

排熱機能付アンテナの熱特性評価

小澤 雄一郎[†] 平野 敬寛[†] 藤原 栄一郎[†] 藤原 暉雄[†] 飯田 光人[‡]

篠原 真毅^{††} 三谷 友彦^{††}

[†](株)IHI エアロスペース 〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-1-1 豊洲 IHI ビル

[‡]千代田アドバンスト・ソリューションズ(株)

〒221-0031 横浜市神奈川区新浦島町 1-1-25 テクノウェイブ 100 ビル

^{††}京大大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: [†]{yuichiro-ozawa, takahiro-hirano, e-fujiwara}@iac.ihl.co.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp

[‡]teruhito.iida@chas.chiyoda.co.jp ^{††}{shino, mitani}@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし マイクロ波を用いた宇宙太陽発電システム (SSPS) では、送電器の電力増幅器において発熱を伴うため、その熱の適切な処理が必要である。そこで、発熱体である電力増幅器からアンテナに熱伝導させ、アンテナ面から輻射によって排熱させる構造の検討を行った。アンテナ構造は、背面とアンテナ面をビア接続して電力増幅器から効率よく伝熱させる構造とし、アンテナ面から効率よく輻射させるために、広い金属面を有するクロススロットアンテナとした。さらにアンテナ面に波長選択体を装着することで、太陽光などの外部からの入熱を遮断するとともに内部からの熱を赤外線です効率よく排熱できる構造とした。本報告では、検討したアンテナの熱特性試験を行った結果および取得した特性を用いた軌道上の熱シミュレーション結果について報告する。

キーワード クロススロットアンテナ、排熱、宇宙太陽発電システム

Thermal Characteristic Evaluation of Heat Radiation Antenna

Yuichiro OZAWA[†] Eichiro Fujiwara[†] Teruo Fujiwara[†] and Teruhito Iida[‡]

[†]IHI AEROSPACE CO., LTD. Toyosu IHI Bldg., 3-1-1 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, 135-0061 Japan

[‡]Chiyoda Advanced Solutions Corporation Technowave 100 Bldg., 1-1-25, Shin-Urashima-Cho, Kanagawa-ku, Yokohama 221-0031 Japan

E-mail: [†]{yuichiro-ozawa, e-fujiwara}@iac.ihl.co.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp [‡]teruhito.iida@chas.chiyoda.co.jp

Abstract For Space Solar Power System (SSPS) with microwave energy transmission, it is necessary to properly deal with the heat which is generated from power amplifier. We studied the antenna structure which conducted heat from power amplifier to antenna and radiated heat from the antenna surface. Via holes in the antenna can conduct heat from the back surface of antenna to the surface of one. The antenna is a crossed slot antenna, which can radiate heat efficiently because the metal surface is large. The antenna has a wavelength selection sheet on the antenna to cut heat from outside to the antenna and radiate heat efficiently. In this paper, we report the results of the thermal characterization test of the antenna.

Keyword Crossed Slot Antenna, Heat Radiation, Space Solar Power System

1. はじめに

マイクロ波を用いた宇宙太陽発電システム (SSPS) では、高出力デバイスである送電器の電力増幅器において発熱を伴うため、安定した動作のためには適切な排熱が必要である。しかし、能動的な熱制御システムを用いた場合、熱制御のための機能や構造が必要となり、システムが複雑化するとともに宇宙機の質量の増加、打ち上げ費用の増加にもつながる。そのため、シ

ステムに必要な最低限の装置で受動的な熱制御が可能であることが望ましい。これまで大規模フェーズドアレイにおいて回路面積を有効利用した上で効率的な排熱が可能で、立体回路構造を有する高出力アクティブ集積アンテナが提案されており、開発が進められている。[1] さらに SSPS では、内部で発生した熱を外部へ排熱するだけでなく、太陽光入射等による外部からの入熱も遮断できる必要がある。一般に宇宙機の受動型熱制

