

修士論文

すばる望遠鏡レーザートモグラフィー
補償光学のための波面センサーユニットの開発

Development of a multi wavefront sensor unit for
laser tomography adaptive optics on the Subaru telescope

東北大学大学院理学研究科
天文学専攻

渡邊 達朗

平成 29 年度

要旨

レーザーガイド星を用いた補償光学は地上大型望遠鏡での光赤外線観測の基盤技術となっており、すばる望遠鏡においても AO188 と呼ばれる装置が 2006 年から運用を開始している。AO188 では 1 つのレーザーガイド星を用いた補償を行っているが、可視光では回折限界には達していない。これは主にレーザーガイド星が有限の距離にあることによる円錐効果が要因である。そこで複数のレーザーガイド星を用いるレーザートモグラフィ補償光学 (Laser Tomography Adaptive Optics : LTAO) の装置を開発し、近赤外線だけでなく補償の難しい可視光域での回折限界を目指す。これにより可視光から近赤外線での高空間分解観測を行うことができ、銀河の形態進化の過程の解明が期待される。LTAO では複数のレーザーガイド星の大気揺らぎを受けた波面を同じ数の波面センサーで測定することが必要である。本研究では波面センサーに光を導くための前置光学系と波面センサー本体から成る、波面センサーユニットの光学的な設計を行った。

目次

要旨	i
第 1 章 すばる望遠鏡での補償光学	1
1.1 補償光学	1
1.1.1 補償光学の原理	1
1.1.2 すばる望遠鏡の補償光学系	4
1.2 レーザートモグラフィ補償光学	7
1.2.1 原理	7
1.2.2 GALACSI/VLT	9
1.3 装置の概要	9
1.3.1 レーザーガイド星生成システム	10
1.3.2 波面センサーユニット	11
1.3.3 AO188 のアップグレード	11
1.3.4 AO188 と波面センサーユニットの連携	12
1.4 高空間分解能観測	13
第 2 章 光学系の仕様決定	17
2.1 レーザーガイド星	17
2.1.1 ナトリウム層	17
2.1.2 視野回転	19
2.1.3 レーザーガイド星の配置間隔	19
2.2 波面センサー	23
2.2.1 可変形鏡との対応	23
2.2.2 分割数	24
2.2.3 読み出し速度	26
2.2.4 ピクセルスケール	26
2.2.5 サブアパーチャーの視野	27

第 3 章	設計にむけて	31
3.1	仕様まとめ	31
3.2	波面センサーユニットの構想	31
3.2.1	ピックオフミラー	32
3.2.2	ビームスプリッター	33
3.3	前置光学系	34
3.3.1	視野回転の補正	35
3.3.2	波面センサーへのピックオフ	37
3.3.3	前置光学系の構成と要求まとめ	40
3.4	波面センサー	40
3.4.1	レーザガイド星の像の移動の補正	41
3.4.2	検出器までの光学系	43
3.5	AO188 で発生する収差	46
第 4 章	設計結果と考察	53
4.1	前置光学系の設計結果 1	53
4.1.1	光学系概要	53
4.1.2	コンフィグレーションの変化と瞳の固定	55
4.1.3	性能評価	58
4.2	前置光学系の設計結果 2	60
4.2.1	各レンズの移動と瞳径の変化	65
4.2.2	再結像時の性能評価	66
4.3	波面センサーの設計結果	74
4.3.1	オフナー光学系	74
4.3.2	マイクロレンズアレイ上の瞳像	75
4.3.3	検出器上での像	77
4.4	制御について	79
第 5 章	結論	83

第 1 章

すばる望遠鏡での補償光学

本章ではまず補償光学 (Adaptive Optics; AO) に関する説明を行い、すばる望遠鏡における現在の補償光学システム AO188 について紹介する。その上で現状のシステムでの問題点にふれ、レーザートモグラフィー補償光学 (Laser Tomography Adaptive Optics; LTAO) の概要を述べる。

1.1 補償光学

星の光は無限遠にある点光源とみなすことができ、星の光が地球に到達する際には平面波となっている。一般的に望遠鏡は平面波を入射させると光が一点に集光される光学系であるため、星の像を点像として得ることができる。しかし、星の光が地球の大気を通して地上に到達するまでに、大気の大気乱流によって平面波が乱され凸凹した波面になってしまう。この光が望遠鏡に入射すると星の像は点ではなく、ぼやけて広がった像となる。補償光学は大気乱流によって乱されてしまった波面をリアルタイムで平面波へと補正し、大気の影響を無くすように開発された技術である。

1.1.1 補償光学の原理

補償光学系の基本構成を図 1.1 に示す。地上大型望遠鏡の従来の AO は以下の 4 つの要素で構成されている。

レーザー光源

大気によって平面波がどのくらい乱されたのかを測定するためには参照光源が必要である。観測したいターゲット天体の近くに参照光源として用いるのに十分明るい星があればそれをガイド星として用いることができ、この場合のガイド星を自然ガイド星 (Natural Guide Star; NGS) と言う。ターゲット天体が点光源かつ明る

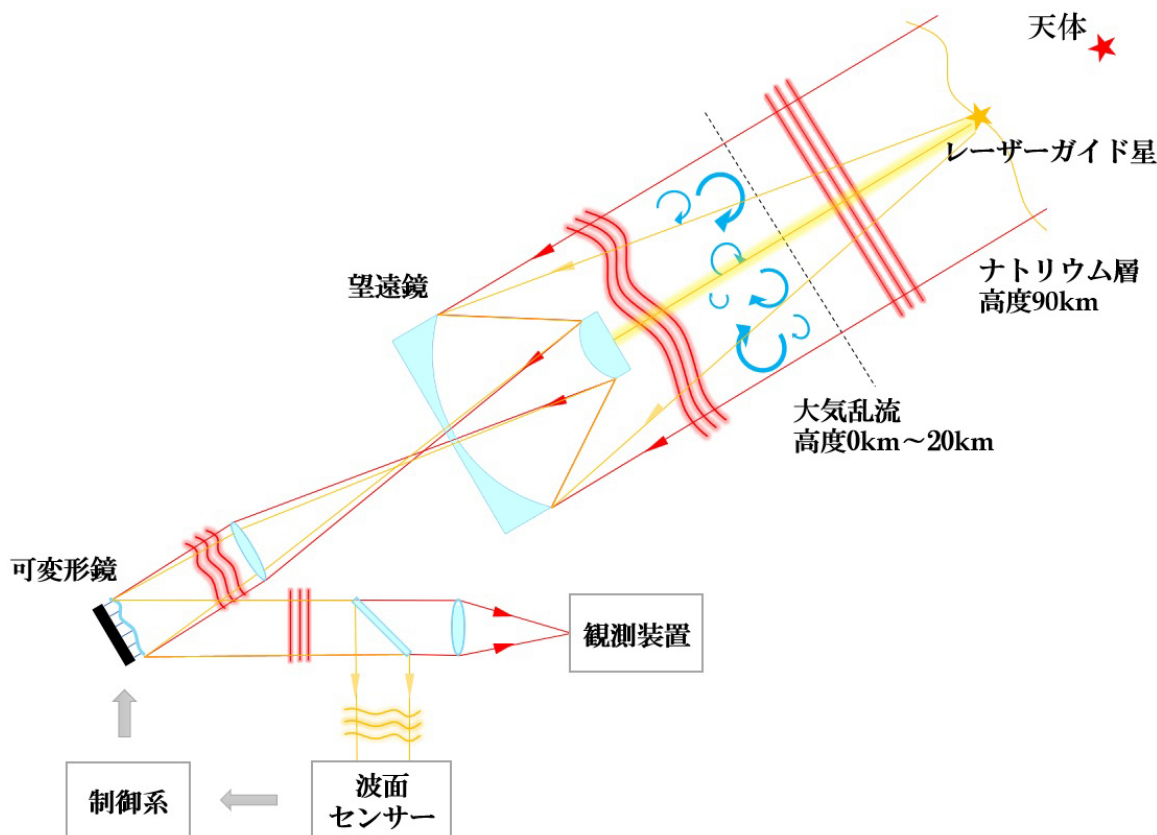


図 1.1 補償光学系の構成

ければ自身をガイド星として用いることもできる。NGS はある程度の明るさが必要であるため観測できる領域が限られてしまう。AO188 のシステムでは R バンドで 16.5 等級より明るくしなければならない。これを解決するためにターゲット天体の近くにレーザーを打ち上げて人工的に星を生成し、それを参照光源として用いることができる。これをレーザーガイド星 (Laser Guide Star; LGS) と言う。LGS は地上 20km 付近の大気の後方散乱光を用いるレイリーガイド星 (Rayleigh guide star) と、地上 90km 付近にあるナトリウム層を発光させるナトリウムガイド星がある [22]。

波面センサー

LGS や NGS の光を用いて、大気によって乱された波面の歪みを測定するのが波面センサー (Wavefront Sensor; WFS) である。波面センサーには Shack-Hartmann 型 (図 1.2) やピラミッド型、曲率波面センサーなどの種類がある。いずれも波面を複数の領域に分割して波面の測定を行う。

Shack-Hartmann 型波面センサーの測定原理を図 1.2 に示す。Shack-Hartmann 型波面センサーはマイクロレンズアレイ (レンズレットアレイとも呼ばれる。) とい

うマイクロレンズが2次元に規則正しく配列された光学素子によって構成される。マイクロレンズアレイに平面波が入射すると、各マイクロレンズの光軸上に点像のスポットが結像する。一方で歪んだ波面が入射すると、各マイクロレンズによって結像したスポットはマイクロレンズに入射してくる波面の傾きに応じて結像位置がずれる。平面波が入射したときの各マイクロレンズがつくるスポット位置を基準位置とすると、基準位置からの変位を測定することで各マイクロレンズに入射してきた波面の傾きを求めることができる。したがって Shack-Hartmann 型波面センサーでは入射波面をマイクロレンズで分割することによって、各マイクロレンズから求められる一次近似された波面のつなぎ合わせとして入射波面の形状を求めることができる。入射波面のサイズに対するマイクロレンズの数を増やせば原理的には歪んだ波面と近似された波面の残差が小さくなり、波面測定精度が向上するが、分割数を上げるほど各マイクロレンズに入る光子数が減るため波面測定に用いるガイド星の明るさや読み出しのタイムスケールによって分割数の上限値が決まる。

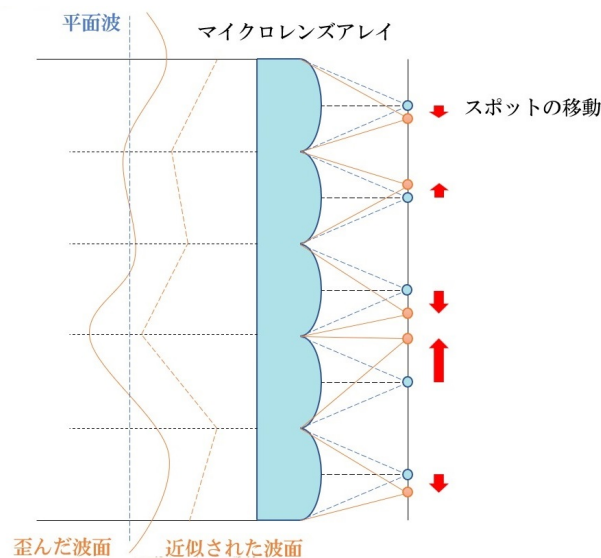


図 1.2 Shack-Hartmann 型の波面センサー。マイクロレンズアレイというマイクロレンズが2次元に配置された光学素子に歪んだ波面が入射すると、平面波が入射したときに各マイクロレンズによって作られる結像スポットからずれた位置にスポットが結像される。このスポットの変位を測定することで入射した波面を測定することができる。

制御系

波面センサーで得られた画像を解析し、波面の補正をするための後述の可変形鏡に返す電圧値を計算する必要がある。これらの解析や演算を行うのが制御系の役割で、リアルタイムシステムとも呼ばれる。

可変形鏡

大気揺らぎによって歪んだ波面を平面波に戻すための鏡で、鏡面の裏側につけられた多数のアクチュエーターが独立に動くことにより鏡の表面形状を変形することができるため、可変形鏡 (Deformable Mirror; DM) と呼ばれる。可変形鏡は鏡が分割され各鏡の裏にアクチュエーターがついているタイプと単一鏡の連続膜タイプがあり、鏡を変形させるメカニズムにも種類がある。いずれにしても各アクチュエーターに与える電圧値によって鏡面形状を変形させる。

大気乱流は数百 Hz～数 kHz のタイムスケールで変動するため、波面測定や制御系による演算、DM による補正も同程度のタイムスケールで行う必要がある。

1.1.2 すばる望遠鏡の補償光学系

すばる望遠鏡では現在 AO188 と呼ばれる補償光学系があり、2006 年から運用を開始している。AO188 の基本的な構成は図 1.1 のようになっており、1 つのレーザーガイド星を用いた観測が可能である。AO の種類としては単層共役補償光学 (Single Conjugate Adaptive Optics; SCAO) というもので、大気揺らぎによる波面乱れが大気一層によるものと仮定し、DM によってその一層による乱れを補正するというようなシステムになっている。システムの主な要素について以下に述べる。

レーザーガイド星生成システム

システムのレイアウトを図 1.3 に示す。レーザーガイド星の光源はすばる望遠鏡の赤外ナスミス台のレーザー室に設置されている。光源は赤外ナスミス台からファイバーを伝って副鏡の背後まで伝送され、口径 50cm のレーザー送信望遠鏡によって打ち上げられる。レーザーガイド星は波長 589.159nm の単色で、オンスカイで 3.0W(R バンドで 12 等級) の明るさである [26]。

AO188 光学系

波面の測定と補正を行う AO188 の装置はレーザー光源と同様、赤外ナスミス台に設置されている。AO188 の光学系のレイアウトを図 1.4 に示す。光学系は観測装置への経路を通る主光学系と波面の測定を行う高次波面センサー、低次波面センサーで構成されている。望遠鏡からの光は F13.9 のビームで入射し、視野回転補正装置 (IMR) で視野回転が補正される。その後、軸外し放物面鏡 (OAP1) でコリメートされ 188 素子の DM によって波面を補正する。DM は焦点面における像のふらつき (波面の傾きの成分) を補正するためのティップティルトステージにマウントされており、このステージが高速で傾きを変えることで、DM に傾きが生じ焦点面における像の移動を抑えることができる。このステージのストロークは± 5

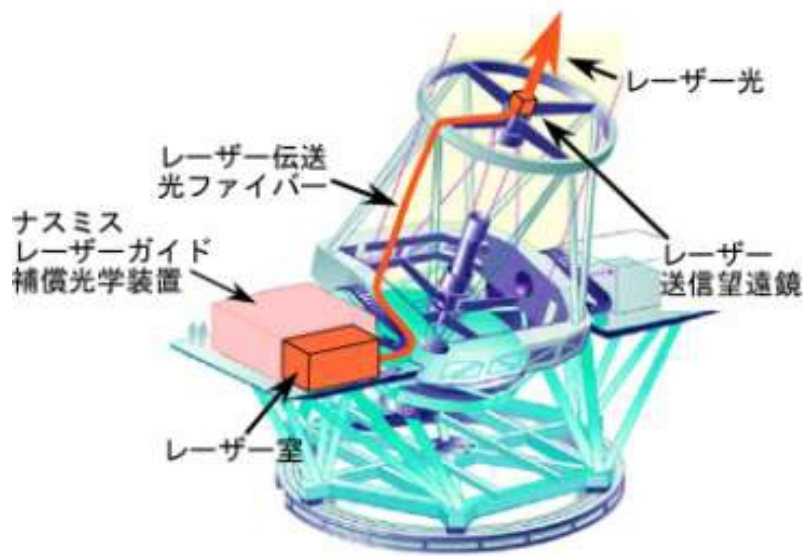


図 1.3 すばる望遠鏡のレーザーガイド星生成システム [26]

秒角である。コリメートされている光路中に大気によって生じる色分散を補正する大気分散補正素子 (ADC) が組み込まれているが、使用するかどうかの切り替えができるようになっている。DM の後は軸外し放物面鏡 (OAP2) によって F13.9 の収束光になり、観測装置へと光を射出する。このとき途中のビームスプリッター (BS) によって高次波面センサーと低次波面センサーへと光が分岐される。詳細は後述するが、波面測定の参照光源にレーザーガイド星を用いる場合、ターゲット天体の焦点面上での移動とフォーカスのずれを原理的に測定することができないため、それらの測定を行うために低次波面センサーが用いられる。低次波面センサーは視野内に存在する星を使って波面測定を行う。高次波面センサーは自然ガイド星を用いて波面測定を行う NGS モードとレーザーガイド星を用いて波面測定を行う LGS モードがあり、DM と同様 188 素子の分割数を持つ。

LGS モードでの補正された後の角度分解能は J バンドで 0.09 秒角、H バンドで 0.07 秒角、K バンドで 0.06 秒角程度となっており、K バンドでは回折限界に近い値になっているものの近赤外線の短波長側では回折限界に対する補正性能は下がっている (図 1.5 左)。また可視光域でも補正が有効であることが示されたが、PSF(Point Spread Function) を見ると広がった成分が支配的である (図 1.5 右)。AO188 のような SCAO システムではガイド星の近くの領域は補正できるが、ガイド星から離れると補正性能が悪くなるといった問題や、補正が回折限界近くまで有効に作用するのは近赤外線に限られるなどの課題がある。これは以下に示すようなことが影響している。

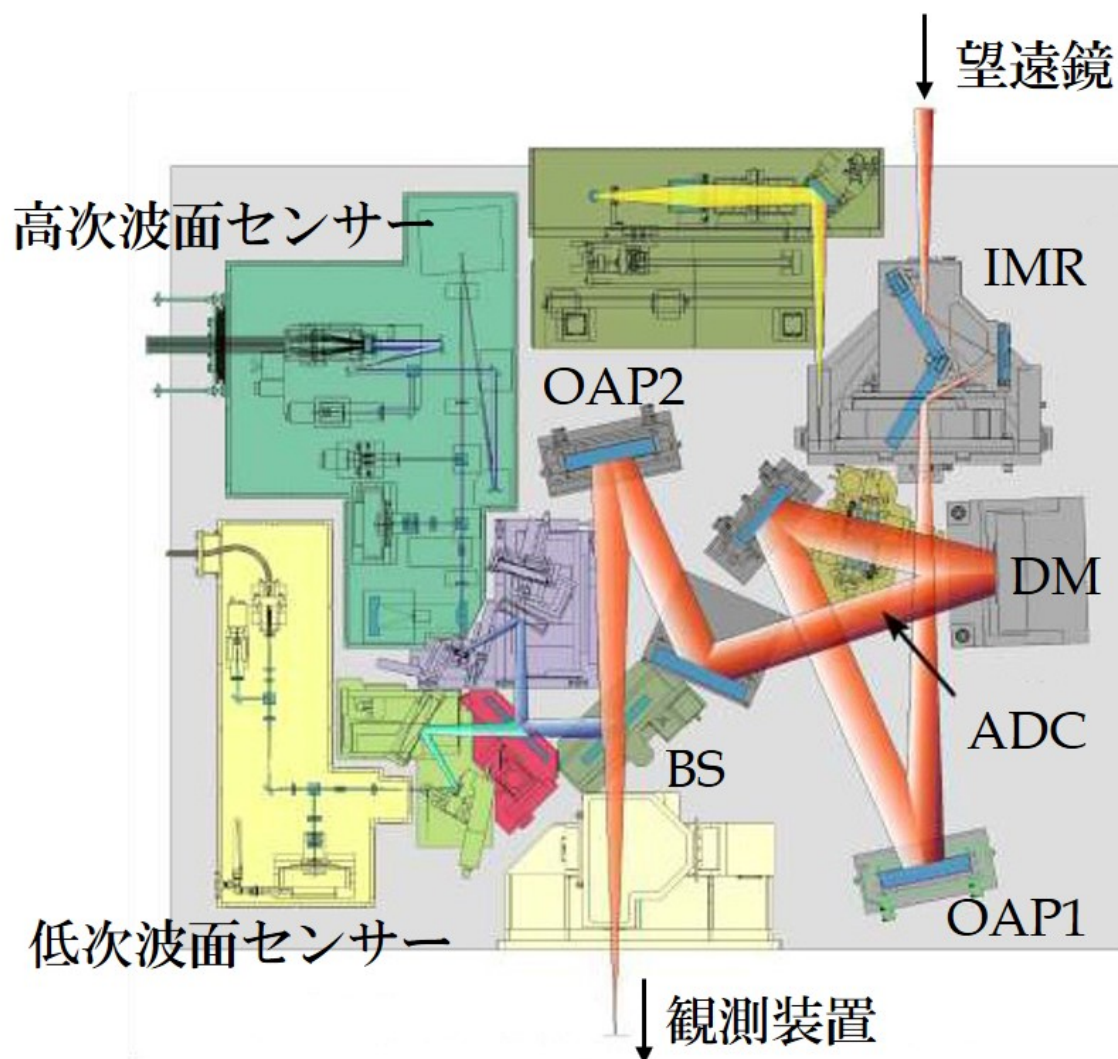


図 1.4 AO188 の光学レイアウト [26]。IMR:Image Rotater(視野回転補正装置)、OAP: Off Axis Parabola(軸外し放物面鏡)、ADC: Atmospheric Dispersion Correcter(大気分散補正素子)、BS: Beam Splitter(ビームスプリッター)

Anisoplanatism

天球上で位置の異なる2つの星からの波面はそれぞれ大気中を異なる経路を通過して伝播する。大気揺らぎのパターンは場所ごとに異なるため2つの星の波面は異なるパターンをもつ。SCAOではガイド星の波面が平面波に近づけるように補正するため、ガイド星付近にある天体の像は良好に補正されるが、ガイド星から離れると補正性能が悪化してしまう。これを anisoplanatism(アニソプラナティズム)という。異なる大気の経路を通過しても波面がほぼ同一とみなせる天球上での角度を isoplanatic angle (アイソプラナティック角) と言い、この角度は波長に依存する [22]。長波長側ほど isoplanatic angle は大きくなり、より広い視野を補正できるこ

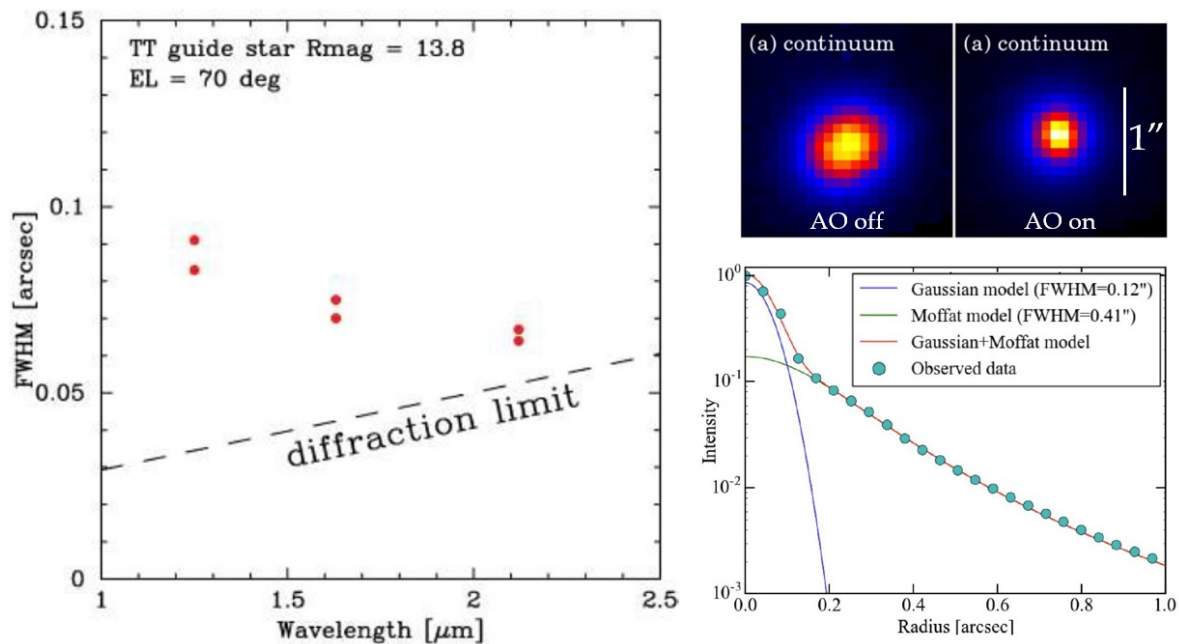


図 1.5 左) 近赤外線各波長における補正後の FWHM [26]。右上) 波長 681nm での補正の有無の比較画像 [12]。カラーは明るさの強度を示す。右下) 波長 740nm での補正後の PSF のプロファイル [14]。

とを意味する。すばる望遠鏡があるマウナケア山頂において典型的な isoplanatic angle は J バンドで 20"、H バンドで 30"、K バンドで 40" 程度と言われている [16]。

コーン効果

波面の参照光源として使われる LGS は地上から有限の距離にあるため、LGS の光が望遠鏡に伝播するときに通過する領域は円錐形となる。一方で、無限遠にあるとみなせる星の光が通過する領域は円筒形となるため、LGS では高層の大気揺らぎの情報を一部得ることができない (図 1.6 左)。これをコーン効果といい、波長が短いほど影響が大きくなる。

1.2 レーザートモグラフィ補償光学

1.2.1 原理

AO188 では近赤外線域での補償は比較的有効に作用するものの、可視光域ではコーン効果の影響を大きく受けてしまい、回折限界に近い補償性能を得ることができない。このコーン効果による影響を少なくするために考えられたものがレーザートモグラフィ補償

光学 (Laser Tomography Adaptive Optics; LTAO) である。LTAO では複数のレーザーガイド星を用いるため、波面センサーもそれぞれのレーザーガイド星に用意する必要がある。

LTAO ではターゲット天体から離れた位置にそれぞれのレーザーガイド星を配置する

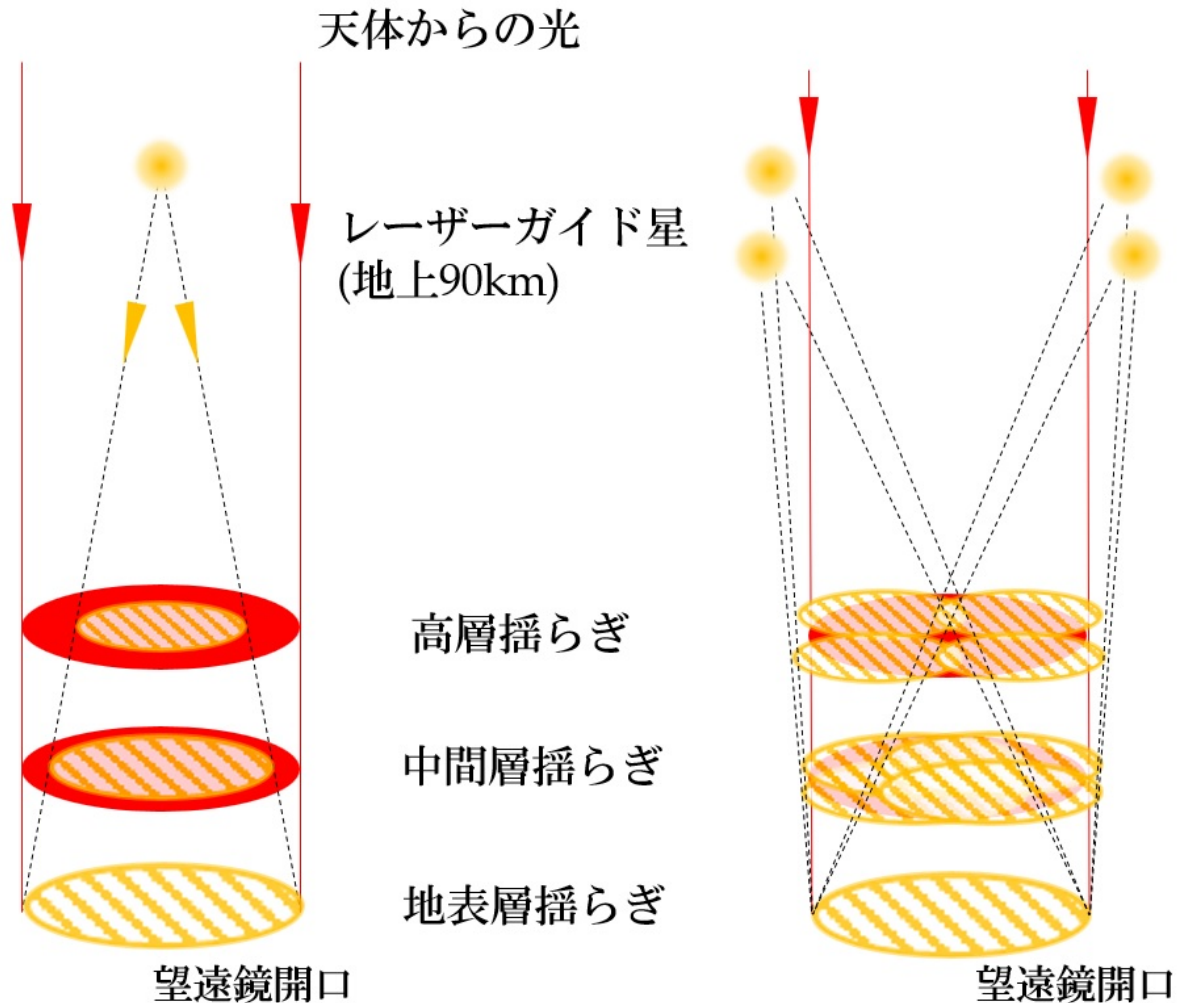


図 1.6 従来の補償光学システム (左) とレーザーTomography補償光学 (右) の場合の光の通過する領域の違い。左ではレーザーガイド星が有限な距離にあるため、高層の大気揺らぎの情報を一部得られていない。

(図 1.6 右)。個々のレーザーガイド星ではターゲット天体方向の大気揺らぎの情報を全て得ることは出来ないが、複数のレーザーガイド星によって得られる波面の情報を組み合わせることで、ターゲット天体方向の大気揺らぎを高層の成分も含めて推定することができる。これにより従来のように1つのレーザーガイド星のAOシステムでは克服できないコーン効果の影響を小さくすることができる。

前述のように、LTAO ではレーザーガイド星をターゲット天体方向から離れた位置に配

置するするため、従来のようにレーザーガイド星によって得られた波面の残差が小さくなるように補正するのではなく、ターゲット天体方向の波面残差を小さくするように補正しなければならない。そこでターゲット天体方向の波面の情報を推定する必要があり、そのためにトモグラフィーの手法が用いられる。トモグラフィーとは波面測定をして得られる大気揺らぎが複数の大気層の足し合わせであるとして、複数のガイド星の波面情報からターゲット天体方向の大気揺らぎを3次的に復元する方法である [6]。

1.2.2 GALACSI/VLT

欧州南天天文台 (ESO) がチリのアタカマ砂漠に所有する VLT (Very Large Telescope) では LTAO の機能をもつ装置が搭載されている。中でも波面の測定を行う装置は GALACSI (図 1.7) と呼ばれるもので、2 つの AO のモードを切り替えることができる。ひとつは Wide Field Mode (WFM) で各方向に共通の大気揺らぎの成分を補正する地表層補償光学 (Ground Layer Adaptive Optics; GLAO) が用いられ比較的広い視野でシーイングの改善ができる。もう一方は Narrow Field Mode (NFM) で LTAO の手法が用いられる。

WFM は既に運用が始まっており、LTAO を用いる NFM は 2018 年 2 月より運用を開始する予定となっている [5]。VLT では 4 つのナトリウムレーザーガイド星が波面測定に用いられているが、それぞれのモードでレーザーガイド星の配置間隔を変えられるようになっており、WFM では視野中心から 64 秒角、LTAO を行う NFM では視野中心から 10 秒角離して配置する [4]。波面の補正は副鏡を可変形鏡にした可変副鏡 (ASM; Adaptive Secondary Mirror) によって行われる。観測装置は MUSE と呼ばれる可視光の面分光装置が搭載されており、WFM モードでは一辺の視野が 1 分角で空間サンプリングが 0.2 秒角、NFM では一辺の視野が約 7.5 秒角で 0.025 秒角の空間サンプリングで観測を行うことができる。LTAO で得られる典型的な角度分解能は波長 650nm で 0.03~0.05 秒角であると予想している。NFM での詳細な仕様を表 1.1 に示す。

1.3 装置の概要

LTAO を行うにあたり AO188 のシステムとの相違点は主にレーザーガイド星の数が増えることと、それに伴って必要な波面センサーの数が増えることである。AO188 とともに使用できる観測装置は AO188 の光学系に最適化されて設計されていることや、LTAO を行う上で AO188 と同じような機能が必要になることなどを踏まえると、コストの面から考えても AO188 の活用は合理的であると考えられる。したがって LTAO の装置としては AO188 のアップグレードと新たに必要となる機能を組み合わせたものになる。

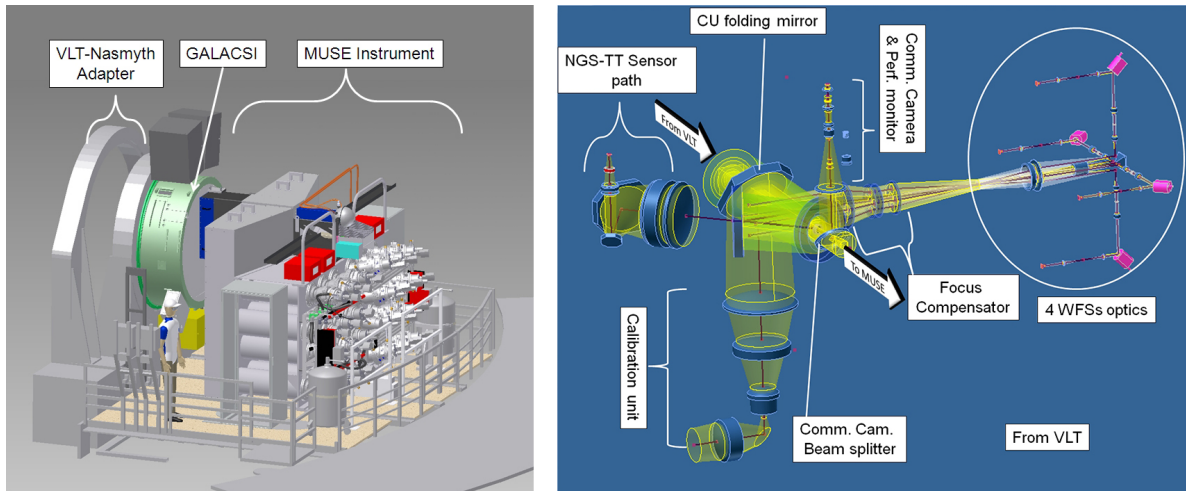


図 1.7 左)VLT に搭載されている波面測定を行う装置 GALACSI と可視光面分光装置 MUSE の外観イメージ。右)GALACSI の光路図。4 つのレーザーガイド星の波面測定と 1 つの自然ガイド星の波面測定を行う。[4]

