

## 解説

# すばる望遠鏡と次世代 30m 望遠鏡 —その技術と成果—

Subaru Telescope and the Next Generation Thirty Meter Telescope  
— Technologies and Achievements —

## 家 正則

Masanori IYE



◎1972年東京大学理学部卒業、同大学院博士課程修了後東京大学理学部助手、助教授、国立天文台助教授を経て、1992年より国立天文台教授、国立天文台大型光学赤外線望遠鏡計画推進部主幹、総合研究大学院大学数物科学研究所長、日本天文学会副理事長、国際光工学会シンポジウム組織委員長などを歴任。2008年仁科賞受賞

◎研究・専門テーマは、観測的宇宙論と望遠鏡・観測装置技術開発  
◎自然科学研究機構・国立天文台 光赤外研究部教授、ELTプロジェクト長、日本学術振興会学術システム研究センター数物系科学主任研究員(併任)  
(〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台／  
E-mail : m.iye@nao.ac.jp)

## 1. はじめに

国立天文台ハワイ観測所のすばる望遠鏡は、1999年1月にファーストライトを迎えた。

2009年1月はちょうどそれから10年、また1984年の本格的検討開始からは25年目となる。おかげさまで、すばる望遠鏡は最遠銀河の発見などの観測的研究で世界を断然リードする活躍をしている。宇宙論研究の中での、すばる望遠鏡の研究成果を解説し、これらの成功を支えた技術開発と今後の機能アップ計画、さらにすばる望遠鏡の次の時代の牽引役となる次世代30m級望遠鏡構想について、述べさせていただく。

## 2. すばる望遠鏡とその観測

装置<sup>(1)～(3)</sup>

### 2.1 能動光学主鏡

すばる望遠鏡(図1)建設での最大の技術的課題は、口径8.2mのガラス主鏡とその支持機構の製作であった。気温が変化しても鏡面が変形しないよう、ガラス材には熱膨張率が $10^{-8}$ /度以下のゼロ膨張ガラスを採用することにした。だが、そもそも直径8mのガラス材を製作できる設備を持った会社は世界中のどこにもなかったので、すばる望遠鏡の主鏡ガラスの製作を引き受ける会社を探すところから始まった。望遠鏡を傾けたときでも、主鏡の反射面は、光学設計で想定した回転双曲面形状からの誤差が光の波長の20分の一以下となるように保たねばならない。このため通常はガラスの厚さを直径の6分の一程度にして剛性を

高め、自重変形量を抑える工夫がなされてきた。だが、直径8mのガラスで厚さ1mを超すものを作るとガラスだけで100tを超してしまう。主鏡が重くなると鏡を支える鏡枠も望遠鏡構造も比例して重くなり、コストが非現実的な額になってしまう。このため、軽量化が必須であった。そこでガラスの厚さを20cmにまで薄くして軽量化することにしたが、この薄さでは鏡を傾けると自重変形量が許容誤差を大きく上回ってしまう。そもそも、従来の厚めのガラスであっても、すばる望遠鏡での要求仕様を満たすには、変形量が無視できない。

そこで反射面の形状を精確に測定して、常にコンピュータ制御で正しい形を保つ「能動光学」機構を採用することにした。国立天文台では鏡の形状を光学的に測定するシャック・ハルトマン型鏡面測定装置を開発し、三菱電機(株)が高精度力センサを内蔵したアクチュエータを開発した。能動光学方式の実証にはアクチュエータ12本で支える、直径62cmの試作望遠鏡を作り、この方式で鏡面形状を制御できることを1988年に確かめ、自信を深めた。1998年に完成した直径8.2mのすばる望遠鏡主鏡は261個のアクチュエータを組み込んだ能動支持機構に載っている。この装置で制御した鏡面の二乗平均誤差はわずかに14nm、光の波長の約40分の一でしかない(図2)。

