平成１２年２月１４日

平成１１年度共同開発研究報告会資料

研究課題

# リニアコライダーのための補償型タイルファイバーカロリメータの高エネルギービームを用いたビームテスト- II

（９９ー０２６）

研究責任者氏名　　竹下　徹
所　属　機　関　　信州大学理学部

## [1] 研究の概要

標準理論を超えた物理を探究するために、電子陽電子衝突型線形加速器（以下リニアコライダーと略）の開発が世界の主要な研究所で進められている。質量の起源たるHiggs粒子や統一理論の担い手たるSUSY 粒子を研究するためには超高性能の加速器と超高性能の測定器（以下LCD と略）が必要であり、カロリメータに対しては40%/√E+2%（２乗和）という優れたハドロンエネルギー分解能が要求されている。このようなエネルギー分解能は、補償型と呼ばれるサンプリング型カロリメータでのみ達成することが可能である。

タイルファイバー型のカロリメータが補償型として機能し、LCD で要求されるエネルギー分解能を達成出来ることを実証するために、神戸大･甲南大･信州大･筑波大･KEK･UCLA からなる我々のグループでは1996年度から共同開発研究を行なっている。1996-97年度においては直線ファイバー型及びシグマループ型タイルファイバー形式のテストモジュールの製作し、KEK-PS において系統的なビームテストを行なった。これにより補償型構成をもつタイルファイバー型カロリメータの性能のうち、比較的低エネルギー領域についてはその性能を確立した。同時にハドロンシャワーの基本的性質についても系統的な知験を得た。

リニアコライダー実験における反応生成粒子のエネルギーは、2-3GeVから100GeV以上に渡る。このためLCD のカロリメータにおいては、高エネルギー領域での性能もまた極めて重要である。またエネルギー分解能において、統計項（40%/√E項）は主として低エネルギーにおける実験で詳しく調べられるが、定数項（+2%項）を調べるためには高い入射エネルギーが必要となる。このため1998-99年度においては、1996-97年度の共同開発研究で製作したタイルファイバー型のカロリメータモジュールを用いてFNAL でテスト実験を行ない、高エネルギーにおける性能を確立することを目的とした共同開発研究を行なった。98年度においてはFNAL の運転が行なわれなかったためビームテストは行なわず、高エネルギーテスト実験に向けた各種シミュレーションスタディやFNAL 実験エリアの現地調査･資料収集、及びその結果を受けての各部品の性能チェック･置き換えやカロリメータモジュール全体の改造/増強を行なった。また Letter-of-Intent と実験申請書をFNAL に提出した。

1999年度(本件研究)においては実験についてのMoUをFNAL と実験グループの間で締結し、TexasA&M の高エネルギーグループの協力を得てFNAL の高エネルギービームを用いたテスト実験を行ない、カロリメータの高エネルギーにおける性能を測定した。

以下本資料においてはFNAL におけるビームテストの実施状況とその成果について報告する。

[2] 研究組織

| | | |
|---|---|---|
| 研究代表者 | 竹下　徹 | 信州大学理学部助教授 |
| 研究従事者 | 古川啓太郎 | 信州大学大学院工学系研究科博士前期 2 年 |
| | 宮島明里 | 信州大学大学院理学研究科修士 2 年 |
| | 武田　廣 | 神戸大学理学部教授 |
| | 野崎光昭 | 神戸大学大学院自然科学研究科教授 |
| | 川越清以 | 神戸大学理学部助教授 |
| | 金谷奈央子 | 神戸大学大学院自然科学研究科博士 2 年 |
| | 杉本佳之 | 神戸大学大学院自然科学研究科修士 2 年 |
| | 竹内　彰 | 神戸大学大学院自然科学研究科修士 2 年 |
| | 梶野文義 | 甲南大学理学部教授 |
| | 金　信弘 | 筑波大学物理学系教授 |
| | 浅川高史 | 筑波大学物理学系研究員 |
| | 大石龍太郎 | 筑波大学物理学系研究員 |
| | 中川敦子 | 筑波大学物理学系一貫博士課程 2 年 |
| | 大田辰郎 | 筑波大学物理学系修士 2 年 |
| | 魚住　聖 | 筑波大学物理学系一貫博士課程 1 年 |
| | 神前純一 | 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所助手 |
| | 藤井芳昭 | 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所助手 |
| 米国側共同研究者 | | |
| | Teruki Kamon | Texas A&M, Associate Professor |
| | James Done | Texas A&M, Research Associate |

