

修士論文
高萩 32 m電波望遠鏡の
指向性に関する調査

茨城大学

大学院理工学研究科 理学専攻 宇宙物理学コース

学籍番号 20nm156g 永野 稜大

概要

高萩アンテナは方位角、仰角(以下AZ,ELとする)共に 1 sec 毎に角度ログとして(1)アンテナの現在位置、(2)制御 PC による指示値、(3) 1 と 2 の差、(4)アンテナ駆動時のモーター印加電圧などが記録されている。また、(3)が 0.010° 以上になると天体追尾ができていないと判断し OFF SOURCE と記録される。角度はAZ,EL共に 21 bit のバイナリ値によって表現されており、各 bit と角度の対応は、bit 番号を n とすると $angle = 360^{\circ} \times 2^{-21} \times 2^n (n=0-20)$ で表される。

高萩アンテナを駆動させた結果、アンテナが指示した方向に正しく向いていない可能性が明らかになった。このままだとアンテナの基本性能の測定や普段の観測を正しく行えない可能性がある。よって高萩アンテナの指向性に関する調査を行った。

初めに 2020/01-2021/06 の間に角度ログに記録された OFF SOURCE について調査を行った。結果、高萩アンテナに記録された OFF SOURCE は①AZ方向のオーバーシユート ②観測中のEL方向の OFF SOURCE ③アンテナの駆動角速度によるAZ方向の追尾遅れ ④AZ方向の強風による影響 ⑤制御ソフトの起動方法に起因するログの記録不備 にパターン分けされた。そのうち①③④⑤は無視できると判断したが、②は観測に影響があると考えられる。②についてさらなる調査を行なった結果、EL方向の OFF SOURCE はEL上昇時のみ発生し、 $1.14^{\circ} + 5.63^{\circ} \cdot n < EL(deg) < 1.32^{\circ} + 5.63^{\circ} \cdot n (n=1-15)$ の範囲ではELの値が異常値になることがあると判明した。

続いてアンテナの動きを調査するためにログの記録を 100 msec 毎に変更し一定電圧駆動試験を行なった。結果、ELの値が異常値になるのは駆動電圧に関係なく、EL上昇時のみだけであることがわかった。

さらに上記の調査や駆動試験によって確認された OFF SOURCE の発生角度を bit 表現した結果、ピン番号 14-11 bit が常に 0011 の組み合わせ、かつ、ピン番号 10-9bit が 01, 10, 11 のどれかしらの組み合わせであることが判明した。この組み合わせは 5.625° 周期に 0.2633° の幅で現れる。

観測中の OFF SOURCE や一定電圧測定で発生した異常のデータを調査したが、異常発生時の角度の変化の仕方に規則性がなかったことから異常の原因は角度の計算及び読み取りではないと考えられる。

高萩アンテナの図面を調査した結果、角度検出機構のギアに 1 周 5.625° に対応するギアが使われていることがわかった。このギアの歯の片面に異物や破損がある場合、異常区間の間隔が 5.625° であることと異常がEL上りにのみ発生することが説明できる。実際にギアを清掃した後、もう一度一定電圧測定を行った結果、異常の大きさが 1/10 程度になった。よってこのギアが異常の原因であったと考えられる。

今後はこのギアの清掃後の結果に関して再現性の確認を行い、異常の原因を判明させる必要がある。

Abstract

It became clear that the Takahagi antenna may not be pointing correctly at the targeted direction, and we may not be able to measure the basic performance of the antenna and make routine observations correctly. So I studied the drive performance of the Takahagi antenna.

First, I studied OFF SOURCE which was recorded in the angle log if the difference between the current position of the antenna and the targeted position calculated by the control pc became larger than 0.010° . As a result, more than 70 % of OFF SOURCE can be ignored because those are caused by the overshooting in azimuth direction, maximum driving speed of the Takahagi antenna, the influence of strong wind, and the influence of unusual launching procedure of the antenna control software. But 25 % of OFF SOURCE can not be ignored. This type of OFF SOURCE caused the elevation position to become abnormal value suddenly. Through careful investigation, I discovered that these OFF SOURCE occur only when the telescope was moving in the upward direction with the interval in the elevation angle of $\sim 5.63^\circ$.

Next, to investigate more precisely, I did drive test at constant angle velocity and express the obtained values in 2-bit format. As a result, it turned out that elevation position became abnormal value independent of the azimuthal drive status, and it occurred every 5.625° within the range of 0.2633° .

I investigated how the values in the elevation direction change within the antenna control system when they become anomalous, but I could not find regularity. Therefore it can be considered as it is not caused by calculations after the angle is read.

Finally, I examined the drawings of the Takahagi antenna. And I found that it has gears to read the angle corresponding to 5.625° per a round. After cleaning these gears, I did drive test again, and the magnitude of abnormal value at elevation direction reduced to 1/10 times smaller than the values before cleaning. Accordingly, these gears were thought to be the cause of the anomalies in the elevation direction.

In the future, it required to conduct several drive tests after cleaning these gears, and determine the cause of the abnormal values.

目次

第 1 章 序論	4
1.1 電波天文学.....	4
1.2 茨城 32 m 電波望遠鏡	4
1.3 アンテナの基本性能	4
1.4 本研究の目的	7
第 2 章 高萩アンテナの角度データ	8
2.1 角度データの記録方法	8
2.2 角度の表現方法	9
第 3 章 天体追尾中の OFF SOURCE に関する調査	10
3.1 目的.....	10
3.2 手法.....	10
3.3 結果.....	11
3.3 考察.....	17
第 4 章 一定電圧駆動試験	20
4.1 目的.....	20
4.2 方法.....	20
4.3 測定.....	21
4.4 考察.....	31
第 5 章 アンテナのギアに関する調査.....	38
5.1 測定.....	40
5.2 結果.....	41
5.3 考察.....	41
第 6 章 まとめ	42

第1章 序論

1.1 電波天文学

電波とは、周波数 $\nu \sim 3$ THz 以下、波長 $\lambda \sim 0.1$ mm 以上の電磁波を指す。電波天文学は天体から放射される電波を観測することで、天体の構造や物理状態等を解明する学問である。電波は可視光では見えない低温の物質を観測できるだけでなく、大気による吸収の効果を受けにくい特性を持つ。この特性により電波は、パラボラアンテナなどの大型の観測装置を用いて地上で観測を行うことができる。また、可視光や赤外線は光子として検出されることが多いのに対し、電波は波として検出することが可能である。この性質を用いて、離れた位置にあるアンテナで捉えた電波を干渉させることで高い分解能を得ることも可能である。

1.2 茨城 32 m 電波望遠鏡

茨城 32 m 電波望遠鏡は茨城大学が運用する日立 32 m 電波望遠鏡と高萩 32 m 電波望遠鏡の総称である。これらの望遠鏡は茨城県の日立市、高萩市に設置されており、日立アンテナ、高萩アンテナと呼ばれる。主な観測対象は 6.7 GHz メタノールメーザー、6, 8, 22 GHz 連続波、22 GHz 水メーザーである。この観測のためには天体強度の正確な導出が必要であり、そのためには次節 1.3 に記載のアンテナの基本性能である能率（とその仰角依存性）の正確な導出と指向精度の向上が必要とされる。

1.3 アンテナの基本的性能

アンテナに必要とされる基本的な性能には大きく分けて2つあり、1つ目は指向性である。指向性はアンテナの向きに関する性能であり、ビームパターンと指向精度がある。もう一つの基本的な性能は集光力である。集光力はアンテナが天体からの信号をどれだけ集められているかを表す性能であり、開口能率と主ビーム能率がある。

1.3.1 ビームパターン

理想的なアンテナはある特定の方向にのみ感度を持つべきであるが、実際のアンテナは広がった方向に感度を持ち、感度に角度依存性がある。この角度依存性のことを

ビームパターン（アンテナパターン） $P(\theta)$ と呼ぶ。ビームパターンの中で感度が最大の山をメインビーム（メインローブ）、その周辺の感度が低い山をサイドローブと呼ぶ。また、アンテナの角度分解能を表す指標として、感度が最大値の半分になる角度が定義されている。これを半値全幅(Half Power Beam Width) θ_{HPBW} と呼び、アンテナの口径を D [m]、観測波長を λ [m]とすると式(1.1)で表される。

$$\theta_{\text{HPBW}} = K \frac{\lambda}{D} \quad (1.1)$$

K はメインビームの形状による係数であり、メインビームがガウシアンであれば $K \approx 1.2$ である。パラボラアンテナの場合、メインビームは $P(\theta)$ として軸対称のガウス関数を使用され、一次元の場合、式(1.2)で表される。

$$P(\theta) = \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{HPBW}}} \right)^2 \right] \quad (1.2)$$

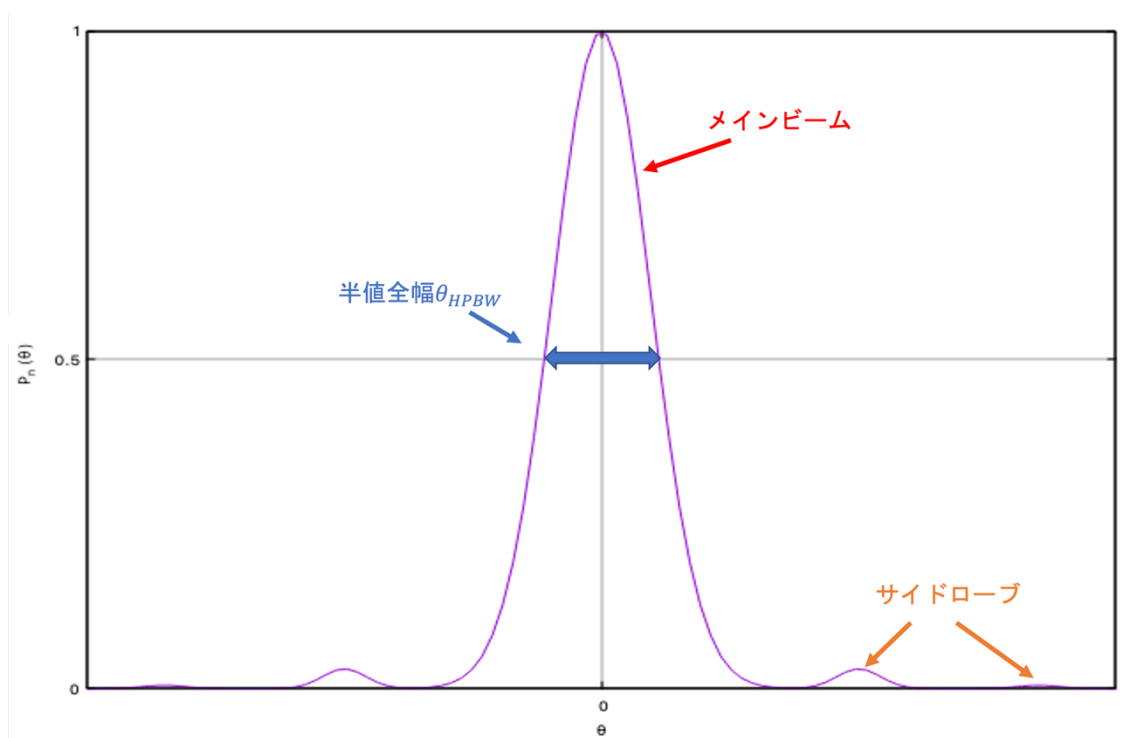


図 1.1 一般的なアンテナビームパターン

1.3.2 指向精度

前述のようにアンテナは特定の方向にのみ感度を持ち、任意の方向にある天体の電波のみを他の方向から混入した電波と区別して受信することが可能である。そのためアンテナが向きたい方向にどれだけ正しく向いているかが重要になる。これを表す性能が指向精度である。この指向精度が悪いと、点源に対しては受信感度の低下、広がりを持った天体に対しては正しい強度分布が得られない、などの影響がある。

アンテナが実際に向いている光軸の方向と、指示した方向の差を指向誤差と呼ぶ。アンテナの指向精度は指向誤差を測定することによって評価することができる。目標とされる指向誤差はビームサイズの $1/20$ 以下である事が理想的であり、少なくとも $1/10$ 以下であることが必要とされる。

茨城 32 m 電波望遠鏡で観測される周波数のうち、もっともビームサイズが小さくなるのは 22 GHz の $1.5'$ であり、目標指向精度はその $1/20$ の $0.073'$ が理想である（表 1.1 参照）。

表 1.1 各周波数の目標指向精度

周波数 [GHz]	波長 [cm]	ビームサイズの計算値 (λ/D) [arcmin]	最低限必要な 指向誤差 [arcmin]	目標とされる 指向誤差 [arcmin]
6.7	4.5	4.8	0.48	0.24
8	3.8	4.0	0.40	0.20
22	1.4	1.5	0.15	0.073

1.3.3 開口能率

開口能率 η_A とは、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 の比のことであり、式(1.3)によって表される。

$$\eta_A = \frac{A_e}{A_p} \quad (1.3)$$

また、真のフラックス密度 F 、観測されたフラックス密度 F_{obs} を用いると、

$$F_{obs} = F \times \eta_A \quad (1.4)$$

が成り立つ。つまり、測定値から天体の真の強度を求めるためには、開口能率が既知である必要がある。また η_A が変化すると観測される強度が変化するため、 η_A の仰角依存性についても求める必要がある。

1.3.4 主ビーム能率

主ビーム能率 η_M とは、全ビーム立体角 Ω_A に対するメインビーム立体角 Ω_M の比のことであり、式(1.5)によって表される。

$$\eta_M = \frac{\Omega_M}{\Omega_A} \quad (1.5)$$

この値が 1 に近いほどメインビームで受ける信号の割合が高くなり、指向性が良く、優れた性能を持つことを意味する。

1.4 本研究の目的

高萩アンテナを駆動させた結果、アンテナが指示した方向に正しく向いていない可能性が明らかになった。このままだと前述のアンテナの基本性能の測定や普段の観測を正しく行えない可能性がある。また、先行研究[1]より、高萩アンテナは駆動角速度が低速の時、トルク不足により駆動が不安定になりアンテナが振動することと、アンテナの駆動方向を反転させた時にモーターのギアとアンテナのギア間でのあそびにより指向誤差が生じる可能性があることがわかっている。

よって本研究は高萩アンテナの指向性に関する調査を行うことを目的とする。

第2章 高萩アンテナの角度データ

2.1 角度データの記録方法

高萩アンテナでは 100 msec 毎にアンテナが向いている角度を読み取っている。ただし角度変化が小さいときは記録されない。また、読み取られた角度のうち、1 sec ごとのデータが角度ログとして記録される。角度ログには以下のような内容が記録される (図 2.1 参照)。

- ANG-REAL アンテナの現在位置
- ANG-TARGET アンテナ制御 PC が計算した天体の位置や指示値
- ANG-DIST REAL と TARGET の差
- VOLTS アンテナ駆動時の印加電圧 $E_{\max}$ (V)

