

論 文

Wheeler法による放射効率測定に関する検討

正員 村本 充^{†*} 正員 石井 望[†] 正員 伊藤 精彦[†]A Study on Radiation Efficiency Measurement of a Small Antenna
Using Wheeler MethodMitsuru MURAMOTO[†], Nozomu ISHII[†] and Kiyohiko ITOH[†], *Members*

あらまし 移動体通信端末のアンテナは形状と共に小さくなり、その電気的特性は著しく劣化している。小形かつ高性能な携帯機を実現するためには、アンテナを高効率化することが重要となる。その際、重要なパラメータとなるのが放射効率であり、Wheeler法を用いて簡易に放射効率の測定が可能である。この手法は、アンテナをラジアン球程度の大きさのキャップで覆うと入力電力が損失電力に等しくなるという仮定に基づいて実施される。しかし、この仮定が成立しなければ、計算される Wheeler 効率は正確な放射効率とならない。実際に Wheeler 法を用いた放射効率の測定を行うと、測定値は理論的な値と異なる落込みを生じることがある。本論文では、キャップをワイヤグリッドで近似し計算機上で Wheeler 法のシミュレーションを実現している。そこで、問題の落込みが測定方法に起因するものではないことを明らかにし、その原因として、キャップをかぶせたとき内部のリアクティブな電磁界が変化しないという Wheeler 法適用の前提条件が成り立っていないことを示している。また、Wheeler 法に使用するキャップの大きさがラジアン球より大きい場合でも十分適用可能であることを示し、その適用限界について検討している。

キーワード Wheeler 法, 放射効率, 小形アンテナ, シミュレーション, 反射係数

1. ま え が き

携帯電話機、ページャ等をはじめとする移動体通信端末は、現在急速に小形軽量化が進んでいる。それに伴い通信端末のアンテナも小形・薄形・軽量であることが要求されるが、アンテナは小形化するとその電気的特性は著しく劣化する⁽¹⁾。小形かつ高性能な携帯機を実現するためには、アンテナを高効率化することが重要である。特にカードサイズページャ用のアンテナは、アンテナ高が電氣的に低いため不整合損が大きく、使用環境における雑音レベルに近いところで使用しており、この種のアンテナの性能は十分なものとは言い難い。これら小形アンテナにおいて、放射効率のより大きいアンテナを設計するためには、その計算手法、測定手法を確立しておくことが重要である。

放射効率の測定法としては、アンテナを覆う球面

上で放射強度を測定するパターン積分法があげられる⁽²⁾。パターン積分法は、放射電力を直接測定することを基本としており、標準的かつ信頼のおける方法とされている。しかし、大規模な設備（電波暗室）等を必要とすることや、時間がかかるなどの欠点があり、測定は容易ではない。

放射効率の簡易測定法として Wheeler 法^{(2)~(4)}と Q ファクタ法が提案されている⁽²⁾。Q ファクタ法は損失を有する実際のアンテナと、それに対応する損失のない理想的なアンテナを考え、これら二つのアンテナの Q の比を放射効率とする方法である。しかし、Q ファクタ法は理想的なアンテナの Q を計算する必要があり、測定のみで放射効率を求めることはできない。

Wheeler 法は、アンテナをシールドすると放射のみが抑制され、入力電力が損失電力に等しくなるという仮定に基づいて放射効率を求める手法である⁽³⁾。つまり、アンテナ単体およびアンテナをシールドした場合の 2 回の入力抵抗の測定により放射効率を算出する。この他に、入力コンダクタンスに着目した方法⁽⁵⁾や反射係数を用いる方法⁽⁶⁾も提案されている。以下、このようにして測定された放射効率を Wheeler 効率と呼

[†] 北海道大学工学部電子工学科, 札幌市
Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo-shi,
060 Japan

* 国際電気株式会社北海道開発センタ, 札幌市
Hokkaido Development Center, Kokusai Electric Co., Ltd.,
Sapporo-shi, 004 Japan