御素子としては、OSR（石英ガラスに銀を蒸着）、銀蒸着テフロンなどがある。これらは太陽光吸収率が小さくて赤外放射率が大きく、かつ宇宙放射線による劣化も少ないため、長寿命の衛星にとっては不可欠な材料である[2]。

そこで、SSPS で広大な面積となるアンテナ放射面を熱制御面として有効活用し、受動型熱制御素子を利用して内部で発生する熱を効率的に排熱する構造を検討した。

本報告では、受動的な排熱機能を有するアンテナの構造、熱特性試験、および試験から得られた排熱特性を使用した軌道上の熱シミュレーション結果について報告する。

2. 排熱機能付アンテナ

2.1. 構造

図 2.1-1 に排熱機能付アンテナ外観図を、図 2.1-2 に構造概要を示す。

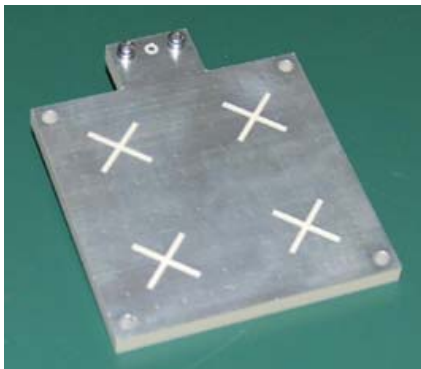


図 2.1-1 排熱機能付アンテナ外観図（64mm 角）

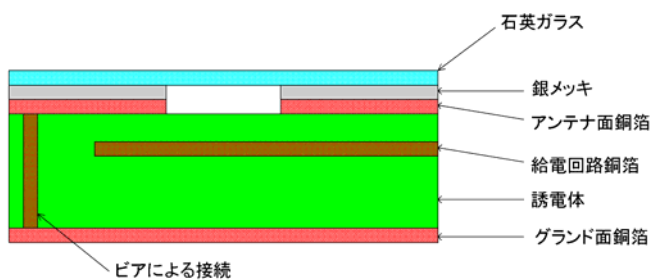


図 2.1-2 排熱機能付アンテナ構造概要

アンテナ面から効率良く輻射するために、広い金属面を有するスロットアンテナを採用し、SSPS では円偏波送電されることから、クロススロットアンテナとした。また、アンテナ表面には太陽光を反射させるために太陽光反射率の高い銀メッキを施し、さらにその表面には赤外輻射率の高い石英ガラスを接着した。

さらに、アンテナ背面からアンテナ放射面に効率良く伝熱させるために、背面の金属と放射面の金属間に複数のピアを設けて接続した。

2.2. 波長選択体の特性

アンテナ放射面に装着する波長選択体のテストピース（30mm 角）を用い、反射・放射特性の確認を行った。

図 2.2-1 に波長選択体（銀メッキ+石英ガラス）の反射特性を示す。石英ガラスの影響を確認するため、銀メッキのみの試験結果も併せて示す。太陽光の主要スペクトル範囲（波長 250nm～2500nm）では、石英ガラスの有無に関係なく反射率は平均 95%であった。

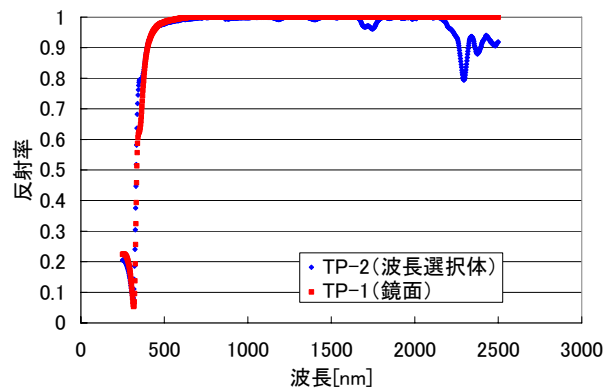


図 2.2-1 波長選択体の反射特性

図 2.2-2 に波長選択体の放射特性を示す。波長選択体の赤外領域（波長 $2.5 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ ）の放射率は平均 84%であったのに対し、銀メッキのみの場合は平均 2%であった。

