

修士学位論文  
ILCカロリメータプロトタイプのシミュ  
レーションによる性能評価

神戸大学理学研究科物理学専攻  
粒子物理学研究室 ILCグループ  
071s106s 上山敬五

平成21年2月6日

# 目次

第1章	ILC 実験	1
1.1	ILC 実験の物理	1
1.1.1	ヒッグス粒子とは	1
1.1.2	ヒッグス粒子の生成過程	2
1.1.3	ヒッグスの崩壊過程	2
1.2	測定器構想	3
第2章	カロリメータ	8
2.1	カロリメータの構造と原理	8
2.2	カロリメータの性能	9
2.2.1	エネルギー分解能	10
2.2.2	1 粒子エネルギー分解能	11
2.2.3	ジェットエネルギー分解能	12
2.2.4	グラニュラリティー	12
第3章	測定器シミュレーション	15
3.1	粒子と物質の相互作用シミュレーション	15
3.2	Geant4	18
3.2.1	Geant4 とは何か	18
3.2.2	Geant4 が提供すること	18
3.2.3	ユーザーが行うこと	19
第4章	研究：カロリメータのシミュレーションによる性能評価	21
4.1	研究内容	21
4.1.1	DESY ビームテスト	21
4.1.2	DESY ビームテストで用いたカロリメータの構造	22
4.1.3	DESY ビームテストで用いたカロリメータのシミュレーションによる性能評価	24
4.2	Shower Shape	25

4.2.1	Show	Shower Shape . . . . .	25
4.2.2	吸収体	にタングステンコバルトを使った場合 . . . . .	26
4.2.3	吸収体	にタングステンを	27
4.3	Show	er Leak . . . . .	29
4.3.1	Show	er Leak . . . . .	29
4.3.2	吸収体	にタングステ	30
4.3.3	吸収体	にタングステンコバルト	32
4.4	何ら補正	を入れない場合 . . . . .	34
4.4.1	エネルギー	損失 . . . . .	34
4.4.2	エネルギー	分解能とリニアリティー . . . . .	38
4.5	シンチレータ	の Uniformity を考慮した	
		場合のエネルギー分	
		解能 . . . . .	39
4.5.1	Uniformity	. . . . .	39
4.5.2	エネルギー	損失 . . . . .	40
4.5.3	エネルギー	分解能とリニアリティー . . . . .	41
4.6	MPPC の	Saturation 効果を考慮した	
		場合のエネルギー分	
		解能 . . . . .	43
4.6.1	MPPC の	Saturation 効果 . . . . .	43
4.6.2	エネルギー	損失 . . . . .	45
4.6.3	エネルギー	分解能とリニアリティー . . . . .	45
4.7	Calibration	Constant . . . . .	48
4.7.1	エネルギー	損失 . . . . .	48
4.7.2	エネルギー	分解能とリニアリティー . . . . .	52
4.8	上記3つの	補正を同時に考慮した	
		場合 . . . . .	55
4.8.1	エネルギー	損失 . . . . .	55
4.8.2	エネルギー	分解能とリニアリティー . . . . .	56

第5章 まとめ

# 目次

1.1	真空の対称性があるビッグバン直後と対称性の破れた現在の様子	2
1.2	真空の対称性があるビッグバン直後と対称性の破れた現在の様子	5
1.3	ヒッグス粒子の質量とそれにともなう崩壊分岐比 (Branching Ratio)	5
1.4	ヒッグス粒子の崩壊過程: * は仮想粒子を表す	6
1.5	ILC の測定器概念図 (上) 現段階での検出器のデザイン (下) 左が検出器の断面図 (ビーム軸上から見たもの)、右が検出器を真横から見たもの	7
2.1	電磁シャワーの様子	9
2.2	カロリメータにおける荷電粒子の反応	10
2.3	$e^- \rightarrow W^+W^-$ , $e^- \rightarrow Z^0Z^0$ を用いたジェット質量再構成シミュレーションの様子	12
2.4	グラニュラリティーの高いカロリメータを使ったときのジェット分解	14
3.1	水中の 8MeV の positron の対消滅	18
4.1	DESY ビームテストでのビームラインのセットアップ	21
4.2	カロリメータの構造	22
4.3	シンチレータ層の構造	23
4.4	実際のビームテストでビームラインに沿って置かれた ECAL テストモジュール; タングステン板が挿入されている。	24
4.5	Geant4 によるシミュレーションの様子	25
4.6	吸収体にタングステンコバルトを使った場合の Shower Shape (右上はビームテスト解析結果)	26

4.7 Shower Maximum(左:シミュレーション 右:ビームテスト解析結果)	27
4.8 吸収体にタングステンを使った場合の Shower Shape(右上はビームテスト解析結果)	28
4.9 Shower Maximum(左:シミュレーション 右:ビームテスト解析結果)	28
4.10 Shower Leak のシミュレーション方法	30
4.11 吸収体にタングステンを使った場合の Shower Leak(低エネルギー)	31
4.12 吸収体にタングステンを使った場合の Shower Leak(高エネルギー)	31
4.13 吸収体にタングステンコバルトを使った場合の Shower Leak(低エネルギー)	33
4.14 吸収体にタングステンコバルトを使った場合の Shower Leak(高エネルギー)	33
4.15 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (タングステンを用いた場合)	35
4.16 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (タングステンコバルトを用いた場合)	36
4.17 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (ビームテスト解析結果)	37
4.18 リニアリティー (左:タングステンを用いた場合のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)	38
4.19 エネルギー分解能 (左:タングステンを用いた場合のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果)	38
4.20 リニアリティー (左:タングステンコバルトを用いた場合のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)	39
4.21 エネルギー分解能 (左:タングステンコバルトを用いた場合のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果)	39
4.22 ストリップシンチレータの Uniformity	40
4.23 Uniformity の関数	41
4.24 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (Uniformity80%)	42
4.25 リニアリティー (左:Uniformity80%の場合のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)	43

4.26	ストリップシンチレータの Uniformity を 80 % に設定した場合のエネルギー分解能 (左:Uniformity80%の場合のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果)	43
4.27	MPCC の Saturation 効果	44
4.28	何ら補正を入れない場合と MPPC のサチュレーション効果を考えた場合のカロリメータ内でのエネルギー損失のヒストグラム (6GeV)	47
4.29	MPCC の Saturation を考慮した場合のリニアリティー	47
4.30	MPCC(1600 ピクセル) の Saturation を考慮した場合のエネルギー分解能 (左:Saturation 効果を考慮した場合のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果)	47
4.31	各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (calibration constant 1%)	49
4.32	各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (calibration constant 3%)	50
4.33	各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (calibration constant 5%)	51
4.34	リニアリティー (左:calibration Constant 1%のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)	53
4.35	リニアリティー (左:calibration Constant 3%のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)	53
4.36	リニアリティー (左:calibration Constant 5%のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)	53
4.37	左:calibration constant 1%のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果	54
4.38	左:calibration constant 3%のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果	54
4.39	左:calibration constant 5%のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果	54
4.40	エネルギー損失のヒストグラム	57
4.41	リニアリティー	58
4.42	エネルギー分解能	58

## 概要

ILC(International Linear Collider) 実験は、Higgs 粒子の探索とその精密測定、そして標準理論を超える新しい物理の探索を目的としている。現在、神戸大学 ILC グループは粒子のエネルギーを測定する粒子検出器であるカロリメータの研究開発を行っている。精密測定を要する ILC 実験の目的達成のためにはカロリメータに対し従来より高い性能が求められる。

2007 年 2 月 26 日から同年 3 月 27 日の期間、DESY- electron synchrotron においてカロリメータの性能評価のためのビームテスト実験を行った。ここで試作したカロリメータは主にシンチレータ層(ストリップシンチレータ+ MPPC)、吸収層(タングステンコバルト)からなる。ストリップシンチレータの Uniformity、MPPC の Saturation 効果等の特質はカロリメータの性能評価の際、重要な要素となる。

本研究は、これらの特質を考慮しつつ、ビームテスト実験の解析結果とシミュレーション結果との比較をし、カロリメータの性能評価を行うとともに、カロリメータのさらなる改良発展に資することを目的とする。

# 第1章 ILC 実験

本章では ILC 実験に関するいくつかの事項について述べる。

## 1.1 ILC 実験の物理

### 1.1.1 ヒッグス粒子とは

標準模型はその原理として素粒子の相互作用を記述するゲージ場理論を用いる。ゲージ場理論が成立するためには全ての素粒子の質量は厳密にゼロでなくてはならないが、現実の世界においてほとんどの素粒子はそれぞれ質量を持っている(光子やグルオンには質量はない)。この矛盾を説明するため、理論的に予言されたのがヒッグス場の存在である。この理論によれば、現在の宇宙はヒッグス場に満たされており、ヒッグス場から抵抗を受けることにより粒子に質量が生じ、宇宙の起源であるビッグバン直後には全ての素粒子が何の抵抗も受けることなく真空中を光速で運動していた。しかしビッグバンから  $10^{-13}$  秒後に自発的対称性の破れが生じて真空に相転移が起こり、真空がヒッグス場で満たされるようになった結果、相互作用を受けた素粒子は質量を持つようになり光速では運動できなくなったと考えられている。光子やグルオンはヒッグス場と反応しないため光速で運動し、質量はゼロである。このヒッグス場を量子化して得られるのがヒッグス粒子である。ヒッグス粒子は発見されれば宇宙における粒子質量の発生も説明できるため、素粒子理論の観点だけでなく宇宙論の観点からも重要な役割を持つ。現在ヒッグス粒子の質量の上限、下限は LEP 実験や Tevatron 実験により、

$$114.4\text{GeV} < m_H < 144\text{GeV} (95 \% C.L.) \quad (1.1)$$

となっている。

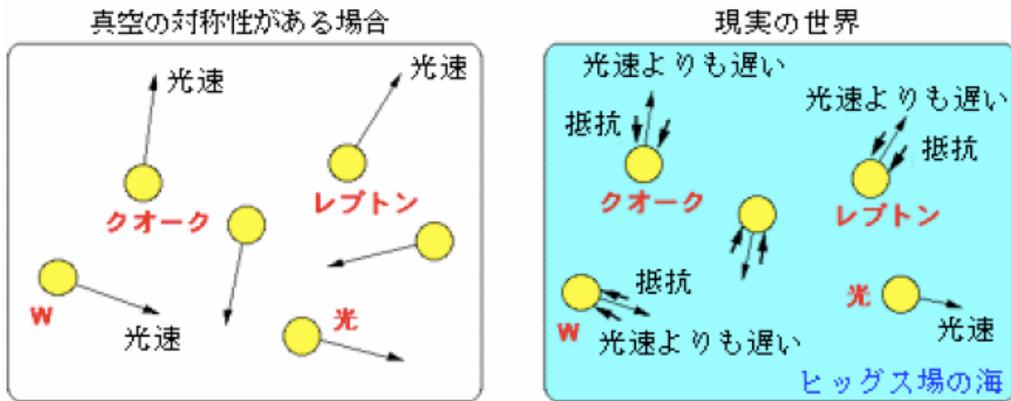


図 1.1: 真空の対称性があるビッグバン直後と対称性の破れた現在の様子

### 1.1.2 ヒッグス粒子の生成過程

ヒッグス粒子を観測するためにはその生成過程を知り、バックグラウンドとの区別をつけることが重要である。電子陽電子衝突におけるヒッグス粒子生成反応の主なパターンは、

$$(a) e^+e^- \rightarrow Z^0 H^0 \quad (1.2)$$

$$(b) e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu} H^0 \quad (1.3)$$

$$(c) e^+e^- \rightarrow e^+e^- H^0 \quad (1.4)$$

等がある。ここで  $H^0$  は中性ヒッグス粒子を表す。(a) の反応は低エネルギーで断面積が大きくなることから軽いヒッグス粒子を探す際に重要になる。一方 (b) や (c) の反応はベクトルボソンフュージョン過程と呼ばれ、1TeV を超えるようなエネルギーで衝突させて際に断面積が大きくなるので、重いヒッグス粒子を探す際に重要になる。図 1.3 にそれぞれの反応のファインマンダイアグラムを示す。

### 1.1.3 ヒッグスの崩壊過程

ヒッグス粒子はそれ自身不安定であり生成後はすぐに崩壊を繰り返すため実際検出器上でそのまま観測することができず、我々は崩壊後の安定になった粒子群を検出し、そのエネルギーからヒッグス粒子の質量を組み直さなければならない。従って、ヒッグス粒子の崩壊反応について

も理解しておく必要がある。ヒッグス粒子のフェルミオン及びウィークボソンとの結合はその質量に比例し、崩壊の部分巾 (崩壊確率) は、

$$\Gamma(H^0 \rightarrow f\hat{f}) \propto \left(\frac{gm_f}{2m_W}\right)^2 \quad (1.5)$$

$$\Gamma(H^0 \rightarrow V\hat{V}) \propto (gm_V)^2 \quad (1.6)$$

$g$  : 結合定数  $V$  : Vector Boson( $W^\pm, Z^0$ )

となる。よってヒッグス粒子は運動力学的に許される範囲内で最も重い粒子への崩壊巾が大きい。しかし 140GeV 以上ではウィークボソン対への崩壊巾は b クォーク対への崩壊巾より大きいので、仮想的な W 粒子を含めて、 $H^0 \rightarrow W^+W^-$  への崩壊巾が最も大きくなる。図 1.3 にヒッグス粒子の崩壊分岐比を、図 1.4 にヒッグス粒子の主な崩壊のファインマンダイアグラムを示す。

## 1.2 測定器構想

電子陽電子衝突型である ILC 実験はバックグラウンドが非常に少なくクリーンな反応を観測できるため精密測定を目的としている。そのため ILC の測定器には高分解能、高感度など、性能の高いものが望まれる。特にヒッグス粒子発見のためには Z 粒子や W 粒子から発生したジェットの再構成および b ジェットの識別は精度良く行えなければならない。そのためにはジェットエネルギー分解能は

$$\sigma_{E_{jet}} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E_{jet}(GeV)}} \quad (1.7)$$

程度が必要であり、これが ILC 測定器開発の目標となっている。また超対称性粒子発見のためには超対称性粒子の崩壊等に特徴的な横運動量欠損のある事象を精度良く測定する必要があり、測定器は十分広い立体角を隙間なく覆うものでなければならない。ILC においては SiD、LDC、GLD、4th と呼ばれる 4 つの測定器コンセプトが提案されており、我々日本グループは GLD の設計を行っている (現在 LDC と GLD が統合され、ILD になりつつある)。ILC の測定器は衝突点のある内側から順に以下のように構成される。

- バージェット検出器

電子陽電子衝突点の極めて近傍に設置され、粒子の飛跡を高精度で測定することにより粒子の崩壊点を検出する。クォークの共鳴状態として生成された B 中間子や D 中間子の崩壊点を見つけ、ジェットが b クォークや c クォークから発生したことを識別する。特に b クォークの同定はヒッグス粒子探索において非常に重要である。バーテックス検出器に入射する粒子束は非常に高密度であるため高い位置分解能が必要とされる。そこでバーテックス検出器には CCD(電荷結合素子) のような二次元分解能の高いモジュールが想定されている。

- 中央飛跡検出器(トラッカー)

荷電粒子の飛跡を検出する。その曲率と磁場の大きさから粒子の運動量を測定することができる。現在 Time Projection Chamber(TPC) の使用が検討されている。ガス中を荷電粒子が通過すると電子とイオンの対が生成され印加した高電圧によってドリフトする。TPC はそのドリフト時間から粒子の通過位置を測定するものである。

- カロリメータ

入射粒子のエネルギーを測定する。飛跡検出器で測定した運動量とカロリメータで測定したエネルギーから入射粒子の質量を求めることができる。カロリメータでは単に入射粒子ジェット全体のエネルギーを測定するだけでなく、個々の粒子のエネルギーに分解することで粒子ジェットの構成要素を同定できるものを考えている。詳しいことは次章で述べる。

- ミューオン検出器

$\mu$  粒子の同定を行う。 $\mu$  粒子は質量が電子よりも重いので電磁シャワーをおこしにくく強い相互作用を起こさないため、非常に透過能力が高くカロリメータも突き抜けて外側まで達してしまう。そこでミューオン検出器は測定器の最も外側を覆う形で設置される。 $\mu$  粒子の運動量は内部の飛跡検出器で測定できるため、その飛跡情報とミューオン検出器のシグナルを繋げることで  $\mu$  粒子の識別を行うことができる。 $\mu$  粒子は新粒子を探索する上で最も他の粒子と区別が付きやすく重要な信号であるため、ミューオン検出器は立体角を広く覆うとともに隙間のないように配置される。

