

# 天体望遠鏡技術の発展

家 正 則

## 1. 望遠鏡の歴史

天体望遠鏡の由来は、1610年にガリレオ・ガリレイが口径4cmほどの屈折式望遠鏡を自作し、天体に向けたことに始まる。ガリレオの望遠鏡は対物凸レンズと接眼凹レンズからなるもので、ガリレオ式(図1a)と呼ばれる。その後、ケプラーが接眼レンズを凸レンズにして実像を見るケプラー式望遠鏡(図1b)を発明した。ケプラー式は像が倒立するが、視野が広く、焦点面にくも糸を張って精密計測ができるなどの利点があるため、以後屈折式望遠鏡の主流となった。

だが、初期の屈折式望遠鏡は、単レンズ方式だったため色収差が大きく、口径比(=焦点距離/口径)を大きくしたものしか実用にならなかった。このため口径の増大とともに望遠鏡の鏡筒が長大化し、18世紀前半には筒長が46mもの巨大な望遠鏡がポーランドのダンチヒで作

られるに至ったが、操作しにくく観測には大変な困難が伴った。

屈折式望遠鏡のこの状況を改善したのが、18世紀半ばの色消しレンズの発明である。クラウンガラスとフリントガラスを組み合わせると色収差が軽減できることがわかつてきただのである。ミュンヘンのガラス職人フラウンホーファーは、質の良いガラスを作り、見え味の良い屈折式望遠鏡を製作し、屈折望遠鏡を普及させた。屈折式望遠鏡は1897年にシカゴに完成したヤーキス天文台の口径101cmの望遠鏡が最大のものとなった。内部を光が透過するレンズは、傷や泡の無い均一なガラス材で作る必要があるが、良質の大きな対物レンズは製作が困難な上、光の吸収損失が大きくなるなどの問題があるため、これ以上大きな屈折望遠鏡は作られなかった。

現在、大型望遠鏡はすべて反射望遠鏡となっている。最初の反射望遠鏡を1668年に作ったのは英國の偉大な物理学者アイザック・ニュートンであった(図2a)。色収差の問題に手を焼いたニュートンは、鏡の反射を利用した望遠鏡を考案した。放物面主鏡と共に焦点の双曲面副鏡を組み合わせたカセグレン望遠鏡の原理(図2b)は1672年に発表された。本質的に色収差の無い反射鏡は、その点では画期的であったが、金属の研磨が容易でないことと、鏡面が酸化して

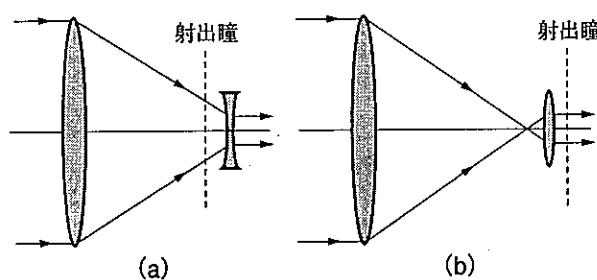


図1 屈折望遠鏡(ガリレオ式、ケプラー式)

国立天文台 光学赤外線天文学・観測システム研究系 Masanori IYE

〒181-0015 東京都三鷹市大沢2-21-1

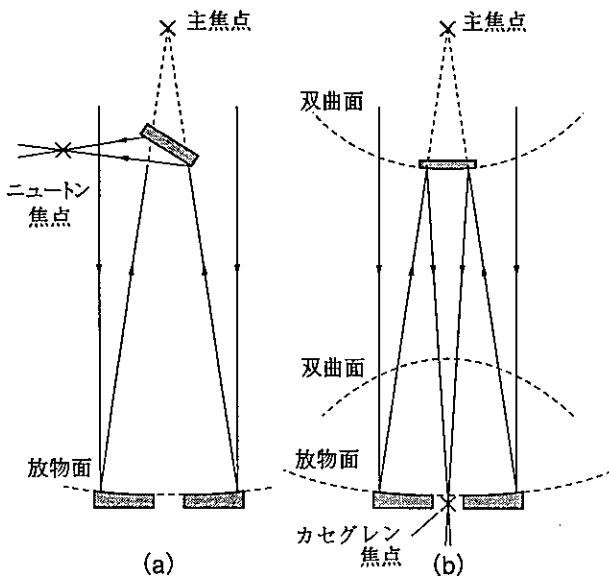


図2 反射望遠鏡(ニュートン焦点、カセグレン焦点)

