

## [共同研究成果]

# 大面積プラズマ生成用アレーアンテナの数値シミュレーション

東北大学大学院工学研究科

佐藤 弘康 澤谷 邦男

### 1. はじめに

高周波放電によりプラズマを生成し、ガラス面にアモルファスシリコンを成膜するプラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) 装置は、液晶ディスプレイや太陽電池等の製作のために重要な技術であり、大面積にわたって均一な成膜が可能な装置の開発が望まれている。このためには、プラズマを生成するアンテナの形状や給電方法について詳細な検討を行う必要があり、数値的な方法によりアンテナの設計ができれば、アンテナ開発が極めて容易になる。しかしながら、プラズマは周波数によって誘電率が大幅に変化するいわゆる分散性媒質であり、また誘電率の実部が負になる場合も少なくないので、市販のアンテナシミュレータや電磁界シミュレータを用いることができない。

筆者らは最近アンテナ・電磁界解析に広く用いられている FDTD (Finite Difference Time Domain, 時間領域差分)法が分散性媒質にも適用可能であることに着目し、これを用いて高周波放電用のアンテナの設計を行った。本稿では、スーパーコンピュータを用いて FDTD 法によりプラズマ生成用アンテナの設計を行い、この設計法が極めて有用であることを明らかにしたので、その結果について述べる。

### 2. FDTD 法によるシミュレーション

FDTD 法は、電界と磁界の時間及び空間の偏微分で与えられるマクスウェルの方程式を、時間と空間の差分で置き換えてこれを数値的に解く方法であり、汎用性が高いという利点を有している。一方、空間を直方体のセルに分割するために、大規模なメモリと長い数値計算が必要となるという欠点ももっている。本手法は時間軸で電界と磁界を交互に求める方法であるため、時間の DO ループに対するベクトル演算および並列演算に適したアルゴリズムであり、大容量のメモリを備えたスーパーコンピュータに適した手法である。これらの計算機の発達に支えられて、この手法が 1990 年代後半から実用的な数値解析の手法としての地位を確立してきた。ただし、プラズマ生成用アンテナの設計に利用するためには、次の問題がある。

1. プラズマ生成のための放電メカニズムを考慮する必要があるが、電磁界解析だけではこれを組み入れることは困難。
2. プラズマを構成する電子とイオンの温度効果を考慮する必要があるが、対象としている 3 次元構造に対してこれを組み入れることは困難。
3. 膜厚分布と電磁界の関係が明確ではない。

これらの問題に対する解決法は容易には見つからないと考えられるので、筆者らは以

下のようにかなり大胆な仮定に基づいて数値解析を開始した。

1. 放電の際の過渡的な現象は無視して、定常的なプラズマに放電用アンテナが置かれているものとする。
2. 熱運動効果は無視して、温度が零の冷プラズマ近似を用いる。また、VHF の周波数を用いるので、イオンは静止しているものとする。冷プラズマ理論を用いたプラズマの複素誘電率は

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)}$$

で与えられ、いわゆるドルード型分散性媒質となる。ここで、 $\omega_p$  はそれぞれ電子プラズマ角周波数、衝突頻度である。

3. 電磁界分布と膜圧分布には相関があり、均一な電磁界が生成できれば膜圧分布も均一となる。

以上の仮定に基づき、大面積 CVD 装置の電磁界解析を行った。図 1 に解析モデルの見取図を示す。真空チャンバの中に 25 素子の折り返しモノポールアンテナを並べて、アンテナ面に平行にガラス基板を置き、アンテナに VHF の周波数を給電して水素とシランの混合ガスを放電するしくみである。ガラス基板の大きさは長さ 1.6m × 幅 1.2m であり、従来と比べて大きな太陽電池パネルや液晶ディスプレイの基板として期待されている。

