

研 究

## 6. レクテナからの高調波再放射の測定

藤野 義之\*<sup>1</sup> 藤田 正晴\*<sup>2</sup>

(1998年6月15日受理)

### 6. MEASUREMENT OF RERADIATION OF MICROWAVES FROM A RECTENNA

By

Yoshiyuki FUJINO and Masaharu FUJITA

Although microwave power transmission has many applications, it also could cause electromagnetic interference in other radio systems because of its relatively high transmission power. The interference caused by the reradiation of higher harmonic waves from the rectenna may be particularly serious because the higher harmonic frequencies are usually allocated to purposes other than microwave power transmission. This paper proposes a practical method to measure the reradiation of higher harmonic waves from a rectenna. Reasonable agreement between measured and calculated results proves the validity of the present measurement method.

[キーワード] マイクロ波電力伝送, レクテナ, 高調波再放射, ダイポールアンテナ, マイクロストリップパッチアンテナ

Microwave power transmission, Rectenna, Harmonics reradiation, Dipole antenna, Microstrip patch antenna

#### 1. ま え が き

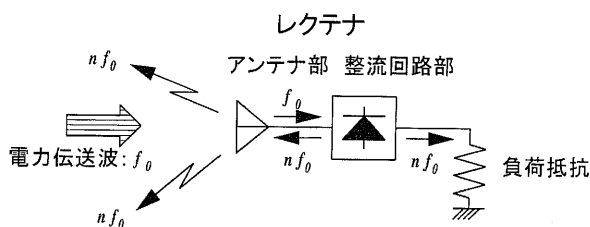
マイクロ波電力伝送は高出力のマイクロ波を扱うため、電磁環境問題を惹起する可能性があり、この部分への取り組みがマイクロ波電力伝送技術を用いたシステムの実用化の鍵となると考えられている。電磁環境問題の要因はいろいろ考えられる<sup>(3)</sup>が、そのうちの一つは、高調波の放射に伴う他の通信システムへの妨害であり、この原因となるものが、送電アンテナで発生する高調波と、レクテナから再放射される高調波である。レクテ

ナでは整流素子として非線形素子であるダイオードを使用しており、このことでアンテナから入力された電波(周波数 $f_0$ )を整流して直流電力に変換する機能を有しているが、同時に基本波の整数倍の高調波(周波数: $2f_0, 3f_0, \dots, nf_0$ ,  $n$ は整数)を生成する(第1図)。この高調波は通常レクテナに設けられているフィルタで取り除かれるが、その残留成分はアンテナから再放射される。この再放射された高調波成分は通常通信に使用される周波数帯域内となることが多いため、電波障害の原因となると考えられる。成層圏無線中継システムではレクテナは高度20 km付近に滞空する飛行体に搭載されるので、このようなレクテナからの高調波再放射による障害が発生すると、そ

\*1 企画部企画課(ATR環境適応通信研究所出向中)

\*2 地球環境計測部

\*本論文の内容は文献(1), (2)で発表したものである。

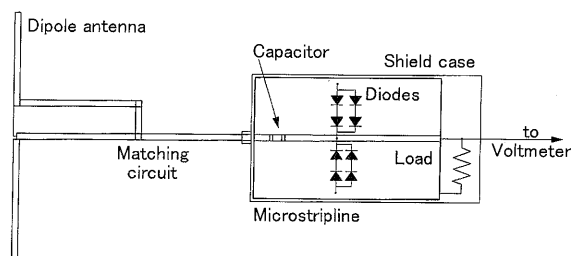


第1図 レクテナからの高調波再放射の説明図

の影響は送電アンテナによるものよりも広範囲に及ぶと考えられる。したがって、レクテナからの高調波再放射量の把握とその定量的な評価は重要な課題である。

反射板付きダイポールアンテナを使用したレクテナからの高調波再放射の理論的な検討が東北大学の島貫他<sup>(4)</sup>によって行われており、この中でアンテナ部の入力インピーダンスの周波数特性を含んだレクテナの高調波再放射量の厳密な計算を行っている。一方、実験的にはレクテナの整流回路部のみについて高調波の発生特性を取得し、再放射特性を評価する方法が広く用いられている<sup>(4), (5)</sup>。また、素子アンテナ形状を工夫することによって高調波再放射の抑止効果をもたせる検証実験において、整流回路部の高調波発生特性の実験値およびアンテナ部の動作利得の実験値から高調波再放射のレベルを推定すること<sup>(6)</sup>も行われた。これらの方法は高電力のマイクロ波送電系を使用する必要がないが、その妥当性については十分に検討されていない。

レクテナから空間に再放射された高調波を直接観測した例はきわめて少ない。R. M. Dickinsonは太陽発電衛星 (SPS) を想定した測定を行っている<sup>(7)</sup>が、送電機の出力電力が20 Wと比較的低いため、実際のマイクロ波送電に必要な電力束密度の環境を実現できているかどうかについて疑問がある。レクテナから再放射される高調波のレベルは、送電機自体で発生する高調波のレベルと比較してきわめて微弱であるため、有効な測定を行うためには送電機から発生する高調波を十分に抑圧する必要がある。しかし、このことは容易ではなく、測定例が少なく測定法も確立していない一つの理由と考えられる。しかしながら、レクテナからの再放射高調波の実態を解明し、その定量評価法を確立することは、マイクロ波送電技術を実



第2図 ダイポールレクテナの構成図

用化する際の技術的な基準を検討する上からも重要である。

本論文ではレクテナから空間に再放射される高調波を実際に測定し、整流回路部およびアンテナ部の個々の特性から推定される高調波の再放射特性との比較をもとに、レクテナからの高調波再放射特性の評価法について検討した結果を述べる。

## 2. ダイポールレクテナの構成<sup>(1)</sup>

第一の供試レクテナとして、ダイポールアンテナを素子とするレクテナを使用した。アンテナ素子としてダイポールアンテナを採用した理由は、それが基本的な素子で高調波周波数における特性が分かりやすく、また後述するように一次元形状であるために高調波測定系を構成し易い点などである。このレクテナの構造を第2図に示す。スタブで整合されたダイポールアンテナ部と整流回路部はコネクタで接続されている。

