

# 波長変換ファイバーの減衰長の測定

甲南大学 理工学部 物理学科

研究室：宇宙粒子研究室

学籍番号：11061021

名前：久下 祐矢

## ～目次～

### ～はじめに～

### 第1章 装置の特性

#### 1.1 波長変換ファイバー

##### 1.1.1 波長変換ファイバーの原理

##### 1.1.2 Y11(200)・Y11(200)M 型

#### 1.2 光電子増倍管(photomultiplier)

##### 1.2.1 光電子増倍管の原理

##### 1.2.2 今回の研究で使用した光電子増倍管

#### 1.3 高圧電源(High Voltage)

##### 1.3.1 高圧電源とは？

##### 1.3.2 今回の研究で使用した高圧電源(RPH-030 型)

#### 1.4 オシロスコープ

#### 1.5 フォトダイオードパワーセンサ

##### 1.5.1 フォトダイオードパワーセンサとは？

##### 1.5.2 フォトダイオードの原理

##### 1.5.3 今回の研究で使用したフォトダイオードパワーセンサ(PD300 - UV)

### 第2章 減衰長の測定

#### 2.1

## ～ はじめに ～

### 研究の目的

波長変換ファイバーに暗室の中で、紫外線 LED の光を当てた際の減衰長を調べる。

### 減衰長とは？

ファイバー内を通過する光は、その発光時の放出角によって、それぞれ通過距離が異なり、境界面での反射回数も異なってくる。距離  $x$  の位置で、角  $\theta$  を伴って放出された光子のトータルの通過距離は

$$x = x / \cos \theta$$

であり、物質（ファイバー）の「純粋な」減衰長を  $L$  とすると、これによる減衰は

$$F = \exp ( x / L \cos \theta )$$

となる。

次に、反射による損失を考える。一回の反射で  $\alpha$  の損失が生じるとした場合、光が検出器にたどり着くまでに、 $N$  回の反射があったとすると

$$F = (1-\alpha)^N \doteq \exp( -N * \alpha )$$

となる。ただし、 $\alpha \ll 1$  と仮定する。

また、反射回数  $N$  は、ファイバーの直径を  $D$  とすると

$$N = x \tan \theta / D$$

である（ファイバー中心軸で発光すると仮定）。したがって、

$$I (x) = \exp ( - x / L \cos \theta ) * \exp ( x \tan \theta * \alpha / D ) = \exp ( - x / L ) \\ 1 / L = 1 / L \cos \theta + \alpha * \tan \theta / D$$

が成り立つ。これに立体角をかけて積分すれば減衰曲線が得られる。

# 第1章 装置の特性

## 1.1 波長変換ファイバー

### 1.1.1 波長変換ファイバーの原理

波長変換ファイバーは、コアの部分に波長変換材(ある波長域の光を吸収してそれより長い波長域の光を等方的に再発光する物質)が混ぜ込まれたプラスチック製の光ファイバーである。

光ファイバーに側面から入ってきた光は通常全反射条件を満たすことができないためそのまま外部にでて行く。よってその光を伝送することはできない。しかし、波長変換材を混ぜ込むことによって、外部から入ってきた光を波長変換材が吸収し等方的に再発光するので、再発光された光のうち全反射条件を満たすものはファイバーの中を伝搬することができる。

入射光のうち再発光され全反射条件を満たしファイバー内に捕獲される光の割合を捕獲効率(Trapping Efficiency)とよぶ。Trapping Efficiencyはシングルクラッドのファイバーの場合3.1%、マルチクラッドのファイバーの場合5.4%である。

今回の研究で使用したY11(200)型は緑色の領域に発光波長をもつため、一般的な光検出器である光電子増倍管(PMT)の量子効率の高い領域(青色の領域)とはあまりマッチしない。しかし、緑色の波長変換ファイバーの方が一般的に減衰長が長いと考えられ、Y11(200)型は非常に重要であるので、今回の研究で取り上げた。

### 1.1.2 Y11(200)・Y11(200) M 型

Description	Emission			Att. Leng. <sup>2)</sup> [m]	Characteristics
	Color	Peak [nm]	Spectra		
Y-11(200), Y-11(200)M	green	476	See the following figure	>3.5	Green Shifter (K-27 formulation)

1) Test fibers are Non-S type, 1mm $\Phi$ .

2) Measured by using bialkali PMT and blue LED(445nm).

Otherwise than descriptions mentioned above, various WLS fibers are available.

Ex. R-3(green to red shifter, peak is 607nm), Y-9(blue to green shifter, 485nm),

B-1(428nm), B-2(437nm).

Y11(200)型は、クラレ社製の緑色領域に発光波長をもつ波長変換ファイバーで、現在さまざまな実験でもっともよく使われている。

「Y11」は波長変換材の種類を表し、「(200)」は混ぜ込まれた波長変換材の濃度とファイバーの径の積(単位はppm・mm)、「M」はマルチクラッドをあらわす。

図1に波長変換材Y11の吸収・発光スペクトラムを載せた。また、図2にY11(200)ファイバーを励起光によって光らせたときの発光スペクトラム、すなわち、ファイバーの中を伝搬した後の発光スペクトラムを載せた。図から分かるように波長変換材の発光スペクトラムのピークは476nm付近にあるが、その領域は実際には吸収領域でもあり、その領域の波長はファイバー内ではあまり伝搬できず、ファイバーの発光スペクトラムのピークはより長い波長側となる。

一方、波長変換ファイバーの性質を特徴づける他の要素として光の減衰長がある。図3にY11(200)のTransmission lossのデータを載せた。この図よりファイバーを伝搬する間にどの波長の光がどれくらい減衰するかがわかる。

