

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17640

研究課題名(和文)最新の化学強化ガラスを用いたCTA大口径望遠鏡用超軽量型分割鏡の開発

研究課題名(英文) Development of very-light segmented mirrors using chemically strengthened glasses for the CTA Large Size Telescopes

研究代表者

林田 将明 (Hayashida, Masaaki)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：60705177

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究から、我々が開発した現状のCTA大口径望遠鏡用分割鏡の2.7mm厚のソーダガラスを2.0mm厚の化学強化ガラス『Dragontrail X』に置き換えることで更なる軽量化が可能であろうとの結論を得ることができた。また最終形状の分割鏡に対し、-20 から40 の温度変化反復試験(計65サイクル)を実施して耐候性を確認し、鏡面精度測定として点光源を用いた『2f法』の測定環境を整備した。この2f法は、現在大量生産中のCTA大口径望遠鏡用分割鏡の品質管理測定の標準方法として用いられている。

研究成果の概要(英文)：We selected "Dragontrail X" for the new chemically strengthened glasses. Our conclusion is that the current 2.7mm thick soda glasses can be replaced by "Dragontrail X" with a 2.0mm thick to aim for the very-light segmented mirrors. Our full size segmented mirrors for the CTA Large Size Telescopes showed no damage after extensive temperature cycling tests. For the quality control during the mass production phase, we have successfully established a new '2f' measurement system, which uses a point light source to measure the surface qualities of mirrors such as curvature radius and imaging performance. The system has been adapted as one of standard measurement systems for the CTA quality control.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：解像型大気チェレンコフ望遠鏡 高エネルギーガンマ線 CTAプロジェクト

## 1. 研究開始当初の背景

「MAGIC」などの解像型大気チェレンコフ望遠鏡や Fermi 衛星の活躍により、100 MeV 以上のガンマ線観測はこの 10 年で大幅に進展した。例えば、最高エネルギー宇宙線の起源の候補とも言われる「ブレーザー天体」は、活動銀河核中心から地球方向に「相対論的ジェット」を吹き出す天体だが、既に 50 以上の天体から 100 GeV 以上の放射が確認され、放射機構の理解が進んできた。そして現在は、ジェット内の加速機構やジェット形成理論とガンマ線放射との関係の理解が大きな課題となっている。また、さらに高速のジェットを噴き出し宇宙最大の爆発現象である「ガンマ線バースト:GRB」からも、10 GeV を超える放射が Fermi 衛星にて検出され、keV-MeV 帯放射とは異なる描像が見えてきた。一方で、未だチェレンコフ望遠鏡による GRB からの放射の検出には至っておらず、数 10 GeV 帯以上の放射機構には謎が多い。

これらの課題をはじめとした宇宙の高エネルギー現象の謎を解明するため、チェレンコフ望遠鏡の観測性能を 20 GeV から 100 TeV 以上の帯域に広げ、かつ現在の装置より感度を一桁以上向上させた観測の実施を目指すプロジェクトとして Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画が進行中である。日欧米を中心に現在 30 を超える国から 1200 名以上が参加、2023 年頃の完成を目指している。CTA 計画は三種類の異なる主鏡口径で構成されるチェレンコフ望遠鏡アレイで、南北半球それぞれに一基地ずつ建設し全天をカバーする。特に、観測エネルギー閾値を 20 GeV まで下げることが、ガンマ線が宇宙空間伝播中に受ける光赤外背景光による吸収の影響を軽減し、より遠方から飛来するガンマ線がチェレンコフ望遠鏡で観測可能となることを意味する。赤方偏移( $z$ )が 2 を超えるブレーザーまた  $z > 4$  の GRB からの放射も検出可能と見積もられ、天体の宇宙論的な進化と関わる議論も可能となる。

そのエネルギー閾値を達成するための核となる望遠鏡が、主鏡の口径 23m 焦点距離 28m の大口径望遠鏡である。大口径望遠鏡の主鏡は、辺-辺 1.51m 面積  $2\text{m}^2$  の六角形の分割鏡約 200 枚から構成され、日本チームが「三光精衡所」と共同開発した分割鏡が採用されている。