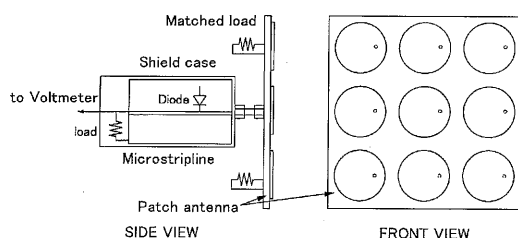
ここでは、レクテナからの再放射を測定することが目的のため、整流回路部には給電点側に直流カット用のキャパシタンスを挿入した他は、通常レクテナに設けられる高調波抑止用のフィルターはあえて省略した。従って、ダイオードで生成した高調波をダイオード側に反射させる構造が無く、マイクロ波-直流 (以下 RF-DC という) 変換効率を最大化するために最適化されたレクテナ構造ではないが、逆に整流回路からの高調波の発生量が多いので測定が容易となり、高調波再放射の実験値と推定値の比較が正しく行えるという利点がある。本レクテナでは1整流回路あたり8本のダイオードを直並列に接続した整流素子を使用しているが、これはレクテナの高電力化を図り、実際の成層圏無線中継システムで想定される程度のマイクロ波入射電力レベルを取り扱うことを目的と

している。ダイオードは1SS 97-2（耐圧 30 V，全容量 1 pF）および HP 5082-2350（耐圧 30 V，全容量 0.9 pF）の 2 種類を使用し，ダイオードの違いによる再放射特性の違いを検討できるようにした。

さらに，マイクロストリップ線路上でダイオードの位置を変化させることで，RF-DC 変換効率最良の点を実験的に求めた。アンテナを経由せず，ダイオードのリード線等から直接空間に放射される高調波は，レクテナ全体をシールドケースで覆うことにより抑止した。また，出力フィルタを使用していないために負荷抵抗に至る直流バスラインから高調波が再放射される可能性があるため，この抑止のために負荷抵抗をシールドケース内に収め，その両端の電圧をシールド線により取り出してモニターした。

### 3. パッチレクテナの構成<sup>(2)</sup>

第二の供試レクテナとして，円形マイクロストリップパッチアンテナを素子アンテナとするレクテナを使用した。これは，薄型であり成層圏無線中継システムのためのレクテナとして適していること，および円形パッチアンテナが高次高調波に対して共振を起こさず，その大きな反射損のためにダイポールアンテナ等と比較して，高調波の再放射を抑止できる<sup>(8)</sup>ことを考慮したためである。パッチレクテナの構成図を第 3 図に示す。アンテナ部は周波数 2.47 GHz の直線偏波円形マイクロストリップパッチアンテナであり，1.6 mm 厚さのガラスクロスステフロン基板（ $\epsilon_r=2.17$ ）上に構成され，ピンによって給電を行っている。アンテナは 9 素子のアレーであり配列は 0.7 波長間隔の正方配列である。実験に際しては中央のアンテナ素子にのみ整流回路を接続し，残りの素子は整



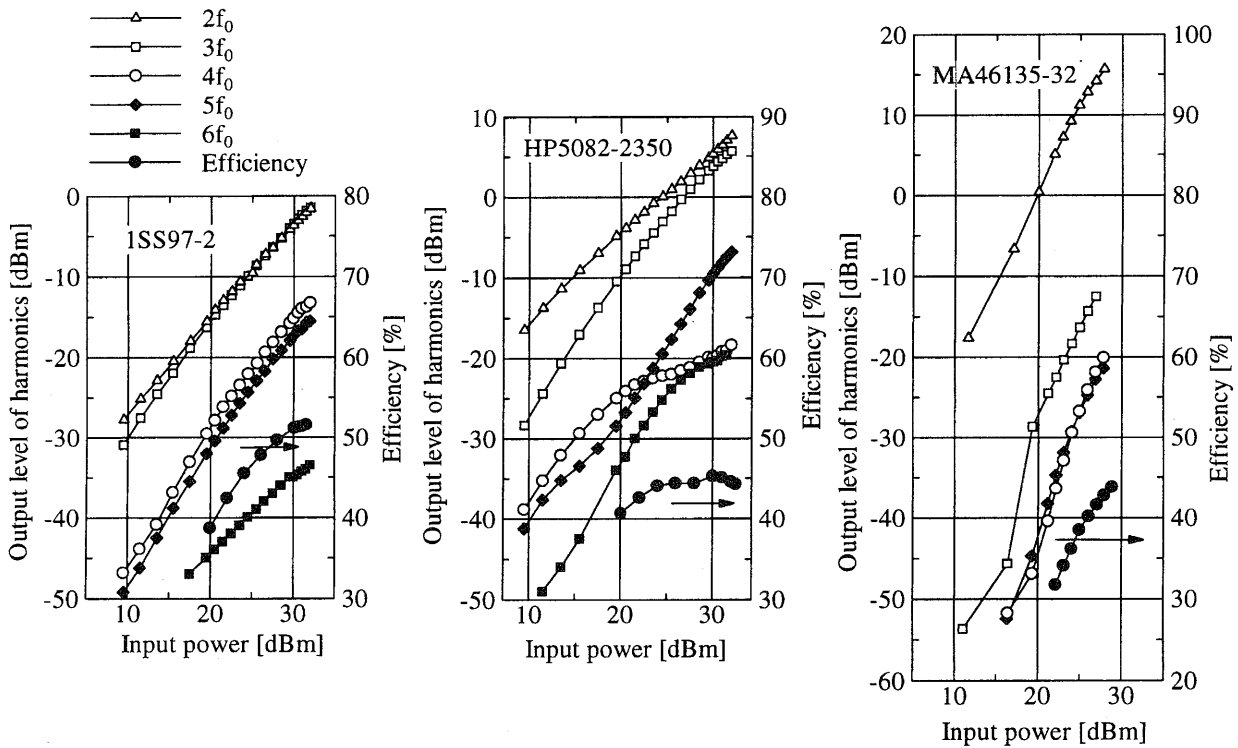
第 3 図 パッチレクテナの構成図

合終端した。パッチレクテナの場合ダイポールレクテナのように，アンテナ部が直流的に短絡されていないため，第 2 図における整流回路において直流カット用のキャパシタンスを省略した他，さらに 1 本で高出力が期待できるダイオード（型番 MA 46135-32，耐圧 60 V，全容量 2.4 pF）を用いることとした。2 節と同様に整流回路部とアンテナ部は，コネクタを使って接続している。また，負荷と整流回路はともにシールドを施している。

### 4. 整流回路部の特性

整流回路部の効率が最高となる動作点は，ダイオードの特性および入力電力によって変化する。ここではマイクロ波駆動小型模型飛行機駆動実験の際の定格電力束密度  $200 \text{ W/m}^2$ <sup>(9), (10)</sup>を参考にして，一整流回路あたりの入力電力をおおむね 1 W に固定し，負荷抵抗を変化させて最高効率を示す抵抗値を求めた。1SS 97-2 および HP 5082-2350 ダイオードを用いた整流回路の最適負荷抵抗は  $150 \Omega$  であり，MA 46135-32 ダイオードを用いた整流回路の最適負荷抵抗は  $210 \Omega$  であった。このため，以降の実験はすべてこれらの抵抗値を使用した。

