

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画における 分割鏡の形状評価システムの開発

馬場 浩則 (茨城大学大学院 理工学研究科), 他 CTA-Japan consortium

Abstract

ここでは、Cherenkov Telescope Array(CTA) 計画における分割球面鏡の形状評価システムとして開発を行っている Phase Measuring Deflectometry(PMD) 法の現状を報告する。

CTA 計画は、大中小の3種類の異なる口径の解像型大気チェレンコフ望遠鏡による大規模望遠鏡群により、現在稼働している同タイプの望遠鏡よりも一桁高い感度で数 10GeV から 100TeV までの広いエネルギー範囲の高エネルギーガンマ線を観測する国際共同実験である。その中で日本グループは、特に口径 23 m を持つ大口径望遠鏡、Large Size Telescope(LST) に重点を置いて開発を行っている。

LST の反射面は六角形で対辺間が 1.51 m、焦点距離 28~28.5 m の大型分割球面鏡 200 枚で構成され、その全ての開発は日本グループが担当する。LST は 8 台建設予定であることから、この大量の分割鏡の形状を高精度かつ効率の良く評価する方法が必要となる。CTA 計画ではこの評価方法として PMD 法という形状測定方法を採用した。PMD 法とは鏡面に位相模様を映し込み、4 台の CCD カメラで鏡全体をカバーするようにステレオ撮影し、形状による位相のずれから、鏡面形状、法線ベクトルを測定する方法である。その後、得られたデータから光線追跡を行い、スポットサイズや焦点距離を評価する。この方法では撮影された画像を合成することにより大型の分割鏡でも全体を測定、評価することが可能で、また最大 28.5 m という焦点距離に対して全長 7m 程度の装置で測定を行うことができる。2012 年の秋に宇宙線研究所内に設計した PMD 法装置が完成し、装置較正を行い、実際に使用する大型分割球面鏡の試測定とその情報をもとに更なる較正を繰り返した。現在では、10 μm 近くまでの鏡面構造を確認できるまでになっているが、スポットサイズの形状を評価するためにはまだ不十分であり、今後も更なるデータの解析と装置の較正が必要である。

1 Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画

1.1 CTA 計画

地球に到来する高エネルギーガンマ線は大気中の原子核との相互作用により、直接地上で観測することが出来ない。しかし、その相互作用を利用して間接的に観測することが出来る。高エネルギーガンマ線は大気中の原子核との相互作用により電磁カスケードシャワーを発生させる。このシャワー内の電子、陽電子が空気中の光速を超えると、チェレンコフ光が発生する。この光の光子数と結像で求められるシャワーの楕円形状を地上の鏡を用いた望遠鏡でとらえることにより、エネルギーと到来方向を決定できる。この原理を用いた望遠鏡を解像型大気チェレンコフ

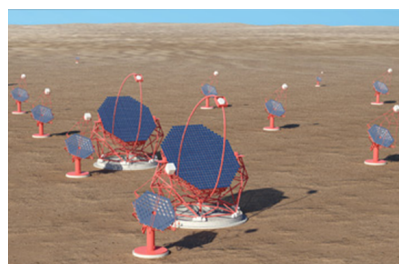


図 1: CTA 計画イメージ

望遠鏡という。

CTA 計画とはこの解像型大気チェレンコフ望遠鏡の図 1 のような大規模望遠鏡群により、広いエネルギー範囲の高エネルギーガンマ線の高感度地上観測を目指す国際共同実験である。この計画では Large Size Telescope、Medium Size Telescope、Small Size

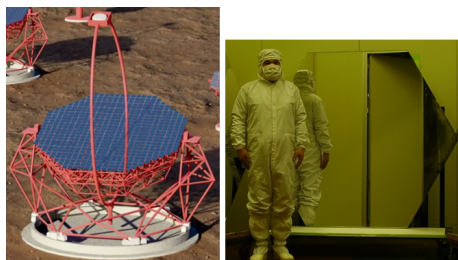


図 2: LST CG イメージ (左) とその分割球面鏡 (右)

Telescope という異なった口径の望遠鏡をそれぞれ南北の 2 ステーションに合計 100 台近く配置することにより、数 10GeV~100TeV までのエネルギー範囲を、現在稼動中の同タイプの望遠鏡の 10 倍の感度で全天観測する。

