

## B11 アンテナ反射鏡の変形計測手法と装置設計

山崎健次 (室蘭工大・学), 樋口健 (室蘭工大), 勝又暢久 (室蘭工大),  
岸本直子 (摂南大), 岩佐貴史 (鳥取大), 藤垣元治 (福井大)

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

### 1. 研究背景と目的

近年宇宙観測や宇宙利用のミッションの高度化が進んでおり、これに対応するために構造体の高精度化が要求されている。中でも、高度な電波天文観測や超長距離通信を実現するために、パラボラアンテナ鏡面形状の高精度化が必須である。そこで、スマート形状可変鏡と高精度変形システムを統合した高精度アンテナシステムの開発と実証の研究を進めている。高精度アンテナシステムとは、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（スマート副鏡）を用いて主鏡変形による電波の位相誤差を補正するシステムである。現在開発中のスマート副鏡は図 1.1 に示すように鏡面が 6 分割されており、各領域が変形可能である。しかし、スマート副鏡を用いて電波の位相誤差を補正するためにはアンテナ主鏡の高精度表面形状計測が必須である。そこで、本研究では高精度アンテナシステムの適用例として、成層圏において天文観測を行う気球 VLBI ミッションにおける地上局アンテナの表面形状を計測することを計画している。

気球 VLBI ミッションの概念図を図 1.2 に示す。気球を使用して観測系を成層圏まで打ち上げ、電波天文観測を行う。観測時の電波はサブミリ〜テラヘルツ帯の使用を目標としており、この場合に必要なアンテナ鏡面精度は数十[ $\mu\text{m}$ ]程度である。本研究において計測対象とする  $\phi 1.5[\text{m}]$  地上局パラボラアンテナを図 1.3 に示す。本稿はアンテナ主鏡の計測装置の設計と、その設計に必要な予備実験について報告する。

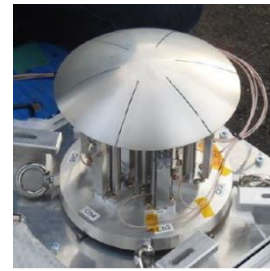


図 1.1 スマート副鏡試作モデル<sup>[1]</sup>

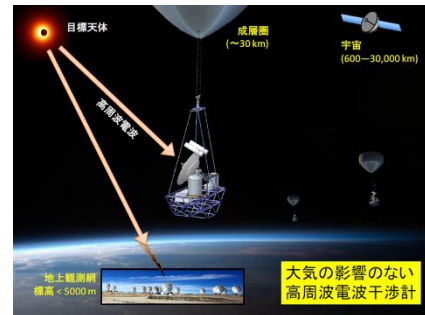
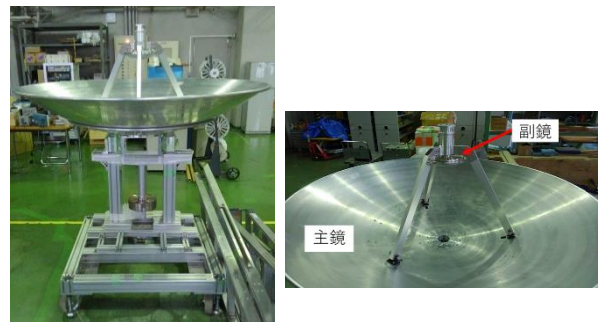


図 1.2 気球 VLBI 概念図<sup>[2]</sup>



(a) 全体 (b) 鏡面部拡大

図 1.3 地上局パラボラアンテナ

### 2. 計測手法

本研究ではアンテナ表面形状の変形量の計測に、計測対象に 2 次元格子を貼付した 2 カメラ法を用いる<sup>[3]</sup>。まず、2 次元格子を使用した 2 カメラ法による形状計測原理を図 2.1 に示す。計測手順は、まず、2

