

水星探査機 (MMO) 搭載用高利得アンテナ (HGA) の開発

Development of High Gain Antenna (HGA) for Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)

JAXA 宇宙科学研究本部 技術開発部 機器開発グループ

鎌田幸男、川原康介、坂井智彦

JAXA ISAS Instrument Development Group, Technology Development Department

Yukio KAMATA, Kousuke KAWAHARA, Tomohiko SAKAI

Abstract

The harsh environment near Mercury (0.3AU from the SUN) imposes 11 solar intensity on MMO HGA. As for HGA of spacecrafts, a parabola antenna is common conventionally, but a planar antenna is advantageous in structure at solar flux concentration. Therefore, we adopted the helical array antenna excited by radial-line for HGA system in terms of planar antennas. The dimension of Helical Element was decided by the numerical analysis of the TLM method and the experiment. Furthermore, the electric characteristic test model of 1/2 size in terms of the area was made by using this element. We established adjustment technique of amplitude and phase by the half-size model. Based on the result, we produced 1/1 full-size model.

This paper describes the basic characteristic of HGA first, and then the influences of heat-resistant material and structure on electrical characteristics.

1.はじめに

E S Aとの共同による国際水星探査計画 Bepi Colombo の磁場・磁気圏を観測の主目標とする Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) の開発が進められており、Figure 1にMMOの外観図を示す。

MMO通信システムでは、1AU以上の深宇宙通信である事の他に、太陽との距離が0.3AUである事から太陽光入射がおよそ11Solarという厳しい熱環境があげられる。従って探査機から露出せざるを得ない搭載用の高利得アンテナは、通信システムにおける重要な開発要素の一つである。筆者らは、水星探査機搭載用高利得アンテナとして、放射効率、耐熱性、収納性等の観点からラジアルラインヘリカルアレーアンテナを採用し、開発を行っている。このHGAの開発スケジュールは、2006年度までにPMを完成させる予定であり、本報告ではPMフェーズに移行する前のEMの開発と主に電気特性の詳細な解析について述べる。まず、6素子モデルによる実験とTLM法による数値解析により最適な素子寸法を決定し、ハーフサイズ(面積1/2)モデルの製作により得られた知見を基に13列546素子から成る1/1スケールモデルを製作した。この基本特性を明らかにすると共に、厳しい熱環境に適合するための材料と構造による電気特性への影響等について述べる。

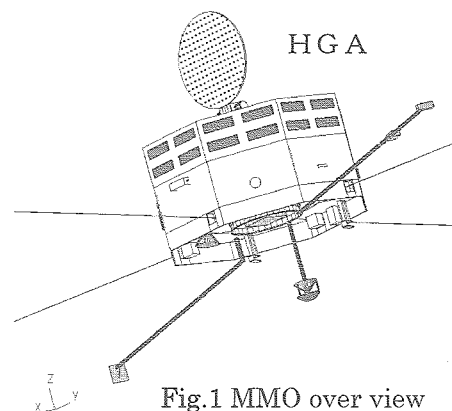


Fig.1 MMO over view

2. MMO搭載用HGAの概要

MMO搭載用HGAに対する主なシステム要求は以下のようになっている。

- 1) 太陽光入射：11Solar
- 2) アンテナ利得：Rx:20dBi以上 Tx:35dBi以上
- 3) 送受共用：Rx:7.15GHz, Tx:8.4GHz
- 4) 打上時の収納性：折畳構造
- 5) 地球指向：Despun制御
- 6) ビームチルト：エレベーション制御機構

従来の探査機搭載用HGAにはパラボラアンテナが広く採用されているが、本ミッションでは1)の11Solarにも及ぶ太陽光の集光による一次放射器の熱条件が厳しくなり、探査機の熱設計が困難である。これに対して平面アンテナは構造上集光部が無く、打上時に折畳む際の収納性も優れている。更に、ラジアルライン給電アレ