* 角度の単位は全て「度」である。

2020001005950	78.4959, 11.3584	78.4928, 11.3587	0.003	-0.035, +0.102	-0.020, +0.310
2020001005950*	ON SOURCE				
2020001005951*	ANG-REAL	ANG-TARGET	ANG-DIST	(REF+ANTCOR)	VOLTS
2020001005951	78.4952, 11.3618	78.4952, 11.3619	0.000	-0.035, +0.102	+0.190, +0.360
2020001005952	78.4952, 11.3653	78.4975, 11.3652	0.002	-0.035, +0.102	+0.360, +0.290
2020001005953	78.4952, 11.3687	78.4999, 11.3685	0.005	-0.035, +0.102	+0.590, +0.320
2020001005954	78.4952, 11.3721	78.5023, 11.3717	0.007	-0.035, +0.102	+0.800, +0.270
2020001005955	78.4952, 11.3749	78.5046, 11.3750	0.009	-0.035, +0.102	+1.000, +0.320
2020001005956	78.4959, 11.3783	78.5070, 11.3782	0.011	-0.035, +0.102	+1.250, +0.310
2020001005956*	OFF SOURCE				
2020001005957*	ANG-REAL	ANG-TARGET	ANG-DIST	(REF+ANTCOR)	VOLTS
2020001005957	78.5048, 11.3811	78.5093, 11.3815	0.004	-0.035, +0.102	+0.690, +0.330
2020001005958	78.5103, 11.3845	78.5117, 11.3847	0.001	-0.035, +0.102	+0.370, +0.310
2020001005958*	ON SOURCE				
2020001005959*	ANG-REAL	ANG-TARGET	ANG-DIST	(REF+ANTCOR)	VOLTS
2020001005959	78.5110, 11.3879	78.5141, 11.3880	0.003	-0.035, +0.102	+0.440, +0.300
2020001010000	78.5123, 11.3907	78.5164, 11.3912	0.004	-0.035, +0.102	+0.590, +0.420
2020001010001	78.5151, 11.3941	78.5188, 11.3945	0.004	-0.035, +0.102	+0.540, +0.390
2020001010002	78.5185, 11.3982	78.5212, 11.3978	0.003	-0.035, +0.102	+0.480, +0.300
2020001010003	78.5206, 11.4010	78.5235, 11.4010	0.003	-0.035, +0.102	+0.480, +0.290
2020001010004	78.5219, 11.4044	78.5259, 11.4043	0.004	-0.035, +0.102	+0.540, +0.300
2020001010005	78.5247, 11.4072	78.5282, 11.4075	0.003	-0.035, +0.102	+0.500, +0.290

図 2.1 角度ログの例

アンテナ駆動時の印加電圧 $E_{\max}$ は駆動角速度と比例しており最大 6.5 V まで設定できる。一番左の行はデータを記録した時刻を 13 桁の数字で表しており、最初の 4 桁が年、次の 3 桁が通算日、次の 2 桁が時、次の 2 桁が分、最後の 2 桁が秒を世界時間で表す。

天体追尾中は $ANG - DIST \leq 0.005^\circ$ になるとアンテナが天体を追尾できていると判断し ON SOURCE と記録される。また、ON SOURCE 後に $ANG - DIST \geq 0.010^\circ$ になると天体を追尾できていないと判断し OFF SOURCE と記録される。

2.2 角度の表現方法

高萩アンテナは方位角 (azimuth) , 仰角(elevation) (以降 AZ, EL とする) のそれぞれの回転軸にシンクロ発信機が取り付けられている。そこから軸の回転角に比例してアナログ信号が発信され、S/D 変換機 (シンクロ-デジタル変換機) に入力されることでデジタル信号に変換される。この時のデジタル信号は 21 bit の BINARY 値である。さらにこの信号はアンテナ制御装置に送られ十進数として角度ログに記録される。先行研究[2]より、コネクタのピン番号 n とアンテナの角度の対応は以下の表 2.1 の様になっており、式(2.1)で表せることがわかっている。

bit	angle(deg)	bit	angle(deg)	bit	angle(deg)
SD20	180	SD13	1.40625	SD6	0.01099
SD19	90	SD12	0.70313	SD5	0.00549
SD18	45	SD11	0.35156	SD4	0.00275
SD17	22.5	SD10	0.17578	SD3	0.00137
SD16	11.25	SD9	0.08789	SD2	0.00069
SD15	5.625	SD8	0.04395	SD1	0.00034
SD14	2.813	SD7	0.02197	SD0	0.00017

表 2.1 bit と角度の対応表

$$angle = 360^{\circ} \times 2^{-21} \times 2^n \quad (2.1)$$

例として $359.99\ldots^{\circ}$, 270° , 85° を出力する際の BINARY 値を表 2.2 に表す。 $359.99\ldots^{\circ}$ の時は全ての bit が 1、 270° の時は 180° , 90° に対応する SD 20, SD 19 のみが 1 になる。

SD	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
359.99°	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
270°	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
85°	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0

表 2.2 BINARY 値の出力例

なお、実際の高萩アンテナでは SD 1 , SD 0 は読み取っておらず、常に 1 として十進数に変換され、出力される。

第3章 天体追尾中の OFF SOURCE に関する調査

3.1 目的

先行研究[1]より、高萩アンテナを駆動させた結果、アンテナが指示した方向に正しく向いていない可能性が明らかになった。よって高萩アンテナの指向性に関する調査を行うにあたり、まず初めに、高萩アンテナではどのような不具合が起きているのか及び、天体追尾ソフトによる天体位置の計算が正常かを確認するために、2020/01-2021/06 に角度ログに記録された OFF SOURCE について調査を行った。

3.2 手法

期間中の天体追尾時に角度ログに記録された OFF SOURCE についてその 10 sec 前から次に ON SOURCE に戻った 10 sec 後までを抜き出し、以下について調べた。

(図 3.1 参照)

1. 観測内容
2. AZ, EL の駆動方向はそれぞれ増加・減少のどちらだったか
3. AZ, EL のどちらで OFF SOURCE が発生したか
4. ANG-TARGET は滑らかに変化していたか
5. OFF SOURCE 前後のアンテナの駆動はどのような駆動か
(例,増加していた EL が OFF SOURCE 後に減少する等)
6. OFF SOURCE が表示されたのは天体追尾中か天体切替え中か

なお、記録された OFF SOURCE のうち、以下のものは調査対象から除外している。

- I. 天体の AZ が真北を通過、すなわち、 0° から 360° または 360° から 0° に変化し、アンテナが追尾できなくなった事による OFF SOURCE
- II. 天体の EL が 5° 以下または 85° 以上となり、アンテナが追尾できなくなった事による OFF SOURCE
- III. 追尾時間が 10 sec 以下のスキャンにおける OFF SOURCE

2020004030221	40.1131, 5.3084	40.1145, 5.3085	0.001	-0.030, +0.171	+0.280, +0.200
2020004030222	40.1137, 5.3104	40.1168, 5.3107	0.003	-0.030, +0.171	+0.440, +0.220
2020004030223	40.1144, 5.3125	40.1190, 5.3128	0.005	-0.030, +0.171	+0.600, +0.220
2020004030224	40.1179, 5.3146	40.1213, 5.3149	0.003	-0.030, +0.171	+0.580, +0.260
2020004030225	40.1234, 5.3173	40.1236, 5.3170	0.000	-0.030, +0.171	+0.300, +0.190
2020004030226	40.1261, 5.3194	40.1258, 5.3191	0.000	-0.030, +0.171	+0.150, +0.160
2020004030227	40.1261, 5.3214	40.1281, 5.3213	0.002	-0.030, +0.171	+0.330, +0.200
2020004030228	40.1275, 5.3235	40.1304, 5.3234	0.003	-0.030, +0.171	+0.460, +0.210
2020004030229	40.1302, 5.3249	40.1326, 5.3255	0.002	-0.030, +0.171	+0.440, +0.240
2020004030230	40.1378, 5.3269	40.1349, 5.3276	0.003	-0.030, +0.171	-0.060, +0.270
2020004030231	40.1474, 5.3290	40.1372, 5.3297	0.010	-0.030, +0.171	-0.640, +0.250
2020004030231* OFF SOURCE					
2020004030232*	ANG-REAL	ANG-TARGET	ANG-DIST	(REF+ANTCOR)	VOLTS
2020004030232	40.1474, 5.3317	40.1394, 5.3319	0.008	-0.030, +0.171	-0.420, +0.220
2020004030233	40.1474, 5.3338	40.1417, 5.3340	0.006	-0.030, +0.171	-0.260, +0.210
2020004030233* ON SOURCE					
2020004030234*	ANG-REAL	ANG-TARGET	ANG-DIST	(REF+ANTCOR)	VOLTS
2020004030234	40.1474, 5.3358	40.1439, 5.3361	0.003	-0.030, +0.171	-0.100, +0.280
2020004030235	40.1474, 5.3386	40.1462, 5.3382	0.001	-0.030, +0.171	+0.060, +0.180
2020004030236	40.1488, 5.3406	40.1485, 5.3403	0.000	-0.030, +0.171	+0.170, +0.150
2020004030237	40.1508, 5.3427	40.1507, 5.3425	0.000	-0.030, +0.171	+0.190, +0.180
2020004030238	40.1522, 5.3448	40.1530, 5.3446	0.001	-0.030, +0.170	+0.240, +0.190
2020004030239	40.1529, 5.3468	40.1553, 5.3467	0.002	-0.030, +0.170	+0.380, +0.180
2020004030240	40.1529, 5.3489	40.1575, 5.3488	0.005	-0.030, +0.170	+0.560, +0.200
2020004030241	40.1536, 5.3509	40.1598, 5.3510	0.006	-0.030, +0.170	+0.740, +0.200
2020004030242	40.1556, 5.3530	40.1621, 5.3531	0.006	-0.030, +0.170	+0.850, +0.240
2020004030243	40.1618, 5.3551	40.1643, 5.3552	0.003	-0.030, +0.170	+0.500, +0.210

AZ:増加
EL:増加
エラー：AZ
Target position:滑らか

[1/1120] 3C84 004 03:30:00 - 03:30:10
OFFSET AZEL -1.6000 0.0000
TRACK NAME 3C84
2020004030231; OFF SOURCE
2020004030233; ON SOURCE

図 3.1 OFF SOURCE の調査例

3.3 結果

今回、調査対象となった OFF SOURCE は 1743 件であった。これらについて上記の 1-6 を調査した結果、OFF SOURCE 前後のアンテナの駆動に関してパターン分けを行うことができた。それぞれのパターンについて横軸に時刻、縦軸に角度を表す図を作成した。分類されたパターンを以下に示す。

3.3.1 天体切り替え時のAZ方向のオーバーシュート

最も多く見られたパターンは天体切り替え時にAZ増加と減少の両方の方向で見られた OFF SOURCE である。天体切り替え時に元々アンテナが向いていた天体の方向と次の観測対象の方向が離れている場合に、アンテナを次の観測対象の方向を向けるために高速で動かした結果、指示値の直前で減速するが止まりきれずに目的地を通り過ぎてしまうオーバーシュートと呼ばれる現象である。（図 3.2 参照）

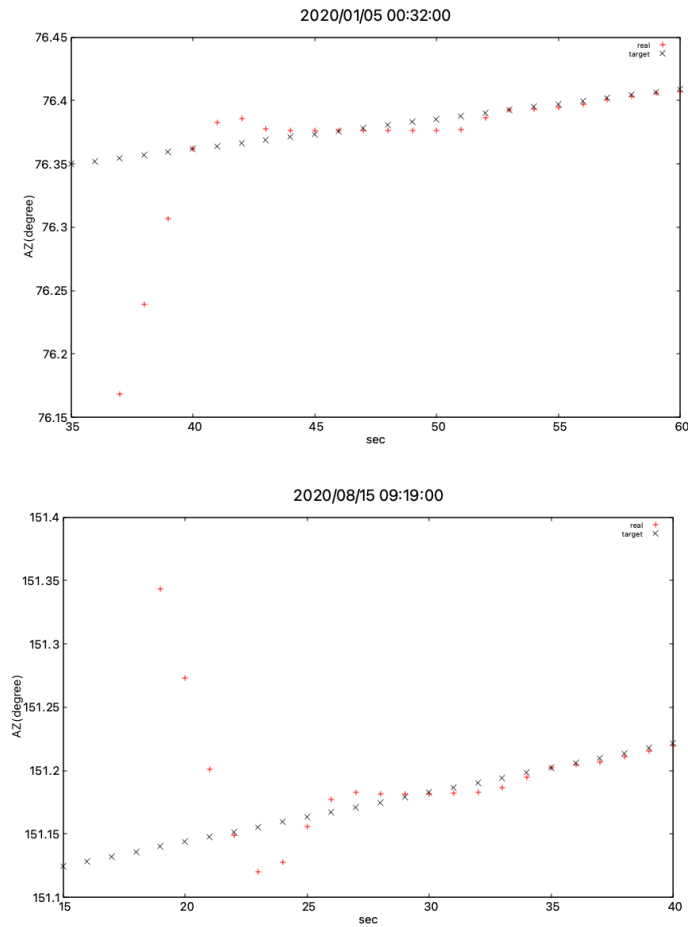


図 3.2 AZ方向のオーバーシュート

以下、プロットは赤が real、黒が target

AZ時計回り（上図）とAZ反時計回り（下図）の両方で見られる。

観測を行う際には実際に天体の強度の測定を開始する時間よりも数秒早く天体方向にアンテナが向き、ON SOURCE となるように観測スケジュールを作成する。今回確認したオーバーシュートによる OFF SOURCE はほとんどその時間内に ON SOURCE に戻っており、天体の強度測定には影響がない。また、高速で駆動しているアンテナが観測対象に近づきブレーキを掛け始めるタイミングは調節可能であるため、オーバーシュートしないようにできると思われる。よってこの現象は分類された OFF SOURCE のパターンのうち、測定に影響がない無視できる OFF SOURCE であると判断した。

3.3.2 観測中のEL方向の OFF SOURCE

次に多く見られたパターンはEL方向において、高萩アンテナの向いている方向が突然異常値になることによる OFF SOURCE である（図 3.3 参照）。

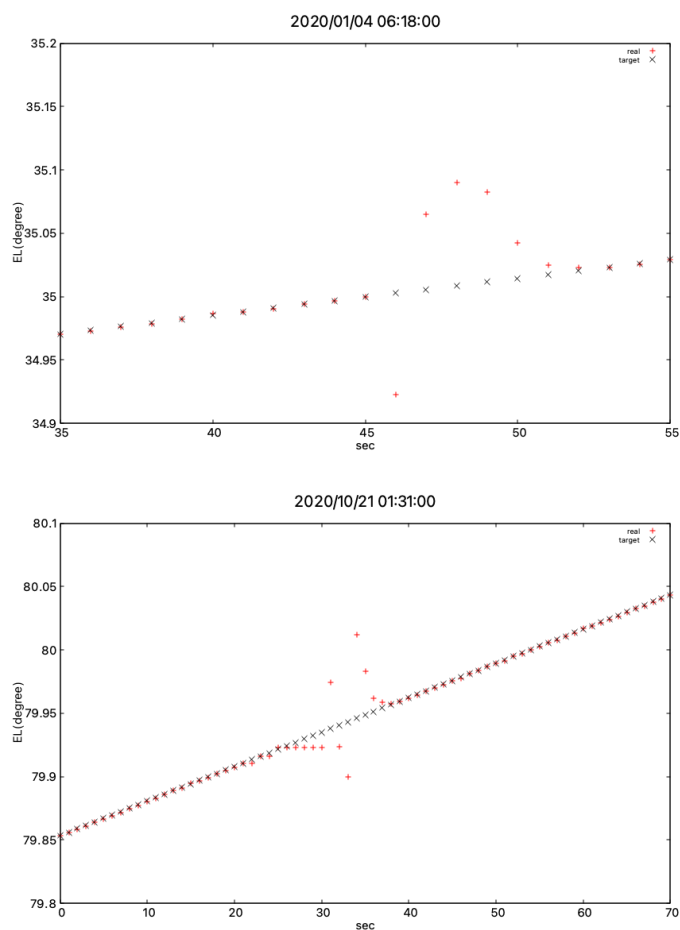


図 3.3 EL方向の OFF SOURCE

real の値が target に対し振動（上図）や停止(下図)をするような動きをとる。

この OFF SOURCE のパターンは原因不明であり、天体追尾中に発生するため天体の強度測定に影響を与える。よって無視することはできないパターンである。

3.3.3 高萩アンテナの最大駆動角速度に起因する OFF SOURCE

次のパターンはAZ方向において ANG-REAL と ANG-TARGET の差が徐々に大きくなることで生じた OFF SOURCE である(図 3.4 参照)。

