

卒業論文

ILC カロリメーターのための  
小型シンチレーターストリップの研究

神戸大学 粒子物理研究室

0463120s 東條 剛士

平成 21 年 2 月 27 日

## 概要

ILC 実験は、電子と陽電子を線形加速器で加速して衝突させ、Higgs 粒子や標準模型を超える新粒子の発見を目的とした実験である。私たちは、ILC 実験の検出器で用いられるカロリメーターの候補の 1 つに挙げられているシンチレーターストリップの包装について実験を行った。その結果、面積の大きい面は全て包装の必要があること、ファイバー端はしっかり押さえる必要があること、ペイントによるコーティングには改良が必要である事が分かった。

# 目次

<b>第1章 ILC 実験</b>	3
1.1 ILC と測定器について	3
1.2 シンチレータと MPPC について	3
<b>第2章 線に対するシンチストリップからの光量測定</b>	5
2.1 実験の目的と内容	5
2.2 セットアップ	5
2.3 各条件のもとでの 線に対するシンチストリップからの光量測定	8
2.3.1 温度依存性	8
2.3.2 ファイバーからの横方向の距離の影響	8
2.3.3 測定ごとの再現性	9
2.3.4 シンチストリップの個体差	10
2.3.5 包装面の影響	12
2.3.6 包装素材	13
2.3.7 チタンホワイトによるペイント	16
2.4 結論	18
2.5 今後の展望	18
<b>謝辞</b>	19

# 第 1 章 ILC 実験

## 1.1 ILC と測定器について

ILC 実験は、電子と陽電子を全長約 40km の線形加速器で加速して衝突させ、Higgs 粒子や標準模型を超える新粒子の発見を目的とした実験である。その重心系のエネルギーは  $0.5 \sim 1$  [TeV]、ルミノシティは  $1 \times 10^{34}$  [ $\text{cm}^{-2}\text{S}^{-1}$ ] である。電子・陽電子衝突は、陽子・陽子衝突実験と比べてバックグラウンドがとても少なく、精密測定に向いている。

その性能を生かすためには、測定器も精度の高いものが必要となる。ジェットのエネルギーを精度良く測定するためには、ジェット中の粒子に対し、荷電粒子は飛跡検出器で運動量を測定し、光子と中性ハドロン粒子はカロリメータでエネルギーを測定するのが望ましい。そのためには、カロリメータ内で粒子を区別する必要があるので、カロリメータを細かく分割する必要がある。

## 1.2 シンチレータと MPPC について

前述の通り、カロリメータは細かく分割されている必要があり、その数として 2000 万チャンネル読み出す案が出ている。光検出器としてそれだけの数の光電子増倍管を用いるのは、価格、設置スペース、耐磁場性能の点で無理がある。そこで光電子増倍管に変わる新しい光検出器として候補に挙がっているのが MPPC (Multi Pixel Photon Counter) である (図 1.1)。MPPC はノイズレートが高いという問題点を持つものの、小さい、安い、必要なバイアス電圧が低い、磁場の影響を受けにくい、といった特徴がある。

一方、シンチレータとして、下図 1.2 のような、シンチレータの中央にファイバーを通したストリップシンチレータが使われる予定である。カロリメータに使われるシンチレータに求められる条件として、発光率が高い、透過率が高い、反応速度が速い、位置依存性が少ない、が挙げられる。これらの条件を満たし、かつ生産性を高めるために、シンチレータ・ファイバー・反射材などの研究が行われている。この卒業研究は、その反射材について実験を行った。

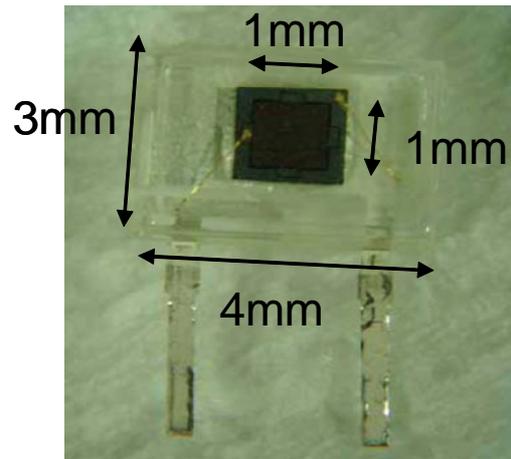


図 1.1 MPPC 中央の 1mm × 1mm の部分がセンサーである。



図 1.2 ストリップシンチレーター：右端のくぼみに MPPC を取り付ける。



図 1.3 包装し、MPPC に取り付けた  
シンチストリップ

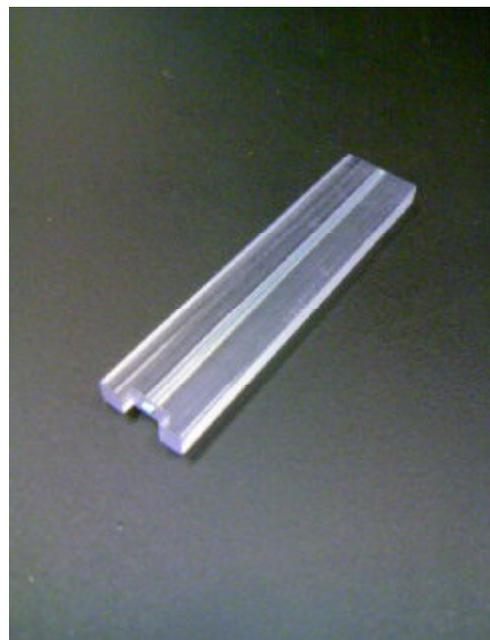


図 1.4 ファイバーを通していない  
シンチストリップ

## 第 2 章 線に対するシンチストリップからの光量測定

### 2.1 実験の目的と内容

ILC 実験では、測定精度の向上のため、カロリメータ内での粒子の識別が必要となる。そのため、細かく分割した構造にする必要があるが、そのためには数千万チャンネル分のシンチレータストリップを用意する必要がある。

荷電粒子がシンチストリップを通過する際にシンチレーション光を出す。そのシンチレーション光を中央の波長変換ファイバーに集め、MPPC へと導く。この時、中央のファイバーに集まる前にシンチストリップから外へ出てしまう光を極力減らさなくてはならない。そのためにシンチストリップを反射材で包む。