アンテナは導波管構造による給電により、給電系のロスを極めて低く出来るため、放射効率がパラボラに比べて約1.5倍高い。この事はアンテナ寸法の小型化につながる。アンテナ素子としては、条件3)の送受共用における17%に及ぶ広帯域性の観点からヘリカルアンテナが適している。これらの検討からMMOのHGAとしてラジアルラインヘリカルアレーアンテナを採用することとした。本方式のアンテナを探査機搭載用として開発するのは世界的に見ても初めての試みである。

3. 数値解析と実測による素子の最適化

ヘリカル素子の支持構造材には高耐熱性(約1800°C)で比誘電率 ϵ が約3.5のボロンナイトライド(BN)を使用するため、このBNの影響を明らかにして広帯域化を図るために、ここでは1素子モデルをTLM(Transmission Line Modeling)法により解析し、ターン数以外のパラメータを決定した。更にこれを基にした6素子モデルによる実測値からターン数を求め、最適な寸法を決定する。解析の結果、周波数の低下量は約12%程度であることが分かった。これにより、ヘリカル直径は10.5mm、BNの外径9.4mm、高さ11mmに決定された。さらに、ヘリカル素子のピッチ角に対する円偏波軸比の周波数特性の解析結果をFigure 2に示す。

この様にピッチ角を大きくすると軸比の周波数帯域が広がる事が分かる。次に、ピッチ角と放射利得の関係をFigure 3に示す。これよりピッチ角が6°で最大になりピッチ角の増加に従い利得は減少する。これらの数値解析結果から、本アンテナでは帯域が2周波共用として十分で、かつ利得も高いピッチ角6°を選定した。

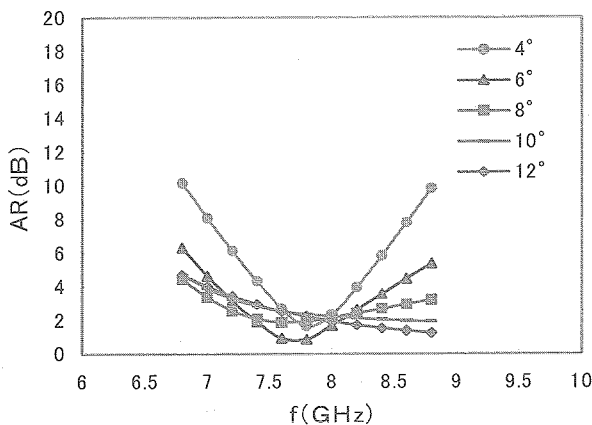


Fig.2 AR response to frequency in each pitch angle (one element)

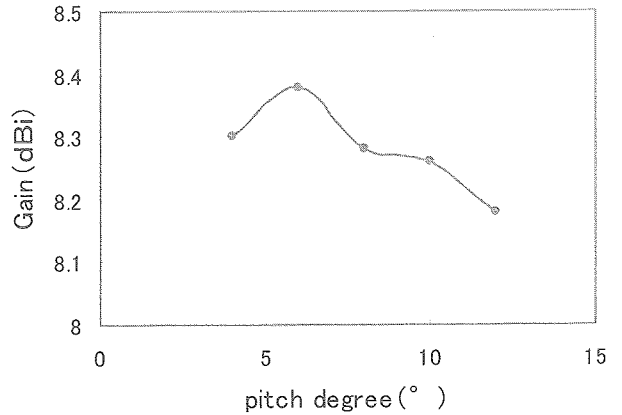


Fig.3 Pitch angle versus Gain (6 elements model)

次に、求めたヘリカル寸法で6素子モデルを作成し、最適なターン数を決定する。

Figure 4に6素子モデル実験によるターン数に対する軸比の周波数特性を示す。これより、巻き数nは2.5ターンの時が最も帯域が広く軸比も良くなる事が分かった。これらの結果より求めたヘリカル素子の最適寸法を以下に示す。

