

CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの開発

田中 駿也 (茨城大学大学院 理工学研究科), 他 CTA Japan consortium

Abstract

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は、大・中・小の口径が異なるチェレンコフ望遠鏡を約 60 台配置して、現在稼働している MAGIC, H.E.S.S, VERITAS 望遠鏡よりも広帯域・高感度のガンマ線観測を目的とする国際共同プロジェクトである。日本グループは大口径望遠鏡 (Large Size Telescope, LST) の開発を中心に進めている。

望遠鏡の焦点面には、チェレンコフ光を捕えて電気信号に変換する光電子増倍管 (Photomultiplier Tube, PMT) が一面に配置され、その数は LST 一台あたり 1855 本にも及ぶ。しかし、PMT を一面に配置する際、LST に使用する PMT の入射窓が円形であるため、PMT 同士を隣接させて配置すると、互いの間に隙間 (デッドスペース) ができてしまう問題点が生じる。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。今回発表するライトガイドは、デッドスペースを埋めて効率よくチェレンコフ光を PMT に導き、かつ夜光などのバックグラウンドを低減するために、全ての PMT に取り付けられる光学部品である。ライトガイドの曲面形状としては、ある角度以内で入射した光は 100 % 集光し、それより大きい角度で入射した光は全てカットするという特徴を持つ Winston Cone が代表的である。これまでに、Winston Cone 型ライトガイドを切削加工と 3D プリンタでいくつか試作し、現在その性能評価を行っている。

本講演では、LST 用に試作したライトガイドの性能評価及び大量生産に向けた開発の現状を報告する。

1 CTA 計画

宇宙から到来した高エネルギーガンマ線は、地球大気と相互作用をして電子・陽電子対を生成し、それらは制動放射を起こして再びガンマ線を放射する。この過程を繰り返して粒子数が増加していき、やがて粒子のエネルギーが低下すると、生成される粒子数も減少していき収束する。この現象を空気シャワーという。空気シャワー中に発生する電子・陽電子が大気中の光速を超すと、チェレンコフ光と呼ばれる光を発する。チェレンコフ光は粒子の進行方向に対して約 1 度の放射角で放出され、地上では数百 m の広がりとなる。図 1 に示すように、地上に到達したチェレンコフ光を、地上に設置したチェレンコフ望遠鏡で観測することで、地球に到来したガンマ線のエネルギーや到来方向を決定することができる。

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は、図 2 のように大・中・小の口径が異なるチェレンコフ望遠鏡を数 km² の範囲に約 60 台配置して、現在稼働している MAGIC, H.E.S.S, VERITAS 望遠鏡よりも広帯域・高感度のガンマ線観測を目指す国際共同実

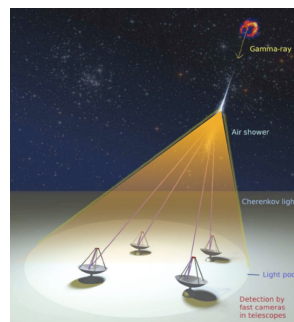


図 1: 空気シャワー中に発生したチェレンコフ光を地上に設置した望遠鏡で検出する [1]。

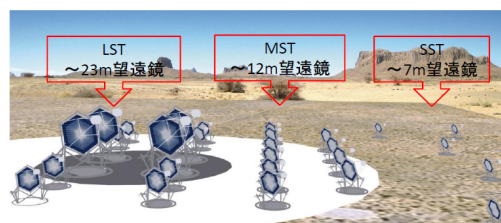


図 2: CTA 想像図 [2]