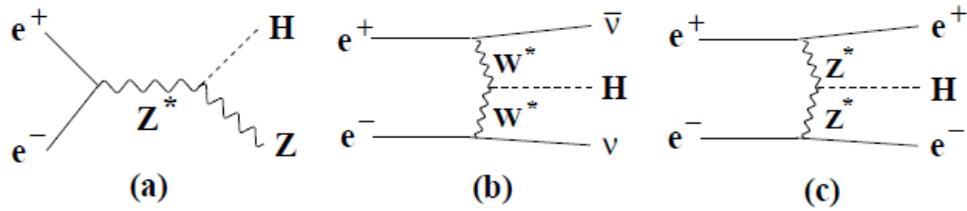


図 1.2: 真空の対称性があるビッグバン直後と対称性の破れた現在の様子

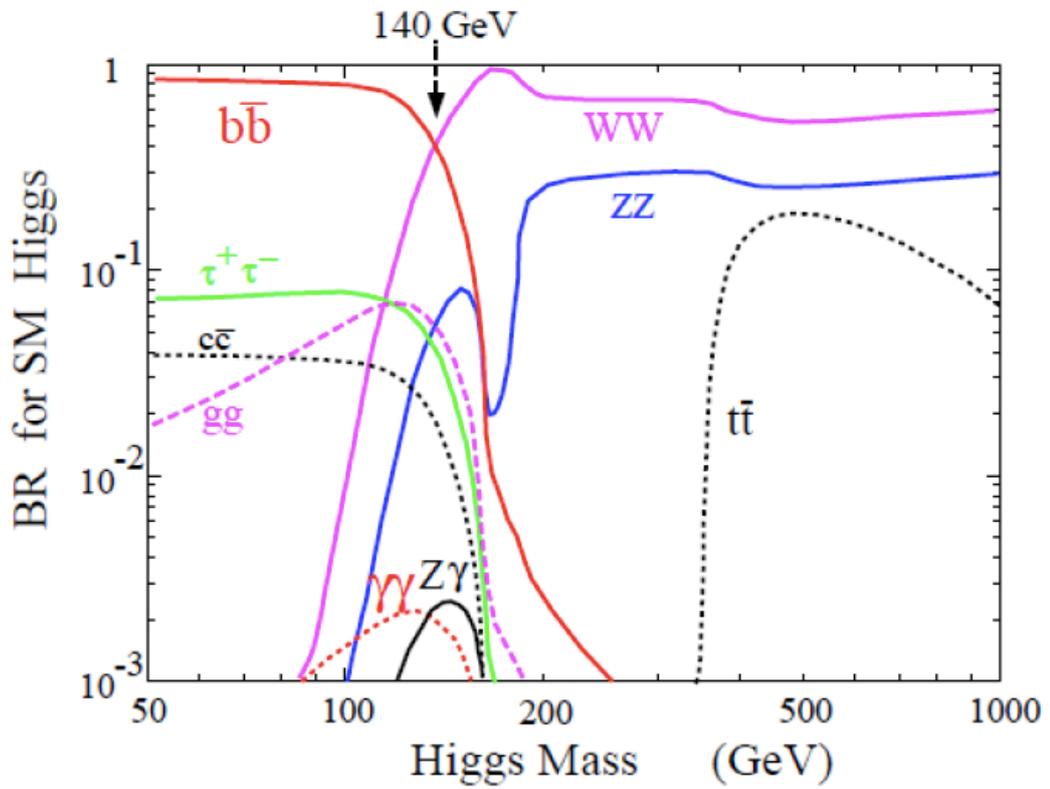


図 1.3: ヒッグス粒子の質量とそれともなう崩壊分岐比 (Branching Ratio)

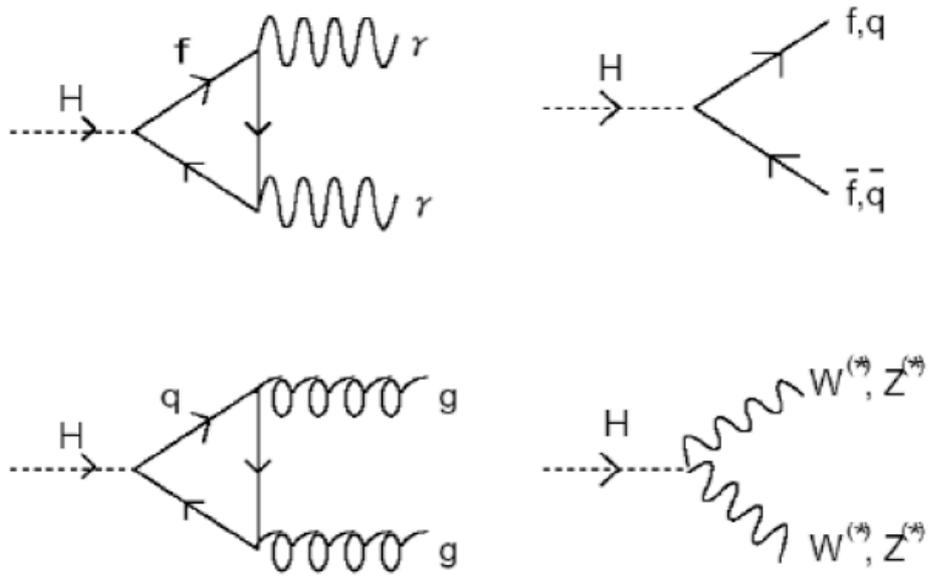


図 1.4: ヒッグス粒子の崩壊過程: \* は仮想粒子を表す

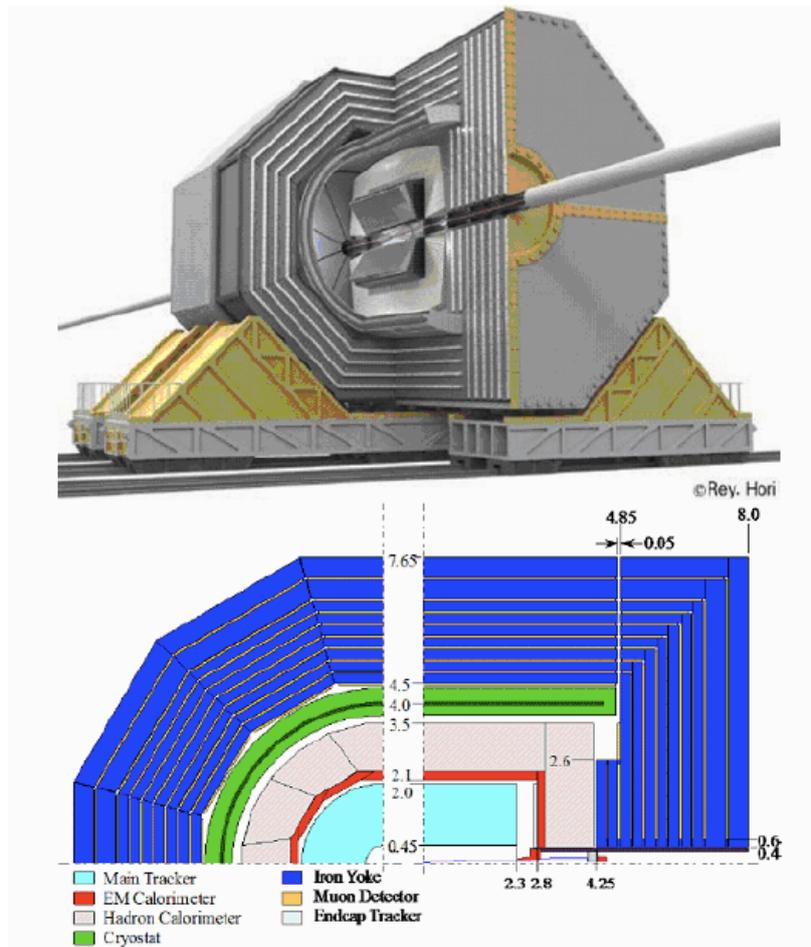


図 1.5: ILC の測定器概念図 (上) 現段階での検出器のデザイン (下) 左が検出器の断面図 (ビーム軸上から見たもの)、右が検出器を真横から見たもの

## 第2章 カロリメータ

神戸大学 ILC グループでは次世代型線形加速器におけるカロリメータの開発を主に行っている。本章ではカロリメータについて述べる。

### 2.1 カロリメータの構造と原理

カロリメータは入射した粒子のエネルギーを光に変換してその光量を光検出器で測定したり (ex:シンチレーター、鉛ガラス...)、直接電気信号に変換して読み出す (ex:Liquid Ar , SiW...) ことでエネルギー測定を行うものである。GLD ではシンチレーターを用いたものを組み込む予定であった。構造としては入射粒子の反応を促進しカロリメータ内のエネルギー損失・反応による二次粒子生成を促進する吸収体と反応によって生成された二次粒子のエネルギーを光に変換する検出体の層の組み合わせからなるサンプリング型カロリメータと吸収体と検出体の両方の性質を持つ物質 (CsI 等の無機シンチレーターや鉛ガラス等のチェレンコフ放射体) を使った全吸収型カロリメータがある。吸収体については鉄・鉛・タングステン・ウランウム等が挙げられ、検出体についてはプラスチックシンチレーターや半導体、ガス、有機液体等が挙げられ、その目的に合わせて選択される。いずれのカロリメータについても電子や光子のエネルギーを検出する電磁カロリメータとハドロンのエネルギーを検出するハドロンカロリメータがある。ハドロンは電子や光子と比べ反応長が長く多くの物質質量が必要とされる為電磁カロリメータの後方にハドロンカロリメータが置かれる。電磁カロリメータにおいて電子や光子はカロリメータに入射すると吸収体にて対生成 ( $e^+e^-$ ) や制動放射 ( $e^-$  or  $e^+e^-$  or  $e^+$ ) を起こし (図 2.1)、発生した粒子 (電子や光子) が検出体の電子を励起する。励起された電子がもとの基底状態に戻った際に発生した光を光検出器に引き入れることで光量を測定するサンプリング型カロリメータについては吸収体、検出体を層状に交互に組み合わせた構造となっているのである検出体の層で停止しない (臨界エネルギーよりも大

きい) 電子や光子は次の吸収体に入射し対生成・制動放射を起こす。このような反応が繰り返されと電磁シャワーと呼ばれるカスケードシャワーが生成される。最終的に電磁カロリメータはこの電磁シャワーのエネルギーを検出することになる。またハドロンについては物質中での弾性もしくは非弾性散乱により二次粒子を発生させこれがイオン化または次なる弾性・非弾性散乱を発生させることでカスケードシャワーを発生させる。これをハドロンシャワーと呼びハドロンカロリメータはこのハドロンシャワーのエネルギーを検出する。電磁シャワーと異なりこのハドロンシャワーは離散的に発生するのでシャワーの起源を特定することが難しいのが特徴である。図 2.2 に模式的な図を示す。

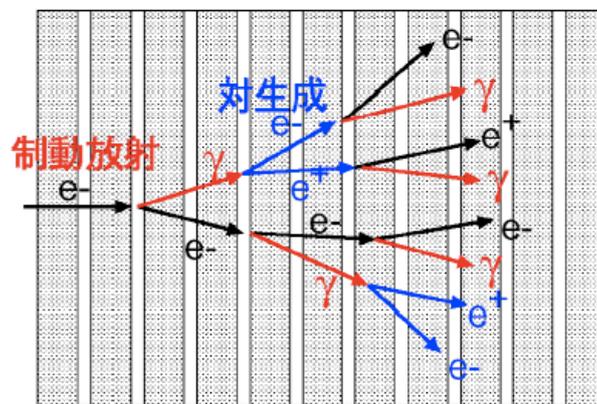


図 2.1: 電磁シャワーの様子

## 2.2 カロリメータの性能

本節では次に挙げるカロリメータに要求される性能及び概念について述べる。

- エネルギー分解能
- 1 粒子エネルギー分解能
- ジェットエネルギー分解能

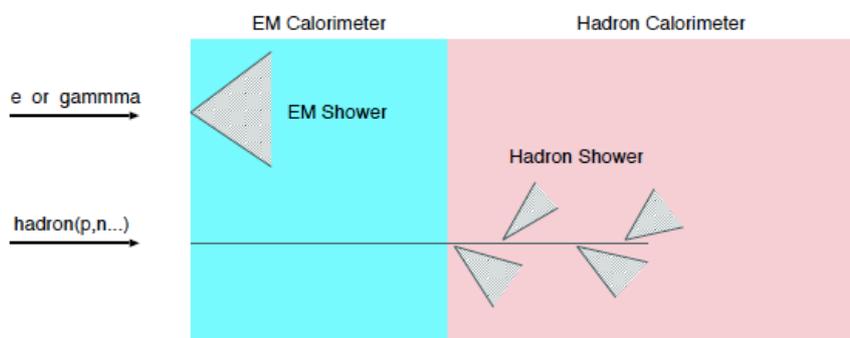


図 2.2: カロリメータにおける荷電粒子の反応

- グラニュラリティー
- 補償の概念

### 2.2.1 エネルギー分解能

カロリメータに入射した粒子のエネルギーをどの程度正確に（揺らぎを少なくして）検出できるかを示すパラメータをエネルギー分解能と呼ぶ。エネルギー分解能は以下の式のように表すことができる。

$$\frac{\sigma_E}{E} = a \oplus \frac{b}{E} \oplus \frac{c}{\sqrt{E}} \quad (2.1)$$

$E$  : 入射エネルギー  $\sigma_E$  : 分解能  $a$  : 定数項 ノイズ項  $c$  : 統計項

ここで、 $A \oplus B = \sqrt{A^2 + B^2}$  を表す。定数項は読み出しチャンネル毎のゲインの不均一性やカロリメータのエネルギーの漏れに起因する。よって入射エネルギーに比例する形を取ることから上の式では定数項となる。ノイズ項については読み出し回路などのエレキ部などのノイズによる寄与を表しているので入射エネルギーに関わらず一定である。これより上の式では  $1/E$  に比例する。最後の統計項については下の三つの寄与に分類できる。

- $\sigma_{int}$  : intrinsic な揺らぎ
- $\sigma_{photo}$  : 検出される光子数の揺らぎ

- $\sigma_{sampling}$  : サンプルングによる揺らぎ (サンプルング型カロリメータについてのみ存在)

ここで  $\sigma_{int}$  とはカロリメータに入射したシャワー自身の揺らぎである。 $\sigma_{photo}$  についてはシンチレータや鉛ガラス等の検出体からの光量検出において光検出器が検出する光電子数の揺らぎで次式のように表される揺らぎである。

$$\frac{\sigma_{photo}}{E} = \frac{1}{\sqrt{N_{p.e.}}} \quad (2.2)$$

最後に  $\sigma_{sampling}$  はサンプルング型カロリメータにおける有感層 (検出体で構成されている層) におちるエネルギーのゆらぎでありサンプルング型カロリメータのエネルギー分解能に寄与する。

## 2.2.2 1 粒子エネルギー分解能

文字通り 1 粒子が入射した際のエネルギーの測定精度である。サンプルング型カロリメータでは主に統計項におけるサンプルング揺らぎがこれに大きく寄与する。光子数揺らぎについては光学系の設計の良し悪しによって決まり、実際最新の設計開発が行われている。これに対してサンプルング揺らぎは検出体と吸収体の構成に依存しており、シミュレーション・ビームテストを通して調査しなければならない。

現在のところ実際に次世代型加速器実験においては、

- 電磁カロリメータ :  $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{15\%}{\sqrt{E(GeV)}} \quad (2.3)$

- ハドロンカロリメータ :  $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{40\%}{\sqrt{E(GeV)}} \quad (2.4)$

が要求されていた。ただしハドロンカロリメータの 40 % という数値は PFA の適用を前提としていない場合に要求される値であり、PFA の適用を前提すると 40 % という値は実現する必要がなく、むしろハドロンカロリメータにおいては 1 粒子のエネルギー分解能よりも次に述べるジェットエネルギー分解能が良いことが重要になる。PFA については後述する。

### 2.2.3 ジェットエネルギー分解能

実際の実験においては4ジェット事象などジェットが絡むイベントを精度良く測る必要がある。これは前章でのべたようにヒッグス発生のイベントは実際に検出できる形としてジェットを伴うものが多いためである。このジェットエネルギー分解能が悪いと質量再構成の際、精度よく組みなおすことが出来なくなるので大変重要な性能である。図2.3にジェット分解能とその時の質量再構成の様子を載せておく。分解能が高いと $W$ と $Z$ 粒子の質量分布をを分離して捉えられていることが分かると思う

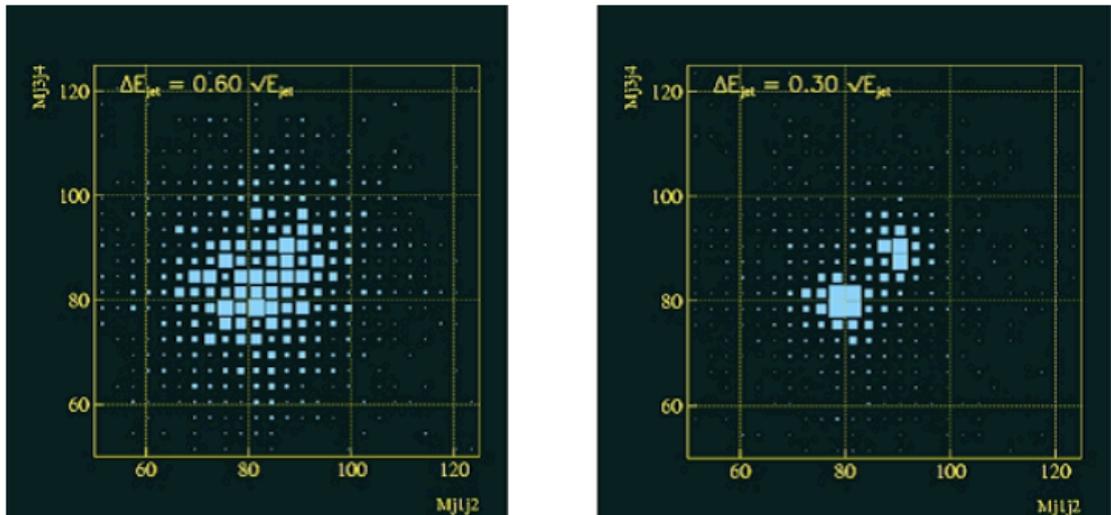


図 2.3:  $pp \rightarrow W^+W^-$ ,  $pp \rightarrow Z^0Z^0$  を用いたジェット質量再構成シミュレーションの様

### 2.2.4 グラニュラリティー

前節で述べたように実際の実験では非常に多くのハドロン・レプトンからなるジェットを精度よく捉えることが重要になる。では精度よく捉えるにはどうすればよいただろうか。答えは捉えるカロリメータの読み出し単位(タイル型カロリメータで言えばタイルのこと)を非常に細かいものにすればよいのである。これは画素のサイズが大きい撮像素子では一定サイズの被写体に対して大雑把な映像しか捉えられないのと同じ具合であ

る。読み出し単位を非常に細かいものにするとジェットの解きほぐし（1粒子1粒子の軌跡に分解すること）が行うことができ、トラックとクラスタの対応付け (Matching) やバックグラウンドの除去なども容易に行うことが出来るはずである。この読み出し単位の細度をグラニュラリティー (Granularity) といい、細かければ細かいほどグラニュラリティーがいいという。

しかしこの概念には問題がある。それはこれを実現するには、

- 読み出しチャンネル数が莫大なものになり、コストが大変高くなってしまう (コストの問題)
- 均一な応答を保持するのが難しい (均一性 (uniformity) の問題)
- ファイバー読み出しの場合、効率よく読み出すには不感部分 (デッドスペース) が大きくなってしまう (取り回しの問題)
- 読み出し単位を小さくすると同時に読み出し単位から得られる光量も小さくなりノイズとの区別がつかない (S/N 比の問題)

などのことが障害となることである。但しこれらの問題にも解決策がある。それは単価が低く、かつ p.e. 分解能および量子効率の高い検出器で無感部分を小さく出来るような光検出器を用いればよいのである (当然であるが...)

