

B03 高精度アンテナシステム実証試験におけるアンテナ主鏡高精度計測

山崎健次 (室蘭工大・院), 樋口健, 勝又暢久 (室蘭工大),
岩佐貴史 (鳥取大), 岸本直子 (摂南大), 藤垣元治 (福井大),
原卓也 (福井大・院), 田中宏明 (防衛大), 小木曾望 (阪府大),
坂野文香 (阪府大・院), 土居明広, 中原聡美 (JAXA)

High Accuracy Measurement of Main Reflector in Demonstration Test of High Accuracy Antenna System

Kenji Yamazaki, Ken Higuchi, Nobuhisa Katsumata (Muroran I.T.),
Takashi Iwasa (Tottori Univ.), Naoko Kishimoto (Setsunan Univ.), Motoharu Fujigaki (Univ. of Fukui),
Takuya Hara (Univ. of Fukui), Hiroraki Tanaka (NDA), Nozomu Kogiso (Osaka Pref.Univ.),
Fumika Sakano (Osaka Pref.Univ.), Akihiro Doi, Satomi Nakahara (JAXA)

1. 研究背景と目的

宇宙科学研究所を中心にして、高性能科学観測に向けた高精度構造・材料の研究開発が行われている^{[1][2][3]}。その中で、高精度2次元構造物の分野においては、スマート可変形状反射鏡と高精度変形計測システムを統合した高精度アンテナシステム構築の研究が進められている。高精度アンテナシステムは、電波望遠鏡アンテナ主鏡の鏡面が熱や自重の影響により変形した場合のアンテナゲイン低下を防ぐため、高精度スマート形状可変副鏡^[4] (スマート副鏡) を用いて主鏡変形による電波の経路差 (位相誤差) を補正するシステムである (Fig.1-1)。スマート副鏡を用いて電波位相を補正するためには、主鏡の表面形状をその場計測することが必要であり、主鏡の変形を計測するために、二次元格子2カメラ法^[5]を用いることを計画している。二次元格子2カメラ法は、非接触の光学的計測手法であり、二次元格子が表示されている領域を面として計測可能である。計測領域が広範囲になったとしても、二次元格子が正しく読み取れる画像を撮影することが可能であれば、一度の撮影によって面計測が可能である。この高精度アンテナシステムの適応例として、気球 VLBI 地上局アンテナ^[6]を対象として研究を進めてきた。そして、気球 VLBI 地上局アンテナにおいて、スマート副鏡や計測システムなどの全てのシステムを統合した高精度アンテナシステム統合性能試験を実施した。本稿では、その試験における主鏡形状計測に関する試験結果を中心に報告する。

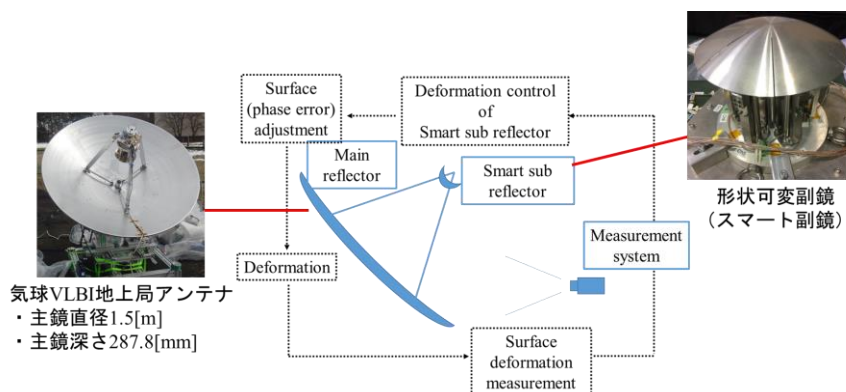


Fig.1-1 High Accuracy Antenna System^{[4][6]}

2. 計測手法

本計測試験では2種類の二次元格子計測手法を用いた。1つ目は、二次元格子2カメラ法、もう1つは、二次元格子1カメラ法である。2つの計測手法の計測原理図を Fig.2-1 に示す。Fig.2-1 からわかるように、どちらの計測手法も計測対象とは別に、基準となる面(基準面)を2面撮影する必要がある。また、計測対象物表面の計測したい領域に、二次元格子を投影、描画または貼付する必要がある。本試験では計測対象物である変形前のアンテナ主鏡自身を基準面として用いており、布シールに印刷した二次元格子を主鏡表面に貼付した。本稿では、本計測の計測結果は基準面1からの変位を表す。このため、計測対象物に対して一度の撮影で補正元となる変形前の主鏡形状からの相対変位が計測可能である。以下、二次元格子1カメラ法の計測原理を説明する。二次元格子2カメラ法の計測原理は、参考文献[5][7]を参照されたい。

