

アレー給電による大規模な低姿勢リフレクトアレーの高利得化

今野 佳祐[†] 陳 強[†]

[†] 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: †{konno, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本報告では、一次放射器とリフレクトアレーが近接した低姿勢な大規模リフレクトアレーを設計する。起電力法による設計法をベクトル型スーパーコンピュータで高速化し、数千素子規模の大規模リフレクトアレーの設計法を構築する。提案設計法を用いて、低姿勢な大規模リフレクトアレーがアレー給電により高利得化できることを示す。
キーワード リフレクトアレー, 起電力法, ベクトル型スーパーコンピュータ

Gain Enhancement of Large-Scale, Low Profile Reflectarray Using Feed Array

Keisuke KONNO[†] and Qiang CHEN[†]

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

Abstract In this report, a low-profile, large-scale reflectarray with a primary source in the vicinity of the reflectarray is designed. The large-scale reflectarray which consists of a few thousand elements is designed using our proposed method. In our proposed method, the reflectarray is designed by the induced electromotive force (EMF) method which is accelerated by a vector-parallel supercomputer. Using our proposed method, it is shown that an array feed is a promising technique for the gain enhancement of the low-profile, large-scale reflectarray.

Key words Reflectarray, Induced electromotive force method, Vector supercomputer

1. ま え が き

近年、パラボラアンテナに代わる薄型の高利得アンテナとして、平面型リフレクトアレーが注目されている [1]。平面型リフレクトアレーは、パラボラアンテナと同様に一次放射器及び反射面から成る。パラボラアンテナの反射面が放物形状なのに対し、平面型リフレクトアレーの反射面は平面である。従って、パラボラアンテナに比べて平面型リフレクトアレーは薄型で軽量だという利点を持つ [2]。

これまで、降雨レーダー用リフレクトアレー [3]、単層の2周波共用リフレクトアレー [4]、20/30 GHz 帯共用の衛星通信用リフレクトアレー [5] 等、様々なリフレクトアレーが設計されてきた。従来のリフレクトアレーでは、開口効率を上げるため、反射面から見て十分遠方に一次放射器を配置している。従って、これらのリフレクトアレーは反射面が平面な分だけパラボラアンテナよりは薄型なもの、一次放射器を含むリフレクトアレー全体は波長に比べて大きな厚みを有している。その一方で、災害に強い衛星通信システムである VSAT (Very Small Aperture Terminal) システムの地球局用アンテナ等、可搬性に特化した

低姿勢リフレクトアレーへの要求が高まっている [6]。このような低姿勢リフレクトアレーの設計では、一次放射器が反射面の近傍に配置されるため、リフレクトアレー素子の設計時に一次放射器の影響を厳密に考慮する必要がある。また、一次放射器を反射面の近傍に配置したことによって利得が下がるため、大規模化等、高利得化の工夫も必要となる。

筆者らはこれまで、起電力法を用いたリフレクトアレーの設計法を提案し、その有効性を明らかにしてきた [7]-[10]。提案法は、一次放射器の影響を厳密に考慮でき、高速に設計が行えるという利点を有する。

本報告では、起電力法を用いたリフレクトアレーの設計法をベクトル型スーパーコンピュータと組み合わせて高速化し、大規模な低姿勢リフレクトアレーの設計法を構築する。数値シミュレーションを行い、大規模な低姿勢リフレクトアレーの利得、設計時間等を数値的に明らかにする。数値シミュレーションの結果、一次放射器をアレー化することで、リフレクトアレーの高利得化が図れることを示す。

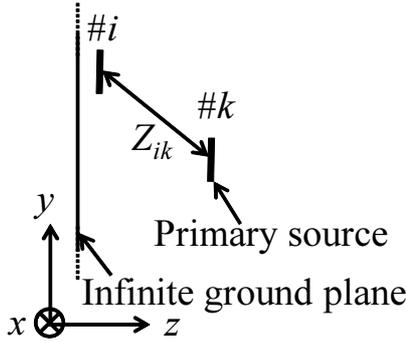


Figure 1 線状ダイポール素子間の相互インピーダンス。

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

図 1 に示すような線状ダイポール型の一次放射器と第 i リフレクタレー素子間の相互インピーダンスは、起電力法を用いて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。

