

# TMT 望遠鏡の主鏡分割鏡

山下 卓也

〈国立天文台TMT推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: takuya.yamashita@nao.ac.jp

TMT望遠鏡の主鏡は対角が約1.44 mの六角形の鏡を492枚組み合わせて口径30 mを実現するセグメント鏡方式である。この方式は超大型望遠鏡の主鏡に最適の方式であるが、鏡の“ふち”まで正確に研磨する必要があるなど特殊な仕様を満足する必要がある。TMTでは、曲げ研磨後に六角形切断し、それを支持機構搭載した後にイオンビーム加工による最終仕上げを施してセグメント鏡を完成させる計画である。主鏡関連の貢献のなかで、日本は、主鏡の“鏡材”のすべてと“研削・研磨・六角形切断・支持機構搭載”の約30%を担当する。これまでに、主鏡鏡材の総数574枚のうちの60枚の量産を行い、そのうち13枚については非球面研削までを終えた。

## 1. はじめに：すばる望遠鏡との比較

TMT望遠鏡は、日本・アメリカ・カナダ・中国・インドの国際共同プロジェクトであるが、日本にとってはすばる望遠鏡の次世代望遠鏡としての位置づけとなる。そこで、まず、TMTの光学系をすばると比較してみよう。

TMTの最大の特徴は、何と言っても、直径30 mという大きな主鏡口径である。この大きな口径を実現するために、主鏡はすばる望遠鏡のような1枚鏡ではなく対角が約1.44 mの六角形の鏡を492枚合わせて用いる分割鏡（セグメント鏡）方式を採用している。すばる望遠鏡の主鏡は1枚の鏡で有効口径8.2 mと建設当時世界最大を誇っていたが、これを大幅に超える直径の鏡を製作することは現実的ではない。そこで、複数の鏡を合わせて大きな主鏡として用いるのである。主鏡は全体としてほぼ放物面をしているので、セグメント鏡はその位置（主に主鏡中心からの距離）により微妙に異なる軸外しの非球面形状をしている。また、セグメント鏡方式の採用によって主鏡の厚さを薄くすることが可能となり、主鏡口径に比しては非

常に軽い望遠鏡となっている。すばる望遠鏡は8.2 mの口径に対して厚さ20 cmとすでに非常に薄いですが、TMTは、30 mも口径があるのに厚さ4.5 cmとさらに薄い。これは、もちろん個々のセグメント鏡の対角長が約1.44 mと小さいことにより可能となっている。このセグメント鏡方式は米国のKeck望遠鏡がいち早く採用して実績を積んでいる。そのKeck望遠鏡を建設・運用しているカリフォルニア工科大学・カリフォルニア大学がTMT計画の主要メンバーとして参加しているので、TMTではKeck望遠鏡技術の継承・発展が可能となっている。

TMTのすばる望遠鏡とのもう一つの違いは主鏡の口径比（口径と焦点距離の比）である。すばる望遠鏡の口径比は約F/2と、主鏡の直径に対して焦点距離は約2倍であったが、TMT望遠鏡は約F/1と焦点距離が口径とほぼ同じとなっている。これにより、TMTの口径はすばる望遠鏡の約4倍になっているが、鏡筒の長さは2倍程度に抑えることができ、望遠鏡構造やドームの軽量化とコストの軽減に寄与している。

図1は主鏡部分だけを取り出したCG図であ

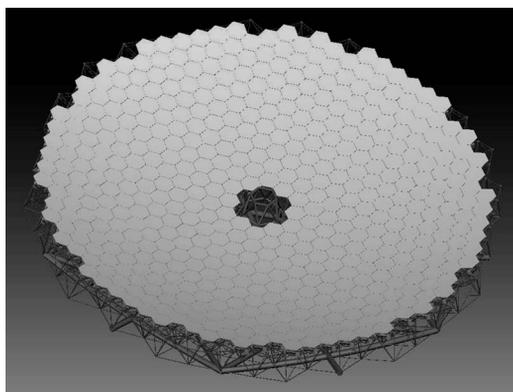


図1 主鏡セルに載った主鏡のCG図(提供TIO: TMT International Observatory).

