

低サイドローブ化技術の検討と低サイドローブ化実験

織笠光明 藤野義之

地上衛星共用電話システムを実現するためには大型のアンテナが必要である。筆者らは開口が30m ϕ クラスの反射鏡アンテナを検討してきた。放射パターンの形状、ビーム指向方向、及びサイドローブ特性を維持するためには、反射鏡の熱歪みによるこれらの特性劣化を補償する必要がある。ここでは開発した DBF / チャネライザを用いて実施した放射パターン補正実験について検討・評価したので報告する。

1 まえがき

STICS の通信システムでは、周波数の有効利用のため周波数再利用を基本としている。その際、周波数繰り返しによる隣接ビームの干渉や、軌道上における反射鏡の熱歪みに放射パターンの劣化によるビーム形状の歪み、サイドローブの劣化やビーム指向方向の変動が想定され、システム実現の課題となっている。検討しているアンテナは開口径が30m ϕ クラスの反射鏡を有するので、打ち上げ時に収納し、軌道上で展開するメッシュ展開反射鏡アンテナが想定される。そのため、軌道上での反射鏡形状の熱歪みは構造上避けられない。一方検討しているアンテナの給電部は100素子クラスのフェーズドアレーアンテナで Digital beam former (DBF) により制御されているので、励振ウェイトに対する自由度が高く、放射パターン劣化の補正実現の可能性が高い。

ここでは低サイドローブアンテナの特性維持を実現するための技術として、開発した DBF / チャネライザを用いて低サイドローブ化実験を実施した結果と評価について述べる。

2 低サイドローブ化技術の検討

低サイドローブ技術は大別すると

- a. あらかじめ設計時に低サイドローブ化を配慮するもの
- b. 放射パターン劣化時に補正して特性を維持するもの

となる。aについては設計及び製造時に配慮しておくべきもので、ここでの検討範囲外とする。一方bについては大型の反射鏡アンテナでは軌道上の熱歪み等、比較的周期が長い変動に対する補正が対象となっている。ここではbに関する事項について検討する。

STICS で検討している衛星搭載アンテナは技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII) と同じ方式である。アレー給電部のビームフォーミングネットワーク (BFN) が DBF で高機能となった違いがあるだけで、メッシュ展開反射鏡を用いていることは同じである。したがって同様に反射鏡の熱歪み問題がある。実際に ETS-VIII では軌道上において反射鏡の熱歪みによるビーム指向方向変動が見られた。

ETS-VIII は2006年の12月に打ち上げられ、種々の通信実験を実施しており、アンテナに関する評価も実施してきた^{[1][2]}。アンテナの評価では、実際に衛星の姿勢を変動させて放射パターンを測定して検討したが、十分な特性を得られていないことがわかったが、改善することはできなかった。これは反射鏡面形状を十分に予測できないことが要因で、複数の地上局を用いて素子電界ベクトル法 (REV 法) による形状予測実験を ETS-VIII を用いて実施したが十分な結果が得られていない^[3]。これは反射鏡の歪み量が大きく1 λ 以上の変形があるため、 λ の不確定性のためと考えられる。

STICS で検討している給電部は DBF を用いたフェーズドアレーアンテナで、想定する素子数も ETS-VIII で31に対し、100程度となる。そのため、ETS-VIII よりも自由度が高く補正機能も優れていることが考えられる。

ここでは反射鏡が歪んだ時の放射パターン補正に関する技術について検討する。以下では低サイドローブ化に関わる3項目について述べる。

2.1 反射鏡歪補正機能

反射鏡が歪むと放射パターンに影響を与える。放射パターンが劣化した箇所を改善するための励振ウェイトを歪んだ鏡面に対して再計算して求め、放射パターンを改善する機能を確認する。この機能は低サイド

ローブ維持のためには必要不可欠であり、DBF がその機能を有していることを確認する。ここでは実際に計算値と実測値が一致していることを実験により確認する。そのため、開発した DBF／チャネライザを用いてその機能の可能性を確認する。素子数は 16 素子であるが、補正機能が確認できれば 100 素子に対しては十分機能を評価したことになる。

周波数を再利用するためには同一周波数のビーム間の干渉量を少なくさせる必要があり、着目したビームのサイドローブのうち周波数が同一の対応するビームのある方向のレベルを下げる機能の確認を実施する。

2.2 RF センサ機能

RF センサはビーム指向方向の角度誤差を検出する機能で、衛星搭載マルチビームアンテナではよく用いられている。反射鏡歪みの放射パターンに対する影響として主に各ビームの指向方向変動に対する変動量を検出する機能である。RF センサは地上のある点にビーコン局を設定し、ビーコン信号を受信してその電波の到来方向を検知するセンサで、ビーム指向方向の制御のための角度信号を出力する。

ビームを精度よく指向させることで安定してビームを配置できることになり、ビーム位置変動による干渉量の増加を防ぐことができる。これはビームがずれると、対象とするエリアの利得が下がり、相対的にサイドローブとのレベル差が小さくなるためである。これは等価的にサイドローブが上昇したとみなすことができ、ビーム指向制御は低サイドローブ化技術に関係する。RF センサ機能は任意の箇所にとこのための和信号と差信号を作ることであり、ここでは実際のメッシュ鏡面を用いて開発した DBF／チャネライザがこの機能を有することを確認する。なお、DBF／チャネライザと制御コンピュータを用いてビーム指向方向が所望の方向からずれたビームを所望方向に向けるシミュレーションを実施している。したがって RF センサ機能を用いた和信号、差信号のパターンが形成できるとビーム指向方向制御をオートトラックのように自動制御もできる可能性がある。

