

CTA計画用SiPMの光検出効率向上に向けた レンズアレイの開発

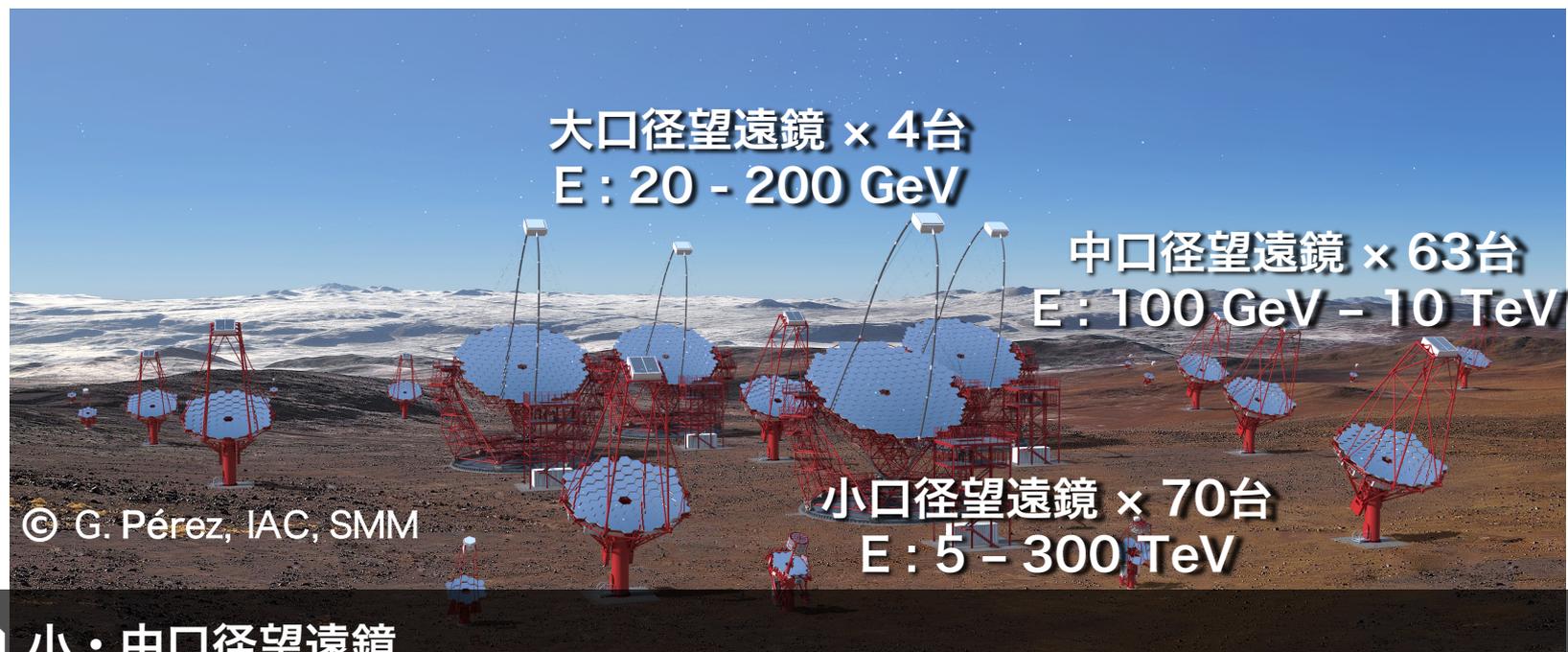
名大 ISEE

朝野彰, 奥村暁, 田島宏康, 他 CTA Consortium

2017年3月20日 日本物理学会

Cherenkov Telescope Array (CTA)の概要

- ❖ ガンマ線と大気との相互作用に起因するチェレンコフ光を観測
- ❖ チェレンコフ光の光量は入射ガンマ線のエネルギーに比例する
→ ガンマ線検出感度の向上には**高い光検出効率**が重要となる
- ❖ 高エネルギーガンマ線の到来頻度はエネルギーの冪乗に従って減衰する



