



cherenkov  
telescope  
array



## CTA 報告 116 :

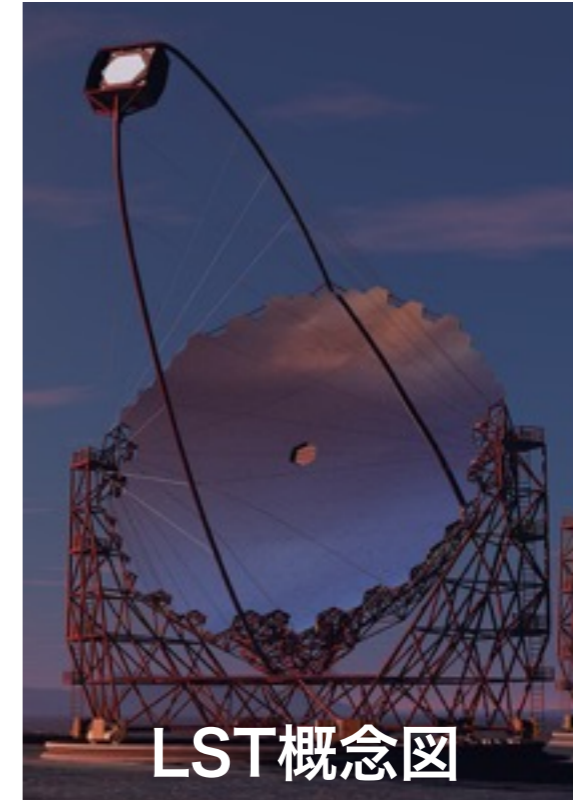
# CTA大口径望遠鏡用分割鏡性能評価と分割鏡最適化配置にむけたsimulation study

稲田知大<sup>A</sup>, 林田将明<sup>A</sup>, 野田浩司<sup>B</sup>, 奥村暁<sup>C</sup>, 加賀谷美佳<sup>D</sup>, 片桐秀明<sup>D</sup>, 黒田隼人<sup>A</sup>, 齋藤隆之<sup>E</sup>, 重中茜<sup>D</sup>, 千川道幸<sup>F</sup>, 手嶋政廣<sup>A,B</sup>, 中嶋大輔<sup>A</sup>, 深見哲志<sup>A</sup>, 本橋大輔<sup>D</sup>, 山本常夏<sup>G</sup>, 吉田龍生<sup>D</sup> 他CTA-Japan consortium

東大宇宙線研<sup>A</sup>, Max-Planck-Inst. fuer Phys.<sup>B</sup>, 名大ISEEC<sup>C</sup>, 茨城大理<sup>D</sup>, 京大理<sup>E</sup>, 近畿大理工<sup>F</sup>, 甲南大理工<sup>G</sup>

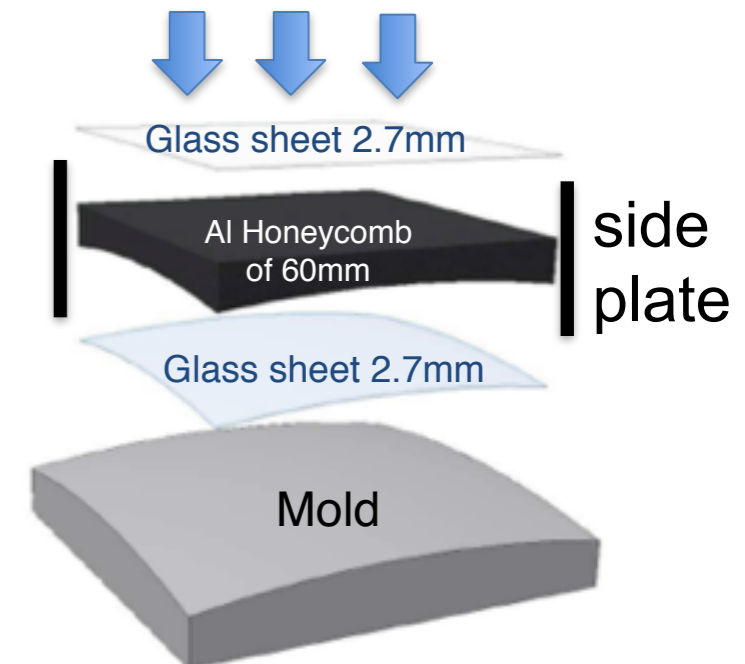
# 大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope : LST)

- 20 GeV - 1 TeVの観測エネルギー帯
- 大口径望遠鏡(LST)光学系仕様
  - 口径(D) : 23m
  - 焦点距離(f) : 28m
  - 焦点面カメラ口径 : 2.25m
  - 視野 : 4.5°
  - 主鏡面形状 : 放物面
    - 198枚の球面分割鏡により構成
  - カメラPixelサイズ : 0.1° (50 mm)



## • 球面分割鏡仕様

- 「三光精衡所」との共同開発
- 曲率半径 : 56.0 - 58.4 m
- スポットサイズ:  $D80 < 33.3 \text{ mm}@2f$ 
  - **D80 : 集光された全光量の80%が入る円の直径**

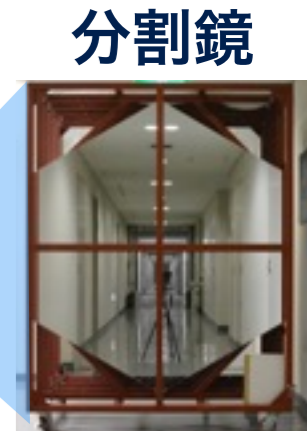
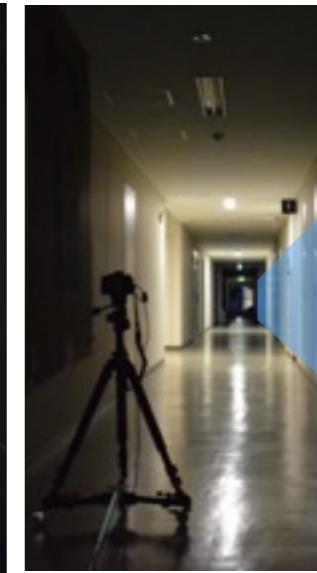
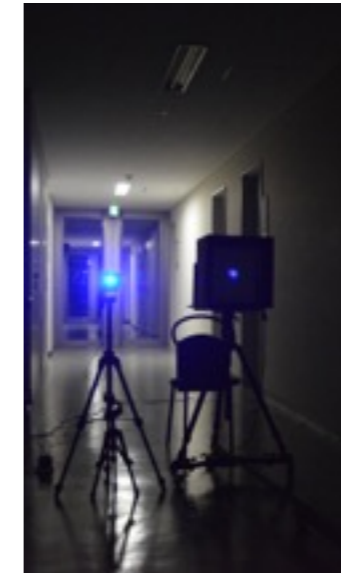


製法 : Cold Slump

# 球面分割鏡の性能評価方法

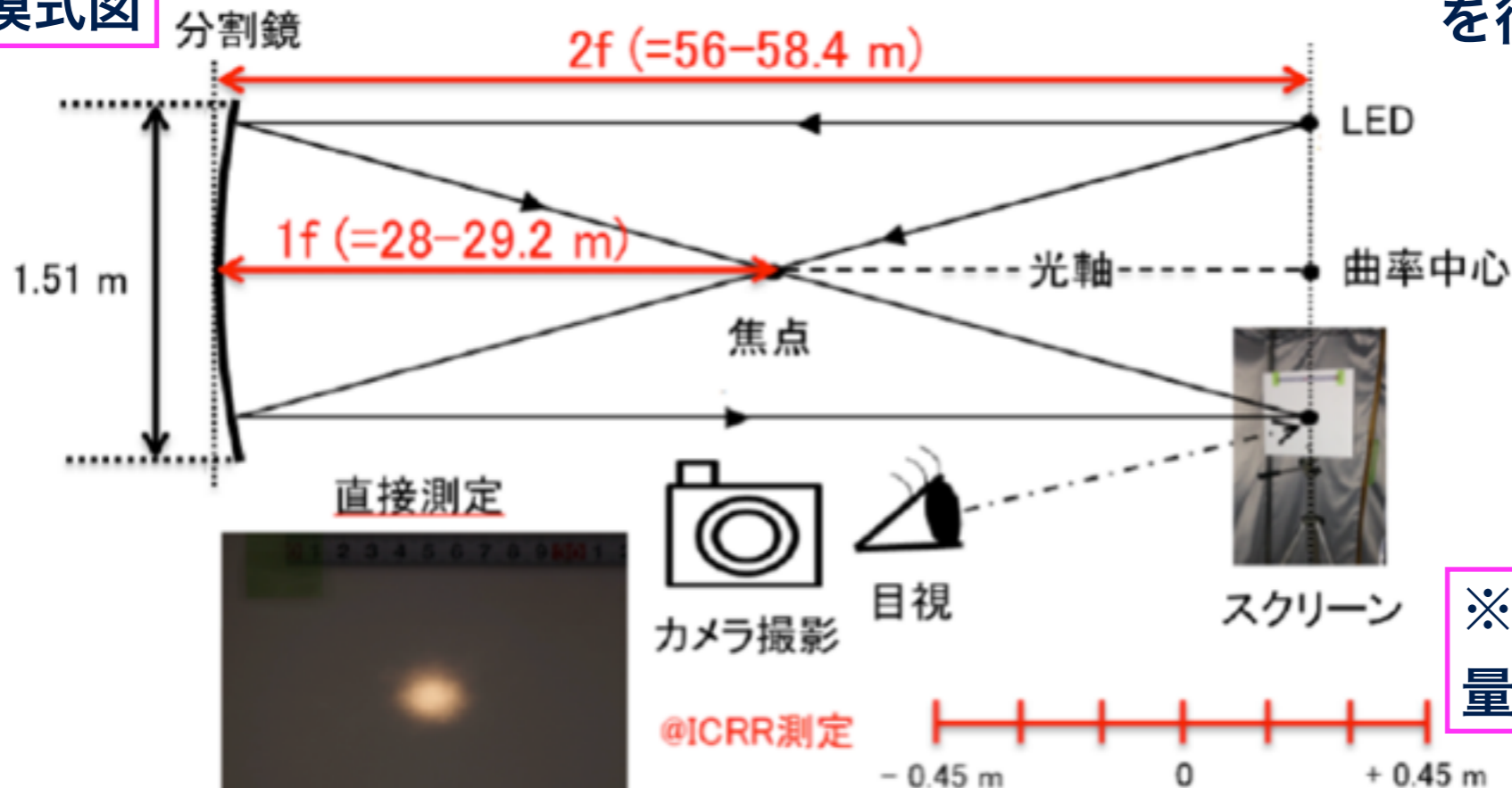
## 結像性能評価方法：2f法

- ・ 曲率半径だけ離れた点光源からの反射像の広がり を測定
- ・ 測定した画像から像の広がり (結像性能:D80) を解析
- ・ 評価する光学系パラメータ
  - ・ 結像性能(D80)
  - ・ 曲率半径(R)