最後に図 2.4 にグラニュラリティーがいいカロリメータに対してジェットがどう捕らえられるか (シミュレーション) を示す。

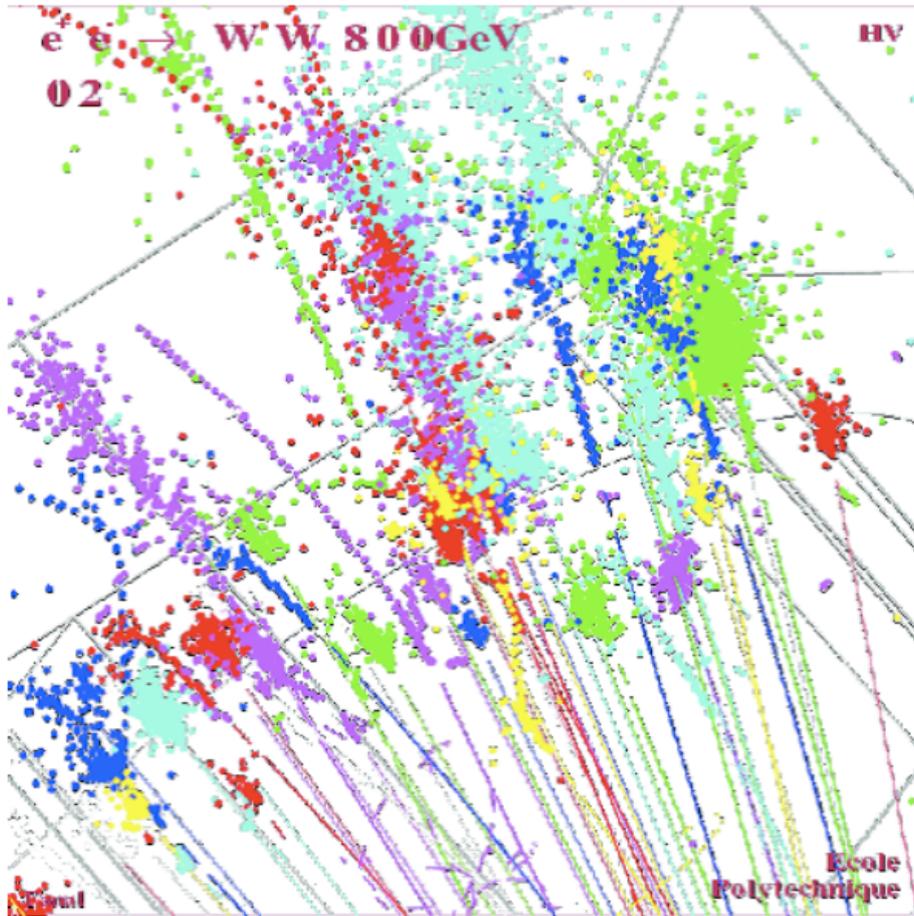


図 2.4: グラニューラリティーの高いカロリメータを使ったときのジェット分解

## 第3章 測定器シミュレーション

この章では、まず粒子の測定器、つまり粒子と物質の相互作用をシミュレーションするとは何かを説明する。さらにその際に用いるツールキットである Geant4 について述べる。

### 3.1 粒子と物質の相互作用シミュレーション

高エネルギー実験に限らず粒子と物質の相互作用を検出する測定器シミュレータには一般的に次のことが求められる。

- 測定器の構造をプログラム内で組み立てることができること。
- モンテカルロ法に基づいて物質内での粒子の相互作用をシミュレートすることにより入射した粒子をプログラムが自動的に輸送できなければならないこと。

モンテカルロ法とは乱数を用いた統計サンプリングを何度も行なうことにより近似解を求める数学的手法であり、測定器シミュレーションの核となる。以下で粒子と物質の相互作用に関する、モンテカルロ法について基本的概念である「粒子が今どこの物質内にいるかに関わらず乱数を振ることができる」ということを説明する。

基本的概念

次のことを定義する。

- $P(x)$  粒子が距離  $x$  進んだ後、物質と相互作用しない確率。
- $w dx$  粒子が位置  $x$  と  $x + dx$  の間で物質と相互作用する確率。

ここで  $w$  は

$$w = N \cdot \sigma \quad (3.1)$$

である。 $N$  は単位ボリウム内のターゲット粒子の数、 $\sigma$  は相互作用の cross section である。

したがって、この定義から  $P(x + dx)$  は粒子が位置  $x + dx$  で物質と相互作用しない確率であるから  $P(x)$  と  $w dx$  を用いて次のように表せる。

$$P(x + dx) = P(x)(1 - w dx) \quad (3.2)$$

ここで  $1 - w dx$  は  $dx$  の間で粒子が物質と相互作用しない確率である。この微分方程式を解くと

$$P(x) = \exp(-wx) \quad (3.3)$$

となる。ここで  $P(0) = 1$  とした。

相互作用の生成

位置  $x$  から  $x + dx$  内で粒子が物質と相互作用する確率を  $P_{int}(x)$  とすると上記により

$$P_{int}(x) dx = P(x) w dx \quad (3.4)$$

である。ここで  $P_{int}(x)$  を PDF (Probability Density Function) と呼ぶ。一方、これの積分

$$\int_0^x dx P_{int}(x) = \int_0^x dx w P(x) = \int_0^x dx w \exp(-wx) = 1 - \exp(-wx) \quad (3.5)$$

を CDF (Cumulative Distribution Function) と呼ぶ。

ここで、

$$= 1 - \exp(-wx) \quad (3.6)$$

となる。この  $x$  は  $[0, 1]$  の一様乱数である。ここから

$$x = -\ln(1 - \text{rand})/w \quad (3.7)$$

となる。

異種混成の物質の中での粒子と物質の相互作用の生成

上記で

$$x = -\ln(1 - \dots)/w \quad (3.8)$$

となったがこの  $x$  は長さの次元を持ち物質に依存する。1 したがって粒子を物質内で輸送する際に物質に依存しない無作為抽出ができない。しかしながら、 $w$  を左辺に移した

$$xw = -\ln(1 - \dots) \quad (3.9)$$

の右辺は物質には依存しない。したがって次のように平均自由行程を定義する。

$$\lambda = \frac{\int dx x P(x)}{\int dx P(x)} = 1/w \quad (3.10)$$

したがって、この  $\lambda$  を用いて  $xw$  は

$$x/\lambda = -\ln(1 - \dots) \quad (3.11)$$

と書き直すことができる。よって平均自由行程  $\lambda$  を単位とすることによって粒子がどの物質と相互作用しているのかに依存しない形で一様乱数を与えることができる。この  $[x/\lambda]$  を Number of Mean Free Path (NMFP) と呼ぶ。

粒子輸送

粒子は段階的にステップ踏んで行くやりかた (stepwise manner) で輸送されていく。その例を図 3.1 に示す。

以下でこの粒子の輸送のされ方を説明する。

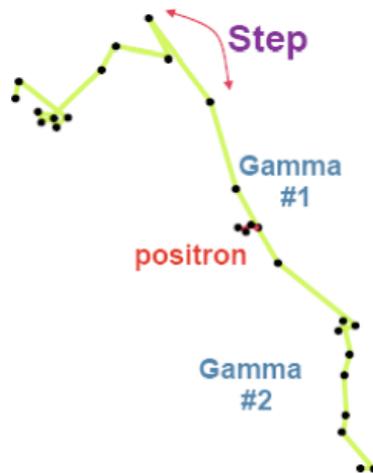


図 3.1: 水中の 8MeV の positron の対消滅

## 3.2 Geant4

### 3.2.1 Geant4 とは何か

Geant4(GEometry ANd Tracking 4)とは粒子と物質の相互作用をシミュレーションする汎用ソフトウェア・ツールキットである。高エネルギー物理学実験 (HEP, High Energy Physics) で使われる測定器の振る舞いをシミュレーションすることを第一義として開発されたが、設計段階から HEP 以外の分野での応用も考慮されていた。現在では宇宙、医療をはじめとする広い分野でも使用されている。

### 3.2.2 Geant4 が提供すること

Geant4 はシミュレーションしたい事象に含まれている粒子を、物質および外部電磁場との相互作用を考慮しつつ、次のいずれかの条件が成り立つまでトランスポート (輸送) する。

1. 運動エネルギーがゼロになるまで。
2. 相互作用により消滅するまで。
3. ユーザが指定するシミュレーション空間の境界 (世界の果て) に到達するまで。

さらに、粒子のトランスポートのさまざまな段階で、ユーザがシミュレーションに介入できる手段を提供してくれる。例えば、

- ・ 測定器の有感部分に粒子が入ると、その時点での粒子の運動学情報を用いて、ユーザが任意のデータ処理を行える。

- ・ 粒子をトランスポートする途中のステップで、ユーザが任意のデータ処理を行える。

- ・ 一つの粒子のトランスポートの最初と最後に、ユーザが任意のデータ処理を行える。

等である。

また Geant4 は以下を提供している。

1. シミュレーションを対話的に或いはバッチ処理として実行する手法。
2. シミュレーション過程を各種グラフィック・ツールで可視化できる手段を提供する。
3. シミュレーションのチェック、デバッグ・ツールを提供する。

### 3.2.3 ユーザーが行うこと

Geant4 がしてくれないことを以下に説明する。

必要最低限の情報はユーザが Geant4 に知らせなければならない。

ユーザーは粒子をトランスポートするにあたり、最低限必要となる以下の3つの情報を与えなければならない。

1. 測定器の構造情報
2. シミュレーションしたい事象に含まれる粒子の種類、始点と運動量ベクトル。
3. 粒子をトランスポートするにあたり、Geant4 が考慮すべき粒子および相互作用の種類。

さらに、シミュレーションを意味あるものにするには、以下の情報のいずれか或いは全てをユーザから与えられなければならない。

1. 外部電磁場がある場合、その分布情報。
2. 粒子トランスポートのさまざまな段階でユーザが行いたいデータ処理。

Geant4 はツールキットである。

一般的に使える実行可能なシミュレーションプログラムの提供はしてくれない。

Geant4 はツールキットであり、ユーザは用意されているコンポーネントを使って自分で必要なシミュレーションプログラムを組み立てなければならない。具体的にはメインプログラムをユーザが書かなければならないということである。

正しいシミュレーション結果は自動的に与えられるわけではない。

ユーザは必ず、自分がどのような条件でシミュレーションをしているかを理解する必要がある。例えば

- ・いくつかのパラメータ（例：Production Threshold）の調整が必要。
  - ・Geant4 の用意している粒子相互作用のうち、適用範囲の正しいものを選択しているか。
- 等が挙げられる。

# 第4章 研究：カロリメータのシミュレーションによる性能評価

## 4.1 研究内容

### 4.1.1 DESY ビームテスト

2007年2月26日から同年3月27日の期間、DESY-II electron synchrotron において、カロリメータの性能評価のためのテスト実験を行った。本実験では1GeV から6GeV のポジトロンビームが使われた。

図4.1 にビームラインのセットアップを示す。

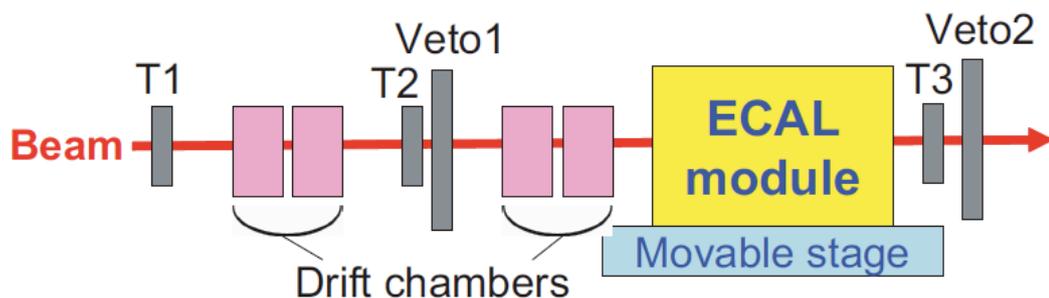


図 4.1: DESY ビームテストでのビームラインのセットアップ

本章以降、この DESY ビームテストの解析結果とシミュレーション結果との比較を行う。

#### 4.1.2 DESY ビームテストで用いたカロリメータの構造

図4.2に示すように、カロリメータはシンチレータ層、吸収層、Gap層の3層を有し、これら3層を1セットとしたときの26セットからなる。

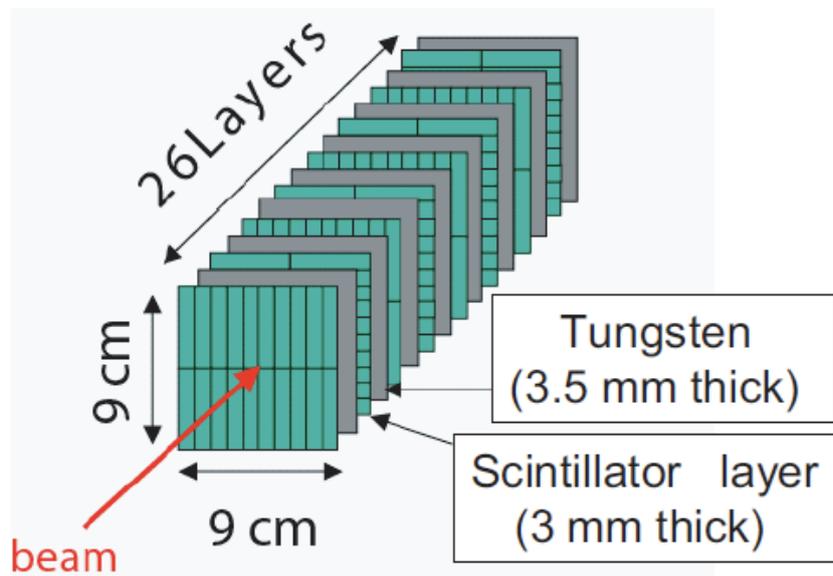


図 4.2: カロリメータの構造

シンチレータ層は  $1.0\text{cm} \times 4.5\text{cm} \times 3.0\text{mm}$  のシンチレータ 18 本からなる。各シンチレータ内部にはWLS(波長変換)ファイバーを通してあり、また、片方の先端にはMPPCを取り付けてあり、粒子がストリップシンチレータ内を通過する際に落とすエネルギーを測定することができる。

##### シンチレータ

荷電粒子が媒質を通過する際、媒質は入射粒子との相互作用によりエネルギーを受け取る。このエネルギーは媒質構成原子の電離、励起エネルギーに変換される。通常励起エネルギーは媒質の熱運動エネルギーに変換されるが、励起エネルギーの一部を可視光の放出に変換する媒質が存在する。このような媒質をシンチレータと呼び、シンチレータから放出される光をシンチレーション光と呼ぶ。

##### WLS(波長変換) ファイバー

WLS ファイバーは、外部からの特定の波長の光を吸収し、それより長波長の光 (緑色光) を再発光する物質 (波長変換材) が溶かし込まれたプラスチックファイバーである。一般に使われている光ファイバーはファイバー側面からの光を光ファイバー内に捕獲し、ファイバー内を伝送させることはできない。しかし、WLS ファイバーはファイバー内で再発光された光のうち全反射角を満たすものであれば、ファイバー中を伝送することができる。このため、シンチレーション光を直接光電子増倍管に導くことが難しい場合、いったんシンチレーション光を WLS ファイバーへ入射し、再発光した光を光電子増倍管に導くという使い方ができる。

