

## [共同研究成果]

# ランダムな位置に破損素子を有する 超大規模アレーアンテナの IEM/LAC による数値解析

今野佳祐, 陳 強, 澤谷 邦男  
東北大学大学院工学研究科 電気・通信工学専攻

## 1 まえがき

近年, 化石燃料に代わる新たなエネルギー源として, 宇宙太陽光利用システム (Space Solar Power Systems, SSPS) が注目を集めている [1], [2]. SSPS は, 宇宙空間に配置したソーラーパネルによって発電した電力をマイクロ波で地上に送電するというシステムである. SSPS の送電部には数億素子規模のアレーアンテナが使用される予定であり, SSPS の実現に先立ってそのような億単位の素子を有する超大規模アレーアンテナの特性を明らかにする必要がある.

さて, アレーアンテナの特性を解析する手法としてモーメント法 (Method of Moments, MoM) が挙げられる [3], [4]. MoM は行列方程式を解くことによってアンテナ上の電流分布を得るという手法であり, 素子間相互結合あるいは運用中に生じた破損素子の影響を考慮した上で電流分布を求められるという利点がある. しかしながら, 未知の電流係数の数を  $N$  とすると, インピーダンス行列を保存するメモリが  $O(N^2)$ , 逆行列を求めるのに必要な計算時間が  $O(N^3)$  になってしまうため, MoM で億単位の素子を有する超大規模アレーアンテナを解析することは不可能である.

そこで我々の研究グループでは, SSPS 用超大規模アレーアンテナの特性を明らかにするために, インピーダンス拡張法 (Impedance Extension Method, IEM) をこれまでに提案した [5]. IEM は, 周期的アレーアンテナ中にある各素子の動作インピーダンスの性質に基づく解析法であり, 億単位の素子を有する超大規模アレーアンテナの数値解析が可能である. また, 局所アドミタンス補償 (Local Admittance Compensation, LAC) を提案し, IEM と組み合わせた IEM/LAC を用いることによりランダムな位置に破損素子を含む超大規模アレーの解析も可能にした [6]. 本報告では, IEM/LAC を用いて億単位の素子を有する超大規模アレーアンテナを解析し, 素子間相互結合の利得への影響, 破損素子がメインローブ及びサイドローブに与える影響を検討する.

## 2 IEM/LAC の原理

図 1 に, IEM の原理を示す. IEM では, 比較的小規模なアレーアンテナ (Small array) を MoM で解析し, 得られた各素子の動作インピーダンスを超大規模なアレーアンテナ (Huge array) の対応する素子にコピーする. そして, 動作インピーダンスと給電電圧から素子の電流分布を求める. IEM を用いることで, 超大規模アレーアンテナにおける素子間相互結合や端効果が動作利得に及ぼす影響を定量的に評価することができる. また, 電流分布を拡張する方法と違い, IEM はテーパ付き給電を与えたアレーアンテナの数値解析を行うことも可能である.

