

8 m 級望遠鏡時代への秒読み

家 正 則

〈国立天文台大型光学赤外線望遠鏡計画推進部 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

試験観測にこぎつけた KECK 望遠鏡，設計・建設が進められている ESO の VLT と日本の JNLT（すばる），計画実行が決まった米・英・加の GEMINI，21 世紀の本格的な 8 m 級望遠鏡時代を前に，先陣を切るこれら 4 大望遠鏡計画の特徴と進行現状を比較紹介する。

1. KECK 望遠鏡¹⁾：「巨人の星」

ケック望遠鏡は直径約 1.8 m の六角セグメント鏡を 36 枚敷き詰めて，有効口径 10 m 相当の集光力を達成しようという，野心的な設計の望遠鏡である。他の 3 大 8 m 望遠鏡で採用された 1 枚鏡方式と異なり，36 枚の鏡からの 36 個の天体像を各々の鏡の向きを精密に調整して 1 つに合わせ込むという方式である。1985 年にマウナケア山頂で建設を開始し，1990 年秋には 9 枚の六角鏡をとりつけて，ファーストライトを宣言したが，このほど 36 枚全ての六角鏡を並べての総合調整が一段落した(図 1)。F/1.75 のモザイク主鏡と F/15 の副鏡からなるリッチ・クレチアン系で，通常のカセグレン焦点と左右のナスミス焦点のほかに，センターセクション上に 4 つの曲げカセグレン焦点

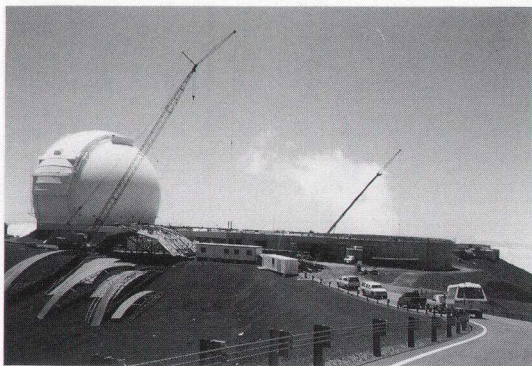


図 1 KECK 望遠鏡 (成相恭二氏撮影)

Masanori Iye : Count down toward the new age with 8m class telescopes

があり，F/15 の焦点としては合計 7 つの観測装置を取り付けることができる。この他に赤外用の F/25 の振動副鏡が備えられる。

各六角鏡は，当初円形の鏡を磨いてから六角形に切り落とす方法で試作したが，切り落としによる鏡面の変形が無視できず難航した。その後，1 枚の六角鏡あたり 30 本のバネを掛け，その力を調整して鏡を曲げながら研磨する手法の開発と，イオンビーム研磨法の開発により，なんとか六角鏡の実用化にこぎつけた。「大リーグボール養成ギブス（ご存知ですか？）」のバネは，36 枚全体では総計 1080 本になる。イオンビーム研磨で仕上がった六角鏡は星像直径が 0.28 秒角に相当するレベルにまで研磨することができた。36 枚の六角鏡すべてをイオンビーム研磨による面精度の良いものに交換するには，まだ少し時間がかかりそうである。

36 枚の六角鏡の位置を合わせるために，六角鏡間の幅 3 mm の継ぎ目にそれぞれ 2 個，合計 168 個の位置センサーが配置され，六角鏡一枚あたり 3 個，合計 108 個のアクチュエータにより，全六角鏡をあたかも一枚鏡のように駆動する。KECK 望遠鏡の解像力を左右する 1080 本のバネの強さの調整，108 個のアクチュエータの微調整も，今後継続して行われる。KECK 望遠鏡は世界で最も調整軸数の多い望遠鏡といえよう。

光軸調整が一段落したことにより，KECK 望遠鏡は集光力では世界一の望遠鏡になったといえる。集めた光をシャープに結像することに関して

は、各々の六角鏡自体の鏡面誤差と、全六角鏡の光軸制御誤差など、他の一枚鏡の望遠鏡に比べて技術的な困難が多いが、それでも総合星像0.4秒角を目指して努力が続けられている。六角鏡間のすきまからの熱放射が一枚鏡方式にはない余分の背景雑音となるため、赤外観測においてはその分もやや不利となる。

