

# T2K前置検出器改良における 光検出器較正システムの開発

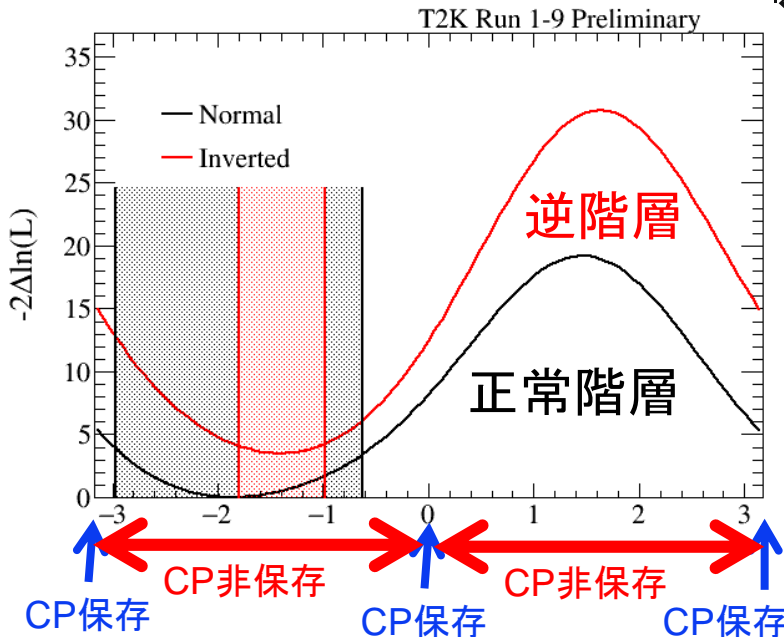
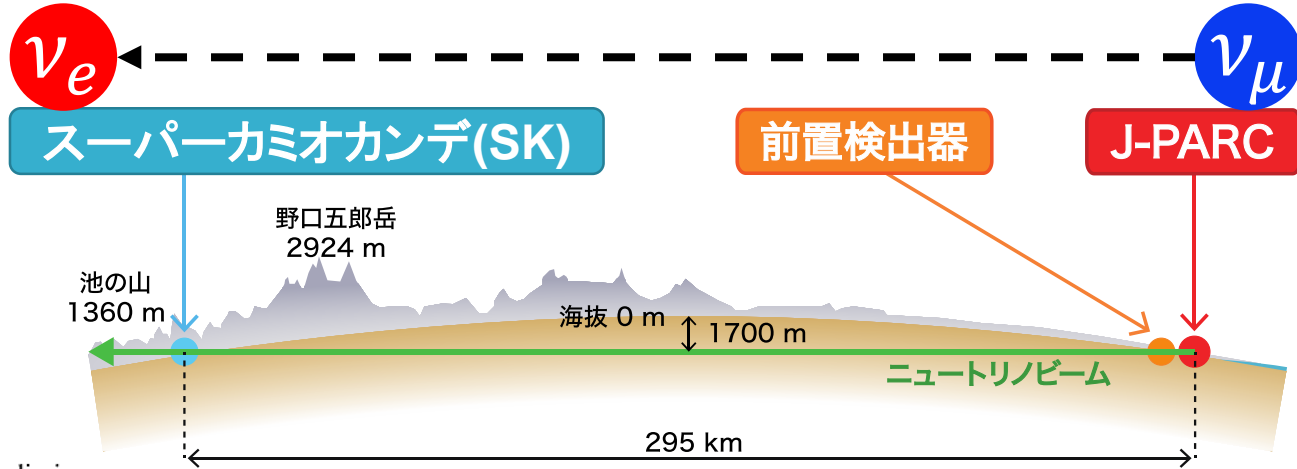
首都大学東京 在原拓司 角野秀一

KEK 松原綱之 CERN Davide Sgalaberna

# T2K実験

- 長基線ニュートリノ振動実験
- J-PARCで大強度の $\nu_\mu$ 、 $\bar{\nu}_\mu$ を生成、射出
- 前置・後置検出器によってニュートリノ振動を観測

ニュートリノの  
CP非対称性を表す  
振動パラメータ  
 $\delta_{CP}$ の測定



現状： ニュートリノの  
CP対称性の破れを $2\sigma$ で示唆

3 $\sigma$ レベルでの $\delta_{cp}$ 測定に向けて:

- 統計量の増加  
→ 測定期間の延長とビーム強度の増強
- 系統誤差の削減  
→ 前置検出器ND280のアップグレード

# ND280-Upgradeについて

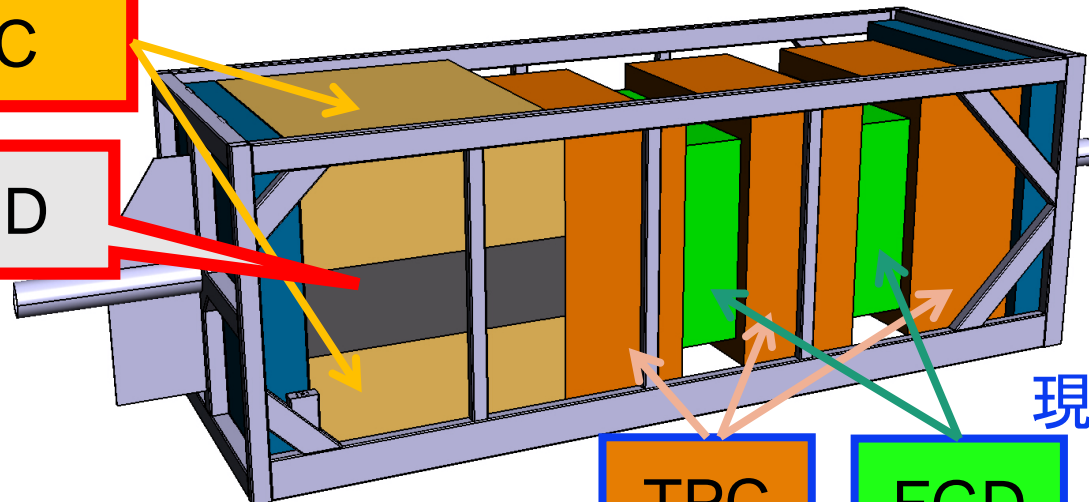
系統誤差の削減を目的として、  
ND280のアップグレードが進められている

新しい  
検出器

HA-TPC

Super-FGD

$\nu_\mu$



現ND280の  
検出器

TPC

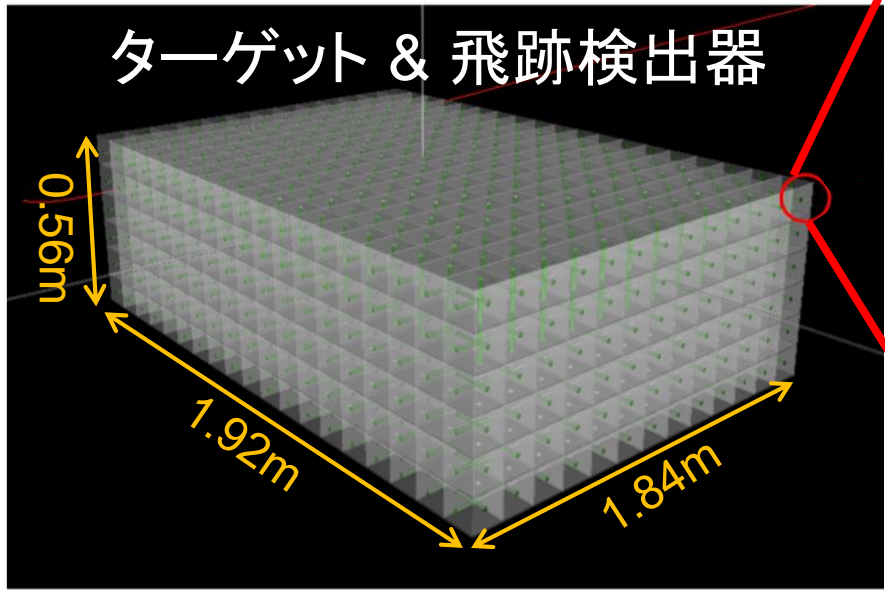
FGD

上流側の検出器を  
新しいトラッカー群に交換

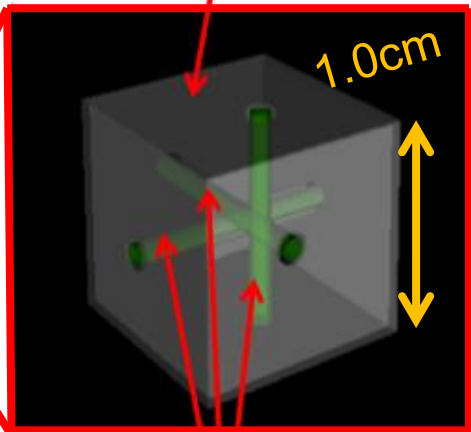
- Super-FGD(飛跡検出器+ターゲット)
- HA-TPC(飛跡検出器)
- TOF(飛行時間測定)

2021年の  
インストールに向けて  
開発が進められている

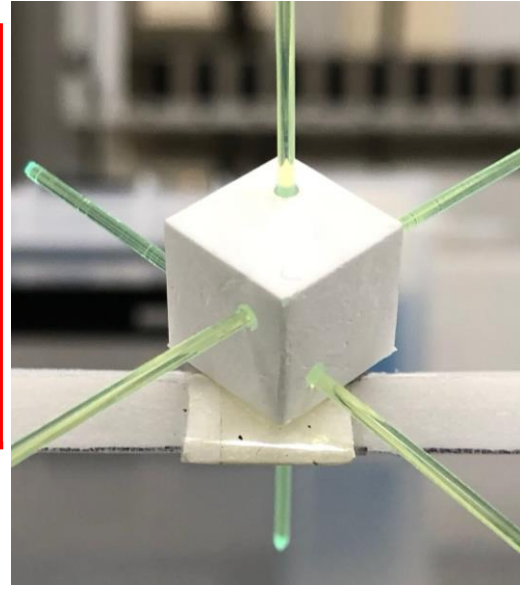
# (Super Fine-Grain Detector) SuperFGD



シンチレータキューブ



波長変換ファイバー



- 1cm立方のシンチレータキューブが約200万個
- 波長変換ファイバー(WLS fiber)をxyzの3方向に通す
- 約6万個の光検出器 (MPPC(Multi-Pixel Photon Counter))を使用
- 光を2次元情報で3方向から検出

1. 大角度散乱する粒子の検出効率が向上
2. 位置分解能向上により、低運動量の荷電粒子の検出効率が上昇

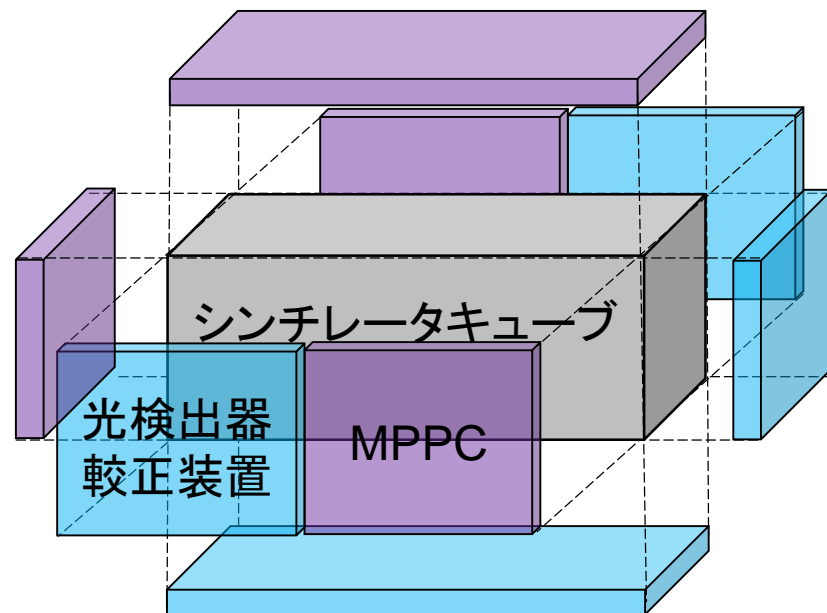
# SuperFGDの光検出器校正装置について

## 用途

- 検出器設置時の動作確認
- 長期運用時の増幅率校正

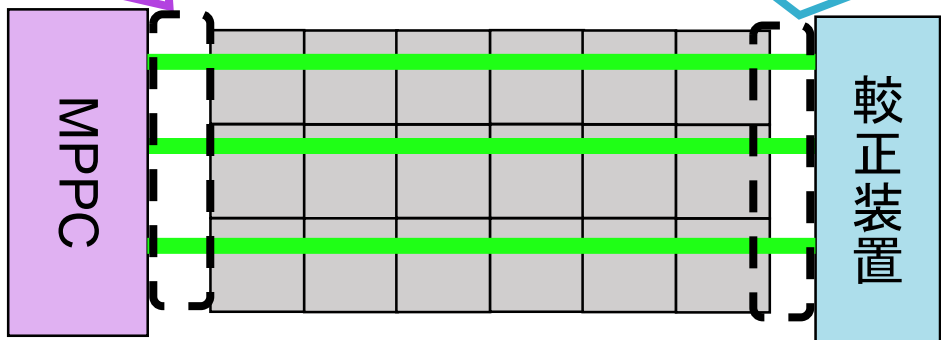
## 要求仕様

- 構造上の制約により、薄い構造で波長変換ファイバーに光を分配可能なこと (暫定目標: 1 cm以内)
- 多チャンネルを同時に増幅率測定するための光量一様性を持つこと (暫定目標: Factor2以内)



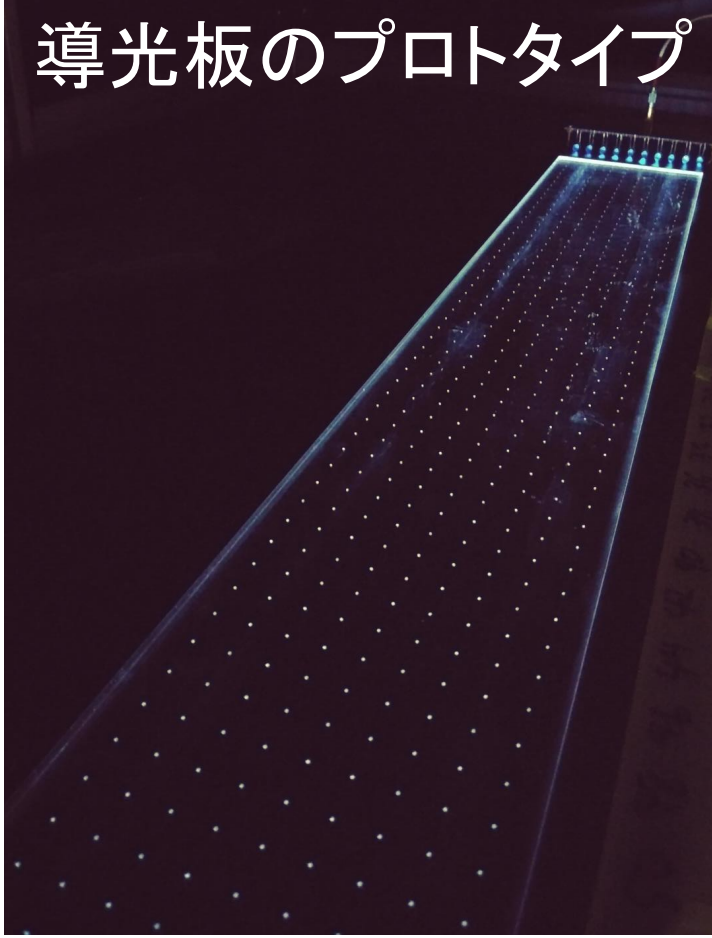
ファイバの片側を MPPCでの読み出し

ファイバのもう片側を校正装置に使用

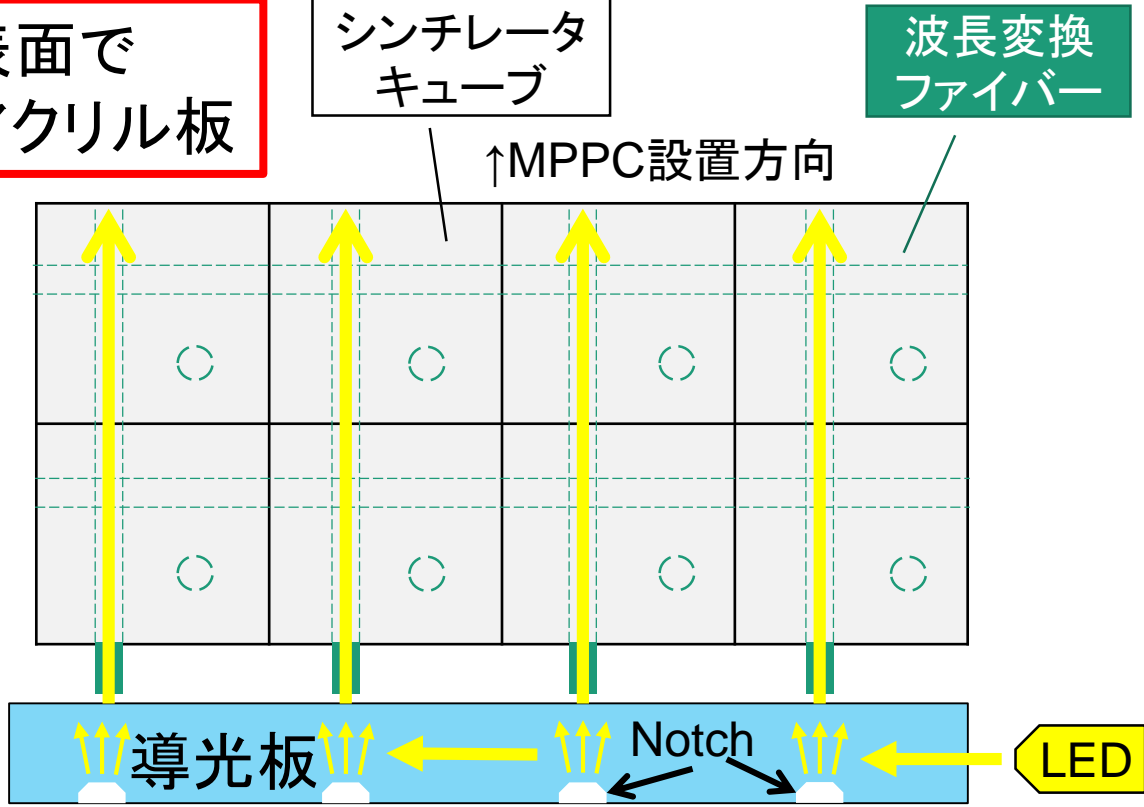


# 導光板を用いた校正装置について

側面から光を照射し表面で発光するように加工したアクリル板



導光板のプロトタイプ



- 光の流れ
1. 側面からLEDの光を入射
  2. Notchで散乱
  3. 波長変換ファイバーに入る
  4. MPPCに光を入射

導光板以外に Notched fiberを用いた校正装置も開発中

# 光検出器較正装置の開発段階

光量一様性の観点からデザインを最適化

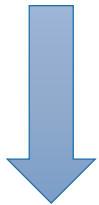
終了



- LEDの種類や数、設置位置
- 導光板の厚み

懸念事項の検証と対応策の検討

途中(課題あり)



- 導光板を介したクロストーク
- 波長変換ファイバー端面の加工
- 波長変換ファイバーのずれによる光量の変化

実機に向けたデザイン決定のための評価

開始



- LED駆動方法の検討
- 較正装置のモジュールのデザイン検討

実機の生産と性能評価

2020年7月以降

- 較正装置の構成要素の生産と統合、その性能評価

# 光検出器較正装置の開発段階

光量一様性の観点からデザインを最適化

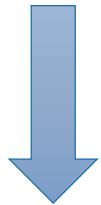
終了



- LEDの種類や数、設置位置
- 導光板の厚み

懸念事項の検証と対応策の検討

途中(課題あり)



