

日本の望遠鏡プロジェクトの変遷 特に主光学系表面の扱い 6 m to 30 m, progress of Japanese telescopes and their primary optics surface

林 左絵子 (国立天文台)

Saeko S. Hayashi (National Astronomical Observatory of Japan)

概要

過去およそ 40 年の間、日本の天体研究用望遠鏡作りに大転換が続いた。そもそも日本の技術で作るということ自体が大きな変化であり、現在では世界的に大きなプロジェクトをリードするに至った。その実例を紹介しつつ、特に主光学系（電波望遠鏡のメインレフレクター、可視赤外線望遠鏡の主鏡）の表面形状について、製造工程や調整方法に触れる。また、TMT の望遠鏡光学系（主鏡、副鏡、第 3 鏡）に用いるコーティングの環境試験が進行しており、1 年経過の様子を紹介する。

Abstract

This report looks back the technical advancement in the telescopes in Japan, mostly in these forty years when the drastic change occurred. The most significant is the growth of the domestic institutions and companies which are now leading variety of international projects. Good examples can be seen in the surface of the electromagnetic wave collectors including the following two: the surface adjustment of the main reflectors of radio telescopes, and the coating for the large mirrors for the optical-infrared observations. In addition, this report includes preliminary measurement of the one-year exposure test of the optical coating under consideration for TMT optics.

1. 日本の天文観測用望遠鏡は内製化の道を進って来た

日本における、研究用天文観測望遠鏡をあえて一言で言うなら、内製化が進んできた。

最初は、20 世紀初頭の（第一次世界大戦の戦勝国としての戦利品であった）カールツァイスの屈折望遠鏡（@国立天文台 三鷹キャンパス）、1960 年代に岡山天体物理観測所に導入された Grubb Parsons の 1.88m 望遠鏡に代表されるような外国製品を買って来て据えつけるというものであった。

次第に国内メーカーの技術力が向上するにつれ、研究機関や大学がメーカーと共同で、あるいはメーカーに依頼して望遠鏡や関連装置の製作ないし製造ができるようになった。同じ岡山の観測所でも 91cm 望遠鏡は国産品である。また研究者、技術者、学生と複数のメーカーの社員が文字通り肩を並べて共同作業することにより作られた 6 m の電波望遠鏡もこの時期の特徴的なものである。

このようにして、研究側にもメーカー側にも技術が蓄積するようになってきた。試作、製作ばかりでなく、建設期のあとの望遠鏡の運用についても、所有・運用する側に技術や関連する経験が蓄積してきた。メーカーの方は世界展開をするほどに成長してきた。望遠鏡の継続的な長期運用のためには、それらを実際に担うスタッフが安心して勤務できる体制作りが出発点であり土台となる。

表 自分が直接見た望遠鏡

設置場所と呼び方例	開口 (cm)	余計なコメント
堂平 サブロク?	91	
岡山 サブロク	91	光電管で測光観測、ドーム内で電熱座布団に座り眼視マニュアルガイド
岡山 ナナヨン	188	1990 年代初め PtSi カメラ (宇宙研 上野宗孝さん作) で赤外観測した
木曽 シュミット		乾板の時代
三鷹 ???	(30)	光電管を使った測光観測
赤外シミュレータ	130	赤外用、すばる望遠鏡の様々なテストに使われた

手を出した望遠鏡 口径の単位にご注意

当時の呼び方	開口 (m)	余計なコメント
三鷹 ミリ波望遠鏡	6	CO J=1-0 輝線観測用 IF 周り
野辺山のヨンゴー	45	レーザー測距、のちに電波ホログラフィ測定に基づく鏡面パネル調整による効率向上
James Clerk Maxwell Telescope (JCMT)	15	電波ホログラフィ測定に基づく鏡面パネル調整による効率向上
United Kingdom InfraRed Telescope (UKIRT)	3.8	近赤外線アレイカメラ第 1 世代目撃 初期観測
Japan National Large Telescope (JNLT) サイトサーベイカメラ		@UH88 インチ望遠鏡建物
JNLT -> すばる望遠鏡	8.3	一太郎と Lotus 1-2-3 を使った概算要求、主鏡製造工程、クリーニング、コーティング
TMT	30	主鏡鏡材、コーティング (deposition, removal)

