

# FMOS 補正光学系駆動機構と観測への制約

秋山 正幸 / 国立天文台ハワイ観測所

- Ver.2.0 : 2007/02/14 補正光学系駆動機構の検討用に大幅改訂中
- Ver.1.1 : 2004/05/25 コマを変位と傾きで消した場合のスポットダイアグラムを追加

## 1 焦点面から見た各軸の位置ズレの影響のまとめ

現状の FMOS 用主焦点ユニット (PIR) は主鏡に対して、補正光学系は XY 平面の 1 軸にのみ駆動可能、焦点面は Z 方向にのみ駆動可能、ローテータはこれらの駆動機構の外にある、という構成になっている。図 1 はこの FMOS の主焦点ユニットを想定して、主鏡光軸 (M1-axis)、補正光学系光軸 (Real position of the corrector)、補正光学系駆動機構方向 (CMM-Movement axis)、ローテータ軸 (Rotater-axis)、ポインティング中心 (Pointing-center)、ガイド位置 (Guide-position) の位置ズレの関係を焦点面を固定して EL=60 度での観測開始と EL=90 度での観測終了を想定したポンチ絵として示している。ズレの大きさ、方向は測定結果に基づくものではない。

1. 望遠鏡をはじめにポインティングしたときの中心位置は AGforSH(AG1) によって行った PA の結果で決まる。AGforSH(AG1) の中心位置に対して、補正光学系は望遠鏡高度によっていろいろな相対位置にあり、AGforSH(AG1) の位置でのゆがみパターンは変動するが、PA を行ったときと同じ補正光学系駆動をしていれば同じゆがみパターンが再現されるので、望遠鏡は AGforSH(AG1) の中心位置に対しては正しい方向を向くように決まる。観測開始時の最終的なポインティングはガイド用ファイバーにガイド星 (アクイジションの基準) が入るように決める。 $\phi = 2.0''$  のガイドファイバーの視野にガイド星が入らないことは避けたい。
2. ガイド星の位置を固定するように観測するので観測中のガイド星の位置は焦点面に固定される (ガイド用ファイバーは視野の左右両端にある。以下ではガイド用スパインとターゲット用スパインのたわみ量の差の影響は無視する)。ローテータの軸は PIR 内部のたわみが大きくないとすると焦点面に対して固定していると見てよい。それ以外の軸は視野回転に伴って、下図に赤矢印で示したようにガイド位置を中心として回転する (ガイド位置とローテータ軸の関係は固定されるので、図の中ではローテータ軸を中心とした回転と近似して書いた)。
3. (観測に影響を与えるズレの 1 個目) 補正光学系駆動機構によって修正しきれない主鏡光軸と補正光学系光軸のズレ (図の中では青点線により示した) によって像にコマを生じる。許容されるズレ量は... と見積もっている。詳細はセクション 4 に示す。
4. (観測に影響を与えるズレの 2 個目) 焦点面のゆがみパターンは補正光学系の軸を中心として決まり、視野回転  $\times$  補正光学系光軸とローテータ軸のズレおよび補正光学系駆動に伴って焦点面のゆがみパターンは焦点面に対して移動 (図の中では緑線により示した) していく。最も条件の悪い天頂付近を除き、1 時間の積分あたりの視野中心と視野端での相対移動量の大きさを  $0.2''$  に押さえる為に主鏡光軸とローテータ軸に許容されるズレ量は 1.3mm と見積もられ

る。これには微分大気差(視野内での大気差の差の変動量)、色微分大気差(ガイド波長と観測波長の差の大気差の差の変動量)の評価は入っていない。視野内での像の相対移動量が大きくなると露出を中断してファイバーの位置に微小な補正をする(Tweakと呼んでいる)必要があり、これには5分程度かかる。露出を中断するので1回の最大露出時間が制限される。詳細はセクション5に示す。

## 2 主焦点ユニット変位量の手持ちの情報のまとめ

地震前 Popt PIR の測定、地震後 Popt の測定、木村レポート参照。

重要なことは、主鏡光軸と PIR ローター軸のズレの関係が地震後にどう変化しているか?地震前よりズレがはるかに大きくなっていたら PIR ローターの軸を主鏡光軸に対して動かす改修(あるいは同等、ローターをスチュワートプラットホームに載せるなど、のこと)が必要になる。

## 3 補正光学系パラメータ、光軸ズレ無しとしてZ軸方向の最適化

Z軸方向に関する変位量は温度変化による筒長の変化と、高度の変化による筒長の変化がある。温度変化に伴う現状の主焦点の6本ジャッキでの補正量は15度の温度変動で1.8mm(宮下レポート:2001/07?)。望遠鏡を倒した際の筒長の変化量は高度角80度から30度で0.4mmである(土居レポート:2000/07/20)。高度角90度から30度での器差補正量は $dZ=0.5\text{mm}$ (秋山レポート:2001/10/19)でコンシステントである。

