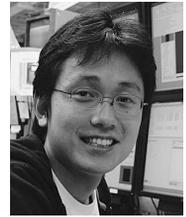


重力波光赤外線対応現象フォローアップ用 チベット望遠鏡HinOTORIの開発



内 海 洋 輔

〈広島大学 宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: youtsumi@hiroshima-u.ac.jp

広島大学宇宙科学センターでは中国チベットの5,100 mの高原に50 cm望遠鏡三色同時撮像システムHinOTORIを設置するプロジェクトを推進している。HinOTORIは重力波光赤外線対応現象のフォローアップを行う全地球観測網構築の一端を担うものである。3年間現地へ渡航できない事態が続く困難を乗り越えて2016年9月に仮設ながらファーストライトを実施した。本稿ではシステムの光学系に関する部分に焦点を当てて紹介し、設置までの困難と設置の際のエピソードを紹介する。

1. はじめに

私たちは重力波光学赤外線対応現象追跡観測のために、世界的なネットワーク（Japanese Collaboration for Gravitational-Wave ElectroMagnetic Follow-up; J-GEM）を組織した（PI：吉田道利・広島大学）。参加望遠鏡は日本、米国ハワイ、チリ、ニュージーランド、南アフリカに分布し、協力して重力波光学赤外線対応天体の追跡観測を実行している¹⁾。望遠鏡の分布を見渡すと日本と南アフリカの間の中央アジア地域の観測拠点が確保できていないことがわかる（文献2，図1参照）。そこで広島大学宇宙科学センターではこの中央アジアの空白地帯を埋めることで観測網を強化するために、チベットサイトに天文台を設置することを計画し、2012年の財源的裏づけがあったことにより計画が実行に移された。

プロジェクト名は広島大学の学章にちなんでHinOTORI（Hiroshima University Operated Tibet Optical Robotic Imager）と名づけた。さまざまな困難に見舞われて何度もプロジェクト存亡の危機を経験するが、文字どおり不死鳥のごとくし

ぶとく生き延びることができ、2016年9月に仮設ではあるが現地でのファーストライトを迎えることができた。本稿ではHinOTORIシステムの光学系の紹介と最も苦勞した現地への渡航問題と建設作業の様子を記す。

2. チベットサイトの特徴

中国西部の天文サイト開拓は中国国家天文台のYao Yongqiang教授のグループと、国立天文台の佐々木敏由紀や広島大学宇宙科学センター（当時国立天文台岡山天体物理観測所）の吉田道利らが中心となって、2004年頃から始められた。詳細は佐々木氏の2015年の文献3を参照されたい。長年の調査の結果、インドとの国境のそばの西チベット地域に高い晴天率でなおかつ、良いシーイングを得られる可能性を示すデータが存在する地域があった。それがチベット自治区阿里（Ali）地区である。この地域一帯は標高4,000 mを超える広い高原があり、所々に5,000-7,000 m級の山脈が存在する。その中のガー山は、5,000 mを超える山脈で街からも車で約30分と比較的アクセスが良く、すばる望遠鏡での晴天率データに近い

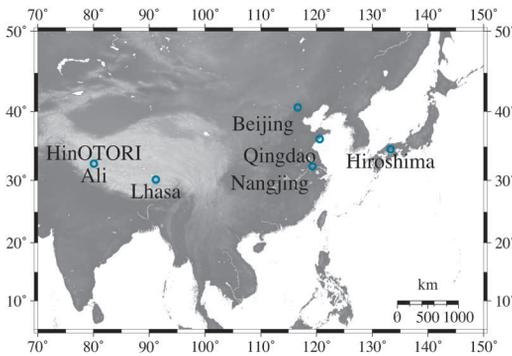


図1 HinOTORIの場所と関係する都市名。

結果を出している天体観測に向けたサイトである。夜空が暗いうえに、シーイングが良いのでシャープな星像が得られることから、より高感度の観測が可能になる。また、世界的に見ても有数の超高地サイトであることから、大気吸収の影響を受けやすい紫外線観測にも向いているなど、観測面において大きなメリットがあり、たいへん魅力的なサイトである。

