

水星探査機 (MMO) 搭載用 円偏波ドーナツビームアンテナの開発

○川原康介、鎌田幸男 (JAXA 宇宙科学研究本部 技術開発部)

The Development of Circular Polarized Doughnut-shaped Beam Antenna for MMO
Kousuke Kawahara, Yukio Kamata (JAXA ISAS)

Abstract

The BepiColombo is the international cooperation between ESA and JAXA in order to explore the planet Mercury. This mission comprises two science elements, MPO to be produced by ESA and MMO to be produced by JAXA. The MMO communication system has two antennas for X-band telemetry and command links. High Gain Antenna (HGA) pointed by Antenna Despun Motor (ADM) and Antenna Pointing Mechanism (APM) is normally used for communication. However, the beam-width of HGA is so narrow that the Medium Gain Antenna (MGA) is also onboard for emergency TLM and CMD link. The radiation characteristics of MGA are required for omnidirectional pattern in the spin plane, circular polarization and wide frequency band (about 17%). We propose Dual-reflector Antenna consists of parabola reflector and conical reflector as the MMO-MGA and manufactured EM-MGA last year. It provides a circular polarized donut-shaped radiation pattern and it's satisfied with requirements. This paper mainly reports about the electrical features of MGA and compares computed results with measurements.

1. はじめに

ESAとの共同による国際水星探査計画 BepiColombo 計画は、水星の内部・表層・大気・磁気圏にわたる総合的観測によって水星の現在と過去を明らかにすることを目的とする、水星探査計画である。BepiColombo 計画は、ESA が担当する「MPO:Mercury Planetary Orbiter」と JAXA が担当する「MMO:Mercury Magnetospheric Orbiter」の2つの探査機から構成される。MMO概観図を Figure1 に示す。

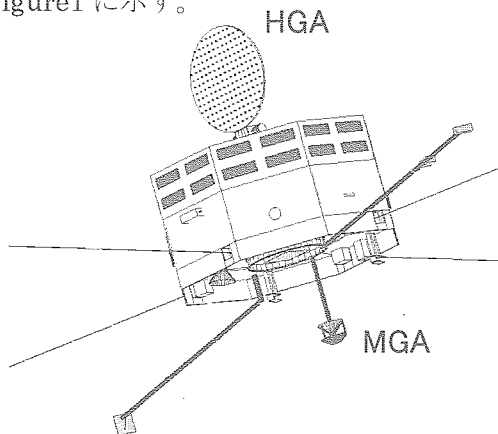


Fig.1 MMO overview

MMOは2005年4月以降、Phase-B (PM-Phase)へ移行し、2012年の打上げに向けて、現在各機器準備を行っている。MMO通信システムには、テレメトリ、コマンド、レンジングを共用とする高利得アンテナ (HGA: High Gain Antenna) を用いる。HGAはデスペン機構および上下角制御機構により地球指向されるが、そのビーム幅は約 2.5° と非常に狭いため非常時のテレメトリ、コマンド用アンテナとして中利得アンテナ (MGA: Medium Gain Antenna) を搭載している。各アンテナの搭載位置を Figure1 に示す。

MMOは、理学観測の性質からスピン安定性を採用している。そのため、MGAはスピン面内で無指向性な放射パターンを有していなければならない。また、通信回線計算から要求されるビーム幅 (Table1) により、偏波ロス (直線偏波では 3dB) の無い円偏波アンテナである事が必要条件となる上に、送受共用のため約 17% の広帯域特性が要求される。また、近日点における太陽との距離が 0.3AU であるため、太陽光

入力が 11Solar という厳しい熱環境にも適合し
なければならない。以上の条件を考慮した上で、
筆者らは 2 枚の反射鏡を組み合わせた双反射鏡
アンテナを提案し開発を進めている。