[3] 研究報告

3.1 背景

リニアコライダーにおける実験は極めて高品質のビームと電子陽電子を用いることによるクリアな事象という非常に優れた特質をもっているが、このような優れた特質を最大限に引き出すためには極めて高性能な測定器が要求される。ほとんどの物理プロセスの精密研究においては 2 ジェット質量再構成によってW粒子とZ粒子を良いS/Nで分離出来ることが不可欠であり、このためにはW粒子やZ粒子の自然幅程度よりも良い 2 ジェット質量分解能が必要である。このような高精度の 2 ジェット質量再構成を行なうためには、

a) エネルギー分解能及びエネルギー測定の線形性が優れていること、
b) 細かくセグメント化された電磁シャワー発達部測定により、高性能なクラスタートラックマッチング及び光子/中性パイ中間子識別ができること、
c) 細かくセグメント化された電磁シャワー本体測定部をもち、電磁粒子とハドロン粒子が高い精度で識別でき、かつ中性クラスターと荷電トラックの偶発的な重なりあいが十分防げること、

等の条件を満たすことが必要である。加えてLCD カロリメータは巨大なシステムであることから、現実的なコストで製作出来ることも極めて重要である。このため超細グラニュラリティを必要とし必然的に高コストとなるソフトウェア補償型よりも、ハードウェア補償型の方がLCD には適している。

我々のグループでは上記の条件を満たしうる最も有力な候補として補償構成比をもつタイルファイバー型のサンプリングカロリメータを採用し、図 1 に示すような構造をもつカロリメータテストモジュールを製作して系統的なテストを行なった。このテストモジュールは鉛の板とシンチレータの板を 2 本のレールの上から吊り下げる構造をしており、鉛とシンチレータの構成比率を広い範囲にわたって細かく変えることができる。このテストモジュールを用いてKEK-PS においてビームテストを行ない、エネルギー分解能やe/π比の鉛とシンチレータの構成比率に対する依存性やタワー境界のレスポンス等を詳しく測定した。これにより補償構成比をもつタイルファイバー型ハドロンカロリメータについての、比較的低いエネルギー領域 (1-4GeV) における特性を把握した。

図１. タイルファイバー型ハドロンカロリメータテストモジュールの概念図。
左図は直線ファイバー型、右図はシグマループ型のテストモジュール。

1999年度においてはシグマループ型のテストモジュールをFNAL の中間子実験ホールに持ち込み、高エネルギー (10-200GeV) のビームを用いて性能測定を行なった。このモジュールについては、既に1998年度の共同開発研究によって高エネルギービームテストに向けてのスタディ、改造を行なってある。このスタディ、改造の内容については既に1998年度の報告書で報告済みであるので省略する。

3.2 実験日程

実験及び付随する各種作業は以下の様な日程で行なわれた。

| | |
|---|---|
| 5 ー 6 月 | KEK 東カウンターホールにおいて発送準備作業。 |
| 6 月21日 | KEK から発送。光電子増倍管やシンチレータアセンブリなどの壊れやすい部品や、鉛薄板のような壊れやすい重量物など取扱が難しい物品が多いため、基本的に梱包は我々自身で行なった。海上コンテナへの積み込みは輸送業者が行なった。 |
| 7 月14日 | 先発隊FNAL 到着。実験室準備等の荷物の受け取り準備作業やFNAL から借用する機材の借り出し･組み上げ開始。 |
| 8 月 4日 | FNAL に測定器一式到着。荷物の開梱･検査、及び測定器組立作業開始。 |
| 8 月15日 | 本隊FNAL 到着。 |
| 9 月 1日 | 組み上げ完了。実験室査察合格。 |
| 9 月 8日 | ビームチューニング開始。 |
| 9 月10日 | ビーム権獲得。実験開始。 |
| 9 月28日 | 測定完了。測定器解体･梱包作業開始。 |
| 10月11日 | 測定器一式KEK へ送り出し。 |
| 11月25日 | 測定器一式KEK に到着。 |

