

Solar-B 衛星搭載超高精度太陽センサー(UFSS)の性能検証

久保雅仁(東大理)、清水敏文(国立天文台)

広川英治、紀伊恒男、橋本樹明、小杉健郎、二宮敬虔(JAXA/ISAS)

山本貴久、奥村徹、津野克彦(NTSpace)

概要

Solar-B 衛星の重要な特徴の一つは、口径 50cm の主鏡の回折限界である 0.2 秒角の空間分解能で太陽の可視光観測が可能となる点である。高分解能の観測の為に厳しい姿勢制御の精度が要求され、高い位置検出精度が太陽センサーに必要となる。我々は、Solar-B 衛星に搭載される超高精度太陽センサー(Ultra Fine Sun Sensor, UFSS)の角度検出性能をプロトタイプ品で検証し、ランダム誤差 0.15arcsec(1 σ)、視野 $\pm 0.5^\circ$ 四方でバイアス誤差約 2arcsec(p-p)の実力を実証した。

1.UFSS の特徴

UFSS-S(センサー部)は、16本のスリットが入ったレチクルとリニア CCD で構成され、このレチクル-CCD のセットを2個直交して並べることで2次元センサーとしての機能を持つ。図2に示したように CCD 上のレチクル像とレプリカ像の位相差で太陽方位を決定しており、16本のスリットの平均的な位置を計測することで位置決定の高精度化を図っている。また、反射光が CCD 上に戻って来ないように CCD を6度非感度軸側に傾斜させる工夫を施している。

UFSS は、「ようこう」で初めて搭載された高精度太陽センサー(TFSS)の光学系の寸法変更や位相検出のロジック等の改良を行ったものである。同様のセンサーで視野が ± 2 度のものは、Astro-F 衛星にも搭載される。

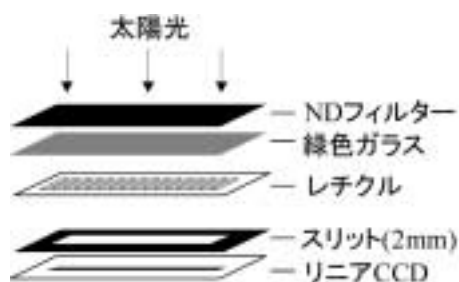


図 1.UFSS の光学系



図 2.UFSS の出力信号例

2.ランダム誤差試験

2.1. 測定方法

UFSS 光学系は、太陽光に最適化するために濃度数%の ND フィルタおよび半値幅~50nm の緑色ガラス(透過率~25%)がレチクル前に入っており、非常に大きく減光を行っている。そのため、非常に明るい光源が必要となるが、キセノンランプなどアーク型ランプでは光源(光量・位置)のふらつきが大きく、ランダム誤差の測定では問題となる。しかし、光学系より ND フィルタ及び色ガラスを取り除くことで、暗いが安定度の高い白色 LED ライト等で計測が可能となる。

さらに、レチクルを CCD(カバーガラス)に直接取り付けすることで、UFSS 光学系の角度感度を大幅に落とすことができ、光源のふらつきを完全に考慮しなくてよい測定が実現できる。実際の UFSS のレチクル-CCD 間は約 80mm だが、この測定では約 2mm になるので、UFSS 出力の位置信号の 1digit はそれぞれ 0.11arcsec、4.4arcsec となる。太陽光は 30arcmin の平行光であるから、CCD でのレチクル端のボケは $0.7\text{mm}(=80[\text{mm}]*0.5[\text{degree}]/180)$ 程度になる。今回は、CCD-レチクル間が約 2mm なので、光源の平行度は 20 度程度でよい。白色 LED ランプは $50 \times 50\text{mm}^2$ なので、凡そ CCD から 130mm 程度離れた場所に設置すれば、太陽光の場合と同様のレチクルパターンが得られ、平行光を作る光学系は必要なくなる。

図 3 に示すように、レチクルを取り付けた CCD の上に黒い紙で内面を貼ったアルミの筒をかぶせ、その上に白色 LED を置いて CCD に光を照射した。測定時は、試験系全体に暗幕をかけて外からの光が入らないようにした。