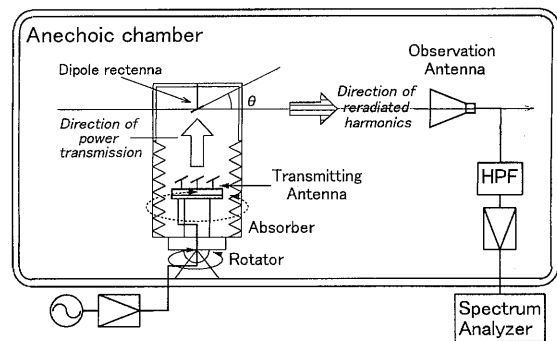
整流回路から発生する高調波を，入力電力を変えて測定した結果を第 4 図に示す。ダイオードによる非線形性のため，1SS 97-2 および HP 5082-2350 ダイオードの 2 次高調波の出力電力は，1 W 入力の付近では，入力電力の 1.1 乗に比例している。一方，MA 46135-32 ダイオードでは，2 次高調波の出力電力は入力電力が 100 mW から 1 W までの間で入力電力の 1.9 乗に比例している。また，3 次高調波の出力電力は，同じ入力電力区間内で入力電力の 2.2 乗に比例している。ダイオードの種類の違いによって，2 次高調波で 11 dB 程度の再放射量の違いがあり，高調波再放射量を評価する上で，ダイオードの選択による違いも大きいことが分かる。また，第 4 図に整流回路の RF-DC 変換効率を併せて示す。フィルタを省略しているため，回路部の RF-DC 変換効率は 50 % 前後であった。



第4図 整流回路部の入力電力対高調波強度並びにRF-DC変換効率

### 5. ダイポールレクテナからの高調波再放射測定系<sup>(1)</sup>

ダイポールレクテナから再放射され、空間を伝搬する高調波を測定するために、第5図に示す測定系を電波暗室内に構成した。送電アンテナから上方向に送電された2.41 GHzの電波は、50 cm (d1) 離れた位置に設置されたレクテナで受電される。本送電アンテナは6素子アクティブフェーズドアレーアンテナであり、電力分配器、4ビットデジタル移相器、電力増幅器および反射板付きダイポールアンテナで構成されている。各電力増幅器の出力電力は10 Wであるため、本送電アンテナの出力電力は約60 Wである。実験時には、移相器の移相量を調整してレクテナに送電ビームを集中させた。この送電系全体は回転台の上に設置されており、レクテナおよび送電システム全体を回転することによって高調波再放射の角度特性を測定することができる。レクテナで発生した高調波は、回転中心から水平方向に3 m (d2) 離れた場所に設置された観測用の広帯域ダブルリッジガイドアンテナで受信される。ここで、送電ア



第5図 ダイポールレクテナから再放射される高調波の角度特性の測定系

ンテナからの高調波放射が観測用アンテナに入射し、干渉の原因となることを防ぐために、送電アンテナの回りを電波吸収体で覆うことで高調波の抑止を図った。観測用アンテナの出力端には、高レベルの基本波によるスペクトラムアナライザの感度抑圧を防止するためのハイパスフィルタ、および高調波に対する感度の向上のための広帯域アンプを挿入している。この出力をスペクトラムアナライザで各次高調波に対して観測することにより、高調波の角度特性を測定した。

著者らが行った以前の実験<sup>(11)</sup>では、送電アンテナから放射される高調波がレクテナからの高調波に比べてかなり大きく、これがレクテナから空間に再放射された高調波の直接測定を困難にしている最大の原因であった。今回、ダイポールアンテナが1次元形状をしており、高調波はダイポールアンテナのH面に等方的に再放射されることを利用して、送電アンテナからレクテナへの送電系の伝搬路と、レクテナからダブルリッジガイドアンテナへの観測系の伝搬路を直交させ、さらに送電アンテナの回りを電波吸収体で覆うことにより、送電アンテナから発生した高調波とレクテナで発生した高調波の間のアイソレーションを確保した。

第6図(a)および(b)に、本測定系の写真を示す。(a)の写真は測定系の全景を示し、手前側にある観測用アンテナから送電部および受電部をみている。送電アンテナは中央部の電波吸収体に囲まれており、この写真では見ることができない。ダイポールレクテナは発泡スチロールの枠の中央部に設置されている。(b)の写真は送電部および受電部の拡大写真であり、送電アンテナのまわりの4面の吸

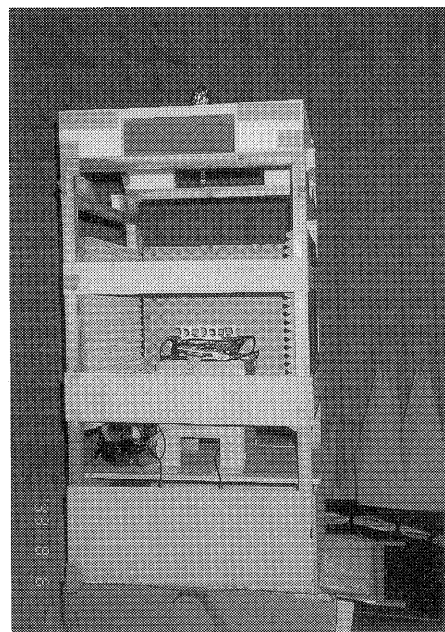
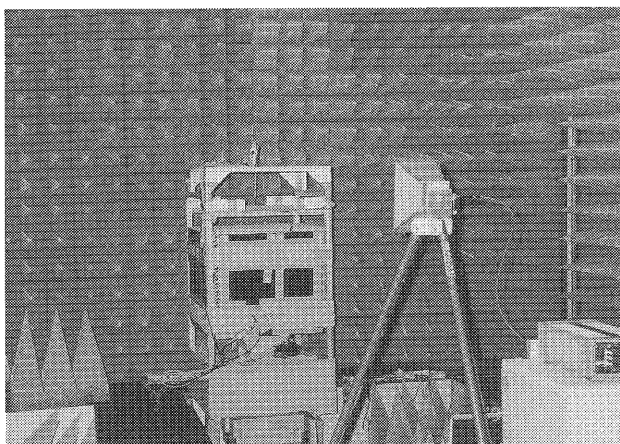
収体のうち、1面を外して、送電アンテナの設置状況を観察できるようにしている。

