

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### アンテナ予報値誤差補正

Simple Correcting Method of Antenna Prediction Error

原島 治, 青木 尋子, 藤田 洋一

Osamu HARASHIMA, Hiroko AOKI and Yoichi FUJITA

2019年1月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 目 次

1. はじめに	1
2. 予報値補正の基本的な考え方	2
3. モデルシミュレーションによる補正精度評価	3
3.1. 評価方法 .....	3
3.2. 評価ケースと条件 .....	3
3.3. AOS 直後の計測による補正誤差結果 .....	3
3.4. 補正誤差の局所的なピーク低減効果 .....	6
4. まとめ	7
付録A アンテナ予報値補正の定式化	8
A.1. 事前設定パラメータ .....	8
A.2. 入力データ .....	9
A.3. 補正マトリックスの計算 .....	9
A.4. 予報値の補正 .....	10
付録B モデルシミュレーション結果	11

# アンテナ予報値誤差補正

原島 治<sup>\*1</sup>, 青木 尋子<sup>\*2</sup>, 藤田 洋一<sup>\*2</sup>

## Simple Correcting Method of Antenna Prediction Error

Osamu HARASHIMA<sup>\*1</sup>, Hiroko AOKI<sup>\*2</sup>, Yoichi FUJITA<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

For low-earth orbit satellites, ground station antenna control data calculated from orbit prediction have non-negligible error, mainly by uncertainty of atmospheric drag. Simple correcting method of antenna prediction error using acquisition data has been formulated. Model simulation shows that this method mitigate antenna direction error under 0.1deg, which is enough accuracy for tracking low-earth orbit satellite by X-band. More accurate antenna prediction data are expected for useful to protect radio interference from other satellites.

**Keywords:** Antenna Prediction, Correcting Method, Ground Station

### 概要

低高度衛星において、予測軌道から算出された地上局アンテナ予報値は、主に大気抵抗の不確定さにより無視できない誤差を有する。アンテナによる衛星捕捉時のデータを用いて、アンテナ予報値を補正する簡単な方法を定式化した。モデルシミュレーションの結果、この方法によりアンテナ指向方向誤差を0.1deg未満に低減できることを確認した。この値は低高度衛星をXバンドで追尾する上で十分な精度である。アンテナ予報値の精度を高めることは、他衛星による電波干渉対策として有効であると期待される。

### 1. はじめに

衛星を地上局アンテナで追尾する方式は大きく分類すると以下の3種類である。

- A) プログラム追尾： 衛星の予測軌道をシミュレーションして事前に作成したアンテナ予報値に従ってアンテナを駆動させる。
- B) 自動追尾： アンテナ予報値に基づく捕捉後、受信電波計測値を指針にしてアンテナを駆動させる。
- C) 自動プログラム追尾： プログラム追尾をしつつ、受信電波計測値から得られる衛星の指向方向と予報値の差分により“その時点の”予報値を補正する。

アンテナ予報値が正確ならば方式A)で問題ないが、軌道予測シミュレーションのモデルが完全でないことによる誤差が存在する。アンテナ予報値誤差が特に問題になるのは高度数100kmの低高度衛星であるが、このような軌道では大気抵抗による誤差が主要因となり、太陽活動極大期も想定して、常時アンテナ追尾を保証する予報値を準備することは運用面で無理がある。例えば、アンテナ追尾に必要な指向精度はXバンドで0.1deg前後だが、高度数100kmの衛星の軌道予測誤差に換算すると1km未満となる。

したがって従来、方式B)が一般的に使われている。しかし昨今、10年前とは比較にならないほど多くの衛星が宇宙空間に存在するようになり、それに伴って電波干渉のリスクも急激に高まっている。方式B)では他衛星の電波に感応してアンテナが引き込まれるという問題が顕在化しつつある。

\* 平成30年10月31日受付 (Received October 31, 2018)

<sup>\*1</sup> 追跡ネットワーク技術センター (Space Tracking and Communications Center)

<sup>\*2</sup> 第二宇宙技術部門 (Space Technology Directorate II)

方式C) はアンテナ予報値を補正する 1 つの方式ではあるが、計測ポイント毎の直接フィードバック的な補正であるため、以下の問題が残る。

- ・受信電波から計測される指向方向には計測誤差が乗り、その誤差が直接補正值に影響する。
- ・アンテナ予報値誤差は、衛星が地上局の天頂付近通過付近で急激に増大するような非線形の振舞をする。直接フィードバック的な補正ではこのような誤差への追従に限界がある。
- ・計測ポイント毎の直接フィードバック方式では、電波干渉の問題は依然として残る。

そこで、衛星の軌道誤差の特性に着目することにより、地上局サイトで捕捉直後に検知された実測値と予報値の差を用いて当該可視パスの予報値(時系列データ)を補正する方式について検討し、その効果をモデルシミュレーションで確認した。

## 2. 予報値補正の基本的な考え方

予報値へのインパクトが大きい軌道誤差は、時間と共に増大する進行方向位置誤差なので、これを補正することを考える。

軌道上「進行方向一定のズレ」は、地上局から見ると方向によって大きさが変化する非線形の振舞いを示すが、地心を原点とした地球固定座標で見ると、少なくとも地上局可視範囲内では一定シフトと見ることができる(図1参照)。

そこで予報値補正を以下の操作として考える(図2参照)。

- ①予報値および実測値から地球固定座標における衛星位置ベクトルを計算。
- ②衛星位置ベクトルの予報値と実測値の差(離角 $\gamma$ )を検出。
- ③予報値の AOS/LOS 時衛星位置ベクトルが成す面内で、各時刻ポイントにおける予報値位置ベクトルを一様に $\gamma$ 回転させる。

地球固定座標における軌道アークは完全な平面内にはないので上記の操作は近似であるが、これは補正誤差の内と考える。(時刻換算10秒の誤差に対して地球自転による影響は赤道上において最大で約0.04deg)

具体的な計算式は付録Aに示す。

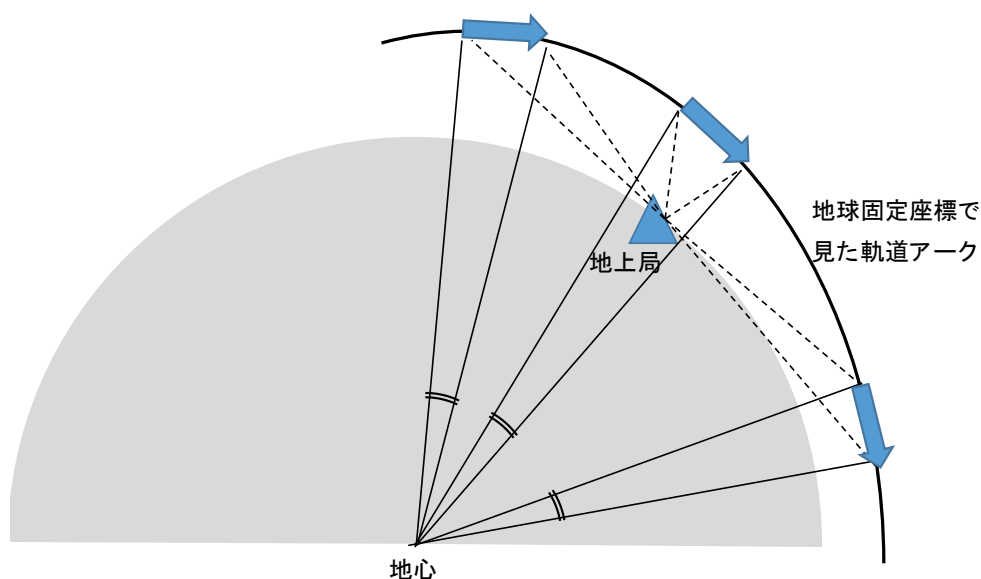


図1 進行方向位置ズレを地球固定座標で見る

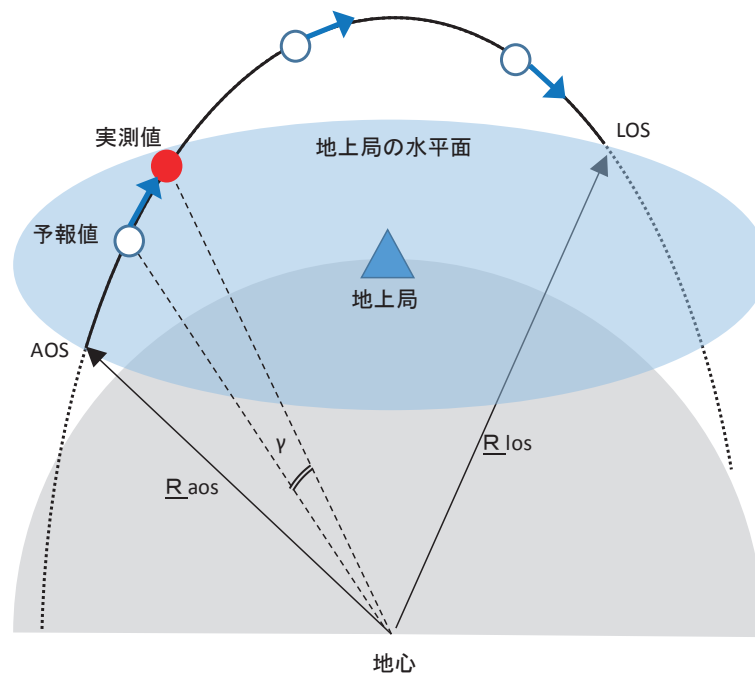


図2 予報値補正の基本的な考え方

### 3. モデルシミュレーションによる補正精度評価

#### 3.1. 評価方法

以下の方法で補正誤差を評価した。

- ①基準にする軌道（ノミナル軌道と称する）と、ノミナル軌道に対して進行方向位置を $\Delta L$ ずらした軌道両方について、指定局の（レンジ、Az、El）を算出する。
- ②ノミナル軌道の（レンジ、Az、El）を予報値、進行方向にずらした軌道の（レンジ、Az、El）を実測値と見なす。
- ③AOS後の実測値と、同時刻の予報値から補正量（図2の $\gamma$ ）を計算する。この時、実測値にはアンテナ設備による方位角／仰角の計測誤差 $\Delta az / \Delta el$ を考慮する。
- ④当該パスの予報値を補正する。
- ⑤実測値と補正值に対して、視線方向ベクトルの方向差 $\Delta \theta$ を計算し、補正誤差とする。

#### 3.2. 評価ケースと条件

軌道は低高度の極軌道（離心率＝0、軌道傾斜角＝97deg）とし、高度について500／450／400kmの3ケースを考慮する。進行方向位置ズレ $\Delta L$ は25／50／75／100kmの4ケースを考慮する。地上局は以下の3ケースを考慮する。計算対象期間は1日とする。

高緯度局： 緯度70degN  
 中緯度局： 緯度35degN  
 赤道局： 緯度0degN

アンテナ設備による計測誤差の大きさは、国内で開発されている設備に相当する誤差として0.05degと考え、 $\Delta AZ = \pm 0.05deg$ 、 $\Delta EL = \pm 0.05deg$ の4ケースを考慮する。

#### 3.3. AOS直後の計測による補正誤差結果

補正量を算出するタイミングをAOS直後（EL～0）とした場合の、地上局と軌道高度の組合せ全

ケースにおける補正誤差 $\Delta \theta$ 算出結果を付録Bに示す。グラフは1日分の可視パス（ケースにより3パス～12パス）について、パス間60秒を空けて一続きにした経過時間に対して $\Delta \theta$ をプロットしている（図3参照）。

