

Wave length shifting fiber の読み出しで光電子数を増やす  
方法

山中卓研究室 M2  
池本 由希子

2004年2月4日

### Abstract

昨今サンドイッチカロリメータでの wave length shifting fiber 読み出しが普及している。fiber 読み出しは獲得光量が少ないという欠点あげられる。そこで通常の光電子増倍管を用いても fiber 読み出しで光電子数の増加が得られるようなライトガイドの開発を行った。

はじめに光電子増倍管の光電面と光の入射角度の関係や fiber からの光分布を測定した。その結果、光電面の法線に対して 60 度傾けて光を入射すると、垂直に入射するとき比べて光電子数が 1.2~1.3 倍増加した。また fiber の端から空気に出る光量分布は、fiber の軸から約 35 度をピークに持っていることがわかった。

これらの結果をもとに、fiber からの光を平行にし、60 度で光電面に入射させる新しいライトガイドを開発し、その性能評価を行った。その結果 1.3~1.85 倍の光電子数増加を得ることができた。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>はじめに</b>	<b>5</b>
1.1	研究の動機	5
1.2	研究の方針	5
<b>第 2 章</b>	<b>予備実験</b>	<b>7</b>
2.1	光電面への光の入射角度と PMT の出力	7
2.1.1	実験のセットアップ	7
2.1.2	実験結果	9
2.2	fiber から出る光の角分布	10
2.2.1	実験のセットアップ	10
2.2.2	実験結果	11
<b>第 3 章</b>	<b>どうすれば fiber からの光を多く集めることが出来るか？</b>	<b>13</b>
3.1	fiber から出た光を平行にするには？	13
3.2	air に出た光の角分布→アクリルに入る角分布	14
3.3	ライトガイドの設計	16
3.3.1	cone の設計	16
3.3.2	ライトガイドの設計	17
<b>第 4 章</b>	<b>本実験</b>	<b>21</b>
4.1	cone から出る光の角分布	21
4.1.1	実験のセットアップ	21
4.1.2	実験結果	23
4.2	ライトガイドの性能実験	32
4.2.1	実験のセットアップ	32
4.2.2	実験結果	35
<b>第 5 章</b>	<b>考察</b>	<b>41</b>
5.1	改良型ライトガイドの性能評価	41
5.1.1	見込み角の違いによる結果について	41
5.1.2	点光源の効果について	43
5.2	PMT の光電面の法線に対して光の入射角度が 60 度のときに量子効率最大になる理由	43

4

5.3 fiber からの光の角分布について . . . . .	44
5.4 これからの課題 . . . . .	45
<b>第 6 章 結論</b>	<b>47</b>

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の動機

昨今、サンドイッチカロリメータ等の読み出しにおいて wave length shifting fiber(以下これを fiber とする)で読み出す方法を採用している実験が多くみられる。fiber 読み出しはシンチレータに比べて減衰が小さいため、非常に大きな検出器からの読み出しの際に距離による依存性が少なく、また積層の構造上読み出し構造を作りやすいなどの利点がある。しかしその反面、fiber から得られる光量は非常に少ないことが欠点としてあげられる。どのような用途の検出器として使う場合もそうだが、特にサンドイッチカロリメータを  $\gamma$  検出器として使用する場合、光量の多少が非常に重要な要素になってくる。

最近ではこの問題を解消するために EGP 型 (図 1.1) の光電子増倍管 (光電子増倍管を以下 PMT とする) が開発された [1]。この PMT は光電面を 1mm 間隔でプリズム状にカットし、光子の反応断面積を増やすことによって見かけ上の量子効率を増加させている。これによって従来型の PMT よりも約 1.8 倍もの光電子数の増加を見込むことが出来るようになった。しかし、この EGP 型の PMT はコストが割高になる。

そこで安価で簡単にそして fiber 読み出しに特化する形で、光電子数増加を見込める方法はないものかと考えるに至った。それが今回の研究の動機である。

## 1.2 研究の方針

より簡単な方法を研究するため、PMT は浜松ホトニクス社の H1161 型を使用することにした。

EGP 型の PMT の特徴から考えて光電面への光の入射角度が光電子数増加に関わっているものと考えられる。そこで予備実験としてまず、光電面への光の入射角度と PMT の出力の関係を調べることにした。そして fiber に特化した形にするため、あらかじめ fiber から出る光の角分布も調べておく。

それらの実験結果から、fiber から出る光をより多く集めることが出来るようなライトガイドの形を検討し、そこから出る光の角分布を測定する。そして集めた光をよりよい角度で PMT へ入射するためのライトガイドを製作し、最終的にどれだけの光電子数の増加を見込めたかを測定することにした。

最後に従来の方法とこの研究で改良した方法で、どれだけ光電子数の増加が見込めたかを比較検討する。

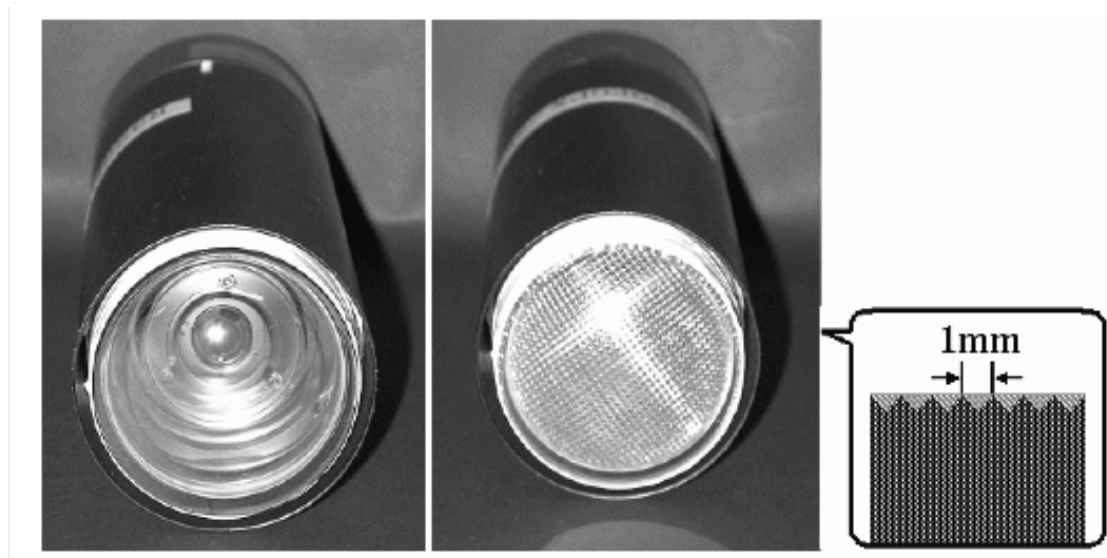


図 1.1: 左が従来型、右が EGP 型の光電子増倍管

## 第2章 予備実験

### 2.1 光電面への光の入射角度と PMT の出力

EGP 型の PMT の特徴から PMT の出力には光電面への光の入射角度依存があると考えられる。そこで光電面への光の入射角度と PMT の出力の関係を調べた。

#### 2.1.1 実験のセットアップ

光源は白色 LED を使用した。スリットを通った光はほぼ平行光線で PMT の光電面の中心にあたるようにした。そのときの光電面付近での光の幅は 1mm 程度にした。このとき LED とスリットは同じ台の上であり、一体となって動かせるようになっている。また PMT 側には PMT のガラス表面での入射角度による反射率の違い等の影響を避けるため、表面のガラスに近い屈折率を持つ半円柱の亚克力を PMT のガラス窓につけた。(図 2.1)

このとき装置全体は 110cm × 80cm × 40cm の箱形の鉄筋に黒のフェルトとブラックシートの 2 重に遮光したブラックボックスで覆った。

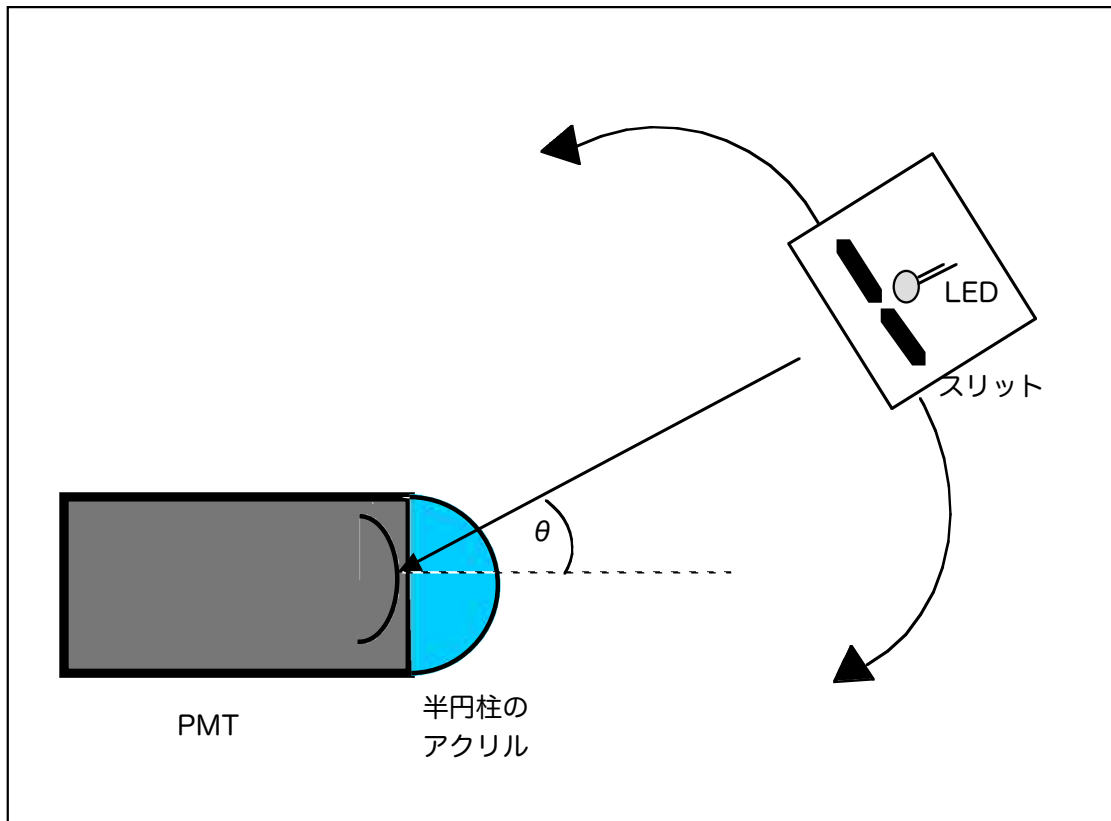


図 2.1: 実験のセットアップ図



### 2.1.2 実験結果

図 2.1 のように PMT ガラス表面に対してちょうど 90 度の位置を入射角 0 度の基準位置として、左右それぞれ入射角度を 5 度おきにかえて PMT の出力を測定した。その結果を図 2.2 に示す。

