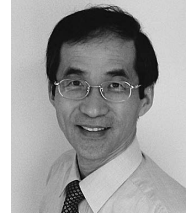


京都大学3.8 m望遠鏡

長田 哲也

〈京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉
e-mail: nagata@kusastro.kyoto-u.ac.jp



2011(平成23)年度からの「大学間連携」事業のもと、京都大学では、望遠鏡や観測機器の技術開発を進めてきました。おかげさまで、分割鏡の計測と製作、観測時を想定した分割鏡リアルタイム制御、極限補償光学の実験などに目覚ましい成果を上げることができました。今後は、2017年にファーストライトを達成し3.8 m望遠鏡を国内望遠鏡の中核としてさらにネットワークの展開に貢献していきたいと考えています。

1. はじまり

私にとっての大学間連携は2008(平成20)年8月の国立天文台長(当時)観山正見さんから京大理附属天文台長柴田一成さん、太田耕司さん、私、広島大の大杉節さん、岡山天体物理観測所長(当時)吉田道利さんへのメールで始まりました。大学の連携に関する文科省のウェブページを教えてくださいました。そして、柴田さんが10月までに京大の附置研究所からも情報を収集されたりした後、11月4日に観山さんと大杉さん、柴田さんとTV会議を行い、20日にはこの3人の方々が文科省へと第1回の打ち合わせに行かれました。

京大ではさらに理学研究科長や総長との面談を重ね、2009(平成21)年4月15日には国立天文台三鷹・岡山、東大、名大、広大とTV会議で結んで、議論を進めました。京大岡山3.8 m望遠鏡の開発状況やドーム予算の心配を述べ、観測装置開発を報告してそれに対する各大学からの連携の可能性をうかがいました。その結果、「京大岡山3.8 m計画への連携」なのか、「各大学で特色ある研究を行ったうえで連携して」なのかについての議論へと進み、各大学の特色あるサイエンスとそのうえでの連携の案をまとめようということに

なりました。次いで、平成23年度概算要求での大学間連携を目指して、吉田さん、土居守さん、大杉さんが5月12日に京大に集まり、「大学間連携で探る宇宙の爆発現象」といったものを目指すことが決まり、さらには、全世界にわたるネットワーク構築のためには名大の南アフリカ天文台IRSFを加えたいと考えました。

1.1 「各大学でも学内からの幅広い理解を」

そしていよいよ、国立天文台、広大に加え鹿児島大の面高俊宏さんにも呼びかけて、文科省へと6月17日に「私ども、京都大学が国立天文台や名古屋大学と共同開発しつつあります3.8 m望遠鏡をはじめとした数カ所の日本の大学光赤外線望遠鏡を連携した、光赤外線天文学に関する大学連携プロジェクトについて、一度、関連する大学の関係者一同でご相談すべく」うかがいました。文科省からは「国立天文台でとりまとめるものの、それぞれの大学でも学内での幅広い理解を得るよう」といった助言をもらって帰ってきました。

2009年8月21日の岡山(光赤外)ユーザーズミーティングでは太田さんが大学間連携について話し¹⁾、9月の山口大学での天文学会年会の際の光赤天連総会でも京大3.8 m望遠鏡のところで、この大学間連携についての計画を話されていま

す。10月に東大からも積極的に参加したいとの表明を受け、12月のTV会議の結果、さらに東工大とも相談を始め、2010(平成22)年となって、1月22日にTV会議(国立天文台、東工大、名大、広大、鹿児島大と結ぶ)を開きました。京大3.8mと岡山に関しては、岡山という観測地を国立天文台に維持してもらい、大学の観測天文学の国内拠点となることを希望しました。そして、2月8日の文科省訪問(国立天文台、東大、東工大、名大、広大、鹿児島大とともに)を経て、各大学でのあわただしい動きがあり、京大からは4月23日に事務方とともに文科省訪問、そして仕上げに全大学そろって4月28日文科省訪問となりました。6月には、さらに北海道大学も参加します。

各大学では、研究科長がこの大学間連携に対して同意書を書くのか学長が書くのかといったことに関する議論があり、京大でも総長にお願いに行きました。これが翌2011年6月22日学士会館での自然科学研究機構長・国立天文台長・各大学の学長せいぞろいの記者会見へとつながっていきます²⁾。

1.2 観測ネットワーク構築のワークショップ

一方、サイエンスの検討として、野上大作さんが世話人となり、2010年6月28日に京大で「中小口径望遠鏡連携観測ネットワークワークショップ」を開きました。北海道大学から鹿児島大学まで幅広い参加を得て、教育での連携も含め、具体的な連携観測に向けての一步を踏み出しました。ガンマ線バーストの観測、突発天体観測の実績と将来などがいろいろと発表されました。さらに、8月18日の光赤天連シンポ第1部「中小口径望遠鏡によるサイエンスとその運用の将来」で、大学間連携の具体的な内容と将来像などを議論しました。京大は、大学間連携の中で望遠鏡や観測機器の技術開発を進め、また、各大学への教育に貢献するという立場で中核となって参加していくことになりました。