3.3 実験装置

ビームテストはFNAL の中間子実験ホール (MesonDet. BLDG.) のE-741エリアにおいて行なった。ビームラインに設置してある汎用駆動架台と本テストモジュールとの組み上げ設置の様子を図 2 に示す。駆動架台については高さ調整のための改造も含めFNAL 側によって整備が行なわれた。またE-741エリアの天井の開口部が事前に入手した図面情報よりも小さく測定器の搬入が出来なかったため、この天井についてもFNAL 側によって開口部拡大改造が行なわれた。

カロリメータはKEK での実験時よりも若干厚みを増強し中心部の光電子増倍管をよりダイナミックレンジの広いものに交換したが、基本的にはKEK で実験した装置と同一のものである。図 1・2 に示されるようにモジュールはシグマループ型の本体とその後方の直線ファイバー部、最後尾のシャワーリークベトー部から構成される。また本体全面にはプリシャワー･シャワーマックス測定器があり、取り付けた状態と取り外した状態での測定を行なった。さらに全体をタワー貫通ミューオンを捕まえるためのミューオンマトリックス測定器で挟み込んである。これらは全て駆動架台の上に設置されており、カロリメータ本体と共に計数室からリモートで上下左右に動かす事ができる。

シグマループ部は 5 x 5 のタワー構造をもち、奥行き方向に 4 分割されている。直線ファイバー部は横方向のセグメント分割は無く、奥行き方向には 9 分割されている。合わせて約 7λ の厚みをもっている。横方向のサイズは 1 mx 1 mと、横方向リークに対して十分な大きさをもっている。プリシャワー測定器直線ファイバー型、シャワーマックス測定器はシンチストリップ型の測定器である。

ビームライン機器としては以下の様な測定器を用いた。これらのビームライン機器はカロリメータとは独立に固定されていて、不動である。これらのビームライン機器の配置も模式的に図 2 に示した。

| | | |
|---|---|---|
| シンクロトロン輻射測定器 | 電子識別用 | FNAL 常設機器 |
| SWDC □ | トラッキング用 | FNAL 常設機器 |
| トリガーシンチレータ | トリガ用 | 日本より搬入 |
| シンチファイバーカウンター | トラッキング用 | 日本より搬入 |
| MWPC □ | トラッキング用 | FNAL より借用して設置 |
| パイオンタギングカウンター | パイオン識別用 | 日本より搬入 |
| ミューオンカウンター | トリガ用 | FNAL 常設機器 |
| チェレンコフカウンター | 粒子識別用 | FNAL 常設機器であるが解体され使用不能 |

図 2 . ビームライン及び測定器本体のレイアウト図。

データ収集系はPC-LinuxとNIM/CAMAC を用いて構築した。このシステムは約10kイベント/スピルのデータ収集速度をもつ( 1 スピル=20秒)。これにより電子データ収集においてはビーム強度が、パイオンデータ収集においてはデータ収集系の速度が律速となった。使用したADC はCAMAC のLeCroy 2285A (15bit,24ch)である。

PC及び一部のCAMAC 、NIMモジュールは日本から持ち込んだが、大部分のモジュールはFNAL より借用した。ケーブルは信号遅延用も含めて全て日本から持ち込んだ。

3.4 実験結果

実験においては、

a) エネルギー分解能、特に定数項、
b) エネルギー測定の線形性とダイナミックレンジ、
c) 電磁シャワーとハドロンシャワーに対する出力比 ( いわゆるe/π比 ) 、
d) タワー構造におけるタワー境界のレスポンスの特異性、
e) プリシャワー・シャワーマックス測定器のe/π識別性能、及び位置分解能

の 5 点を測定することを目的とした。測定は 10GeV-200GeVの e, π, μ 混合ビームを用いて行なった。但し 2 次、 3 次ターゲットの組み合わせにより、ある程度の粒子組成のエンリッチは可能であった。また本測定に先立ちビームの組成の測定を行なった。これはビームラインがBTeV テスト実験用に組み替えられて以降全くそのような測定が行なわれていなかったためである。

e/π比の鉛厚に対する依存性を確認するため 2 種類の鉛厚構成に組み替えて測定を繰り返す予定であったが、ビームラインのチューニングに手間取ったことと予想外にビームの組成が汚かったために測定に時間がかかり、構成の組み替えは行なわなかった。以下に示す結果は全て鉛:シンチ=8:2の構成のものである。

