

TMTの観測性能とその評価

橋本哲也

〈国立天文台TMT推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: tetsuya.hashimoto@nao.ac.jp



Thirty Meter Telescope (TMT) が完成したとき、どのようなサイエンスが可能になるのでしょうか。それを詳しく検討するためには、さまざまな観測条件に合わせたTMTの性能を評価するとともに、他の望遠鏡と比較する必要があります。そこでTMTを含む各種光学望遠鏡の性能の評価を行うためのツールとしてTMT Exposure Time Calculator (ETC)を開発しています。ここではTMTが稼働する2020年代の代表的な光学赤外線望遠鏡を取り上げその性能を比較しました。TMTは多くの面で非常に高いパフォーマンスを示しますが同時に弱点もあります。この弱点を補うように他の望遠鏡と連携してサイエンスを進めていくことがたいへん重要になると考えられます。

1. はじめに

Thirty Meter Telescope (TMT) 計画は2020年代初頭の稼働開始を目指して今年度建設が開始された次世代超大型望遠鏡計画です。完成すれば世界最大となるこの光学赤外線望遠鏡を使い十分な成果を上げるためにはTMTによってどのようなサイエンスが可能になるのか、今からしっかりとした検討を進めていく必要があります。また将来的なTMT観測装置を検討するうえでも、TMTでそもそも何ができるのかということについて事前に把握しておく必要があります。これまで国内ではTMTサイエンス検討会をはじめとし、国際的な活動としてはTMT Science ForumやTMT Science Workshopなどが企画され、TMT時代のサイエンス検討活動が徐々に本格化しつつあります。このようなサイエンス検討活動を補助し促進することを目的として、TMT Exposure Time Calculator (ETC) の開発を開始しました。TMT ETCを用いることでさまざまな望遠鏡の性能を評価することができます。ここではTMTが運用開始する2020年代の代表的な光学赤外線望遠鏡として、

TMT, すばる望遠鏡, 口径6.5 m赤外線宇宙望遠鏡 (James Webb Space Telescope; 以下JWST) を取り上げ、各望遠鏡のもつ特色を比較することでTMTの性能を浮き彫りにします。

2. TMT ETCのコンセプト

TMT ETCのコンセプトは単純明解です。「誰でも、お手軽に、ざっくりと」です。TMT計画では各観測装置グループが各々の計画する装置に特化した観測シミュレーションソフトを開発しています。TMTを想定した明確なサイエンスケースがある場合や、あるいはすでに具体的な観測天体が決まっているような場合など、非常に精度の高いシミュレーション結果を必要とする場合にはこのようなソフトウェアが適しています。しかし、このようなシミュレーションを行うには観測装置に関する専門知識が必要とされ、必ずしも誰もが扱いきやすいとは限りません。そこで、あまり観測の経験がない方でも、簡単にTMTの性能を評価することができるようなETCの開発を進めています。TMTではどのようなサイエンスが可能になるのか、まずはTMT ETCを使ってその可能性

を検討し、より精度の高い計算を必要とする場合には各観測装置に特化したシミュレーションソフトを使うといった相補的な役割を目指しています。

3. TMT ETCの使い方

上で述べたようにTMT ETCは誰でも簡単に使えるということに重点を置いています。特別なソフトウェアをダウンロード/インストールしなくてもWebブラウザベースで簡単に計算できるような仕組みになっています。TMT ETCには撮像用¹⁾と分光用²⁾の二つが用意されています。

どちらのETCについても観測ターゲットの明

るさ(図1)、見かけの形状(点源かどうか)と星像(Point Spread Function)の選択(図2)、望遠鏡/観測装置部分のパラメーター(図3)、月齢等を含む夜光のコンディション³⁾を入力することで、指定した積分時間で観測を行った場合のターゲットの信号対ノイズ比が出力されます。分光用ETCについては、これに加えてターゲットのスペクトルエネルギー分布を、銀河⁴⁾、星⁵⁾、冪乗型のテンプレートから選ぶことができます(図4)。観測装置に関する各種パラメーターは、観測経験のない方でも使いやすいように、第一期観測装置である近赤外撮像分光装置(IRIS)、広視野可視

