

アンテナ放射効率低下メカニズムの解明と改善手法の開発に関する研究

代表研究者 有馬 卓司 東京農工大学 工学部 准教授

1 はじめに

現在、ワイヤレス通信技術は生活になくてはならない技術となっている。ワイヤレス通信技術の中でも電波のインターフェイスの役割を果たすアンテナは非常に重要である。アンテナの放射効率は通信の質を直接左右し、さらにはバッテリーの持ちとも直結する重要な指標である。一方、アンテナは高い放射効率を得る為に、銅などの導電率の高い良導体で構成される。これまでの研究により、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が知られている[1]。このメカニズムは十分に解明されているとは言えない[2]。本研究では、スマートフォンなどに用いられているアンテナの放射効率が低下する問題を解決するために、シミュレーションを用いて放射効率を効率よく低下メカニズムを解析する手法の開発を行った。

本研究では、電磁界解析において現在主流な手法である FDTD 法（時間領域差分法）を用いてアンテナ放射効率低下のメカニズムを効率よく解析する手法の開発を行った。本報告書の構成を示す。まず、FDTD 法を用いてアンテナの放射効率を計算すると、計算時間が長くかかりさらにその精度は低いことが知られている。そこで、2 章において、FDTD 法におけるアンテナ放射効率解析の問題点の解明を行った。さらに、その成果を踏まえ、3 章では、FDTD 法における効率的なアンテナ放射効率解析手法の開発を行いその有効性を評価している。4 章は本研究のまとめである。

2 FDTD 法におけるアンテナ放射効率解析の問題点の解明

FDTD 法は現在電磁界解析の分野で主流な解析手法となっている。この手法は、時間領域のマクスウエルの方程式

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$$

を直接差分し電界および磁界を求める手法である。この手法は計算時間が比較的掛かることと、使用する計算メモリが多いことが難点である。一方、この手法は複雑なモデルを比較的容易に解析できることから、計算機の発達とともに注目されている手法である。

まず本研究では、FDTD 法におけるアンテナ放射効率解析の問題点を解明した。これまで一般的に FDTD 法を用いたアンテナ放射効率の解析は非常に精度が悪いと言われその理由は明らかになっていなかった。

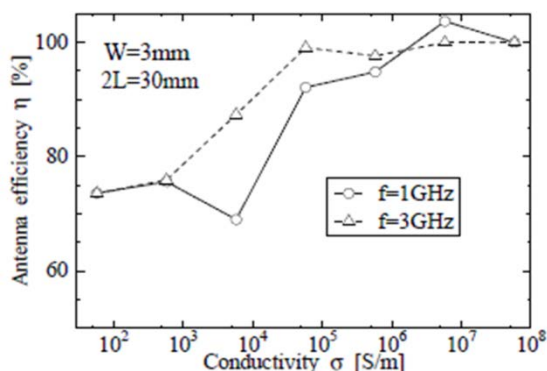


図1 従来手法による解析例

弦波で励振し、アンテナ全体を囲む仮想閉曲面 S 上の電磁流を面積分することで得られる。この結果をそのまま利用してアンテナ効率を求めたいため、入力電力は

まず、FDTD 法における遠方界の計算手法を説明する。FDTD 法においてアンテナの放射効率は、その定義通り、アンテナから放射される電力とアンテナに入射電力の比で計算される。アンテナの放射電力を P_{rad} 、アンテナの入力電力を P_{in} とすると放射効率 η は

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}}$$

より計算される。

FDTD 法において、アンテナを単一周波数の正

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

によって求められる．ただし V_0 、 I はそれぞれ給電電圧，給電電流である．また T は周期である．次に放射電力 P_{rad} は

$$P_{rad} = \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \oint_S \mathbf{S}(r, t) \cdot \mathbf{n} dS \right\} dt$$

によって求める．ただし $\mathbf{S}$ はポインティングベクトルである．この手法を用いて，アンテナの放射効率を解析した例を図 1 に示す．同図中に解析したアンテナモデルを示す．このモデルは平板ダイポールアンテナである．解析においては，アンテナの電気導電率 σ を変化させて解析を行っている．通常の FDTD 法により解析した結果は滑らかでなく，一部放射効率が 100% を超えているなど正しく解析が行えていない事が伺える．この原因の解明を行った．解析モデルを図 2 に，解析に用いたパラメータを表 1 に示す．