る。TMTの光学系は最近の大型望遠鏡では標準的なリッチ-クレッチェンタイプである。表1に主な光学的仕様をまとめる。

## 2. セグメント鏡の特徴

セグメント鏡方式は、大型の主鏡を実現する手段として非常に有効であるが、その加工には特有の困難も伴う。その一つは、“ふち”の問題である。通常の研磨方式では、①研磨パッドを“ふち”で止めると“ふち”部分の研磨量を制御できない、あるいは、②研磨パッドを鏡材の外側に出してしまうと“あたり”が変化して研磨が計算どおりにいかない、からである。1枚鏡を用いる光学系は“ふち”の部分まで完全な形状を達成している必要はないので特に問題にはならない。“ふち”を光学的に使わなければ良いただけだからである。しかし、セグメント鏡方式の場合は、個々のセグメント鏡の“ふち”は主鏡全体にとっては“ふち”ではない。したがって、セグメント鏡の“ふち”まで(ほとんど)完全な表面形状を達成する必要がある。一般的に“ふち”まで完全に(近く)磨こうとすると、①研磨パッドの“ふち”からの飛び出しの影響をヤトイによって抑える方法と、②大きめの鏡材を研磨した後に必要サイズに切断する方法がある。TMTでは、Keck望遠鏡

表1 TMT望遠鏡光学系の主要パラメーター。

光学系	リッチ-クレッチェン
合成焦点距離	450 m
主鏡口径	30 m (多角形に外接する円の直径)
主鏡表面形状	双曲面
主鏡近軸曲率半径	60 m
主鏡円錐定数	-1.0009535
副鏡焦点距離	3.1138393 m
副鏡口径	3.0245 m
副鏡表面形状	双曲面
副鏡円錐定数	-1.31822813
主鏡副鏡間距離	27.09375 m
第三鏡口径	短径=2.4502 m, 長径=3.5079 m の楕円
第三鏡表面形状	平面
第三鏡駆動	2軸駆動
写野	直径15分角
写野の実スケール	直径1.9 m

での成功経験をもとに後者を選択している。厳密には、研磨後の切断により表面形状がわずかに変化するが、“ふち”の変形は非常にわずかで許容範囲にある。これに加えて、セグメント鏡全体のスケールでの形状変化が生じるが、これは、後述する研磨の後の最終仕上げ工程で修正する方針である。

また、1枚鏡を用いる光学系の場合は曲率半径の誤差に対しても寛容であるが、セグメント鏡はその集合体全体があたかも一体の鏡のように振る舞わないといけないので、セグメント鏡の曲率半径がお互いにほぼ完全に一致している必要がある。実際は、後述する望遠鏡搭載時に用いる専用の支持機構がセグメント鏡面をわずかに変形させる機能をもっており、その機能を曲率半径を完全に一致させるのにも用いる。したがって、研磨段階での曲率半径の一致は“完全”である必要はないが、支持機構で補正できる変形量は大きくはないので研磨時に良いレベルで一致させておく必要がある。TMTでは研磨時の鏡面計測に多数の距離センサーを並べた計測装置(2Dプロファイロメーターと呼んでいる)を主要な計測装置として用いるが、その較正には精度良く曲率半径を61.7 m

(研磨するセグメント鏡の非球面形状からの差が最も小さい球面の曲率半径で、主鏡中心の曲率半径60 mとは異なる)にコントロールした参照球面を用いる。米国では計測用干渉計と参照球面を水平方向に配置してその距離を正確に測定することにより達成している。日本では絶対曲率の測定能力の高いプローブ接触式の測定器で測定する。そして、これらの参照球面を直接比較することによって相互検証を行って曲率半径の較正をする予定である。また、TMTの場合は4カ国のパートナーが分担して研磨するので、各国間に差が出ないように残りの2カ国(中国・インド)の参照球面も含めて互いに較正しておく方針である。

