

修 士 学 位 論 文

茨城 32 m 電波望遠鏡日立アンテナにおける
指向精度評価及びその改善

2011 年度
(平成 23 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

10NM157T

齋藤悠

概要

茨城大学では KDDI から国立天文台に譲渡された 2 台の衛星通信用アンテナを電波望遠鏡として運用するための整備を行っている。これは正式名称を国立天文台水沢 VLBI 観測所茨城観測局といい、茨城県の日立・高萩市にまたがる 2 台のアンテナからなる。それぞれを日立・高萩アンテナと呼ぶ。現在、両アンテナには 6.7 - 8.4 GHz 両帯域用冷却受信機の搭載が完了しており、アンテナ性能評価、分光計の整備などが完了しつつある。この中で私はおもに日立アンテナの指向精度評価及びその改善に取り組んできた。

指向精度はアンテナが指示した方向にどれだけ正しく向くかを表す精度である。この性能が低い場合、点源の天体では受信強度の低下、広がった天体では正しい強度分布が得られないなど、観測の信頼性が低下してしまう。このように、指向精度は望遠鏡の基本的性能である。指向精度は全天の多くの方向での方位角 (Az ; *Azimuth*)・仰角 (El ; *Elevation*) 方向の指向誤差量 (dX, dEl) を測定することで評価できる。ここで dX は Az 方向の実角で、方位角の指向誤差量 ΔAz に対して $dX \equiv \Delta Az \cos(El)$ とする。指向誤差には時間的にほとんど変化しない再現性誤差と、測定毎に異なる非再現性誤差がある。非再現性誤差は鏡面の熱変形や、風によるアンテナのぶれなどの影響で生じ、取り除く事は難しい。再現性誤差はアンテナの構造に起因する誤差であり、8 つの器差パラメータと呼ばれる未定係数を含む、 Az と El の正弦余弦成分からなる多項のモデル式で表すことができる。再現性誤差は、モデル式に適切な器差パラメータ値を代入して計算した指向誤差量を、アンテナ制御時にオフセットとして加えることで補正できる。指向精度評価には、各方向における指向誤差量の平均値 $\overline{dX}$ 、 $\overline{dEl}$ 及び標準偏差 σ_{dX} 、 σ_{dEl} についてそれぞれ二乗和を取った指向誤差の平均値 $\overline{\Delta} = \sqrt{\overline{dX}^2 + \overline{dEl}^2}$ 、及び標準偏差 $\sigma = \sqrt{\sigma_{dX}^2 + \sigma_{dEl}^2}$ を用いた。目標指向精度はこれらの和 $\overline{\Delta} + \sigma$ で、8.4 GHz 帯ビームサイズ (約 $3.8'$) の $1/10$ の $0.38'$ とした。指向誤差量は 9 点十字スキャンにより測定した。これは点源と見なせる天体に対して、天体方向と天体から Az 、 El 方向に $\pm$ のオフセットをいれた点の受信強度を測定し、ビームのずれ量を推定する方法である。今回はオフセットを $\pm 1.5'$ 、 $\pm 3'$ とした。そして各スキャンの測定結果を方位角・仰角方向それぞれ独立なガウシアンでフィットし、指向誤差量を求めた。器差パラメータ値は、各指向誤差量を最小二乗法を用いてモデル式でフィッティングすることで推定した。

日立アンテナの指向精度測定は 2010 年 9 月から行ってきた。1 回の測定は全天をカバーするように約 50 - 100 セットの十字スキャンを 2 - 4 日掛けて行った。2010 年 11 月の測定結果から器差パラメータ値を導出し、2011 年 1 月の測定で用いた結果、指向誤差の平均値及び標準偏差はそれぞれ、 $0.47'$ から $0.28'$ 、及び $1.0'$ から $0.56'$ に改善した。しかし震災後の 2011 年 6 月の測定で、平均値で $1.4'$ と大きなずれが確認された。これを受け、2011 年 10 月に再測定を行った。この結果、指向誤差の平均値及び標準偏差は $0.07'$ 、 $0.59'$ となり、震災前と同様の精度を得た。しかしまだ目標指向精度には達していない。2011 年 12 月には、受信機の載せ替えによる指向誤差の変動を調査するための測定を行った。結果は、受信機取り外し前が平均値 $0.23'$ 、標準偏差 $0.49'$ 、再度取り付け後が平均値 $0.24'$ 、標準偏差 $0.41'$ となった。これより、同じ受信機の取り外し、取り付け前後では指向誤差の有意な変化はないことが分かった。また指向誤差の時間変動を調べた結果、約 2 ヶ月の間で $0.1' - 0.2'$ 程度変動する可能性がある事が分かった。しかし比較した測定同士のデータ数に差があるため、これに関しては更なる調査が必要である。更に最適なモデル式についても検討した。この結果、器差パラメータを追加し、 Az に対して 180° 周期の正弦余弦の項を加えることで、モデル式による指向誤差の再現性が向上する事が分かった。

今後、目標指向精度を達成するためには、モデル式に新たな器差パラメータの項を追加する必要があると思われる。そして低 El において指向誤差の測定エラーが大きいことから、この指向誤差の再現性を調べるためにより精度の良い測定を行う必要がある。この方法としては、連続的にデータを取得する十字スキャンやメタノールメーザーを用いた分光観測、光学ポインティングなどが考えられる。

目次

第 1 章	序論	5
1.1	電波天文学	5
1.2	茨城 32 m 電波望遠鏡	5
1.3	電波望遠鏡装置の概要	6
1.3.1	電波望遠鏡の構成	6
1.3.2	アンテナ	6
1.3.3	受信機	6
1.3.4	検波器、分光器	7
第 2 章	アンテナの性能	8
2.1	指向性	8
2.1.1	アンテナ感度の角度依存性	8
2.1.2	パラボラアンテナのビームパターン	8
2.2	能率	9
2.2.1	主ビーム能率	9
2.2.2	開口能率	9
2.3	追尾・駆動性能	9
第 3 章	指向精度	10
3.1	電波望遠鏡に求められる指向精度	10
3.2	指向誤差を再現するモデル	12
第 4 章	指向精度評価測定	15
4.1	目的	15
4.2	測定及び解析方法	15
4.2.1	指向精度評価測定方法	15
4.2.2	解析方法	16
	・ 指向誤差量の導出及び指向精度評価	16
	・ 器差パラメータの推定	17
4.3	各測定結果	17
4.3.1	各測定の概要	17
4.3.2	2010 年 11 月と 2010 年 12 月の測定	19
4.3.3	2011 年 6 月の測定	31
4.3.4	2011 年 7 月と 8 月の測定	38
4.3.5	2011 年 10 月の測定	40
4.3.6	2011 年 12 月の測定	52
4.4	まとめ	57
第 5 章	考察	59
5.1	指向誤差の時間変動	59
5.1.1	はじめに	59
5.1.2	比較 1	59
5.1.3	比較 2	63

5.1.4	まとめ	67
5.2	受信機載せ替えによる指向誤差の変動	67
5.2.1	はじめに	67
5.2.2	方法	67
5.2.3	受信機載せ替え前後の指向誤差の比較	67
5.3	最適なモデル式の検討	68
5.3.1	現状のモデル式	68
5.3.2	モデル式の検討	69
第 6 章	まとめと今後の課題	78
付 録 A	カセグレン型パラボラアンテナの光学系	80
付 録 B	ヘテロダインによる周波数変換の原理	82
付 録 C	ビームパターンとアンテナ開口面上電場分布の関係	83
付 録 D	指向誤差を表すモデル式の導出	85

目 次

1.1	茨城 32 m 電波望遠鏡	5
1.2	一般的な電波望遠鏡の構成	6
2.1	アンテナの角度方向	8
2.2	アンテナビームパターン	8
3.1	軸対称ガウス関数	11
3.2	器差を表す単位ベクトル群	12
4.1	<i>gaussfit</i> による指向誤差の導出	15
4.2	9 点十字スキャン	16
4.3	101104 観測方向プロット	20
4.4	101229 観測方向プロット	20
4.5	101104 実測値と補正量の比較	22
4.6	101104 実測値と残差の比較	25
4.7	101229 の指向誤差の実測値	28
4.8	110601 観測方向プロット	32
4.9	101229 と 110601 の指向誤差の実測値の比較	33
4.10	110601 の指向誤差の実測値と補正量の比較	36
4.11	+1' の補正を加えたことによる 110819 と 110826 の指向誤差の実測値の変化	39
4.12	111013 観測方向プロット	42
4.13	111020 観測方向プロット	42
4.14	111013 の指向誤差の実測値と補正量の比較	43
4.15	111013 の指向誤差の実測値と残差の比較	46
4.16	111020 の指向誤差の実測値	49
4.17	111207 観測方向プロット	53
4.18	111226 観測方向プロット	53
4.19	111207 と 111226 の指向誤差の実測値の比較	54
4.20	指向誤差の平均値の推移	58
4.21	指向誤差の標準偏差の推移	58
5.1	111020 と 111207 の測定結果の比較 1	60
5.2	111020 と 111207 測定結果の比較 2	64
5.3	受信機	67
5.4	現状のモデル式によるフィット結果	70
5.5	新たなモデル式によるフィット結果	73
5.6	新たなモデル式による残差	76
A.1	パラボラアンテナの光学系	80
A.2	カセグレン光学系	81
C.1	微小開口要素が遠方で作る電場	83
D.1	i_3 、 i_4 を含む平面	86

D.2 i_1, i_2 を含む平面	86
--------------------------------	----

第1章 序論

1.1 電波天文学

電波とは電磁波の中で、波長で $0.1 \mu\text{m}$ 以上、周波数では 1 THz 以下程度のものを指す。電波天文学は天体などが放射するこの帯域の電磁波を観測して、可視光などでは見えない天体や宇宙の構造を明らかにする学問である。電波には、波長が長いと吸収を受けにくい、可視光では見えない低温の物質を見る事が出来るなどの特徴がある。銀河系全体の構造を明らかにしたり、星の材料となる冷たい星間ガスを観測してその誕生の様子を調べるには、これらの特徴を活かした電波による観測が必要とされる。

電波天文学において電波を観測する装置である電波望遠鏡は、いわゆる「アンテナ」であり、多くは放物面の主鏡を持つパラボラアンテナが使われる。可視光や赤外線では多くの場合、電磁波を光子として捉えるが、電波は位相情報を持った波として捉える事が出来る。そのため電波天文学では干渉技術を使用した観測が行われる。これにより、離れた所にある複数のアンテナで捉えた電波を干渉させ、他の波長では得られない高い角分解能を得る事が出来る。また可視光や赤外線ではプリズムや回折格子を利用して分光した後光を光子として検出するのに対して、電波では、受信した電磁波を電気信号に変換した後で、計算機等を用いて電力の周波数成分を取り出す。そのため計算機の性能次第で、周波数分解能を向上させる事が出来る。

1.2 茨城 32 m 電波望遠鏡

茨城 32 m 電波望遠鏡は、KDDI から国立天文台に譲渡され、茨城大学で立ち上げとその運用を行っている 2 台のパラボラアンテナである。元は衛星通信用アンテナであった。茨城県の北部に位置する日立・高萩両市にまたがって立地し、それぞれ日立・高萩アンテナと呼ぶ。観測周波数帯は $6.3 - 7 \text{ GHz}$ (C band)、 $8 - 8.8 \text{ GHz}$ (X band)、 22 GHz (K band) である。主な観測対象は、 6 GHz 帯ではメタノールメーザー、 8 GHz 帯では連続波、 22 GHz 帯では水メーザー及び連続波が挙げられる。茨城 32 m 電波望遠鏡は 2 台のアンテナがあることから、2 台を同時に用いた 2 素子干渉計としても用いることが出来る。更に国立天文台水沢 VLBI 観測所茨城観測局として、超長基線の干渉計である VLBI 観測にも利用されている。



図 1.1: 茨城 32 m 電波望遠鏡

1.3 電波望遠鏡装置の概要

電波望遠鏡は天体が発する電波を受信してその強度やスペクトル、偏光及びそれらの変動などを観察し、天体の物理状態を知るための装置である。ここでは茨城 32 m 電波望遠鏡（以下、茨城 32 m）を例にして、電波望遠鏡装置の概要を説明する。

1.3.1 電波望遠鏡の構成

電波望遠鏡装置の全体の構成を図 1.2 に示した。空間を伝搬してきた電磁波はアンテナにより集光され、一次放射器を経て受信機へと導かれる。天体の発する電波は微弱なため、受信機内で電気信号へ変換され、低雑音の増幅器によって増幅される。またここで帯域幅の選別や周波数変換も行われる。必要な強度、帯域幅、周波数に変換された信号は、検波器や分光計に入力される。ここで電力信号となり天体の発した電波の情報が得られる。望遠鏡の前端に位置する受信機などはフロントエンド、後端に位置する検波器、分光器などはバックエンドと言われる。計算機はデータの貯蔵や解析、装置全体の機器制御などを行う所である。

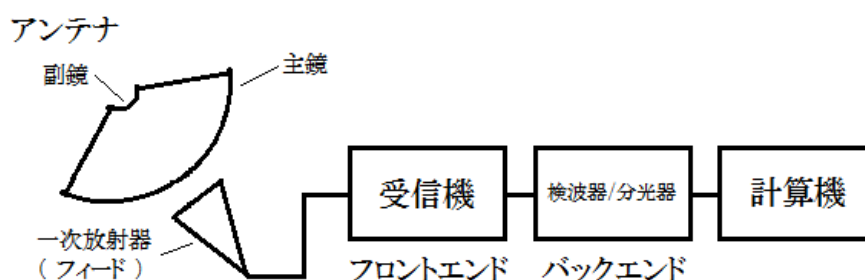


図 1.2: 一般的な電波望遠鏡の構成

1.3.2 アンテナ

茨城 32 m はその名の通り口径が 32 m のパラボラアンテナを有している。アンテナの役割は、微弱な信号を捉えるために電波を集光することと、電波の到来方向を区別する指向性を持たせることである。パラボラアンテナは大きな開口面積を持つため集光力が大きい。また、どれだけ細かい構造を区別できるかを表す指標である角分解能は、観測波長 λ 、開口の直径 D に対して概ね λ/D で表されることから、パラボラアンテナは高い角分解能と鋭い指向性を実現できる。これらの利点によりほとんどの電波望遠鏡にパラボラ光学系が使用されている。その中でも茨城 32 m は回転放物面の主反射鏡に回転双曲面の副反射鏡を組み合わせたカセグレン型パラボラアンテナ（付録 A 参照）である。

1.3.3 受信機

受信機は信号の増幅、周波数変換、また周波数幅の選択が行われる装置である。茨城 32 m に搭載されている受信機では、入力された電波（RF ; *Radio Frequency*）は導波管内で左右の円偏波成分に分けられたあと、同軸導波管変換器により同軸ケーブルを通る電気信号に変えられる。電波天文学において、フラックス密度の単位としてジャンスキー [Jy] ($1\text{Jy} = 10^{-26}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) が用いられるように、天体からの電波は非常に微弱である。そのため、電気信号に変換された RF 信号はすぐさま低雑音の増幅器によって増幅される。ここまでの操作は熱雑音を減らすために、約 10 K に保たれた真空のデューワー内で行われる。増幅された信号はミキサでより低い周波数へ変換（ダウンコンバート）される。この信号は第 1 中間周波数（1st IF ; *Intermediate Frequency*）信号と呼ばれ、更に増幅が行われて後段（バックエンド）へ送られる。

茨城 32 m の受信機は、ヘテロダイン方式（付録 B 参照）で周波数変換を行うヘテロダイン受信機である。この方式は観測する電波の周波数によって、2 種類の方法ある。1 つは茨城 32 m の受信機の方法で、初段の RF 信号で増幅を行ってから周波数変換を行う。もう 1 つは、低雑音増幅器の製作が困難なミリ波サブミリ波帯などの高

周波における方法で、先に周波数変換を行ってから増幅を行う。この方式では天体の位相情報が保たれた信号を得る事が出来る。この他にサブミリ波帯で使用する、受信電波のエネルギーを熱エネルギーに変換して検出するボロメータを用いた受信機もある。

茨城 32 m では IF 系と呼ばれる装置の中で、この周波数変換が行われる。6.7 及び 8.4 GHz 帯ではそれぞれ 5900、7632 MHz の LO 信号を用いて、512 - 1024 MHz の 1st IF 信号へと変換している。1st IF 信号は十分周波数が低い場合はそのまま取り扱うこともあるが、多くの場合さらに低い周波数へ変換される。この信号は 2nd IF と呼ばれる。

1.3.4 検波器、分光器

検波器や分光器は、電波望遠鏡装置の中で電波の入力方向から見て後端に当たるので、バックエンドと言われる。天体からの入力信号はここで最終的に電力信号となり、読み取られる。連続波の電波強度を得たい場合は、周波数帯域幅での電力の積分値を出力する検波器を用いる。天体のスペクトルを見たい場合には、受信した電波強度の周波数成分であるパワースペクトルを出力する分光器を用いる。

第2章 アンテナの性能

2.1 指向性

2.1.1 アンテナ感度の角度依存性

アンテナはその形状によって、到来する電波に対する感度の角度依存性が異なる。この感度の角度依存性はビームパターンまたはアンテナパワーパターン（以下ビームパターンとする）などと呼ばれる関数で表される。受信電波の強度は電力で表されるため、ビームパターンは電力を単位とした角度の関数 $P(\theta, \phi)$ となる。ここで (θ, ϕ) は $\theta = 0$ をアンテナの光軸とした球面座標である（図 2.1 参照）。ビームパターンは角度依存性のみを示したい場合が多いため、 $P(\theta, \phi)$ をその最大値 $P_{\max}$ で割った規格化したビームパターン $P_n(\theta, \phi)$ がよく使われる。通常アンテナビームパターンはその感度が極大となる方向がいくつか存在する（図 2.2 参照）。最も感度が大きい方向を含むビームの山を主ビーム、その周辺の感度の低いビームの山をサイドローブという。アンテナの指向方向はこの主ビームのピーク方向である。指向性の鋭さは角度分解能に相当するが、それを表す指標として半値全幅（HPBW ; *Half Power Beam Width*）が用いられる。これは感度が最大値の半分になるまでの主ビームの広がり角度で、観測波長 $\lambda[\text{m}]$ 、開口直径 $D[\text{m}]$ とすると

$$\theta_{\text{HPBW}} = K \frac{\lambda}{D} \quad [\text{rad}] \quad (2.1)$$

と表される。 K は主ビームの形状による係数であり、主ビームがガウス関数の形状であれば $K \approx 1.2$ である。電波望遠鏡に多く使われるパラボラアンテナのビームパターンは軸対称ガウス関数（式 (2.2)）で近似されるので、電波の帯域では回折限界に近い角度分解能が得られる。

$$P_n(\theta, \phi) = \exp \left(-4 \ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{HPBW}}} \right)^2 \right). \quad (2.2)$$

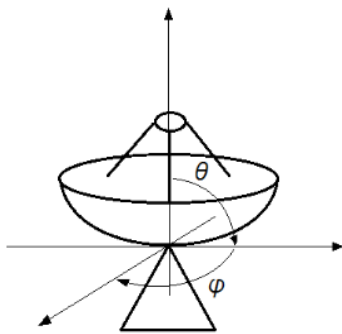


図 2.1: アンテナの角度方向
光軸方向に $\theta = 0$ 、光軸の方位角方向に ϕ をとる。

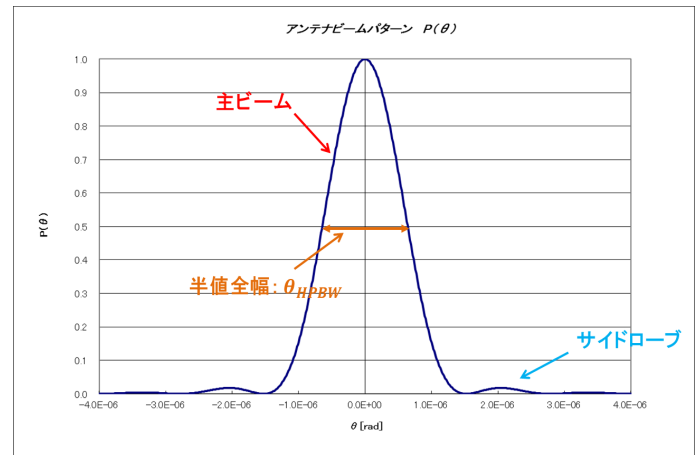


図 2.2: アンテナビームパターン
一番大きい山が主ビーム、その周辺の小さい山がサイドローブである。

2.1.2 パラボラアンテナのビームパターン

アンテナ感度の角度依存性を示すビームパターンは、アンテナ開口面上の電場分布のフーリエ変換の 2 乗に比例した形で表せる（付録参照）。これより開口面上での電場分布を一様とすると、ビームパターンは *sinc* 関数の 2

乗の形となる。しかしこの場合、サイドローブが現れ、限定した範囲のみからの電波を得るという意味では指向性が低下する。ビームパターンが完全に *sinc* 関数で表される場合、第一サイドローブのピーク強度は主ビームに比べて約 4.5% となる。そこで一般に 1 次放射器としてガウス型に近いビームパターンを持つホーンアンテナが用いられ、開口面上の電場分布をガウス型とする。これによりガウス関数のフーリエ変換はやはりガウス関数であるという関係から、ビームパターンもガウス型に近い形となるため、サイドローブを減らすことが出来る。

2.2 能率

2.2.1 主ビーム能率

アンテナの能率には主ビーム能率 η_M や開口能率 η_A がある。主ビーム能率はアンテナの全ビーム立体角 Ω_A に占める主ビーム立体角 Ω_M の割合で

$$\eta_M \equiv \frac{\Omega_M}{\Omega_A} \quad (2.3)$$

と表される。この値が 1 に近い程、主ビームで受信する電力の割合が増える。全ビーム立体角はアンテナビームパターン $P_n(\theta, \phi)$ を全方向で積分したもの、主ビーム立体角は主ビームの範囲で積分したもので、以下の式で表される。

$$\Omega_A = \iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P_n(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi, \quad (2.4)$$

$$\Omega_M = \iint_{\text{mainbeam}} P_n(\theta, \phi) d\Omega. \quad (2.5)$$

ここで $d\Omega$ は $\sin \theta d\theta d\phi$ 、mainbeam は主ビームの立体角の範囲を表す。ビームパターンの内、主ビーム以外に感度を持つ立体角を $\Omega_{\text{minorlobes}}$ とすると、全ビーム立体角 Ω_A は

$$\Omega_A = \Omega_M + \Omega_{\text{minorlobes}} \quad (2.6)$$

と書ける。これよりサイドローブやそれ以外のマイナーローブが小さいほど、主ビーム能率は向上し、見たい方向からの電波のみを捉えられる。

2.2.2 開口能率

開口能率はアンテナの物理的開口面積 A_p に対する有効的な開口面積 A_e の割合で、

$$\eta_A \equiv \frac{A_e}{A_p} \quad (2.7)$$

と表される。これは実際のアンテナは鏡面誤差等のために A_p に入射した電波を全ては受信できず、 η_A の割合で受信することを表している。開口能率と鏡面誤差はルッツの式により関係付けられる。ルッツの式は鏡面誤差を ϵ 、観測波長を λ とすると

$$\eta_A = \eta_0 \exp\left\{-\left(\frac{4\pi\epsilon}{\lambda}\right)^2\right\} \quad (2.8)$$

と表される。 η_0 は鏡面誤差以外の以下のような要因による有効開口面積や受信電力の減少を含む項である。

- サイドローブを小さくするために、主鏡面の端からの電力の寄与を小さくする事 (エッジテーパー)
- 副鏡やその支柱など、主鏡面への電波を遮る外部構造

式 2.8 より η_A は波長に対する鏡面誤差の大きさに依存し、アンテナの使用周波数を決める要因となる。

2.3 追尾・駆動性能

電波望遠鏡に用いるアンテナは、天体を滑らかに追尾する事が求められる。そのためには追尾誤差が小さいことが必要である。理想的な追尾誤差はビームサイズの $1/20$ である。また目的天体と参照天体を短期間で切り替えたり、均質なマッピングのデータを得るためには高速駆動が求められる。日立アンテナの最大駆動角速度は $0.3^\circ/\text{sec}$ 、高萩アンテナは $0.1^\circ/\text{sec}$ である。

第3章 指向精度

3.1 電波望遠鏡に求められる指向精度

前章で述べたようにアンテナの感度は角度依存性を持つ。電波望遠鏡では特に鋭いアンテナビームパターンを持つパラボラアンテナが使われ、任意の方向からやってくる天体などの電波を区別して測定する事が出来る。そのため、アンテナが向きたい方向にどれほど正しく向くかという事が重要になる。このどれほど正しく向くかという精度が指向精度である。指向精度が低いアンテナでは、点源に近い天体を観測する場合は受信強度が低下し、観測感度及び効率が下がり、広がった天体を観測する場合は、正しい強度分布が得られないなど、観測の信頼性が低下してしまう。

実際にアンテナが向いている方向は、その感度が最大の方向と定義すると、ビームパターンの主ビームのピーク方向（光軸方向）と言える。この光軸方向と指示した方向とのずれを指向誤差と呼び、一般にアンテナの指向方向（方位角、仰角）により異なる。指向精度は実際に指向誤差を測定することで評価出来る。指向誤差を全天をカバーするように多くの点で測定し、その平均値と標準偏差を求める。目標とされる指向精度は、この標準偏差で理想的にはビームサイズの $1/20$ 、少なくとも $1/10$ とされる。この値は程度問題であるが、アンテナの主ビームを軸対称ガウス関数とした場合、ビームサイズの $1/20$ 、 $1/10$ だけずれたところではそれぞれ、ピークの約 99.3%、97.3% の強度となる（図 3.1 参照）。茨城 32 m における目標指向精度は現段階では、8.4 GHz 帯のビームサイズの $1/10$ である約 $0.38'$ とした（表 3.1 参照）。しかし今後、22 GHz 帯受信機が搭載されれば、更に高い指向精度が求められる。

表 3.1: 各周波数での目標指向精度

周波数 [GHz]	波長 [cm]	ビームサイズ (λ/D)	1/10	1/20
6.7	4.5	4.8	0.48	0.24
8.4	3.6	3.8	0.38	0.19
22	1.4	1.5	0.15	0.073

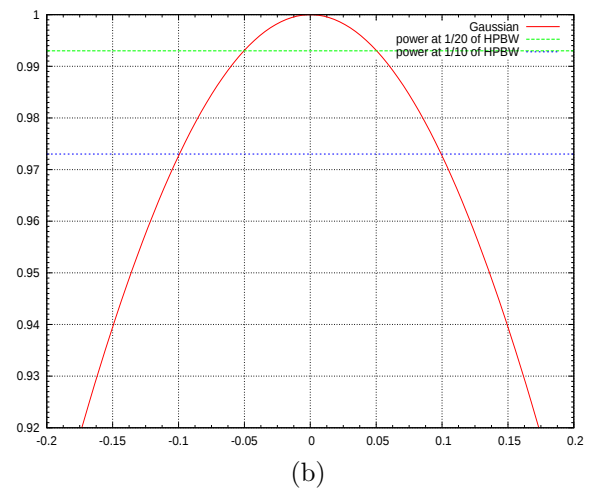
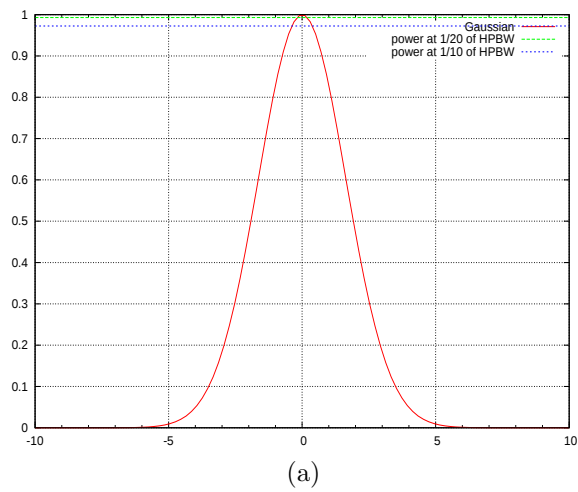


図 3.1: 軸対称ガウス関数
 (a) 半値全幅を $3.8'$ として、8.4 GHz 帯の主ビームを近似したガウス関数。緑色の線で半値全幅の $1/20$ 、青色の破線で $1/10$ の強度の割合を示した。(b) (a) を拡大した図。横軸は $3.8'$ を 1 とした角度である。0.05 で 99.3%、0.1 で 97.3% となっていることが分かる。

3.2 指向誤差を再現するモデル

指向誤差には時間的に変化する非再現性誤差と、時間的な変化が小さい再現性誤差がある。非再現性誤差は観測時の天候や時間帯など環境の変化によって生じる誤差である。例えば、気温の変化や太陽放射による装置の熱変形、風の影響などがある。これと異なり、再現性誤差はアンテナ装置の設置誤差に起因して生じる指向誤差である。設置誤差は器差（または機差）と呼ばれ、器差をもたらす各要因は器差パラメータによって表される。したがって器差を表すモデルにより、器差パラメータを通して指向誤差を再現できる。以下では茨城 32 m アンテナの構造と同じである経緯台式の望遠鏡の指向誤差を表すモデルを説明する。

方位角 (Az : *Azimuth*) は北から東回りに 360° 、仰角は (El : *Elevation*) 水平から天頂方向へ 90° をとる角度とする。この時、ある天体の方向 (Az , El) にアンテナを向けた時の器差による指向誤差について考える。器差を表すために 9 個の単位ベクトルを以下の様に定義する。器差の要因はこれらのベクトル周りの回転変位角をパラメータとして表現できる。各ベクトル周りの回転は、その指す方向を向いたときに時計回りを正とする。

・器差を表すベクトル群

- ・ i_1 : 地平面内の北向き ($Az = 0^\circ$)
- ・ i_2 : 地平面内の西向き ($Az = 270^\circ$)
- ・ i_3 : 地平面に垂直な天頂方向 ($El = 90^\circ$)。器差の無い理想的な場合に Az 軸が向いているべき方向。
- ・ i_4 : 地平面内の方位角方向。 i_1 を i_3 周りに Az 回した方向。
- ・ i_5 : i_4 を i_3 周りに 90° 回した方向。器差の無い理想的な場合に EL 軸が向いているべき方向。
- ・ i_* : 天頂方向 i_3 と Az 方向 i_4 の張る平面内で仰角 El の方向。器差の無い理想的な場合にアンテナの光軸が向いているべき天体の方向 (Az , El)。
- ・ i_6 : i_* を i_5 の回りに -90° 回した方向。
- ・ i_{El} : i_* に垂直で天球面に接する平面内で天頂方向に向くベクトル。
- ・ i_{Az} : i_{El} を i_* の周りに 90° 回した方向。

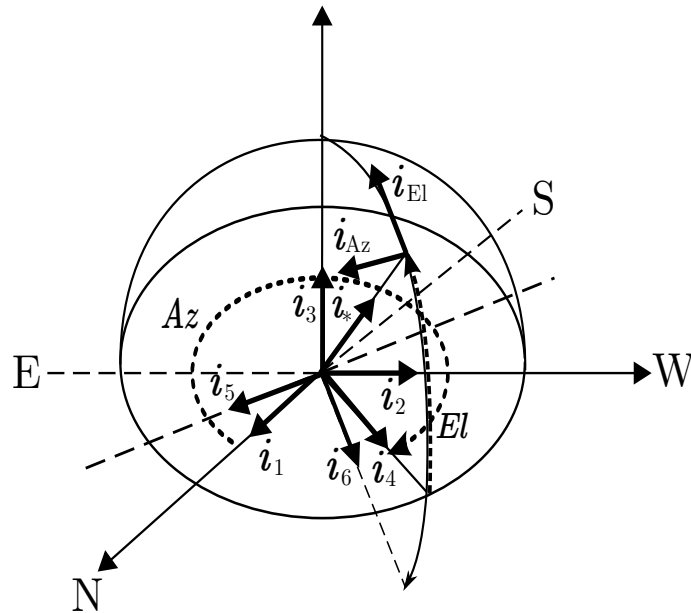


図 3.2: 器差を表す単位ベクトル群

器差の要因とその各パラメータをまとめたものを表 3.2 に示した。方位角軸の傾きは方位角軸が本来向いているべき方向である i_3 方向に垂直な 2 つのベクトル i_1 、 i_2 の周りの回転変位角の結果によって生じたものとする事が出来る。図 3.2 から分かるように i_1 の周りの回転が東西方向、 i_2 の周りの回転が南北方向である。エンコーダは角度を読み取る装置であり、その原点が正しい位置に設定されていない事による原点ずれを表すのが、 Az 及び El エンコーダの原点ずれである。これらは、その軸方向のベクトル i_3 及び i_5 周りの回転で説明できる。 El 軸の傾きは Az 軸の傾き同様、それが本来向いているべき方向である i_5 方向に垂直な 2 つのベクトル i_3 、 i_4 の周りの回転で表される。しかしここで、 i_3 は Az エンコーダの原点ずれを既に表しており、それと区別がつかない。したがって El 軸の傾きを表す独立なパラメータは、 i_4 のみとする。同様に光軸の傾きは i_* に垂直な 2 つのベクトル i_5 、 i_6 の周りの回転変位角がパラメータとなるが、 i_6 のみを独立なパラメータとする。

表 3.2: 器差の要因とそれを表すパラメータ

器差の要因	パラメータ
Az 軸の東西方向への傾き	i_1 周りの回転変位角
Az 軸の南北方向への傾き	i_2 周りの回転変位角
Az エンコーダの原点ずれ	i_3 周りの回転変位角
El 軸の傾き	i_4 周りの回転変位角
El エンコーダの原点ずれ	i_5 周りの回転変位角
光軸の傾き	i_6 周りの回転変位角

実際の器差の要因には、回転変位では表せない重力による弾性変形があるが、ここではアンテナを剛体と見なし、回転変位の効果のみを考える。重力による効果は後で付け加える。一般に器差は微小量であるので各単位ベクトル周りの回転変位も微小である。そこで、剛体がある単位ベクトル i_n の周りを微小角 $\Delta\theta_n$ だけ回転する事を考えると、剛体に固定された任意のベクトル x の変位 Δx は

$$\begin{aligned}\Delta x &= \sin(\Delta\theta_n) i_n \times x \\ &\approx \Delta\theta_n \times x\end{aligned}\quad (3.1)$$

と近似出来る。ここで $\Delta\theta_n$ は微小回転角ベクトルとして $\Delta\theta_n = \Delta\theta_n i_n$ で定義する。アンテナの器差は表 3.2 の 6 つの単位ベクトル周りの回転変位が重なって生じる。今知りたい指向誤差は、器差の無い理想の場合に光軸方向の単位ベクトル i_* が向いているべき方向 (Az 、 El) からの i_* のずれである。したがって 6 つの単位ベクトル周りの回転変位によるアンテナの合成微小回転角ベクトル $\Delta\Theta$ を考えれば良い。1 次近似の範囲では微小回転角はベクトル的に合成できるため

$$\Delta\Theta = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4 + \Delta\theta_5 + \Delta\theta_6 \quad (3.2)$$

と出来る。この回転変位角をアンテナが持つとき、光軸ベクトル i_* が指す方向 i'_* の実際の天体方向 (Az 、 El) からのずれ $\Delta i_* = i'_* - i_*$ は

$$\Delta i_* = \Delta\Theta \times i_* \quad (3.3)$$

と表せる。これを方位角、仰角方向に投影することで、それぞれの方向の指向誤差は

$$\begin{aligned}\Delta Az \cos(El) &= \Delta i_* \cdot i_{Az}, \\ \Delta El &= \Delta i_* \cdot i_{El}\end{aligned}\quad (3.4)$$

となる。 $\Delta Az \cos(El)$ は仰角 El での方位角方向の実角を表す。したがって式 (3.2) を式 (3.3) に代入し、さらに式 (3.4) に代入することで、方位角、仰角方向の指向誤差のうち、回転変位による成分を器差パラメータを通じて表せる。最終的に式 (3.4) は

$$\begin{aligned}\Delta Az \cos(El) &= \Delta i_* \cdot i_{Az} \\ &= \Delta\theta_6 + \Delta\theta_1 \cos(Az) \sin(El) - \Delta\theta_2 \sin(Az) \sin(El) + \theta_4 \sin(El) - \Delta\theta_3 \cos(El),\end{aligned}\quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}\Delta El &= \Delta i_* \cdot i_{El} \\ &= \Delta\theta_5 - \Delta\theta_1 \sin(Az) - \Delta\theta_2 \cos(Az)\end{aligned}\quad (3.6)$$

となる (計算過程は付録 D 参照)。実際に茨城 32 m 電波望遠鏡日立アンテナで用いられている指向誤差を表すモデル式は以下のものである。

$$dX = A1 \cos(El) + A3 \cos(Az) \sin(El) - A4 \sin(Az) \sin(El) + A5 \sin(El) + A7, \quad (3.7)$$

$$dEl = A2 - A3 \sin(Az) - A4 \cos(Az) + A6 \cos(El) + A8 \sin(El). \quad (3.8)$$

ここで $dX = \Delta Az \cos(El)$ 、 $dEl = \Delta El + A6 \cos(El) + A8 \sin(El)$ としている。この式では表 3.3 の様に器差パラメータを置き直している。またこのアンテナは口径が 32 m と大きいため、重力による弾性変形の効果を考慮した項 $A6$ 、 $A8$ が加わっている。

表 3.3: 器差パラメータの対応関係

器差の要因	器差パラメータ
Az エンコーダの原点ずれ	$A1 = -\Delta\theta_3$
El エンコーダの原点ずれ	$A2 = \Delta\theta_5$
Az 軸の東西方向への傾き	$A3 = \Delta\theta_1$
Az 軸の南北方向への傾き	$A4 = \Delta\theta_2$
El 軸と Az 軸の非直交性	$A5 = \Delta\theta_4$
光軸と El 軸の非直交性	$A7 = \Delta\theta_6$
重力による鏡面の弾性変形	$A6, A8$ 対応なし

式 (3.7)、(3.8) から分かるように、指向誤差は方位角・仰角の関数になっている。そこで全天の多くの方向で指向誤差を測定し、これらの式でフィッティングすることで器差パラメータの値を推定すれば、測定した指向誤差を再現できる。すなわち、推定した器差パラメータ値を式 (3.7)、(3.8) に代入して計算した指向誤差量を、アンテナ制御時にオフセットとして与えることで、指向誤差を補正する事が出来る。

第4章 指向精度評価測定

4.1 目的

指向精度評価測定は指向誤差を測定することで指向精度を評価し、指向精度が低い場合には補正を加えて向上させる事を目的としている。私が行ったのは日立アンテナの指向精度評価であり、前章で述べたように目標指向精度 $0.38'$ の達成を目指した。測定は 8.4 GHz 帯で行った。

4.2 測定及び解析方法

4.2.1 指向精度評価測定方法

前章では、式 (3.7)、(3.8) に対応する方位角・仰角方向の指向誤差を測定する事で指向精度の評価及び補正を行う事が出来ることを述べた。実際には十字スキャンと言われる方法で測定を行い、指向誤差を測定した。この手順を電波ポインティングと呼ぶ。十字スキャンとは、位置が正確に分かっている点源と見なせる天体に対して、方位角・仰角方向にオフセットをいれた方向とその天体中心方向の電波強度を測定する方法である。もし指向誤差が無ければ、天体中心方向に向けたときに強度がピークとなる。しかし実際には指向誤差があるため、ピーク的位置は天体中心方向からずれる。そこでビームパターンをガウス関数型と仮定して測定結果をガウスフィットすることで、ピーク位置すなわち指向誤差量を求める事が出来る (図 4.1 参照)。

