

すばる望遠鏡の視力を 10 倍に改善する補償光学

家 正則

国立天文台

発行所 日本眼科紀要会
567-0047 茨木市美穂ヶ丘3-6 山本ビル302号室 ☎072-623-7878

視覚の科学
Japanese Journal of Visual Science

総 説

すばる望遠鏡の視力を 10 倍に改善する補償光学

家 正則

国立天文台

Adaptive Optics for Improving the Subaru Telescope Vision by an Order of Magnitude

Masanori Iye

National Astronomical Observatory

大気が揺らぐと星の光は瞬く。このため、望遠鏡の「視力」はある程度以上には改善できないと考えられてきた。この宿命を克服する補償光学系を開発し、ハワイ島マウナケア山頂に建設した直径 8m のすばる望遠鏡に搭載した。補償光学系を利用しやすくするために、パワーレーザーを用いて上空 90km の高層大気中で光る人工星を発生させ、大気の揺らぎを測る光源にするシステムも開発した。これらのハイテク技術の原理に加えて、すばる望遠鏡で見つけた 129 億光年彼方の最遠銀河の発見の様子や、すばる望遠鏡に続く直径 30m の次世代超大型望遠鏡計画について、画像を中心に視覚的に紹介する。

(視覚の科学 31: 89 – 93, 2010)

キーワード：補償光学、すばる望遠鏡、天文学、回折限界

Atmospheric turbulence causes twinkling of stars and diminishes the clarity of telescopic vision. We developed adaptive optics systems for the 8m Subaru Telescope atop Mauna Kea, Hawaii, to overcome this problem for ground-based telescopes. To make use of the adaptive optics system easier, we developed a laser guide star generation system to make an artificial star in the upper atmosphere, using a power laser beam, to measure atmospheric turbulence. The basic principles of these high-tech systems, the scientific story of the discovery of the most distant galaxy, 12.9 billion light years distant, and a project for constructing an even larger 30m telescope are shown using images and visual drawings.

(Jpn J Vis Sci 31: 89-93, 2010)

Key Words : Adaptive optics, Subaru Telescope, Astronomy, Diffraction limit

1. すばる望遠鏡建設とその成果



著 者

国立天文台が海拔 4,200m のハワイ島マウナケア山頂に 1991 年から 9 年がかりで建設したすばる望遠鏡は、本格的観測を始めてから今年で 11 年目になります。建設の最大の難関は直径 8.2m の主鏡の製作でした。こんなに大きなガラスを製

作できる会社も、ガラスを磨く設備をもった会社も、当時は世界のどこにもなく、まずそのような挑戦と一緒にする会社を探すことから始まりました。

鏡面は光を精密に反射しなければならないので、光の波長の 1/20 以下の凸凹しか許されません。軽量化するため鏡の厚さをわずか 20cm にしたので、鏡の姿勢による変形は無視できません。そこでコンピュータ制御で鏡面の形を常に理想的な回転双曲面にする「能動光学方式」を考案し、採用することにしました。

ガラスの製作に 4 年、研磨に 4 年かかり、1998 年

別刷請求先：181-8588 三鷹市大沢 2-21-1 国立天文台 家 正則
(2010 年 9 月 22 日受理)

Reprint requests to: Masanori Iye National Astronomical Observatory
2-21-1 Osawa, Mitaka 181-8588, Japan
(Received and accepted September 22, 2010)



図1 米国ピツツバーグ近郊の光学会社施設での、すばる望遠鏡の主鏡完成検査（1998年8月28日）
7年がかりで完成した世界最大、最高精度の鏡について、翌日の地元誌には、当時米国で公開中だった日本映画ゴジラをもじって、「ゴジラのコンタクトレンズ完成」の見出しが躍った。