2.3 鏡面計測点の影響

反射鏡の鏡面形状がわかると放射パターンが予測でき、補正に必要な励振ウェイトを求めることができることを 2.1 では述べた。実際に鏡面形状を計測するためには計測点にターゲットを設け、ターゲットの位置から鏡面形状を推定する手法が考えられる。このターゲットはメッシュ鏡面そのものに直接設けることは困難であり、ターゲットの位置に制約があることが想定される。

そのため、限定されたターゲットで鏡面を推定し放射パターンの予測の可能性について実験的に評価・検討した。ターゲットの位置(間隔)を変えるために、同じ反射鏡を使用する(ターゲット間隔は変わらない)が周波数を変えた測定を実施して等価的にターゲット間隔を変えて評価した。その際給電部は周波数に対応したホーンアンテナを用いている。

3 実験結果と考察

ここでは低サイドローブ技術に関わる 3 つの項目の実験結果と考察についてまとめる。実験は開口径 3.3m のメッシュ反射鏡と 16 素子給電部と DBF／チャネライザを組み合わせて実施した。測定は京都大学、生存圏研究所の設備であるプレーンポラニアフィールドアンテナパターン測定設備を用いた^{[4][5]}。

3.1 反射鏡歪補正実験

(1) 試験概要

反射鏡が歪んだ時の放射パターンはビーム形状歪と指向方向変動、サイドローブ上昇等が生じる。給電部がフェーズドアレーアンテナであるため、アレーの励振ウェイトを変えることで放射パターン補正の可能性がある。そのため、実際にメッシュ反射鏡と給電部を組み合わせて開発した DBF／チャネライザを用いて励振ウェイトを調整して放射パターンを補正する実験を行った。アンテナのパラメータと構成を図 1 に示す。アンテナパラメータは、

開口径 D : 3.3m、 F/D : 1.04、オフセット角 : 37.5° で測定時はアレー給電部を図の焦点から 1m 反射鏡側にオフセットして配置した。図 2 に測定系の外観を示す。反射鏡の Z 軸が上を向いている。給電部は 4×4 のアレーで、素子はパッチアンテナである。DBF／チャネライザは図の左下に設置している。