3. HinOTORIの光学系設計

サイトの特色を活かしつつ探索性能を確保するために広視野・高結像性能・高スループットを目指し、HinOTORIを設計し、開発した。また新規サイトであり、海外に設置することによるメンテナンスの難易度が高いことが当初よりある程度は予想されたことから、「挑戦的な設計」よりも「確実な設計」を重視した。ここでは特に配慮した望遠鏡、装置光学系について概略を説明する。

3.1 望遠鏡

まずシステムのメインのコンポーネントである望遠鏡について説明する。ガー山の良好なシーイング条件を活かすためには、視野全面にわたってシャープな像を得る結像性能を確保する必要がある。望遠鏡光学系についてはさまざまな系が提案されていて、系に応じて結像性能や製作の難易度を左右するので目的に応じて適切な系を選ぶ必要がある。一般に市販されている二面鏡の光学系で

はRitchey-Chretien (RC; 非球面主鏡と非球面副鏡)かDall-Kirkham (DK; 楕円面主鏡と球面副鏡)が主流である。RC系は結像性能を確保しやすいが、その良好な特徴を得るための非球面鏡の検査が難しいために研磨が難しく一般的に高価である。一方でDK系はRC系に比べ研磨が容易であるために安価であるが、視野端での像悪化が著しく、像悪化の補正のために補正レンズを入れる必要がある。光学計算ソフトZemaxを用いて検討したところ、どちらの系を採用したとしても補正レンズ系が必要になることがわかった。RC系は素性が良いので同一素材の薄い補正レンズ2枚で収差が補正できるが、DK系はより複雑かつ厚い補正レンズ系が必要であった。補正レンズ系を導入すると、界面による反射とガラス材による吸収があるので、スループットを維持するためにRC系を採用した。さらに私たちは後述する三色同時撮像光学系を搭載するつもりであり、その搭載には標準品より長いバックフォーカス(鏡後面からカセグレン焦点までの距離)を確保する必要があったので、こちらで指定したRC条件を満たす50 cmの口径をもち、バックフォーカスが460 mmの光学パラメーターどおりに製作できる会社に依頼した。

3.2 同時撮像光学系

50 cm望遠鏡という小口径ながら高効率の観測で競争力をもつために、三色同時撮像光学系を採用した。この光学系には望遠鏡が残した「残収差」を除去する機能と三色同時撮像を実現する機能が必要である。また三色のうち一色はこの手の三色同時撮像カメラではあまり例がない紫外域のu-bandを採用することで特色を出すことを目指した。

残収差は補正レンズを使うことで取り除くことができる。ところがレンズ自体による吸収と界面による反射があり、特にu-bandにおける光学ガラスレンズ(BK7)の吸収は大きい。こうした要請により現実的にはレンズ枚数をできるだけ減

らすことが望ましい。幸い望遠鏡に Ritchey-Chretien系を採用したので、球面・コマ収差は取りきれており、残る非点収差、像面湾曲、およびレンズの使用により新たに発生する色収差を除いてやれば良く、この補正は2枚の同一ガラス材（熔融石英）のレンズの組み合わせで300-900 nmという観測波長全域の補正ができた。

三色同時撮像をするためには望遠鏡の光を波長に応じて分ける光学素子「ビームスプリッター」を導入する必要がある。ビームスプリッターとしてはダイクロミックミラーを採用した。ダイクロミックミラーは干渉膜の調節により波長に応じて透過と反射をコントロールした天文用途では広く使われている素子である。唯一の欠点は光軸に非軸対称な光学素子を入れるので新たな収差を作り出してしまうことである。この非軸対称な収差を抑えるためにはくさび形の板に干渉膜を成膜する必要がある。また収差の要因となってしまう成膜時に膜応力で発生する基板の反りについても着目していたが、基板厚を10 mmとし、反りに気をつけながら成膜した。