宇宙線研究所6F廊下で測定  
を行っている

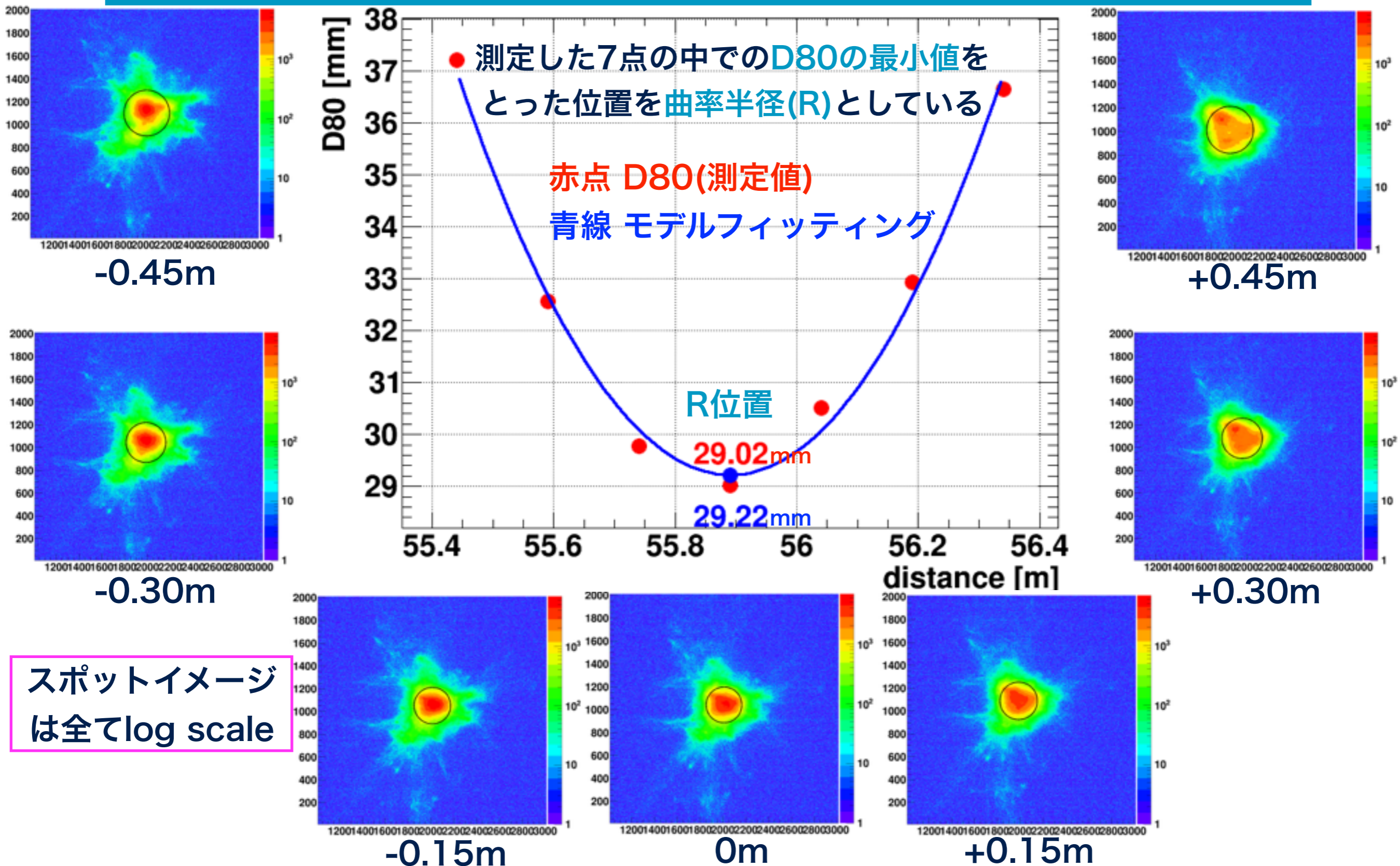
### 2f測定模式図



※曲率半径に対する変化量は0.15m刻みに相当

基準点に対してスクリーンを0.3m刻みで動かし測定

# 2f測定で得られたスポットイメージとD80

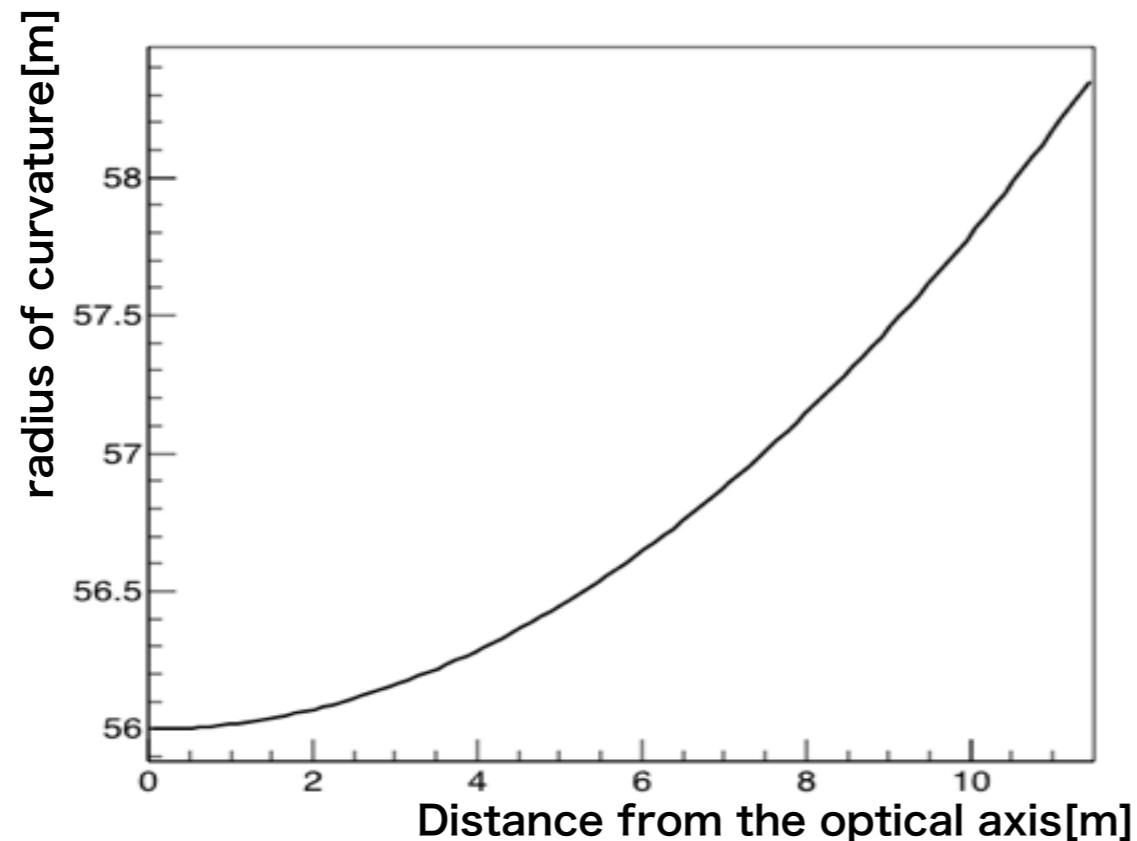


# 分割鏡最適配置に向けて

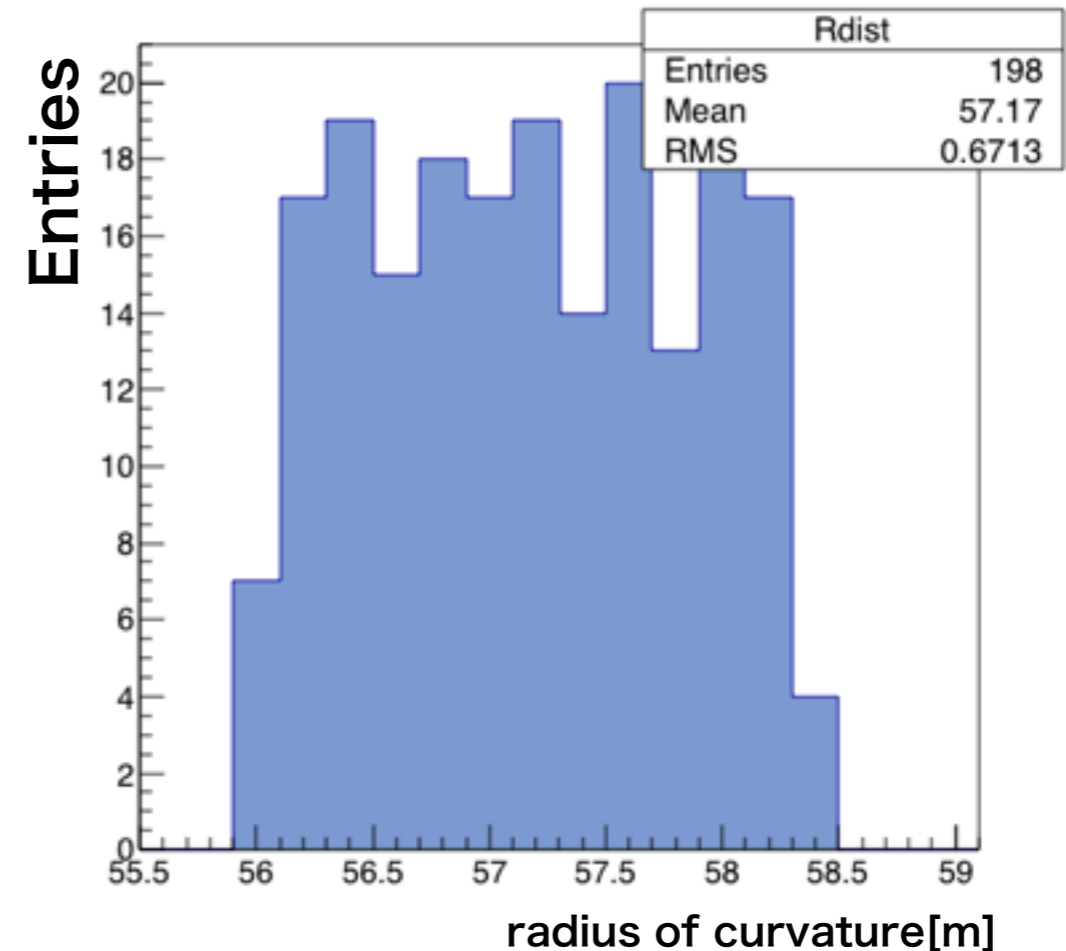
## 最適配置に向けて考慮すべきこと

- 分割鏡のスポットサイズ
- 分割鏡の曲率半径

放物面上の曲率半径と  
光軸からの距離の関係