□ 小・中口径望遠鏡

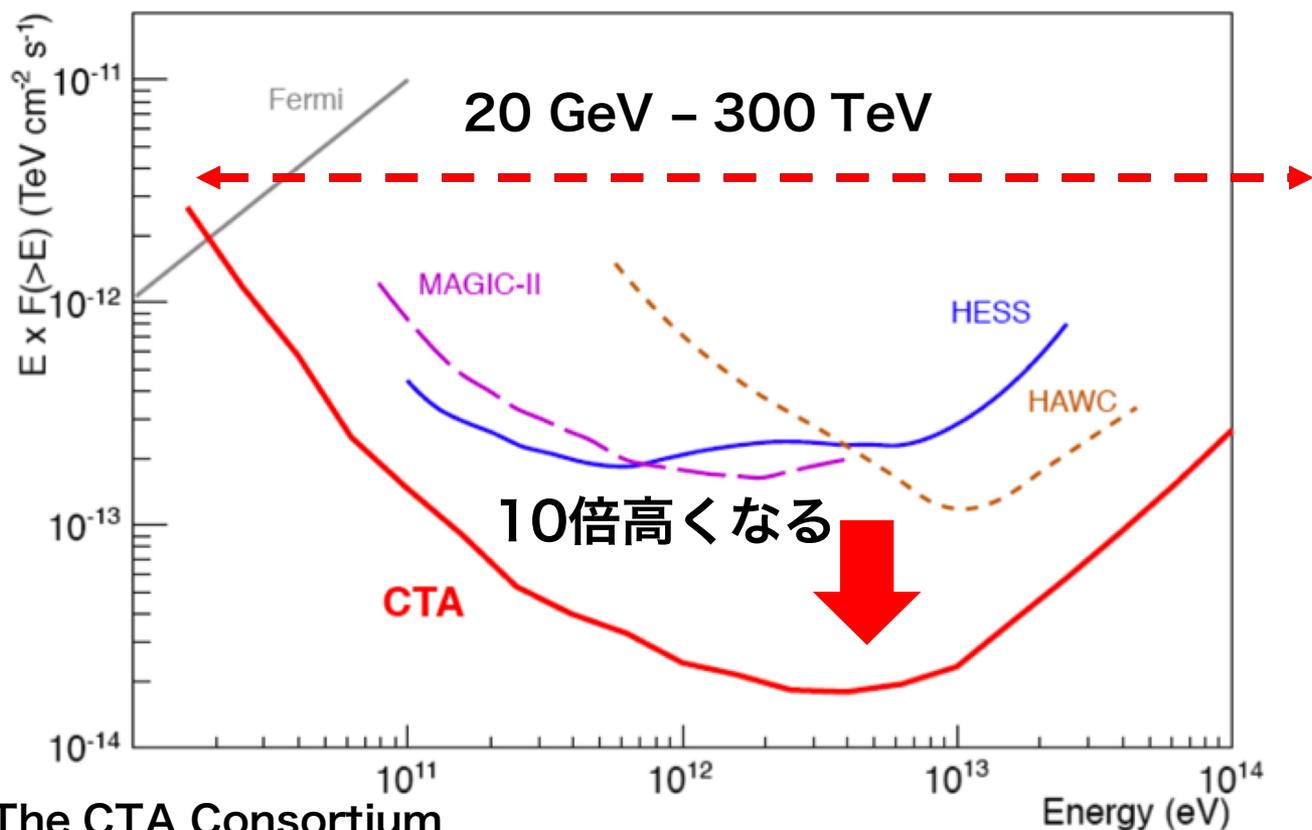
多数の望遠鏡を設置することで高エネルギーガンマ線観測を目指す

→ 設置台数を増やすために **望遠鏡1台あたりの製作費低減** が重要となる

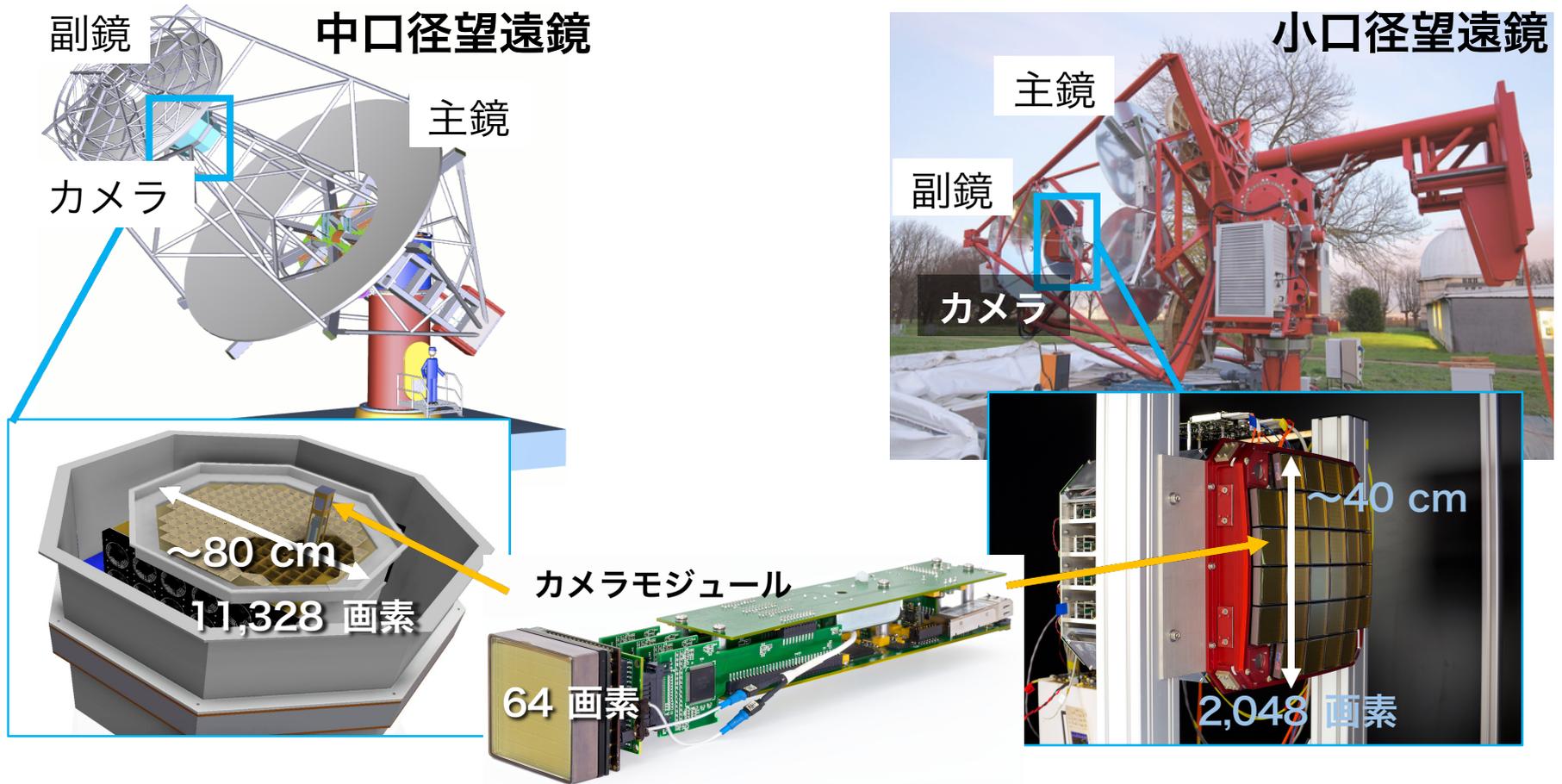
CTAの感度

- ❖ 20 GeV – 300 TeVの広い観測エネルギー帯域を実現
- ❖ 従来より1桁以上高いガンマ線源検出感度を目指す

ガンマ線検出感度曲線



焦点面カメラに使用するSiPM

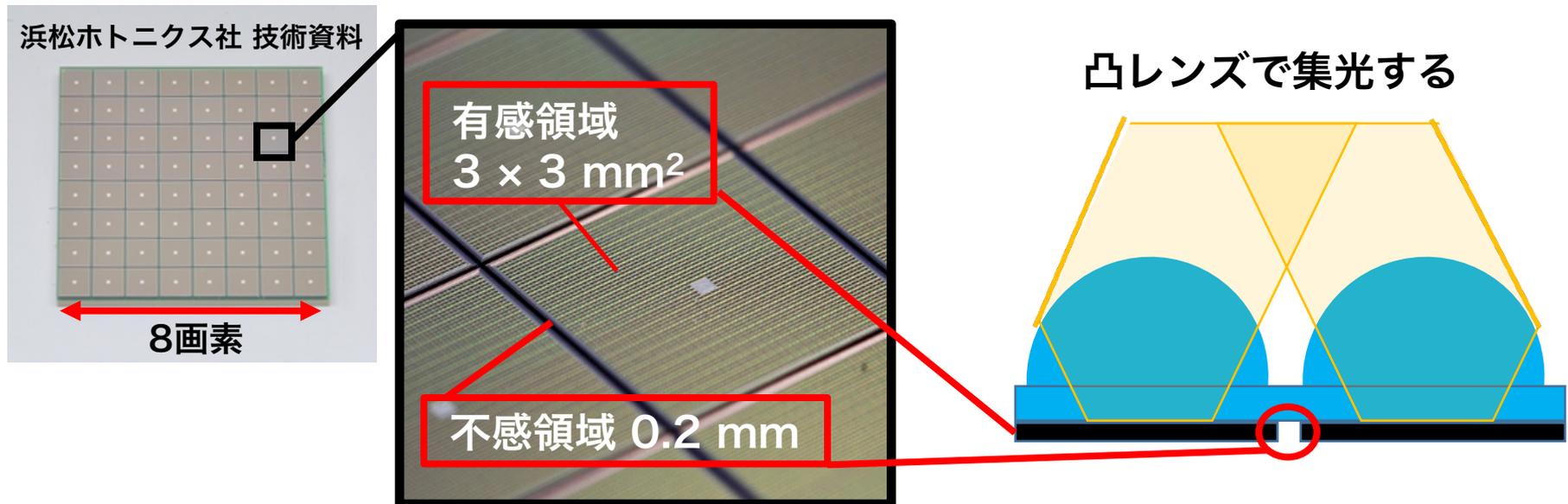


- ❖ 光学系に副鏡を採用することで焦点面カメラを小型化
- ❖ 焦点面カメラには半導体光電子増倍素子 (SiPM)を採用予定
→ 光検出効率がさらに向上する手法を検討

SiPM用レンズアレイ開発の目的

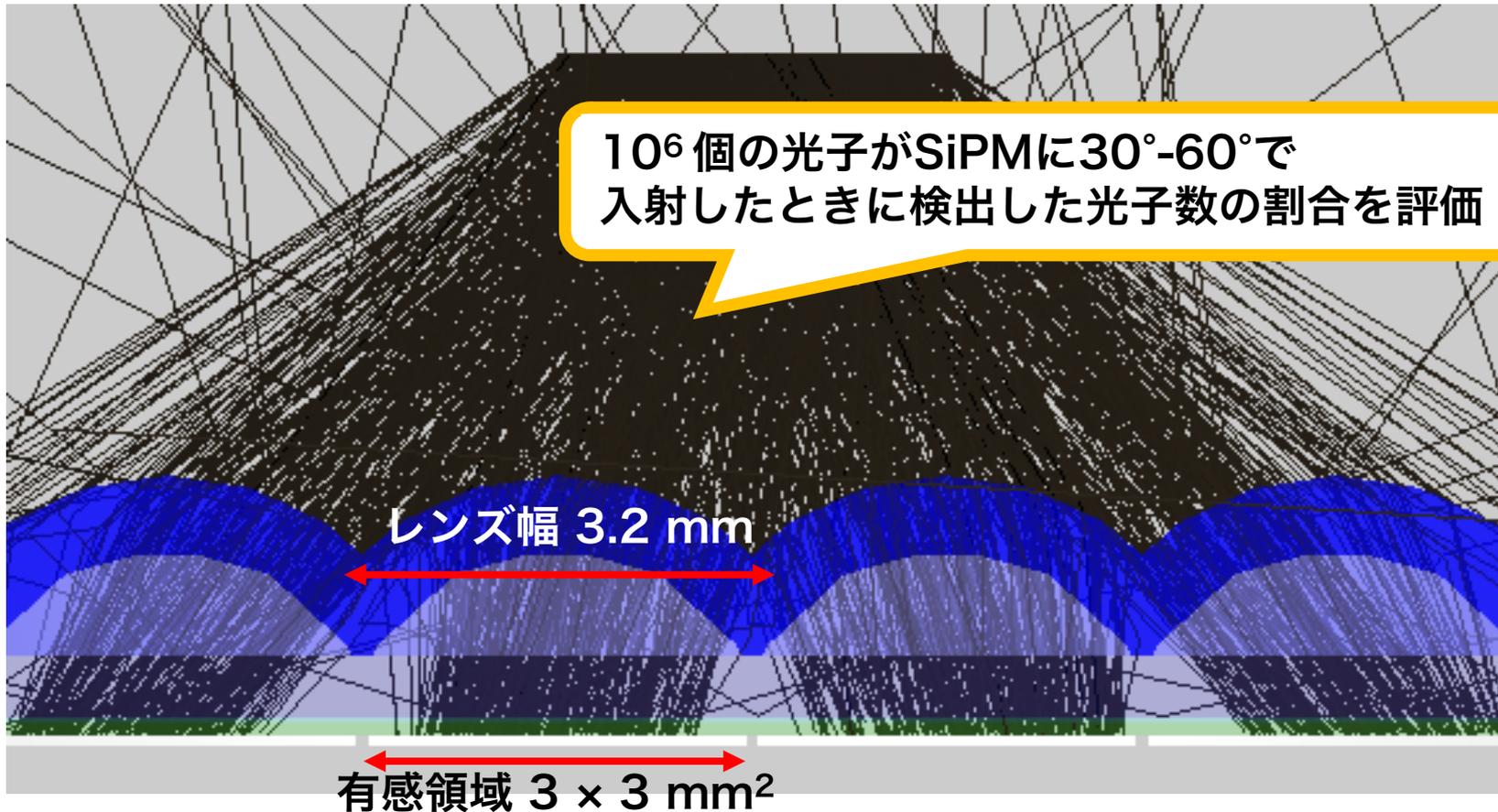
- ❖ アレイ型SiPMには不感領域が存在する
- ❖ 入射チェレンコフ光の10 %程度は不感領域に落ちる