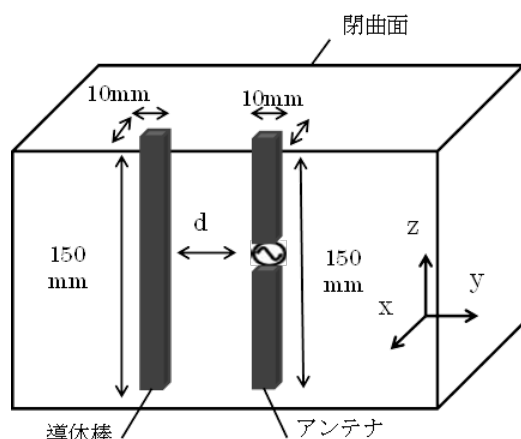


表 1 計算パラメータ

周波数 (GHz)	1.0
アンテナ長さ	0.5λ
アンテナ媒質	銅 ($\sigma = 5.8 \times 10^7$)
导体棒アンテナ距離 (λ)	0.033
吸収境界	30 層

図 2 解析モデル

解析モデルは図 2 に示す様に，ダイポールアンテナ付近に导体棒がある場合である．このモデルはアンテナがある程度の太さを持つとアンテナ内の電流に偏りが生じ，その電流の偏りにより放射効率に影響が出るという問題が報告されているためにこのモデルを選んだ．本研究では，図 2 のように太さ 10mm のダイポールアンテナを解析領域の中央に配置し，その横に导体棒を配置した．その导体棒とダイポールアンテナの距離 d を y 方向に変化させ，電流の偏りが生じ放射効率計算に影響が生じるか確認を行った．この解析では半波長ダイポールを用い正弦波を 100 周期励振させ，遠方界を計算する閉曲面の距離はアンテナから 0.033λ と

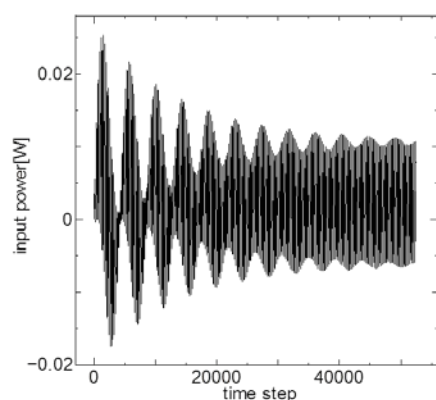


図 3. 解析結果

した．入力電力を P_{in} の解析結果を図 3 に示す．この結果は，横軸が時間，縦軸が入力電力である．解析モデルは，ダイポールアンテナ近傍に金属片が配置されているモデルである．解析結果を見ると正弦波を励振し始めた部分から导体棒の影響により電流が振動し，入力電力にもその影響が出ていることが分かる．上述した様に FDTD 法は時間領域で解析をする手法である．一方アンテナは，共振した状態で使用されるために，時間領域では共振状態に達するまで非常に長い時間が掛かる．図 3 の結果においても，包絡線を見ると，入力電力が振動している．この振動はなかなか収束しないことが分かる．またここには示していないが，导体棒とアンテナ間の距離が 0.1λ ， 0.083λ の時には 7, 80 周期程度励振させた場所では定常状態になってはいるものの，导体棒アンテナ間距離をより近づけた際には 100 周期程度励振させた際にも定常状態にはならず，影響が出てしまっていた．この状態で放射効率を計算すると，積分する場所によって放射効率の計算結果が違ってしまいうため，安定した高精度な放射効率計算を行う事ができない．加えて定常状態にするために正弦波をより励振させると数値分散の影響により正確な放射効率計算ができず，解析時間もかかってしま

うためこれを改善し定常状態を作り、高精度な放射効率計算を可能にする必要がある。

続いて、念のために励振を緩やかに立ち上げることにより導体棒からの影響を抑えることができるか確認した。例として導体棒とアンテナの距離 d が 0.03λ (10 セル) を取り上げた。解析条件は上記と同様にし、緩やかに立ち上げる周期を 10, 20 と変化させて解析を行った。結果は 10 周期緩やかに立ち上げた場合では、ほとんど効果がなく定常状態には程遠い状態になった。一方、20 周期緩やかに立ち上げた場合では 10 周期緩やかに立ち上げた場合よりも振動が抑えられてはいるものの、定常状態と思われるところを拡大してみるといまだに振動しており完全に定常状態にはできていないことが分かる。