【素子の最適寸法】

- | | |
|------------------------------|------------------------|
| ヘリカル素子: | ボロンナイトライド: |
| 線径: 1mm | 外径: 9.4mm |
| 巻き数: n=2.5 | 内径: 6.0mm |
| 巻き線高さ: h=1.5mm | 高さ: 11mm |
| 巻き線立ち上げ角: $\theta = 0^\circ$ | 誘電率: $\epsilon = 3.5$ |
| ピッチ角: $\alpha = 6^\circ$ | $\tan \delta : 0.0027$ |
| 直径: d=10.5mm | |

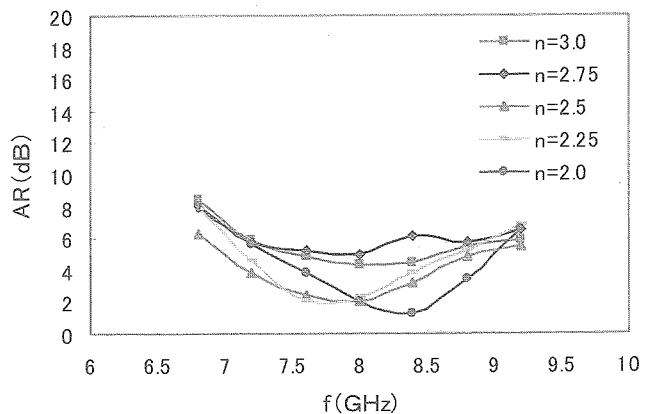
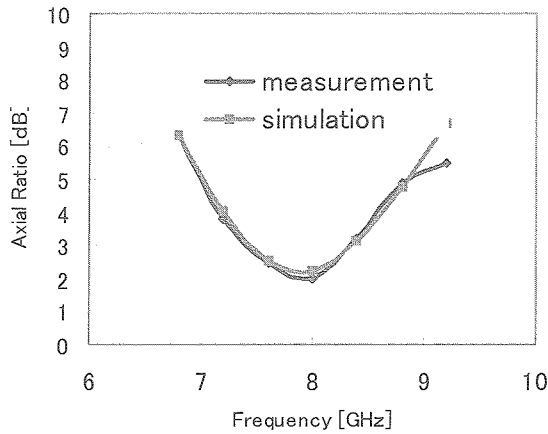


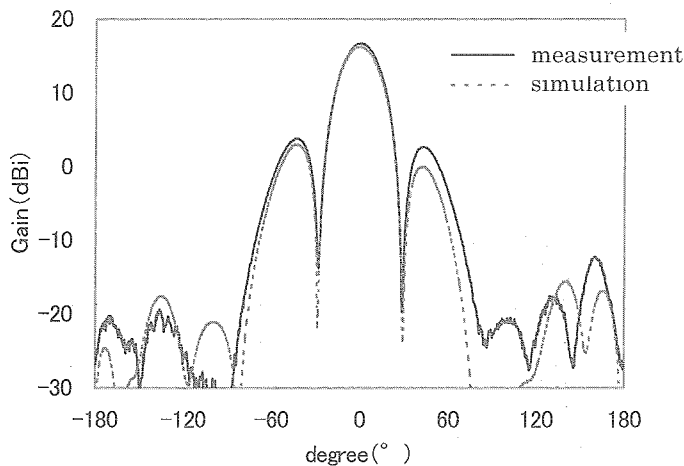
Fig.4 AR response to frequency in each turn number (6 elements model)

決定されたパラメータ寸法の6素子モデルを作成し、軸比特性と放射パターンについて実測値とTLM法による解析値とを比較した。その一例をFigure 5に示す。これらに示すように軸

比及び放射パターンどちらも実測値と解析値は良く一致していることが分かる。このことは実測と解析の妥当性を示している。



(a) Axial Ratio versus Frequency



(b) Radiation pattern 8.4GHz

Fig.5 Comparison of measurement and simulation (6 elements model)