ぶことにする。Wheeler 法は、その測定が簡単かつ短時間で行えるという利点があり、いくつかのアンテナについてこの手法の妥当性が報告されている。しかし、その多くは実験的に検討されており^{(7)~(9)}、理論的なシミュレーションにより妥当性を検証した例は多くない^{(11)~(13)}。

そこで本論文では、モーメント法により擬似的に Wheeler 法による効率測定のシミュレーションを行い、その結果を実際の測定値と比較する。測定器の不確かさにより測定された Wheeler 効率は雑音を多く含み、周波数に対して連続的な変化をしないが、シミュレーションの結果はその測定結果を回帰するような変化をする。このことにより Wheeler 法による測定結果が妥当であることを示す。更に、モーメント法によるアンテナ単体の放射効率の理論値と Wheeler 効率とを比較し、それらが一部の周波数を除いて一致することを示すとともに、一致しない部分について考察を加える。

今回測定に用いたアンテナは、外部整合回路を用いなくてもアンテナ単体で整合がとれるような構造をしており、515 MHz において放射効率が 80% 以上という計算結果が得られている。しかし、Wheeler 効率の測定を行うと、放射効率が最大になるはずの周波数で落込みが生じる^{(7),(13)}。この現象は、シールドに用いるキャップの空洞共振モードの共振周波数以外で起きていることや、シミュレーションによる Wheeler 効率からも同様の現象が確認されることから、この落込みは測定方法に起因するものではなく、Wheeler 法固有の問題があると考えられる。本論文では、シミュレーション結果を詳細に検討することにより、この現象が生じる理由について考察を行う。

Wheeler 法で用いるキャップの大きさは、アンテナ周囲のリアクティブエネルギーに変化を与えないようにするため半径 $\lambda/2\pi$ の球 (ラジアン球) が望ましいと言われている⁽³⁾。しかし、数種類のキャップを用いて測定を行ったところ、どのキャップを用いた場合にも測定される Wheeler 効率はほぼ等しく、キャップは厳密にラジアン球でなくてもよいことがわかった。本論文では、キャップの選び方およびその適用限界について触れる。

2. 放射効率

2.1 モーメント法による放射効率

放射効率の理論値はモーメント法を用いて簡単に求めることができる。本論文では、展開関数と試験関数

を共に区分正弦関数に選びガラーキン法を用いた。また、インピーダンス行列が対称行列になるように展開関数を配置した^{(14)~(16)}。

放射効率をモーメント法を用いた数値計算により算出する方法には、2通りの方法が考えられる。一つは、モーメント法により求まるアンテナ上の電流分布を用いて、放射電力密度をアンテナを見込む全立体角にわたり積分し、放射効率 η を次の定義に従い算出する方法である。すなわち、

$$P_{\text{rad}} = \frac{r^2}{\eta_0} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi |E(r, \theta, \phi)|^2 \sin\theta d\theta \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} \quad (2)$$

となる。ここで、 P_{rad} 、 P_{in} はそれぞれ放射電力、入力電力である。

もう一つは、入力電力と損失電力をそれぞれ直接求める方法である。本論文において用いた計算手法では、一般化インピーダンス行列の各要素を放射に寄与する部分と損失に寄与する部分とに分離し、形式的に、

$$[Z_{mn} + \Delta Z_{mn}][I_n] = [V_m] \quad (3)$$

なる形の行列方程式を解いている。ここで、 Z_{mn} は損失を含まない相互インピーダンス項、 ΔZ_{mn} は損失分のインピーダンス項であり、 I_n 、 V_m はそれぞれ電流ベクトル、電圧ベクトルの成分である。また、入力電力 P_{in} および損失電力 P_{loss} は次のように計算することができる。

$$\begin{aligned} P_{\text{in}} &= \sum_n \sum_m I_n^* (Z_{mn} + \Delta Z_{mn}) I_m \\ &= \text{Re}(V_{\text{in}} I_{\text{in}}^*) \end{aligned} \quad (4)$$

$$P_{\text{loss}} = \sum_n \sum_m I_n^* \Delta Z_{mn} I_m \quad (5)$$

従って、入力電力から損失電力を分離することができ、式 (4)、(5)、および入力電力が放射電力と損失電力の和で表されることを用いると、放射効率は、

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} = 1 - \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{in}}} \quad (6)$$

