

CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの 形状決定と製作方法の確立に向けた開発

小野 祥弥 (茨城大学大学院 理工学研究科)

Abstract

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、口径が異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡群を用いて、これまでにない高感度で高エネルギーガンマ線の地上観測を目指す国際共同プロジェクトである。この計画において CTA-Japan グループが主に開発に携わっている大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST) の焦点面にはガンマ線によって生じたチェレンコフ光を検出する光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube, PMT) が 1855 個配置され、全ての PMT にライトガイドと呼ばれる光学部品が取り付けられる。ライトガイドは、PMT 間に生じる隙間 (デッドスペース) を埋めることで観測したい光であるチェレンコフ光をより効率よく集めるという役割と、夜光などのバックグラウンドを低減するという役割を担う。この役割を達成するためにライトガイドの内側には反射材を貼り、その形状は光線追跡シミュレーションの結果から最適化される予定で、ある入射角度 (cutoff angle) 以内に入射した光をよく集め、それ以上の角度で入射した光をカットするという性質を持っている。ライトガイドの内面はその役割上、綺麗な鏡面である必要があるが、これまでに試作したものの一部には表面に縞模様が生じているものがあつたためこの原因を探った。本講演では、この縞模様の原因を探るための実験に加え、LST 用ライトガイドの形状を決定するために必要な反射材の反射率測定及び大量生産に向けた開発の状況について報告する。

1 CTA 計画

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、図 1 のように大・中・小と口径が異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡を約 100 台配列することで、これまでにない感度で 20 GeV から 100 TeV 以上の広いエネルギー帯において高エネルギーガンマ線を地上で観測することを目指す国際共同プロジェクトである。日本グループは主に大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST) の開発に携わっている。

高エネルギーガンマ線は図 2 のように地球大気に入射する際、大気中の原子核と相互作用し、空気シャワーを生じる。この過程で発生する電子・陽電子が空気中の光速を超すと、大気中でチェレンコフ光を発生する。チェレンコフ光は粒子の進行方向から約 1 度の方向に放射され、地上に降り注ぐ頃には 300m 程度の広がりとなる。CTA 計画ではこれをステレオ観測することで、ガンマ線の到来方向やエネルギーの大きさを決定する。

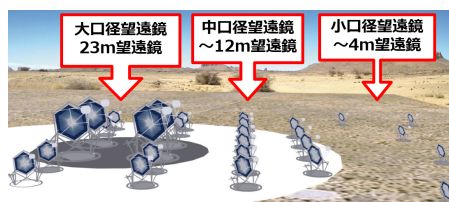


図 1: CTA イメージ図 [1]

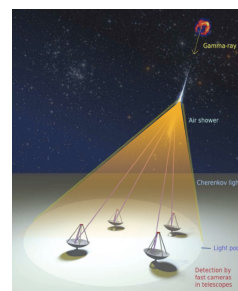


図 2: 高エネルギーガンマ線によって空気シャワーが起こり、放射されたチェレンコフ光を観測する [2]。

2 ライトガイドとは

LST 焦点面には、チェレンコフ光を検出するためのカメラとして 1855 本もの PMT が一面に配置される。しかし、PMT の入射窓が円形であるため、これを並べると図 3 左のようにデッドスペースとなる隙間が生じてしまう。このデッドスペースに入射したチェレンコフ光は検出することができないことから、望遠鏡の有効面積が減少してしまう。

