

# 大規模な低姿勢リフレクタレー設計法の高速化に関する一検討

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: †{konno, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本報告では、起電力法によるリフレクタレーの設計法をベクトル型スーパーコンピュータによって高速化するための手法について述べる。高速化した設計法によって数千素子規模の大規模リフレクタレーを設計とし、その特性を数値的に明らかにする。また、設計及び数値シミュレーションに必要な計算時間と計算機メモリを定量的に明らかにする。

キーワード リフレクタレー, 起電力法, ベクトル型スーパーコンピュータ

## A Study of Accerelation of Design Method for Large-Scale, Low Profile Reflectarray

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: †{konno, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** In this report, a design method for reflectarrays using induced electromotive force (EMF) method is accelerated using a vector supercomputer. A large-scale reflectarray which consists of a few thousand elements is designed by using the method. Finally, the CPU time and computer memory required for the design of the reflectarray is quantitatively evaluated.

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

### 1. ま え が き

高利得・広帯域なアンテナとして、反射鏡アンテナであるパラボラアンテナがこれまで用いられてきたが、パラボラアンテナは大型でかさばるという欠点があった。そこで近年、パラボラアンテナに代わる新たなアンテナとして、平面型リフレクタレーが注目されている [1]。平面型リフレクタレーは、電磁波を送受信する一次放射器と、多数の素子から成る反射面から構成されている [2]。平面型リフレクタレーの反射面は、一次放射器から入射した電界の位相を回転させ、所望の方向で平面波を形成するように設計される。そのため、反射面上にあるリフレクタレー素子の大きさを変えることで、所望の方向で反射電界の位相を揃える。従って、平面型リフレクタレーを設計するには、リフレクタレーの素子の大きさに対する反射電界の位相変化量、すなわち反射係数の位相を予め求めておく必要がある。

これまで、スペクトル領域のモーメント法 [3]- [5] や有限要素法 [6]- [9] など、様々な手法を用いて平面型リフレクタレーが設計されてきた。これらの手法はいずれも、反射面に到来する

電界が平面波であること、すなわちリフレクタレーの反射面と一次放射器が十分に離れていることを前提にしている。従って、リフレクタレーの反射面と一次放射器が互いに近接しているときには、これらの設計法は正しい反射係数を必ずしも与えない。

そこで筆者らは、起電力法を用いたリフレクタレーの設計法を提案し、その有効性を明らかにしてきた [10]- [13]。提案法では、起電力法による自己・相互インピーダンスの計算には線積分が 1 度必要なだけであり、リフレクタレーが高速に設計できるという利点がある。また、提案法で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計算している。従って、提案法は一次放射器とリフレクタレーの反射面が近接した低姿勢なリフレクタレーの設計に有効である。筆者らは、提案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タレーを設計、その特性を明らかにした [14]。その一方で、ベクトル型スーパーコンピュータによってリフレクタレーの設計がどの程度高速化されたかは定量的に評価されていない。

本報告では、ベクトル型スーパーコンピュータによるリフレ

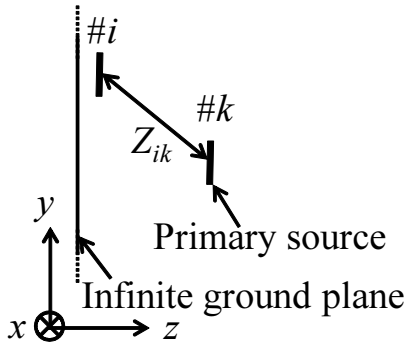


Figure 1 線状ダイポール素子間の相互インピーダンス。

クトアレー設計法の高速化の効果を定量的に評価する。数値シミュレーションを行い、設計に要した時間や必要な計算機メモリを数値的に明らかにする。

## 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 設計法の原理

起電力法を用いた線状素子リフレクタレー設計法は、以下のようになる。

(1) リフレクタレーの基本構造(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。

(2) 起電力法を用い、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) 所望の反射方向  $(\theta_d, \phi_d)$  を決定し、(2) で数値計算した電流を用い、全ての位置にある素子の  $(\theta_d, \phi_d)$  方向の反射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  $(\theta_d, \phi_d)$  方向へ反射する電界の位相  $P$  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、 $(\theta_d, \phi_d)$  方向へ反射する電界の位相が  $P$  となるように決める。

