

# 対数周期ダイポールアレーを用いた広帯域リフレクトアレー

伊東 大貴<sup>†</sup> 今野 佳祐<sup>†</sup> 陳 強<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05  
E-mail: †{h.ito,konno,chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 対数周期ダイポールアレー (Log-Periodic Dipole Array, LPDA) アンテナは、自己補対構造に由来する超広帯域特性を持つことが知られている。本報告では、LPDA の散乱特性を電磁界数値シミュレーションによって明らかにする。LPDA の反射係数位相特性および RCS を明らかにし、LPDA を用いたリフレクトアレーを設計する。さらに、LPDA を用いたリフレクトアレーを 3D プリントを用いて試作し、その散乱特性を実験的に明らかにする。

キーワード 散乱特性, 対数周期ダイポールアレー, リフレクトアレー

## Wideband Reflectarray Using Log-periodic Dipole Array

Hiroki ITO<sup>†</sup>, Keisuke KONNO<sup>†</sup>, and Qiang CHEN<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University  
6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan  
E-mail: †{h.ito,konno,chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** Log-Periodic Dipole Array(LPDA) antenna is well known as the one of the ultrawideband antennas. In this report, the scattering performance of a LPDA is numerically simulated. The phase characteristics of a reflection coefficient is investigated and the reflectarray which consists of the LPDA is designed. The designed LPDA reflectarray is fabricated using a 3D printing technology and the scattering performance of the designed reflectarray is experimentally clarified.

**Key words** Scattering performance, Log-periodic dipole array, Reflectarray

### 1. ま え が き

リフレクトアレーとは入射波を設計した所望の方向に強く散乱させることができる散乱体であり、一次放射器と反射面で構成される。反射面は大きさの異なる多数のリフレクトアレー素子から成り、ある方向から到来した入射波の位相を回転させ、所望の方向に平面波を形成する。これまで、マイクロストリップ素子から成る平面型リフレクトアレー [1] がよく用いられ、市街地の伝播環境の改善などに用いられてきた [2]。

平面型リフレクトアレーは、マイクロストリップ素子の自体の狭帯域性に加え、素子ごとの空間位相遅延に差があることから、狭帯域であることが知られている [3]。平面型リフレクトアレーの狭帯域性を克服するために、リフレクトアレーの多層化による広帯域化をはじめ、これまで様々な研究が行われてきた [4] [5]。その一方、近年では 3 次元形状の素子を持ったリフレクトアレーや周期構造が注目を集めている [6]- [9]。

本報告では、超広帯域アンテナの一つである Log Periodic Dipole Array (LPDA) の散乱特性を電磁界数値シミュレーションによって明らかにする。LPDA の RCS の 3dB 帯域幅と、素

子長の変化による位相変化を明らかにする。そして LPDA を用いたリフレクトアレーを設計する。また、3D プリントと導電性スプレーを用いてリフレクトアレーを試作し、その散乱特性を実験的に明らかにする。

### 2. 広帯域なりフレクトアレー素子とそのモデル

#### 2.1 広帯域なりフレクトアレー素子

まえがきでも述べたように、リフレクトアレーの帯域は素子の帯域とリフレクトアレー素子との間の位相差により決定される。ここでは、素子の帯域を広げることによってリフレクトアレーの狭帯域性を改善することを図るため、素子の広帯域設計を行う。

広帯域な素子は、その散乱波の振幅と位相に、図 1 に示すような特徴を持っていることが望ましい。まず、所望方向において散乱波の振幅が広帯域に亘って一定であることが望ましい。このような振幅特性を持った素子から成るリフレクトアレーは、周波数の変化に対する振幅の変動を小さくすることができると考えられる。

次に散乱波の位相特性について述べる。従来の素子の狭帯域

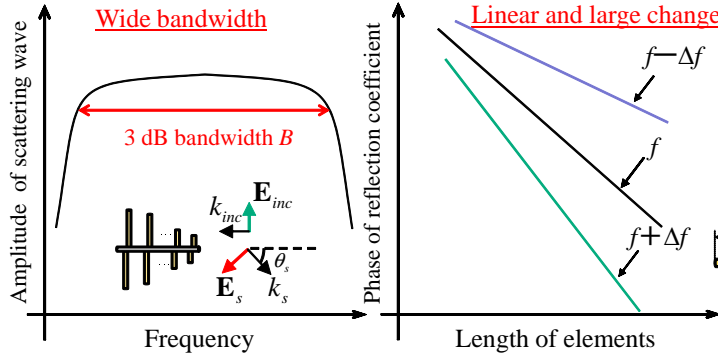


図 1 広帯域なりフレクタレー素子の散乱特性 .