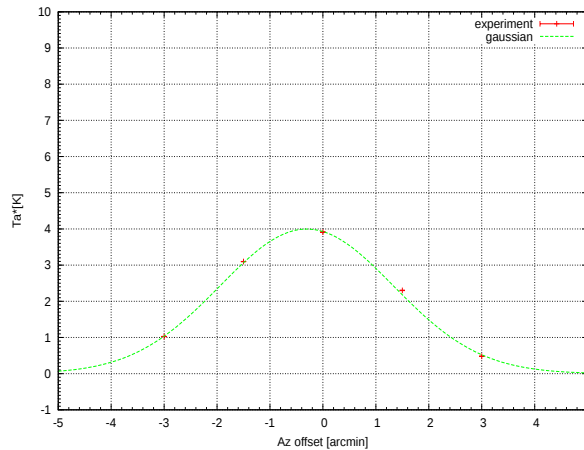


図 4.1: *gaussfit* による指向誤差の導出

セット毎に測定値から導出したアンテナ温度を、方位角 (dX)・仰角 (dEl) 方向に対してそれぞれ独立なガウス関数 $f(x) = a \exp\left(-4 \ln 2 \frac{(x-b)^2}{c^2}\right)$ でフィットし、指向誤差量を求めた。

今回はオフセットを $\pm 3'$ 、 $\pm 1.5'$ とした 9 点十字スキャン (図 4.2) を行い、8.4 GHz 帯の天体からの連続波をパワーメータで取得した。オフセットの間隔はナイキストのサンプリング定理を元に、8.4 GHz 帯ビームサイズの約半分とした。これは、ガウスフィットの精度を上げるため、情報損失のないオフセット間隔、かつ大気や受信機の変動の影響が少ない観測点数とするためである。アンテナのビーム内に天体が入っていない方向である OFF 点は $(dX, dEl) = (-30', 0')$ 方向とした。天体を入れた方向である ON 点の受信強度から OFF 点を差し引くことで大気放射を補正した。大気放射強度は El に依存するため、 Az 方向にアンテナを振った方向を OFF 点として、

ON と OFF で同じ大気放射強度を得るようにした。各方向の測定時間は 10 秒とし、測定点間の移動時間は 20 秒とした。20 秒では高仰角で移動が間に合わない範囲が存在するが、以下で説明するように測定の目的に対しては大きな影響はない。受信機の変動の影響を小さくするため、ほぼ全天を測定でき、かつなるべく短い移動時間とした。日立アンテナの駆動速度は現時点では毎秒 0.2° に設定されているので、最大速度で駆動した場合 20 秒では $4^\circ = 240'$ 移動できる。図 4.2 の ⑥ → ⑦ 間の実角の移動角度 $33'$ を 20 秒以内に移動するためには、実角の関係式 $dX = \Delta Az \cos(El)$ から、 $\cos(El) > 33'/240'$ を満たす El であることが必要である。これは約 $El < 82^\circ$ であるが、 El リミットが 85° であるので、電波ポインティング測定を行う El の範囲を 82° 以下に設定しても、器差パラメータの導出に大きな影響は与えない。したがって 20 秒はほぼ十分な測定範囲を確保できる移動時間である。各測定では、この十字スキャンを全天をカバーするように異なる Az 、 El で 60 - 100 セット程度行った。

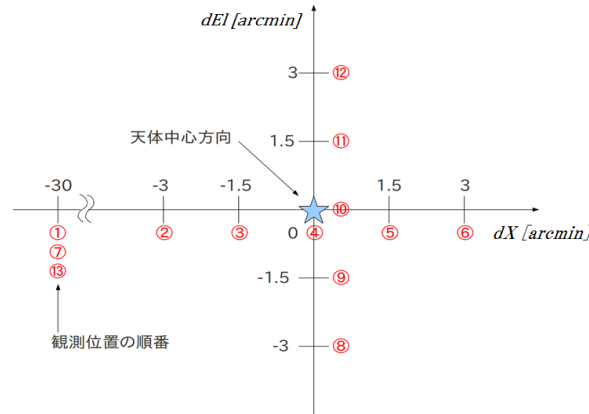


図 4.2: 9 点十字スキャン

横軸が Az 方向の実角オフセット、縦軸が El 方向のオフセットを表す。オフセット $0'$ が、アンテナ制御プログラムで計算された天体中心方向に向けたときに、アンテナが実際に向く方向である。番号の順番でアンテナを振り、各点で 10 秒止まって測定をする。OFF 点として、スキャンの初めと dX スキャンの後、及び最後に $dX = -30'$ の方向を計 3 回測定した。

4.2.2 解析方法

・指向誤差量の導出及び指向精度評価

指向誤差量を求めるためのガウスフィットの方法について説明する。測定データは各点の 10 秒間の平均値を計算し、アンテナ温度に換算した。OFF 点は 3 回取っているので、1 回目と 2 回目の平均値を Az 方向のスキャンに、2 回目と 3 回目を El 方向のスキャンのアンテナ温度の計算に用いた。このデータを方位角 (dX)、仰角 (dEl) 方向毎に、それぞれ独立なガウス関数

$$f(x) = a \exp\left(-4 \ln 2 \frac{(x-b)^2}{c^2}\right) \quad (4.1)$$

でフィットし、指向誤差量を求めた。このフィッティングには gnuplot を用いた。目で見て明らかにフィットできていないデータやフィッティングのエラーが大きいものは除去した。

次に指向精度の評価方法について述べる。ガウスフィットの結果、各方向における方位角及び仰角方向の指向誤差量 dX_i 、 dEl_i が得られる。ここで $i = 1 \sim N$ は各測定を表し、 N は使用した全測定データ数とする。この平均

値 $\overline{dX}$ 、 $\overline{dEl}$ 及び標準偏差 σ_{dX} 、 σ_{dEl} は

$$\overline{dX} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dX_i, \quad (4.2)$$

$$\overline{dEl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dEl_i, \quad (4.3)$$

$$\sigma_{dX} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (dX_i - \overline{dX})^2}, \quad (4.4)$$

$$\sigma_{dEl} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (dEl_i - \overline{dEl})^2} \quad (4.5)$$

である。これらについてそれぞれ二乗和を取ったものを指向誤差の平均値及び標準偏差とした。つまり

$$\text{平均値 } \overline{\Delta} = \sqrt{\overline{dX}^2 + \overline{dEl}^2}, \quad (4.6)$$

$$\text{標準偏差 } \sigma = \sqrt{\sigma_{dX}^2 + \sigma_{dEl}^2} \quad (4.7)$$

とする。平均値 $\overline{\Delta}$ は、横軸 dX 、縦軸 dEl で各測定データをプロットした際に現れる原点からの平均距離（データ点の重心と原点との距離）を表す。標準偏差 σ は平均値の周りでのデータの分布の広がりを示す。したがって $\overline{\Delta} + \sigma$ の広がりが小さくなることが求められる。指向精度の定量的評価にはこの値を用いた。

・器差パラメータの推定

測定時に適用していた器差パラメータ値を P_{t-1} とし、その測定結果から推定した器差パラメータ値の補正量を ΔP_{t-1} 、新たに適用すべき器差パラメータ値を P_t とするとその関係は、

$$P_t = P_{t-1} + \Delta P_{t-1}. \quad (4.8)$$

となる。実際には測定により求めた指向誤差量を、最小二乗法を用いて式 (3.7)、(3.8) でフィットすることで器差パラメータの補正量 ΔP_t を推定した。フィッティングには gnuplot を使用した。この際、フィッティングする式は dX 、 dEl の 2 式あるので、フィットする順番によって 2 通りのやり方がある。そのため 2 種類の器差パラメータ値が推定される。そこで、推定した 2 種類の器差パラメータ値を用いてそれぞれ指向誤差を計算し、測定値との残差を求めた。そして残差の指向誤差の平均値及び標準偏差を比較し、より正しく補正が出来ている方の器差パラメータ値を採用した。また、器差パラメータの $A3$ 、 $A4$ はどちらの式にも含まれているため、後のフィットでは初めのフィットで求めた $A3$ 、 $A4$ の値を定数として固定し、フィットの変数には含めなかった。

gnuplot による最小二乗フィットでは、フィットするデータに重みを与えることが出来る。2011 年 6 月の測定の解析まではこの重みとして、単にガウスフィットのエラーを用いていた。しかし、高仰角でのデータ数が少ないために、高仰角の指向誤差を正しくフィット出来ない事が問題となった。そこで 2011 年 7 月の測定の解析時から、仰角に対するデータ数の密度の逆数を重みとして加えてフィットを行う事とした。この方法の結果、高仰角においても正しくフィットを行えるようになった。

4.3 各測定結果

4.3.1 各測定の概要

各指向精度評価測定の概要を述べる。測定は 2010 年 11 月から 2011 年 12 月にまでの間に計 10 回行った。ここで各測定を以下のような名称で呼ぶ事にする。この名称を用いて、各測定時の器差パラメータ値を表 4.1 にまとめた。101104 は 1 回目の測定で、器差パラメータ値は全てゼロである。つまり補正がなされていない状態である。101229 は 101104 の測定結果から推定した器差パラメータ値を適用した。この測定後に東日本大震災が発生し、日立アンテナも地震に見舞われた。そのため 110601 では地震による指向誤差への影響を調べるため、器差パラ

名称	測定日程
101104 測定	2010 年 11 月 4、5、6 日
101229 測定	2010 年 12 月 29、30 日、2011 年 1 月 1 日
110601 測定	2011 年 6 月 1、2、3 日
110714 測定	2011 年 7 月 14、15、22 日
110819 測定	2011 年 8 月 19、21、25 日
110825 測定	2011 年 8 月 26 日
111013 測定	2011 年 10 月 13、14、16、17 日
111020 測定	2011 年 10 月 20 日
111207 測定	2011 年 12 月 7、8、9、22 日
111226 測定	2011 年 12 月 26、27 日

メータ値は変えずに測定した。指向誤差は平均値で約 $1'$ という値が測定され、指向精度が悪化した。110714 及び 110819 の測定は器差パラメータ値の適用方法を誤った。正しくは式 (4.8) における P_t の値を適用するが、誤って ΔP_{t-1} の値を適用してしまった。そのため 110714、110819 では正しい補正が行われなかった。この結果、110819 においても平均値で約 $1'$ の指向誤差が測定された。110825 ではこの誤りに気付かず、強引に指向誤差を補正するために器差パラメータの A_2 、 A_7 に $1'$ を加えた。このため 111013 で改めて測定をし直し、この結果から推定した器差パラメータ値を適用して 111020 の測定を行った。111207 及び 111226 は、受信機載せ替えによる指向誤差への影響を調べるために行った。

表 4.1: 各測定時の器差パラメータ値

測定	適用した器差パラメータ値
101104	P_0 : 全て 0
101229	P_1 : 101104 の測定結果から推定した値 ($P_0 + \Delta P_0$)
110601	同上
110714	P_2 : 110601 の測定結果から推定した補正量 (ΔP_1)
110819	P_3 : 110714 の測定結果から推定した補正量 (ΔP_2)
110826	P'_3 : P_3 の A_2 、 A_7 に $1'$ を加えた値
111013	同上
111020	P_4 : 111013 の測定結果から推定した値 ($P'_3 + \Delta P_3$)
111207	同上
111226	同上

4.3.2 2010 年 11 月と 2010 年 12 月の測定

2010 年 11 月に 1 回目の指向精度評価測定を行った。そしてこの測定の結果から推定した器差パラメータ値を適用した検証測定を 2010 年 12 月から 2011 年 1 月に掛けて行った。これらの測定の諸元を以下に示した。

・測定諸元

● 101104

－ 測定日時

JST 2011/11/04 11:10 - 17:12、11/05 9:20 - 19:43、11/06 20:37 - 24:13

－ 天候、気温、 τ 、 T_{sys}^* ：

11/04 9:00 曇り、10.8 、0.010、21 K

11/05 9:00 晴れ、15.3 、0.009、22 K

11/06 20:00 晴れ、14.3 、0.010、21 K

－ 観測天体

3C273B、3C286、3C345、3C371、3C454.3、3C48、3C84、4C39.25、NRAO530、OV236、2021+614、1803+784

● 101229

－ 測定日時

JST 2010/12/29 10:20 - 21:13、12/30 9:20 - 14:18、2011/01/01 8:10 - 10:48

－ 天候、気温、 τ 、 T_{sys}^* ：

12/29 9:07 晴れ、9.1 、0.009、21 K

12/30 8:51 晴れ、2.7 、0.011、21 K

1/06 8:10 晴れ (雲多め)、5.3 、0.009、21 K

－ 観測天体

3C273B、3C286、3C345、3C371、3C454.3、3C48、3C84、4C39.25、NRAO530、OV236、2021+614、1803+784

ガウスフィットの結果、指向精度の評価に用いる事ができた有効な十字スキャンセット数は 101104 及び 101229 でそれぞれ 66、54 セットであった。各セットの観測方向を横軸 Az 、縦軸 El でプロットした図を以下に示した。図 4.3 及びその他の測定において、 $EL > 82^\circ$ の観測点で追尾遅れがあるが、以下の 2 つの条件を満たすものは有効なデータとして用いた。OFF 点の追尾遅れがあるが、天体から十分に離れており OFF 点と見なせる。OFF 点から ON 点への移動の際に追尾遅れがあるが、そのデータでも目で見て正しくガウスフィットができる。

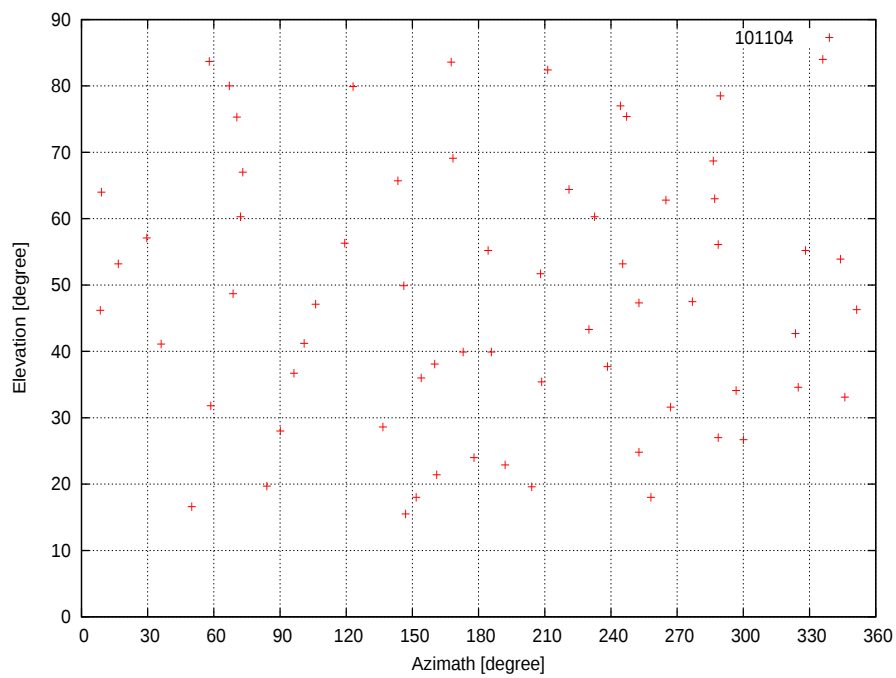


図 4.3: 101104 観測方向プロット

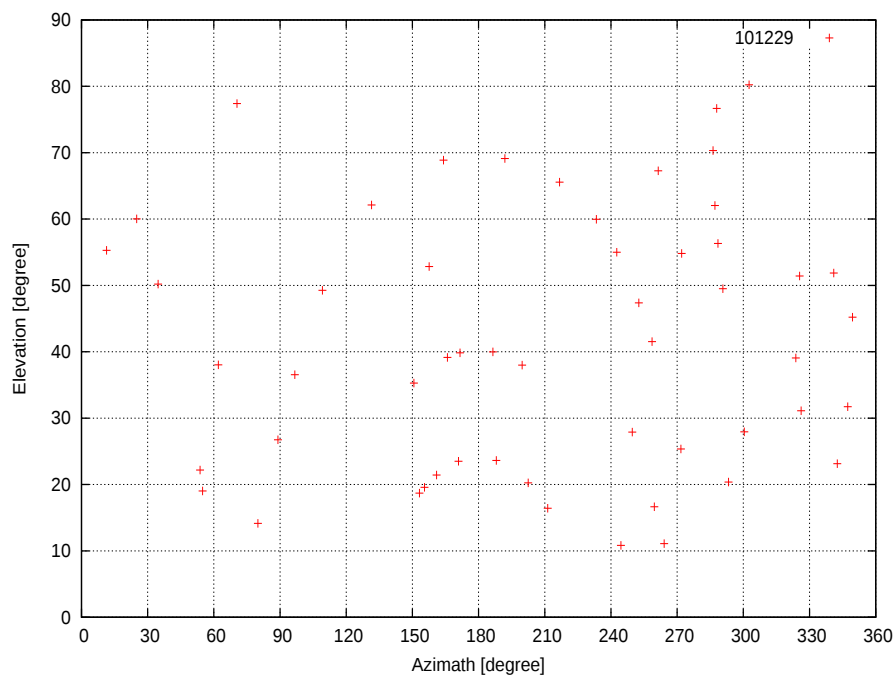


図 4.4: 101229 観測方向プロット

測定した指向誤差の解析の結果、101104 の指向精度は指向誤差の平均値で $0.47'$ 、標準偏差で $1.0'$ という値が得られた (表 4.3)。この指向誤差をモデル式でフィットして器差パラメータの補正量を推定した。採用した器差パラメータ値を以下に示した。この値をモデル式に代入して指向誤差の補正量及び残差を計算した。その結果、残

表 4.2: 101104 の結果から推定した器差パラメータ値

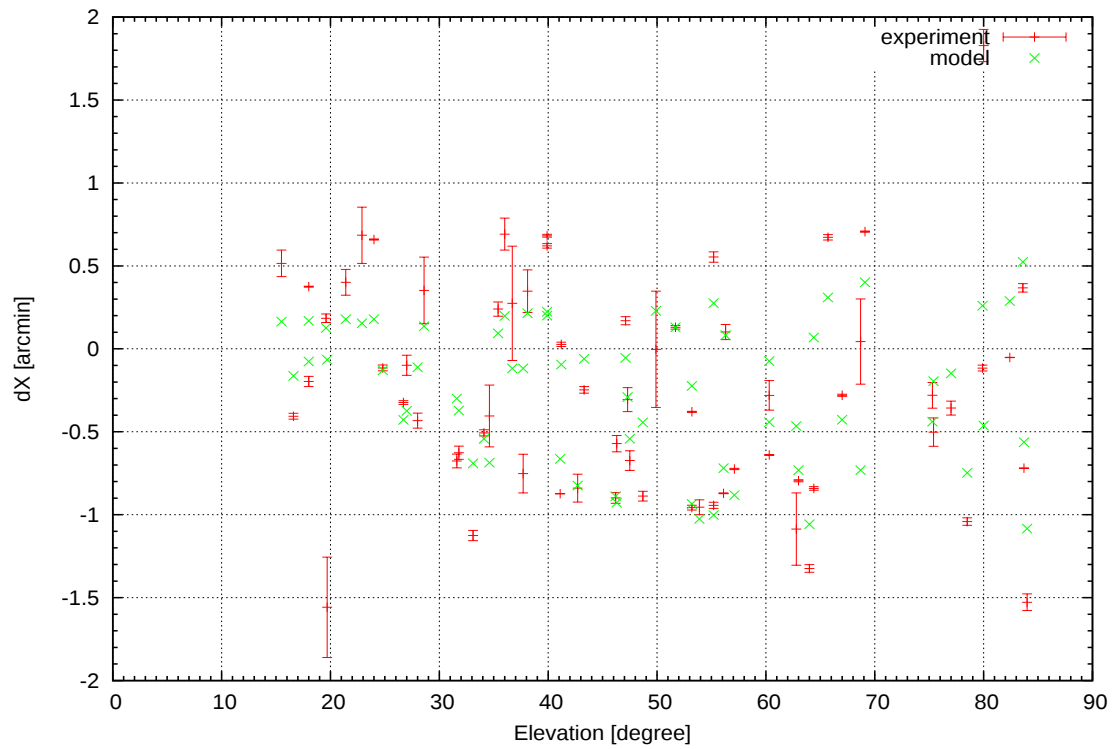
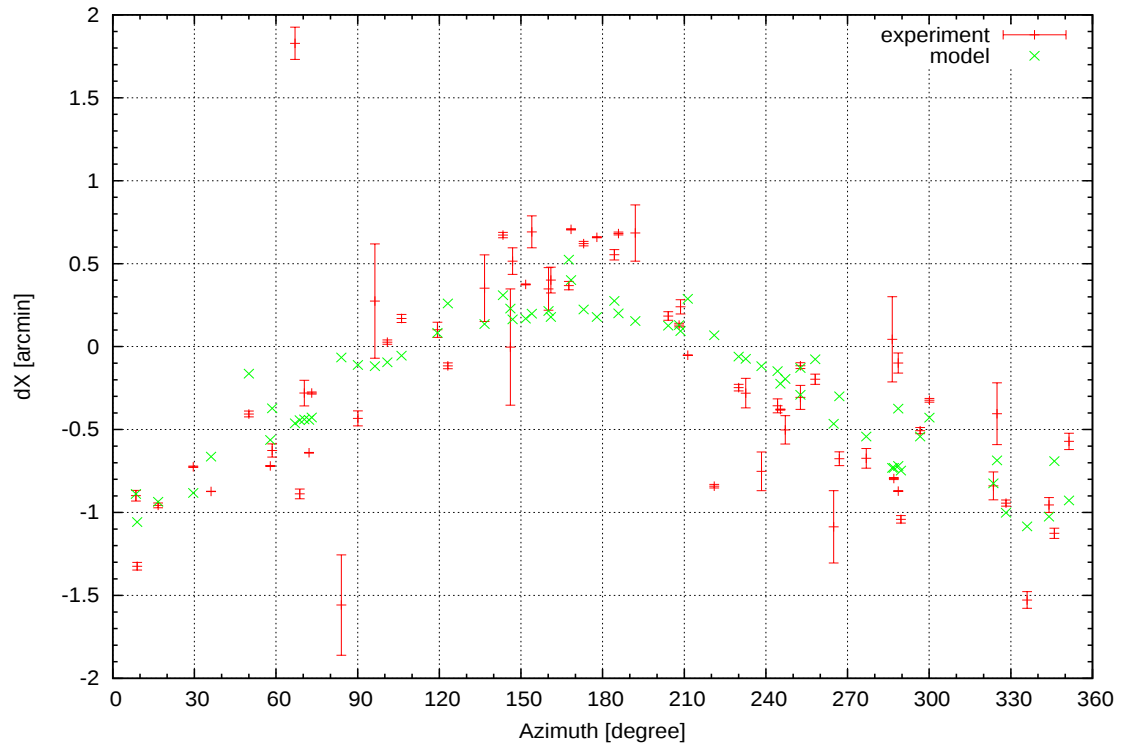
器差パラメータ	101104 測定時の値 (P_0)	補正量 (ΔP_0)	101229 で適用した値 (P_1)
A1	0	- 0.536877	- 0.536877
A2	0	- 0.761366	- 0.761366
A3	0	- 0.799243	- 0.799243
A4	0	- 0.175533	- 0.175533
A5	0	- 0.972704	- 0.972704
A6	0	0.243596	0.243596
A7	0	0.737118	0.737118
A8	0	0.384624	0.384624

単位 : [arcmin]

差は指向誤差の平均値及び標準偏差で $0.0021'$ 、 $0.72'$ という値が得られた。実際に 101229 の測定結果では指向誤差の平均値及び標準偏差で $0.28'$ 、 $0.56'$ という結果となった。平均値は計算値程ではないが、約 $0.2'$ の改善が見られた。標準偏差は大幅に改善し、約 $0.4'$ 縮小した。計算値と実測値の間で差があるが、2 つの測定で観測方向が同一ではない事や非再現性誤差、測定誤差など、測定状況が異なる事がその原因だと思われる。101104 の指向誤差の実測値と補正量及び残差のプロットは図 4.5 及び図 4.6 に、101229 の指向誤差の実測値のプロットは図 4.7 に示した。

表 4.3: 101104 と 101229 の指向精度測定結果

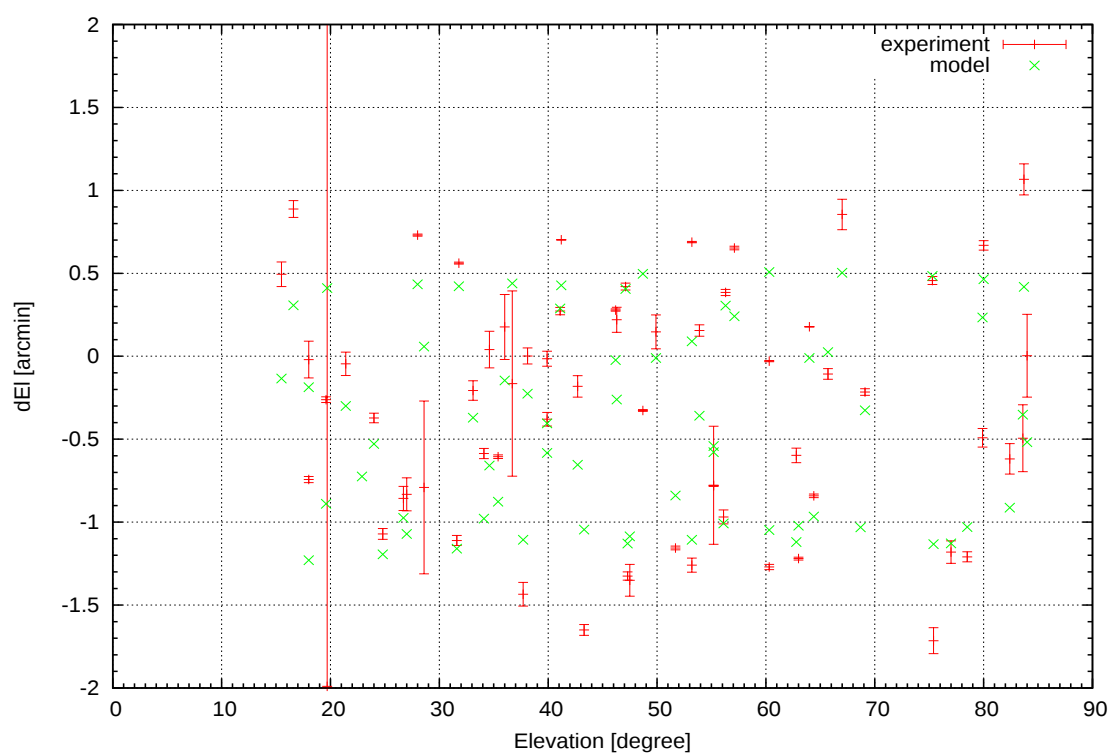
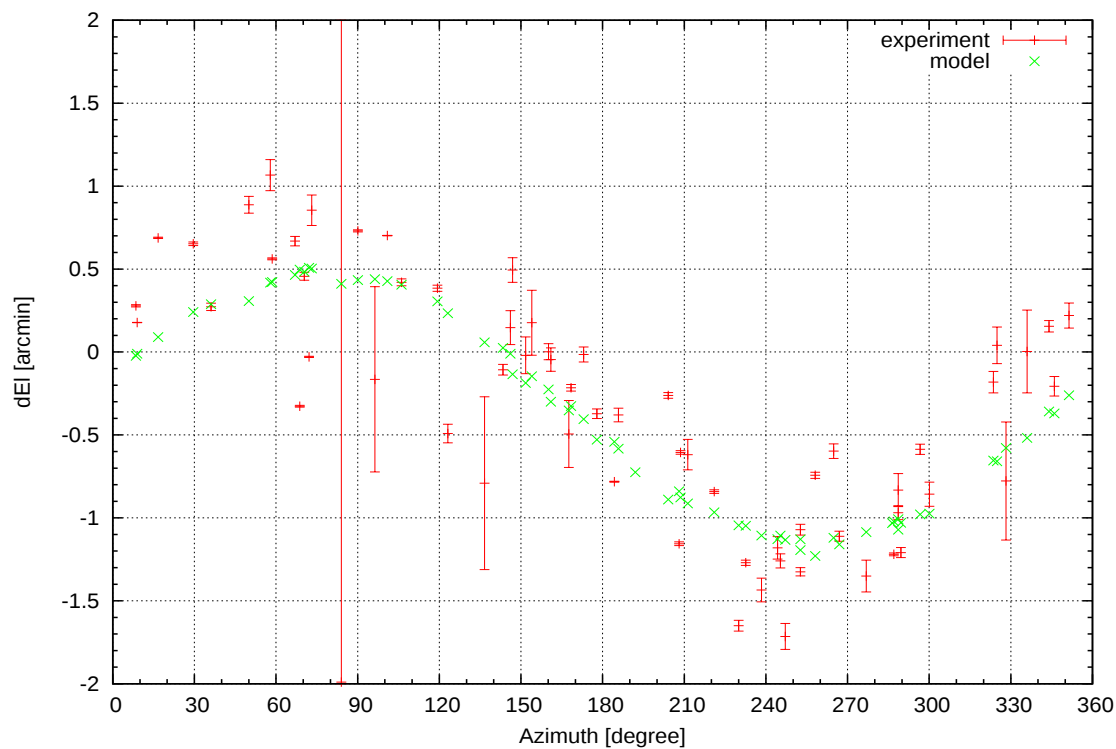
単位 : [arcmin]		101104	補正量	残差	101229
dX	平均値 $\overline{dX}$	-0.25	-0.25	0.0021	0.12
	標準偏差 σ_{dX}	0.65	0.43	0.46	0.39
dEl	平均値 $\overline{dEl}$	-0.39	-0.39	1.2×10^{-7}	0.26
	標準偏差 σ_{dEl}	0.81	0.59	0.56	0.41
指向誤差	平均値 $\overline{\Delta}$	0.47	0.47	0.0021	0.28
	標準偏差 σ	1.0	0.73	0.72	0.56
指向精度 $\overline{\Delta} + \sigma$		1.5	1.2	0.72	0.84



(a)

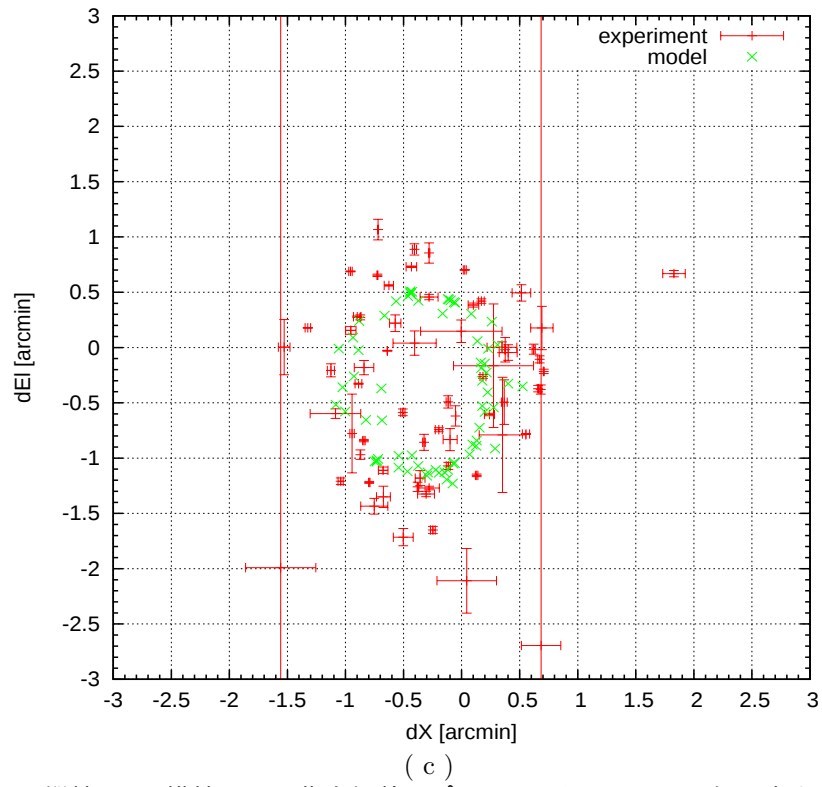
Azimuth 方向の指向誤差をプロットした図である。上図が横軸 *Azimuth*、下図が横軸 *Elevation* である。赤が実測値で、緑が推定した器差パラメータ値を用いて計算した補正量。

図 4.5: 101104 実測値と補正量の比較

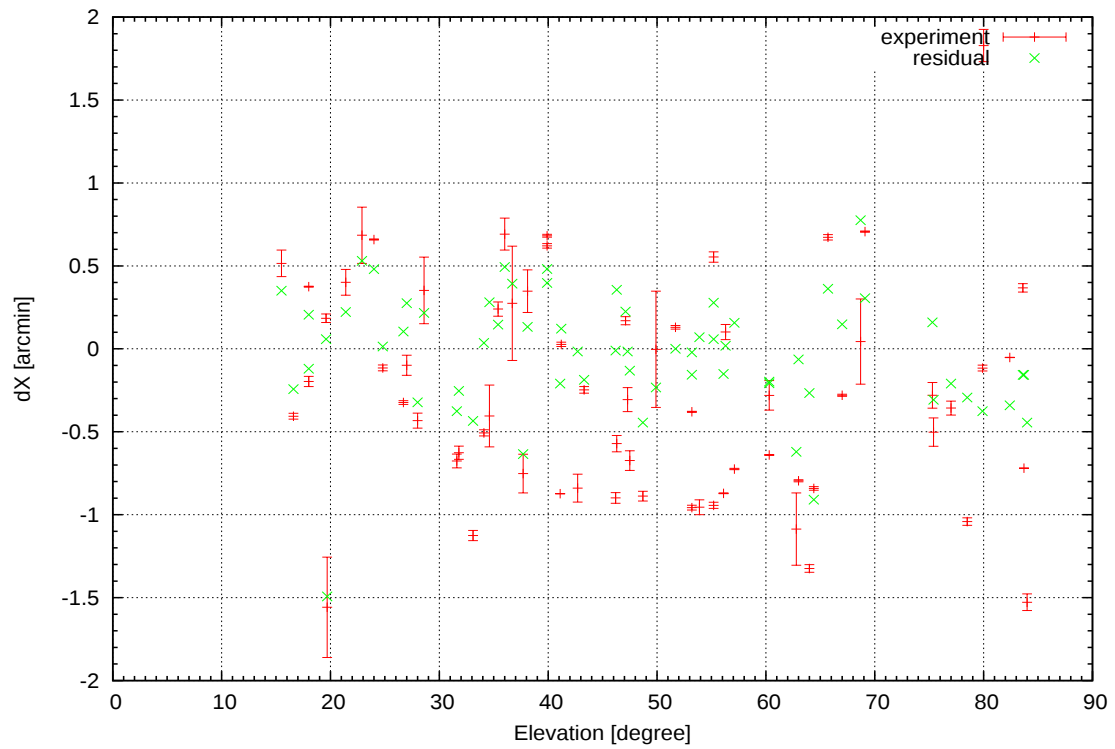
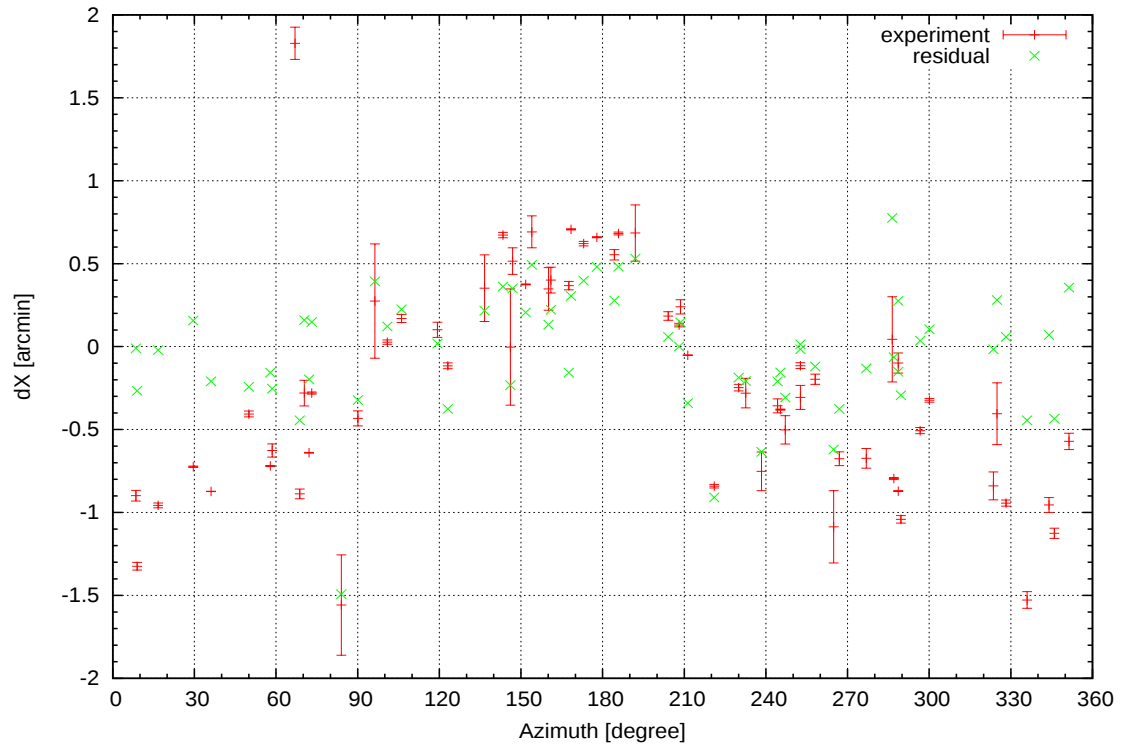


(b)