2. 望遠鏡光学系の集光面 初期性能の達成から発展し、観測可能な波長域を広げることができる

ヨンゴー (野辺山宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡) の場合、センチ波観測からセンチ波に近いミリ波、そしてついに本当のミリ波へ。代表的な輝線で表現すると 1.4 GHz (HI) -> 49 GHz (CS) -> 115 GHz (CO J=1-0)。もちろん受信機も異なるが、望遠鏡側も性能向上が必要だった。アンテナは約 800 枚の鏡面パネルの段差・傾き等を追いつめることで、効率を上げられるように作られていた。

課題は形状の測定である。当初はコーナーキューブをアンテナ面に林立させ、センターハブに置いたレーザー測距儀で距離とわずかな傾きのずれを測定していた。1980 年代半ばから、電波ホログラフィ測定が始まった。田中春夫さん、石黒正人さん、海部宣男さんといった錚々たるリーダーのもと、2 人の「宮」さん (宮沢敬輔さん、宮地竹史さん) ら技術系職員、東洋大学工学部の院生、三菱電機通信機製作所、そして解析ソフトで関連メーカーの方が日夜働いていた。キャンパス内に宿舎があり、3 食ばっちり所内食堂でいただける (まだ成長途中の学生・院生にはまさに生命線) おかげで、24 時間の活動が可能なのである。その後も何年にもわたり、性能向上が続いていた。

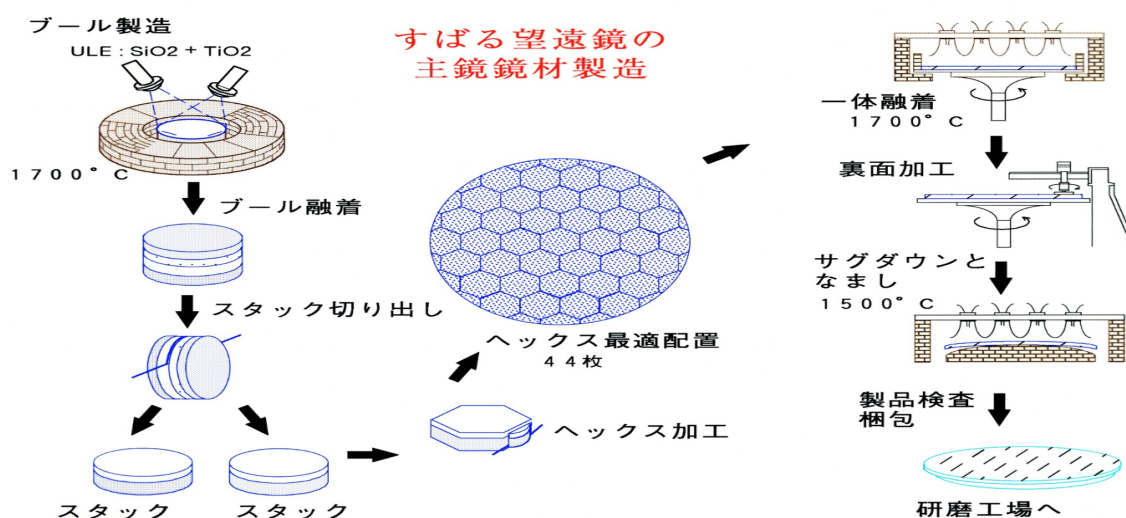
1987年に動き始めた15mサブミリ波望遠鏡 James Clerk Maxwell Telescope (JCMT)でも同様のことが起きた。ミリ波で短い方から1ミリ以下のサブミリ波へ、0.1 THz から 1THz へと実際に観測できる波長が広がっていったのである。輝線で表現すると 230 GHz (CO J=2-1) -> 345 GHz (CO J=3-2) -> 490 GHz (CI) -> 810 GHz (CI etc.)となる。