シンチストリップを包む反射材は、なるべく光量が多くなるように、かつ光量の位置依存性が小さくなるように選ぶ必要がある。ここで言う光量とは、ファイバーを通ったシンチレーション光が MPPC に入射し、それにより MPPC から出てくる光電子数のことである。また、数千万チャンネル分用意することを考えると、包装に極力手間がかからないことも必要である。

この卒業研究では、

シンチストリップの包装面を減らす (2.3.5)

包装素材を変える (2.3.6)

直接反射材をペイントする (2.3.7)

ことによってシンチストリップから得られる光量を測定する。

### 2.2 セットアップ

シンチストリップに目的の包装を施して MPPC を取り付け、トリガー用シンチレータと共に恒温槽の中に設置する。温度は 25℃、MPPC のバイアス電圧は 76.0V とする。ストロンチウム 90 を線源とし、厚さ 5mm で穴の直径 2.1mm のアルミのコリメータを用い、線源を測定対象のシンチストリップとトリガー用シンチレータへ入射する。

線が通過する際にシンチストリップは発光する。その光は、シンチストリップの中央に設置された波長変換ファイバーによって MPPC へ導かれる。MPPC に光が入射すると、光量に応じた電気信号に変換されて出てくる。それをアンプ (ここでは ASD を用いた) で約百倍に増幅して ADC に送る。(図 1.1)

一方でトリガーシンチに入射した線源が出す光は、ライトガイドを通して光電子増倍管へ導かれる。光電子増倍管から出る信号をディスクリミネーターで矩形波にし、ゲートジェネレーターを通して適切な幅 (150ns) に広げ、ゲート信号としてタイミングを合わせ

て ADC へ送る。(図 1.1、図 1.2)

この二つの信号から、ADC は入射した信号を積分してその値を PC に送る。この時、1ADC カウントは 0.25pC である。

送られてきた数値データ 1 万イベントを、ROOT を用いてヒストグラムとして出力し、そこから平均光電子数  $N_{p.e}$  を読み取る。(図 1.3)

ここで、

$$N_{p.e} = \frac{Mean}{\Delta d}$$

である。(図 1.3)

特に断りがない場合、線をファイバーから 3mm 離れた軸上に入射する(図 1.4)。例えば MPPC から 16mm の位置で測定する、という場合、図 1.5 に示す位置に線を入射する。包装にはキモト製フィルムを用いる。キモト製フィルムについては 2.3.6 を参照。