Elevation 方向の指向誤差をプロットした図である。上図が横軸 *Azimuth*、下図が横軸 *Elevation* である。



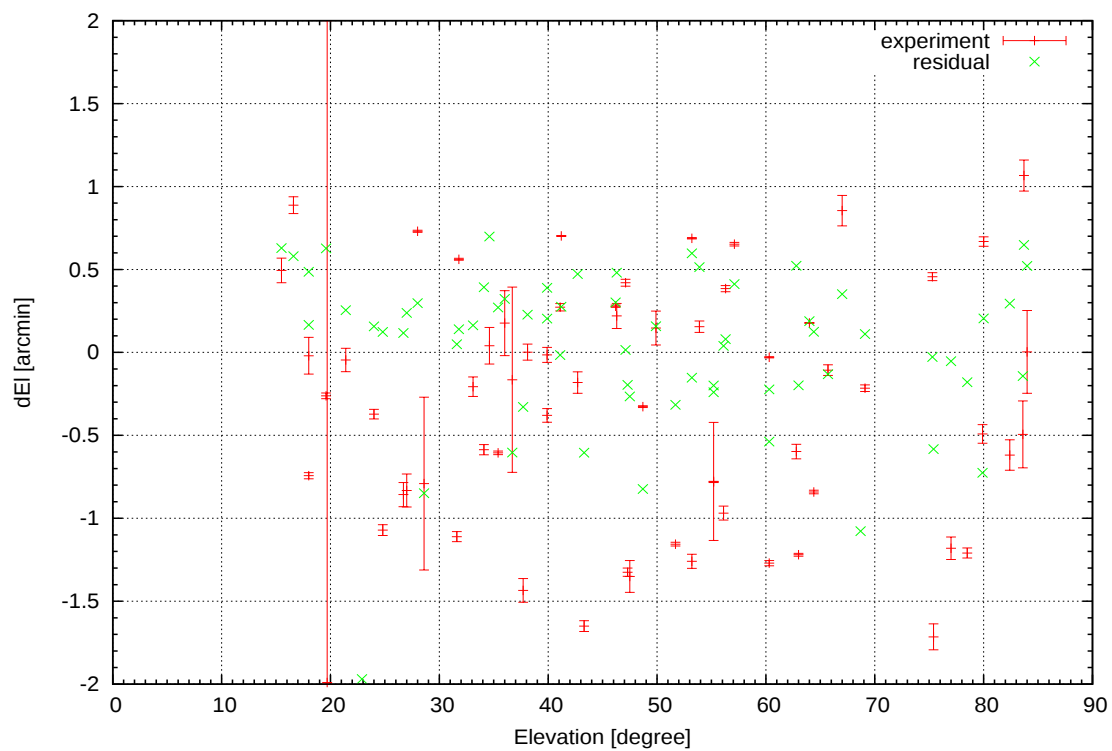
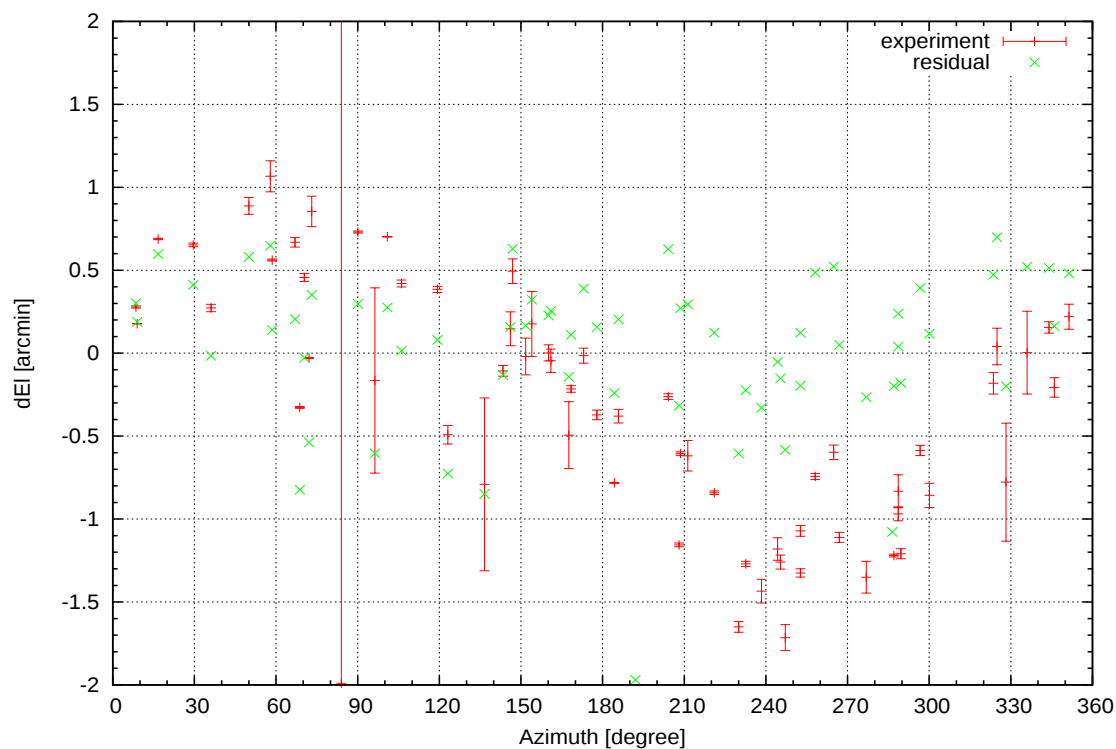
縦軸 dX 、横軸 dEl で指向誤差をプロットした図である。緑で表された補正量が赤の実測値を再現している事が分かる。



(a)

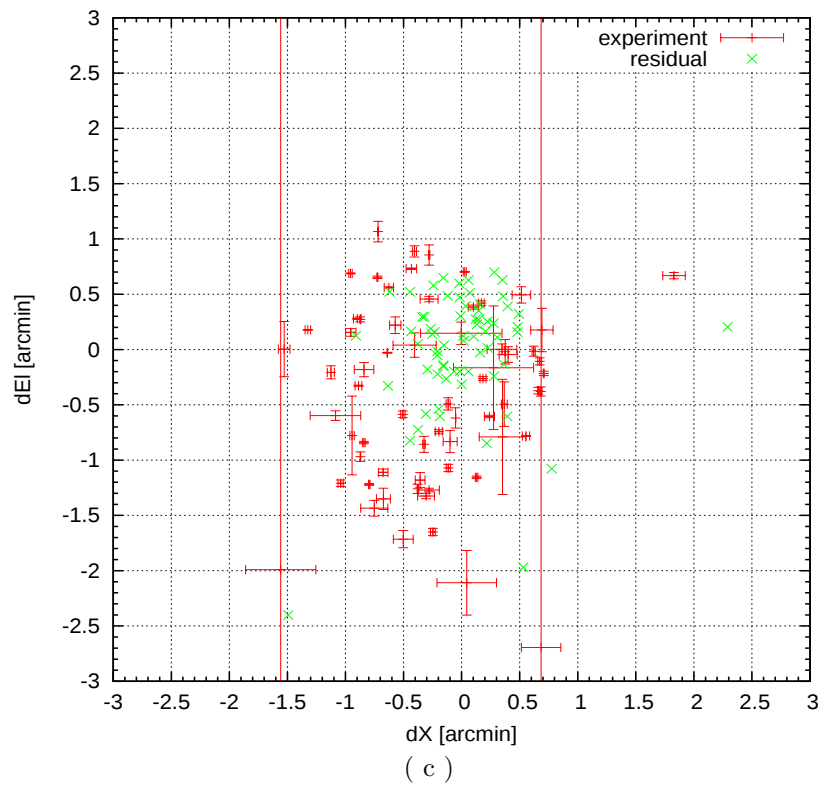
軸は図 4.5 (a) と同じである。赤が実測値、緑が器差パラメータ値を用いて計算した補正量を実測値から引いた残差を表す。縦軸の 0 の付近に残差が集中している事から補正が出来ている事が分かる。

図 4.6: 101104 実測値と残差の比較

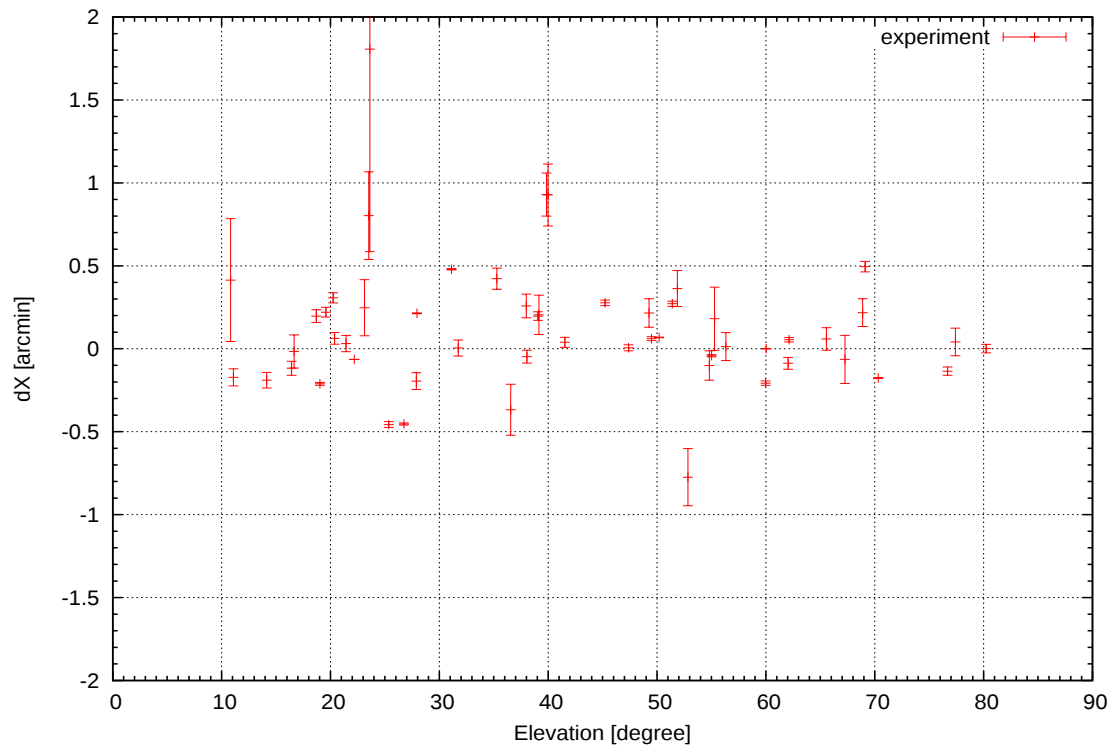
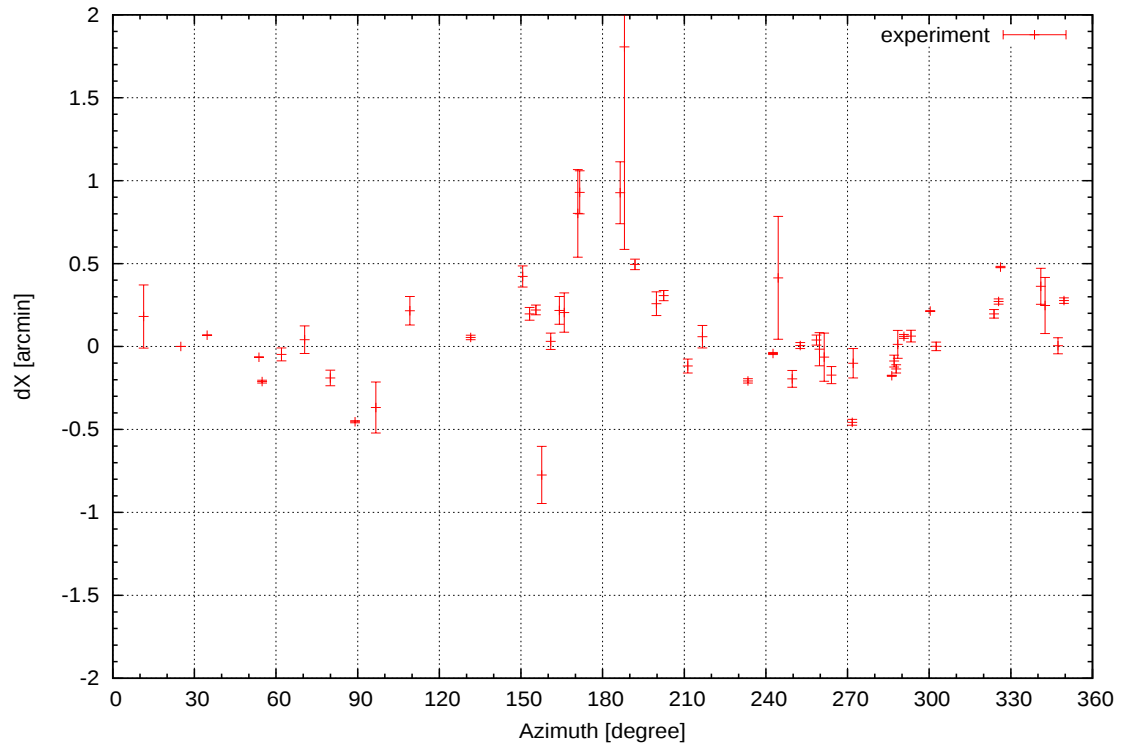


(b)

軸は図 4.5 (b) と同じである。



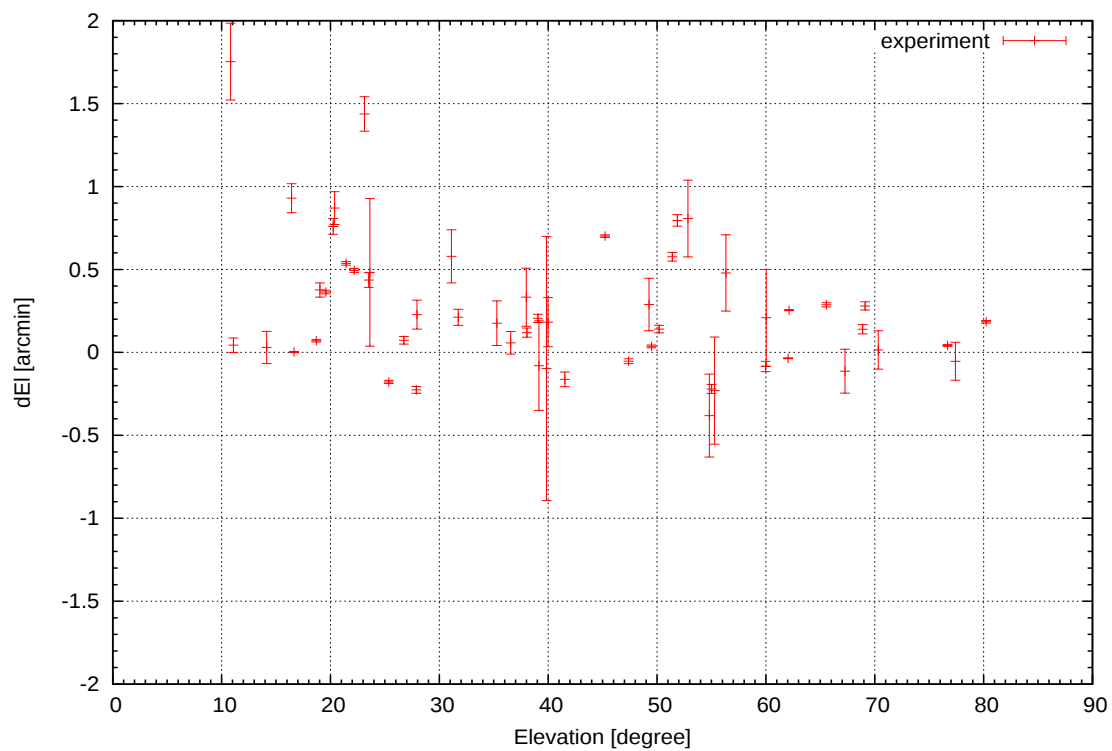
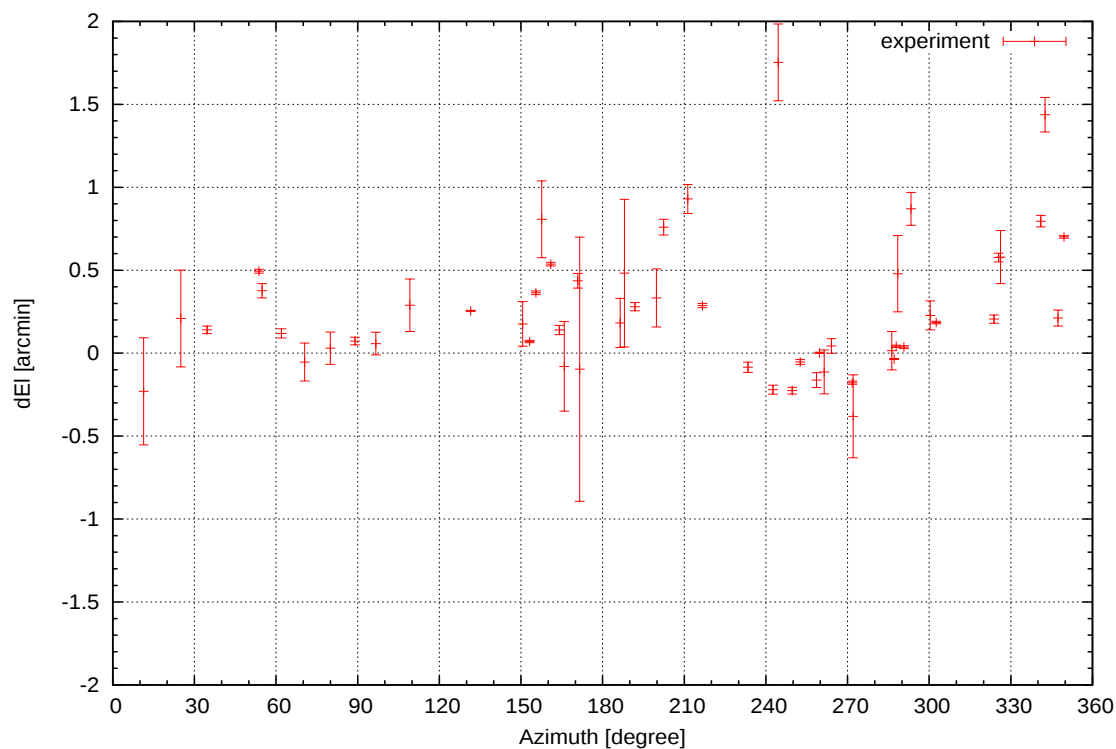
軸は図 4.5 (c) と同じである。緑で表された残差が赤の実測値に比べ、原点に集中している事が分かる。



(a)

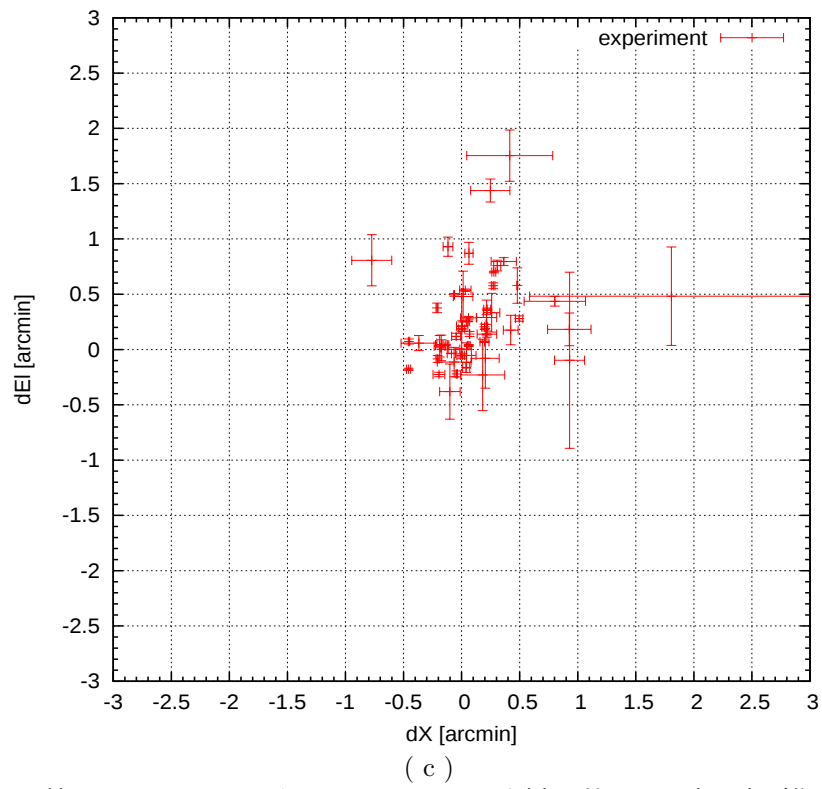
軸は図 4.5 と同じである。101229 の実測値をプロットした図である。
101104 の実測値に比べ、指向誤差が小さくなっている。

図 4.7: 101229 の指向誤差の実測値



(b)

軸は図 4.5 (b) と同じである。



軸は図 4.5 (c) と同じである。101104 の測定に比べて原点に点が集中し、指向誤差が小さくなっていることが分かる。

4.3.3 2011 年 6 月の測定

101229 測定の結果から、1 回目の指向誤差の補正は正しく行われた事が分かった。しかしその後の 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により、茨城 32 m 電波望遠鏡のある高萩市・日立市においても震度 6 弱及び 6 強の地震に見舞われた。これにより日立アンテナも被害を受けたため、指向精度への影響を調査するための測定を行った。測定の諸元を以下に示した。

・測定諸元

• 測定日時

JST 2012/06/01 15:35 - 06/02 5:48、06/02 18:30 - 06/03 15:41、06/04 9:28 - 15:41

• 天候、気温、 τ 、 T_{sys}^* :

06/01 14:55 曇り、13.6 、0.009、23 K

06/02 6:10 曇り、13.0 、0.019、24 K

06/02 18:00 雨、15.4 、0.016、28 K

06/03 17:40 晴れ、21.9 、0.010、23 K

• 観測天体

3C273B、3C286、3C454.3、4C39.25、NRAO530、OV236、2021+614、1803+784

解析の結果、ガウスフィットが出来た有効な十字スキンのセット数は 102 点であった。観測方向のプロットを図 4.8 に示した。

指向誤差の平均値及び標準偏差は、表 4.4 に示したように $1.4'$ 及び $0.73'$ となった。実測値を 101229 の結果と比較してプロットしたものが図 4.9 であるが、101229 の結果と比べると指向誤差の平均値で約 $1'$ のずれが見られた。この測定結果をモデル式でフィットし、器差パラメータを推定した。この値から計算した補正量は表 4.4 に示した。図 4.10 から分かるようにフィットがあまり正しく出来ていないため、各パラメータ値の変化が実際の器差の変化と対応しているとは言い難い。(ここでフィット結果がよくないのは §4.2.2 で述べたように、仰角に対するデータ数密度の重み付けをまだ行っていないからである。) しかし器差パラメータの補正によって、少なくとも平均的な指向誤差のずれは再現していることから、表 4.5 で示したように器差パラメータ値の変化は、実際に器差が変化したことを反映していると考えられる。§5.2 や §5.1 で述べるように受信機の載せ替えや時間変動による影響では、約 $1'$ もの指向誤差の変化が起きることは考えにくい。したがってこの器差の変化は地震による影響と考えられる。

表 4.4: 101229 と 110601 の指向精度の比較

単位 : [arcmin]		101229	110601	補正量
dX	平均値 $\overline{dX}$	0.12	1.1	1.3
	標準偏差 σ_{dX}	0.39	0.46	0.15
dEl	平均値 $\overline{dEl}$	0.26	0.86	0.86
	標準偏差 σ_{dEl}	0.41	0.56	0.48
指向誤差	平均値 $\overline{\Delta}$	0.28	1.4	1.6
	標準偏差 σ	0.56	0.73	0.51
指向精度 $\overline{\Delta} + \sigma$		0.84	2.1	2.1

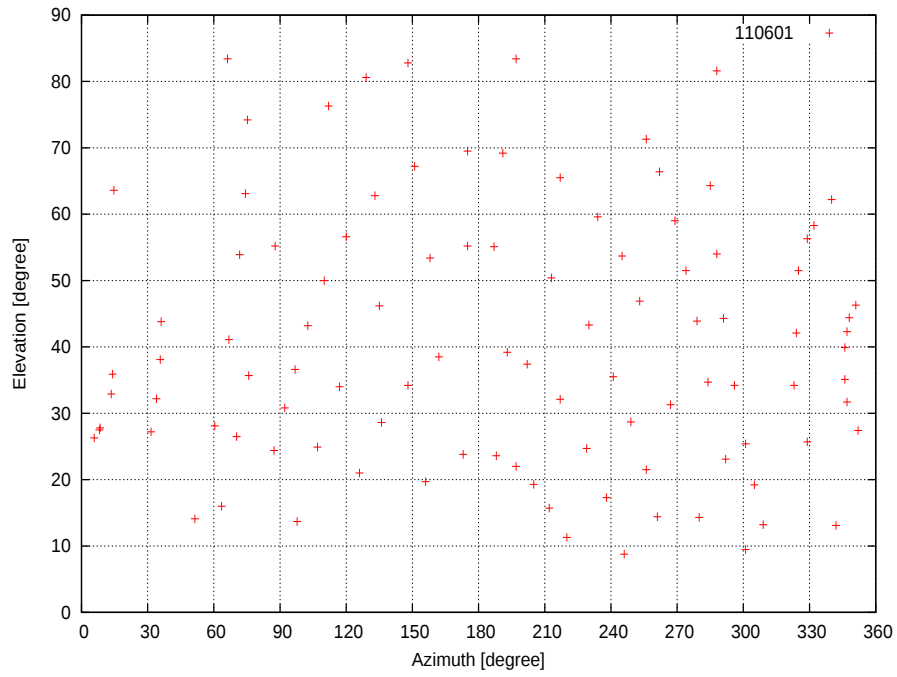
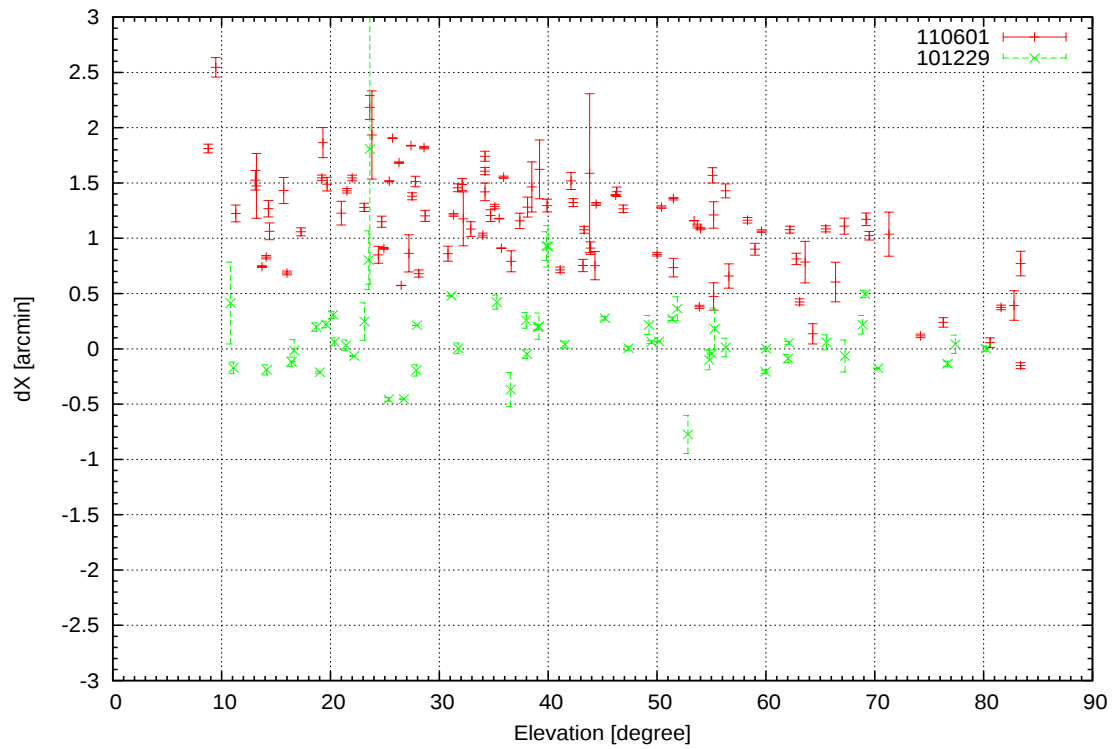
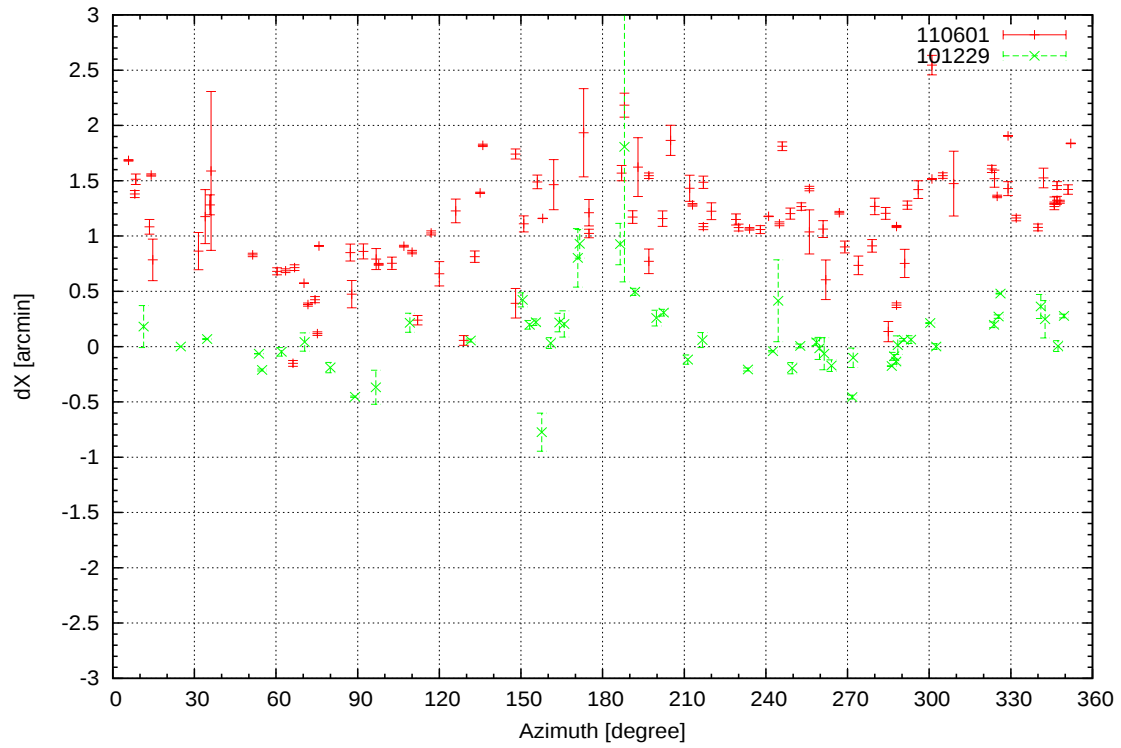


図 4.8: 110601 観測方向プロット

表 4.5: 101229 と 110601 での器差パラメータ値の変化

器差パラメータ	110601 測定時の値 (P_1)	補正量 (ΔP_2)	新たに適用すべき値
A1	- 0.536877	- 1.8994	- 2.436277
A2	- 0.761366	8.31093	7.549564
A3	- 0.799243	0.0890082	- 0.7102348
A4	- 0.175533	0.0633225	- 0.112348
A5	- 0.972704	-1.84216	- 2.814864
A6	0.243596	-5.74473	- 5.501534
A7	0.737118	3.79796	4.535078
A8	0.384624	-5.42047	- 5.035846

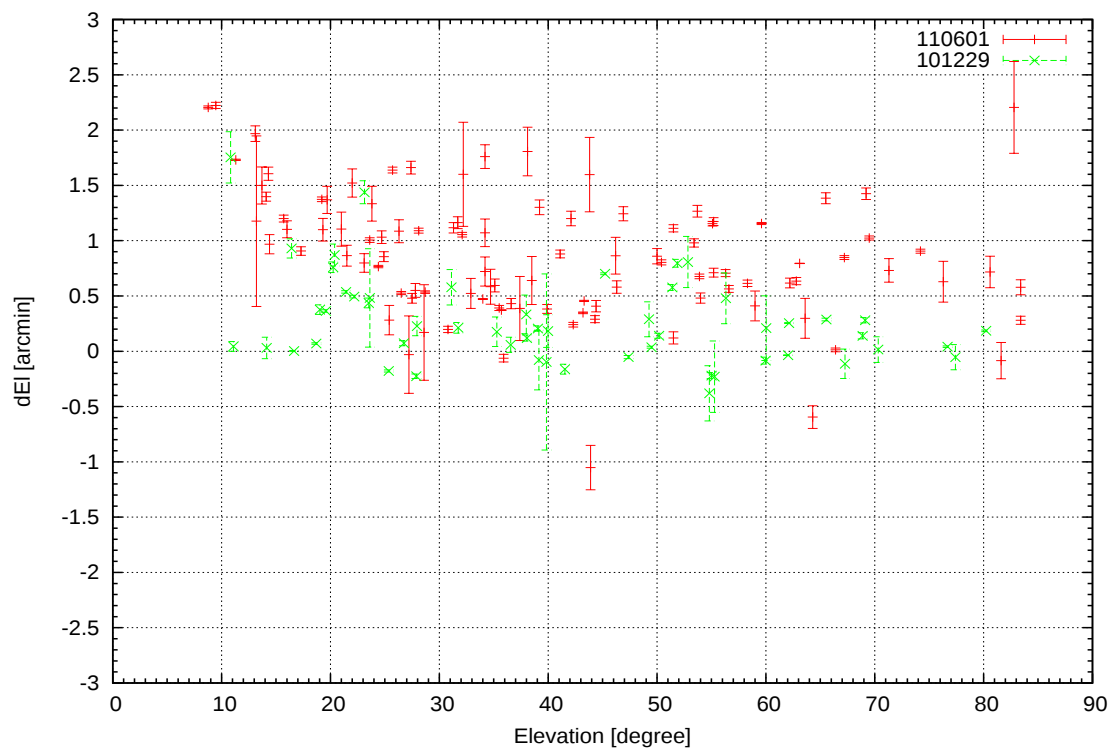
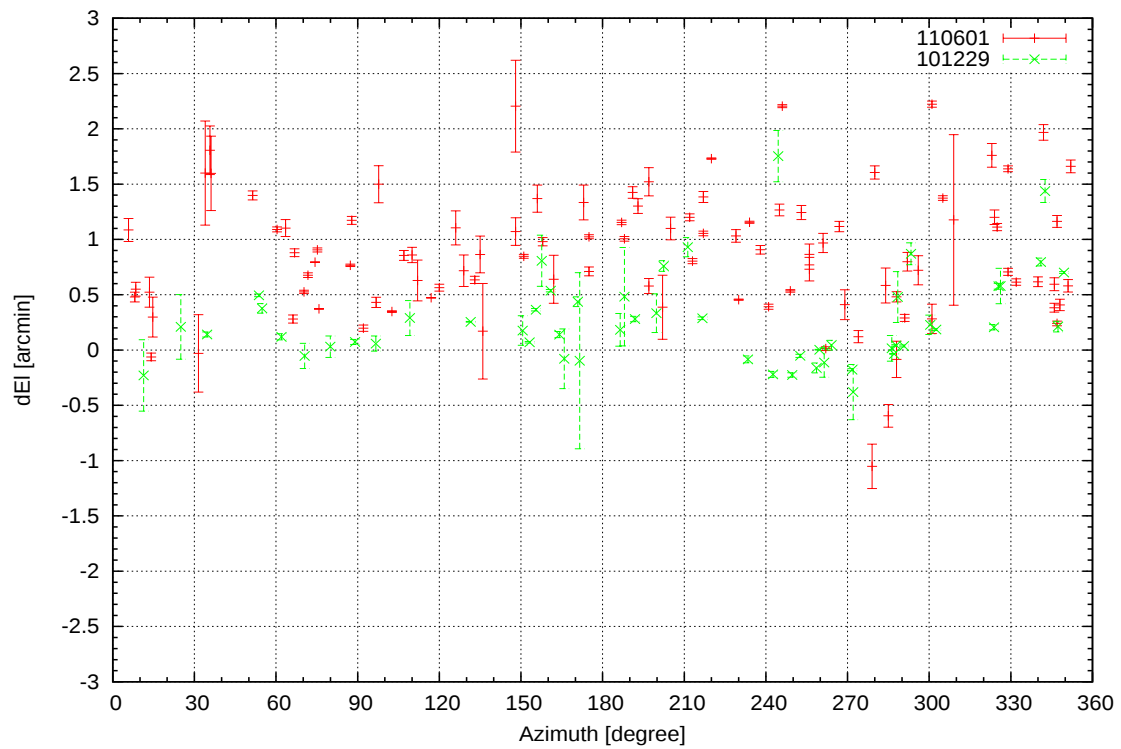
単位 : [arcmin]



(a)

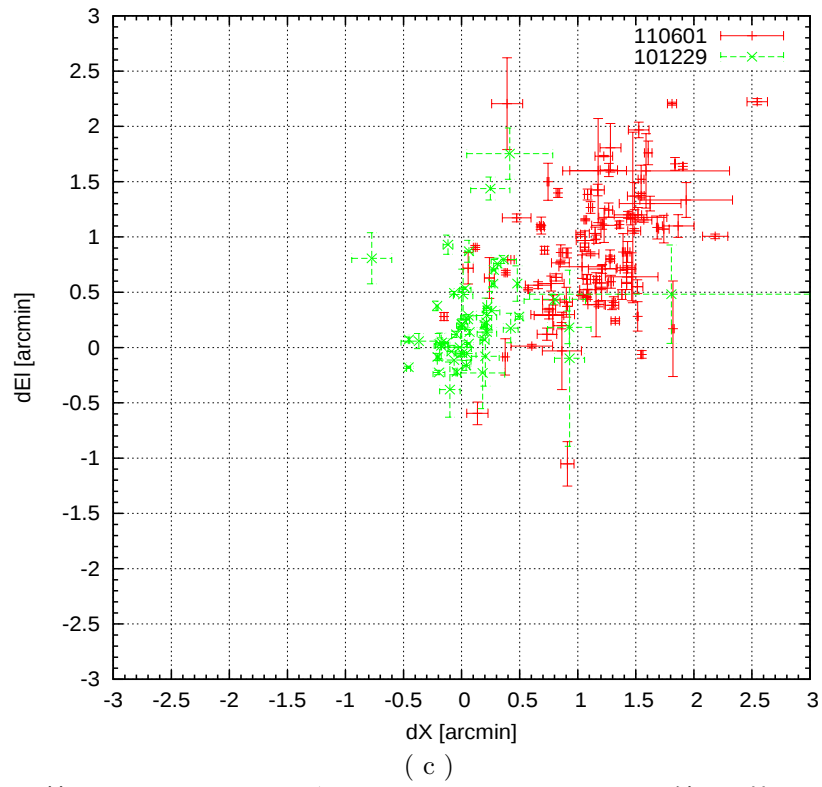
軸は図 4.5 の (a) と同じである。赤が 110601、緑が 101229 の指向誤差の実測値である。101229 に比べ、 dX が $+1'$ 程度変動した事が分かる。