そして、2010年12月末には予算原案にこの要

求が認められたとの観山さんからのお知らせがあり、無事に2011年度に大学間連携が開始されます。2011年2月[tennet: 8403]として五つの参加機関から「大学間連携による光・赤外線天文学研究教育拠点のネットワーク構築事業にかかわる人事公募のお知らせ」が流れました。ただ、京大理学研究科では、物理学・宇宙物理学専攻に加えて数学・地球・化学・生物からも教授が参加し副研究科長が運営委員長となる「新技術光赤外線望遠鏡」特別講座を作ることが必要で、公募も8月の[tennet: 8946]まで遅れてしまいました。とは言うものの、こういう面倒な仕組み作りこそ研究科全体からの幅広い理解を得ることに役立っています。こうして、私たちは「望遠鏡本体あるいは関連する装置の開発を積極的に推進する」特定准教授1名、特定助教1名を迎えたのです。

2. 望遠鏡の技術開発

京大3.8m望遠鏡は、日本初の分割鏡方式の東アジア最大の光赤外線望遠鏡です。すばる望遠鏡が国家プロジェクトとして活躍する時代に、自前で中口径の望遠鏡を作り試行錯誤しながら観測装置の開発や観測研究をのびのびと進めていくことも極めて重要であろうと、1990年代から議論が始まり、そして、やっとファーストライトに近づいてきました。この望遠鏡を製作する過程で、1) 大きさ1mの鏡を1 μ m精度で加工する超精密研削加工技術、2) 鏡面を100nm精度で机上計測するCGH干渉計、3) 大きさ1mの18枚の鏡を10Hz、50nmの精度で保持する分割鏡制御技術、4) その光学系を精密に迅速に天体に指向する超軽量望遠鏡架台の開発³⁾を行ってきています(図1)。

望遠鏡は国立天文台岡山天体物理観測所(浅口市と矢掛町)の駐車場の仮ドームに2015(平成27)年3月に設置されました。隣接地を京大が借りて、今年度予算で建設されるドームへと、すみやかに移設し試験を開始したいと考えています。

以下では、この大学間連携に関連した技術開発

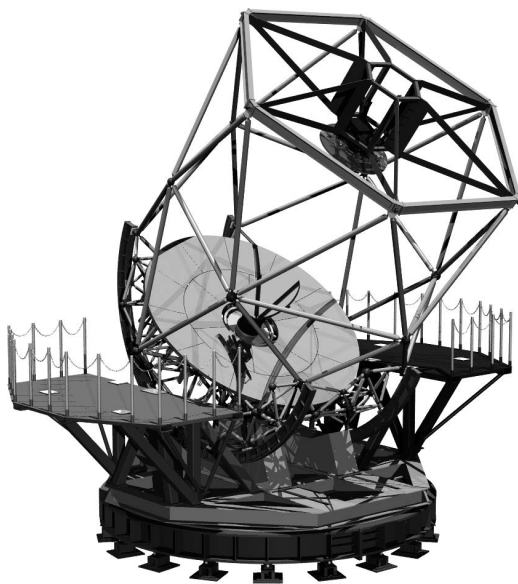


図1 京大岡山3.8 m望遠鏡.

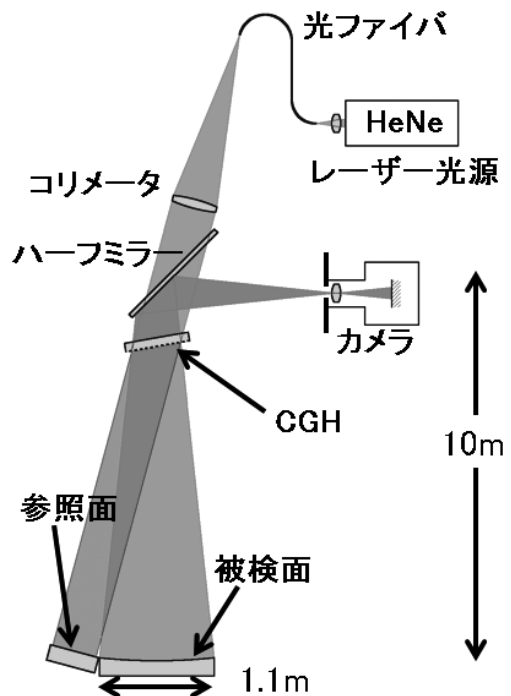


図2 CGH干渉計の光路図.