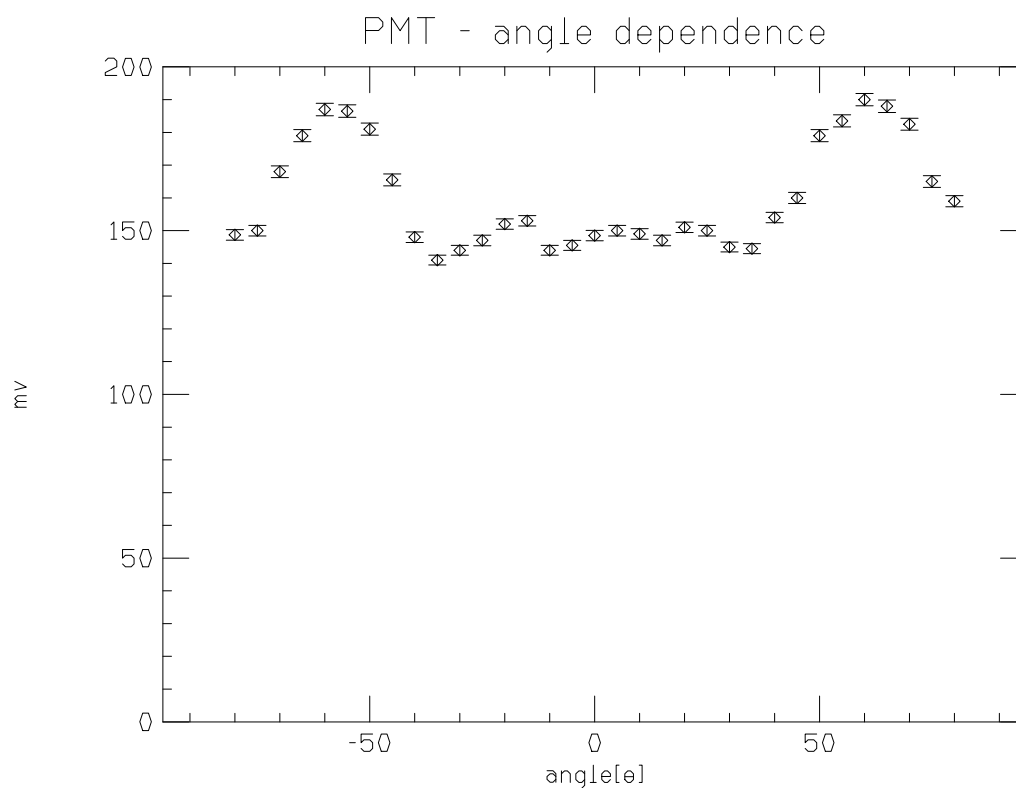


図 2.2: PMT への入射角度と光量の関係

図からわかるように±60度付近で出力が最大になっていることがわかる。つまり0度入射(垂直入射)よりもやや傾けて光を入射した方が、約1.2倍も多くの光電子数を得ることが出来ることがわかる。

## 2.2 fiber から出る光の角分布

fiber に特化した形で獲得光電子数の増加を見込みたいため、fiber から出る光の角分布を調べた。

### 2.2.1 実験のセットアップ

使用した fiber はクラレの Y11 で直径が 1mm である。fiber の長さは 44cm でシンチレータからの光を吸収するときと同じ状況にするため、fiber の横から青色 LED を照射した。照射位置は角分布の測定端から 32cm の位置にした。LED 照射位置はアルミナイズドマイラーで覆い、光源と fiber 全体は図 2.3 に示すように測定端を残し黒画用紙で覆った。また測定用 PMT は fiber の測定端から 20.2cm の位置に置き、ガラス表面には黒画用紙とブラックテープで作った横幅 1cm のスリットを接着させた。このスリット幅は光源を見込める立体角と測定光量の間をみて適切な幅を考慮した。

先の実験と同様に装置全体は遮光をした。



図 2.3: 実験のセットアップ (左の暗箱中に LED と fiber が入っており、測定端のみ外に出ている。右は測定用 PMT)

### 2.2.2 実験結果

fiber の軸方向を角度0度として、左右それぞれ5度おきに光量測定を行った。このとき PMT からの信号をそのままオシロスコープで測定すると、single photon がまばらにきているのが見えるだけで測定値としては使えない。そこで信号を積分回路に通して測定することにした。その結果を図 2.4 に示す。ある角度  $\theta$  で出た光の総量の角分布をみるために図 2.4 に  $\sin\theta$  をかけたものが図 2.5 である。これより、角度 35 度あたりをピークとした光量分布をしていることがわかる。

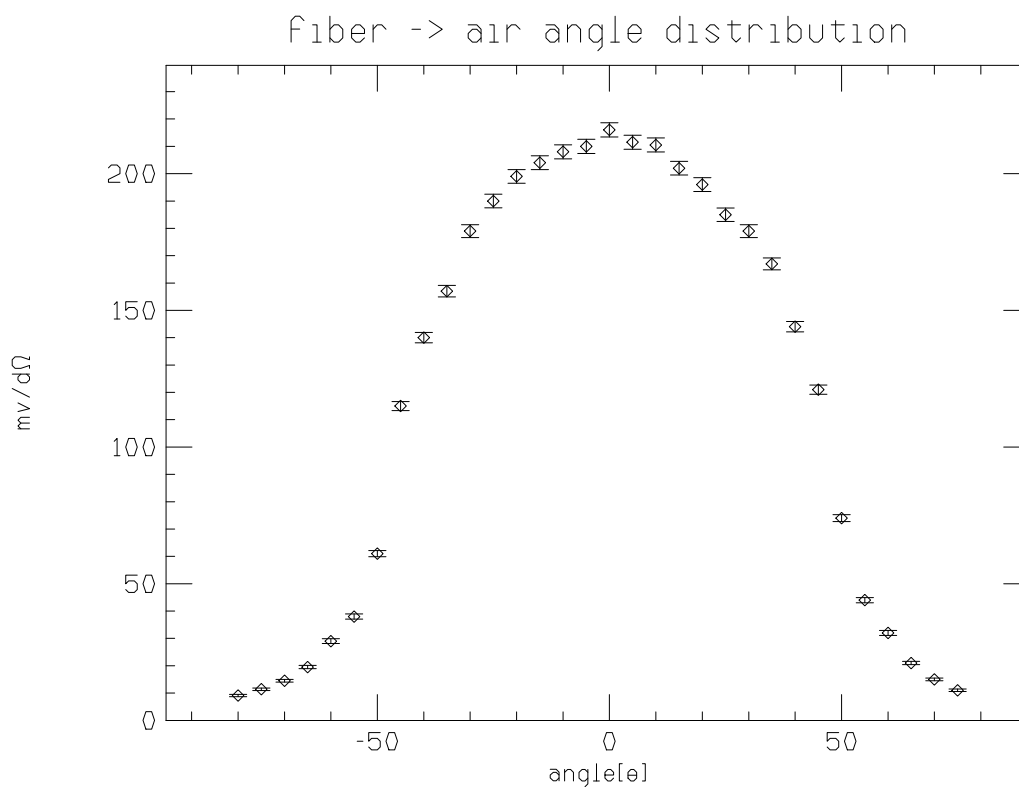
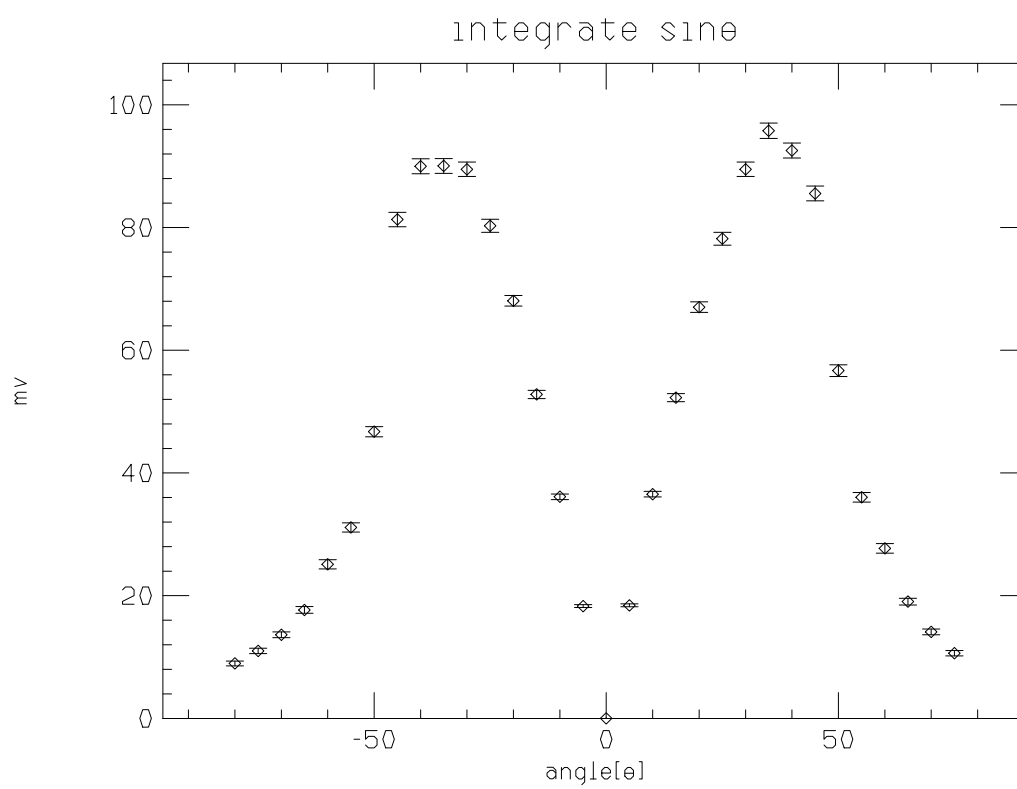


図 2.4: fiber から出る光の立体角あたりの角分布

図 2.5: fiber から出る光の角度  $\theta$  あたりの分布

## 第3章 どうすれば fiber からの光を多く集めることができるか？

予備実験の結果から fiber から出た光を出来るだけ平行光線にして、それを角度 60 度で PMT に入射させることが出来ればより多くの光電子数を得られるものと考えられる。そこでまず、fiber から出る光を平行光線にする方法を考える。