表 1.1 NWM での MUSE の仕様 [5]。ストレル比は無収差の光学系の PSF のピーク値に対する比で、1 の場合に光学系が理想的な結像をしていることになる。

パラメータ	値
視野	7.42×7.43 秒角
空間サンプリング	0.025 秒角/pixel
空間分解能 (FWHM)	0.03 - 0.05 秒角
波長分解能	1740 (480nm) - 3450 (930nm)
ストレル比	0.1 - 0.3
限界フラックス (1 時間積分)	$2.3 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
限界等級 (1 時間積分)	$R_{AB} = 22.3 \text{ mag}$
限界表面輝度 (1 時間積分)	$R_{AB} = 17.3 \text{ mag arcsec}^{-2}$

新たに必要となるものは主に、複数のレーザーガイド星を生成するシステムと、それぞれのレーザーガイド星の波面測定を行う波面センサーである。今回のプロジェクトでは 4 つのレーザーガイド星を用いて波面測定を行うことが決まっているため、4 つの波面センサーが新たに必要になる。

1.3.1 レーザーガイド星生成システム

AO188 では 1 つのレーザーガイド星のみであったが、LTAO では 4 つのレーザーガイド星を生成する必要がある。光源は TOPTICA 社製の高輝度ファイバーレーザーを用い

ることが決まっており、VLT では同様のものがすでにインストールされている [3]。すばる望遠鏡の既存のレーザーの出力が 5.5W [26] であるのに対し、新しいレーザーは 20W 程度の出力のため約 4 倍の明るさが得られる。既存のレーザー光源を TOPTICA 社製のものに置き換えるにあたり、光源は従来と同様に赤外ナスミス台に設置される。レーザーは望遠鏡のトラス構造を伝ってトップリングに設置される Beam splitting optics によって 4 つのビームに分岐され、その後副鏡の背後にある既存のレーザー送信望遠鏡によって上空に打ち上げられる。したがって、1 つのレーザー光源を 4 つに分けてガイド星をつくる。ただし 4 つに光を分けず、従来のシステムと同様 1 つのレーザーガイド星としても用いることができる。

1.3.2 波面センサーユニット

新たに必要な 4 つの波面センサーは AO188 の後ろに設置される。波面センサーを含めその他 LTAO を行うにあたって新たに必要な光学系を波面センサーユニット (Wavefront Sensor unit; WFS unit) と呼ぶことにする。赤外ナスミス台に設置される各装置の位置を図 1.8 に示す。従来は使用する観測装置を AO188 の後ろに設置するようになっており、使用する装置を変更したいときは装置入れ替えのための移動が必要であったが、AO188 の後ろにビームスイッチャー (Beam Switcher) と呼ばれる光学系を設置することが決まっており、装置の切り替えを移動することなく行うことができるようになる。ビームスイッチャーは 1:1 の等倍りレー光学系になっており、平面鏡を回転させることで装置の切り替えができるようになっている。ビームスイッチャーが導入されることで、波面センサーユニットを AO188 の直後に設置するスペースを得ることができる。

1.3.3 AO188 のアップグレード

LTAO で特に可視域において補正性能を上げるには DM のアップグレードが必要である。図 1.9 に DM の素子数とストレル比のシミュレーション結果を示す。ストレル比は収差のない理想結像の PSF のピーク値と収差によって低下したピーク値との比を表したもので、1 に近いほど理想的な結像であることを示す。近赤外線では現在のシステムのまま、レーザーを高輝度のものにするだけでストレル比は 2 倍程度増加するが、DM の素子数が増加しても補正性能はさほど増加しない。可視光域でも同様の傾向が見られるが、レーザーを高輝度にしても高いストレル比は見込めない。これは先に述べたコーン効果の影響を大きく受けるためである。しかし 4 つのレーザーガイド星を用いて LTAO を行うことで、現在の素子数でもストレル比を 2 倍近くに改善することができ、500 素子の場合ではストレル比 0.5 近くまで達する。したがって、可視光域において LTAO を行うこと

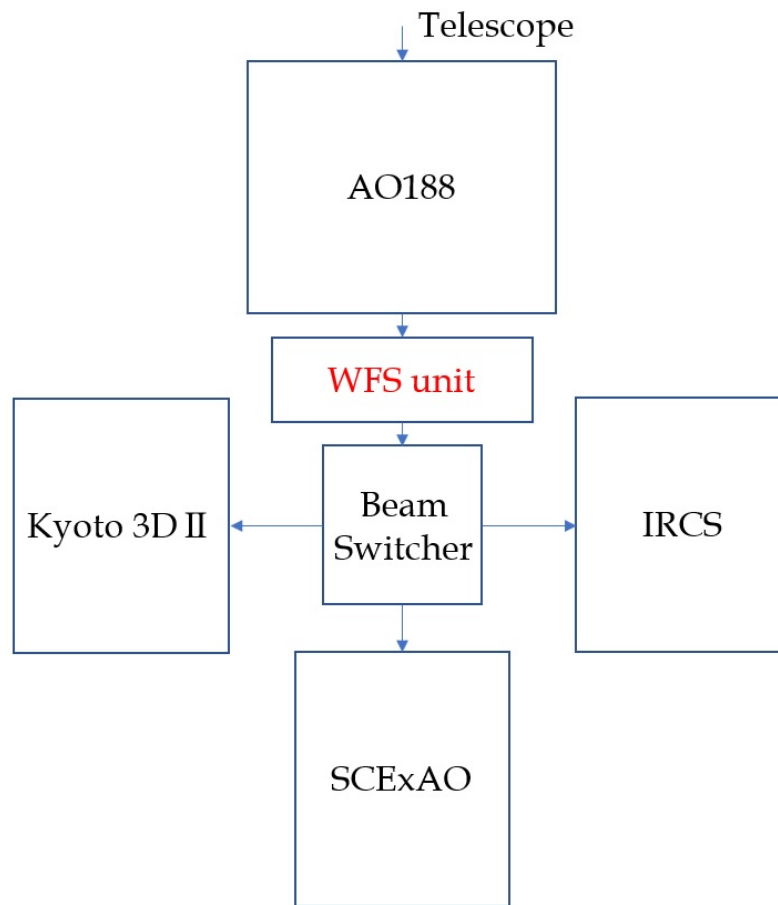


図 1.8 赤外ナスミス台に設置される各装置の配置。矢印は光路の進み方を示す。

で大きく性能を向上できることが期待され、性能向上には DM の素子数の増加が必要である。DM のアップグレードについては現在検討が行われている。

1.3.4 AO188 と波面センサーユニットの連携

先に述べたように、LTAO は既存の AO 装置である AO188 と新たに開発するレーザーガイド星用の波面センサーユニットを併用して行うことになる。ここでは AO188 と波面センサーユニットのシステム構成について述べる。図 1.10 にシステム構成の概略図を示す。4 つのレーザーガイド星を用いた波面測定は波面センサーユニット内に設置される 4 つの波面センサーによって行われ、検出器の画像データが随時制御系へと送られる。詳細は後述するが、レーザーガイド星は原理的に大気揺らぎによる焦点面上での天体の移動とピントのずれの成分を検出できないため、自然ガイド星を使ってこの成分を検出する必要があり、これを AO188 内の低次波面センサーで行う。低次波面センサーは 2×2 分割

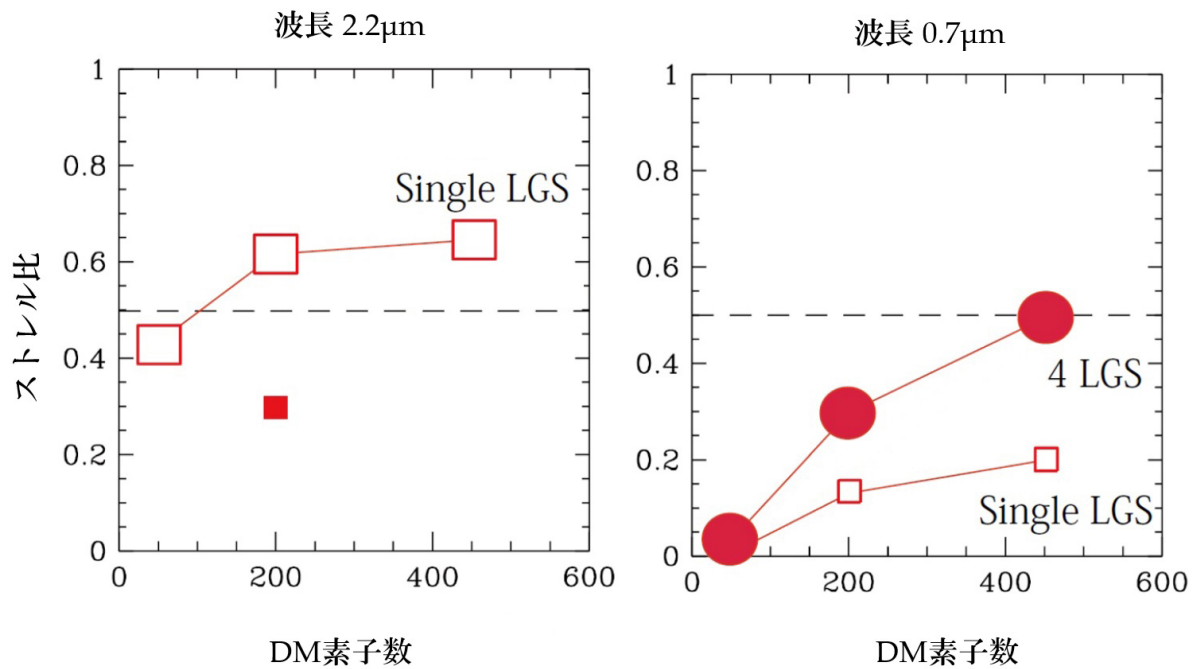


図 1.9 DM の素子数とストレル比の関係 [1]。図左は近赤外線 $2.2\mu\text{m}$ 、図右は可視光 $0.7\mu\text{m}$ における関係を表す。白抜き四角は新たに設置する高輝度ファイバーレーザーを 1 つのレーザーガイド星として用いた場合のもので、塗りつぶしの四角は現在のシステムを表している。塗りつぶしの丸記号は 4 つのレーザーガイド星を用いて LTAO を行った場合のものである。点線はストレル比 0.5 を表しており、RMS 波面収差に換算すると波長を λ として約 $\lambda/10$ である。

の Shack-Hartmann 型波面センサーで、視野直径 2.7 分角にある R バンドで 18 等級以下の任意の星を用いて波面測定を行うことができる [26]。以上のことから制御系は波面センサーユニット内の波面センサーと AO188 内の低次波面センサーから波面の測定データを取得し、データの解析やトモグラフィー等の演算を行い最終的に DM のそれぞれのアクチュエーターに付加すべき電圧値を計算する。得られた値を補正信号として DM に返すことで波面補正が行われる。

1.4 高空間分解能観測

LTAO をすばる望遠鏡に実装することで現在設置されている観測装置と LTAO を組み合わせ、可視光から近赤外線での広い波長にわたって高い空間分解能で観測を行うことが可能となる。使用できる観測装置は近赤外線の撮像分光装置 IRCS (Infrared Camera and Spectrograph) と可視光の面分光装置 Kyoto3DII である。それぞれの装置の仕様を表 1.2、表 1.3 に示す。

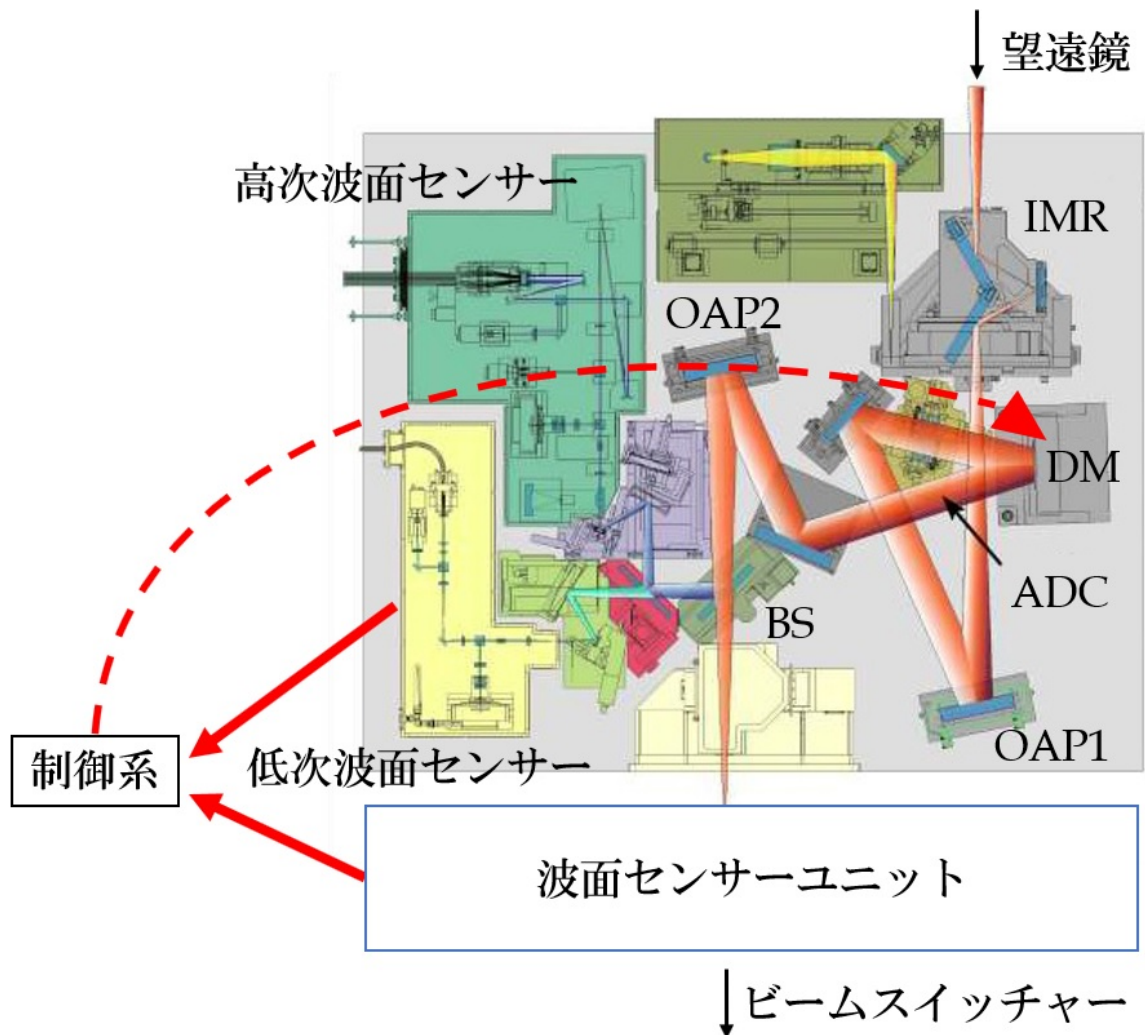


図 1.10 AO188 と波面センサーユニットのシステム構成。赤い矢印は信号の流れを示す。制御系は波面センサーユニット内の 4 つの波面センサーと AO188 内の低次波面センサーから波面の情報を取得し DM に最適な補正信号を渡す。

IRCS の撮像モードでは空間分解能の異なる 3 つのモードが用意され、最高で $0''.012$ でのサンプリングが可能である。また分光モードでは分散素子が grism と echelle 回折格子の 2 つがあり、異なる波長分解能で観測できる。特に echelle 回折格子の場合は最高で $R \sim 20,000$ 程度の波長分解能をもつ。検出器は撮像と分光でそれぞれ 1 つずつ持つが、同じ検出器を用いているため感度を持つ波長帯は同じである。Kyoto3DII は波長 640 - 920nm の可視の装置で、面分光、ロングスリット分光、撮像観測を行うことができる。特に面分光観測では $R \sim 1200$ での観測が可能であるが、打ち上げが予定されている JWST (James Webb Space Telescope) の面分光装置 (視野 $3''$, 0、空間サンプリング $0''.1$) でも同じ波長帯では $R \sim 100$ と波長分解能が低い [15]。

IRCS や Kyoto3DII を用いて可視光から近赤外線まで高い空間分解能での観測が可能

表 1.2 IRCS の仕様 [10]。

モード	撮像			分光		
	fine	high	low	grism		echelle
視野, (スリット長)	11".94	20".57	53".68	(23")	(20")	(3".9 - 10".5)
空間サンプリング	0".012	0".021	0".053	0".022	0".060	0".075
波長分解能	-			R~900	R~1400	R~20,000
波長	1.0 - 5.6 μ m			1.0 - 4.2 μ m		1.0 - 5.6 μ m

表 1.3 Kyoto3DII の仕様 [13]。

	面分光	ロングスリット分光	撮像
視野, (スリット長)	3".1	(1'.3)	1'.7
空間サンプリング	0".084	0".050	0".050
波長分解能	R~1200		-
波長	640 - 920nm		

となるが、これらの装置を用いることで銀河の形態進化の解明が期待される。近傍銀河の形態分類では全体の約 7 割が円盤銀河、約 1 割が不規則銀河、残りが楕円銀河やレンズ状銀河となっているが、 $z \sim 0.65$ では約 3 割が円盤銀河、約 5 割が不規則銀河となっている [2]。これは $z \sim 0.65$ で存在する不規則銀河が現在に至るまでに円盤銀河へと形態進化していると考えられることができる。実際、宇宙の星形成史では $z \sim 2$ でピークを迎え、現在の宇宙での星形成密度はピーク時に比べて約一桁低くなっている [11]。このことから、銀河を構成する星は $z \sim 2$ あたりで多く形成され、その後形態が確立していったと考えられる。銀河の形態がどのように進化してきたのかを探るためには近傍から $z \sim 2$ までの銀河を構成する星が銀河内でどのような運動をしているかを測定する必要があるが、そのためには星からの輝線や吸収線を銀河の場所ごとに観測し、銀河の動力学的な構造を知る必要がある。これらの観測は HST (Hubble Space Telescope) や地上大型望遠鏡で可視光や近赤外線的面分光装置を用いて行われてきているが、十分に空間分解できていない銀河も存在する [19][7]。LTAO と IRCS や Kyoto3DII を組み合わせ、高い空間分解能で遠方銀河の内部構造を詳細に観測することで、銀河の形態進化の解明が期待される。

第 2 章

光学系の仕様決定

本章では LTAO を行うにあたり波面センサーユニットとして必要な機能や仕様について述べる。

2.1 レーザーガイド星

波面センサーユニットは 4 つのレーザーガイド星の波面測定を行うため、レーザーガイド星のもつ特有の諸問題に対処しつつ波面測定を精度よく行うために一定の性能を満たす必要がある。

2.1.1 ナトリウム層

レーザーガイド星は高度 90km 付近にあるナトリウム層を励起発光させることによって生成されるが、ナトリウム層自体は 10~20km 程度の厚さを持ち、層の厚さや高さ分布は数分程度のタイムスケールで変化する [8][22]。図 2.1 にナトリウム層の厚さと高さの時間変化の観測例を示すが、ナトリウム層が高度 80~100km 付近に存在し、高さの中央値が 90km 付近で時間変化していることがわかる。レーザーガイド星までの距離の変化はナトリウム層自体の高さ分布の時間変化によって引き起こされるだけでなく、望遠鏡のエレベーションの変化によっても変化する。例えばナトリウム層が高度 90km にあった場合、天頂 (高度 90°) 観測時はレーザーガイド星までの距離は 90km であるのに対し、高度 30° を観測する場合はナトリウム層までの距離は 2 倍伸びて 180km となる (図 2.2 左)。ガイド星までの距離は有限でありエレベーションなどにより変化するため、レーザーガイド星の結像位置はその距離に応じて無限遠の結像位置からずれてしまう。AO188 から射出するビームにおいて、物体位置が無限遠にある場合の結像位置に対して 90km の場合は約 136mm 後方に結像する。また 90km と 200km の場合の結像位置の差は約 75mm であ

る。波面センサーユニットではこの結像位置の変化に対応する光学系が必要になる。

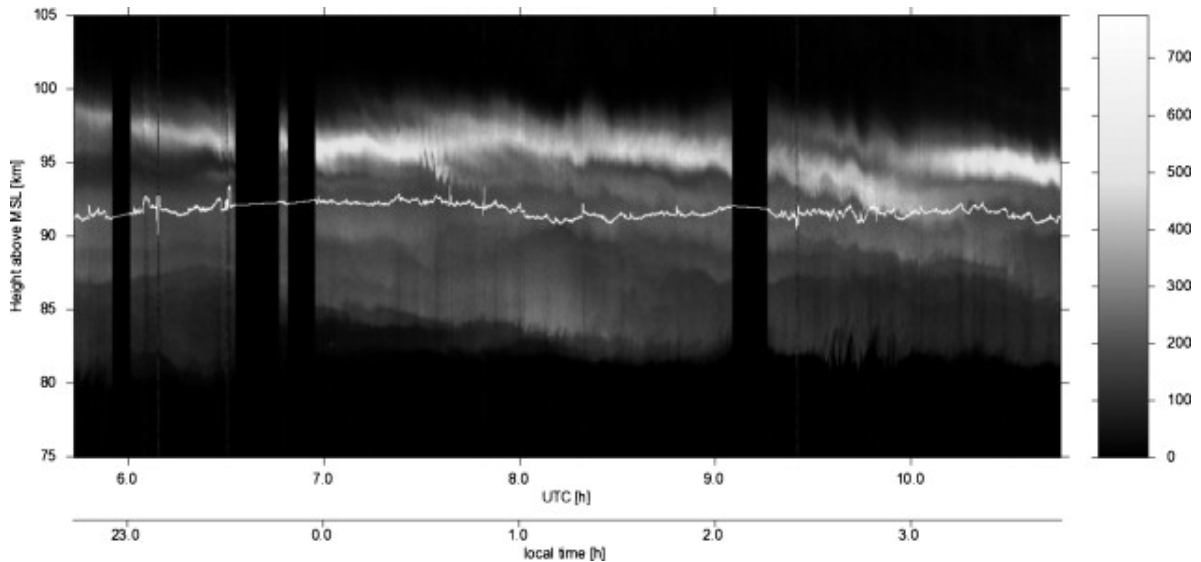


図 2.1 ナトリウム層の厚さと高さ分布の時間変化 [8]。グレースケールは地上から出力 5W のナトリウムレーザーを打ち上げたとき、観測される光子数 (1.3 秒/75m 毎, 直径 6m 円形開口) を表し、白線は各時間での高さの中央値を示す。

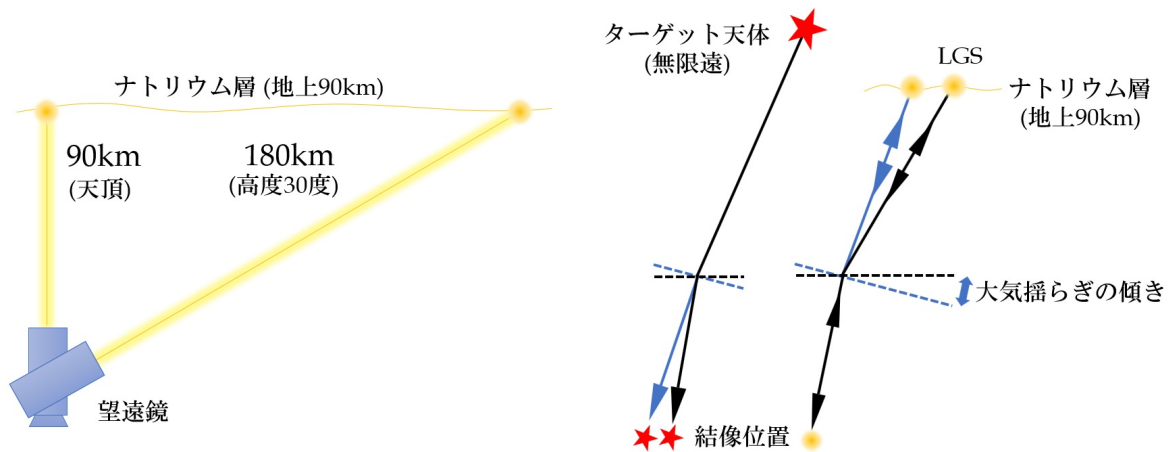


図 2.2 左) エレベーションの変化による LGS までの距離の変化。右) LGS が波面の傾きの情報を得られない理由の概念図。実線は光の進み方、点線は大気の傾きを表し、色の違いは大気の傾きの違いを表す。ターゲット天体は大気揺らぎによって一回だけ屈折するが、レーザーガイド星は大気揺らぎを往復するため、屈折は打ち上げ時と戻ってくる時の二回起こる。これによりレーザーガイド星ではターゲット天体の結像位置の変化を検出できない。

またナトリウム層の高さが変化することで、波面センサーによって得られるフォーカス

のずれが大気揺らぎ由来なのかナトリウム層由来なのか区別することができない。さらに、レーザーは地上から打ち上げられるため大気揺らぎを往復することになる。また打ち上げ時に 50cm 程度のビーム径であるのに対し、レーザーガイド星の光は 8.2m の開口で受けるため、往復時にレーザーガイド星のずれ方が変化する。仮に打ち上げ時と同じ望遠鏡でレーザーガイド星を観測する場合はレーザーガイド星の像は検出器上で動かない。これに対し、ターゲット天体は大気揺らぎの傾きによって検出器上での結像位置が変化する。検出器上での像の移動は波面の最低次の成分で波面の平均的な傾きを表すが、これらの理由からレーザーガイド星では大気揺らぎによる波面の傾きの情報を得ることができない。したがってレーザーガイド星では波面の傾きとフォーカスのずれの成分を得ることができず、自然ガイド星を用いる必要がある。これは先述のように AO188 内の低次波面センサーで行う。(図 2.2 右)

2.1.2 視野回転

すばる望遠鏡は経緯台式の架台であるため、星を追尾したときに視野回転が生じる。ターゲット天体とレーザーガイド星の視野回転の仕方を図 2.3 に示す。ナスミス台から見ると、ターゲット天体は方位角とエレベーションに依存して回転するのに対し、レーザーガイド星は望遠鏡に対して固定して打ち上げられているため方位角には依存せず、エレベーションにのみ依存して視野回転する。ターゲット天体の視野回転は AO188 内の視野回転補正装置 (図 1.4 の IMR) で補正されるのに対し、レーザーガイド星は AO188 が作る焦点面において方位角に依存して視野回転することになる。そのため、波面センサーユニットではレーザーガイド星の視野回転を補正する必要がある。AO188 内の視野回転補正装置は 3 枚の平面鏡によって構成され、各面と光軸との交点を結ぶと正三角形になる K 配置と呼ばれる配置になっているため K ミラーと呼ばれる。

2.1.3 レーザーガイド星の配置間隔

LTAO を行う上で重要になってくるのが、4 つのレーザーガイド星をターゲット天体からどのくらい離して配置するかということである。レーザーガイド星の配置間隔が変わることで、ターゲット天体のビームに対して 4 つのガイド星で高層の大気揺らぎをどのくらいカバーできるかが変わってくる。図 2.4 にレーザーガイド星の配置間隔を変えた時の地上 16km におけるターゲット天体のビームのカバレッジの違いを示す。地上 16km は大気揺らぎによる星像への影響が効いてくる最も高い層の目安とされている。このとき、レーザーガイド星を中心から 10 秒角程度離して配置することでターゲット天体の領域をカバーすることができるがわかる。

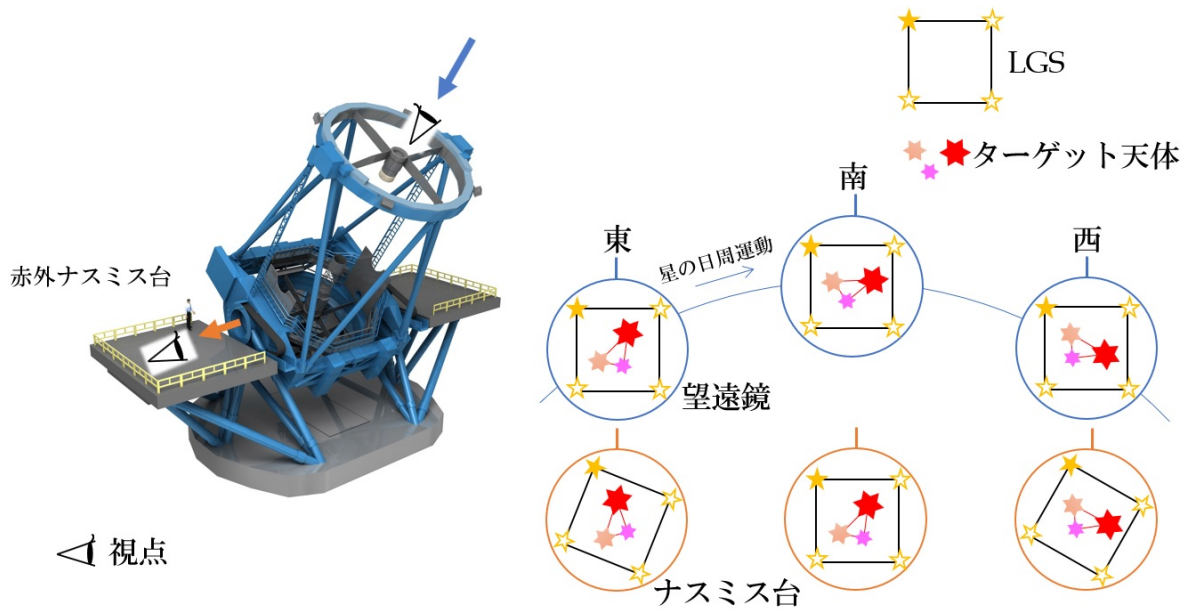


図 2.3 左) すばる望遠鏡の外観 [20]。右) ターゲット天体とレーザーガイド星の視野回転の仕方の違い。上段 (青枠) は望遠鏡に乗って見た時、下段 (橙枠) は赤外ナスミス台に乗って見た時の視野回転の仕方。視点は左図参照。

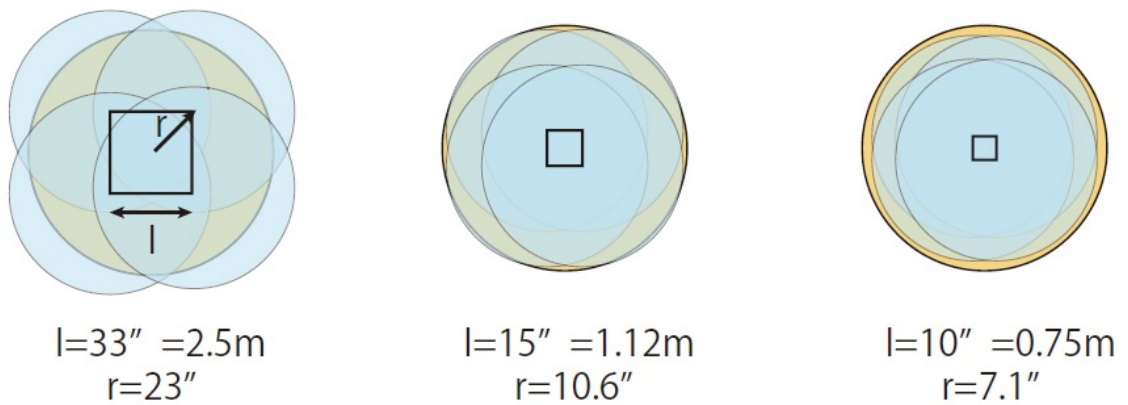


図 2.4 地上 16km におけるターゲット天体のビームのカバレッジとレーザーガイド星の配置間隔 [1]。オレンジ色の領域がターゲット天体のビームで、水色の領域が 4 つのレーザーガイド星のビームを表す。4 つのレーザーガイド星は図中の四角形の四隅にあり、 l がガイド星の配置間隔、 r が中心からの距離を示す。

図 2.5 にレーザーガイド星の配置間隔を変えた時の高次波面誤差の変化のシミュレーション結果を示す。高次波面誤差は補正された波面のうち波面の傾きの成分を取り除いたものに相当する。基本的に DM の素子数が変わると関数の形はあまり変わらずに波面誤差が変化し、素子数の増加に伴って波面誤差が低下する傾向が見られる。また DM の素子数によらずレーザーガイド星の配置間隔が 10 秒角のあたりで高次波面誤差が最小値と

なっていることがわかる。これは図 2.4 で見られたように、ガイド星の間隔が 10 秒角程度のときターゲット天体の高層領域をちょうどカバーできることに概ね一致する。これら

