

B21 高精度アンテナシステム構築のための主鏡変形計測

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)

Kenji Yamazaki (Muroran I.T.), Ken Higuchi, Nobuhisa Katsumata (Muroran I.T.),
Takashi Iwasa (Tottori Univ.), Naoko Kishimoto (Setsunan Univ.), Motoharu Fujigaki (Univ. of Fukui)

1. 研究背景と目的

現在, 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。その中で, 高精度 2 次元構造物においては, 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にアンテナゲインの低下を防ぐため, 高精度スマート形状可変副鏡^[1] (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。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る。主鏡の変形を計測するために, 広範囲を一度に面計測可能である二次元格子を用いた 2 カメラ計測手法^[2]を用いることを計画している。高精度アンテナシステムの適用例として, 気球 VLBI アンテナシステム^[3]を想定する。気球 VLBI アンテナシステムは, 気球によって成層圏まで観測系を打ち上げ, 成層圏と地上で天文観測を行うプロジェクトである。観測等に使用する電波は, サブミリ波帯を目標としており, この時必要となる鏡面精度は数十 $[\mu\text{m}_{\text{RMS}}]$ 程度となる。

本稿では, 気球 VLBI 地上局パラボラアンテナ主鏡を計測対象として, 二次元格子を用いた 2 カメラ計測手法と, フォトグラメトリとの 2 種類の計測手法を用いて実施した表面形状計測試験を報告する。

2. 計測手法

本計測試験では 2 種類の計測手法を用いて計測を実施した。1 つ目は, 高精度アンテナシステムに組み込むことを想定している計測手法である二次元格子を用いた 2 カメラ計測手法である。この手法は二次元格子が投影, 描画または貼付されている領域の面計測が可能である。計測においては, 基準面と呼ばれる面を 2 面撮影し, その間に空間座標系を作成することで, 計測対象物の表面の 3 次元座標を求める。計測結果は, 基準面からの変位を表すため, 計測対象物に対して一度の撮影で補正元となる基準曲面形状からの相対変位が計測可能である。本計測試験では, アンテナ主鏡表面に二次元格子を貼付して基準面および計測対象として計測を行った。

2 つ目の計測手法は, フォトグラメトリである。この手法は, ターゲットマーカを貼付した点の 3 次元座標を計測する手法であり, あらかじめ基準として設定したクロスバー上の点から座標系を作成して 3 次元座標値を求める。座標値取得のために, 異方向から多数枚の画像を撮影する必要がある。

3. 計測試験概要

本計測試験で計測対象とした直径 1.5[m] の気球 VLBI 地上局アンテナ主鏡とその計測装置を Fig.1 に示す。計測装置は, 二次元格子を用いた計測のためのものであり, 既存の経度方向アンテナ支持構造土台部の上に取り付けている。アンテナ主鏡は光軸が仰角 45[deg] となるように経度方向を設置し, 2 種類の計測手法で主鏡の光軸方向の相対

変位を計測する。二次元格子を用いた計測手法では、直接光軸方向の相対変位を計測可能であるが、フォトグラメトリは絶対座標系での座標値を求め、その値を光軸方向の変位に変換することが必要である。使用する計測機器を Table1 に示す。二次元格子を用いた計測手法で使用するカメラは解像度が 3088[pixel]×2076[pixel]であり、2カメラ法であるのでこれを2台使用する。フォトグラメトリでは解像度 5184[pixel]×3456[pixel]のカメラを1台使用する。計測する領域を Fig.2 に示す。二次元格子を用いた計測では、A~I の計9領域を計測する。各領域は A4 サイズのコットン布シールに1ピッチ 16[mm] (白 8[mm], 黒 8[mm]) の二次元格子を印刷してある。A および B 領域は副鏡支持構造により格子の一部が見えなくなるため、あらかじめ A4 より狭い領域の計測としている。また、G 領域はφ162[mm]の円形領域の計測である。一方フォトグラメトリは、ターゲットマーカを貼付した計 78 点を計測する。Fig.3 に計測の流れを示す。最初に二次元格子を用いた計測に必要な基準面と呼ばれる面を2面撮影する。2つの基準面間の距離は2[mm]とした。その後、各計測手法において、初期状態の主鏡を計測、次に荷重状態の計測、最後に荷重除荷後の計測を行う。初期状態、荷重状態時および除荷後の計測は、基準面の中間地点である 1[mm]地点で行う。荷重状態時および変位の正負を Fig.4 に示す。主鏡最下部に S 字フックを介して重りをつるしてあり、荷重は計 7.12[kg]である。