二次元格子1カメラ法は、カメラの各画素に対して、基準面間の二次元格子の位相差 $\Delta\phi_{Ref}$ および計測対象と基準面1の間における二次元格子の位相差 $\Delta\phi$ の比と、任意に指定する基準面間距離 Z_{Ref} と求めたい変位 ΔZ の比とから変位を算出する。 Z 方向変位 $\Delta Z_X, \Delta Z_Y$ は

$$\Delta Z_X = \frac{\Delta\phi_X}{\Delta\phi_{RefX}} Z_{Ref} \quad (2-1)$$

$$\Delta Z_Y = \frac{\Delta\phi_Y}{\Delta\phi_{RefY}} Z_{Ref} \quad (2-2)$$

と表される。ここで、 X, Y に区別した理由は、それぞれ二次元格子の X 方向、 Y 方向のみの位相値を用いて計算しているためである。つまり、式(2-1)および式(2-2)は一方の位相値を用いた変位算出式となる。この2式に対して、基準面間の X, Y 方向の位相差 $\Delta\phi_{RefX}, \Delta\phi_{RefY}$ を重み付き平均の重みとして扱うことで、変位 ΔZ_{Weight} を

$$\Delta Z_{Weight} = \frac{\Delta\phi_{RefX}\Delta Z_X + \Delta\phi_{RefY}\Delta Z_Y}{\Delta\phi_{RefX} + \Delta\phi_{RefY}} \quad (2-3)$$

と算出することができる。本稿で示す二次元格子1カメラ法の計測結果は、式(2-3)で算出した重み付けした変位である。二次元格子1カメラ法の特徴として、現在使用している計測プログラムにおいて、二次元格子2カメラ法よりも結果算出が速い。このため、より短時間で計測結果の算出を求められる際には有効である。