だが、いくつかの試練を克服した KECK 望遠鏡は、1993年3月に InSb アレー赤外線カメラを搭載して、試験観測に入った。すぐお隣では2台目の望遠鏡 KECK II の建設が、1996年頃の完成を目指して進められている。二台の10m級望遠鏡に加えていくつかの補助望遠鏡を配置し、光干渉計を構成する計画である。

2. VLT^{2,3)}: 「南の4天王」

欧州8ヶ国が共同で運営している欧州南天天文台(ESO)は1987年末にVLT計画の実行を決めた。VLT計画は南米チリ北部のアタカマ砂漠のセロ・パラナル山に口径8mの望遠鏡を4台建設しようという計画である。ESOが既に13台の望遠鏡を建設し運営している世界最大規模の天文台ラ・シヤからセロ・パラナルは北に約500km程の距離にあり、標高2664m、気象条件は年平均相対湿度15%以下、年平均気温12度、年平均風速7



図2 VLT建設予定地のパラナル山頂(文献5より)

m/secとされている。VLT建設用地として2.5ヘクタールの敷地を作るため、頂上から30m下までをそっくり削り取った(図2)。

VLTの主鏡はJNLTと同様の8mメニスカス鏡である。鏡はガラスセラミック製で、一枚目の鏡は現在、焼きなまし段階に入っている。1993年秋から研磨を開始し、一台目の完成予定は1996年、順調に進めば1998年末には4台目が完成する運びである。

4台の8m望遠鏡にはそれぞれカセグレン焦点、ナスミス焦点、クーデ焦点が備えられる。カセグレンとナスミスの合計8つの焦点位置には、それぞれに異なる専用の観測装置を備え、独立した望遠鏡として運用される。クーデ焦点にも独自の観測装置が予定されている。4台の8m望遠鏡に加えて、移動可能な複数の1.8m望遠鏡を配置し、光干渉計を構成することも計画されている。ちなみに、一台目の望遠鏡には中分散赤外分光撮像装置(MIRS)、紫外可視焦点短縮型分光器(FORS)が装着される予定である。

3. JNLT⁴⁾: 「グレートウォール」

日本の国立天文台が1991年度より建設を始めたJNLT(愛称:すばる)は、この稿を書いている1993年4月の時点までに、(1)主鏡用の超低膨張ガラス部材の製作、(2)1992年の七夕の日に行われた現地起工式に引続く地盤改良と望遠鏡基礎及びドーム基礎の工事(1993年9月号、宮下暁彦氏の稿参照)、(3)ドームの詳細設計が完了し、望遠鏡本体の設計製作も急ピッチで進行している。1993年度にはガラス部材を融着して一枚ものの8mメニスカス鏡材が完成する予定であり、ドーム下部の建設も進む予定である。JNLTは望遠鏡熱環境を整えるため、ドームにさまざまな工夫を施している。ドーム内部に熱を放出しないよう、駆動系な

どから発する熱はドーム外部へ排出し、日中は夜間の予測気温より1度程度低めにドーム内を冷却しておく。万一、ドーム内部に空気の揺らぎが生じた場合にも、これを効率良く流し去ることができるように、望遠鏡の両側に高さ20m、幅40mの巨大な壁を作り、通風路を確保する構造になっている。JNLTの主要な研究テーマである宇宙の大構造にちなんで、この壁を「グレートウォール」と呼んでいる。

これまでの4m級望遠鏡は、パロマー天文台、ESO(チリ)、UK(オーストラリア)に設置された1m級シュミット望遠鏡による全天サーベイのアトラスを拠り所として、観測天体を選んできた。だが、より暗い天体を対象とする8m級望遠鏡の場合、興味ある天体は自分で見つける必要がある。他の望遠鏡には無い主焦点を持つJNLTは、その広い視野を活用して自力でも新しい天体を捜し出せる望遠鏡となる。

JNLTの観測装置についてはすばる専門委員会装置開発小委員会の呼びかけに応じて現在8件程度の具体提案がなされている。1993年3月23-25日には、ハワイ大学からの8名の参加も得て、「すばる観測装置大ワークショップ」を東大総合図