すぐに壊ってしまうという難点があった。ハーシェルが1789年に作った40フィート望遠鏡は錫と銅の合金を研磨したもので、完成当初は67%の反射率を有していたが、酸化も早かったという(図3)。やがて、金属のかわりにガラスを研磨し、その表面に金属薄膜を鍍銀やメッキ法により形成する方法が工夫され、反射鏡を用いた望遠鏡が実用化された。

二十世紀に入ると、米国で天文学者が大富豪から巨額の寄付を得て、大型反射式望遠鏡が次々に建設されるようになった。口径の増大はウィルソン山の100インチ望遠鏡、1948年完成のパ

ロマー山の200インチ望遠鏡で頂点に達した。200インチ望遠鏡の建設には第二次世界大戦の影響もあり、完成までに15年以上の歳月を要した。

その後、唯一の例外としてソ連の6m望遠鏡が建設されたが、世界の先端的天文台は1960年代から80年代前半にかけて、こぞって3mから4mクラスの望遠鏡を建設した。無闇に口径を大きくするのではなく、精度の良い望遠鏡を観測条件の良い場所に建設することが優先されたのである。パロマー以降約30年間にわたり、望遠鏡の大型化が一時停止した背景には、それまでの光化学反応を利用した乳剤乾板から半導体の光電効果を利用したCCDに光検出器が置き換わり、効率が約100倍に向上了ることが重要な要因として挙げられる。望遠鏡を大きくしなくとも、検出器の高感度化で観測能力の大幅な改善が実現できたのである。だが、CCDの普及で光を有効利用する効率はほぼ限界に達した。4m級望遠鏡の性能を上回る望遠鏡が必要となり、1980年代中頃から先進各国で次世代の大型望遠鏡計画が検討されはじめた(図4)。こうして、コンピュータ制御技術の発展を背景に、1990年代に入って8m級望遠鏡の建設ラッシュとなった。1980年代前半までの望遠鏡は赤道儀方式(図5a)の架台のものが多かったが、望遠鏡の駆動にもコンピュータが利用されるよ

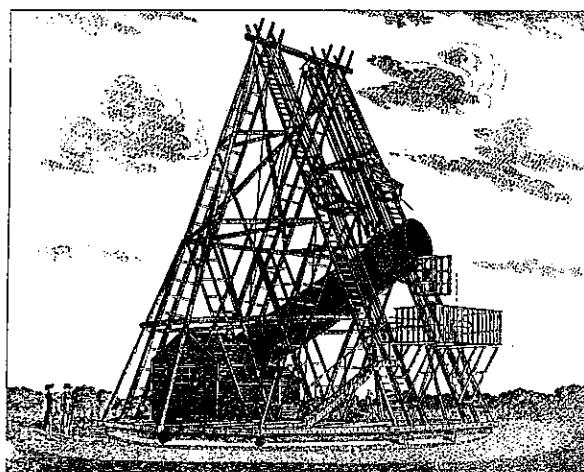


図3 ウィリアム・ハーシェルの40フィート望遠鏡  
(ミュンヘン博物館)

