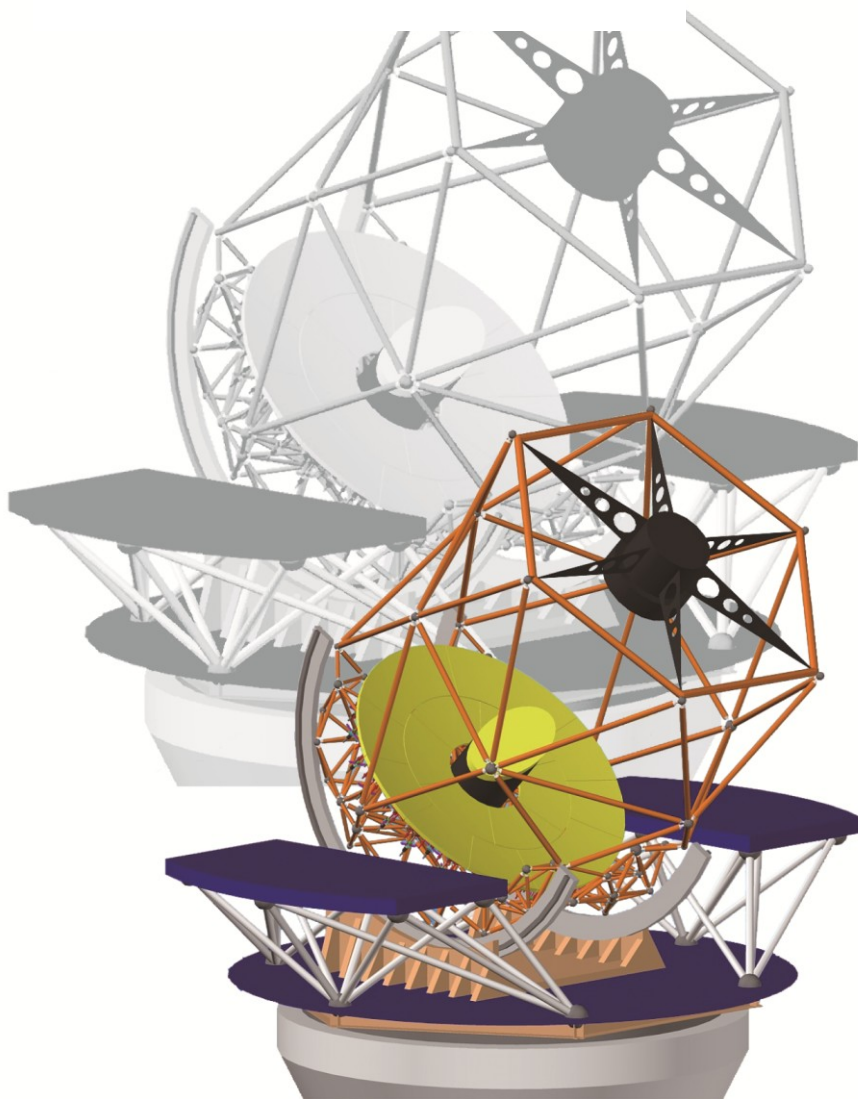


次ページが表紙の案

岡山 3.8m 新技術

光学赤外線望遠鏡計画書



望遠鏡ワーキンググループ

2010年3月

目次

第1章 計画の概要と目的	1
第2章 研究課題の概要	4
2-1 技術的課題	4
2-2 天文学の課題	7
第3章 突発天体と星形成領域の観測	10
3-1 突発天体现象	10
3-2 星・惑星形成の現場	24
第4章 研削による鏡面形成	31
4-1 概要	31
4-2 セグメント鏡の光学性能	33
4-3 軸外し非球面の研削・研磨加工	33
4-4 研削・研磨における机上計測	38
第5章 望遠鏡	42
5-1 光学系	42
5-2 架台構造	52
5-3 主鏡の支持・制御機構	58
5-4 副鏡・第3鏡	69
5-5 その他の光学系	77
第6章 ドーム・建物・付帯設備	79
6-1 ドームの概要	79
6-2 ドームの詳細	81
6-3 付帯設備	85
6-4 観測棟	86
第7章 観測装置	87
7-1 高速測光・分光装置	87
7-2 可視・近赤外同時面分光装置	90
7-3 可視近赤外撮像装置	92
7-4 高分散分光器	94
第8章 設置場所	95
8-1 背景・経緯	95
8-2 サイト調査	97
8-3 設置場所	102
第9章 組織・運営	103
第10章 建設計画	105

第 11 章 その他特筆すべき事項：これまでの経緯と関連資料について—	106
付録・参考資料 —————	112
A 関連論文、天文学会・研究会発表リスト	112
B 新聞記事等	120
C 日本学術会議 資料等	124
D 競争的資金獲得状況	130
E 推進 WG 名簿	132
F 協力者	132

第1章 計画の概要と目的

本計画は、可視光・赤外線観測場所として国内で最もすぐれた自然科学研究機構 国立天文台 岡山天体物理観測所隣接地に、新技術を用いた口径 3.8m の光学赤外線望遠鏡（以下、3.8m 望遠鏡；図 1.1）を建設し、次世代望遠鏡の建設に必要な技術開発を行なうとともに、突発天体现象や星・惑星形成の現場等の観測を通して、わが国における天文学研究を大学間連携により一層推進するものである。

ガリレオが自らレンズを組み合わせて作った望遠鏡を天空に向けて以来 400 年、望遠鏡や観測装置の進歩が、観測天文学を進展させてきた。中でも、望遠鏡の大口径化（図 1.2）

がもたらす集光力と空間分解能の向上によつて、遠方からやってくる微かな光が検出され、天体の細かな構造が解き明かされてきた。

すばる望遠鏡に代表される大口径望遠鏡が国内外の多くの研究者によって広く共同利用され、個々の天体の詳しい性質や限られた天域内の微光天体の研究に成果をあげている。その一方で、世界では口径 3–4m クラスの中口径望遠鏡も現在数多く建設されており、その専有性を活かして広視野探査などに特化した観測が行なわれている。宇宙の観測は、世界にわずかしかない大口径の望遠鏡と、柔軟に運用できてさまざまな観測に対応可能な数多くの中小口径望遠鏡とが協力し合って進めて行くことが肝要である。

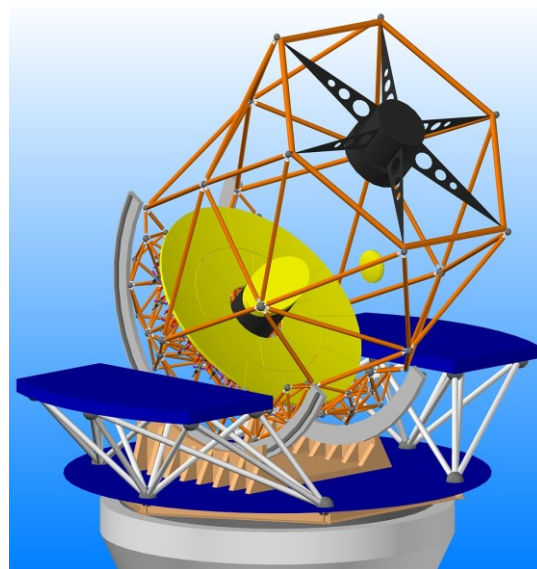


図 1.1 3.8m 望遠鏡完成予想図。

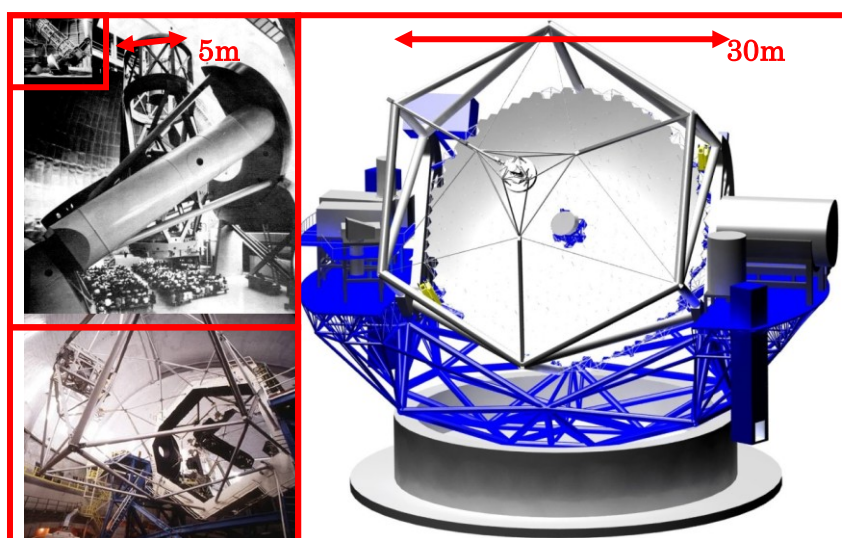


図 1.2 望遠鏡の歴史：左上から反時計回りに Mt.Wilson 1.5m (1908 年)、Hale 5m (1948 年)、Keck 10m (1993 年)、TMT 30m (計画中)。

1.1 望遠鏡の新技术

現在世界最大の望遠鏡は口径 8–10m クラスであるが、次世代の望遠鏡としては口径 30m クラスのものが検討され、すでに建設が計画されている。それらの超大型望遠鏡では、口径 8.2m のすばる望遠鏡のように単一の主鏡をつくることは不可能で、分割鏡を組み合わせて巨大な口径の主鏡として働かせることが必要となる。さらに、その分割鏡の数は数百枚になるため、鏡を効率よく大量生産する技術も欠かせない。また、従来の望遠鏡構造を踏襲したのでは、建設費が巨大になるだけでなく自らの重量による変形が大きくて使いものにならないため、架台部分にも斬新な構造が必要となる。加えて、3.8m 望遠鏡では突発天体现象に対応するため、高速駆動性能も必要となる。これらの技術を開拓することが、本計画の一つの目的である。

1.2 中口径望遠鏡で推進する天文学研究

現代天文学研究の潮流は装置の大型化を目指しており、超大口径望遠鏡のみが天文学の目指すべき方向のように思われがちである。しかし、ガンマ線バーストの可視光閃光の発見、系外惑星の発見と探索、銀河ハロー中のコンパクト天体の探索など、中小口径望遠鏡がその機動力や専有性を活かし、新たな天文学分野の開拓に威力を発揮してきた例は枚挙にいとまがない。現在、日本を中心とした地球の半球の中には、口径 3m を超える光学赤外線望遠鏡はあまり存在しない。この地理的条件を考慮してガンマ線バーストやブラックホール天体などの突発天体现象を世界に先がけて分光・偏光観測し、また独自に系外惑星探査を進め、超高分散分光観測から星・惑星系形成領域の物理を極めるなどによって、天文学の最先端を切り開くことが本計画のもう一つの目的である。

1.3 大学における天文学研究基盤の強化

国家プロジェクトとしてのすばる望遠鏡のような大口径望遠鏡だけでは、試行錯誤しながら観測装置の開発や観測研究をのびのびと進めていくような若手研究者の養成は難しい。一方、3.8m望遠鏡は、国内最大の光学赤外線観測天文学の研究拠点として、国立天文台、産業界との密接な連携の下、大学間連携で共同運用するものである（図 1.3）。中口径の望遠鏡ならではの研究プロジェクトを大学間連携等の仕組みを使って行なっていくことで、各大学の天文学研究を活性化し、人材育成に大きな効果をあげることが期待される。なお、本計画は、日本学術会議天文学研究連絡委員会からは計画推進を支持する特別議事録も出されるなど、光学赤外線天文学コミュニティ全体からの強い要請を受けているものであることを追記しておく。

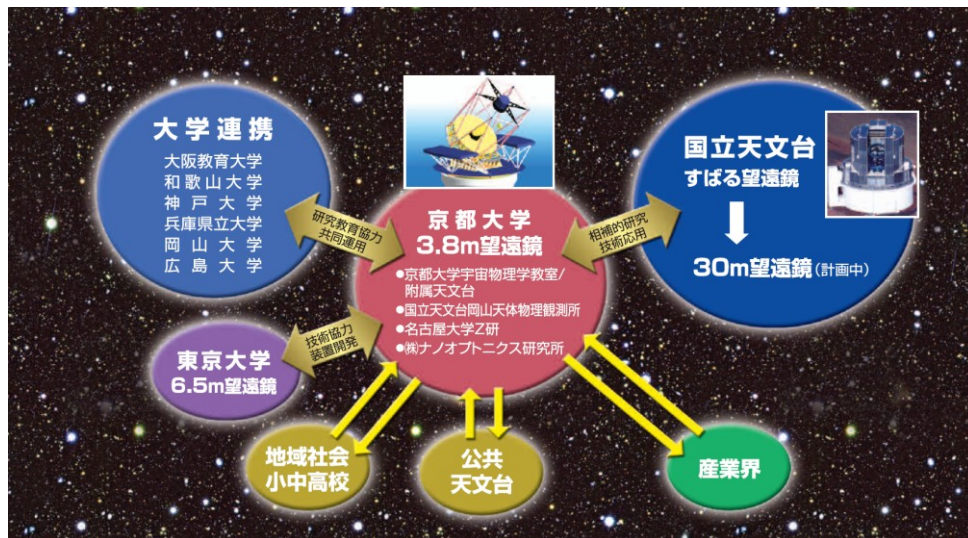


図 1.3 大学連携、国立天文台、産業界と共同開発・運用する 3.8m望遠鏡。
(2008 年のパンフレットより転載。一部記載に古いものがあります。)

1.4 一般社会への貢献

天文学に対する国民の関心はきわめて高く、岡山天体物理観測所にも見学者が多く訪れる。しかしながら、現在の学校教育や社会教育の場において、天文学の教育や普及が行なわれる機会は決して多いとはいえないのが現状である。岡山天体物理観測所に最先端技術を結集した望遠鏡を建設することは、小中高大学生から一般の人々の科学に対する興味をいっそう喚起し、天文学の普及に資することがおおいに期待される。実際、地元の期待は極めて高い。そこで、地域との堅固な協力のもと、望遠鏡を見学可能にし、年に何度かの公開、大学間連携による天文教育の実施等を行なう。これによって、国民の科学リテラシーの向上に寄与し、科学技術立国に向けた取り組みの一つとしたい。

また、本計画は産学連携によって天文学の最先端の研究設備を作る、わが国としては初めてと言って良い試みであり、日本の高い技術力を用い、それを純粋科学の研究に生かしてまた産業界へとフィードバックする仕組み作りに貢献したいと考えている。

第2章 研究課題の概要

3.8m 望遠鏡の研究課題は、将来の超大型望遠鏡製作に向けた基礎技術開発と、国内の専有望遠鏡（「ホームテレスコープ」）という利便性を活かした天文学の研究である。本章ではそれらの概要を述べる。

2.1 技術的課題

3.8m 望遠鏡は、(1) 研削による鏡製作、(2) 分割鏡方式、(3) 軽量架台の3大特徴がある。いずれも今後の大型望遠鏡の主流となる方式で、日本では初めての技術となる（表 2.1）。これらの技術は、本計画の口径 3.8m 望遠鏡で宇宙の研究を行なう際に決定的な長所となるだけでなく、次世代の超大型望遠鏡への道を拓くものである。

表 2.1 3.8m 望遠鏡の新技術

従来（主流の）方式	3.8m 望遠鏡の方式	新方式のメリット
研磨による鏡製作 一枚鏡方式 重量架台	研削による鏡製作 分割鏡方式 軽量架台	短時間、低コストでできる。 超大型望遠鏡製作に不可欠。 機動性に優れ、低コスト。

2.1.1 研削による光学系の製作

ガリレオやケプラーの時代の望遠鏡はレンズの組み合わせであったが、いまや天文学研究に用いられるほとんどの望遠鏡は反射鏡の組み合わせである。従来、レンズや反射鏡といった光学素子の製作は、ガラス板を回転させながら圧力をかけて磨いていく「研磨」によってなされてきた。研磨によって、高精度の球面レンズや球面鏡は比較的容易に製作できる。現代の望遠鏡では、天体の光を集める鏡（主鏡）は軸対称な放物面や双曲面の形状をしており、まず球面を作った後で修正研磨を施して軸対称の非球面を作るのが普通である。

ところが、この工程には2つの問題点がある。まず、研磨はきわめて時間のかかるプロセスであるという点である。次に、非球面研磨が困難であるという点である。加えて分割鏡では、鏡の形状は非軸対称となり、さらに困難となる。



図 2.1 研削による反射鏡の製作。扇形の鏡を、左の黒いボックス中で高速回転している砥石で削って、高精度面に仕上げていく。

これらを解決するために、本計画では、回転砥石の位置を高精度に制御して、鏡の面を思いのままの曲面に削り出す「研削」を行なう（図 2.1）。光の波長の数分の一（およそ $100\text{nm}=1$ 万分の 1 ミリ）までの精度

の鏡面を得ることは従来の機械加工では考えられなかったが、現代の日本の高精度工作機械では不可能でなくなっている。研削によって、研磨よりも桁違いに速く、しかも非軸対称の鏡面が製作可能であることをこの計画で実証する。

製作した鏡面は、レーザー光線を使った干渉計を用いて形状を検査し、フィードバックをかけて修正加工を行なう。このように、大型精密研削盤と光学干渉計とを組み合わせ、次世代の超大型望遠鏡の主鏡製作方法を確立する。

2.1.2 分割鏡の支持・制御

こうやって出来上がった分割鏡を 18 枚集めて、全体として 1 つの主鏡として機能させる (図 2.2 左) には、光の波長の数分の一までの精度の位置制御が必要である。本計画では、軽量でコンパクトな制御システムを開発する。各々の分割鏡はサイズが 1m 程度、質量が 100kg 程度あり、自分の重さで変形しないよう、裏には 27 点で支える機構を取り付ける (図 2.2 右)。分割鏡相互の位置制御には鏡に取り付けた位置センサーと高精度アクチュエータを用いる。鏡を整列させる手順としては、各分割鏡の焦点合わせ・軸合わせを行なった後、さらに光の波長レベルまで合わせて、1 つの高精度な鏡とする。この調整には、レーザー光線を使い、干渉像を検出する。これは観測の合間の短い時間で調整可能と考えている。

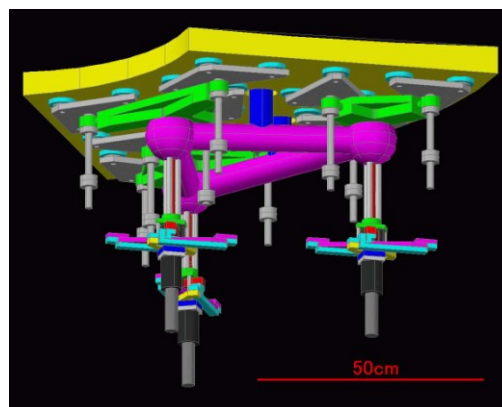
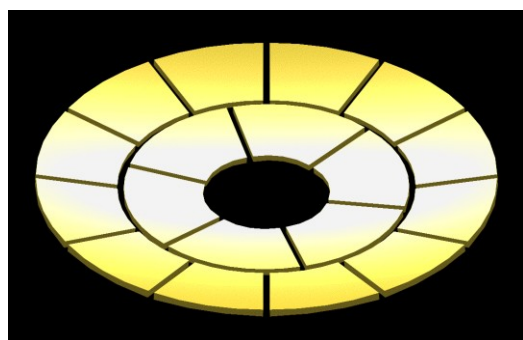


図 2.2 左：3.8m 望遠鏡で採用する 18 枚の分割鏡。右：鏡の支持機構。

また、各分割鏡の形が扇型をしているのも、本計画の 3.8m 望遠鏡の特徴である (図 2.2 左)。望遠鏡全体としての主鏡形状は円形となるため、図 2.3 のように、得られる天体像は円形の素直な光学パターンとなる。従来の六角形の分割鏡 (例えばケック望遠鏡；図 1.2 参照) を用いた望遠鏡と比べて格段に優れている。また、従来の六角形の分割鏡の組み合わせだと、曲率など、同じ反射面形状を持つ分割鏡は 6 枚ずつしかない。これだと、次世代の超大型望遠鏡で数百枚の分割鏡を持つ場合には、膨大な種類の鏡が必要になる。一方、この 3.8m 望遠鏡で内周と外周という 2 種類の反射面形状だけとなるように、扇形では一般にはるかに種類が少なくすむので、製作面でも運用面でも利点大きい。

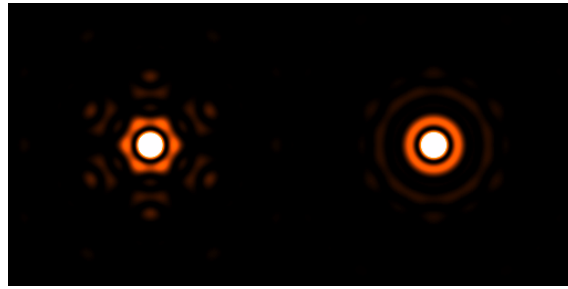


図 2.3 従来方式分割鏡による像(左)と新方式分割鏡による像(右)。

2.1.3 軽量架台

天体からの光や赤外線は主鏡で集められ、第2番目の鏡(副鏡)と第3番目の鏡で反射された後、観測装置へと導かれる。架台は、これらの鏡と観測装置を地球の自転にともなって移動する天体に向ける。次世代の超大型望遠鏡では、これまでのような架台を使うと自重変形が大きく、建設に巨額のコストがかかってしまう。そこで、本計画では、従来にない斬新なデザインの軽い架台を開発する。第1の特徴は、望遠鏡の生命である主鏡を真下からがっちり支える構造である。第2の特徴は、三角形を基本とした構造(トラス構造)の多用である(図2.4)。トラスによって、それほど重くなくてしかも堅固な架台を設計製作することができる。こうして、次世代の超大型望遠鏡のプロトタイプとしての架台を3.8m望遠鏡に用いることで、このクラスの口径の望遠鏡としても、次のような高性能を実現させることができる: 1) 軽量であるため、速く正確に天体をとらえるという高い駆動性能を可能にする。これにより、突発天体現象を迅速に観測できる利点がある。2) また、熱容量が小さいため、外気温度に速く追随する。これにより、望遠鏡本体が周囲の空気と温度が違うために起こるかげろうのような大気ゆらぎを抑えることができ、高解像度が達成できる。

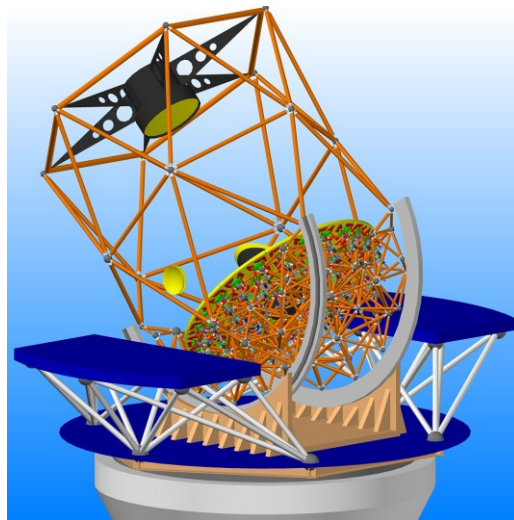


図 2.4 トラス構造をベースとする軽量架台の完成予想図。

2.2 天文学の課題

2.2.1 突発天体现象

突発天体とは、急激に増光や減光を示すなどの激しい光度変化を、突発的に示す天体をいう。太陽など、いわゆる主系列星の光度は、長年に渡ってほぼ同じ明るさで光っている。(でないと、われわれは存在しなかっただろう。) 換言すれば、恒星進化の時間は、人間の寿命より遙かに長い。人類の歴史において、宇宙は、多かれ少なかれ不変のものと認識されていたのである。しかしながら、数ヶ月から、速いもので数日、いや、数時間・数分で急激な光度変化を記録する特殊な天体も多々ある。そういった天体を総称として突発天体とよぶ(表 2.2 参照; 原始星・T タウリ星は突発天体ではないが激しい増光を示すことが知られており、ここに含めた)。

表 2.2 いろいろな突発天体现象。

突発天体现象	変光時間	コメント
ガンマ線バースト	数秒～数十日	未だ起源は謎。残光観測が正体究明に重要。
ブラックホール連星	数日～数か月	ブラックホールを含む連星系。X線新星を含む。
超新星	数日～数か月	恒星の終末の大爆発。
激変星	数秒～数十日	白色矮星を含む連星系。新星、矮新星など。
フレア星	数秒～数日	太陽フレアと同様のフレア。巨大なものもある。
原始星・T タウリ星	数秒～数日	主系列星になる前の星のフレア。

ガンマ線バースト、超新星、新星、激変星、X線トランジェント(X線新星)など、代表的な突発天体现象(激変天体现象)の多くは高密度天体(白色矮星、中性子星、ブラックホール)に落ち込むガスが明るく光り、観測されるものである(図 2.5)。こうして、突発天体现象の研究は、相対論的天体の天体物理的理解において大きな意義がある。それ以外にも強烈な個性を持つ天体が宇宙に数多く存在する。



図 2.5 近接連星系の概念図。通常の星(左上)から高密度天体(右下)へのガス流入により作られた円盤が光り観測される(落合隆郎氏の厚意による)。

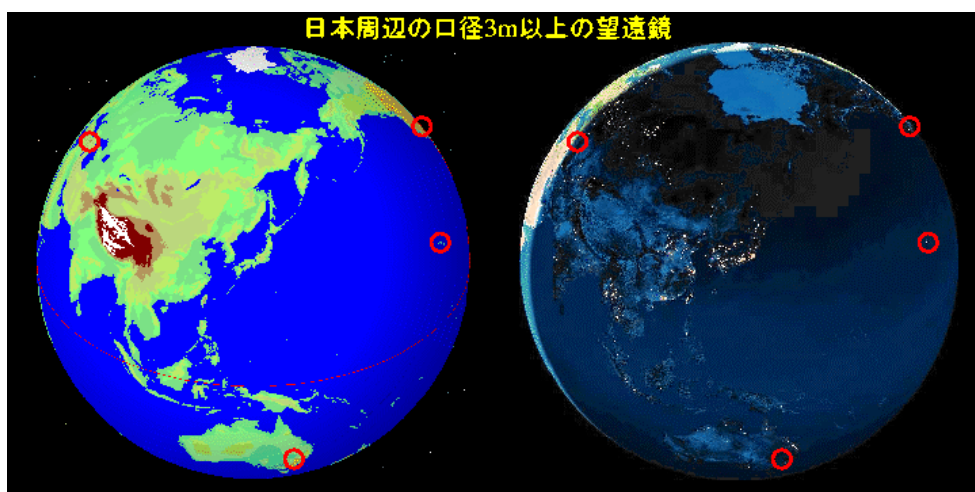


図 2.6 日本周辺の口径 3m 以上の望遠鏡。日本周辺は空白域にあたる。

こうした突発天体は、激変星など 19 世紀から知られているものがある一方で、現在でも新種の天体（ハイパーノバ、超短時間型 X 線新星など）の発見が相次いでおり、今後も新種の現象の発見が期待される。これらは国内に適切な望遠鏡がなかったために、天体そのものの観測機会を失ってきた可能性が極めて大きい（図 2.6）。特にガンマ線バーストの可視光対応天体のように、数時間といった極めて短い時間で変光（減光）する天体が発見されてきているが、海外も含めて既存の大型望遠鏡は新規天体の迅速な観測を必ずしも得意としない。逆に言えばこれらの短時間現象の即時対応を得意とする望遠鏡や観測装置が使えるようになれば、世界最先端の研究を進められると考えられる。突発天体検出を効率よく進めるネットワークと、機動性あるホームテレスコープの組み合わせが、明日の天文学を切り開くといえる。本計画による望遠鏡は、日本の経度付近における中口径望遠鏡の欠如を埋め、日本が夜の時間帯に発生する貴重な天体現象を捕まえること、また 24 時間連続観測ネットワークの形成等に活躍することが期待される。

2.2.2 星・惑星系形成

近年の天文学上の大発見の一つに、太陽系外惑星の発見がある。ドップラー法（惑星が周りを回っていることによる主星のふらつきで惑星を検出する方法）や、トランジット法（惑星が主星の前を横切る際、主星がやや暗くなることで惑星を検出する方法）、重力レンズ法（主星、惑星による重力レンズ効果で遠方の天体の明るさが一時的に増すことにより惑星を検出する方法）で発見された惑星（系）の数は、1995 年以来すでに 400 を超えており（2010 年 3 月現在）、年々、着実に増えている。もはや惑星系は稀な存在ではなく、太陽のような主系列星の周りにはかなり普遍的に存在するものと考えられている。日本でも、岡山天体物理観測所で系外惑星探査がなされており、これにより巨星の周りの惑星系が多数見つかった（図 2.7）。

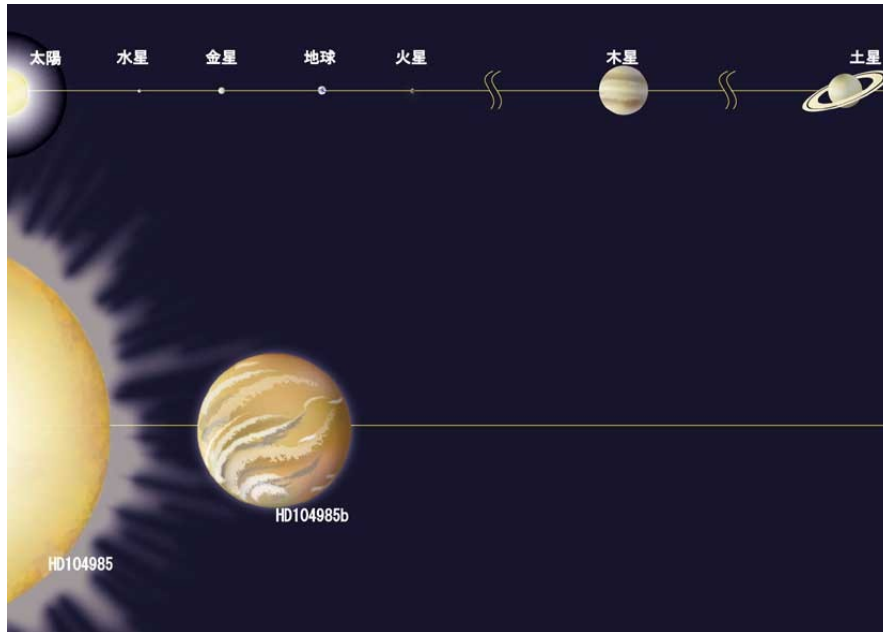


図 2.7 岡山観測所で発見された、巨星 HD10485 の周りを回る系外惑星 HD104985b と、太陽系惑星との比較の概念図。(岡山天体物理観測所提供)

発見された系外惑星の中には、地球と同様、 H_2O が液体として存在することのできる「居住可能領域」(ハビタブルゾーン) 近くに位置する惑星もあり、今後もさらに発見されると考えられている。このような惑星をターゲットにした現実的な地球外生命体探査から、地上の小口径望遠鏡による系外惑星探しに至るまで、現在、系外惑星観測に関する様々な計画が世界的に進行中である。3.8m 望遠鏡でも、その機動性を活かした系外惑星探査を計画している。

我々の太陽系や、発見された系外惑星系のような星・惑星系は、原始惑星系円盤とよばれる、塵(星間ダストともよばれる、ヘリウムより重い元素からなる固体微粒子)とガスからなる円盤中で形成されると考えられている。円盤赤道面に次第に塵が沈殿し、それが集まって惑星の種(微惑星)となり、その種がさらに合体・成長し、あるいは周りのガスを取り込んで惑星が形成されると考えられている。したがって円盤内で塵が集積し、ガスを取り込み、また残ったガスを散逸させるといった過程を観測的に明らかにすることは、惑星系形成を理解する上で極めて重要である。

円盤内の塵成分に関しては、測光観測によりこれまでに多くの研究がなされてきた。一方、ガス成分を観測するためには、分光観測が必要となる。特に円盤から放射される、比較的強度が弱く線幅の細いスペクトル線を測定するには、超高分散分光観測が必要である。ホームテlescope ならではのフレキシブルな観測時間を利用することにより、星・惑星系形成の基礎過程の解明に繋がる観測が可能である。例えば、原始惑星系円盤からの水素分子輝線の時間変動や、太陽系の彗星での塵表面反応分子スペクトル線の観測がそれにあたる。これらの過程を観測的に解明することにより、原始惑星系円盤の物理的・化学的構造の解明に至る糸口が得られる。

第3章 突発天体と星・惑星系形成領域の観測

本章では、新技術望遠鏡で取り組む天文学の課題（突発天体现象と星・惑星系形成領域の解明）について、やや詳しく述べる。

3.1 突発天体现象

3.1.1 突発天体现象の即時観測の意義

現代天文学の進展に伴って、われわれの宇宙観は「静的な宇宙」から「動的な宇宙」へとめざましい変遷を遂げている。そして宇宙の動的現象は、宇宙進化からミリ秒以下のスケールまで、あらゆるタイムスケールの現象となって現れていることが明らかになり、観測手段の進歩によってそれらの変動が現実に関測可能となってきている。特に、ブラックホールをはじめとする強重力場、白色矮星・中性子星のような縮退天体など、地上の実験室では決して再現できない環境下で起きる天体现象が、20世紀の産み出した最大の物理理論である相対性理論・量子力学の実験場として、さまざまな科学分野から脚光を浴び続けている。

これらの極端な物理状態、あるいは強重力場における天体现象は、その物理条件から容易に予測されるように、短いタイムスケールのものが多く（激変天体现象）、ミリ秒から時間のスケールの変動に本質的な情報が含まれている。中には数時間で活動が終止するものさえある。したがってこれらの現象は、いかに大型の望遠鏡であっても、地球上の1地点からでは、あるいは突発的な現象に迅速に対応できる設計がなされていないならば、決してカバーしきれないものではない。一方で、一旦、観測にかかれば、それが当該分野の研究を大きく進展させる画期的成果に結びつくことさえ十分にあり得るのが、突発天体の観測的研究の特徴である。このタイムスケールの天体変動は、天体観測における限りない可能性を秘めたフロンティアなのである。



図 3.1 日本上空の天体からみた地球。赤丸が3m級以上の光学赤外線望遠鏡の存在場所である。これらの場所からは、日本上空で発生した突発現象は、地平線近くにしかみえないので、観測が不可能である。

図 3.1 に示すように、地球上で、日本を含む西太平洋地域は、3m 級の望遠鏡の完全な空白域となっている。すなわち、日本での天頂方向に短時間の天体現象が起きても、既存の 3m 級望遠鏡は、最もよい条件の場所でも地平高度が 30°以下の、厳しい観測条件でしか観測できない。その場所が夜間である必要性を考えるとさらに観測可能性が下がる。その現象は観測史上最大のガンマ線バーストかも知れないし、あるいは 1 世紀に一度も起きないような近傍超新星の爆発初期かも知れない。さらに、現代の知識でさえも測り知ることのできない未知の天体現象かも知れない。この地域に適切な観測設備が存在しない状態が続けば、全人類的財産となり得るそれらの情報が記録されることなく、空しく空間の彼方に去ってゆく日をやがて迎えることになるであろう。いや、それが今晩現実となる可能性すらある。

これらの突発的な天体現象や、時間的要請の厳しい観測に対応できる、しかも現代天文学の要請に応えられる性能と観測装置を備えた望遠鏡は、日本近傍地域では、広島大学宇宙科学センターの 1.5m かなた望遠鏡などきわめて限られており、中口径 (3m 級) 望遠鏡にいたっては皆無である。そのためこれまでに日本国内での実現が困難であった観測テーマや、もし日本からの参加があれば大きな成果が期待できた国際共同観測が国内天文コミュニティにとって未開拓のまま多数残されている。

突発天体現象は、

- ・ 予測できない現象
- ・ 持続時間や変動のタイムスケールが短い (1 日またはそれ以下)
- ・ 一回限りの現象である場合が多い

等の特徴をもち、その現象が宇宙の天体活動の解明に本質的重要性を持つものがあることがわかってきている。

3.1.2 ガンマ線バースト (GRB)

ガンマ線バーストは 1960 年代 Vela 衛星によって発見された天体現象で、ごく短時間 (多くは数秒から数十秒) 天空から強烈なガンマ線が降り注ぐものである。約 30 年間正体不明の謎の天体現象で、銀河系ハロー部の中性子星から、宇宙論的遠方の現象まで、その起源を説明するためにさまざまな説があった。

1997 年、ガンマ線バーストに付随した X 線の残光 (afterglow) が発見され、それを受けて光学同定がなされた。特に、GRB 970508 では分光観測の結果、赤方偏移 (z) が 0.835 の宇宙論的遠方にある天体であることが明らかになった。その後いくつものガンマ線バーストの光学同定がなされた結果、以下のような驚くべき示唆が得られている。

(1) 莫大なエネルギー

もし等方的に放射されているとすれば、星 1 個の静止質量エネルギーを超えるケー

スも報告されている。ローレンツ因子 100 にも達するような、極めて相対論的なジェットを正面から見ているとする説が有力。

(2) 超新星との関係

GRB 980425 でガンマ線バーストの位置誤差内に超新星 (SN 1998bw) が発見されたことからガンマ線バーストと超新星爆発との関連が指摘されはじめ、GRB 030329 では、可視スペクトル的にも超新星成分が認められ、超新星爆発との付随がはっきりしてきた。このことからガンマ線バーストの起源として超大質量星の重力崩壊が考えられるようになってきた。

(3) 可視光フラッシュ

GRB 990123 において、ガンマ線ピークの直後に 9 等級の可視光フラッシュが観測された。このバーストは $z=1.61$ と測定されており、もし銀河系内で起きたならば太陽ほどに輝いたはずである。さらに、GRB 080319B の可視光フラッシュは V バンドで 5.3 等にも達し、 $z=0.937$ という宇宙論的距離にありながら「肉眼でも見える GRB (naked-eye GRB)」と呼ばれている。また、GRB 030329 では宇宙物理学教室屋上

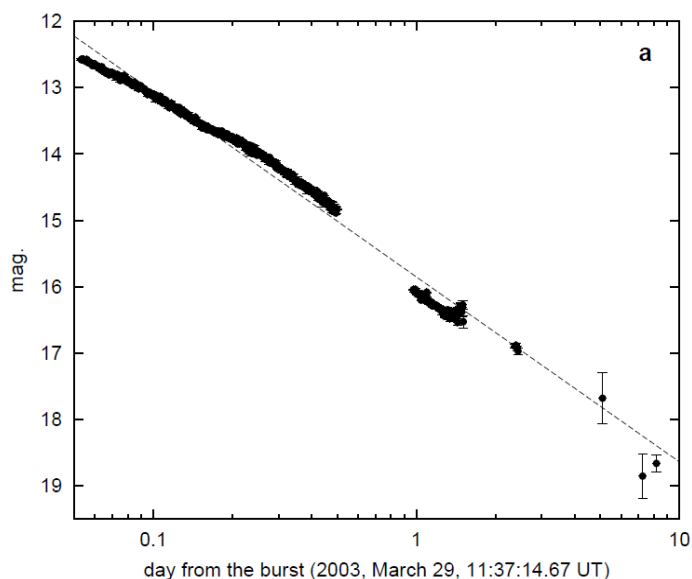


図 3.2 GRB 990123 の残光の光度曲線。データは宇宙物理学教室屋上に設置された 30cm 望遠鏡を含め、20-60cm クラスの望遠鏡と取得されたもの。可視光残光が時間のべき乗 (図の点線) からはずれて、短時間で変動することがわかった。(Uemura, M. et al, 2003, Nature, 423, 843 より)

の 30cm 望遠鏡で残光が観測され(図 3.2)、当初の予想とは相違し、単純な時間のべき乗で暗くなっていくわけではないことが示された。

ガンマ線バーストの今後の研究において

- ・極めて相対論的なジェットという描像は正しいのか？
- ・それを生み出す根源は何か？
- ・残光を伴うものと伴わないものの違いは何か？
- ・母銀河との関係、宇宙初期からの進化

など、観測的に明らかにしなければならない根源的なテーマがある。これらの研究のためには、残光やフラッシュの光学観測が極めて重要である。

しかしながら、これらの観測には、観測天文学の歴史にも類をみない困難さが伴っている。例えば

- ・可視光フラッシュはきわめて短時間の現象(最短数秒のオーダー)で、地球上で観測できる地域が限られる
- ・非常に暗い(残光発見時の典型的な明るさは18~21等)

これらを観測するためには、ガンマ線バースト発生から1時間以内の、まだあまり暗くなっていない段階(18等程度まで)における精密観測(分光観測、偏光観測)が強く望まれる(ただしガンマ線バーストによっては必ずしもこの段階があるとは限らない)。さらに、より暗くなった段階(18~21等)においては、可視光から近赤外線まで幅広く追跡できる装置や体制が必要となる(もともと明るい残光現象を伴わない場合には、それに加えて、まず新天体を発見する体制も必要となる)。

ガンマ線バーストからの放射はシンクロトロン放射であると考えられているが、その磁場が星間磁場(外部磁場)であるのか、相対論的ジェット内の内部磁場であるのかを知ることは、ガンマ線バーストの発生起源に迫る根源的な情報となる。この観測のためには、早い時期の偏光観測(直線偏光、円偏光とも)が極めて重要である。

また、ショートガンマ線バーストと呼ばれる、タイムスケールの短い(~数秒以下)ガンマ線バーストでは、**Swift** 衛星打ち上げ以降にいくつか残光が報告されて楕円銀河に付随するらしいものが発見されている。すなわち、その起源は、タイムスケールの長い(数秒~数十秒)ロングガンマ線バーストとは異なり超大質量星の重力崩壊でなく、中性子星やブラックホールなどの連星系の合体といった可能性もでてきた。さらに、残光を伴うガンマ線バーストとそうでないバーストが存在していることも知られている。可視での残光が見られないものがかなりの数存在し、遠方宇宙で出現している可能性や、ダストに隠されたガンマ線バーストである可能性等が指摘されている。

ガンマ線バーストの起源が超大質量星であると考えられること等から、それが宇宙の暗黒時代と呼ばれる宇宙史上最も謎につつまれた時代(赤方偏移が10や20の時代)を探る手がかりになる。初代の天体の生まれた時期への制限、星形成の歴史としての宇宙史、吸収線系から探る銀河間空間の物理状態と歴史(すなわち宇宙の再電離問題)、ダークエネルギーの正体への制限等々、いくつもの現代天文学の最重要課題に関連する研究テーマが多く存在する。

ガンマ線バーストの光学観測は最先端の観測的テーマで、今後も驚くべき発見や飛躍の発展が期待される。日本は、ガンマ線バーストの光学観測の「空白域」で、地球規模で重要な位置を占めている。最低限必要な観測機器は、撮像・分光を即時に切り替えられるタイプの、3m 級以上の望遠鏡である。そして、現象から 30 分以内に天体を同定し、観測を開始できる必要がある。なお、「すばる望遠鏡」では日本の空白を埋めることはむろんできないし、このような機動的な観測も不可能である。

ガンマ線バーストの観測を行なうにあたって、応答時間を短くするために、高速・正確な機器制御、迅速な天体同定など、技術的にも挑戦的な課題が多い。また人間の判断による観測の遅れを避けるために、自動観測や他観測途中での割り込み観測、リモート観測などの技術を必要とする。

3.8m 望遠鏡は、Swift 衛星や Fermi 衛星等からガンマ線バースト発生のアラートを受け、数分以内に指定の方向に望遠鏡を向けることができる機動性と、ガンマ線源の位置誤差をカバー可能な広い視野、あるいは位置誤差の小さいものについては、30 秒角×30 秒角程度の領域を高精度で撮像・分光する面分光 (Integral Field Unit; IFU) ファイバー分光器を備える。これらによって即座に分光しその時間的な変化の様子を取得すれば、1 回の観測で、これまでに得られたガンマ線バーストに関する光学的情報を上回る情報が得られる可能性がある。

3.1.3 新型のブラックホール連星・X 線新星

ブラックホール自体は光らないが、連星系をなしていれば相手の星の表面から落ち込むガスは猛烈な放射を出す。実際に今まで見つかった恒星質量ブラックホール候補天体のほとんどは連星系をなしている。すなわち、ブラックホールとペア (連星系) を組んだ通常の星の表面から、ガスがブラックホールの巨大な重力に引かれて渦を巻いて落ちていって降着円盤を形成し、この降着円盤が明るく光って観測されるのである。

X 線新星はブラックホールや中性子星への急激な質量降着現象を観測していると考えられている。ブラックホールの存在証明は可視光観測と力学的な理論から質量を調べることによってなされており、X 線新星は現在最も確かな恒星質量ブラックホールの存在場所と考えられている。ブラックホールへの降着のメカニズムや、降着現象への強重力場の影響を知るために、可視光での活動と X 線活動の相関を知ることが極めて重要である。

20 世紀末、新種のブラックホール候補星が、京都大学チームを中心とするグループにより発見・同定された。京都大学で、1999 年夏に V4641 Sgr が活発に活動していることに気づいてモニター観測を継続していたところ、同年 9 月 15 日にその巨大増光を発見した (図 3.3)。可視光増光の約 7 時間後に、RXTE 衛星は、RXTE 史上最も明るい X 線バーストを観測し、また 1 ミリ秒までの X 線変動や相対論的ジェットの前線観測により、これは極めて有力なブラックホール候補であることが判明した。

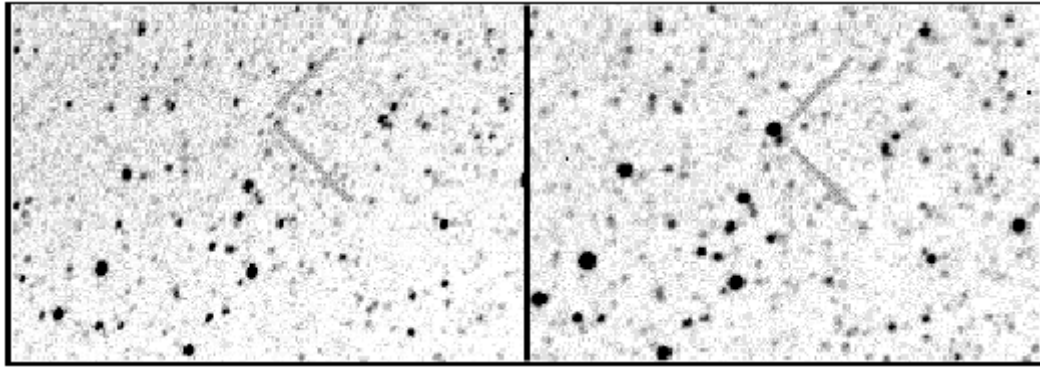


図 3.3 X 線新星 V4641 Sgr の発見画像(京都大学)。

これら新型の「超短時間型 X 線新星」は、いずれも減光時間が数時間で、X 線に比べ強い可視光増光を伴っているのが特徴である(ちなみに従来の型の減光時間は 30 日程度で、X 線で圧倒的な放射をしている)。しかもこれらの天体は静穏時には高エネルギー天体としての特徴をほとんど示さず、X 線増光時間も 1 日以下と極めて短いため、通常のモニター観測では見過ごされて来た。V4641 Sgr の場合、光学的にはヘリウム電離輝線などの高エネルギー現象は光での極大から 1 日以内に消失したことが示されており、天体の性質の確認に早期の可視光観測がいかに重要であるかがわかる。未だ同定されずにいる多数の「隠れたブラックホール候補」が、今後超短時間型 X 線新星現象を通じて発見され、太陽系近傍のブラックホールの検出数が飛躍的に増加する可能性がある。また、V4641 Sgr は暗い時期でも V バンドで 13.8 等と非常に明るい天体であることから、隠れたブラックホール候補星がまだ多数あることが期待される。

「超短時間型 X 線新星」を見つけるには、X 線モニター観測によるアラートを待っていたのでは限界がある(V4641 Sgr の場合、X 線バーストが開始した時点で既に光学バーストはピークを越えていた)。全世界の、アマチュアも含めた光学観測家との即座の情報交換が不可欠である。V4641 Sgr の発見には、VSNET と呼ばれる、京都大学にホストサーバーを置く国際変光星ネットワークが重要な貢献をした。3.8m 望遠鏡と国際変光星ネットワークの有機的連動は、このような突発現象の観測的研究において、これまで誰も手にしたことの無い最有力の武器となることであろう。

3.1.4 超新星

(1) Ia 型超新星

Ia 型超新星は、その最大絶対光度の一様性を用いて、非常に遠方の天体の距離を測定する(supernova cosmology)など観測的宇宙論においても重要な天体である。Ia 型超新星は連星中の白色矮星が相手の星からの質量降着によってチャンドラセカール限界を超えることによって起きる現象であることは広く受け入れられているが、現在でも起

