

TMT 建設開始への道のり

家 正 則 (TMT 国際天文台評議員会副議長)

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

e-mail: m.iye@nao.ac.jp



2002年に検討を開始した日本の30 m望遠鏡構想JELTを推進するため、国立天文台内にJELT準備室が2005年に設立された。準備室は内外情勢を見極め、ハワイでの建設を条件として、カリフォルニア大学連合とカナダが検討を進めていたTMT構想と合流して計画を早期実現する方針を2006年に固めた。学界各方面からの支持を得て国際協議を重ねた結果、2009年にはTMT建設地をハワイとすることがTMT協力評議会で合意された。日本の役割分担の具体化と概算要求の準備を進めるなか、やがて中国とインドが参加意向を表明し、国際プロジェクトとしてのTMT計画の骨格が固まった。各パートナーの責任と権利関係の協議を経て、国際合意書がまとまり、2014年5月にTMT国際天文台が設立され、同7月に建設開始を宣言する運びとなった。紆余曲折があったが、この間の経緯と今後の展望について、私見を交えて記させていただく。

まえがき

2014年5月に設立されたTMT国際天文台は、7月末に建設開始を公式に宣言した。TMT計画の概要を本誌特集企画としてご紹介させていただく。

この号では、まず、建設開始にいたる経緯をご紹介し、つづいて日本の主要な役割である望遠鏡構造と主鏡の製作について解説する。また、TMTの運用計画についても現時点での議論を紹介する。次号以降では、TMTの装置計画と日本の役割・開発状況、および科学的目標について分野ごとに解説してもらう予定である。コミュニティーでの今後の検討・議論に役立てていただければ幸いである。

1. JELT 構想

すばる望遠鏡本体とその8つの第一期観測装置がすべて完成し共同利用が安定期に入った2002年頃から、一部の有志と次世代望遠鏡の構想検討を開始した。完成直後のいよいよこれからという時期に、次の計画の構想検討を始めたのは、すば

る望遠鏡の構想検討開始から完成までに18年を要した経緯を踏まえたからである。

すばる望遠鏡を単純に大きくして30 m望遠鏡とすることを考えると、その重量は約50倍となる。天文学者らしく単純に、望遠鏡の値段はその重量にほぼ比例すると考えると1兆円を大幅に超える建設費が必要となる。

すばる望遠鏡による観測や、レーザーガイド補償光学系の開発と平行して、3年あまりかけて構想検討と関連開発を進め、まとめた30 m望遠鏡JELT計画は、(1)主鏡口径比1.0のコンパクトな光学系、(2)広視野無収差平坦焦点を実現する三非球面光学設計、(3)六角セグメントでなく扇型セグメント鏡の採用による、異形状セグメント数の縮減とコスト削減、(4)国内メーカーが開発したゼロ膨張セラミクス鏡材による軽量化など、建設費軽減と性能達成のための独創的アイデアを入れた構想であった。科学研究費補助金や自然科学研究機構の連携研究経費の助成を得て、核融合科学研究所と大型セラミクス鏡のマイクロ波

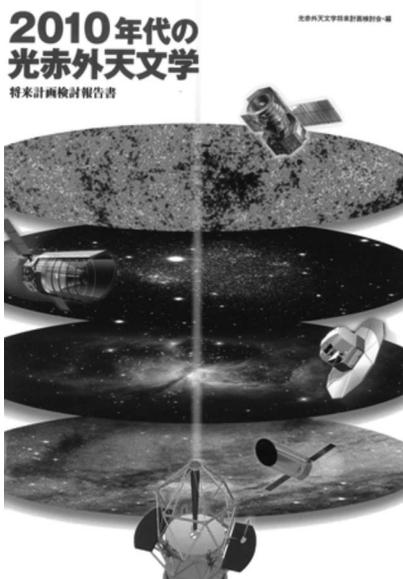


図1 将来計画検討報告書 (2005年).

