

### 法政大学二連望遠鏡の 遠隔観測システム構築と性能評価 — 全天スカイモニター的设计開発と 30 cm望遠鏡の性能評価 —

Kihara, Naoki / 木原, 直樹

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014319>

# 法政大学二連望遠鏡の 遠隔観測システム構築と性能評価 —全天スカイモニターの設計開発と30cm望遠鏡の性能評価—

CONSTRUCTION OF REMOTE OBSERVATION SYSTEM AND PERFORMANCE  
ASSESSMENT OF HOSEI TWIN TELESCOPE

THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN ALL-SKY MONITOR AND ASSESSMENT OF 30 cm TELESCOPE

木原直樹

Naoki Kihara

指導教員 岡村定矩、八木雅文

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻（創生科学系）修士課程

A twin optical telescope consisting of a 30-cm reflector and a 13-cm refractor was installed in Koganei campus in March 2015. We have been constructing its remote observation system and carrying out an assessment of its performances. This paper describes the design and development of an all-sky monitor, which is a component essential to the remote observation, together with the results of some tests of the CCD camera performances including the bias and dark, flat fields, zero points of the magnitude, and system efficiency.

**Key Words** : *telescope, remote observation, all sky-monitor, CCD camera*

## 1. 研究の背景と目的

私が通う法政大学理工学部創生科学科は、2011年4月に新設された学科である。科学の礎である物理学と数理学を学び、理系、文系問わず広い分野に進出できる能力と意欲を持つ「理系ジェネラリスト」を育成することを目標としている。

本学科の学生の中には、中学・高校の理科・数学の教師を目指す学生も毎年2割程度いる。天体望遠鏡の操作や望遠鏡を用いた実験は教科書に記載されている学習事項であるが、実際に望遠鏡を操作したことがある学生は、教師を志望する学生本人を含め少ない。また天文・宇宙に関心のある学生も毎年数人程度いるが、そうした学生自らが天体観測を行う機会や設備がなかった。

このような背景から、2015年3月に法政大学小金井キャンパス西館屋上に、口径30cmの反射望遠鏡と口径13cmの屈折望遠鏡を一つの赤道儀に同架した二連望遠鏡HOTATE (HOsei Twin Astromonomical Telescope) を設置した。利用目的は主に3つある。一つ目は、学生の教育と実習への利用である。HOTATEにより、学生がコンピュータ制御された天文台型望遠鏡を用いた天体観測実習および取得データの解析といった実践的な経験を積むことができる。また、二つ目は、大学院生および学部4年生の卒業研究での利用である。夜空の明るい市街地にあるという不利な立地条件であるが、一方で観測時間の自由

がきくという利点もある。この利点を生かして、空の明るさの影響を受けにくい狭帯域での長時間撮像観測や、突発天体のモニター観測などで、新しい研究の芽を出すことができる。三つ目は、天文学の広報普及のための天体観望会の実施である。

私たちの研究室では、移動に数分かかる別の建物にある研究室から遠隔操作で観測ができるシステムを完成させるプロジェクトを行っている。本論文では、私が行った遠隔観測システムの重要な要素の一つである全天スカイモニターの設計開発と30cm望遠鏡の性能評価について述べる。プロジェクト全体の成果についての論文(参考文献1)は別途まとめられていて、国立天文台報告に投稿される予定である。

## 2. 全天スカイモニターの設計開発

### 2.1 全天スカイモニターと開発の方針

天体観測をする上で、雲の有無など空の状態を画像で確認するのが有効である。こうした観測所の天候状況を把握するために利用されるのが、全天モニターやスカイモニターといわれる装置である。近年、日本国内の天気予報はスーパーコンピュータの台頭により精度が飛躍的に上がっている。しかし、実際はその予報と異なることは少なくない。また、天気予報からだけでは雲の動き

や空の様子が分からないことも多いため、実際に目視による確認が必要になってくる。観測者が研究室から事前にそうした情報を確認できると観測の効率化が図れる。加えて、雲の動きや空の状況を観測しデータを蓄積することで、後の解析や他の研究に利用できるデータが得ることができる。現在、日本国内にある様々な観測所では、同様の装置が整備されている。



図1 岡山理科大学スカイモニターの中身(左)、外装(右)