### 2.2 高画質の秘密

有効口径10mのケック望遠鏡など、すばる望遠鏡に匹敵するサイズの望遠鏡は世界中で現在10台余りあり、毎夜観測を行っている。すばる望遠鏡は、それらの中でも画質が良いことで定評がある。高精度の主鏡能動支持機構の開発で常に主鏡のゆがみを打ち消し、光が正しく焦点を結ぶようにしたことがその成功の第一の要因である。第二の要因としては望遠鏡駆動精度の高さがあげられる。天体の日周運動を追尾するため、重さ550tの望遠鏡をスムーズに駆動する必要がある。すばる望遠鏡では摩擦抵抗の無い静圧軸受で望遠鏡を油膜の上に浮かせ、ギアなどの動力伝達機構を介すことなくリニアモータにより直接望遠鏡を駆動している。見逃せない第三の要因は、望遠鏡環境の熱管理による空気の乱れの抑制である。建設地として選んだハワイ島のマウナケア山頂(海拔4139m)は絶海の孤立峰であり、流れる風に乱れが少なく、星がシャープに見える。このため各国が最先端の望遠鏡を建設している。すばる望遠鏡のドームは、他の望遠鏡と違う形をしている。これは地表付近の乱れた風を避けるためであり、ドーム内の風通しも良くした(図3)。さらに、昼間のドーム内を空冷して夜間の気温に保ち、鏡や望遠鏡構造物からの陽炎が立たないように工夫した。これらのお陰ですばる望遠鏡の画質が良いのである。

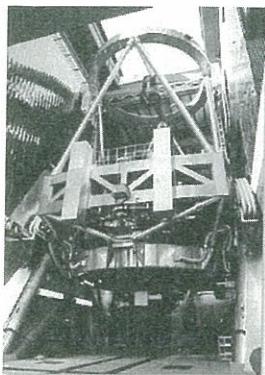


図1 すばる望遠鏡

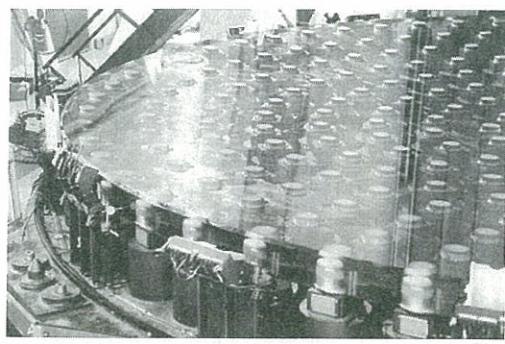


図2 261本のアクチュエータからなる主鏡能動支持機構に支えられたすばる望遠鏡の主鏡アルミ蒸着をする前なので透けて見えている。

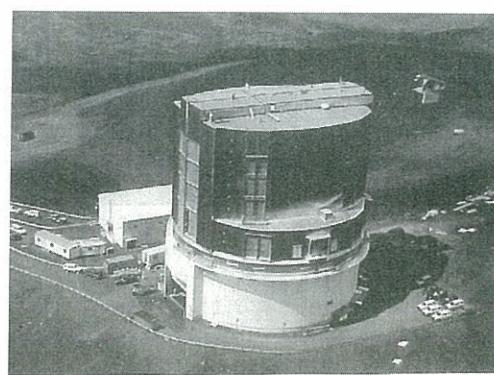


図3 円筒形のすばる望遠鏡ドーム

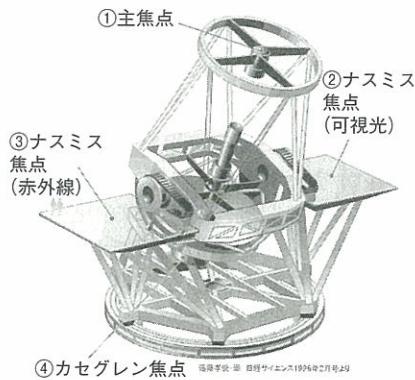


図4 すばる望遠鏡の四つの焦点

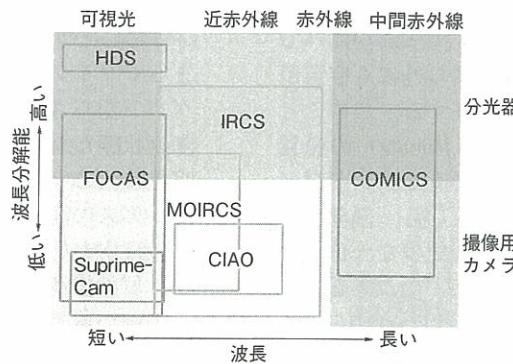


図5 2009年1月時点でのすばる望遠鏡の七つの観測装置

観測波長域と波長分解能が異なる七種類の装置を使い分けてさまざまな観測を行うことができる。

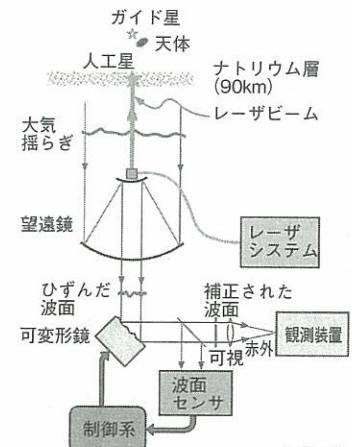


図6 レーザガイド補償光学系概念図

すばる望遠鏡には四箇所の焦点があり（図4），これらを使い分けるには望遠鏡の先端に取り付ける副鏡を交換する必要がある。現在利用可能な観測装置は図5の七つであるが，これらの観測装置も観測目的に応じて交換する必要がある。2tもある光学系を安定に交換するためのロボット機構の開発も，すばる望遠鏡の安定な運用につながり，成功の原因となっている。