1991年から製造・建設が始まった Japan National Large Telescope (JNLT, 1992年愛称公募によりすばる望遠鏡となる)では1980年代から1990年代にかけての赤外アレイ検出器の大発展に伴い、可視光から赤外(近赤外、中間赤外)への性能拡大が求められた。観測装置もそれぞれに工夫され、望遠鏡光学系ではアルミニウムを基本に、赤外観測時に使う副鏡と第3鏡に銀のコーティングを施すようにした。銀はガラスへの付着力が強くないため、ガラスとの間にクロム層を入れる一手間がかかるが、実験を繰り返すことで実用に使えるようにすることができた。この銀コーティングは開発実験センター(ATCの前身)の方々、ハワイ観測所現地の職員、三菱電機の担当者の多大の努力が実ったものである。

続いて次世代超大型光学赤外線望遠鏡 Thirty Meter Telescope (TMT)。8-10m級望遠鏡の次については日本も米国も単独では実現不可能という規模になり、日米加(加奈陀)印(印度)の国際協力で分割鏡方式の主鏡、望遠鏡架台、観測装置作り、建物設計などが進んでいる。光学系コーティングでは、可視赤外プラス紫外域の性能が、望遠鏡サイト条件を最大限に活かし、ライバルに対しての強みとする上できわめて重要である。このため、紫外増反射膜を施したコーティングに関わる様々のテストを進めている。コーティングのサンプルを、TMTと似た望遠鏡サイトで環境暴露し、性能劣化を評価することもその一環である。

3. すばる望遠鏡の光学系の作り方

すばる望遠鏡の主鏡は一枚のものであって、材料としては熱膨張率が極めて小さい ULE ガラスを使った。コーニング社のニューヨーク州カントン工場での硝材製造において、実は六角形を基本とし、並べて加熱し餅のようにふくらませ、隣接する六角形とつながるようにして単一鏡の基板を作った。研磨はペンシルバニア州ピッツバーグ近郊にあったコントラベス社(当時の名称)のワンパン工場で行われた。



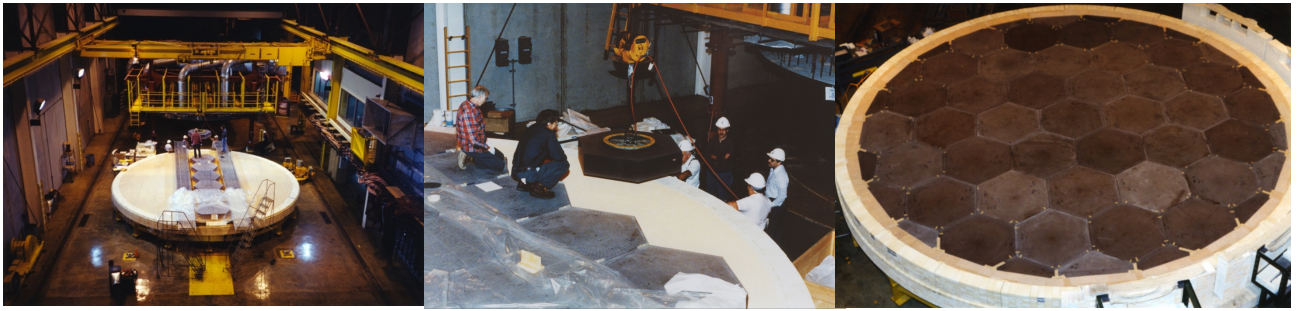


写真 6 角形を並べて熔かし合わせ、1 枚物とする (コーニング社工場にて 宮下暁彦さん撮影)

