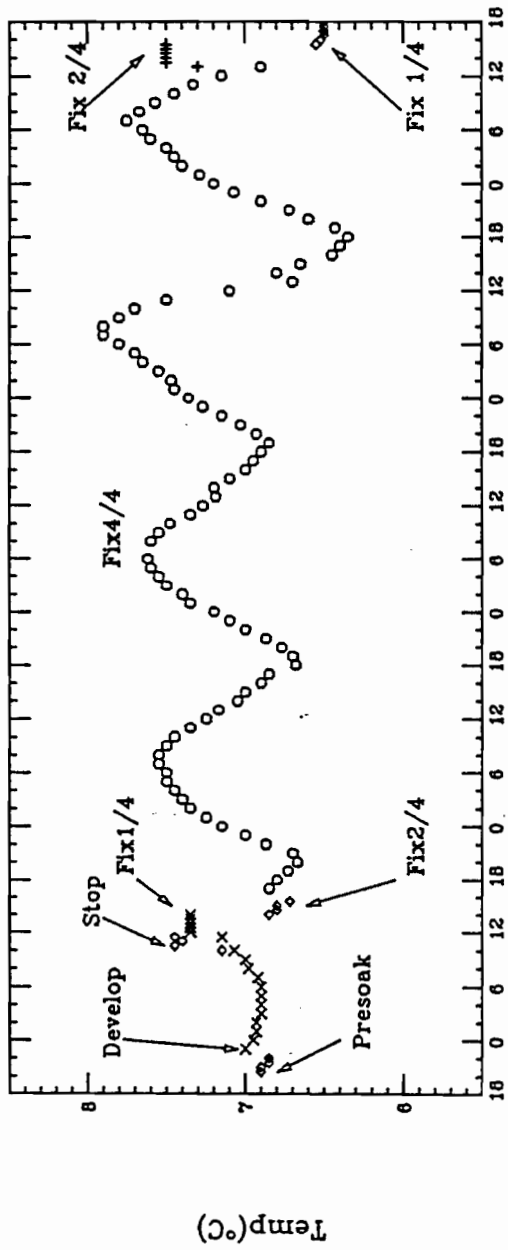
### Cooling down of the catch tank for processing