- 導光板を介したクロストーク → **ほぼ無し**
- 波長変換ファイバー端面の加工
- 波長変換ファイバーのずれによる光量の変化



実機に向けたデザイン決定のための評価

開始



- LED駆動方法の検討
- 較正装置のモジュールのデザイン検討

実機の生産と性能評価

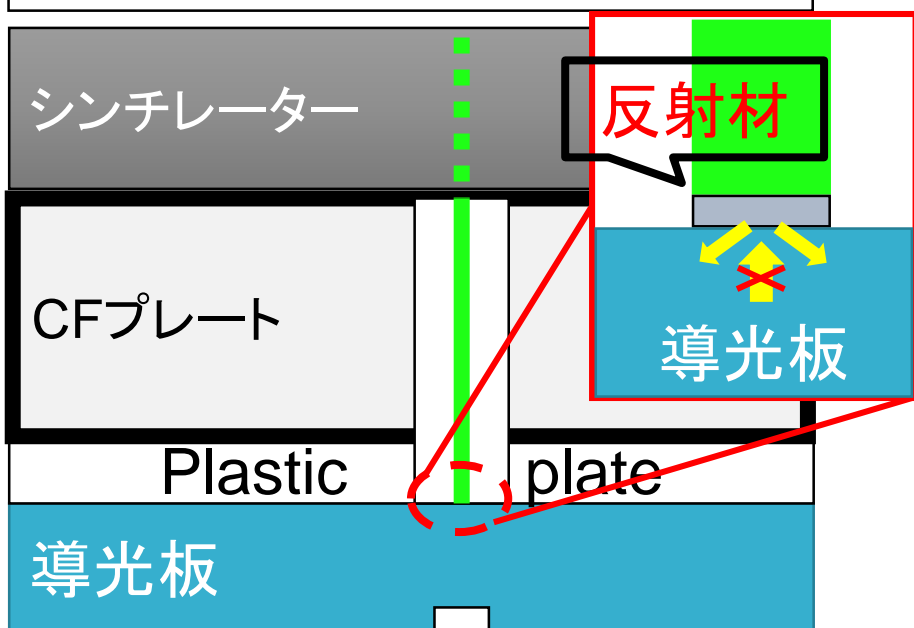
2020年7月以降

- 較正装置の構成要素の生産と統合、その性能評価



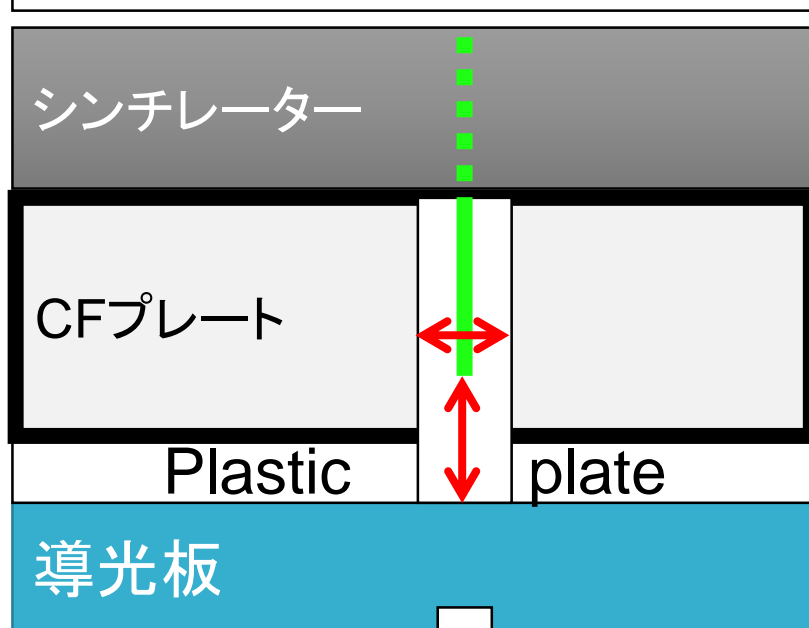
# 懸念事項

## ファイバー端面の加工



- 反射材無し  
→ 端面 + 側面から光を入射
- 反射材有り  
→ 側面のみから光を入射

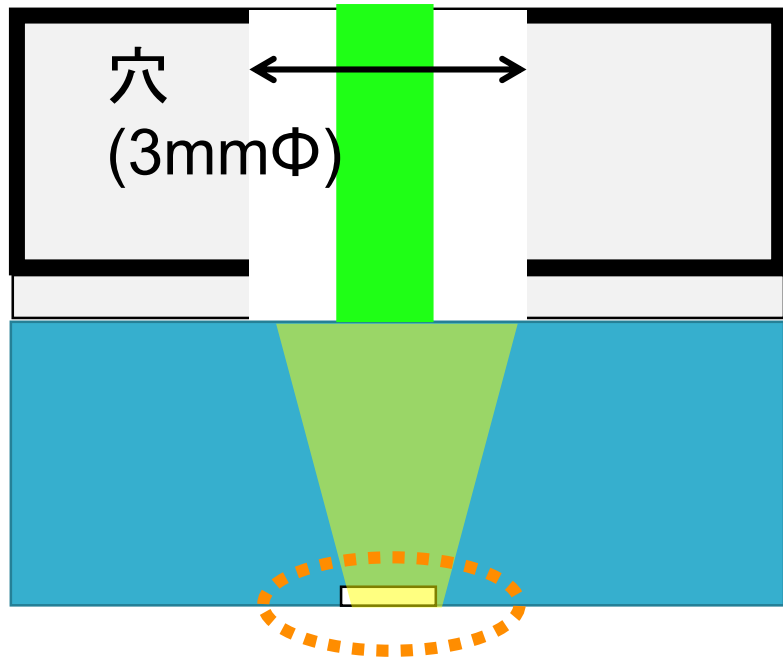
## 波長変換ファイバーのずれ



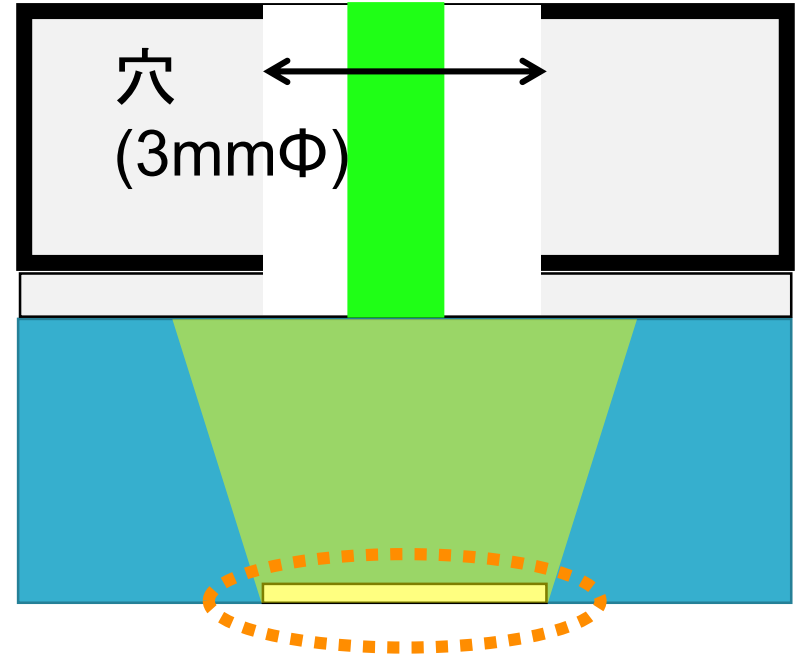
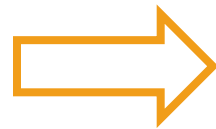
- 横方向のずれ  
→ 対処済み(後述)
- 縦方向のずれ  
→ 課題あり(後述)

# 横方向のずれへの対策

Notchのサイズを大きく → 光の到達領域が大きくなる

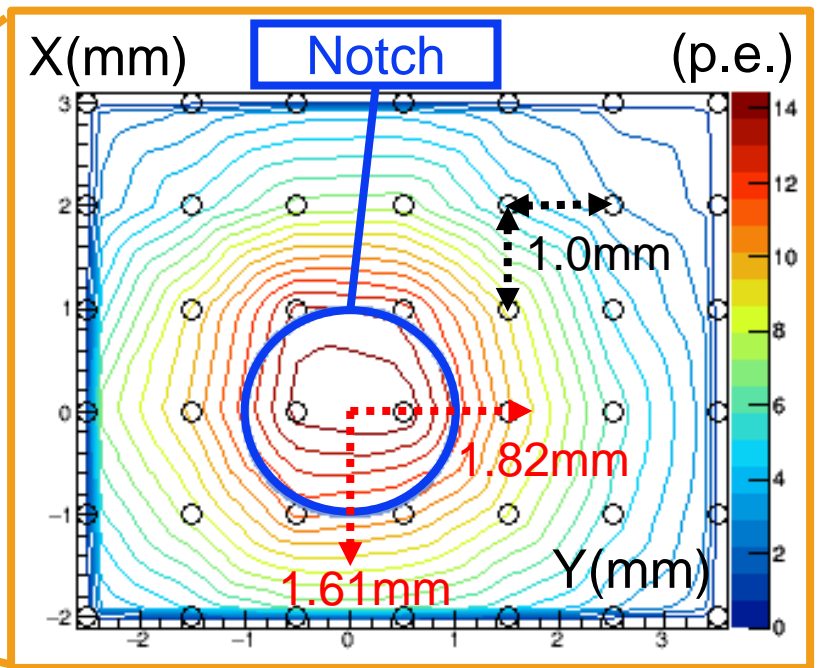
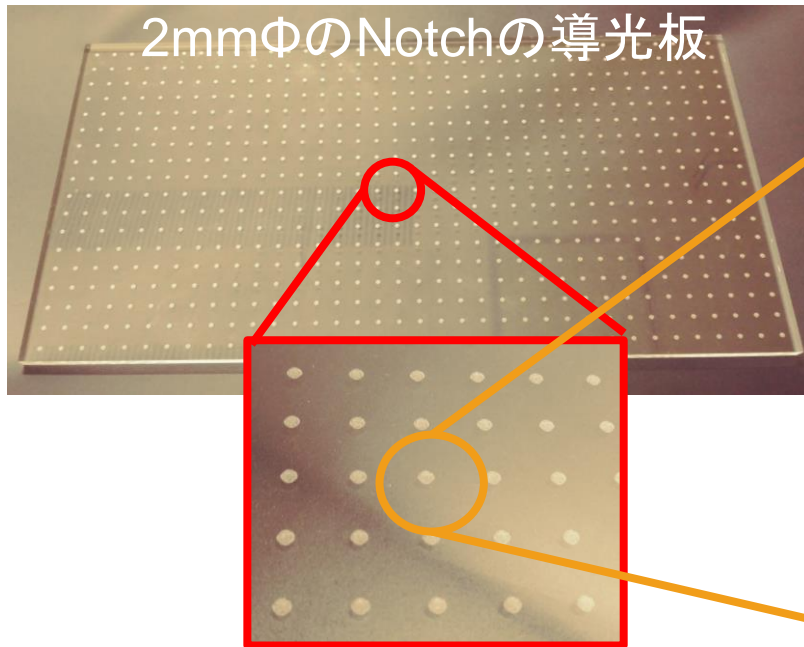


Notchの大きさ  
1mm



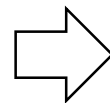
Notchの大きさ  
3mm

# 横方向のずれへの対策



2mmΦのNotchの導光板を使用して、ずれの許容量を測定

2次元ガウスでフィッティング  
X方向のRMS: 1.61mm  
Y方向のRMS: 1.82mm



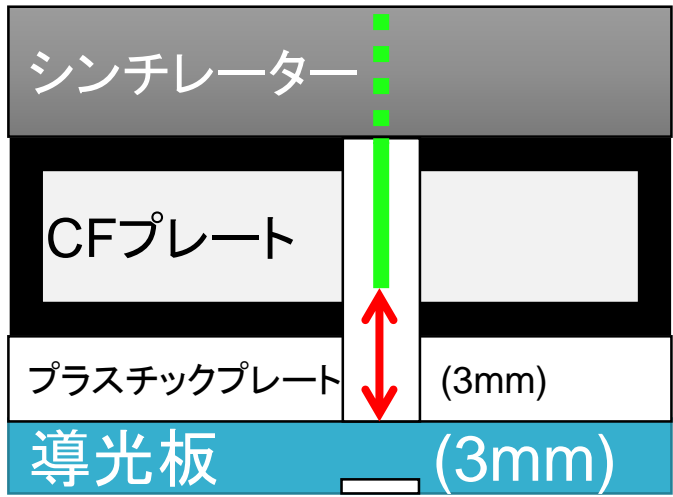
ずれの許容量  
Notchの大きさ+1.2mm

3mmΦのNotchの導光板で十分に横方向のずれの影響を緩和できる

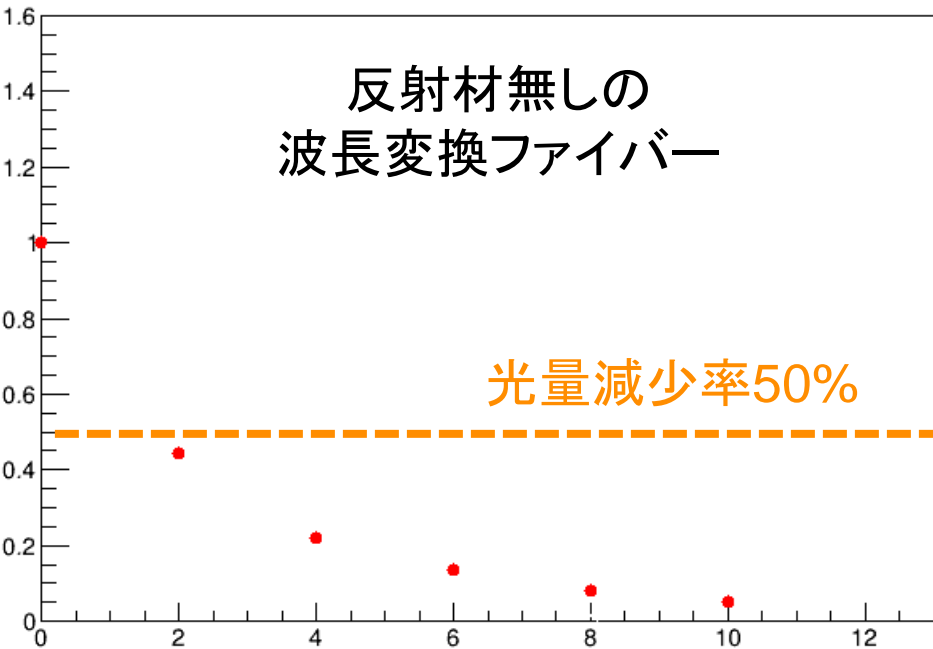
# 縦方向のずれ

ファイバーを縦方向にずらし  
光量の減少率を測定

縦方向のずれの許容量は約2mm

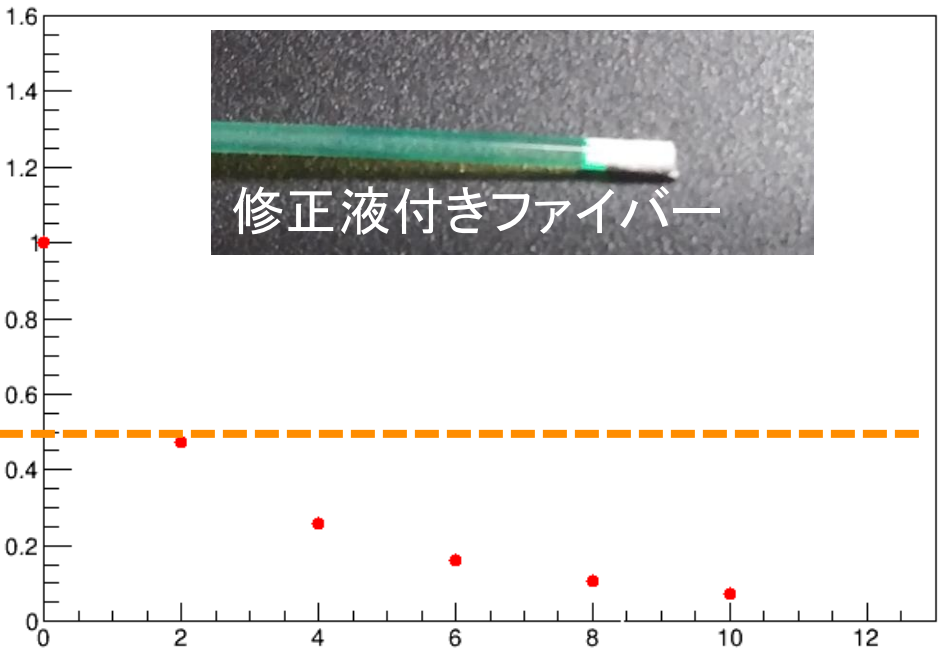


光量減少率



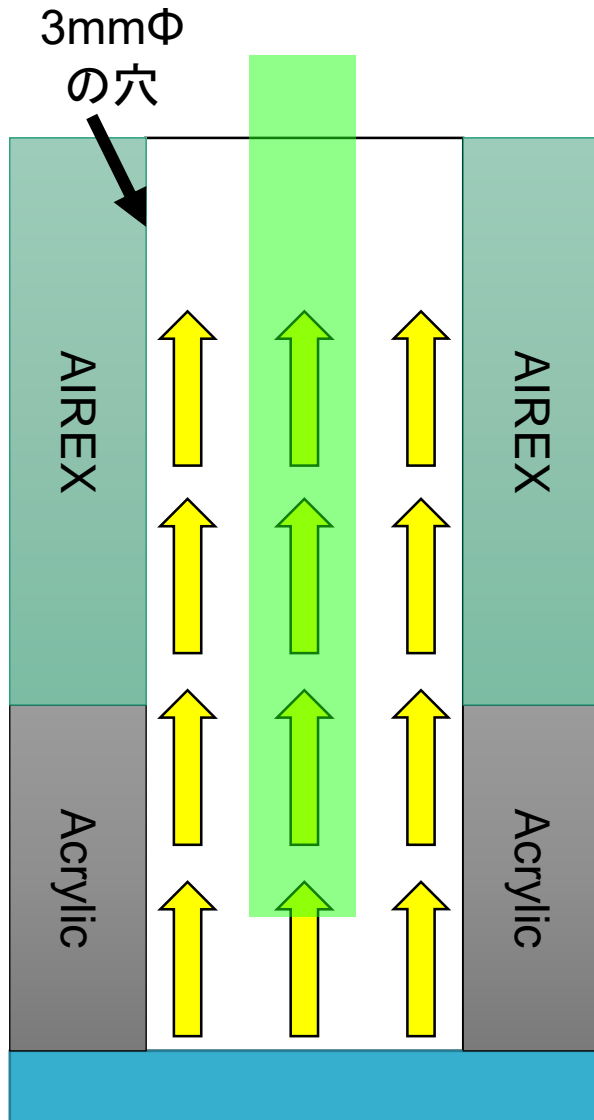
導光板からの  
ファイバーのずれ(mm)

光量減少率



導光板からの  
ファイバーのずれ(mm)