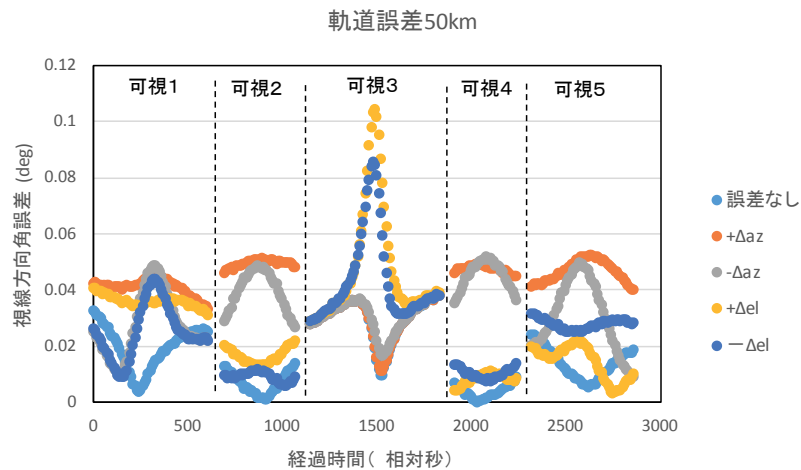


図3 補正誤差結果グラフの可視パス対応の説明

代表例として、（中緯度局、高度500km）ケースにおける可視パス（Az、El）グラフと補正誤差計算結果を図4、図5に示す。

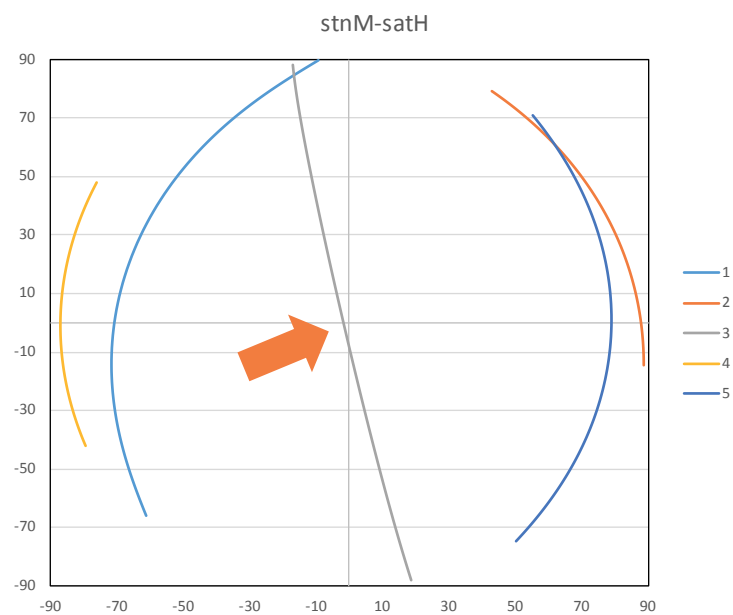


図4 可視パスの（Az、El）： 中緯度局、軌道高度500km

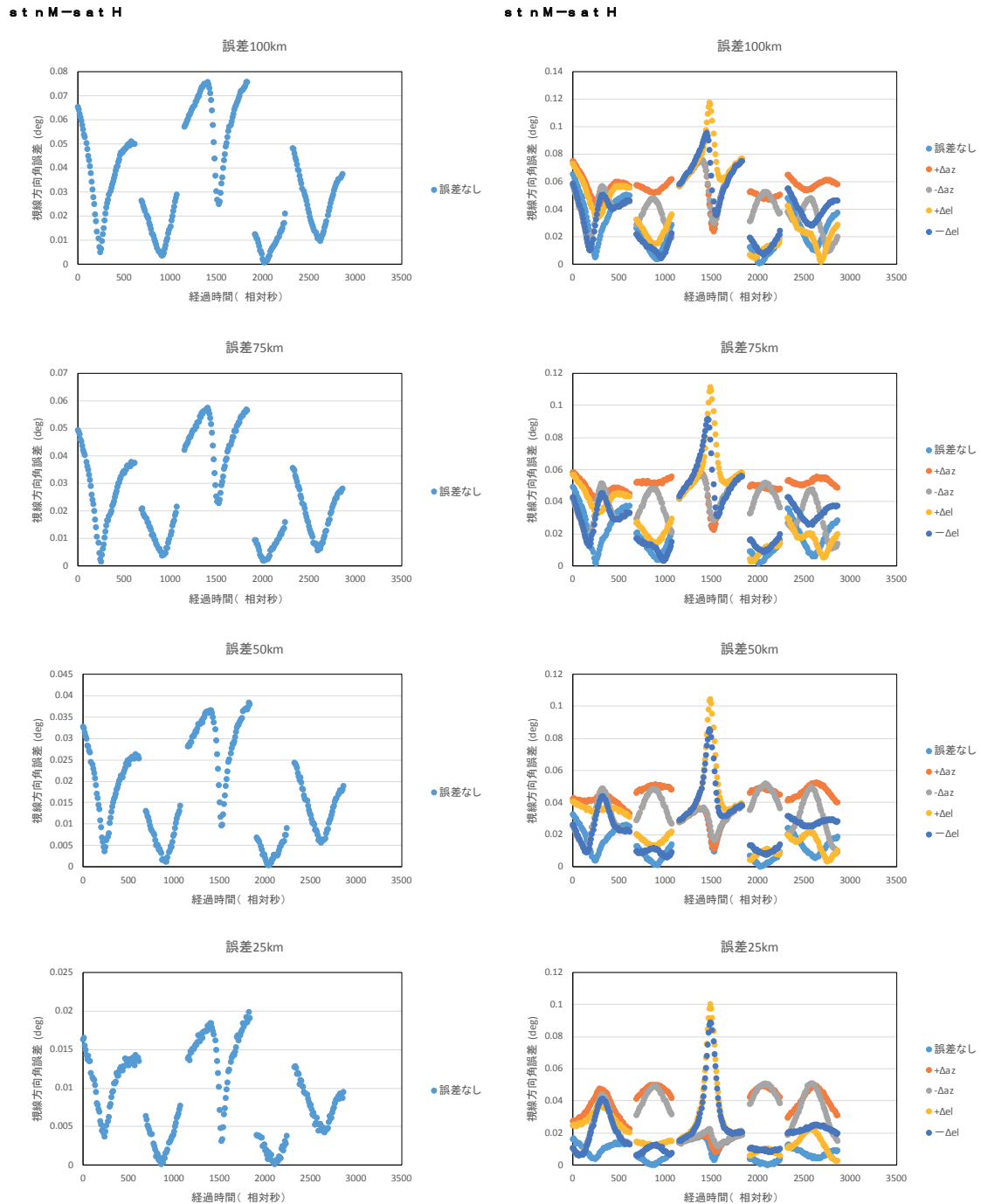


図5 補正誤差： 中緯度局、軌道高度 500km

計測誤差なしケース（図5の左側）が「補正方式自体の誤差」を表している。付録Bの全ケースグラフから読み取れる主な特徴は以下である。

- ・補正誤差は高緯度局→中緯度局→赤道上局の順に小さくなる。
- ・進行方向位置誤差に概ね比例した補正誤差が出ている。
- ・500～400kmの範囲では、補正誤差は軌道高度にほとんど依らない。

高緯度局の進行方向位置誤差100kmのケースで誤差は約0.12degである。実際にありうる進行方向位置誤差は軌道決定や予報値更新の運用に依るが、50km程度と見れば、補正方式自体の誤差は0.06deg未満である。

計測誤差考慮ケース（図5の右側）が実際に期待される補正誤差である。付録Bの全ケースグラフ

において、まず、局所的なピークとなっている極大値（図5では3番目の可視パスで出ている）を除いて見た場合、主な結果を以下に示す。

- ・高緯度局、中緯度局の補正誤差は、進行方向位置誤差 100km、75km では補正方式自体の誤差が支配的だが、進行方向位置誤差 50km 以下では計測誤差が支配的となり、0.05～0.06deg が補正誤差の限界となる。
- ・赤道上局では補正方式自体の誤差が小さいため、進行方向位置誤差 100～25km に依らず、計測誤差が支配的で 0.05～0.06deg が補正誤差の限界となる。

次に、上記で除いた「局所的なピーク」について考察する。

補正誤差の「局所的なピーク」は、天頂付近を通過するパスのさらに天頂付近（図4の矢印付近）で現れる。また、計測誤差をEL方向に設定したケースで出ている。今回のシミュレーションではAOS直後の計測によって補正量（図2の $\gamma$ ）を算出している。これらのことから、以下の現象が見えていと考えられる。

- ・天頂付近を通過するパスの AOS 付近の EL 誤差は進行方向位置誤差に影響する。  
→計測誤差が進行方向位置誤差に上乘せされる。（図6参照）
- ・天頂付近ではスラントレンジが小さくなるため、進行方向位置誤差による方向角誤差が増大する。  
EL誤差の進行方向位置誤差への感度は、ELが高くなると減少する。したがって、AOS直後だけではなく、ELがある程度大きくなったところで補正量を修正していくことが考えられる。

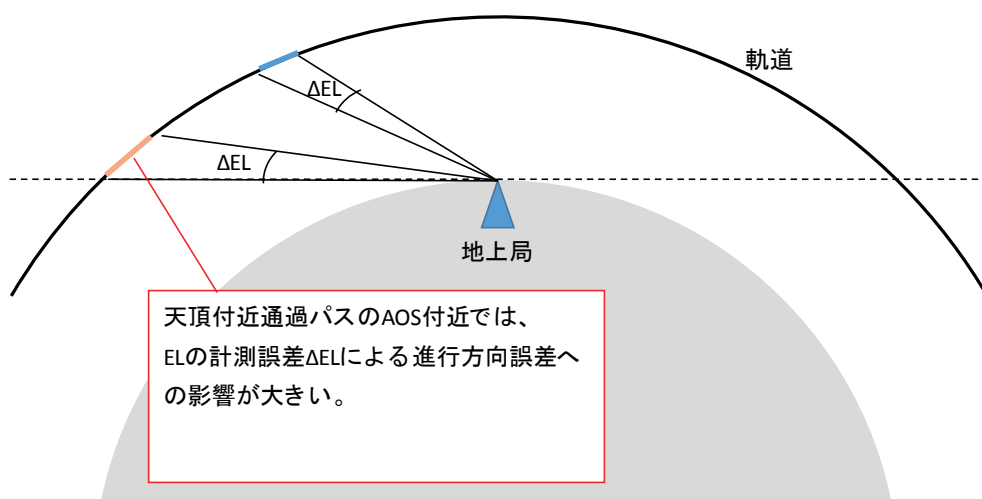


図6 天頂付近通過パスにおける EL 計測誤差の影響

### 3.4. 補正誤差の局所的なピーク低減効果

前節の考察を確認するため、（中緯度局、軌道高度500km）ケースの3番目の可視パス（図4の矢印を付けたパス）について、EL～15degおよび30deg付近で補正量を計算しなおした場合の結果を図7に示す。