### 3. 大気のゆらぎを打ち消す ハイテク技術<sup>(3)～(5)</sup>

#### 3.1 補償光学

理論的には星像の大きさは光の波長  $\lambda$  と望遠鏡直径  $D$  の比  $\lambda/D$  で決まる回折限界まで小さくできるはずであり，すばる望遠鏡の場合この値は近赤外では 0.06 秒角となる。だが，画質が良いことで定評のあるすばる望遠鏡でも，星像は通常 0.6 秒角程度に広がって見える。

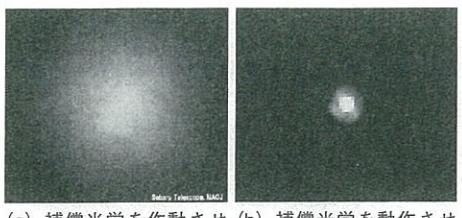
これは地球大気のゆらぎにより，無限の彼方から届く天体からの光の波面が望遠鏡に到達する直前の最後の 200km ほどのところで乱されてしまうためである。大気圏外に打ち上げられたハッブル宇宙望遠鏡はこのようなゆらぎの影響を受けないため，星像の大きさが 0.2 角度にまで縮まり，そのシャープな画像が新聞や雑誌を飾ってきた。

長い間地上からの天体観測の宿命と考えられてきた，この大気ゆらぎによる星像のボケを直す「補償光学」と呼ばれるハイテク技術がある。それには，明るい星の光を分析して大気のゆらぎによる乱れを毎秒 2 000 回測定し，この

亂れを打ち消すように小型の薄い鏡を高速駆動してやる。こうすると地上の望遠鏡でも回折限界の解像力を達成することができる。この原理は 1953 年に提唱されていた。だが，実用的な技術が成熟してきたのは 1990 年代後半からである。すばる望遠鏡では，薄鏡の駆動制御素子数が 36 個の第一世代の補償光学系を 2002 年に完成した。だが，第一世代の装置は大気のゆらぎを測るために明るい星の光を分析する必要があり，この装置を使って画質の改善ができるのは，観測したい天体のすぐそばに運よく明るい星があるときだけであった。

#### 3.2 レーザガイド星技術

2002 年度から科学研究費補助金特別推進研究の助成を得て，制御素子数 188 個の第二世代の補償光学系を開発した（図6）。2006 年 10 月に行った試験観測の画像では 0.6 秒角の星像が 1/10 の 0.06 秒角に縮むことが確認された（図7）。制御素子数が 5 倍に増えたため像改善の精度も格段に向上した。さらにこの装置をどの天体の観測でも使えるようにするために，「レーザーガイド星生成装置」という，とんでもない装置を開発した（図8）。すばる望遠鏡から波長 589nm のナトリウム D 線で発振する 6W 級のパワーレーザビームを打ち上げる（図6）。すると，高度 90km の上層大気中に存在するナトリウム層のナトリウム原子が励起され，発光するので人工星ができる。すばる望遠鏡が向いている方角に人工星を作ることができるので，その光を分析すると，大気のゆらぎを測定することができる。



(a) 捲償光学を作動させ  
ない場合 0.6 秒角に広が  
ると 0.06 秒角にシャープ  
になる

図 7 捲償光学の効果

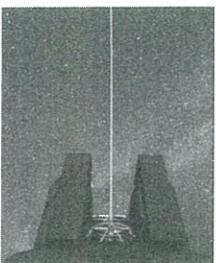


図 8 すばる望遠鏡か  
らのレーザビ  
ーム発振

## 4. 宇宙観の驚くべき展開<sup>(6)-(10)</sup>

### 4.1 20世紀の宇宙観

閑話休題。ここで 20世紀の宇宙観の発展を振り返ってみることにしよう。われわれの天の川銀河の外にも宇宙が広がっていて、そこには無数の銀河が存在する。このことを確認したのは、1923年のハッブル (E. Hubble) の発見であった。彼は当時世界最大の 2.5m 望遠鏡でアンドロメダ大星雲の距離を初めて測定することに成功し、渦巻星雲が銀河系の外にあり、銀河系と匹敵する大規模な天体であることを証明した。ハッブルは引き続き多くの渦巻銀河の速度を測り、遠い銀河ほど大きな速度でわれわれから遠ざかっていることを 1929 年に見抜いた。今年は膨張宇宙発見の 80 周年にあたる。

