

## 目 次

表題は本協会初代理事長 故岡崎嘉平太書

卷頭言：「すばる望遠鏡から次世代望遠鏡TMTへ」

自然科学研究機構 国立天文台 ELTプロジェクト室 室長・教授 家 正則 ----- 1

技術紹介1：「TMT計画実現に向けた技術課題と日本の取り組み」

自然科学研究機構 国立天文台 ELTプロジェクト室 研究員 秋田谷 洋 ----- 4

技術紹介2：「望遠鏡の主鏡製作と研削技術」

(株)ナノオプト・エナジー ナノオプトニクス研究所 所長 舞原 俊憲 ----- 7

技術紹介3：「TMT主鏡用極低膨張結晶化ガラス Clearceram-Z」

(株)オハラ 製造技術部 技術一課 課長補佐 岸 孝之 ----- 10

協会関連事項、あとがき：----- 12

## 卷頭言

すばる望遠鏡から  
次世代望遠鏡TMTへ自然科学研究機構  
国立天文台ELTプロジェクト室  
室長・教授 家 正則

## 1. はじめに

2009年はガリレオ・ガリレイが自作の望遠鏡を使って天界の観察を始めた1609年からちょうど400年目にあたり、世界天文年としてさまざまなイベントが催された。ガリレオがつくった望遠鏡は口径5cm程度で視野も狭く、決して使い勝手の良いものではなかったが、彼は木星の衛星や月のクレーター、天の川の星々などを発見して、人類の宇宙観を一変させるきっかけをついた。

その後の天文学の歴史を振り返ると、その時代時代で可能な限りの大きな望遠鏡を次々に作り、人類の認知する宇宙を格段に広げてきたことがわかる。望遠鏡の建設にはいろいろな部分で精密加工が必要であり、望遠鏡の歴史は精密測定技術の発展に裏打ちされた先端加工技術の発展の歴史であったと言っても過言でないであろう。

## 2. すばる望遠鏡の先端加工技術

望遠鏡は天体からの微弱な電磁波を焦点面に結像して、検出できるレベルに增幅するための装置である<sup>[1]</sup>。天体望遠鏡の鏡やレンズには光学設計に従った双曲面、放物面などの非球面がしばしば採用される。目的によるが、その形状誤差は光の波長の例えれば1/12以下に抑えねばならない。直径8.2mのすばる望遠鏡の主鏡は、専用の研磨・測定施設を建設し、4年の歳月をかけて研磨し、最終形状誤差が14nm(約1/50波長)の鏡面を実現した(図1)。このような高精度加工には高精度計測が不可欠であり、ヌルレンズと光干渉計による鏡面計測や3次元プロファイル計測が併用された。

大型主鏡でこのような驚異的な面精度の加工が実現した背景には、「能動光学」と名づけた鏡面制御技術の開発があった。8.2mの主鏡は厚さ20cm(直径の1/40!)、重さ23トンのゼロ膨張ガラス製だが、全体としては薄い皿形であり、鏡の姿勢の変化や気温の変化のため、そのままでは必要な精度で形状を維持することは容易でない。そこで考えたのが主鏡を261本のロボット腕(アクチュエータ)で支え、その支持力をコンピュータ制御して常に形状を安定に維持するという能動光学方式である。各アクチュエータは、0kgから最大150kgまで、鏡を支える力を1g単位で制御する。アクチュエータ群の支持力分布を毎秒毎秒自動制御して、鏡の形状を維持し、ときどき実際の星の光の集まり具

合を光学的にチェックして、制御が正しく機能していることを確認するという方式である<sup>[2]</sup>。

望遠鏡は天体運動を精密に追尾しなければならない。このため総重量 550 トンの望遠鏡を、精密研磨された円形レールの上で厚さ約 50 ミクロンの油膜に浮かせて、摩擦を限りなく小さくして、リニアモーターで駆動している。浮いているときには 550 トンもの望遠鏡を、人が手で押すとゆっくりと滑り出すほどである。このシステムの実現には直径 16m のレールをどこかが無いように精密加工して敷設する必要があった。紙面に限りがあり書き尽くせないが、すばる望遠鏡の建設には、他にも通常の精度を超えた先端加工技術を要求した場面が多々あった。