図A1.10 (b) process装置の冷却能力

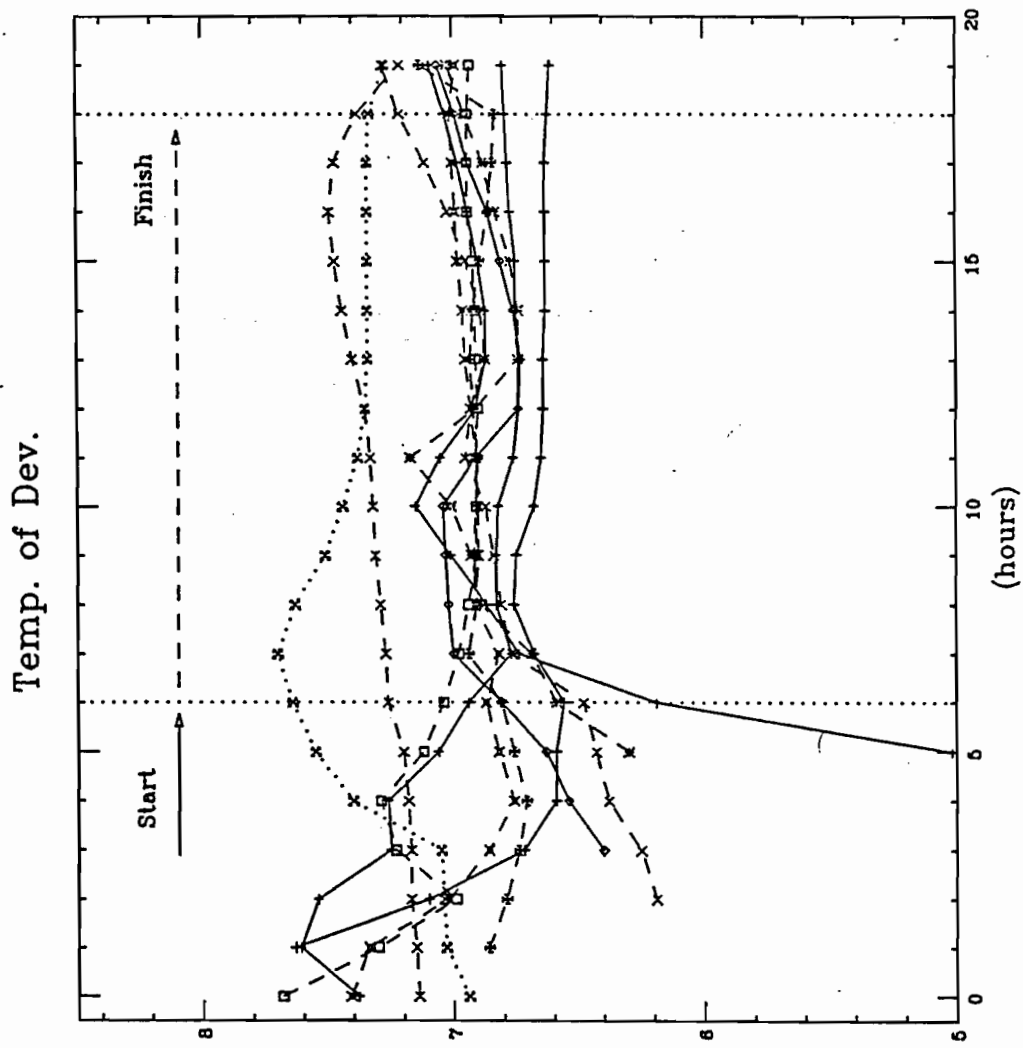
冷却機を作動してからの時間と液温の関係





図A1.11 (a) 乾板処理中の液温の変化

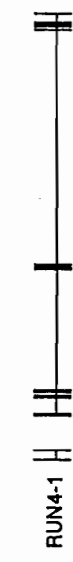
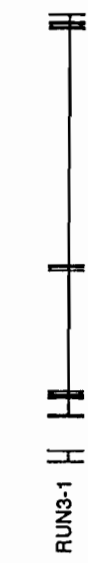
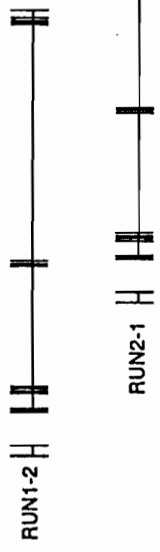
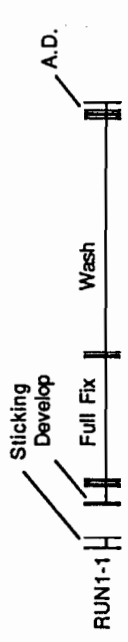
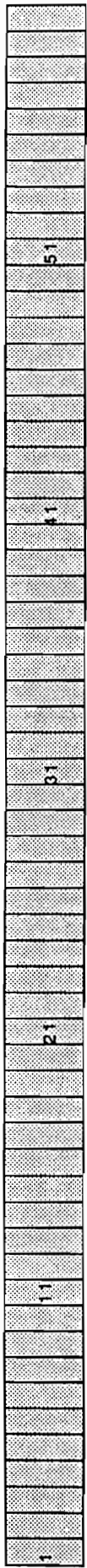
典型的なrunについて全行程にわたって液温を測定した結果



(c)

図A1.11 (b) 現像液の温度変化  
E653一次実験の全てのrunについて液温を測定した結果

Days



図A1. 12 E653実験での現像処理スケジュール表

12に示した。設備の処理能力としては先に述べたように一度に2リットルの乾板の現像が可能であるが、今回は貼付け処理に要する時間的制約から一回に2モジュール、乾板量にして約1リットルしかできないので図に示したように一回2リットルの処理を前半、後半に分けて現像開始を2日ずらして行った。そして、この過程を単位として、タンクの使用状況と処理液の入れ替え、冷却に要する時間等を考慮し、処理の繰り返し日程を決定した。こうして24モジュール、12リットルの乾板の現像全てを終了するのにほぼ2カ月を要した。