## 2. 研究の目的

大口径望遠鏡は、GRB のような突発天体観測のために全天のどこでも 20 秒以内に向く高速回転仕様であり、全体が軽量に設計されている。本研究の目的は、作業の効率性・安全性の向上、また構造体の動的な歪みの一層の抑制のためにも、日本が開発した CTA 大口径望遠鏡用の軽量分割鏡の更なる軽量化を目指すものである。また、日本チーム開発した分割鏡が、屋外で運用される CTA 大口径望遠鏡

にて問題なく十分な性能を発揮できるように、その耐候性の確認と分割鏡の品質性能評価方法を確立することも本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

鏡の構造は、60mm 厚のアルミハニカムを 2.7mm 厚のガラス 2 枚で挟み、その周辺枠は、ガラスとの温度係数を考慮しステンレス (SUS410) 製の板 (幅 65mm, 3mm 厚) で構成されている。曲面は「cold slump 法」にて形成され、56m の曲面半径を持つ型 (Mold) に空気の高圧で押し付けて曲面を形成している (図 1)

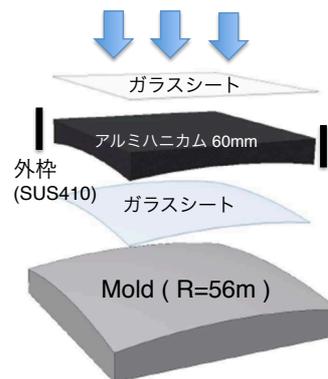


図 1. CTA 大口径望遠鏡用の分割鏡の主な構成

現重量 47kg の半分以上の 27kg はガラスが占めており、ガラスの軽量化が分割鏡全体の軽量化に直結する。現在は一般のソーダガラスを使用しているが、近年のスマートフォンやタブレットに採用され、通常のガラスと比べて「薄くて丈夫」と言われる化学強化ガラスを活用した。この化学強化ガラスには、一般ソーダガラスより 8 倍程度の強度を持つ「旭硝子」社が開発した「Dragontrail X」を採用した。0.7mm, 1.5mm そして 2.0mm 厚の「Dragontrail X」を用いた試作鏡 (図 2) を作成し、表面ガラスの衝撃耐久性を確認した。

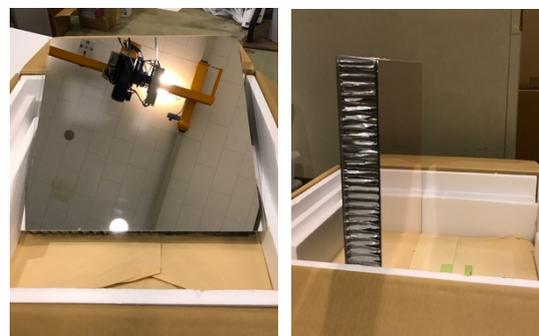


図 2. 「Dragontrail X」をガラスに用いた試作鏡

ガラスだけでなくステンレス製の外枠に関して、現状 3mm 厚のものが使用されていたが、1.5mm に薄くして約 4kg の軽減をはかった。そのため、構造の強度が減り耐候性が弱くなる可能性もあるため、環境試験として温度変

化反復測定を実施した。

また、大口径望遠鏡建設のために、分割鏡は数 100 枚の単位で製造されるが、それら分割鏡の品質管理として、全ての鏡一枚一枚の鏡面精度、曲率半径と結像性能を測定する必要がある。その測定には、曲率半径だけ離れた場所に点光源を置き、鏡に反射された光が点光源の場所にて結ぶ像の大きさを測定する「2f 法」を採用した (図 3 参照)。