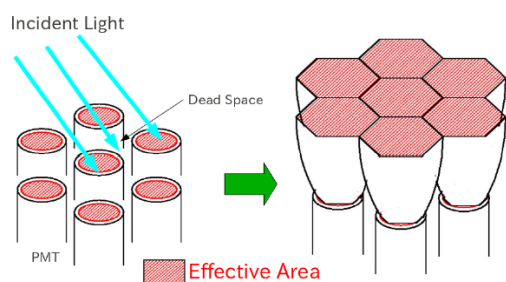


図 3: ライトガイドを PMT に取り付けることによりデッドスペースが低減し、焦点面の有効面積（図の赤い領域）が拡大する [3]。

この PMT 間のデッドスペースを低減するために、図 3 右のように全ての PMT にライトガイドと呼ばれる光学部品を取り付ける。ライトガイドの内側は鏡面になっており、これを取り付けることによって効率よくチェレンコフ光を PMT に導くことができる。また、観測中には夜光や地面からの照り返しなどのバックグラウンドとなる光が焦点面に直接入射してしまうことがあるが、ライトガイドの内面形状の特性により、これを低減することができる。これらの役割は、ライトガイドの内側鏡面の形状を最適化することによってさらに性能を改善することが出来ると期待される。そのため以前より光線追跡プログラムを用いて形状最適化のためのシミュレーションを行っている。

3 試作ライトガイド反射面の横縞

本研究ではライトガイドの大量生産に向けての性能検証のために、これまでいくつかのライトガイドを試作してきた。試作の際は主に 3D プリンタ (KEYENCE 製 AGILISTA-3000) でライトガイドの

型を成形し、その内面（6 面）に反射材として 3M 製の Enhanced Specular Reflector (ESR) フィルムを貼り付けることで作製してきた。しかし、図 4 に示すように試作したライトガイドの反射面の一部に横縞が浮かび上がってしまった。これは反射面が歪んでいることを意味している。

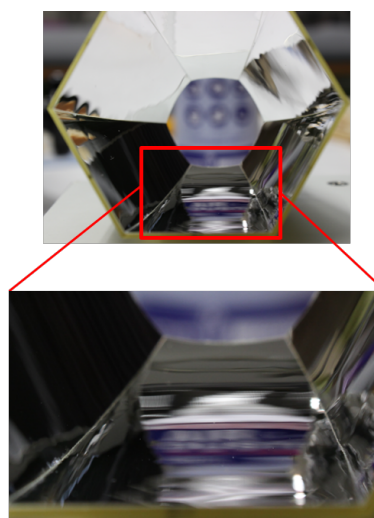


図 4: ライトガイドの鏡面にできた横縞

ライトガイドの鏡面に横縞が浮かび上がってしまう原因として候補に挙がったのは、反射材の貼り付けに用いる両面テープの模様と 3D プリンタで作成した型の表面の細かな横線である。これを確かめるべく、図 5 に示すように 3D プリンタで作成した平面と平らなアクリル板に反射材をはりつけたところ、3D プリンタで作成した平板にのみ横縞が浮かび上がった。このことから試作ライトガイドの鏡面に現れていた横縞は、3D プリンタ由来だということがわかった。尚、最終的にライトガイドを大量生産する段階では、射出成形と呼ばれる方法で型を作成する予定であり、この方法では横縞が発生する心配は無い。