処理に用いた各液の量は表A1.3に示した通りである。この液量はタンクの容量、処理に必要な最低量、そして現像用乾板ラックの構造から決まる液面の高さ、及び、ラックと乾板そのものの体積による液面上昇等を考慮して決めた。現像は一回1リットルの乾板を4個のラックに収納し、2つのタンクを用いて行った。これにより乾板量のおおよそ120倍の液量を確保した。また、定着液に関しては使用するハイポが多量であるので計量の簡素化等も考え合わせ購入単位(25、50あるいは100ポンド/袋)で調液できるようにした。更に、ハイポの溶解に伴う液量の増大も無視できないのでこれも考慮した。1kgのハイポの溶解により約0.5リットルの増加があり、従って表に示した薬品量により調液した場合、最終的に標準定着液で272リットルの液量となり、乾板量の約13倍を確保した。

予浸、現像、及び、停止の各液は1/2処理単位、2モジュールの処理毎に新しいものと入れ替え、標準定着液については1処理単位、4モジュール毎に入れ替えた。1/2、及び、1/4濃度の定着液は、予備定着時には前回用いたものを再度使い、最終段階では新しい液を使った。

現像処理最終段階に行うアルコール脱水では、危険物であるアルコールの保管の問題から一回の調液に使用できるアルコール量が2ドラムで、かつ使い切らなければならないという制限があったため、当初予定していた量の液を使用することができなかった。このため、タンク内に水を満たしたいくつかの容器を沈め必要な液面の高さを確保した。なお、液は1.5~2処理単位毎に新しいものと入れ替えた。

