

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14280

研究課題名(和文)『飛行型標準光源による世界最高レベルの精度での宇宙線観測の実現』

研究課題名(英文) "Development of calibration for cosmic ray observation with the world's highest level of accuracy using a flying standard light source"

研究代表者

富田 孝幸 (Tomida, Takayuki)

信州大学・学術研究院工学系・助教

研究者番号：70632975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、発展目覚ましいドローン技術とGPS測量技術を応用した望遠鏡校正装置の開発に成功した。開発機を用いた測定で、宇宙線望遠鏡の幾何光学測定(視野方向)に関して世界最高水準の性能が達せられた。2018年、2019年における実地試験において、試験対象となった12台の望遠鏡において視野方向では $0.03^\circ$ の系統誤差の精度で測定することに成功した。本研究で得られた補正値を宇宙線解析へ導入し、その影響を見積もる解析にも着手しており継続して成果確実である。また、既に収差や感度の解析にも着手しており、別の望遠鏡性能に関しても継続して成果が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超高エネルギー宇宙線観測用の望遠鏡の構成はその設置条件により幾何光学的特性の測定は困難を極める。本研究により開発した装置により、得られた光学特性は世界最高水準であり、これにより宇宙線観測における解析精度も極めて向上する。特に宇宙線観測において重要なパラメーターであるエネルギー計測と宇宙線空気シャワーの最大発達点( $X_{max}$ )の計測においては平均値にまで改善が得られほどの成果である。

研究成果の概要(英文)：In this research, we succeeded in developing a telescope calibration device applying drone technology and GPS surveying technology. With the measurement using the developed machine, the world's highest level performance was achieved regarding the geometrical optical measurement (viewing direction) of the cosmic ray telescope. In the field tests in 2018 and 2019, we succeeded in measuring the systematic error of  $0.03^\circ$  in the visual field direction with the 12 telescopes that were tested.

The correction values obtained in this research are introduced into cosmic ray analysis, and the analysis to estimate the effect is also underway, and the results will continue to be reliable. In addition, we have already begun analysis of aberrations and sensitivity, and we expect further success in other telescope performance.

研究分野：遠隔検知、装置校正、宇宙線観測

キーワード：校正技術 超高エネルギー宇宙線 望遠鏡 ドローン

## 1. 研究開始当初の背景

現在でも継続されていることであるが、TA 実験・CTA 実験や POLARBEAR-2 に代表されるように、広大かつ平坦な観測地に大型望遠鏡を複数台配列した観測実験が日本を主体とした組織運営で盛んとなっている。これらの実験の成果も特筆するモノが多く TA 実験では川田氏らにより世界で初の超高エネルギー宇宙線到来方向の異方性が発見されている (ApJ 804:133 (2015))。

これら実験では巨大な測定領域を確保するために個々の望遠鏡を数 km～数十 km 場合によっては大陸を跨いで複数の大型望遠鏡を屋外に設置しており、各実験において高精度化のために検出器性能測定装置をレーザー、キセノン光源、放射線光源や電子加速器などを利用して独自に開発しているが個々の大型望遠鏡の絶対較正には至っていなかった。5年以上の観測実績のある TA 実験でさえも例に漏れておらず、同一望遠鏡を使用した観測例でも数%の差異を残している。また、同じく超高エネルギー宇宙線を観測対象とした Auger 実験との間でも望遠鏡の構成の違いから差異の理解が進まず約 20%もの誤差が埋められていない。これらの問題は極めて巨大な望遠鏡を交換することによって同一の現象を観測することで解決する流れもある。この方法は大型の予算を必要うえに、その成果物が遠隔地の設置された望遠鏡の装置性能を理解するのみであり費用対効果が極めて小さい。

一方で、望遠鏡の観測視野の空間的理解も観測時に捕捉される星やレーザーを利用して調整されているが、0.1 度の精度には至っていない。これは偏に主要測定器である望遠鏡が長距離遠隔地かつ屋外に設置されていることが問題となっていた。そこで、既に産業界で広く活用されているドローンおよび高精度 GPS の技術を応用することで可搬型かつ高位置精度の標準光源の開発を提案した。図 1 に観測概念図を示す。



