

# 山口32m電波望遠鏡のポインティング測定

藤沢健太

## 1. はじめに

山口32mの追尾システムは2002年末にほぼ完成し、角度検出の分解能は0.001度を達成、ジッタのない滑らかな追尾が可能となっている。このシステムを用いて天体追尾を行ったところ、天体位置に対してビーム位置が系統的にずれる（指向誤差がある）事が確認されている。特に仰角方向でずれが大きく、1分角に達すると考えられた。指向誤差は、（1）アンテナ本来の性能を發揮できない、（2）VLBI観測においてフラックス密度の誤差を生じる、（3）マッピング観測などで誤差を生じる、（4）開口能率やビームパターン測定などアンテナの特性測定において誤差を生じる、などの問題を生じるため、補正が必要である。

指向誤差とここで呼んだものは、正確には指向誤差と追尾誤差の両方を含めている。指向誤差とは計算によって得られた天体位置にビームを向けたとき、真の位置とビーム位置のずれを表す。追尾誤差とは、天体を連続的に追尾した場合、どれほどの滑らかさで追尾できるか、というものである。両者をあわせた誤差のうち、指向誤差はアンテナの設置状況などに依存する器差パラメータに還元できると期待される。追尾誤差も器差パラメータに依存するが、山口32mの場合は製作した追尾システムの特性に大きく依存すると考えられる。

今回、山口32mの指向誤差を測定し、器差補正値を求めること、追尾誤差の到達可能精度の測定を目標とした研究を行った。なお、器差補正値の定義は「深宇宙通信用臼田64mアンテナ三菱電機完成図書 Xバンド送受信設備V. 器差補正部動作説明」に従った。

## 2. 測定

### 2-1. 測定方法

測定には「十字スキャン」と呼ばれる方法を用いた。明るい天体を追尾しながら、ビームに角度オフセットを重畳し、受信強度の変動を測定することによってビームのずれを推定するという方法である。図1に示すように、天体信号を受信しない状態（方位角に大きなオフセット、オフ点と呼ぶ）での受信パワー（この場合はシステム雑音のみ）を測定し、次に方位角方向に $-\delta$ 、 $0$ 、 $+\delta$ 、さらに仰角方向に $-\delta$ 、 $0$ 、 $+\delta$ のオフセットを与え、受信パワーを測定する。この一連の手順をスキャンと呼ぶ。

今回の測定ではオフセット角 $\delta$ を2分角、各オフセット点での滞在時間は2.5秒、移動を5秒と設定した。実際には追尾システムの特性の関係で、移動時間の5秒内には次の点に向かず、収束するまでに20秒程度かかることがしばしばあった。また、収束に要する時間もスキャン毎に異なっていた。方位角の $-\delta$ オフセットは連続して2回設定した。これは、オフ点（+30分角）から $-\delta$ 位置に戻るのに、1回（30秒）では間に合わないためである。また、オフ点に向ける場合も間に合わず、アンテナが追尾状態に入ることはなかった。しかし追尾に入っていないくても天体からは十分離れているので、追尾状態でなくてもオフ点のデータはそのまま有効とした。移動が5秒では間に合わないことを考慮して、有効なデータは各オフセット点における追尾時間（2.5秒間）の最後の5秒間だけとした。スキャンのシーケンスを表1に、データの取得シーケンスを表2に示す。1スキャンは4分間であり、1時間の測定で15データ（方位角、仰角それぞれ）

を取得できる。

表1. オフセットテーブル

番号	時間 (秒)	方位角オフセット ( $\delta A_z$ ) 分角	仰角オフセット ( $\delta E_1$ ) 分角
1	0-25	30	0
2	30-55	-2	0
3	60-85	-2	0
4	90-115	0	0
5	120-145	2	0
6	150-175	0	-2
7	180-205	0	0
8	210-235	0	2

表2. データ取得テーブル

番号	オフセット状態 (分角)		取得開始時刻 (秒)	取得時間 (秒)
	方位角	仰角		
1	30	0	20	5
2	-2	0	80	5
3	0	0	110	5
4	2	0	140	5
5	0	-2	170	5
6	0	0	200	5
7	0	2	230	5

## 2-2. 時刻あわせ

追尾システムはPC内蔵の時計を基準としている。PC内蔵時計は歩度が大きくずれており、3時間で1秒程度、進む。そのため、測定開始前には必ず時報(117)で時刻あわせを行い、また観測時間中にも随時チェックして、1秒以上ずれないようにした。しかしこの補正は手作業で行っており、また1秒以上ずれてしまったケースもあった。1秒の時刻ずれは角度にして約15秒角=0.25分角に相当する。これは測定精度に対して有意な大きさであるが、解析では無視した。

## 2-3. データの取得

8GHzダウンコンバータのIF2出力(100-500MHz、変換以前の中央周波数=380MHz)のうち、一つをパワーメータで測定した。用いたパワーメータは、アンリツML2437A、パワーセンサはアンリツMA2437Aである。受信パワーは-19~-17dBm程度である。パワーメータの読み取りは0.001dBm単位である。この測定では、パワーメータは1秒間に約19回のデータ取得を行うが、そのまま時刻符号をつけてテキストファイルとして保存した。データの取得ソフトウェアはHP-VEEを使って自作した。

