

# 導入エラーの定量的評価 実際の観測

沖田博文 (東北大)

2009/12/16

## 1 はじめに

南極 40cm 赤外線望遠鏡には試験観測から導入誤差が存在することが確認されている。これは望遠鏡制御システムに天体の座標を与え、望遠鏡のモーターを回転させてその天体の方向へ向けても実際には天体の方向を向いていない、といったエラーとして現れる。

これらの原因として

1. 極軸が不一致 (設置誤差)
2. 大気差 (地球大気の影響)
3. ピリオディックモーション (ギヤの加工誤差)
4. バックラッシュ (ギヤのかみ合わせ)
5. 赤経軸と赤緯軸の直交誤差 (加工・調整誤差)
6. 赤緯軸と光軸の直交誤差 (加工・調整誤差)

が考えられる。ここで「導入エラーの定量的評価 (沖田博文、2009 年 12 月 3 日レポート)」によると上記 6 つの成分は

赤経軸方向

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{obs} &\equiv (\Delta\alpha_B - \Delta\alpha_A) \cos \delta_B \\ &\simeq \left\{ \epsilon_p \{ \sin(H_B - H_p) \tan \delta_B - \sin(H_A - H_p) \tan \delta_A \} \right. \\ &\quad - R_0 \left( \frac{\sin H_B \cos L}{\sin \delta_B \sin L + \cos \delta_B \cos L \cos H_B} - \frac{\sin H_A \cos L}{\sin \delta_A \sin L + \cos \delta_A \cos L \cos H_A} \right) \\ &\quad \left. + d (\tan \delta_B - \tan \delta_A) - t \left( \frac{1}{\cos \delta_B} - \frac{1}{\cos \delta_A} \right) \pm 2P_0 \right\} \cos \delta_B \end{aligned} \quad (1)$$

赤緯軸方向

$$\begin{aligned}
 \Delta\delta_{obs} &\equiv \Delta\delta_B - \Delta\delta_A \\
 &\simeq \epsilon_p \{ \cos(H_B - H_p) - \cos(H_A - H_p) \} \\
 &+ R_0 \left\{ \frac{\sin L}{\sin \delta_B \cos \delta_B \sin L + \cos^2 \delta_B \cos L \cos H_B} - \frac{\sin L}{\sin \delta_A \cos \delta_A \sin L + \cos^2 \delta_A \cos L \cos H_A} - (\tan \delta_B - \tan \delta_A) \right\} \\
 &\pm B_0
 \end{aligned} \tag{2}$$

$H_A$  アライメントする天体の時角

$\delta_A$  アライメントする天体の赤緯

$H_B$  導入誤差を測定する天体の時角

$\delta_B$  追尾誤差を測定する天体の赤緯

$L$  観測地の緯度

$H_p$  設置誤差の時角

$\epsilon_p$  設置誤差の大きさ

$d$  RA 軸と Dec 軸の直交誤差 (望遠鏡が向いている方向から見てフォーク西側が左手側になるよう望遠鏡を向けたとき、RA 軸と Dec 軸に、時計回り正の方向)

$t$  Dec 軸と光軸の直交誤差 (望遠鏡が向いている方向から見てフォーク西側が左手側になるよう望遠鏡を向けたとき、Dec 軸と光軸に、反時計回り正の方向)

$R_0$  大気差定数

$H_0$  ピリオディックモーション (RA 軸) の振幅

$B_0$  バックラッシュ (Dec 軸) の大きさ

と書ける。そこでこのレポートでは実際に天体を観測し、これらの誤差を見積もっていく。

## 2 観測方法

南極 40cm 赤外線望遠鏡の接眼部に Apogee 社製冷却 CCD カメラ ALTA U9000 を取り付けて観測を行った。観測方法はまずある天体で望遠鏡のアライメントをとり、その位置を撮影・記録する。次に望遠鏡を操作し別の天体を導入、その位置を撮影・記録する。これを繰り返して導入される天体の位置を記録した。

なお天体の撮影は 1、2、4[sec] 露出を各 1 コマずつ撮影し最適な露出のものを観測結果とした。

表 1 に観測装置の各種パラメーターを示す。

またこれとは別にピクセルサイズの測定・カメラの取付角度 (CCD チップの  $xy$  軸と時角  $HA$ ・Dec 方向の角度) を測定する為、前者は離角の判っている二重星を、後者は明るい恒星を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止するといった観測でそれぞれ求めて観測データの補正に用いる。

| 望遠鏡     | 南極 40cm 赤外線望遠鏡          |
|---------|-------------------------|
| 口径      | 400 [mm]                |
| 焦点距離    | 4800 [mm]               |
| カメラ     | ALTA U9000              |
| ピクセルサイズ | 12 [ $\mu$ m]           |
| 冷却温度    | -20,-30 [ $^{\circ}$ C] |
| フィルター   | なし                      |
| 露出時間    | 1,2,4 [sec]             |