図 1：ドローン標準光源装置による観測

## 2. 研究の目的

遠隔操作または自律動作をするドローン（自律型無人航空機）は空撮や配送など産業分野での応用を広げ続けており、その飛行性能、位置精度、安定性などでも様々な応用に耐えられる性能になりつつある。しかしながら、自然科学に代表されるような科学研究の分野での応用例は少なく、近年発達しているこの技術を有効に利用できていない。一方で、大型望遠鏡を使用する研究分野では、『すばる望遠鏡のレーザーガイド星（国立天文台・理化学研究所）』のように新型の較正装置を開発することによって現行の大型観測装置を有効利用かつ従来よりも高精度な計測が求められている。本研究では、大型望遠鏡による高精度計測の実現のためのドローン搭載型標準光源の開発およびその運用・評価までを目的とする。

具体的には、大型望遠鏡性能の測定手法に自在に位置を制御可能なドローンを取り入れることで、あらゆる大型望遠鏡に対する汎用な較正装置を開発し、全く新しい装置性能測定手法を確立することを目標とする。その実証例として大陸間を跨ぐ実験である TA 実験と Auger 実験それぞれの装置性能の測定精度の差の 1 桁以上向上を目指すものである。また、その後の展望として現在建設中である CTA 実験などでも標準搭載された較正装置として運用も目指す。

## 3. 研究の方法

当初計画として、下記の手順に従い研究を推進することとした。

### 平成 28 年度：ドローン搭載型標準光源の試験機 開発から実証試験

- A) 全方位一様な光球の作成および性能評価
- B) GPS 同期の発光時間制御用の回路作成と性能評価
- C) 発光量、温度、位置など基礎データ収集装置の作成と性能評価

### 平成 29 年度：複数の観測機を対象とした性能計測および評価方法の開発

- A) 観測地での実証試験
- B) 解析ソフト・シミュレーターの作成および取得データ評価
- C) 再現性・装置差の確認および季節依存性の確認

### 平成 30 年度：大型望遠鏡の性能評価手法の確立と公表

## 4. 研究成果

本研究における研究成果は、大きく分けて (1) 較正装置、(2) 観測手法の開発、(3) 解析手法の開発、(4) 測定および較正值の評価、の 4 種に区分される。以下にその詳細を記す。

## (1) 較正装置の開発

本研究にて開発した飛行型標準光源の要求仕様は、『観測地の大気条件』、『望遠鏡仕様』などの要件を満たすための開発要素は『A 全方位発光光源』、『B 発光制御回路』、『C 測距装置』、およびドローンにそれら全てを搭載した『D 飛行型標準光源』となる。

### A) 全方位発光光源の開発

光源を全方位発光とすることにより、ドローンの空中姿勢によらず測定対象から同等の光量を観測可能とする。一方で飛行機体に搭載するために高性能化による重量増加を避ける必要があった。また、FDの受光検出可能波長範囲が300~400 nmであるため、発光波長は紫外光である必要がある。

発光源はUV-LED (Roithner laser technik 製 H2A1-H375 H2A1-H375) を選定した。大光量かつ比較的発光角度が広く、 $\pm 50^\circ$ で最大光量となる最前方の発光量に対し80%以上の発光特性であることが選定理由である。一様性を考慮すると光源の形状は球形が最適となる。FDの性能で観測可能な光量および搭載時の大きさを検討し12面体の各面にLEDを配置し、その周囲を球形の減光拡散器で覆うことにより近似的に一樣光源を実現した。図2に開発した光源の概観を示す。この光源の発光角度依存性は測定により最大違い幅で $\pm 7\%$ と測定された。A)にて選定された飛行機体は機体前方の方向を $15^\circ$ 程度の範囲で制御固定可能である。本光源の発光量角度依存性を $15^\circ$ 回転させた際の変化量を評価した(図3)。図3により $0\sim 150^\circ$ で0.5%の発光量の変化に留まった。これにより光源の $300^\circ$ 範囲で一樣であり、非一樣範囲が $60^\circ$ であることが示される。非一樣範囲を含めた観測光量でもそのバラツキは $\pm 4\%$ 程度である。また、LEDマウントはUV硬化型3Dプリンターで製造し、減光拡散器はシリコン製の市販電灯の拡散器(直径約15cm)を転用した。金属の使用を避けることで軽量な光源を実現した。