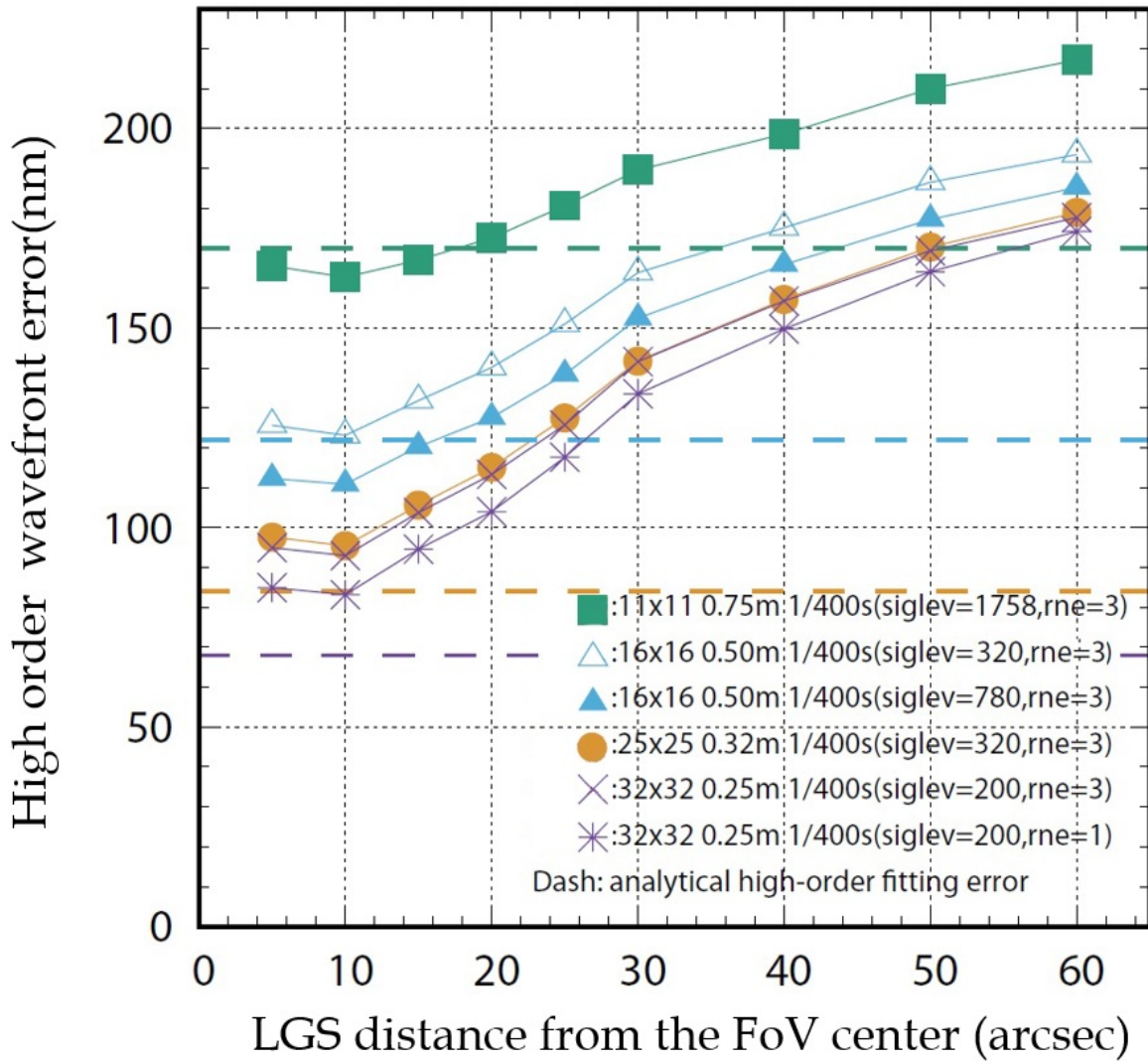


図 2.5 レーザーガイド星の配置間隔を変えた時の高次波面誤差 [1]。横軸はレーザーガイド星の視野中心からの距離 (図 2.4 中の r に相当)、縦軸は補正された波面の高次波面誤差を表す。ここで、高次波面誤差は補正された波面のうち波面の傾きの成分を取り除いたものに相当する。凡例の数字は左から波面測定時の波面の分割数、分割された領域の主鏡上でのサイズ、補正のタイムステップ、レーザーガイド星の明るさレベル、検出器の読み出しノイズを表す。また、点線は DM のもつフィッティングエラーの値を示す。フィッティングエラーは波面のスケールに対する DM のアクチュエーターの数に依存する値で [21]、表現できる波面の形状が有限であることから生じる波面誤差である。なお、このシミュレーションは天頂観測時 (レーザーガイド星までの距離が 90km) を想定しており、DM の素子数と波面の分割数は等しい。

の結果から、レーザーガイド星の配置間隔を 10 秒角程度にしたとき LTAO で最も波面誤

差を小さくできることになる。よってガイド星は10秒角間隔で打ち上げ、波面センサーでもこの間隔で波面測定を行うことができるようにする必要がある。

ここでエレベーションの変化に伴う最適なレーザーガイド星の配置間隔について図2.6を基に考える。図2.4に示すような、ある高度におけるターゲット天体のビームのカバ

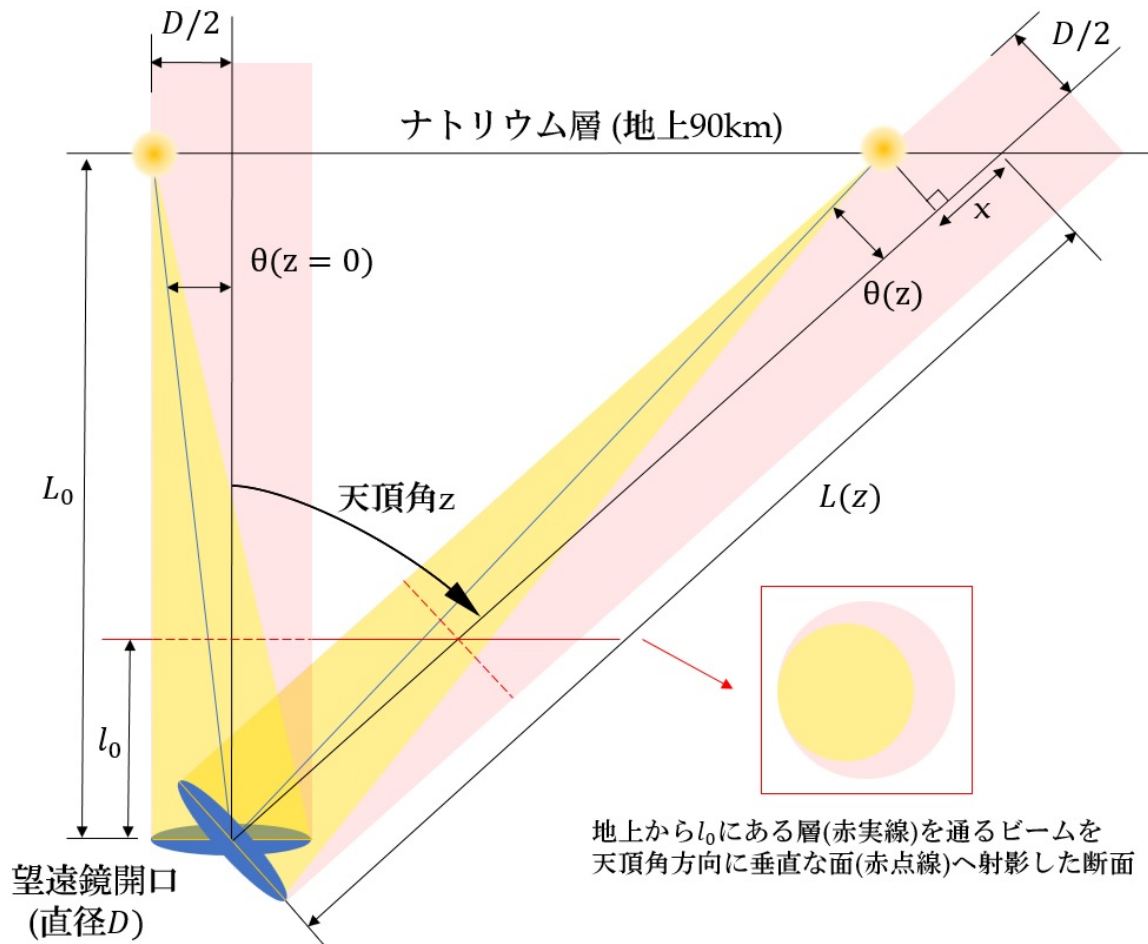


図 2.6 エレベーションが変化したときの LGS の配置間隔について。ターゲット天体が視野中心にあるとして視野中心から $\theta(z)$ だけレーザーガイド星を離して配置する。 z は天頂角を示し、天頂のとき 0° である。 L_0 はナトリウム層の高度、 $L(z)$ は天頂角が z の時のナトリウム層までの距離、 D は望遠鏡の円形開口径である。赤い領域はターゲット天体のビームが通る領域、黄色の領域はレーザーガイド星の通る領域を示す。

リッジをエレベーションに寄らず保つためにはナトリウム層の高さにおいて視野中心の軸から一定の距離にレーザーガイド星を配置する必要がある。この「一定の距離」は図2.6において $D/2$ である。レーザーガイド星を $D/2$ の距離に置くことで地上から任意の高さ l_0 にある層におけるレーザーガイド星のビームの射影断面をターゲット天体のビームの射影断面の内接円とすることができる。ここで $D/2$ という値は必ずしも最適な距離を示す

わけではなく、あくまで例としての値である。さて、天頂角が z の方向を観測するときのレーザーガイド星の視野中心からの離角を $\theta(z)$ とする。図から以下の関係が求まる。

$$L(z) = \frac{L_0}{\cos(z)} \quad (2.1.1)$$

$$\begin{aligned} \theta(z) &= \arctan\left(\frac{D/2}{L(z) - x}\right) \\ &\cong \arctan\left(\frac{D/2}{L(z)}\right) \\ &= \arctan\left(\frac{D}{2L_0} \cos(z)\right) \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

ここで、途中 x は $L(z)$ に対して微小であるとして無視した。式 (2.1.2) より最適なレーザーガイド星の配置間隔は天頂角に依存することがわかる。 $L = 90\text{km}$, $D = 8.2\text{m}$ とすると $\theta(0^\circ) = 9.40$ 秒角、 $\theta(60^\circ) = 4.70$ 秒角であり、高度 30° では天頂時と比較して配置間隔を約 $1/2$ にすることを示す。これは観測中にエレベーションの変化に伴ってレーザーガイド星の間隔を変化させながら波面測定を行うことが最適であることを意味する。図 2.5 にレーザーガイド星の配置間隔と高次波面誤差の関係を示したが、この結果は天頂観測時の配置間隔であり、エレベーションが下がると最適なレーザーガイド星の間隔は狭くなるため、グラフ全体が左側にシフトすると考えられる。

以上の議論から、レーザーガイド星の配置間隔の変化に対応できる光学系とすることとし、配置間隔は 0-20 秒角として考える。配置間隔の変化はレーザーガイド星生成システム中の光学系で行われる予定であるが、可変可能なレンジは未定である。

2.2 波面センサー

前提として波面センサーには Shack-Hartmann 型波面センサー (図 1.2 参照) を用い、検出器には浜松ホトニクス Orca Flash 4.0 V2 を用いることとなっている。検出器の仕様については表 2.1 に示す。

2.2.1 可変形鏡との対応

波面を測定する際、平行光になっている光路中に波面センサーを置く必要があるが、可変形鏡と対応する決まった位置に置く必要がある。望遠鏡に入射した光は収束光となるため、コリメーターを使って平行光に戻す (図 2.7)。このときコリメートされた光路中に射出瞳 (開口絞りの像) ができるが、AO188 の可変形鏡は射出瞳位置に配置されているた

表 2.1 Orca Flash 4.0 V2 の仕様 [27]

パラメータ	仕様
撮像素子	CMOS イメージセンサ
有効画素数	2048 × 2048
画素サイズ	6.5 × 6.5 μm
有効素子サイズ	13.312 × 13.312 mm
読み出しノイズ	1.0 e^- (median) 1.6 e^- (rms)
読み出し速度	100frame/sec (2048 × 2048 pix) 400frame/sec (512 × 512 pix) 800frame/sec (256 × 256 pix)

め、波面センサーも同様に射出瞳位置に置かなければならない。これは波面センサーと可変形鏡の対応関係を一致させるためである。

開口絞りとは光学系に入射する光線束を制限するものであり、一般的に望遠鏡では主鏡や対物レンズが開口絞りとなるが、すばる望遠鏡の赤外ナスミス焦点の場合は副鏡が開口絞りとなる。すばる望遠鏡では観測波長や観測する焦点によって3つの副鏡を使い分けているが、赤外ナスミス焦点で観測する際は副鏡の中央部にセンターコーンがついた赤外副鏡が使用され、このセンターコーンによってわずかに入射光線が制限されるからである。センターコーンとは主鏡カセグレン穴の鏡でない構造物からの赤外線放射が副鏡で反射して観測装置に入射するのを防ぐためのもので、円錐状の形をしている。

したがって AO188 の可変形鏡は副鏡を開口絞りとしたときの射出瞳位置にあり、波面センサーも同様に射出瞳位置に置く必要があるということになる。これ以降、射出瞳を単に瞳と呼ぶことにする。

2.2.2 分割数

分割数は波面の空間サンプリングを決める量であり、補償光学において重要なパラメータである。分割数が多ければより小さい空間スケールの波面形状を測定できるが、分割された領域に入るフォトン数は減るため検出器との組み合わせによって最適な分割数は変化する。ここで、分割数は瞳の直径に対するマイクロレンズアレイのレンズ数とし、各マイクロレンズによって分割された領域をサブアパーチャ (sub-aperture) と呼ぶこととする (図 2.8)。

図 2.5 にレーザーガイド星の配置間隔と高次波面誤差のシミュレーション結果 [1] を示

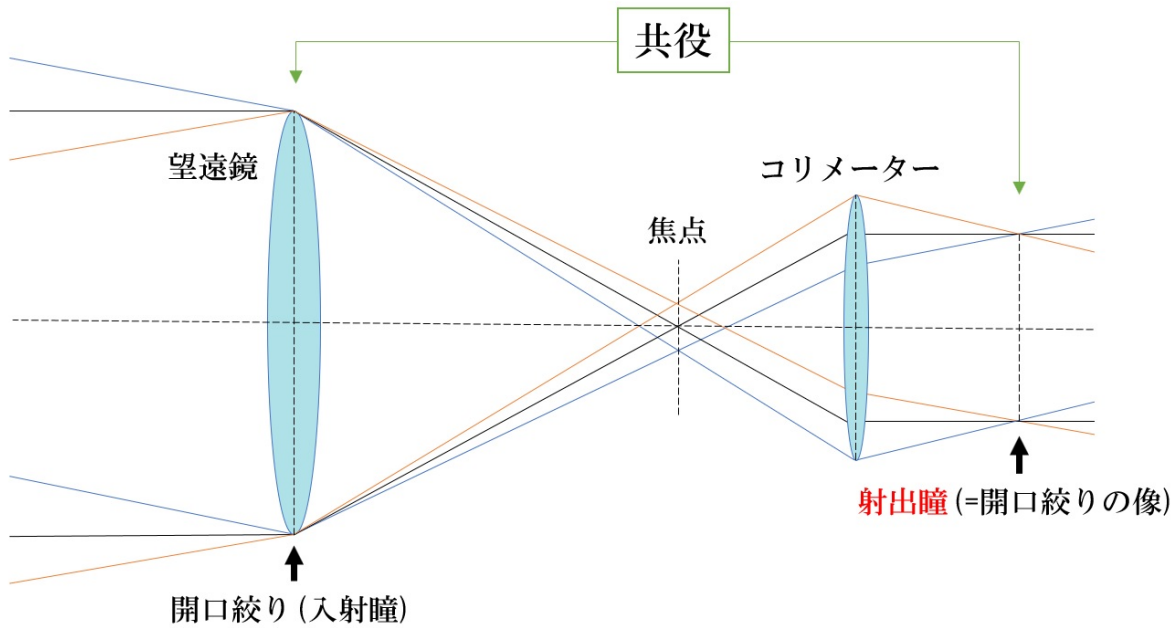
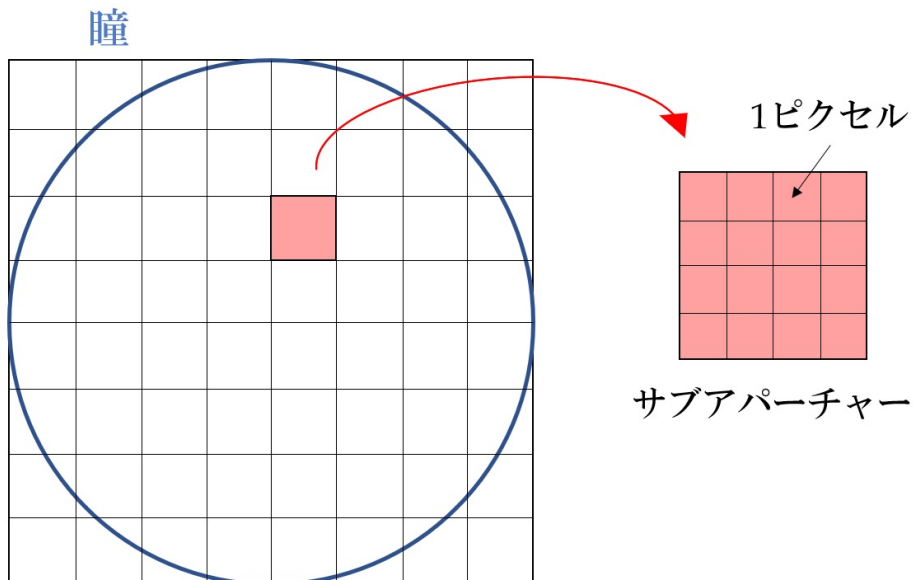


図 2.7 入射瞳と射出瞳の関係。色の違いは視野の違いを表す。光学系に入射する光束サイズを制限するものを開口絞りといい、開口絞りを物体側（図左側）から見たときの像を入射瞳という。一般的に望遠鏡では主鏡や対物レンズが開口絞りであり、開口絞りより物体側にはレンズ等が存在しないため、開口絞り自体が入射瞳となる。一方像側（図右側）から見た開口絞りの像を射出瞳という。また光学系において物体側と像側が対応関係にあるとき共役であるといい、入射瞳と射出瞳は共役関係にある。



瞳の分割数： 8×8 ，サブアパーチャーあたりのピクセル数： 4×4

図 2.8 瞳の分割数とサブアパーチャーの定義。図は瞳の分割数が 8×8 で、1つのサブアパーチャーは 4×4 ピクセルの場合。このとき使用する総ピクセル数は 32×32 である。

したが、グラフの色の違いは分割数の違いを表しており分割数が多くなるにつれて高次波面誤差も小さくなる傾向にある。橙と紫の記号はそれぞれ分割数が 25、32 であり、紫の米印は同じ条件で検出器の読み出しノイズレベルが低い場合 (ピクセルあたりの読み出しノイズが $1e^{-}$) を示す。これを見ると検出器の読み出しノイズが低い場合は 32 分割でも高次波面誤差が低下するが、そうでない場合は 25 分割の場合とほとんど変わらない。実際に、用いる検出器の読み出しノイズは RMS で $1.6e^{-}$ (表 2.1) であり、レーザーガイド星が暗くなると波面測定精度が下がり、高次波面誤差も増加するため分割数は 25 として仕様値を設定する。分割数が 25 の場合、1 つのサブアパーチャのサイズは主鏡上での 0.32m に相当する。

2.2.3 読み出し速度

図 2.9 に補正のタイムスケールを変えた時の高次波面誤差のシミュレーション結果を示す。補正のタイムスケールを短くするほど高次波面誤差は低下する傾向にあるが、シミュレーションにおいて補正のタイムスケールごとに波面測定時のノイズレベルが一定になるようにレーザーガイド星の明るさを変化させている。図中の橙のグラフはレーザーガイド星の明るさが典型的な値のときのものを表しており、読み出し速度は 400frame/sec である。図中の水色のグラフはレーザーガイド星の明るさが典型値の 2 倍のときのものを示し、読み出し速度は 800frame/sec である。レーザーガイド星が明るく、検出器の読み出しノイズが低い場合に図中の水色のレベルまで高次波面誤差を低下できるが、400frame/sec と 800frame/sec の場合では波面誤差はあまり変化していない。

検出器の読み出し速度は読み出すピクセル数 (=使用するセンサーサイズ) に依存しているため (表 2.1)、光学的には最終的な検出器位置における Shak-Hartmann のスポットの結像領域のサイズへ影響するが、これは比較的柔軟に調整できるため仕様値としては 800frame/sec で読み出し可能な光学系とすることとする。800frame/sec で読み出し可能な領域のサイズは表 2.1 より 256×256 ピクセルで、約 $1.66\text{mm} \times 1.66\text{mm}$ である。

2.2.4 ピクセルスケール

図 2.10 にピクセルスケールを変えた時の各マイクロレンズがつくるスポットの重心検出精度の違いを示す。どの条件の場合もサンプリングが 0.3 秒角を下回ると重心検出精度が急激に悪化していることがわかる。これはサンプリングを細かくしすぎた結果、ピクセルあたりに入射する光子数が低下するためであると考えられる。検出器の読み出しノイズの RMS 値が $1.6e^{-}$ であるため、緑と橙のグラフの中間程度の値をとると考えると 0.4 秒角程度で最も重心検出精度は高くなるが、読み出し速度を上げた場合を考えると

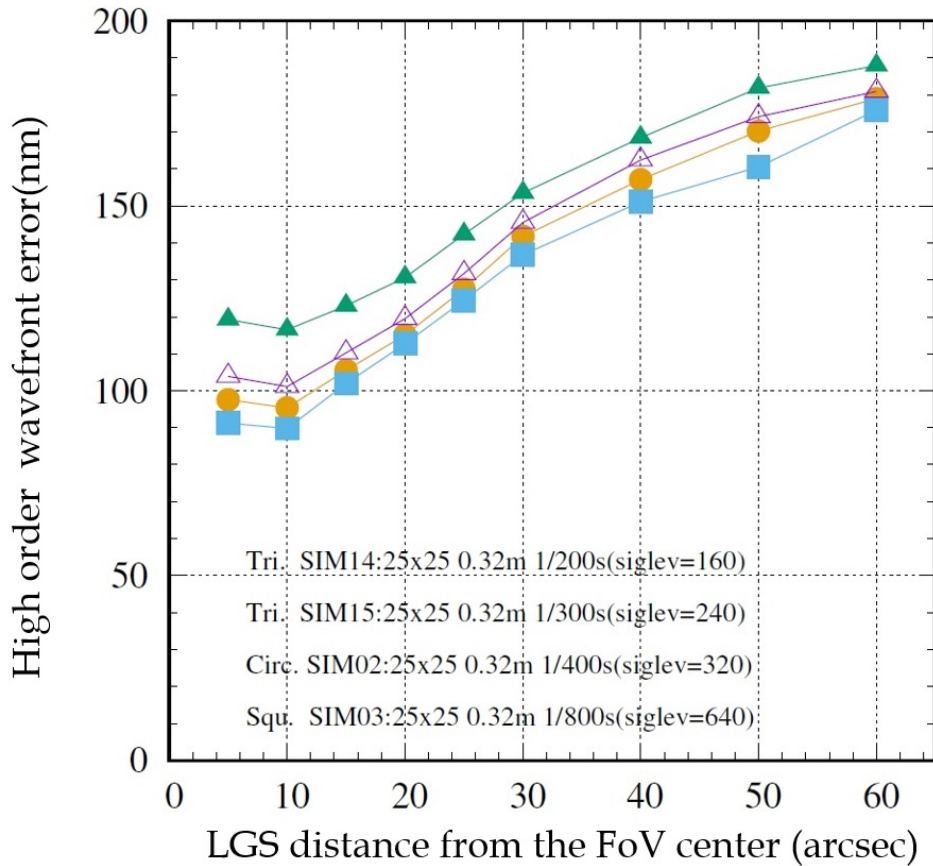


図 2.9 補正のタイムスケールを変えた時の高次波面誤差の変化のシミュレーション結果 [1]。横軸はレーザーガイド星の配置間隔を表す。色の違いは補正のタイムスケールの違いを示し、緑：1/200s、紫：1/300s、橙：1/400s、水色：1/800s 毎となっている。補正のタイムスケールによる変化の違いだけを見るため、波面測定時のレーザーガイド星の明るさは変化させている。いずれも分割数は 25 である。

0.5 秒角程度がノイズレベルに対して重心検出精度の変化が鈍い。以上のことから、ピクセルスケールは 0.5 秒角を仕様値として設定する。

2.2.5 サブアパーチャーの視野

サブアパーチャーの視野は 1 つのサブアパーチャーあたりのピクセル数とピクセルスケールによって決まる (図 2.8 参照)。ピクセルスケールは 0.5 秒角としたので、視野を決める上での自由度はサブアパーチャーあたりのピクセル数のみであるが、瞳の分割数 25 で、読み出し速度 800frame/sec 以上 (使用する総ピクセル数：256×256pix 以下) かつ、サブアパーチャーあたりのピクセル数を整数値にすることを考えるとサブアパーチャーあ

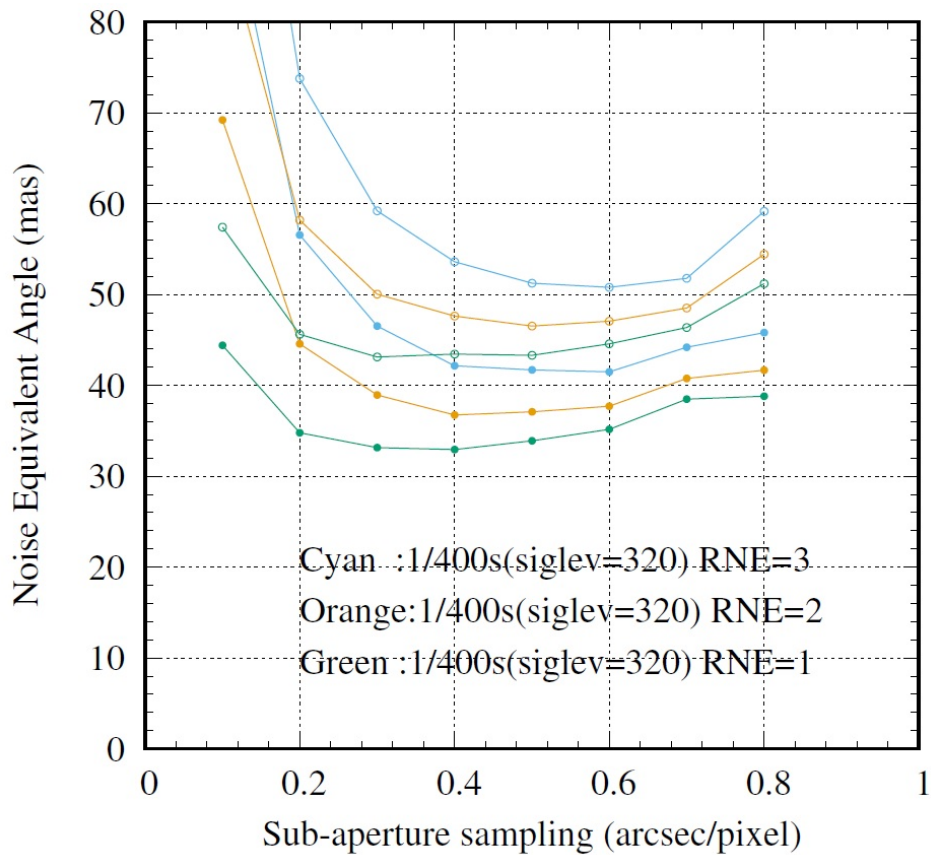


図 2.10 サブアパーチャーのピクセルスケールとスポットの重心検出精度の関係 (シミュレーション結果)[1]。横軸はサブアパーチャーのピクセルスケール、縦軸は各マイクロレンズがつくるスポットの重心検出精度を表す。色の違いは検出器の読み出しノイズの違い (水色: $3e^-$ 、橙: $2e^-$ 、緑: $1e^-$) を示し、同色で記号の異なるグラフはサブアパーチャー内のスポットの結像位置の違いによる重心検出精度の違いを表す。縦軸の値が大きいほど重心検出精度は下がる。

たりのピクセル数に制限がかかる。総ピクセル数の関係式は以下の通りである。

$$\text{総ピクセル数 (一辺)} = \text{瞳の分割数} \times \text{サブアパーチャーあたりのピクセル数} \quad (2.2.1)$$

これより、議論してきた仕様を満たすのはサブアパーチャーあたりのピクセル数が 10 以下の場合であり、このとき総ピクセル数 250、サブアパーチャーの視野は一辺 5 秒角である。図 2.11 に AO188 で補正された後のレーザーガイド星の像を示すが、PSF サイズは FWHM で 1.1 秒角である。波面センサーユニットの波面センサーでも AO188 の可変形鏡によって補正された後の像を見ることになるためレーザーガイド星のサイズが同じような値をとると考えるとスポットの重心検出は視野 4 秒角あれば行えると考えられる。したがってサブアパーチャーの視野の仕様値は一辺 4 秒角として設定する。このとき総ピクセ

ル数は 200×200 である。

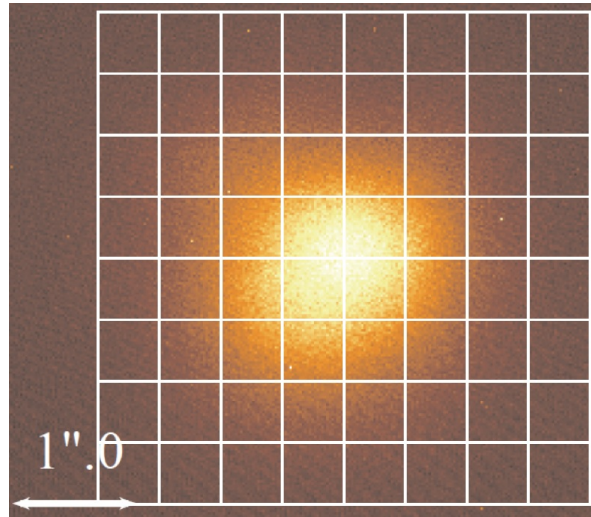


図 2.11 AO188 で補正された後のレーザーガイド星の像 [1]。グリッドは 0.5 秒角サイズで、レーザーガイド星のサイズは FWHM で 1.1 秒角である。

第 3 章

設計にむけて

本章では波面センサーユニットの光学系を設計するにあたってシステム構成の方針を決定するための考察を行った。

3.1 仕様まとめ

前章の議論から波面センサーユニットの光学系の設計仕様値を表 3.1 に示す。また波面センサーユニット装置全体の要請として、他の装置と干渉しないサイズにする必要がある。AO188 からビームスイッチャーの装置間の距離が約 800mm で、AO188 の焦点位置からナスミス台の床まで約 1560mm である。装置全体がこのサイズ以下になるような光学系にする必要がある。さらに赤外ナスミス焦点の観測装置を使って観測する際に、必ず LTAO を用いるというわけではないので波面センサーユニットに光を入れるかどうかによらず、AO188 から射出したビームは同じ経路をたどる必要がある。

3.2 波面センサーユニットの構想

光学系の方向性を決める上で重要になってくるのが、AO188 から射出するビームをどのように波面センサーユニットに導くかということである。LTAO を用いるかどうかによらず AO188 からのビームは同じ経路をたどる必要があるため、方法としては AO188 の直後にできる焦点面にピックオフミラーを入れるか、ビームスプリッターを入れて光路を分離するかのどちらかである。ビームスプリッターを入れる場合、観測装置と共通の光路中に光学素子を入れることになるため、ビームスプリッターによる透過率の低下、ビームスイッチャーに入射するビームの光軸のシフト、および光学的な収差の発生が考えられる。一方でピックオフミラーを用いる場合は観測装置へと入射するビームに影響がないため、まずはじめにピックオフミラーを用いる場合について検討を行った。

表 3.1 波面センサーユニットの光学設計の仕様値

パラメータ	仕様
波面センサーの数	4
レーザーガイド星の間隔	0 - 20 秒角
瞳の分割数	25×25
使用するピクセル数	200×200pix
読み出しサイズ	1.3×1.3mm
読み出し速度	> 800frame/sec
ピクセルスケール	0.5 秒角
サブアパーチャーの視野	4.0 秒角
サブアパーチャーあたりのピクセル数	8×8
波長	589.159nm

3.2.1 ピックオフミラー

ピックオフミラーを用いた場合の波面センサーユニット全体の構成イメージを図 3.1 に示す。1つの回転ステージに4つの波面センサーが搭載され、AO188から射出した光をピックオフミラーによって波面センサーへと導く。このとき観測装置に入る光はAO188からそのまま直進し、ビームスイッチャーへと入射する。回転ステージはレーザーガイド星の視野回転を補正するためのものである。視野回転の補正は装置全体を回転させるか、AO188の視野回転補正装置のように光学的に像を回転させるかの2種類あるが、ピックオフミラーを用いる場合は光路を4方向に分岐するため光学的な補正は難しい。このことから装置全体を回して視野回転を補正する必要がある。像を回転させるKミラーは3枚の鏡で構成されるため、それぞれの鏡の傾きや全体の回転軸合わせなど調整が容易ではない。一方で波面センサーを回転ステージにのせて装置全体を回す場合はステージ全体の位置と傾きを調整すればよいためシンプルである。しかしながら、ステージに波面センサーが載っていることで回転によって波面センサーにかかる重力の方向が変化するためレンズ等のずれによって波面測定の見誤差が増加する可能性がある。

ピックオフミラーを用いる場合において最も考慮すべきは、観測装置へと入射する光をさえぎることなくピックオフ可能かどうかという点である。これはレーザーガイド星が有限の距離にあることから無限遠にある天体と焦点位置が異なるという点において難しくなる。

図 3.2 に物体距離が変化したときの AO188 のつくるそれぞれの焦点面と各焦点面にお

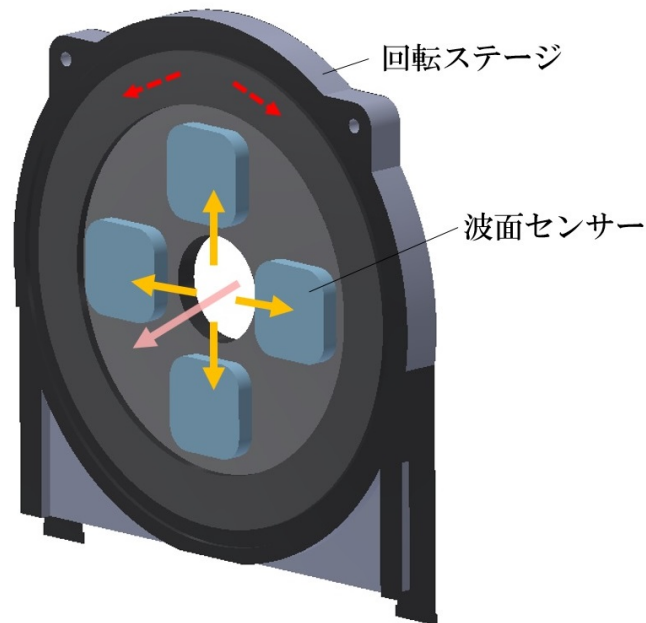


図 3.1 ピックオフミラーを用いた場合の波面センサーユニットの概念図。黄色い矢印はレーザーガイド星の光、桃色の矢印はビームスイッチャーに入射する光を示す。4つの波面センサーが1つの回転ステージに搭載されている。