焼成炉の開発と研磨実証などを進めた。国産初のゼロ膨張セラミクス鏡は現在広島大学1.5 m望遠鏡の副鏡として実用に供されている。

全国の光赤外研究者と理論研究者の協力を得て2005年にとりまとめた「2010年代の光赤外天文学：将来計画検討報告書」(図1)では、JELT計画をすばる望遠鏡の次期計画として実現を目指す方針を掲げ、基本方針を了承していただいた。だが、素人見積もりでも建設費を現実的なレベルにすることが容易ではないことが明らかであった。

当時、次世代の超大型望遠鏡計画として、日本のJELT計画以外にも、欧州南天天文台では100 m OWL計画(後のE-ELT計画)、米国ではカリフォルニア工科大学などの30 mTMT計画、カーネギー天文台などの24 mGMT計画が構想されていた。だがどの計画も単独では建設費確保の目処が立たない状況であった^{1),2)}。

2. TMT計画への合流

話は少しさかのぼるが、すばる望遠鏡の建設が本格化し始めた1992年末、ジェミニ計画責任者だったMatt Mountain氏(現・宇宙望遠鏡科学研

究所長)から、助けて欲しいという連絡が入った。聴いてみると、米国上院での公聴会で薄鏡のジェミニ計画と蜂の巣構造鏡方式の得失をヒアリングされるので、先行していた日本と欧州南天天文台から助言を得たいとのことであった。オックスフォードでの会合を皮切りに「8 mクラブ」と名づけて5回ほど集まったが、目的を共有しつつも異なるアプローチを企画した日米欧の互いの8 m計画を相互議論するたいへん実りのある会合となった。これを契機に世界の望遠鏡業界のリーダーとの連帯感が生まれたように思う。

各国の動向を把握し、国際協力の可能性を探る機会としては、先進各国科学予算担当局の担当者と望遠鏡計画関係者が情報交換する場として90年代末以降何度か開催された「エージェンシー会議」や、天文学における国際協力事業を議論する場として、OECD主催のグローバル・サイエンス・フォーラム(2003年ミュンヘン、2004年パリ)があった。90年代半ばから国際光工学会SPIEの隔年のシンポジウムで組織委員長を継続して務めさせていただいたのも情勢把握におおいに役立ったが、これらの会議の場で具体的な動きに結びつくことは少なかった。

具体的な動きとしては、JELT計画の検討を進めていた2004年4月に、すばる時代から研究面での日英協力の窓口として親交があったRichard Ellis教授とカリフォルニア工科大学で懇談したのを皮切りに、しだいにTMTを連携先として意識するようになったように思う。国立天文台内にJELT推進室を2005年度から立ち上げ、全体計画を練り概算要求の準備を進めていたが、2005年11月にEllis教授ほかとTV会議を行い、後述するような理由で日本としてはマウナケアでの建設を希望する意向を非公式に伝えた。

当時、TMTグループはチリのアルマゾネス山とハワイのマウナケア山を建設候補地として比較検討を行っていた。観測条件などからはどちらも捨て難い魅力があるものの、チリのほうが建設許



図2 マウナケア山頂の祭壇（筆者撮影）。

可手続きがはるかにスムーズにいくとの見通しをもっていた。マウナケアは地元のポリネシア系の地元住民には神聖な山であり（図2）、天文台建設に反対する動きがあったためである。日本がハワイという主張をしたこともあり、TMTは民間シンクタンクのキーストーン財団にハワイ関係者60人の聞き取り調査を依頼し、ハワイに建設する場合の手順や所要期間の見通しの報告を2006年2月に得た。その報告は決して楽観的なものではなく、建設許可取得には2014年頃までかかるだろうというものであった（実際、この予想どおりとなったことは驚きである）。このため日本もチリでの早期建設に是非協力して欲しいとの要請を受けた。

すばる望遠鏡は、当時そのユニークな主焦点カメラSCamの機能を活かした遠宇宙の観測で成果を上げ始めており、主焦点カメラをさらに大型化したHyper Suprime Cam (HSC)に置き換える計画が走り始めていた。このため、筆者らは、次世代望遠鏡は是非マウナケアに建設したいと考えるようになった。ALMAとの連携を考えるとチリでも良いのではないかという意見もあったが、HSCによる探査観測で日本の研究者が絞り込んだ観測天体を次世代望遠鏡で詳細な観測を行う戦略が日本にとって有利だと考えたからである。

欧州南天天文台のE-ELTとカーネギー天文台ほかのGMTはその建設地としてチリを明確に意



図3 TMT建設候補地を全員一致でマウナケアに決定した2009年7月のTMT協力評議会。

識していた。チリでのTMTの建設に合意すると3計画の中での一番乗りは果たせるかもしれないが、次世代3計画がすべて南半球に集中するアンバランスを招くことになり、グローバルな戦略からも望ましくないとの思いもあっての決断だった。

