

次世代ガンマ線望遠鏡 CTA における大口径望遠鏡の分割鏡の形状測定

長 紀仁 (茨城大学大学院 理工学研究科)

Abstract

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、大・中・小と口径の異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡を用いて、これまでよりも高感度で 20 GeV から 100 TeV 以上にわたる広エネルギー帯において高エネルギーガンマ線の観測を目指す国際共同プロジェクトである。

CTA-Japan グループが研究開発を行っている大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope (LST)) は、CTA 計画全体で 8 台建設される予定である。この 23 m の口径を実現するために、1 台あたり六角形の対辺が 1.51 m の分割球面鏡を約 200 枚も使用する。この大口径望遠鏡開発に伴い、大量の大型分割鏡の形状を高精度かつ効率よく評価することが必要不可欠であり、現在この評価方法として Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法という方法を採用している。

PMD 法とはドイツのエアランゲン大学で開発された 3 次元形状測定方法で、液晶スクリーンを使い対象の鏡面に位相模様を映し、正反射によって生じた像の鏡面形状に変形を 4 台の CCD カメラでステレオ撮影した画像を解析することにより、鏡面形状、法線を測定する方法である。これまでグループでは、PMD 法で得られた鏡面情報から光線追跡シミュレーションを行い、スポットサイズや焦点距離の評価を行ってきた。

本講演では、直径 0.303 m、焦点距離 1.5 m、面精度 ($1/12\lambda =$ 約 50 nm) の放物面鏡を試験鏡として用いて、レーザープロブ方式の非接触 3 次元形状測定装置 (NH-6) による測定と PMD 法の測定の比較を試みたので、その結果について報告する。今後は、非接触 3 次元測定装置による測定や 2f 法によって得られたデータを解析する方法を確立し、PMD 法の結果と比較し精度を評価することを目指す。

1 LST における分割鏡開発

高エネルギーガンマ線が地球に到来すると、大気中の原子核との相互反応により電磁カスケードシャワーを発生する。このシャワー内の電子、陽電子が大気中の光速を超えると、チェレンコフ光が発生する。CTA 計画とは、このチェレンコフ光のつくるイメージを大・中・小と口径の異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡を地上に配置することにより、これまでの 10 倍の感度で 20 GeV から 100 TeV 以上にわたるエネルギー範囲において観測を目指す国際共同プロジェクトである。

CTA-Japan グループは大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope (LST)) の開発に貢献している。LST は CTA で観測するガンマ線のエネルギー範囲において、20 GeV から 100 GeV までの低エネルギー側の観測を担当する。

LST では 23 m という大口径を、対辺が 1.51 m の六角形の分割球面鏡を約 200 枚組み合わせること

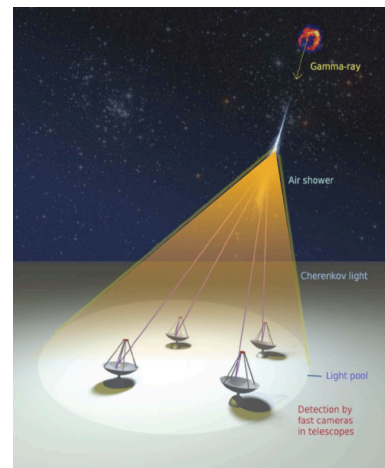


図 1: シャワーによって発生するチェレンコフ光を複数台の望遠鏡で観測する。[1]

によって実現する。これにより、集光面の PMT における光子密度を稼ぎ、高い SN 比で電磁カスケードシャワーの楕円形状をとらえる。そのために、分

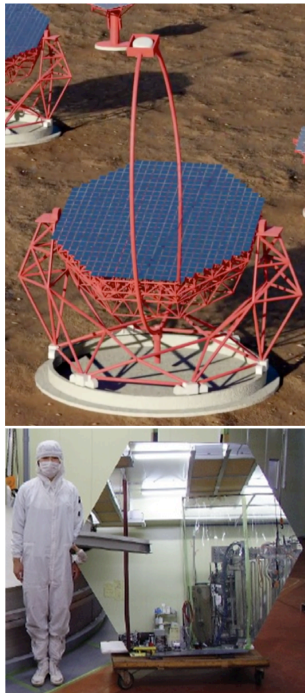


図 2: LST イメージ (上) とその分割鏡 (下)

割鏡の開発においては、分割鏡の一つ一つのスポットサイズはその Point Spread Function (PSF) の 80% の光が入る直径 (D80) が結像面の 1 ピクセル (50 mm) の 2/3 よりも小さい (D80 < 32 mm) 必要がある。また、分割鏡の個々のスポットを合成した LST 全体のスポットのシミュレーションを行うためには、分割鏡の個々のスポットサイズの形状情報が必要となる。