4. ハーフサイズ (面積 1/2) モデル

1/1 モデルは直径約 80cm で 13 列 546 素子からなるアレーアンテナであり、非常に多くの素子調整が必要になる。このため、これを製作する前に面積で約半分の大きさになる直径約 50cm で 9 列 270 素子からなるハーフサイズモデルを製作し、各素子の位相・振幅分布の測定とそれらの調整手法と、設計手法の確立、電気特性の確認等を行った。ここで使用するヘリカル素子と支持構造材の B N は、前節で示された寸法である。

Figure 6 に製作したハーフサイズモデルの外観写真を示す。

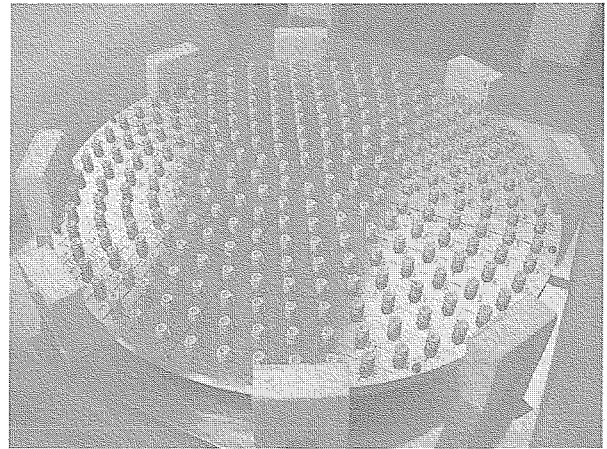


Fig.6 Half-size model outer view

プローブにより全素子の振幅と位相を測定し、各素子の給電ピン長を調整することで全素子の給電電力がほぼ等振幅に、ヘリカル取り付け位相を調整することでほぼ等位相に調整した。但し、位相は高利得が要求される 8.4GHz 帯で等位相に調整されている。

この時のリターンロス特性は 7.15GHz で -13 dB、8.4GHz で -17dB と良好な広帯域特性を示し。さらに、アンテナ利得は 8.4GHz で 33.1dBi、7.15GHz で 23.3dBi が得られ、8.4GHz では放射効率が約 89% の高効率を実現した。

5. 1/1 スケールモデル

1/2 サイズモデルにより得られた成果から、各素子の振幅と位相の調整手法が確立され、この結果を基に 1/1 スケールモデルを製作した。Figure 7 にこの外観写真を示す。

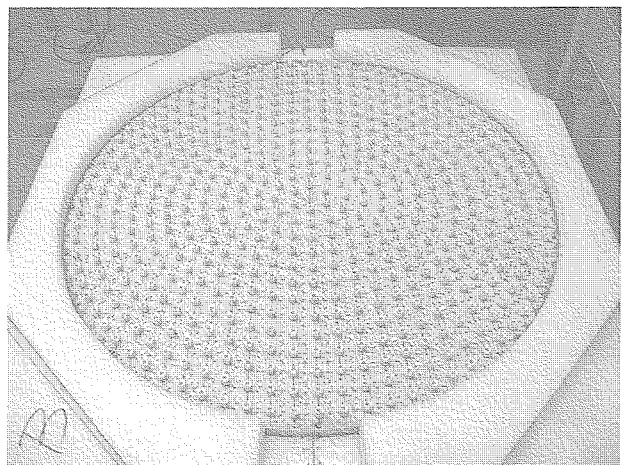


Fig.7 1/1 scale model outer view

5-1. アンテナの構造

今回開発したアンテナの構造を Figure 8 に示す。直径 80cm の金属円板 2 枚を 1 cm 間隔で向かい合せ、ラジアル導波路を構成する。アンテナ素子にはショートターンヘリカルを用い、図のように等間隔に 13 列 546 素子を配置する。給電はアンテナ裏側の中央部から給電ピンを挿入して給電する。アンテナ表面温度は 300°C にもなるためヘリカル素子の支持構造材には耐熱性が高く、セラミックスの中では比較的低温誘電率でロケット搭載用として実績も有る BN を使用する。11Solar もの厳しい熱環境と打上時の振動・衝撃環境に適合するための剛性増大と熱歪量低減対策としてラジアル導波管内部に板バネ状のチタン製スタッドを 12 個等間隔に挿入し、表裏両平板を結合する。アンテナ単体の構造は Figure 9 に示すように、2.5 ターンのヘリカル素子が BN 製の支持構造材で取り付けられる。さらに、Figure 10 にラジアルライン断図を示す。

