

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

SOLAR-C向け超高精度太陽センサ(試作品) のランダム誤差とリニアリティ誤差

Random and Linearity Errors of
the Ultra Fine Sun Sensor (Breadboard Model) for SOLAR-C

鄭 祥子, 長谷川 隆祥, 藤島 早織, 合田 雄哉, 村尾 一
吉田 南, 清水 敏文, 久保 雅仁, 津野 克彦

TEI Akiko, HASEGAWA Takahiro, FUJISHIMA Saori, GODA Yuya, MURAO Hajime
YOSHIDA Minami, SHIMIZU Toshifumi, KUBO Masahito and TSUNO Katsuhiko

2024年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

概要	1
1. はじめに	2
1.1. 「ひので」衛星の UFSS	2
1.2. UFSS の原理	2
1.3. リニアリティ誤差の定義とその較正	3
1.4. JAXA と新たな開発メーカーとの共同開発	3
1.5. 「ひので」UFSS と SOLAR-C UFSS の相違点	3
2. ランダム誤差	4
2.1. 相関処理	4
2.2. フィードバックゲイン	4
2.3. 評価における目標	5
2.4. 評価データ	5
2.5. 解析	8
2.6. 結果と結論	8
3. リニアリティ誤差	8
3.1. データ	9
3.2. 手法：較正前リニアリティ誤差の導出	10
3.3. 手法：B スプライン関数による補正関数の導出	10
3.4. 手法：測定系に対する UFSS-S 開口面の回転成分の除去	12
3.5. 清掃前のリニアリティ誤差と較正リニアリティ誤差	13
3.6. 清掃前の較正リニアリティ誤差の主要因	14
3.7. CCD 波形の棘	19
3.8. 平行度が悪い光源を用いた棘の確認	20
3.9. 光学顕微鏡検査による塵の確認	20
3.10. CCD カバーガラスの清掃	20
3.11. 清掃後のリニアリティ誤差と較正リニアリティ誤差、及び CCD 波形	25
3.12. 考察と結論	25
4. 今後の展望	25
参考文献	26

SOLAR-C 向け超高精度太陽センサ(試作品) のランダム誤差とリニアリティ誤差

鄭 祥子^{*1}, 長谷川 隆祥^{*2,1}, 藤島 早織^{*3}, 合田 雄哉^{*3}, 村尾 一^{*3},
吉田 南^{*2,1}, 清水 敏文^{*1}, 久保 雅仁^{*4}, 津野 克彦^{*5}

Random and Linearity Errors of the Ultra Fine Sun Sensor (Breadboard Model) for SOLAR-C

TEI Akiko^{*1}, HASEGAWA Takahiro^{*2,1}, FUJISHIMA Saori^{*3}, GODA Yuya^{*3}, MURAO Hajime^{*3},
YOSHIDA Minami^{*2,1}, SHIMIZU Toshifumi^{*1}, KUBO Masahito^{*4} and TSUNO Katsuhiko^{*5}

ABSTRACT

The SOLAR-C satellite, which key scientific performance is to observe the Sun with high spatial resolution, is required to have high-pointing body control and its achievement highly depends on the performance of the Ultra Fine Sun Sensor (UFSS). This article reports the evaluation results of random error and linearity error acquired with a breadboard model of UFSS. The random error was evaluated to be less than $0.3''$ (σ), which is within the goal accuracy for the random error. Regarding the linearity error, the initial model showed a steep change at some locations along the sensitivity direction, which may prevent the goal accuracy for the linearity [Less than $2''$ (p-p) for $1 \text{ deg} \times 1 \text{ deg}$ field of view] from being achieved even after adapting a linearity error correction. The shapes of the output waveform suggested that this steep change was caused by dust/scratches on the CCD cover glass, indicating the importance of contamination control in the manufacturing. After identifying the locations of dusts on the CCD cover glass and cleaning them, the steep change in linearity error was reduced. This improvement is a great step toward the achievement of the goal accuracy for the linearity with the correction.

Keywords: SOLAR-C, EUVST, UFSS, random error, linearity error

概要

高空間分解能の太陽観測を行う SOLAR-C 衛星には高い衛星ボディ制御が要求され、その要求実現において超高精度太陽センサ UFSS (Ultra Fine Sun Sensor)の性能が重要である。本論文は、UFSS の試作モデルのランダム誤差およびリニアリティ誤差に関する評価結果について報告する。ランダム誤差は $0.3''$ 以下(σ 値)であり目標精度を達成していることが確認できた。また、リニアリティ誤差については当初、感度方向に沿って急峻に変化する角度が複数あり、これが原因でリニアリティ誤差の較正後も目標精度[視野 $1^\circ \times 1^\circ$ に対して $2''$ 以下(p-p 値)]を達成できない可能性があった。この急峻な変化は、出力波形の形状から CCD カバーガラス上の塵/傷に起因することが示唆され、製造過程におけるコンタミネーション管理の重要性が判明した。CCD カバーガラス上の塵を特定し清掃した結果、リニアリティ誤差の急峻な変化は低減され、較正後に目標精度を達成できる見通しが立った。

* 2023 年 11 月 27 日受付 (Received November 27, 2023)

*¹ 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 (Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science)

*² 東京大学大学院 理学系研究科 (School of Science, The University of Tokyo)

*³ 国立天文台 (National Astronomical Observatory of Japan)

*⁴ 理化学研究所 (RIKEN)

*⁵ 明星電気株式会社 (Meisei Electric Co., Ltd.)

1. はじめに

2028 年度の打上げを予定する次期太陽観測衛星 SOLAR-C (正式名: 高感度太陽紫外線分光観測衛星)は高解像度(0.4 秒角)の極紫外線域分光観測を世界で初めて実現する計画である。SOLAR-C ではこの高解像度観測を実現するため、太陽面の観測ターゲットに対して極紫外線望遠鏡 (EUV high-throughput Spectroscopic Telescope, EUVST)が指向するように、望遠鏡を搭載する衛星ボディの姿勢を高精度に制御する。さらにその上で、望遠鏡の主鏡の傾動角を制御すること(ティップティルト鏡)で、像揺れを抑制し安定化された太陽像を各観測装置 2 次元センサで得る。

SOLAR-C では、観測ターゲットに対して、 $20''(0\text{-p})$ の精度範囲に望遠鏡指向軸を向けられる絶対指向の精度が要求されている。また、指向安定度の要求は、短期安定度 5 秒間あたり $0.2''(3\sigma)$ 、中期安定度 1 時間あたり $2''(0\text{-p})$ であり、この精度は、衛星内擾乱源で駆動される構造振動特性、構造の熱変形性能、衛星の姿勢制御機能、観測装置がもつ像安定化機能で決まる。このうち、衛星の姿勢制御を実現するため、太陽の方向を高精度で検知し、その情報を衛星姿勢制御系にて使用することによる衛星ボディ制御が有効である。SOLAR-C ではこの太陽指向角度を検出するセンサとして超高精度太陽センサ UFSS (Ultra Fine Sun Sensor)を搭載する。

また、SOLAR-C の姿勢制御系の主な姿勢検出センサには、衛星の各軸の角速度(deg/s)を超高精度に計測する慣性基準装置(IRU)と、太陽観測衛星が指向する太陽面上の位置を精度高く計測する UFSS、また主に衛星のロール角計測に用いられるスタートラッカ(STT)がある。このうち UFSS は、衛星を太陽面上のターゲット位置に高精度で指向させるために重要な姿勢センサであり、その検出角度の誤差は姿勢制御系が実現できる性能に影響を及ぼす。

我々は、SOLAR-C に搭載する UFSS に対する要求仕様として、「視野が $1^\circ \times 1^\circ$ 」、「出力角のランダム誤差が σ をその標準偏差として $3\sigma < 1''$ 」、「視野内におけるリニアリティ誤差が地上試験による較正をした後に $p\text{-p}$ で $< 2''$ 」、「熱歪による検出角度への影響が温度変化に対して $< 1''/^\circ\text{C}$ 」と設定して検討を進めてきた。

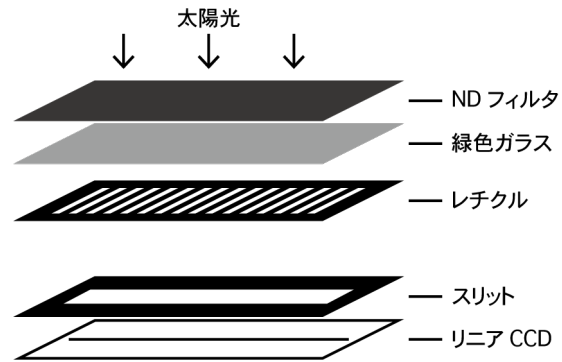


図 1-1. UFSS の光学系の概要

本稿では主に、ランダム誤差(2 章)とリニアリティ誤差(3 章)の評価結果について述べる。

1.1. 「ひので」衛星の UFSS

2006 年に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)にも、太陽指向角度を検出するための姿勢系センサとして UFSS が搭載された。「ひので」衛星はその打ち上げから 17 年が経った 2023 年現在でも科学観測を継続しており、搭載された UFSS は打ち上げから現在に至るまで当初の性能を維持し続けることで、「ひので」衛星の高解像度観測に貢献している。

SOLAR-C に搭載する UFSS はこの「ひので」衛星に搭載された UFSS の設計思想を基本的には踏襲する前提で新規に開発中であり、その概要を以下 1.2 節で述べる。なお、両者の違いについては 1.5 節で言及する。

1.2. UFSS の原理

UFSS はセンサ部である UFSS-S と、電気回路部である UFSS-E、そして両者をつなぐハーネス UFSS-HNS の 3 つから構成される。このうち UFSS-S は直交する 2 つの 1 次元リニアセンサから成り、これによって UFSS に対する太陽の方向(角度 2 成分)を検出する 2 次元センサとして機能する。1 つの 1 次元リニアセンサの光学系は、16 本の平行なスリットが入ったレチクルと 2048 ピクセルのリニア CCD から成り、レチクルより上流側には入射する太陽光を減光するための ND フィルタと、透過光の波長帯域を制限する緑色ガラスが設置される(図 1-1)。(但し、今回使用した試作品では ND フィルタは入っておらず、測定の際

に擬似太陽光と UFSS-S の間に ND フィルタを設置して測定した。)レチクルが入射光を一部遮光することで明暗模様がスリットの先のリニア CCD 上に投影され、その検出信号波形が UFSS-HNS を介して UFSS-E に送られる。UFSS-E では、この検出信号波形と、信号処理回路による基準信号波形との積分が最小になるように基準信号の位相が制御され、その位相情報から太陽角度情報が得られる。この太陽角度情報を衛星姿勢制御系で使用する際には、1.3 節で述べるように、打ち上げ前に予め地上評価で導出される較正用補正関数による補正を施すことで、視野にわたるリニアリティ誤差の要求実現を確保する。

1.3. リニアリティ誤差の定義とその較正

UFSS がセンサとして入射太陽光の角度を正しく検出できることが理想だが、実際には入射角度に応じて検出角度の系統的なズレが発生する。このズレがあるままで、衛星の姿勢制御系で UFSS 検出角度を使用すると、衛星の絶対指向の誤差に直結してしまう。この影響を低減するため、予め地上試験において既知の入射角度ごとの検出角度を測定し、その差分としてリニアリティ誤差を定義する。これを 2 軸センサそれぞれについて実施し、UFSS 視野内のリニアリティ誤差マップを得る。衛星の姿勢制御系において、この誤差マップを使って、検出角度に応じたリニアリティ誤差を較正した上で太陽角度情報として姿勢制御に使用する。なお、ひので衛星の UFSS ではこのリニアリティ誤差をバイアス誤差と呼んでいたが、センサが検出すべき角度からどれくらいズレているかを示す誤差であることから、SOLAR-C の UFSS ではリニアリティ誤差と呼ぶこととした。

1.4. JAXA と新たな開発メーカーとの共同開発

ひのででは、当時の NEC 東芝スペースシステム社が UFSS の開発を担当し、プロジェクト側(宇宙研/JAXA や国立天文台)がその性能検証や動作検討等を実施してメーカーと連携することで、求められる性能を持つ UFSS を確立させた。

その後、次期太陽観測衛星計画の立ち上げ時期に、UFSS 開発に必要な技術を上記メーカーで維持することが困難であることが明らかとなり、各メーカーとの調整の結果、明星電気(株)

との間で基本的な部分から開発・検討を進めることになった。この JAXA と明星電気による UFSS の共同研究開発は 2013 年度に始まった。JAXA 側では、ひので UFSS の開発を主導した当時のメーカー開発担当者及び、宇宙研と国立天文台の太陽関係者が結集して開発が始まった。(現在ではここに若手研究者らも加わっている。)

このような体制の共同開発は、ひので開発で得た知見や経験の遺産を基礎にしている。その上で、設計や制御ロジックについての詳細は、新開発メーカーの考えも尊重しつつほぼゼロから吟味・検討を重ねてきた。この点で、「ひので」衛星 UFSS の開発とは状況が大きく異なっている。

この共同開発では、ランダム誤差やリニアリティ誤差の誤差要因の検討、CCD 選定のための放射線試験、角度検出回路の設計検討、数学モデルを用いた熱変形解析による精度評価などを実施し、UFSS 試作品第一号機(Bread-Board Model, BBM)を開発した。2019 年からはこの試作品第一号機を用いて、本稿で述べるランダム誤差やリニアリティ誤差の測定実験を通じた性能検証を行ってきた。

1.5. 「ひので」UFSS と SOLAR-C UFSS の相違点

SOLAR-C UFSS では、「ひので」UFSS と回路設計における分解能の実現方法が異なる。「ひので」UFSS では、低速・小規模の FPGA にアナログディレイラインを組み合わせることで、レプリカ制御分解能 1/256 画素という分解能を実現していた。一方、SOLAR-C UFSS では、昨今通常使用されている、より高速な FPGA を使用し、この高速 FPGA のロジック設計で同じ分解能を実現している。

次に、本稿にてリニアリティ誤差の特性上重要な課題として後ほど述べられる、製造メーカーが所有する設備の違い、およびそれに起因するダスト検査方法の違いを挙げる。「ひので」UFSS では、開発メーカーには高精度平行光源を持つ太陽シミュレータが存在した。よって、メーカーで組み立てる際に、太陽シミュレータからの入射光によって CCD 波形にダストの影響が出ていないことが確認できるまでクリーニングを実施するという手順を製造工程の中で取ることができた。従って、宇宙研/JAXA・