これら結果より、入力電力の収束の遅さがアンテナの放射電力解析の収束の遅さの原因であることが分かった。よって、アンテナの放射効率を FDTD 法を用いて効率よく解析を行うには、この入力電力を早く収束させる必要があることが分かった。

3 FDTD 法における効率的なアンテナ放射効率解析手法の開発

本章では、前章より得られた知見をもとに、FDTD 法を用いて効率よくアンテナ効率を計算する手法について検討した。

(1) 提案手法の概要

前節の知見より、ゆるやかに励振を行うことである程度振動を抑える事ができたが、完全な定常状態にはならなかった。そこで本研究では、通常の FDTD 法に伝達関数を用いて定常状態の電流を予測することで正確な放射効率計算ができるようにする手法を提案する。振動しており収束していない給電電流はフーリエ変換を行うと周波数領域では様々な周波数帯の成分を含んでしまっている。その中からたとえば解析をしたい 1GHz の周波数成分のみを取り出し、時間領域に逆フーリエ変換を行う事で定常状態の給電電流を算出することができる。本研究では伝達関数を、自己回帰移動平均 (ARMA) モデルを用いて求める。

(2) ARMA モデル

FDTD 法を用いてアンテナの効率において、効率的に解析が行えない原因は入力電力の収束の遅さであることが分かった。そこで本研究においては、FDTD 法を用いて高速にアンテナの放射効率を解析する手法について、入力電力の収束の遅さを考慮する手法の開発及びその有効性の確認を行った。開発した手法は、FDTD 法の特性に注目したものである。上記 2 で述べたように FDTD 法において放射効率はアンテナの入力電力と放射電力の比で計算されるが、この際の入力電力は、その定義通り入力電圧と、入力電流の積を積分することにより計算される。本研究ではこの入力電力と放射電力の比の計算を数学的知見に基づいて、最終的に得られる結果を予測する手法を開発した。予測する手法としては、ARMA (自己回帰移動平均モデル) を用いた。ここで、ARMA モデルは次式で表す有理関数モデルで表される。

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

ここで、入力電力を $Y(z)$ 、放射電力を $X(z)$ で表す。そして、提案手法では $H(z)$ を右辺に示すような関数で近似する。このようにすると、 $H(z)$ がある関数で表されることになる。一方、通常的手法ではこのようなことをしないので、FDTD 法の計算が収束するまで計算する必要がある。一般的に、FDTD 方で収束が遅いのは、なかなか放射しない電磁波成分がアンテナに残るためと言われている。よって提案手法は所望の周波数でのみ有効な結果を取り出すことができると言える。

(3) ARMA モデルによる伝達関数の導出

・ ARMA モデルの定式化

ARMA の解析において線形の周波数領域の伝達関数 $H(z)$ が用いられる。伝達関数上式によって表される。

ここで、 z は複素変数、 a と b は求めるべき未知の係数である。伝達関数 $H(z)$ を決定するためには、未知の係数 a と b を求め伝達関数に代入する。この伝達関数を用いることで、フーリエ変換を用いずに直接、周波数領域の結果を得ることができる。次に、ARMA モデルの未知係数の求め方を示す。

• ARMA モデルの未知係数の計算

時間領域の ARMA モデルは式のように線形で表され, 過去のデータから未来のデータを予測する形になっている。

$$y(n) = -\sum_{i=1}^p b_i y(n-i) + \sum_{j=0}^q a_j x(n-j)$$

ここで, $x(n)$ と $y(n)$ は伝達関数であり, 入力信号と出力信号に対応している. a_i と b_i は求める ARMA の係数である. また, p, q は係数の個数で未知である. 今回の解析において, 入力信号 $x(n)$ はダイポールアンテナの給電電圧, 出力信号は $y(n)$ はダイポールアンテナの給電電流である. ここで, 係数 a_j, b_i を求めるためには FDTD 法において N 個の時間領域のデータが必要である. 未知の係数を求めるために式を以下のように行列式に書き換える.

$$[Y]_{N \times 1} = [D]_{N \times (p+q+1)} [C]_{(p+q+1) \times 1}$$

以下に表すように $[Y]$ は出力ベクトル, $[C]$ は係数ベクトル, $[D]$ は出力信号と入力信号からなる行列である.