このとき、図 1 に示すような線状ダイポール素子間の相互インピーダンスを起電力法で計算する式は以下のようになる。

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

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、 $l_k$  と  $l_i$  はそれぞれ一次放射器と第  $i$  リフレクタレーの素子長である。 $y_c$  は第  $i$  リフレクタレー素子の中心の  $y$  座標、 $I_k$  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。

起電力法による線状素子リフレクタレーは、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できるだけでなく、数値計算時間が短いという利点を持つ。

### 2.2 大規模リフレクタレー設計のための高速化

起電力法による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

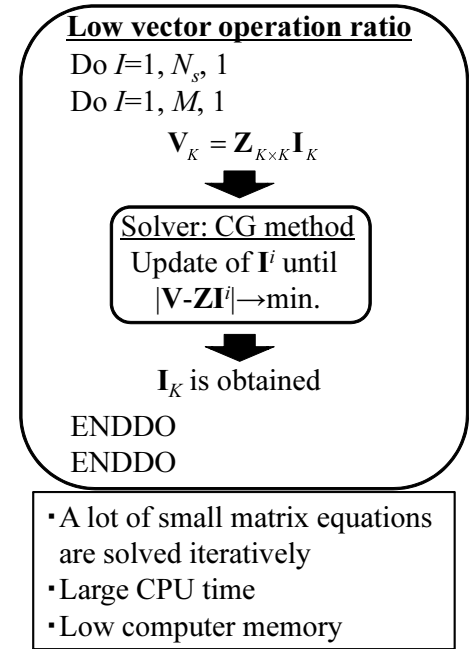


Figure 2 低ベクトル演算率となる反復解法のアルゴリズム。

間がかかる。そこで、大規模リフレクタレーの設計を高速化するため、ベクトル型スーパーコンピュータでの高速化を図る。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 [15]。従って、ループ長が長くなるようなプログラム構造とし、最も長いループに対してベクトル演算を実行すれば、計算時間の大幅な短縮が期待できる。大規模リフレクタレーでは素子数が非常に多くなることから、本報告では素子数のループに対してベクトル演算を行う。

演算全体に対するベクトル演算の割合であるベクトル演算率を高くし、計算を高速化するためのアルゴリズムの例を図 2 および図 3 を用いて説明する。図 2 および図 3 には、素子長に対してリフレクタレー素子の電流を繰り返し計算する部分のアルゴリズムが示されている。なお、 $N_s$  はリフレクタレー素子の長さを変えらる回数、 $M (= M_x M_y)$  はリフレクタレー素子数である。また、 $K$  はリフレクタレー素子に含まれるダイポール素子数で、線状ダイポール素子であれば 2、寄生素子付きのダイポール素子であれば 6 である。図 2 のアルゴリズムは、小規模な  $K \times K$  の行列方程式を繰り返し解くアルゴリズムになっている。このアルゴリズムの場合、外側の二重ループに対して並列化が実行できるが、反復法で行列方程式を解く部分で現れる  $K \times K$  の小規模な行列-ベクトル積の演算はベクトル化できず、ベクトル演算率は小さくなる。その結果、ベクトル型スーパーコンピュータを用いても計算時間はそれほど短縮できない。その一方で、図 3 のアルゴリズムは、解くべき  $N_s \times M$  個の  $K \times K$  の行列方程式を一つの大きな行列方程式とみなして、大きな配列に格納してから解いている。このアルゴリズムの場合、反復法で行列方程式を解く部分に  $K N_s M \times K N_s M$  の大規模な行列-ベクトル積の演算が現れる。従って、このアルゴリズムは並列化・ベクトル化の両方に適しており、ベクトル型スーパーコンピュータを用いた計算時間の短縮が期待できる。