図5と図7を比較すると、局所的なピークは低減され、補正誤差は進行方向位置誤差50kmの場合、約0.06degとなる。

したがってアンテナ予報値補正処理を実装する場合、捕捉直後から一定期間補正值を算出し続けることが有効である。局所的なピークは最大ELがそれほど高くない、すなわち可視時間が短いパスでは現れないので、補正值を継続算出する期間の目安としては、可視時間の長いパスに対して、可視時間の1/3程度が適切と考える。



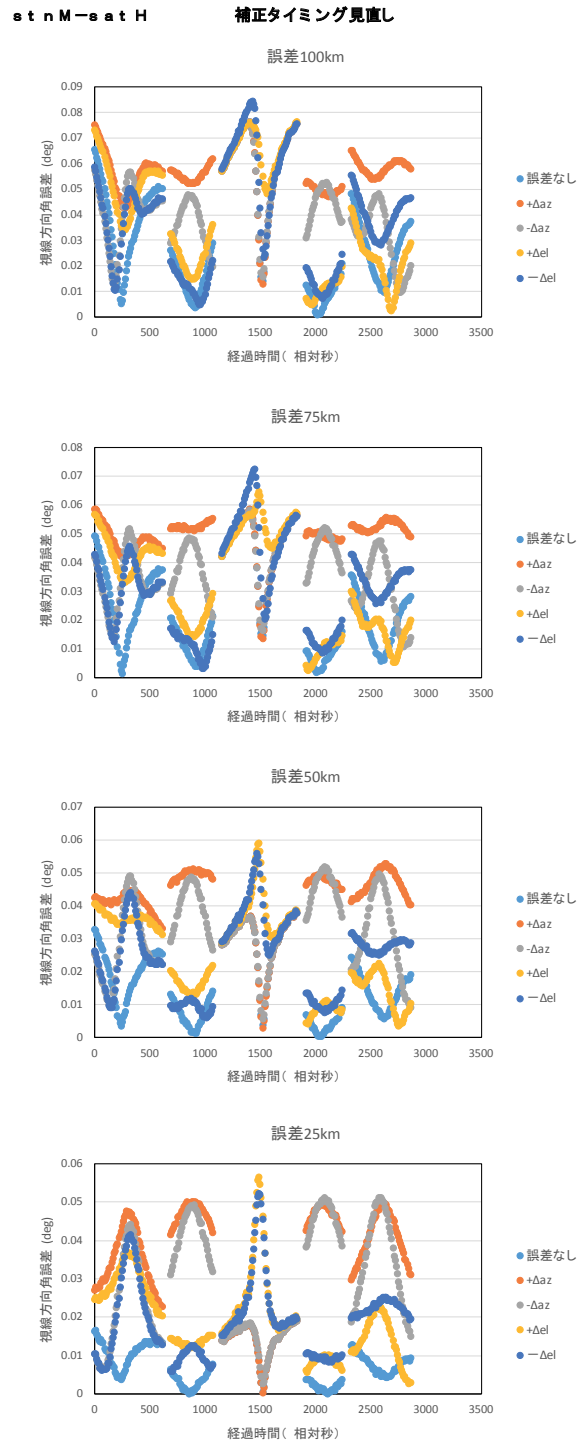


図7 補正誤差（補正値を継続修正）： 中緯度局、軌道高度 500km

#### 4. まとめ

- 地上局サイトで捕捉後に検知された実測値と予報値の差を用いて当該可視パスの予報値（時系列データ）を補正する方式を示した。
- 補正式は簡易であり、地上局サイトで充分実装可能と考える（プログラム規模としては 100～200 ステップ程度と予想）。
- 高度 400～500km の極軌道について、高緯度／中緯度／赤道上的地上局のアンテナ予報値を補正す

るモデルシミュレーションを行い、補正誤差を評価した。実際の運用でありうる軌道予測の進行方向位置誤差を 50km とした場合、アンテナ予報値の指向方向誤差を 0.1deg 未満に補正できる可能性が示された。

- ・天頂付近通過パスについては実測値の計測誤差の影響を抑えるため、AOS 直後だけではなく EL 上昇に伴って補正値を継続算出していくプロセスが有効である。

## 付録A アンテナ予報値補正の定式化

### A.1. 事前設定パラメータ

- ・地上局位置ベクトル（地球固定座標）  $\mathbf{S}$
- ・地上局位置地心緯度  $\phi$
- ・地上局位置経度  $\lambda$
- ・地表面座標→地球固定座標変換行列  $\Phi_{fs}$
- ・地球固定座標→地表面座標変換行列  $\Phi_{sf} = \Phi_{fs}^T$

$$\begin{aligned} \Phi_{fs} &= R_Z(\pi - \lambda) \cdot R_Y(\pi/2 - \phi) \\ &= \begin{pmatrix} -\cos \lambda \sin \phi & \sin \lambda & \cos \lambda \cos \phi \\ -\sin \lambda \sin \phi & -\cos \lambda & \sin \lambda \cos \phi \\ \cos \phi & 0 & \sin \phi \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $R_V(\theta)$  は V 軸周りに座標軸を  $\theta$  回転させた時の座標変換行列。

地表面座標の XYZ 方向は図 A 1 のように定義。ただし地表面座標の原点は地上局位置なので原点シフトして方向の関係だけ見ている。

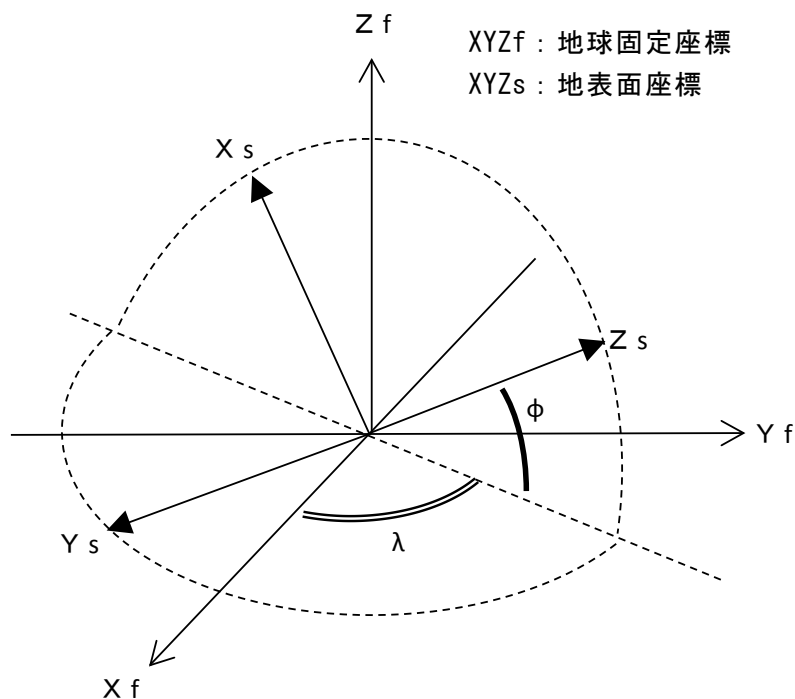


図 A 1 地表面座標と地球固定座標の関係

## A.2. 入力データ

- ・レンジ  $\rho_i$
- ・方位角  $Az_i$
- ・仰角  $El_i$

以下、suffix  $i$  は、 $a$ ：予報値、 $b$ ：実測値、 $c$ ：補正值 とする。

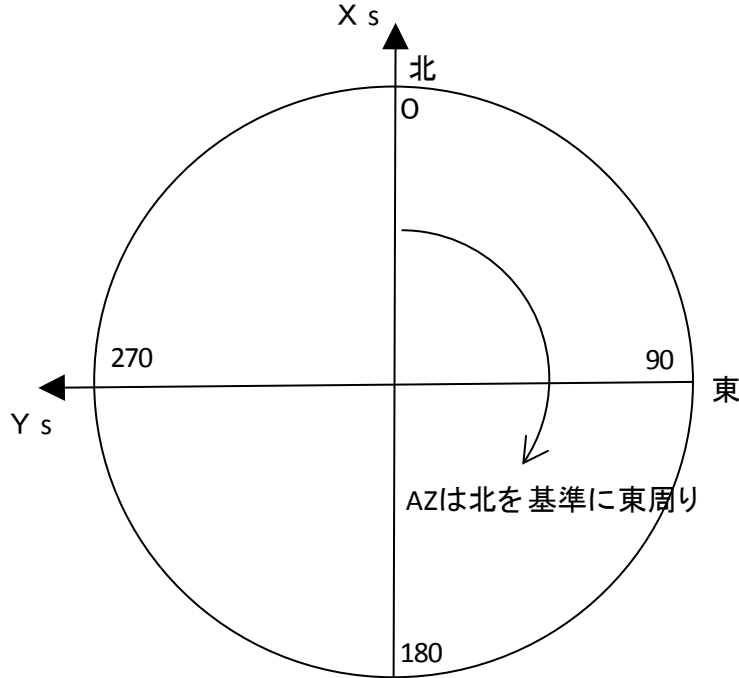


図 A 2 方位角の定義

## A.3. 補正マトリックスの計算

AOS 直後の時刻  $t$  における実測値 ( $\rho$ 、 $Az$ 、 $El$ )  $b$  から以下を計算する。

視線ベクトル

$$\mathbf{\rho b} = \rho b \begin{pmatrix} \cos Elb \cdot \cos (2\pi - Azb) \\ \cos Elb \cdot \sin (2\pi - Azb) \\ \sin Elb \end{pmatrix} \quad (2)$$

地球固定座標における衛星位置ベクトル

$$\mathbf{Rb} = \mathbf{S} + \Phi_{fs} \cdot \mathbf{\rho b} \quad (3)$$

衛星位置の方向単位ベクトル

$$\mathbf{Ub} = \mathbf{Rb} / |\mathbf{Rb}| \quad (4)$$

同様に同時刻  $t$  における予報値 ( $\rho$ 、 $Az$ 、 $El$ )  $a$  から、衛星位置ベクトル  $\mathbf{Ra}$ 、衛星位置の方向単位ベクトル  $\mathbf{Ua}$  を計算する。

同様の式により、AOS/LOS 時刻における予報値から、衛星位置の方向単位ベクトル  $\mathbf{Uaos}$ 、 $\mathbf{Ulos}$  を計算する。