書館で開催した。図3は、ここで提案された装置を、そのカバーする波長範囲と波長分解能で分類したものである。微光天体分光撮像器は開口タレット、グリズムタレット、フィルタータレットの選択で可視から近赤外までの撮像と様々な分光ができる多機能装置、赤外冷却分光器は1-5 μm での補償光学による高解像を前提とした分光装置、中間赤外分光器は未開拓の10-20 μm 帯での分光装置、コロナグラフ撮像器は原始惑星系の観測を目指す高解像装置、夜光除去分光器は近赤外領域での前景光となる大気発光によるOH輝線を巧妙に取り除き、より暗い天体の分光を目指すユニークな装置、モザイクCCDカメラは数10個のCCD素子を並べて広視野の撮像を実現する可視用カメラ、モザイクPtSiカメラはその赤外版、多天体分光器は光ファイバーで多数の天体の光を分光器に導き同時に観測する装置である。これらの装置の観測視野と空間解像力は図4のようになる。今後、これらの装置提案をもとに、装置構想をさらに磨き上げ、さまざまな観測要求に応えられるようにする必要がある。これらの装置の大部分は望遠鏡の機能を有効に活用する上で必要不可欠な、比較的標準型の装置である。一方で、JNLT

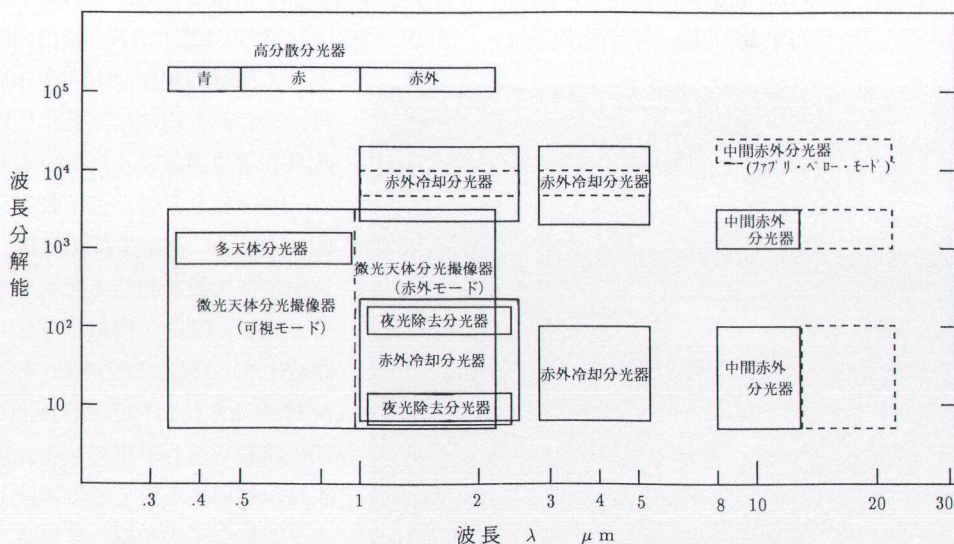


図3 JNLTの観測装置の波長域と波長分解能

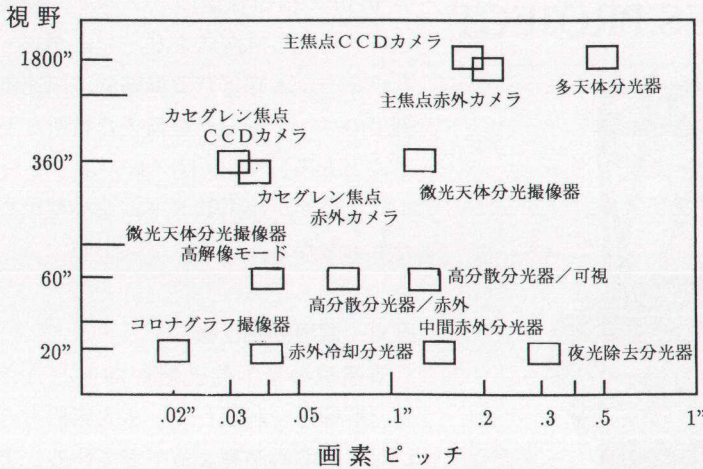


図4 JNLTの観測装置の視野と解像力

ユーザーのオリジナリティーを發揮した、ユニークな装置の開発も併せて進める必要があることは言を待たない。どの装置から立ち上げて行くかは、天文学上の重要性、望遠鏡建設工工程、観測装置の完成度を考慮して、決めて行くことになる。KECKが稼働開始し、VLTがJNLTに一年先行、GEMINIは一年遅れでスタートを切った現在、いかに優れた観測装置群を作れるかに勝負がかかっていると言っても過言でない。

4. GEMINI^{5,6)}: 「二卵性双生児?」

GEMINI計画は米国50%、英国25%、カナダ15%、チリ5%、(残り5%の分担未定)の国際協力でマウナケアと南米チリのセロ・パチョン山にそれぞれ一台の8m望遠鏡を建設する計画である。1992年秋に薄メニスカス方式で建設することを決めた。具体設計はこれからなので未定な点も多いが、GEMINIの最大の特徴は、波長2.2ミクロン(K-バンド)の赤外線、回折限界に近い0.1秒角を目標星像直径と設定しているところにある。また、直カセグレン焦点に加えて四つの曲げカセグレン焦点を備え、複数の観測装置を常時使用可能とし、機器の交換を最小限に抑える工夫が構想されている。望遠鏡に装着する観測装置の重量が大きいため、主鏡を高度軸近くまで上げて