## 2-4. 測定

測定は2003年3月29日から5月22日までに、9回行われた。数Jy以上のフラックス密度がある天体から、希望の方位角・仰角方向にあるものを選択した。Tau-AやCas-Aなどビーム幅(約4分角)に対して有意な広がりを持つ天体は用いなかった。測定内容を表3にまとめた。また、測定した天球上の位置を方位角-仰角にプロットした結果を図1に示す。

表3. 測定

測定番号	測定日	時間 (UT)	天体名	方位角、仰角	測定点数 (*)	コメント
1	2003/03/29	09:40 - 10:55	0528+134	227, 62 - 249, 49	18	fine and low wind 偏波 = RHCP
2	2003/04/15	12:00 - 18:50	3C273B	130, 46 - 260, 17	103	fine and low wind 偏波 = RHCP
3	2003/04/15	05:15 - 08:00	4C39.25	56, 21 - 68, 50	40	fine and low wind 偏波 = RHCP
4	2003/04/16	19:06 - 22:00	OV-236	153, 21 - 205, 21	56	fine and low wind 偏波 = RHCP
5	2003/04/17	05:00 - 06:22	3C454.3	272, 26 - 282, 10	21	fine and low wind 偏波 = RHCP
6	2003/04/17	06:40 - 08:00	3C84	296, 67 - 295, 53	20	fine and low wind 偏波 = RHCP
7	2003/05/20	10:10 - 11:40	3C371	21, 25 - 24, 32	24	fine and low wind 偏波 = LHCP
8	2003/05/20	12:22 - 18:50	NRAO530	113, 9 - 248, 7	140	fine and low wind 偏波 = LHCP
9	2003/05/22	16:00 - 17:30	1849+670	18, 15 - 6, 56	22	fine and low wind 偏波 = LHCP

(\*) リダクションの結果、明らかに不良なデータは除き、解析で用いた数。合計444点。

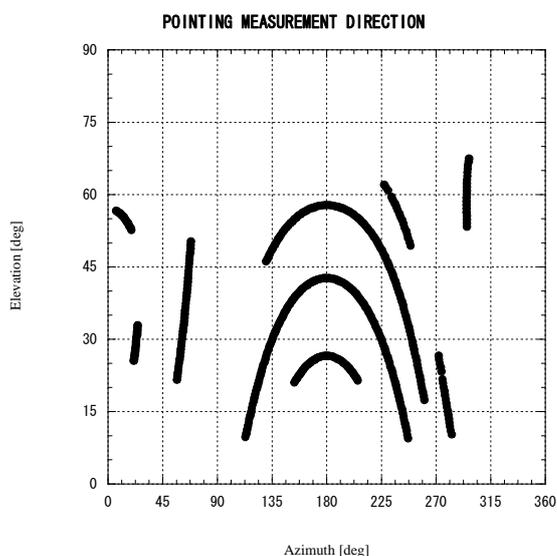


図1. 測定点の分布

## 2-5. データ処理

9回の測定に対応した9個のデータファイルを、次の手順で処理した：

- 1) 1秒間に約19回取得されるデータを平均し、1秒に1個のデータとする  
(onesevavg.exeを使用)
- 2) ヘッダ情報をエディタで編集して書き込む
- 3) ポインティングデータ抽出ソフト (reduct1.exe) によって、各測定点ごとのオフセット  
他のデータテーブルとする
- 4) 器差補正計算ソフト (reduct3.exe) によって順次ファイルを読み込み、器差補正值、補  
正後の予想残差を計算、それぞれファイルに出力する

データ処理の詳細は付録Aに示した。

## 3. 結果

### 3-1. 測定結果

指向誤差の測定結果を、横軸に方位角をとった場合 (図2 a)、仰角を取った場合 (図2 b) のそれぞれの図に示す。ただし×は方位角、●は仰角の結果である。図が縮退しているため分布が明瞭ではないが、明らかに系統的な残差があることがわかる。特に、仰角の指向誤差は系統的に1分角低い位置になっている。これは計算値に対してビームの位置が常に下側にあることを意味する。

### 3-2. 器差パラメータ

この結果に対して8個の器差パラメータを最小自乗法により決定した。得られた器差パラメータを表4に、共分散を表5に示す。最小自乗法によって得られた器差パラメータは、「たわみ2」項が突出して大きく、他の約10倍となっている。結果で述べた仰角の系統的なオフセットがこの項目によって吸収されていることがわかる。共分散に特に大きな項は無く、器差パラメータの分離に対して測定点が適当に分布していることを示している。

この器差補正值を用いて、今回の測定を補正した結果を図3 a、bに示す。これは器差補正值をセットした状態で測定を行った場合に得られるであろう指向誤差測定のシミュレーションに相当するものである。

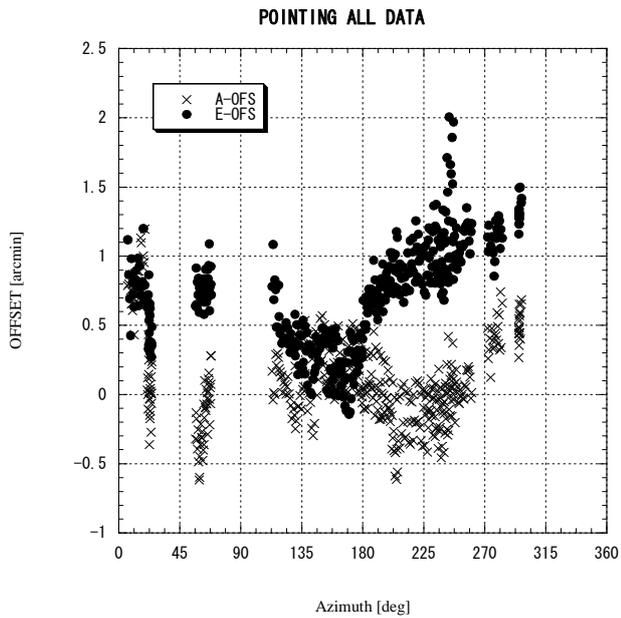


図 2 a. 指向誤差 (方位角に対するプロット)