源天体が観測的に確かめられていないために、光度の一様性がどこまで確かなものであるのか、あるいは宇宙進化に伴った進化の可能性があるのかなど多くの問題が残されている。この問題に対する観測的アプローチとして、有力母天体と考えられている反復新星(U Sco など)や超軟 X 線源の観測によって、また Ia 型超新星爆発のごく初期の分光観測によって、爆発前の連星やその連星周囲物質を探ることが有力と考えられる。この観測のためには、近傍(おとめ座銀河団程度)の Ia 型超新星の爆発のごく初期(モデルによるが 1 日から数日以内)の分光観測が必要とされる。現在行なわれている超新星サーベイの限界等級は 17~18 等で、最も早い時期に精密なデータを得る観測を行なうためには、この程度の等級の天体の分光観測ができることが必須である。世界的にみて超新星の分光観測は 1~2m 級望遠鏡で 15~17 等のものが多くなされているが、17~18 等を観測するためには 3m 級の大型望遠鏡が必要である。このテーマが非常に重要であると認識されていながらこれまで成功を収めていない理由として、突発天体に適した仕様・運用がなされている大型望遠鏡がほとんどないことが挙げられるであろう。突発天体仕様の 3.8m 望遠鏡が実現すれば、この分野はこの望遠鏡の独壇場となることすら期待される。

(2) 重力崩壊型超新星

大マゼラン銀河に出現した SN 1987A はこの仲間である。大質量星進化の最終段階の大爆発現象であり、その後に中性子星やブラックホールを残すと考えられている。重力崩壊型超新星はスペクトルによっていくつかの種類に分類されるが、その中の Ib、Ic、IIIn 型の超新星のなかに、典型的な重力崩壊型超新星の 10 倍以上のエネルギーを発する天体(ハイパーノバ)が存在することが最近明らかになっている。ガンマ線バーストと重力崩壊型超新星の関連が見え始めており、これらの関係を確認してゆくためには、ガンマ線バーストの光学追跡観測とともに、多くの超新星の系統的な観測が、今まで以上に求められている。

(3) 銀河系内超新星

スーパーカミオカンデによるニュートリノのモニターが行なわれており、光での爆発前に検出・通報される体制が作られている(SNEWS network)。星の内部で発生した衝撃波が星の表面に達する瞬間(shock outbreak)が観測できる期待が持たれている。

3.1.5 高密度天体の高速観測

X 線連星系の高密度天体や、銀河中心の巨大ブラックホールは、いずれも極めて高エネルギーに至る幅広い波長域での放射、激しい時間変動、複雑なスペクトル変動を示す。これはおそらく、高密度天体の強い重力に引かれてそこに落ち込みつつある降着流の中では、磁場・物質・放射が空間的にも時間的にも入り乱れ、粒子加速やプラズマ加熱を

起こし、エネルギーを交換し合いながら、様々な放射メカニズムで間欠的にエネルギーを放出した結果であろう。しかし、複雑に絡み合う物理過程の理解や時間変動の起源の解明には、まだほとんど手がつけられていないといっても過言ではない。

ブラックホール時間変動のミリ秒に至る高速観測は、X線領域では「ぎんが」の時代（1980年代後半）からの常套手段であるが、可視光ではまだまだ遅れている。短時間変動を生み出すような相対論的プラズマが、激しい可視光変動を生み出すとは考えにくく、高速可視光観測の必要性が認識されていなかったためである。しかし、ショック等により非熱的粒子が生み出された現場に磁場が存在すれば、シンクロトロン放射により激しい可視光変動が生じる。実際、予想通り、ブラックホール天体からも可視光変動が発見されている。今後、相対論的天体の高速可視・赤外観測は世界的な流行になり、一大学間分野を形成するものと期待される。まさに、未開拓の広野がそこにある。

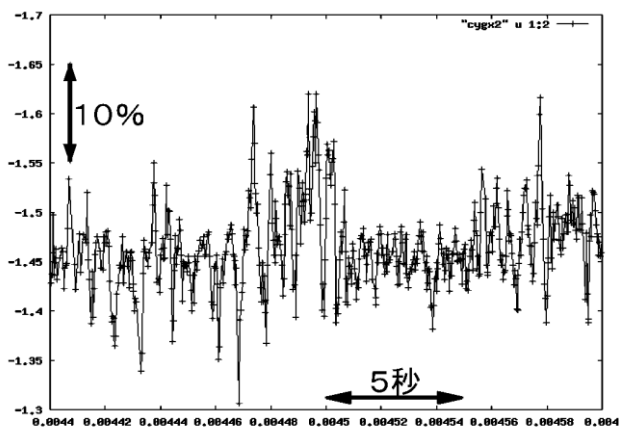


図 3.4 かなた望遠鏡+高速測光システムで観測した Cyg X-1 の短時間変動（京大グループ）。秒以下の変動が明らか。

図 3.4 は、2007 年 8 月にブラックホール X 線連星 Cyg X-1 を、この

CCD カメラでの最も速いモード（33.8 枚/秒）で測光観測したものである。この天体はブラックホール X 線連星としては可視光では最も明るいもので、高速測光観測には非常によい題材である。横軸の一目盛りは 1.728 秒である。この観測では 1 秒、あるいはそれ以下の時間スケールで 10% 程度の振幅のフレア現象が多数受かっているのがわかる。このような短い時間尺度と大きな振幅での可視光での短時間変動は、世界でも初めての結果である。

同様のランダムな変動は激変星にもみられる。図 3.5 はその一例で、激変星 KR Aur を約 1 秒に 1 枚という高時間分解能で測光観測したものである。3.8m 望遠鏡が完成すると、やや暗いブラックホールに対しても高速測光・分光観測を行なうことが可能になる。X 線観測など多波長データと組み合わせることにより、激しい時間変動の起源の解明に至るものと期待される。

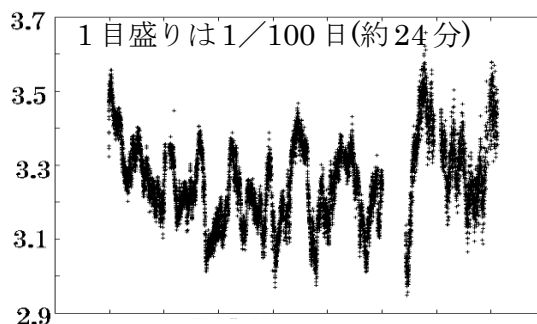


図 3.5 激変星 KR Aur の flickering。振幅・タイムスケールともにランダムな振動 (flickering) が見て取れる。

ところで、特殊なケースだが、ブラックホール連星は、ほぼ周期的な光度変動を示すことがある。同様の振動現象は、中性子星の X 線連星系や激変星にも発見されており、円盤内縁のケプラー回転速度（あるいは周期）と相関があることまで分かっている。これらの変動の起源は未解明の課題であり、X 線等との同時多波長高速観測がその解明に至る道筋をつけるものと期待される。

3.1.6 ブラックホール・ジェットの偏光観測

近年、高密度天体の活動性を生み出す物理機構において、磁場の働きは無視できないことが明らかにされつつある。否、それどころか、あらゆる活動性の源であることも十分考えられる。その最たる例が、前節で述べた相対論的天体からの放射にみられる短時間変動であり、またこれから述べる、相対論的天体から激しく飛び出すジェットである。ブラックホールに落ち込むガスは、ガスが持っているエネルギーの一部を放射の形で、また別の一部を相対論的ジェットの形で放出する。そして、放射ゆらぎおよびジェット放出のメカニズムの鍵を握るのが磁場であるとの認識がますます強まっているのである。前者においては短時間変動の高速測光・分光観測が、後者においては、磁場強度及びその 3 次元的磁力線構造を描き出す観測、すなわち偏光観測が必要となる。

ブラックホール（近傍）からは高速のジェットが飛び出す。その速度は光速の 90% 以上にも達し、多量のガスと共に、ジェットの中で生成された磁場や高エネルギー宇宙線も放出され、広く宇宙空間を満たすと考えられている。おおざっぱに言って、ブラックホールに落ち込むガスのもつ静止質量エネルギーの 1 割が、ブラックホールから飛び出すという。なぜ、ブラックホールの深いポテンシャルの奥底から高速ジェットが飛び出してしまうのか。そこで磁場が重要な役割を演じているといわれているものの、その具体的な物理機構はいまだ謎に包まれている。

そこで可視近赤外領域で偏光装置を開発して、活動銀河核の中心ブラックホール及び銀河系内の連星系ブラックホールをモニター観測し、ブラックホール近傍の磁場構造を求めて、放射磁気流体シミュレーションで得られた構造と比較することにより、数十年來の謎であるブラックホール・ジェットの加速・収束機構を解明しようと計画している。

磁場がジェットの謎を解く最重要キーワードであるという認識は、1970 年代の磁気モデルの提唱（ラブレスやブランドフォードらによる）以来広がりつつあるが、その現実的な理解には大規模計算機シミュレーションや詳細な偏光観測が不可欠であるため研究は遅れていた。それが、近年、ようやく可能になった。

ところで、磁気流体シミュレーションにより高速ジェットの噴出が計算されているものの、（人為的にジェットの根本にエネルギーを注入しない限り）光速の 90% を超える相対論的ジェットはまだ再現されていないことには注意を要する。最終速度はジェットが飛び出す根元のケプラー速度、すなわちせいぜい光速の 10~20% どまりである。この難問を解決するアイデアとして、(i) 回転ブラックホールの回転エネルギーを何らか

の方法でジェット加速に用いるという説（ブランドフォード・ズネィエク効果）、(ii) ジェットは通常（陽子・電子）プラズマより軽くて飛びやすい電子・陽電子対プラズマで構成されているとする説、(iii) 磁気リコネクションによって磁気エネルギーを効率よくジェットの運動エネルギーに変換する説と三つある。

どれが正しいのか。例えば、第一の説を検証する方法として、ブレーザーをはじめとするジェット天体を観測して磁場構造を求め、その磁場強度から磁場エネルギーを求め、どれだけのエネルギーがブラックホールから近傍の磁場に注入されているかを見積もることがあげられる。また、電波など他波長域の観測とも協調して、磁場および粒子の運動エネルギー構造や円偏光マップを求め、プラズマ組成への制限を見いだすことが必要となろう。

最近、広島大学のかなた望遠鏡でとられた、ブレーザーの偏光観測の例を図 3.6 に挙げる。偏光度も、その向きも、増光と共に、大きく変化することがわかる。まだまだ数は限られているので、今後の系統的なモニター観測が急務の課題となっている。

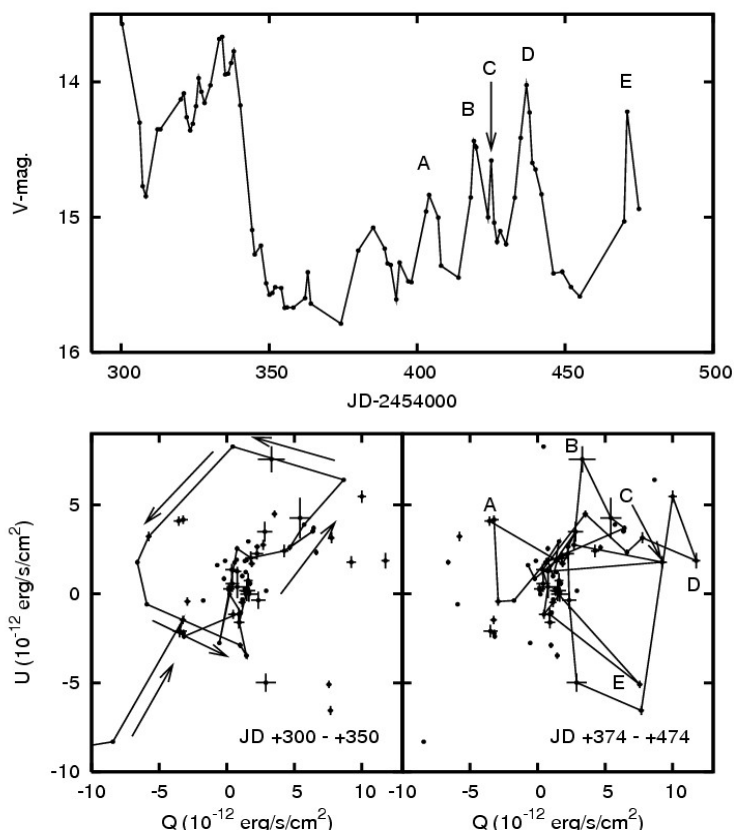


図 3.6 かなた望遠鏡の偏光装置で観測したブレーザーの偏光特性の時間変化。

(上) V 等級の時間変化。

(下) フレア（増光）時における、偏光のストークスパラメータ Q U 平面上での変化。フレアによって、偏光特性のふるまいが変化することが判明した。

(広島大学・植村氏の厚意による)

3.1.7 恒星フレアと原始星フレア

恒星フレアは様々なタイプの恒星にみられる現象であるが、特にフレア星（晩期型輝線星）、RS CVn 型連星、原始星では、太陽フレアよりも桁も大きなエネルギー規模のフレアが起こる。これらのフレアの機構は、まだ全く未解明であるが、太陽フレアが表面磁場の爆発的エネルギー解放現象であることが明らかになりつつあることを背景に、類似の機構が巨大恒星フレアにも適用可能であるかどうか、多くの研究者の関心の的となっている。観測的には、これらの星のいくつかで強い磁場が観測されており、太陽類似の磁気流体機構が適用できる可能性は高い。

図 3.7 は、太陽フレアの説明図である。実線は磁力線を表し、今まさに X-point で磁力線のつなぎ替え（磁気リコネクション）が起きつつあるところである。太陽フレアの場合、この磁力線のつなぎ替えで加速された非熱的電子が熱伝導、あるいは両方により彩層プラズマが数千万度程度まで急激に加熱される。この時、可視光、軟 X 線、硬 X 線および紫外線連続光の急激な増光がみられ、数百 km 毎秒の上昇流が起こる（彩層蒸発と呼ばれる）。これは、コロナ密度の上昇と軟 X 線の Ca XIX の青方偏移で観測されている。また彩層上部から中部では、彩層蒸発の反作用としての 1 万度程度の彩層プラズマによる下降流が起こり、これが H α の赤方偏移として観測される。これは、特にフレア初期の H α の輝線成分が急激に強くなっているときに、数分程度の継続時間で観測されている。また、リコネクション点より上空では、高速のプラズマ噴出が発生すると予想されるが、実際、フレアにともなって、秒速数百 km の速度をもつ H α フィラメント噴出や、X 線プラズモイド噴出が普遍的に観測されている。このように太陽フレアでは磁気リコネクションモデルが基本的には観測された様々な現象をうまく説明している。

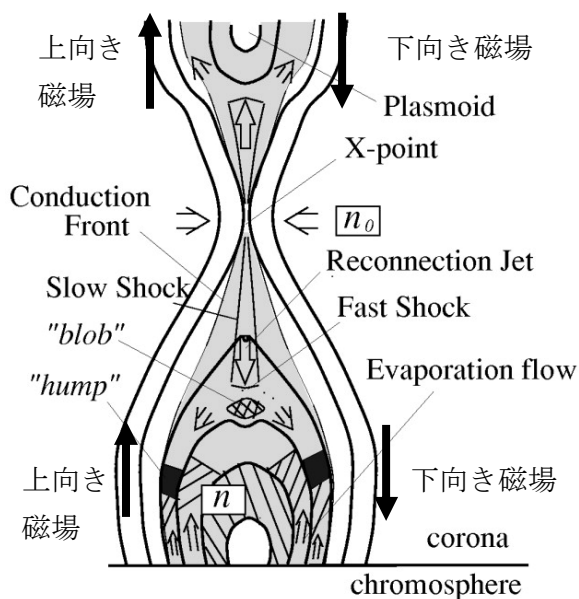


図 3.7 太陽フレアの磁気リコネクションモデル。反平行磁場のつなぎ変わりにより磁場のエネルギーが粒子加速に使われる。

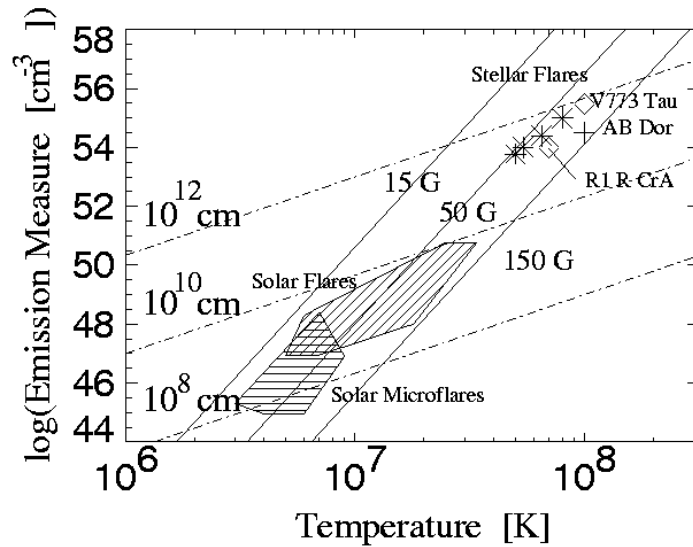
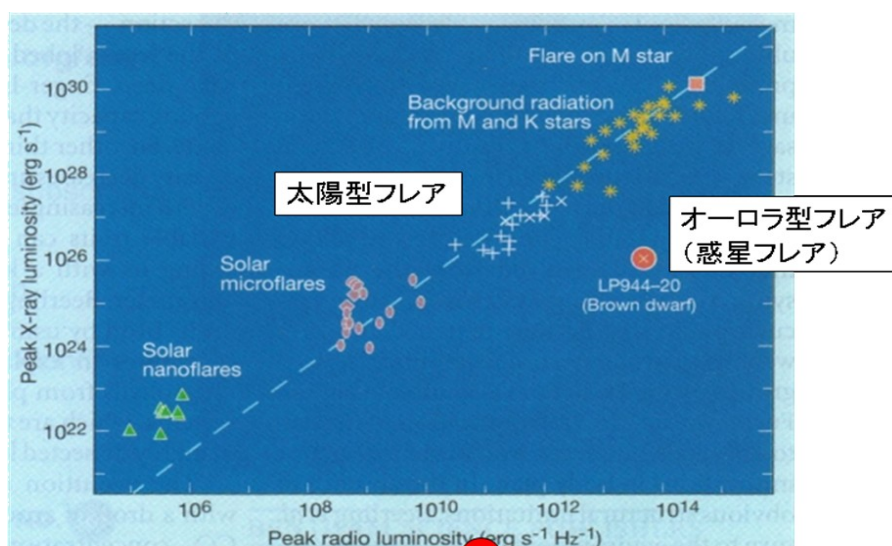


図 3.8 太陽フレア、恒星フレア、原始星フレアのエミッションメジャー (EM) - 温度 (T) ダイアグラム (Shibata and Yokoyama 1999)。図中、星印は恒星フレア、ダイヤモンドは原始星フレアと T タウリ型フレアである。実線、破線は、磁気リコネクションモデルに基づく予言であり、実線は磁場強度一定、破線はフレア・ループの長さが一定となる直線である。

図 3.8 は太陽フレア、恒星フレア、原始星フレアなどの、エミッションメジャー (電子密度の 2 乗 × 体積) と温度の関係性をプロットしたものである。興味深いことに、太陽フレアから恒星フレア、原始星フレアまでほぼ同じ直線上にのっている。このことは、太陽フレアと恒星フレア、原始星フレアが同じ物理法則で発生していることを示唆する。実際、磁気リコネクションモデルによれば、図中の実線に沿って磁場強度が一定になることが示され、モデルが予言する磁場強度は太陽コロナ (活動領域) の平均磁場強度とほぼ合っている。一方、モデルはフレア・ループの長さも予言しており、それは破線で示されている。再び太陽では観測されたフレア・ループの長さを良く再現している。この図より、もし太陽フレアの機構が恒星フレアにも当てはめられるなら、恒星フレアの巨大エネルギーは、磁場の強さは太陽とさほど変わらなくても巨大な磁力線ループが存在すれば説明できる。つまり磁場の強い領域が恒星表面の大きな領域を占めていれば (= filling factor が大きければ)、大きな磁力線ループが存在し、ひいては巨大フレアを起こす可能性があることがわかる。実際フレア星では、恒星表面の 50% 以上を数 kG の磁場が覆っている、という観測がある。このような恒星で太陽類似のフレアが起これば、その結果として、上記に述べた、(i) フィラメント噴出、(ii) 彩層蒸発の反作用としての彩層下降流が、H α 輝線の青方偏移や赤方偏移として観測されると期待される。これらの速度場観測は、3.8m 光学赤外線望遠鏡で十分観測可能であり、それが検出できれ

ば、恒星フレアの機構解明に大きく近づくだけでなく、太陽と異なるパラメータでフレア・プラズマの物理学が研究できるという新しい学問、比較太陽恒星フレア物理学の幕開けとなろう。

図 3.9 は、多くの太陽フレア（ナノフレア、マイクロフレアを含む）と恒星フレアから放射される X 線の強度と電波の強度を縦軸と横軸にプロットしたものである。太陽



木星オーロラ

図 3.9 太陽フレアと恒星フレアの X 線強度と電波強度の相関 (Guedel-Benz relation)。褐色矮星 (Brown dwarf) のデータは Berger et al. (2001) より。

フレアと恒星フレアとが見事に同じ直線上にのっているのがわかる。このことから、太陽フレアと恒星フレアが同じ物理機構で発生している可能性がよみとれる。ところが、興味深いことに、褐色矮星 LP944-20 で発生したフレアのデータは、この直線上にのっていない。これは、この褐色矮星で起きたフレアは太陽で起きているようなフレアとは異なり、惑星オーロラのようなフレア（オーロラ型フレア、または、惑星型フレア）が起きていることを示しているのではなかろうか？ まだ、このような惑星型フレアの観測例は他にはほとんど知られていないが、フレアの H α 輝線強度は X 線強度と良い相関があることが知られているので、3.8m 望遠鏡で恒星フレアの分光観測が進めば、惑星型フレアの検出例も増加するであろう。これはとりもなおさず、惑星検出の新しい方法ともなる。

3.1.7 活動銀河核降着流の偏光観測

最後に、突発天体ではないが、もう一つ、3.8m 望遠鏡での観測が威力を発する例を挙げる。それは、銀河中心にある大質量ブラックホールの偏光観測である。連星系とは異なり、銀河中心ブラックホールの周囲には、広い輝線を発する領域 (BLR) や狭い輝線

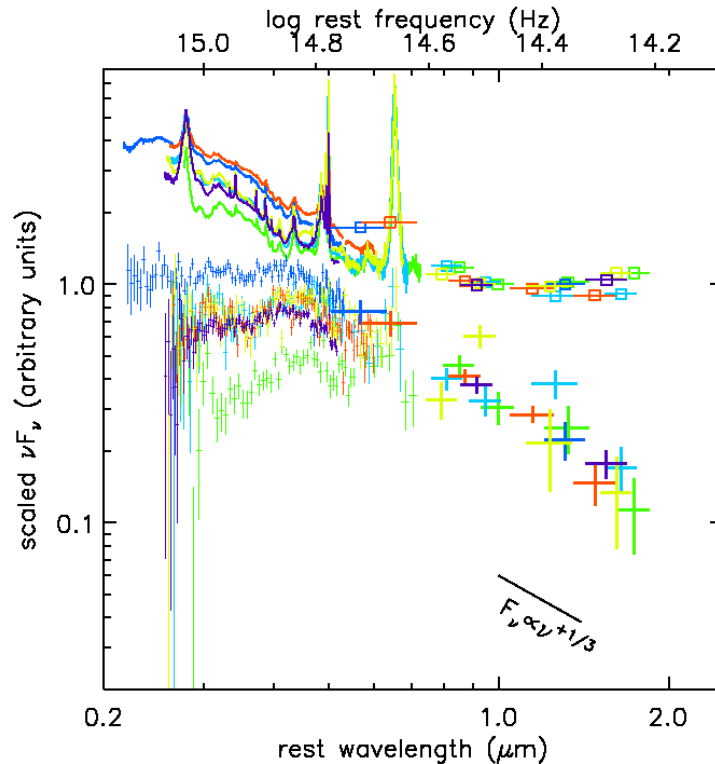


図 3.10 活動銀河核の可視域スペクトル(上の数本の線) およびその偏光スペクトル (下の線; マックスプランク電波天文学研究所・岸本氏の厚意による)

を発する領域 (NLR)、ダストトーラス、そしてジェットやアウトフローなど、さまざまな構造が存在し、それらが可視・赤外領域でそれぞれ放射するため、ブラックホールに落ち込むガスからの放射のみを、周りからの放射から分離して取り出すのが至難の業である。そこで注目されるのが、偏光観測である。すなわち、ブラックホール近傍からの光は、われわれに届くまでにガス塊により散乱されて偏光していると考えられるので、偏光をとらえることにより、周りからの直接光を排除し、降着ガスからの光のみを選択してダイレクトにとらえることができるというアイデアである。

現在、そのような偏光観測が続々と進められている。ブラックホールへの降着流の標準モデル (標準降着円盤モデル) によると、可視光～紫外のスペクトルの傾きは、光子振動数 ν の $1/3$ 乗に比例することが予想されている。これまで、活動銀河核において、その直接証明は無かったが、最近、岸本らによる観測により、検証がなされたことは大きな進展であった (図 3.10)。

近年、狭輝線セイファート 1 型銀河 (NLS1) とよばれる、活動銀河核の一種が脚光を浴びている。これは、可視光観測から幅の広い輝線が受かっていないものの、X 線スペクトルに吸収構造がなく、セイファート 1 型の広い輝線が何らかの理由で狭くなっている (FWHM で 2000km/s 以下) ものと考えられている。換言すれば、BLR は存在する

が、幅の広い輝線を示す通常のセイファート 1 型銀河 (BLS1) の BLR ほどは激しく運動していないものということになる。それはなぜか？NLS1 は比較的小質量のブラックホールが中心にあるものとする解釈が、現在広く受け入れられている。ブラックホール質量が小さくなれば、ブラックホールによる重力は弱くなり、同じ距離における回転速度は小さくなるからである。実際、観測から見積もられた NLS1 のブラックホール質量は、他の活動銀河核に比べ、1~2 桁小さな傾向にあることが確かめられている。

もし、この解釈が正しければ、NLS1 はエディントン光度近くで光っている天体 (光度とエディントン光度との比、エディントン比が大きな天体) ということになり、興味深い。というのも、エディントン比が大きくなると、降着円盤の標準円盤モデルが適用できず、放射圧駆動風や光子捕捉といった現象が期待されるからである。偏光を用いたサーベイによって、ブラックホール降着の基本問題にも、解決の糸口が得られると期待される。

3.2 星・惑星系形成の現場

3.2.1 多様な太陽系外惑星の発見

太陽以外の一般の恒星を周回する惑星は太陽系外惑星 (または系外惑星) と呼ばれる。系外惑星を探す試みは 1930 年代頃から始まり、惑星の引力による恒星の天球上での位置のふらつきをとらえるアストロメトリ法によって 1960 年代にはいくつかの発見が報じられたこともあった (後の観測で否定された)。1980 年代に入ると、惑星の引力による恒星の視線速度のふらつきをとらえるドップラー法による観測が盛んになり、1995 年に同手法を用いてペガサス座 51 番星の周りに初めて系外惑星が発見された (図 3.11)。これを契機に以後続々と多種多様な系外惑星が発見され、現在その数は 400 を超える。これらの多くは木星や土星のような巨大ガス惑星と考えられるが、近年の観測精度の向上に伴って海王星クラスの惑星や地球の数倍から 10 倍の質量をもつ比較的軽い惑星も見つかり始めている。

ドップラー法では、恒星大気中の様々な元素による吸収線が恒星の運動と共にドップラー効果によってその波長を微妙に変化させる様子を分光観測によって検出する。例えば太陽系を真横から見ると、太陽は木星の引力を受けて視線速度が振幅約 12m/s で変化し、これに伴って可視域では波長がわずかに約 0.00002nm だけ変化する。このよう

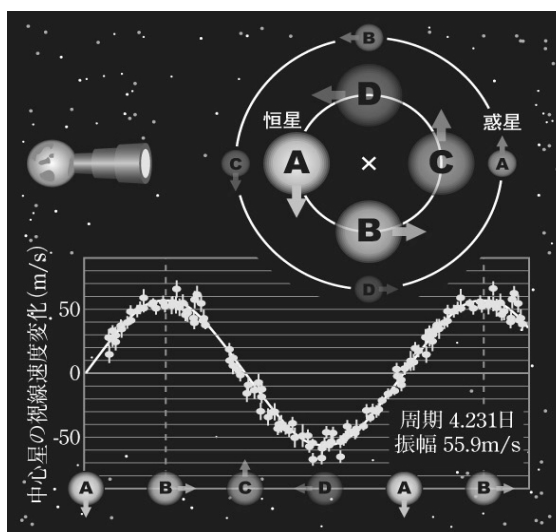


図 3.11 惑星をもつ恒星の視線速度変化。
(理科年表オフィシャルサイトより)

な精密観測を可能にする手法として現在広く世界で用いられているのが、ガス吸収セルである（ヨウ素分子ガスを封入した「ヨードセル」が主に使われる）。ガスセルを通して恒星の光を分光してガスの吸収線を恒星のスペクトルに同時に写し込み、このガスの吸収線を絶対的な波長目盛として恒星の吸収線の波長シフトを測定することによってあらゆる機器的な誤差を取り除くことができる。岡山 188cm 望遠鏡の可視高分散分光器 HIDES にも 2000 年にヨードセルが導入され、最高で約 2m/s の精度が達成されている。

3.2.2 系外惑星の探査

(1) 岡山 188cm 望遠鏡による巨星の周りの惑星探索

中心星の質量は惑星形成を左右する重要なパラメータの一つである。質量の大きな恒星は質量の大きな原始惑星系円盤をもつと考えられ、惑星頻度や惑星質量の中心星依存性は円盤中での微惑星集積の効率などを知る手がかりとなる。しかし、現在知られている系外惑星の親星の大部分は FGK 型の矮星、いわゆる太陽型星 (0.7-1.5 太陽質量) に偏っている。質量の大きな恒星は主系列段階（早期型星）では高温のためスペクトル

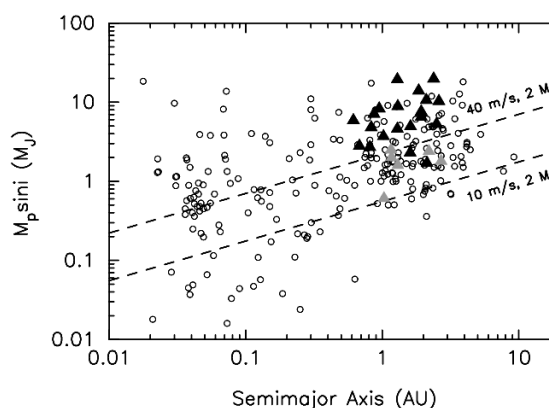


図 3.12 巨星周りの惑星 (▲) の軌道長半径分布 (○は太陽型星の周りの惑星)。

中に吸収線が少なく、かつ高速自転により線幅が広がっており、原理的に視線速度の精密測定が困難なため惑星探索が進んでいない。岡山観測所では、このような中質量星

(1.5-5 太陽質量) が進化して低温、低速自転になった段階の「G 型巨星」を対象に 188cm 望遠鏡と HIDES を用いたドップラー法による惑星探索を進めている。2001 年の観測開始以来、約 300 個のサンプルから現在までに 11 個の惑星が見つかっており、

- ・木星の 5 倍以上の質量をもつ超巨大惑星の頻度が太陽型星に比べて高い、
- ・軌道長半径約 0.6AU 以内には惑星が見つかっていない

など、興味深い性質が現れ始めている (図 3.12)。今後発見数をさらに増やし、統計的精度を高めていく必要がある。

(2) 3.8m 望遠鏡による系外惑星探索

(a) 巨星の惑星探索

現在岡山 188cm 望遠鏡で効率的に観測できるのは可視で 6.5 等より明るい恒星に限られ、そのためサンプル数が約 300 個に留まっている。3.8m 望遠鏡で 7~8

等星にまで対象が広がれば 1000 個以上の十分なサンプルをもとに 100 個以上の惑星発見が見込まれ、統計的な精度を格段に向上させることができる。系外惑星探索には長期間に渡ってまとまった観測時間が必要なため、大望遠鏡よりフレキシブルな中口径望遠鏡の方が適している。

(b) 低質量星周りの惑星探索

約 0.3 太陽質量より軽い低温度星は放射のピークが近赤外～赤外域にあり、可視域では非常に暗くなる。そのため、大望遠鏡でも可視域でのドップラー法による惑星探索は困難であり、効率のよい赤外での観測が求められる。また、中心星が軽いので軽い惑星に対しても視線速度変化が大きくなり、仮に 1m/s の精度が出せれば 1～数地球質量の惑星に手が届く。しかも、中心星が低温なので居住可能地域(ハビタブルゾーン)が中心星近傍にあり、ハビタブルゾーン内の地球型惑星の検出が可能となる(図 3.13)。3.8m 望遠鏡に視線速度精密測定機能を有する赤外高分散分光器を搭載し、ある程度まとまった時間を投入することによって、このように新しい質量範囲の惑星探索を切り開くことができると期待される。

3.2.3 星・惑星系形成シナリオ

我々の太陽系や発見された系外惑星系のような星・惑星系は、銀河中の高密度領域である分子雲の中の、さらに高密度な領域(分子雲コア)が重力収縮することにより形成される。分子雲コアが回転しつつ収縮すると、コア中心に原始星と半径数百 AU の回転平衡円盤からなる系が形成される。この回転平衡円盤(原始惑星系円盤)内で惑星は形成されると考えられる。

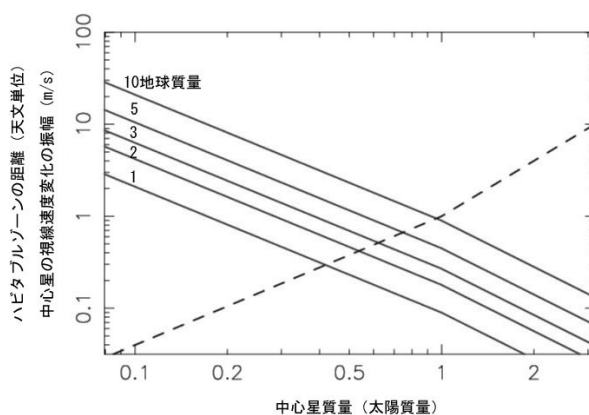


図 3.13 ハビタブルゾーンにある惑星が様々な質量の中心星に及ぼす視線速度変化。

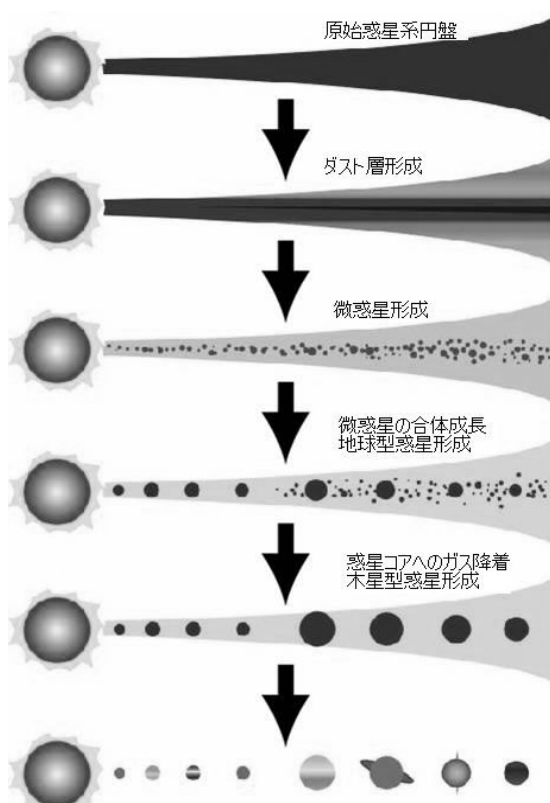


図 3.14 惑星系形成標準シナリオ。

神戸大・理・地球惑星科学・宇宙物理学研究室

惑星系形成標準シナリオ（京都モデル）によると、原始惑星系円盤は高密度の為、円盤中のダスト粒子（星間塵）は衝突・合体成長し、さらに中心星の重力により円盤赤道面へと沈殿する。赤道面付近に集まった固体粒子は、やがて微惑星と呼ばれる半径数 km 程度の天体を形成する。さらに微惑星の合体成長により、地球型惑星や木星型惑星固体コアが形成される。固体コアが円盤内のガスを捕獲して木星型惑星を形成した後、中心星へのガス降着や光蒸発により円盤ガスは散逸し、最終的に我々の太陽系のような惑星系が形成されると考えられている（図 3.14）。

太陽系のみではなく系外惑星系も考慮した星・惑星系形成論の確立には、分子雲や原始惑星系円盤の詳細観測と理論モデルとの比較による、惑星形成初期段階での多様性の理解が重要になると考えられる。

3.2.4 星・惑星系形成領域の赤外線超高分散分光観測

前述のように星・惑星系は、星間塵による減光を強く受ける高密度領域で形成される。従って可視光での観測は困難で、減光が小さい赤外線での観測を行なう必要がある。星・惑星系形成領域の観測としては、1987年に打ち上げられた赤外線天文衛星 IRAS により点源の測光観測が初めて統計的に行なわれた。その後も赤外線観測技術は大きく向上し、近年では地上望遠鏡により星・惑星系形成領域の高分散分光観測が可能になった。これにより、分子雲内ガスの運動や温度、分子雲を構成するガスや塵の組成など、詳細な情報が得られるようになった。星・惑星系形成過程の解明には、星・惑星系が形成されている小さなスケールの領域から放射される強度の弱いスペクトル線の観測が必要となる。このような弱いスペクトル線の観測やその付近の波長帯の観測からガスの物理的・化学的情報を得るには、超高分散分光観測が必須である。この節では、岡山 3.8m 望遠鏡に搭載予定の赤外線超高分散分光器を用いた星・惑星系形成領域の観測計画について述べる。

(1) 星形成領域における水素分子スペクトル線の観測

水素分子は水素原子が 2 つ結合した等核分子で、等核分子からのスペクトル線強度は一般的に言って弱いため、観測が難しい。しかし、水素分子は分子雲ガスの主成分（存在量 80%）であり、また分子構造が簡単なため、その化学的特徴が最もよく研究されている。

それらの研究によると、星間ガス中の水素分子の励起機構として次の 4 つの機構が考えられている：(i) 分子・原子・電子との衝突による熱励起、(ii) 紫外線の吸収による非熱的励起、(iii) X 線による電離に起因する非熱的励起、(iv) ダスト上で水素分子が形成される際の非熱的励起。水素分子輝線はこれまでに星形成領域、惑星状星雲、超新星残骸、系外銀河など様々な天体から観測されており、その放射領域が持つ物理的特徴は、大きく分けて 2 種類に分類できる。一つは、大質量星に照射された反射星雲などの

強い紫外線の影響下にある領域、もう一つは、若い星に付随するジェット中の衝撃波面などの高温領域である(図 3.15)。前者における水素分子の主な励起機構は紫外線励起、後者は衝突熱励起であると考えられる。

近年では 3–4m 級の地上望遠鏡に搭載された高分散分光器の活躍により、見かけのサイズの小さな原始惑星系円盤や系外銀河中心付近の星形成領域からも水素分子輝線が観測されるようになった。観測された輝線とモデル計算から、X 線励起も含めた水素分子励起機構、即ち天体中の分子ガスの物理状態(紫外線・X 線照射下、あるいは高温状態)に関する情報が得られるようになった。

さて、水素分子は近赤外線(K バンド・H バンド)に強いスペクトル線を持つが、H・K バンドは地球大気等の熱輻射の影響が少なく、岡山での観測に適している。また前述のように、水素分子スペクトル線は一般的に強度が弱く、その観測には比較的長い積分時間を必要とするが、観測時間をフレキシブルに使える点も岡山 3.8m 望遠鏡の利点である。

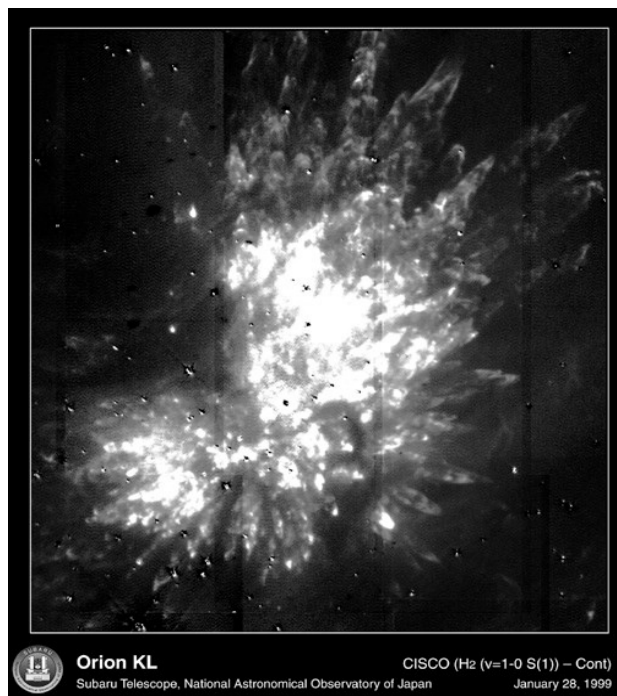


図 3.15 大質量星形成領域オリオン星雲における K バンドでの水素分子輝線の観測。

(2) 原始惑星系円盤からの水素分子輝線の時間変動

星・惑星系形成の舞台である原始惑星系円盤からも K バンドで水素分子輝線が観測されている。その時間変動性が示唆されているが、観測例が少ないため、まだはっきりとしたことはわかっていない。円盤中心の若い星は強い紫外線・X 線を放射しており、円盤内の水素分子励起に影響を及ぼすと考えられる。若い星の紫外線・X 線放射は時間変動していることが観測的に知られており、その変動と円盤ガスの主成分である水素分子の輝線の時間変動との相関を調べることで、円盤ガスの物理状態、特に、中心星の紫外線・X 線放射により加熱される円盤ガス温度の時間変動に関する情報が得られると考えられる。大型望遠鏡では得ることが難しい、岡山 3.8m 望遠鏡でのフレキシブルな観測時間を有効に活用して原始惑星系円盤からの水素分子輝線の時間変動を調べることにより、円盤ガス温度の時間変動、また円盤ガスからガス惑星や地球型惑星大気が形成される過程に対して示唆が得られると期待される。

(3) 彗星における塵表面反応分子スペクトル線の観測

星間空間では様々な分子スペクトル線が観測され、星間物質の化学組成やそこから示唆される天体の物理量に関する情報を提供しているが、分子スペクトル線の多くはミリ波・サブミリ波で観測されたものであった。しかし上述の水素分子と同様、永久双極子モーメントを持たない C_2H_2 や CH_4 のような分子は、赤外線領域でしか観測ができない。またこれらの分子は、星間空間中に存在する塵表面での反応により生成された可能性のある分子種である。

塵表面反応は星間空間特有の反応で、室内実験や分子動力学シミュレーションにより反応係数などを求める試みがなされているが、取り扱いが難しく、取り組むべき課題が数多く残されている。また塵表面反応では、星間空間の気相反応で生成される分子よりも複雑な分子が生成されると考えられる。従って、生体分子生成に繋がる複雑な分子種生成の観点からも、塵表面反応に関する研究がなされている。

塵表面反応により生成されたと考えられる SiO や NH_3 のような分子種は、星形成領域や太陽系内の彗星で観測されている。原始星が形成される直前の分子雲コアのような低温・高密度領域では、ガス粒子は塵表面に凍結すると考えられる。凍結した原子・分子は塵表面で化学反応をおこし、新たな分子を生成する。分子雲コア中心で原始星が形成され原始星周囲の塵が暖められると、塵表面で生成された分子が気相へと蒸発して、気相中でさらに化学反応をおこし複雑な分子種を生成する。彗星の場合は、太陽近辺で太陽光により暖められ彗星核から放出されたガスの中に、塵表面反応起源と考えられる分子種が豊富に含まれることが知られている。

塵表面反応起源と考えられる分子種はミリ波・サブミリ波で数多く観測されてきたが、近年は赤外線宇宙望遠鏡で塵表面反応起源の固相・気相分子が観測され、また赤外線高分散分光器を用いて地上望遠鏡でも観測がされるようになった。原始惑星系円盤内でも円盤内縁部の高温領域では塵表面分子が気相に蒸発すると考えられるが、既存の電波干渉計では空間分解能が十分ではない（見かけの大きさ数秒角で、近傍の惑星系形成領域でも太陽-地球間距離の数百倍に相当する）ため、これまで観測が難しかった。しかし最近赤外線宇宙望遠鏡により数種類の分子種が検出され、また地上望遠鏡でも赤外線領域での追観測が行なわれた。原始惑星系円盤内で塵表面分子が蒸発できる領域は惑星形成領域に相当するため、塵表面反応分子の観測は惑星形成領域の物理・化学構造を理解する上でも重要である。

近赤外線地上観測では、最近彗星から塵表面反応起源と考えられる分子のスペクトル線が数多く検出され（図 3.16）、また原始惑星系円盤からも 2 種類の分子種が検出された。岡山 3.8m 望遠鏡に搭載予定の超高分散分光器を用いて彗星や大小質量星形成コア、原始惑星系円盤からの近赤外線分子スペクトル線を統計的に観測することにより、原始惑星系円盤の惑星形成領域の分析にも有用な塵表面反応素過程の解明に寄与できると

期待される。

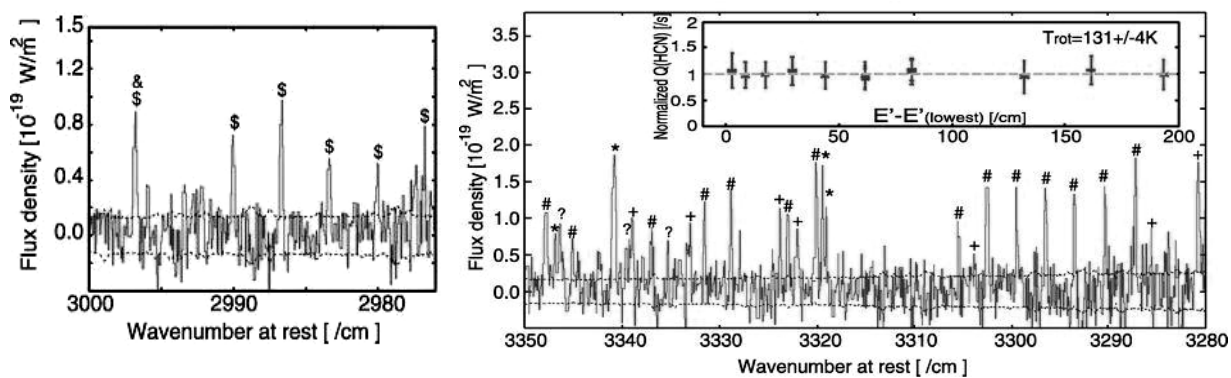


図 3.16 木星族彗星における近赤外線での分子スペクトル線の観測。

図中の\$は C₂H₆、#は HCN 分子スペクトル線。(Kobayashi et al., 2007, ApJ, 668, L75 より)

第4章 研削による鏡面形成

4.1 概要

光を一点に集める反射鏡やレンズなどの光学素子は、回折限界の結像性能を得るために使用する光の波長の $1/8$ (反射鏡の場合) $\sim 1/2$ (レンズの場合) 以上の精度で製作する必要がある。特に、大型望遠鏡の主鏡は反射面の面積も広く、全面を上記の精度で製作するために多大な時間を要する。また次世代望遠鏡で用いられる分割鏡は非軸対称な鏡面形状となるため、その製作をより困難なものとしている。非軸対称の大面積反射光学面を速い加工速度で製作する、これが次世代超大型望遠鏡の主鏡を製作する上で克服すべき技術課題となっている。

光学面の従来の加工方法は研磨、即ち対象物を回転させながら研磨剤を含むパッドに圧力をかけて磨き上げる方法である。加工後は干渉計で形状を調べ、研磨職人の経験で判断して修正研磨を施す。この繰り返しで全面にわたり高い精度の光学面を製作していく。非軸対称な光学面を製作する場合には、より大きな鏡の一部として周辺部分とつなぎ合わせて軸対称研磨をした後、接合面を切り離して取り出すか、対象物に歪みの力を加えて変形させた状態で軸対称研磨をし、加工後に力を解放することで非軸対称な形状とする方法がある。しかし、どちらの場合も時間のかかる困難な作業となっているのが現状である。

