

CTA 計画での大口径望遠鏡に用いるライトガイドの開発

茨城大学高エネルギー宇宙物理グループ 修士1年 田中駿也

東大宇宙線研：手嶋政廣 大岡秀行 名古屋大：奥村暁 京都大：林田将明

茨城大：片桐秀明 吉田龍生 他 CTA Japan グループ

1 Introduction

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画 (図 1) は、より高精度な高エネルギーガンマ線観測を目指すための国際共同プロジェクトである。CTA は、大・中・小の口径が異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡を数十台配置して、現在稼働している MAGIC, H.E.S.S., VERITAS 望遠鏡よりも広帯域・高感度なガンマ線観測を行うことを目的とし、日本グループは大口径望遠鏡 (LST) (図 2) の開発を中心に進めている。

チェレンコフ望遠鏡とは、高エネルギーガンマ線と地球大気の相互作用によって生じる大気チェレンコフ光を観測する望遠鏡である。宇宙からやってきた高エネルギーガンマ線は地球大気中の原子と相互作用をして、雪崩的に電子・陽電子対を生成する空気シャワーと呼ばれる現象を起こす。その高エネルギーの電子・陽電子が、屈折率のある大気中の光速を超過すると、チェレンコフ光を放射する。放射されたチェレンコフ光を地上に設置した望遠鏡で観測することで、元のガンマ線のエネルギーや到来方向を推定することができる。

望遠鏡には、チェレンコフ光を捕える光電子増倍管 (PMT) が一面に配置されたカメラが設置される。カメラ面に配置する際の問題点として、LST に使用する PMT の入射窓が円形をしているため、互いの間に隙間 (デッドスペース) ができてしまい、この隙間に入射したチェレンコフ光は捕えることができない。ライトガイドは、この隙間を埋めて、効率よくチェレンコフ光を PMT に導く役割を担う。ここでは、ライトガイドの形状最適化、そして LST プロトタイプに搭載するライトガイド製作の現状を報告する。

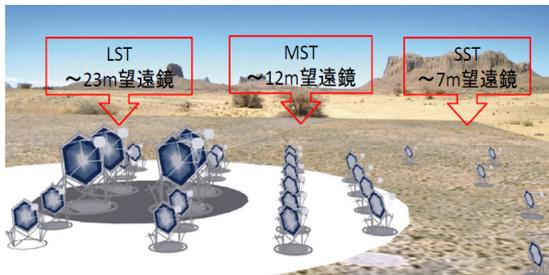


図 1 CTA 想像図 [1]

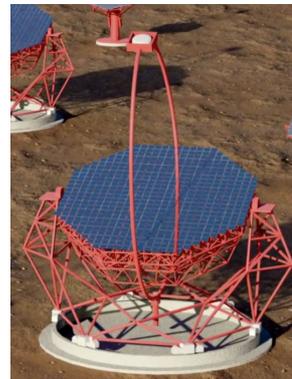


図 2 Large Size Telescope (LST) イメージ図 [2]

2 ライトガイド形状の最適化

チェレンコフ光は望遠鏡のミラーで反射して集光し、焦点面に設置したカメラに入射する。カメラ面には、光電子増倍管 (PMT) が一面に配置され、微弱なチェレンコフ光を電気信号に変換する。LST1 台に使用する PMT は約 1900 本に及ぶ。しかし、それらをカメラ面に配置する際に、LST に使用する PMT の入射窓は円形なため、PMT 同士を隣接させて並べると隙間ができ、チェレンコフ光を捕えられないデッドスペースが存在してしまう。ライトガイド (図 3) は、この隙間を埋めるための光学部品であり、カメラ面に配置する全ての PMT に取り付けられ、チェレンコフ光をより効率よく PMT に集めることができる。ライトガイドの外形状は、カメラ面が六角形になるように PMT を配置するのに合わせ、六角形の形状をしている。

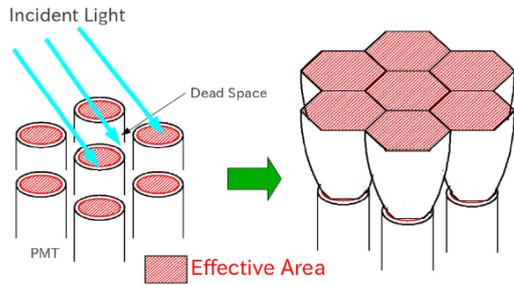


図3 PMTにライトガイドを配置した図。カメラ面が六角形なため、ライトガイドも六角形の形状をしている [3]

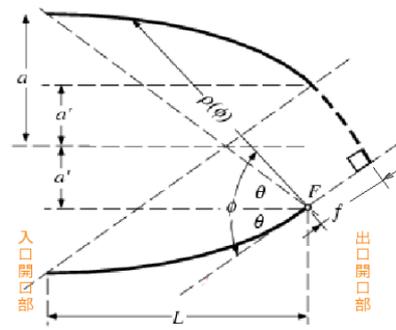


図4 Winston Cone形状 [4]

