

# IAUと日本の天文学の100年

## —地上観測分野を中心として— (3)



### 岡村 定 矩

〈東京大学エグゼクティブ・マネジメント・プログラム 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

日本天文教育普及研究会会長

e-mail: sadanori.okamura@emp.u-tokyo.ac.jp

2019年は国際天文学連合（IAU）創立100周年であった。この機会に、主に地上観測分野を中心に日本の天文学のこれまでの100年の発展とIAUとの関わりを概観する。最終の第三回では、第5章で日本の基幹望遠鏡である、すばる、アルマ、TMT、およびKAGRAを概観する。続いて第6章で世界最先端の二つのカメラHyper Suprime-Camとトモエゴゼンを紹介し、最後の第7章でIAUの中での日本の現状と将来への展望をまとめる。

## 5. 日本の基幹望遠鏡

日本の地上観測分野を世界の最先端に引き上げたすばる望遠鏡とアルマ望遠鏡、およびこれからその役目を担うTMTとKAGRAを概観する。

### 5.1 すばる望遠鏡

ハワイ州マウナケア山頂に大口径光学赤外線望遠鏡を建設する。これがすばる望遠鏡プロジェクトである。1991年から建設が開始され、2000年に単一主鏡としては世界最大の有効口径8.2 mのすばる望遠鏡が完成した<sup>\*10</sup>。これは日本独自のプロジェクトであったが、大使館関連施設以外で外国に置かれる国の施設として前例がないこと、マウナケア山頂は科学保護区でありかつハワイの先住民（Native Hawaiian）にとっては神聖な場所であること、設置する土地はハワイ州からハワイ大学に貸与されているものを転貸されること等々、政治的・社会的課題の多いものであった [64]。

それに加えて技術的課題も山積していた。望遠鏡の大口径化への道は反射主鏡の軽量化への道で

あったともいえる。ハニカム鏡、薄メニスカス鏡、モザイク鏡の三種の軽量鏡の中からすばるが選んだのは薄メニスカス鏡であった。口径8.2 mの単一の鏡を作る。それは世界でまだ誰も実現したことはなかった。さらに加えて、計画の具体的な検討が始まった1980年代、日本には大型望遠鏡に関する技術も観測経験もほとんどなかった。図7に世界の大望遠鏡建設の歴史を示す。諸外国は4 m級望遠鏡の豊富な経験の上に立って8 m級を実現したのに対し、日本は1960年の1.88 mから一挙に世界の最先端に挑戦したことがわかる。

プロジェクトの主契約を受けた三菱電機は、1974年に完成した3.9 mアングローオーストラリア望遠鏡（架台と制御系のみ）しか大型光学望遠鏡の製造経験はなかった。この時の経験を持つ故木下親郎氏のもとで、若い伊藤昇氏、三神泉氏がすばる望遠鏡製作の技術責任者となって、天文学者とさまざまな分野の技術者との間で技術検討が行われた [65-67]。その結果、数々のユニークな特長を持つすばる望遠鏡が完成した。楕円筒型の

