

## 起電力法によるリフレクタレー設計法の一検討

今野 佳祐<sup>†</sup> 陳 強<sup>†</sup> 澤谷 邦男<sup>†</sup> 亀田 卓<sup>††</sup> 末松 憲治<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

<sup>††</sup> 東北大学 電気通信研究所, 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

E-mail: †{konno, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 起電力法によるリフレクタレーの設計法を提案する。提案設計法は、一次放射器から各リフレクタレー素子への電磁波の入射角度を厳密に考慮でき、リフレクタレーの設計時間も短いという特徴を持つ。本報告では、ダイポール素子と寄生ダイポール素子から成るリフレクタレーを提案法により設計し、数値的にその有効性を示す。また、設計したリフレクタレーの高利得化を図り、その効果を明らかにする。

キーワード リフレクタレー, 起電力法

## A Study of Design Method for Reflectarray by Induced Electromotive Force Method

Keisuke KONNO<sup>†</sup>, Qiang CHEN<sup>†</sup>, Kunio SAWAYA<sup>†</sup>, Suguru KAMEDA<sup>††</sup>, and Noriharu SUEMATSU<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

<sup>††</sup> Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai,  
Miyagi, 182-8522, Japan

E-mail: †{konno, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** A design method of reflectarray by the induced electromotive force method is proposed. The effect of the angle of incidence from a primary source to a reflectarray element is included in the design process of the reflectarray by the proposed method. The CPU time for design of the reflectarray by the proposed method is short because mutual coupling between reflectarray elements is ignored. The reflectarray which consists of a dipole and parasitic dipole element is designed by the proposed method and the performance of the proposed method is shown. In addition, improvement of the gain of the designed reflectarray is carried out.

**Key words** Reflectarray, Induced electromotive force method

### 1. ま え が き

レーダーや衛星通信システム用のアンテナとして、パラボラ反射器がこれまで広く用いられてきた [1]。パラボラ反射器は高利得かつ広帯域であるが、重量と体積が共に大きいという欠点がある。そこで、パラボラ反射器の代わりとなる高利得反射鏡アンテナとして、平面状のリフレクタレーが近年提案されている [2], [3]。リフレクタレーは、全リフレクタレー素子の散乱電界の位相が所望の方向で同相となるような、異なる大きさの素子から構成される。従って、所望のリフレクタレーを設計するためには、素子の大きさに対する散乱電界の位相変化量をできるだけ正確に求めることが重要である。素子の大きさ

に対する散乱電界の位相変化量が素子への入射電界に依存するため、リフレクタレーの設計において、入射電界を正確に考慮することが必要である。

従来の研究では、素子の大きさに対する散乱電界の位相変化量を計算する際に、平面波の垂直入射を仮定した研究が多かった [4]-[6]。しかしながら、一次放射器がリフレクタレーに近接していたり、一次放射器からリフレクタレー素子を見込む角度が大きかったりするとき、リフレクタレー素子への入射電界を垂直な平面波だと仮定するのは正確ではない。そこで、リフレクタレー素子の設計において入射電界を正確に表現するための様々な手法が提案されてきた。Zhou 等は、スペクトル領域モーメント法において入射電界をできるだけ正確に表現する

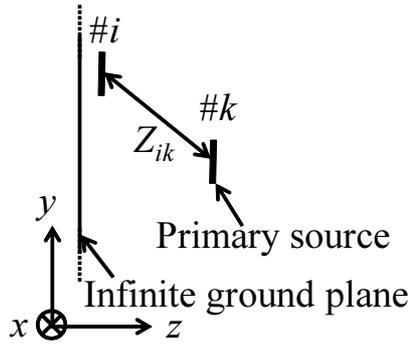


Figure 1 線状ダイポール素子間の相互インピーダンス。

ために、一次放射器であるコルゲート付きホーンアンテナの指向性の測定結果を用いた [7]。一方、Arrebola 等は、一次放射器であるホーンアンテナの遠方界測定結果から得られた開口面の等価面磁流を用い、リフレクタレー素子への入射電界を実現する方法を提案した [8]。どちらの手法も、一次放射器の指向性を考慮した入射電界を実現することができるが、一次放射器の指向性を予め測定しておく必要がある。このように、リフレクタレーの設計において、一次放射器からリフレクタレーへの入射電界を正確に考慮する効率的な手法がこれまでに提案されたとは言えない。