アインシュタイン (A. Einstein) は一般相対性理論の枠組みをつくる中で、宇宙に不变性を求め 1917 年に宇宙項という定数を付け加えた。フリードマン (A. Freedman) はアインシュタインの枠組みの中で宇宙の構造と運動を記述する方程式を 1922 年に考え、宇宙の理論的研究が始まった。ハッブルが宇宙膨張を 1929 年に発見したとき、アインシュタインは宇宙項の導入を「生涯最大の過ち」と悔いた。ところが、この宇宙項が今「暗黒エネルギー」と名前を変えて再登場することになった。アインシュタインがこのことを知ったら、いったいなんと言うだろうか？

膨張宇宙を過去にさかのぼって考えたガモフ (G. Gamov) は、宇宙が高温高密度状態から始まり、その最初の数分間にヘリウム原子核ができるはずと 1940 年代に考えた。定常宇宙論者のホイル (F. Hoyle) がからかい半分で名付けた、このビッグバン宇宙論は、1965 年の宇宙マイクロ波背景放射の発見、ヘリウムの存在比が宇宙のどこでもほぼ一定であることなどから、観測的に裏付けられ、確固たるものとなった。

### 4.2 最新宇宙観

宇宙マイクロ波背景放射は 1990 年代に宇宙背景放射探査機・COBE 衛星の観測でそのスペクトルが絶対温度 2.75 度の黒体ふく射スペクトルによく一致することが確認された。後継機 WMAP 衛星による、そのふく射強度の空間分布の微少なゆらぎの解析から、2003 年には膨張宇宙モデルのパラメータが驚くほどの精度で決まった。また、一定の光度をもつ I 型超新星を距離測定の物差しにして、遠方の銀河の距離と後退速度を調査した結果からは、宇宙膨張が加速しているという驚くべき発見が報告された。膨張宇宙を加速するのに必要な正体不明のエネルギーがあるはずで、これを「暗黒エネルギー」と呼ぶようになった。

こうして、ビッグバンからの年齢が 137 億年、膨張は現

在加速中、構成成分としては物質密度が約 4%、未知の暗黒物質の密度が約 23%、膨張を加速する暗黒エネルギーの密度が約 73% という最新宇宙像が標準モデルとして定着してきた<sup>(6)-(8)</sup>。

## 5. 宇宙の夜明けに迫る<sup>(6)-(8)-(10)</sup>

### 5.1 銀河形成史

入れ物としての宇宙全体の進化の様子は、前章で述べたように近年急激に理解が進んだ。その中でいつごろ最初の星や銀河が生まれたのかという問題が、現在の天文学での最大の関心となっている。ビッグバン後急速に膨張して冷えた宇宙は爆発後 38 万年ごろには 3 000 度程度にまで冷え、それまで電離状態でバラバラだった陽子と電子が結合して中性水素原子となった。これ以降は、光は電子に散乱されることがなくなるので、この時代の光が宇宙膨張で薄まってマイクロ波となって、現在観測されるのである。ビッグバンから 38 万年以降の宇宙には、自ら光を放つ天体が無い状態となるので、この時代を宇宙の暗黒時代と呼ぶ。暗黒時代の宇宙では、かすかな密度ゆらぎが次第に成長して、ガスの濃い部分があちこちで収縮する。その中心で原子核反応が始まるとき、宇宙の一番星を宿す原始銀河が誕生する。原始銀河の中で高温で明るい大質量星が輝きだすと、その強い紫外線で周辺の銀河間空間の中性水素ガスが電離されていく。ビッグバン後、冷えて一度中性化した宇宙は、こうして原始銀河のベビーブームを迎えると再び熱せられ、「再電離」して夜明けを迎えるようになる。