この時、観測対象はAZ = 180° 付近かつ高いEL (おおよそ 80° 以上) に位置し、図 3.4 上図での target の移動角速度は 0.074°/sec と比較的速い。一方この時のアンテナの最大駆動電圧は 6.5 V であり最大駆動角速度は 0.069°/sec であった。このことからこの OFF SOURCE は観測対象の移動角速度が高萩アンテナの最大駆動角速度を上回ったために生じたものだと考えられる。また、このパターンが発生するときの観測スケジュールは高萩アンテナ用に最適化されたものではなかった(最大駆動角速度が高萩アンテナより速いアンテナ用に最適化されたものという意味)。よってこのパターンも無視できるパターンであると判断した。

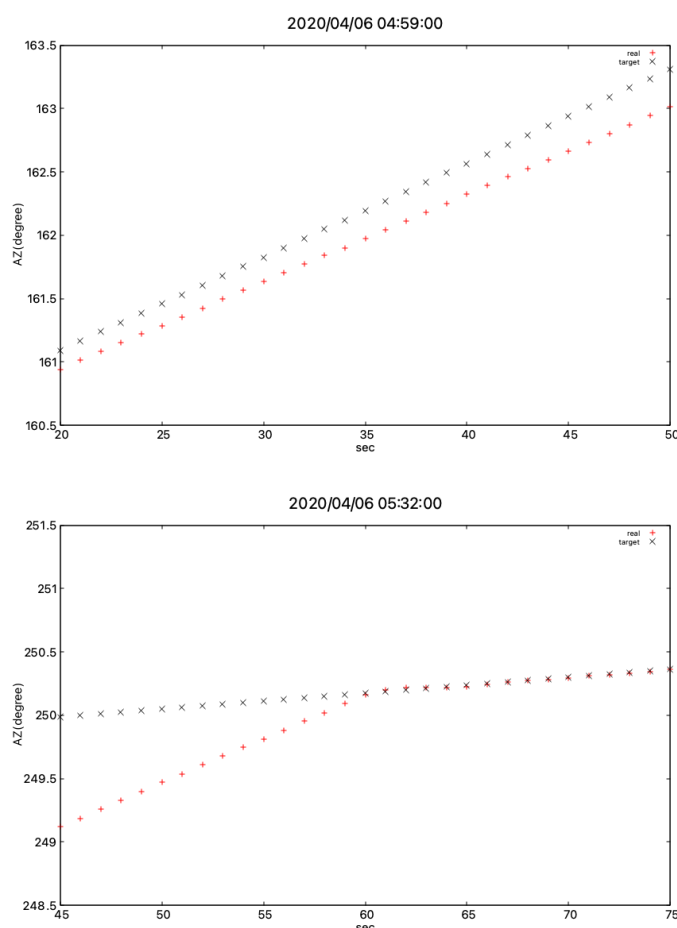


図 3.4 高萩アンテナの最大駆動角速度に起因する OFF SOURCE
上図で OFF SOURCE になってから約 30 分間 (下図の中央付近まで)、
real と target の差が開いた状態が続く。

3.3.4 強風による OFF SOURCE

次のパターンもAZ方向の OFF SOURCE であり、 2021/02/23 と 2021/03/17 にのみ発生したパターンである(図 3.5 参照)。

図 3.5 の時のアンテナの駆動角速度は $0.00025^{\circ}/\text{sec}$ と比較的遅かった。またこのパターンが見られた時はアンテナの正面または背面から 10 m/sec 以上の強風が吹いていた。よってこの OFF SOURCE はアンテナが強風によって煽られたことで発生したものであり環境が外因であるため、無視できる OFF SOURCE であると判断した。

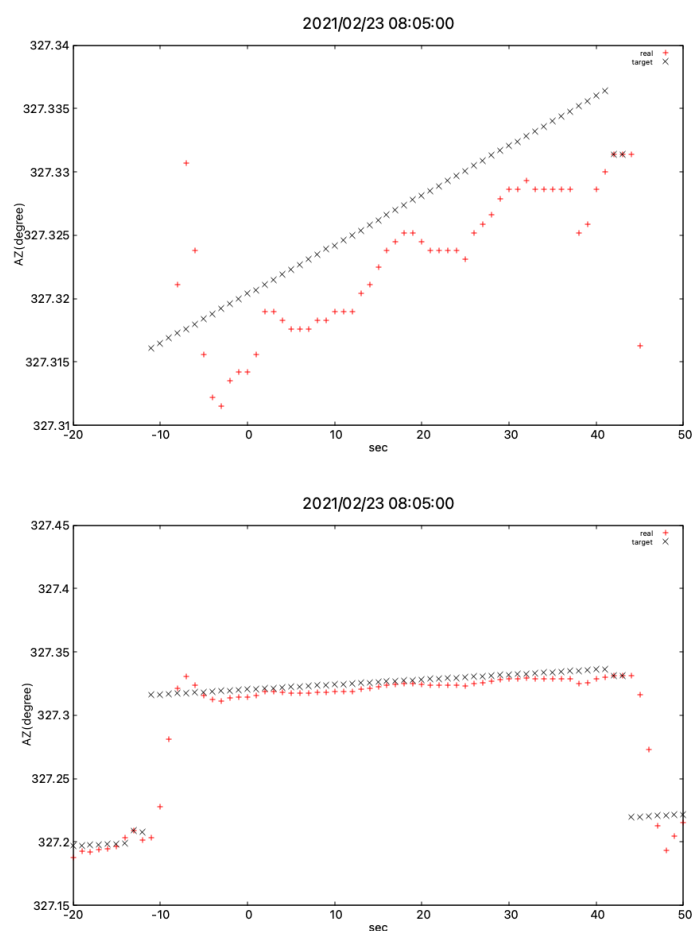


図 3.5 強風による OFF SOURCE

下図は縦軸の幅を図 3.2-3.4 に合わせたもの。

3.3.5 制御ソフトの起動方法に起因する角度ログの記録不備

最後のパターンは 2020/08/26 と 2021/03/28 の天体追尾中にELとAZでそれぞれ一回ずつ見られた OFF SOURCE である。どちらも発生時に角度ログが正しく記録されておらず、データが飛び飛びになっている（図 3.6 参照）。

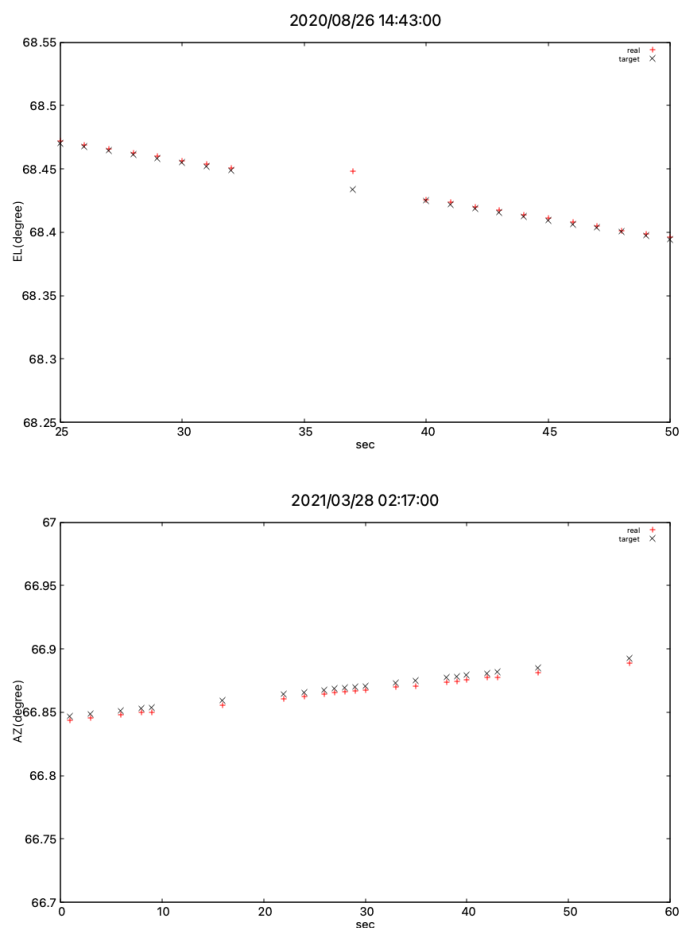


図 3.6 角度ログの記録不備

この 2 回の OFF SOURCE 発生時はともに、観測所内の他の PC からアンテナ制御 PC に ssh 接続し、その端末内で制御ソフトを起動した状態であった。この時、2 台の PC 間の通信に時間がかかったため角度を時間内に読み取ることができず記録されなかったのだと考えられる。このような制御ソフトの起動方法を避けることでこのパターンの OFF SOURCE は発生を防ぐことが可能である。よってこのパターンも無視できるものと判断した。

3.3 考察

今回の調査を行った OFF SOURCE に ANG-TARGET が滑らかに変化していないものは存在しなかった。よって天体追尾ソフトによる天体位置の計算は正常であったと言える。

また、上記の 5 つの OFF SOURCE のパターンの割合は図 3.7 の様になった。

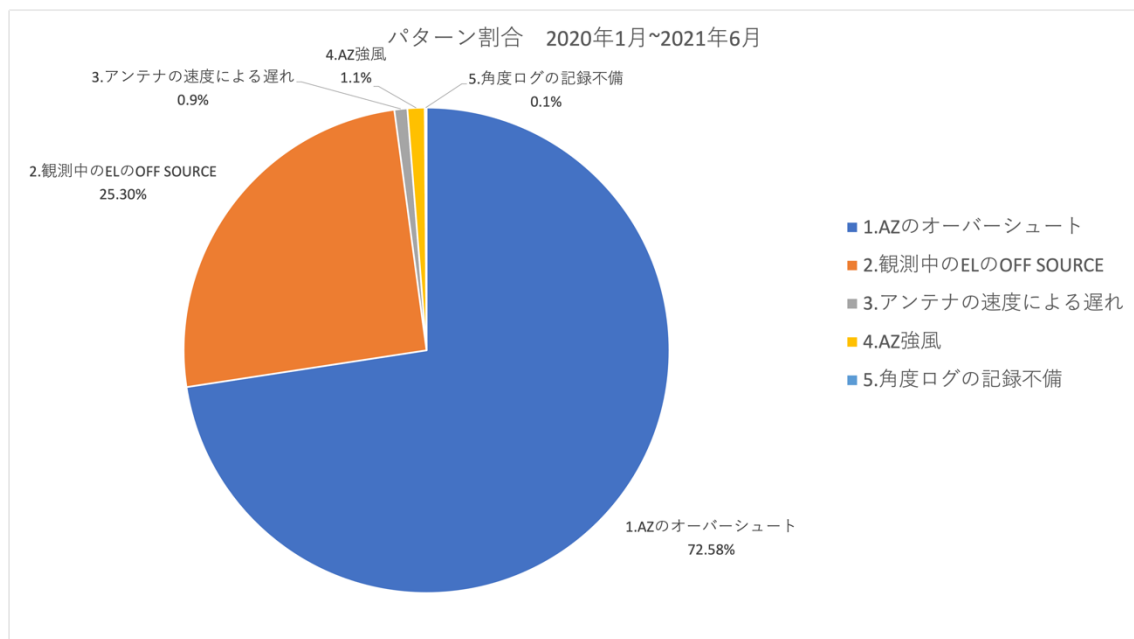


図 3.7 OFF SOURCE パターンの割合

70 %以上が無視できると判断されたのに対し、無視できないと判断された OFF SOURCE は合計で 25.3 %であり、そのうちの大半が 2.観測中の EL の OFF SOURCE であった。本研究ではこの OFF SOURCE についてより深く調査を行った。

観測中の EL の OFF SOURCE 全てについて OFF SOURCE の発生角度、発生時の ANG-DIST について調べた。横軸に発生角度、縦軸に ANG-DIST をとった図を図 3.8 として示す。

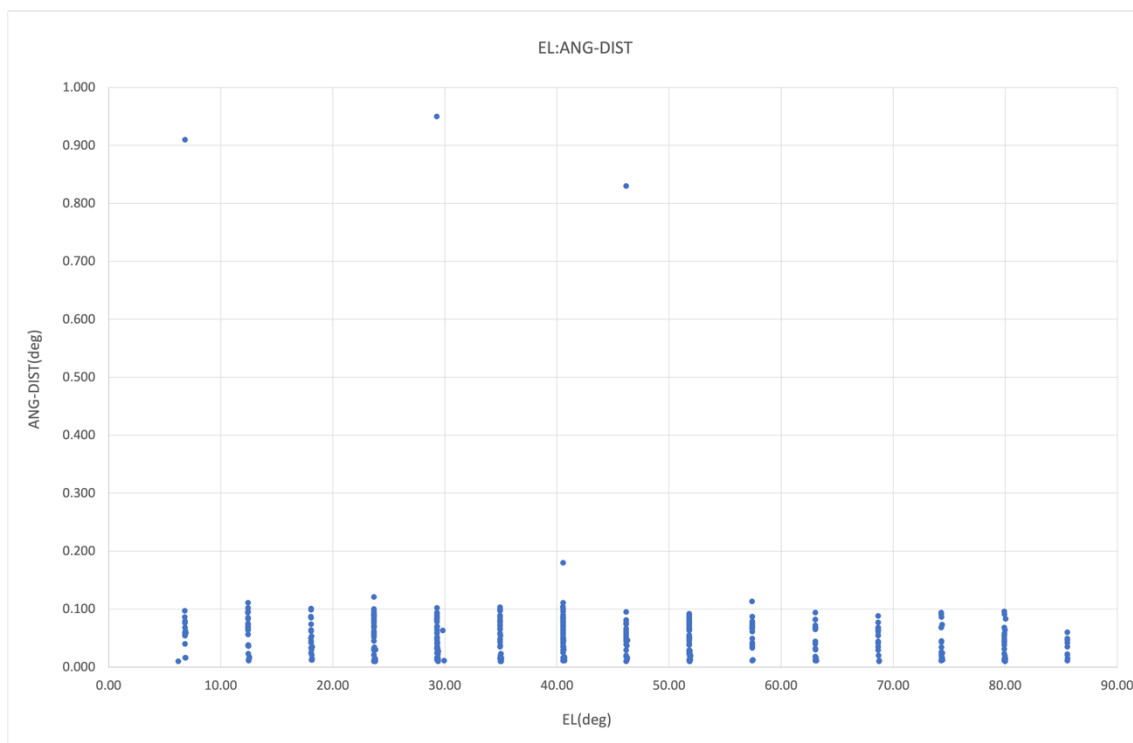


図 3.8 OFF SOURCE の発生角度:発生時の ANG-DIST

図 3.8 より、15 箇所の特定の角度の区間にのみ、OFF SOURCE が集中して発生していることが発見された。これら 15 箇所の区間を“異常区間”と呼ぶことにした。それぞれの異常区間について OFF SOURCE の発生角度の平均を求め、異常区間の間隔について調べた表を表 3.1 として示す。

平均 (°)	6.813	12.439	18.076	23.696	29.315	34.942	40.560	46.190
差 (°)		5.627	5.637	5.619	5.620	5.627	5.617	5.630
平均 (°)	51.809	57.424	63.064	68.683	74.324	79.938	85.551	
差 (°)	5.619	5.615	5.640	5.619	5.641	5.615	5.613	

表 3.1 各異常区間の平均と差

差 = (異常区間の平均値) − (直前の異常区間の平均値)