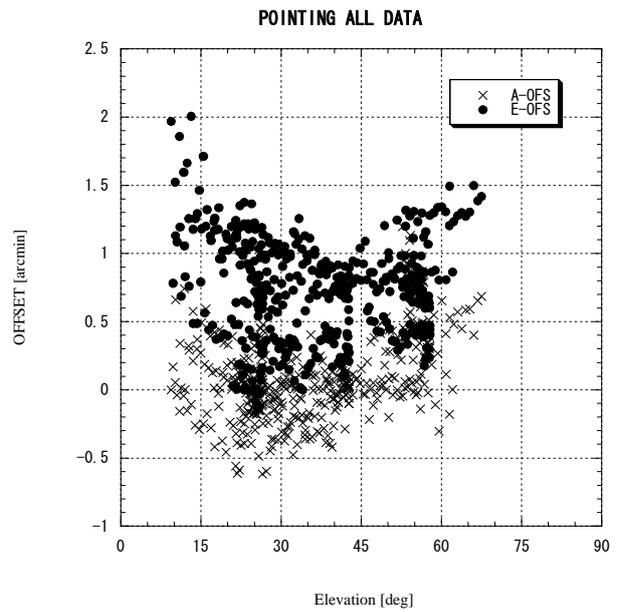


図 2 b. 指向誤差 (仰角に対するプロット)

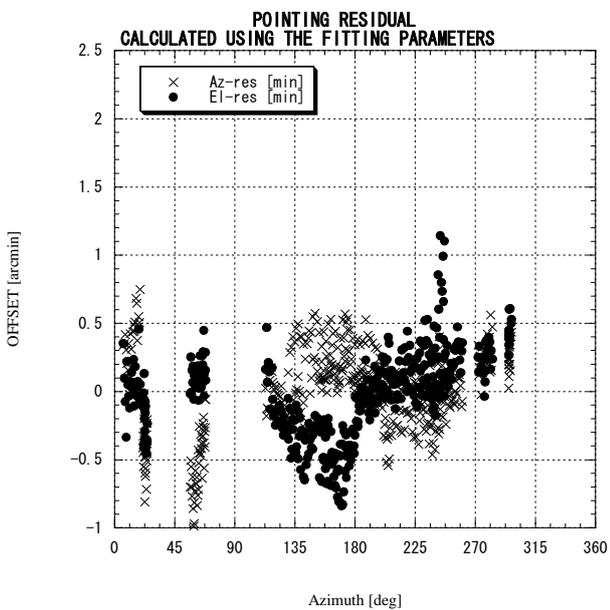


図 3 a. 器差補正後の指向誤差の残差  
方位角プロット

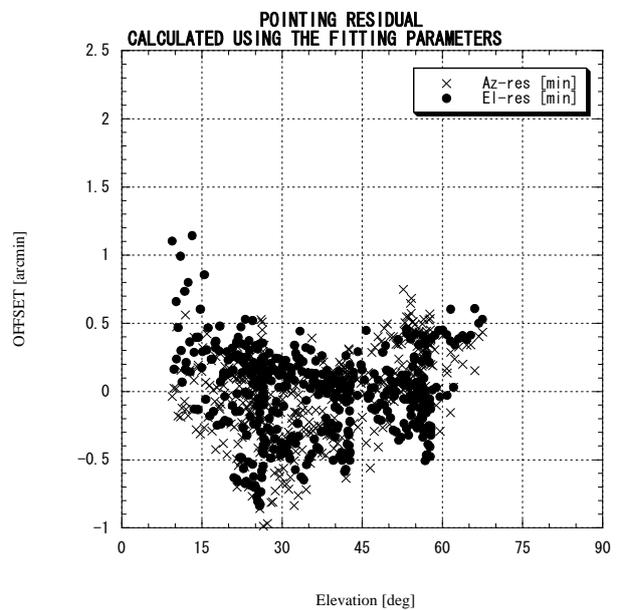


図 3 b. 同  
仰角プロット

表 4. 器差パラメータ

番号	意味	値 (分角)	誤差 (分角)
1	方位角バイアス	0.091608	0.005569
2	仰角バイアス	0.009555	0.002364
3	ロールミスレベル	0.135160	0.003653
4	ピッチミスレベル	-0.031425	0.001221
5	方位・仰角非直交度	0.003062	0.000481
6	たわみ 1	-0.008713	0.007176
7	仰角軸とビームの非直交度	0.080483	0.001266
8	たわみ 2	0.845945	0.001061

表 5. 共分散

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.005569	0.002483	0.003150	0.001616	0.000469	0.001815	0.000763	0.000494
2	0.002483	0.002364	0.000753	0.000393	0.000169	-0.000950	-0.000399	-0.000258
3	0.003150	0.000753	0.003653	0.001943	0.000843	0.003190	0.001341	0.000868
4	0.001616	0.000393	0.001943	0.001221	0.000481	0.001573	0.000661	0.000428
5	0.000469	0.000169	0.000843	0.000481	0.000481	0.000926	-0.000002	-0.000001
6	0.001815	-0.000950	0.003190	0.001573	0.000926	0.007176	0.001504	-0.000003
7	0.000763	-0.000399	0.001341	0.000661	-0.000002	0.001504	0.001266	0.000819
8	0.000494	-0.000258	0.000868	0.000428	-0.000001	-0.000003	0.000819	0.001061