不感領域に起因するチェレンコフ光の損失を最小限に抑えるために
SiPM表面にレンズを多数並べて（レンズアレイ）、有感領域へ集光する



SiPM用レンズアレイの光学シミュレーション

光線追跡ソフト ROBASTを用いたレンズアレイの光学シミュレーション

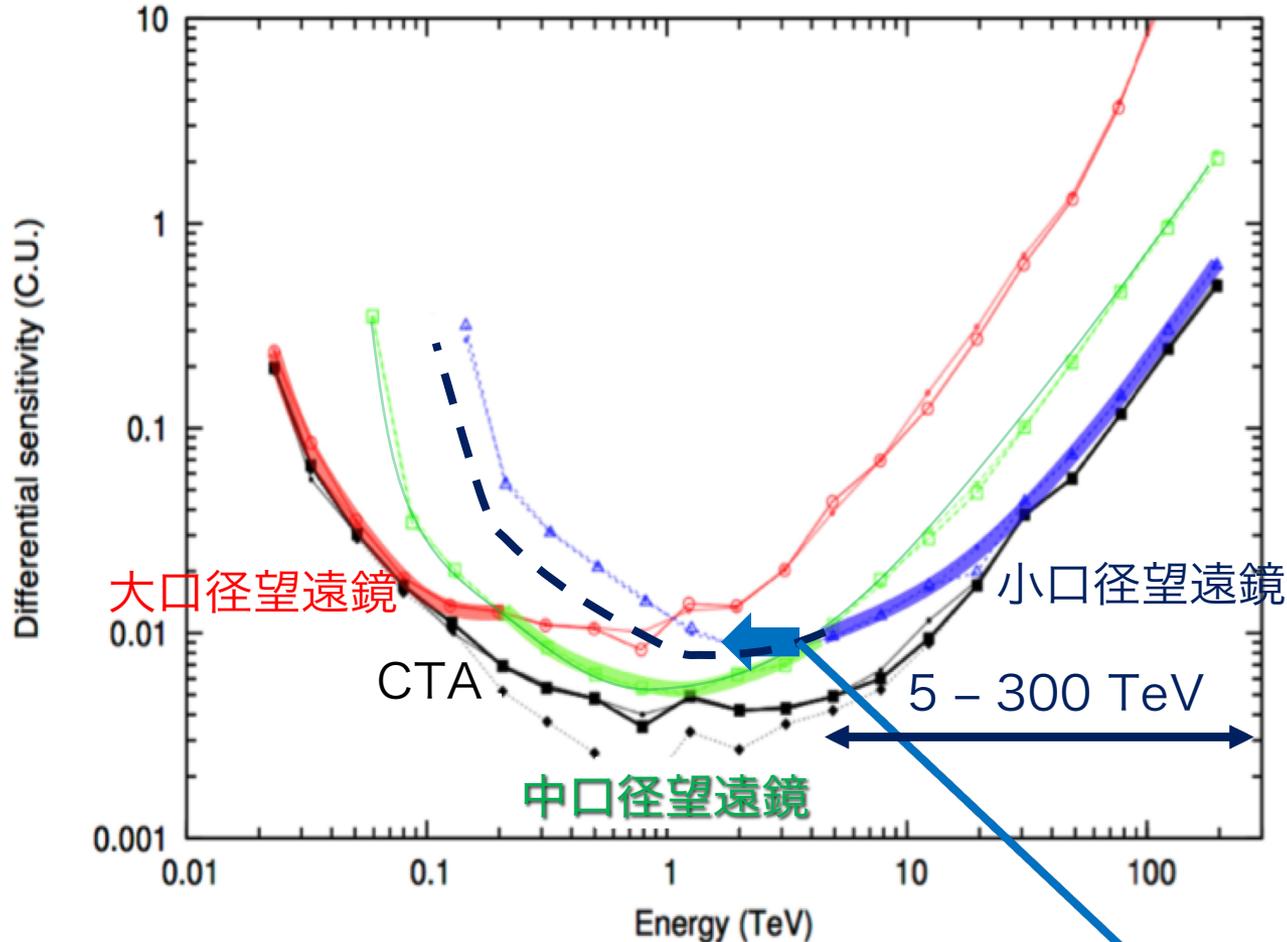


光検出効率が15 %程度向上すると期待される

SiPM用レンズアレイ開発の効果

CTAのガンマ線検出感度

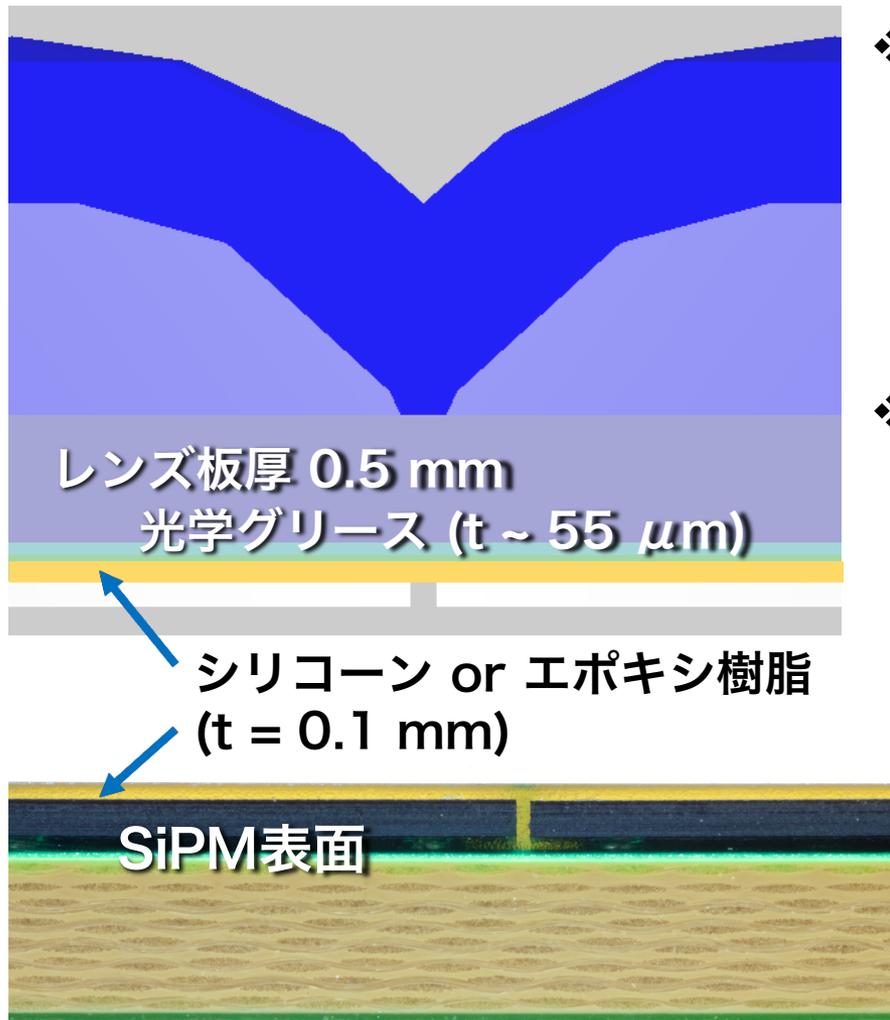
© The CTA Consortium



検出可能なガンマ線エネルギー下限付近でさらなるガンマ線検出感度向上が期待できる

レンズアレイの光学シミュレーション

光学素材の物理特性、レンズアレイ成形用金型の物理的制約を組み込んだ
レンズアレイの光学シミュレーションをする



❖ 光学素材の物理特性

- 光学グリース (BC-630) の透過率
- SiPM表面 シリコン or エポキシ樹脂の透過率
- 紫外透過ガラスの内部吸収長

❖ 金型の物理的制約