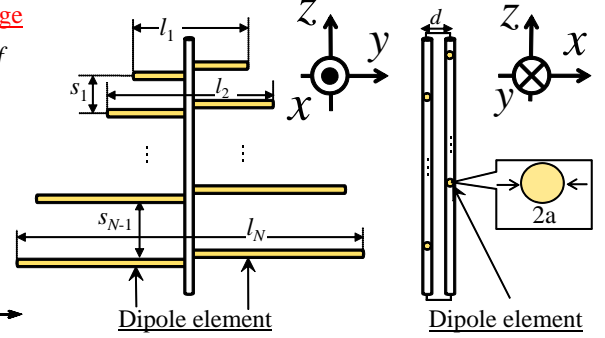


図 2 LPDA .

性は、広帯域に亘って十分な位相変化量を確保できないこと、位相変化の仕方が非線形のため、試作誤差の影響が大きいに起因する。よって広帯域なりフレクタレーを実現する素子の散乱波の位相特性は以下の点のようになることが望ましい。

1. 素子長に対する位相変化が線形である。
2. 広い周波数の範囲に亘って位相変化量が大きい。

散乱波が以上のような振幅・位相特性を持つ素子から成るリフレクタレーは、従来のマイクロストリップ素子から成るリフレクタレーと比較して、広帯域であることが期待できる。本報告では、そのような特徴を持つ素子として、LPDA を用いる。

## 2.2 LPDA の構造

本節では、LPDA のモデルおよび構造パラメータを示す。本節の内容は、文献 [10] に示されているものと同様であるが、設計や考察に必要な内容なのでここで再掲する。

本報告で用いる LPDA のモデルを図 2 に示す。両端を短絡した平行二本線路で線状ダイポール素子が接続された構造になっている。LPDA は、以下のように設計される。まず、設計したい LPDA の周波数帯域の上限と下限に対応した素子長をそれぞれ  $l_1$  と  $l_N$  とする。ここで、 $N$  は LPDA におけるダイポール素子数である。すると、LPDA の理想的な動作帯域  $B_s$  は以下の式で表される。

$$B = \frac{l_N}{l_1} \quad (1)$$

次に、LPDA における隣接ダイポール素子長の比及び隣接ダイポール素子間隔の比  $\tau$  を決める。

$$\tau = \frac{l_{n-1}}{l_n} = \frac{s_{n-1}}{s_n} \quad \text{where } n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式 (1)、式 (2) から、LPDA におけるダイポールの素子数は以下の式で決められる。

$$N = \left\lceil 1.5 + \frac{\log B_s}{\log \frac{1}{\tau}} \right\rceil \quad (3)$$

ただし、 $\lceil \cdot \rceil$  はガウス記号である。このように設計した LPDA をアンテナとして用いたときの放射特性及び放射のメカニズムはよく知られている。LPDA では、給電電圧源の周波数に対応した素子が強く励振され、その前後にある素子がそれぞれ導波器及び反射器の振る舞いをする事で指向性アンテナとして動作

する。また、動作周波数が変化すると、放射に寄与するダイポール素子が変わっていき、理想的には長さ  $l_1$  のダイポール素子と長さ  $l_N$  のダイポール素子がカバーする  $B_s$  に亘って指向性アンテナとして動作する。

## 3. LPDA から成るリフレクタレーの設計

ここでは、LPDA の RCS 特性および反射係數位相特性を数値的に明らかにし、LPDA から成るリフレクタレーを設計する。はじめに、リフレクタレー素子の散乱特性の算出法について説明する。まず、素子に対して平面波を TM 入射させる。次にモーメント法を用いて各素子の電流を算出する。そして、得られた電流から素子の散乱界を計算し、RCS および反射係數位相特性を求める。ここで、入射波の方向を  $(\theta_{in}, \phi_{in})$ 、散乱波の方向を  $(\theta_s, \phi_s)$  とした。ここでは、リフレクタレーの設計において主ビームの所望方向を  $(\theta_s, \phi_s) = (20^\circ, 180^\circ)$  したので、素子の特性を明らかにするときの散乱波の角度も同じ方向とした。