本報告では、線状素子から成るリフレクタレーの設計手法を提案する。提案手法では、一次放射器とリフレクタレー素子間の相互インピーダンスを起電力法によって計算する。従って、リフレクタレー素子の散乱電界の位相に、一次放射器からリフレクタレー素子への入射電界の角度と距離の影響がどちらも含まれる。また、線状素子間の相互インピーダンスの計算時間は短く、リフレクタレー素子間の相互結合も無視しているため、提案設計手法の計算時間は短い。ダイポール素子と寄生ダイポール素子から成るリフレクタレーを設計し、提案設計手法の有効性を示す。そして、一次放射器とリフレクタレーとの距離を変えたり、反射板を用いたりすることで、設計したリフレクタレーの高利得化を図り、その効果を明らかにする。

## 2. 起電力法を用いた線状素子リフレクタレー設計法

### 2.1 起電力法

起電力法を用いると、図 1 に示すような一次放射器と第  $i$  リフレクタレー素子間の相互インピーダンスは以下の式で表される。

$$Z_{ik} = - \int_{y_c - l_i}^{y_c + l_i} E_y \frac{I_i^* \sin k_0(l_i - |y - y_c|)}{I_k \sin(k_0 l_k) I_i^* \sin(k_0 l_i)} dy, \quad (1)$$

ここで、 $E_y$  は第  $i$  リフレクタレー素子の入射電界の  $y$  成分であり、 $l_k$  と  $l_i$  はそれぞれ一次放射器と第  $i$  リフレクタレー素子の長さである。 $y_c$  は第  $i$  リフレクタレー素子の中心の  $y$  座標であり、 $I_k$  と  $I_i$  はそれぞれ一次放射器と第  $i$  リフレクタレー素子の電流である。

我々の提案手法では、各位置にあるリフレクタレー素子の電流が (1) 式から得られる。従って、一次放射器からリフレク

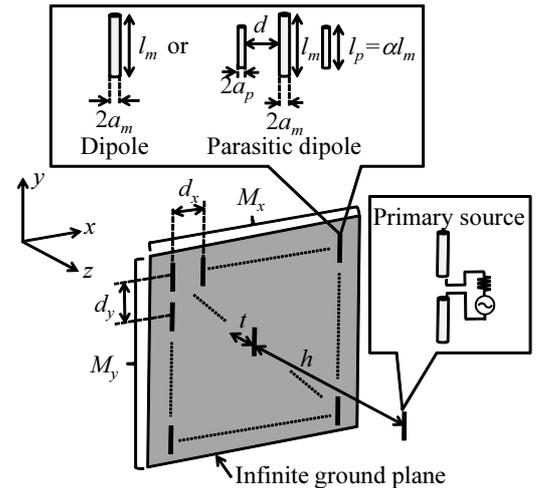


Figure 2 線状ダイポール素子と寄生ダイポール素子が混在するリフレクタレー。

タレー素子への入射電界の角度や距離が、リフレクタレー素子の散乱電界の位相に与える影響を厳密に考慮することができる。また、線状素子の相互インピーダンスの計算は短時間で済むため、計算時間が短いという利点もある。

### 2.2 提案設計法による線状素子リフレクタレーの設計

提案設計法によって、線状素子リフレクタレーは以下のように設計される。

(1) リフレクタレー素子数、素子間距離、反射板と素子間の距離や一次放射器の位置など、リフレクタレーの基本的な構造を決定する。

(2) 起電力法を用い、各位置にあるリフレクタレー素子の電流を素子長に対して数値計算する。このとき、反射板の大きさは無限とし、鏡像法を用いる。また、素子の電流を計算するとき、リフレクタレー素子間の相互結合は無視する。