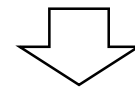
# 縦方向のずれの対策



## アイデア

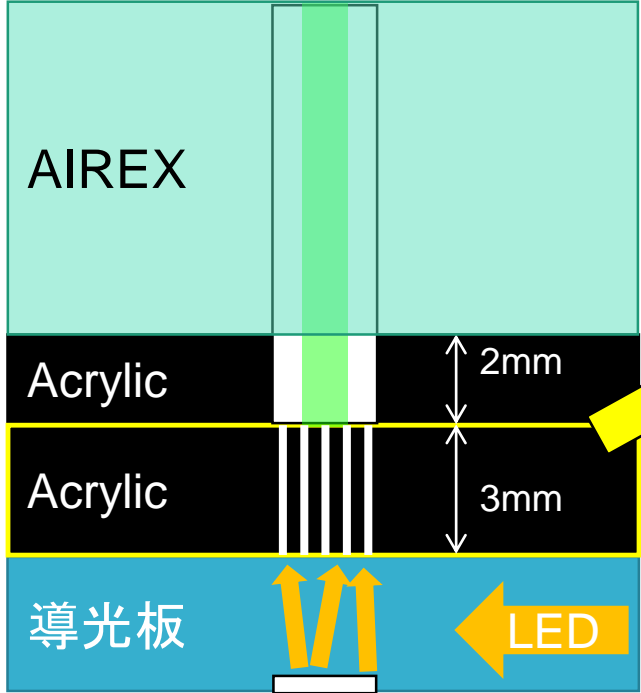
反射材無しでファイバーで  
ファイバー方向のみの光にすれば、  
ずれの許容量を増やせる？

光がファイバー方向のみ  
→壁での光の吸収がない

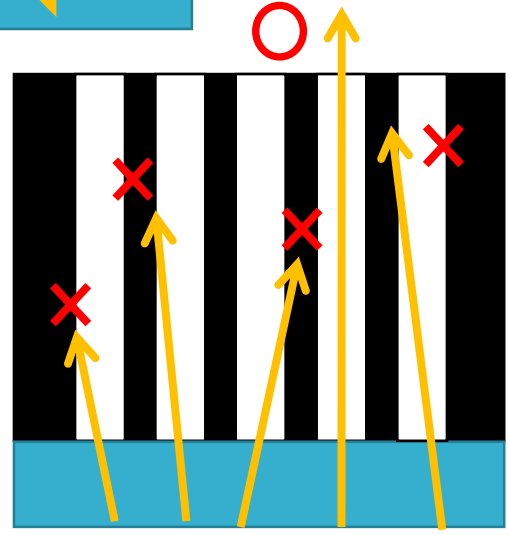
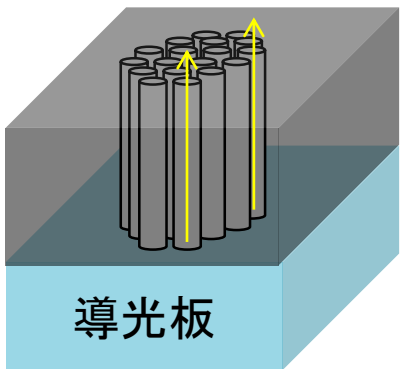
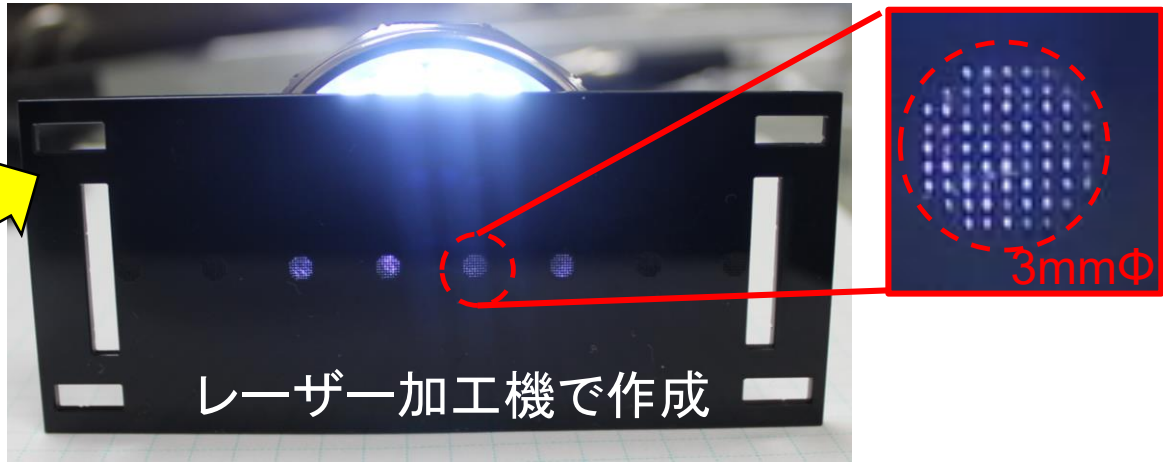


穴のどの位置でも光量が同じ

# 縦方向のずれの対策



導光板と黒アクリル(2mm)の間に、  
小さな穴(約0.1mm)がたくさん空いた黒アクリル

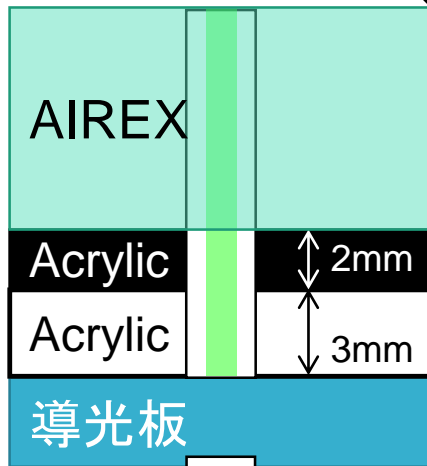


垂直な光: 黒アクリルの穴を通過  
斜めな光: 黒アクリルで吸収

ファイバー方向のみの  
光にすることが可能

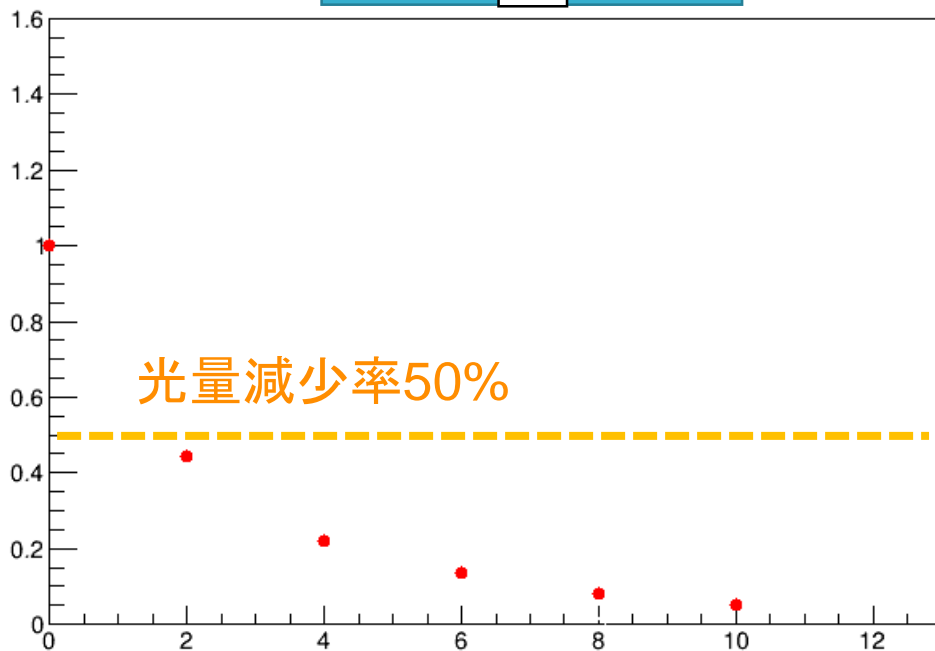
# 測定結果

対策前



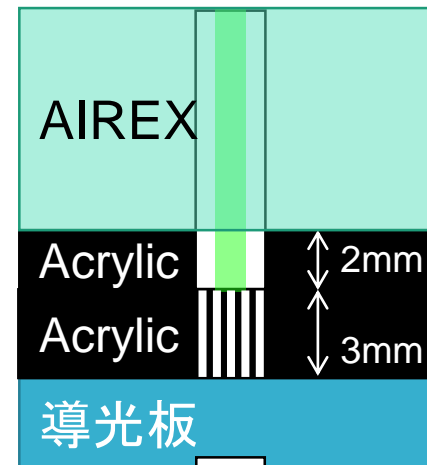
光量減少率

導光板



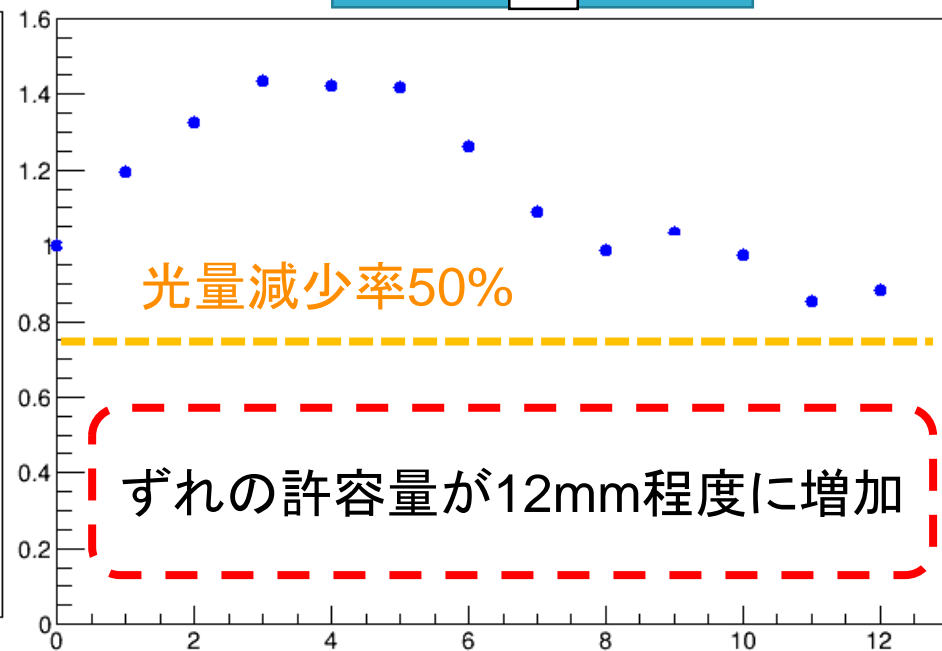
導光板からの  
ファイバーのずれ(mm)

対策後



光量減少率

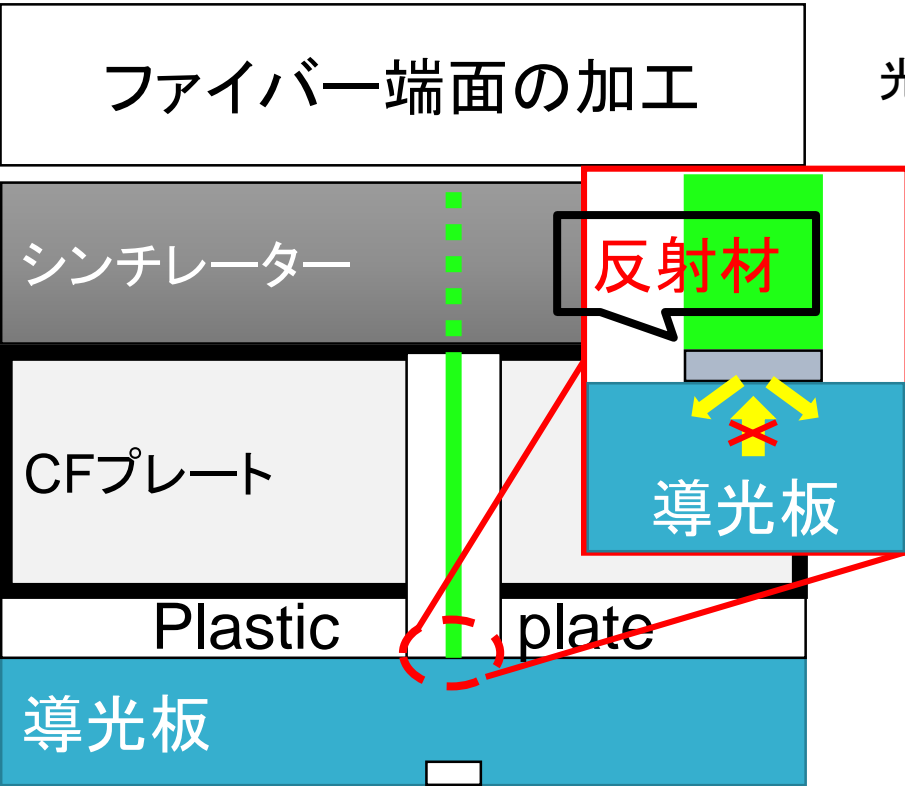
導光板



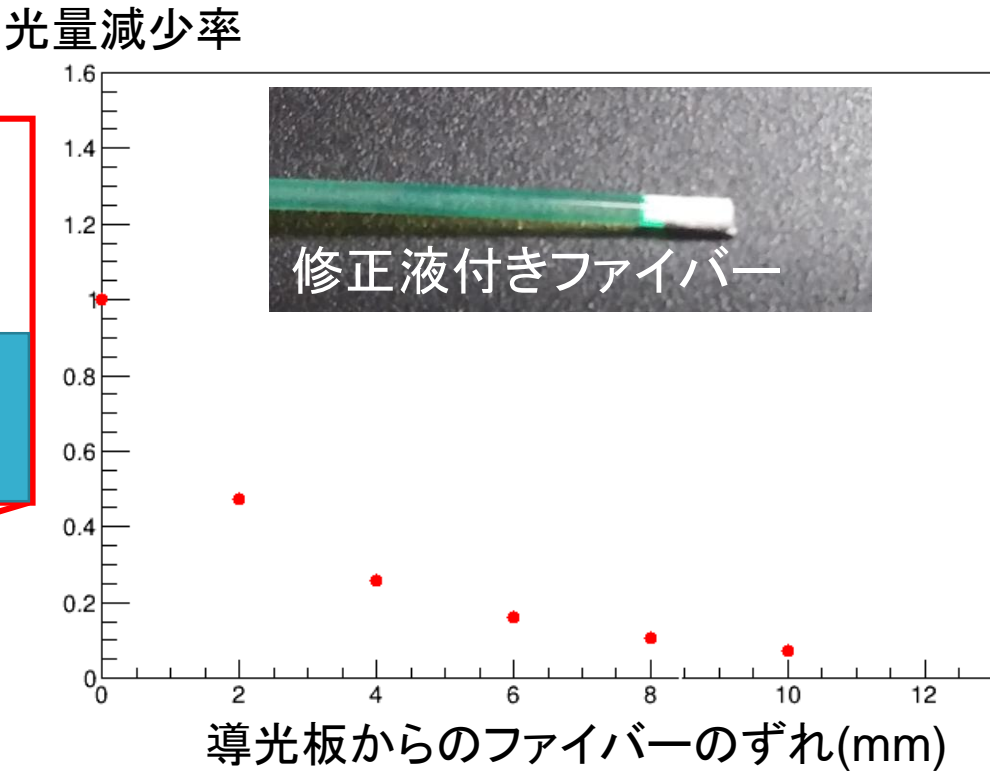
導光板からの  
ファイバーのずれ(mm)

# 縦方向のずれの残る課題

反射材がついたときの、  
縦方向のずれによる光量の変化が緩和できていない



## 縦方向のずれによる光量の変化





# 今後について

実機に向けたデザイン決定のための評価

開始

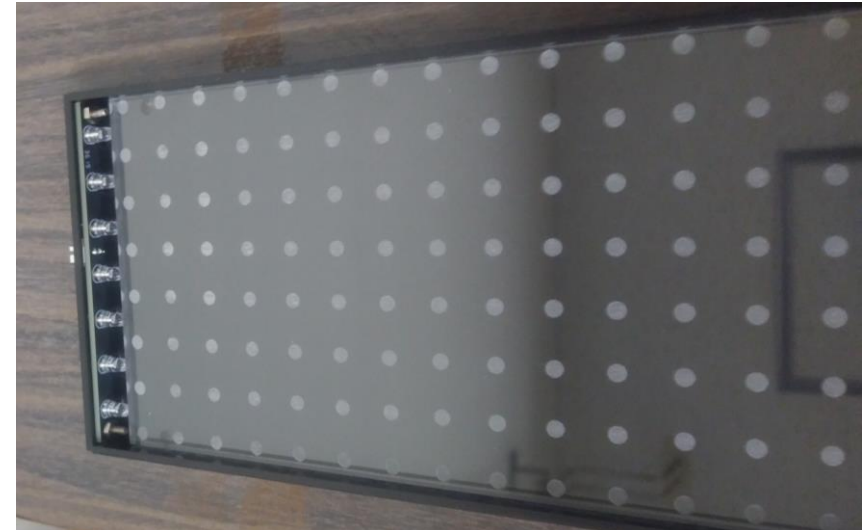
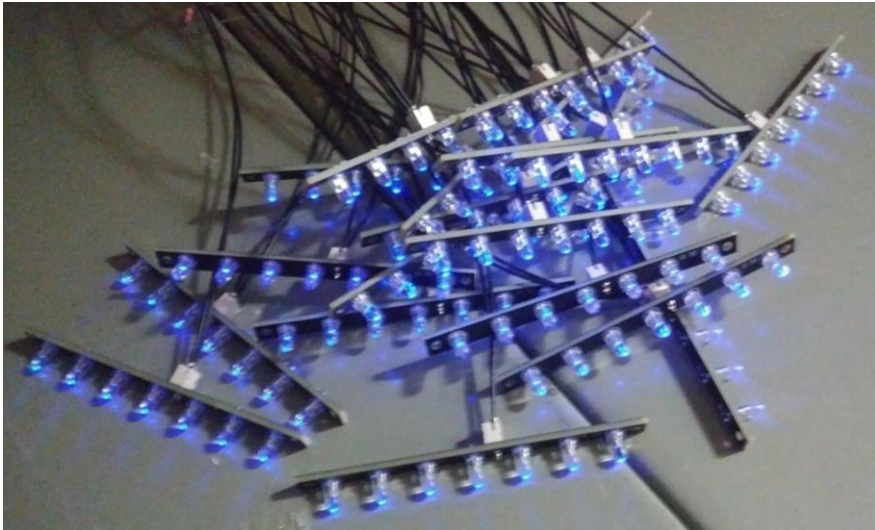


- LED駆動方法の検討
- 校正装置のモジュールのデザイン検討

実機の生産と性能評価

2020年7月以降

- 校正装置の構成要素の生産と統合、その性能評価

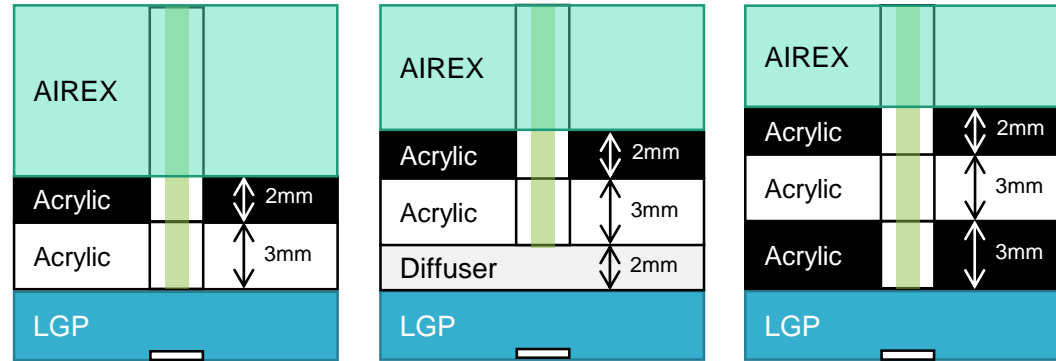


# まとめ

- T2K実験では、ニュートリノのCP対称性の $3\sigma$ レベルでの測定に向けて、前置検出器ND280のアップグレード計画が進行中である
- 標的兼トラッカー検出器であるSuperFGDの光検出器較正装置として導光板の使用を検討している
- LEDや導光板の厚みの最適化を行った
- 懸念事項の検証を行い、その対応策の評価を行った
- 反射材ありでの縦方向のずれが課題として残されている
- 今後はLED駆動方法の検討や、較正装置を固定用のBoxなどの設計と評価を行う