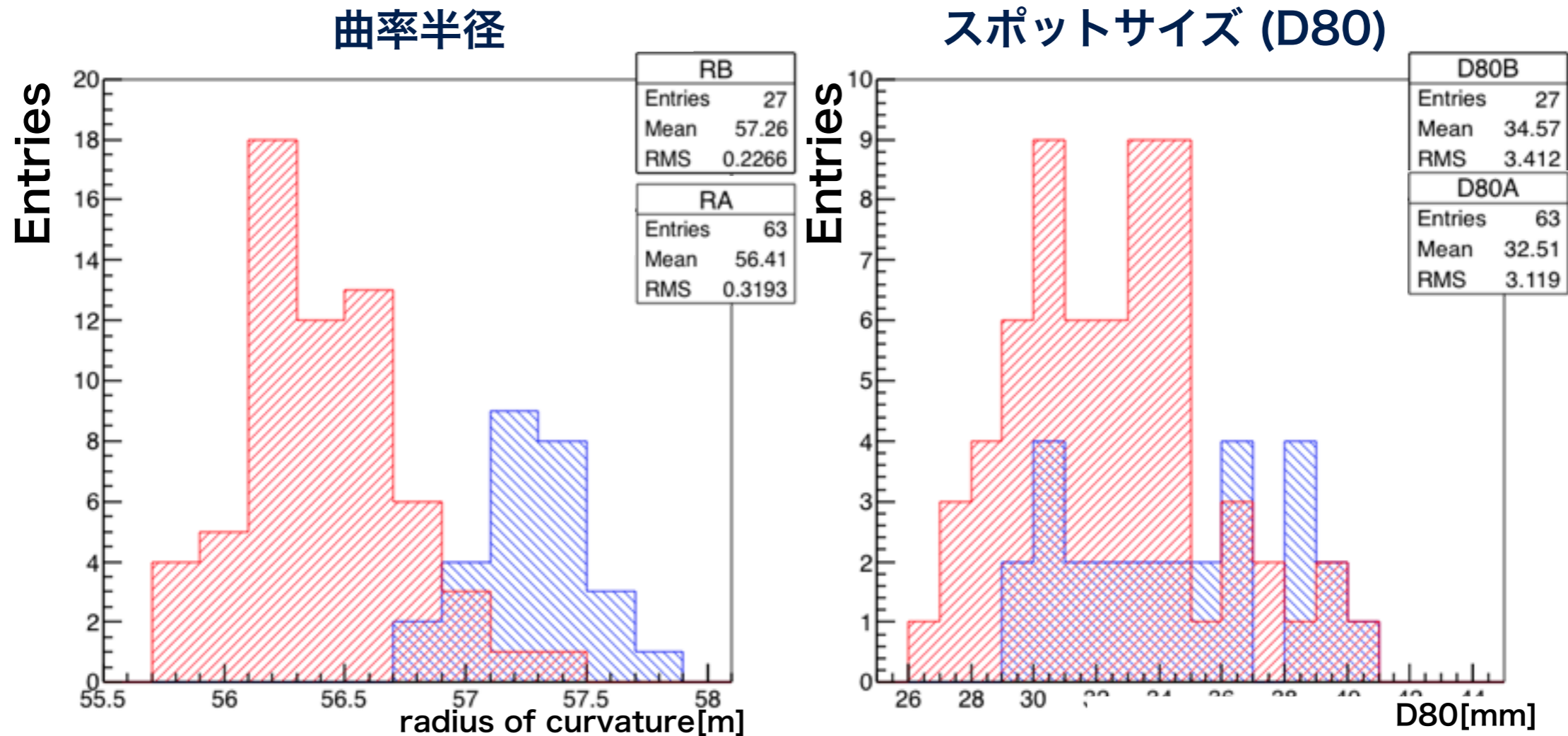


左図から決まる理想的な曲率半径分布  
R : 56 - 58.4 m



# 球面分割鏡性能評価結果

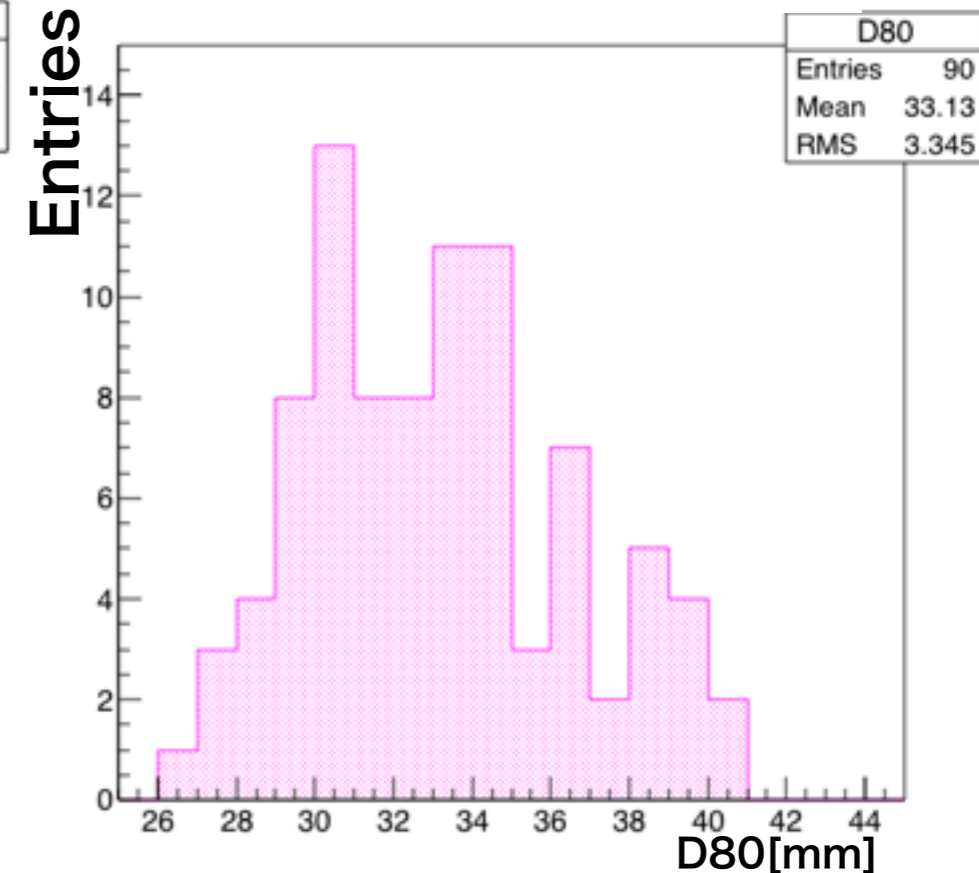
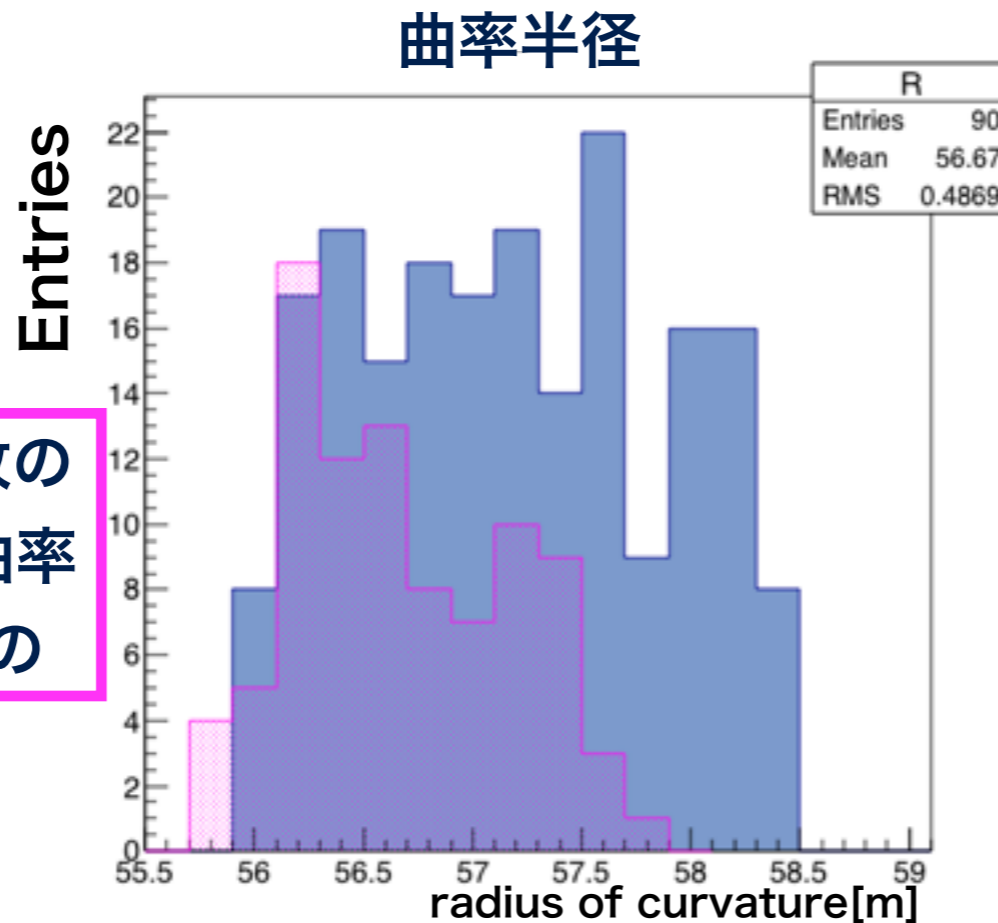
- 主鏡放物面を構成するため、仕様曲率半径範囲にてほぼ均質な分布になるように三種の異なる曲率を持ったMold(型)を用いて、同数ずつ製造する
- それぞれのMoldごとの曲率半径はMoldA 56.4m, MoldB 57.2m MoldC 58.0m
  - 以下は現在製造済みのMoldA63枚、MoldB27枚、計90枚を測定した結果