国立天文台が UFSS を受領し測定する際には CCD 波形にダストが影響することがなかった。一方、SOLAR-C UFSS では、メーカーの開発環境には高精度平行光源を持つ太陽シミュレータがない。従って、組み立て時に CCD 波形を見ながらダストを確認する手段の確立が必要であるため、3.8-10 節に述べるように、組み立て前にできるだけメーカーにてダストを検出・除去し、組み立て後に宇宙研の太陽シミュレータにて確認を行う手法を取ることにした。なお、SOLAR-C UFSS メーカーでは、試作品の組み立て作業を、一般的な宇宙機向け電子機器の組立作業のクリーンルーム(ISO 149644-1 Class8)環境にて実施している。

SOLAR-C UFSS の構造体内部の設計方針については、参考論文[1]の図 3 を参照されたい。

2. ランダム誤差

SOLAR-C に搭載する UFSS に要求されるランダム誤差は $3\sigma < 1''$ である。本章では、UFSS 試作品第一号機を用いた、ランダム誤差の評価結果について述べる。

2.1. 相関処理^[4]

UFSS-S に光が入射することで、レチクルと CCD によって得られた検出波形は、UFSS-HNS を介して UFSS-E に送られる。UFSS-E では、この CCD 検出波形に対して、レプリカ信号(回路内で生成する矩形波)との相関処理がなされて入射光角度を導出する。以下にこの原理を説明する。まず、入射光とレチクルによって CCD 上にできる 16 本の明暗模様は、レチクルのスリット間隔とレチクル-CCD 間距離で決まる空間サイズを持ち、正弦波で近似できる。これが CCD 信号となり順次読み出される。一方、レプリカ信号は、その基準波の周期が CCD 信号の周期 T_R と同じであるような矩形波として設計で与えられる。この時、ある時刻 t において、入射光の角度(UFSS が検出す

べき角度)を θ 、検出角度誤差を δ 、CCD 出力信号(平均値を差し引いたもの)を $S(t)$ 、 $S(t)$ と位相が 90 度ずれたレプリカ信号を $R(t)$ とすると、時刻 0 から NT_R まで積分して $R(t)$ と $S(t)$ の相関値を考えることで、

$$A \sin \delta = \frac{1}{N} \int_0^{NT_R} R \left(2\pi \frac{t}{T_R} + \theta + \delta \right) \cdot S \left(2\pi \frac{t}{T_R} + \theta \right) dt \quad (1)$$

とかける。今回用いた UFSS 試作品では両端の波形の半周期ずつを除去しており $N = 15$ とした。式(1)は、レプリカ信号 $R(t)$ と CCD 信号波形 $S(t)$ の位相差のうち、90 度からのずれ量である δ が小さい範囲では、相関値がレプリカの位相誤差 δ に比例することを示している。この相関値をフィードバックすることで、レプリカ信号 $R(t)$ と CCD 信号波形 $S(t)$ の位相差を 90 度に保つことができ、その状態でのレプリカ信号 $R(t)$ の位相角として太陽方向を求めることができる。

2.2. フィードバックゲイン^[4]

入射角度の導出は、CCD の 1 ラインのスキャン(2048 pixel 分)毎に行われ、そのサンプリングは 30 Hz 程度である。 n 回目の CCD スキャンにおいて、レプリカ $R(t)$ の位相を決める位相レジスタの値を P_n 、 $S(t)$ と $R(t)$ の相関結果を $A \sin \delta = C_n$ とすると、次の関係式に従って位相レジスタは更新されて P_{n+1} を得る。

$$P_{n+1} = P_n - k C_n \quad (2)$$

ここで、 k はフィードバックゲインである。太陽角に相当する位相レジスタの値を P_∞ とおくと、相関器出力 C_n は検出角度誤差であるので $C_n = P_n - P_\infty$ とかける。この関係を使うと式(2)は下記の漸化式になる。

$$C_{n+1} = (1 - k) C_n \quad (3)$$

これより、

$$C_n = C_0 (1 - k)^n \quad (4)$$

が得られる。

n が十分大きい時、 $0 < k < 2$ の条件で $C_n \rightarrow 0$ となり、この時 P_n は太陽角を示す。但し、 $1 < k < 2$ の場合は、 C_n は正/負の値を交互に取りながら0に収束する。この振動がノイズによって励起される可能性があるため、 $0 < k < 1$ となるように設計する。また、式(4)から収束は指数関数的であり、収束時間は k に依存することがわかる。この収束時間は漸化式のアップデートサイクルを単位としておおむね $1/k$ で表される。つまり、 $0 < k < 1$ の時、 k が大きい(1に近い)ほど、収束までのアップデート回数は少なくなる。従って、収束の観点からは、 k は大きいほうが望ましい。一方、入力に対するUFSSの応答は時定数 $1/k$ の1次遅れ系で近似できるため、UFSSの出力ノイズは、ホワイトノイズと時定数 $1/k$ の一次ローパスフィルタでモデル化でき、ランダム誤差は $k^{1/2}$ に比例して大きくなる。この意味では、 k は小さいほうが望ましい。以上より、フィードバックゲイン k は、収束のしやすさとランダム誤差のトレードオフを考慮して決定することが望ましい。姿勢系では、十分に低い周波数のフィルタを用いることになると想定されるため、ホワイトノイズのスペクトル密度が重要な情報となる。

$|C_n|$ は位相レジスタの値と太陽角の誤差であるので、この値がある閾値内にある時に収束フラグを立てる(収束フラグの値を1にする)設計となっている。この閾値は、CCDのランダムノイズなどで出力される $|C_n|$ の0近傍の小さな値を考慮して決定する。なお、角度導出には打ち切り条件はなく、無条件に積算していく設計である。

衛星の姿勢変動によって太陽角が変化している場合には、 $|C_n|$ は姿勢変動の速さに依存して0でない値となるが、式(2)の漸化式を実行し続けているため、収束フラグが立っている場合には十分な精度で太陽角を検出できていると考えてよい。

フィードバックゲイン k は、太陽光の強度にも比例する相関器のゲイン(「アナログ回路のゲイン」と呼ぶ)と、デジタル回路のゲインの積で表される。アナログ回路のゲインは1よりわずかに大きな値になるように設計して固定した。以下では、デジタル回路のゲインを、 K_i 値と呼ぶことにする。

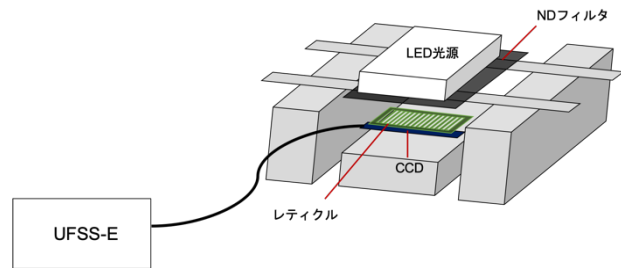


図 2-1. 測定の光学系の概念図。LED 光源を ND フィルターにより減光し、レチクルを通して CCD にあて、角度出力を記録する。

2.3. 評価における目標

今回の測定では、入射光の強度及びデジタル回路のゲイン(K_i 値)が変わってもランダム誤差が要求 $3\sigma < 1''$ を満たすかどうかを検証する。

2.4. 評価データ

使用したデータは、2019年1月21日から22日にかけて、明星電気(株)伊勢崎本社クリーンルームにて、明星電気が当時のUFSS試作品に対して取得した。

CCD出力波形の振幅は、入射光が強いほど大きくなる。UFSSで用いられる二次元CCDセンサTCD1209DGの飽和出力電圧が標準2.0V/最小1.5Vであり、軌道上での光量はマージン込みで飽和出力電圧の半分前後に設定する予定である。光量設定の不確定性を考慮して、今回の測定では、CCD出力波形の振幅が約0.5Vまたは約1Vになる場合のデータを取得した。測定に用いた光学系の概念図を図2-1に示す。白色LEDライトの光をND(Neutral Density)フィルタを用いて減光した。使用したライトは四角型(約5cm四方)の全面発光するLEDライトで、DC安定化電源に接続させるタイプである。DC電圧の設定によって光量設定ができる。太陽光(平行度0.5度)とは異なり、LEDライトは平行光源ではないが、UFSS-Sを構成するレチクルと二次元CCDとの間の距離を近接させることで、CCD上に投影されるレチクルのパターンを、太陽光の場合と同様にすることができる。また、この測定形態とすることによって、LEDライトの位置が外部振動などによって動くことによる角度の変動が小さくなる。本測定では、LEDライトからCCDまでの距離を短く(2~3cm程度)設定した。また、暗幕によってこの測定系を覆うことで、部屋の明かりなどの他の光源からの光による影響が出ないようにした。

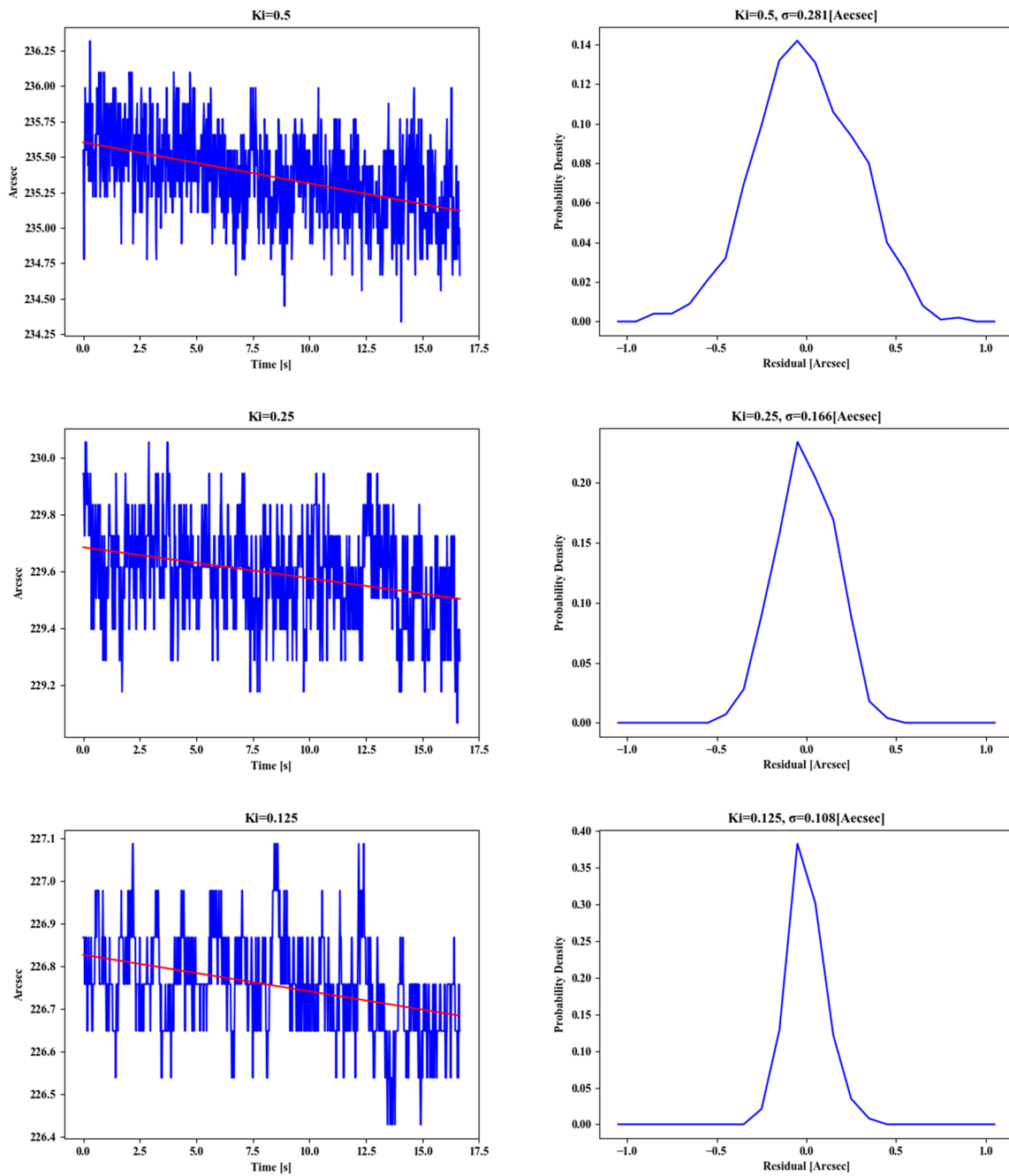


図 2-2. 波形振幅 0.5V の場合のランダム誤差測定結果。Ki 値 0.5(上図)、0.25(中図)、0.125(下図)における UFSS 検出角度の時間経過(左図の青線)とその線形フィッティング(左図の赤線)、及びランダムノイズ(フィッティング残差)のヒストグラム(右図)。残差の標準偏差(σ)を右図上部に示す。