ここで、整流回路への入力電力は、320 mW (+25 dBm) に固定して再放射高調波の角度特性を測定した。この値を入射電力束密度に換算すると概ね 160 W/m<sup>2</sup> である。レクテナへの入射電力束密度の一つの目安は成層圏無線中継システムと類似のシステムであるカナダの SHARP 計画の検討結果<sup>(12)</sup>の 400 W/m<sup>2</sup> であるが、送電アンテナの出力が限られていたため、実験は前述の入射電力束密度の値で行った。

本論文では、高調波再放射量を評価するための数値として、等価等方放射電力(以下 *e.i.r.p.* という)を使用した。レクテナからの高調波再放射の *e.i.r.p.* は次式で求められる。

$$e.i.r.p. = \frac{G_{TH}}{M_H} \cdot P_{fd} \cdot A_e \cdot \eta_H \dots\dots\dots(1)$$

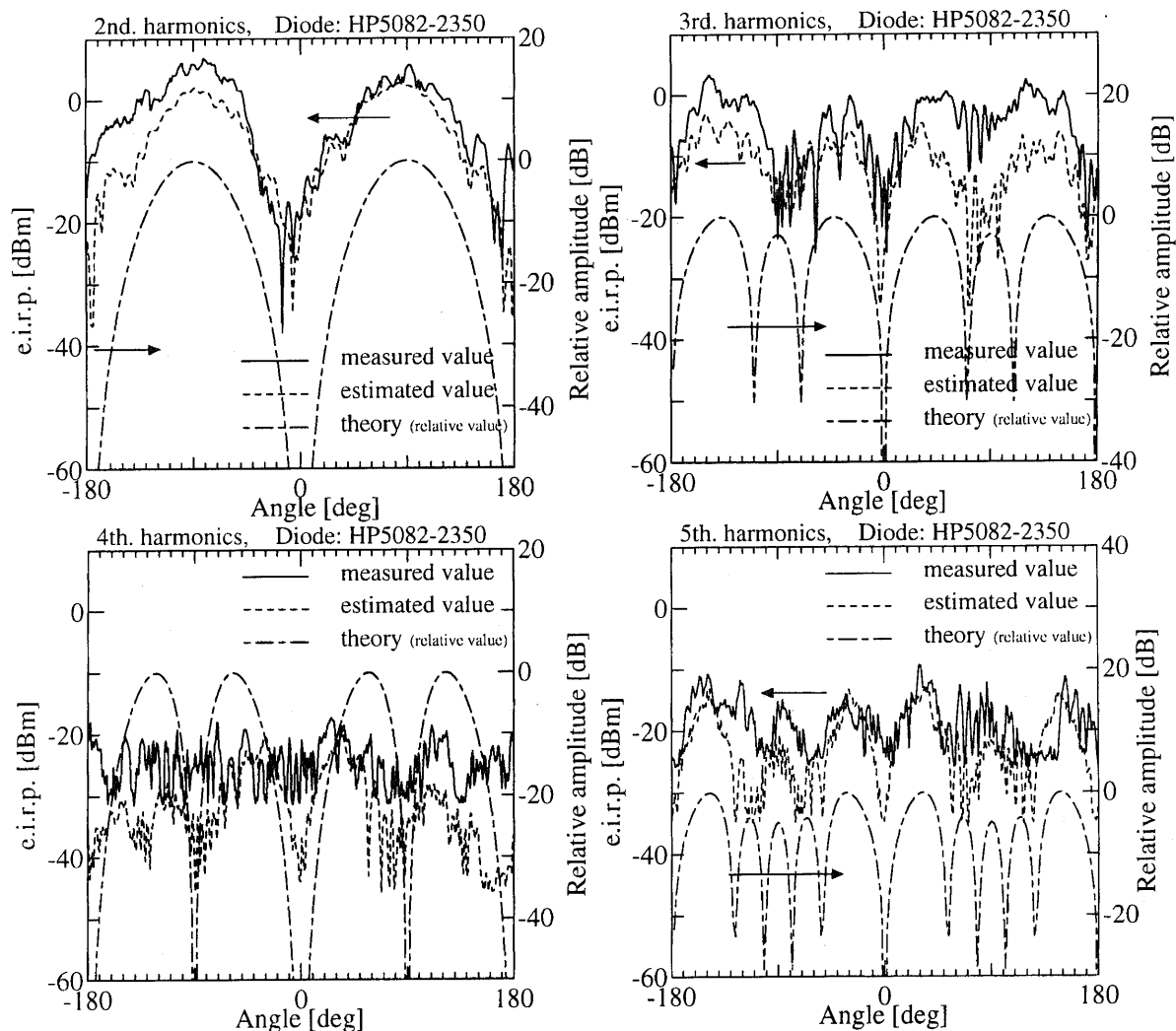
ここで、 $G_{TH}$  および  $M_H$  は、それぞれ、ある高調波周波数におけるレクテナのアンテナ部の絶対利得及び反射損である。また、 $\eta_H$  は基本波に対する高調波の出力電力の比であり、 $P_{fd}$  及び  $A_e$  はそれぞれ、基本波の入射電力束密度、及び実効開



(a)測定系全景

(b)送電機とダイポールレクテナ

第6図 ダイポールレクテナの高調波再放射測定系の写真



第9図 ダイポールレクテナの高調波再放射の角度特性 (ダイオード HP 5082-2350)

図から2次および3次高調波については、実験値と評価値はおおむね一致していることが分かる。4次高調波に関しては、送電アンテナからの高調波の影響によると思われる乱れが生じている。また、5次高調波についてはスペクトラムアナライザのダイナミックレンジの関係でピーク付近での実験値しか得られていないが、両者は概ね一致していることが分かる。このことから整流回路部がシールドされていれば整流回路部とアンテナ部のそれぞれの特性を用いて、レクテナの高調波再放射特性を評価できることが確認された。

また、角度特性のパターン形状について評価するために、ダイポールアンテナの各高調波周波数における放射特性<sup>(13)</sup>の計算を行った。スペースの都合上、この結果を第9図にのみ併せて示す。

ただし図示した値は相対値であり、その形状のみについて議論するものである。2次高調波の形状は2つのローブを持つ点で実験値は理論値とほぼ一致し、3次高調波の形状は実験値から4つの大きなローブの存在が分かる。また、5次高調波についても、0度および180度近傍の大きなローブの存在が分かり、観測した高調波がダイポールアンテナから再放射されたものであることを示している。しかしながら、4次高調波の角度特性や3次および5次高調波の±90度付近の小さなローブの存在はあまりはっきりしない。この理由は前述の通り、送電アンテナからの高調波やスペクトラムアナライザのノイズレベルの問題ではないかと考えられる。これら、実験値と評価値の一致、および2次高調波と3次高調波についての放射指