#### ※補足説明

1. シングルクラッドとはコアの外側に1重にクラッドがあるファイバーのことで、マルチクラッドとは2重にクラッドがあるファイバーのことである。

2. S型とはファイバーのコアを構成しているポリスチレン分子の方向がそろえられており曲げに対して強いが光の減衰長は短くなる。

3. non-S型(標準型)はポリスチレンの分子の方向がそろっておらずその分光学的に等方的で光の減衰は少ないが、曲げに対しては弱い。

4. Sはシングルクラッドをあらわす。発光スペクトラムそのものはシングルクラッドでもマルチクラッドでも基本的にはかわらない。

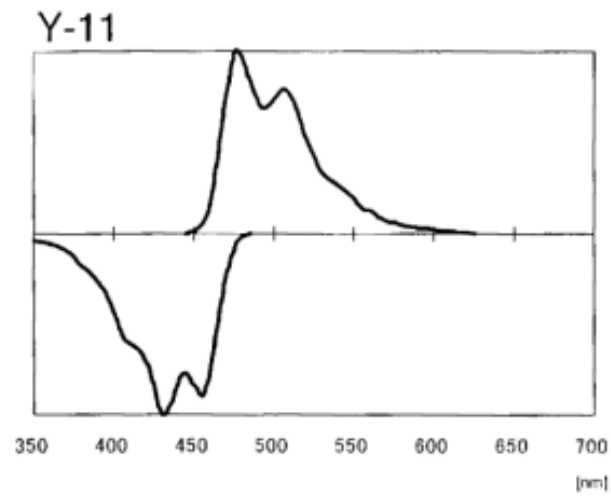


図1. Y11 の吸収・発光スペクトラム（上が発光スペクトラム、下が吸収スペクトラム）

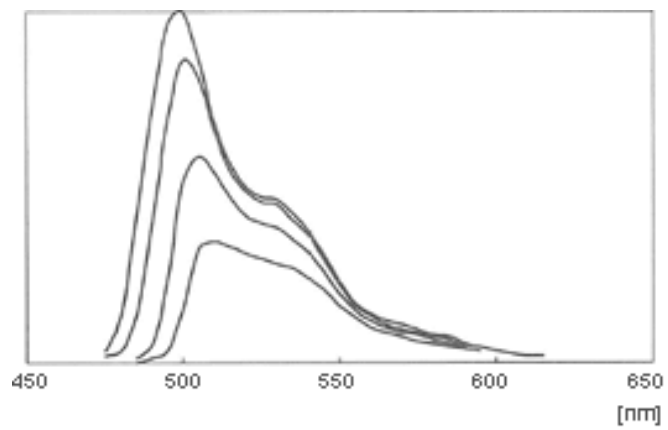


図2. 430nmの励起光で光らせたときのY11(200)Mの発光スペクトラム

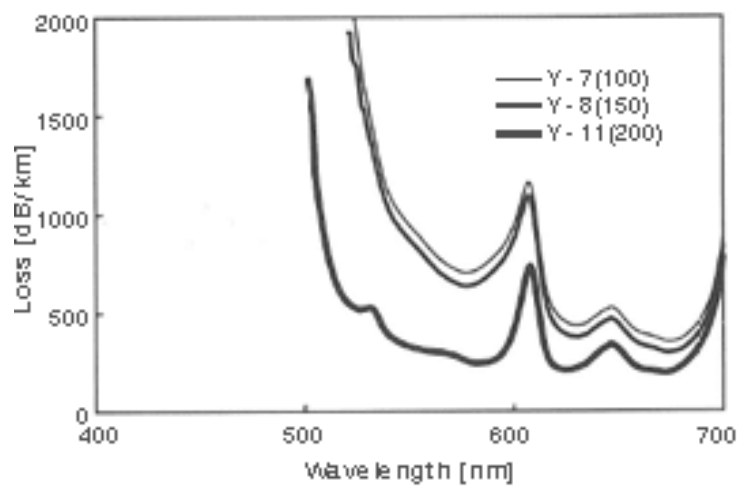


図3. Y11(200)の Transmission loss

## 1.2 光電子増倍管 (photomultiplier)

### 1.2.1 光電子増倍管の原理

おおよその構造は下図のとおりである(10段の増幅と仮定)。最初の電極(青)が光電面で、アルカリ金属で覆われている。その電極は負の高圧(-HV)になっている(高電圧電源を電池の記号で表わした)。分割抵抗  $r$  によって、それ以降の電極(\*1)は次第に電圧が高くなり、最終的に GND(アース電位)となる。

光(1個のフォトンとする)が入ると、ある確率(量子効率)で電子1個が飛び出る。その電子は向かいの電極に向かって加速され、ぶちあたって電子数個を放出する。もし1段あたり4倍の電子が生成すれば、ねずみ算的に  $4^{10} \approx 10^6$  個に増えるが、実際、それくらいの値になりうる。

増幅された電子群は陽極に吸い込まれ、負荷抵抗  $R$  を通る。その時に  $V=RI$  という電圧パルスが発生する。ここで電流  $I$  は電荷量( $Q$ )/パルス幅( $\tau$ ) で与えられる。[電流源+内部抵抗という Norton 等価回路]

1個のフォトンが何個の電子に増幅されるか(ゲイン  $G$ )は HV の大きさによる。HV が 500V 以下ではほぼ  $G=0$  である。1000V 以上では、過大な電子が流れないように注意が必要である(電極面が焼け付いてゲインが低下するおそれあり)。実験に際しては、オシロスコープで出力信号を見ながら徐々に HV を高くしていくこと。