本報告では、PM-Phase 移行前の MGA-E M
の開発について報告する。最適化設計には T L
M (Transmission Line Modeling) 法による数
値解析を行っており、その結果を基にしたアン
テナの試作、測定を行っている。実測値と計算
値は良く一致しており、良好な電気特性が実現
している。

2. MMO 搭載用 MGA の概要

MMO 搭載用 MGA に対するシステム要求は
以下の通り、

[System Requirement]

- 1) Incident radiation : 11Solar
- 2) Directivity : Omnidirectional radiation
in the spin plane
- 3) Maximum gain
Telemetry : more than 5.9dBi
Command : more than 2.5dBi
- 4) Beam width : Table1
- 5) Frequency band
Telemetry : 8.4GHz
Command : 7.15GHz
- 6) Polarization : Circular
(Right Hand Circular Polarization)

MMO は水星周回探査機であるため、最大で
約 1.5AU の通信回線が要求される。計画軌道上
における探査機から地球までの距離とアンテナ
指向角の関係を Figure2 に示す。最大距離での
要求利得は通信回線計算により、テレメトリで
5.9dBi、コマンドで 2.5dBi であるので、Figure2

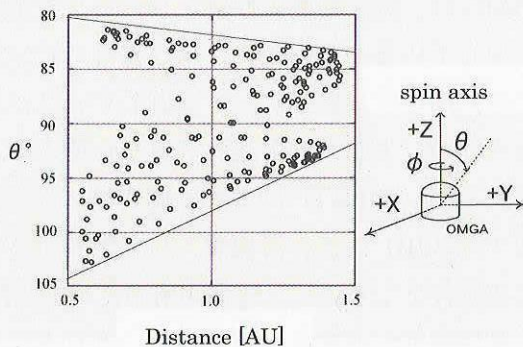


Fig.2 Relationship between orbiter-earth distance and direction from orbiter to the earth

に示す関係から MGA に対する要求利得とビー
ム幅の関係は Table1 で示す値になる。指向角
と要求利得の関係を図示したものが Figure3 で
ある。

Distance orbiter-earth [AU]	0.5	0.75	1	1.25	1.5
Beam Width (Up/Down) [deg]	+9.9 -14.3	+9.1 -11.2	+8.2 -8.0	+7.4 -4.9	+6.5 -1.7
CMD (7.15GHz) Required Gain [dBi]	-7.0	-3.5	-1.0	0.9	2.5
TLM (8.4GHz) Required Gain [dBi]	-3.6	-0.1	2.4	4.3	5.9

Table1 Required gain and beam width

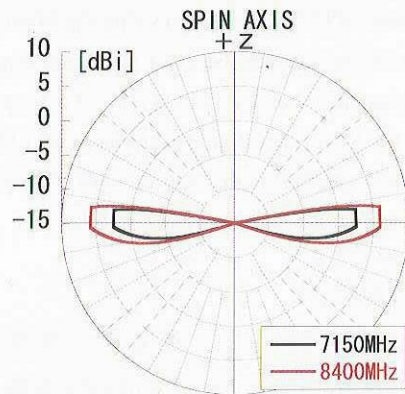


Fig.3 Required gain and directivity

3. MGA の構造

本アンテナは、パラボラ反射鏡をサブリフレ
クター、円錐鏡をメインリフレクターにもつ双
反射鏡アンテナである。その動作原理図を
Figure4 に示す。円錐鏡の頂点に位置する円偏
波発生器から放射された球面波が、パラボラ反
射鏡で反射されて平面波となり、下方に放射さ
れる。さらに円錐鏡で水平方向に反射され、水
平面において無指向性の放射パターンが実現さ
れる。また、パラボラ反射鏡の支持ならびに太
陽光の遮蔽のために、開口面がアンテナカバー
により覆われている。アンテナカバーには、飛
翔体搭載用アンテナとしても実績のある材質の
ポリイミド成形体が使われている。Table2 に材
質の特性を、Figure5 に電波の透過特性を示す。
支持構造としての強度保持と電波透過性の兼ね
合いから、カバー厚は 1 mm を採用している。