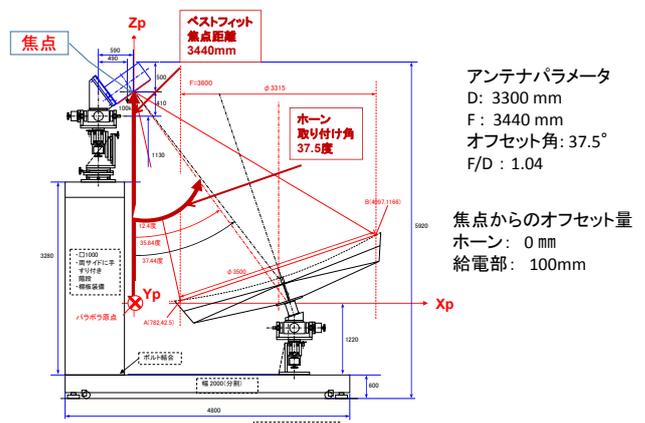


図 1 測定したアンテナパラメータと構成

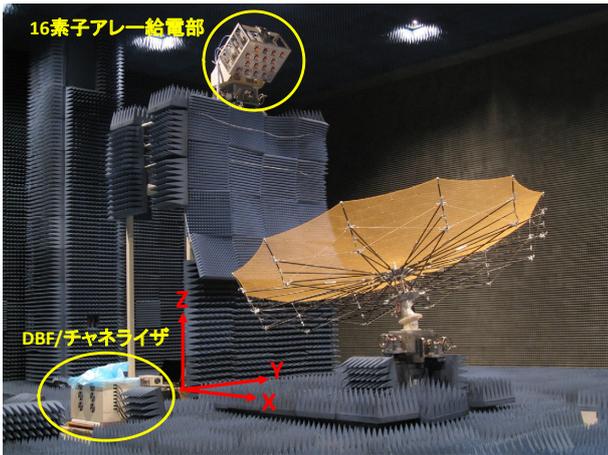


図2 測定系の外観

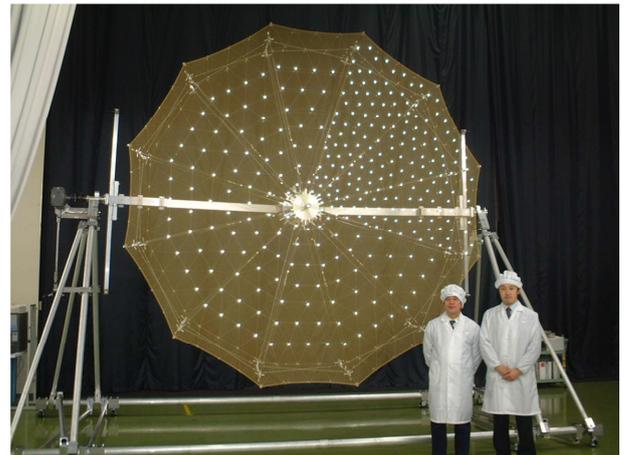


図4 反射鏡外観とターゲット

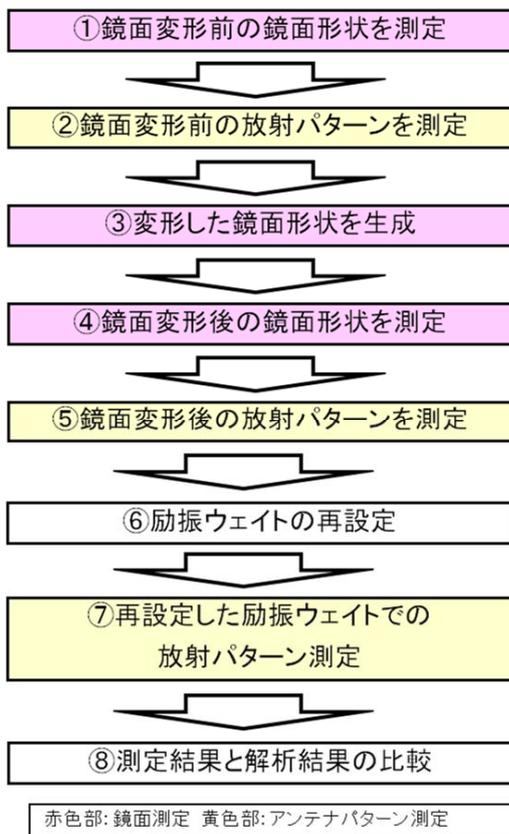


図3 反射鏡歪補正実験フロー

実験は通常の鏡面状態とそこからわざと歪ませた状態を作った鏡面状態で、比較検討した。検討フローを図3に示す。まず①で設定した鏡面形状を測定する。ここではGSI社(Geodetic Systems, Inc.)製のV-STARSを用いて計測した。これは写真計測システムでターゲットの位置を正確に計測することができる。図4に反射の外観とターゲットを示す。白い明るい点が貼付されたターゲットである。

図のターゲットがはっきりと見えるのは写真を撮る際にフラッシュを用いるので、その光が反射して写る



図5 鏡面形状計測の様子



図6 鏡面を歪ませた状態

ためである。図5に写真計測の様子を示す。クレーンを使い上から移動しながら多数の箇所写真を撮っている。

鏡面形状計測後、②で放射パターンを測定する。その際図2に示すように床面、治具に電波吸収体を設置し、図2の状態での測定を実施した。次に③で鏡面を歪ませる。これは図6に示すようにメッシュ鏡面の背面

3 地上／衛星間干渉回避及び周波数割当技術

にボルトをつるして下方方向に歪ませている。

鏡面を歪ませたあと、④で①と同様に鏡面形状を測定した。図7に歪前の形状を、図8に歪後の形状を示す。図の丸は理想パラボラからのずれを示しており、大きいほど差異が大きいことを示す。○の色は方向を示し、青が上方(Z軸)を白が下方を示しており、図8の白く大きくなった○の箇所が実際に歪ませた箇所である。

形状測定後、⑤でパターンを測定する。

パターン測定はプレーンポーラニアフィールドアンテナ測定装置を使用して実施した。図7の通常の鏡面では理想パラボラに対し紙面の手前方向に最大3mm程度の誤差の箇所があるだけで、ほとんどは1mm以下の誤差となっている。一方、図8の歪ませた鏡面では紙面の奥の方に最大15mm程度誤差が白丸で見え、ボルトで歪んだ鏡面形状となっていることがわかる。

測定系構成を図9に示す。アンテナは受信系を用い、

図のプローブからCW信号を放射し、反射鏡で反射した信号を給電部で受信してRx DBF／チャネライザを介して測定装置の受信機に入力される。ここで反射鏡、給電部及びDBF／チャネライザを設置している床面は回転するため、信号は床面のロータリージョイントを介して測定装置に入力される。測定装置のプローブは1軸(半径方向)に走査する。スキャン範囲と設置機材の関係を図10に示す。スキャン範囲は径約7mの円である。

⑤のパターン測定の後、鏡面変形前のパターンとの比較評価を行い、歪んだ鏡面に対する放射パターンを補正する新たな励振ウェイトを⑥で求めて、⑦のパターン測定でその効果を評価する。

(2) 試験結果

図11に鏡面変形前の放射パターンを、図12に変形時の鏡面での放射パターン測定結果を示す。変形時のパターンでは着目箇所付近のサイドローブが上昇していることがわかる。