(3) 所望の散乱方向  $(\theta_s, \phi_s)$  を決定する。そして、(2) で数値計算した電流を用い、各位置にある素子の  $(\theta_s, \phi_s)$  方向の散乱電界の位相と素子長との関係を求める。

(4) 任意の位置にある素子の長さを適当に固定し、その素子が  $(\theta_s, \phi_s)$  方向へ散乱する電界の位相  $P$  を位相の基準とする。その他の位置にあるリフレクタレー素子の長さは、 $(\theta_s, \phi_s)$  方向へ散乱する電界の位相が  $P$  となるように決める。

提案設計法の利点は 2 つ挙げられる。1 つは、一次放射器からリフレクタレー素子への入射電界の角度や距離が、リフレクタレー素子の散乱電界の位相に与える影響を厳密に考慮できることである。もう 1 つは、リフレクタレー素子を線状素子とし、かつリフレクタレー素子間の相互結合を無視しているため、設計に要する時間が短いことである。

## 3. リフレクタレーの設計例

### 3.1 提案設計法の有効性

提案手法を用いて、線状ダイポール素子と寄生ダイポール素子が混在したリフレクタレーを設計した。リフレクタレーの構造やパラメータの定義は図 2 に示されており、一次放射器は線状ダイポールアンテナとした。リフレクタレー素子の素

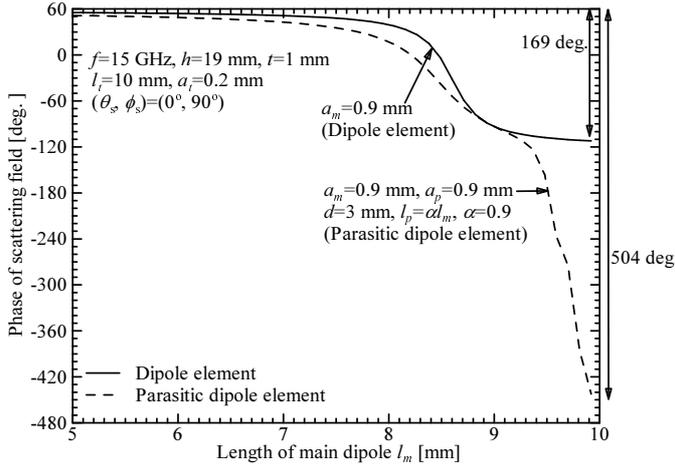


Figure 3 素子長に対する散乱電界の位相変化量.

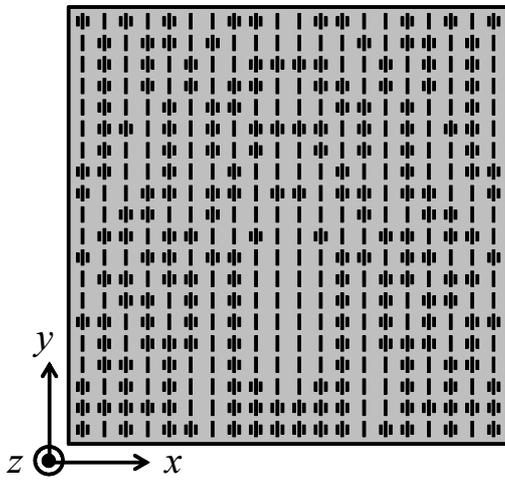


Figure 4 ダイポール素子と寄生ダイポール素子が混在したリフレクタアレーの設計例.

素子長に対する散乱電界の位相の一例を図3に示す. 図3から, 線状ダイポール素子の位相変化量は  $169^\circ$  であり,  $360^\circ$  に達しないことが分かる. 従って, 線状ダイポール素子だけでリフレクタアレーを構成しようとする, 必要な位相を実現できない位置が現れる. 一方で, 寄生ダイポール素子の位相変化量は  $504^\circ$  であり, 素子長を変えることで必要な位相変化量を確保できる. そこで, 所望の位相が線状ダイポール素子で実現できない位置には寄生ダイポール素子を配置することとする.