\*10 実際の鏡の直径は8.3 m

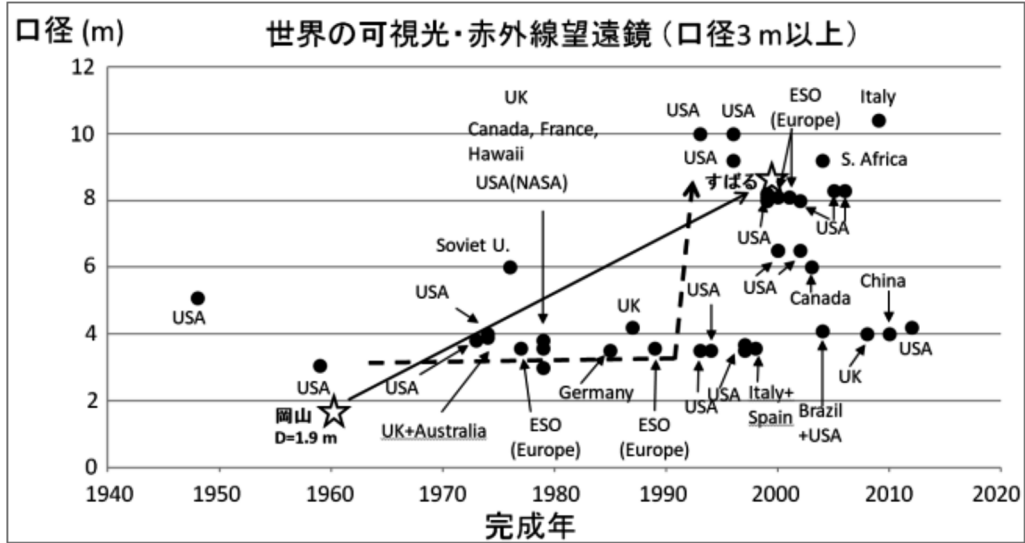


図7 世界の大型望遠鏡を、縦軸に口径、横軸に完成年を取ってプロットしたもの。略号は設置国や組織など。

ドーム、世界最高の鏡面精度を持つ薄メニスカス鏡（ヘックスと呼ばれる44枚の部材ごとの熱膨張率の違いの影響を極限まで制御して溶融して一体化し、高精度で研磨した）、それを支える261本の高精度アクチュエーター（力の分解能10万分の1）、およびアクチュエーターの力の作用点を工夫したユニークな主鏡支持機構（図8）などは世界に類を見ないものである [68]。主鏡裏面への穴開けの決断は、外国関係者から ‘crazy’ とまで言われたと聞いている。

なかでもとりわけユニークであったのが、広視野撮像を目指すための主焦点の設置であった。広い視野を取るためには主焦点補正光学系が必須である。従って、主焦点を作るためには、鏡筒の先端に置かれるカメラと補正光学系の重量を支えるために、望遠鏡全体を強靱に設計する必要がある（図9）。すばる望遠鏡の建設経費が同規模の望遠鏡に比べて高価であるのは、主焦点での広視野撮像を目指したからである。後述するが、このことはすばる望遠鏡の将来に大きな影響を与えることになる。

## 5.2 アルマ望遠鏡

南米チリのアタカマ高原（標高5000 m）に設置された66台のアンテナからなるミリ波/サブミリ波帯の電波干渉計、これがアルマ望遠鏡である（図10）。これはすばる望遠鏡のような日本独自の計画ではなく、日本、アメリカ、ヨーロッパ（17カ国からなるヨーロッパ南天天文台：ESO）の国際共同プロジェクトとして始まった。現在は、東アジア（日本、韓国、台湾）、北米（アメリカ、カナダ）、ヨーロッパの3極により設立された合同アルマ観測所が運用にあっている。歴史的経緯を見ると、日本は困難な状況からの出発であったにもかかわらず、最終的にはプロジェクトに大きな貢献をしたことがわかる。

1983年頃に日本とアメリカで大型ミリ波干渉計の計画が持ち上がった。その後日本はサブミリ波まで視野に入れ、サブミリ波観測に最適なサイトを探すため、1992年からチリ北部でのサイト調査を開始した。さらに1995年にはESOも同様な計画の検討を始めた。1997年には東京で日米ワークショップが開催され、日米計画間の協力が議論され、1999年には米欧が計画の合同に合意