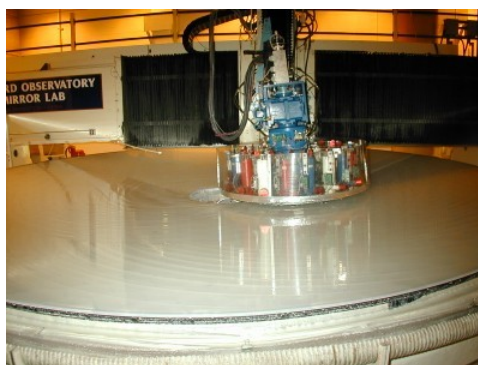


図 4.1 研磨による鏡面形成の例。研磨圧と研磨時間により鏡面形状を形成していく。

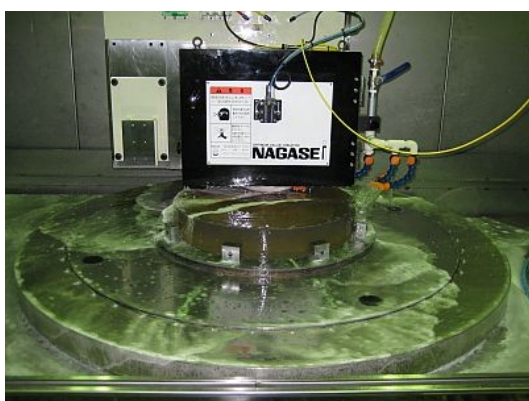


図 4.2 研削による鏡面形成。回転砥石を3次元精密位置制御することにより鏡面形状を形成していく。

日本では、主に金属製品の高精度加工技術が発達しており、世界に類をみない高精度な加工機械が数多く存在する。光学面形成にも転用可能な加工方法としては、刃で対象物を切り落とす切削加工や回転砥石で削り落とす研削加工などの方法がある。これらの加工は、すでに光学面形成に必要な精度を達成しており、実際に小型の非球面レンズなどが製作されている。これらのうち、面で加工する研削加工は大面積の加工に適している。また研削加工機は回転砥石の3次元位置を高精度に制

御して加工するため、軸対称／非軸対称形を問わず同等な加工が可能である。このように、日本の持つ高い研削加工技術は次世代超大型望遠鏡の主鏡製作において非常に貴重な加工方法である。

製作した鏡面は干渉計を用いて光学的に形状を測定する。その際、研削盤からの取り外しや移動などを行なうと、環境変化による鏡面の変形と研削盤の加工誤差の切り分けが困難となり修正加工が難しくなる。本計画では測定用の干渉計を研削盤の真上に配置し、鏡を動かすことなく形状を測定することで上記の不定性を排除する。その測定結果を研削加工機にフィードバックして修正加工することで短時間での大型反射光学面の形成を可能とする。干渉計は名古屋大学で開発したCGH (Computer Generated Hologram) 干渉計を用いる。この干渉計は測定対象となる鏡面の形状に合わせた波面をコンピュータで生成したホログラムマスクを用いて作ることで、通常の干渉計では測定が難しい軸外し非球面の形状測定を行なうものである。この干渉計は測定対象からの反射光と波面形状の基準となる参照光がほぼ同じ光路を通過するため、室内の空気の揺らぎや振動の影響を受けにくいことも特長である。

また干渉計での測定時には鏡は望遠鏡に搭載した時と同じ支持点で支えることが望ましい。研削盤上に置いたままで望遠鏡搭載時の状況が再現できる専用台座を製作し、研削中の形状と望遠鏡搭載時の形状の両方を測定することで、搭載時に理想形状となるような補正加工が可能である。これらの測定結果を詳細に解析し研削盤の加工特性を把握すれば、研削盤の加工性能を更に引き上げられる加工性もある。

このように本計画では大型精密研削盤と光学干渉計を組み合わせ、研削機上で形状を光学測定して形状誤差をフィードバックすることで、研削盤の限界の加工性能を引き出し、大面積の非軸対称非球面光学面を短い時間で製作する。これにより、次世代超大型望遠鏡の主鏡製作方法に新たな道を拓くと同時に、通常の大規模金属加工では検証不可能であった大型研削盤の究極の加工性能を、鏡の光学性能という形で検証する。

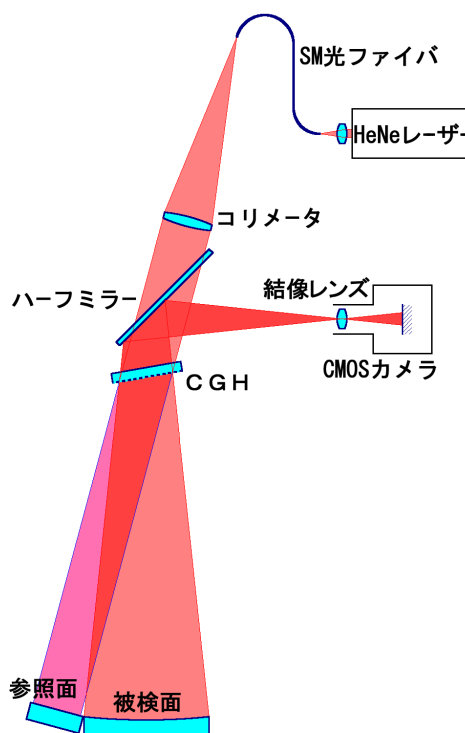


図 4.3 CGH 干渉計の原理。
ホログラムマスクを透過する際の0次光と1次光を干渉させて鏡面形状を測定する。

4.2 セグメント鏡の光学性能

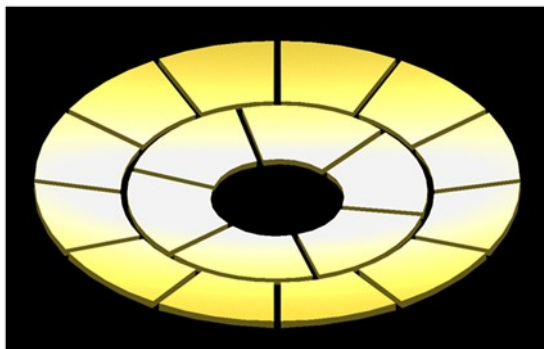


図 4.4 3.8m セグメント主鏡の形状

本プロジェクトに用いるセグメントの形状は、図 4.4 に示すように内周 6 枚と外周 12 枚の 2 種類で、対角線長は内周 1028mm、外周 1051mm となる。18 枚のセグメントを組み上げたときに直径 3.8m、曲率半径 10m の回転双曲面となるよう、各セグメントは軸外し双曲面の表面形状を持つ。非球面度(球面との差)は内周 42 μm 、外周 150 μm である。

各セグメントの形状精度、及び表面粗さに関して以下の目標値を想定している。岡山観測所の典型的な大気条件の下では可視光で 1.4 秒角、近赤外光で 1 秒角程度の結像性能が期待できる。ただし近赤外光では大気揺らぎを能動的に補正するアダプティブオプティクス(AO)を使用することにより回折限界を達成できる可能性がある。AO を稼働できる波長として 1.65 μm (H-バンド) を想定した場合、主鏡、副鏡および波面センサーや可変鏡駆動の精度などを併せた総合的な位相誤差として、光学系の結像点で $\pm 1/4\lambda_{1.65}$ が要求される。 $\pm 1/4\lambda_{1.65}$ は Peak-to-Valley (P-V) 約 0.8 μm である。したがって、主鏡と副鏡に対する位相誤差への寄与の配分としては、それぞれ P-V0.40 μm 以下であれば十分である。主鏡の形状誤差は位相誤差の半分以下とする必要があるため目標値として P-V0.15 μm を設定する。

上記精度の望遠鏡光学系が仮にできたとすると、大気揺らぎの寄与を考えない場合、可視光での結像精度は可視光の回折限界像 (0.044 秒角) の 5 倍程度、すなわち約 0.2 秒角となる。しかし現実には大気揺らぎによる像の広がりのため、もっとも良い気象条件でもその倍以上になると思われる。ただし AO を動作させて位相誤差を小さくすることで、可視光の回折限界に達しないものの、約 0.2 秒角程度の星像が得られる可能性がある。

4.3 軸外し非球面の研削・研磨加工

従来、天体望遠鏡に限らず、大型のレンズ面や反射鏡面の製作は、(i) カーブジェネレータと呼ばれる研削加工機で形状精度が 0.1mm~1mm 程度の大まかな曲面を形成してから、(ii) 砂摺りと呼ばれる粗い研磨工程により、数~10 μm 程度の形状誤差の摺りガラス状の面にする。続いて、(iii) 半液状の砥粒液を付けたピッチ盤を硝材に押し当てて回転させる方法で研磨を行ない、目的の面形状に仕上げていく。この従来の研磨

法では、ピッチ盤と硝材の曲率をよく一致させて、両者を回転させながら「とも摺り」を行なうため、軸対称かつ球面からのズレの小さな非球面の製作に限られていた。

最近では球面からのズレが大きな非球面加工も要請されるようになったため、比較的小口径（10-300mm 程度）の非球面光学素子の製作を、従来の研磨法でなく砥粒の細かい砥石による高精度研削加工機で行なうようになってきた。我々もこの新技術望遠鏡プロジェクトに先立って、大きさ $\square 300\text{mm}$ 程度で軸対称性のない非球面レンズの加工を研削のみで行ない、波長 $0.9\sim 1.8\mu\text{m}$ の光に対して形状精度と表面の粗さや透過率の仕様を満たす光学素子の製作に成功している。

この新技術望遠鏡プロジェクトでは、これらの経験に基づいて可視光にも用いることのできる、従来にない大型光学素子の研削加工機を開発・製作した。この加工機は「軸外し非球面研削加工」の能力に加え、可視光における表面粗さの要請を満たすための研磨機能を付加したものである。

以下に、研削加工機自体の駆動性のチェック、サンプル硝材を使った研削・研磨の試験結果などを示し、最終的に 18 枚の望遠鏡の扇型セグメント鏡の製作計画を示す。

4.3.1 大型研削加工機 N2C-1300D

本新技術望遠鏡プロジェクトの主要な開発用設備の一つである大型研削加工機 N2C-1300D は、被加工物の位置の移動用の左右移動ステージ（X 軸と呼ぶ）、前後移動ステージ（Z 軸）、それら 2 軸のステージ搭載したロータリーテーブル（その回転軸を B 軸と呼ぶ）、さらに砥石ホイールの上下駆動軸（Y 軸）の計 4 軸により制御される。加工機を構成する各駆動軸を図 4.5 に図示する。

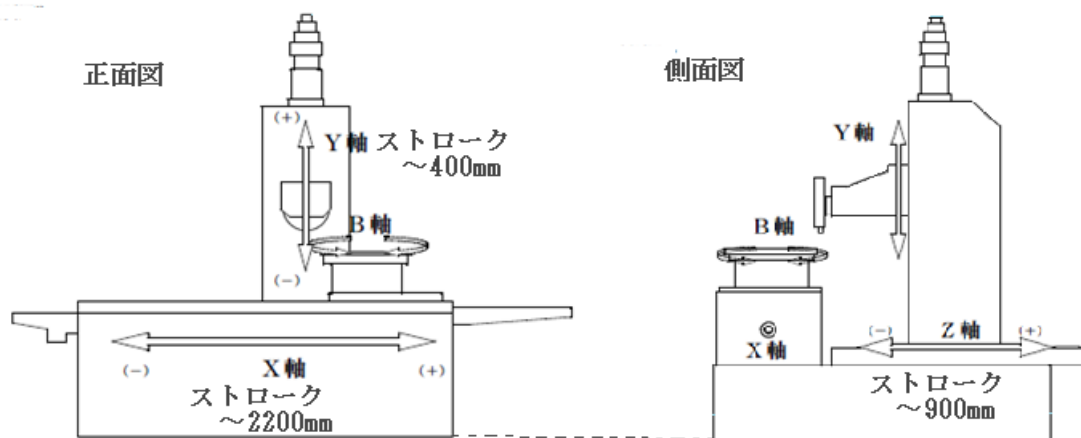


図 4.5 大型研削加工機 N2C-1300D の駆動軸。

この研削加工機の大きな特長は、すべての駆動軸が油静圧軸受となっており位置制御が1nm分解能で行なわれることである。それぞれ1m当たりの真直度は0.3-0.4 μ m程度である。ただし、その動きには高い再現性を持っているため繰り返し再現性は50nmよりも良い。

その結果として、この研削加工機では、直径が約1.5mまでの各種ガラスまたはセラミックタイプの鏡材を、少なくともP-V150nmの形状精度で加工できると期待している。

以下に、本加工機の各駆動軸の再現性に関する測定結果を簡単に示す。図4.6は、 ϕ 650mm、面精度P-V26nmの基準平面原器を、X軸を動かしながらレーザー変位計で測定した結果である。

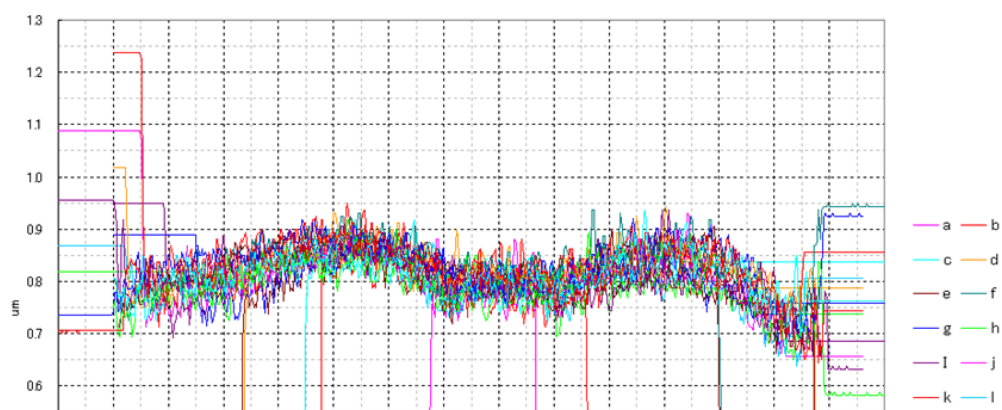


図 4.6 ϕ 650mm の基準平面原器を、X 軸を駆動して測定した結果。各色は平面原器上の位置の違いを示す。原器を理想平面とした場合、X 軸の真直度はほぼ 0.2 μ m 以内に収まっていること、および再現性は 50nm 程度に収まっていることがわかる。

また、Z 軸については真直度のカーブにやや細かい揺らぎ成分があるが、再現性についてはほぼ同様の結果が得られている。硝材を載せて回転する「ロータリーテーブル」の駆動精度試験も基準平面原器を使って行なった。1 回転の間の高さの揺らぎを計測した結果、図 4.7 に示すように 1 周の間に P-V 約 400nm 程度の上下運動を行なうことが確認されている。

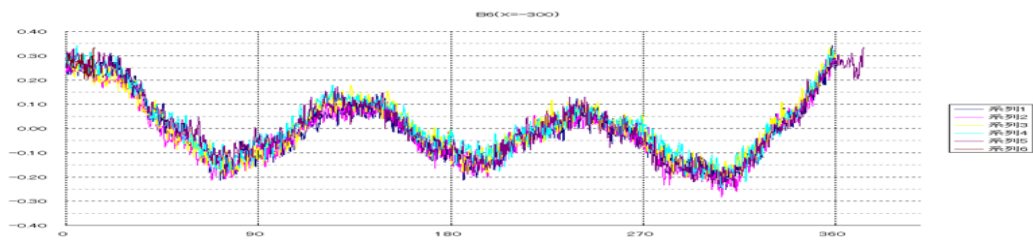


図 4.7 基準平面原器を置いたロータリーテーブルの回転角依存性データ。
油静圧パッドの影響により、1回転で3か所の山が見える。

このような上下運動は、回転ステージの油静圧軸受けを構成するパッドの配置に対応するものである。幸いなことにこの上下運動も再現性がよい、また中心では上下運動は P-V $0.1\mu\text{m}$ 以下であるので半径の異なる位置での上下運動が完全に予測できる、このため研削プログラムによる補正が可能である。ただし、この上下運動の振る舞いはロータリーテーブルに搭載する治具と硝材の全重量によって異なると思われるので、実際の研削条件のもとで、揺らぎ量データを取ること、またもしあるならば、その時間的な変化もチェックして、研削加工への補正を行なう必要がある。

以上のような性能をもつ大型研削加工機 N2C-1300D の外観形状を図 4.8 に示す。

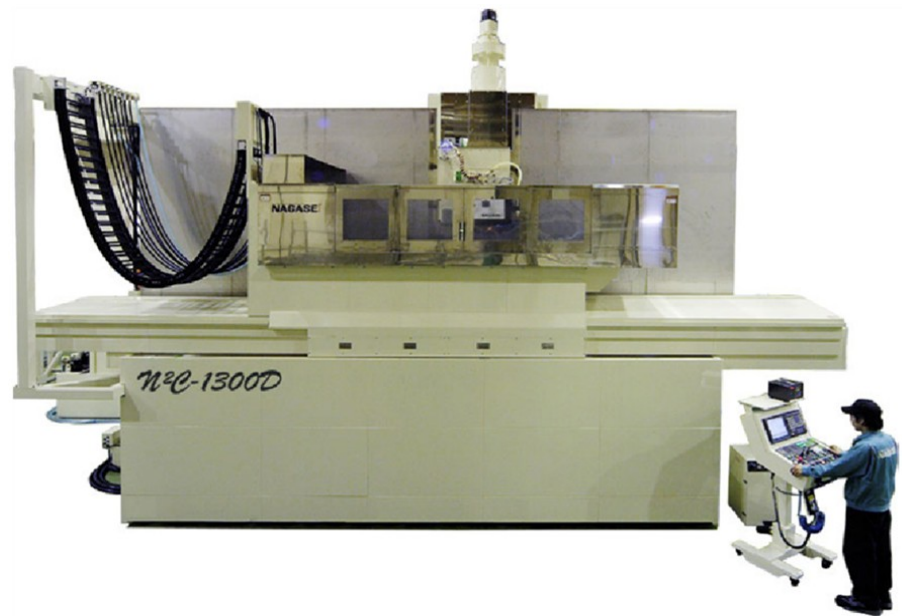


図 4.8 ナガセインテグレックス社の構内のナノオプトニクス研究所棟内に設置した大型研削加工機 N2C-1300D。

4.3.2 非球面の試験研削

2010年2月時点において1枚目のセグメントの非球面研削加工を終了し、研磨加工を行なっている段階である。

以下にこれまで進めてきた平面鏡や非球面レンズ、非球面反射鏡などの試験的な意味合いの強い研削工程やその評価データなどを掲載する。ちなみに、これまで行なった硝材は、 $\phi 700\text{mm}$ 非球面凸レンズ、 $\phi 610\text{mm}$ リッチー・クレチアン反射鏡、 $\phi 1500\text{mm}$ 軸はずし反射鏡などである。まだおもに試験的要素が多いが、次に示す図 4.9 は、 $\phi 610\text{mm}$ のリッチー・クレチアン反射鏡の研削面を測定したものである。

この図の形状を作った #1200 番砥石による研削では、プログラム通りの形状を作ることに適している。ロータリーテーブルの角度を変えながら4方向で計測をした結果を重ねて表示しているが、それぞれがよく一致していることがわかる。(本来は中心対称のカーブになるべきだが、X軸の駆動の揺らぎによるもので、通常は右半分を見ることにしてよい。)

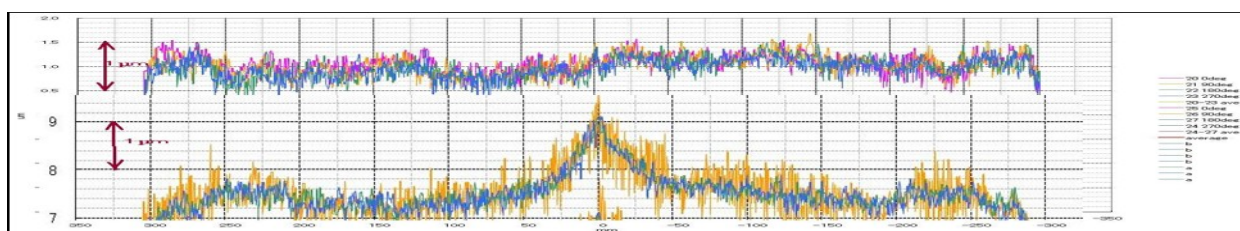


図 4.9 $\phi 610\text{mm}$ のリッチー・クレチアン反射鏡の研削結果。下のグラフは #1200 の番手の砥石による最初の 1 パスの研削結果である。中央部分はプログラムで上方に逃げているために盛り上がっている。それに対して上のカーブは、補正プログラムを 1 回だけかけた結果の形状プロファイルである。

4.3.3 研磨の方針

上記のような研削の方法で形状精度を P-V $0.15\mu\text{m}$ 以内にはすることは可能であると考えているが、可視光において十分スムーズな反射性能を得るために、最終的な表面粗さを rms 2.5nm 以下にすることを目標にして、研削したサンプル鏡の研磨を行なった。

以下の図 4.10 のように、「縁ダレ」が起こり、かつサイズがセグメントの半分程度ではあるものの、目標の $0.15\mu\text{m}$ の形状精度で形状をつくることの可能性は、この試験研磨により明確に示された。(この後さらに、「縁ダレ」を生じない研磨方法での研磨を行なうことができた。)

なお約 40 時間程度の研磨の後表面粗さは、目標の 2.5nm-rms になったことが Zygo 社の顕微式干渉計で確認された。ただし、表面層の少し奥にまで及んでいる可能性のある「サブサーフェース・ダメージ (SSD)」については、今後詳細を調べる必要がある。

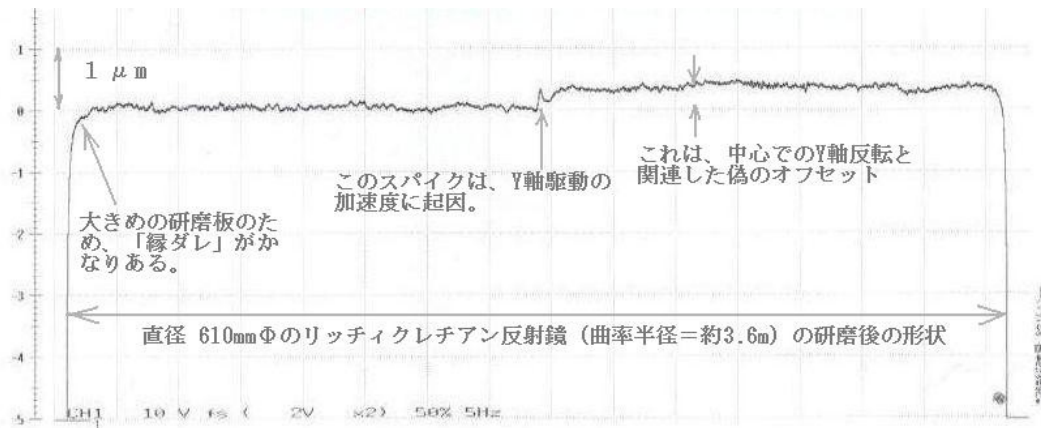


図 4.10 $\phi 610\text{mm}$ のリッチー・クレチアン反射鏡の試験研磨後の形状計測。

4.4 研削・研磨における机上計測

加工された鏡面形状の精度を評価し、形状誤差があった場合にその値を研削盤にフィードバックしてより高精度な鏡面を作成するために、鏡面形状の計測器が必要である。形状測定は加工された鏡を研削盤上に搭載したままの状態で行なう。これは加工と測定における環境変化にともなう鏡面の変形を避けること、効率的に加工フェーズと計測フェーズを切り替えること、の2点を目的としている。

加工の初期～中期において、面粗さのために加工面が光学鏡面になっていない段階ではレーザー変位計で鏡面の高さを計測しながら研削盤の駆動軸を使ってスキャンすることで鏡面全体の形状を得る。加工が進み、可視光での反射率が十分に高くなってからは鏡面の近似曲率中心に設置したCGH干渉計を使用して鏡面の全体形状を一度に取得する。

4.4.1 CGH干渉計による鏡面形状測定

高精度な鏡面の製作には精密な加工機と共に測定装置が不可欠である。鏡面形状の測定結果を用いて修正加工を行なうことでより精密な鏡面を目指す。修正加工においては加工前後での鏡面位置に高い再現性が求められる。本システムでは加工機をまたぐように高さ約10mの検査塔を建て、その上に測定装置を設置することで、鏡を取り外すことなく測定・加工を行なうことができる。

鏡面形状測定には名古屋大学で開発したCGH干渉計を用いる。CGH干渉計の仕様を表4.1に示す。鏡面計測用の干渉計では理想とする鏡面形状に合わせた波面を生成する必要がある。従来用いられてきたヌルレンズに代えてCGHを用いることで、これまで極めて困難であった非軸対称な形状を持つ鏡面の測定を可能にした。

表 4.1 CGH 干渉計の仕様

測定対象	: 軸外し双極面 (セグメント主鏡) 2 種類
測定範囲	: 1730×1388mm
検出器	: CMOS イメージセンサー 1280×1024pixel
光源	: He-Ne レーザー $\lambda = 0.6328\text{nm}$
CGH 描画領域 (=平行光束径)	: $\phi 50\text{mm}$
干渉縞画像取得時間	: 3 枚で 0.1 秒以下 (積分時間: 3ms/枚)
測定データ更新間隔	: 約 1 秒
測定精度	: P-V $\sim 100\text{nm}$

CGH は回折を利用した光学素子であり比較的単純な形状のものは **FZP (Fresnel Zone Plate)** とも呼ばれる。

回折格子と同様にガラス基板上に細かい縞模様が刻まれている。縞模様 1 本毎に生成された素元波が 1 波長ずつずれて干渉することで新たな波面が形成される。回折格子の縞は

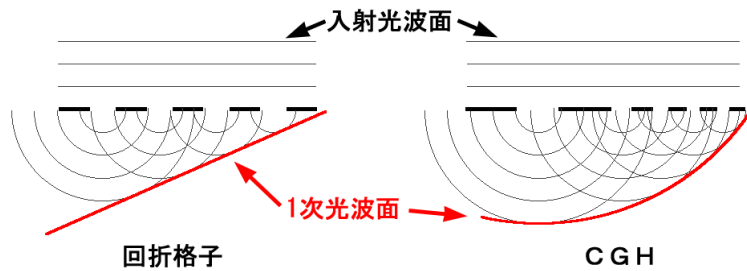


図 4.11 CGH から出射する波面の伝播の様子。

等間隔に並んだ直線であるため 1 次光の波面は傾いた平面となる。一方 CGH では縞の形状・間隔を変えることで任意の波面形状を作り出すことができる。

外周セグメント鏡用に計算したパターンと実際に製作した CGH を図 4.12 に示す。CGH は鏡面測定用のパターンと位置合わせ用のパターンで構成されており $\square 50\text{mm}$ の

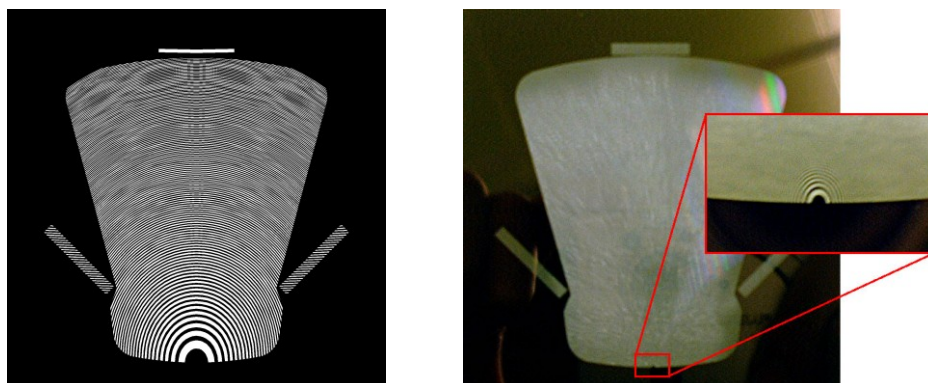
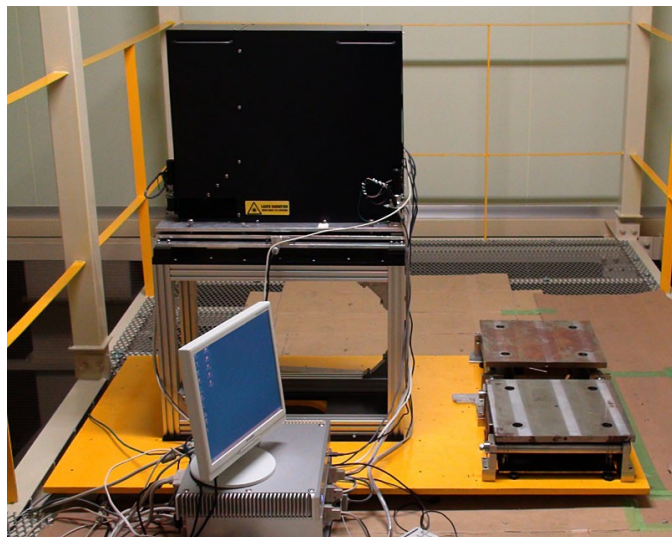


図 4.12 外周セグメント測定用の CGH パターン(左)と実際に制作した CGH (右)。一辺の長さは 60mm、最小の縞間隔は約 $6\mu\text{m}$ である。左図の縞間隔は 30 倍に拡大して描かれている。

領域に描画されている。パターンは石英ガラス基板に蒸着されたクロム膜にレーザー描画装置を使って形成した。レーザースポットを照射した基板を X-Y スキャンして描画するため被検面形状の球面/非球面に因らず描画精度は一定である。

図 4.13 に測定塔上に設置した CGH 干渉計を示す。図中上側の黒い箱が CGH 干渉計であり、手前には干渉計の制御・データ取得のための PC 及び電子回路がある。干渉計の右側にある 2 個の四角い部品は測定塔の振動を減らすための制振装置である。



実際に研削・研磨加工されたセグメント鏡を用いて複数回の測定を行なったところ、測定の再現性は P-V \sim 100nm となった。また、一般的な干渉計でも測定可能な小口径の球面鏡（直径 152.4mm、曲率半径 1828.8mm、精度 $\lambda/4$ ）を被検面として、CGH 干渉計（球面鏡用に作成した CGH を使用）とフィゾー干渉計での測定結果を比較した。結果、両者の差は P-V \sim 80nm でありセグメント鏡に必要な鏡面精度 P-V 150nm を満たすことを確認した。

図 4.13 測定塔上に設置した CGH 干渉計、右の 2 個の鉄板は測定塔の振動を抑えるための制振装置。

4.4.2 研削・研磨時および機上計測時の鏡面保持方法

研削研磨の際には、セグメント硝材は大型研削加工機のロータリーテーブル上に安定に設置することが必要ではあるが、研削・研磨されて面形状を上記の CGH 干渉計で計測する際には、望遠鏡の主鏡セルに組み込まれたときと同じ条件、すなわち「27 点ホ

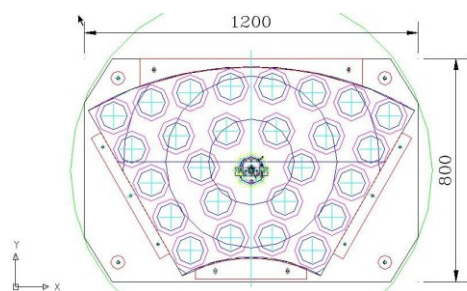


図 4.14 27 支持点をもつ「セグメント硝材支持治具」の上面図。

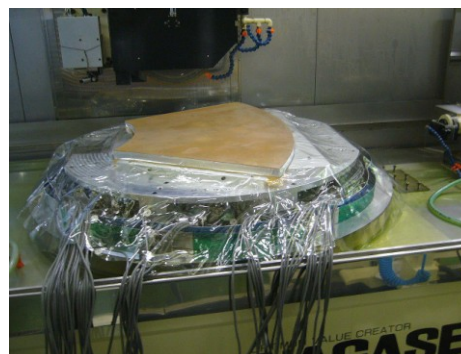


図 4.15 研削加工機に搭載されたセグメント硝材支持治具。

イッフルツリー」と同等の方法で硝材を支持して計測しなければならない。

我々は厚さ 145mm のアルミ基板に、望遠鏡搭載時と同じ位置に支持点をもつ硝材保持治具を作った。各支持点には 10gf の精度で支持荷重がモニターできるロードセルを組み込んでいる。アクチュエータ制御の 27 支持点配置などを示す支持治具の形状を図 4.14 に、また実際にこの硝材保持治具を大型研削加工機 N2C1300D に搭載した様子を図 4.15 に示す。硝材の周りのポリエチレンシートは、研削液がアクチュエータ領域に入らないようにカバーするためのものである。

第5章 望遠鏡

5.1 光学系

5.1.1 光学系の概要

望遠鏡の基本光学系は、広視野を確保するため、リッチー・クレチアン系を採用する。焦点は2つのナスミス焦点のみとし、カセグレン焦点、主焦点を採用しない。これにより、望遠鏡構造を単純化するとともに運用効率を向上させることとした。主鏡は分割鏡方式であり、扇形のセグメント鏡を内周6枚、外周12枚の計18枚配置する。主鏡の有効口径は3.78mである。主鏡の焦点距離は5000mm、主鏡F比はF/1.32とした。ナスミス焦点における合成F比はF/6、合成焦点距離は22.8mである。

2つのナスミス焦点は、それぞれ第1ナスミス焦点、第2ナスミス焦点と呼ぶ。第1ナスミス焦点は汎用焦点であり、可視赤外線撮像装置その他の観測装置を装着する。ケラレのない有効視野直径は10分角以上を確保し、挿脱可能な大気分散補正光学系(ADC)を焦点付近に持つ。第2ナスミス焦点は、直径1度角以上の視野を持ち、広視野可視撮像装置および広視野ファイバー分光装置などが置かれる。第2ナスミス焦点は広視野を確保するため、2枚4面構成の補正レンズを焦点前に持つ。像面湾曲は許すこととして、補正レンズの面はすべて球面で構成する。

主たる光学系の詳細

カセグレン望遠鏡の光学系の基本パラメータは以下のように求められる。主鏡口径を Dp 、主鏡のF比を Fp 、主鏡-副鏡間距離を S 、カセグレンバックフォーカス(主鏡面からカセグレン焦点までの距離)を bc とし、これらを設計の基本パラメータとして与える。このとき、この4つの量を用いて、以下のように放物面主鏡を持つカセグレン望遠鏡の各光学パラメータが求まる。

$$\text{主鏡焦点距離 } fp = Dp \times Fp$$

$$\text{副鏡口径 } Ds = Dp - \frac{S}{Fp}$$

$$\text{副鏡-カセグレン焦点間距離 } L = S + bc$$

$$\text{副鏡-主鏡焦点間距離 } \alpha = fp - S$$

$$\text{副鏡焦点距離 } fs = \frac{\alpha \times L}{\alpha - L}$$

$$\text{合成焦点距離 } f = \frac{fp \times fs}{fp + fs - L}$$

$$\text{合成F比 } F = \frac{f}{Dp}$$

ナスミス焦点の場合、これにナスミス焦点引き出し量（主鏡端からナスミス焦点までの距離） bn を与えると、第3鏡の主鏡からの距離 Lt が求まる。

$$\text{第3鏡の主鏡からの距離 } Lt = \frac{Dp}{2} - bc + bn$$

3.8m 望遠鏡の場合、基本となる4つのパラメータを以下のように定めて基本設計とした。

$$Dp = 3780\text{mm} \quad Fp = 1.3228 \quad S = 3700\text{mm} \quad bc = 2190\text{mm}$$

このとき、副鏡サイズと副鏡焦点距離、および合成焦点距離は以下のようになる。

$$Ds = 983\text{mm} \quad fs = -1668.7\text{mm} \quad f = 22648\text{mm} \quad F = 5.99$$

これらの値を元に、全体をリッチー・クレチアン系として、補正光学系なしで、視野直径10分角以内で回折限界に近い結像性能が得られるように主鏡・副鏡の形状最適化を行なった。像面湾曲は許した。

第2ナスミス焦点については、広視野を確保するための補正レンズを挿入する。補正レンズの光学系は、3.8m 望遠鏡と同じ合成F比 (F/6) を持つWIYN 望遠鏡に搭載されている補正レンズを参考に、3.8m 望遠鏡用に最適化した。可視光から近赤外線まで良好な透過率を得るため、レンズ材質は熔融石英 (fused silica) とし、4面2枚構成で面はすべて球面とした。

3.8m 望遠鏡の主な光学素子の構成と、主な諸元を、表 5.1 および表 5.2 に示す。また、光学パラメータの詳細な値を表 5.3 に示す。

表 5.1 光学素子の構成

	口径	F 比	焦点距離	最大厚み	硝材
主鏡（凹面鏡）	3780mm (18 枚分割鏡)	1.32	5000mm		クリアセラム Z
副鏡（凸面鏡）	1060mm	—	-1667mm		クリアセラム Z or Borosilicate
第 3 鏡（平面鏡）	1000mm × 750mm	—	∞		クリアセラム Z or Borosilicate
大気分散補正系 (直進プリズム 2 枚)	600mm	—	—	30mm	Fused Silica (2 prisms)
広視野補正第 1 レンズ (球面レンズ)	480mm	—	—	20mm	Fused Silica
広視野補正第 2 レンズ (球面レンズ)	480mm	—	—	20mm	Fused Silica

表 5.2 光学系の主な諸元

	第 1 ナスミス焦点	第 2 ナスミス焦点
焦点距離	22.69m	22.66m
F 比	6.00	5.99
ナスミス引き出し量	1000mm	1006mm
視野	10' φ	1° φ
プレートスケール	9".09/mm	9".10/mm
広視野補正光学系	なし	あり
大気分散補正光学系 (ADC)	あり	なし
結像性能	視野 10' φ にわたって直径 0.3" 以内に点光源の 80% 以上のエネルギーが集中 ADC 装着時、天頂角 0°~ 70° にわたって点光源のイ メージ劣化 10% 以内	視野 1° φ にわたって直径 1" 以内に点光源の 80% 以 上のエネルギーが集中

表 5.3 光学パラメータ詳細

主鏡有効口径	3783mm
主鏡焦点距離口径比	1.32
主鏡焦点距離	5000mm
主鏡非球面定数	-1.034609
副鏡有効口径	1059mm
副鏡焦点距離	1667.4mm
副鏡非球面定数	-2.73112
ナスミス引き出し量	1000mm
主鏡副鏡間距離	3700mm
主鏡第 3 鏡間距離	3000mm
合成焦点距離	22692.39mm
合成焦点距離口径比	6.00
焦点スケール	9".09/mm
像面曲率半径 第 1 ナスミス焦点 第 2 ナスミス焦点	1424.9mm 2764.9mm
第 1 補正レンズ (球面) 有効口径 第 1 面曲率半径 第 2 面曲率半径 中心厚み	480mm -982.95mm -1340.18mm 20mm
第 2 補正レンズ (球面) 有効口径 第 1 面曲率半径 第 2 面曲率半径 中心厚み	480mm -555.85mm -463.45mm 20mm
第 3 鏡 - 第 1 補正レンズ間距離	2102mm
第 1 補正レンズ - 第 2 補正レンズ間距離	2mm

表 5.4 第1ナスミス焦点の ZEMAX データ

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic
OBJ	STANDARD	Infinity	Infinity		0	0
1	STANDARD	Infinity	4000		1100	0
STO	STANDARD	-10000	-3700	MIRROR	3785	-1.034609
3	STANDARD	-3334.779	3000	MIRROR	1005.72	-2.73112
4	COORDBRK	-	0		-	-
5	STANDARD	Infinity	0	MIRROR	748.0775	0
6	COORDBRK	-	-2900		-	-
IMA	STANDARD	1424.922			79.2252	0

表 5.5 第2ナスミス焦点の ZEMAX データ

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic
OBJ	STANDARD	Infinity	Infinity		0	0
1	STANDARD	Infinity	4000		1100	0
STO	STANDARD	-10000	-3700	MIRROR	3783.122	-1.034609
3	STANDARD	-3334.779	3000	MIRROR	1059.011	-2.73112
4	COORDBRK	-	0		-	-
5	STANDARD	Infinity	0	MIRROR	961.9125	0
6	COORDBRK	-	-2102.035		-	-
7	STANDARD	-982.9455	-20	F_SILICA	479.4657	0
8	STANDARD	-1340.177	-2		476.7864	0
9	STANDARD	-555.8477	-20	F_SILICA	471.1046	0
10	STANDARD	-463.4525	-751.5743		459.7758	0
IMA	STANDARD	2764.873			398.6194	0

5.1.3 光学系配置

図 5.1 に第 1 ナスミス焦点の光学系の配置図、図 5.2 に第 2 ナスミス焦点の光学系の配置図を示す。副鏡面は主鏡面から 3700mm 上方に位置する。第 3 鏡面は副鏡面から 3000mm 下方に位置する。このとき、ナスミス焦点の引き出し量は、主鏡端面から 1000mm となる。第 1 ナスミス焦点については、このまま焦点面に結像する。第 2 ナスミス焦点では、球面 4 面 2 枚組みの広視野補正レンズ (図 5.3) の第 1 面が、第 3 鏡から 2102mm (主鏡端面から 212mm) のところに置かれる。広視野補正レンズの最終面から第 2 ナスミス焦点までの距離は 752mm である (表 5.3 参照)。

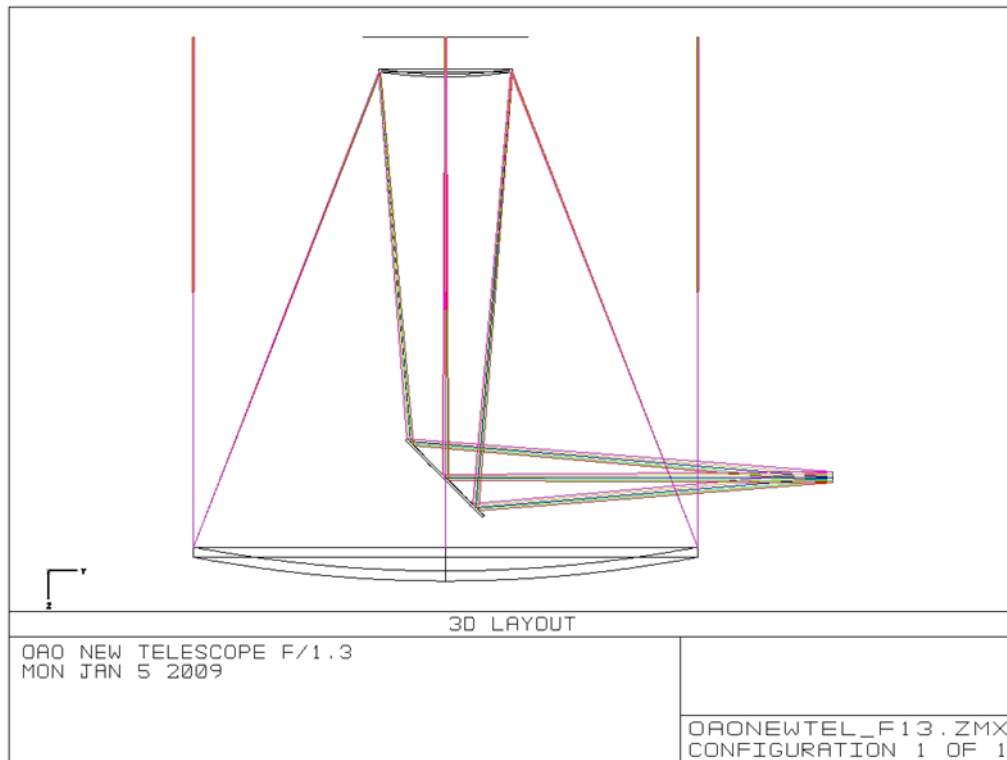


図 5.1 第 1 ナスミス焦点光学配置

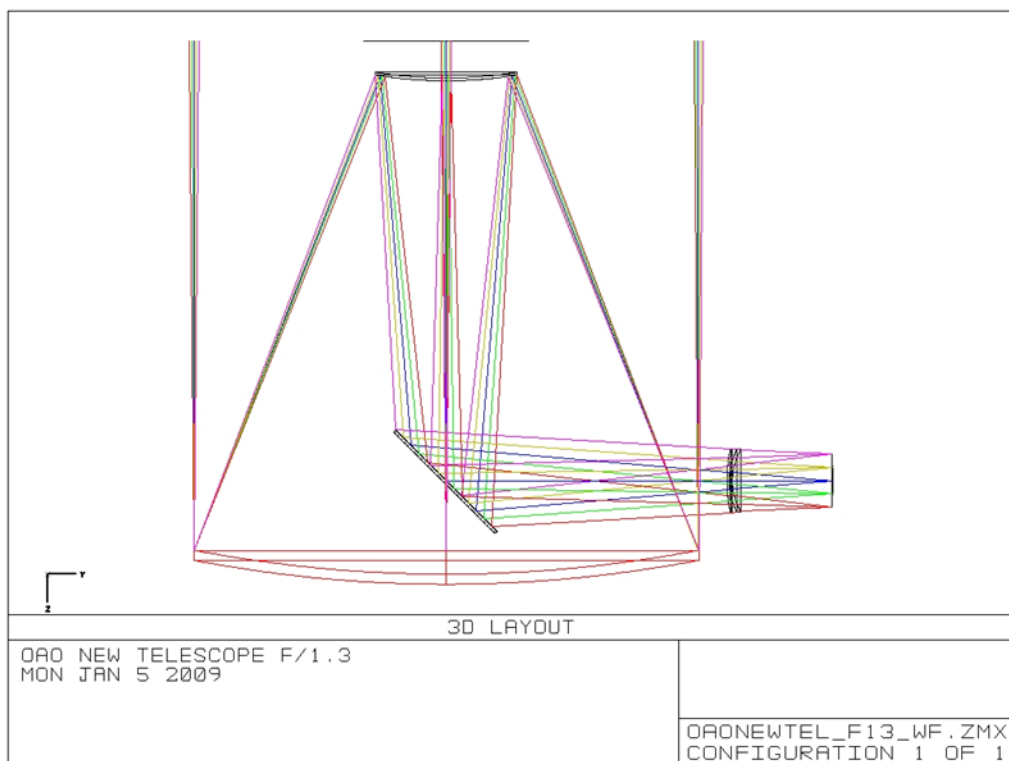


図 5.2 第 2 ナスミス焦点光学配置。最も外側の光線（赤と紫で示された光線）は、それぞれ視野中心から 30 分角離れている。

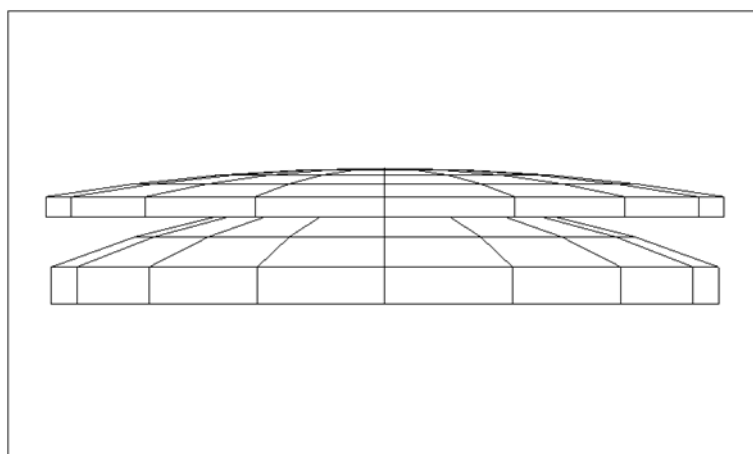


図 5.3 第 2 ナスミス焦点用広視野補正レンズ。球面 4 面の 2 枚組みレンズで、レンズ径は 480mm、中心でのレンズ厚みは 20mm、レンズ間距離は 2mm である。

5.1.4 光学系性能

第1ナスミス焦点は、補正レンズなしのリッチー・クレチアン焦点であり、強い像面湾曲（曲率半径 1425mm）を持つが、視野半径 3 分角まではほぼ回折限界に近い良像が得られ、視野半径 5 分角でも直径 0.3 秒角以内に点光源の 80%以上のエネルギーが入る設計となっている（図 5.5）。図 5.4 に焦点内外像を示す。視野半径 6 分角（図 5.4 の最下段のスポット）では焦点位置でも像が収束していないが、像サイズはシーイングより十分小さく、問題とはならない。像面湾曲を補正するフィールドフラットナーレンズは検討中である。