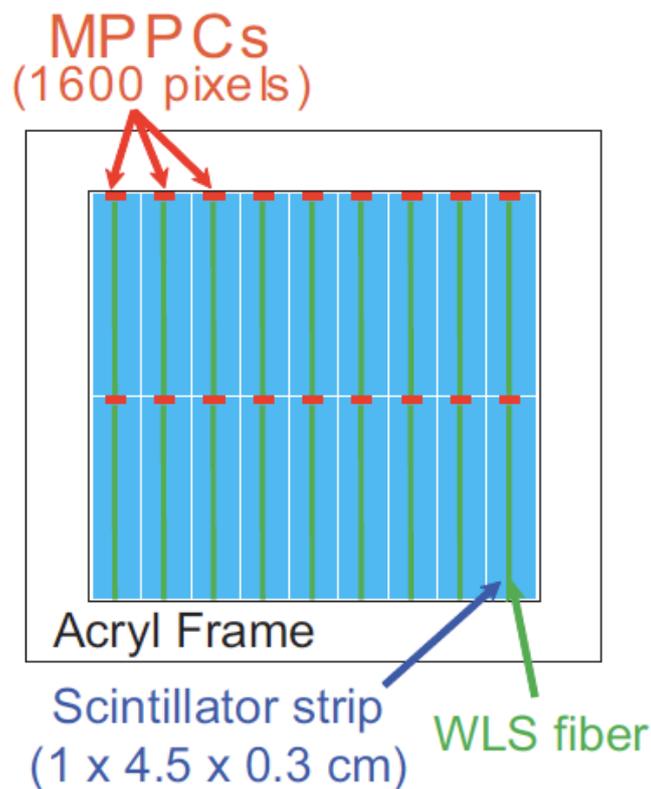


図 4.3: シンチレータ層の構造

吸収層は 9.0cm × 9.0cm × 3.0mm のタンゲステン板からなる。この層があることにより、電磁シャワー現象を促進させることができる。このタンゲステン板は 88 %タンゲステン、12 %コバルトからなる物質である。

Gap 層は 9.0cm × 9.0cm × 1.0mm の空気層である。主にケーブル等の配置のために設けられた空間である。

図 4.4 に実際のビームテストの様子を示す。

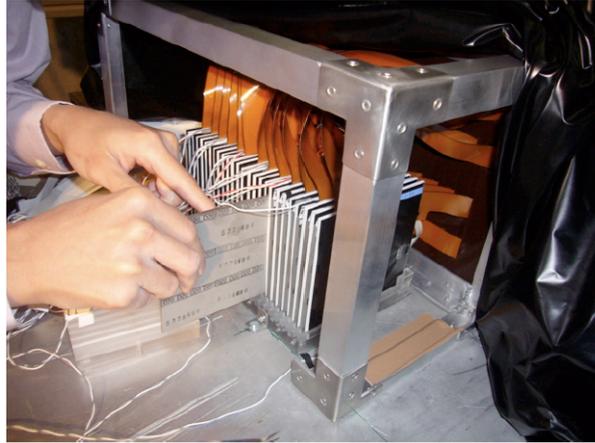


図 4.4: 実際のビームテストでビームラインに沿って置かれた ECAL テストモジュール；タングステン板が挿入されている。

#### 4.1.3 DESY ビームテストで用いたカロリメータのシミュレーションによる性能評価

Geant4.9.0 を用いて様々な補正を組み込んで、シミュレーションによるカロリメータの性能評価を行った。ここに言う補正とは、主に MPPC の Saturation 効果、ストリップシンチレータの CalibrationConstant と Uniformity である。

エネルギー分解能等の実質的なカロリメータの性能評価の前に、まずはシャワーシェイプのシミュレーションを行い、ここでシミュレーションの信頼性を担保すると共にカロリメータの設計段階で重要なシャワーリークを考える。

次に、カロリメータの性能評価の第 1 段階として何ら補正を入れない場合を考え、第 2 段階として各々の補正のみを入れた場合を考え、そして第 3 段階として 3 つの補正を同時に入れた場合を考え、ビームテストの解析結果と照らし合わせる。

図 4.5 に Geant4 によるシミュレーションの様子を示す。

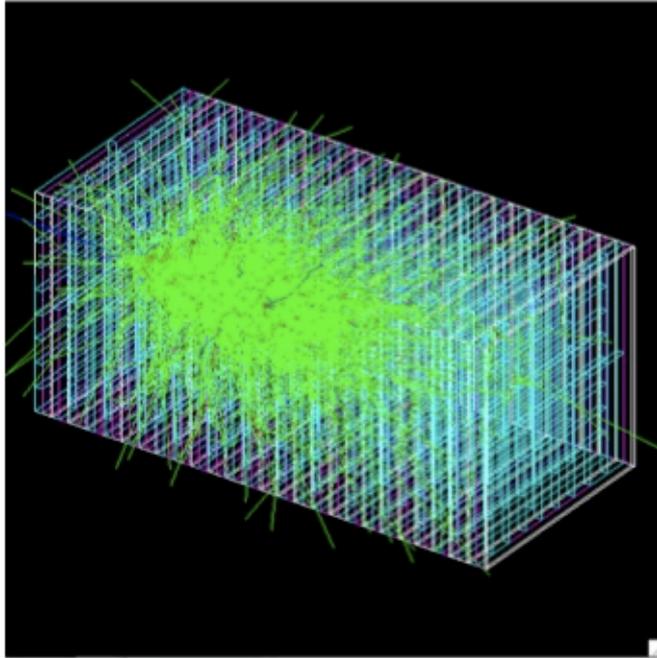


図 4.5: Geant4 によるシミュレーションの様子

## 4.2 Shower Shape

### 4.2.1 Shower Shape

Shower Shape とはカロリメータ内で起こる電磁シャワーの縦方向の位置分解能を示すものであり、横軸にカロリメータのレイヤーナンバー、縦軸にそのレイヤー内でのエネルギー損失の平均をとる。

シミュレーションの設定

シミュレーションの設定を以下に述べる。

- 入射粒子：ポジトロン
- 入射粒子のエネルギー：1GeV から 6GeV
- イベント数：3000 回
- ビームの入射位置：カロリメータ中央

- ストリップシンチレータの Uniformity : 80 %

上記設定下において、本節のシミュレーションを行った。  
以下、吸収体の材質の違いに分けて結果を示す。

#### 4.2.2 吸収体にタングステンコバルトを使った場合

図 4.6 に吸収体にタングステンコバルトを用いた場合の Shower Shape のシミュレーション結果と実際のビームテストの解析結果から得られた同グラフを示す。この図から、シミュレーションにより 1GeV から 6GeV のシャワーの形状をほぼ再現できている。

また、図 4.7 に吸収体にタングステンコバルトを用いた場合の Shower Maximum のシミュレーション結果と実際のビームテストの解析結果から得られた同グラフを示す。これもシミュレーションにより 1GeV から 6GeV の Shower Maximum の位置をほぼ再現できている。

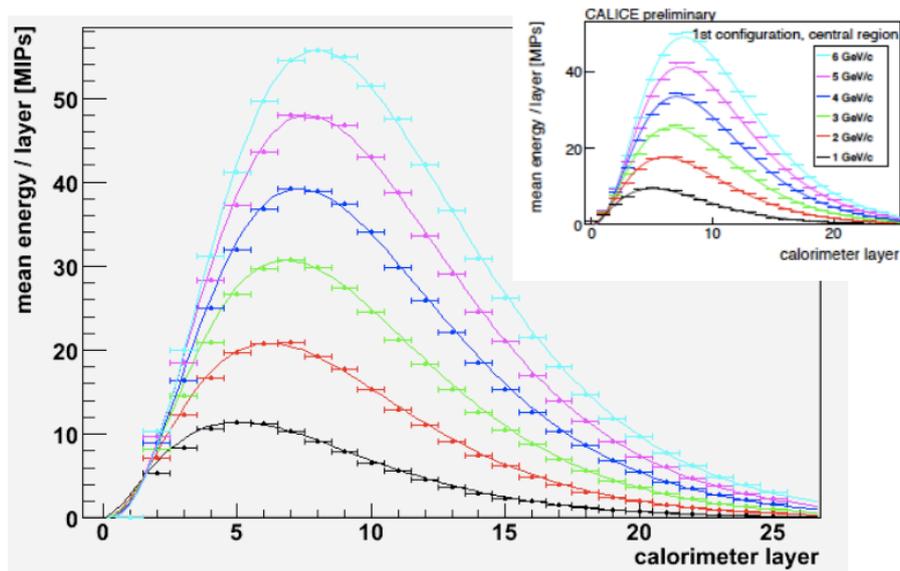


図 4.6: 吸収体にタングステンコバルトを使った場合の Shower Shape(右上はビームテスト解析結果)

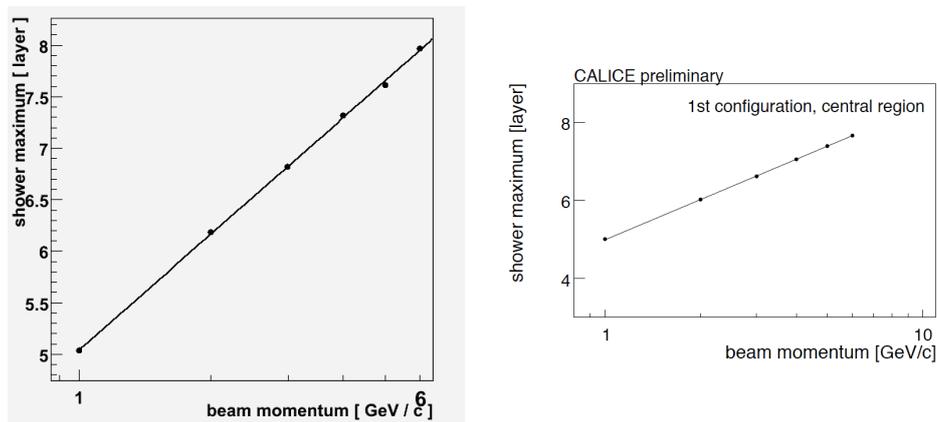


図 4.7: Shower Maximum(左:シミュレーション 右:ビームテスト解析結果)

#### 4.2.3 吸収体にタングステンを使った場合

図 4.8 に吸収体にタングステンをを用いた場合の Shower Shape のシミュレーション結果と実際のビームテストの解析結果から得られた同グラフを示す。この図から、シミュレーションによるシャワーの形状と実際のビームテストの解析結果から得られたシャワーの形状が異なっていることがわかる。これは、タングステンの方がタングステンコバルトよりも単位体積当たりの質量が大きいので、カロリメータ内のより前方で電磁シャワーが起きるためである。このような性質により、吸収体にタングステンをを用いた場合の方が高エネルギー実験におけるカロリメータ内の十分なエネルギー損失を可能とする。それ故、我々は本番の実験においては吸収体にタングステンをを用いる予定である。

また、図 4.9 に吸収体にタングステンをを用いた場合の Shower Maximum のシミュレーション結果と実際のビームテストの解析結果から得られた同グラフを示す。Shower Maximum の位置が合っていないことがわかる。

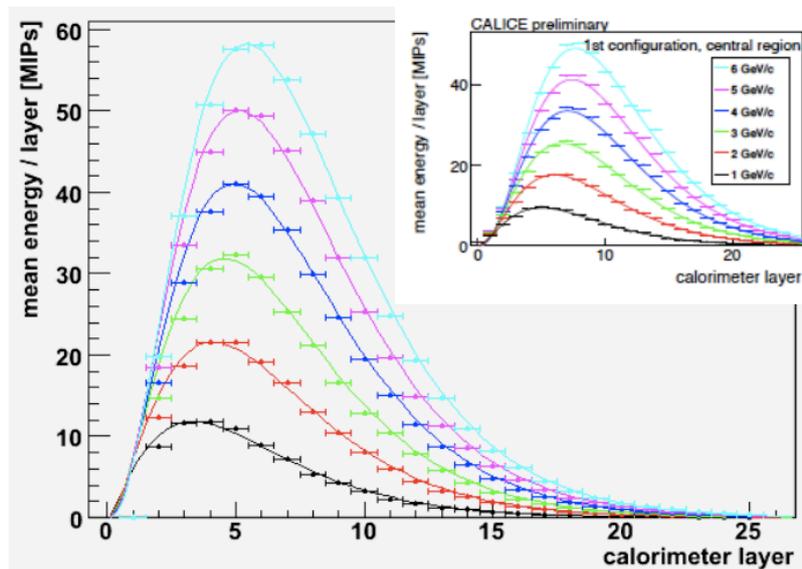


図 4.8: 吸収体にタングステンを使った場合の Shower Shape(右上はビームテスト解析結果)

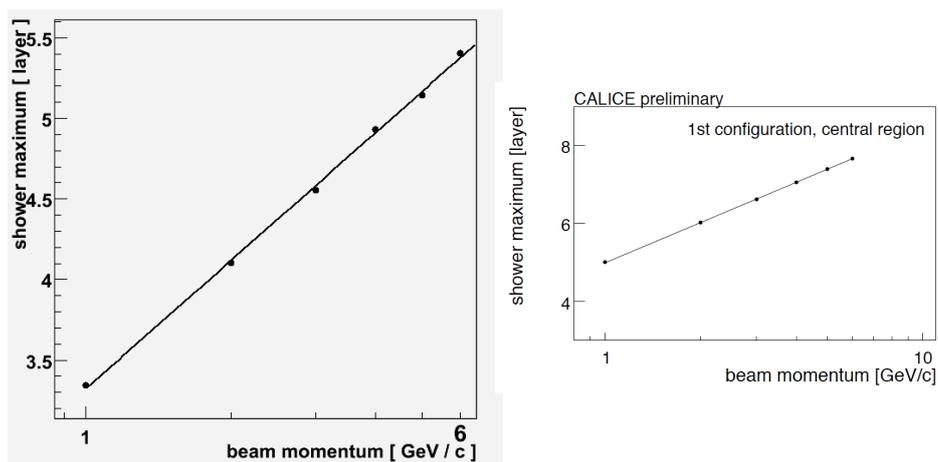


図 4.9: Shower Maximum(左:シミュレーション 右:ビームテスト解析結果)

## 4.3 Shower Leak

### 4.3.1 Shower Leak

Shower Leak とは電磁シャワーがカロリメータを突き抜けて漏れ出すことを言う。この Shower Leak はカロリメータ内で十分なエネルギー損失が得られなかった場合に起こり、カロリメータの大きさを設計する段階で重要な要素となる。本節ではこの Shower Leak のシミュレーションを行う。

#### シミュレーションの設定

- 入射粒子：ポジトロン
- 入射粒子のエネルギー：1GeV から 6GeV(低エネルギー) の場合と 1GeV から 100GeV(高エネルギー) の場合
- 吸収体の材質：タングステンの場合とタングステンコバルトの場合
- 入射位置：カロリメータ中央
- イベント数：3000 回

さらに上記設定下において、図 4.10 に示すように空気からなる厚さ 1mm の3つのターゲット (front,side,back) でカロリメータ周辺を覆い、この際、カロリメータ外部に漏れたエネルギーのうち各々のターゲットでのエネルギー損失とそれらの和を求めた。

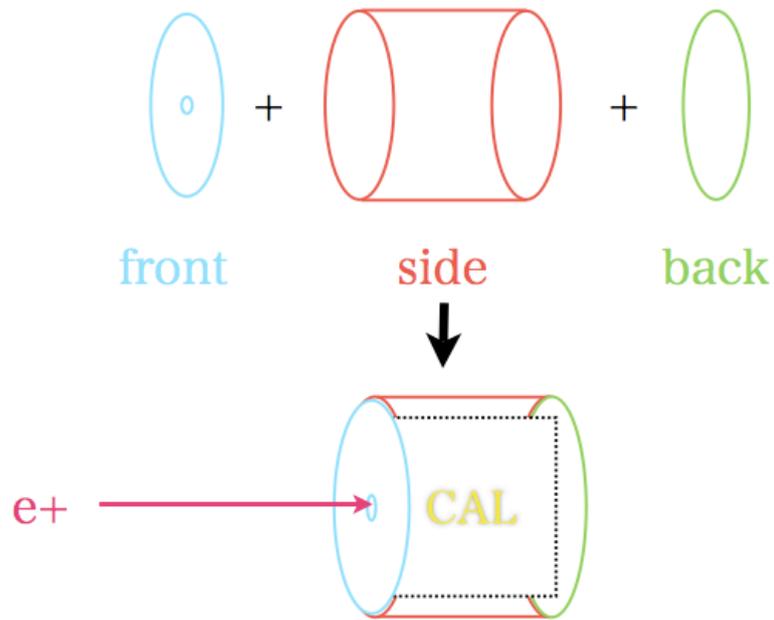


図 4.10: Shower Leak のシミュレーション方法

#### 4.3.2 吸収体にタングステンを使った場合

図 4.11 に吸収体にタングステンを使った場合の Shower Leak のシミュレーションを示す。入射粒子のエネルギーは 1GeV から 6GeV である。

およそ 3.6 % のエネルギーがカロリメータ外部に漏れ出していることがわかる。

さらに、高エネルギーの場合を考慮して入射粒子のエネルギーを 1GeV から 100GeV とした場合の Shower Leak のシミュレーションの様子を図 4.12 に示す。

およそ 3.6 % から 3.9 % のエネルギーがカロリメータ外部に漏れ出していることがわかる。

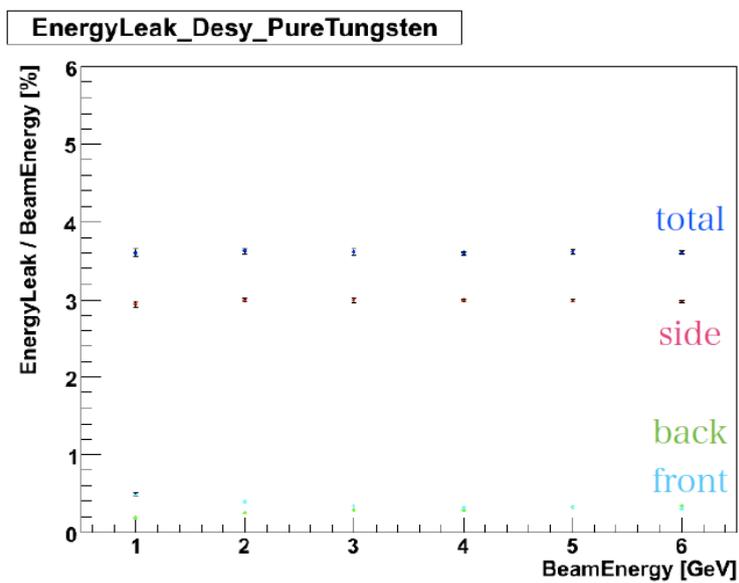


図 4.11: 吸収体にタングステンをを使った場合の Shower Leak(低エネルギー)