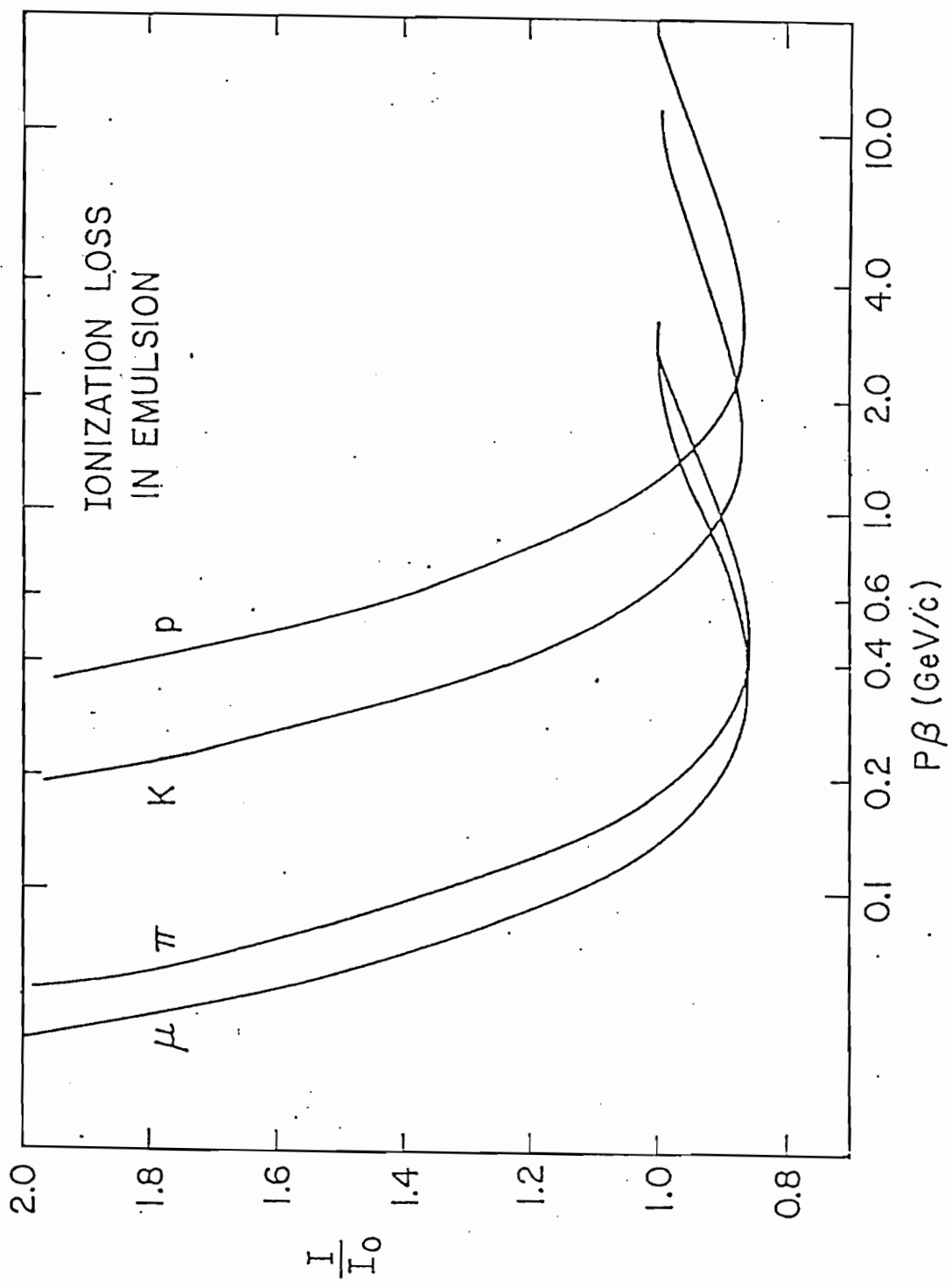
一方、薄塗乾板も同設備を使用して現像を行った。現像時間、条

件等は表 A 1. 2 に示した。薄塗乾板の場合、厚塗りに比べて現像処理による歪みなどが解析に与える影響は小さく、処理液の浸透速度も十分に速く現像むらも生じにくい。従って液温は通常 20 °C 前後で行う。また、定着は直接標準濃度の液を使用すればよく、最終段階のアルコール溶液による脱水も必要はない。しかし、ここではペリクルの処理に使用した液が利用できたので多少なりとも品質の良いものにするためペリクルと同様の処方にて現像した。