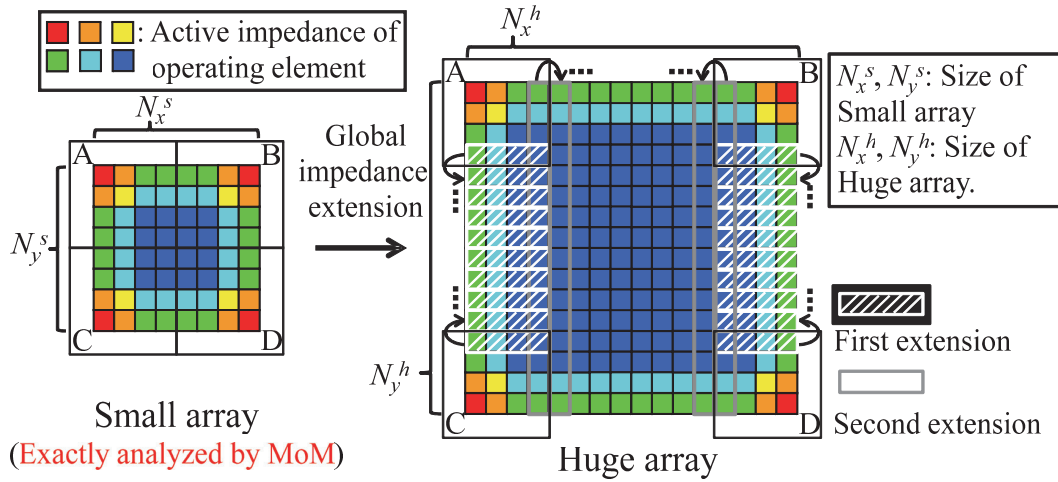


図 1: 8 × 8 Small array から 16 × 16 Huge array への IEM.

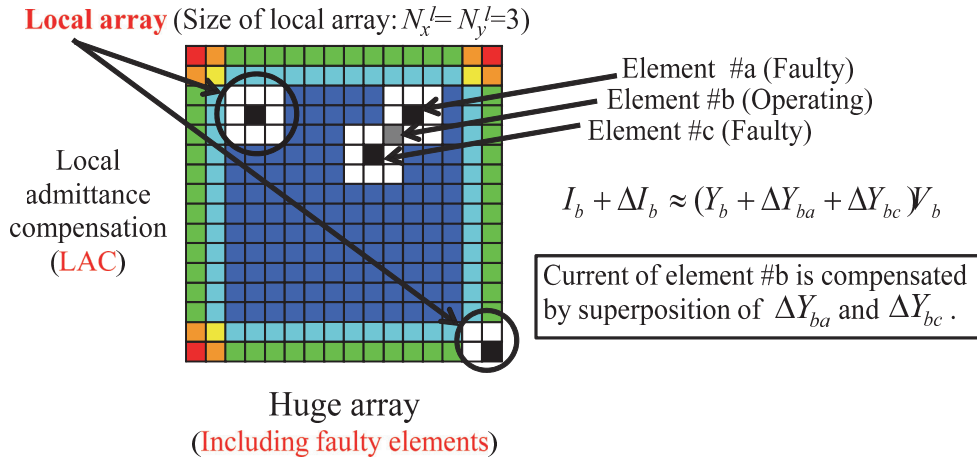


図 2: 8 × 8 Small array から 16 × 16 Huge array への IEM/LAC.

運用中に破損素子が生じた Huge array を解析する際には、図 2 に示すような LAC を実行し、破損素子の影響を組み入れることができる。LAC では、予め 1 つだけ破損素子を含む Small array を全パターン (図の場合は  $8 \times 8 = 64$  通り) 解析し、全く破損素子を含まない Small array の動作アドミタンスをその動作アドミタンスから引いて保存しておく。そして、図 2 に示すように、破損素子の周囲にある素子の動作アドミタンスの変動を組み入れる。LAC では、破損素子の影響を受ける範囲にある素子のことを Local array と呼び、図 2 では  $N_x^l = N_y^l = 3$  である。LAC は重畳の理に基づいているため、複数の破損素子から影響を受けた素子の動作アドミタンスの変動も加算によって容易に組み込むことができる。以上のように、IEM と LAC を組み合わせた IEM/LAC を利用することで、ランダムな位置に破損素子を含む超大規模アレーアンテナの数値解析が可能になる。