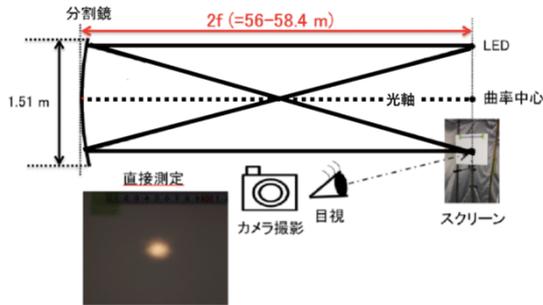


図 3. 2f 法の模式図

大口径望遠鏡の分割鏡の曲率半径の仕様は 56.0-58.4m であり、2f 法により測定を行うためにも 60m ほどの空間にて安定に測定できるシステムが必要となる。そこで、宇宙線研究所の廊下 (6F) にそのスペースを確保し、点光源には 470nm の LED (3W) を使用、テフロン板に映った反射像を市販のデジタルカメラにて撮影し、その画像を解析することで反射像の大きさを測定した。その反射像を鏡からの距離を変えて複数測定し、反射像の大きさが最小となる距離を「曲率半径」と定義した。また反射光が点光源とほぼ同じ高さに戻るためには、分割鏡を垂直に立てる必要がある (スクリーンの上下可動範囲を 1m 以内として、 $\pm 0.5^\circ$  の精度が必要)、そのために分割鏡を入れる「ラック」を設計し、分割鏡をそのラックに入れて測定を行った。ラックに鏡の入っている状態を図 4 に示す。



図 4. 「ラック」に入った状態の full size の CTA 大口径望遠鏡用の分割鏡。

#### 4. 研究成果

ガラスに Dragontrail X を使って作成した試作鏡の表面形状を、宇宙線研究所にて Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法により測定し性能評価した。2.0mm 厚、1.3mm 厚の試作鏡に関しての鏡面形状は、理想球面からのズレが  $20\mu\text{m}$  以内にほぼ収まっており、目標の精度に達している事が確認できた。ただし、0.7mm 厚では十分な曲面精度が出ていない部分も見られた。また、ガラス衝撃耐久性の試験として、CTA の環境試験マニュアルに沿って、金属製の玉の落下テストを 3 パターン実施し、その後の表面ガラス変形具合を評価した。2.0mm 厚のガラスの場合、変形は最大  $20\mu\text{m}$  程度であり問題なかった。一方 1.3mm 厚の場合、一番厳しい条件 (直径 3cm の 100g の玉を 50cm 上から 10 回) にて、 $50\mu\text{m}$  以上の変形が見られた箇所があったが、要求条件 (2cm の 32g の玉を 100cm 上から 10 回) では、最大  $30\mu\text{m}$  程度であった。一方で、0.7mm 厚の場合、要求条件でも  $50\mu\text{m}$  以上の変形が見られた。これらの結果から、2.0mm 厚を用いる事で、衝撃耐久性も十分に満たしながら、分割鏡の更なる軽量化が期待できるとの結論に至った。

環境試験として行った温度変化加速試験は、ステンレス枠を 1.5mm 厚にした full size の分割鏡を恒温恒湿室に入れ、 $-20^\circ\text{C}$  から  $40^\circ\text{C}$  の範囲で温度を繰り返し上下に変化させた。 $-20^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C} \rightarrow -20^\circ\text{C}$  を 1 サイクルとして、計 25 日間で 65 サイクル行った。これにより、1) メカニカルなダメージの有無 (ガラスにヒビが入るまたは構造物に剥離が生じてないか等)、2) 形状の変化の有無、を確認した。1) に関しては、初期開発時の試験の結果から使用金属の材質を変更し (アルミ  $\rightarrow$  ステンレス)、より耐熱性に優れた糊を採用して改良を重ねていたこともあり、メカニカルなダメージは確認できなかった。また 2) の全体の形状に関しては、この試験の前後に 2f 法にて曲率半径と結像性能を測定し、それらに大きな変化がないことを確認した。CTA のサイトの温度変化は、 $-20^\circ\text{C}$  から  $40^\circ\text{C}$  の範囲内であり、この測定からも、我々の開発した分割鏡は CTA サイトでの使用に適した耐候性を有していることを示すことができた。