(1) 式を用いて得られた相互インピーダンスは一次放射器とリフレクタレーの相互結合を厳密に表している。また、相互インピーダンスが単積分で表現されていることから、(1) 式は短時間で数値計算できる。

2.2 起電力法による線状素子リフレクタレーの設計

起電力法を用いて、線状素子リフレクタレーは以下のように設計される。

(1) リフレクタレーの基本的な構造 (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、一次放射器の素子数など) を決定する。

(2) 起電力法により、全ての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、無限大の反射板を仮定し、鏡像法を用いると共に、異なる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 (θ_d, ϕ_d) を決定する。そして、(2) で数値計算した電流を用い、全ての位置にある素子の (θ_d, ϕ_d) 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 (θ_d, ϕ_d) 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、(θ_d, ϕ_d) 方向へ散乱する電界の位相が P となるように決める。

起電力法を用いたリフレクタレー設計法の利点は以下の 2 点である。1 点目は、一次放射器とリフレクタレー素子間の相互結合を厳密に考慮しているため、一次放射器とリフレクタレー

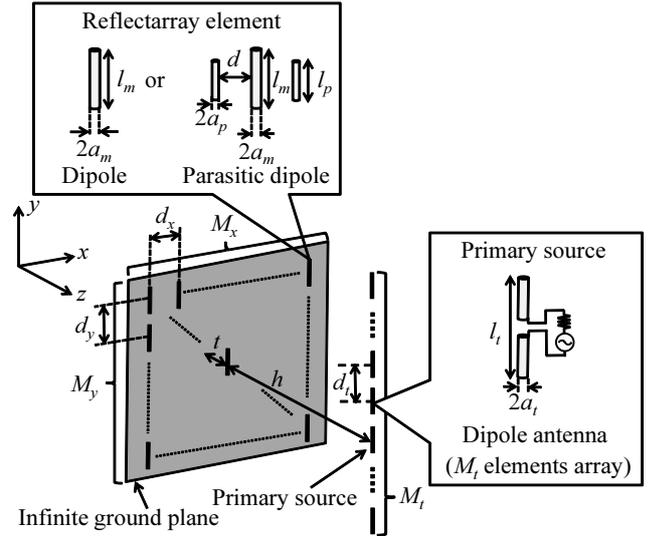


Figure 2 線状ダイポール素子と寄生ダイポール素子が混在するリフレクタレー。

レー素子が近接した低姿勢リフレクタレーの設計に応用できることである。2 点目は、リフレクタレー素子を線状素子とし、かつ異なる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。

2.3 大規模リフレクタレー設計のための高速化

起電力法を用いたリフレクタレー設計法を用いても、数千素子規模の大規模リフレクタレーの設計には非常に長い計算時間が必要となる。そこで、大規模リフレクタレーの設計を高速に行うため、起電力法を用いたリフレクタレー設計法をベクトル型スーパーコンピュータで高速化する。ベクトル型スーパーコンピュータは、プログラムのループ中で繰り返し処理されるような配列データの演算を一括実行するベクトル演算機能を持っている [11]。従って、プログラムをチューニングしてループ長を長くし、最も長いループに対してベクトル演算を実行すれば、計算時間が大幅に短縮できる。大規模リフレクタレーでは素子数が非常に多くなるので、本報告では素子数のループに対してベクトル演算を実行する。

3. 小規模なリフレクタレーの設計例

起電力法を用いたリフレクタレー設計法により、線状ダイポール素子と寄生ダイポール素子が混在した小規模な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を図 2 に示す。数値シミュレーションには、Intel Core i5-3470 3.20 GHz CPU を搭載した PC を用いた。

十分遠方に一次放射器を有するリフレクタレーを設計し、その指向性利得パターンを数値的に求めた結果を図 3 に示す。指向性利得は以下の式で求めた。

$$G_d = \frac{|\mathbf{E}_s|^2 / Z_0}{P_{rad} / 4\pi r^2} \quad (2)$$

\mathbf{E}_s はリフレクタレーの散乱界、 Z_0 は真空の固有インピーダンス、 P_{rad} はリフレクタレーの散乱電力、 r は観測点までの距離である。本報告では、リフレクタレーからの散乱界を全球面で数値積分して P_{rad} を求めた。図 3 から、一次放射器がリフ