### 3 数値解析

#### 3.1 解析モデル

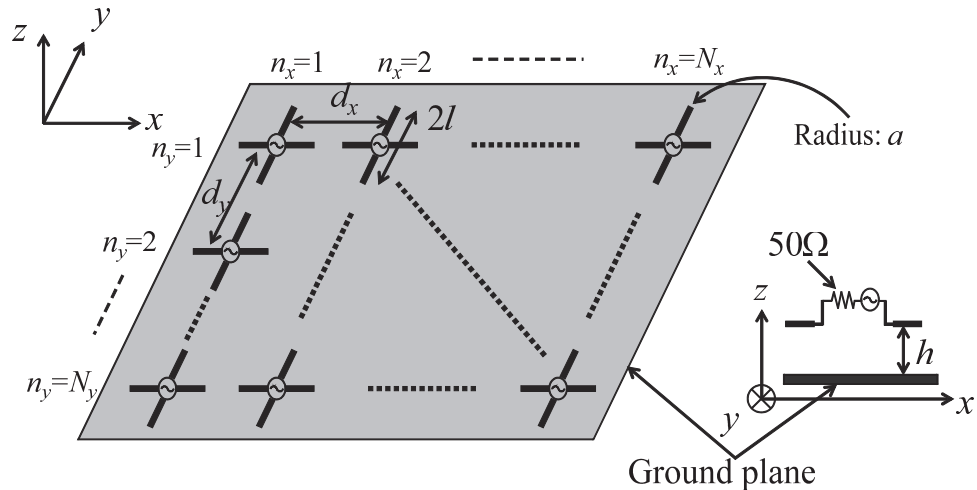


図 3: 反射板付き 2次元クロスダイポールアレーアンテナ.

図 3 に, 解析モデルである反射板付きの 2次元クロスダイポールアレーアンテナを示す. 反射板の影響は鏡像法を用いて再現し, Small array の解析にはスーパーコンピュータ向けにベクトル化・並列化チューニングを施した MoM を用いる. 各素子は 3つのセグメントに分割するものとし, 給電分布はガウス分布に従う 10dB テーパーとする. また, 給電位相を変えることによってビーム方向も  $(\theta_{main}, \phi_{main})$  へと制御できる.

#### 3.2 超大規模アレーアンテナの IEM による数値解析

表 1:  $10,000 \times 10,000$  の Huge array の動作利得における素子間相互結合の影響.

|  | Actual Gain [dBi] |                     |
|--|-------------------|---------------------|
|  | IEM               | w/o mutual coupling |
| Mainlobe ( $\theta = 10^\circ$ )       | 82.0              | 81.7                |
| Sidelobe ( $\theta \approx 40^\circ$ ) | -3.9              | -2.6                |

まず, IEM を用いて超大規模アレーを数値解析し, 動作利得における素子間相互結合の影響を明らかにする. 表 1 に, 1 億素子 (i.e.  $N_x^h = N_y^h = 10,000$ ) の Huge array を IEM で解析して得た動作利得を示す. なお, small array のサイズは  $N_x^s = N_y^s = 50$ , Small array 及び Huge array の素子長  $2l = 0.5\lambda$ , 素子半径  $a = 0.00825\lambda$ , 素子-反射板間距離  $h = 0.25\lambda$  とし, ビーム方向は  $(\theta_{main}, \phi_{main}) = (10^\circ, 0^\circ)$  とした. この Huge array を厳密に解析するのに必要な計算機メモリは約 11520PB に達するため, 厳密解を得るのは不可能である. しかしながら, IEM を用いることで約 19GB 程度まで必要なメモリが削減され, 近似解を得ることができる. 表 1 から, メインローブ

レベルが素子間相互結合の影響によって 0.3dB 増加している一方で, 40° 方向のサイドローブレベルは 1.3dB 低下していることが分かる. SSPS 用アレーアンテナの規模は非常に大きく, 送信電力も大きいため, 素子間相互結合による動作利得の増減は電力効率や EMC の観点から決して無視できない. 従って, SSPS 用超大規模アレーアンテナを設計する際に, 素子間相互結合の影響を考慮する必要があると言える.

