

光学ポインティング測定システムによる ALMA 12-mプロトタイプアンテナ指向精度評価

池之上文吾, 浮田信治, 齋藤正雄, 江澤元

(2005年4月28日受理)

Performance Evaluation of an ALMA 12-m Prototype Antenna with an Optical Pointing Telescope System

Bungo IKENOUE, Nobuharu UKITA, Masao SAITO, and Hajime EZAWA

Abstract

The optical pointing telescope (OPT) of 10-cm has been built to make performance evaluations of a proto-type 12-m radio telescope for the Atacama Compact Array project under actual operating conditions. The OPT system consists of an objective lens with a 2X extender, a peltier cooled CCD video camera, and an image acquisition & control computer. The plate scales were found to be $1.16 \text{ arcsec pixel}^{-1}$. A red filter (R64) enabled us to make daytime observations of stars brighter than $m_v < 3.5$ magnitude with a typical S/N larger than 20 by image integration for 1-3 seconds, which results in an error smaller than 0.1 arcsecond. The antenna testing was done at the VLA site of the National Radio Astronomy Observatory (NRAO) in Socorro, New Mexico, US, where star image centroid motions sampled at 30 Hz at zenith were found to be typically 1.0 arcsec rms in March 2004. Stellar image motions for 300 seconds showed a Kolmogorov $-2/3$ turbulence relationship. Positional determination error decreased with $N^{-0.2}$, where N is the number of frames of consecutive exposures. These results suggest that individual measurements with integration time of a few seconds give an error of star position determinations of 0.4 – 0.6 arcseconds rms. The whole sky absolute pointing error under no wind and during night was measured to be 1.17 arcseconds rms. Pointing hysteresis errors (bi-directional repeatability) were found to be $\pm 0.2 - 0.4$ arcseconds. Continuous tracking measurements of Polaris during day and night have revealed a large pointing drift due to thermal distortion of the yoke structure. We have applied retrospective thermal corrections to tracking data of several stars for two hours, with a preliminary thermal deformation model of the yoke, and have found the tracking accuracy improved to be 0.1 – 0.3 arcseconds rms for a 15-minute period. The OPT was also successfully used to demonstrate fast switching motion capability of the antenna that enables it to move back and forth between two positions of 1.5 degrees apart within 1.5 seconds and settle to within 3 arcsecond pointing error. A careful data analysis has revealed, however, that the antenna mount during the fast switching motion displays damped oscillation at the damped natural frequency of about 5 Hz with a decay time of about 1 second.

1. はじめに

ALMA 12mプロトタイプアンテナの評価活動をアメリカニューメキシコ州ソコロのNRAO VLAサイトの一画ATFサイトにて行った(2003年7月~2005年2月). 光学ポインティング測定システムはこのプロトタイプアンテナの追尾精度0.6秒角rms以下, 絶対指向精度2秒角rms以下と

いう指向精度確認に使用する. また, 駆動性能評価として1.5度離れた天空上の点に1.5秒以内に移動・静停する高速スイッチング性能評価, 及び気象変化とアンテナの温度変化による指向誤差を補正する実時間補正装置性能評価にも使用する. 光学ポインティング測定システムは天候に測定を左右されるという欠点がある. しかしながらミリ波サブミリ波電波源に比べ多くの明るい可視星があ

ること、またCCDカメラと光学望遠鏡を組み合わせることによりデータが数秒で取得可能であり、重心位置を0.1秒角の精度で求めることが可能であるという利点がある¹⁾。光学ポインティング測定システム単体評価を行った後、この測定システムを用いてALMA 12mプロトタイプアンテナの指向追尾精度評価を行い、ある特定の気象条件の下でALMAの技術仕様を満足することを確認した。また、プロトタイプアンテナの熱変形による指向誤差と、ポインティング補正式で補正できない再現性の無い機械的歪み及び局所的な歪み

による指向誤差を求めた。

2. ALMA12mプロトタイプアンテナ技術仕様とその評価用光学ポインティング測定システム

2.1 ALMA12mプロトタイプアンテナ技術仕様

図1に評価対象であるALMA12mプロトタイプアンテナとその仕様とを示す。光学望遠鏡のアンテナ搭載位置も示した。光学ポインティング測定システムを用いて絶対指向精度・相対指向精度・高速駆動性能を評価する。

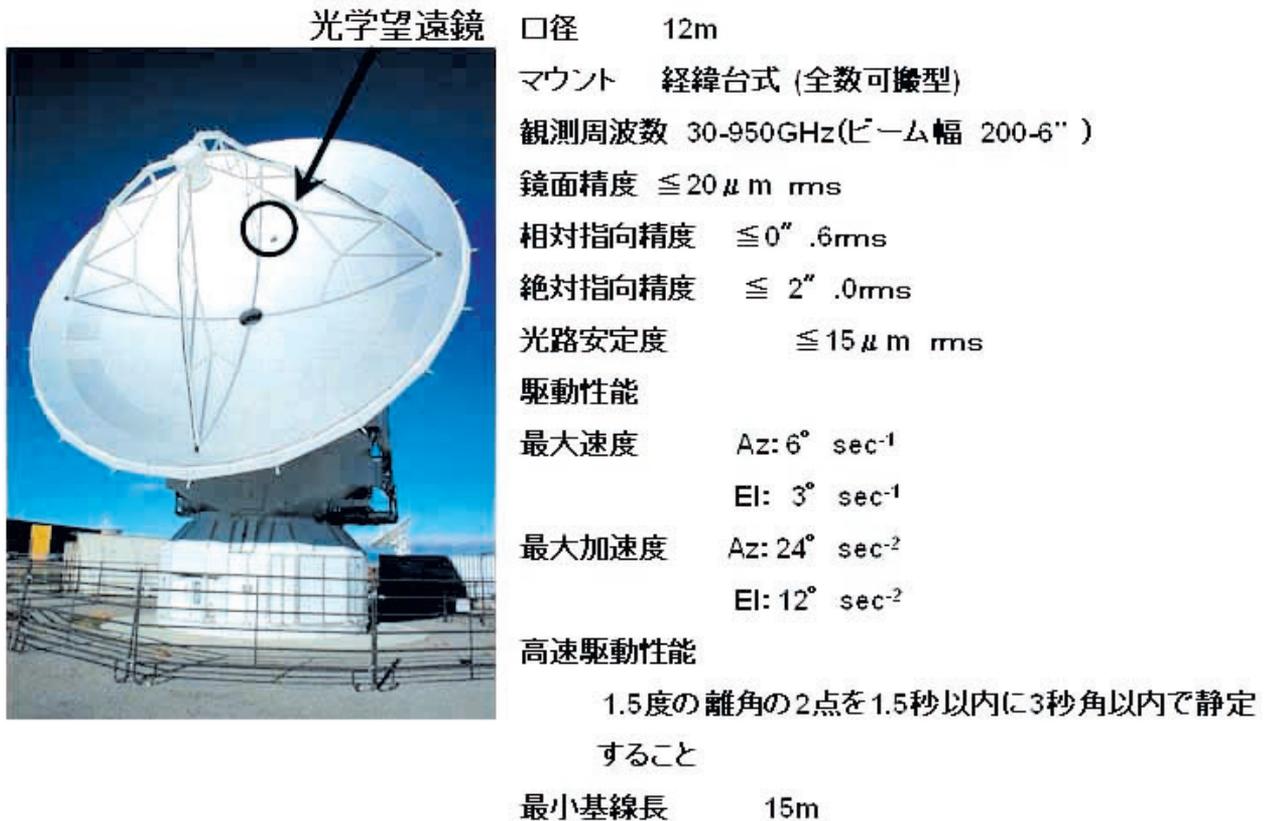


図1. ALMA12mプロトタイプアンテナ

2.2 光学ポインティング測定システム諸元

基本デザイン及び搭載機器はNRAOデザインのものと同じである。これはATFサイトで日米欧三者のALMA12mプロトタイプアンテナを同一条件同一機器で評価、比較するためである。表1に光学ポインティング測定システム諸元を示す。