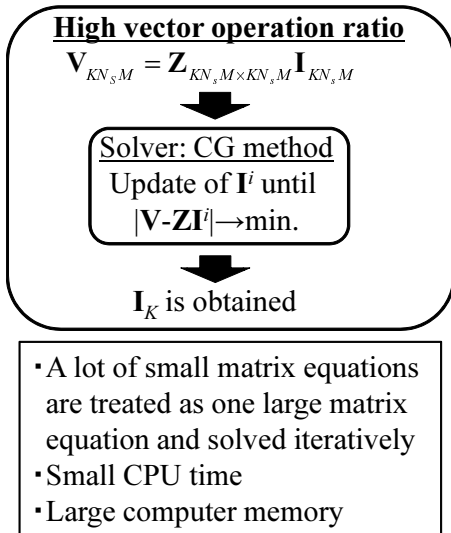


Figure 3 高ベクトル演算率となる反復解法のアルゴリズム.

Table 1 計算時間と計算機メモリ.

Process	CPU time	Computer memory
Design of reflectarray	$O(N_s N_i M (M_t + K)^2)$	$O(N_s M (M_t + K)^2)$
Numerical analysis of reflectarray	$O(N_s (KM + M_t)^3)$	$O((KM + M_t)^2)$

### 2.3 計算時間と計算機メモリ

起電力法を用いたリフレクタレー設計法の計算時間と計算機メモリのオーダーを表1に示す. 表1で,  $N_i$  はCG法の反復回数である. なお, この表に示された計算機メモリのオーダーは, ベクトル型スーパーコンピュータによるベクトル演算を最大限利用することを前提とした値である. 従って, 可能な限り計算機メモリを活用するようになっている. また, リフレクタレーの設計時には, 行列方程式を解く手法として共役勾配 (Conjugate-Gradient, CG) 法を用いた. 一方で, 設計したリフレクタレーの数値シミュレーション時には, 行列方程式を解く手法としてLU分解を用いた.

### 3. 大規模な低姿勢リフレクタレーの設計例

ここでは, 起電力法による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, 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を用い, 8並列で計算を行った. プログラムは十分に改良を行い, ベクトル演算率が99.5%以上の状態で実行した.

#### 3.1 リフレクタレー素子数と利得との関係

図4に, 大規模な低姿勢リフレクタレーの動作利得パターンを数値的に求めた結果を示す. なお, 動作利得は以下の式から求めた.

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

$\mathbf{E}_t$  は一次放射器とリフレクタレー素子の全電界,  $Z_0$  は真空

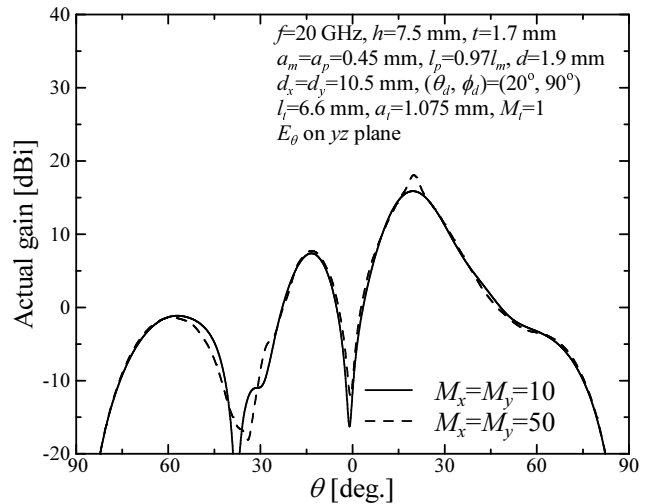


Figure 4 低姿勢リフレクタレーの動作利得パターン ( $M_t = 1$ ).