第2ナスミス焦点は、視野 1 度角を確保するため広視野補正レンズを挿入する（図 5.3）。第2ナスミス焦点に対するスポットダイアグラムを図 5.6 に示す。可視（550nm）から近赤外線（2.2 μm ）に至るまで、直径 1 度角の視野全面で、直径 0.4 秒角以内に点光源からのエネルギーの 80%が入る良像が得られる。ただし、視野中心から半径 0.4 度角より離れた視野端では、像面歪曲の波長依存性が大きく、長い波長ほど遠くに結像する（図 5.6）。しかし、550nm と 2.2 μm での結像位置の差は 0.5 秒角以内に収まっており（図 5.7）、シーイングによる像劣化を考えれば無視できるレベルであると言える。図 5.8 に焦点内外像を示す。焦点から $\pm 100\mu\text{m}$ ずれても像がほとんど劣化しないことがわかる。第2ナスミス焦点も、像面湾曲（曲率半径 2765mm）を持つ。

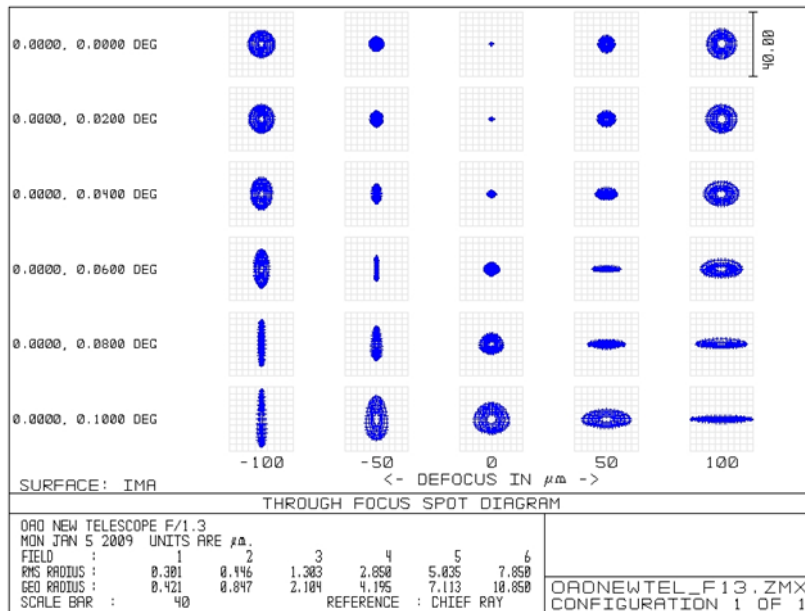


図 5.4 第1ナスミス焦点の焦点内外像。各ボックスのスケールは焦点面で 40 μm （0.36 秒角）。最上段が視野中心の像で、下段に行くに従って視野中心から 0.02 度ずつ離れた位置での像を示す。また、列は左から、焦点より -100 μm 、-50 μm 、0 μm （焦点位置）、+50 μm 、+100 μm での像を示す。

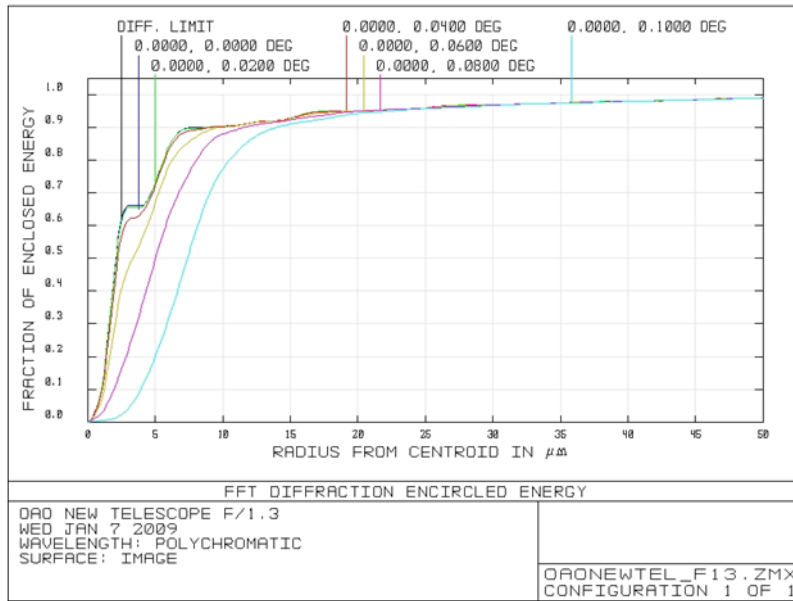


図 5.5 第 1 ナスミス焦点の点光源に対するエネルギー集中度。視野中心から 0.6 度=3.6 分角（黄土色の線）まではほぼ回折限界に近い結像性能を有している。視野端（中心から 0.1 度=6 分角；水色の線）でも、80%以上のエネルギーの集中する半径は 11 μm であり、岡山天体物理観測所における典型的なシーイングサイズ（約 1 秒角=110 μm ）より十分小さい。

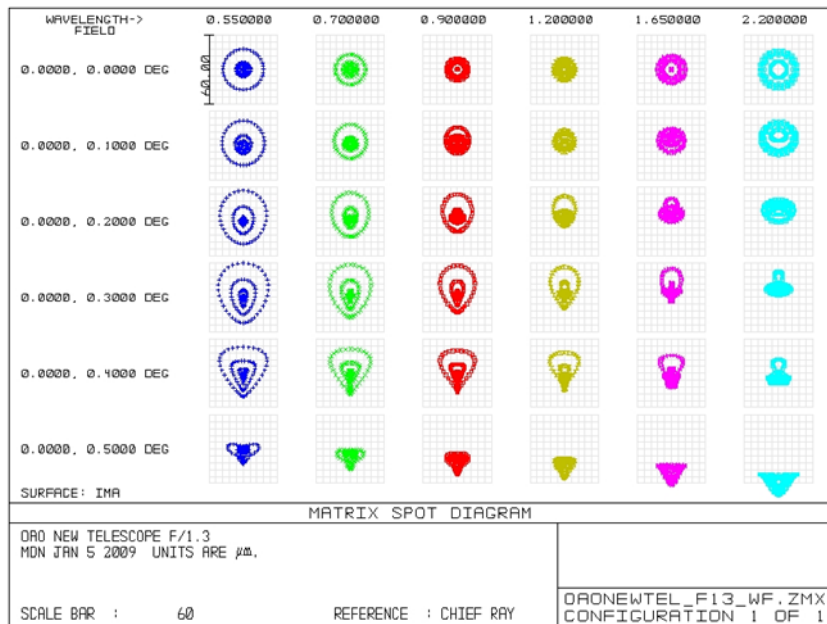


図 5.6 第 2 ナスミス焦点のスポットダイアグラム。各ボックスのスケールは焦点面で 60 μm （0.55 秒角）。最上段が視野中心の像で、下段にいくに従って視野中心から 0.1 度ずつ離れた位置での像を示す。また、列は左から、550nm、700nm、900nm、1.2 μm 、1.65 μm 、2.2 μm での像を示す。

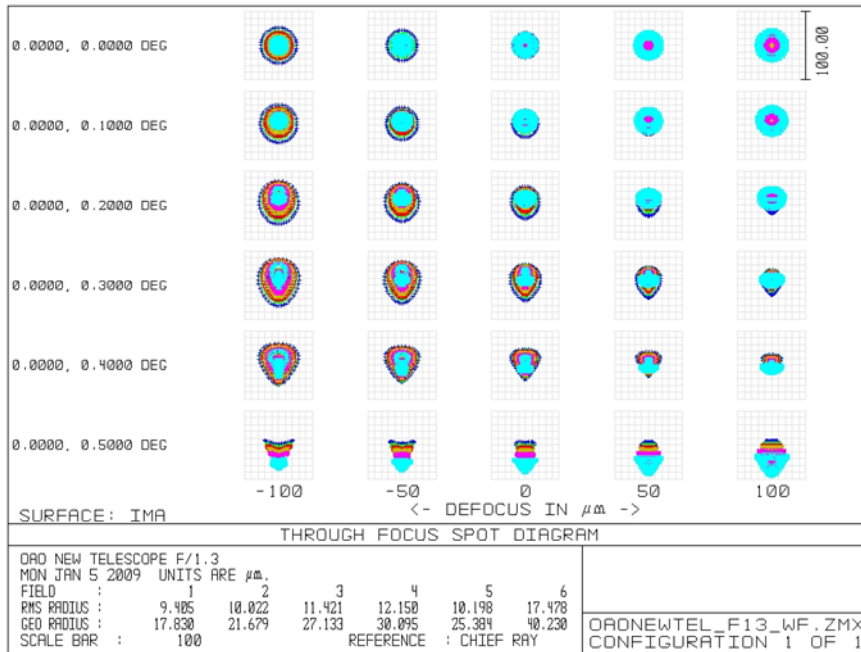


図 5.7 第 2 ナスミス焦点での焦点内外像。各ボックスのスケールは焦点面で $100\mu\text{m}$ (0.91 秒角)。最上段が視野中心の像で、下段に行くに従って視野中心から 0.02 度ずつ離れた位置での像を示す。すべての波長は重ねて示されている。列は左から、焦点より $-100\mu\text{m}$ 、 $-50\mu\text{m}$ 、 $0\mu\text{m}$ (焦点位置)、 $+50\mu\text{m}$ 、 $+100\mu\text{m}$ での像を示す。

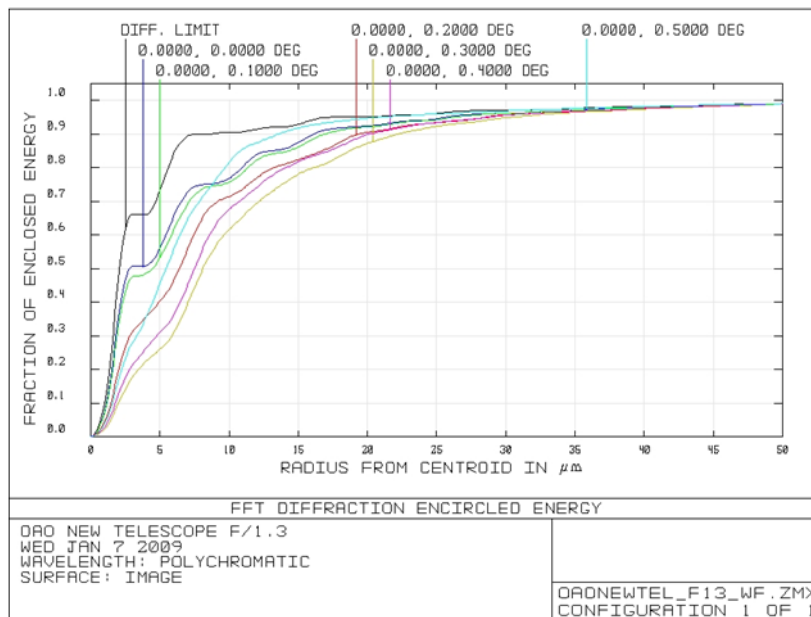


図 5.8 第 2 ナスミス焦点の点光源に対するエネルギー集中度。波長 550nm での値が示されている。

5.2 架台構造

5.2.1 概要



図 5.9 すばる望遠鏡の架台部。
写真中央の四角の枠体がセンタ
セクションと呼ばれる部分。

すばる望遠鏡などに見られるように、通常の望遠鏡架台はセンタセクションと呼ばれる強固な枠体の構造物の両側に軸受けを設けて高度軸とし、その下に主鏡を保持する主鏡セル、上には副鏡・スパイダ・トップリング等とそれを支える鏡筒トラス構造が接続される。望遠鏡を傾けた際には、架台の重力変形による主鏡と副鏡の横ずれ方向の移動量が同じになるようにトラス強度を決め、光学系に対する重力変形の寄与が少なくなるように設計されている（セルリエトラス構造）。一方、次世代超巨大望遠鏡の主鏡口径は 30m にもなるため、同じ方法で架台を製作するとセンタセクションの強度を保つために望遠鏡重量と建設コストが膨大なものになってしまう。そのために考えられているのが、センタセクションを作らず、主鏡セルの背面を円弧状のレールを用いて直接支持する方式で、巨大電波望遠鏡などで用いられている架台方式である。

この方法は、架台全体を軽量・強固な構造にできる一方で、望遠鏡を傾けた際の架台の変形をアクチュエータなどで積極的に修正する必要がある、従来のセルリエトラス構造の望遠鏡よりも制御が難しくなることが予想される。本計画では、この軽量トラス架台を用いることで、次世代望遠鏡で用いられる新方式の架台の製作や制御などの技術を開発し、軽量強固な構造をもつ機動性の高い（突発天体の出現時に高速対応できる）望遠鏡を製作する。これは同時に建設費のコストダウンにもつながる試みであり、今後の中小望遠鏡でも利用される可能性がある。この軽量トラス架台に関しては、名古屋大学の Z 研グループが 2m サイズのもので既に製作・試験を行っており、望遠鏡として十分な精度で駆動できることが確認できている。また、本計画のトラス構造の設計に際しては、名古屋大学の森研の協力により遺伝的アルゴリズムを取り入れた最適化設計が行われ、傾けた時のトラス変形の分割主鏡配置に与える影響が最小となるようにトラス構造が決められている。

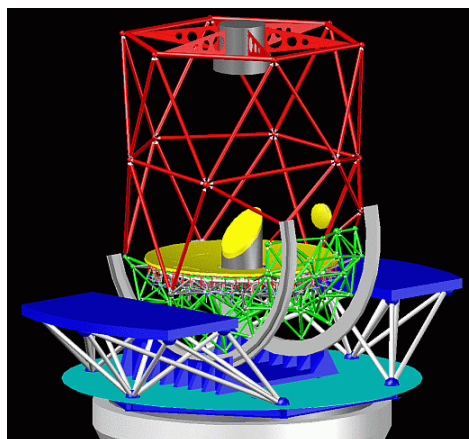


図 5.10 軽量架台。
センタセクションが無く、主鏡セルを背面から直接支持する。

5.2.2 軽量架台

望遠鏡架台は主鏡と副鏡および観測装置を支持する構造物である。天体は地球の自転に伴い天球上を移動する。架台の役割は、光学系と観測装置を支えながら、それらを天体に向けることである。この天体に向ける精度(指向精度)と追いかける精度(追尾精度)にはそれぞれ数秒角と0.5秒角程度が要求される(長さ数キロメートルの棒の先を5円玉の穴に通すような精度)。すなわち重たい鏡を頑強に支え、さらに高い精度で駆動することが架台には求められる。これに加えて本計画ではより軽量の望遠鏡を目指す。軽量の望遠鏡の利点として (i) 望遠鏡の熱容量が小さいため、望遠鏡本体に起因する大気揺らぎが小さく星像の劣化が小さい。(ii) 慣性質量が小さいため、高い駆動性能が得られ、突発的な現象を起こす天体を迅速に観測できる。(iii) 輸送から組み立てまでの建設コストが安い、があげられる。

本望遠鏡の主鏡は薄い分割鏡であるため2.7トンと従来の望遠鏡に較べて軽量である。しかしながら、18枚の分割鏡を整然と並べるために、架台上にある $18 \times 3 = 54$ 箇所の主鏡支持点位置の変位を0.1mm以内に抑えることが求められる。

本計画ではこの架台を達成するために名古屋大学で開発された超軽量望遠鏡(図5.11)の方式を採用し、設計の最適化に遺伝的アルゴリズムを用いた。

(1) 超軽量望遠鏡

この望遠鏡構造の特徴は望遠鏡構造の命ともいえる主鏡セルを真下から支える点にある(図5.12)。これにより、鏡支持構造にはたらく曲げモーメントを抑えることができ、軽量で強固な構造が実現できる。そのためにTHK(株)のRガイドという大きな円弧状の軸受を用いた。この構造は従来のセルリエトラスを用いた構造と異なり、堅牢で重量物となるセンタセクションが不要になる点でも優れている。



図 5.11 超軽量望遠鏡。

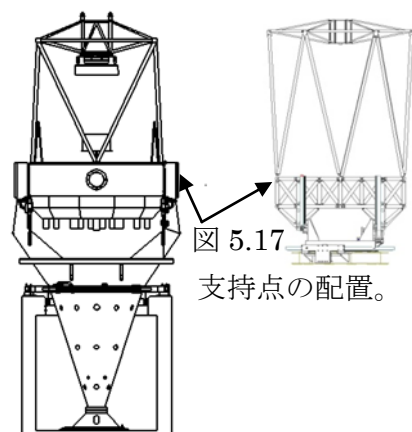


図 5.12 従来との比較。
右が超軽量望遠鏡。

(2) トラス構造

さらに軽量かつ強固という面において優れているトラス構造をふんだんに用いた。トラス構造は線材のみで構成され、曲げモーメントが構造内にはたらかず、引っ張り圧縮力のみがはたらく構造である。そのため力学的に効率のいい（強度に対する自重が小さい）構造である。またトラス構造は力学的に単純であるため、強度や固有振動数などの数値シミュレーションと現物の実験値が良く一致し、設計開発が行ないやすい。本望遠鏡ではこのトラスに組立解体が可能な(株)太陽工業製の TM トラスを用いた。

(3) 設計条件

3.8m 望遠鏡鏡筒の形態解析を行なう際に要求される条件を述べる。

(a) 幾何条件

3.8m 望遠鏡の主鏡は54 節点で主鏡セルと接続し、支持される。このうち3節点で1つの分割鏡を支持し、計18枚を支持する。なお、この主鏡の曲率半径は10mである。図5.13 は主鏡の裏側を示しており、黄色で表されるのが主鏡、それ以外が鏡の変形を補正するアクチュエータである。これに示されるように主鏡部の各節点でアクチュエータを介して主鏡を支持するため、主鏡部には54 個のアクチュエータが設置されることになる。第三鏡と主鏡セルとを接続する節点は3節点必要であり、それら節点により主鏡中央部で第三鏡を支持する。副鏡に関しては鏡筒上端に図5.14 のようなトップリングをつくり、それにより支持することとする。主鏡と同様に、第三鏡には3個、副鏡には1個のアクチュエータがそれぞれを支持する節点に取り付けられる。

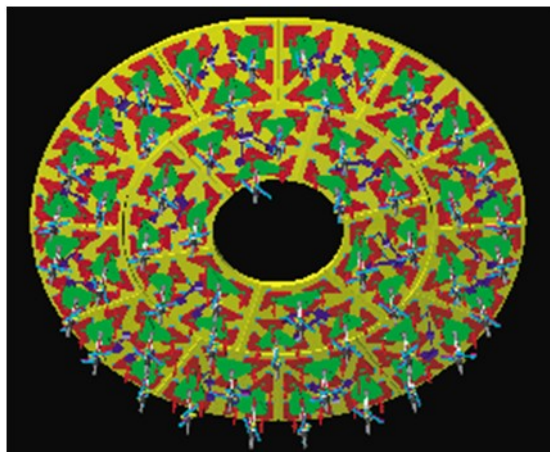


図 5.13 主鏡セルとの接続点。

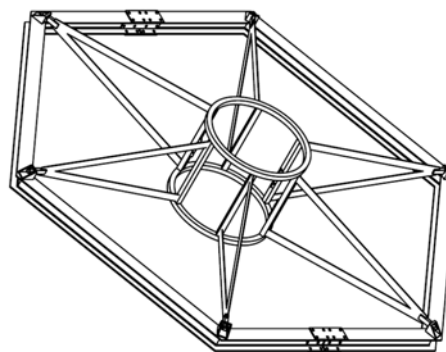


図 5.14 トップリング。

(b) 構造形態創生

ここで、第三鏡の中心であり望遠鏡の姿勢が変化しても座標が変わらない点を不動点と呼ぶが、この点を座標の原点と定義すると図5.15、5.16 のように節点座標を示せる。ここで、高さ方向をz軸方向、望遠鏡の仰角方向の回転の基準をy軸としている。アーク

レールは実際には半径2.5mのものを使用するが、この上に配置される接合部材が半径2.26mの円弧上に並べられるため、解析上はアークレールも半径2.26mとする。

これは図5.16中の円上に配置される。不動点の定義上、各アークレールの中心と不動点は同一直線上に存在する。

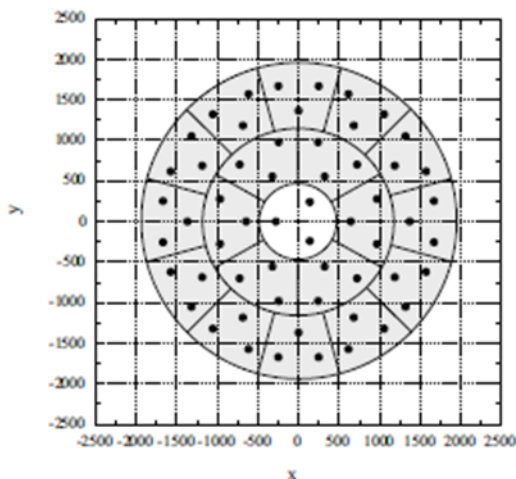


図 5.15 節点座標 (x-y 平面)。

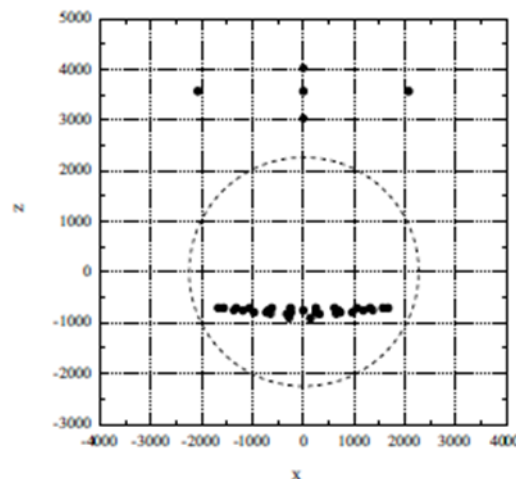


図 5.16 節点座標 (x-z 平面)。

(c) 支持条件

レールは鏡筒に2本取り付けられ、支持点をこれらレール上に各3点設置する。レール下部の土台の規模から、図5.17に示すように鉛直下向きから $-20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ の範囲内に支持点を配置しなければならないため、両端とその中央の点を支持点とする。

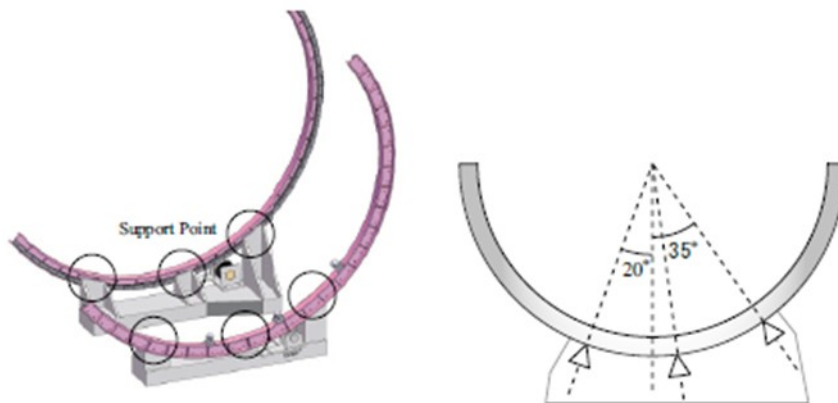


図 5.17 支持点の配置。

(d) 光学条件

構造物が光を遮断しないように部材の生成箇所を制限する。副鏡およびスパイダーが光を遮断してしまうことは望遠鏡の構造上避けようがないため、これ以外の部材が光路を遮らないようにする必要がある。具体的には、副鏡、スパイダー以外の部材が式(i)、(ii)を満たすように配置されなければならない。

$$\begin{aligned} & \bullet x^2 + y^2 > 1900^2 \quad (z \geq -518) \quad (i) \\ & \bullet x^2 + z^2 > 250^2 \quad (ii) \end{aligned}$$

(e) 荷重条件

設置予定の鏡の重量を考慮して主鏡に接続する54節点に各50kgf（キログラム重）を作用させる。分割鏡の重量が約73kgfであるので、これを等分すると1節点は約24kgfとなるが、これにアクチュエータの重量を加えるため、1節点50kgfとしている。実際は重量バランスを考慮せねばならず、望遠鏡の姿勢によって重量の振り分けは変化するが、簡略化のためここでは無視する。また、副鏡は質量のない剛体に置き換え、完全ではないが重量バランスを考慮し上側の節点に125kgf、下側に275kgf作用させる。第三鏡に関しては、これに接続する3節点に100kgf作用させ、さらにモーメント荷重を考慮し、図5.20のように3節点上に四面体を組み、その上端節点に200kgf作用させる。この四面体に用いた部材も質量のない剛体とする。さらに鏡筒の自重も考慮する。これら荷重は、全て重力方向に作用することとする。

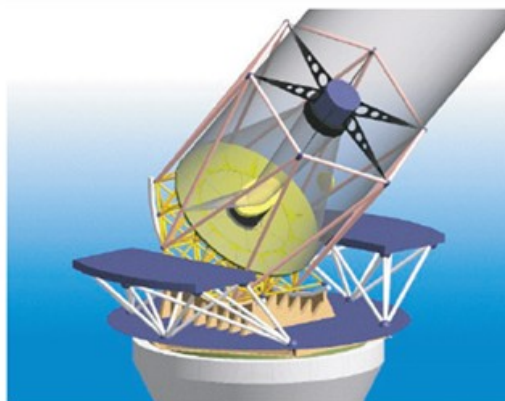


図 5.18 光路。

水色の半透明が光路となる。

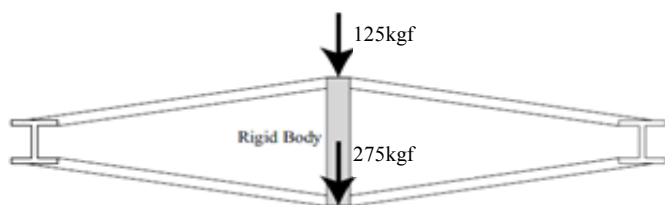


図 5.19 副鏡部モデル。

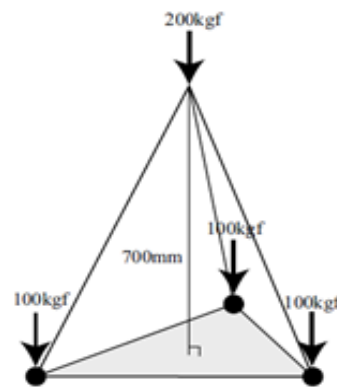


図 5.20 第三鏡部モデル。

(4) 遺伝的アルゴリズムを用いた最適設計
本望遠鏡構造に求められる仕様は大変厳しい。主鏡は 54 か所の点に支えられながら重力に対し回転する。これら各支持点の相対的な位置が変位すると鏡がずれることになる。そのためいかなる姿勢の時でも表 5.6 の条件を満たすことが求められる。なおこの様に相

表 5.6 変形への制約。

応力度 部材干渉	許容応力度以下 干渉なし (光路、アクチュエータを含む)
変位補正量	
主鏡 接線方向	0.1mm 以下
主鏡 法線方向	0.1mm 以下
副鏡 接線方向	2.0mm 以下
第三鏡 法線方向	0.05mm 以下

対変位を小さく抑えた変形をホモロガス変形という。この条件を満たしつつ軽量の望遠鏡構造（最適解）を創造するために遺伝的アルゴリズムを用いた。このプログラムを名大工学部の空間建築を専門とする大森研と(株)TTDCが開発した。遺伝的アルゴリズムとは、対象（望遠鏡構造）をあたかも計算機の中で生命の進化のように発展させる。今回の進化の方向は、より高いホモロガス性と軽量さである。

これにより仕様を満たす4.7トンの構造が創造された(図5.22)。これは従来の構造に比べ1/5程度の重量である。

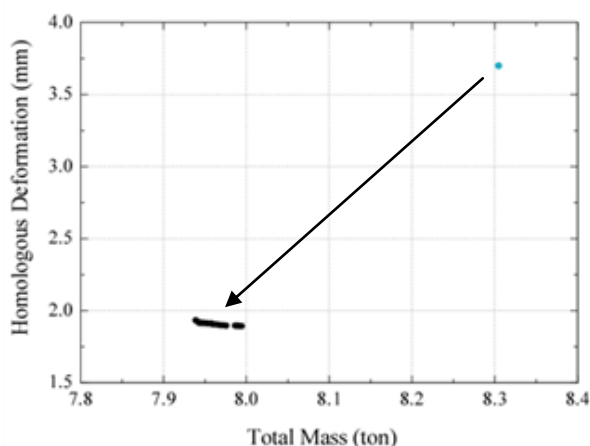


図 5.21 最適化進化の様子。

横軸は重量、縦軸は変形量（ホモロガス変位からのずれ）右上ほど重たく変形が大きい構造で、左下ほど軽く変形の小さい優れた構造といえる。

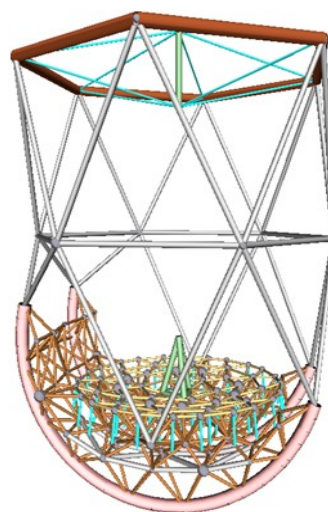


図 5.22 最適化された鏡筒トラスモデル。



図 5.23 仮組中の主鏡セルトラス。

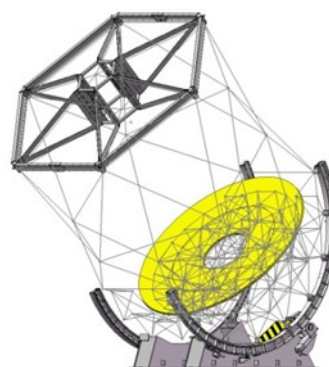


図 5.24 08年11月時点の望遠鏡。線材はトラスのパイプを示す。これに加えて方位軸構造とナスミス台が取り付けられる。

5.3 主鏡の支持・制御機構

5.3.1 概要

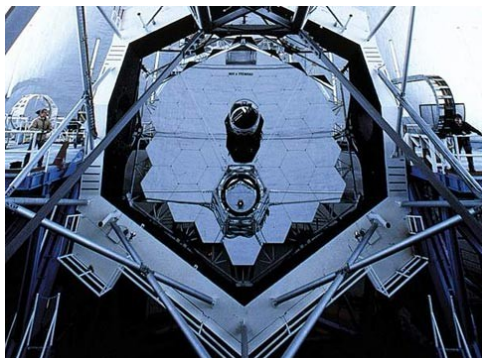


図 5.25 ケック望遠鏡。
1.8m 六角鏡 36 枚からなる分割鏡望遠鏡である。

現在、世界には口径 10m クラスの望遠鏡が 5 台存在する (Keck、KeckII、HET、SALT、GTC) が、その全てが分割鏡を用いた望遠鏡である。更に、次世代の超大型望遠鏡計画も分割鏡望遠鏡を中心に進められており、今後の望遠鏡開発においても分割鏡制御技術は必須の技術である。しかし、日本では分割鏡制御の経験はなく現時点では独自の次世代望遠鏡計画を持つことは極めて困難である。また、次世代超大型望遠鏡は建設費も膨大になり、技術的にも困難であるが建設資金の準備もほぼ同等に困難なものとなっ

ている。本計画では、日本独自の分割鏡制御技術を開発し、同時にできる限り安価な主鏡支持システムを構築することで、今後の日本独自の次世代望遠鏡計画を持つ可能性を切り開くことも目標としている。具体的には以下の点で従来の分割鏡制御方式とは異なっている。

(1) 軽量コンパクトな分割鏡制御システム

分割鏡を全体として 1 枚の鏡として機能させるには、隣同士の鏡の段差を光の波長の $1/8$ 以下 (50nm 程度) に抑える必要がある。ナノ精度での位置検出を、従来の静電容量測定方式よりも環境変化の影響を受けにくい相互インダクタンス測定方式のセンサーを用い、高精度の位置調整をハーモニックギアと無関節でこの機構の組み合わせで行なうことにより安定性を高め、システムの小型軽量化が可能となる。

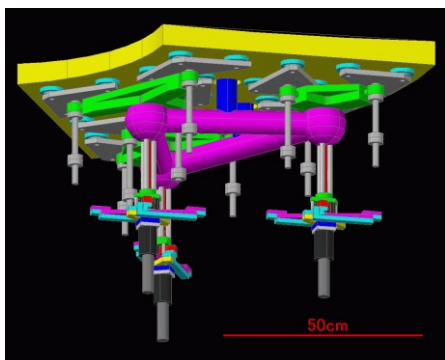


図 5.26 分割鏡制御システム。
望遠鏡トラス構造の節点を支持点として鏡を 3 点で位置決めする。

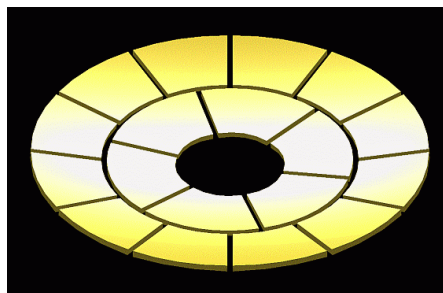


図 5.27 新技術望遠鏡主鏡。
1m サイズの扇型分割鏡 18 枚で構成される (隙間は誇張して表示)。

(2) 扇型分割鏡の採用

従来の分割鏡望遠鏡は、六角形の分割鏡の組み合わせで作られるが、この方式だと同じ反射面形状を持つ鏡は6枚しかない。再蒸着などのために一つの形状の鏡に1枚のスペアを用意することが必須なので、500枚近くの鏡を持つ望遠鏡の場合は100枚近くのスペアが必要となる。それに対し、扇型分割鏡の場合は1周全てが同じ反射面形状を持つため、巨大望遠鏡でもスペアの鏡は数枚で済み、コスト面で大きな利点がある。また、望遠鏡全体としての主鏡形状が円形となるため、最終的な天体像の形状が六角形の分割鏡の組み合わせで得られるものよりも光学的に優れている。

(3) 自己位相測定方式

従来の分割鏡望遠鏡では、隣同士の鏡の段差を天然の星の光を用いて光学的に確認しているが、この方式では時間がかかる上に、日本国内のような星像変化の激しいところでは安定して測定できない可能性が高い。そのため本計画では、焦点面から拡散する波長可変のレーザー光を主鏡全面に当て、分割鏡の境界上に設置された小さいハーフミラーで一部の光を焦点面に戻すことによって、隣同士の鏡の段差を光学的に高速測定する。これにより、分割鏡望遠鏡の安定性が飛躍的に高まることが予想される。

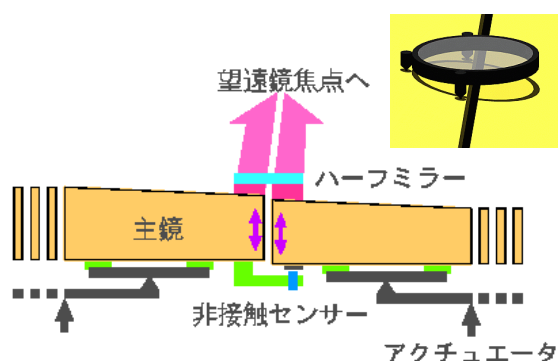


図 5.28 自己位相測定の方法。
焦点から照射した光の一部をハーフミラーで戻すことで2鏡面での干渉を調べる。

これらの技術に関しては、京都大学で数年前から基礎開発研究が進められており、各種シミュレーションや試作機の製作、安定性や制御精度の試験が行なわれている。

5.3.2 分割鏡位置制御機構

分割された鏡を組み合わせることで1つの像を結像させるには3つの段階がある。初めに行なうのが焦点合わせである。これは、各分割鏡による星像がばらばらに分かれている状態で個々の鏡を上下方向に動かして焦点を合わせ、星像サイズを最小にしておくことである。次に行なうのが軸合わせである。個々の分割鏡の角度を調整して星像を1つに重ねることで鏡の向きを揃える作業である。こ

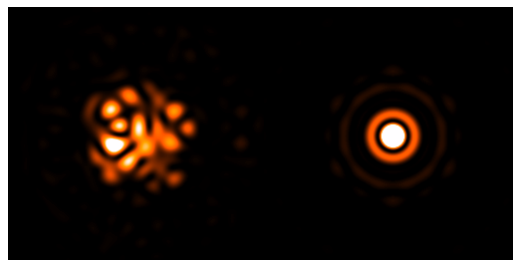


図 5.29 位相合わせ前後の星像。
分割鏡の位相が合っていないと、望遠鏡の限界性能を引き出すことができない。

の段階で、個々の分割鏡の焦点と向きが調整できたが、この状態はまだ完全な状態ではなく、小口径の望遠鏡の解像度のまま光量のみが増えた状態でしかない。分割鏡を全体で1枚の鏡として機能させるためには、この状態からさらに位相合わせを行なう必要がある。この作業は、隣同士の鏡の上下位置を波長の8分の1以上の精度で合わせる作業で、このナノ精度での微調整を経て初めて1枚鏡と同等の性能が発揮される。通常の観測の場合は、星像サイズは大気揺らぎの大きさ（シーイング）で決まるため、位相まで合わせる必要はないが、大気揺らぎを補正する補償光学を用いる際には望遠鏡の限界性能での観測となり、位相合わせが必要となる。

個々の分割鏡の大きさや重さは望遠鏡によって異なるが、典型的にはサイズが1m～1.5m、重量が80kg～150kg程度の大きさである。この鏡を光の波長の8分の1以上の精度、例えば典型的な光の波長を1 μm とすると最低でも約100nmの精度での位置制御が必要となる。その他の条件も顧慮すると、分割鏡主鏡制御機構に必要な条件は以下のようなになる。

1. 1mmの範囲内で精度20nm程度での位置測定と移動が可能であること
2. 温度や湿度などの環境の影響が少なく、数週間にわたって安定して運用できること
3. シンプルかつ安価であること

安価で高精度な位置センサーとして物体とセンサーヘッド間の静電容量を測定するものと、インダクタンスを測定するものがあるが、長期安定性を調べた結果後者の方式の方が安定性に優れていることが判明し（測定原理に湿度に依存する誘電率や、温度に依存する抵抗を含まないことが理由と考えられる）、インダクタンスセンサーを採用することに決定した。また、位置を動かす機構として、日本独自の技術であるハーモニックギアを搭載したリニアアクチュエータを用い、シンプルな無関節でこの機構を用いて駆動精度を上げて利用することとした。このシステムの欠点としては、バックラッシュがあ

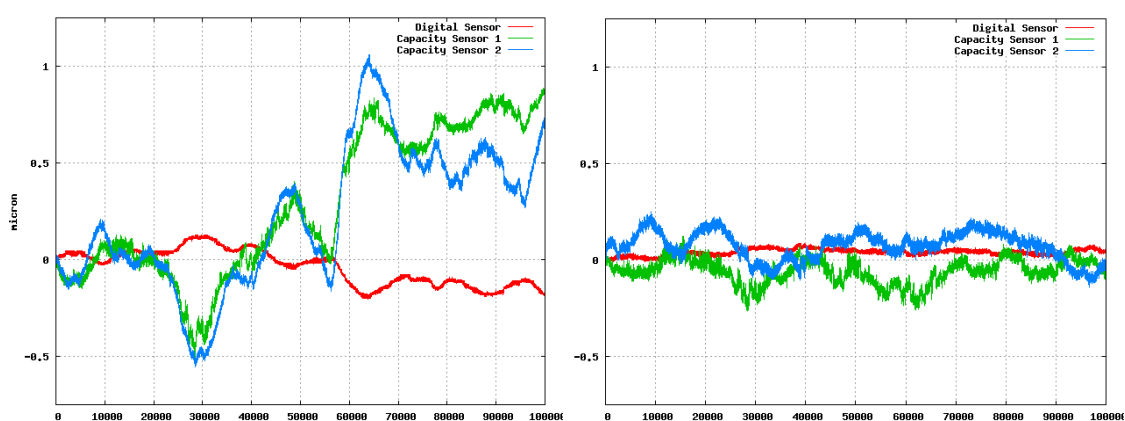


図 5.30 静電容量方式とインダクタンス方式のセンサー安定性の比較。

左図は10日間での静電容量センサー（青・緑）とインダクタンスセンサー（赤）の安定性。静電容量センサーは1 μm 程度の変化があるが、インダクタンスセンサーはその5分の1程度。右図は結果を温度や湿度などの測定値を用いて補正したもの。インダクタンスセンサーは10日間で20nm以内の安定性を示した。

ることと高速制御ができないことであるが、風の影響まで補正しようとせず単に再現性のある機械的な変形のみを補正するのであれば、問題ないものと考えられる。

現在完成している位置制御機構の性能は以下の通りである。

最小駆動分解能	: 1.7nm
駆動再現精度	: 20nm
位置センサー分解能	: 10~50nm
位置センサー安定性	: ~50nm / 6 週間 (環境パラメータ補正後)

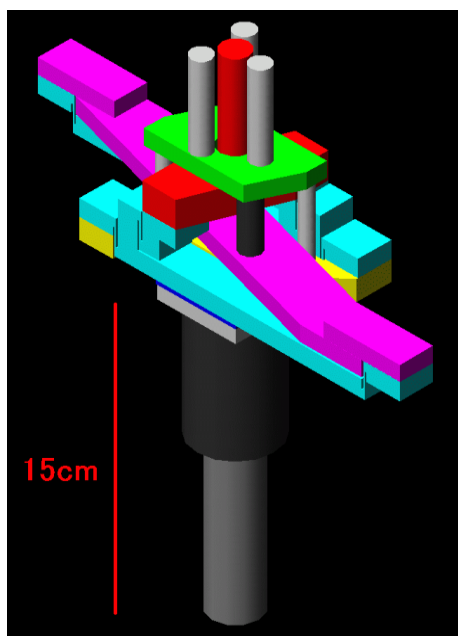


図 5.31 アクチュエータ設計図。
最下部の灰色の円筒が DC モータ、その上の黒色円筒がハーモニックギアとボールねじ部で、中心シャフト (隠れている) によりピンク色の上昇バーが持ち上げられる。水色部分がてこレバーで、板ばね状関節を介して 10 : 1 のてこ比で赤色の支持シャフトを持ち上げる構造。ハーモニックギアの駆動を安定させるために、上昇レバーは押しばねで上方より力が加えられている (黄緑のフランジ板との間の黒色円筒部)。

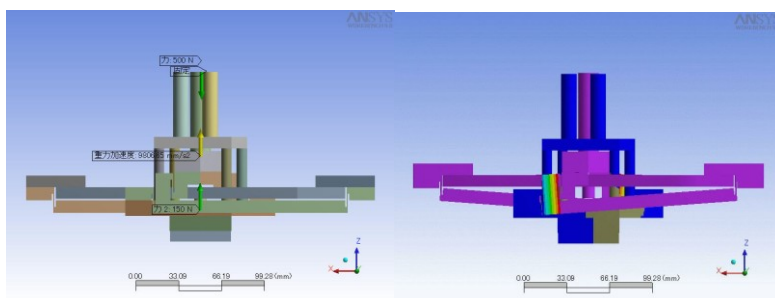


図 5.32 てこ変形解析。
上昇バーがもちあげられたときのてこ部分の変形の様子を有限要素法で解析したもの。

5.3.3 分割鏡支持機構

望遠鏡の主鏡鏡面形状に自重変形の影響ができるだけ出ないようにするためには、鏡自体の強度を強くするか、できる限り無重力に近い状態で支持する必要がある。鏡の強度を上げる方法としては、鏡の厚さを増やすのが最も簡単であるが重量が増すため好ましくない。次に鏡の内部をあらかじめ空洞にして製作するハニカム鏡や、背面に多くの凹みを加工したり薄い鏡に背面から格子状のリブを接着して補強した軽量鏡が考えられるが、これらの鏡は手間がかかり高価なため、大量生産には不向きである。また、鏡の素材自体をより強度の高い材料に置き換えることも考えられるが、鏡面形成時の難易度などを考えるとこれも容易ではない。結局、鏡自体の強度を上げることは難しく、支持方法で自重変形を最小に抑えることが必要となってくる。

鏡を無重力に近い方法で支持する方法として、カウンターウェイトとてこレバーを用いる方法、空気パッドや空圧・油圧アクチュエータ等で等圧支持する方法、ホイップルツリーと呼ばれる2つないし3つの支持点の組の重心を支持する方法などがあるが、重量が軽く機械式のアクチュエータと組み合わせて使えるホイップルツリー方式を採用することにした。鏡の厚さは最も薄い部分で4cmとし、まず、自重変形の影響が鏡面に表れない為に必要な支持点数を有限要素法により評価した結果、9点支持では影響が出るが27点支持ならば自重変形の影響がほぼなくなることが確認できた。

次に、背面支持点を固定点ではなく、等圧支持にして浮かせた状態にしたところ、全体が2つに折れ曲がるような変形が発生したが、隣の鏡との相対位置関係を測定するセンサー分として70gのおもりを6ヶ所に配置したところ、曲がりはなく、全体の傾斜が若干残った。実際の場合は、個々の鏡の形状を星の光と波面センサーで確認し、数10g程度のおもりで調整したり、弱いばねで力を加えたりして補正可能であると予想される。

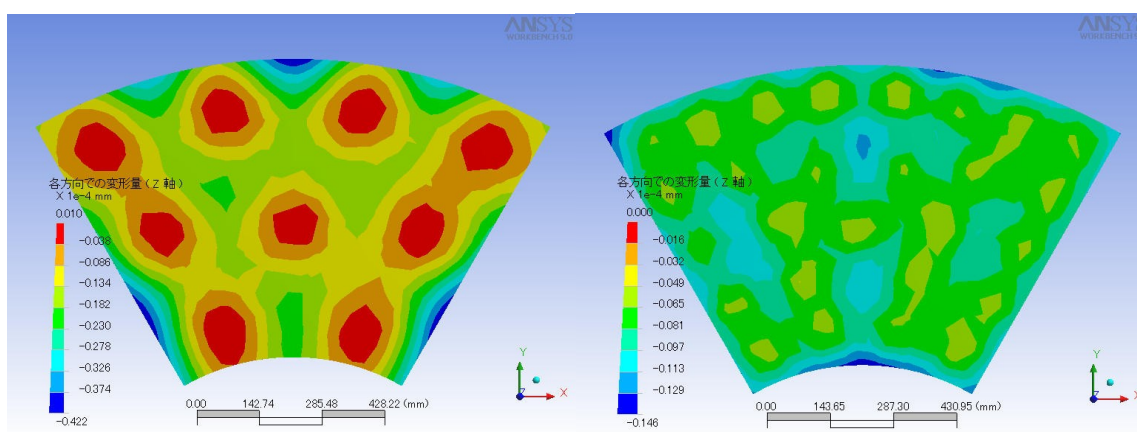


図 5.33 支持点数による主鏡の自重変形。

左が9点で支持した場合（20-30nmの変形が現れる）、右が27点で支持した場合（ほぼ全面で自重変形は5nm以下になる）。

支持点の位置が決まったら、3点ずつを三角形でつなぎ、個々の三角形の重心をさらに大きい三角形でつなぐ。こうしてできた三角形の重心をアクチュエータで支えることにより9点に対して同じ力で支持力が伝わり、27個の支持点を3個のアクチュエータで支えることが可能となる。また、望遠鏡が傾いたときにトルクが発生しないように、接続点が重心となるようカウンターウェイトを用いて高さ方向に重心を引き出して接続している。上段ツリーと下段ツリーはガタの無いロッドエンドで接続し、下段ツリーとアクチュエータ駆動軸は球面ベアリングで接続する。1枚の分割鏡(75kg)を支持するホイップルツリーの質量は54kg、鏡を載せたときの変形は最大で25 μ mとなっている。鏡の支持点部では、支持機構と鏡の熱膨張率の違いの影響を逃がすため、摩擦を極力抑えた横滑りする面で垂直方向の荷重のみを支える。

