

# CTA における鏡開発

茨城大学博士前期課程 1 年 馬場浩則

奥村暁<sup>F</sup>, 加賀谷美佳<sup>A</sup>, 片桐秀明<sup>A</sup>, 北本兼統<sup>E</sup>, 峪中良介<sup>E</sup>, 周小溪<sup>E</sup>, 田中駿也<sup>A</sup>, 千川道幸<sup>E</sup>,  
手嶋政廣<sup>B,C</sup>, 中嶋大輔<sup>C</sup>, 野里明香<sup>E</sup>, 林田将明<sup>G</sup>, 柳田昭平<sup>A</sup>, 山本常夏<sup>D</sup>, 吉田龍生<sup>A</sup>,  
R. Krobot<sup>H</sup>, 他 CTA-Japan consortium

茨城大理<sup>A</sup>, 東大宇宙線研<sup>B</sup>, Max-Planck-Inst. fuer Phys.<sup>C</sup>, 甲南大理工<sup>D</sup>, 近畿大理工<sup>E</sup>,  
名大 STE 研<sup>F</sup>, 京都大理<sup>G</sup>, University of Erlangen-Nuremberg<sup>H</sup>

## 1. Cherenkov Telescope Array 計画 (CTA 計画)

CTA 計画とは、大規模な地上チェレンコフ望遠鏡群により、20GeV~100TeV 以上の広いエネルギー範囲のガンマ線観測を狙う次世代国際共同実験である。大中小の三種類の大きさの望遠鏡 (図 1) により、広いエネルギー範囲での観測を可能にする。

日本グループが重点を置いている

Large Size Telescope

口径 : 23m

エネルギー範囲 :

20GeV~100GeV

Medium Size

Telescope

12.3m

100GeV~10TeV

Small Size Telescope

7.4m

1TeV~100TeV以上

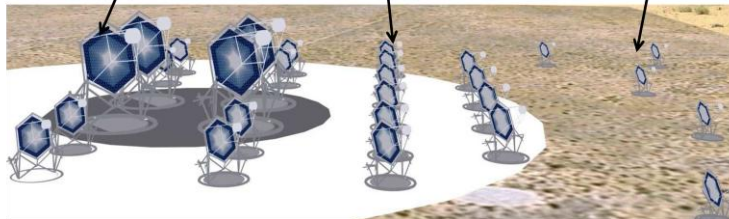


図 1 : CTA イメージと 3 種類の望遠鏡の特徴

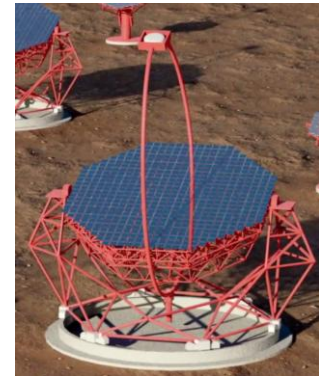


図 2 : LST (CG)

日本グループはこの 3 種類の大きさの望遠鏡のうち、Large Size Telescope (LST) (図 2) の開発に重点を置いている。低エネルギーガンマ線からのチェレンコフ光を観測するために口径 23m と大きくなっており、それに対応し焦点距離も 27.6m と長く採られている。これは入射光が off-axis の場合に発生する収差を小さくするため、 $f/d$  値は決まっていることによっている。

建設する LST には、複数の分割球面鏡を放物面型に組み合わせて巨大な鏡とした放物面複合鏡が使われる。この分割鏡には費用、製作時間などを踏まえて大量生産ができ、かつ LST の口径を満たす大きさ、集光面のピクセルサイズの 1/3 以下に 80% 以上の光を集光できるスポットサイズ、10 年の耐久性、20 秒で 180° 回転 (ガンマ線バーストを捕える) を可能にする重量などの仕様要求がある。

我々 CTA-Japan mirror グループはこの仕様を満たした分割球面鏡を開発するために、この分割球面鏡についての研究を行っている。ここではその研究の現状を報告する。