レンズ系のパラメータは実際に出来たブランクのサイズを反映した Peter Gillingham 2004/02バージョンが最新である。Peter Gillingham レポート:2003/06/24では温度変化に伴う筒長変化に対して、光学パラメータを最適化している。望遠鏡鏡筒は鉄、補正光学系シェルはアルミとして、熱変形の効果を計算。それにあわせて鏡面の最適な Conic 定数、補正光学系と焦点面の最適距離(z軸駆動の位置)を計算。鏡筒の変形量は+10度から-5度で2.3mmと見積もり。この変位量に対し最新パラメータを用いた時、Conic 定数の最適値は-1.0102から-1.0114の範囲。現在使われている定数の範囲は-1.00583(光学ナスミス)、-1.01966(赤外ナスミス)。変位量に対して必要となるz軸駆動の量は2.2mm。

5度で最適化された光学パラメータを用いると、焦点距離は16648.5mmであり、プレートスケールは $80.8\mu\text{m} / 1\text{arcsec}$ である。30分視野は145.44mmになる。視野のゆがみの量は $0.957\% @ 0.73\mu\text{m}(\text{AG})$ ,  $0.953\% @ 0.9\mu\text{m}$ ,  $0.949\% @ 1.3\mu\text{m}$ ,  $0.943\% @ 1.8\mu\text{m}$ である。天頂を向いたときの視野端での $0.9\mu\text{m}$ と $1.8\mu\text{m}$ でのずれ量は $0.09\text{arcsec}$ 、 $0.73\mu\text{m}(\text{AG})$ と $1.3\mu\text{m}$ (観測中心波長)でのずれ量は $0.07\text{arcsec}$ 。(スポットダイアグラムの上での視野端でのずれ量とコンシステント。)

図2は焦点内外像を示す。視野内で比較的像が一様になるように最適焦点位置を決めている。この際、視野中心ではオフフォーカスになっていることに注意。

## 4 補正光学系の変位とコマ収差、変位の許容量

補正光学系の変位によって、図3に示すようにコマ収差を生じる。0.5mm平行に変位した場合のスポットダイアグラムを図??(上図)に示す。補正光学系が傾いた場合もコマ収差を生じる。その場合のスポットダイアグラムも図??(下図)に示す。