四つのパートナーでは、研磨したセグメント鏡を六角形に切断し、専用の支持機構に接着搭載するところまでを行う。その後、これらの支持機構搭載済みセグメント鏡は米国に送られ、イオンビーム加工法により最終仕上げが行われる。前述した専用支持機構への搭載による変形に加えて、円盤状で行った研磨後の六角形への切断によっても、表面形状がわずかに変化する。これらの修正を行うのがイオンビーム加工である。真空中において高電圧で加速したイオンを中性化してからターゲットに照射して原子レベルで材料を除去するのがイオンビーム加工である。その原理上、ターゲットの“ふち”部分まで計算どおりに加工できるので仕上げ加工に最適の手段である。また、研磨パッドによる加工圧もないことも利点となり、専用の支持機構に搭載したままの状態での最終的な主鏡セグメントに必要な精度に表面形状を加工することができるのである。また、この段階では一ヶ所で加工するので、もし、四つのパートナーでの研磨加工の曲率半径がわずかに異なっても、修正可能である。

### 3. セグメント鏡の配置、支持、制御

図2は主鏡セグメントの配置を表している。492枚のセグメント鏡は六つのグループに分けら

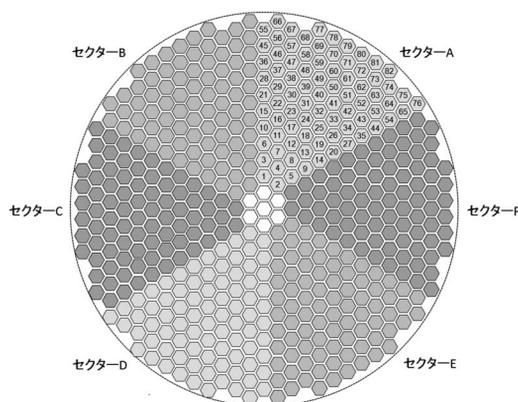


図2 主鏡セグメントの配置パターン。数字はセクターA内のセグメント鏡の表面形状のタイプを表す(TIO提供の図を加工)。

れ(図ではセクターA-Fと表記)、その六つのグループはお互いに完全に同じセグメントの構成となっている。つまり、各グループは $492/6=82$ 枚のセグメントからなっている。またこの82枚はすべて形状が異なり82種類の形状のセグメントが必要となる(いくつかのペア、例えば4と5、は主鏡中心からの距離は同じであるが、六角形への切り取り形状が異なる)。また、同時に使用するセグメント鏡は492枚であるが、製作するのは $82 \times 7 = 574$ 枚であり、残りの1セット82枚は蒸着交換用である。セグメント鏡の場合、すべてのセグメント鏡全体を一括して再蒸着するのは現実的ではないので、普段から順次取り外して再蒸着することになる。その再蒸着の間に主鏡に抜けがないように1セットを余分に準備して、再蒸着済みのセグメント鏡を汚れたものと交換するのである。

図3は主鏡セグメントの一部を取り出したCGである。セグメント鏡は支持機構に搭載され、その支持機構は軸方向の位置調整をするアクチュエーターを介して主鏡セルに取り付けられる。

前述したように、TMTセグメント鏡の厚さは4.5 cmと非常に薄いため、精度良く鏡を支持する必要がある。すばる望遠鏡では主鏡が直接アク

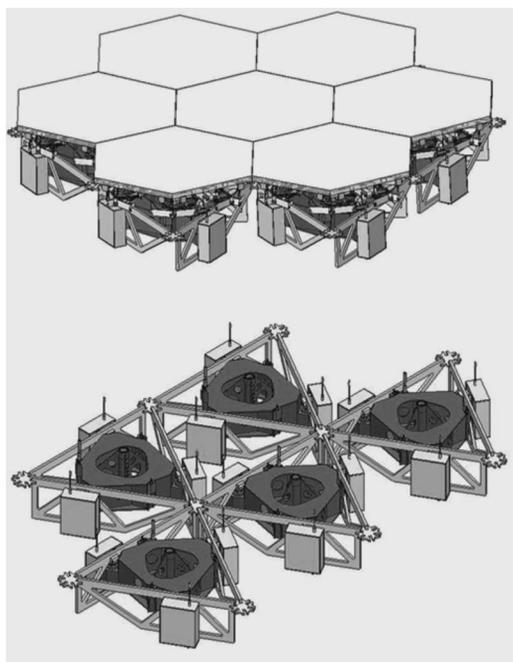


図3 主鏡セルに搭載された主鏡セグメントの一部を切り出したCG (上). セグメント鏡とその支持機構の一部を取り外した状態のCG (下) (提供TIO).