# Backup

# 縦方向のズレの対策案と結果



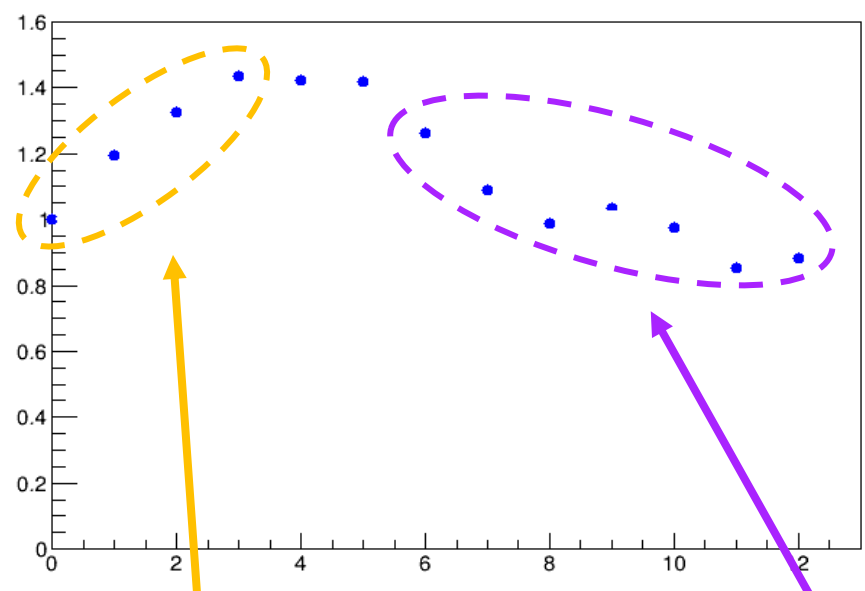
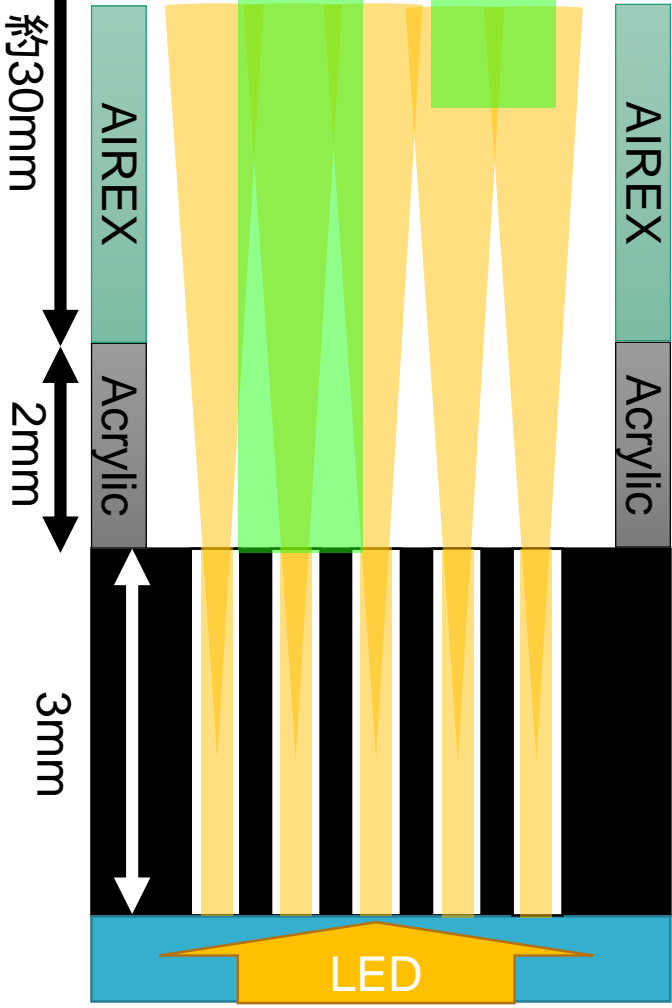
	Normal		Diffuser		Black acrylic	
	Normal	White painting	Normal	White painting	Normal	White painting
Laser dot	2mm	2mm	2mm	2mm	3mm	2mm
Inkjet	2mm	~5mm	2mm	~8mm	2mm	2mm

Inkjet & diffuser & white painting : トランス大

Other : トランス ~ 2 mm

Inkjet LGP: 長期安定性が不明 → Laser dotでトランスを増やしたい

# 考察



ズレが3mmまでは  
光量が増える

黒アクリルから離れるほど  
複数の穴からの光が、  
端面に入るから？

ズレが6mm以降は  
光量が減る

広がった光がAIREXに  
当たり、散乱or吸収されて、  
穴を通る光が減る？

# 光検出器較正装置の開発段階

光量一様性の観点からデザインを最適化

終了



- LEDの種類や数、設置位置
- 導光板の厚み

懸念事項の検証と対応策の検討

途中(課題あり)



- 導光板を介したクロストーク
- 波長変換ファイバー端面の加工
- 波長変換ファイバーのずれによる光量の変化

実機に向けたデザイン決定のための評価

開始



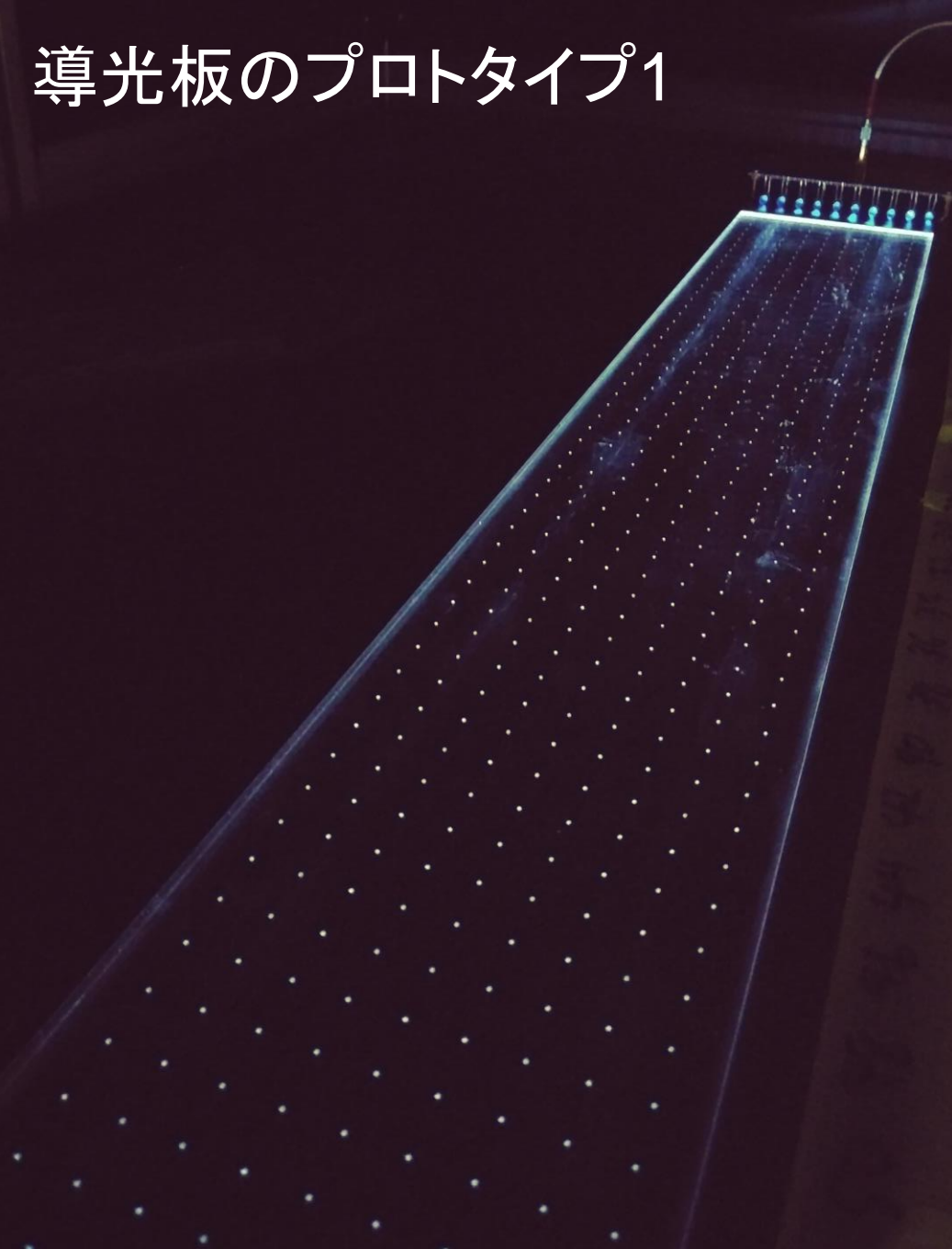
- LED駆動方法の検討
- 較正装置のモジュールのデザイン検討

実機の生産と性能評価

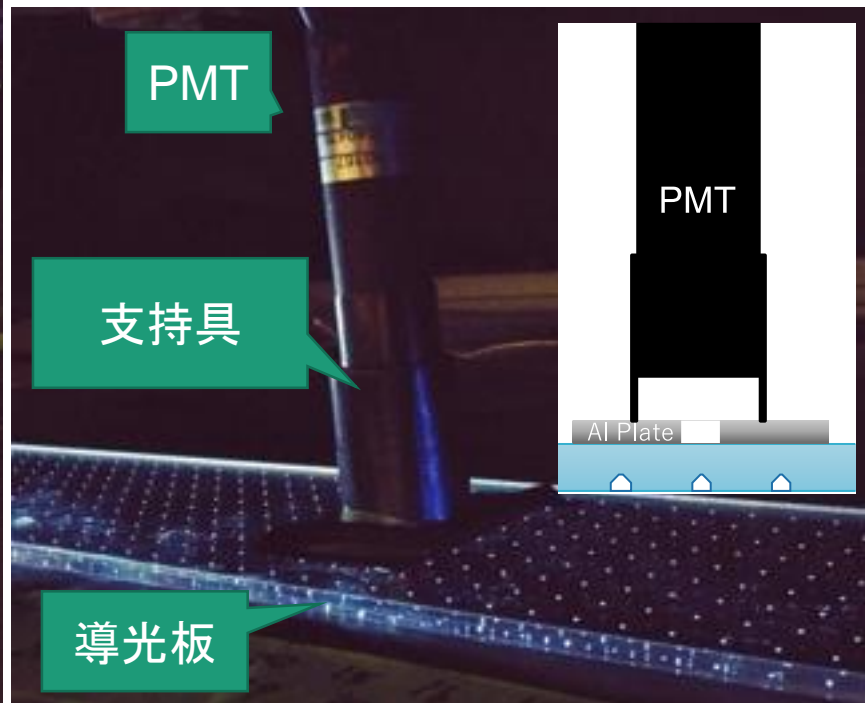
2020年7月以降

- 較正装置の構成要素の生産と統合、その性能評価

# 導光板のプロトタイプ1



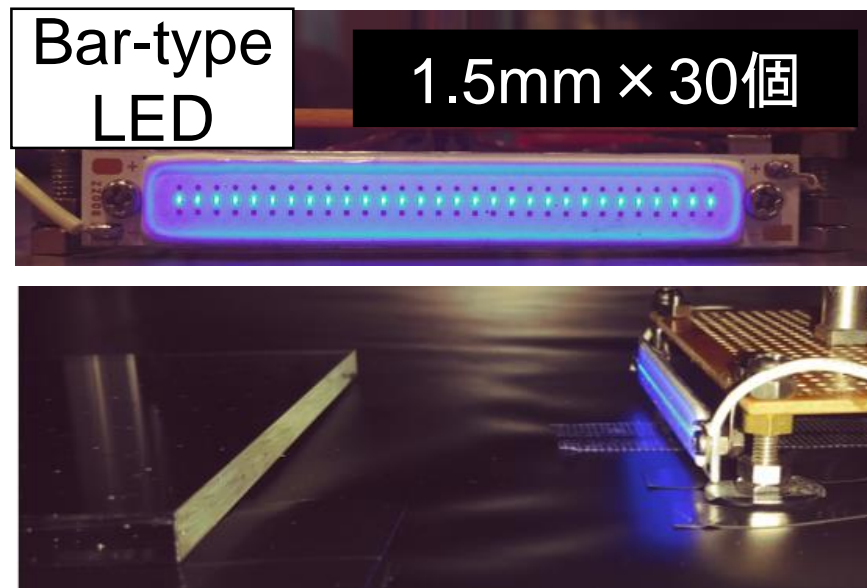
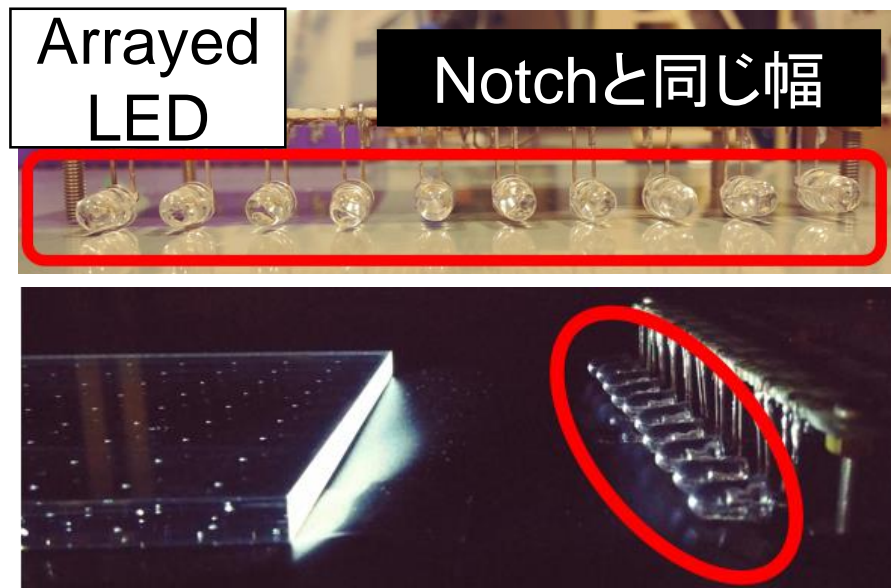
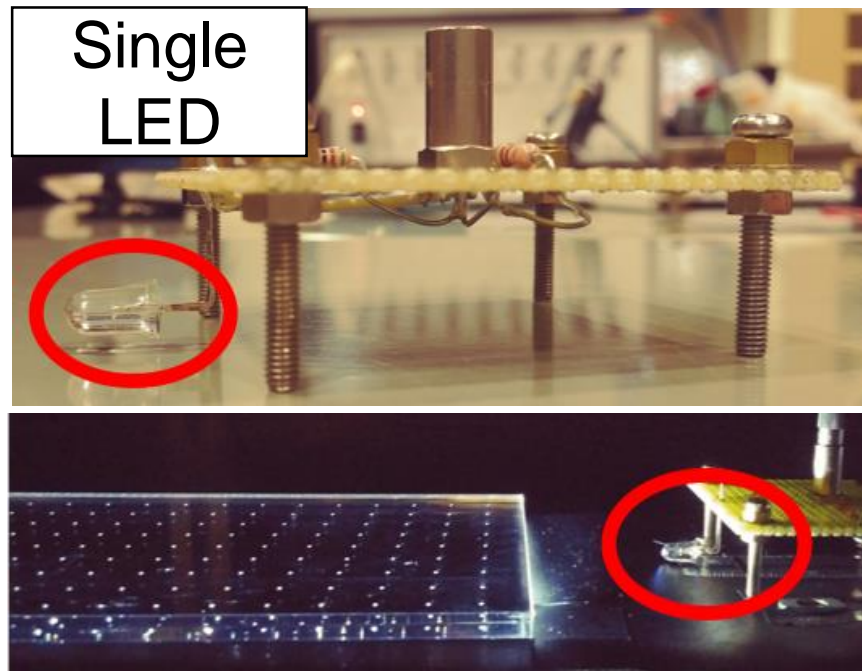
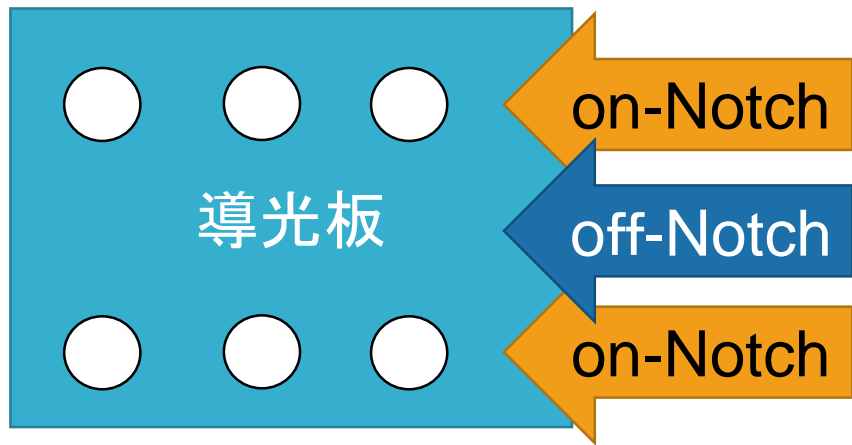
## 光量測定にPMTを使用