測定精度0.1秒角を達成するためには角度分解能1秒角程度の望遠鏡とS/N 20-30程度の星像が必要である (測定精度はほぼビーム幅 / (S/N) である)。光学望遠鏡の理論分解能 $\Delta\theta$ と観測波長 λ 、口径 D の関係は $\Delta\theta = \lambda/D$ 。ここで理論分解を1秒角観測波長を500nmとすると、口径 D が100mmの望遠鏡が必要となる。十分たくさんの

星が測定できるためには4等星 (全天710個 理科年表より) が測定できなければならない。4等星がS/N 30 (等級差3.7) で測定可能とすると限界等級は8等級となる。また、ALMAは昼夜問わず観測を行う。昼間は日照の影響や気温変化が大きいためアンテナ構造体の温度分布が非均一になり、指向誤差が大きくなると予想される。そのため昼間にも光学ポインティング測定を行い、指向誤差の評価を行う必要がある。そこで、赤フィルター (R64) を用いて昼間の光学ポインティング測定を可能にしている。この赤フィルターを用いた昼間の測定限界等級は約3.5等である。アンテナの固有振動数は5Hz程度である。これを測定するた

仕様	諸元	
・分解能 1" 0".1 (測定精度) S/N 20-30 限界等級 8等級	レンズ	ビクセン光学 ED102S アポクロマートレンズ 口径100mm
	焦点距離	920mm ×2 (CANON Extender 2XH) F値 = 18
	CCDカメラ	Cohu4920 peltier cooled camera 8.4×9.8 μm pixel size 6.4×4.8 mm image area
・昼間の測定可能	赤フィルター	R64
・高速データ取得 10samples sec ⁻¹ 以上	Image Grabber	National Instruments NI1407 30 frame sec ⁻¹ A/D conversion 256 (8bit)
	Control PC	DELL Optiplex GX260
	Control Software	National Instruments LabVIEW

表1. 光学ポインティング測定システム諸元表

めに画像取得は毎秒10フレームが必要となる。この測定システムではCCDカメラのビデオ信号を読み取るため毎秒30フレームが可能である。

その他の特徴として光学ポインティング測定システムは熱膨張係数の小さなインバ製の鏡筒を持つ。この鏡筒の目的は、熱変形による鏡筒の変化を小さくし測定誤差を小さくする、インバ製のセンターハブ及びインバ製の取り付けフレームと同素材にすることで熱膨張係数の異なる素材間でのバイメタル効果による指向精度低下を避けるという2点である。

2.3 光学ポインティング測定システムブロック

光学ポインティング測定システムは観測トレーラーから遠隔操作される。この測定システムのシステムブロックを図2に示す。シャッター開閉動作と開閉位置センサーには、リモートI/Oを使用している。リモートI/OはLANを通じて観測トレーラーの制御PCと接続され、遠隔操作される。また、CCDカメラのビデオ信号は電気→光変換され光ファイバーを経て光→電気変換され制御・計測用PCと観測モニターに送られる。

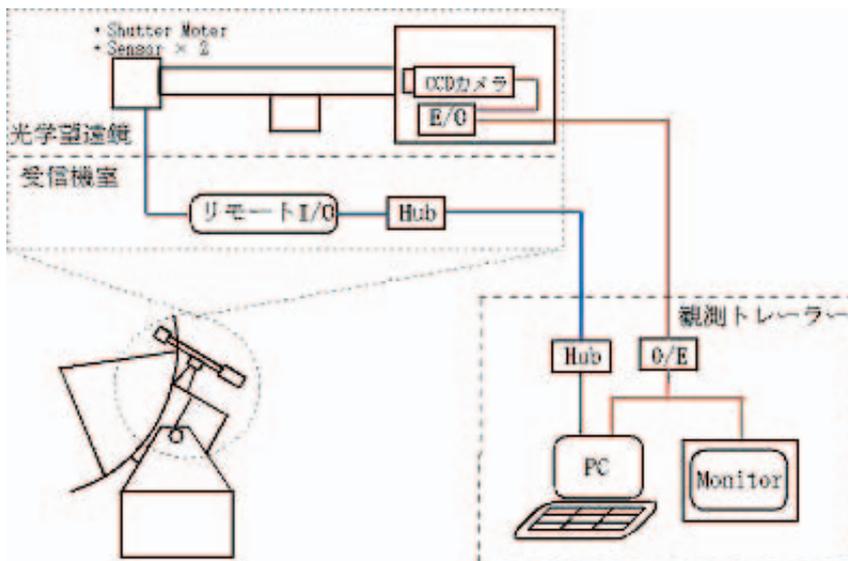


図2. 光学ポインティング測定システムブロック

3. 光学ポインティング測定システム性能評価

光学ポインティング測定システムがALMA12 mプロトタイプアンテナ評価に十分な性能を有しているか確認のため、システム単体の評価を行った。星像は毎秒30フレームで対象星一つにつき50枚取得し、それを足し合わせて平均化した後、重心位置を求めた。

3.1 ピクセルスケールと画像面歪み測定

光学ポインティング測定システムを用いて、指向精度測定の際に重要となるピクセルスケールと視野回転角の測定を行った。また、光学ポインティング測定システムは焦点距離90cmの光学望遠鏡に2倍のエクステンダーを取り付けて焦点距離を180cmに伸ばしている。このエクステンダーはCCDカメラのCマウントに取付けるタイプのもので、我々が用いているF値9の光学望遠鏡専用の物ではないため星像に歪みが生じないか確認のた

めに像面歪み測定を行った。

測定はプロトタイプアンテナをAz方向・El方向とともに0.03度ずつ駆動し、それぞれの位置で北極星の重心位置を求めた。これと測定時のAz・El角度より計算で求めた北極星の位置との比較を行い、視野回転角とピクセルスケール及び画像面の歪みを測定した。図3にCCDカメラで取得した重心位置と計算により求めた位置の差をベクトル表示したものを示す。実際の星像位置に計算による星像位置が重なるように求めた視野回転角は35.6度、ピクセルスケールX方向・Y方向ともに1.163 秒角 pixel⁻¹、誤差0.59秒角rmsである。CCD画像面端では誤差が1秒角を超えており歪みの大きなものが見られるが、測定時は対象をCCD画像面の中心に捉えて測定を行うので大きな問題にはならない。測定時の星像の歪みは大気シーイングによる測定精度と同等かそれ以下(0.3~0.4秒角 4.1参照)であり、星像の歪みによる誤差は無視できる。