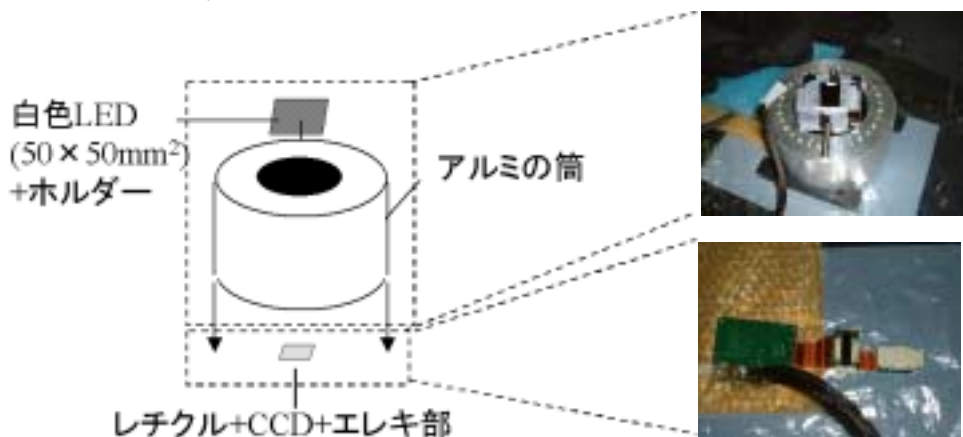


図 3. ランダム誤差試験コンフィギュレーション

2.2.測定結果

図 4 に 300 秒間にわたる UFSS の出力を示した。図中の式は 300 秒間のデータを使って直線フィットした結果である。図 5 は、各データ点から直線式で示される傾き及びオフセットを差し引いてヒストグラムにしたものである。測定の結果、ランダム誤差は、 $\sigma = 1.40 \text{ digit/p-p} = 9.11 \text{ digit}$ となった。UFSS 光学系では $\text{digit} = 0.11 \text{ arcsec}$ であるので、ランダム誤差は $\sigma = 0.15 \text{ arcsec/p-p} = 1.00 \text{ arcsec}$ に相当する。

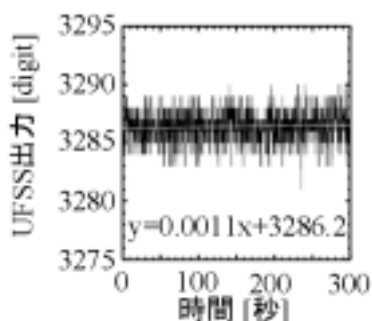


図 4. UFSS 出力の時間変化

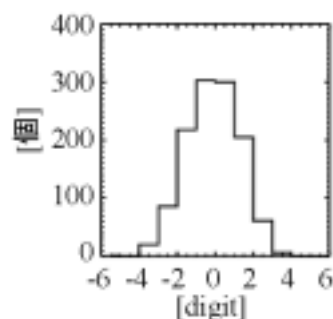


図 5. UFSS 出力のヒストグラム(図 4 中の式の傾き、オフセットを除いている)

3. バイアス誤差試験

3.1. 試験方法

2軸ジンバルに取り付けた UFSS-S に 2/100 太陽シミュレーター光源を照射して、ジンバルを回転させジンバルの回転角度と UFSS の出力を比較する。ジンバルの回転角度は、ジンバルのエンコーダ出力ではバイアス誤差が大きいため、レーザー変位計 2 個でジンバルの角度(Az 軸、EI 軸)を光学的に測定するシステムを構築した。システムは、UFSS マウント治具に取り付けたリフレクターと石定盤に載せたレーザー及びインターフェロメーターから成り立つ。このレーザー変位計は、角度分解能 0.05arcsec で $\pm 10^\circ$ の視野を計測できるもので、本測定では十分な精度を有している。さらに、光源やレーザーの熱によるゆらぎを抑えるために扇風機で風を送りながら測定を行なった。