# 球面分割鏡性能評価結果

- 主鏡放物面を構成するため、仕様曲率半径範囲にてほぼ均質な分布になるように三種の異なる曲率を持ったMold(型)を用いて、同数ずつ製造する
- それぞれのMoldごとの曲率半径はMold A 56.4m, MoldB 57.2m MoldC 58.0m
  - 以下は現在製造済みのMoldA63枚、MoldB27枚、計90枚を測定した結果

スポットサイズ (D80)  
Mold A + MoldB 合計



MoldA+MoldBの90枚の曲率半径とLSTの理想曲率半径の分布を比べたもの

順調に生産できており、今年度内にさらに400枚製造予定

# 分割鏡の”さらなる配置最適化”の検討

## モチベーション

- 分割鏡配置をさらに最適化し、より感度を向上させたい

## 現状

- 2f測定により球面分割鏡に理想球面からの”ずれ”があることがわかってきた

## 提案

- 理想球面からの”ずれ”を2方向の曲率半径として近似して放物面配置に利用できないか
  - 放物面の曲率半径の**最大値**と**最小値**を利用

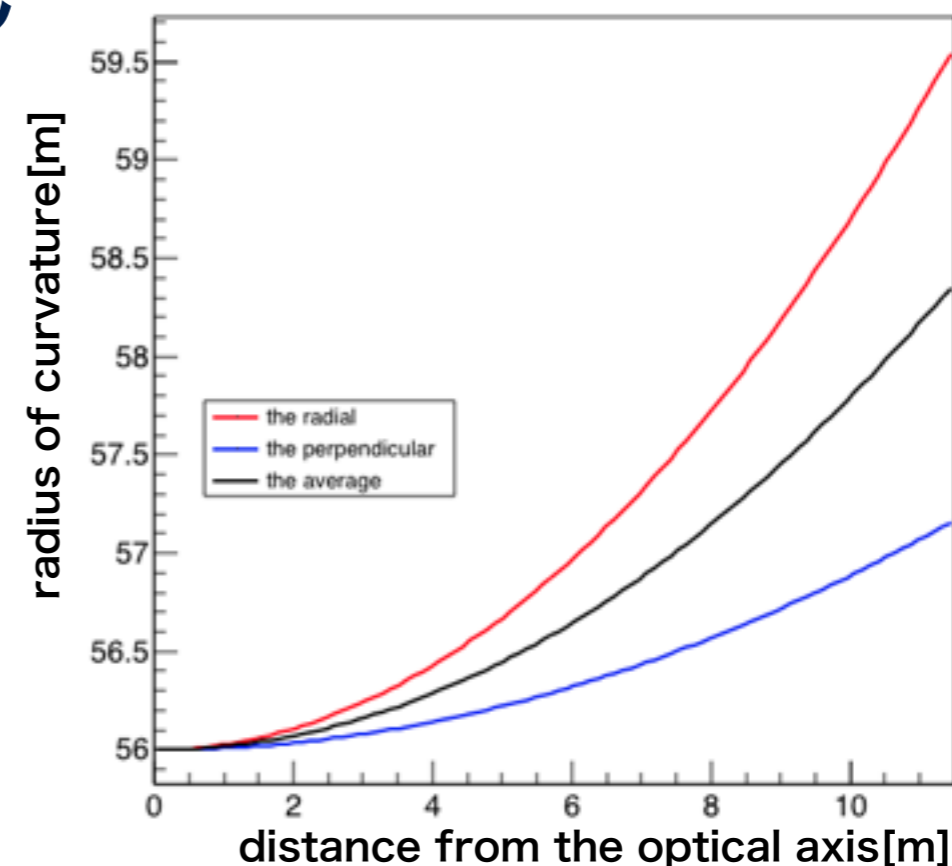
## 課題

- 個々の分割鏡に対して2方向の曲率半径を決める必要がある

2f測定の結果に対して  
新しい解析手法の導入



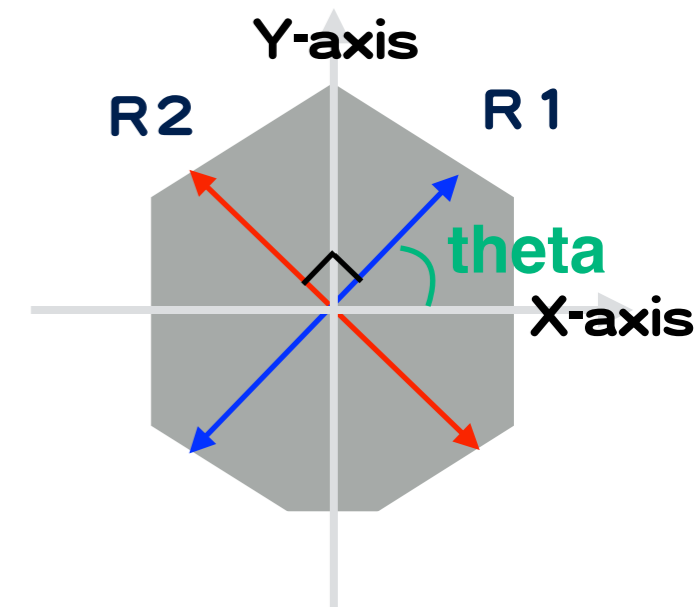
主鏡放物面の曲率半径 vs 中心からの距離





# 2f法での新スポット解析手法の開発に向けて

- 個々の分割鏡の製造の際に生まれる理想球面からの”ずれ”を2方向の曲率半径として近似できないか



## 測りたいパラメータ

- 分割鏡の持つ2方向の曲率半径(R1, R2)
- 分割鏡上での曲率半径の方向(theta)

## 検証方法 2段階のアプローチ

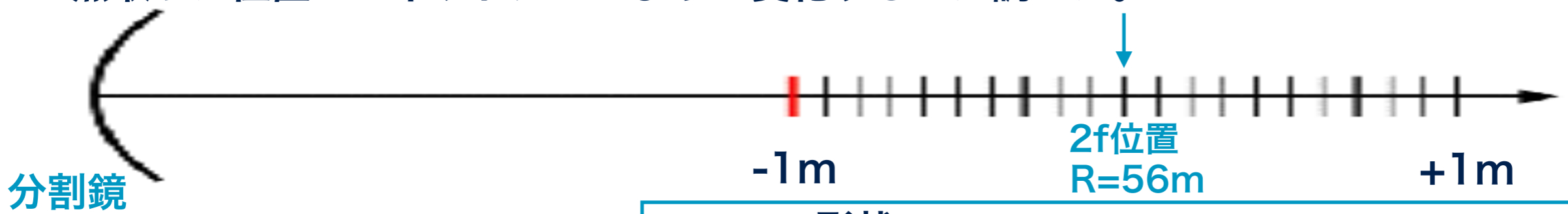
- 光線追跡シミュレーションを用いて2方向の曲率半径(R1, R2)をあらかじめ決めた分割鏡形状を定義しスポットにどのような特徴が現れるか調べた
  - トーラスを利用して分割鏡形状を定義した
- 実際に2f測定で得られたデータを用いてtheta, R1, R2が決められるかどうかを調べた

# 分割鏡の2f光線追跡シミュレーション

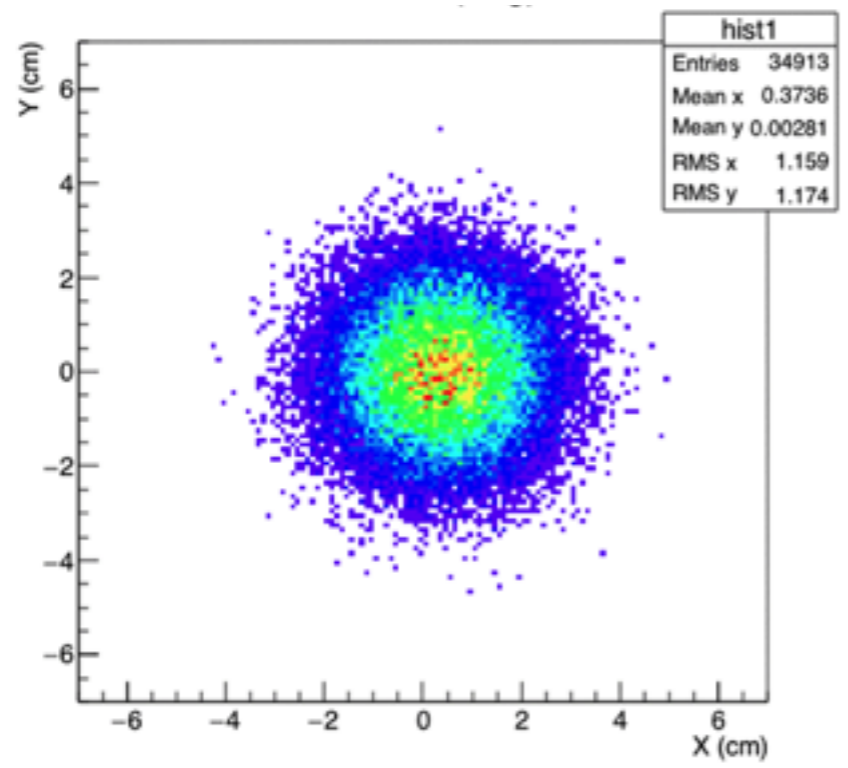
(1) 光線追跡シミュレーションを用いて2方向の曲率半径(R1, R2)を持つ分割鏡形状を定義しスポットにどのような特徴が現れるか調べた

## 光線追跡シミュレーション

- 1枚の分割鏡に点光源から光を入射して、2f位置および前後0.1mごとに10点ずつ計21点取った位置でスポットがどのように変化するか調べた。



理想球面分割鏡



**形状**

$R1 = R - 0.3 [m]$   
 $R2 = R + 0.3 [m]$   
 $theta = 0 [deg]$

$R$ は球面鏡とした場合の理想的な曲率半径  
 今回は56mに設定した

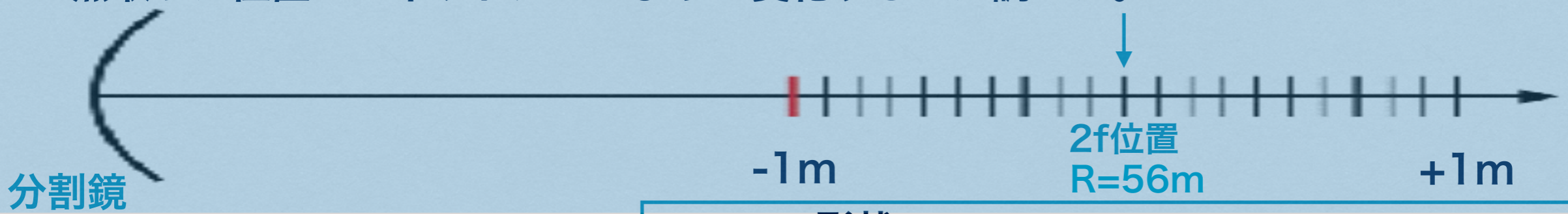
hist1	
Entries	32990
Mean x	0.367
Mean y	-3.855e-05
RMS x	0.9695
RMS y	1.463