ける天体の光とレーザーガイド星の像のフットプリントを示す。天体の光は視野 3.1×3.1 秒角を考えた。これは Kyoto3DII の面分光の観測視野に相当する。このとき、観測装置に入射する光を遮らないレーザーガイド星の最小配置間隔は物体距離が 80km の場合と 200km の場合でそれぞれ 13.6 秒角、7.4 秒角である。ピックオフミラーのサイズを考慮すればこの間隔はさらに広がる。レーザーガイド星の配置間隔は天頂観測時でも 10 秒角程度に抑える必要があるためピックオフミラーによる観測視野への影響は避けられない。このことからピックオフミラーによるレーザーガイド星のピックオフは不可能である。したがってビームスプリッターによるピックオフを検討することとする。

3.2.2 ビームスプリッター

ピックオフミラーでレーザーガイド星の光をピックオフする場合はレーザーガイド星ごとにそれぞれの波面センサーへと光を導入できるが、ビームスプリッターの場合には4つのレーザーガイド星の光を一方向に反射させることになる。装置のサイズと AO188 の焦点位置を考えると、ビームスプリッターを焦点面より前に置くことは難しく、ビームスプリッターで反射した後は拡散光へと転じてしまう。このときビームスプリッターで分岐した直後に、さらにそれぞれの波面センサーに光を分岐することは難しいため再結像をさせ

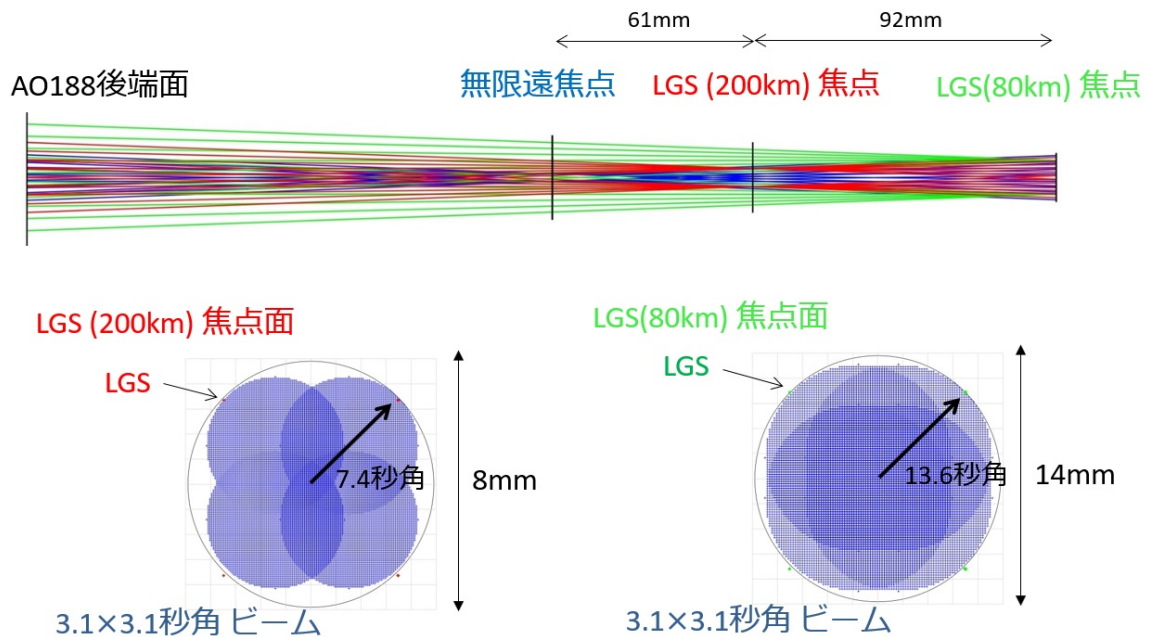


図 3.2 上) 物体距離の違いによる焦点位置の違い。青線が無限遠、赤線が 200km、緑線が 80km の光線を表す。左下) 観測装置の視野として 3.1×3.1 秒角を考えた時の物体距離 200km の焦点面におけるビームのフットプリント。赤い点がレーザーガイド星の像で、青い領域が視野の最周辺に結像する無限遠からの光を表す。レーザーガイド星は観測視野に被らないように配置している。右下) 左下と同様であるが、物体距離が 80km の場合。レーザーガイド星の像は緑の点で表す。

るための光学系を用意し、再結像後の焦点位置でそれぞれの波面センサーへと光を分岐するという方針で設計を進めこととした。なお、これ以降はそれぞれの波面センサーに光を分岐するまでの再結像を行う部分を前置光学系と呼び、前置光学系以降の光学系を単に波面センサーと呼ぶことにする。

3.3 前置光学系

前置光学系では前述のように波面センサーへと光を分岐するまでの再結像を行うわけであるが、レーザーガイド星の配置間隔が非常に狭くなることを考慮するとレーザーガイド星までの距離の変化による焦点位置の変化を補正し、共通の焦点面で各波面センサーへと光を分岐することが望ましい。この場合、前置光学系でフォーカスが調整されるため、個々の波面センサーでフォーカスの調整を行う必要はなくなる。それぞれの波面センサーでフォーカスの調整を行う場合にはレンズや調整のためのステージを 4 つずつ用意しなければならないが、共通の光路で補正してしまえばそれらは不要となるため、コストの面から考えてもメリットがある。

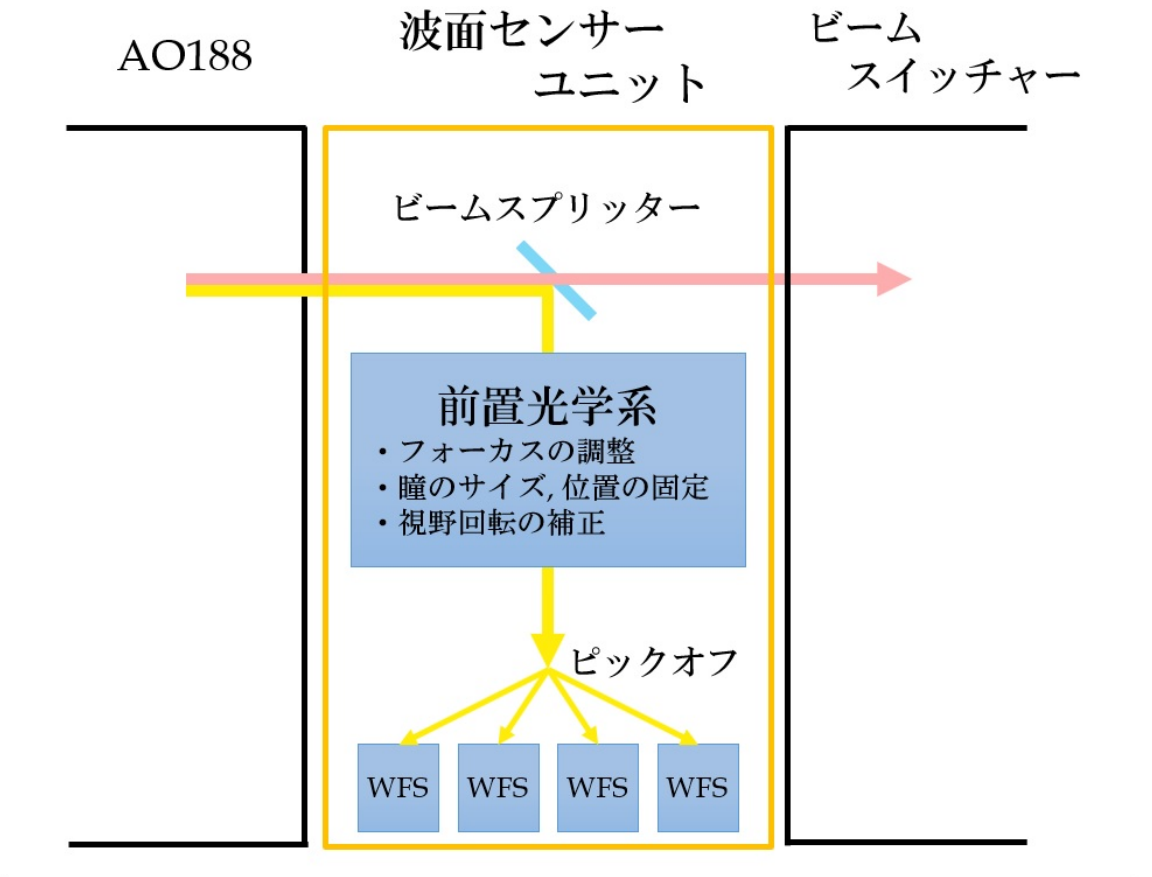
フォーカスの調整に加えて、瞳の結像も同時に考える必要がある。AO188のDM上に瞳が作られるわけであるが、DM以降の光学素子はすべて決まった位置に固定されているため、レーザーガイド星の距離に依存せず瞳の位置は変化しない。また、DM上にできる瞳のサイズもレーザーガイド星の距離や配置間隔によらず同じである。前置光学系でフォーカスの調整を行った際にレーザーガイド星の距離や配置間隔の変化に伴って瞳の位置やサイズが変化してしまう場合には、各波面センサーにその調整機構を設ける必要があり、フォーカスの時と同様に光学素子やステージの数の増加につながる。したがって前置光学系ではフォーカスの調整を行うと同時に、レーザーガイド星の距離や配置間隔によらず瞳の位置とサイズを固定することが望ましい。

さらに、視野回転の補正についても考える。前置光学系で焦点の再結像を行う際、レーザーガイド星の像は再結像の焦点面で回転することになるためこれを補正しなければならない。AO188の焦点面でピックオフミラーを使って分岐させることを考えた時と同様に、4つの波面センサーを前置光学系の光軸周りに回転させることで補正できるが、装置のサイズが限られているため容易ではない。したがって、Kミラーを前置光学系内に配置して視野回転の補正を行うこととする。こうすることで波面センサーの光学系はすべて固定されることになるため、より安定的であると考えられる。以上のことから前置光学系ではフォーカスの調整、瞳の位置とサイズの固定及び視野回転の補正を行う(図3.3)。

3.3.1 視野回転の補正

前置光学系の視野回転補正はKミラー(図3.4)によって行う。Kミラーは3枚の平面鏡によって構成されており、回転軸と入射光線の光軸を一致させて光軸上の光が正三角形の経路をたどるように配置する。この状態を保ちながら回転軸まわりにKミラー全体を回転させることで、その回転角に応じて視野回転を補正することができる。図の場合は視野を180°回転させた状態である。

Kミラーは3枚の鏡によって構成されるため、それぞれの鏡の傾きのズレや回転軸と光軸の不一致などによって射出後の像に視野回転以外の移動や回転を生じさせてしまう。Kミラーの回転による鏡の傾きのズレをできるだけ小さく抑えるためにビームスプリッターによって赤外ナスミス台の床方向にビームを分岐することとした。これは回転軸を重力方向と一致させることで重力のかかる方向の変化による鏡の傾きのずれやKミラー全体のたわみの変化をなくすことができるからである。また前置光学系を通過後、それぞれの波面センサーに光をピックオフするわけであるが、光を垂直に反射させることで床に水平な方向に波面センサーを展開でき、光学系の調整がしやすくなると考えられる。



赤外ナスミス台

図 3.3 波面センサーユニット内の光学系の概念的なレイアウト。ターゲット天体の光 (赤矢印) はビームスプリッターを透過してビームスイッチャーへと入射する。レーザーガイド星の光は (黄色矢印) はビームスプリッターで反射されて前置光学系へと入射し、瞳の位置とサイズを保ちつつフォーカスの調整と視野回転の補正を行う。その後各波面センサーへと光がピックアップされる。

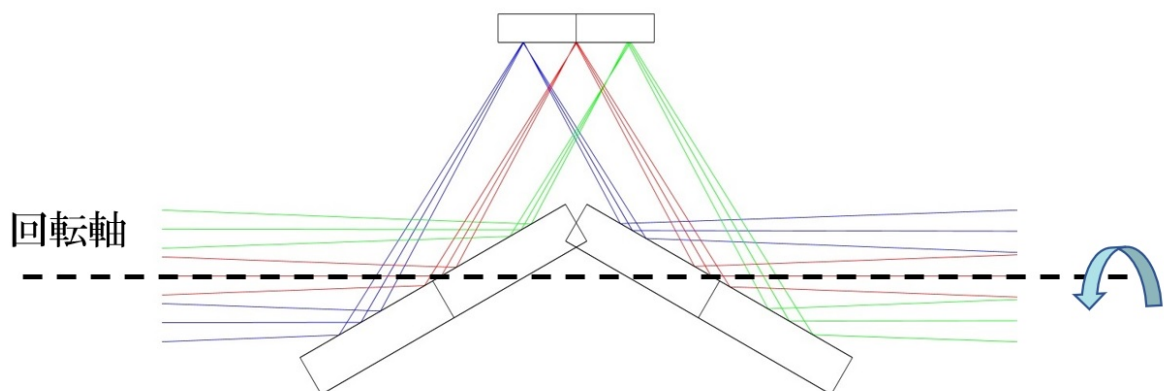


図 3.4 K ミラーの光路図。色の違いは視野の違いを表す。

3.3.2 波面センサーへのピックオフ

4つのレーザーガイド星の光をそれぞれの波面センサーに導くために、前置光学系で再結像された焦点面にピックオフミラーを配置する必要がある。ピックオフ後の波面センサーの光学系は固定であるため、レーザーガイド星までの距離や配置間隔が変化したとしても波面センサーへ入射する主光線は波面センサーの光軸に常に一致している状態を保たなければならない。ここで、主光線とは物体から射出して光学系の入射瞳の中心を通過する光線である。

このときの焦点面に関する条件を図3.5をもとに説明する。図は前置光学系によって再結像された焦点面付近の光線のピックオフミラー前後での光路の違いを示したものである。レーザーガイド星の配置間隔を変える状況を考えて、再結像時の焦点面が反射前の主光線に対して垂直な場合(図左)、主光線の高さは一致するが、配置間隔に応じて焦点位置から波面センサーの距離が変化してしまう。この変化を補正するためには、それぞれの波面センサーを個別のステージにのせて配置間隔に応じて焦点位置からそれぞれの波面センサーまでの距離を変えるか、光学的にレンズ等を動かす必要がある、いずれにしてもステージや光学素子の増加につながる。これを回避するためには再結像時の焦点面を 45° 傾ければよい(図右)。こうすることによってレーザーガイド星の配置間隔を変えたとしてもピックオフミラーを動かすだけで主光線の高さと焦点位置から波面センサーまでの距離の両方を一致させることが可能である。したがって前置光学系ではレーザーガイド星の配置間隔に応じて主光線に対して 45° 傾いた像面に焦点を結ぶ必要がある。

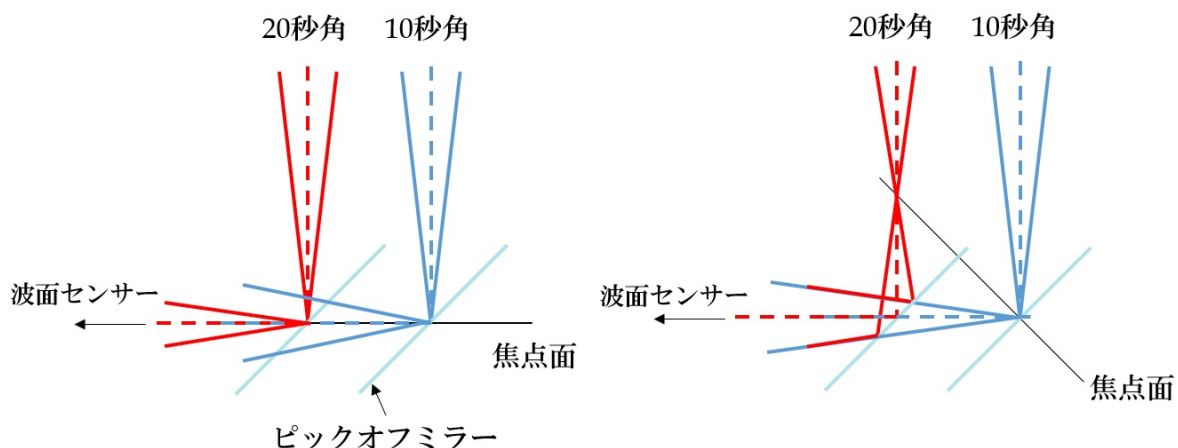


図 3.5 再結像後の焦点面について。図上から入射した光はピックオフミラーによって左側に反射され、1つの波面センサーに入射する。光線の色の違いはレーザーガイド星の配置間隔の違いを示す。左) 焦点面が反射前の光軸に対して垂直な場合。右) 焦点面を反射前の光軸に対して 45° 傾けた場合。点線はそれぞれの場合の主光線を表す。

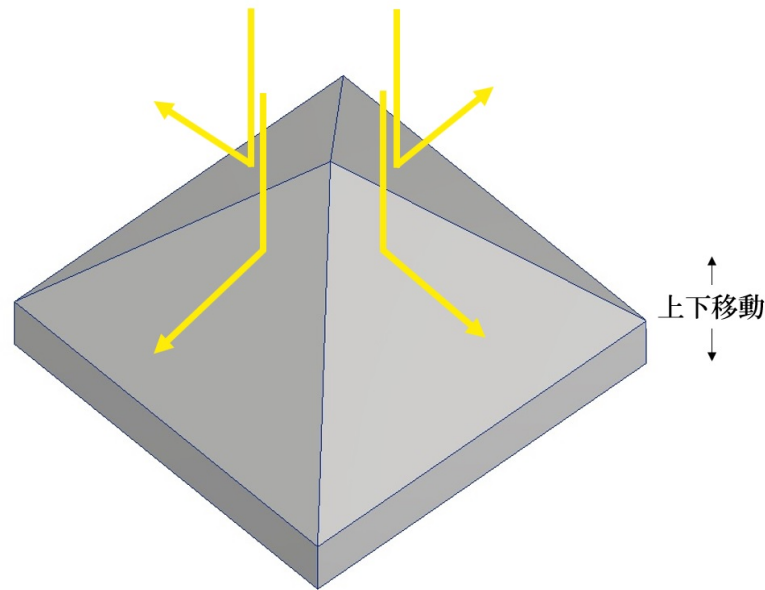


図 3.6 ピラミッドミラーによるピックアップ

またそれぞれの波面センサーへのピックアップは図 3.6 に示すように 4 面が平面鏡になっているピラミッド型の鏡を用いることで 4 つのレーザーガイド星の光を同時に分岐することができ、レーザーガイド星の配置間隔を変化させるときはピラミッドミラーを鉛直方向に移動させることで波面センサーに入射する主光線の高さを一致させることができる。この場合ピックアップに必要なステージは 1 つのみであるので、それぞれの波面センサーにステージを持たせてピックアップする場合よりシンプルである。

ピックアップにおいて注意しなければならない点として、入射する主光線の傾きがある。図 3.5 に示したようにピックアップミラーを 45° 傾けて配置したとき、主光線が傾きをもたずに入射した場合は垂直に反射されるが、傾きを持っていた場合は射出後の光線も傾きを持ってしまい、後続のレンズに入射する角度が変わってしまう。このためには主光線の傾きをできるだけ小さくする必要がある。

主光線の傾きは主光線角と呼ばれ、光軸に対する角度で定義される。図 3.7 に主光線角の小さい光学系の例を示すが、こういった主光線角の小さい光学系はテレセントリックな光学系と呼ばれる。図で示した光学系は 2 つのレンズによって構成されており、レンズとレンズの間に絞りが配置されている。主光線は光線のうちで絞りの中心を通る光線であり、また絞りの端を通る光をマージナル光線という。図で示した例は物体側での主光線角が 0° (光軸と平行) であり、かつ像側での主光線角も 0° である。物体側の主光線が光軸と平行な場合を物体側テレセントリック、像側の主光線が光軸と平行な場合を像側テレセントリックといい、物体側と像側の両方がテレセントリックな場合を両側テレセントリックという。したがって図で示した光学系は両側テレセントリックな光学系である。テレセン

トリックな光学系はレンズの焦点距離に対する絞りの配置位置が重要である。図 3.8 に光学に関する用語の定義を図示するが、物体側テレセントリックにする場合にはレンズから像側焦点距離だけ離れた位置に絞りを配置し、像側テレセントリックにする場合には絞りからレンズの物体側焦点距離だけ離れた位置にレンズを配置すればよい。テレセントリックな光学系は入射瞳や射出瞳に関して次のことが言える。図 3.7 下を見ると明らかであるが、絞りから左側の光学系のみを考えると絞りの中心から出た (左側に進む) 光線がレンズを通過した後にコリメートされているように見ることができる。これは絞りの像がコリメートされているので、絞りの結像位置は無限遠にあることになる。物体側から見たときの絞りの像が入射瞳であるという定義から、物体側テレセントリックの場合には入射瞳が無限遠にあることを意味する。同様に、像側テレセントリックな場合には射出瞳が無限遠にある。

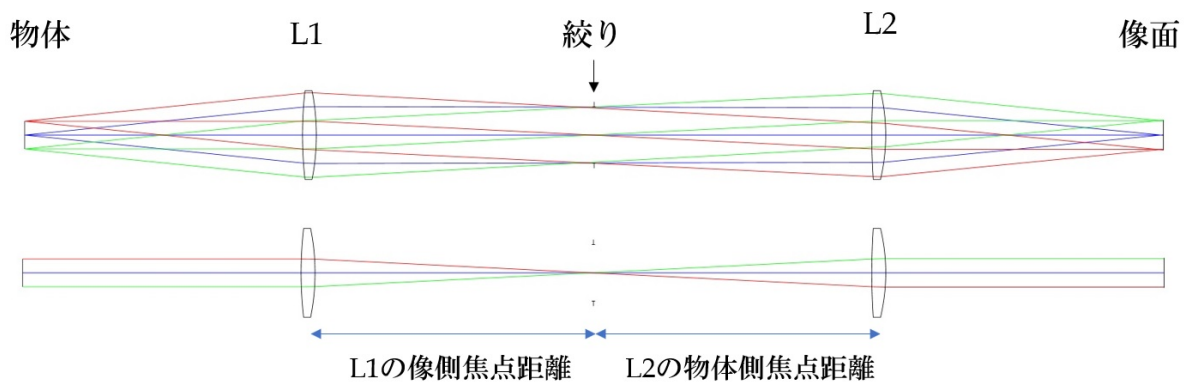


図 3.7 テレセントリックな光学系の例。色の違いは物体高の違いを表しており、上の光路図はマージナル光線と主光線が示されている。下の光路図は上の光路図の主光線のみを抜き出したものである。

実際 AO188 の光学系の主光学系 (図 1.4 の赤い光束の経路) について見てみると主光学系でパワーを持っているのは OAP1 と OAP2 のみであり、それぞれコリメートと再結像を行っているわけであるが、可変形鏡 (開口絞りの像ができる位置) から OAP1、OAP2 までの距離はそれぞれの焦点距離の値にほぼ等しく、AO188 から射出してくる光線はほぼテレセントリックである。したがって、前置光学系ではテレセントリックに入射してくる光線をテレセントリックに射出しなければならず、両側テレセントリックな光学系にする必要があるということである。望遠鏡を含めたシステム全体において絞りは副鏡であるので、前置光学系の場合には絞りの像、つまり瞳から後続して配置するレンズの物体側焦点距離だけ瞳から離してレンズを配置することで原理的に再結像時の光をテレセントリックにすることができる。

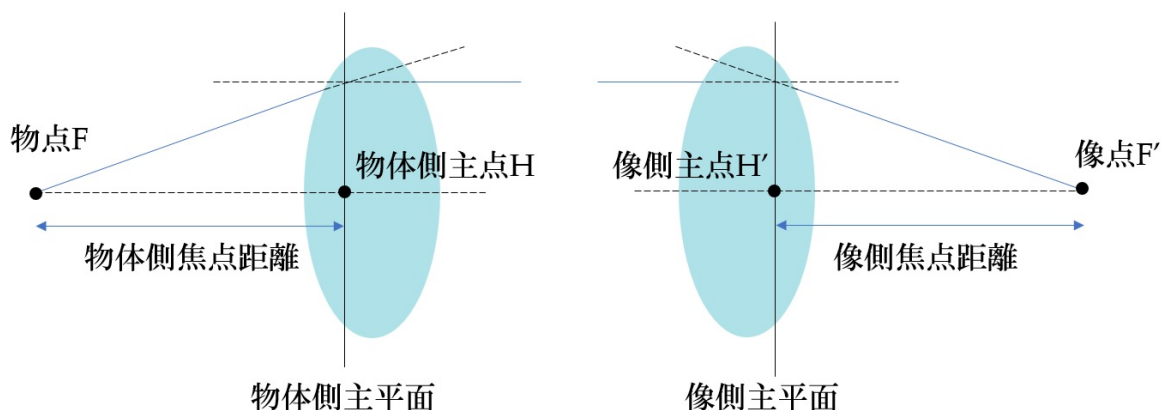


図 3.8 レンズの主平面、主点、焦点距離。物点 F から光軸に対して微小な角度をもった光線がレンズに入射したとき、射出光線が光軸と平行になったときのレンズに入射する前の光線と射出後の光線の交点を光軸に垂直におろした交点を物体側主点といい、主点を含み光軸に垂直な平面を物体側主平面という。物点が屈折率 1(空気と違ってよい)の媒質内にあるとき、物体側焦点距離は物点と物体側主点の距離で定義される。像側についても同様であり、いずれも光線角が 0 に近いときの近軸理論で定義されるものである。

3.3.3 前置光学系の構成と要求まとめ

ここまで、前置光学系の構成について述べてきたが、設計をする上での注意点や前置光学系への要求についてまとめる。

- レーザーガイド星の焦点位置の補正を行い、配置間隔に応じて決まった焦点位置に再結像させる。
- K ミラーによって視野回転の補正を行う。
- レーザーガイド星の焦点位置や配置間隔によらず決まった位置に同じサイズの瞳をつくる。
- 射出後の光線をテレセントリックにする。

以上を念頭に前置光学系の設計を行った。設計の結果は次の章で紹介する。

3.4 波面センサー

波面センサーでは前置光学系から射出してくるビームをコリメートし、マイクロレンズアレイで瞳を分割、マイクロレンズアレイが作る像を検出器に結像させる必要がある。また、レーザーガイド星の結像位置が焦点面上でふらつくことが知られており、これらの補

正についても波面センサー内で行う必要がある。これらを踏まえた上で波面センサーの仕様値を満たすためのレンズに対する条件について幾何光学の観点から考える。

3.4.1 レーザガイド星の像の移動の補正

レーザーガイド星では原理的にターゲット天体の波面の傾き（結像位置の変化）を検出できないことは 2.1.1 で示したが、レーザーガイド星も焦点面で像のふらつきが起きる。レーザーの打ち上げ時、開口 50cm のレーザー送信望遠鏡でビームが打ち上げられるため、ナトリウム層に到達する前にビームが通過する大気揺らぎの領域は直径が概ね 50cm の円筒領域であるのに対し、波面センサーで検出するレーザーガイド星の像は望遠鏡で見えるため、望遠鏡の開口に入射するレーザーの光は概ね 8m サイズの領域を通過してことになる。これは、打ち上げ時は 50cm の領域の大気揺らぎの平均的な傾きによってビームの屈折する方向が変わるのに対し、戻ってくる時は 8m の領域の大気揺らぎの平均的な傾きによってビームの屈折する方向が変わることを意味する。大気揺らぎによる焦点面での結像位置のずれの RMS 値は以下の式によって計算できる [23]。

$$\sigma_{\theta} = 0.062D^{-1/6}r_0^{-5/6}\cos z^{-1/2} \quad (\text{秒角}) \quad (3.4.1)$$

$D(m)$ は開口径、 $r_0(m)$ はフリード長（フリードパラメータとも言う）、 z は天頂角である。フリード長は地上において大気揺らぎによる影響を受けておらず、平面波であるとみなせる領域の直径を表す。この式からマウナケア山頂での典型的なフリード長 $r_0 = 0.2m$ を仮定して、 $D = 50cm$ の場合と $D = 8.2m$ の場合での値を計算すると、天頂の場合でそれぞれ 0.27 秒角、0.17 秒角となり、 $z = 60^\circ$ では 0.38 秒角、0.24 秒角である。いずれにしても打ち上げ時と戻ってくる時でレーザーガイド星の通過経路の違いからレーザーガイド星の焦点面で像のふらつきが生じる。これは原理的にはレーザーを打ち上げる望遠鏡でレーザーの像を観測すればふらつきは生じない。また、波面センサーユニットは AO188 の可変形鏡よりも後ろにあり、可変形鏡はターゲット天体の焦点面における像の移動を補正するが、レーザーガイド星とターゲット天体で像のずれ方が異なるため、これによってもレーザーガイド星の焦点面での像の移動が発生する。

これらの効果によるレーザーガイド星の像の移動を補正するために波面センサーの光路中にこれを補正するための光学系を用意することとする。補正は AO188 の高次波面センサーでも用いられている手法で、オフナー光学系の凸面鏡を高速で傾きを変えられるティップティルトステージにのせて補正するという方法で考える。オフナー光学系とは A. Offner[17] が考案した 2 枚の球面鏡によって構成される等倍の両側テレセントリックなレーザ光学系で（図 3.9 左）、同心の球面鏡を使うことで自動的に収差補正がなされ、鏡なので色収差も発生しない。オフナー光学系は 2 枚の球面鏡で構成されるため、安価でア

ライメントも行いやすいという特徴がある。

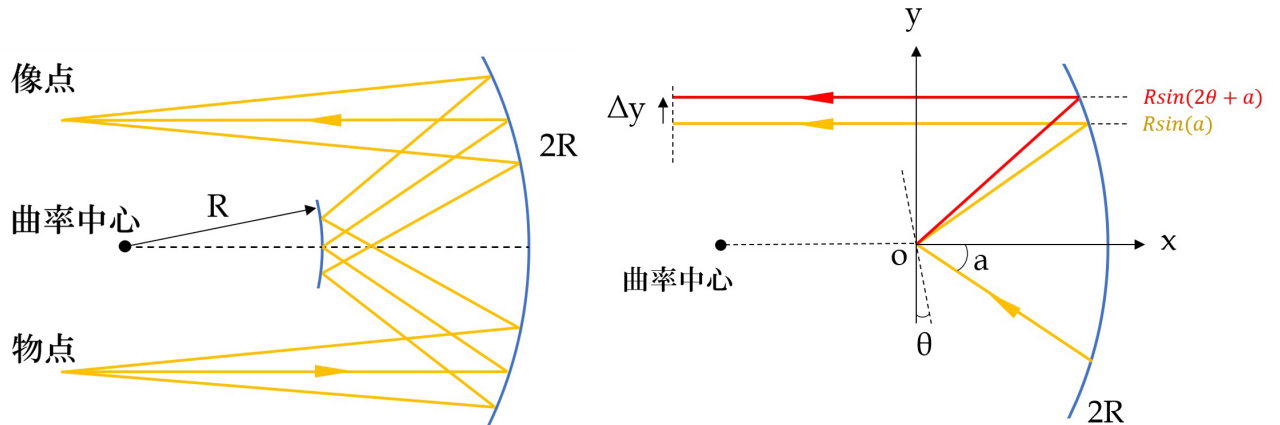


図 3.9 左) オフナー光学系。球面の凸面鏡と凹面鏡によって構成され、凹面鏡の曲率半径は凸面鏡の曲率半径の 2 倍であり、それぞれの鏡の曲率中心が一致している。右) ティップティルトステージによって鏡面が角度 θ だけ傾いたとき像面における結像位置が Δy ずれた様子を示す。座標軸の中心を O にとると凹面鏡までの距離は R である。

図 3.9 右のようにティップティルトステージが角度 θ 傾くことによって像面における結像位置が Δy ずれた状況を考える。傾きがない場合 (図の黄色い線) の反射後の高さを y_0 、 θ 傾いた場合 (図の赤線) を y とし、反射後の光線がもとの光線より 2θ 傾いて射出することを踏まえると、それぞれの値は以下ようになる。

$$y_0 = R \sin(a) \quad (3.4.2)$$

$$y = R \sin(2\theta + a) \quad (3.4.3)$$

したがって焦点面における像の移動 $\Delta y(mm)$ は

$$\Delta y = R (\sin(2\theta + a) - \sin(a)) \quad (mm) \quad (3.4.4)$$

と表すことができる。厳密には凸面鏡は原点 O を中心に傾くわけではないが、原点 O からティップティルトステージの回転中心までの距離が R に対して十分小さければ良い近似値として扱うことができる。AO188 と前置光学系の射出光の F 値をそれぞれ F 、 F' とし、プレートスケール (mm/秒角) を d 、 d' とするとオフナー光学系は等倍のリレー光学系であるので、オフナー光学系の後にできる像面でのプレートスケールは d' に等しく、

$$d' = \frac{F'}{F} d \quad (3.4.5)$$

と表すことができる。したがって、ティップティルトステージが角度 θ 傾いたときの像の移動は

$$\Delta y = \frac{R}{d} \frac{F'}{F} (\sin(2\theta + a) - \sin(a)) \quad (\text{秒角}) \quad (3.4.6)$$

表 3.2 ティップティルトステージによる像の移動量

製品	閉ループ時の傾角 (mrad)	像の移動量 (秒角)
S-330.2	± 1.0	± 0.56
S-330.4	± 2.5	± 1.40
S-330.8	± 5.0	± 2.81

である。オフナー光学系に入射する光軸高 y_0 を用いて表すと、式 (3.4.2) より以下のように書くことができる。

$$\Delta y = \frac{1}{d} \frac{F}{F'} \left\{ \sqrt{R^2 - y_0^2} \sin 2\theta - y_0(1 - \cos 2\theta) \right\} \quad (\text{秒角}) \quad (3.4.7)$$

ティップティルトステージは Physik Instrumente 社の S-330 Piezo Tip/Tilt platform[9] の 2 軸ステージを用いることを想定し像の移動量の計算を行った。 $R = 150\text{mm}$, $y_0 = 30\text{mm}$ とし、前置光学系が等倍の結像をする場合での計算結果を表 3.2 に示す。なお AO188 の F 値は 13.9、プレートスケール d は 0.533mm/秒角 である。

3.4.2 検出器までの光学系

オフナー光学系以降の検出器に至るまでの光学系の構成について考える。前置光学系の作る像はオフナー光学系によって等倍リレーされるので、コリメーターによって像をコリメートし、その光路中にできる瞳位置にマイクロレンズアレイを配置すればよい。マイクロレンズアレイによって瞳が分割されるわけであるが、この瞳径のサイズによって光学系の構成が変わってくる。最終的に検出器上に作られる像のサイズは瞳径に等しいが、検出器の読み出し範囲が仕様値で決まっているためそのサイズは直径 1.3mm にする必要がある。瞳の分割数の仕様値は 25 であるので、サブアパーチャーのサイズは検出器上で $52\mu\text{m}$ である。またサブアパーチャーの視野の仕様値は 4 秒角であるため、これを満たす光学系でなければならない。