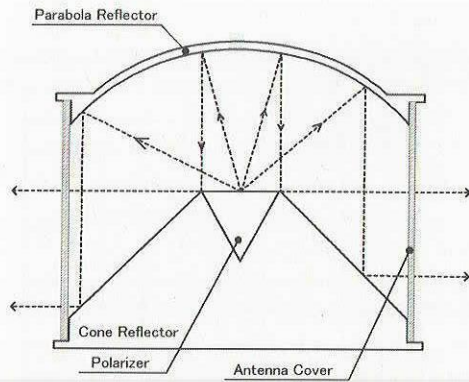


Fig.4 Dual-reflector antenna geometry

Material	Polyimide (CEPLA)
Permittivity	3.45
Tan δ	0.0012 (at 1kHz)
Thermal cracking temperature	548degC
Linear expansion coefficient	8.25×10^{-5} cm/cm/degC (at 200~300degC)
Radiation hardness	10^9 rad
Tensile strength	420kg/cm ² (at 260degC)
Bend strength	600kg/cm ² (at 260degC)

Table2 The properties of antenna cover

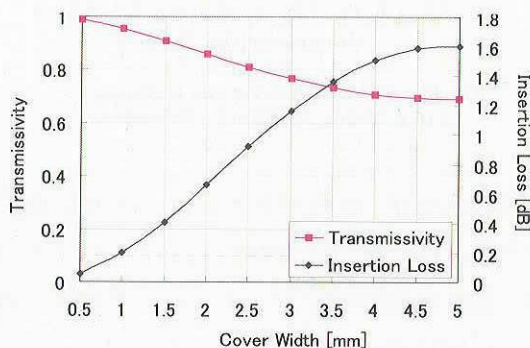


Fig.5 Radio-wave transmissivity and insertion loss

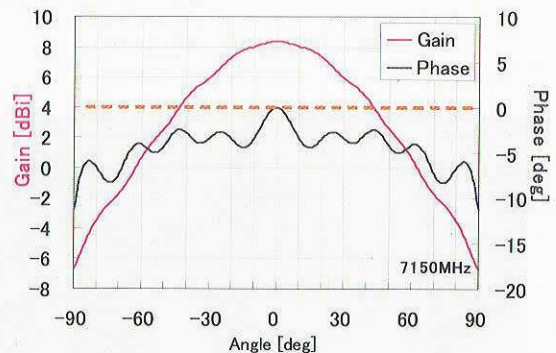
4. 最適化設計

アンテナの開口面積と放射利得、ビーム幅には密接な関係が有るため、本アンテナのように厳しいシステム要求が課されている場合には、最適寸法を十分に検討する必要がある。なお、最適化にはTLM法による数値解析を用いる。

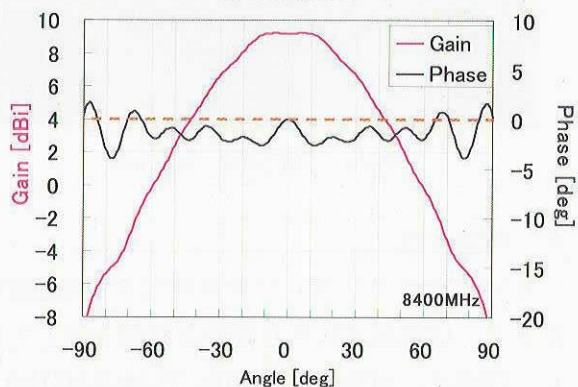
本アンテナの開口部は円錐鏡により決定するため、双反射鏡の間隔は狭く設計する事が望ましい。ゆえに、パラボラ反射鏡の開口角を 160° と限界に近い設計を行う事で焦点距離を短くしている。Figure6 に一次放射器 (円偏波発生器) の放射特性を示す。