全天スカイモニターに要求される項目を以下に挙げる。

- 1) ほぼ全天が一度で観測できること。
- 2) 昼夜問わず24時間モニターできること。
- 3) 観測結果を即時遠隔から確認できること。
- 4) 太陽が高い位置にあるときでも撮像できること。
- 5) 暗い夜でも雲の判別ができること。
- 6) 結果をデジタルデータとして保存できること。
- 7) 十分な耐雨能力を持つこと。
- 8) 結露を起こさないこと。
- 9) 安価であること。
- 10) できるだけメンテナンスが必要ないシステムにすること。

これらの要求を満たす全天スカイモニターの構成を検討する。

## 2.2 ハードウェア カメラとレンズの選定

昼間と夜間の空の明るさは8桁程度異なる。そのため、カメラの露出時間（シャッター速度）や絞り値、検出素子のゲイン（もしくは、感度）は、大きな明るさの変化に対応できるようPCで制御することが必要である。全天という広い視野を一度に撮影するため、カメラには魚眼レンズが取り付けられるが望ましい。

市販のカメラが安価で入手性が良いこと考慮すると、コンパクトデジタルカメラ、ネットワークカメラ、デジタル一眼レフカメラが望ましい。しかし、コンパクトデジタルカメラでは魚眼レンズがつかない点、ネットワークカメラは雲の形状を把握する程度の解像度がないという点で、デジタル一眼レフカメラを採用した。

多くのデジタル一眼レフカメラが Picture Transfer Protocol (PTP) 規格に対応しており、USB 接続により、シャッター速度などをソフトウェアで設定可能である。

一方、デジタル一眼レフカメラを用いる場合の問題点は、ミラーのはね上げ機構や機械的シャッターの耐久性

である。本来であれば、ミラーレスカメラや電子シャッターのみの機構が望ましいが、最適な候補が見当たらなかったため、数年でのカメラ交換、もしくは、オーバーホールを想定してデジタル一眼レフカメラ：Canon EOS 40Dを採用した。

カメラのレンズは、全天2πステラジアンという広い視野を撮像するため、魚眼レンズ SIGMA 8mm F3.5 EX DG FISHEYE を採用した



図2 全天スカイモニター用カメラと魚眼レンズ

## 制御用 PC

デジタル一眼レフカメラを制御するためのPCは、Mini PC Intel NUC Kit NUC5CPYH (図3)を採用した。OSは、Linuxのdistributionの一つであるUbuntu16.04を使用している。露出時間の自動制御をするため利用するソフトウェアが、Linux上で起動するため、Ubuntuとの互換が実証されているNUCを選定した。また、OSをダウンロードする際、USBを用いてインストールするため、インターフェース面が充実していること、ネットワークにつなげることができることもNUCを採用した理由である。



図3 制御用 PC

## 2.3 ソフトウェア

カメラは、Linux上でgPhoto2プログラムを利用して制御する。適切な露出設定をしながら定期的にデータ取得を行うサーバープログラムを構成した。

### gPhoto2

一眼レフカメラメーカーであるCanonとNikonからは、USBケーブルを通じてPCによるカメラ制御ができるソフトウェアが提供されている。しかし、こうしたメーカーが提供するソフトウェアは、PCからシャッターを切ることや一定間隔でのインターバル撮影を自動実行させる機能が主であり、カメラのシャッター速度や絞り値、感度など、細かな設定を変えて撮影することまで対応していない。

gPhoto2は、Linuxまたは、Unix系のシステムにおいて

カメラを制御できるアプリケーションソフトウェアである。

## 制御するパラメータ

制御パラメータを以下に項目として挙げる。

- 1) ISO 感度
- 2) 露出時間(シャッター速度)
- 3) 撮影枚数

空の視認性を維持するためには、空の明るさ変化に対応して、常に最も適した露出設定を選択する必要がある。実際に本大学東小金井キャンパス中庭から空を撮影し、適切な露出時間を検討する。

太陽が空にある昼間の空と太陽が沈んだ夜の空では、露出時間が大きく異なることが分かるが、同じ時間帯における晴れた日と曇りの日の露出時間は大きな差が無いことが分かった。