図 4.9: 101229 と 110601 の指向誤差の実測値の比較

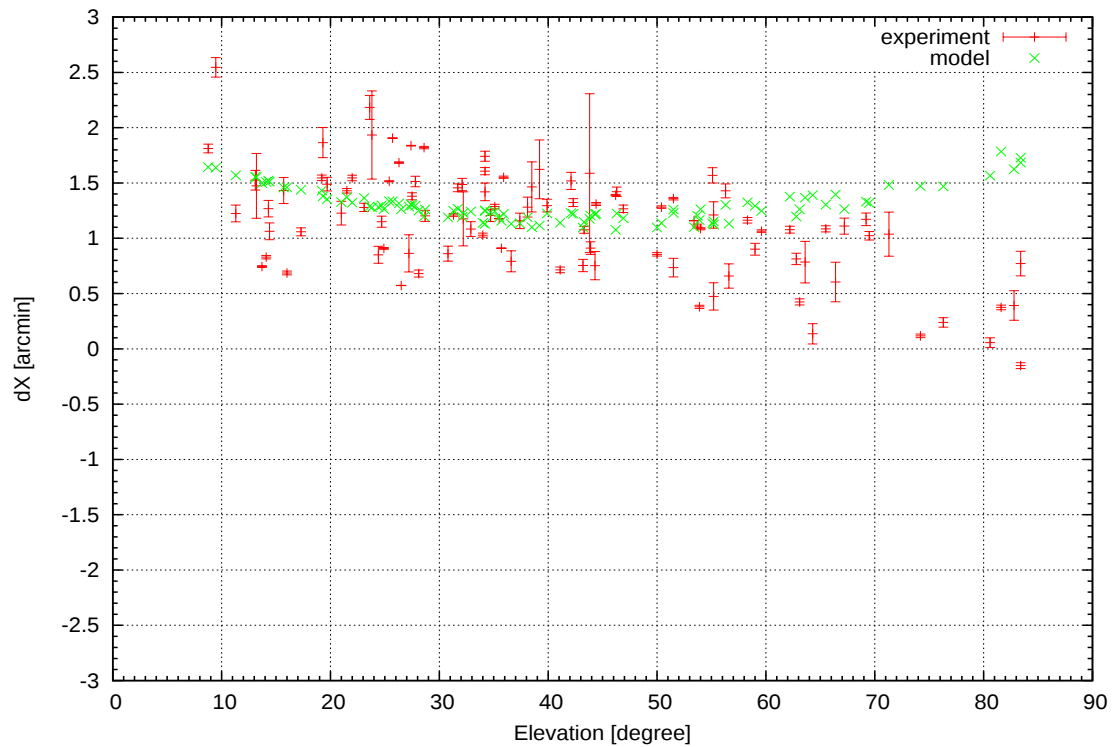
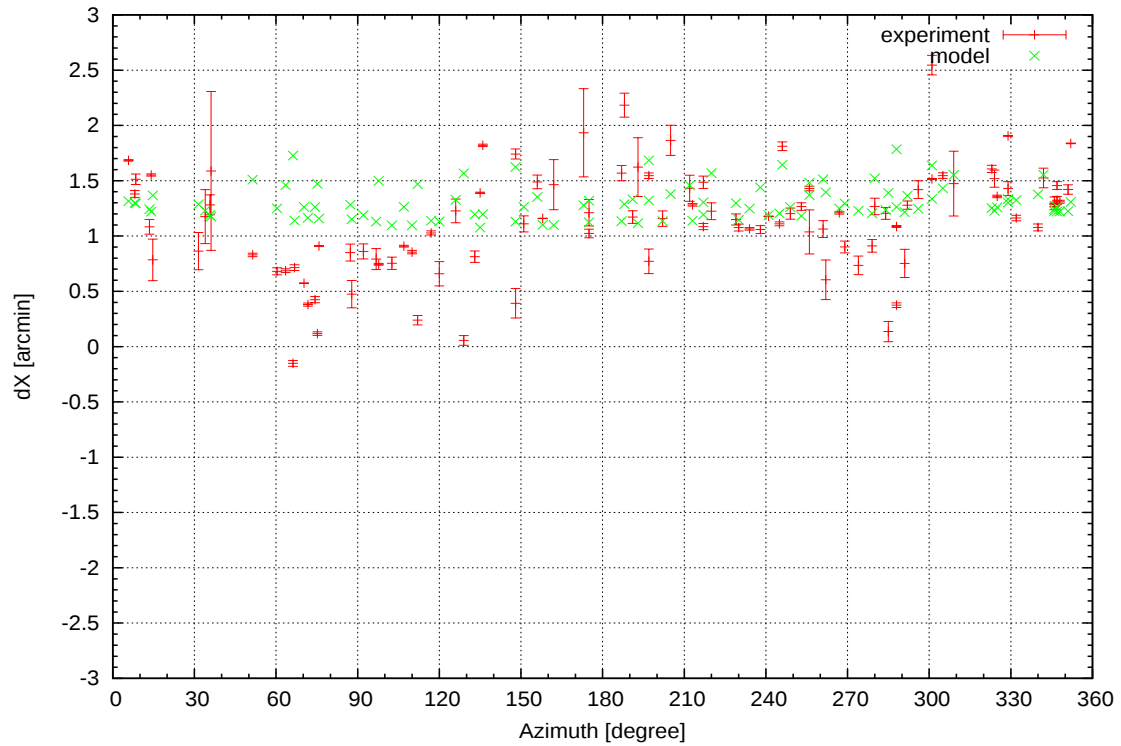


(b)

軸は図 4.5 の (b) と同じである。101229 に比べ、 dEl も $+0.5'$ 程度変動した事が分かる。



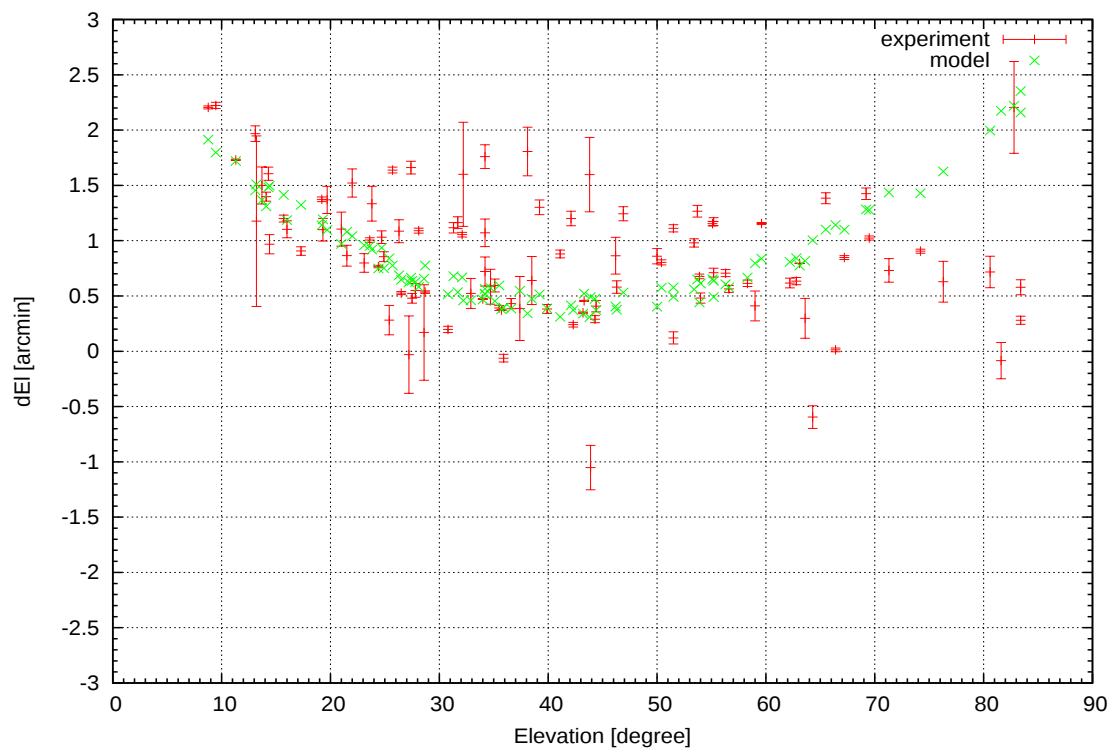
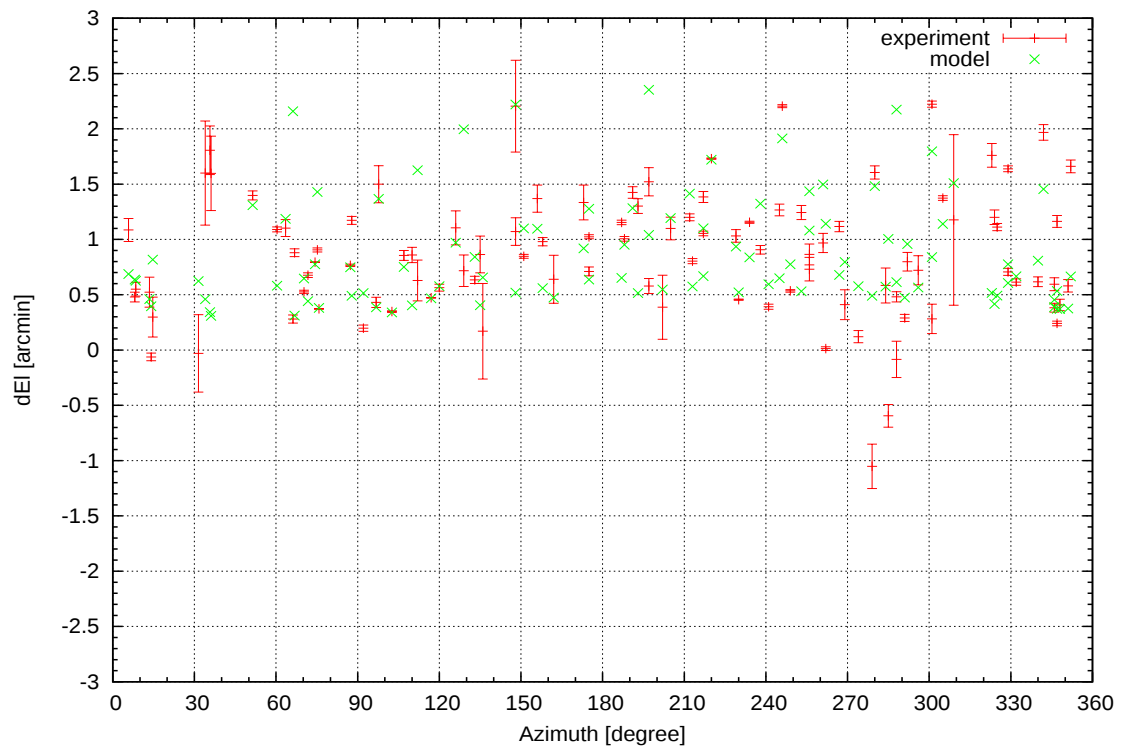
軸は図 4.5 の (c) と同じである。110601 は 101229 の結果に比べ、指向誤差の平均値が大きくずれた事が分かる。



(a)

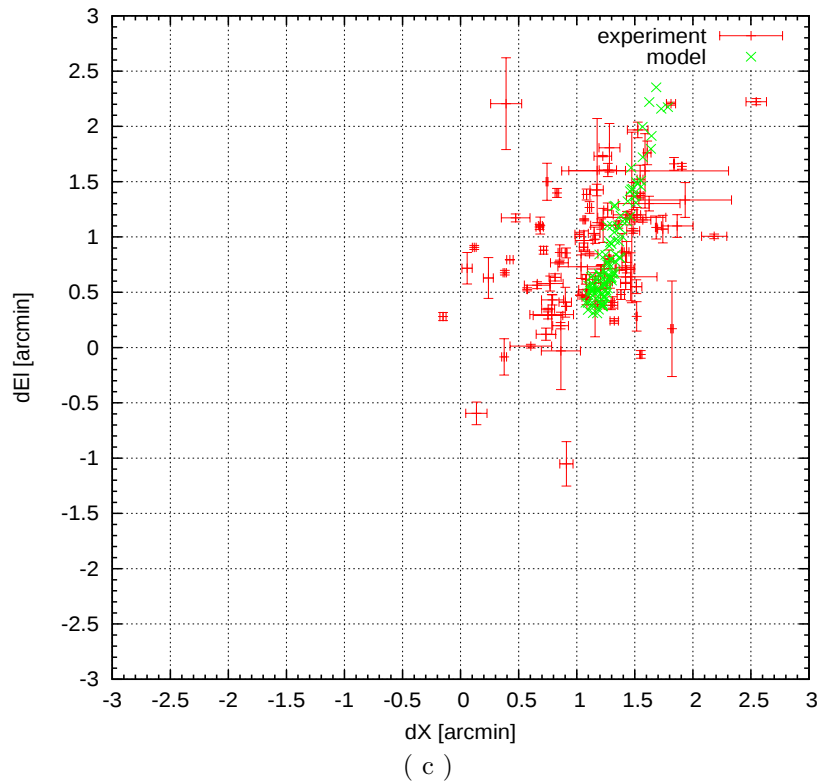
軸は図 4.5 の (a) と同じである。赤が指向誤差の実測値、緑が補正量である。 El が高い所で補正が出来ていないが、平均的な指向誤差のずれは捉えている。

図 4.10: 110601 の指向誤差の実測値と補正量の比較



(b)

軸は図 4.5 の (b) と同じである。赤が指向誤差の実測値、緑が補正量である。 El 方向の指向誤差も El が高い所で補正が出来ていない。



軸は図 4.5 の (c) と同じである。平均値は補正できているが、ばらつきはあまり補正できていない事が分かる。

4.3.4 2011 年 7 月と 8 月の測定

110601 測定結果から新たに適用すべき器差パラメータ値を推定した (表 4.5)。しかし 110714 の測定では、 $P_1 + \Delta P_1$ を適用すべき所を、誤って ΔP_1 を新たな器差パラメータ値 P_2 として適用してしまったため、正しい補正が行われなかった。更に 110714 測定結果から、器差パラメータの補正量 ΔP_2 を推定したが、次の 110819 測定においても同じ誤り犯してしまったため、指向誤差の補正が正しく出来なかった。したがってこれら 110714、110819 測定の結果にはあまり触れずに、ここでは次の 10 月の測定に関連する 110826 測定に関して説明する。

図 4.11 より 110819 測定の結果では指向誤差の平均値で約 $1'$ の指向ずれが存在した。この時点では器差パラメータ値の適用方法の誤りに気付いていなかったため、方位角・仰角に依存しない器差パラメータの項である A2、A7 に $+1'$ を加える事でその補正を試みた。つまり表 4.6 のように器差パラメータ値を変更した。器差パラメータ

表 4.6: 110819 と 110826 での器差パラメータ値の変更

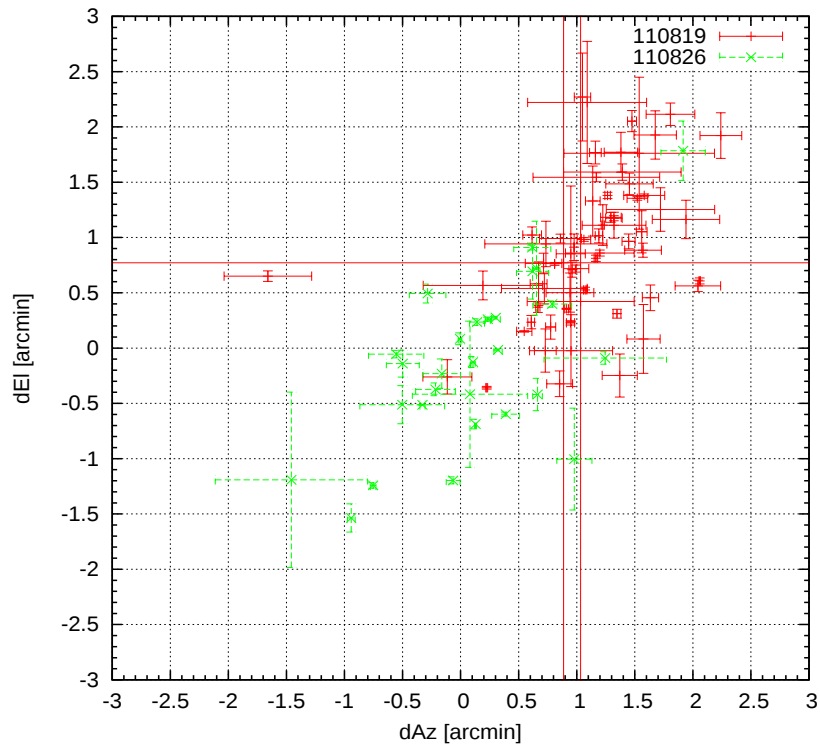
器差パラメータ	110819 測定時の値 (P_3)	110826 測定時の値 (P'_3)
A1	3.77858	3.77858
A2	- 4.2011	- 3.2011
A3	- 1.1549	- 1.1549
A4	0.0950805	0.0950805
A5	1.91758	1.91758
A6	3.5672	3.5672
A7	- 4.28645	- 3.28645
A8	1.9898	1.9898

単位 : [arcmin]

値の変更の結果、約 $1'$ の大きな指向ずれは補正できたことが図 4.11 から分かる。また表 4.7 で 7 月、8 月測定結果の指向精度を比較した。

表 4.7: 7 月と 8 月の指向精度測定結果

単位 : [arcmin]		110714	110819	110826
dX	平均値 $\overline{dX}$	- 0.42	1.1	0.11
	標準偏差 σ_{dX}	0.70	0.57	0.61
dEl	平均値 $\overline{dEl}$	- 0.52	0.89	- 0.13
	標準偏差 σ_{dEl}	0.92	0.65	0.67
指向誤差	平均値 $\overline{\Delta}$	0.67	1.42	0.17
	標準偏差 σ	1.2	0.86	0.91
指向精度 $\overline{\Delta} + \sigma$		1.9	2.3	1.1



縦軸 dEl 、横軸 dX で指向誤差をプロットした図である。赤が 110819 の、緑が 110826 の実測値である。方位角・仰角方向に $+1'$ の補正を入れたことで、指向誤差の平均値が 0 に近づいた事が分かる。

図 4.11: $+1'$ の補正を加えたことによる 110819 と 110826 の指向誤差の実測値の変化

4.3.5 2011 年 10 月の測定

7 月、8 月の指向精度測定では、誤った器差パラメータ値を用いていたため、指向誤差が正しく補正出来ていなかった。そこで 10 月に改めて測定を行った。まず初めの 111013 測定は、110826 測定と同じ器差パラメータ値で行い、指向誤差を求めた。その後、この測定の結果から推定した器差パラメータ値を適用し、111020 測定でその値の検証を行った。これらの測定の諸元を以下に示した。

・測定諸元

● 111013

－ 測定日時

JST 2012/10/13 18:30 - 10/14 6:06、10/16 17:00 - 10/18 6:06

－ 天候、気温、 τ 、 T_{sys}^* ：

10/13 18:00 薄曇り、18.7、0.016、28 K

10/14 6:25 曇り、15.4、0.012、28 K

10/16 17:40 晴れ、21.5、0.010、28 K

10/17 6:10 晴れ、17.1、0.011、28 K

－ 観測天体

3C84、3C454.3、0212+735、0836+710、0234+285、0003-066、2345-167

● 111020

－ 測定日時

JST 2012/10/20 17:00 - 10/21 6:04

－ 天候、気温、 τ 、 T_{sys}^* ：

10/20 16:20 曇り、18.0、0.010、21 K

10/21 6:30 薄曇り、15.7、0.010、21 K

－ 観測天体

3C84、3C454.3、0212+735、0836+710、0234+285、0003-066、2345-167、2255-282

ガウスフィットを正しく行う事が出来た有効な十字スキャンセット数は、111013 が 101 セット、111020 が 59 セットであった。この観測方向のプロットを図 4.12 及び図 4.13 に示した。111013 の測定結果を用いて推定した器差パラメータ値を表 4.9 に示した。111013 の指向誤差の実測値は、平均値が 0.49'、標準偏差が 0.72' であった。これに対し、パラメータ値 P_4 を用いて計算した残差の平均値及び標準偏差は 0.069'、0.53' となり、このパラメータ値を適用した場合、指向精度が向上する事が予想された。そして実際に 111020 の結果では平均値が 0.070'、標準偏差が 0.59' と、111013 の残差とほぼ等しい値となり、指向精度の向上が確認された。111013 の指向誤差の実測値と補正量及び残差のプロットを図 4.14 及び図 4.15 に、111020 の実測値のプロットを図 4.16 に、またこれらの指向精度測定結果を表 4.8 にまとめた。

表 4.8: 10 月の指向精度測定結果

単位 : [arcmin]		111013	残差	111020
dX	平均値 $\overline{dX}$	0.13	- 0.045	- 0.0036
	標準偏差 σ_{dX}	0.41	0.42	0.44
dEl	平均値 $\overline{dEl}$	- 0.47	- 0.052	- 0.070
	標準偏差 σ_{dEl}	0.59	0.31	0.39
指向誤差	平均値 $\overline{\Delta}$	0.49	0.069	0.070
	標準偏差 σ	0.72	0.53	0.59
指向精度 $\overline{\Delta} + \sigma$		1.2	0.60	0.66

表 4.9: 111013 の結果から推定した器差パラメータ値

器差パラメータ	111013 測定時の値 (P'_3)	補正量 (ΔP_4)	111020 で適用した値 (P_4)
A1	3.77858	- 2.934747964	0.843832036
A2	- 3.2011	4.886847108	1.685747108
A3	- 1.1549	0.417445824	- 0.737454176
A4	0.0950805	0.214215898	0.309296398
A5	1.91758	- 2.456150262	- 0.538570262
A6	3.5672	- 4.526687378	- 0.959487378
A7	- 3.28645	3.838171579	0.551721579
A8	1.9898	- 3.417305195	- 1.427505195

単位 : [arcmin]

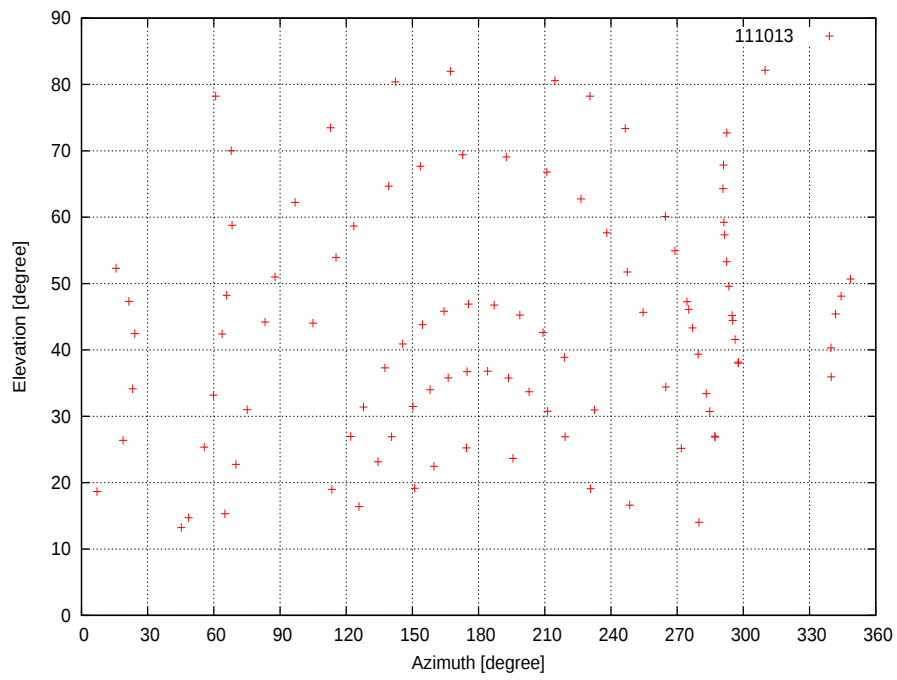


図 4.12: 111013 観測方向プロット

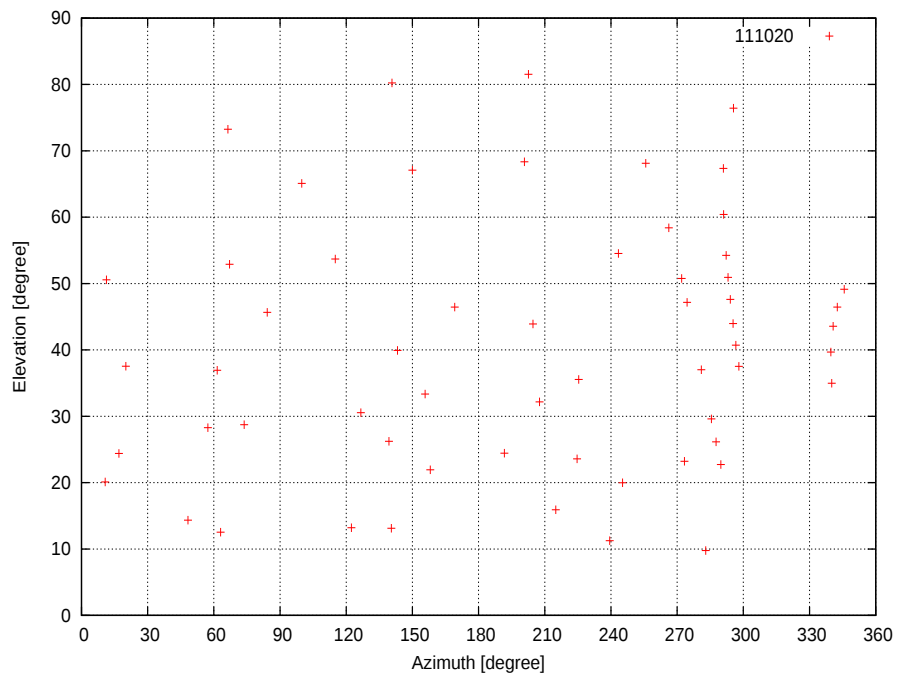
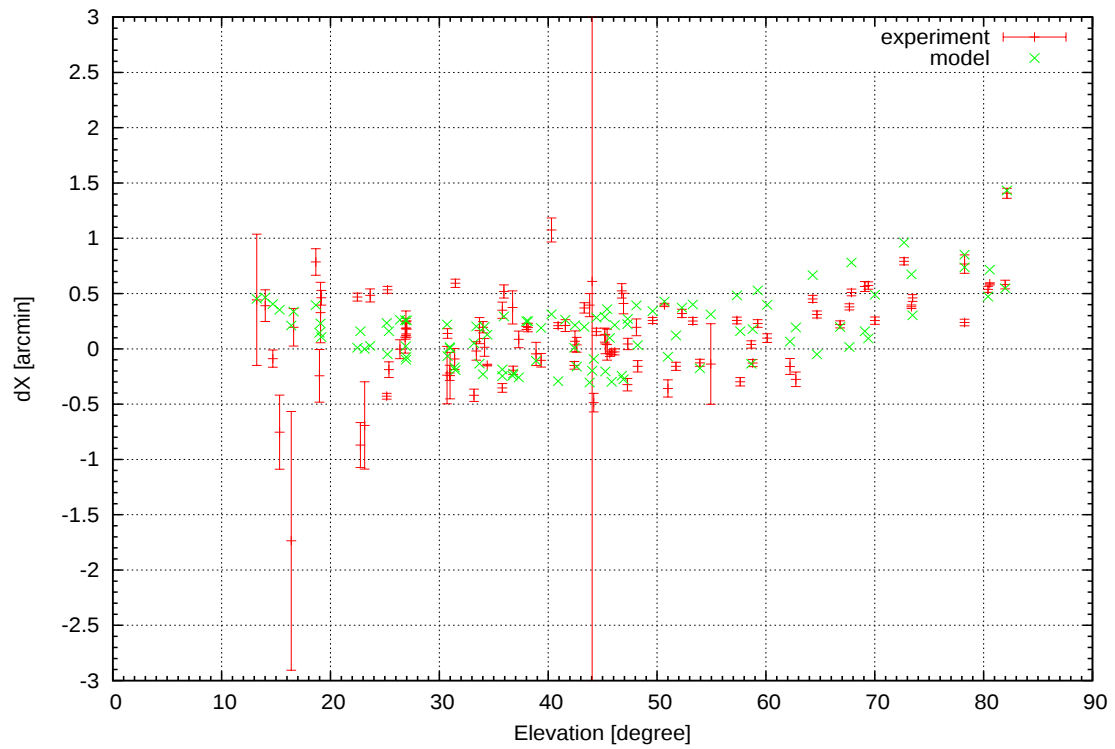
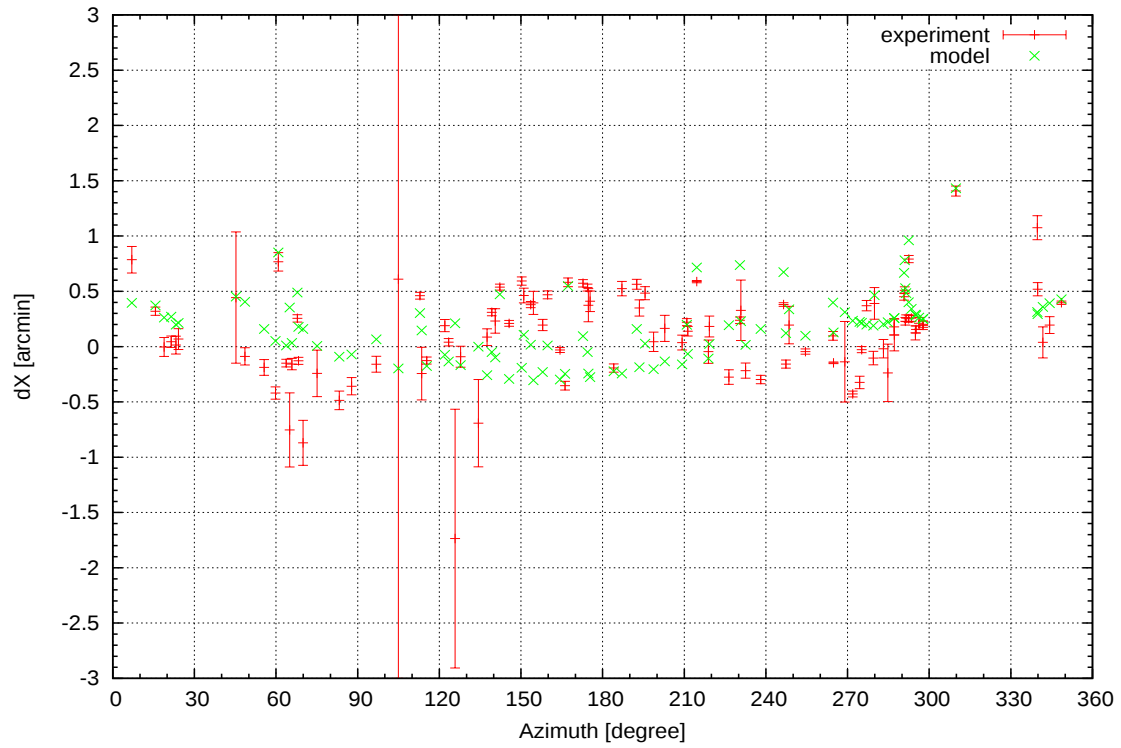


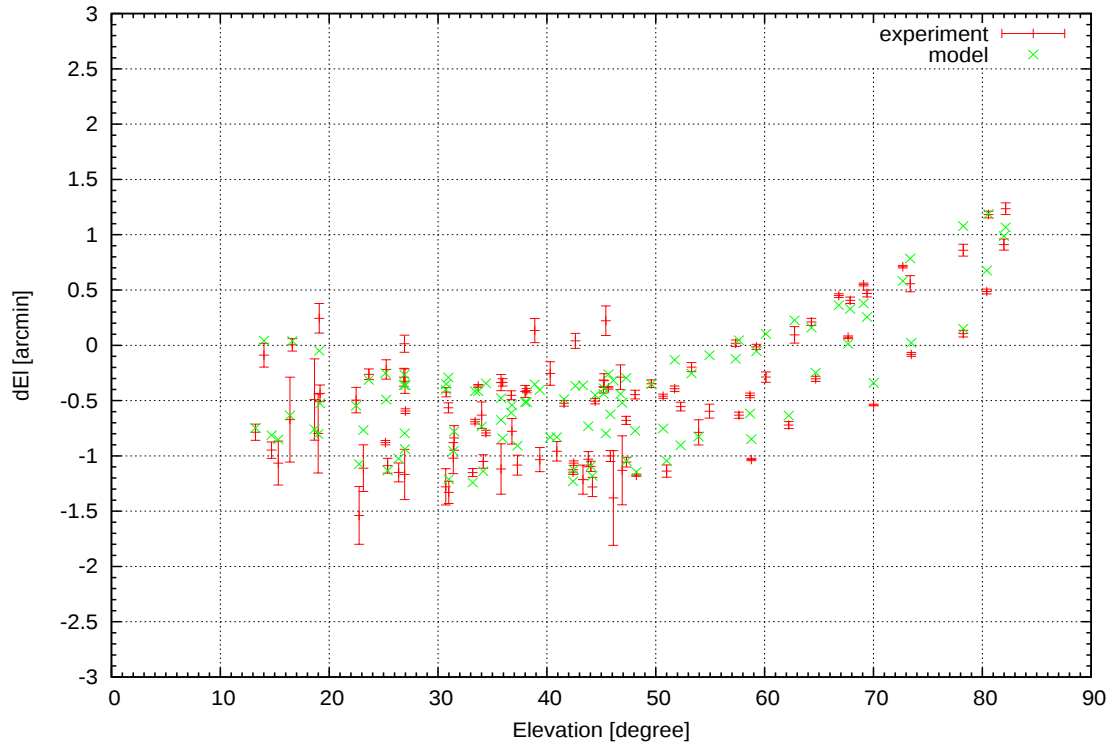
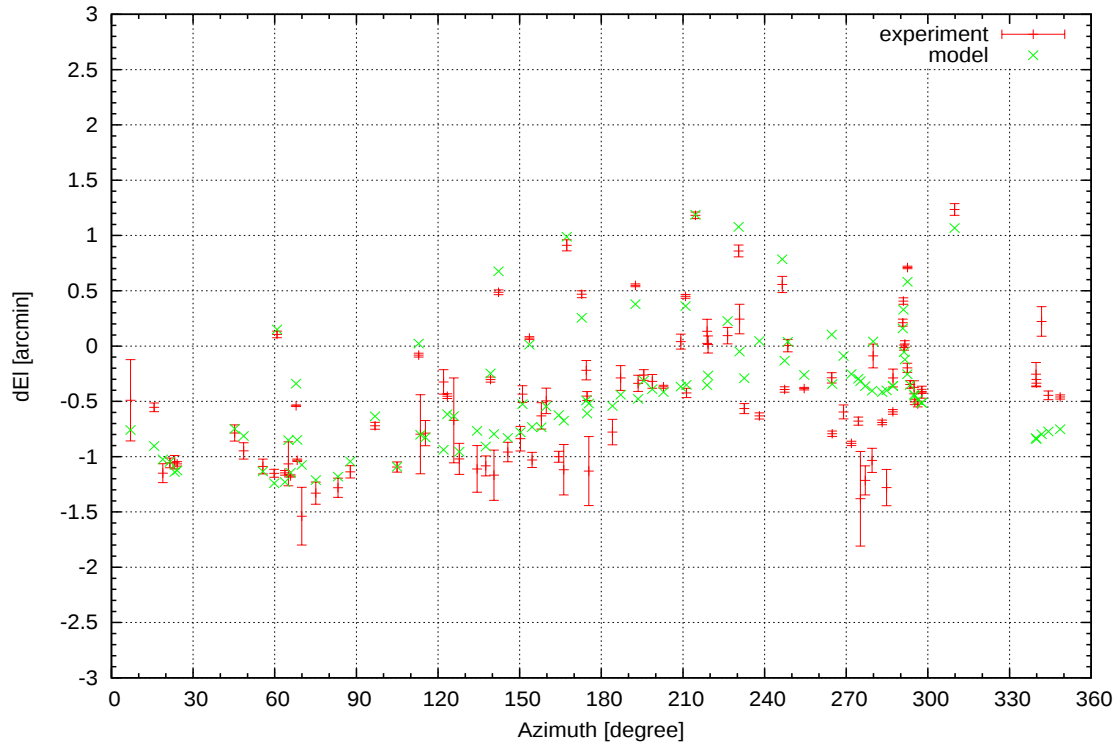
図 4.13: 111020 観測方向プロット



(a)

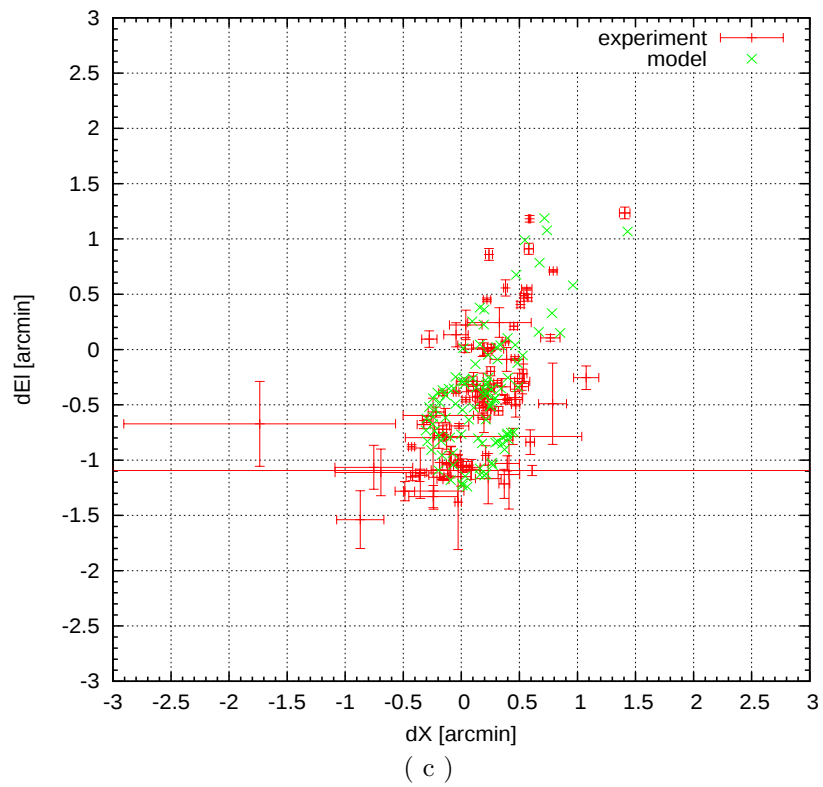
Azimuth 方向の指向誤差 dX をプロットした図である。上図が横軸 *Azimuth*、下図が横軸 *Elevation* である。赤が 111013 の指向誤差の実測値、緑が補正量。補正量が実測値を再現している事が分かる。

