

連載

望遠鏡 400 年【3】

現在の大型望遠鏡

～すばる望遠鏡で見えてきた宇宙～

臼田-佐藤 功美子（国立天文台ハワイ観測所）

1. 大口径望遠鏡の時代

人類の持つ宇宙の描像は、望遠鏡技術とともに発展してきたと言っても過言ではない。宇宙を調べる方法は、カミオカンデ、スーパーカミオカンデ [1] のようなニュートリノを使う手法を除いては、宇宙から届く（電波からガンマ線まで多波長での）電磁波を受けるのがほとんど唯一の方法で、望遠鏡は電磁波を受ける重要な道具だからである。重力波も重要な観測手法になる可能性があるが、検出に成功したという報告はまだ聞いていない。

これまで誰も見たことのないより暗い天体を見たい、天体のより細かい構造を見たいという人類の宇宙への興味と探求心が、より大口径の望遠鏡を作りあげた。そして光学望遠鏡の主流はレンズを使った屈折望遠鏡から鏡を使った反射望遠鏡へと移行した。大きなレンズで、波長（色）によって異なる屈折率の違いから生じる色収差をキャンセルできる様、精度良く研磨するのが難しいことと、屈折望遠鏡は反射望遠鏡に比べて一般的に焦点距離が長く、屈折望遠鏡に見合った高いドームの建設が困難なことが主な理由である。

現在は、8m～10m クラスの大口径反射望遠鏡の全盛期と言える。理科年表（平成 20 年版だと天文部 85 ページ）[2] で調べると、2008 年現在、口径 8m 以上の光学赤外線望遠鏡は世界に 13 台ある。ハワイに 4 台、南米チリに 5 台、スペイン・カナリア諸島に 1 台（建設中）、アメリカ・アリゾナ州に 1 台、同テキサス州に 1 台、南アフリカに 1 台と、ハワイとチリに集中している。



図 1 ハワイ島マウナケア山頂に並ぶ望遠鏡群。中央付近、円筒形のドームが日本国立天文台のすばる望遠鏡。（Credit: 国立天文台）

ためしてみよう！

マウナケア山頂にある、すばる望遠鏡。その主鏡の直径 8.2m がどのくらい大きいか、巻き尺で測って実感しよう！ 小学校低学年であれば、クラスのみんなで手をつないで直径 8.2m の円をつくってみよう。すばる望遠鏡の主鏡と教室、どちらが大きいかな？

1.1 マウナケア山頂の大型望遠鏡

マウナケア山頂には、世界各国 13 台の望遠鏡が並んでいる。光学赤外線望遠鏡が 9 台、電波（サブミリ波）望遠鏡が 2 台、電波（サブミリ波）干渉計が 1 台、超長基線干渉計（VLBI）用電波望遠鏡が 1 台、という内訳になっている。

光学赤外線望遠鏡の中で一番大きな口径を持つのは、すばる望遠鏡……ではなく、そのとなりにある 2 台のケック望遠鏡（Keck I & Keck II）[3]。口径 10m だが、すばるの主鏡のような単一鏡（一枚鏡）ではな

く、六角形のセグメントを 36 枚並べた複合鏡だ。(単一鏡では、8.2m のすばるが最大。) すばるとほぼ同じ大きさの口径 (8.1m) を持つジェミニ北望遠鏡は、名前の通り双子の望遠鏡で、かたわれ (ジェミニ南) は南米チリにある。ジェミニ天文台 [4] は、アメリカ、イギリス、カナダ、オーストラリア、アルゼンチン、ブラジル、チリ、7 カ国の共同で運営されている。

Mirror Sizes of Optical and Infrared Telescopes on Mauna Kea

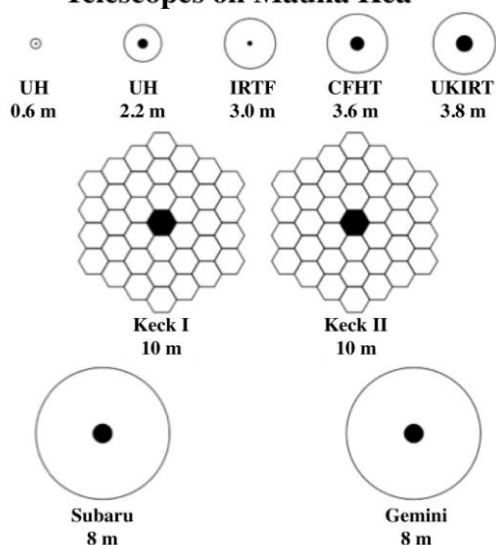


図 2 マウナケア山頂にある光学赤外線望遠鏡の主鏡の大きさ比較 (Art by Wendy Nakano, Credit: Institute for Astronomy, University of Hawaii [5])

1.2 なぜ大きな鏡が必要なの？

～望遠鏡の空間分解能と集光力～

望遠鏡がどのくらい細かいものを分解して見えるかという能力「空間分解能」(＝視力) は観測波長に比例し、望遠鏡の口径に反比例する。

$$[\text{空間分解能}] \sim [\text{波長}] / [\text{口径}]$$

空間分解能の値が小さいほど、細かいものが分解されて見えることになる。つまり同じ波長では、望遠鏡の口径が大きければ大きいほど、小さい (良い) 空間分解能が得られる。

逆に、波長が長いほど、空間分解能は大きく (悪く) なる。例えば野辺山宇宙電波観測所 [6] にある口径 45m の電波望遠鏡は、すばる望遠鏡 (8.2m) の 6 倍近い口径を持っているのに、視力は (可視光線での) 人間の目と同程度しかない。それは電波の波長が可視光線に比べて 3 桁から 4 桁長いためである。

集光力 (光を集める能力) は鏡の面積で効いてくる。口径 1 の望遠鏡 A と口径 2 の望遠鏡 B を比べてみよう。B は A に比べて 2 倍空間分解能が良く (2 倍小さいものが見え)、 $2^2 = 4$ 倍集光力が高い (4 倍暗いものが見える)。

計算してみよう！

望遠鏡を使って宇宙を見るということは、より大きな「目」で宇宙を見るということである。では、望遠鏡を使うと、人間の目と比べてどのくらい細かく暗いものが見えるだろうか？口径 10cm の望遠鏡の空間分解能と集光力は、それぞれ人間の目の何倍だろうか？口径 8.2m のすばる望遠鏡ならば？自分や友達の目の大きさ (直径) を測り、計算してみよう。