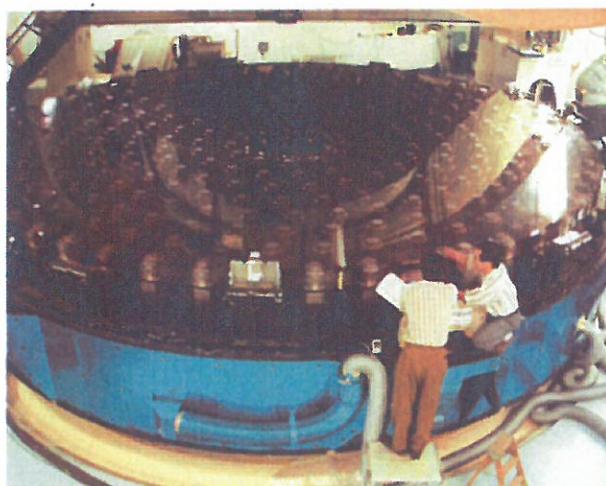


図1. 1998 年の夏、4 年間にわたったすばる望遠鏡主鏡の精密研磨が完了した

### 3. 補償光学

能動光学の発展として、大気のゆらぎを克服する「補償光学」という最先端技術を開発した。能動光学で望遠鏡の光学系を常に理想的な状態に保てるようとしても、地上の望遠鏡は大気を通して宇宙を観測するという宿命を負っている。大気中の温度ゆらぎは光を微妙に屈折させるため星は瞬き揺れる。「補償光学」は望遠鏡に入射する光のどの部分がどう揺らいでいるかを高速測定して、望遠鏡の焦点近くに配置した直径 10cm 程の薄い小型鏡の鏡面を高速に変化させて、光のゆらぎをうち消してしまう超ハイテク技術である。撮影した画像を後の処理で画質を改善するのではなく、光を実時間制御して高画質化する技術である<sup>[3]</sup>。このシステムの開発ですばる望遠鏡の視力は 10 倍向上し、ハッブル宇宙望遠鏡の視力を 3 倍上回る鮮明な画像の撮影が可能になっている（図2）。

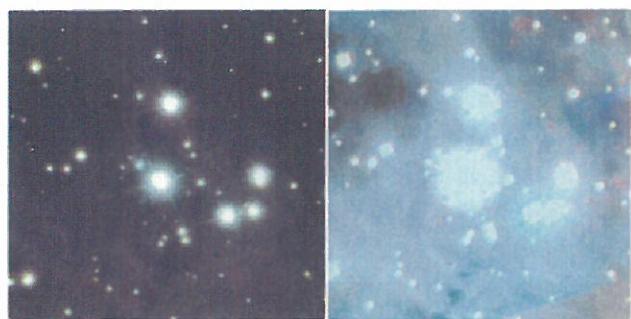


図2. 補償光学による解像力改善例

右) すばる望遠鏡のファーストライト(1999 年)当時の画像  
左) 同じ領域を補償光学装置で 2006 年に撮影した画像  
解像度は 10 倍向上した

補償光学系の要となるのが、薄い小型の「可変形鏡」である。すばる望遠鏡では圧電素子シートに多数の電極を貼り付け、表面側をメッキして可変形鏡を製作した。これらの電極に印可する電圧を高速制御して、薄鏡の鏡面が数 100Hz の速さで変形し、望遠鏡に入射した光束のゆがみを実時間修正する。

### 4. 最新宇宙像

この 10 年間で、膨張宇宙論のパラメータが驚くほどの精度で決められた。それによると、宇宙は物質密度が約 4%、未知のダークマター密度が約 23%、膨張を加速するダークエネルギー密度が約 73% という構成からなっていて、宇宙年齢は約 137 億年、膨張は加速中であるという描像が固まった。

ビッグバンから約 38 万年後に約 3000 度にまで冷えた宇宙は、陽子と電子が結合し、ダークマターと中性水素原子に満たされた。中性化した宇宙は光と物質の相互作用が切れ、これ以降の宇宙は背景放射以外には光の無い「暗黒時代」となった。やがてダークマターの密度ゆらぎが成長し、その重力で物質が集まり、原始銀河の中で多くの星が一齊に生まれ始める。

遠い銀河からの光は地球に到達するまでに時間がかかるので、遠い天体ほど昔の姿を見ていることになる。図3 のパネル中の赤いシミのような天体が、我々が 2006 年にすばる望遠鏡での発見を発表した最も遠い銀河 IOK-1 だ<sup>[4]</sup>。この銀河の距離は 129 億光年、約 129 億年前の姿だ。その後、我々自身も含めて世界中の天文学者がより遠い銀河を探しているが、未だにこれより遠い銀河は見つかっていない。

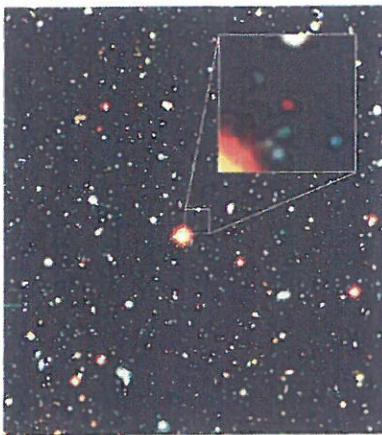


図3. 距離 129 億光年の最遠銀河 IOK-1

図4はすばる望遠鏡の補償光学系に新しいカメラをつけて2009年に発見した太陽系外惑星の写真である<sup>[6]</sup>。太陽と似た星の周囲を巡る大型惑星の姿がすばる望遠鏡で初めて撮影された。地球に似た惑星が見つかるのも遠くないかもしれない。