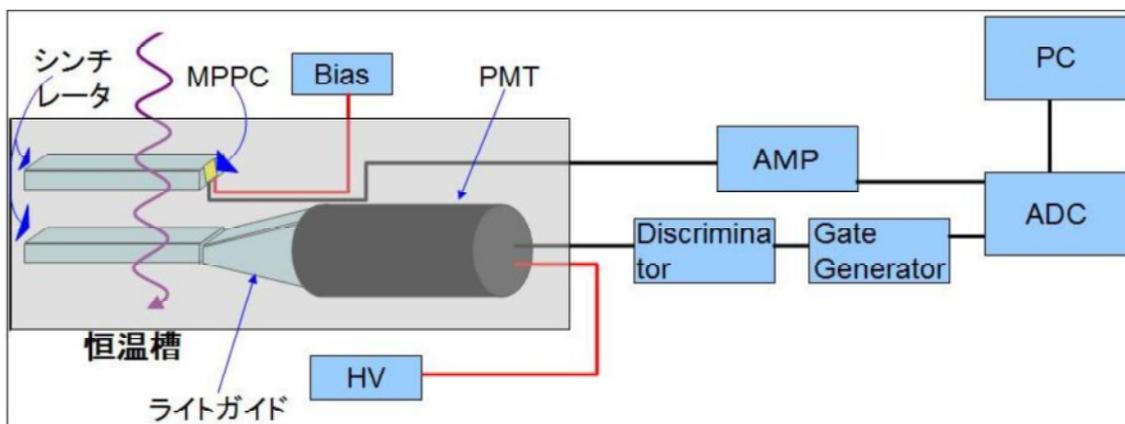


図 1.1: セットアップ

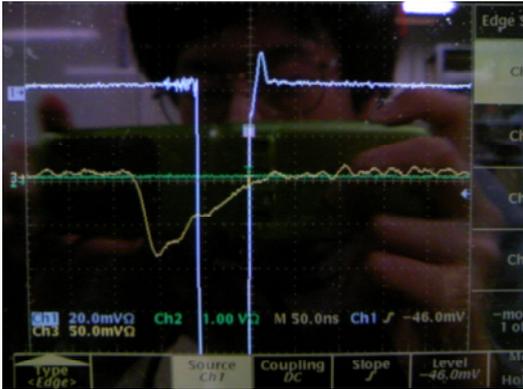


図 1.2: トリガー信号をディスクリミネーターに通した段階の様子。  
CH1 がトリガー、  
CH3 がシンチストリップの信号である。

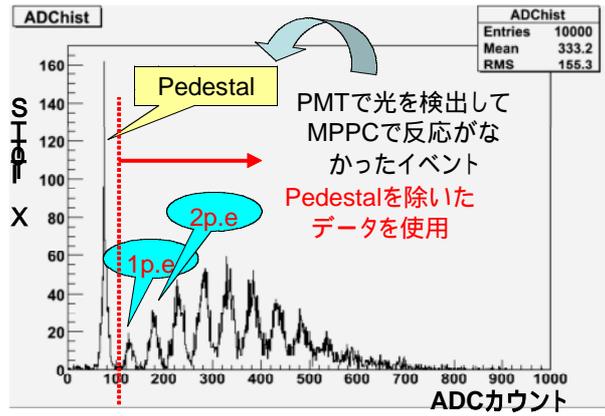


図 1.3: 読み出すヒストグラム  
d:山同士の間隔  
mean:カウントの平均値

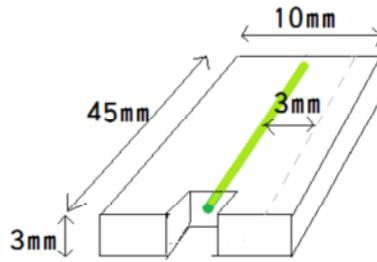


図 1.4 シンチストリップ

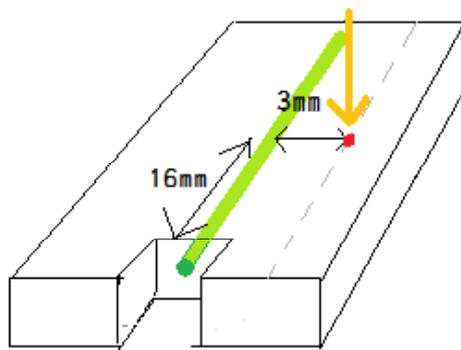


図 1.5 線の入射位置

## 2.3 各条件の下での 線に対するシンチストリップからの 光量測定

### 2.3.1 温度依存性

MPPC のブレイクダウン電圧は温度上昇に伴い一次関数的に上昇する。そのため、同じバイアス電圧でも MPPC にかかるオーバーボルテージ（「バイアス電圧」 - 「ブレイクダウン電圧」と定義する）は高温になるほど小さくなる。

MPPC の光子検出効率はオーバーボルテージにより変動するため、温度が変化すると光量も変化してしまう（図 2.1）。

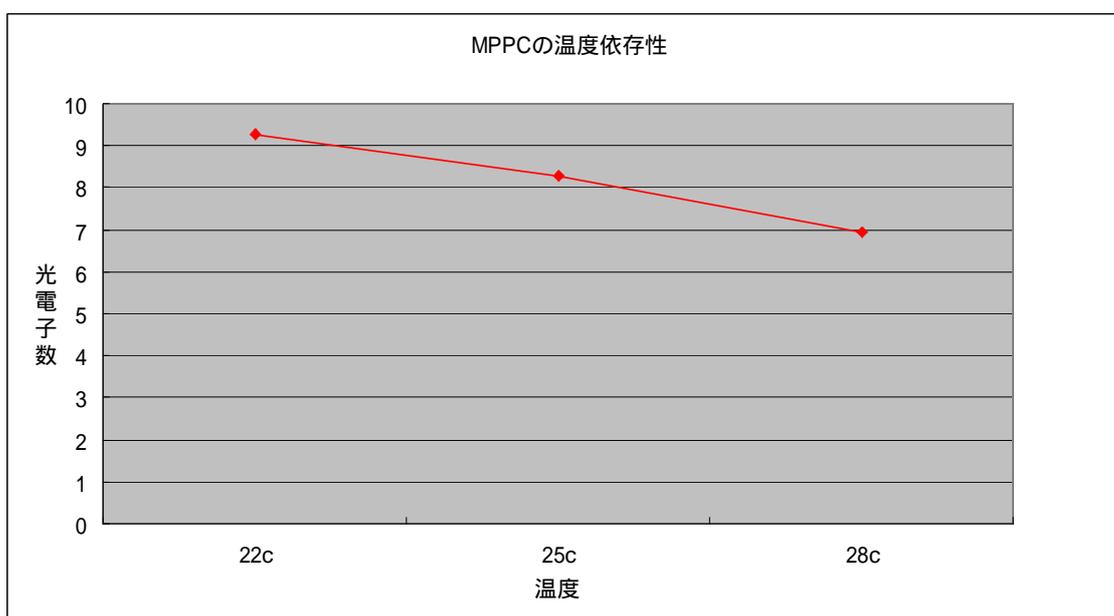


図 2.1: 温度による絶対光量の変化 MPPC から 16mm の位置に 線を入射。  
6 度で約 25% の光量の減少が見られる。

実験の結果から、温度の影響が無視できないことが分かった。卒業研究の目的は包装による違いの確認であるので、恒温槽を用いて 25 に統一する。

### 2.3.2 ファイバーからの横方向の距離の影響

測定点はファイバーから 3mm 離れた軸上にとり決めたが、それ以外の位置で取ると測定結果に影響が出るかどうかを確認する。

MPPC から 16mm の位置で、線源を横方向に動かし（図 2.2）、光量の変化を見る。すると実験結果は以下（図 2.3）のようになった。このことから、ファイバーから離れるほど光量が減っていくが、ファイバーの真上でも光量が落ちることが分かった。（これは中心部はファイバーが通っている分シンチレータが薄いためである。）

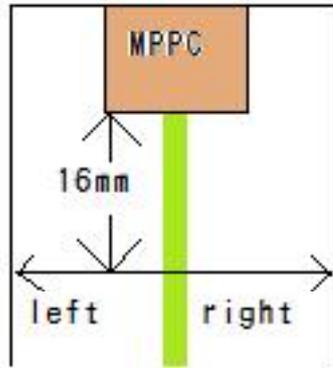


図 2.2 今回の測定点

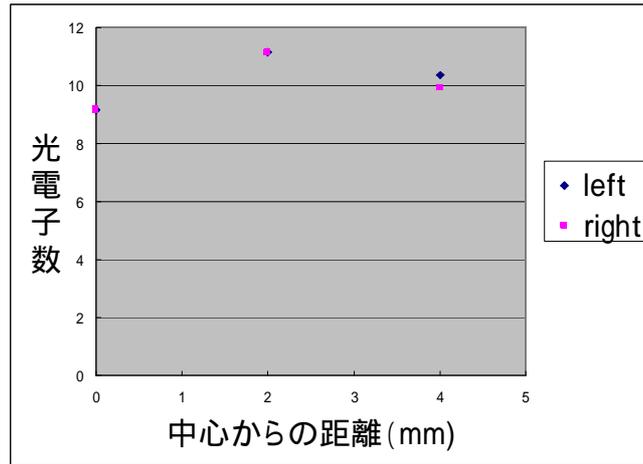


図 2.3 左右に動かすことで、10%程の差が出る。

### 2.3.3 測定ごとの再現性

シンチストリップに反射材を巻き、MPPC と接続して恒温槽内に設置する、という一連の動作でどの程度測定結果にばらつきが出るのかを調べる。この実験では、包装素材を切り出すところから始める。

まず、キモト製フィルムを包装素材として、MPPC から 5mm、16mm、22.5mm、40mm の位置で繰り返し測定を行った。その結果が、以下の図 2.4 である。