補正マトリックスは、 $\mathbf{Uaos}$  と  $\mathbf{Ulos}$  の成す面に垂直方向を軸としてベクトル  $\mathbf{Ua}$  を  $\mathbf{Ub}$  方向に回転させるオペレータなので、図 A 3 のような座標系  $XYZ_n$  を定義すると、補正マトリックスは

$$\mathbf{Cmat} = \Phi^T \times \text{ROT}(\gamma) \times \Phi \quad (5)$$

と書ける。ここで

$\Phi$ ：地球固定座標から  $XYZ_n$  系への変換行列

$\text{ROT}(\gamma)$ ： $Z_n$  軸周りにベクトルを  $\gamma$  回転する行列 【注】

$\Phi^T$ ： $XYZ_n$  系から地球固定座標へ戻す変換行列

【注】ベクトルの回転行列であり、座標軸を回転させた時の座標変換行列ではない。

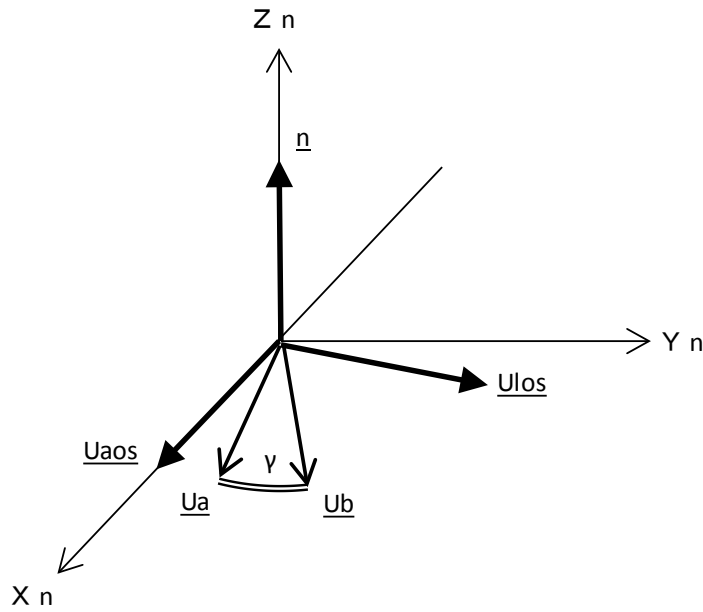


図 A3 XYZn 座標の定義

地球固定座標において、XYZn 系の座標軸方向単位ベクトルは以下で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Xn} &= \mathbf{Uaos} \\ \mathbf{n} &= \mathbf{Uaos} \times \mathbf{Ulos} \\ \mathbf{Zn} &= \mathbf{n} / |\mathbf{n}| \\ \mathbf{Yn} &= \mathbf{Zn} \times \mathbf{Xn} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

地球固定座標から XYZn 系への変換行列、その逆変換行列は以下で与えられる。

$$\Phi = \begin{pmatrix} Xnx & Xny & Xnz \\ Ynx & Yny & Ynz \\ Znx & Zny & Znz \end{pmatrix} \quad \Phi^T = \begin{pmatrix} Xnx & Ynx & Znx \\ Xny & Yny & Zny \\ Xnz & Ynz & Znz \end{pmatrix} \quad (7)$$

Zn 軸周りのベクトル回転行列は以下で与えられる。

$$\gamma = \cos^{-1} (\mathbf{Ua} \cdot \mathbf{Ub})$$

$$\text{ROT}(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

#### A.4. 予報値の補正

予報値（時系列データ）の各時刻ポイントデータ（ $\rho$ 、 $Az$ 、 $El$ ） $\mathbf{a}$  に対して以下の計算を行う。

視線ベクトル

$$\rho \mathbf{a} = \rho \mathbf{a} \begin{pmatrix} \cos El_a \cdot \cos (2\pi - Az_a) \\ \cos El_a \cdot \sin (2\pi - Az_a) \\ \sin El_a \end{pmatrix} \quad (9)$$

地球固定座標における衛星位置ベクトル

$$\mathbf{Ra} = \mathbf{S} + \Phi \mathbf{fs} \cdot \rho \mathbf{a} \quad (10)$$

補正マトリックスによる補正

$$\mathbf{Rc} = \mathbf{Cmat} \cdot \mathbf{Ra} \quad (11)$$

地表面座標における視線ベクトル

$$\rho \mathbf{c} = \Phi \mathbf{sf} \cdot (\mathbf{Rc} - \mathbf{S}) \quad (12)$$

レンジ

$$\rho c = |\rho \mathbf{c}| \quad (13)$$

視線方向単位ベクトル

$$\mathbf{U} \rho = \rho \mathbf{c} / \rho c \quad (14)$$

方位角

$$\alpha = \text{ATNA2}(-U \rho x, -U \rho y) + \pi$$

$$Az = 2\pi - \alpha \quad (15)$$

仰角

$$El = \sin^{-1}(U \rho z) \quad (16)$$

## 付録B モデルシミュレーション結果

表 B1 軌道条件

項目		satH	satM	satL
軌道高度	km	500	450	400
離心率		0		
軌道傾斜角	deg	97		
昇交点経度	degE	エポックにおいて0		
近地点引数	deg	0		
平均近点離角	deg			
進行方向 位置ズレ (km)	100	0.83301	0.83911	0.84530
	75	0.62476	0.62933	0.63398
	50	0.41651	0.41956	0.42265
	25	0.20825	0.20978	0.21133
	0	0.00000	0.00000	0.00000

表 B2 地上局位置

ケース	緯度(degN)	経度(degE)
stnH	70	20
stnM	35	135
stnL	0	135

表 B3 計測誤差ケース

ケース	方位角誤差	仰角誤差
誤差なし	0	0
+ Δaz	0.05deg	0
- Δaz	-0.05deg	0
+ Δel	0	0.05deg
- Δel	0	-0.05deg

対象期間における各地上局の可視パスの (Az、El) グラフを図 B 1 に示す。  
地上局と軌道高度の各組合せケースにおける補正誤差  $\Delta \theta$  を算出した結果を図 B 2 に示す。グラフは 1 日分の可視パス (ケースにより 3 パス～12 パス) について、パス間 60 秒を空けて一続きにした経過時間に対して  $\Delta \theta$  をプロットしている。

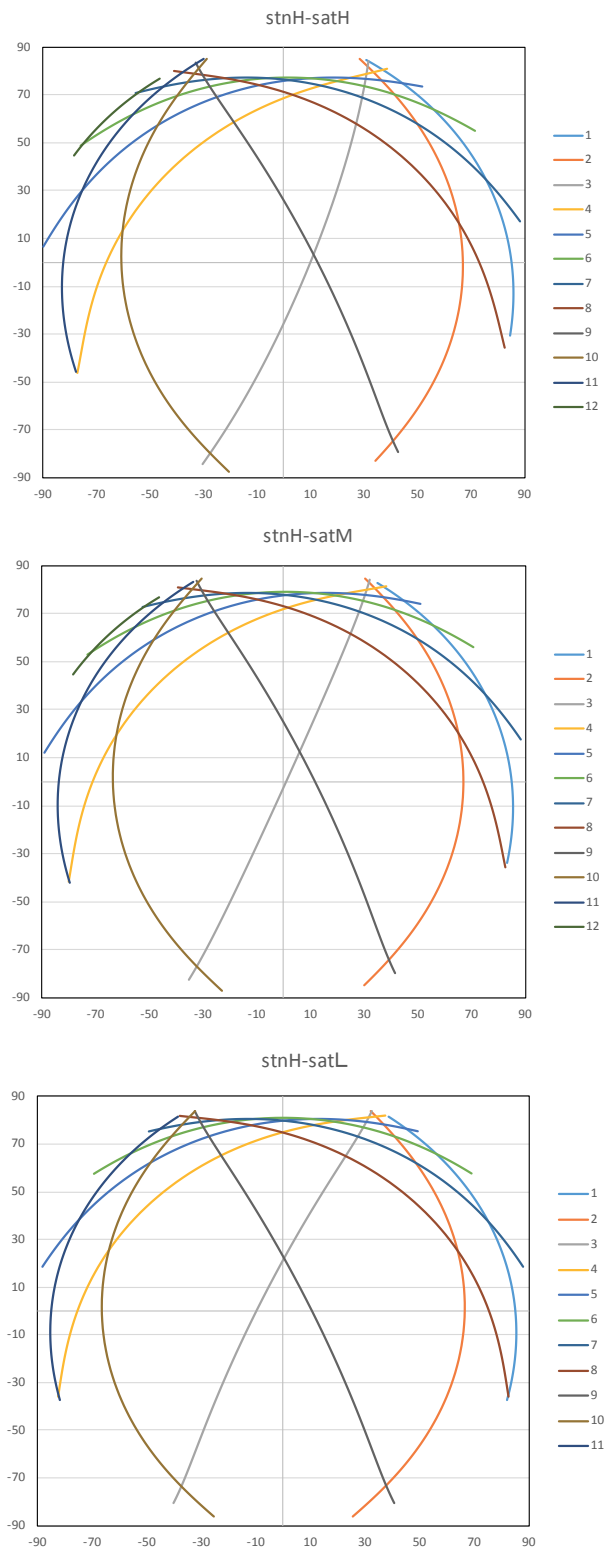


図 B 1 - 1 可視パスの (Az、El) : 高緯度局

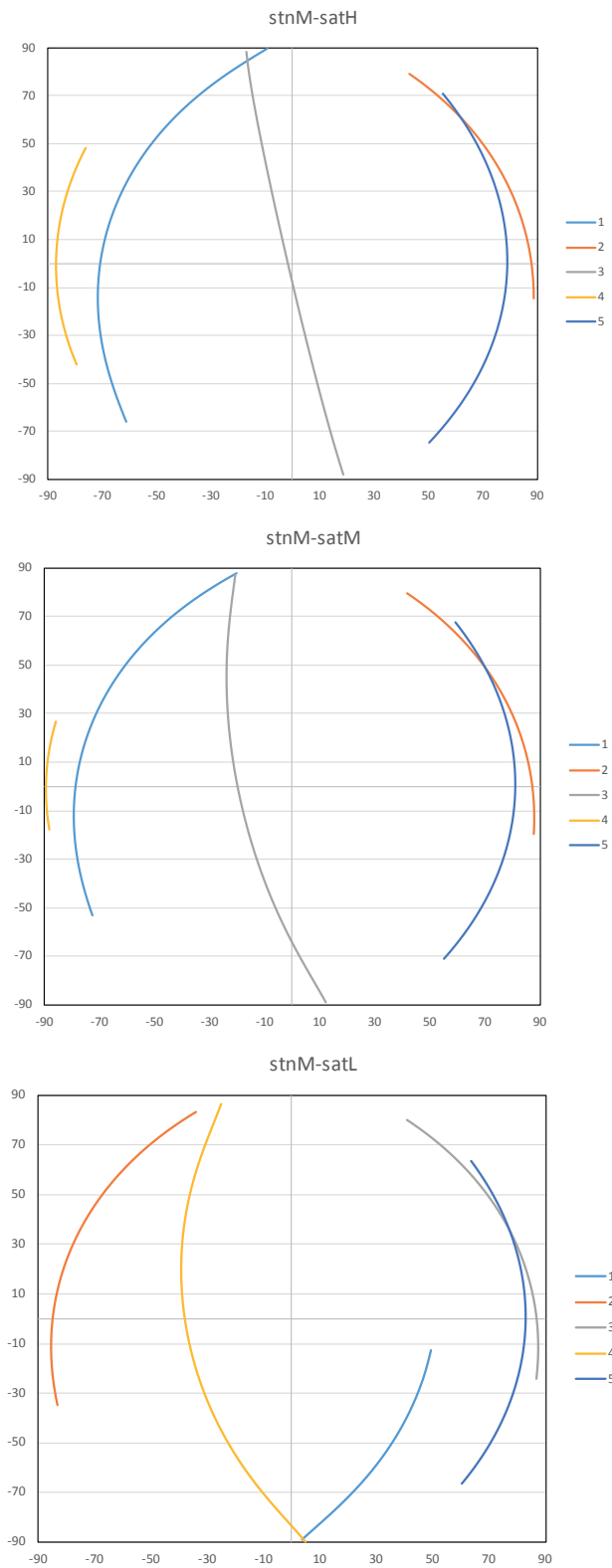
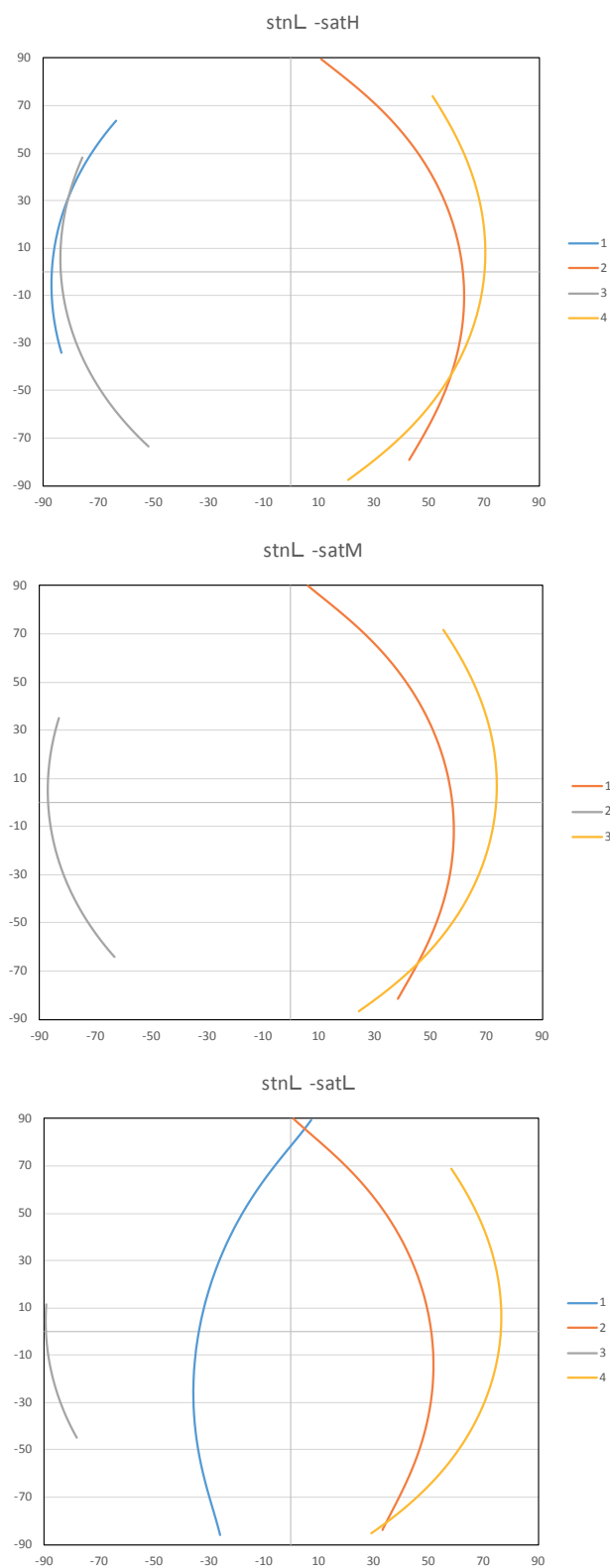