2. きらきら光るお空の星よ、なぜ星を★形に書くの？ ～観測に適したサイトとは～

第 1 節で紹介した通り、大口径望遠鏡は特定のサイトに集中して建設されている。良いデータを得るためには、良い観測サイトを選ぶ必要があるからだ。このような書き方をすると、小口径の望遠鏡は、もはや時代遅れで最先端の研究には適さないような誤解を受けるかもしれないが、全くそんなことはない。大口径でしかできない観測があるように、小口径でしかできない観測もある。大口径望遠鏡は空間分解能が良い反面、一度に観測できる視野 (FOV: Field of View) が小さいので、広い範囲を観測するのには適さない。つまり、

「森」の全体像を大局的に調べたいようなサーベイ観測には小口径望遠鏡が適し、その「森」の中で気になる「木」数本の枝葉を細かく調べたいという詳細観測には、大口径望遠鏡が適する。大口径と小口径の望遠鏡は相補的な関係にある。

それでは、天文観測に適したサイトとはどのようなところだろうか。「きらきら星」という童謡があるが、「星がきらきら瞬く」とはどういうことだろう？星の本当の形は丸(●)なのに、なぜ星は星形(★)で表現されるのだろう？そのカギは地球の大気にある。大気は常にゆらゆら揺れ動いて、星からの光を乱している。例えば、プールの底に五円玉を沈めた時、水面が静かな時は五円玉の像がはっきり見えるが、風が吹いてさざ波がたつと、像が揺らいで見える。これと同じことが大気と星像にも言える。大気揺らぎが激しく、星像が乱れ、星が瞬いて見える(=星の形が★形に見える)ところでは良い観測データが得られない。大気が安定し、シーイングの良い(シャープな星像が得られる)ところが観測に適したサイトである。

すばる望遠鏡が建設されたマウナケア山頂は、標高 4,205m (13,796 フィート)と富士山 (3,776m)よりも高い。(13,796 フィートは「悲惨な(137) 苦勞(96)」と覚えると忘れない(笑))。大気が薄くて安定しているだけでなく、晴天率が高い、湿度が低い、夜空が暗い、下界から車でアクセスしやすい、といった条件が整っている。南米チリと並んで最も観測に適したサイトといえるだろう。

ためしてみよう！

水を大気と見立てて、大気揺らぎを実感しよう。

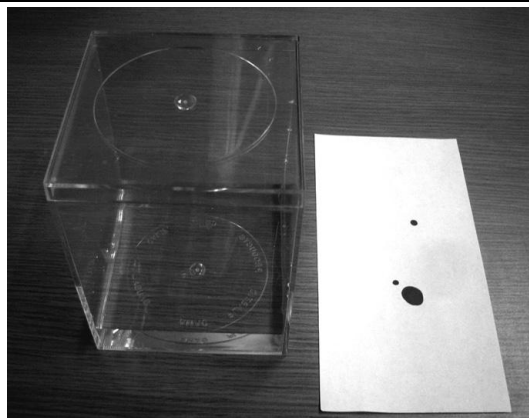


図 3-1 用意するもの：水を入れた透明な容器（水は少量で可）と、星（複数の●）を書き込んだ紙（この写真の場合は三重星）



図 3-2 「星」の手前にプラスチック容器を持ち、「大気」を介して「星」を見る。容器を揺らして「大気揺らぎ」を作ると、何個の星を分解して見られるかな？

2.1 すばる望遠鏡の、空気の流れを考慮した円筒形ドーム

大気がゆらゆら揺れて「きらきら星状態」になると困るのは上空だけではなく、ドーム内も同じだ。すばる望遠鏡のドームは、設計段階で水流実験やコンピュータシミュレーションを行い、その結果円筒形のドームを採用した。風通しを良くすることにより、ドーム内で空気がよどむのを防ぎ、かつ、内部の熱

を効果的に排出することができる。

昼間はドームを閉めきり、エアコンを夜の温度以下に設定している。もしも昼間にドームを開けておくと、夜になって冷たい外気が入った時に対流がおきるので、それを防ぐためだ。ドーム内には至る所に通気口がある。温度管理に細心の注意を払っている。

夜間観測中は、ドーム内は無人になる。ドーム内に人間がいると、体温で気流が乱れ、観測に悪影響を及ぼすからだ。また、赤外線での観測の場合は、人間の出している赤外線が雑音になる。人間にとっても寒いドーム内に留まるのは嬉しくない。更に観測中、ドームは望遠鏡と同期して動いており、ドーム側の出口の扉をあけても、いつも観測棟への入り口とつながっているわけではない。観測者は制御棟のコンピュータから望遠鏡を制御している。現在はヒロ山麓施設からのリモート観測も可能である。リモート観測の場合、観測者は山麓施設からテレビ会議システムを使って、山頂のオペレーターと相談しながら観測を行う。リモート観測の場合でも、オペレーター2名は山頂に上がるので、山頂施設が無人になることはない。安全のため、ドームを開ける作業は、山頂からでないとできないようになっている。



図 4 すばる望遠鏡のドーム（右）と制御棟（左）。(Credit: 国立天文台)

3. すばる望遠鏡のココがすごい！

～科学的成果を支える最先端技術～

望遠鏡でシャープな画像を効率よく得るためには、主鏡が大きいだけでなく、次の4点が重要だと考えられる。

- (1) なめらかな鏡面
- (2) 精度のよい鏡の形
- (3) 精度よい天体の追尾
- (4) ぴかぴかの（反射率の高い）鏡

3.1 なめらかな鏡面

すばる望遠鏡の主鏡はアメリカ本土、ペンシルバニア州の探鉱あとで研磨された。裏面3年、表面1年以上かけて磨きあげた、主鏡面の平均誤差(理想面からはずれたデコボコ)は14 nm (0.014 ミクロン)。主鏡(8.2m)をハワイ島の大きさ(約100km: 四国の半分の大きさ)にしても、鏡面のでこぼこは紙一枚(0.2mm)程度の厚さにしかない。

こぼれ話：大きな鏡を運ぶのは大変！

すばるのホームページ等で、アメリカ本土の広い高速道路2車線(+路肩)からはみ出る主鏡輸送箱をトラックが運んでいる写真をご覧になったことがあるかもしれない。船でハワイ島に着いた後、カワイハエ港からマウナケア山頂までパトカーに先導され、時速10kmのノロノロ運転で半日以上かけて運ばれた。ハワイ島の道は本土の高速道路ほど広くない。運んでいる途中に道路脇の標識が邪魔になる。警察官が道路標識を抜いた後、主鏡をつんだトラックが進み、警察官が標識を埋め直すという作業を行った。