# 分割鏡の2f光線追跡シミュレーション

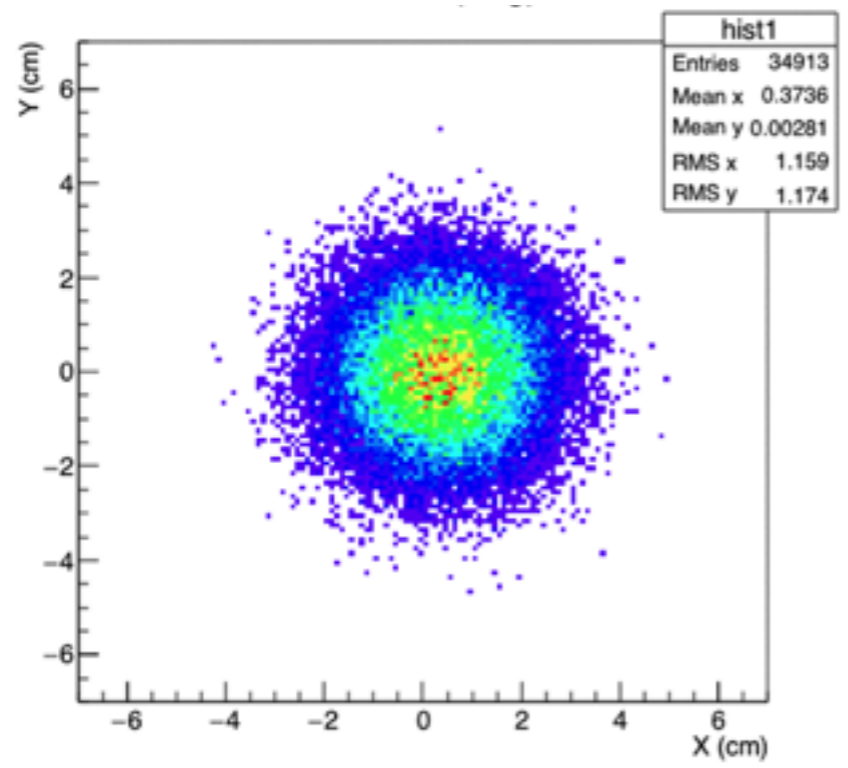
(1) 光線追跡シミュレーションを用いて2方向の曲率半径(R1, R2)を持つ分割鏡形状を定義しスポットにどの

**2方向の曲率半径を持った分割鏡の場合  
楕円の長軸の方向が90度回転する**

- 光線追跡シミュレーション
- 1枚の分割鏡に点光源から光を入射して、21位置および前後0.1mmごとに10点ずつ計21点取った位置でスポットがどのように変化するのか調べた。



理想球面分割鏡



形状

Y-axis

X-axis

R2

theta

R1

R1=R-0.3[m]  
R2=R+0.3[m]  
theta=0[deg]  
Rは球面鏡とした場合の理想的な曲率半径  
今回は56mに設定した

hist1	
Entries	32990
Mean x	0.367
Mean y	-3.855e-05
RMS x	0.9695
RMS y	1.463

# 楕円イメージのスポット解析手法

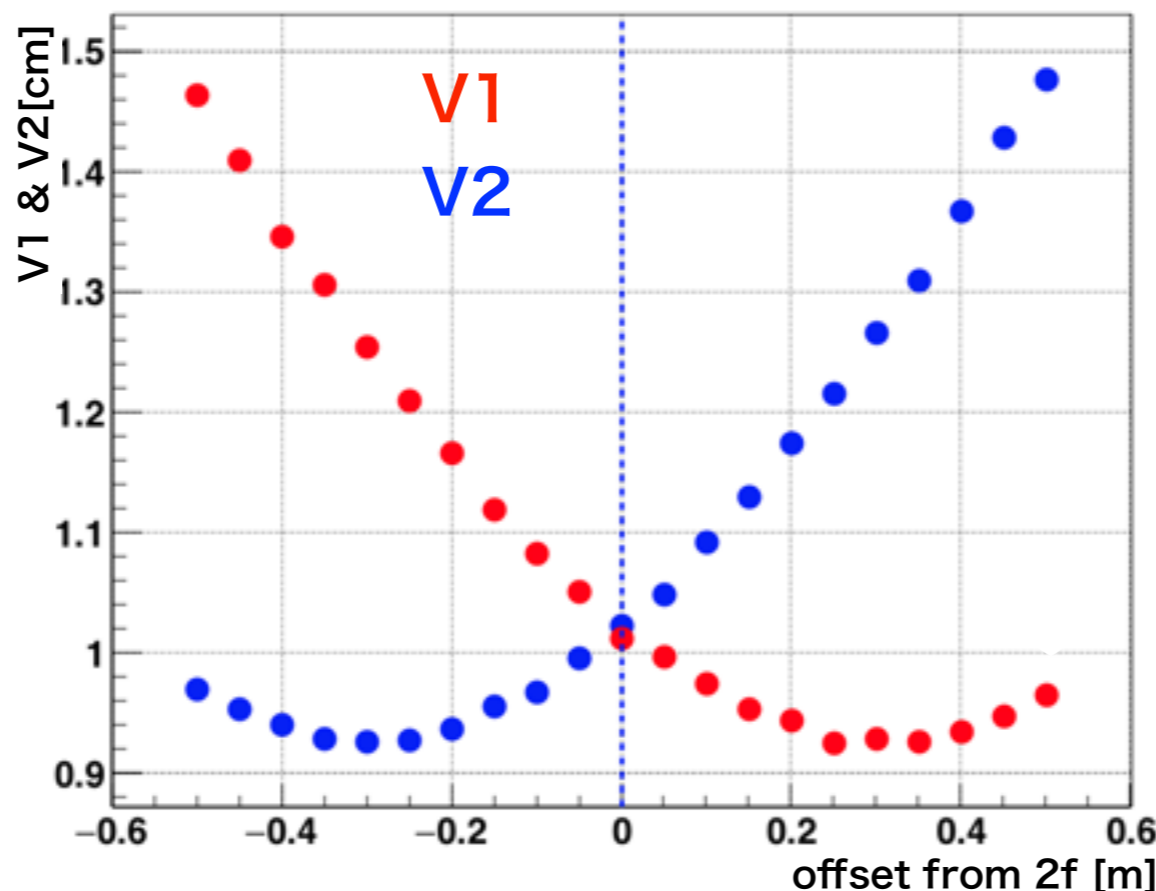
## 楕円形のスポットの解析手法

各位置でのスポットに対して軸の傾き (**theta**) を固定し、光量の二次のモーメントの平方根をとり、以下のようにパラメータを2つ定義する

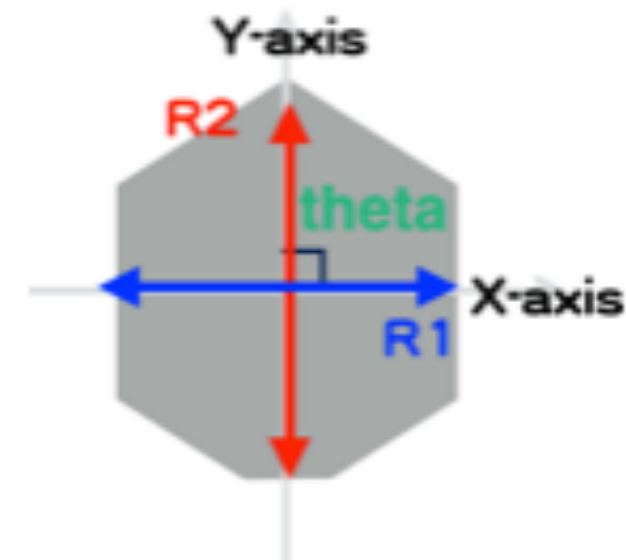
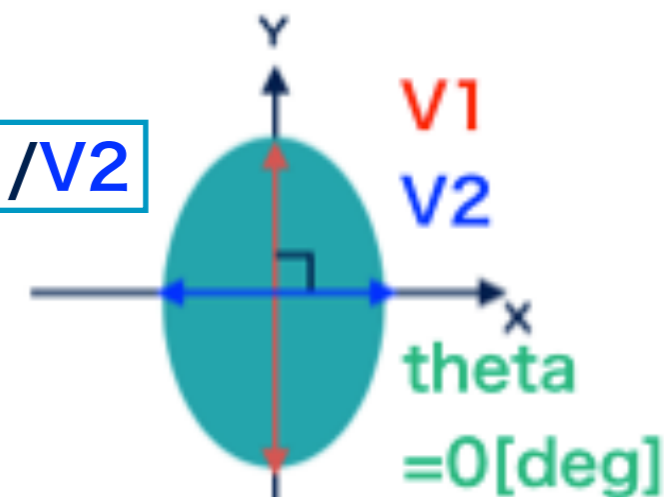
固定した軸の傾きの平行/垂直な方向の二次のモーメントの平方根: **V1/V2**

