

## [共同研究成果]

# 電流の偏りに注目したアンテナ放射効率の解析

有馬 卓司, 宇野 亨

東京農工大学 大学院工学研究院 先端電気電子部門

身の回りは電波を利用した機器であふれている。無線電力伝送など新しい技術が現れており、今後ますます電波の利用が多くなると考えられる。これら機器においては、電気信号もしくは電力の送受信はアンテナを用いて行われる。アンテナ自身に効率があり放射効率と呼ばれる。放射効率の良いアンテナでは電波をほぼ損失無く送れるのに対し、放射効率の悪いアンテナでは電波の多くを損失してしまう。このようにアンテナの放射効率は非常に重要なパラメータである。アンテナの放射効率は材質にも左右されるが、良導体を用いても条件によっては効率が低下することが知られている。放射効率が低下するメカニズムを解明できれば、その改善に寄与することができ、省エネルギー化や携帯情報端末の電池のもちを改善することができる。本研究では、アンテナに導体が近づくことで、電流分布に偏りが生じることに注目し、偏りと放射効率の関係について解析的に評価している。解析には数値電磁解析手法の一つである FDTD 法を用いた。

## 1. はじめに

現在身の回りの多くの電子機器にワイヤレス機能が実装されている。これらは無線 LAN を利用してインターネットに接続され、非常に多くの情報を利用することができ、生活が一段と豊かになった感がある。今後も IoT (Internet of Things) の普及によりますますワイヤレス機器が増えてくると考えられる。これら機器においては、情報の送受信はアンテナを用いて行われる。このためアンテナは電波と情報のインターフェイスとして用いられるため、アンテナの性能により通信の質が左右されると言っても過言ではない。アンテナ自身に効率があり放射効率と呼ばれる。放射効率は、入力電力と放射した電力の比で定義される。そのため放射効率の良いアンテナでは電波をほぼ損失無く送れるのに対し、放射効率の悪いアンテナでは電波の多くを損失してしまい放射させることができない。以上よりアンテナの放射効率は非常に重要なパラメータである。

筆者らのグループではこれまでアンテナの放射効率低下メカニズム解明に関する研究を継続して行ってきた。たとえば、文献[1, 2]では良導体のみで構成したアンテナにおいてもその条件により、アンテナ放射効率の低下が起きる事を報告してきた。また文献[3]では、アンテナを構成する導体板の表面の粗さがその導電率に及ぼす影響について報告してきた。この研究では、導体自体の導電率が高いのであるが、その表面の粗さによって導電率が低下することを指摘している。この原因は、アンテナの表面上に電流が集中するので、その電流が表面粗さの影響を大きく受けることと考えられる。本研究では、アンテナの近くに導体が接近すると、アンテナ上の電流分布に偏りが生じる事による放射効率低下のメカニズムの解明を行った。これは、偏りにより電流分布がより表面に分布する事が原因と考えられる。解析には、電磁界解析の代表的な手法である FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method) を用いた[4, 5]。この手法は、時間領域のマクスウェルの方程式を直接差分し時間領域で解析する手法である。FDTD 法は比較的容易に複雑なモデルを解析できることが強みであるが、解析モデルによっては比較的多くの計算時間が必要となる。本研究の解析モデルにおいてもアンテナ内の電流分布を精密に計算するため多くの計算時間が必要になる。そこで、FDTD 法の解析時間の高速化について東北大学サイバーサイエンスセンターの多大な協力を得た。

## 2. 解析モデルと解析手法

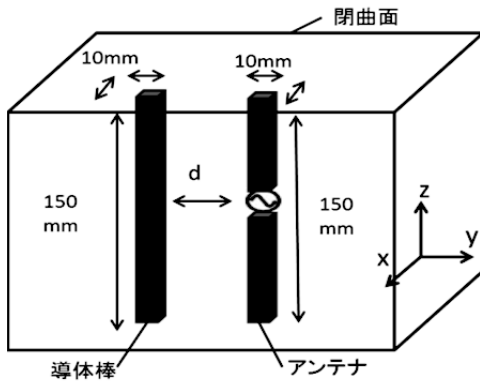


図1. 解析モデル

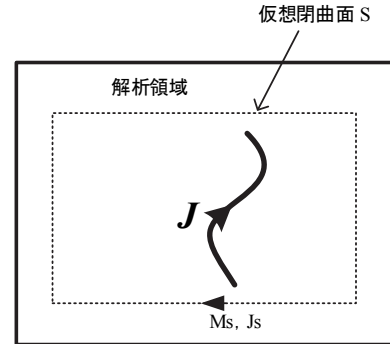


図2. 遠方界解散手法

本研究では、図1に示す解析モデルを用いた。このモデルでは、一辺の幅が10mmで全長150mmのアンテナの近傍に同じ長さの導体棒が配置されたモデルである。この導体棒とアンテナの間隔dを変化させることでアンテナ上の電流分布に偏りを生じさせその際の放射効率の変化を確認した。