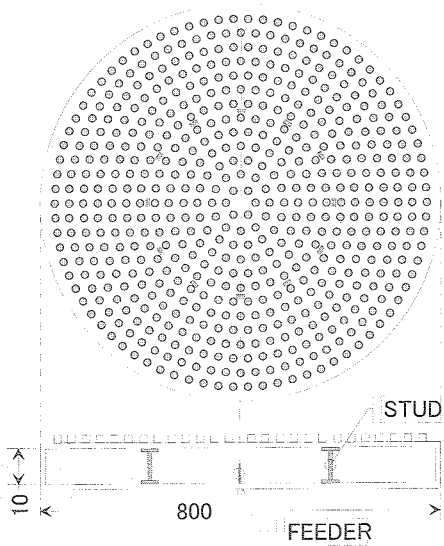


Fig.8 Antenna schematic view

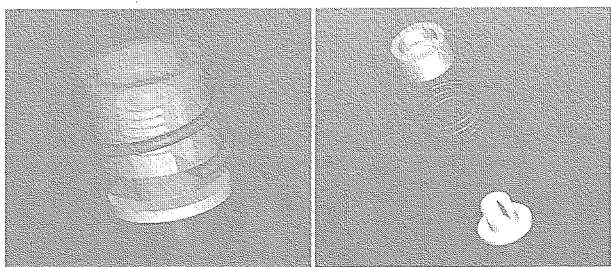


Fig.9 Helical element support structure

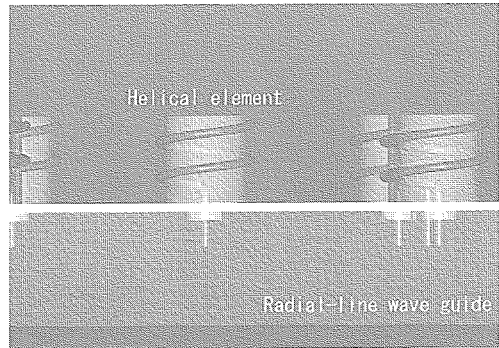


Fig.10 Section of Radial Line

5-2. リターンロス特性と軸比特性

アンテナのインピーダンス整合を表す特性としてリターンロスの周波数特性を Figure 11 に示す。スタッドの有無共に 7.15GHz と 8.4GHz 両周波数帯において 10dB 以上のリターンロスを得られており、広帯域な特性が確認された。また、スタッドの影響もそれほど大きくない。

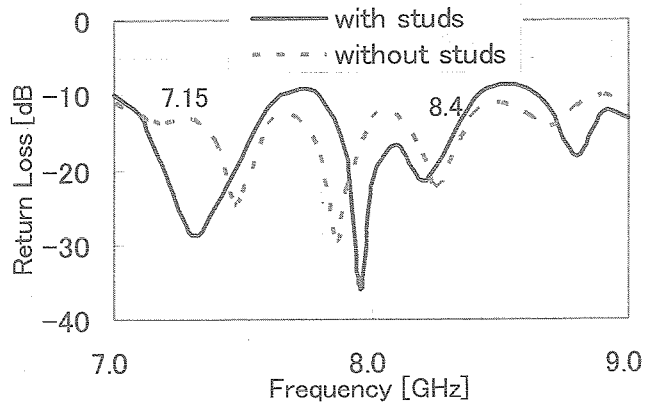


Fig.11 Return Loss property

円偏波率を表す特性として軸比の周波数特性を Figure 12 に示す。スタッドを挿入することで 8.4GHz 帯の特性がやや劣化したのが、7.15GHz では良くなり、広帯域にわたって良好な特性が得られた。