光学系の構成を決めるために様々なパラメーターがどういう関係性にあるのかを一般化して考える。オフナー光学系は等倍リレー光学系であるため、コリメーターに入射してくるビームは前置光学系の再結像時のビームと等価である。前節と同様に、前置光学系の再結像時の F 値を F' とし、プレートスケールを d' とする。コリメーターの焦点距離を f_{col} 、マイクロレンズアレイのピッチを p 、マイクロレンズの焦点距離を f_{MLA} とする。このときの状況を図 3.10 に示す。前置光学系の射出光はテレセントリックであり、オフナー光学系は両側テレセントリックな光学系であるため、コリメーターに入射する前、瞳は無限遠にある。したがって瞳位置はコリメーターから f_{col} だけ離れた位置にできる。また、マイクロレンズアレイはコリメートされた光路中に配置されるため、マイク

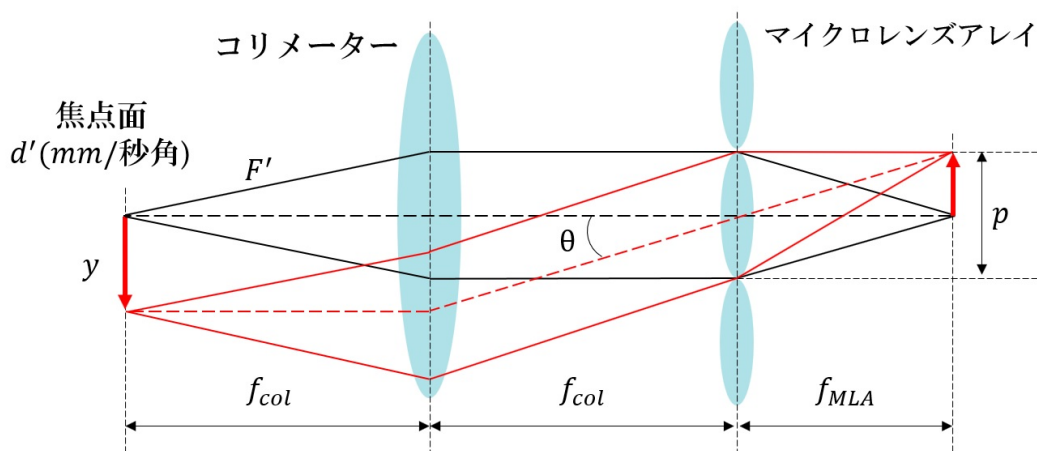


図 3.10 コリメーターとマイクロレンズアレイの関係。主光線を太い点線で示した。

レンズがつくる像はマイクロレンズから f_{MLA} 離れた位置にできる。このとき、サブアパーチャーの端に結像するような光線 (図中の赤線) を考え、焦点面におけるスケールを $y(mm)$ とする。このとき、この光線の主光線はマイクロレンズの中心に結像する光線 (図中の黒線) の主光線に対し角度 θ 傾いている。サブアパーチャーの視野はマイクロレンズの端に結像する像で定義されるため、以下の関係が成り立つ。

$$Sub\ Aperture\ FoV = \frac{2y}{d'} \quad (\text{秒角}) \quad (3.4.8)$$

ここで、係数の 2 は考えている光線がサブアパーチャーの中心からそのサイズの半分 ($p/2$) の位置に結像するからである。また、図の幾何から

$$\tan \theta = \frac{y}{f_{col}} = \frac{p/2}{f_{MLA}} \quad (3.4.9)$$

$$y = \frac{p}{2} \frac{f_{col}}{f_{MLA}} \quad (3.4.10)$$

また、マイクロレンズアレイ上での瞳径を D_{pupil} 、瞳の分割数を N とすると以下の関係式が成り立つ。

$$D_{pupil} = Np \quad (3.4.11)$$

$$F' = \frac{f_{col}}{D_{pupil}} \quad (3.4.12)$$

この 2 つの式から、コリメーターの焦点距離 f_{col} は

$$f_{col} = D_{pupil} F' = NpF' \quad (3.4.13)$$

式 (3.4.13) を式 (3.4.10) に代入して、

$$y = \frac{Np^2}{2} \frac{F'}{f_{MLA}} \quad (3.4.14)$$

表 3.3 マイクロレンズアレイ (MLA) とリレー光学系の各パラメータ

パラメータ	値
MLA ピッチ	150 μm
MLA 焦点距離	3.66mm
MLA 上の瞳径	3.75mm
リレー光学系縮小比	2.88:1

これを式 (3.4.8) に代入すればサブアパーチャーの視野に関する以下の関係式が求まる。

$$\text{Sub Aperture FoV} = \frac{F'}{d'} \frac{Np^2}{f_{MLA}} \quad (\text{秒角}) \quad (3.4.15)$$

ここで前節で示したプレートスケールに関する関係式 (3.4.5) を用いればさらに、

$$\text{Sub Aperture FoV} = \frac{F}{d} \frac{Np^2}{f_{MLA}} \quad (\text{秒角}) \quad (3.4.16)$$

と書ける。 F と d はそれぞれ AO188 の射出光の F 値とプレートスケールであるため、この値は定数として考えることができる。これはサブアパーチャーの視野が瞳の分割数とマイクロレンズの焦点距離及びピッチのみで決まっていることがわかる。

ピッチが 52 μm の場合、マイクロレンズアレイの直後に検出器を置くことも考えられるが、サブアパーチャーの視野 4 秒角を満たす場合のマイクロレンズアレイの焦点距離は 0.44mm であり、マウントが難しい。マイクロレンズアレイの後に 1:1 のリレーレンズを用いれば光学系としては可能であるが、ピッチが小さいためマイクロレンズアレイの中心の位置決めが難しくなると考えられる。市販されているマイクロレンズアレイの多くはピッチが 100~300 μm であり、広く使われているものの多くはピッチが 150 μm や 300 μm のものであることを踏まえると、どちらかのピッチのマイクロレンズアレイが望ましいと考えられる。

ピッチが 150 μm のときマイクロレンズアレイ上に作られる瞳径は 3.75mm で、300 μm の場合は 7.5mm である。最終的に検出器上で 1.3mm に収めなければならないため、マイクロレンズアレイの直後にできる像を縮小リレーして検出器に結像させる必要がある。150 μm ピッチの場合は縮小比はおよそ 2.88:1 で、300 μm ピッチの場合は 5.77:1 である。後者の場合、縮小比が大きく最終像面での像面湾曲や歪曲収差等の発生が考えられるためマイクロレンズアレイのピッチは 150 μm のものを採用することとし、2:88:1 の縮小光学系でマイクロレンズアレイの像を検出器にリレーすることとする。表 3.3 に幾何光学から求めたマイクロレンズアレイとリレー光学系のパラメータを示す。

3.5 AO188 で発生する収差

レーザーガイド星の光は AO188 の主光学系を経て波面センサーユニットに入射する。主光学系中でパワーをもつものはコリメートする OAP1 と、コリメート光を再結像する OAP2 で、どちらも軸外し放物面鏡である。放物面鏡は入射した平行光を光軸上に無収差に結像する鏡であるが、入射光の光軸と鏡の光軸を一致させると、入射した方向に反射してしまうため、可変形鏡を配置することができない。このため放物面鏡の軸を入射光線の光軸から外すことで反射光に角度をつけ可変形鏡の挿入を可能としている。このとき、コリメートと再結像を行う 2 枚の軸外し放物面鏡は無限遠に対して共役な配置となっており、無限遠にある天体に対して最も収差が少なくなるように最適化されている。一方でレーザーガイド星は有限な距離にあるため、無限遠にある物体がつくる焦点位置からずれた位置に焦点面がある。これにより、焦点面から放物面鏡までの距離はレーザーガイド星までの距離によって変化し、その変化量に応じて理想的な無限遠の共役位置からずれることになる。したがって 2 枚の軸外し放物面鏡によって有限距離にあるレーザーガイド星の像に収差が発生する。これらの収差は放物面鏡が軸外しであるために光軸に対して回転対称ではなくなる。

AO188 のそれぞれの物体距離に対応する焦点面における各視野のスポットダイアグラムを図 3.12～図 3.14 に示す。視野点の定義は図 3.11 に示す。スポットダイアグラムの図中の丸記号は回折限界時の PSF サイズを示すエアリー半径であるが、無限遠の場合のスポットサイズは視野中心から離れるにしたがって肥大する傾向が見られるが、概ねエアリー半径程度もしくはそれ以下である。一方で 90km や 200km におけるスポットは物体距離が近くなるにつれて悪くなる傾向を示しており、90km の視野中心から 20 秒角離れた 4 点では 0.2 秒角程度の広がりをもつ。また、それぞれの視野の波面収差マップを図 3.15～図 3.17 に示し、波面収差の PTV (peak to valley) 値と RMS 値を表 3.4～表 3.6 に示す。90km や 200km の波面収差の PTV 値と RMS 値は無限遠の値に対してそれぞれ概ね一桁悪い値をとる。

これら有限距離にある場合の収差を補正するためには、収差の発生元が非軸対称な軸外し放物面鏡によるものであるので前置光学系で非軸対称な光学系を用意する必要がある。レーザーガイド星までの距離変化による焦点位置の変化補正や瞳に関する要求を考えると光学系が複雑化することが予想され、光学系の調整等も難しくなる。実際、Gemini の多層共役補償光学系 (Multi Conjugate Adaptive Optics) のシステム CANOPUS ではレーザーガイド星の波面センサーは無限遠共役の 2 枚の軸外し放物面鏡の後に配置されているが、視野中心 1 点と視野中心から 30 秒角離れた 4 点にあるレーザーガイド星の像と瞳の収差補正に 2 つのズームレンズと 6 つの倍率調整レンズを組み合わせ、計 8 つのス

テッピングモーターによって機械制御している [18]。レーザーガイド星の配置間隔を固定している点と、AO のタイプが異なるものの光学的な構図は同じである。

これらのことを踏まえて、本研究では次のような方針で設計を進めることとする。AO188 で発生するレーザーガイド星に対する収差は、2 枚の固定された軸外し放物面鏡によって発生しているがレーザーガイド星の距離と視野位置が決まれば収差の出方は一意に決まる。したがって前置光学系では AO188 で発生する収差を補正しない代わりに発生した収差が変化しないように再結像し、波面センサーで得られた波面から AO188 で発生する収差を引くことで大気揺らぎの波面測定を行うこととする。これは波面測定時に補正するか波面測定後に補正するという違いがあるが、どちらにせよ発生する収差量は変わらず、補正後の収差をできるだけ小さくするという立場は変わらないので原理的には等価である。

以上の議論をまとめると、前置光学系は AO188 の作る焦点面における像が仮に点像であった場合にそれを点像として再結像する光学系とし、AO188 で発生する波面収差は測定された波面から引き算して考えるということである。実際には可変形鏡によって補正される波面は視野中心に最適化されていることから、レーザーガイド星の視野位置では方向の違いによる残差波面が上乘せされる。したがって、波面センサーでは大気揺らぎによる波面収差、AO188 で発生する波面収差及び視野中心に最適化された波面からの残差波面の足し合わせを見るわけであるが、トモグラフィーによって視野中心に最適化された波面からの残差量は推定できるため原理的には波面センサーで得られたデータから大気揺らぎのみによる波面収差を検出できるはずである。

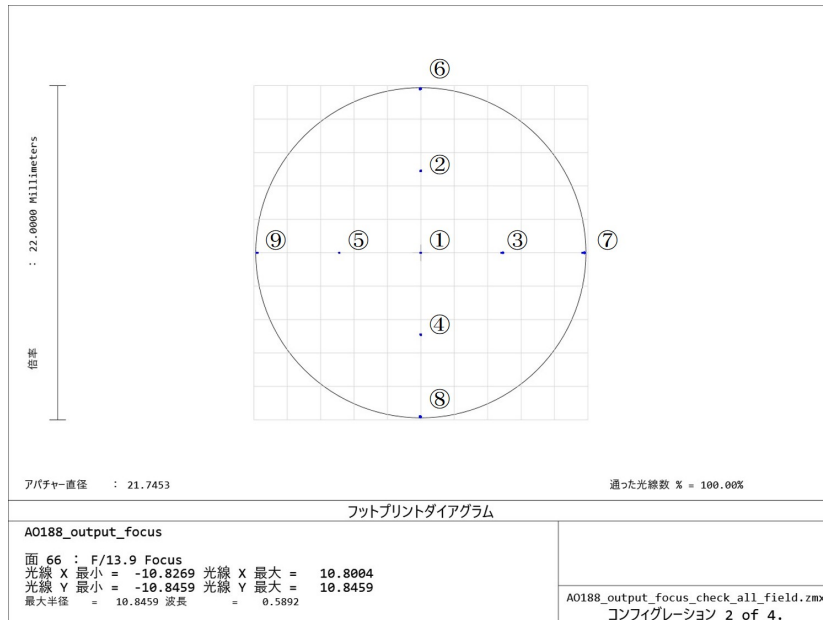


図 3.11 視野点の定義。それぞれ視野中心の 1 点、半径 10 秒角の 4 点、半径 20 秒角の 4 点である。

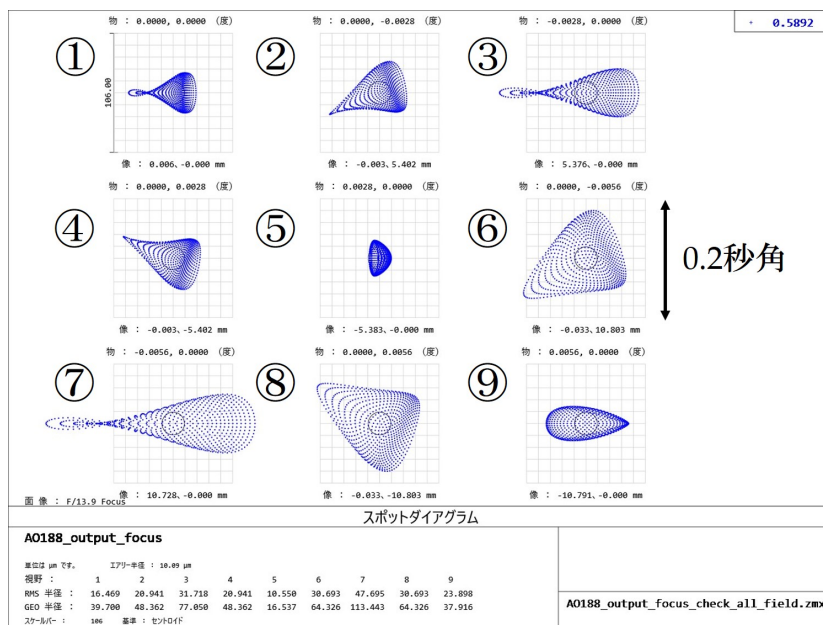


図 3.12 90km の場合の各視野のスポットダイアグラム。図中の丸記号はエアリー半径を示す。

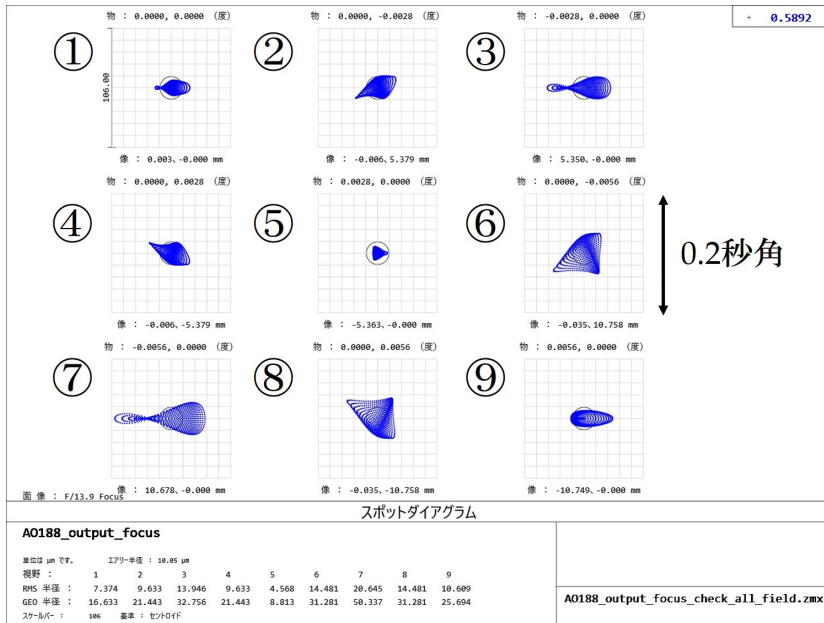


図 3.13 200km の場合の各視野のスポットダイアグラム。
 図中の丸記号はエアリー半径を示す。

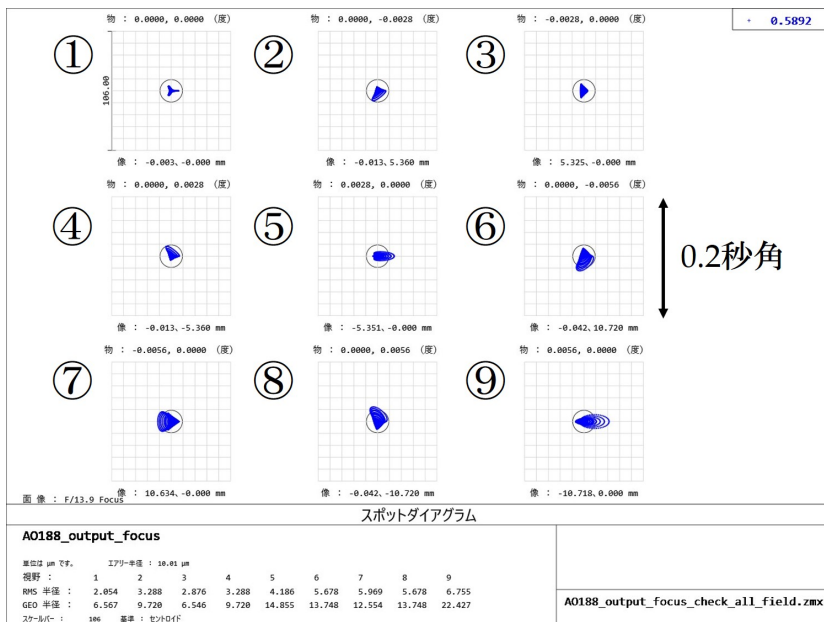


図 3.14 無限遠の場合の各視野のスポットダイアグラム。図
 中の丸記号はエアリー半径を示す。

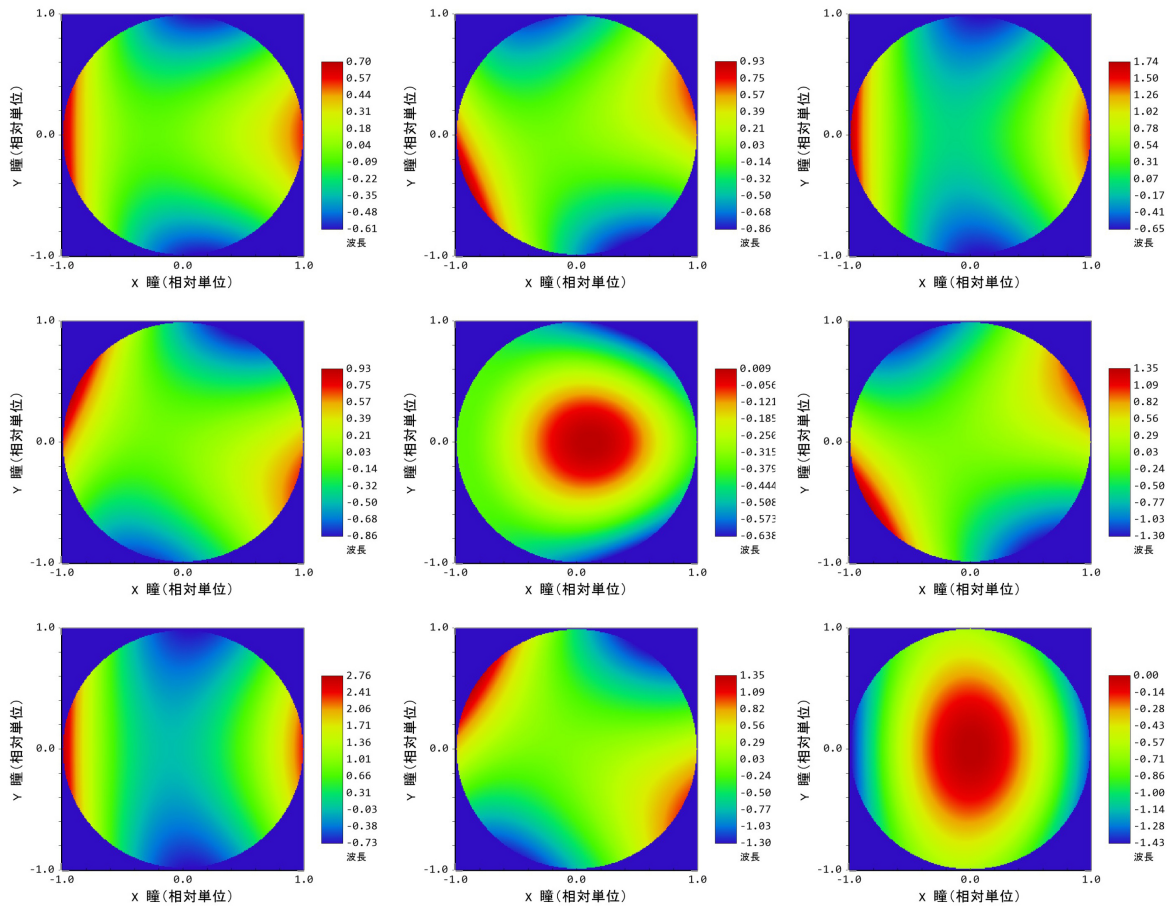


図 3.15 90km の各視野における波面収差マップ。視野位置はスポットダイアグラムの配置と対応している。

表 3.4 90km の各視野における波面の RMS 値と PV 値。値は波長比 (589.159nm) である。

視野点	PV 値	RMS 値
1	1.3125	0.2540
2	1.7868	0.3347
3	2.3900	0.4833
4	1.7868	0.3347
5	0.6463	0.1509
6	2.6507	0.5048
7	3.4902	0.7266
8	2.6507	0.5048
9	1.4257	0.3329

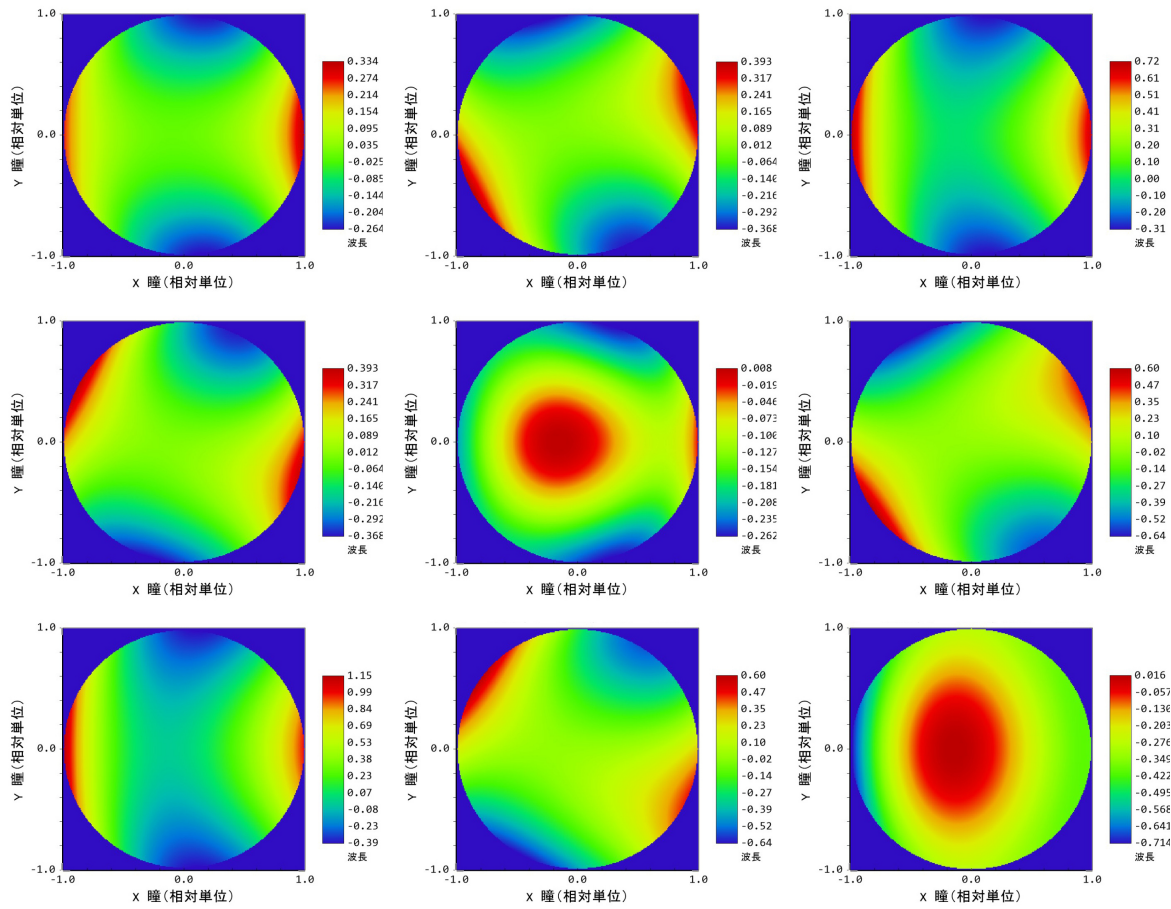


図 3.16 200km の各視野における波面収差マップ。視野位置はスポットダイアグラムの配置と対応している。

表 3.5 200km の各視野における波面の RMS 値と PV 値。値は波長比 (589.159nm) である。

視野点	PV 値	RMS 値
1	0.5977	0.1135
2	0.7601	0.1516
3	1.0227	0.2110
4	0.7601	0.1516
5	0.2697	0.0652
6	1.2364	0.2312
7	1.5342	0.3131
8	1.2364	0.2312
9	0.7299	0.1421

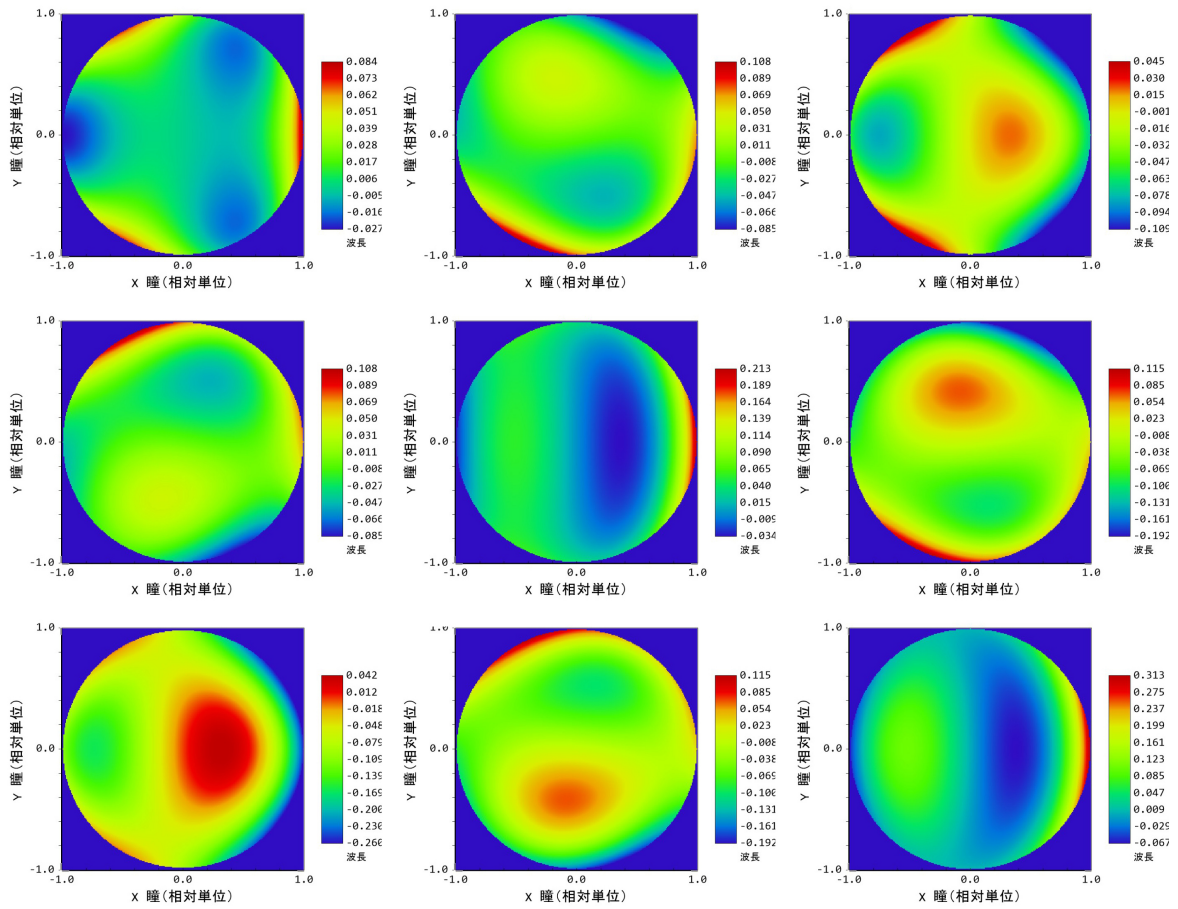


図 3.17 無限遠の各視野における波面収差マップ。視野位置はスポットダイアグラムの配置と対応している。

表 3.6 無限遠の各視野における波面の RMS 値と PV 値。値は波長比 (589.159nm) である。

視野点	PV 値	RMS 値
1	0.1110	0.0185
2	0.1931	0.0282
3	0.1545	0.0301
4	0.1931	0.0282
5	0.2477	0.0373
6	0.3074	0.0491
7	0.3024	0.0630
8	0.3074	0.0491
9	0.3808	0.0609

第 4 章

設計結果と考察

本章では前章までの議論を踏まえて前置光学系と波面センサーの設計をした結果について述べ、それらの評価を行う。設計は光学シミュレーションソフト Zemax を用いて行った。Zemax ではレンズの材質や厚み、曲率半径やレンズ間隔などの光学的なパラメータを設定することで、光学系に入射した光線のふるまいを調べることができ、またそれをもとにレンズの各パラメータを設定した制限内で最適化することができるソフトで、光学設計では広く使われている。

4.1 前置光学系の設計結果 1

4.1.1 光学系概要

前置光学系の設計ではレーザーガイド星までの距離が 90km、200km、無限遠の 3 つの場合それぞれにおいて、4 つのレーザーガイド星が視野中心から半径 10 秒角、20 秒角に配置された場合、および視野中心にある場合の 9 つの視野点を想定した。視野点の配置は図 3.11 と同じであるが、レーザーガイド星の配置間隔が変化したときに再結像の焦点位置が変化するためレーザーガイド星の距離が同じでも配置間隔が変わったときは別のコンフィグレーションとして考える。補償光学を用いて観測を行うのは一般に高度 30° までであることを踏まえると性能としては 200km 程度までで十分であると思われるが、比較のために無限遠の場合についても光学系として成り立つように設計を行った。

設計した前置光学系のレイアウトを図 4.1 に示す。この光学系は凸レンズ (L1) と凹レンズ (L2) がその間隔を保ったままレーザーガイド星の距離に応じて移動する。全コンフィグレーションにおける L1 と L2 のレンズペアの移動量は約 109mm で、90 から 200 のレンジでの移動量は約 65mm である。L3 についてはコンフィグレーションの変化に伴って動くことを許したが、その移動量は全コンフィグレーションの変化で約 0.9mm でありほ



図 4.1 設計した前置光学系のレイアウトで、レーザーガイド星が 90km で配置間隔が 10 秒角の場合。

とんど変化していない。

フォーカシング系ではレーザーガイド星の距離の変化による焦点位置の変化を補正しつつ、再結像時の焦点位置をレーザーガイド星の間隔に応じて最適な位置に調整する。このとき、どのコンフィグレーションにおいても決まった位置に瞳像をつくる。この瞳像はフォーカシング系と再結像レンズの間に配置した視野回転補正を行う K ミラーの、2枚目の鏡付近につくられる。波面センサーユニットのエンベロープは AO188 のフランジ面から 800mm よりも小さくしなければならない。AO188 内の K ミラーは視野 2.7 分角のビームを視野回転させるため回転ステージを含めた物理的サイズが大きくなっている。このことを考えると K ミラーのサイズを小さくすることは装置全体の小型化につながる。また、大きな光学系を高精度に回転させなければならないことを考えると回転ステージのコスト増加にもつながる。したがって、全コンフィグレーションで最も光束が細くなる瞳位置に K ミラーを配置した。また、K ミラーの機械的なサイズを考慮してフォーカシング系、再結像系までの距離に余裕を持たせている。K ミラーの 1 枚目と 3 枚目の平面鏡によって反射される光線のうち、鏡の中心から最も外側にある光線は概ね長軸方向に 65mm で、2 枚目の鏡の場合は 34mm 程度である。AO188 の K ミラーのサイズは光軸方向に約 400mm であるのに対し、波面センサーユニットとして必要な K ミラーサイズは光軸方向に 130mm 程度である。このサイズは瞳径サイズで決まっているので、フォーカシング系全体の焦点距離で決まるとも言える。フォーカシング系の焦点距離はコンフィグレーションによって変化するが、平均的には 400mm である。また、K ミラーはコリメート光中に配置されるため、各鏡の鏡面精度が直接的に波面へと影響を与えるため K ミラーの平面鏡は特に高精度でなければならない。