残差は 1 分角以上外れたものがほぼなくなったとはいえ、系統的な分布が明瞭に残っており、一部では生の測定データより悪くなっている部分もある。このことは、測定された指向誤差に器差補正モデルで表現できない系統的な成分が存在することを意味している。特に低仰角（15 度以下）および高仰角（60 度以上）において特に仰角にオフセットが生じている。低仰角でのずれは、大気差補正の過小が原因である可能性がある。

このような問題があるが、大部分のデータは 0 の周りに分布しており、0.5 分角を超えるものはわずかである。残差の標準偏差は方位角方向に  $\sigma_{AZ} = 0.309$  分角、仰角方向に  $\sigma_{EL} = 0.379$  分角、両者の影響を考慮した幾何平均値は  $\sigma = 0.489$  分角である。残差分布が正規分布に従うと仮定すれば、ずれが  $1\sigma$  以下におさまる確率は 76%、 $2\sigma$  以下におさまる確率は 95% である。 $1\sigma = 0.489$  分角はビーム幅 (FWHM = 4.1 分角) の 12% に、 $2\sigma = 0.978$  分角は 24% に相当する。ビーム中心で天体を受信する受信強度に対し、ビーム中心から FWHM の 12%、24% ずれた位置で受信する強度は、それぞれ 96%、85% となる。この考察を表 5 にまとめた。ただし、残差はランダムなものではないため、統計的な扱いには注意を要する。なお、当然ながら残差の平均値は方位角、仰角ともに 0 である。

表5. 受信強度の確からしさ

ずれの範囲	ずれの大きさ (分角)	ずれの大きさ (FWHMとの比)	発生確率	受信強度の低下 (センターとの比)
$< 1 \sigma$	0. 4 8 9	$< 1.2 \%$	7.6 %	9.6 %
$< 2 \sigma$	0. 9 7 9	$< 2.4 \%$	9.5 %	8.5 %
$< 3 \sigma$	1. 4 6 8	$< 3.6 \%$	99.6 %	7.0 %

### 3-3. 再現性観測

測定と解析によって得られた器差パラメータを実際に使用し、器差補正ができることを確認する測定を行った。追尾システムに器差パラメータの値が組み込まれていることをのぞき、測定・解析方法は通常のポインティングデータの取得方法と全く同様である。測定日は2003年8月12日、測定時間は15時34分から20時30分(世界時)まで約5時間、天体は3C454.3で、角度範囲は方位角=142-260度、仰角=68-42度である。有効なデータは63点取得された。天気はうす曇、風は弱かった。受信した偏波はRHCPである。測定した結果を図4a、bに示す。

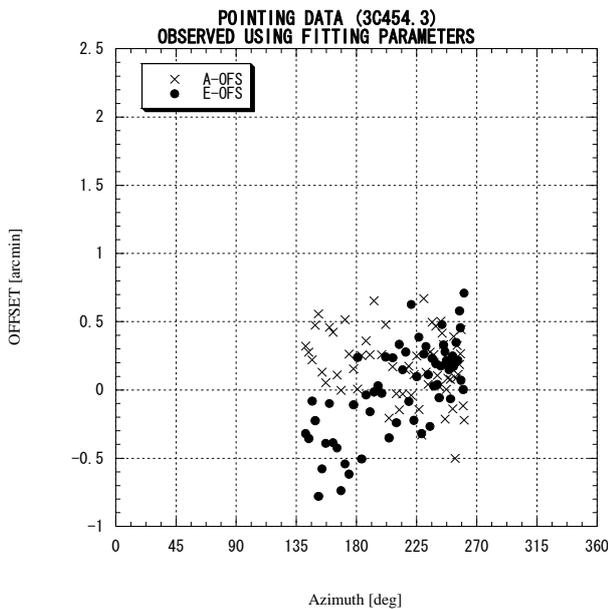


図4 a. 器差パラメータ使用での残差方位角プロット

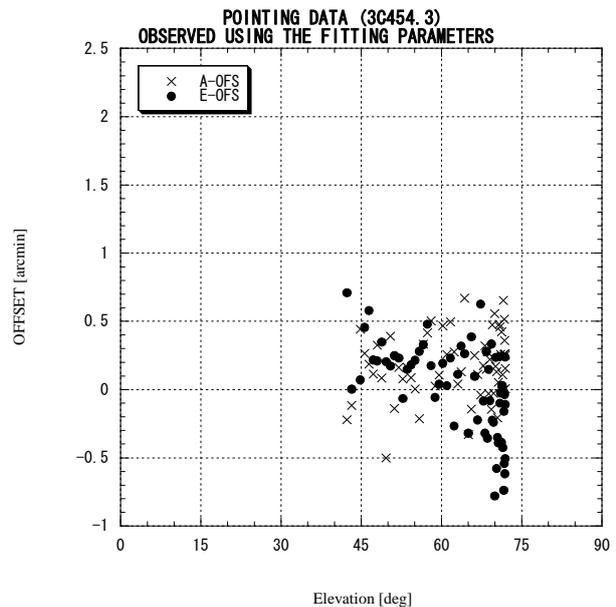


図4 b. 同仰角プロット

今回測定した3C454.3の位置は、器差補正決定のために行った観測と重なる部分がないため直接比較することはできない。しかし得られた指向誤差の残差分布は、図3に示した計算結果とよく一致している。このことは、器差補正値が追尾システムにセットされて正しく補正が行われていることを示している。また、測定期間が3月から8月までにわたっているにもかかわらず、きわめてよい再現性があることも表している。