- 成形可能なレンズ板厚
- レンズアレイの製造誤差

既知の物理特性

- 光学グリース (BC-630) の透過率
- SiPM表面樹脂の透過率

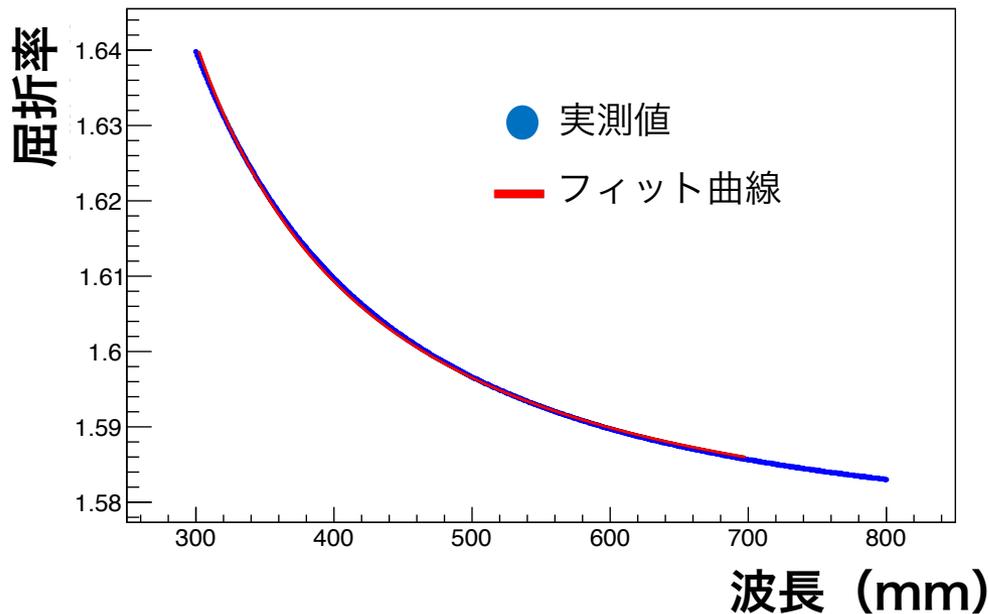
紫外透過ガラスの基礎特性

❖ 紫外透過ガラス UVC-200B

- 紫外光を透過し、紫外光照射による透過率劣化が少ない
 - 安価であるため、大量生産に適する
- 金型成形に適する新素材であり、屈折率の実測値がない

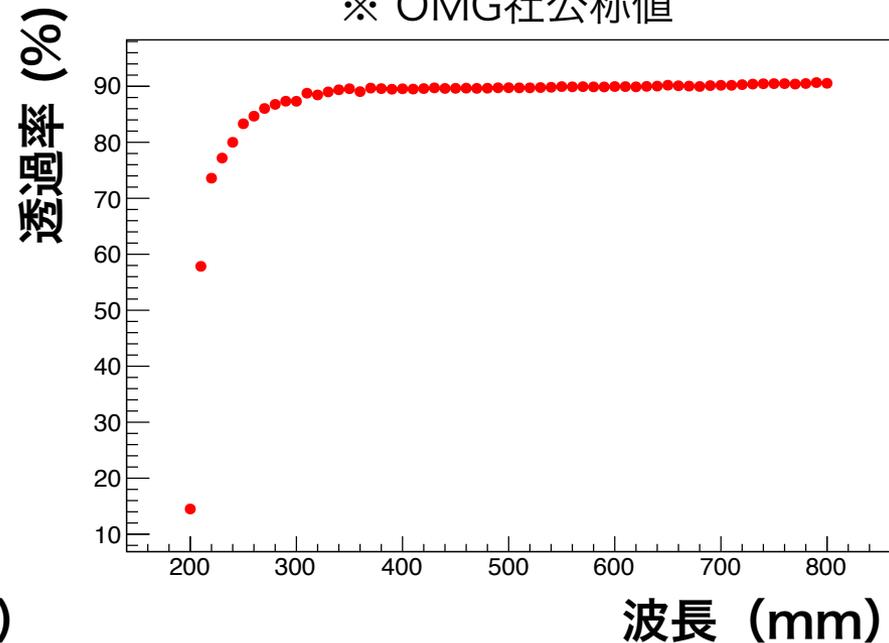
屈折率実測値

※ 測定器：エリプソメータ FE-5000



透過率 (t = 1 mm)

※ OMG社公称値



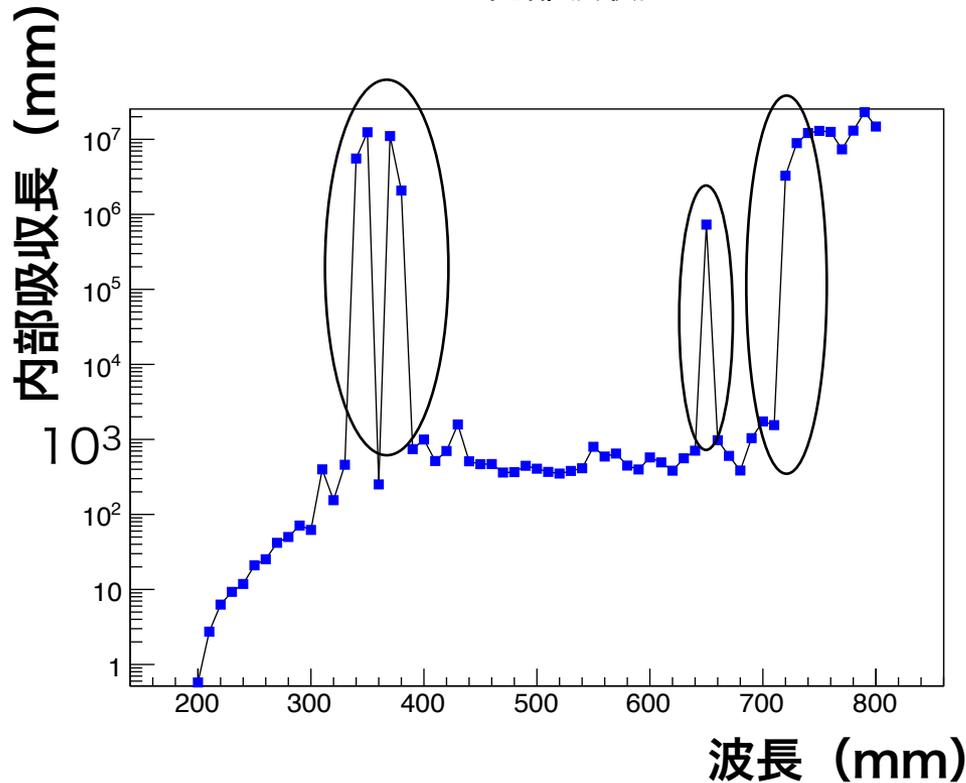
上記測定結果より UVC-200B の内部吸収長の波長連続分布を推定する

紫外透過ガラスの内部吸収長

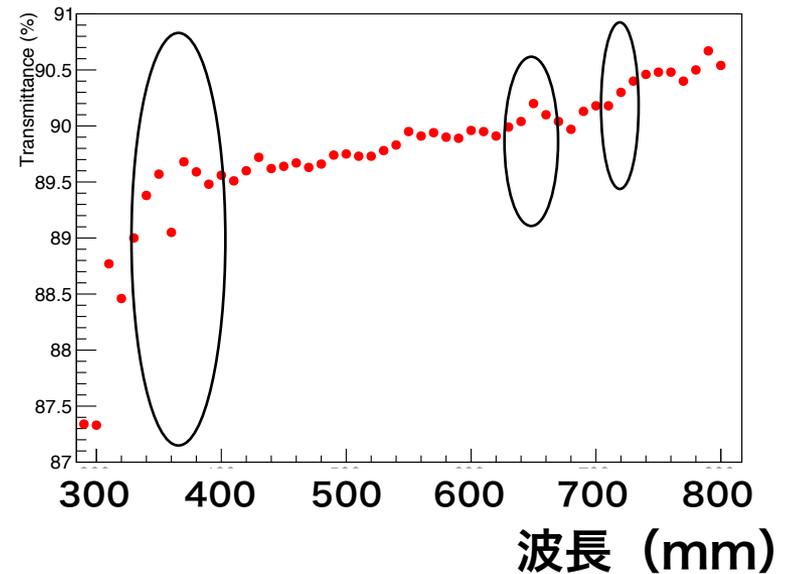
$$\text{透過率} = \frac{A(1 - R)^2}{(1 - A^2R^2)}$$