散乱方向を  $(\theta_s, \phi_s) = (10^\circ, 90^\circ)$  とした線状素子リフレクタアレーの設計例を図4に示す. リフレクタアレーの散乱方向が  $\theta$  方向のみに走査されているため, 設計した線状素子リフレクタアレーは  $x$  軸方向に対称となっている.

設計した線状素子リフレクタアレーの散乱パターンを図5に示す. なお, リフレクタアレーのアンテナ利得を以下のように定義する.

$$G = \frac{|\mathbf{D}(\theta, \phi)|^2}{30P_{in}} \quad (2)$$

ここで,  $\mathbf{D}(\theta, \phi)$  はリフレクタアレーの指向性関数,  $P_{in}$  は一次放射器への入力電力である. 図5に示されているように, 設計

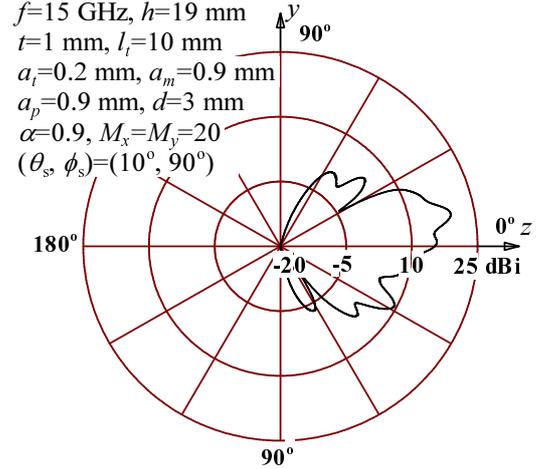


Figure 5 設計リフレクタアレーの散乱パターン.

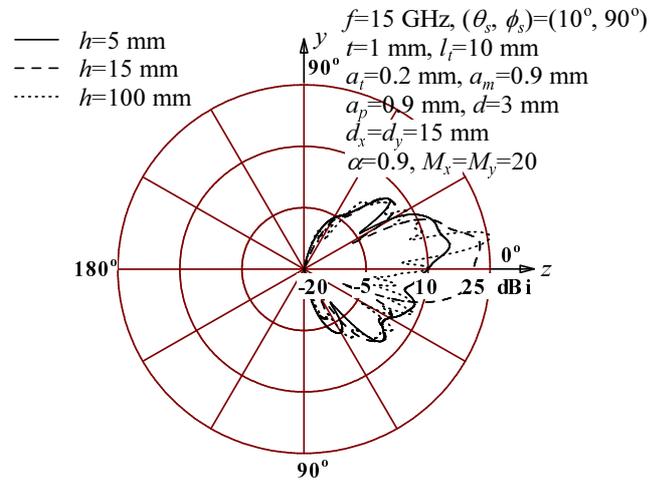


Figure 6 一次放射器とリフレクタアレー間距離  $h$  が散乱パターンに及ぼす影響.

Table 1 提案法によって設計した  $20 \times 20$  素子リフレクタアレーの最大のアンテナ利得とその方向, 及び開口効率 (所望の散乱方向は  $(\theta_s, \phi_s) = (10^\circ, 90^\circ)$ , 一次放射器に反射板無).

$h$ [mm]	Maximum antenna gain [dBi]	Direction $(\theta, \phi)$ [deg.]	Aperture efficiency [%]
5	15.7	$(9.7^\circ, 90^\circ)$	1.3
15	23	$(7.9^\circ, 90^\circ)$	7.1
100	25.7	$(10^\circ, 90^\circ)$	13.1

したリフレクタアレーの散乱方向は,  $(\theta_s, \phi_s) = (10^\circ, 90^\circ)$  とほぼ一致している.