バランスを取る設計となっている。後で触れる米国内事情のため、マウナケアに置くGEMINI I号機は薄メニスカス鏡で赤外用とし、セロ・パチョンに置くGEMINI II号機はハネカム鏡で可視用として立ち上げるという二卵性双生児案なども飛び出しているようだが、GEMINIグループとしては、共に薄メニスカス鏡で少なくとも当初は共に赤外用とする一卵性双生児構想を検討しているようである。

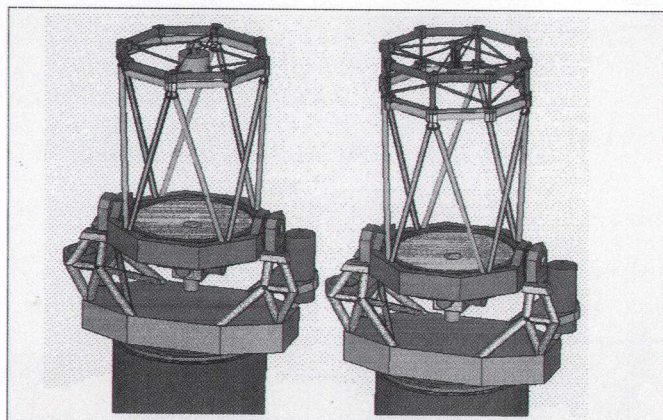
5. 4大計画の比較

4大望遠鏡計画の特徴を様々な切り口から比較するために、その主要要素を表1にまとめた。

5.1 目標星像直径

光学系の設計製作誤差、望遠鏡追尾誤差を含めた総合解像力の目標値は、補償光学なしで、KECKが0.4秒角、VLTとJNLTが0.2秒角、後発のGEMINIはティップティルト副鏡の実用化を前提として、0.1秒角である。能動光学と補償光学技術の実現性が高まったことにより、望遠鏡本体への要求精度は後発の計画ほど次第に高度なものになってきている。

GEMINI TELESCOPES PROJECT



F/6 & F/16 CONFIGURATIONS

図5 GEMINI 望遠鏡概念図

5.2 風圧による主鏡の変形

年平均風速 7 m/sec のマウナケア。薄メニスカス鏡方式や KECK 望遠鏡では、鏡に風があたると鏡がたわんだり、鏡がそっぽを向く可能性があり、主鏡部に当たる風圧をドームに備えた防風機構で、許容限界以下に減速させる必要がある。JNLT では観測時の許容最大風速は 14 m/sec を想定しているが、主鏡部での風速は 2 m/sec 以下に抑える構想である。防風機構では減速しきれないほど風が強いのに上層のシーイングが良い場合に風圧による変形が深刻になるが、そのような夜は ESO の統計では 0.4% 程度と見積もられている。実際には防風機構を用いることで十分対処できよう。VLT では風圧による鏡の変位は 3 分割の油圧システムにより受動的に取り除く。JNLT では主鏡にかかる風圧を 3 か所の固定点にとりつけた力センサーで計測し、付加荷重を 264 個のアクチュエータに割り振る能動制御系を組むことによって能動的に取り除く。風圧による変形を測定する方法についても検討が進められている。