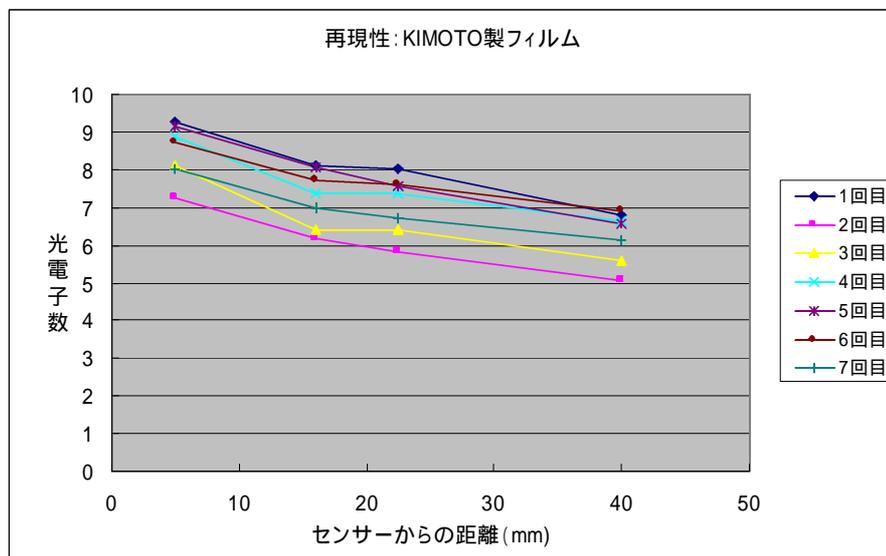


図 2.4 キモト製フィルムによる再現性のテスト

次に、アルミホイルを包装素材として、同様に繰り返し測定を行った。アルミホイルを用いる理由は、アルミホイルは加工が比較的容易なため、包装による差が出にくいと思われるためである。その結果が以下の図 2.5 である。

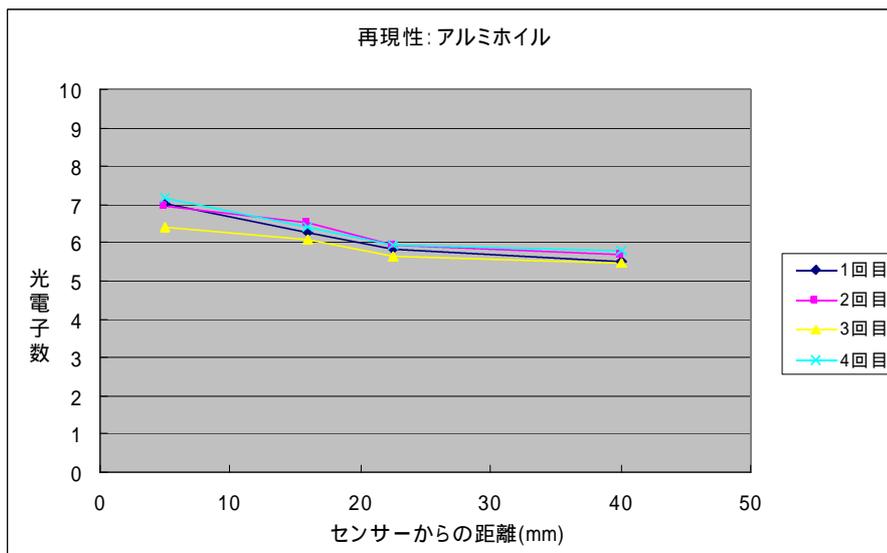


図 2.5 アルミホイルによる再現性のテスト

これら二つの結果から、包装が簡単な素材の場合の測定値のばらつきは約 5%であることが分かった。そしてキモト製フィルムを使用したときには、明らかに大きなばらつきが生じていることが分かる。この理由は後述する。(2.3.6 参照)

### 2.3.4 シンチストリップの個体差

ここでシンチストリップごとの個体差をテストする。2.3.3 の実験より、アルミホイルを包装素材に用いて実験を行えば良い再現性が得られることが分かっている。そこで、アルミホイルを用いて、4本のシンチストリップを 2.3.3 と同様に測定した。その結果は下図 2.6 である。

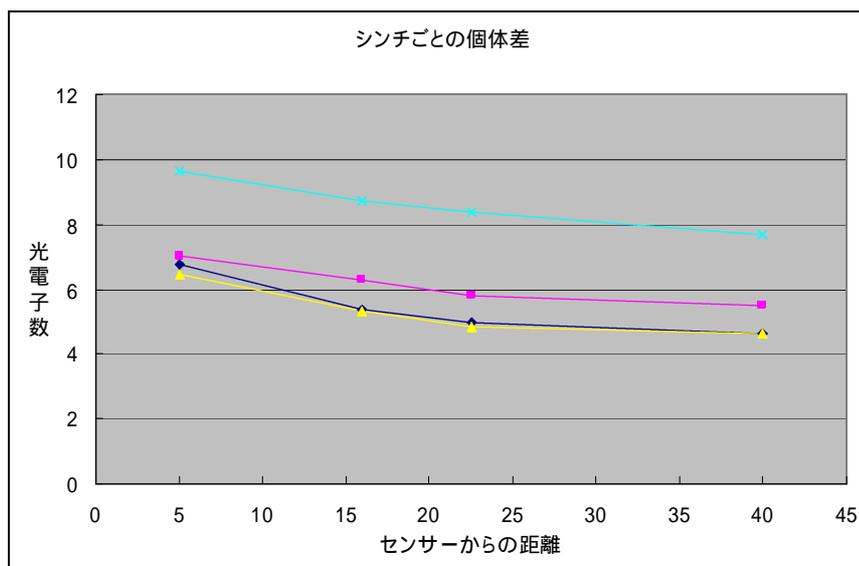


図 2.6 アルミホイルによるシンチの個体差テスト

絶対光量が大きく離れている固体もあり、シンチストリップごとの性能差は無視できないことが分かる。よって、今回の研究はなるべく同一のシンチストリップを用いて行う。

ここでもう一つの注意点に気がついた。同一のシンチストリップで再現性のテストをしたとき、包装素材にアルミホイルを用いたのに結果が再現されなかった。下図 2.7 がその結果である。