向性の実験値と理論値の形状の一致から、当該再放射がアンテナ素子のみからであるときは、間接的な推定が有効であることがわかる。

ダイポールレクテナを用いて、実際に空間に再放射された高調波の測定値と、整流回路及びアンテナ部の個々の特性から求めた高調波の再放射特性を比較検討した結果、以下のことが結論される。まず、高調波がレクテナのアンテナ部からのみ放射される場合には、整流回路部およびアンテナ部の個々の特性を用いてレクテナの高調波再放射特性を求めることができる。整流回路部がシールドされておらず、この部分からも高調波の再放射がある一般の場合には、整流回路部及びアンテナ部の特性のみではレクテナの高調波再放射特性は記述できず、直接測定が必要である。

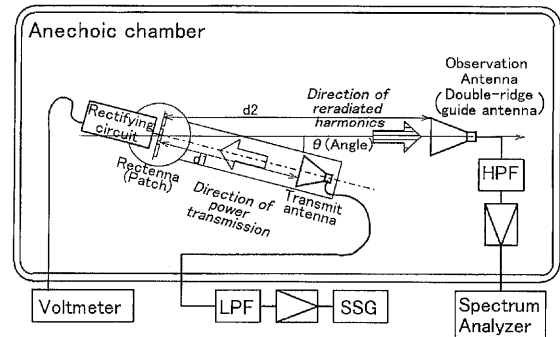
しかし、第5図に示されるダイポールレクテナに用いた測定法は対象が1次元の線状構造を持つレクテナに限られており、通常使用される平面構造を持つレクテナに適用することは不可能であった。このため、次節以降で一般の場合の測定法について考察する。

## 7. パッチレクテナからの高調波再放射 実験系<sup>(2)</sup>

前節で用いた再放射高調波の測定法は対象が1次元の線状構造を持つレクテナに限られており、通常使用される平面構造を持つレクテナに適用することは不可能であった。

本節では、より実用に近い平面構造を持つレクテナに適用が可能な高調波再放射の測定手法を提案し、マイクロストリップパッチレクテナを用いた実験値および整流回路部、アンテナ部の高調波特性から求められる高調波再放射特性との比較に基づく評価結果について述べる。

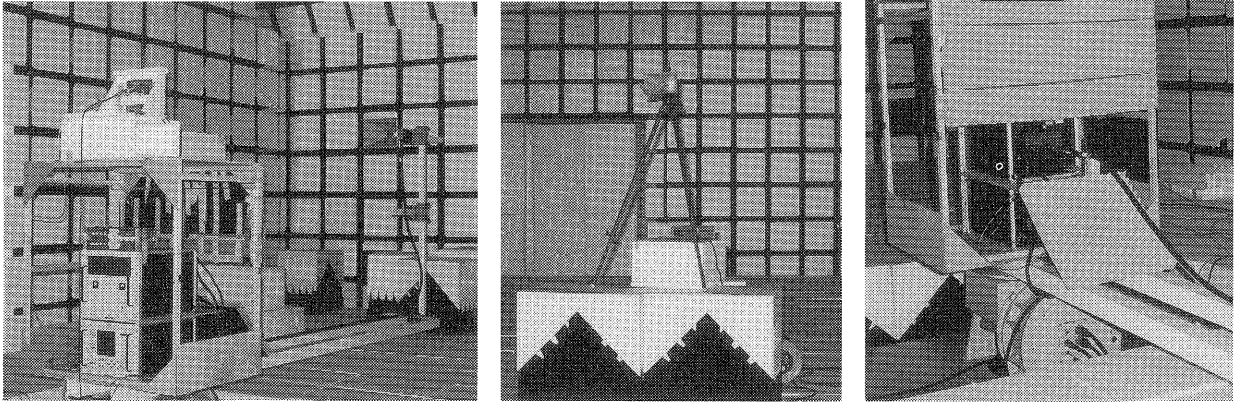
パッチレクテナは平面的な構造を持つため、ダイポールレクテナの評価用として採用した、送電機からレクテナへの伝搬路とレクテナから観測用アンテナへの伝搬路を直交させて、送電系からの高調波の直接の干渉を抑制する方法は使用できない。そこで、高調波の再放射が十分小さい送電系を使用し、さらに第10図に示すようにマイクロ波送電用の伝搬路(送電機→レクテナ)と高調波観測用の伝搬路(レクテナ→観測用アンテナ)が



第10図 パッチレクテナからの高調波再放射の角度特性の測定系

レクテナ面においてのみ交差するように工夫した。回転台上にはレクテナと送電アンテナが取り付けられてマイクロ波送電用の伝搬路を形成しており、回転台の動きに伴ってこれらは一体として回転する。このとき、レクテナはおおむね回転中心上に設けられている。回転台は電波暗室の端付近に設置されており、回転角が±90度を超えると送電アンテナを載せた治具が電波暗室の壁面と干渉するため、回転角は±90度以内とした。一方、高調波観測用アンテナは電波暗室の他端に置かれており、マイクロ波送電用の伝搬路が回転台と共に回転するにしたがって入射・再放射間の様々な角度におけるレクテナからの高調波再放射量を測定することができる。

信号発生器(SSG)で発生した2.47 GHzの信号は増幅器で500 Wまで増幅され、ローパスフィルタ(LPF)を通した後、送電アンテナである標準ホーンアンテナから送電される。レクテナで発生する高調波のみを測定するためには、干渉となる送電機自体から発生する高調波を十分抑止しなければならないが、今回の送電系ではこれらは2次から5次までの高次高調波に関して-70 dBc以下となることを実測により確認している。電力伝送のための電波は、送電アンテナから3.75 m (d1)離れたレクテナに向けて送電される。レクテナの整流素子であるダイオードで発生し、そのアンテナ部(パッチアンテナ)から再放射された高調波は、5.4 m (d2)離れた位置に設置されたダブルリッジガイドアンテナで受信され、基本波除去用のハイパスフィルタを通過した後、プリアンプで増幅され、スペクトラムアナライザで観