### 3.1 LPDA の動作帯域

まずは  $(\theta_s, \phi_s) = (20^\circ, 180^\circ)$  において RCS が広帯域に亘って一定となる LPDA の構造を決定した。なお、ここでは中心周波数を 8 GHz として設計を行った。図 3 にそのときの RCS の周波数特性を示す。ここで RCS の定義を以下に示す。

$$\text{RCS} = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[ 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \right] [\text{m}^2] \quad (4)$$

$R$  は LPDA から観測点までの距離、 $\mathbf{E}_s$  は散乱電界、 $\mathbf{E}_i$  は入射電界を表している。図 3 から動作帯域は 1:2.4(80%) となった。

### 3.2 LPDA 素子の反射係數位相特性

LPDA の素子長に対する反射係數位相特性を数値的に明らかにする。図 4 に LPDA の素子長を変化させた時の反射係數位相特性を示す。図 4 から、本報告で設計した LPDA は  $360^\circ$  以上の非常に大きな位相変化量を持つ素子であることがわかる。また、素子長に対する位相変化が線形に近い形になっている。以上の数値シミュレーション結果と前章の議論から、設計した LPDA は、素子として広帯域な散乱特性を有していると言える。

### 3.3 LPDA から成るリフレクタレーの設計

LPDA 素子を用いて図 5 に示すようなリフレクタレーを設計する。LPDA 素子を  $x$  方向にのみ 5 素子配置し、素子間隔を  $d_x$  と定義する。リフレクタレーの設計法を下記に示す。

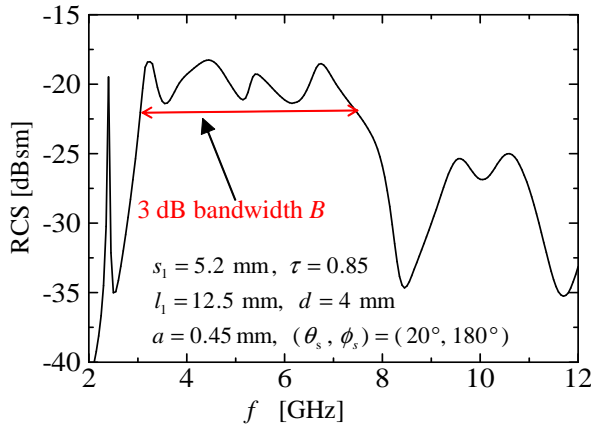


図3 LPDA の RCS の周波数特性 .

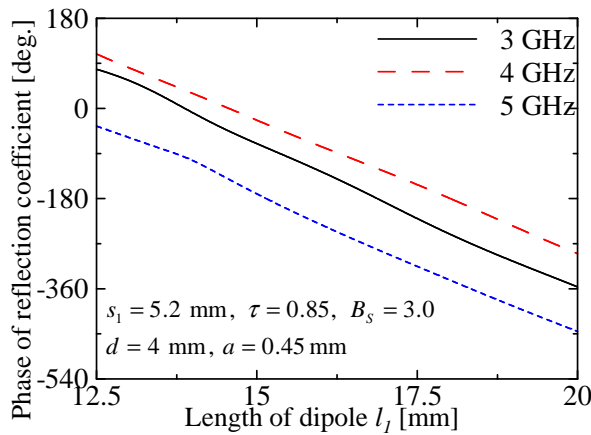


図4 LPDA の反射係数位相特性 .

1. 基準となる素子に平面波を入射し、他の素子との相互結合を無視して所望方向の散乱電界の位相を計算する．この散乱電界の位相を基準とする．
2. 他の素子に平面波を入射し、所望方向におけるそれぞれの素子の散乱電界の位相を素子長を変えて計算する．そして、基準となる素子と散乱電界の位相が同相となるように  $l_1$  から  $l_N$  を調節する．ここでも、素子間相互結合を無視する．
3. 全素子の相互結合を考慮し、設計したリフレクトアレーの散乱特性を計算する．

以上のような設計法により、図5に示すような TM 入射の平面波を  $\theta = 20^\circ$  方向に散乱するようなリフレクトアレーを設計した．設計したリフレクトアレーの  $xz$  平面の RCS パターンを図6に示す．各周波数で、概ね  $20^\circ$  方向への散乱波を確認できた．メインビームのずれの原因は、リフレクトアレー素子の大きさを決める際に素子間相互結合を無視したことにある．

