

平成 2 8 年 6 月 1 日現在

機関番号：3 4 4 1 9

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013 ~ 2015

課題番号：2 5 2 8 7 0 6 3

研究課題名 (和文) CTA大口径望遠鏡アクティブ・ミラー制御 (AMC) システムの開発

研究課題名 (英文) R&D of an active mirror control system of the large telescope for the CTA project

研究代表者

千川 道幸 (CHIKAWA, Michiyuki)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：5 0 1 7 9 9 4 1

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 11,400,000 円

研究成果の概要 (和文) : CTA計画のLSTは20GeVの閾値を持つガンマ線観測装置である。198枚の六角形分割鏡から構成され、AMCシステムにより常時能動的に方向制御される。構成する個々の分割鏡はアクチュエータ、CMOSカメラ、レーザーにより光軸の向きを補正する。ここ3年をかけてAMCシステムを開発してきた結果、光軸の向きを2秒角の高性能で制御する事を達成した。この値は当初の目標である14秒角を大きく上回る性能である。更に、198枚の分割鏡を同時に制御するための拡張AMCのアルゴリズムを、全ての鏡を十枚程に分ける方法を採用することにより開発した。鏡とAMCシステムはラパルマに建設中のLST第1号機に組み込む予定である。

研究成果の概要 (英文) : The LST of the CTA is designed to achieve a threshold energy of 20GeV for HE gamma rays. The dish of the LST is composed of 198 hexagonal 1.5m mirrors. The mirror facets are actively aligned during operations by an AMC system. To correct a direction of the optical axis of a each mirror facet, the AMC system uses two actuators, a CMOS camera, and a reference laser. The AMC system has been developed for these three years and achieved a high performance of 2 arcsec to control optical axis direction. This specification is exceeded our original goal of 14 arcsec. Furthermore an algorithm for extended AMC system was developed to control 198 mirrors on the LST simultaneously by method of clusterised all mirrors divided into ten mirrors in each group. The mirrors with the AMC system is expected to install a first LST at La Palma in early 2017.

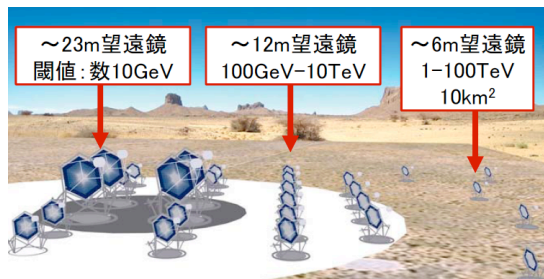
This work was supported by JSPS KAKENHI Number 25287063, and gratefully acknowledge to the organizations of Max-Planck-Society, and U. Zurich.

研究分野：宇宙粒子線実験物理学

キーワード：CTAプロジェクト 高エネルギーガンマ線 チェレンコフ望遠鏡 大口径望遠鏡 アクティブミラー制御
アクチュエータ 宇宙粒子線実験物理学

1. 研究開始当初の背景

新しいチェレンコフ望遠鏡 MAGIC, HESS, VERITAS などにより, 多種, 多様な TeV (10^{12} eV) 領域ガンマ線源が銀河系内, 銀河系外に 100 以上発見されている。これらの観測から, 宇宙線の起源, 宇宙での非熱的過程, 活動銀河の相対論的ジェット, 銀河間空間を満たす可視・赤外領域背景放射等の問題が徐々に解き明かされつつある。この研究分野を飛躍的に発展させ, かつ宇宙でおこる高エネルギー現象に関する重要な問題に明確な答えを出すために, チェレンコフ望遠鏡アレイ計画 (CTA) が世界 75 カ国の科学者が集結して建設計画を推進している。日本は **CTA-Japan を組織し, ドイツマックスプランク物理学研究所を中心とするヨーロッパの CTA グループと共同で 23m 大口径望遠鏡プロトタイプを建設し, CTA 建設への第一歩を踏み出す開発研究を進めている。特に CTA-Japan では大口径望遠鏡の分割鏡の製作も担当しており, 観測時の現象を記録する精度を高める為に個々の分割鏡を全て最適な状態にする為の制御を能動的に行うアクティブ・ミラー制御システム (AMC) の開発を行うことを目的とする。**上で述べたように, CTA は日米欧を中心とする国際共同研究としてその準備研究が進んでおり, この分野で活躍してきた世界の主要グループが参加しており, 高エネルギーガンマ線観測施設として世界で唯一の研究施設となる。CTA は北半球と南半球とで, 全天を観測する観測施設である。大, 中, 小口径の三種類のチェレンコフ望遠鏡 60 台の望遠鏡アレイから構成され, 20GeV から 100TeV までの広いエネルギー範囲での観測を可能とし, 銀河系内, 系外の高エネルギー天体を観測する。感度は現在の HESS, MAGIC から 1 桁向上し (1mCrab, 10^{-14} erg/cm²s), 角度分解は 3 倍向上 (0.03° at 1TeV), エネルギー分解能も 10% であり, 広帯域, 高感度, 高精度の観測が可能となる。高性能の達成・維持に於いて, AMC システムの構築がデータ収集の要となる。