験である。日本グループは大口径望遠鏡 (Large Size Telescope, LST) の開発を中心に進めている。

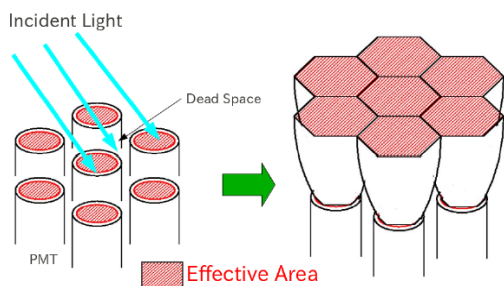


図 3: ライトガイドを PMT に取り付けることによりデッドスペースが低減し、焦点面の有効面積（図の赤い領域）が拡大する [3]。

2 ライトガイド

2.1 ライトガイドの目的

LST の焦点面には、チェレンコフ光を電気信号に変換する光検出器である、光電子増倍管 (Photomultiplier Tube, PMT) が一面に配置される。LST 焦点面の大きさは直径 2.5m であり、LST 一台あたりに使用する PMT の数は 1855 本にも及ぶ。しかし、PMT を一面に配置する際の問題点として、LST に使用する PMT の入射窓が円形なため、PMT 同士を隣接させて配置すると互いの間に隙間 (デッドスペース) ができてしまう。このデッドスペースに入射した光は検出することができず、望遠鏡の有効面積が減少する原因となる。ライトガイドは、この PMT 間のデッドスペースを低減するために、図 3 のように全ての PMT に取り付けられる光学部品である。ライトガイドの内面は鏡面になっており、ライトガイド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 PMT に入射してしまうが、ライトガイドはこれを低減する役割も担う。

2.2 ライトガイドの形状: Winston Cone

焦点面に隙間なくライトガイドを配置するため、ライトガイドの外形は六角形である。六角形ライトガイドの場合、内面の形も六角形なので、面が六面つらな形をしている。ライトガイド内面の向かい

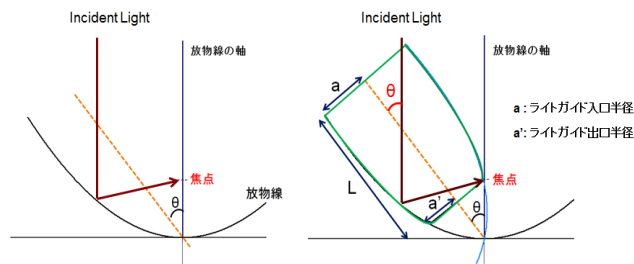


図 4: 右図の緑線が WinstonCone。図の θ よりも小さい角度で入射した光は必ずライトガイド出口を通過する。

合う曲面同士の形状としては、Winston Cone[4] が代表的である。Winston Cone は、放物線の軸と平行に入射した光は必ず焦点に集まる性質を利用し、図 4 のような、放物線の焦点の位置にもう一つの放物線の端が位置する形状をしている。この形状により二次元において、cutoff angle と呼ばれる、ある角度 θ 以内で入射した光は 100 % 集光し、それより大きい角度で入射した光はカットするという理想的な集光の特徴を持つ。この特徴により、夜光や地面からの照り返しなどの反射鏡以外から PMT に入射するバックグラウンドとなる光を低減することができる。

2.3 Winston Cone 型ライトガイド試作

本研究ではこれまでにライトガイド大量生産に向けての形状確認として、Winston Cone 型のライトガイドを切削加工と 3D プリンタ (KEYENCE 製 AGIRISTA-3000) で試作した。3D プリンタでは形状確認以外に、3D プリンタでも大量生産は可能なのかを確認する目的も兼ねていたが、3D プリンタではライトガイド一個あたりの製作費用が高いことがわかったため、大量生産は射出成形で行う予定である。ライトガイドを取り付ける PMT には約 $-1000V$ の高電圧を印加することを考慮すると絶縁性のものでなければいけないため、ライトガイドの材質はプラスチックである。切削加工で試作したライトガイドの材質はポリプロピレン (PP)、3D プリンタで試作したものはプリンタ専用樹脂である。

また、試作したライトガイドの内面に、反射材として 3M 製の Enhanced Specular Reflector (ESR)