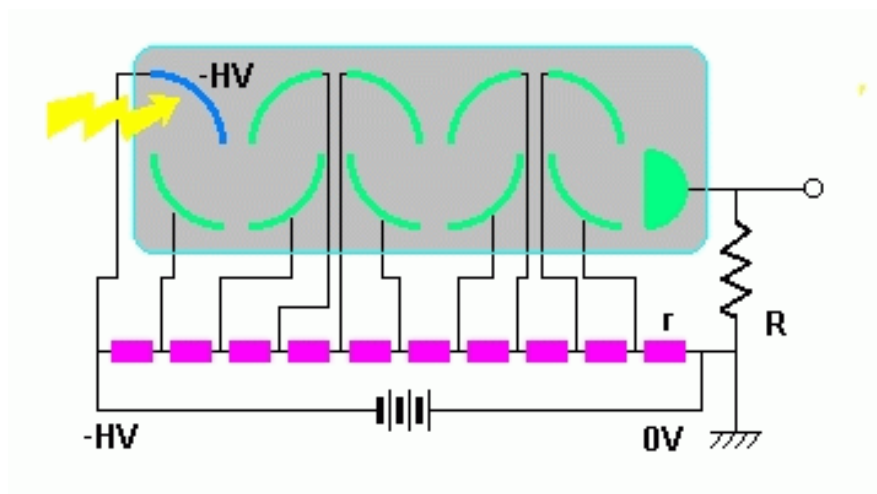


図4. PMT の構造

### 1.2.2 今回の研究で使用した光電子増倍管



図5. PMT (R329-02)

仕様

種類	ヘッドオン型	管径	φ 51 mm
受光面形状	円形	受光面サイズ	φ 46 mm
感度波長 (Short)	300 nm	感度波長 (Long)	650 nm
感度波長 (Peak)	420 nm	分光感度特性カーブ NO.	400 K
分光面 種類	バイアルカリ	窓材質	硼硅酸ガラス
ダイノード構造	ラインフォーカス	ダイノード段数	12
(最大)陽極-陰極間電圧	2700 V	(最大)平均陽極電流	0.2 mA
陽極-陰極間 印加電圧	1500 V	(陰極)ルーメン感度 Min.	60 μA/lm
(陰極)ルーメン感度 Typ.	90 μA/lm	(陰極)青感度指数 Typ	10.5
(陰極)放射感度 Typ	85 mA/W	(陽極)ルーメン感度 Min	30 A/lm
(陽極)ルーメン感度 typ	100 A/lm	(陽極)放射感度 Typ	9.4*10 <sup>4</sup> A/W
(陽極)ゲイン Typ	1.1*10 <sup>6</sup>	(陽極)暗電流 Typ	6 nA
(陽極)暗電流 Max	40 nA	(時間特性)上昇時間 Typ	2.6 ns
(時間特性)走行時間 Typ	48 ns		



## 1.3 高圧電源(High Voltage)

### 1.3.1 高圧電源とは？

高圧電源とは、複雑な電力変換回路で低電位を高電位に変換するものである。‘高圧’とは量ではなく相対的なものであるが、電圧が 62Vdc を超えると、人体への危険性があり、使用の際は十分な安全対策をとるべきである。高圧電源の標準的な出力電圧は、1kV から 360kV であるが、その他 62V から 500kV までである。高圧電源はDC もしくはAC の入力電圧で作動する。直流入力電圧は、1~125 ワットの低い電力のアプリケーションを使用するのに効率的である。標準的なDC 入力電圧は、+12Vdc と+24Vdc である。AC 入力の高圧電源は、100Vac~480Vac の様々な入力電圧で作動し、設計により単相または三相になっている。力率補正/ユニバーサル入力電圧の高圧電源は、ユーザーが操作しなくても 90~264Vac で作動する。出力電力レンジは、1 ワット以下から 200 キロワットを超えるものに及ぶ。高圧電源は以下のカテゴリーに分類される

- ・モジュラー高圧電源
- ・ラックマウント高圧電源
- ・X線発生装置
- ・X線源 (Monoblock)
- ・カスタム高圧電源
- ・アプリケーション用高圧電源

直流高圧電源の場合、極性も考慮に入れなければならない。正極性、負極性、もしくは両極性がある。アプリケーション用の電源の中には、スイッチまたはリモートコントロール信号によって出力極性を電氣的に反転できるものも存在する。

高圧電源の出力は、適切な定格の高圧ケーブルを通して、提供される。よりコンパクトで効率的な電源では、ケーブルは高圧フライワイアで固定され、大きな電源ではシールドされた同軸高圧ケーブルが使われ、取り外し可能である。

### 1.3.2 今回の研究で使用した高圧電源(RPH-030 型)

RPH-030 は、光電子増倍管用の 4ch 高圧電源である。

各チャンネルの出力電圧は、0～3.0kV(2mA)迄可変する事ができ、リアパネルの SHV コネクタより出力さる。

各チャンネルの出力電圧及び電流は、フロントパネルの 4 桁 LED で確認でき、カレントリミット機能は、過電流をチャンネル毎に設定する事ができる。

NIM 電源の AC117V 及び一般 AC100V からの電源供給が可能である。



図 6. 高圧電源装置 (RPH-030)

#### 特徴

- 4ch 独立 0～3.0kV 可変
- 過負荷保護回路
- CURRENT LIMIT 機能
- 電圧 MONITOR 機能

## 仕様

チャンネル数		4ch
電源入力		AC90 ~ 130V (一般家庭用 AC 電源及び電源 AC 出力)
定格出力		各 CHANNEL0 ~ -3.0kV 出力可変 2mA
負荷変動		+3 ~ -3
ノイズリップル		100mV (p-p) 以下
使用温度		0~40℃ (室内での使用を前提)
ケース		NIM 2 幅
備考		出力コネクタ MHV 使用も有