図13は変形した鏡面形状をもとに着目箇所にレベルの低い拘束点を与えてのサイドローブを下げる励振

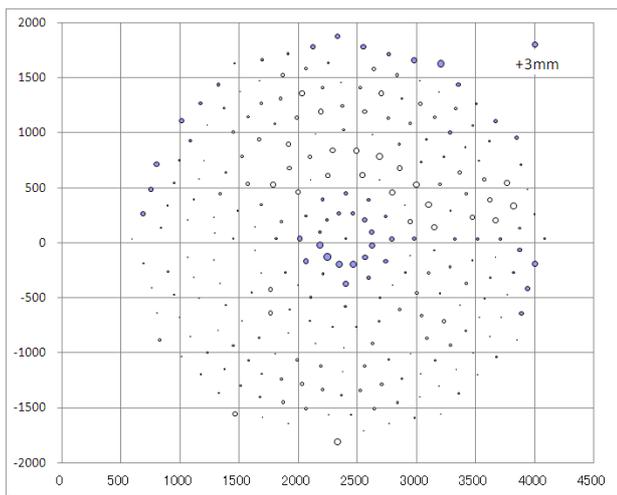


図7 通常の鏡面形状

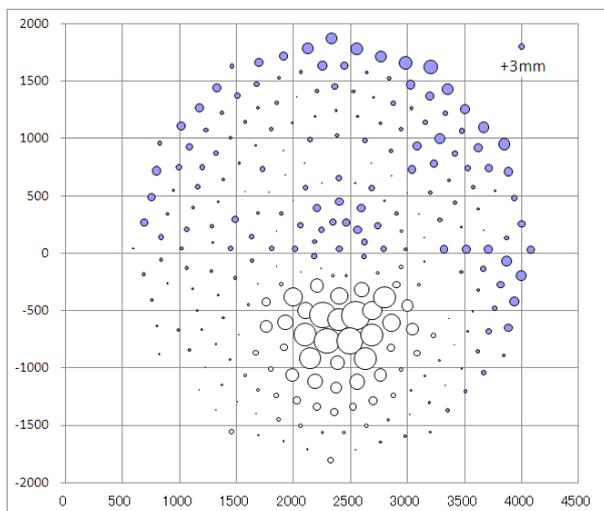


図8 歪時の鏡面形状

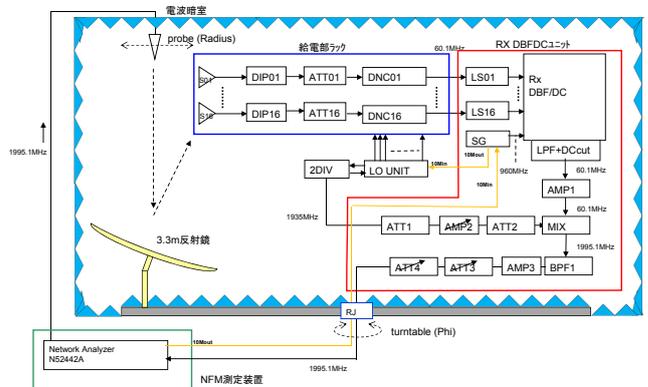


図9 鏡面誤差補正実験の測定系構成

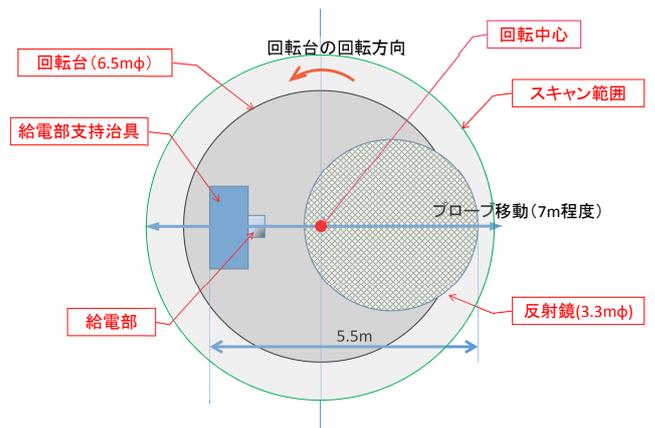


図10 パターン測定時のスキャン範囲

ウェイトを求め、実際にそのウェイトを与えて放射パターンを測定した結果である。着目箇所のサイドローブレベルが上がっているのがわかる。

ここでわかりやすいようにカット面でのパターンを

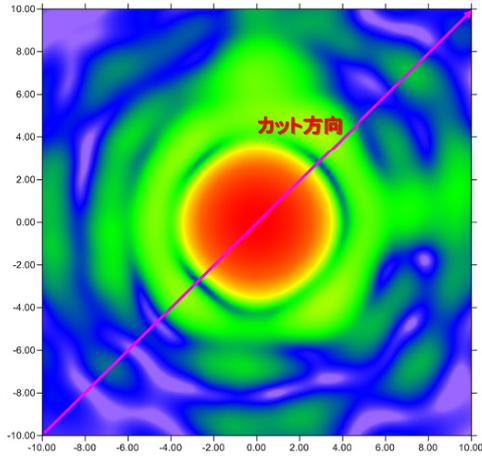


図 11 ノミナル鏡面の放射パターン (測定値)

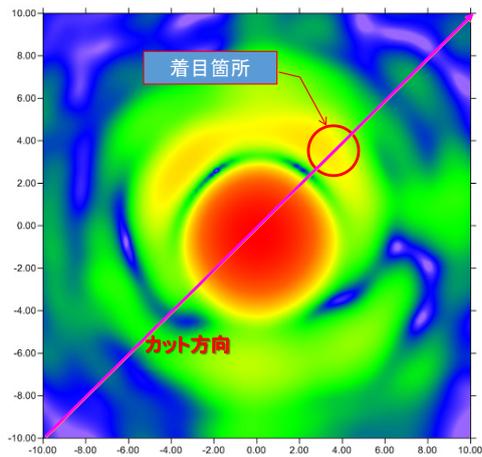


図 12 変形鏡面時の放射パターン (測定値)

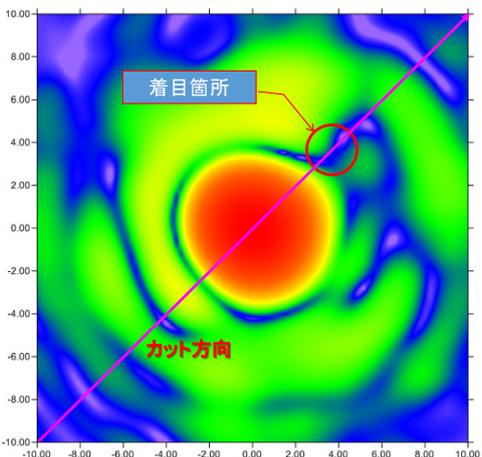


図 13 補正後の放射パターン (測定値)

示す。カット方向は、図 11～13 に示す方向である。

図 14 に鏡面変形のないノミナル時のカットパターンを示す。図の右側の第 1 サイドローブ付近が本実験で確認した箇所である。図の赤い線がパターン測定結果の結果で、青い線が反射鏡形状を測定した結果に基づく計算値を示している。