図2：開発した光源の概観

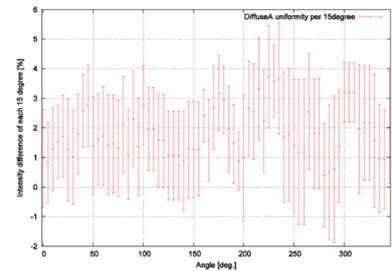


図3：発光量の角度依存性

### B) GPS同期の発光制御エレクトロニクスの開発

光源の発光周波数、パルス幅、時間同期を制御するエレクトロニクスにより駆動する。制御パラメータは、FDや後述する測距モジュールの仕様・性能を考慮し決定する必要がある。

FDによるこれまでの観測から信号を取得可能な周期は30Hz未満と判明している。測距モジュールの計測周期はGPS同期の10Hzであり、GPS同期10PPSで発光することで測距と同期可能となる。FDによる1回の信号取得の時間窓は $50\mu s$ である。背景信号の計測用に $12.5\mu s$ とするため $35\mu s$ 未満の発光パルス幅が要求される。発光後の背景信号も計測し発光安定性も担保するために発光幅は $10\mu s$ とした。

また、FDは宇宙線空気シャワーの飛跡を大気蛍光により観測するため連なった複数ピクセルが受光することで信号取得する仕様となっており、本機光源の実像はピクセルあたりの観測空間 $1^\circ$ に対し、十分に小さいため条件を満たさない。このためFDの外部トリガー機能を利用し発光タイミングと同期して強制的に信号取得トリガーを入力する方法を選択した。このため、2つの同期した発振機を開発し本機の発光とFD用データ取得用のトリガーモジュールとした。発振機はFPGA (Xilinx:spartan-6) を搭載したFPGA評価ボードを基に開発した。観測環境は高地・荒野の夜間であり温度変化が大きいため、クロック安定性に懸念があった。このため、GPSの1PPS毎にフィードバックし補正する仕様とした。1PPS間のクロック数を計測し、任意に分周することで温度環境に影響されない任意周期で発光およびFDによる信号取得を実現した。また、この手法により2つのFPGAボードの個体差を解消され、誤差500ns未満で同期性が担保された。

### C) RTK-GPSによる測距性能評価と導入

ドローンの飛行性能から光源位置の制御で要求値を満たすことは困難である。このため、ドローンの航程制御とは別により詳細の測距をRTK-GPSモジュールを搭載することで担保した。RTK-GPSによる測距は、2つのGPSアンテナを用いて衛星からの信号取得時間差などから2者間の相対距離を正確に計測するものである。一方のGPSモジュールを本機に搭載、他方を地上の既知の測量地に設置することで光源位置を測定する。RTK-GPSモジュールには公称誤差 $\pm 10cm$ であるSwift製Piksiを採用した。地上レベルでのPiksiの測距性能は $\pm 2cm$ と十分な数値を示し、再起動による再現性試験でも誤差は1cm未満であった。しかし、十分な性能を担保するには予備計測・較正に電力投入から1.5時間以上を要する点が運用方法を制限する。空中・移動中での測距性能は後述の解析手法にて説明する。

#### D) 飛行型標準光源の開発

上記の開発モジュールをドローンへ搭載する際には、個々の機器の電源を独立とした。一般的なドローン搭載機は飛行用の大型バッテリーから電力供給をすることで重量を低減することで飛行時間を担保する。しかし、測距モジュールである Piksi は電力投入毎に 1.5 時間もの予備時間が必要であり、飛行用バッテリーの待機電力消費を回避するために独立電源とした。発光制御および発光電力は個別の動作電圧が異なり、浮遊回路接置のため動作安定性のために発光系も独立とした。加えて、ドローン制御モジュールの A3 にも独立電源を必要とするため、本機には飛行用電源も合わせて 4 系統の電源を搭載した。

エレクトロニクスは、ダンパーによりメインフレームから独立のジンバルブランケットの上部に設置した。一方で、光源はジンバルブランケットの下部へ設置することで離着陸時の衝撃から保護した。図 4 に開発された飛行型標準光源の外観と搭載されたエレクトロニクスを示す。