#### 4. リフレクトアレーの試作と実験

##### 4.1 リフレクトアレーの製作方法

LPDA を 3D プリンターで造形し、導電性スプレーを吹きかけることで散乱体とする．3D プリンターは Dimension BST768 3D printer を使用し、導電性スプレーはエスシールド EMI-21 を用いた．また、3D プリンターと導電性スプレーを用いて製作

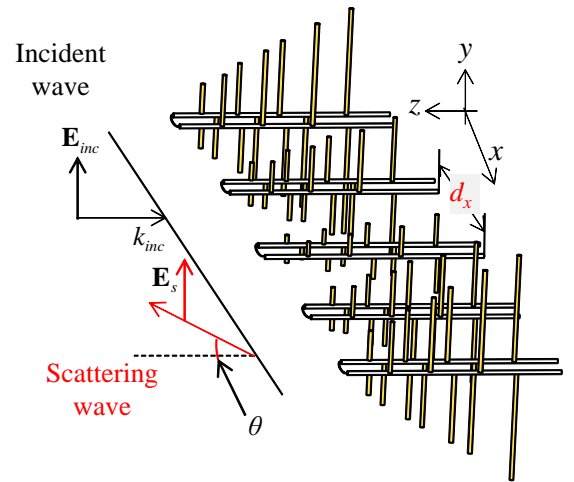


図5 LPDA 素子から構成されるリフレクトアレー .

$s_1 = 5.2 \text{ mm}$ ,  $\tau = 0.85$ ,  $d = 4 \text{ mm}$ ,  $d_x = 20 \text{ mm}$   
 $(\theta_{in}, \phi_{in}) = (0, 90) \text{ deg.}$ ,  $(\theta_s, \phi_s) = (20, 180) \text{ deg.}$

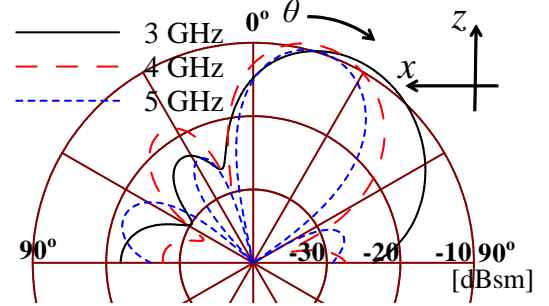


図6 リフレクトアレー RCS パターン .

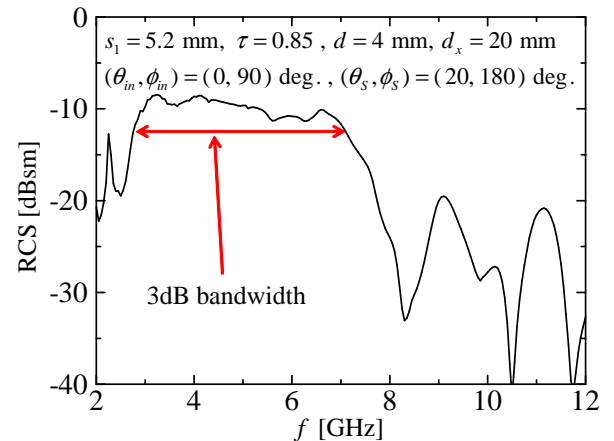


図7 リフレクトアレーの RCS 周波数特性 .

したリフレクトアレーを図8に示す．

##### 4.2 測定システム

実験システムの模式図を図9に示す．実験は電波暗室内で行われ、受信アンテナは固定されている．送信アンテナとリフレクトアレーは回転台上に設置されており、この回転台は  $\theta$  方向に回転が可能である．この時送受信アンテナとリフレクトアレーの距離は  $0.7 \text{ m}$  である．ケーブルの影響を最小限に抑えるために、電波暗室内にネットワークアナライザーを配置して