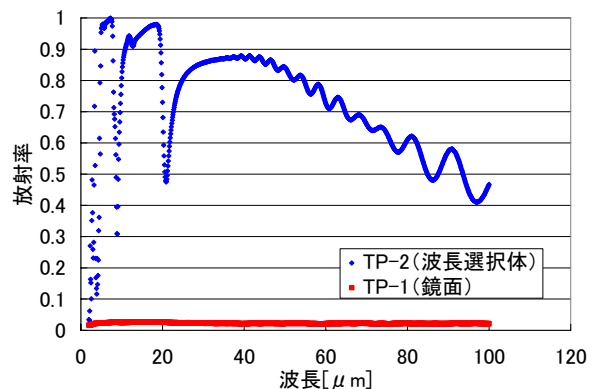


図 2.2-2 波長選択体の放射特性

以上より、本波長選択体は太陽光をほぼ反射し、熱は赤外線として輻射しやすいことが確認できた。

3. 排熱特性試験

3.1. 試験方法

図 3.1-1 に試験構成を示す。排熱機能付アンテナの背面には熱源である電力増幅器を接続する。アンテナと電力増幅器間には接触面を確保して安定して熱伝導するように航空・宇宙で使用されている熱伝導シート CHO-THERM1 を挿入する。この状態で電力増幅器の電源を ON し、各部の温度を測定した。測定温度結果から平衡温度を推定し、排熱機能付アンテナの熱コンダクタンスを算出した。

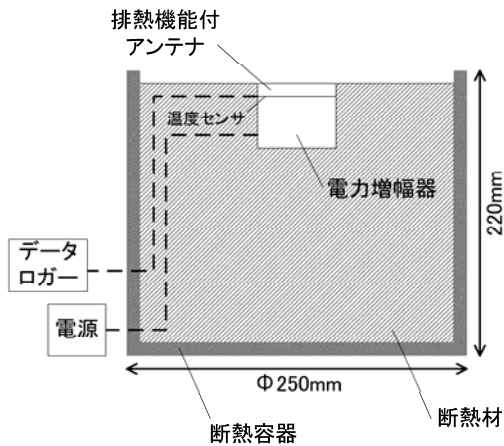


図 3.1-1 排熱特性試験構成

3.2. 試験結果

図 3.2-1 にアンテナ放射面およびアンテナ背面（アンテナと熱伝導シートの間）温度を試験結果から合わせこみ、平衡温度を推定したグラフを示す。このとき、電力増幅器の発熱およびアンテナの不整合による反射に起因する入熱量は 4.5W であった。

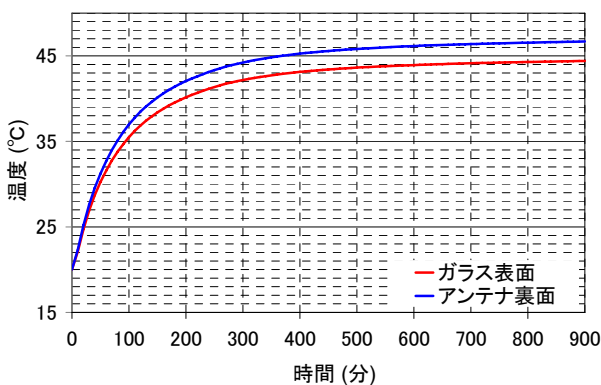


図 3.2-1 温度合わせこみ結果

入熱量と平衡温度から、アンテナ放射面からの排熱量を式 (1) (2) より算出した結果、1.15W であつ

$$q_{conv} = hA(T_s - T_a) \quad (\text{自然対流}) \quad \dots (1)$$

$$q_{rad} = \varepsilon_{IR} \sigma A (T_s^4 - T_a^4) \quad (\text{輻射}) \quad \dots (2)$$