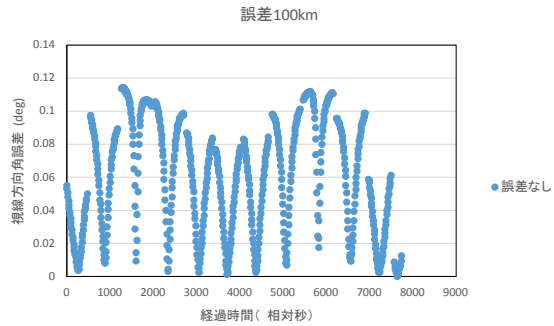
図 B 1 - 2 可視パスの (Az, El) : 中緯度局



図B 1－3 可視パスの (Az、El) : 赤道上局



stnH-satH



stnH-satH

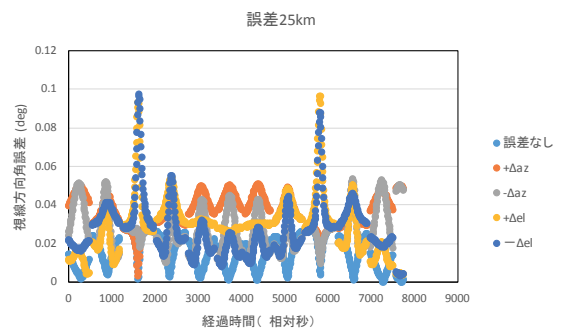
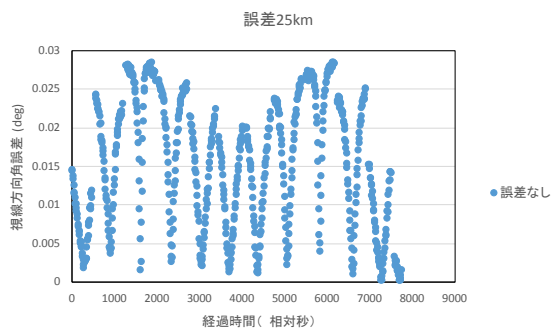
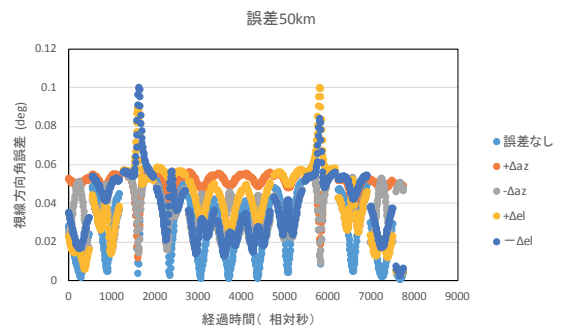
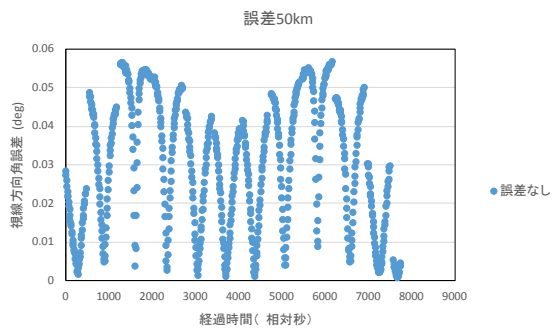
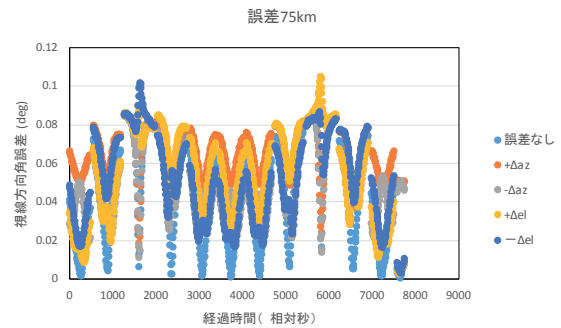
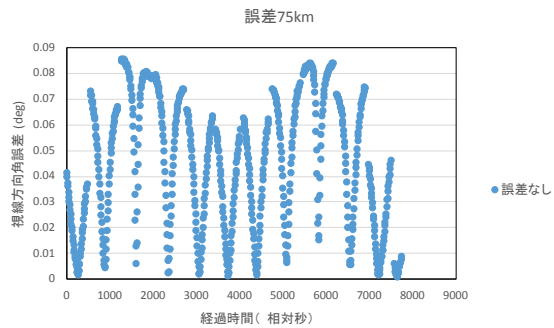
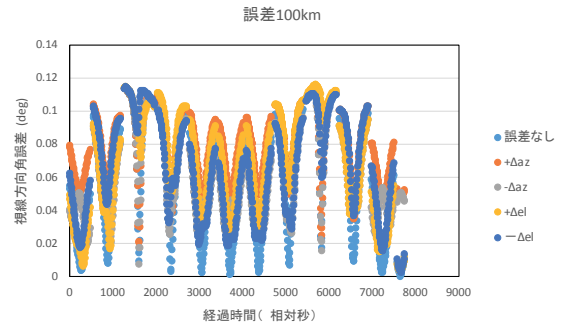
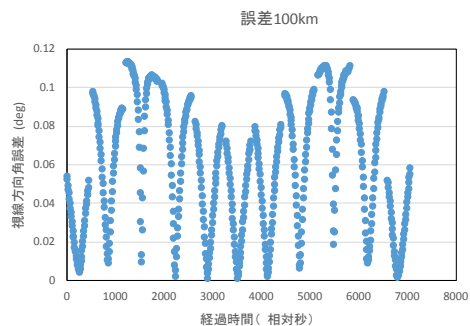