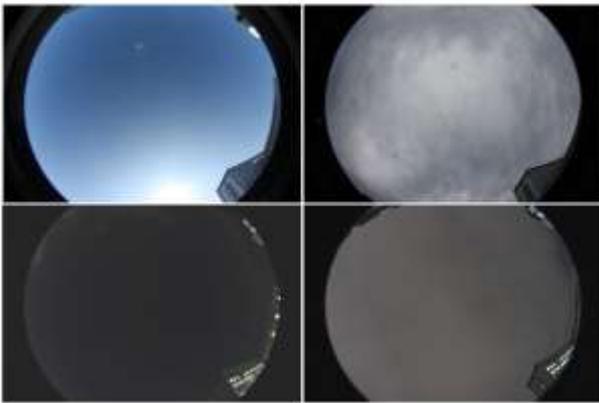


図4 中庭からの空の様子-晴れた昼(左上)、曇った昼(右上)、晴れた夜(左下)、曇った夜(右下)

## 2.4 制御プログラム

全天スカイモニターに使用するデジタル一眼レフカメラは、Linux 上で gPhoto2 を介し制御する。私が作成したプログラムの基本構成を以下に示す。

- 1) カメラの電源を OFF にする。
- 2) 5 秒後にカメラの電源を ON にする。
- 3) 10 秒後に gPhoto2 とカメラが接続しているか確認する
- 4) 様々なシャッター速度で撮影する。

EOS 40D は、カメラの電源スイッチが ON であっても、操作することなく一定の時間が経過すると自動で電源が切られるように設計されている。gPhoto2 は、PC からカメラの自動撮影や設定を制御することはできるが、カメラ自身の電源制御に関しては行えない。そのため、PC から電源の ON/OFF の制御が可能な電気タップ(IP POWER 9258)から直接カメラの電源を制御する。PC 上で制御する場合、カメラの電源スイッチが ON の状態でもカメラの設定でカメラの電源が自動的に切られた状態から、再度カメラの電源を入れるコマンドを送っても電源は ON に

ならない。カメラの電源スイッチは常時 ON にしてあるが、電源が ON/OFF どちらの状態であっても必ず一旦電源を OFF にするコマンドを送ってから電源を ON にするコマンドを走らせるように設計した。

## 2.5 運用テスト

今回開発する全天スカイモニターは、15分に1度間隔で撮像することで空の様子をモニターすることを目的としている。Linux の機能の一つに cron と呼ばれる、指定したコマンドやシェルスクリプト定期的に走らせることができるものがある。この機能を用いて 2016 年 12 月 7 から同年 12 月 9 日の間に研究室でプログラムの運用テストを行った。その間、誤作動を起こすことなくカメラは撮像し続けることができた。



図5 試作機用格納容器

試験用の格納容器本体は、防水で透明という観点からアクリル水槽(図5)を採用した。試験用の格納容器の設置運用テストを 2016 年 11 月 29 日から 2016 年 12 月 5 日の間に行った。アクリル水槽内にデジタル温度計を取り付け、気象モニターから得られる外気温と容器内の温度のそれぞれの変化とその関係性を調査した。

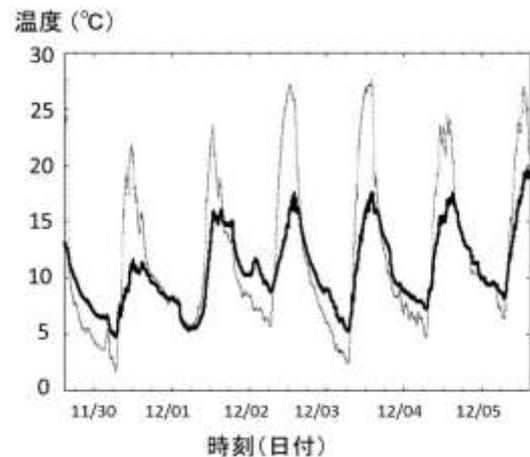


図6 容器内温度と外気温。太い線が容器内温度、細い線が外気温を表す

結果は図 6 に示す。図から、外気温の変動幅に比べてアクリル水槽内温度の変動幅は相当に大きいことがわかる。外気温が 5 °C 以下になると水槽内の温度は 0 °C 近くまで下がり、内部で結露が起こることが分かった。日中は外気温に比べ水槽内の温度は大幅に上昇する。EOS 40D の使用可能温度は公称で 0°C ~ +40°C、使用可能湿度は、85% 以下となっているため、格納容器内には断熱材の使用と内部空気の攪拌あるいは外部空気との交換機能が必要であることが分かった。