### 3-2. 追尾誤差

仮に系統的な誤差を完全に除去できたとすると、ランダムな追尾誤差が残ることになる。この追尾誤差の大きさを以下の手順で見積もった。4月25日の3C273Bの測定結果に着目して解析を行う。3C273Bの指向誤差の測定結果を図5a、3-1で求めた器差パラメータを用いて得られる残差プロットを図5b、残差プロットに示した最相当てはめ曲線（4次関数）を差し引いた結果を図5cにそれぞれ示す。測定点は100点以上あるため、4次関数は十分滑らかな曲線であると考えてよい。最終的な残差プロットには系統誤差がなくなり、平均値0の周辺に密に分布している。この分布の標準偏差は、方位角残差が0.0759分角、仰角残差が0.0890分角である。両方をあわせた標準偏差は0.117分角=7.0秒角=0.0020度であり、これは8GHzのビーム幅の2.9%に相当する。仮に22GHzでのビーム幅を1.55(=4.1/(22/8))分角とすると、7.6%に相当する。したがって、将来、器差補正モデルを球面調和関数展開などとして高次の項まで決定できたら、22GHzでの観測にも十分対応できることを示している。また、角度検出の分解能=0.001度に対し、追尾誤差が0.002度を達成したことは、山口32m電波望遠鏡の駆動部、追尾システム、および測定システムが極めて高い完成度であることを示している<sup>1</sup>。