ここで、

h : 0.75 W/m²K (自然対流の熱伝達率)

A : 64mm × 64mm (石英ガラス面積)

T_s : ガラス表面温度測定値

T_a : 22.5°C (雰囲気温度)

ε_{IR} : 0.84 (赤外放射率)

σ : 5.67 × 10⁻⁸ W/m²/K⁴ (ボルツマン定数)

アンテナ裏面とガラス表面の温度差 ΔT は 2.27K であったことから、式 (3) を用いて排熱機能付アンテナの熱コンダクタンスを算出した結果、0.50W/K であった。

$$C = \frac{q_{conv} + q_{rad}}{T_L - T_s} \quad (\text{熱コンダクタンス}) \quad \dots (3)$$

ここで、

T_L : アンテナ裏面温度測定値

4. 軌道上の熱シミュレーション

4.1. 熱モデルおよび解析条件

表 4.1-1 に示す軌道に対して熱シミュレーションを行った。図 4.1-1 に熱解析モデルを、表 4.1-2 にアンテナの材料特性を示す。電力増幅器から排熱機能付アンテナに入熱させ、アンテナの熱特性を計算した。SSPS では数 km にわたって同様の送電器が配置され、全て同様に発熱すると仮定し、図に示すモデルのアンテナ放射面以外は全て断熱とした。

表 4.1-1 シミュレーション軌道

	低軌道	静止軌道
近地点高度	692.9 km	35752 km
遠地点高度	711.4 km	35971 km
軌道傾斜角	98.2 度	0.17 度
周期	98.8 分	23 時間 59 分

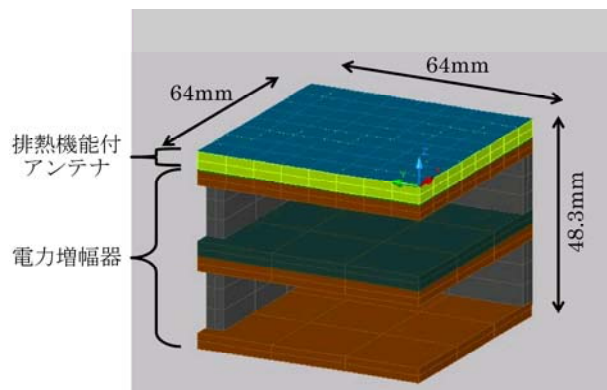


図 4.1-1 熱解析モデル

表 4.1-2 材料特性

材料	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/mK)	熱容量 (J/KgK)	厚さ合計 (mm)
石英ガラス	2200	1.38	772	0.2
接着剤	1030	0.16	1000	0.02
銀メッキ	N/A	429	N/A	0.006
銅箔	8960	401	385	0.105
誘電体	1910	0.42	920	4.5
熱伝導シート	1550	2.6	1000	0.38
ニッケルメッキ	8908	90.7	440	0.03
アルミプレート	2685	138	921	5

4.2. シミュレーション結果

入熱量を 0.5～8W で変化させた場合の電力増幅器筐体温度の変化を図 4.2-1 (低軌道) および図 4.2-2 (静止軌道) に示す。解析の初期温度は 20℃とした。

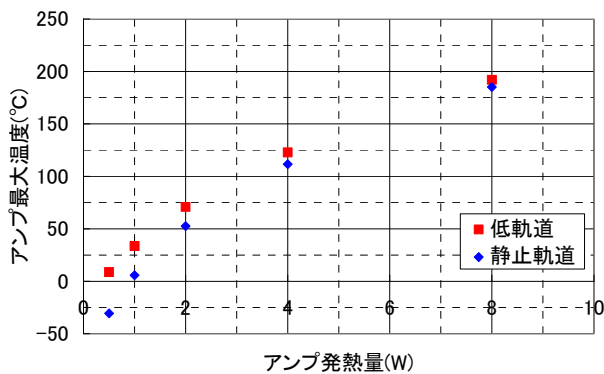


図 4.2-1 電力増幅器筐体温度

低軌道の平衡温度は静止軌道と比較して、10～40℃高い。これは地球のアルベド、赤外放射の影響と考えられる。今回使用した電力増幅器は雰囲気温度 40℃以下で使用することが条件となっており、入熱量（電力増幅器の発熱およびアンテナ不整合による反射に起因する発熱）は低軌道の場合 1.2W 以下、静止軌道の場合 1.8W 以下に抑える必要がある。