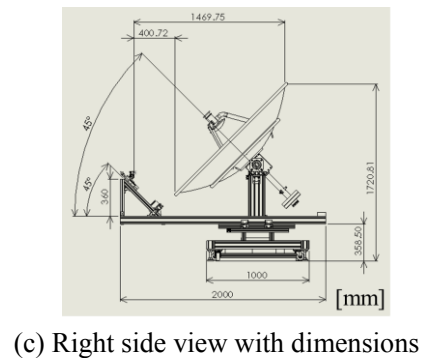
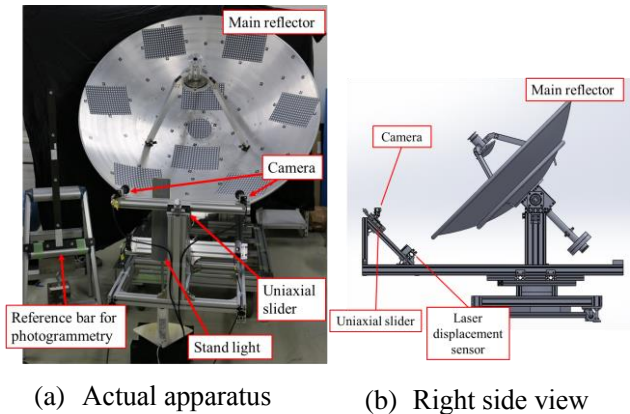


Fig.1 Measurement apparatus

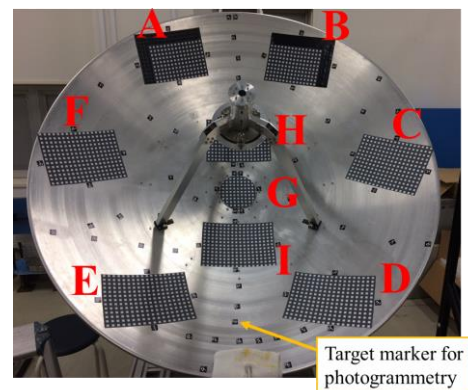


Fig.2 Measurement areas

Table1 Measurement instrument

measuring method	two-dimensional grating and two camera method	photogrammetry
measuring system	Analyzer-I	scan reference
camera	iDS, UI-3880CP-M-GL Rev.2 resolution 3088×2076 [pixel] 6.41 [Mpixel]	Canon EOS 1300D resolution 5184×3456 [pixel] 18 [Mpixel]
	SIGMAKOKI, TAMC-10161 migration length ±35 [mm] straightness 2[μm]	