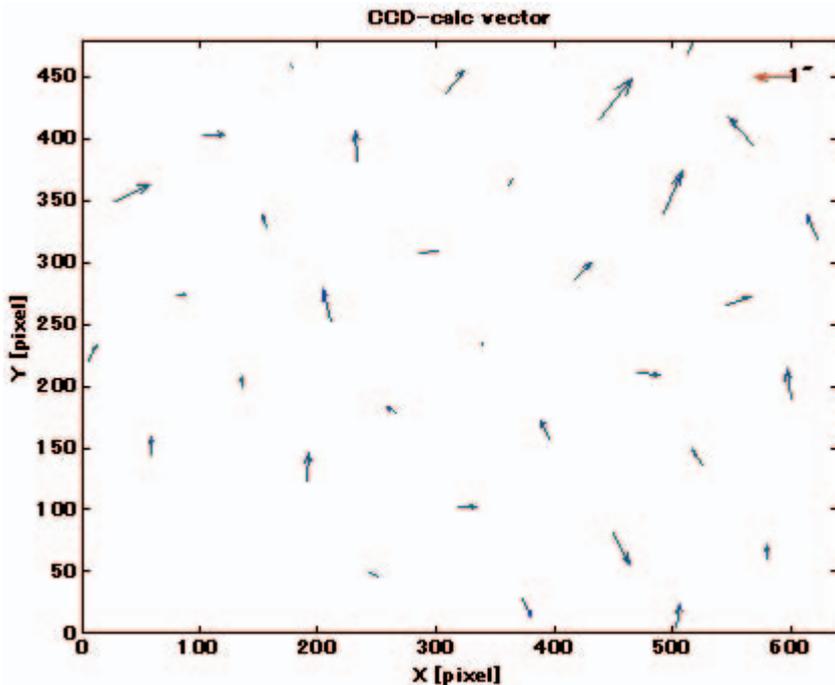


図3. 画像面歪み。画像面端では歪みが大きなものが見られるが実際の測定時には対象を画像面中心に捉えるので測定誤差は十分小さい。

3.2 振動測定

光学望遠鏡先端部及びアンテナ主鏡部に地震加速度計(PCB393B31×8, PCB393B21×2)を取り付けアンテナを駆動し、アンテナに対する光学望遠鏡及びその取付け台座の機械振動を測定した。アンテナへの外乱に対して両者は同振幅・同位相で振動していることが確認された(1~

18Hz)。光学望遠鏡筒部は31Hz及び45Hz近辺で主鏡部とは著しく異なる振動しているが、その振幅は十分小さく、アンテナ指向評価精度には影響はない。図4にアンテナ駆動時の、図5にアンテナ停止時のアンテナ主鏡部に対する光学望遠鏡及び取付け台座の機械振動測定結果を示す。

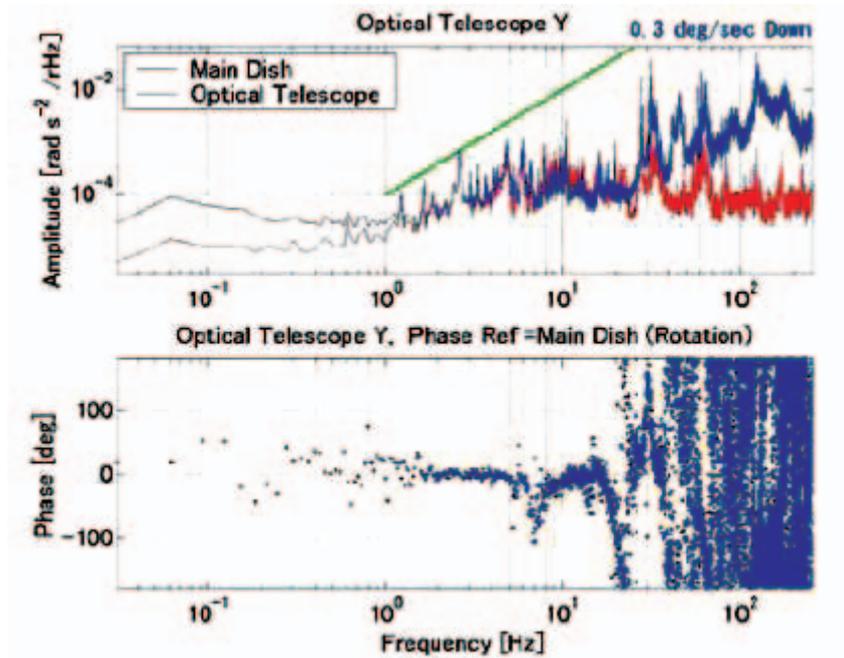


図4. EIを0.3 度毎秒で駆動中に、主鏡部（上端部と下端部にセンサー配置）と光学望遠鏡筒に発生した角加速度の非一様性の周波数特性。1~18 Hz 程度まで同振幅・同位相で振動している。緑線は振動振幅一定を示すライン。スペクトル中の個々の成分は、Az第2遊星ギア（2.7Hz）第3遊星ギア（0.6Hzとその2倍3倍）の波面誤差に起因している。4.9Hzと6.0Hz付近の成分は、ヨーク部・マウント部で発生している固有のものである。

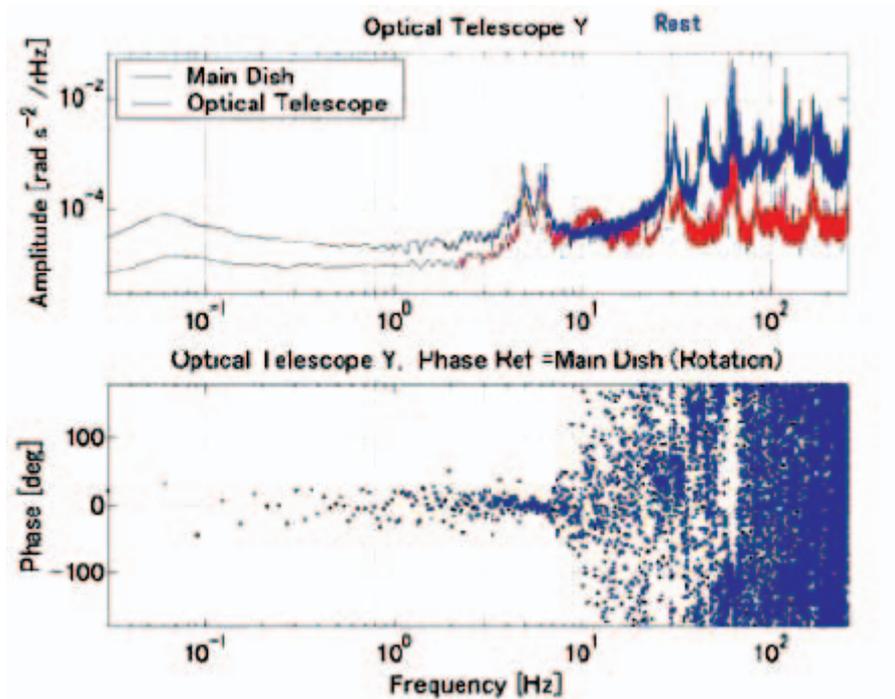


図5. アンテナ静止状態での振動の様子。光学望遠鏡は31Hz及び45Hz近辺で固有振動していると推定される。

4. ALMA12mプロトタイプアンテナ評価

4.1 ATFサイトシーイング

ATFサイトのシーイング測定を光学ポインティング測定システムを用いて行った。約5分間CCD画像を毎秒約23フレームの割合でデジタル化して記録した。測定は2003年12月7日に行われ