2006年夏から四半期ごとにパサデナで開催されていたTMT協力評議会にオブザーバーとして参加することにし、上記の日本の立場を述べた。

2007年11月、カリフォルニア大学サンタバーバラ校のHenry Yang学長が来日した折に、家に面会を求めてこられた。晩秋の晴れた日曜だったがホテルを訪ね、江戸博物館にご案内した。ヤン学長は幼少期を台湾で過ごされたとのことで、大正期の日本家屋の展示を見て、子どもの頃の自分の家と同じつくりだと懐かしがられた。渡米して苦勞して大学長にまで上り詰めた話などを聴き、半日語ったが、その中で日本がマウナケアでの建設を重視していることを確認し、筆者の話を細かくメモされて帰られた。

2008年11月には観山正見国立天文台長名で、「TMTがマウナケアを建設地と選定するなら、日本も計画に参加することを目指して予算要求を行う」旨の意向書簡を交わした。日本の参加はTMT計画にとってもメリットが大きいため、結局2009年7月の協力評議会にて建設候補地をマウナケアとすることに決した（図3）。これをもって、日本はまだ予算貢献がない段階ではあったが、ボード会

議の協力メンバーとして参加することとなった。

3. 役割分担

2003年にカリフォルニア大学とカリフォルニア工科大学、カナダ天文学大学連合の3者がTMT観測所公社を設立し、建設計画を検討していたが、日本がオブザーバーとして検討に参加した2006年時点では、望遠鏡本体とドーム（図4）はカナダの分担であった。そこで、日本は全体の約1/4規模の分担を想定して、主鏡セグメントの全数製作と副鏡、第三鏡の製作を主な担当とすることとし具体的検討を始めた。

その後、中国が2010年に、さらにインドが2011年に、TMT計画への参加希望を表明したが、どちらも国内産業育成の観点から、主鏡の研磨の

一部を分担したいとの意向であった。また、この間、副鏡や第三鏡の技術検討の中で、すばる望遠鏡製作実績のある日本が望遠鏡を担当するのが自然との認識が広がっていった。これらの動きを受けて、各国の予算要求上の制約も考慮しつつ役割分担を見直す協議を重ねた結果、日本は望遠鏡本体の設計・製作（図5）と主鏡鏡材の製作を分担し、主鏡研磨は日本・中国・インド・アメリカの4者が分担するシナリオが提案され、2011年夏に基本合意された。

米国は今のところカリフォルニア大学とカリフォルニア工科大学がメンバーだが、米国国立科学財団NSFが参加しないと、カリフォルニア以外の米国の天文学者は、TMTを使えなくなる。NSFは財政事情から2018年以降に次世代望遠鏡に参加する可能性を示唆し、2011年末に支援申請書の招請を行った。TMTは2012年4月の期限までに提案書（図6）を提出したが、GMTは提出しなかった。このため、NSFが支援する計画はTMTに絞られ、2013年からは全米の天文学者がTMTに参加する枠組み検討のための準備費が支



図4 風抵抗の少ないカーセル型TMTドームの完成予想図。

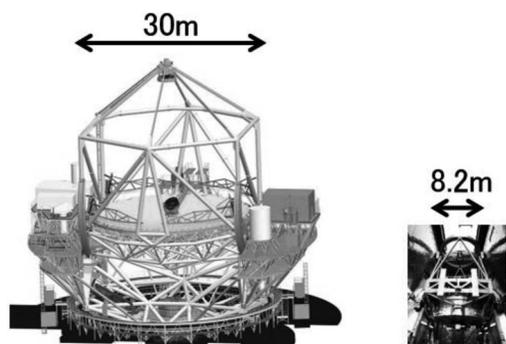


図5 TMTとすばる望遠鏡の比較。



図6 TMT計画提案書（2012年4月）。

出されている。2013年にハワイで、2014年にはツーソンでTMT科学フォーラムが開催され、全米の天文学者の期待も膨らんでいる。

4. 合意書協議

TMT協力評議会に協力メンバーとして参加を始めて、役割分担の協議などを進めるなか、2009年頃からパートナーの義務と権利に関する基本合意書の作成に向けた議論が始まった。

この中でカリフォルニア大学とカリフォルニア工科大学からでてきたのが「プレミア論争」である。曰く「TMT計画はカリフォルニア大学とカリフォルニア工科大学が獲得した資金により始まった計画であり、ベンチャーリスクをかけた両大学の資金貢献の価値は後から参加するパートナーの貢献の2.5倍の価値をプレミアとして認めて欲しい」というものであった。