2 Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法

先にも述べた通り、LST は、1 台あたり約 200 枚の分割鏡を使用する。そのため大量生産された分割鏡を高精度かつ効率よく評価する方法が必要不可欠である。CTA-Japan グループではこの評価方法として、Phase Measuring Deflectometry (PMD) を採用した。

この方法は位相シフト法とステレオカメラ写真測

量を利用した方法で、図 3 で示した通り、鏡面に位相模様を映し込み、複数のカメラで形状に依存した位相のずれをステレオ観測することにより、鏡面形状、法線ベクトルを測定する。その後、得られた鏡面データから光線追跡シミュレーションを行い、スポットサイズや焦点距離を評価する。この方法では、曲率半径が長い球面鏡でもその長さに対してコンパクトな装置で測定を行うことができる。さらに従来の 2f 法では得られない鏡面のデータも得ることができるというメリットもある。

PMD 法によって鏡の形状を測定するために必要な較正は、カメラキャリブレーション、スクリーンキャリブレーション、ワールド座標キャリブレーションの 3 つである。

カメラキャリブレーションとは、CCD カメラにレンズをつけて撮影を行うと、理想レンズからの歪みにより撮影された画像が実物に対して歪んでしまう現象が起こるので、それを補正し、歪みのない正確な画像の撮影を可能にすることである。

スクリーンキャリブレーションとは、スクリーン表面が持つ歪みにより、画像を投影した際に元の画像データに対して見える画像が歪む現象を補正し、スクリーン表面の歪みを無くすることである。

ワールド座標キャリブレーションとは、測定を行うために、装置全体の座標系 (ワールド座標) での原点、CCD カメラの各ピクセルにおける視線ベクトルの座標、スクリーンの座標を決定することである。

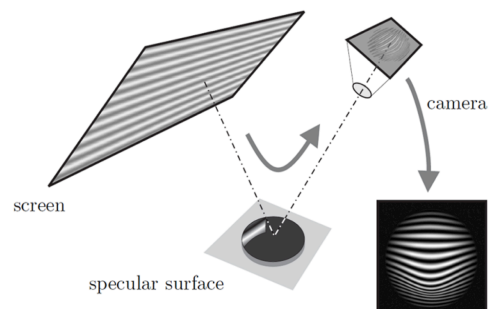


図 3: PMD 法イメージ [2]

3 レーザープローブ方式の非接触 3 次元形状測定装置 (NH-6) と PMD 法の測定の比較

PMD 法の更なる精度向上を目指した改善を行っていく上で、考えられる改善の一つとして、ワールド座標キャリブレーションに使用する鏡の改善がある。もし、キャリブレーションを行う際に理想的な球面鏡を使用することができれば、測定精度を向上することが可能になると考えられる。

今回はその前段階として、仕様のわかっている直径 0.303 m、焦点距離 1.5 m、面精度 ($1/12\lambda =$ 約 50 nm) の光学放物面鏡を試験鏡として用いて、名古屋大学全学技術センター第一装置開発室にあるレー

ザープローブ方式による非接触 3 次元形状測定装置 (三鷹光器 NH-6) と PMD 法の測定結果の比較を行い、現在の PMD 法の精度の評価を試みた。

それぞれ測定で得られた試験鏡の鏡面座標データを元に焦点距離を求め、理想放物面をフィッティングし、実測値で求められた球面との差を求めた。以下にその結果を示す。

レーザープローブ方式による非接触 3 次元形状測定装置での測定データは、鏡表面の汚れ等により、鏡表面状でのレーザースポットの像が歪んでしまい、AF センサ状に結像できなかった等の原因が考えられ、測定がうまくできず、直径 10 cm でのデータしかとれなかった。PMD 法の方でのデータは直径 30 cm のものとなっている。

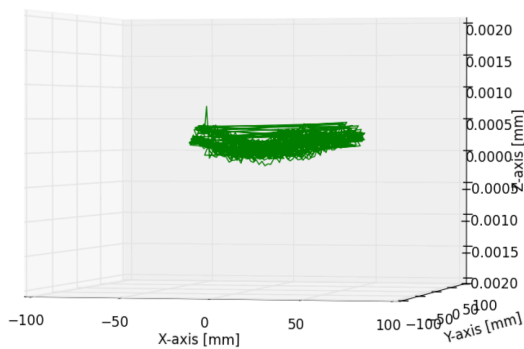


図 4: レーザープローブ方式の測定 (直径 10 cm) による理想放物面からのずれ (3 次元プロット)