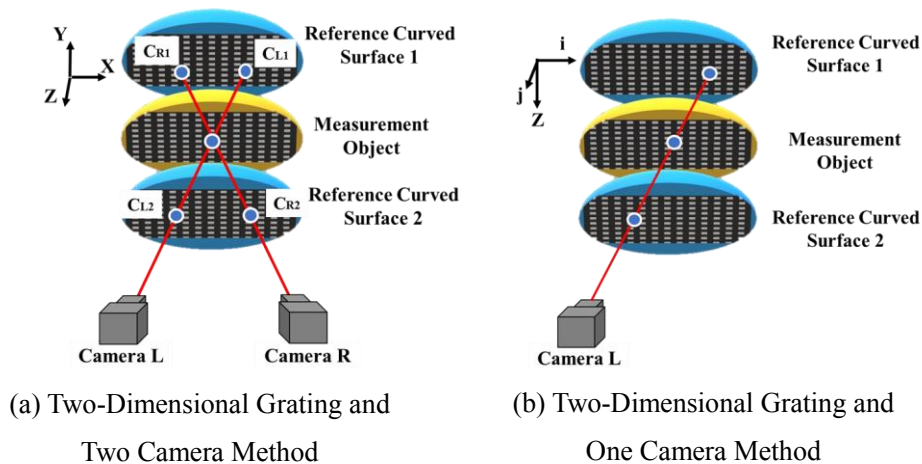


Fig.2-1 Principle of Measurement Method

3. 試験内容

計測対象は、気球 VLBI 地上局アンテナであり、Fig.3-1 に示すように、副鏡が太陽光の集光による熱の影響を受けづらい夜間かつ、静止衛星からの電波を受信するために野外で試験を行う。アンテナ計測装置をアンテナ土台に取り付け、LED ライトで鏡面を照らすことで、アンテナ主鏡表面に貼付してある二次元格子を撮影する。変位計測に使用する機器を Table3-1 に示す。本試験では、スマート副鏡を駆動させ電波位相を補正することで、アンテナゲインが向上することを確認する。そのためには主鏡の変形をその場で計測し、計測結果をその場でスマート副鏡に渡す必要がある。現在の二次元格子 2 カメラ法はプログラムの都合上、変位計測の結果算出に多少時間がかかる。試験時に結果算出の時間が長くなると、大気の影響などによってアンテナゲインに変動が生じてしまい、スマート副鏡の効果を正しく評価できない可能性がある。そこで、現状のプログラムにおいて、二次元格子 2 カメラ法よりも変位の結果算出が速い、二次元格子 1 カメラ法を用いて主鏡の変位計測を行い、その結果をスマート副鏡に渡すことにした。二次元格子 2 カメラ法でも主鏡の計測は行うが、試験時にリアルタイムで計測結果をスマート副鏡に対して使用していない。計測領域を Fig.3-2 に示す。本試験では、主鏡全体の 13 領域に二次元格子を貼付している。スマート副鏡駆動のために渡す変位データは、13 領域のうち A, B, D, F, H, J, K の 7 領域である。計測系の配置を Fig.3-3 に示し、試験の流れを Fig.3-4 に示す。基準面間の距離は 2.000[mm]として、変位計測は中間の 1.000[mm]地点で行う。本試験では、アンテナ光軸は電波源である IPSTAR 衛星の高度から仰角 41.5[deg]としており、計測空間の Z 軸方向を定義するスライダ移動軸はアンテナ光軸方向から 3.5[deg]傾いている。初期形状を計測し、その後 44.2[N] (4.5[kg])をアンテナ主鏡に载荷する。アンテナ主鏡に荷重载荷時の変形量をスマート副鏡に渡す。この結果を元にスマート副鏡の変形量を定め⁸⁾、スマート副鏡を駆動させる。スマート副鏡はノミナル状態から±0.5[mm]の変形が可能である。スマート副鏡駆動中と駆動前後のアンテナ受信電波強度を計測することで、スマート副鏡の効果を確認する。試験時に撮影した各カメラの画像を Fig.3-5 に示す。主鏡正面から LED ライトを照射しているため、A 領域ではステイによる影が生じている。また、全ての計測領域に貼付している直交二次元格子は同一であるが、カメラからの距離やアンテナ曲面の影響から、1 台のカメラ内および 2 台のカメラ間において見え方が大きく異なることがわかる。

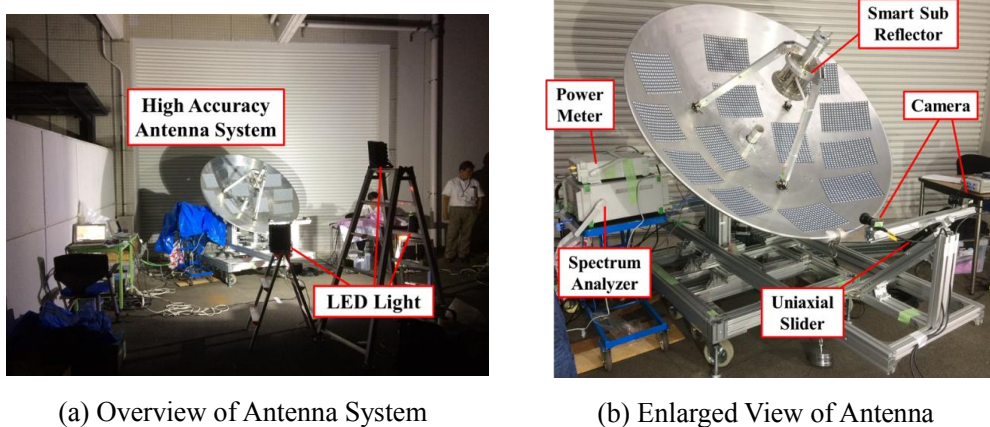


Fig.3-1 Antenna System

Table3-1 Measuring Instrument

Measuring method	Two-dimensional grating and two camera method
Measuring system	Analyzer-I (by Fujigaki)
Camera	iDS, UI-3880CP-M-GL Rev.2 ×2 resolution 3088×2076 [pixel] 6.41 [Mpixel]
Uniaxial slider	SIGMAKOKI, TAMC-10161
	migration length ±35 [mm]
	straightness 2 [μm] repetitive positioning accuracy 15 [μm]