六角形ライトガイドの場合、内面の形も六角形なので、内面・外面ともに各辺ごとの計六面がつながったものとなっている。そのうち、ライトガイド内面の六面それぞれの形状としては、Winston Cone が代表的である (図4)。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、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ような形状をしている (図4 下側の放物線の端が、上側の放物線の焦点 F と一致している)。この形状により、二次元において、ある角度 (cutoff angle) 以内に入射した光は 100 % 集光し、それより大きな角度で入射した光はカットするという理想的な集光率の特徴を持つ。しかし、三次元で考えた場合、ライトガイドの六角形形状に入射する光は必ずしも二次元のような集光はしない。図5のギザギザとしている線は、六角形 Winston Cone のシミュレーション結果 (横軸: 入射角、縦軸: 集光率) であり、直角に曲がっている線は二次元の Winston Cone の集光率である。二次元 Winston Cone は、cutoff angle (図では約 31 度) で 0 % になる理想的な集光率をしているが、三次元である六角形 Winston Cone は、cutoff angle 付近で集光率が落ちてしまっている。したがって、Winston Cone は、六角形であるライトガイドに最も適した形状ではない。そこで、光線追跡シミュレーション (ray tracing) を行い (ツールとして ROBAST [5] を使用)、Winston Cone よりも集光率が高い形状を探している。方法としては、Bézier 曲線という N 個の制御点 (始点、終点含む) からなる $N-1$ 次の曲線 (図6) をライトガイドの曲面形状とし、制御点の座標を変えることで曲線の形状を様々に変化させ、それぞれの形状で ray tracing を行っていくことで、Winston Cone よりも集光率が高い形状を探することができる。

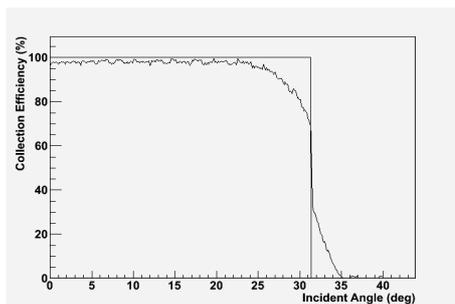


図5 Winston Cone 型ライトガイドの集光率 (内面反射率 98 % を仮定)。cutoff angle は約 31 度であり、二次元 Winston Cone はその角度で集光率が 0 % になっているのに対し、六角形 Winston Cone の集光率は cutoff angle 付近で落ちてしまっている。

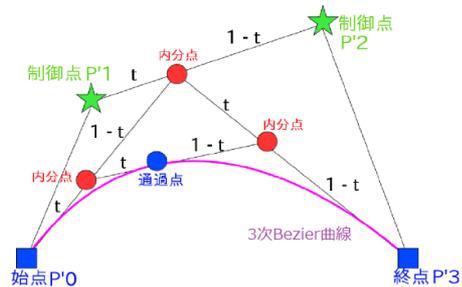


図6 3次 Bézier 曲線 [3]

3 大口径望遠鏡 (LST) 用ライトガイド製作へ

現在、LST プロトタイプに搭載するライトガイドの製作を進めている。ライトガイドを設置する PMT の光電面は、約 $-1000V$ の高電圧がかかっているため、ライトガイドの素材としては絶縁性であり、かつ放電を

起こしにくいことが要求される。そのため、素材はプラスチックを用いる。また、内面には反射率の高い反射材（フォイル）を貼る。ライトガイドとPMTを接続する方法としては、PMT側にライトガイドを設置するプレートを取り付け、そこにライトガイドを一つずつはめていく方法と、プレートとライトガイドが一体化したものを最初から作る、という方法がある。前者ではプレートとの結合部をライトガイド側に作成する必要があるが、後者ではその必要はない。カメラを構成する光検出器モジュールは1クラスターあたりPMTが7本搭載されているため、一体型の場合、プレートとライトガイド7個が一体化したものとなる(図7)。しかし、反射材の貼り方によっては一体化したものだと貼ることが困難になる場合も考えられるため、反射材の貼り方を今後検討していく必要がある。また、Winston Cone型ライトガイドと形状を最適化ライトガイド両方を製作し、集光率の違いを測定する実験を予定している。



図7 左上が結合部付きのライトガイド、真中がプレート一体型ライトガイド (いずれも曲面形状はWinston Cone)

4 まとめ

ライトガイドの代表的な形状であるWinston Coneは、二次元において理想的な集光率を持つが、三次元で考えた場合、ライトガイドに最も適した形状ではない。そのため、光線追跡シミュレーション(ray tracing)を行い、Winston Coneよりも集光率が高い形状を探している。

また、LSTプロトタイプに搭載するライトガイドの製作を現在進めている。PMTの光電面には $-1000V$ の高電圧がかかっているため、素材はプラスチックを用い、ライトガイド内面には反射率の高い反射材(フォイル)を貼って取り付ける。PMTにライトガイドを設置する際、PMT側にライトガイドを設置するプレートを作り、ライトガイドを一つ一つはめていくか、もしくはプレートとライトガイドが一体化したものを作ってしまうか、が考えられる。一体化の場合、プレートとライトガイドがフィットするような機構を作る必要が一切ないが、反射材の貼り方によっては、貼ることが困難な場合が考えられるため、今後、反射材の貼り方を検討していく必要がある。

参考文献

- [1] Actis, M., Agnetta, G., Aharonian, F. *et al.*, 2011, *Experimental Astronomy*, 32, 193
- [1] <http://www.cta-observatory.org/>
- [2] 黒田 和典 茨城大学修士論文,(2011)
- [3] <http://scienceworld.wolfram.com/physics/WinstonCone.html>
- [5] Okumura, A. *et al.*, 2011, *International Cosmic Ray Conference*, 9, 210