## 2. 鏡開発に関する研究

LST 用試作分割鏡として、軽量化のためのアルミハニカム層をガラス層で挟んで製造された鏡に金型から曲率を写し取る方法（コールドスランプ法）で曲率を持たせ、多層膜コーティングを施したものが数枚試作された。左下の写真のものは開発された試作分割鏡であるが、この六角形の対辺間が 1510mm の大きさの分割球面鏡が LST の複合鏡を構成する（図 3）。

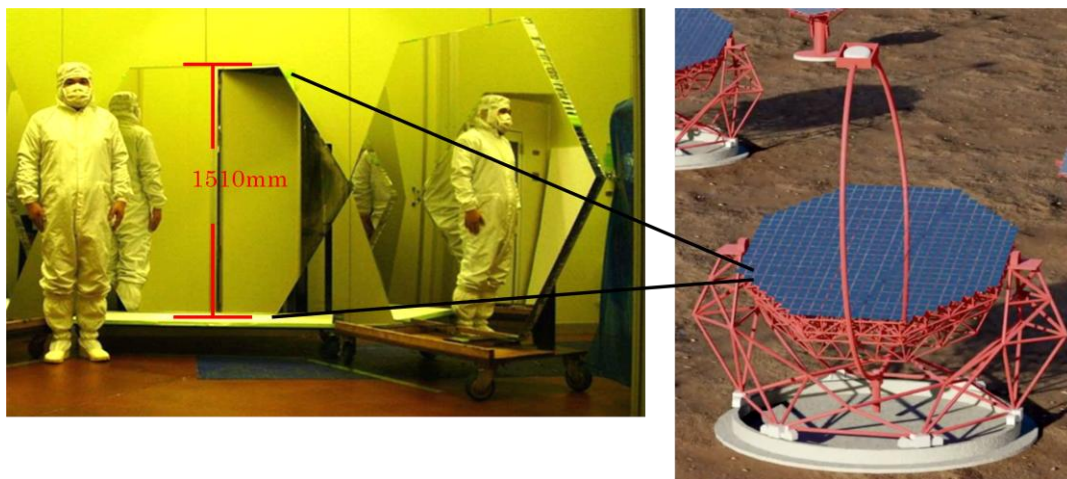


図 3：試作された分割鏡（左）とそれが組み込まれる LST の部位

現在この試作された分割球面鏡について、雨に対する耐久性の調査、スポットサイズの評価などを行っており、また、今後分割球面鏡の形状を精密に評価するための新しい評価方法の開発などを行っている。以下では、これらを順に紹介する。

### 2-1. 耐久性について

チェレンコフ望遠鏡は野外に設置されるため、鏡面は雨にさらされる。しかし鏡面の面積は広いため、メンテナンスに時間やコストがかかる。この対策として、多層膜コーティングの施された分割球面鏡に対して、反射率の経年変化が 1%/year 以下という耐久性（10 年の耐久性）が要求されている。

現在、複数の大学で、鏡サンプルを塩水、酸、水などに浸け続けて腐食を加速させ、それを観測することによって 10 年後の反射率低下を見積もる促進腐食試験を行い、腐食を促進された鏡の解析が行われているところである。（図 4）。