### 3. 30 cm 望遠鏡の性能評価

#### 3. 1 CCD の性能評価

##### 3. 1. 1 CCD カメラの基礎事項

###### CCD カメラ

HOTATE ではチェコの Moravian Instruments 社製 G2-1600 という CCD カメラを採用している。CCD 素子からは、各ピクセルに溜まった電荷量（電子の数  $N_e$  × 素電荷  $e$ ）が読みだされ、電子回路を経由して電圧として読み出す。その電圧（アナログ値）をデジタルな値に変換（A/D 変換）してカウント値  $N_c$  としてコンピュータに取り込み、データの特性を記述するヘッダーと共に、カウント値  $N_c$  を以下に説明する FITS 形式でディスクに記録する。

CCD カメラの 1 回の露光で得られるデータをフレームと呼ぶ。私たちの Moravian G2-1600 カメラで得られる画像のサイズは 1536 × 1024 画素である。

###### FITS と FITS ヘッダー

天文観測のデータは一般的に 2 次元あるいはそれ以上の多次元の配列のデータである。座標軸は、観測装置の種類によるが、HOTATE の画像では天球上の座標に対応する。また、配列内には各ピクセルに入射した光の強度に対応するカウント値が格納される。

したがって、データを扱う際は、配列に格納されている数値だけでなく、それぞれの座標軸の意味と単位や尺度を知っておく必要がある。さらに、観測時刻やデータに付随する観測装置の設定の情報、観測条件も重要な情報である。このようなデータ自体の性質、また観測条件などの情報をひとまとめにし、一つのファイルとして扱うことのできる規格として、FITS (Flexible Image Transport System) 書式が広く用いられる。

FITS ヘッダーには、データの次元や座標軸の意味や尺度、観測天域、観測時刻、あるいは観測装置の設定などが記録されている。

###### ds9 と IRAF

FITS ファイルを扱うためには、FITS ファイルを利用するためのソフトウェアが必要である。FITS ブラウザソフトは無償で使えるものが多数ある。そのため使用用途や

目的に合わせて最適なものを選ぶことが大切である。我々は、IRAF の画像ブラウザに使用するので、ds9 を使用する。IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) とはアメリカの NOAO (National Optical Astronomy Observatory) で開発されている天文解析用のソフトウェアパッケージである。第 3 章で行う解析のほとんどがこの IRAF を用いて行っている。

###### CCD データの一次処理

天体を観測する際に、CCD から得られた直後の撮像観測データは（生データ）は、そのままでは直接物理量の測定に利用することはできない。様々な補正校正用データを用いた 1 次処理をすることによりその後の詳細なデータ解析に利用可能なデータになる。1 次処理によって生データから、天体だけの信号を正確に抽出する。

##### 3. 1. 2 バイアスとダーク

バイアスとダークの差し引きは真っ先に行う一次処理である。バイアスフレームは露出時間ゼロで露光せずに読み出したデータのことである。露出 0 秒なので、出力される読み取り値も 0 になるはずだが、現実には CCD から画素ごとの電荷を読み出すときに一定のバイアス電圧をかけて、読み出し雑音が混入しても負の値が発生しないようにしてあるためにカウントは 0 にはならない。CCD で得られる画像にはすべてこのバイアス電圧に対応するカウント値が付加されている。

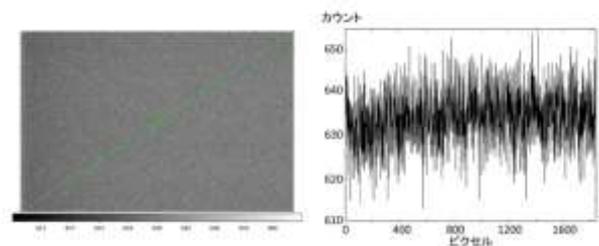


図 7 典型的なバイアスフレーム(左)、対角線のプロファイル(右)