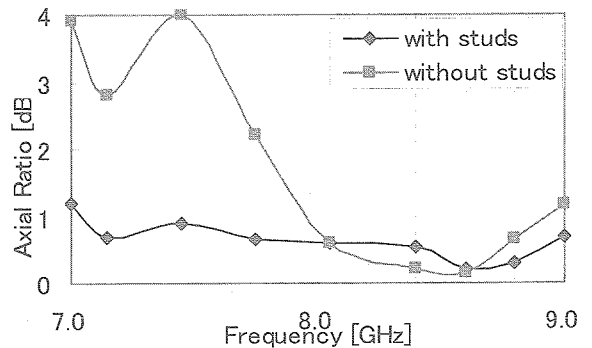


Fig.12 Axial Ratio property

5・3．放射特性

【基本特性】

8.4GHz帯で振幅及び位相を均一分布に調整した場合の放射パターンをFigure13(a),(b)に示す。ここで計算値は、TLM法により求めた1素子の放射パターンとアレーファクターの積から求めたもので、これらに示すように8.4GHzと7.15GHzのどちらのパターンも実測値とほぼ一致している。この時の利得は、8.4GHzで35.9 dBi、7.15GHzで20.2dBiが得られ、8.4GHzでの開口効率は約80%の高効率になる。

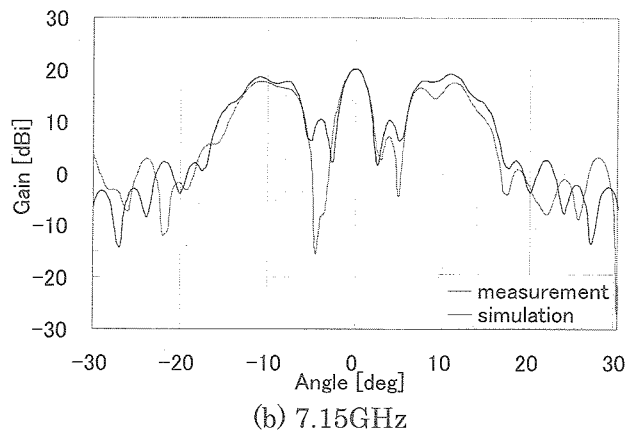
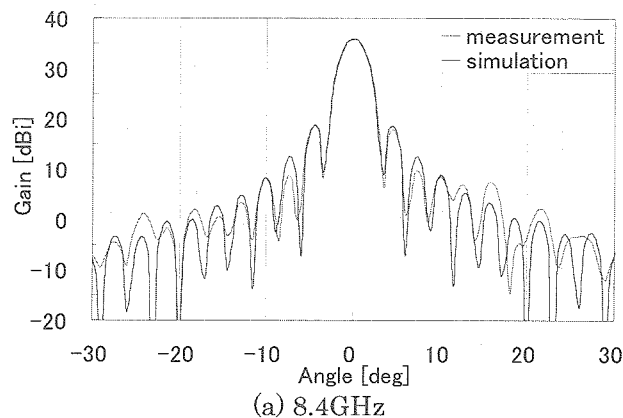


Fig.13 Radiation pattern

【構造補強部材スタッドによる影響】

ラジアル導波管内部に挿入される金属製のスタッドは、厚さ0.5mm、幅9mmの板バネ形状をしている。この挿入位置を変えた時の利得変動をFigure14に示す。このように周期的な変動を示しており、7,8列間に挿入した場合には8.4GHzでの低下量は比較的小さく、0.44dBとなった。また、構造上の挿入すべき位置も円盤の中央部であるため、この位置をベースラインとする。この利得低下の原因は、スタッドにより導波管内部の振幅と位相が乱されたと考え

られる。全素子の振幅分布と位相分布を実測した結果、位相分布の乱れはほとんど変化していないが振幅分布は明らかに乱されており、8.4GHzでのスタッドを入れる前と後の分布図をFigure15に示す。このことから、スタッドを挿入することによる利得低下は主に振幅分布の乱れが原因と考えられる。