Scale Flux Density by using:		
<input checked="" type="radio"/> Apparent magnitude	<input type="text" value="K (2.1μm)"/>	Magnitude system <input type="radio"/> Vega <input checked="" type="radio"/> AB
	= <input type="text" value="20.0"/> mag for point source mag/arcsecond ² for extended source	
<input type="radio"/> Absolute magnitude	<input type="text" value="V (0.55μm)"/>	
	= <input type="text" value="-18.0"/> mag for point source mag/arcsecond ² for extended source	
<input type="radio"/> Flux density at <input type="text" value="0.5"/> μm	$F_{\lambda} = $ <input type="text" value="1.0e-17"/> erg/s/cm ² /μm for point source erg/s/cm ² /μm/arcsecond ² for extended source	

図1 分光用TMT ETCの使用例。ここではターゲットの明るさを指定します。指定の仕方には見かけ等級、絶対等級、Flux densityがあります。

Source Geometry:	
<input checked="" type="radio"/> Point Source	Extract square region
<input type="radio"/> Extended Source	= slit width x spatial length = <input type="text" value="0.1"/> x <input type="text" value="0.1"/> arcsecond ²

Point Spread Function:	
Seeing size:	<input type="text" value="600"/> mas
<input checked="" type="radio"/> with Adaptive Optics, Strehl Ratio = <input type="text" value="0.5"/>	<input type="radio"/> without Adaptive Optics

図2 ターゲット天体の形状と星像の指定。分光の場合はスリット幅と空間方向に足し合わせる大きさを指定します。また、補償光学の有無で星像を指定します。補償光学を想定する場合は、回折限界コアとシーイングハローの2成分で星像近似を行い、両者のflux比は指定するストレール比によって決まります。補償光学なしの場合はシングルガウシアン星像近似になります。

System Configuration:	
Use instrument parameters for	<input type="radio"/> IRIS <input type="radio"/> MOBIE <input type="radio"/> IRMS <input checked="" type="radio"/> Other
Telescope Diameter:	30 (Ground) m
Spectral resolution $R = \lambda / \Delta \lambda =$	1000
Pixel scale:	50 mas/pixel
Pixel scale in \AA along dispersion axis:	1.0 \AA /pixel
Detector dimension along dispersion axis:	1024 pixel (Please don't input too large number due to limitation of machine power)
Central wavelength on detector:	2.0 μm
Read out noise:	10 electrons/pixel in rms
Dark current:	0.01 electrons/sec/pixel
Total efficiency:	0.2 including both optics efficiency and instrumental quantum efficiency

図3 望遠鏡の選択，ならびに観測装置に関するパラメーターの設定．TMTを想定した30 m望遠鏡だけでなく，地上中小口径望遠鏡や宇宙望遠鏡も想定できます．観測装置については，TMT第一期観測装置であるIRIS，WFOS/MOBIE，IRMSのいずれかを選択すると各装置に対応したパラメーターが一括で設定されます．ユーザー自身による設定も可能です．

Target Spectral Energy Distribution:				
<input checked="" type="radio"/> Galaxy	Single burst 2.5 Gyr	+	<input checked="" type="checkbox"/> Additional Line Feature	
<input type="radio"/> Star	O dwarf		Emission	<input checked="" type="checkbox"/> Dust extinction
<input type="radio"/> Power law	$F_\nu \propto \nu^{-\beta}, \beta = 1.0$		at 0.6563 μm	Starburst
<input type="radio"/> User Input	(N/A, under construction)		Equivalent Width = 10.0 \AA	E(B-V) = 0.5
		Line Width 200.0 km/s	<input type="checkbox"/> Absorption by Ly α forest	

図4 分光用ETCの場合はターゲットのスペクトルも指定します．必要に応じてダスト減光やLy α forestによる吸収も考慮することができます．独自の輝線/吸収線を加える場合には等価幅 (Equivalent Width) でその強度を入力します．

撮像分光装置 (WFOS/MOBIE)，近赤外多天体分光装置 (IRMS) を想定したパラメーターセットから一括して指定することもできます．

4. ETCの工夫した点／苦労した点

TMTは特定の天体を詳細に調べるにはたいへん優れていますが，広視野探索のようなサーベイ型の観測には必ずしも適しているとは限りません．そこですばる望遠鏡をはじめとする他の望遠鏡と連携することによってその性能を最大限発揮できると期待されています．TMT ETCでは