※楕円の長軸/短軸方向への二次のモーメント (Hillas parameter の length/width) を交わる点で入れ替えたものと等しい

光線追跡によって得られた21枚のスポット画像に対して、上記の解析を行ったもの



定義したパラメータ



**theta**によって決まる軸が曲率半径の2方向に対応している

# 楕円イメージのスポット解析手法

## 楕円形のスポットの解析手法

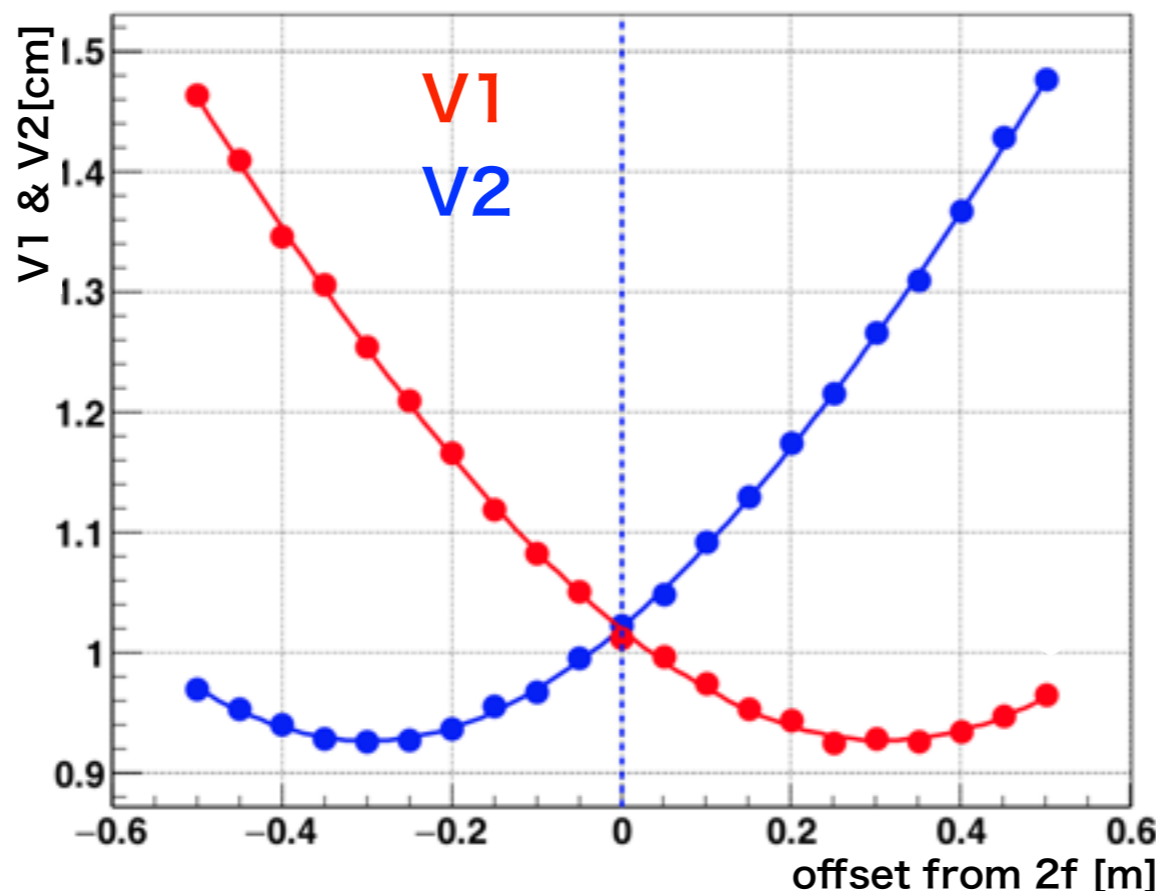
各位置でのスポットに対して軸の傾き (**theta**) を固定し、光量の二次のモーメントの平方根をとり、以下のようにパラメータを2つ定義する

固定した軸の傾きの平行/垂直な方向の二次のモーメントの平方根: **V1/V2**

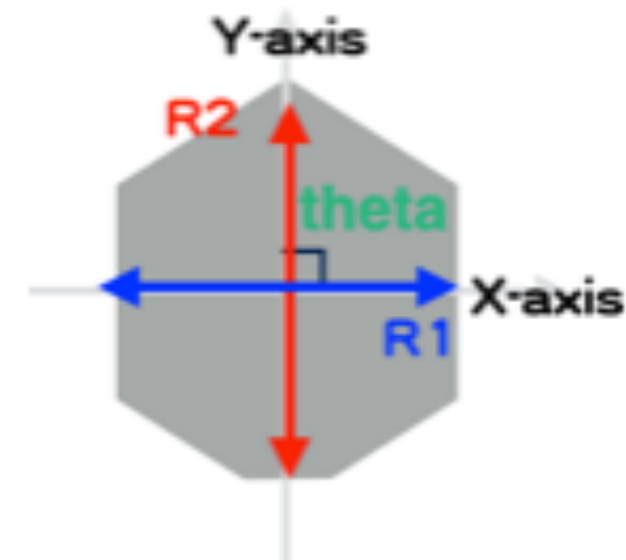
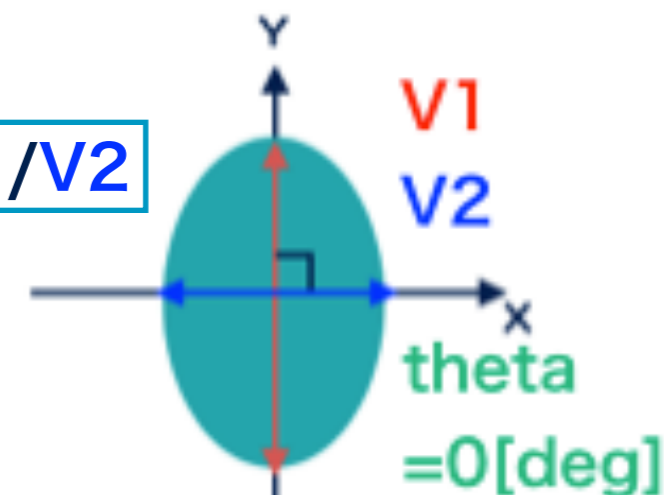
※楕円の長軸/短軸方向への二次のモーメント (Hillas parameter の length/width) を交わる点で入れ替えたものと等しい

光線追跡によって得られた21枚のスポット画像に対して、上記の解析を行ったもの

双曲線でfittingを行うことによって **V1**, **V2** それぞれの最小値を決めた



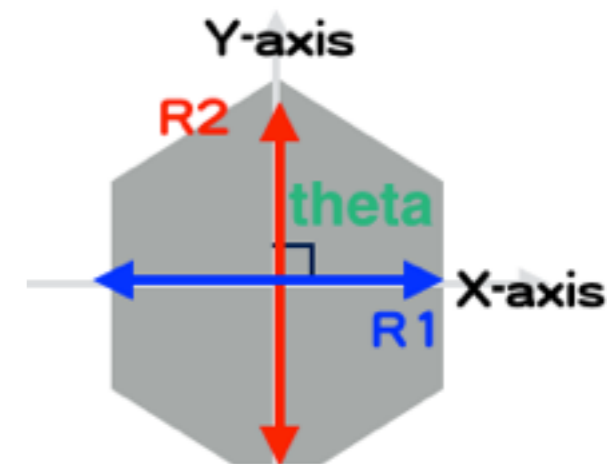
定義したパラメータ



**theta**によって決まる軸が曲率半径の2方向に対応している

# 2方向の曲率半径とパラメータV1, V2の関係

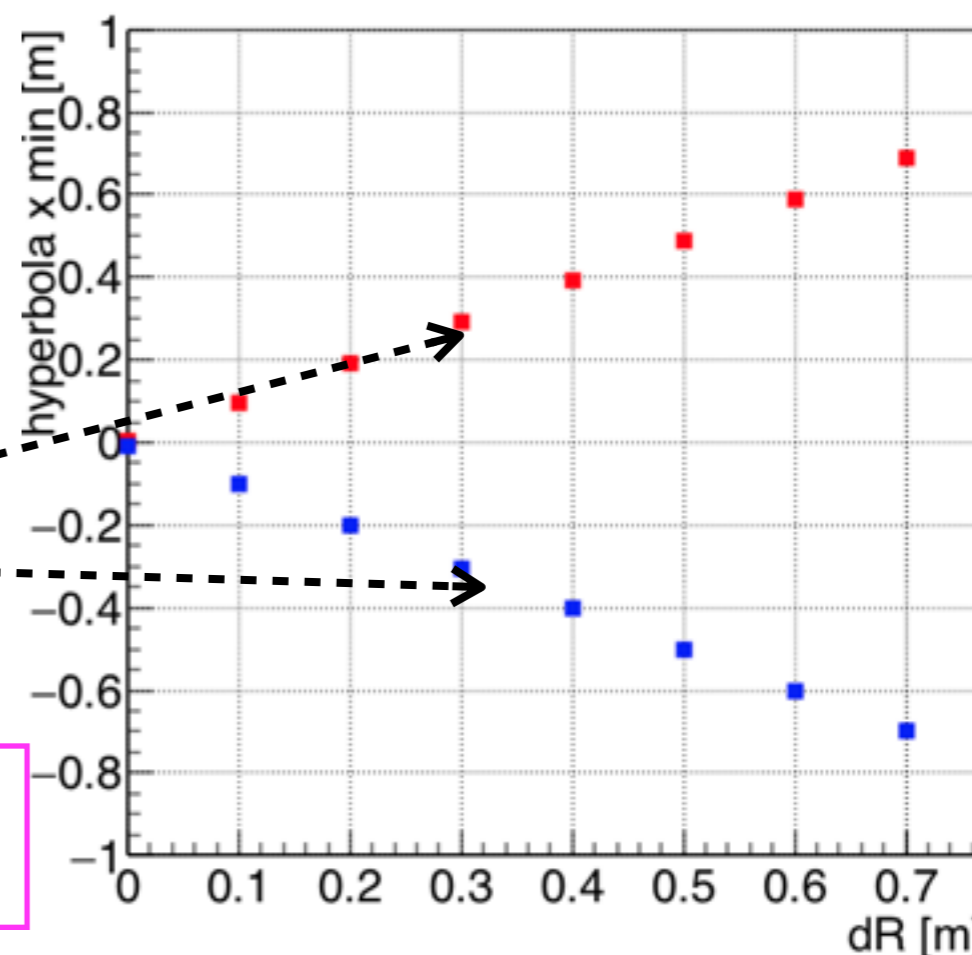
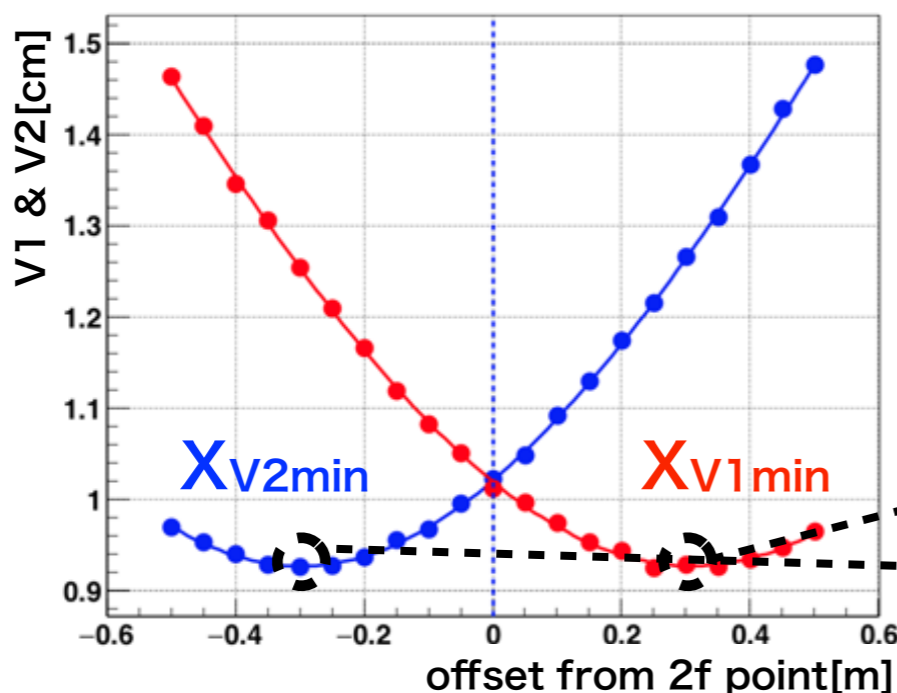
offsetに対するモーメントVのプロットに双曲線フィッティングを行い、V1, V2が最小となるoffsetの値 $X_{V1min}$ ,  $X_{V2min}$ を縦軸に、dRを横軸にとったグラフを作り,2方向の曲率半径とパラメータV1, V2の関係を調べた



$$R1 = R - dR$$

$$R2 = R + dR$$

例  
dR=0.3[m]