日本に地震が多いことが、主鏡が日本で磨けなかった一番の理由だが、もう1つの理由は輸送の問題だった。そう、日本の高速道路には料金所がある。さすがに警察官でもすばるの主鏡のためだけに、(ハワイ島の道路標識のように)料金所の撤去はできないだろう(笑)。

3.2 精度のよい鏡の形：能動光学

望遠鏡は、方位角 (azimuth) 方向の動き (=左右の動き) と仰角 (elevation) 方向の動き (=上下の動き) を組み合わせて動く。直径 8.2m もある大きく重い鏡だと、仰角が変わるたびに自己重力で変形する。常に正しい鏡の形に保っていないと焦点で像を結ばず、ピンぼけになるが、重力変形の問題をどう解決すればよいのだろうか。

すばる望遠鏡の主鏡は、できるだけ軽くするために厚みが 20cm しかない。それでも 8.2m 鏡の自己重力は無視できない。そこで登場するのが「アクチュエーター」とよばれる、261 本のロボットの指。アクチュエーター 1 本 1 本に力のセンサーがついており、一円玉の重さも感じることができる。センサー付きのアクチュエーターたちが裏側から主鏡を支え、鏡の形を制御している。このような技術を能動光学 (active optics) という。

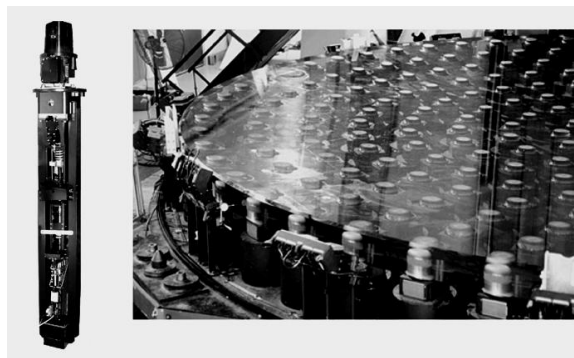


図5 単体のアクチュエーター（左）と、アルミニウムコーティング前の主鏡（右）。裏面に多数取り付けられたアクチュエーターが透けて見える（Credit: 国立天文台）。

すばる望遠鏡の主鏡の裏面にはアクチュエーターをはめる穴がくりぬかれており、その部分の厚みはたった 5cm。主鏡の裏面を磨くのに 3 年かかったと書いたが、穴を 1 個 1 個くりぬいていたため時間がかかった。ケック、ジェミニといった他の大型望遠鏡もアクチュエーターで制御する能動光学を使っているが、

穴をくりぬいて厚さ 5cm という薄い鏡の裏から非常に「能動的に」形状を制御しているのはすばる望遠鏡だけである。

3.3 精度よい天体の追尾

地球の自転に伴い、天体は日周運動を行っている。精度よく天体を追尾しないと、星像がぼやけてしまう。555 トンのすばる望遠鏡を動かすのに 1/1000 mm の精度が要求される。鉄製の方位軸レールの上に薄い（約 100 ミクロンの）油膜をはり、その上にのった望遠鏡を電磁石で動かす。もしもギアを使うと、ギアの振動が望遠鏡に伝わり、星像がぶれてしまうが、リニアモーターカーと同様電磁石で動かすことにより、なめらかに望遠鏡を動かすことができる。すばる望遠鏡は油膜の上に浮いている状態なので、ブレーキを解除すれば大人 2、3 名で動かすことができる。観測時は、天体の近くにある星の動きをモニタし、0.1 秒ごとに補正をかけながら天体を追尾している。

3.4 反射率の高い鏡

望遠鏡は光を集める道具である。鏡面の反射率が低くて効率よく光を集められないと、暗い天体の観測が困難になる。毎晩観測していると、鏡面にほこりが付着し、反射率がおちてくる。すばる望遠鏡では 2~3 週間に一度、昼間に主鏡を傾けてドライアイス吹き付け、ほこりを除去している。雪のようなドライアイスは、鏡面のほこりを洗い流した後気化するので後片付けが楽だ。ドライアイスによる洗浄システムは望遠鏡本体に組み込まれている。

すばる望遠鏡の主鏡はアルミニウムでコーティングされている。銀ほどアルミニウムの劣化は激しくないが、それでも何年も使っていると劣化する。すばる望遠鏡では、2、3 年に一度コーティングし直している（この作業を再蒸着という）。蒸着は大変大がかりな作

業で、全行程を終えるのに 2、3 週間かかる。

調べてみよう！ 銀とアルミ、どちらの反射率が高い？

すばるの主鏡はアルミのメッキ。ジェミニの主鏡は銀メッキ。どちらも光赤外望遠鏡なのに、この違いはどこからくるのだろうか？ 答えを得るために、理科年表 [2] 内、「金属面の分光反射率」を見ていただきたい。（平成 20 年版だと、物理/化学部 99 ページ。）赤外域（0.800 ミクロンより長波長）でアルミニウムと銀の反射率を比べると、銀の反射率の方が高い。可視域（0.38 ミクロンから 0.75 ミクロン）でも銀の反射率の方が高い。しかし、銀は紫外域の 0.34 ミクロンより短くなると、急激に反射率が落ちる。すばる望遠鏡では U バンド（0.31 から 0.41 ミクロンあたり）の観測を行うことがあるので、銀メッキは不適當となる。一方ジェミニ望遠鏡では U バンドでの観測を行わないため、可視光・赤外域でより反射率の高い銀でメッキしている。（こういう、データから答えを導く演習、高校生向けにいかがでしょう ☺？）

実はすばる望遠鏡では、アルミメッキされた可視副鏡（第二鏡）と、銀メッキされた赤外副鏡、それから主焦点観測装置を観測波長・目的に応じて交換している。

第 1 節で「人類の持つ宇宙の描像は、望遠鏡技術とともに発展してきたと言っても過言ではない」と書いたが、最先端の科学的成果を出すためには最新の（細心の？）技術が必要ということ、実感していただければ幸いである。

4. 反射望遠鏡の 4 つの焦点と観測装置

図 6 に、すばる望遠鏡と 4 つの焦点を示す。



図 6 すばるの焦点（遠藤孝悦・画、日経サイエンス 1996 年 2 月号より）

天体からの光が主鏡で反射して最初に像を結ぶのが主焦点、主焦点に副鏡をおき、そこで再び反射して望遠鏡のおしりで像を結ぶのがカセグレン焦点、光路の途中に第三鏡をおいた場合、両脇で像を結ぶのがナスミス焦点。大口径望遠鏡で、4 つの焦点全てに観測装置を搭載しているのは、すばる望遠鏡だけである。（ケック望遠鏡はカセグレン&ナスミス焦点、ジェミニ望遠鏡はカセグレン焦点のみを使っている。）