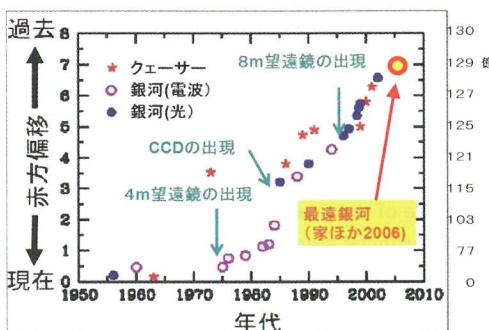


図3 人類が見た最も遠い天体の記録更新の歩み

8月に世界最大、最高精度の鏡が完成しました（図1¹⁾）。2000年から世界中の天文学者が、この巨大で鋭い視力をもつ「眼」を駆使して様々な研究がなされました²⁾。

図2は私達が2006年に発見した129億光年かたな銀河の写真です。これは人類がその距離を測ることができた天体の中で最も遠くにある銀河となりました。129億光年の銀河からの光は、129億年かかるで地球に届きます。「遠くを見ることは昔を見ることになりますので、宇宙考古学を研究することができます。図3は人類がどこまで見ることができたかの歴史を示しています。私達の発見は2010年の現在でもギネス記録となっています^{3, 4)}（最遠銀河発見 http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/09/13/j_index.html）。

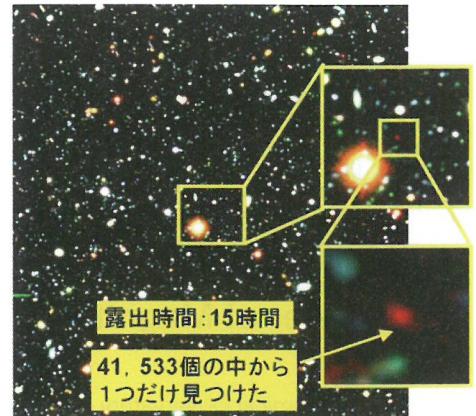


図2 完成したすばる望遠鏡を駆使した探査観測を行い、発見した距離129億光年かたな銀河IOK-1
2006年のNature誌で発表したこの成果はいまだに破られない世界記録となっている。

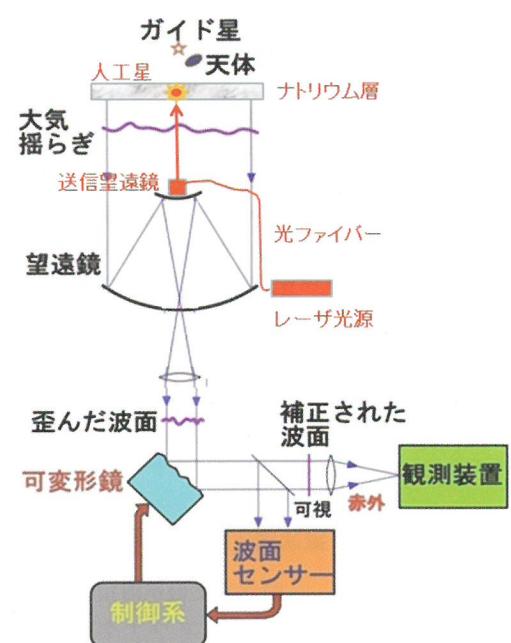


図4 レーザーガイド補償光学系のシステム構成

2. 補 償 光 学

本稿で眼光学学会の皆さんにとくに見ていただきたいのは、天文学における「補償光学⁵⁾」の応用実例です。これまでの天体観測では空気の揺らぎのため星が瞬き、にじんでしまうのが悩みでした。図4は光の揺らぎ様子を測って、その影響を直しながら観測する

「補償光学系」の原理を示しています。

「ガイド星」からの光の揺らぎを「波面センサ」で高速測定し、「可変形鏡」で波面揺らぎを実時間補正して、望遠鏡の回折限界の画像を得ます。観測したい天体のそばに十分に明るいガイド星がない場合でも、補償光学系を利用できるようにするために、「レーザービーム」をすばる望遠鏡から発射して上空で光る「人工星」をつくるシステムを追加製作しました。

光波面の揺らぎを測るには望遠鏡光学系の射出瞳位置にマイクロレンズアレーを置いて光束を分割し、各部分光束がつくる光源星の像の横収差（波面の一次微分）の分布を測るシャック・ハルトマン法（図5上）と、瞳位置前後の光束の照度分布を比較して波面の曲率（波面の二次微分）の分布を測る曲率センサ法