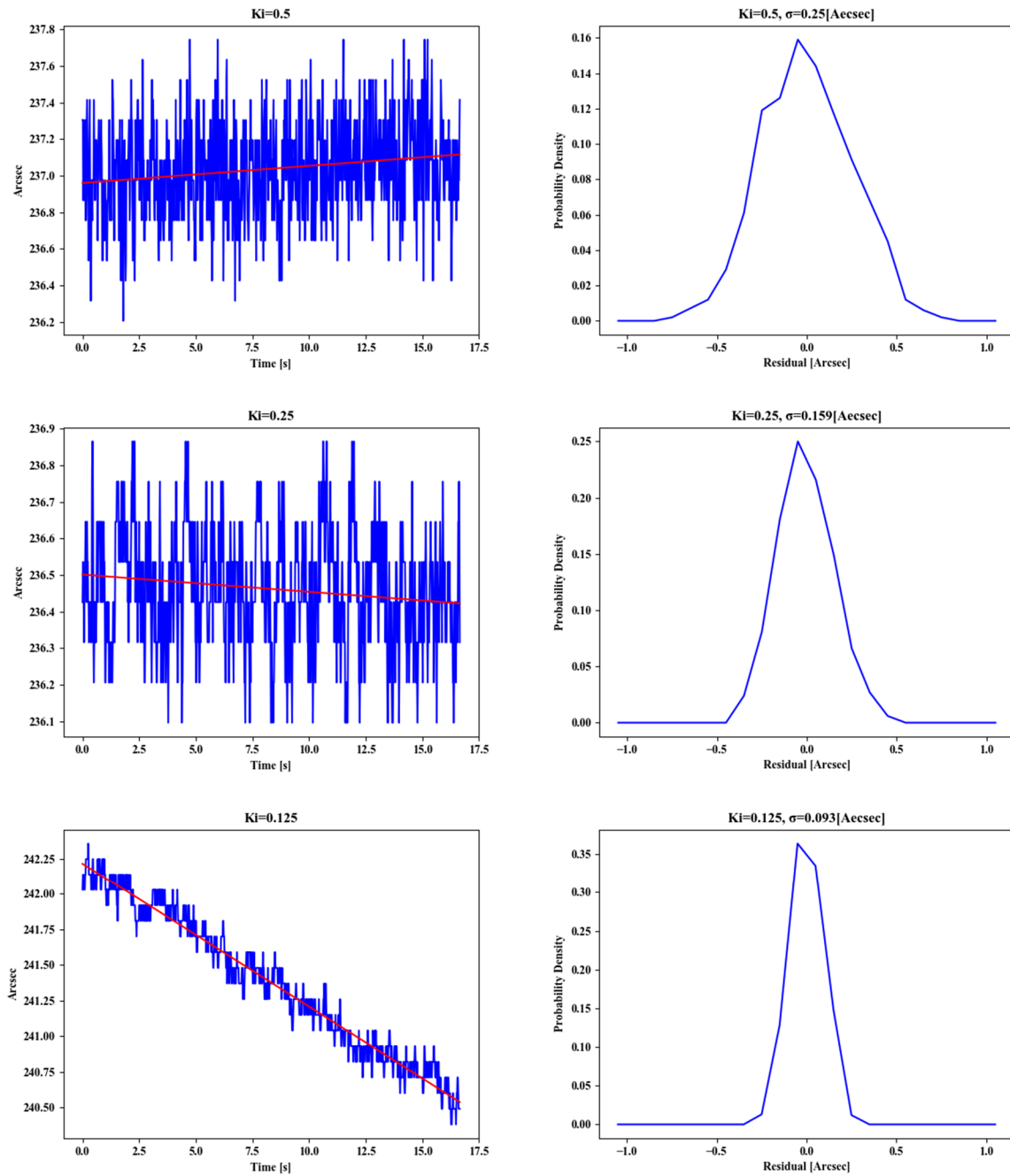


図 2-3. 波形振幅 1V の場合のランダム誤差測定結果。Ki 値 0.5(上図)、0.25(中図)、0.125(下図)における UFSS 検出角度の時間経過(左図の青線)とその線形フィッティング(左図の赤線)、及びランダムノイズ(フィッティング残差)のヒストグラム(右図)。残差の標準偏差(σ)を右図上部に示す。

CCD出力信号の処理回路としては、UFSS-Eに搭載するために試作した相関処理回路を用いた。この相関処理回路では、センサ部分から出力されるCCD波形に対して、レプリカ信号との相関処理を行うことによって、検出角度が出力される。相関処理回路で調整可能なKi値として、0.5、0.25、0.125の3つの場合それぞれについて測定を実施した。

2.5. 解析

得られたデータから、検出角度の変化を解析した。UFSS検出角度は、時系列に沿ってドリフトがあるが、その中でも安定している(振動などによる外部環境の影響が小さいと思われる)時間帯のデータ1000点を取り出して使用した(図2-2、2-3の左図青線)。なお、ドリフトは試験系におけるCCD-レチクル-LEDライトの関係性が熱などの環境変化で発生したと思われる。読み出し頻度は60Hzなので、およそ16秒間の連続データである。このデータを時間の関数として線形フィッティング(図2-2、2-3の左図赤線)し、その残差を求めた。残差のヒストグラムを図2-2、2-3の右図に示す。この残差の標準偏差 σ を計算し、ランダム誤差を 3σ に対して評価した。

2.6. 結果と結論

CCD出力波形の振幅が約0.5V、Ki値が0.5、0.25、0.125の場合についての解析結果を図2-2に示す。得られた標準偏差 σ はKi値0.5、0.25、0.125でそれぞれ0.281"、0.166"、0.108"であった。

次に、CCD出力波形の振幅が約1V、Ki値が0.5、0.25、0.125の場合についての解析結果を図2-3に示す。得られた標準偏差はKi値0.5、0.25、0.125でそれぞれ0.25"、0.159"、0.093"であった。

各測定における標準偏差 σ を表2-1にまとめる。波形振幅0.5Vと1Vのどちらの場合においても、Ki値が小さくなるにつれて角度出力のランダム誤差は小さくなった。また、いずれの場合においてもランダム誤差は要求 $3\sigma < 1"$ を満たした。

以上により、UFSS試作品の出力角度のランダム誤差は、入射光の強度及び使用したKi値によらず、要求 $3\sigma < 1"$ を満たすことが分かった。

表 2-1.ランダム誤差測定結果

	Ki=0.5	Ki=0.25	Ki=0.125
測定1 (0.5V)	0.281"	0.166"	0.108"
測定2 (1.0V)	0.25"	0.159"	0.093"

3. リニアリティ誤差

本稿におけるリニアリティ誤差は、太陽光の入射角度とUFSSの出力角度(測定値)の差分として定義される。「ひので」衛星UFSSと同様に、SOLAR-C UFSSが検出した太陽方向角度は、予め地上でのリニアリティ誤差測定によって導出した補正関数を用いて姿勢制御系で較正され、使用される。SOLAR-Cに搭載するUFSSの開発において要求されるリニアリティ誤差は、センサの感度方向の視野範囲 $\pm 0.5^\circ$ におけるリニアリティ誤差(較正後)の最大値と最小値の差分(peak-to-peak; p-p)に対して $p-p < 2"$ である。

補正関数としては、ひので UFSSと同様に、2変数3次のBスプライン関数を想定している。リニアリティ誤差がこの補正関数で表現できる程度に十分滑らかであれば、較正後のリニアリティ誤差を低減できる。逆に、測定したリニアリティ誤差が滑らかでなければ、較正による残差が大きくなり、較正後のリニアリティ誤差が上記の要求値を満たすことができない要因となりうる。また、どの程度滑らかであれば補正関数で十分に表現できるかは、Bスプライン関数を表現するBスプライン係数の数にも依る。係数の数が多いほど、細かな形状を表現できる一方で、姿勢制御系の搭載計算機にて較正に使用する情報量が増えるため、係数の数についても検討が必要である。今回は、「ひので」衛星UFSSで用いた係数の数16個を基準にそれより多い個数を使用して較正の度合いの変化についても評価した。

1章で述べたように、UFSSは太陽光がレチクルに入射することによる明暗模様から角度を検出している。そのため、CCDカバーガラス等に塵や傷が付いていた場合、明暗模様に影響が生じ、検出角度にずれをもたらす可能性がある。したがって、そのような場合には、CCDカバーガラス等に傷がないものを選別し、塵が付着しないように組み立てを実施する必要がある。

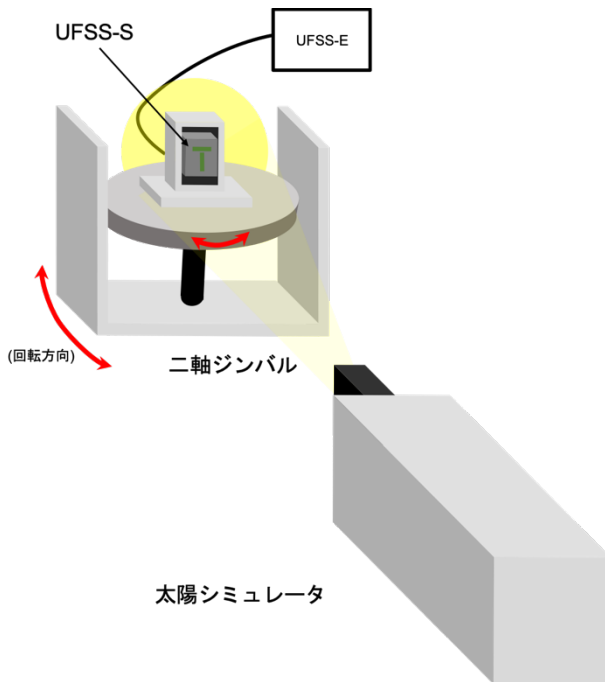


図 3-1. バイアス誤差測定実験の配置。

本章ではまず、UFSS試作品（以下、UFSS）に対するリニアリティ誤差の測定とその較正結果を評価する。この際、Bスプライン係数の個数への依存性についても調べる。次に、較正後のリニアリティ誤差の主要因となりうる CCDカバーガラス上の塵による影響を確認し、この塵の影響を低減するための CCDカバーガラスの清掃手法について述べる。さらに、清掃後のリニアリティ誤差とその較正後の値について、Bスプライン係数の個数への依存性も含めて、評価結果を述べる。最後に、較正リニアリティ誤差が要求を満たす見込みについてまとめる。なお、本章に出てくるUFSS試作品は、2つあるセンサのうちいずれかの出力しか読み出せない仕様であるため、リニアリティ誤差の評価はセンサ毎に独立に実施する。

3.1. データ

我々は清掃前の2021年3月31・4月1日と清掃後の2021年8月11・12日、宇宙科学研究所相模原キャンパスC棟姿勢制御室で、リニアリティ誤差測定データを取得した。図3-1にある実験装置の配置の模式図に示すように、擬似太陽光源装置(太陽シミュレータ)と共に太陽センサの機能・性能評価に供せられている精密二軸ジンバル(2012年度に更新)に設置治具によってUFSSを固定し、太陽シミュレータから

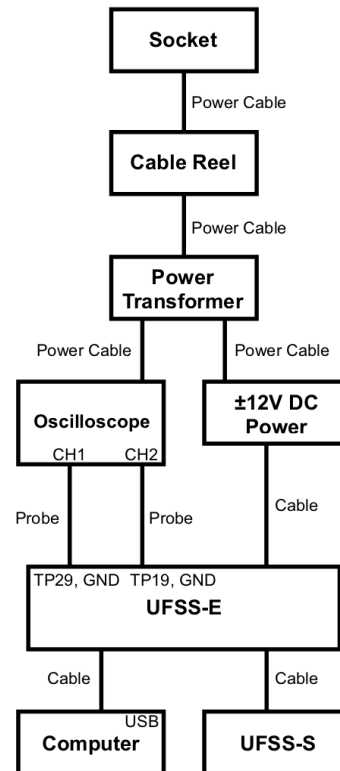


図 3-2. UFSS の電気回路部と周辺機器との接続関係。

の擬似太陽光(光量は太陽光の約2%だが、太陽光の平行度が高精度で模擬されている)を照射しながらUFSSのデータ出力を記録した。2軸あるリニアセンサのうち、測定するセンサの感度方向・非感度方向のそれぞれが二軸ジンバルのAz(方位角)方向・El(仰角)方向となるようにUFSSを設置した。但し、センサ2軸の方向と二軸ジンバルの2軸方向は完全には合わせることができないため、測定結果にその影響が現れることに注意が必要である(3.4節参照)。二軸ジンバルの仕様上での制御性能は、位置精度および再現性は共に ± 1 arcsec RMS、角度設定分解能は0.036 arcsecであり、本計測では二軸ジンバルの測定精度は今回の目的には十分あると考え、ジンバルの制御コマンド値を用いて太陽入射角とみなした。また、測定に使用したUFSS試作品にはNDフィルタが入っていないため、UFSSセンサへの入射光量が飽和せず適度になるように、ガラスNDフィルタ二枚(透過率10%と20%, 合計透過率 2%)を重ねることで減光させた。

さらに、UFSSの電気回路部と周辺機器は図3-2のように接続した。UFSSの読み出しデー

タは、測定用のコンピュータにおいて、シリアル通信にて取得でき、時々刻々のデータが目視確認でき、テキストデータとして保存できる。また、このUFSSの読み出しデータには、検出角度に加えて、Sun Presenceフラグ (SP; センサの視野内であれば1、視野外であれば0)、収束フラグ(角度導出計算が収束していれば1、収束していなければ0)などがある。

本計測においては、2つあるリニアセンサそれぞれに対して、以下の方法でリニアリティ誤差の二次元格子状データを取得した。まず、UFSSの出力角度とSPフラグの値に注目し、UFSSの感度範囲となるようなジンバルのAz角とEl角の範囲を調べ、その中心角度付近をジンバルのAz角の原点、及びEl角の原点として決定した。これらの原点を基準 (0°) として、ジンバルのAz角 θ の方向 (UFSSの感度方向に対応) に 0.025° 間隔で45点、El角 ϕ の方向 (UFSSの非感度方向に対応) に 0.25° 間隔で5点の計225点の二次元格子状データを取得した ($-0.55^\circ \leq \theta \leq +0.55^\circ$ 、 $-0.50^\circ \leq \phi \leq +0.50^\circ$)。この際、1計測点での測定時間は20秒とした。UFSS出力の読み出し速度は60Hz程度なので、1点でのデータ数は1200個程度である。

3.2. 手法：較正前リニアリティ誤差の導出

較正前リニアリティ誤差は、前節の方法で取得した二次元格子状データの各点において、ジンバルのAz角とEl角の2変数関数として以下の方法で求めた。まず、各点における約20秒間のデータのうち、出力角度の回路計算が収束したデータ(収束フラグが1のもの)のみを取り出した。そして、ジンバルのAz角度の制御が安定したデータだけを使用するため(スキャン間の移動時とその前後のデータを省くため)、収束データのうちさらに最初と最後の各100点を除いたデータだけを用いた。さらに、SPと出力角度を参照し、全てのジンバルEl角においてセンサの感度範囲に入っているAz角データ39点を選択して使用した。続いて、El角中

心のデータの中で、選択された39点のAz角データの中心点を取り出し、そこでリニアリティ誤差がゼロとなるように視野中心のジンバルAz角度をシフトさせて入力角度とした。UFSS出力角度のリニアリティ誤差は、入力角度からUFSSの出力角度を引いたものとして求めた。

3.3. 手法：B スプライン関数による補正関数の導出

本節では、リニアリティ誤差の測定結果を用いて、UFSS出力角度リニアリティ誤差の角度依存性を任意の出力角度の関数として表現することで、リニアリティ誤差を較正する方法について述べる。