## すばる望遠鏡の挑戦: 主鏡裏面に261個の穴を開ける

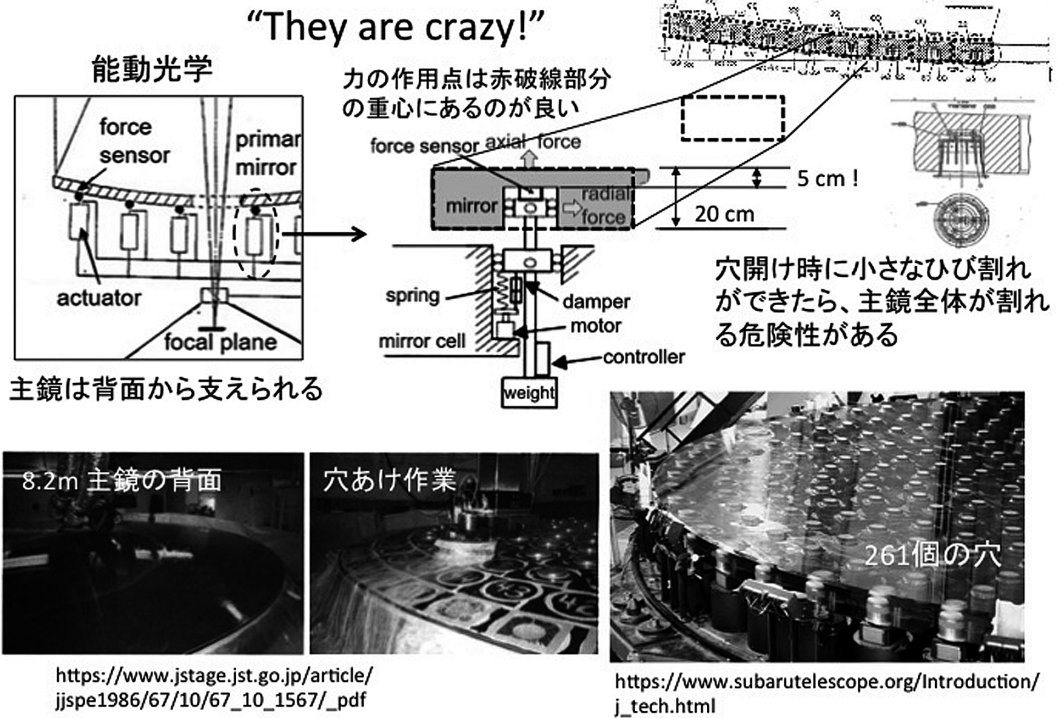


図8 すばる望遠鏡のアクチュエータと支持機構。



図9 すばる望遠鏡（左）と主焦点に搭載された広視野カメラ Suprime-Cam（右）（クレジット：国立天文台）。



図10 アルマ望遠鏡（クレジット：国立天文台）。

した。その後紆余曲折を経て、2001年に日米欧の3極会議を東京で開催し、3者共同建設に合意した。そして2001年にアメリカの予算が認められ、2002年にはESOの予算も認められたが、日本の予算はなかなか認められなかった。置いてきぼりになった形の日本だったが、2年以上遅れて

2004年に予算が承認されてからは、驚異的なスピードで米欧に追いつき追いつ越した。アルマ仕様に合致する最初のアンテナを納入したのは日本だったし、分担した16台のアンテナをすべて期日通りに納入したのは日本だけであった。さらに受信機開発においても、日本は最も開発が難しい



図11 日本が開発した3バンドの受信機（出典は国立天文台，注記は筆者）。

と言われたバンド10を含む3バンドの受信機を開発・供給した（図11）。このアルマプロジェクトで日本は高い国際的信用を得た。「日本は決断（予算承認）するのは遅いが、一旦決断すると国際プロジェクトで非常に信頼できるパートナーになる」。アルマ望遠鏡建設の記録は、山根一眞氏が長年の詳細な聞き取りや現地調査に基づいて書いた著書 [69] によくまとめられている。その本の帯には、『日本が自信を取り戻す』日本人必読の熱いドラマ』とある。

2019年4月10日に、イベントホライズンテレスコープ（EHT）がおどめ座銀河団の巨大楕円銀河M87の中心核にあるブラックホールのシャドウ（影）を捕らえたとのニュースが世界を駆け巡った。アルマ望遠鏡がEHTに参加したことがその大成功の鍵であったことは広く知られている。国内4局のアンテナによる電波干渉計VERAプロジェクトから始まって、それを日本国内の多くのアンテナ、韓国のアンテナ、さらには東アジアの多数のアンテナを含む一大VLBIネットワークに進化させていった日本のグループが、この大成功にも重要な役割を果たした [70]。

### 5.3 TMTとKAGRA

すばる、ケック、ジェミニ、VLTなど8-10 mクラスの望遠鏡が活躍する中、次のターゲットは口径30 m級の超大型望遠鏡であることは明らか

だった。アメリカ、日本、ヨーロッパでそれぞれ計画が構想された。日本はすばる望遠鏡と同じく、独自に超大型望遠鏡をマウナケア山頂に設置する計画を進めたが、最終的にはアメリカのカリフォルニア大学連合を中心とした30 m望遠鏡（Thirty Meter Telescope: TMT）計画に参加することを2008年に決定した。アメリカではもう一つの巨大マゼラン望遠鏡（Giant Magellan Telescope: GMT）計画があるが、こちらはチリへ設置が決まっており、一方TMTへの日本参加は、すばる望遠鏡のあるマウナケア山に設置することを戦略的条件としたものであった。

TMTは、カナダ天文学大学連合、カリフォルニア工科大学、カリフォルニア大学、中国科学院国家天文台、インド科学技術省、および国立天文台（日本）が参加する国際プロジェクトであり、2014年に設立されたTMT国際天文台が建設・運用にあたる。すばる望遠鏡で培われた経験と技術をもとに、日本はTMTプロジェクトで中心的な役割を担っている。日本の担当部分は、望遠鏡本体と制御系の製作、モザイク主鏡鏡材のすべて（予備を含めて574枚）の供給、主鏡鏡材175枚の研磨、観測装置の一部の開発・製作などである（図12）。

TMT建設の起工式は2014年10月に行われたが、民族運動の建設反対派から、ハワイ州土地天然資源省が承認した保護地区利用許可の承認手続が妥当でないとの申し立てがあり、ハワイ州最高裁は2015年12月に手続のやり直しを命じた。利用許可の再確認に当初想定を超える年月を要することになったが、2019年6月に最終的な現地工事開始の許可が得られた。しかし、背景にはNative Hawaiianに関する根深い歴史問題があるため、その後も工事再開を目指して州政府や反対派との粘り強い協議調整が続けられている。