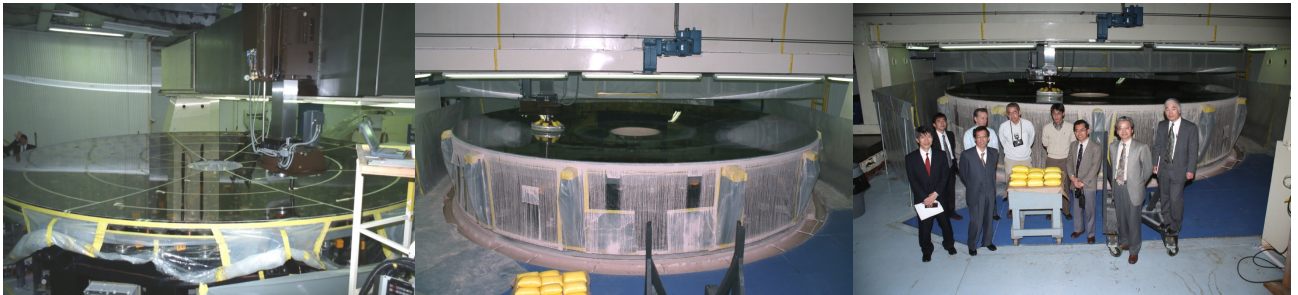


写真 研磨の様子。畳約 36 畳の前に検収チーム。(コントラベス社工場にて 宮下暁彦さん撮影)

光学系（に限らないのではあるが）について随所で軽量化が必要であったが、特にチョッピング、後にはティップティルト駆動を行うようになった赤外副鏡についてはその要求が一段と厳しい。軽量化と強靱さの兼ね合いのため、鏡材は中抜きではなく薄い表面と裏面の間を薄板（というか柱に近い感じ）でつないで作っている。部品接着の重要性は言うまでもない。

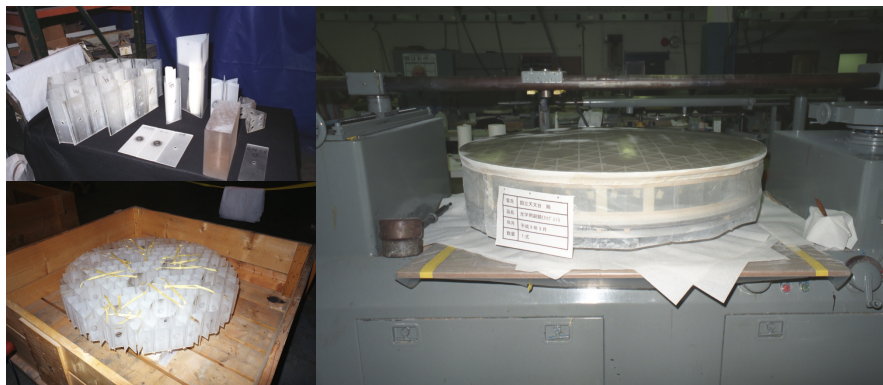


写真 赤外副鏡 フリットボンディングで支柱を貼り合わせ 軽くて丈夫。(宮下暁彦さん撮影)