図 4.14: 111013 の指向誤差の実測値と補正量の比較

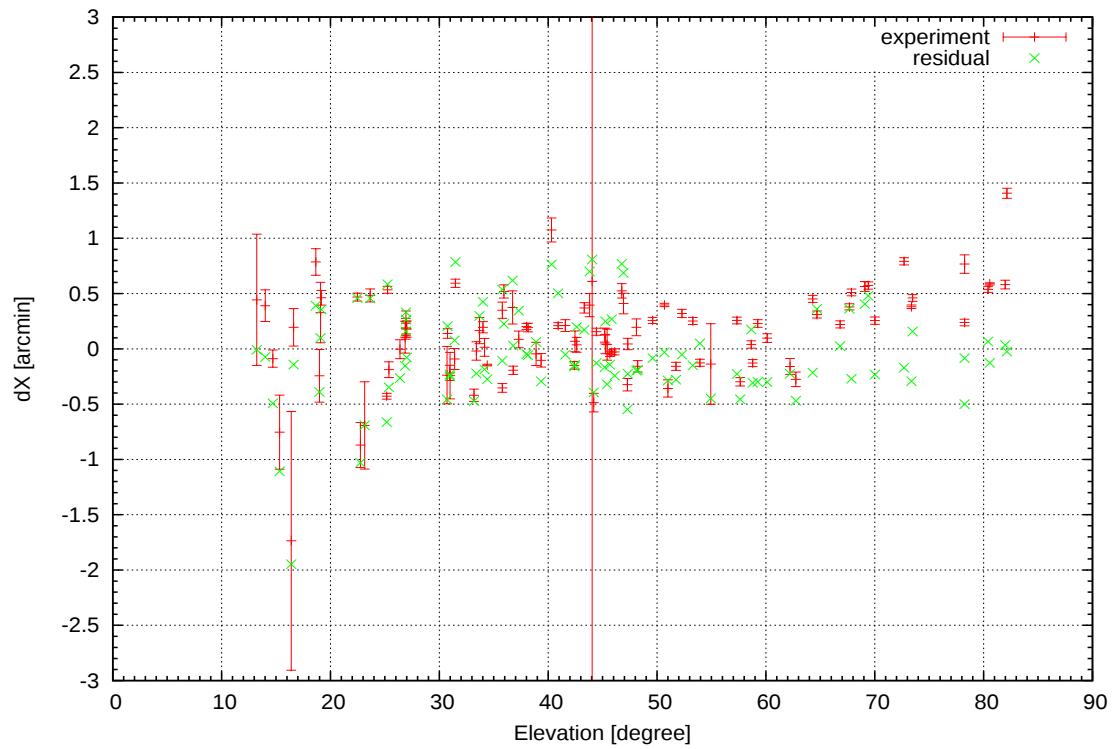
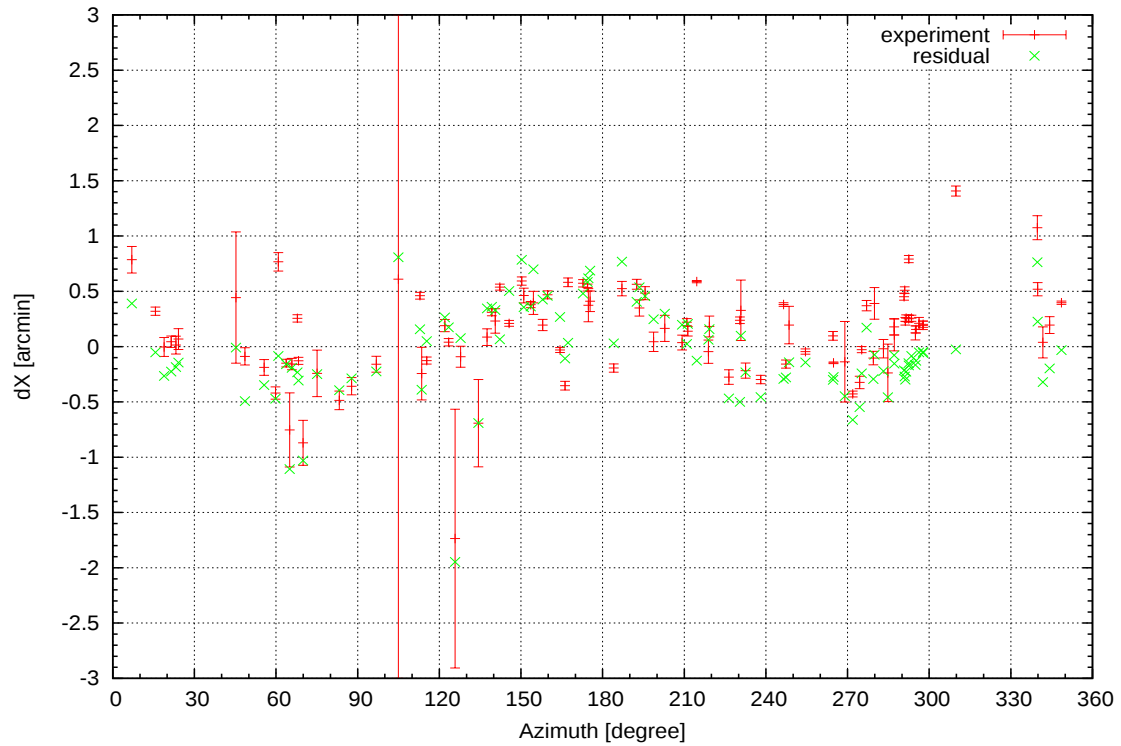


(b)

$Elevation$ 方向の指向誤差 dEI をプロットした図である。上図が横軸 $Azimuth$ 、下図が横軸 $Elevation$ である。赤が 111013 の指向誤差の実測値、緑が補正量。



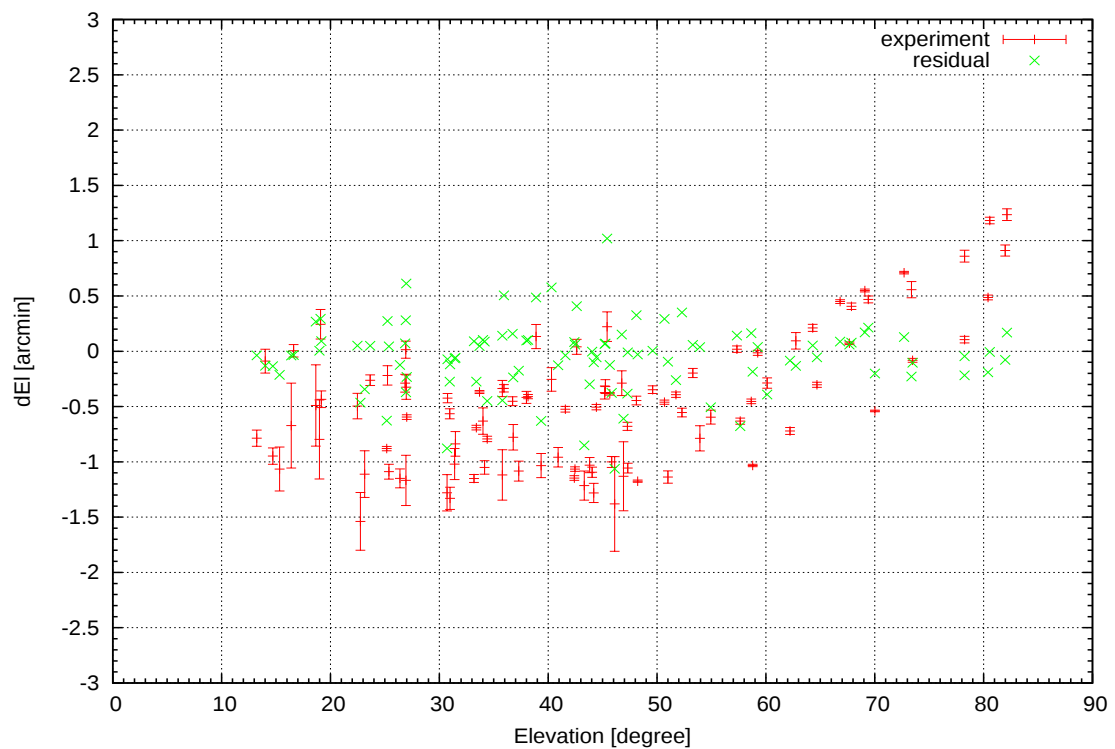
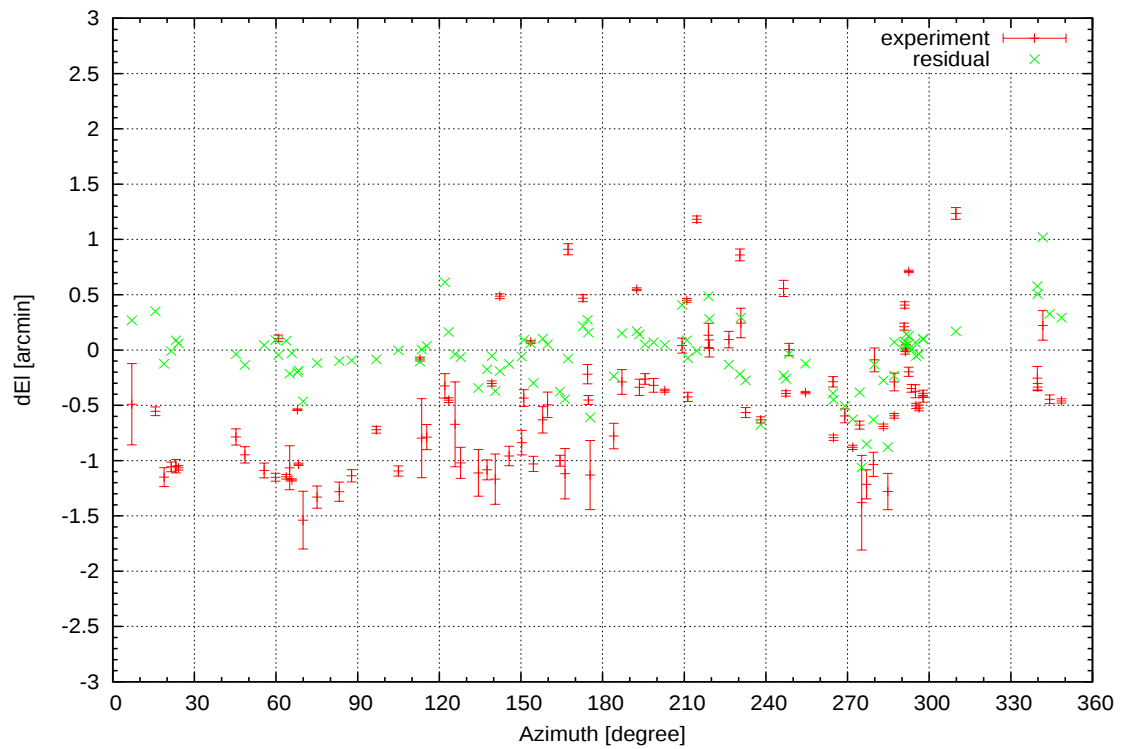
縦軸 dX 、横軸 dEl で指向誤差をプロットした図である。緑が補正量が、赤の実測値を再現している事が分かる。



(a)

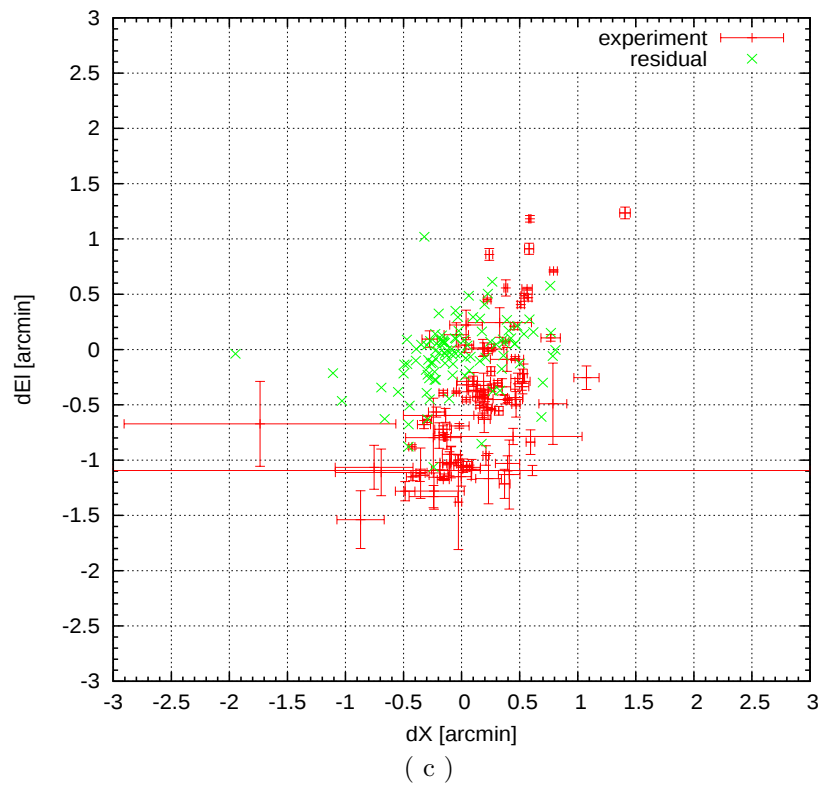
軸は図 4.14 (a) と同じである。赤が指向誤差の実測値、緑が残差である。残差は実測値に比べて、縦軸方向で 0 に近い範囲に分布しており、指向ずれが小さくなっていることが分かる。

図 4.15: 111013 の指向誤差の実測値と残差の比較

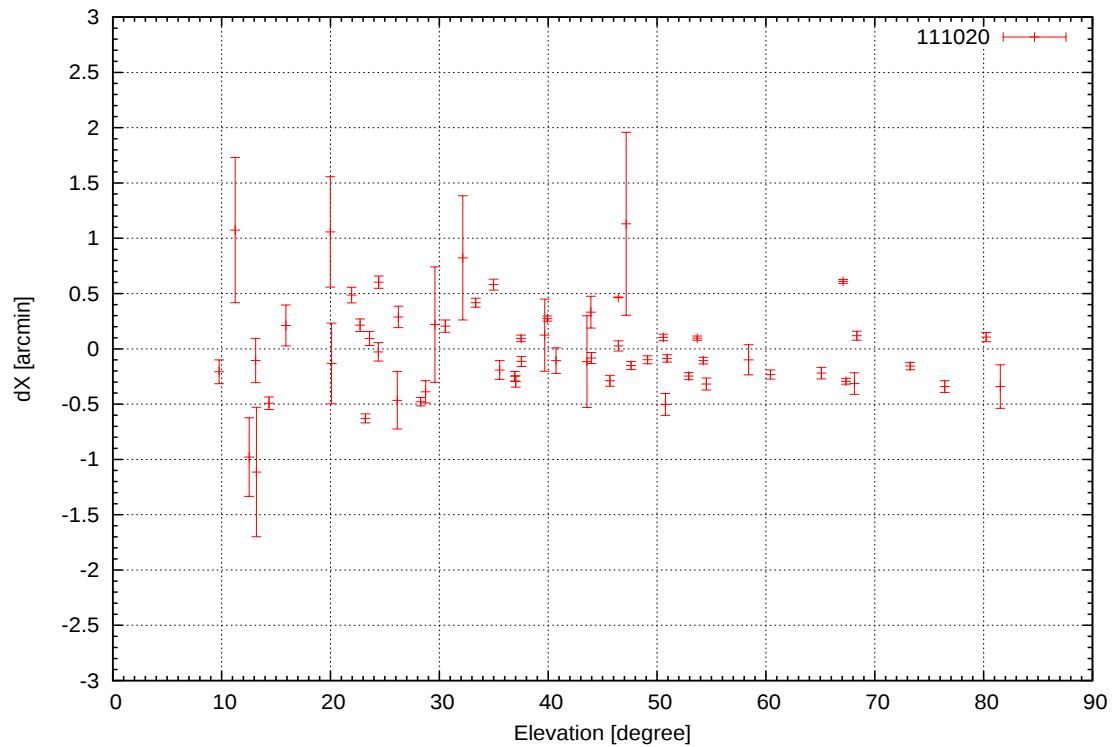
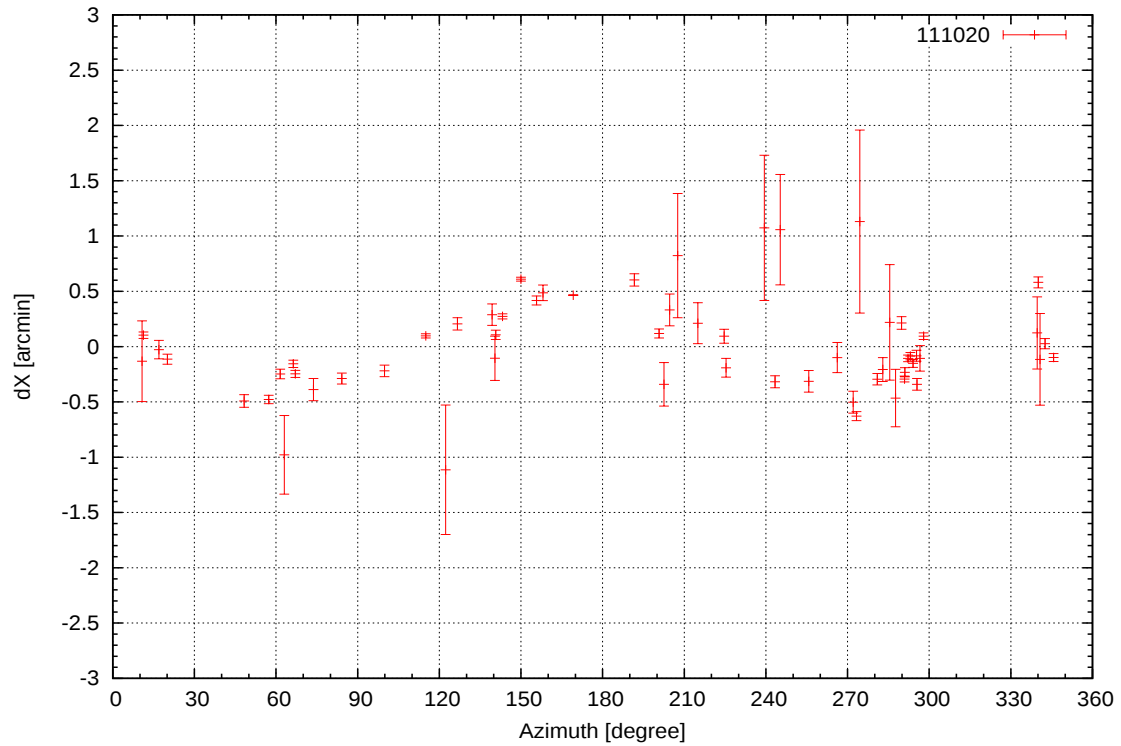


(b)

軸は図 4.14 (b) と同じである。赤が指向誤差の実測値、緑が残差である。



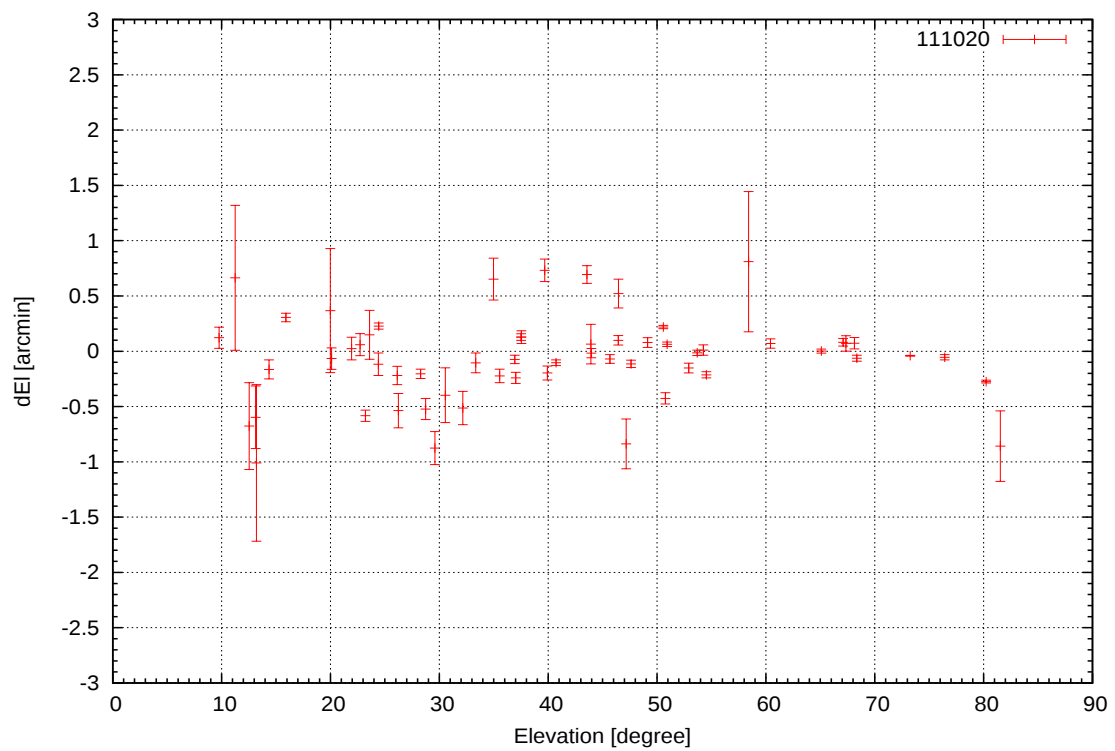
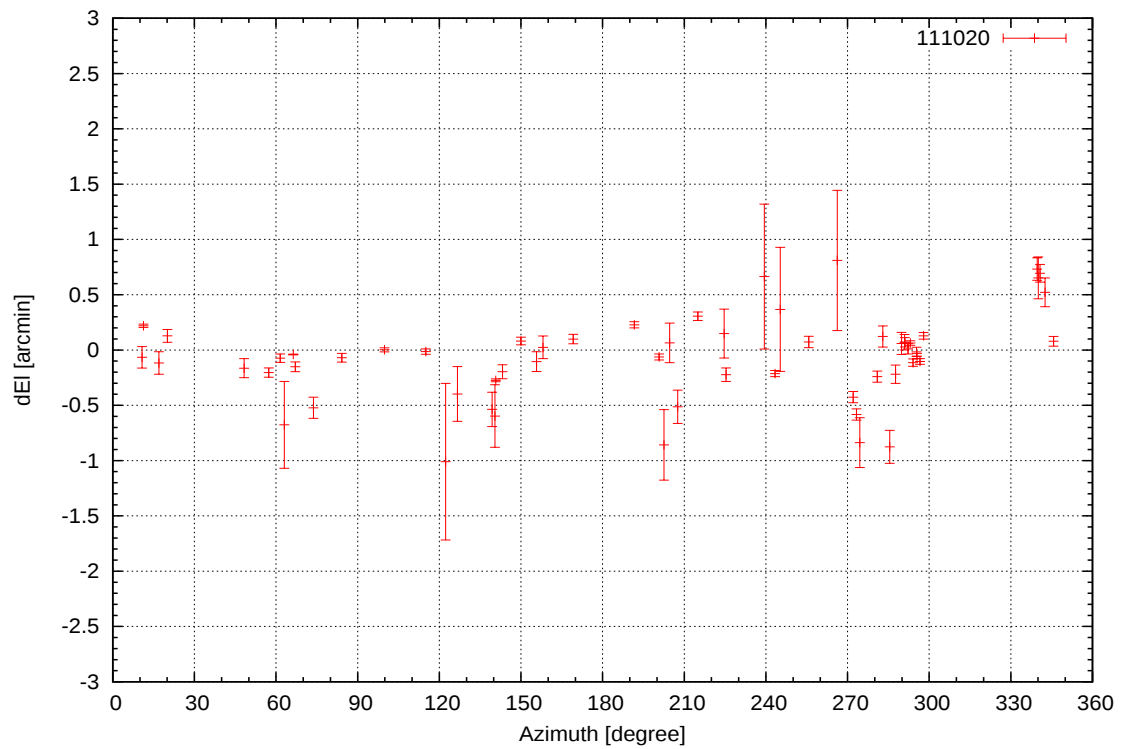
軸は図 4.14 (c) と同じである。赤が指向誤差の実測値、緑が残差である。残差は原点に集中し、指向誤差が補正されることが分かる。



(a)

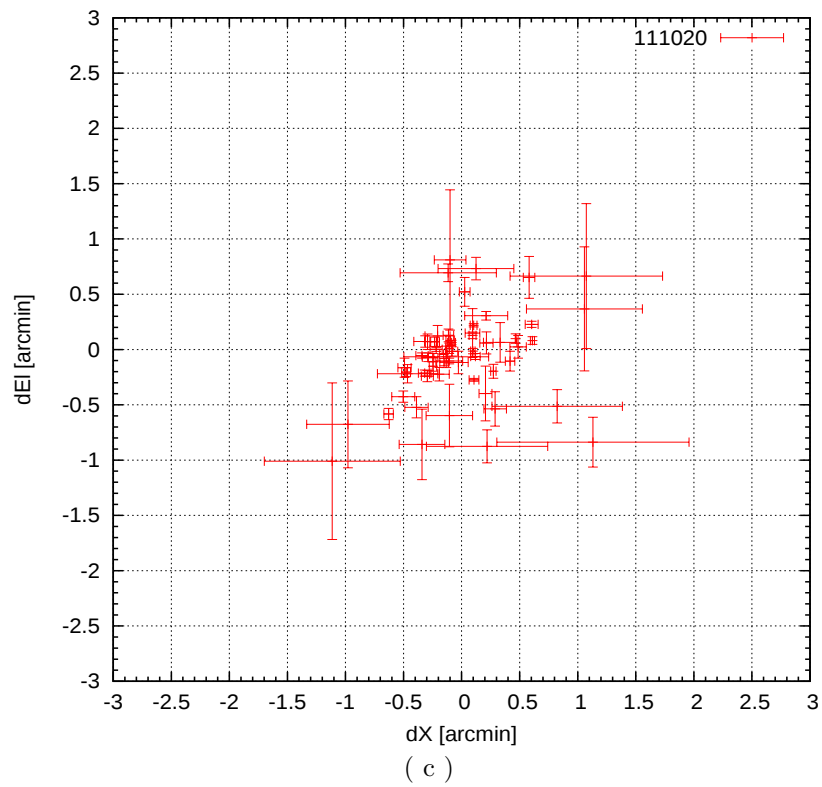
軸は図 4.14 (a) と同じである。111020 の Az 方向の指向誤差の実測値をプロットした図である。図 4.15 の残差と同じような指向誤差の分布が得られた。これより補正が正しく行われたことが分かる。

図 4.16: 111020 の指向誤差の実測値



(b)

軸は図 4.14 (b) と同じである。111020 の El 方向の指向誤差の実測値をプロットした図である。



軸は図 4.14 (c) と同じである。111020 の指向誤差の実測値をプロットした図である。111013 の測定結果 (図 4.14 (c)) に比べて指向誤差が改善した事が分かる。

4.3.6 2011 年 12 月の測定

10 月の段階で、目標指向精度は達成していないものの、平均値は $0.070'$ とほぼ 0 に近く、標準偏差も $0.59'$ となり、震災前の指向精度に戻った。そのため、12 月の測定は指向誤差の補正ではなく、受信機の載せ替えによる指向誤差の変化を調査するために行った。これに関する考察は § 5.2 で述べ、ここでは測定の諸元及び結果を示した。

・測定諸元

● 111207

－ 測定日時

JST 2011/12/07 19:00 - 12/08 7:56、12/09 19:00 - 12/10 7:35、12/22 17:00 - 12/23 5:33

－ 天候、気温、 τ 、 T_{sys}^* :

12/07 18:45 曇り、8.2 、0.0097、21 K

12/08 8:20 曇り、7.8 、0.018、22 K

12/09 18:30 晴れ、3.7 、0.009、21 K

12/22 16:20 薄曇り、8.2 、0.0092、21 K

12/23 5:40 晴れ、8.2 、0.0087、20 K

－ 観測天体

3C84、3C454.3、3C286、3C273B、0212+735、0836+710、1803+784、2021+614、0003-066

● 111226

－ 測定日時

JST 2011/12/26 17:00 - 12/27 5:30、12/27 17:00 - 12/28 4:49

－ 天候、気温、 τ 、 T_{sys}^* :

12/26 16:00 晴れ、7.6 、0.0089、22 K

12/27 6:00 晴れ、-0.6 、0.0092、21 K

12/27 16:40 晴れ、6.5 、0.0090、21 K

－ 観測天体

4C39.25、3C84、3C273B、0234+285、0528+134、0420-014、0727-115、0834-201、0836+710、0212+735

解析の結果、ガウスフィットを行う事が出来た有効な十字スキャンセット数は 111207 が 168 セット、111226 が 111 セットであった。図 4.17、図 4.18 に観測方向のプロットを示した。求めた指向誤差を表 5.2 に、指向誤差をプロットしたものを図 4.19 に示した。

表 4.10: 12 月の指向精度測定結果

単位 : [arcmin]		111207	111226
dX	平均値 $\overline{dX}$	- 0.23	- 0.22
	標準偏差 σ_{dX}	0.36	0.30
dEl	平均値 $\overline{dEl}$	- 0.020	0.065
	標準偏差 σ_{dEl}	0.33	0.26
指向誤差	平均値 $\overline{\Delta}$	0.23	0.23
	標準偏差 σ	0.49	0.40
指向精度 $\overline{\Delta} + \sigma$		0.72	0.63

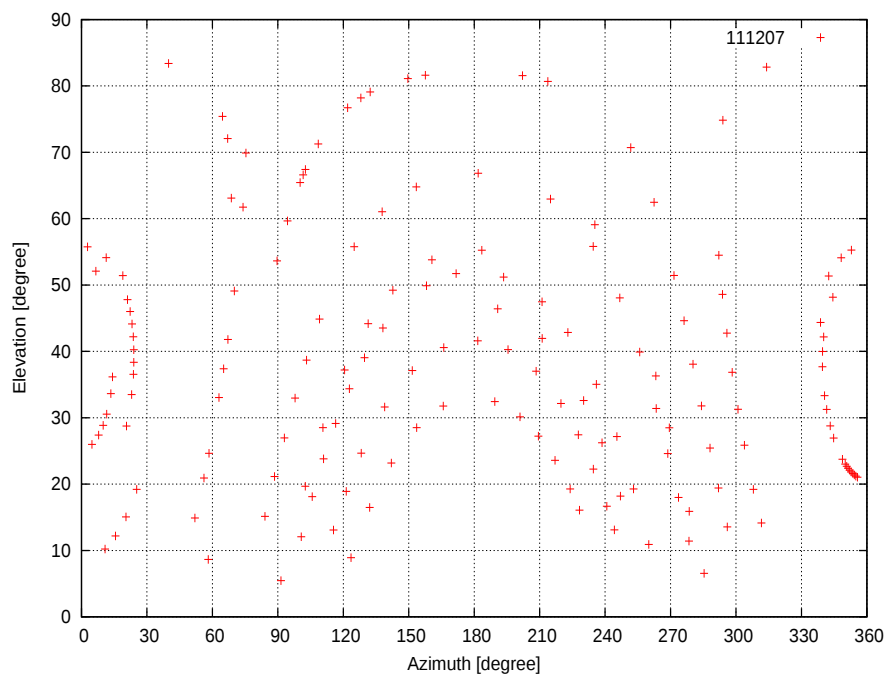


図 4.17: 111207 観測方向プロット

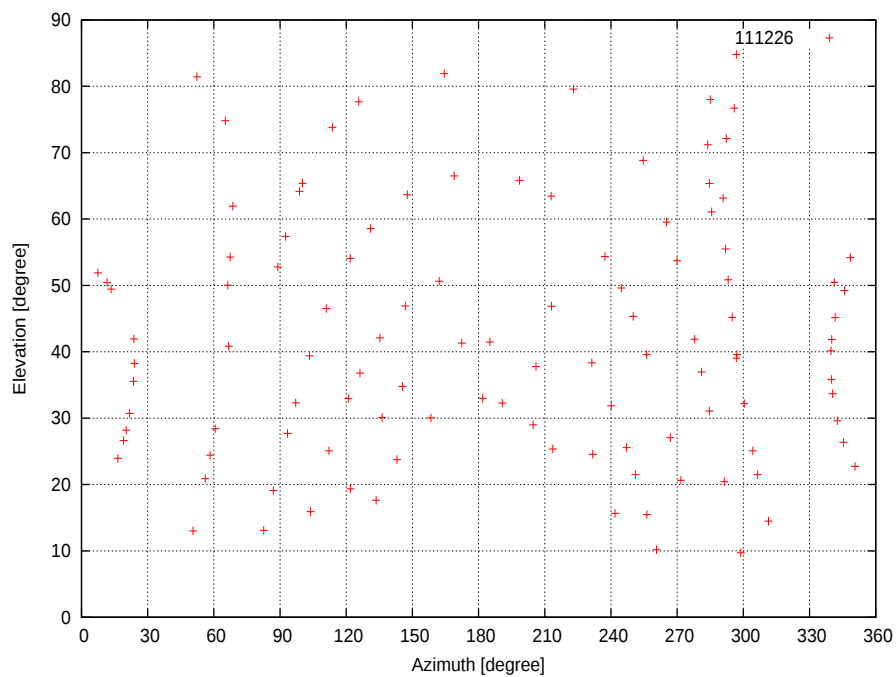
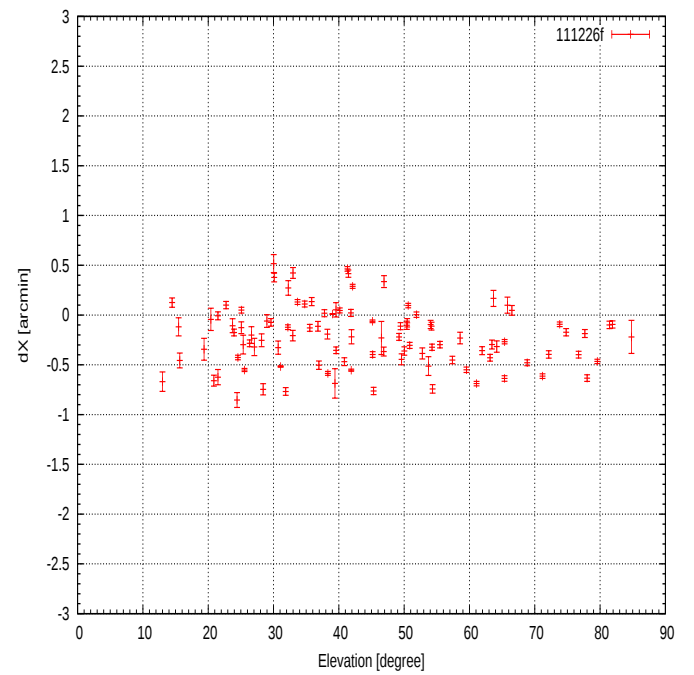
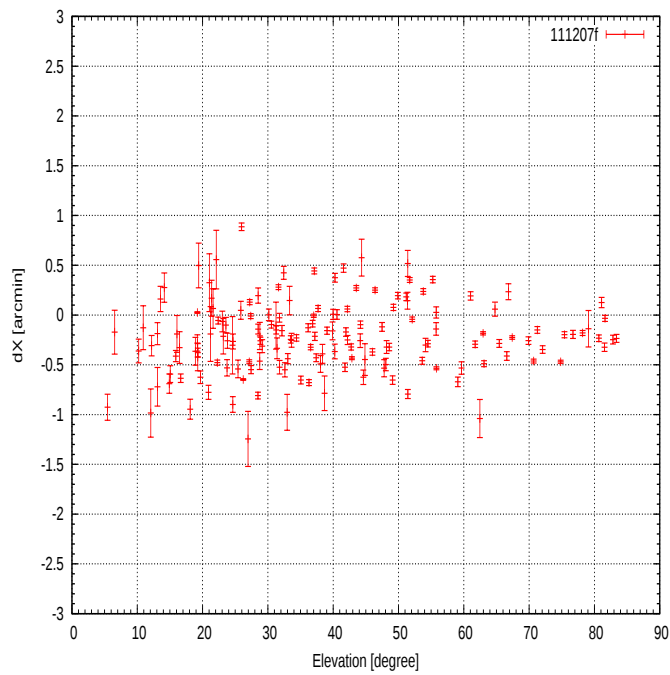
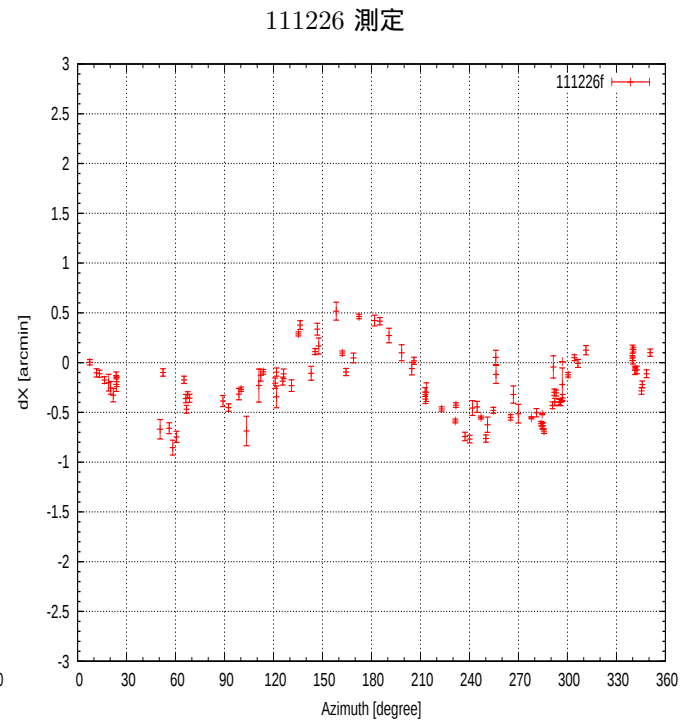
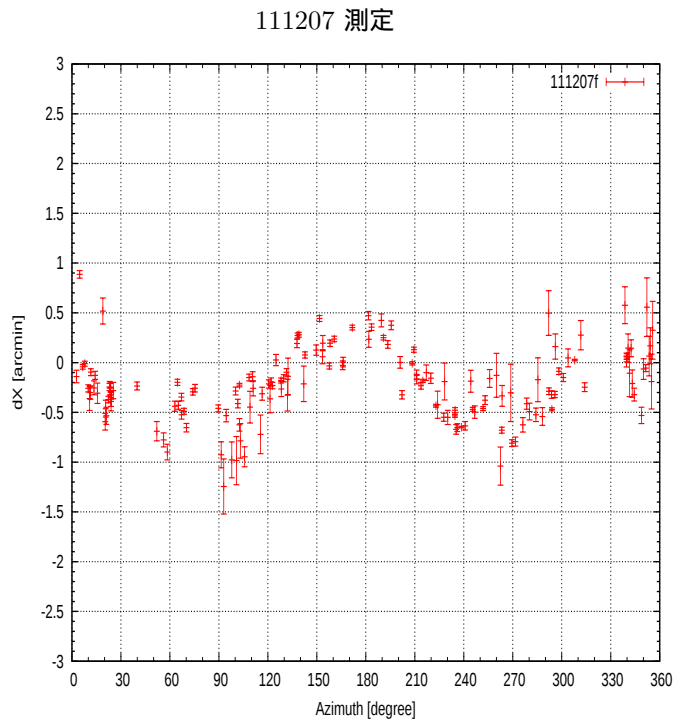


図 4.18: 111226 観測方向プロット

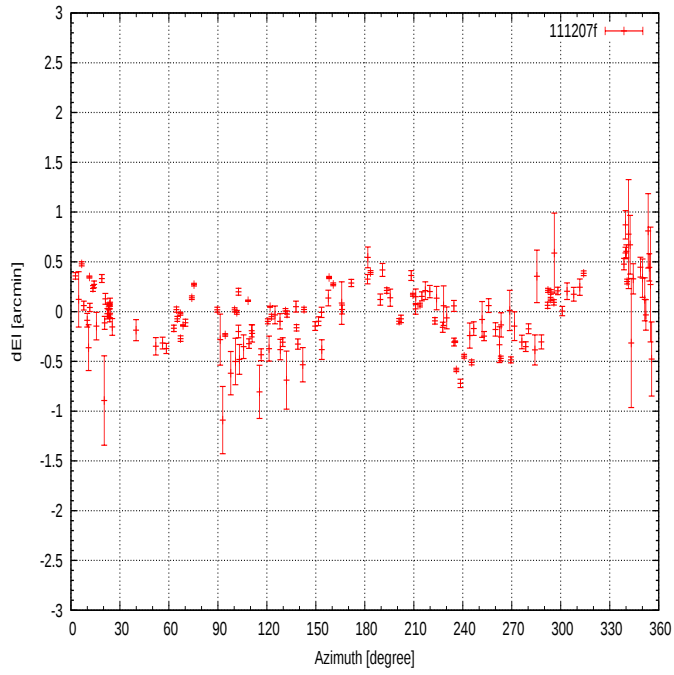


(a)