## 片側から光を入射

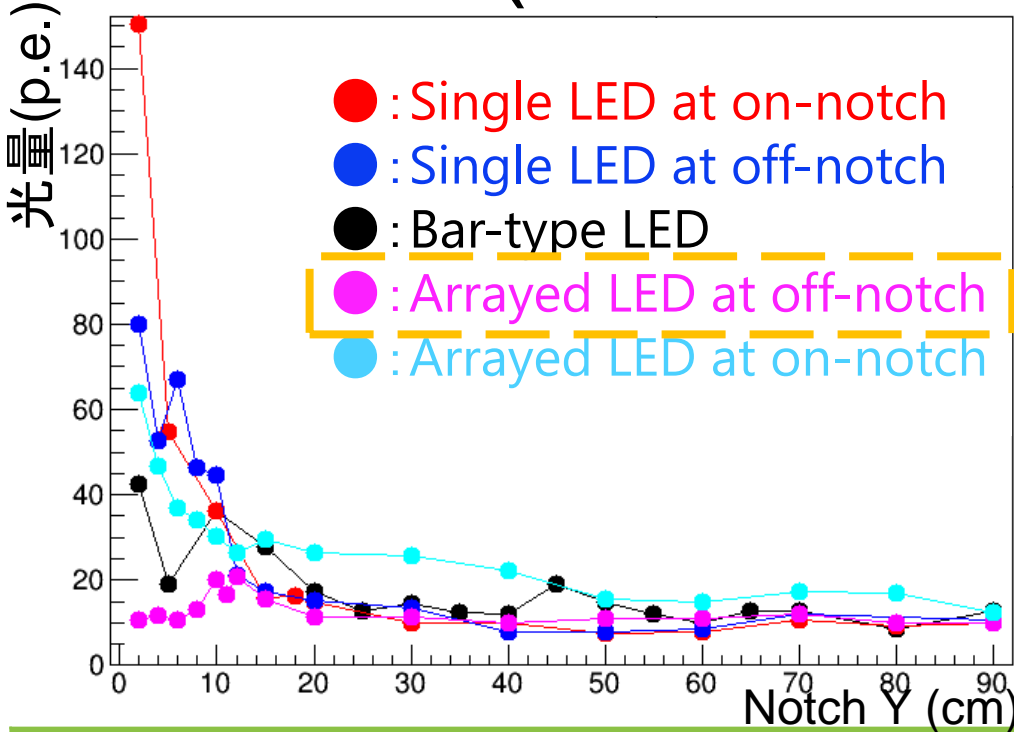


# 使用した光源と On/Off Notch

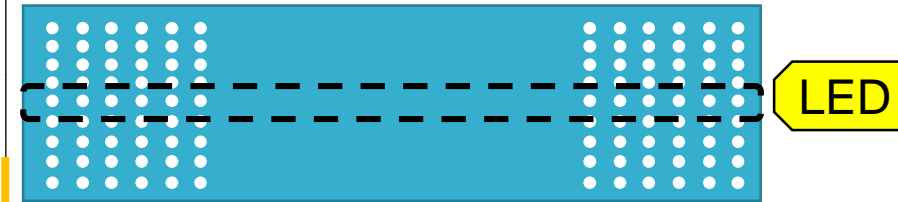




# 光量測定(LEDの種類と設置位置)



導光板の中心の1列を測定



Single LED



Bar-type LED



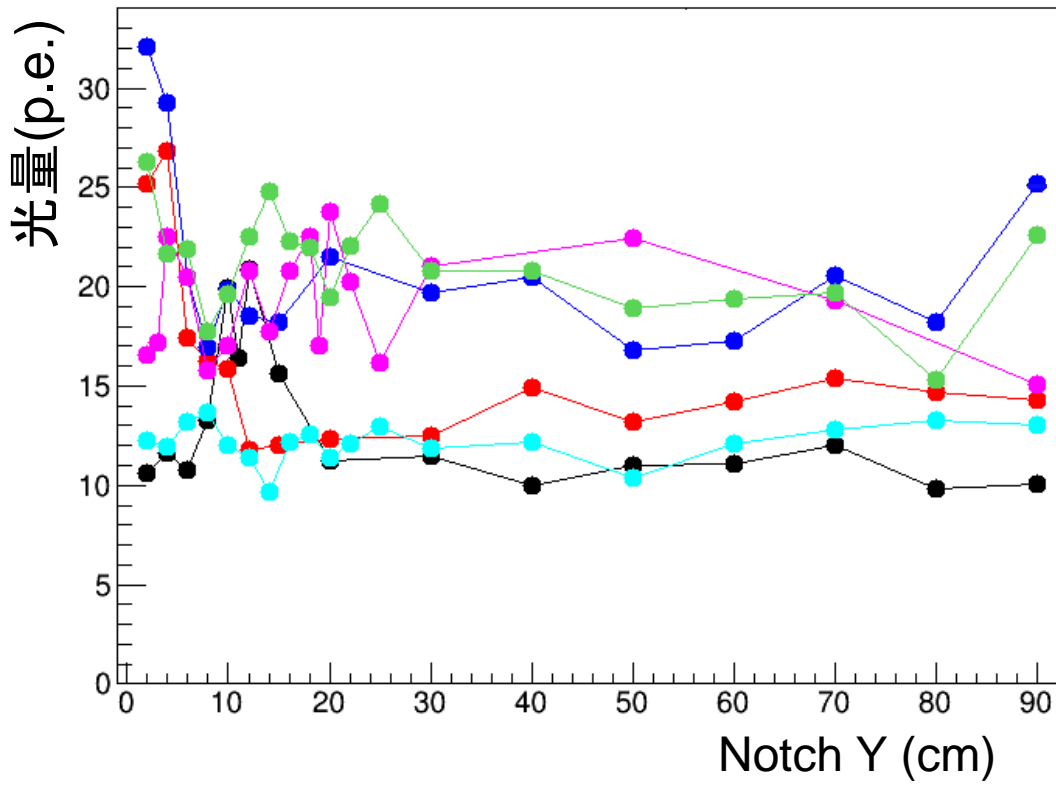
Arrayed LED

## 一様性(RMS/Mean)

Single LED at on-notch	$1.392 \pm 0.811$
Single LED at off-notch	$0.810 \pm 0.329$
Bar-type LED	$0.521 \pm 0.155$
Arrayed LED at off-notch	$0.263 \pm 0.064$
Arrayed LED at on-notch	$0.472 \pm 0.144$

off-NotchのArrayed LEDが最適な光源

# LEDの位置と導光板の厚みの最適化



## 一様性 (RMS/Mean)

厚み : 5mm 光源との距離 : 3.5cm	0.263 ± 0.064
厚み : 5mm 光源との距離 : 0.1cm	0.117 ± 0.022
厚み : 3mm 光源との距離 : 3.5cm	0.274 ± 0.069
厚み : 3mm 光源との距離 : 0.1cm	0.079 ± 0.014
厚み : 2mm 光源との距離 : 3.5cm	0.207 ± 0.049
厚み : 2mm 光源との距離 : 0.1cm	0.137 ± 0.028

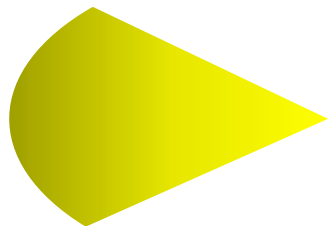
**導光板の厚みが3mm  
LED(光源)と導光板の距離が0.1cm**



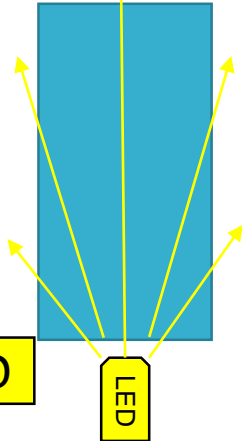
# 考察

LEDからの距離:大 → 光量:減

①: 光の拡散



③: 外に出る

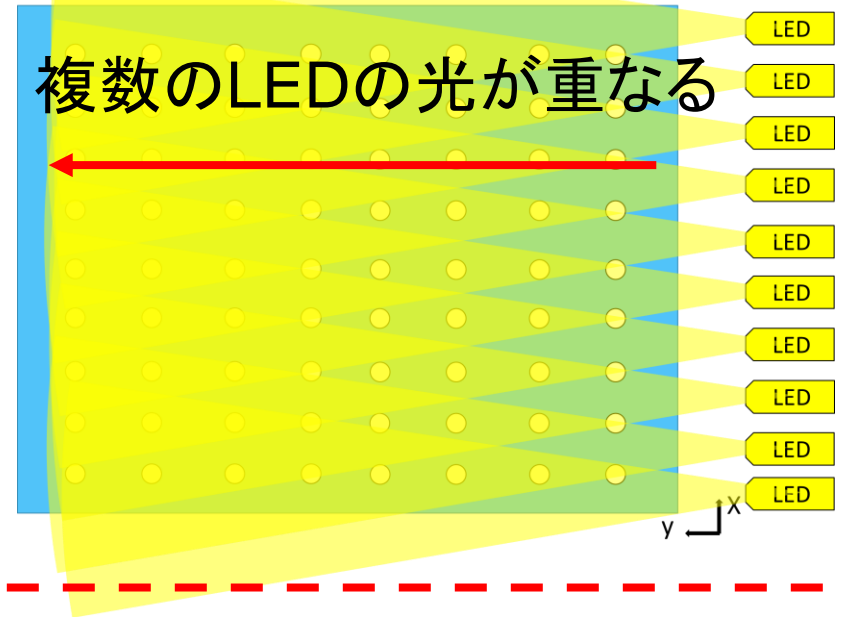


②: Notchでの散乱



LEDからの距離:大 → 光量:増

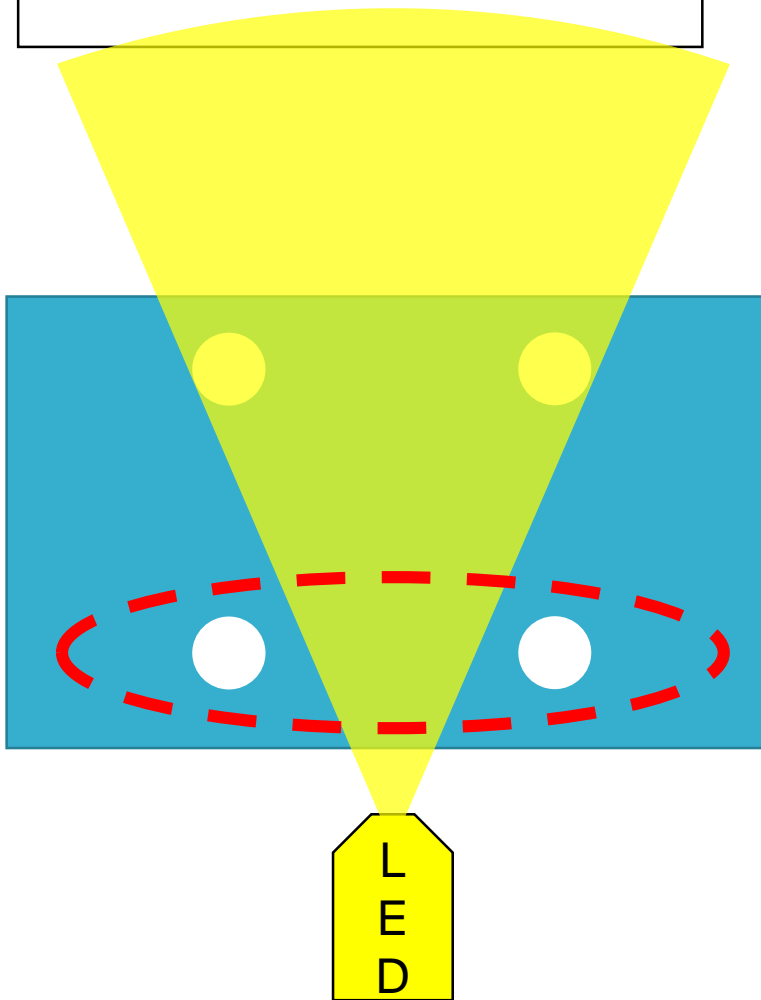
複数のLEDの光が重なる



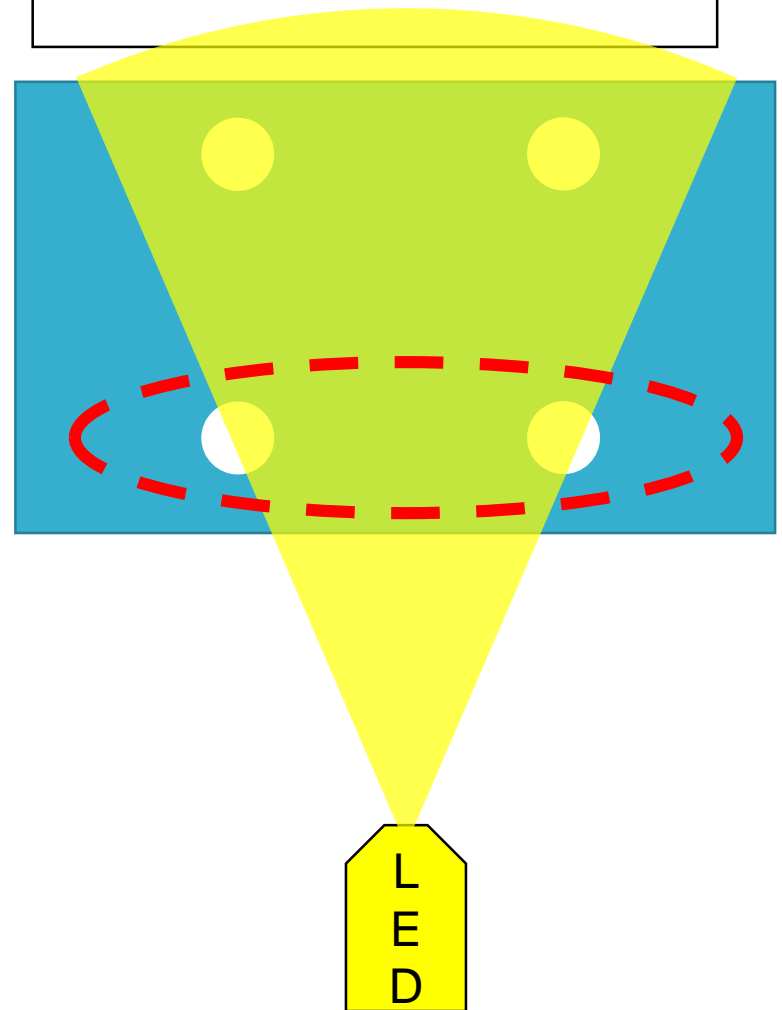
LEDからの距離による光量の  
増加と減少のバランスにより  
Arrayed LEDのoff-Notchで  
一様性が向上した

# 考察

LEDと導光板の距離が近いとき

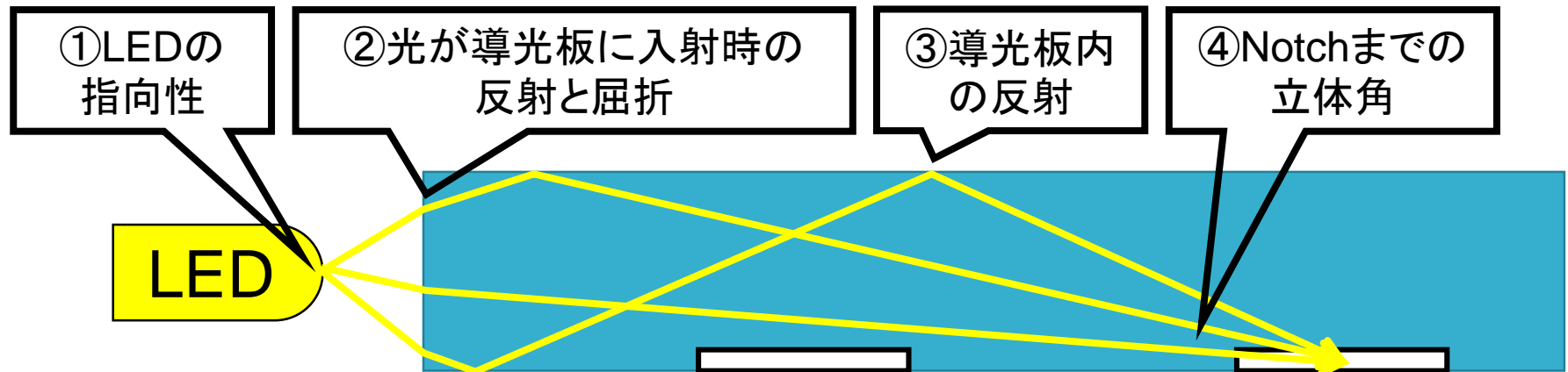


LEDと導光板の距離が遠いとき



# 数値計算の概要

4つの影響を考慮し、相対的な光量の計算を行う  
(GEANT4のように光の軌道を1つ1つ追うものではない)

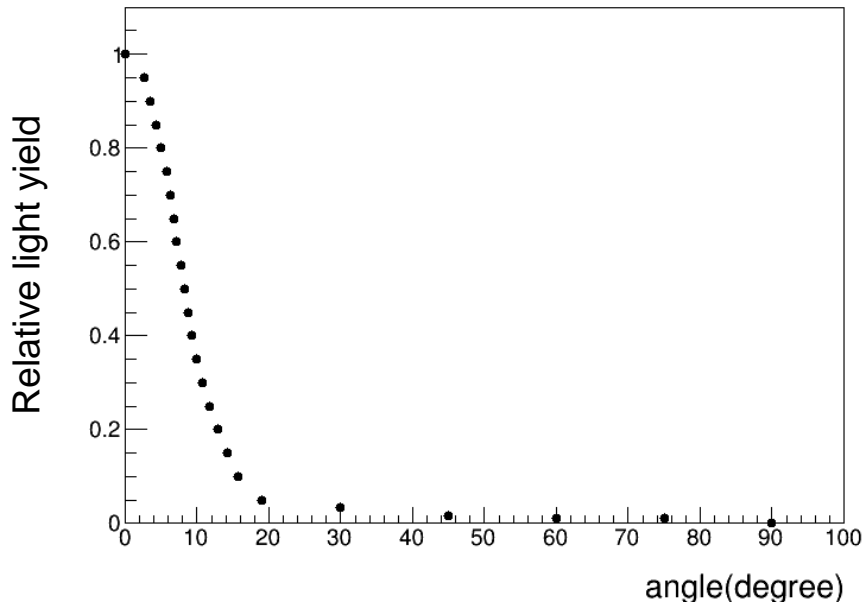


注記：現在の数値計算で考慮できていないもの

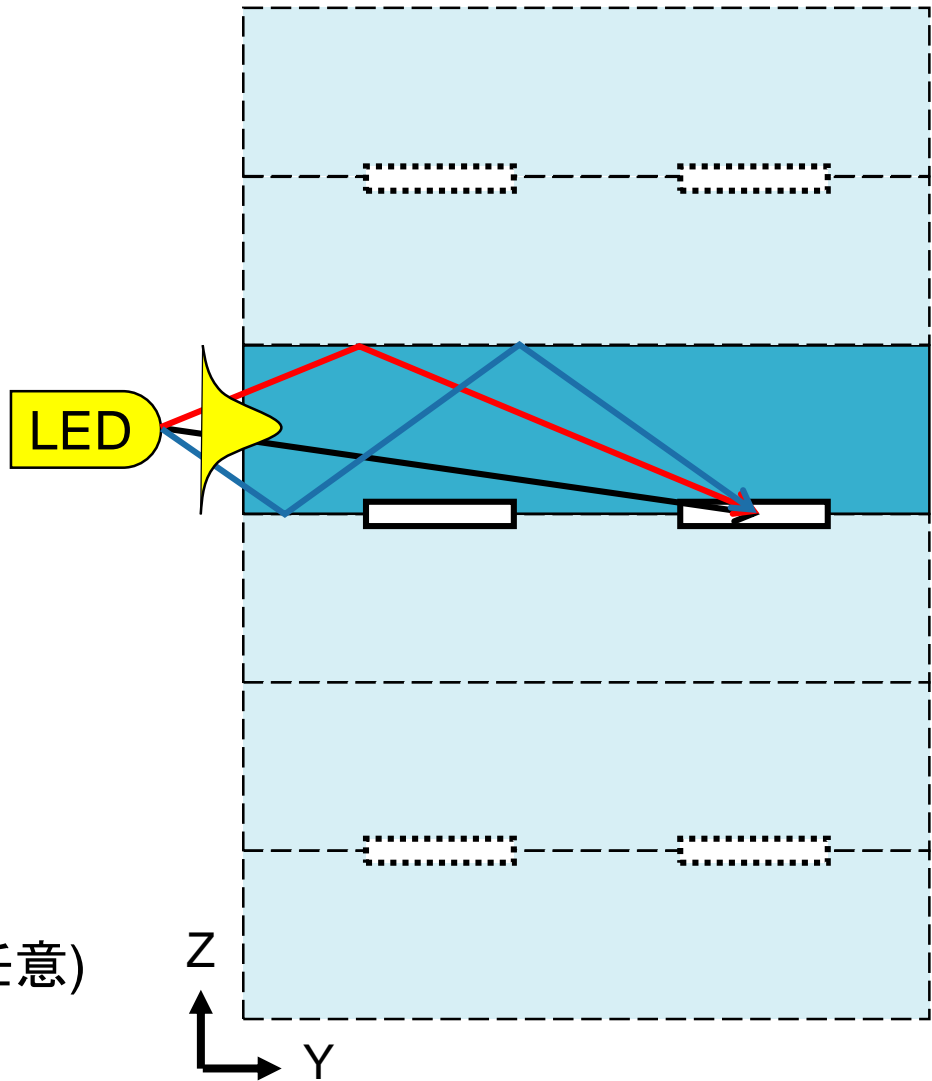
- 導光板内の減衰
- Notchでの散乱
- LEDの大きさ(現在発光箇所は1点)
- Notchの影(LEDとNotchの間に別のNotchがあったときの減衰)

# ①LEDの指向性

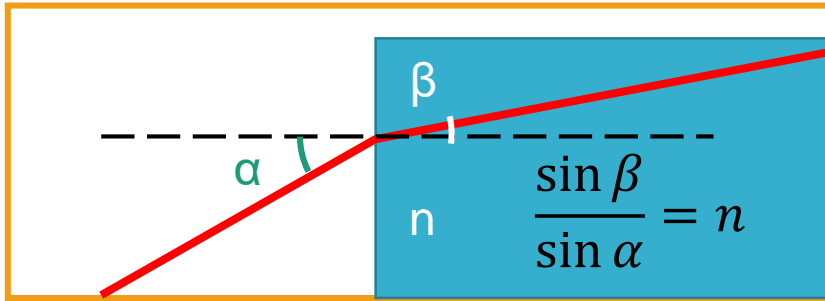
数値計算におけるパラメータ  
LEDの光量角度分布:  
LEDの仕様書より以下のデータ