1.2 Large Size Telescope (LST)

CTA-Japan グループは主に LST の開発に重点を置いている。LST は図 2. 左のような形状で、CTA 計画における観測するガンマ線のエネルギー範囲において数 10GeV~100GeV までの低エネルギー側の担当する。チェレンコフ光の光子数は元となるガンマ線のエネルギーに依存し、ガンマ線のエネルギーが低いほど光子の数も少なくなる。LST はこの低エネルギーガンマ線でのチェレンコフ光の光子を十分にとらえるため、複数の分割球面鏡を組み合わせた放物面型複合鏡を用いて 23 m という大口径を実現しつつ、シャワーの楕円形状をとらえるために収差の発生を抑える必要があり、焦点距離を 28 m (F 値 = 1.2) としている。

LST で使われる分割球面鏡は図 2. 右のような対辺間が 1.51 m の六角形の形状をしており、放物面型複合鏡のシミュレーションから焦点距離を基準に 28~28.5m の間で 3 種類に分類し、約 200 枚組み合わせて LST 自身の 23 m の口径と 28 m の焦点距離を実現する。(図 2; 右) また、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ために、分割球面鏡の一つひと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、

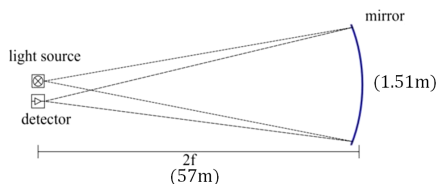


図 3: 2f 法の概略図 [1]

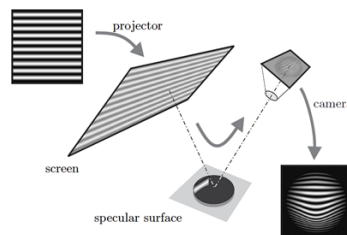


図 4: PMD 法イメージ [2]

つまり $D80 < 32$ mm である必要がある。さらには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 分割球面鏡の形状評価法の開発

2.1 Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法

従来の球面鏡評価方法として、2f 法が行われている。この方法は図 3 のように対象となる球面鏡の曲率半径の距離 (2f) に光源と検出器を置き、実際に光を反射させ、集光したスポットサイズを測定する。しかし、CTA 計画の LST で使用する分割球面鏡は曲率半径が 57 m にもなり、この方法を用いた場合、暗室に近い状態の実験室が 57 m 以上必要となる。そのため CTA 計画ではこの評価法として、Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法を採用した。

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 4 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

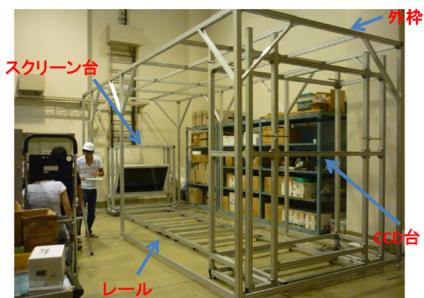


図 5: 制作した PMD 装置

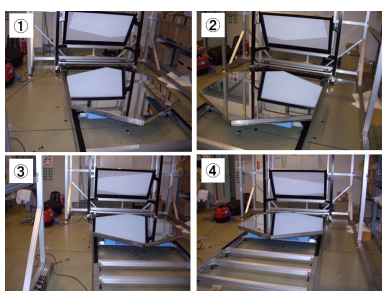


図 6: 4 台の CCD カメラ視野

撮影された画像を合成することにより大型の分割鏡でも全体を測定、評価することが可能で、曲率半径が長い球面鏡でもに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。

2.2 装置製作

CCD カメラで撮影した際にスクリーンの像が映る鏡の範囲を計算し、4 台の CCD カメラを合わせれば鏡全体にスクリーン像が映っている状態に出来るそれぞれの位置を決定した。それをもとに装置を設計、製作を行った。

完成した装置は図 5 のようになり、長辺 7.12 m、短辺 2.82 m、高さ 3.12 m という大きさになった。実際に CCD 視野を確認すると、図 6 のように 4 台の CCD カメラで十分に鏡全体をスクリーン像で覆うことが出来た。

2.3 較正

測定を行う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む現象を補正し、歪みのない正確な画像の撮影を可能にすることである。Australis という Photometrix 社製のキャリブレーションソフトを使用して補正を行った。まず、正確な座標がわかっている複数のドットが書かれているカーボンファイバー製のボードを撮影の位置や角度を変えて撮影した。そして、Australis を用いて複数の画像と座標データとの比較から補正式の係数を求めた。

スクリーンキャリブレーション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。この補正ではまず、スクリーンに投影した画像データを位置と角度を変えた複数の状態で較正済みカメラで撮影した。そしてそれぞれの画像と元の画像データとの残差からスクリーンの補正式の係数を求めた。

ワールド座標キャリブレーションとは PMD 装置全体の座標系に CCD カメラピクセル、スクリーンを対応させる。この較正では、まず球面鏡を使ってスクリーンを投影させた鏡面を異なった条件で複数回撮影した。そして、それぞれの画像における各座標の対応関係を、CCD カメラの位置、スクリーンの位置、球面鏡の曲率をフリーパラメータをとって最も適切になるように求めた。