た。その星像重心の変動はKolmogorov大気モデルから予想されるような $-2/3$ のインデックスをしめしている（図6）。一方、Kolmogorov大気モデルから予想されるシーイングによる重心変動の時系列データを用いて、 N 個のデータを平均した後の推定誤差を見積もると、 $N^{-0.2}$ に比例して改善することがわかる²⁾。したがって一回の測定に連

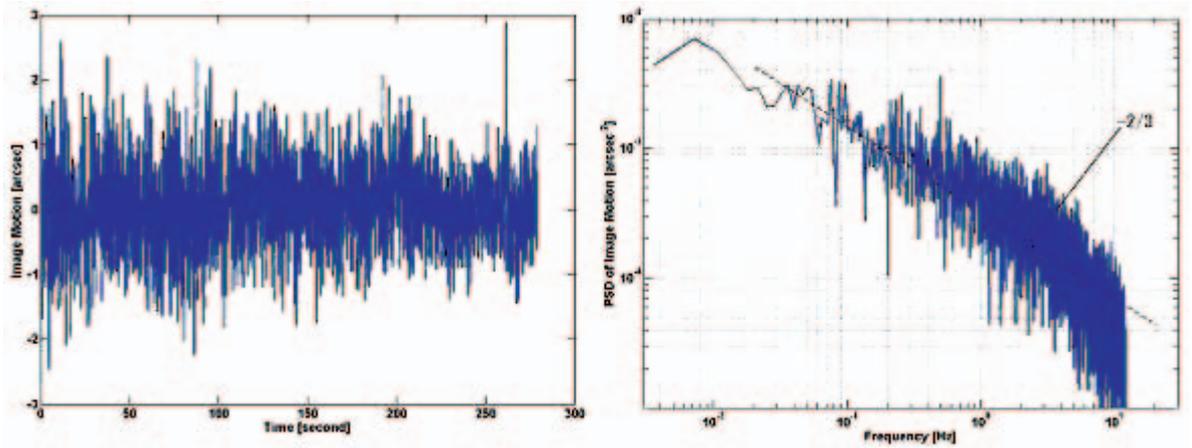


図6. 連続追尾時の星像重心 (EL方向) の変動 (左パネル) とそのスペクトル (PSD) (右パネル)

続する N 枚のフレームを取得した場合、 N 枚の画像の重心位置のrmsを求め、その $N^{-0.2}$ 倍がその測定による位置推定誤差の見積りとなしよ。このようにして見積りもったATFサイトのシーイング誤差は0.3~0.4秒角である。

4.2 アンテナ指向精度の温度依存性 (熱荷重測定)

ALMA12mプロトタイプアンテナは気象変化とアンテナの温度変化による指向誤差の補正のために実時間補正装置を搭載している。その一つにアンテナ架台部に同架した傾斜角計 (神鋼電機、

Model LSO-C1) がある。アンテナ運用時に実時間補正装置を用いた場合、この傾斜角計の原点オフセット値の温度依存性が原因となり指向誤差が生じると予想される。また、アンテナ構造体の温度分布非均一性に起因するアンテナ熱変形が原因となり指向誤差を生じると予想される。これら二つによる指向誤差をそれぞれ測定した。

4.2.1 XY傾斜角計原点オフセット値の温度依存性

実時間補正装置に用いているXY傾斜角計原点オフセット値の温度依存性を調べた。測定方法は

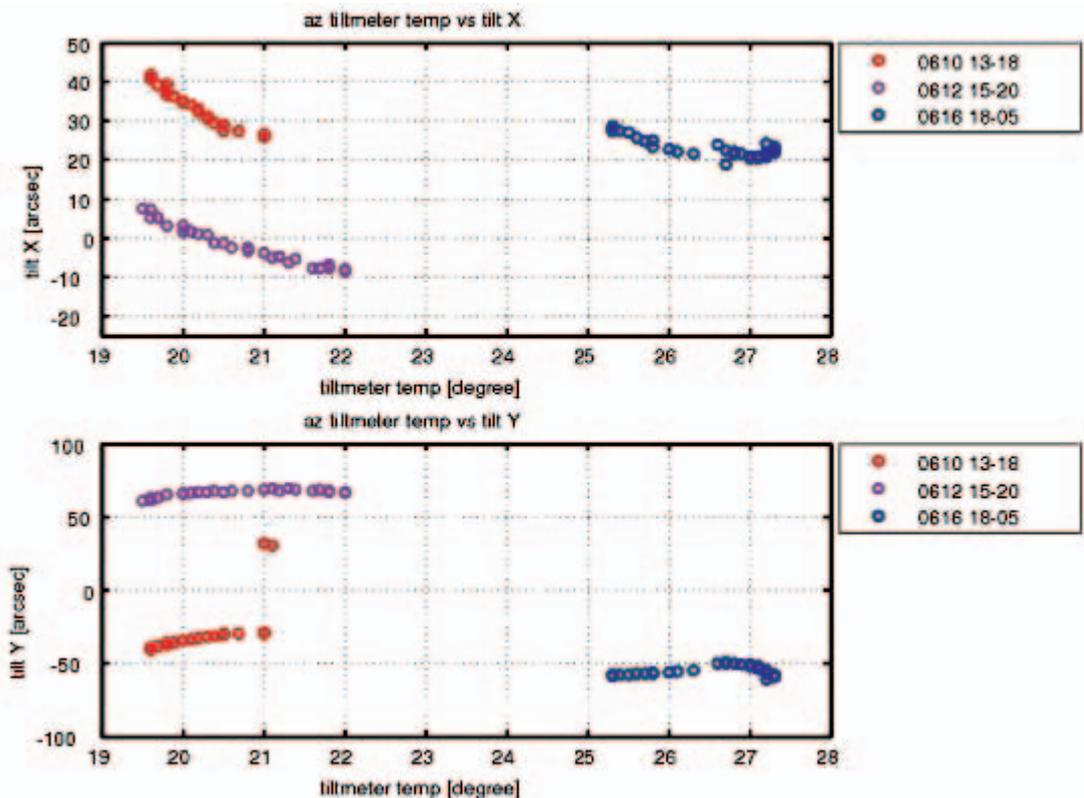


図7. XY傾斜計原点オフセット値とXY傾斜計温度

以下のように行った。

EIを90度に固定しAzを1度毎秒の速度で±190度回転させ、±360度の範囲のXY傾斜角計出力を取り出す。回転させる理由はXY傾斜計マウント部分の熱変形によるAz方向回転軸の傾斜角変化の影響を受けないようにするためである。XY傾斜角計出力のCWとCCW方向の平均値を求め、これをその時刻のXY傾斜角計原点オフセット値とする。このようにして求めたXY傾斜角計原点オフセット値をその時刻のXY傾斜角計搭載部の温度に対してプロットすると、XY傾斜角計原点オフセット値の温度依存性が明らかになる。