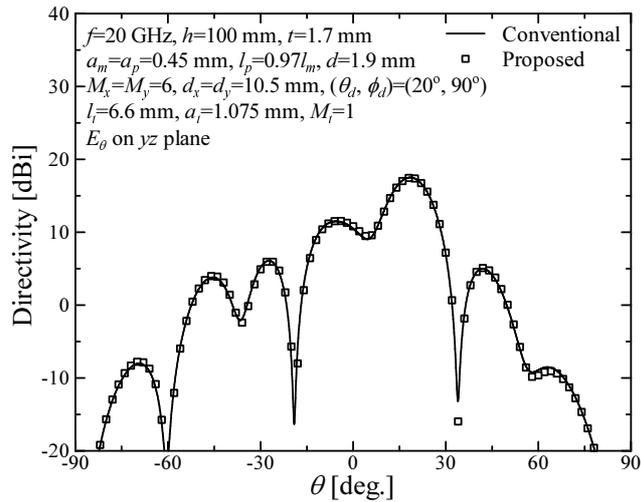


Figure 3 6 × 6 線状素子リフレクタレーの指向性利得パターン ($h = 100$).

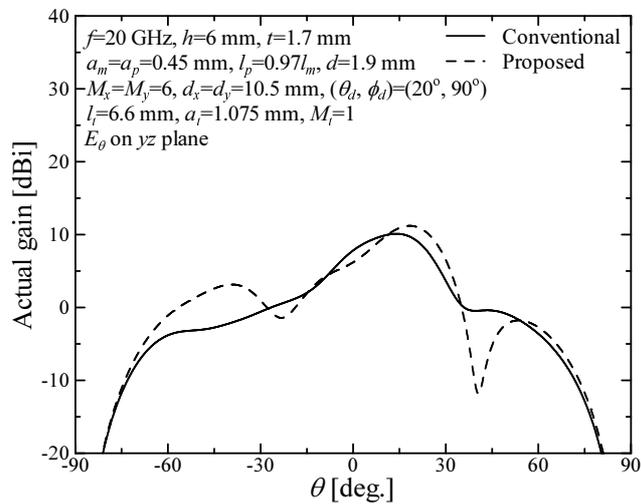


Figure 4 6 × 6 線状素子リフレクタレーの動作利得パターン ($h = 6$).

レクタレーから十分遠方にある場合は、垂直入射の平面波を励振源として一次放射器を無視して設計したリフレクタレー (Conventional) と起電力法を用いた設計法により一次放射器を考慮して設計したリフレクタレー (Proposed) の指向性利得は、互いにほぼ一致することが分かる。従って、一次放射器がリフレクタレーから十分遠方にある場合は、どちらの手法でリフレクタレーを設計しても構わないと言える。なお、設計したリフレクタレーの開口効率はこちらもおおよそ 36% であった。

次に、一次放射器とリフレクタレーが近接した 6 × 6 素子の低姿勢リフレクタレーを設計し、その動作利得パターンの数値計算結果を図 4 に示す。動作利得は以下の式で求めた。

$$G_{ra} = \frac{|\mathbf{E}_t|^2 / Z_0}{P_{in} / 4\pi r^2} \quad (3)$$

\mathbf{E}_t は一次放射器とリフレクタレー素子の全電界、 P_{in} は一次放射器への入力電力である。図 4 から、起電力法を用いて一次放射器を考慮して設計した低姿勢リフレクタレーの利得は、垂直入射の平面波を励振源として一次放射器を無視して

Table 1 6 × 6 素子の低姿勢リフレクタレーの設計及び動作利得パターンの数値計算に要した時間 (所望の散乱方向は $(\theta_d, \phi_d) = (20^\circ, 90^\circ)$).