一方で、東京大学宇宙線研究所が中心となって、国立天文台、高エネルギー加速器研究機構などと共同でレーザー干渉計型の大型低温重力波望



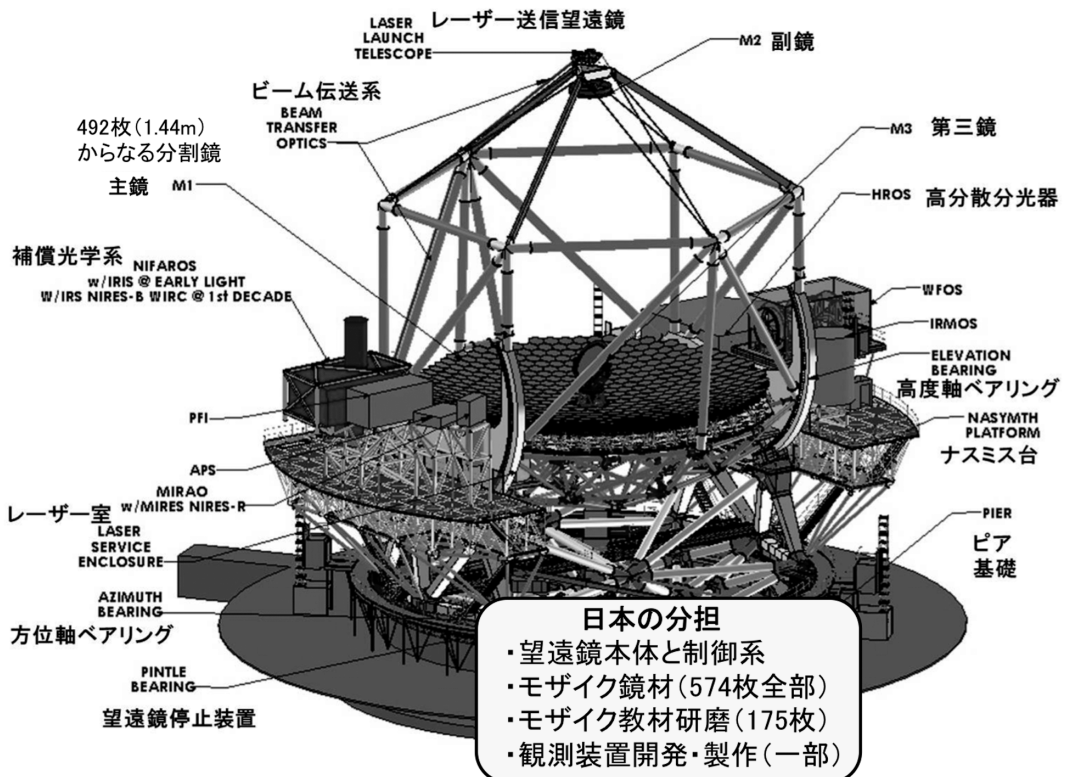
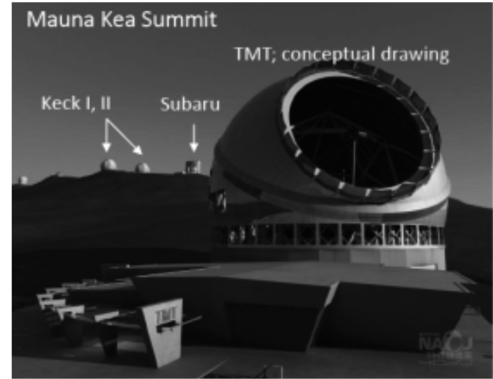
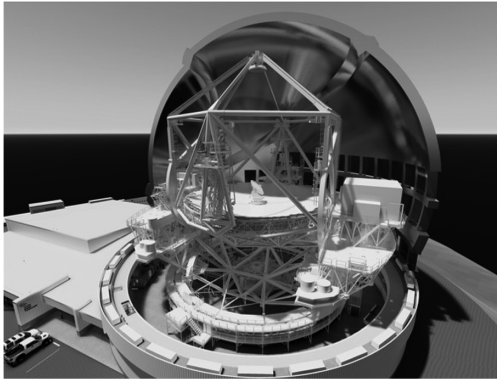


図12 TMTの完成予想図(上)と構造解説図(下)。上左図の出典はTMT国際天文台 <https://www.tmt.org/image/67>。それ以外は国立天文台の資料に説明を補足。