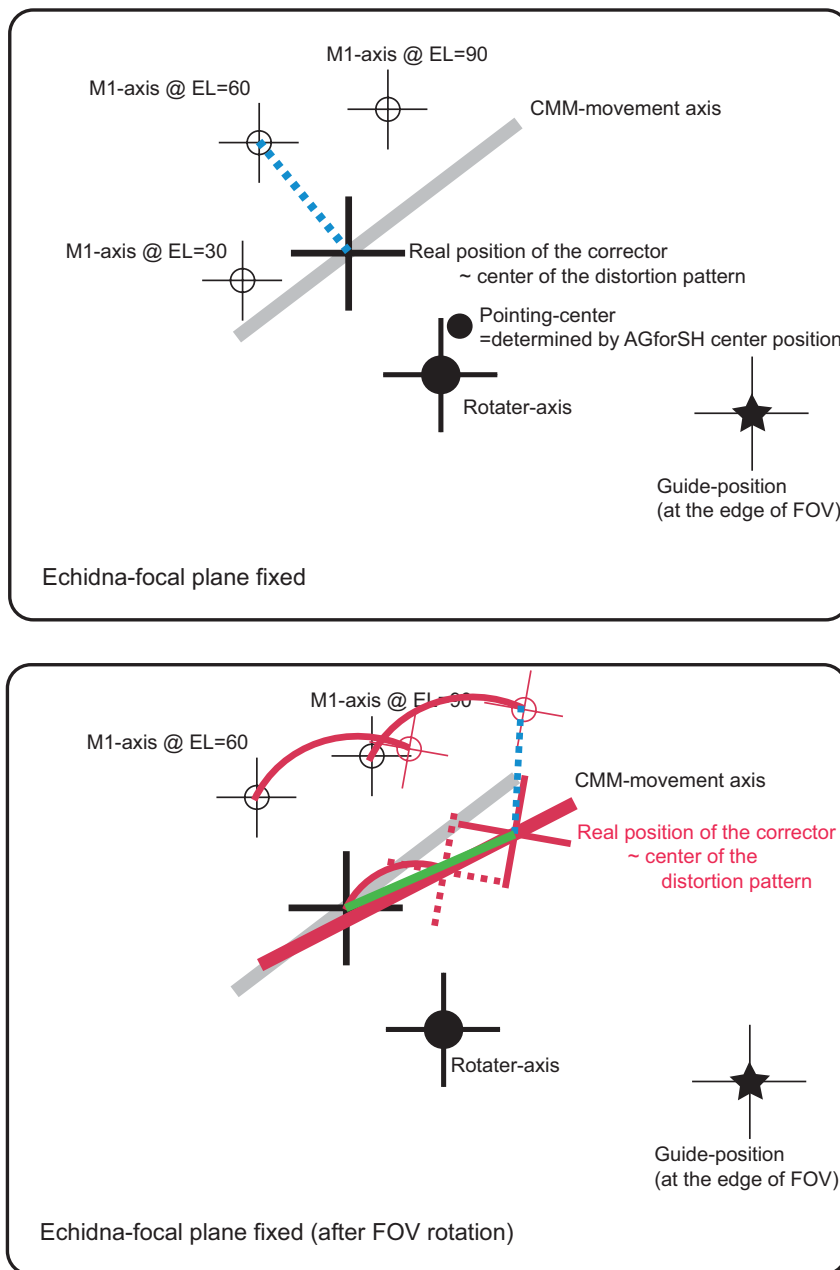


図 1: 焦点面を固定して見たときのいろいろな軸をポンチ絵で示したもの。上は観測開始時、下は観測終了時を想定したポンチ絵。それぞれの軸の位置関係はポンチ絵として示したもので、測定に基づいたものではない。はじめのポインティング位置は AGforSH(AG1) による PA で決まり、ガイド星位置で補正される。

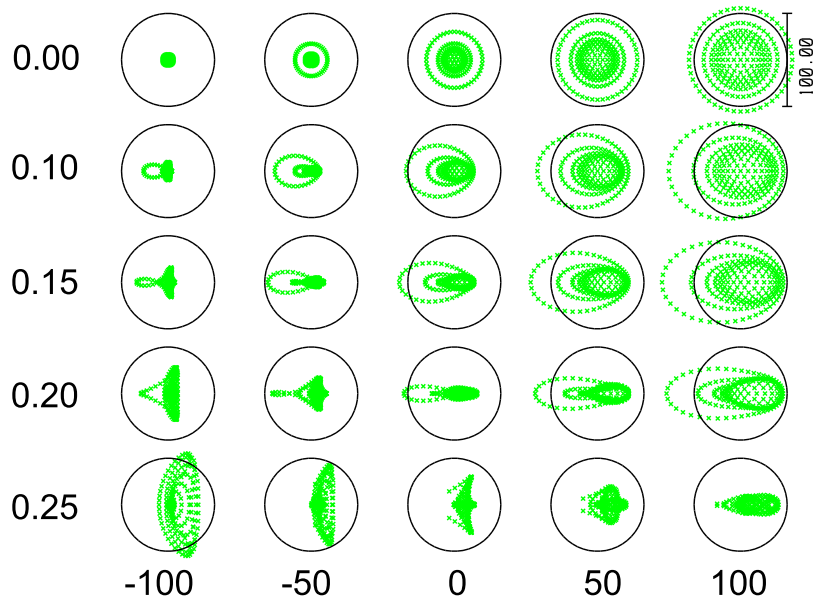


図 2:  $1.3\mu\text{m}$  での焦点内外像。横並びは焦点ズレをあらわす、単位  $\mu\text{m}$ 。縦並びは視野中心からの距離、単位度。円は  $100\mu\text{m}$  直径。

## 5 補正光学系の傾きと XY 駆動による補正

$\theta_X$ 、 $\theta_Y$ 、つまり主鏡と副鏡の光軸傾きの量は天頂から高度角 0 度までで最大 21 秒角変化 (JTS-96-1451 仮組みでの結果)。ただし、Scam では取り付け角に 3 分程度の傾きがある (宮崎レポート:2000/07/14)。この傾きは高度依存して変化する成分ではない。

5 度で最適化された光学パラメータを用いて、補正光学系が平行変位した場合、傾いた場合のスポットダイアグラムを作成すると図??(下図)のようになる。ズレ、回転方向の定義は図 5 のとおり。補正光学系が変位した場合の Zernike 係数を Zemax の Analysis.Calculations.ZernikeFringeCoefficients を用いて計算。CoordBreak を補正光学系第 1 レンズ第 1 面に入れて補正光学系の光軸ズレを再現する。以下のズレ量の値はこの位置での値。シャックハルトマンカメラの観測波長は現 AG の観測波長を参考にしては  $0.73\mu\text{m}$  とした。視野中心の星像を用いる。

### 5.1 光軸ズレあり、光軸傾きなし、焦点面は補正光学系と平行、の場合

X 軸方向の変位があった場合のコマの量などのまとめは表 1。A31 の大きさは補正光学系の光軸ズレ量に比例し、 $A31 = -2.3142 \times \Delta X(\text{mm})$  と記述できる。

Y 軸方向に変位があった場合には A2-2, A3-1 が表の値を持つ。補正光学系の X 軸 Y 軸方向の光軸ズレ量は 2 個の係数で区別できるので、光軸ズレの方向を決めることもできる。