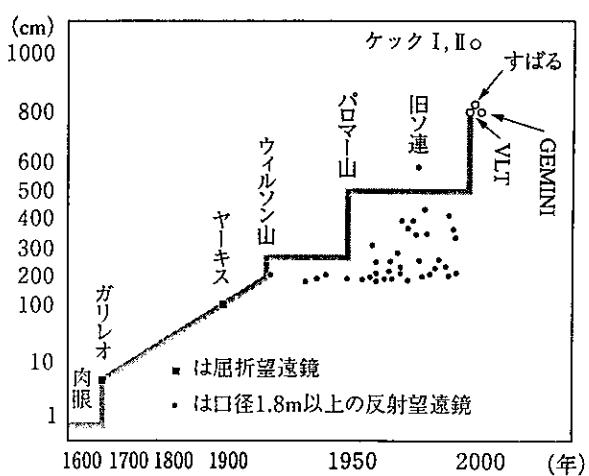


図4 望遠鏡口径増大の歩み

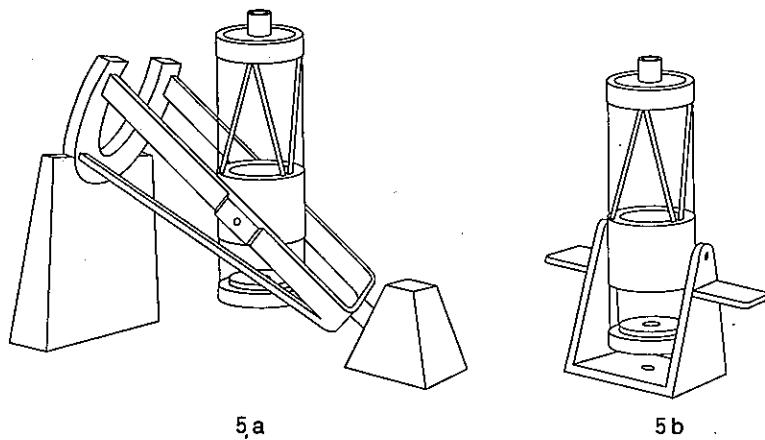


図5 望遠鏡の架台（赤道儀、経緯儀）

うになり、新しい大型望遠鏡はほとんどすべて経緯台方式(図5b)の架台となった。口径8.2mの日本のすばる望遠鏡、欧州南天天文台の口径8mVLT、米英加ほかの口径8mGEMINI、有効口径10mの分割鏡方式ケック望遠鏡など合計9台以上の8m級望遠鏡が21世紀初めには稼働することになる。

## 2. 光検出器の発展

人間の目が感じる本来の意味の可視光は、生物進化を育んできた太陽のスペクトルエネルギー強度の大きい波長380—790nmの比較的限られた範囲に一致している。この波長帯では人間の目は、かなり感度の良い鋭敏な光検出器であり、情報量の多い画像データをそれまでのデータベースと照合して把握し、重要な情報を抽出するという、柔軟で高度に洗練された「画像処理装置」(脳)と連動している優れたシステムである。ただ、その画像記録は主観的なフィルターを介して「揮発性メモリ」に記録されるだけであり、後から客観的に画像記録を読み出すことには多大の困難を伴う。天体観測も写真乾板が登場するまでは、眼視観測によるスケッチが主流であった。このため、「見えた」「見えなかった」という論争が後を絶たなかった。

19世紀後半の天体写真撮影法の普及はこの事情を一変させた。光化学反応により、写真乳

剤中のハロゲン化銀に形成された潜像を、現像により還元して銀粒子を光に応じた黒みとして定着する天体写真乾板は、それまでの眼視観測による天体観測を、客観的かつ記録性のよいものに変えた。新星などの現象についても、撮影された写真乾板を見れば、後からでも調べ直すことができるようになった。写真乾板は短波長の青色に感度を持つものが主であったが、成分

を工夫して波長感度特性を変えたり、色フィルターで乾板に当たる光の波長域を選んだりして、観測できるようになった。感光乳剤の感度の低い赤外線観測にはアンモニア水やフォーミングガスに浸して波長700nm以上での感度を上げる工夫をした特殊乾板などが開発してきた。写真乾板の量子効率(入射光子を捕らえる効率)はせいぜい1%程度と言われている。写真乾板に写った天体のネガ像から天体の光度を測定するには、様々な光量を当てた時のネガ像の黒みを同じ乾板に焼き込んでおいて、ネガ像の黒みと光量の関係を校正し、天体の光量を測るという方法が開発された。だが写真観測では、乾板の現像ムラや、特性曲線の非線形性など厄介な問題がつきまとつたため、精度の良い測定は簡単ではなかった。