表 1 観測装置の各種パラメーター

### 3 観測

2009 年 12 月 8 日、12 月 10 日の 2 夜観測を行った。観測した恒星の詳細を表 2、表 3 に示す。

| 観測天体            | RA  | $\delta$               | $H_0$ [rad] | Seeing |
|-----------------|---|------------------------|-------------|--------|
| $\gamma$ -Gri   | 21 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup> 32.2 <sup>s</sup> | -37 $^{\circ}$ 19'10'' | 0.178       | 12''   |
| $\alpha$ -PsA   | 22 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 12.6 <sup>s</sup> | -29 $^{\circ}$ 34'12'' | 0.117       | 7.5''  |
| 88-Aqu          | 23 <sup>h</sup> 09 <sup>m</sup> 59.5 <sup>s</sup> | -21 $^{\circ}$ 07'07'' | 0.179       | 7.2''  |
| $\lambda$ -Aqu  | 22 <sup>h</sup> 53 <sup>m</sup> 08.8 <sup>s</sup> | -07 $^{\circ}$ 31'32'' | 0.370       | 6.4''  |
| $\alpha$ -Aqu   | 22 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup> 18.2 <sup>s</sup> | -00 $^{\circ}$ 16'11'' | 0.234       | 7.6''  |
| $\epsilon$ -Peg | 21 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup> 40.8 <sup>s</sup> | +09 $^{\circ}$ 55'24'' | 0.343       | 8.6''  |
| $\iota$ -Peg    | 22 <sup>h</sup> 07 <sup>m</sup> 28.6 <sup>s</sup> | +25 $^{\circ}$ 23'52'' | 0.257       | 5.5''  |
| $\eta$ -Peg     | 22 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup> 28.7 <sup>s</sup> | +30 $^{\circ}$ 16'41'' | 0.109       | 6.9''  |
| $\sigma$ -And   | 23 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> 23.4 <sup>s</sup> | +42 $^{\circ}$ 23'07'' | 0.0376      | 5.1''  |
| $\alpha$ -Lac   | 22 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> 42.2 <sup>s</sup> | +50 $^{\circ}$ 20'23'' | 0.181       | 5.0''  |
| $\zeta$ -Cep    | 22 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 11.7 <sup>s</sup> | +58 $^{\circ}$ 15'24'' | 0.278       | 6.6''  |
| $\beta$ -Cep    | 21 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> 45.0 <sup>s</sup> | +70 $^{\circ}$ 36'37'' | 0.474       | 6.0''  |
| $\gamma$ -Cep   | 23 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup> 46.6 <sup>s</sup> | +77 $^{\circ}$ 41'41'' | -0.0854     | 5.4''  |
| SAO3816         | 22 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup> 14.1 <sup>s</sup> | +84 $^{\circ}$ 24'23'' | 0.126       | 4.5''  |

表 2 2009 年 12 月 08 日の観測対象星

なおピクセルサイズの測定は 12 月 7 日に  $\theta_1$ -Ori と  $\theta_2$ -Ori の離角を観測して求め、またカメラの取付角は 8 日は  $\alpha$ -And、10 日は  $\gamma$ -Reg を観測して測定した。

| 観測天体      | RA  | $\delta$   | $H_0$ [rad] | Seeing |
|-----------|---|------------|-------------|--------|
| SAO163107 | 19 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup> 58.6 <sup>s</sup> | -19°16'01" | 1.03        | 11"    |
| SAO163245 | 20 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup> 38.3 <sup>s</sup> | -11°34'15" | 0.978       | 6.2"   |
| SAO125429 | 20 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup> 50.7 <sup>s</sup> | +00°29'02" | 0.834       | 2.2"   |
| SAO105615 | 20 <sup>h</sup> 03 <sup>m</sup> 57.0 <sup>s</sup> | +16°03'41" | 0.861       | 3.2"   |
| SAO69562  | 20 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 17.8 <sup>s</sup> | +30°49'20" | 0.846       | 2.6"   |
| SAO49105  | 20 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> 03.7 <sup>s</sup> | +44°09'01" | 0.898       | 3.4"   |
| SAO32016  | 19 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup> 24.0 <sup>s</sup> | +59°27'05" | 0.974       | 3.5"   |
| SAO9631   | 20 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup> 13.4 <sup>s</sup> | +73°56'31" | 0.916       | 2.9"   |
| SAO3332   | 19 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 31.1 <sup>s</sup> | +84°41'59" | 0.960       | 3.4"   |