それぞれの異常区間の差の平均は 5.624° であり、ほぼ等間隔に異常区間が現れている。表 2.1 および式 2.1 より、アンテナの角度を bit 表現にしたときの SD15 に対応する角度は

$$360^{\circ} \times 2^{-21} \times 2^{15} = 5.625^{\circ} \quad (3.1)$$

であり、異常区間の間隔ととても近いことから SD 15 もしくはそれ以下の bit に何かしらの異常があり、OFF SOURCE の原因となっている可能性が考えられる。

また、発生直前のアンテナが正常に動いていた時 ($ANG - DIST \leq 0.005^\circ$ かつ、target の移動方向とアンテナの駆動方向が同じの時) の駆動電圧についても調査し、発生直前の駆動電圧: 発生時の ANG-DIST の図を作成した(図 3.9)。

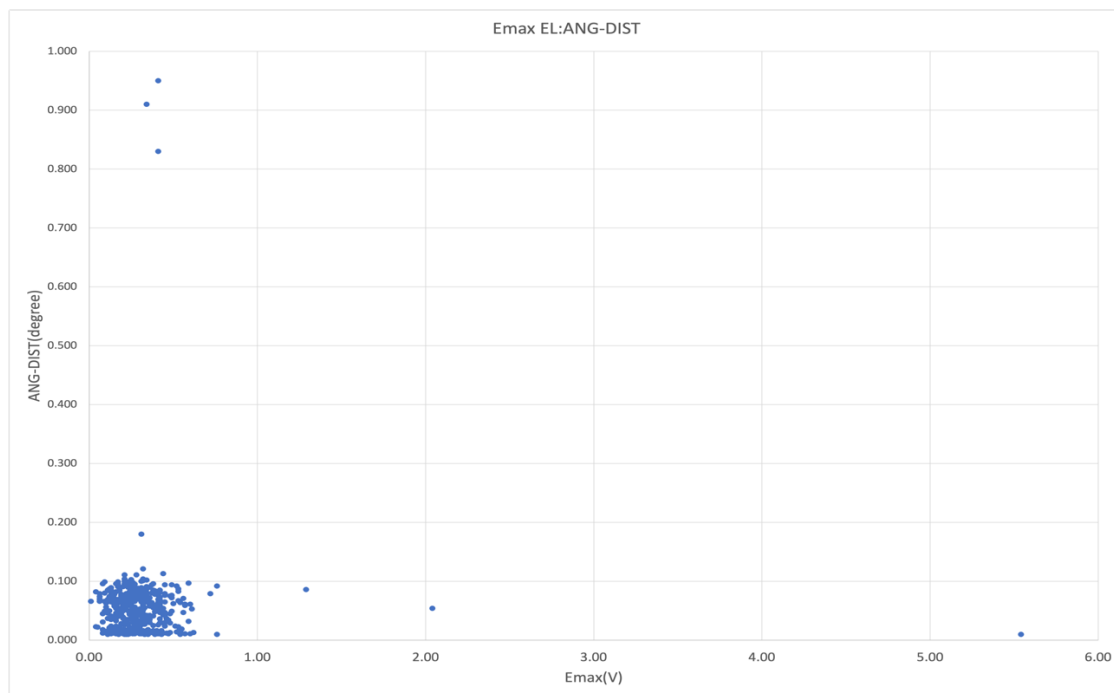


図 3.9 発生直前の駆動電圧: 発生時の ANG-DIST

この図より、天体追尾中の EL 方向の OFF SOURCE は全て $E_{\max} \geq 0\text{ V}$ のアンテナの EL を上り方向に動かしたときに発生ことが多いとわかった。

第4章 一定電圧駆動試験

4.1 目的

前章にて天体追尾中の EL 方向の OFF SOURCE について調査を行い、約 5.624° おきの異常区間に OFF SOURCE が集中していることと、それらの OFF SOURCE は EL 上りにのみ発生していることが判明した。しかし、天体追尾中は OFF SOURCE が発生するとその離角を補正しようとして駆動電圧が変わってしまうため、OFF SOURCE 発生時やその直前直後のアンテナの駆動方向は EL 下り方向の場合もあった。駆動角速度や駆動方向が一定の場合、結果が変わる可能性がある。よって駆動電圧を一定にした駆動試験を行い、この時も同様の現象が発生するか調査した。また、より細かいアンテナの角度変化についても調査するためにこれらの駆動試験では100 msec 毎に記録されたデータを用いた。

4.2 方法

以下の測定 1-5 にて高萩アンテナを一定の駆動電圧で動かす測定を行った。天体追尾時は ANG-TARGET はその瞬間毎のアンテナを向ける方向を示すが、一定電圧駆動時は最終的にアンテナを向ける方向（例えば測定 1 では $EL = 85^\circ$ ）を常に示すため、ANG-DIST がその瞬間におけるずれの大きさを表さない。また、それぞれの測定でアンテナが移動する角度に対し発生すると予想される異常の大きさが小さいため、時刻:アンテナの角度の図を作っても異常を確認するのが難しい。しかしアンテナが駆動する角速度は常に一定なため、アンテナが正常に動いた場合は 100 msec 前のデータとの差（以降 dEL, dAZ とする）も常に一定のはずである。よってこの測定では dEL, dAZ を用いて異常の有無を判断した。測定 2 以降は dEL, dAZ が 0.025° 以上の時、異常が起きていると判断し、それ以下は測定の誤差であるとして無視した。

4.3 測定

測定 1 $E_{\max}(EL) = 0.2\text{ V}$ での測定

まずAZを固定し $E_{\max}(EL) = 0.2\text{ V}$ でELのみを上り方向に動かす試験を行った。測定諸元は以下の様になる。

測定日	開始時刻	終了時刻	AZ駆動電圧 (V)	EL駆動電圧 (V)	開始 AZ(deg)	開始 EL(deg)	終了 AZ(deg)	終了 EL(deg)
2021/09/09	02:48:06	13:38:49	0.0	0.2	179.9979	5.0049	179.9972	84.9970

測定 1 測定諸元

結果

ELについて $EL:dEL$ は図 4.1 の様になった。

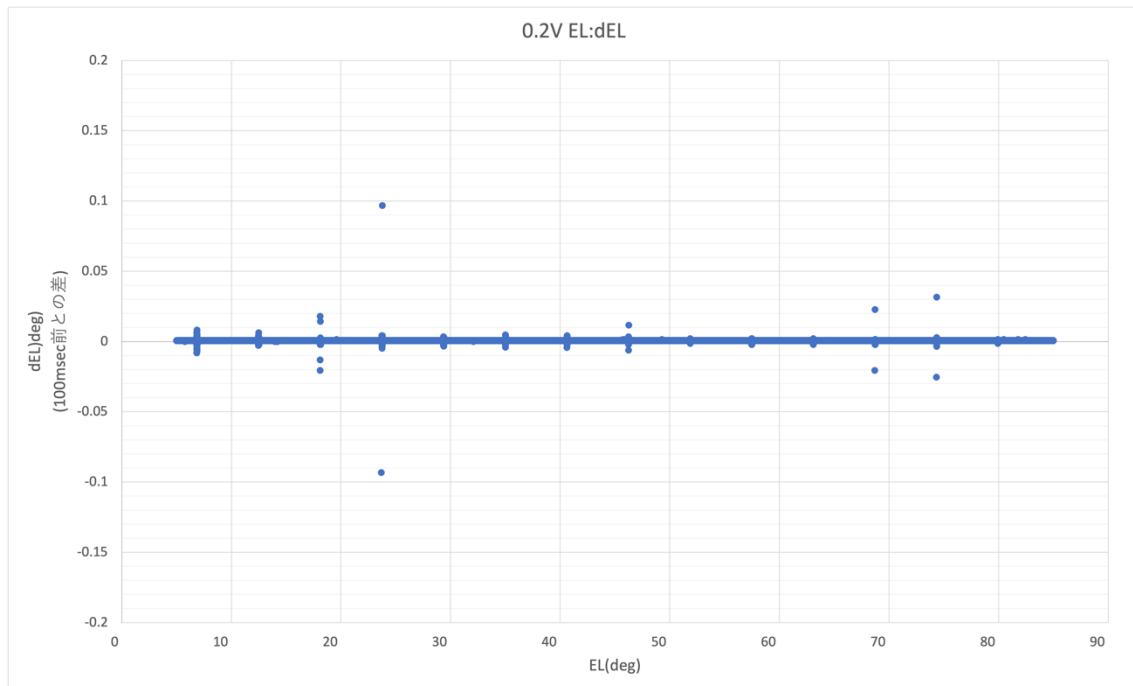


図 4.1 測定 1 結果

図 4.1 より、 $EL = 18^\circ, 23^\circ, 69^\circ, 74^\circ$ 付近で大きな異常が起きていることが判明した。また、それ以外のELでも dEL が周囲と比べて大きくなっている区間がいくつか見られる。この区間は前章の天体追尾中のEL方向の OFF SOURCE で確認された異常区間とほとんど一致していた。

測定 2 $E_{\max}(EL) = 1.0 \text{ V}$, AZ 時計回りの測定

続いて、電圧と異常の大きさの関係を調べるために、電圧を $E_{\max} = 1.0 \text{ V}$ に変えて測定を行った。また、天体追尾中の EL 方向の OFF SOURCE の調査から得られた「 EL 方向の OFF SOURCE や異常は EL 上りのみ発生する」という結論が正しいか確かめるためにこの測定では EL 上りと下りをそれぞれ2回ずつ測定している。さらにこの測定では、 AZ 方向に異常がないかも調べるために、 AZ 方向も時計回りに駆動させている。測定諸元は以下の様になる。

no	測定日	開始時刻	終了時刻	AZ 駆動電圧 (V)	EL 駆動電圧 (V)	開始 AZ (deg)	開始 EL (deg)	終了 AZ (deg)	終了 EL (deg)
1	2021/10/07	04:12:59	06:57:12	1.0	1.0	52.3264	12.4227	129.9984	84.9980
2	2021/10/07	13:14:56	15:38:48	1.0	-1.0	130.5834	84.4031	200.0046	5.0001
3	2021/10/07	19:22:56	21:38:30	1.0	1.0	200.0053	5.0001	264.6935	85.0011
4	2021/10/07	21:40:36	00:04:29	1.0	-1.0	264.9977	85.0011	334.9978	5.0001

測定 2 測定諸元

no 1 と no 3 が EL 上り、no 2 と no 4 が EL 下りの測定。

結果

AZ , EL それぞれについて no 1-4 の測定の $AZ:dAZ$, $EL:dEL$ は図 4.2, 4.3 の様になった。

図 4.2 より、 AZ 方向には 0.025° を超える異常は発生せず、アンテナが滑らかに駆動していると言える。図 4.3 より、 EL 上り方向に駆動した no 1 と no 3 の測定では dEL が 0.025° を超える異常が多数の区間で発生しているが、 EL 下り方向に駆動した no 2 と no 4 の測定では異常がないことがわかる。よって EL 方向の異常は EL 上り方向にのみ発生することが確かめられた。

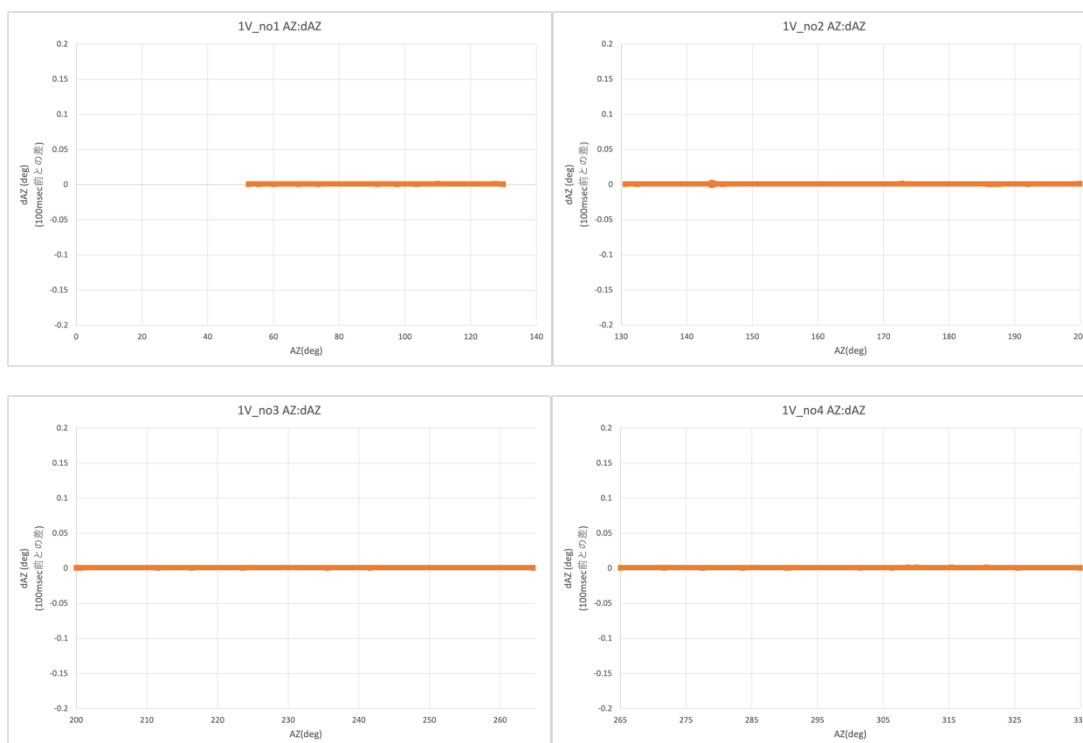


図 4.2 測定 2 AZ結果

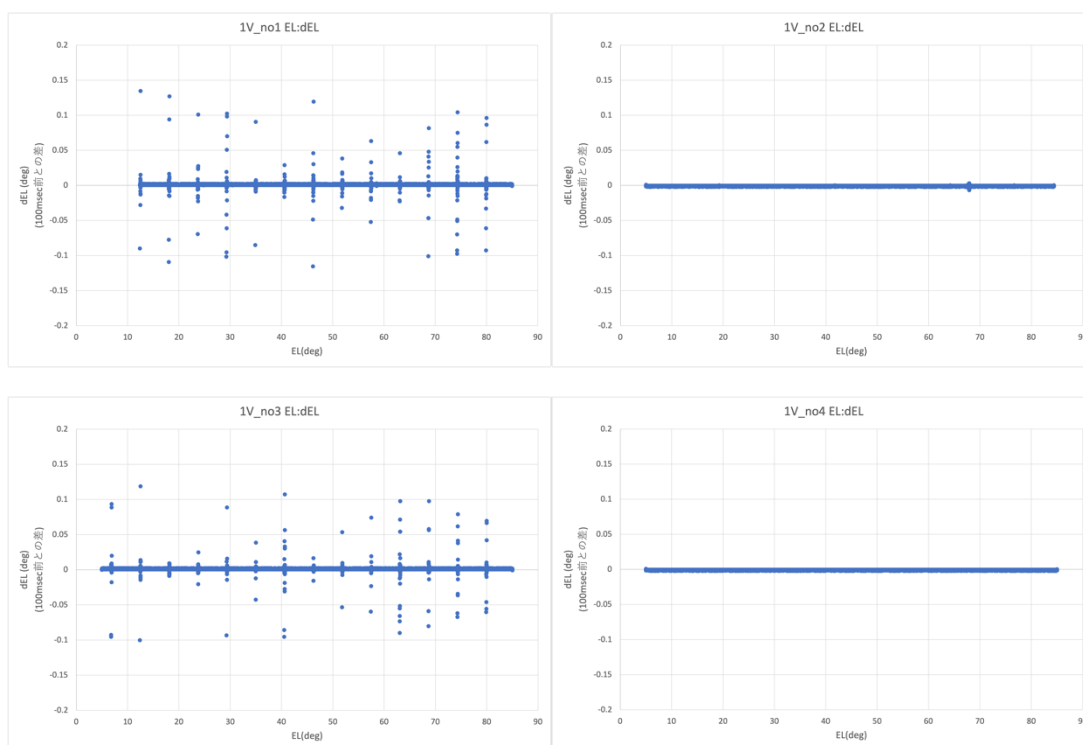


図 4.3 測定 2 EL結果

図 4.3 の no 1 と no 3 の結果を重ねると図 4.4 の様に異常が発生している区間がほとんど重なった。また、この区間は測定 1 や天体追尾中の *EL* 方向の OFF SOURCE で確認された異常区間とも重なる。

