

未来材米斗

Expected Materials for the Future

Review

酸塩基複合化学を基盤とする高機能触媒の創製

フタロシアニン類縁化が切り開く新たな機能性色素の世界

トモグラフィーを用いた高分子不均一構造の
3次元可視化の最前線

室温結晶成長技術を用いた
高輝度緑色発光素子用材料の開発

プラズモニクスが拓く革新的光デバイス

強磁場中コロイドプロセスを利用した
セラミックス配向積層体の作製

◎ WANTS-NEEDS-SEEDS

光で溶ける有機材料の開発

——再利用可能な新しい光応答性材料

◎ 未来への道しるべ

超サステナブル建築と材料



4

2011

望遠鏡の視力を高める レーザーガイド星補償光学系

家 正則 Masanori Iye

自然科学研究機構国立天文台 研究連携主幹・教授 兼 超大型望遠鏡 TMT プロジェクト室長、
東京大学 大学院理学系研究科 教授、総合研究大学院大学 物理科学研究科 教授

1977年、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、理学博士。同大学理学部天文学科助手、同大学東京天文台助手、同助教授、国立天文台助教授を経て、1992年、同教授、現在に至る。2010年より同研究連携主幹兼務。専門は銀河物理学、観測天文学。東レ科学技術賞（2011年）、文部科学大臣表彰（2010年研究部門）、仁科記念賞（2008年）、日本光学会光設計特別賞（2006年度）などを受賞。著書に、「シリーズ 現代の天文学」第15巻、第5巻（日本評論社、編集）、『21世紀の宇宙観測』（誠文堂新光社、監修、2002）、『すばる望遠鏡』（岩波ジュニア新書、2002）、『地球と宇宙の事典』（岩波ジュニア新書、2000）など多数。



シーディング

すばる望遠鏡で観測するには、まず競争率約4倍の難関を突破して観測時間を確保する必要がある。すべての提案書はその分野の専門家により国際審査され、高得点を得た提案のみが採択される。次の難関は天気である。どんなに準備万端で臨んでも、観測当夜が晴れなければ話にならない。晴れても良い観測ができるとは限らない。良いデータが撮れるかどうかは星がどれくらいシャープに見えるかで大きく違ってくる。観測時の星像の大きさを角度秒の単位で測り、天文学者はこれを「シーディング」と呼ぶ。

太平洋の孤立峰、ハワイ島のマウナケア山頂（海拔4,200 m）は、年間を通して夜間気温がほぼ0°Cで安定している。風上に風を乱す原因となる地形がないマウナケア山頂は、世界一シーディングの良い観測地として知られている。実際、すばる望遠鏡でのシーディングは平均で0.6秒角であり、日本国内

での平均値が2秒角程度であるのと比べると、天体がはるかにすっきりと見える。国立天文台がすばる望遠鏡をハワイのマウナケア山頂に建設した最大の理由はここにあった。

補償光学

直径8.2 mのすばる望遠鏡の解像力は、理論的にはその回折限界で規定され、波長2 μmの近赤外線では、本来0.06秒角である。だが、実際のシーディングは平均で0.6秒角。つまり、世界一良い観測地といえども、地球の大気ゆらぎにより、そのシーディングは理論的限界の10倍にまでボケたものになっているのである。口径2.4 mのハッブル宇宙望遠鏡が切れ味の良い見事な天体写真を提供できるのは、大気ゆらぎのない宇宙空間からの観測だからである。もし、地球の大気がなければ、直径で3.4倍大きいすばる望遠鏡は3.4倍細かいところまで見えるはず

である。大気をなくしてしまうわけにはいかないが、大気によるボケをなんとか打ち消すことはできないだろうか？

大気ゆらぎによる光の乱れ方を測つて、それを直接補正すれば地上からでも理論的な回折限界の解像力が達成されるはずである。1953年にアメリカの天文学者バブコックがこう考えた。原理は簡単でも、「補償光学」と名付けられたこのアイデアの実現にはさまざまなハイテク技術の成熟を待つ必要があった。

筆者たちのグループは1995年ごろから開発を進め、1999年から動きはじめたすばる望遠鏡に、第一世代の補償光学系を2002年に完成させた。ここで紹介するのは2002年から9年がかりで、10数名にのぼるチームメンバー^{注)}が心血を注いで開発・製作した第二世代のレーザーガイド星補償光学