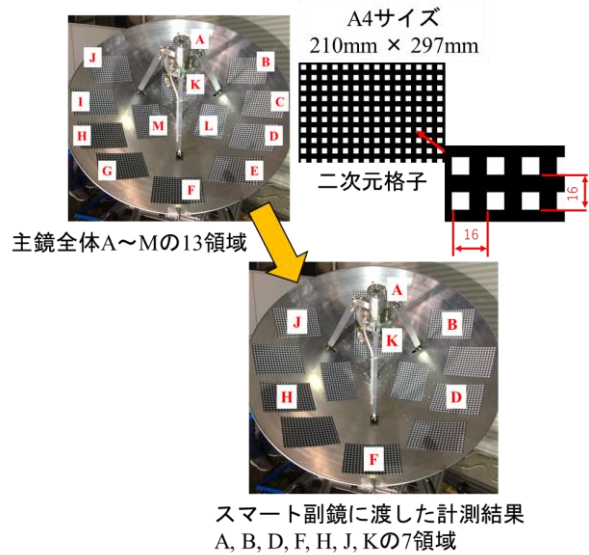


Fig.3-2 Measurement Areas

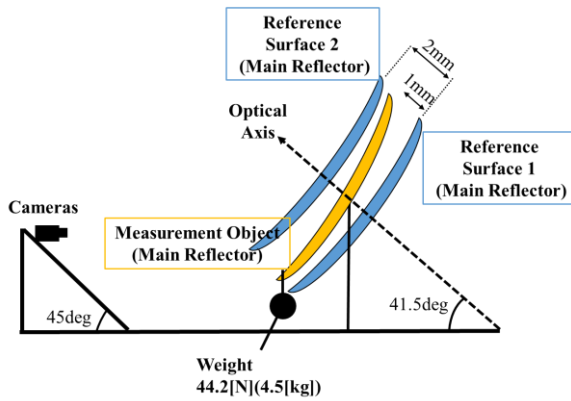


Fig.3-3 Measurement System Layout

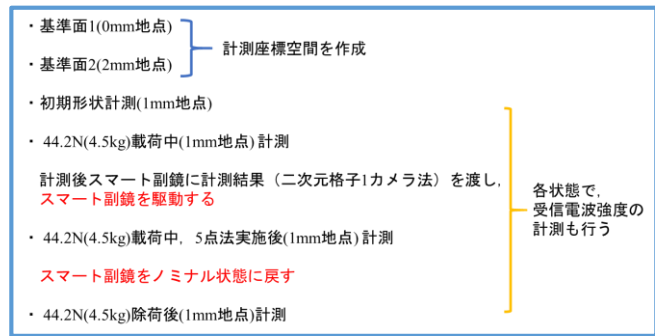
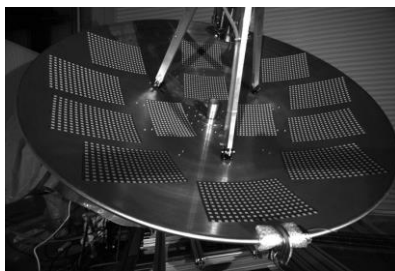
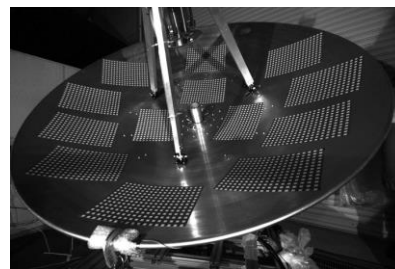


Fig.3-4 Measurement Flow



(a) Left Camera's Sight



(b) Right Camera's Sight

Fig.3-5 Taken Image

4. 試験結果

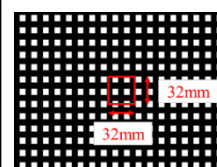
まず、意図的に主鏡を变形させる前の变形計測結果を示す。Table4-1 に各計測領域の中心部 32×32mm (格子 2 ピッチ分) に相当する領域の計測値を平均化した変位量および標準偏差を示す。変位量の計測値は、理想的にはすべての領域において一様に 1.000[mm]となる。平均値を見ると、両計測手法、かつ、全計測領域において非常に 1.000[mm]に近い値を計測していることが確認できる。各計測領域の誤差の平均を求めると、二次元格子 2 カメラ法で 1.281[%]、二次元格子 1 カメラ法で 0.523[%]と

なった。本計測試験において使用した計測機器において主要な誤差要因となる機器は、一軸スライダである。一軸スライダの位置決めに関わる誤差は、カタログ値から 15[μm]である。このスライダ位置決め誤差と計測結果から算出した誤差を比較すると、計測結果の誤差は一軸スライダの誤差と同程度あるいはそれ以下であり、この計測は十分に高精度で計測していると判断できる。また、標準偏差を見ても計測値のばらつきが小さいことが確認できる。二次元格子 1 カメラ法における A 領域の標準偏差が他領域に比べ極端に大きくなっている。この理由は、A 領域は副鏡を支える 3 本のステイに LED ライトが当たり、A 領域中央部に影が発生しているためだと考える。影が発生していることにより、位相解析時に誤差が大きくなってしまった。二次元格子 2 カメラ法においても同様の条件で計測しているが、2 カメラ法の結果に対しては、孤立点の除去を行っているため、極端な外れ値は除去している。二次元格子 1 カメラ法に対しても同様の処理を行いたいが、ソフトウェア上の問題から処理を行えていない。しかしながら、以上の結果より、この 2 種類の計測手法による計測結果に有意差がないことが示された。