表 3 2009 年 12 月 10 日の観測対象星

## 4 データ解析

### 4.1 カメラの取付角度の測定

カメラの取付角度、すなわち CCD チップの  $y$  軸と時角方向のなす角度を明るい恒星を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止することで求めた。解析は ds9 に撮影した画像を表示させ、 $y$  軸方向 150[pixel] 毎に位置を記録し、それらを直線でフィッティングし傾きを求めた。8 日は  $\alpha$ -And、10 日は  $\gamma$ -Reg を観測して測定した。

図 1、図 2 はそれぞれ 8 日、10 日に測定したカメラの取付角度の解析結果である。

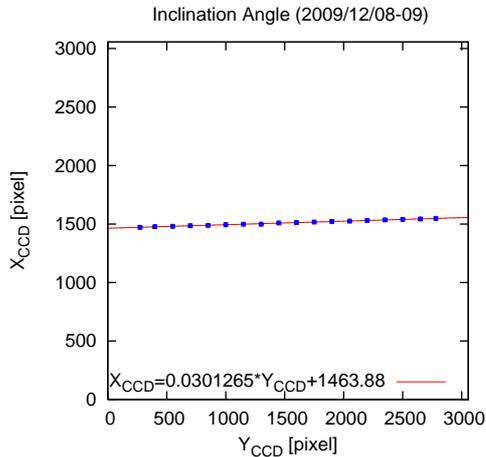


図 1 取付角度の測定 (8 日)

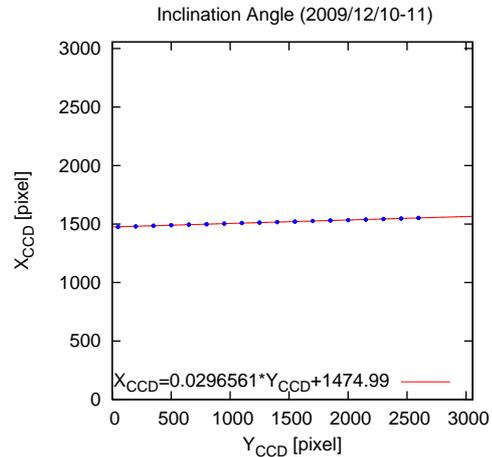


図 2 取付角度の測定 (10 日)

この結果から CCD チップの  $x$  軸と時角方向のなす角は 8 日は 0.0301[rad]、10 日は 0.0297[rad] であることが判った。

## 4.2 ピクセルサイズの測定

ピクセルサイズは 12 月 7 日に観測した  $\theta 1$ -Ori、 $\theta 2$ -Ori の離角から求めた。この天体の離角は「DIMM のピクセルサイズ測定 (沖田博文、2008 年 1 月 16 日レポート)」の手法を用いて  $135.07[\text{arcsec}]$  であることが判っている。そこで 2 つの天体の CCD のチップ上の位置を測定し、位置の差からピクセルサイズを求める。

シーイングの影響を除く為に 10 フレームについて位置の測定を行った。結果を式 (3) に示す。誤差は  $1\sigma$ 。

$$\text{Pixel Size} = 0.518 \pm 0.000[\text{arcsec/pixel}] \quad (3)$$

なおピクセルサイズは本来であれば観測日毎に測定するべきであるが、今回の観測では天候の変化によって 8 日・10 日共にピクセルサイズの測定が行えなかった為 12 月 7 日に行った観測のデータを用いることにした。なおカメラは望遠鏡から取り外していないので焦点距離の変化は気温変化程度であり、十分無視して良いと考えられる。

## 4.3 天体の位置測定・補正

IRAF の imexamine コマンドを用いて天体の CCD 上での位置を拾い、前述のカメラの取付角度・ピクセルサイズを補正し、さらに横軸を時角方向 (+ が西、- が東)、縦軸を赤緯 (+ が北、- が南) となるように変換した。imexamine で log ファイルを出力する設定にし、その log ファイルから必要な情報を読み出し座標変換を awk ファイルで行った。