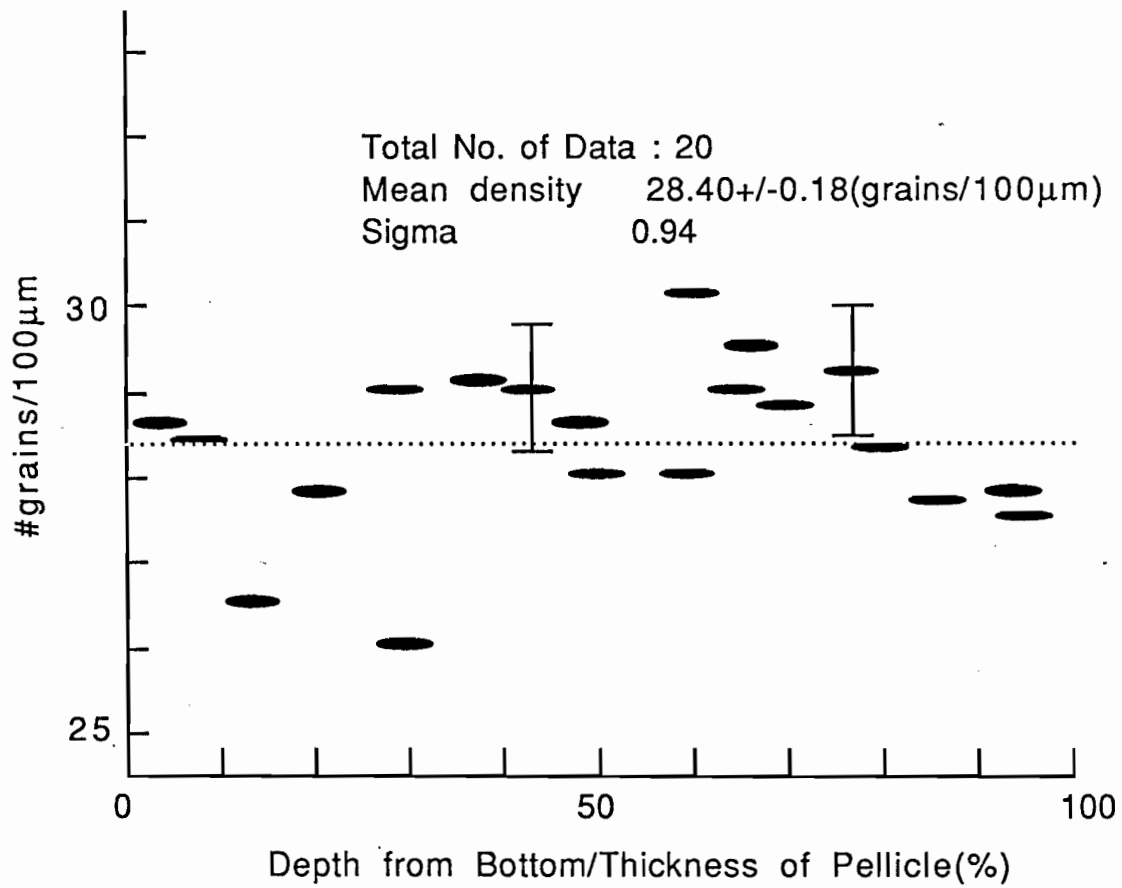
#### A 1 - 5 現像後のペリクルの性能

定着処理により、多量の臭化銀が流出し、乾燥後のペリクルの厚さは、現像前の厚さの約半分になる。この乾燥後の厚さ ( $t$ ) に対するビーム照射時の厚さ ( $T$ ) の比を、シュリンクエージファクター ( $SF = T / t$ ) と呼ぶ。乾板解析の際、厚さ方法の測定値は、すべて、この値を用いて縮みを補正しなければならない。

グレイン密度は、荷電粒子が乾板中で失うエネルギーにより変化する。図 A 1. 13 は、粒子の種類別に  $P\beta$  によるグレイン密度の変化を示したものである。この図よりわかるように運動量が 2 GeV/c 以上の粒子に対する飛跡のグレイン密度は、一定である。このような粒子を最少イオン化粒子と呼ぶ。乾板での粒子の飛跡を、そのグレイン密度  $I$  と、最小イオン化粒子のグレイン密度  $I_0$  の比を基に以下のように分類する。即ち、 $I / I_0 \leq 1.4$  のものを thin track、また、 $1.4 < I / I_0 \leq 4$  のものを gray track、 $4 < I / I_0$  のものを black track、そして、gray track と black track を合わせて heavy track と呼んでいる。また、グレイン密度は、用いた乳剤の種類、及び、現像処理の条件等により異なる。図 A 1. 14 は、E 653 実験で用いた原子核乾板で測定した最少イオン化粒子のグレイン密度である。100  $\mu$ m 当り平均  $28.40 \pm 0.18$  であった。



図A1. 13  $I/I_0$ と $P\beta$ の関係



図A1.14 グレイン密度とペリクル底面からの距離の関係

## 付録2 データサマリーテープ (D S T)

各検出器のデータ、及び、乾板の測定データ、そして運動学的フィットの結果等の情報は全てD S T (データサマリーテープ) に記録される。D S Tには、例えばS S D各層のヒット位置等の生データとそれらから得られるデータサマリーとが記録されている。データサマリーは、以下に示すようなモジュールに分けられている。

- ( 1) Header module
- ( 2) Vertex module
- ( 3) Emulsion module
- ( 4) Spectrometer module
- ( 5) Liquid Argon Calorimeter module
- ( 6) Hadron Calorimeter module
- ( 7) Inferred Tracks module
- ( 8) Muon Spectrometer module
- ( 9) Kinematic Fit module
- (10) Spare module