この測定を繰り返し、XY傾斜角計原点オフセット値の温度依存性を測定した(2004年6月)。結果を図7に示す。

測定の結果、XY傾斜角計原点オフセット値に温度依存性があることが確認できた。それぞれの測定日において温度に対する1次傾斜の係数を求めた後それらの平均を求めるとX傾斜計：-3.4秒角 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 、Y傾斜計：2.4秒角 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ であった。この値は傾斜計の典型的な安定性の2倍から4倍と非常に大きい。この原因が傾斜角計本体はアルミ、傾斜角計台座はインバで構成されていることによるバイメタル効果の影響ではないかと考え、2004年10月末にX傾斜計のみアルミ製の台座に交換して同様の測定を行った。しかしながら、測定結果に再現性が無く、X傾斜計：0.29秒角 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 、Y傾斜計：0.20秒角 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ となり、指向精度誤差に与える影響は非常に小さい。これらの測定の違いは傾斜

角計の温度である。6月の測定では20 $^{\circ}\text{C}$ 以上、10月の測定では10 $^{\circ}\text{C}$ 以下であった。傾斜角計の温度により原点オフセット値の温度依存性が変化すると思われる。

4.2.2 アンテナ構造体温度非均一性による指向精度誤差

アンテナ構造体温度非均一性と指向精度の関係を調べるためにXY傾斜計による実時間補正無しで北極星の連続追尾試験を行った。画像取得は赤フィルター(R64)により日中も可能なので10分おきにほぼ1日継続して取得した。ポインティング器差モデルに多少の誤差があっても北極星はほとんど動かないはずであるが、星像位置はドリフトした。このドリフトとアンテナヨーク部に取付けられた温度センサーの結果を比較したところ(図8)、Az方向ドリフトはヨーク上部の左右温度差と相関が見られた(図9)。またEI方向ドリフトはヨーク前後の温度差と相関が見られた(図10)。結果はAz方向：7.1秒角毎ヨーク左右温度差、EI方向：7.2秒角毎ヨーク前後温度差。0.1秒角の精度で補正を行うには大きな値である。0.1秒角の精度の補正を行うには0.01 $^{\circ}\text{C}$ の精度で測定できる温度センサーが必要になる。実際は白金センサーを用いて0.01 $^{\circ}\text{C}$ の精度で測定しているが、温度センサーの数や適切な測定位置など考えると数箇所の温度を測定し補正に用いるのは困難と思われる。

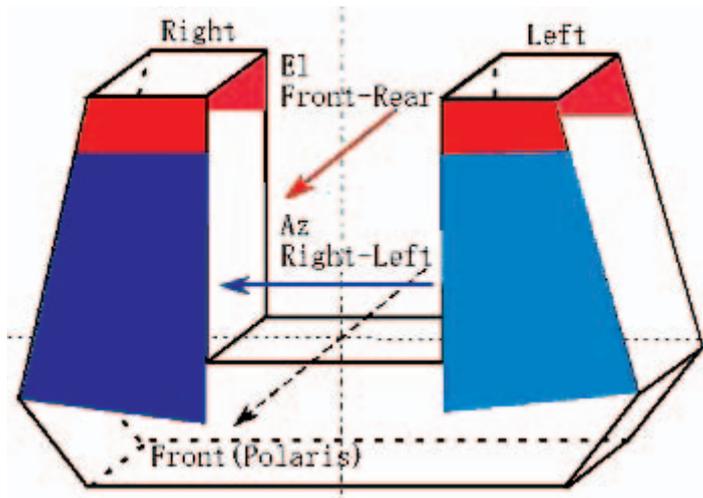


図8. ヨーク温度非均一性

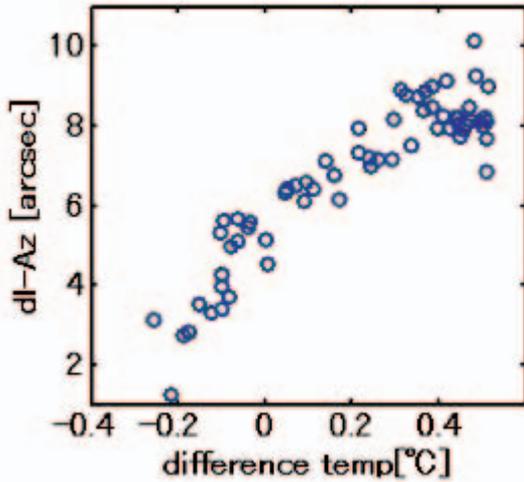


図9. Az方向誤差とヨーク左右温度差

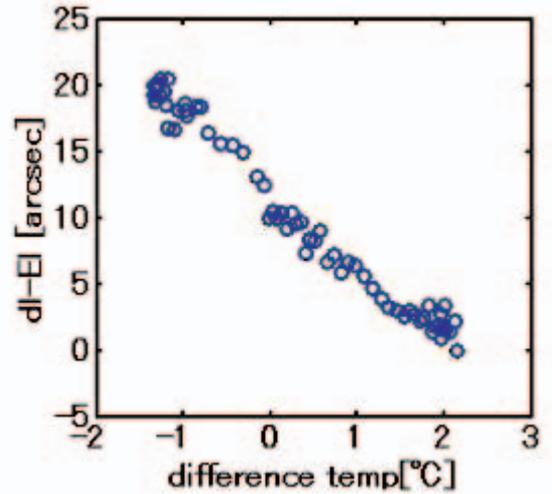


図10. EI方向とヨーク前後温度差

4.3 誤差配分表

4.1~4.2で求めた誤差要因と、指向追尾精度評価と相対指向精度評価の結果より誤差配分を見積もり、アンテナメーカーの設計の際の目標値と比

較した。表2にメーカー目標値と実機の測定値の誤差配分表を示す。強風時及び日中の光学ポインティング測定は天候不良のため実施できていない。

全天指向精度 (単位: 秒角)	メーカー目標値		測定値	
	日中	夜間	日中	夜間
	2.0rss	2.0rss	-	1.17rss
風 (一定)	0.23	0.51	-	-
風 (突風)	0.09	0.20	-	-
サーボエラー (風)	0.10	0.10	-	-
風荷重小計	0.27rss	0.56rss	-	-
構造温度変化	0.20	0.10	-	-
環境温度変化	0.40	0.10	-	-
熱荷重小計	0.45rss	0.14rss	10×ヨーク温度差	←
エンコーダ	0.045	0.045	0.05	←
サーボエラー	0.10	0.10	0.14	←
機械的非再現性・局所的歪み	0.30	0.30	-	1.0
ポインティング器差モデルの不完全性	-	-	0.50	←

表2. 誤差配分表

4.4 絶対指向精度評価

ALMAの絶対指向精度の仕様値は2秒角rmsである。第一段階の目標は、再現性のある指向誤差特性を表現する簡単なモデル(器差モデル)の適切な数式を確立することと、再現性のない、あるいは数式モデルで表現できない局所的な機械起源の指向誤差量を見積もることである。