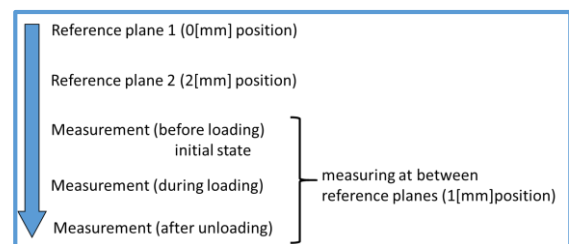


Fig.3 Measurement flow

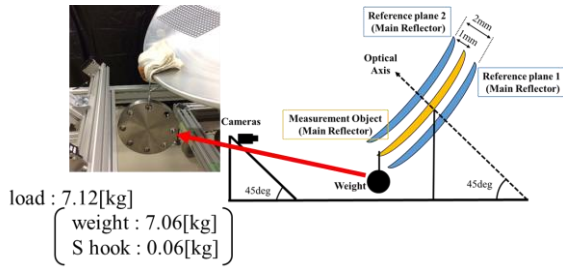


Fig.4 Load testing method

4. 計測結果

Fig.5 に荷重載荷時における初期状態からの光軸方向相対変位を示す。面で示している箇所が二次元格子を用いた計測の結果であり、その周りの点がフォトグラメトリの計測結果である。フォトグラメトリの計測結果は点であるが、見やすくするため表示上拡大している。両者の計測結果共に2.000[mm]~-3.000[mm]の範囲を色を付けて表示している。結果が示す正の値は、光軸に沿って手前に変位していることを示し、負の値は光軸に沿って奥側に変位していることを示す。また、Fig.6 に二次元格子各領域の計測結果のヒストグラムを示す。横軸は相対変位[mm]を示し、縦軸は計測点数を示している。2つの計測手法における計測結果は概ね一致している。主鏡上部のA、BおよびHは正方向に変位しており、中段のC、Fは大きく正方向に変位している。中心のGは変位がほとんど生じていない。下段のD、EおよびIは、荷重を載荷した位置の周辺であることから負の方向に変位している。2つの計測手法とも主鏡の左右で同様の変形モードが計測されていることから、両計測手法間の整合性が取れていると判断する。

続いて Fig.7 に荷重除荷後における初期状態からの光軸方向相対変位を示す。この計測結果は、理想的には0.000[mm]となる。ここでは、0.200[mm]~-0.500[mm]の範囲を色を付けて表示している。結果が示す正の値は、手前に変位していることを示し、負の値は奥側に変位していることを示す。また、Fig.8 に二次元格子を用いた計測

結果のヒストグラムを示す。結果を確認すると、2つの計測手法において変位量の大きさがやや異なっていることが確認できる。フォトグラメトリの結果を見るとCが手前に変位し、Fが奥側に変位していることが確認できる。二次元格子を用いた計測結果のヒストグラムを見ると、フォトグラメトリと同様にCが手前にFは奥に変位していることを確認できるが、フォトグラメトリほど顕著な変位量は現れていない。しかしながら、両計測手法においてアンテナ主鏡が初期状態からわずかながらヨー回転していることが計測されている。また、二次元格子を用いた計測手法においては、AおよびBは手前に変位しており、DおよびEが奥に変位している結果を示している。ここから、アンテナ主鏡がわずかながらピッチ回転したと判断できる。荷重除荷後の初期状態からの相対変位は、荷重載荷による影響によって主鏡に予期しない剛体回転が生じ、本来0[mm]となるはずの計測値からズレを持つ値を計測している。

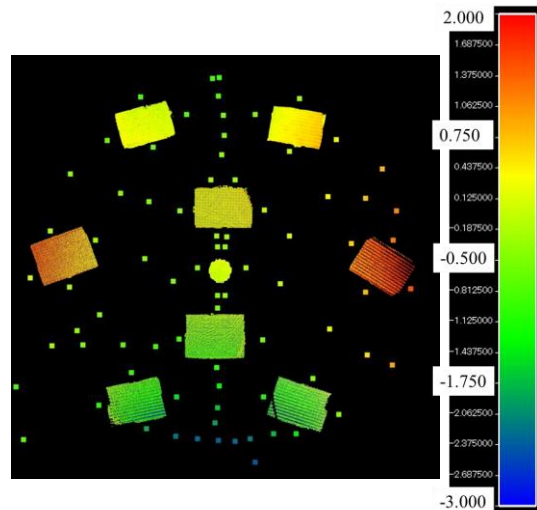


Fig.5 Measurement result (during loading)