Table4-1 Measurement Results of Initial State (1mm Position)

二次元格子の位置 格子上の名前	2カメラ法			1カメラ法		
	初期形状 (1mm地点) [mm]	誤差[%]	標準偏差 [mm _{RMS}]	初期形状 (1mm地点) [mm]	誤差[%]	標準偏差 [mm _{RMS}]
A	1.017	1.701	0.078	1.022	2.169	2.631
B	1.013	1.281	0.068	1.004	0.359	0.034
D	1.002	0.213	0.093	0.991	-0.902	0.022
F	1.008	0.805	0.096	1.002	0.249	0.060
H	1.016	1.639	0.092	1.005	0.481	0.026
J	1.030	3.043	0.066	1.007	0.745	0.019
K	1.003	0.287	0.080	1.006	0.560	0.031
標準偏差 [mm _{RMS}]	0.009	-	-	0.008	-	-

誤差の平均[%]	1.281	誤差の平均[%]	0.523
----------	-------	----------	-------



続いて、アンテナ主鏡に荷重を載荷した際の変形計測結果を示す。Table4-2 に各計測領域の中心部 32×32[mm]に相当する領域の平均値をまとめた。Table4-1 において示した初期形状計測結果の平均値と 44.2[N]載荷時の計測結果を示している。載荷中の結果において () 内に表示している値は、初期形状からの変位を示している。二次元格子 2 カメラ法において主鏡の左右対称位置である B と J 領域のペア、D と H 領域のペア間での変位量の対応は取れていることが確認できる。一方で、二次元格子 1 カメラ法で計測した B と J 領域のペア、D と H 領域のペア間では 100[μm]程度の誤差が生じている。しかしながら、初期形状においては主鏡左右対称位置の計測領域間での差異は見受けられないため、平均値を算出するための計測結果内に外れ値が存在していることや、2 つの計測手法の計測結果をまったく同一の領域で評価できていないため、平均を求めるための領域のズレによって変位の値が変化していることが考えられる。

高精度アンテナシステムの統合性能試験として、スマート副鏡による電波補正効果を検証する。スマート副鏡に渡すための計測結果は、二次元格子 1 カメラ法で計測した変位である。Table4-3 にアンテナが受信した電波強度を示す。アンテナ主鏡に荷重を載荷した状態から、載荷状態のままスマート副鏡を駆動させると、受信強度の向上を確認した。このときのスマート副鏡の変位量は 6 枚の鏡面全て

が最大変位量である±0.5[mm]のどちらかの状態になっていた。 載荷状態のままスマート副鏡を駆動させた状態から、スマート副鏡をノミナル状態に戻すと、受信強度の低下を確認した。 スマート副鏡を作動させることで、ゲインを0.100[dBm]程度向上することができた。 本試験でのゲイン向上の程度が小さいとも判断できるが、スマート副鏡のストローク量の制限と、主鏡の変形モードに原因がある。 スマート副鏡のストローク量に関しては、本試験で用いたスマート副鏡のストローク量が±0.5[mm]であり、本試験での主鏡の変形が大きいためスマート副鏡で完全に補正することができなかった。 載荷荷重を小さくすると主鏡の変形量は小さくなるが、この場合はゲインの評価時に有意な差が現れない可能性があったため、本試験では非線形的な変位が現れない程度にあえて荷重を大きくしている。 主鏡の変形モードに関しては、スマート副鏡が本試験のようにアンテナ主鏡の下部に荷重を載荷した際に現れる変形モードに合わせて設計されていないということである。 実際にアンテナを使用している際に、主鏡上のある一点に荷重が与えられることはないため、本試験のような変形モードには完全に対応できなかった。 しかしながら、スマート副鏡を駆動させることでゲインが向上することは確認できたため、高精度アンテナシステムとして成立することが検証できた。

Table4-2 Measurement Results of During Loading (1mm Position)