4. TMT 光学系 異なる材料の接合面が大きな課題

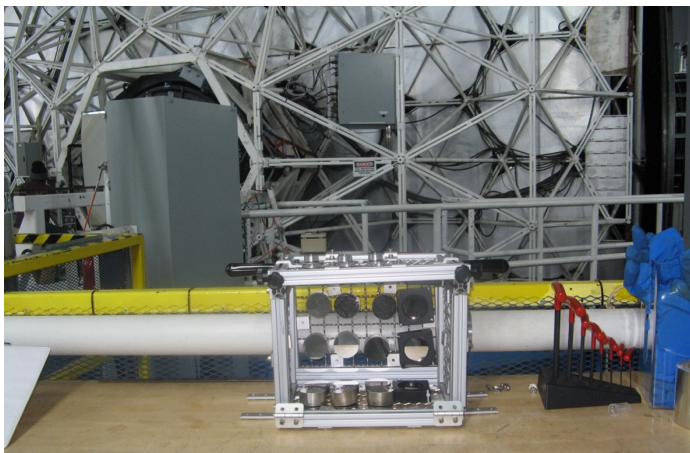
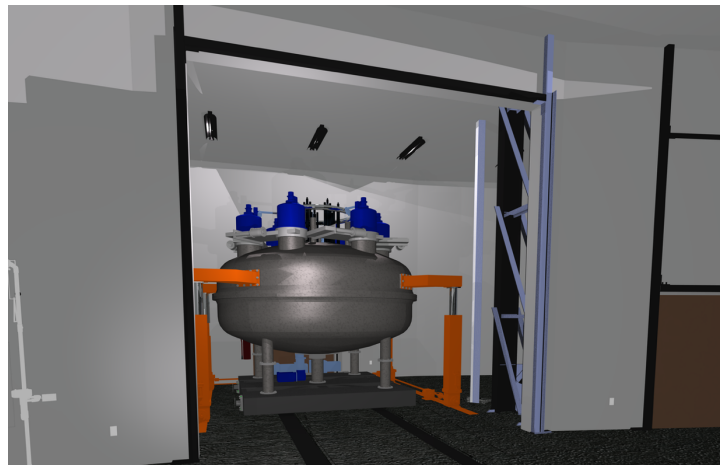
TMT プロジェクトでは、随所で物作りが進んでおり、主鏡も分割鏡の製造が進行している。日本では原料粉を熔かし合わせて（水に溶かすのではなく熱で熔解するため「火」篇）硝材をオハラ社で作製、岡本オプティクス社で球面研削を行ったものを日本および海外の工場に出荷しており、全体数の 6 割に達している。その後工程となる研磨工程について、日本はすでにキャノン社で 30 枚超を仕上げ、米国ではコヒーレント社で月産 6 枚程度で推移、インドでは加工機の立ち上げが行われている。



主鏡分割鏡 研磨済み「ラウンデル」 直径
1.5 メートル、厚さ 45 ミリの円形、この次の
工程で 6 角形にする。

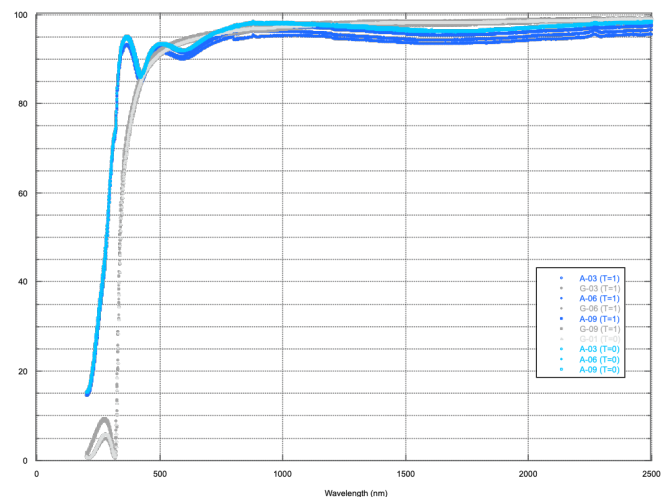
©キャノンおよび国立天文台

望遠鏡光学系のコーティングは、望遠鏡
現地で行うが、そのコーティング装置の設
計も始まっている。TMT では多数の主鏡分
割鏡を通年でコーティングしていく小型の
装置と、それより大きな副鏡・第 3 鏡に対
応する装置を作る。左のイラストは概念設
計時のもの。©TMT 国際天文台



コーティング自体の基礎実験も進めている。
これは、コーティング自体の環境試験（左の写
真）と、再コーティング時の剥離方法が主なも
のである。剥離は、繰り返し時にガラス面をい
ためず、少数・少量かつ環境負荷の少ない薬品
の組み合わせの 2 つが大きな課題である。メー
カーの協力を得て、現実的な方法について次第
に見通しが立ってきた。