5. 考察

今回の電力増幅器および排熱機能付アンテナを SSPS に使用した場合、電力増幅器の温度は許容温度を逸脱する。従って、電力増幅器および排熱機能付アンテナの改善が必要である。ここでは排熱機能付アンテナの排熱について考察する。

本アンテナの誘電体は厚みが 4.5mm、熱伝導率は 0.42W/mK であり、アンテナの熱伝達への寄与が最も

大きい。よって排熱に適した誘電体の選定が必要である。また、アンテナ構造の改良により、熱コンダクタンスを大きくする工夫も必要である。本アンテナではアンテナ背面と放射面間の熱コンダクタンスを大きくするために複数の銅製ビアを用いてアンテナ背面と放射面を接続している。このビア直径を大きくする、もしくは数量を増やすことにより、熱コンダクタンスを大きくすることが可能である。図 5-1 にビア直径と熱コンダクタンスの関係を示す。例えばビア直径を 3mm に大きくすることで、本アンテナの熱コンダクタンスは 1.3W/K となり、今回製作したものの 2.6 倍となる。このように、構造の工夫によってさらなる改善の可能性を有するが、アンテナ誘電体部にビアを設けることはアンテナの VSWR、ゲイン、ビームパターン、軸比などの特性に大きく影響することから、アンテナ特性を考慮しながらの検討が必要である。

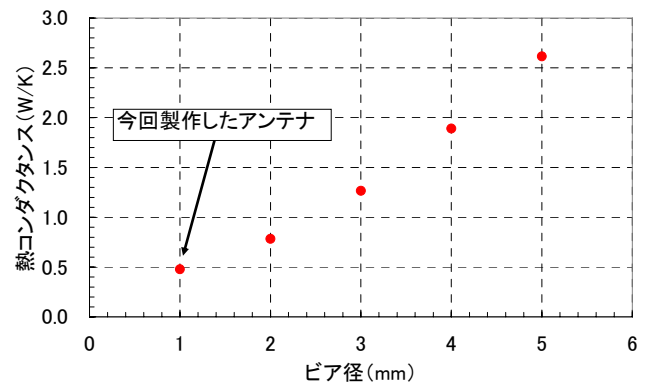


図 5-1 ビア直径と熱コンダクタンスの関係

6. まとめ

今回、SSPS 送電アンテナとしてクロススロットアンテナの表面に波長選択体を装着した排熱機能付アンテナの特性評価を行った。その結果、電力増幅器の発熱は低軌道の場合に 1.2W 以下、静止軌道の場合に 1.8W 以下であれば、本アンテナ表面からの輻射のみで排熱が可能であることがわかった。しかし、今回の試験で使用した電力増幅器およびアンテナ特性による入熱量は 4.5W であり、このままでは成立しない。よって、高温で動作可能な電力増幅器や、より高効率な電力増幅器の開発、クロススロットアンテナの不整合の改善、排熱可能量を増加させるアンテナ構造などの検討が必要である。

文 献

- [1] 七日市一嘉, 川崎繁男, 篠原真毅, 松本紘, 森雅裕, “廃熱構造を持つ SSPS 用アクティブ集積アンテナアレーの開発”, 信学技報, SPS2005-18, Mar. 2005.
- [2] 茂原正道・鳥山芳夫共著, 衛星設計入門, pp.112, ㈱培風館, 2002.