5.3 ドーム構造

KECK 望遠鏡は古典的な美しい半球型の白いドームに収められている。JNLT は高さ 42 m, 直

径 40 m の楕円柱型のドームで、両開きスリットと風防スクリーン、グレートウォールと呼ばれる風路壁、風速制御用のベンチレータを備えた斬新なドームとなる。VLT はグレートウォールはないが、JNLT ドームを小型化したものとなる。

5.4 温度制御仕様

望遠鏡の光学的性能が向上したため、解像力を制限している大気揺らぎに対する関心が高まってきている。上層大気のシーイング補償は補償光学に頼るしか方策はないが、ドーム周辺の

接地境界層の揺らぎやドーム内部の揺らぎは、工夫次第で抑え込むことができる。主鏡表面温度が周辺気温よりも高いと、鏡面からかげろうが立ち昇り、解像力を落としてしまう。これをミラーシーイングと呼んでいる。鏡の温度が気温と等しいか 1 度程度低いようにしておけば、ミラーシーイングは問題とならない。そのための温度制御法、夜間気温予測法の開発に関心が寄せられている。

5.5 アクチュエータと能動補正の使い方

JNLT は音叉型力センサーを内蔵した機械式アクチュエータを開発した。モータでボールスクリュウを回転しバネを押し縮めることにより力を発生する。鏡の裏からポケットを掘り、そこへ挿入した 264 本のアクチュエータにより鏡を局所重心で支えるため、完全なフローティング支持を実現する。VLT は歪ゲージ型力センサーを用い、油圧と機械式を併用した 150 本のアクチュエータで鏡を支える。横方向の支持は鏡の周辺に取り付けた 64 個のバランサーで行うが、望遠鏡を傾けると鏡が折れ曲がるのでその分は 150 本のアクチュエータで形を整える。GEMINI も歪ゲージ型力センサーを用いるが、空気圧方式のアクチュエータの採用を検討している。薄メニスカス鏡を支える能

表1 4大望遠鏡計画の比較

	KECK I	VLT(UT1)	JNLT	GEMINI(北)
組織	カルテク他	ESO(欧8ヶ国)	国立天文台(日)	米・英・加・刊+?
観測開始	93年春	96年夏	98年春	98年秋
建設地	マウナケア	パラナル(チリ?)	マウナケア	マウナケア
主鏡有効径	10m(36枚)	8m(セ・ロ・ユウ)	8.2m(ULE)	8m(ULE)
目標星像直径	0."42(80%)	0."26(80%)	0."23(FWHM)	0."1(50%) (注1)
主鏡アクチュエータ	108個 電動	150個 油圧+空気圧	264個 電動	120個 油圧+空気圧
コーティング	7μ蒸着	スパッタ	7μ蒸着	スパッタ
ドーム(径、高)	半球	円柱(28m)	楕円柱(40m, 42m)	半球(33m)
ドーム/望遠鏡回転	非同期	非同期	同期	非同期
スリット駆動	昇降型	両横開き型	両横開き型	昇降型
風路壁	なし	なし	あり	あり
副鏡枚数	2	1x4(交換なし)	7(注2)	3
カセグレンF比(注3)	F/15 F/25	F/13.6(15')x4	F/12.2(6') F/35(4')	F/6(45') F/16(3'5)
曲げカセグレンF比	F/15x4	なし	将来移行	F/16(3'5)x4
ナスミスF比	F/15x2	F/15(20')x8	F/12.6(4')x2 F/36x2	F/19(3')x2
主焦点F比	なし	なし	F/2(30')	なし
クーデF比	なし	F/50(2')x4	将来設置	なし
ナスミス像回転補償	装置を回転	装置を回転	像を回転	装置を回転
カセ搭載装置全重量		2.5t	2t	4t
カセ搭載可能装置数	5ポート	各1個(UT1-4)	付け替え	5ポート