$$[Y] = [y(1), y(2), \dots, y(N)] \in R^{N \times 1}$$

$$[C] = [b_1, \dots, b_p, a_0, \dots, a_q] \in R^{(p+q+1) \times 1}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & x(1) & 0 & \dots & 0 \\ -y(1) & 0 & \dots & 0 & x(2) & x(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ -y(p) & -y(p-1) & \dots & -y(1) & x(p+1) & x(p) & \dots & x(p+1-q) \\ -y(p+1) & -y(p) & \dots & -y(2) & x(p+2) & x(p+1) & \dots & x(p+2-q) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -y(N-1) & -y(N-2) & \dots & -y(N-p) & x(N) & x(N-1) & \dots & x(N-q) \end{bmatrix} \in R^{N \times (p+q+1)}$$

未知の係数行列である $[C]$ について解くことで係数 a_j, b_i を求めることができる.

FDTD 法で得た時間領域のデータ数 N が $p+q+1$ より大きいとき係数行列は最小二乗法を用いて式で計算できる.

$$[C] = ([D]^T [D])^{-1} [D]^T [Y]$$

係数行列 $[C]$ が求まれば, 伝達関数 $H(j\omega)$ の係数を代入し Z を $\exp(j\omega T)$ に置き換えることで得られる.

• 効率的な ARMA モデルのによる次数の決定

次に, 次数 p と q の関係について考える. ダイポールアンテナの等価回路は図 4 で表される.

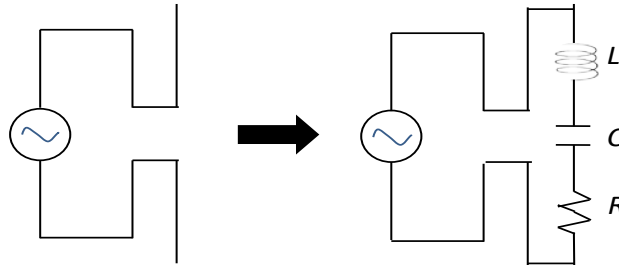


図 4 ダイポールアンテナ等価回路

図 4 のダイポールアンテナの等価回路において, 入力インピーダンスは次式で表される.

$$Z_{dipole} = \frac{1 + j\omega R + (j\omega)^2 L}{j\omega C}$$

ここで, ダイポールアンテナの次数は分子が 2, 分母が 1 となり分母の次数=分子の次数-1 の関係となる. よって, ARMA の次数 p, q の関係もダイポールアンテナ等価回路の入力インピーダンスの次数の関係に合う

せて $p=q-1$ の関係で計算する．本研究では，このような ARMA モデルを構築しアンテナの放射効率を効率に解析する手法を検討する．

(4)電流推定値を用いた放射効率計算

・ダイポールアンテナの解析

前節で述べた自己回帰移動平均 (ARMA) モデルによる伝達関数を用いて，電流の値を推定し放射効率の計算を行う．最初に簡易的なモデルとしてダイポールアンテナのみの状態で解析を行った．解析条件は全節の解析モデルと同じとし，時間領域で正弦波を 100 周期計算した結果と 5 周期程度 (3000step) 計算した時間領域の給電電圧を入力信号 $x(n)$ ，給電電流を出力信号 $y(n)$ として ARMA モデルで計算した伝達関数から推定した結果を比較した．なお，ARMA モデルにおけるデータ数 N は 3000， $q=1500$ ， $p=1499$ とした．結果を以下の図に示す．