すばる望遠鏡はこの宇宙の夜明けの時代の銀河を探す研究で現在世界の最先端を走っている。このためには遠い銀河を探ることが重要となる。遠い銀河ほど「昔の姿」を見ていることになるからである。すばる望遠鏡は遠い銀河を見ることで宇宙の地層を掘る宇宙考古学の研究を行っているのである。遠い銀河の目印になるのは、水素原子が放つ強い光信号であるライマン  $\alpha$  輝線である。本来は波長 121.6nm の紫外線だが、遠い銀河ほどこの光が赤方偏移して長い波長の赤外線になる。すばる望遠鏡グループでは、観測の妨げとなる地球大気の OH 分子基の発光が弱い波長域に狙いを定めて、専用の特殊なフィルタを開発し、視野の広いカメラで遠い宇宙の銀河を戦略的に探してきた。

### 5.2 最遠銀河の発見

図 9 の拡大パネルの中央のシミのような天体が、われわれが発見した最も遠い銀河 IOK-1<sup>(9)-(10)</sup>。この銀河は波長 973nm の光だけを透す特殊フィルタで 15 時間にわたり撮影した画像に写った 41 533 個の銀河の中から、このフィルタでの画像でだけ見える銀河として見つけたものである(図 10)。この観測を行った筆者、大学院生の太田氏、准教授の柏川氏のイニシャルをつけてこれらの天体を IOK-1 と命名した。分光観測の結果、ライマン  $\alpha$  輴線が 968nm

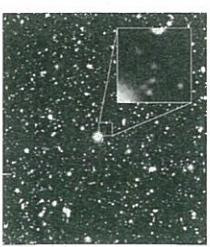


図 9 最遠銀河 IOK-1

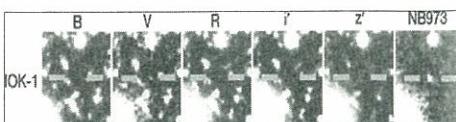


図 10 赤方偏移 7 の銀河 IOK-1  
B (青), V (黄), R (赤), I' (波長 750nm の近赤外), z' (波長 880nm の近赤外) の各広帯域フィルタでの画像では写っていないが、波長 973nm の狭帯域フィルタの画像でのみ写っている。

表1 最遠銀河ベストテン

この数年間のすばる望遠鏡による一連の観測により、最も遠い銀河のベストテンのうち、第9位を除く九つがすばる望遠鏡による発見となっている。

Table1：赤方偏移が確定した最遠銀河ベストテン（2008年10月14日時点）。

順位	銀河名	座標	赤方偏移	億年*	論文	出版日
1	IOK-1	J132359.8 + 272456	6.964	128.8	Iye et al.	Sep. 14, 2006
2	SDF ID1004	J132522.3 + 273520	6.597	128.2	Taniguchi et al.	Feb. 25, 2005
3	SDF ID1018	J132520.4 + 273459	6.596	128.2	Kashikawa et al.	Apr. 25, 2006
4	SXDF Himiko in SXDS field		6.595	128.2	Ouchi et al.	Jul. 25, 2008
5	SDF ID1030	j132357.1 + 272448	6.589	128.2	Kashikawa et al.	Apr. 25, 2006
6	SDF ID1007	J132432.5 + 271647	6.580	128.2	Taniguchi et al.	Feb. 25, 2005
7	SDF ID1008	J132518.8 + 273043	6.578	128.2	Taniguchi et al.	Feb. 25, 2005
8	SDF ID1001	J132418.3 + 271455	6.578	128.2	Kodaira et al.	Apr. 25, 2003
9*	HCM-6A	J023954.7 - 013332	6.560	128.2	Hu et al.	Apr. 1, 2002
10	SDF ID1059	J132432.9 + 273124	6.557	128.2	Kashikawa et al.	Apr. 25, 2006

\*年齢は宇宙年齢が136.6億年となるモデルに基づいて算出。

\*この銀河のみケック望遠鏡で発見された。他はすばる望遠鏡によるすばる深探査領域での発見。

に赤方偏移していることから、最遠銀河 IOK-1 は 129 億昔、ビッグバン後約 8 億年の時代の若い銀河であることが確認された（図 11）。表 1 は、現時点での最遠銀河のベストテンである。このうちの九つまでがすばる望遠鏡による日本人グループの発見による。これは、すばる望遠鏡だけが視野の広い主焦点カメラを装備したことと、研究グループが一致協力して徹底的観測を遂行した成果である。一連の観測から、赤方偏移が 6 を越すと銀河の数が著しく減っていることが明らかとなってきた。これはすばる望遠鏡がついに宇宙の暗黒時代の夜明けの時代を見始めたためと考えている。最遠銀河探しの研究は世界中の天文学者が競争中であり、今後もさらに探査を進める計画である。