と算出される。

2.2 Wheeler 効率

アンテナの周りの半径 $\lambda/2\pi$ の球 (ラジアン球) の内部はリアクティブエネルギー、外部は放射電力で占められている⁽³⁾。このラジアン球を導体シールド

(キャップ)で置き換えると、球内部のリアクティブエネルギー、すなわちアンテナの近傍界に著しい変化を与えることなく放射電力のみを妨げることができる^{(2)~(4)}。入力電力は放射電力と損失電力の和で表されるが、アンテナを導体キャップで覆うと放射電力が消失するので、このとき入力電力と損失電力は等しくなる。この原理に基づいて効率を算出する手法が Wheeler 法である。すなわち、Wheeler 効率は、

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} = 1 - \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{in}}} = 1 - \frac{R_{\text{loss}}}{R_{\text{in}}} \quad (7)$$

$$= 1 - \frac{G_{\text{loss}}}{G_{\text{in}}} \quad (8)$$

$$= 1 - \frac{1 - |\Gamma_{\text{cap}}|^2}{1 - |\Gamma_{\text{in}}|^2} \quad (9)$$

で与えられる^{(3), (5)~(7)}。ここで、 R_{in} 、 R_{loss} はそれぞれ入力、損失抵抗、 G_{in} 、 G_{loss} はそれぞれ入力、損失コンダクタンス、また、 Γ_{cap} 、 Γ_{in} はそれぞれキャップを付けたとき、付けないときの反射係数である。式(7)のように入力抵抗を用いる方法は、被測定アンテナが測定周波数において直列共振モデルで表現できているため、並列共振点では適用することができない。逆に式(8)は入力コンダクタンスに着目した並列共振モデルで、直列共振点で適用することができない⁽⁵⁾。式(9)は反射係数を用いた方法で、共振モデルを仮定してしないため、共振点に関係なくすべての周波数で定義される⁽⁶⁾。

Wheeler 法を用いる場合、キャップの大きさに注意する必要がある。キャップと接地板によって空洞共振器が形成されるため、その共振点で Wheeler 効率には落込みが生じる。従って、キャップの共振点付近での Wheeler 効率は真の放射効率ではないことに注意する必要がある。

3. 実験結果

3.1 アンテナの構造

解析するアンテナモデルを図1に示す。同図において、給電点から接地されている点にかけてのループを給電ループ、また接地板と平行に配置されているループ部分をトップループと呼ぶことにする。これは低姿勢のループアンテナで、トップループは板に置き換えても特性はそれほど変化しない。このアンテナは外部整合回路を用いなくとも、アンテナ自体で整合がとれる構造となっており、図中の構造パラメータの場合では、515 MHz において VSWR が計算で 1.3、測定で

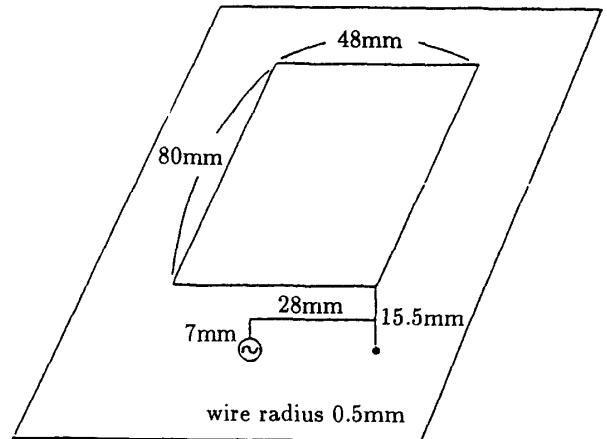


図1 整合をとったアンテナ
Fig.1 A matched antenna.