図11は夜間無風時の約80分間に216星の観測を行ったAz,EI分布、図12は絶対指向精度である。

前夜の観測より求めた器差モデルを用い、架台部に搭載したXY傾斜計による実時間補正が行われている。測定されたAz方向誤差は0.85秒角rms、こうど角方向誤差は0.80秒角rmsであり、絶対指向誤差は1.17秒角rmsである。このデータに対して器差モデルの更新をすると、残差は1.05秒角rmsとなり、器差モデルには少なくとも0.5秒角rms相当の再現性がない成分がある。この測定された絶対指向誤差1.17秒角rmsの中には、大気シ

ーイング効果による測定誤差0.42秒角rms(約1.7秒間の50枚のCCD画像データからKolmogorov大気を仮定して推定), 器差モデル誤差0.5秒角rms, サーボ追尾誤差約0.14秒角rms, 角度検出器誤差

0.05秒角rmsが含まれている. これらの項を差し引いて, 機械起源の指向誤差は約1.0秒角rmsと推定された.

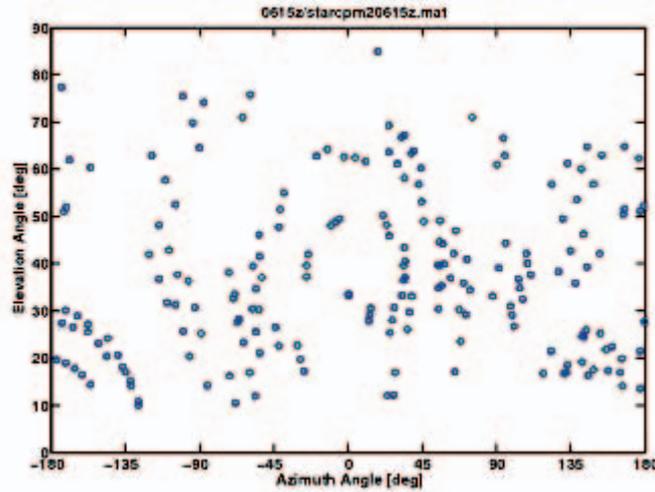


図11. 光学ポインティング測定時の星のAz,El分布

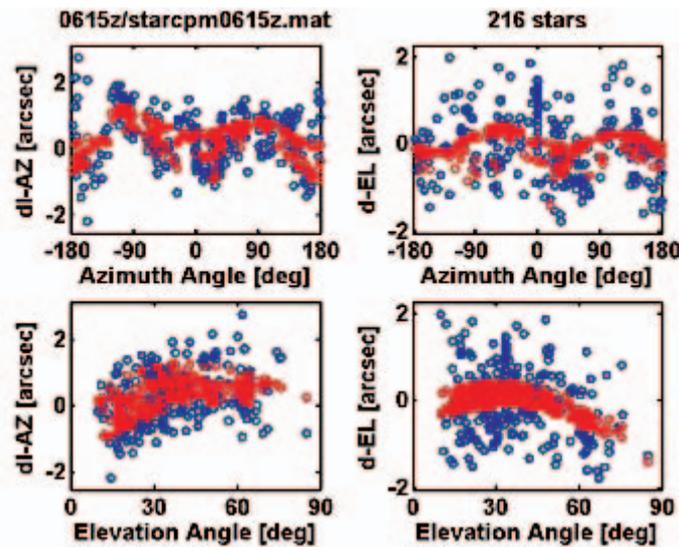


図12. 光学ポインティング測定システムを用いた全天絶対指向精度の測定. 青が測定値, 赤が器差モデルフィット

4.5 クロスローラーベアリング起源による指向精度誤差

ALMA12mプロトタイプアンテナではアンテナが目標天体にCW回転で接近する場合とCCW回転で接近する場合とで指向誤差が発生する現象があった. これはプロトタイプアンテナで採用したクロスローラーベアリング起源の指向誤差である. 量産機的设计に当たりこの指向誤差量を詳細に見積もることは指向誤差配分の際に非常に重要である.

光学ポインティング測定システムを用いた全天指向誤差測定データを再解析して, プロトタイプアンテナのクロスローラーベアリング起源による

指向履歴誤差量が, $\pm 0.21 \sim 0.45$ 秒角であることを見出した. これは全天指向誤差の中で, 機械起源の指向誤差の推定量, 約1.0 秒角rms, と比較して小さく, 指向誤差全体への寄与は4~20%程度であると推定された. 測定データと解析手法は2004年3月14~20日及び6月16日に行われた14組の全天指向精度測定の光学望遠鏡画像データ, アンテナ位置指令値・角度エンコーダのログデータを用いた. ログデータから目標天体に移動するに必要だった移動距離角を求め, これに対する指向誤差をプロットした. 更に, まず一度器差モデルを求め, 残差の指向誤差を時間軸に対してプロットして, そこに見えた長期ドリフトを温度によ

る指向誤差ドリフトと解釈し、3次カーブで除去。この後再度器差モデルを求め、残差を指向誤差とした。指向誤差の中に隠れていた要因を更にひとつ分離し取出すことができ、残差誤差についてより確度の高い考察が出来るようになった。

図13にアンテナ移動距離角に対する指向誤差の

プロットを示す。移動角距離の小さなデータ点(2度以下)を除き、CW側とCCW側において平均値を求めた。指向履歴誤差量は、北極星の場合0.45秒角、その他の星の場合0.21秒角であった。

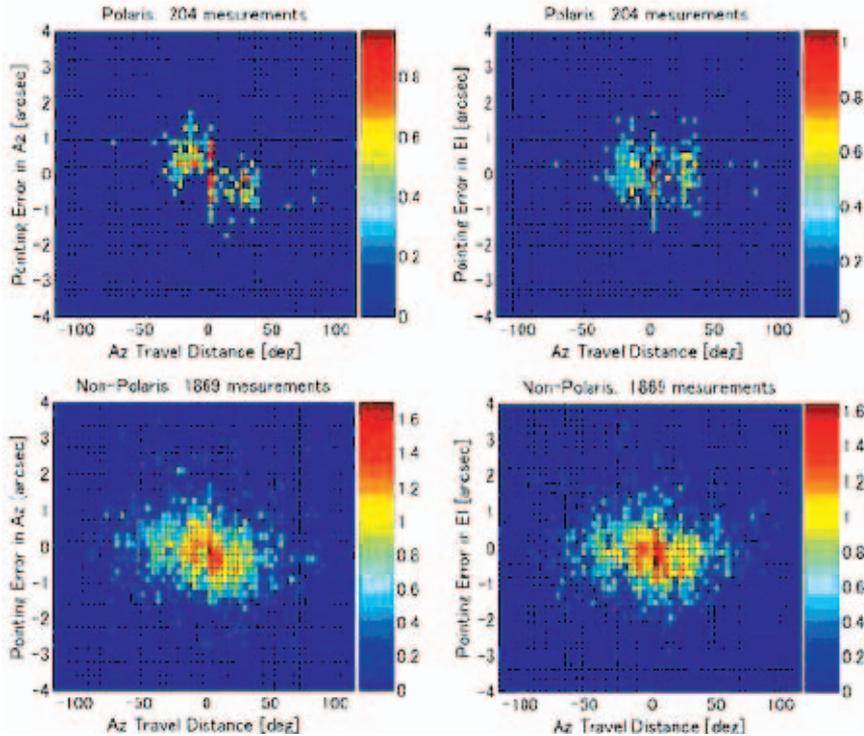


図13. 目標天体に達するまでに回転した方位軸角の変化に対する指向誤差の頻度分布. カラーバーは頻度(正確には頻度+1)の対数値を表示. 北極星(上段Panel 1&2)とその他の星(下段Panel 3&4)の場合に分けて表示した. Az方向には履歴誤差の傾向がある.