スポット解析で得たパラメータ $X_{V1min}$ ,  $X_{V2min}$ と鏡形状R1,R2との間に対応関係があることがわかった

# 2f法測定データへの楕円スポット解析手法の適用

(2)実際に2f測定で得られたデータを用いてtheta, R1, R2が決められるかどうかを調べた

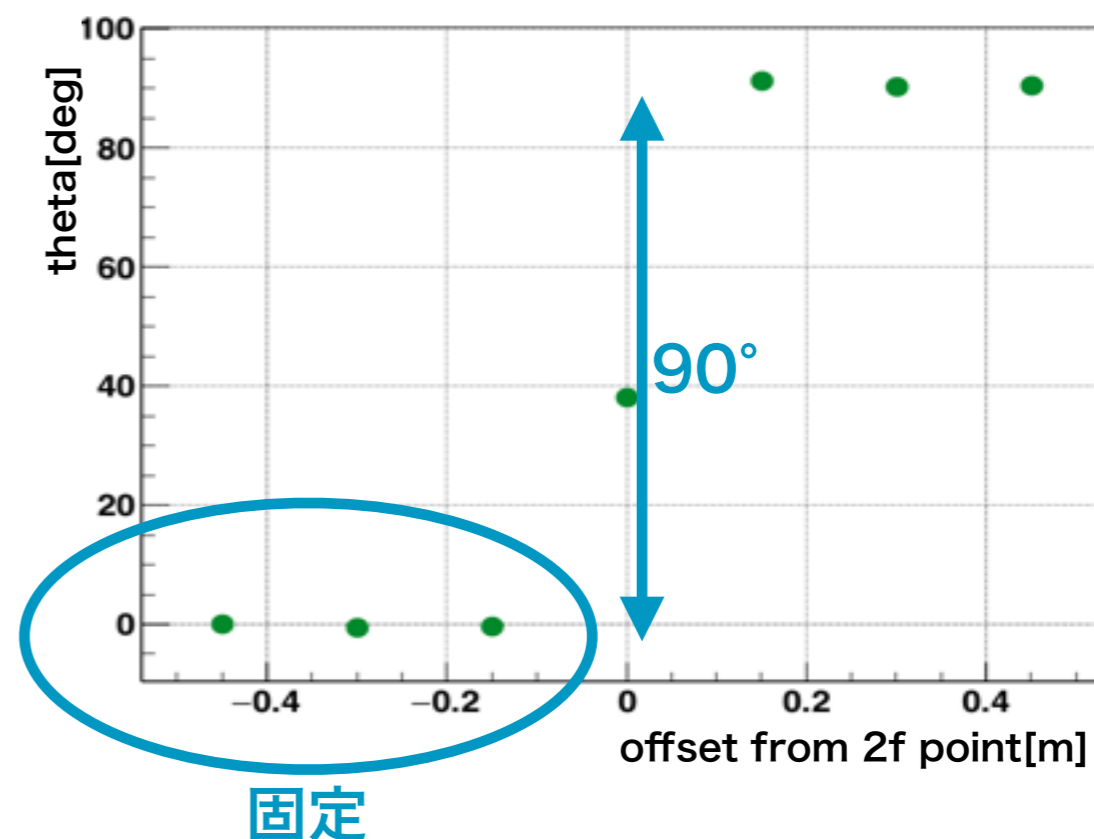
解析は以下の2段階に分けて行った

- thetaの決定
- R1, R2の決定

## 手法

- thetaの決定
  - 楕円の長軸/短軸方向の光量の二次のモーメントの平方根を解析で求める
  - 二方向の曲率半径を持つ鏡では理想的には右図のようにthetaが楕円の長軸の向きが変わる点で90°変化する
  - 向きが変わる前の点でthetaを固定し決定する。
  - 曲率半径の方向を決めることができた

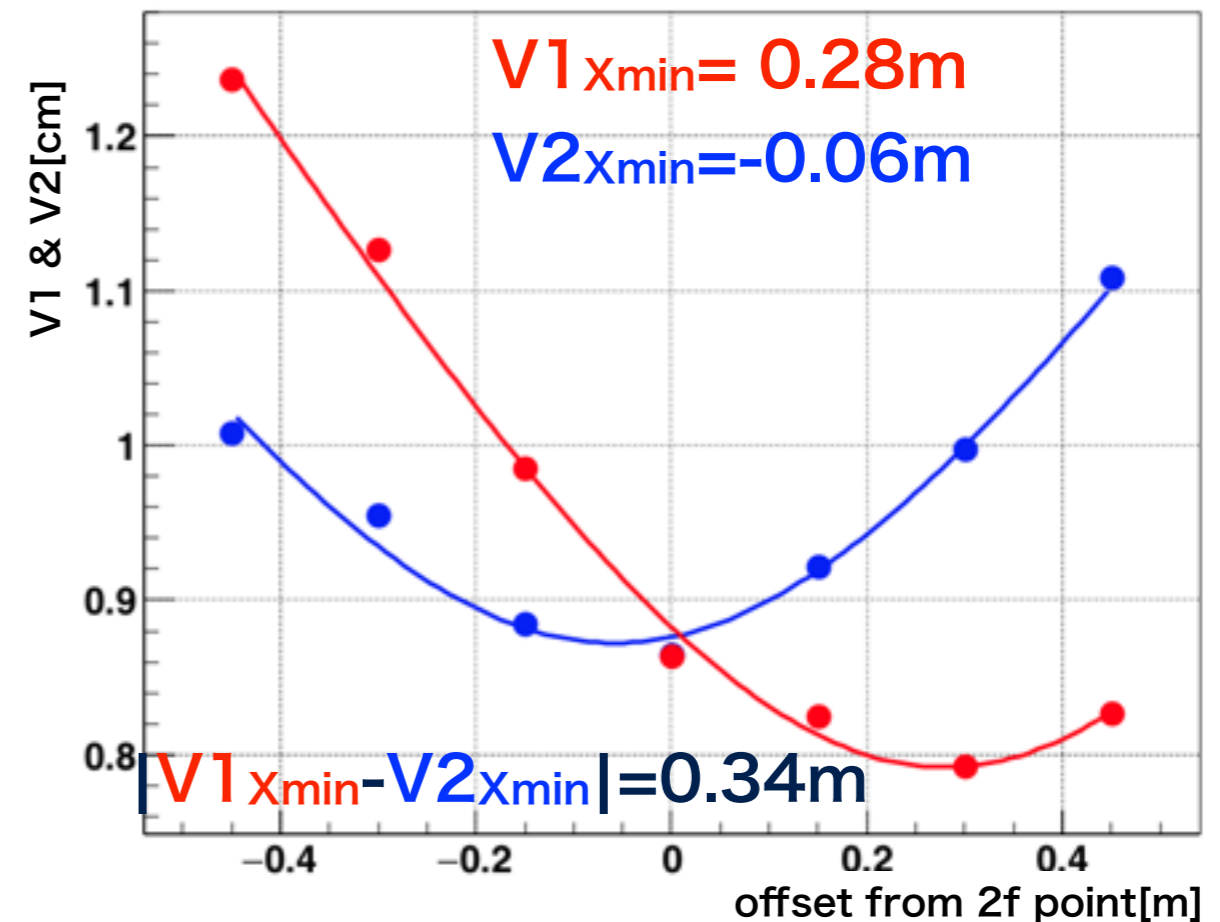
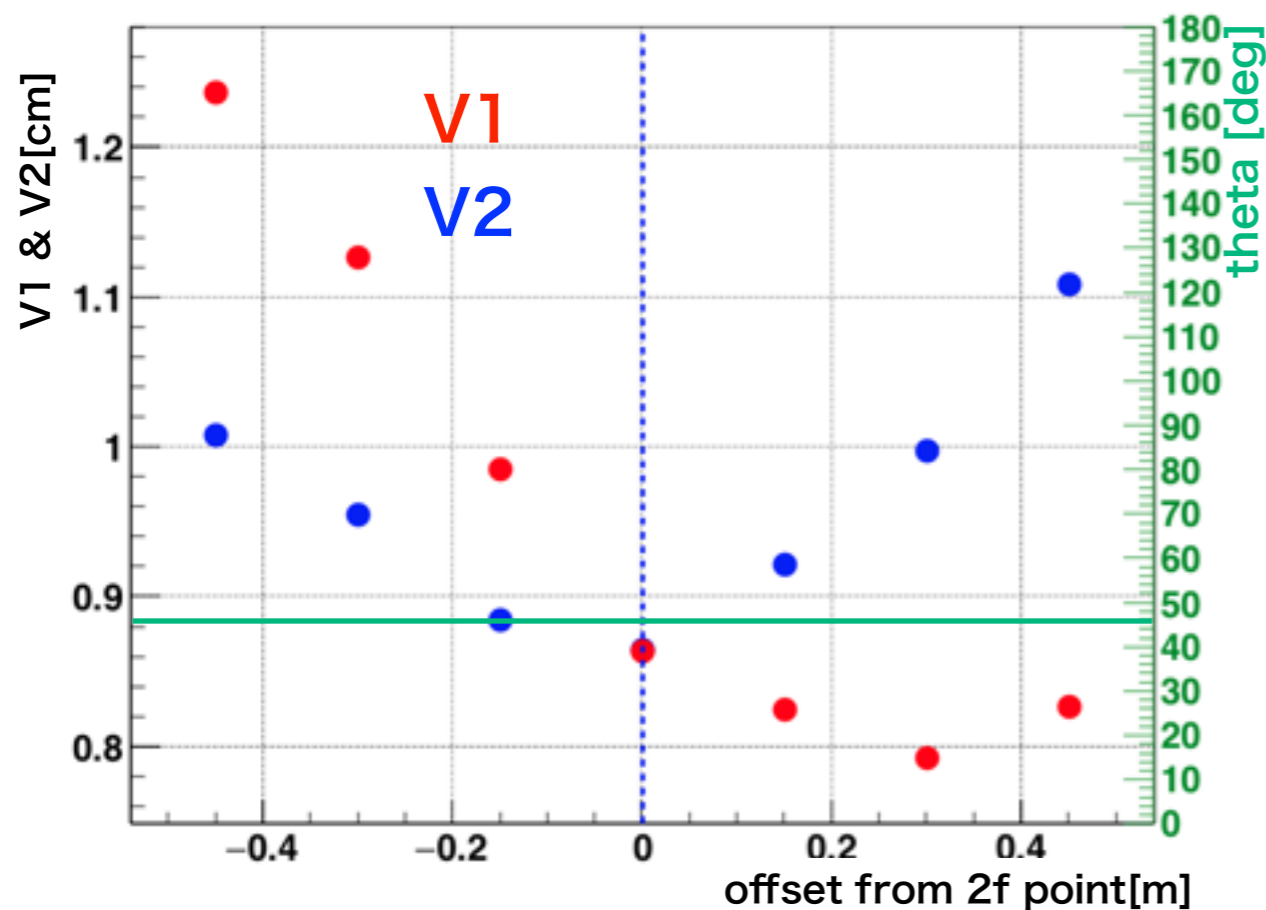
シミュレーションによる各点でのthetaの値