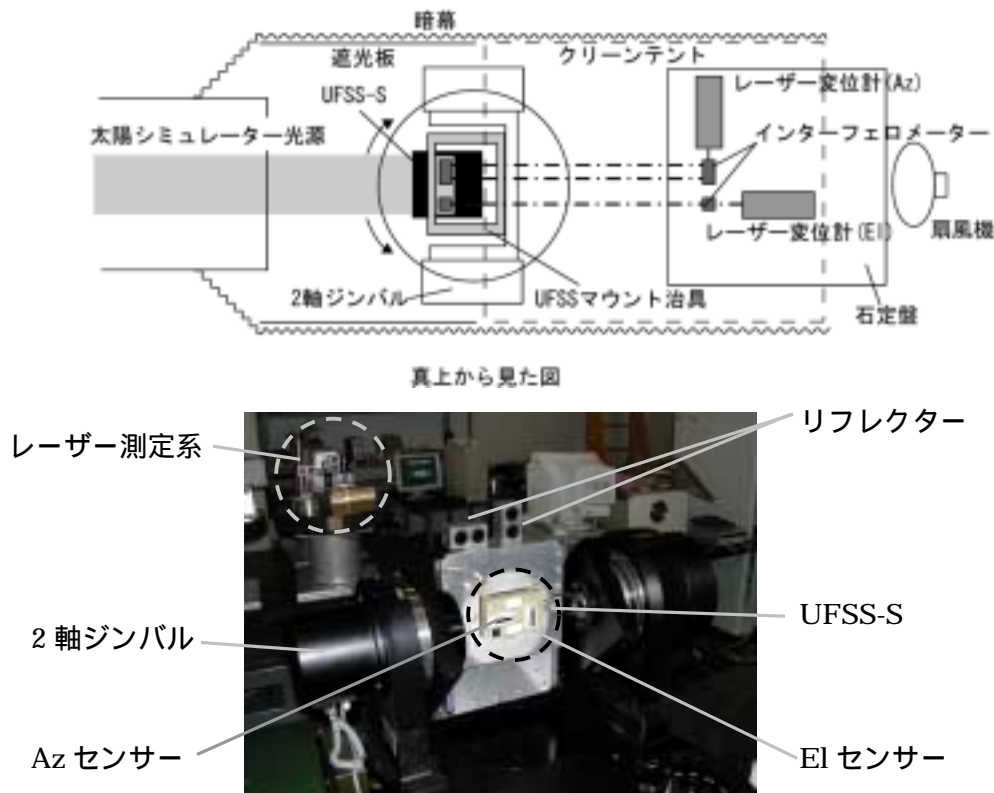


図 6. バイアス誤差試験コンフィギュレーション(JAXA / ISAS 姿勢制御系試験室)

3.2. 測定結果

図 7 は、 $Az \pm 0.5^\circ$ 、 $EI \pm 0.4^\circ$ の範囲を Az 方向に 0.025° 間隔でスキャンした結果である。Az センサーでは $EI = \pm 0.35^\circ$ より外側、EI センサーでは $Az = \pm 0.4^\circ$ より外側で誤差が大きくなっている。これは、入射光がレチクルでけられているためであり、オシロスコープによる CCD 出力波形の測定でも確認されている。センサーによってけられる範囲が違うのは、それぞれのセンサーで開口の非感度軸方向の長さが違うレチクルが入っているためである。

EI センサーでのみ横方向にスジ状の誤差(=Az 方向スライスのオフセット)が見られる。しかし、もう 1 度測定しても再現せず、また Az センサーにはこのようなオフセットが見えていない。このことから UFSS-S の問題では無く、別の測定で明らかになっている太陽シミュレーター光源のドリフトが原因で

あると考えられる。EI センサーにのみ顕著なのは、光源の安定度が EI 方向(=重力方向)の方が悪い
ためであり、PSD センサーを用いて太陽シミュレーター光源の長期安定度を調べた結果と一致している。

視野端でのけられと光源のドリフトの影響を除くと、誤差は視野にわたって 2arcsec 以内である。また、さらに細かく 0.005° 間隔でスキャンをしても同様の振る舞いで特に大きな誤差は生じなかった。