4.1. 主焦点

主焦点にカメラを取り付けるということは、頭に重いものを置くようなもので、バランスが悪くなる。しかも、望遠鏡の支柱が頑丈でないと重い「頭」を支えられない。主焦点カメラをつけるためには、技術力も費用も必要となる。実際主焦点を使用している望遠鏡は、口径 8m 以上ではすばる望遠鏡とアメリカ・アリゾナ州の LBT (Large Binocular Telescope) [7] のみだ。理科年表（平成 20 年版だと天文部 85 ページ）[2] を見ると、南アフリカの SALT とアメリカ・マクドナルド天文台のホビー・エバリー望遠鏡も主焦点

を使っているのではないか、と思われるかもしれない。この2台の望遠鏡は、仰角 (elevation) が固定された主焦点専用望遠鏡で、特定の空の領域しか見ることができないため、すばる望遠鏡、LBT と区別した。

LBT (Large Binocular Telescope) って何？

アメリカ・アリゾナ州にある望遠鏡。
“Binocular” (双眼鏡) という名前通り、1台の望遠鏡に直径 8.4m の2枚の鏡が並べられ、連動して動く。ちなみに、すばる望遠鏡が保持していた「世界最大の単一鏡」という記録をぬりかえたのも、LBT。

4.1.1 すばるの主焦点カメラ Suprime-Cam

搭載するのが大変でも、主焦点カメラには大きな利点がある。一度に広い空の領域を観測できる点だ。すばる望遠鏡の誇る主焦点カメラ Suprime-Cam (Subaru Prime Focus Camera) の視野は 34 分角 × 27 分角で、満月 (直径約 30 分角) をほぼまるごと撮影できる (「分角」は角度の単位で、1 分角は 1° の $1/60$)。すばるのカセグレン焦点カメラの視野は、広い視野を誇る MOIRCS でも 4 分角 × 7 分角。この値から主焦点の視野がいかに大きいか、おわかりいただけるだろう。Suprime-Cam は 2048×4096 画素の CCD カメラ 10 個をすき間なく並べた、全体で 8000 万画素のスーパー・デジタルカメラとすることができるだろう。

すばる望遠鏡は「最も遠い銀河」を見つけるのがとても得意だ。それは広視野の主焦点カメラを使って、空の広い領域を効率的に観測できるので、遠い銀河候補を見つけやすいからである。(もちろん候補天体の距離は、分光装置で赤方偏移を測定して同定される。)

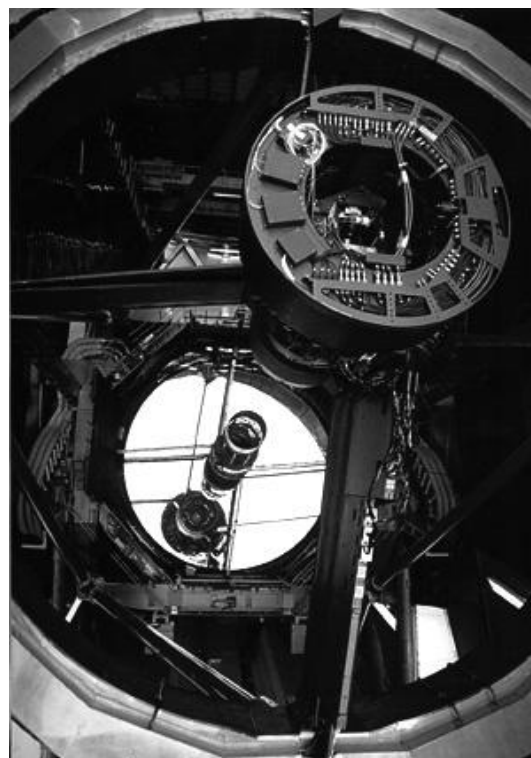


図 7 Suprime-Cam をとりつけたすばる望遠鏡 (Credit: 国立天文台)

こんなにパワフルな主焦点カメラを持っても、研究者たちの宇宙をもっと詳しく調べたいという野望を止めることはできない。将来計画として Suprime-Cam よりもっと視野の広い、Hyper Suprime-Cam (HSC) を開発しようという計画が進められている。HSC が稼働すると、Suprime-Cam の 10 倍近い視野が一度に観測でき、アンドロメダ銀河 (M31) を一度に観測することが可能となるだろう。

4.1.2 ファーストライトを迎えたばかりの FMOS (エフモス)

昨年 (2007 年) 12 月に新しい主焦点用装置がファーストライトを迎えた。その名はファイバー多天体分光器 FMOS (Fiber Multi Object Spectrograph)。主焦点の広い視野の中で、400 個の天体を近赤外線と同時に分光

できる。国立天文台、京都大学、イギリス、オーストラリアの共同で開発された。主焦点で受けた多数の天体からの光を、名前通り光ファイバーで分光装置まで届ける。大きく重い分光装置を望遠鏡本体（しかも主焦点）に据え付けるのは困難だが、カメラの部分と分光装置を切り離し、光ファイバーでつなげるにより、400 個もの天体を同時分光できる装置が実現した。

4.2 カセグレン焦点

カセグレン焦点は望遠鏡のおしりの部分にあるため、他の焦点に比べて装置交換が容易だ。すばる望遠鏡では観測目的に応じて、COMICS（冷却中間赤外線分光撮像装置）、FOCAS（微光天体分光撮像装置）、MOIRCS（多天体近赤外撮像分光装置）、CIAO（コロナグラフ撮像装置）の4つの装置を交換して使っている。観測装置の交換は注意を必要とする作業で、空気の薄いマウナケア山頂では特に困難になる。すばる望遠鏡では素早く、安全、正確に装置を交換するため、カセグレン焦点観測装置自動交換システム CIAX（著者の写真参照）や、トップユニット交換装置 TUE（副鏡、主焦点カメラの交換装置）など、自動交換装置を多く取り入れて作業の効率化をはかっている。

ここでユニークなカセグレン装置を2つ紹介する。

4.2.1 大学院生の熱い思いが実を結んだ MOIRCS（モアックス）

多天体近赤外撮像分光装置 MOIRCS (Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph) は 2004 年にファーストライトを迎えた、新しい観測装置。東北大学と国立天文台が共同で開発した。東北大学・博士課程の学生数名はハワイ(ヒロ市)に住み、現地で MOIRCS の開発に尽力した。既に4