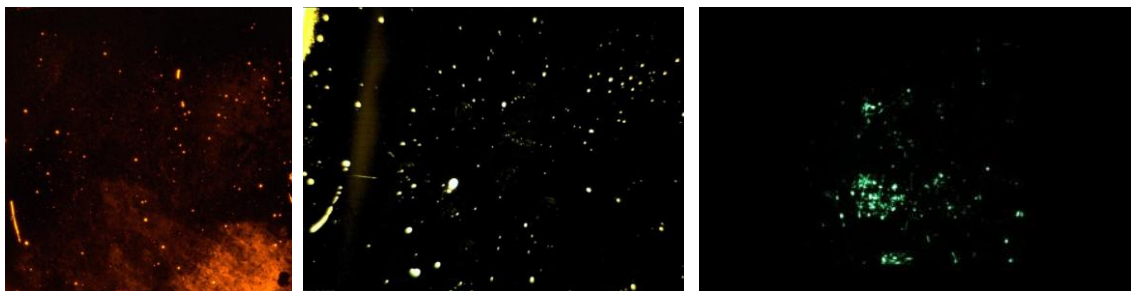


図 4：腐食された鏡サンプル（左. 近畿大、中央. 甲南大、右. 茨城大）

## 2-2. 分割球面鏡の評価について

試作された分割球面鏡について、 $2f$ 法と言う評価方法でスポットサイズの評価を行った。 $2f$ 法とは球面鏡の光軸上で曲率半径の中心に光源と検出器を置き、直接スポットサイズを測る方法(図5)である。この方法には仕組みがシンプルであるというメリットがあるが、曲率半径分の距離を必要とするため、LST分割球面鏡の場合は装置が巨大化してしまうことや、直接スポットサイズの光を測定するため、高精度の測定には全体が暗い方が良く、暗室内や夜間での測定など、周囲の明るさを抑える工夫が望まれることなどのデメリットがある。

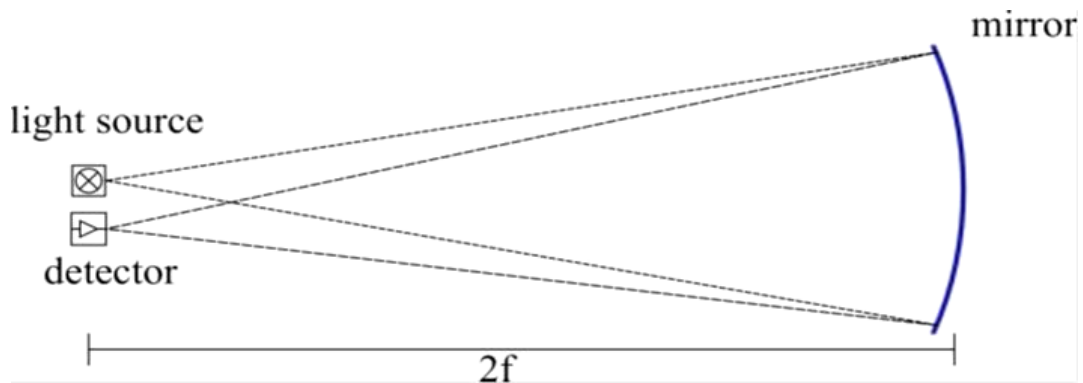


図5 :  $2f$ 法イメージ[1]

この測定によって撮影した画像(図6)の光強度をY軸方向に射影した分布を描き、ガウシアンフィッティングを行ったところ(図7)、スポットサイズは半径約12mmであった。しかし、画像をさらに調べたところ、この画像はサチュレーションを起こしている(図8)ことがわかり、より正確な見積もりを求めるために、精密な再測定を計画している。