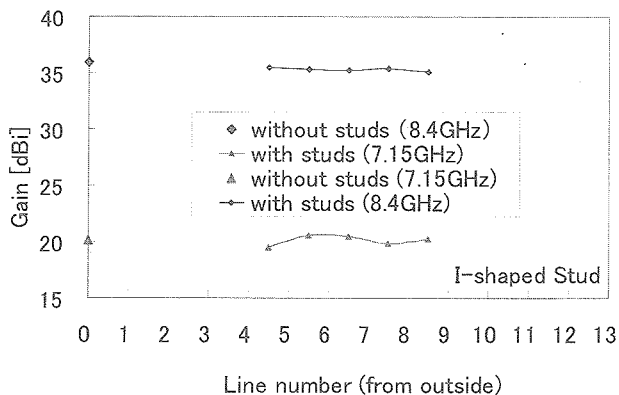


Fig.14 Gain variation affected by the insert position of studs

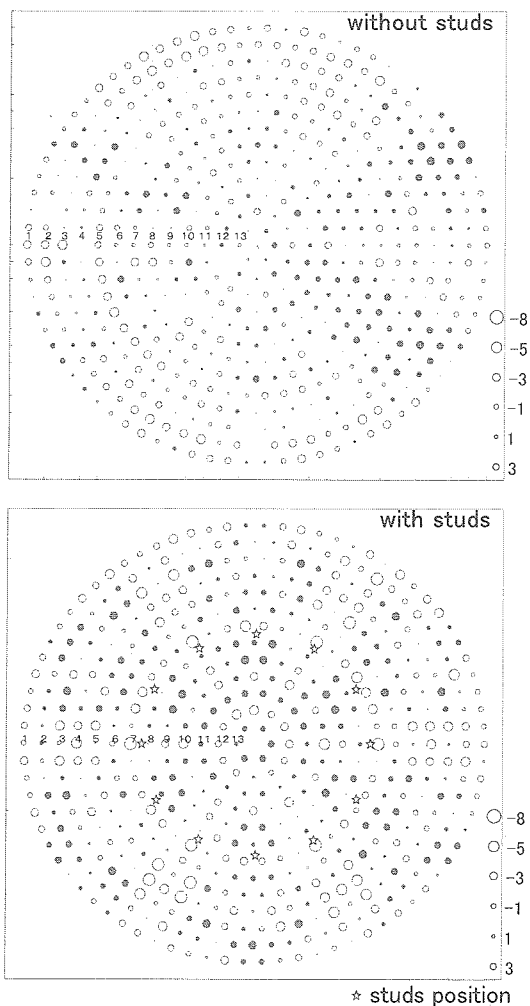


Fig.15 Amplitude distribution (8400MHz)

【位相補正による利得可変】

Figure14 に示したようにスタッドを挿入することにより 7.15GHz での利得が低下し 19.34 dBi となり、要求値の 20dBi を下回った。この対策として位相補正をかけることによって利得増加を図る。給電位相は 8.4GHz 帯で均一分布に調整しているため、7.15GHz 帯では長路効果により位相差が生じ、5,6 列付近で位相が反転する。このため、この付近の位相を補正する事で大きな利得上昇が期待できる。Figure16 は 5,6 列付近の位相を変化させた時の均一分布 (8.4GHz) 時に対する利得の差分を表したもので、計算値はスタッドの影響を考慮していない。このように補正をかけることで、7.15GHz では大きく利得を増加させ、8.4GHz での利得低下量は少なく抑えることが可能である。実測結果から 4, 5, 6 列を各々 +30 度の補正をかけることで、7.15GHz では 3.2dB 増加し、22.54dBi の利得が得られた。一方、8.4GHz での利得低下量は 0.15dB と非常にわずかな値に止まり、35.35dBi となり、スタッド挿入後も両周波数帯において要求利得を満足することができた。