- LEDの数 : 1 or 10(任意)
- LEDの位置 : Y -0.1cm or -3.5cm(任意)
- LEDの方向 : +Y(任意)



## ②光が導光板に入射時の反射と屈折



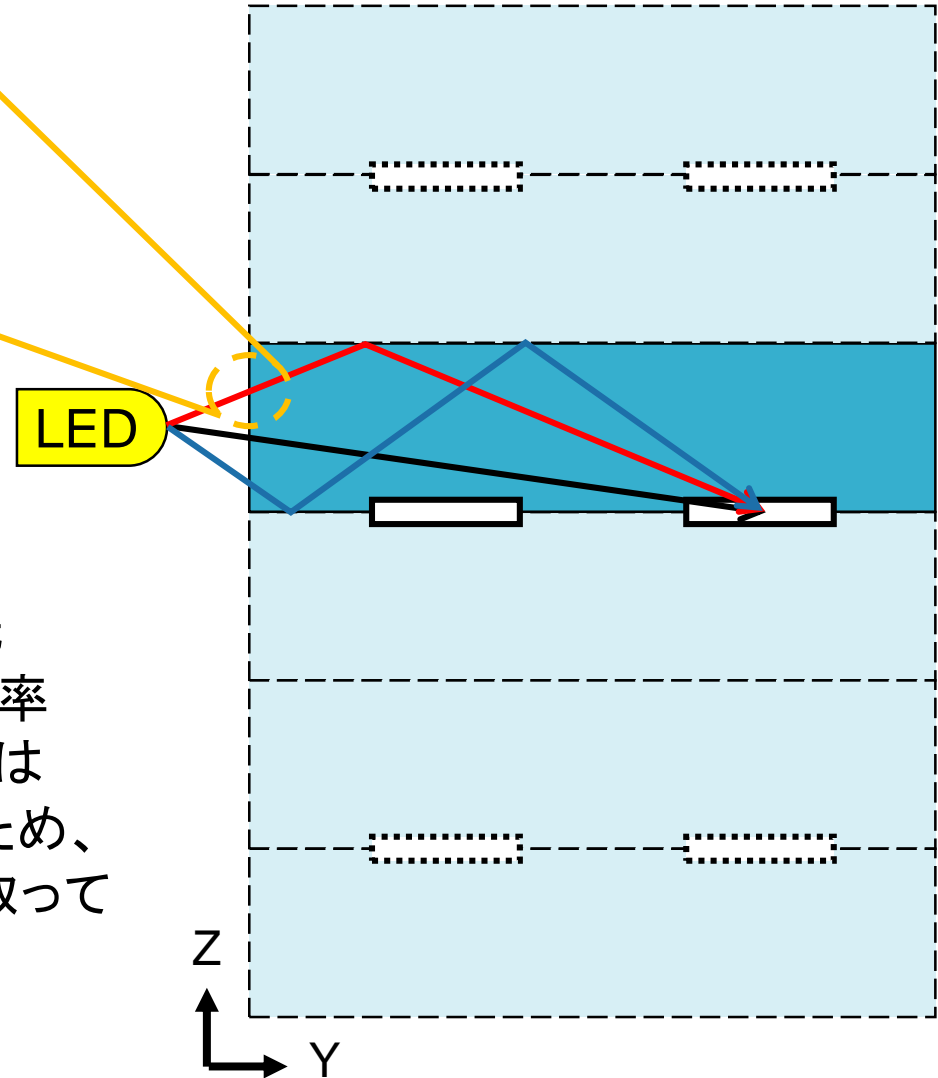
フレネル方程式より透過率を計算

$$t_p = \frac{2 \cos \alpha}{n \cos \alpha + \cos \beta}$$

$$t_s = \frac{2 \cos \alpha}{\cos \alpha + n \cos \beta}$$

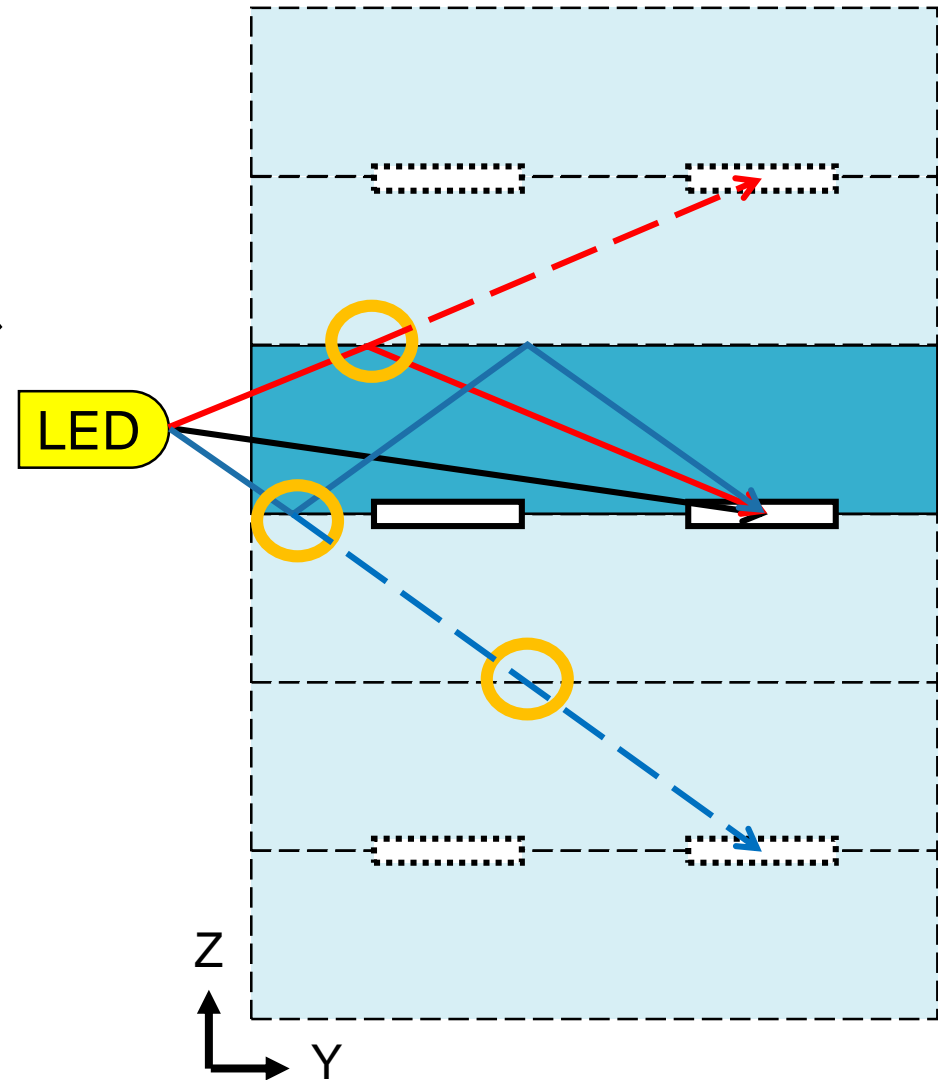
$$T_{p,s} = \frac{n \cos \beta}{\cos \alpha} t_{p,s}^2$$

$T_{p,s}$ は偏光した光  
(p波,s波)の透過率  
今の数値計算では  
偏向していないため、  
これらの平均を取っている



# ③導光板内の反射

- 空気と導光板の臨界角は：  
 $\theta_c = 42^\circ$ .
- 仮想の導光板とNotchを用意し  
角度を計算する
- 重み:1 ( $\theta > \theta_c$ )  
重み:0 ( $\theta < \theta_c$ )





# ④ LEDからNotchまでの立体角

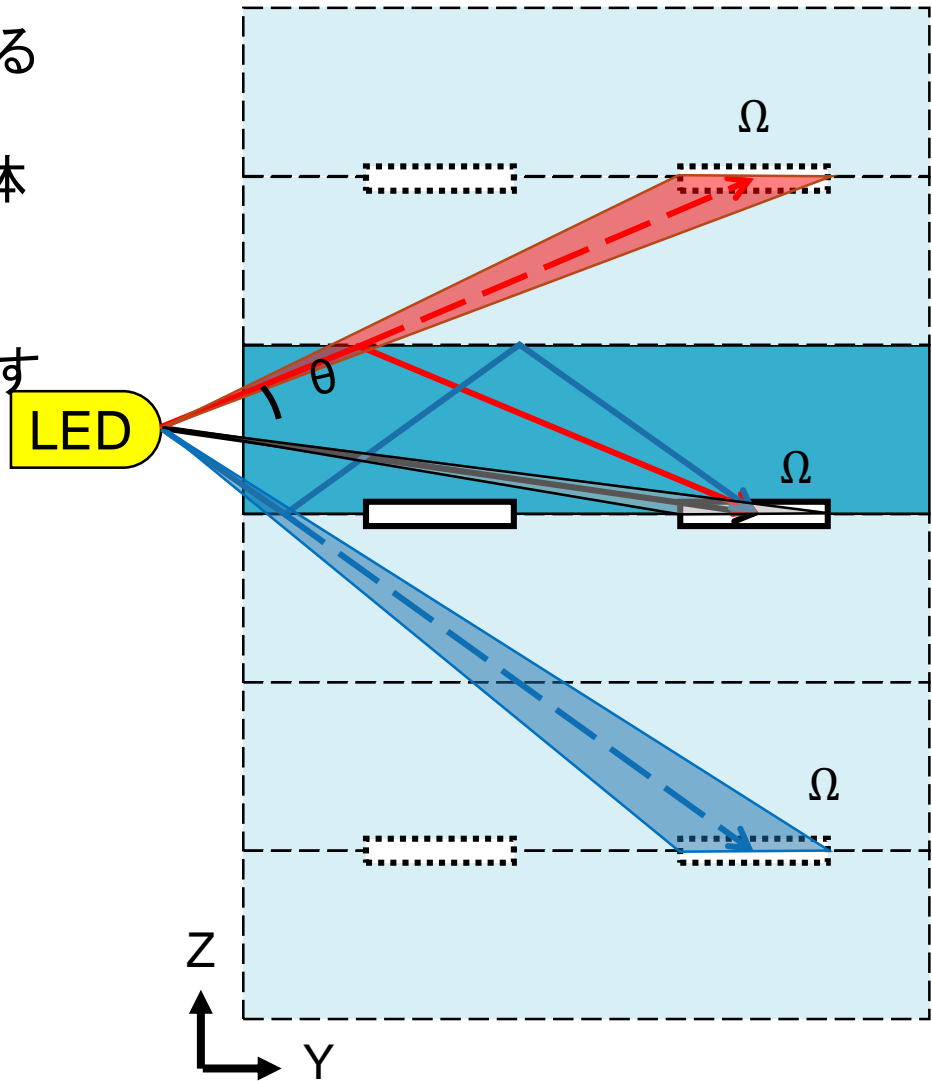
仮の層とNotchを用意し立体角を計算する

1つのNotchに対応する仮のNotchの立体角を計算する

仮のNotchの立体角を全て計算し、対応する元の1つのNotchに足し合わせる

それぞれの立体角 $\Omega$ は以下のように計算される

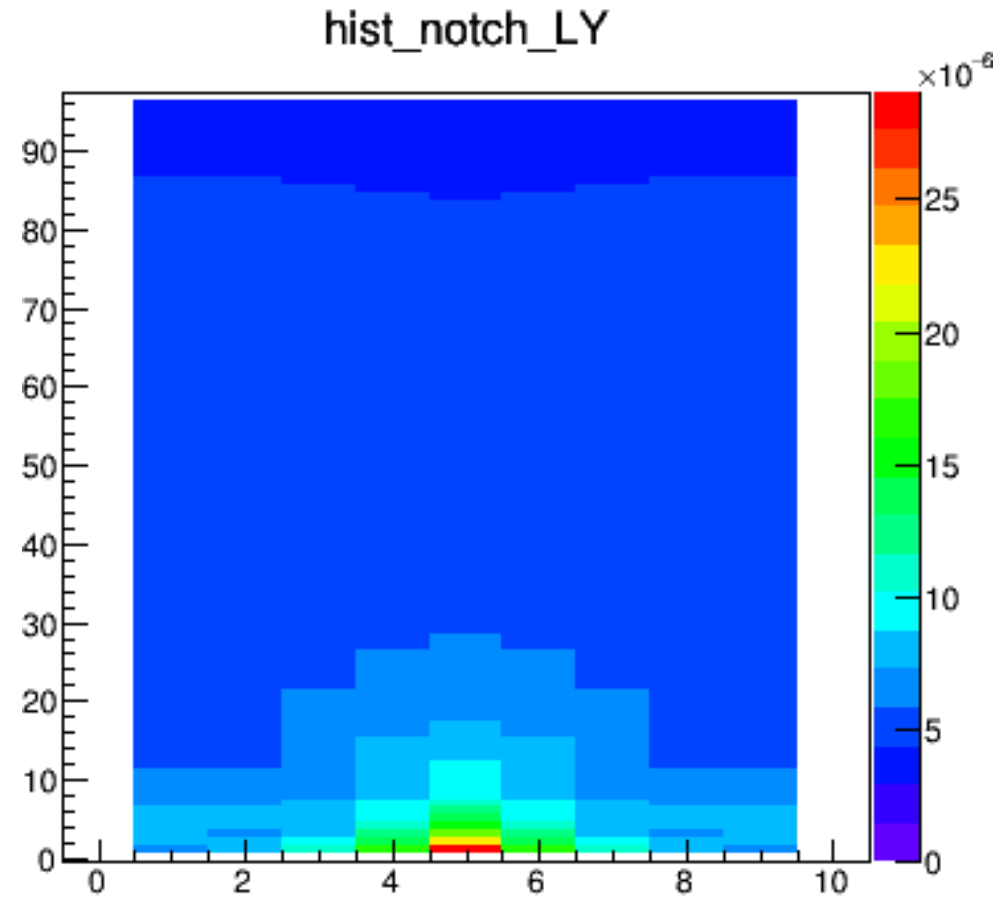
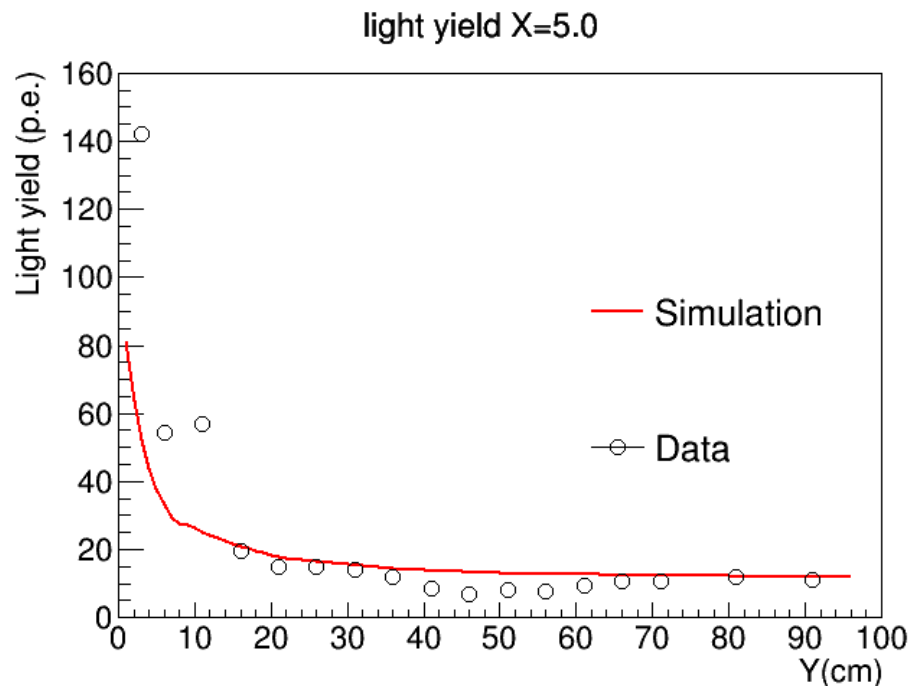
$$\Omega = S_{notch} \times \sin \theta \div r^2$$
$$r = r_{LED-LGP(edge)} + r_{LGP(edge)-notch}$$



# シミュレーション結果

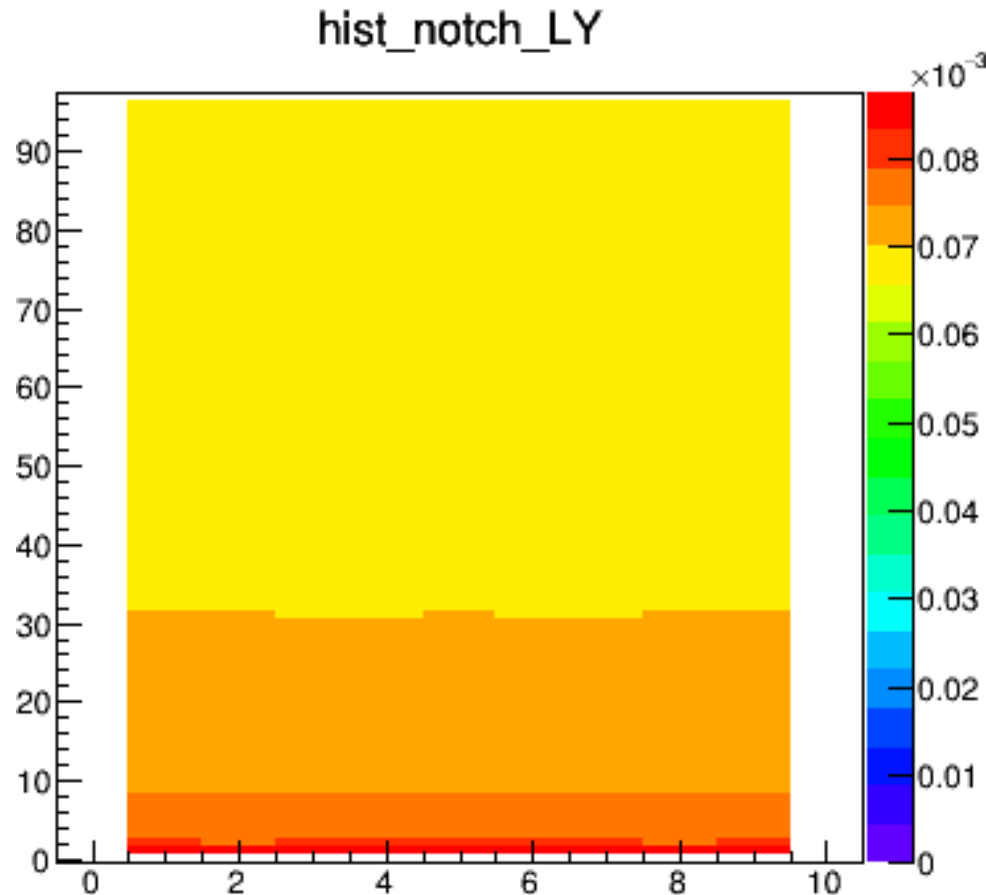
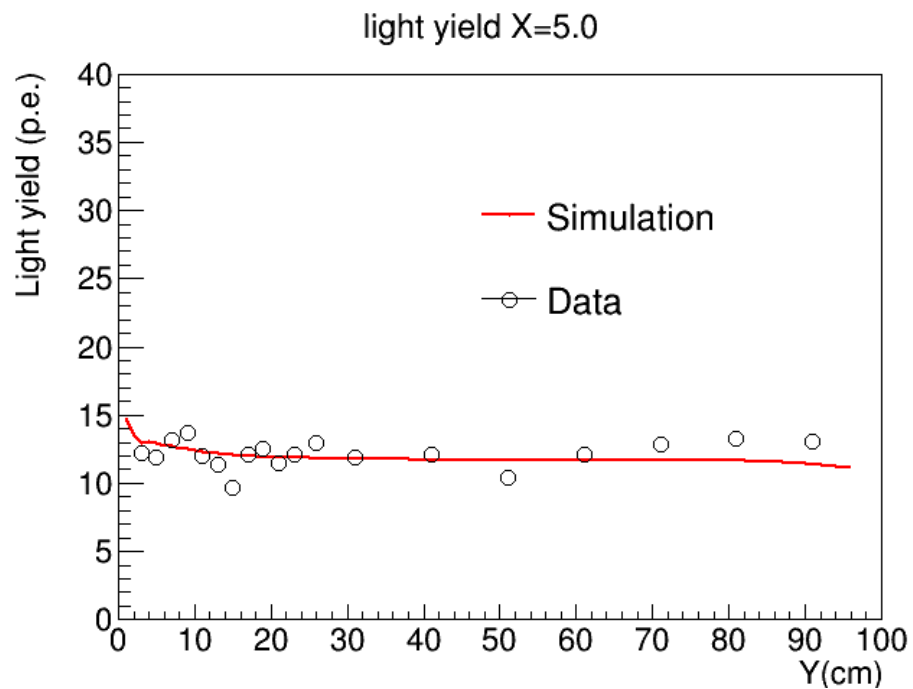
- Thick : 5mm
- LED-LGP : 35mm
- Number of reflection :  
X=6, Y=2, Z=129 times