K ミラーで視野回転が補正された後は 3 枚のレンズで構成される再結像系によって焦点面に再結像をする。全コンフィグレーションでフォーカシング系によって作られる瞳位置は同じであるため、再結像系は固定された状態である。再結像系の焦点距離は 300mm であるので AO188 の像を 4:3 でリレーし再結像時の F 値は 10.4 である。AO188 の焦点位置からナスミス台の床までおよそ 1,560mm で、焦点位置から再結像の焦点位置までおよそ 1,140mm であるので床までは 40cm 程余裕がある。再結像系の焦点距離を長くすると床までのスペースが限られてしまうことと、ピックアップ後に配置されるオフナー光学系によるレーザーガイド星の像移動の補正において、縮小された方が相対的にストローク量が大きくなるため有利であることを考慮して 4:3 の縮小光学系とした。

4.1.2 コンフィグレーションの変化と瞳の固定

図 4.2 に全コンフィグレーションにおいてフォーカシング系の L1 と L2 のペアが最も離れているときのレイアウトを示す。図下は無遠、視野中心の場合で L2 と L3 の光軸

上の間隔が 10mm 程度である。200km までを考えればこの間隔は 55mm 程度あるので機械的には問題ないと考えられる。焦点面は視野中心の場合が最も再結像系から遠く、20 秒角の場合が最も近くなる。その差は 8mm 程度である。

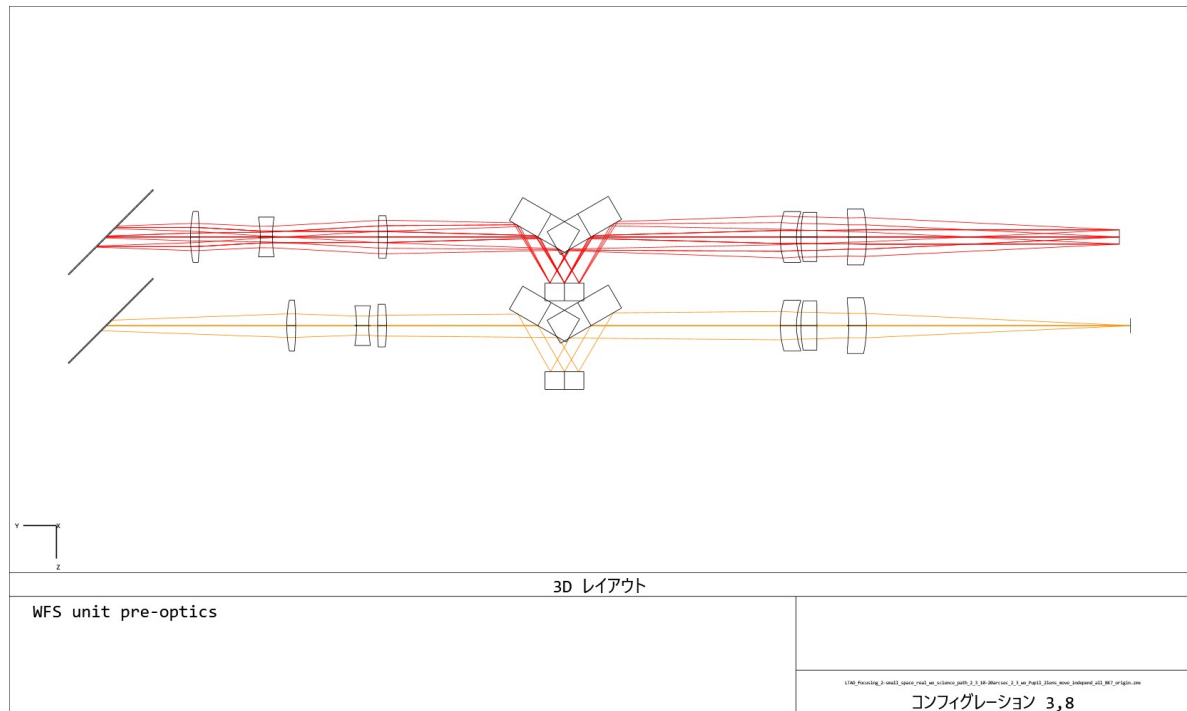


図 4.2 フォーカシング系の L1 と L2 のペアが最も離れているときのレイアウト。上) 物体距離が 90km で配置間隔が 20 秒角の場合。下) 物体距離が無遠で視野中心の場合。

全コンフィグレーションで近軸計算から算出される瞳位置の変化は 0.01mm 以下である。フォーカシング系の移動によらず瞳位置が固定される理由を図 4.3 をもとに説明する。視野中心から離れた位置に結像する光線のうちの主光線を考える (図中赤線)。AO188 の焦点はテレセントリックであるため、主光線は光軸に対して平行である。この光線は凸レンズ (L1) によって光軸と交わる方向に屈折する。このとき、凹レンズ (L2) の像側焦点にこの光線が向かうように L2 の位置を決めることで、主光線は再び光軸と平行になる。したがって L1-L2 の間隔を変えなければ、L1 と L2 のペアが移動しても L2 で屈折した後の主光線は光軸と平行になる。よって瞳位置は L3 の焦点距離で決定されることになる。また視野中心のマージナル光線を考えると、L1 と L2 のペアの位置によらず瞳位置は同じであるため、L2 で屈折した後のマージナル光線が L3 の物体側焦点 (図中 O') から射出したかのように見える位置に L1 と L2 のペアを置くことで L3 によってマージナル光線はコリメートされる。これにより、すべてのコンフィグレーションで瞳位置を固定しつつレーザーガイド星の距離の変化による焦点位置のずれを補正することができる。

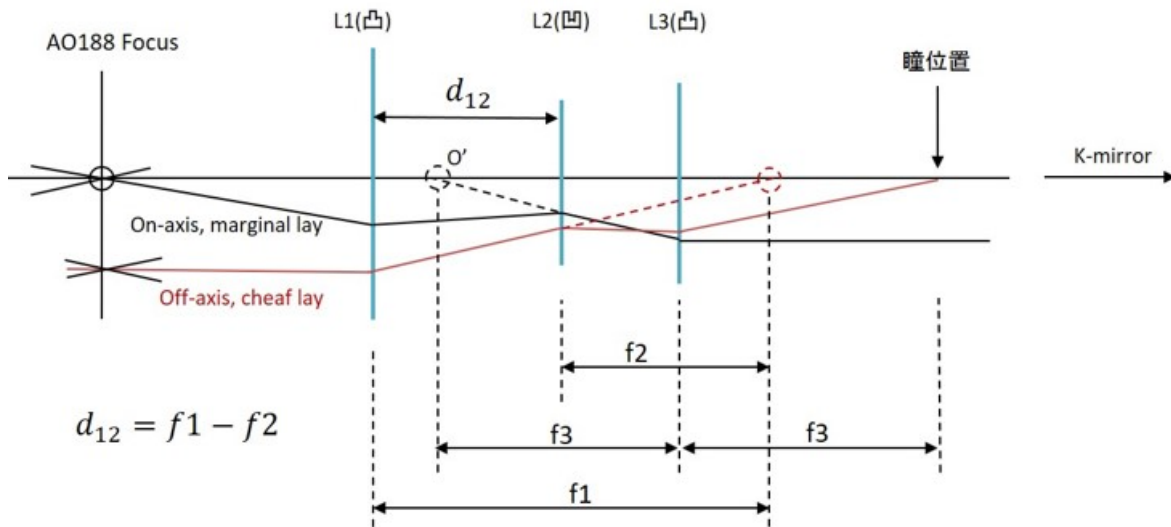


図 4.3 フォーカシング系のコンセプト。視野中心のマージナル光線 (黒) と軸外の主光線 (赤) が L1~L3 によって屈折する様子を示す。

原理的には L1 と L2 の間隔を固定し、そのレンズペアを L3(固定) に対して移動させることで、瞳位置を固定しつつ焦点位置のずれを補正できるが、設計した光学系では L3 の移動を許した。

図 4.4 に全コンフィグレーションでのフォーカシング系の各レンズのレンズ位置の変化を示す。L1 と L2 の間隔は一定であるが、物体距離によってレンズペアの位置が変化している。レーザーガイド星までの距離が同じで間隔のみが変化するとき、視野中心から離れるにしたがって再結像時の焦点面を再結像系に対して近づけなければならないため、L1 と L2 のレンズペアがビームスプリッターに近づくことによってこの調整を行っている。また L3 は物体距離が遠くなるにつれて僅かにビームスプリッター方向に移動している。

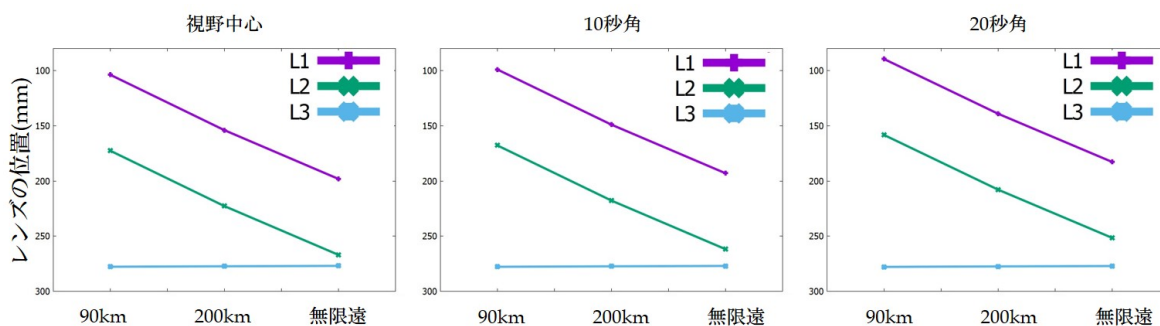


図 4.4 全コンフィグレーションでの L1、L2、L3 のレンズ位置の変化。レンズ位置は AO188 の射出光を前置光学系に分岐するビームスプリッターからの距離を示す。左) 視野中心の場合。中) 10 秒角の場合。右) 20 秒角の場合。

4.1.3 性能評価

再結像後の 90km、200km、無限遠の場合の各視野のスポットダイアグラムを図 4.5～図 4.7 に示す。再結像前 (図 3.12～図 3.14) と比較してスポットの形に多少の変化がみられるものの、角度スケールで見たときのスポットサイズの変化はあまりない。前置光学系で発生した収差を見るために、AO188 の焦点面で求まる波面収差と再結像時の焦点面で求まる波面収差の残差の計算を 90km の場合と 200km の場合について行った。それぞれの焦点面での波面収差とその残差を図 4.8～図 4.11 に示す。また、それぞれのコンフィグレーションで平均した残差の RMS 値を表 4.1 に示す。視野中心の場合は 1 点のみである。これらの結果を踏まると軸外から離れるにしたがって残差の波面収差量が増していることを示している。波面収差が十分小さいと考えられる場合に、ストレル比 SD は波長比で表された RMS 波面収差 W_{RMS} に対して

$$SD = 1 - (2\pi W_{RMS})^2 \quad (4.1.1)$$

と表すことできる [25]。残差波面から計算されるストレル比は、ガイド星間隔が 10 秒角のとき、90km と 200km の場合でそれぞれ 0.77、0.96 であり、天頂観測時の残差がやや大きいことがわかる。

残差波面だけでなく瞳像についても評価を行った。瞳像は K ミラーの 2 枚目のミラー付近にできるため、可変形鏡上にできる瞳のフットプリントとその位置でのフットプリントを比較した。図 4.12 に全コンフィグレーションでのそれぞれの面でのフットプリントを示す。可変形鏡上で各コンフィグレーション間でずれることなく瞳が結像しているのに対し、前置光学系の光路中にできる瞳像ではコンフィグレーションによって瞳径が異なっている。各コンフィグレーションでの瞳径を表 4.2 に示す。全コンフィグレーションで瞳径は直径比で最大 4.54% 変化する。これは瞳を 25 分割したときのサブアパーチャーサイズの 113% にあたり、1 素子以上ずれることになる。90km-200km での変化で考えても直径比 2.67%、サブアパーチャーサイズの 66.8% である。倍率変化による波面の残差を可変形鏡のフィッティングエラー以下にするためには、口径 8.2m で可変形鏡の分割数を波面センサーと同じ 25 の場合を考えると、その変化をおよそ直径比 2% 以内に抑える必要がある [24]。したがってこの光学系では 90km から 200km における瞳像の変化によって波面測定を満足に行うことができないことがわかった。

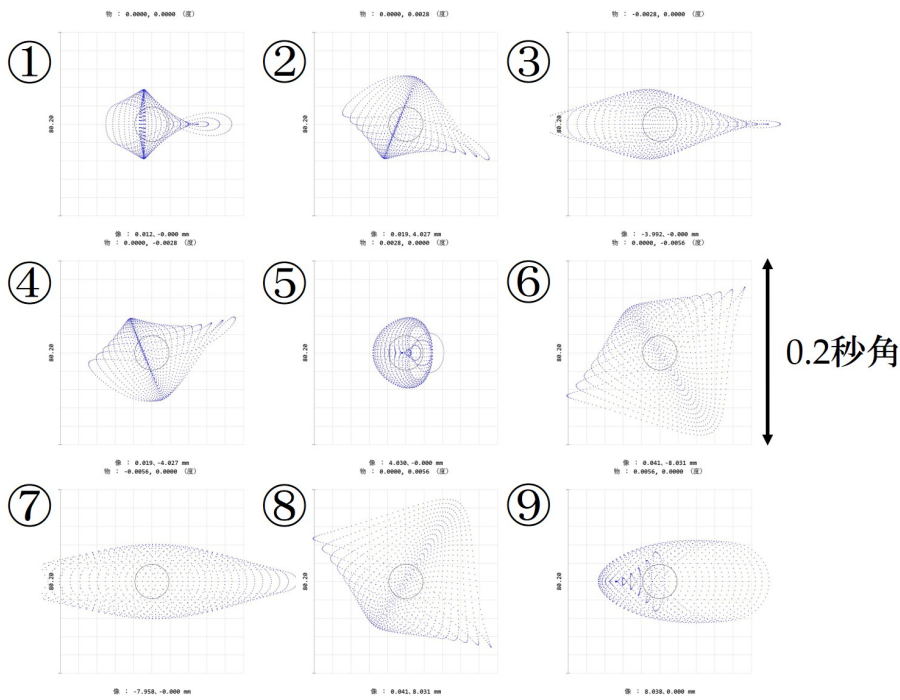


図 4.5 再結像後の 90km の場合の各視野のスポットダイアグラム。図中の丸記号はエアリー半径を示す。

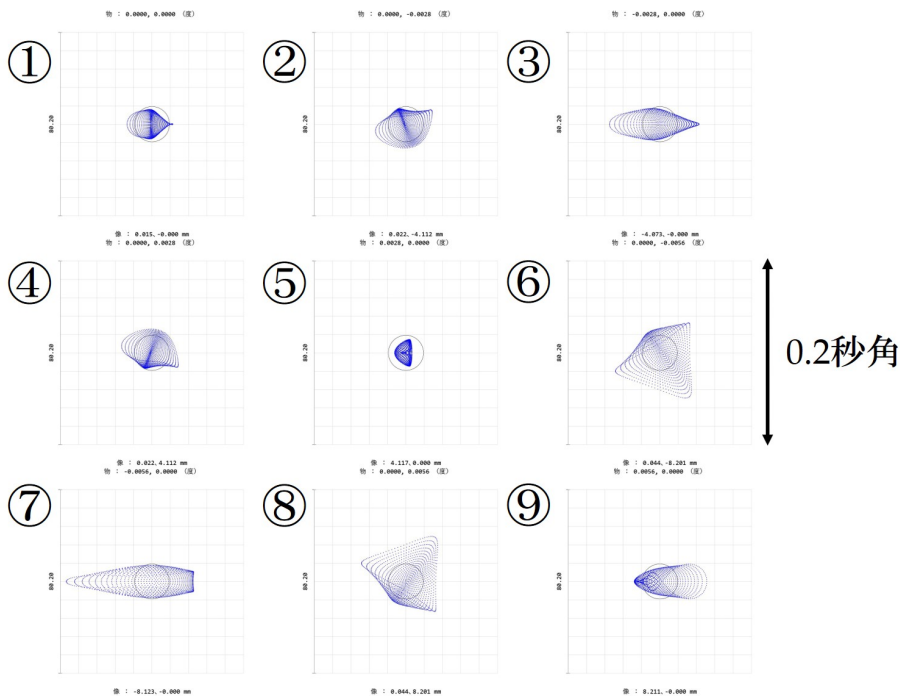


図 4.6 再結像後の 200km の場合の各視野のスポットダイアグラム。図中の丸記号はエアリー半径を示す。

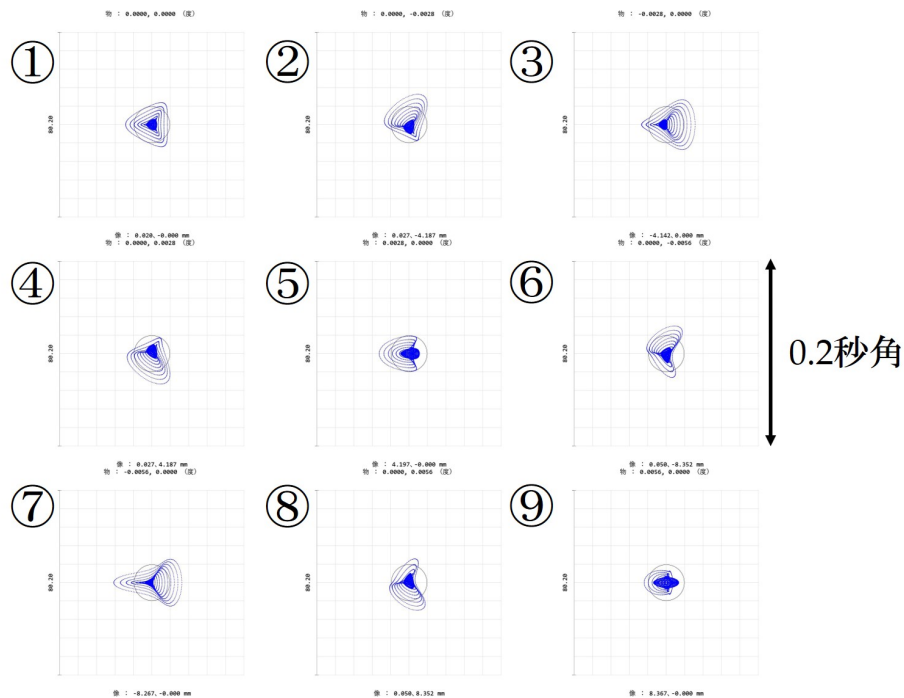


図 4.7 再結像後の無限遠の場合の各視野のスポットダイアグラム。
図中の丸記号はエアリー半径を示す。

表 4.1 残差波面の RMS 値 (波長比)

	90km	200km
視野中心	0.0397	0.0043
10 秒角	0.0759	0.0328
20 秒角	0.1710	0.1014

表 4.2 前置光学系の光路中にできる瞳径の半径値 (mm)

	90km	200km	無限遠
視野中心	14.337	13.964	13.714
10 秒角	14.285	13.990	13.739
20 秒角	14.337	14.038	13.784

4.2 前置光学系の設計結果 2

前節での結果を踏まえ、瞳のサイズ変化が小さい光学系について検証を行っていたところ、L1 と L2 の間隔に対して瞳径が敏感に変化することがわかったため、L1 と L2 の間隔を可変とする場合の前置光学系について検証を行った。これに関する結果について本節

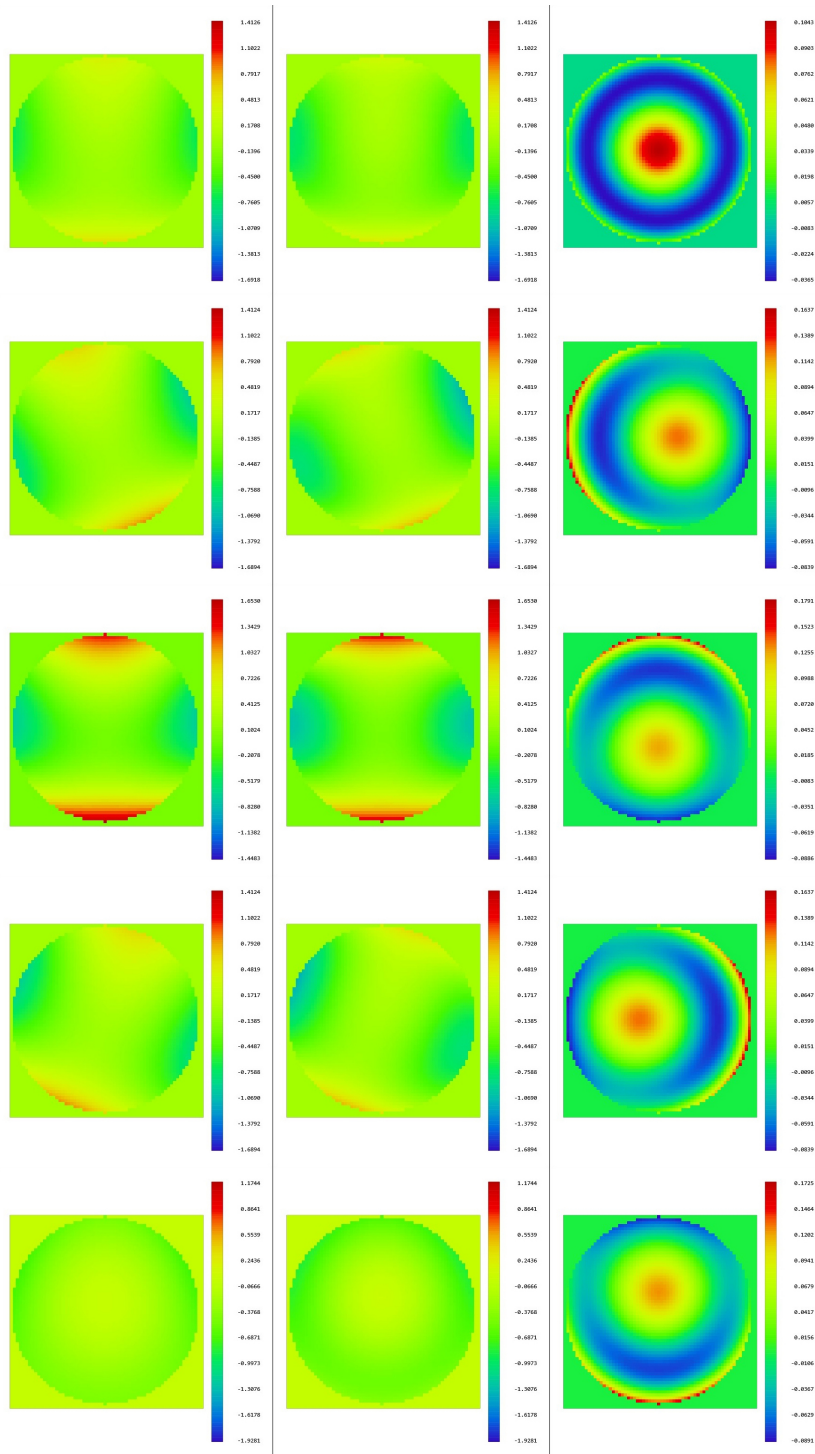


図 4.8 90km での各焦点面での波面収差マップとその残差。左列が AO188 の焦点面、中列が再結像時の焦点面での波面収差を表しており、右列はその残差である。上から視野点 1 ~5 に対応する。各視野点におけるそれぞれの焦点面での波面収差のカラースケールは同じであるが、残差のマップについてはその残差波面が持つ PTV 値がカラースケールの最大最小値に対応する。

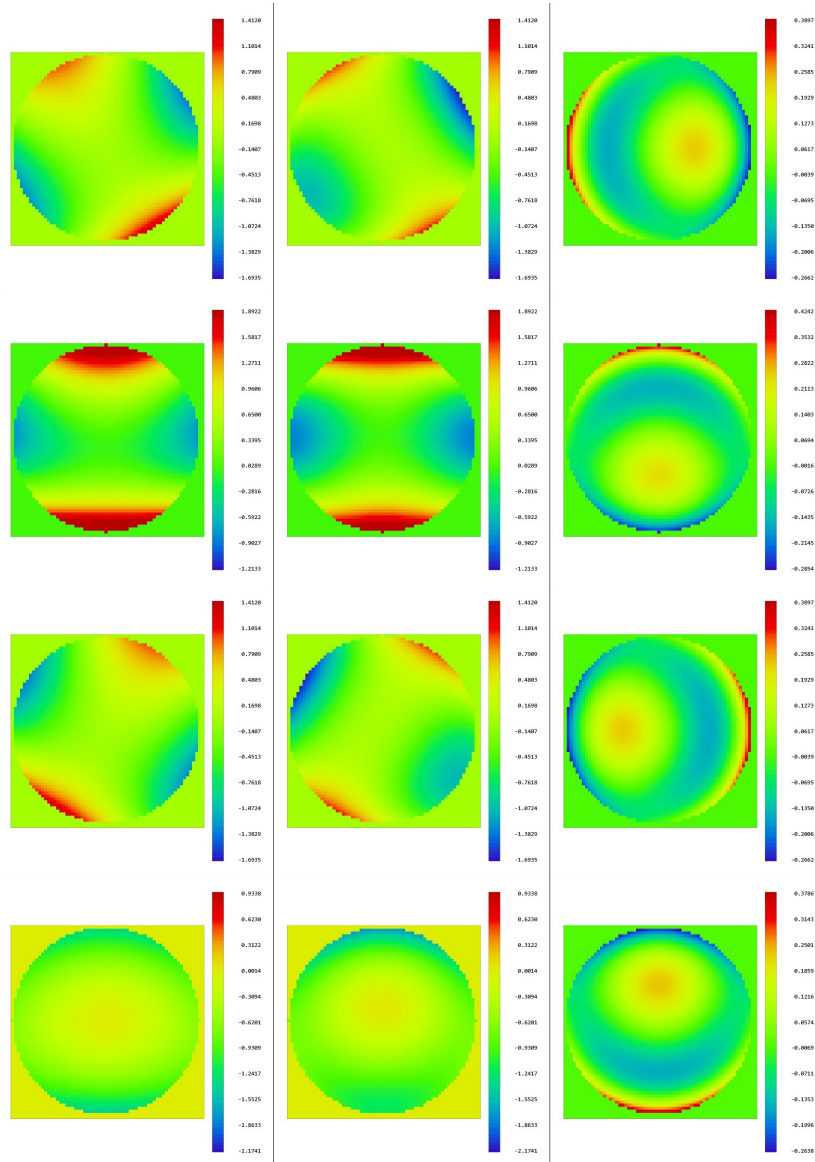


図 4.9 90km での各焦点面での波面収差マップとその残差。左列が AO188 の焦点面、中列が再結像時の焦点面での波面収差を表しており、右列はその残差である。上から視野点 6～9 に対応する。各視野点におけるそれぞれの焦点面での波面収差のカラースケールは同じであるが、残差のマップについてはその残差波面が持つ PTV 値がカラースケールの最大最小値に対応する。

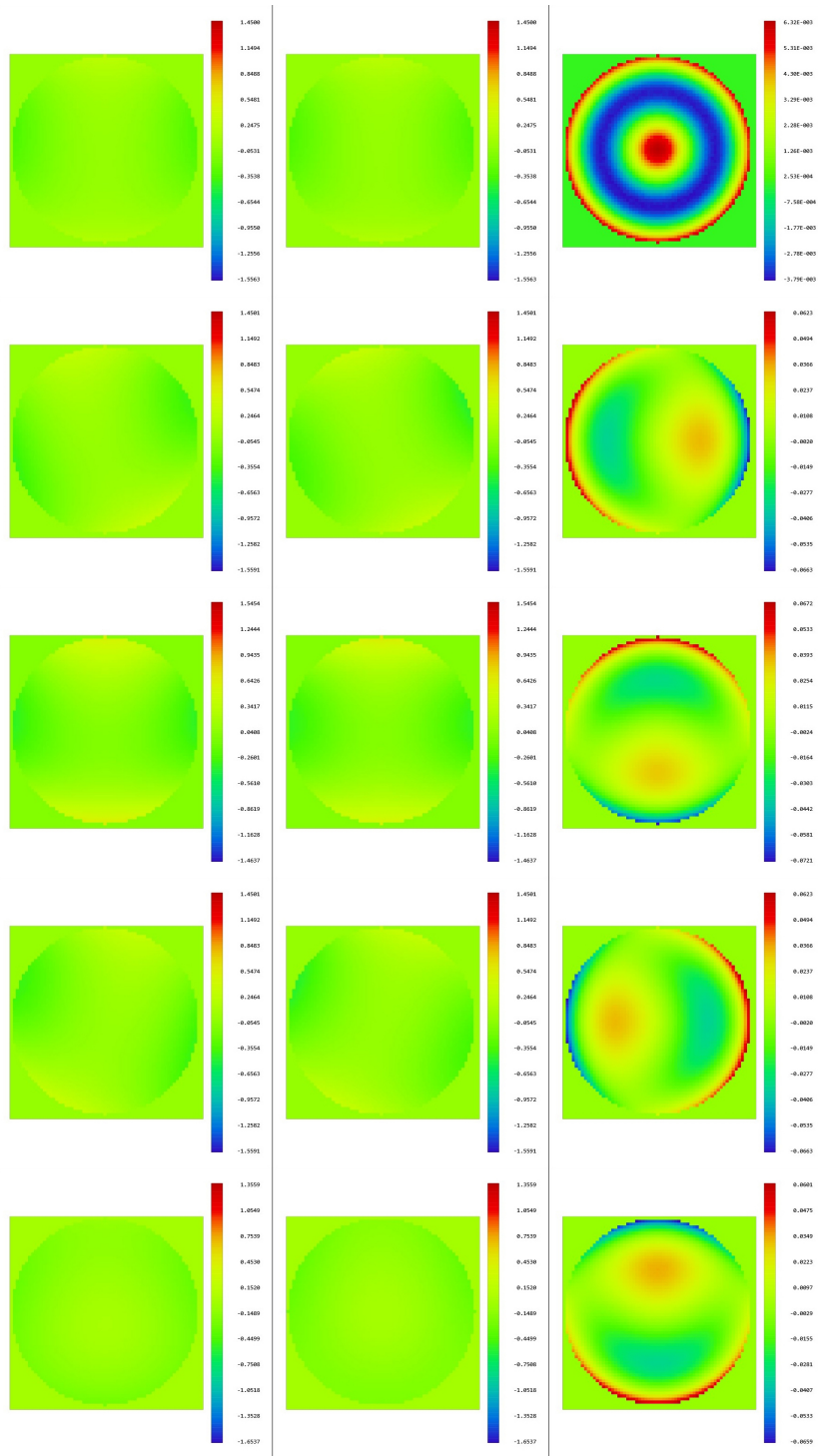


図 4.10 200km での各焦点面での波面収差マップとその残差。左列が AO188 の焦点面、中列が再結像時の焦点面での波面収差を表しており、右列はその残差である。上から視野点 1~5 に対応する。各視野点におけるそれぞれの焦点面での波面収差のカラースケールは同じであるが、残差のマップについてはその残差波面が持つ PTV 値がカラースケールの最大最小値に対応する。

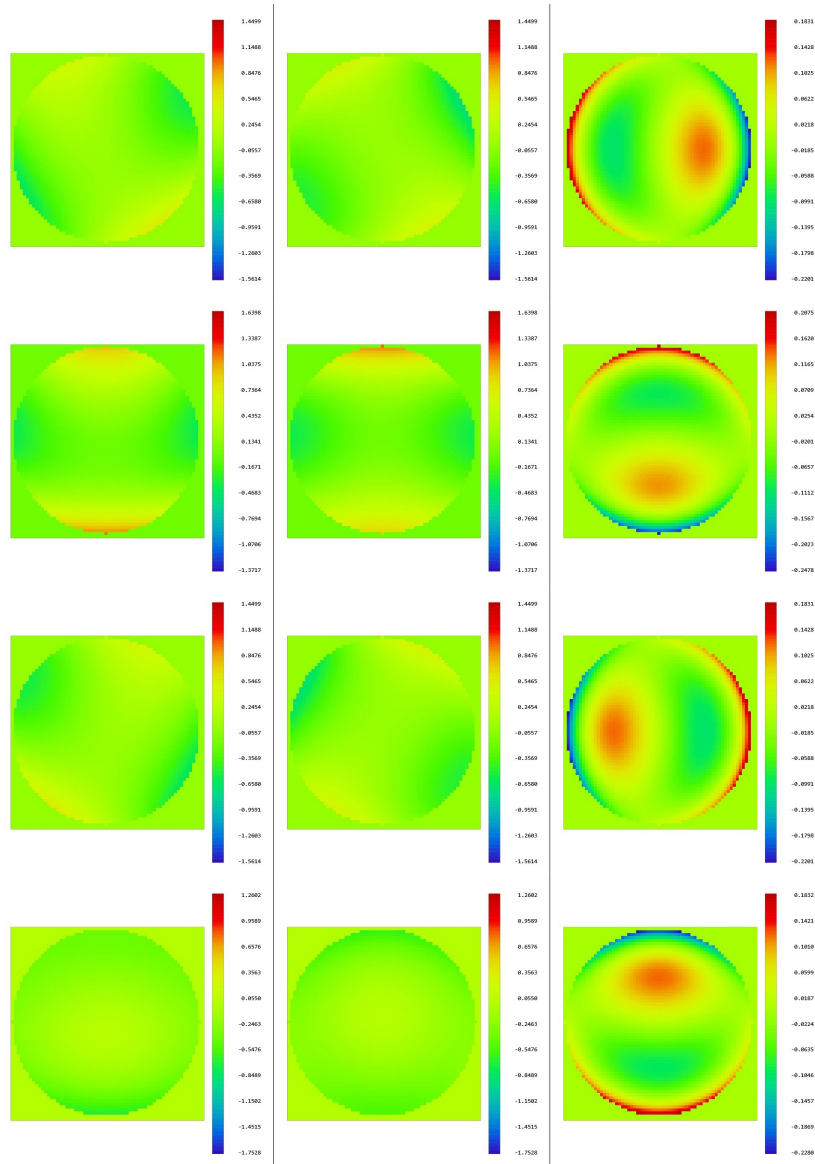


図 4.11 200km での各焦点面での波面収差マップとその残差。左列が AO188 の焦点面、中列が再結像時の焦点面での波面収差を表しており、右列はその残差である。上から視野点 6~9 に対応する。各視野点におけるそれぞれの焦点面での波面収差のカラースケールは同じであるが、残差のマップについてはその残差波面が持つ PTV 値がカラースケールの最大最小値に対応する。