### 3.3 破損素子を含む超大規模アレーアンテナの IEM/LAC による数値解析

表 2: メインローブレベルと破損素子数との関係.

|              | $ \mathbf{E}_R ^2$ [dB] |             |
|--------------|-------------------------|-------------|
|              | IEM/LAC                 | $(1 - P)^2$ |
| $P = 0.1 \%$ | -0.0096 ~ -0.0094       | -0.0087     |
| $P = 1 \%$   | -0.0958 ~ -0.0952       | -0.087      |
| $P = 10 \%$  | -0.998 ~ -0.996         | -0.92       |

破損素子数が動作利得に及ぼす影響を統計的に評価するために, 相対利得 “Relative gain” を以下のように定義する.

$$\text{Relative gain} = |\mathbf{E}_R|^2 = \frac{|\mathbf{E}(P, \theta, \phi)|^2}{|\mathbf{E}(0, \theta, \phi)|^2}. \quad (1)$$

ここで,  $\mathbf{E}$  は  $(\theta, \phi)$  方向の遠方界,  $P$  は Huge array に占める破損素子の割合である. 本節では, 破損素子がメインローブ及びサイドローブに及ぼす影響を相対利得によって評価する.

前節と同様に,  $N_x^h = N_y^h = 10,000$  の Huge array を IEM/LAC によって解析し, 破損素子は割合  $P$  で Huge array 中のランダムな位置に分布しているものとする. Huge array の素子数以外のパラメータは前節までと同じであるが, IEM/LAC における Local array サイズは数値解析に基づいて  $N_x^l = N_y^l = 3$  (i.e.,  $1.5\lambda \times 1.5\lambda$ ) と最適化してある. 前節で説明したように, この Huge array を厳密に解くのに莫大な計算機メモリを要するため, 厳密解を求めることは不可能であるが, 厳密解が得られる規模の Huge array を解析するのに要した時間から推定すると, この規模の Huge array を 1 度解析するには最低でも 2,400 日以上かかることになる. 一方で, IEM/LAC による数値解析に要した計算時間は 1 回当たり約 15 秒であり, 非常に短時間である. 本節では統計的な解析を行うため, 試行回数  $M_t$  を 2,000 回とした. Huge array における破損素子数と相対利得との関係を表 2 に示す. 表 2 から,  $P$  を固定した場合に IEM/LAC によって得られたメインローブの相対利得はほぼ一定値となっていることが分かる. これは, メインローブでは各素子からの電界が位相差のない状態で足し合わせられており, 生じた破損素子の数に応じて一定程度必ず相対利得が低下するからである. なお, 文献 [7] では, そのときの相対利得が  $(1 - P)^2$  となることが示されているが, IEM/LAC によって得た結果とよく一致していることが分かる. また, IEM/LAC によって得られた結果と  $(1 - P)^2$  との間に若干の差が生じているのは, 素子間相互結合の影響や給電振幅分布にテーパをかけた分布を与えたことによるものだと考えられる.