（図5下）があります。

波面補正用の可変形鏡としては、ピエゾ素子駆動のものが天文では多用されています。積層型ピエゾ素子を用いる方式（図6上）とバイモルフ型ピエゾ素子を用いる方式（図6下）があります^{6, 7)}。眼科医療用には、液晶型変調素子やMEMS（micro electro mechanical systems）素子を用いたよりコンパクトなシステムが適しているでしょう。

2006年10月の試験観測で、実際に恒星の画像を補償光学系を作動させて撮影したのが図7です。効果抜群で、「裸眼」では0.6秒角に広がった像となるのが、「補償光学眼鏡」をかけると0.06秒角と、像の大さきが1/10にシャープになることが確認できました。

図8はオリオン大星雲のトラベジウム領域の画像ですが、右は1999年にすばる望遠鏡完成直後に撮影したもので、「裸眼」画像に相当します。左が2006年に補償光学系を通して撮影した「眼鏡使用」画像に相当します。

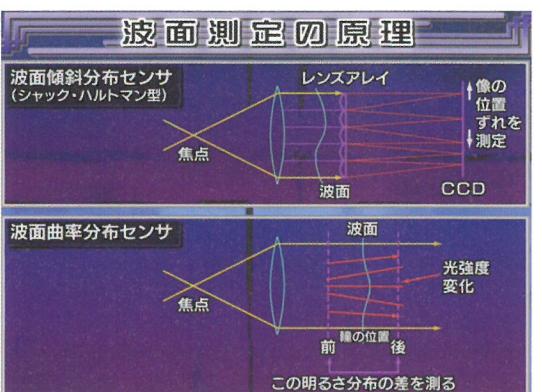


図5 光波面測定の原理

波面傾斜分布センサ（シャック・ハルトマン型）
波面曲率分布センサ
レンズアレイ
CCD
焦点
波面
この明るさ分布の差を測る

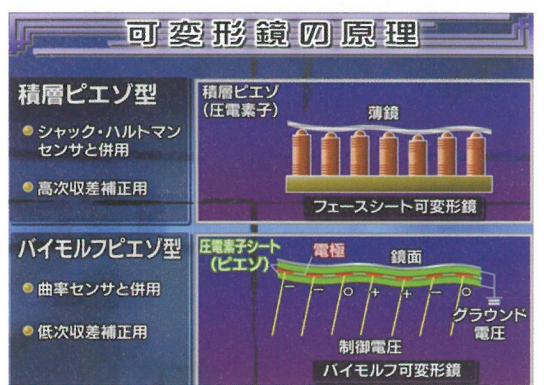


図6 積層型ピエゾ素子（上）を用いる方式とバイモルフ型ピエゾ素子（下）を用いる方式



図7 補償光学をオフにした通常の星像（右）は直径0.6秒角に広がっているが、補償光学を動作させた星像（左）は直径0.06秒角に収縮し、中心の輝度が格段に向上する。
Subaru Telescope, NAOJ