UVC-200Bの透過率と反射率R (屈折率から計算)
より内部吸収長を推定する

$$A = \exp\left[-\frac{\text{UVC-200Bの厚み 1 mm}}{\text{UVC-200Bの内部吸収長}}\right]$$



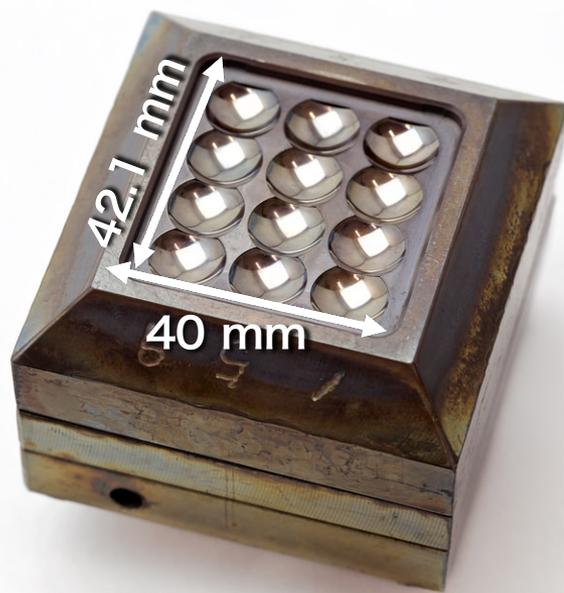
特定波長における透過率の不連続点
→シミュレーションの際には無視する



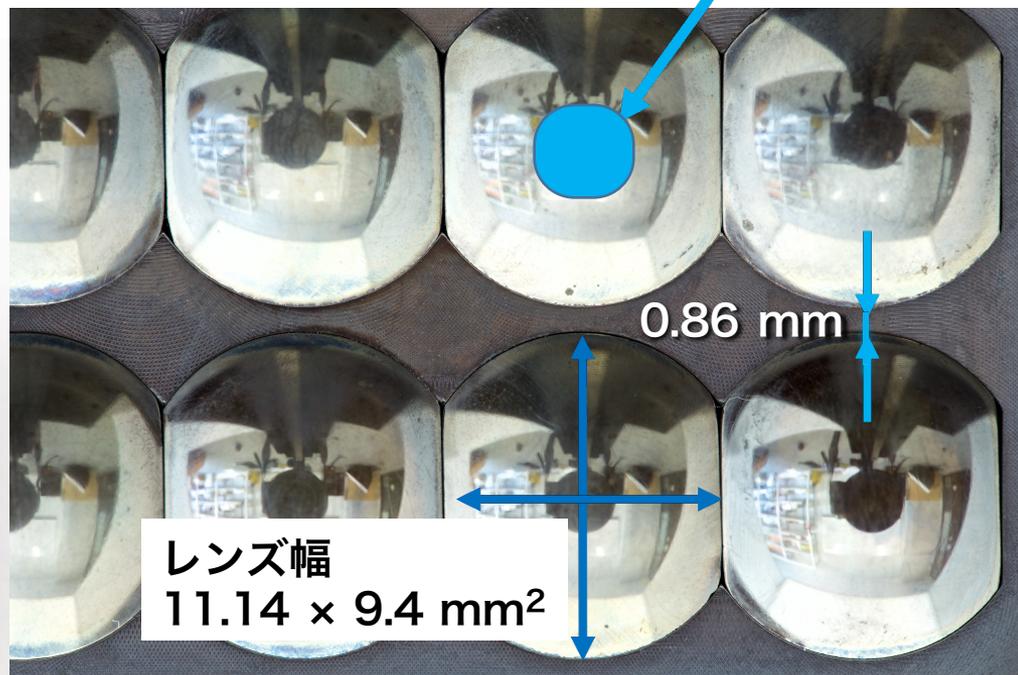
UVC-200B の内部吸収長を光学シミュレーションに組み込む

既存金型によるレンズアレイ成形検証

- ❖ UVC-200B製のレンズアレイ成形は前例がない
 - レンズアレイ製作（レンズ幅 3.2 mm）の前段階として既存金型でレンズアレイ成形の検証をする



レンズ幅 $3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$



既存金型によるレンズアレイ成形；検証結果

既存金型によりUVC-200B製のレンズアレイ成形に成功した



金型と成形品の各球面形状を測定し、製造誤差を評価する

既存金型・成形品の球面形状；測定方法

❖ 測定方法

非接触三次元測定器を用いて、金型・成形品の球面形状を二次元スキャンする

❖ 測定条件

| | X方向 | Y方向 |
|----------|-----|-----|
| 測定可能傾斜角度 | 20° | 15° |
| 成形品の傾斜角度 | 22° | 18° |