ケック望遠鏡の実現からTMT構想の基礎を築いたのはカリフォルニア大学のJerry Nelson博士である。すばる望遠鏡の構想検討の初期、ケックの分割鏡方式の採用も検討したが、あまりに斬新で実現は難しいのではないかと感じた。これを抜群の物理センスと不屈の努力で実現したNelson博士の実績には深い畏敬の念をもっている。ムーア財団からの2億ドルもの寄付(図7)を全額TMT計画に投資した両カリフォルニア大学の決断にも敬意を表す。

だが、国からの予算を使って参加することを想定している日本としては、こんな提案は受諾できるはずがない。プレミア因子2.5倍という数字の根拠も全く説明できない。この提案に対しては当初から受け入れ難いと突っぱね、結局4年間折り合いがつかない状態が続いた。後から参加を希望した中国とインドもこのプレミア提案は受け入れられないとの立場であった。

結局、2013年の1月になって、この問題の解決を図るためTMT協力評議会は、第三者機関として国際シンクタンクのマッキンゼー & カンパニー

に全パートナーの意見を聴取させ、調停案を起案させることとした。3カ月に及ぶ聞き取りの結果、プレミア因子には根拠がなく、基本的には日本側の主張に分があるという結論となった。ただし、先行投資分については年利4%程度の付加価値をつけるという調停案が提示され、全パートナーがこれに合意した。

各パートナーはその寄与の7割を物納、3割を現金貢献することを基本とすることとし、為替レートやインフレの変動、人件費の格差など貢献価値の評価には難しい問題があるが、現金貢献はドル建てで評価し、物納については国際コストレビューに基づいて積算した国際標準価格でその貢献価値を評価することとした。

コストレビューは2012年2月に世界の専門家22名を招き、3日間にわたり開催された。

これらの基本合意を記した主協定書は2013年7月に完成し、林正彦国立天文台長など参加パートナー6者の代表が署名した(図8)。その後、非営利有限責任会社としてTMT国際天文台(TMT International Observatory; TIO)を設立するための設立合意書と、各パートナーの貢献内容を明記した寄与合意書を国際法律事務所ホーガン・ラベ



図7 TMT計画に2003年時点で2億ドルの寄付を約定したインテル社元会長のGordon Moore氏(左)。中央は筆者。右は後にTMT国際天文台統括責任者に任命されたEdward Stoneカリフォルニア工科大学副学長(2013年3月)。

ルズ社の協力を得て約1年間にわたり起案協議し、全体で200ページを超える合意書群の最終版が2014年4月に完成した。この合意書群の文面協議には、国立天文台でも国際協定書などでの実績のある弁護士事務所の石原仁氏の協力を得て³⁾、推進室一同と事務部のメンバーが慣れない法律文書を分担精査し、国内法や会計規則との整合性も含めて分析し協議した。そのうち、国立天文台から弁護士資格を取れる人が出るかもしれない。

5. TMT 国際天文台設立

2014年4月末までにTMT主合意書、TMT国際天文台設立合意書、寄与合意書に佐藤勝彦自然科学研究機構長が署名し(図9)、中国国家天文台長、カリフォルニア大学長、カリフォルニア工科大学長の署名も整った。これをもって5月6日にデラウェア州法に則り、TMT国際天文台(Thirty Meter Telescope International Observatory; TIO)が非営利有限責任会社(Limited Liability Company)として正式に登記され、設立された。

TMT国際天文台の第1回評議員会は2014年5月22日と23日にパサデナのTMT本部で開催さ



図8 2013年7月ハワイで開催されたTMT協力評議会で主協定書に署名した6名の代表者。左からErnie Seaquist(カナダ天文学大学連合代表)、Eswar Reddy(インドTMT連携機構代表)、Edward Stone(カリフォルニア工科大学副学長)、林正彦(国立天文台長)、Jun Yan(中国国家天文台長)、Henry Yang(カリフォルニア大学サンタバーバラ校学長)。

れた。この会議で最高決定機関となるTMT国際天文台評議員会議長にカリフォルニア大学サンタバーバラ校Henry Yang学長、同副議長に筆者が選出された。評議員会はTMT国際天文台統括責任者にカリフォルニア工科大学Edward Stone副学長、TMTプロジェクト・マネジャーにGary Sanders博士、そのほか財務責任者など建設期の執行責任者を任命した。TIO設立メンバーとなった日本・中国・カリフォルニア大学・カリフォルニア工科大学の四者に加えて、2014年秋までに署名を整え正式メンバーとなる予定のインド、2015年春に正式メンバーとなる予定のカナダ、および、2018年以降にメンバー参加を予定している全米天文学大学連合をそれぞれ投票権のない準メンバーとすることを承認した。