1. CTA のイメージ図。20GeV から 100TeV 領域の宇宙ガンマ線を高感度, 高精度で観測する。大口径望遠鏡を中心に, 中口径と小口径の望遠鏡群が配置される。

2. 研究の目的

近年, 宇宙の観測は高エネルギーガンマ線領域にまでに広がって来ている。非熱的な高エネルギー粒子生成を伴う様々な現象や激しい時間変動, バースト的な爆発を伴う現象が観測され, 極限状態にある宇宙の姿が次第に明らかになりつつある。次世代高エネルギーガンマ線観測装置チェレンコフ望遠鏡アレイ (CTA) 計画では, 宇宙線起源, 非熱的粒子加速の解明, さらに, 超高密度物質, ブラックホールなどの極限時空の研究, 暗黒物質粒子の探索などの重要な研究課題に観測的に迫る。本計画研究では, 23m 大口径チェレンコフ望遠鏡を建設し, その運用により高エネルギー宇宙ガンマ線による極限宇宙の研究を行うにあたり, 現象の観測精度を高める為に大型望遠鏡の分割鏡を個々にアクティブ制御するシステム (AMC) の開発研究を行う。

3. 研究の方法

CTA の 23m 大口径チェレンコフ望遠鏡構造は, ドイツマックスプランク物理学研究所が担当して設計している。そのフレーム構造はカーボンファイバーチューブを用いた計量柔構造で, 天頂角および 206 枚の分割鏡をサポートする構造の位置に依存して 0.05 度程度の歪みを生ずる。この構造の歪みを個々の分割鏡アクチュエータにより微調整し, 光軸のずれの補正を行う。補正する微調整の大きさ及び向きは赤外レーザを用いた基準点とのずれによる値からベクトル量として求め, アクチュエータに逐次フィードバックされる。この一連の制御を全 206 枚の分割鏡に対して, 大口径望遠鏡を対象天体に向ける間の数秒から 20 秒の時間で行う。観測中にこの AMC によるオンライン光軸補正を常時行う。先ず, 2 セットの AMC を製作して, その補正ルーチンを評価し, 206 枚の分割鏡(*)に拡張する為の基礎データとする。同時に AMC システムの耐久試験を行う。

(*) 2016 年に建設開始時の設計は 198 枚

AMC と密接な関係がある CTA 大口径望遠鏡ミラーの製作に関して, 平成 24 年度迄の開発研究は以下のような状況である。

- (1) 軽量 2m² サイズのセグメント反射鏡の開発 (宇宙線研, 茨城大, 三光精衡)。大口径望遠鏡では 2m² サイズの六角形 (1.5m 辺-辺) セグメント反射鏡が必要となる。焦点距離 28m, 曲率半径 56m で結像精度 0.03° (15mm) の高精度が要求される。60mm 厚のアルミハニカムを 2 枚の 3mm 厚のガラスシートではさみサンドイッチ構造を製作する。既に 2m² 鏡の試作・試験が進んでおり良好な結果を得ている。
- (2) 鏡表面の最適化, 長寿命化をはかる (宇宙線研, 茨城大, 三光精衡)。

CTA は 20 年の運用を予定している。しか

し、望遠鏡群は屋外にむき出しで設置され、風雨、ダストに常にさらされる。長期の運転とそのメンテナンスを考えれば、鏡表面は 10 年以上の寿命を持つことが要求される。ガラス面にクロムの下地を形成し、その上にアルミの反射面の層を形成し、保護膜層として $\text{SiO}_2 + \text{HfO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{HfO}_2 + \text{SiO}_2$ の 7 層マルチコート保護層をスパッタリングで形成する。長寿命化と干渉効果による 95% の高反射率を達成している。