TMT以外の望遠鏡を想定した計算も可能になっています．例えば，すばる望遠鏡 (主鏡8.2 m) で撮像した天体をTMTで分光した場合にどの程度の信号対ノイズ比として観測することができるのか検討することができます．このようにTMT以外の任意の望遠鏡，観測装置を考慮する場合，想定しなければならぬパラメーター範囲は非常に広がってしまいます．まだ開発途上のところもありますが，現実的な範囲であればどのようなパラメーターセットをインプットしても正しく動作させることに注力しました．

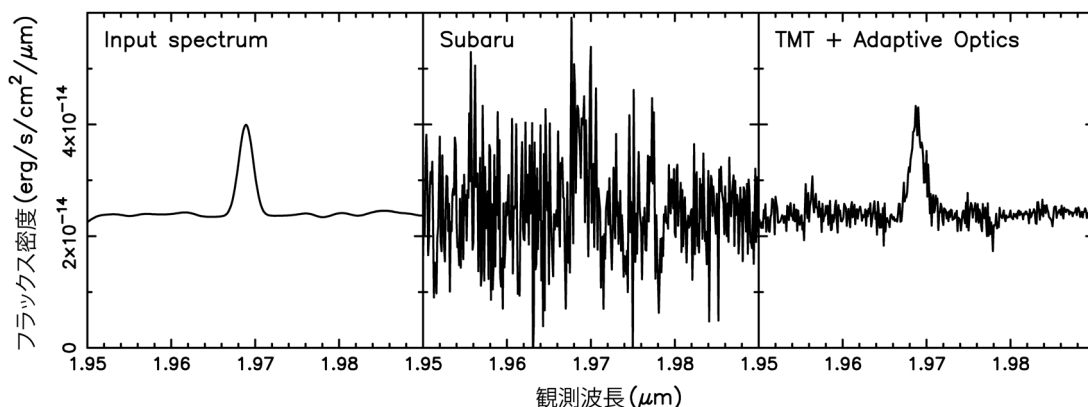


図5 赤方偏移2にあるH α 輝線銀河の分光シミュレーション(波長分解能 $R=1,000$)。入力スペクトル(左)はKバンド20等級の明るさで、H α 輝線の等価幅 $=5\text{ \AA}$ 、線幅 $=200\text{ km/s}$ を想定しています。すばる望遠鏡(真中)では信号対ノイズ比の低いスペクトルしか得られなかった天体について、TMTと補償光学(右)を組み合わせることで非常にクリアなスペクトルを得ることができます。

また、分光ETCのスペクトルエネルギー分布についていくつかのテンプレートを用意していますが、これらは基本的には連続光成分のみになります。これに輝線や吸収線、赤方偏移等を指定することでユーザー自身の手でスペクトルテンプレートを生成することができるようにしました。さらにダスト吸収⁶⁾や、遠方銀河を想定したLy α forestによる吸収⁷⁾を加えることも可能で、より実際の観測に近づくように工夫しました。図5は赤方偏移2にあるH α 輝線銀河(Kバンド20等級、輝線幅 200 km/s 、等価幅 $=5\text{ \AA}$ 、波長分解能 $R=1,000$)を入力スペクトル(左図)とし、すばる望遠鏡で観測した場合のシミュレーション(真中)とTMT+補償光学観測のシミュレーション(右図)の一例を示しています。すばる望遠鏡ではノイズが目立つスペクトルがTMTを用いることで劇的に改善されていることがわかります。TMT ETCではこのような分光シミュレーションをさまざまな望遠鏡を想定して簡単に行うことができますので、是非活用してください。

5. TMTの期待される性能

5.1 集光力

地上の超大型望遠鏡の第一の特徴として挙げら

れるのが巨大な主鏡による集光力です。TMTはすばる望遠鏡をはじめとする現在世界最大クラスの8m級光学赤外線望遠鏡の約13倍の集光力をもちます。観測天体のポワソンノイズや背景光が主なノイズ源となるような一般的な撮像観測の場合、ほぼ4倍の点源撮像能力、検出器の読み出しノイズが効いてくるような可視近赤外線分光においては約13倍の分光能力をもつことになります。またTMTにとって最も重要な機能の一つである補償光学を用いる場合には、このような撮像分光能力、観測効率はさらに向上すると期待されています。