図 B 2 - 1 a 補正誤差： 高緯度局、軌道高度 500km

st nH-sat M



st nH-sat M

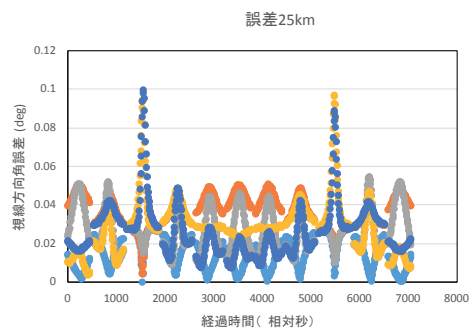
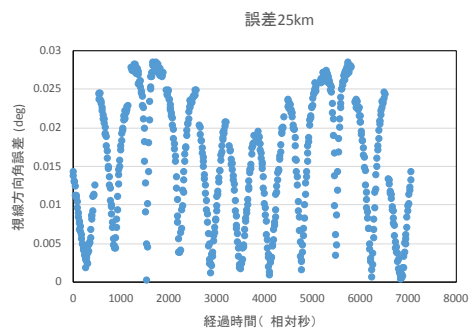
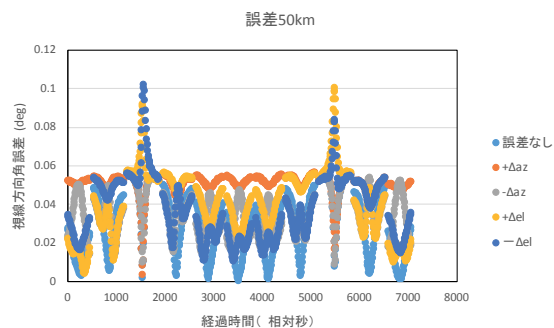
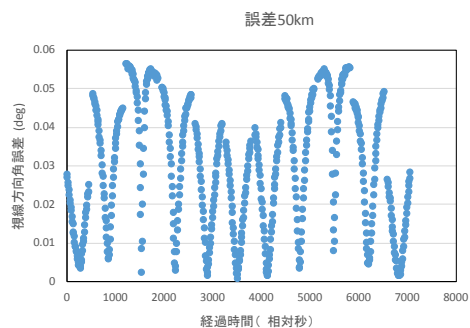
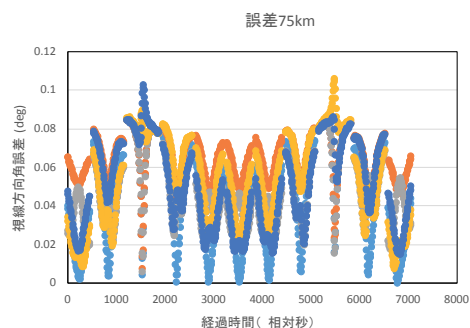
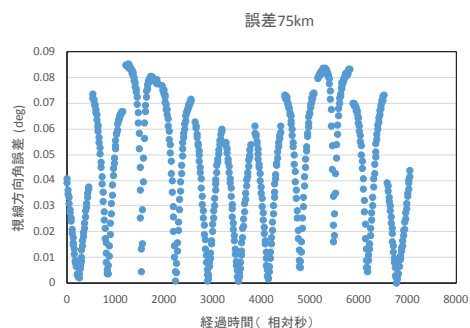
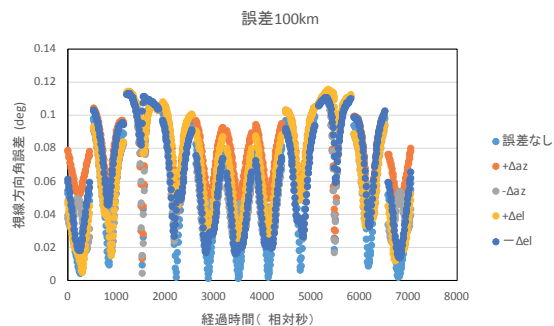
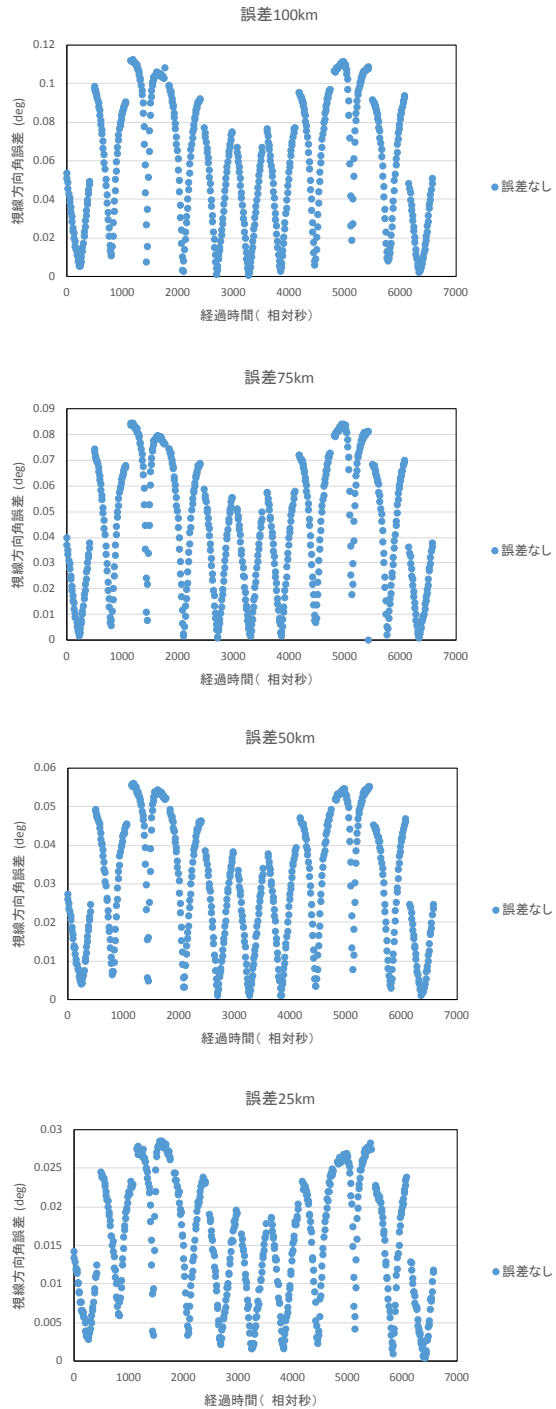
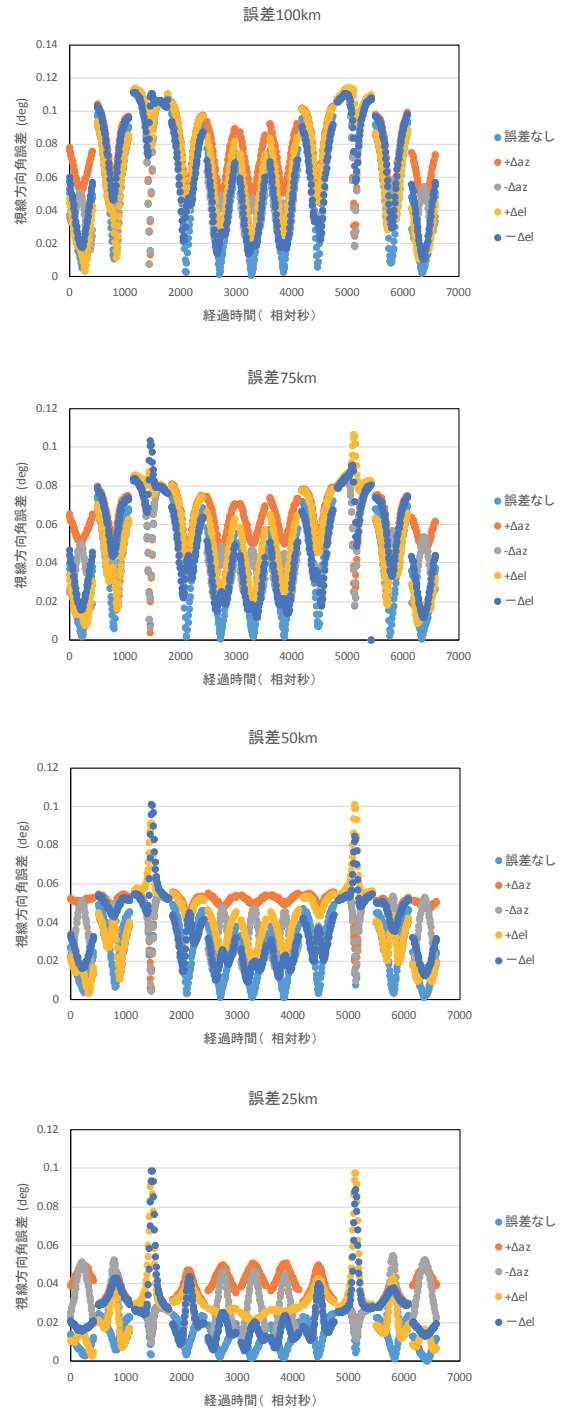


図 B 2 - 1 b 補正誤差： 高緯度局、軌道高度 450km

stnH-satL

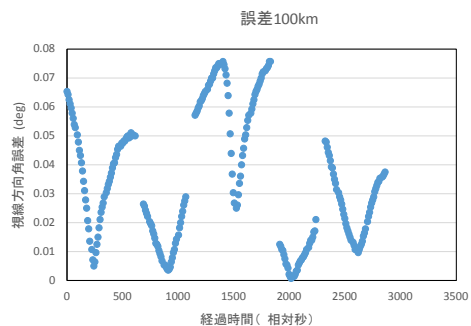


stnH-satL

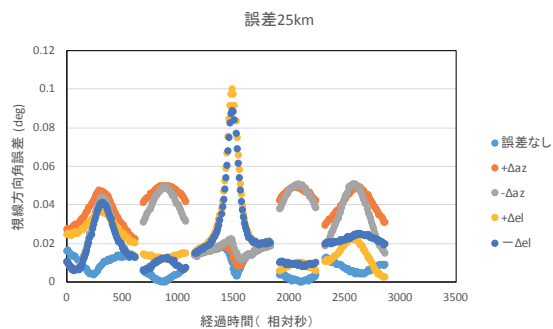
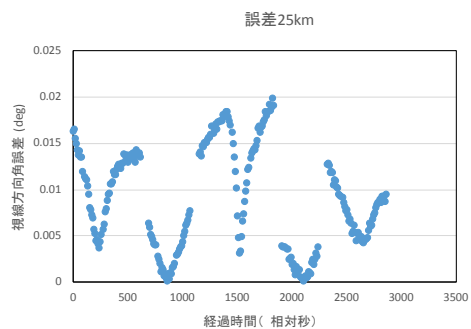
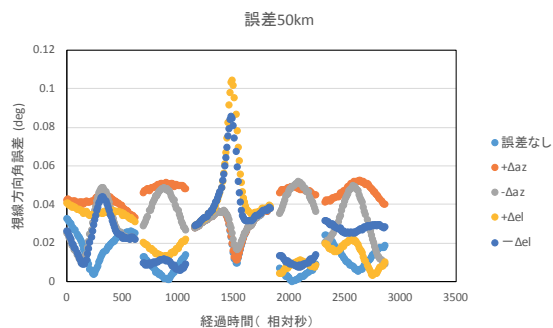
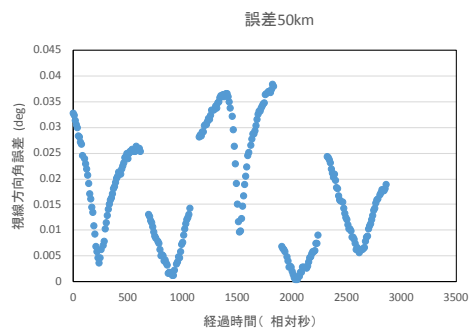
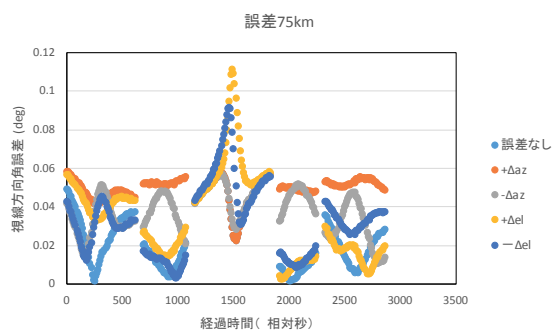
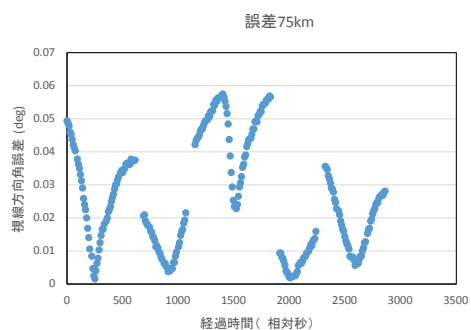
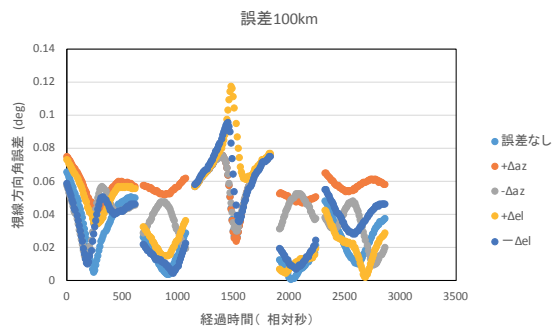