## 5 理論曲線とのフィッティング

「南極 40cm 赤外線望遠鏡バックラッシュ量の評価 (沖田博文、2009 年 11 月 16 日レポート)」より Dec 方向には無視できない量のバックラッシュが存在する。また式 (2) から、Dec 方向の導入エラーは大気差と設置誤差に由来する事が判る。今回の観測ではほぼ同じ時角  $HA$  の天体を赤緯  $\delta$  を変えてその位置を測定したため時角の変化に対する導入エラーのデータが無い。その為、Dec 方向の導入エラーから有意義なデータは得られない。

そこで今回の解析では RA 方向の導入エラーのみから直交誤差  $d$ 、 $t$  (+ 設置誤差  $\epsilon_p$ 、 $H_p$ ) を求めることにした。

### 5.1 大気差の補正

大気差による時角・赤緯方向の導入エラーは式 (1)、式 (2) によると観測時の天体の時角  $H_A$ 、 $H_B$  と赤緯  $\delta_A$ 、 $\delta_B$ 、観測地の緯度  $L$  で一意に求まる。よってあらかじめ大気差による移動量は差し引くことができる。

### 5.2 設置誤差の見積もり・補正

「追尾エラーの定量的評価 実際の観測 (沖田博文、2009 年 11 月 11 日レポート)」によると望遠鏡の設置誤差は  $\epsilon_p = 146 \pm 22[\text{arcsec}]$ 、 $H_p = -0.122 \pm 0.096[\text{radian}]$  であると見積もられていた。そこで 12 月 8 日の観測前に極軸の高度を極軸高度調整ネジを  $90^\circ$  回して高度を下げた。これは (推定)  $145[\text{arcsec}]$  に相当する。

この作業の結果極軸はほぼ完璧に点の北極を向いていると言える。そこで今回の導入エラーの見積もりでは設置誤差は 0 と見なせる。よって設置誤差によるエラーは小さく無視できると仮定して以降計算していく。

### 5.3 測定位置の誤差見積もり

「追尾エラーの定量的評価 実際の観測 (沖田博文、2009 年 11 月 11 日レポート)」、「南極 40cm 赤外線望遠鏡バックラッシュ量の評価 (沖田博文、2009 年 11 月 16 日レポート)」によると南極 40cm 赤外線望遠鏡の RA 軸方向には以下のピリオディックモーションとバックラッシュによる天体位置の誤差がある事が示されている。

$$P_0 = 4.3 \pm 1.8[\text{arcsec}] \quad (4)$$

$$B_{RA} = -3.6 \pm 14[\text{arcsec}] \quad (5)$$

ここで RA 方向のバックラッシュは原理的に生じないはずであるが、エクス電子設計の稲岡さんの話ではソフトウェア内部での天体の位置のやりとりで桁落ちが存在し、数秒角程度の誤差があるかもしれないとの事であった。つまり機械的なギヤの遊びもしくはソフトウェア的な導入精度不足が実際に存在し  $B_{RA}$  程度の導入誤差が存在すると考えられる。そこでこれらをすべて測定位置の誤差として見積もる。アライメントした天体の位置もピリオディックモーション・バックラッシュの影響により誤差が生じる。また観測時のシーイングサイズ  $S_*[\text{arcsec}]$  程度の位置の測定誤差も生じる。(\* = A, B)

よって天体 A でアライメントし天体 B を導入した時の、CCD 上に写る 2 つの天体の RA 方向の位置誤差は

$$\Delta\alpha_{error} \leq (P_0 + B_{RA} + S_A) \cos \delta_A + (P_0 + B_{RA} + S_B) \cos \delta_B \quad (6)$$

但し赤緯  $\delta$  が大きくほど同じエラー量でも CCD 上に写る RA 方向の角度が小さくなる効果を考慮して  $\cos \delta$  の項を書き加えた。

### 5.4 直交誤差 $d$ 、 $t$ の見積もり

前節までの議論から、設置誤差を無視し、大気差の影響を差し引いた天体の赤緯に対する赤経方向の導入エラーを図 3 に示す。誤差は前小節の通り、望遠鏡のピリオディックモーションとバックラッシュの最大値に観測時のシーイングを足したもので評価した。

この結果から RA 軸と Dec 軸の直交誤差  $d = 87 \pm 21[\text{arcsec}]$ 、Dec 軸と光軸の直交誤差  $t = 320 \pm 29[\text{arcsec}]$  であると見積もることができる。