補正レンズ系の配置はダイクロミックミラーの前後どちらにも置くことができる。前に置いた場合は全光路共通の補正レンズ系となり、後に置いた場合はそれぞれの光路に補正レンズ系を用意する必要がある。前者の場合は光学素子の大型化と300-900 nmという広帯域の反射防止コートが難しいという欠点があった。一方で、後者の方は素子数が増えるが、それぞれの光学素子を小型化することができて、入手が容易で、なおかつ反射防止コートの波長帯域を各波長帯に限定化することができたので結果的には低コストで高効率なシステムを作ることができた。

これまでのまとめとして図2にHinOTORIの光学レイアウトを示す。RCの光学系のおかげで焦点において球面収差とコマ収差が取り除かれたF/8の光を集める。その光をダイクロミックミラーで吸収されないようにするために、まずは短

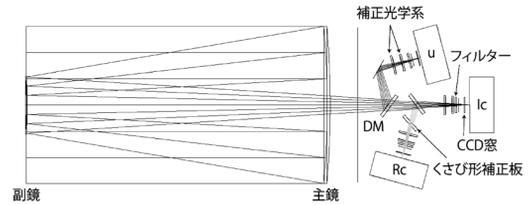


図2 光学レイアウト。望遠鏡で集められたダイクロミックミラーを用いて光を青い波長域から順に折り曲げ、2枚の熔融シリカ球面レンズで構成された補正レンズ系を使って収差を補正し、CCDカメラで記録する。

表1 三色同時撮像装置の諸元。

視野角	約24×24 arc min ²
ピクセルサイズ	13.5 μm
搭載バンド	SDSS- <i>u</i> , Cousins <i>Rc</i> , <i>Ic</i>
補正レンズ系材質	熔融シリカ
装置搭載時の合成焦点距離	4,250 mm
ピクセルスケール	0.68 arc sec

波長から順にダイクロミックミラーで反射し、補正レンズ系で残収差を補正する。最初に取り上げた*u*-bandはスペースの観点から再度アルミミラーで反射して光路を折る。折角が浅いほうが良いのでスペースを考慮しながらできるだけ折角を浅くできる角度を探した。また、ダイクロミックミラーを奇数回透過する*Rc*-bandは非対称な収差が残ってしまう。それを取り除くために、くさび形の石英板（くさび形補正板）をいれることでダイクロミックミラーを透過したことで作られた収差を取り除くようにした。こうした設計により約30分角において、ピクセルサイズの13.5 μmよりも十分に小さい収差が期待できる光学系を設計することができた。最終的にデザインし、製作した光学系の諸元を表1にまとめる。

3.3 その他の特徴

望遠鏡、装置光学系のほかにも特別に配慮した点がある。一般的なCCDは紫外線の感度がないので、UV光によって蛍光する層を載せたUV特化品を選択した。その効果は歴然で、標高0 mで標準のCCDを使った場合に比べて3倍の効率向

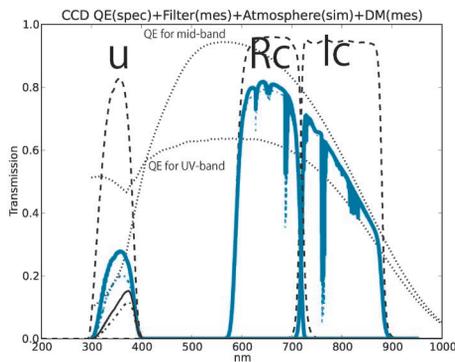


図3 各バンドの透過特性。各バンドには上から順にフィルター単体の透過特性（破線）、CCDの量子効率（QE）+フィルターの透過率+ダイクロイックミラーの透過率+大気の透過率を考慮した総合透過率（青太実線）、標高0mのときの総合透過率（青点破線）を記した。u-bandについてはさらにUV特化CCDではない通常品を用いた場合の5,100（太実線）および0m（点破線）の総合透過率を合わせて記している。

上が見込めるのである（図3）。

日周運動を追尾するための架台も必要である。東京工業大学MITSuME明野観測所や埼玉大学SaCRAに納品しているメーカーが製作に応じた。事前に埼玉大学に設置されている製品をテストしたところ、ウォームギヤ起因の周期的誤差とドリフトが生じることが判明した。この周期誤差は別につけたエンコーダーの読みを使ってフィードバックをかけるサーボ制御で修正できることがわかったので、新造機では常にサーボ機能が有効となるようにした。ドリフトについては非恒星時追尾用の速度補正機能がついていたので、それを利用することで除去できることを確認し製作した。