### 3.2 一次放射器とリフレクタアレー間距離の影響

図6に, 一次放射器である半波長ダイポールアンテナとリフレクタアレー間の距離  $h$  が散乱パターンに及ぼす影響を示す. また, 設計リフレクタアレーのアンテナ利得の最大値, その方向, そして開口効率を表1に示す. 図6から, 一次放射器とリフレクタアレーの距離  $h$  が小さいほど, リフレクタアレーのアンテナ利得の最大値は低いことが分かる. 加えて, 一次放射器とリフレクタアレーの距離  $h$  が小さいほど, リフレクタアレーのビーム幅も広がっていることが分かる. これは, 図7及び8

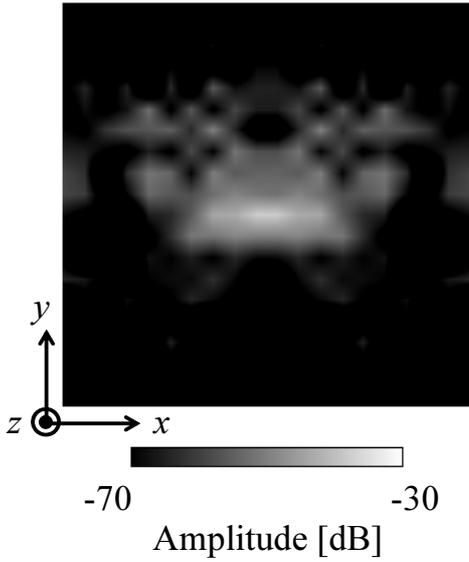


Figure 7 リフレクタレー素子の電流分布 ( $h = 5$  mm).

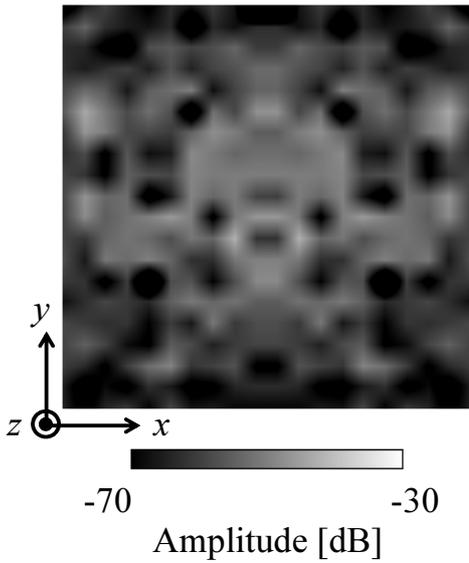


Figure 8 リフレクタレー素子の電流分布 ( $h = 100$  mm).

に示すように、リフレクタレー素子の電流分布の違いによるものである。一次放射器とリフレクタレーの距離  $h$  が小さいときは、図 7 に示すように、リフレクタレー中にある一部の素子にしか大きな電流が流れない。従って、リフレクタレー中にある素子の一部しか散乱に寄与せず、結果としてアンテナ利得と開口効率が下がり、ビーム幅も広くなる。その一方、一次放射器とリフレクタレーの距離  $h$  が大きいときは、図 8 に示すように、リフレクタレー中にある素子の大部分に大きな電流が流れる。その結果、リフレクタレー中にある素子のほとんどが散乱に寄与し、結果としてアンテナ利得と開口効率が上がり、ビーム幅が狭くなる。以上のことから、一次放射器とリフレクタレー間の距離が小さい場合にアンテナ利得と開口効率を上げるためには、一次放射器としてアレーアンテナを用いるなどの工夫が必要だと考えられる。

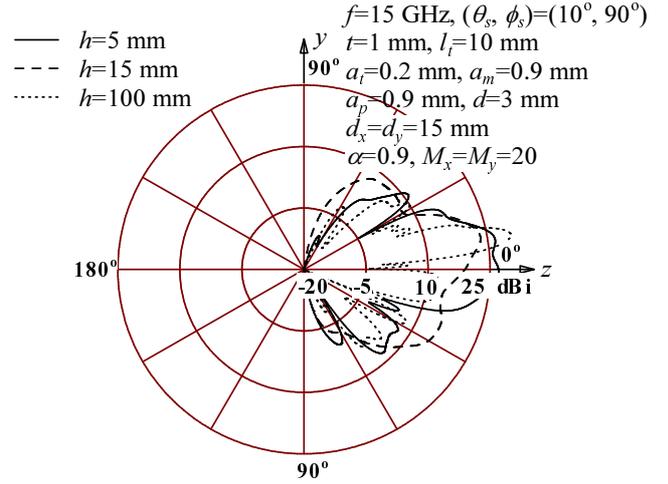


Figure 9 一次放射器とリフレクタレー間距離  $h$  が散乱パターンに及ぼす影響 (一次放射器に反射板有).