チュエーター (261本) によって支持され、そのアクチュエーターは主鏡セルに直接取り付けられていた。しかし、TMT望遠鏡ではセグメント鏡ごとに個別の支持機構 (図4) をもち、その支持機構をアクチュエーターが支持・位置制御する。すばる望遠鏡の主鏡の (アクチュエーターによる) 支持点の間隔は約45 cmであったが、TMTセグメント鏡の軸方向支持ロッドの間隔は約20 cm程度と狭くなっている。ただし、厚さが約1/4.4になっているのに対して間隔は約1/2.3でしかない、とも言える。また、すばる望遠鏡ではアクチュエーターが軸方向の支持と横方向の支持を兼ねていたのに対し、TMTではそれぞれの機能を別の構造にもたせてある。セグメント鏡中央1カ所には横方向に支えるダイヤフラムを接着し (図5の写真の中央部分)、周りには軸方向に支えるロッドを27本用いる。このロッドは3分割のウィツ

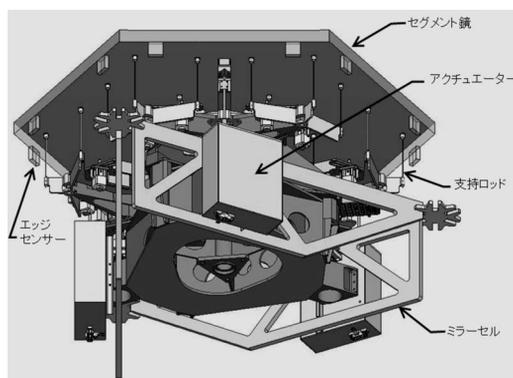


図4 一つの主鏡セグメント、支持機構、主鏡セルのCG図 (提供TIO)。

フルツリー (Whiffletree) を2段階用いることにより、機械的な構造で自動的に適切な支持力を発生できるようになっている。その上で、ウィツフルツリーのアームに曲げモーメントを加えることにより、各点の支持力を微調整して鏡面形状を制御する設計である。つまり、すばる望遠鏡では1本1本のアクチュエーターの支持力を指示して鏡面形状を制御していたが、TMTでは機械構造による平衡値からの差分を指示する制御となる。また、セグメント鏡間の段差は支持機構を軸方向に支えるアクチュエーターの位置制御により修正して、主鏡があたかも一体の鏡となるようにリアルタイム制御される。

## 4. 日本の貢献

すばる望遠鏡では、主鏡の鏡材は米Corning社製で、研磨は米Contraves社 (現L3 Integrated Optical Systems社のピッツバーグ工場) が行い、主鏡製作には日本の光学技術を生かすことができなかった。しかし、TMTでは、主鏡鏡材の製造のすべてと、その研削・研磨の約30%を日本が担う。

### 4.1 主鏡セグメント用鏡材

国立天文台ではオハラ社と協力して、同社のクリアセラム<sup>TM</sup>を用いてTMT主鏡セグメントの試作を行い、その実用性の確認を行ってきた。大型

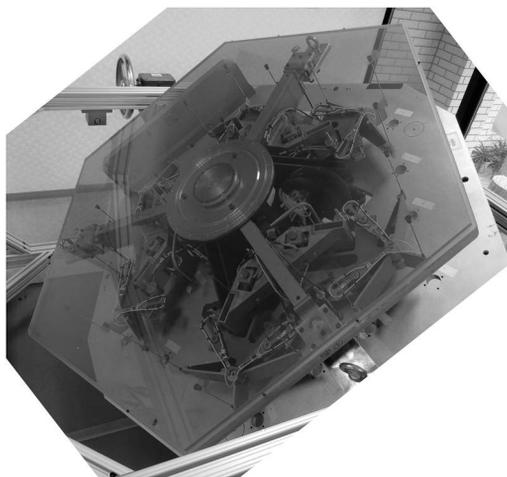


図5 2013年9月の東北大学での年會に展示した試作セグメント鏡。望遠鏡搭載時に実際に用いられる専用の支持機構に搭載され、展示にあたっては、その支持機構は傾斜可能なフレームに固定されている。