| Process | The order of CPU time | CPU time [sec.] |
|---|-----------------------|-----------------|
| Design of reflectarray | $O(M \times (M_t)^3)$ | 26 |
| Numerical analysis of designed reflectarray | $O((M + M_t)^3)$ | 0.4 |

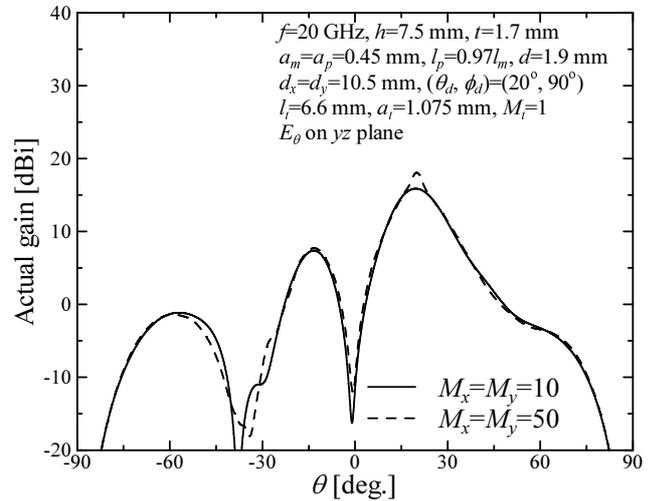


Figure 5 低姿勢リフレクタレーの動作利得パターン ($M_t = 1$).

設計したリフレクタレーよりもやや高くなること分かる。更に図 4 では、垂直入射の平面波を励振源とし、一次放射器を無視して設計したリフレクタレーの主ビームが、所望の方向 $(\theta_d, \phi_d) = (20^\circ, 90^\circ)$ を向いていないことも分かる。従って、一次放射器とリフレクタレーが近接した低姿勢リフレクタレーの設計には、起電力法を用いた設計法が適していることが分かる。なお、起電力法を用いて設計したリフレクタレーの開口効率はどちらもおよそ 9% であり、一次放射器を遠方に配置したリフレクタレーよりもかなり低い値となった。従って、大規模化等によってリフレクタレーの高利得化・高効率化を図る必要がある。

また、起電力法を用いた設計法によって 6 × 6 素子の低姿勢リフレクタレーを設計し、その動作利得パターンを数値的に求めるのに要した時間を表 1 に示す。低姿勢リフレクタレーの設計及びその動作利得パターンの数値シミュレーションが短時間でなされていることが分かる。

4. 大規模な低姿勢リフレクタレーの設計例

ここでは、起電力法を用いたリフレクタレー設計法とベクトル型スーパーコンピュータとを組み合わせ、大規模な低姿勢リフレクタレーを設計した結果を示す。ベクトル型スーパーコンピュータとして、東北大学サイバーサイエンスセンターにある NEC 製のスーパーコンピュータ SX-9 を使い、8 並列で計算を行った。プログラムは十分にチューニングし、ベクトル演算率が 99.5% 以上の状態で実行した。

4.1 リフレクタレー素子数と利得との関係

その一方、図 5 に、大規模な低姿勢リフレクタレーの動作利

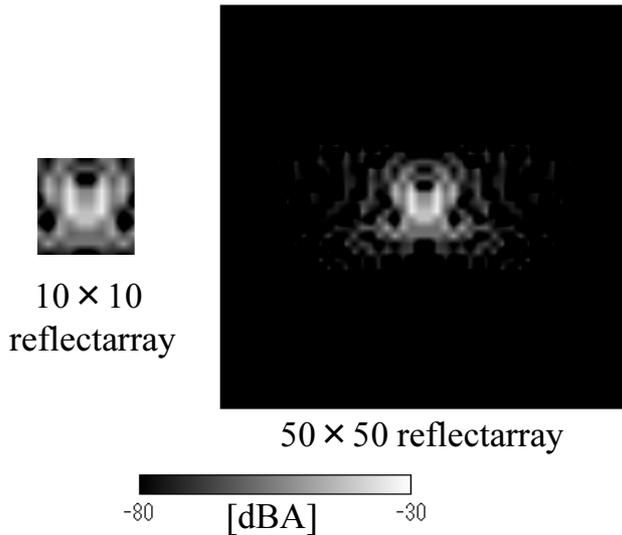


Figure 6 低姿勢リフレクタレーの開口面の電流分布 ($M_t = 1$).