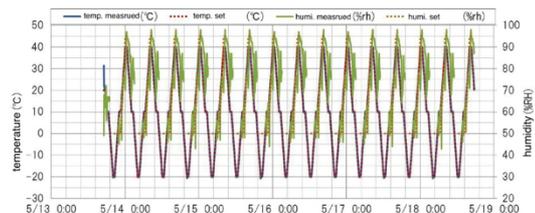


図 5. 環境試験 (温度変化加速試験) における、恒温恒湿室内の温度・湿度の変化の様子を表したグラフ。25 日間のうちの最後の 5 日間分。

図 6, 7 に 2f 法で得られた反射像の例を示す。鏡の結像性能としての CTA の反射像の大きさの定義は「全反射光の 80%の光が入る円の直径」であり『D80』と呼んでいる。図 7 の黒丸が、この反射像に対する解析にて得られた D80 を示しており、29.77mm と求まった。測定精度として、周辺環境や解析方法による系統誤差、例えば、背景光の強度やカメラレンズの違い等が結果に与える影響を評価したが、全て 1mm 以下の違いに収まっており、保守的に 1mm 以内の精度で D80 が決定可能と見積もった。図 8 は、鏡の曲率半径を決定するための測定結果であり、鏡からの距離 56-57m の間で 0.15m おきに計 7 点を撮像し、それぞれの場所での D80 を求めたグラフである。真ん中の測定点にて最小の D80 を示しており、ここから曲率半径 56.55m と求まった。距離自体の決定精度は 2cm 以内、また両隣 ( $\pm 0.15m$ ) の D80 と有意に異なる (小さい) ことが示されており、繰り返し測定の結果からも、曲率半径の決定精度は  $\pm 0.1m$  以内と見積もった。この曲率半径に対する CTA の要求測定精度は  $\pm 0.2m$  であり、その精度を十分に到達した測定系を整えることができた。



図 6. スクリーン上に映る、2f 法による分割鏡の反射像の写真。

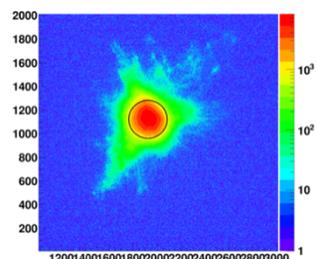


図 7. スクリーンに映った反射像を取得したデジタルカメラ画像。色は log スケール (右カラーラベル)。黒丸がスポットサイズである『D80』を表す。

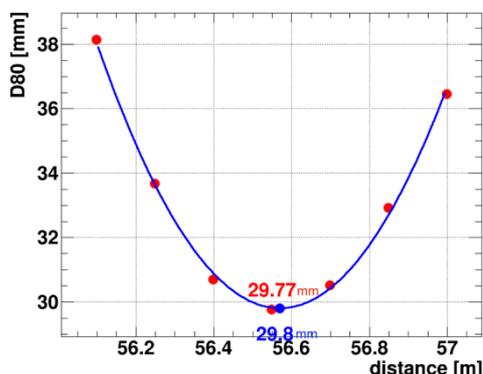


図 8. CTA 大口径望遠鏡用の分割鏡の 2f 法により鏡面精度測定の結果の例。赤が測定点で青線は測定点をフィットした双曲線。最小の D80 測定値は 29.77mm で、フィットした双曲線の最小値が 29.8mm と一致している。この D80 が最小値を示した距離 (横軸) の大きさが、その鏡の「曲率半径」に対応する。

本研究に整備した 2f 法測定系は、CTA の標準品質測定装置の一つとして認められ、量産された CTA 大口径望遠鏡用の分割鏡の全ての鏡面精度を測定している。図 9 は量産された 193 枚の鏡面精度、曲率半径と結像性能 (D80) の測定結果の分布である。幾つかの鏡は結像性能が仕様 (D80 $\times$ 34mm@2f $\sim$ 2 分角) を超えている。ただし、これらは量産の初期ロットであり、この測定結果からフィードバックをかけ、製造工程を改善し、それ以降の鏡は全て仕様を満たすことができています。この 193 枚は、CTA 北サイトであるスペイン、カナリア諸島ラパルマ島に無事運送を完了している。