### 1.4 オシロスコープ

#### オシロスコープとは？

オシロスコープとは、時間の経過と共に電気信号（電圧）が変化していく様子をリアルタイムでブラウン管に描かせ、目では見えない電気信号の変化していく様子を観測できるようにした波形測定器である。

このブラウン管上の輝点の動きの速さや振れの大きさを測ることで、間接的に電気信号の電圧の時間的变化を簡単に測ることができる。

すなわち、測定しようとする現象が電圧の形に変換できれば、電気信号の変化だけでなく、温度、湿度、速度、圧力など、色々な現象の変化量を測ることができる。

また、メータ類と大きく異なるところは、単にその電圧の平均的な値を測るものではなく、電圧が変化していく様子を時々刻々と目で追いかけたり、突発的に発生する現象も捉えることも可能である。

さらに、非常に高い周波数の電気信号の変化もブラウン管に描くことが可能で、エレクトロニクス分野のエンジニアには必携の波形測定器として重宝がられている。

## 1.5 フォトダイオードパワーセンサ

### 1.5.1 フォトダイオードパワーセンサとは？

フォトダイオードを利用したパワーセンサーで、一般的には数 10 nW から数 10 mW 程度のパワー測定に利用されている。サーマルセンサーは 10 mW 程度からの測定となっているため、サーマルセンサーで測定できない低パワー領域での測定に最適である。

### 1.5.2 フォトダイオードの原理

フォトダイオードは pn 接合、もしくは、pin 構造を持っている。十分なエネルギーを持った光子がダイオードに入射した際に、それは電子を励起し、自由電子と自由正孔のペアを生成する。もし、光子の吸収が接合部の空乏層で生じるか、空乏層から拡散距離内で生じる場合、これらのキャリアは空乏層のビルトインポテンシャルにより接合部から移動し、光電流が流れる。

フォトダイオードはゼロバイアスもしくは逆バイアスの元で使用することが可能である。ゼロバイアスのもとでは、ダイオードに入射した光はデバイスを流れる電流となり、光電流と逆向きに流れる「暗電流」とは逆の向きの順方向のバイアスを作り出す。これは、光起電力効果と呼ばれ、太陽電池の基本である。実際太陽電池は大きなフォトダイオードを多数並べたものである。

逆バイアスの印加は電流としてはその方向に僅かにしか流れない(逆方向リーク電流等と呼ばれる)。しかし、重要な点は逆バイアスは空乏層を広げ(それにより反応する領域を広げ)、光電流を強める。この効果を利用した回路は光起電力に基づくものより光に敏感となり、端子間容量も小さくなる。これは、応答速度を上げる効果がある。その一方で、光電池モードでの使用はノイズが小さいという特徴がある。

アヴァランシェ・フォトダイオードは同様の構造を持っているが、使用時にはもっと高い逆方向電圧を印加する。この高い電圧により、光により生成したキャリアがアヴァランシェ・ブレークダウンにより増加し、フォトダイオードの内部利得を高める効果がある。これにより、「受光感度」が向上する。

### 1.5.3 今回の研究で使用したフォトダイオードパワーセンサ( PD300 - UV )

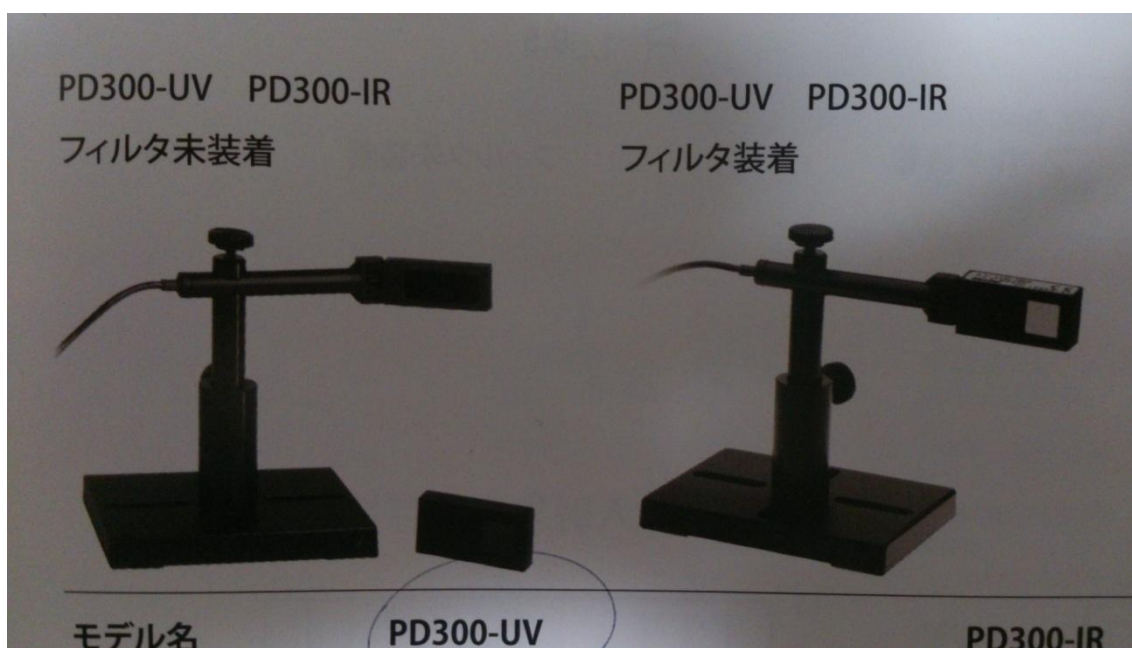


図7. フォトダイオード(PD300-UV)