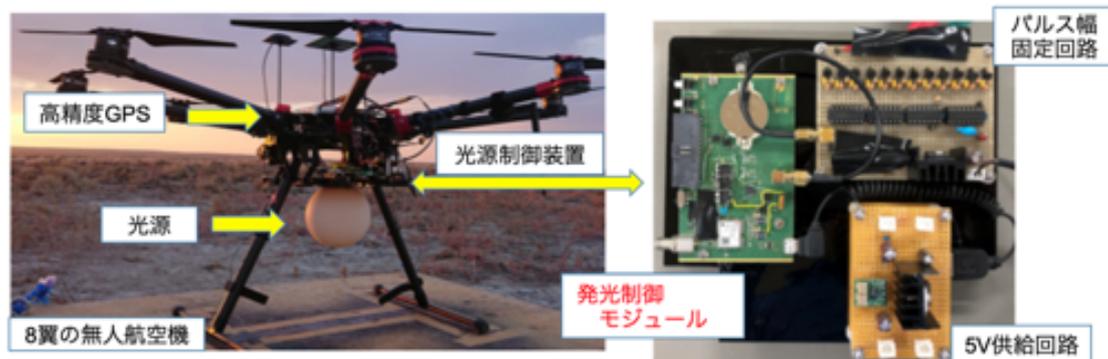


図 4：飛行型標準光源の外観および搭載されたエレクトロニクス

### (2) 観測手法の開発

#### A) 宇宙線観測用の望遠鏡を用いた実地試験

前章で報告した開発機を 2017～2019 年度に TA 実験の望遠鏡を用いて実地試験をした。2017 年度の試験により夜間の冷え込みは 9 月であっても 10°C を下回ることもあり、実際の飛行時間は 12 分程度であった。望遠鏡視野への往復移動、着陸操作、安全対策の予備時間を考慮すると測定可能時間は 8 分程度となった。飛行速度は piksi の飛行時の通信安定性試験、測距周波数 10Hz と測距分解能 10cm より 1m/s が最適とされた。測定時の本機と望遠鏡の距離は、距離による受光量の変化、大気透明度の影響から 300m と設定した。

#### B) 運用方法の確立

計測対象となる望遠鏡特性により必要となる飛行プランが下記のように設定された。

- 視野方向 : 視野中心の仰角・方位角  $5 \times 5^\circ$
- 収差 : 視野外周部より  $4^\circ$  内側 \* 像の伸びによる影響
- ピクセル感度 : 視野全域

### (3) 解析手法の開発

TA 実験の FD における既存の補正值測定に対し、本機が特化した観測対象を視野方向と設定した。視野方向の影響は空間分解能  $1^\circ$  に対して決定精度  $0.1^\circ$  でエネルギー決定精度 4%、空気シャワー最大発達点 (Xmax) 9g と数値計算により推定された。2018 年度の試験飛行データにて開発した FD 視野方向の解析手法の 2 つを記す。

#### A) 検出素子の不感領域を利用した視野方向解析

前述のとおり、光源の受光像は FD の 1 ピクセルよりも十分に小さい。これにより光源位置毎の受光量を評価することでピクセル間の不感領域を映し出すことが可能となる。不感領域の解析により得られたピクセル形状と既知のピクセル情報を比較することにより、解析に使用する較正值を決定する。本試験で測定対象となった 12 台の FD における視野中心付近の受光量マップと既知のピクセル外形の比較を示す。TA 実験の FD は奇数 ID 機が下視野、偶数 ID が上視野を示す。下視野の受光量マップではピクセル形状が確認されるが、上視野では ID 4 を除き明確な輪郭が確認できなかった。これは望遠鏡の集光性能が低いため、光源の実像が不感領域よりも大きいことが想定される。望遠鏡建設時の従事者によると ID 4 が最初期に設置され、上視野の鏡設定には集光性能確認装置の設置難度が高かった情報が得られた。本手法では限られた FD の視野方向の測定に留まったが視覚的に開発機の性能が確認された。

#### B) 望遠鏡による受光量重心を利用した視野方向解析

他方の手法は受光像と光源位置の直接比較である。しかし、前述にあるように受光像が FD の 1 ピクセルよりも小さいため、像の形状を詳細に把握することは困難である。このため、像

の代表値として受光信号の重心を用いたが、重心も1回の発光に対する算出では、像の中心を含むピクセルの中心へ偏ることとなる。これを解消するために統計的に複数回の受光信号の重心の平均と光源位置を比較する。

#### (4) 測定および較正值の評価

##### A) 宇宙線望遠鏡の幾何光学性能の評価

前章で開発した解析手法である2手法により得られた既知値との差分は定性的に同方向であり、両解析にて本機、本手法の解析能が確認された。また、重心による解析では集光性能の低いFDがよりバラツキが小さいものの集光性能に寄らず全FDでの解析に成功しており、中心値の評価であることから統計誤差は平均値の標準誤差により $\pm 0.005^\circ$ 未満と高精度の数値を得るに至った。