Edward Stone博士(図7)は有名なボイジャー計画の責任者を現在も務めておられ、昨年ボイジャーが太陽系圏外に脱出したときには、世界中のマスコミに登場された。78歳とお聴きしているが、会議の取り仕切り方や柔軟かつ毅然とした決断ぶりなど、見事なリーダーである。

また67歳のGary Sanders博士は超伝導超大型加速器(SSC)計画、重力波干渉計LIGO計画に続いて、2003年からTMT計画のプロジェクト・マネー

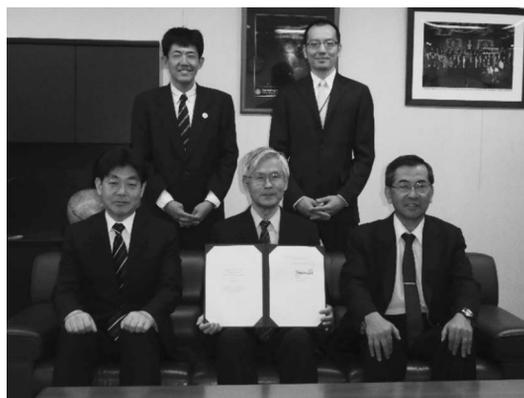


図9 2014年4月28日、自然科学研究機構長がTMT合意書群に最終署名。前列左から飯沢理事、佐藤勝彦機構長、筆者、後列左から白田知史TMT推進室長、石原仁弁護士。



図10 日本からの平成26年度のワークパッケージ合意書に署名する筆者とGary Sanders (TMT国際天文台プロジェクトマネジャー)。



図11 第1回TMT国際天文台評議会で、初期建設の開始について評決。代表議決権のあるTom Soifer (カリフォルニア工科大学), Xue Suijian (中国国家天文台), 家正則 (国立天文台), Henry Yang (カリフォルニア大学) が順次、賛成の挙手をしているところ。

ジャーを務めておられる。1,000億円規模の大型科学プロジェクトを三つ仕切ってきた世界屈指の科学プロジェクト・マネジャーである(図10)。出身は高エネルギー物理実験だが、あらゆる面に博識であり、いろんな修羅場を経験したマネジャーならではの懐の深さとウィットが魅力の人材である。

この会議でもう一つの重要な決定は、主合意書の規定に基づき、TIOが建設の初期段階にとりかかることを全員一致で承認したことにある(図11)。2015年4月の第4回TIO評議員会までに、インドと

カナダの参加を経て、本格建設開始を再確認する。

6. 建設開始に向けて

TMTの建設予定地(通称13 North)はすばる望遠鏡から西北西約900 mの距離にあり、スミソニアン天文台のサブミリ波アンテナアレイが展開されている敷地の一部を通過して、溶岩斜面を少し下ったところである。岩盤がなく地盤改良が必要だったすばる望遠鏡建設地より標高は約130 m下がるが、地盤改良の必要がない場所である。この場所での建設についてはすでに2013年4月にTMTが土地使用許可を得ており、同夏には地盤調査を終えている。

山頂地域一帯はハワイ州の土地であるが、ハワイ大学が科学研究のため2033年まで山頂地区の使用についてハワイ州土地資源局から許可を得ている。すばる望遠鏡の建設地は、そのハワイ大学から国立天文台が年間1ドルの借地料を支払う代わりにハワイ大学の研究者に年間52夜の観測時間を提供するという転貸借協定により使用权を得て建設運用を行ってきた。TMTについてはハワイ大学の使用時間割合を減ずる代わりに、ハワイコミュニティの教育福祉資金をTMTから提供するという内容の転貸借協定を結ぶことを第2回TIO評議員会で承認した(図12)。この転貸借についてハワイ州土地天然資源局の承認が7月25日に得られた。これをもって、一連の法的手続きは終了し、TMT建設開始を7月28日に記者発表した。

7. 今後の展望

TMTに加えて、欧州南天天文台は2025年頃の完成を期して、アルマゾネス山に口径39 mの欧州超大型望遠鏡E-ELTの建設を目指している。またカーネギー天文台ほかも口径8 mの鏡7枚を乗せた大マゼラン望遠鏡GMTの2020年代半ばの完成を目指している。いずれも現時点では完成までにさらに予算確保が必要であり、技術的な困難も待ち受けているかもしれないが、どの計画も