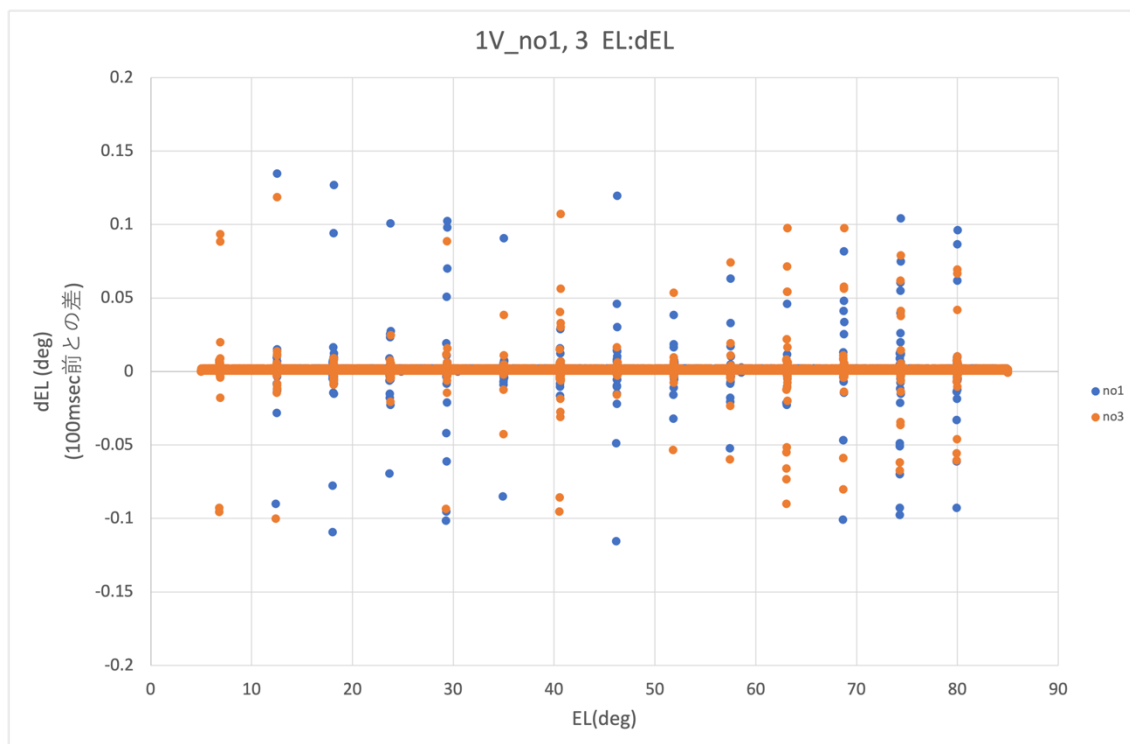


図 4.4 測定 2 no 1, 3 *EL* 結果

測定 3 $E_{\max}(EL) = 1.0 \text{ V}$, AZ 反時計回りまたは固定の測定

次に、 AZ による影響を調べるために $E_{\max} = 1.0 \text{ V}$ で AZ を反時計回り方向に駆動させた測定と AZ を固定させた測定を行った。測定諸元は以下の様になる。

no	測定日	開始時刻	終了時刻	AZ 駆動電圧 (V)	EL 駆動電圧 (V)	開始 AZ (deg)	開始 EL (deg)	終了 AZ (deg)	終了 EL (deg)
1	2021/10/18	01:46:50	03:50:17	-1.0	1.0	348.0001	4.9987	291.6038	84.9998
2	2021/10/18	03:52:01	06:04:15	-1.0	-1.0	291.5029	85.0004	232.0291	5.0008
3	2021/10/18	06:05:59	08:09:47	-1.0	1.0	232.0037	5.0008	163.8480	84.9998
4	2021/10/18	09:00:48	11:14:21	-1.0	-1.0	163.5026	84.9998	106.5632	5.0008
5	2021/10/18	11:29:52	13:33:15	-1.0	1.0	100.0030	5.0008	47.7911	84.9998
6	2021/10/18	21:38:47	23:53:24	0.0	-1.0	12.0025	84.9998	12.0018	5.0021
7	2021/10/19	00:02:56	02:05:49	0.0	1.0	12.0018	5.0021	12.0018	84.9991

測定 2 測定諸元

no 1, 3, 5 が AZ 反時計回り EL 上り、no 2, 4 が AZ 反時計回り EL 下り

no 6 が AZ 固定 EL 下り、no 7 が AZ 固定 EL 上りとなる

結果

測定 3 も測定 2 と同様に、 AZ 方向の異常は見られなかった。 EL 方向の結果は図 4.5 の様になり EL を上り方向に駆動させた no 1, 3, 5, 7 でのみ異常が発生している。これにより、 EL 方向の異常は AZ の駆動に関係なく EL 上り方向にのみ発生し、同じ区間で発生することが判明した。

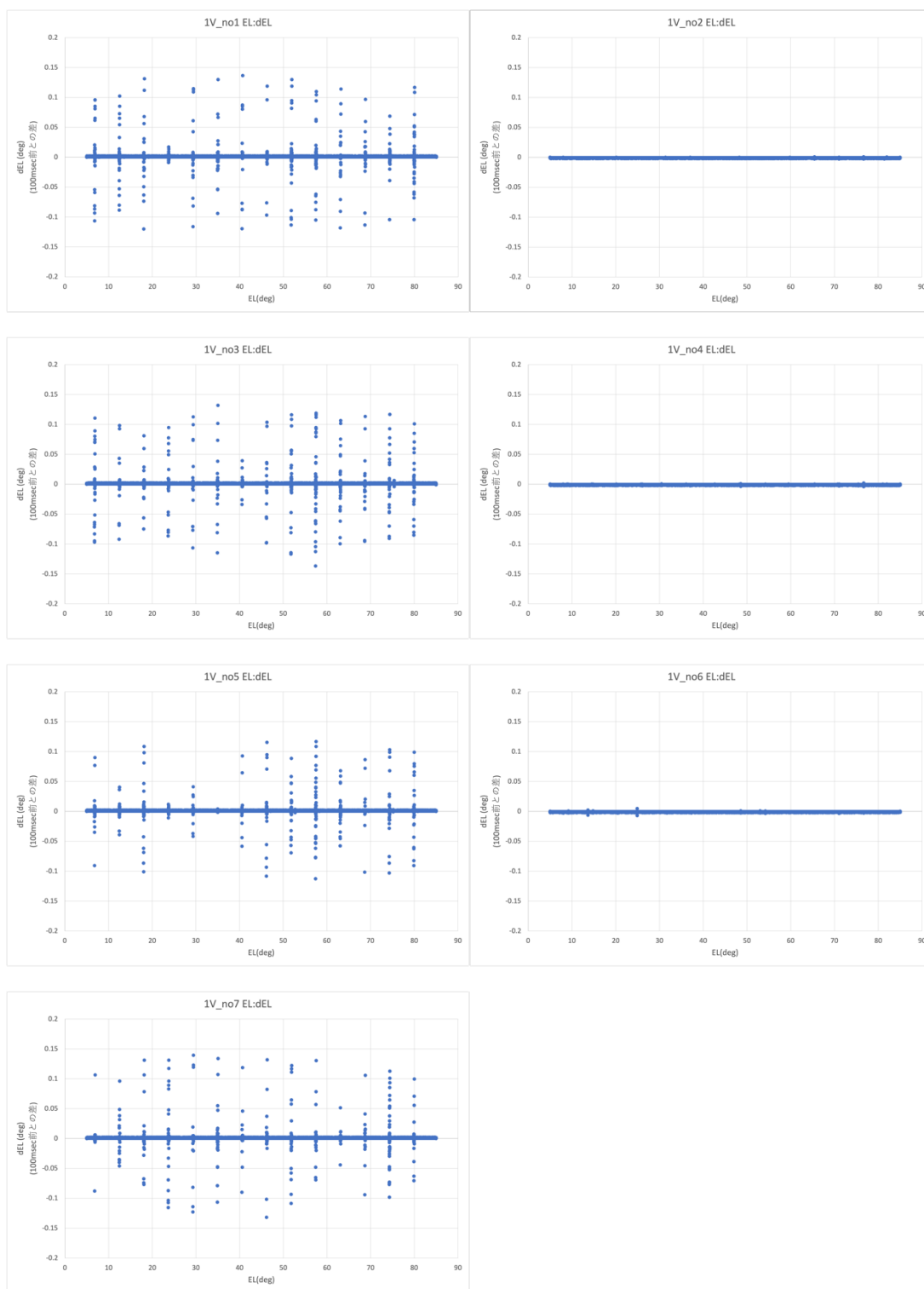


図 4.5 測定 3 *EL*結果

測定 4 $E_{\max}(EL) > 1.0 \text{ V}$ 、AZ固定の測定

測定 2, 3 で $E_{\max} = 1.0 \text{ V}$ の測定を行い EL 方向の異常を確認したが、角速度を速くした時にも同じ現象が発生するか確かめるために電圧を $E_{\max} = 1.5 \text{ V}$, 2.3 V , 4.5 V , 6.5 V でも測定を行った。この測定では AZ は固定している。測定諸元は以下の様になる。

no	測定日	開始時刻	終了時刻	AZ駆動電圧 (V)	EL駆動電圧 (V)	開始 AZ(deg)	開始 EL(deg)	終了 AZ(deg)	終了 EL(deg)
1	2021/11/18	22:39:45	22:58:18	0.0	1.5	89.9992	4.9987	89.9992	84.9998
2	2021/11/18	23:22:57	23:49:46	0.0	2.3	89.9992	4.9980	89.9992	84.9991
3	2021/11/19	00:12:40	01:05:23	0.0	4.5	89.9992	4.9987	89.9992	84.9991
4	2021/11/19	01:33:28	02:54:41	0.0	6.5	89.9999	4.9994	89.9992	85.0032

測定 4 測定諸元

結果

EL 方向の結果は図 4.6 の様になり、測定 1-3 とほぼ同じ区間に異常が見られた。これより、駆動電圧が $E_{\max}(EL) > 1.0 \text{ V}$ でも異常は発生することが確かめられた。

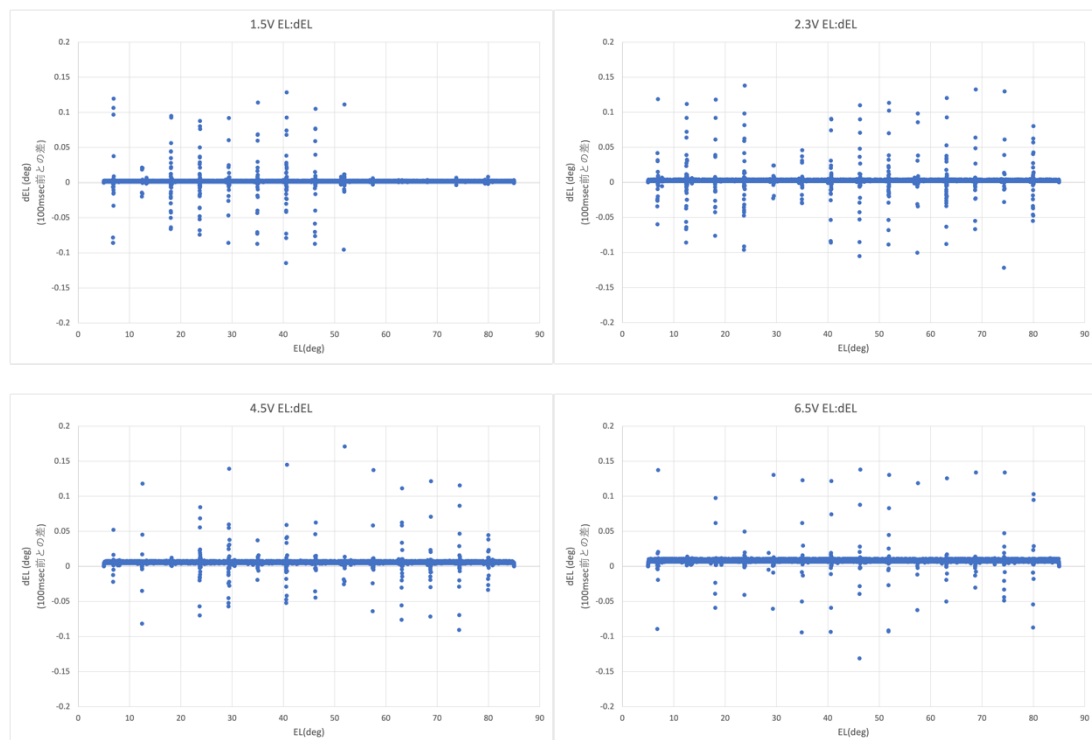


図 4.6 測定 4 EL 結果

測定 5 $E_{\max}(EL) > 1.0\text{ V}$ 、AZ駆動の測定

最後に、 $E_{\max} = 1.5\text{ V}, 2.3\text{ V}, 4.5\text{ V}, 6.5\text{ V}$ で発生した異常の再現性とAZによる影響を調査した。測定は以下の観測諸元のように $E_{\max} = 1.5\text{ V}, 2.3\text{ V}, 4.5\text{ V}, 6.5\text{ V}$ のそれぞれでEL上りと下り、AZ時計回りと反時計回りの16通りの測定を行った。

no	測定日	開始時刻	終了時刻	AZ駆動電圧 (V)	EL駆動電圧 (V)	開始 AZ(deg)	開始 EL(deg)	終了 AZ(deg)	終了 EL(deg)
1	2021/12/21	05:05:16	05:24:04	6.5	-6.5	131.0059	84.9812	200.0005	4.9973
2	2021/12/21	05:44:20	06:11:09	4.5	4.5	200.0177	5.0502	270.0020	84.9929
3	2021/12/21	06:51:44	07:51:38	2.3	-2.3	270.0020	84.9977	347.9932	5.0008
4	2021/12/21	08:22:43	10:09:53	-1.5	1.5	347.9932	5.0145	270.0068	85.0004
5	2021/12/21	10:18:40	10:48:11	-4.5	-4.5	270.0027	85.0004	189.9954	5.0008
6	2021/12/21	11:06:00	11:50:20	-6.5	6.5	189.9954	5.0090	109.9909	84.9998
7	2021/12/21	11:52:03	12:21:12	4.5	-4.5	110.0136	84.9908	190.0064	5.0014
8	2021/12/21	12:37:48	13:41:37	-2.3	2.3	189.9975	5.0207	110.0101	84.9998
9	2021/12/21	17:07:21	18:54:33	1.5	-1.5	110.0101	84.9915	189.9954	5.0008
10	2021/12/22	13:06:37	14:11:14	2.3	2.3	130.0025	5.0008	209.9878	85.0004
11	2021/12/22	14:42:13	16:22:42	-1.5	-1.5	209.9995	84.9998	140.0056	5.0001
12	2021/12/22	23:28:03	23:54:59	-4.5	4.5	140.0028	5.0008	69.9993	84.9812
13	2021/12/23	00:20:09	00:39:00	-6.5	-6.5	99.9995	85.0004	24.9993	4.998
14	2021/12/23	00:50:55	02:31:31	1.5	1.5	25.0007	5.0001	99.9755	84.9998
15	2021/12/23	02:32:28	03:33:31	-2.3	-2.3	99.9851	84.9634	25.0439	5.0008
16	2021/12/23	03:46:06	04:11:49	6.5	6.5	25.0007	5.0042	129.9373	85.0004