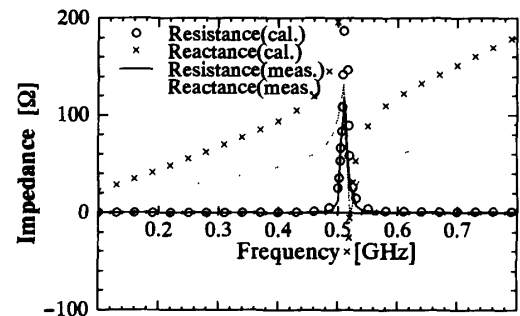


図2 インピーダンスの周波数特性の計算値と測定値
Fig.2 Frequency characteristics of impedance.

1.6となっている。

アンテナ上の電流分布を計算してみた結果、整合がとれていない場合給電ループ内を流れる電流は、整合がとれた場合トップループに多量に流れ込み放射する仕組みになっていることがわかった。

このアンテナの入力インピーダンスの周波数特性を図2に示す。ピークに多少の差があるが共振周波数はほぼ等しく、アンテナの製作精度を確認できた。

3.2 放射効率 (理論値)

モーメント法を用いて計算した放射効率の理論値を図3に示す。図中、丸印は放射界をアンテナを見込む全立体角にわたり積分することにより求めた放射効率であり、実線は損失電力を直接計算することにより得られた放射効率である。なお、導電率は 5×10^6 S/m として計算した。図3の2通りの放射効率はほぼ等しく、以後の図における理論値として後者の値を採用する。

また、図3から明らかなように、効率は整合周波数である 515 MHz で最大となっていることがわかる。

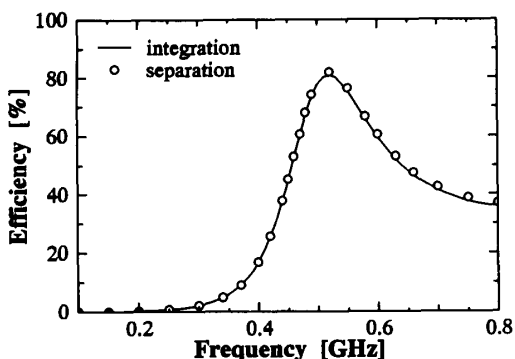


図3 モーメント法による理論的な放射効率
Fig.3 Theoretical radiation efficiency using the Moment method.

3.3 Wheeler 効率

つぎに、Wheeler 法の測定結果について示す。図4は測定に用いたキャップの外観を示したものである。図4(a)に示したキャップはアルミ板で製作したもので、これを直方体型と呼ぶことにする。同図(b)は調理用ボールであり、これを半球型と呼ぶことにする。表1に、キャップの大きさ、空胴共振周波数を示す。

図5に $10 \times 10 \times 5$ cm, $36 \times 36 \times 18$ cm の直方体型キャップ、および、直径 24 cm の半球型キャップを用いて測定した Wheeler 効率を示した。なお、Wheeler 効率の算定には反射係数を用いた式 (9) を用いている。表1から、 $36 \times 36 \times 18$ cm の直方体型キャップを用いた場合、589 MHz に空胴モードの共振点があることがわかる。図5において 600 MHz 付近で落込みがあり、そこでは Wheeler 効率が負になっているが、この落込みがキャップの空胴共振に対応するものである。この落込みを除いては、どのキャップを用いても同等の効率が得られている。更に、本論文に示したキャップ以外にも数種類のキャップを用いて測定を行い、ほぼ同じ結果が得られることを確認している。このように、使用するキャップの形状や大きさの相違によって、測定される Wheeler 効率が大幅に変化することはない (7), (10)。