### 3.1 fiber から出た光を平行にするには？

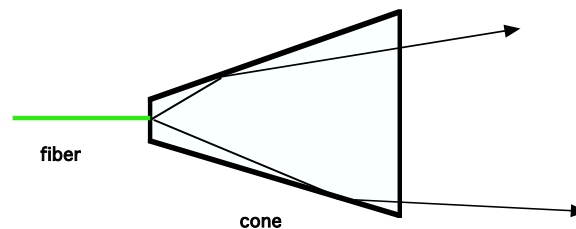


図 3.1: cone の断面図

- cone

図 3.1 のような cone 状のライトガイドを考える。fiber 光を入射する端面が fiber の直径に対して十分大きいならば fiber からの光が点光源としてみなせる。そうすれば fiber から出る光の一番強度の強い角度の光をすべて平行にするような角度を持った cone を考えることが出来るので、それを通った光は平均的に平行光線にすることが出来る。(点光源としてみなせない場合、一番強度の強い角度で出た光でも断面図に対してねじれの角度で入射されると、すべてを平行にすることは出来ない。)

またアクリルの cone は安価で加工が簡単であるという利点が挙げられる。

- lens

凸型 lens を考える。PMT の直径を考えるとある程度 lens の口径は小さいものでなければならない。また fiber からの光角分布で一番強度の高い 35 度の光線を十分にとらえてやるには焦点距離が短く、分厚いものでなくてはならない。

このことから加工や取り扱いが難しいことが考えられる。

平行光線にした後、60度の傾きでPMTに入射させることを考えても coneの方が加工も取り扱いも容易だと考えた。このため、今回の研究では cone型のライトガイドを製作することに決めた。

### 3.2 airに出た光の角分布→アクリルに入る角分布

2.2節より fiberからの光が空気中に出る時の分布は測定した。しかし実際には fiberからライトガイドを通してPMTに光を入射することになる。そこでスネルの法則を利用して光が fiberからライトガイドへ出るときの分布へ変換した。ライトガイドとしてはアクリルを用いた。このとき fiberの屈折率  $n_f=1.59$ 、アクリルの屈折率  $n_a=1.49$ とした。

このときのグラフが図3.2である。また、2.2.2と同様に  $\sin\theta$ をかけたものが図3.3である。

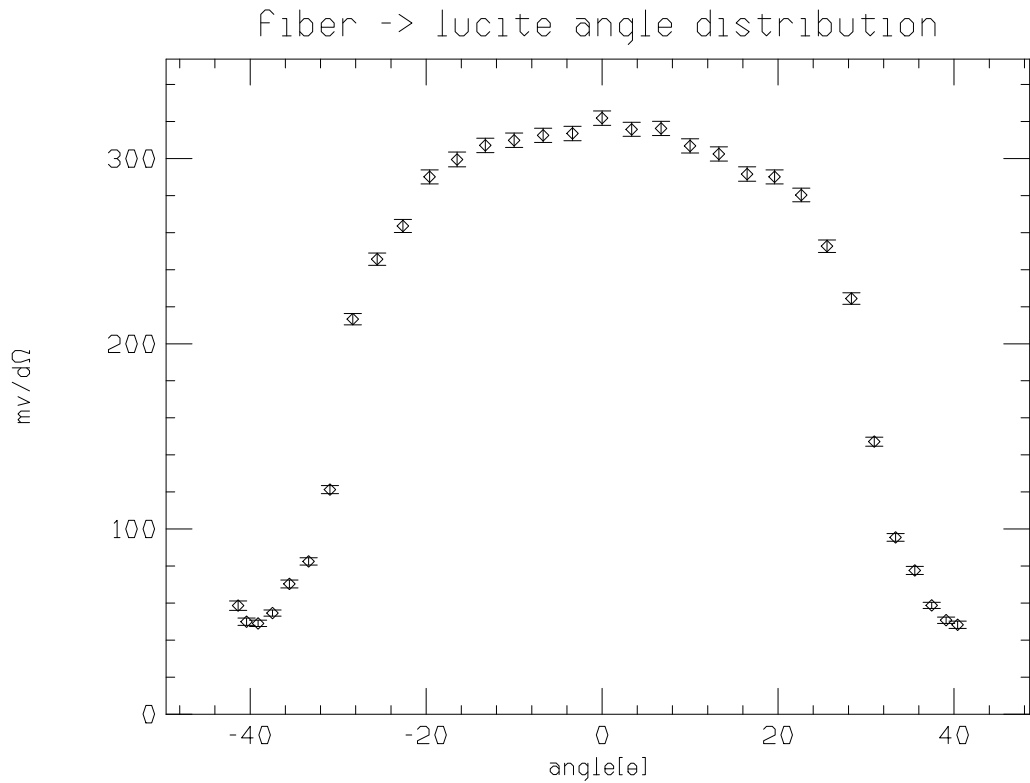
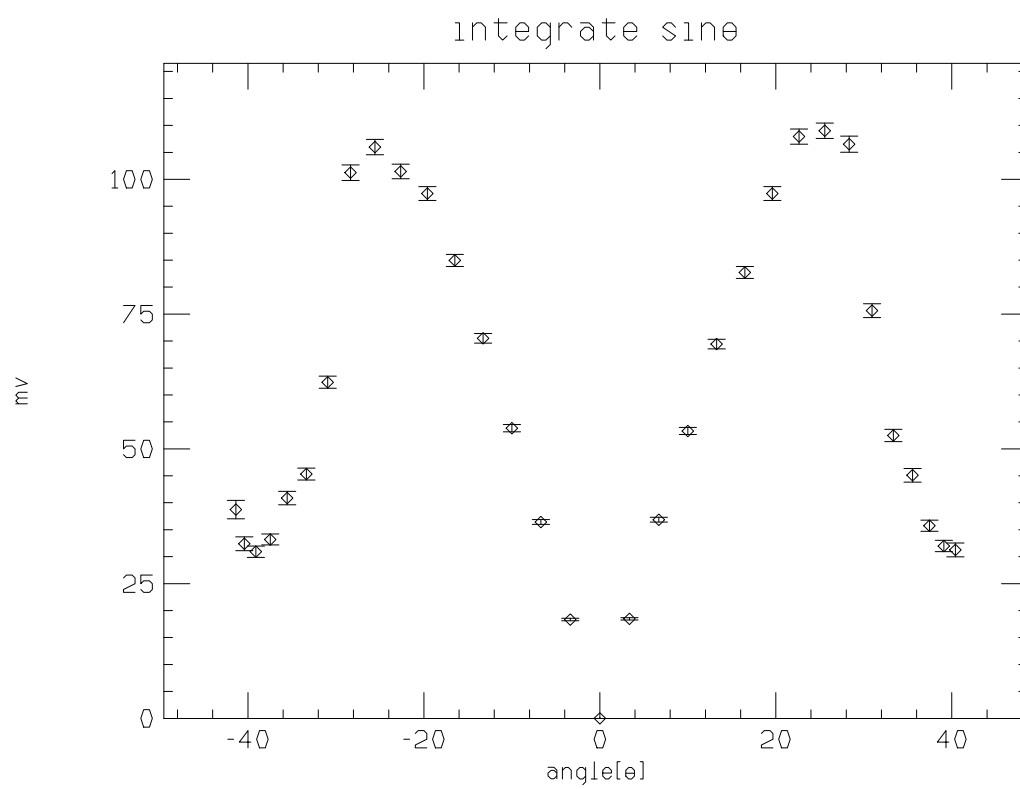


図 3.2: fiber からアクリルライトガイドへ出る光の立体角あたりの角分布

図 3.3: fiber からアクリルライトガイドへ出る光の角度 $\theta$ あたりの分布

### 3.3 ライトガイドの設計

#### 3.3.1 cone の設計

図 3.3 より、fiber からアクリルライトガイドへの光の分布は fiber の軸から 24 度あたりをピークとして広がっていることがわかる。そこで 24 度の光束を平行光線にするような cone を考える。

まず、cone の角度  $\theta_{cone}$  (図 3.4) は 12 度である必要がある。次に光源が点光源にみなせることの効果を調べるために、直径 1mm の fiber に対して図 3.4 の  $r_1$  がそれぞれ 1.0、2.0、4.0mm のもの考えることにした。また、出来るだけ多くの光量を得たいことから、図 3.3 より、光軸からの見込み角  $\theta_{min}$  (図 3.4) が 16 度と 20 度の cone を検討することにした。最後に加工の都合上、cone の先端に 5mm の円柱を延長したものを製作した。

製作した cone のサイズは表 3.1 に示す通りである。

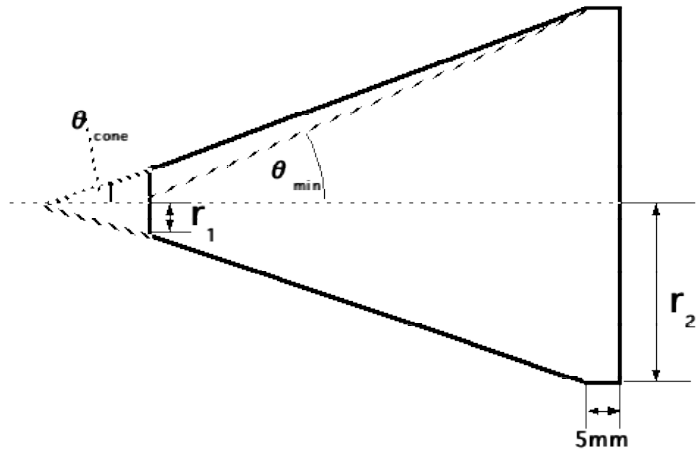


図 3.4: cone(断面図) の設計

$\theta_{min}$ (degree)	$r_1$ (mm)	$r_2$ (mm)	name
16	1.00	3.87	A1610
16	2.00	7.73	A1620
16	4.00	15.46	A1640
20	1.00	2.40	A2010
20	2.00	4.81	A2020
20	4.00	9.62	A2040

表 3.1: cone のサイズ



## 3.3.2 ライトガイドの設計

## 開発したライトガイド

3.3.1 節の cone に加えて平行になった光を角度 60 度で PMT に入射できる形を考えた。cone に 60 度入射が可能ないように斜めに切った円柱を取り付けたような形のライトガイドを製作した。これは加工の都合がおおいに関わってきたが、cone によって平均的に平行光線となった光はほぼそのまま直進することを考えても妥当だと考えられる。