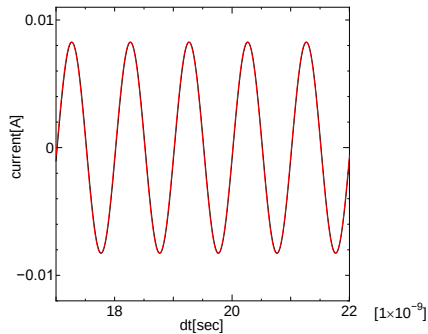


図 5 励振 20 周期前後での電流比較

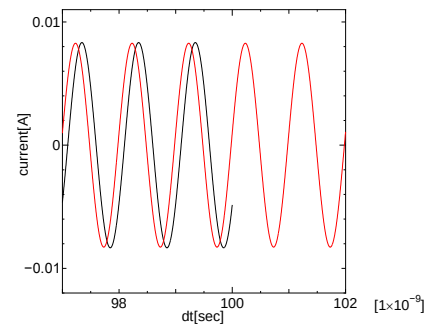


図 6 励振 100 周期前後での電流比較

図 5 および図 6 は時間領域で正弦波を 100 周期励振した結果と ARMA モデルを用いて計算した伝達関数から推定した電流との比較の図である．黒線が前者，赤線が後者となっている．図を見ると，励振 20 周期前後での電流比較においては，精度良く推定できていることがわかる．一方で励振 100 周期での比較を行うと参照値と推定値との位相のずれが見られるようになった．この原因としては，100 周期まで励振を行うと FDTD 法における分散誤差の影響から徐々に位相の誤差が大きくなり，このような結果になったのではないかと考えられる．本研究で述べた放射効率計算手法において，入力電力の計算は励振を行った最後の周期から 2 周期分とって積分することで計算を行っていた．計算式を以下に示す．

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

しかし，図 6 を見ると位相のずれが生じるため積分の値にも違いが出てしまう．そこで本研究では入力電力の計算を実効値から算出する手法を用いて計算を行った．計算式を以下に示す．

$$P_{in} = V_{rms} I_{rms} \cos \theta$$

V_{rms} ， I_{rms} はそれぞれ給電電圧，給電電流の最大値から $\sqrt{2}$ を取って算出した値であり， θ は位相差である．

それぞれから計算した入力電力の計算結果を表 2 に示す．上式では正弦波を 100 周期励振した際の入力電力，下式では ARMA モデルを用いて計算した伝達関数から計算した電流推定値を用いて計算を行った．

表 2 入力電力比較

$P_{in} = \frac{1}{T} \int_0^T V_0(t) I(t) dt$	4.103E-03
$P_{in} = V_{rms} I_{rms} \cos \theta$	4.098E-03

結果を見るとほぼ精度良く計算できていることが分かることから，ARMA モデルを用いた電流推定値も精度良く推定できていることが分かる．また，電流推定値を用いた入力電力計算結果から放射効率を計算した結果，99.883 (%) と高精度に計算できていることが分かった．この手法を用いて導体棒付近のアンテナ解析を行う．

(5) 導体棒近傍のダイポールアンテナ解析

前節と同様に ARMA モデルを用いて伝達関数を計算し電流を推定した計算結果を用いて放射効率を計算した。本研究では、放射効率を 100 周期までは 20 周期目, 30 周期目, 40 周期目・・・と 10 周期ごとに計算し, 100 周期以降は 20 周期ごとに計算して, 計算する周期に関わらず高精度な放射効率計算が可能となっているか確認を行った。今回は例として, 導体棒アンテナ距離を 0.033λ と 0.05λ の場合で計算を行った。解析条件は 4.2 節と同じである。以下に参照値と電流推定値との比較, 放射効率の計算結果をそれぞれ示す。