Figure7 には、8400MHz でのアンテナ径に

対する $\phi=0^\circ$ 面での放射利得とビーム幅 (最大要求値 5.9dBi 以上) の変化を示している。また、最大要求利得 5.9dBi と、そのとき要求されるビーム幅 8.2° のラインも破線にて示している。アンテナ径が 200,220mm の場合には、放射利得・ビーム幅共にシステム要求値を満足するが、直径が 180mm の場合には要求利得を下回る。要求を満足する範囲で、アンテナ系を小さくする事がアンテナの小型化、軽量化に繋がるため、アンテナ径 200mm を最適寸法として採用している。Figure8 にアンテナ寸法図を、Figure9 に概観写真を示す。



(a) 7150MHz



(b) 8400MHz

Fig.6 Polarizer radiation properties

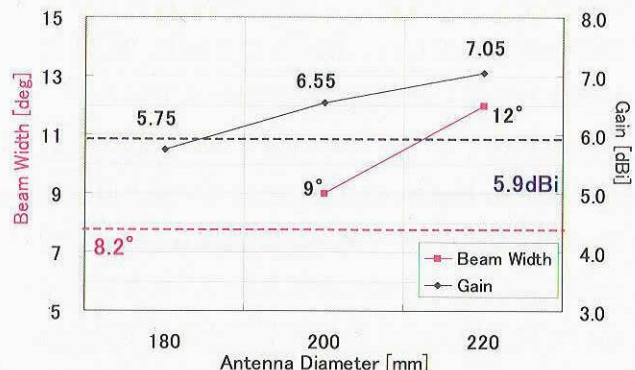


Fig.7 Gain and beam width at several antenna diameter

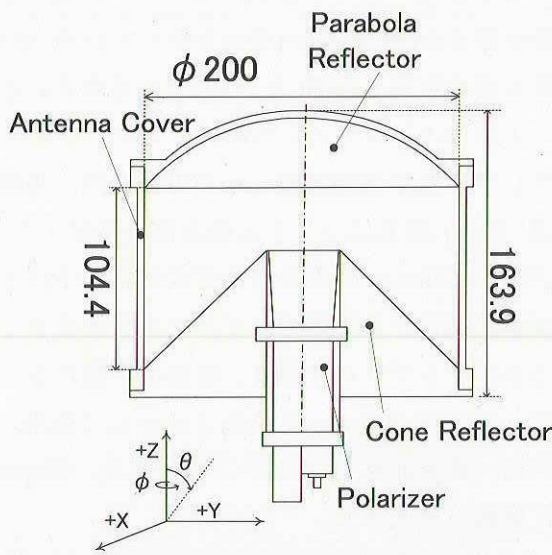


Fig.8 Dimensional drawing

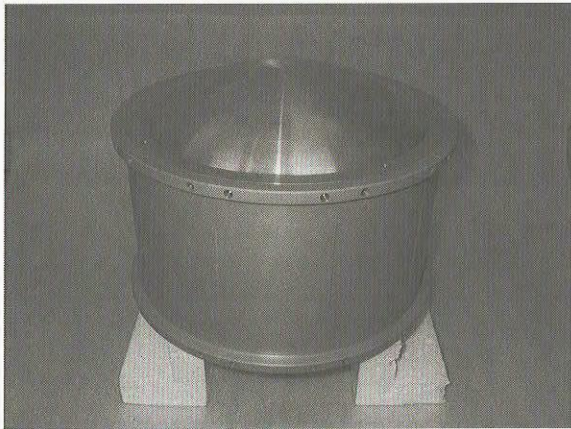


Fig.9 EM-MGA overview

5. 電気特性

本アンテナのリターンロス特性を Figure10 に示す。広帯域にわたり良好な特性を示しており、CMD(7.15GHz)で-20dB, TLM(8.4GHz)で-21dBである。Figure11 には、軸比(円偏波率)特性を示しているが、これも広帯域にわたって良好な特性が得られ、CMD で 2.5dB, TLM で 1.3dB と良好な円偏波特性が得られている。