また、各モジュールは、更にサブモジュールに分けられている。例えば、vertex moduleでは一つ一つ反応点毎に、またspectrometer moduleでは、一本一本の飛跡毎にサブモジュールを形成している。

各モジュールのデータは全て4バイトの整数型で記録されており、決められたスケールをかけることにより実際の値に変換する。



### 付録 3 運動学的フィットの方法

原子核乾板で測定を行った崩壊候補に対しある崩壊モードを仮定し、その親粒子と崩壊により生成された娘粒子との間で運動量とエネルギーが保存しているか否かを調べて親粒子の種類（質量）と運動量を決定する。この際の束縛条件は、運動量3成分とエネルギーを合わせた4成分である。運動学的フィットを行うときの束縛条件の数と未知の数によりその呼び方を、3Cフィット、2Cフィット、1Cフィット、0Cフィットというように区別している。

実際に測定できる物理量は、娘粒子に対しては、運動量の大きさ（ $P$ ）、飛跡の角度（ $X_s$ ,  $Y_s$ ）、そして、エネルギー（ $E$ ）の4つである。エネルギーについては、常に測定可能であるとは限らない。また親粒子については、角度は測定できるが、運動量、エネルギーの測定は殆ど不可能である。

親粒子の角度が測定できており、運動量が測定できていない娘粒子がある場合、親粒子の質量を仮定して運動量のフィットを行う。これを3Cフィットと呼ぶ。3Cフィットにおいて親粒子の質量を仮定できないときは、親粒子の質量と運動量をパラメータとしてフィットを行う。これを2Cフィットと呼ぶ。また、崩壊が非常に短い距離で起こっているなどの理由で親粒子の角度が測定できない場合には、1Cフィットを行う。ここでは、親粒子の質量を仮定しその運動量と角度をフィットする。娘粒子の親粒子に対する横運動量のスカラー和が誤差の範囲で0にならない場合には、中性粒子が崩壊によって生成されたと判断し、カウンターが中性粒子を検出しているか否かを確認する。中性粒子が検出されていない場合、もしくは、検出された中性粒子を考慮しても横運動量が保存しないときは、 $\Delta C = \Delta S$ を満足する範囲で中性粒子の生成を仮定し横運動量を保存させる。そうして、親粒子の質量を仮定しその運動量の大きさと中性粒子の運動量と角度を計算する。これを0Cフィットと呼ぶ。

付録4 運動量の推定法

崩壊により生成された荷電娘粒子  $i$  の親粒子に対する角度を  $\theta_i$  とすると、これら  $\theta_i$  の幾何平均  $\langle \tan \theta \rangle_g$  は、

$$\langle \tan \theta \rangle_g = \exp \{ \langle \log (\tan \theta) \rangle \}$$

と計算できる。

一般に、娘粒子の数が多ければ、親粒子の重心系で、娘粒子が等方的に放出されると考えて良い。それ故、 $\langle \log (\tan \theta) \rangle$  は、

$$\begin{aligned} \langle \log (\tan \theta) \rangle &= \{ \int \log (\tan \theta) \times 2\pi \sin \theta \cdot d\theta \} / (4\pi) \end{aligned}$$

と表される。

一方  $\tan \theta$  は、親粒子のローレンツ因子を  $\gamma$  とすると、

$$\begin{aligned} \tan \theta &= P_T / P_L \\ &= P \cdot \sin \theta \cdot / \{ \gamma (P_L \cdot + \beta E \cdot) \} \\ &= P \cdot \sin \theta \cdot / [ \gamma \{ P \cdot \cos \theta + \beta (P \cdot^2 + m^2) \} ] \\ &\sim \sin \theta \cdot / \{ (\cos \theta \cdot + 1) \} \end{aligned}$$