現在の将来計画ではTMTが運用を開始する2020年代には、ほぼ同時期に打ち上げが計画されているJWSTも運用されていることとなります。集光力という面ではTMTはJWSTをはじめとする宇宙望遠鏡を圧倒しますが、地球大気からの背景光がノイズ源になってしまうという面もあります。天体からの光をどれだけ感度良く検出することができるのか、これについて地上望遠鏡と宇宙望遠鏡を比較するためには両者のノイズ源の差を十分に考慮する必要があります。

5.2 空間分解能

今後、光赤外天文学の観測的研究には高空間分

解能（画像のシャープさの指標）はその重要性がさらに増していくと考えられています。例えば、銀河の形成・進化の過程を明らかにするためには、遠方銀河の内部構造やより詳細な性質を調べることが必要となります。また、遠方超新星探査や、高赤方偏移キューサー、ガンマ線バースト残光の検出と付随する吸収線を用いた銀河間ガスの研究といった、点源の検出と分光を行う観測には高空間分解能は本質的に重要です。同様に系外惑星の直接検出にも、高コントラスト撮像に加え、高空間分解能はたいへん重要な役割を果たします。

一般に地上望遠鏡は地球大気の揺らぎの影響を受けるため、どんなに口径を大きくしても空間分解能はこの揺らぎ（シーイング）よりも向上することはありません。一方、宇宙望遠鏡は地球大気の揺らぎの影響を受けることがないため、基本的には空間分解能は回折限界に近いものになり、その空間分解能は望遠鏡口径が大きいほど高いものになります。

補償光学はこの地球大気の揺らぎの影響を取り除き、回折限界に近い空間分解能を得るための技術でTMTにとって最も重要な機能の一つです。現在の補償光学は赤外線での補正が十分に機能しています。TMTがこの補償光学装置を用いて回折限界に近い、望遠鏡本来の性能を発揮した場合には、赤外線においてJWSTの約5倍の空間分解能を得ることができます。これはアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（ALMA）に迫る空間分解能であり、将来的にTMTとALMAの緊密な連携が期待されています。

このように補償光学はTMTの性能を最大限に発揮するためにはなくてはならない技術ですが、天候による不安定性や、限定された有効視野と観測波長帯域など、今後の課題となる点があることにも留意する必要があります。今後の補償光学技術の発展はますます重要になり、TMTでは初期補償光学装置（NFIRAOS）以降の装置として、広視野補償光学などの発展的研究開発が進められて

います。

5.3 波長分解能

分光観測、特に高分散分光観測は天体の物理量や運動状態の精密な測定や、微小にしか存在しないような元素の同定などが実現できるばかりでなく、宇宙の加速膨張の直接検出、系外惑星の大気分光から生命の痕跡を探る観測など、TMT時代においてますます重要な観測手法になると期待されています。

高分散分光観測は主鏡で集めた光を波長ごとに非常に細かく分ける必要があるため望遠鏡の集光力が鍵となります。地上望遠鏡にはノイズ源として地球大気からの背景光がありますが、高分散分光観測においては背景光の夜光輝線同士の間を上手く使うことで、大幅にノイズが減少し高い感度を得ることができます。このような夜光輝線の谷間を使う場合の感度は大雑把には主鏡面積に比例するためTMTはJWSTの10倍以上の感度を得ることが期待されます。また昨今の観測装置の大型化という面でも十分なスペースを確保しやすい地上望遠鏡にメリットがあります。このような理由からTMTのような地上超大型望遠鏡と高分散分光観測は相性が良く、TMTで初めて展開できるサイエンスケースは数多く存在します。

5.4 視野

近年のすばる望遠鏡主焦点カメラの活躍からもわかるように、大望遠鏡の集光力と広視野撮像の組み合わせは、天文学におけるサーベイ観測の分野でたいへん大きな威力を発揮することが知られています。昨年すばる望遠鏡に搭載され、いよいよ本格的運用が始まった超広視野主焦点カメラ（Hyper Suprime-Cam）は約1.5度角の視野をもっています。JWSTは数分角（1分角は1/60度角）の視野を高い空間分解能と感度でカバーすることができます。TMTと初期補償光学装置の組み合わせの場合は直径30秒角（1秒角は1/60分角）の範囲で非常に高い空間分解能を達成します。補償光学を必要としない観測の場合にはTMTは15分