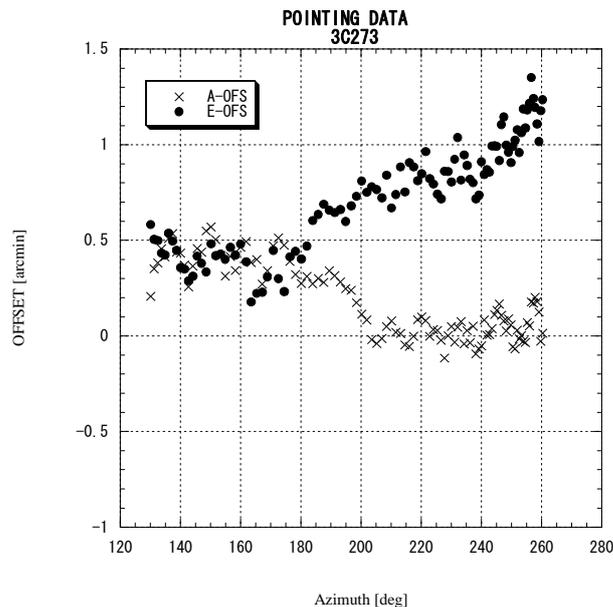


図5a. 3C273Bの測定結果

<sup>1</sup> 0.002度の角度制御は、直径16mのレール上で0.27mmの位置制御に相当する。

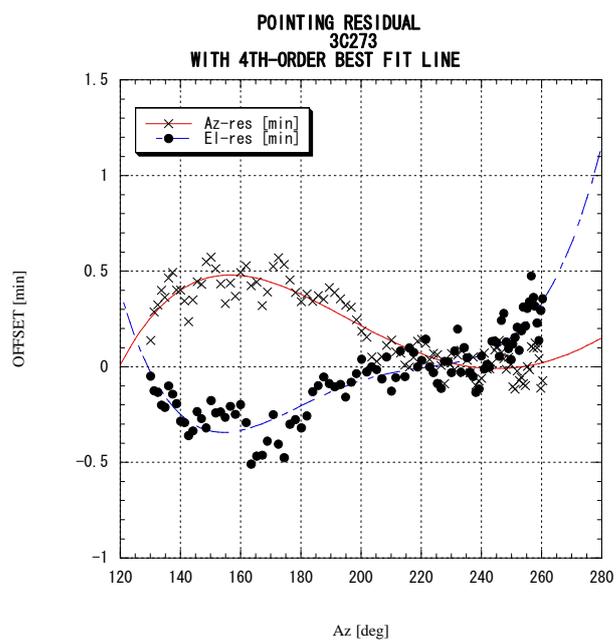


図 5 b. 器差パラメータによる系統誤差を除去した結果  
 最相当てはめ 4 次関数もあわせて示している

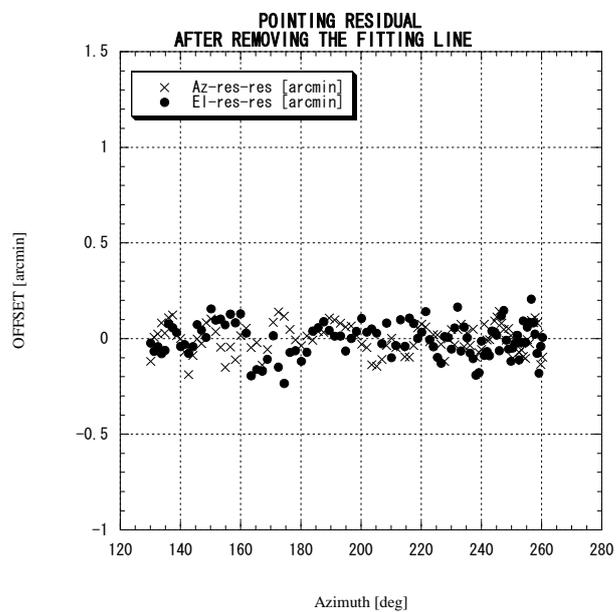


図 5 c. 4 次関数による系統誤差除去  
 最終的な残差はほぼ白色化されている

#### 4. 系統的な残差

追尾誤差におけるランダムな誤差が0.12分角であるのに対し、器差補正值による補正だけでは標準偏差=0.49分角という残差がある。これは系統的な残差が存在することを示している。系統的な残差を生む原因となりうるのは、以下の項目である。項目と内容の説明、将来の高精度化への対策をまとめる。

##### 1) 追尾システムの時刻ずれ

最大0.5分角の誤差を生じていると考えられる。追尾システムの計算機をネットワークに接続し、NTPによって常時正確な時刻とすることで解決できる。

##### 2) 大気差の補正誤差

低仰角において仰角方向に大きな誤差を生じていることから、大気差の補正が過小であった可能性がある。これは今回の測定結果を元にして、逆に補正值を計算することも可能と考えられる。

##### 3) 角度検出器の非線形性

エンコーダの非線形性は本質的な問題である。この対策は、測定値を増やして全方位の分布を調べ、アンテナ特性とは無関係なモデル、例えば球面調和関数による展開などを行ってパラメータ化するしかない。

##### 4) 追尾システムの角度に対する依存性

高仰角では方位角方向の移動速度が大きいいため、追尾システムが角度予報値に追従しきれない兆候が見られる。このことによる系統的な残差が存在すると考えられる。

##### 5) 測定にRHCPとLHCPが混在すること

これは測定時のミスである。今後、RHCPとLHCPでビーム位置がどのように異なっているか（ビーム・スクイント）を調査が必要である。これはマッピング観測においても重要なパラメータとなる。

##### 6) 天体の位置計算誤差

これは測定精度に対して十分小さいと考えられるので、無視できる。位置計算において問題となるのは、2で述べた大気差である。

##### 7) 測定途中の気象状態の変化

今回の測定は、常に快晴で測定を行うことができた。したがって雲による影響はほぼ無視できる。大気中の水蒸気量が大气差の変動に影響している可能性はあるが、影響があるのは方位角のみであり、現実的にはかなり小さい値であると考えられる。

##### 8) その他

#### 5. 最終的な結果

今回得られた器差パラメータにより、指向誤差の標準偏差は0.49分角となった。この値は当面の8GHz観測において若干の精度劣化を生じうるが、利用に耐えうる精度である。より高精度な観測を実現するために、また将来の高周波数帯での観測に対応するために、今後も上記の問題を考慮しつつ継続してポインティングの測定を行うことが必要である。

## 付録A. データ処理について

### (0) データ取得

各回の側定では、V E Eによって次の内容を含んだデータが取得される。

```
01:56:52 -21.426
01:56:53 -21.426
01:56:53 -21.425
01:56:53 -21.425
01:56:53 -21.426
```

### (1) 1秒平均

1秒間に約19回取得されるデータを平均し、1秒に1個のデータとする。使用するソフトウェアは oneseavg.exe である。起動し、ファイル読み込み画面で上記のデータファイルを指定する。

```
01:56:52 7012 -21.426
01:56:53 7013 -21.426
01:56:54 7014 -21.425
01:56:55 7015 -21.424
01:56:56 7016 -21.424
```

1秒毎に平均化されたデータが出力される。元データファイル名が xxxx.dat の場合、出力ファイル名は xxxavg.dat となる。

### (2) ヘッダ情報付加

上記の xxxavg.dat ファイルに以下のフォーマットのヘッダをエディタで編集して書き込む。

```
YAMAGUCHI-32M      , site name
131.559529         , longitude
+34.212791         , latitude
0.0               , pole position x
0.0               , pole position y
0.0               , delta t
0.0               , delta dt
0528+134          , source name
05 , 30 , 56.416533 , RA
+13 , 31 , 55.14596 , Dec
2000.0            , epoch
2003/03/29        , obs date
09:40:00          , scan start time
240               , scan period
30 , 0 , 20 , 5   , off (d-az d-el st period)
-2 , 0 , 80 , 5   , az-
0 , 0 , 110 , 5   , 0
2 , 0 , 140 , 5   , az+
0 , -2 , 170 , 5   , el-
0 , 0 , 200 , 5   , 0
0 , 2 , 230 , 5   , el+
CH2 (RHCP)        , channel
fine and low wind
this is a test.
comment three lines.
###
01:56:52 7012 -21.426
```