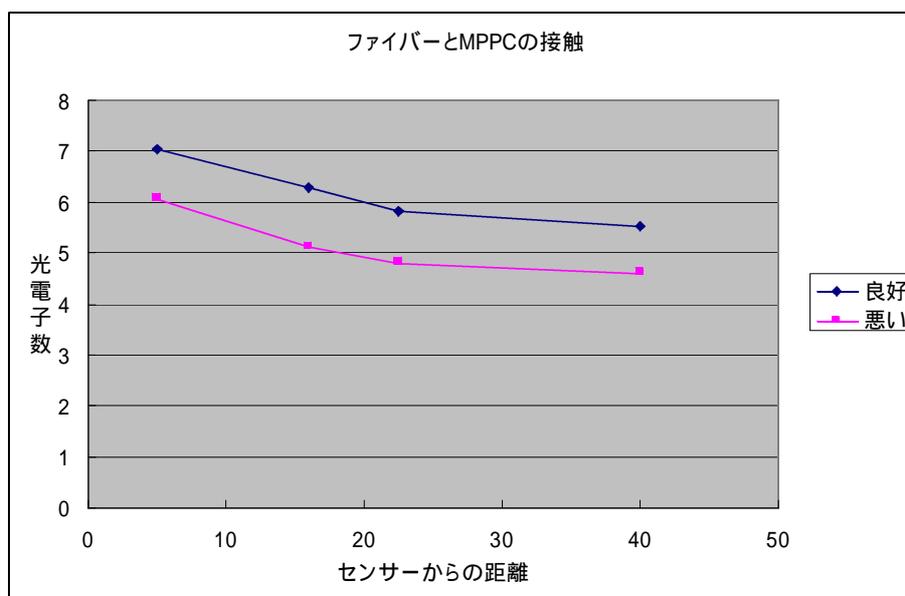


図 2.7 同一のシンチストリップで、同様の条件で実験を行ったが再現されなかった。

調べた結果、これはシンチストリップ内のファイバーが中心を通っていない事が原因であることが分かった（下図 2.8 参照）。このストリップの場合、上下をひっくり返して測定することで、図 2.7 の両方の結果を再現することができた。よって実験の際は、シンチストリップの上下も決めて行う必要がある。



図 2.8 このシンチストリップの場合、ファイバーは上下の比が約 5 : 4 の位置を通っている。

### 2.3.5 包装面の影響

シンチストリップの各面を図 2.9 のように A.B.C.D.E.F と名づけ、A から順に包装面を増やしながらか光量を測定することで、各面の光量への影響を調べる。測定は MPPC から 5mm と 40mm の位置で行い、絶対光量の変化と位置依存性を調べる。

なお E 面は、光がシンチストリップからファイバーを経ずに MPPC へ入射すること（この光をダイレクト光と呼ぶ事にする）を防ぐという、他の面とは異なる役割を持つ。そのため E を貼る場合と貼らない場合で別々に測定を行った。その結果が図 2.10 である。

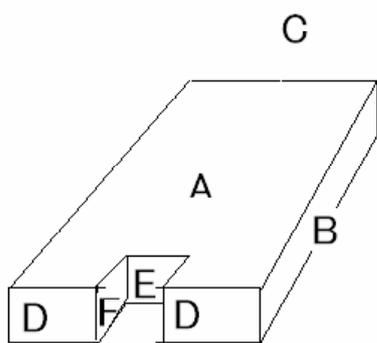


図 2.9 各面を A-F と名付ける。

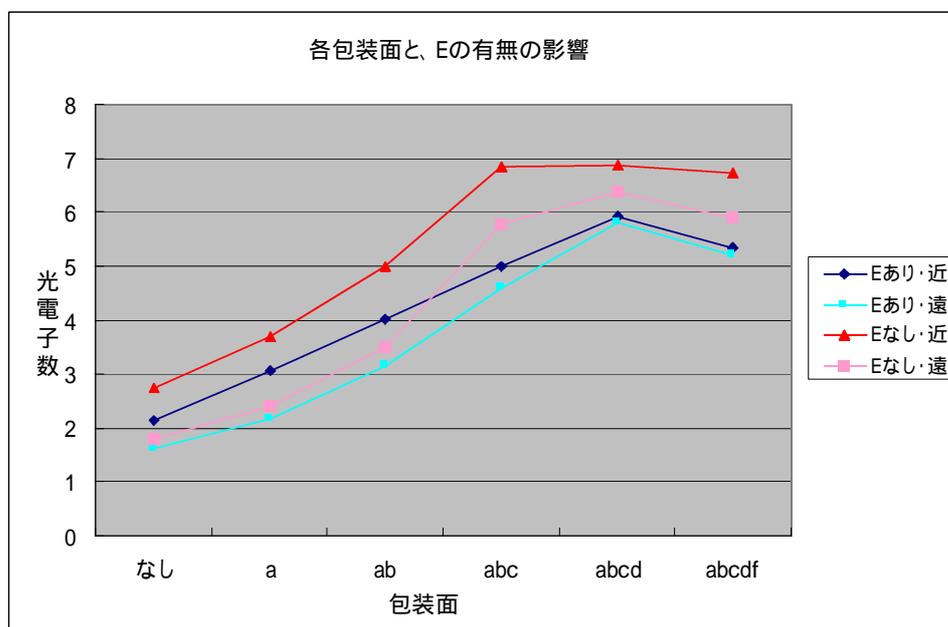


図 2.10 各包装面の影響

この結果により、A.B.C.D 面は面積の大小にかかわらず、包装の必要があることが分か

る。そして E 面を貼ることで全体的な光量が低下する。これはダイレクト光が入らないからであると思われる。

F 面を貼ることで光量の減少が見られた。これの原因は今のところ次の二つが考えられる。

- 1 . F 面という細かい部分を包装しようとしたため、包装に無理が生じて MPPC の設置に悪影響を及ぼし、図 2.7 のように光量が下がった。
- 2 . F 面からも MPPC へのダイレクト光が発生しており、F 面を貼ることでそれが防がれた。