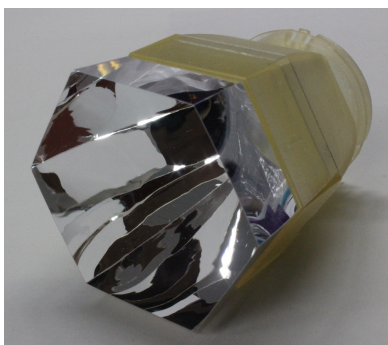


図 5: 3D プリンタで試作した WinstonCone 型ライトガイド。内面の反射材は図 6 のオス型を使用して貼った。

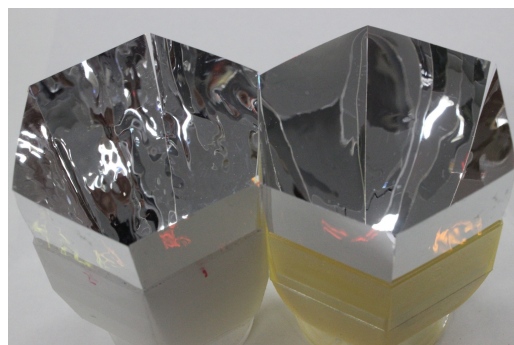


図 7: 左が反射材を指で圧着した試作一号で、右が反射材をオス型で圧着した試作二号。

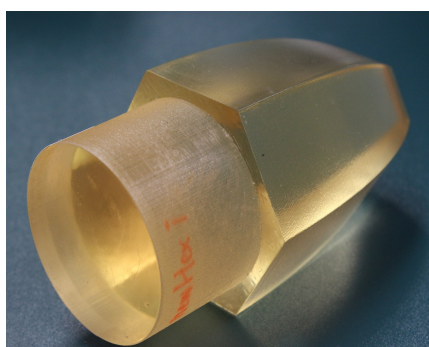


図 6: 反射材を貼る際に使用したオス型。こちらも 3D プリンタで製作した。

フィルムを貼った。ESR は可視光領域の波長に対して反射率が 98 % 以上ある。試作一号には、接着剤をライトガイド内面に塗布して、反射材を貼り付け指で圧着したが、圧着する際、接着剤を均一な厚みにすることができず、内面にでこぼこができてしまった。そこで、図 5 の試作二号には、実際に MAGIC 望遠鏡でライトガイドに反射材を貼る方法である、ライトガイドの内面と同じ形状をしている図 6 のオス型を差し込んで、六面全てを同時に圧着する方法で貼った。これにより、図 7 のように試作二号は、試作一号に比べ内面のでこぼこを少なくして貼ることができた。また、LST 一台当たりにライトガイドは 1855 個使用するため、反射材を効率よく貼る方法を確立する必要があるが、オス型で圧着する方法は六面同時に貼ることができるため、効率よく貼ることができる。

3 集光率角度依存性の測定

試作したライトガイドの性能評価として、集光率角度依存性を測定した。実験のセットアップを図 8 に、オス型を使用して反射材を貼った試作二号の測定結果を図 9 に示す。測定結果は、シミュレーションに近い値となったが、入射角度 $\pm 15 \sim 25$ 度付近の集光率が上昇していた。指で圧着して反射材を貼った試作一号の測定結果でもこの傾向が見られたため、反射材のでこぼこではなく、PMT 光電面感度の位置依存性と入射角度依存性の影響ではないかと考えられる。これらの依存性は詳しく測定されておらずデータがないため、シミュレーションには考慮していない。また反射材の ESR フィルムにも反射率入射角度依存性があると考えられるため、これらを測定してより現実に近いシミュレーションを行っていく必要がある。

4 まとめと今後

本研究ではこれまでにライトガイド大量生産に向けての形状確認として、Winston Cone 型ライトガイドを切削加工と 3D プリンタで試作した。3D プリンタでは形状確認以外に、3D プリンタでも大量生産は可能なのかを確認する目的も兼ねていたが、3D プリンタではライトガイド一個あたりの製作費用が高いことがわかったため、大量生産は射出成形で行う予定である。ライトガイドに貼る反射材の貼り方として、ライトガイド内面と同じ形状のオス型を差し込むという方法により接着剤をほぼ一様な厚みで貼ること