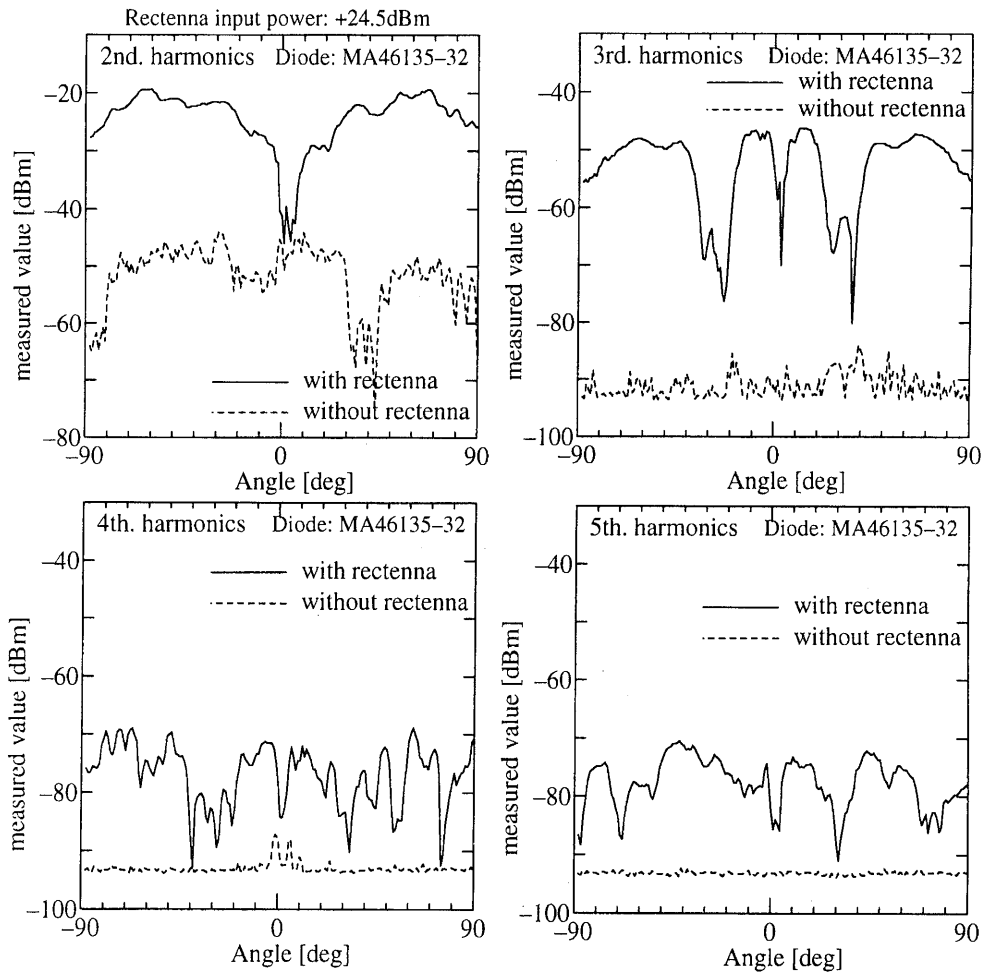


(a) 送電系および受電系

(b) 観測アンテナ

(c) 送電機と受電アンテナ

第11図 パッチレクテナからの高調波再放射の測定系



第12図 パッチレクテナからの高調波受信レベルの角度特性



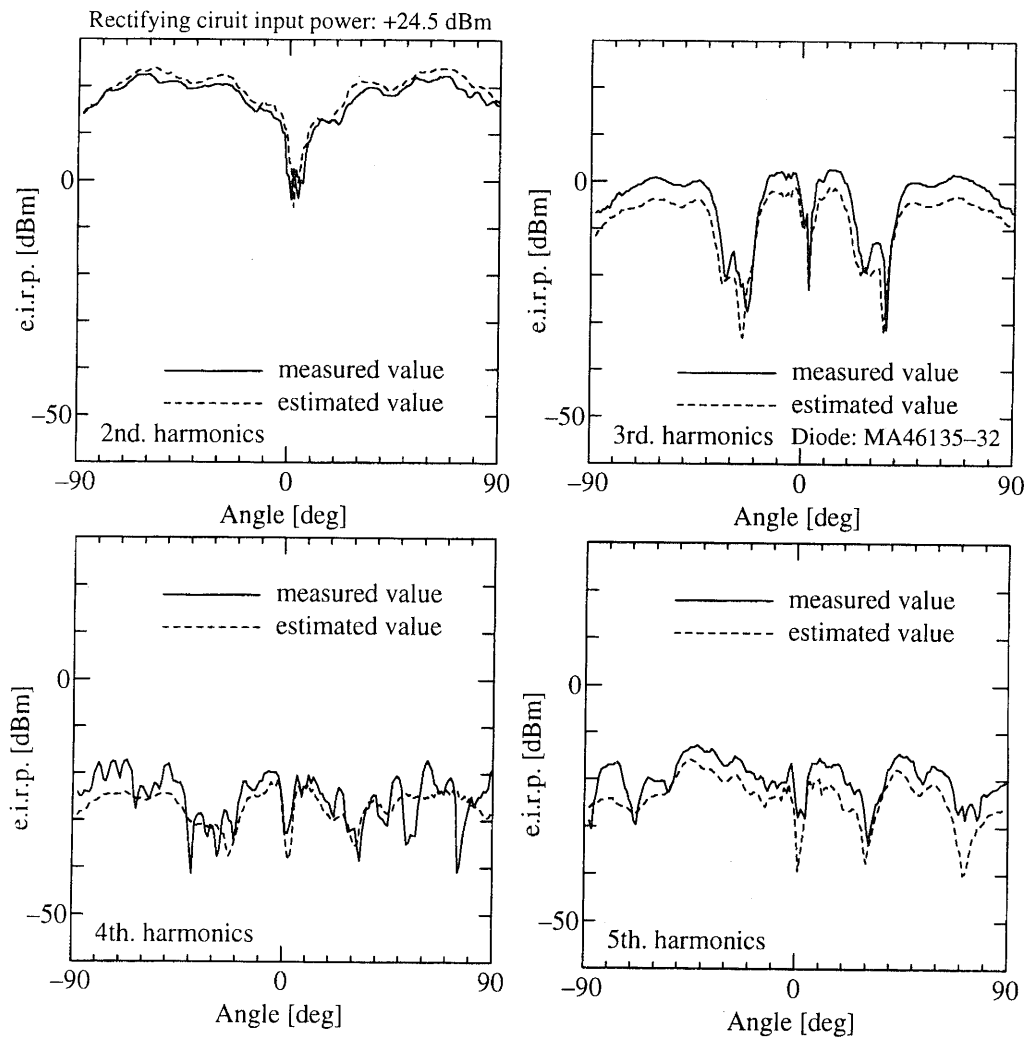
測される。マイクロ波送電の周波数はパッチアンテナの共振周波数である 2.47 GHz とし、整流回路への入力電力はダイポールレクテナの実験とほぼ同じ 280 mW (+24.5 dBm) とした。