2.4 PMD 法を用いた分割鏡の測定

各キャリブレーションを終え、実際に 1.51 m の試作分割球面鏡の測定を行った。測定はまず PMD 装置で各カメラで見えている鏡の部分的な範囲を計測する。その後、4 台分すべての画像を開発元である 3 D-shape 社が製作した合成プログラムを使用して合成し、1 枚の鏡のデータにする。

測定の結果、図 7 の半径 58.095 m の理想球面からのずれの画像、図 8 のローカルな曲率半径をその逆数で表した画像の両者ともほとんど合成の跡が見られない。さらには鏡の製造過程において研磨の際、鏡を部分的に吸引して固定した時に出来たであろう、

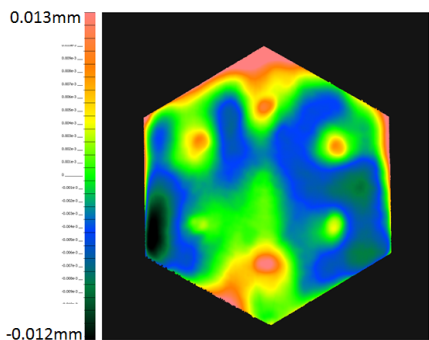


図 7: 理想球面 (58.095m) からのずれ

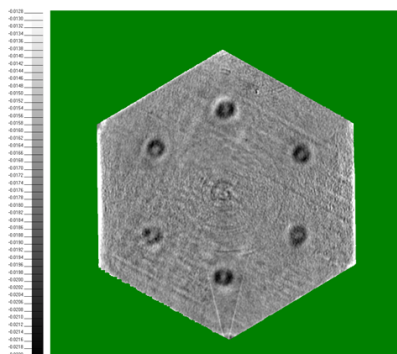


図 8: 曲率半径の分布

高さが $8 \mu\text{m}$ 程度の 6 つの対称構造が見えている。また、図 9 のスポットサイズが最小となる曲率半径は 58.14 m、D80 は 15.7 mm となった。さらに鏡のエッジによる影響である、六方向に伸びた線も確認することができ、実際の鏡のスポットをある程度再現できている。

しかし、測定の精度を見るために同じ鏡を時計回りに 120 度回転させた場合を測定してみると、図 10 のようにスポットサイズは対応した回転変化をせず、最小となる曲率半径、D80 はそれぞれ 58.2 m、16.6 mm となった。これはまだ装置の系統誤差が大きく、測定精度が十分でないことが言える。

3 まとめと今後

CTA 計画における鏡の形状評価方法の開発として、PMD 法の装置を製作、較正を行い、測定を行った。その結果、現段階では PMD 装置は $10 \mu\text{m}$ 付近の鏡面構造を測定することが出来るようになった。しか

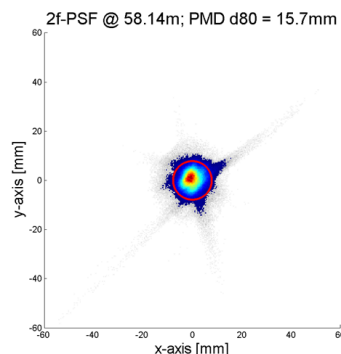


図 9: 2f の位置でのスポットサイズ

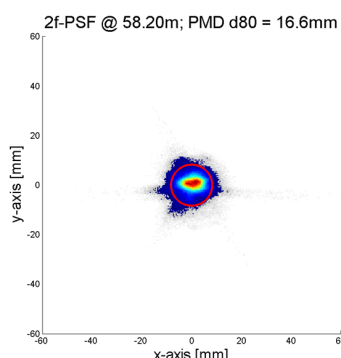


図 10: 120 度回転させた 2f でのスポットサイズ

し、回転に対する変化は見られず、スポットサイズの形状まで測定するには現段階以上、最低でも 2 倍以上の測定精度が必要と予測される。

今後は測定の精度にかなり効いていると考えられるスクリーンキャリブレーションにおける較正式の見直しを行い、系統誤差を理解して較正精度の向上を図る。そして、実際に鏡の評価装置として運用を可能にする予定である。

Reference

- [1] Knauer Markus C, Kaminski Jrgen, Husler Gerd, 2004, Proceedings of the SPIE, 5457, 366
- [2] Anneli Schulz, Roman Krobot, Evelyn Olesch, Christian Faber, Friedrich Stinzling, Christian Stegmann, Gerd Husler on behalf of the CTA consortium, 2011, Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC2011), 9, 34