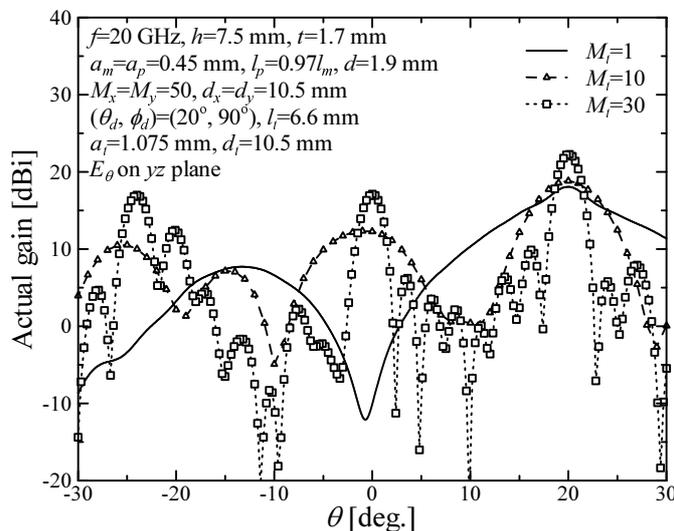


Figure 7 アレー化した一次放射器を有する大規模な低姿勢リフレクタレーの動作利得パターン.

得パターンを数値的に求めた結果を示す。また、図 6 に、その大規模リフレクタレー開口面の電流分布を示す。図 5 から、リフレクタレー素子数を増やしているにもかかわらず、動作利得はさほど大きくなっていないことが分かる。一次放射器がリフレクタレーに近い場合、リフレクタレーは近傍界で励振されているとみなせる。このとき、図 6 に示すように、一次放射器に近いリフレクタレー開口面の一部が強く励振され、その他の部分はほとんど励振されない。従って、リフレクタレー素子数を増やしても実効的な開口面は広がらず、利得があまり上がらない。

以上のことから、低姿勢リフレクタレーを高利得化するには、リフレクタレーの大規模化だけでは不十分だと言える。

4.2 一次放射器の素子数と利得との関係

低姿勢リフレクタレーを高利得化するため、リフレクタレーの大規模化に加えて一次放射器のアレー化を行う。図 7 に、アレー化した一次放射器を有するリフレクタレーの動作利得

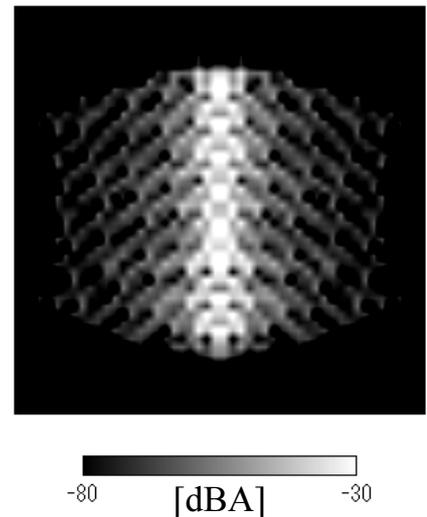


Figure 8 アレー化した一次放射器を有する大規模な低姿勢リフレクタレーの開口面の電流分布 ($M_x = M_y = 50, M_t = 30$).

Table 2 50×50 素子の大規模な低姿勢リフレクタレーの設計及び動作利得パターンの数値計算に要した時間 ($M_t = 30$).

| Process | CPU time [sec.] | |
|---|-----------------|------|
| | Core i5 | SX-9 |
| Design of reflectarray | 181771 | 2349 |
| Numerical analysis of designed reflectarray | 61742 | 419 |
| Total | 243513 | 2768 |

パターンを示す。また、図 8 に、その大規模リフレクタレー開口面の電流分布を示す。図 7 から、一次放射器の素子数を増やすと主ビームの利得が上がる事が分かる。図 8 に示すように、一次放射器の素子数を増やすと、リフレクタレー開口面の多くの部分が励振されるようになる。従って、リフレクタレーの実効的な開口面が広がり、利得が上がる。