チベット現地の気象観測により冬期夜間は摂氏-25度程度まで下がる事が確認された。こうした低温下で駆動系がきちんと機能するかどうかを国立天文台先端技術センターの恒温槽を使い試験した。その結果-20度以下の低温下では使用しているモーターのグリースが氷結し、機能しないことがわかった。この対策のために、モーターを分解し低温対策グリースに入れ替えることで解

決した。

製作した望遠鏡・同時撮像光学系・カメラ・赤道儀・ドーム制御装置は東広島天文台にて可能な限りテストを行い、また制御ソフトウェアの開発も行った。これらの結果については天文学会年会で発表した⁴⁾⁻⁸⁾。

4. プロジェクトの実際と進捗

前の章ではHinOTORIシステムの技術的なことについて概説した。HinOTORIシステムの製作と並行して、現地に渡航し現場を把握し、基礎工事等、HinOTORIシステムを設置できる準備をする必要があった。この章では本プロジェクトの最大の課題であった渡航の様子について記す。

4.1 2013：チベット渡航

2013年4月に初めて中国国家天文台がある北京を訪問し、共同研究者のYao Yongqiang氏と面会した。これが私にとって初めての中国であり、私たちの計画を中国側に初めて紹介する機会となった。その後、現場の状況を理解するために6月にチベット・アリ山へ渡航することになった。チベット旅行は一般に時間がかかるので中国入国ビザの取得を要求される。さらに、チベット自治区は非解放地域として位置づけられており、自治区政府が発行する特別な許可証の取得が必要となる。これらの手続きは全体でおよそ1カ月程度かかった。普通の海外出張に比べると提出すべき書類が格段に増えるが、手続きは順調に進んだ。インターネットの状況や温度湿度を測定するための簡単な装置を製作し、阿里現地に設置し、気象条件のモニタリングを行う体制を整えることができ、プロジェクトは順調に進むかのように思われた。

4.2 2013後半-2015：暗黒時代

ここからが悪夢の始まりである。現地の様子をより詳細に観測するために、さまざまな環境センサーを備えた気象観測装置を準備し、2013年9月に渡航することを目指して手続きを開始した。と

ころが、チベットに入るための許可はいつまで経っても発行されることはなかった。仕切り直して11月に渡航を目指す、それでも許可が下りることはなかった。

何度か申請を出しているうちにわかってきたことは、2013年9月に中国における出入国に関する法律が変わり、チベット自治区への外国人の出入りもそれに準拠するということになったのである。中国への出入国には現地に受け入れ組織が必要となるが、その時点で私たちは現地に対応する組織をもっていなかった。それから約1年は中国側で中国国家天文台阿里観測所が設置されるのを待つことになった。2015年になり、対応組織である阿里観測所が設置されたので、再びチベット渡航を目指した。しかし、その後もどういふわけか許可証が発行されることがない膠着状態が続いたのである。人さえもいけない状況が何年も続き、解決策さえ見いだせず、計画の大幅変更や断念も考えざるをえなかった。

4.3 2016：状況の改善

一度は諦めかけたプロジェクトであったが、Yao氏らの尽力により現地での申請手続きのフレームワークが確立されてきた。また日本側からは在中国日本国大使館を通して中国政府と交渉を続け、2016年6月には日本科学技術訪問団に同行する形で3年ぶりのLhasa入りし、チベット自治区科学技術庁やチベット大学を訪問することができた。この訪問の成功を受けて入域に向けて自信を得ることができたので建設に向けての準備を加速し、広島大学の吉田・内海およびドーム会社2名の合計4名の日本人チームで2016年8月初めの渡航を目指し手続きを開始した。ところが出発日を目前にしても再び許可が下りないのである。追加で書類を求められ、それに応じて準備して提出するが、やはりなかなか状況は好転せず、陰鬱な日々が続いた。結局許可が下りて、それが手元に届いたのが9月2日であった。スケジュールが大幅に遅延した結果、ドーム会社は都合で同行する