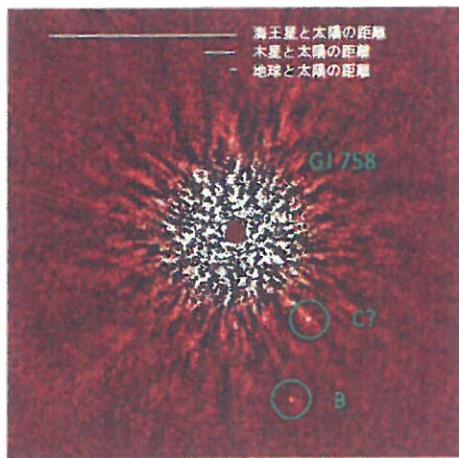


図4. 恒星 GJ758 の惑星BとCの発見

## 5. 超大型望遠鏡 TMT 計画

この10年余りのすばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡の観測は数々の発見をもたらしたが、すでにこれらの望遠鏡の能力いっぱいの観測を究めた状況となっている。

地上望遠鏡計画としては、欧州南天天文台(ESO)が部分鏡984枚からなる口径42mの次世代E-ELTを、カリフォルニア工科大学などが部分鏡492枚からなる口径30mの次世代望遠鏡TMT(Thirty Meter Telescope)を、そしてカーネギー天文台などが8mの鏡7枚を併せたGMTをそれぞれ構想している。スペースでは2.4mのハッブル宇宙望遠鏡の後継機として6.5mの宇宙望遠鏡JWSTの打ち上げが2014年頃に予定されている。

国立天文台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などの国際協力で、すばる望遠鏡の隣に口径30mの次世代超大型望遠鏡TMT(図5)を建設する構想の実現に向けて活動をしている<sup>[6]</sup>。順調に建設に着手できれば、2018年末には観測開始にこぎつけることができると期待している。

地上望遠鏡の集光力は鏡の面積に比例して増える。補償光学技術を実装した望遠鏡では、回折限界の分解能が実現できるので、望遠鏡の直径をDとすると、点光源である星の光の強さは $D^4$ に比例して強くすることができます。すばる望遠鏡の限界等級は約28等に達しているが、次世代の30m級望遠鏡に補償光学装置を装備すれば、それより約100倍暗い33等の天体まで観測できる可能性がある。

TMTが完成すれば、すばる望遠鏡などで発見した太陽系外惑星の大気組成を調べ、生命存在の兆候を分析することができるであろう。現在137億歳の宇宙は毎年、137億分の1だけ大きくなっている。遠い天体ほど昔の光を見ていることになるので、色々な天体の赤方偏移を超精密測定すれば、宇宙膨張の歴史を直接計測できる。そのような研究からダークエネルギーの正体に迫ることができるかもしれない。

TMTの驚異的な視力で、いったいどんな宇宙の姿が見えるのだろうか？　楽しみである。

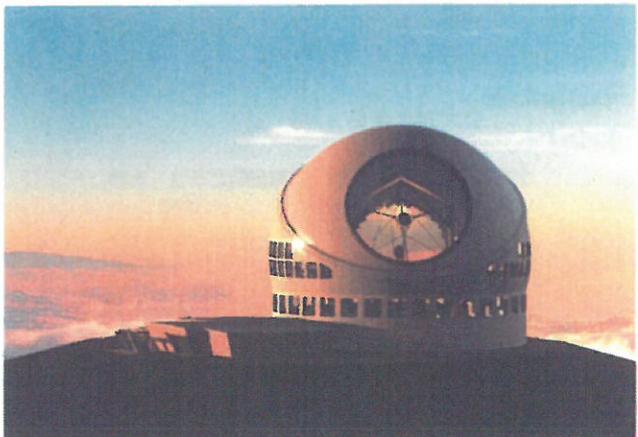


図5. マウナケア山頂の30m望遠鏡TMT 完成予想図

## <参考文献>

- [1] 家正則他編、宇宙の観測―光・赤外天文学―、日本評論社、(2007)
- [2] 家正則、すばる望遠鏡、岩波書店(2003)
- [3] 高見英樹、パリティ、17、22、(2002)
- [4] Iye, M. et al., Nature, 443, 186 (2006).
- [5] Thalmann, C. et al., Ap.J., 707, 123 (2009)
- [6] 家正則、パリティ、24、16 (2009)