製作したライトガイドのサイズは表 3.2 に示す通りである。

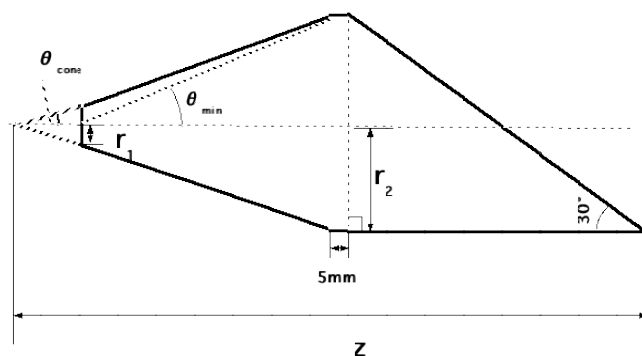


図 3.5: ライトガイド (断面図) の設計

$\theta_{min}$ (degree)	$r_1$ (mm)	$r_2$ (mm)	$z$ (mm)	name
16	1.00	3.87	36.57	B1610
16	2.00	7.73	68.15	B1620
16	3.00	11.60	99.72	B1630
18	3.00	8.68	75.86	B1830
20	1.00	2.40	24.64	B2010
20	2.00	4.81	44.27	B2020
20	3.00	7.21	63.91	B2030
20	4.00	9.62	83.54	B2040
22	3.00	6.33	56.71	B2230
24	3.00	5.74	51.89	B2430
26	2.00	3.54	33.96	B2620
26	4.00	7.09	62.91	B2640

表 3.2: ライトガイドのサイズ

### 比較のためのライトガイド

開発したライトガイドと従来の読み出し方法とを比べるために、円柱型のライトガイドの製作も行った。また PMT へ入射角だけを考慮したものとの比較を行うために、光が PMT に入射角 60 度で入るように円柱を斜めにカットした形のライトガイドも製作した。製作したライトガイドのサイズは表 3.3、表 3.4 にそれぞれ示す通りである。

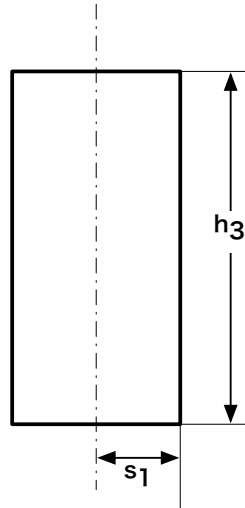


図 3.6: 円柱ライトガイド (断面図) の設計

$s_1$ (mm)	$h_3$ (mm)	name
1.93	10.1	C1
4.22	17.8	C2
7.73	40.3	C3

表 3.3: 円柱のサイズ

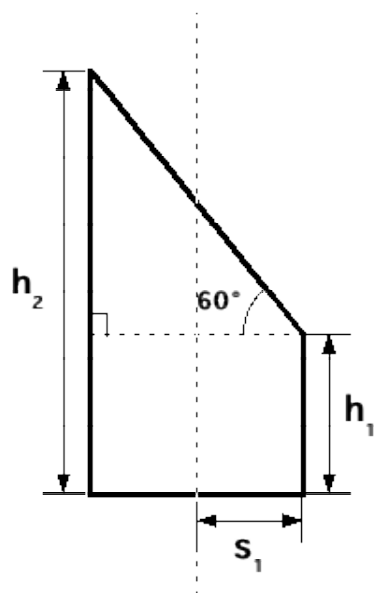


図 3.7: 円柱斜め切りライトガイド (断面図) の設計

$s_1$ (mm)	$h_1$ (mm)	$h_2$ (mm)	name
1.93	6.74	13.4	D1
4.22	10.5	25.1	D2
7.73	27.0	53.7	D3

表 3.4: 円柱斜め切りのサイズ



## 第4章 本実験

### 4.1 cone から出る光の角分布

前章で設計した cone から出る光の角分布を測定した。

#### 4.1.1 実験のセットアップ

予備実験と同様に、使用した fiber はクラレの Y11 で直径が 1mm である。これを図 3.4 の  $r_1$  側の中央に接着した。fiber の長さは 44cm で fiber の横から青色 LED を照射した。照射位置は角分布の測定端 (cone の端) から 32cm の位置にした。cone を真正面から見た図が図 4.2 である。LED 照射位置はアルミナイズドマイラーで覆い、光源と fiber 全体は黒画用紙で覆った。また図 4.1 に示すように測定用 PMT は cone の測定端から 20.2cm の位置に置き、ガラス表面には黒画用紙とブラックテープで作った  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  のスリットを接着させた。

装置全体は遮光をした。

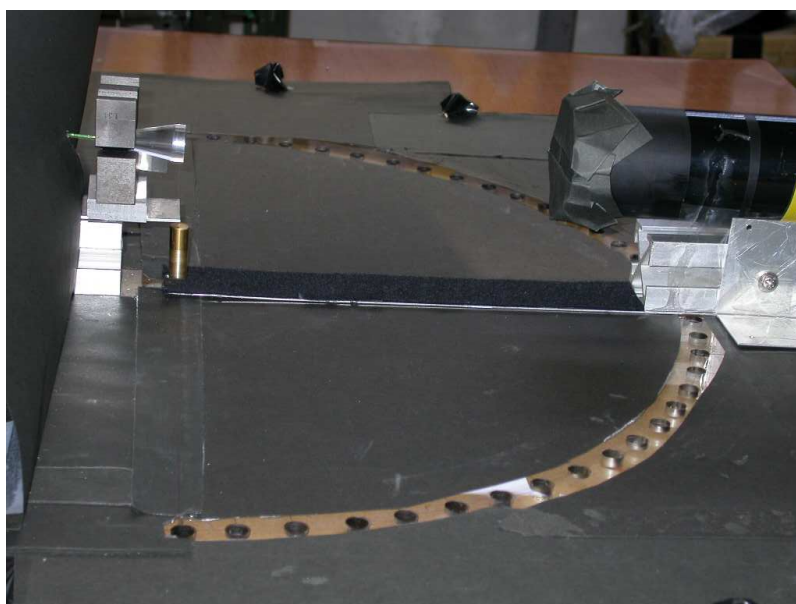


図 4.1: cone から出る光角分布の測定装置 (左は fiber 付きの cone、右は測定用 PMT)

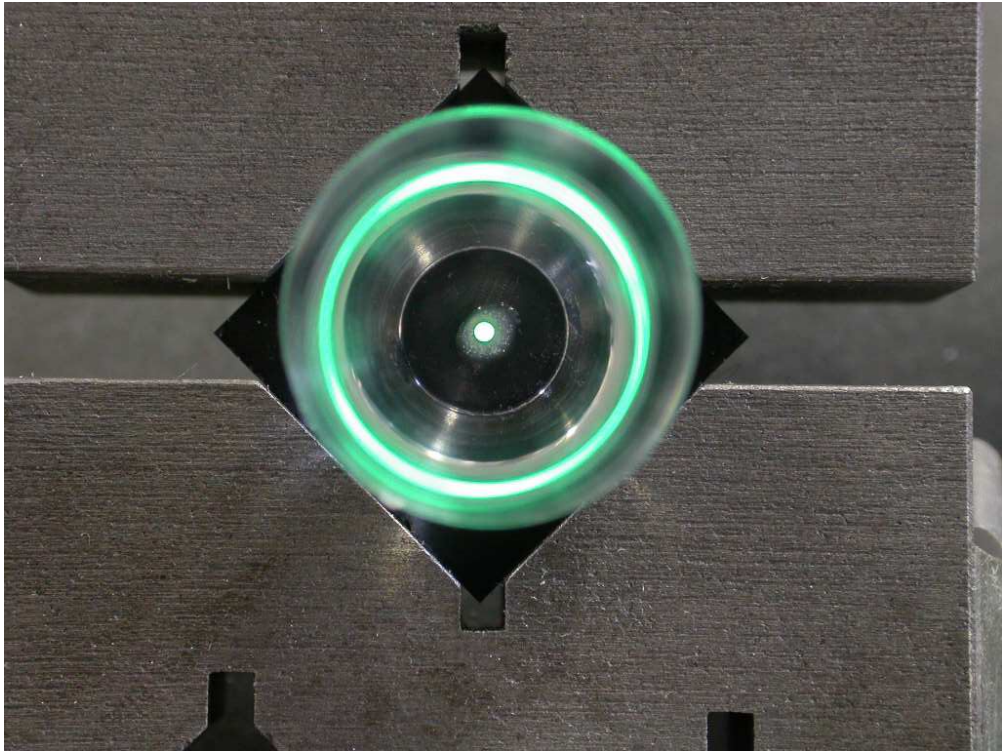


図 4.2: cone を真正面から見た図 (平行光線として一番強く反射している光が緑のリング状に見える。)

### 4.1.2 実験結果

fiber からの光角分布を測定したときと同様に、fiber の軸方向を角度 0 度として、左右それぞれ 5 度おきに光量を測定をした。PMT からの信号は積分回路を通して、その波高を測定した。

それぞれの cone から出る光角分布は図 4.3、図 4.5、図 4.7、図 4.9、図 4.11、図 4.13 に示す通りである。

また、それぞれの cone から出る光の  $\cos\theta$  の分布が図 4.4、図 4.6、図 4.8、図 4.10、図 4.12、図 4.14 である。さらにこれらの図をもとにそれぞれの角度までごとに全光量の何パーセントの光量を有しているかを示したものが表 4.1、表 4.2 である。

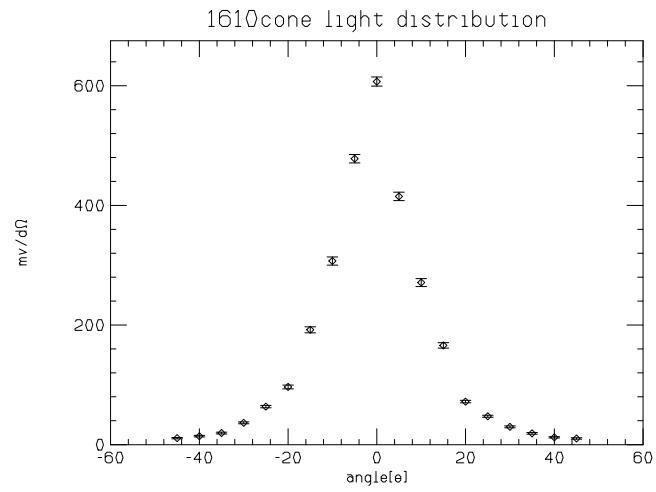
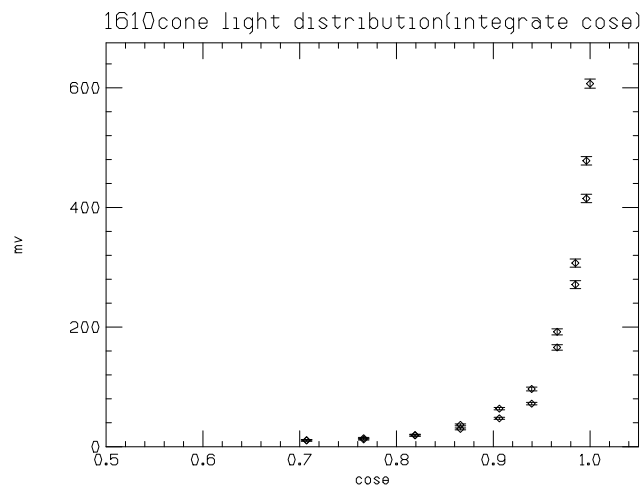