今回の実験では、いずれが原因であるかは特定できなかった。

### 2.3.6 包装素材

シンチストリップの包装素材の違いによる光量の変化を調べる。現在のところ、最も入手が手軽かつ高性能な包装素材として、キモト製フィルムが注目されている。このフィルムは、アルミをプラスチックの膜で挟んだような構造をしており、その厚さは約 0.1mm である ( 図 2.11、図 2.12 )。

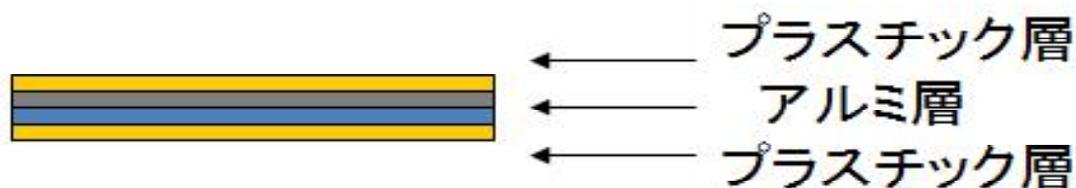


図 2.11 キモトフィルムの構造



図 2.12 キモトフィルムの外見。反射面は片面のみである。

今回はアルミホイル、白い反射材、白いコピー紙を用意し、キモト製フィルムとの差を調べた。また、包装の代わりにチタンホワイト ( 2.3.7 参照 ) を直接塗る方法も試した。結果が次の図 2.13、図 2.14 である。

なお、この実験では、E,F 面以外を包装した。

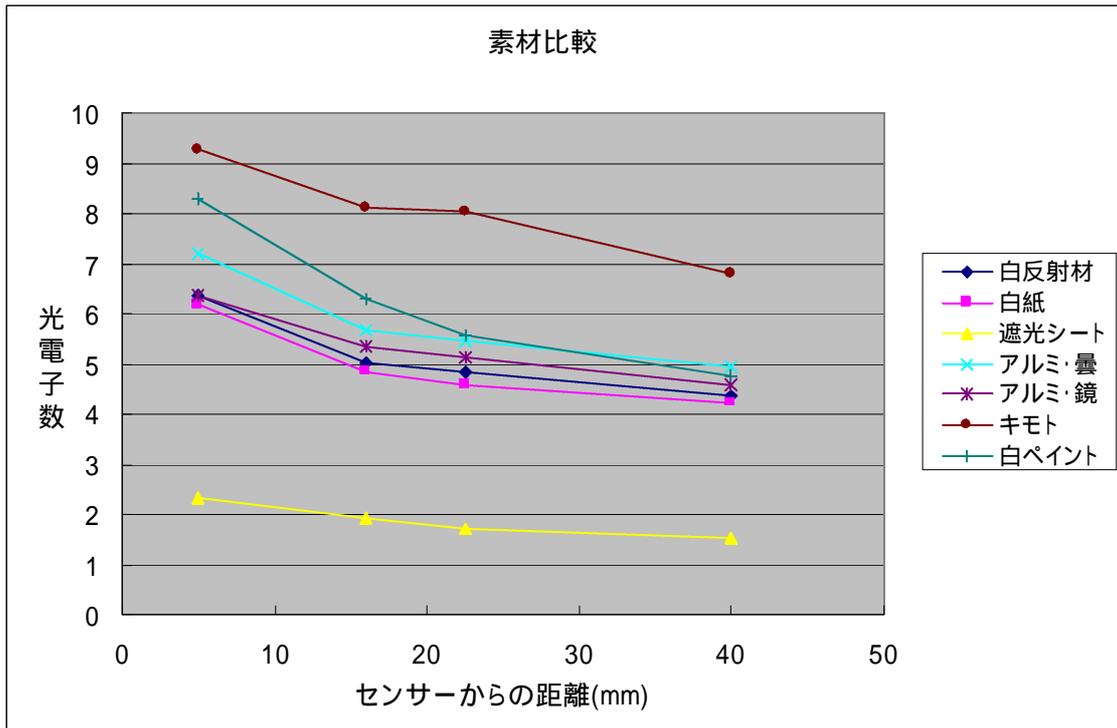


図 2.13 左上から順にキモト製フィルム、チタンホワイトペイント、アルミホイル（反射面を外側）、アルミホイル（反射面を内側）、白反射材、白コピー紙、遮光シートである。

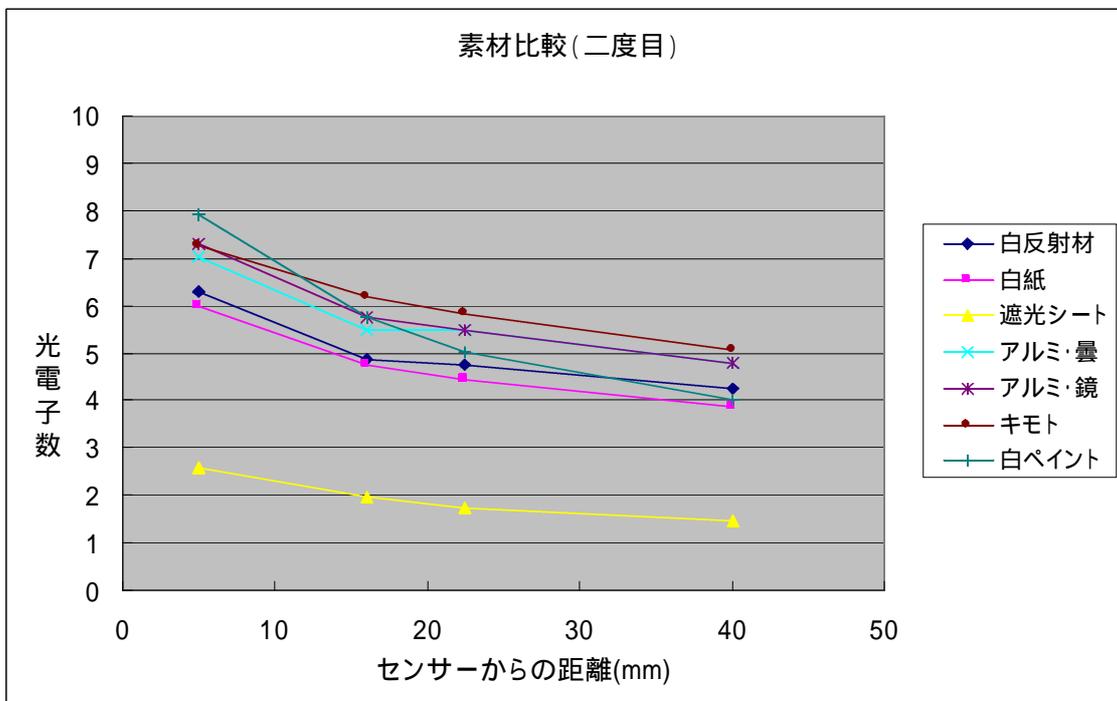


図 2.14 左上から順にチタンホワイトペイント、キモト製フィルム、アルミホイル（反射面を内側）、アルミホイル（反射面を外側）、白反射材、白コピー紙、遮光シートである。