放射特性として、スピン面($\theta=90^\circ$ 面)の放射パターンを Figure12,13 に、スピン面と直交する $\phi=0^\circ$ 面の放射パターンを Figure14,15 にそれぞれ示す。これらに示すように、スピン面においてほぼ円形の良好な無指向性特性が得られている。

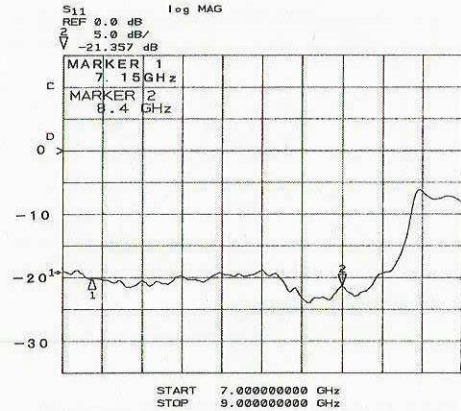


Fig.10 Return Loss

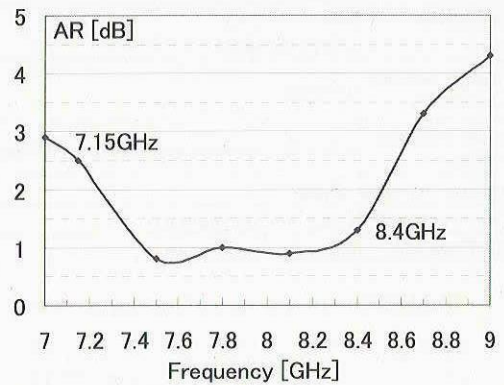


Fig.11 Axial Ratio versus frequency (in $\phi=0^\circ$ section, $\theta=90^\circ$)

さらに、 $\phi=0^\circ$ 面のパターンは、スピン面で最大となりほぼ軸対称かつサイドローブの殆ど無い優れた指向性を示している。要求値に対して、CMDでは十分に満足できており、TLMに関してほぼ満足する結果が得られている。また、解析値と実測値は良く一致している。