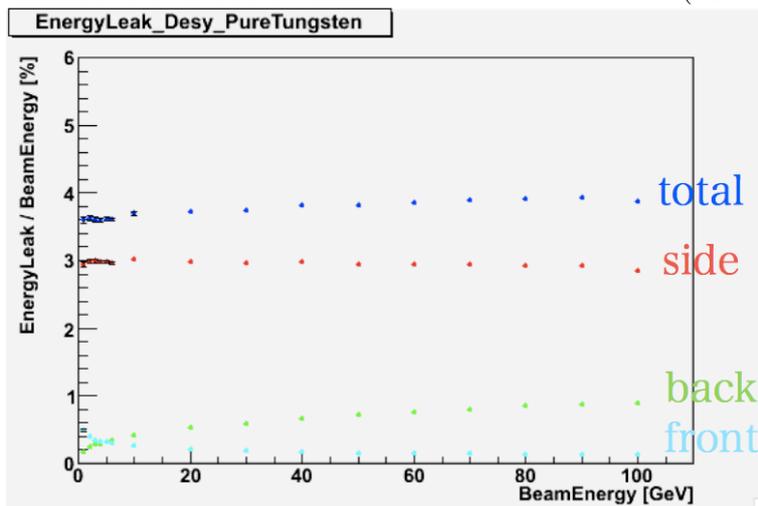


図 4.12: 吸収体にタングステンをを使った場合の Shower Leak(高エネルギー)

### 4.3.3 吸収体にタングステンコバルトを使った場合

図 4.13 に吸収体にタングステンコバルトを使った場合の Shower Leak のシミュレーションを示す。入射粒子のエネルギーは 1GeV から 6GeV である。

およそ 4.2 % から 4.6 % のエネルギーがカロリメータ外部に漏れ出していることがわかる。

さらに、高エネルギーの場合を考慮して入射粒子のエネルギーを 1GeV から 100GeV とした場合の ShowerLeak のシミュレーションの様子を図 4.14 に示す。

およそ 4.2 % から 5.5 % のエネルギーがカロリメータ外部に漏れ出していることがわかる。

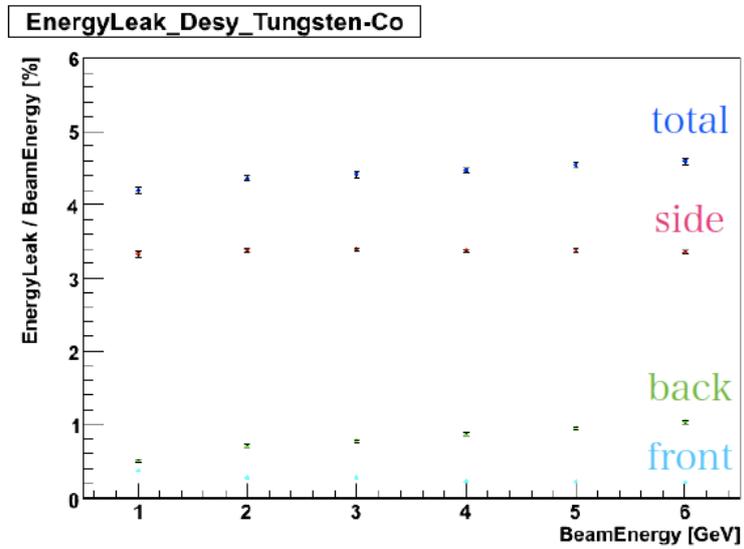


図 4.13: 吸収体にタングステンコバルトを使った場合の Shower Leak(低エネルギー)

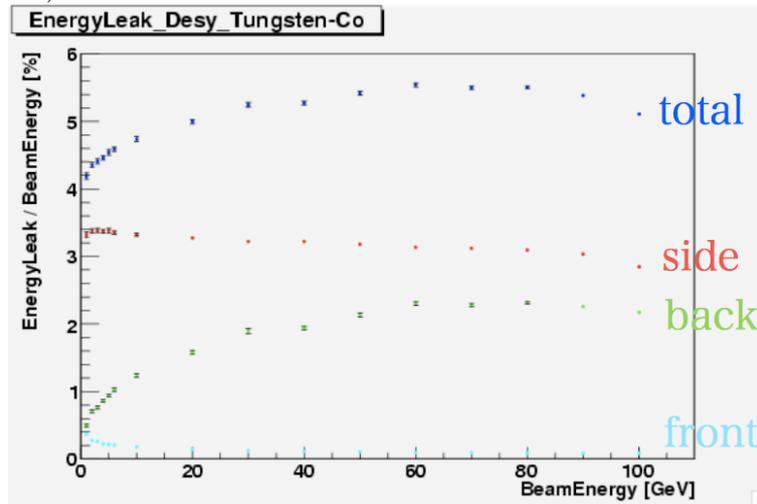


図 4.14: 吸収体にタングステンコバルトを使った場合の Shower Leak(高エネルギー)

## 4.4 何ら補正を入れない場合

本節では、まずは何ら補正を入れることなくカロリメータの性能評価を行う。ここでのシミュレーション結果を基礎として今後これに補正を考慮し、ビームテストの解析結果との比較を行う。

本節シミュレーションの設定を以下に述べる。

シミュレーションの設定

- 入射粒子：ポジトロン
- 入射粒子のエネルギー：1GeV から 6GeV
- 吸収体の材質：タングステンとタングステンコバルト
- ビームの入射位置：カロリメータ中央
- イベント数：3000 回

上記設定下において、本節のシミュレーションを行った。

### 4.4.1 エネルギー損失

図 4.15 に吸収体にタングステンをを用いた場合の、図 4.16 に吸収体にタングステンコバルトを用いた場合の各エネルギーごとのカロリメータ内のエネルギー損失のヒストグラムを示す。

これらのヒストグラムを比較すると、吸収体にタングステンコバルトを用いた場合の方がよりカロリメータ内でのエネルギー損失が大きいことがわかる。これは、タングステンよりもタングステンコバルトの方が密度が小さいため、同一長さに対しての物質質量が多いタングステンコバルトを用いた場合の方がシンチレータ層により多くの光子が入ったためであると考えられる。

図 4.17 に DESY ビームテストの解析結果から得られた同ヒストグラムを示す。当然のことであるが、吸収体にタングステンコバルトを用いた場合の方が、吸収体にタングステンをを用いた場合よりもヒストグラムの形がビームテストの解析結果から得られたヒストグラムの形に近いことがわかる。このヒストグラムから得られる、Sigma と Mean を用いてエネルギー分解能を求める。

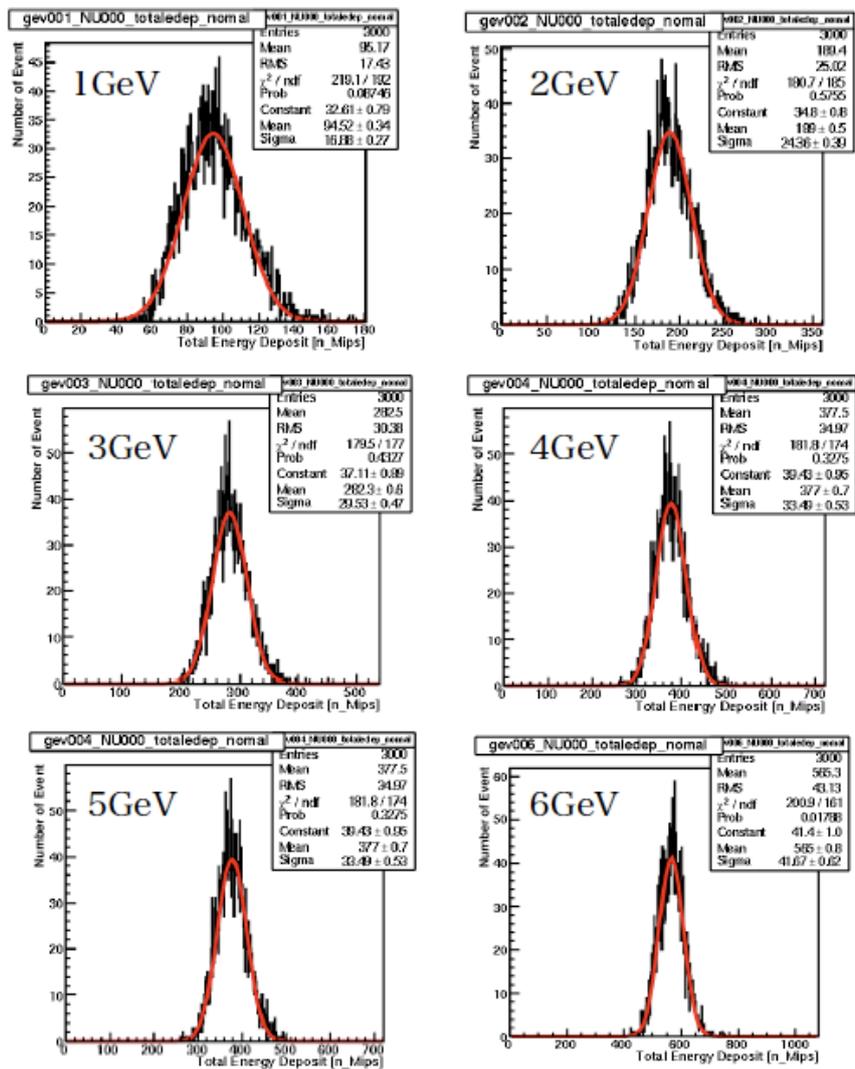


図 4.15: 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (タングステンを用いた場合)

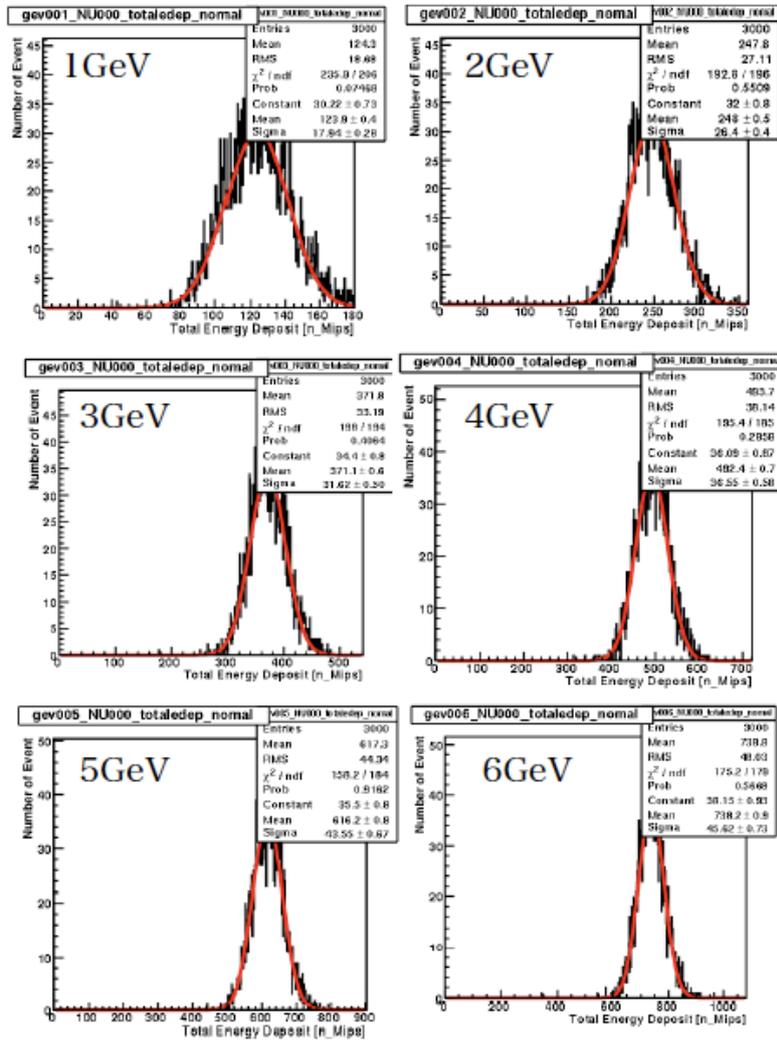


図 4.16: 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (タングステンコバルトを用いた場合)

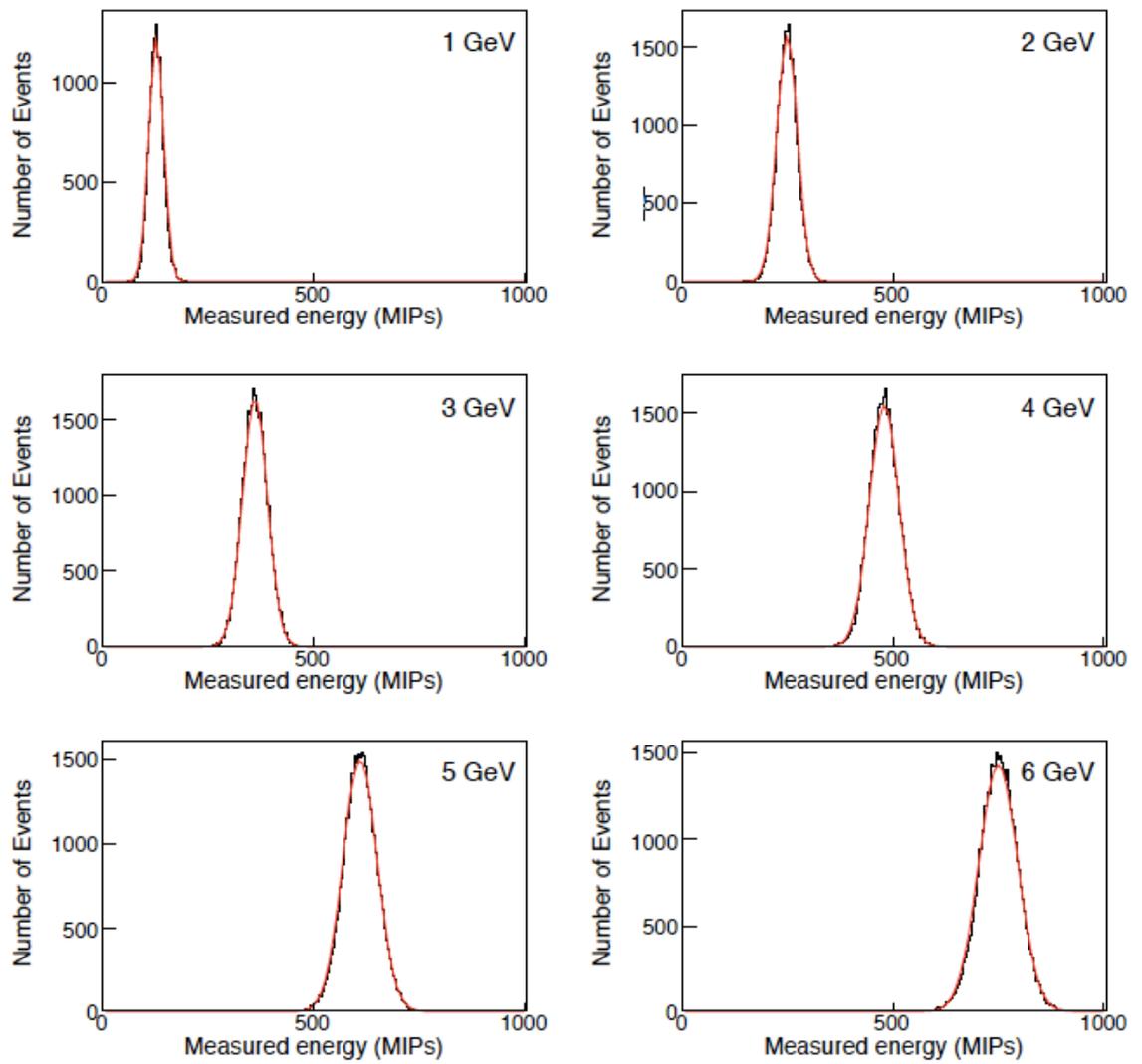


図 4.17: 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (ビームテスト解析結果)

#### 4.4.2 エネルギー分解能とリニアリティー

図 4.18 と図 4.19 に吸収体にタングステンを用いた場合の、図 4.20 と図 4.21 に吸収体にタングステンコバルトを用いた場合のリニアリティーとエネルギー分解能を示す。

図 4.18 と図 4.20 より、リニアリティーについては吸収体にどちらの材質を用いた場合についても、リニアリティーを満たしていることがわかる。

図 4.19 より吸収体にタングステンを用いた場合、カロリメータの統計項は  $17.95 \pm 0.32 \%$ 、定数項は  $1.17 \pm 1.23\%$  であることがわかる。

図 4.21 より吸収体にタングステンコバルトを用いた場合、カロリメータの統計項は  $14.45 \pm 0.29\%$ 、定数項は  $2.17 \pm 0.52\%$  であることがわかる。