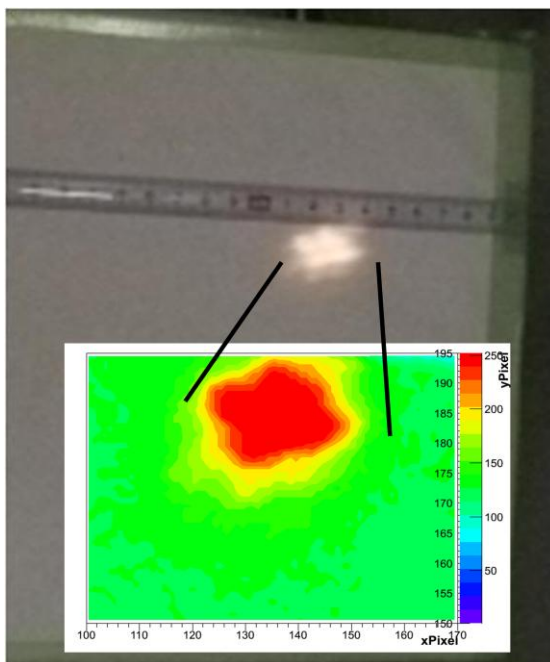


図6 :  $2f$ 法によって撮影された焦点

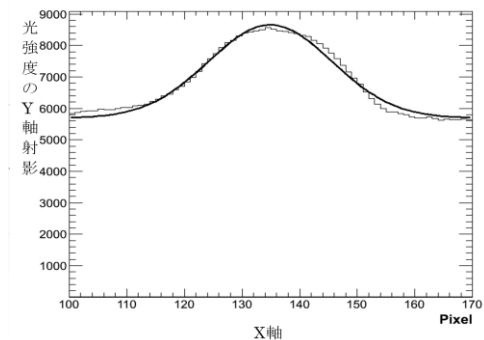


図7 : Y軸射影+ガウシアンフィッティング

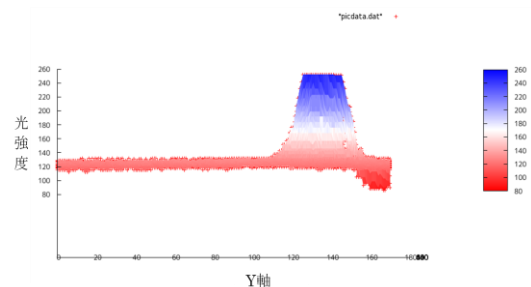


図8 : 投影画像、サチュレーションがある

### 2-3. 鏡の新しい評価方法の開発

CTA では分割球面鏡の新しい評価方法として、Phase Measuring Deflectometry 法(PMD 法) (図9)。を採用することとなった。PMD 法は、位相シフト法、及び、ステレオカメラ写真測量を利用して鏡面各点の勾配、法線ベクトルを求め、対象物の形状を高精度で測定する方法である。

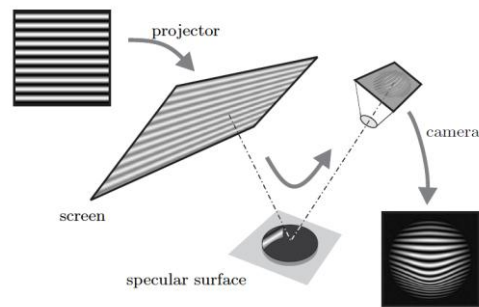


図9：PMD 法イメージ[2]

光を CCD から出る 1 本の光線と考えた場合を考える。左下図 (図 10 左) のように光が水平面から  $\alpha$  だけ傾いた鏡面で反射するとき、反射角は水平面の場合に対して  $2\alpha$  だけ振れ、縞模様のスクリーン上で  $\varphi$  だけずれる。これは  $\varphi = d \cdot \tan 2\alpha$  で表され、つまり CCD からは  $d$ 、 $\alpha$  (勾配) に依存した縞模様のずれが観測できる。これをもとに鏡面の勾配を計算する。しかし鏡面の場合は右下図 (図 10 右) のように高さが唯一に決まらないため、カメラでステレオ撮影することによって高さを決める。

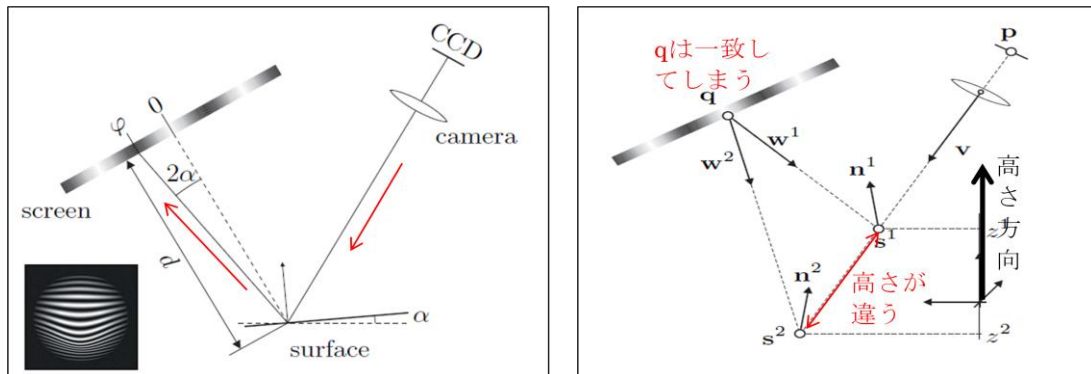


図 10：PMD 法原理[2]