図 4.3: A1610cone 光角分布

図 4.4: A1610cone から出る光の  $\cos\theta$  分布



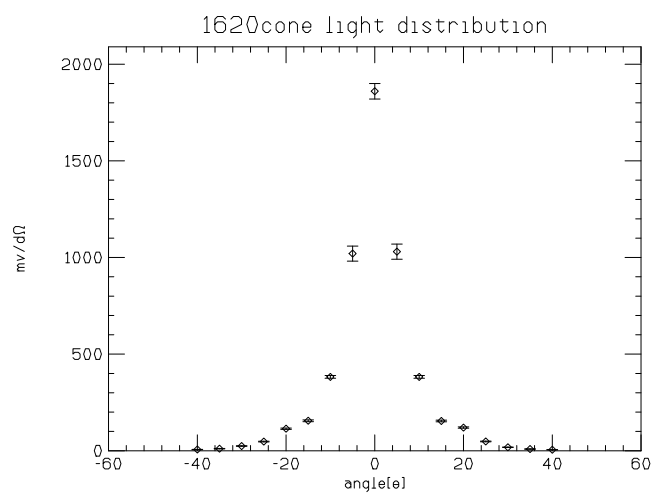
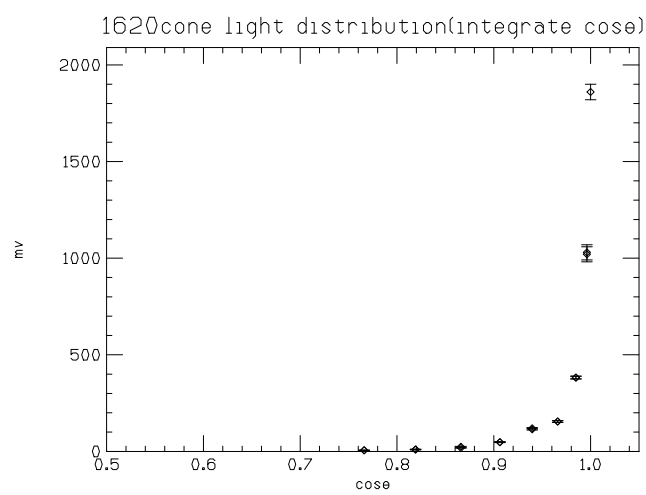


図 4.5: A1620cone 光角分布

図 4.6: A1620cone から出る光の  $\cos\theta$  分布

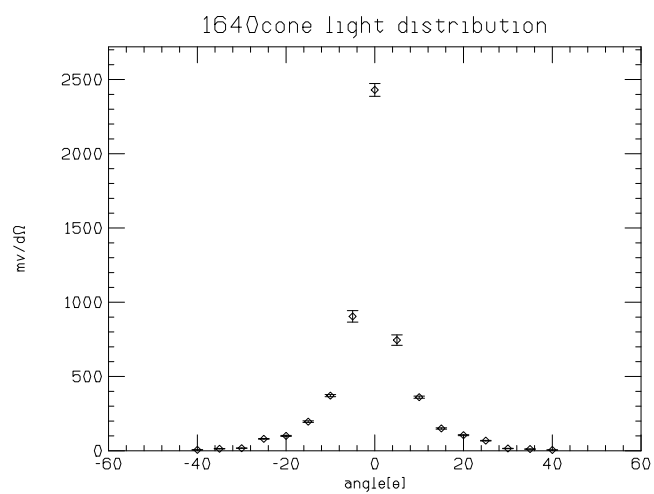
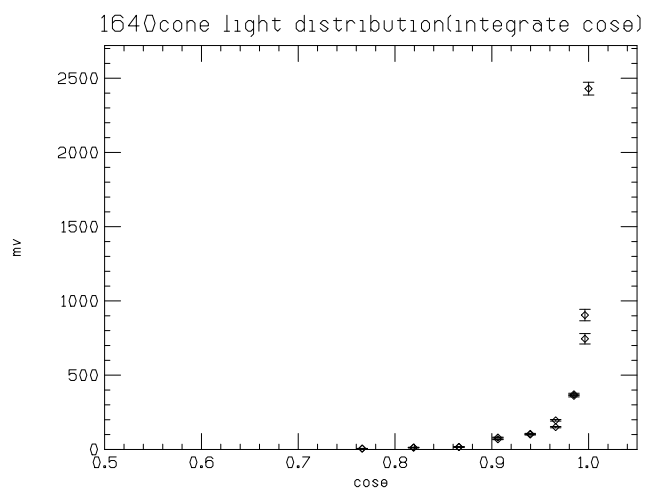


図 4.7: A1640cone 光角分布

図 4.8: A1640cone から出る光の  $\cos\theta$  分布

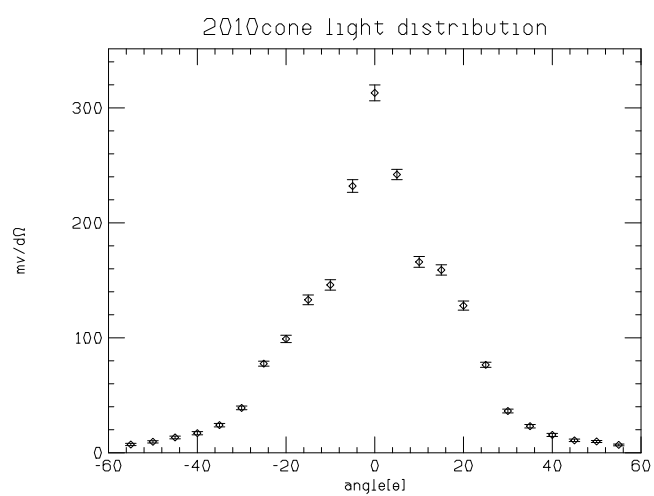
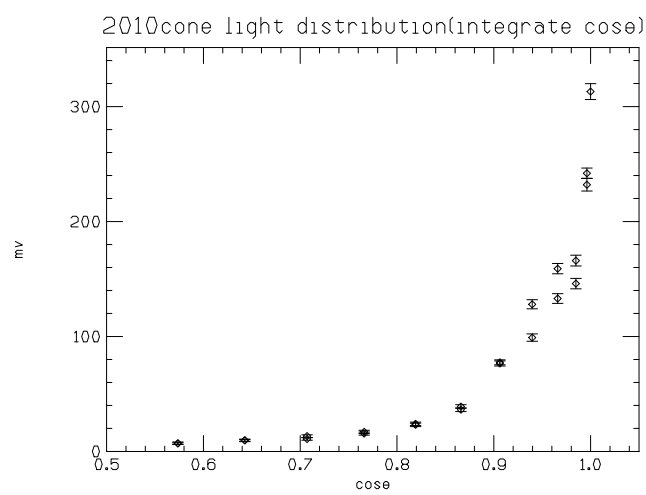


図 4.9: A2010cone 光角分布

図 4.10: A2010cone から出る光の  $\cos\theta$  分布

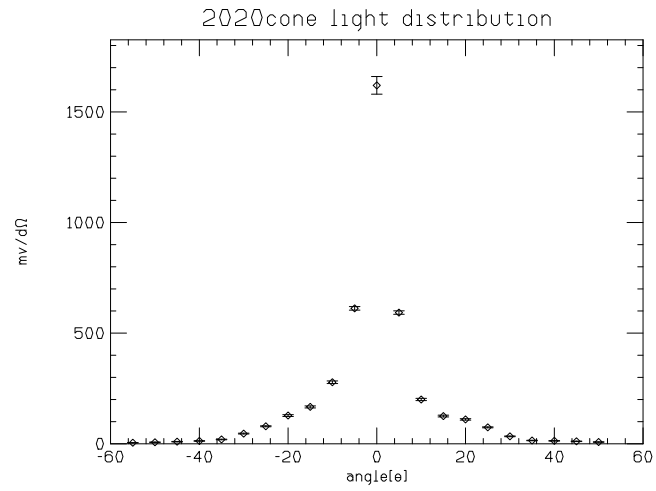
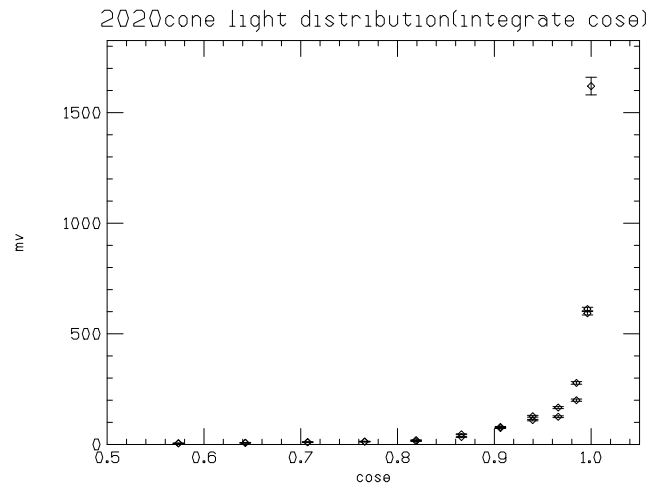


図 4.11: A2020cone 光角分布

図 4.12: A2020cone から出る光の  $\cos\theta$  分布

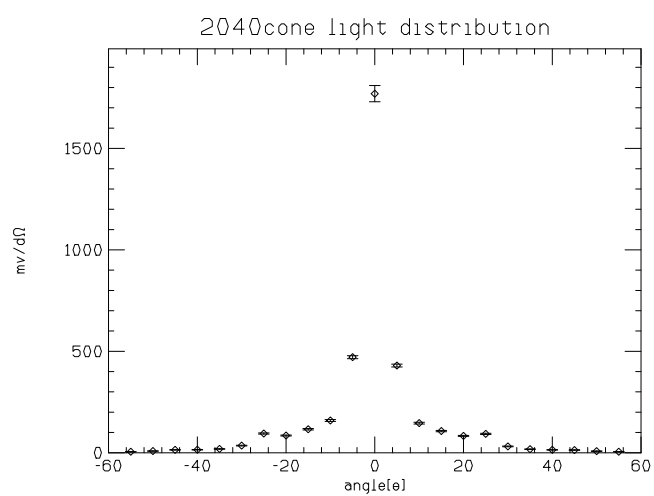
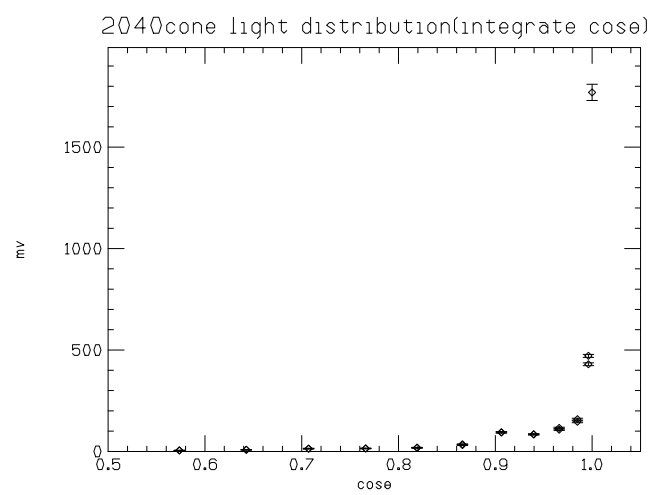