本解析においては、UFSSが検出すべき角度は精密2軸ジンバルの設定角度と一致すると仮定する。一方、実際にUFSSが衛星に搭載される場合には、UFSSへの入力角度は不明であり、測定情報しか得られない。よって、UFSSの測定値から求まる較正方法を考える必要がある。そこで本解析では、任意のUFSS出力角度に対してリニアリティ誤差の較正量を求める。

その際、リニアリティ誤差がUFSS出力角度とジンバルEl角の設定角度の2変数の関数と見なすことで、測定実験で得られた離散点に対して曲面フィッティングを行う。フィッティング関数としては、3次のBスプライン曲面(2変数)を採用した。Bスプライン曲面は、2つある変数のそれぞれで区間を決め、各変数の区間ごとに定義されたBスプライン基底関数を2つの変数方向のそれぞれに渡って重みづけて足し合わせることで表現される。このように、Bスプラインは、複雑な曲面であっても、区間を導入することにより低次の多項式で近似して表現することが可能になるという利点がある。本解析でのBスプライン関数によるフィッティングには、Pythonのscipy.interpolateパッケージにあるモジュール(関数プログラム)を使用した。

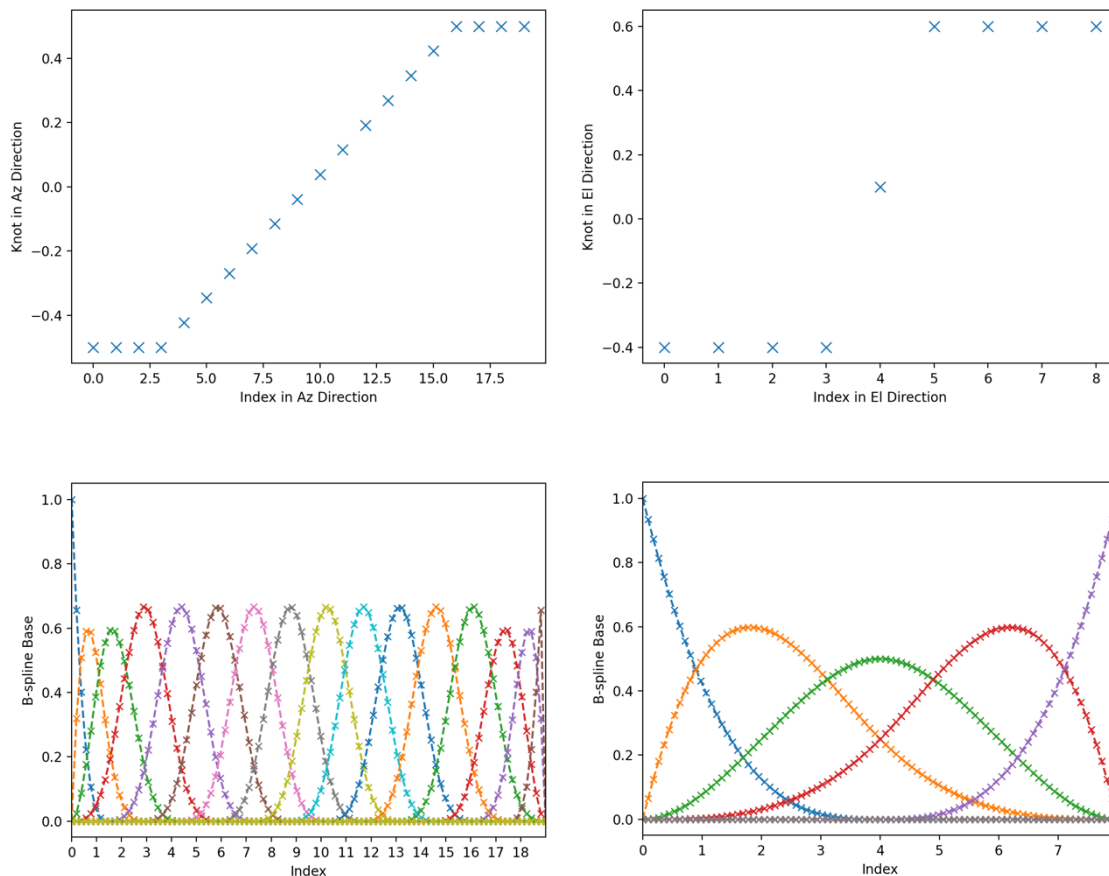


図 3-3. 感度方向 x (左)と非感度方向 y (右)のそれぞれで B スプラインフィッティングに使用した区間点(ノットベクトル) (上)と 3 次の B スプライン基底関数(下)。

「ひので」衛星UFSSでは、直交する2方向の角度で決まるリニアリティ誤差を2変数の3次Bスプライン関数(曲面)でフィッティングしていた。今回、測定実験で使用したUFSS試作品では2方向の角度を同時には測定できないため、「ひので」衛星UFSSと完全に同じ様にはリニアリティ誤差を評価することはできない。そこで、できるだけ同じ様な考え方でリニアリティ誤差較正を模擬するために、Az方向のUFSS出力角度 x とEl方向のジンバル角度設定値 y の2つを変数とした場合のリニアリティ誤差について、2変数の3次Bスプラインフィッティングを実施した。非感度方向のリニアリティ誤差の変動は視野内で急峻に変動することは期待されないため、これは補正関数の導出方法を検討するのに十分な手法であるといえる。

感度軸方向に足し上げる区間の数(ジンバルAz方向の係数の数) n_{cx} は「ひので」衛星UFSSと同じ16を基本とし、17から22までの n_{cx} についても評価した。非感度軸方向に足し

上げる区間の数(El方向の係数の数) n_{cy} はジンバルの設定角度点数と同じ5とした。ここで、2変数 n_d 次のBスプライン曲面のある変数についての区間点の数 n_t は、Bスプライン係数の数(足し合わせる区間の数)を n_c とすると、 $n_t = n_c + n_d + 1$ で決まる。よって、前述のように係数の数を設定すると、各変数における区間点の数は、 x 方向に $n_{tx} = n_{cx} + n_{dx} + 1 = 16 + 3 + 1 = 20$ 、 y 方向に $n_{ty} = n_{cy} + n_{dy} + 1 = 5 + 3 + 1 = 9$ となる。使用した区間点 $x_i (i = 0, 1, \dots, n_{tx} - 1)$ 及び $y_j (j = 0, 1, \dots, n_{ty} - 1)$ を図3-3(上)に示す。区間点の最初の $n_d + 1 (= 4)$ 点と最後の $n_d + 1 (= 4)$ 点の値は変数 x 及び y の定義範囲($-0.5^\circ \leq x \leq 0.5^\circ$)の最小値(-0.5°)と最大値(0.5°)に設定した。それ以外の点はこれら最小値と最大値の間の値を一様間隔(0.077° 間隔及び 0.5° 間隔)で埋めるように設定した。これらの区間点から決まる $n_{cx} (= 16)$ 個及び $n_{cy} (= 5)$ 個の3次のBスプライン基底関数を図3-3(下)に示す。以上のように設定したB

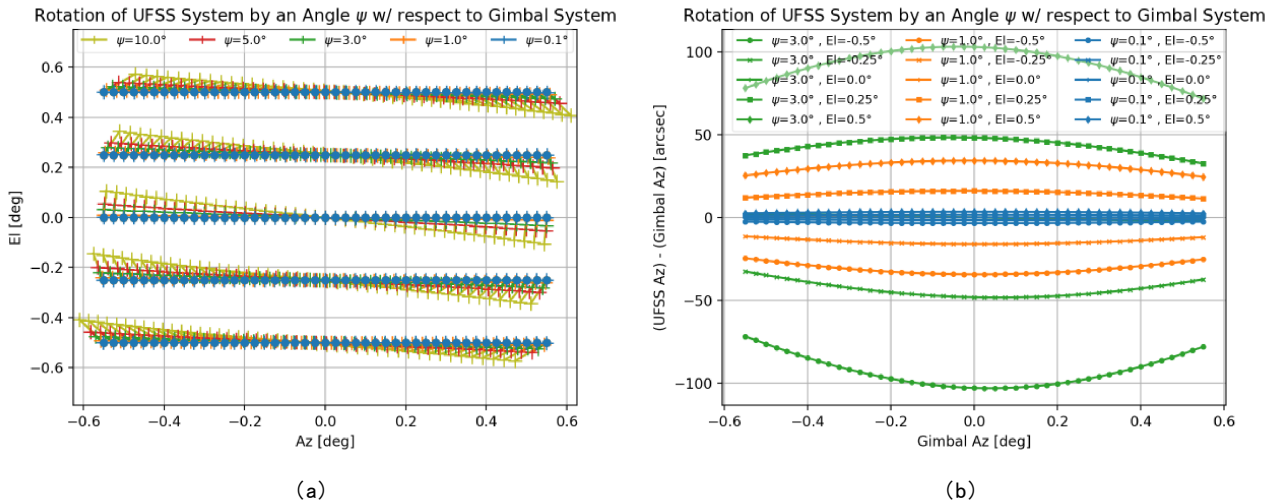


図 3-4. ジンバルに対して UFSS-S の開口面が XZ 平面で角度 ψ だけ回転する場合のシミュレーション。回転量 ψ を変えた際の違いを異なる色で示す。(a) 回転しない場合(点)と ψ だけ回転する場合(+), UFSS-S に入射する光束の実質的な Az 角度と El 角度の関係。比較する角度同士(ジンバルに設定する Az 角度と El 角度が同じ)を線で繋ぐ。(b) 回転しない場合の検出角度から、 ψ だけ回転する場合の検出角度を引いた結果。

スプライン基底関数 $B_{n_{dx},i}(x)$ と $B_{n_{dy},j}(y)$ を用いて、2変数の B スプライン関数 $S(x,y)$ は

$$S(x,y) = \sum_{i=0}^{n_{tx}-1} \sum_{j=0}^{n_{ty}-1} C_{ij} B_{n_{dx},i}(x) B_{n_{dy},j}(y) \quad (5)$$

と表現できる。 C_{ij} は 2変数の場合の B スプライン係数であり、 x 方向の i 番目の区間と y 方向の j 番目の区間の組み合わせで決まる。合計で $39 \times 5 = 195$ 個の測定点に対するフィッティング曲面 $S(x,y)$ を最小二乗法で計算することにより係数 C_{ij} を求めることができる。今回は Python の bisplrep モジュールにより曲面フィッティングを行い、係数 C_{ij} を決定した。これら係数から式(5)のように i と j について足し合わせることで、2変数の補正関数を得る。また、フィッティング結果(B スプライン係数)から補正関数を表現するために bisplev モジュールを使用した。

3.4. 手法：測定系に対する UFSS-S 開口面の回転成分の除去

前述したように、センサ2軸の方向と2軸ジンバルの軸方向は完全には合わせることができないため、測定結果にその影響が現れる。具体的には、リニアリティ誤差の非感度方向

の傾斜により、感度方向の急峻な変化をとらえにくくなってしまふ。本節では、この影響を除去して感度方向の急峻な変化に注目するために用いた手法について述べる。

今回は、ジンバルの Az 角回転軸と El 角回転軸、および太陽シミュレータ光の向きは互いに直交していると仮定し、さらに UFSS の開口面がシミュレータ光に垂直な面と平行であると仮定した。その上で、UFSS を測定系に設置する際に、UFSS がその開口面内にて回転し、測定している UFSS のセンサの感度方向の軸がジンバル Az 角の軸に対して相対角度を持っていると仮定した。この相対角度が実際にはゼロでない場合に、ゼロであると考えてリニアリティ誤差を導出してしまふと、リニアリティ誤差に影響が現れる(図3-4)。図3-4に示した通り、この影響は、El 角と Az 角に対してオフセット値を基準としてそれぞれ対称であり、視野に渡って滑らかであるが、例えば1度の相対角があれば(図3-4の緑線)、El 角方向に $\pm 30''$ 程の誤差となってしまうことが分かる。そこで今回は、回転を仮定した後のリニアリティ誤差の p-p が最小となるようにこの回転角を決定し、このような影響を除去して感度方向の急峻な変化に注目することができるようにした。

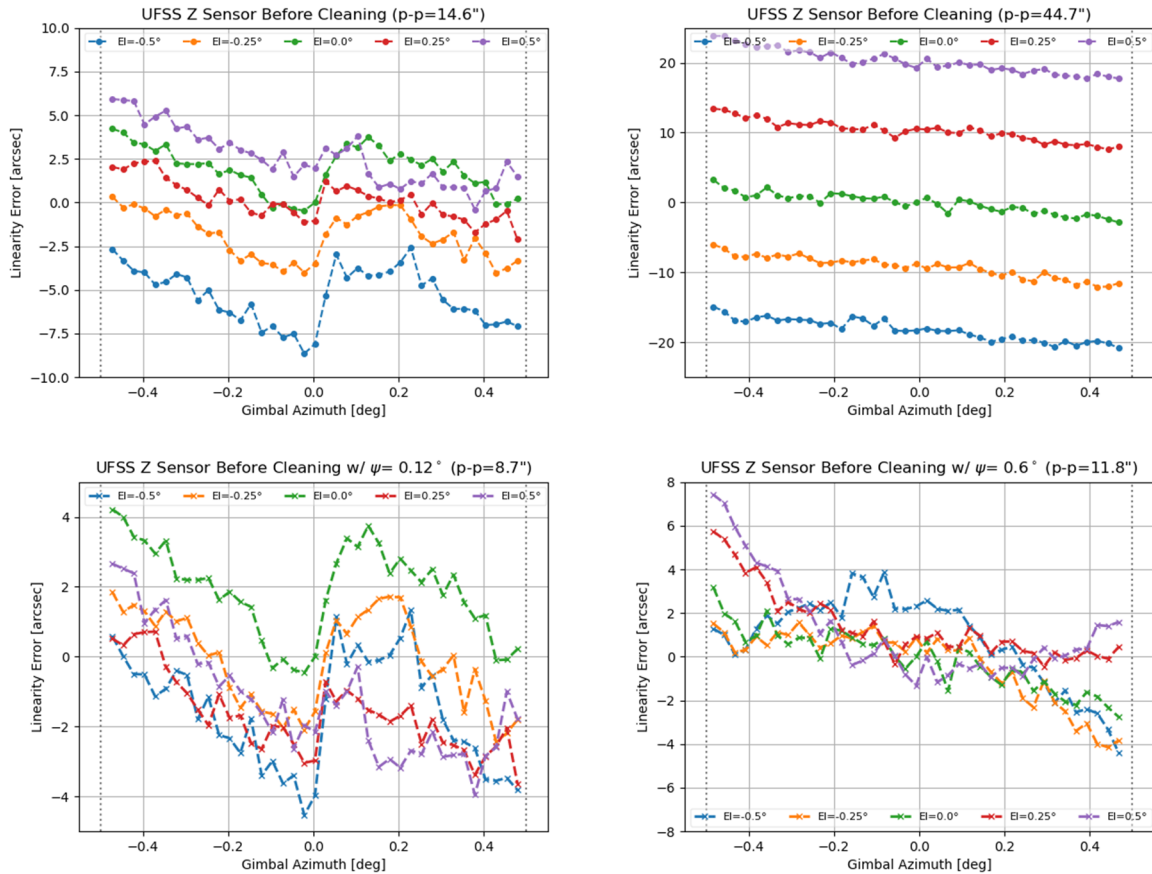


図 3-5. Z 軸センサの清掃前(左)と清掃後(右)のリニアリティ誤差。もとのリニアリティ誤差(上)と開口面回転を考慮した際のリニアリティ誤差(下)。非感度方向の入射光角度を線の色で示す。