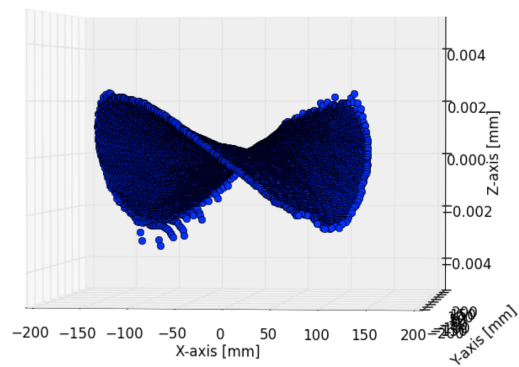


図 6: PMD 法の測定 (直径 30 cm) による理想放物面からのずれ (3 次元プロット)

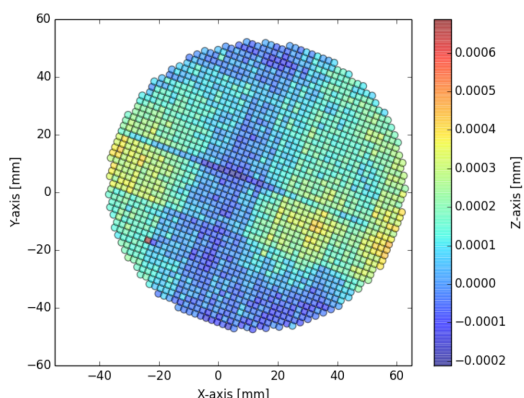


図 5: レーザープローブ方式の測定 (直径 10 cm) による理想放物面からのずれ (2 次元プロット)

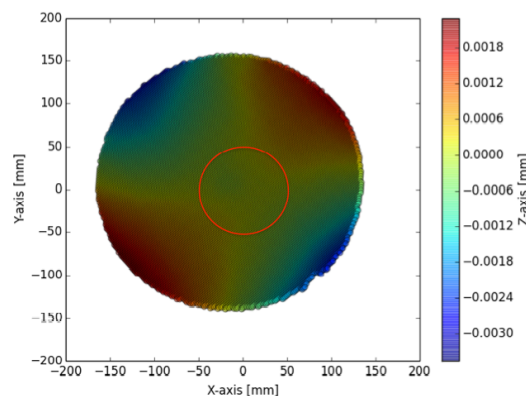


図 7: PMD 法の測定 (直径 30 cm) による理想放物面からのずれ (2 次元プロット) 赤い円はレーザープローブ方式での測定範囲 (直径 10 cm) を示している。

非接触 3 次元形状測定装置の測定による結果では、理想放物面との差は $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下で見られた。一方、PMD 法の測定による結果では、理想放物面との差は約 $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度で見られた。そして理想放物面との差の現れ方が馬の鞍型のように分布しているという特徴が見られた。

4 まとめと今後

今回 PMD 法との比較に用いたレーザープローブ方式による非接触 3 次元形状測定装置であるが、鏡表面の汚れ等により、鏡表面状でのレーザースポットの像が歪んでしまい、AF センサ状に結像できなかった等の原因が考えられ、うまく測定することができなかった。そのため、測定範囲が直径 10 cm の範囲となってしまう、試験鏡の鏡面全体 (直径 30 cm) を測定した PMD 法との比較は鏡面の底に近い局所的な部分 (図 7 の赤い円で囲った範囲内) でしか比較ができないが、理想放物面との差はともに $\pm 1 \mu\text{m}$ 程度で見られ、それほど大きな差はないと考えられる。今後は、非接触 3 次元形状測定装置で直径 30 cm の範囲で測定をやり直し、鏡面全体での比較を行う必要がある。

また今回焦点距離を求めた方法とは別に、光線追跡シミュレーションによって焦点距離を求め理想放物面をフィッティングして両者の表面形状の測定結果を比較するというものも行う予定である。

Reference

- [1] CTA-Japan コンソーシアム, 2010, 『Cherenkov Telescope Array 計画』
- [2] A. Schulz, R. Krobot, E. Olesch, C. Faber, F. Stinzling, C. Stegmann, G. Husler on behalf of the CTA consortium, 2011, Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC2011), 9, 34
- [3] 馬場浩則, 2013, 修士学位論文 『次世代超高エネルギーガンマ線天文台 CTA 計画における大口径望遠鏡の分割鏡の集光性能評価の研究』, 茨城大学