4.6 相対指向精度評価

ALMAの相対指向精度の仕様値は2度角以内の範囲及び15分間の間、0.6秒角rss以下と規定されている。図14に夜間無風時に行われた測定の一例を示す。9度離れている δ Ophと ϵ Oph(2度離れた明るい星のペアが無かったため代用)とを交互に20秒毎に16分間観測した。測定された相

対指向誤差はAz方向0.49秒角rms、El方向0.32秒角rmsであり、両軸合わせて、0.58秒角rmsである。この16分間では、有意な指向誤差のドリフトもない。大気シーイング効果による各点の測定誤差(各軸方向0.3秒角rms)を考慮すると、相対指向精度0.6秒角rssの推定は困難である。よりよい測定方法等の再検討が必要である。

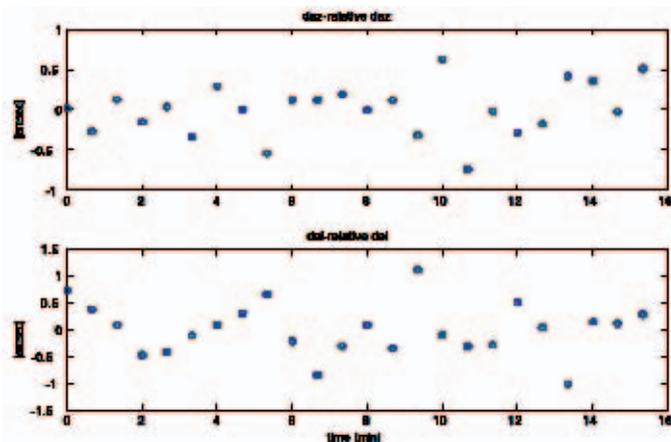


図14. δ Ophの ϵ Ophに対する重心位置の相対変化

4.7 連続追尾精度評価

夜間無風時に ϵ Virの連続追尾精度評価を行った。図15にあるように長時間の連続追尾の際に星の重心位置がドリフトしていく。これは4.2で述

べたXY傾斜角計ゼロ点オフセット値の温度依存性による指向追尾精度誤差と、アンテナ構造体温度非均一性によるアンテナ熱変形による指向追尾精度誤差と思われる。

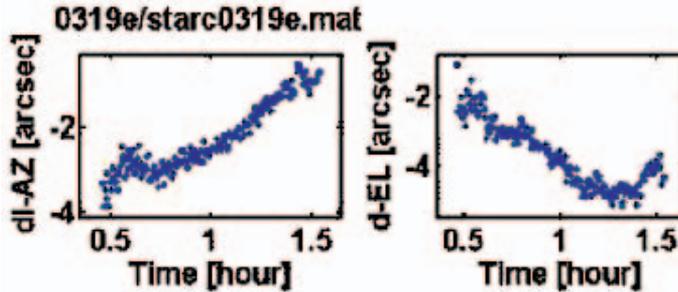


図15. ϵ Vir連続追尾精度測定時のドリフト

連続追尾精度測定の結果に対して、XY傾斜角計ゼロ点オフセット値の温度依存性とアンテナ構造体温度非均一性による指向精度誤差を用いて補正した。結果を図16と図17に示す。青いグラフの左がAz方向誤差、右がEl方向誤差である。赤いグラフはそれぞれの補正結果である。El方向は数秒角あったドリフトが改善されたが、Az方向は

改善されたものと改善されないものがある。また、ドリフト除去後も部分的に1.5秒角程度の誤差が残っている。補正式は、Az方向：指向誤差 - 傾斜計温度依存性 (-3.5 秒角 $^{\circ}\text{C}^{-1}$) - $7 \times$ ヨーク左右温度差 - $4 \times$ ヨーク前後温度差の左右温度差、El方向：指向誤差 - 傾斜角計温度依存性 (1 秒角 $^{\circ}\text{C}^{-1}$) - $4.5 \times$ ヨーク前後温度差である。

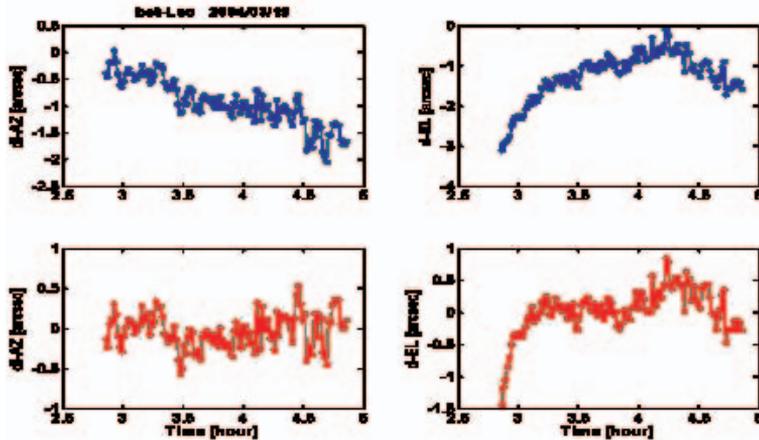


図16. 2004/03/18 β Leoの連続追尾精度結果の温度補正

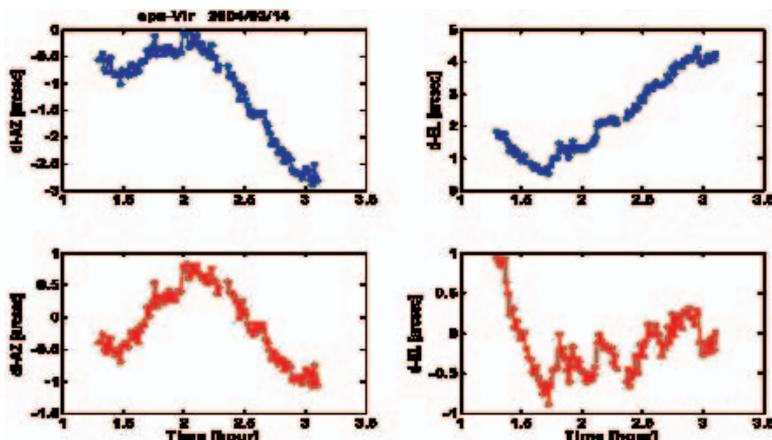


図17. 2004/03/14 ϵ Virの連続追尾精度結果の温度補正

4.8 高速駆動性能評価

ALMAの高速駆動性能の仕様は1.5度の離角の2点を1.5秒以内に3秒角以内に静定することである。測定に用いた2星は δ Ophと ε Ophで、その離角は約1.5度である。この2星を20秒周期で交互に観測しながら光学ポインティング測定システムと角度エンコーダのデータを15分間（2004年3月18日UT07h48m-UT8h05m）収録した。光学ポインティング測定の結果と角度エンコーダの結果を比較する理由は、光学ポインティング測定の結果は主鏡部の振動を示し、角度エンコーダの振動はアンテナ主鏡部とアンテナ架台部間の振動を示すからである。両者を比較することでアンテナの振動の様子が分かる。測定時の方位は、Az=113度、El=25度であった。2星間のAz度差