右のグラフは、環境試験開始後約 1 年のコーティ
ングサンプルの分光反射特性。横軸が波長で 0-2500
nm、縦軸が反射率で 0-100 %。灰色系は TMT のファ
ーストライト時に用いるコーティング、青系（短波長
で反射率が高いグループ、水色が暴露開始時、青が約 1
年後）が紫外増反射膜のテストサンプルである。ここ
で注目しているのは短波長側が可視域と異なるかとい
うことだが、顕著な違いは見られない。ほぼ同じぐ
らい劣化するということである。



5. 余計なコメント

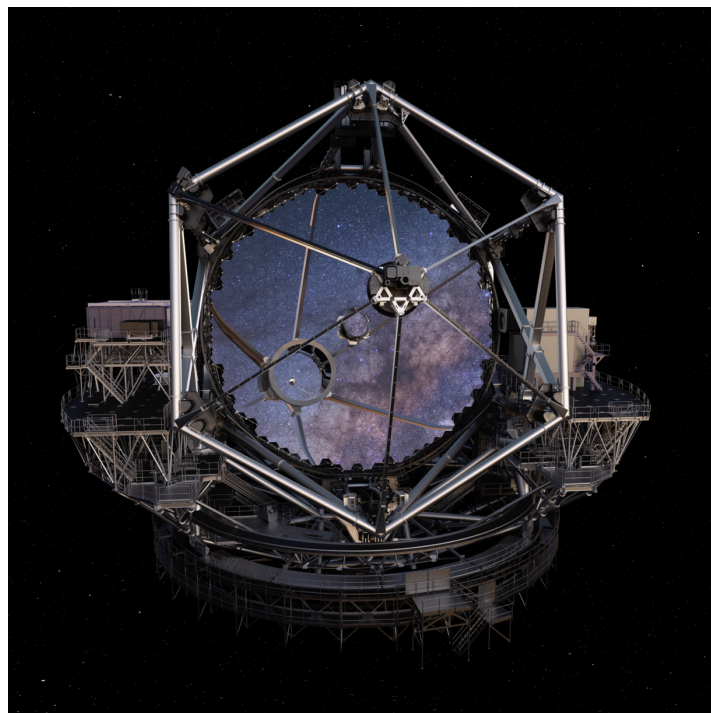
日本における天文工学はこの 40 年間で大きく変化した。ここまで内製化をキーワードに記述してきたが、実は同時に国際化・構成員の多様化、つまりいろいろな面で異なる相手との協力が進んできた。野辺山宇宙電波観測所の立ち上げ期に顕著であったように、異なる経験・専門・考え方を持つ人々が共通の目標に向かって力を合わせることで、進歩の原動力なのではなかろうか。

それまでできなかったこと、できないと言われていたことを実現していくためには、内向きではなく外向きの思考かつ志向が要ることを目の当たりにしてきた。TMT ファーストライトを職員として見届けることはかなわないが、外から見守りたいものである。

技術シンポは、大学・研究機関・メーカーなどで、天文に関わる技術をリードしてきている皆さんがオーガナイズして開催されてきた。なんと今回で 43 回目。このシンポの一層の発展と、ご関係の皆様のご健勝を祈念いたします。

参考：自分が技術シンポで行った発表リスト。技術シンポに参加し、皆様からのアドバイスやご意見をいただくことで育てていただきました。

- ★ 1986 電波ホログラフィ法による鏡面測定
- ★ 1994 すばる望遠鏡の紹介
- ★ 2017 光学赤外線望遠鏡光学系材料について
- ★ 2019 TMT 主鏡鏡材製作の進捗と国際共同
- ★ 2020 ディアスポラ時代の検収をどうやって確実にしていくか
- ★ 2021 大型鏡材の表面欠陥、紫外域でのコーティング性能向上
- ★ 2022 望遠鏡光学系コーティング開発の協力例



宇宙を映す望遠鏡の実現は人類の協力を反映する ©TMT 国際天文台