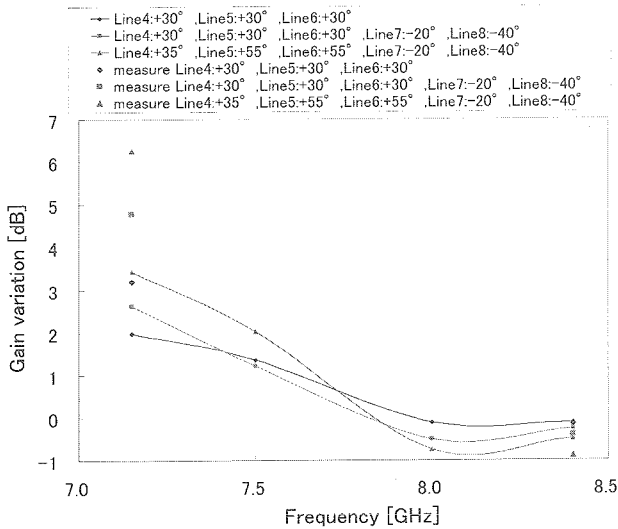


Fig.16 Gain variation affected by phase collection

【熱歪による影響】

熱構造モデルによる熱解析の結果、熱制御を施してもラジアル導波管表裏の温度差は、最大で約 120 度が予測されている。このため低線膨張係数の材質を使用し、低変形構造としている。熱解析結果から最も厳しい条件の一つである表裏温度差・表面側温度差最大ケースにおける熱歪解析結果は Figure17 のように求められる。このように歪量は非常にわずかで 1mm 以内に

取まっている。これを模擬した歪量を機械的に与え電気特性としてリターンロス特性と利得を実測した。この結果リターンロスは殆ど変化が無く、利得は 8.4GHz で 0.21dB 低下したが、7.15GHz では殆ど変化せず、影響は十分に小さいことが確認された。

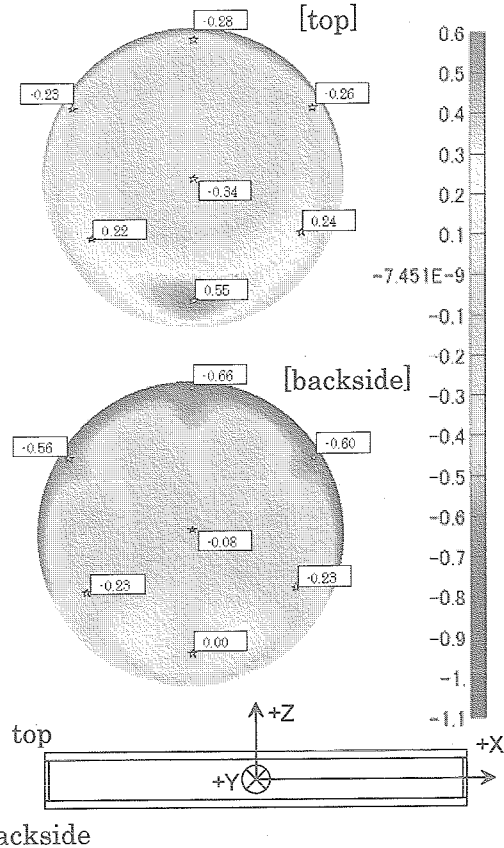


Fig.17 Thermal analysis result

6. まとめ

本報告では、MMO搭載用HGAとしてラジアルラインヘリカルアレーアンテナの実現に向け、7.15GHz 帯と 8.4GHz 帯の送受共用化と放射効率の観点からヘリカル素子の最適化を行い、ハーフサイズモデルにより得られた知見を基に、1/1 スケールモデルを製作した。その電気特性は、ほぼ期待された性能を示し、懸念されたスタッドの影響もそれほど小さくなく、位相補正により 7.15GHz での利得を上げることで両周波数帯の要求利得を満足できた。さらに最悪ケースの熱解析結果を模擬した熱歪量による利得低下量も十分に小さい値であることを確認した。これらのことから、MMO-HGAとして要求仕様を満足できる見通しを得た。

今後は、熱構造モデルによる温度試験により、熱解析値の妥当性を評価し、さらにPM, FMの製作を進めていく計画である。