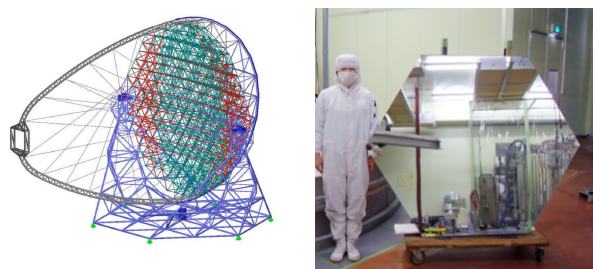


図 2 左図：23m 口径 CTA-LST 望遠鏡デザイン（マックスプランク物理学研究所）。総重量 50 トンで、ガンマ線バースト追観測のため 20 秒で 180 度回転を可能としている。中図：大口径望遠鏡に於ける天頂角に依存して歪む構造の天頂角 90 度でのシミュレーション値。右図：日本グループが開発・試作した 2m² 反射鏡、重量 40kg、反射率はピーク（波長 350nm）で 95% である。

AMC 全体計画

次に示す様に、大口径望遠鏡の歪みに対する AMC システム構築は、長期的補正と一時的補正が要求される（図 3）。

I. 大口径望遠鏡を構成する分割鏡の正しい光軸をデータベース化し、補正時にずれの量を決める参照データとする。＜長期に亘る歪み補正＞

- (1) 大口径望遠鏡を構成する分割鏡が撮像カメラ位置で正しく結像する位置ベクトルをデータベース化（データテーブル作成）
- (2) 基準となる大口径望遠鏡の光軸を赤外線（IR）レーザビームで定義
- (3) 高精度傾斜計により大口径望遠鏡の向き（天頂角）を数 arcsec の精度で測定
- (4) 大口径望遠鏡の中心に置いた高分解能 CCD カメラで IR レーザビーム位置と視野方向にある星像をモニタすることで補正を行う

→ 大口径望遠鏡の観測視野に於ける光軸の方向決定案

II. 大口径望遠鏡を構成する 206 枚の分割鏡に対し、フレームの歪みによりずれた光軸を補正する。歪みの原因は、望遠鏡の向きの天頂角に依存した加重の変化による歪み、風などの抵抗による歪みなどがある。＜一時的な歪み補正＞

- (1) 図 3 右の撮像カメラに取り付けた LED の位置と光軸を決めた IR レーザビーム位置を比較し、撮像カメラ位置のずれを検出
- (2) 大口径望遠鏡を構成する 206 枚の分割鏡に取り付けた IR レーザのビーム位置と光軸を決めた IR レーザビーム位置とを比較し撮像カメラ位置のずれを検出

→ 大口径望遠鏡を構成する 206 枚の分割鏡の光軸を AMC により補正

AMC 開発全体計画の流れ

分担者の担当を開発項目毎に定め、プロトタイプ 2 セットの開発と分割鏡 206 枚への拡張を 3 年間で行う。

〔平成 25 年度〕CTA 開発フェーズ

CTA の 23m 大口径望遠鏡構造は、ドイツマックスプランク物理学研究所が設計を担当している。そのフレーム構造はカーボンファイバークラウドを用いた計量柔構造で、天頂角および 206 枚の分割鏡をサポートする構造の位置に依存して 0.05 度程度の歪みを生ずる。この構造の歪みを個々の分割鏡アクチュエータにより微調整し、光軸のずれの補正を行う。方法は鏡の裏面のフレームに取り付けた固定軸に対し、自由度が一方向と二方向を持つアクチュエータを押し引きすることで光軸の補正を行う。十分検討された構造を持つ、中型望遠鏡用のアクチュエータが Zurich 大学で既に試作されているので、購入して、評価版として AMC システムを製作する。

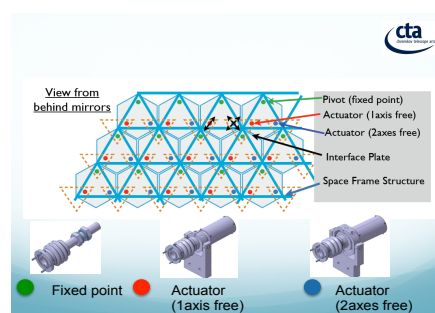


図 5 一軸・二軸自由度を持つアクチュエータ

〔平成 26 年度〕CTA 開発フェーズ

前年度に引き続き、PC によるアクチュエータの制御部分の開発研究とずれの補正を行う技術開発を継続して行い、制御システムを製作する。

〔平成 27 年度〕CTA 建設フェーズ

大型望遠鏡の分割鏡を個々にアクティブに制御するシステムとしての AMC を構築する為に、アクチュエータ制御システムと IR レーザビームによる光軸補正システムを統合する。