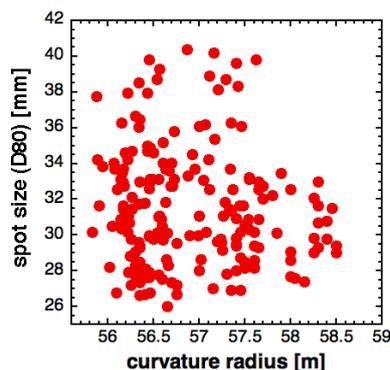


図 9. 2f 法により測定された、CTA 大口径望遠鏡用の分割鏡 193 枚の結像性能 D80 (y 軸) と曲率半径 (x 軸) の結果の散布図。

## 5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Masaaki Hayashida et al., First minute-scale variability in Fermi-LAT blazar observations during the giant outburst of 3C279 in 2015 June, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1792, 050015 (2017) DOI:10.1063/1.4968961
- ② Ackermann, M., Hayashida, M. (77/182 番目: アルファベット順, 論文責任著者), et al, (Fermi-LAT Collaboration), Minute-timescale  $>100$  MeV  $\gamma$ -Ray Variability during the Giant Outburst of Quasar 3C 279 Observed by Fermi-LAT in 2015 June, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, Vol. 824, (2016), L20, 8 pp. DOI: 10.3847/2041-8205/824/2/L20
- ③ Hayashida, M., et al. for the CTA Consortium, The Optical system for the Large Size Telescope of the Cherenkov Telescope Array, Proceedings of Science (the 34th International Cosmic Ray Conference), 査読無, 34, (2015), id. 927 <https://arxiv.org/abs/1508.07626>

- ④ Hayashida, M., Nalewajko, K., Madejski, G.M., et al., Rapid Variability of Blazar 3C 279 during Flaring States in 2013-2014 with Joint Fermi-LAT, NuSTAR, Swift, and Ground-Based Multiwavelength Observations, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 807, (2015), 79, 18pp.  
DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/79

International Cosmic Ray Conference (ICRC2015), July 2015, Hague (Netherlands)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林田 将明 (HAYASHIDA, Masaaki)  
東京大学宇宙線研究所・特任助教  
研究者番号：60705177

[学会発表] (計 8 件)

- ① 稲田知大、林田将明、他 CTA-Japan コンソーシアム、CTA 報告 122:CTA 大口径望遠鏡の光学性能最適化に向けた分割鏡測定とその配置の検討 日本物理学会 2017 年年次大会 2017 年 3 月、大阪大学 (大阪府、豊中市)
- ② 稲田知大、林田将明、他 CTA-Japan コンソーシアム、CTA 報告 116:CTA 大口径望遠鏡用分割鏡性能評価と分割鏡最適化配置にむけた simulation study、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月、宮崎大学 (宮崎県、宮崎市)
- ③ 林田将明、他 CTA-Japan コンソーシアム、CTA 大口径望遠鏡初号機建設に向けた光学系最終デザインと品質管理、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月、愛媛大学 (愛媛県、松山市)
- ④ M. Hayashida, G. Madejski, R. Blandford, K. Asano, S. Larsson for the Fermi-LAT Collaboration, K. Nalewajko, and M. Sikora, First minute-scale variability in Fermi-LAT blazar observations during the giant outburst of 3C 279 in June 2015, 6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy (Gamma2016), July 2016, Heidelberg (Germany)
- ⑤ M. Hayashida, Very fast gamma-ray variability and Multi-wavelength view of 3C 279 during outbursts in 2013-2015, *Blazars through Sharp Multi-Wavelength Eyes*, May 2016, Malaga (Spain),
- ⑥ 長紀仁、林田将明、他 CTA-Japan コンソーシアム、CTA 報告 107:CTA 大口径望遠鏡用分割鏡の性能評価、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月、東北学院大学 (宮崎県、仙台)
- ⑦ 林田将明、他 CTA-Japan コンソーシアム、CTA 大口径望遠鏡初号機の光学系開発状況と性能評価、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月、甲南大学 (兵庫県、神戸市)
- ⑧ M. Hayashida, et al. for the CTA Consortium, The Optical system for the Large Size Telescope of the Cherenkov Telescope Array, The 34th