4.3 計算時間

また、起電力法を用いた設計法によって 50×50 素子の大規模な低姿勢リフレクタレーを設計し、その動作利得パターンを数値的に求めるのに要した時間を表 2 に示す。比較のため、小規模なリフレクタレーの設計に用いた Core i5 CPU を搭載した PC で同じ数値シミュレーションを行うのに必要な計算時間も表 2 に示す。Core i5 CPU の代わりにベクトル型スーパーコンピュータ SX-9 を用いた場合、リフレクタレーの設計時間は約 1/77、設計したリフレクタレーの計算時間は約 1/147、総計算時間は約 1/88 になった。ベクトル型スーパーコンピュータの並列化機能及びベクトル演算機能によって、数値シミュレーションの時間が大幅に削減されていることが分かる。

5. むすび

本報告では、起電力法を用いたリフレクタレー設計法をベクトル型スーパーコンピュータと組み合わせて高速化した。高速化した設計法を用いて、大規模な低姿勢リフレクタレーを設計し、アレー給電を用いてその高利得化を図った。今後は、リ

フレクトアレー素子間隔や一次放射器の高さと利得・サイドローブとの関係を解明すると共に、最適化アルゴリズムを用いて高利得化・低サイドローブ化を図る予定である。

謝 辞

本研究成果の一部は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-9 を用いて得られた。本研究成果の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) 電波有効利用促進型研究開発及び JSPS 科研費 26820137 の助成を受けて得られた。また、本研究の一部は東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究として進められたものである。

References

- [1] J. Huang, "Analysis of a microstrip reflectarray antenna for microspacecraft applications," TDA Progress Report 42-120, pp. 153-173, Feb. 1995.
- [2] J. Huang and J.A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, John Wiley & Sons, 2008.
- [3] S.-H. Hsu, C. Han, J. Huang, and K. Chang, "An Offset Linear-Array-Fed Ku/Ka Dual-Band Reflectarray for Planet Cloud/Precipitation Radar," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.55, no.11, pp.3114-3122, Nov. 2007.
- [4] S.-W. Qu, Q.-Y. Chen, M.-Y. Xia, and X.Y. Zhang, "Single-Layer Dual-Band Reflectarray With Single Linear Polarization," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.62, no.1, Jan. 2014.
- [5] T. Smith, U. Gothelf, O.S. Kim, and O. Breinbjerg, "An FSS-Backed 20/30 GHz Circularly Polarized Reflectarray for a Shared Aperture L- and Ka-band Satellite Communication Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.62, no.2, pp.661-668, Feb. 2014.
- [6] N. Suematsu, S. Kameda, H. Oguma, M. Sasanuma, S. Eguchi, and K. Kuroda, "Multi-Mode SDR VSAT against Big Disasters," *Microwave Conference (EuMC)*, 2013 European, pp.842-845, Oct. 2013.
- [7] 今野 佳祐, 陳 強, 澤谷 邦男, 亀田 卓, 末松 憲治, "起電力法によるリフレクトアレー設計法の一検討," *信学技報*, vol.112, no.491, AP2012-164, pp.1-5, 2013 年 3 月.
- [8] 今野 佳祐, 陳 強, 澤谷 邦男, 亀田 卓, 末松 憲治, "起電力法を用いた線状素子リフレクトアレーの設計," *信学総大*, B-1-138, p.138, 2013 年 3 月.
- [9] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, S. Kameda and N. Suematsu, "Novel design method for reflectarray by induced electromotive force method," *Proc. IEEE AP-S Int. Symp.*, 429.3, pp.1342-1343, July 2013.
- [10] K. Konno, Q. Chen, S. Kameda and N. Suematsu, "Design of finite FSS-backed reflectarray by using BDP-CG method," *Proc. iWAT2014*, pp. 200-202, March 2014.
- [11] サイバーサイエンスセンター スーパーコンピューティング研究部, "スーパーコンピュータシステム SX-9 利用ガイド", p.2, 2014 年 4 月.