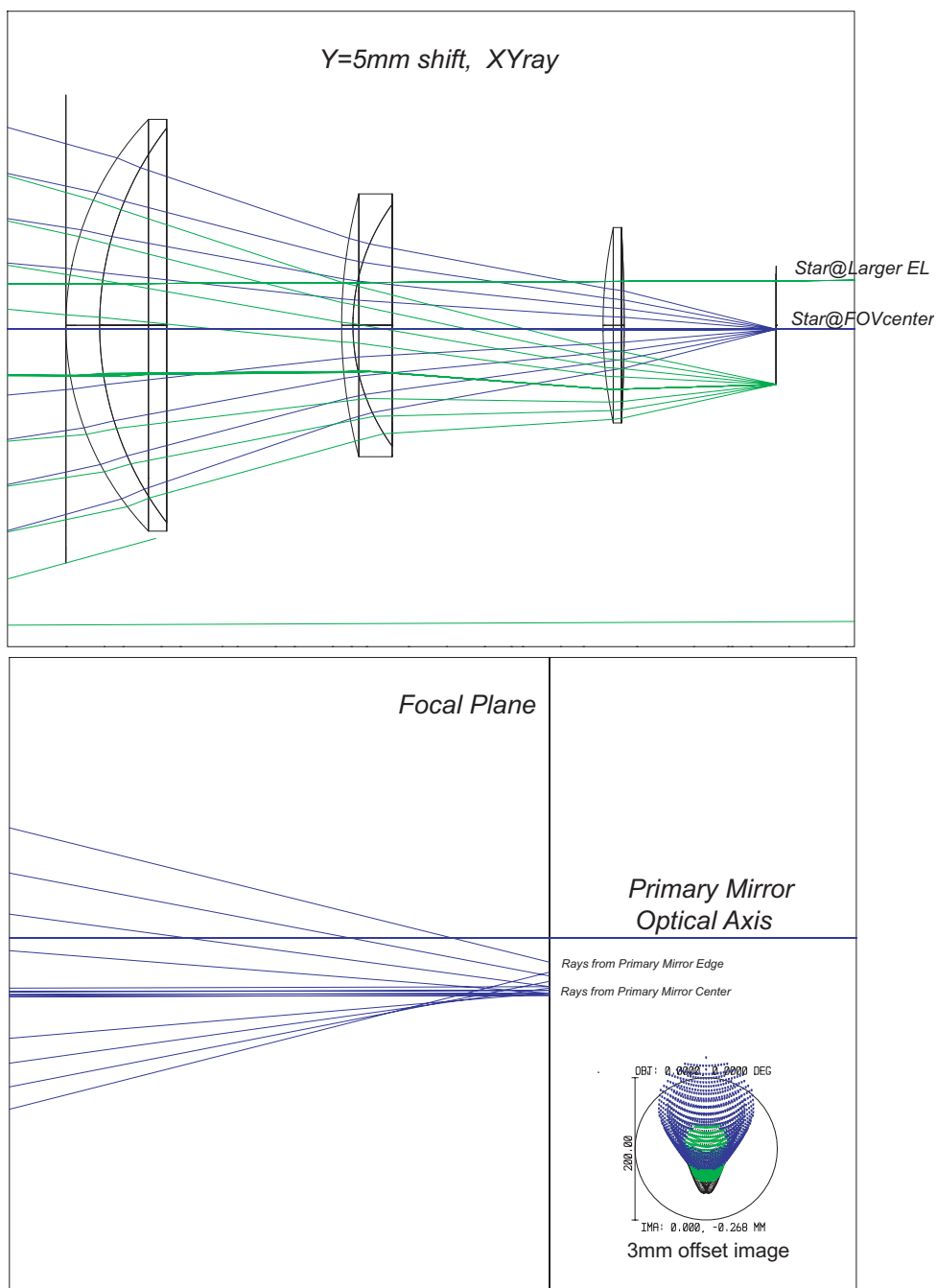


図 3: 補正光学系の変位とそれによるコマ収差の方向の関係。

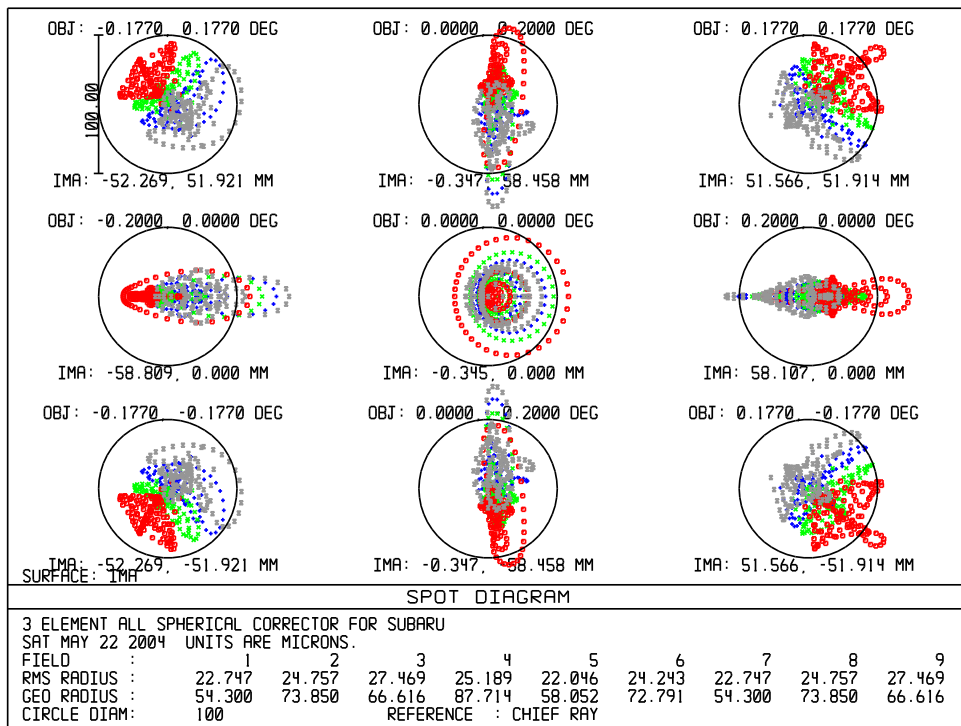
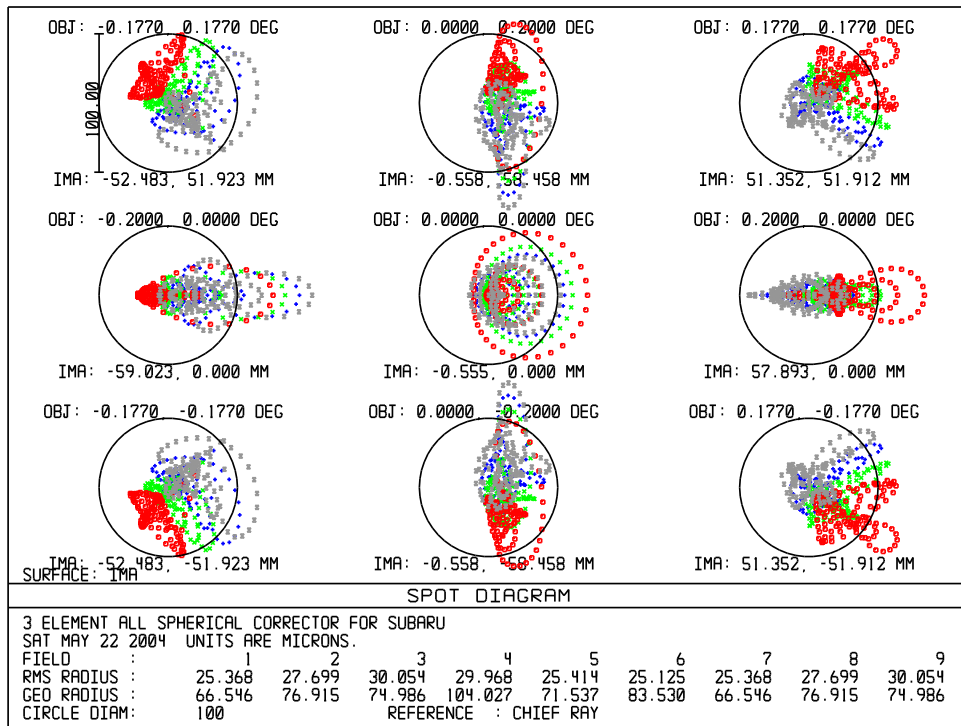


図 4:  $\Delta X = 0.5\text{mm}$  平行に変位した場合 (上) と  $\Delta\theta Y = 0.02\text{deg}$  傾けた場合 (下) のスポットダイアグラム。灰色: $0.73\mu\text{m}$ 、青: $0.9\mu\text{m}$ 、緑: $1.3\mu\text{m}$ 、赤: $1.8\mu\text{m}$ 。