を中心に、いくつかのハイライトを紹介します。

2.1 分割鏡の計測と製作

主鏡は18枚の分割鏡からなり、軸対称な双曲面（副鏡とともにリッチー・クレチエン光学系をなす）です。その一部分となる18枚それぞれは非軸対称かつ非球面なので、製作は容易ではありません。そもそも計測ができなければ修正しつづの製作もできないので、干渉計を使うなどして高精度計測をする工夫をしなければなりません。加工機から取り外すことなく機上計測することにも気を遣いました。そのために、私たちはCGH (Computer Generated Hologram) 干渉計を開発しました(図2)⁴⁾。干渉計は、調べるべき光学面からやってきた光波(被検光)を既知の光波(参照光)と干渉させて、そのパターンから被検光の波面形状そして光学面の形状を推定します。開発した干渉計では、理想的な光学面が作るはずの波面を生成する光学素子としてCGHという回折格子のようなものを用います。CGHの基板に描画された透過・遮蔽の格子によって回折した光波が、参照光として働くわけです。

このCGH干渉計では、被検光と参照光がほぼ共通の光路(コモンパス)を通るので、レーザーのモードジャンプ、空気揺らぎ、振動に対して強い干渉計となります。これを後述の加工機の直上に設置して、機上計測を実現しました。

鏡加工では、高速化を目指して、従来の研磨よりも効率的に形状を達成できる超精密研削盤を用いた加工技術を開発しました⁵⁾。研削は研磨とは異なり、砥石と加工物(ワークと言う; この場合は鏡)との位置関係を極めて精度良く制御する必要があります。鏡が薄くて変形しやすいため、それを強固に支持するのの一方法です。しかし今回はそうではなく、3点の固定点プラスばねによる静圧受けに近い支持方法を用い、加工圧力による変形を考慮した軌道を砥石に描かせました。この補正加工法によって、1 μ m程度の形状誤差に収まる高精度研削を達成しました。その後の短期間の研磨で、図3のように干渉縞が得られる見事な鏡面ができています。

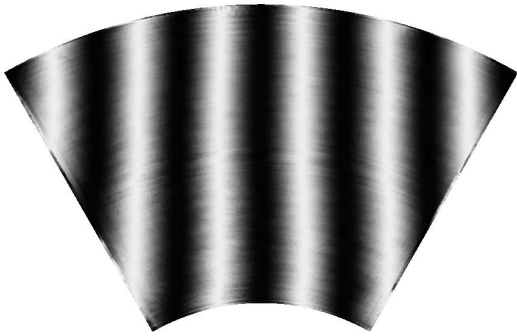


図3 1枚の分割鏡の、ヘリウムネオンレーザーでの干渉縞画像。

2.2 観測中の分割鏡リアルタイム制御

分割鏡からなる主鏡が、1枚の高精度な双曲面の鏡として機能するためには、不断の制御が必要です。まず観測前に、18枚の分割鏡の間の段差がなくなるようにレーザーを使った位相カメラで調整しておきます。そして観測中の、温度変化・望遠鏡姿勢変化に伴う重力変化・風による外乱による段差変動を、rmsで50 nm以下に抑える必要があります。これにはレーザー使用の位相カメラは使えないため、鏡に取り付けられたエッジセンサによって常に相対的な段差を検出し、制御しなければなりません⁶⁾。

エッジセンサは18枚の鏡に78個設置し、rms=2 nm、屋外にさらされる環境のもとで30 nmの安定性をもちます。このセンサからの信号をもとに、各分割鏡を支える3本ずつのアクチュエータの位置を制御器で計算し、指示します(図4)。このフィードバックループを200 Hzで行い、実効的な制御帯域として10 Hzを想定しています。これに関しては、室内実験で実機と同じシステムを構築し、問題ない精度を達成しています。

なお、超軽量望遠鏡架台の開発は大学間連携よりも早くスタートしていましたが、その架台を設置し試験をすることができたのは、まさに連携の名古屋大学の大型実験棟でした。

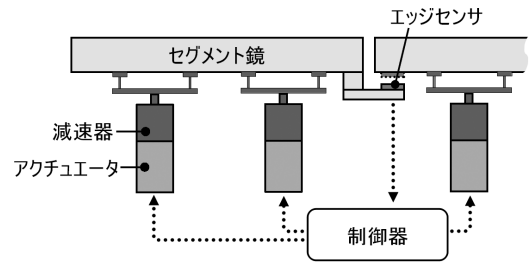


図4 分割鏡制御システム。

3. 観測機器の技術開発

今年も岡山ユーザーズミーティング(第26回光赤外ユーザーズミーティング)で議論された⁷⁾ように、3.8 m望遠鏡の共同利用を(たとえ曲りなりであっても)開始したいと考えているのは2018(平成30)年度内であり、その時に既存の観測装置として利用できるのは高速カメラ、分光器KOOLSとその面分光ユニットKOOLS-IFU、そして極限補償光学観測装置SEICAの予定です。ここではこの大学間連携の事業として特別講座で開発されている極限補償光学の技術について述べます。