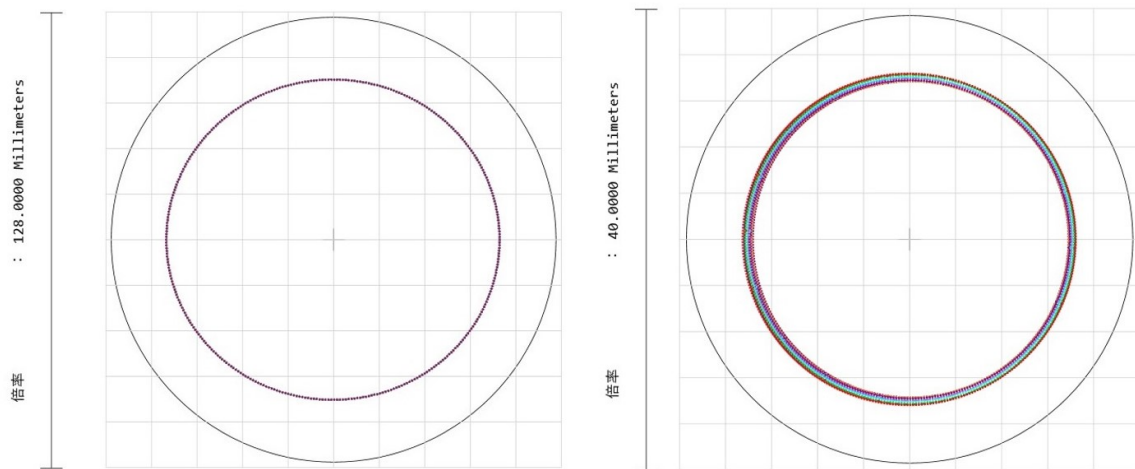


図 4.12 左) 可変形鏡上にできる瞳像。右) 前置光学系の光路中にできる瞳像。色の違いはコンフィグレーションの違いを表しており、コンフィグレーションの違いによって瞳径の変化が起きている。

で議論する。

4.2.1 各レンズの移動と瞳径の変化

前置光学系のレイアウトは L1 と L2 の間隔が可変であるという点を除いて図 4.1 と同じである。L2 を可変にした場合に最適化を行った結果、コンフィグレーションの変化に伴う各レンズのふるまいの変化が見られた。図 4.13 に各レンズの移動のふるまいを示す。L1 と L2 の間隔は物体距離が遠くなるにしたがってわずかに L1 に近づく結果となり、これに伴い瞳位置を固定するために L3 も L2 に近づいている。実際、設計結果 1 での瞳径は 90km、200km、無限遠の順に小さくなっており (表 4.2)、物体距離への依存性がある。これはレーザーガイド星が有限距離にあるためにその距離に応じて実効的な F 値が変化するからであると考えられる。

L1 の移動距離は全コンフィグレーションで最大 83mm 移動し、L1 に対する L2 までの距離の変化は 3.5mm である。また、L3 の位置の変化は 14mm であった。図 4.14 にコンフィグレーションが変化したとき L1 が最もビームスプリッターに近づく場合と離れる場合のレイアウトを示す。図 4.14 は無限遠の視野中心の場合を示すが、このとき L1 と L2 の間隔及び L2 と L3 の間隔が最小となり、その間隔はそれぞれ 70mm、15mm である。

再結像時の結像性能について詳細な評価をする前に、瞳のサイズについて評価を行う。図 4.15 に全コンフィグレーションでの可変形鏡における瞳のフットプリントと前置光学系の光路中にできる瞳のフットプリントを示す。L1 と L2 を固定していた場合 (図 4.12)

に比べてコンフィグレーションによる変化が小さくなっている。瞳の左側で重なりが悪化している様子が見られるが、これは軸外し放物面によって生じている瞳像の像面の傾きによるものであると考えられる。前置光学系の光路中にできる瞳はフォーカシング系の焦点距離によってサイズが決まっているが、この傾きはコリメーターの焦点距離に依存して大きくなる傾向が見られた。コリメーターの焦点距離が短くなればこの傾きは十分小さくなると思えることができる。各コンフィグレーションでの瞳径を表 4.3 に示す。全コンフィグレーションで瞳径は直径比で最大 0.85% 変化し、これはサブアパーチャーサイズの 21% に相当する。また 90km-200km での変化は直径比 0.68% で、サブアパーチャーサイズの 17% である。したがって L1-L2 の間隔変化を許せば瞳径の変化を補正することができる。

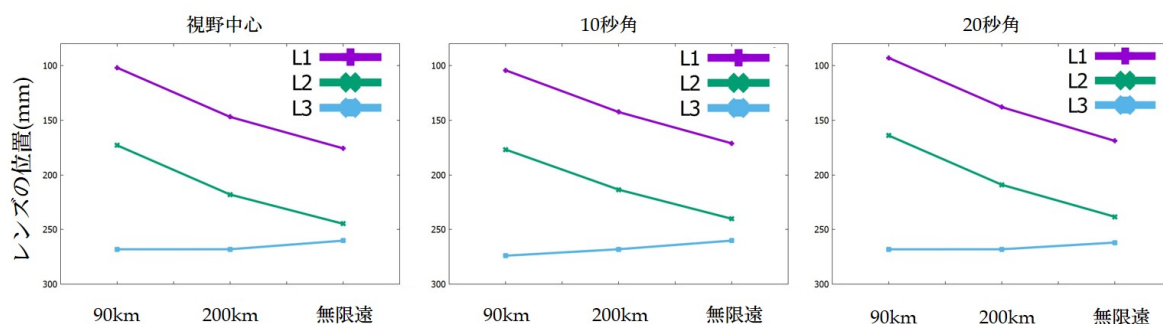


図 4.13 全コンフィグレーションでの L1、L2、L3 のレンズ位置の変化。レンズ位置は AO188 の射出光を前置光学系に分岐するビームスプリッターからの距離を示す。左) 視野中心の場合。中)10 秒角の場合。右)20 秒角の場合。

表 4.3 前置光学系の光路中にできる瞳径の半径値 (mm)

	90km	200km	無限遠
視野中心	14.330	14.240	14.358
10 秒角	14.304	14.243	14.353
20 秒角	14.334	14.238	14.297

4.2.2 再結像時の性能評価

L1-L2 の間隔を可変にした場合、瞳径に関する変化を小さくすることができたため、再結像時の性能について評価を行う。

再結像後の 90km、200km、無限遠の場合の各視野のスポットダイアグラムを図 4.16～

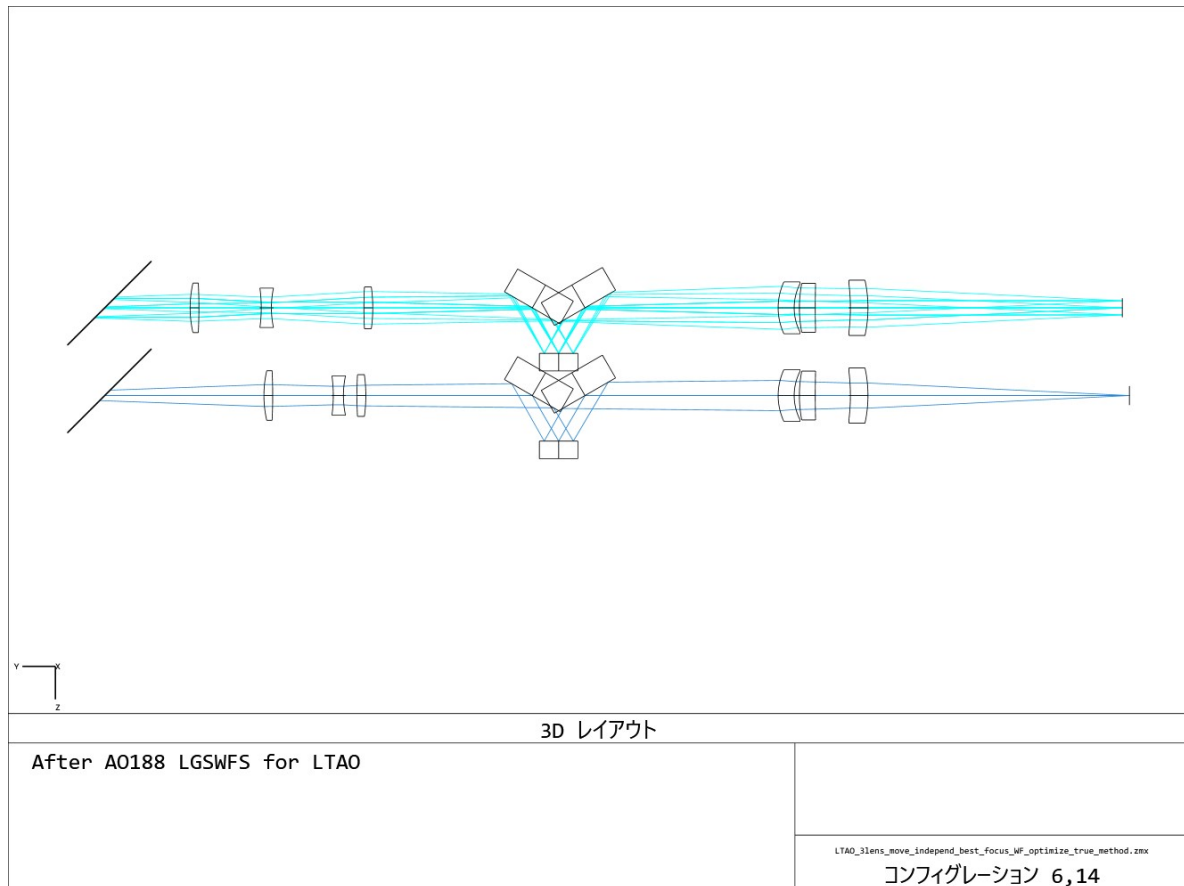


図 4.14 L1 が最も離れている場合のコンフィグレーション。上が物体距離 90km、配置間隔 20 秒のときで、下は無限遠の視野中心の場合である。

図 4.18 に示す。L2 を固定した場合と同様に再結像前 (図 3.12～図 3.14) と比較してスポットの形に多少の変化がみられるものの、角度スケールで見たときのスポットサイズの変化はあまりない。前置光学系で発生した収差を見るために、AO188 の焦点面で求まる波面収差と再結像時の焦点面で求まる波面収差の残差の計算を 90km の場合と 200km の場合について行った。それぞれの焦点面での波面収差とその残差を図 4.19～図 4.22 に示す。また、それぞれのコンフィグレーションで平均した残差の RMS 値を表 4.4 に示す。これらの結果を踏まると軸外から離れるにしたがって残差の波面収差量が増すという傾向は変わっていない。残差波面から計算されるストレル比は、ガイド星間隔が 10 秒角のとき、90km と 200km の場合でそれぞれ 0.83、0.95 であり、視野中心から 10 秒角までであればレーザーガイド星までの距離によらずストレル比は 0.8 以上である。波面収差マップの残差を見ると、軸上での球面収差や軸外でのコマ収差が見られ、前置光学系の改善の余地はあるものの、レーザーガイド星の配置間隔の議論 (2.1.3) を踏まえれば天頂観測時で配置間隔が最も大きくなりその間隔は 10 秒角程度である。よって現在の設計構成で、前

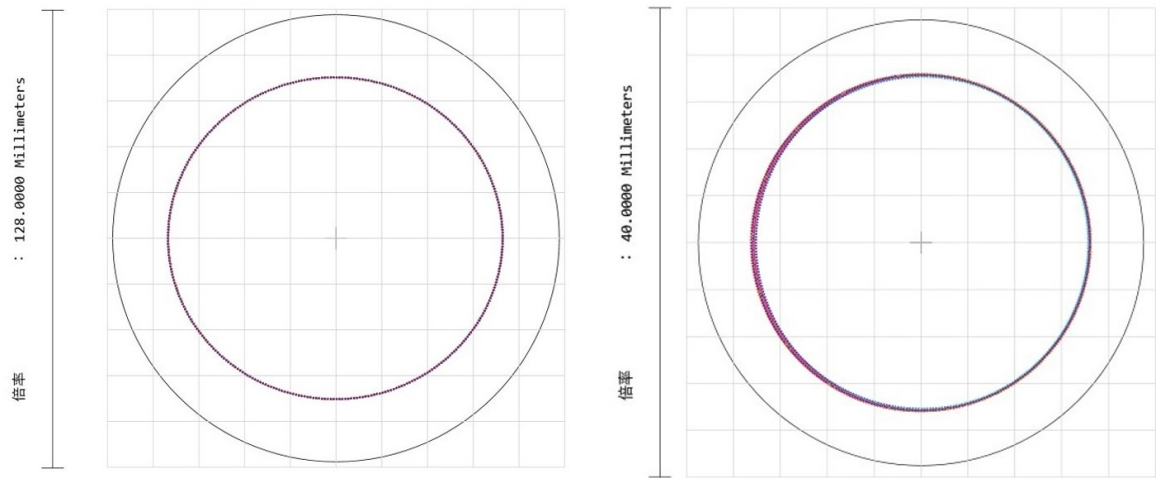


図 4.15 左) 可変形鏡上にてできる瞳像。右) 前置光学系の光路中にてできる瞳像。色の違いはコンフィギュレーションの違いを表している。

置光学系として機能しうると考え波面センサーの光学系について設計を行うこととする。

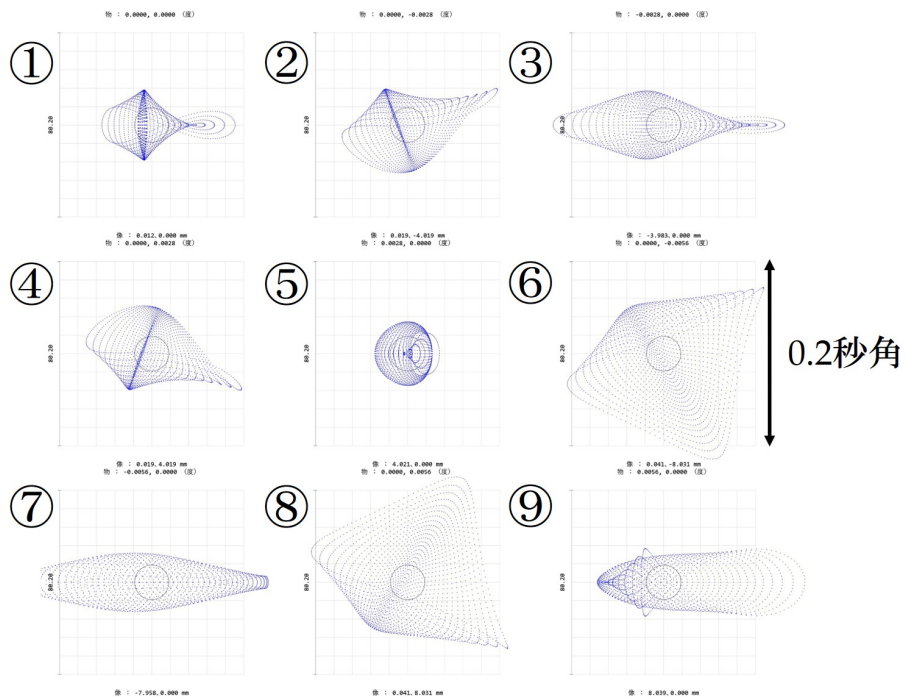


図 4.16 再結像後の 90km の場合の各視野のスポットダイアグラム。
図中の丸記号はエアリー半径を示す。

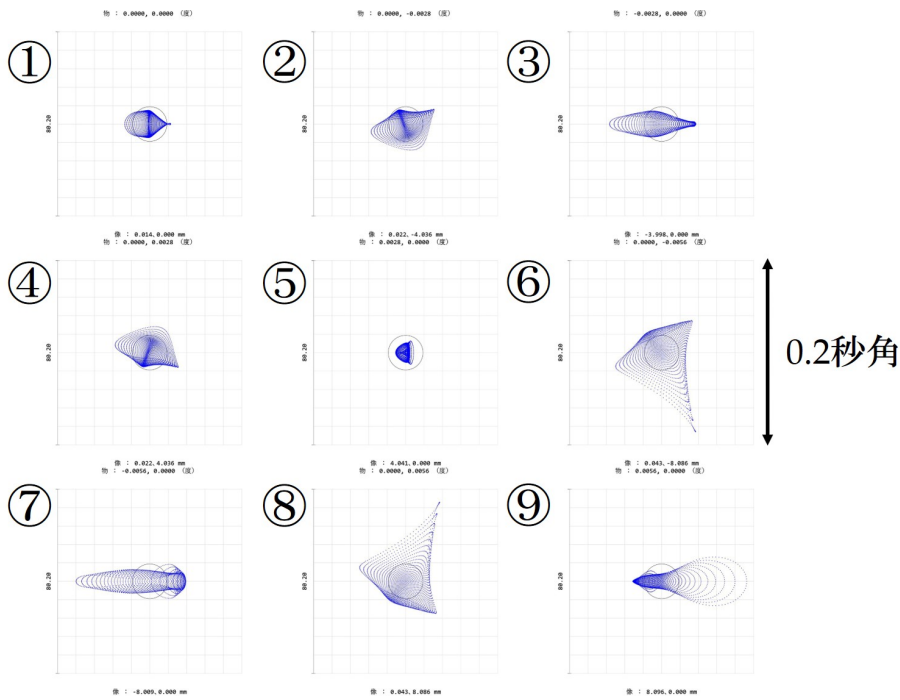


図 4.17 再結像後の 200km の場合の各視野のスポットダイアグラム。図中の丸記号はエアリー半径を示す。

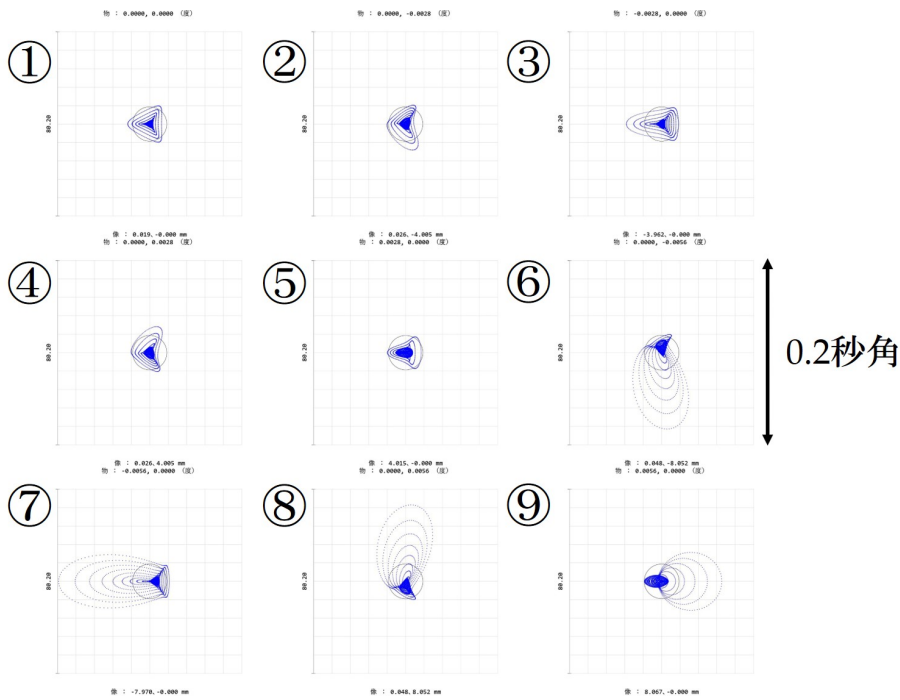


図 4.18 再結像後の無限遠の場合の各視野のスポットダイアグラム。図中の丸記号はエアリー半径を示す。

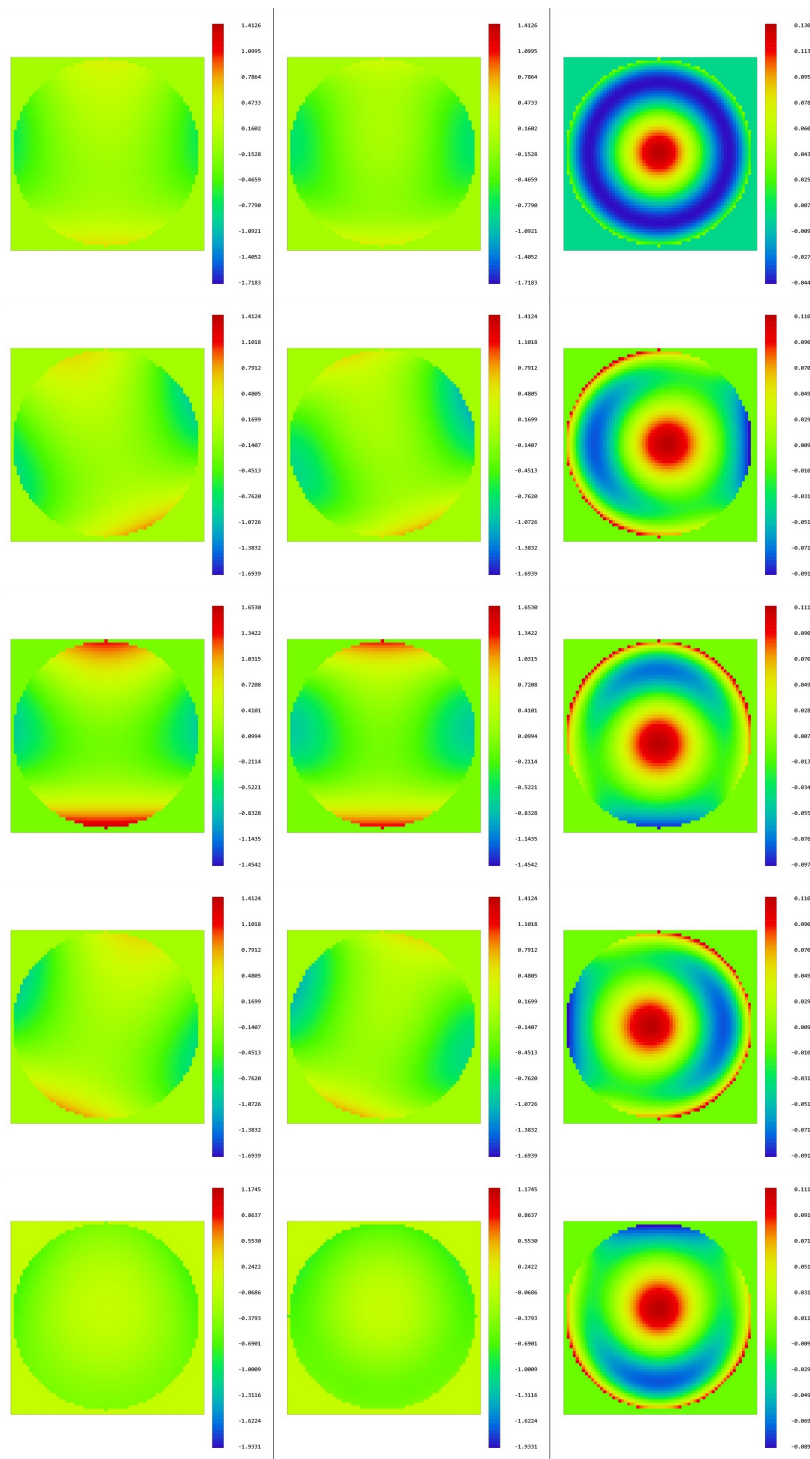


図 4.19 90km での各焦点面での波面収差マップとその残差。左列が AO188 の焦点面、中列が再結像時の焦点面での波面収差を表しており、右列はその残差である。上から視野点 1~5 に対応する。各視野点におけるそれぞれの焦点面での波面収差のカラースケールは同じであるが、残差のマップについてはその残差波面が持つ PTV 値がカラースケールの最大最小値に対応する。

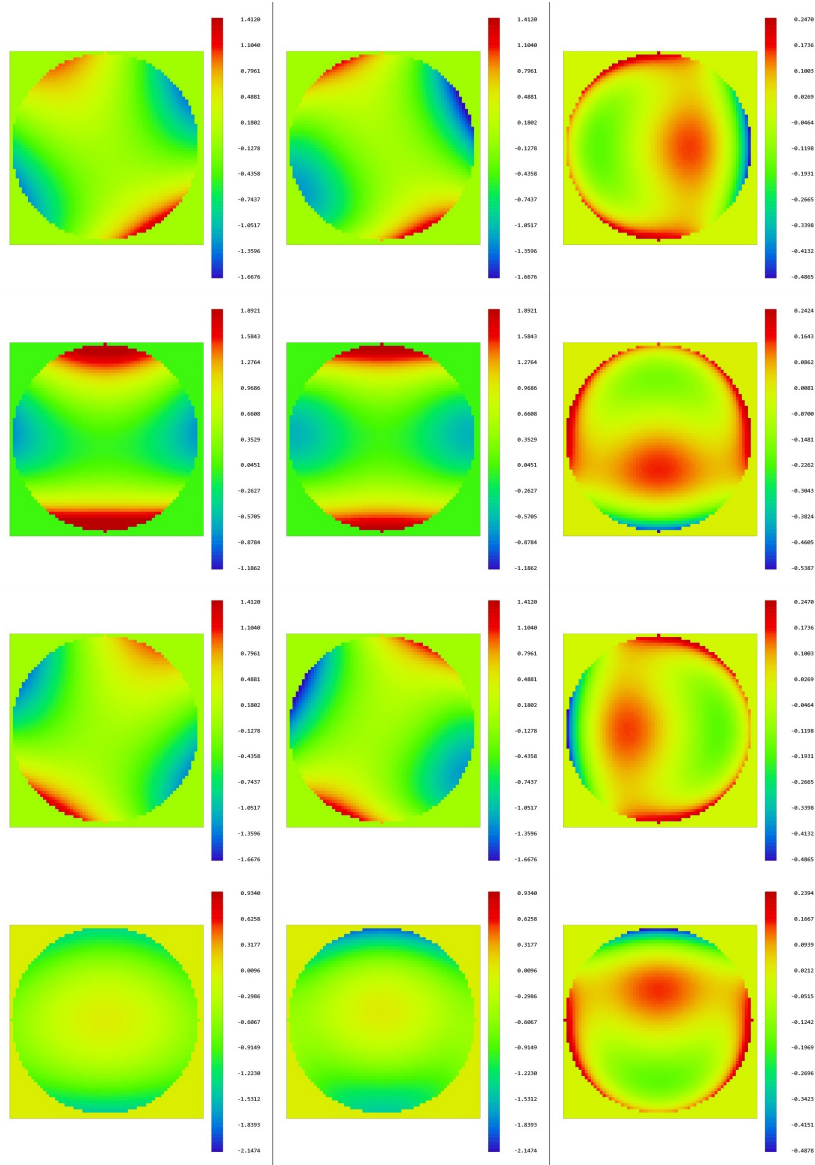


図 4.20 90km での各焦点面での波面収差マップとその残差。左列が AO188 の焦点面、中列が再結像時の焦点面での波面収差を表しており、右列はその残差である。上から視野点 6~9 に対応する。各視野点におけるそれぞれの焦点面での波面収差のカラースケールは同じであるが、残差のマップについてはその残差波面が持つ PTV 値がカラースケールの最大最小値に対応する。

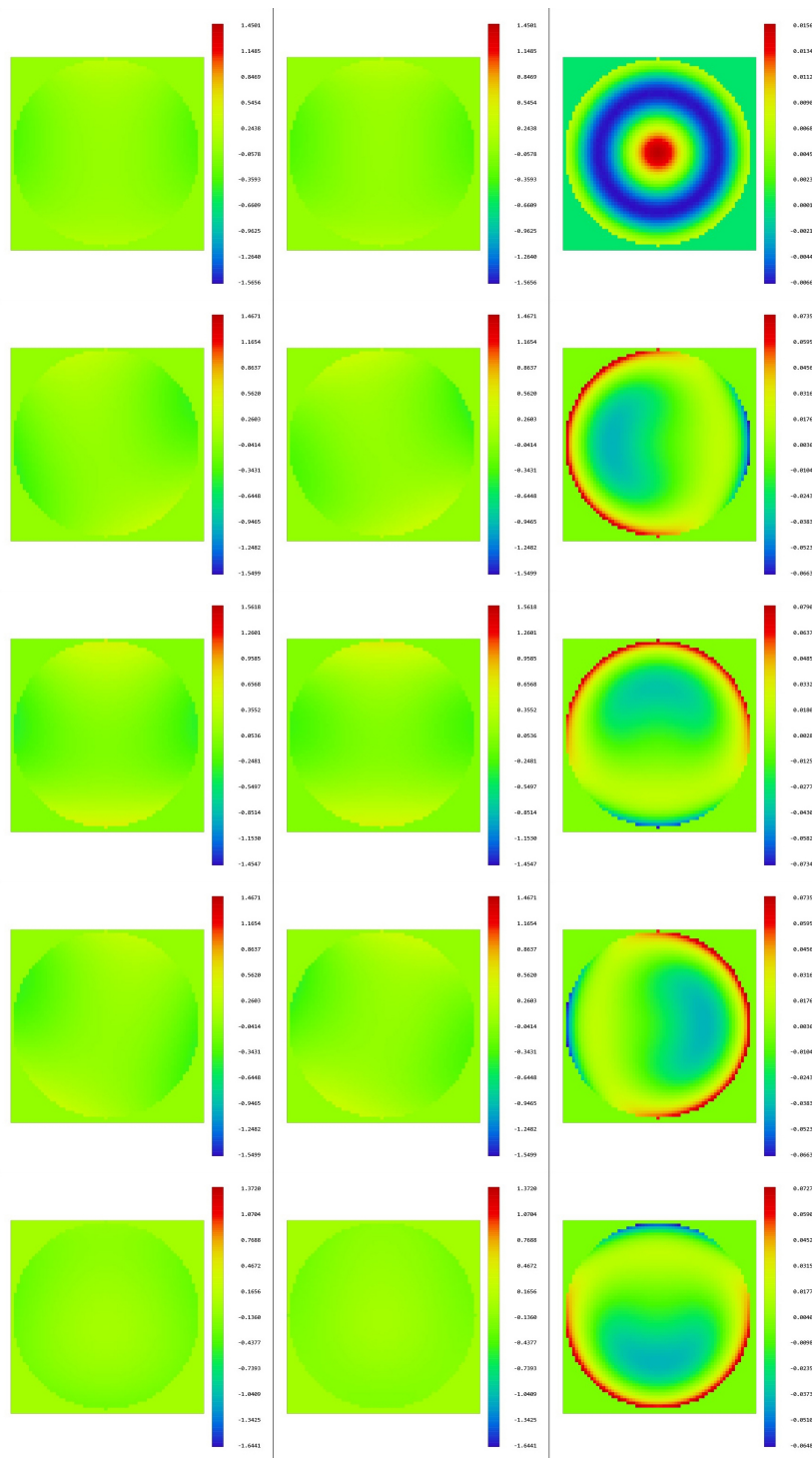


図 4.21 200km での各焦点面での波面収差マップとその残差。左列が AO188 の焦点面、中列が再結像時の焦点面での波面収差を表しており、右列はその残差である。上から視野点 1~5 に対応する。各視野点におけるそれぞれの焦点面での波面収差のカラースケールは同じであるが、残差のマップについてはその残差波面が持つ PTV 値がカラースケールの最大最小値に対応する。

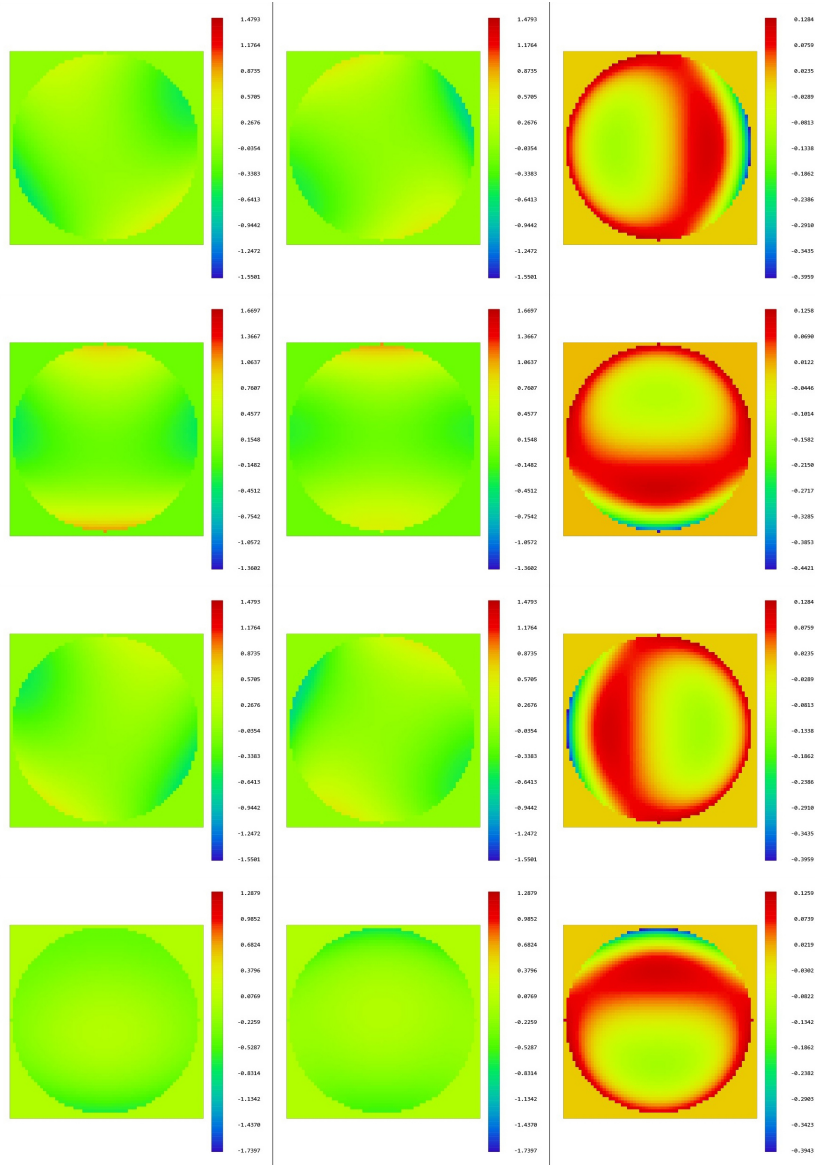


図 4.22 200km での各焦点面での波面収差マップとその残差。左列が AO188 の焦点面、中列が再結像時の焦点面での波面収差を表しており、右列はその残差である。上から視野点 6~9 に対応する。各視野点におけるそれぞれの焦点面での波面収差のカラースケールは同じであるが、残差のマップについてはその残差波面が持つ PTV 値がカラースケールの最大最小値に対応する。