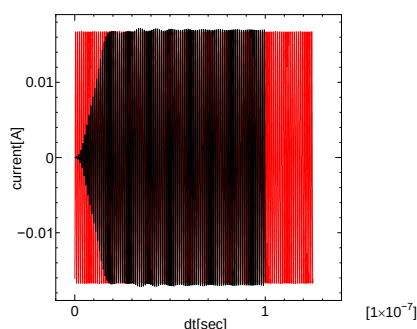


図 7 導体棒アンテナ間距離 0.033λ 電流比較

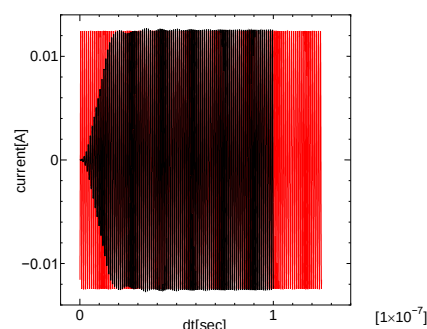


図 8 導体棒アンテナ間距離 0.05λ 電流比較

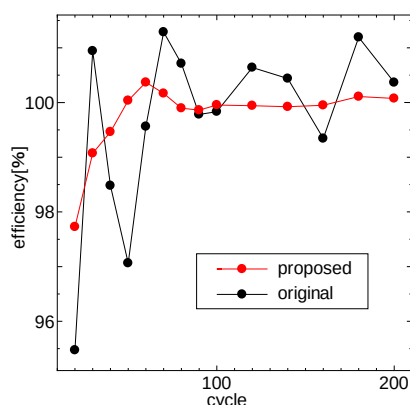


図 9 導体棒アンテナ間距離 0.033λ 放射効率比較

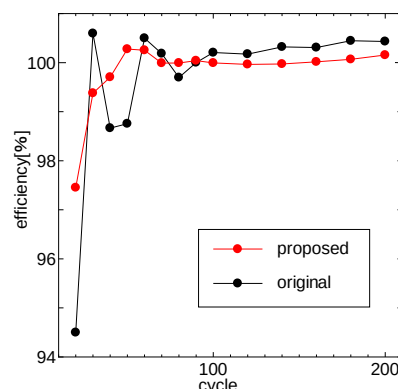


図 10 導体棒アンテナ間距離 0.05λ 放射効率比較

伝達関数を用いた電流推定値と参照値を比較した図 7, および図 8 はそれぞれデータ数 $N=3000$ とし, 導体棒アンテナ間距離 0.033λ では $q=240$, $p=239$, 導体棒アンテナ間距離 0.05λ では $q=460$, $p=459$ とした。それぞれ図を見ると, 実効値計算に必要な振幅含めほぼ精度よく推定できていることが分かる。また図 9 および図 10 はそれぞれ導体棒アンテナ間距離 0.033λ , 0.05λ の放射効率計算比較であり, 表 3, および表 4 における rms は $V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \theta$ で計算した入力電力であり, eff はこれまでと同じように計算した放射効率であり, effrms は伝達関数を用いて電流推定値を用いた放射効率である。導体棒アンテナ間距離 0.033λ , 0.05λ の放射効率をそれぞれ見ると, 図 10 を見ると FDTD 法で計算した場合は 200 周期まで計算しても放射効率がなかなか安定していないのに対し, 伝達関数による電流推定値を用いた提案手法の場合は励振 80 周期目から安定して放射効率を計算できていることがわかる。図 10 では, FDTD 法で計算した場合は 100 周期を超えると安定しているものの, 100%を超えてしまっているのに対し提案手法ではより高精度に放射効率を計算できていることが分かる。しかし, まだ放射効率が 100%を超えているところも存在している。この部分に関しては, 放射電力が影響していると考えられる。入力電力の大きさが導体棒の影響によって変化することでそれに応じて放射電力にも影響が出てきてしまう。これにより放射電力が増減することで放射効率にも影響を及ぼしていると考えられる。

表 3 導体棒アンテナ間距離 0.033λ 各種数値

cycle	pin	prad	rms	eff	effrms
20	2.272E-03	2.169E-03	2.219E-03	95.474	97.728
30	2.178E-03	2.199E-03	2.219E-03	100.943	99.072
40	2.241E-03	2.207E-03	2.219E-03	98.480	99.464
50	2.287E-03	2.220E-03	2.219E-03	97.064	100.037
60	2.237E-03	2.227E-03	2.219E-03	99.563	100.369
70	2.195E-03	2.223E-03	2.219E-03	101.288	100.167
80	2.201E-03	2.217E-03	2.219E-03	100.713	99.897
90	2.221E-03	2.216E-03	2.219E-03	99.782	99.862
100	2.222E-03	2.218E-03	2.219E-03	99.833	99.955
120	2.204E-03	2.218E-03	2.219E-03	100.640	99.943
140	2.208E-03	2.217E-03	2.219E-03	100.439	99.923
160	2.233E-03	2.218E-03	2.219E-03	99.343	99.950
180	2.195E-03	2.222E-03	2.219E-03	101.193	100.109
200	2.213E-03	2.221E-03	2.219E-03	100.367	100.075