PMD 法は従来の 2f 法と同様に測定はシンプルであるのに、直接鏡面の情報(勾配、座標、法線)が得られる、装置をコンパクトにできるなどの利点がある。実際に University of Erlangen-Nuremberg にて、Medium Size Telescope (MST) 用分割球面鏡 (対辺間 1200mm) 用の装置が製作され、測定が行われている。LST 用分割球面鏡を日本で生産するため、日本でこの PMD 法による分割球面鏡の評価ができるようになることが望ましい。そのために日本での PMD 法装置開発を行っている。

日本での装置開発にあたり、University of Erlangen-Nuremberg の MST 分割球面鏡(対辺間 1200mm)用 PMD 法装置を LST 分割球面鏡(対辺間 1510mm)用に拡張したものを考える。2f 法に比べてコンパクトなスペース内で、4 台の CCD カメラで十分な overlap 部分を作りつつ 1510mm の分割鏡全体を撮影できる (図 11) ように、それぞれ CCD カメラ、スクリーン、分割鏡の位置を決定する。上記のことを満たした CCD、スクリーン、分割鏡の位置を計算したところ、図 12 のようになった。

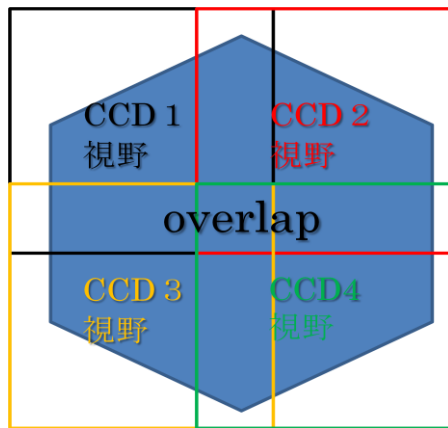


図 1 1 : 4 台の CCD 視野と分割鏡の関係

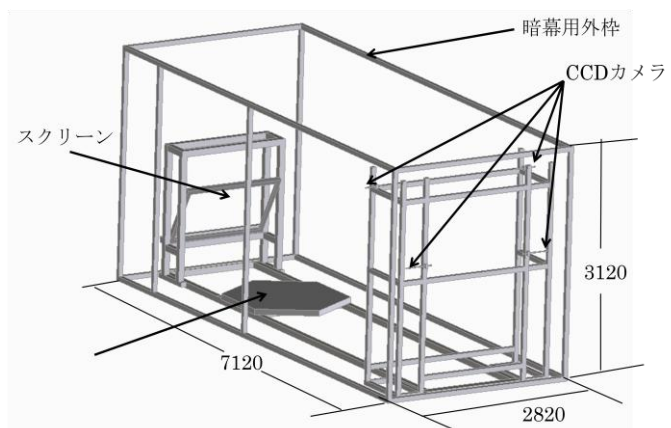


図 1 2 : 設計した LST 分割鏡用 PMD 法装置

#### 4. 総括

我々は CTA 計画における LST の分割球面鏡開発のため、以下のような研究を行っている。

- ・ 雨に対する分割鏡の 10 年の耐久性を調査するために、各大学で様々な条件の溶液に鏡を浸けて腐食を調査しており、現在、腐食した鏡の解析が行われている。
- ・ 試作された分割鏡のスポットサイズ（80%の光が入る）は、写真を基に Y 軸射影ガウシアンフィッティングから求めると、直径は 24mm であった。また、より信頼度を高めた正確な再測定を行う予定である。
- ・ 新しい鏡の評価方法である PMD 法は、2f 法に比べて、鏡面データが得られる、装置がコンパクトなどの利点があり、大量生産された分割鏡を評価法として効果である。現在、実際に装置を組み立て、試作鏡の評価の準備中であり、また、レイトレーズを使いスポットサイズを求め、2f 法の測定結果との比較も行う予定である。

#### 5. 参考文献

[1] Anneli Schulz, Roman Krobot, Evelyn Olesch, Christian Faber, Friedrich Stinzing, Christian Stegmann, Gerd Häusler on behalf of the CTA consortium. Methods of the characterization of mirror facets for Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes. 32nd International Cosmic Ray Conference, 2011.

[2] Markus C. Knauer, Jürgen Kaminski, Gerd Häusler. Phase Measuring Deflectometry: a new approach to easurespecular free-form surfaces. Staudtstr, 7/B2, 91058 Erlangen, Germany. 2004.