←ヘッダはここまで

(3) オフセット他を計算

ポインティングデータ抽出ソフト (reduct1.exe) によって、スキャンを切り出し、各測定点 (スキャン) ごとのオフセット、ビーム幅等のデータファイルを作成する。この作業は完全に自動で行われる。出力ファイル名は rxxxxavg.dat と、先頭に r が付加されたものとなる。なお、ソフトウェアの都合上、入力データファイルはソフトウェアと同じディレクトリに入れてあることが必要である。reduct1.exe は F-BASIC によって書かれている。

```

YAMAGUCHI-32M
131.559529
34.212791
0
0
0
0
0528+134
5          30          56.416533
13         31          55.14596
2000.0
2003/03/29
09:40:00
240
30          0          20          5
-2          0          80          5
0           0          110         5
2           0          140         5
0           -2         170         5
0           0          200         5
0           2          230         5
CH2 (RHCP)
fine and low wind
this is a test.
comment three lines.
19
#####
←データ数
←ここまではヘッダ
YR MO DY HR MN SEC  AZ  EL  A-OFS A-BW A-PK  E-OFS E-BW  E-PK  PK
2003 3 29 9 40 120 227.19 62.11 0.001 3.360 0.0627 0.862 3.492 0.0781 0.0762
2003 3 29 9 40 360 228.79 61.50 -0.180 3.862 0.0578 1.204 3.592 0.0701 0.0747
2003 3 29 9 40 600 230.33 60.87 0.114 4.173 0.0696 0.806 4.110 0.0793 0.0784
2003 3 29 9 40 1080 233.25 59.56 -0.304 3.112 0.0640 0.804 4.088 0.0636 0.0683
2003 3 29 9 40 1220 234.62 59.00 -0.110 4.191 0.0641 0.876 3.992 0.0690 0.0715

```

ヘッダは、編集して入力したものとほぼ同一である。データの内容は以下の通り。

```

YR MO DY HR MN SEC  AZ  EL  A-OFS A-BW A-PK  E-OFS E-BW  E-PK  PK
2003 3 29 9 40 120 227.19 62.11 0.001 3.360 0.0627 0.862 3.492 0.0781 0.0762

```

順に、年、月、日、時、分、秒 (観測開始時刻と、経過秒)、測定を行った方位角 (度)、仰角 (度)、方位角オフセット (分角)、方位角ビーム幅 (分角)、方位角オフセットを補正した場合のピークの強度 (システム雑音に対する d B)、仰角オフセット (分角)、仰角ビーム幅 (分角)、仰角オフセットを補正した場合のピークの強度 (システム雑音に対する d B)、方位角・仰角ともに補正した場合のピーク強度 (システム雑音に対する d B)。

本レポートに掲載した図 1、2、4、5 a は、このデータ部分を用いている。全 9 回のデータをいっせいに示した図 (1、2) は、9 個のファイルからデータ部分だけを手で編集して一つのファイルにまとめたものを用いている。

#### (4) 器差補正計算

この作業を行う前に、入力ファイルのデータを検討し、明らかな異常データは手作業で削除しておく必要がある。異常データの削除が終ったファイルを、器差補正計算ソフト (reduct3.exe) によって順次読み込み、器差補正值、補正後の予想残差を計算、それぞれファイルに出力する。この作業は、ファイル指定だけで自動で行われる。最終的な結果の出力ファイル名を入力する。出力ファイル名が yyyy.dat の場合、データファイルとして yyyy.dat、パラメータファイルとして par-yyyy.dat という2つのファイルが生成される。内容は以下の通りである。

yyyy.dat は器差補正值を用いた場合に得られる残差である。本レポートでは図3、5bでこの結果が用いられている。

par-yyyy.dat は、最初に各回の測定の簡単なまとめが記述され、後半は全測定データ数、器差補正值、残差の標準偏差、誤差行列、器差補正值 (度で表したもので内容は同一) が記述されている。

reduct3.exe は F-BASIC によって書かれている。器差パラメータの計算にはQR分解法を用いており、正規方程式を直接解いていない。この方法は「最小二乗法による実験データ解析」中川・小柳著 (東京大学出版会) を参考にしている。

#### yyyy.dat の内容

Az [deg]	El [deg]	Az-offset [min]	El-offset [min]	Az-res [min]	El-res [min]
227.19	62.11	0.001	0.862	0.030	0.031
228.79	61.50	-0.180	1.204	-0.156	0.370
230.33	60.87	0.114	0.806	0.134	-0.031
233.25	59.56	-0.304	0.804	-0.292	-0.039
234.63	58.89	-0.110	0.876	-0.102	0.031
235.97	58.21	0.184	0.863	0.188	0.015
237.26	57.52	-0.022	1.067	-0.022	0.217
238.50	56.82	0.042	0.860	0.038	0.008
239.71	56.11	-0.142	0.681	-0.150	-0.173
240.00	55.20	0.057	0.900	0.045	0.040

par-yyyy.dat の内容

ANTENNA PARAMETERS FOR YAMAGUCHI 32M TELESCOPE

SOURCES

No. 1 0528+134

2003/03/29

09:40:00

CH2 (RHCP)

fine and low wind

this is a test.

comment three lines.