- single LED on-notch



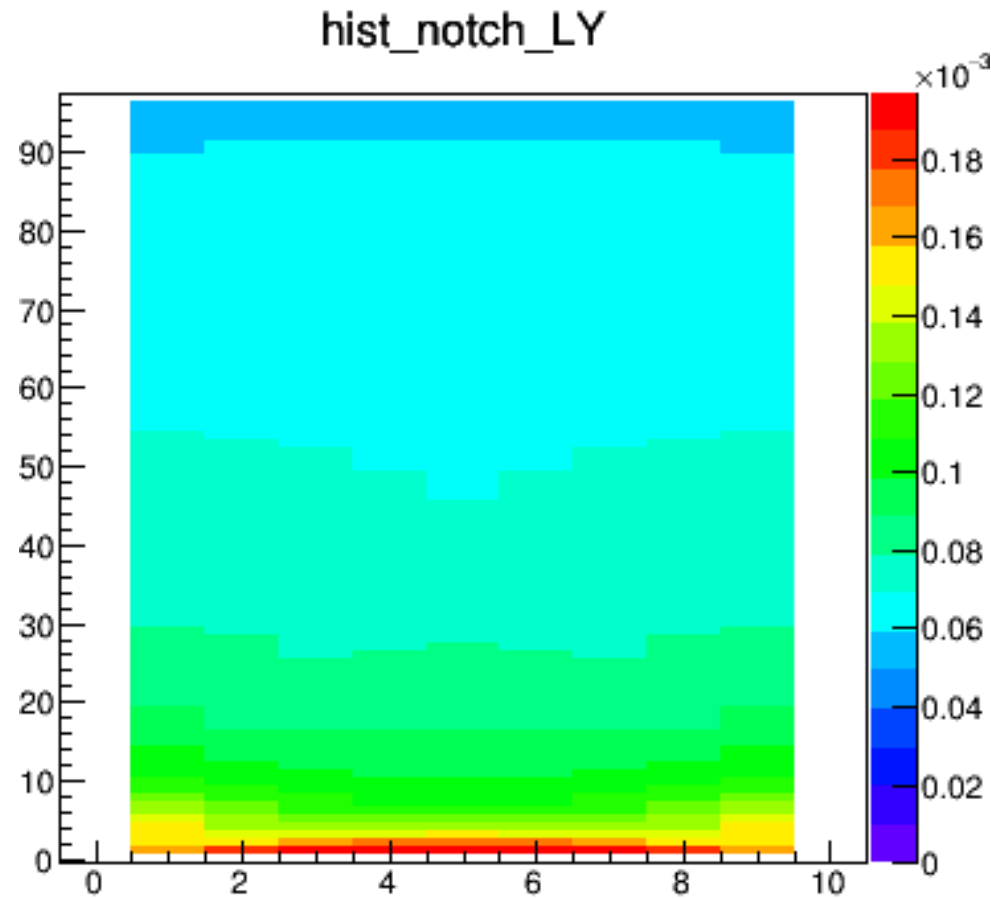
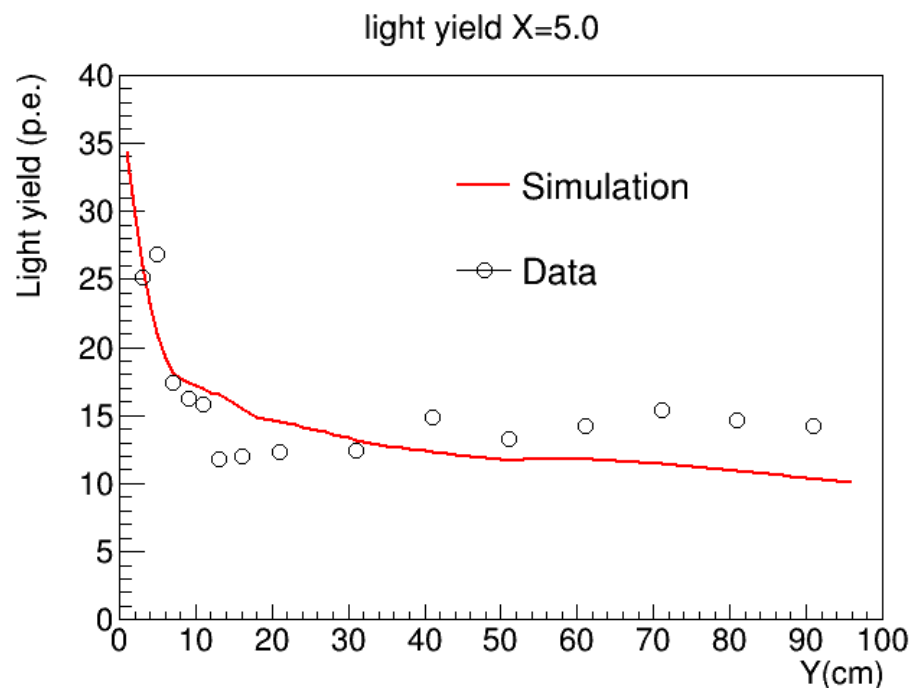
# シミュレーション結果

- Thick : 3mm
- LED-LGP : 1mm
- Number of reflection :  
X=6, Y=2, Z=128 times
- Arrayed LED off-notch



# シミュレーション結果

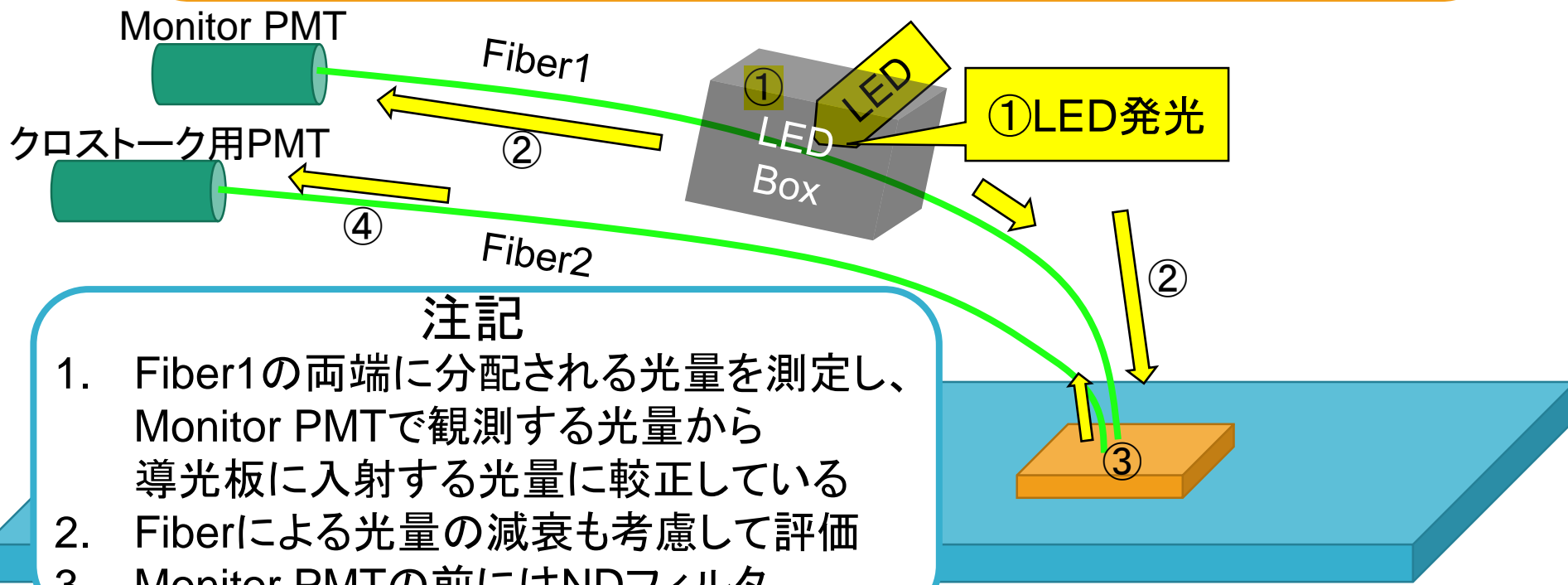
- Thick : 3mm
- LED-LGP : 35mm
- Number of reflection :  
X=6, Y=2, Z=128 times
- Arrayed LED off-notch



# クロストーク測定の方法

## クロストーク測定の流れ

1. LED Box内のLEDが発光
2. ファイバを通った光がMonitor PMTと導光板に入射
3. 導光板内のNotchで散乱された光は隣のファイバに入射
4. 隣のファイバに入射した光がクロストーク用PMTに入射

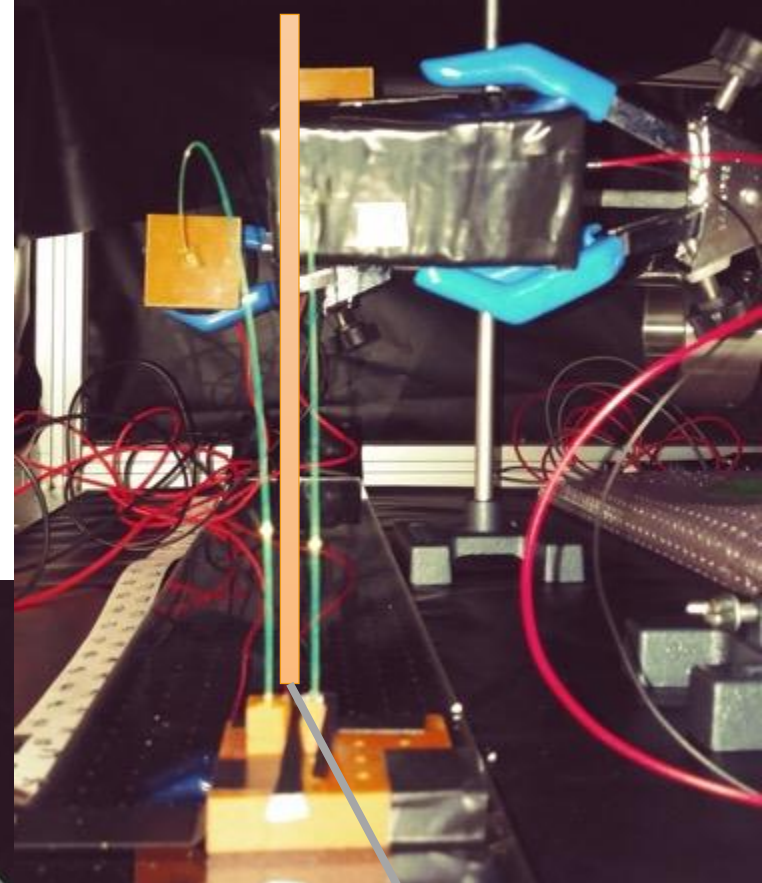
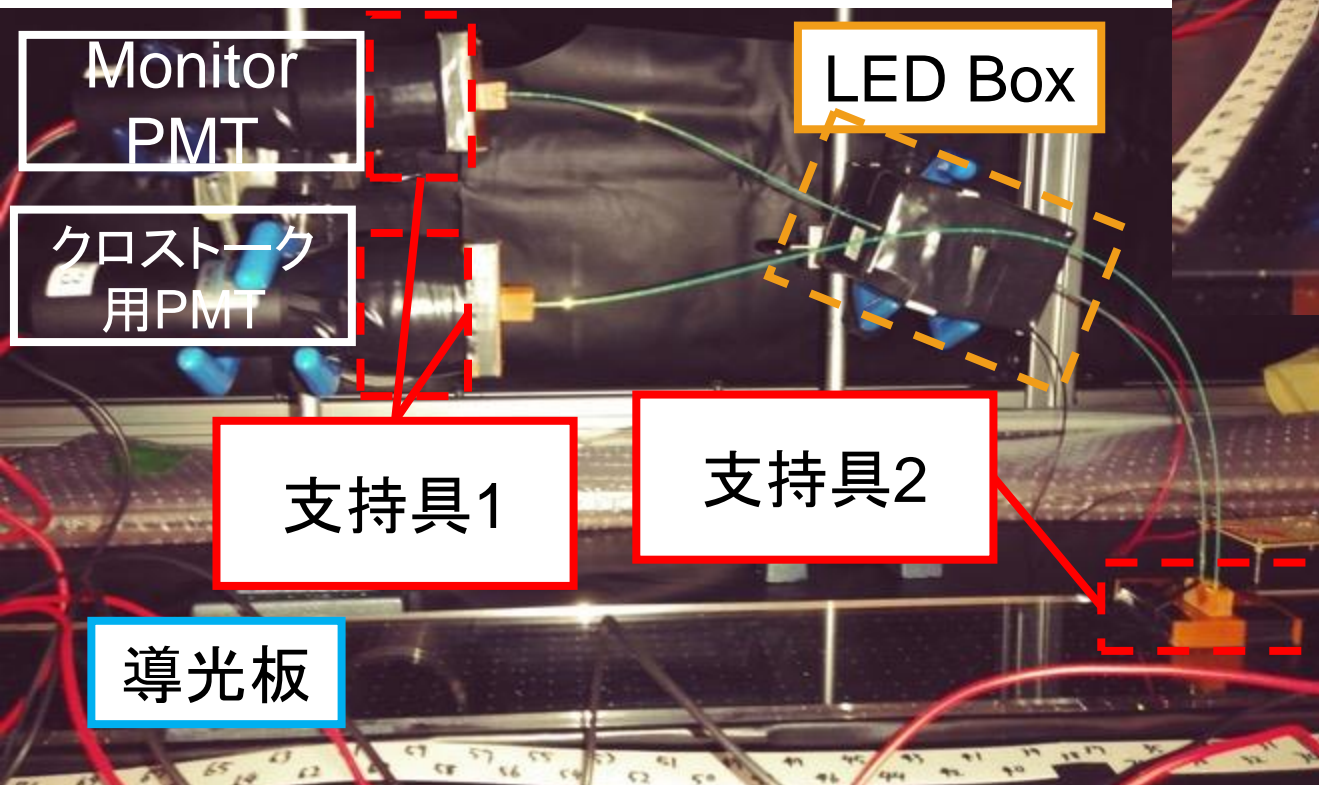