図8. ディスプレイ(Vega)

図7のフォトダイオード(PD300-UV)を図8のディスプレイ(Vega)に接続することにより、パワー測定の値を読み取ることができる。

スペック

モデル名	PD300-UV	
用途	最小パワー測定 紫外線領域 200-1100nm	
ディテクタタイプ	シリコン	
有効口径	10x10mm	
外部フィルタ	フィルタ	フィルタ
	未装着時	装着時
測定波長範囲	200 - 1100nm	220 - 1100nm
パワーレンジ	20pW - 3mW	2μW - 300mW
パワースケール	3nW - 3mW dBm	300μW - 300mW dBm
分解能	1pW	100nW
最大パワー vs 測定波長帯域	250-350nm 400nm 3mW	300mW 300mW
	600nm 3mW	300mW
	800-950nm 2.5mW	150mW
	1064nm 3mW	30mW
校正精度 (使用温度範囲15℃~30℃での 誤差を含む垂直入射時)		
誤差vs 測定波長帯域	± 6% 200-270nm ± 3% 270-950nm ± 5% 950-1100nm	± 10% 220-400nm ± 5% 400-950nm ± 7% 950-1100nm
最大平均パワー密度	10W/cm <sup>2</sup>	50W/cm <sup>2</sup>
最大パルスエネルギー	0.4μJ	15μJ
出力ノイズレベル フィルタ未装着時	± 1pW	
応答速度 (表示器併用・0.95%到達時間) における代表値)	0.2 秒	
誤差を含む垂直入射時)	± 2%	
ファイバアダプタ (33ページ参照)	SC, ST, FC, SMA	
バージョン		
製品番号	PD300-UV 7Z02413 PD300-UV-193 7Z02413A ※ PD300-UV-193 は 193nm にて追加校正	