注) 早野裕、高見英樹、大屋真、美濃和陽典、渡邊誠、服部雅之、斎藤嘉彦、伊藤周、Sebastian Enger、Stephan Colley、Taras Golota、Olivier Guyon、Vincent Garrel

系である。図1に示すように、全体システムは188素子補償光学系とレーザーガイド星生成系からなる。

188素子補償光学系

図1のシステム構成図下部にある188素子補償光学系は、波面センサーと可変形鏡、それらを制御する高速制御系からなり、すばる望遠鏡の高度軸上にできるナスマス焦点に配備している。188個のアバランシェ光ダイオードからなる波面センサーは、観測したい天体のすぐ近くにあるガイド星の光ビームのゆらぎ分布をkHzの速さで測

る。光波面の誤差分布をちょうど打ち消すように可変形鏡の表面を高速に凸凹させて、ゆがんだ波面を平面波になるように補正する。すると観測装置には大気のゆらぎが補正された光が届くので、望遠鏡の回折限界に相当するきわめて高画質な像が得られるという方法である。

望遠鏡ビームを188分割するには、専用のマイクロレンズ（図2）をチームで設計し国内メーカーで外注製作した。可変形鏡は、その裏面に188個のバイモルフ型のピエゾ駆動電極（図3）を188個のマイクロレンズと幾何学的に対応させた形に配置した特注品で、電極配置パターンを設計して、フラン

スの光学会社に制作依頼した（図4）。波面センサーと可変形鏡のビーム分割を最適化したのは、ビームの波面乱れの制御が安定に行えるようにするための工夫である。

188素子補償光学系自体は2006年10月にファーストライトを迎えて、補償光学試用により、0.6秒角の星像が1/10の大きさの0.06秒角になることが実証された（図5）。実際、補償光学により2006年に撮影したオリオン大星雲中の四つ星トラペジウムの画像を、補償光学が完成する前の1999年にすばる望遠鏡で撮影した画像と比べるとその切れ味の違いが一目瞭然である（図6）。