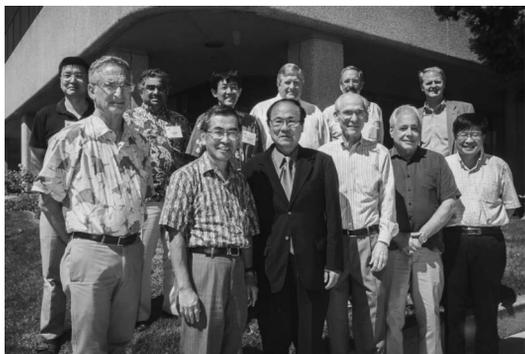


図12 第2回TMT国際天文台評議員会（2014年7月22日）にて。前列左からカルテク代表T. Soifer, 評議員会副議長（筆者）, 評議員会議長H. Yang, 統括責任者E. Stone, プロジェクト・マネジャーG. Sanders, 中国代表S. Xue, 後列左から中国委員S. Mao, カルテク委員S. Kulkarni, 日本委員白田知史, カルテク委員D. Currie, カリフォルニア大委員M. Bolte, N. Brostrom.

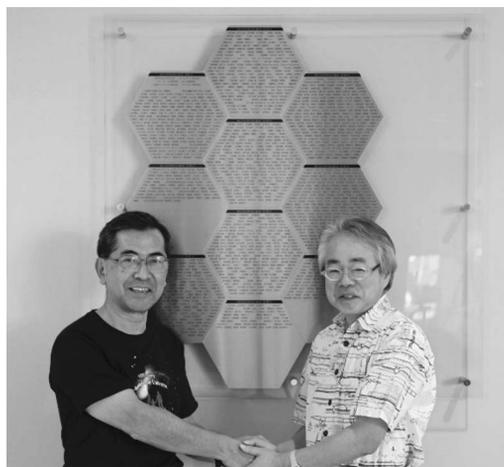


図13 TMT計画への寄付者は2013年3月末までに1,583名に達した。第一期寄付者全員の銘板を2014年3月には、ハワイ観測所ロビーに展示させていただくこととした。

最終的には実現するに違いない。

すばる望遠鏡はすでにジェミニ望遠鏡やケック望遠鏡との時間交換などを進めているが、TMTの完成後には山頂の天文台群をまとめてマウナケア国際天文台として運用する構想の議論も始まっている。2020年代にはハワイとチリの次世代望

遠鏡が、JWSTやALMAとの連携で、人類の宇宙観を大きく塗り替える発見がなされることになるだろう。まことに楽しみだ。

国内の科学館やプラネタリウムの学芸員を中心とする応援団「クラブTMT」が設立され、TMT推進室一同も計画の意義をいろんな場で広く訴えており^{4), 5)}, 多くの一般の方からの期待もある(図13)。是非、期待に応えたいものである。

参考文献

- 1) 家正則, 2006, 天文月報99, 266—「次世代超大型光赤外望遠鏡(ELTs)を巡る状況について」
- 2) 家正則, 2007, 科学(岩波書店), 第77巻, 第9号, 938—「2020年の宇宙学へ—観測天文学の光と闇, 光赤外超大型望遠鏡と次世代宇宙望遠鏡」
- 3) 石原仁, 2013, 法と経済のジャーナルAsahi Judiciary, 7月号—「国立天文台の弁護士として宇宙の深淵にわくわくする」
- 4) 家正則, 2014, 学士會会報(年頭号)第904号, 54—「次世代超大型望遠鏡TMTで見る宇宙—第二の地球, 宇宙の一番星, 暗黒エネルギー」
- 5) 国立天文台TMT推進室ホームページ<http://tmt.nao.ac.jp/>

Milestones to the Start of Construction of TMT

Masanori IYE

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

Abstract: NAOJ started conceptual design of its original 30 m telescope, JELT, back in 2002. JELT project office founded in 2005 decided to join TMT project in 2006 if Mauna Kea is chosen for its site of construction. TMT collaborative board chose Mauna Kea in 2009 and NAOJ signed a letter of intent to join TMT as a collaborating partner to define Japan's role. After China and India expressed their intention to join, it was agreed that NAOJ will be responsible for designing and building the telescope structure, manufacturing primary mirror blanks, and polishing part of them. With formal signing by the NINS president in April 2014, the TMT International Observatory was founded in May 2014 with its four initial members and the start of construction was declared in July. This article describes, with some personal views, the history and prospects of Japan's participation in the TMT project.