図 9. PD300-UV のスペック

特性

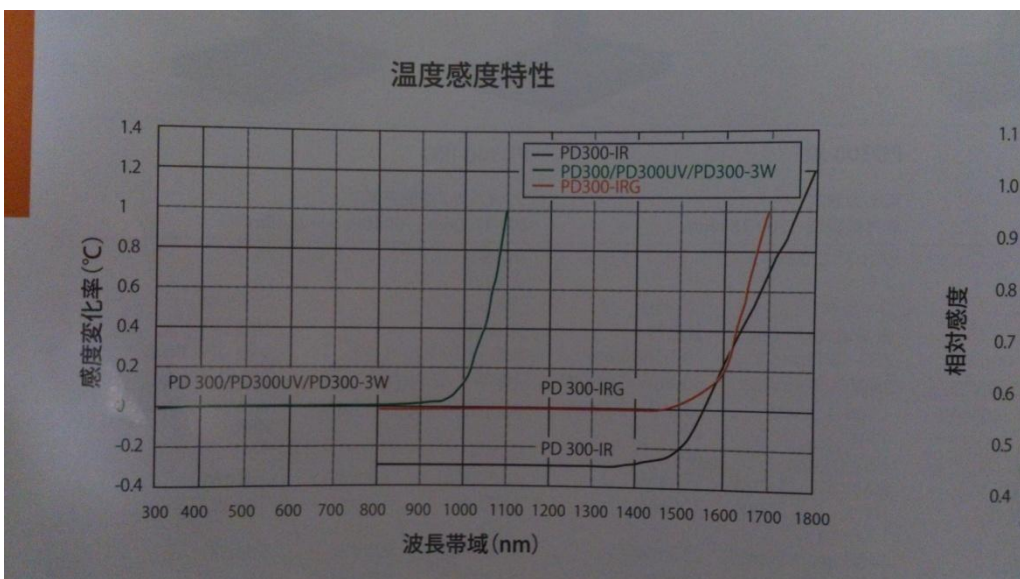


図 10. 温度による感度の特性

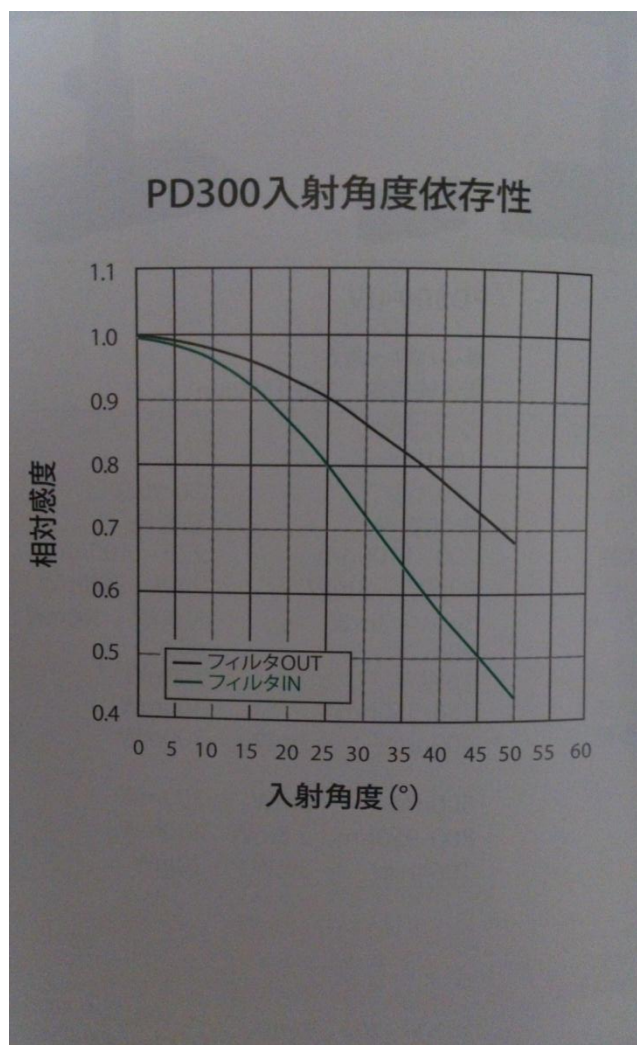


図 1 1. 入射角依存性

## 第2章 減衰長の測定

### 2.1 フォトダイオード (PhotoDiode) を使った測定

波長変換ファイバーを、フォトダイオード (PhotoDiode) を検出器として使用した際の測定は以下の通りである。

#### 測定方法・装置図

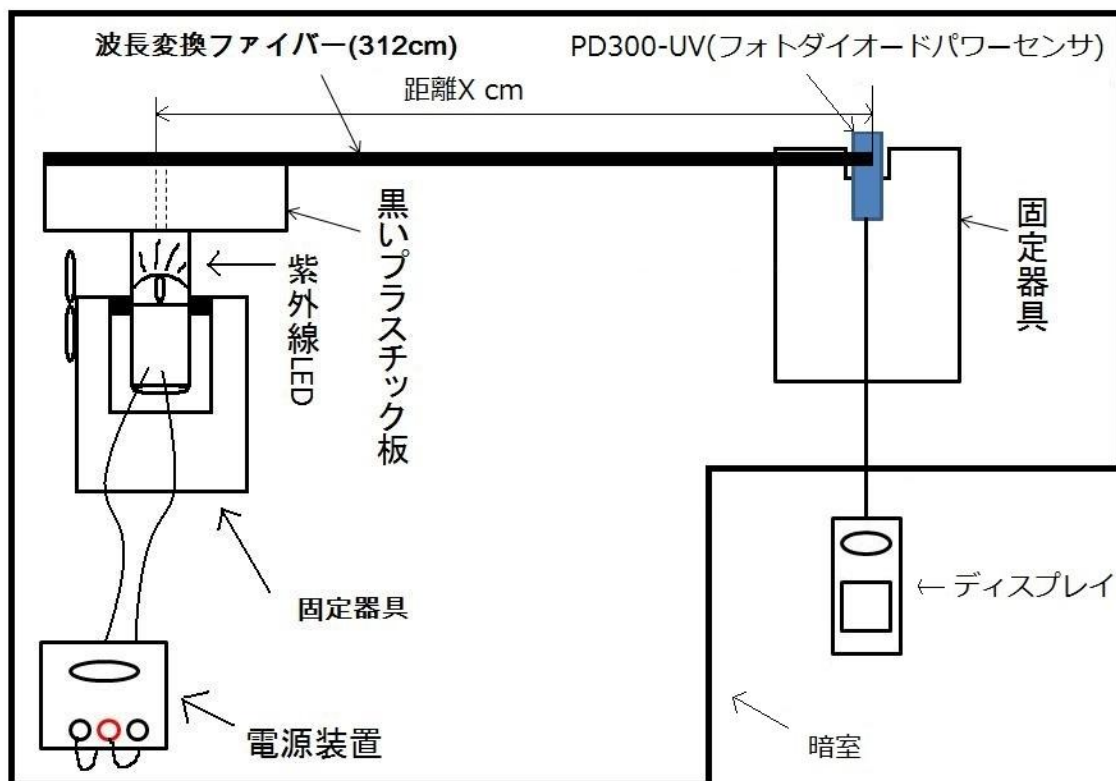


図1. フォトダイオードの実験装置

1. 図のような装置を暗室内に置き、外からの光が暗室中に入らないように設置する。
2. その後、波長変換ファイバーに紫外 LED の光を当て 300 cm から 10 cm おきに距離を変え、距離ごとの光量をフォトダイオードで測定する。
3. 光量と距離の関係のグラフを描き減衰長があるかを調べる。