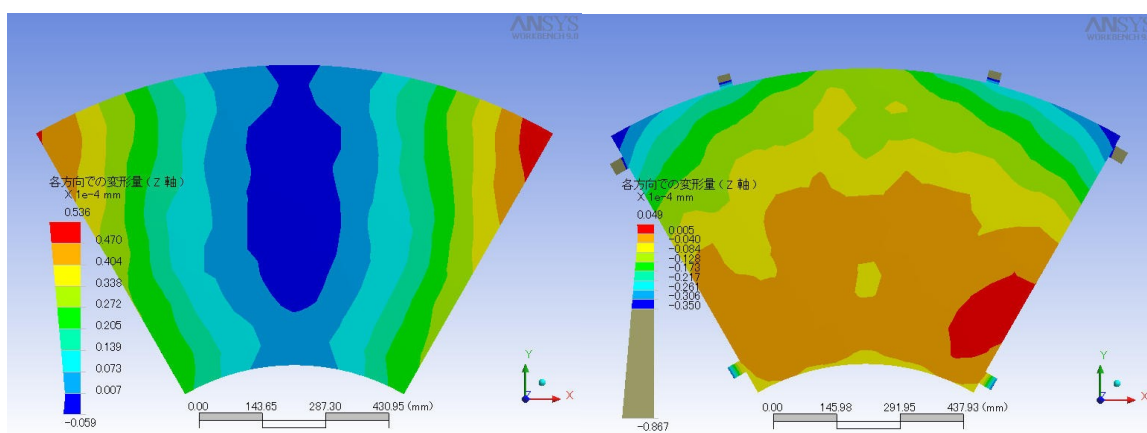


図 5.34 27点等圧支持による主鏡の自重変形。

左が何も付いていない状態、右は隣の鏡との相対位置を測定するセンサーに相当する70gの重りを6か所に付けた場合。数十gの調整で折れ曲がりがなくなることがわかる。

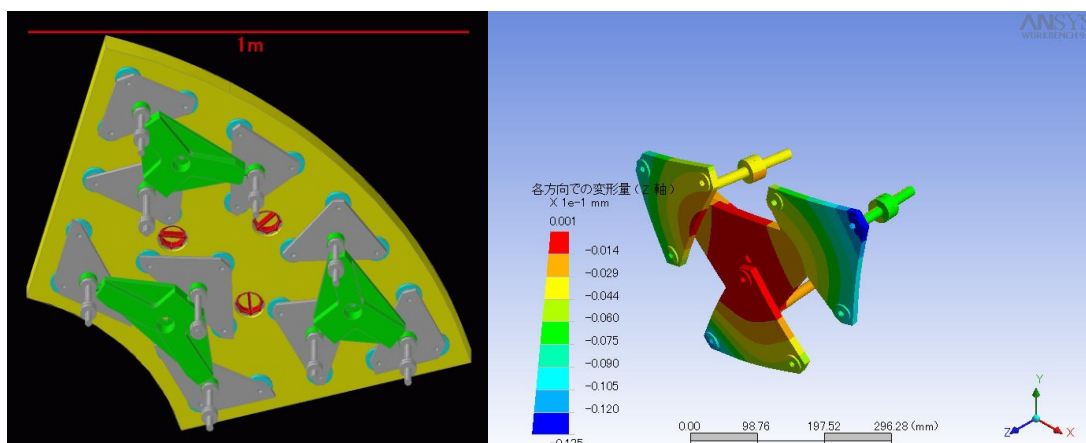


図 5.35 ホイップルツリー。

左図は内周用分割鏡を裏側から見たところ。望遠鏡が傾いたときにもトルクが発生しないように重心位置で球面ジョイントにより接続している。1枚の分割鏡を支持するホイップルツリーの重量は54kg、鏡を載せたときの変形は最大で25 μ m。

一方、鏡の背面には3箇所円柱状の窪みが加工してあり、それらの窪みを利用して鏡の横ずれを防ぐ機構が取り付けられる。この横ずれ支持機構は鏡の上下方向の動きを妨げることなく、鏡の取り外しの際にも簡単にはずすことができるよう、無給油スライドレールと大口径のボールプランジヤで放射状に配置された板を挟み込む構造になっている。これにより、鏡との熱膨張率の違いの影響を受けずに、鏡の横ずれのみを抑えることができる。アクチュエータはトラス節点（グローブ）の下に配置され、駆動軸はグローブ内のリニアブッシュを通して下段ホイップルツリーに接続される。

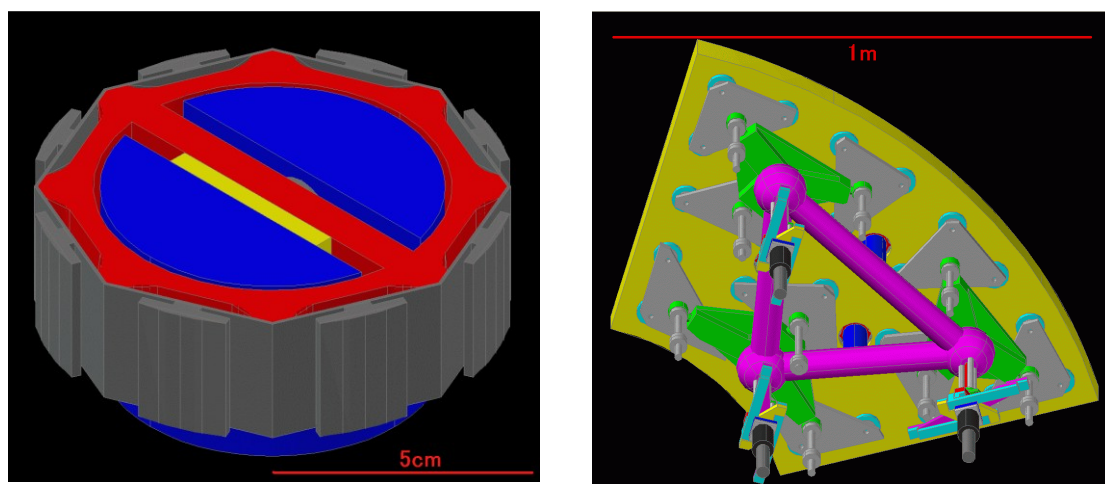


図 5.36 横ずれ支持機構。

左図は横ずれ支持機構先端部で、無給油スライドレールと大口径のボールプランジヤで固定板を挟み込む。それぞれの横ずれ支持の支柱は、トラス棒の中央に接続される。

2～4mm の間隔で配置された鏡同士の相対位置関係は、背面の境界部に取り付けるインダクタンスセンサーで測定し、常に位置関係が変化しないようフィードバック制御をして鏡面全体の形状を保持する。また、アクチュエータ駆動軸にもインダクタンスセンサーを取り付けてアクチュエータの動きをモニターする。全体の自由度よりも多くのセンサーを配置することで精度を高めると同時に、センサー故障時にその取り付け位置を自動的に特定し、交換までの間他のセンサーで役割をカバーできることを目指す。インダクタンスセンサーは1ヶ月程度で原点がずれてくるため、後述の自己位相測定システムを用いて光学的位置合わせを定期的に行ない、センサーの0点補正を更新する。

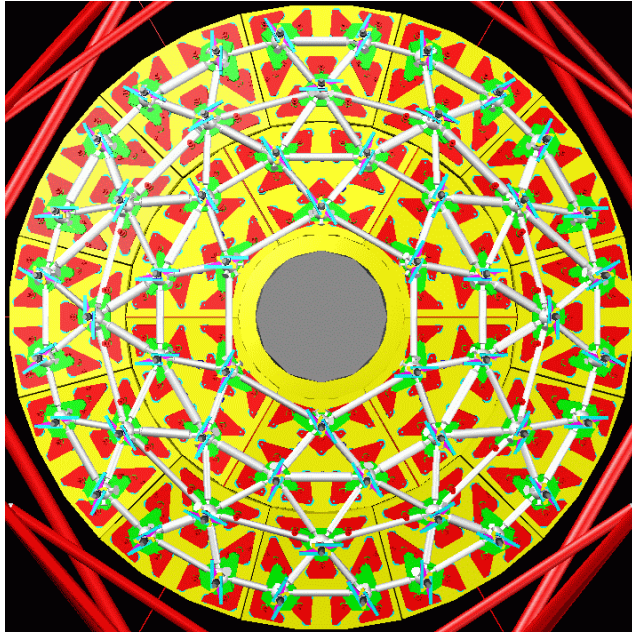


図 5.37 主鏡裏側から見た最上部トラス構造と主鏡支持機構。

鏡の間隔は2~4mmで、境界部付近にインダクタンスセンサーが配置される。中央部には第三鏡支持機構が入るが、詳細は検討中。その上方には副鏡がある。

5.3.4 自己位相測定機構

望遠鏡の主鏡全体に理想的な平面波が入射する場合、位相合わせの過程は、デフォーカス像を用いて更に詳細に確認することが可能である。分割鏡間の光の位相が不連続な場合には、隣同士の鏡端での回折光の干渉により鏡の境界部分の光が弱まり、デフォーカス像は不連続となる。鏡面位置が完全に揃った状態では、デフォーカス像はどの波長でも位相差なく滑らかにつながるため、位相が揃ったことが確認できる。

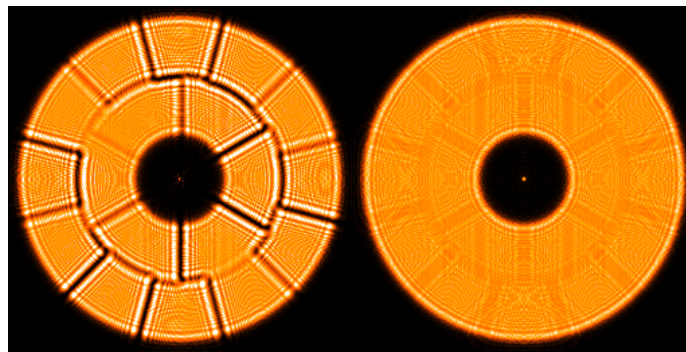


図 5.38 デフォーカス像に対する位相合わせの効果。左図ではずれている位相が右図では揃っている。京大新技術望遠鏡は世界初の扇型鏡を用いた分割鏡望遠鏡で、きれいな回折限界像が得られる他、大型化して分割鏡の枚数が増えても六角形鏡に比べて鏡の種類が少なく済むメリットがある。

実際には天体からの光は主に地球大気の上層部の速い気流と地表付近での乱流により乱されるため、望遠鏡の口径全面にわたって理想的な平面波が入射することはなく、すばる望遠鏡やケック望遠鏡のあるハワイ島マウナケア山頂でも、波面の乱れのサイズは可視光で 20cm 程度のサイズとなっている(日本国内では 7cm 程度)。しかし、波長 $3\mu\text{m}$ の赤外線では波面の乱れのサイズは 2m 弱程度にまで広がり、単一の分割鏡に対しては平面波とみなすことができるようになるため、ケック望遠鏡では赤外線カメラを用いてこの効果を確認している。

可視光で分割鏡の位相を確認するためには、平面波とみなせるサイズにまで口径を絞る必要がある。すなわち、図 5.38 で分割鏡の境界付近の光だけを狭い範囲で切り出し、干渉によるコントラストを高めるために集光して回折限界像を調べる。その場合、光束内で境界を挟んだ 2 つの部分の位相がずれていると、回折像は干渉のため分裂し 2 つのコアを持つ状態になる。この効果を利用して分割鏡間の位相のずれを測定するのが位相測定カメラである。

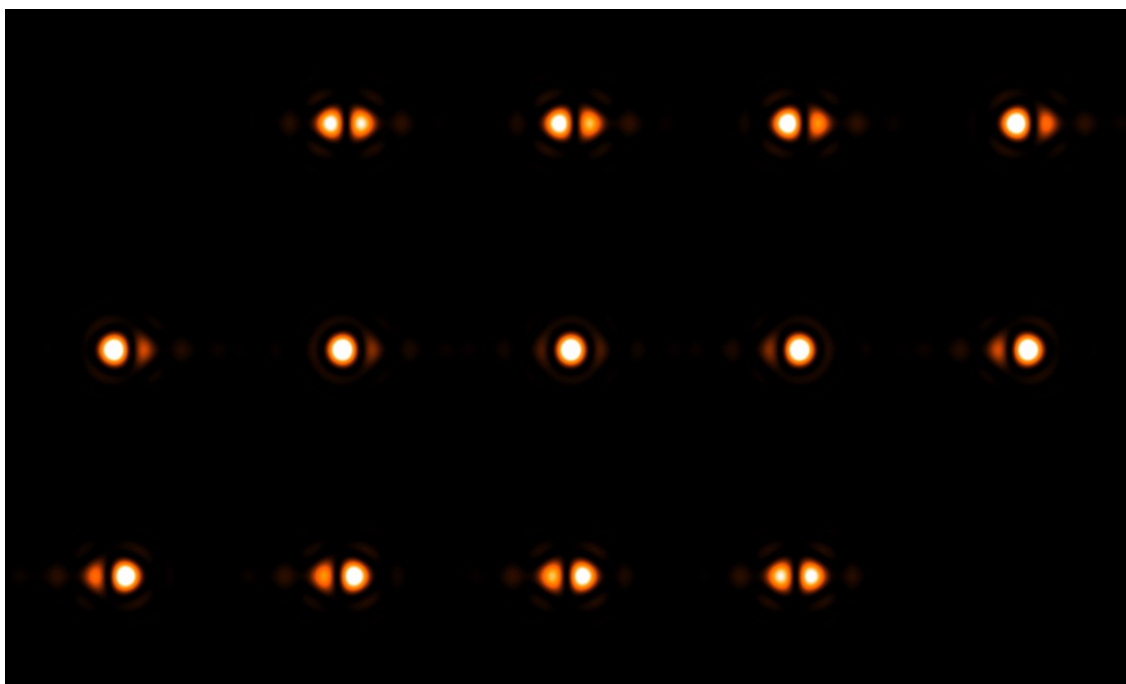


図 5.39 2 分割された光束による干渉効果で回折限界像が分裂する様子。上段左から、 $-6/13$ 波長、 $-5/13$ 波長の順で $1/13$ 波長ずつ位相が変化し、下段右で $+6/13$ 波長のずれとなっている。位相測定カメラはこの効果を利用して分割鏡間の鏡面のずれを測定する。

図 5.39 は単一波長の場合について回折限界像の変化の様子を表したものであり、位相が 1 波長分ずつずれる毎に同じ像形状が繰り返して出現する。しかし、実際には波長が異なれば鏡面位置の違いによって生ずる位相のずれの量も変化するため、様々な波長

成分の重ね合わせによりこの特徴は波長帯が広がるほど均一化されて違いがわかりにくくなっていく。唯一、完全に鏡面位置が揃った場合には、波長帯の幅によらず上図中央に相当する回折限界像が得られる。そのため、まず波長幅の狭いフィルターを用いてシャープな回折限界像が得られる場所を探し、徐々にフィルターの波長幅を広くして調整範囲を絞り込んでいく。この手法で、ケック望遠鏡では 30nm の鏡面位置精度を達成している。しかし、この方法では狭帯域から広帯域フィルターまで数種類のフィルターを交換し、4 等星から 7 等星まで各フィルターで最適な明るさとなる天体へと望遠鏡の向きを変えながら観測・調整を繰り返す必要があるため、天候とシーイングの良い日に微調整なら 1 時間、分割鏡の 1 つを交換後などは半夜程度の時間を要する調整作業となる。

上述のように、分割鏡の鏡面位置合わせの作業は手間と時間のかかる作業であり、かつ観測可能な夜間の貴重な時間を必要とする。そのため、この位相合わせの作業は頻繁に行なうことはできない。しかし、昼間のドーム内や、観測の合間の数分の時間で鏡面の位相の状態を確認することができれば、分割鏡を常に最良の状態に保つことができる。京大新技術望遠鏡では、従来の星を用いた位相合わせの他に、自己光源を用いて分割鏡間の位相差を測定できる方法を試験する予定で、現在その基礎試験を進めている。

焦点面からレーザーを照射すると、通常とは逆の光路で空に向けた平行光となって光は出ていくが、その一部分を分割鏡境界部に配置された小型のハーフミラーで戻すことで、星の光を用いた測定と同等の測定ができるものと期待できる。照射するレーザーとしては、ネオンレーザーの主要可視発振波長である 543nm、604nm、612nm、633nm の 4 種類の波長を切り替えることができるものを用いると、前頁の干渉パターンが 4 つの単色波長で得られる。この結果を前頁にある 13 分割テンプレートと比較し、4 つの波長のそれぞれに対しパターンを決定することにより、目標位置から $\pm 10\mu\text{m}$ の範囲内において $\pm 5\text{nm}$ の精度でずれ量が確定できる（主鏡に 2 度反射して戻るため、光路差は鏡面位置ずれの 4 倍となる）。

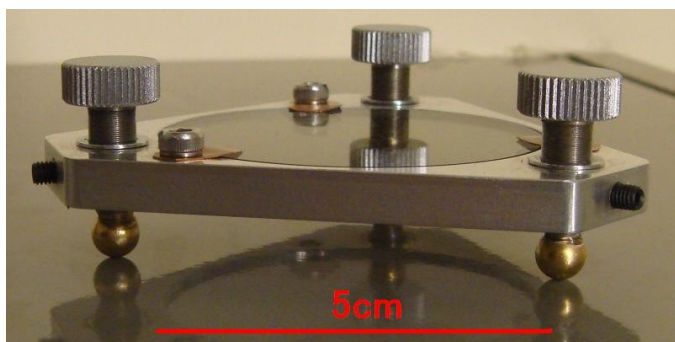


図 5.40 分割鏡境界上に配置されるハーフミラー（試作品）。主鏡鏡面上に直径 2mm 程度の金属片を接着しておき、3 本の高さ調整ねじの先端に付けられたネオジウム磁石球により磁力で固定する。これにより、焦点面から照射された光の一部分が再度焦点面に戻る。

この方法は、比較的大きなずれ量であっても短時間で高精度の位置決定ができるため、観測の合間の短い時間で調整できることが特徴である。欠点としては、鏡面上に散乱体が置かれることによってゴーストや迷光が発生する可能性があることであるが、そういう不都合が生じた場合にはハーフミラーホルダーは簡単に取り外し可能であるため問題ないものと考えている。

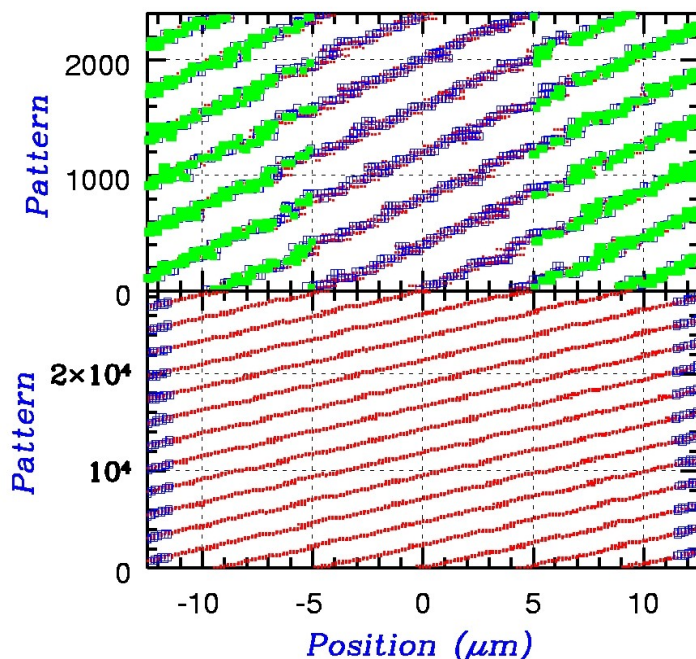


図 5.41 鏡面が完全に揃っている状態から前後に数 μm ずれたときの、4つの波長での回折像のパターン変化の様子。下段は1波長を13段階に判定できた場合（図 5.39 参照）で $13^4=28561$ 通りの状態があり、上段はその半分の7段階に判定できた場合で、 $7^4=2401$ 通りの状態がある。点はパターンから位置が1点に特定できるところ、白抜き四角は対応点が2点あるところ、中塗りの四角は対応点が3点以上あるところを表す。7段階にしか判定できない場合でも、ずれが $\pm 5\mu\text{m}$ 以内であれば70%の確率で1点が特定でき、残りの場合でも候補は2点に絞り込めるため、少しずらして再度測定することで位置を1点に決定することができる。

5.4 副鏡・第3鏡

5.4.1 概要

副鏡、第3鏡ともに、1mを越える大きな光学素子であるため（表5.1参照）、低膨張ガラスを用い、ハニカム構造を採用して軽量化をはかる。硝材としては、主鏡セグメントと同じオハラ・クリアセラムZ、もしくはBorosilicate材（オハラE6など）を用いる。ハニカム構造は、裏面からのくり抜き加工、もしくはリブと鏡面を別に製作して後から組み合わせるフリットボンディング工法を用いて製作する。

副鏡・第3鏡の支持構造は、カウンターウェイトを用いたフローティング支持とする。裏面からハニカム構造内部に支持ロッドを挿入し、それぞれの鏡の厚さ方向の重心に支持点を置いて、そこにかかる重量をカウンターウェイトでバランスさせる。

副鏡支持構造の載った副鏡セルは、5軸制御の可能な副鏡駆動機構から吊るされ、さらに駆動機構はそれを支える副鏡トラスおよび6本のスパイダーによって望遠鏡筒に固定される。第3鏡セルは、3軸制御可能な第3鏡駆動機構の上に載せられ、主鏡セルより第3鏡トラスで支えられる。第3鏡トラスはナスミス焦点切り替えのために180度回転する機構を備える。

5.4.2 副鏡

副鏡の基本パラメータは、表5.6のようになる。

表 5.6 副鏡の基本パラメータ

口径	1100mm
曲率	3335mm
鏡中心での厚み	130mm
支持点	15点 ・内側：3点 ・中側：6点 ・外側：6点

これを元に、さらに、質量150kg以下、水平支持時の鏡面最大変形量50nm（可視域で約1/10λ）以下という条件を満たすように設計を行ない、図5.42に示すようなハニカム構造を採用することとした。この設計で、質量150kg、鏡面の最大変形量36nm（クリアセラムZ使用時）と仕様を満たすことを確認した（図5.43）。各くり抜き穴は、鏡面側に24mmの厚みを残してある。15点の支持は、内側からφ390mm、φ780mm、φ1000mmの位置にそれぞれ3点、6点、6点を配置した（図5.42の青色丸）。

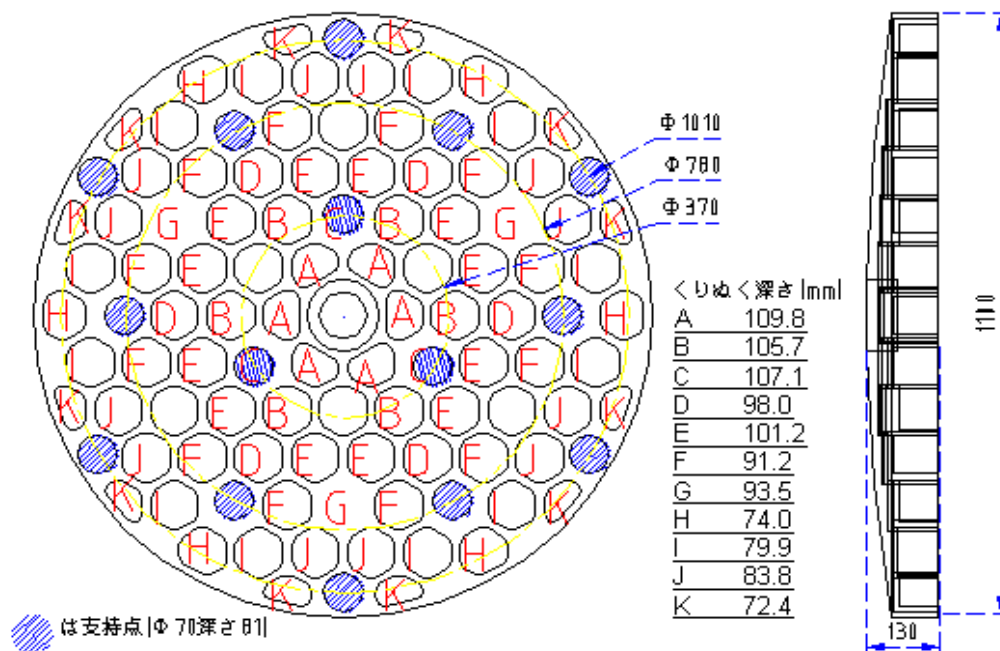


図 5.42 副鏡構造。計量化のためにハニカム構造をとる。青い斜線部はフローティングによる支持点を示す。中央の穴は落下防止用のストッパー。

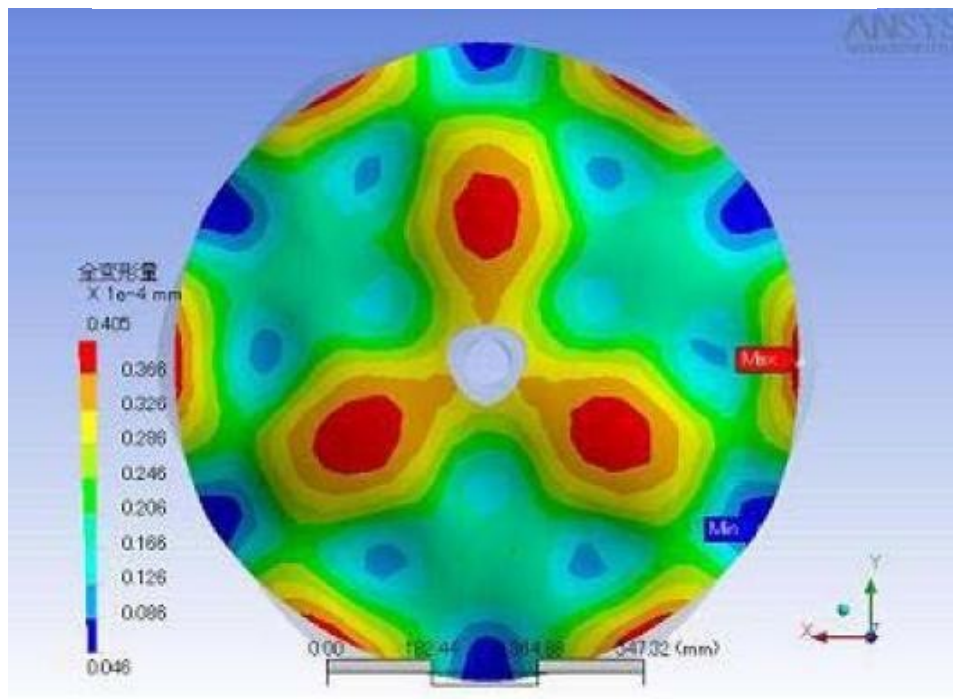


図 5.43 FEM 解析による副鏡の変形マップ。15 点支持により副鏡面を下にして水平に吊り下げたときの鏡面変形を示す。理想面からの最大変形量は 36nm となっている。

5.4.3 第3鏡

第3鏡は1100mm×780mmの楕円形をした大型の平面鏡(図5.44)であり、副鏡と同じようにハニカム構造として軽量化をはかる。支持点数は8点であり、フローティング支持とする。

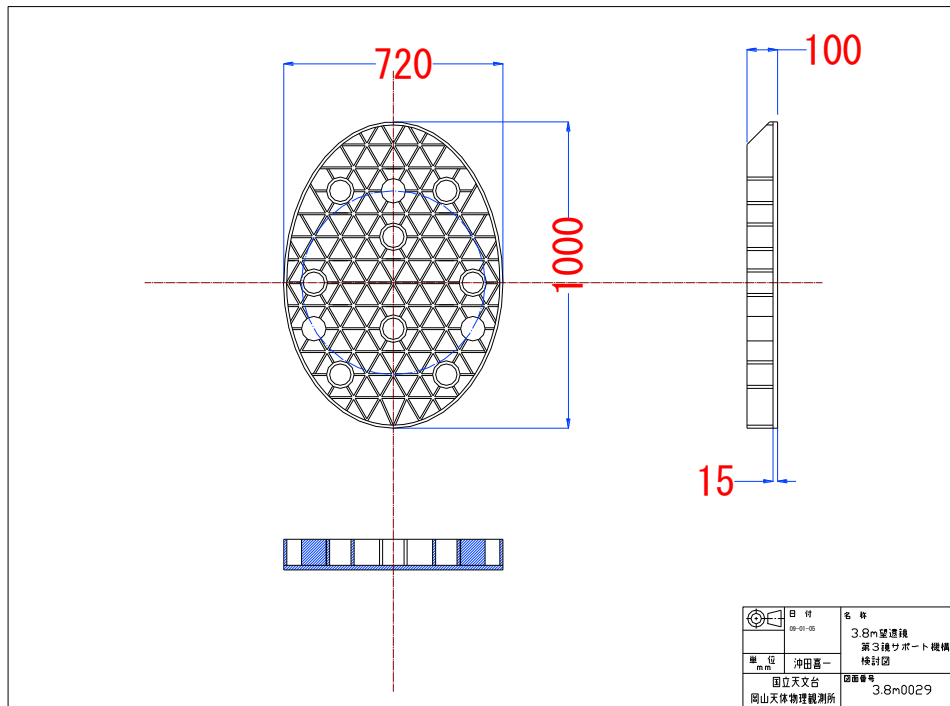


図 5.44 第3鏡構造

5.4.4 副鏡・第3鏡支持機構

副鏡、第3鏡の支持機構はカウンターウェイトを用いたフローティング支持である。支持点はそれぞれの鏡のハニカム構造の中に挿入し、鏡の厚み方向の重心で鏡を支える。支持点にかかる鏡の重量は二つのカウンターウェイトでバランスを取る(図5.45)。

副鏡セルおよび、副鏡支持の全体構造を図5.46に示す。副鏡セルはリブ構造を持つ金属板で構成され、副鏡支持機構を支え、副鏡落下防止機構も備える。

第3鏡セルおよび第3鏡支持の全体構造を図5.47に示す。

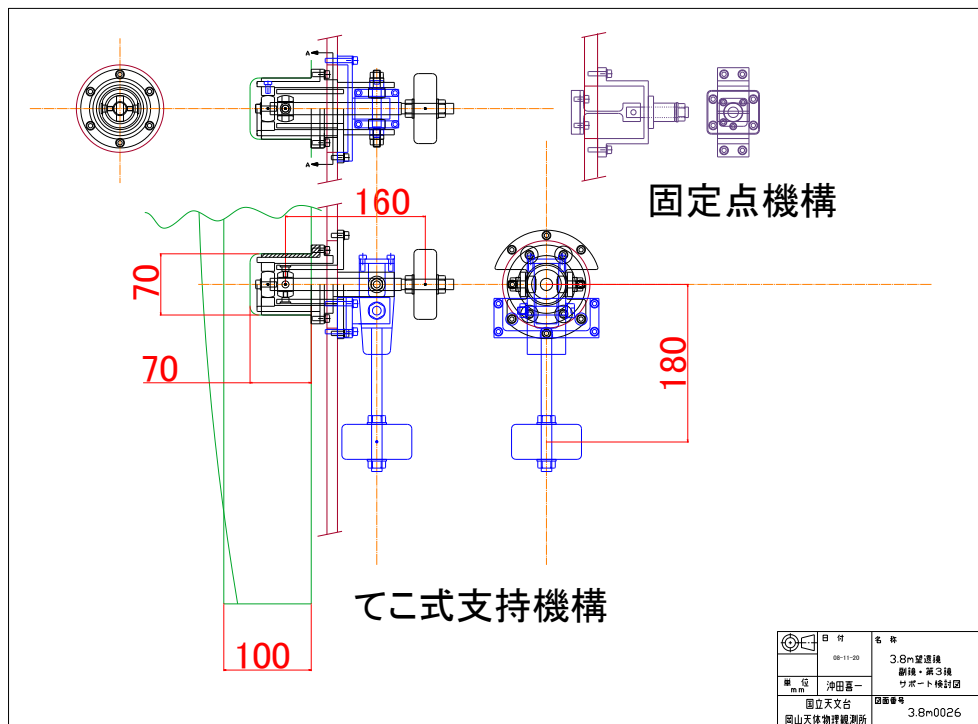


図 5.45 副鏡支持点構造。

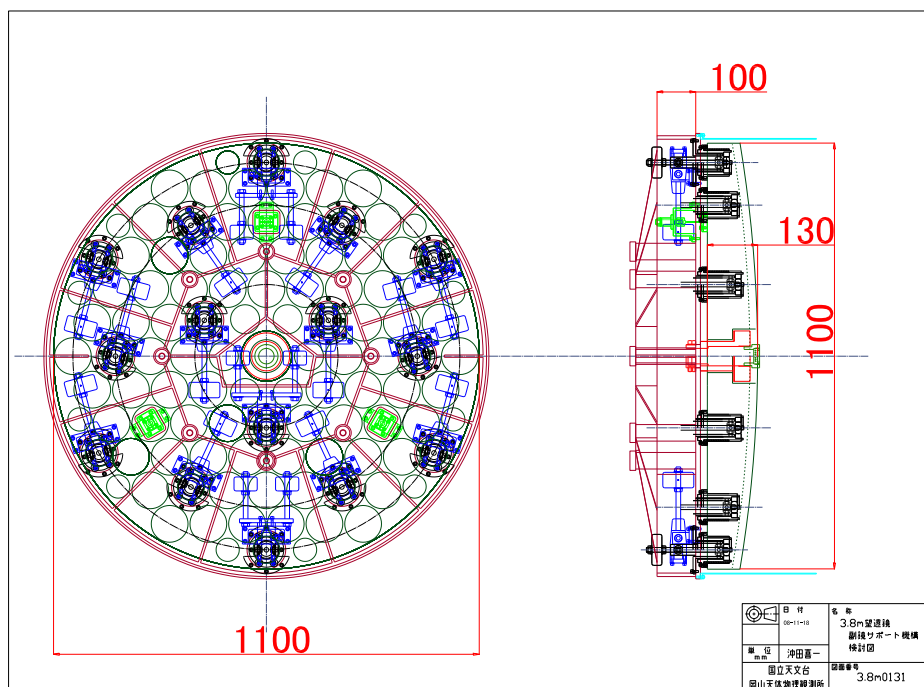


図 5.46 副鏡セルと副鏡支持点の配置。副鏡中心には落下防止金具が挿入される。

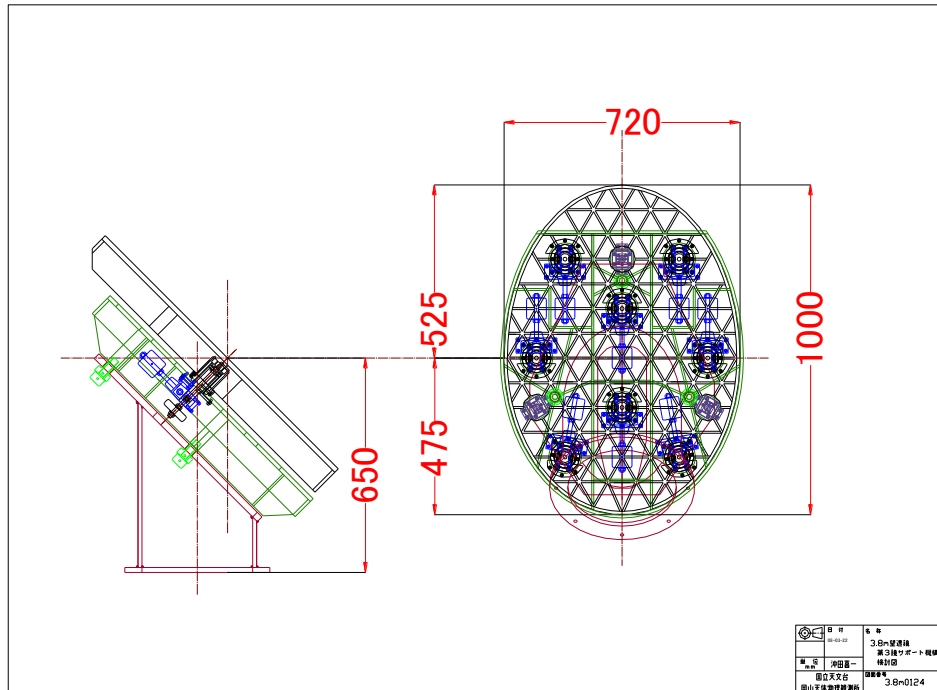


図 5.47 第3鏡セルと第3鏡支持点の配置

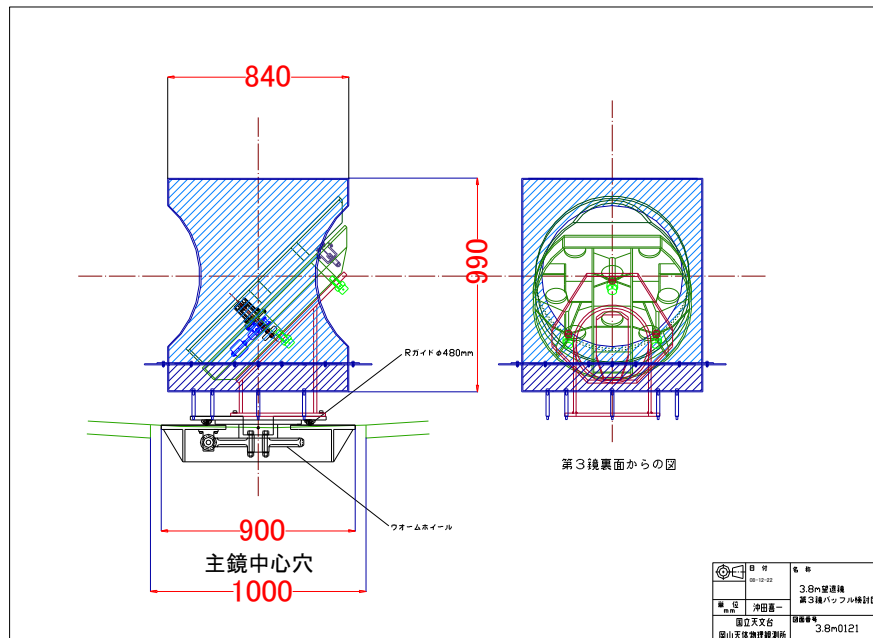


図 5.48 第3鏡駆動機構および第3鏡バッフル

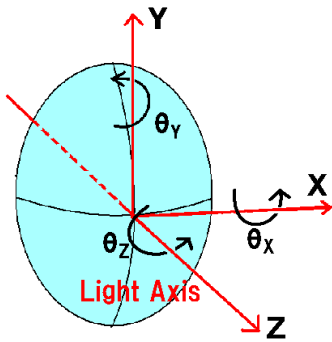


図 5.49 各軸の定義。

副鏡支持・駆動機構について、さらに詳細に述べる。

(1) ステージの必要駆動性能

(a) 軸の定義と駆動軸

図 5.49 のように各軸を定義した。この中で鏡の回転(θ_z)以外の 5 軸(X、Y、Z、 θ_x 、 θ_y)を駆動させる。

(b) 駆動分解能

駆動分解能は光学シミュレーションを行なって算出した。副鏡を調整された場所からティルト・シフトさせた時の

“encircled energy” を調べることで値を得た。焦点面における 2 ピクセル内の encircled energy は光軸が合っている時、視野中心で 86%程度である。それが 80%以下になるティルト・シフト量の限界値を駆動分解能とする。

ナスマス焦点には視野の異なる FMOS 焦点と汎用焦点があり、それぞれ視野は 1° の直径、 0.1° の直径である。

また、FMOS 側にはコレクターレンズが必要となり、波長によって結像性能が異なるが、解析波長は観測波長の中で一番収差の大きな $2.2\mu\text{m}$ を用いた。

以上の条件で得られた値を、それぞれの駆動分解能とし、表 5.6 にまとめた。

表 5.6

軸	分解能
X、Y	100 μm
θ_x 、 θ_y	18 秒角
Z	20 μm

(c) 駆動範囲

駆動範囲は (i) 重力変形、(ii) 取り付け誤差、(iii) 熱変形、(iv) 経年変化、の最大値を考慮することで算出する。主鏡セルの撓み、鏡筒、スパイダーの撓み。それぞれのおおよその値を表 5.7 にまとめた。

表 5.7

	重力変形	組み立て誤差	熱変形	経年変化
シフト(mm)	2.0	1.0		1.0
ティルト(分角)	5	30		10
フォーカス方向(mm)	1.0	1.0	0.1	1.0

これらより、必要な駆動範囲を表 5.8 のように定めた。

表 5.8

軸	駆動範囲
X、Y	$\pm 5\text{mm}$
θ_x 、 θ_y	$\pm 1\text{deg}$
Z	$\pm 10\text{mm}$

(2) 駆動方式

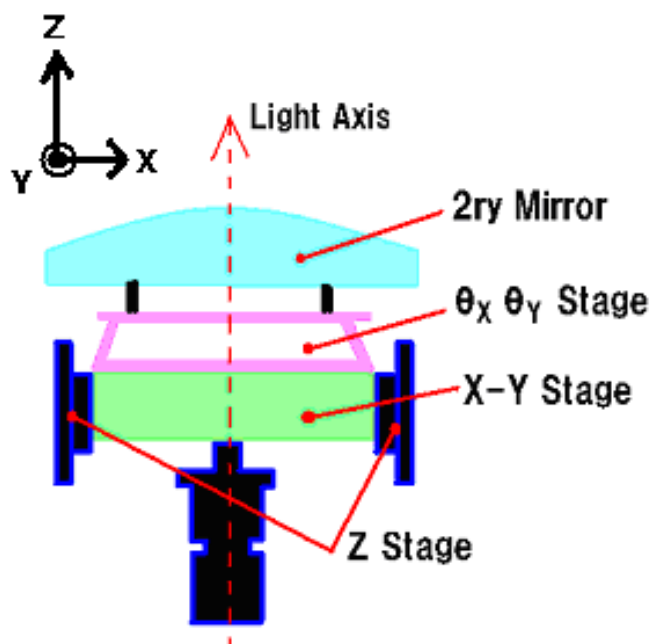


図 5.50 副鏡支持の概略図

(a) X-Y ステージ

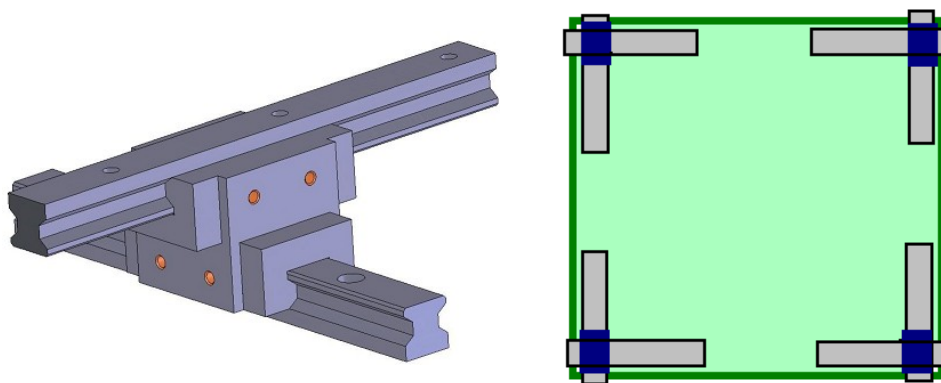


図 5.51 X-Y ステージとその配置

THK 社製クロス LM ガイド SCR15S を四組用いた X-Y ステージを、ハーモニックドライブシステムズ社製 AC サーボアクチュエータ FHA-11C で駆動させる。

用いるボールネジは THK 社製(ピッチ 4mm)を使用。これらを組み合わせた分解能は 17nm/pulse となる。

(b) Z ステージ

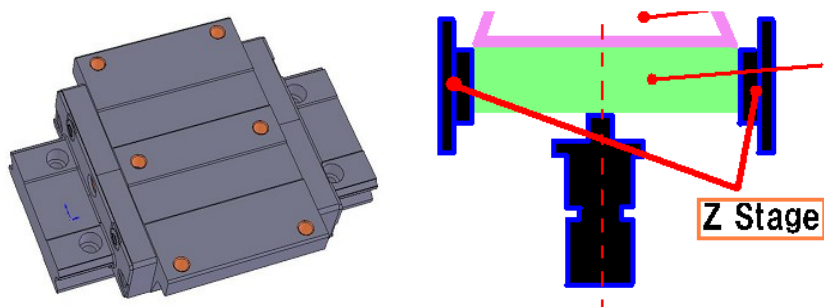


図 5.52 Z ステージとその配置

ステージと鏡全体の重量を支えるため、リニアアクチュエータは高出力のものを採用する。THK 社製ワイドレール HRW50CA をステージとし、ハーモニックドライブシステムズ社製リニアアクチュエータ LBC-25A-5D6K を用いて駆動させる。このアクチュエータは副鏡を含めた駆動装置の全重量を支えることになるため、高出力のものを用いる。分解能は $0.32\mu\text{m}$ 。

(c) θ_x 、 θ_y ステージ

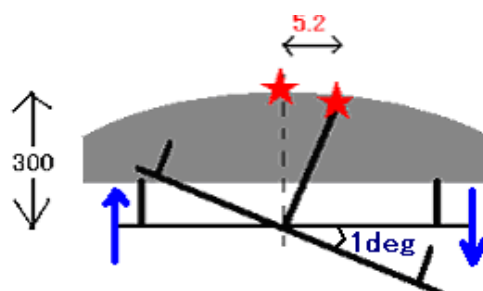


図 5.53 必要な副鏡の傾き

一般的に、鏡を傾ける方法として鏡の裏面をアクチュエータで押し引きする手段がとられている。しかし鏡が厚く、傾ける角度が大きい場合、傾けることで生じる鏡面中心のシフトも大きくなる。今回の場合、鏡の厚さ+バックプレーン 300mm 、最大ティルト角を 1deg とすると、鏡面中心の移動量は約 5.2mm になる。

このステージは X・Y 方向に駆動することもできるが、2 軸制御になり光学調整や指向制御の補正が煩雑になる。そこで、レールを用いないゴニオステージを考案した。ゴニオステージとは、回転中心が固定される回転ステージであり、小さいものでも非常に高価である上、今回の仕様(耐荷重)を満たす市販のゴニオステージは存在しない。

今回提案する構造ならば、回転中心の位置を自由に選べ、ティルト角が 1deg の範囲で、鏡面中心の移動量の最大値が $10\mu\text{m}$ 程度に抑えられる。これは、シフト駆動に必要な分解能($100\mu\text{m}$)に対し十分小さい値である。

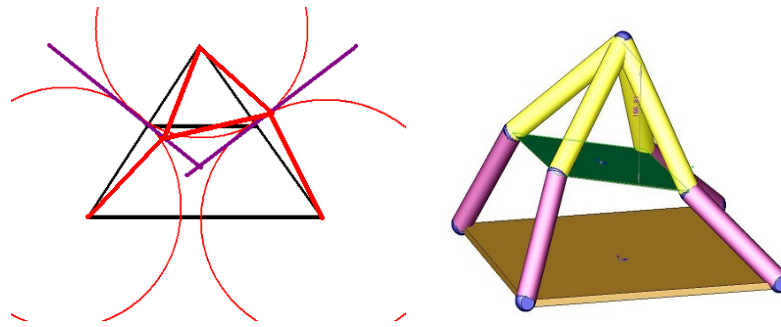


図 5.54 考案した θ_x 、 θ_y ステージの原理図

このステージ (conical stage) を駆動するために、ハーモニックドライブシステムズ社製リニアアクチュエータ LAH-80-5020-F-PA/PB を用いる予定である。分解能は $2\mu\text{m}$ で、角度に換算するとおよそ $1''$ である。

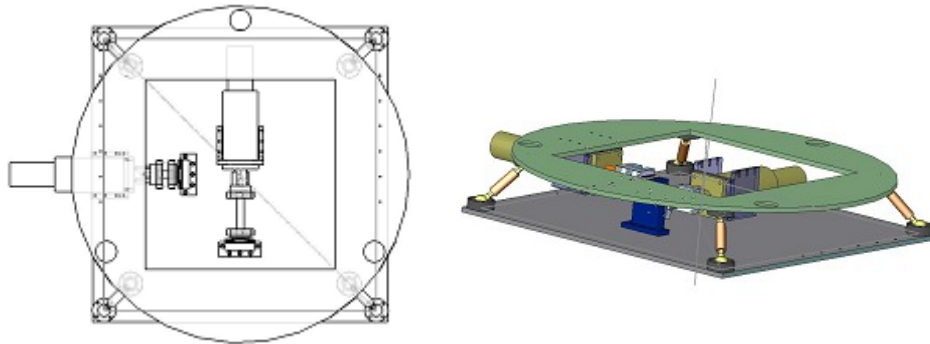


図 5.55 θ_x 、 θ_y ステージ

以下に、要求値と最終的な設計値をまとめた (要求値 / 設計値)。

表 5.9

	X・Y	Z	$\theta_x \cdot \theta_y$
駆動範囲	$\pm 4\text{mm} / \pm 5\text{mm}$	$\pm 3.5 / \pm 10\text{mm}$	$\pm 50\text{min} / \pm 1\text{deg}$
分解能	$100\mu\text{m} / 17\text{nm}$	$20\mu\text{m} / 0.32\mu\text{m}$	$18\text{arcsec} / 1\text{arcsec}$

5.5 その他の光学系

5.5.1 広視野補正レンズ

広視野補正レンズは、可視光から近赤外の波長域で視野 1° の観測を可能とする。材質は熔融水晶の直径 50cm のメニスカスレンズ 2 枚組から成る。ナスミス台と鏡筒の間に位置し、ナスミス台から望遠鏡中心方向に突き出したホルダーによって支持される。ホルダーには望遠鏡の光軸と補正レンズの軸をあわせるための XY 調整機構が必要である。