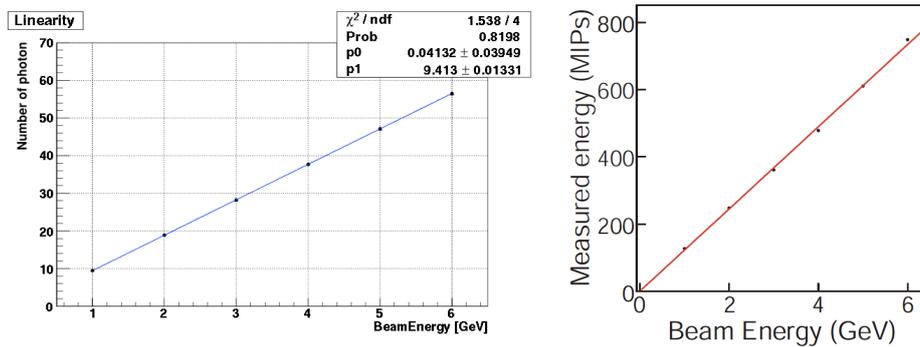


図 4.18: リニアリティー (左:タングステンを用いた場合のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)

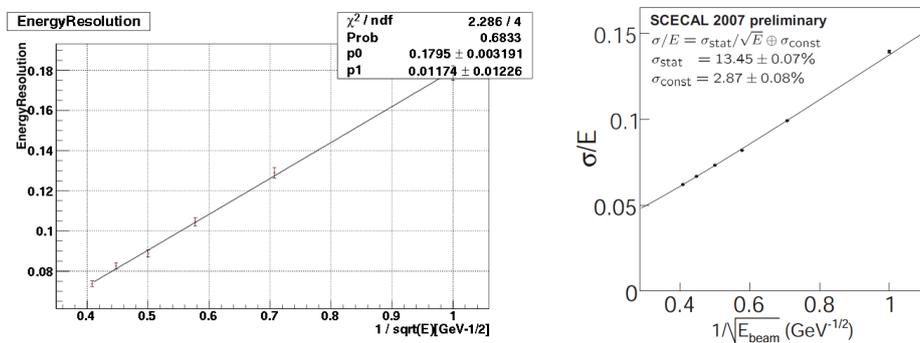


図 4.19: エネルギー分解能 (左:タングステンを用いた場合のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果)

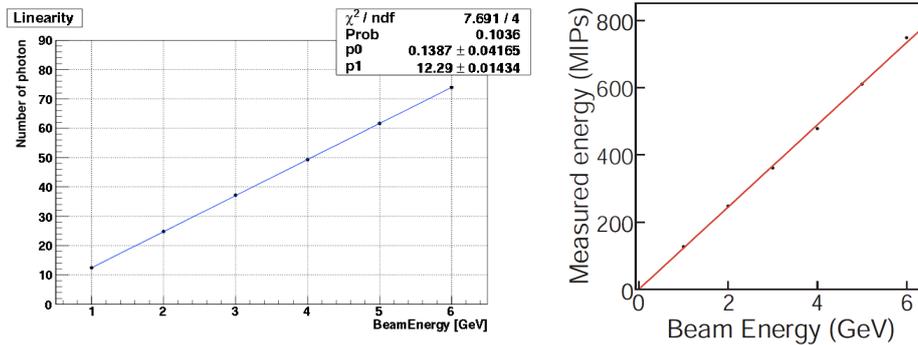


図 4.20: リニアリティ (左:タングステンコバルトを用いた場合のリニアリティ 右:ビームテスト解析結果)

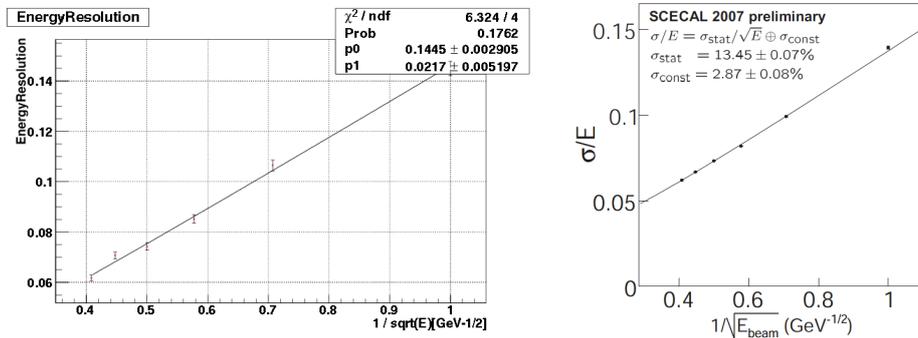


図 4.21: エネルギー分解能 (左:タングステンコバルトを用いた場合のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果)

## 4.5 シンチレータの Uniformity を考慮した場合のエネルギー分解能

### 4.5.1 Uniformity

実際のシンチレータでは、粒子が通過する位置と MPPC からの距離によって、測定する光量に違いが生じる。シンチレータの Uniformity とはシンチレータに入射した光に対する、光の入射位置に依らないシンチレータの応答一様性をいう。

図 4.22 にビームテストの解析結果による fiber readout タイプと direct readout タイプのストリップシンチレータの Uniformity の図を示す。fiber

readout タイプは 80 % ~ 90 % の Uniformity を、direct readout タイプは 60 % ~ 75 % の Uniformity を有することがわかる。

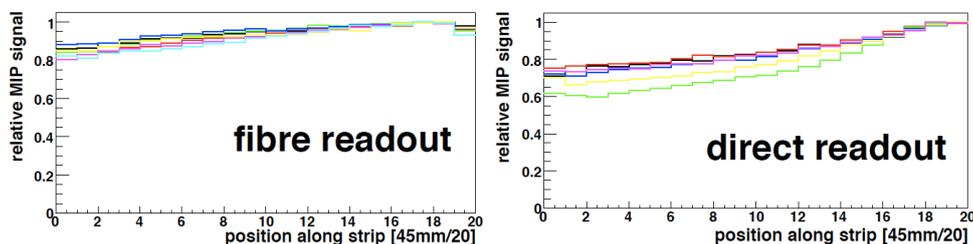


図 4.22: ストリップシンチレータの Uniformity

本節シミュレーションの設定を以下に述べる。

シミュレーションの設定

- 入射粒子：ポジトロン
- 入射粒子のエネルギー：1GeV から 6GeV
- 吸収体の材質：タンゲステンコバルト
- ビームの入射位置：カロリメータ中央
- イベント数：3000 回
- ストリップシンチレータの Uniformity：100 %、90 %、80 %、70 %、60 %、50 % の 6 つの場合

図 4.23 に Uniformity を設定する際に用いた関数を示す。横軸  $x$  はシンチレータ内の粒子の通過位置と MPPC からの距離である。

上記設定下において、本節のシミュレーションを行った。

以下、この際の例として Uniformity を 80 % に設定した場合のシミュレーション結果を考える。

#### 4.5.2 エネルギー損失

図 4.24 にストリップシンチレータの各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラムを示す。前節と同様に、このヒストグラムから得られる Sigma と Mean を用いてエネルギー分解能を求める。

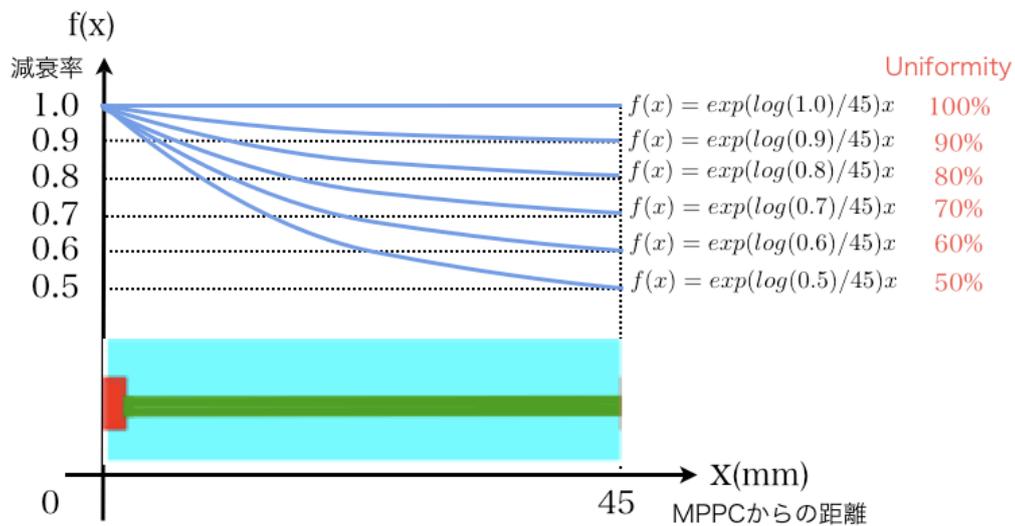


図 4.23: Uniformity の関数

### 4.5.3 エネルギー分解能とリニアリティ

図 4.25 より、ストリップシンチレータの Uniformity を 80% に設定した場合、前節同様リニアリティを満たしていることがわかる。

図 4.42 より、カロリメータのエネルギー分解能については、前節の何ら補正を入れない場合のエネルギー分解能に比べ、カロリメータの定数項に大きな違いが生じている。つまり、何ら補正を入れない場合におけるカロリメータの定数項は  $2.17 \pm 0.52 \%$  であるのに対して、ストリップシンチレータの Uniformity を 80% に設定した場合におけるカロリメータの定数項は  $4.73 \pm 0.28 \%$  であり、定数項が大きくなっていることがわかる。ストリップシンチレータの Uniformity の効果はカロリメータの定数項に効いてくるのである。

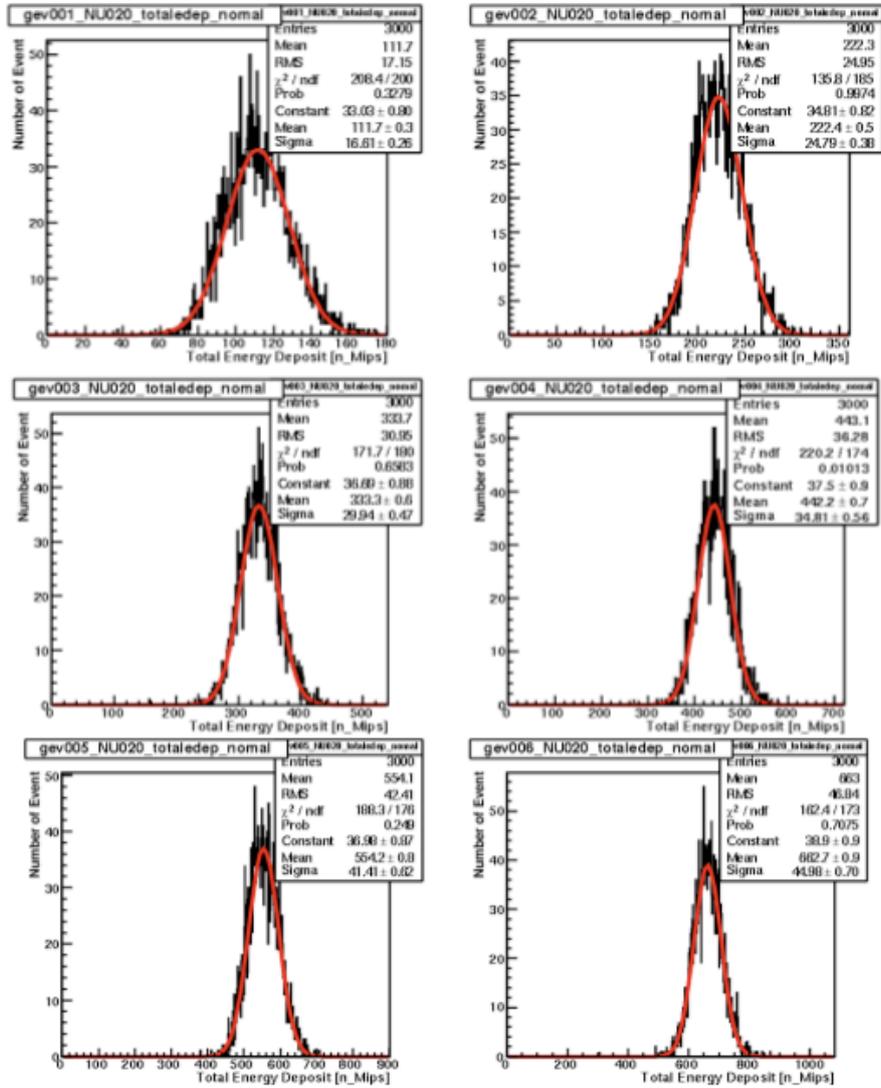


図 4.24: 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (Uniformity80%)

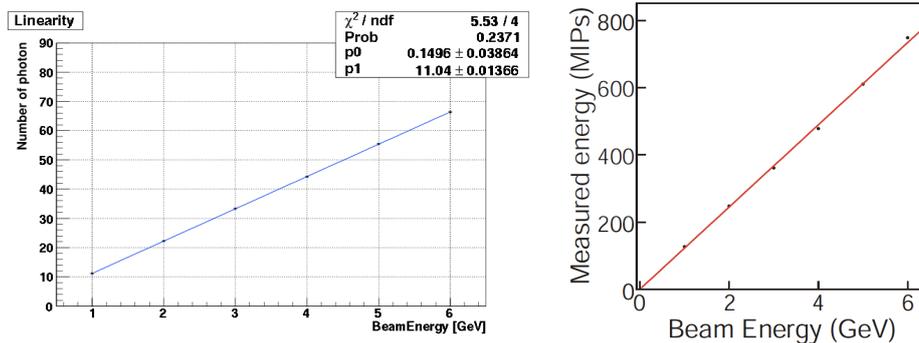


図 4.25: リニアリティー (左:Uniformity80%の場合のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)

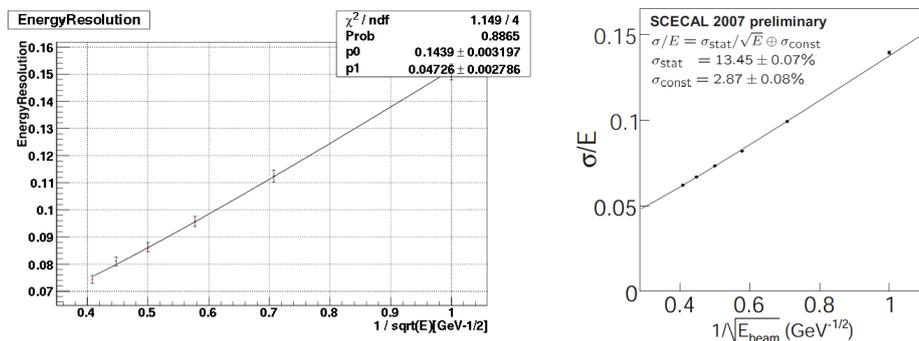


図 4.26: ストリップシンチレータの Uniformity を 80 % に設定した場合のエネルギー分解能 (左:Uniformity80%の場合のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果)

## 4.6 MPPC の Saturation 効果を考慮した場合のエネルギー分解能

### 4.6.1 MPPC の Saturation 効果

MPPC の pixel 数には限度があり、1 ピクセルは 1 度に 1 つの光子しかカウントできない。よって、入射光量に対する MPPC の応答は線形とならない。

つまり、MPPC の Saturation 効果とは MPPC のピクセル数の上限により入射する全ての光子をカウントできなくなるという効果である。

エネルギーを正確に測定するために、MPPC の Saturation 効果を考慮しなければならない。

MPPC の応答関数は理論的には次式で表される。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{pic}}(1 - e^{-N_{\text{p.e.}}/N_{\text{pic}}}) \quad (4.1)$$

ここで、 $N_{\text{pic}}$  は MPPC の pixel 数を表し  $N_{\text{fired}}$  はシグナルを感知した MPPC の pixel 数を表す。 $N_{\text{p.e.}}$  は MPPC に入射した光子数と MPPC の光子の検出効率との積である。この関数は、 $N_{\text{p.e.}} \ll N_{\text{pic}}$  の範囲においては直線とみなすことができるが、この範囲を超えると MPPC の Saturation 効果が起こり始め、ついには  $N_{\text{fired}} \sim N_{\text{pic}}$  の時に MPPC の応答が一定となる。

DESY ビームテストでは 1600 ピクセルの MPPC を用いた。図 4.27 に 1600 ピクセルの MPPC の Saturation 効果を示す。入射光量に対する MPPC の応答が線形とならないことがわかる。

現在の MPPC は研究がすすむにつれ、3000 ピクセルを有するまでになっている。

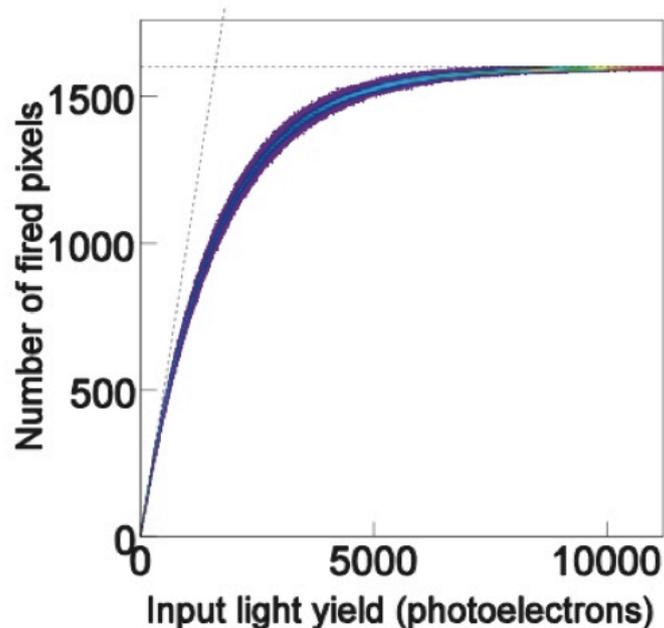


図 4.27: MPPC の Saturation 効果

本節では、この MPPC の Saturation 効果を考慮してシミュレーション

によるカロリメータの性能評価を行う。本節シミュレーションの設定を以下に述べる。

#### シミュレーションの設定

- 入射粒子：ポジトロン
- 入射粒子のエネルギー：1GeV から 6GeV
- 吸収体の材質：タングステンコバルト
- イベント数：3000 回
- ビームの入射位置：カロリメータ中央
- MPPC のピクセル数：1600,2000,2500,3000