図 7 は典型的なバイアスフレーム（左）で、そのバイアスフレームの対角線に沿ったプロファイル（右）である。図からわかるように、大局的なパターンは見られない。

CCD などの検出器には、電子の熱運動のために検出器中に電荷が溜められてしまう暗電流と呼ばれる現象がある。天体からの光による電荷とこの暗電流による電荷を分離することが必要となる。天体の画像を取得したときと同じ露出時間で、検出器のシャッターを閉じたまま光の入らない状態で撮像し読み出したものをダークフレームという。

暗電流によるダークカウントを調べるために、CCD 温度が -30°C ~ -26°C の状態でシャッターを閉じて 180s、

420s、900s の積分を行い、読みだしたフレームからバイアスを引いてメジアンを求めたものをダークカウント値とした。各積分時間に対し 8 枚のフレームを取得した。図 8 は、縦軸をダークカウントの平均値、横軸を積分時間でプロットしたものである。一般的に期待されるダークカウントと積分時間の比例関係は見えないが、これは、ダークカウント自体が極めて小さく、データの統計精度が不十分であることが考えられる。15 分の積分でダークカウントは 2 程度であることから、通常観測時に行っている 3 分程度の露光時間ではダークは無視できることが分かった。

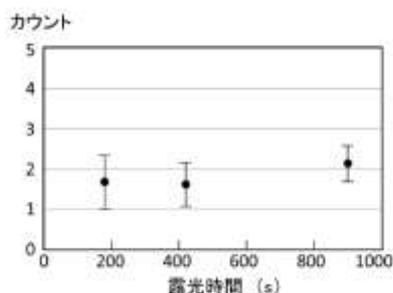


図 8 ダークカウントの時間変化

### 3.1.3 ピクセルスケールと視野

ピクセルスケールとは、天体画像の 1 画素 (pixel) が天球上で何秒角に相当するかを表す数値である。位置がしっかりと求められている天体がある程度の数ある星野を撮像し、CCD のピクセル座標と天球上の赤道座標 (赤経、赤緯) の関係式を求める。これでピクセルスケールと視野の広さが決まる。

HOTATE で撮影した空の画像データには世界座標システム (WCS) が張られており、各ピクセルの座標と赤道座標の対応が付けられている。世界座標を張る過程で、ピクセル座標と赤道座標の変換パラメータが決まる。世界座標 (WCS) が張られた R バンドの画像 62 枚からピクセルスケールを求めた。結果は

$$0.949 \pm 0.002 \quad (1\sigma) \quad ["/\text{pixel}]$$

となった。CCD カメラは  $1536 \times 1024$  画素からなっているので、これより視野は

$$24'.2 \times 16'.3$$

となる。

## 3.2 測光性能評価

### 3.2.1 スカイフラットとドームフラット

CCD のような検出器は 1 画素ごとに感度が異なるのが一般的である。また、光学系の非一様性の影響も観測データには大きく反映される。これら画素ごとの感度ムラや光学系の非一様性を補正するために望遠鏡に一樣な光を入射して取得するのがフラットデータである。図 10 にドームフラットとスカイフラットを示す。

ドームフラット用データは、ドームでドームフラット板を立て掛けてデータの取得を行った。ドームフラット板は、パネルに白紙を貼り付けたものである。これを、白熱電球で光が一樣になるように照射し、電球の明るさと露出時間を変えることで所要のデータを取得した。

スカイフラット用データは、2017 年 1 月 25 日に観測した blankfield (明るい天体のない天域) のデータから作成した。作成した典型的なスカイフラットは、天体を撮像した画像 8 フレームから作成した。スカイフラットを作る場合、星などの天体の影響が出ないようにマスクをかけることや、望遠鏡指向位置をずらしながら天体画像を取得するディザリングなどの工夫が行われるが、取得データの不足により星の影響が除去しきれていないように見える。今後、フラットデータを取得する際はその点に気をつけてデータを取得する必要がある。