## 6. 次世代超大型望遠鏡<sup>(11)</sup>

最遠銀河の発見などすばる望遠鏡の活躍は、広視野カメラで広い夜空を探すことができたからだ。すばる望遠鏡には 2011 年ごろの完成を目指して視野をさらに 10 倍広げた超広視野カメラの開発を進めている。また、大気のゆらぎに制限されてきた地上望遠鏡の解像力を、現在の約 10 倍の回折限界の解像力にまで高めるレーザガイド補償光学系が完成し、2009 年後半から本観測を開始する。最遠銀河を 10 倍の解像度でぜひ見てみたい。

日米欧の天文学者は 2020 年ごろの宇宙観測を行うために、次世代の超大型望遠鏡や次世代宇宙望遠鏡 JWST の実現に期待している。国立天文台では、カリフォルニア大学、カリフォルニア工科大学、カナダ天文学大学連合との国際協力により、マウナケアに直径 30m の次世代超大型望遠



図 12 次世代 30m 望遠鏡の完成予想図

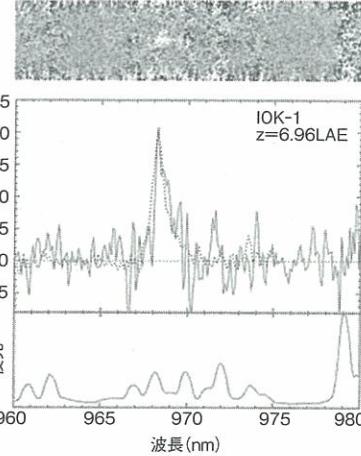


図 11 その赤方偏移したライマン  $\alpha$  輝線から 129 億年昔の銀河であること  
が確認された  
(Iye, M., ほか, Nature, 443 (2006), 186. より転載)

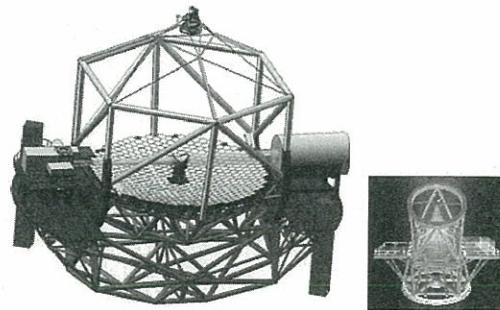


図 13 30m 望遠鏡 TMT と 8.2m すばる望遠鏡

鏡 TMT を建設することを検討している（図 12）。TMT は直径 1.5m の六角形の部分鏡を 492 枚敷き詰めて、有効口径 30m の望遠鏡とする構想である（図 13）。地上望遠鏡の集光力は鏡の面積に比例して増える。近年実用化された補償光学技術を高度化すれば、回折限界の解像力を実現できる。このため補償光学を備えた望遠鏡ではその直径を D とすると、星の光の強さは  $D^4$  に比例して強くすることができる。次世代の 30m 級望遠鏡に補償光学装置を装備すれば、その視力は想像もできないほど高いものになるはずであり、今後の展開が楽しみである。

（原稿受付 2008 年 10 月 14 日）

### ●文 献

- (1) すばる望遠鏡ホームページ [http://subarutelescope.org/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/j_index.html)
- (2) Iye, M., ほか, Current Performance and On-Going Improvements of the 8.2m Subaru Telescope, PASJ 56 (2004), 381-397.
- (3) 家 正則他編, 宇宙の観測Ⅰ—光・赤外天文学, シリーズ現代の天文学, 15 (2007), 日本評論社.
- (4) 高見英樹, 分解能 0.06 秒角の星像を得る補償光学でシャープな星像を, パリティ, 17-5 (2002), 22.
- (5) レーザガイド補償光学試験成功 [http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/j_index.html)
- (6) 家 正則, 宇宙の夜明けに迫る, パリティ, 23-11, (2008), 4.
- (7) 二間瀬敏史他編, 宇宙論Ⅰ—宇宙のはじまり, シリーズ現代の天文学, 2 (2007), 日本評論社.
- (8) 池内 了他編, 宇宙論Ⅱ—宇宙の進化, シリーズ現代の天文学, 3 (2007), 日本評論社.
- (9) Iye, M., ほか, A Galaxy at a Redshift 6.96, Nature, 443 (2006), 186-188.
- (10) 最遠銀河発見 [http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/09/13/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/09/13/j_index.html)
- (11) 次世代超大型望遠鏡プロジェクト室ホームページ <http://jelt.mtk.nao.ac.jp/>