上記設定下において、本節のシミュレーションを行った。

#### 4.6.2 エネルギー損失

図 4.28 に入射粒子のエネルギーが 6GeV の時の何ら補正を入れない場合と MPPC のサチュレーション効果を考えた場合のカロリメータ内でのエネルギー損失のヒストグラムを示す。図 4.28 より、何ら補正を入れない場合に比べ、MPPC のサチュレーション効果を考えた場合は MPPC に入射した光を全てカウントできないがために、ヒストグラムの Mean が減少しているのがわかり、サチュレーション効果がシミュレーションに確実に反映されている。

前節と同様に、このヒストグラムから得られる Sigma と Mean を用いてエネルギー分解能を求める。

#### 4.6.3 エネルギー分解能とリニアリティー

図 4.29 に MPPC の Saturation 効果を考慮した場合のリニアリティーの図を示す。MPPC のサチュレーション効果によりピクセル数が少ない程、MPPC がカウントできる光子数が減少することによってリニアリティーからずれていることがわかる。MPPC の Saturation 効果はカロリメータのリニアリティーに効いてくるのである。

図 4.30 に MPCC(1600 ピクセル) の Saturation を考慮した場合のエネルギー分解能を示す。カロリメータの統計項は  $14.45 \pm 0.27\%$ 、定数項は  $1.81 \pm 0.57\%$  であることがわかる。

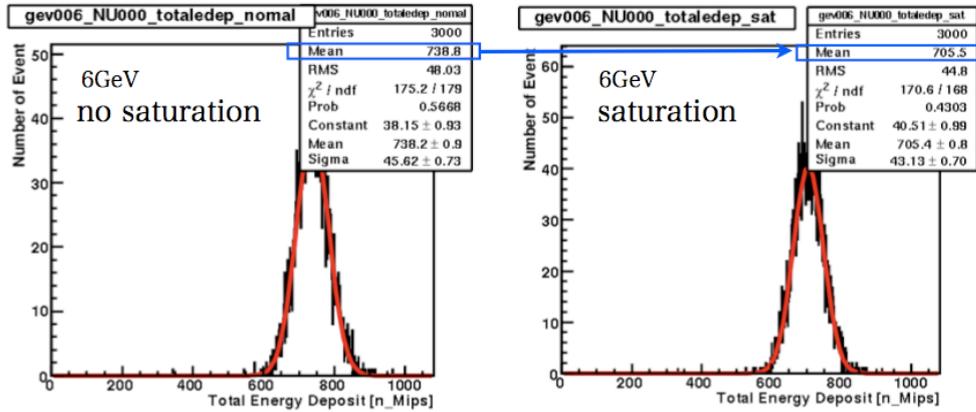


図 4.28: 何ら補正を入れない場合と MPPC のサチュレーション効果を考えた場合のカロリメータ内でのエネルギー損失のヒストグラム (6GeV)

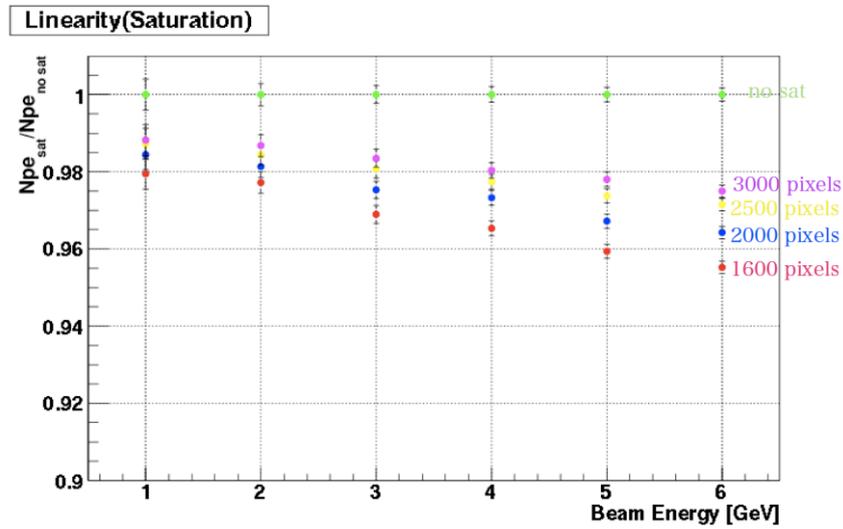


図 4.29: MPCC の Saturation を考慮した場合のリニアリティー

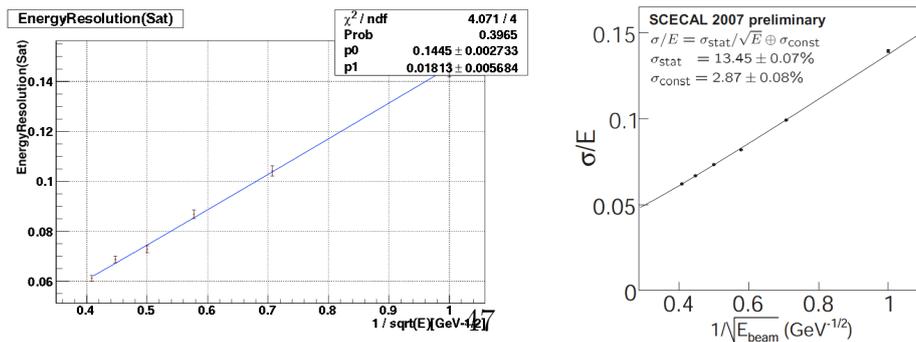


図 4.30: MPCC(1600 ピクセル) の Saturation を考慮した場合のエネルギー分解能 (左:Saturation 効果を考慮した場合のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果)

## 4.7 Calibration Constant

実際のビームテストにおいては、シンチレータとMPPCの性能のばらつきやシンチレータとMPPCのコンタクト等によってカロリメータ内の同じ位置に粒子が来ても同じレスポンスを得ることができない。そこで Calibration Constant を用いてカロリメータ内のエネルギー損失に多少のばらつきを持たせ、実際のビームテストの状況下に近い状況をシミュレーションにおいても作り出そうというのが本節の目的である。

本節シミュレーションの設定を以下に述べる。

シミュレーションの設定

- 入射粒子：ポジトロン
- 入射粒子のエネルギー：1GeV から 6GeV
- 吸収体の材質：タングステンコバルト
- イベント数：3000 回
- ビームの入射位置：カロリメータ中央
- Calibration Constant：1%、3%、5%

上記設定下において本節のシミュレーションを行った。

### 4.7.1 エネルギー損失

図 4.31 と図 4.32 と図 4.33 に Calibration Constant を 1%、3%、5% に設定した場合のカロリメータ内でのエネルギー損失のヒストグラムを示す。前節と同様に、このヒストグラムから得られる Sigma と Mean を用いてエネルギー分解能を求める。

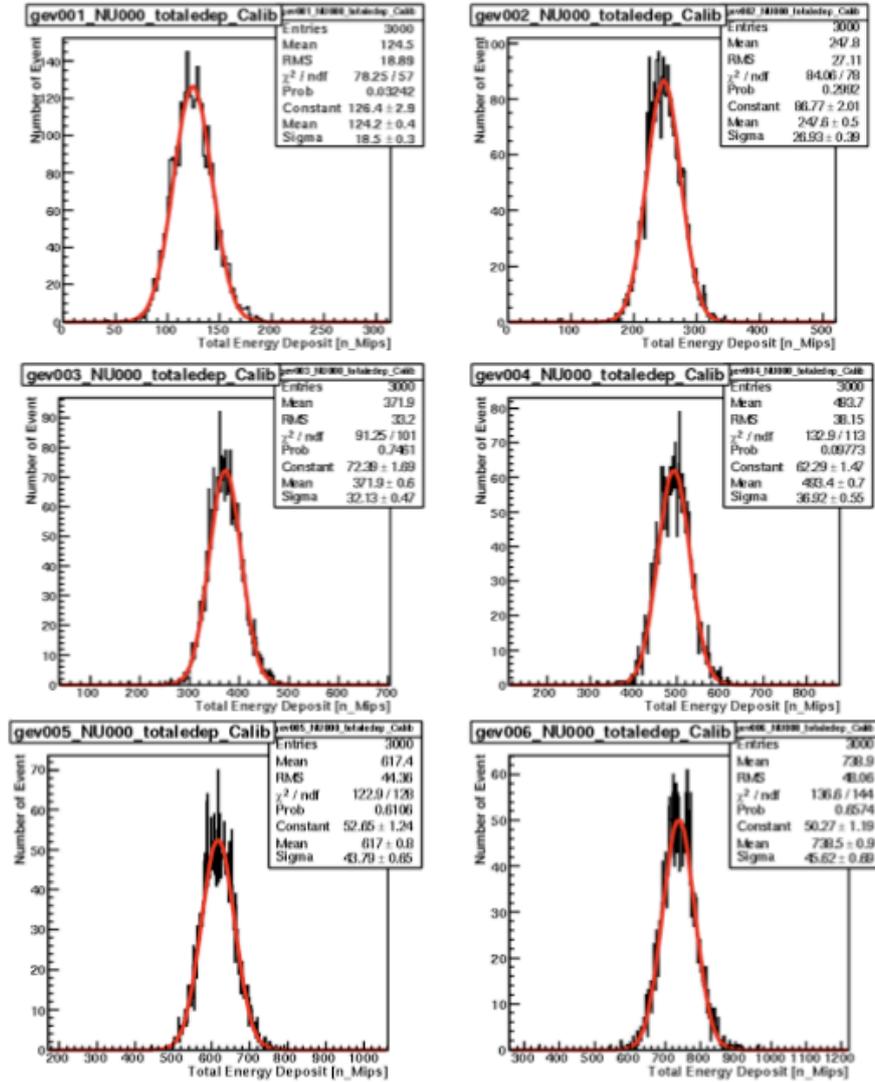


図 4.31: 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (calibration constant 1%)

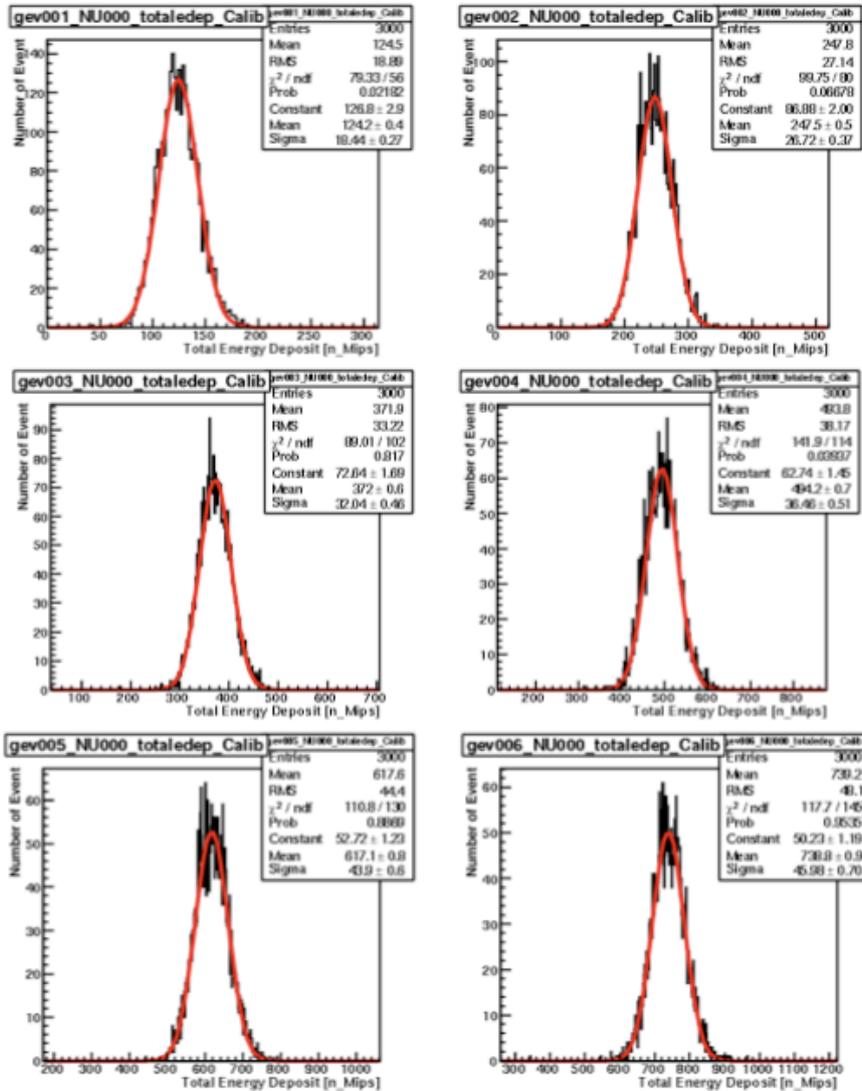


図 4.32: 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (calibration constant 3%)

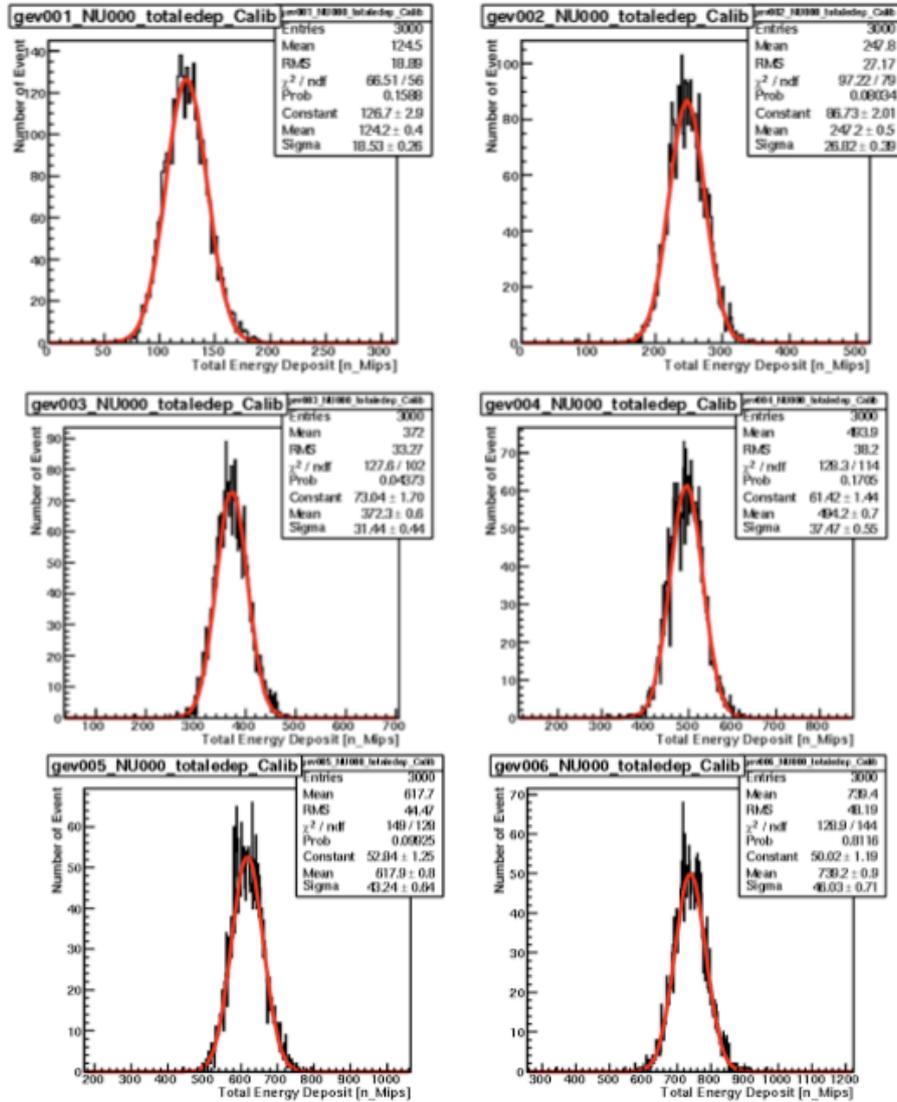


図 4.33: 各エネルギーごとのエネルギー損失のヒストグラム (calibration constant 5%)

#### 4.7.2 エネルギー分解能とリニアリティ

図 4.34 と図 4.35 と図 4.36 に calibration constant が 1%、3%、5% の場合のカロリメータのリニアリティを示す。全てリニアリティを満たしていることがわかる。

図 4.37 と図 4.38 と図 4.39 に calibration constant が 1%、3%、5% の場合のカロリメータのエネルギー分解能を示す。

図 4.37 より calibration constant が 1% の場合のカロリメータの統計項は  $14.94 \pm 0.27\%$ 、定数項  $1.47 \pm 0.72\%$ 、図 4.38 より calibration constant が 3% の場合のカロリメータの統計項は  $14.78 \pm 0.27\%$ 、定数項は  $1.76 \pm 0.60\%$ 、図 4.39 より calibration constant が 5% の場合のカロリメータの統計項は  $14.84 \pm 0.27\%$ 、定数項は  $1.64 \pm 0.64\%$ 、であることがわかる。