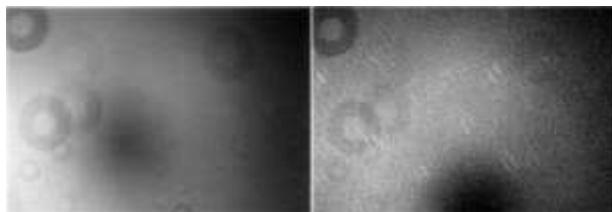


図 9 R バンドの典型的なドームフラット (左) とスカイフラット (右)。スカイフラットはフレーム数が少ないため星の影響が残っている。

図 9 からわかるようにフラットフレームで最も目立つパターンは、画面中央やや下に中心を持ちほぼ画面全体に広がる穴の空いた主鏡のゴーストである。サイズの小さいドーナツ状のパターンは、フィルターごとに変化するため、フィルターについてのゴミによるものであると判断できる。大きな主鏡のゴーストは、スカイフラットとドームフラットでその中心位置がずれていることが分かる。この原因は、おそらく撮影方向の違いによって、たわみによる望遠鏡と CCD カメラの間の相対姿勢が変化することによるものだと考えられる。

厳密には、撮影視野とほぼ同じ方向でスカイフラットを作成しそれを用いるべきであるが、極めて低い高度で観測をしない限り、典型的なスカイフラットを用いるのが現実的である。

以下の図 10 上図に、R バンドで撮影したある 1 枚の画

像(右)とそれを共通のスカイフラット (R バンド) でフラット化した画像(左)を示す。カウント値はメジアンで割り算して正規化してある。下図は、上図の黄色の線に沿ったプロフィールを示したものである。原画像にあった 5-6% (p-p) の大局的なムラが、フラット化によってほぼ 1%以下になったことがわかる。ある程度の高度の範囲であれば、共通のスカイフラットを使うことで実用上問題ない。しかし、CCD カメラを取り外す必要が出てくれば、その前後では異なるスカイフラットを使うべきである。

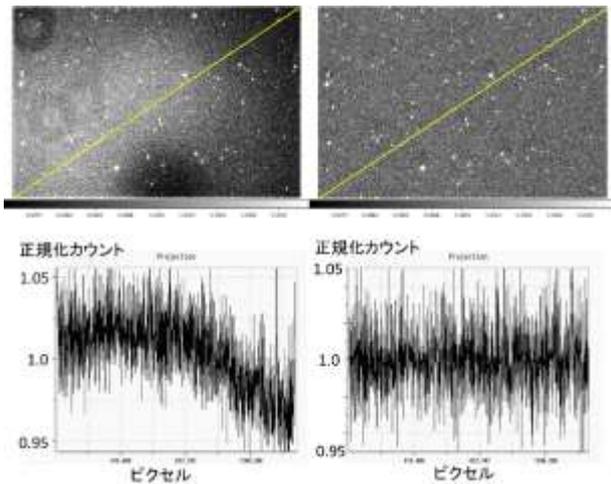


図 10 (上) R バンドで撮影したある 1 枚の画像 (左) とそれを共通のスカイフラット (R バンド) で割り算した画像 (右)。カウント値はモード割り算して正規化してある。(下) 上図の斜め線に沿ったプロフィール。

### 3.2.2 等級原点 明るさと等級

天体の明るさは、天体表面から単位時間に放出される光子のエネルギーの総和や、観測点における単位面積を単位時間に通過するエネルギー量など、場合によって様々な単位を用いて表される。

天体を 10 パーセク (1 パーセク = 3.26 光年 =  $3.1 \times 10^{13}$  km) の距離から見たときの見かけの等級を絶対等級と呼び、天体の真の明るさを表す指標として用いられる。天体から届く光の強度は天体までの距離の 2 乗に反比例するので、天体までの距離を  $d$  パーセクとすると見かけの等級  $m$  と絶対等級  $M$  の関係は以下ようになる。

$$m - M = -2.5 \log_{10} \left( \frac{10^2}{d^2} \right) \\ = 5 \log_{10} d - 5$$

この  $m - M$  を距離指数と呼び、天体までの距離を表す指標として用いられる。

### 測光標準星

測光標準星は、高い精度で明るさが測定されている星で、測光観測の際の相対的な明るさの基準となるものである。様々な測光標準星のカタログが存在し、目標天体の方向とできる限り同じ方向にある標準星を目標天体の観測の直前もしくは直後に観測することで、大気の透過率の影響を相殺することができる。測光標準星のカタログに記載してある等級は地球大気による減光を補正している値であり、地球大気外で測定したときの明るさで示されている。