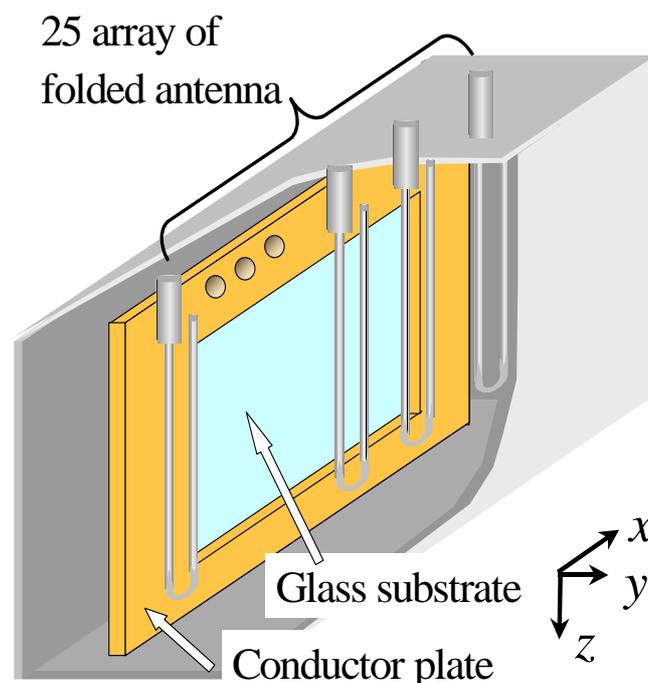


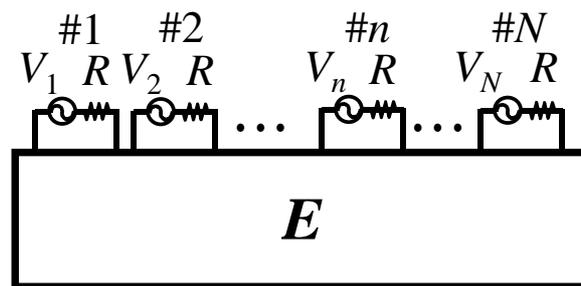
図 1 解析モデル

### 3 . 計算結果と実験結果

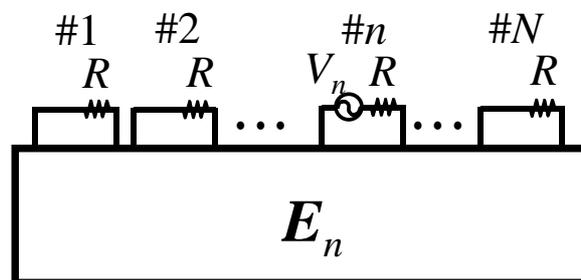
25 素子の折り返しモノポールアンテナを同位相で給電したときの、基板面上の電界分布と単位時間あたりの膜厚分布を図 3 に示す . 解析で得られた電界の強い部分と、実験で得られた膜の厚い部分はほぼ一致しており、両者に相関がある .

各アンテナを同位相で給電しても電界と膜厚の分布は不均一であるため、各アンテナの給電位相を制御した . しかしさまざまに位相を変えるたびに FDTD 法による計算を行うことは非常に時間がかかってしまう . そこで電磁界の重ねの理を用いて計算時間の短縮を図った . 位相を変えたときの基板面上の電界 ( 図 2(a) ) は、各アンテナを独立に給電し、その他のアンテナを整合したときのそれぞれの電磁界 ( 図 2(b) ) を重ね合わせることで得られるので、アンテナの数だけ FDTD 計算すればよい . 最適な給電位相は、基板面上の電界の偏差を最小にする最適化問題を共役勾配法により解いて求めた .

最適な位相で給電して得られた電界分布 ( 図 4(a) ) は大面積にわたり均一な分布となった . このときの膜厚分布 ( 図 4(b) ) も電界分布と同様に均一となり、この場合も両者に相関がある . このことから給電位相を制御する方法が大面積プラズマの生成に有用と考えられる .



(a)



(b)