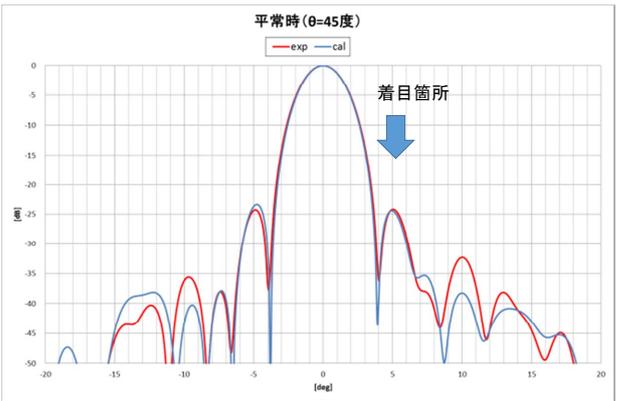


図 14 ノミナル鏡面形状時のカットパターン

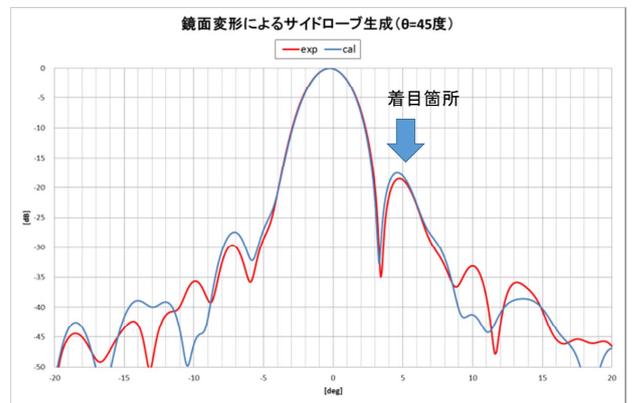


図 15 鏡面形状変形時のカットパターン

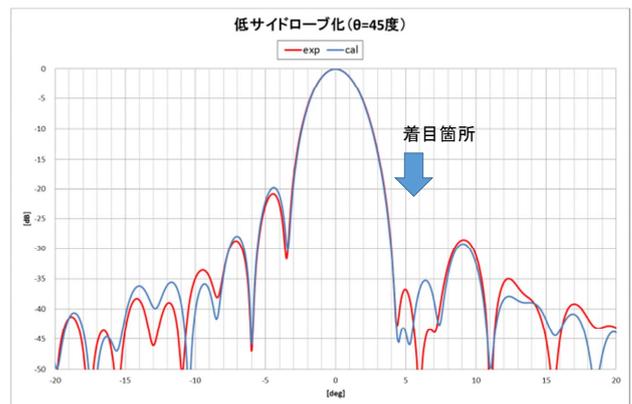


図 16 ビーム補正時のカットパターン

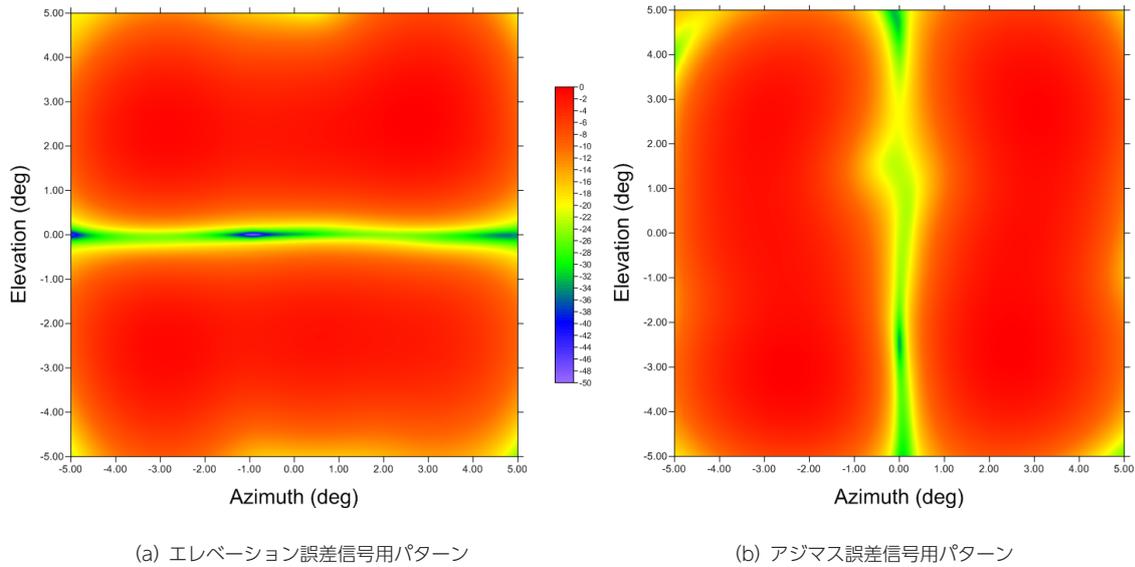


図 17 RF センサの放射パターン

かる。

図 16 は変形時の鏡面形状を用い、着目箇所レベルを下げるように肋振ウェイトを求めてパターン測定を実施した結果である。着目箇所レベルが下がっていることがわかる。

実験の結果、16 素子アレーでも鏡面形状が既知の場合は鏡面が変形しても十分サイドローブを下げる補正が可能であることがわかった。

3.2 RF センサ機能確認実験

RF センサ機能の確認は RF センサのヌルパターンが実際の鏡面で形成できるかどうかを確認する。測定系は誤差補正実験で実施した図 9 の構成を用いて実施した。RF センサは通常の放射パターンを和信号 E_{Σ} と呼び、角度誤差用の放射パターンを差信号 E_{Δ} と呼ぶ。差信号は通常角度方向に対して、エレベーション誤差とアジマス誤差を出力する。図 17 は RF センサ用のヌルパターンを測定した結果である。放射パターンをエレベーションとアジマス用にそれぞれのパターンを作成し出力する。ここでエレベーション面は図 1 における z_p-x_p 面、アジマス面は y_p-z_p 面である。図 17 の溝のような箇所がヌル点となっている。エレベーションパターンはほぼ上下対称のパターンが得られているのに対し、アジマス誤差のパターンがあまり対称でない。これは図 18 に示す給電部を用いているため素子配置に対して左右方向（アジマス方向）に対称でないためである。これは素子数も 16 素子と少ないため、自由度が少ないことも影響している。素子数が多くなれば対称なパターンが容易に得られると考えられる。