次元格子を表示した基準面を、図 2.1 の Z 軸方向の座標値が異なるように 2 面撮影し、その画像に対してサンプリングモアレ法を用いて位相解析を行う。サンプリングモアレ法では、カメラの各画素の位相を求めるために、撮影した 2 次元格子に対して任意の周期で間引きを行うことによりモアレ縞を作成し、モアレ縞と輝度値を使用して位相を求める。これにより基準面間に 3 次元空間座標を形成し、各カメラの視線式を算出する。次に、2 次元格子を表示した計測対象物を撮影し同様に位相解析を行うと、計測対象物表面の座標値が 2 つの視線式の交点として求められ、表面形状の計測が可能となる。ここにおいて、基準面に計測対象物自身を用いることで、計測対象物の相対変位、すなわち変形量を計測することが可能となる。本計測手法は 2 次元格子を表示した範囲に対して計測が可能である。左右カメラの画像の対応と基準面 2 面と計測対象物の画像の対応をとるために、対応点と呼ばれる点を設定している。対応点は画像処理の原点となり、任意の位置に設定することができる。

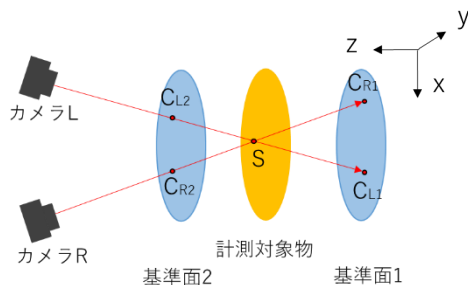


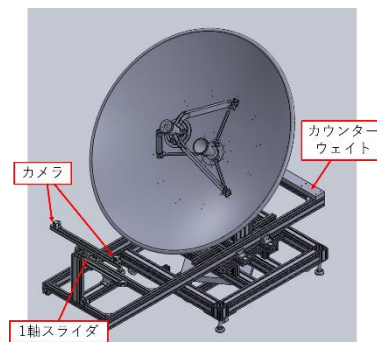
図 2.1 計測原理概要

### 3. 設計した計測装置

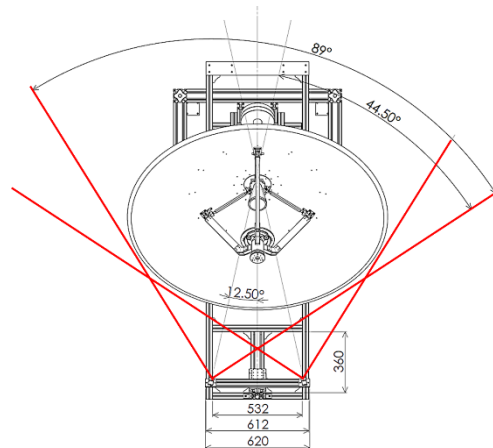
φ1.5[m]気球 VLBI 地上局パラボラアンテナ主鏡を計測するための計測装置を設計する上での設計要件は 3 点あり、

- ・現在のパラボラアンテナ回転台座の上部に計測系が組み立つこと。
- ・45[deg]の仰角を持つパラボラアンテナの光軸方向変位を計測可能であること。
- ・カメラ視野に鏡面全面が収まること。

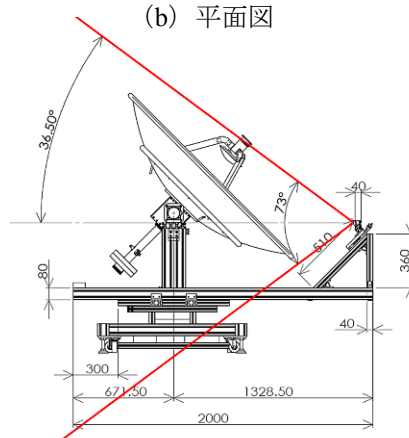
である。これらの要件を満たすように 3D CAD ソフト SOLIDWORKS を使用して設計した計測装置を図 3.1 に示す。搭載予定機器はカメラ 2 台、一軸スライダ 1 台とカウンターウェイトおよびフレームである。選定したレンズの画角は、図 3.1 (b) (c) に赤線で示すように、水平方向 89.0[deg]、垂直方向 73.8[deg] である。3D モデルに対しても、画角内に鏡面全面が収まることを確認した (図 3.2)。