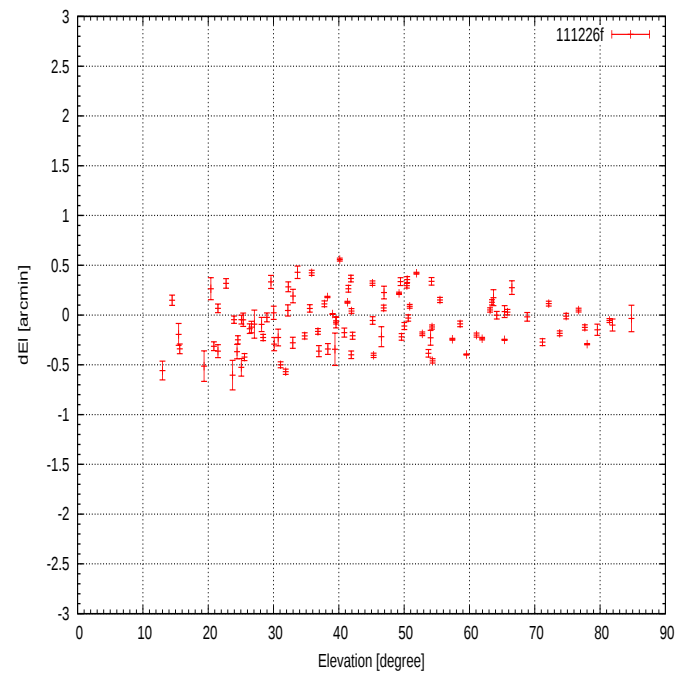
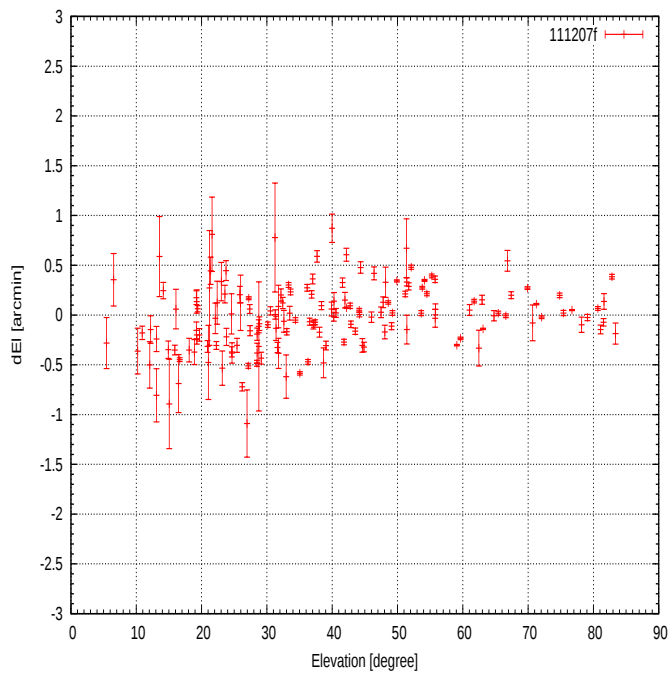
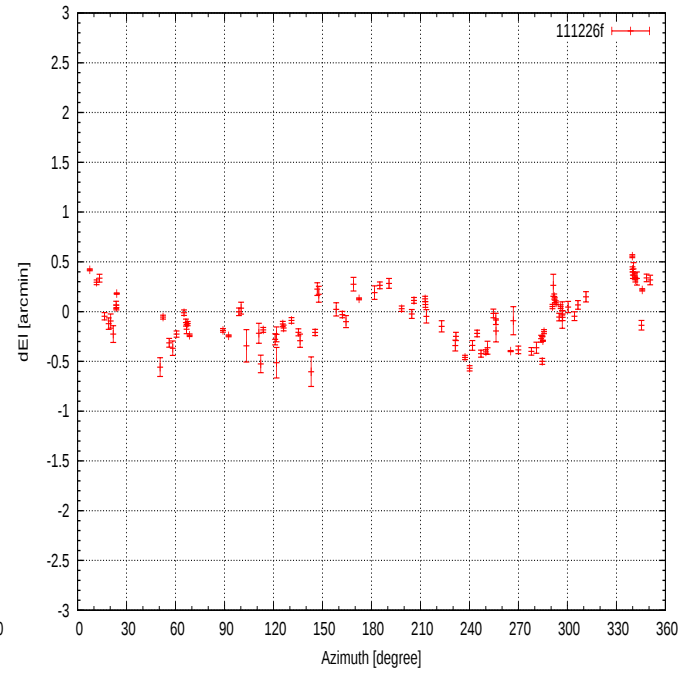
左が 111207、右が 111226 の測定結果である。縦軸が *Azimuth* 方向の指向誤差、上段の横軸は *Azimuth*、下段の横軸は *Elevation* である。

図 4.19: 111207 と 111226 の指向誤差の実測値の比較

111207 測定



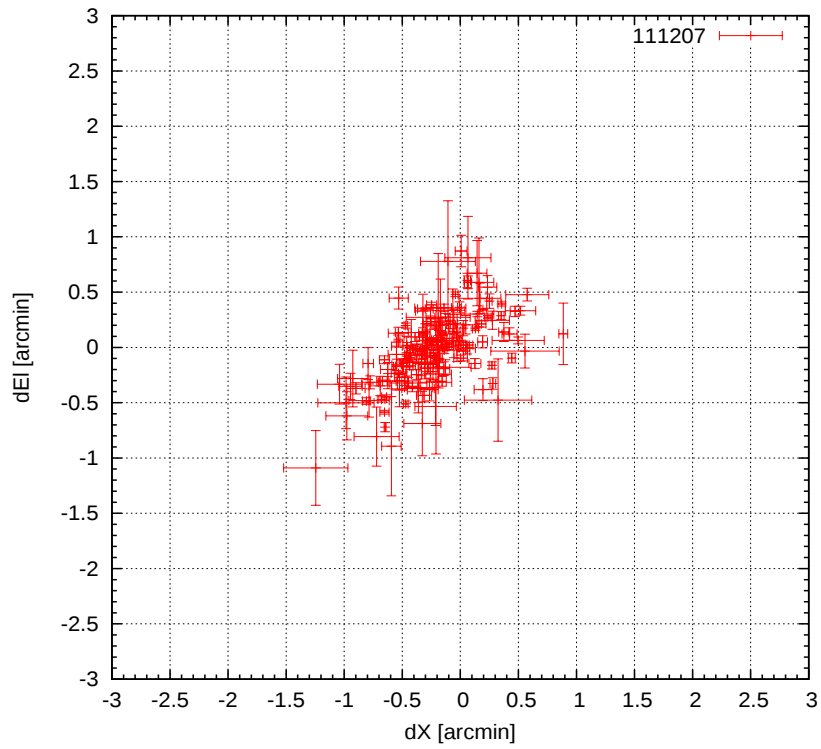
111226 測定



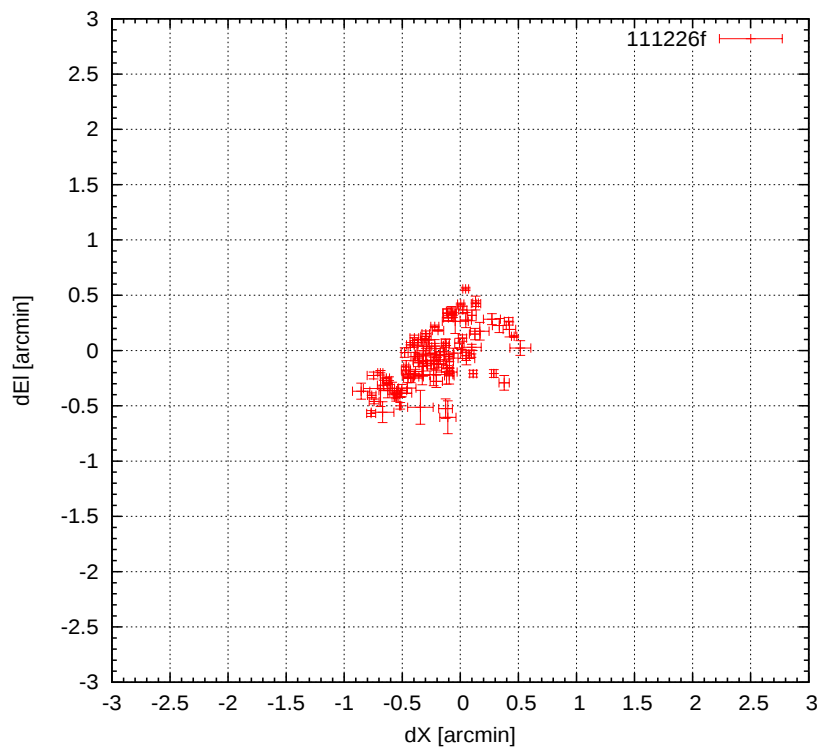
(b)

縦軸が *Elevation* 方向の指向誤差、上段の横軸は *Azimuth*、下段の横軸は *Elevation* である。低 *El* ほど指向誤差のばらつきが大きく、エラーも大きい傾向にある。

111207 測定



111226 測定



(c)

上図が 111207、下図が 111226 の指向誤差の実測値である。縦軸が dX 、横軸が dEl である。111207 の方が測定データ数多く、指向誤差のばらつきが大きい事が分かる。

4.4 まとめ

これまでの器差パラメータ値と指向精度をまとめた。表 4.11 に各測定時に実際に適用した器差パラメータ値 P_t を、表 4.12 に各測定結果から推定した適用すべき器差パラメータの補正量 ΔP_t をまとめた。表 4.13 に各測定結果から求めた指向誤差を示した。これを横軸を測定日、縦軸を指向誤差の平均値及び標準偏差としてその推移を表したものが、図 4.20 及び図 4.21 である。

図 4.20、図 4.21 から 101229 測定では平均値、標準偏差がともに 0 に近づき指向精度が向上した事が、110601 測定時には再び平均値が大きくなりずれた事が分かる。この後の 7 月、8 月の測定では誤った器差パラメータ値を適用したため、正しい補正が行われなかった。110714 測定では器差パラメータ値として ΔP_1 を適用したため、 P_1 に対する実際のパラメータの補正量は $-\Delta P_0 + \Delta P_1$ である (表 4.12 参照)。よって ΔP_0 による補正が差し引かれ、標準偏差がはじめの 101104 測定と似た値となった事が見て取れる。次の 110819 測定では、 ΔP_2 を器差パラメータ値として適用したため、 P_2 に対する実際のパラメータの補正量は $-\Delta P_1 + \Delta P_2$ である。したがって ΔP_1 による補正が差し引かれた事で、再び平均値が大きくなりずれた事が分かる。110826 測定では、器差パラメータの A_2 、 A_7 に $+1'$ を加えたので平均値が 0 に近づき、標準偏差はほぼ変化しなかった。その後の 10 月の測定では正しく補正が行われ、平均値、標準偏差ともに 0 に近づいた事が分かる。

111020 の測定で得られた最終的な日立アンテナの指向誤差は、平均値及び標準偏差で $0.070'$ 及び $0.59'$ となった。これらの和は $0.66'$ であり、目標とする指向精度である $0.38'$ には未だ達していない。 $0.66'$ の指向ずれがある場合、8.4 GHz 帯においてピーク強度に対する受信パワーの減少は約 8 % と計算される。

表 4.11: 各測定で適用した器差パラメータ値 P_t

単位 : [arcmin]	器差パラメータ							
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
101104 : P_0	0	0	0	0	0	0	0	0
101229 : P_1	-0.536877	-0.761366	-0.799243	-0.175533	-0.972704	0.243596	0.737118	0.384624
110601 : P_1	-0.536877	-0.761366	-0.799243	-0.175533	-0.972704	0.243596	0.737118	0.384624
110714 : P_2	-1.8994	8.31093	0.0890082	0.0633225	-1.84216	-5.74473	3.79796	-5.42047
110819 : P_3	3.77858	-4.2011	-1.1549	0.0950805	1.91758	3.5672	-4.28645	1.9898
110826 : P'_3	3.77858	-4.2011	-1.1549	0.0950805	1.91758	3.5672	-4.28645	1.9898
111013 : P'_3	3.77858	-3.2011	-1.1549	0.0950805	1.91758	3.5672	-3.28645	1.9898
111020 : P_4	0.843832036	1.685747108	-0.737454176	0.309296398	-0.538570262	-0.959487378	0.551721579	-1.427505195

表 4.12: 各測定結果から推定した器差パラメータの補正量 ΔP_t

単位 : [arcmin]	器差パラメータ							
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
101104 : ΔP_0	-0.536877	-0.761366	-0.799243	-0.175533	-0.972704	0.243596	0.737118	0.384624
101229 : -	-	-	-	-	-	-	-	-
110601 : ΔP_1	-1.8994	8.31093	0.0890082	0.0633225	-1.84216	-5.74473	3.79796	-5.42047
110714 : ΔP_2	3.77858	-4.2011	-1.1549	0.0950805	1.91758	3.5672	-4.28645	1.9898
110819 : ΔP_2	-2.68985	4.34968	0.0252369	0.0810009	-2.60559	-2.90375	4.70479	-2.31699
110826 : -	-	-	-	-	-	-	-	-
111013 : ΔP_3	-2.934747964	4.886847108	0.417445824	0.214215898	-2.456150262	-4.536687378	3.838171579	-3.417305195
111020 : -	-	-	-	-	-	-	-	-

表 4.13: 指向誤差の推移

単位 : [arcmin]		101104	101229	110601	110714	110819	110826	111013	111020
dX	平均値 $\overline{dX}$	- 0.25	- 0.12	1.1	- 0.42	1.1	0.11	0.13	- 0.036
	標準偏差 σ_{dX}	0.65	0.39	0.46	0.70	0.57	0.61	0.41	0.44
dEl	平均値 $\overline{dEl}$	- 0.39	0.26	0.86	- 0.52	0.89	- 0.13	- 0.47	- 0.070
	標準偏差 σ_{dEl}	0.81	0.41	0.56	0.92	0.65	0.67	0.59	0.39
指向誤差	平均値 $\overline{\Delta}$	0.47	0.28	1.4	0.67	1.42	0.17	0.49	0.070
	標準偏差 σ	1.0	0.56	0.73	1.2	0.86	0.91	0.72	0.59
指向精度 $\overline{\Delta} + \sigma$		1.5	0.84	2.1	1.9	2.3	1.1	1.2	0.66



図 4.20: 指向誤差の平均値の推移
破線の左側が地震前、右側が地震後である。

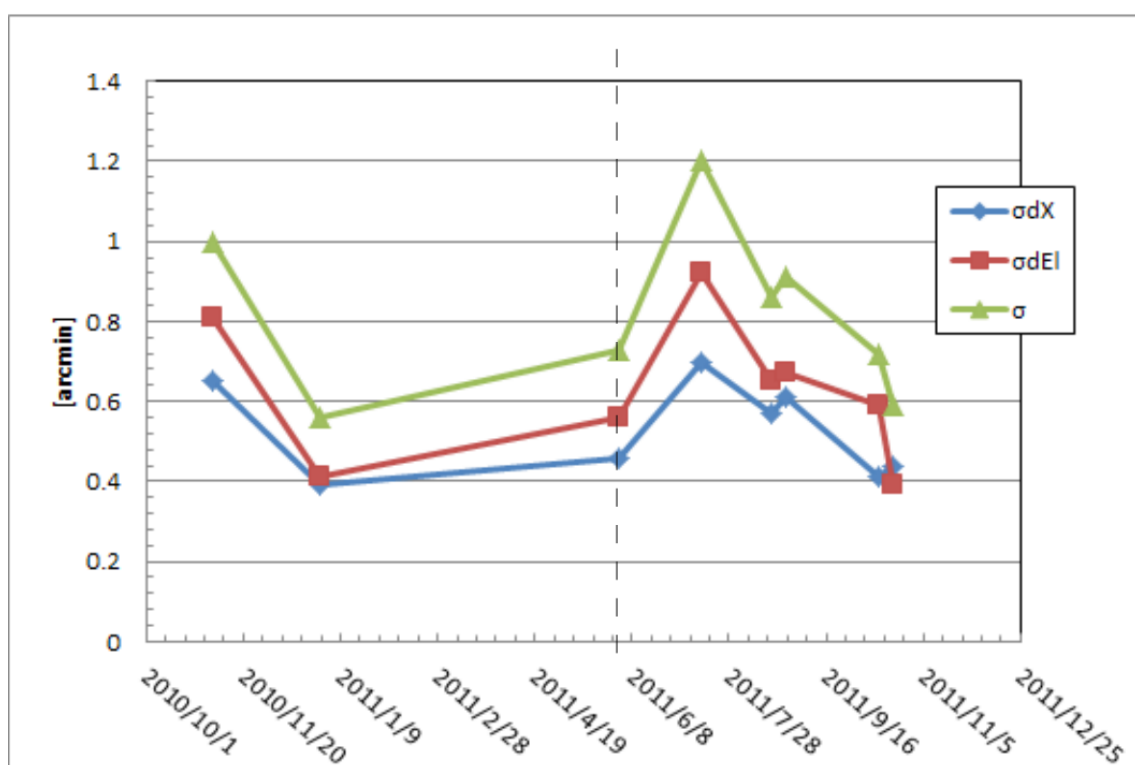


図 4.21: 指向誤差の標準偏差の推移
破線の左側が地震前、右側が地震後である。

第5章 考察

5.1 指向誤差の時間変動

5.1.1 はじめに

10 月の 111020 測定と 12 月の 111207 測定の結果を比較し、指向誤差の時間変動を調べた。10 月 20 日の指向精度測定と 12 月の受信機載せ替え前の測定は、器差パラメータのと同じであるので、この 2 つの測定結果を比較することで、単なる時間経過による指向誤差の変動を見ることが出来る。111020 の指向誤差の測定結果 (図 4.13) と 111207 の結果 (図 4.19) を見ると、傾向から外れたデータでエラーが大きい事が分かる。そこで 2 つの測定の指向誤差の傾向をより正しく求めるために、エラーが大きいデータを除去して比較をした。使用するデータのエラーの上限値の違いにより、2 通りの比較を行った。結果的に観測点数が異なるため対等な比較は難しかったが、Az 方向の指向誤差の負の方向への変動が見られた。

5.1.2 比較 1

各測定における平均的なエラーの値よりも大きいエラーを持つデータは、十分質の高い測定ができていなかったと考え、それらのデータを除去した。ここでの比較では、平均的なエラーの値 (基準値とする) として dX 、 dEl のエラー値 δ_{dX} 、 δ_{dEl} の平均値 $\overline{\delta_{dX}}$ 、 $\overline{\delta_{dEl}}$ にその標準偏差 $\sigma_{\delta_{dX}}$ 、 $\sigma_{\delta_{dEl}}$ を加算した値を用いた (表 5.2 参照)。これにより残ったデータを使い、指向誤差の平均値及び標準偏差を求めた。使用したデータ数は、111020 測定が 47 セット、111207 測定が 116 セットであった。この指向誤差を比較した結果を表 5.1 にまとめた。

表 5.1: 111020 と 111207 における指向誤差の比較 1

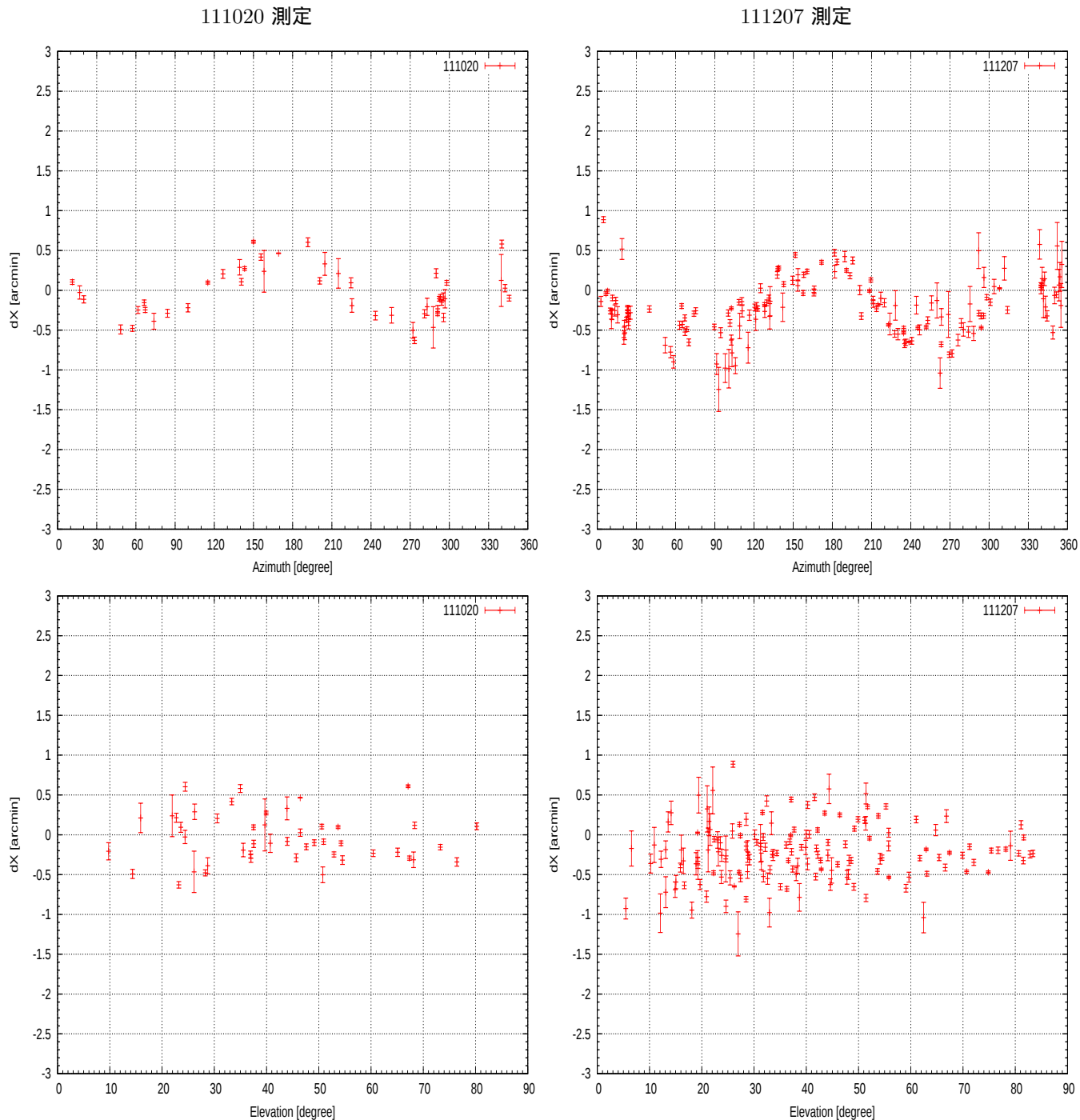
単位 : [arcmin]		111020	111207	変動
dX	平均値 $\overline{dX}$	-0.040	-0.23	-0.19
	標準偏差 σ_{dX}	0.31	0.36	0.050
dEl	平均値 $\overline{dEl}$	-0.026	-0.020	0.0066
	標準偏差 σ_{dEl}	0.26	0.33	0.066
指向誤差	平均値 $\overline{\Delta}$	0.048	0.23	0.18
	標準偏差 σ	0.41	0.49	0.081
指向精度 $\overline{\Delta} + \sigma$		0.46	0.72	0.26

表 5.2: 指向誤差のエラーの基準値

単位 : [arcmin]		111020	111207
δ_{dX}	平均値 $\overline{\delta_{dX}}$	0.155	0.120
	標準偏差 $\sigma_{\delta_{dX}}$	0.194	0.195
δ_{dEl}	平均値 $\overline{\delta_{dEl}}$	0.124	0.161
	標準偏差 $\sigma_{\delta_{dEl}}$	0.159	0.577
$\overline{\delta_{dX}} + \sigma_{\delta_{dX}}$		0.35	0.31
$\overline{\delta_{dEl}} + \sigma_{\delta_{dEl}}$		0.28	0.73

表 5.1 より、 El 方向の指向誤差はほとんど変化は見られなかったが、 Az 方向には約 $-0.19'$ の変化がみられた。これらの指向誤差を比較してプロットしたものが図 5.1 である。この図からも 12 月の測定では 10 月の測定結果

に比べ、全体的に dX の負の方向へ平行移動したように見える。

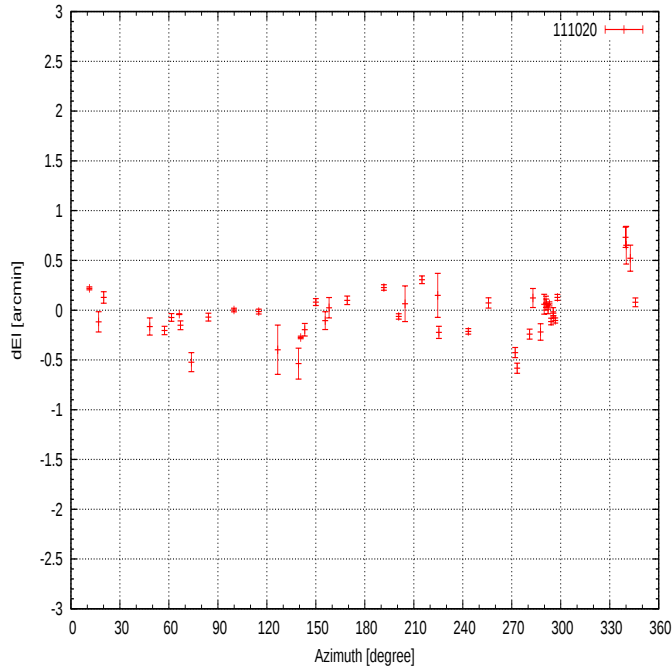


(a)

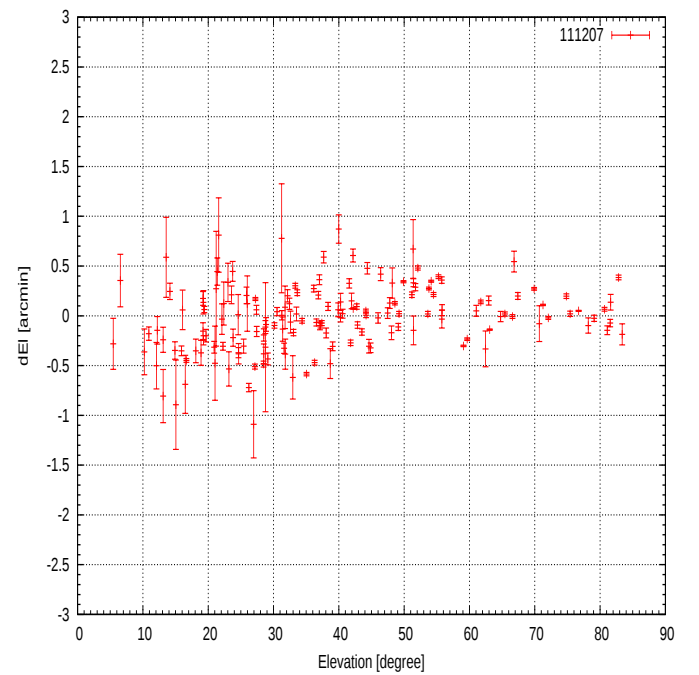
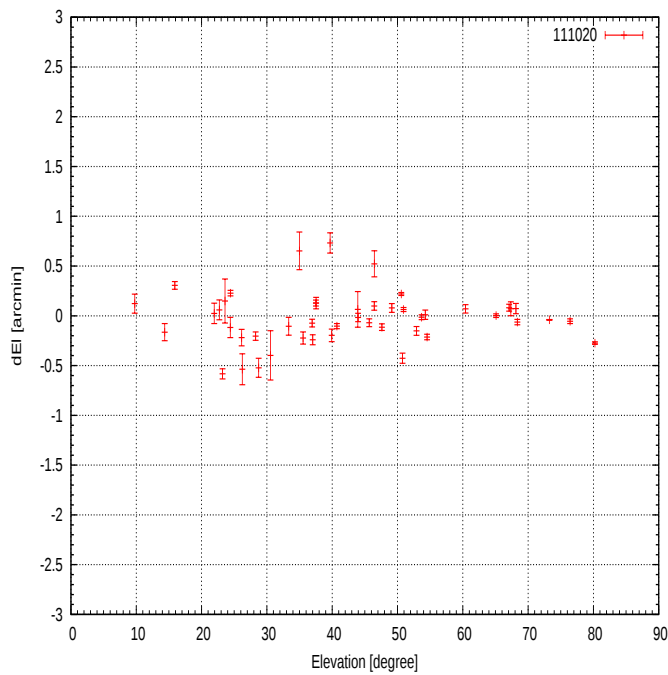
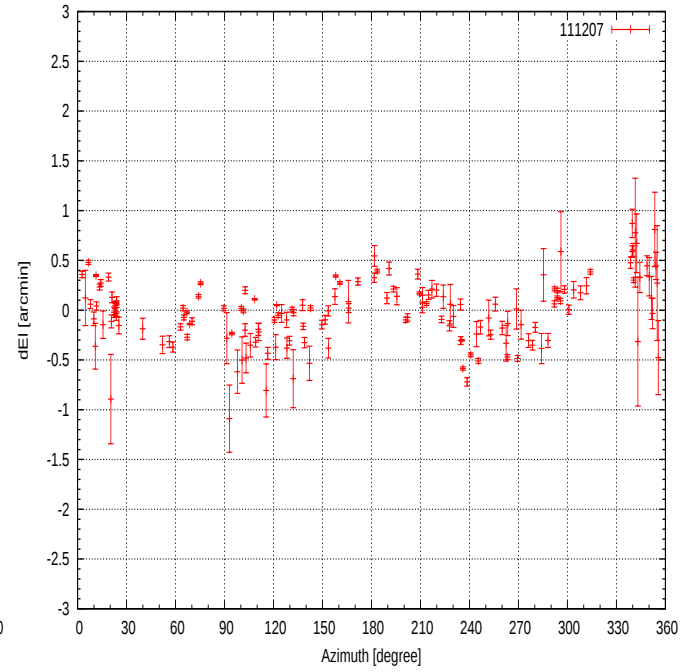
左の列が 111020 の測定結果、右の列が 111207 の測定結果である。縦軸に *Azimuth* 方向の指向誤差 dX をプロットした図である。上段が横軸 *Azimuth*、下段が横軸 *Elevation* である。111207 の結果は 111020 に比べ、縦軸の負の方向に変化したように見える。

図 5.1: 111020 と 111207 の測定結果の比較 1

111020 測定



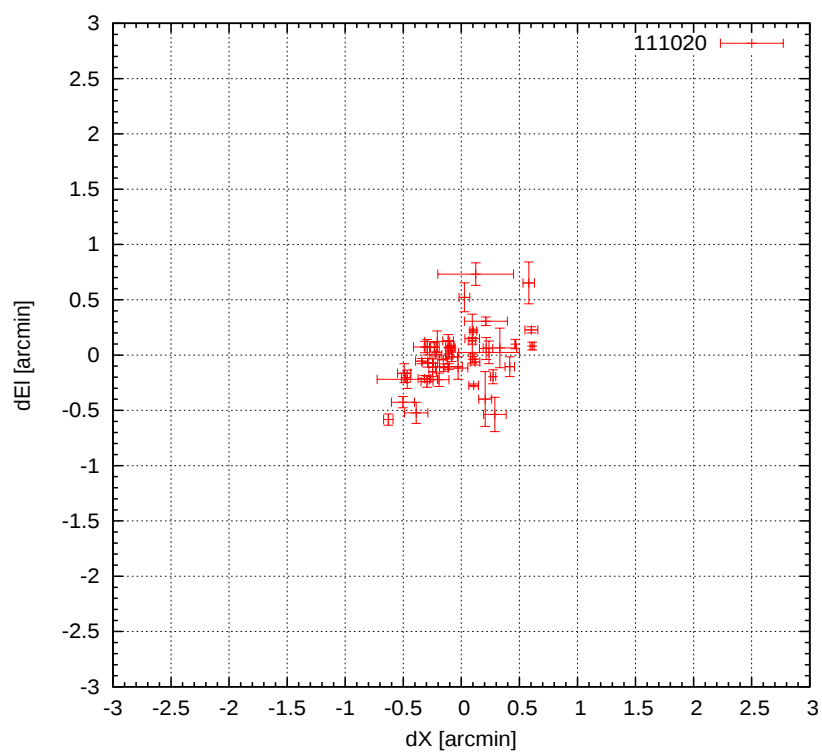
111207 月測定



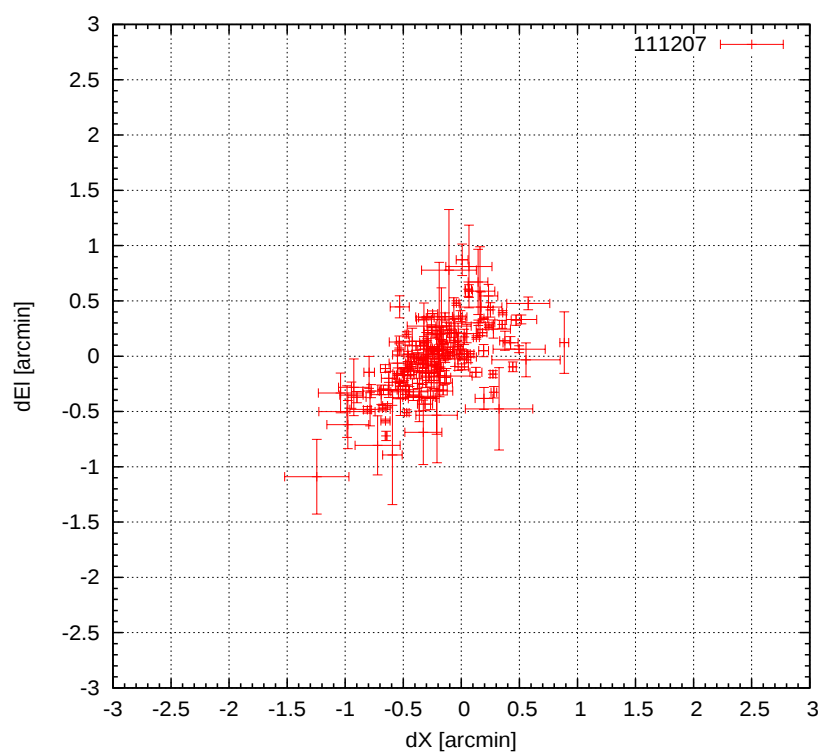
(b)

縦軸に *Elevation* 方向の指向誤差 dEl をプロットした図である。上段が横軸 *Azimuth*、下段が横軸 *Elevation* である。 dEl はあまり変化が見られないことが分かる。

111020 測定



111207 測定



(c)

上図が 111020、下図が 111207 の指向誤差のプロットである。縦軸 dX 、横軸 dEl である。測定データの数異なるため、この図からは指向誤差の変化は分かりにくい。

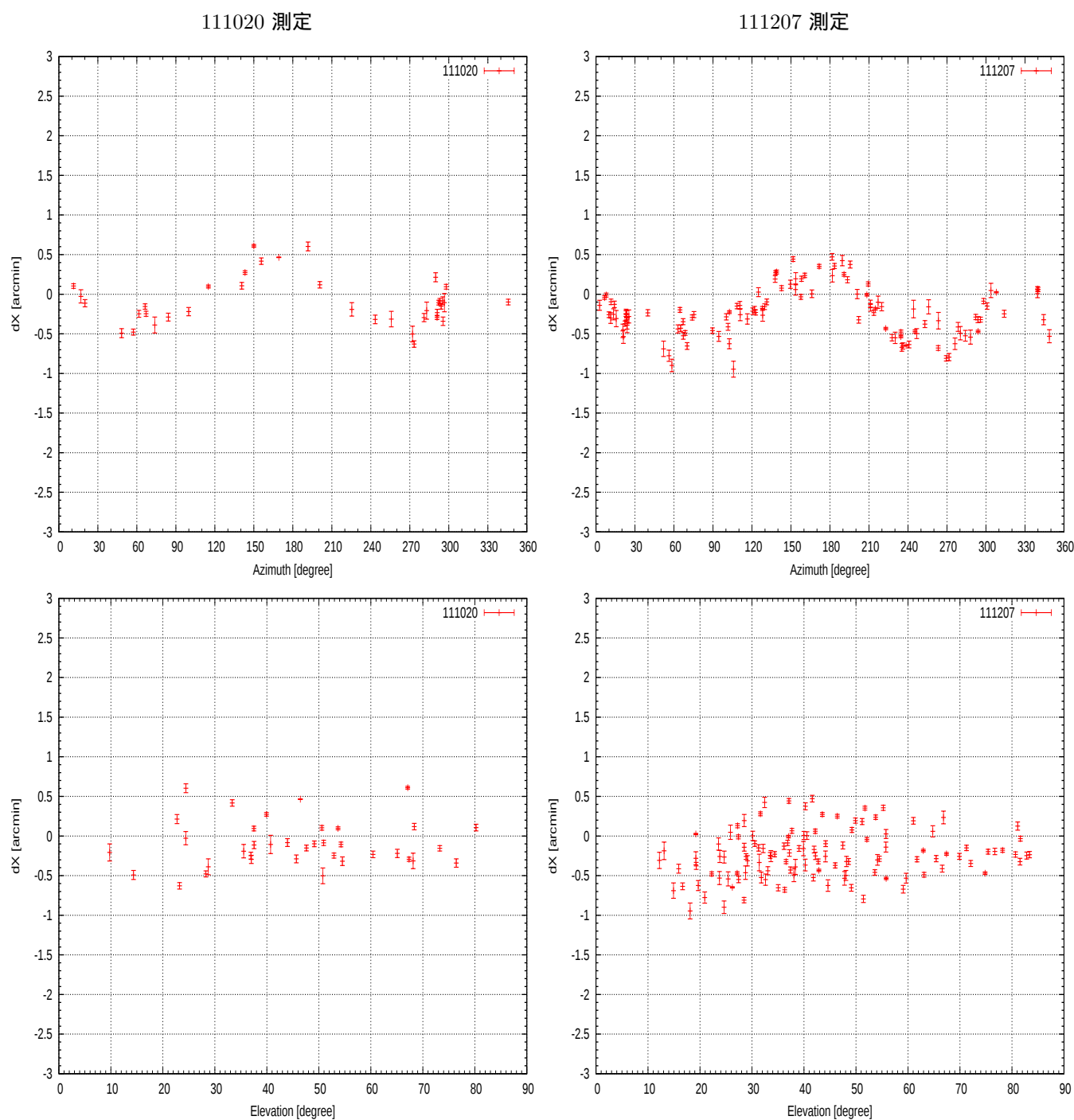
5.1.3 比較 2

§5.1.2 では基準値よりもエラーが大きいデータは除いたが、12 月の測定結果には未だエラーが大きいデータが多くある。そこで、より正確な比較を行うため、更にエラーの小さいデータのみを選び比較した。そのため、§5.1.2 では平均値に標準偏差を加算した値を基準値としていたが、ここでは平均値を基準値とした。したがって 111020 測定では $\delta_{dX} < 0.155'$ かつ $\delta_{dEl} < 0.124'$ 、111207 測定では $\delta_{dX} < 0.120'$ かつ $\delta_{dEl} < 0.161'$ のデータを用いた。使用したデータ数は、111020 測定で 37 セット、111207 測定で 118 セットとなった。この結果得られた指向誤差を比較したものを表 5.3 に、プロットしたものを図 5.2 に示した。表 5.3 から、やはり Az 方向の指向誤差が負の