望遠鏡の鏡材には超低膨張ガラスが用いられるが、それは温度変化に対して鏡面形状の変化を最小限に抑える必要があるからである。ただし、超低膨張ガラス材とはいえ、すべての温度範囲で膨張率をゼロ近くにできるわけではなく、想定される温度範囲が決まっている。望遠鏡の運用時の温度変化範囲としては $-5^{\circ}\text{C}$ から $+9^{\circ}\text{C}$ を考えているが、その運用時温度変化と同様に重要なのが研磨加工時（ $20^{\circ}\text{C}$ 前後）と運用時の温度差である。最終仕上げ加工時の鏡面測定は平均運用温度にして行う予定であるが、この温度差も考慮されている。これらを合わせて熱膨張係数の平均値が $0 \pm 40 \times 10^{-9} \text{K}^{-1}$ 、鏡材内部のばらつきが $0 \pm 10 \times 10^{-9} \text{K}^{-1}$ という仕様となっている。通常のクリアセラム™は常温付近に最適化されているが、2013年度に製造工程を改良し、TMTで必要とされるより低い温度範囲での最適化に成功した。そして、実際60枚のガラス材の量産を行った（図6）。2014年度以降も引き続いて量産を行い、2019年度までに総計574枚の鏡材を製造する予定である。



図6 完成した60枚の鏡材の一部（撮影場所：（株）オハラ）。

#### 4.2 セグメント鏡の研削・研磨

望遠鏡にとって主鏡は「華」であり、当初から主鏡の研磨（正確には、研削・研磨・外形加工・支持機構搭載までを含む）を希望していた日本・米国に加えて、新たな参加パートナーの中国・インドも主鏡の研磨を希望した。このため、日本・米国・中国・インドの四つのパートナーで82種類574枚のセグメントを分担して研磨することとなったのである。

すばる望遠鏡の有効口径8.2 mもの大きな鏡は日本で作れなかったが、TMT望遠鏡の個々のセグメント鏡のサイズは約1.5 mである。このサイズの鏡であれば日本のメーカーでも特に大規模な投資をしなくても研磨できる。そこで、TMTプロジェクトへの協力を申し出てくれたキャノンと2010年度より実サイズのプロトタイプセグメント鏡の試作を開始した。まず、キャノンの有する技術を結集して1枚のセグメント鏡を加工し、その技術力を実証することにしたのである。米国TMTは後述する曲げ研磨法を推奨していたが、まだ日本での実績はなかったため、曲げ研磨法はおおまかな非球面形状を作っておくところまでとし、計算機制御の研磨機で表面形状精度を上げていくという方法を取った。この際、表面形状測定

にはキヤノンが独自開発し保有する触針式の高精度形状測定装置を用いた。この装置はナノメートルオーダーの精度を誇るが、測定面積が十分でないために1枚のセグメント鏡を6回に分けて測定し、この分割測定データを合成するスティッチング処理をして全体の鏡面形状を求める。測定・研磨のサイクルを多数繰り返して経験を積み、問題点を解決して、TMTの仕様をほぼ達成できるところまでたどり着いた。この間、2011年3月に東日本大震災が起り、試作を行っていたキヤノンの宇都宮工場も甚大な被害を受けしばらくの間試作がストップしたが、2011年の秋にはプロトタイプ鏡の試作を完了した。その後、2012年度には、この試作セグメント鏡をTMT専用の支持機構に搭載し、搭載による表面形状の変化を測定した。この際に、予想しない形状変化が測定されたが、モデル解析上の問題を発見し、専用の支持機構への搭載による鏡面の挙動を理解・再現できるようになった。この試作セグメント鏡はTMT計画の進捗をデモするためにいくつかの機会に展示に用いてきた。2012年3月に龍谷大学で開催された天文学会春季年会では、研磨後のセグメント鏡を単体で展示し、2013年9月の東北大学での天文学会秋季年会では専用の支持機構に搭載したセグメント鏡を展示した(図5)。これ以外にも光学関連や一般対象の宇宙天文イベントで展示を行っている。