(a) 立体図

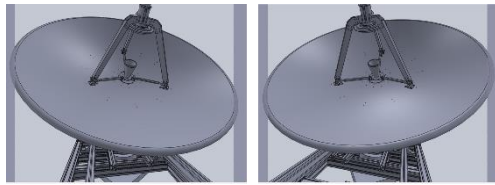


(b) 平面図



(c) 左側面図

図 3.1 設計した計測装置



(a) 左カメラの視野 (b) 右カメラの視野

図 3.2 3D CAD によるカメラ視野の確認

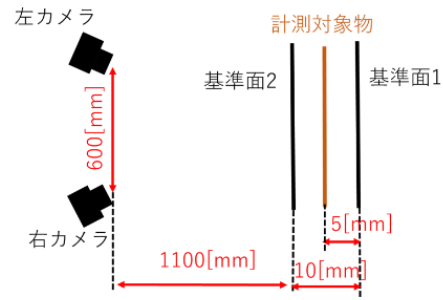


図 4.2 計測系配置図

#### 4. 予備実験

アンテナ主鏡計測装置を設計する上で事前確認が必要な以下の2項目に関して予備実験を行った。

##### 4.1 主鏡中心の円孔の存在を考慮した計測

アンテナ中心部付近の表面形状を計測することを考える。サンプリングモアレ法を使用して表面形状を計測する範囲に対しては、2次元格子を表示する必要がある。しかし、アンテナ主鏡の中心には図 1.3 に示すように円孔が存在する。円孔が存在する中心部付近に2次元格子を貼付または描画する場合、円孔部分で2次元格子が不連続となってしまう。そこで、2次元格子表示範囲内に円孔が存在する場合に計測可能であるか確認するための予備実験を行った。

本計測では、サンプリングモアレ法を用いた相対変位計測を行う(図 4.1)。計測対象物は A4 サイズの布シールに格子を印刷して貼付した平板であり、中心部は格子が円形(φ80[mm])に存在していない。計測条件を表 4.1 に示し、計測系の配置図を図 4.2 に示す。

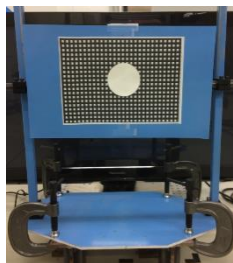
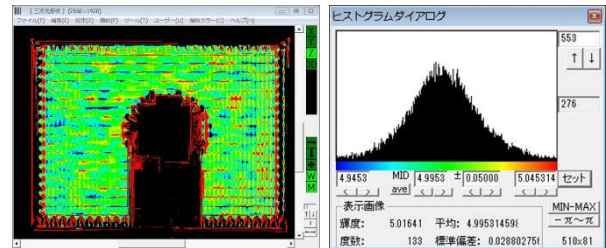


図 4.1 計測対象  
(中心部を白色円形で隠す)

表 4.1 計測条件

カメラ	UI-3480CP-M-GL Rev.2 解像度 2560×1920
レンズ	FUJINON HF9HA-1B 画角 39.09×29.52 [deg]
貼付格子のピッチ	10×10[mm]
基準面1から計測対象までの距離	5[mm]
計測回数	2回

相対変位計測の結果の一例を図 4.3 に示す。図 4.3 (a) は計測された形状を示しており、図 4.3 (b) のヒストグラムで設定したレンジ内を着色して表示している。ここでは計測された平均平面位置に対して±50[μm]の範囲を着色して表示している。円孔下部は、計測されているがヒストグラムのレンジ外となっているため黒色表示となっている。計測平面位置が5[mm]となるように設定して計測を行い、カラー表示されている範囲の平均平面位置は4.995[mm]程度となっている。非平面度の平均値は0.025[mm<sub>RMS</sub>]程度であり、円孔の下部を除く領域で高精度計測が行えた。



(a) 計測形状 (b) ヒストグラム

図 4.3 計測結果 (中心部を白色円形で隠す)

円孔の全周囲高精度計測を目指して図 4.4 に示すように、格子が中心部では四角形に存在しない計測対象を使用して、再度表面形状計測を行った。計測条件、計測系配置は表 4.1、図 4.2 と同様である。計測結果の一例を図 4.5 に示す。中心部に円形に格子が存在しない場合の計測と同様に、計測された平均平面位置に対して±50[μm]の範囲を着色して表示している。格子が存在しない四角形領域の下部は、計測されているがヒストグラムのレンジ外であり、黒