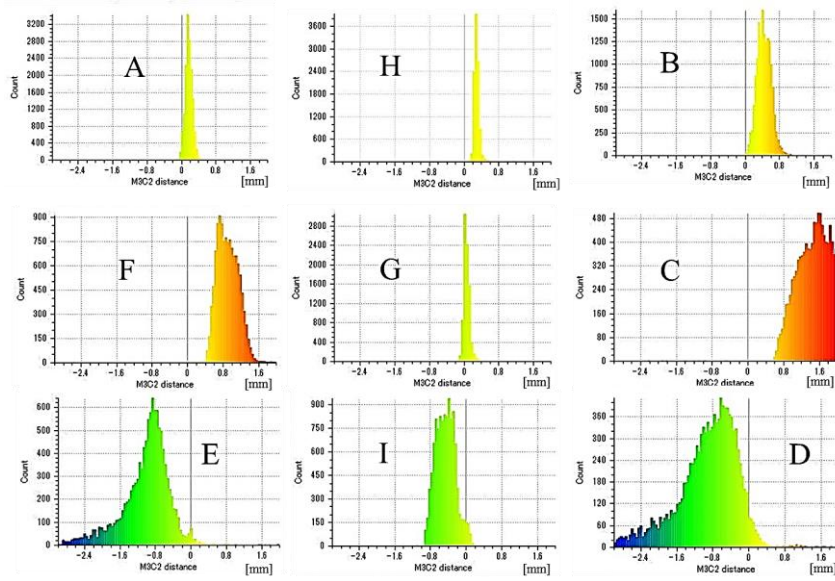


Fig.6 Histogram of measurement result (during loading)

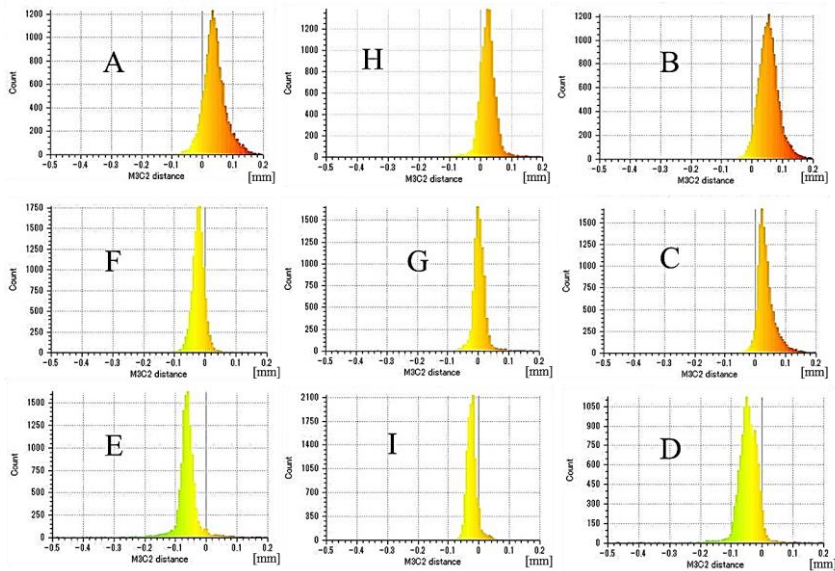


Fig.8 Histogram of measurement result (after unloading)

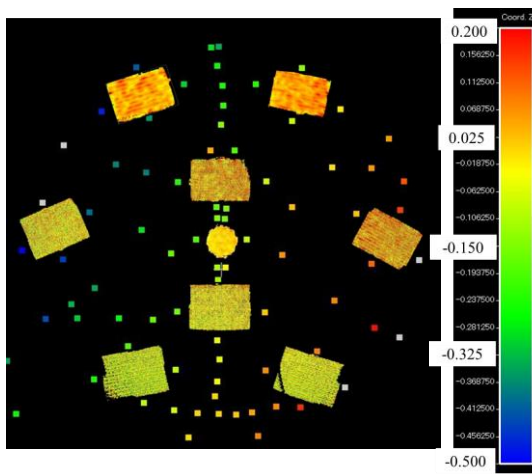


Fig.7 Measurement result (after unloading)