測定 5 観測諸元

結果

それぞれの電圧毎のEL方向の結果を図 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 として下記に示す（no 不同、左上からAZ時計回りEL上り、AZ時計回りEL下り、AZ反時計回りEL上り、AZ反時計回りEL下り）。測定 1-4 と同様に異常はEL上りにのみ発生し、AZの影響は見られなかった。また。測定 4, 5 より異常の発生が駆動電圧にも依存しないことが判明した。

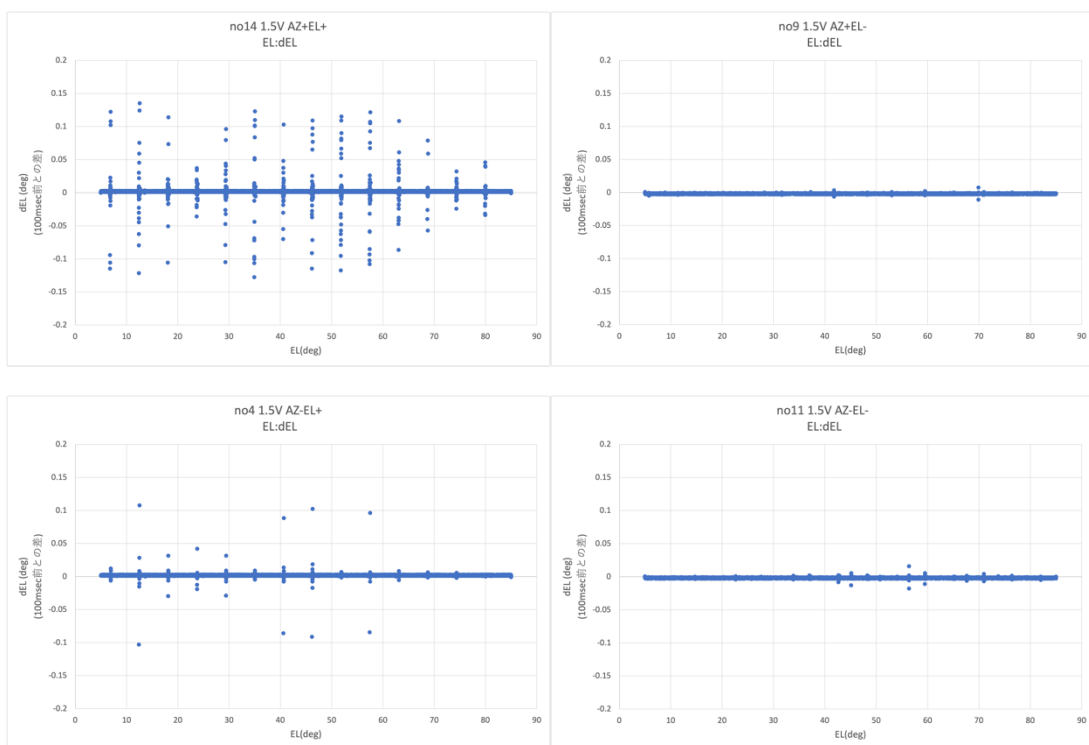


図 4.7 測定 5 1.5 V 結果

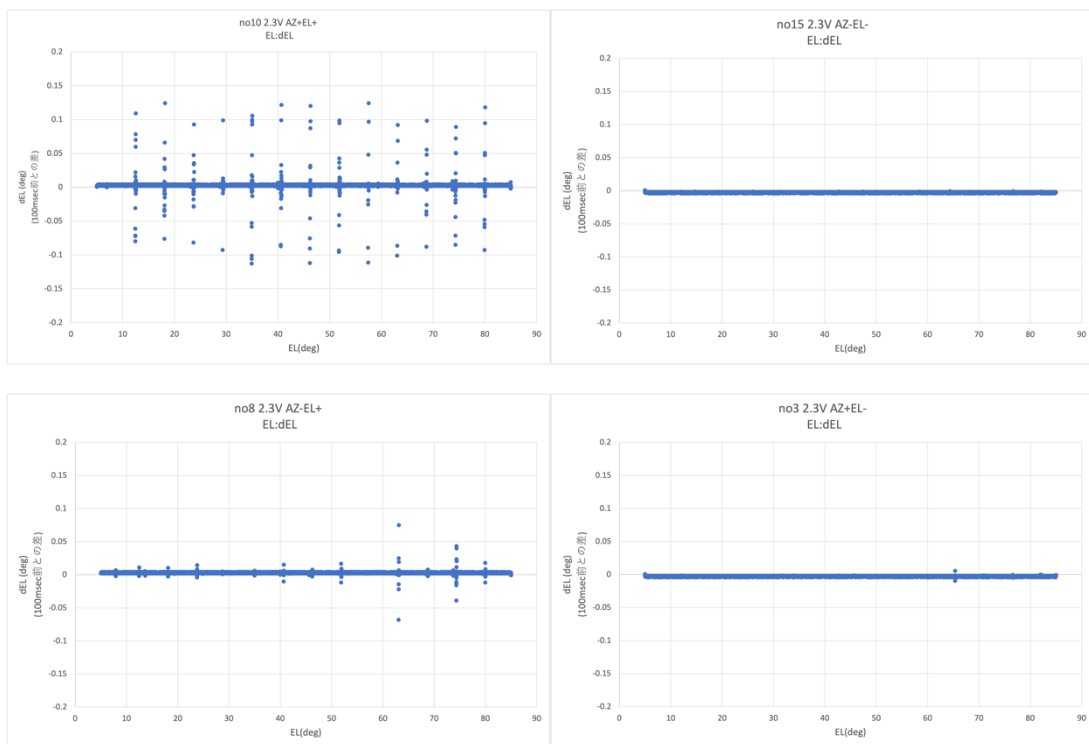


図 4.8 測定 5 2.3 V 結果

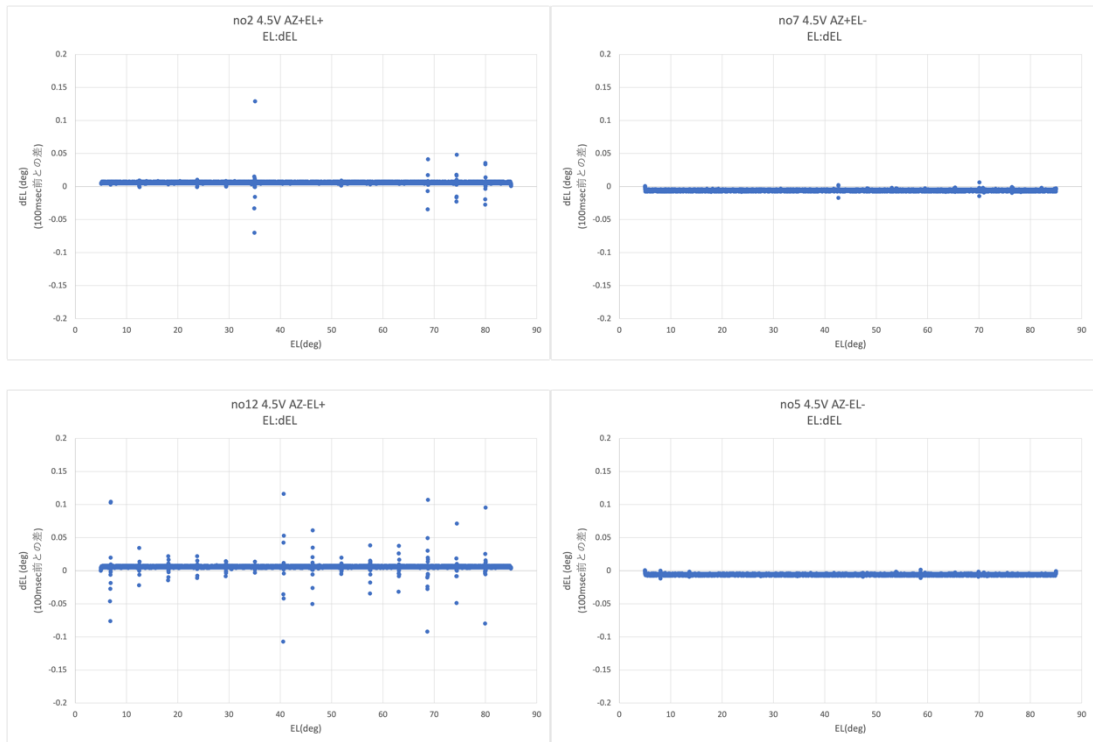


図 4.9 測定 5 4.5 V 結果

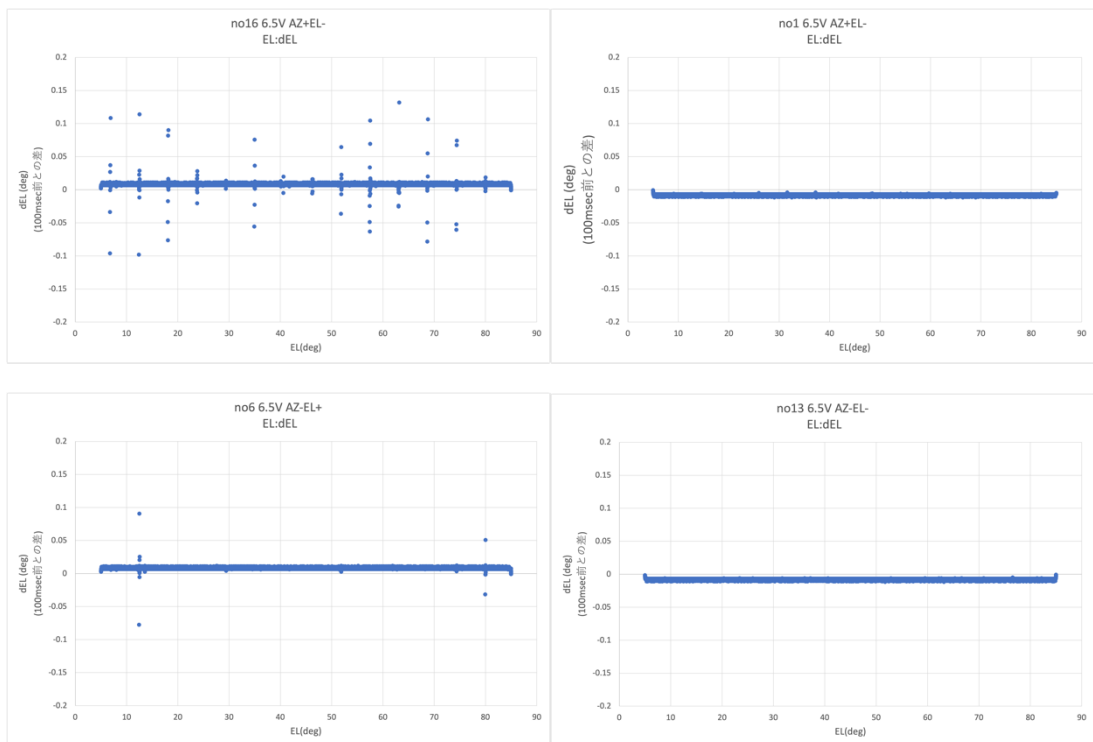


図 4.10 測定 5 6.5 V 結果

4.4 考察

4.4.1 異常区間の間隔

天体追尾中の EL 方向の OFF SOURCE や測定 1-5 の調査結果より、 EL 方向のほぼ同じ区間に異常が発生することがわかった。この異常区間はほぼ等間隔に発生しており OFF SOURCE の調査よりこの間隔は約 5.624° と導出され、高萩アンテナの角度を bit 表現にした時の SD 15 に対応する角度である 5.625° と近い値であった。より正確にこの間隔を調べるために、測定 2・no 1 の $EL:dEL$ の図（図 4.3 左上）の 13 個の異常区間について、以下の手順を用いた。

1. 異常区間の間隔を x と仮定する
2. $EL = 12.5^\circ + n \cdot x$ ($n = 0, 1, 2 \dots 12$, $x \sim 5.625^\circ$) 付近の異常区間のデータについてそれぞれ $EL - n \cdot x : dEL$ の図を作成
3. 2 の図を重ねる。

以上の作業を x の値を変えて行う。仮定した x の値が正しい値だった場合、手順 2 で得られる図の全てに異常が含まれ、手順 3 で得る図には全ての異常が重なるはずである。このときの x を異常区間の間隔とした。 $x = 5.620^\circ, 5.624^\circ, 5.625^\circ, 5.630^\circ$ とした時の手順 3 の結果を図 4.11 として以下に示す。

結果、 $x = 5.620^\circ, 5.630^\circ$ では全ての異常が図に収まらず、異常区間の間隔は $5.624^\circ, 5.625^\circ$ に近い値であることがわかった。

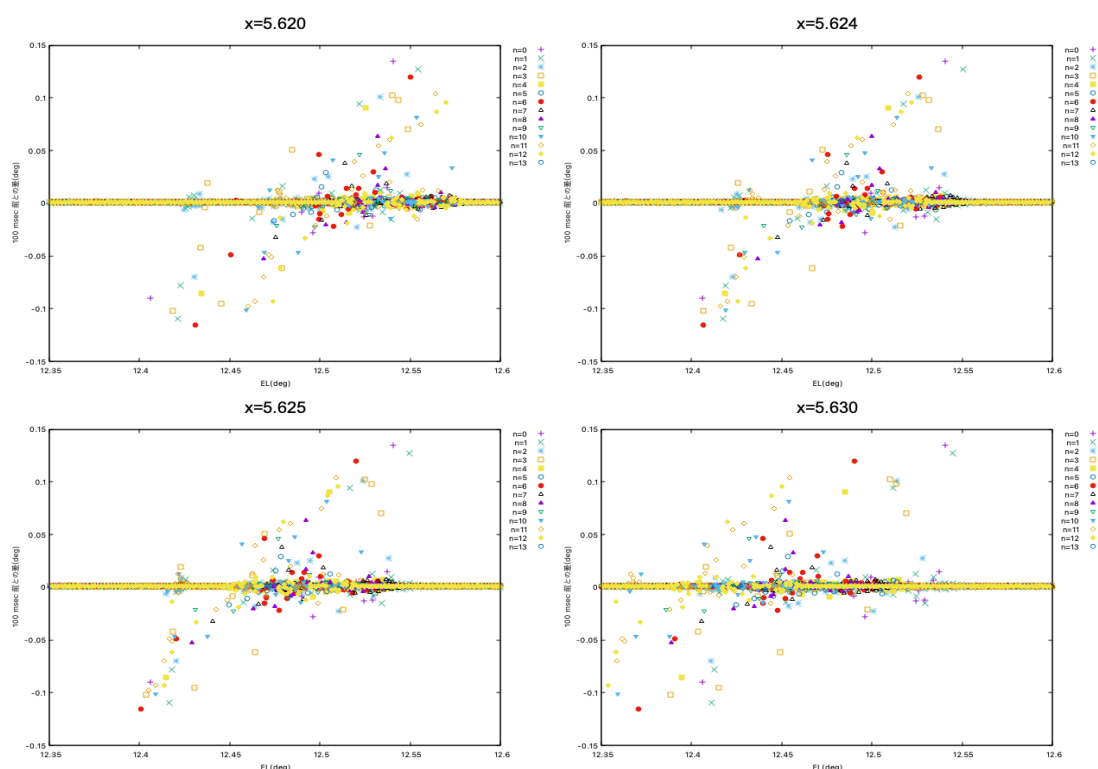


図 4.11 異常区間の間隔調査

4.4.2 異常区間の bit 表現化

異常区間の間隔が角度を 2bit 表現にした時の SD 15 に対応する角度である 5.625° と近い値であることから、異常の発生条件は SD 15 が切り替わる時である可能性が考えられる。よって、異常の発生条件を調べるために、天体追尾中の EL 方向の OFF SOURCE の前後 10 sec と測定 1-5 で dEL が 0.025° を上回った時の前後 1 sec (それぞれ前後の 10 データ) について、表 2.2 の様に角度を 10 bit から 2 bit 表現に変換し、異常発生時の角度変化について調査を行った。2 bit 化の例として測定 2・no 1 の 12.5° 付近の異常区間を変換したときの結果を表 4.1 として示す。