色で表示されている。この結果から、格子が顕著に不連続になると、計測処理過程の格子読み取り時に誤差が生じ、本来とは異なる位相を用いて表面形状を算出するため、計測値は出力されるが精度は劣ることが確認できた。

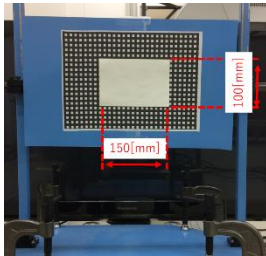


図 4.4 計測対象（中心部を白色四角形で隠す）

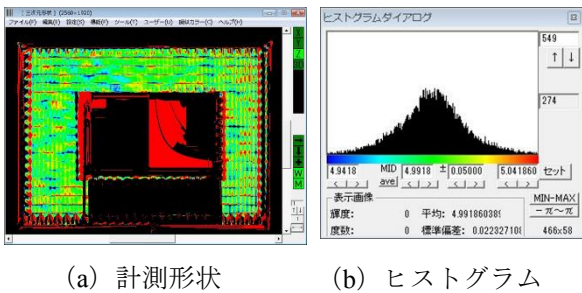


図 4.5 計測結果（中心部を白色四角形で隠す）

中心部の孔の全周囲を高精度計測するために、計測過程において設定する対応点の位置を調整する。対応点は画像処理の原点となる点であり、任意の位置に設定することが可能である。撮影した画像に対して対応点を設定するが、一度の計測過程（位相解析から計測形状算出まで）内では、対応点の位置は統一しなければならない。今回は1回の取得画像に対して対応点を2箇所を設定して解析を行った。

対応点の位置変化による計測形状の違いを図 4.6 に示す。図 4.6 (a), (c) に示す赤丸が対応点の位置である。孔の上部に対応点を設定すると(図 4.6(a)), 孔の下部の計測精度が低下する。反対に、孔の下部に対応点を設定すると(図 4.6 (c)), 孔の上部の計測精度が低下する。対応点の位置を2パターンに変化させることによって、孔の全周囲を計測することが可能となることがわかる。

対応点の位置を変化させた場合に、計測精度に影響がないか確認する。図 4.7 において、対応点を上部に設定した場合と下部に設定した場合の計測値の比較を行う。図 4.7 は対応点の位置を変化させ計測した計測結果に対して、それぞれの計測形状の孔を中心として上もしくは下、左、右の領域に分割した各領域の平面位置の平均値と非平面度の平均値を表でまとめている。対応点の位置が異なる2つの解析結果において共通領域である左と右の領域に関して比較を行うと、平面位置、非平面度の両者において最大 40[ $\mu\text{m}$ ]程度の差が見受けられるが、これは要求仕様上許容される誤差範囲内である。