5.5.2 大気分散補正プリズム

可視・赤外同時分光観測の際、大気分散による天体位置のずれにより可視光と近赤外線でスリット内部に入る光量にかなりの違いが生じる。これを抑えるため、大気分散補正プリズムが必要である。大気分散補正プリズムは、2組の直進プリズムの相対回転角を調整することで分散強度を可変とし、大気屈折率の差を打ち消す機構である。通常焦点側はガイドや主鏡調整用のシステムが込み合うため設置が困難であるが、広視野焦点側に取り付け予定である。これにより広視野のファイバー多天体可視近赤外同時分光も可能となる。

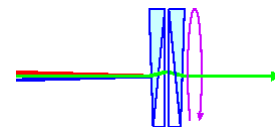


図 5.56 大気分散補正プリズム。2組の直進プリズムから成る。

5.5.3 焦点システム

通常焦点部には、追尾用のオートガイダー、主鏡調整用のシャックハルトマンカメラ兼主鏡位相測定用の位相カメラシステム、自己位相測定時の波長可変レーザー光源射出ステージ、波長較正用輝線ランプ及びハロゲンランプ、などが存在している。オートガイダーとシャックハルトマンカメラは、同一の r, θ ステージ

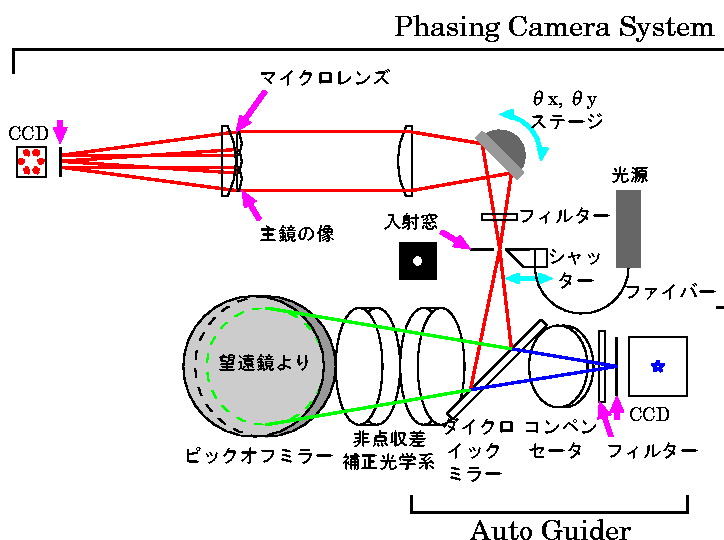


図 5.57 オートガイダーとシャックハルトマンカメラ。光軸からの軸外し量に応じて非点収差量を調整できる機構を持つ。

に位置する。焦点は $F/6$ で集光するため、ガイド星を取り出すピックオフミラーの影の影響を避けるためには光軸中心から 10 分角以上離れる必要があり、非点収差を補正する光学系が必須である。同様な光学系は、正対する波長可変レーザー光源側にも必要である。

第6章 ドーム・建物・付帯設備

本計画の中で必要となる主要な施設は、3.8m 望遠鏡本体を格納するドーム、観測操作を行なう観測棟である。現在のドームは、星像の見え方（シーイング）を十分考慮したものが必須である。近年ドーム内シーイングの研究が盛んに行なわれ、すばる望遠鏡はもちろん、世界の望遠鏡はこのシーイングの対策に大きな視点を置き設計されており、既存のドームもこのシーイング対策のため改造を行なっている。本計画でもすばるドームに採用された、自然風を最大限利用しての通風構造を持ったドーム設計、夜間の観測時の気温を考慮した昼間のドーム内空調を採用する。さらに、ドームの持つ機能も単に望遠鏡を格納するだけでなく、観測装置等の保守・整備が機能的に行なえるための付帯設備が必要である。

6.1 ドームの概要

6.1.1 ドームの持つべき機能

ドームの持つべき機能を、表 6.1 に、ドーム外観図を図 6.1 に示す。

表 6.1 ドームの持つべき機能

機能及び必要条件	対策項目
1. 安全に望遠鏡格納する	降雨、降雪、防風、地震、防火
2. 観測中の光路を妨げない	扉開閉機能、ドーム回転機能
3. シーイングを劣化させない	ドーム形状、熱対策、振動対策、通風機能
4. 大型重量物の搬入経路の確保	大型搬入口、ハッチ、リフター、エレベータ、クレーン等設備
5. 回転部に動力、信号線を接続する必要	架線、接触抵抗、瞬断対策
6. 保守が容易である	保守用足場、通路等の設置
7. 低コストである	軽量化、単純構造

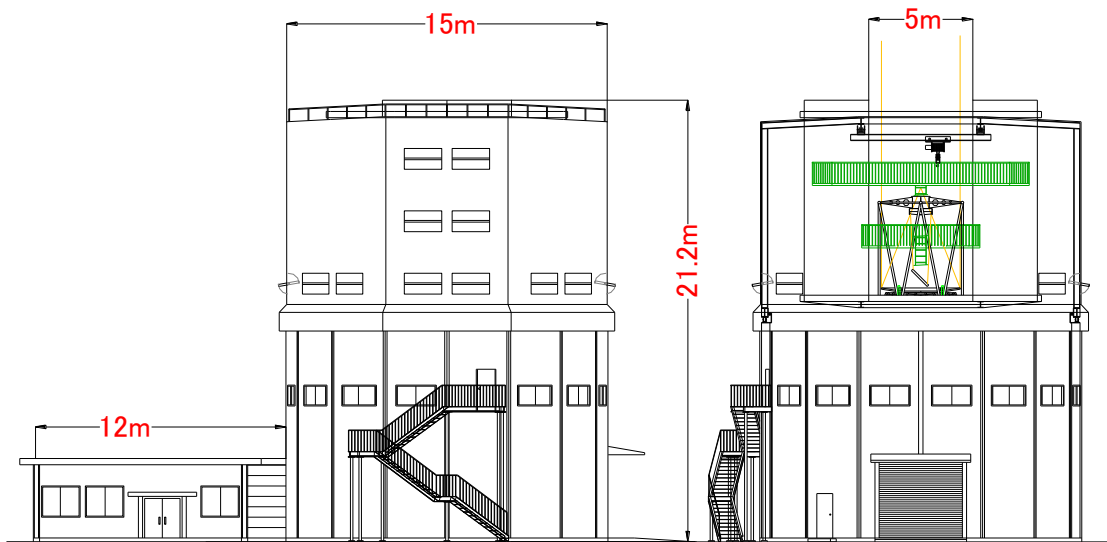


図 6.1 ドーム外観図

6.1.2 ドームのシーイング劣化対策

シーイング劣化の要因としては、上層の自由大気、地表乱流層、ドーム内微熱乱流がある。自由大気の原因は取り除くことはできないが、国立天文台岡山天体物理観測所の位置は日本では良いサイトとして認められている。地上乱流層による劣化は約 15m の高さに望遠鏡を設置すること（第 7 章で述べる Cr^2 の測定結果参照）、ドーム形状をすばる望遠鏡で採用した円筒型を基本とすることで、シーイングの劣化対策を施すこととした。残された要因のドーム内微熱乱流によるシーイング劣化の問題である。

Lowen(1979)によれば、主鏡と周辺気温の温度差 1°C に対して劣化するシーイングは約 $0.5''$ であると言われている。また、温度差のあるドーム内の空気を風で吹き流すことでシーイングが改善されることも解っている。そこで、本計画では、その夜の外気温予想値になるよう昼の間ドーム内を空調し、さらにドーム側壁に風通しの窓を設け、自然風を観測時に流すことで対策を講じる。

6.1.3 風対策

本計画の望遠鏡の運用は、通常風速 10m/s 以下の環境下で行なうことを前提としているが、通風窓等の運用で、セグメント主鏡に及ぼす風の影響は少ないものと考えられるので、特に風を緩和するための設備は想定していない。

6.2 ドームの詳細

6.2.1 ドーム上部構造

ドーム上部構造はシーイング対策を充分考慮した構造とし、以下の構成で設計する。

- ・ドーム殻構造：ドームの骨組みは鉄骨構造。外壁は熱反射と夜間の温度に追従の良いアルミ板張り。
- ・ドーム内部構造：ドーム内へ昼間の熱伝導を押さえるためにアルミ外壁内側に断熱材を貼り付ける。
- ・ドーム回転駆動機構：目的の天体に指向するために回転を行なう装置。0.1度角の精度を有するエンコーダを使用し望遠鏡と同期回転するための制御機能を持つ。
- ・安全確認装置：ドーム回転する際の安全確認用監視カメラ等で構成する。
- ・集電装置：ドーム上部で必要な電力を供給する架線構造を施す。
- ・通風窓：ドームシーイング改善のためにドーム側壁に設ける窓。窓扉は風向を考慮して電動で開閉できる構造とする。
- ・エアシール：シーイング改善のためのドーム空調（昼間）時における機密性を確保するため、ドーム回転部分等のシール対策を施す。
- ・レール及びボギー台車等：ドーム上部構造を滑らかに回転するためのレール及び台車。車輪は内外輪差の無い構造とする。
- ・スリット構造：目的天体を捕捉、追尾するためのドーム開口部の扉。観測時に望遠鏡を方位軸方向にスイッチングする際の視野分を考慮して、5m以上の幅を確保する。左右2枚のL字型構造で行なう。
- ・スリット開閉駆動装置：左右2枚のL字型構造の扉をスライドさせ、開口部の開閉を行なう駆動装置。
- ・フラット用スクリーン：観測装置のCCD検出器は沢山のピクセルから構成されている。そのピクセル間の感度補正を行なう際の一様光源投射システムの反射板としてスリット構造裏側か、ドーム内壁にスクリーンを設置する。
- ・XY走行クレーン等：ドーム上部に取り付けるXYクレーン。重量物の1階からの吊り上げ、吊り降ろしに日常使用する。また、鏡再蒸着時のセグメント鏡、副鏡、3鏡等の着脱等に使用する。吊荷重2.5トン、走行範囲5.4m×11.4m。揚程20m。変速機能付きのものとする。

6.2.2 ドーム下部構造

ドーム下部構造には、望遠鏡を岩盤から支えるための基礎（ピア）、ドーム上部構造を支える構造の他、重量物の観測階への運搬手段、人荷を移動させる手段、観測装置の調整場所等の確保が必要である。また、地表乱流層の影響を除去するために、望遠鏡の不動点高さは12.7m（注：接地境界層の測定からは15mが望まれるが、許容範囲と想定している）に置く必要から、ドームは3階構造となる。3階の床面が観測階で、望遠鏡架台の回転面位置になる。本計画では、以下の構成で設計する。図6.2に1階平面、図6.3に2階平面、図6.4に3階（観測床）平面、図6.5にドーム断面の概念図を示す。

- ・望遠鏡基礎（ピア）：望遠鏡の基礎。地上約8m、地下約2m、直径（下部4m、上部5.8m）の空洞コンクリート柱、フーチングは直径9mを想定。
- ・大型搬入口：大物荷物等の運搬に際してトラックが通過可能な開口が必要である。
- ・電動ハッチ（2F、3F）：重量物の観測階への吊り上げ、吊り降ろしの際、途中階、及び観測階にあるハッチ。電動で開閉可能とする。
- ・観測装置調整エリア：待機中の観測装置の調整等を行なうエリアである。
- ・エレベータ：1階から3階まで（約9.4m）移動可。鏡再蒸着時のセグメント鏡の運搬、液体窒素のタンク、各種ガスのボンベの運搬、観測装置の運搬等に使用する。また 日常の望遠鏡、観測装置等の保守・運用のために人のアクセスにも使用する。籠内寸法：W2m×L1.8m×H2m、荷重1トン程度が必要であり、スペースを考慮して、マシンルームレスが望ましい。また、消防法の観点からエレベータロビーを設け防火区画とする。
- ・ジブクレーン：再蒸着作業時に、鏡類をハンドリングするためのクレーン。大型搬入口での重量物の吊り上げ等にも使用する。吊荷重2トン程度。
- ・内部階段、安全柵等：ドーム内壁に沿って各階にアクセスするための階段及び安全のための柵。非常用階段に供する。
- ・見学者階段等：本計画による研究の一端を、国民に広く啓蒙する意味からも一般の人々の望遠鏡見学が可能になるように計画している。しかしながら、望遠鏡のシステムに悪い影響を与えないようにする事も大切で、そのため別ルートから見学できるよう階段等を設ける。理科離れ、科学離れの防止策の一助になることを望む。

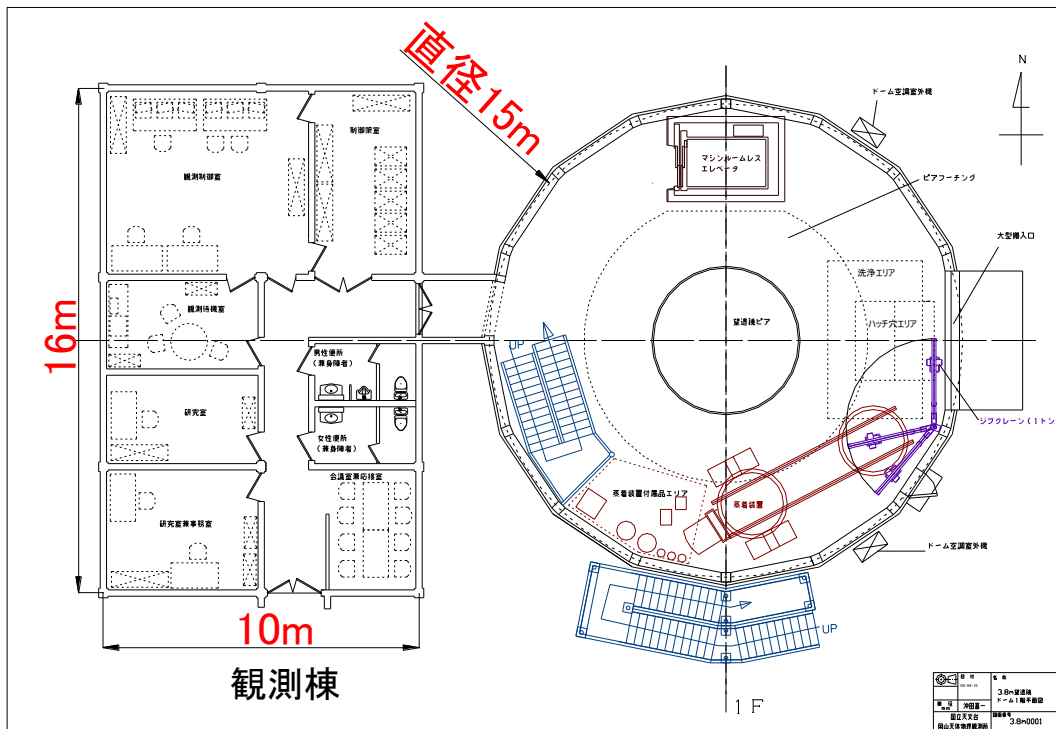


図 6.2 1階平面図

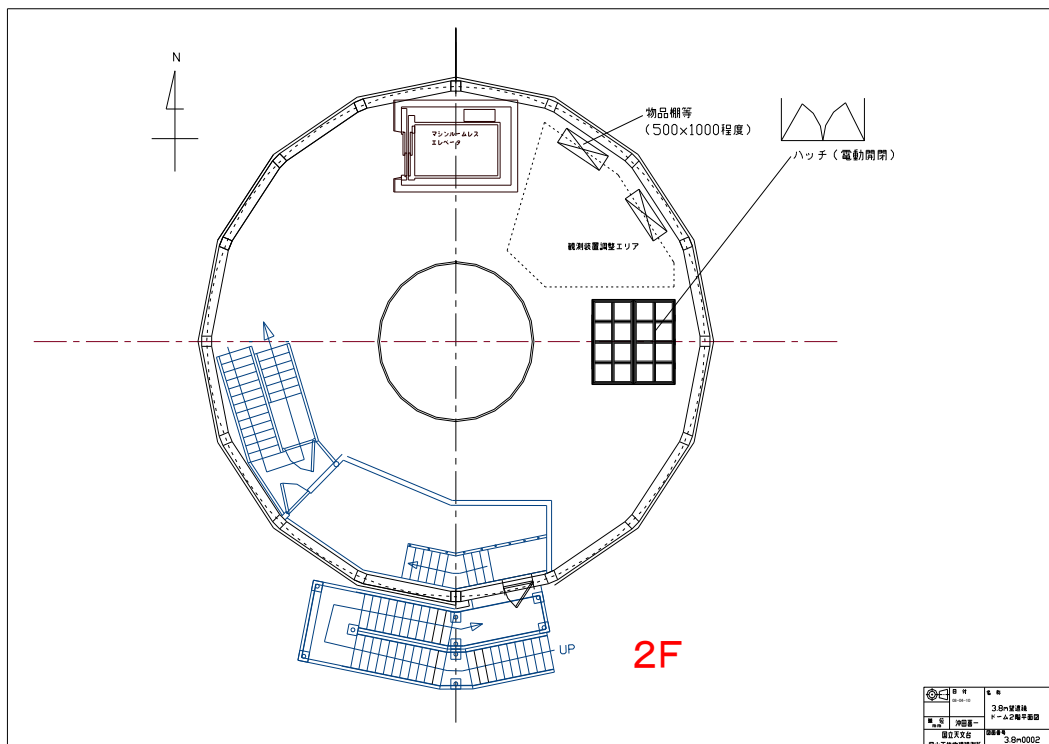


図 6.3 2階平面図

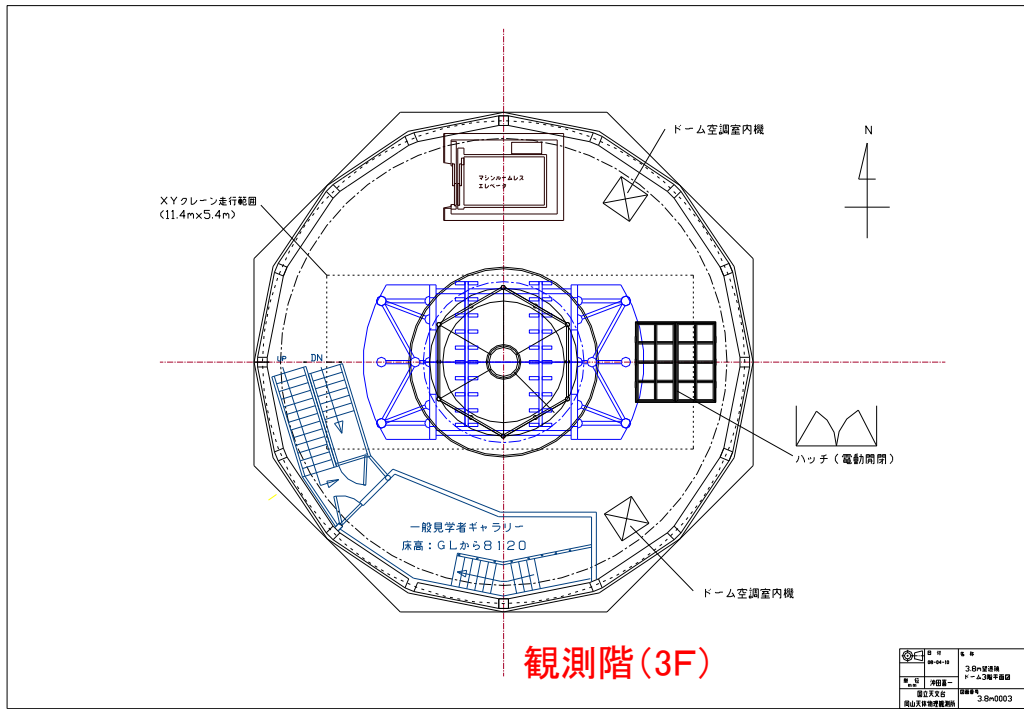


図 6.4 3階 (観測床) 平面図

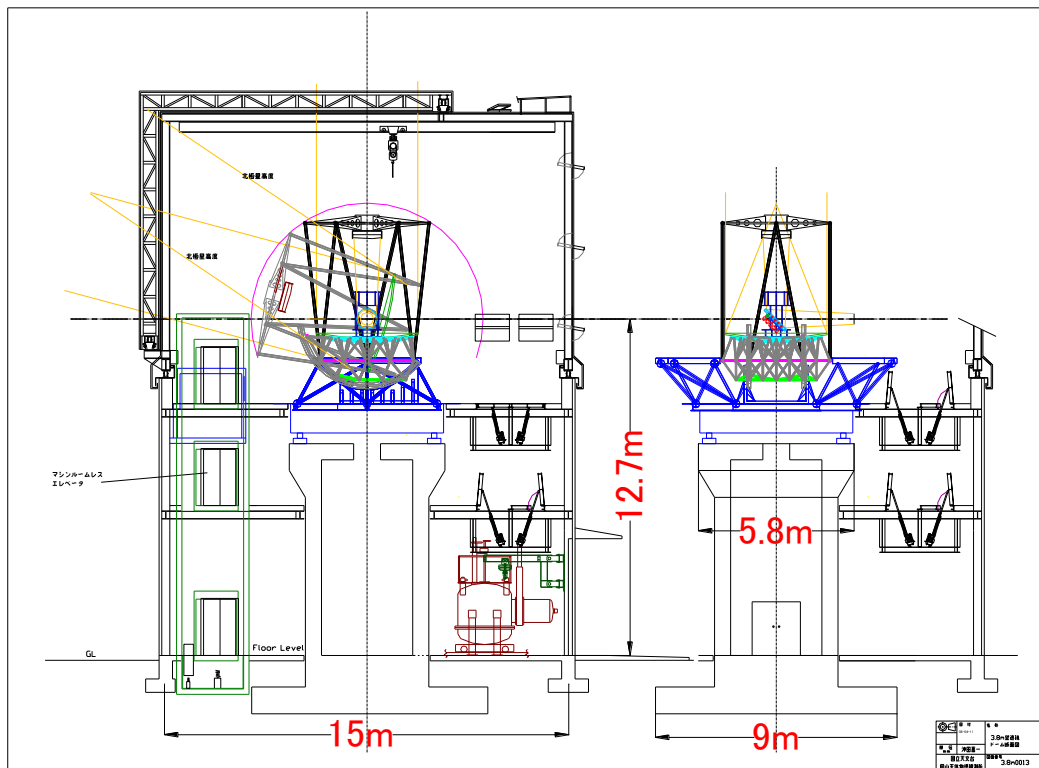


図 6.5 ドーム断面図

6.2.3 保守運用装置

保守運用装置は、再蒸着時にセルからセグメント主鏡等を挿脱したり、重量物を観測階まで輸送するために必要な装置である。また、鏡類の再蒸着を行なう蒸着装置、その際の運搬箱類、解体組み立てに使用する治具類である。これらの装置は効率よく運用し、1夜でも多くの観測時間を確保できるよう計画している。

- ・XY 走行クレーン（ドーム上部構造）
- ・エレベータ（ドーム下部構造）
- ・ジブクレーン（ドーム下部構造）
- ・電動リフター：第3鏡等の保守時にアクセスするための移動式電動リフター。
- ・真空蒸着装置：国立天文台三鷹から移送した中型真空蒸着装置を再構築して利用する計画である。これは、直径1.6mまでの鏡は蒸着可能である。望遠鏡主鏡は18枚の分割鏡でありこの装置で蒸着可能である。この装置は鏡を水平位置で保持できる方式なので、効率よく蒸着を行なうことが可能である。
- ・主鏡、副鏡等運搬箱：再蒸着時に所定の場所まで運搬する箱類。キャスター付きで移動が容易にできる。
- ・副鏡、第3鏡等組立治具：副鏡、第3鏡をセルに組込み、解体する際の治具類。

6.3 付帯設備

6.3.1 空調設備

- ・ドーム空調設備：ドーム内シーイングの劣化を防ぐために昼間ドーム内を空調する。基本的に観測当夜の外気温より2度程度低温になるよう制御する。
- ・一般空調設備：観測棟の居室等の一般空調設備。

6.3.2 電源設備

ドーム、望遠鏡等に供給する電源設備。主キュービクルから分岐敷設する。雷対策として、耐雷トランスを設置する。停電時のドームスリットの閉動作、望遠鏡の安全位置への格納、計算機システムの対策として無停電電源UPSを設ける。

6.3.3 給排水設備

給水は国立天文台岡山天体物理観測所の入水槽設備からの分岐で行なう。ドーム内、観測棟から排出される汚水は合併浄化槽で処理を行ない排水する。

6.3.4 開発実験調整設備

観測装置の改造、開発、望遠鏡の性能向上のための改良・開発等のために各種の測定

器類が必要である。また、検出器の観測装置内への着脱はクリーンな環境で行なう必要があり簡易クリーンブース等を設置する。

6.4 観測棟

6.4.1 制御棟の概要

ドーム内に極力発熱源は置かないという設計思想は、最近の天文台では常識となっている。そこで本計画でも望遠鏡や観測装置の保守、整備の他は極力ドーム内に立ち入らないことが重要である。このような観点から、夜観測を行なう場合その制御は、ドームから離れた位置で行なう必要があり、隣接した観測棟を計画する。観測棟はその機能から観測制御室、観測待機室を置く。また、取得したデータを簡易解析するための研究室、事務処理等のための事務室等の居住区を配した、約 110 平米程度の建物を必要とする。概略図を図 6.2 に示す。

6.4.2 観測制御室

夜間の観測制御を統括的に行なう。望遠鏡操作用計算機、観測装置制御用計算機、データ取得用計算機等が配置される。

6.4.3 観測待機室

夜間観測者の夜間食堂、天候回復を待つ場合などの休憩室となる。簡単な食事が作れる設備、給湯設備が必要である。

6.4.4 研究室

夜間取得したデータの一次解析などを行なう計算機を配置し、併せて現地研究者の居室とする。

6.4.5 事務室

天文台運営に関する事務処理、事務連絡等を行なう。

第7章 観測装置

項目の順番はまだ検討が必要であるが、以下のような観測装置が提案されている。他に、赤外超高分散分光装置、偏光観測装置も提案がある。

7.1 高速測光・分光器

高速測光装置の開発を既に行ない、2.2章で触れたように研究に使用してきている。その上で、同じ CCD カメラを用いて高速分光装置を開発し、広島大学・かなた望遠鏡に装着し、すでにテスト観測および本観測に入っている。この章では高速測光観測装置、及び高速分光観測装置の概要を述べる。高速観測は口径の大きな望遠鏡でこそその真価を発揮する。これらの観測装置の開発は、当初より 3.8m 新技術望遠鏡で同等以上のものを使用することを念頭においてなされたものである。

7.1.1 高速測光装置

ブラックホール X 線連星や激変星において、短時間変動現象をつぶさに調べるためには、従来使われてきたような読み出し速度は遅いが高い精度で観測の行なえる CCD カメラや、観測の精度としては低くなるが非常に高速読み出しが出来る CCD カメラ、あるいは CMOS カメラのいずれでもない、高速読み出しが可能で、かつノイズが低く抑えられていて感度の高くさらに光子を沢山集められる CCD カメラが是非とも必要である。そのため、e2v 社の新しいチップ (CCD97) を使用した高速 CCD カメラ (図 7.1) を、2004 年に浜松ホトニクスと共同で開発した。この CCD カメラはフルフレームで最速 35.8 フレーム/秒で撮像が可能であり、飽和電荷量は 37 万電子と十分な性能を持っている。また読み出しノイズも最大で 40 電子



図 7.1 高速 CCD カメラ。

表 7.1

ピクセル数	512 × 512	飽和電荷量	370,000 e ⁻
ピクセルサイズ	16 μm × 16 μm	冷却性能	外気温-50 度 (ペルティエ冷却 + 空冷)
チップサイズ	8.2 mm × 8.2 mm		
最大電子増倍ゲイン	2000 倍	A/D コンバータ	14 bit
読み出しノイズ	40 e ⁻ (ゲイン最小時)	フレームレート	35.8 frame/sec (no bin)
	<1 e ⁻ (ゲイン最大時)		66.9 frame/sec (2×2 bin)
限界等級 (no filter)	20 mag (0.2 mag error. 10 秒露出。かなた望遠鏡取り付け時。)		

に抑えられている。ただし、暗電流が大きくなってしまったために、最長露出時間は 10 秒に制限されている。基本特性は表 7.1 のようにまとめられる。

また量子効率が非常に高く、500-600nm で 90%を超える。そして量子効率が 50%を超える範囲が 400-870nm にわたる。図 7.2 にこのカメラの量子効率を示す。C9100-12 がこの時開発された CCD カメラである。

このカメラでは 1 枚の画像の大きさが 0.5MB であり、1 時間の観測で最大 64GB、1 晩の観測で 700GB 程度の画像データが生じる。このため、1TB の HDD を積んだ PC でカメラ制御を行なっているが、大容量ファイルサーバや大容量テープメディアへのこまめなデータバックアップが必須となっている。

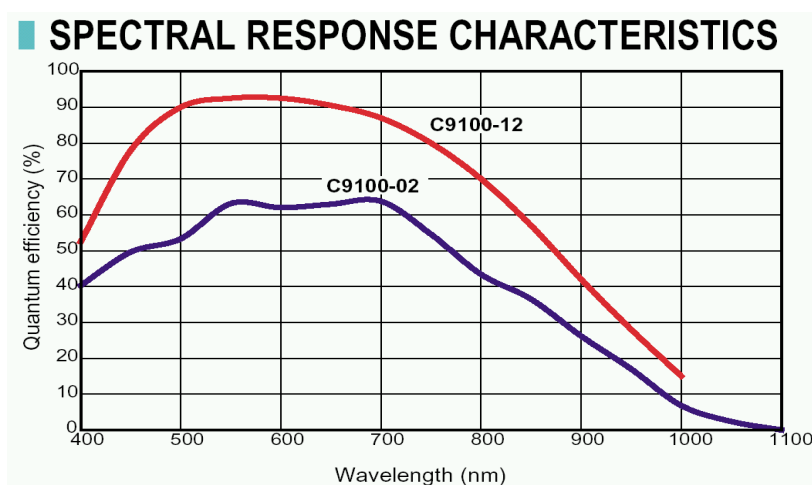


図 7.2 高速 CCD カメラの量子効率。C9100-12 は浜松ホトニクス の製品としての型番で、こちらが今回開発されたカメラである。

7.1.2 高速分光観測装置

高速測光装置では高速性を重視するために基本的には単色(あるいはフィルターなし)で使用することを想定しており、変動現象の有無や変動があった場合のタイムスケールや変動プロファイルを押さえることは可能であるが、さらに SED や線スペクトルの情報が得られれば、その変動を作り出す物理機構により迫ることが可能となる。この発想の元に、連続光の SED を調査することが目的の超低分散分光モード($R = \lambda / \Delta\lambda \sim 20$)と、それにプラスして輝線強度の短時間変動を捕らえることが目的の低分散モード($R \sim 150$)の 2 つのモードを持つ高速分光装置を開発した。

図 7.3 がかなた望遠鏡用に開発された高速分光装置の光学系の設計図である。レンズ系は同じくかなた望遠鏡用に開発された広視野偏光装置 HOWPol の予備のものを、広島大学側のご好意により流用させてもらった。超低分散素子としては、2 種類の異なる素材(BK7 と F2)を組み合わせた 2 素子プリズムを採用した。透過率は 85%以上で、波長分解能は $R \sim 10-70$ ($\lambda \sim 400-800\text{nm}$)、直透過光の波長は $\lambda = 600\text{nm}$ である(図 7.

4). 低分散素子としては、Newport 社製の透過型グレーティング(200 本/mm、ブレイズ波長 505nm)を採用した。透過率は 50–75%、波長分解能は 0.2mm スリットを使用して $R \sim 155 @ H\alpha$ 、観測波長域は 450–680nm、直透過光の波長は 550nm である(図 7.5)。分散素子を光路から外すこともでき、その場合は B、V、Rc などのフィルターを入れて撮像・測光装置として使用可能である。波長較正用ランプとしては、Oriel 社製 Hg-Ne ランプを使用した。

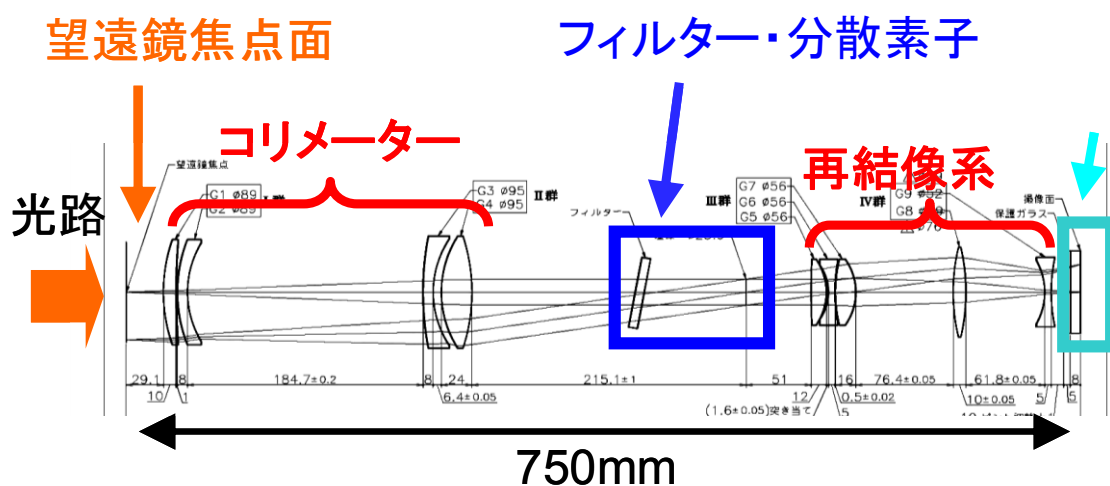


図 7.3 高速分光装置の光学系。レンズ系はかなた望遠鏡用に開発されている偏光観測装置 HOWPol のもの予備を使用させてもらっている。

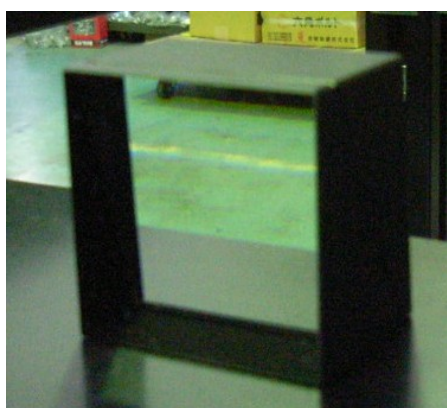


図 7.4 超低分散素子。BK7 と F2 の 2 素子プリズム。波長分解能は $R = 70 - 10 (\lambda = 400 - 800\text{nm})$ 。

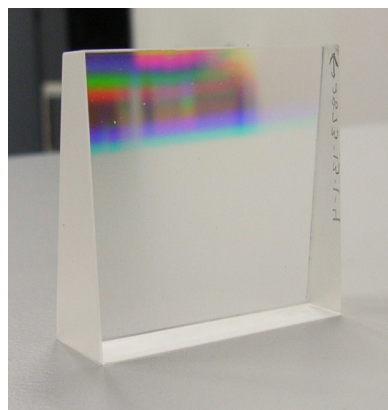


図 7.5 透過型グレーティング(200 本/mm)の低分散素子。観測波長は $\lambda = 450 - 680\text{nm}$ 。波長分解能は $R = 155 @ H\alpha$ 。

実際に完成したかなた望遠鏡用の高速分光装置は図 7.6 に示した。この分光装置をかなた望遠鏡に取り付け、実際に取得した標準星 HR5501 (B9.5V, 画像取得時 Z \sim 40 $^\circ$) のスペクトル画像、及び波長較正後、感度補正後のスペクトルが図 7.7 である。これを用いて計算された大気・望遠鏡・装置・CCD 量子効率全てを含めた効率のピークは、

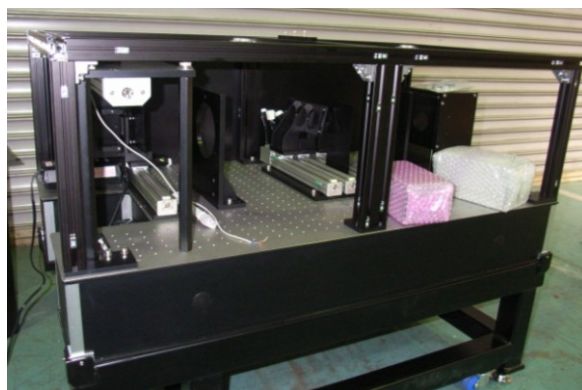


図 7.6 完成した高速分光装置。

波長 $\lambda=640\text{nm}$ で約 13%であった。また 10 秒露出において 550nm で S/N=10 となる星の等級を限界等級とすると、超低分散モードで 15.7 等と計算された。これを単純に口径比で計算すると、3.8m 新技術望遠鏡では 17.6 等まで観測できることになり、多くのブラックホール X 線連星や激変星の時間分解能分光観測が可能となる。

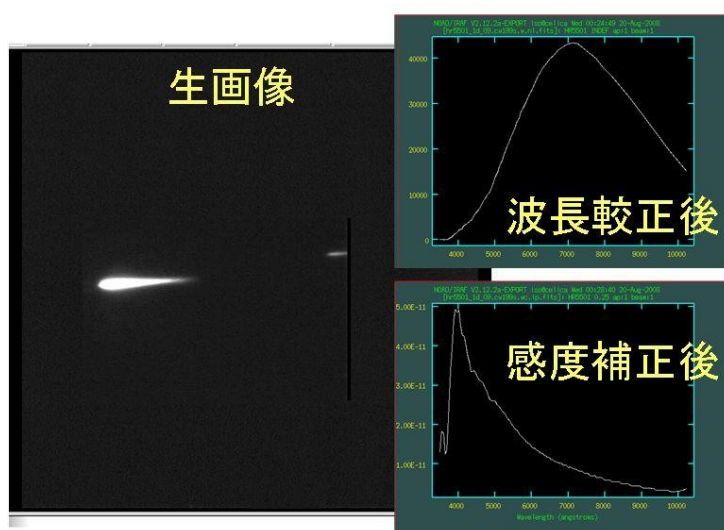


図 7.7 高速分光装置の超低分散モードで撮影された標準星 HR5501 のスペクトルの生画像(左)、この画像から測定されて波長較正まで済んだスペクトル(右上)、さらに感度補正を施したスペクトル (右下)。

7.2 可視・近赤外同時面分光装置

ガンマ線バースト (GRB) は極めて短い時間スケールで明るさが減少してしまうので、ガンマ線観測衛星を用いた即時観測網が整備されている。GRB の発生を検出した衛星は、位置情報とともにアラートをほぼリアルタイムで世界の観測所に流す (現在軌道上にある SWIFT 衛星は 70 秒以内に位置精度 3 \sim 5 秒角の情報を配信し、2013 年に打上予定である ECLAIRs 衛星は 5 分以内に位置精度 10 秒角の情報を配信する予定である)。このアラートを受けて即座に物理観測を行なえるような体制を整えておくことは、ガンマ線バーストの追究観測を進めるうえで欠かせない。特に日本は、地球規模で見たときに 3m 級以上の望遠鏡の空白地帯に位置しており、日本国内にこのような即時

観測体制を整えておくことは非常に重要である。そこで 3.8m 望遠鏡には即時分光を可能とする面分光装置が装備される。

3.1.2 章で述べたように GRB の詳細研究を行うためには、発生後間もない明るい GRB を分光することが極めて重要となる。しかし、衛星の位置決定精度が数秒角であるのに加え、望遠鏡の典型的な指向精度が数秒角程度であるため、通常のロングスリット分光観測（典型的なスリット幅は 1 秒角）を行なうためには、まず GRB の対応天体を同定し、次にそれをスリットに落とすために微調整をするという一連の作業が必要となり、露出開始までに時間がかかってしまう。この一連の作業を自動化することは困難で、人間による判断と操作の介在が避けられない。

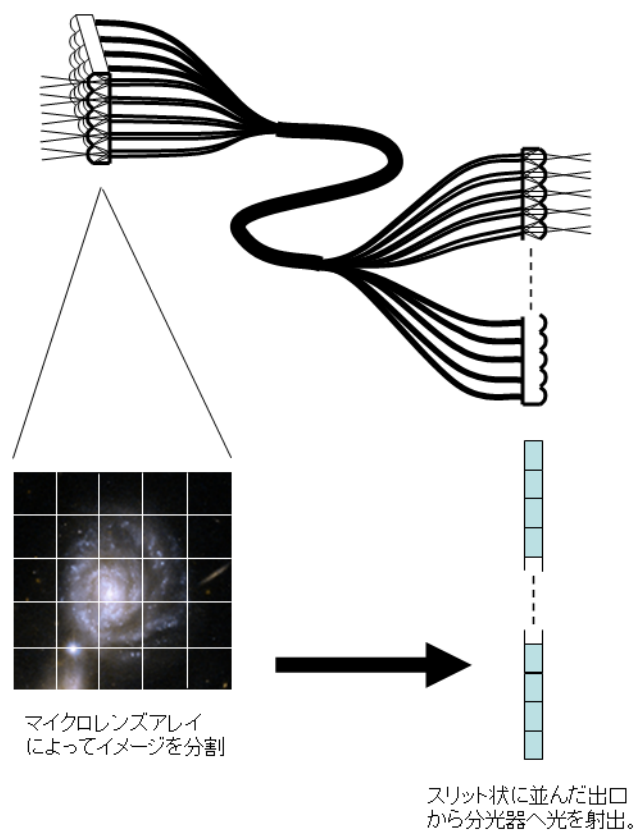


図 7.8 面分光ユニットの概念図。

なり、露出開始までに時間がかかってしまう。この一連の作業を自動化することは困難で、人間による判断と操作の介在が避けられない。

面分光装置を用いればこの一連の作業を省いて、GRB の即時分光が可能となる。面分光とは空間 2 次元+波長 1 次元の 3 次元データを一度の露出で取得することができる観測手法である。3.8m 望遠鏡に装備される面分光装置はマイクロレンズアレイと光ファイバー束を結合させた面分光ユニットを搭載し、30 秒角程度の視野を 30×30 素子程度のマイクロレンズアレイでカバーする。この視野は衛星の位置決定精度よりも十分に広いので、衛星から通報された位置へ望遠鏡を向けるだけで即座に分光観測を開始できる。通常のロングスリット分光の

ような微調整が不要で、自動観測を実現できるので、GRB 発生から分光観測までの時間を大幅に短縮できる。

この装置で用いられる IFU の概念図を図 7.8 に示した。望遠鏡により結像されたイメージは小さなレンズが 2 次元的に並んだマイクロレンズアレイにより分割される。分割された光は光ファイバーにより 1 次元的に並んだスリット状の出口より分光器へ導かれ、ロングスリット分光の要領で分光される。

なおこのモードは GRB 以外の突発現象の分光観測にも用いられる。また、一般的の銀河および星雲等広がりのある天体の分光観測においても効率の高い観測を実現するものである。

7.3 可視近赤外線撮像装置

7.3.1 概要

3.8m 望遠鏡第一ナスマス焦点に装着する可視近赤外同時撮像装置を開発する。この装置は、可視光(波長 0.4 μm から 0.9 μm)および近赤外線(波長 1 μm から 2.5 μm)の2つの波長域で同時に天体を撮像する機能を持つ。視野は可視光で約 8 分角、近赤外線で約 4 分角である。

3.8m 望遠鏡の天文学の課題として、ガンマ線バーストに代表される突発天体観測による動的天体現象の解明と、星・惑星形成の解明がある。これらの研究を推進するためには、可視近赤外線の同時撮像機能を持った広視野の撮像装置が必要である。

7.3.2 基本仕様

現在計画中の基本仕様を表 7.2 にまとめる。

表 7.2

項目	仕様	備考
観測波長範囲	0.4 μm ~2.5 μm	
視野	8 分角以上(可視光) 4 分角以上(近赤外線)	
画素スケール	0.24 秒角/画素 0.2 秒角/画素	25 μm 画素 20 μm 画素
可視 CCD 画素数	2048 × 2048 以上	裏面照射タイプ
赤外検出器画素数	1024 × 1024 以上	
同時撮像機能	可視(0.4~0.9 μm) 近赤外(1~2.5 μm) 2 バンド同時	

7.3.3 構造

・基本構造

可視 CCD1 台と近赤外線検出器 1 台からなり、ダイクロイックミラーによってビームを分割することで、同一視野の可視・近赤外線の同時撮像を可能とする。全体の光学系はオフナー光学系とし、望遠鏡焦点面の像を 1:1 で結像する。ダイクロイックミラーは望遠鏡焦点より前もしくはオフナー再結像光学系直後に置き、波長 1 μm 付近で二つのビームに分ける。可視ビームと近赤外線ビームの両方にそれぞれ 8 枚挿入可能なフィルターターレットを 2 層用意する。近赤外線域での感度を向上させるため、望遠鏡副

鏡の瞳像の位置に冷却ストップを置き、望遠鏡からの熱輻射をカットする。概念図を図7.9に示す。

赤外線ビームの冷却ストップは、副鏡遮蔽域および副鏡スパイダーからの熱輻射を遮断するため、副鏡遮蔽およびスパイダーのパターンを持ち、望遠鏡の写野回転と同期して回転する機構を持つ。

・構成

- 有効波長域 400nm～2.5μm
- オフナー光学系 F/6
- 冷却ストップ
- ダイクロイックミラーによる可視・近赤外線分割
- フィルターターレット 可視ビーム、近赤外線ビームそれぞれに8枚ターレット2層
- 検出器 XYZ 駆動機構

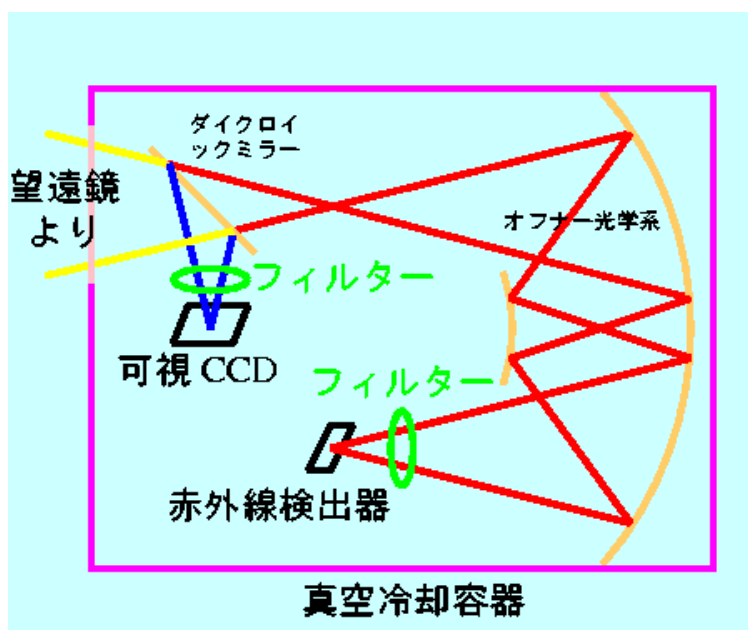


図 7.9 可視赤外線撮像装置概念図。

7.3.4 限界等級

表 7.3

観測波長域	限界等級 (1 時間積分・S/N=5)
B バンド	25.2 等級
V バンド	24.8 等級
R バンド	24.4 等級
I バンド	23.8 等級
J バンド	21.3 等級
H バンド	20.4 等級
K バンド	19.8 等級

限界等級を表 7.3 にまとめておく。

7.4 高分散分光器

高分散分光器は、彗星の化学組成解析、スペクトル解析や星震学による恒星の大気や内部の診断、金属欠乏星をプローブとした銀河や宇宙全体の化学進化の解明、系外惑星探索やその大気診断など、様々な天体の物理学的な研究に使用されている装置であり、3.8m 望遠鏡にも搭載されるべき観測装置の一つである。高分散分光器を早期に実現する方法としては、そのナスミス焦点から光ファイバーによって現在 188cm 望遠鏡で使用されている HIDES へ天体光を導き、同装置を利用することが考えられる。しかし、望遠鏡とのマッチングの要請から、高分散分光器の波長分解能 (R) とスリット幅 (Φ) の積は望遠鏡の口径に反比例することが知られており、2m クラスの望遠鏡用としてもあまり大きくない $R\Phi$ をもつ HIDES ($R=68,000$ で $\Phi=0.76$ 秒角) をそのまま 3.8m 望遠鏡で用いると、分解能や観測効率がかなり制限されてしまうことになる。また、系外惑星探索や星震学など 1m/s 以下の視線速度測定精度が重要になってくる観測では、分光器内の温度や気圧が非常に安定した分光器が求められる。従って、3.8m 望遠鏡の能力を十分活用するには、なるべく早く口径や科学的な目的に沿った新高分散分光器の開発を行なうべく検討中である。