遠鏡を建設するプロジェクトが2010年に始まった。KAGRAと名付けられた重力波望遠鏡は岐阜県神岡の山中に設置されている。旧神岡鉱山の地下に直交する二本のトンネルを掘り、そこに長さ3 kmの真空パイプを通して、その中に設置する

冷却したサファイア鏡によりレーザー干渉計を構成する。地面振動の小さい安定した地下に設置することと、主要な4枚の鏡を極低温にして雑音を抑えて感度を上げることが、外国の装置にない特長である(図13)。



図13 KAGRAの概略図(上)と防振装置に取り付け作業中のサファイア鏡(下)(出典上:東京大学宇宙線研究所,下:東京大学[https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/z0508\\_00110.html](https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/z0508_00110.html)tokyo.ac.jp/focus/ja/features/z0508\_00110.html).

建設開始時点ではKAGRAは重力波検出の一番乗りを目指していたが、それは実現できなかった。2015年9月14日に世界初の重力波検出に成功したのは、2002年に観測を開始して以来長年性能向上のための開発を進めてきたアメリカの重力波望遠鏡LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) であった。KAGRAは2019年10月に完成し感度向上作業や試験運転を行い、2020年2月に初期観測を開始した。初期観測の後、さらなる感度向上のための装置改修を経て本格観測へと向かう。

KAGRAの本格観測が始まれば、アメリカの

論文数(2000-2012)

インパクトファクター(2000-2011)

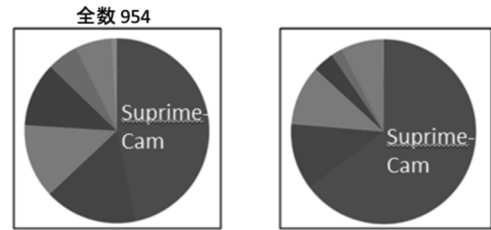


図14 運用からほぼ10年間における第一世代の7つの観測装置の成果(文献[73]のデータから筆者が作成)。

LIGO(2台)、ヨーロッパのVIRGOとともに重力波天文台のネットワークを組んで、重力波源の天球上の位置を正確に決めることができようになり、重力波天文学の大きな発展が期待できる。

## 6. 世界をリードするカメラ: ハイパーシュプリームカム(HSC)とトモエゴゼン

すばる望遠鏡は8m級望遠鏡の中で唯一主焦点を有していることはすでに述べた。主焦点は、広い視野が確保でき、主鏡で1回反射されただけで光が集まる光損失最少の焦点のため、微光天体の探査に必須の焦点である。主焦点広視野撮像の実現には、カメラだけでなく、主焦点広視野補正光学系、および補正光学系とカメラを精密に支えて回転させる装置回転機構など技術的な開発課題が多く、一時はすばる計画の中で主焦点の実現が危ぶまれた時期もあった。しかし、関係者の絶大な努力によって、8m級望遠鏡で唯一の主焦点が実現したのである。

第一期観測装置として主焦点に置かれたのは筆者がPIを勤めたシュプリームカム(Suprime-Cam)である[71]。視野は $27' \times 34'$ で、そこを10枚の $2k \times 4k$ のCCD素子でカバーした。Suprime-Camは8mクラス望遠鏡の大集光力と広視野を生かすユニークな装置として、さまざまな分野で大きな成果を挙げた[72](図14)。