ただし、この回転の影響は補正関数を導出する際には、フィッティングにあたって十分滑らかな傾斜をもたらすのみであるため、補正関数に容易に取り込むことができる。よって、補正関数を導出する際にはこの開口面内回転の影響を除去した上で導出する必要はなく、3.3節では測定で得られた元のリニアリティ誤差マップに対して直接Bスプライン関数のフィッティングを実施していることに注意を要する。この開口面回転を考慮したリニアリティ誤差は、リニアリティ誤差の感度方向の急峻な変化に注目する際にのみ用いる。

3.5. 清掃前のリニアリティ誤差と較正リニアリティ誤差

清掃前のUFSSに対して得られたリニアリティ誤差の測定結果を図3-5(左上)、図3-6(左上)に示す。これらに対して、3.3節に記載した手法により決定した、リニアリティ誤差の補正関数を図3-7(左下)と図3-8(左下)に示す。UFSS出力角度のEI角度を変数とした際のリニアリティ誤差を曲面でフィッティングできていることが分かる。また、測定に用いたジ

バルの各EI値におけるフィッティング結果を図3-7(右中)と図3-8(右中)に示す。各EI角において曲線でフィッティングできていることが分かる。次に、測定されたUFSS出力角度・ジンバルEI角度の組み合わせに対応する較正値をもとのリニアリティ誤差から引いて得られた較正後のリニアリティ誤差を図3-7(右下)と図3-8(右下)に示す。リニアリティ誤差の大きさは、Z軸センサがp-pで2.6''、X軸センサがp-pで3.5''となった。これはいずれも要求(p-p<2'')を満たしていない。

次に、感度方向のBスプライン係数の数 n_{cx} として17から22までの値を用いた際に、較正後リニアリティ誤差がどう変化するかを見る。Z軸センサとX軸センサそれぞれについての較正後リニアリティ誤差を図3-9と図3-10に示す。Z軸センサについては、大まかな傾向として、 n_{cx} が大きくなるほど較正後リニアリティ誤差が小さくなることがわかる。これは、 n_{cx} が大きいくほど、リニアリティ誤差の急峻な変化をフィッティングできるためであるといえる。その結果、 $n_{cx} = 22$ の場合に、要求(p-p<2'')を満たすことが分かる。一方、Z軸センサについ

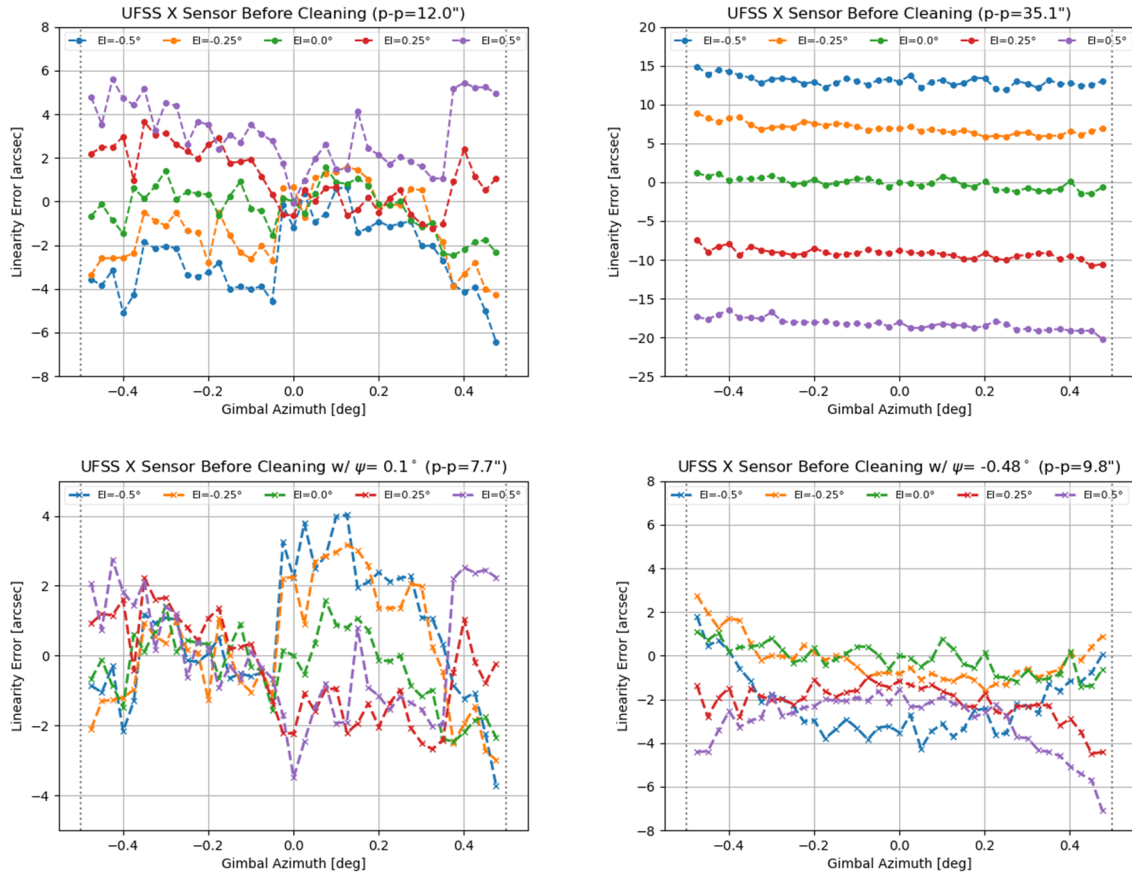


図 3-6. X 軸センサの清掃前(左)と清掃後(右)のリニアリティ誤差。もとのリニアリティ誤差(上)と開口面回転を考慮した際のリニアリティ誤差(下)。非感度方向の入射光角度を線の色で示す。

ては、 n_{cx} を大きくしても、 $p-p$ が要求を満たさないことが分かった。これは、リニアリティ誤差マップの形状が n_{cx} を22まで増大させるだけではとらえることができない程度に急峻であることに起因するといえる。

3.6. 清掃前の較正リニアリティ誤差の主要因

3.5節で見た清掃前の較正後リニアリティ誤差の主要因について考える。較正後リニアリティ誤差の $p-p$ を決めているUFSS出力角度は、Z軸センサ(図3-7(右下))では 0° 付近と 0.05° 付近(いずれも $EI=0.5^\circ$)、X軸センサ(図3-8(右下))では -0.05° 付近と -0.025° 付近(いずれも $EI=0.5^\circ$)である。これらの角度は、較正前リニアリティ誤差で対応を見ると、Z軸センサ(図3-5(左))では入力角度 0° 付近と 0.05° 付近に対応し、X軸センサ(図3-6(左))では入力角度 -0.05° 付近と -0.025° 付近に対応する。ここで、感度方向の急峻な変化に注目するため、開口面内の回転角度を仮定した結果を図3-5(左下)、図3-6(左下)に示す。開口面の回転角度はそれ

ぞれ、 0.12° 、 0.10° である。両センサ共に、較正後リニアリティ誤差の $p-p$ を決めているUFSS出力角度は、較正前リニアリティ誤差が感度方向に急峻な変化を持つ角度付近に対応していることが分かる。そのような急峻な変化のうちフィッティングで除去しきれていない成分が大きく残ることで較正後のリニアリティ誤差の主要因となっている。

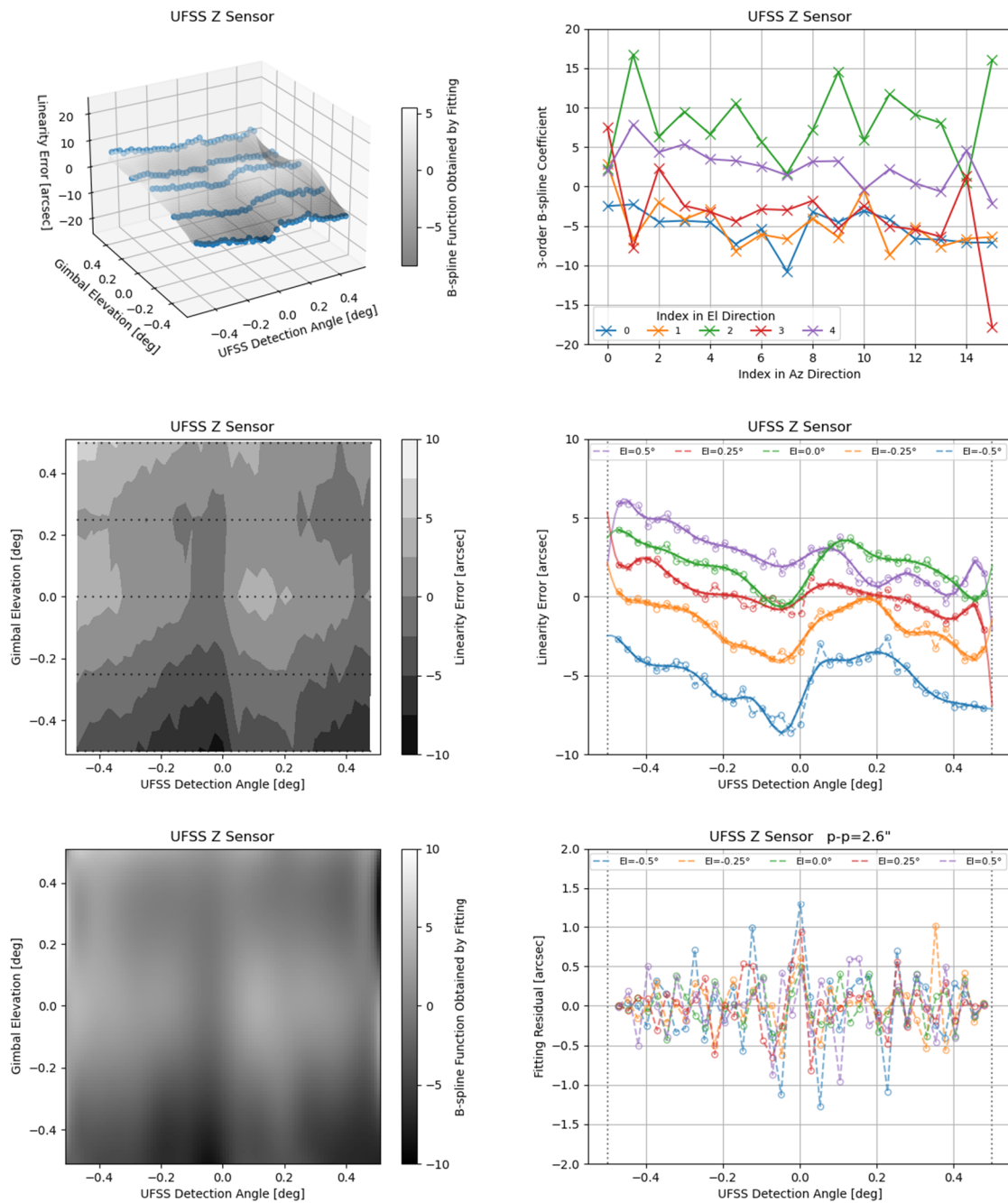


図 3-7. 清掃前の Z 軸センサの線形リティ誤差とそれを 2 変数 3 次 B スプラインフィッティングして得られた補正関数。(左上)線形リティ誤差(青点)とその補正関数(灰曲面)。(左中)横軸を UFSS 出力角度、縦軸をジンバル EI 角度とした時の線形リティ誤差の等高線をカラーで示した図。(左下)横軸を UFSS 出力角度、縦軸をジンバル EI 角度とした時の補正関数をカラーで示した図。(右上)求めた 3 次の B スプライン係数。(右中)各 EI 角度での線形リティ誤差(点)とその補正関数(線)。(右下)補正関数で補正した後の各 EI 角度での線形リティ誤差。