## 6 考察

前節より 12 月 8 日と 12 月 10 日の両観測で得られた直交誤差は設置誤差が無視できるくらい十分小さいと仮定してそれぞれ RA 軸と Dec 軸の直交誤差  $d = 87 \pm 21[\text{arcsec}]$ 、Dec 軸と光軸の直交誤差  $t = 320 \pm 29[\text{arcsec}]$  であると見積もられた。これを実際の誤差に焼き直すと、Dec ユニットとフォーカスユニットの間に挿入すべきシムの厚みは  $0.34 \pm 0.08 [\text{mm}]$  であり、主鏡調整ネジを  $150 \pm 14 [\text{degree}]$  回転させる必要があることになる。これは機械加工精度や望遠鏡の組立精度等から十分予想できる程度の誤差量であり、今回の観測結果は妥当であると言える。

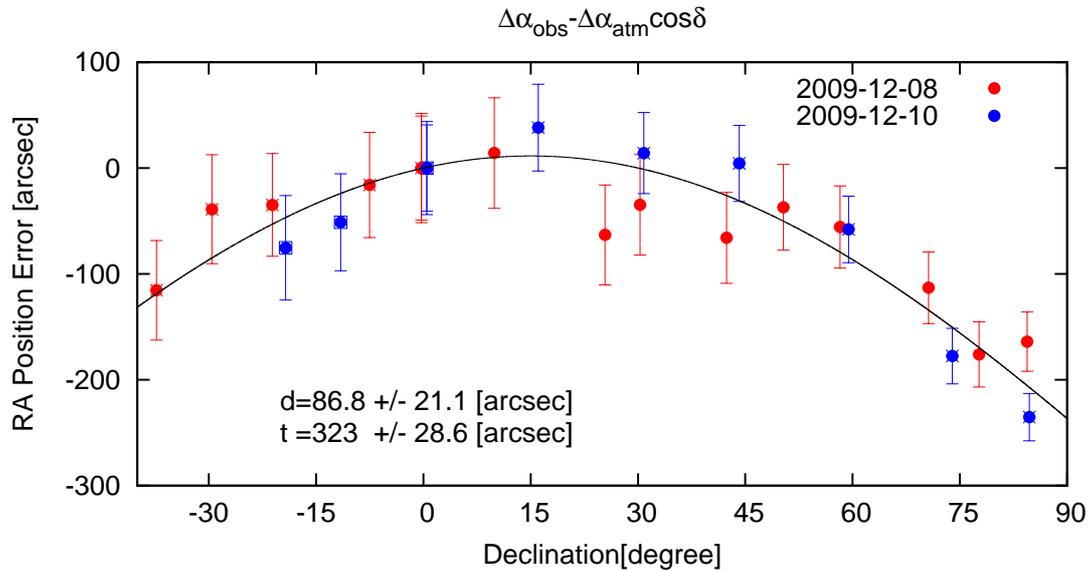


図 3 大気差の影響を除いた天体位置の変化

## 7 まとめ

2009年12月8日と10日に導入エラーの測定を行った。南極40cm赤外線望遠鏡にALTA U9000を取り付け1、2、4秒のいずれかの露出時間で天体を撮影しその位置を測定した。2つの天体の位置の差から、設置誤差が無視できると仮定し大気差による位置ズレを補正することで直交誤差  $d$ 、 $t$  を求めた。その結果、RA軸とDec軸の直交誤差  $d$ 、Dec軸と光軸の直交誤差  $t$  はそれぞれ  $d = 87 \pm 21$  [arcsec]、 $t = 320 \pm 29$  [arcsec] であった。

## 8 参考文献

1. 南極40cm赤外線望遠鏡のRA軸・Dec軸の直交誤差について、沖田博文、2009年9月30日レポート
2. 追尾エラーの定量的評価、沖田博文、2009年11月11日レポート
3. 追尾エラーの定量的評価 実際の観測、沖田博文、2009年11月11日レポート
4. 南極40cm赤外線望遠鏡バックラッシュ量の評価、沖田博文、2009年11月16日レポート
5. 南極40cm赤外線望遠鏡のDec軸・光軸の直交誤差について、沖田博文、2009年11月18日レポート
6. 南極40cm赤外線望遠鏡の設置誤差による導入エラーについて、沖田博文、2009年11月26日レポート
7. 導入エラーの定量的評価、沖田博文、2009年12月03日レポート