ことはできなくなり、ついにはドームの設置ができなくなってしまった。また私たちもビザの都合で8月中旬より北京入りしており、私たちの渡航もその時点で長期にわたっていたため、時間的な制約もあった。とはいえ、せっかく現地入りできるチャンスを得たので、時間もなく、設備的な制限も厳しい拘束条件のもとでもできることを実施することにした。中国側がすでに設置していたドームがあったので、そこを間借りすることで試験観測を実施することを目標としたのである。

9月5日に空路でLhasa（標高3,600 m）入りし、通常高地順応のために2泊するところを1泊のみで、次の日の9月6日には阿里空港（4,300 m）へ飛んだ。到着後休む間もなく直ちに車で5,100 mのサイトへ向かった。直ちにサイトの状況をチェックし、既設の望遠鏡があるドームにどのようなかたちでHinOTORIのシステムを設置するかを議論した。既設望遠鏡はいったん撤去するとして、ピアの直径が小さいためにそのままでは赤道儀が設置できないことがわかった。直ちにH鋼を組み合わせたうえで鉄板を敷く簡易インターフェイスの図面を書き、鋼材屋を巡り材料を調達し、さらに加工・溶接を依頼した。その後、4,300 mにあるオフィスの庭に放置（！）されていた私たちの荷物をサイトに輸送するために、クレーン付きのトラックで吊り込んでサイトを目指したが、日没がきてしまったためにここで初日の作業は終了した。本来なら到着日は高地順応の休日とするはずなのだが、初日から飛ばしての作業である。

2日目の9月7日、山頂に荷物が到着。到着と同時に直ちに開梱作業を行い、ひさびさの望遠鏡資材と対面した。広島から出荷したのが2015年10月末なのでほぼ10カ月ぶりの対面であった。途中の悪路や風雨にさらされてしまったようだが、日本の梱包会社の仕事はたいへん優秀で、中の荷物に破損は見られず、また、風雨対策がしてあったために中身がぬれることはなかった。開梱



図4 ドームピアーに赤道儀を設置するためにピアーにインターフェイスを溶接作業しているところ。

作業が終わったところで、昨日発注したピアー赤道儀インターフェイス（H鋼と鉄板を溶接したもの）が届いたので、早速吊り込んで設置した（図4）。続いて赤道儀、望遠鏡の設置と1日で大物を設置することができた。

9月8日、望遠鏡に装置を取り付け、バランス調整を行なった。アンバランスであるとトルクが大きくなってモーターが赤道儀を駆動することができない。ところが広島でのスペースの都合上、全系組み上げ試験ができなかったので、ここにきてアンバランスが発覚する。手元にあった重りを試行錯誤をすることで何とかバランスを合わせて、到着後初めて赤道儀を駆動する赤道儀駆動試験の実施に成功した。つづいて望遠鏡のミラーカバーや焦点合わせ用リニアアクチュエーターの駆動試験を実施し、問題がないことが確認できた。そして、日が暮れたあと、北極星用望遠鏡を見ながら赤道儀の向きを調整し、赤道儀の水平・方位・仰角の調整を実施した（図5）。その後、多少手間取ったもののアンタレスを導入して望遠鏡の指向を調整し、そして調整結果の確認のために土星に向けて撮像を実施。何とか土星がその視野内に写っていることを確認ができた。さらなる調整が必要であるものの、全体的な機能としてすべて機能していることが確認できた。二日間の試験



図5 極軸望遠鏡を取り付け極軸調整中のHinO-TORI望遠鏡。

観測を実施し、試験データとしては輸送後の光学系のテストのためにハルトマンテスト用画像の取得、スループットの測定のために測光標準星を取得した。次回の渡航まで荷物を安全に保管するために片付けて仮設作業は何とか「成功」というかたちで終了し、次のステップへの道筋をつけることができた。