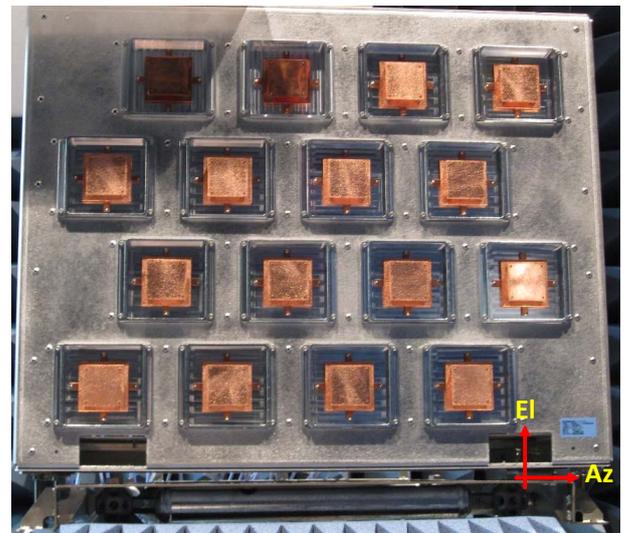


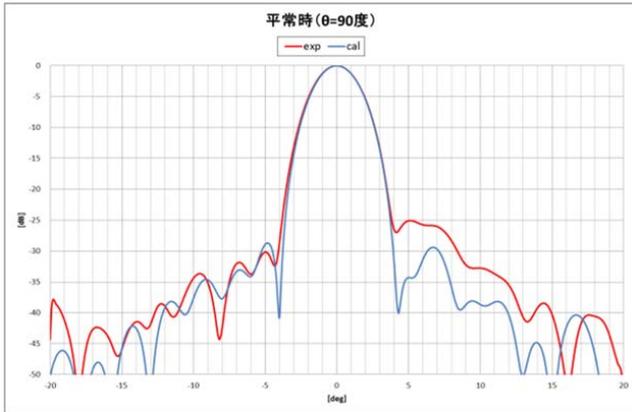
図 18 給電部の構成

図 19 にエレベーション方向のカットパターンの例を示す。赤線が測定結果で、青線が計算結果である。中心にヌルができていることがわかる。和信号を用いて規格化し、入力電力の変動に対応している。そのため角度誤差の信号レベルは

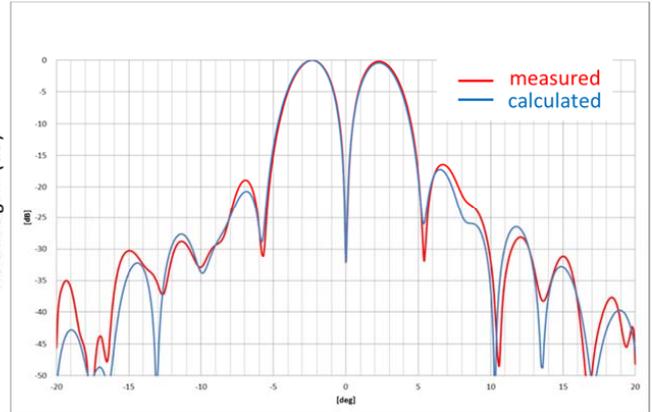
$$\text{角度誤差} : \delta E = \frac{E_{\Delta}}{E_{\Sigma}} \quad (1)$$

で示される。 δE は角度誤差が大きくなると増加する。

実際のメッシュ鏡面を用いて RF 信号用の放射パターンを形成する試験を実施した。その結果 RF センサパターンを形成できることを確認した。



(a) 和信号パターン (E 面カット)



(b) 差信号パターン (E 面カット)

図 19 RF センサのカットパターン例

3.3 ターゲット間隔に関する実験

鏡面計測をする場合通常計測点が必要となり、V-STARS で計測する場合ターゲットを設ける。図 4 は実際に用いた反射鏡でターゲットを白い点で示されている。この間隔が測定間隔となる。図 20 は拡大した図で赤丸にターゲットが貼付されている。この箇所がこの反射鏡のハードポイントとなっている。黄色の矢印はメッシュ鏡面上に添付されたターゲットを示しており、本メッシュ鏡面では一部このような箇所もあるが、実際の搭載アンテナでは貼付することができない。このターゲット間隔は約 200 mm (メッシュ内は除く) で添付している。

測定はパターン計算の正確さを得るため、特性が既知のホーンアンテナを用いた。図 21 は S 帯ホーンの設置の様子を示している。ホーンは図 1 の焦点に設置した。

測定系の構成を図 22 に示す。

実験は周波数を 3 周波数で実施した。周波数は

S 帯 : 1995.1 GHz

X 帯 : 11.0 GHz (5.5 倍間隔)

Ka 帯 : 20.0 GHz (10 倍間隔)

である。

測定結果を図 23~25 に示す。赤線が実測値で青線が計算値である。周波数が高くなっても近軸付近では計算値と実測値のパターンがあっていることがわかる。周波数が高くなると等価的に寸法が大きくなるので、測定間隔が広くても近軸のパターン付近では評価できることがわかった。本実験では実際のターゲット間隔が 200 mm であるが、Ka バンド測定の場合等価的に 10 倍の 2,000 mm 間隔に相当する。測定間隔が広いとゆっくりとした鏡面変動が支配的となり、放射パターンの近軸付近の評価ができることと考えられる。一方広角は早い周期の変動が支配的になるため計算値と実