名が MOIRCS の開発と観測データで学位をとった。大学院生が観測装置の開発に深く関わり、自分の開発した装置で観測するというスタイルは、日本のお家芸といえるかもしれない。

MOIRCS は 8~10m クラス望遠鏡の中では、近赤外線の世界最大級の視野（4 分角 × 7 分角）を持つだけでなく、多天体の分光を同時に行えるのが最大の特徴である。分光観測では天体にスリットをあてるので、以前は一度に一天体しか分光できないのが普通だった。最近マルチスリットによる多天体分光 MOS (Multi Object Spectroscopy: モスとよぶ) が主流となった。可視光線での多天体分光装置は、すばる望遠鏡でも FOCAS がファーストライト当時（1999 年 ~ 2000 年）から稼働しているが、赤外線での観測は装置を冷却しなければいけないため、困難であった。8~10m の大型望遠鏡の中で、冷却マルチスリットによる近赤外線での多天体分光を実現させたのは、すばる望遠鏡 + MOIRCS が世界で初めて。同時に 50 天体以上を分光できる。

計算しよう！赤外線での分光観測はなぜ重要？

MOIRCS も FMOS も、近赤外線での多天体分光装置。可視光線ではなく、何故近赤外線の装置なのだろう？

遠い天体（銀河）ほど速く私たちのところから遠ざかっている。（ここでは宇宙膨張、ハッブルの法則の話は省略する。）遠ざかる天体からの光は、ドップラー効果により長波長側（赤い側）にシフトする。これを赤方偏移という。遠ざかる速度が速い天体ほど、つまり遠い天体ほど、赤方偏移の値が大きくなる。赤方偏移を z 、静止波長を λ_0 、観測波長を λ_{obs} とすると、

$$z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0) / \lambda_0 = \lambda_{\text{obs}} / \lambda_0 - 1$$

という関係で表される。つまり、赤方偏移 z の天体で観測される波長 λ_{obs} は、

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_0 (z + 1)$$

となり、 $z = 0$ (近傍) では観測波長は静止波長と同じ、 $z = 1$ では観測波長が2倍、 $z = 2$ では3倍・・・になることが上式からわかる。赤方偏移の測定には、水素原子輝線/吸収線の $H\alpha$ (エッチ・アルファ、 $\lambda_0 = 656.28 \text{ nm}$) や、 $Ly\alpha$ (ライマン・アルファ、 $\lambda_0 = 121.56 \text{ nm}$) がよく使われる。

すばるが 2006 年 9 月「最も遠い銀河の世界記録を更新」で発表した銀河は $z = 7.0$ なので、 $Ly\alpha$ の観測波長は8倍に伸びて 972.48 nm ($= 0.97 \text{ ミクロン}$)と近赤外線になる。ということで、赤外線での観測が必要不可欠になる。

とまあ、こんな単純なかけ算をして波長を認識するだけでも、電磁波のよい演習になる。高校生向けにいかがでしょう ☺?

4.2.2 惑星のうまれる現場を探れ！ CIAO (チャオ) と HiCIAO (ハイ・チャオ)

惑星はどのようにできるのだろうか？どのくらいの質量の惑星が、中心星 (恒星) からどのくらいの距離にできるのだろうか？惑星系形成は、(主焦点カメラのところで触れた) 遠方銀河の探査・宇宙論と並んで、大型光学赤外線望遠鏡で探る、二大「旬のテーマ」と言ってもいいだろう。

恒星は宇宙の (厳密には分子雲内の) ガスとちり (固体の微粒子) が自己重力で収縮してうまれる。恒星がうまれた後も、残りのガスとちりがまわりをまわり、円盤をつくっている。これを原始惑星系円盤という。惑星はそこから形成されると考えられているので、原始惑星系円盤の観測は重要だ。1980 年代

頃から、野辺山宇宙電波観測所 [6] の NMA (Nobeyama Millimeter Array) のような電波干渉計で、円盤の質量分布やガスの運動が調べられてきたが、最近では赤外線でも観測されるようになった。

電波ならともかく、近赤外線で観測しようとする、中心星からの光が明るすぎて円盤がよく見えない。昼間、太陽が明るすぎて他の星々が見えないのと同じだ。それでも昼間星々が見える時がある。そう、日食の時だ。すばる望遠鏡のコロナグラフ撮像装置 CIAO (Coronagraphic Imager with Adaptive Optics) は中心星からの光が届く部分にマスクをして光を遮ることにより、人工的な「星食」を作りだして恒星のまわりの暗い天体を撮像する装置である。(人工的に「食」作るコロナグラフはもともと太陽のコロナを見るために、太陽の光球からの光を抑えるように作られた装置だった。)

CIAO で若い恒星のまわりの原始惑星系円盤を撮像すると、これまでに見たこともない構造が見えてきた。

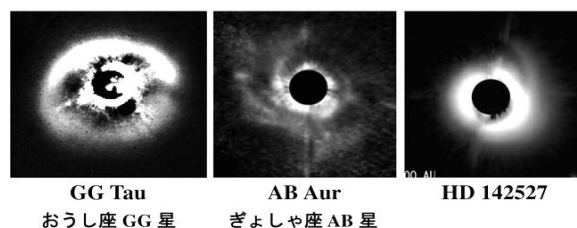


図 8 すばる望遠鏡 + CIAO で撮像された原始惑星系円盤。おうし座 GG 星 (ドーナツ型)、ぎょしゃ座 AB 星 (渦巻き型)、HD 142527 (バナナスプリット：2本のバナナが向き合った形状) と、様々なパターンが見えてきた。(Credit: 国立天文台)

コロナグラフ撮像装置の次の目標は、太陽系外惑星 (系外惑星) の直接撮像だ。ご存知の通り、系外惑星 (太陽ではなく、別の恒星のまわりをまわる惑星) は既に 200 個以上

発見されているが、全てドップラー遷移法やトランジット法を使った間接的な観測によるもので、直接「撮影」された前例はない。が、すばる望遠鏡や南米チリにあるヨーロッパの望遠鏡 VLT (Very Large Telescope) [8] はその一歩手前まで来ているようだ。VLT とは、南米チリにあるヨーロッパ南天天文台 ESO の 8m 鏡で、4 台ある。