Table 2 提案法によって設計した  $20 \times 20$  素子リフレクタレーの最大のアンテナ利得とその方向、及び開口効率 (所望の散乱方向は  $(\theta_s, \phi_s) = (10^\circ, 90^\circ)$ 、一次放射器に反射板有).

$h$ [mm]	Maximum antenna gain [dBi]	Direction $(\theta, \phi)$ [deg.]	Aperture efficiency [%]
5	27.1	$(0.8^\circ, -90^\circ)$	18.1
15	23.4	$(10.6^\circ, 90^\circ)$	7.7
100	30.7	$(9.6^\circ, 90^\circ)$	41.6

### 3.3 反射板を用いた一次放射器の高利得化

これまででは一次放射器として半波長ダイポールアンテナを用いてきたが、リフレクタレーの一次放射器には高利得のアンテナが用いられるのが一般的である。そこで本節では、一次放射器である半波長ダイポールアンテナの背面に反射板を配置し、高利得化を図る。図 9 に、一次放射器である反射板付き半波長ダイポールアンテナとリフレクタレー間の距離  $h$  が散乱パターンに及ぼす影響を示す。また、設計リフレクタレーのアンテナ利得の最大値、その方向、そして開口効率を表 2 に示す。なお、反射板と一次放射器との距離は  $5 \text{ mm} (= \frac{\lambda}{4} @ 15 \text{ GHz})$  とした。図 9 と図 6 を比較すると、一次放射器に反射板を配置すると、リフレクタレーのアンテナ利得がいずれも向上することが分かる。また、図 10 と 7、図 11 と 8 をそれぞれ比較すると、一次放射器に反射板を配置することで、大きな電流が流れるリフレクタレー素子が増えることが分かる。従って、反射板の配置によって一次放射器の利得が向上した結果、リフレクタレーの開口効率が良くなり、アンテナ利得が増加したと考えられる。

### 3.4 リフレクタレーの設計時間

リフレクタレーの設計時間を表 3 に示す。表 3 から、リフレクタレーの設計時間は合計 600 秒ほどであることが分かる。なお、リフレクタレーの設計は Intel Core i5 3.2 GHz CPU 搭載の PC で行われた。設計したリフレクタレーの散乱パターンの数値計算に要した時間を除けば、リフレクタレーの設計に要する時間の大半が、リフレクタレー素子の電流を計算するための時間であることが分かる。従って、リフレクタ

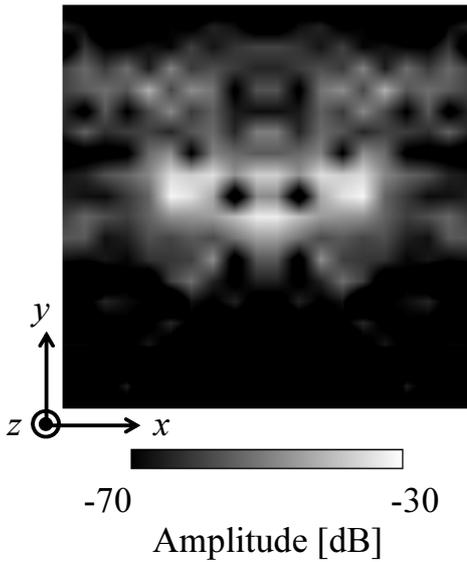


Figure 10 リフレクトアレー素子の電流分布 ( $h = 5$  mm, 一次放射器に反射板有. ).