図 4.13: A2040cone 光角分布

図 4.14: A2040cone から出る光の  $\cos\theta$  分布

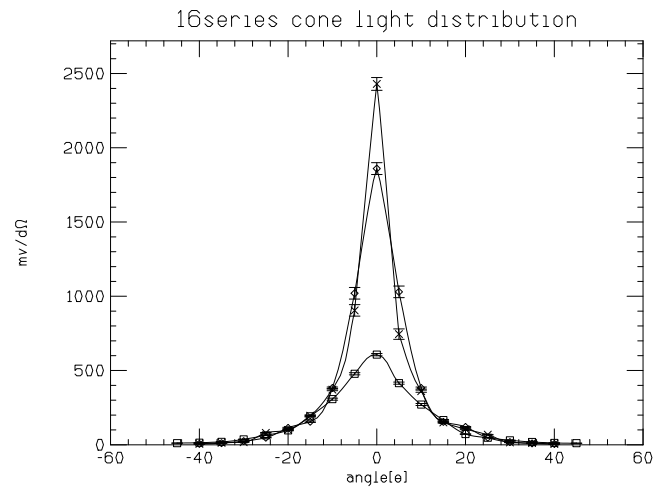


図 4.15: □ A1610、◇ A1620、× A1640

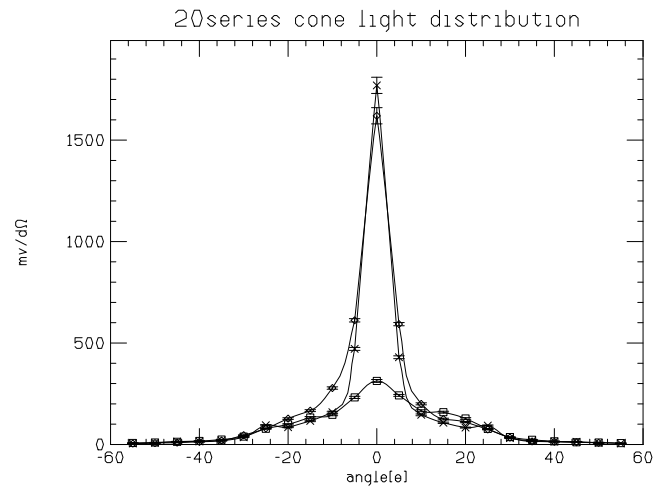


図 4.16: □ A2010、◇ A2020、× A2040

name	5 度	10 度	15 度	20 度	25 度	30 度	35 度
A1610	9.56	29.5	50.6	67.1	78.2	86.7	92.6
A1620	20.0	49.3	67.7	80.7	90.8	95.8	98.5
A1640	22.4	47.0	65.5	78.6	89.2	95.8	98.3

表 4.1: 見込み角 16 度の cone で 0 度からそれぞれの角度までの光量の割合 (%)

name	5 度	10 度	15 度	20 度	25 度	30 度	35 度	40 度	45 度	50 度
A2010	5.33	16.7	31.3	48.6	64.8	76.6	83.9	89.3	93.5	97.1
A2020	16.6	35.4	49.6	63.2	76.0	85.2	90.4	93.5	96.2	98.3
A2040	18.9	34.3	45.5	56.9	70.3	81.7	87.1	91.0	94.8	98.0

表 4.2: 見込み角 20 度の cone で 0 度からそれぞれの角度までの光量の割合 (%)

fiber のみの場合の光角分布に比べて、全体的にみて比較的前方に光を集めることが出来た。見込み角の違いをみると、16 度の方の方がより前方に集まっていることがわかる。また  $r_1$  が 1mm の時はほかに比べて極端に集光率が悪くなっていることがわかる。つまり直径 1mm の fiber に対して cone の直径が 4mm 以上あれば点光源としてみなして集光できるといえる。

その場合、cone の中心軸からみて 15 度以内に、見込み角 16 度では全体の 50~70 %、見込み角 20 度では 30~50 % の光を集めることが出来た。

以上の結果から cone を使って前方に光を集め、平均的に光を平行光線にすることが出来た。

## 4.2 ライトガイドの性能実験

製作したライトガイドをつかって fiber からどれだけの光量を得られるか実験した。

### 4.2.1 実験のセットアップ

使用した fiber は予備実験と同様にクラレの Y11 で直径が 1mm のものである。これをライトガイドの中心に接着した。fiber の全長は 44cm で端から約 1cm の所に横から青色 LED を照射した。光源全体は黒色の樹脂とブラックテープで遮光し黒画用紙のスリットを設けて、ライトガイドに直接 LED 光があたらないようにした。fiber は曲げると中できれいに全反射せず外に光が漏れるので、出来るだけまっすぐになるように装置を配置した。その様子を図 4.17 に示す。ライトガイドは PMT との接面の中心が光電面の中心にくるように接着した (図 4.18)。接着剤はオプティカルセメントの主材のみを使用し、硬化剤は使用しなかった。

また使用した LED に熱や時間等によって出力の変化がみられたため、リファレンスとして光源の LED 光を直接モニターできるように PMT を設置した。これによって、たとえ LED の光量に変化してもライトガイドの違いによる出力の間の差を絶対評価できるようにした。



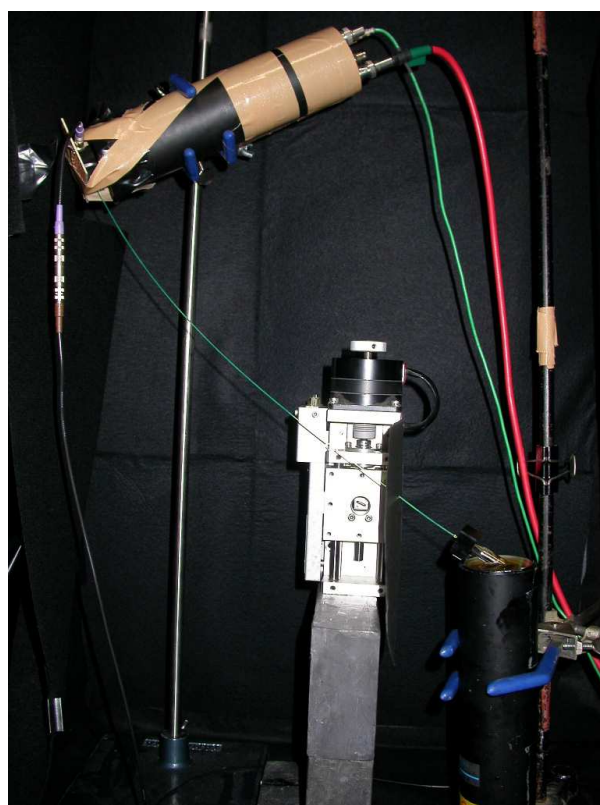


図 4.17: 開発したライトガイドを使った光量測定装置 (左上に LED とリファレンス用 PMT、中央は黒画用紙のスリット、右下はライトガイドを接着した測定用 PMT)

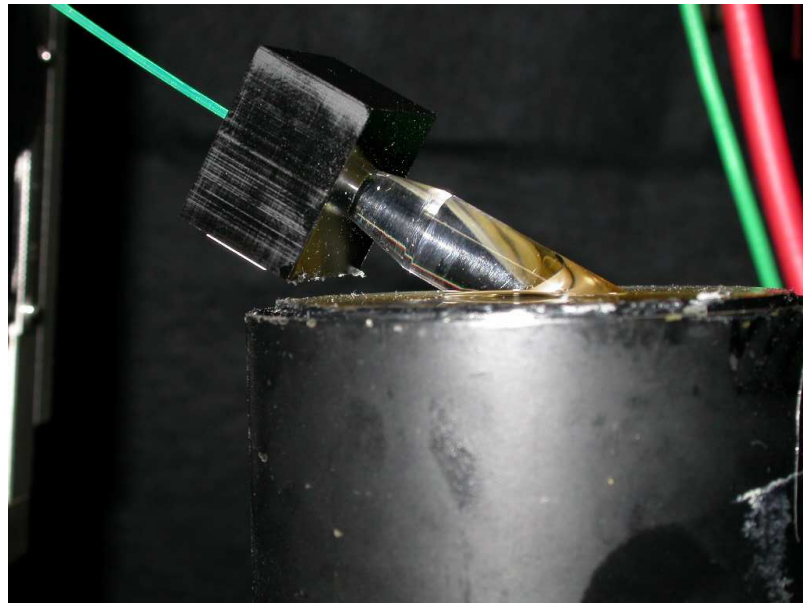


図 4.18: 開発したライトガイド (接着面の様子)

### 4.2.2 実験結果

得られたPMT出力はリファレンスとして得たLEDの光量との比で評価した。各ライトガイドごとでの測定回数が少なかった。そのため誤差の評価は各々の1回目の測定に対して2回目、3回目…の各測定値の比がどれだけずれたかを比で計算し ( $x$ 回目/1回目)、その比の標準偏差を考える。それを各測定値に対して相対誤差として適用した。そのため誤差の見積もりは若干多く見積もられていると考えられる。

表 4.3 にその結果を示す。

name	得られた光量
B1610	1.11±0.05
B1620	1.24±0.05
B1630	1.05±0.05
B1830	1.30±0.06
B2010	1.33±0.06
B2020	1.50±0.06
B2030	1.37±0.06
B2040	1.28±0.05
B2230	1.43±0.06
B2430	1.29±0.06
B2620	1.07±0.05
B2640	1.33±0.06