すばる望遠鏡 + CIAO で、おうし座 DH 星の「伴星」の撮像に成功している (2005 年 2 月リリース)。「伴星」の質量は木星の約 40 倍あり、惑星と呼ぶには質量が大きすぎる、褐色矮星だった。また、VLT+コロナグラフ (NACO: NAOS-CONICA) では、褐色矮星 2M1207 の惑星 (13~14 木星質量) を撮像している [9]。恒星+褐色矮星、褐色矮星+惑星の撮像例はあるが、最初に恒星+惑星の撮像に成功するのはどの望遠鏡だろうか？

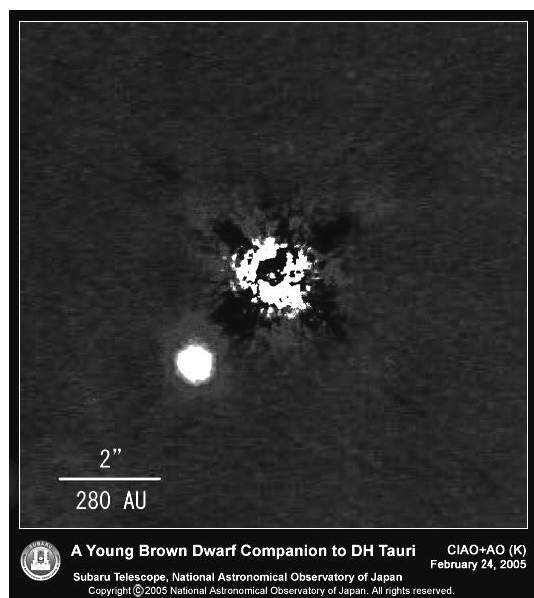


図 9 おうし座 DH 星と伴星 (褐色矮星)。中心星はコロナグラフで隠されているため、暗くなっている。(Credit: 国立天文台)

すばる望遠鏡で現在稼働中の CIAO は中心星より 1 万倍かそれ以上暗い天体をとらえ

ることができる。CIAO よりもっと暗い天体 (中心星とのコントラストがもっと大きい) 天体を捕らえようと Hi-CIAO が開発され、2007 年 12 月にファーストライトを迎えた。Hi-CIAO では、中心星より 5 桁 (10 万倍) かそれ以上暗い天体を観測することができる。地球型惑星を撮像するには 10 桁のコントラストが必要で、HiCIAO を使っても難しいが、木星型惑星の検出が十分可能だと期待されている。さらに、HiCIAO を用いて系外惑星の直接撮像を目指す “SEEDS” プロジェクトが、2008 年 3 月に「すばる望遠鏡第一回戦略枠」として採択された。すばる望遠鏡 + HiCIAO が系外惑星の直接撮像に成功する日を楽しみにしている。地上の大口径望遠鏡で現在コロナグラフを持っているのは、すばる (CIAO) と VLT (NACO)。そこに新しく仲間入りしたのがジェミニ南の NICI とすばるの HiCIAO。NICI は HiCIAO の良きライバルとなるだろう。

4.3 ナスミス焦点

主焦点、カセグレン焦点は望遠鏡の仰角方向 (上下方向) とともに動くため、大きく重い装置を搭載することができない。(カセグレン焦点の装置はみな 2m 立方、重さ 2 トン程度) それに対し、装置の姿勢変化を伴わないナスミス焦点には、精密で重量の大きな装置を設置することが可能だ。すばる望遠鏡では、ナスミス焦点の一方に IRCS (近赤外線分光撮像装置) と新補償光学装置 (AO188、第 5 節参照) が、もう一方に HDS (高分散分光器 (可視光)) が設置されている。

2 つの分解能：空間分解能と波長分解能

この節をお読みになってお気づきになっただろうが、観測には撮像と分光、2 つのモードがある。撮像は、市販のデジカメで写真を撮るのと同様、ある空の領域の 2 次元写真をとる

手法。分光は、天体からの光を（回折格子などの）分光器で分光し、得られたスペクトルをデジカメで撮る手法。現在では、CCD を使ってデジタルデータを得る望遠鏡がほとんどなので、「デジカメ」という表現を使った。そして「分解能」にも、空間分解能と波長分解能の2種類がある。空間分解能は、前述の通りどのくらい小さいものが見分けられるか（＝視力）で、望遠鏡の口径で決まる。波長分解能は、分光した時、どのくらい細かい波長に分解できるかで、個々の分光装置によるもので、望遠鏡本体の性能とは独立に決まる。分光装置の中には、観測目的により波長分解能を変えられるものも多い。

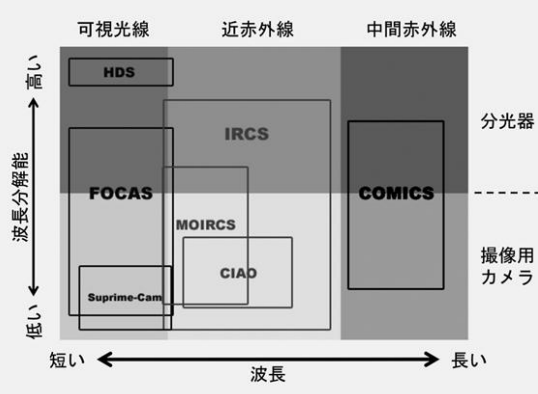


図 10 すばる望遠鏡の各観測装置でカバーできる波長域（横軸）と波長分解能（縦軸）の関係。（Credit: 国立天文台）

5. きらきら光るお空の星よ、どうすれば大型地上望遠鏡の視力が良くなるの？ ～補償光学（AO）～

数々の発見を生みだしている、すばる望遠鏡。8.2m の巨大な「目」で一体どのくらい細かいものが見えているのだろう。マウナケア山頂の典型的なシーイングが 0.6 秒角（1 秒角 = 1/60 分角 = 1/3600°）だが、この空間分解能だと、東京から富士山頂（約 100km 先）にある直径 30cm のラージ・ピザが 1 枚

あるか 2 枚あるかが見分けられるくらいの視力である（視力 100）。しかしこの視力、8.2m 鏡の能力を最大限に活かした値ではない。マウナケア山頂は空気が薄くて安定しているとはいえ、影響が全くないわけではないからである。どんなに空の条件の良いサイトを選んでも、地上望遠鏡は宇宙望遠鏡に匹敵する空間分解能を達成できないのだろうか？