天体測光の精度を格段に改善したのが、外部光電効果を用いた光電子増倍管の登場であった。光電子増倍管は天体からの微弱な光を光電子に換え、その電子を電場で加速して二次電子放出面にあて、電子の数を10万倍程度に増やして、電気信号にして取り出す装置である。撮像向きではないが、恒星の明るさの測定や変光現象の測定に威力を發揮した。外部光電効果を用いた光電管の量子効率は20%以下であった。その後、1960年代から70年代にはさまざまなTV型の撮像装置が天体観測にも導入された。

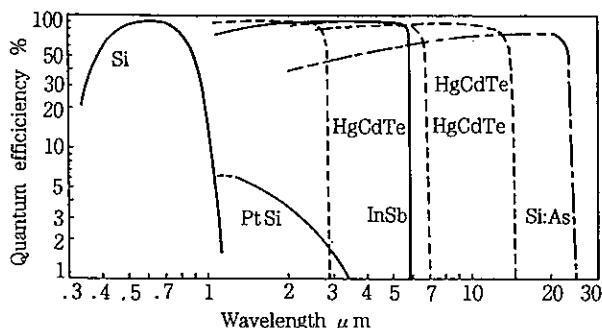


図6 光検出器の感度

天体からの光は極めて微弱である。星の明るさの目安となる、こと座の0等星ヴェガからの光子数は、ヴェガが天頂近くにあるときでも波長550nmでは、1秒あたり、1平方cmあたり、1nmあたりで1万個程度である。5等級ごとに明るさが100分の1になるから、例えば主鏡の面積50万平方cmのすばる望遠鏡で、25等星を観測するときには、1万秒(3時間)露出して、1nmあたりの光子数がやっと5000個になる程度である。地球大気での光の吸収損失や、大気光の前景放射、検出器の量子効率などを考えるとこれでも、精度の良い観測には十分とは言えないほどの数なのである。

1980年代に入って、シリコン半導体の内部光电効果を利用したCCDが用いられるようになると、量子効率が最大で70%程度にも達するようになり、感度の一様性と再現性が良いこともあって、天体観測の感度と精度が劇的に向上した。現在では、「可視光」の波長域はCCDの有感帯である350—900nm全体を指すようになってきている。1980年代末からは赤外線半導体摄像素子の開発も進み、波長1ミクロンから10ミクロン程度までの近・中間赤外線についても、「可視光」とかなり近い画質の天体写真が撮影できる摄像素子が登場してきた(図6)。CCDの登場で可視光観測でも真空技術や冷却技術が重要になってきたことも、赤外線観測との技術面での共通化につながり、最近では赤外線天文学と可視光天文学の境界が薄まってきている。特に大気の窓(図7)といわれるJバンド

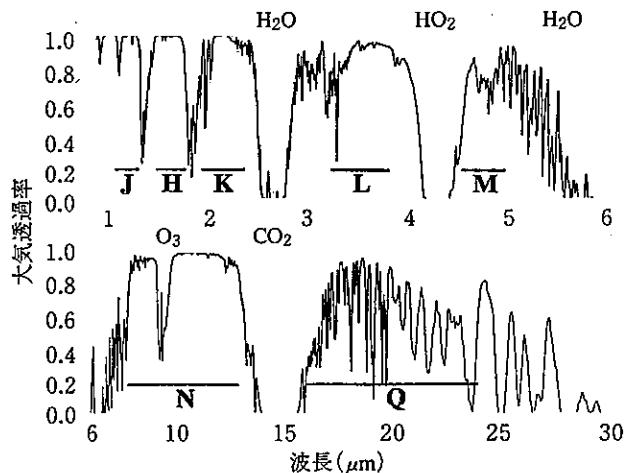


図7 大気の透過率

(波長1.2ミクロン), Hバンド(1.6ミクロン), Kバンド(2.2ミクロン)の近赤外線については、可視光観測とほとんど差が無くなってきた。Kバンドより長波長側のLバンド(3.5ミクロン), Nバンド(10ミクロン)では地球大気の熱放射が強いため、可視光の観測法とはかなり異なる工夫が必要となる。