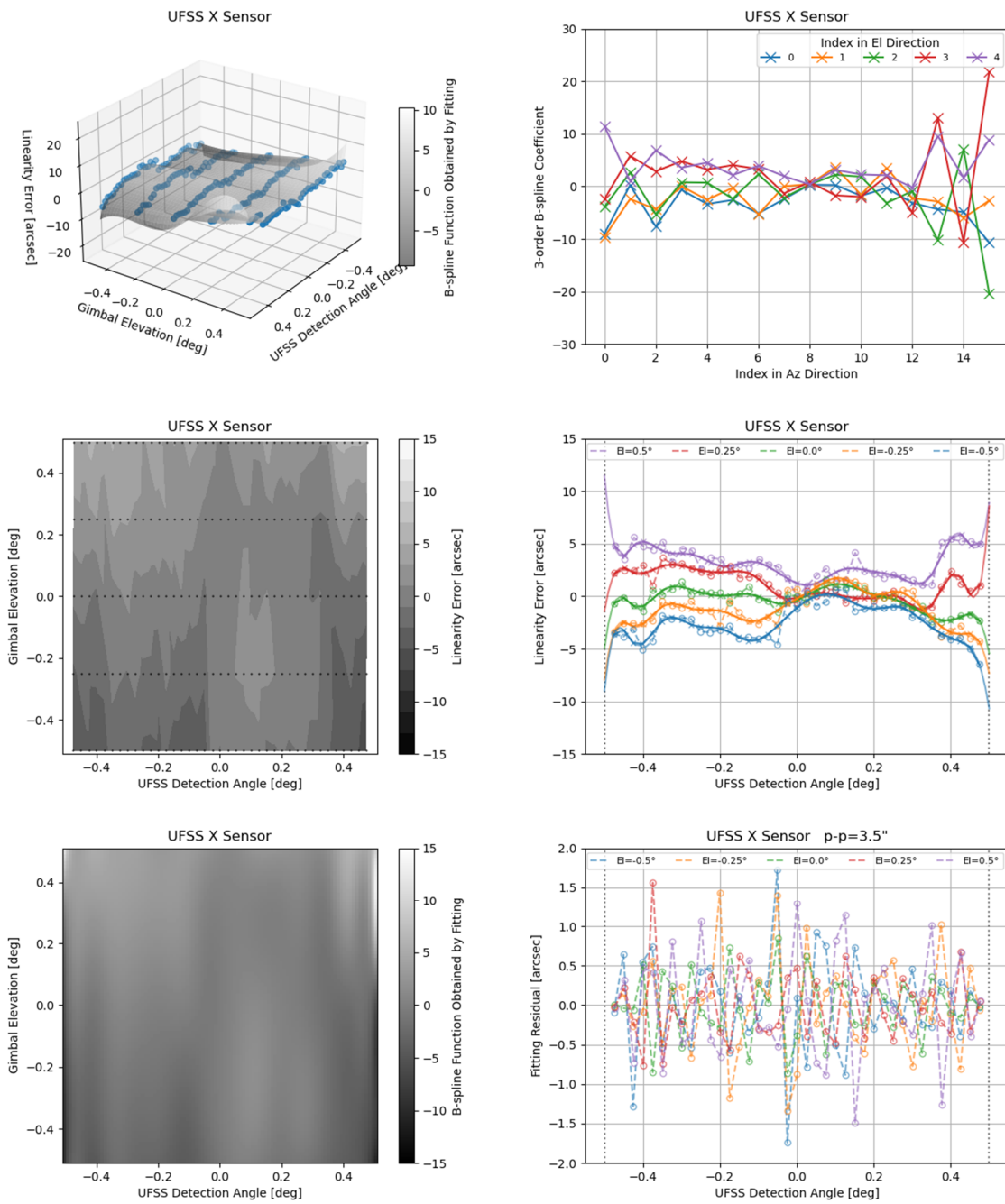


図 3-8. 清掃前の X 軸センサのリニアリティ誤差とそれを 2 変数 3 次 B スプラインフィッティングして得られた補正関数。(左上)リニアリティ誤差(青点)とその補正関数(灰曲面)。(左中)横軸を UFSS 出力角度、縦軸をジンバル EI 角度とした時のリニアリティ誤差の等高線をカラーで示した図。(左下)横軸を UFSS 出力角度、縦軸をジンバル EI 角度とした時の補正関数をカラーで示した図。(右上)求めた 3 次の B スプライン係数。(右中)各 EI 角度でのリニアリティ誤差(点)とその補正関数(線)。(右下)補正関数で補正した後の各 EI 角度でのリニアリティ誤差。

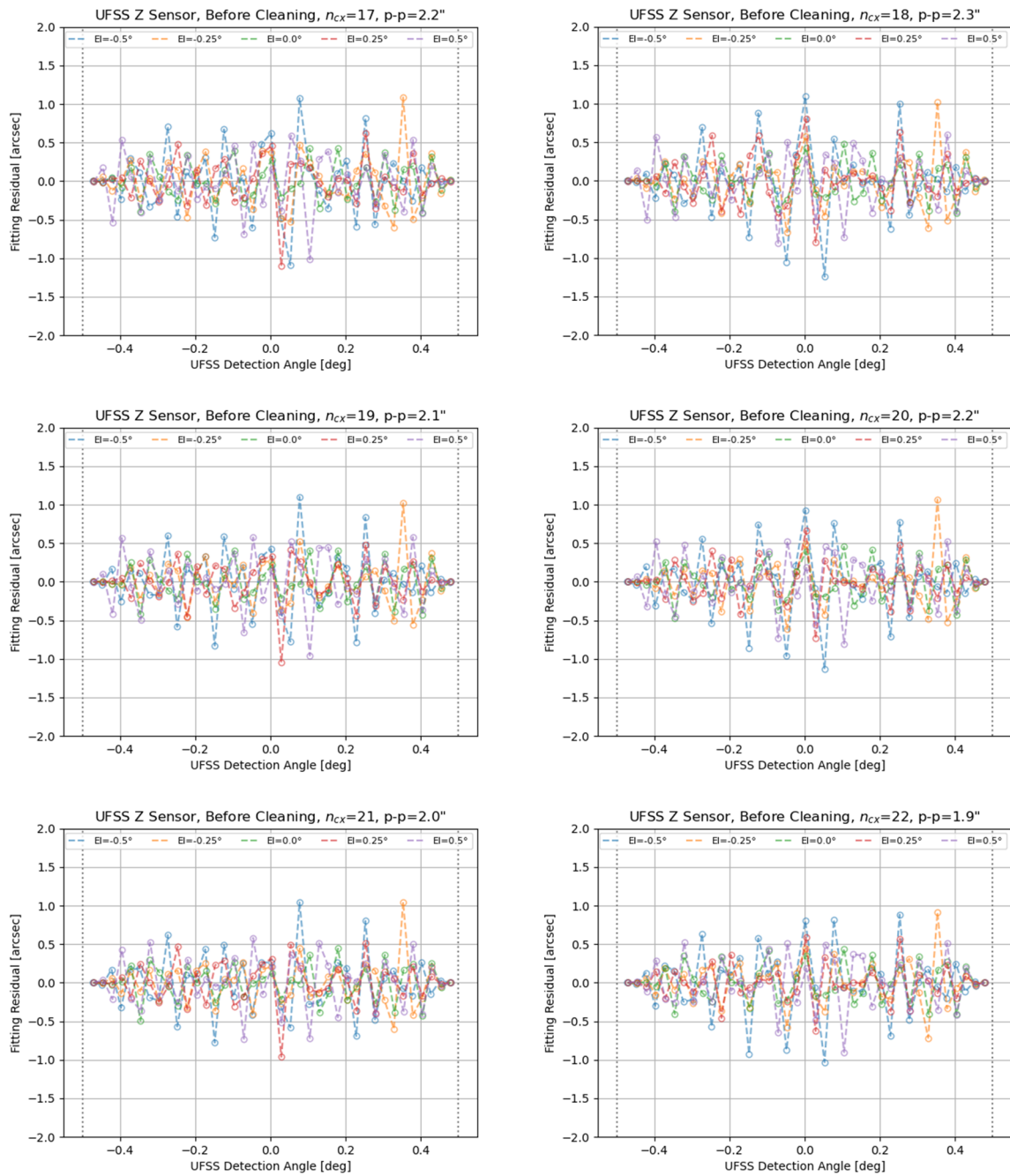


図 3-9. 清掃前の Z 軸センサについて、感度方向の B スプライン係数の数が 17 個から 22 個の時の補正後の線形誤差。

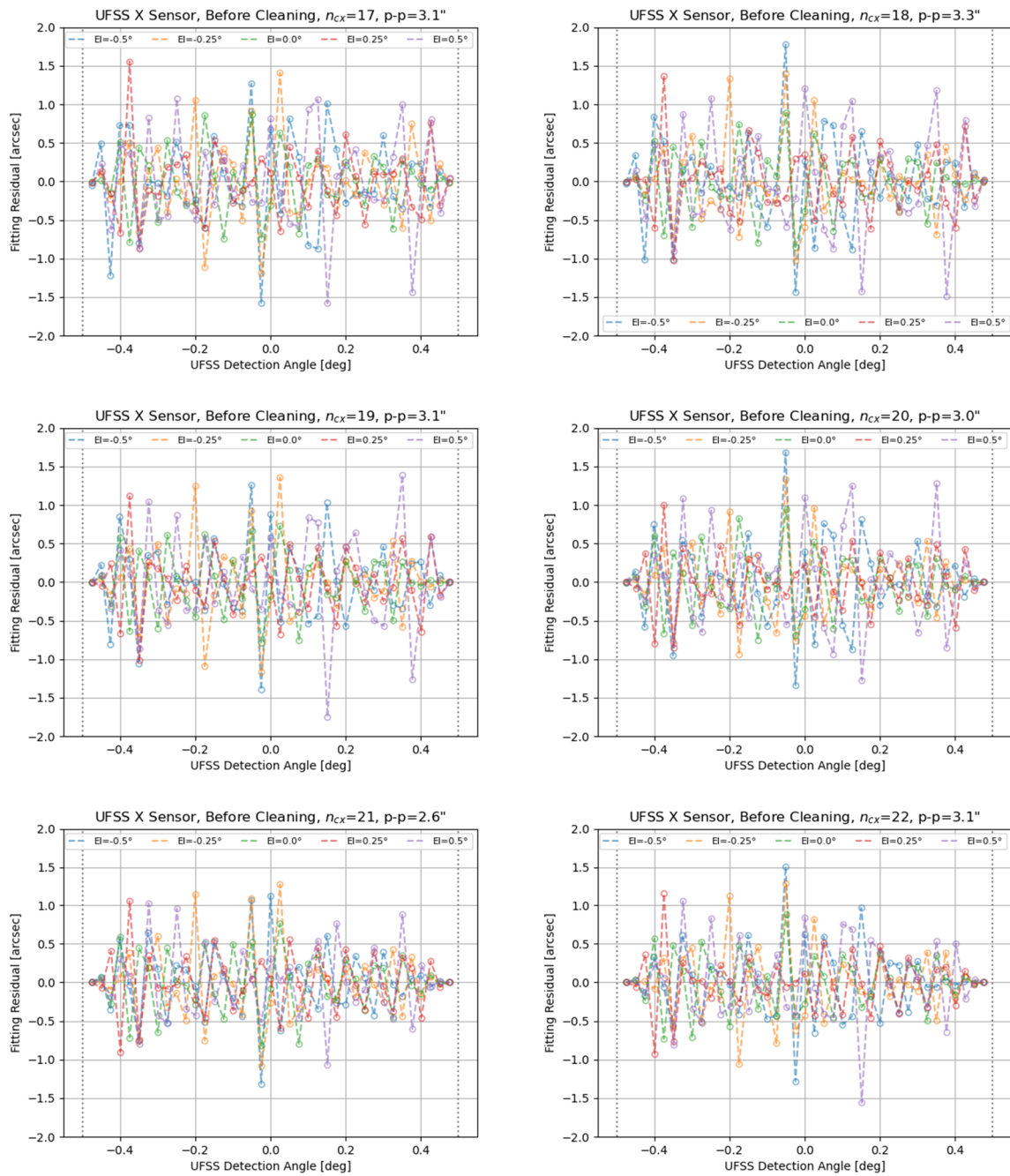


図 3-10. 清掃前の X 軸センサについて、感度方向の B スプライン係数の数が 17 個から 22 個の時の補正後のリニアリティ誤差。

3.7. CCD 波形の棘

清掃前のリニアリティ誤差の過大なp-p値の主要因であるリニアリティ誤差の急峻な変化(3.6節)の原因を探るために、急峻な形状を示す角度付近において、UFSSから出力されるCCD波形をオシロスコープで調査した。レチクルを通してCCDで受光した光は、負の電圧となってオシロスコープに表示されるため、16個ある下に凸の部分に注目した。その結果、リニアリティ誤差の急峻な変化が見られる角度付近では、図3-11(左)の矢印の例に見られる

ように、波形の一部に棘のような信号が現れることが分かった。確認できたCCD波形の棘についての情報を表3-1にまとめる。棘の大きさ(波形における深さ)には個体差があるが、今回は比較的大きいもの(目安としては棘の深さが波形の振幅の5パーセント程度以上に及ぶもの)について取り上げる。

これらの棘の全てに共通の振る舞いは、同一の棘に注目した場合、センサへの入力角度が少しずつ変わるにつれて、CCD上のレチク

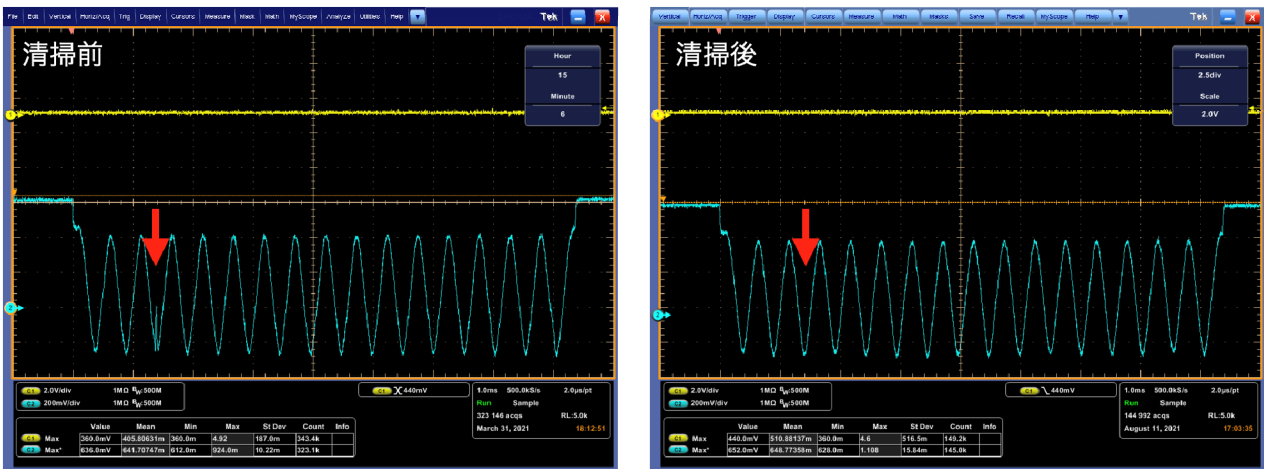


図 3-11. 清掃によって CCD 波形の棘がなくなった例(棘 ID: Z1)。 (左)清掃前と(b)清掃後の CCD 波形。いずれも宇宙研での測定時にジンバル設定角度が $EI=0^\circ$ 、 $Az=0.004^\circ$ で得られたもの。赤矢印は清掃前に棘を確認した位置を示す。