まず図 2.13 のように、キモト製フィルムの光量の多さが際立つ結果となった。そして、キモト製フィルムと外見が似ているアルミホイルを用いても、光量は大きく落ち込み、白紙とあまり変わらなかった。また、期待されていたチタンホワイトによるペイントは、センサー近くでの光量こそ多いものの、位置依存性がかなり悪い結果となった。

同じ条件でこの実験をもう一度行った結果が図 2.14 である。こちらではキモト製フィルムの結果が再現されていない。これは 2.3.3 でも触れたことである。この原因は C 面の接触状態ではないかと考えられる（図 2.15）

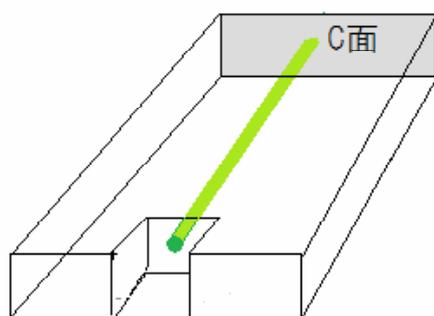


図 2.15 C 面

図 2.15 のように、C 面にはファイバー端が出ており、ここを反射材で押さえてやる必要がある。キモト製フィルムを使用した場合、包み方によってはうまく C 面のファイバー端を押さえられないことがあり、そのために図 2.4 のようなばらつきが生じたと思われる。

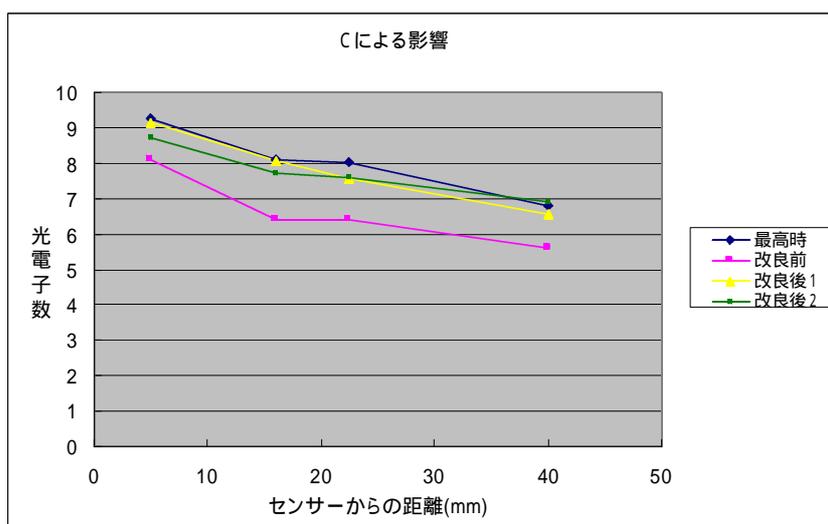


図 2.16 再現されなかったシンチストリップ（最下段）の C 面を意識して接触させることで、最高時の光量（最上段）をほぼ再現できた。

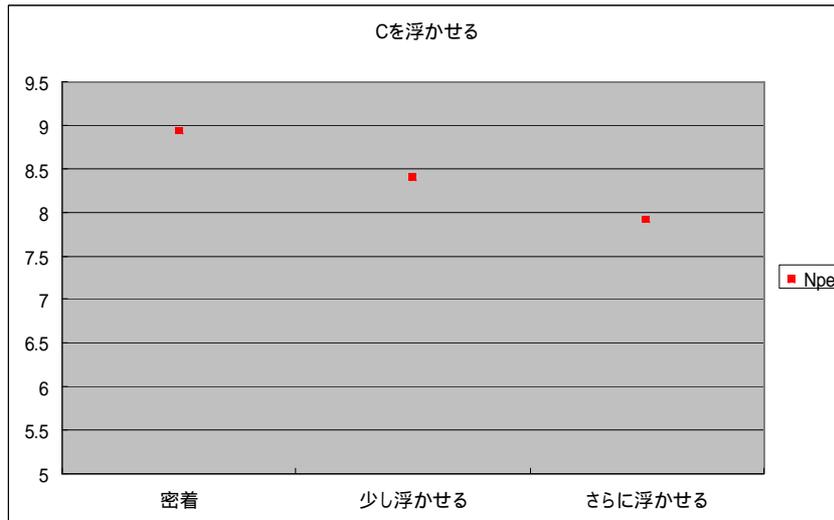


図 2.17 あえてC面を浮かせることで、光量が減ることを確認した。

### 2.3.7 チタンホワイトによるペイント

シンチストリップを製造するとき、包装素材を巻くのではなくペイントすれば、製造効率は向上すると思われる。そこで、チタンホワイトが塗料として注目されている（チタンホワイトは紫外線であるシンチレーション光を反射する性質を持っている）。

2.3.6 で高い光量を得ることができたキモト製フィルムが他の素材と異なるのは、反射材の表面がプラスチックの層でコーティングされている点である。そこでここでは、チタンホワイトを直接シンチストリップにペイントした場合と、いったんシンチストリップをサランラップで包んだ上からペイントした場合を比較する。（ただし、ペイントは塗ると剥がせないため、今回は個体差の少ない2本のシンチストリップを用いた。）

その結果（図 2.18）、ラップの上から包装した場合は位置依存性が改善することが分かった。

このような結果になる理由として、シンチストリップと包装素材との間にできる空気の層が原因ではないか、という意見がある（図 2.19、図 2.20 参照）が、まだはっきりしていない。