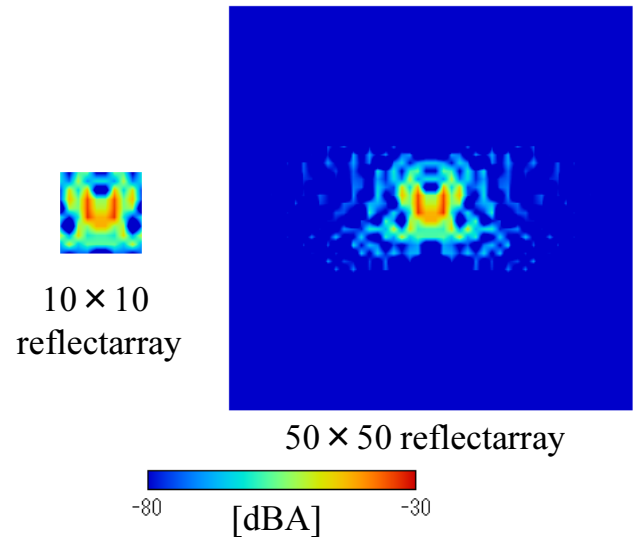


Figure 5 低姿勢リフレクタレーの開口面の電流分布 ( $M_t = 1$ ).

の固有インピーダンス,  $P_{in}$  は一次放射器への入力電力,  $r$  は観測点までの距離である. また, 図5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4から, リフレクタレー素子数を増やしても, 動作利得はさほど大きくならないことが分かる. 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考えられる. このとき, 図5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, 残り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すことが実効的な開口面の広がりにつながらず, 利得は結果的にさほど上がらない. 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考えられる.

#### 3.2 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6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パターンを示す. また, 図7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6から, 一次放射器の素子数を増や

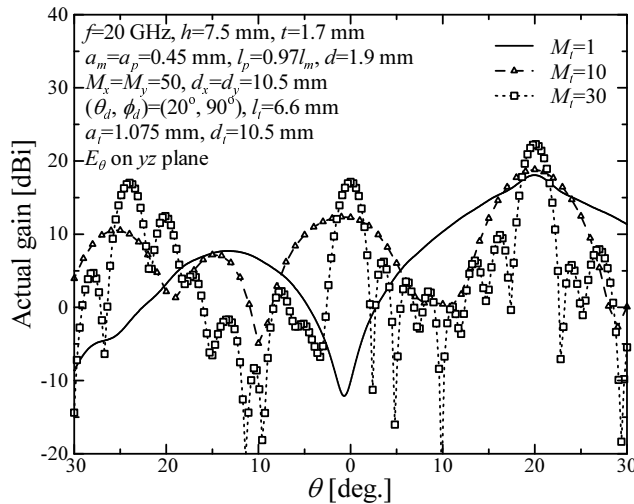


Figure 6 アレー化した一次放射器を有する大規模な低姿勢リフレクトアレーの動作利得パターン。

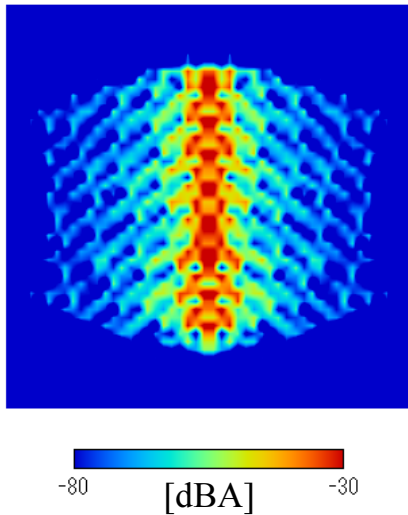


Figure 7 アレー化した一次放射器を有する大規模な低姿勢リフレクトアレーの開口面の電流分布 ( $M_x = M_y = 50$ ,  $M_t = 30$ ).