Suprime-Camの大きな成功を受けて、さらに

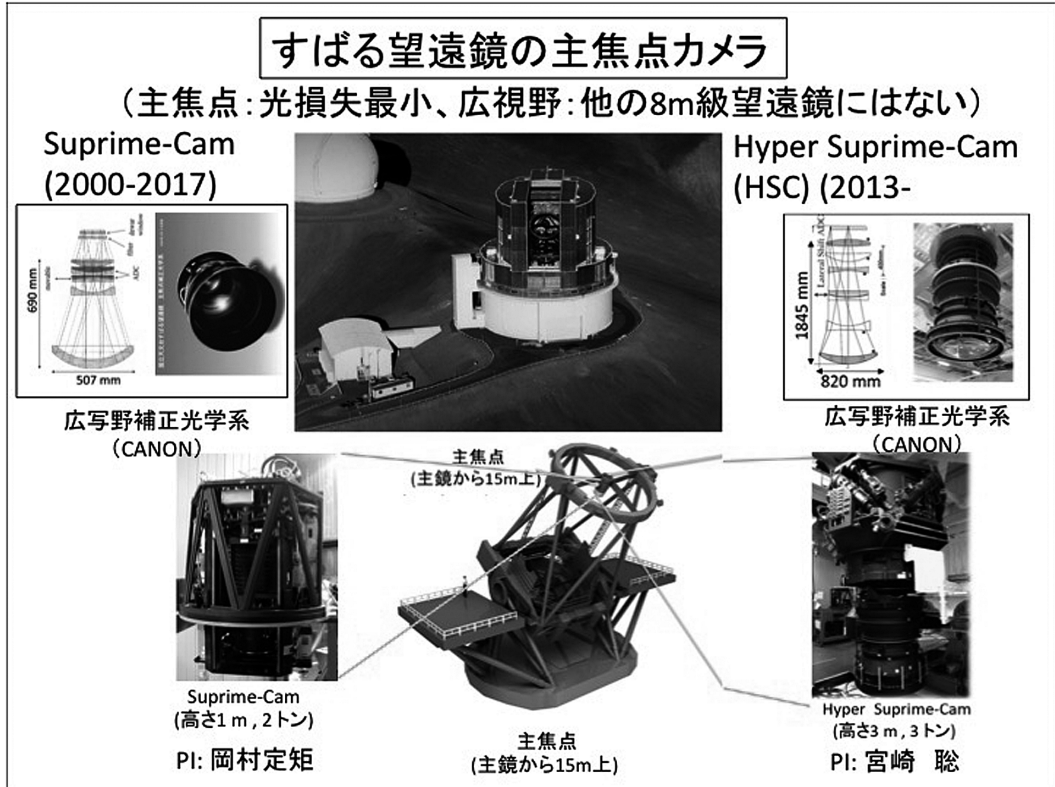


図15 すばる望遠鏡の主焦点とSuprime-CamとHyper Suprime-Cam (HSC) (筆者製作。個々の図の出典は国立天文台)。

高性能のHyper Suprime-Cam (HSC) の開発が宮崎聡氏をPIとして行われ、2013年から観測が始まった(図15)。HSCは $2\text{k} \times 4\text{k}$ のCCD素子104枚でSuprime-Camのほぼ10倍の視野をカバーする(図16)。主焦点補正光学系も新たに開発され、巨大なカメラを搭載するためにトップリング(筒頂環)も新たなものに交換された。

すばる戦略プロポーザル(Subaru Strategic Program: SSP)で5-6年間に300夜の観測時間を獲得した「HSC SSPサーベイ」が現在進行中である。このサーベイは、日本の関連研究者のほぼすべてと台湾、およびプリンストン大学の研究者による国際プロジェクトである。サーベイで得られたデータは取得後一定期間経過したものから順次全世界に公開される。2017年2月にはその第一

次公開、2019年5月には第二次公開が行われた。このサーベイのデータは今後しばらくの間、かつてのパロマー天文台スカイサーベイ[74]が生み出したデータのような世界基準として利用されることになるだろう。HSC SSPサーベイの解説と初期成果は、日本天文学会欧文研究報告の2018年1月の特別号にまとめられている[75]。HSCサーベイのデータを誰でも簡単に見ることができる画像ビューワーhscMAPも整備されている[76, 77]。また2019年末には、HSCサーベイのデータに基づいた市民天文学プロジェクト「GALAXY CRUISE (ギャラクシー クルーズ)」が船出した[77]。Suprime-Camは2017年5月30日に最終ランを終えて、17年間の活躍に幕を下ろした。