図 2 電磁界の重ねの理

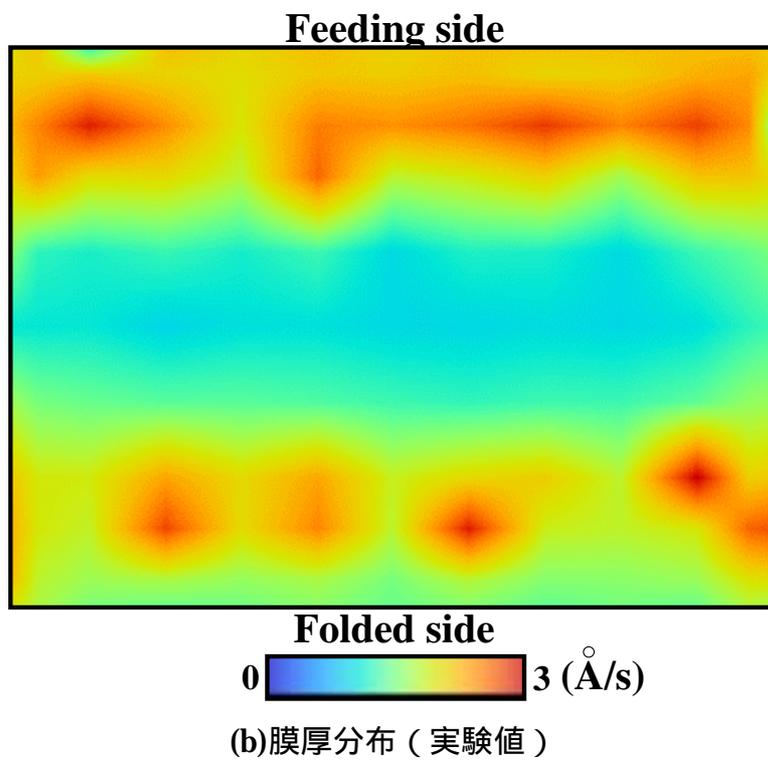
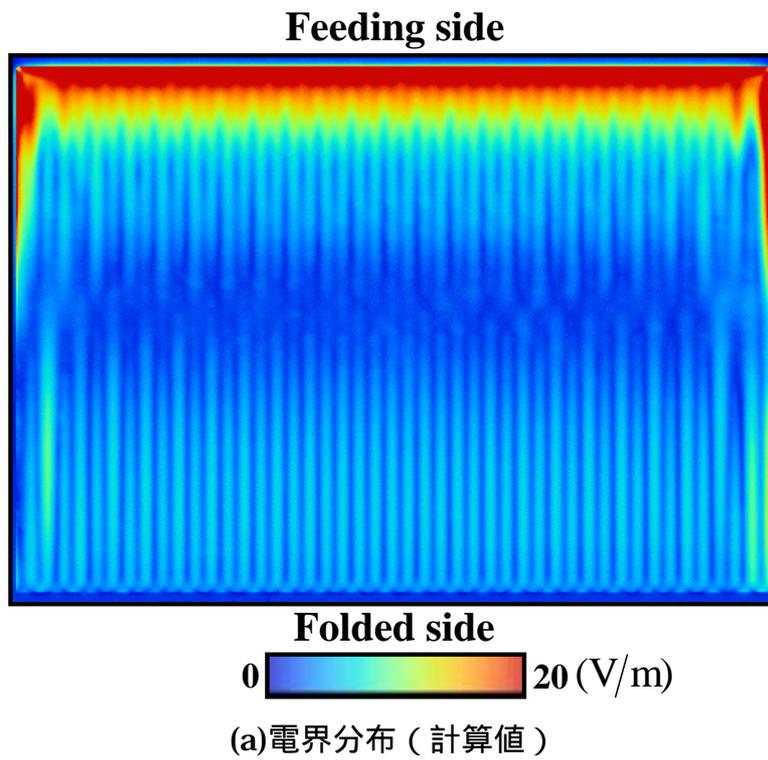