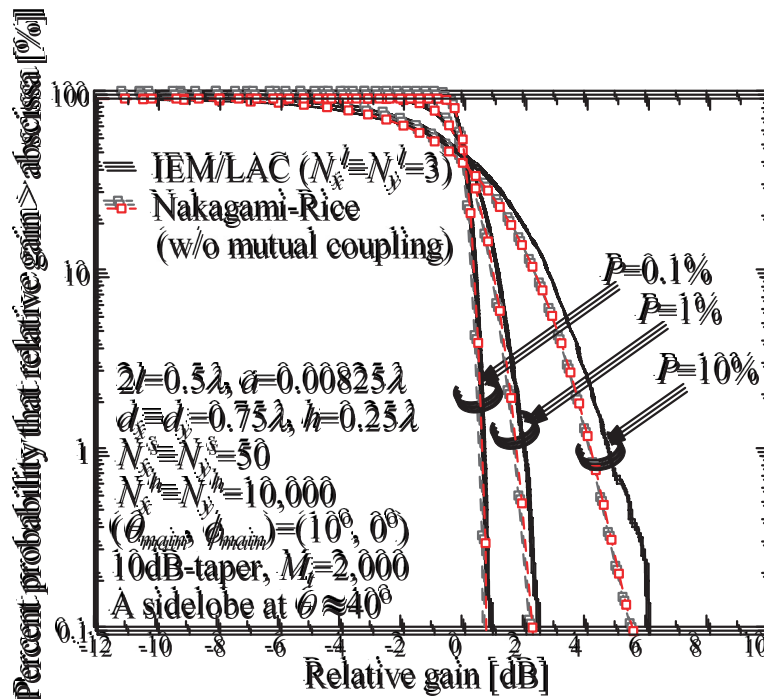


図 4:  $\theta \approx 40^\circ$  方向のサイドローブの相対利得が横軸を超えるパーセント確率。

同じ Huge array において、 $\theta \approx 40^\circ$  方向へのサイドローブの相対利得が横軸の値を超えるパーセント確率を求め、結果を図 4 に示す。なお、素子の電流振幅や位相にランダムな誤差を含むアレーアンテナに関する過去の研究では、相対振幅値の確率密度関数が仲上-ライス分布であるということが報告されてきたため、仲上-ライス分布による曲線も比較のために示す [8], [9]。(1) 式に示した相対利得の定義から、図 4 において 0dB を超える、または下回る値の相対利得は、破損素子によるサイドローブレベルの上昇または低下をそれぞれ示している。図 4 から、ランダムに破損素子が分布した Huge array においては 10% の確率で、0.4 dB (@ $P = 0.1\%$ ), 1.1 dB (@ $P = 1\%$ ), そして 2.8 dB (@ $P = 10\%$ ) ほどサイドローブレベルが上昇することが分かる。このことは、サイドローブでは各素子からの電界が位相差を持って足し合わせられているため、メインローブと違い破損素子の数だけではなくその分布によって上昇・低下が決まることを意味している。また、素子間相互結合を無視した仲上-ライス分布の結果と比較すると IEM/LAC によって得られた結果は高い相対利得を示しており、破損素子の影響は素子間相互結合を考慮して評価すべきであることも分かる。超大規模なアレーアンテナの場合、サイドローブレベルも非常に大きくなるため、このようなサイドローブレベルの上昇は EMC の観点から非常に重大な問題である。

## 4 むすび

本報告では、周期的アレーアンテナの性質に基づいて SSPS 用超大規模アレーアンテナを解析する手法である IEM/LAC について概説した。次に、破損素子のない 1 億素子の超大規模アレーアン

テナを IEM によって数値解析し、素子間相互結合が動作利得に及ぼす影響を定量的に明らかにした。そして、破損素子を含む1億素子の超大規模アレーアンテナを IEM/LAC によって数値解析し、破損素子の数及び分布が動作利得に及ぼす影響を統計的に明らかにした。その結果、メインローブは破損素子の数が増加すると単調に低下する一方、サイドローブは破損素子の分布によっては上昇し得ることが分かった。

## 謝辞

本研究は、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 を利用して行われたものである。関係各位に深く感謝する。

## 参考文献

- [1] P.E. Glaser, "Power from the sun: Its future," *Science*, vol.162, pp.857-861, Nov. 1968.
- [2] P.E. Glaser, "An overview of the solar power satellite option," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.40, no.6, pp.1230-1238, June 1992.
- [3] R.F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, Macmillan, New York, 1968.
- [4] J.H. Richmond and N.H. Geary, "Mutual impedance of nonplanar-skew sinusoidal dipoles," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-23, no.3, pp.412-414, May 1975.
- [5] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Analysis of huge-scale periodic array antenna using impedance extension method," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E92-B, no.12, pp.3869-3874, Dec. 2009.
- [6] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Statistical analysis of huge-scale periodic array antenna including randomly distributed faulty elements," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E94-C, no.10, pp.1611-1617, Oct. 2011.
- [7] M.I. Skolnik, J.W. Sherman, III, and F.C. OGG, Jr., "Statistically designed density-tapered arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.12, no.4, pp.408-417, July 1964.
- [8] J.K. Hsiao, "Normalized relationship among errors and sidelobe levels," *Radio Sci.*, vol.19, no.1, pp.292-302, Janu.-Feb. 1984.
- [9] R.J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, Boston, London, 1994.