## 2.2 光電子増倍管(PMT)を使用した際の測定

次に光電子増倍管を検出器として使用した場合の減衰長の測定は以下の通りである。また、フォトダイオードの測定の時と同じ波長変換ファイバーを使用して測定してある。

### 測定方法・装置図

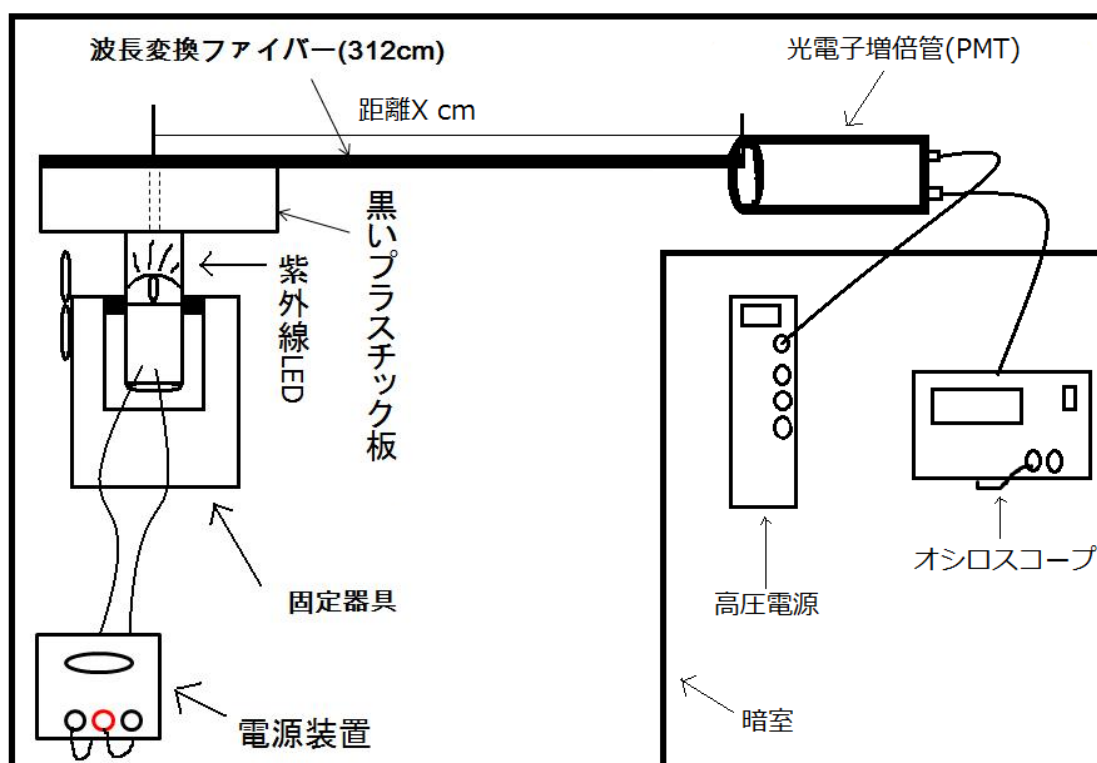


図3. 光電子増倍管の実験装置

1. 図のような装置を暗室内に置き、外からの光が暗室中に入らないように設置する。
2. その後、波長変換ファイバーに紫外LEDの光を当てる。
3. 暗室になったのを確認し、高圧電源の電源をいれ光電子増倍管に700Vの電圧をかける。この時、外部からの光が絶対に入らないように気をつける。(PMTが壊れる可能性があるため。)
4. 2～3の手順を、波長変換ファイバーに光を当てる距離を300cm～20cmまで、10cmごとに測定する。
5. 距離ごとの光量をオシロスコープで読みとる。

### 3.1 測定結果

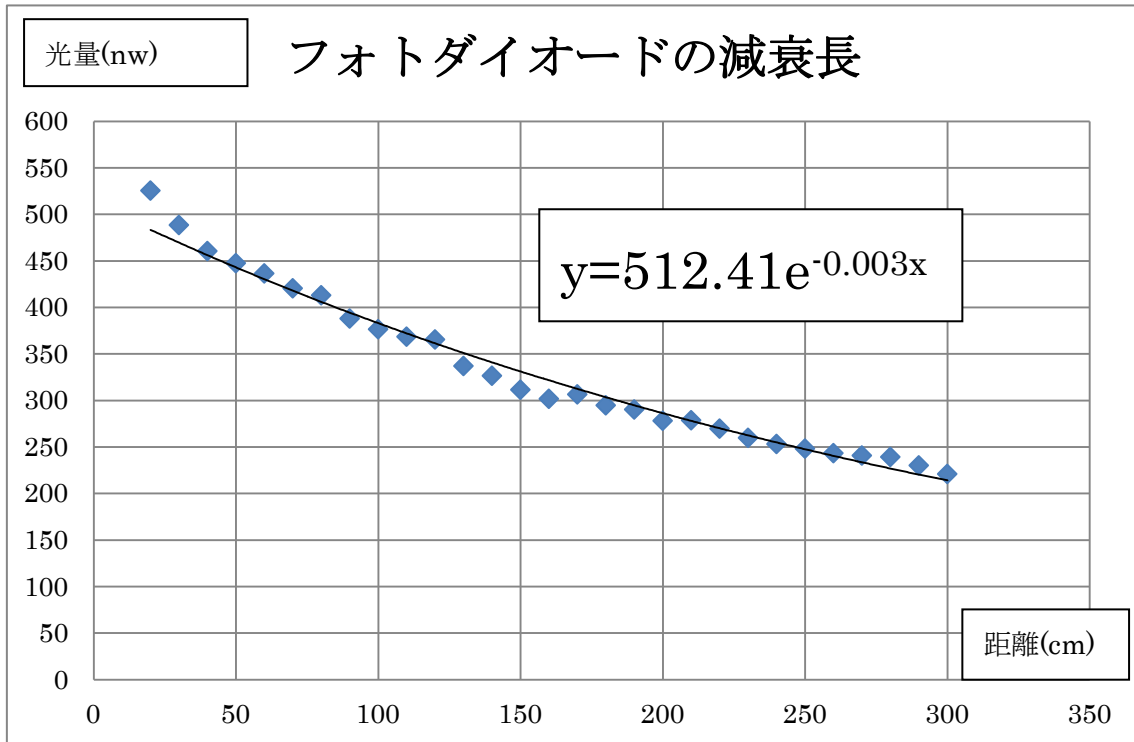


図2. 減衰長のグラフ(フォトダイオード)

グラフより減衰長の計算を行うと、約 3.3 m 付近で減衰長が得られるのがわかった。これは、波長変換ファイバーのカタログ(第1章 1.1.2)の減衰長が 3.5 m よりも手前の位置で得られると記載されているため、約 3.3 m 付近という結果は減衰長が得られたといってもよいと考えられる。