実測値(°)	$dEL(^{\circ})$	SD20-11	SD10-1
12.5127		0000100011	1001011101
12.514	0.0013	0000100011	1001100001
12.5154	0.0014	0000100011	1001100101
12.5154	0.0000	0000100011	1001100101
12.5202	0.0048	0000100011	1001110011
12.5188	-0.0014	0000100011	1001101111
12.5223	0.0035	0000100011	1001111001
12.5374	0.0151	0000100011	1010100101
12.5243	-0.0131	0000100011	1001111111
12.5243	0.0000	0000100011	1001111111
12.4962	<u>-0.0281</u>	0000100011	1000101101
12.4062	<u>-0.0900</u>	0000100011	0100100111
12.5408	<u>0.1346</u>	0000100011	1010101111
12.5291	-0.0117	0000100011	1010001101
12.5257	-0.0034	0000100011	1010000011
12.5271	0.0014	0000100011	1010000111
12.5339	0.0068	0000100011	1010011011
12.5346	0.0007	0000100011	1010011101
12.5346	0.0000	0000100011	1010011101
12.5367	0.0021	0000100011	1010100011
12.5381	0.0014	0000100011	1010100111
12.5374	-0.0007	0000100011	1010100101
12.5394	0.0020	0000100011	1010101011

表 4.1 2bit 化 例 (測定 2・no 1 12.5° 付近の異常区間)
下線部の 3 行が異常値

全ての OFF SOURCE と異常区間を 2bit 化した結果、SD 15 には規則性は見られなかったが、SD 14-11 が常に 0011 の組み合わせであり、かつ、SD 10, 9 が 01, 10, 11 のどれかの組み合わせの時にのみ、OFF SOURCE や異常が発生していることが判明した。

この組み合わせは SD 15 が切り替わるたびに現れるため 5.625° おきに発生する。これは前節で求めた異常区間の間隔と一致する。また、表 4.2 の様に SD 10, 9 が

01、SD 8 以下が全て 0 の組み合わせの時から、SD 10, 9 が 11、SD 8 以下が全て 1 の組み合わせの時まで、 0.2633° の幅を持って現れる。これが異常区間の幅である。

SD20	SD19	SD18	SD17	SD16	SD15	SD14	SD13	SD12	SD11	SD10	SD9	SD8	SD7	SD6	SD5	SD4	SD3	SD2	SD1	10bit(°)
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1426
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.4059
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6.7676
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7.0309
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	12.3926
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12.6559
:																				
0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	85.5127
0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	85.7809

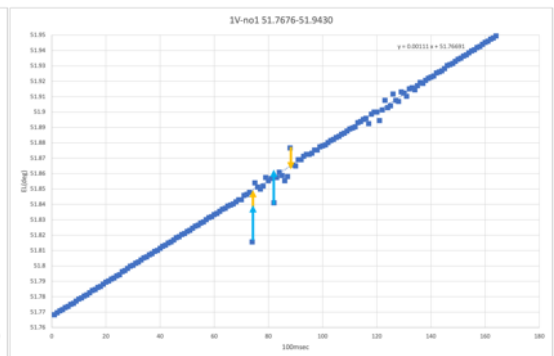
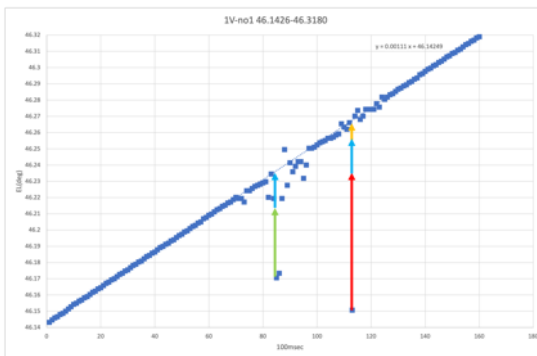
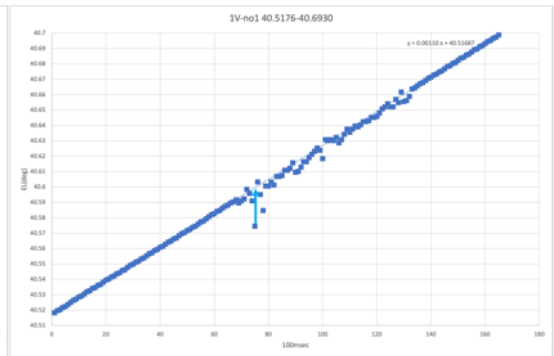
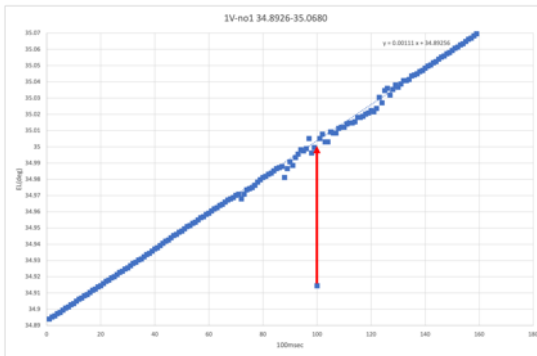
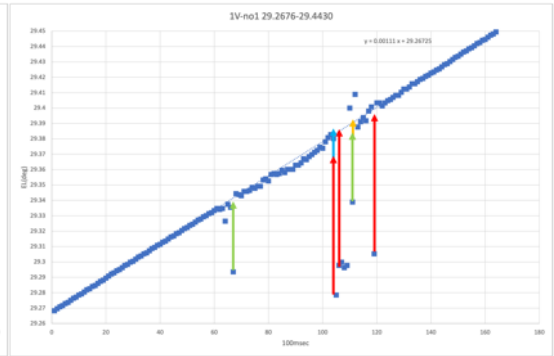
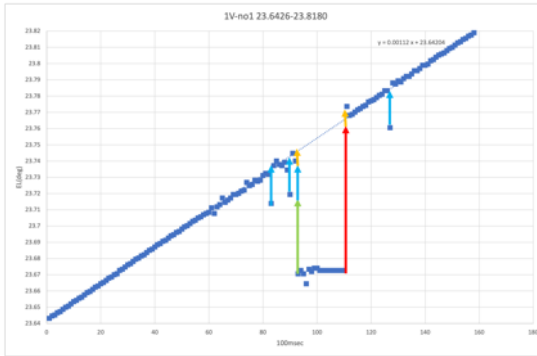
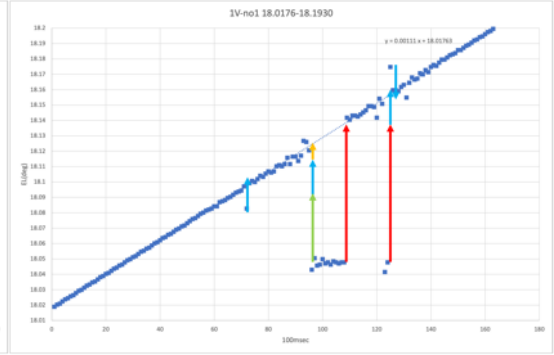
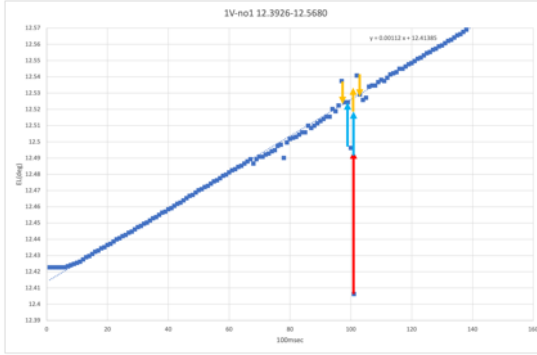
表 4.2

SD14-9 の特定の組み合わせは 5.625° おきに
 0.2633° の幅を持って現れる。

なお、 $E_{max} = 0.2\text{ V}, 1.0\text{ V}, 1.5\text{ V}$ の測定時は異常区間の幅がもう少し狭く、SD 14-11 が常に 0011 の組み合わせであり、かつ、SD 10, 9 が 01, 10 のどちらかの組み合わせの時にのみ異常が発生していた。この場合も異常区間の間隔は 5.625° であるが、異常区間の幅は 0.1754° となる。

4.4.3 異常の規則性に関する調査

前節で異常が発生するときの bit の組み合わせについては判明したが、原因はまだわかっていない。異常の原因が角度信号処理時の S/D 変換機やコネクタでの角度計算及び読み取りにある場合、特定の bit のみに異常が発生し、本来 1 である値が 0 として読み込まれるもしくはその逆が発生している (10101010 $\rightarrow$ 00101010) 可能性が高い。これに関して調査を行うために、異常発生時の直前までの ANG-REAL を最小二乗法でフィッティングすることで異常発生時に本来アンテナが向いているはずの角度の理想値を導出した。この理想値と実測値を比較し「どの bit を変更すると、理想値になるか」を導出した。これは異常発生時の各 bit の変化の仕方を表す。以下の図 4.12 は測定 2・no 1 の 13 個の異常区間についてそれぞれ「どの bit を変更すると、理想値になるか」を導出した結果を EL の時間変化の図と矢印によって表した図である (SD 5 以下は省略している)。



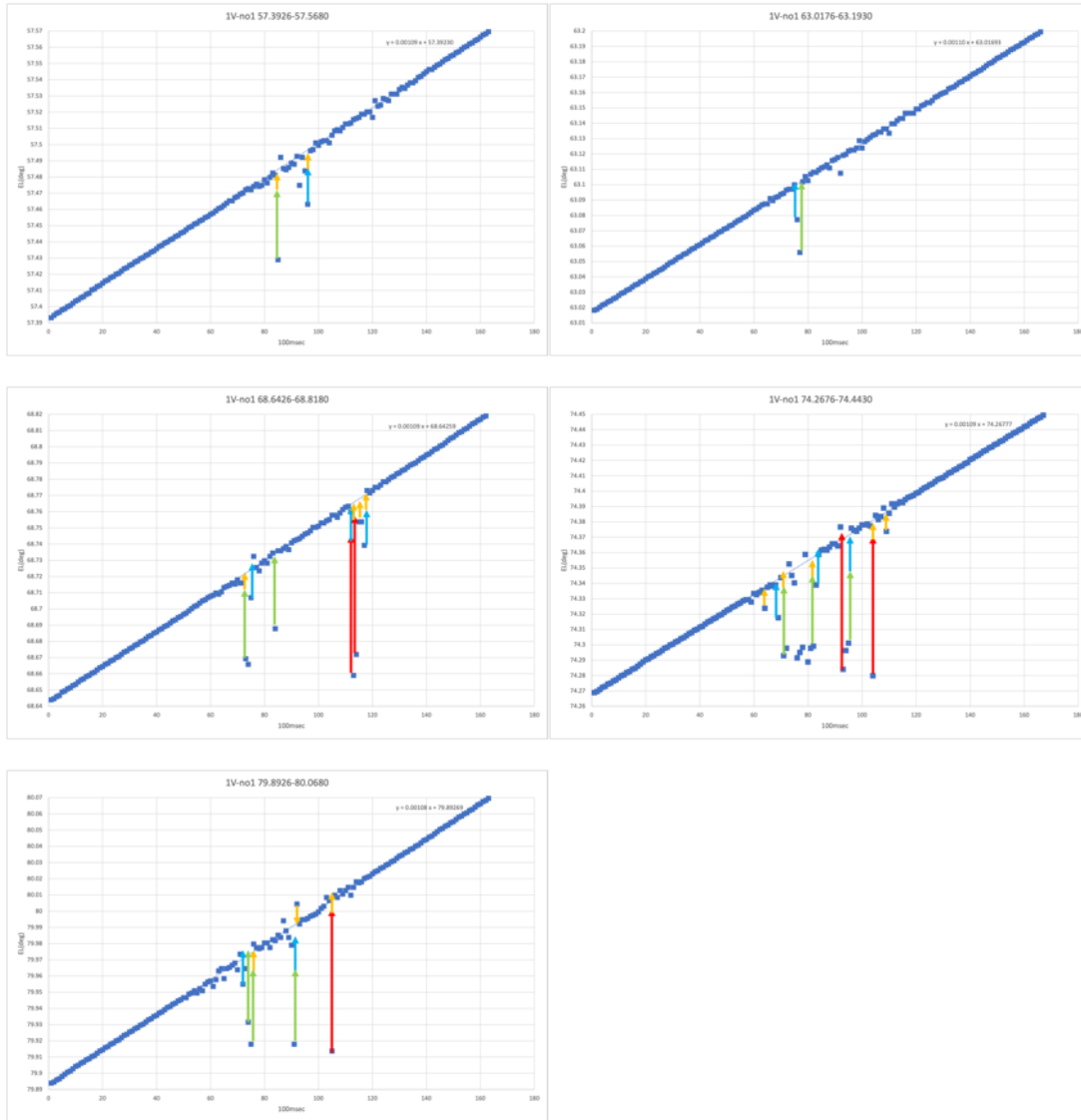


図 4.12

赤：SD 9 が 0->1 になった場合の増加量 (0.08789 deg)

緑：SD 8 が 0->1 になった場合の増加量 (0.04394 deg)

青：SD 7 が 0->1 になった場合の増加量 (0.02197 deg)

黄：SD 6 が 0->1 になった場合の増加量 (0.01099 deg)

調査の結果、異常発生時の角度の変化の仕方に規則性は見られなかった。上記の他に特定の bit 以下がいくつかズレて読み込まれる (10101010 → *1010101) 可能性や、特定の bit が入れ替わって読み込まれる (10101010 → 00101011) 可能性についても調査したが全ての異常に共通する規則は無かった。また、もしこれらの可能性が異常の原因であったとしても、異常がアンテナを EL 上り方向に動かした時にのみ発生する理由は説明できない。よって異常の原因は角度信号処理時の S/D 変換機やコネクタでの角度計算及び読み取りではないと考えられる。

第5章 アンテナのギアに関する調査

前章より、異常の原因が角度の計算及び読み取りではないことがわかった。よって異常の原因は高萩アンテナ本体の機構にあるのではないかと考えられる。高萩アンテナ本体の機構のうち、異常の原因として考えられるのはアンテナのギアによる影響である。異常区間の間隔が 5.625° であることから、高萩アンテナの駆動部または角度検出機構にアンテナが 5.625° 駆動する度に1回転するギアが存在すれば、それが異常の原因として考えられる。高萩アンテナの図面を見てギアについて調査を行った結果、角度検出機構のギアに関して、以下の図 5.1, 5.2 の様な記載があった。