すと主ビームの利得が上がる事が分かる。図7に示すように、一次放射器の素子数を増やすと、リフレクトアレー開口面の多くの部分が共振されるようになる。従って、リフレクトアレーの実効的な開口面が広がり、利得が上がる。

### 3.3 計算時間

また、起電力法を用いた設計法によって  $50 \times 50$  素子の大規模な低姿勢リフレクトアレーを設計し、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、小規模なリフレクトア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の推定値も表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、リフレクトアレーの設計時間は約  $1/77$ 、設計したリフレクトア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事が分かる。

図8に、 $M$  素子のリフレクトアレーを設計するのに要した計

Table 2  $50 \times 50$  素子の大規模な低姿勢リフレクトア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

算時間と計算機メモリを素子数  $M$  に対して示す。リフレクトアレーの設計では、リフレクトアレー素子と一次放射器との相互結合を考慮した  $2(M_t + K) \times 2(M_t + K)$  の小規模行列方程式を繰り返し解く部分に最も長い時間がかかる。行列方程式を解く回数は設計しようとしているリフレクトアレーの素子数  $M$  に比例するため、設計に必要な計算時間も  $M$  に比例する。同様に、リフレクトアレーの設計に必要な計算機メモリも  $M$  に比例している。本報告では、 $M$  個の小規模な行列方程式を繰り返し解く部分をベクトル演算で高速化している。その際、2.2節で示したように、解くべき  $M$  個の小規模行列方程式の集まりを1つの大きな配列に格納し、それを仮想的な大規模行列方程式とみなしてCG法で解いている。その結果、リフレクトアレーの設計に必要な計算機メモリも  $M$  に比例する。

図9に、設計した  $M$  素子のリフレクトアレーの数値解析に必要な計算時間とメモリを示す。 $M$  素子のリフレクトアレーの数値解析で最も時間がかかるのは、行列方程式を解く部分である。本報告では、設計したリフレクトアレーから求めた行列方程式を数値的に解く際に、LU分解を用いている。行列方程式の未知数は素子数  $M$  に比例し、かつ  $M$  が十分大きければベクトル演算によって計算時間のオーダーは変わらないので、LU分解の計算時間は  $M^3$  に比例する。従って、 $M$  素子のリフレクトアレーの数値解析に必要な計算時間は  $M^3$  となる。その一方、必要な計算機メモリのオーダーは、係数行列のサイズである  $M^2$  に比例する。

図10に、 $M_t$  個の一次放射器を持つ  $M = 2500$  素子のリフレクトアレーを設計するのに要した計算時間と計算機メモリを一次放射器の数  $M_t$  に対して示す。 $M_t$  が大きくなると、繰り返し解く小規模な行列方程式のサイズが大きくなる。CG法の反復1回当たりの計算時間は  $(K + M_t)^2$  に比例するため、 $M_t$  が  $K$  よりも大きければ反復回数は  $M_t^2$  に比例する。

## 4. むすび

本報告では、起電力法を用いたリフレクトア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トアレーを設計し、アレー給電を用いてその高利得化を図った。設計に必要な計算時間を定量的に評価し、ベクトル型スーパーコンピュータによる高速化の有効性を明らかにした。

## 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

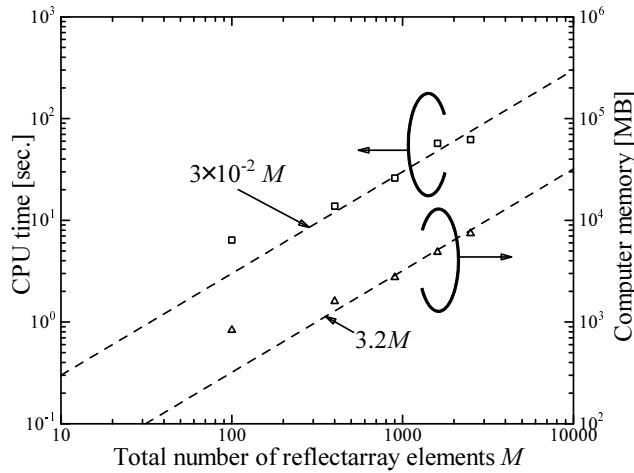


Figure 8 リフレクタレーの設計に要した計算時間と計算機メモリ ( $M_t = 1$ ).