4. 研究成果

ANC システムによる LST の歪みの分割鏡方向補正を試験してきた。システムは CMOS カメラとレーザー装置を用いた能動的な補正システムとし、AMC システムの要求精度である 0.45 ピクセルにスポットの補正を行うことを目標とした結果、図 6 のようにランダムにスポットを基準点から ± 40 ピクセルの範囲で動かし自重による歪みは最大 4 分角程度で 25mm レンズのと看約 8 ピクセルに対応させて ± 10 ピクセルに範囲を狭め、より短い時間で 2 回の試行により補正を高精度に行った。この補正例で示されるように、補正（赤点）が要求精度円内に収まることが達成できた。現時点で 2 秒角に収まっている。単一の分割鏡での補正が達成されたことで図 7 のように 198 枚の分割鏡をクラスターに分け、夫々のクラスターを独立に補正するシステムを構築中で、現在建設中の LST 初号機へのインストールに向けて R&D を行っている。

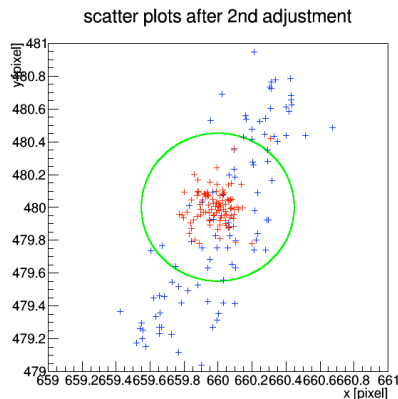


図 6 補正試験の例 円：要求精度，緑：1 回補正，赤：2 回補正

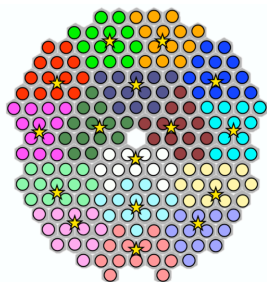


図 7 分割鏡クラスターによる制御領域

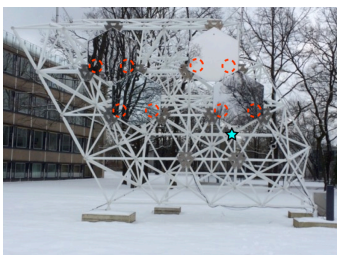


図 8(a) 1/8 LST 耐環境，信号強度試験

又、現在ドイツ・ミュンヘンのマックスプランク高等物理学研究所(MPI)に図 8(a)のように 1/8 サイズ LST 構造体を設置している。その構造体には分割鏡 4 枚を取り付け、実際に室外で AMC システムの稼働試験をしており、雨や風圧、気温変化など実際の LST に近い環境でデータを取得している。また、1 台の PC で 4 枚の分割鏡を制御して、複数の分割鏡に対する AMC の性能評価をしている。2015 年 1 月から現在 (2016 年) 迄、PC とアクチュエータ間による無線通信で電波強度と気象情報の記録を行ってきており、図 8(b)の例に示すように全アクチュエータで高感度（例では -92dBm 以上）の電波強度を維持している。

この様に世界初の 198 枚もの分割鏡から構成される LST の建設はこれまで経験がないだけに試行錯誤ではあったが、当初目標の AMC システム構築を達成させることができた。現在建設中の LST 初号機へのインストールに向けて更なる R&D を行っている状況である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

B.S.Acharya, M.Chikawa, T.Yamamoto, T.Yoshida, M.Hayashida, A.Okumura, M.Teshima, A.No zato, CTA consortium
Introducing the CTA Project
Astroparticle Physics, 43, 2013 pp3-18,
[dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.01.007](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.01.007)

〔学会発表〕（計 36 件）

- (1) 深見哲志, 野田浩司, 手嶋政廣, 奥村曉, 加賀谷美佳, 片桐秀明, 齋藤浩二, 千川道幸, 中嶋大輔, 野里明香, 花畑義隆, 馬場浩則, 林田将明, 柳田昭平, 山本常夏, 吉田龍生, 他 CTA-Japan consortium
CTA 大口径望遠鏡用分割鏡制御システムの試験構造体を用いた運用試験
天文学会春季大会首都大学東京（東京都八王子市南大沢），
2016 年 3 月 17 日
- (2) 深見哲志, 野田浩司, 手嶋政廣, 奥村曉, 加賀谷美佳, 片桐秀明, 齋藤浩二, 千川道幸, 中嶋大輔, 野里明香, 花畑義隆, 馬場浩則, 林田将明, 柳田昭平, 山本常夏, 吉田龍生, 他 CTA-Japan consortium
CTA 報告 101：無線通信を用いた CTA 大口径望遠鏡用 Active Mirror Control ソフトウェアの運用試験
物理学会大阪市立大学（大阪府大阪市住吉区），
2015 年 9 月 27 日
- (3) 林田将明, 千川道幸, 山本常夏, 吉田