##### B) 再現性・系統誤差の確認

2019年度の試験飛行にて、2018年度の試験対象となったFDのうち4FDを対象として詳細なデータを取得し、前項で得られた結果の再現性に加えて、本システムおよび重心解析における系統誤差を見積もった。本システムでの解析手法では望遠鏡の視野中心と焦点面の中心ピクセルが一致していることが望まれ、両者が一致してない場合には収差による偏りが生じる。このため、設計上の中心ピクセルの隣接のピクセルでも同様の解析をすることで本解析における系統誤差は $0.01^\circ$ と見積もられた。また、2018年度と2019年度の差分は最大で $0.03^\circ$ と見積もられ、これを現段階での系統誤差として計上する。十分な再現性が確認された。また年度を跨ぐ試験における差分はシステム性能ではなく、2018年度の飛行航路がFD視野中心のピクセルに限定したことによる偏りと対象FDの多さから飛行数が最低限であったことに起因すると考えられ、2019年度の測定方法に準拠する測定により系統誤差はシステムの本質による前者の数値である $0.1^\circ$ 程度まで収束すると考えられる。

#### (5) 総括

本研究における開発機を用いた測定で、宇宙線望遠鏡の幾何光学測定（視野方向）に関して世界最高水準の性能が達せられた。本研究で得られた補正值を宇宙線解析へ導入し、その影響を見積もる解析にも着手しており継続して成果確実である。また、既に収差や感度の解析にも着手しており、別の望遠鏡性能に関しても継続して成果が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takayuki Tomida, Taichi Inadomi, Terutsugu Seki, Yuichiro Tameda, Yuya Oku, Kengo Sano, and TA Collaboration	4. 巻 -
2. 論文標題 Developing the calibration device using UAV mounted UV LED light source for the fluorescence detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 European Physical Journal Conferences 210:05015	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/201921005015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tameda Yuichiro, Tomida Takayuki, Hayashi Motoki, Seki Terutsugu, Telescope Array collaboration	4. 巻 -
2. 論文標題 TA fluorescence detector calibration by UV LED with an unmanned aerial vehicle	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PoS ICRC2017	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.301.0434	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hayashi Motoki, Tameda Yuichiro, Tomida Takayuki, Tsunesada Yoshiki, Seki Terutsugu, Saito Yoshinori, for the Telescope Array Collaboration	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a UAV-mounted Light Source for Fluorescence Detector Calibration of the Telescope Array Experiment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc., 011036	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.19.011036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takayuki Tomida, Kengo Sano, Yuya Oku Yuichiro Tameda, Taichi Inadomi, Arata Nakazawa, Daisuke Ikeda, for the Telescope Array collaboration	4. 巻 -
2. 論文標題 Geometry calibration of Fluorescence Detector using standard light source mounted on UAV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 稲富大地, 関皓月, 佐野賢吾, 奥悠弥, 富田孝幸, 齊藤保典, 多米田裕一郎, 山崎勝也, 他 Telescope Array Collaboration
2. 発表標題 TA実験324: 飛行型標準光源を用いた大気蛍光望遠鏡の視野方向解析
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Tomida, Taichi Inadomi, Terutsugu Seki, Yuichiro Tameda, Yuya Oku, Kengo Sano, and TA Collaboration
2. 発表標題 Development of the calibration device using UAV mounted UV-LED light source for the fluorescence detector
3. 学会等名 UHECR2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐野 賢吾, 富田 孝幸, 稲富 大地, 関 皓, 多米田 裕一郎, 奥 悠弥, 齊藤 保典
2. 発表標題 大気蛍光望遠鏡較正用標準光源搭載無人航空機測位精度
3. 学会等名 平成30年度(2018年) 応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富田孝幸
2. 発表標題 TA実験310: UAV搭載型標準光源による大気蛍光望遠鏡の較正
3. 学会等名 日本理学会2018年 73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Tomida
2. 発表標題 TA fluorescence detector calibration by UV LED with an unmanned aerial vehicle
3. 学会等名 The 35th International Cosmic Ray Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 稲富 大地、関 皓月、富田 孝幸、多米田 裕一郎、齊藤 保典、
2. 発表標題 UAV搭載型標準光源を用いた大気蛍光望遠鏡較正実験
3. 学会等名 応用物理学会 北信越支部大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	多米田 裕一郎  (Tameda Yuichiro)		
研究協力者	池田 大輔  (IKEDA Daisuke)		