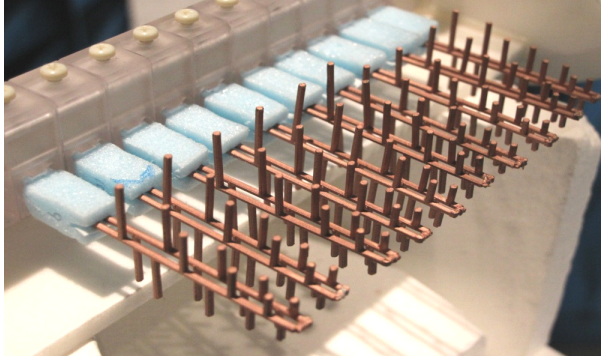


図 8 試作したリフレクトアレー

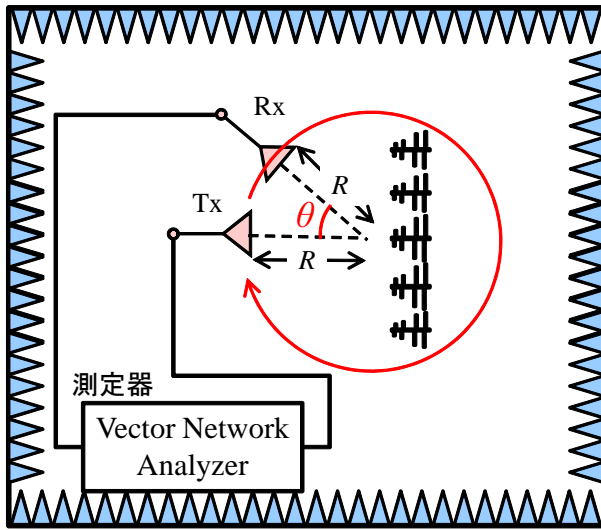


図 9 測定システムの模式図．

測定を行った．その他の装置等は電波暗室内に配置している．RCS は、式 (5) を用いて計算を行った．

$$\sigma = \frac{P_r}{P_t} \left[ \frac{4\pi R^2}{\lambda} \right]^2 \frac{4\pi}{G_{0r} G_{0t}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5)$$

ここで、 $P_t$  は送信電力、 $P_r$  は受信電力、 $G_{0t}$  は送信アンテナの動作利得、 $G_{0r}$  は受信アンテナの動作利得を示している． $P_r$  及び  $P_t$  は、測定した  $S_{11}$  と  $S_{21}$  から求められ、 $G_{0t}$  及び  $G_{0r}$  は、送信アンテナと受信アンテナを対向させて得た動作利得の測定値を使用した．測定の方法として、LPDA を置いた状態と置いていない状態の  $S$  パラメータを測定し、複素数で差分をとった  $S$  パラメータを使用する．

#### 4.3 試作したリフレクトアレーの散乱特性

図 10 に試作したリフレクトアレーの RCS の周波数特性を示す．また、図 11 に 4 GHz における散乱パターンを示す．なお、散乱波は  $\theta_s = 20^\circ$  に向くようにした．図 10 および図 11 から、実験によって得られた RCS と数値シミュレーションによって得られた RCS の間には、ずれがあるものの、それぞれ周波数と角度に対して同じ変化をしていることが分かる．ずれの原因は、リフレクトアレーの試作誤差、素子配置のずれなどの要因の他に、リフレクトアレーを送受信アンテナの遠方界領域に配置できなかったという測定装置の都合が挙げられる．特に後者は、実験によって得られた RCS が数値シミュレーションによ