赤外線は可視光に比べてエネルギーが低い低温度の天体を見ることになる。特に低温星や星間空間の塵の熱放射が重要な赤外線源となる。スペクトル線の解析から様々な分子や原子に関する情報が得られる。可視光に比べて星間塵による減光が少ないので、暗黒星雲に遮られた銀河系の中心部まで見通すことができる。また、宇宙膨張により遠方の銀河の可視光は赤方偏移して赤外線になるため、遠宇宙の観測でも赤外線が重要となる。こうして、すばる望遠鏡をはじめとする次世代の8m級望遠鏡は、伝統のある可視光と新分野の赤外線の両方の観測機能を重視した設計となってきたのである。

### 3. 21世紀の宇宙観をつくる大望遠鏡群

大気に吸収されるため地上までは到達しない紫外線での宇宙観測を行うことと、大気の揺らぎを避けて高い想像力の観測を実現するために、口径2.4mのハッブル宇宙望遠鏡が企画され1990年に打ち上げられた。スペースシャトル

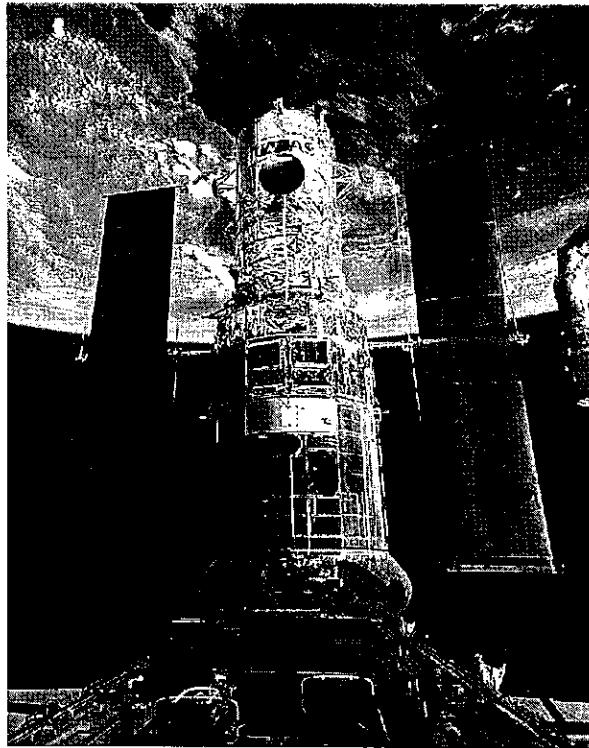


図8 修理のためスペースシャトルに回収されたハッブル宇宙望遠鏡

チャレンジャー号の爆発や、主鏡の研磨ミスなどの試練を乗り越えて、マスコミでも報道されているように、ハッブル宇宙望遠鏡は数々の新発見をもたらしている（図8）。

新聞等ではハッブル宇宙望遠鏡に比べると派手な報道が少ないが、学術的には勝るとも劣らない成果を挙げているのが、カリフォルニア大学連合が建設し1993年から稼働をはじめた有効口径10mのケック望遠鏡である。ケック望遠鏡は、直径1.6m程度の六角形鏡を三十六枚敷き詰めて有効口径10mの望遠鏡に仕立てた、分割鏡方式の望遠鏡である（図9）。非回転対称な分割鏡方式は鏡面精度の実現などで困難があり、各要素鏡の方向を揃えるだけでなく、その高さも合わせる必要があり、すばる望遠鏡など後述の薄鏡方式とは別の困難があったが、実用化にこぎつけた。ケック望遠鏡はハッブル望遠鏡の10倍以上の集光力を活かした分光観測で天体物理学的に重要な様々な成果を挙げている。