と書ける。ここで、実験室系でのチャーム粒子の運動量が大きく、その質量は娘粒子の質量に比して十分に大きいので、 $\beta \sim 1$ 、 $P \cdot^2 \gg m^2$  で近似した。従って、

$$\langle \log (\tan \theta) \rangle = -\log \gamma$$

となる。故に、

$$\langle \tan \theta \rangle_g = 1 / \gamma$$

で与えられる。

チャーム粒子の運動量は、その質量を  $M$  とすると、

$$P = M \beta \gamma$$

であるから、

$$P = M / \langle \tan \theta \rangle_g$$

となる。

こうして運動量は、角度の情報のみから推定できる。但し、E 5 3 1 実験で収集したチャーム粒子について、運動学的フィットで求められた運動量  $P_{meas}$  と、上述の方法で求めた運動量  $P_{calc}$  とを比較

した結果、以下のような相関があることがわかった (A4.1)。

荷電一体崩壊の場合  $P_{\text{meas}} = (1.94 \pm 0.78) P_{\text{cal}}$

荷電二体崩壊の場合  $P_{\text{meas}} = (0.81 \pm 0.43) P_{\text{cal}}$

荷電三体崩壊の場合  $P_{\text{meas}} = (0.86 \pm 0.22) P_{\text{cal}}$

荷電四体崩壊の場合  $P_{\text{meas}} = (0.71 \pm 0.17) P_{\text{cal}}$

従って、この式を用いて補正した推定運動量は、20～50%の誤差を含んだものである。

参考文献リスト

- 文献 1. 1     PARTICLE DATA BOOKLET  
M.Aguilar-Benitez et al.(Particle Data Group)  
Phys.Lett. 170B,1(1986)
- 文献 1. 2     第5の相互作用  
R.v.Eötvös,D.Pákar, and E.Fekete Ann.Phys.(Leipzig) 68,11(1922)  
E.Fischbach et al. Phys.Rev.Lett. 56,3(1986)
- 文献 1. 3     電弱相互作用  
S.L.Glashow Nucl.Phys. 22,579(1961)  
A.Salam and J.C.Ward Phys.Lett. 13,168(1964)  
S.Weinberg Phys.Rev.Lett. 19,1264,(1967)  
C.Quigg 'Gauge Theories of Strong, Weak and Electromagnetic  
Interactions' (Benjamin and Cummins, Reading,1983)
- 文献 1. 4     ウイークボソンの発見  
G.Arnison et al. Phys,Lett. 122B,103(1983)  
M.Banner et al. Phys.Lett. 122B,476(1983)  
P.Bagnaia et al. Phys.Lett. 129B,130(1983)
- 文献 1. 5     クォーク模型  
M.Gell-Mann Phys. Lett. 8,214(1964)  
G.Zweig CERN Report 8419/Th 412,1964
- 文献 1. 6     6つのクォークの予言  
M.Kobayashi and K.Maskawa Prog.Theor.Phys. 49,282(1972)
- 文献 1. 7     J/ $\psi$ の発見 ( S L A C )  
J.E.Augustin et al. Phys.Rev.Lett. 33,1406(1974)
- 文献 1. 8     J/ $\psi$ の発見 ( B N L )  
J.J.Aubert et al. Phys.Rev.Lett. 33,1404(1974)
- 文献 1. 9     Tの発見  
S.W.Herb et al. Phys.Rev.Lett. 39,252(1977)  
W.R.Innes et al. Phys.Rev.Lett. 39,1240,1640(E)(1977)
- 文献 1. 10    ボトム粒子の直接観測  
J.Albanese et al. Phys.Lett. 158B,186(1985)