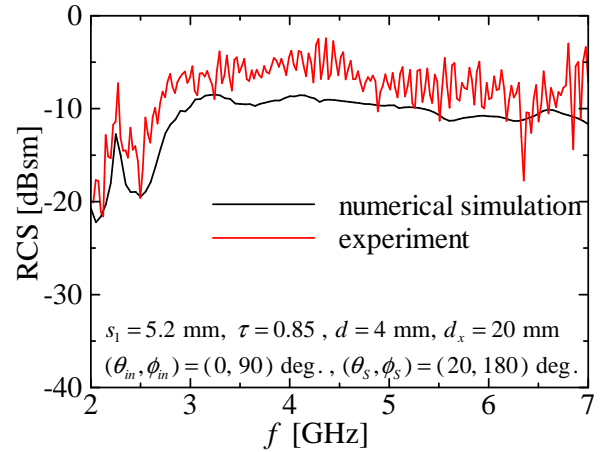


図 10 リフレクトアレーの RCS 周波数特性の比較．

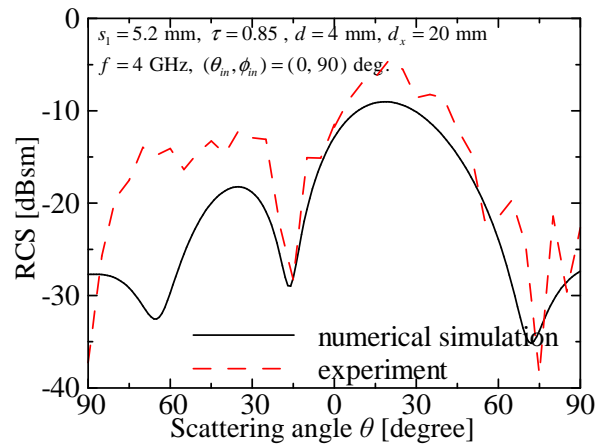


図 11 リフレクトアレーの散乱パターンの比較．

て得られた値より大きくなった主な原因と考えられる．アンテナの遠方界となる距離  $R$  の定義は以下の式で表される．

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \text{ [m]} \quad (6)$$

ここで  $D$  はアンテナの最大寸法である．試作したリフレクトアレーの最大寸法は 0.2 m であるため、式 (6) から遠方界となるための距離  $R$  は 1.3 m 以上必要である．実験は 0.7 m の距離で行ったため数値解析値より RCS が大きくなったと考えられる．以上の要因を考慮すると、数値シミュレーション値と実験値の間にずれはあるものの、RCS の傾向が一致していることから、実験的に LPDA から成るリフレクトアレーの広帯域性を確認できたと言える．

## 5. む す び

本報告では、LPDA を用いたリフレクトアレーの広帯域性を数値シミュレーションおよび実験により明らかにした．LPDA の RCS および反射係数位相特性を示し、LPDA が従来の素子より広帯域な特性を持つリフレクトアレー素子であることを示した．そして、LPDA から成るリフレクトアレーを設計し、主ビームを所望方向へ向けることが可能であることを数値的に明らかにした．また、3D プリンタと導電性スプレーを用いてリ

フレクトアレーを試作し，その散乱特性を実験により明らかにした．その結果から，実験値と数値シミュレーション値の傾向が一致することを示し，3D プリンターと導電性スプレーを用いたアンテナの試作法の有効性を示した．

## 謝 辞

東北大学サイバーサイエンスセンターのスタッフからは有益な助言を頂いた．ここに感謝する．本研究成果の一部は，JSPS 科研費 26820137 および JSPS 海外特別研究員制度の助成を受けて得られたものである．

## 文 献

- [1] J. Huang, "Analysis of a microstrip reflectarray antenna for microspacecraft applications," TDA Progress Report 42-120, Feb. 1995, pp. 153-173.
- [2] Q. Chen, J.-F. Li, Y. Kurihara, and K. Sawaya, "Measurement of Reflectarray for Improving MIMO Channel Capacity of Outdoor NLOS Radio Channel," 2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting (AP-S 2013), Orlando, Florida, USA, Jul. 7-13, 2013.
- [3] J. Huang and J. A. Encinar, Reflectarray Antennas, John Wiley and Sons, 2008.
- [4] Jose A. Encinar, "Design of Two-Layer Printed Reflectarrays Using Patches of Variable Size", IEEE Trans, Antennas and Propag., vol. 49, no.10, October 2001.
- [5] Jose A. Encinar, and J. Agustin Zornoza, "Broadband Design of Three-Layer Printed Reflectarrays", IEEE Trans, Antennas and Propag., vol. 51, no.7, October 2003.
- [6] B.Sanz-Izquierdo, and E. A. Parker, "3D Printing Technique for Fabrication of Frequency Selective Structures for Built Environment", Electronics Letters, 29th, August, 2013, vol. 49, No. 18.
- [7] Payam Nayeri, Min Liang, Rafael Austreberto Sabory-Garcia, Mingguang Tuo, Fan Yang, Michael Gehm, Hao Xin, Atef Z. Elsherbeni, "3D Printed Dielectric Reflectarrays: Low-Cost High-Gain Antennas at Sub-Millimeter Waves", IEEE Trans, Antennas and Propag., vol. 62, no.4, April 2014.
- [8] Minwoo Yi, Woosang Lee, and Jooho So, "Design of Cylindrically Conformed Metal Reflectarray Antennas for Millimeter-Wave Applications", Electronics Letters, 25th, September, 2014, vol. 50, No. 20, pp. 1409-1410.
- [9] Benito Sanz-Izquierdo, and Edward A. Parker, "3-D Printing of Elements in Frequency Selective Arrays", IEEE Trans, Antennas and Propag., vol. 62, no.12, December 2014.
- [10] 横川 佳, 今野 佳祐, 陳 強, "対数周期ダイポールアレーの散乱特性に関する研究", 信学技報, vol. 114, no. 294, AP2014-137, pp. 51-54, 2014 年 11 月 .