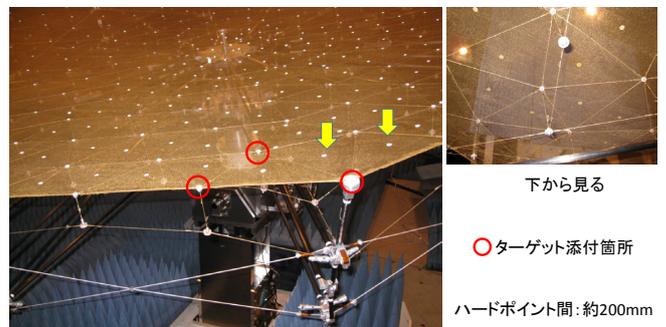


図 20 メッシュ鏡面とターゲット



図 21 S 帯ホーンを用いたアンテナ構成外観

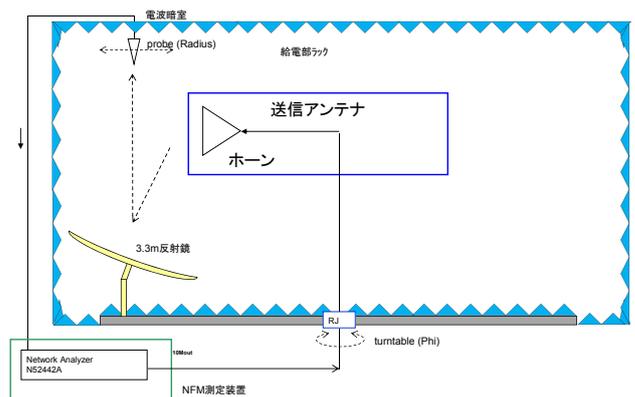
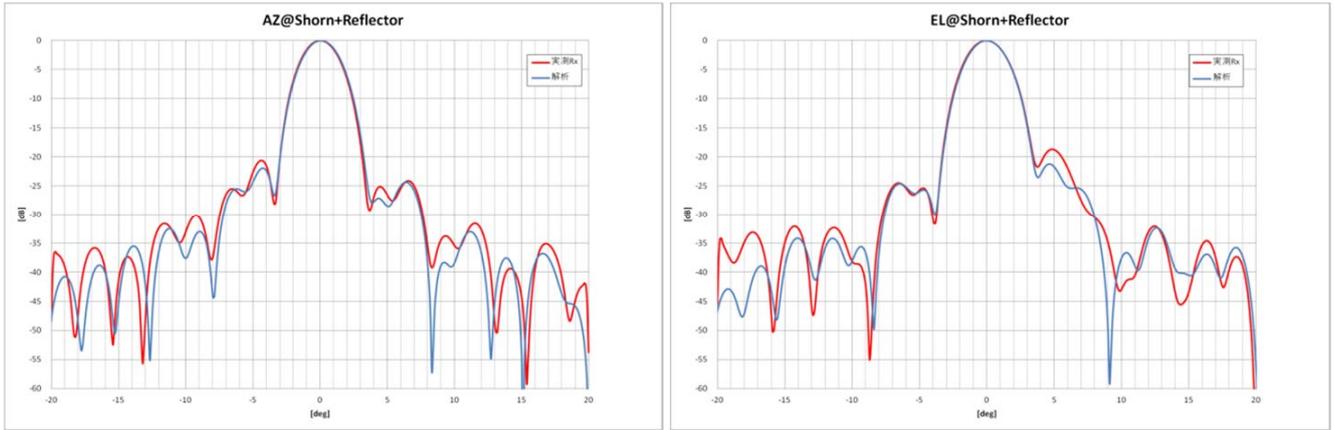