この測定系の写真を第 11 図(a), (b), (c)の各図に示す。第 11 図(a)は送電系および受電系の外観であり、全て回転台の上に設置されている。パッチレクテナの中心は回転中心に一致するように位置を調整した。また、パッチレクテナの下には送電機が設置されており、ここから送電アンテナまで低損失のケーブルを使って給電を行っている。第 11 図(b)は、観測用のダブルリッジアンテナであり、これは回転台の中心を向いて設置されている。また、第 11 図(c)は、回転台上の受電用レクテナと送電機の拡大図であり、送電アンテナから

のマイクロ波はレクテナと共に送電機の近傍をも照射するため、送電機筐体近傍を電波吸収体で覆う工夫を施している。

### 8. パッチレクテナからの高調波再放射 実験結果<sup>(2)</sup>

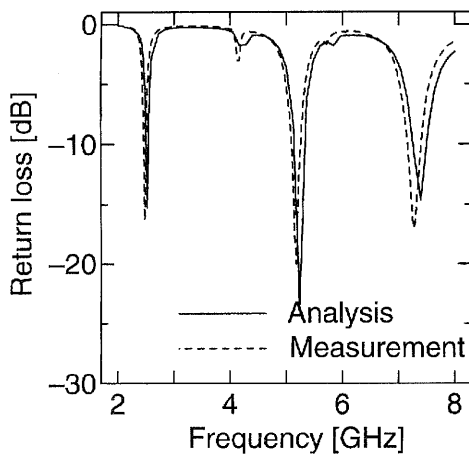
最初に測定系のチェックのため、レクテナを設置したときとしないときの両方の場合について、観測用アンテナで受信される高調波レベルの比較を行った。結果の一例を第 12 図に示す。両者の差は 2 次から 5 次の高調波でそれぞれ 24 dB, 40 dB, 23 dB, 22 dB 程度であり、送電機自体からの高調波が十分抑止されていることが分かる。なお、レクテナを設置したとき、第 12 図において 0 度方向にデータの落ち込みがあるのは、送電ア



第 13 図 パッチレクテナの高調波再放射の角度特性 (ダイオード MA 46135-32)

ンテナによってレクテナが遮蔽されるためであり、第10図で $\theta = 0$ 度の場合に対応する。

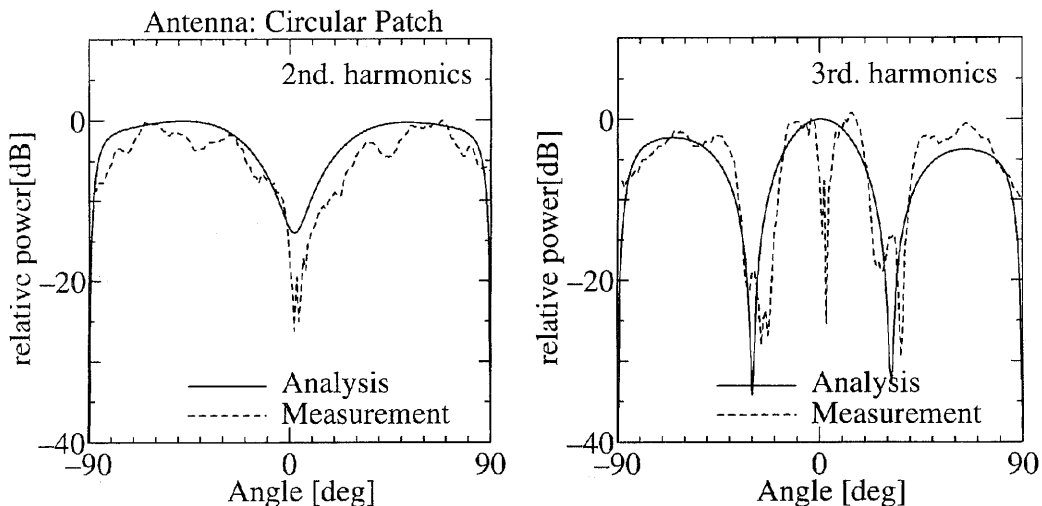
ここで、レクテナからの高調波再放射量を、先ほどと同様の*e.i.r.p.*を用いて評価した。このレクテナから再放射された2次高調波のE面の角度特性を*e.i.r.p.*で表したものを第13図に示す。ここで、実験値はスペクトラムアナライザの測定値からフリスの公式を用いて高調波再放射の*e.i.r.p.*に変換したものを、評価値はパッチアンテナの当該高調波周波数における動作利得パターンの測定値と整流回路の高調波発生特性から計算した*e.i.r.p.*である。第10図の測定系を用いてパッチアンテナの動作利得の測定を行ったので、送電アンテナによる遮蔽の効果が測定結果に表れてお



第14図 パッチアンテナ素子の入力反射係数の周波数特性

り、評価値にも反映されている。第13図から明らかなように、各高調波の*e.i.r.p.*の実験値と評価値は良く一致しており、整流回路部がシールドされているときの高調波再放射特性に関する6節の結論を支持している。

ここでパッチアンテナの高調波周波数における諸特性の測定値の妥当性の確認のため、今回使用したアンテナの給電点反射減衰量の周波数特性と、各次高調波における放射指向性の理論値を、部分領域展開関数を用いたモーメント法<sup>(14)</sup>によって解析した。解析では1素子のパッチアンテナが無限大の誘電体基板上に設置されているとしてモデル化を行った。誘電体の厚さおよび誘電定数とパッチアンテナの直径は、実験モデルと同一とした。第14図に、給電点反射減衰量の周波数特性の理論値を測定値と共に示す。周波数特性には各モードに対応する共振がみられるが、共振周波数の理論値と測定値は良く一致しており、解析結果の妥当性を示していると考えられる。周波数が高くなるにつれて共振周波数の理論値と測定値の差が大きくなる傾向にあるのは、モーメント法を用いた理論計算時のメッシュの間隔を周波数によらずに一定としているために、周波数が高くなるにつれてメッシュ間隔が波長比で相対的に大きくなり、計算誤差が大きくなるためではないかと考えられる。したがって、特に4次高調波以上については計算誤差を抑えるためにメッシュ間隔を狭くする必要があり、これは総メッシュ数の増加を招き、



第15図 円形パッチアンテナの2次および3次高調波周波数における放射指向性の実験値と計算値

現実的な時間内に計算を終わらせることができなかったため、今回の理論値の計算は2次および3次高調波のみに留めた。2次、および3次高調波周波数におけるE面の放射指向性の計算値を、第10図の測定系を用いて測定した実験値とともに第15図に示す。ここで、縦軸は最大放射量を基準として正規化している。計算結果によれば、2次高調波周波数では中央にヌルができるパターンとなり、3次高調波周波数ではそのヌル点が±30度前後の点に移動していることが分かる。2次、3次高調波ともに指向性の形状はおおむね実験値と一致していることが分かる。なお、2次、3次高調波ともに実験値が0度方向でヌル点を持つのは、先にも述べたように測定時に第10図に示す測定系をそのまま使用したため、観測用アンテナが送電アンテナによってブロッキングされるためである。また、±90度付近で理論値と実験値にみられる差は、理論値の計算では無限地板を仮定しているのに対し、実験では地板を2.5波長程度の有限値としているためである。