2019年4月、東京大学木曾観測所の105 cm

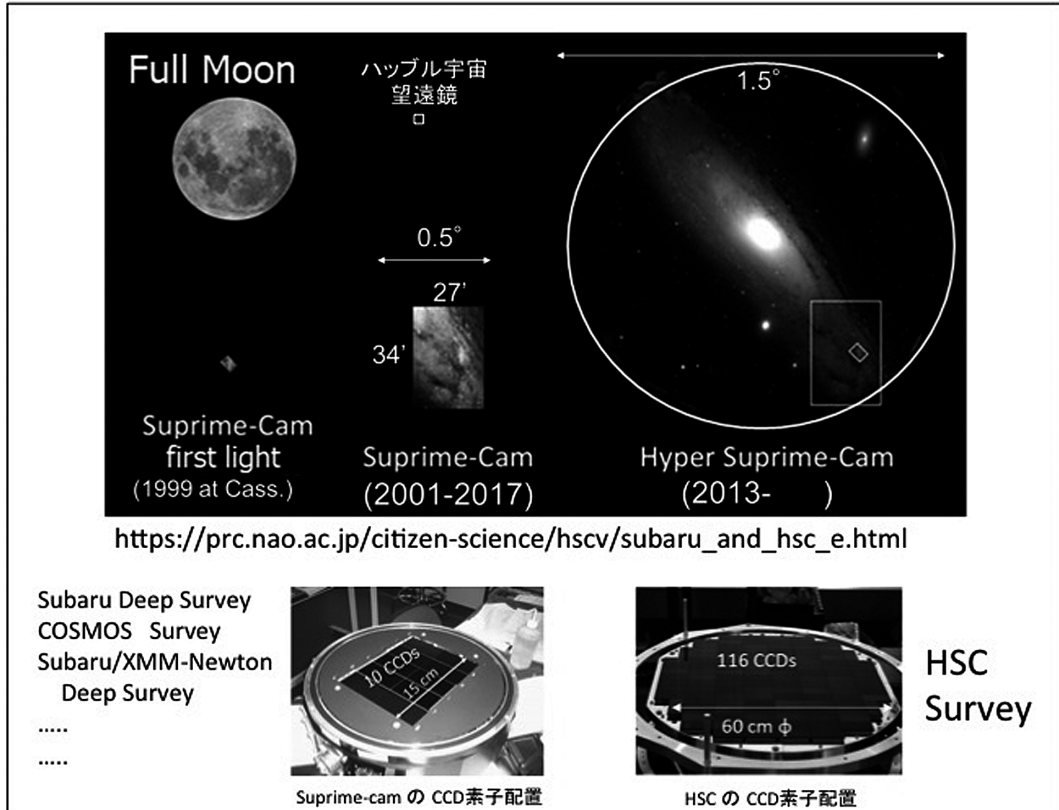


図16 Suprime-CamとHyper Suprime-Cam (HSC) の視野比較(上)とCCD配列(下)。HSCでは116枚のうちの104枚を撮像に用いている(筆者製作。個々の図の出典は国立天文台)。

シュミット望遠鏡用の革新的なカメラが完成した(図17)。トモエゴゼンと名付けられたこのカメラは、木曾シュミットの直径9度という広い視野を84個のCMOSセンサー(キヤノン製)で覆い尽くす。ただし、センサーの間には隙間があるので、一度にカバーできる視野は20平方度である。隙間なく視野全部をカバーするには4回の露光が必要である。このカメラの最大の特長は、高速のCMOSセンサーを用いているため、露光時間を0.5秒まで短くする、すなわち空の動画を撮れる所にある。これだけ高速に広視野をカバーできる天文学用のカメラは世界に類を見ない。

パロマーシュミット望遠鏡では、焦点面に大型のモザイクCCDカメラを付けたトランジェント天体(突発天体)の探査が2009年から始まり、

突発天体の発見と研究に大きな進展をもたらした。その最新版であるツビッキートラジェントファシリティー(ZTF) [79] は2017年から観測を始めた。そのカメラは、トモエゴゼンの2倍以上の視野42平方度をCCDでカバーするが、CCDの読み出しに10秒かかるので、連続撮影画像でも10秒以下の時間分解能は得られない。

1秒以下という時間分解能も可能にするトモエゴゼンの広視野撮像からどのような天文学が拓けてくるか興味は尽きない。実際、試験観測を始めたとたんの2019年3月には、直径8mの小惑星が地球をかすめて通り過ぎたことを示すデータが得られている。



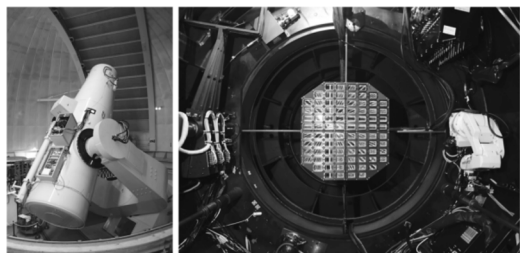


図17 木曾シュミット望遠鏡（左）とその焦点に取り付けられたトモエゴゼン（右）（画像提供：東京大学木曾観測所）。

## 7. まとめと今後の展望

地上観測分野を中心に、日本の天文学の100年を概観した。筆者の独断であえて一言でまとめれば、「戦中戦後は世界に遅れを取ったが、1970年頃から頑張った。そして現在は世界に伍しているばかりか、一部の分野では世界をリードしている」。IAUの中でも、今や日本は個人会員数で世界第3位の大国である。

今後天文学分野では、観測装置の大型化にともない建設・運営予算の巨大化が進むことは必至である。その一方で、先進国が基礎科学に投資できる予算が大幅に増えることは望めず、すでに見られる望遠鏡、装置などの建設や運用における国際協力は今後必須となって行くだらう。そのような流れに向けて日本の天文学コミュニティが考慮すべきことは、世界の中での存在感をいかに確保するか、すべての分野に投資するか得意分野への集中か、現在の先端に行く大プロジェクトと次の新しい分野を開く萌芽的研究のバランスをどう取るか、社会の理解を得るために天文学と社会のコミュニケーションをいかに促進するか、等々であろう。IAUの戦略目標の重要な要素である「社会との関わり」で言えば、日本天文学会の「インターネット天文学辞典」[80]は先駆的な試みとして注目される。