# 2f測定データにおける2方向の曲率半径

## ・ R1, R2の決定

- ・  $\theta=46^\circ$ に固定してパラメータV1, V2を用いて解析し、7点に対して双曲線フィッティングを行った



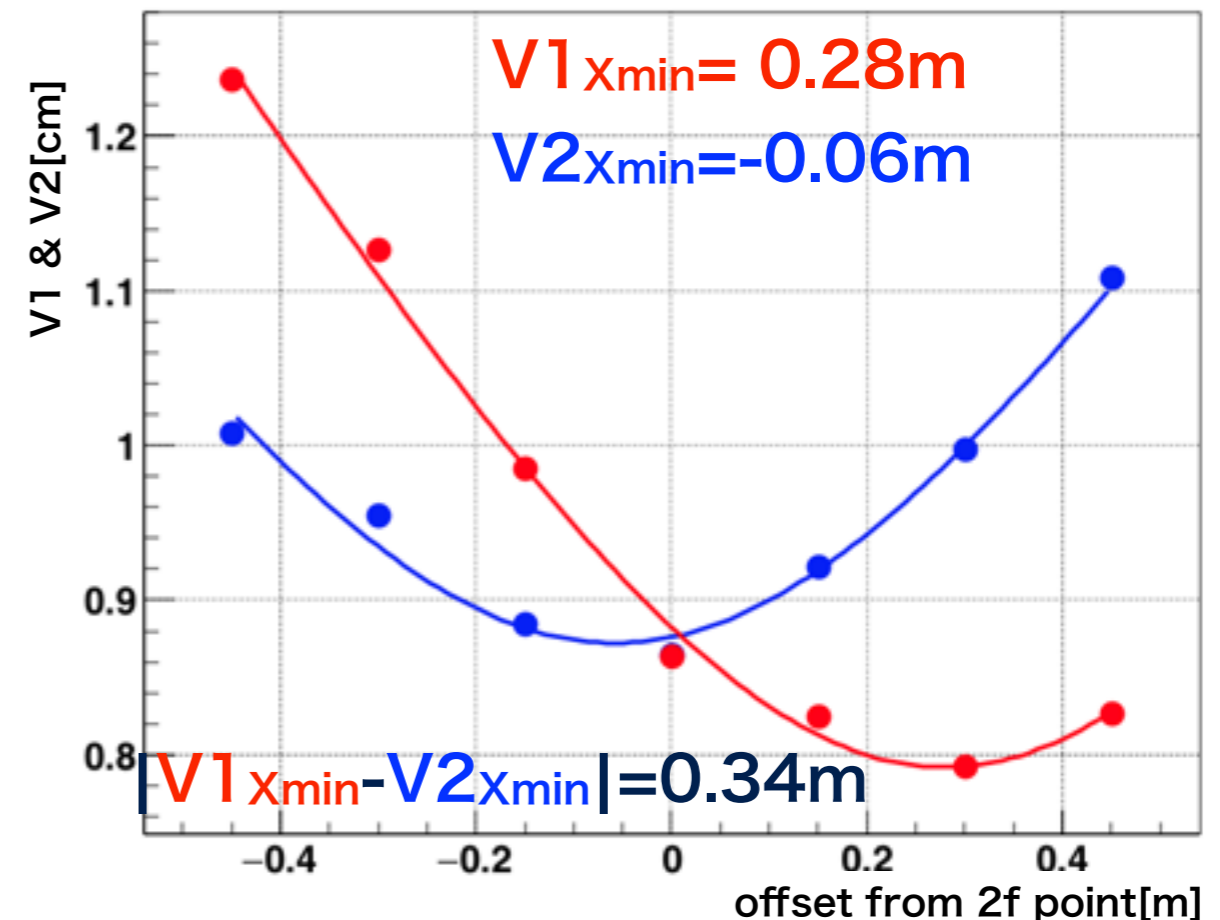
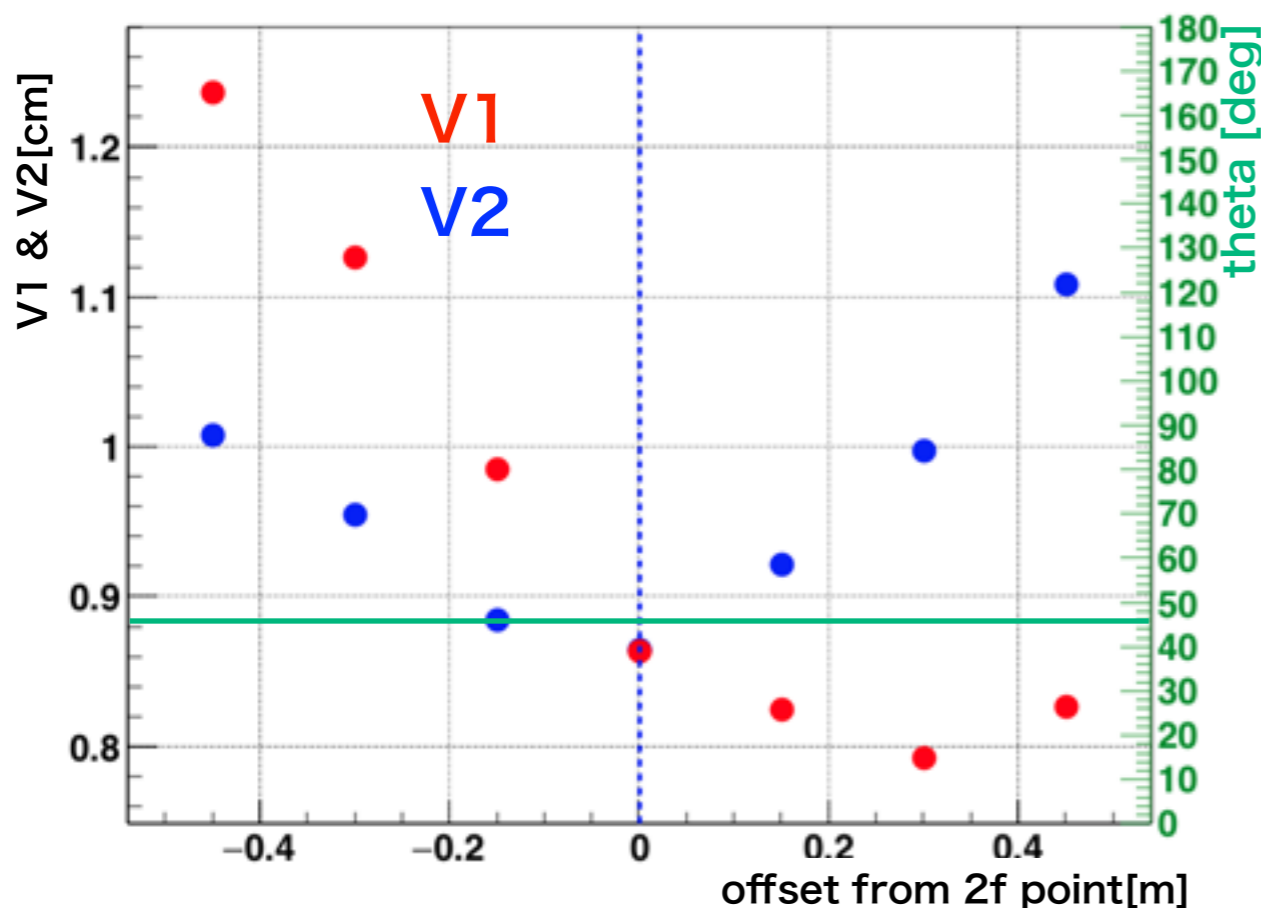


# 2f測定データにおける2方向の曲率半径

## ・ R1, R2の決定

- ・  $\theta=46^\circ$ に固定してパラメータV1, V2を用いて解析し、7点に対して双曲線フィッティングを行った

双曲線フィッティングによってパラメータV1, V2の最小値を決めることができた。2f測定におけるオフセットの範囲内(-0.45m~+0.45m)にV1, V2の最小点があればR1, R2の測定につながることが分かった。



- ・ 2016年にすでに製造を行った分の球面分割鏡90枚の性能評価測定が終了
  - ・ 現在順調に製造できており、引き続き性能評価を行う
  - ・ 今年度内に400枚製造予定(2台目以降にも利用)
- ・ 測定した分割鏡を用いて配置の最適化を行う
- ・ 望遠鏡の感度向上を目指して配置のさらなる最適化を検討中
  - ・ 2f法スポットの新しい解析手法を導入した
    - ・ 2f光線追跡シミュレーションと2f測定データから分割鏡の球面からのずれを2方向の曲率半径に近似できる可能性を示した
    - ・ 今後、より多くの分割鏡測定データを解析し解析手法の改善につなげる