表 3-1. 棘の視認性と塵の対応。(左)Z 軸センサと(右)X 軸センサ。

Z軸センサ									X軸センサ												
棘 ID	棘位置		清掃前				清掃後				棘 ID	棘位置		清掃前				清掃後			
	CCD pix番号	スリット番号	光入力調査による棘の確認		光学顕微鏡による塵の確認	光学顕微鏡による塵の確認	光入力調査による棘の確認		光学顕微鏡による塵の確認	CCD pix番号		スリット番号	光入力調査による棘の確認		光学顕微鏡による塵の確認	光学顕微鏡による塵の確認	光入力調査による棘の確認		光学顕微鏡による塵の確認		
			宇宙研の太陽シミュレータ光	平行度の悪い光源			平行度の悪い光源	宇宙研の太陽シミュレータ光					宇宙研の太陽シミュレータ光	平行度の悪い光源			宇宙研の太陽シミュレータ光				
Z1	320±10	3	○	○	330±10	×	×	×	X1	370±10	3	○	○	360±10, 380±10	×	×	×				
Z2	1800±10	14, 15	○	×	×	×	—	×	X2	530±10	4, 5	○	○	540±10	×	×	×				
Z3	1970±10	16	○	×	1990±10	×	—	×	X3	585±10	5	○	○	580±10	×	×	×				
									X4	1085±10	9	○	○ (2つ)	1100±10	×	×	×				

[注1] スリット番号：該当の棘がオシロスコープによるCCD波形表示で左から何番目の谷(レチクルのスリット位置)に出現するか
 [注2] 光入力調査でオシロスコープによるCCD波形に棘が確認できたかどうか
 ○：見えた、×：該当範囲付近には見えない
 [注3] CCD pix番号の対応までは確認しておらず、CCD波形の該当スリット番号位置に棘が目視できたかで判断した。
 [注4] 数値：該当範囲付近に見えた場合のpix番号、×：該当範囲付近には見えない
 [注5] 同じpix位置ではあるが、入射光の向きによっては、隣り合う2つのスリットのそれぞれで棘が見える。
 [注6] 清掃前に平行度の悪い光源で確認できず、清掃前後の視認性を比較できないので“—”で示す。
 [注7] 2つの棘が確認されたので“○”で示す。

ル波形の位置が全体的に移動していく一方で、CCD上の棘の位置はほとんど変化しないことである。従って、棘はCCDカバーガラス上の塵に起因する可能性が浮上した。我々はこれを検証するため、2021年7月、以下の3.8節から3.10節に述べる確認作業と塵の清掃作業をメーカーにて実施した。

3.8. 平行度が悪い光源を用いた棘の確認

まず、宇宙研での光入力測定実験で確認したCCD波形に見られる棘がメーカーにおいても確認できるかどうかを確認した。メーカーには宇宙研にあるような較正された平行光を出力できる太陽シミュレータはないため、代わりに、キセノンランプと簡易的なコリメータレンズから成る太陽シミュレータ(ウシオ製)を使用した。この太陽シミュレータは、太陽光相当の10万ルクスをφ10cm程度のエリアに作るができるが、精密光学系の評価が可能な平行度を有していない。この太陽シミュレータからの光をUFSSに入射し、オシロスコープでCCD波形を調査した。Z軸センサについては、宇宙研の測定で見られた棘3つのうち、1つを確認でき、X軸センサについては棘4つのうち全ての棘を確認できた(表3-1)。CCDカバーガラスは、CCD受光面から0.7mm±0.1mmの近接距離に存在するため、平行度が悪い光源光束を用いても、リニアリティ誤差に大きく影響を与える塵の有無を識別できることが判明した。ただし、全ての棘を確認できたわけではないことに注意が必要である。

3.9. 光学顕微鏡検査による塵の確認

次に、UFSS-Sのカバーを外し、UFSS-S内部の光学系に付着した塵を光学顕微鏡(倍率50)により調査した。

まず、CCDカバーガラス表面およびCCD受光面の塵の有無を調査した。その際、カバーガラス面とCCD受光面のそれぞれに顕微鏡のピントを合わせて調査した。なお、光学面間で発生する多重反射によるリニアリティ誤差発生を防ぐために、レチクルやCCD取り付け部からなる光学系のタワーの向きに対して、CCD(カバーガラスを含む)は非感度方向に10°程傾けてあるため、CCD内の受光素子であるフォトダイオードが並ぶ一列に対して幅およそ0.3mm内にある塵がCCD波形に影響を

与える。よって、我々はこの範囲を重点的に調査した。なお、CCDの1ピクセルの物理サイズは14μmであり、CCDの感度方向と非感度方向の大きさはそれぞれ28.6mm(=14μm×2048)と14μmである。また、CCD受光面とカバーガラス面の距離は約1.7mmである。

その結果、2つのCCDセンサそれぞれにおいて、複数箇所に10μmクラスの塵が確認された。宇宙研での測定実験でCCD波形から得た棘のCCDピクセル座標と、メーカーで光学顕微鏡によるCCD検査から読み取った塵のピクセル座標の対応関係について調べた。その結果、棘の1つ(ID:Z2)を除いては、棘の位置の決定誤差の範囲内に対応する塵が確認された(表3-1)。なお、宇宙研測定で見たCCD波形における棘の位置の決定誤差は10ピクセル程度、メーカーでの光学顕微鏡による塵の位置の決定誤差は10ピクセル程度である。

また、レチクルの表面も検査したが、塵の付着は確認されなかった。

3.10. CCDカバーガラスの清掃

前節の作業にて見つかったCCDカバーガラス上の塵の清掃を実施した。清掃は、以下の方法による。

(1) デジタルカメラ用のイメージセンサクリーニング機材を用いて塵を除去

(2) 顕微鏡で確認し、塵を除去できていない箇所に対して(1)を再度実施

(3) (2)でも除去できない塵に対しては、IPAを浸したダスパーで拭き取りを実施

なお、ダスパーを使用しての清掃には繊維塵付着の可能性があったが、イオナイザーの前で拭き取りを実施することで繊維塵の付着なく塵の除去ができた。

その後、再び光学顕微鏡での検査を実施した。2つのCCDセンサそれぞれのカバーガラス上に1つずつ塵が確認されたものの、それ以外は清掃前に見えていた多数の塵を除去できていることが分かった。

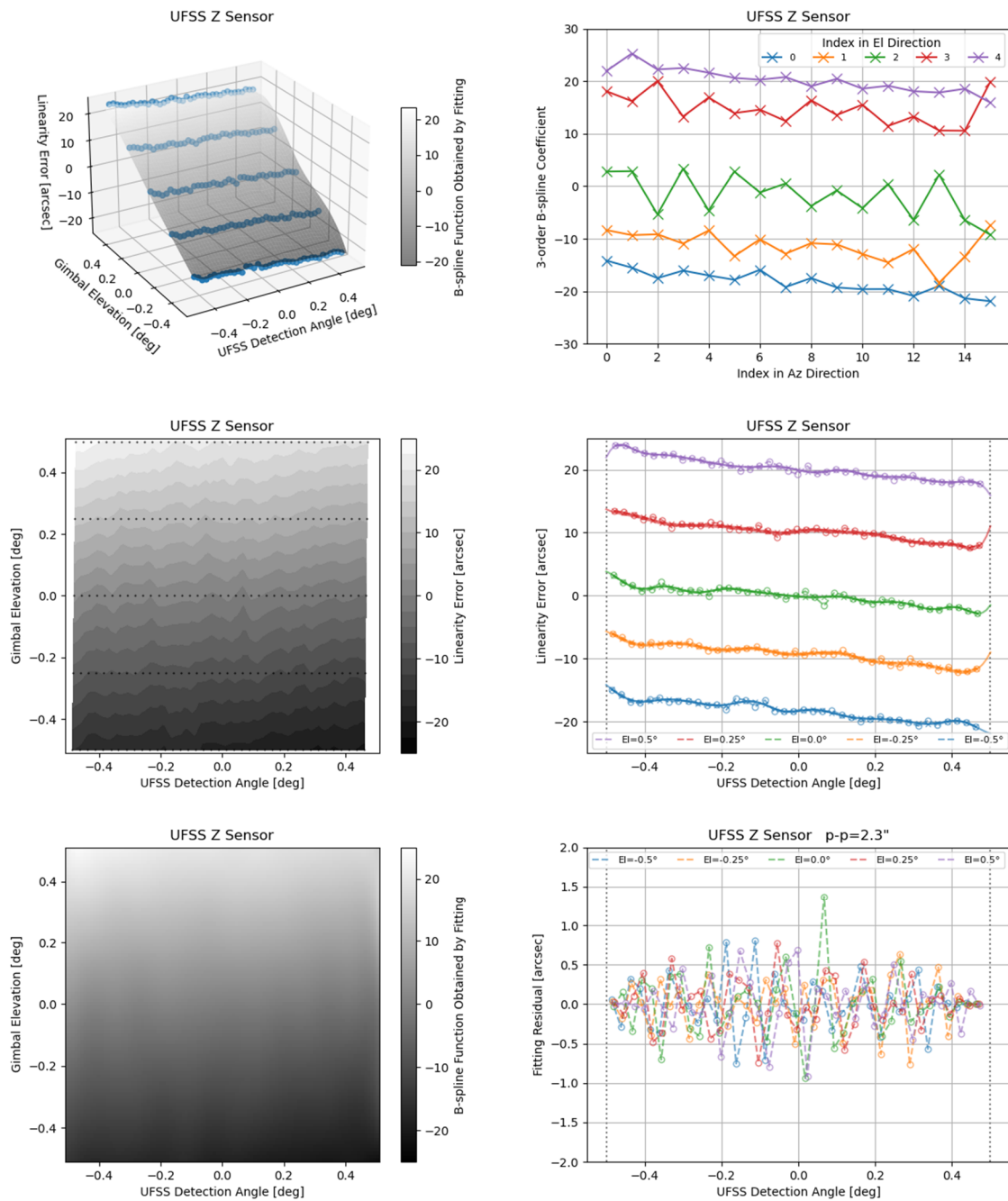


図 3-12. 清掃後の Z 軸センサのリニアリティ誤差とそれを 2 変数 3 次 B スプラインフィッティングして得られた補正関数。(左上)リニアリティ誤差(青点)とその補正関数(灰曲面)。(左中)横軸を UFSS 出力角度、縦軸をジンバル EI 角度とした時のリニアリティ誤差の等高線をカラーで示した図。(左下)横軸を UFSS 出力角度、縦軸をジンバル EI 角度とした時の補正関数をカラーで示した図。(右上)求めた 3 次の B スプライン係数。(右中)各 EI 角度でのリニアリティ誤差(点)とその補正関数(線)。(右下)補正関数で補正した後の各 EI 角度でのリニアリティ誤差。

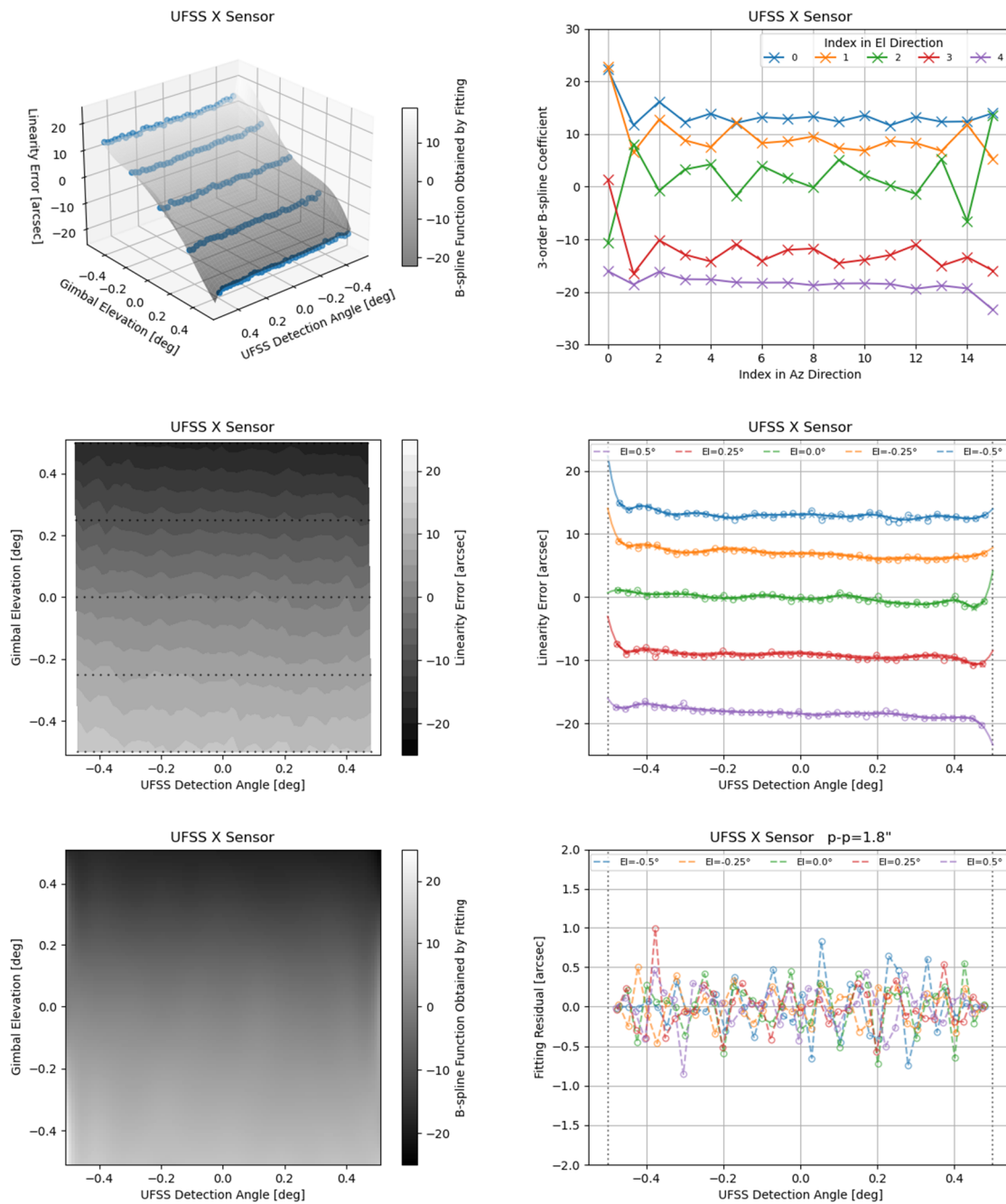


図 3-13. 清掃後の X 軸センサのリニアリティ誤差とそれを 2 変数 3 次 B スプラインフィッティングして得られた補正関数。(左上)リニアリティ誤差(青点)とその補正関数(灰曲面)。(左中)横軸を UFSS 出力角度、縦軸をジンバル El 角度とした時のリニアリティ誤差の等高線をカラーで示した図。(左下)横軸を UFSS 出力角度、縦軸をジンバル El 角度とした時の補正関数をカラーで示した図。(右上)求めた 3 次の B スプライン係数。(右中)各 El 角度でのリニアリティ誤差(点)とその補正関数(線)。(右下)補正関数で補正した後の各 El 角度でのリニアリティ誤差。