表 4.3: 開発したライトガイドの結果

また比較のために製作した円柱、円柱斜め切りライトガイドの結果をそれぞれ表 4.4、表 4.5 に示す。

name	得られた光量
C1	$0.620 \pm 0.027$
C2	$0.812 \pm 0.035$
C3	$0.811 \pm 0.035$

表 4.4: 円柱ライトガイドの結果

name	得られた光量
D1	$1.03 \pm 0.04$
D2	$1.10 \pm 0.05$
D3	$1.39 \pm 0.06$

表 4.5: 円柱斜め切りライトガイドの結果

すべての結果をまとめたのが図 4.19 である。

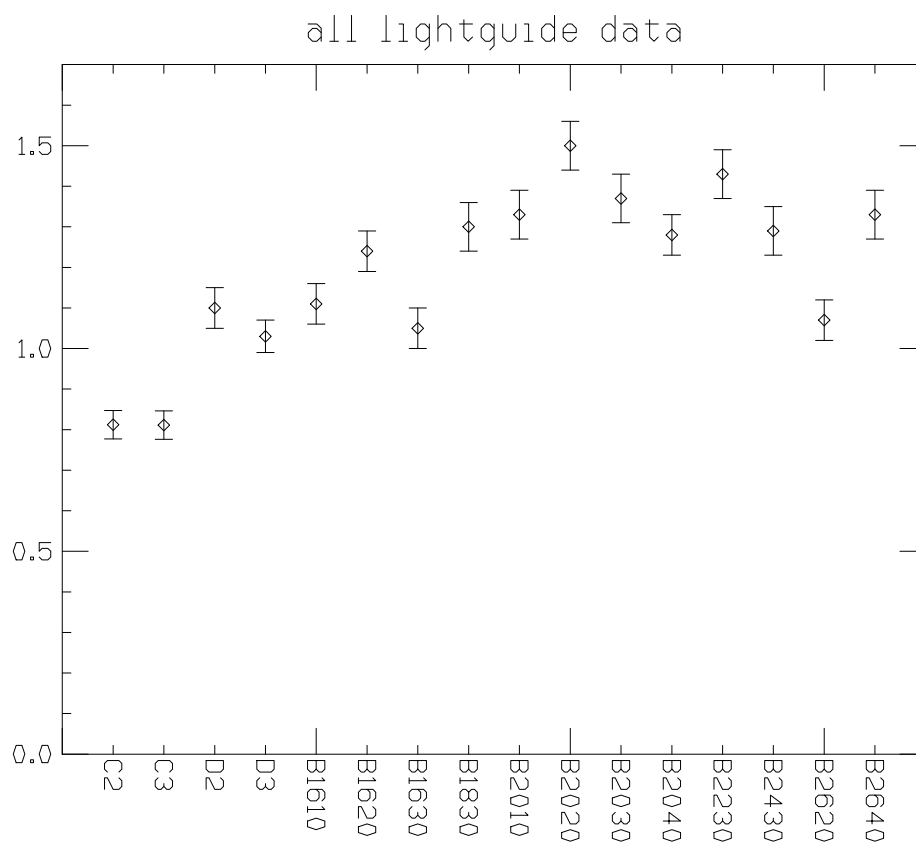


図 4.19: すべてのライトガイドの PMT の出力評価

図 4.19 より、開発したライトガイドは円柱ライトガイドに比べて 1.3 から最大で 1.85 倍も光電子数が増加していることがわかった。

$r_1$  の値を一定の 3mm にして (点光源としての効果を一緒にして) 見込み角  $\theta_{min}$  の違いを比べたグラフが図 4.20 である。

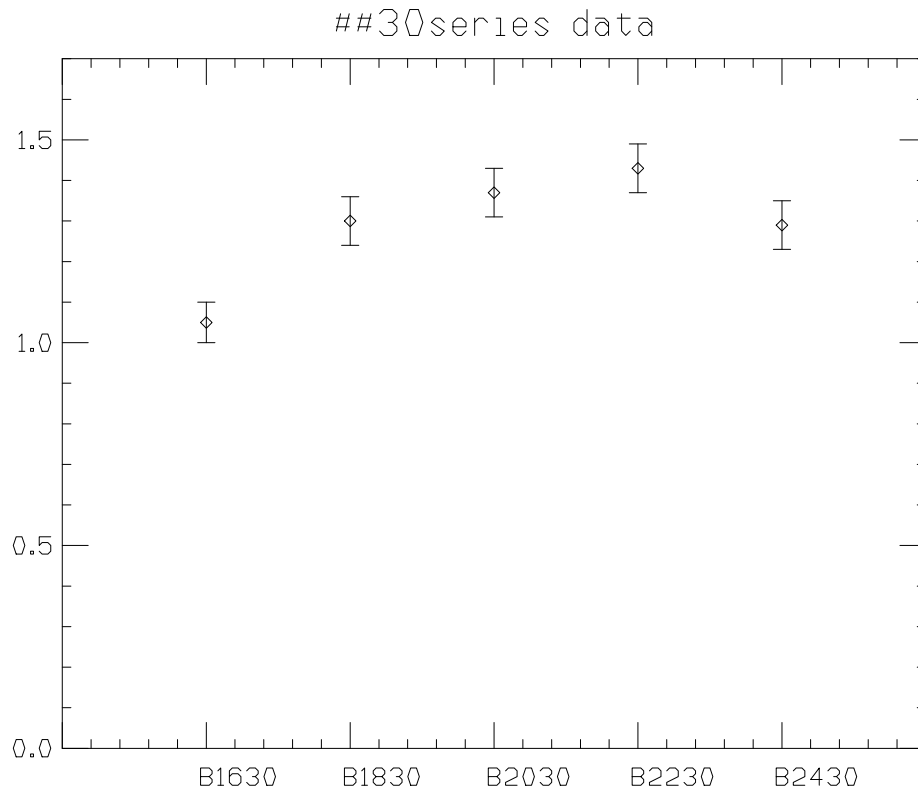


図 4.20: 見込み角の違いによる PMT の出力評価

あまり大きな違いは見られない。B1830、B2030、B2040 が若干 B2430 に比べて PMT の出力が大きいことから、図 3.3 よりピーク角 24 度よりもより小さな角度にでる光までより多く集めた方が効率が上がることがわかる。また B1630 が少し出力が落ちているのは  $r_2$  が大きいいため、集めた光の量と PMT の光電面で中心から離れると量子効率が下がるという効果が競合した結果といえると考えられる。このことは次の第 5 章でも触れる。

$r_1$  の違い（点光源としての効果の違い）によって比べたグラフが図 4.21 である。

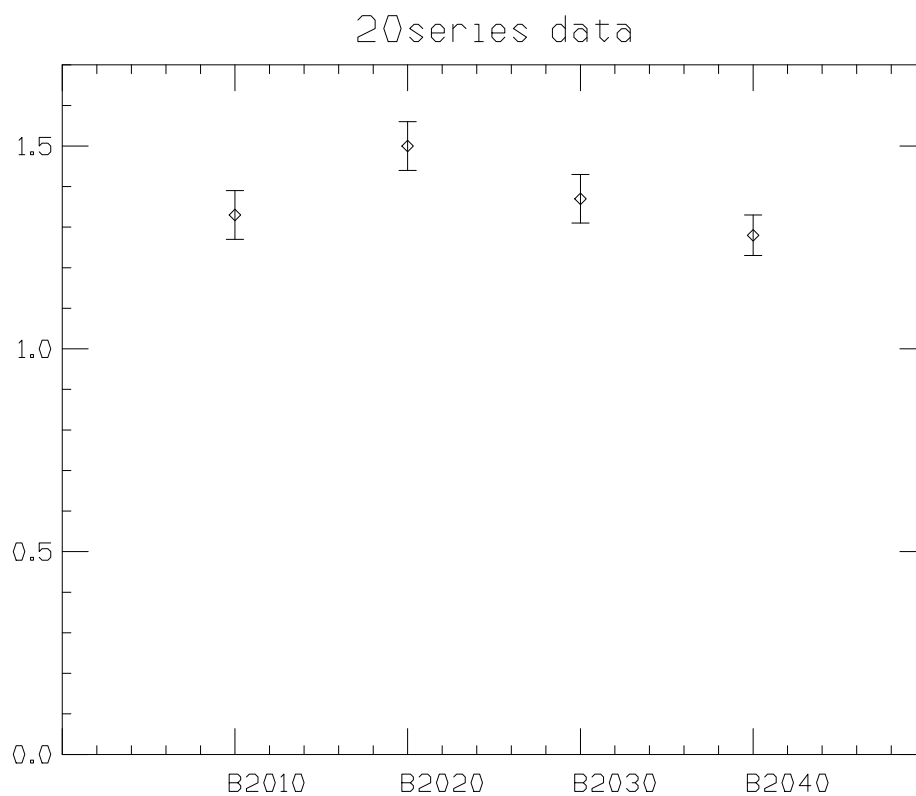


図 4.21:  $r_1$  の違いによる PMT の出力評価

$r_1$  が大きい方が点光源としてみなせてその効果が高いと考えていたが、光電面の大きさとの兼ね合いもあってか B2020 が一番光電子数を得ていることがわかった。この  $r_1$  の違いによる効果は次の第 5 章で述べる。





## 第5章 考察

今回の実験で得た結果について様々な考察を試みた。

### 5.1 改良型ライトガイドの性能評価

#### 5.1.1 見込み角の違いによる結果について

前章の cone から出る光の角分布結果より見込み角 16 度の方が 20 度に比べて前方に光が集められているという結果が得られた。その結果から見込み角 16 度の方が 20 度のライトガイドに比べてより多くの PMT 出力を得られると予想した。しかし、結果は見込み角 20 度のライトガイドの方が多くの出力を得ていることがわかった。これはライトガイドの形と大きさに関係があると思われる。

まず fiber から出た光角分布のピークとなる角で出た光が平行光線として光電面に入射するように cone、ライトガイドは設計した。またその他の角度で cone から出た光はある程度平行光線に近い角度にそろえられて観測できる。このためより多くの光を取り込める、見込み角 16 度の cone の方がより前方に集めることができたという実験結果が得られたのだろう。しかしライトガイドの場合、PMT の光電面の法線に対して 60 度傾けて入射する必要があることから、cone に対して 60 度に斜め切りした円柱をつけた形になっている。(図 3.5) そのため、多少平行からずれた光がその円柱の斜め切りの部分で反射され大角度になって光電面に入射している可能性が考えられる。またその反射によって多少の光の減衰も考えられるだろう。しかし、この効果については今回実験を行っていないので見込み角の違いによってどれだけの差が出てくるのか定量的に議論できない。

次に考えられるのはライトガイドと PMT のガラス面との接着面積である。今回使用した PMT の光電面は曲率を持つので、中心軸から離れて端になるほど光電面に対する法線ベクトルが傾くものが多いため、目的の入射角を得られず、量子効率が落ちる。これは次の光電面の位置の違いによる出力変化でも述べるように、今回の PMT で簡単な実験を行った結果である図 5.1 からも明らかである。設計したライトガイドの大きさは見込み角 16 度の方が大きい。つまりガラス面との接着面積も大きく、光は光電面全体に広がって入射することになる。つまり全体として平均した量子効率を考えたとき、見込み角 16 度のライトガイドの方が小さくなってしまっているのではないかと考えられる。