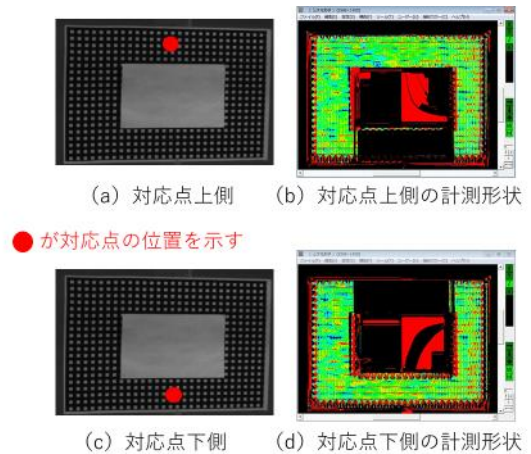


図 4.6 対応点の位置変化と計測形状の関係

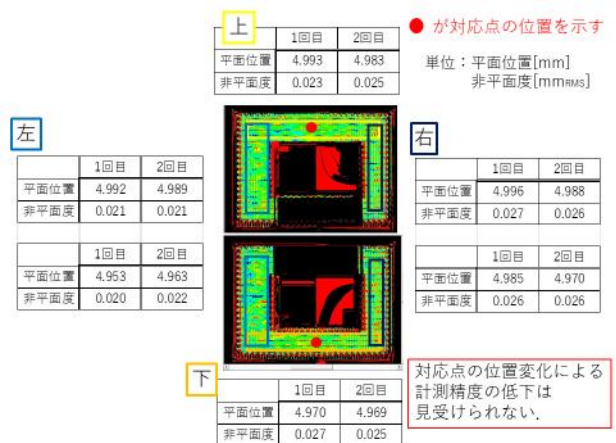


図 4.7 対応点の位置変化による計測精度の比較

以上より、円孔が存在するアンテナ主鏡中心部付近の計測を行うと、孔の周囲で一部計測結果が低下する領域が現れるが、対応点の位置を変化させることにより孔の全周囲を高精度に計測できることが分かった。

#### 4.2 カメラを仰角 45[deg]に設定した場合の計測

計測装置の設計要件として、45[deg]の仰角を持つパラボラアンテナの光軸方向相対変位を計測可能であることが求められている。光軸方向相対変位を計測するために、図 4.8 に示すようにアンテナ光軸とスライダ移動軸を一致させることを計画している。

2つの軸を一致させる位置関係において計測可能であるか確かめるために予備実験を行った。図 4.9(a) が設計した計測装置における計測状態を示している。これは、アンテナ光軸とスライダ移動軸が仰角 45[deg]の傾きを持っている。この状態を模擬した図 4.9(b) に示す計測状態で計測を行う。これは、アンテナ光軸とスライダ移動軸は水平に設置し、カメラに仰角 45[deg]を与える。これにより、模擬的に新たに設計した計測装置の状態を再現している。

サンプリングモアレ法を用いた相対変位計測の計測系配置を図 4.10 に示す。計測装置全体の外観を図 4.11(a) に示し、カメラ固定部分の拡大図を図 4.11(b) に示す。計測対象物はφ1.5[m]パラボラアンテナである。パラボラアンテナ上部に2次元格子を印刷したA4サイズの布シールを貼付してあり、計測領域はパラボラアンテナ上部である。計測条件を表 4.2 に示す。

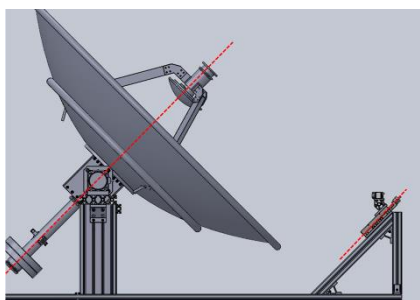
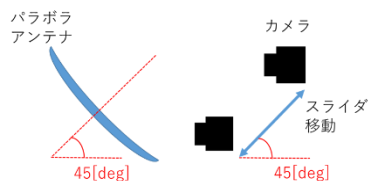
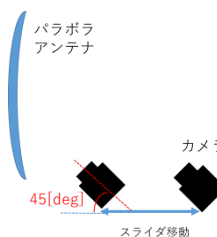


図 4.8 アンテナ光軸とスライダ移動軸



(a) 設計した計測装置の計測状態



(b) 予備実験の計測状態

図 4.9 計測状態

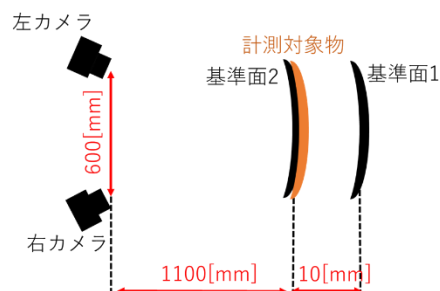
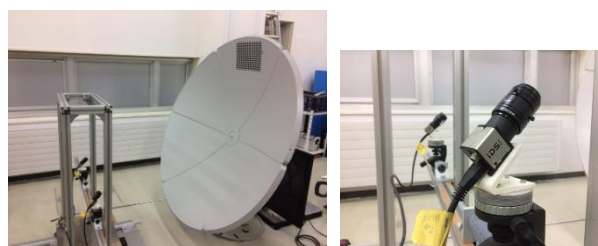