図B2-1c 補正誤差： 高緯度局、軌道高度 400km

stnM-satH

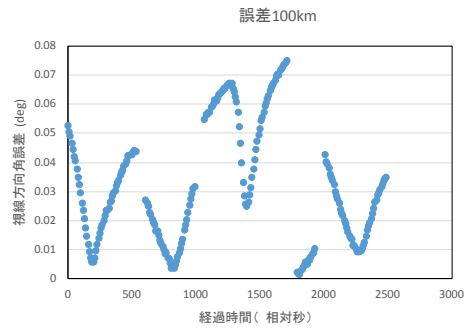


stnM-satH



図B 2 - 2 a 補正誤差： 中緯度局、軌道高度 500km

stnM-satM



stnM-satM

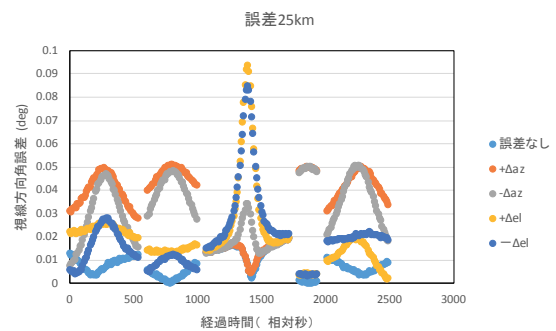
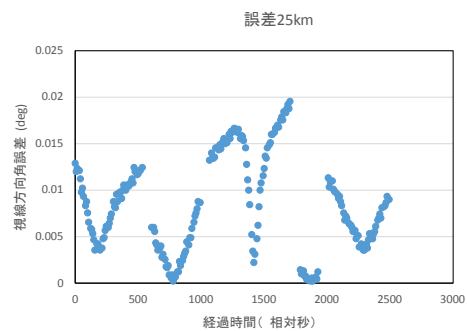
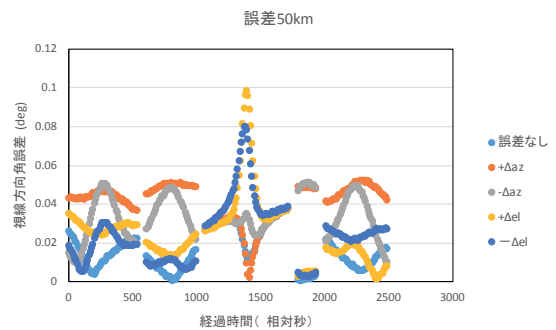
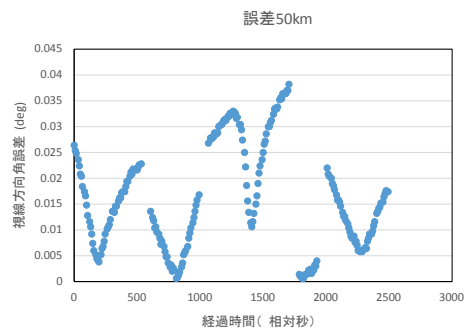
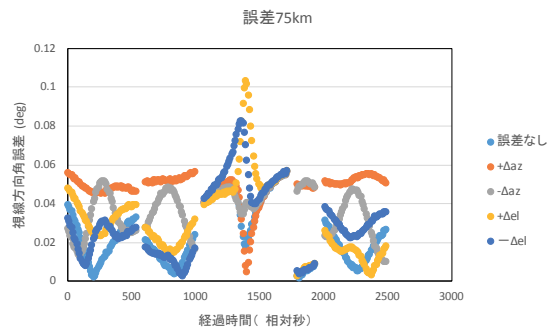
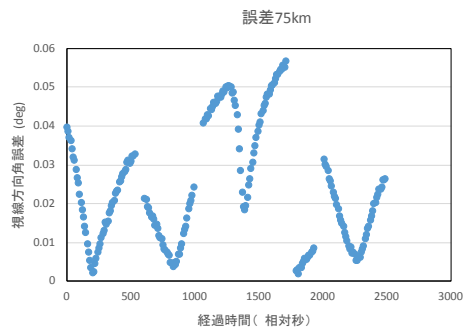
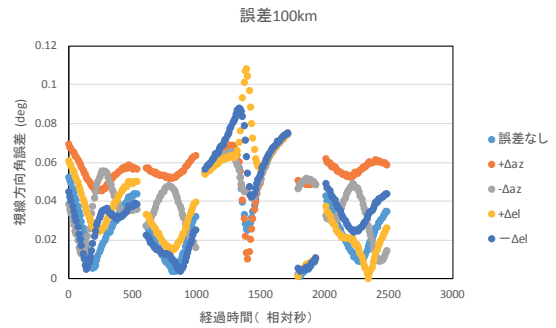
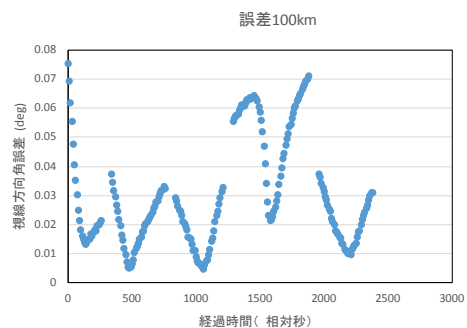


図 B 2 - 2 b 補正誤差： 中緯度局、軌道高度 450km

st n M - s a t L



st n M - s a t L

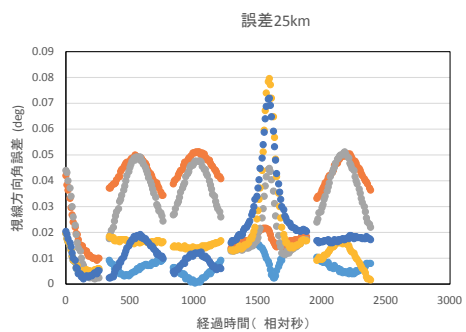
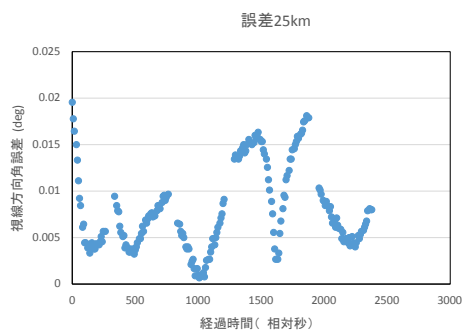
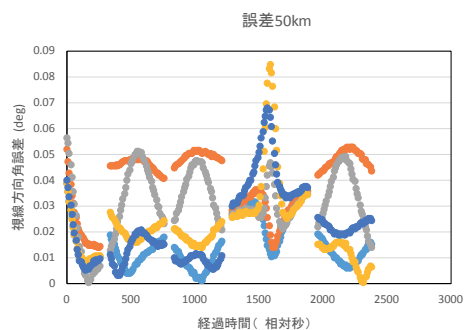
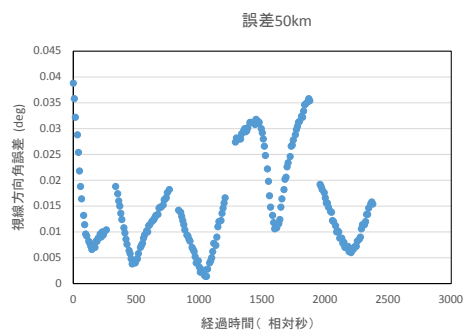
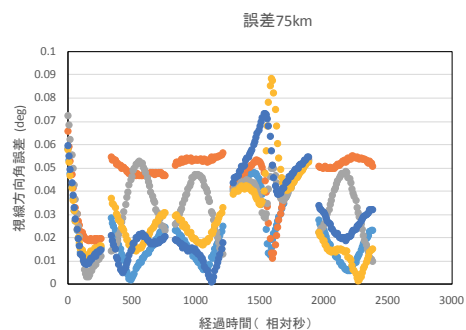
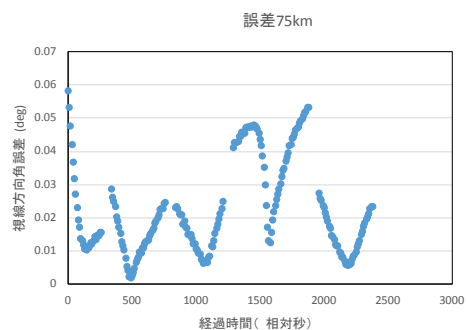
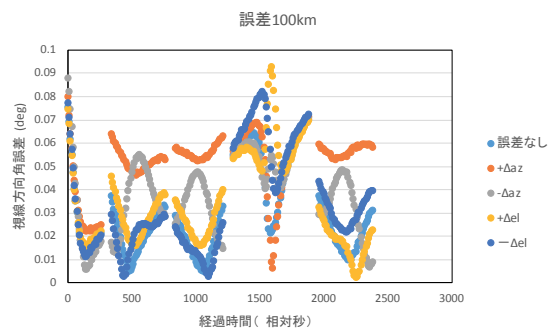
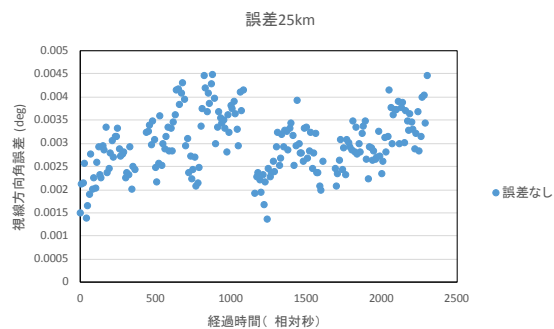
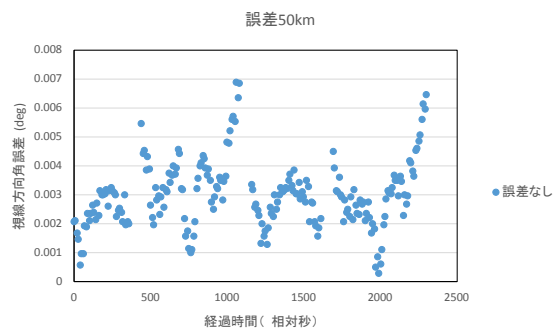
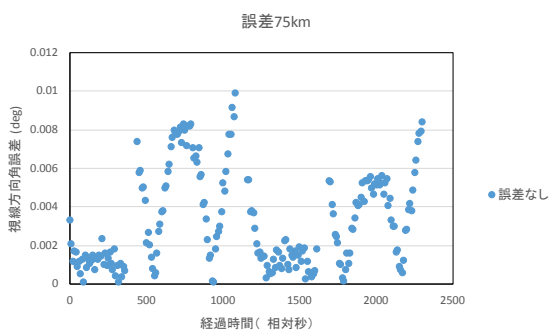
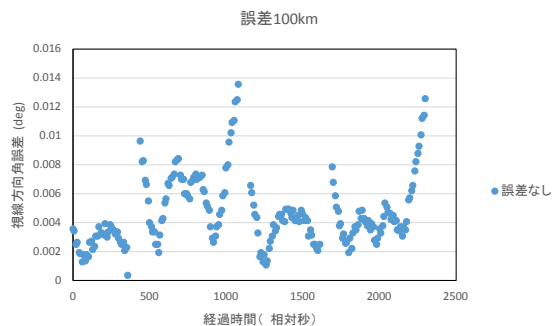