表 5.3: 111020 と 111207 における指向誤差の比較 2

単位 : [arcmin]		111020	111207	変動
dX	平均値 $\overline{dX}$	-0.095	-0.24	-0.14
	標準偏差 σ_{dX}	0.30	0.30	0.005
dEl	平均値 $\overline{dEl}$	-0.069	-0.0079	0.061
	標準偏差 σ_{dEl}	0.19	0.27	0.087
指向誤差	平均値 $\overline{\Delta}$	0.12	0.24	0.12
	標準偏差 σ	0.35	0.41	0.057
指向精度 $\overline{\Delta} + \sigma$		0.47	0.65	0.18

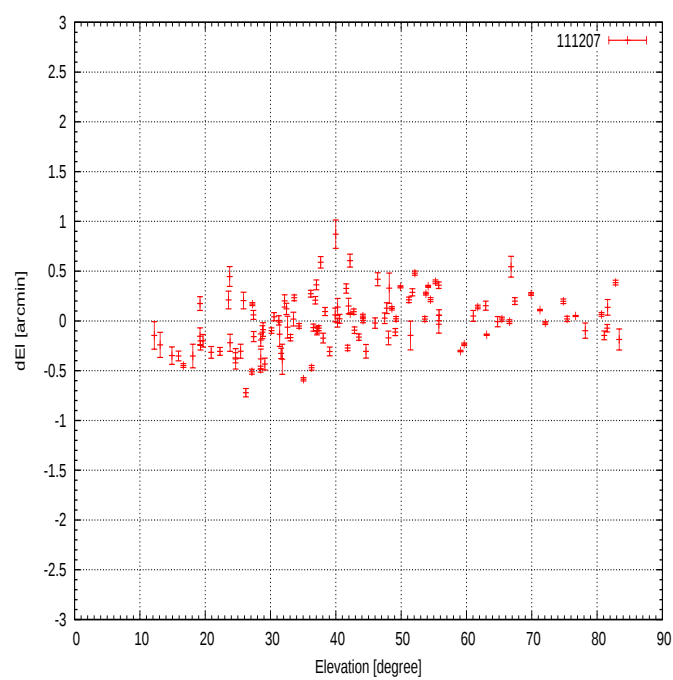
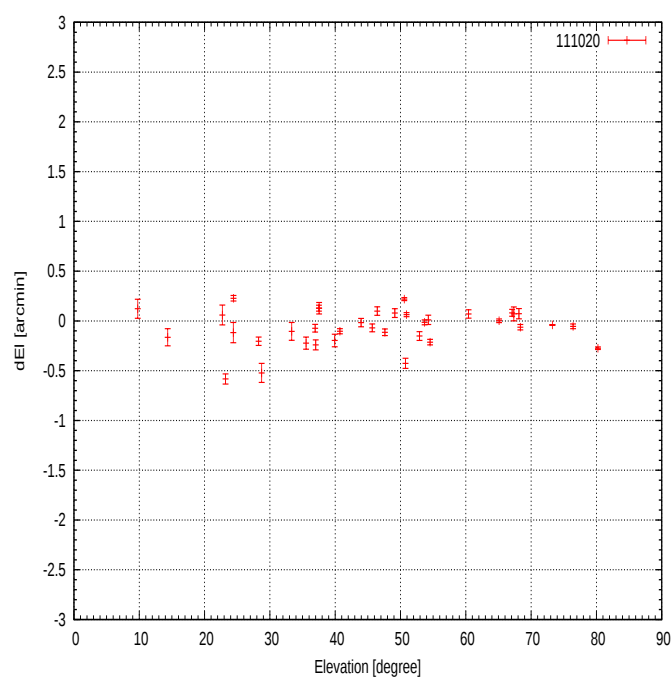
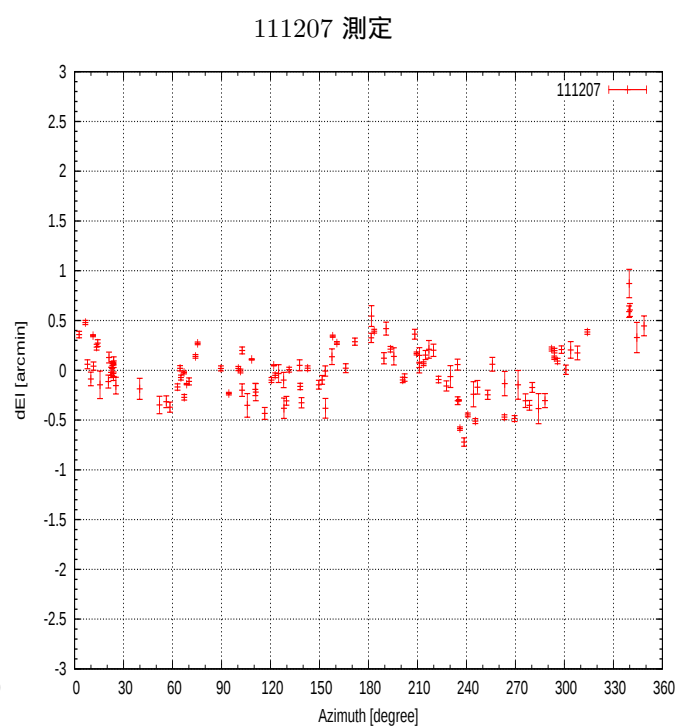
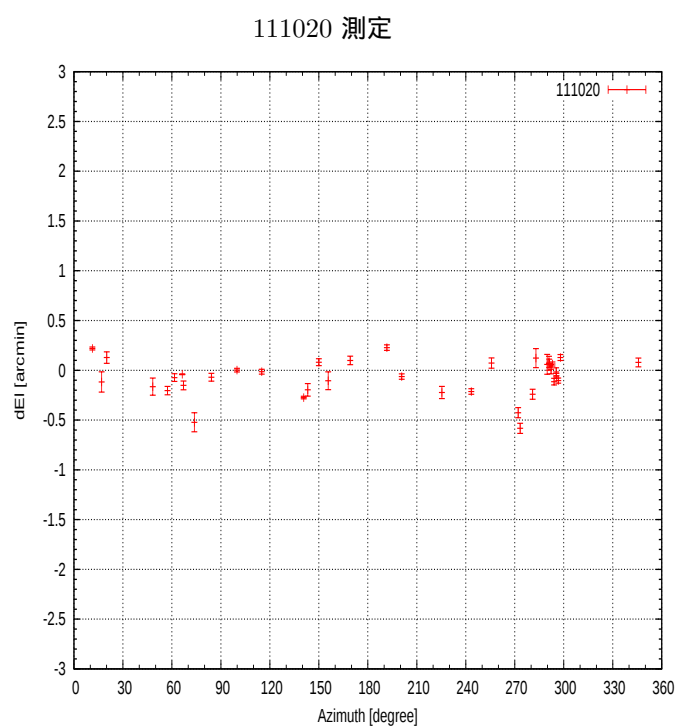
方向へ変化している事が分かる。一方、 El 方向の指向誤差の変動は、§5.1.2 の解析方法よりも大きく出てしまっている。しかし、 $0.061'$ はビームサイズの約 1.6×10^{-4} 倍であり、ビームのピークからこの値だけずれたとしても受信強度の変化はほぼ無いため、有意な変動ではないと考えられる。



(a)

図 5.1 (a) と同様のプロットである。図 5.1 (a) ほどではないが、この図においても 111207 の測定結果は 111020 に比べ、 dX の負の方向へ変化した様に見える。

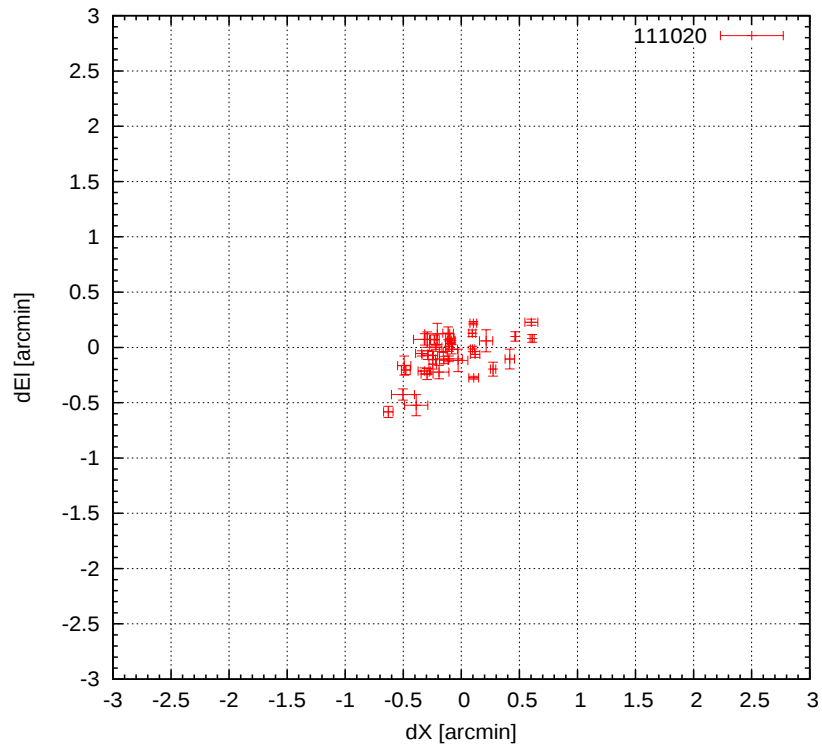
図 5.2: 111020 と 111207 測定結果の比較 2



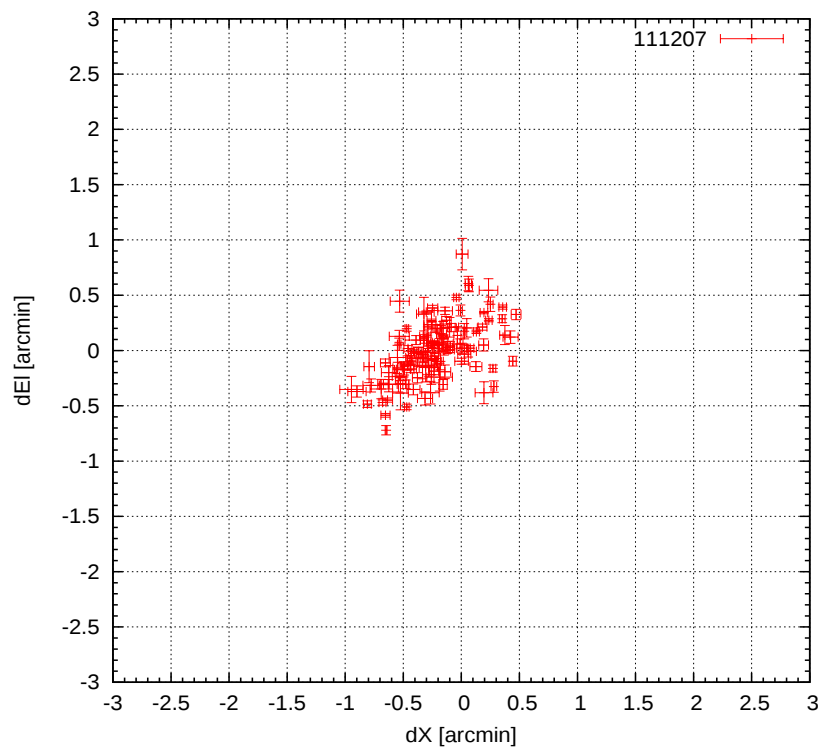
(b)

図 5.1 (b) と同様のプロットである。

111020 測定



111207 測定



(c)

図 5.1 (c) と同様のプロットである。この図からは、測定データ数が異なるため指向誤差の変化が分かりにくい。

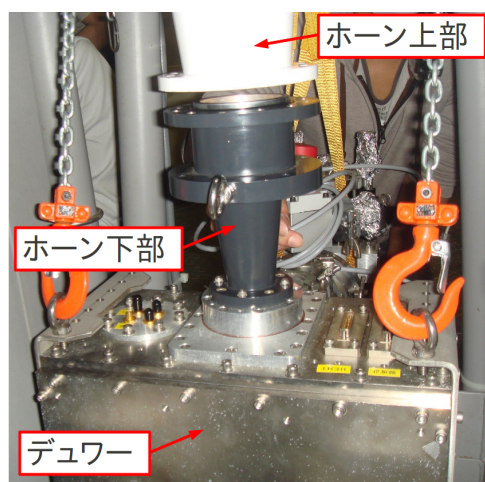
5.1.4 まとめ

Az 方向の指向誤差が、比較 1 の方法では約 $0.19'$ 、比較 2 の方法では約 $0.14'$ だけ負の方向に変化した。指向誤差の平均値ではそれぞれ、 $0.18'$ 、 $0.12'$ の変化である。この結果が正しいものだとすると、約 2 ヶ月で $0.1'$ 程度、指向誤差が変動する事になる。しかし、今回の測定は観測点数の違いのため、111020、111207 の 2 つの測定において指向誤差の傾向を同程度に評価できていないことが考えられる。したがって、同程度の観測点数で期間を空けて指向精度測定を行い、比較する必要がある。そして変動が見られた場合は、それがある値の周りでのランダムな変動なのか、一方向への変動なのかを調べるため、定期的な測定が必要である。ランダムな変動の場合は、変動の大きさによっては指向誤差の補正は必要ないが、一方向への変動の場合は、定期的な補正が必要である。

5.2 受信機載せ替えによる指向誤差の変動

5.2.1 はじめに

茨城 32 m 電波望遠鏡では 6.7 - 8.4 GHz 帯と 22 GHz 帯を切り替える際に、受信機を載せ替える。この時にデュワーからホーン下部を取り外す (図 5.3 参照)。このホーン下部とデュワーとの接合部はネジで固定されるが、ホーン側はネジを通す穴が開いているのみでネジは切っていない。そのため、載せ替え毎にこの接合部がずれる可能性がある。12 月の測定ではこのずれによって、指向誤差が有意に変化するかを調査した。



上部の白い部分がホーン上部、黒色の部分がホーン下部である。その下の銀色の箱がデュワーである。これは受信機載せ替え作業時の写真であり、ホーン下部と上部が外れた状態にある。ホーン下部とデュワーはネジで固定されているが、ホーン側の穴にはネジが切られておらず、載せ替え毎に位置が多少ずれる可能性がある。

図 5.3: 受信機

5.2.2 方法

受信機載せ替え作業時の状態を再現するために、デュワーを一旦下げてホーン下部を取り外し、再び取り付けた。この作業の前後で指向精度測定を行い、指向誤差を比較することで、その変動を調べた。作業前の測定が 111207、作業後が 111226 である。測定の諸元は § 4.3.6 に示した。測定データの内、§ 5.1.2 比較 1 と同じ方法でエラーの大きいデータを取り除いて指向誤差を求めた。エラーの基準値を表 5.4 に示した。

5.2.3 受信機載せ替え前後の指向誤差の比較

受信機載せ替え前後で指向誤差を求めた結果、その差は平均値では $0.01'$ 程度、標準偏差では約 $0.08'$ となった。平均値の差はビームサイズの 0.003 倍程度であり、有意な変化域ではない。標準偏差の差はそれよりも大きい。

表 5.4: 指向誤差のエラーの基準値

単位 : [arcmin]		111207	111226
δ_{dX}	平均値 $\overline{\delta_{dX}}$	0.120	0.0702
	標準偏差 $\sigma_{\delta_{dX}}$	0.195	0.100
δ_{dEl}	平均値 $\overline{\delta_{dEl}}$	0.161	0.0700
	標準偏差 $\sigma_{\delta_{dEl}}$	0.577	0.108
$\overline{\delta_{dX}} + \sigma_{\delta_{dX}}$		0.31	0.17
$\overline{\delta_{dEl}} + \sigma_{\delta_{dX}}$		0.73	0.18

図 4.19 で横軸に仰角をとったプロットを見ると、111207 測定で標準偏差を大きくしているデータは、エラーが大きいデータであり、かつそれらは低仰角に多い。一方、111226 測定ではそもそも低仰角のデータが少ないため、111207 に比べて標準偏差が小さいと考えられる。すなわち、111207 においてエラーが大きいデータ、もしくは低仰角のデータを取り除いて比較を行った方がより正しい比較となると考えられる。

そこでまず 111207 測定のデータにおいて、111226 と同じ基準値を使い、エラーが大きいデータを除いて標準偏差を求めた。この結果、表 5.6 に示したように標準偏差の値は $0.41'$ となり、111226 の値に近づいた。また低仰角のデータを取り除き、エラーによる制限は付けずに $El > 30^\circ$ のデータをのみを使って求めた値も、111226 の値に近づいた。このことから、標準偏差の差も受信機載せ替えによる指向誤差の変動ではなく、測定点の分布及び測定精度の違いによるものと考えられる。結論として受信機載せ替えによる指向誤差の変動はほぼ無く、あったとしても指向誤差の平均値で $0.01'$ 程度であり、有意な変化ではない。ただし、ここで調べたのは同一の受信機の載せ替えであり、異なる受信機の場合は別途調査が必要である。

表 5.5: 受信機載せ替え前後の指向誤差の比較

単位 : [arcmin]		111207	111226
dX	平均値 $\overline{dX}$	- 0.23	- 0.22
	標準偏差 σ_{dX}	0.36	0.30
dEl	平均値 $\overline{dEl}$	- 0.020	0.065
	標準偏差 σ_{dEl}	0.33	0.26
指向誤差	平均値 $\overline{\Delta}$	0.23	0.24
	標準偏差 σ	0.49	0.41
指向精度 $\overline{\Delta} + \sigma$		0.72	0.65

表 5.6: 111207 測定の指向誤差の比較

単位 : [arcmin]		エラーが 111226 の基準値以下の データのみを用いた場合	$El > 30^\circ$ のデータ のみを用いた場合
指向誤差	平均値	0.23	0.20
	標準偏差	0.41	0.44

5.3 最適なモデル式の検討

5.3.1 現状のモデル式

指向誤差の補正は、それを再現するモデル式によって計算した値を、アンテナ制御時にオフセットとして加える事で行う。したがっていくら正確に指向誤差の測定を行っても、それを正しく再現し得るモデル式を用いなければ、指向精度を向上させる事は出来ない。だが現状のモデル式では指向誤差を正しく再現できていない。現状の

モデル式を再び以下に示す。

$$dX = A1 \cos(El) + A3 \cos(Az) \sin(El) - A4 \sin(Az) \sin(El) + A5 \sin(El) + A7, \quad (5.1)$$

$$dEl = A2 - A3 \sin(Az) - A4 \cos(Az) + A6 \cos(El) + A8 \sin(El). \quad (5.2)$$

この式で 12 月に測定した指向誤差をフィッティングした結果を図 5.4 に示す。図 5.4 から分かるように、補正量が測定値をあまり良く再現していない。この原因は、 Az 方向への指向誤差の依存性が、現状のモデル式では再現することが難しい 360° よりも短い周期になっていることにある。このような指向誤差の特徴が現れているのは、これまでに行った補正により、再現が出来ない指向誤差が顕著に出てきたため考えられる。したがってこの指向誤差を再現できるモデル式の検討を行った。

5.3.2 モデル式の検討

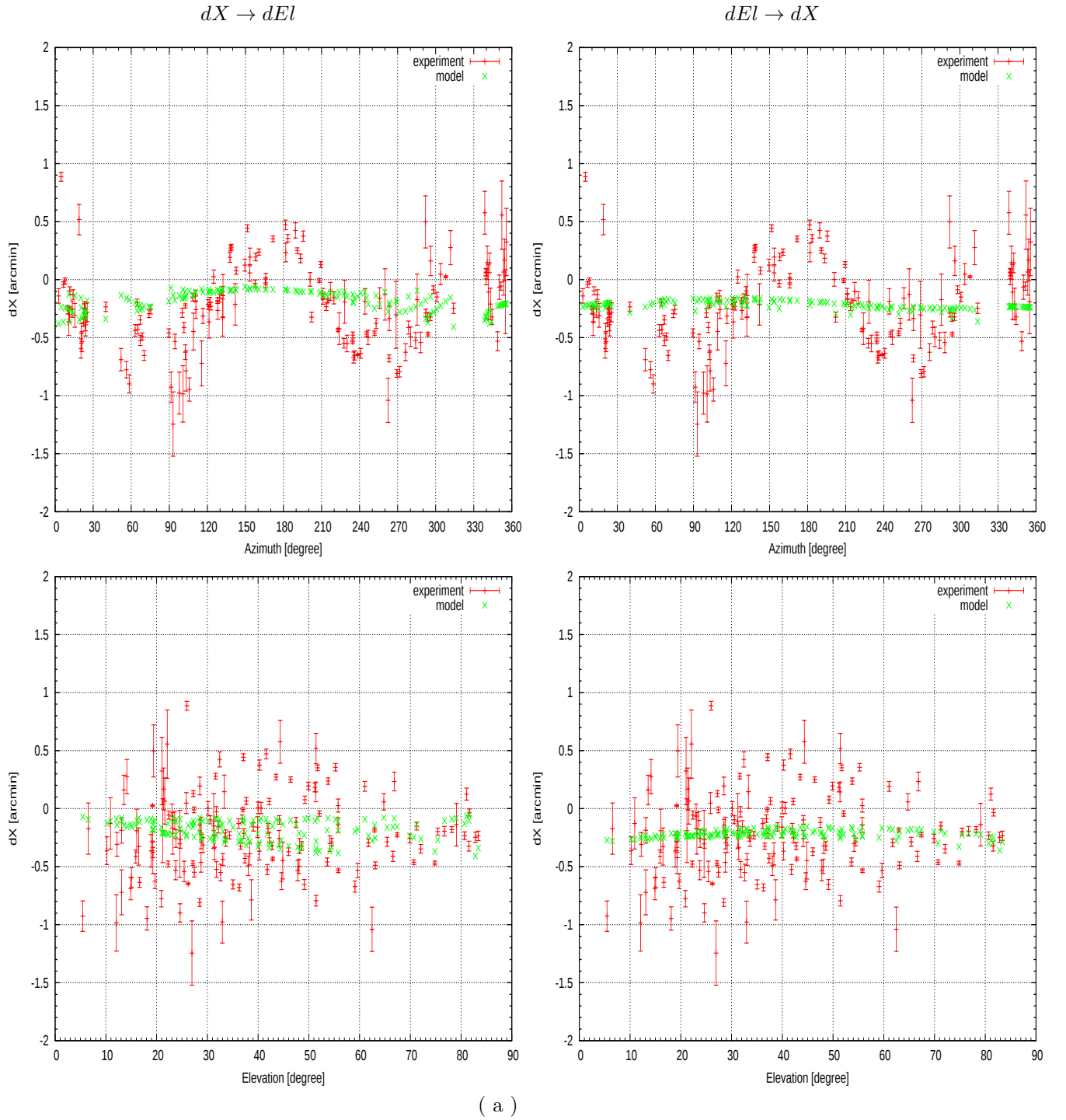
図 5.4 から、指向誤差には Az 方向に約 180° 周期の変化がみられる。そこで新たなパラメータ $A9, A10, A11, A12$ を用いて、 Az の 2 倍の正弦余弦の項を加えた。以下にその式を示した。

$$dX = A1 \cos(El) + A3 \cos(Az) \sin(El) - A4 \sin(Az) \sin(El) + A5 \sin(El) + A7 + A9 \sin(2Az) + A10 \cos(2Az), \quad (5.3)$$

$$dEl = A2 - A3 \sin(Az) - A4 \cos(Az) + A6 \cos(El) + A8 \sin(El) + A11 \sin(2Az) + A12 \cos(2Az). \quad (5.4)$$

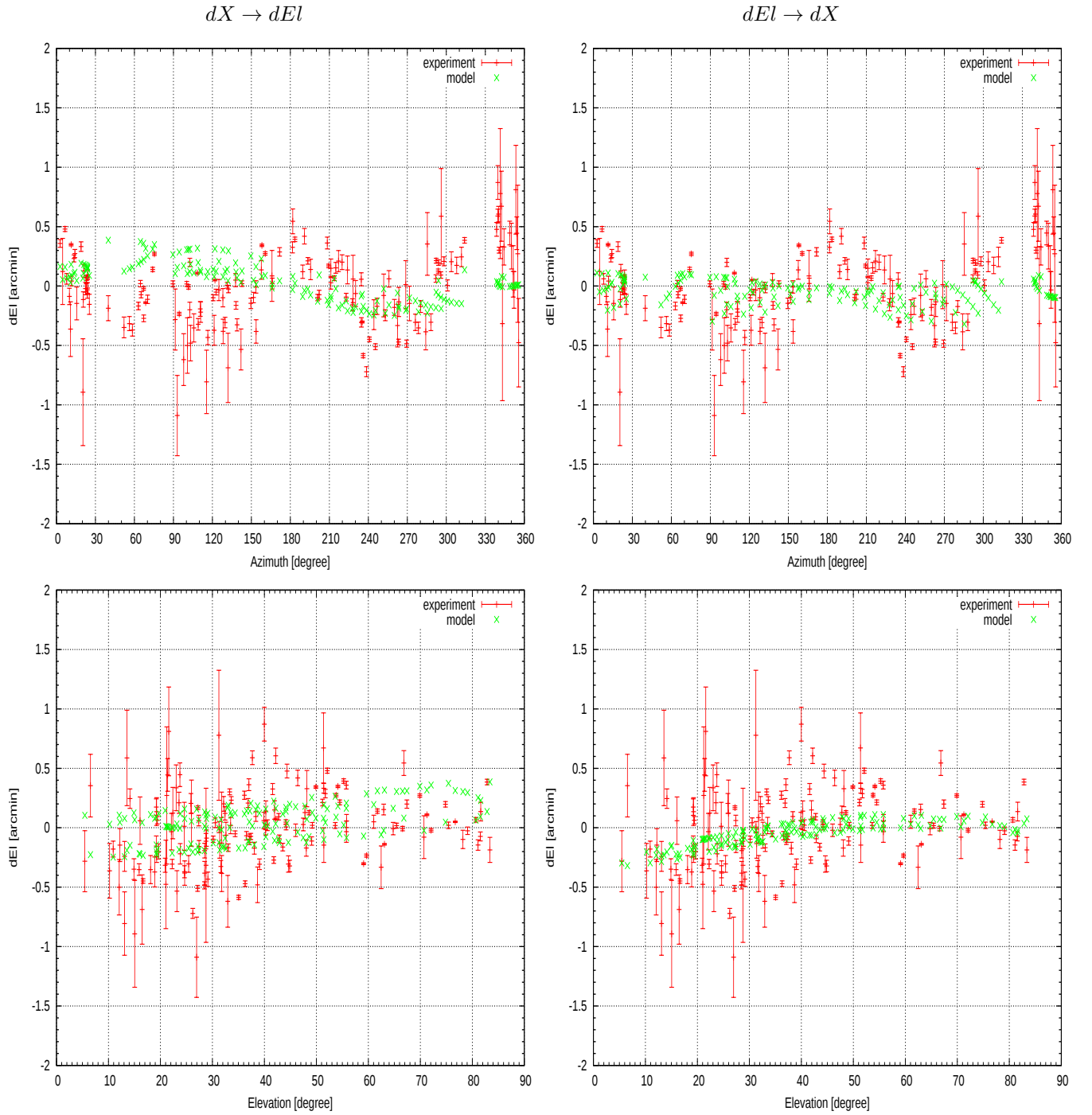
12 月の測定値をこの式でフィッティングした結果を図 5.5 に示した。 dEl を先にフィットした結果では dX の指向誤差が正しく再現されていないが、 dX からフィットを行った結果では、現状のものに比べ指向誤差を良く再現している事が分かる。図 5.6 に示した補正後の残差では、 $1'$ 以上のずれは無くなり、ほぼ $0.5'$ 以内に収まっている。現状のモデル式及び新たな式を用いた補正後の指向精度を求めた結果を表 5.7 にまとめた。新たなモデル式を使用して dX の式から先にフィッティングを行った結果、補正後の計算値が指向誤差の標準偏差で約 $0.39'$ となり、ほぼ目標指向精度に達することが分かった。

表 5.7: 現状の式と新たな式での補正後の指向精度の比較					
		現状のモデル式		新たなモデル式	
単位 : [arcmin]		$dX \rightarrow dEl$	$dEl \rightarrow dX$	$dX \rightarrow dEl$	$dEl \rightarrow dX$
dX	平均値	-0.041	-0.0058	-0.077	-0.076
	標準偏差	0.36	0.36	0.27	0.38
dEl	平均値	-0.059	0.031	-0.030	-0.011
	標準偏差	0.36	0.31	0.27	0.25
指向誤差	平均値	0.072	0.031	0.083	0.077
	標準偏差	0.52	0.47	0.39	0.46

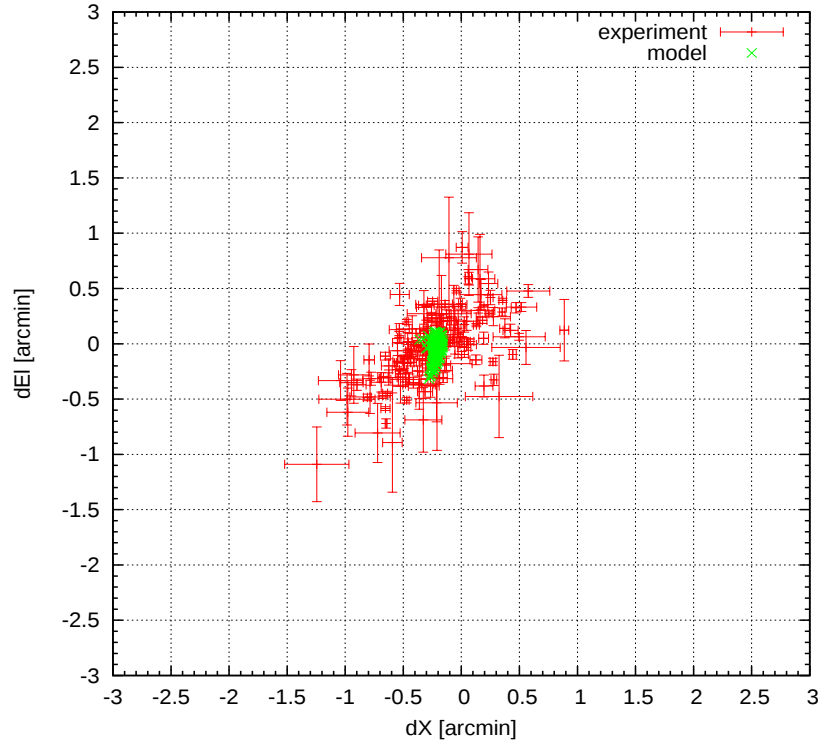
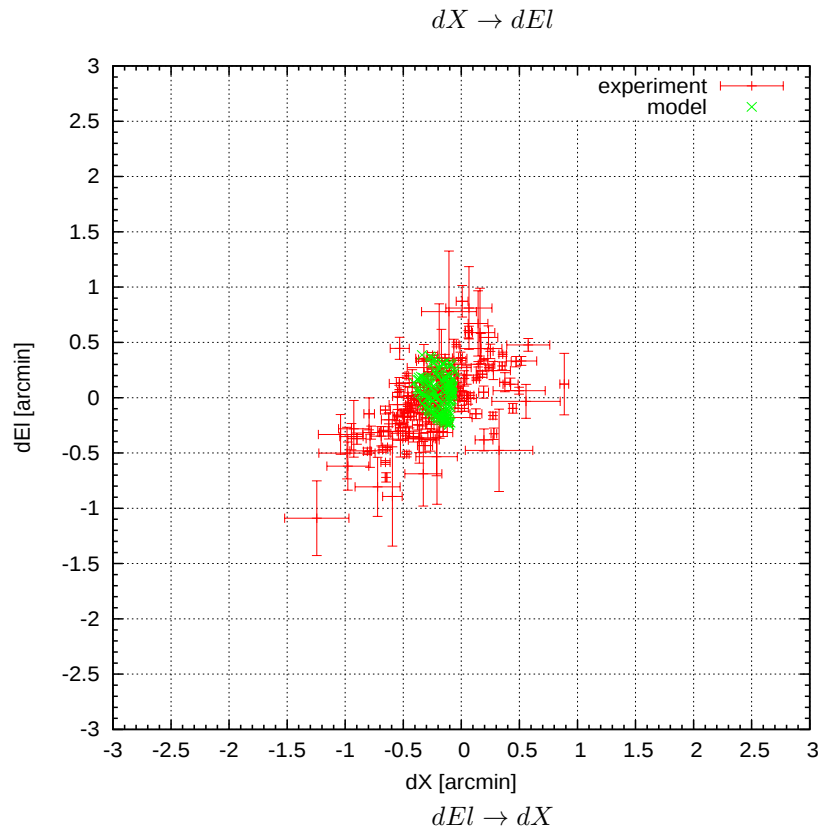


(a)
 左が先に dX の式を、右が先に dEl の式をフィットした結果である。
 縦軸に *Azimuth* 方向の指向誤差 dX をプロットした。上段が横軸
Azimuth、下段が横軸 *Elevation* である。赤の実測値に対して緑の
 補正量が正しくフィット出来ていない事が分かる。

図 5.4: 現状のモデル式によるフィット結果



(b)
縦軸に *Elevation* 方向の指向誤差 dEl をプロットした。上段が横軸
Azimuth、下段が横軸 *Elevation* である。



(c)

縦軸 dX 、横軸 dEl をプロットした図である。上が dX を先に、下が dEl を先にフィットした結果である。

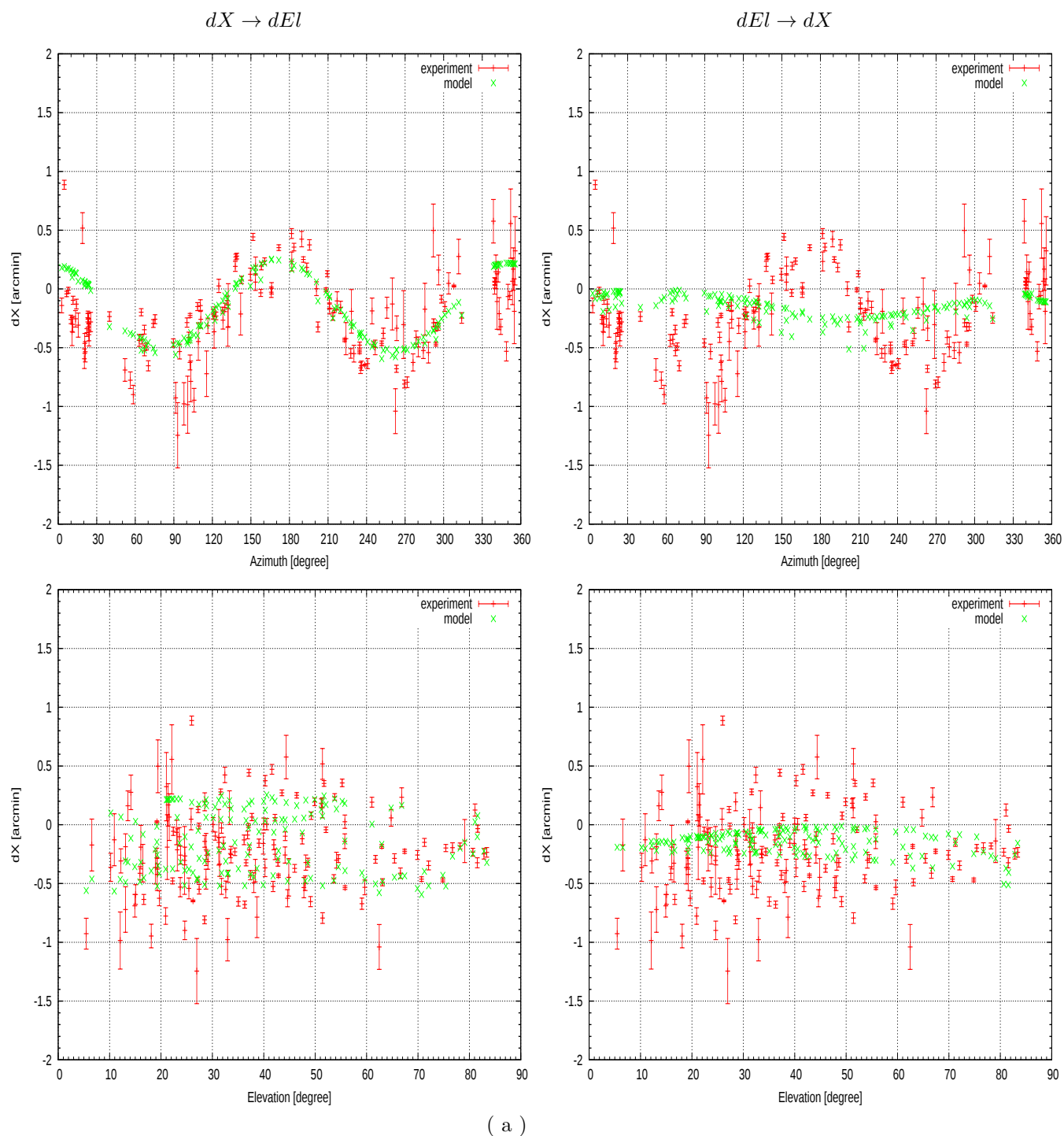
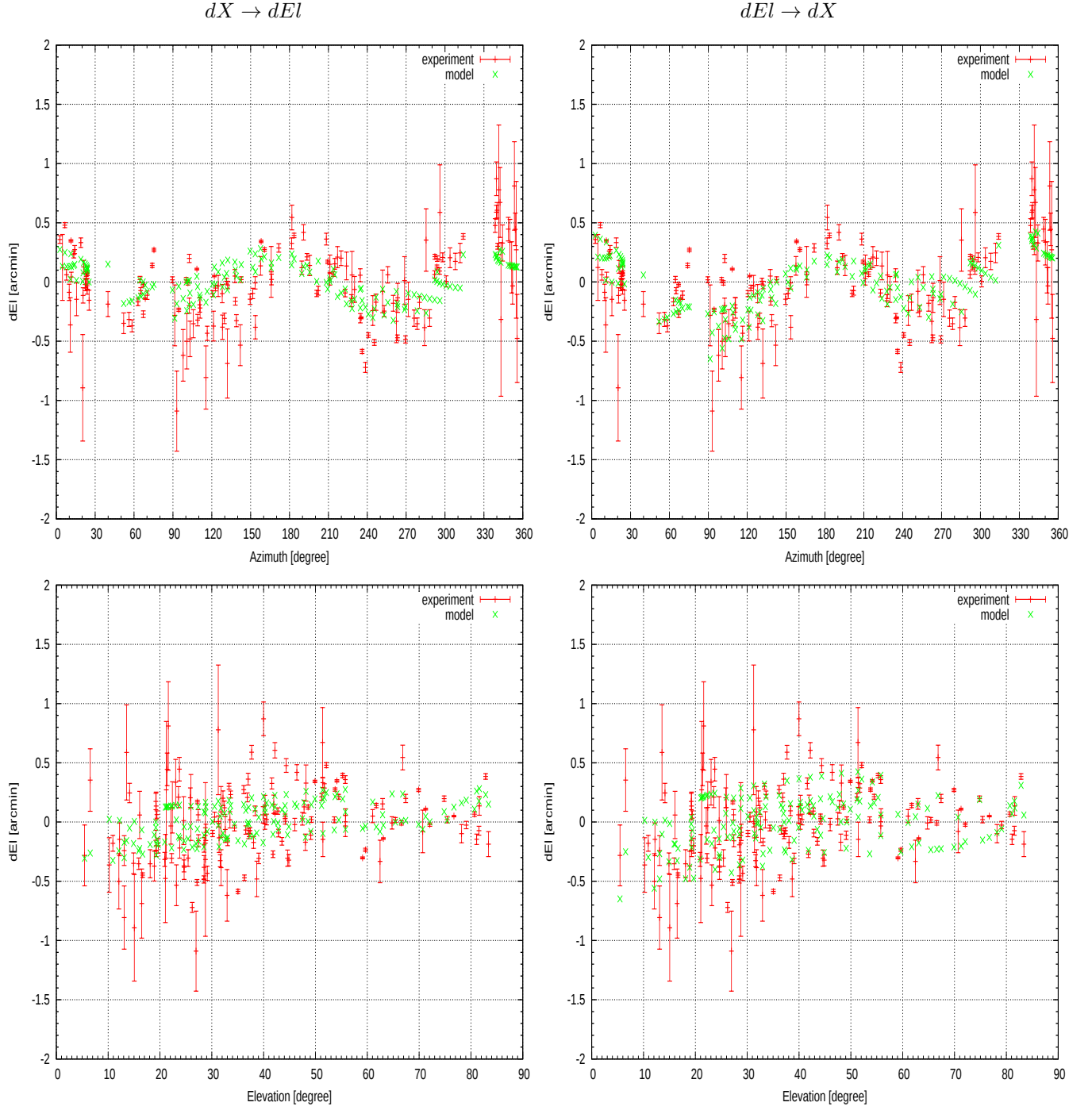