ハッブル望遠鏡やケック望遠鏡の活躍を横目に見ながら、日米欧の主要天文台が企画してき

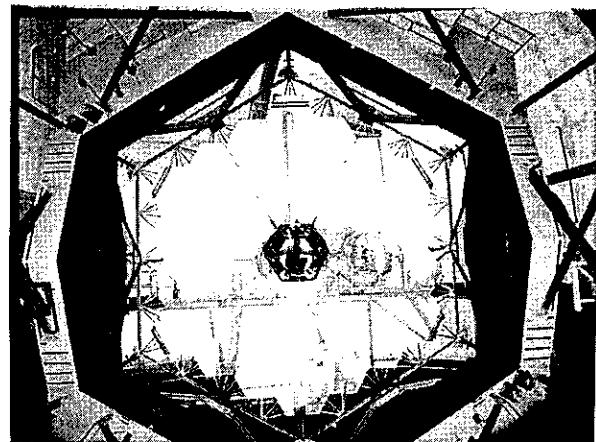


図9 分割鏡方式のケック望遠鏡

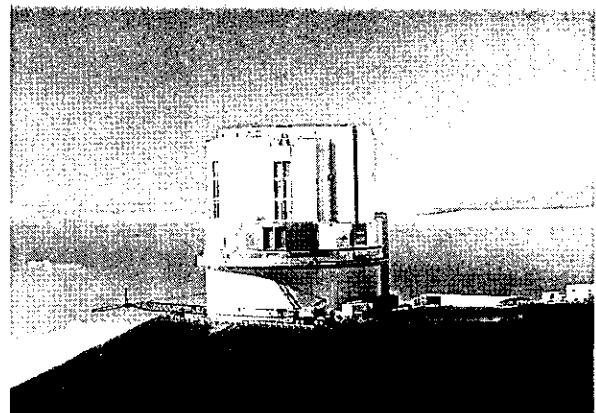


図10 マウナケア山頂のすばる望遠鏡ドーム  
(関口氏の図3を再録)

たのが、薄鏡方式の本格的な8m級望遠鏡である。これらはコンピュータの発達をフルに利用したインテリジェントな望遠鏡、能動光学方式の望遠鏡である。光の波長の十分の一以下のレベルで直径8m級の望遠鏡鏡面を設計値どおりに保つには、何らかの制御なしでは現実的には実現できない。形を制御するのなら、いつのこと思い切ってガラスを薄くして軽量化してしまおうというのが能動光学の発想の原点であった。本シリーズで関口氏以下の解説で詳しく紹介する日本の8.2mすばる望遠鏡（図10）、歐州8ヶ国共同の歐州南天天文台が南米チリのアンデス高原に建設している4台の8m望遠鏡VLT（図11）、米英加ほか3ヶ国共同の8mGEMINI望遠鏡は、具体的方式こそ異なるものの、いずれも一枚物の薄鏡の表面形状をコンピュータ制御で整えるという能動光学方式を採用した。直径