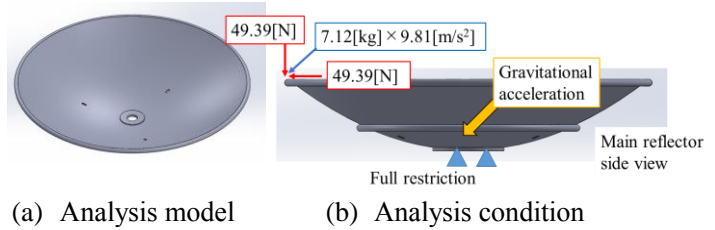


Fig.9 Static analysis

ここで、主鏡に荷重を载荷した際の変形モードを確認するために、荷重载荷時のアンテナ主鏡変形形状を数値解析によって算出した。作成した解析モデルおよび解析条件を Fig.9 に示す。解析モデルはアンテナ主鏡のみとしており、材料はアルミ系としてヤング率 70[GPa]、ポアソン比 0.3、密度 $2.7 \times 10^{-6}[\text{kg}/\text{mm}^3]$ とした。解析条件は、静解析として主鏡の中心を完全拘束し、水平から 45[deg]傾いた方向から計測時に载荷した荷重値を負荷する。さらに、主鏡に重力加速度を与える。これによりアンテナ光軸が仰角 45[deg]傾いた状態を再現している。解析結果を Fig.10 に示す。Fig.5 の計測結果と比較すると、荷重载荷位置が奥側に変位して、主鏡の左右が手前に大きく変位する、主鏡変形モードの整合性が取れていることがわかる。これより、荷重载荷時の計測結果は妥当であると判断できる。しかし、解析結果の変位量は計測結果のおよそ 1/10 倍となっており、現状では大きな差異が生じている。変位量不一致の原因として、解析における拘束条件が過拘束となっていると考えられる。例えば、本解析では主鏡の中心を完全拘束しているが、これによって主鏡の剛体回転による変位が加味されていない。

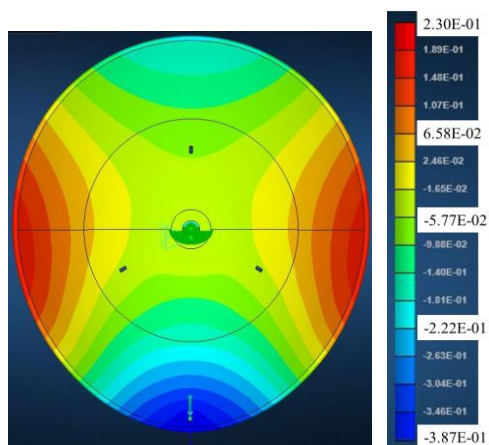


Fig.10 Result of static analysis

5. まとめ

直径 1.5[m]の気球 VLBI 地上局アンテナ主鏡に対して 2つの計測手法による計測試験を行い、結果の比較を行った。結果として、二次元格子を用いた計測手法とフォトグラメトリの計測結果は、概ね一致した。さらに、荷重除荷後の計測においては、予期せぬ剛体回転を含めた 100[μm]レベルの微小な変位を高精度に計測することができた。これより、一度の撮影で主鏡全体の相対変位を計測することが可能な、二次元格子を用いた計測手法の有用性を示すことができた。また、アンテナ主鏡の静解析を行い計測結果と解析の間で、荷重载荷時の変形モードの整合性が取れていることを確認した。これにより、計測結果が妥当であることを示すことができた。

謝辞

本研究は、JAXA/ISAS 平成 30 年度戦略的開発研究費「高性能科学観測にむけた高精度構造・材料の研究開発」のサブテーマ「スマート形状可変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の開発・実証」、および、科学研究費助成事業 平成 27~29 年度基礎研究 (C)「計測対象の大きさによらない高精度動的表面形状計測法」(課題番号 15K06594) の支援で行われた。

参考文献

- [1] 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, (2016).
- [2] 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).
- [3] 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).