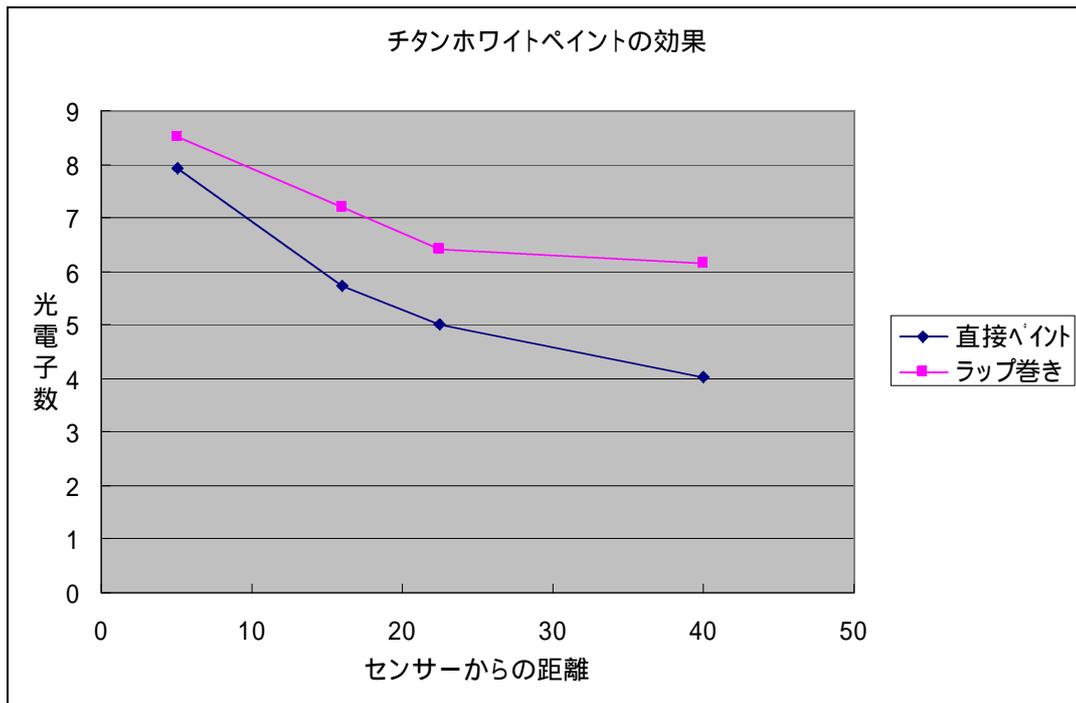


図 2.18 直接ペイントと、ラップを挟んでのペイントの比較

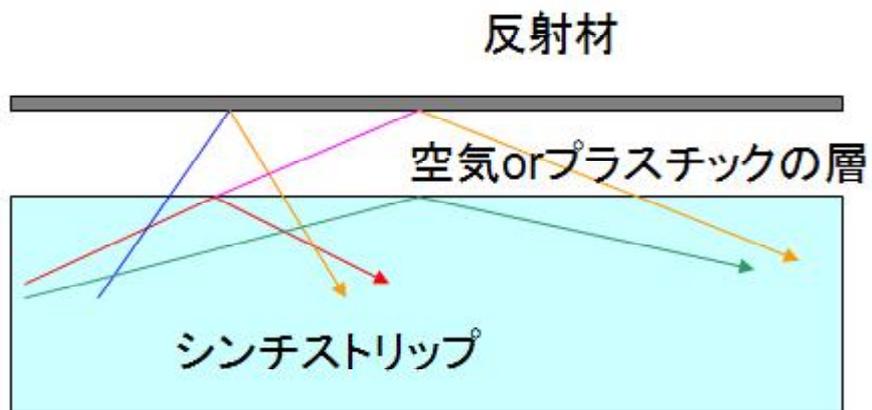


図 2.19 空気やプラスチックの層がある場合、シンチストリップ内での全反射が期待できる。

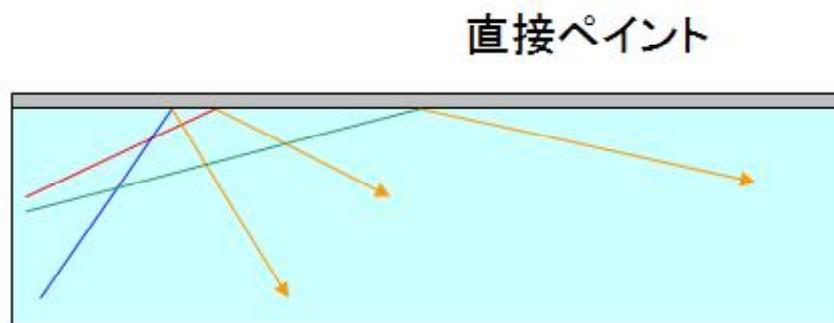


図 2.20 直接ペイントすると、シンチストリップ内での全反射が起こらない。

## 2.4 結論

以上の実験より、面積の大きい面 A,B,C,D はすべて包装する必要があることが分かった。そして包装素材として現在最も適しているのはキモト製フィルムであり、それ以外の素材では 20%以上光量が落ちてしまった。包装の際には C 面のファイバー端を押さえることも忘れてはならない。またこの卒業研究では、チタンホワイトによるペイントは位置依存性が悪いものになる、という結論に達した。

## 2.5 今後の展望

測定精度の向上

コリメータを改良する

現在のコリメータよりも穴の直径を小さくすることで、測定時間はかかるが精度の向上を目指す。

XY ステージを使用する

現在の位置決めは目測に頼っている。これを機械制御で自動的に行えるようにすることで精度の向上が見込める。

MPPC 固定方法の改善

現在 MPPC のシンチストリップへの設置は手作業で行い、固定はセロハンテープを用いている。もっときっちりした固定方法を用いれば、MPPC とファイバーとの接触の精度が良くなる。

包装素材・包装方法の改善

さらに光量・位置依存性の改善を図る。

コスト・手間の削減を図る。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、指導していただいた川越清以教授、魚住聖氏に感謝いたします。また共同実験者の木村暁彦氏、ILC グループの先輩である上山敬五氏と池田紘子氏、そして神戸大学粒子物理研究の皆様、ありがとうございました。