心配ご無用。リアルタイムで大気揺らぎを補正する装置、補償光学（Adaptive Optics: 以下 AO とよぶ）を使うことで大気の影響をキャンセルすることができる。観測天体の近くにある明るい星（参照星）からの光を観測し、波面の曲率を「波面センサー」を使って測定する。（参照星の星像がどのくらい●（まる）からずれているかを測る。）制御システムを通して可変鏡に補正をかける。36 分割された可変鏡のガラス 1 つ 1 つについた piezo 素子に電圧がかけられ、その形を変える。この、可変鏡で乱れた波面を補正する制御ループを 1,000 Hz（1 秒間に 1,000 回）で動かす。AO の原理については、ジェミニ天文台が面白いアニメーションを作成したので [10]、是非ご覧になっていただきたい。

現在すばる望遠鏡（や他の大口径望遠鏡）では、近赤外線波長域にて AO が稼働している。AO を使うと、空間分解能が 10 倍良くなり、0.06 秒角を達成できる（視力 1000）。この視力だと、東京から富士山頂のピンポン玉が見分けられる（ラージ・ピザ上のサラミが何枚あるか見分けられる）。2006 年 10 月、すばる望遠鏡で新しい AO システム（AO188）がファーストライトを迎えた。可変鏡が 36 素子から 188 素子になり、短波長で特に大気補正精度が高まった（第 4 節で紹介した CIAO と Hi-CIAO も AO と組み合わせられる。Hi-CIAO は AO188 と組み合わせられる）。

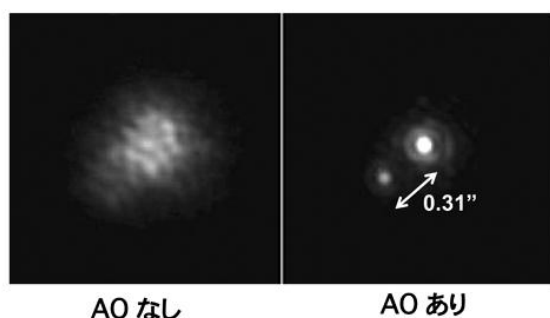


図 11 すばる望遠鏡を用いて K バンド (2.15 ミクロン：近赤外線) で撮像した連星 HR 1852 (Takami et al. 2004 [11])。36 素子の AO システムなし (左) では何個星があるのか見分けられないが、AO システムを働かせると (右) 0.36 秒角間隔の 2 個の星が分解されて見える。星の形もまるく、回折リングも見えている。

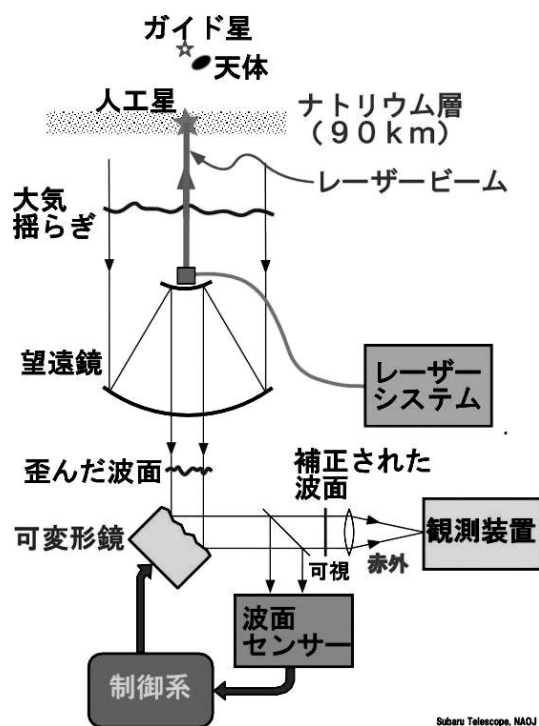


図 12 補償光学系とレーザーガイド星・生成システムの原理 (Credit: 国立天文台)

赤外線だけでなく、可視光線でも AO を稼働させたいという将来計画がある。可視光線で AO を効かせるには、さらに素子数の多い

可変鏡と、制御ループでのより速い計算処理能力が必要とされる。もしも可視 AO が稼働すると、すばる望遠鏡で 0.02 秒角 (視力 3000) の空間分解能が達成できる。その場合、東京から富士山頂のパチンコ玉が見分けられる程度の視力となる。

AO システムにも弱点がある。観測天体の近くに明るい参照星がないと、AO が働かない。ケック、ジェミニ、すばる望遠鏡ではレーザーガイド星・生成システムを搭載することで、この弱点を克服した。(すばる望遠鏡のレーザーガイド星システムは、国立天文台と理化学研究所の共同で開発された。) 黄色いナトリウム D2 線 (波長 589 nm) にチューニングしたレーザーを照射すると、上空 90km のナトリウム層にあるナトリウム原子が発光し、人工星を作る。



図 13 すばる望遠鏡から、レーザーガイド星・生成用レーザービームを初照射 (2006 年 10 月)。(Credit: 国立天文台)

5.1 大口径望遠鏡 + AO 見えてきたもの

5.1.1 木星の環（すばる望遠鏡）

木星の環は暗いため、地球から観測することができず、ボイジャー探査機が木星に近づいた時に発見された。すばる望遠鏡 + AO で撮像したこの赤外線画像は、木星の環をくっきりととらえている。

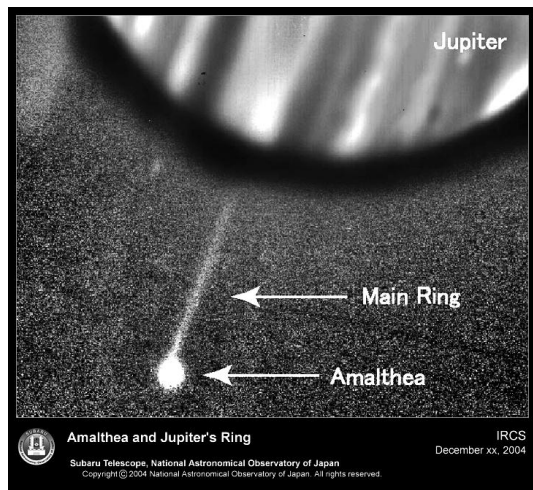


図 14 木星と衛星アマルテア (Credit: 国立天文台)