図3 同位相で給電したときの基板面上の電界と膜厚の比較

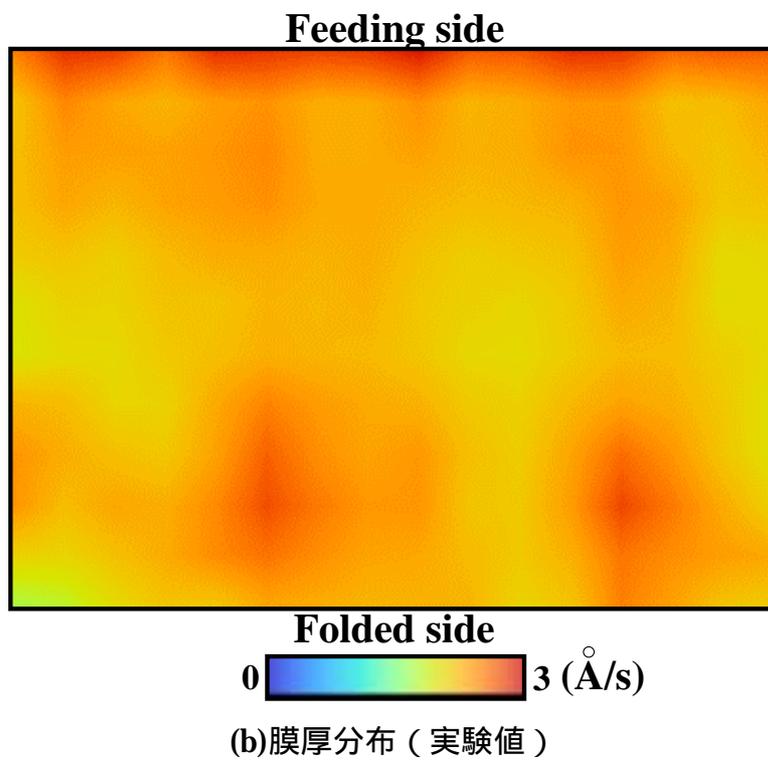
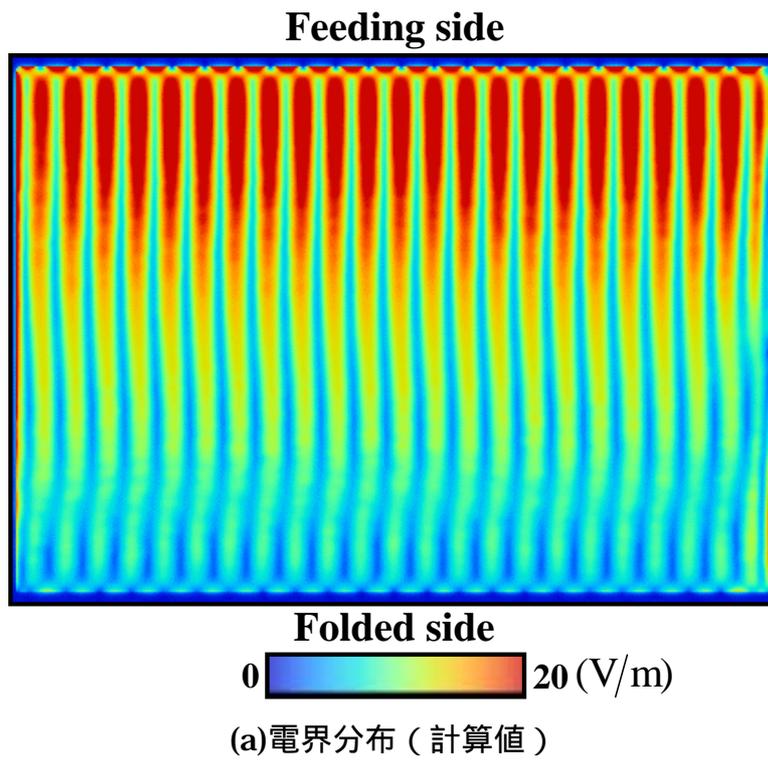


図 4 最適位相で給電したときの基板面上の電界と膜厚の比較

#### 4. むすび

スーパーコンピュータを用いて FDTD 法によりプラズマ生成用アンテナの設計を行い、実験との比較により、この設計法が極めて有用であることを明らかにした。これにより、従来のアンテナや電磁界シミュレータではできなかったアンテナの設計が可能となり、数値計算による設計の分野を更に広げることができた。

#### 謝辞

本文は東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻玉城克彰氏(平成13年博士前期課程修了)が在学中に行った研究をまとめたものである。

また、本研究の一部は太陽光発電研究組合の援助により、アネルバ(株)と共同で行われたものである。さらに本研究の一部は東北大学情報シナジーセンターのスーパーコンピュータを利用し、同センターとの共同研究で行われたものである。また、研究にあたっては同センターの有益なご指導と多大な協力をいただいた。

#### 参考文献

- [1] 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998
- [2] H. Sato, K. Tamashiro, K. Sawaya, T. Takagi, M. Ueda, and Y. Watabe, "FDTD Analysis of Wire Antenna Used for Process Plasma," 2001 IEEE AP-S Int. Symp. National Radio Science Meeting, Vol 3, pp.561-564, 2001.
- [3] 玉城 克彰, 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 高木 朋子, 上田 仁, 渡部 嘉, "大面積プラズマ生成用線状アンテナの FDTD 解析", 電子情報通信学会技術研究報告, AP2001-82, pp. 59-66, Oct. 2001.