### 3.2 測定結果

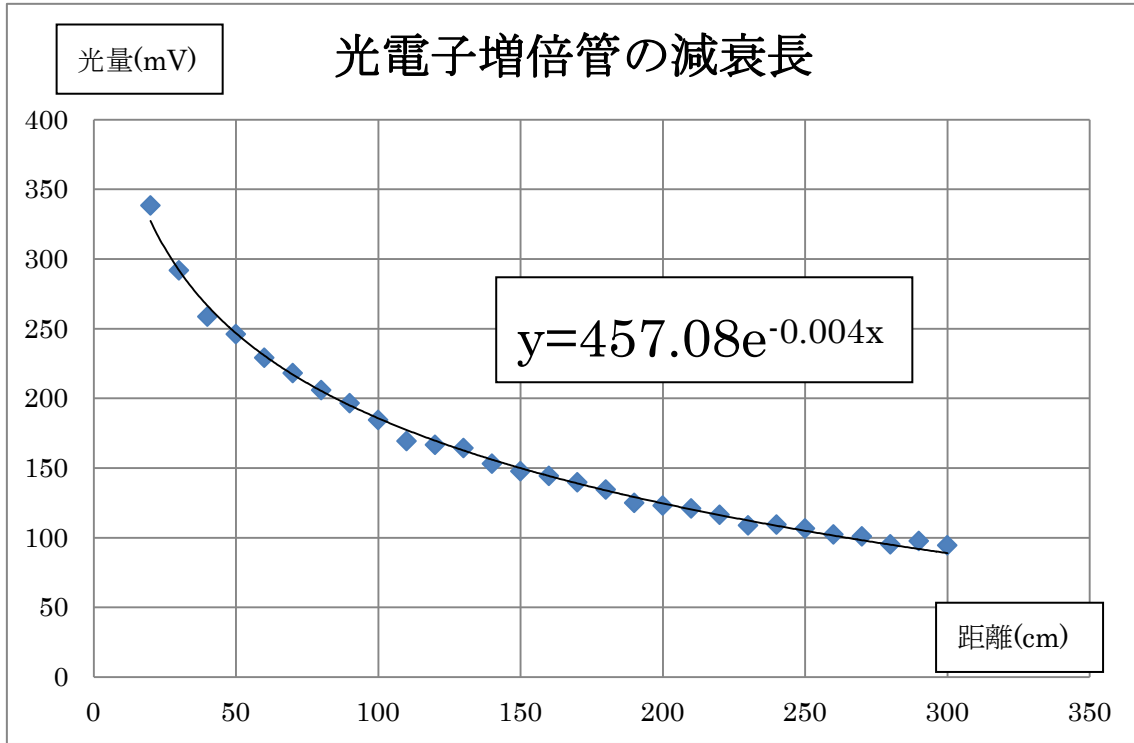


図 4. 減衰長のグラフ(光電子増倍管)

グラフより減衰長の計算を行うと、約 2.5 m 付近で減衰長が得られるのがわかった。これは、波長変換ファイバーのカタログ(第 1 章 1.1.2)の減衰長が 3.5 m よりも手前の位置で得られると記載されているため、約 2.5 m 付近という結果は減衰長が得られたといってもよいと考えられる。

### 3.3 2つの測定の比較

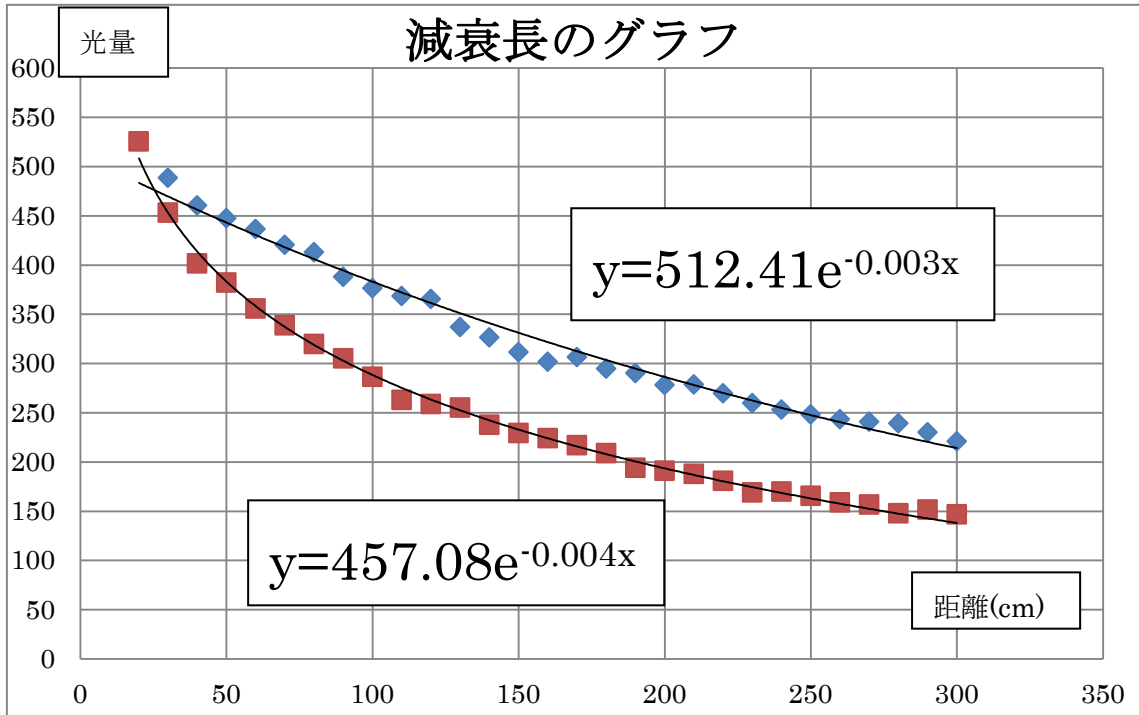


図5. 光電子増倍管とフォトダイオードの比較のグラフ

上図は光電子増倍管とフォトダイオードの測定結果のグラフを比較したものである。  
 ■が光電子増倍管で測定したものとなり、◆がフォトダイオードにて測定したものである。(形を比較するため 20 cm における値を同じにしてある。)