龍生, 手嶋政廣, 野田浩司, 手嶋政廣,
奥村曉, 加賀谷美佳, 片桐秀明, 中嶋
大輔, 野里明香, 花畑義隆, 馬場浩則,
山本常夏, 他 CTA-Japan

The Optical system for the Large Size
Telescope of the Cherenkov Telescope
Array

(Proceeding:arXiv:1508.07626)

ICRC2015 (Den Haag, Nederland)

2015 年 7 月 30 日

- (4) 深見哲志, 野田浩司, 手嶋政廣, 奥村
曉, 加賀谷美佳, 片桐秀明, 齋藤浩二,
千川道幸, 中嶋大輔, 野里明香, 花畑
義隆, 馬場浩則, 林田将明, 柳田昭平,
山本常夏, 吉田龍生, 他 CTA-Japan
consortium

CTA 報告 93 : CTA 大口径望遠鏡用 AMC
システムの開発及び試験構造体を用い
た光学系試験

物理学会早稲田大学早稲田キャンパス,

2015 年 3 月 21 日

- (5) 深見哲志, 野田浩司, 手嶋政廣, 奥村
曉, 加賀谷美佳, 片桐秀明, 齋藤浩二,
千川道幸, 中嶋大輔, 野里明香, 花畑
義隆, 馬場浩則, 林田将明, 柳田昭平,
山本常夏, 吉田龍生, 他 CTA-Japan
consortium

CTA 報告 84: CTA 大口径望遠鏡用試験
構造体を用いた光学系位置調整機構の
試験

物理学会 佐賀大学 本庄キャンパス,

2014 年 9 月 18 日

- (6) 小島拓実, 田中駿也, 野田浩司, 手嶋
政廣, 奥村曉, 加賀谷美佳, 片桐秀明,
齋藤浩二, 千川道幸, 中嶋大輔, 野里
明香, 花畑義隆, 馬場浩則, 林田将明,
柳田昭平, 山本常夏, 吉田龍生, 他
CTA-Japan consortium

CTA 報告 73:CTA 大口径望遠鏡に用い
る分割鏡制御システムの開発

物理学会 東海大学 (神奈川県), 2014
年 3 月 27

- (7) 野里明香, 千川道幸, 小島拓実, 奥村
曉, 加賀谷美佳, 片桐秀明, 齋藤浩二,
田中駿也, 手嶋政廣, 中嶋大輔, 野田
浩司, 林田将明, 馬場浩則, 花畑義隆,
柳田昭平, 山本常夏, 吉田龍生, 他
CTA-Japan

R&D of AMC System for the LST

国際宇宙ガンマ線天文台 (CTA) 大口
径望遠鏡 (LST) ワークショップ,
東京大学宇宙線研究所 (千葉県), 2014
年 1 月 16 日

- (8) 野里明香, 千川道幸, 奥村曉, 加賀谷
美佳, 片桐秀明, 齋藤浩二, 田中駿也,
手嶋政廣, 中嶋大輔, 野田浩司, 林田
将明, 馬場浩則, 花畑義隆, 柳田昭平,
山本常夏, 吉田龍生, 他 CTA-Japan
CTA 報告 64:CTA 大口径望遠鏡用 AMC の

アクチュエータ制御開発
物理学会, 徳島大学 (徳島県),
2013 年 9 月 20 日

〔図書〕 (計 0 件)

〔その他〕

研究内容パンフレット

- (1) Cherenkov Telescope Array,
CTA計画

日本語 第2版 2015年5月

- (2) CTA Japan編

Cherenkov Telescope Array計画書,
日本語 第2版 2014年7月

ホームページ等

<http://www.cta-observatory.jp>

<https://portal.cta-observatory.org>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者

千川 道幸 (CHIKAWA, Michiyuki)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号 : 50179941

- (2) 研究分担者

吉田 龍生 (YOSHIDA, Tatsuo)

茨城大学・理学部・教授

研究者番号 : 60241741

研究分担者

山本 常夏 (YAMAMOTO, Tokonatsu)

甲南大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 40454722

研究分担者

奥村 曉 (OKUMURA, Akira)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号 : 90645011

研究分担者

林田 将明 (HAYASHIDA, Masaaki)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号 : 60705177