5.1.2 木星の衛星・イオの火山マップ（ケック望遠鏡）

イオは木星から近いため、潮汐力を強く受けた活発な衛星である。ケック望遠鏡 + AO でイオの火山分布をマッピングしたアニメーション [12] は必見。

5.1.3 天王星の台風（ケック望遠鏡）

天王星本体に散らばる「白い」点々。これは天王星の台風・嵐だ。マウナケアから、大口径望遠鏡 + AO を使って天王星の天気予報ができる時代となった。

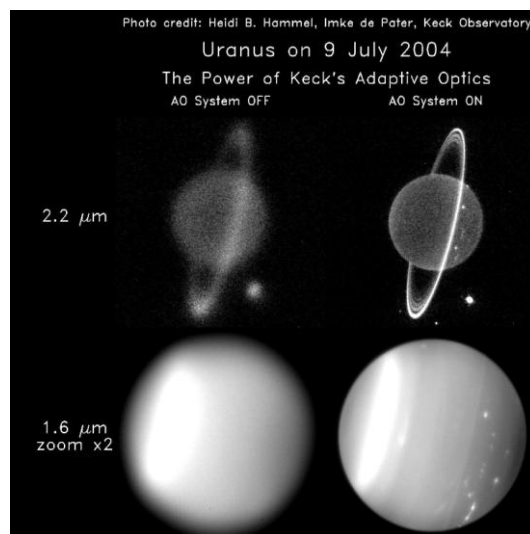


図 15 ケック望遠鏡 + AO で撮像した天王星 [13]。AO なし（左）と AO あり（右）の画像を比較している。AO が働くと、天王星の環が何層にも分解されて見える。(Credit: W. M. Keck Observatory)

5.1.4 銀河中心のブラックホール（VLT）

私たちの住む天の川銀河（銀河系）にはブラックホールがあると考えられていたが、その証拠となる観測データを得たのが VLT + AO [14]。彼ら (Genzel et al.) は 1992 年から 2006 年まで 14 年間かけて、天の川銀河の中心（いて座 A*）付近、数 10 光日（1 光日 = 光が 1 日かけてすすむ距離）にある星の固有運動を調べ、その運動から中心の質量は太陽の 300 万倍と求めた。電波・X 線の観測からいて座 A* の大きさを 10 光日以下と見積もって密度を求め、ブラックホールが存在する間接的証拠をつかんだ。ヨーロッパ南天天文台 (ESO) のホームページにいくと、星の固有運動のムービー [15] が見られる。必見！である。(年期のはいった、あまりにもすごいデータなので、初めてムービーを見た時は「すげーすげーすげー」と絶叫してしまった (笑)。さすが、Genzel 大先生。)

6. すばるの次は？ 30m 鏡計画

現在、日本、アメリカ、ヨーロッパ等で、8～10m 鏡よりさらに大きい、口径数十メートルの次世代望遠鏡を計画中だ。ここまで大きなプロジェクトになると、単独の機関または国で全ての予算をまかなえるところはない。

計画の中で日本と密接な関係がある TMT (Thirty Meter Telescope) [16] について少し紹介する。TMT はアメリカ・カリフォルニア工科大学 (通称カルテク)、同カリフォルニア大学、カナダ三者のプロジェクトで、名前の通り口径 30m の望遠鏡だ。この口径ですばる望遠鏡のような単一鏡を作るのは難しい。主鏡がケック望遠鏡のような複合鏡になるが、現在のスペックでは 492 枚のセグメントを組み合わせるにこなっている。ドームの直径は 61.8m、ジェット機がまるごと収まる大きさになる。

現在、日本も参加の方向に向けて検討中だ。国立天文台 ELT (Extremely Large Telescope) 室のメンバー (実はメンバーのほとんどがハワイ観測所と兼任) や大学の光赤外スタッフが TMT の会議に参加して、日本は主鏡、装置、人材等でどのような形の関与が可能かを考えている。

さて、この TMT、どこに建設されるのだろうか。ハワイ、メキシコ、チリの合計 5 箇所がサイト候補に挙げられ、各候補地でシーイングの測定が行われている。ハワイのマウナケアとチリのアルマソネス (Armazones) の 2 箇所が、最有力候補だと言われているが、たとえマウナケアが建設サイトとして選ばれたとしても、正念場はその後からだ。ハワイに住む人々が TMT 計画を理解し歓迎してくれるように働きかける努力を惜しんではない。現存のすばる望遠鏡や他の外国の望遠鏡もそうだが、良い望遠鏡を作って良い科学的成果をあげればそれでいいというものではない。望遠鏡の建設や運用を通じて現地に

住み、そこでの文化を尊重し、人々と交流を深めながらコミュニティにとけ込むことが、望遠鏡プロジェクトの成功につながる。マウナケア天文台群普及委員会 (MKOOC: Mauna Kea Observatories Outreach Committee) のメンバーで、各観測所で普及活動に携わる私たちは、真剣に地域貢献を考え、天文台と地域社会のかけ橋となるべく、日々努力を続けている。この手の仕事は成果が見えるようになるまでに長い時間を要するが、少しずつでもハワイの人々が天文学を好きになり、観測所にポジティブな気持ちを持ってくれるようになればいいなと思っている。

参考文献

すばる望遠鏡ホームページ

http://SubaruTelescope.org/j_index.html

すばる望遠鏡パンフレット (日本語版)

国立天文台発行 (2007 年)

[1] スーパーカミオカンデ

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk>

[2] 理科年表・平成 20 年(2008 年)版

国立天文台編 丸善株式会社

[3] ケック天文台 W.M. Keck Observatory

<http://www.keckobservatory.org>

[4] ジェミニ天文台 Gemini Observatory

<http://www.gemini.edu>

[5] ハワイ大学 天文学科

Institute for Astronomy, University of Hawaii

<http://www.ifa.hawaii.edu>

[6] 国立天文台・野辺山宇宙電波観測所

<http://www.nro.nao.ac.jp>

[7] Large Binocular Telescope Observatory

<http://medusa.as.arizona.edu/lbto/>

[8] Very Large Telescope / Paranal Observatory

<http://www.eso.org/paranal>

[9] VLT +NACO でとらえた、褐色矮星
2M1207 と惑星

<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2005/pr-12-05.html>

[10] ジェミニ天文台の AO ムービー

http://www.gemini.edu/files/docman/press_releases/pr2003-2/aoanim.mov

[11] すばる望遠鏡 36 素子 AO システム

Takami et al. PASJ, 56, 225 (2004)

[12] ケック望遠鏡 + AO で描いたイオの火山マップのムービー

<http://alamoana.keck.hawaii.edu/news/archive/io/index.html>

[13] ケック望遠鏡 + AO で撮像した天王星

<http://www.keckobservatory.org/article.php?id=3>

[14] VLT +NACO でとらえた、銀河系中心付近の星々の固有運動

<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2002/pr-17-02.html>

[15] 文献[14] のムービー

<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2002/video/vid-02-02.mpg>

[16] TMT (Thirty Meter Telescope)

<http://www.tmt.org/>

臼田-佐藤 功美子