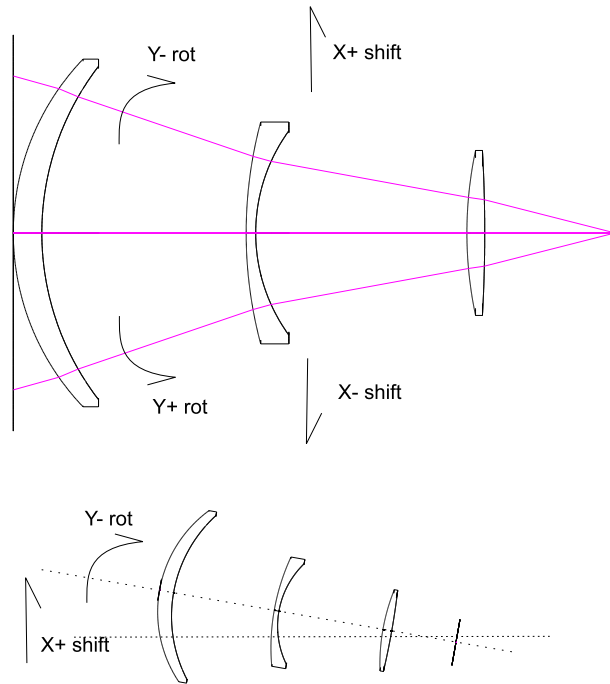


図 5: 上) 変位の方向のまとめ。下) コマが無くなるセンスの移動方向。

## 5.2 光軸傾きあり、光軸ずれなし、焦点面は補正光学系に平行の場合

$\theta Y$  の方向の回転の時のまとめは表 2。傾きの場合もコマ収差が支配的。コマの量は傾きに対して、 $A_{31} = 0.5496 \times \Delta\theta Y(\text{arcmin})$  X 軸まわりの回転では  $A_{2-2}, A_{3-1}$  が表の値を持つ。