3.1 極限補償光学

視線速度法などによって間接的に検出されている太陽系外惑星を高解像・高コントラストで直接撮像し、その性質を明らかに(キャラクタリゼーション)するのがSEICAの役割です⁸⁾。

地球大気の揺らぎが天体からの波面を凸凹に乱すため、地上の望遠鏡で回折限界の結像は得られません。これを改善する技術が補償光学です。補償光学は波面の状態を検出する波面センサ、波面のゆがみを逆位相の反射鏡で打ち消す可変形鏡、および波面センサから可変形鏡への指令を行う演算部からなります。

従来の、解像度だけの改善をねらった補償光学では、大気の揺らぎより時間的・空間的に低周波な補正でも十分効果を発揮しました。しかし、高周波な波面の歪みは僅かであっても星の周囲にハローを作るため、暗い惑星はこれに埋もれてしま

います。解像度と高コントラスト双方を要求する惑星直接撮像用の補償光学は従来の補償光学よりはるかに高周波な補償が求められ、これを極限補償光学と呼んでいます。

補償光学の性能は観測地の大気状態と望遠鏡の口径によく適合させる必要があります。望遠鏡口径が大きいほど、望遠鏡に入射するビームが増えるため、補償が困難になるのです。岡山という観測地と口径3.8 mという組み合わせは絶妙です。

開発中の観測装置SEICAでは、位置ずれ (Tip/Tilt)、低周波の大振幅補正 (Woofers)、高周波の小振幅補正 (Tweeters) という3段階での波面補正を行うことにしており、その基礎実験、実機製作を進めています。

3.2 点回折干渉計

新しい波面センサの研究・開発も進めています。波面センサは大別すると、波面の位相を直接検出するタイプ (位相型) と傾斜や曲率から積分によって波面を生成するタイプ (傾斜型・曲率型) に分けられます。極限補償光学では高い精度が求められるため位相型が望ましいものの、なかなか実現していません。従来の位相型波面センサの課題は、位相に対する非線形な出力による演算処理の複雑さと高いシステム安定性が重要な点でした。そこで、私たちは「点回折干渉計」 (Point Diffraction Interferometer) を応用することに着目し⁹⁾、位相も振幅も得るといふ解析の論文を発表しました¹⁰⁾。このPDI方式は形状計測の分野で実証されており、振動のある不安定な環境下でも高精度かつ高速演算を実現しています。取得された画像の引き算と割り算から波面の歪みを導出できるため、演算処理は非常に簡易に済みます。

4. 京大3.8 mのこれから

新ドームに望遠鏡を移設し、動作の試験を繰り返し、光学系の調整を進め、2017年のファーストライトを目指しています。京大では突発天体、

スーパーフレア、系外惑星など、他の望遠鏡だけでは解明困難なサイエンステーマに挑みたいと計画しており、これらに関してはまた機会を改めて御紹介できればと思います。まだまだ乗り越えるべき問題は数多くありますが、さらに連携を進めて、一大学ではなし得ない大きな成果を上げたいものと思っています。また、一昨年から短期滞在実習も進めてきており、この面でも貢献していきたいと考えています。

参考文献

- 1) http://www.oao.nao.ac.jp/oaoweb/wp-content/uploads/oaoum09_ohta.pdf
- 2) 関口和寛, 2011, 国立天文台ニュース 217, 6
- 3) Kunda M., Kurita M., Ohmori H., 2012, International Association for Shell and Spatial Structures 53, 49
- 4) Kino M., Kurita M., 2012, Applied Optics 51(19), 4291
- 5) Tokoro H., Maihara T., 2012, Journal of the Japan Society of Grinding Engineers 56(7), 447
- 6) Shimono A., et al., 2012, SPIE 8444, 84445Z また、第15回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会なども参照 http://www.si-sice.org/si2014/si2014_program_detail.pdf
- 7) <http://www.oao.nao.ac.jp/support/commonuse/um/um2015/>
- 8) Matsuo T., et al., 2014, SPIE 9147, 9147 V
- 9) Imada H., et al., 2015, Applied Optics 54, 7870
- 10) Yamamoto K., et al., 2015, Applied Optics 54, 7895

Kyoto University 3.8 m Telescope

Tetsuya NAGATA

Department of Astronomy, Kyoto University, Kitashirakawa, Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: In the framework of the Optical and Infrared Synergetic Telescopes for Education and Research (OISTER) started in 2011, we have been developing the telescope and instruments in Kyoto University. Thanks to the program which is supported by many people, remarkable progress has been achieved in measurement, fabrication, and control of the segmented mirrors, extreme adaptive optics experiments, among others. We plan to contribute further to the evolving network, making the 3.8 m telescope as the core after achieving its first light in 2017.