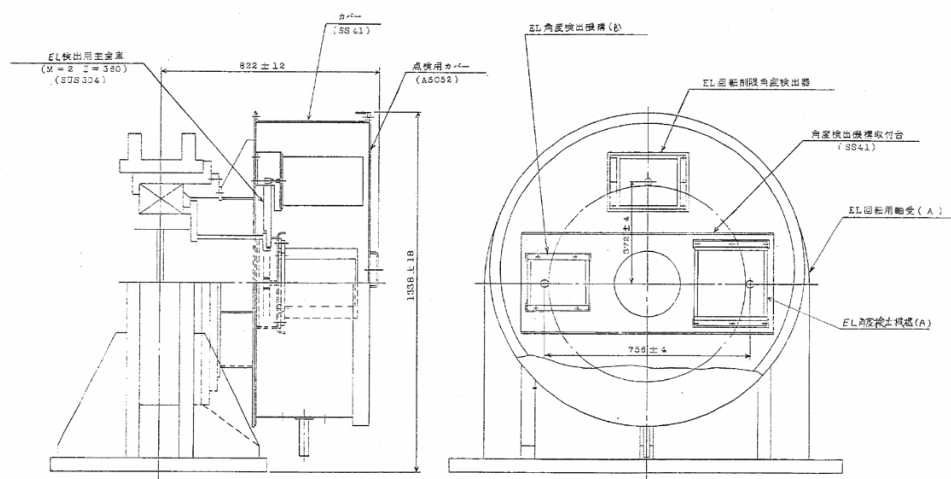


図 5.1 EL角度検出機構の図面

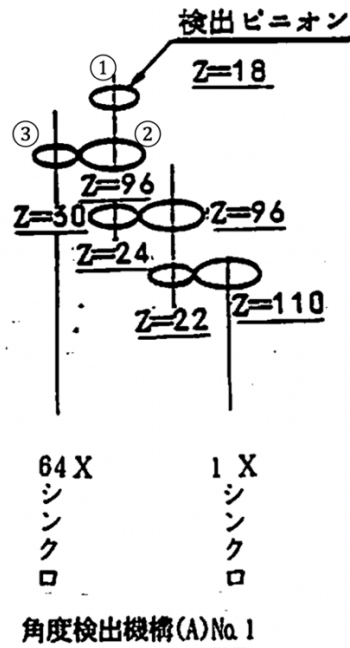


図 5.2 角度検出機構 拡大図

図 5.2 の $z=18$ の①のギアは図 5.1 左図の $z=360$ の EL 検出用主歯車につながっているため EL 検出用主歯車が 1 回転すると①のギアは 20 回転 ($360 / 18$) する。①と②のギアは連動しているため①のギアが 20 回転すると②のギアも 20 回転する。 $z=96$ の②のギアが 20 回転すると $z=30$ の③のギアは 64 回転する ($20 \times 96 / 30$)。よって EL 検出用主歯車を 1 回転 (360°) させると③のギアは 64 回転する。反対に③のギアを 1 回転させると EL 検出用主歯車は $5.625^\circ (= 360^\circ \times 1/64)$ 回転する。なお、図 5.2 の図面は角度検出機構 No 1 のものであるが、高萩アンテナには角度検出機構 No 2 として図 5.2 に描かれている 4 つの軸のうち、左側の 2 つの軸のみが搭載された機構もある。よって③のギアは 2 つ存在する。以上より③のギアが 1 周 5.625° に対応するギアであり、異常の原因であると考えられる。

さらに図 5.3 の様にギアの歯の片面にのみ、異物や破損があった場合、それによる影響が出るのはギアの回転方向のうちどちらか一方のみである。この場合、 EL 上りにのみ異常が発生することも説明できる。よって異常の原因はこのギアであると考えられる。

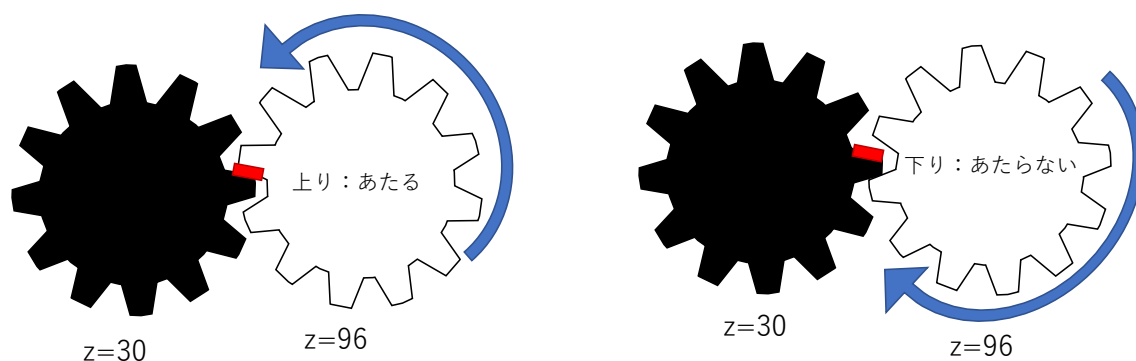


図 5.3 ギアの回転方向による違い

5.1 測定

測定 6 ギア清掃後の $E_{\max}(EL) = 1.5 \text{ V}$ 一定電圧駆動試験

③のギアによる影響の調査として目視によるギアの確認をしたが、目立った異物や破損は見られなかった。しかしこのギアの大きさは数 cm 程度であり、異常の原因が目視では確認できないほど小さい可能性もあるため、一度、エタノールをつけたブラシによってギア全体を清掃し、測定 1-5 の測定と同様に一定電圧での駆動試験を行った。測定は $E_{\max} = 1.5 \text{ V}$ で行いAZは固定し、ほぼ同じ内容で4回の測定を行った。測定諸元は以下の様になる。

no	測定日	開始時刻	終了時刻	AZ駆動電圧 (V)	EL駆動電圧 (V)	開始 AZ(deg)	開始 EL(deg)	終了 AZ(deg)	終了 EL(deg)
1	2022/01/06	05:28:06	06:50:12	0.0	1.5	139.9994	5.0248	140.0014	84.9915
2	2022/01/07	10:08:14	11:30:50	0.0	1.5	130.0011	5.0021	130.0011	84.9936
3	2022/01/08	09:54:30	11:16:33	0.0	1.5	89.9979	4.9973	89.9979	84.9992
4	2022/01/08	11:38:22	13:01:21	0.0	1.5	99.9995	5.0001	99.9975	84.9950

測定 6 測定諸元

5.2 結果

測定 6 のEL方向の結果は図 5.4, 5.5 の様になった。

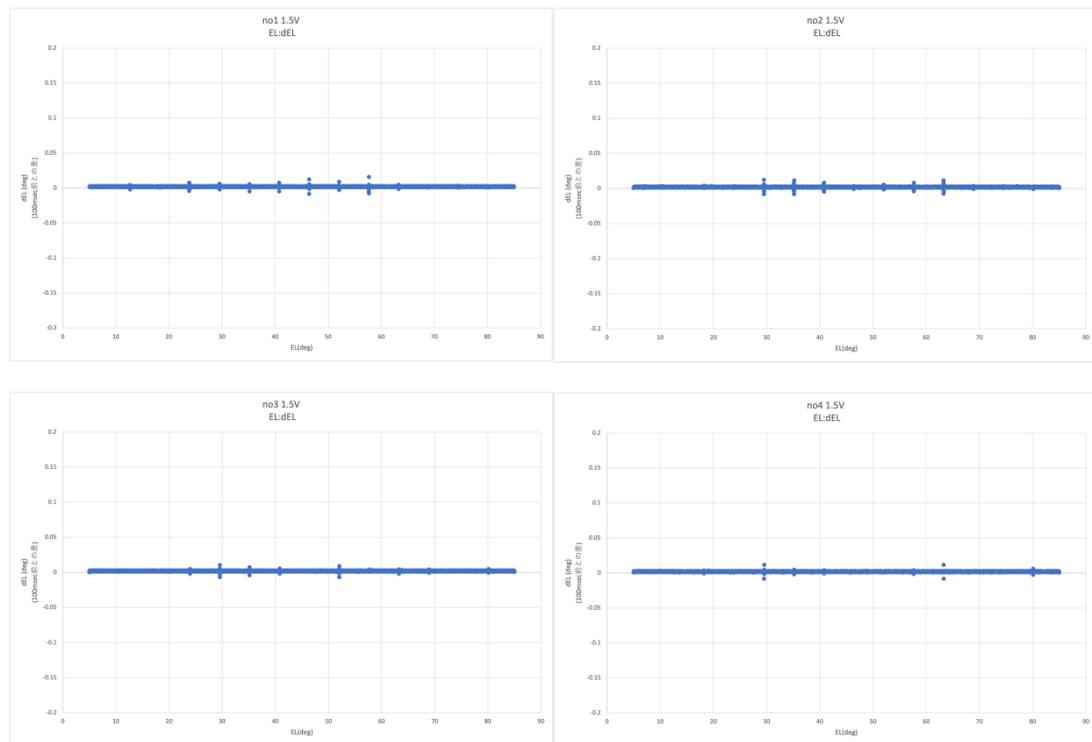


図 5.4 測定 6 結果

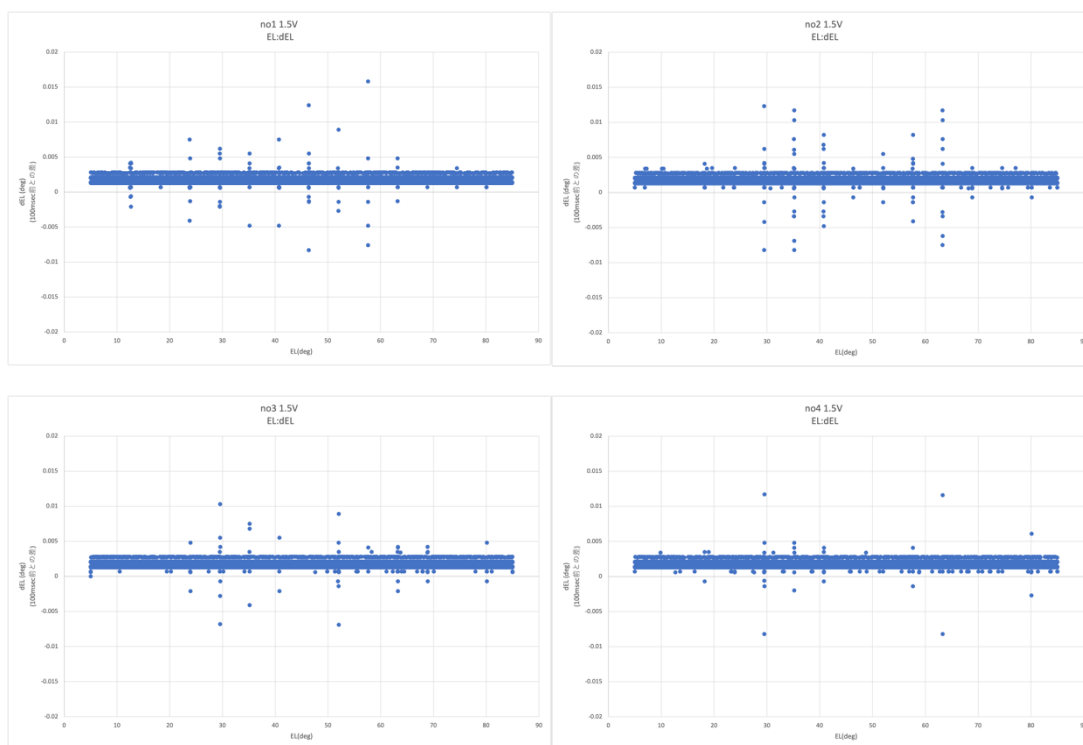


図 5.5 測定 6 結果(図 5.4 の縦軸の幅を 1/10 倍したもの)

5.3 考察

図 5.4, 5.5 を見ると、4 回の測定全てにおいて異常区間が完全に無くなったわけではないが、 dEL の大きさに着目すると、測定 1-5 の dEL の最大値は 0.15° 程であったのに対し、測定 6 の dEL の最大値は約 0.015° であり 1/10 程度になっている。この原因としては高萩アンテナの角度検出機構 No 1, No 2 のどちらかの③のギアに目視では確認できない異物もしくは汚れが付着しており、それが清掃によって一部拭き取られたためであると考えられる。今後はもう一度ギアの清掃を行い、同様の結果が得られることを確認する必要がある。

第6章 まとめ

高萩アンテナを駆動させた結果、アンテナが指示した方向に向いておらず、観測や性能評価が正しく行えていない可能性が明らかになった。そこで、高萩アンテナの指向性に関する調査を行った。

まず初めに 2020/01-2021/06 の間に角度ログに記録された OFF SOURCE について調査を行った。結果、高萩アンテナに記録された OFF SOURCE は①AZ方向のオーバーシュート ②観測中のEL方向の OFF SOURCE ③アンテナの駆動角速度によるAZ方向の追尾遅れ ④AZ方向の強風による影響 ⑤制御ソフトの起動方法に起因するログの記録不備 にパターン分けされた。そのうち①③④⑤は無視できると判断したが、②は観測に影響があると考えられる。②について調査を行った結果、高萩アンテナはEL上り方向に駆動させた時に特定の角度の区間でのみ角度が急に異常値になり、さらにその異常区間は等間隔に並んでいることが判明した。

次に、天体追尾中は OFF SOURCE が発生してもそれを補正するために駆動角速度を変えるため、高萩アンテナの駆動電圧を一定にした測定を行い、この時にも異常が発生するか調査した。結果、異常はAZの駆動や駆動電圧によらず、EL上り方向にのみ発生することが確認された。

観測中の OFF SOURCE や一定電圧測定で発生した異常を 2 bit 表現にした結果、OFF SOURCE や異常が発生するのは SD 14-11 が 0011 の組み合わせ、かつ、SD 10, 9 が 01, 10, 11 のどれかの組み合わせの時のみであることが判明した。このことから異常区間の間隔は 5.625° 、幅は 0.2633° であることがわかった。

異常の原因が角度の計算及び読み取りであった場合、異常発生時の角度の変化の仕方に規則性がある可能性が高いが、観測中の OFF SOURCE や一定電圧測定で発生した異常のデータからは規則性を見つけることができなかった。

異常の原因がアンテナ本体の機構にある場合を検討するため高萩アンテナの図面を調査した結果、角度検出機構のギアに 1 周 5.625° に対応するギアが使われていることがわかった。このギアの歯の片面に異物や破損がある場合、異常区間の間隔が 5.625° であることと異常がEL上りにのみ発生することが説明できる。実際にギアを清掃した後、もう一度一定電圧測定を行った結果、異常の大きさが 1/10 程度になった。よってこのギアが異常の原因であったと考えられる。

今後はこのギアの清掃後の結果に関して再現性の確認を行い、異常の原因を判明させる必要がある。

謝辞

本研究を進めるに当たって、指導教員である米倉覚則先生には研究の進め方やアンテナの駆動など、多くの面で大変お世話になりました。ゼミや発表練習では百瀬宗武先生にも指導を頂きお世話になりました。感謝申し上げます。

ゼミやモニター観測、PC の設定時には、研究員の方々に多くの知識や助言を頂きました。感謝申し上げます。

研究室の皆さまは、あまり研究室に行かない私にも気さくに話しかけていただき、配属されてからの 3 年間を豊かなものしていただきました。特に同期とは研究や発表練習だけでなく、普段の生活に至るまで、多くの知識、意見の共有ができました。感謝申し上げます。

また、研究室外でも、高校時代や学部時代からの友人、サークルの先輩,同期,後輩たちは私の大学生活をとっても価値のあるものにしてくれました。感謝申し上げます。

最後に、今まで支えてくださった両親、兄弟のおかげで、大学の生活や研究を充実して進めることができました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 永野稜大, 高萩 32m 電波望遠鏡の駆動試験及び能率、ビームパターン測定, 茨城大学 理学部理学科, 2019.
- [2] 星慶幸, 旧 KDDI 茨城 32m アンテナの電波望遠鏡化に向けての基礎研究, 茨城大学 大学院理工学研究科, 2008.