そして、この後、この試作の経験をもとに最も効率的に量産できる研磨方法の検討を行った。日本の光学関連技術を生かしたいという希望はあったが、結局は米国TMTが提唱しているKeck望遠鏡で実用化した曲げ研磨法を採用することにした。「曲げ研磨法」とは、非球面と球面の差の分だけ鏡材を曲げた状態で球面研削・球面研磨した後、曲げを解放して非球面を得る方法である。この方法の利点は球面研磨時に、セグメント鏡とほぼ同じ大きさの研磨皿を用いることができるために時間あたりの研磨量が大きく、高速に研磨でき

る点である。しかし、「曲げ」によって非球面形状が決まるので、高精度に自由な形状を作れるわけではない。したがって、応用範囲の広い研磨法とは言えないが、大望遠鏡のセグメント鏡の加工との親和性は高いと言える。それは、TMTセグメント鏡は、非常に薄く曲げやすいこと、また薄いために研磨後に専用の支持機構への接着・搭載による(研磨加工時の支持状態からの)変形が避けられないために、後述のイオンビーム仕上げ加工が必須となるからである。そうすると、研磨段階では最終仕様近くまで高精度に研磨してもコストが増大するだけである。そこで、TMTプロジェクト全体としては技術的に経験の蓄積されている曲げ研磨法が最適の方法であると判断したのである。とは言え、Keck望遠鏡の対角1.8 mセグメント鏡が36枚なのに対してTMT望遠鏡では対角1.44 mセグメント鏡を492枚も必要とする。しかし、望遠鏡の建設期間はほぼ同じである。したがって、Keck建設時と同じ技術では実現不可能で、圧倒的に効率的で速い研磨工程を実現しなくてはならない。

蒸着用の予備を含めた574(=82×7)枚の全セグメント鏡のうち、日本は内側の175枚を担当することになっている。これは日本が最初に量産開始へのプロセスを始めたからである。外側のほうが非球面量が大きく製造するのが難しいので、技術を実証する観点から日本としては外側の一部でも研磨したいところである。しかし、プロジェクトとしては最初に必要となる内側のセグメントから製造するのが適切な判断である。

日本は、2013年度から量産工程に入り、まず、13枚の鏡材について球面研削・非球面研削加工を行った。2014年度以降は、順次、非球面研磨、六角形切断などの外形加工、専用の支持機構への搭載作業を始める。そして、2016年度には少数ではあるが最初の支持機構搭載済みセグメント鏡が完成し、米国に向けて出荷される予定である。その後、量産は2020年度まで続いて総計175枚

が米国に出荷され、イオンビーム加工による最終仕上げの後、保護膜付き銀コーティングが施されてTMT望遠鏡に搭載される。望遠鏡に搭載後は、セグメント鏡の鏡面形状調整とセグメント鏡間のギャップ調整が行われる。望遠鏡の試運転当初は40枚程度のセグメント鏡で調整が行われる予定で、日本の製作したセグメント鏡が用いられることになる。

### 参考文献

- 1) Subsystem Requirement Documents for M1 Optics System (TMT.OPT.DRD.07.007)
- 2) Specification for Primary Mirror Segment Blanks (TMT.OPT.SPE.07.001)
- 3) TMT Polished Mirror Assembly—Intermediate Polishing specification (TMT.OPT.SPE.11.001)

### A Segmented Primary Mirror of TMT

**Takuya YAMASHITA**

*TMTJ Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: The 30 m aperture of primary mirror of TMT (Thirty Meter Telescope) is attained with 492 segmented hexagonal mirrors with 1.44 m diagonal distances. The segmented mirror method is one of the most appropriate approach to realize extremely large telescopes. TMT project employs SMP (Stressed Mirror Polishing) and IBF (Ion Beam Figuring) to fabricate the segments. Japan's contributions include all the "mirror blanks" and about 30% of the "grinding, polishing, hex cutting, and mounting" of the segments. We have fabricated 60 blanks and 13 of them have been aspherically ground.