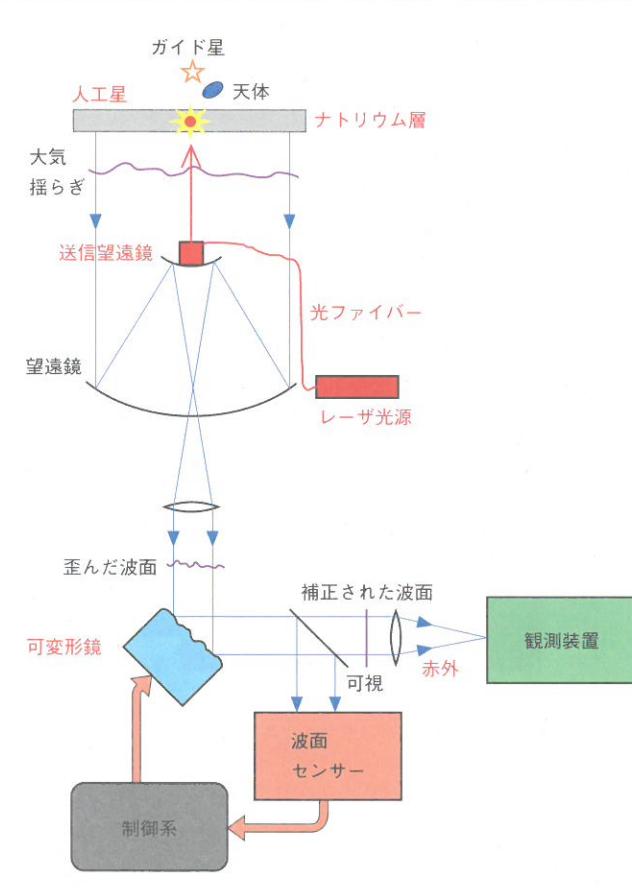


図1 すばる望遠鏡レーザーガイド星補償光学系システムの構成



図2 波面センサ用マイクロレンズアレー

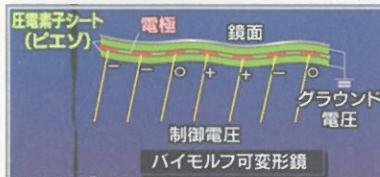


図3 バイモルフ型ピエゾ電極による鏡面変形



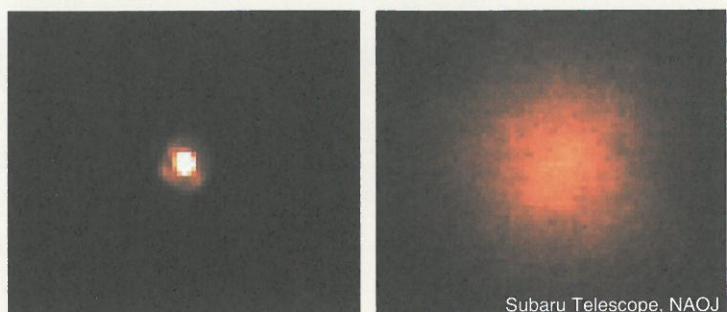
図4 製作した特注の可変形鏡（直径130 mm）

レーザーガイド星生成システム

制御素子数36の第一世代の補償光学系も制御素子数188の第二世代の補償光学系も、それら単体では使用範囲が限られていた。それは大気揺らぎを精度良く測るには約12等星より明るいガイド星が必要であり、観測したい天体から1分角以内にそのような明るいガイド星がある確率は実際にはあまり大きくなきからである。

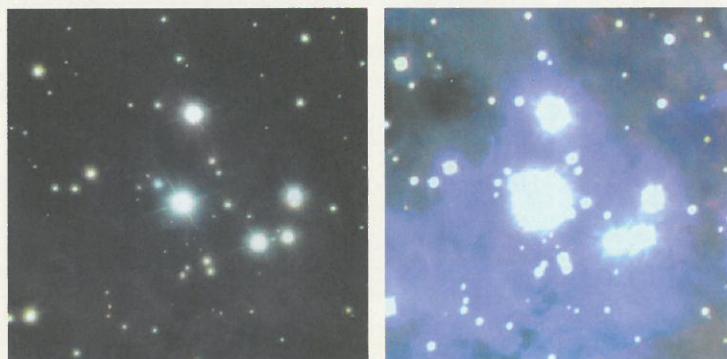
筆者は遠い宇宙の銀河を探して、宇宙考古学の観測的研究を行っている。図7は筆者たちがすばる望遠鏡で2006年に発見した距離129億光年の銀河IOK-1である。この銀河は2006年9月から2010年11月の4年あまりの間、もっとも遠い銀河の世界記録となっていた。129億光年かたな銀河からの光は地球に届くまでに129億年かかる。つまり、遠い銀河ほど昔の銀河の姿を見ていることになる。より遠い銀河を観測することで、より昔の宇宙を直接見ることができます。そのような遠宇宙を見据える観測は、天の川から十分離れた方角で、われわれの銀河系内の星がほとんどない天域に的を絞って行っている。このため、遠宇宙の観測では、明るいガイド星がなく、これまで自分たちでつくった補償光学系を使った観測ができずにいた。

このはがゆい想いを解決するため、十分な明るさのガイド星を人工的につくる革新的な装置「レーザーガイド星生成装置」を開発した。そのカギは、高度約90 kmの高さにあるナトリウム原子層を用いることがある。ナトリウム原子を励起する波長589 nmのD₂線で発振する出力6Wのパワーレーザーは、2つの波長の赤外線のNd:YAGレーザーから和周波レーザーを作る方



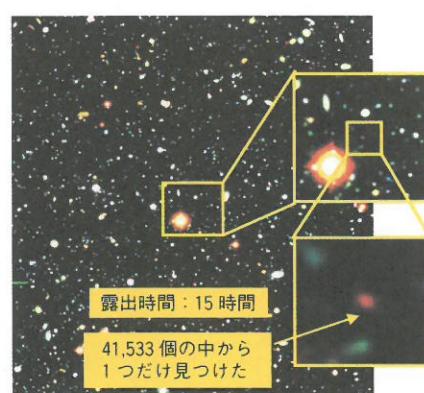
Subaru Telescope, NAOJ

図5 補償光学動作時の恒星像（星像直径0.06秒角、左）と補償光学不使用時の恒星像（星像直径0.6秒角、右）



2006年10月に撮影した188素子補償光学系のファーストライト観測画像（左）は、補償光学なしで観測した2000年の画像（右）と比べると解像度が10倍向上していることが確認された。