視野中心像で見た場合には平行移動成分と、傾き成分を区別することは出来ない。傾きによって生じたコマ収差も  $\Delta X(\text{mm}) = -0.2374 \times \Delta\theta Y(\text{arcmin})$  の平行移動で補正することができる(コマフリーセンターに対する回転に焼きなおしている?)。FMOS ユニットの、傾き成分を補正する機構は無いので、直進駆動を用いて傾きによって生じるコマ収差も打ち消す必要がある。打ち消しあった後のスポットダイアグラムは図 4 に示した。打ち消しあった後のスポットダイアグラムでは視野周辺像で非点収差がでる。 $(-0.177, 0.177)$  での星像の場合、ずれ無しの場合  $A_{22} = 0.00$   $A_{2-2} = -1.32$   $A_{31} = 0.38$   $A_{3-1} = -0.38$  に対して、打ち消しあった後は  $A_{22} = -0.83$   $A_{2-2} = -2.16$   $A_{31} = 0.37$   $A_{3-1} = -0.38$  となり、コマ収差の量はほとんど変わらないが、非点収差が出ているのがわかる。

## 6 視野ゆがみパターンの移動とその影響

光軸ずれなし、傾きなしの場合の視野ゆがみの様子を図 4 にしめす。ゆがみの量は上で書いたとおり。光軸ずれ (1mm)、傾きあり ( $-4.21\text{arcmin}$ )、コマなしの場合でも焦点面が補正光学系に平行の場合、視野ゆがみの量の変化はほとんどない ( $0.95148\% - 0.95148\%$ )。

補正光学系光軸が焦点面に対して移動した場合(補正光学系駆動またはローテータ回転)には視野ゆがみのパターンはそれに伴って移動する。その際の視野の各位置での像の移動量を図 8 に示した。補正光学系光軸が焦点面に対して 2mm 移動することで、視野端の像は  $0.5''$  移動する。ガ



Shift (mm)	A22	A31	RMS (waves)	EED1 (arcsec)	EED2 (arcsec)
0.0	0.000000	0.000000	1.510	0.48	0.53
0.1	0.000012	-0.231423	1.513	0.48	0.53
0.2	0.000046	-0.462845	1.519	0.48	0.52
0.3	0.000102	-0.694268	1.530	0.48	0.51
0.4	0.000182	-0.925691	1.561	0.51	0.51
0.5	0.000285	-1.157113	1.564	0.52	0.50
0.6	0.000410	-1.388536	1.587	0.52	0.50
0.7	0.000558	-1.619958	1.614	0.54	0.50
0.8	0.000728	-1.851380	1.644	0.57	0.52
0.9	0.000922	-2.082802	1.678	0.57	0.54
1.0	0.001138	-2.314224	1.715	0.59	0.57
1.1	0.001377	-2.545645	1.755	0.62	0.62
1.2	0.001639	-2.777067	1.797	0.67	0.64
1.3	0.001923	-3.008488	1.843	0.72	0.69
1.4	0.002231	-3.239909	1.890	0.74	0.74
1.5	0.002560	-3.471329	1.940	0.79	0.79
1.6	0.002913	-3.702749	1.992	0.82	0.82
1.7	0.003289	-3.934169	2.046	0.87	0.89
1.8	0.003687	-4.165589	2.102	0.92	0.89
1.9	0.004108	-4.397008	2.159	0.94	0.94
2.0	0.004551	-4.628427	2.218	0.99	0.99

表 1: X 軸方向の変位の場合。視野中心像に対する  $A22=\rho^2 \cos 2\phi$  (Astigmatism 3rd)、 $A31=(3\rho^2 - 2)\rho \cos \phi$  (Coma 3rd)、 $0.73\mu\text{m}$  での波面 rms、 $1.30\mu\text{m}$  での 80%エンサークルエナジー直径。視野端での 80%エンサークルエナジー直径。

イドは視野端で行うので、視野端と視野中心の移動量の差がそのまま効いてくる事に注意が必要、視野端がちょっとわるくなるのはまあいいかというのは許されない。観測中の像の移動量を  $0.2''$  に押さえる為には補正光学系光軸が焦点面に対して  $0.8\text{mm}$  の移動に抑える必要がある。