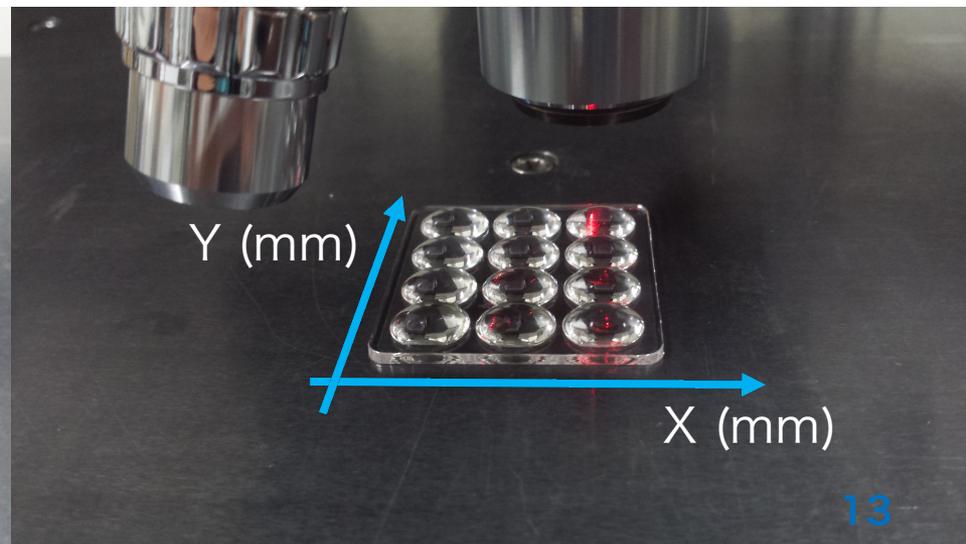


成形品は各球面部分のみを二次元スキャン

金型

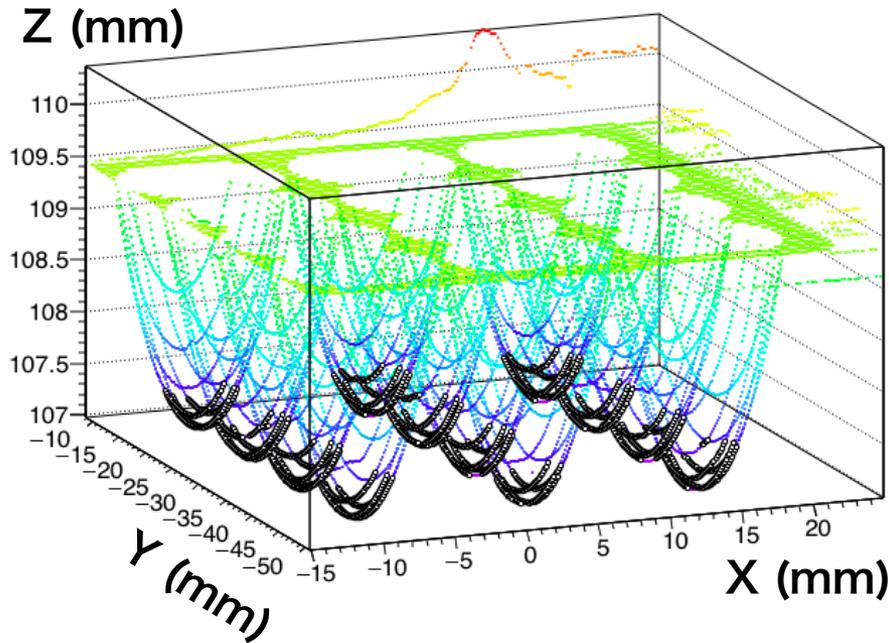


成形品

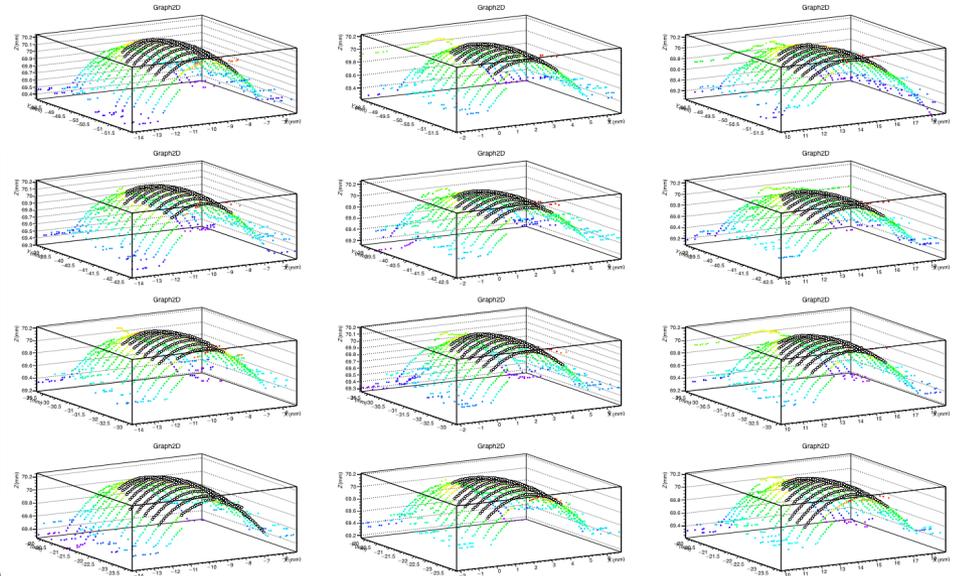


既存金型・射出成形品の球面形状；測定結果

金型



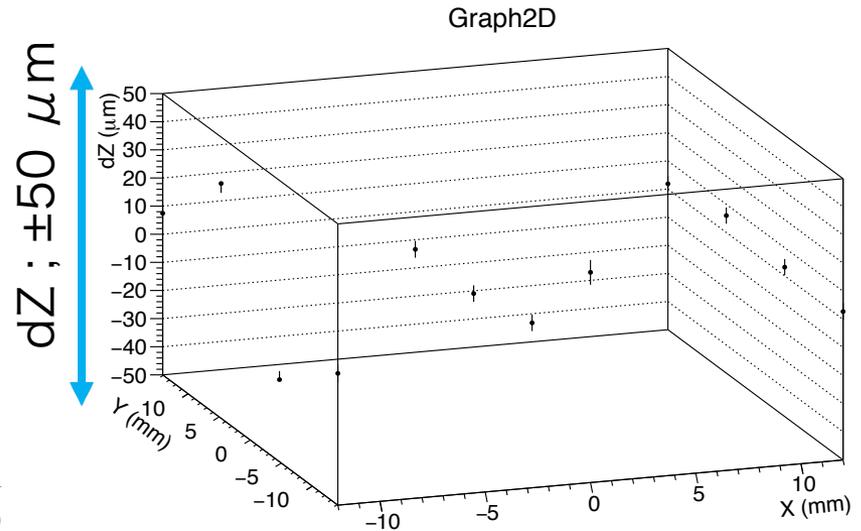
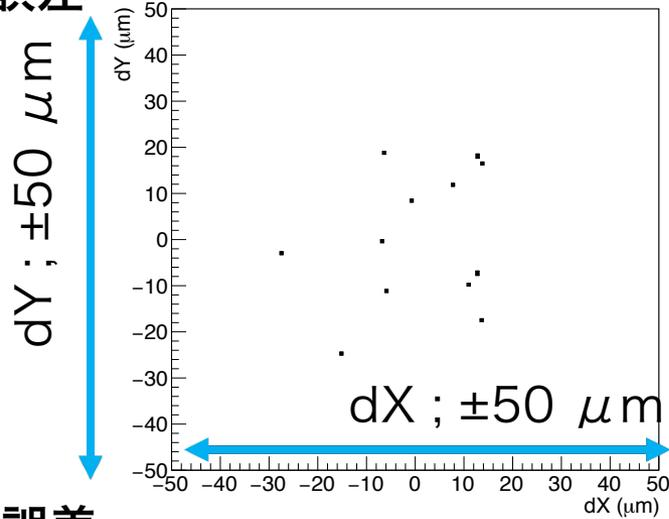
成形品



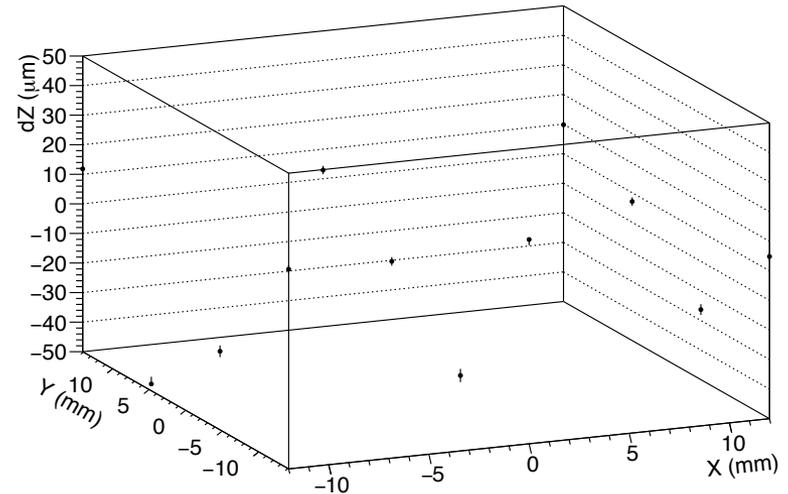
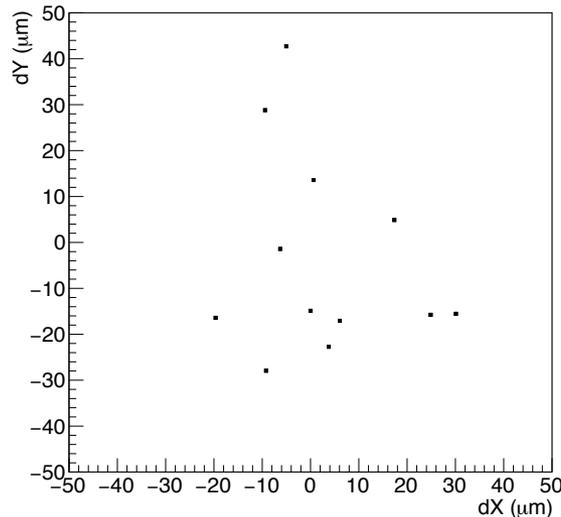
- ❖ 12個の球面について球面フィットをして、金型・成形品の球面中心を各々求める
- ❖ 理想球面中心に対する残差を計算し、製造誤差 dX , dY , dZ を求める

既存金型・成形品の製造誤差評価

金型の製造誤差



成形品の製造誤差



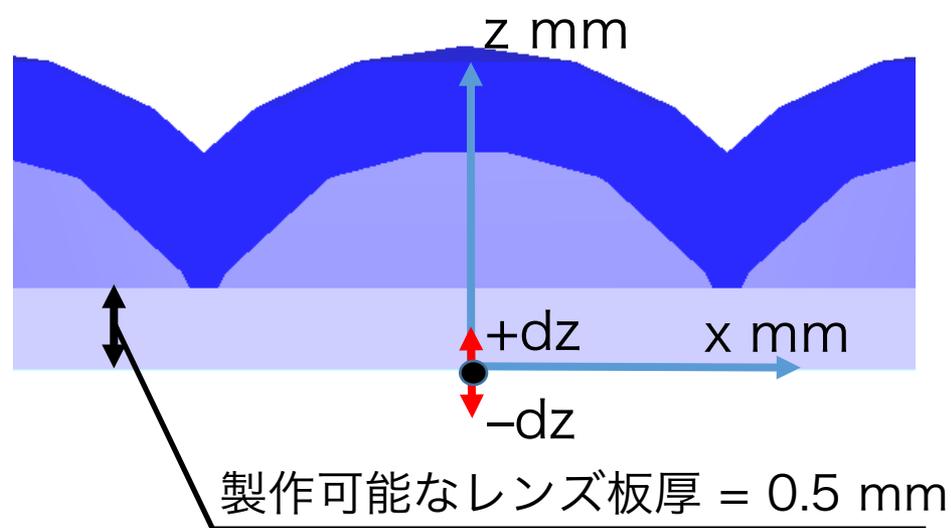
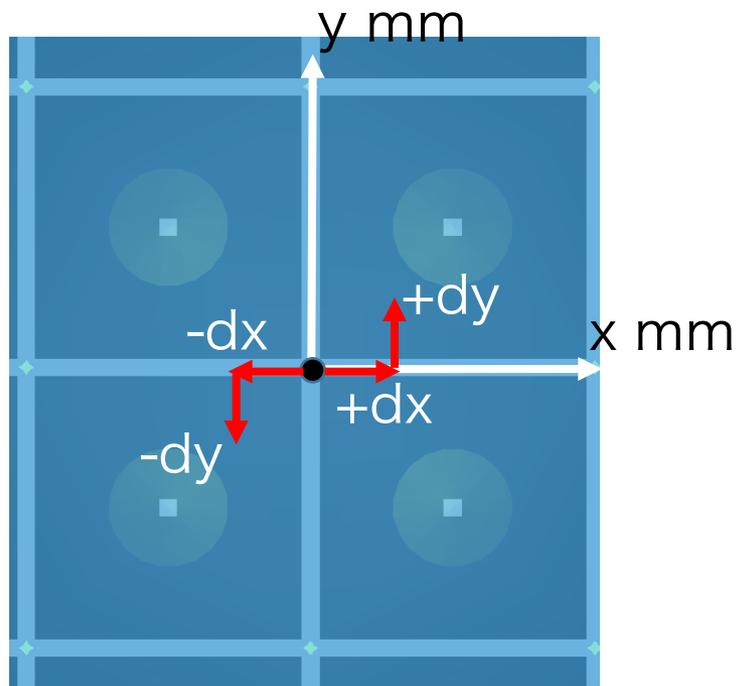
金型・成形品の製造誤差は測定精度・フィット精度を含めて最大約 $\pm 50 \mu m$