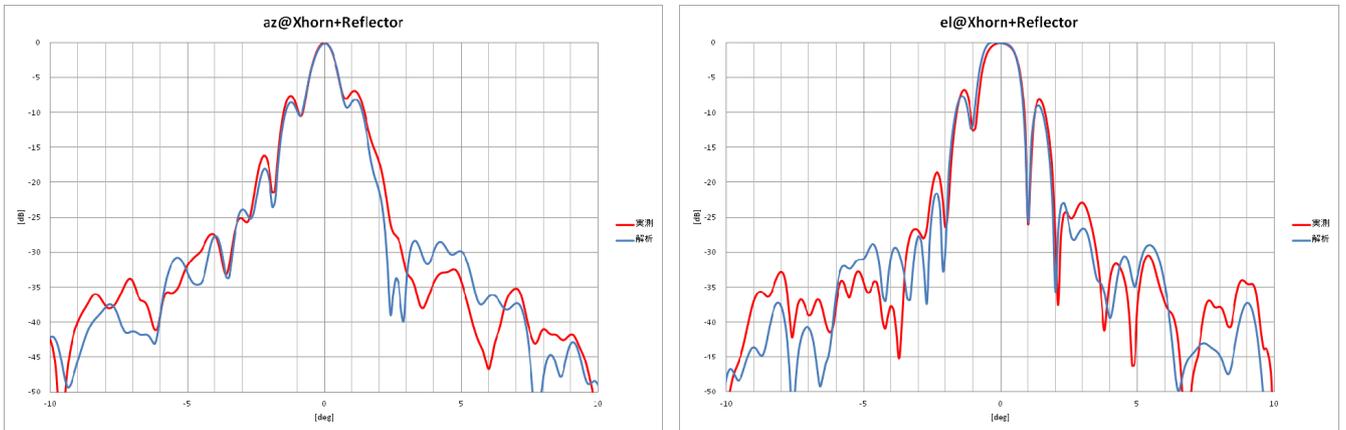
図 22 ターゲット間隔実験用測定系構成

3 地上／衛星間干渉回避及び周波数割当技術



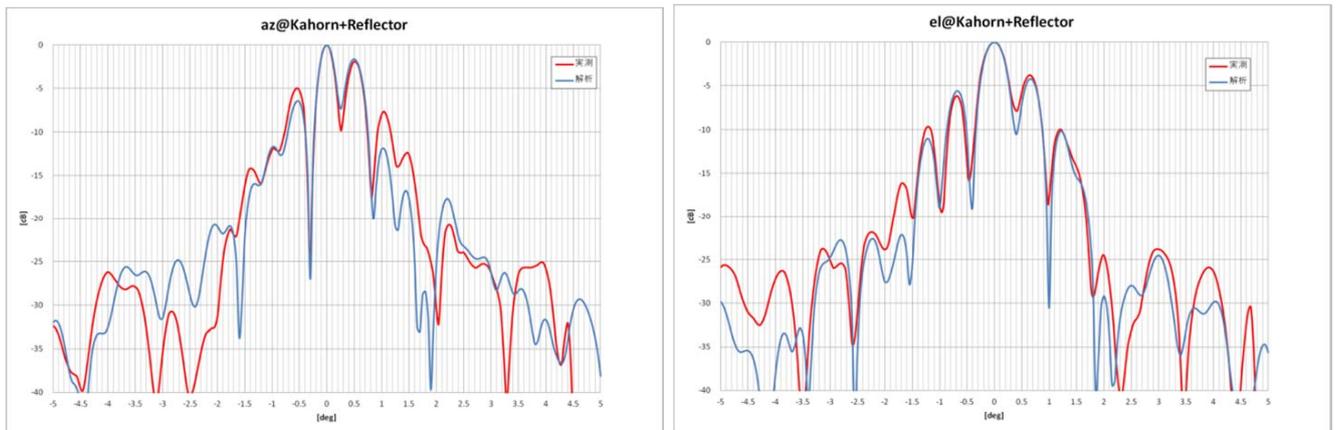
(a) カットパターン (YZ-Plane) (Az カット) (b) カットパターン (XZ-Plane) (El カット)

図 23 S 帯ホーン給電部の放射パターン



(a) カットパターン (YZ 面) Az カット (b) カットパターン (XZ 面) El カット

図 24 X 帯ホーン給電部の放射パターン



(a) YZ-面 Az カット (b) XZ-Plane El カット

図 25 Ka 帯ホーン給電部の放射パターン

測値差異が大きくなると考えられる。このため、広角の放射パターンの計算精度を高めるためには計測点間の形状を補完する技術が必要である。

4 まとめ

将来の大型アンテナに必要な低サイドローブ化の技術として、DBF／チャネライザを用いて鏡面歪によるアンテナ放射パターンのサイドローブ劣化の補正実験を実施した。実際のメッシュ鏡面を歪ませて放射パターンの測定と鏡面形状を予測（計算）し、アレーアンテナの励振ウェイトを再設定することで放射パターンを確認した。その結果、鏡面の歪による放射パターン劣化の補正が可能であることが確かめられた。また、ビーム指向方向に関する変動については、RF センサパターンを実際のメッシュ鏡面で作成することができることを確認した。また、鏡面形状計測に関する測定間隔について、周波数を変えた実験により形状計測間隔が広くても近軸方向のパターンについて評価が可能であることがわかった。また広角については計測点間の形状も必要であることが確認された。今後はさらに軌道上で安定したアンテナの放射パターンを得るために、軌道上での鏡面形状の計測手法ならびに、計測点間の形状予測技術の開発が必要である。

5 謝辞

本研究にあたり、京都大学 生存圏研究所の高度マイクロ波エネルギー伝送装置の設備を利用させていただいた、篠原先生、三谷先生をはじめ関係各位に感謝する。

本研究は総務省の研究委託「地上／衛星共用携帯電話システムの研究開発」により実施した。関係各位に感謝する。

【参考文献】

- 1 佐藤正樹, 藤野義之, 織笠光明, “軌道上における技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII) 搭載大型アンテナのパターン特性測定,” 研究速報 B, Vol. J91-B, No.12, pp.1641-1643 2088-12.
- 2 佐藤正樹, 織笠光明, 藤野義之, “軌道上における ETS-VIII 衛星の大型アンテナ放射パターンの評価,” 信学論, B, Vol.J94-B, No.3, pp344-352, 2011-3.
- 3 織笠光明, 佐藤正樹, 山本伸一, 川崎和義, 藤野義之, “大型反射鏡アンテナの放射パターン補正実験,” 情報通信研究機構研究報告, Vol.60, No.1, pp73-85, 2014.
- 4 T. Oriyasa, Y. Fujino, M. Satoh, and H. Tsuji, “Measurement experiment and evaluation of radiation patterns of the mesh reflector antenna mounted on communication satellite for hybrid mobile communication system,” 63rd International Astronautical Congress, IAC-12-B2.2.6, Oct. 2012.
- 5 織笠光明, 藤野義之, 辻宏之, “地上衛星共用携帯電話システム用搭載アンテナの反射鏡と DBF／チャネライザ組み合わせ試験,” 無線電力伝送研究会, WPT-2012-45, May 2013.



織笠光明 (おりかさ てるあき)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
博士(工学)
衛星通信、アンテナ



藤野義之 (ふじの よしゆき)

東洋大学理工学部電気電子情報工学科教授／
元ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
(～2013年4月)
博士(工学)
衛星通信、アンテナ、無線電力伝送