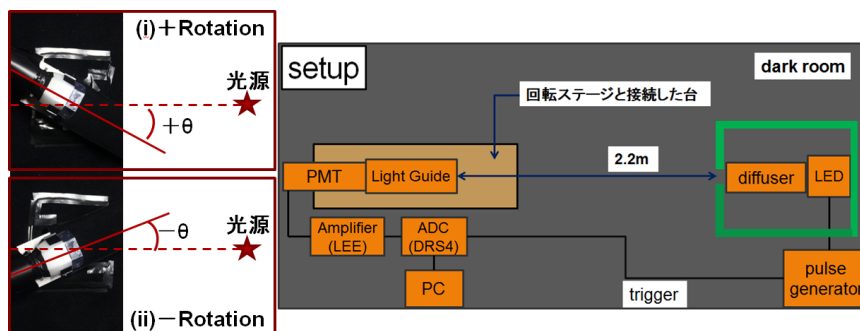


図 8: 集光率測定実験のセットアップ。実験方法は、ライトガイドに ± 1 度以下の平行光を入射させるために Pulse Generator (KEITHLEY 製 3390 型) で pulse 状に光らせた LED (日亜化学工業製 NSPB346KS) を 2m 以上離れた。そして、PMT に取り付けたライトガイドを回転ステージ (シグマ光機製 KSC-606, 目盛最小読取 1 度) と接続し、入射光に対する角度ごとの PMT 出力値を測定した。測定した PMT 出力値は、LEE アンプで増幅した PMT からの pulse 信号を ADC (DRS4) でデジタル変換し、pulse 信号の積分値を 1500 イベント分取得して、その平均値とした。また、ライトガイドの回転方向は時計回りを +、反時計回りを - とした。

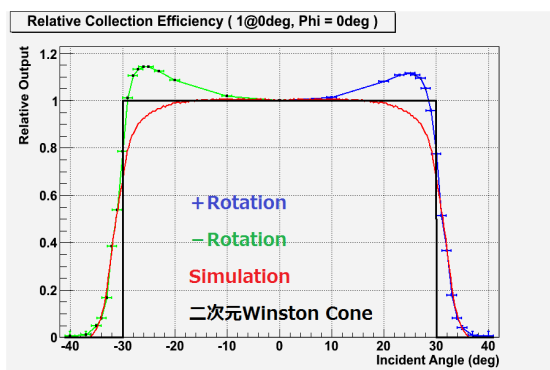


図 9: 集光率角度依存性の測定結果。青、緑線が測定結果で、赤線がシミュレーション、黒線が二次元 Winston Cone の集光率である。縦軸は入射角度 0 度ときの PMT 出力に対する相対値を表している。

ができた。また、試作したライトガイドの性能評価実験として、集光率角度依存性を測定した。測定結果は、シミュレーションに近いものとなった。しかし、PMT 光電面感度の位置依存性・入射角度依存性や、ESR フィルムの反射率入射角度依存性をシミュレーションに考慮していないため、今後はそれらを測定し、より現実に近いシミュレーションを行っていく予定である。

また、Winston Cone は二次元において理想的な集光をするが、三次元で考えた場合、LST 用のライトガイドに最も適した形状ではない。実際、図 9 に赤線で書かれているシミュレーション結果でも、30 度の cutoff angle よりも手前で集光率が下がってしまっ

いたり、ノイズになってしまう cutoff angle より大きい入射角度の光を集光してしまっている。そのため、ツールとして ROBAST[5] を使用した Ray tracing を行い、Winston Cone 型よりも集光率の高いライトガイドの形状を探していく予定である。Bézier 曲線という N 個の制御点からなる $N - 1$ 次の曲線を用いて Winston Cone よりも集光率が高い形状を探す研究 [3, 6] は行われており、Bézier 曲線型ライトガイドと Winston Cone 型ライトガイドの曲面の差は数 mm 程度 [6] である。そのため、射出成形でのライトガイド成形誤差は $\pm 0.18\text{mm}$ と見積もられているが、十分曲面形状の差を再現できると考えられる。

Reference

- [1] Heinrich J. Völk *et al.*, 2009, *Experimental Astronomy*, 25, 173-191.
- [2] M. Actis *et al.*, 2011, *Experimental Astronomy*, 32, 193-316.
- [3] 黒田和典, 2011 年度, 茨城大学修士学位論文
- [4] R. Winston, 1970, *Journal of the Optical Society of America*, 60, 245-247.
- [5] A. Okumura *et al.*, 2011, *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference*, 9, 210-213.
- [6] A. Okumura, 2012, *Astroparticle Physics*, 38, 18-24.