レンズアレイの製造公差解析

公差解析

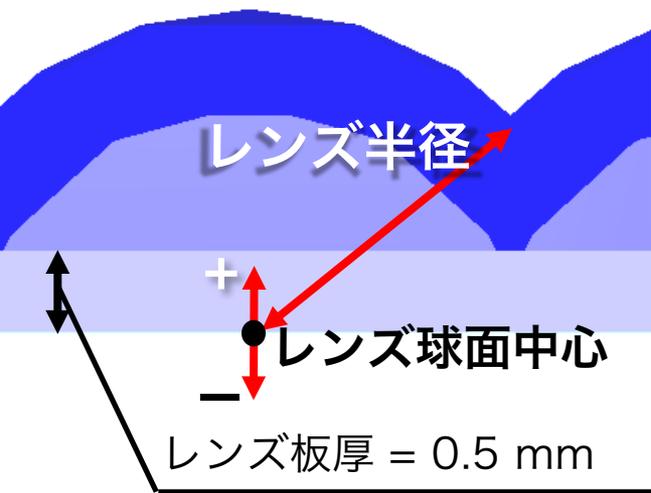
- ❖ 各レンズ中心位置の製造誤差 dx , dy , dz を光学シミュレーションに組み込む
- ❖ 理想のレンズ板厚 = 0.1 mm での最大光検出効率に対する光検出効率劣化を求める

| 製造誤差 | | |
|-----------|-----------|-----------|
| dx (mm) | dy (mm) | dz (mm) |
| +0.1 | +0.1 | +0.15 |
| +0.2 | +0.2 | +0.15 |
| -0.1 | -0.1 | -0.15 |
| -0.2 | -0.2 | -0.15 |

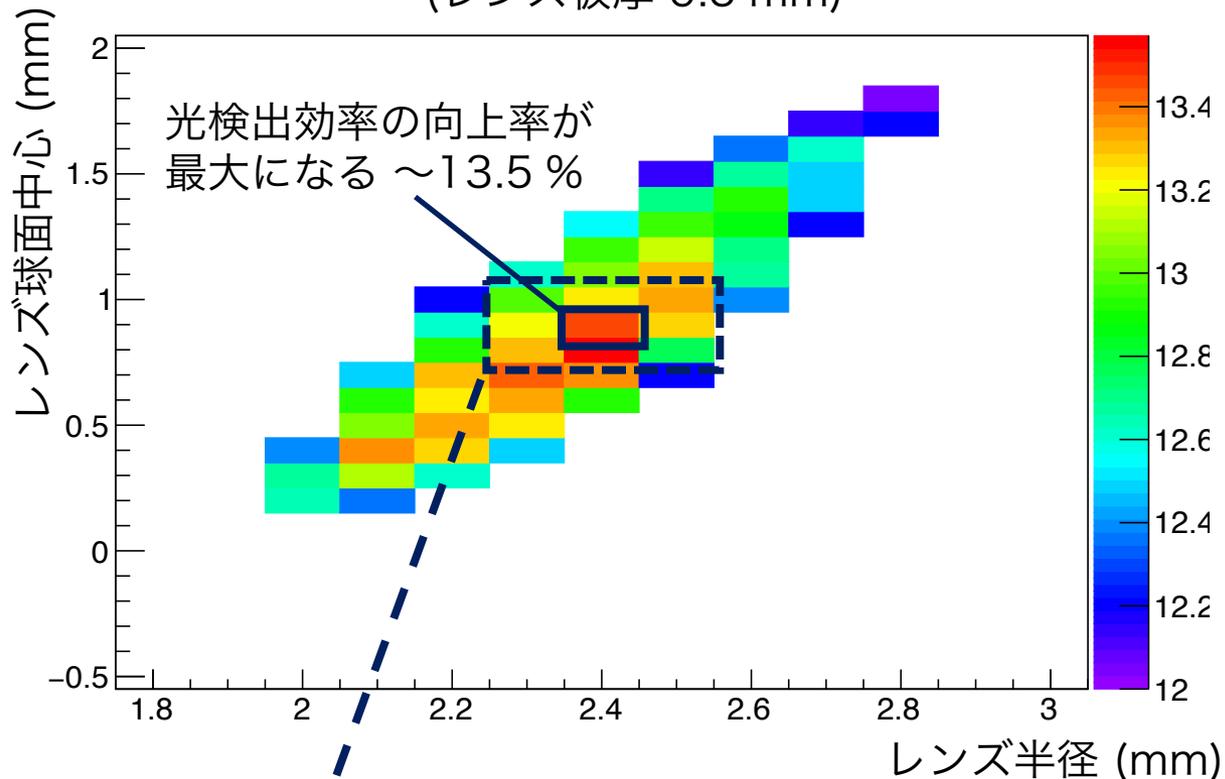


レンズアレイの製造公差解析

公差解析



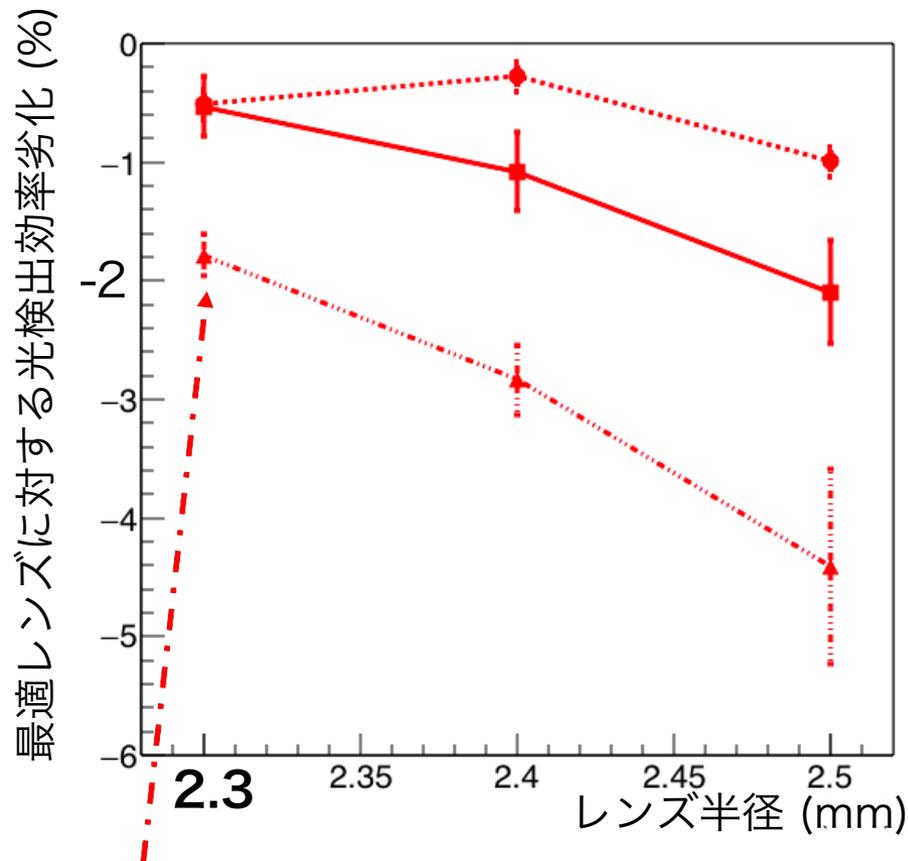
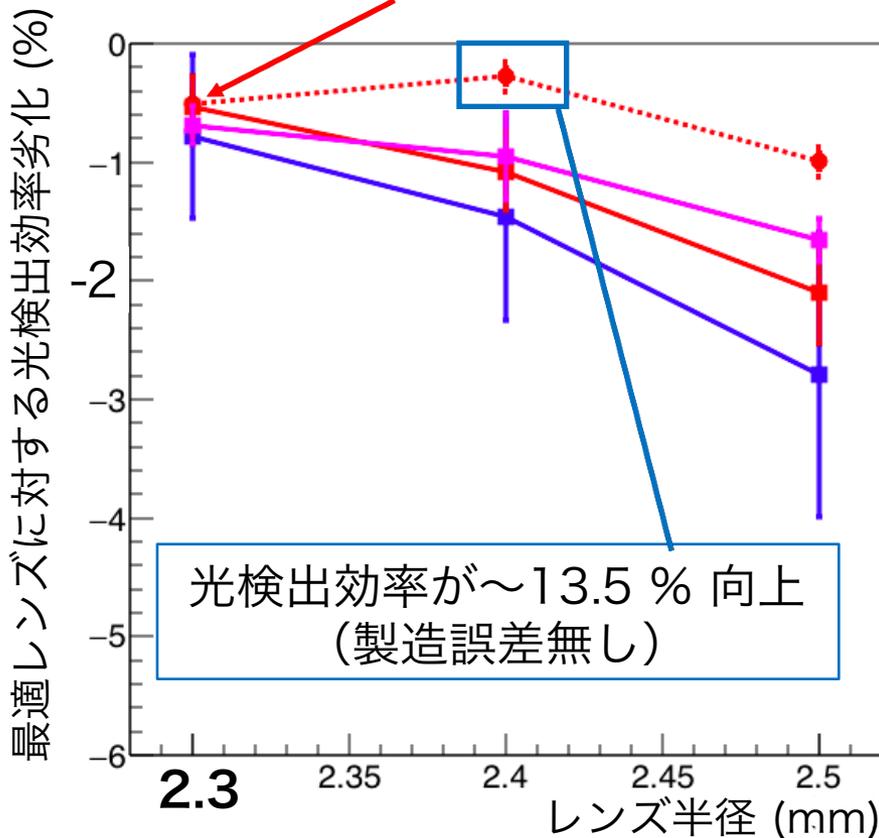
レンズ無しに対する光検出効率の向上率
(レンズ板厚 0.5 mm)