### 等級原点

天体の相対的な明るさは、1 次処理された画像上でのカウントを比較すれば知ることができるが、絶対的な明るさはそれだけでは知ることができない。絶対的な天体の明るさを知るためには、既に明るさの分かっている天体 (測光標準星) を同時に観測して観測されるカウントと等級の間関係を求めることが必要である。特に露出 1 秒あたりのカウントが何等級に相当するかを示す値を等級原点と呼ぶ。

等級原点を求めるに当たり対象とした標準星は、Landolt (2009) (参考文献 2) による測光標準星カタログにある SA107 と SA110 という天域である。あるバンドにおける星の等級カタログ値を  $m_{cat}$  [mag] とし、露出時間  $t$  秒の画像中で (複数ピクセルにわたる) その星の全カウントを積分した値を露出時間  $t$  で割り、1 秒あたりのカウントにした値を  $n_0$  [カウント/秒] とする。等級原点  $m_0$  [mag] は、

$$m_0 = m_{cat} + 2.5 \log n_0$$

として求められる。

SA107 の観測は 2016 年 8 月 4 日に行った。R と I バンドは露出時間の異なる 3 枚 (60 秒、120 秒、240 秒) の画像からそれぞれ 11 個の星を抽出して等級原点を計算した。B と V バンドは、露出時間の異なる 2 枚 (120 秒、240 秒) の画像からそれぞれ 10 個と 11 個の星を抽出して計算した。SA110 の観測は 2016 年 10 月 14 日に行った。R、I、V バンドについては、各バンド 4 枚の画像からそれぞれ 11 個の星を抽出して計算をした。B バンドは、写っている星が少なく 4 枚の画像からそれぞれ 5 個~6 個の星を抽出して計算した。

以下の図 11 に代表例として SA110 の R バンドにおける等級原点と星の明るさおよび星の色の関係を示す。等級原点と星の明るさの関係において SA107、SA110 共に、星ごとに多少のばらつきがある。大気減光の効果が見えるが、この効果も結果の不定性に含めることにする。

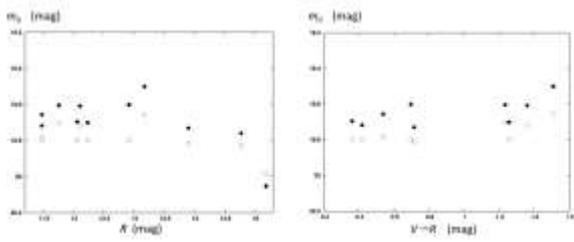


図 11 SA110 の R バンドにおける等級原点と星の明るさ (左)、および星の色 (右)。白丸と黒丸はそれぞれ、高度  $23.3^\circ$  と  $33.3^\circ$  での値。等級は Landolt (2009) (参考文献 2) による。右図では  $R \leq 14$  等より明るい星のみ示した。

星が暗くなると等級原点の決定精度が悪くなることがグラフから読み取れる。その結果を踏まえて、各バンドで明るい星を抽出し、等級原点とその不定性を表 1 のように求めた。

表 1 等級原点

バンド	$m_0$ [mag]
B	$18.2 \pm 0.1$
V	$19.9 \pm 0.1$
R	$19.7 \pm 0.05$
I	$18.7 \pm 0.04$

### 3.2.3 システム効率

望遠鏡による天体観測のシステム効率  $\eta$  は次の式で定義される。

$$\eta = \frac{N_e}{N_p}$$

ここで  $N_p$  は、望遠鏡に単位時間あたりに入射する光子の数、 $N_e$  はその光子によって CCD 素子に蓄えられる電荷の数である。システム効率は主に、望遠鏡の光学素子の吸収や反射による損失、フィルターの透過率、CCD の量子効率によって決まる。ここではこれまでの観測データに基づいて、HOTATE 望遠鏡の CCD カメラの V バンドにおけるシステム効率を求める。