4 形状最適化に向けた基礎特性の測定

ライトガイドの内側の形状を最適化するために必要な要素の 1 つに、反射率の入射角度依存性がある。ライトガイド内部で起こる反射は主に入射角の大き

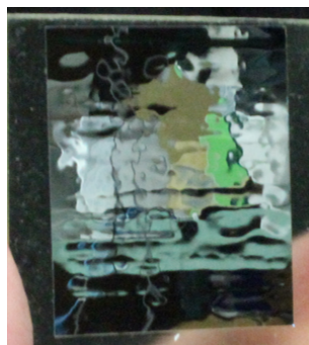


図 5: 3D プリンタで作成した平板に貼り付けた反射材

い場合が多いが、これが反射率にどのような影響を与えるのかを確かめるために、各入射角における反射率を測定した。図 6 が測定系の写真である。反射材の向きや、検出器の位置を動かすことで入射角 θ を変えることができる。今回は入射角 20、45、60、70 度、波長 250 - 400 nm で、反射材にはこれまでのライトガイド試作品にも使用してきた ESR と、本番で使用する予定の、紫外 (UV) 領域を増反射させる多層膜コーティングを施した反射材 (以下、UV-ESR と呼ぶ) について反射率を測定した。結果を図 7 に示す。今回の測定によると UV-ESR は反射率がおおよそ 90 % までしか届いていない。ESR の反射率は可視光領域の波長に対して反射率が 98 % 以上あることを考えると、UV-ESR の多層膜コーティングには改善の余地があることがわかった。そのため、より高い反射率が出るようにコーティングを変更する予定である。今のところは反射率を 95 % と仮定して最適化を行うが、今後新たなコーティングを施した反射材が完成した場合はその反射率測定結果をシミュレーションに取り込む予定である。

5 大量生産に向けて

ライトガイドは LST 1 台につき 1855 本必要である。また LST は南北の観測サイト合計で 8 台建造する予定なので、最終的に必要となるライトガイドはおおよそ 15,000 個である。これまでライトガイドを試作する時は主に 3D プリンタを使用してきたが、これは単価が高いため大量生産には向かない。大量生

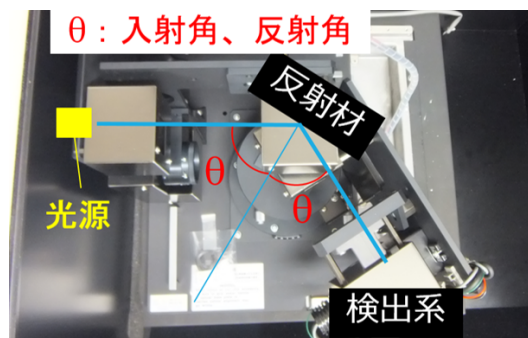


図 6: 今回使用した反射率測定器。波長・角度を変えて測定することができる。

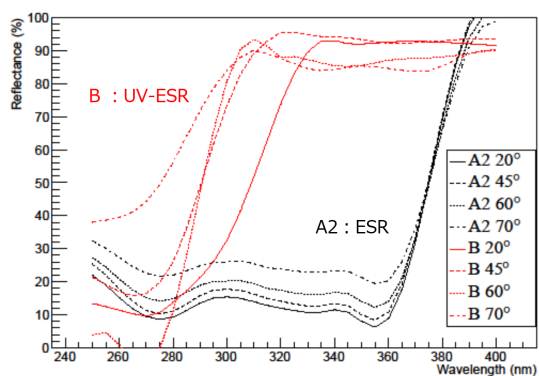


図 7: 反射率測定結果

産の段階では射出成形という手法を採用する予定である。射出成形とは始めに成形したいものの金型を作り、そこへ材料となる樹脂を流し込んで成形するというものである。金型を作るのは高くつくが、1度作ってしまえばそれ以後はパーツ 1 つあたりの値段が非常に安いため、大量生産に向いている。

現在は大量生産の前段階としてライトガイドの形状最適化や、材料決めを行っているところだが今年度中を目標に、大量生産に移る予定である。

6 まとめと今後

本研究では CTA の LST 用ライトガイドの形状決定と製作方法の確立に向けた開発として、これまで試作したライトガイドの鏡面に現れていた横縞の原因を究明し、生産段階の射出成形では問題にならな

2014 年度 第 44 回 天文・天体物理若手夏の学校

いことを突き止めた。また、反射材の反射率測定の結果から、反射材の多層膜コーティングには改善の余地があることがわかった。最適化が終了し、ライトガイドの形状や材料が最終決定したら射出成形による大量生産に移行する。

Reference

- [1] M. Actis et al., 2011, *Experimental Astronomy*, 32, 193-316.
- [2] H. J. Völk and K. Bernlöhr, 2009, *Experimental Astronomy*, 25, 173-191.
- [3] 田中駿也, 2013 年度, 茨城大学修士学位論文