SCAN NUMBER = 18

No. 2 3C273B

2003/04/15

12:00:00

239.71 , 56.11 , -0.142 , 0.681 , -0.150 , -0.173

240.88 , 55.39 , 0.057 , 0.898 , 0.045 , 0.042

(途中省略)

TOTAL SCAN NUMBER = 444

PARAMETERS [arc min]

a1 = 0.091608 +/- 0.007876

a2 = 0.009555 +/- 0.003344

a3 = 0.135160 +/- 0.005166

a4 = -0.031425 +/- 0.001727

a5 = 0.003062 +/- 0.000680

a6 = -0.008713 +/- 0.010148

a7 = 0.080483 +/- 0.001790

a8 = 0.845945 +/- 0.001500

RMS RESIDUAL AZ [arc min] = 0.309364

RMS RESIDUAL EL [arc min] = 0.378705

RMS RESIDUAL TOTAL [arc min] = 0.489002

error matrix

0.007876 0.003512 0.004454 0.002285 0.000663 0.002566 0.001079 0.000698

0.003512 0.003344 0.001065 0.000556 0.000239 -0.001343 -0.000565 -0.000366

0.004454 0.001065 0.005166 0.002747 0.001193 0.004512 0.001896 0.001228

0.002285 0.000556 0.002747 0.001727 0.000680 0.002224 0.000935 0.000605

0.000663 0.000239 0.001193 0.000680 0.000680 0.001310 -0.000003 -0.000002

0.002566 -0.001343 0.004512 0.002224 0.001310 0.010148 0.002128 -0.000004

0.001079 -0.000565 0.001896 0.000935 -0.000003 0.002128 0.001790 0.001159

0.000698 -0.000366 0.001228 0.000605 -0.000002 -0.000004 0.001159 0.001500

PARAMETERS [deg]

a1 = 0.00152679 +/- 0.00013127

a2 = 0.00015924 +/- 0.00005573

a3 = 0.00225267 +/- 0.00008610

a4 = -0.00052375 +/- 0.00002878

a5 = 0.00005104 +/- 0.00001134

a6 = -0.00014521 +/- 0.00016913

a7 = 0.00134138 +/- 0.00002983

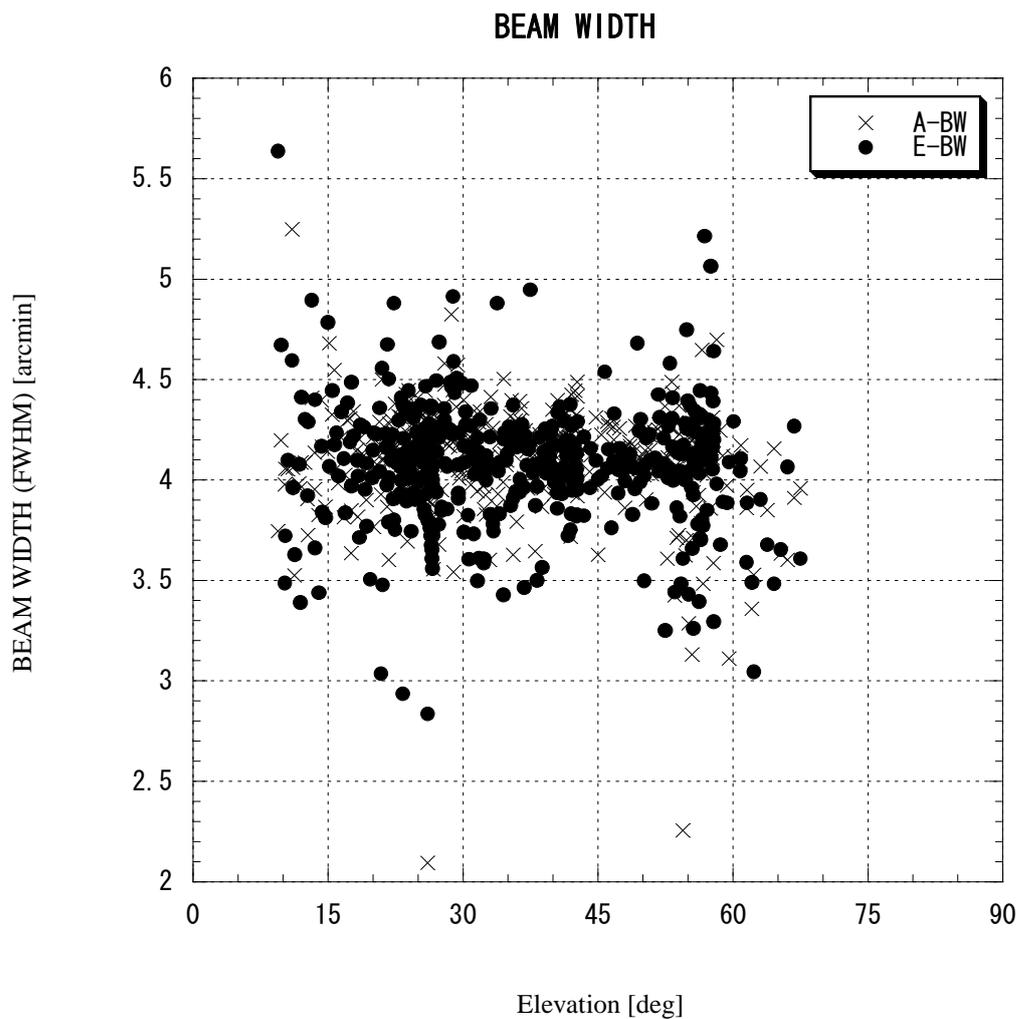
a8 = 0.01409909 +/- 0.00002501

## 付録B. ビーム幅

ポインティングの測定では、副産物としてビームの大きさが方位角、仰角方向のそれぞれについて得られる。表B、図Bに測定結果を示す。図は方位角方向、仰角方向のビーム幅（FWHM）を仰角に対してプロットしている。仰角に対する依存性は小さくほぼ一定値であり、また方位角、仰角ともに1%以内の精度で一致している。

表B. ビーム幅

	ビーム幅 FWHM (分角)	標準偏差 (分角)
方位角	4.11	0.26
仰角	4.08	0.30



図B 1. ビーム幅