### 光電面の位置の違いによる出力変化

ライトガイドの性能評価実験では光電面の中心にライトガイドの中心がくるようにセッティングしたが、光電面は位置の違いによってその量子効率が異なる。H1161型では中心軸からはなれると量子効率は落ちるものが多い。そこで今回開発したライトガイドのうち一番小さなB2010を使って光を60度入射し、簡単に位置ごとのPMTの出力を測定した。その結果を図5.1に示す。図中の値は4.2.2と同様に、得られた出力をリファレンスとして得たLEDの光量との比で評価したものを示してある。

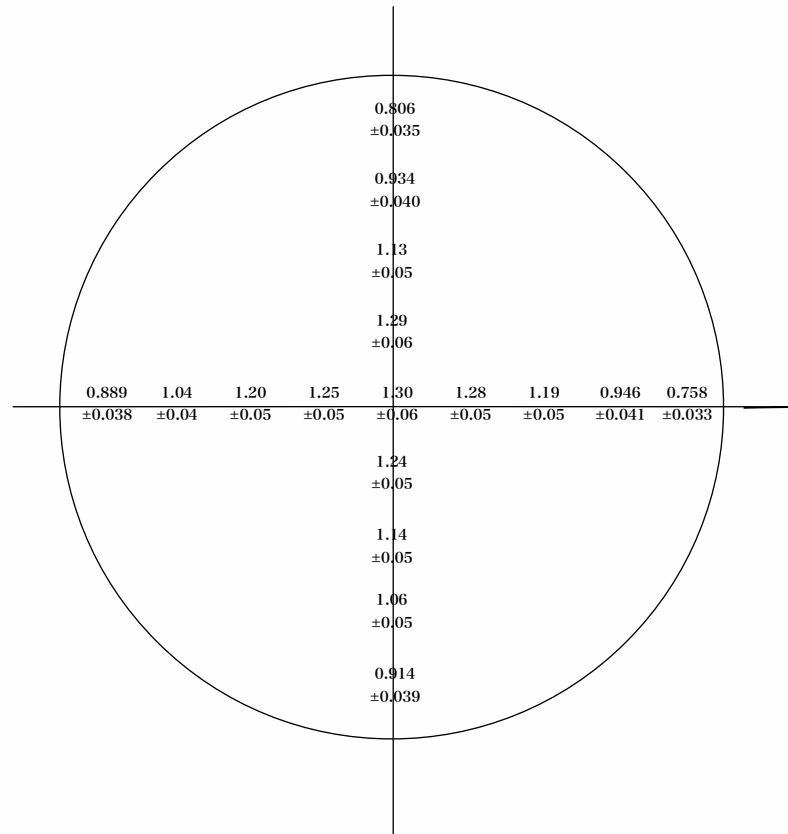


図 5.1: B2010 のライトガイドを使った PMT の出力の場所による違いの結果 (各点 5mm おきに測定した。光電面の大きさは直径 46mm である。)

これにより確かに光電面の中心から離れると出力が落ちる、つまり量子効率が下がり獲得光電子数が少なくなっていることがわかる。

## 5.2. PMTの光電面の法線に対して光の入射角度が60度のときに量子効率最大になる理由43

### 5.1.2 点光源の効果について

前述の考察は同様に図 4.21 の結果にもいえると考えられる。図 4.2 をみるとライトガイド内部で反射する光の一番強度の強い部分がリング状に見える。これは  $r_1$  の違いによってそのリングの大きさは異なる。その大きさは  $r_1$  が 1mm、2mm、3mm、4mm のときそれぞれ直径が 5~6mm、8mm、10mm、14mm 程度である。ここで光電面での中心軸からの位置の違いによる量子効率の違いを考慮すると、リングが小さい方がより平均的に量子効率が高いものと考えられる。またこれに図 4.16 や表 4.2 を加えて考慮すると B2020 が結果として最高の光電子増加率を得たと考えられる。

## 5.2 PMTの光電面の法線に対して光の入射角度が60度のときに量子効率最大になる理由

PMT の内部では、まず光電面に光が入ってくると光電効果を起こして光電子を放出する。その放出された光電子をダイノードで増幅させて最終的にアノード面に集められた光電子を電気信号にかえて PMT の信号として観測できる。そのうち光電面でおこっている現象について着目する。光電面でおこっていると考えられる現象を模式的に図 5.2 に示した。

光電面に入ってきた光は光電面の金属と反応して光電効果を起こし光電子を放出する。しかし光電面にはある程度の厚さがある。そのため金属表面やある深さまでで相互作用して放出された光電子は、その持つエネルギーを金属中を通過する際に使い果たしてしまい、外側に出てこない。つまり実際に獲得できる光電子はある深さ以上のところで光電効果を起こして、なおかつそこから外側までの金属中を通過できるだけのエネルギーを持った光電子に限られる。

そこで図 5.2 中の  $\Delta t$  を考える。光の入射角度が大きくなると  $1/\cos\theta$  で  $\Delta t$  が大きくなる。これは光の反応断面積が増加していることに相当する。これによってより光電効果が起きて金属の外側に出られるようなエネルギーを持った光電子が放出される確率が上がるのではないかと考えられる。またあまり広角度になりすぎると PMT の表面のガラス面で光が屈折して理想的に光電面に入射されなかったり、全反射等で光の減衰がおこることなどが考えられる。

これらの効果の総合結果として最終的に 60 度という角度が最大の光電子数増加を見込んだのではないかと考えられる。

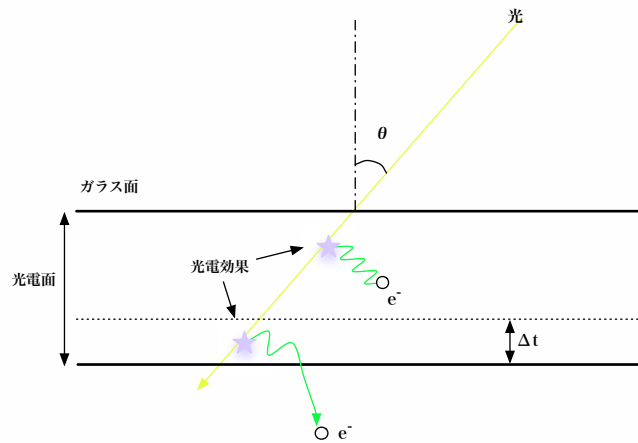


図 5.2: 光電面内部での現象の模式図 (光電面は誇張して描いてあります。)

### 5.3 fiber からの光の角分布について

今回使った fiber の断面図を図 5.3 に示す。

fiber はまっすぐな状態でも失われる光がある。これが曲げられ曲率が小さくなるにつれその損失量は多くなる。2.2 の実験で装置図の光源と fiber は黒画用紙で覆われているが (図 2.3)、実はその中で fiber が曲がっている。そのため本来の fiber からの光角分布とは多少異なる可能性が出てくる。実際に図 5.3 のような角度で理想的に光が出てきた場合、今回の実験結果 (図 2.5) とは測定誤差を鑑みても大きく異なることがわかる。

この実験時にもっと考慮していたら最終的な結果も今回の結果よりもより良い結果が得られたらろうと考えられる。

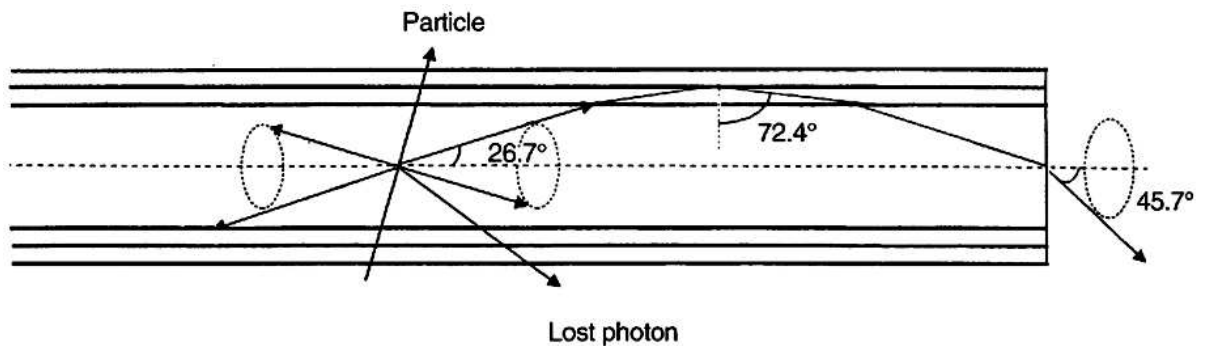


図 5.3: 使用した fiber の断面図 [2]

## 5.4 これからの課題

今回の実験で使用した PMT は光電面が端の方で曲率を持ち、量子効率が落ちるという特徴があった。その影響で予想した結果が得られなかったものもある。PMT の中には光電面がより平らなものもあり、多種多様なものがある。そのため実際の実験で使用する PMT での検証も必要となってくるだろう。fiber に関しても、現実の構造上曲げる必要が出てくることもあり今回の実験ほどの効率が得られない可能性もある。実情に合わせた形での検討も必要だろう。

また今回は fiber1 本に対して実験を行ってきた。しかし実際の実験を行う際は多数の fiber を使用することになる。そのため今回の実験結果をもとに更なる応用が必要となってくる。cone 型もおそらく改良が必要となってくるであろうし、fiber1 本を点光源としてみなせる形で今回は検討を進めてきたのでこれも十分に改良の余地がある。Winston cone 型や lens を使った新しい方法など今後の構想は様々考えられるが、今回の実験がその基礎となりうることを期待したい。



## 第6章 結論

今回の研究では、cone と、円柱を 60 度に斜め切りしたもの組み合わせた形のライトガイドを開発した。これを使って光電面の法線に対して 60 度の角度で fiber からの光をほぼ平行に入射させた。fiber を PMT に垂直に取り付ける場合に比べ、開発したライトガイドを用いると最大 1.85 倍もの光電子数を得られた。これによって通常の PMT を用いても EGP 型の PMT に匹敵する効率が得られることがわかった。





## 関連図書

- [1] 有賀雄一, ” *E391a* バレル部カウンターの応答特性の研究 ” Master thesis, Yamagata Univ.(2002)
- [2] ” *SCINTILLATION MATERIALS* ”, KURARAY CO, LTD

### 謝辞

この論文を仕上げるにあたって多くの方々にお世話になりました。研究室の仲間やスタッフの方はもちろん、別の研究室ながら親しくさせて頂きご指導いただいた先生方や精神的に様々な部分でお世話になった学校関係者の方々に心より感謝申し上げます。

特に山中卓教授には、右も左もわからなくなっていた私に根気よく一からご指導いただきました。本当にありがとうございました。