点線枠内の9点で公差解析をしてレンズの形状最終化をする

レンズアレイの製造公差解析：結果

- レンズ半径 = 2.3 mm, レンズ球面中心 = -0.8 mm のレンズアレイ
レンズ球面中心 = -0.8 mm, 製造誤差 ± 0.1 mm \rightarrow 製造誤差無しと同等性能

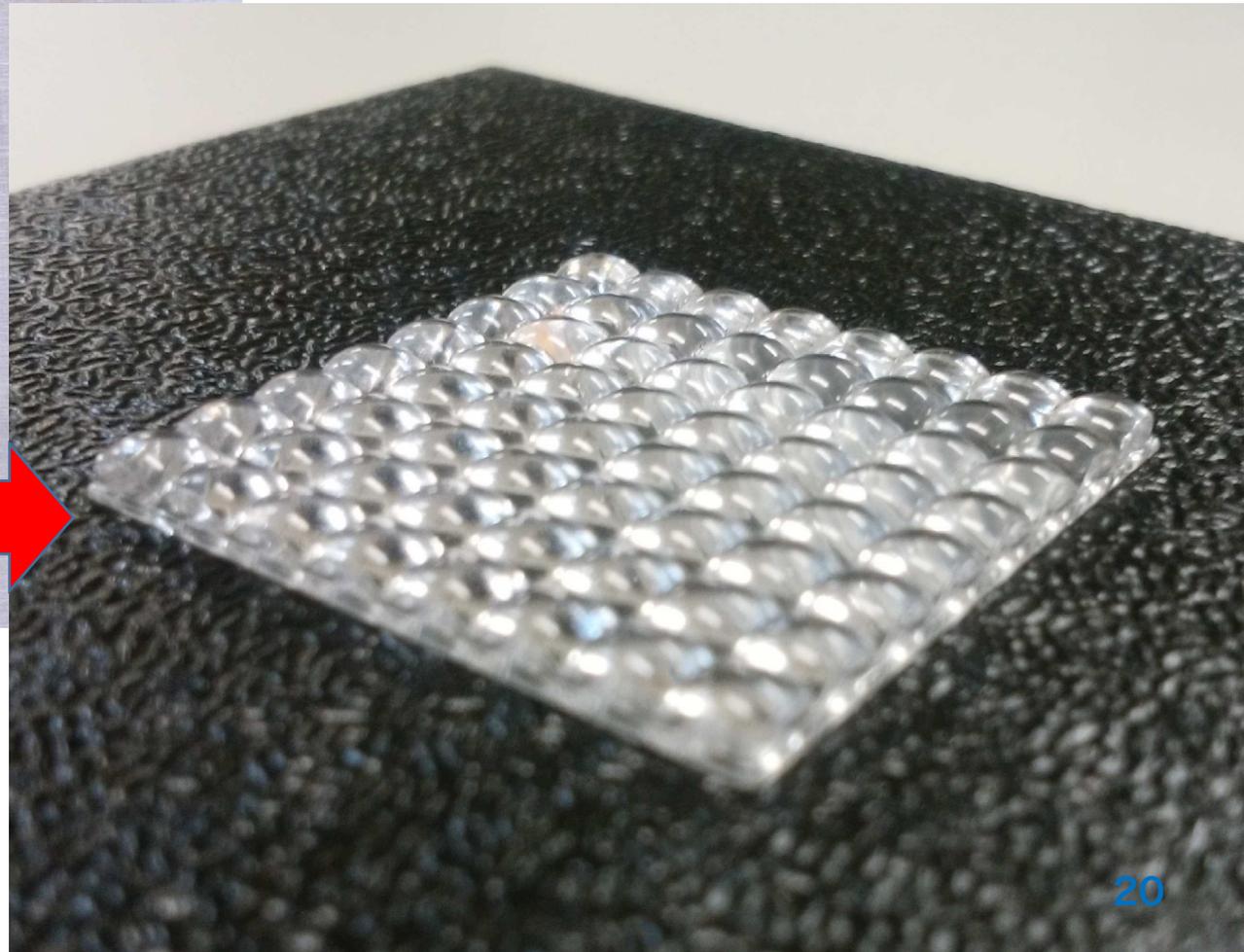
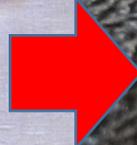
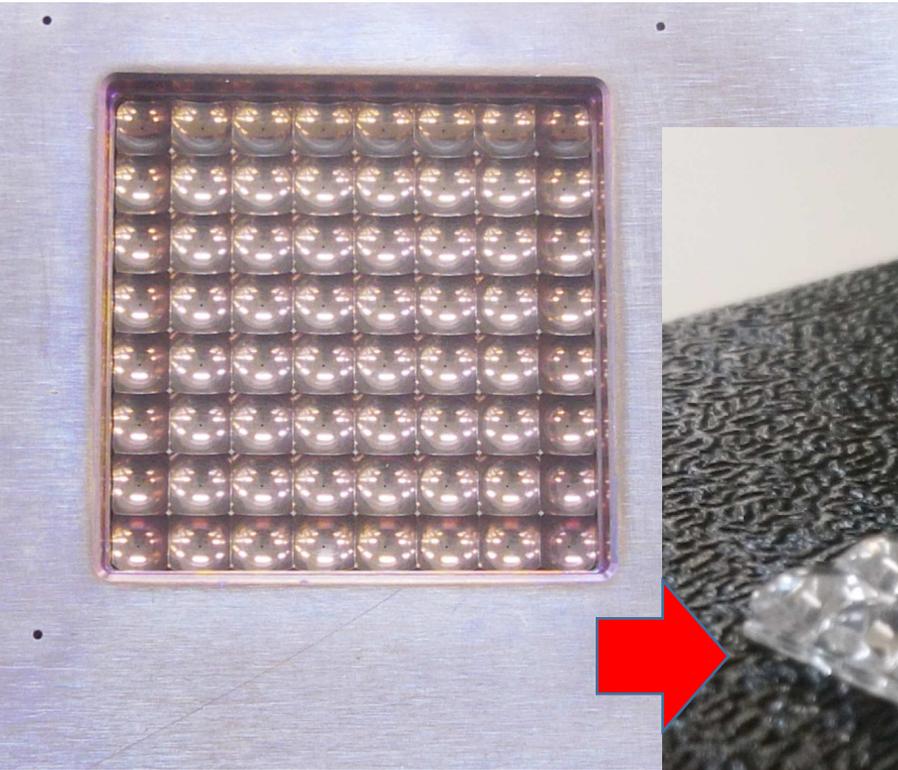


レンズ球面中心 = -0.8 mm, 製造誤差 ± 0.2 mm \rightarrow 約 2%程度の性能劣化で済む

➡ 製造誤差を含めて最大13%程度光検出効率が向上

レンズアレイの製作状況

金型を製作し、見事レンズアレイの成形に成功



まとめと今後

- ❖ 入射チェレンコフ光の10 %程度はアレイ型SiPMの隣接画素間に存在する不感領域へと落ちる
 - レンズアレイにより集光することで、光検出効率が15 %程度向上する
- ❖ レンズアレイの効果実証のため、紫外透過レンズアレイの試作をした
 - レンズ用光学素材の物理特性、金型の物理的制約を組み込んだ光学シミュレーションによりレンズアレイの製造公差を考慮してレンズ形状を決定した
- ❖ レンズ板厚 0.5 mm, レンズ半径 = 2.3 mm, レンズ球面中心 = -0.8 mm のレンズアレイで製造誤差を含めて約13 %程度光検出効率が向上する

今後

- ・ レンズ有無で光検出効率の測定をしてシミュレーション結果を検証する
 - 入射角度依存性の測定
 - 入射光子がレンズ内で複数回反射して隣接画素へ光子が混入する割合