図 4.10 計測系配置



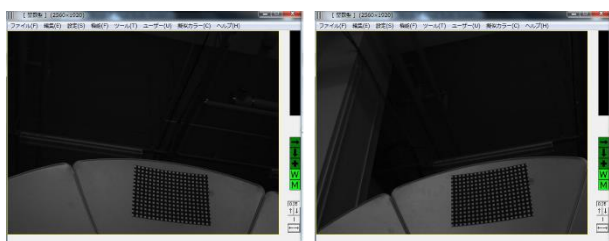
(a) 計測系全体 (b) カメラ固定部

図 4.11 予備実験計測装置

表 4.2 計測条件

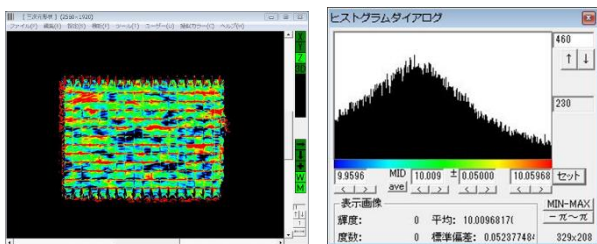
カメラ	UI-3480CP-M-GL Rev.2 解像度 2560×1920
レンズ	KOWA LM8JC1MS 画角 42.6×32.5 [deg]
格子ピッチ	16×16 [mm]
基準面1から計測対象までの距離	10[mm]
計測回数	3回

実際の撮影画像を図 4.12 に示す。どちらの画像も 2 次元格子を貼付したパラボラアンテナの上部がわずかに写っている程度であるが、この画像を用いて表面形状の計測を行う。相対変位計測結果の一例を図 4.13 に示す。図 4.13 (a) は計測された形状を示しており、図 4.13 (b) のヒストグラムで設定したレンジ内を着色して表示している。計測形状から計測領域とした A4 領域が計測されていることが確認できる。今回行った 3 回の計測結果を表 4.3 にまとめた。設定した平面位置 10[mm]に対して、計測結果は曲面の並行移動量では誤差 40[ $\mu\text{m}$ ]程度となっている。曲面の非平行度は 60[ $\mu\text{m}_{\text{RMS}}$ ]程度となっており、高精度の計測といえる。



(a) 左カメラの画像 (b) 右カメラの画像

図 4.12 撮影画像



(a) 計測形状 (b) ヒストグラム

図 4.13 計測結果

表 4.3 曲面の相対変位計測結果まとめ

計測回数	平行移動量 [mm]	非平行度 [ $\text{mm}_{\text{RMS}}$ ]
1回目	10.007	0.051
2回目	10.040	0.059
3回目	9.984	0.059

以上より、カメラを仰角 45[deg]に設定した場合にもスライダ移動方向の変位が高精度に計測可能であることを示した。これにより、今回設計した計測装置において計測可能であることが示された。

## 5. まとめ

高精度アンテナシステムの開発・実証のために気球 VLBI ミッションに使用する  $\phi 1.5[\text{m}]$ 地上局パラボラアンテナ用表面変形計測装置を設計した。計測装置の設計において確認が必要な 2 項目に関して予備実験を行った。1 つ目の予備実験より、円孔を有するアンテナ主鏡中心部を計測する場合は、1 回の撮影画像に対して対応点の位置を変化させることにより、全周囲高精度計測が可能であることを示した。2 つ目の予備実験より、設計した計測装置の機器配置によって、45[deg]の仰角を持つパラボラアンテナの光軸方向相対変位を計測可能であることを示した。

## 謝辞

本研究は、JAXA/ISAS 平成 29 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 他：高精度スマート形状可変鏡試作モデルの開発，第 29 回宇宙構造・材料シンポジウム講演集，(2013)，A13.
- [2] 土居明広 他：気球 VLBI，2015 年度 VLBI 懇談会シンポジウム，(2015).
- [3] 山崎健次 他：計測対象への二次元格子貼付による簡易型表面形状計測法，第 59 回構造強度に関する講演会集，(2017)，1A06.