### 注記

1. Fiber1の両端に分配される光量を測定し、Monitor PMTで観測する光量から導光板に入射する光量に較正している
2. Fiberによる光量の減衰も考慮して評価
3. Monitor PMTの前にはNDフィルタ

# クロストーク測定時の セットアップ

PMT × 2  
使用したもの: LED Box  
支持具 × 2

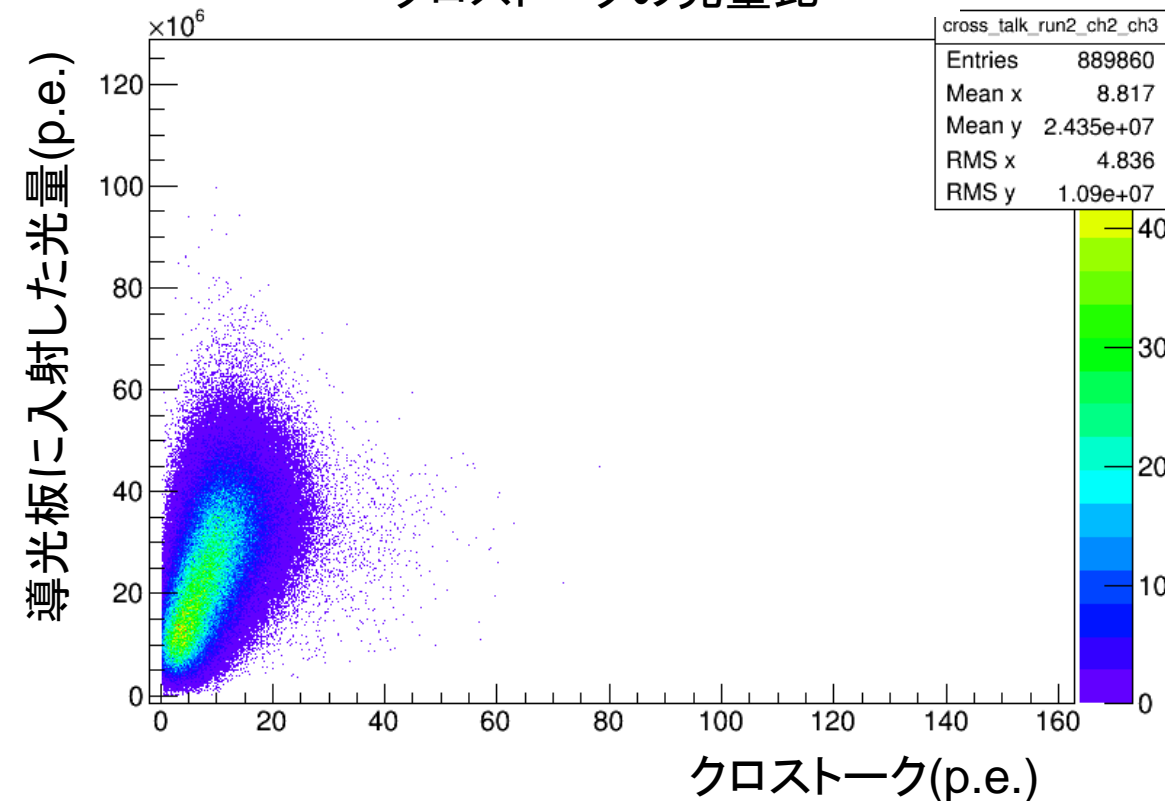


ファイバー間の  
クロストークを避けるた  
めに仕切りを設置

# クロストークの評価について

$$\text{クロストークの光量比} = \frac{\text{クロストーク}}{\text{導光板に入射した光量}}$$

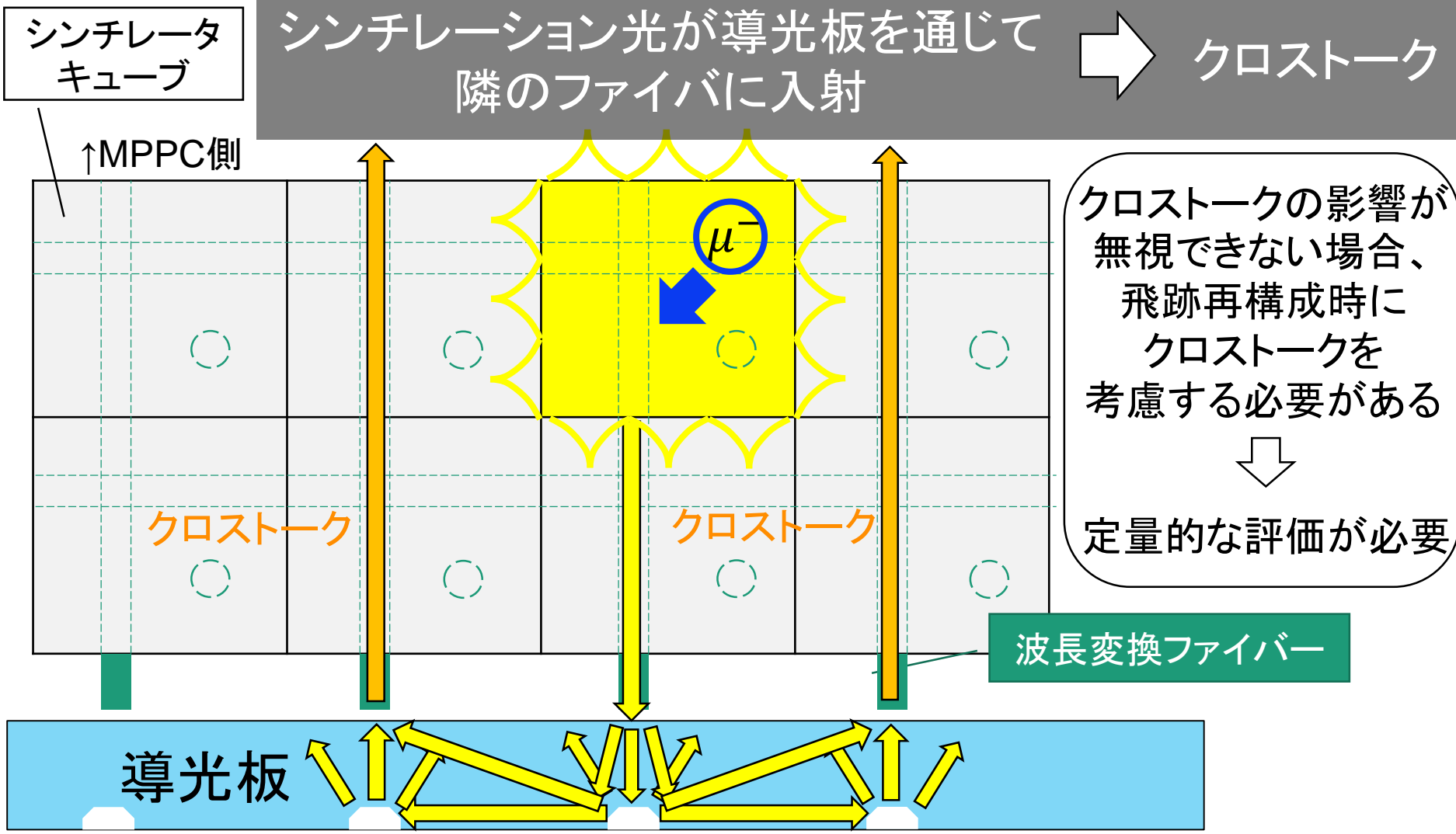
クロストークの光量比



クロストークの光量比  
 $(4.3 \pm 0.2) \times 10^{-7}$

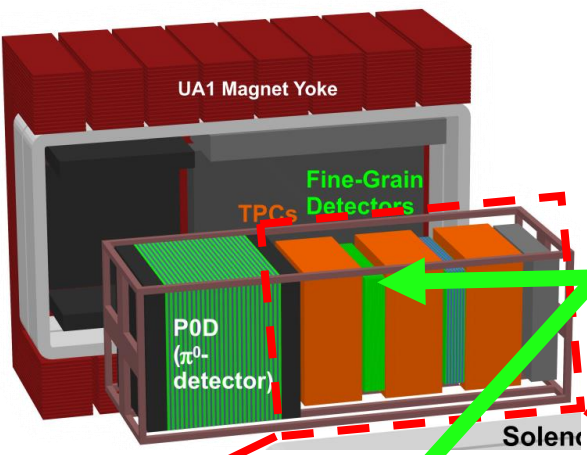
導光板による  
クロストークの影響は  
無視できるほど小さく  
トラッキング性能に  
影響を与えない

# 導光板によるクロストークの影響

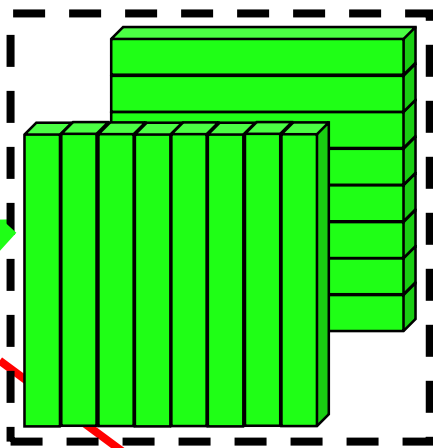




# 現在のND280の問題点



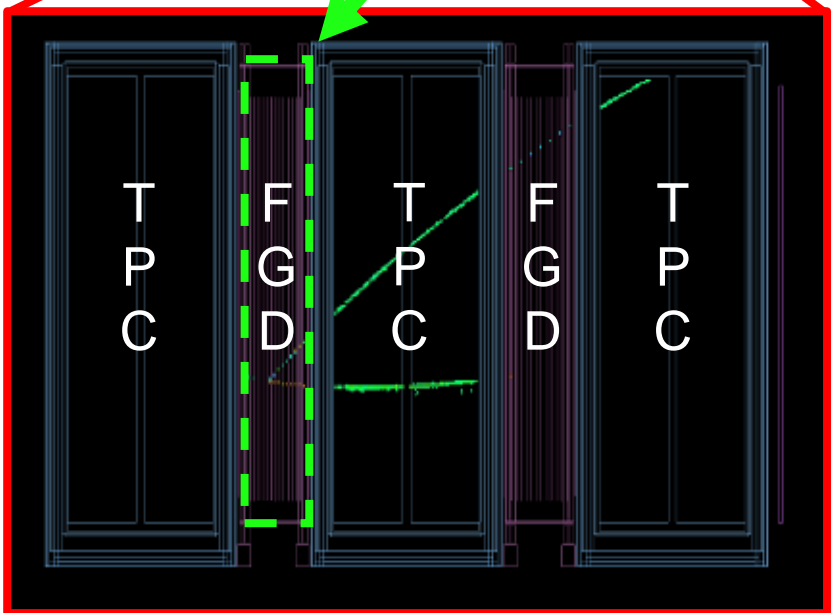
## FGD: ターゲット & 飛跡検出器



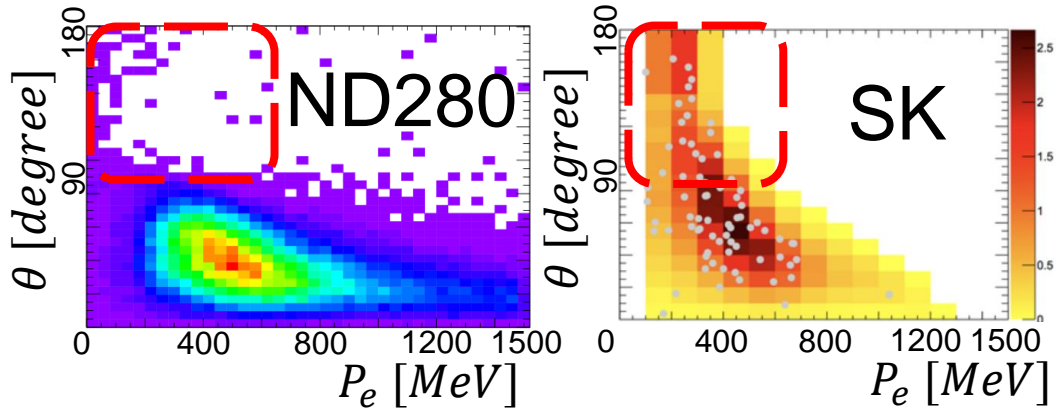
X方向のシンチレータを並べた層  
Y方向のシンチレータを並べた層  
→荷電粒子の通過位置がわかる

シンチレーターに沿った飛跡の位置分解能が悪い

ND280は大角度散乱に対するアクセプタンスが低い



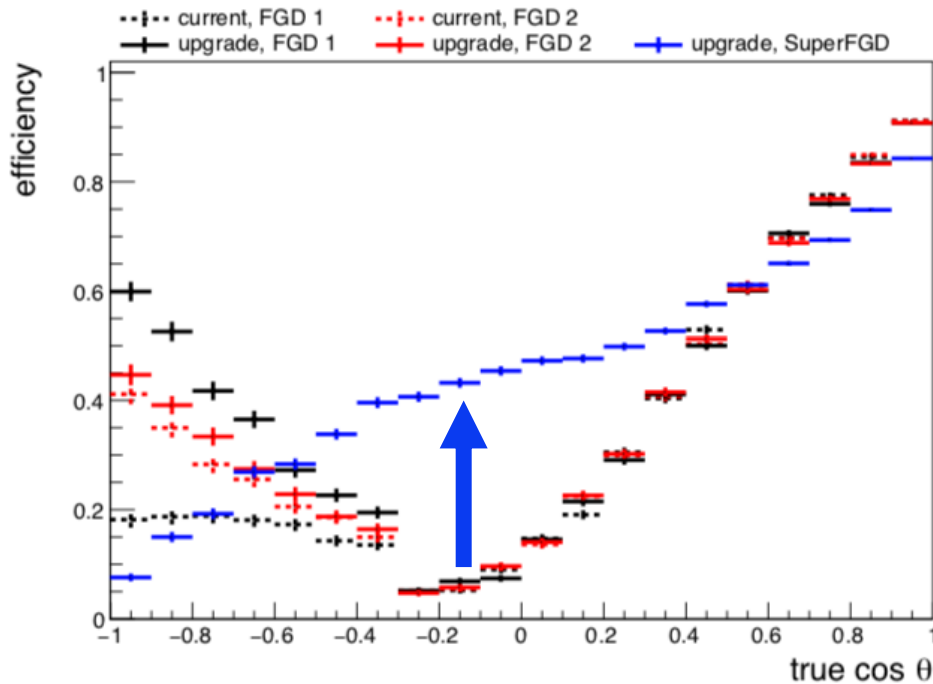
## 運動量角度分布



# ND280-Upgrade

## ND280で改善が見込まれる点

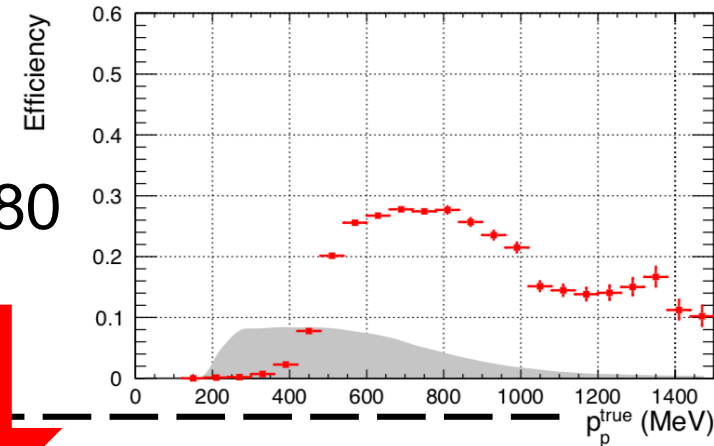
### 大角度の散乱の検出効率



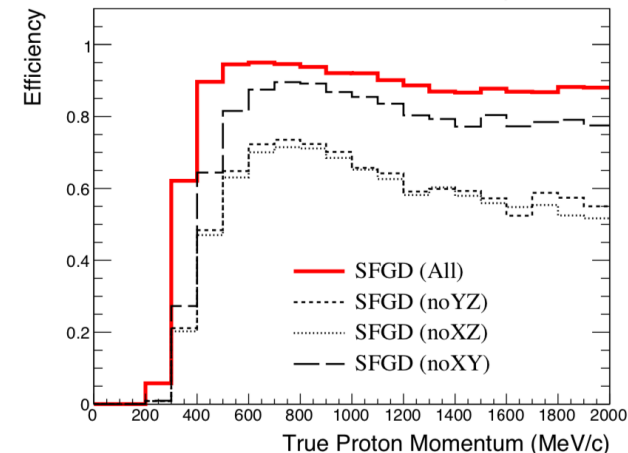
Super-FGDによりビームに対し $90^\circ$ 付近の検出効率が大幅に上昇

### 低運動量の荷電粒子の検出効率 例：陽子

ND280



ND280-Upgrade



# ND280とND280-Upgradeによる系統誤差の削減について

## FGDとSuper-FGDの運動量測定における系統誤差の角度依存性について

### ND280によるSKでの系統誤差の制約

Detector configuration	Momentum / $\cos\theta$	$0 < p < 0.5 \text{ GeV}/c$	$p > 0.5 \text{ GeV}/c$
FGD1, FGD2	$-1 < \cos\theta < -0.6$	20%	20%
	$-0.6 < \cos\theta < 0$	50%	60%
	$0 < \cos\theta < +0.6$	30%	50%
	$+0.6 < \cos\theta < +1$	9%	2.5%
SD	$-1 < \cos\theta < -0.6$	9%	2.5%
	$-0.6 < \cos\theta < 0$	9%	2.5%
	$0 < \cos\theta < +0.6$	9%	2.5%
	$+0.6 < \cos\theta < +1$	9%	2.5%

Source of uncertainty		$\nu_e$ CCQE-like $\delta N/N$ (%)	$\nu_\mu$ $\delta N/N$ (%)	$\nu_e$ CC1 $\pi^+$ $\delta N/N$ (%)
Flux + cross-section (constrained by ND280)	Current ND280	2.2	2.3	2.1
	Upgrade ND280	1.8	1.9	1.4

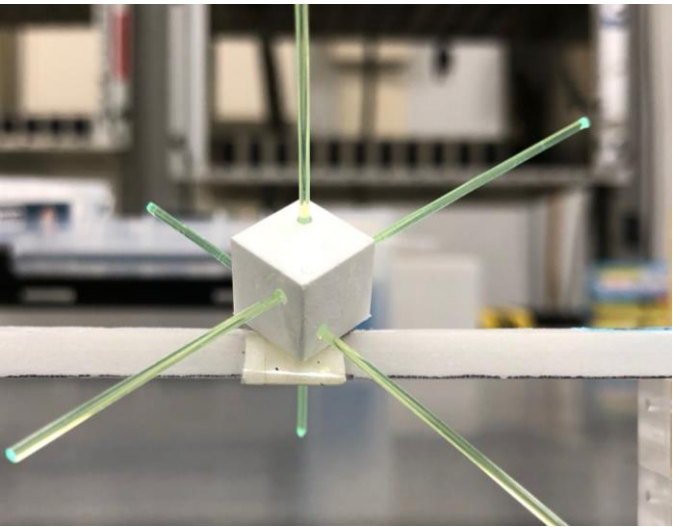
Source of uncertainty	$\nu_e$ CCQE-like $\delta N/N$	$\nu_\mu$ $\delta N/N$	$\nu_e$ CC1 $\pi^+$ $\delta N/N$
Flux (w/ ND280 constraint)	3.7%	3.6%	3.6%
Cross section (w/ ND280 constraint)	5.1%	4.0%	4.9%
Flux+cross-section (w/o ND280 constraint)	11.3%	10.8%	16.4%
(w/ ND280 constraint)	4.2%	2.9%	5.0%
FSI+SI+PN at SK	2.5%	1.5%	10.5%
SK detector	2.4%	3.9%	9.3%
All (w/o ND280 constraint)	12.7%	12.0%	21.9%
(w/ ND280 constraint)	5.5%	5.1%	14.8%

Super-FGDでは4 $\pi$ のアクセプタンスを持つため、大角度散乱による系統誤差が削減されているのがわかる

ND280での測定により、SKでのFluxとニュートリノ反応に制限をかけている

ND280-Upgradeにより、ND280の系統誤差を20~30%削減することが出来る

# Scintillator Cubes & WLS fiber



Scintillator Cubes:  
UNIPLAST Co.(Russia)が製作  
材料

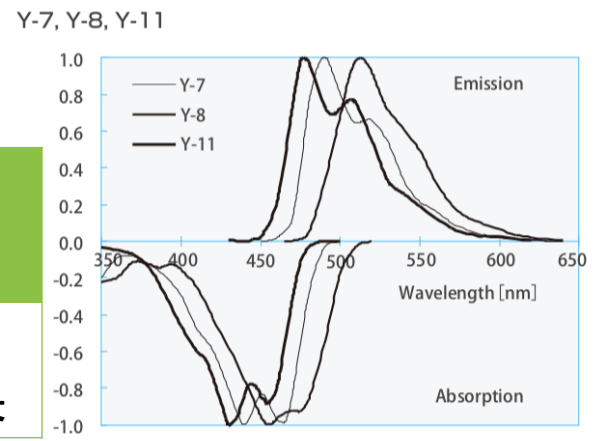
ポリエチレン+PTP(1.5%)...①  
+POPOP(0.01%)...②

①: p-テルフェニル  
②: 1,4-ビス-2-(5-フェニルオキサゾリル)  
ベンゼン

株式会社 クラレ  
波長変換ファイバー: Y11(200)

銘柄	発光		減衰時間 [ns]	減衰 長[m]	特徴
	色	ピーク[nm]			
Y-11(200)	緑	476	430	>3.5	高発光 高減衰長

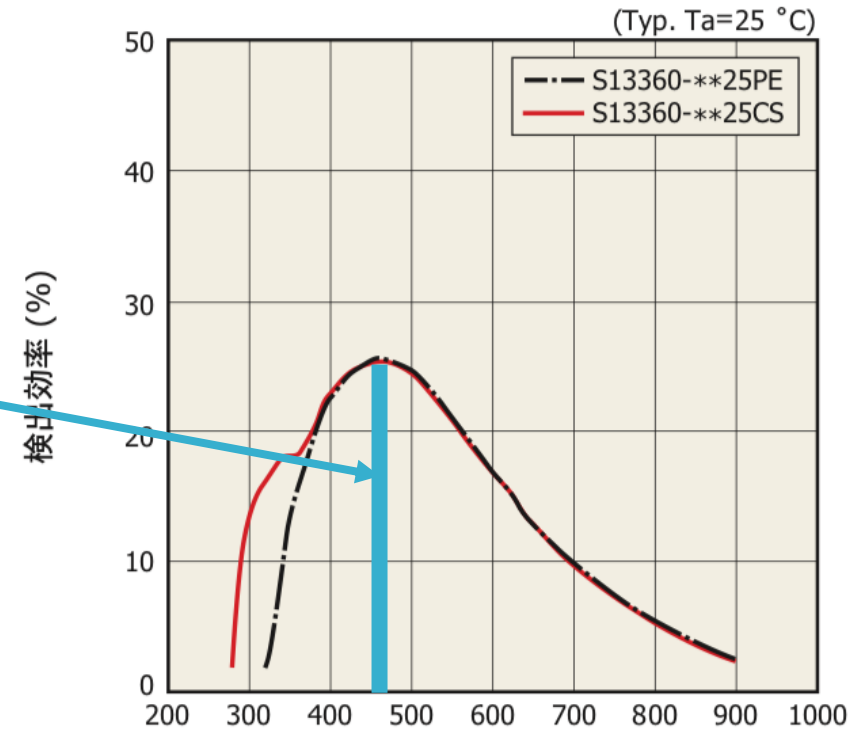
Absorption and Emission Spectra .....



# MPPCについて

## ❖ 検出効率-波長 (代表例)

ピクセルピッチ: 25  $\mu\text{m}$



浜松ホトニクス株式会社  
S13360-1325PEを使用

波長変換ファイバーの  
発光波長のピーク476nm

## ❖ セレクションガイド

型名	ピクセルピッチ ( $\mu\text{m}$ )	有効受光面サイズ (mm)	ピクセル数	パッケージ	開口率 (%)
S13360-1325CS	25	1.3 × 1.3	2668	セラミック	47
S13360-1325PE				表面実装型	
S13360-3025CS		3.0 × 3.0	14400	セラミック	
S13360-3025PE				表面実装型	
S13360-6025CS		6.0 × 6.0	57600	セラミック	
S13360-6025PE				表面実装型	