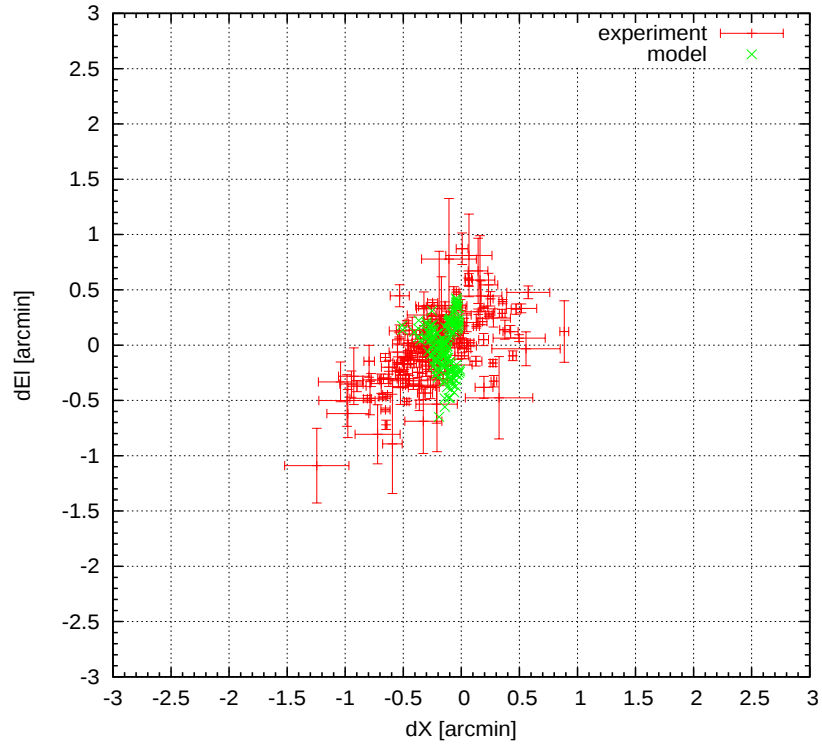
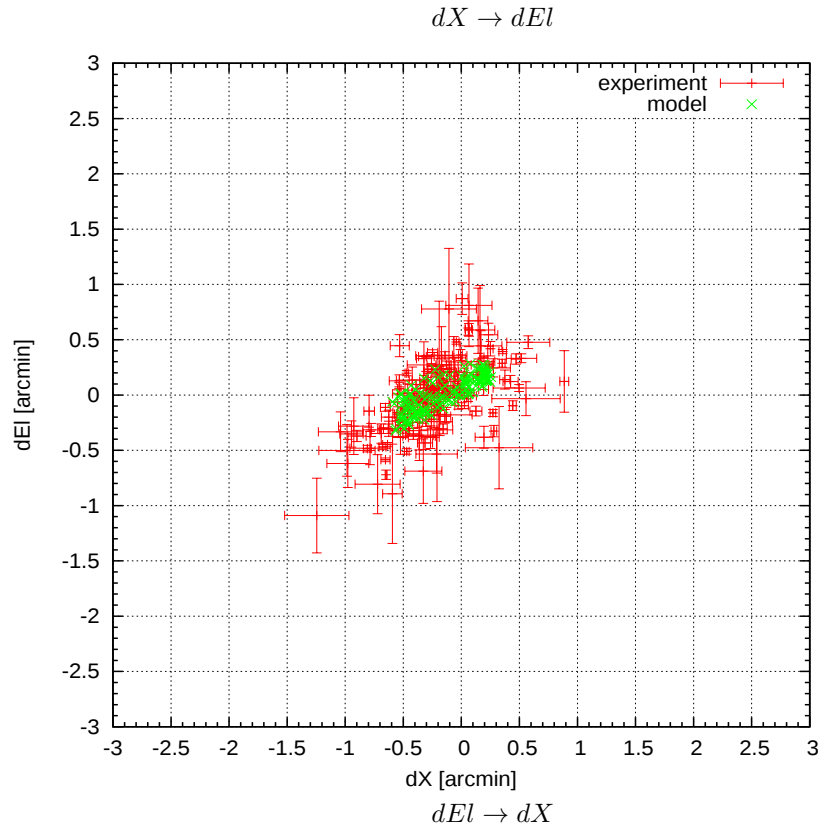
図 5.7 (a) と同様のプロットである。 dEl を先にフィッティングした方は補正が正しく出来ていないが、 dX を先に行った方は正しく補正が出来ていることが分かる。

図 5.5: 新たなモデル式によるフィット結果



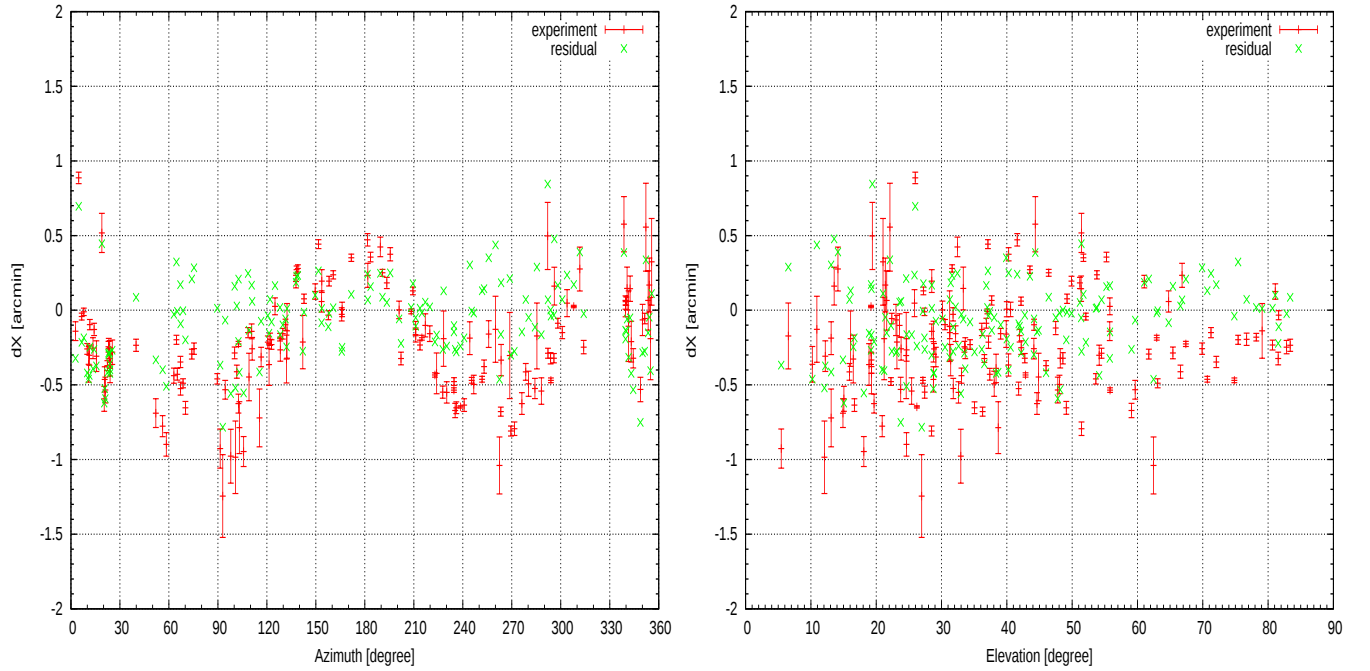
(b)

図 5.7 (b) と同様のプロットである。 dEl の補正は、 dEl を先にフィッティングした方が正しく出来ている。

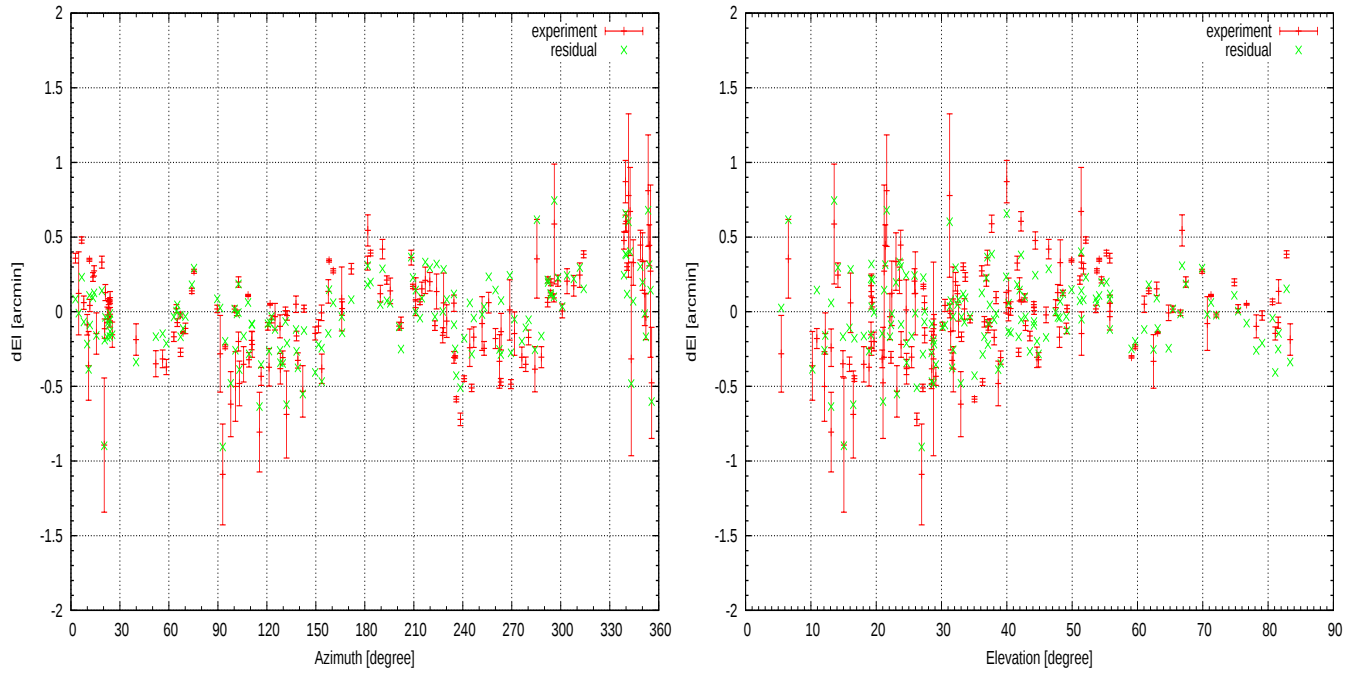


(c)

図 5.7 (c) と同様のプロットである。上図が dX を先に、下図が dEl を先にフィットした図である。



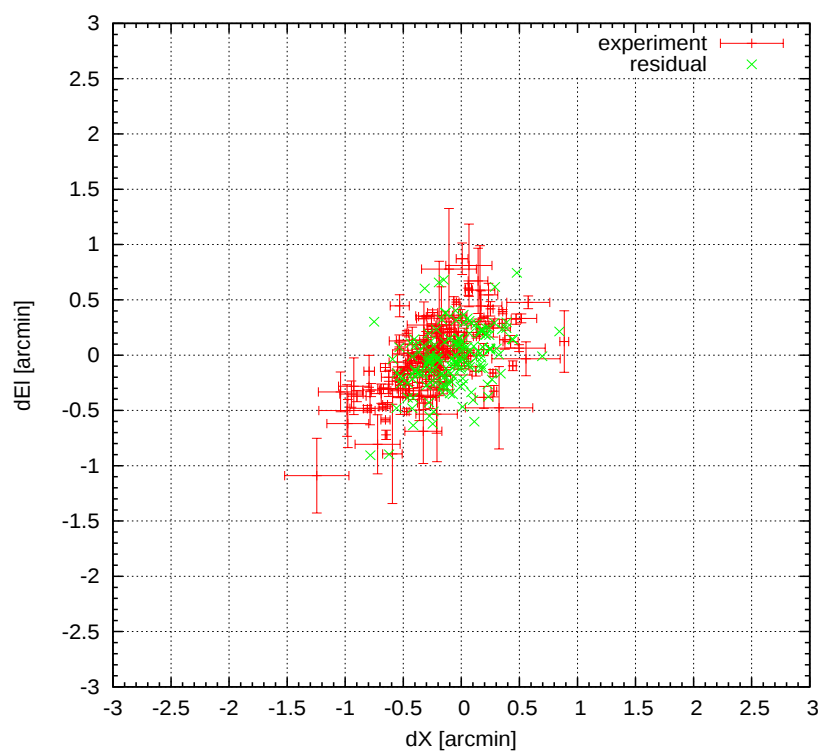
(a)



(b)

新たなモデル式で dX を先にフィットして求めた残差をプロットした図である。上段が縦軸 dX 、下段が縦軸 dEl で、左が横軸 $Azimuth$ 、右が横軸 $Elevation$ である。緑の残差を見ると、特に Az に対して周期的な誤差を補正している事が分かる。

図 5.6: 新たなモデル式による残差



(c)

図 5.7 (c) と同様のプロットである。指向誤差がほぼ $0.5'$ 以内に収まっている事が分かる。

第6章 まとめと今後の課題

2010 年 11 月から 2011 年 12 月まで日立アンテナにおける指向精度測定、及び指向誤差の補正を行ってきた。2012 年 1 月現在、最後に器差パラメータ値の補正を行った 2011 年 10 月 20 日の測定結果で、指向精度は指向誤差の平均値が $0.070'$ 、標準偏差が $0.59'$ という値を得た。日立アンテナにおいて指向誤差が変化する要因として、受信機の載せ替えが考えられていたが、§ 5.2 の結果から有意な変化はないことが分かった。指向誤差の時間変動に関しては、約 2 ヶ月の間で平均値で $0.1' - 0.2'$ 程度の変動が確認された。しかしこれが真の変動かをより正確に調べるためには、観測方向及び十字スキャン測定セット数を両者で同程度にした測定を行い、比較する必要がある。目標指向精度は 8.4 GHz 帯ビームサイズの $1/10$ である $0.38'$ を指向誤差の平均値と標準偏差の和 $\bar{\Delta} + \sigma$ で達成することであるが、現状では $0.66'$ であり達成していない。今後この精度を達成するためには、§ 5.3 で検討した様に器差パラメータに追加の項を加える事が必要だと考えられる。また、低 EL における測定では指向誤差のエラーが大きいため、これが真のものを調べるためにより精度の良い測定を行う必要がある。この方法としては、連続的にデータを取得する十字スキャンやメタノールメーザーを用いた分光観測、光学ポインティングなどが考えられる。

謝辞

茨城大学大学院博士前期課程における 2 年間、多くの方々にご指導を受け、また助言を頂き、本日まで研究を行って来ることが出来ました。この修士論文の最後にその感謝の意を表したいと思います。指導教員の百瀬先生は研究面での助言はもちろんの事、ゼミや授業ではとても有益な知識を与えて下さいました。その全てを私が吸収できたかという点、多く努力不足のため溢れ落ちてしまっていますが、そのかけらは確実に残っています。今後それらのかけらから大きな知識を得るよう精進して行きます。米倉先生には茨城 32 m 電波望遠鏡の立ち上げに関わる私の研究上、大変お世話になりました。高萩で作業をする中で多くの事を学びました。米倉先生のご指導によりここまで研究を進める事が出来ました。山口大学の藤沢健太先生には、同氏のレポートや研究会などでお会いした時に頂いた助言など、研究面で多くの事を参考にさせて頂きました。大阪府立大学の方々には茨城 32 m 電波望遠鏡の受信機全般に関わる事で大変お世話になりました。岡本先生には学部と修士 1 年次のゼミや授業で、丁寧な指導をして頂きました。授業のレポートは大変でしたがとても勉強になり、また面白いレポートでした。高萩の現地の作業では、作業員の作間さん、宇宙電波館の職員である藤原さん、笹山さん、金沢鉄鋼の方々など多くの方にお世話になりました。お陰様で高萩での良い思い出が沢山出来ました。最後に 3 年間、または 2 年間、同じ研究室で共に授業や研究を行ってきた皆へ。少しの間でしたが楽しい時間を与えてくださり、ありがとうございました。最後まで楽しく研究できたのも皆のお陰です。本当に色々と助けられたと思います。

そしてやはり、学生という貴重な時間過ごす事を許してくれた両親、家族には感謝をしなくてはなりません。

付 録 A カセグレン型パラボラアンテナの光学系

まずパラボラアンテナの光学系を考える。この光学系は図 A.1 の様に表される。焦点距離 f の反射面に垂直に電波が入射したとする。開口面に入射する波面が反射鏡から h 離れた位置にあるとすると、この波面が光軸上において反射鏡で反射され焦点に達するまでの光学的距離は $2f + h$ である。軸外の光線もフェルマーの原理より同じ距離だけ進み、焦点に達するので

$$2f + h = \sqrt{r^2 + (f - x)^2} + (f - x) + h \quad (\text{A.1})$$

である。焦点から h の位置の波面ではその位相は揃っていたので、そこから同じ光学的距離を進んだ焦点でも位相は揃っている。式 (A.1) より

$$r^2 = 4fx. \quad (\text{A.2})$$

を得て、反射鏡の形状が回転放物面 (*paraboloid*) をしていることがわかる。

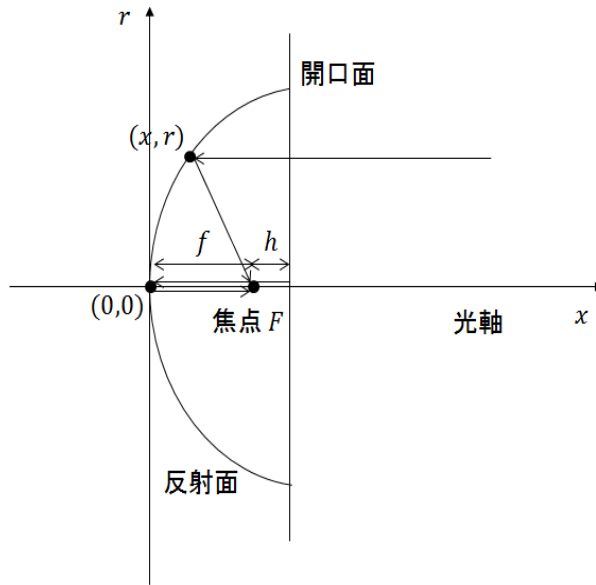


図 A.1: パラボラアンテナの光学系

次にカセグレン型の光学系について考える。先程と同じく回転放物面 $r^2 = 4fx$ に、電波が開口面に垂直な方向から入射したとする。開口面から回転放物面の焦点である点 $F_1(x, y) = (f, 0)$ までの光学的距離 R は r によらず全て等しく

$$R = 2f + h. \quad (\text{A.3})$$

である。副反射鏡として以下の式で表される回転双曲面を考える。

$$\frac{x'^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1. \quad (\text{A.4})$$

x' の原点 O' は x 軸上にある。この双曲面の焦点は点 $F_2(x', r) = (\sqrt{a^2 + b^2}, 0)$ と点 $F'_2(x', r) = (-\sqrt{a^2 + b^2}, 0)$ である。ここで F_1 と F_2 が一致するように副反射鏡を平行移動させる。この時、原点 O と O' の距離 Δ は $\Delta = f - \sqrt{a^2 + b^2}$ となる。したがって副反射鏡の形状は

$$\frac{(x - \Delta)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1 \quad (\text{A.5})$$

となる。双曲線の定理から $|PF_2 - PF'_2| = 2a$ 、また開口面から点 P までの光学的距離は $2f + h - PF_2$ である。これより、開口面から点 P で反射して点 F'_2 に至る光学的距離 R' は

$$R' = (2f + h - PF_2) + PF'_2 = 2f + h + 2a \quad (\text{A.6})$$

となる。すなわち開口面を垂直に通過した光線は、同一の光学的距離を通って点 $F'_2(x, r) = (-\sqrt{a^2 + b^2} + \Delta, 0)$ に集まる。つまり点 F'_2 は光学系の合成焦点となっている。

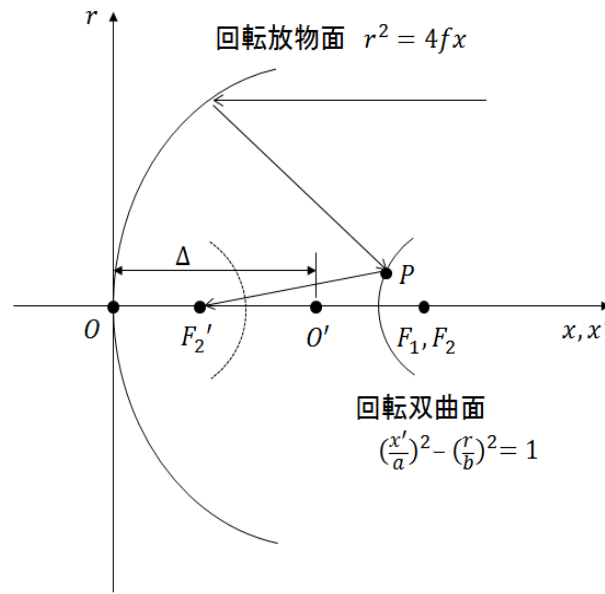


図 A.2: カセグレン光学系

この様に収束された電波は、一般的にホーンアンテナの1次放射器に入射し、受信機に導かれる。茨城 32 m でもホーンアンテナが用いられ、それが直接受信機に接続されている。ホーンアンテナはガウス型のアンテナパターンを持っているため、主鏡面の端からの電波の寄与を小さくし、サイドローブ小さくする働きも持つ。

付 録 B ヘテロダインによる周波数変換の原理

ヘテロダイン方式による周波数変換の原理を説明する。周波数変換器は天体信号とそれに近い周波数の局部発信器 (LO ; *Local Oscillator*) 信号を混ぜて、非線形素子でその差周波成分を取り出す。非線形な電圧 - 電流特性 ($I - V$ 特性) を持つ素子として半導体ダイオードを考える。この $I - V$ 特性の一般的な式は

$$I = I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V}{V_0} \right) - 1 \right\} \quad (\text{B.1})$$

である。ここで、 $V_0 = \frac{\eta k_B T}{e}$ 、 I_0 : 逆飽和電流、 k_B : ボルツマン係数、 e : 電子の電荷量、 T : 素子の物理温度、 η : ダイオードの性能を表す係数である。この式の指数関数部分を展開すると

$$I = I_0 \left\{ 1 + \frac{V}{V_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 + \cdots - 1 \right\} \quad (\text{B.2})$$

となる。3 次以降の項を無視すると

$$I = I_0 \left\{ 1 + \frac{V}{V_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right\} \quad (\text{B.3})$$

となって、非線形特性があることが分かる。アンテナからの入力電波と、局部発信器からの信号をそれぞれ

$$V_s(t) = V_{s0} \cos \omega_s t + \phi_s, \quad (\text{B.4})$$

$$V_l(t) = V_{l0} \cos \omega_l t + \phi_l \quad (\text{B.5})$$

とする。式 (B.3) の 2 次の電流成分のみを考えると、半導体ダイオードにこれらの入力があった時の出力電流 i_m は以下の様になる。

$$\begin{aligned} i_m &= K[V_s(t) + V_l(t)]^2 \\ &= K[V_s(t)^2 + 2V_s(t)V_l(t) + V_l(t)^2] \\ &= K[V_{s0}(t)^2 \cos^2(\omega_s t + \phi_s) + V_{l0}^2 \cos^2(\omega_l t + \phi_l) + 2V_{s0}V_{l0} \cos(\omega_s t + \phi_s) \cos(\omega_l t + \phi_l)]. \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

ここで三角関数の公式を用いると

$$\begin{aligned} i_m &= K \left[\frac{1}{2} V_{s0}^2 \{ \cos 2(\omega_s t + \phi_s) + 1 \} + \frac{1}{2} V_{l0}^2 \{ \cos 2(\omega_l t + \phi_l) + 1 \} \right. \\ &\quad \left. + 2V_{s0}V_{l0} \left\{ \frac{1}{2} \cos(\omega_s t + \phi_s + \omega_l t + \phi_l) + \frac{1}{2} \cos(\omega_s t + \phi_s - (\omega_l t + \phi_l)) \right\} \right] \\ &= \frac{1}{2} K (V_{s0}^2 + V_{l0}^2) \\ &\quad + \frac{1}{2} K V_{s0}^2 \cos 2(\omega_s t + \phi_s) + \frac{1}{2} K V_{l0}^2 \cos 2(\omega_l t + \phi_l) \\ &\quad + K V_{s0}V_{l0} \cos[(\omega_s + \omega_l)t + (\phi_s + \phi_l)] + K V_{s0}V_{l0} \cos[(\omega_s - \omega_l)t + (\phi_s - \phi_l)] \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

が得られる。第 1 項目は直流成分、第 2、3 項目はそれぞれアンテナから入力される電波信号、局部発信器からの信号の第 2 高波調成分、そして第 4、5 項目がそれぞれ和周波、差周波成分である。この出力信号を周波数フィルタに掛けて、差周波成分のみを取り出すことで、低い周波数の IF 信号へ変換する。これがヘテロダイン受信機の原理である。また式 (B.7) を見ると、 $\phi_s - \phi_l$ の様に天体起源の位相の情報が保たれている事が分かる。すなわち、この方式では天体の位相の情報も得る事が出来る。ただし、これには LO 信号の安定性が求められる。

付 録 C ビームパターンとアンテナ開口面上電場分布の関係

アンテナは送信と受信において同じ性質を持つため、送信の場合を考えてビームパターンを説明する。アンテナのビームパターンは、アンテナ開口面の電場が遠方で作る電場パターンである。遠方のある点で作られる電場は、開口面上の微小開口要素が作る電場の足し合わせとなる。そこでまず 1 つの微小開口要素が作る電場を考える。

ここでは簡単のため 1 次元のアンテナ開口を考える (図 C.1 参照)。開口面上の微小開口要素を $[x, x + dx]$ とす

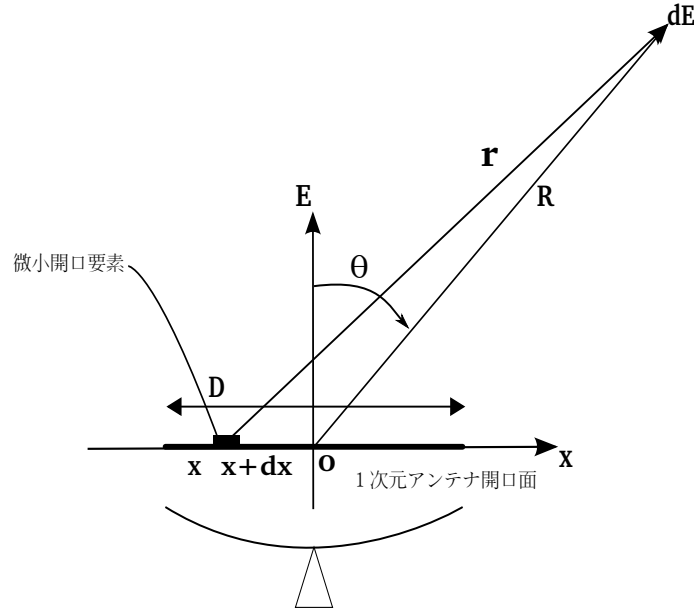


図 C.1: 微小開口要素が遠方で作る電場

る。今、開口面の大きさを D とし、その中心から角度 θ 、距離 R の十分遠方の点において、 dx 内の電場の変動により誘起される電場の強さ dE は

$$pdE \propto E(x) \frac{\exp(-i2\pi r/\lambda)}{r} dx \quad (C.1)$$

と表される。ここで λ は電波の波長、 r は dx から遠方の点までの距離である。距離 R が開口の大きさに比べて十分に大きいことから、 $r \approx R + x \sin \theta$ 及び $R \gg x \sin \theta$ であるので、式 (C.1) は

$$\begin{aligned} dE &\propto E(x) \frac{\exp(-i2\pi R/\lambda) \exp(-i2\pi x \sin \theta/\lambda)}{R + x \sin \theta} dx \\ &= E(x) \frac{\exp(-i2\pi R/\lambda) \exp(-i2\pi x \sin \theta/\lambda)}{R} dx \end{aligned} \quad (C.2)$$

となる。この時、位相項中の $x \sin \theta$ は λ に比べて小さいとは見なせないので、無視できないことに注意する。 R と λ は定数であるので、式 (C.3) の比例関係のみを取り出すと

$$dE(\theta) \propto E(x) \exp(-i2\pi x \sin \theta/\lambda) dx \quad (C.3)$$

となる。これが微小開口要素が作る電場である。 $l = \sin \theta$ 、 $u = \frac{x}{\lambda}$ とすると、アンテナ開口面全体が作る電場は、式 (C.3) を開口面全体で積分して

$$E(l) = \alpha \int_{-D/2\lambda}^{D/2\lambda} E(u) \exp(-i2\pi ul) du \quad (C.4)$$

となる。 α は比例係数である。この式から、アンテナ遠方での電場分布 $E(l)$ は開口面上の電場 $E(u)$ のフーリエ変換になることが分かる。電力は電場の 2 乗に比例するので、結局ビームパターンは開口面上電場分布のフーリエ変換の 2 乗に比例した形となる。

付 録 D 指向誤差を表すモデル式の導出

式 (3.5)、(3.6) を求める。 $\Delta Az \cos(El) = \Delta \mathbf{i}_* \cdot \mathbf{i}_{Az}$ 、 $\Delta El = \Delta \mathbf{i}_* \cdot \mathbf{i}_{El}$ は次の 2 式

$$\Delta \Theta = \Delta \theta_1 + \Delta \theta_2 + \Delta \theta_3 + \Delta \theta_4 + \Delta \theta_5 + \Delta \theta_6, \quad (D.1)$$

$$\Delta \mathbf{i}_* = \Delta \Theta \times \mathbf{i}_* \quad (D.2)$$

を用いることで、 i_1 から i_6 の単位ベクトルと $\mathbf{i}_*$ の外積をとり、更にそれと $\mathbf{i}_{Az}$ または $\mathbf{i}_{El}$ との内積をとったものとして表せる。そこでまず計算を簡単にするために i_1 から i_6 の単位ベクトルを $\mathbf{i}_*$ 、 $\mathbf{i}_{Az}$ 、 $\mathbf{i}_{El}$ の 3 つのベクトルで表す。図 3.2 より i_5 、 i_6 は簡単で

$$\mathbf{i}_5 = \mathbf{i}_{Az}, \quad (D.3)$$

$$\mathbf{i}_6 = -\mathbf{i}_{El} \quad (D.4)$$

である。次に i_3 、 i_4 は $\mathbf{i}_*$ 、 $\mathbf{i}_{El}$ と同一平面内にあるので、この 2 つのベクトルを用いて表せる。図 D.1 より

$$\mathbf{i}_4 = \cos(El)\mathbf{i}_* - \sin(El)\mathbf{i}_{El}, \quad (D.5)$$

$$\mathbf{i}_3 = \sin(El)\mathbf{i}_* + \cos(El)\mathbf{i}_{El} \quad (D.6)$$

となる。また i_1 、 i_2 は i_4 、 i_5 と同一平面内にあるため、図 D.2 より

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_1 &= \cos(360^\circ - Az)\mathbf{i}_4 + \sin(360^\circ - Az)\mathbf{i}_5 \\ &= \cos(Az)\mathbf{i}_4 - \sin(Az)\mathbf{i}_5 \\ &= \cos(Az)\cos(El)\mathbf{i}_* - \cos(Az)\sin(El)\mathbf{i}_{El} - \sin(Az)\mathbf{i}_{Az}, \end{aligned} \quad (D.7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_2 &= \sin(360^\circ - Az)\mathbf{i}_4 - \cos(360^\circ - Az)\mathbf{i}_5 \\ &= -\sin(Az)\mathbf{i}_4 - \cos(Az)\mathbf{i}_5 \\ &= -\sin(Az)\cos(El)\mathbf{i}_* + \sin(Az)\sin(El)\mathbf{i}_{El} - \cos(Az)\mathbf{i}_{Az} \end{aligned} \quad (D.8)$$

となる。これらの式を用いて $\Delta \Theta \times \mathbf{i}_*$ を計算する。ここで、 $\mathbf{i}_*$ 、 $\mathbf{i}_{Az}$ 、 $\mathbf{i}_{El}$ の 3 つのベクトルは互いに直交することから以下の関係があることを用いる。

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_* \times \mathbf{i}_* &= 0 \\ \mathbf{i}_{Az} \times \mathbf{i}_* &= \mathbf{i}_{El} \\ \mathbf{i}_{El} \times \mathbf{i}_* &= -\mathbf{i}_{Az}. \end{aligned} \quad (D.9)$$

これより

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_1 \times \mathbf{i}_* &= \cos(Az)\sin(El)\mathbf{i}_{Az} - \sin(Az)\mathbf{i}_{El} \\ \mathbf{i}_2 \times \mathbf{i}_* &= -\sin(Az)\sin(El)\mathbf{i}_{Az} - \cos(Az)\mathbf{i}_{El} \\ \mathbf{i}_3 \times \mathbf{i}_* &= -\cos(El)\mathbf{i}_{Az} \\ \mathbf{i}_4 \times \mathbf{i}_* &= \sin(El)\mathbf{i}_{Az} \\ \mathbf{i}_5 \times \mathbf{i}_* &= \mathbf{i}_{El} \\ \mathbf{i}_6 \times \mathbf{i}_* &= \mathbf{i}_{Az}. \end{aligned} \quad (D.10)$$

したがって

$$\begin{aligned}
\Delta \mathbf{i}_* &= \Delta \Theta \times \mathbf{i}_* \\
&= \Delta \theta_1 \{ \cos(Az) \sin(El) \mathbf{i}_{Az} - \sin(Az) \mathbf{i}_{El} \} \\
&\quad + \Delta \theta_2 \{ -\sin(Az) \sin(El) \mathbf{i}_{Az} - \cos(Az) \mathbf{i}_{El} \} \\
&\quad - \Delta \theta_3 \cos(El) \mathbf{i}_{Az} + \Delta \theta_4 \sin(El) \mathbf{i}_{Az} + \Delta \theta_5 \mathbf{i}_{El} + \Delta \theta_6 \mathbf{i}_{Az}.
\end{aligned} \tag{D.11}$$

ゆえに式 (3.4) は

$$\begin{aligned}
\Delta Az \cos(El) &= \Delta \mathbf{i}_* \cdot \mathbf{i}_{Az} \\
&= \Delta \theta_6 + \Delta \theta_1 \cos(Az) \sin(El) - \Delta \theta_2 \sin(Az) \sin(El) + \theta_4 \sin(El) - \Delta \theta_3 \cos(El), \\
\Delta El &= \Delta \mathbf{i}_* \cdot \mathbf{i}_{El} \\
&= \Delta \theta_5 - \Delta \theta_1 \sin(Az) - \Delta \theta_2 \cos(Az)
\end{aligned}$$

と求まる。

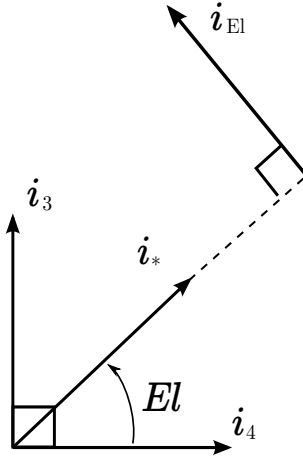


図 D.1: i_3 、 i_4 を含む平面

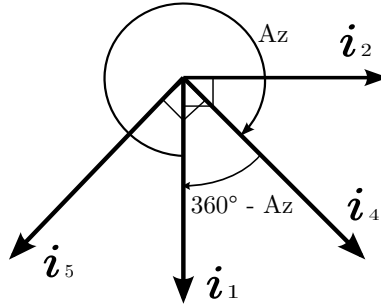


図 D.2: i_1 、 i_2 を含む平面

関連図書

- [1] 中井直正・坪井昌人・福井康雄、『宇宙の観測 II 電波天文学 シリーズ現代の天文学 第 16 巻』(日本評論社 2009 年 8 月 25 日 第 1 刷)
- [2] John R. Taylor、訳者 林茂雄、馬場涼、『計測における 誤差解析入門』(東京化学同人 2010 年 4 月 30 日 第 9 刷)
- [3] 奥野宏文、「平成 19 年度 修士論文 1.85 m 電波望遠鏡の制御系の開発」、大阪府立大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 宇宙物理学研究室
- [4] 藤沢健太、「山口 32 m 電波望遠鏡のポインティング測定」、
<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/kenta/Y4project/pointing-030601.pdf>、2003 年
- [5] 藤沢健太、「ポインティング精度の向上について」、
<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/kenta/Y4project/pointing-070423.pdf>、2007 年
- [6] 「VERA Status Report」、Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan、17 September 2010
- [7] 「The pointing of the IRAM 30-m telescope」
Greve, A., Panis, J. -F., & Thum, C., 1996, A&AS, 115, 379