一方、個人会員数は第3位であるにもかかわらず、IAUすなわち世界の天文の中での日本の存在感は憂慮すべき事態にある。第2回で掲載した図17（113巻4月号238ページ）には、IAUの重要なポストについての日本人とその在任期間も示してある。何れも故人となられたが、古在由秀、海部宣男両氏が日本人として会長を務められ、海部氏はここ10年あまりのIAUの大改革の屋台骨を支えられた。また、渡部潤一氏が2018年に日本人で4人目となる副会長に就任された。しかし、IAU活動の中心である部会や委員会の中核にいる日本人が近年少なくなり、IAU内での日本のプレゼンスは低下している。2018-2021の3年間を見ると、執行委員会付きの特別指名委員会と決議委員会に日本人各1名がいるが、9つの部会の委員長と副委員長はゼロ、35の委員会で委員長が僅か1名、副委員長はゼロである。部会と委員会では通常、組織委員の中から副委員長を選び、副委員長が次の期の委員長になることが多いので、2021年からの3年間は、部会長と委員長ともにゼロになる可能性が高い。また1997年のIAU京都総会以降、1998年から2019年12月までの20年間に165のIAUシンポジウムが開催されたが、そのうち日本で開催されたのは僅か4つという有様である<sup>\*11</sup>。

この状況はIAUに関する日本の若手天文学者の関心が低いことが原因ではないかと想像する。IAUの活動を支えるために日本学術会議を通じて支払われている分担金は、仮に日本人の会員1人あたりに換算すると約1万円である<sup>\*12</sup>。執行委員会はもとより、自らの研究に関連する部会や委員会の活動を通してIAUに貢献することが日本の天文学の発展に通じることは、本シリーズで示したデータからも理解できることと思う。

大成功に終わったIAU京都総会（図18）に続いて、再びIAU総会を日本で開催することを提

<sup>\*11</sup> 2020年3月に広島で開催予定であったIAUシンポジウム360は、新型コロナウイルスの感染拡大のため延期された。

<sup>\*12</sup> 分担金は会員数に比例するわけではない。



図18 1997年のIAU京都総会の開会式の様子を報じるIAU新聞。

案したい。可能な最速のプランは、2024年の第32回のケープタウン総会で、第34回総会（2030年）の開催地として日本が発表されることである。そのためには十分な余裕を持って招聘計画を準備し、2024年の総会前の執行委員会で競争を勝ち抜いて選ばれる必要がある。日本学術会議のIAU分科会でもその方向で合意がなされている。若い人々の奮起を期待したい。

本稿作成にあたって、記述内容に間違いなどないか、家正則、石黒正人、梶田隆章、宮崎聡、土居守の諸氏にそれぞれ該当箇所の確認をお願いした。記して謝意を表する。

参考文献

[64] 小平桂一, 2006, 宇宙の果てまで(ハヤカワ文庫); すばるプロジェクトについては他にも関係者による多数の著書あり。

[65] 小平桂一, 1988, 天文月報, 81, 12

[66] 「JNLT特集」, 1990, 天文月報, 83, 92

[67] 家正則ほか, 1993, 応用物理, 62, 540

[68] <https://www.subarutelescope.org/jp/about/features/> (2020.4.7)

[69] 山根一眞, 2017, 『アルマ』の創造者たち (日経BP)

[70] 松下聡樹ほか, 2019, 天文月報, 112, 444

[71] 岡村定矩, 2017, 天文月報, 110, 768

[72] 「Suprime-Cam特集」, 天文月報, 110, 766-111, 161

[73] Arimoto, N., 2015, Subaru Telescope, Director's Report 2009-2013, presented at the External Review of National Astronomical Observatory of Japan, 24-26 Feb, 2015

[74] <http://astro-dic.jp/palomar-observatory-sky-survey/> (2020.2.16)

[75] SPECIAL ISSUE: SUBARU HYPER SUPRIME-CAM SURVEY, 2018, PASJ, 70, SP1

[76] <https://prc.nao.ac.jp/citizen-science/hscv/hscviewer.html> (2020.2.16)

[77] <http://hscmap.mtk.nao.ac.jp/hscMap2/> (2020.2.16)

[78] <https://galaxycruise.mtk.nao.ac.jp/> (2020.3.13)

[79] Bellm, E. C., et al., 2019, PASP, 131, 018002

[80] 岡村定矩ほか, 2018, 天文月報, 111, 601