FDTD法は解析モデルを微小領域に分けて解析するが、本解析ではその大きさを1mmとした。このため、アンテナは各幅方向に10分割されているのでアンテナ上の電流分布を詳細に解析出来る。アンテナの放射効率 $\eta$ は次式で定義される。

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (1)$$

$\eta$ :放射効率  
 $P_{in}$ :入力電力  
 $P_{rad}$ :放射電力

FDTD法では入力電力は給電部の電圧と電流を1周期積分する事により求まる。

$$P_{in} = \frac{1}{T} \int_0^T V_0(t) I(t) dt \quad (2)$$

放射電力はアンテナから放射される電波のうち遠方に届く遠方界と呼ばれる成分が寄与するので、遠方界を求める必要がある。アンテナの遠方界は図2に示すようにアンテナを仮想的な閉曲面で囲い、閉曲面上の等価電磁流を解析する。解析した電磁流を数値積分することにより遠方界での電界成分 $E_\theta, E_\phi$ を求めることが出来る。求まった、 $E_\theta, E_\phi$ より、指向性関数Dを用いて最終的に

$$D(\theta, \varphi) = \sqrt{E_\theta^2(\theta, \varphi) + E_\phi^2(\theta, \varphi)} \quad (3)$$

$$P_{rad} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{|D(\theta, \varphi)|^2}{Z_0} \sin \theta d\theta d\varphi dt \quad (4)$$

(4)式より、放射電力を求めることが出来る。以上より求めた入力電力と放射電力より(1)式の計算を行い効率を求める。

### 3. 電流の偏りと放射効率の関係

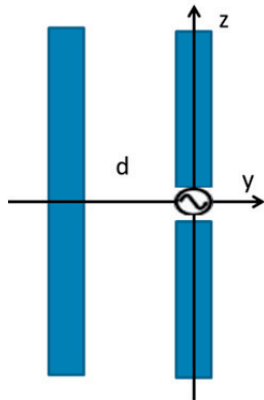


図 3. 座標系

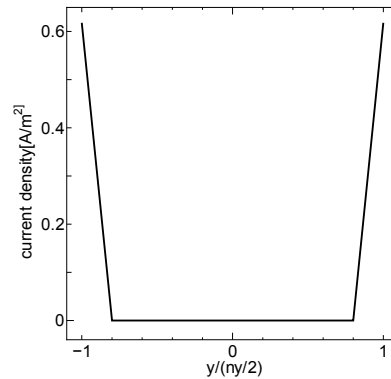


図 4. アンテナ単体の電流分布

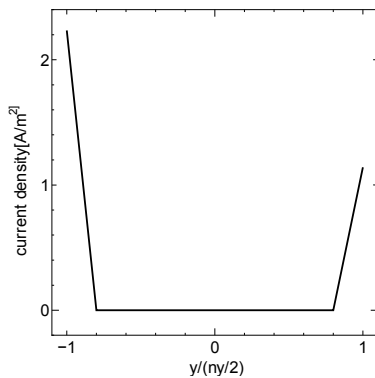


図 5. 電流分布 (d=15mm)

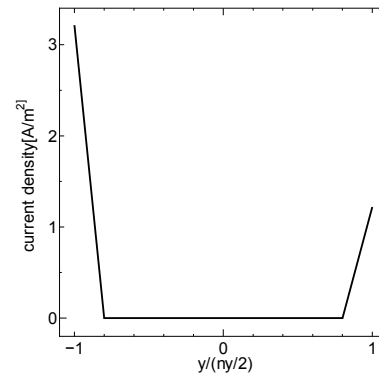


図 6. 電流分布 (d=10mm)

図 3 に座標系を示す．図 4 にアンテナ単体の電流分布を示す．図 4 は横軸がアンテナの中心軸上の電流分布であり，半分の幅が 1 となるように正規化している．解析した周波数は 1GHz の連続波を給電部により給電している．当然ながらアンテナ単体では電流が対照的に流れており偏りは生じていないことが分かる．次にアンテナ近傍に導体棒を配置した際の電流分布を解析した結果を示す．図 5 は，アンテナと導体棒の間隔  $d$  を 15mm とした際の電流分布，図 6 は，アンテナと導体棒の間隔  $d$  を 10mm とした際の電流分布である．横軸は，図 4 と同じく中心軸上の電流分布であるが，アンテナ単体の際と比べて電流分布の大きさが，左に多く偏っていることが分かる．またその偏りは，アンテナと導体棒の間隔  $d$  が小さくなるとより顕著に偏りが生じている事が分かる．

次に，この際の入力電力を精度よく計算する手法について述べる．図 7 から図 9 に入力電力  $P_{in}$  の時間変化を示す．このように，導体棒が近傍にあると入力電力がなかなか収束しないことが分かる．これではいつまでも計算を終わらせることができない．そこで本研究では収束値を予測する手法として ARMA と呼ばれるアルゴリズムを導入した [6]．ARMA アルゴリズムでは計算値を次式で示す有理関数で近似する手法である．