実際の測定は以下の様な手順で行なわれた。

1) ビーム組成測定兼ビームチューニング
2) Calibration(50GeV, e-tune,π-tune) □ ; with PreShower/ShowerMaxCounters
3) EnergyScan(10GeV - 200GeV, e-tune,π-tune) □ ; with PreShower/ShowerMaxCounters
4) PositionScan(50GeV, e-tune,π-tune) □ ; with PreShower/ShowerMaxCounters
5) Calibration(50GeV, e-tune,π-tune) □ ; withoutPreShower/ShowerMaxCounters
6) EnergyScan(10GeV - 200GeV, e-tune,π-tune) □ ; withoutPreShower/ShowerMaxCounters
7) PositionScan(50GeV, e-tune,π-tune) □ ; withoutPreShower/ShowerMaxCounters
8) Calibration(50GeV π-tune) □ ; withoutPreShower/ShowerMaxCounters

3.4.1 ビーム組成

測定されたビーム中の粒子の組成を図 3 に示す。これは広面積のパイオンタギングカウンターの波高分布を用いて、MIP 1 粒子のみがカウンターを通過したイベントをピックアップしたものである。各チューンにおける各粒子の割合は悪くないが、問題は電子チューンにおける単一粒子成分の割合の低さである。図 3 から90%以上のイベントにおいて、ビームライン上流で多重粒子発生を引き起こしていることがわかる。E-741ビームラインは複数ユーザーによる串差しビームラインであるため、上流に設置された測定器群 ( 情報によれば

非常に薄いものだとのことではあるが）の影響を強く受けたものと思われる。この結果単一粒子イベントを十分な統計でためるため、予定よりも非常に長い実験時間を必要とすることとなった。

図3.ビーム中の粒子の組成及び強度。

3.4.2 タワー較正

カロリメータ本体は電動駆動架台の上に設置されている。これにより全てのタワーに直接ビームを打ち込んでゲイン較正を行なった。較正はまず最初に50GeVのe-tuneおよびπ-tuneのビームを用いて、その後定期的にπ-tuneのビームを用いて行なった。

カロリメータの各タワーは奥行き方向に4セグメントに分割され、さらにその後方にも後部セクションが存在する。最前面のセグメント以外には直接ビームを照射することが出来ないため較正の基本はπ-tuneビーム中に含まれるミューオンとし、これが各セクションを貫通する時のエネルギーデポジットを用いて相対ゲインの較正を行なった。全体の規格化は電子中心入射を用いて行なった。また電子が直接打ち込める最前面のセクションについては、電子イベントでクロスチェックを行なった。図4に典型的なミューオンのエネルギーデポシットスペクトルを示す。このフィティングにより直接入射の電子を使うことの出来ない後方セクションにおいても約1%の精度で較正係数が決められる。

図4.ミューオンのエネルギーデポシットスペクトル

3.4.3 エネルギースキャン

測定器中心にビームを入射して、エネルギー分解能とエネルギー測定の線形性を測定した。測定エネルギーは公称値 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200GeVの7点である。測定されたpionについてのリニアリティを図5に示す。横軸はビームエネルギーで、運動量分析磁石の値で補正済みである。またプロットしたイベントはカロリメータ最後尾のリークベトー部を用いて後方シャワーリークイベントを除去したものである。これから1%のリニアリティが確保されている事がわかる。

図6にはエネルギー分解能を示した。図5と同じく後方シャワーリークイベントは除去してある。低エネルギーで分解能が悪化する傾向が見られるが、これについてはビームクォリティが悪い可能性も含めて現在解析中である。この10GeVのデータを除外したフィットの結果は、プレリミナリながら

$$\sigma_E/E = 44.1\%/\sqrt{E} + 0.0\% \quad \text{for pions}$$

であった。

図5.pionについてのエネルギー測定のリニアリティ

図6.pionについてのエネルギー分解能

3.4.4 タワー境界レスポンス

低エネルギーにおけるタワー境界のレスポンスの特異性については、既にKEKにおけるビームテストで測定した。高エネルギーになることにより特異性が変化する理由は特に見当たらないが、今回も入射位置をスキャンしてタワー境界のレスポンスについて測定した。これについては現在解析中である。