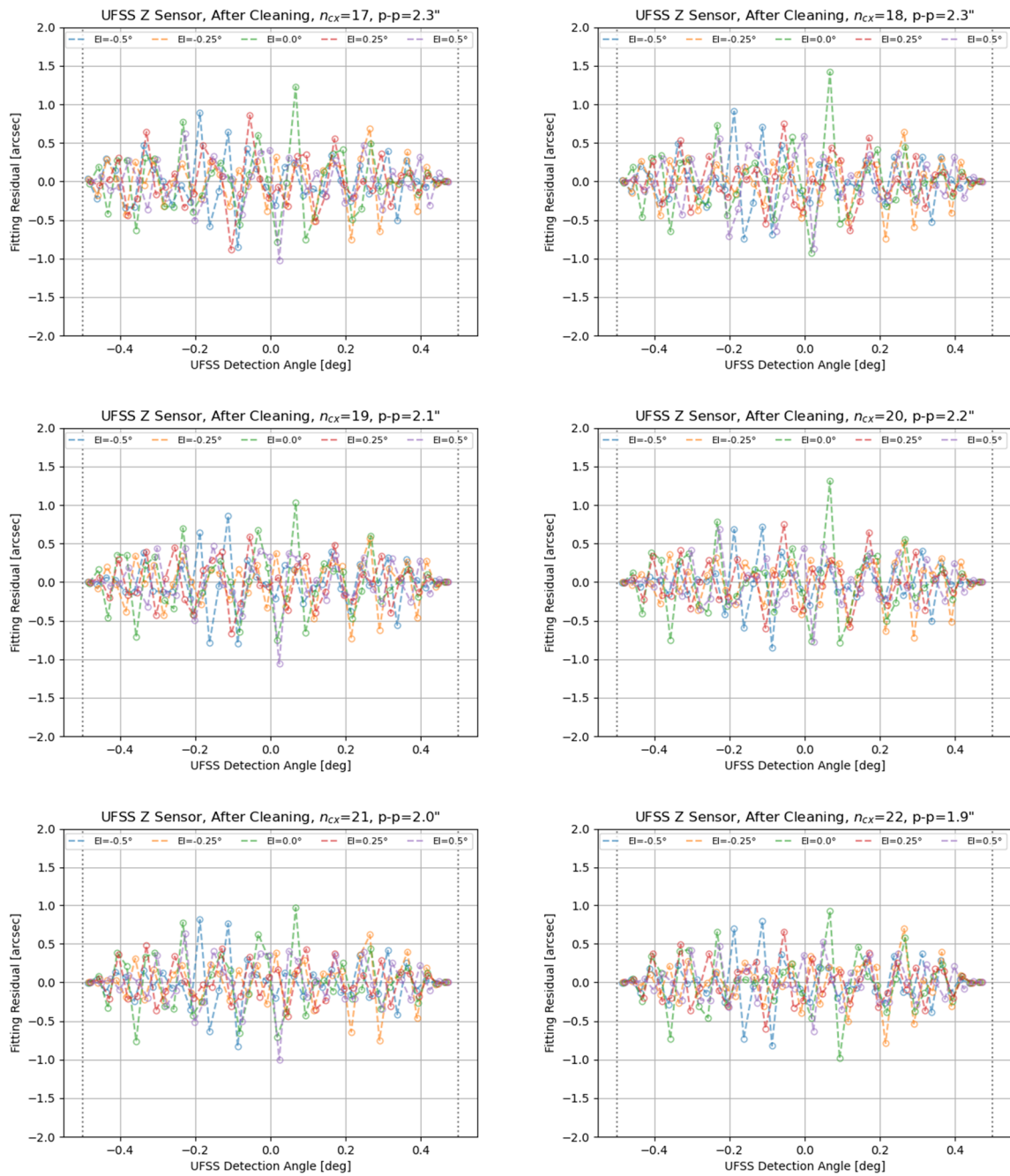


図 3-14. 清掃後の Z 軸センサについて、感度方向の B スプライン係数の数が 17 個から 22 個の時の補正後の線形誤差。

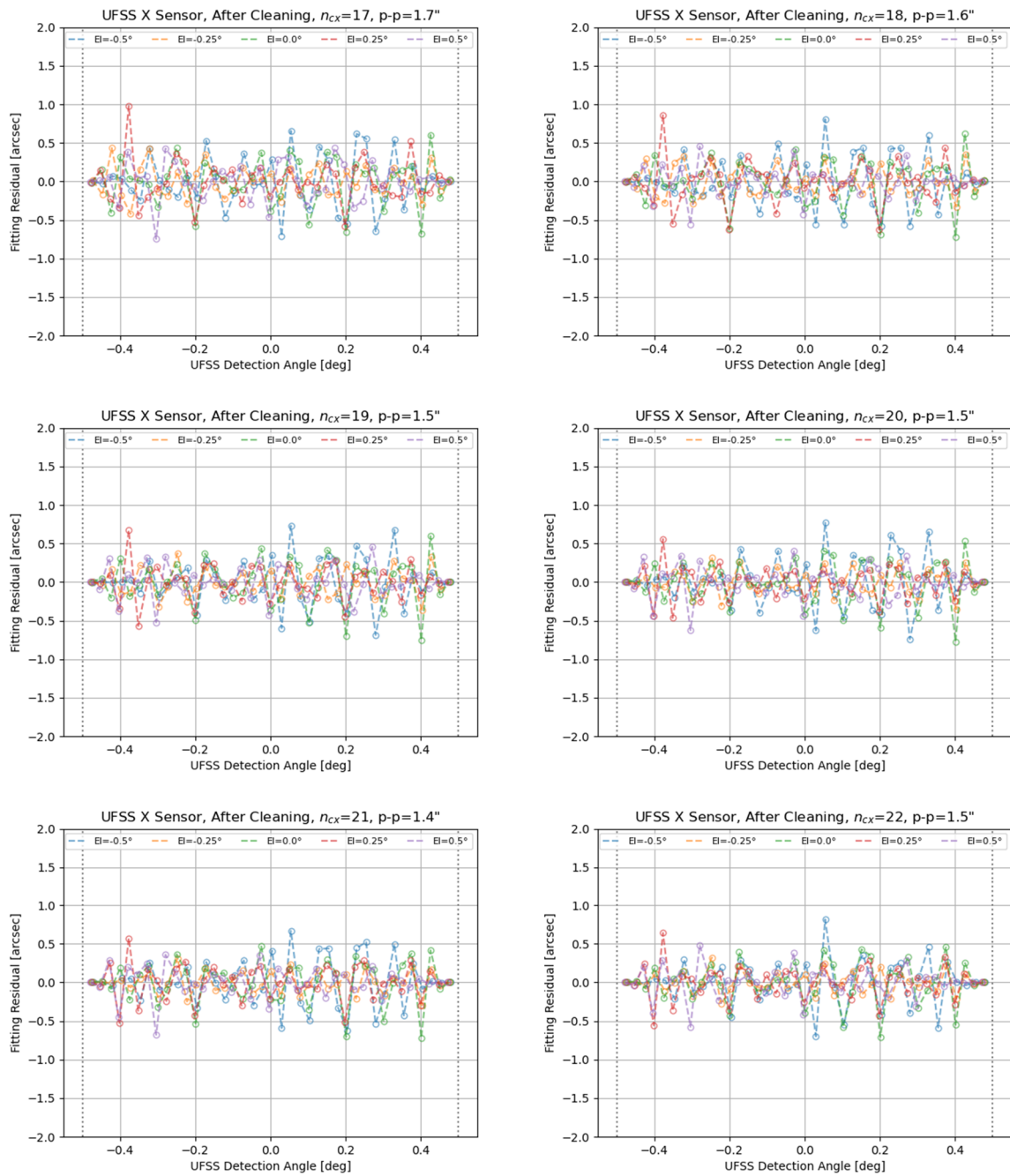


図 3-15. 清掃後の X 軸センサについて、感度方向の B スプライン係数の数が 17 個から 22 個の時の補正後のリニアリティ誤差。

3.11. 清掃後のリニアリティ誤差と校正リニアリティ誤差、及び CCD 波形

清掃後に宇宙科学研究所の設備を用いて取得したリニアリティ誤差の測定結果を図3-5(右上)、図3-6(右上)に示す。また、これらの結果に対して開口面の回転を考慮したものを図3-5(右下)、図3-6(右下)に示す。清掃後は、両センサ共に、視野中心でのリニアリティ誤差の急変度合いが低減したことが分かる。これにより、Bスプライン関数による校正をした後のリニアリティ誤差(図3-12(右下)と図3-13(右下))はZ軸センサで2.3"、X軸センサで1.8"と清掃前からそれぞれ改善した。X軸センサにおいては要求($p\text{-}p < 2''$)を満たしていることが確認できた。また、感度方向のBスプライン係数の数 n_{cx} として17から22までの値を用いた場合、校正リニアリティ誤差は図3-14・図3-15のように変化した。X軸センサについては n_{cx} が16個の場合からさらに $p\text{-}p$ が小さくなっており、Z軸センサでは、 n_{cx} が21個・22個の場合で要求($p\text{-}p < 2''$)を満たすことが確認できた。

清掃後の宇宙研での光入力測定の際に得られたCCD波形の例を図3-11(右)に示す。清掃前(図3-11(左))と比較して、棘がなくなっているのが分かる。さらにこの角度周辺に見られたリニアリティ誤差の急峻な変化が低減していることが図3-5(右)から分かる。

3.12. 考察と結論

今回の検証から、CCDカバーガラス上に塵が付着することで、CCDで読み出す信号に棘状構造がもたらされ、UFSSの出力角度にリニアリティ誤差の急峻な変化を生み出していると考えられる。これより、一般的な宇宙機向け電子機器の組立作業のクリーンルーム(ISO 149644-1 Class8)環境では不十分で、よりコンタミネーション管理された環境での組み立てが必要なことが明らかとなった。フライト実機を作製する際には、カバーガラスに塵が付着しないように組み立てるコンタミネーション管理が重要である。クリーンベンチ環境で光学顕微鏡を用いた組立てやセンサ内部の部品清掃などを検討する必要がある。

また、今回のUFSS-S内部のCCDカバーガラスの清掃により、CCD波形の棘のうち、顕著なものはなくすことができた。今回取り上げなかったが、もっと小さい棘の一部は、清掃でも除去しきれていないが、急峻な変化を

起こすような塵の除去はできたと考えられる。

また、感度方向のBスプライン係数の個数 n_{cx} を増やすと、校正後のリニアリティ誤差を低減する効果がある場合があることを確認した。今回は n_{cx} として16個から22個までの値を検証したが、実際にどの値にするかは最終的には衛星システムメーカーの判断となる。

なお、3.1節に記載の通り、本稿においては2軸ジンバルがその仕様上の制御性能を満たしているという前提で評価を実施した。そのため、太陽シミュレータと2軸ジンバルで構成される測定系が、評価において十分な測定精度を持っていない可能性は否定できず、その点で懸念が残る。従って我々は、BBM第二号機(実質のEM)の性能検証に先立ち、測定系が十分な精度を持っているかについての評価活動も進めている。

3.3節に述べたように、今回は用いた試作品の仕様により2軸センサの出力が1軸ずつしかできない状況で取得したデータを用いて補正関数の導出を模擬した。フライト実機では、リニアリティ誤差を持つ1軸センサが2つ同時に太陽方向角度を検出するため、この2つの検出角度から、2つの校正後角度を導出する。この場合も、1軸センサ毎に、2変数3次のBスプライン関数でフィッティングして補正関数を導出するという点では同じであり、非感度方向にもリニアリティ誤差があるという点が今回の検証と異なる点となる。感度方向のリニアリティ誤差の変動の形状が非感度方向に急峻に変動する場合には校正が効きにくくなるが、その要因としては塵の問題が考えられる。対処法としては今回検証した清掃方法が考えられる。従って、校正後リニアリティ誤差が要求を満たすために、CCDカバーガラス上の塵をなくす必要があるという点は今回の検証でカバーできている。よって、感度方向のBスプライン係数の個数 n_{cx} として22個を用いれば、校正後のリニアリティ誤差が要求を満たす見込みを得ることができたと結論する。

4. 今後の展望

我々は、2022年度からUFSS-SおよびUFSS-Eの全機能・性能を検証するために、ほぼフライト実機と同様となるBBM第二号機の開発を開始した。この開発は、2章と3章で得られた

ランダム誤差やリニアリティ誤差についての知見に加え、これまでの研究開発で得られたその他全ての成果をもとに進めている。また、UFSSが搭載される望遠鏡の開発を担当する望遠鏡メーカーや姿勢制御系を開発する衛星システムメーカーともインターフェース条件の詳細について調整を行なっている。

一方、BBM第一号機の開発の中で、宇宙研にある測定系の精度をさらに向上する必要があることが判明した。このため我々は、既存の測定系を、ひので UFSS開発時に構築した測定系²⁾も参考にして、高精度の計測を実現させるべく準備を進めている。

参考文献

- [1] K. Tsuno, et al., “UFSS (ultra fine sun sensor): CCD sun sensor with sub-arc second accuracy for the next solar observing satellite SOLAR-C”, Proc. SPIE Volume 11180, International Conference on Space Optics — ICSO 2018; 111804O (2019)
<https://doi.org/10.1117/12.2536087>
- [2] M. Kubo, et. al., “Performance verification of Ultra Fine Sun Sensors (UFSS) aboard HINODE”, JAXA Research and Development Report, JAXA-RR-07-013, (2008-02-29), 資料番号: AA0063799000

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-23-002

JAXA Research and Development Report

SOLAR-C向け超高精度太陽センサ(試作品)のランダム誤差とリニアリティ誤差

Random and Linearity Errors of the Ultra Fine Sun Sensor (Breadboard Model) for SOLAR-C

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: <https://www.jaxa.jp/>

発行日 2024年2月13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・電子媒体等に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.