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{a_0 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_q Z^{-q}}{1 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_p Z^{-p}} \quad (5)$$

この際  $H$  は  $Y$  と  $X$  の関数になっているが，本研究では  $H$  を放射効率としているので， $Y$  は放射電力， $X$  は入射電力である． $z$  は  $z$  変換のパラメータである．

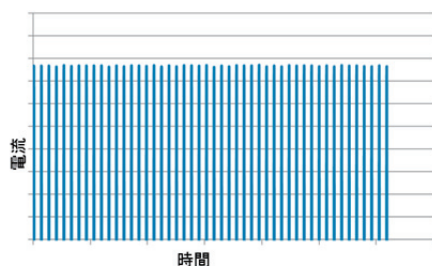


図 7. 電流分布 (単体)

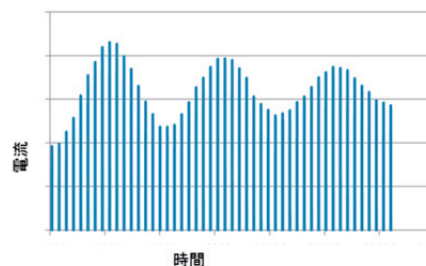


図 8. 電流分布 (d=15mm)

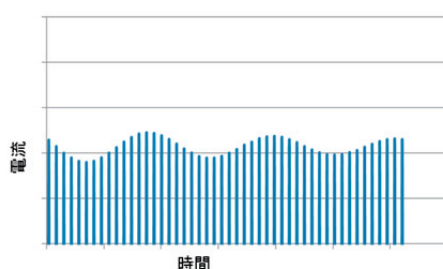


図 9. 電流分布 (d=15mm)

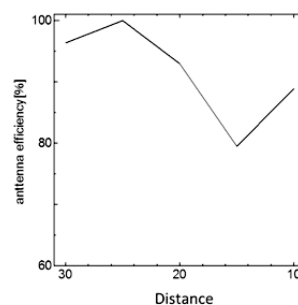


図 10. 放射効率

上述した放射電力と入射電力の計算手法を駆使して解析したアンテナの放射効率を図 10 に示す。この解析では、ARMA アルゴリズムを組み込んでいる。図 10 の横軸は、アンテナと導体の距離であり、縦軸はアンテナの放射効率である。放射効率はアンテナと導体の距離に依存することが分かる。特に、本研究の例では、15mm 付近で効率が大きく落ち込んでいることが分かる。本研究のアンテナの長さ等は一例であるが、この例ではアンテナの 15mm 近くに導体棒があると顕著な放射効率の低下が起きることが示唆された。この条件を回避することでアンテナの効率低下を防ぐことができると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、アンテナ近傍に導体棒が有る際に起きる電流の偏りとアンテナの放射効率の関係について解析を行いその特性を明らかにした。解析には FDTD 法を用いた。解析の結果アンテナの電流が偏ると放射効率が低下することが示唆された。また、ある条件において顕著に放射効率の低下が起きることを示した。本研究で用いたアンテナは一辺の幅が 10mm で全長 150mm のアンテナであったが、この例ではアンテナの 15mm 近く導体棒があると顕著な放射効率の低下が起きることが示唆された。この条件を回避することでアンテナの効率低下を防ぐことができると考えられる。今後さらなる検討により、アンテナの放射効率低下が起きる条件やその詳細なメカニズムを明らかにすることによりアンテナの放射効率が低下しない条件を明らかにする事が出来ると考える。そのためにはさらなる解析が必要である。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、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を利用した。この恩恵にあずかり本研究が遂行できた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただき遂行できた。

### 参考文献

- [1] 山本雄太, 宇野亨有, 馬卓司, 何一偉 "FDTD 法におけるアンテナ放射効率計算法に関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, AP2011-71, pp.37-42
- [2] 山本雄太, 宇野亨, 有馬卓司 "FDTD 法における遠方界を用いたアンテナ放射効率計算法に関する研究", 2012 電子情報通信学会全国大会論文集, B-1-175, p.175
- [3] 北住亮祐, 宇野亨, 有馬卓司, "表面粗さによるアンテナ放射効率低下に関する検討," 電子情報通信学会技術報告, vol.114, no.94, AP2014-130, pp. 13-16, 2014 年 11 月
- [4] 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.
- [5] 宇野亨, 何一偉, 有馬卓司, 数値電磁界解析のための FDTD 法, コロナ社, 2016.
- [6] Takuji Arima, Akie Kuriyama and Toru Uno, "ARMA/FDTD Technique for Reflection Properties of Periodic Structures at Oblique Incidence and Developing Wide Angle EBG Application, " Proc. 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, Bali Island, Indonesia, pp.8-10, 2015.7.1