は0.2度、El差は1.4度であり、この測定では主にEl方向の性能を評価することになる。

測定時に用いられたポインティングモデルとこの高速スイッチング測定の前に行われた全天ポインティング測定（UT6h06m-UT7h13m及び8h59m-10h01m）から求められたポインティングモデルとの間に優位な差があったので、光学ポインティング測定システムで測定された星の重心に対して補正を行った。これにより、約4時間の間におけるアンテナの熱変形に伴うポインティングドリフトが補正されたと思われる。

図18は15分間の45回分のデータを平均化している。青線は角度検出器と指令値の差を表し、黒線は光学ポインティング測定システムによる星の重心位置を示している。1.5度の離角を1.5秒で移動

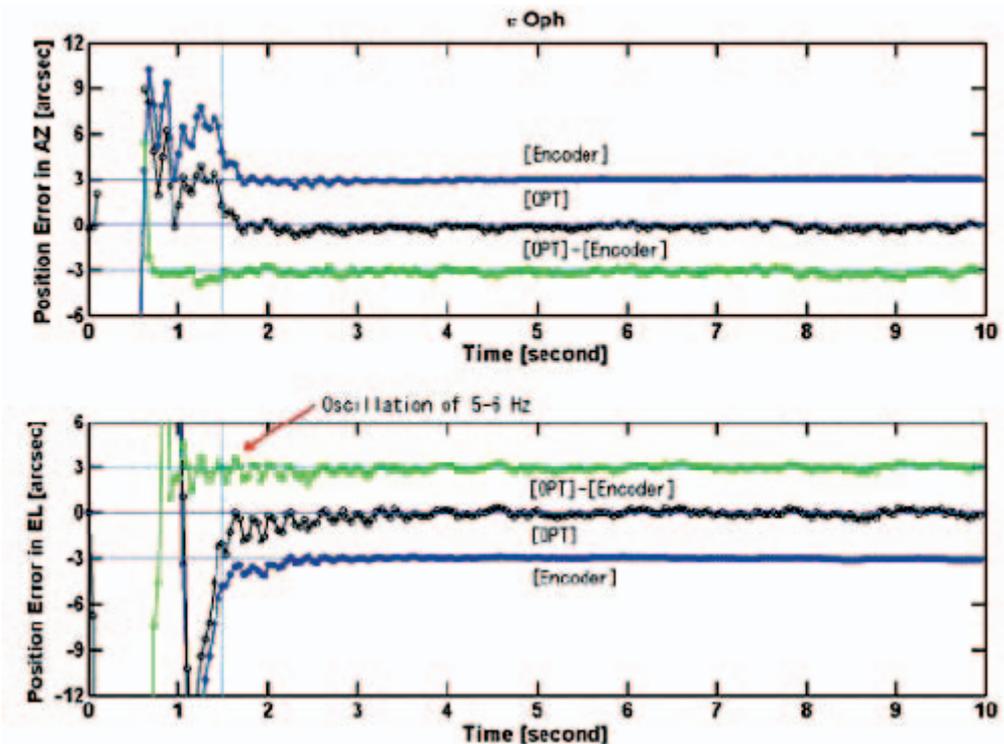


図18. 高速スイッチング測定時の星像重心位置及び角度検出器の値の変化（+ないし-3秒角のオフセットを加えて表示）。

し、3秒角以内に静定していることがわかる。

一方、光学望遠鏡が示す指向誤差（黒線）とEL軸の角度エンコーダの示す指向誤差（青線）の間には明らかな差異（緑線）があり、アンテナが約5 Hz、減衰時定数約1秒の減衰振動をしていることがわかった。この固有振動数は架台部に特徴的な周波数であり、主鏡部自身、また主鏡部とEl軸の間にはこのような固有振動数を持つ部分がないことから、架台部の振動と推察される。追尾誤差が十分小さくなるまでに約3秒経過してお

り、観測効率に大きな影響を与える。プロトタイプアンテナでは、この点に関しての仕様が定められておらず問題であることがわかった。大きな加速度の変化（Jerk 値）を与えない制御を行うこと、量産アンテナにはこの点に関する仕様を盛り込むこと、振動の少ない架台部の設計などの対策が必要である。

5. まとめ

光学ポインティング測定システムの評価を行い

画像面歪みが大気シーイングによる測定制度と同等かそれ以下であり、測定誤差を議論する際には無視できることを確認した。光学望遠鏡とアンテナ主鏡部が1~18Hzまで両者は同振幅・同位相で振動していることを確認した。また、赤フィルターを用いることにより昼間に約3.5等級まで測定できることを確認した。以上よりALMAの技術仕様の指向追尾精度及び高速駆動性能評価に用いる性能を有すると判断した。

アンテナ評価を行う過程で、実時間補正装置に用いているXY傾斜角計のゼロ点オフセット値温度依存性がアンテナ指向追尾精度に影響を及ぼすことが分かった。しかしながら、傾斜角計の温度により温度依存性の値が変化するという現象が現れた。指向精度向上のためには傾斜角計を用いた実時間補正装置は必須と思われるので今後より詳細な検討を行う。また、アンテナ構造体温度の非均一性によるアンテナ熱変形（特にヨーク部分の温度差による変形）が指向追尾精度に影響を及ぼすことが分かった。その値はAz,El方向とも7秒角 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 程度と非常に大きい。これはアンテナ構造体温度を測定し補正することにより指向追尾精度向上が期待できるが、1秒角以下の精度を議論する我々には、 0.01°C の精度で測定できる温度セン

サーの必要性や、その温度センサーを構造体のどの部分に取付けるか、補正式が常に同じかなど実現が困難と思われる部分が多い。ゆえに、最終的に熱変形の値を検出する補正装置が必要と思われる。全天絶対指向精度2.0秒角、相対指向精度0.6秒角はある条件の下（夜間無風時）仕様値を満足した。しかしながら、相対指向精度測定はより良い測定手法の検討が必要である。全天絶対指向精度測定結果の詳細な解析によりAzベアリング起源の指向誤差量を見出した。これにより指向誤差のより確度の高い考察ができるようになった。高速駆動性能は仕様値を満足した。この測定の際に毎秒30フレームの高速サンプリングによりもともとた数値と確度検出器出力の比較により架台部の振動が問題となるが分かった。量産機では架台部の設計と大きな加速度の変化を与えない制御の設計が重要である。

参考文献

- 1) J. Mangum, An Optical Pointing System for the ALMA Prototype Antennas, *ALMA memo#288*, (2000).
- 2) Fred Forbes, Dome induced image motion, *SPIE*, **332**, 186-192 (1982).