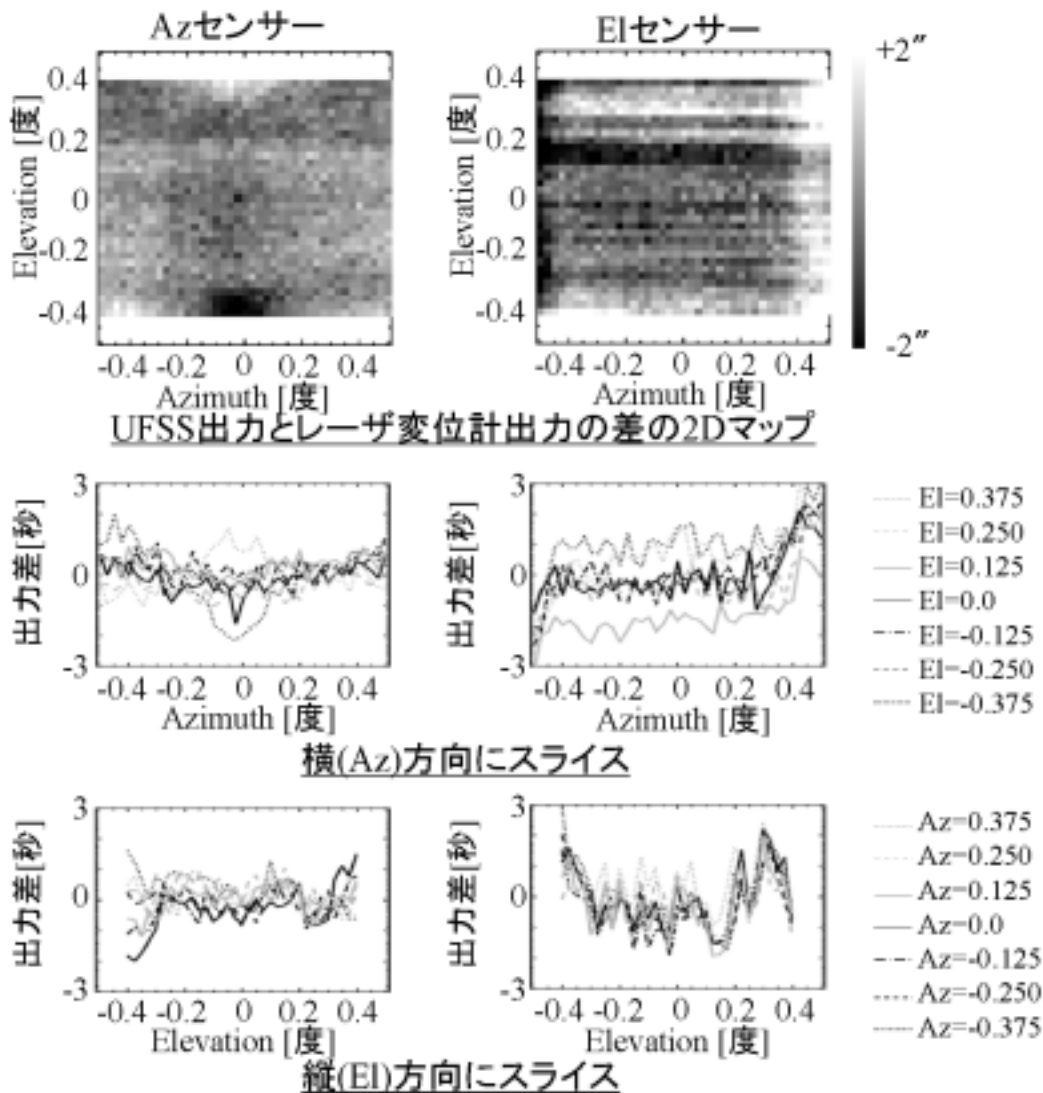


図 7. バイアス誤差試験測定結果

4.まとめ

ランダム誤差及びバイアス誤差ともに Solar-B 衛星で必要とされる精度(ランダム：1arcsec(3)、バイアス：2arcsec)を満足するフライト品を製作できることを確認した。バイアス誤差測定で明らかになった視野端でのけられの問題は、フライト品においてレチクルの幅を広げることで対策する。太陽シミュレーターのドリフトは、UFSS-S の取付を 90 度回転させた状態でも測定することで、EI センサーについても今回の Az センサーのようにドリフトの影響がほとんど無い条件にて評価できる。以上のことから本性能検証試験によって、フライト品の性能評価試験を行なうことができる試験系を確立できたと考える。これ程に高精度でしかも 10 時間以上に渡り同一の精度を保って太陽センサーの出力を較正したのは初めてであり、今後同程度の精度を必要とするセンサーの較正においても重要な検証試験であると考えられる。