二次元格子2カメラ法

二次元格子の位置 格子上的名前	計測された変位量	
	基準形状 (1mm地点) [mm]	44.2N載荷中 [mm]
A	1.017	0.887 (-0.130)
B	1.013	1.284 (0.271)
D	1.002	1.314 (0.312)
F	1.008	0.129 (-0.879)
H	1.016	1.330 (0.313)
J	1.030	1.309 (0.279)
K	1.003	1.010 (0.007)
標準偏差[mm _{RMS}]	0.009	0.405

二次元格子1カメラ法

二次元格子の位置 計測領域	計測された変位量	
	初期形状 (1mm地点) [mm]	44.2N載荷中 [mm]
A	1.022	0.958 (-0.064)
B	1.004	1.134 (0.130)
D	0.991	1.157 (0.166)
F	1.002	-0.164 (-1.166)
H	1.005	1.366 (0.361)
J	1.007	1.266 (0.259)
K	1.006	0.968 (-0.038)
標準偏差[mm _{RMS}]	0.008	0.477

Table4-3 Reception Radio Wave Intensity

計測状態	受信電波強度 [dBm]
荷重	-37.857
荷重+ スマート副鏡作動	-37.742
荷重	-37.829
無負荷3	-37.576

0.115[dBm]
向上

0.087[dBm]
低下

5. まとめ

高精度アンテナシステムの適用例として研究を進めてきた気球 VLBI 地上局アンテナに対して、スマート副鏡や計測システムなどの全てのシステムを統合した高精度アンテナシステム統合性能試験を実施した。主鏡の相対変位量の計測においては、二次元格子 2 カメラ法と二次元格子 1 カメラ法の 2 種類の計測手法を用いて計測を行った。この 2 種類の計測手法に有意差がないことを主鏡の初期形状の形状計測において確認した。主鏡に荷重を載荷して変形させた状態の変形計測では、2 種類の計測手法で計測した変形モードは同様のモードであり、変位量も概ね一致していた。スマート副鏡にフィードバックするための変位量は、計測結果の算出が速い二次元格子 1 カメラ法の計測結果として、試験時にその場で計測し結果をスマート副鏡に渡した。この変位量をもとにスマート副鏡を駆動させ主鏡の電波位相の補正を行い、ゲインの向上を確認した。本試験結果から、高精度アンテナシステムが成立することを確認し、高精度アンテナシステム構築に必須である計測技術に二次元格子を用いた計測手法が適していることを示した。

参考文献

- [1] 石村康生, 後藤健, 田中宏明, 高精度大型宇宙構造システムの研究開発メンバー: 高精度大型宇宙構造システムとその基盤技術-2019 年度-, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2G11, (2019).
- [2] 後藤健, 米山聡, 井上遼, 向後保雄, 小林訓史: 熱サイクルによる CFRP の熱機械特性の変動とその支配要因, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3J07, (2018).
- [3] 後藤良太, 小野ゆかり, 稲垣直寛, 石村康生, 河野太郎, 馬場満久: 伸展マストの部材温度制御によるアライメントポインティング制御, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2G15, (2019).
- [4] 田中宏明: 圧電アクチュエータと合焦点機構による反射鏡アンテナの行路誤差制御, 日本機械学会論文集, 82 巻 835 号, (2016).
- [5] 志茂公亮, 藤垣元治, 梶谷明大, 森本吉春: サンプリングモアレ法を用いた三次元形状・ひずみ分布の動的計測手法の精度評価, 日本実験力学学会講演論文集 No.10, (2010).
- [6] 土居明広, 河野祐介, 木村公洋, 他: 気球 VLBI 実験: 2017 年の実験の報告と実験再提案, 平成 29 年度大気球シンポジウム, 神奈川, (2017).
- [7] Kenji Yamazaki, Ken Higuchi, Nobuhisa Katsumata, Takashi Iwasa, Naoko Kishimoto, Motoharu Fujigaki: Deformation Measurement and the Analysis of Main Reflector for High Structural Accuracy System, 32nd ISTS, c-42, (2019).
- [8] 坂野文香, 小木曾望, 田中宏明, 樋口健, 勝又暢久, 山崎健次, 岩佐貴史, 岸本直子, 藤垣元治, 土居明広, 中原聡美, 長谷川豊, 河野祐介: スマート副鏡のアクチュエータ入力最適化のカセグレンアンテナ実験による検証, 第 28 回スペース・エンジニア・コンファレンス[SEC'19]講演論文集, B04, (2019).