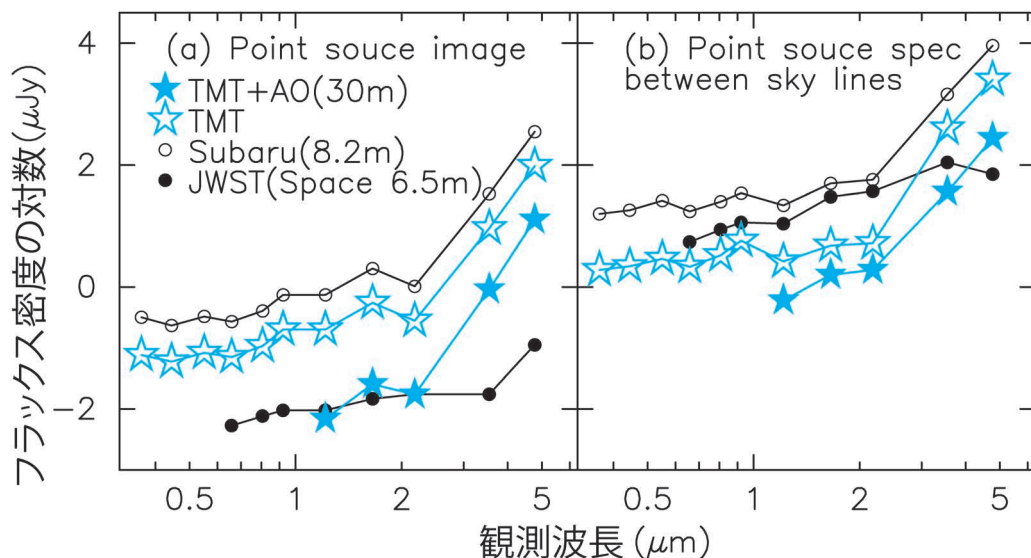


図6 1時間積分で連続光成分の信号対ノイズ比が10となる天体(点源)の明るさ。図中で下側に位置するほど感度が高いことを示しています。(a)は撮像観測の場合、(b)は分光観測で夜光輝線の谷間を狙った場合の感度を示しています。JWSTは基本的には赤外線望遠鏡ですが、赤外線カメラ(NIRCam)ならびに赤外線分光装置(NIRSpec)は0.6-5.0 μm をカバーする仕様になっています¹⁰⁾。

角の視野を確保することができます。いずれにしても、TMTには主焦点がなく限られた視野しかないため、すばる望遠鏡が得意とするような広域サーベイ観測には向いていません。そこですばるをはじめとする広視野カメラをもった大型望遠鏡でサーベイ観測を行い、TMTを使って個別の天体を詳細に調べるといった、相補的な望遠鏡連携がたいへん重要になると考えられています。

5.5 感度

TMT ETCを用いて、点源撮像、分光それぞれの場合について、TMT、TMT+補償光学、すばる望遠鏡、JWSTの感度を計算したものを図6に示しています。量子効率を含めた観測装置に関する各種パラメーターは基本的にはすべて同じ値を用いており、1時間積分で連続光成分の信号対ノイズ比が10になる天体の明るさを μJy 単位で表示しています。点源の空間的広がり(半値幅)についてはTMT+補償光学はストレール比=0.5の回折限界コアとシーイングハローを、JWSTは回折限界を、TMT、すばる望遠鏡については $0''.8$ (可

視光)および $0''.6$ (近赤外)を仮定しています。ノイズ源である背景光は地上望遠鏡についてはマウナケア山の測定値⁸⁾、JWSTについては黄道面のダストによる太陽光の散乱、黄道面のダストからの熱輻射、銀河面のダストからの熱輻射、望遠鏡自身の熱輻射⁹⁾を考慮しています。図6(a)からもわかるように撮像観測については地球大気からの背景光の影響は大きく、30 m望遠鏡をもってしても6.5 m宇宙望遠鏡の感度には劣ってしまいます。補償光学を用いた場合でも波長が長くなる程JWSTの優位性は目立っています。さらに、中間赤外線、遠赤外線においては地上望遠鏡による観測は背景ノイズが大きくなることもあり、撮像感度という意味では宇宙望遠鏡に軍配があたります。一方、図6(b)の分光観測については、夜光輝線の谷間を狙った、やや理想的な条件を想定しているものの、30 m望遠鏡の集光力が活かされ、JWSTをしのぐ感度を達成していることがわかります。実際には波長分解能が低い場合には夜光輝線の影響が広がってしまうため、TMTは高分散