これら、レクテナから再放射される高調波の実験値と評価値の一致、および2次および3次高調波周波数におけるパッチアンテナの放射指向性の実験値と理論値の形状の一致から、当該高調波がレクテナのアンテナ素子から再放射されたものであることが確認できた。本測定法を用いることにより、一般的な形状を持つレクテナからの高調波の再放射を測定できることを示した。

## 9. む す び

本論文ではマイクロ波電力伝送に伴う電磁環境問題を明らかにすることを目的として、レクテナからの高次高調波の再放射の測定・評価手法を提案し、実験的な検討を行った。基礎実験として行ったダイポールレクテナを用いた実験では、実際に空間に再放射された高調波の実験値と、整流回路及びアンテナ部の個々の特性から求めた高調波の再放射特性を比較検討し、以下の各点を実験的に確認した。

1. 高調波がレクテナのアンテナ部からのみ放射される場合には、整流回路部及びアンテナ部の個々の特性を用いてレクテナの高調波再放射特性を求めることができる。

2. 整流回路部がシールドされておらず、この部分からも高調波の再放射がある一般の場合、整流回路部及びアンテナ部の特性のみではレクテナの高調波再放射特性は記述できず、直接測定が必要である。

次に、実用的な平面形状を持つレクテナからの高次高調波の再放射の測定手法を提案し、実験的な検討を行った。ここで提案した測定系においては、レクテナの整流回路への入力電力を280 mW (24.5 dBm) としたとき、送電機自体から放射される2次から5次までの高調波は、レクテナから再放射される高調波よりも22 dB以下であることを確認したのち、レクテナから再放射される高次高調波の角度特性を、実際に空間を伝搬した状態で測定した。この実験値とアンテナ部および整流回路部の個々の高調波特性から求めた評価値がほぼ一致することは、先の結論を再度裏付けると共に、ここで提案した測定法の有効性を示すものである。また、パッチアンテナの高調波周波数における特性が実験値とモーメント法を用いた理論値で良く一致することから、本測定の測定結果そのものの妥当性も確認した。

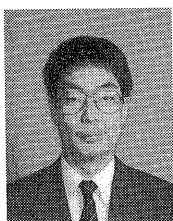
ここで提案した測定法は、一般の平面状のレクテナの高調波再放射の測定に適用することができ、アンテナ部の形状に関する制約は少ない。また、レクテナの実際の使用状況においては後部をシールドすることが重量、構造の面から困難な場合も考えられ、このときはアンテナ部ばかりでなく、整流回路部からの再放射も検討する必要があるが、本測定法はこのような状況においても適用が可能である。

本論文では、従来きわめて測定例の少なかったレクテナからの高調波再放射の定量的な測定法を1次元形状レクテナと平面形状レクテナに関してそれぞれ提案し、その有効性を実験的に示した。これらの測定法は、現状ではレクテナからの再放射高調波を直接測定するおそらく唯一の手段であり、将来におけるマイクロ波送電技術の実用化の際に必要な技術的な基準を検討する上で有効となると考えられる。

今後は、レクテナをアレー化した状態での再放射の実態を解明することが課題である。

## 参 考 文 献

- (1) 藤野義之, 藤田正晴, “マイクロ波受電用レクテナの高調波再放射の評価に関する実験的研究”, 電学論 A, Vol.117-A, No.5, pp.490-495, May, 1997.
- (2) 藤野義之, 藤田正晴, “平面形状を有するレクテナの高調波再放射の測定法とその評価”, 信学論 B-II, Vol.J81-B-II, No.1, pp.112-118, Jan, 1998.
- (3) 杉浦 行, “地上の電磁環境に及ぼす SPS の影響”, 電波研究所季報, Vol.28, No.148, Dec., 1982.
- (4) 島貫靖士, 安達三郎, “マイクロ波電力伝送用アレイの理論的・実験的検討”, 信学論(B), Vol.J67-B, No.11, pp.1301-1308, Nov., 1984.
- (5) T. Ito, Y. Fujino, and M. Fujita, “Fundamental experiment of a rectenna array for microwave power reception”, IEICE Trans. on Communications, Vol.E76-B, No.12, pp.1508-1513, Dec. 1993.
- (6) 秋葉康弘, 小川恭孝, 伊藤精彦, “円形マイクロストリップアンテナを用いた太陽発電衛星受電用レクテナモジュールに関する研究”, 信学技報, AP83-55, pp.37-41, 1983.
- (7) R. M. Dickinson, “Beamed microwave power transmitting and receiving subsystems radiation characteristics”, NASA contractor's report, CR-163362, 1980.
- (8) 伊藤精彦, 後藤尚久, “電力無線送受用空中線”, 特許公報, No.1533411, Dec. 12, 1989.
- (9) 松本 紘, 賀谷信幸, 藤田正晴, 藤野義之, 藤原暉雄, 佐藤達男, “MILAX の成果と模型飛行機”, 第 12 回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, pp.47-52, 1993.
- (10) 藤野義之, 藤田正晴, 沢田 寿, 川端一彰, “MILAX 用レクテナ”, 第 12 回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, pp.57-61, 1993.
- (11) 藤野義之, 藤田正晴, 行田弘一, 知名 理, “レクテナからの高調波再放射に関する基礎実験”, 1993 年信学秋季全大, B-39, Sep., 1993.
- (12) J. J. Schlesak, and A. Alden, “SHARP rectenna and low altitude flight tests”, Proc. of IEEE Global Telecomm. Conf., New Orleans, Dec., 1985.
- (13) 電子情報通信学会編, “アンテナ工学ハンドブック”, コロナ社, p.19, 1980.
- (14) J. R. Mosig, and F. E. Gardiol, “General integral equation formulation for microstrip antennas and scatterers”, IEE Proc., Vol.132, Pt.H, No.7, Dec. 1985.



藤野 義之  
Yoshiyuki FUJINO  
企画部企画課(ATR 環境適応通信研究所出向中)  
E-mail: fujino@acr.atr.co.jp



藤田 正晴  
Masaharu FUJITA  
地球環境計測部  
マイクロ波リモートセンシング  
E-mail: mfujita@crl.go.jp

.....