表 4 導体棒アンテナ間距離 0.05λ 各種数値

Period	pin	prad	rms	eff	effrms
20	2.338E-03	2.209E-03	2.267E-03	94.500	97.452
30	2.239E-03	2.253E-03	2.267E-03	100.597	99.378
40	2.291E-03	2.260E-03	2.267E-03	98.666	99.704
50	2.302E-03	2.273E-03	2.267E-03	98.756	100.276
60	2.261E-03	2.272E-03	2.267E-03	100.499	100.253
70	2.262E-03	2.267E-03	2.267E-03	100.185	99.991
80	2.273E-03	2.267E-03	2.267E-03	99.697	99.994
90	2.268E-03	2.268E-03	2.267E-03	100.001	100.041
100	2.262E-03	2.267E-03	2.267E-03	100.206	99.994
120	2.262E-03	2.266E-03	2.267E-03	100.174	99.965
140	2.259E-03	2.266E-03	2.267E-03	100.321	99.973
160	2.260E-03	2.267E-03	2.267E-03	100.309	100.017
180	2.258E-03	2.268E-03	2.267E-03	100.446	100.068
200	2.260E-03	2.270E-03	2.267E-03	100.433	100.156

最後に計算時間について比較した結果を表 4.5 に示す. 本研究では通常の FDTD 法で計算した結果と提案した手法において安定した放射効率計算結果が見られた励振 80 周期目との解析時間の比較を行った.

表 5 計算時間比較

	計算時間
FDTD 法(200 周期)	583m34s
FDTD 法+伝達関数(80 周期)	249m15s

表を見ると FDTD 法計算した場合に対して, 提案手法のほうが約 1/2 以下程度にまで解析時間を短縮できていることが分かる. 以上結果より, 本研究では FDTD 法を用いて高精度かつ高速にアンテナの放射効率を解析する手法を開発した. また, いくつかの解析によりその有効性を確かめた.

4 まとめ

本研究では、アンテナ放射効率低下のメカニズムを解明するために、FDTD法を用いてアンテナ放射効率解析の問題点の解明、および効率よくアンテナ放射効率を解析する手法の開発を行った。FDTD法を用いてアンテナ放射効率解析が正しく計算できない原因は、給電電力が収束しることが原因であることを解明した。また、高速に計算する手法の開発では、ARMAアルゴリズムをFDTD法に組み込むことで、高速に計算できることが分かった。また、ARMAでは収束値を予測できるために精度も向上する事が分かった。提案した手法は計算した場合に対して、提案手法のほうが約1/2以下の計算時間程度にまで解析時間を短縮できていることが分かる。以上結果より、本研究ではFDTD法を用いて高精度かつ高速にアンテナの放射効率を解析する手法の開発に成功した。また、いくつかの解析によりその有効性を確かめた。この手法は大変有意義であると考えられる。

【参考文献】

- [1] Naoko Yamada, Kentaro Asami, Takuji Arima, and Toru Uno, "Comparison of MoM and FDTD Calculations of Impedance and Radiation Efficiency for Lossy Planar Antenna," 2005 International Symposium on Antennas and Propagation.
- [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] H. Wheeler, "The Radiansphere around a Small Antenna", Proceedings of the IRE, Volume:47, Issue:8, pp.1325-1331, Aug. 1959,
- [4] Takuji Arima and Toru Uno, "Whole Body SAR Measurement Technique by Using Wheeler Cap Method for Human Head Size Phantom," International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 700-703, Nov. 2012,
- [5] 石井望, 金子貴幸, 宮川道夫, "改良型 Wheeler 法におけるアンテナ放射効率の落込み回避について(アンテナ・伝搬)," 電子情報通信学会論文誌. B, 通信, vol. 88, pp. 2287-2295, 2005/11/01 2005.
- [6] 金子貴幸, 石井望, 宮川道夫, "B-1-201 Wheeler 法における新しい放射効率算出式について," 電子情報通信学会総合大会講演論文集, vol. 2003, p. 201, 2003/03/03 2003.
- [7] M. Kirschning and R. H. Jansen, "Accurate model for effective dielectric constant of microstrip with validity up to millimetre-wave frequencies," Electronics letters, vol. 18, pp. 272-273, 1982.
- [8] 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12-14日

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
-----	----------	------

ARMA/FDTD Analysis of Loop Antennas near Human Body for MHz Band Wireless Power Transfer System	Proc. 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016)	2016 年 10 月
Acceleration of FDTD Calculation of EM Fields Due to Loop Antennas Used for MHz Band Wireless Transfer System Placed near Human Body	IEICE Communications Express	2017 年 6 月
FDTD 法による ARMA アルゴリズムを用いた定常電磁界解析の高速化	電子情報通信学会 2016 年ソサイエティ大会講演論文集	2016 年 9 月