5. おわりに

外国の非解放地域であるという特別な事情を抱えたサイトへの天文台建設は困難の連続であった。当初想像していなかったような問題や出来事が多発した。厄介なことは、時間が進むにつれて状況が変わってってしまうということである。プロジェクトを始める前はとても簡単に現地に入ることができたが、ある日突然これまでの方法では入れなくなってしまったりするのである。私たちの現地入域についていえば、一定の解決に3年3カ月もの時間を要した。忍耐強く待つことが極めて重要だったと思う。その意味で5年間の事業

年度がある科研費新学術領域研究のプロジェクトとして取り組めたのは幸運だった。その一方で、国をまたぐという性質上、さまざまなリスクがあり、なんとか事業年度の5年以内に仮設でありながらもファーストライトを迎えることができたのは奇跡であるとも言える。

協力機関からも「やめたほうが良い」と言われ、何度も諦めそうになった。具体的にほかのサイトを検討し議論したことが何度もあった。北京の寒空の下、右も左もわからず、文字どおりさまよっていた。あてもなくさまよっていたが、上司に「とにかく会いに行け」と指示され、いろいろな人に支援を要請して回っているうちに少しずつ中国における人脈ができていった。そして相談をしているうちに励まされ、本当に僅かずつであるが状況が好転していった。特に中国科学院紫金山天文台の劉彩品氏からのメールに「内海さんのメールを見ていると、数十年前海部さんと見た夢（東アジア諸国の研究者が協力して天文学を発展させるというもの⁹⁾）が実現できそうな気がしてきます。」とあった。このメッセージは私を強く奮い立たせた。そして国家天文台、紫金山天文台の研究者との協力関係は共同作業ができるまでに発展した。今後は今回得られた試験観測データの解析や、定常運用に向けて恒久設置作業や設置後の評価を行う必要があるが、彼らと協力して一つ一つ問題をクリアしていきたいと考えている。そして、重力波光赤外線天体の全地球モニタリングネットワークの一端を担えるようにしたい。

謝 辞

本プロジェクトは天文学者に限らずたくさんの協力者に支えられている。プロジェクトページ¹⁰⁾のメンバーリストに限らず、以下に記す関係諸機関の強力なサポートによっている。在中国日本国大使館、日本学術振興会北京事務所、国立

天文台、国立天文台岡山天体物理観測所、中国科学技術部、中国科学院、中国国家天文台、中国紫金山天文台、広島大学事務。またリスクを顧みずに本プロジェクトの各コンポーネントの製作にあたったメーカー各社に感謝したい。編集を担当してくださった諸隈智貴氏の各氏から原稿について有益なコメントを数多くいただいた。

参考文献

- 1) Morokuma T., et al., 2016, PASJ 68, 9
- 2) 諸隈智貴, 2017, 天文月報 110, 14
- 3) 佐々木敏由紀, 2015, 天文月報 108, 480
- 4) 内海洋輔ほか, 2013, 天文学会秋季年会 V229b
- 5) 内海洋輔ほか, 2014, 天文学会春季年会 V230b
- 6) 内海洋輔ほか, 2014, 天文学会秋季年会 V205b
- 7) 内海洋輔ほか, 2015, 天文学会春季年会 V229b
- 8) 内海洋輔ほか, 2016, 天文学会秋季年会 V219b
- 9) 海部宣男, 劉彩品, 2015, 天文月報 108, 475
- 10) HinOTORI プロジェクトページ, <http://hinotori.hiroshima-u.ac.jp>

Development of HinOTORI: The Tibet Astronomical Observatory for Electromagnetic Counterparts of Gravitational Wave Transients

YOUSUKE UTSUMI

*Hiroshima Astrophysical Science Center,
Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama,
Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan*

Abstract: We conduct a project to build a new simultaneous imaging system with 50 cm telescope in Tibet, HinOTORI. HinOTORI is going to join the Japanese observation network for Electromagnetic Counterparts of Gravitational Wave Transients. We successfully performed the first light observation with temporal setting at the site September 2016 while we had not been able to get enter Tibet for 3 years. Here we describe the optical design of the system, difficulties we encountered and story on the installation work.