図6 オリオン大星雲の四つ星「トラペジウム」領域



赤方偏移の測定値からこの銀河は129億光年かたな銀河であることが確認された。

図7 すばる望遠鏡を用いて筆者たちが2006年に発見した最遠方銀河IOK-1

式で理化学研究所と共同開発した。

レーザーを望遠鏡の向いている方向に撃つために口径50 cmの専用の送信

望遠鏡をイタリアの会社で製作し、これをすばる望遠鏡の先端に取り付けた。レーザー光源から送信望遠鏡に

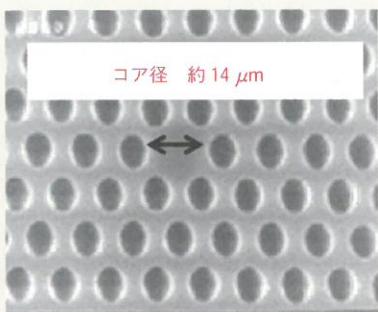


図8 フォトニック結晶光ファイバー

レーザービームを送るには、複数の反射鏡でビームをリレーする方式が一般的だったが、国内のメーカーが開発したフォトニック結晶光ファイバー（図8）を用いることで、容易に高出力レーザーを損失なく伝送できるようにした。

すばる望遠鏡から2006年には実際にレーザーを初めて照射したが、月のない夜であれば肉眼でレーザービームを直接視認することができる。高感度カメラでビームの先端を撮影すると上空90 kmの高さで光る約11等級の「人工星」を確認することができる（図9）。実際、レーザーガイド星を用いた補償光学技術は8 m級望遠鏡の観測能力を大幅に向上させることができるため、マウナケア山頂では、すばる望遠鏡、ケック望遠鏡、ジェミニ望遠鏡のレーザービームが夜空を交錯する夜が増えている（図10）。レーザービームが他の望遠鏡の観測や、夜間飛行する飛行機、上空を通過する人工衛星の妨げにならないように、マウナケア山頂でのレーザービーム送信は相互管制する体制を組んでいる。2011年2月の試験観測でもレーザーガイド星補償光学系の威力を示す観測成果が得られたが、プレスリリース前のため、本稿で紹介できないのが残念である。