2010年9月

天文学における補償光学・家 正則



図8 トライアゴン領域の画像改善
右画像は裸眼画像。左は補償光学系を用いて撮影した画像。解像力は10倍に改善された。

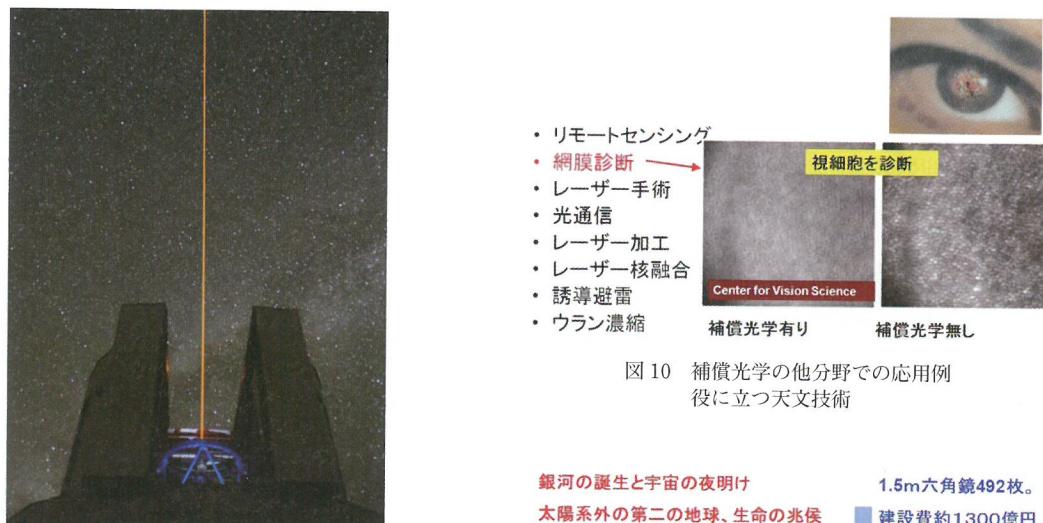


図9 2006年10月のレーザービーム初照射風景
月明かりのない夜ならレーザービームを肉眼で見ることができます。

補償光学装置を動作させるには、観測したい天体のそばにある明るい星をガイド星として利用します(図4)。観測したい天体のそばに適切な明るい星がない場合は、揺らぎの測定ができないため、これまで補償光学系を使えませんでした。そんな状況を改善するために開発したのが、「レーザーガイド星生成装置」です。

レーザーガイド星生成装置は、地球上空90kmの高さにあるナトリウム層を波長589nmのナトリウムD線で発振するレーザーで照射します(図9)。レーザーに照射されたナトリウム原子は励起され、同じ波長のオレンジ色の光を放ちますので、レーザーパワー



図10 補償光学の他分野での応用例
役に立つ天文技術



図11 次世代超大型望遠鏡TMT計画
TMT: Thirty meter telescope

を上げると十分に明るい「人工星光源」となり、その光波面の揺らぎを測定して補償光学系を動作させることができます⁸⁾。補償光学系にこの装置を追加製作したおかげで、任意の天体の観測に補償光学系を使うことができるようになりました(レーザーガイド補償光学試験成功 http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/j_index.html)。

補償光学技術は天文学の世界のニーズから開発が進みました。光を直接制御する技術として、近年リモートセンシング、網膜診断、光通信、レーザー加工、レーザー核融合など様々な分野への応用が検討されています。

図10は眼底撮影時に水晶体や硝子体の屈折率分布の揺らぎや、測定光学系の収差を測定して、補償することにより高解像度の撮影を試みた例で、国内外でも開発が進められているとうかがっています。要素技術などでの共通の関心もあるので、天文学と眼光学や他の分野との情報交換、共同開発などの動きが今後重要なになってくるのではないかと考えております。

3. 次世代超大型望遠鏡計画 TMT(図11)

最後になりますが、私達は2020年ごろの完成を目指して、すばる望遠鏡の隣に、日米加などの国際協力事業として直径30mの次世代超大型望遠鏡を建設しようと計画しています(<http://tmt.mtk.nao.ac.jp/moved.html>)。宇宙の理解はこの30年で大幅に進みました。10年後にこの望遠鏡が完成し、進化した補償光学系が実用化されると、33等星が見えてくると試算して

います。これは月面で源氏蛍が瞬く明るさに相当します。10年後の天文学で一体何が見えてくるか、科学的想像力を働かせて楽しみにしています。

文 献

- 1) 家正則: すばる望遠鏡. 岩波ジュニア新書, 東京, 2003.
- 2) 林正彦: ファーストライトから10年「すばる」が明らかにした宇宙. 日経サイエンス 2月号: 24-31, 2009.
- 3) Iye M, Ota K et al: A galaxy at a redshift $z=6.96$. Nature 443: 186-188, 2006.
- 4) 家正則: 宇宙の夜明けに迫る—最果ての銀河探査一. パリティ 23: 4-14, 2008.
- 5) Babcock HW: The possibility of compensating astronomical seeing. Publ Astron Soc Pacific 65: 229-236, 1953.
- 6) 早野裕: 宇宙の観測I, シリーズ現代の天文学台15巻, 家正則他編, 第7章3節, 日本評論社, 東京, 2007.
- 7) 高見英樹: 補償光学でシャープな星像を. パリティ 17: 22-28, 2002.
- 8) Thompson LA & Gardner CS: Experiments on laser guide stars at Mauna Kea Observatory for adaptive imaging in astronomy. Nature 329: 229-231, 1987.