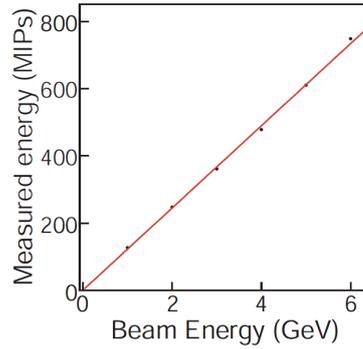
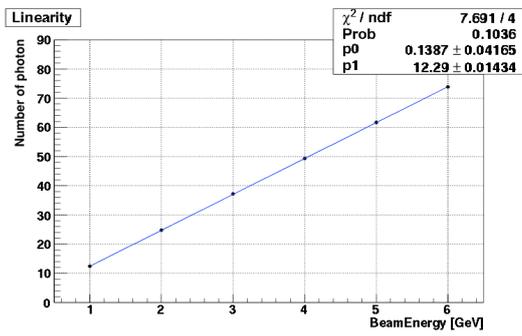


図 4.34: リニアリティー (左:calibration Constant 1%のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)

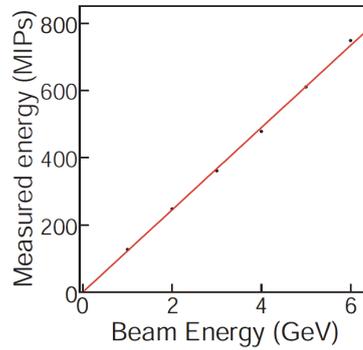
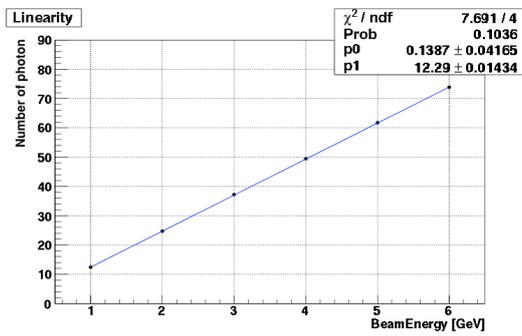


図 4.35: リニアリティー (左:calibration Constant 3%のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)

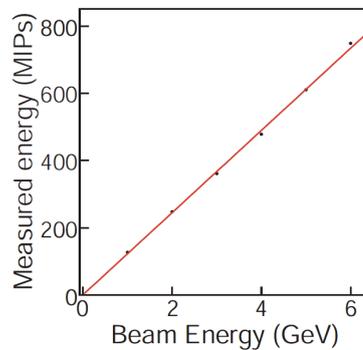
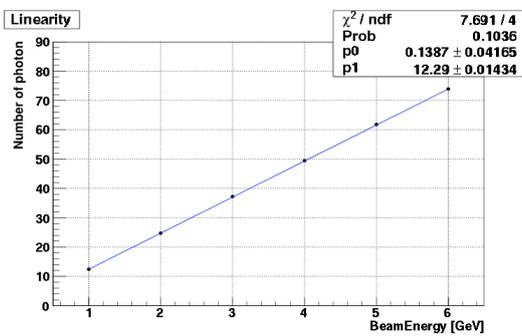


図 4.36: リニアリティー (左:calibration Constant 5%のリニアリティー 右:ビームテスト解析結果)

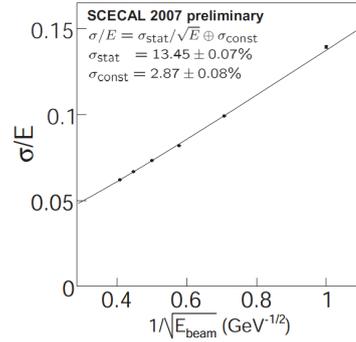
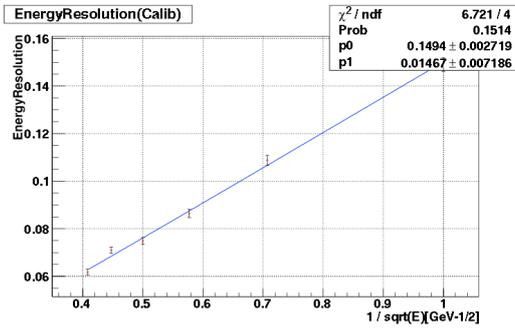


図 4.37: 左:calibration constant 1%のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果

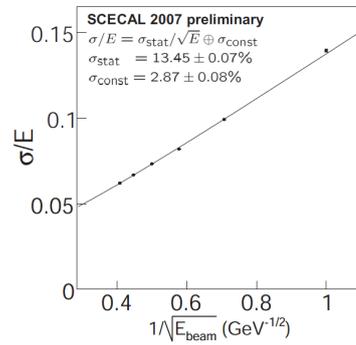
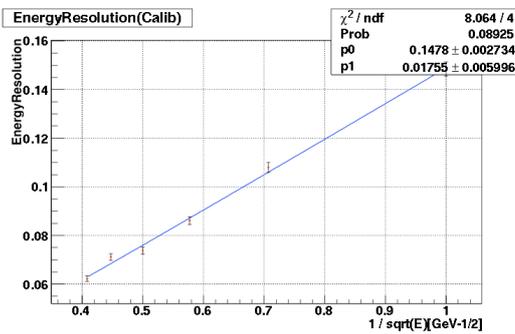


図 4.38: 左:calibration constant 3%のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果

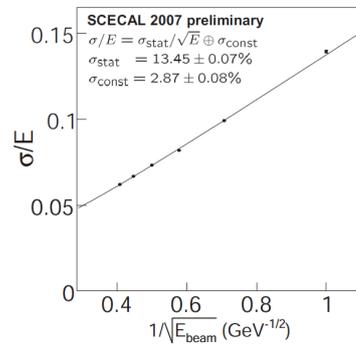
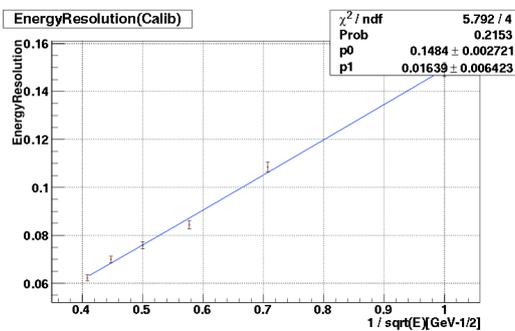


図 4.39: 左:calibration constant 5%のエネルギー分解能 右:ビームテスト解析結果

## 4.8 上記3つの補正を同時に考慮した場合

最後に上記3つの補正 (Uniformity , MPPC のサチュレーション効果 , Calibration Constant) を同時に入れた場合のシミュレーションを行う。これら3つの補正を同時に考えることで、実際のビームテストの状況下に最も近い状況を作り出し、実際のビームテストの解析結果と照らし合わせる。

本節シミュレーションの設定を以下に述べる。

### シミュレーションの設定

- 入射粒子：ポジトロン
- 入射粒子のエネルギー：1GeV から 6GeV
- 吸収体の材質：タングステンコバルト
- イベント数：3000 回
- ビームの入射位置：カロリメータ中央
- ストリップシンチレータの Uniformity : 100 %、90 %、80 %、70 %、60 %、50 % の 6 つの場合
- MPPC(1600 ピクセル) の Saturation 効果
- キャリブレーションコンスタント：1 %、3 %、5 %

上記設定下においてシミュレーションを行った。

### 4.8.1 エネルギー損失

図 4.40 にエネルギー損失のヒストグラムを示す。前節と同様に、このヒストグラムから得られる Sigma と Mean を用いてエネルギー分解能を求める。

#### 4.8.2 エネルギー分解能とリニアリティー

図4.41 にリニアリティーの図を示す。MPPC の Saturation 効果を考慮しているため、リニアリティーからずれていることがわかる。

図4.42 にエネルギー分解能の図を示す。カロリメータの統計項は、 $14.47 \pm 0.28 \%$  であり定数項は  $2.84 \pm 0.39 \%$  となった。

これをビームテストの解析結果の統計項  $13.45 \pm 0.07\%$ 、定数項  $2.87 \pm 0.08\%$  と比較しすると、定数項はかなりの精度で一致しているが統計項はシミュレーションによる結果の方が大きくなった。

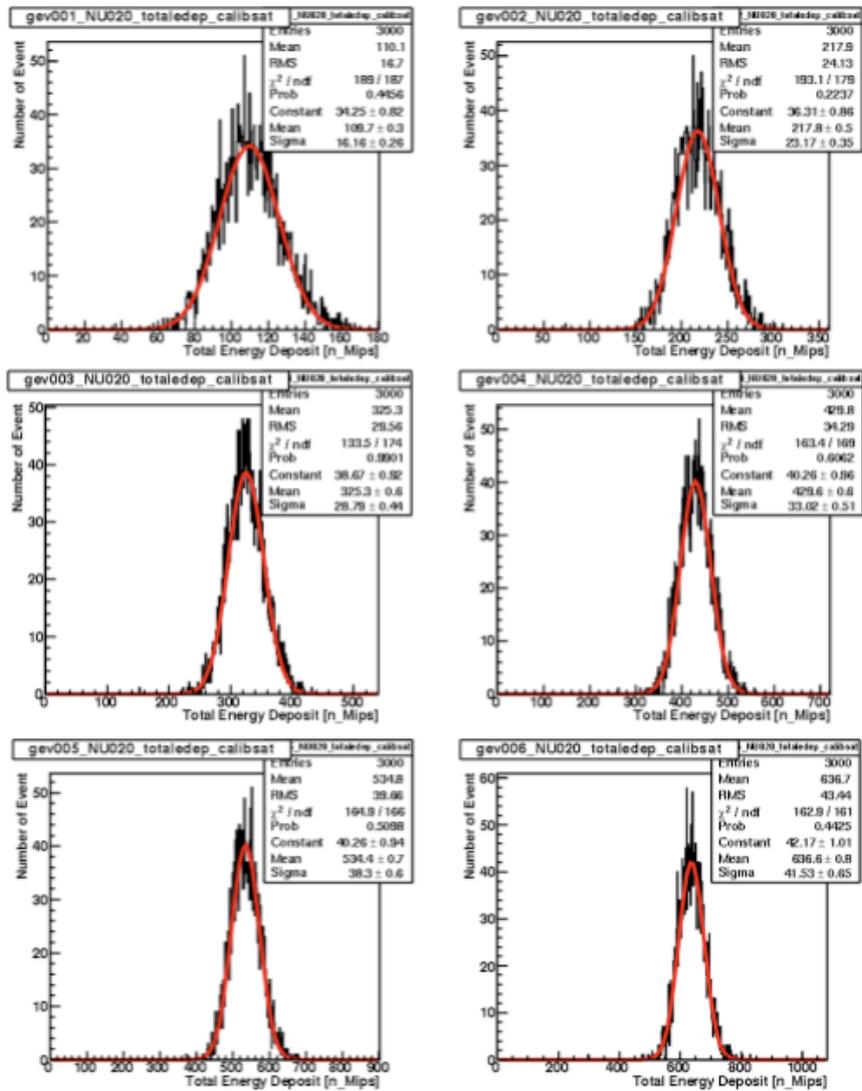


図 4.40: エネルギー損失のヒストグラム

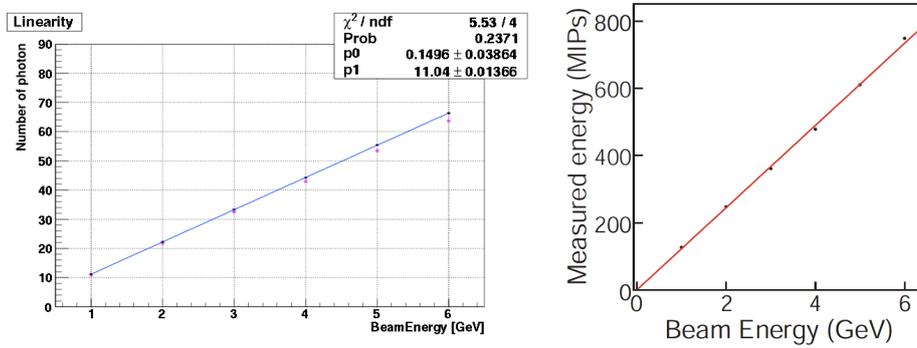


図 4.41: リニアリティ

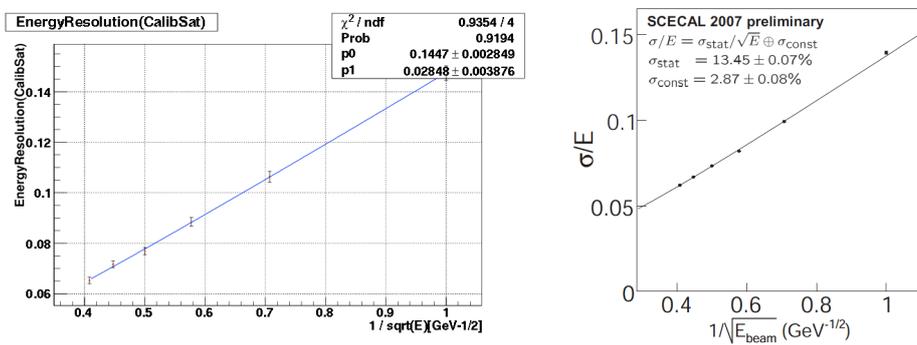


図 4.42: エネルギー分解能

## 第5章 まとめ

前章まで、様々な補正を考慮してカロリメータの性能評価をしてきた。

その結果として、まず Shower Shape はシミュレーションによってビームテスト解析結果をよく再現することができており、シミュレーションの信頼性を担保することができた。

Show Leak については、シミュレーションにより吸収体にタングステンコバルトを使った場合、入射ビームが低エネルギー (1GeV から 6GeV) ではおよそ 3.6%、高エネルギーではおよそ 3.6%から 3.9%のエネルギーがカロリメータ外部に漏れ出していることがわかった。また吸収体にタングステンを使った場合、入射ビームが低エネルギー (1GeV から 6GeV) ではおよそ 4.2%から 4.6%、高エネルギーではおよそ 4.2%から 5.5%のエネルギーがカロリメータ外部に漏れ出していることがわかった。

Uniformity と CalibrationConstant の効果はカロリメータの定数項に効き、MPPC の Saturation 効果はリニアリティーに効くことがわかった。

次に、ビームテストの解析結果をうまく再現できた例として、Uniformity80%、MPPC の Saturation 効果、CalibrationConstant3%に設定した場合の統計項  $14.47 \pm 0.28 \%$ 、定数項  $2.84 \pm 0.39 \%$  があげられる。これをビームテストの解析結果の統計項  $13.45 \pm 0.07\%$ 、定数項  $2.87 \pm 0.08\%$  と比較しすると、定数項はかなりの精度で一致しているが統計項はシミュレーションによる結果の方が大きくなった。

この統計項の不一致の原因としては、光子数とエネルギーの変換において光子の揺らぎを考慮しておらず、常に 1MIP を 10p.e. として変換していたことが考えられる。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導して下さった川越清以先生に深く感謝致します。

Daniel Jeans 氏にはシミュレーションプログラムについてのたくさんのアドバイスを頂きました。私が質問に行かせて頂きたいといかなる時も笑顔で懇切丁寧に教えて頂きました。本当にありがとうございました。

先輩である田村勇樹氏には研究内容と共に、社会人としての心構えを教えて頂き、深く感謝しております。

同じく先輩である佐野恵理さんにはソフトボール大会で活躍して頂き、ありがとうございます。

西脇健二くんには素粒子物理学の理論的な事を教えて頂きました。説明がとてもわかりやすかったです。

岡田勝吾くんには高エネルギー物理学の理論的な事を教えて頂き、ありがとうございます。

楠本彬くんは研究室で私の隣の席であり、プログラムについて基礎から教えて頂き、大変役に立ちました。

柔道部の田村直樹くんの研究に対する姿勢は感心致しました。またいつかキャッチボールをやりましょう。

池田紘子さんは、同じILCグループのメンバーでもあり、ソフトボール大会で活躍して頂き、ありがとうございます。

M1の田辺晃くん、西山 知徳くん、秋山邦裕くんはミーティングの司会や記録、研究室内のネットワーク管理等ご苦労様でした。

B4の森島俊くんには私生活においてアメリカン・フットボール部員らしいたくましい姿勢を見せて頂きました。

2008年度卒業生の榊井誠くん、2006年度卒業生の大島千明くんには私生活においていつも楽しく過ごさせて頂きました。

また2002年度入学生の同期の皆様には大変お世話になりました。

最後に、これまでの長い間、私を支えて下さった両親に感謝致します。本当にありがとう。

## 関連図書

- [1] Claus Grupen and Boris Shwartz 『Particle Detector』 Cambridge Monograph on Particle Physics , Nuclear Physics and Cosmology
- [2] Mario Conte and William W Mackay 『An introduction to the Physics of Particle Accelerators』
- [3] 木村嘉考 『高エネルギー加速器』 共立出版株式会社
- [4] 真木昌弘 『高エネルギー物理学実験』 丸善株式会社
- [5] 田村勇樹 “ 次世代線型加速器実験へむけての新型光検出器の評価 ” 2006 神戸大学
- [6] 林晋 “ ILC 実験用フルシミュレータによる Particle Flow Algorithm の研究” 2007 神戸大学
- [7] 佐野恵理 “ 新型半導体光検出器 MPPC のための電流積分器 ASIC の性能評価” 2008 神戸大学
- [8] 山内伸 “ リニアコライダー実験用ストリップ・ファイバー電磁カロリメータの性能評価” 2005 筑波大学