3.4.5 PreShower/ShowerMax測定器による粒子識別

2ジェット質量を精度良く再構成するためにはトラックとクラスターを正確に対応付けすることが必要であり、高精度のシャワーマックス測定器が必要である。また高性能のプリシャワー/シャワーマックス測定器の組み合わせは $\pi^0/\gamma$ の識別にも威力を発揮する。今回のビームテストにおいてはタイルファイバー系と構造的に相性が良く、また比較的安価なシンチストリップ型のシャワーマックス測定器とタイルファイバー型の

プリシャワー測定器を組み込んだ性能測定も行なった。図 7 に e/π 識別の結果を示す。プリシャワー測定器の波高（横軸）とシャワーマックス測定器のプロファイル（縦軸）のカットにより、電子の検出効率96%においてパイオンの混じりを1/56に抑えることが出来ている。

図 7 .プリシャワー･シャワーマックス測定器での e/π 識別

3.5 KEK でのテスト結果との比較･接続

図 8 にエネルギー分解能を、また図 9 には e/π 出力比を、KEK でのビームテストの結果とFNAL での結果をあわせて示した。実験間の系統誤差の評価がまだ出来ていないので、誤差棒にはそれは含まれていない。

図 8 .エネルギー分解能（KEK データ+FNAL データ）

□ 印は直線ファイバーモジュールの、また○ 印はシグマループ型モジュールのKEK でのビームテストの結果。また● 印はシグマループ型モジュールのFNAL でのビームテストの結果。

図 9 .e/π 出力比（KEK データ+FNAL データ）

○ 印は直線ファイバーモジュールのKEK での、また● 印はシグマループ型モジュールの FNAL でのビームテストの結果。FNAL での結果の誤差棒は統計誤差のみ。

シグマループ型モジュールのエネルギー分解能については、KEK でのビームテストの結果自体がまだ最終的な誤差の評価が終わっておらず、FNAL の結果とKEK の結果の整合性についはまだて議論出来ない。10GeV より上と下の振る舞いの違いについてもリアルな現象であるかどうかはまだ解析中である。

## [4] まとめ

LCD のカロリメータとしてはハードウェア補償型のタイルファイバーカロリメータが最適であるとの観点から、過去 5 年に渡りテストモジュールの製作、ビームテストを行なってきた。今回のFNAL でのビームテストはその締めくくりとなるものである。結果は現在解析中であり、特にKEK-PS における低エネルギービームテストの結果との接続には系統誤差の評価等が必要である。

現時点での途中結果から、プレリミナリながら以下の様な結論が得られる。

1) エネルギー測定の線形性は1%程度と良い。またパイオンの波高分布も殆どテールのないガウス分布が得られた。これはKEK における低エネルギービームテストでe/π=1のハードウェア補償が実現されていたことから予想されていたが、これが裏付けられた。
2) エネルギー分解能としてはパイオンに対して $\sigma_E/E = 44.1\%/\sqrt{E} + 0.0\%$ が得られた。定数項が小さい事もまた、ハードウェア補償が実現されていたことから予想されていた通りである。統計項が若干悪めに出た原因については、一層の検討が必要である。
3) e/π=1が確認された。e/π比は一般にエネルギーが高くなれば 1 に近づくので、予想通りの結果である。

プリシャワー･シャワーマックス測定器の結果、及びタワー境界のレスポンスについては、まだ解析中で結論は得られていない。

今回の実験でほぼ予想された通りの結果が得られたことは、LCD カロリメータの設計に向けて極めて大きな収穫であった。エネルギー分解能が若干悪めに出ているが得られた値そのものは許容範囲であり、実機においてこの性能が確保されれば問題とはならない。今回の結果により構造的なR&D はほぼ完了したと考えて良く、今後の鍵はいかにして実機においてこの性能を実現するかというクオリティコントロールになると思われる。