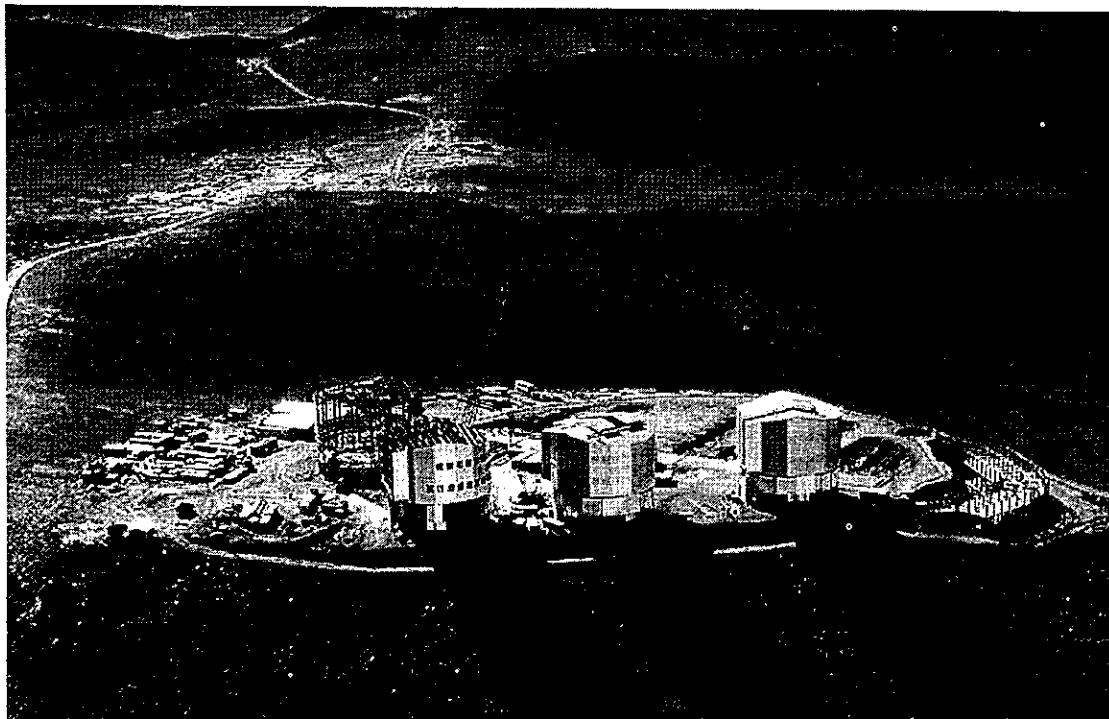


図11 チリのアンデス高原に建設中の欧州南天天文台のVLT。  
4台の8m望遠鏡を将来的には光干渉計として結ぶ計画

8mもの主鏡用ガラスをつくり、それを磨くということ自体が人類初の大事業である(大坪氏の解説参照)。

能動光学技術をさらに発展させた補償光学技術(高見氏の解説参照)の確立により、ゆらぐ大気の底からでも、あたかも真空中で観測しているかのように大気の揺らぎの影響を打ち消すことが可能となり、地上大型望遠鏡の解像力はハッブル宇宙望遠鏡の解像力を上回ろうとしている。また、ハッブル望遠鏡の10倍以上の集光力を持つ8m級望遠鏡は分光観測ではハッブル望遠鏡を凌ぐ性能を発揮する。すばる望遠鏡には可視光や赤外線でのさまざまな観測を実現するために、合計7台の特徴ある観測装置の製作が進められている(山下氏の解説参照)。これらの8m級能動光学望遠鏡はいづれも1998年から1999年にかけて試験観測に入る予定である。予定どおりに建設が進めば、2002年には南北両半球で合計9台以上の8m級望遠鏡が宇宙に向けられることになる。人類の認識が宇宙全体に届くという意味で21世紀はまさに宇宙時代の幕開けとなるであろう(図12)。

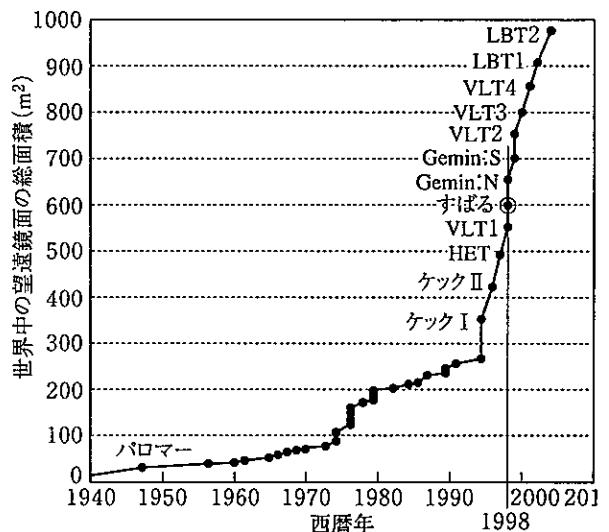


図12 大型望遠鏡の完成予定(未完)