- 文献 1. 1 1 7 番目のクォークの存在を示唆する実験結果  
 TRISTAN TOPAZ, AMY and VENUS group HIGH ENERGY QUARTERLY 5-2 (1988)
- 文献 1. 1 2 E 5 3 1 実験におけるチャーム粒子寿命測定結果  
 N. Usida et al. Phys. Rev. Lett. 45, 1049 (1980)  
 N. Usida et al. Phys. Rev. Lett. 45, 1053 (1980)  
 N. Usida et al. Phys. Rev. Lett. 48, 844 (1983)  
 N. Usida et al. Phys. Rev. Lett. 51, 2362 (1983)  
 N. Usida et al. Phys. Rev. Lett. 56, 1771 (1986)  
 N. Usida et al. Phys. Rev. Lett. 56, 1767 (1986)
- 文献 1. 1 3 ハイブリッド・エマルジョン・スペクトロメータを用いた最初の実験  
 E. H. S. Burhop et al. Nuovo Cimento 39, 1037 (1965)
- 文献 1. 1 4 E 6 5 3 実験のproposal  
 'E-653 proposal to measure charm and B decays via hadronic production in a hybrid emulsion spectrometer' (1981)
- 文献 2. 1 E 6 5 3 実験装置  
 G. Oleynik Ph.D. thesis, The Ohio State University (1987)  
 'Hybrid Emulsion Spectrometer for the Detection of Hadronically Produced Heavy Flavor States' to be submitted to Nucl. Inst. Meth.
- 文献 2. 2 バーテックス SSD  
 J. Dunlea Ph.D. thesis, The Ohio State University (1987)
- 文献 2. 3 スペクトロメータドリフトチェンバー  
 S. Krivatch et al. Proceedings of the XXIII International Conference on High Energy Physics, Berkeley 1464 (1986)
- 文献 6. 1 ハドロン相互作用によるチャーム粒子の生成  
 Kerman and Van Dalen Phys. Rep. 106, 297 (1984)  
 C. Caso Proceedings of the 1985 Kyoto International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energy, Kyoto 488 (1985)  
 S. Reucroft Proceedings of the 6th International Conference on Physics in Collision, Chicago 193 (1986)  
 S. Reucroft Proceeding of the Hadronic Session of the XXI Rencontre de Moriond, Les Arcs 323 (1986)  
 C. Caso 'Heavy Flavour Production and Decay : An Experimental Review'  
 INFN GE/AE 87-03, Invited talk given to The International Conference On Changing Faces of Physics of Particles and Nuclei, Varanasi, India (1987)  
 B. D'Almagne 'Hadro and Photoproduction of c and b Hadrons'

LAL 87-52(1987)

P.Weilhammer 'Review of Recent Experimental Results on Hadroproduction of Heavy quarks' CERN-EP/88-08(1988)

文献6. 2 Flavour excitationモデル

B.L.Combridge Nucl.Phys. B151,429(1979)

V.barger,F.Halzen and W.Y.Keung Phys.Rev. D25,112(1979)

P.Mazzanti and S.Wada Phys.Rev D26,602(1982)

文献6. 3 Intrinsic charmモデル

S.J.Brodsky,P.Hoyer,C.Peterson and N.Sakai Phys.Lett. 93B,451(1980)

S.J.Brodsky,C.Peterson and N.Sakai Phys.Rev. D23,2745(1981)

文献6. 4 CERN - I S Rのチャーム粒子実験

K.L.Giboni et al. Phys.Lett. 85B,437(1979)

W.Lockman et al. Phys.Lett. 85B,443(1979)

M.Basile et al. Lett.Nuovo Cimento 30,487(1981)

文献6. 5 Leading particle effect

M.Basile et al. Lett.Nuovo Cimento 30,487(1981)

M.Aguilar-Benitez et al. Phys.Lett. 123B,98(1983)

M.Aguilar-Benitez et al. Phys.Lett. 123B,103(1983)

M.Aguilar-Benitez et al. Phys.Lett. 161B,400(1985)

M.Aguilar-Benitez et al. Z.Phys. C31,491(1986)

文献6. 6 チャーム粒子対の方位角の差に関する実験報告

M.Auguliar-Benitez et al. Phys. Lett. 164B,404(1985)

M.Auguliar-Benitez et al. CERN/EP 88-49(1989)

S.Aoki et al.Phys.Lett. 209B,133(1988)

文献A 1. 1 原子核乾板ペリクルの製作とその性質

藤岡五郎等 神戸大学大学院自然科学研究科紀要2-B:1-14(1984)

文献A 4. 1 運動量の推定

皆川双葉 修士論文(1988)

その他参考にした文献

阿部務 修士論文(1987)

武田勝 修士論文(1987)