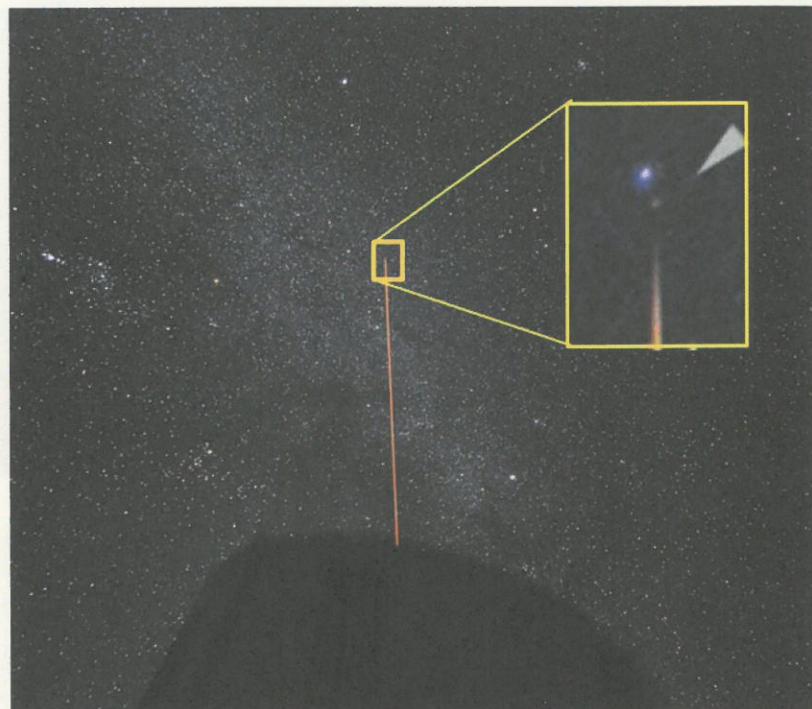


図9 上空90 kmで光るレーザーガイド星



図10 レーザービームの競演

次世代超大型望遠鏡構想

すばる望遠鏡が動きはじめて10年が経った今、日本の天文学界はすばる

望遠鏡の近くに直径30 mの主鏡をもつ次世代超大型望遠鏡TMTを、国際協力で建設することを計画している（図11）。すばる望遠鏡の主鏡は直径

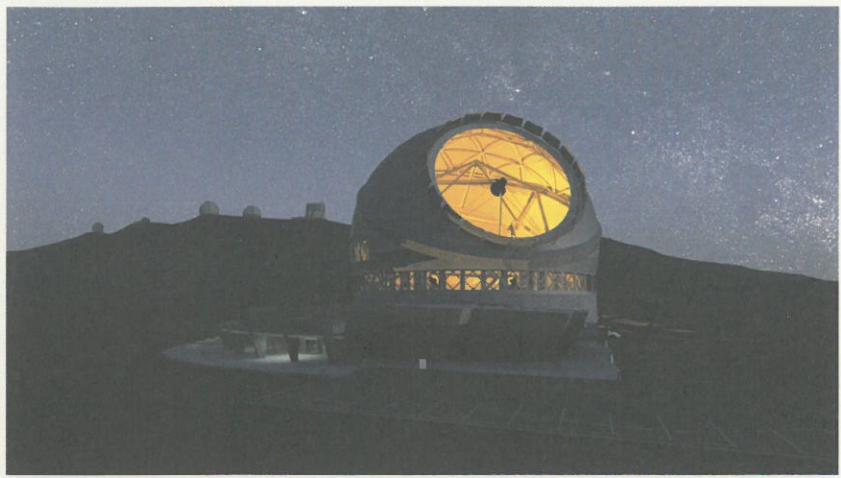


図11 国際協力でマウナケア山頂に建設が期待されている次世代超大型望遠鏡TMTの完成予想図

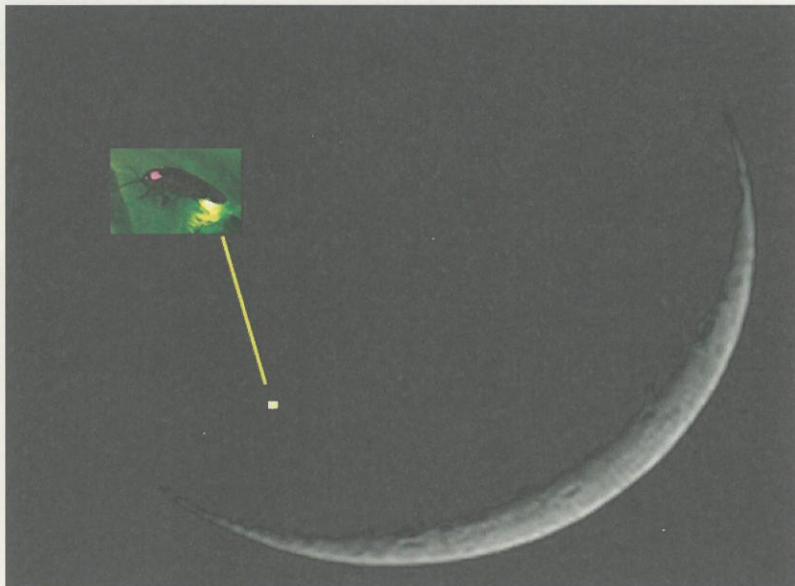


図12 月面で光るゲンジホタルも検出できる次世代超大型望遠鏡TMT

8.2 m, 厚さ20 cm, 重さ23 tの単一ガラスで製作したが、さすがに直径30 mの単一ガラス鏡は製作も運搬も不可能である。そこで実際には直径1.5 mの六角形の鏡を492枚敷き詰めて、全体があたかもひと続きの鏡となるように調整して運用する構想である。現在カリフォルニア大学とカリフォルニア工科大学が、「インテル入ってる?」で有名なインテル社の創始者ゴードン・ムーア氏からの200万ドルの寄付などを得て、合計300万ドルの基金を確保しているが、日本・米国・カナダ・中国・インドの5ヵ国での建設参加に向けて計画推進中である。順調に進めば、2020年には観測をはじめることができる。

この次世代超大型望遠鏡でさらに進化した補償光学系が実際に稼働しはじめるとき可視光での限界等級は最大33等級にも達すると期待されている。これは月面の夜側で光るゲンジホタルの明るさ（図12）に相当する。初期宇宙史の直接観測、太陽系外の惑星の探査、ダークエネルギーの正体の解明などで活躍が期待されている。10年後に何が見えるか、おおいに楽しみである。