## 7 大気差と合わせた評価

## 8 焦点面の Z 方向駆動とゆがみパターンのスケールの変動

## 9 オフセットガイドは可能か

Tilt (arcmin)	A22	A31	RMS (waves)	EED1 (arcsec)	EED2 (arcsec)
0.60	-0.00065	-0.32973	1.515	0.48	0.53
1.20	-0.00260	-0.65947	1.527	0.48	0.53
1.80	-0.00584	-0.98920	1.547	0.50	0.53
2.40	-0.01038	-1.31893	1.674	0.52	0.54
3.00	-0.01622	-1.64867	1.609	0.54	0.57
3.60	-0.02336	-1.97840	1.651	0.57	0.62
4.20	-0.03179	-2.30813	1.698	0.59	0.67
4.80	-0.04152	-2.63787	1.752	0.64	0.67
5.40	-0.05255	-2.96760	1.811	0.69	0.72
6.00	-0.06488	-3.29734	1.874	0.74	0.79
6.60	-0.07850	-3.62707	1.942	0.79	0.84
7.20	-0.09342	-3.95681	2.014	0.87	0.92
7.80	-0.10964	-4.28654	2.089	0.94	0.99
8.40	-0.12716	-4.61628	2.168	0.99	1.04
9.00	-0.14597	-4.94602	2.249	1.04	1.14
9.60	-0.16608	-5.27575	2.333	1.14	1.19
10.20	-0.18749	-5.60549	2.419	1.19	1.24
10.80	-0.21020	-5.93523	2.507	1.24	1.34
11.40	-0.23420	-6.26497	2.597	1.34	1.44
12.00	-0.25950	-6.59471	2.689	1.39	1.49

表 2: Y 軸まわりの回転の場合。視野中心像に対する  $A22=\rho^2\cos 2\phi$  (Astigmatism 3rd)、 $A31=(3\rho^2-2)\rho\cos\phi$  (Coma 3rd)、 $0.73\mu\text{m}$  での波面 rms、 $1.30\mu\text{m}$  での 80%エンサークルエナジー直径。視野端での 80%エンサークルエナジー直径。

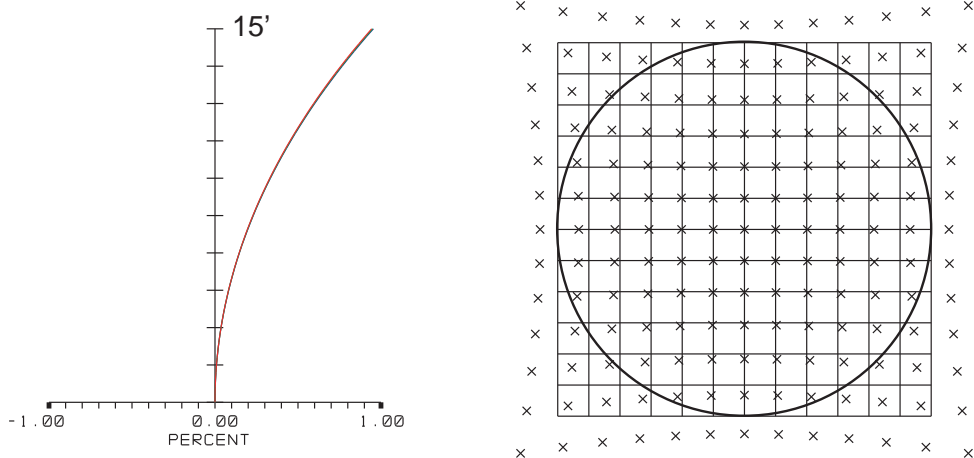


図 7: 視野ゆがみの量。左) 波長毎の視野ゆがみ量。灰色: $0.73\mu\text{m}$ 、青: $0.9\mu\text{m}$ 、緑: $1.3\mu\text{m}$ 、赤: $1.8\mu\text{m}$ 。視野端は  $0.25$  度半径。右) $1.3\mu\text{m}$  での視野ゆがみの様子。変位は  $10$  倍してある。円が FMOS の視野を表す。