#### 4. 将来計画と光技術の展望

目前に迫った21世紀の望遠鏡計画はこれで最後というわけではない。直径8m級の地上大型望遠鏡の当面の次の目標は干渉計画であろう。ケック望遠鏡の1号機と2号機は光干渉計として運用する計画であり、南米のチリに建設される4台の8m望遠鏡VLTも光干渉計として運用が予定されている。日本のすばるも

GEMINI やケックと結ぶことが構想されている。電波観測では干渉計技術が発達しており、宇宙科学研究所が1997年に地球周回軌道に投入した電波天文衛星「はるか」は地上局と結ばれて、基線長が1万 km にもおよぶ電波干渉計が実現している。電波に比べて波長が何桁も小さい光の干渉計は、それだけにより困難な技術であるが、これらの8m級大型望遠鏡に補償光学装置を装備し、光干渉観測が実現すると、有効口径100m級の望遠鏡となり、その解像力はハッブル宇宙望遠鏡を50倍も上回るものとなる。光で1ミリ秒角の空間解像力が実現できると、宇宙に関する新しい発見が相次ぐものと期待できる。

米国はハッブル宇宙望遠鏡の次の計画として次世代宇宙望遠鏡計画（図13）の具体化を進めている。これは紫外線観測を狙ったハッブル宇宙望遠鏡とは違って、近赤外線観測に焦点を合わせた口径8m級望遠鏡を太陽と地球のラグランジュ点L2に打ち上げようという構想である。欧州や日本にもこの計画への参加が呼びかけられているが、日本ではまだ誰も見ていない中間赤外線の観測に焦点を絞った独自の魅力的な宇宙望遠鏡計画が宇宙科学研究所を中心に構想されている。

科学衛星を打ち上げてきた文部省宇宙科学研究所と、実用衛星を打ち上げて来た宇宙開発事業団とは、これまで独立に計画を進めてきた。今後より規模が大きくなる天文科学衛星ミッションの策定に関しては、国立天文台を含めた協力連携関係や国際協力の可能性も視野に入れて科学的立場から検討する必要があろう。

日本学術会議第4部の旧日食専門委員会を改

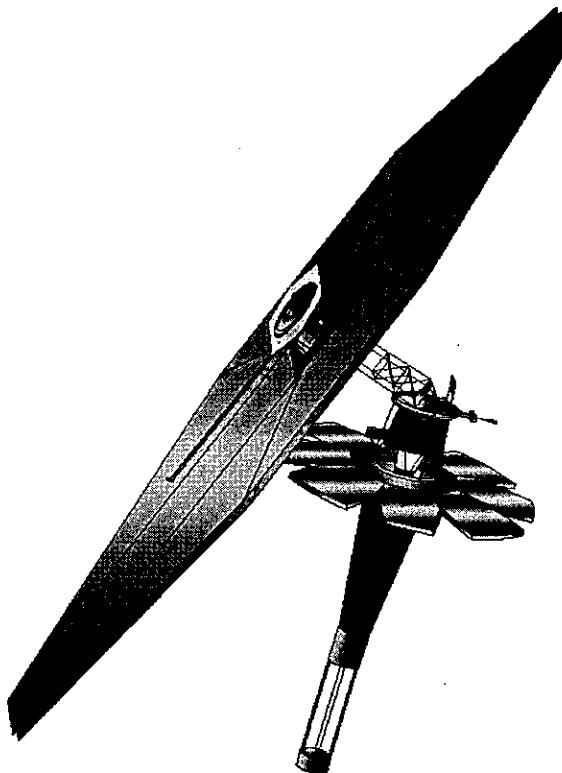


図13 NASA の次世代宇宙望遠鏡構想図

名して1997年度に発足した天文学国際共同観測専門委員会は、天文学での国際共同計画を遂行する上で、改善したいことがらを研究者の立場からとりまとめて提言しようと活動を始めている。このような場を通じて国際協力を進める枠組みの整備についても進言してゆくことが次世代の大型天文観測計画を進めるうえでは必要だと考えている。

#### 参考文献

1. Wilson, R. N., "Reflecting Telescope Optics I", Springer, 1996
2. 家正則, 科学, 9月号, 644頁, 1997