- 注1) 追尾誤差なしの場合
- 注2) 主焦点補正系2個を含む
- 注3) 括弧内にケラレなしの視野(分)を示す

動支持機構の要である力センサーとアクチュエータの方式が、それぞれの検討で3者3様となったのは興味深い。

副鏡を少し前後させ、主鏡の球面収差を能動補正すると、望遠鏡の焦点位置をある程度自由に前後させることができる。VLTは共通の副鏡で力まかせに主鏡を曲げて、焦点距離が3.5mも違うカセグレン焦点とナスミス焦点を利用できるようにする。この方式だと解像力がやや落ちるため、JNLTとGEMINIは専用の副鏡を用意して取り替える方針である。

6. 薄鏡ワークショップ

1993年2月上旬、王立エジンバラ天文台から、「GEMINIグループ主催で3月初旬に8m級薄鏡望遠鏡ワークショップを急遽行うので、日本からも誰か出席して欲しい」という連絡があり、急な話だが参加することにした。

JNLTは1984年に薄鏡方式の採用を決め、以後同じ方式のVLT計画を進めるESOと技術情報の交換をしながら、検討を進めてきた。GEMINI計画の場合、英国のグリニッジ天文台は

以前から薄鏡方式を主張してきたが、米国内ではアリゾナ大学鏡研究所は一貫してハネカム・ボロシリケート鏡の研究を行ってきた。1992年秋にGEMINIも薄鏡方式を採用することに決めたが、鏡研究所の生き残りを掛けて、ハネカム鏡方式復活の強い働きかけがあったようである⁷⁾。GEMINIグループとしては、充分な理論武装を期して、急遽上記ワークショップ開催を呼びかけたというのが真相のようである。

いきさつはともあれ、ワークショップでは、前節で述べたような、3者共通の課題を軸に、オックスフォードで2日間、ミュンヘンのESO本部で1日、それぞれの計画と検討内容を報告し、互いのアプローチの比較検討を行った。議論の内容は、論文発表以前のそれぞれのホットな研究の紹介であり、アイデアの交換であり、JNL Tにとっても大変有意義であった。JNL Tで検討した風圧変形の評価と対処法の研究⁸⁾や、ミラーシーイング⁹⁾・ドームシーイング¹⁰⁾の測定と抑制法のオリジナルな研究の紹介は、特にGEMINIグループの関心を呼んだ。4大望遠鏡グループは互いにライ

バルではあるが、オープンな情報交換を期している。このような、会議を毎年持回りで開くことなどを合意してワークショップを終了した。

計画が軌道に載り急ピッチで建設が進んでいるJNL Tだが、他の8m級望遠鏡に勝る天文学的成果を上げるため、望遠鏡、観測装置に新たな工夫を盛り込んで行きたいものである。

参 考 文 献

- 1) Nelson, J., and Mast, T. 1992, in *Proc. Progress in Telescope and Instrumentation Technologies*, 3.
- 2) Beckers, J. M., and Tarengi, M. 1992, *ibid.*, 13
- 3) Enard, D. 1992, *ibid.*, 25.
- 4) Kodaira, K. 1992, *ibid.*, 43.
- 5) Osmer, P. S., 1992, *ibid.*, 35.
- 6) Randall, L. K. 1992, *ibid.*, 39.
- 7) Robinson, L., J., and Murray, J. 1993, *Sky and Telescope*, 85 (5), 26.
- 8) Itoh, N., Mikami, I., Noguchi, T., Shimizu, Y., Yamashita, Y., Sovka, J., McLaren, R., Erasmus, A. 1990, *SPIE Proc.*, 1236, 866.
- 9) Iye, M., Noguchi, T., Torii, Y., Mikami, Y., Ando, H. 1991, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 103, 712
- 10) Iye, M., Nishihara, E., Hayano, Y., Takato, N., Okada, T. 1992, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 104, 760



南天の星—南十字星とケンタウルス座近傍

大森幸子 (東京都)