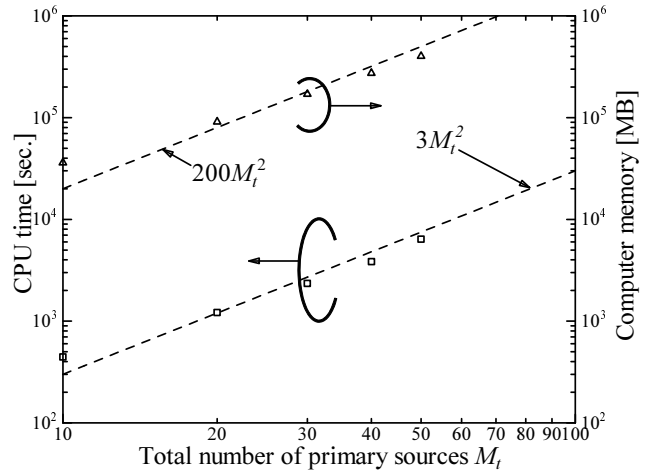


Figure 10 リフレクタレーの設計に要した計算時間と計算機メモリ ( $M = 2500$ ).

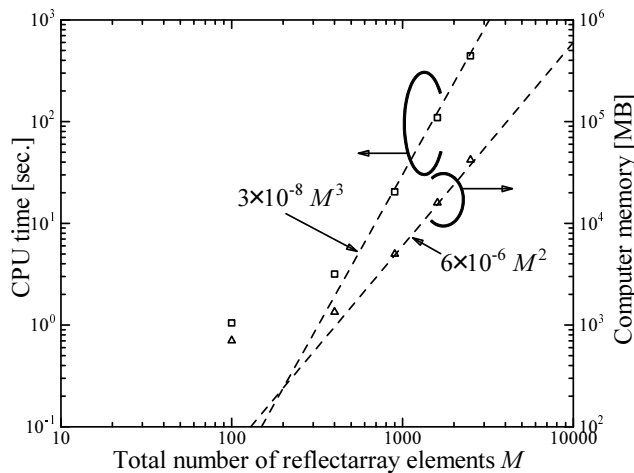


Figure 9 リフレクタレーの数値シミュレーションに要した計算時間と計算機メモリ ( $M_t = 1$ ).

有効利用促進型研究開発によって得られた。

### 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] D.M. Pozar and T.A. Metzler, "Analysis of a reflectarray antenna using microstrip patches of variable size," Electr. Lett., vol. 29, no. 8, pp. 657-658, April 1993.
- [4] C. Wan and J.A. Encinar, "Efficient computation of generalized scattering matrix for analyzing multilayered periodic structures," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 43, no. 11, pp. 1233-1242, Nov. 1995.
- [5] 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.
- [6] R. Remski, "Analysis of PBG surfaces using Ansoft HFSS," Microw. J., vol. 43, no. 9, pp. 190-198, Sept. 2000.
- [7] I. Bardi, R. Remski, D. Perry, Z. Cendes, "Plane wave scattering from frequency-selective surfaces by the finite-element method," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 2, pp.

641-644, March 2002.

- [8] 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.
- [9] Q.-Y. Li, Y.-C. Jiao, G. Zhao, "A novel microstrip rectangular-patch/ring-combination reflectarray element and its application," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 8, pp. 1119-1122, 2009.
- [10] 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タ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.
- [11] 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タレーの設計," 信学総大, B-1-138, p. 138, 2013年3月.
- [12] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, S. Kameda and N. Sue-matsu, "Novel design method for reflectarray by induced electromotive force method," Proc. IEEE AP-S Int. Symp., 429.3, pp. 1342-1343, July 2013.
- [13] K. Konno, Q. Chen, S. Kameda and N. Sue-matsu, "Design of finite FSS-backed reflectarray by using BDP-CG method," Proc. iWAT2014, pp. 200-202, March 2014.
- [14] 今野 佳祐, 陳 強, "アレー給電による大規模な低姿勢リフレクタレーの高利得化," 信学技報, vol. 114, no. 294, AP2014-138, pp. 55-59, 2014年11月.
- [15] 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.