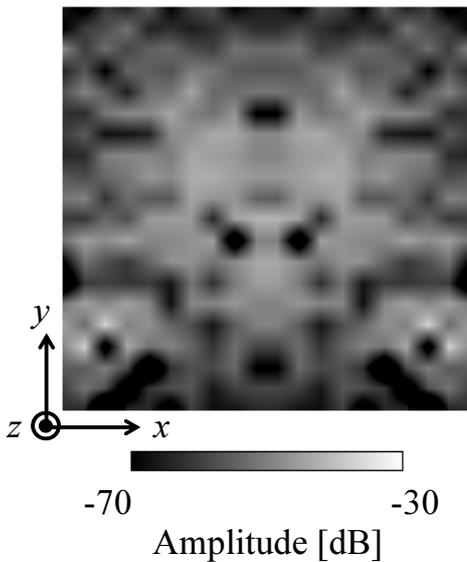


Figure 11 リフレクトアレー素子の電流分布 ( $h = 100$  mm, 一次放射器に反射板有. ).

Table 3 提案設計法を用いた  $20 \times 20$  素子リフレクトアレーの設計時間.

Design step	CPU time [sec.]
Calculation of current of unit element	344.3
Calculation of scattering field of unit element	15.3
Design of reflectarray	11.3
Full-wave analysis of designed reflectarray	230.3

レー素子電流の計算を行う際にリフレクトアレー素子間の相互結合を無視することが、計算時間の短縮に有効であると言える。

#### 4. む す び

本報告では、起電力法を用いた線状素子リフレクトアレーの設計方法を提案した。提案設計法では、リフレクトアレー素子への入射電界の入射角度及び一次放射器とリフレクトアレー素子間の距離が、リフレクトアレー素子の散乱電界の位相に及ぼす影響を正確に考慮することができる。提案設計法を用い、線状ダイポール素子と寄生ダイポール素子が混在したリフレクトアレーの設計を行った。数値シミュレーションを行った結果、設計したリフレクトアレーが所望の散乱方向を持つことを確認した。また、一次放射器とリフレクトアレー間の距離に対してアンテナ利得と開口効率を数値計算した。その結果、一次放射器とリフレクトアレー間の距離が小さい場合は、リフレクトアレー素子の一部にしか大きな電流が流れず、開口効率が低くなるためアンテナ利得も小さくなることが分かった。最後に、一次放射器に反射板を配置してリフレクトアレーのアンテナ利得向上を図った。

今後は、一次放射器をアレー化して、近距離からの給電でも高い開口効率とアンテナ利得を実現することが課題である。二周波用のリフレクトアレーや円偏波を放射するリフレクトアレー、そして所望のサイドローブレベルを持つリフレクトアレーを設計できるようにするなど、提案手法を改良することも考えている。また、提案法で設計したリフレクトアレーを試作し、実験的に有効性を確かめることも考えている。

#### 謝 辞

本研究は、総務省委託研究「災害時に有効な衛星通信ネットワークの研究開発」の一環として実施された。

#### References

- [1] J.D. Kraus and R.J. Marhefka, *Antennas: For All Applications*, 3rd ed. McGraw-Hill, Chapter 10, pp.365-374, 2003.
- [2] J. Huang, "Analysis of a microstrip reflectarray antenna for microspacecraft applications," TDA Progress Report 42-120, pp. 153-173, Feb. 1995.
- [3] J. Huang and J.A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, John Wiley & Sons, 2008.
- [4] D. Pilz and W. Menzel, "Full wave analysis of a planar reflector antenna," Proc. Asia-Pacific Microw. Conf., Dec. 1997, pp. 225-227.
- [5] R. Remski, "Analysis of PBG surfaces using Ansoft HFSS," *Microw. J.*, vol. 43, no. 9, pp. 190-198, Sept. 2000.
- [6] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi, "Novel broadband planar reflectarray with parasitic dipoles for wireless communication applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol.8, pp.881-885, 2009.
- [7] M. Zhou, E. Jørgensen, O.S. Kim, S.B. Sørensen, P. Meincke, and O. Breinbjerg, "Accurate and efficient analysis of printed reflectarrays with arbitrary elements using higher-order hierarchical Legendre basis functions," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol.11, pp.814-817, 2012.
- [8] M. Arrebola, Y. Álvarez, J.A. Encinar, and F. Las-Heras, "Accurate analysis of printed reflectarrays considering the near field of the primary feed," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol.3, no.2, pp.187-194, 2009.