第 8 章 設置場所

8.1 背景・経緯

東京大学東京天文台岡山天体物理観測所（現国立天文台）の建設の際には、日本国内での最適地を選定する調査が行なわれた。まず、気象庁の協力の下、気象学的に見て天体観測に適した場所 3 カ所（静岡、長野、岡山）が選定された。この 3 カ所で 1954 年から 1955 年にかけてサイト調査が実施された結果、国内最適地として岡山が選ばれたわけであるが、その特徴は気候穏やかなため星像の小さいこと、晴天日が四季を通じてまんべんなく配置されていることである。これらの点が、気象学的に見て天体観測に適した他の適地（静岡、長野）と異なる優れた特質である。このときの調査では、岡山の星像（シーイングサイズ）が最も小さく（平均 2 秒角）、主としてこれを反映して、岡山で 1 時間の露出で済む観測が、静岡では 2 時間、長野では 3 時間かかることが結論されている。（高地を除く）世界の天体観測適地では星像は 1 秒角程度といわれており、これに較べると岡山でも 4 倍の観測時間を必要とすることになる。しかしながら、岡山天体物理観測所における、周囲の樹木の伐採などの星像改善の努力の結果、188cm 望遠鏡のドーム内でもしばしば 1 秒角をきることが報告されている（最頻値 1.2 秒角、中央値 1.4 秒角）。したがって、大陸東岸に位置する日本では、晴天率では世界適地に劣るものの、星像ではそれ程遜色ない可能性がある。なお、竹林寺山の平均晴天率は 40% である。

そこで、ガンマ線バーストなどの突発天体の観測における東アジアの位置的な重要性、および機器開発や院生教育の利便さなどを含めた総合判断として、新望遠鏡の場所として国内設置を考える。その適地として岡山県を想定し、さらなるサイト調査を実施することにした。まず、岡山天体物理観測所（在竹林寺山）と、その北約 10km に位置する美星天文台において、空の明るさの測定を実施した。この結果、可視域での人工光の影響は、美星天文台の方が少ないが、主として想定している赤外域では変わらないこと、北に入るだけに、冬には雪が流れてきて観測可能日の減ること、交通の便などを総合判断して、現岡山天体物理観測所近辺を候補地と考え、ドーム外での星像測定、高さ方向の星像の変化、ローカルな場所による違いを調査した。方法としては、すばる望遠鏡で用いられている二つの方法、即ち、地上での星像測定に DIMM、高さ方向の星像の変化を調べるために、高さ 30m のタワーにセンサーを取り付けた C_T^2 法を採用した。タワーは 188cm 鏡ドームの西 70m に設置、DIMM はタワー直下および太陽クーデドーム付近において測定を実施した。以下に、これらの調査結果について述べる。



図 8.1 岡山天体物理観測所周辺地図。

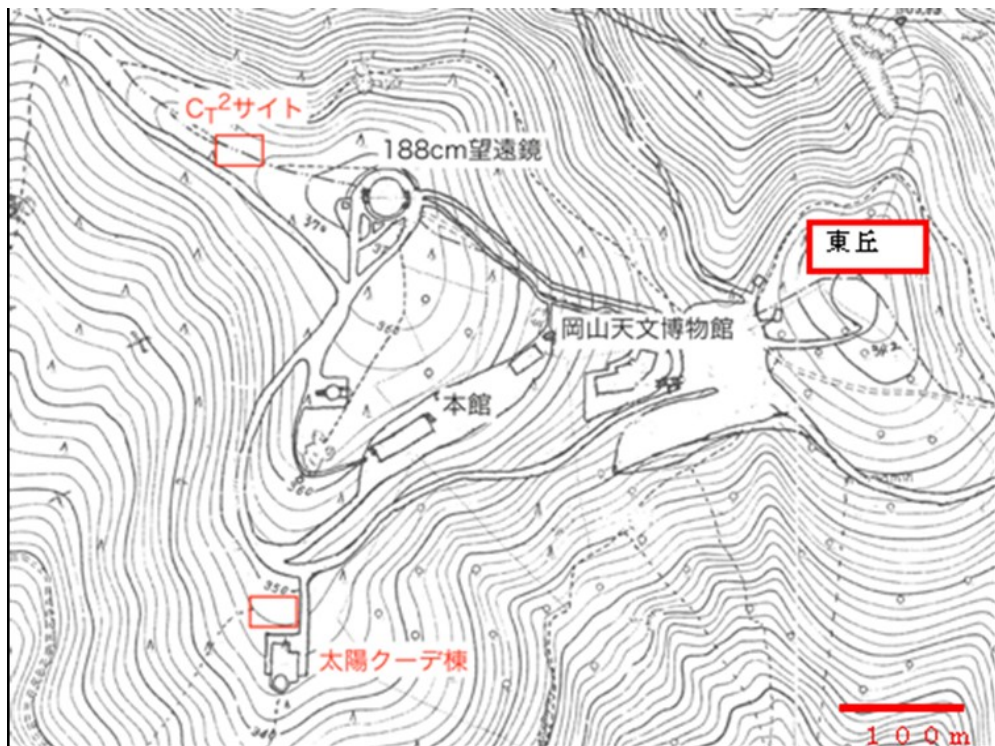


図 8.2 岡山天体物理観測所構内。

8.2 サイト調査

8.2.1 空の明るさ

岡山天体物理観測所は 1960 年の開所時に比べ、周辺地域の都市化、工業化が進み、夜空が明るくなっていると言われているが、定量的な測定はあまりなかった。そこで、京都大学新技術望遠鏡ワーキンググループでは 2000 年度に岡山天体物理観測所と岡山県美星町にある美星天文台で空の明るさの測定を行なった。測定は、ペルティエ冷却の CCD カメラに焦点距離 50mm のカメラレンズを取り付けて、方位方向に 45 度ずつ、高度方向に 30 度、45 度と天頂を撮影し、明るい星で較正して背景の明るさを求める方法で行なった。フィルターは R-band 付近で、都市光の影響を低減するため、標準的な Kron-Cousins system のものより短波長側を削ったもの (600-750 nm) を用いた。

測定は数回行なったが、天候などの条件が整い、岡山観測所と美星天文台両方の同時測定ができたのは 2000 年 8 月の二晩、2001 年 3 月の一晩の計三晩であった。これらの測定の結果、以下の結論が得られた：

- ・岡山観測所での天頂の空の明るさは典型的には 20.0mag/arcsec^2 程度で、美星天文台では $20.1\text{-}20.3\text{mag/arcsec}^2$ 程度であった。
- ・美星天文台と岡山観測所の差は 0.3 等程度であるが、薄雲があるような条件では差が大きくなり、岡山観測所の方が都市光の反射の影響を受けやすいことが示唆される。
- ・世界的に空が暗いとされているサイトでの R-band の空の明るさは 20.7 等から 21 等くらいである。一方、V-band では美星天文台での測光観測で、世界で最も暗いサイトと比べると 1 等程度明るいことが分かっており、R-band 付近では都市光の影響がやや低減されている と言える。

8.2.2 DIMM によるナチュラルシーイング測定

DIMM(Differential Image Motion Monitor)は一定距離離れた二つの望遠鏡開口で同じ星を撮像し、重心位置の相対的な揺らぎを測定することで大気の流れ具合を測定する装置で、シーイング条件の評価の標準的な手法として多くの観測サイトで測定が行なわれている。特に我々の調査では、 C_T^2 法での接地境界層成分の測定と並行して行なっているため、DIMM による測定と C_T^2 法での測定をあわせることで、ドーム高さで接地境界層成分の寄与が小さい場合のシーイングの推定まで行なうことができることが特徴である。

2001 年度から、DIMM を用いた岡山観測所構内でのシーイング測定を目指した装置開発と実際の測定を行なってきた。現在利用している装置はミード社製 20cm 経緯台に 14.4cm 離れた直径 5cm の開口板を取り付け二つの星像を結び、II-CCD で検出するものである。2002 年 1 月から 2003 年 8 月までに計 11 晩の測定データが得られている。測定は主に C_T^2 タワーサイト、および太陽クーデ棟屋上で行なった。これらのデ

一タから地上でのシーイングの頻度分布を求めたのが図 8.3 である。最頻値は 1.0-1.2"の間になっている。

図 8.4 には、主として測定を行なった太陽クーデ棟屋上と C_T^2 タワーサイトとでの FWHM(大口径の望遠鏡で星を見た場合の星像のひろがりを表す量:小さいほどシーイングが良い)の頻度分布の比較を示した。 C_T^2 タワーサイトの方がやや大きめに分布しているが、 C_T^2 タワーサイトでは地上で、太陽クーデ棟では屋上で測定しているということ、また測定日が異なるということを考えて、太陽クーデ棟と C_T^2 タワーサイトでは有意なシーイングの違いがあるとは結論できない。

さらに、前半夜と後半夜では、前半夜の方が昼間の熱の影響を受けてシーイングが悪い可能性があると考え、24 時を境にデータを分割して FWHM の頻度分布を調べた。前半夜の方が若干大きめであるが、差は僅かで有意とは言えない。また、測定データを春、夏、冬に分けて FWHM の頻度分布を調べたが、有意な違いは見られなかった。季節変動よりは日毎の変動の方が大きいようである。

ナチュラルシーイングの測定は、これまでに岡山観測所スタッフによっても行なわれている。例えば、岡山観測所の柳澤氏らの報告(2001 年度岡山ユーザー ズミーティング)によれば 188cm 望遠鏡のガイダーの星像を用いた測定では、FWHM の最頻値は 1.4"とされている。我々のこれまでの測定結果よりやや大きい値であるが、ガイド光学系の収差の影響、ドームによるシーイングの劣化等を考慮すれば矛盾はないものと考えられる。また、国立天文台の浦口氏らが開発した、太陽クーデ望遠鏡に同架した DIMM と我々の DIMM による同時測定も行なっており、よく一致した結果が得られている。DIMM によるシーイング測定は今後も継続して進めていく予定であるが、これまでに得られている結果から、岡山観測所サイトは全体として日本国内でも屈指の空気のゆらぎの少ない観測条件を得られるサイトであると結論できる。

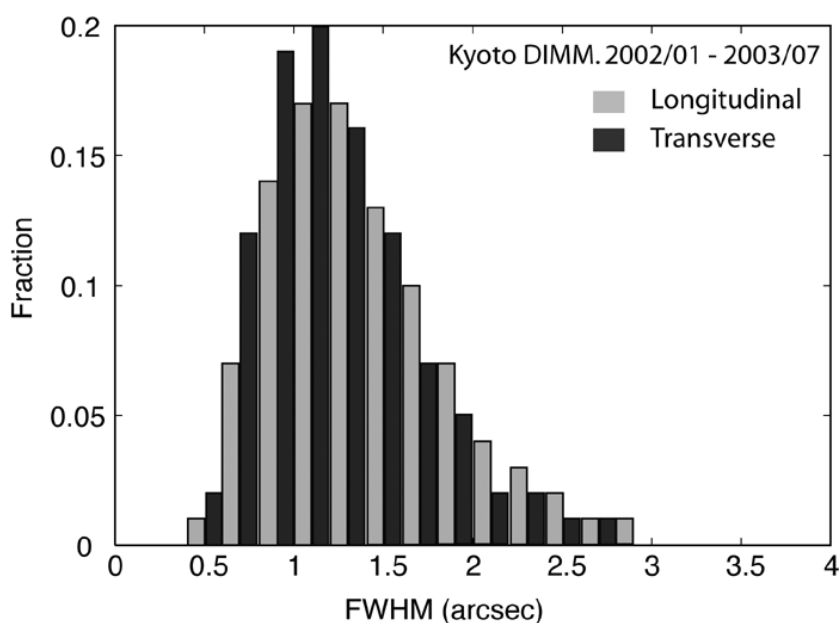


図 8.3 FWHM(星像直径)の頻度分布。

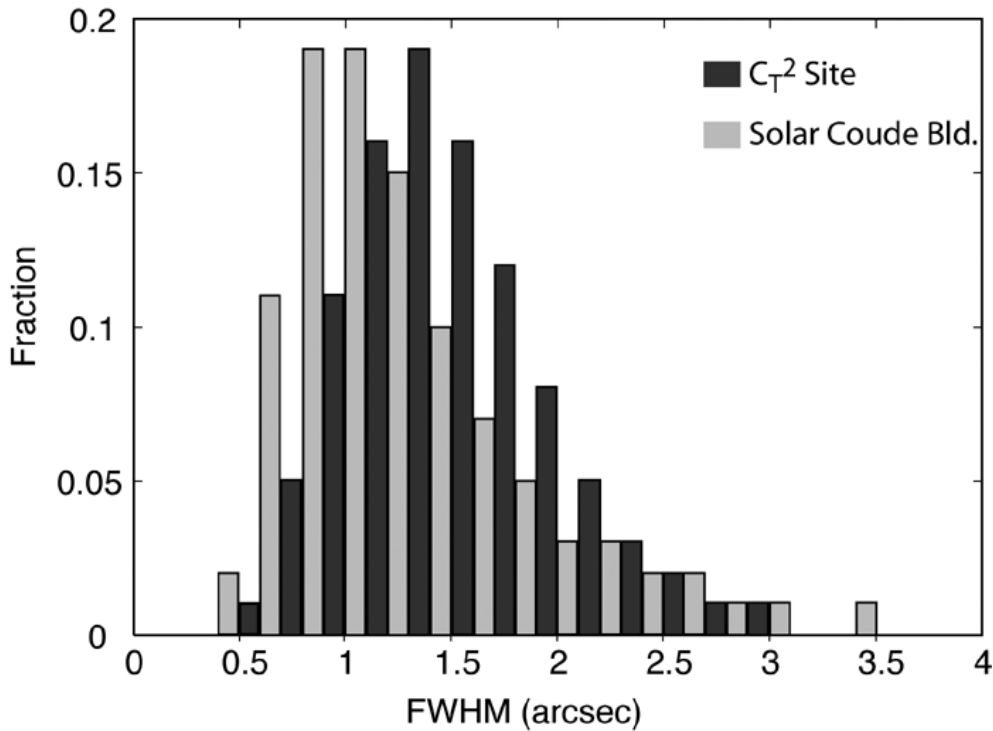


図 8.4 太陽クーデ棟屋上と C_T²サイトでの FWHM の比較。

8.2.3 C_T²法による地上付近の乱流調査

シーイングを劣化させる要因として 3 つ(接地境界層、ドーム環境、上層の自由大気)がある。接地境界層は大気と地表の境界層で、そこでの温度の乱れによって大気の屈折率が乱され星像がボケてしまう。一般的には、この層内では高さと共にシーイングの乱れは減少する。また、接地境界層ではシーイングは局所的な地形に大きく影響される。C_T²法による調査の目的は、シーイングの乱れの一要因である接地境界層での屈折率の揺らぎが、高さに依存してどのように変化するかを、岡山観測所で実際に測定して、シーイングへの接地境界層からの寄与を定量的に評価し、望遠鏡の不動点をどの位の高さに設置すれば良いかを決定することである。

測定タワーは 188cm 望遠鏡ドームから西側尾根にそって 70m 程進んだ所に設置されている。このタワーの高さ 27m, 20m, 15m と 10m の 4 ヶ所に一対のセンサーを 1m の間隔で取り付けて、2 点間の温度差のゆらぎ (C_T²) を測定し、この値からシーイングの高さ方向の変化を求める。この高さ毎の温度揺らぎから、接地境界層の影響が十分小さくなる高さ(スケールハイト)、および接地境界層からのシーイングへの寄与分(地上 0m における寄与 $\theta(0)$ と地上 15m における寄与 $\theta(15)$)を導出する。センサーはホイートストンブリッジ回路の一つに直径約 20 μ m のニッケル線を巻いた抵抗体を用いたものであり、微少な温度変化による抵抗値の変化を電圧値の変化に変換することで測定することができる。

これまでに、2002年8月から2003年10月までの計29日分のデータが取得されている。各日ともデータは日の入後少し後から日の出のすこし前まで取得した。図8.5は今までに測定した全データから求めたスケールハイトの頻度分布で、全データの80%は14.75m以下に含まれている。最頻値は4m~6mである。図8.6は季節毎にスケールハイトの頻度分布を表したものである。ここからは冬が最も大きく、秋が最も小さいことが分かる。図8.7は全データから求めた、地上0m、15mでの接地境界層のシーイングへの寄与($\theta(0)$ 、 $\theta(15)$)の頻度分布である。 $\theta(0)$ ではデータの80%は1.4"以下に含まれている。 $\theta(15)$ では80%が0.44"以下に含まれている。

これまでの調査で得られた全スケールハイトの80%は14.75m以内に含まれている。このことから、3.5m望遠鏡を15m以上に設置すれば接地境界層成分の影響はほぼ取り除くことができると考えられる。そして、季節毎の変化としては、冬が最も接地境界層の影響が大きく、秋が最も影響が小さいという結果になった。

DIMMの測定結果によると、地上でのシーイングが2"程度になる時が全体の2割程度存在する。このような条件の時、接地境界層とそれより上方の自由大気がシーイングに及ぼす影響が同程度であると仮定すると、これまでの C_T^2 法による測定結果から、地上15mでは1.5"程度のシーイングを確保できることが期待される。

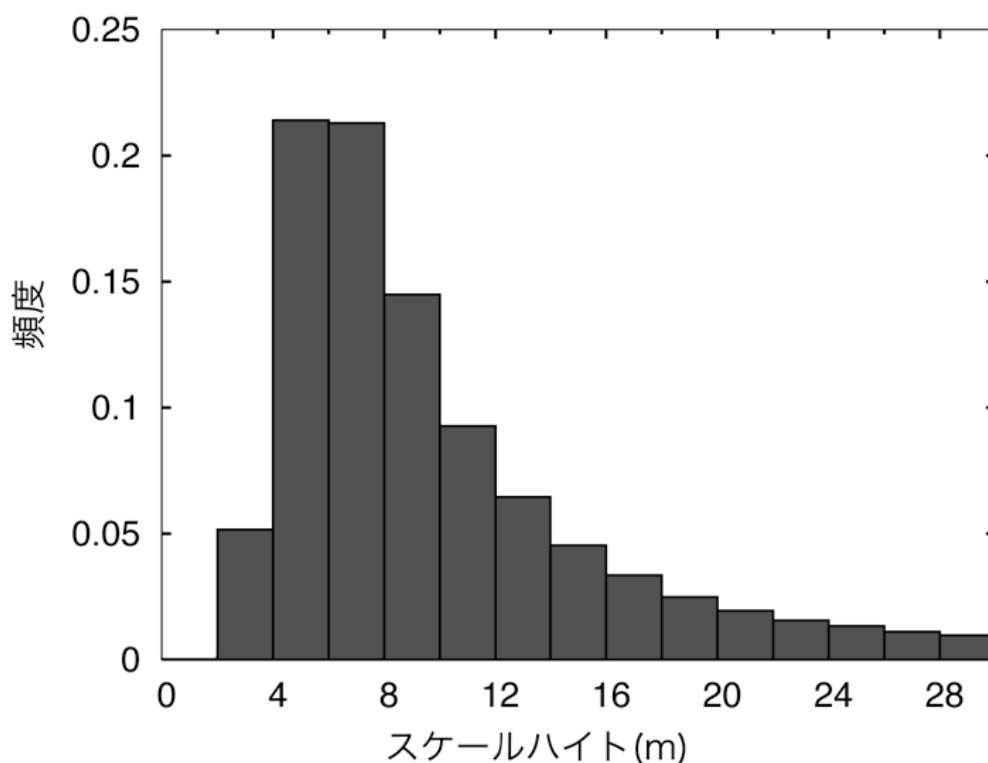


図 8.5 スケールハイトの頻度分布。

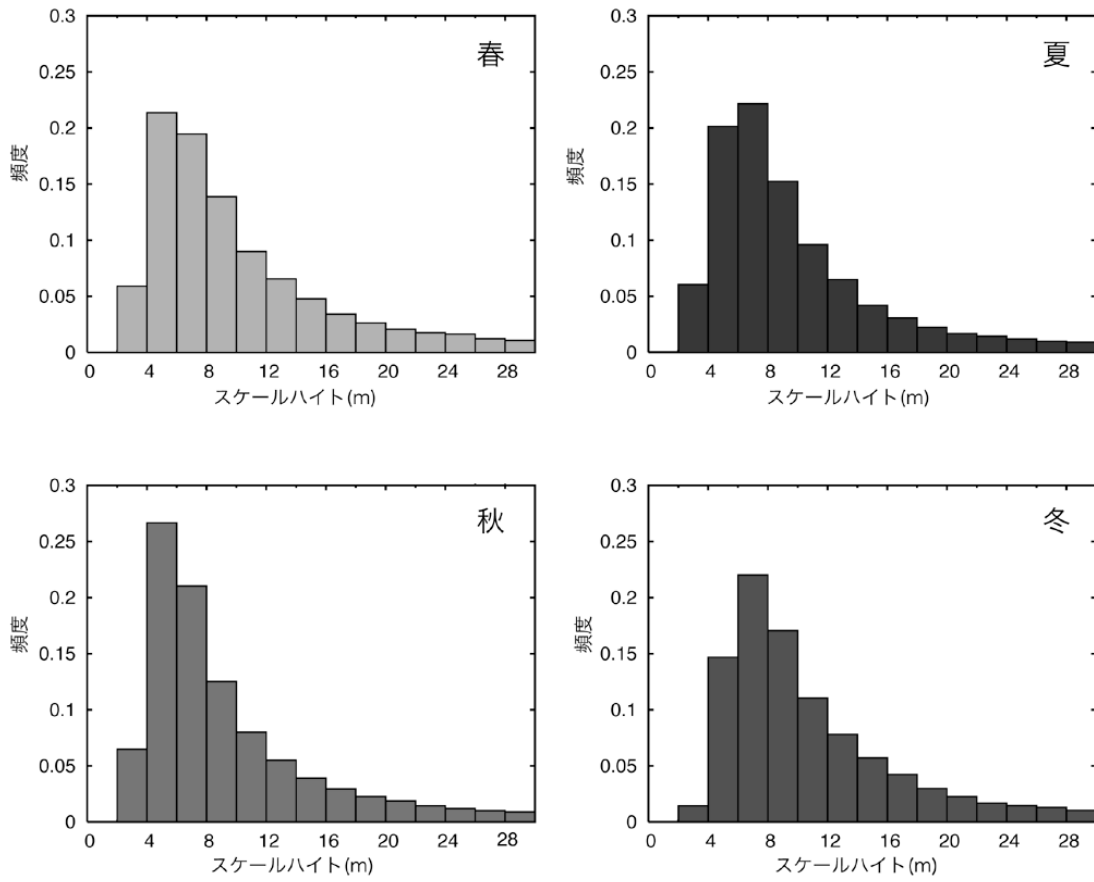


図 8.6 季節毎のスケールハイトの頻度分布。

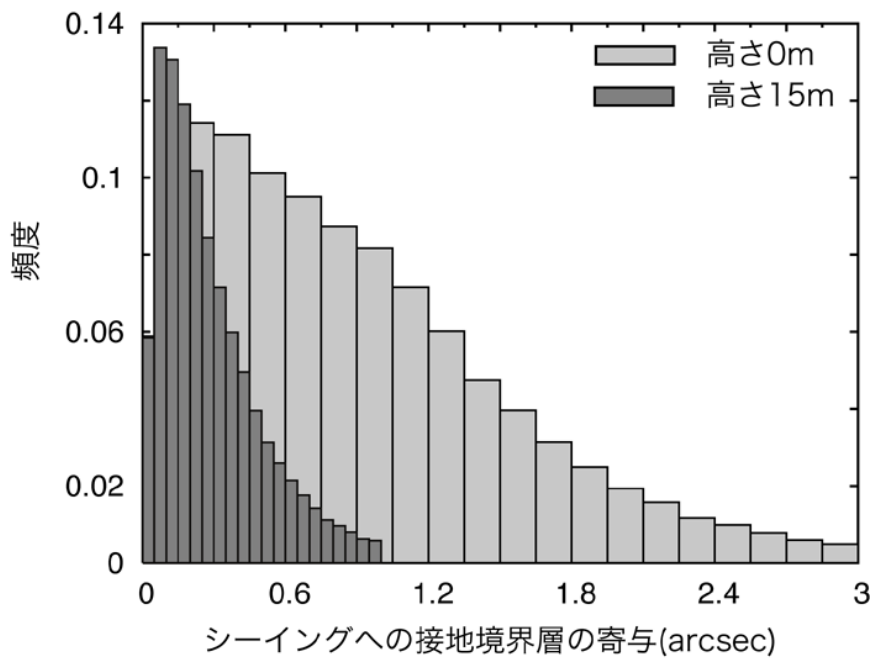


図 8.7 シーイングへの接地境界層の寄与の頻度分布。

8.3 設置場所

8.3.1 設置場所の決定

以上に述べたこれまでの調査結果から、岡山観測所の地上でのナチュラルシーイングは典型的に 1"強程度であり、15m 程度の高さに望遠鏡の不動点を持ってくれば、接地境界層のシーイングへの影響を多くの場合無視できる程度に減ずることが可能と考えられることが明らかになった。

観測所構内のどこに望遠鏡を設置するかについては、構内 2 地点での星像の大きさに有意な差がないことから、電気、ネットワーク等のインフラ整備の容易な地点を考えることとした。この観点から、太陽クレー棟北の平坦地を第一候補としていたが、その他の設置候補地の一つとして観測所に隣接する岡山天文博物館の東側の丘陵地が挙げられる。この場所についても引き続き、DIMM と C_T^2 法による地上付近の乱流調査を行ない、良好な結果を得た。現在、この東丘を候補地として決定している。

8.3.2 設置場所の遺跡調査

岡山天体物理観測所の敷地内は天文台遺跡に指定されている。最初の候補地太陽クレー棟北側の候補地を試掘した結果、弥生後期の住居跡が出土した。現在の候補地は当初天文台遺跡の範囲外にあったが、埋蔵文化財の存在が示唆されたため、ここも試掘した。結果、同様に弥生後期の住居跡らしきものが出土し、設置場所を本格的に発掘調査する必要が発生した。平成 20 年度に、民間の資金援助を受け、本格調査を行なった。浅口市教育委員会により、県の埋蔵文化財課の指導のもと平成 20 年 5 月、6 月、7 月の約 2 か半月現地発掘調査が行なわれた。結果は、予想通り弥生時代後期の住居跡、土器など出土した。作業の一部を図 8.8、図 8.9 に示す。年度末に調査報告書が完成する。調査の結果、同地にドーム施設を建設することは可能との了解を得た。現在は、安全上の対策として、穴等は埋め戻している。



図 8.8 作業状況。



図 8.9 出土した竪穴住居跡。

第9章 組織・運営

新望遠鏡は、京都大学大学院理学研究科附属天文台に属する。同天文台には、現在、花山天文台・飛騨天文台があるが、新望遠鏡が設置されれば岡山天文台(仮称)を設置し、望遠鏡の運用の主体となる予定である。

3.8m 望遠鏡の主たる使用者は京都大学であるが、研究目的は、広く天文学の様々な分野や隣接分野と深く関連しており、研究を効率よく進めるために、全国の大学の研究者と協力して行なう。あわせて、教育における協力の推進もはかる。

(1) 大学間共同研究の実行

大学間の共同によって研究の推進をはかることは、天文学の発展のためには極めて有意義である。特に、望遠鏡や観測装置の特徴を相補的に組み合わせることによって、よりいっそう研究の成果を高めることが期待される。このような観点からも、3.8m 望遠鏡の運用についても共同で積極的にすすめる。この方針をもって岡山天文台は大学間の協力の要の役割を果たす。

(2) 教育における大学間共同

天文学分野では、他の自然科学分野にくらべ、多くの大学においては教員数が著しく少ない。従って、各地に点在するさまざまな分野をカバーする天文学の大学教員が協力し、単位互換制度を活用するなどして、観測天文学の大学院および学部教育において高い効果を上げることを目指す。この協力は中等教育機関の教員研修、および、社会人教育、市民への普及にも適用される。

(3) 大学間連携の枠組

当面は、大学間協定などの制度を活用して、大学間共同研究・教育をおこなう。将来的には、大学付置のセンターを持つ大学、国立天文台などを中心としつつ、大学間連携の実施を検討する。

以上のような運営形態を念頭におくと、このクラスの望遠鏡の運営のためには、岡山現地に一定の人員配置が必要である。具体的な現地の業務としては、望遠鏡運用、共同研究推進、観測装置開発等がある。また、PDF 研究員や事務を扱うための人員も必要である。運用にあたっては京都大学が責任を持ち、関連する大学、国立天文台等の支援を受けながら進める。

現在の京都大学大学院理学研究科附属天文台には、理学研究科の関連教室などの教員も構成員とする、運営協議会がおかれている。岡山天文台(仮称)の運営については、

全国の大学との共同研究/共同教育を実施するために、岡山共同利用協議会(仮称)をおき、京都大学宇宙物理学教室、全国の関連大学、国立天文台の研究者の参加を得て、合同で運用方針を審議する。

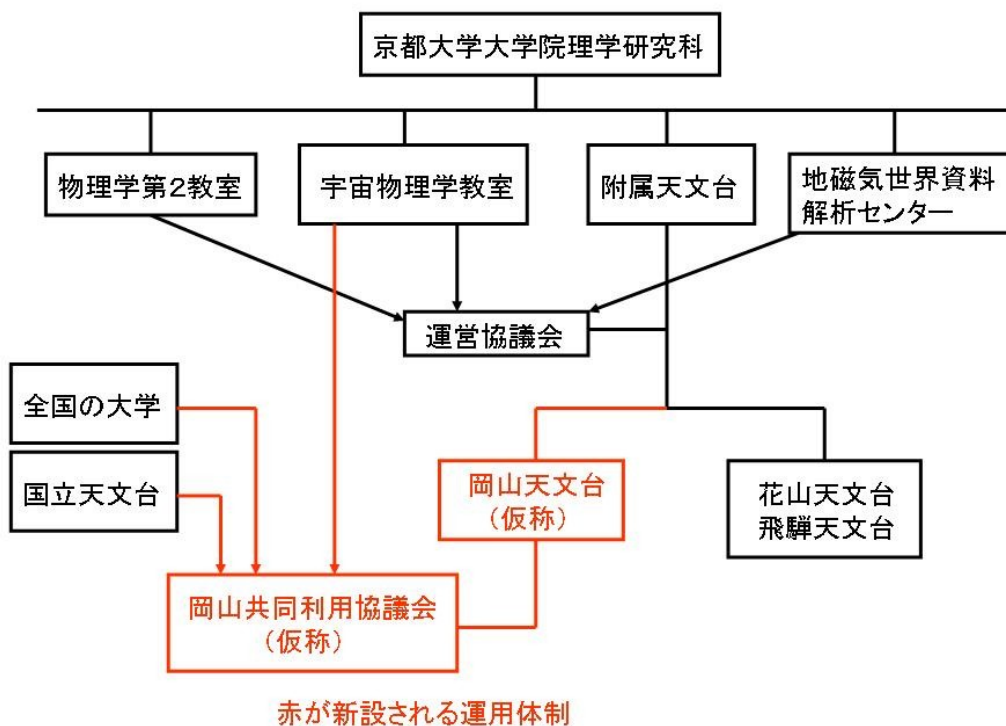


図 9.1

第10章 建設計画

以下のようなスケジュールで進めている。



第 11 章 その他特筆すべき事項：

これまでの経緯と関連資料について

本章では、本望遠鏡計画に関連するこれまでの経緯を簡単にまとめておこう。なお、文中で触れることのできなかった、望遠鏡プロジェクトにご尽力いただいている（いただいた）方々については本章末尾に名簿があるので参照されたい。

11-1 プロジェクトの開始と学術会議天文研連特別議事録など（1999 年～2005 年）

(1) 岡山 3m 望遠鏡プロジェクトの開始（1999～2002）

本 3m 級望遠鏡計画が京大で議論されるようになったのは直接的には、1998 年 11 月ころからである。それ以前にも、1970 年代から附属天文台 2m 望遠鏡計画や京大海外 4m 望遠鏡計画などあったが（後者は一部すばる望遠鏡計画につながっていった）、現在の計画に直接つながるものではない。

1999 年 1 月頃、岡山天体物理観測所の 188cm 望遠鏡の後継機という観点から、日本の光赤外線天文学の将来計画の一環として京大で岡山 3m 望遠鏡ワーキンググループが結成された（大谷浩教授、平田龍幸助教授、太田耕司助教授（当時）ら）。3m 級の光赤外線望遠鏡を国立天文台岡山観測所内に建設し、大学連携という形で京大が中心になって運用、教育研究のために活用するというプランである。1999 年の天文学会での光天連（光学赤外線天文連絡会）総会において 3m 光学赤外線望遠鏡計画（予算約 10 億円）という案が初めて提示された。

この年 4 月に柴田一成教授が附属天文台に、6 月に舞原俊憲教授が宇宙物理学教室に着任。宇宙物理学教室と附属天文台が協力して望遠鏡計画を推進するための土台が出来た。この頃、毎週金曜日の定例望遠鏡 WG 会議が始まる。2000 年 10 月には 3m 級望遠鏡による突発天体観測の中心メンバーとして、附属天文台に野上大作助手が着任。附属天文台としては初の恒星分野の教員となった。

2000 年 3 月、宇宙物理学教室より 3m 望遠鏡計画に関する概算要求が初めて理学部に提出された。翌 2001 年から 3m 望遠鏡計画の概算要求は、完成後の維持運営を考慮して附属天文台より提出されるようになったが、当初は附属天文台の太陽望遠鏡整備が 1 位にあり、3m 級望遠鏡計画は 2 位であった。

2001 年 5 月に学術会議天文学研究連絡会（天文研連）の会議において特別議事録「岡山天体物理観測所の将来計画について」が発表された。議事録の中の文章を抜粋すると、

「国立天文台付属岡山天体物理観測所を京都大学へ移管し、建設後 40 年を経た現有 188 センチ望遠鏡を新鋭の望遠鏡に置き換えて先端的研究を推進するとともに、他大学とも連携して運用することを通じて、国内における観測研究や装置開発の拠点とし、かつ若手研究者育成のための研究教育装置として有効利用を図る事を目指す将来計画が、京都大学理学部から提案された。この計画は国立天文台においても積極的に受け止められ、上記目的達成のための施設移管や整備について京都大学と協力して推進する意向であることが確認された。

それらの提案を受けて本委員会として議論した結果、この将来計画は、本委員会が目指す大学における天文学の研究教育基盤の強化という方向に合致しており、天文学研究の総合的な発展のため早期に実現するよう積極的に推進すべきであるとの結論を得た。」

と書かれている。天文研連は日本の天文学者の総意をまとめる機関であり、ここにおいて、初めて京大の計画が日本の天文学のコミュニティからサポートを受けたわけである。2002 年 2 月には飛騨天文台の太陽望遠鏡整備の概算要求が認められたため、2003 年度の概算要求としては 3m 級望遠鏡計画が理学部(大型設備概算要求)の実質 1 位となる。

(2) 分割鏡方式とトラス方式の導入 (2002～2004)

2002 年 4 月に岩室史英助教授が宇宙物理学教室に着任、以後、望遠鏡計画の技術開発の中心メンバーとして計画を引っ張ることになる。2002 年 9 月に岩室助教授と岡山観測所吉田道利所長がアリゾナ周辺の中口径望遠鏡を視察。

2002 年 9 月の岡山 UM/光天連シンポにおいて、30m 望遠鏡などを念頭においた、分割鏡の可能性が指摘され、検討が開始された。2003 年 1 月頃、トラス方式(軽量架台)の採用を決定。

2003 年 4 月には、再び学術会議天文研連で、特別議事録「大学における光赤外線観測天文学の研究基盤の強化について」が発表された。ここには、東大、東北大の計画とともに京大の計画が

「京都大学の 3.5m 望遠鏡計画は、新技術による軽量望遠鏡を西日本で最高の観測サイトである国立天文台岡山天体物理観測所内に設置し、すばる望遠鏡や我が国の赤外線衛星 Astro-F との連携により、宇宙の突発現象の分光学的追求と星形成史の解明を目指す計画である。また、西日本の多くの大学と密に連携し、西日本における天文学の教育研究の拠点を形成する。」

と書かれ、

「日本学術会議天文学研究連絡委員会は我国の天文学コミュニティの総意を代表して、これらの計画が順次、早期に実現することを強く望むものである。」

と結ばれている。

(3) 研削加工技術の導入 (2004~2005)

2004年には、3m級望遠鏡計画の新たなリーダーとして長田哲也教授が宇宙物理学教室に着任、また2004年4月より柴田教授が附属天文台の台長を務めることとなり、新たな体制が始まった。

この頃から研削技術の応用を検討開始した。2004年5月頃には、概算要求として研削を出すかどうか議論があり、研削採用に伴いクリアセラム18枚方式に計画が変わった。この頃、名古屋大学光赤外線天文学(Z)研究室佐藤修二教授のグループが望遠鏡計画に加わる。

2004年2月に理学部1位概算要求として、2005年2月には大学連携の形で国立天文台と協力した概算要求として提出されたが、予算は認められなかった。

2005年5月には、新たな学術会議天文研連特別議事録「大学における光赤外線観測天文学の推進について」が発表された。ここでは

「大学が大学院教育や特色ある独自研究を進めるために固有の望遠鏡を持つことの重要性については、すでに1994年の日本学術会議天文学研究連絡委員会報告『21世紀の天文学長期計画』において深く検討され、強調されてきた。また2000年文部省学術審議会特定研究領域推進分科会宇宙科学部会報告『我が国における天文学研究の推進について』においても、同趣旨の勧告がなされている。」

ということが強調された上で、

「京都大学を中心として、技術的な側面の研究開発に重点をおいた3m望遠鏡を国立天文台岡山天体物理観測所のサイトに設置する。ここでは、次世代超大型望遠鏡への技術開発研究や機動性を生かした観測課題を追求する。とりわけ、研削による鏡面製作や分割鏡の新方式制御を目指し、国内産業とも密接なかかわりを持つ実験望遠鏡として、大学での教育や人材育成に貢献する。」

「日本学術会議天文学研究連絡委員会はわが国の天文学コミュニティの総意を代表して、光赤外線天文学の領域において大学が最優先で推進すべきTAO計画及び新技術実験望遠鏡計画を核とした東京大学と京都大学の計画が早期に実現することを強く望むものである。」

と結論づけられている。

また、2005年6月、東大との間に、「東大および京大の望遠鏡プロジェクト推進に関する協力関係についての協定」が結ばれた。東大が推進するアタカマ望遠鏡計画と京大が推進するセグメント鏡開発に基づく実験望遠鏡計画を、お互いの協力の基に推進しようという協定である。調印者は、吉井讓東大理学系研究科天文教育研究センター長、長田京大理学研究科宇宙物理学教室主任、柴田同附属天文台長である。

11-2 産学連携による望遠鏡開発 (2005年～)

2005年前期にプロジェクトの大きな進展があった。京大理学部宇宙物理学教室の卒業生、藤原洋氏(インターネット総合研究所代表取締役所長)から資金提供を受けて、産学連携で望遠鏡の基礎技術を開発し、同時にその技術を産業界にフィードバックすることにより、産学連携で3m級望遠鏡を作ろうというプロジェクトが始まったのである。

2005年11月にはそのための企業、ナノオプトニクス研究所が設立され、翌年4月には定年退職直後の舞原名誉教授が、ナノオプトニクス研究所の最初の専任職員となった。同研究所の設立資金、望遠鏡建設費約10億円は、藤原洋氏が個人の資産から提供し、藤原洋氏がナノオプトニクス研究所の代表取締役所長となった。

以後、望遠鏡の基礎技術開発、すなわち、

- (1) 研削による高精度鏡面加工、
- (2) 分割鏡方式、
- (3) 軽量架台、

の開発が、ナノオプトニクス研究所、名古屋大学、京都大学、国立天文台岡山天体物理観測所の産学連携共同研究により推進されることになる。

そのため、2006年1月には、京大理学研究科附属天文台とナノオプトニクス研究所の間で民間との共同研究「3m級新技術光学赤外線望遠鏡の開発と、それによる宇宙物理学の研究」(予算、年間約900万円)が正式に契約された。(同共同研究は単年度契約とし、タイトル、年間予算額は、毎年検討。ちなみに、2007年度の共同研究タイトルは「複合鏡望遠鏡におけるセグメント鏡支持機構の開発とそれをを用いた宇宙物理学の研究」で予算は約700万円。)

2006年8月には、京大院理宇宙物理教室、同附属天文台、名大院理光赤外天文研究室、国立天文台岡山観測所、ナノオプトニクス研究所との間で4者の協力に関する覚書が締結され、民間の支援による本望遠鏡計画の全貌が、記者発表された。10億円に達する民間資金の支援による天体望遠鏡開発というのはわが国では初めてということもあって、多くの新聞で取り上げられた。覚書の締結者は、長田哲也(京大院理宇宙物理学教室主任)、柴田一成(京大院理附属天文台長)、佐藤修二(名大院理光赤外線天文学研究室教授)、吉田道利(国立天文台岡山天体物理観測所長)、藤原洋(ナノオプトニク

ス研究所代表取締役所長)の各氏であった。

2007年2月には、科学技術振興調整費プランの申請に京大から3件選ばれたものの1つ、「先端的複合領域イノベーション拠点形成」の領域で「超精密研削加工と天文光学技術の融合拠点」というタイトルで申請した。7年間数十億円にのぼる予算で拠点を立ち上げる計画であったが、これは採択されなかった。

2007年4月には京大理学研究科将来計画委員会に望遠鏡ワーキンググループ(WG)が設置され、本望遠鏡計画に関する組織的な検討・議論が初めて公的になされるようになった。京大理学研究科として望遠鏡をいかに運用していくか、予算、人員は大丈夫か、また、附属天文台の将来計画との関連はどうなっているか、という検討である。

当初は、望遠鏡建設予定地での埋蔵文化財調査のために望遠鏡計画が京大理学研究科で正式に認められる必要性があって将来計画委員会での議論が始まったが、京大での議論には少し時間がかかることが判明し、結局、埋蔵文化財調査のための予算(1500万円)は藤原洋氏が個人の寄附という形で国立天文台に寄附し、最終的には、国立天文台が地元自治体と協議して埋蔵文化財調査を進めた。

2007年10月にはナガセインテグレーション社において、望遠鏡鏡研削用の研削加工機(建設費約4億円)が完成し完成披露式が開催された。これについても、いくつか新聞や雑誌の報道があった。

2007年から2008年4月にかけて、宇宙物理学教室では太田耕司教授と嶺重慎教授が着任、また、附属天文台では一本潔教授が着任し、これでようやく宇宙物理学教室(教授3人:長田、太田、嶺重)と附属天文台(教授2人:柴田、一本)の教授が全員揃い、望遠鏡計画を推進する体制が整った。

将来計画委員会望遠鏡WGでの議論では、望遠鏡の維持運営は財団方式にするのが良いのではないか、ということで種々の検討を進めていたが、まずは藤原洋氏より10年間の運用資金とドーム建設費のための経費を個人の寄附(委任経理金)という形で寄附をしてもらうのが良いのではないか、ということになり、2009年度中に藤原洋氏から総額4億円の寄附をしてもらうということで、2008年12月17日に、了解を得た。それを受けて、2008年12月26日に第2回将来計画委員会望遠鏡計画WGが開催され、藤原氏からの寄付の件について説明した。合わせて、(1)望遠鏡運用経費の内訳(国立天文台と京大の経費分担内訳)、(2)運用のために人員配置計画(附属天文台)(3)ドーム建設費用の概算、についても説明し、それについて議論があった。

2009年4月9日に、将来計画委員会が開催され、平野前将来計画委員長より、望遠鏡WGの進捗状況について以下の説明があった:「藤原氏より4億円の寄付申し出があり、運用のメドがたった。国立天文台との共同運用や附属天文台の人員配置計画の内容も具体化されてきている」。同年4月20日に、附属天文台運営協議会で、望遠鏡計画の進捗状況を説明し、藤原氏からの4億円の寄付の申し出を受け入れることが了承された。それを受け、同年5月7日の専攻長会議、5月21日の教授会において、藤原洋氏

より 2009 年度末（2010 年 3 月 31 日）に 4 億円の寄付を受け入れることが正式に了承された。ここに至って、理学研究科として望遠鏡計画にコミットすることが正式に認められることとなった。

2009 年 9 月 18 日には、京大時計台ホールで花山天文台創立 80 周年記念式典が開かれ、そこで 3.8m 望遠鏡計画への支援に対し、吉川研一理学研究科長が藤原洋氏に理学研究科を代表して感謝状を贈呈した。2010 年 3 月 1 日には、理学研究科野中事務部長、三方施設掛長、玉井財務掛長、長田教授、太田教授、柴田教授が岡山観測所 3.8m 望遠鏡建設地を視察。のち、浅口市長、同教育委員会、矢掛町長、同教育委員会を訪問し、土地の借り受け、ドーム建設等について事前の挨拶を行なった。

一方、3.8m 望遠鏡計画の進展を受けて、光赤外線天文学分野の大学間連携による共同研究の概算要求（平成 23 年度）の準備が 2009 年初頭より進められつつあり、2010 年 2 月 8 日には国立天文台、東大、東京工大、名大、京大、広島大、鹿児島大の代表者が文部科学省大学機関課を訪問し、計画の概要を説明した。（2010 年 3 月 8 日）

付録・参考資料

A 関連論文、天文学会・研究会発表リスト

《学術論文》

・ Kurita, M.; Sato, S.; Noda, N.