図 B 2 - 2 c 補正誤差： 中緯度局、軌道高度 400km

stnL-sat H



stnL-sat H

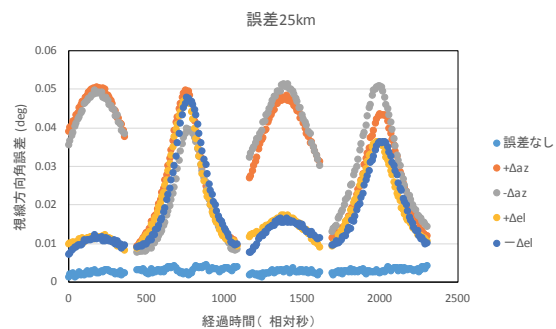
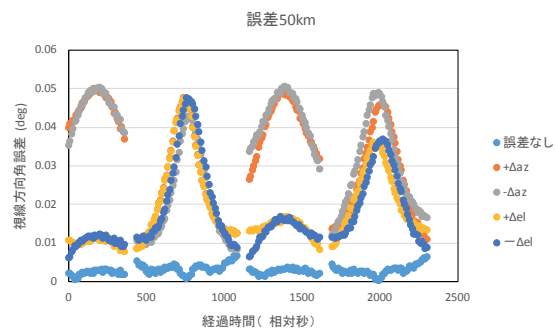
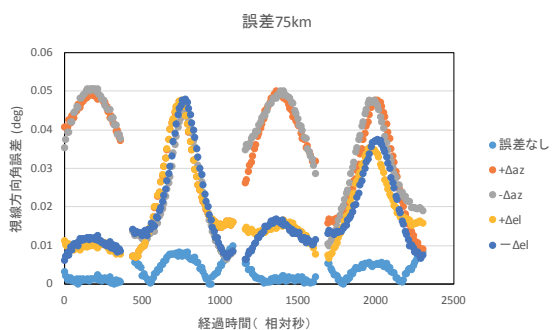
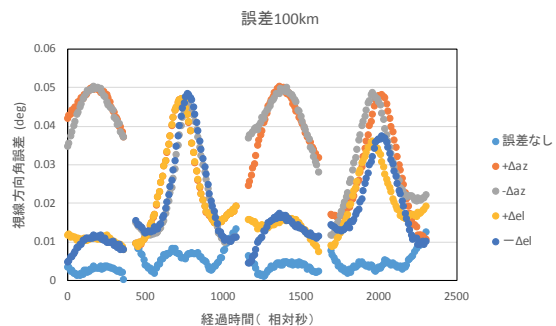
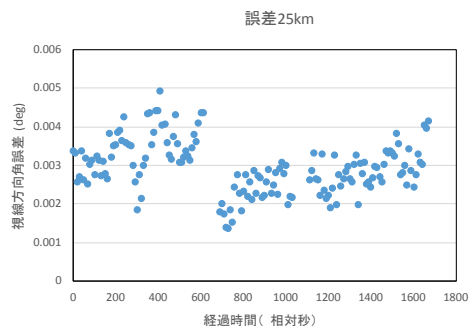
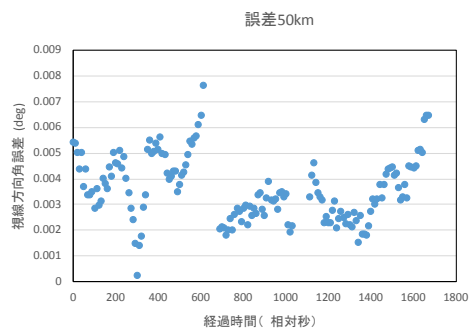
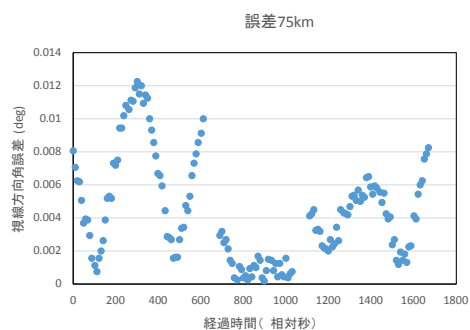
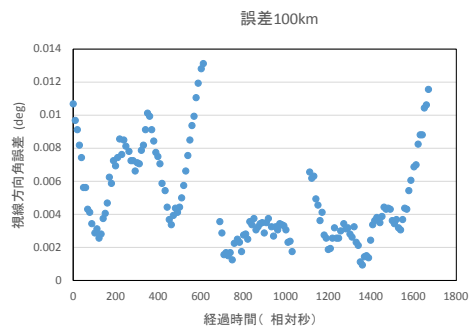


図 B 2 - 3 a 補正誤差： 赤道上局、軌道高度 500km

stnL-sat M



stnL-sat M

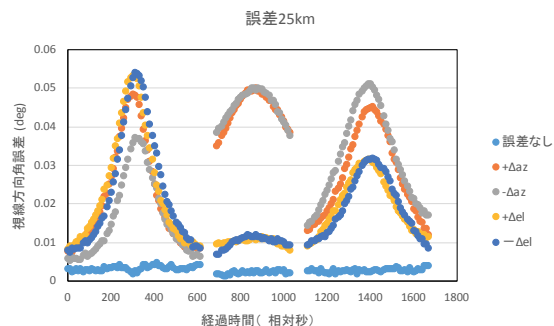
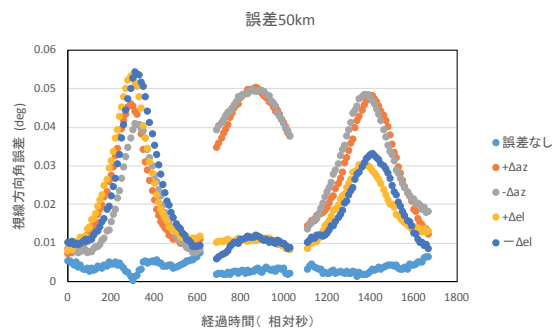
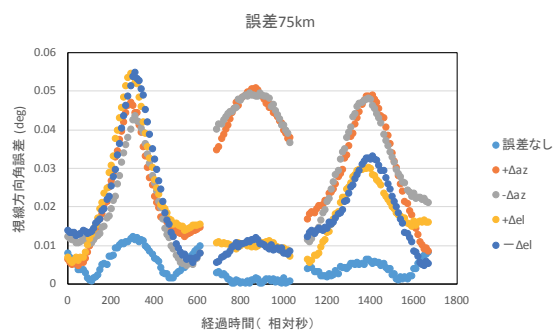
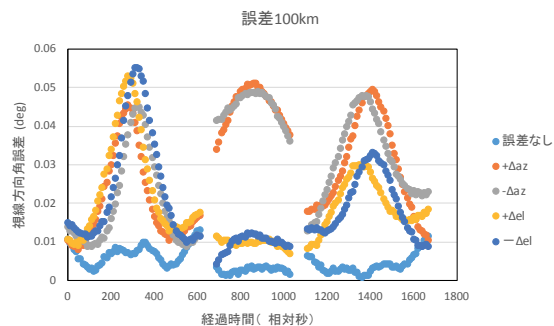
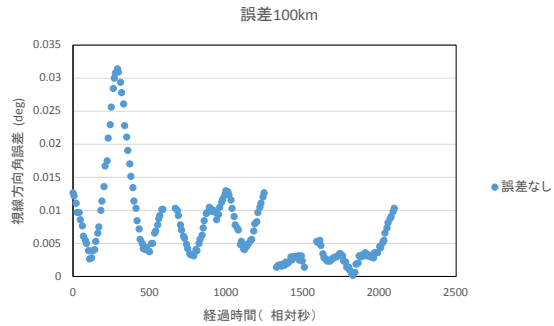


図 B 2 - 3 b 補正誤差： 赤道上局、軌道高度 450km



stnL-satL



stnL-satL

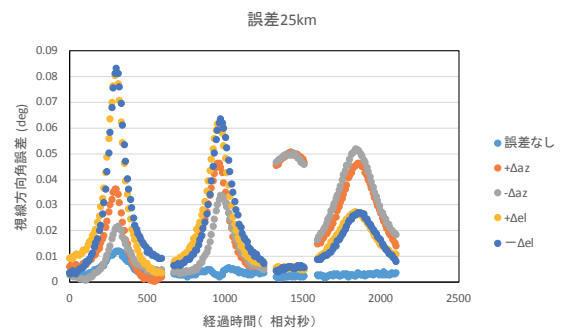
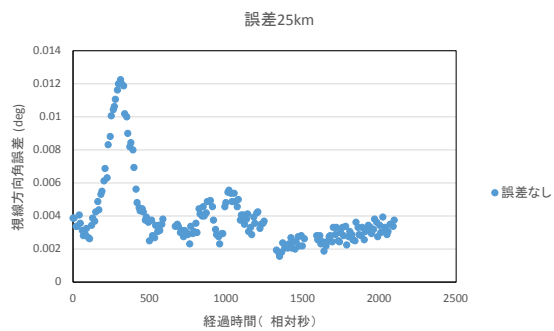
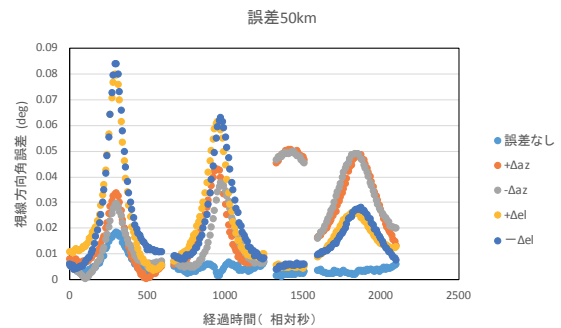
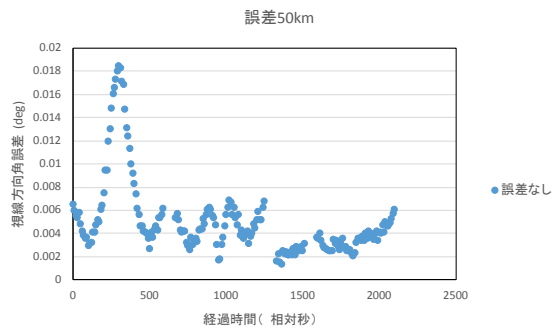
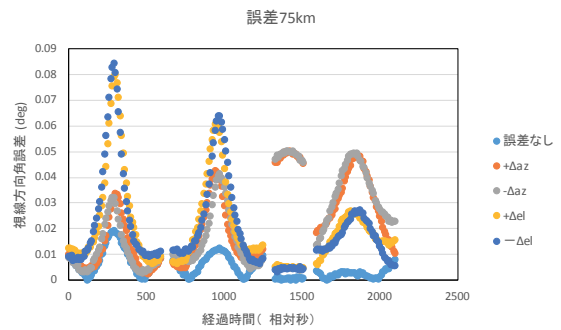
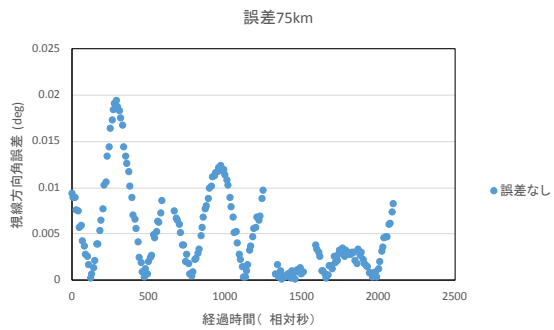
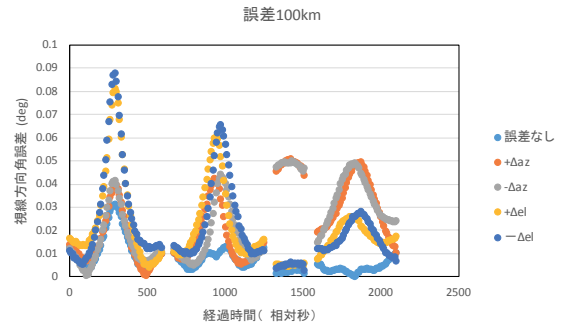


図 B 2 - 3 c 補正誤差： 赤道上局、軌道高度 400km

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-18-006

JAXA Research and Development Memorandum

## アンテナ予報値誤差補正

Simple Correcting Method of Antenna Prediction Error

---

発	行	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)				
		〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1				
		URL: <a href="http://www.jaxa.jp/">http://www.jaxa.jp/</a>				
発	行	日	平成31年1月17日			
電	子	出	版	制	作	松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。  
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