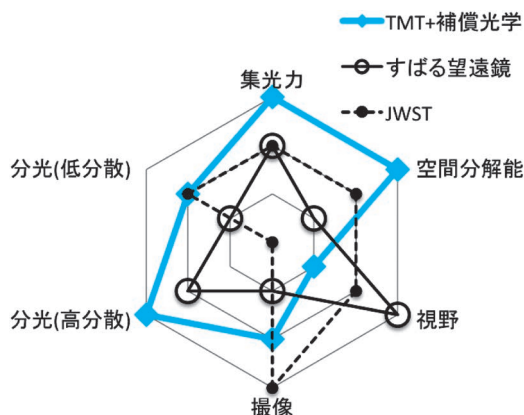


図7 TMTとすばる望遠鏡，ならびにJWSTの性能評価図。TMTは集光力，空間分解能，高分散分光の面で特に高い性能を発揮します。TMTの視野の狭さについては，すばる望遠鏡が上手くこれを補う形になっています。JWSTのような宇宙望遠鏡は撮像観測で高い感度を達成し，特に中間赤外・遠赤外線観測でその威力を発揮します。

分光観測の場合により力を発揮しやすいという面があります。ただし，単純な感度ではJWSTが劣っていても，宇宙望遠鏡には夜光輝線や大気吸収の影響を受けないという大きなメリットがあります。また中間赤外線，遠赤外線の分光観測についてもやはり宇宙望遠鏡は高い感度を発揮します。

5.6 性能評価のまとめ

望遠鏡の集光力，空間分解能，視野，波長分解能，撮像分光感度の観点からTMT，すばる望遠鏡，JWSTの性能を評価したものを図7にまとめています。TMTは光学赤外線望遠鏡として非常に性能の高いレベルでまとまっており，集光力，空間分解能，高分散分光の面で特に高い性能を発揮します。弱点である視野の狭さについては，すばる望遠鏡がこれを補う形になっていて，TMTとすばる望遠鏡との相補的連携はたいへん相性が良いと言えます。JWSTのような宇宙望遠鏡は，高い感度と空間分解能が必要とされるような撮像観測，ならびに赤外線，特に地上望遠鏡では観測の難しい中間赤外・遠赤外線の観測で活躍します。

これらの望遠鏡の役割は相補的であり，例えば初期宇宙の天体の研究では，非常に視野の広いすばる望遠鏡やある程度大きな視野をもった宇宙望遠鏡による探査が必須であり，それらで検出された天体の精度の良い分光観測はTMTのような地上超大型望遠鏡によって担われることになります。このようにTMTだけでは足りない性能を補うように他の望遠鏡と連携してサイエンスを進めていくことがたいへん重要になると考えられます。

参考文献

- 1) http://tmt.mtk.nao.ac.jp/ETC_image.shtml
- 2) http://tmt.mtk.nao.ac.jp/ETC_spec.shtml
- 3) Krisciunas K., Schaefer B. E., 1991, PASP 103, 1033
- 4) Bruzual G., Charlot. S, 2003, MNRAS 344, 1000
- 5) Pickles A. J., 1998, PASP 110, 863
- 6) Li A., et al., 2008, ApJ 685, 1046
- 7) Becker G. D., Rauch M., Sargent W., 2007, ApJ 662, 72
- 8) Gemini Observatory (<http://www.gemini.edu/>)
- 9) Allen, C. W., 1973, Astrophysical Quantities
- 10) JWST (<http://www.jwst.nasa.gov/>)

Performances of Thirty Meter Telescope and Their Evaluation

Tetsuya HASHIMOTO

National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-2 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: What kind of astronomical sciences are expected in the era of Thirty Meter Telescope (TMT)? In order to explore that, the evaluation of performances of TMT is essential depending on various instrumental parameters and observational conditions as well as comparison with other telescopes in operation at that time. TMT Exposure Time Calculator (ETC) is in a phase of development as a tool to evaluate performances of optical telescopes including TMT. I picked up some typical optical telescopes in operation in the 2020s and compared their performances. TMT demonstrates high ability in many aspects but has a few of weak points. It is very important to progress astronomical sciences by using TMT as well as other telescopes so as to cover the shortcomings of TMT.