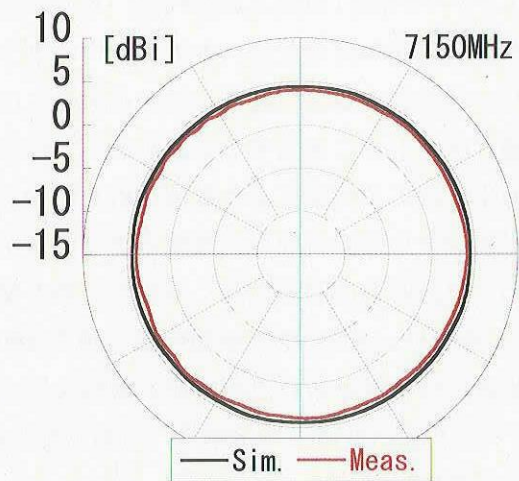


Fig.12 Radiation pattern at 7150MHz in the spin plane

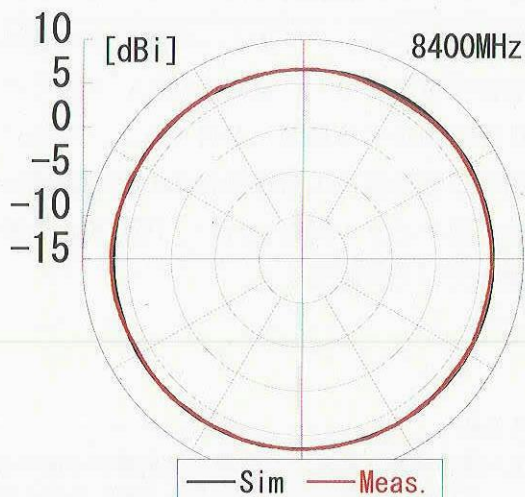


Fig.13 Radiation pattern at 8400MHz in the spin plane

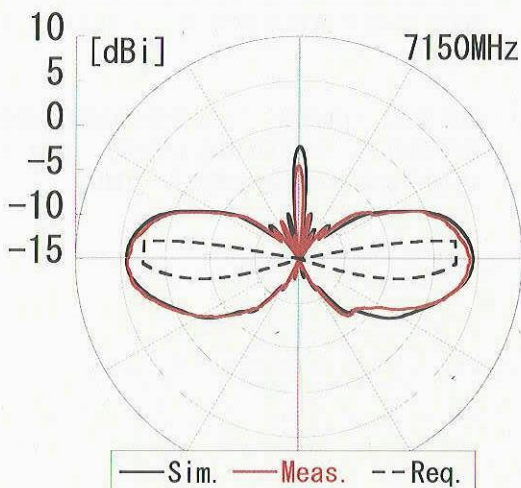


Fig.14 Radiation pattern at 7150MHz in the $\phi=0$ deg section

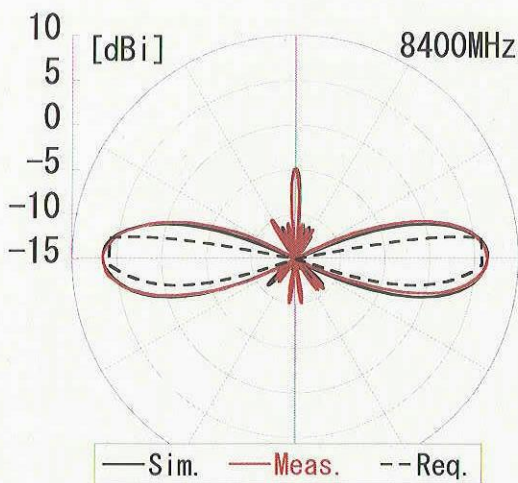


Fig.15 Radiation pattern at 8400MHz in the $\phi=0$ deg section

6. 従来型MGAとの比較

本アンテナ同様、ドーナツビームを有するアンテナの例として、PLANET-A 搭載用MGAの電気特性を紹介する。

PLANET-A(すいせい)は、ハレー彗星の探査を目的として1985年8月にM-3S-II ロケット2号機により打ち上げられた。MMOと同じくスピン衛星で、衛星下面にMGAが位置している。Figure16 に衛星概観図とMGA搭載位置を示す。

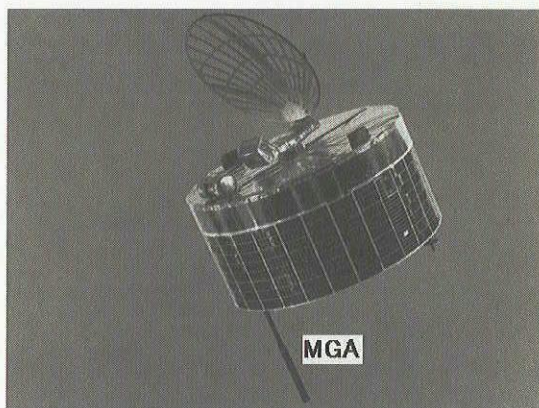


Fig.16 PLANET-A overview

アンテナの構造は、Figure17で示すように半波長ダイポールを3つアレイ化したコリニアアレイアンテナである。周波数はSバンドで、TLM : 2295.4MHz帯、CMD : 2113.6MHz帯である。Figure18に測定座標系を、TLMとCMDの放射パターンをFigure19,20にそれぞれ示す。