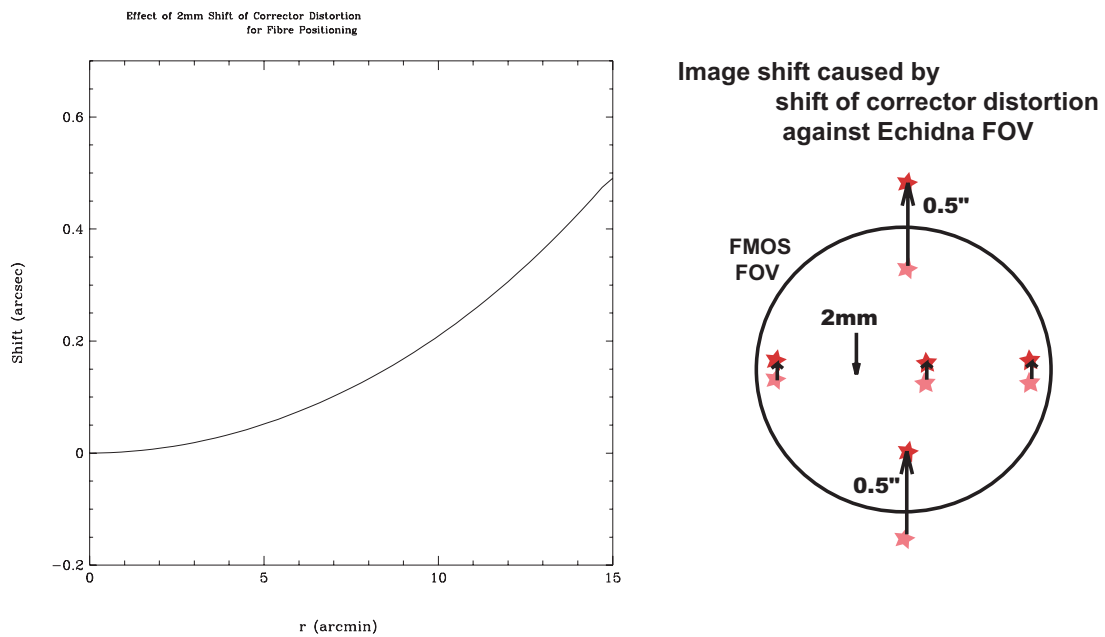


図 8: (左) 補正光学系が視野に対して  $2\text{mm}$  移動した場合のゆがみパターンの移動に伴う、各位置での像の移動量。視野中心ではほとんど移動は無いが視野端では  $0.5''$  程度の移動がある。(右) 像の移動の方向をポンチ絵で示したものの。

HA(hours)	Dec										
	80	70	60	50	40	30	20	10	0	-10	-20
-5.0	0.77										
-4.0	0.83	0.79	0.65	0.59	0.20	0.17	0.18				
-3.0	0.93	0.90	0.86	0.79	0.14	0.16	0.42	0.46	0.56	0.65	
-2.0	1.01	1.03	1.30	1.24	0.02	0.16	0.90	0.96	0.78	0.89	
-1.0	1.08	1.12	1.94	1.90	3.96	3.98	1.57	1.84	0.96	1.11	
0.0	1.06	1.13	1.92	1.91	3.55	4.61	1.56	1.84	0.95	1.10	
1.0	1.01	1.03	1.29	1.24	0.01	0.16	0.88	0.97	0.77	0.89	
2.0	0.92	0.90	0.86	0.79	0.14	0.16	0.41	0.45	0.55	0.65	
3.0	0.83	0.79	0.65	0.59	0.20	0.17	0.18	0.23	0.38	0.47	
4.0	0.77	0.72	0.56	0.50	0.24	0.19	0.04				

表 3: 視野回転に伴う補正光学系光軸の焦点面に対する 1 時間あたりの移動量 (mm)。補正光学系光軸と PIR ロータ軸のズレは 3mm と仮定した場合で、Parallactic angle  $\theta_{\text{par}}$  の時間変化量により  $3(\text{mm}) \times 2 \times \sqrt{\frac{1-\cos(d\theta_{\text{par}})}{2}}$  で計算。数字の入っていない領域は  $\sec z > 2.0$  で観測しない。ズレの大きいエリアでは 1 時間以上の露出をするには、露出を中断してファイバーの位置に微小な補正をする (Tweak と呼んでいる) 必要があり、これには 5 分程度かかる。露出を中断するので 1 回の最大露出時間が制限される。

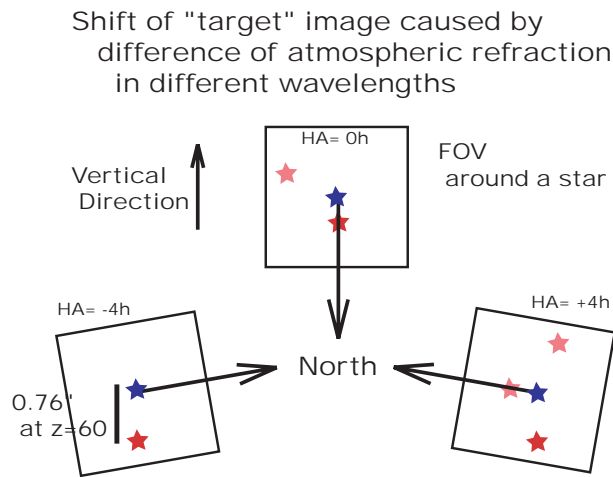


図 9: 色微分大気差の影響

Image shift caused by  
"differential" atmospheric refraction

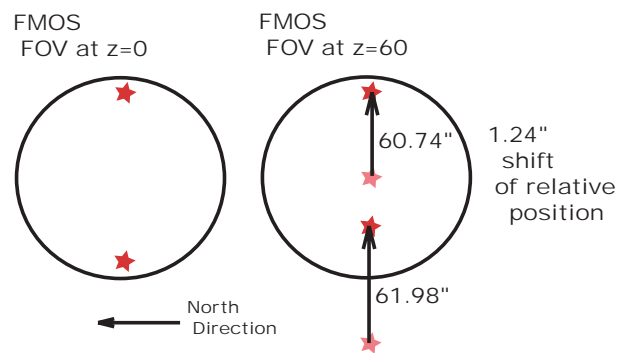


図 10: 微分大気差の影響