表 4.4 残差波面の RMS 値 (波長比)

	90km	200km
視野中心	0.0488	0.0066
10 秒角	0.0647	0.0341
20 秒角	0.1780	0.1293

4.3 波面センサーの設計結果

波面センサーを含む波面センサーユニット全体のレイアウトを図 4.23 に示す。また、ピラミッドミラー以降の波面センサーの光学系を図 4.24 に示す。ピラミッドミラー以降の光学系は凸面鏡がティップティルトステージにのせられたオフナー光学系に入射し、レーザーガイド星の焦点面での像の移動を補正するティップティルトミラーとして作用する(図 4.24 中 TT ミラー)。その後、オフナー光学系で等倍リレーされた焦点面にステアリングミラーを配置し、マイクロレンズアレイ上での瞳の移動を補正する。これについては後で詳細を説明する。ステアリングミラーで反射された後、コリメーターによってマイクロレンズアレイ上に径 3.75mm の瞳がつくられ、マイクロレンズアレイによって瞳が 25 分割される。分割された瞳の Shack-Hartmann 像は約 2.88:1 の縮小リレーレンズ系で検出器上で径 1.3mm に縮小される。

4.3.1 オフナー光学系

AO188 から射出する F13.9 のビームは前置光学系によって F10.5 に変換される。このとき、式 (3.4.7) から求まる像の移動量と Zemax 上で鏡を動かしたときの実際の移動量を表 4.5 に示す。なおオフナー光学系のパラメータとして凸面鏡の曲率半径を $R = 150\text{mm}$ 、オフナー光学系に対しての入射光線高を $y_0 = 30\text{mm}$ とした。また、凸面鏡はティップティルトステージのプラットフォームに接着されるとし、凸面鏡の厚さを 5mm とした。このとき、ティップティルトステージの回転中心から凸面鏡までの距離は 11.5mm である。表 4.5 から式 (3.4.7) で求まる移動量は良い近似を与えることがわかる。いずれにしても、大気揺らぎ等によりレーザーガイド星が 2 秒角程度ふらつくと考えると、S-300.4 もしくは S-300.8 のものが望ましいと考えられる。

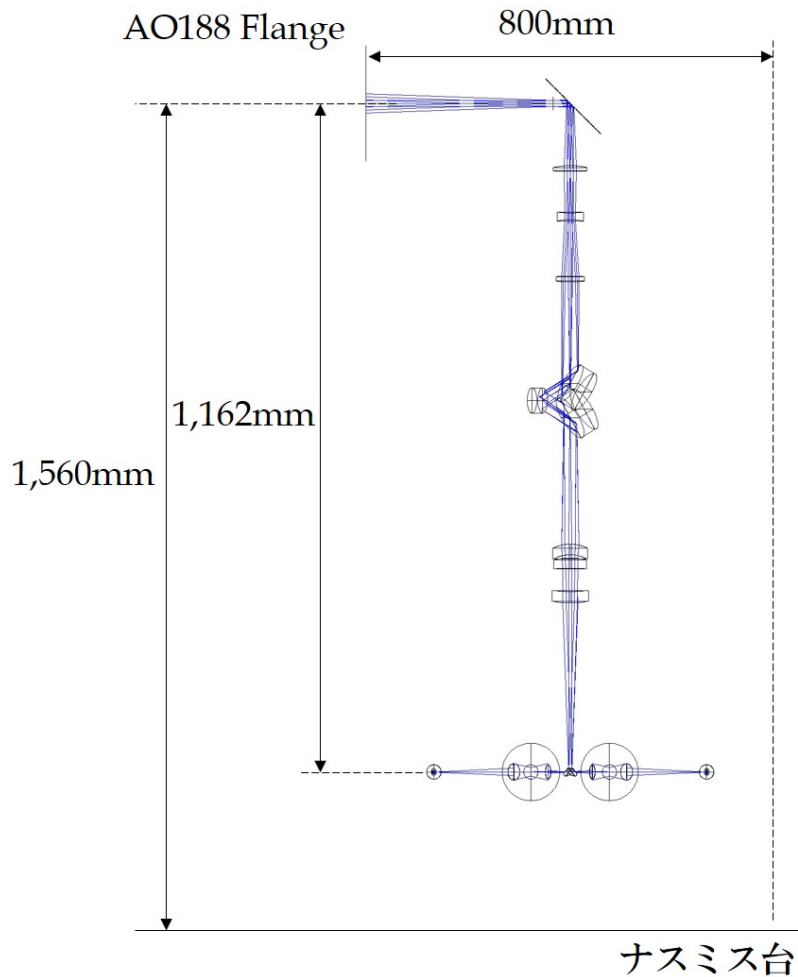


図 4.23 波面センサーユニットをナスミス台上で横から見た時のレイアウト。

表 4.5 ティップティルトステージによる像の移動量

製品	式 (3.4.7) から求めた像の移動量 (秒角)	Zemax 上での実際の移動量 (秒角)
S-330.2	± 0.75	± 0.74
S-330.4	± 1.87	± 1.84
S-330.8	± 3.73	± 3.67

4.3.2 マイクロレンズアレイ上の瞳像

前置光学系の射出光が F10.5 であるのでマイクロレンズアレイ上での瞳径を 3.75mm にするためには式 (3.4.13) から $f_{col} = 39.4\text{mm}$ であると求まる。実際に Zemax 上では瞳径を 3.75mm にするためのコリメーターの焦点距離は 38.9mm であった。図 4.25 左に

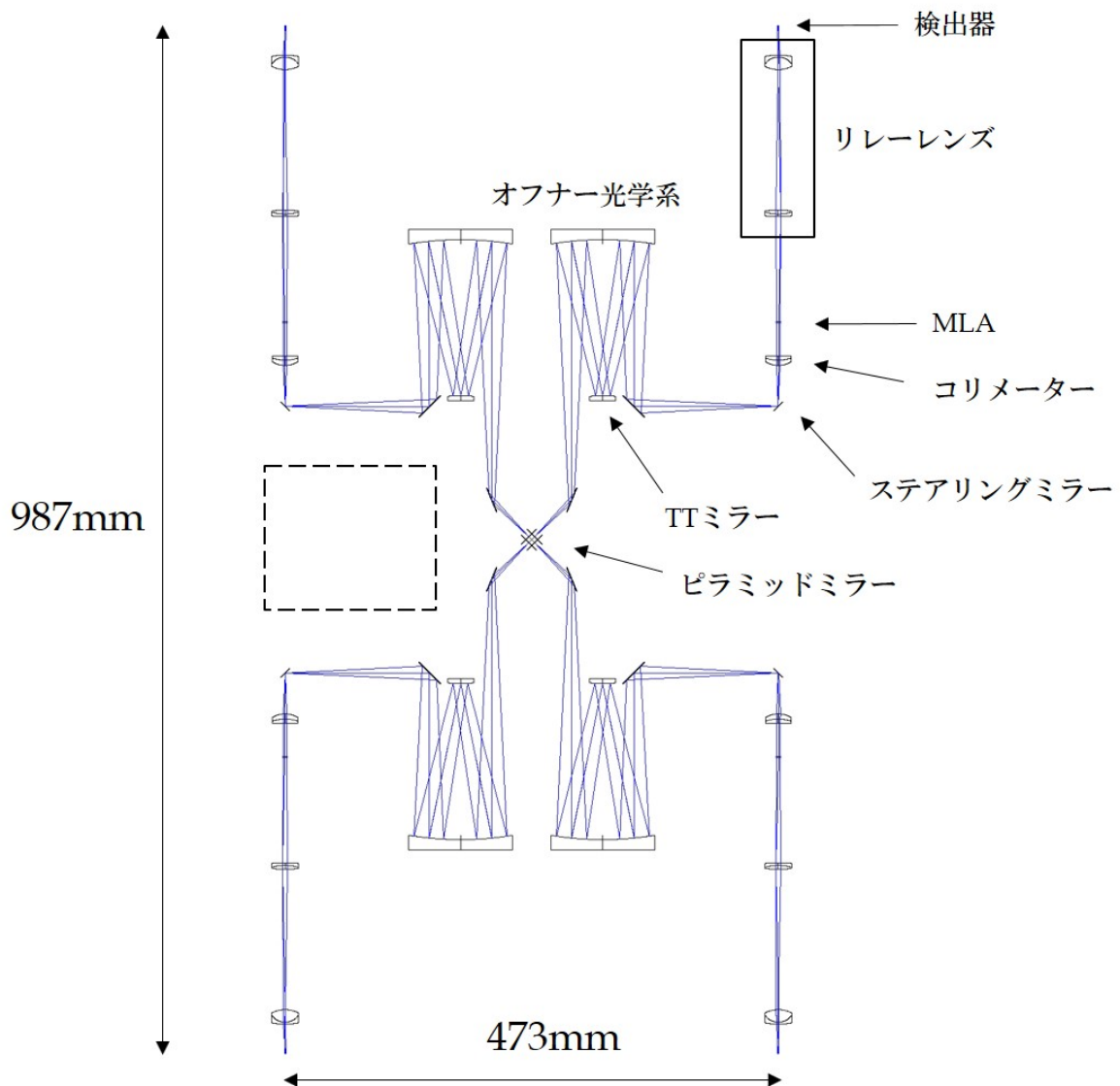


図 4.24 4つの波面センサーのレイアウト。

マイクロレンズアレイ上にできる瞳のフットプリントを示す。コンフィグレーションの違いによって各波面センサーのマイクロレンズアレイ上での瞳の位置が変化してしまうことを表している。これは前置光学系の再結像時の主光線角が視野によって異なっていることを示す。時間経過とともに K ミラーによってレーザーガイド星の視野回転が補正されるため、各波面センサーのマイクロレンズアレイ上にできる瞳位置は同じでなければならない。視野の変化による瞳位置の補正を行うために、オフナー光学系後の焦点面にステアリングミラーを配置した。オフナー光学系のティップティルトミラーによって焦点面での像の移動が補正されるためステアリングミラーの鏡の中心に常にレーザーガイド星の像が位置することになる。焦点位置で鏡の傾きを変えることで、コリメーターに入射する主光線

をコリメーターの光軸に一致させることができるため視野の変化によるマイクロレンズアレイ上での瞳の移動は補正される。

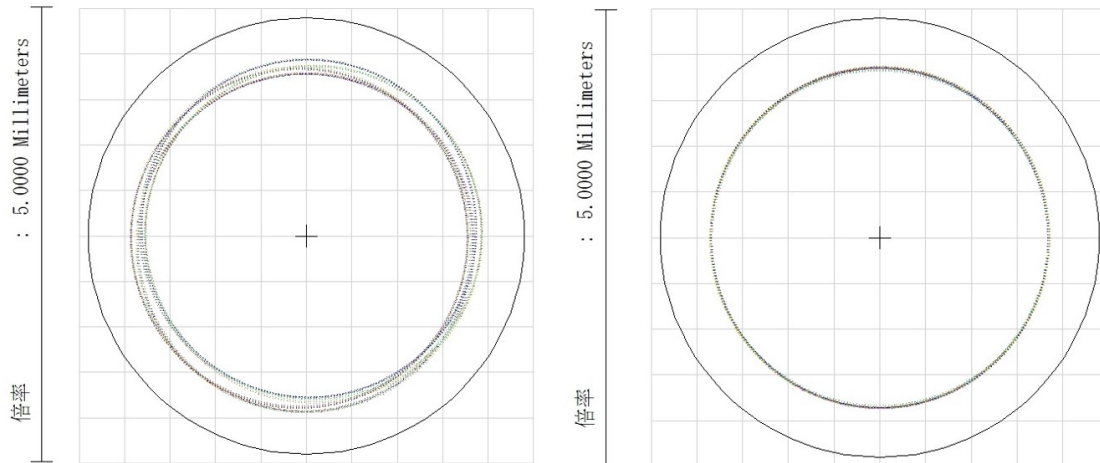


図 4.25 左) マイクロレンズアレイ上にできる瞳像。全コンフィグレーションでの瞳のフットプリントを示しており、色の違いがコンフィグレーションの違いを表す。右) 瞳の移動を差し引いたときの全コンフィグレーションでの瞳のフットプリント。

4.3.3 検出器上での像

150 μm ピッチのマイクロレンズアレイで、サブアパーチャーの視野を 4 秒角にするためマイクロレンズの曲率を最適化した。このときのマイクロレンズアレイの焦点距離は 3.61mm であり、式 (3.4.16) で求まる値とよく一致している (表 3.3)。マイクロレンズアレイによって分割された 3.75mm の瞳は縮小リレーレンズによって検出器上で 1.3mm のサイズとなる。リレーレンズは 2 つのアクロマティックレンズで構成され、それぞれの焦点距離は 100mm と 34.6mm である。このリレーレンズで生じるディストーションは最も悪いサブアパーチャーの位置で 0.045% であるので、リレーレンズによる瞳像の歪みは波面測定にほとんど影響しないと考えられる。図 4.26 に最も悪いサブアパーチャーの位置でのディストーションマップを示す。また、検出器上での像を図 4.27 示す。直径方向に 25 個のスポットが結像している。実際には副鏡による遮蔽と副鏡を支持しているスパイダーによる遮蔽があるため、光が入らないサブアパーチャーがある。また、サブアパーチャー内での結像の様子を図 4.28 に示す。サブアパーチャーの端に入射する光線はコマ収差が顕著に現れており、放射状に広がっている。これは個々のマイクロレンズによって引き起こされるもので、補正するのは不可能である。したがって視野中心から離れるにしたがって重心検出の精度が下がることが予想される。

設計した波面センサーの各パラメータの設計値を表 4.6 に示す。これらの値は仕様値と一致している。

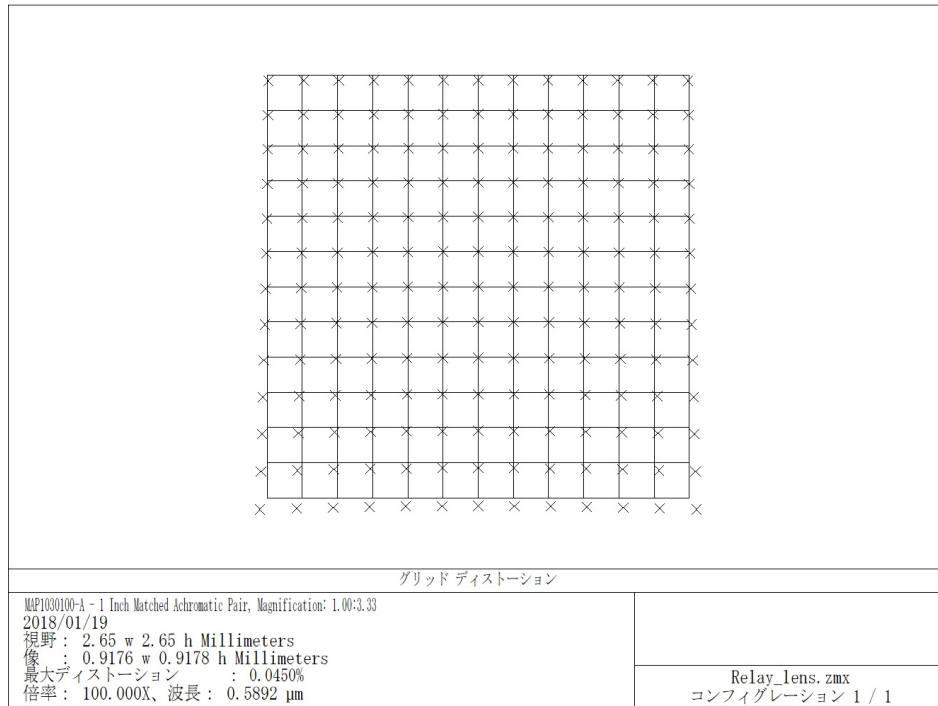


図 4.26 ディストーションが最大のサブアパーチャーの位置でのリレーレンズのディストーションマップ。スケールは 100 倍にして表示している。

表 4.6 波面センサーの設計値

パラメータ	設計値
瞳の分割数	25×25
使用するピクセル数	200×200pix
読み出しサイズ	1.3×1.3mm
読み出し速度	> 800frame/sec
ピクセルスケール	0.5 秒角
サブアパーチャーの視野	4.0 秒角
サブアパーチャーあたりのピクセル数	8×8

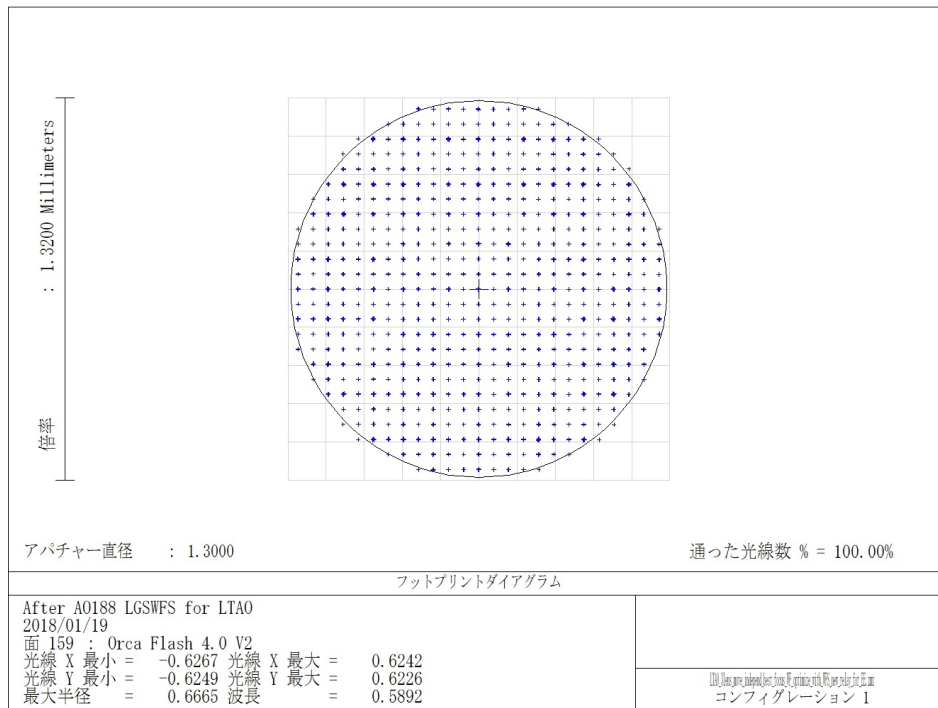


図 4.27 検出器上での像。

4.4 制御について

波面センサーユニットではできる限りステージの数やレンズの枚数を減らすように設計を進めてきた。必要となる各種ステージについて以下にまとめる。

フォーカシング

前置光学系のフォーカシングレンズの移動を行う。3枚のレンズを独立に動かさなければならないので機械的な工夫がなされる必要がある。またこれらのステージはレーザーガイド星の距離と配置間隔によって動かなければならないが、それらの変位は光学設計から求めたレンズの動きと同期する必要がある。また、フォーカシングレンズはナトリウム層の高さ変化に対応するため随時フォーカスを調整する必要があり、その補正値は4つの波面センサーで得られる平均的なフォーカスのずれである。

K ミラー

視野回転を補正するために K ミラーを回転ステージに内蔵する必要がある。ターゲット天体はエレベーションと方位に依存して視野回転するのに対し、レーザーガイド星はエレベーションのみに依存して視野回転する。ターゲット天体の視野回転が AO188 内の K ミラーで補正されるので、波面センサーユニットの K ミラーは

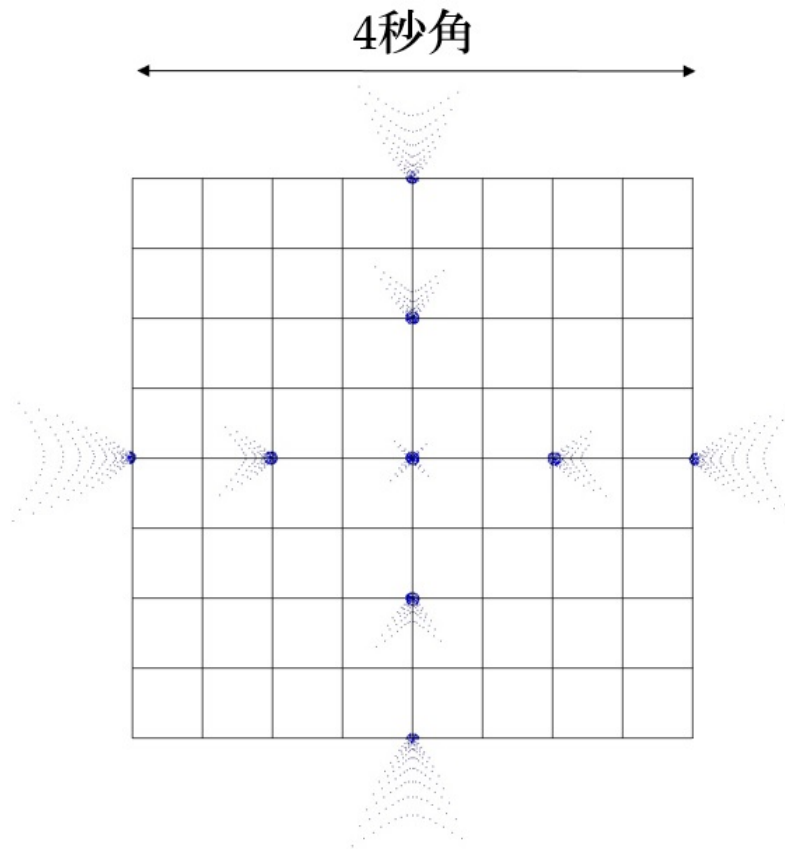


図 4.28 サブアパーチャー内での結像の様子。分割された一つのグリッドは 1 ピクセルである。サブアパーチャーは 8×8 ピクセルで分割される。視野中心 1 点と中心から 1 秒角、2 秒角離れたそれぞれ 4 点の計 9 点の位置での結像を示す。

AO188 の K ミラーによって回転された方位角に依存する成分を逆補正することになる。

ピラミッドミラー

レーザーガイド星の配置間隔を変えるためにピラミッドミラーを上下移動させる必要がある。これはレーザーガイド星の配置間隔のみに依存するため、配置間隔が決まれば一意に決まる。移動量は配置間隔の変位の分だけ変わればよいので、例えば視野中心から 10 秒角にある状態から 5 秒角に変えるとき、再結像時の焦点面で 5 秒角に対応するスケールの分だけ上下方向に移動させればよい。どちらに移動させるかはどの配置間隔を基準とするかによって変わる。また、波面センサーユニットでは 4 つのレーザーガイド星の波面測定を同時に行うように設計したが、レーザーの打ち上げ時に 4 本で打ち上げるか、1 本で打ち上げるかを切り替えられる。仮に 1 本のレーザーを視野中心に打つ場合、ピラミッドミラーを水平方向の一軸に移動

させればフォーカシング系によるフォーカスの調整を行うことで1つのレーザーガイド星の波面測定も行うことができる。1つのレーザーの場合は光源での出力を4分割することなく打ち上げられるので、ガイド星の明るさが4倍になる。LTAOの場合は400frame/secでの読み出しをベースラインとしているが、波面センサーでの読み出しは800frame/sec以上で行うことができる。近赤外線の高波長側ではコーン効果の影響は小さくなるので、風速等によっては4倍明るいレーザーガイド星で早く読み出しを行った方が結果として性能が上がる可能性もある。いずれにしてもピラミッドミラーを水平方向に移動させることで、視野中心の場合の波面測定も行うことができる。

ティップティルトミラー

オフナー光学系の凸面鏡はティップティルトステージにマウントされ、レーザーガイド星の焦点位置での像のふらつきを補正する。焦点位置での像の移動では瞳の移動は起きないが、波面センサーで見た時に、波面の傾きに応じてスポットが基準位置からずれていることになる。サブアパーチャーの視野中心から離れるにしたがってマイクロレンズによる結像性能が悪くなるので、スポットの重心検出精度が低下することが予想される。したがって各波面センサーで得られた波面の傾きの情報から焦点面上での像の移動量を計算し、それに応じてティップティルトステージを傾けることになる。

ステアリングミラー

マイクロレンズアレイ上での瞳の移動を補正するためのステージが必要である。これは前置光学系での改良によっては必ずしも必要ではないが、Kミラーの回転による主光線角のズレが生じた場合、同様に瞳の移動が引き起こされるので光学系の公差やステージの精度によっては必要になってくる。瞳がマイクロレンズ上で移動すると波面センサーでは外側のサブアパーチャーの光量が変化すると考えられるため、その情報を使って補正することができる。なお、瞳の移動は望遠鏡のポインティングが変わることによる視野の変化によっておこるため、ステージはモーターによる制御で十分であると考えられる。

ビームスプリッター

赤外ナスミス台に配置されている観測装置によっては波面センサーユニットを使わない場合があるため、AO188の焦点でレーザーガイド星の光の分岐を行うビームスプリッターは使用するときとしないときで切り替えられる必要がある。また、波面センサーにレーザーガイド星の光を正確に入れるためにはレーザーの打ち上げ時の位置を正確にする必要があり、AO188のシステムでは視野10秒角のレーザーガイド星捕獲カメラによってそのキャリブレーションを行っている。LTAOを行う際もAO188のレーザーガイド星捕獲カメラの仕様を想定しているが、レーザー

ガイド星の配置間隔によっては視野の端となり、レーザーガイド星の光を正確に波面センサーに導入できない可能性がある。この場合、波面センサーユニットにこの機能が必要であるが、前置光学系の再結像系の光路中にビームスプリッターもしくは折り返しミラーを用意し、このミラーの出し入れによって捕獲を行うことができる。今回の設計では仮に捕獲用のカメラを配置する場合、図 4.24 の点線部に捕獲用のカメラを配置することを想定した。

なお、K ミラーの回転によって視野回転は補正されるが、瞳像の回転が発生する。これは波面センサーのサブアパーチャーと可変形鏡のマッピングが回転することになる。これは検出器で得られたデータから補完することを念頭に考えたが、瞳のマッピングの回転補正を行うためにはそれぞれの波面センサーのマイクロレンズより前に K ミラーを配置して補正するか、マイクロレンズと検出器自体を光軸周りに回転させる必要がある。これらの機能が必要かどうかは検証される必要がある。

第 5 章

結論

すばる望遠鏡の現在の補償光学システム AO188 では近赤外線の高波長側では回折限界を達成しているが、可視光域では回折限界に達しておらず、性能向上のためには複数のレーザーガイド星を用いた LTAO システムを実装する必要がある。本研究ではすばる望遠鏡で LTAO を行うために必要な、レーザーガイド星の波面測定を行う波面センサーユニットの光学設計を行った。

波面センサーユニットは、AO188 の焦点面での像に収差を加えずに再結像し、レーザーガイド星の焦点変化や配置間隔の変化に対応しつつ瞳を決まった位置、決まったサイズにつくる前置光学系と、それぞれのレーザーガイド星の波面測定を行う波面センサーによって構成するというコンセプトのもと設計を行った。

前置光学系内にできる瞳像に関しては 90km から 200km で直径比 0.68% の瞳サイズの変化が発生するが、25 分割の可変形鏡を想定した場合に許容される瞳のサイズ変化は 2% 以下であるので、波面測定精度への影響は少ないと考えられる。再結像時の性能はレーザーガイド星の配置間隔が視野中心から 10 秒角のとき 90km と 200km での平均的なストレル比はそれぞれ 0.83、0.95 である。エレベーションが下がることでレーザーガイド星の配置間隔を狭めなければならないことを考えると視野中心付近での結像性能は 10 秒角の場合より良くなるため、前置光学系のシステムとしては成立しうると考えられる。前置光学系に続く波面センサーでは各パラメータを仕様値通りに設計できた。また各レンズの配置は機械的な干渉が発生しないよう配慮した。

一方で現状の設計結果ではマイクロレンズアレイ上での瞳の移動が発生していることや、10 秒角より広い視野まで考慮すると収差の発生が大きくなっているため、公差解析を行った上でより収差の少ない光学系へと改善する必要があると考えられる。

謝辞

まず本研究を行うにあたり学部生での期間を含め3年間ご指導いただいた秋山正幸教授に心から感謝申し上げます。本研究を通して装置開発に携わる機会を与えていただき、大変貴重な経験をさせていただきました。また、国立天文台の大屋真様には毎週のゼミで様々なご助言をいただき、研究を進めていく上で大きな後押しをしていただきました。さらにハワイ観測所的美濃和陽典様にはすばる望遠鏡に関する様々なデータを提供していただき、またハワイ出張の際には研究に関するご助言を多くいただきました。最後に、大学生活で苦楽を共にしてきた天文学専攻の同期の皆さんやスタッフの方々、研究を応援してくれた家族に深く感謝申し上げます。

reference

- [1] Masayuki Akiyama. Ultimate-start:subaru tomography adaptive optics research experiment scope, overview, and schedule.
- [2] R. Delgado-Serrano, F. Hammer, Y. B. Yang, M. Puech, H. Flores, and M. Rodrigues. How was the Hubble sequence 6 Gyr ago? *A&A*, 509:A78, January 2010.
- [3] ESO. 4 laser guide star facility <https://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/vlt-instr/4lgsf/>.
- [4] ESO. Galaksi <https://www.eso.org/sci/facilities/develop/ao/sys/galaksi.html>.
- [5] ESO. Muse - multi-unit spectroscopic explorer <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/muse.html>.
- [6] E. Gendron F. Assemat and F. Hammer. The FALCON concept: multi-object adaptive optics and atmospheric tomography for integral field spectroscopy. Principles and performances on an 8 meter telescope. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 376:287, March 2007.
- [7] C. M. Harrison, H. L. Johnson, A. M. Swinbank, J. P. Stott, R. G. Bower, Ian Smail, A. L. Tiley, A. J. Bunker, M. Cirasuolo, D. Sobral, R. M. Sharples, P. Best, M. Bureau, M. J. Jarvis, and G. Magdis. The kmos redshift one spectroscopic survey (kross): rotational velocities and angular momentum of $z \sim 0.9$ galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(2):1965–1983, 2017.
- [8] Paul Hickson and Thomas Pfrommer. High-resolution lidar observations of mesospheric sodium and implications for adaptive optics. In *Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest*, page AOTuA2. Optical Society of America, 2009.
- [9] Physik Instrumente. S-330 piezo tip/tilt platform <https://www.physikinstrumente.com/en/products/z-tip-tilt-platforms/>

- [piezo-platforms/s-330-piezo-tip-tilt-platform-300700/](#).
- [10] Naoto Kobayashi, Alan T. Tokunaga, Hiroshi Terada, Miwa Goto, Mark Weber, Robert Potter, Peter M. Onaka, Gregory K. Ching, Tony T. Young, Kent Fletcher, Douglas Neil, Louis Robertson, Daniel Cook, Masatoshi Imanishi, and David W. Warren. Ircs: infrared camera and spectrograph for the subaru telescope, 2000.
- [11] P. Madau and M. Dickinson. Cosmic Star-Formation History. *ARA&A*, 52:415–486, August 2014.
- [12] K. Matsubayashi, H. Sugai, A. Shimono, A. Akita, T. Hattori, Y. Hayano, Y. Minowa, and N. Takeyama. Adaptive optics at optical wavelengths: Test observations of kyoto 3dii connected to subaru telescope ao188. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128(967):095003, 2016.
- [13] Kazuya Matsubayashi. Kyoto3dii. <http://cosmos.phys.sci.ehime-u.ac.jp/~kazuya/p-3dii/index.html>.
- [14] K. Mitsuda, Y. Hashiba, Y. Minowa, Y. Hayano, H. Sugai, A. Shimono, K. Matsubayashi, T. Hattori, Y. Kamata, S. Ozaki, M. Doi, and S. Sako. Ccd system upgrading of the kyoto3dii and integral field spectroscopic observation with the new system, 2016.
- [15] NASA. Nirspec ifu spectroscopy. <https://jwst-docs.stsci.edu/display/jti/nirspec+ifu+spectroscopy>.
- [16] GEMINI Observatory. Mcao in a nutshell <http://www.gemini.edu/sciops/instruments/gems/mcao-nutshell>, September 2015.
- [17] A. Offner. New concepts in projection mask aligners. *Optical Engineering*, 14:14 – 14 – 3, 1975.
- [18] F. Rigaut, B. Neichel, M. Boccas, C. d’Orgeville, F. Vidal, M. A. van Dam, G. Arriagada, V. Fesquet, R. L. Galvez, G. Gausachs, C. Cavedoni, A. W. Ebberts, S. Karewicz, E. James, J. Lührs, V. Montes, G. Perez, W. N. Rambold, R. Rojas, S. Walker, M. Bec, G. Tranco, M. Sheehan, B. Irarrazaval, C. Boyer, B. L. Ellerbroek, R. Flicker, D. Gratadour, A. Garcia-Rissmann, and F. Daruich. Gemini multiconjugate adaptive optics system review - I. Design, trade-offs and integration. *MNRAS*, 437:2361–2375, January 2014.
- [19] A. M. Swinbank, C. M. Harrison, J. Trayford, M. Schaller, Ian Smail, J. Schaye, T. Theuns, R. Smit, D. M. Alexander, R. Bacon, R. G. Bower, T. Contini, R. A. Crain, C. de Breuck, R. Decarli, B. Epinat, M. Fumagalli, M. Furlong, A. Galametz, H. L. Johnson, C. Lagos, J. Richard, J. Vernet, R. M. Sharples,

- D. Sobral, and J. P. Stott. Angular momentum evolution of galaxies over the past 10 gyr: a muse and kmos dynamical survey of 400 star-forming galaxies from $z = 0.3$ to 1.7. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(3):3140–3159, 2017.
- [20] Subaru Telescope. Specifications. <https://www.subarutelescope.org/introduction/telescope.html>.
- [21] Robert K. Tyson. *Adaptive Optics Engineering Handbook*. CRC Press, 1999.
- [22] Robert K. Tyson. *Principles of Adaptive Optics, Fourth Edition*. CRC Press, 2015.
- [23] Colin E Webb and Julian D C Jones, editors. *Handbook of Laser Technology and Applications volume III : Applications*. CRC Press, December 2003.
- [24] 大野良人. Dm 計算まとめ.
- [25] 岸川利郎. ユーザーエンジニアのための光学入門. オプトロニクス社, July 1997.
- [26] 家 正則. 科学研究費補助金基盤研究 (s) 研究成果報告書、レーザーガイド補償光学系による銀河形成史の解明. June 2012.
- [27] 浜松ホトニクス. *Orca Flash 4.0 V2* 技術資料, sep 2015.