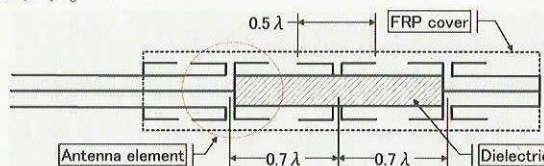


Fig.17 PLANET-A-MGA schematic view

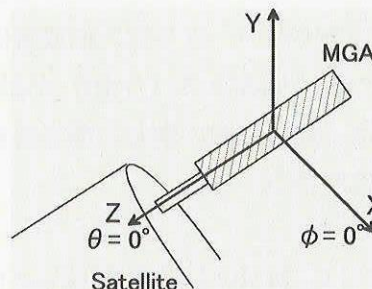


Fig.18 Coordinate system

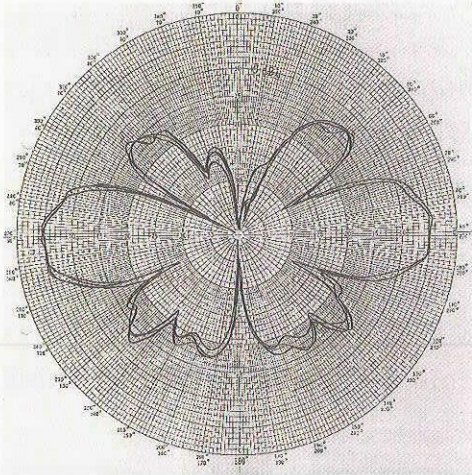


Fig.19 Radiation pattern (PLANET-A)
($\phi=0\text{deg}$ Section, TLM)

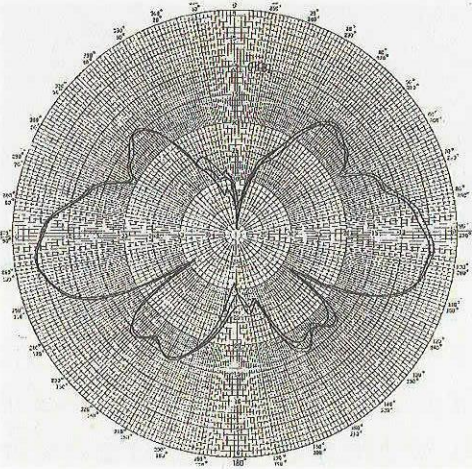


Fig.20 Radiation pattern (PLANET-A)
($\phi=0\text{deg}$ Section, CMD)

この型式のアンテナは、さきがけ(MS-T5),すいせい(PLANET-A),GEOTAIL等で使用されているが、その電気特性は双反射鏡アンテナと比べ乱れた放射パターンをしている上に、サイドローブが強く現れている。また、線上アンテナであるため、一般に周波数帯域が狭く今回の様に17%もの帯域を必要とする2周波共用アンテナとして適していない。さらに、偏波特性が直線偏波であるため偏波ロス(3dB)が発生する。このことは、通信回線の厳しい深宇宙通信において致命的である。

7. まとめ

本報告では、MMO搭載用MGAとして開発している双反射鏡アンテナの電気諸特性につい

て述べた。その放射特性は、サイドローブが殆ど無い放射パターンに加え、広帯域かつ良好な円偏波率特性を示し、MMO-MGAとしての要求仕様を満足する見通しが得られた。今後は、導電性白色塗装による電気特性の影響評価や塗装材の熱サイクル試験を行い、PM, FMの製作を進めていく計画である。

参考文献

- (1) 鎌田幸男、石丸元 ”二枚の反射鏡から構成される円偏波無指向性アンテナ” 2002年電子情報通信学会 ソサエティ大会 B-1-56
- (2) 鎌田幸男、川原康介、水野貴秀、石丸元 ”水星探査機搭載用広帯域円偏波無指向性アンテナ” 2003年電子情報通信学会 ソサエティ大会 B-1-70
- (3) 鎌田幸男、川原康介 ”水星探査機(MMO)無指向性中利得アンテナ(OMGA)の開発” 2004年第48回宇宙科学技術連合講演会 1H05