「Ultra-Lightweight Telescope Mount」

2009, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 121, issue 877, pp.266-271

・ Kurita, Mikio; Sato, Shuji; Morishima, Kunihiro; Achiwa, Hiroki; Ito, Hitomi; Nagata, Tetsuya; Noda, Noriaki; Koiso, Nobuo

「Development of the ultralight medium-size telescope」

2004, Astronomical Structures and Mechanisms Technology. Edited by Antebi, Joseph; Lemke, Dietrich. Proceedings of the SPIE, Volume 5495, pp. 518-525

《博士論文、修士論文》

・ 和田 晋平 2003 年度 京都大学理学研究科修士論文 『Cr² 法によるシーイング測定システムの開発と岡山観測所サイト調査への応用—接地境界層のシーイング条件から見た望遠鏡の設置条件の評価—』

・ 坂井 道成 2006 年度 京都大学理学研究科修士論文 『京都大学新技術望遠鏡分割主鏡制御システム用非接触精密位置センサーの開発』

・ 大久保 悠 2007 年度 京都大学理学研究科修士論文 『3.8m新技術望遠鏡主鏡製作に向けた試験研削』

・ 宮前 克之 2007 年度 京都大学理学研究科修士論文 『岡山 3.8m 新技術望遠鏡計画—位相測定カメラの基礎開発—』

・ 吉田 憲司 2007 年度 名古屋大学理学研究科修士論文 『岡山新望遠鏡用副鏡支持駆動装置の開発』

・ 薫田 匡史 2008 年度 名古屋大学環境学研究科修士論文 『ホモロガス変形を考慮したトラス構造物の構造形態創生に関する研究』

・森谷友由希 2008 年度 京都大学理学研究科修士論文 『岡山 3.8m 新技術望遠鏡の開発における主鏡位置制御アクチュエータ駆動用センサの安定性試験及び AO シミュレータを用いた透過型 AO 導入の検討』

≪日本天文学会年会≫

1. 企画セッション「中小口径望遠鏡による天文学」2008 年秋季年会(岡山理科大学)
・長田哲也(京都大学)、新技術望遠鏡計画推進グループ 『京大岡山新技術望遠鏡計画計画の概要』 日本天文学会 2008 年秋季年会(岡山理科大学) A02a

・古間木翔太(京都大学)、新技術望遠鏡計画推進グループ 『研削による望遠鏡主鏡の製作』 日本天文学会 2008 年秋季年会(岡山理科大学) A03a

2. 通常セッション

・和田 晋平、舞原 俊憲、太田 耕司、平田 龍幸、岩田 生、安東 正隆(京都大学)、小矢野 久(岡山天体物理観測所(OAO))、田村 直之(Durham Univ.)、新望遠鏡 WG メンバー(京都大学、OAO) 『新技術望遠鏡計画に伴う岡山天体物理観測所の天体観測条件の評価 I』 日本天文学会 2003 年春季年会(東北大学) V09b

・佐藤 修二、栗田 光樹夫、長嶋 千恵、木野 勝、永山 貴宏、加藤 大輔、長田 哲也、河合 利秀(名古屋大学)、大森 整、林 偉民、天文望遠鏡ミラー開発チーム(理化学研究所(理研)) 『研削鏡とトラス構造架台を用いた中口径望遠鏡の製作』 日本天文学会 2003 年秋季年会(愛媛大学) V20a

・栗田 光樹夫、森島 邦博、加藤 大輔、永山 貴宏、佐藤 修二(名古屋大学)、野田 範昭、小原 優明(太陽工業株式会社)、THK 株式会社、株式会社西村製作所 『新技術望遠鏡架台の開発経過』 日本天文学会 2003 年秋季年会(愛媛大学) V24b

・栗田光樹夫、森島邦博、阿知波洋樹、伊藤仁美、永山 貴宏、佐藤 修二、長田哲也(名古屋大学)、野田 範昭(太陽工業株式会社)、THK 株式会社、株式会社西村製作所 『新技術望遠鏡架台の開発経過とこれから』 日本天文学会 2004 年春季年会(名古屋大学) V53b

・佐藤修二、福村香織、田中真知子、木野勝、栗田光樹夫(名古屋大学)、森田晋也、天体望遠鏡ミラー開発チーム(理研)、株式会社ナガセインテグレックス 『干渉法による鏡形状測定装置の開発』 日本天文学会 2004 年春季年会(名古屋大学) V68a

・服部 堯(国立天文台岡山)、岩田 生(国立天文台三鷹)、平田 龍幸(京都大理)、吉田 道利、沖田 喜一、清水 康広、稲田 素子(OAO) 『岡山天体物理観測所 常設シーイングモニター』 日本天文学会 2004 年秋季年会(岩手大学) V38b

・栗田光樹夫、阿知波洋樹、佐藤修二、長田哲也(名古屋大学)、野田範昭(太陽工業株式会社)、THK 株式会社、株式会社西村製作所 『次世代超大型光赤外望遠鏡 II: 超軽量架台の開発経過』 日本天文学会 2004 年秋季年会(岩手大学) V41a

・千田崇文、岩室史英、木村仁彦、下農淳司(京都大学)、京大岡山新望遠鏡グループ 『次世代超大型光赤外望遠鏡 III:分割鏡支持アクチュエータの開発』 日本天文学会 2004 年秋季年会(岩手大学) V42a

・佐藤修二、福村香織、木野勝、栗田光樹夫(名古屋大学)、家正則(国立天文台)、田中善衛、渡部光隆、金田亮(山形県工業技術センター) 『次世代超大型光赤外望遠鏡 VI: 研削で鏡面製作する方法の開発』 日本天文学会 2004 年秋季年会(岩手大学) V44a

・木野勝、福村香織、栗田光樹夫、佐藤修二(名古屋大学) 『次世代超大型光赤外望遠鏡 V: CGH を用いた off-axis 鏡の検査法』 日本天文学会 2004 年秋季年会(岩手大学) V45b

・栗田光樹夫、阿知波洋樹、長瀬良太、加藤大輔、佐藤修二(名古屋大学)、野田範昭(太陽工業) 『超軽量望遠鏡の屋外試験結果』 日本天文学会 2006 年春季年会(岐阜大学) V10a

・坂井道成、岩室史英、下農淳司、長田哲也、太田耕司、安東正隆(京都大学)、舞原俊憲(ナノオプトニクス研究所)、吉田道利、沖田喜一、泉浦秀行、岩田生(国立天文台) 『京大新技術望遠鏡分割鏡制御システム用非接触精密位置センサーの開発』 日本天文学会 2006 年秋季年会(九州国際大学) V42a

・下農 淳司、岩室 史英、大久保 悠、森谷 友由希、長田 哲也(京都大学)、舞原 俊憲、所 仁志(ナノオプトニクス研究所)、中島 悠(中島分光)、木野 勝、栗田 光樹夫(名古屋大学) 『岡山新技術望遠鏡用主鏡研削のための測定時鏡材保持機構の開発』 日本天文学会 2008 年春季年会(国立オリンピック記念青少年総合センター) V26a

・所 仁志、舞原 俊憲、藤原 洋(ナノオプトニクス研究所)、宇野 剛、山口 政男(ナガセインテグレーション)、岡山 3.8m 新技術望遠鏡開発グループ 『岡山 3.8m 新技術望遠

鏡の開発 V：超精密研削加工による主鏡の製作』 日本天文学会 2008 年秋季年会(岡山理科大学) V06b

・下農 淳司、岩室 史英、森谷 友由希、長田 哲也(京都大学)、舞原 俊憲、所 仁志(ナノオプトニクス研究所)、中島 悠(中島分光)、木野 勝、栗田 光樹夫(名古屋大学)
『岡山 3.8m 新技術望遠鏡の開発 VI：主鏡研削のための測定時鏡材保持機構』 日本天文学会 2008 年秋季年会(岡山理科大学) V07b

・森谷 友由希、岩室 史英(京都大学)、沖田 喜一(国立天文台岡山天体物理観測所)他、岡山 3.8m 新技術望遠鏡開発グループ 『岡山 3.8m 新技術望遠鏡の開発 VII:副鏡の設計案』 日本天文学会 2008 年秋季年会(岡山理科大学) V09b

・栗田光樹夫、薫田匡史、大森博司、佐藤修二(名古屋大学)、野田範昭(太陽工業)、河村拓昌(TTDC)、京都岡山新技術望遠鏡メンバー 『3.8m 望遠鏡のための鏡筒トラス設計』 日本天文学会 2009 年春季年会(大阪府立大学) V55b

・木野勝、竹川翔一郎、林秀行、栗田光樹夫、佐藤修二(名古屋大学)、伊藤重夫((株)ユビテック)、京都岡山新技術望遠鏡メンバー 『CGH を用いた軸外し非球面鏡測定用干渉計の開発』 日本天文学会 2009 年春季年会(大阪府立大学) V56b
・舞原 俊憲(ナノオプト)、所 仁志(ナノオプト)、長田 哲也(京都大学)、岡山新技術望遠鏡開発グループ 『岡山 3.8m 新技術望遠鏡の開発 X：超精密研削加工による主鏡製作』 日本天文学会 2009 年秋季年会(山口大学) V16a

・下農 淳司、岩室 史英、古間木 翔太、森谷 友由希、長田 哲也(京都大学)、舞原 俊憲、所 仁志(ナノオプトニクス研究所)、中島 悠(中島分光)、木野 勝、栗田 光樹夫(名古屋大学)、岡山 3.8m 新技術望遠鏡開発グループ 『岡山 3.8m 新技術望遠鏡の開発 XI:主鏡研削のための鏡材保持機構』 日本天文学会 2009 年秋季年会(山口大学) V17b

・森谷友由希、岩室史英(京都大学)、他京大岡山 3.8m 新技術望遠鏡計画 WG 『京大岡山 3.8m 新技術望遠鏡の開発 XII：主鏡位置制御機構の駆動試験』 日本天文学会 2009 年秋季年会(山口大学) V18b

《シンポジウム》

・岡山新天文台計画シンポジウム 2000 年 8 月 30 日～31 日 良寛荘(岡山県倉敷市)

《岡山ユーザーズミーティング》

2001 年度岡山ユーザーズミーティング(第 12 回光赤外ユーザーズミーティング) 新望遠鏡計画セッション

- ・大谷 浩(京都大学) 『岡山 3m 新技術光学赤外線望遠鏡計画』
- ・舞原 俊憲(京都大学) 『岡山 3m 望遠鏡計画(望遠鏡ドーム/観測装置の案)』
- ・岩田 生(京都大学) 『サイト調査について』
- ・太田 耕司(京都大学) 『岡山新天文台の運用のイメージ』
- ・野上 大作(京都大学) 『3m 望遠鏡で行うサイエンス 恒星の活動現象』
- ・大杉 節(広島大学) 『3m 望遠鏡で行うサイエンス GLAST Gamma-ray Large Area Space Telescope』

・太田 耕司(京都大学) 『3m 望遠鏡で行うサイエンス GRB を用いて探る $z=10-20$ の宇宙』

他多数のサイエンス講演

2002 年度岡山ユーザーズミーティング(第 13 回光赤外ユーザーズミーティング) OAO の長期計画セッション

- ・大谷 浩(京都大学) 『岡山新天文台計画 進捗状況』
- ・吉田 道利(OAO) 『新望遠鏡デザイン(含ドーム/設置場所)』
- ・渡邊 悦二(OAO) 『岡山既存望遠鏡の基礎強度調査結果報告』
- ・岩室 史英(京都大学) 『アリゾナ周辺の新望遠鏡について』
- ・舞原 俊憲(京都大学) 『どう実現するか—大型科研費による構想—』
- ・小矢 野久(OAO) 『サイト調査 CT2 タワー建設』
- ・和田 晋平(京都大学) 『サイト調査 CT2 実測』
- ・安東 正隆(京都大学) 『サイト調査 DIMM 観測』

2003 年度岡山ユーザーズミーティング(第 14 回光赤外ユーザーズミーティング) 岡山の長期計画セッション

- ・舞原 俊憲(京都大学) 『岡山 3.5m 望遠鏡画』
- ・岩室 史英(京都大学) 『望遠鏡デザインや施策の現状』
- ・野上 大作(京都大学) 『可視・赤外多色高速測光装置開発の提案』
- ・和田 晋平(京都大学) 『サイト調査報告 (CT²)』
- ・岩田 生(京都大学) 『ドーム候補地とサイト調査報告(DIMM)』
- ・沖田 喜一(OAO) 『遺跡調査報告』
- ・太田 耕司(京都大学) 『岡山新天文台運用のイメージ』

- ・木村 仁彦(京都大学) 『岡山 3.5m 新技術光赤外線望遠鏡計画』 ポスター発表

2004 年度岡山ユーザーズミーティング(第 15 回光赤外ユーザーズミーティング) 京
大岡山新天文台計画 進捗状況セッション

- ・長田 哲也(京都大学) 『計画の進捗状況及び変更点』
- ・岩室 史英(京都大学) 『望遠鏡デザイン』
- ・千田 崇文(京都大学) 『分割鏡支持アクチュエータの制御試験状況』
- ・服部 堯(OAO) 『ドーム候補地とサイト調査』

2005 年度岡山ユーザーズミーティング(第 16 回光赤外ユーザーズミーティング) 岡
山の長期計画(京大岡山新天文台計画)セッション

- ・海部 宣男(国立天文台) 『計画の進捗状況』
- ・長田 哲也(京都大学) 『開発実験などの進捗状況』
- ・嶺重 慎(京都大学) 『高速測光観測によって拓く相対論的天体の物理』
- ・植村 誠(広島大学) 『海外の高速測光事情-VLT で活躍する ULTRACAM-』
- ・長田 哲也(京都大学) 『超高分散分光でさぐる近赤外吸収線』
- ・小林 尚人(東海大学) 『サイエンスに関するコメント』
- ・本原 顕太郎(東京大学) 『岡山 3m への期待とコメント』

2006 年度岡山ユーザーズミーティング(第 17 回光赤外ユーザーズミーティング) 岡
山の長期計画(京大岡山新天文台計画)セッション

- ・長田 哲也(京都大学) 『計画全体の進捗状』
- ・岩室 史英(京都大学) 『望遠鏡設計の進捗状況』
- ・栗田 光樹夫(名古屋大学) 『鏡筒トラス構造と研削盤開発の経過報告』
- ・坂井 道成(京都大学) 『岡山新技術望遠鏡実験の進捗状況』
- ・野上 大作(京都大学) 『岡山新技術望遠鏡+高速観測で行うサイエンス』
- ・沖田 喜一(OAO) 『京大 3.8m 新技術望遠鏡の進捗状況(ドーム部分のコメント)』
- ・吉田 道利(OAO) 『岡山天体物理観測所の将来について』

2007 年度岡山ユーザーズミーティング(第 18 回光赤外ユーザーズミーティング) 岡
山の長期計画(京大岡山新天文台計画)セッション

- ・長田 哲也(京都大学) 『計画全体の進捗状』
- ・栗田 光樹夫(名古屋大学) 『望遠鏡設計の進捗状況』
- ・森谷 友由希(京都大学) 『京大岡山新天文台計画～副鏡軽量化～』
- ・宮前 克之(京都大学) 『岡山 3.8m 新技術望遠鏡計画位相測定カメラ』
- ・岩室 史英(京都大学) 『京大岡山 3.8m 新技術望遠鏡 望遠鏡設計の進捗状況(つづき)』

- ・下農 淳司(京都大学) 『京大岡山新天文台計画－鏡材支持システム－』
- ・野上 大作(京都大学) 『京大岡山新天文台計画：サイエンスの検討状況』
- ・太田 耕司(京都大学) 『望遠鏡の運用方針』

2008 年度岡山ユーザーズミーティング(第 19 回光赤外ユーザーズミーティング) 京大岡山新天文台計画セッション

- ・長田 哲也(京都大学) 『全体の進捗状況』
- ・古間木 翔太(京都大学) 『岡山 3.8m 新技術望遠鏡計画における鏡面研削加工の進捗状況』
- ・下農 淳司(京都大学) 『もぐらたたき進捗状況』
- ・森谷 友由希(京都大学) 『副鏡とセンサー』
- ・栗田 光樹夫(名古屋大学) 『架台と CGH について』
- ・尾崎 忍夫(OAO) 『観測装置のレビューと募集』
- ・野上 大作(京都大学) 『岡山新望遠鏡で行うサイエンスの検討状況』

2009 年度岡山ユーザーズミーティング 長期計画(京大岡山新天文台計画)セッション

- ・岩室史英(京都大学) 『京大岡山新技術望遠鏡進捗状況』
- ・古間木翔太(京都大学) 『岡山新技術望遠鏡計画における研削加工の進捗状況』
- ・森谷友由希(京都大学) 『主鏡位置制御機構の試験進捗状況』
- ・下農淳司(京都大学) 『もぐらの現状』
- ・太田耕司(京都大学) 『大学間連携について』
- ・吉田道利(国立天文台) 『京大岡山観測所のイメージ』

《その他》

- ・京大天文台将来計画ワークショップ 2001 年 6 月 9 日 飛騨天文台
- ・岩室 史英(京都大学) 『京大の試み』 2003 年度光赤外将来計画シンポジウム 光赤外将来計画検討会中間報告会
- ・栗田光樹夫(名古屋大学) 『名大の試み』 2003 年度光赤外将来計画シンポジウム 光赤外将来計画検討会中間報告会
- ・岩室 史英(京都大学) 『大学基盤強化(1) 岡山新天文台グループ』 2003 年度光学赤外線天文学連絡会シンポジウム
- ・栗田光樹夫(名古屋大学) 『大学基盤強化(3) Z 研グループ』 2003 年度光学赤外線天文学連絡会シンポジウム
- ・太田 耕司(京都大学) 『岡山新天文台計画のレビュー』 2004 年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム
- ・長田 哲也(京都大学) 『京大岡山 3m 望遠鏡計画と研削による主鏡製作・分割鏡の

制御』 2005 年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム

・岩室 史英(京都大学) 『京大岡山新技術望遠鏡：進捗状況』 2008 年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム

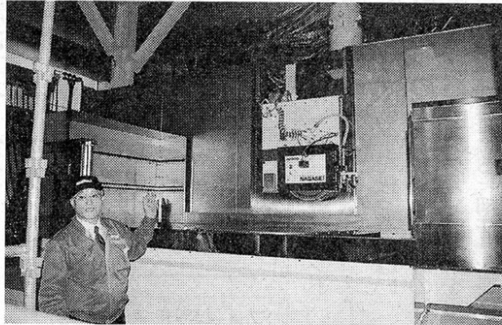
・沖田 喜一(OAO) 『京大 3.8m 新技術望遠鏡の進捗状況』 第 26 回天文学に関する技術シンポジウム 2006

・沖田 喜一(OAO) 『3.8m 新技術望遠鏡の副鏡、第 3 鏡サポート機構の設計』 第 28 回天文学に関する技術シンポジウム 2008

《論文》

・和田晋平、舞原俊憲、平田龍幸、太田耕司、岩室史英、岩田生、木村仁彦、衛藤茂、安東正隆、下農淳司、小矢野久、吉田道利、沖田喜一、岡田隆史、泉浦秀行、清水康広、稲田素子、柳沢顕史、長山省吾、服部堯、田村直之、三上良孝『国立天文台岡山天体物理観測所(OAO)サイト調査：接地境界層の評価』 国立天文台報 vol. 7, p.29-p.39 (2004)

ナガセインテグレックスが製作した、ナノテクノロジーで望遠鏡の鏡を研削する工作機械＝関市武芸川町跡部、同社工場



赤外線望遠鏡の鏡を研削加工

京都大などが進める光学赤外線望遠鏡プロジェクトに参加している精密加工メーカー、ナガセインテグレックス（本社関市武芸川町跡部、長瀬幸泰社長）が、同社工場内に同望遠鏡の鏡を製作する工作機械を完成させ、二十六日公開した。

同望遠鏡は、京都大、名古屋大の両大学院、岡山大学の国立天文台岡山天体物理観測所、光学機器ベンチャーのナノオプトニクス研究所（京都市）が共同で開発を進めている。鏡は直径三・八センチ、厚さ最大で、扇形鏡十八枚を組み合わせて作る。同望遠鏡は、約二〇一一年の使用開始を目指す。同社は、同研究所などの依頼を受け、約二年かけて工作機械を製作。同機械は、高さ約六・二メートル、幅約一〇・一メートル、奥行き約六・一メートルで、下部のテーブルに材料となるガラスを載せて研削加工し、上部の測定機の数値を受けて補正する仕組み。十億分の一単位で研削加工するナノテクノロジー（超微細加工技術）を用い、鏡一枚につき一年以上かかっていた製作期間を数週間程度に短縮し、費用の抑制にも成功した。

工作機械が完成、公開

ナガセインテグレックス

同望遠鏡は、約二〇一一年の使用開始を目指す。同社は、同研究所などの依頼を受け、約二年かけて工作機械を製作。同機械は、高さ約六・二メートル、幅約一〇・一メートル、奥行き約六・一メートルで、下部のテーブルに材料となるガラスを載せて研削加工し、上部の測定機の数値を受けて補正する仕組み。十億分の一単位で研削加工するナノテクノロジー（超微細加工技術）を用い、鏡一枚につき一年以上かかっていた製作期間を数週間程度に短縮し、費用の抑制にも成功した。

同機械は、同研究所が約四億円で買い取り、間もなく鏡の製作に入る。ナガセインテグレックスの山口政男専務は「いかに早く傷のない鏡を作れるかを追求した。研削加工精度の高さは世界でも類がない」と話している。

大型天体望遠鏡用

回転砥石でガラスを曲面に削って鏡の分割部品を作る



鏡の部品製造装置が完成

ナノオプトニクス研 披露

光学機器製造ベンチャーのナノオプトニクス研究所（京都市、藤原洋社長）は、大型天体望遠鏡の心臓部である鏡の製造装置を完成させた。鏡の分割部品「セグメント」を作る装置で、高さ十五センチ。新装置は十五日、同社工場（岐阜県関市）で関係者に披露する。

今後、京都大学や名古屋大学、国立天文台と共同で、二〇一二年に岡山県に設置する国内最大の赤外線望遠鏡向けに製造を開始する。新装置は精密に位置制御できる回転砥石を持つ。縦・横約一センチ、厚さ六ミリほどのガラス板の表面を誤差数十ナノ（ナは十億分の一）の切削装置を円内に作る。

国立天文台の岡山天体物理観測所（岡山県浅口市）に設置予定の望遠鏡には、セグメントを十八個つなぎ合わせた直径三・八メートルの鏡を使う。米国ではカリフォルニア工科大学などが直径三十メートルの望遠鏡を建設する計画がある。藤原社長は、この望遠鏡の開発でも協力依頼を受けた。五百一六個のセグメントが必要になるといふ。受注すれば、七、八台の切削装置を円内に作る。

（日経産業新聞 2007年12月14日）



新選 三っ星

飛騨美濃の逸品 ⑩

- 国際性……☆☆☆
- 将来性……☆☆☆
- ロマン……☆☆☆

ナガセ社の望遠鏡

130億光年先の宇宙を見通す目が生まれようとしている。

岡山県の山中に3年後に完成するアジア最大の反射望遠鏡。岡市武芸川町跡部の工作機械会社「ナガセインテグレックス」は、その主鏡を作る専用の研削機の製造を受注した。昨年10月に完成し、社内で主鏡のテスト加工を繰り返している。

研削機作りを支えたのは、世界最高と言われる10億分の1級（1ナメートル）単位の超精密加工技術だ。1ナメートルは髪の毛の太さの約10万分の1。「富士山の高さと

同じ直線を削っても、誤差は1円玉の半分にも満たない」と山口政男専務は胸を張る。

巨大な主鏡は磨いていたら追いつかない。同社は削ることで受注に成功。これまで1枚の鏡を磨くのに1年以上、1億円以上かかっていた時間とコストが半分に抑えられるという。

☆☆☆

ナガセの本社に入るとすべ、「限りなき0への挑戦」と壁に書いた大きな文字が目に入る。

同社は1950年に創業。かつてはごく普通の

宇宙見通す「究極のゼロ」



1ナメートル単位の加工が可能な研削機。下の台が回転し、上の砥石（といし）が動きながら望遠鏡の分割鏡を削る＝岡市武芸川町跡部のナガセインテグレックス社工場

誤差との戦い 超精密加工

工作機械会社だった。しかし好景気に陰りが見え始めた80年、長瀬幸泰社長は「浮き沈みの激しい業界で生き残るには、世界一のものを作らなければ」と超精密加工の研究に賭み出した。

工作機械が作る部品や製品には、どうしても誤差が生じる。そこをあえて、測定できる誤差をすべてゼロにする「究極のゼロ」を目指した。そんな姿勢は業界内で異端視され「過剰品質だ」と批判を受けたこともある。

コンピューター制御の全自動で機械の振動を抑える装置など、世界初の技術が次々と開発。90年

代には業界初の超精密加工機の販売を始めた。テレビや携帯電話の液晶に使われるフィルムレンズの金型加工機など、世界最高水準の工作機械を作るまでになった。

「30財望遠鏡は、地球上から宇宙を見る手段としては究極形。これができれば、宇宙誕生の謎の解明や生命の痕跡の研究も前進する」。京大大学院宇宙物理学教室の長田哲也教授も期待する。

「夢と夢の共振です」と長瀬社長。宇宙の謎に迫る研究者に出会った「究極のゼロ」。二つの夢に誤差はない。

（畑野直行）

米園とカナダなどが進

☆☆☆

この望遠鏡のもう一つの特徴は、日本の大型望遠鏡では初めて、従来の1枚鏡ではなく扇形の凹面鏡18枚を組み合わせる分割鏡方式だ。分割鏡技術は今後、より遠い宇宙を見通す大きな望遠鏡を作るために欠かせない。

アジア最大の反射望遠鏡 岡山県浅口市の国立天文台岡山天体物理観測所に11年に完成予定。主鏡の直径は3.8財でアジア最大となる。建設費約10億円を民間のナノオプトニクス研究所（京都市）が負担することで実現。研究には京都大を中心に、名古屋大や国立天文台などが参加する。

ナガセインテグレックス、超精密加工が可能な工作機械メーカー。国立天文台ハイパステック研究所の超精密加工センターに所属する長瀬社長は、手掛けた実績もある。昨年8月には1ナメートルの運動精度で研削加工のみでレンズや鏡を仕上げる技術と研削機を評価され、政府主催の「第2回ものづくり日本大賞」で内閣総理大臣賞を受賞した。

起業家と天文学とは、とても密接な関係にあるらしい。鉄鋼王カーネギーはウィルソン山天文台に、ロックフェラー財団はパロマー天文台に資金援助して巨大な望遠鏡を作り、天文学の進歩に貢献した。こうして得られた近代の科学的宇宙観に基づいて、産業革命や民主主義は進展した——というのが、IT関連のシステム構築やコンサルを手がけるインターネット総合研究所（IRI）藤原洋代表取締役所長の持論だ。

そして、そう唱える藤原氏の設立したナノオプトニクス研究所が、10億円近くを資金援助して、反射鏡の直径が3・8mという巨大な光学赤外線望遠鏡を作ろうとしている。

岡山県にナノオプトニクス研究所ほか3者が共同で建設するこの望遠鏡。完成すれば国内はもちろん、アジアでも最大となるが、巨大な反射鏡を製造するのは簡単ではない。

今回の場合、1枚鏡ではなく18枚に分割して製造する。従来は、分割した鏡を研磨剤で磨いて作っていた。だが磨く手法では、一説によると「1枚1年1億円」というくらい、コストと時間がかかるそう。そこで今回は世界で初めて、鏡を砥石で削って作る。

岐阜県関市のナガセインテグレッタスは、年商54億円、社員数約120名の中堅工作機械メーカーだが、ナノメートル（100万分の1ミリ）精度で削るという、世界でも希な超精密加工技術を持つ。その技術を活かして、同社は鏡を削る加工機を開発。磨く手法に比べて時間で10分の1、コストも半分以上で鏡を作れるという。

3・8m望遠鏡はこの加工機で反射鏡を削り、2011年の完成を目指す。そして、鏡を削る技術の用途はさらに広がる。あの「ムーアの法則」で知られるインテル創業者ゴードン・ムーア氏の財団が2億ドルを出資したTMT計画など、現在、世界中に直径30m級望遠鏡の建設計画がある。反射鏡が30mにもなると、分割すれば数百枚になり、磨く手法では何年かかるかわからないため、削る技術は非常に有望だとか。望遠鏡だけでなく太陽光発電施設の反射鏡なども応用範囲という。

岐阜発の技術で削った鏡は、どんな未来を映すのか。

独自技術で岐阜から世界へ 超精密加工技術で 目指すは“ムーアの鏡”

文＝中西祥智（編集部） 写真＝曾根田 元
Text : Nakanishi Yoshitomo Photo : Soneda Gen



IRI所長藤原 洋氏（左）に、大学で同窓だった京都大学大学院理学研究科附属天文台長の柴田一成教授（右）が30年ぶりに連絡したのが、今回の発端だったとか。



ナガセインテグレッタスが開発した、レンズ加工機「N-C-1300」。専用の建屋いっばいに鎮座する巨大な工作機械だが、10ナノメートル単位で繊細に動く。

※1 京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室・附属天文台、名古屋大学大学院理学研究科光赤外線天文学研究室、国立天文台岡山天体物理観測所の3者。
※2 Thirty Meter Telescope Projectの略で、そのものスバリ30m望遠鏡計画だ。カリフォルニア州パロマー天文台などが中心となり、2016年にハワイもしくはチリに望遠鏡を建設する。

C 日本学術会議 資料等

日本学術会議 天文学研究連絡委員会 特別議事録

2005年5月18日
天文学研究連絡委員会委員長 池内 了

「大学における光赤外線観測天文学の推進について」

(はじめに)

第19期日本学術会議天文学研究連絡委員会は、東京大学と京都大学が相互の協力および国立天文台との連携のもとで立案・推進中の Tokyo Atacama Observatory 計画 (以下、TAO 計画)、及び次世代大型望遠鏡を展望した新技術実験望遠鏡計画を核とする光赤外線望遠鏡建設計画に関し、その意義と緊急性を審議した。その結果、わが国の天文学研究と科学教育におけるこの計画の重要性に鑑み、わが国の全天文学を代表する本委員会の総意として、下記の特別議事録を残すことを決定した。

記

(すばる望遠鏡と大学望遠鏡)

国立天文台がハワイに設置したすばる望遠鏡の優れた性能と観測成果は、現在世界的に高く評価されており、わが国のみならず国際的な天文学の推進に大きな役割を果たしつつある。大学共同利用機関である国立天文台は、わが国の大学研究者等に世界的に最先端の観測性能を有するすばる望遠鏡を共同利用装置として提供することで、わが国の天文学の推進に大きな寄与を果たしている。しかしその一方で、わが国の大学における天文学の観測施設や研究設備の強化は十分ではなく、特に人材育成の観点からもそれぞれの大学の特徴を生かした基盤的設備の充実が望まれる。欧米では、それぞれの国で複数の大学が優れた望遠鏡を有し、国立施設の大望遠鏡と競い、あるいは連携を図りつつ優れた教育や先進的開発研究を進めており、それらとの落差は大きい。

(大学望遠鏡の重要性)

わが国における光学赤外線天文学の総合的な発展のためには、大学共同利用機関である国立天文台による中枢的大型望遠鏡の建設に加え、大学における特色ある望遠鏡・観測施設の充実による研究基盤の強化という、2本の柱が必要である。大学における適切な望遠鏡・観測施設が存在は、新たな可能性を開く萌芽的研究、特色ある観測装置の開発、大学院学生の教育、すばる望遠鏡による優れた観測計画の創出にも、不可欠だからである。

自然を探究する科学の推進には、最先端を開拓する高いピークと、それを支えつつ新たな方向や若い人材を育てる広い裾野の両方が不可欠であることは、先に述べた欧米の例を見るまでもないであろう。大学が大学院教育や特色ある独自研究を進めるために固有の望遠鏡を持つことの重要性については、すでに1994年の日本学術会議天文学研究連絡委員会報告『21世紀の天文学長期計画』において深く検討され、強調されてきた。また2000年文部省学術審議会特定研究領域推進分科会宇宙科学部会報告『我が国における天文学研究の推進について』においても、同趣旨の勧告がなされている。

(大学望遠鏡の近年の状況)

近年、各大学においては、天文学および関連分野の研究者が科学研究費補助金などの競争的資金や国際協力により、小型の特色ある望遠鏡による研究を進めるなど、状況を少しずつ改善する具体的努力が積み重ねられてきた。その例としては、東京大学のハレアカラ 2m望遠鏡による活動銀河核の可視赤外線長期モニター観測、名古屋大学の南アフリカ 1.4m望遠鏡による大小マゼラン星雲・銀河中心部および星生成領域の赤外線探査がある。これらは競争的資金や自助努力の範囲で実現し、大学の基盤の強化に貢献してきた。しかし、さらに、国際的な天文学分野の最前線で活躍するすばる望遠鏡や、近い将来に完成する ALMA との連携のもとで、天文学の新しいフロンティアを拓き、かつその先頭に立つことを可能にする大学発信の本格的な望遠鏡計画の実現が是非とも必要である。

このような方向を目指す具体的な大学独自の計画として、地上の観測条件としては究極的な条件を有する南米チリのアタカマ高地に望遠鏡を設置する TAO 計画が東京大学を中心として進められている。また、将来を見据えた新たな技術の展望を開くために、国内（岡山）設置の新しい概念の実験望遠鏡による研究開発の計画が京都大学を中心に進められている。これらの計画は当初はそれぞれの独自計画の推進が行われてきたが、全国の大学間の連携による共同研究的な枠組みをベースにした全体計画としてまとまりを持つようになってきた。

（東京大学と京都大学の望遠鏡計画の概要とその評価）

TAO 計画は、国立天文台が推進中の ALMA 計画のサイトに近いチリの標高 5600m の山頂に、赤外線観測に最適化した 6.5m 望遠鏡を設置するものである。望遠鏡サイトとして世界最高の標高という好条件を利用して、高赤方偏移の天体を観測し、すばる望遠鏡や ALMA と連携して、宇宙初期の歴史の解明を目指す。

この望遠鏡計画は、大学独自の斬新な研究計画を目指すと同時に、すばる望遠鏡と密接に連携してそれぞれ特色ある探査的プロジェクトを強力に進めることを基本とし、すばる望遠鏡との相補性や、探査結果をもとにすばる望遠鏡を用いてより高度な観測成果を目指しているところも、優れた点である。さらに、大学間の連携を重視し、強力な教育拠点とすることで、次世代を担う人材の育成、および新たな可能性を開く機器の開発研究や萌芽的研究、技術力の育成等、大学の教育研究基盤の強化の要請に応えるものとして位置付けられている。

さらに、京都大学を中心として、技術的な側面の研究開発に重点をおいた 3m 望遠鏡を国立天文台岡山天体物理観測所のサイトに設置する。ここでは、次世代超大型望遠鏡への技術開発研究や機動性を生かした観測課題を追求する。とりわけ、研削による鏡面製作や分割鏡の新方式制御を目指し、国内産業とも密接なかかわりを持つ実験望遠鏡として、大学での教育や人材育成に貢献する。

（東京大学と京都大学の協力及び国立天文台と他大学との連携）

TAO 計画は、サイト調査、望遠鏡設計と技術開発、観測装置の共同製作など、東京大学と京都大学との協力に基づいて進められている。一方、京都大学が中心となって国立天文台岡山天体物理観測所・名古屋大学の関連研究室との連携で進めている 3m 望遠鏡は、すばる望遠鏡・TAO 望遠鏡から次世代超大型望遠鏡構想へと繋いでいくものとして大変重要な役割を担う。

地上の大型観測装置計画としては、先にふれた文部省学術審議会の報告にあるとおり、大学共同利用機関における共同利用装置として、アルマ計画の推進及び達成が最重要課題とされている所でありその認識はかわるものではないが、これらの拠点大学の観測装置の充実は、人材養成の立場からも日本の天文学の発展を支える基盤となるものである。従って、これらの望遠鏡計画は、国立天文台との密接な協力のもとで進められるべきものであるとともに、大学独自の計画を実現する新しい枠組みのもとでの道筋をつくることも必要である。例えば、大学が中心となって企画立案する大型・中型計画の評価とその実施、また大学間の新しいタイプの共同研究・連携研究の実施などが進められるようなシステムが望まれる。

全国の関連大学との協力体制も光学赤外線天文学連絡会など広い研究者コミュニティを中心に組織しつつあり、法人化後の大学のあり方に新たな方向性を打ち出すものとしても評価される。

（結論）

東京大学と京都大学の密接な協力の基に進められている望遠鏡計画は、わが国に切望されてきた大学の観測的基盤と天文学教育の強化を実現するものであると同時に、大学間の新たな協力などを実現するものであると考えられる。これらの実現はすばる望遠鏡などの活躍で広がりつつある宇宙と自然への興味をさらに拡大し、日本全体の大学の教育と研究上の特色を最大限に活かしてゆく道であろう。

以上の視点から、日本学術会議天文学研究連絡委員会はわが国の天文学コミュニティの総意を代表して、光赤外線天文学の領域において大学が最優先で推進すべき TAO 計画及び新技術実験望遠鏡計画を核とした東京大学と京都大学の計画が早期に実現することを強く望むものである。

2005年1月21日

光学赤外線天文学連絡会 運営委員会声明

光学赤外線天文学連絡会 運営委員会

<声明主文>

わが国の光赤外線天文学研究分野が、国内外の天文学研究の進歩・発展に対して将来にわたって一層の貢献をするために、東京大学及び京都大学双方の新望遠鏡建設を核とする計画の推進が必要である。すばる望遠鏡の成果を継承・発展させるためには本計画のすみやかな実現が強く望まれるものであり、当該大学はもとより、文部科学省、並びに関連研究者の一層の努力を要請する。

<日本の光赤外地観測天文学の現状>

すばる望遠鏡から生み出される最新の研究成果は、わが国の光赤外線天文学が世界の一流に並び、あるいは世界をリードしていることを証明している。この望遠鏡は、日本の光学赤外線天文学研究者らの長年にわたる強い要請に応じて建設されたものであり、2000年度から始まった本格的観測によって先端的な研究成果が次々と生み出されている。われわれ光学赤外線天文学研究者にとって、8.2mの口径を持つすばる望遠鏡を用いて世界に誇れる科学的成果を達成することが、大きな喜びであると同時に重要な責務でもある。

一方、口径6mを越える大型望遠鏡がすでに全世界で13台稼働し、3台が建設中である。この事実は少数の大型望遠鏡だけでは学問的要請に十分応えられないことを如実に表している。わが国がすばる望遠鏡以外に口径2mを越える望遠鏡を持たないことは、すばる望遠鏡の成功に喜んでばかりはいられない基盤の弱さを示すものである。

他方で、すばる望遠鏡計画において、建設開始の数年以上前から、その成功の鍵となる新技術開発が進められていたことを忘れてはならない。次世代の大望遠鏡の成功の鍵は、建設開始以前の周到な技術開発と、次世代の研究を担う若手研究者の養成である。

<基幹大学望遠鏡の必要性>

国家的大計画を遂行する国立天文台などの大学共同利用機関と、これを支える各大学とは相補的な役割を担う。

国立天文台のすばる望遠鏡が大活躍する時代にあつては、一方において大学における観測天文学の教育研究の基盤の強化がきわめて重要である。大学は先端的なサイエンスの研究および独創的な新技術開発の核となること、また、それらを担う人材の育成を行うことが求められている。このことは既に1994年の天文学研究連絡委員会の報告書『21世紀に向けた天文学長期計画について』および、2000年12月の(旧)文部省学術審議会総会報告『我が国における天文学研究の推進について(報告)』の中で強調されている。

つまり、次代を担える若手研究者の養成、変化の激しい最先端研究への臨機応変の対応、将来の大望遠鏡のための基礎技術開発などは、各大学が担うべき使命である。これらが揃うことで当該分野の学術研究が総合的に発展できるのであって、大望遠鏡一つあれば済むというものではない。

<提案されている大学望遠鏡計画>

東京大学、京都大学がそれぞれ提案中の二つの望遠鏡計画は、上記のような理念の下で一体の計画としてとらえるべきものである。両望遠鏡はすばる望遠鏡や ALMA との比較では小規模の計画であり、国立天文台よりはむしろ、実力と体制を備えた基幹大学が担うべきものである。

東京大学の 6.5m 望遠鏡はその中核であり、天文学の最前線を切り拓こうとする野心的な計画である。未開拓であった波長帯や対象を開拓していく萌芽的研究や、大規模なサーベイ観測を行って人類の知的財産の一角を担う重要な成果を出すことをめざしている。超新星やクェーサーの大規模な近赤外分光サーベイによるダークエネルギーの詳細研究や、原始惑星系円盤の中間赤外線詳細撮像などはきわめて重要な成果をもたらすと期待される。建設予定サイトはチリ・アタカマの高度 5600m の場所であり、赤外線観測にとって地上最高のサイトの一つであるとともに、ALMA との連携観測が容易である。また高い空間分解能と赤外線観測性能を両立させるため、能動光学副鏡を装備するなどの工夫を行う。東京大学が望遠鏡本体の建設を行い、京都大学は観測装置の開発とサイト調査を分担する。さらに日本全国の研究者との共同研究を行うことで、様々な新しいアイデアを生かしながら活発な観測研究を行う計画である。

京都大学が提案する国内 3m 級望遠鏡はさらにその次の時代の発展を図るものである。このためには観測研究とともに技術開発研究が欠かせないが、上記 6.5m 望遠鏡やすばるなどの大型望遠鏡は新技術開発に最適とはいえない。従って京都大学は世界最先端のユニークな技術開発を進めるために 3m 級望遠鏡を国内に設置する計画を提案する。目標は、研削による鏡面製作と分割鏡制御という革新的技術開発研究であり、国内産業との連携を強化しながら、将来の超大型望遠鏡や宇宙望遠鏡のための基礎開発となるであろう。また 6.5m 望遠鏡等に装着する観測装置の開発という役割も重要である。また国内に設置される大学望遠鏡という利点を生かした、機動性のある研究課題の展開、たとえばコンパクト天体の物理の解明、星間物質研究の新局面の開拓等でユニークな研究成果が期待される。京都大学を中心に、国立天文台岡山天体物理観測所、名古屋大学の関連研究グループが共同で望遠鏡建設を推進する。

<国立天文台、将来の大型計画との関係>

この基本計画の推進は、次世代のより高度な超大型国際望遠鏡の建設とそれによって展開されるサイエンスの基礎となり、日本の光学赤外線天文学の基盤を強化し、国立天文台を中心とした大きな計画に発展していくことが期待され、わが国の天文学研究の発展のためにきわめて重要なステップである。

民間からの資金援助により、国内最大の 3.8m 新技術天体望遠鏡の建設を開始することが正式に決まり、8月1日に関係者の間で覚書締結式が行なわれることになった。資金援助する民間会社はナノオプトニクス研究所（藤原洋 代表取締役）。

望遠鏡は、

- 京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室・附属天文台
- 名古屋大学大学院 理学研究科 光赤外線天文学研究室
- 国立天文台 岡山天体物理観測所
- ナノオプトニクス研究所

の連携研究により、5年計画で建設される予定。

望遠鏡は国内初の分割鏡方式で建設される。また、日本が誇る超精密研削によって主鏡を製作するという技術を世界で初めて採用し、さらにきわめて軽量の架台を使うなど、将来の超巨大 30m 級望遠鏡建設のために必要な基礎技術を実験開発するのが特色。

主な開発事項として

- 1) 超精密研削による主鏡の製作
- 2) 18枚からなる分割鏡の制御
- 3) 軽量架台

があげられる。

大口径望遠鏡によってかすかな天体が観測され、星・惑星の誕生の現場や宇宙誕生直後の銀河の姿が明らかになりつつある。ケック 10m 望遠鏡がハワイに 2 台、ヨーロッパの VLT8m 望遠鏡がチリに 4 台、ジュミニ 8m 望遠鏡が南北半球に 2 台、われらがすばる 8m 望遠鏡がハワイに 1 台と、いまや 8-10m 級の望遠鏡が世界中で活躍している。そこで「次世代」の望遠鏡として、米国を中心に 30m 望遠鏡(Thirty Meter Telescope, TMT)計画、ヨーロッパで 100m 望遠鏡(Overwhelmingly Large, OWL)などの計画が検討されている。なかでも、7億ドル(約 800 億円)をかけると言われる TMT では今年度にデザインや建設費のレビューを次々に行ない、数年以内に建設に着手して早ければ 2015 年には最初の天文学的成果を出したいとしている。

次世代の超巨大望遠鏡では、ほとんどの計画で、数百枚以上の分割鏡を用いることになっている。問題になるのがその鏡を製作するスピードで、従来の研磨方式で軸外しの非球面鏡を 1 枚製作するには通常 1~2 年かかる。砥粒を流し、力をかけてゴシゴシ磨いて鏡材をこすり取っていくために遅いのである。

そこで、この計画では、砥石で削り取る方法を採用する。日本の誇る超精密技術では 1 ナノメートルの精度で砥石の位置を制御することができる。これは、光の波長(数百ナノメートル)に比べて十分に短く、完璧な鏡面を仕上げることができるはずである。もちろん、砥石が摩耗し、鏡材自体がたわみ、温度変化による膨張が邪魔をするなど、精度を何桁も落とす原因が数多くあ

るので、鏡面の精度を測定しながらの研削がポイントになってくる。光の干渉計の技術を使って削り具合を測定しつつその結果をフィードバックして、数十ナノメートルという超高精度の主鏡を製作する。数週間以内に1枚ずつの鏡を完成することをめざす。

鏡材も、日本で作られる、温度膨張率がほぼゼロのハイテク材料を採用する。

主鏡は18枚からなる(1枚1枚をセグメントと呼んでいる)。それぞれのセグメントを数十ナノメートルの精度で位置合わせ・角度合わせする技術も重要である。高精度のアクチュエータで動かし、それを高精度の位置センサーで読み取ってフィードバックする、しかもそれを長期間にわたって安定して行なうことが要求される。

さらに、そもそも超巨大望遠鏡では軽量の架台構造が要求される。スケールを単に2倍にしただけでは、重さが2の3乗で8倍となるのに対して、それを支える強さは2の2乗で4倍にしか増えないからである。ここでは、トラスで組んだ極めて軽量の架台を採用する。

望遠鏡設置場所は国内で天文観測条件の最も良い国立天文台岡山天体物理観測所の隣接地。

東アジアは、中口径から大口径の望遠鏡の空白地帯となっており、ガンマ線バーストや超新星爆発などの突発天体现象が起こっても直ちには観測態勢がとれないという問題があった。その空白を埋めるために、晴天率が良く、大気が安定してシーイングが良い(大気ゆらぎによる星像の悪化が少なく、1秒角程度—木星の視直径の1/40ほど)瀬戸内地方の、岡山天体物理観測所に望遠鏡を建設する。5年後、2011年のファーストライトをめざす。

京都大学理学研究科附属天文台が中心となって国内の大学連携により共同運用を目指す。世界最高水準の超高速超高分散分光偏光観測により、突発天体や星形成領域の観測で新発見をねらう。

国内最大という口径を生かして、さまざまな観測にチャレンジする。特に、高速(数十ミリ秒)の測光や分光によってブラックホールやガンマ線バーストなどの突発天体の性質にせまる観測や、超高分散観測(波長の5万分の1まで分光する)によって星・惑星形成領域の星間水素分子の分布をさぐる観測を考えている。また、多くの研究者と連携して、すばる望遠鏡とは相補的ないろいろな共同研究や教育を行なっていきたい。

民間からの資金援助でこのような規模の天体望遠鏡が建設されるのは外国では珍しくないが、国内では初めて。

そもそも分割鏡の先達、口径10mのケック望遠鏡がケック財団によるものであることをはじめとして、その前に世界最大を誇ったパロマー山5mヘール望遠鏡(1948年)がカーネギー協会からの援助、さらにその前の世界最大のウィルソン山2.5mフッカー望遠鏡(1917年)がカーネギー協会と資産家フッカーからの援助など、さまざまな例がある。

望遠鏡計画ウェブサイト: <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~nagata/Kyoto3m/index.htm>

D 競争的経費獲得状況

名称：国立天文台 共同開発研究
期間：平成 15 年度
課題：大型ハニカム鏡制御法の開発
経費：255 万円 (H15)
代表：岩室 史英

名称：国立天文台 大学支援経費
期間：平成 15 年度
課題：ハニカムセグメント鏡制御法試験
経費：700 万円 (H15)
代表：岩室 史英

名称：科学研究費補助金（基盤研究（B））
期間：平成 16-18 年度
課題：高速測光システムで探るブラックホール短時間変動の起源
経費：1690 万円 (H16-H18)
代表：嶺重 慎

名称：国立天文台 共同開発研究
期間：平成 16 年度
課題：分割強位置制御試験システムの開発
経費：100 万円 (H16)
代表：岩室 史英

名称：科学研究費補助金（基盤研究（B））
期間：平成 17-18 年度
課題：大型分割鏡制御技術の研究開発
経費：550 万円 (H17-H18)
代表：岩室 史英

名称：京都大学 総長裁量経費
期間：平成 17 年度
課題：京大岡山新望遠鏡 分割主鏡研削技術開発
経費：1200 万円 (H17)
代表：岩室 史英

名称：国立天文台 共同開発研究
期間：平成 17 年度
課題：検索による鏡面加工技術開発
経費：200 万円 (H17)
代表：岩室 史英

名称：国立天文台 共同開発研究
期間：平成 18 年度
課題：京大新技術望遠鏡位相測定カメラの基礎技術開発
経費：297 万円 (H18)
代表：岩室 史英

名称：科学研究費補助金（基盤研究（B））
期間：平成 19-21 年度
課題：高速分光システムでとらえるブラックホール粒子加速の現場
経費：1370 万円 (H19-H21)
代表：嶺重 慎

名称：科学研究費補助金（基盤研究（B））
期間：平成 19-21 年度
課題：分割鏡位相測定システムの開発
経費：960 万円 (H19-H21)
代表：岩室 史英

E 望遠鏡ワーキンググループ名簿

京都大学

岩室史英、太田耕司、柴田一成、長田哲也、仲谷善一、野上大作、嶺重慎、
下農淳司、森谷友由希、古間木翔太、鈴木裕司、河手香織

国立天文台

沖田喜一、小矢野久、柳澤顕史、泉浦秀行、尾崎忍夫、岩田生、坂本彰弘

広島大学

吉田道利

名古屋大学

佐藤修二、栗田光樹夫、木野勝

ナノオプトニクス

藤原洋、舞原俊憲、所仁志、高橋啓介

F 協力者

大谷浩、平田龍幸、服部堯、田村直之、木村仁彦、衛藤茂、和田晋平、安東正隆、
千田崇文、坂井道成、大久保悠、宮前克之、加藤太一、戸谷友則、野村英子
(以上 京都大学)、

渡辺悦二、乗本祐慈、岡田隆史、清水康広、浦口史寛、長山省吾、稲田素子、三上良孝、
磯貝瑞希、神戸英治 (以上 国立天文台)、

吉田憲司、大森博司、薫田匡史 (以上 名古屋大学)、

松本桂 (大阪教育大)、佐藤文衛 (東京工業大学)、大杉節、川端弘治、植村誠 (以上 広
島大学)、土居守 (東京大学)

裏表紙の案



設置場所

- **岡山県浅口市**
国立天文台岡山天体物理観測所構内
- **国内最高レベルの晴天率**
- **国内最高レベルの星像**
- **アクセスの良さ**

世界にデータ発信



京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室
〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 phone: 075-753-3890 / fax: 075-753-3897
<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp>

附属天文台（花山天文台・飛騨天文台）
〒607-8471 京都市山科区花山大峰町 phone: 075-581-1235 / fax: 075-581-9617
<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp>