

Estimation of Substrate Parameter for High RF-DC Conversion Efficiency Rectenna*

Kan OKADA, Naoki SHINOHARA, Hiroshi MATSUMOTO

Kyoto University

Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

Abstract

In Space Solar Power Satellite system (SPS), it is very important to develop the RF-DC efficiency of Rectenna that changes microwave power into DC power. Moreover, since very huge Rectenna is needed, we need to make Rectenna cheaply. So, we notice the substrate to mount a rectification circuit. In our research group, experimental examination to the height of substrate was carried out to solve the relation between RF-DC conversion efficiency and substrate parameters. Moreover, also in the rectification circuit that uses the glass epoxy ($\epsilon_r \approx 4.2$) substrate that the substrate characteristic is generally considered to be bad, we could check about 63% RF-DC conversion efficiency that was comparatively high efficiency. So it is thought that there is a certain amount of selection nature in the parameter of the substrate needed for realization of efficient Rectenna. So, even if we don't use the expensive substrate like Teflon that is used mainly, it is assumed that high efficiency is kept by using a cheap substrate.

So, the purpose of this study is to carry out the detailed analysis and evaluation about the substrate parameter dependability of the RF-DC conversion efficiency by using a simulation.

In this study, dependability was examined about 4 parameters (ϵ_r , $\tan\delta$, h , t). When an ideal microstrip line is taken into consideration, there was no dependability to ϵ_r . But since the influence by a manufacture error became large relatively if ϵ_r became large when the error of actual line length and width was taken into consideration, the decline of RF-DC conversion efficiency became large. About $\tan\delta$, if it is to 0.01 or less, high efficiency is maintainable. So, Even if it is the substrate in which the characteristic is inferior to the expensive Teflon, it is thought that efficient Rectenna is realizable. About h , when an ideal line was taken into consideration, the dependability to RF-DC conversion efficiency was not almost seen. And, since the influence by a manufacture error became large relatively if h is small when the error was taken into consideration, decline of RF-DC conversion efficiency became large. About t , the dependability of the RF-DC conversion efficiency is not almost seen.

* Presented at the 7th SPS Symposium, 16-17 September, 2004

高効率レクテナ整流回路の基板パラメータ解析^{注1}

岡田寛、篠原真毅、松本紘（京都大学）

611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

kokada@rish.kyoto-u.ac.jp

要旨：宇宙太陽発電所 SPS において、マイクロ波で送電された電力を直流に変換するレクテナの高効率化が重要である。ここで、我々は、レクテナ整流回路を実現する基板に注目した。本研究では、レクテナ整流回路を実現する基板パラメータのうち、 ϵ_r 、 $\tan \delta$ 、 h 、 t の基板パラメータへの依存性についてシミュレーションを用いた、より詳細な解析を行うとともに、経済性・回路小型化などの課題を解決しつつ高効率が得られるレクテナの実現に最適な基板の検討を行うことを目的とする。

1. 研究の背景と目的

マイクロ波電力送電において、マイクロ波で送られてきた電力はレクテナ (Rectifying Antenna) により整流されて直流の電力に変換される。このレクテナの RF-DC 変換による損失はそのままマイクロ波送電の電力損失となり、SPS システム全体における電力損失に直接影響するため、その高効率化がきわめて重要な課題である。また、同時に、SPS では非常に巨大なレクテナが必要となるため、できるだけ安価なレクテナが要求される。

ここで、我々はこの効率化の実現のため、レクテナ回路を実現する基板に注目した。過去において、当研究グループではマイクロ波伝送用受電レクテナの RF-DC 変換効率と基板パラメータの関係について、特に基板厚に対しての実験的な検討がされている。これから、異なるパラメータを有する基板を用いたレクテナ整流回路でも、ある程度の高効率を保っていることが確認された^[1]。

また、一般に基板特性が悪いと考えられているガラスエポキシ ($\epsilon_r \approx 4.2$) を基板材質として使用したレクテナ整流回路においても、RF-DC 変換効率は 63% 程度の効率を得られていることから、高効率レクテナの実現に必要なとされる基板のパラメータにはある程度の選択性があるものと考えられる^[2]。つまり、現在主に使用されている高価なテフロン基板を用いなくても、安価に高効率を保つことができる可能性があると考えられる。そこで今回、我々は、このレクテナの RF-DC 変換効率の基板パラメータ依存性について、シミュレーションを用いたより詳細な解析・評価を行うとともに、回路小型化や経済性などの課題を解決しつつ、高効率を得られるレクテナの実現に最適な基板パラメータを検討することを目的とする。

^{注1} 第7回 SPS シンポジウム、九州工業大学にて 2004 年 9 月 16、17 日開催

2. レクテナ整流回路基板パラメータと検討回路構成

検討する基板パラメータとパラメータ解析の

基準となるパラメータ値を以下に示す。

1. ϵ_r (比誘電率) = 10.0
2. $\tan \delta$ (誘電損失) = 0.0050
3. h (基板厚) = 1.6 mm
4. t (導体厚) = 18 μm

基板パラメータ解析に用いた基本整流回路の構成と、その回路での入力電力に対する RF-DC 変換効率を図 1、図 2 に示す。また、今回使用したダイオードは Agilent 製の HSMS-2855 である。基板には、中興化成工業株式会社の CGC-500 JE1002 を想定した。

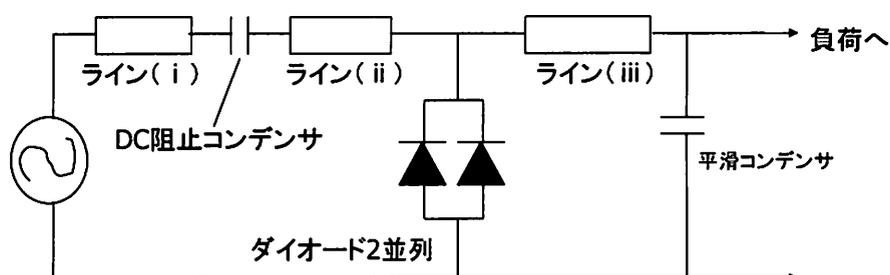


図 1 : 整流回路構成

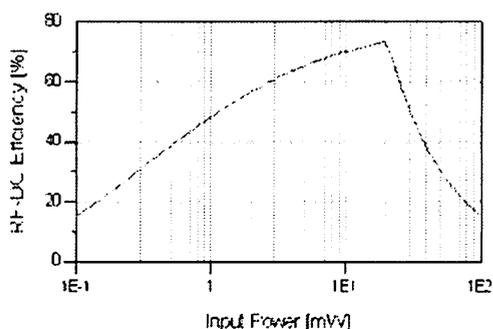


図 2 : 入力電力に対する RF-DC 変換効率

3. 理想回路における RF-DC 変換効率の基板パラメータ依存性

上記、基準パラメータの値を基にして各パラメータを変化させることでレクテナの RF-DC 変換効率が基準 RF-DC 変換効率からどの程度変化するかを検討した。今回、検討したレクテナ整流回路は、理想的なマイクロストリップラインを考えており、ラインのインピーダンスと位相を与えるもので、 ϵ_r や、 h 、 t を変化させても、RF-DC 変換効率はほとんど変化することはなかった。しかし、 $\tan \delta$ については、レクテナ整流回路の RF-DC 変換効率に大きな変化が見られた (図 3)。

$\tan \delta$ がある一定のところまでは RF-DC 変換効率の低下は僅かだが、それ以上になると急激に低下している。これより、最大 RF-DC 変換効率 ($\tan \delta = 0$ のとき) の 0.95 以上を確保するためには誘電損失 ($\tan \delta$) は 0.013 以下であることが必要であることが分かる。

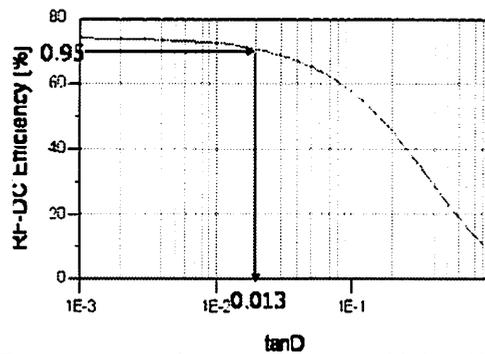


図 3 : RF-DC 変換効率 $\tan \delta$ に対する依存性

4. RF-DC 変換効率の基板パラメータと試作精度誤差への依存性

前節の検討では、理想的な線路のインピーダンスと位相を与えていたが、実際には、ラインの実際の長さや幅を与えるため、必然的に製作誤差が生ずる。そこで、次に、各パラメータを変化させた場合において、整流回路におけるマイクロストリップラインのライン長やライン幅に誤差が生じたときに、どの程度 RF-DC 変換効率が変化するかを検討した。

図 1 から分かるように、今回検討した整流回路には 4 つのマイクロストリップラインがあるが、図 1 の (i) ~ (iii) のラインについて製作誤差を考慮して検討した。

- (1) ϵ_r を変化させた場合に、ダイオード・平滑コンデンサ間のライン長および幅に誤差があると、 ϵ_r が大きくなるにつれて、RF-DC 変換効率の低下も大きくなっている。例えば、ダイオード・平滑コンデンサ間のライン長誤差が 0.2 mm ある場合に、 $\epsilon_r = 20.0$ とすると、 $\epsilon_r = 2.0$ のときに比べて、約 4% の RF-DC 変換効率の低下が見られた。また、ダイオード・平滑コンデンサのライン幅やダイオード・DC 阻止コンデンサ間のライン長が変化した場合にも、大きな効率の変化が見られた。

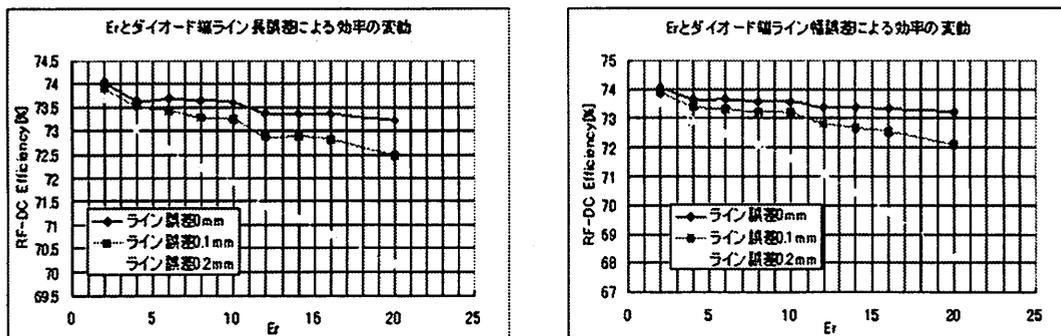


図 4 : RF-DC 変換効率の ϵ_r に対する依存性 (ダイオード・平滑コンデンサ間のライン (iii) に製作誤差がある場合)

- (2) $\tan \delta$ を変化させた場合、理想的なラインを想定した場合と、ほぼ同様に、 $\tan \delta > 0.01$ で急激に RF-DC 変換効率が落ち込んでいることが確認された。また、製作誤差による変化もほとんどなく、わずかに効率が低下するのみであった。

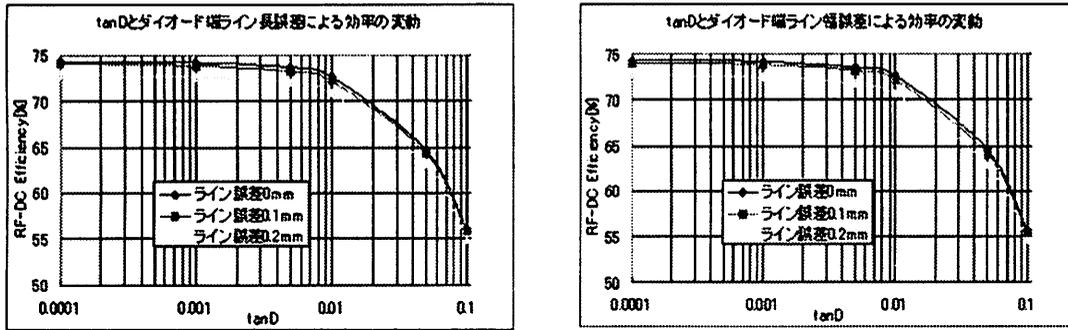


図5：RF-DC変換効率の $\tan \delta$ に対する依存性（ダイオード・平滑コンデンサ間のライン(iii)に製作誤差がある場合）

- (3) h を変化させた場合、ダイオード・平滑コンデンサ間のライン幅に製作誤差があると、 h が小さくなるにつれて、極端にRF-DC変換効率が低下している。これは、 h が小さくなるとライン幅は狭くなるため、製作誤差の影響が相対的に大きくなるためである。これより、 ± 0.2 mmの誤差がある場合に、効率の低下を3%程度に抑えるためには、 $h > 1.2$ mmである必要があることが分かる。

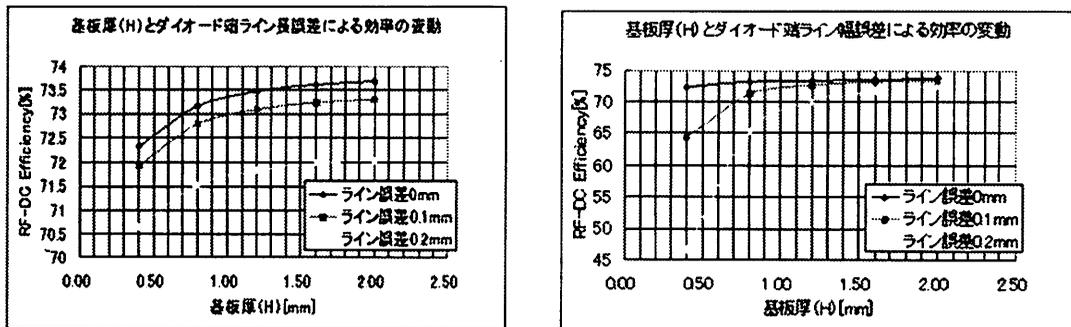


図6：RF-DC変換効率の h に対する依存性（ダイオード・平滑コンデンサ間のライン(iii)に製作誤差がある場合）

- (4) t を変化させた場合、製作誤差が大きくなるほど、効率は大きく低下する（製作誤差が ± 0.2 mmの場合、約2~4%RF-DC変換効率が低下する）が、RF-DC変換効率の t に対する依存性はほとんど見られなかった。

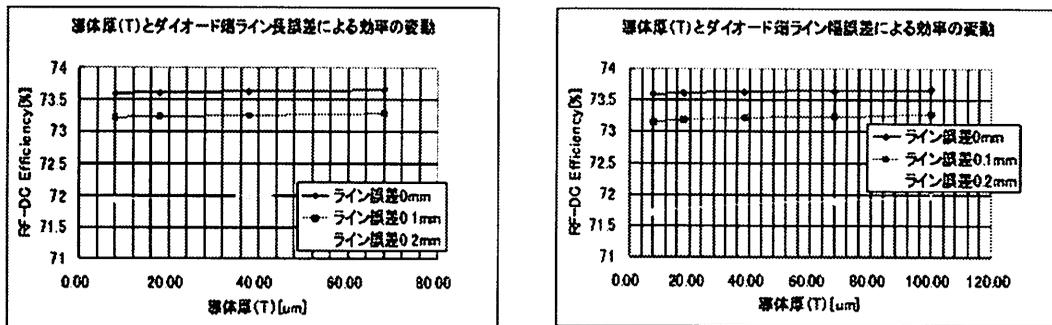


図7：RF-DC変換効率の t に対する依存性（ダイオード・平滑コンデンサ間のライン(iii)に製作誤差がある場合）

5. まとめ

- (1) ϵ_r については、理想的なラインを考慮した場合は、RF-DC 変換効率に対する依存性はほとんど見られないが、実際のライン長・幅の製作誤差を考慮した場合、 ϵ_r が大きくなると誤差による影響が相対的に大きくなるため、RF-DC 変換効率の低下が大きくなる ($\epsilon_r = 15$ のとき、約 3~5%低下)。レクテナ面積を小さくするためには、ある程度大きな値が必要であると考えられる。
- (2) $\tan \delta$ については、0.01 以下までであれば、高効率を維持できる。このことから、現在、主に使用されている高価なテフロン基板 ($\tan \delta = 0.0050$) よりも多少、特性の劣る基板であっても、高効率レクテナを実現できると考えられる。
- (3) h については、理想的なラインを考慮した場合は、RF-DC 変換効率に対する依存性はほとんど見られないが、製作誤差を考慮した場合は、 h が小さいと、誤差による影響が相対的に大きくなるため、RF-DC 変換効率の低下が大きくなる (ダイオード・平滑コンデンサ間のラインの誤差による影響が最も大きく、 $h = 0.50\text{mm}$ のとき、製作誤差が $\pm 0.20\text{mm}$ あると、約 25%の効率の低下)。
- (4) t に対する RF-DC 変換効率の依存性はほとんど見られない。

6. 今後の検討事項

今回の検討では、基本的なダイオード 2 並列整流回路についてのパラメータ解析を行ったが、さらに異なった整流回路についても検討を行う。そして、これらの基板パラメータ解析による検討により、経済面や、回路小型化などの課題を解決しつつ、高効率の RF-DC 変換効率を得られ、かつ製作に適した基板パラメータを検討し、提案するつもりである。さらに、実際に、提案した基板を用いてレクテナを製作し、その特性の評価を行いながら、高効率レクテナの実現に役立てる予定である。

参考文献

- [1] 古川正利, “マイクロ波エネルギー伝送用受電レクテナの開発研究”, 修士論文, 平成 8 年.
- [2] 武市統, 篠原真毅, 松本紘, 橋本弘蔵, “マイクロ波送電用整流回路の小型軽量化に関する研究”, 信学論誌(B), vol.J86-B, no.5, pp.1374-1383, 2003 年 5 月