Landolt の測光システム (参考文献 2) において V バンド波長  $\lambda = 555.6\text{nm}$  で 0 等級の星を地球大気外で観測したときに受ける放射のエネルギー  $E_\lambda$  は

$$E_\lambda = 3.56 \times 10^{-11} \text{ Wm}^2 \text{ nm}^{-1}$$

である。(参考文献 9: 理科年表より) これを光子のエネルギーで割って入射する光子の数で表すと、

$$n_p = 9.96 \times 10^7 \text{ photons}^{-1} \text{ m}^2 \text{ nm}^{-1}$$

これに V フィルターのバンド幅 110nm と望遠鏡の集光

面積  $6.09 \times 10^{-2} \text{ m}^2$  をかけ、天頂 ( $\sec z=1$ ) における V バンドの大気減光  $k_V = 0.27 \text{ mag}$  の補正を加えると、HOTATE に入射する光子数は

$$n_p(0\text{mag}) = 5.21 \times 10^8 \text{ photons}^{-1}$$

一方、V バンドの等級原点より 19.9 等級の星から入射する光で HOTATE の CCD に毎秒 1 カウント (2.38e) 個の電荷が発生するので、0 等の星からの入射光で発生する電荷  $N_e(0\text{mag})$  は、ポグソンの式、

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{I_1}{I_2}$$

から、

$$0 - 19.9 = -2.5 \log \frac{N_e(0\text{mag})}{2.38}$$

より、 $N_e(0\text{mag}) = 2.17 \times 10^8$  となる。これらの値を定義に代入して

$$\eta = \frac{N_e}{N_p} \sim 0.42 (42\%)$$

となる。

CCD 素子の V バンドにおける量子効率はカタログによると  $\sim 70\%$  であり、V バンドフィルターの平均透過率は  $\sim 85\%$  であるので、この値を前提とすれば、望遠鏡の光学系による反射吸収等の損失が  $\sim 30\%$  あることになる。

## 4. 今後の課題

今後取り組むべき課題を以下に挙げる。全天スカイモニターについては以下の諸点である

- 台座が完成後、試験用アクリル水槽を設置し、長期間に渡る容器内の温度変化を調査
- 超小型サーキュレータ等を用いた結露対策
- 容器内の温度管理の検討
- 台座とカメラ等の接続の確認
- 格納容器自体の素材の選定や断熱素材を含めた設計と制作
- 年間を通した太陽高度の違いや月齢の違いによる最適の露出パラメータの決定
- 蓄積されるデータのアーカイブ化と活用方法の検討  
筆者が担当した性能評価については以下の点が挙げられる。
- 天体の観測データを撮り溜め、典型的なスカイフラットを再度作り直す
- 様々な高度で測光標準星の観測を行い。等級原点の精度を高める

## 謝辞

岡村定矩教授には、指導教員として研究、論文作成において親身にご指導いただきました。八木雅文客員准教授には、全天スカイモニターの制御プログラムをはじめ、様々なデータ解析をご教示いただきました。和歌山大学の富田晃彦氏と和歌山県みさと天文台の小澤友彦氏には全天スカイモニターについての情報を提供してもらいました。その他、HOTATE プロジェクトに携っていただいたすべての方々に対し、感謝の意を申し上げます。

## 参考文献

1. 大橋龍太郎、木原直樹、吉田尚洋、山田龍之介、伊藤綾香、福島広大、岡村定矩(法政大学)、八木雅文(国立天文台、法政大学)  
「法政大学二連望遠鏡の遠隔操作システム構築と性能評価」 2017
2. Landolt, A.U. 2009, AJ, 137, 4186
3. 家正則、岩室史英、舞原俊憲、水本好彦、吉田道利  
「宇宙の観測 I - 光・赤外天文学」 シリーズ現代の天文学第 15 巻
4. 天文情報処理研究会監修  
「FITS の手引き-第 6.0 版-」 国立天文台 天文データセンター
5. 渡辺 誠、秋田谷 洋  
「円滑な連携観測のための諸環境の整備」 天文月報 2016 年 3 月 第 109 巻 第 3 号
6. 高木良輔  
「全天スカイモニターの製作と天文学への応用」岡山理科大学大学院総合情報研究科生物地球システム専攻 修士論文 2013
7. 岡村定矩、三浦孝夫、玉井哲雄、伊藤隆一編  
「理系ジェネラリストへの手引き」 日本評論社 2015
8. <http://www.bao.go.jp/koubo/manual/irafspbao0505.pdf>
9. 国立天文台編「理科年表」2017 年 丸善、天 47 (123 頁)