さて、問題となるのは図5の 515 MHz 付近で測定値に落込みが見られることである。この落込みがキャップの共振によるものではないことは表1から確認できる。更に、キャップの形状・大きさによらず同様の落込みが同一の周波数で観測されていることから、キャップの共振でないことは明確である。つまり、この落込みはキャップの形状や大きさによる特異な現象ではなく、Wheeler 法自体に問題があると考えられる。

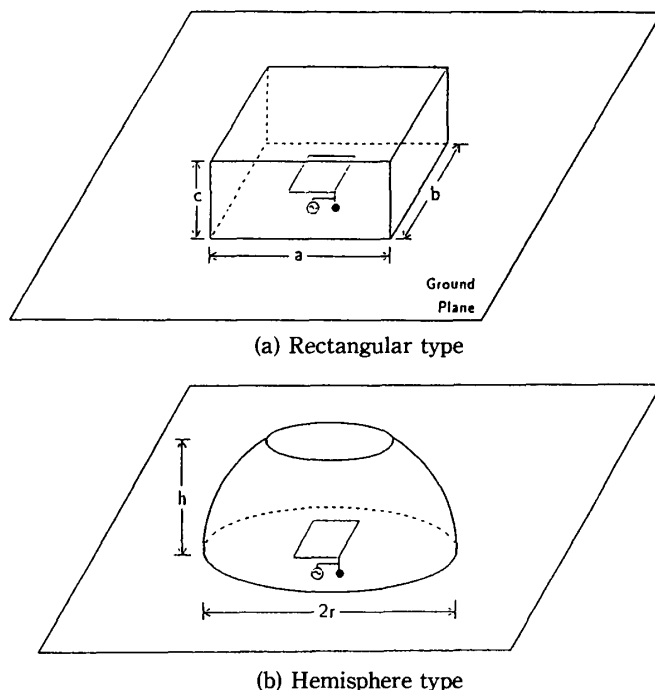


図4 測定に用いたキャップの形状
Fig.4 Shape of the shielding cap in measurements.

表1 キャップの空胴共振周波数

Type	Size [cm]	Resonant Frequency [GHz]			
		1st	2nd	3rd	4th
Rectangular	a=10, b=10, c=5	2.121	3.354	3.674	4.243
Rectangular	a=36, b=36, c=18	0.589	0.932	1.021	1.179
Hemisphere	2r=24, h=9	1.092	1.540	1.788	1.979

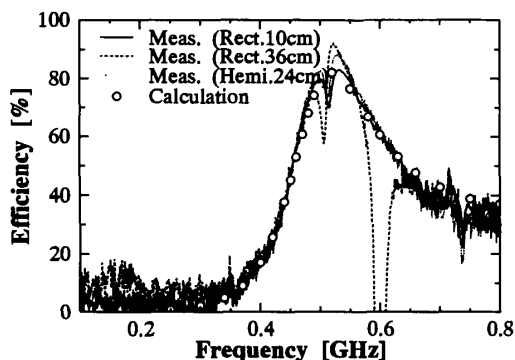


図5 Wheeler 効率の測定値と理論値 (cap は $10 \times 10 \times 5$ cm の直方体型, 直径 24 cm の半球型, $36 \times 36 \times 18$ cm の直方体型を使用)
Fig.5 Measured Wheeler efficiency and calculated efficiency.

また、この落込みの見られる周波数は効率が最大となるはずの箇所 (リターンロス最小点) である (図3) ので、この落込みは深刻な問題である。

4. シミュレーション結果

4.1 Wheeler 法のシミュレーション

キャップをワイヤグリッドで近似することにより、計算機上で Wheeler 法のシミュレーションを行うことができる^{(11),(13)}。シミュレーションから得られた Wheeler 効率を測定値と比較すること、およびキャップをかぶせた際の入力インピーダンス、キャップからの漏れ電力などの種々のパラメータを調べることを目的として、Wheeler 法を擬した数値シミュレーションを行った。

キャップの形状は直方体 (10 cm × 10 cm × 5 cm) とし、図 6 に示すように各辺を 7 分割 (グリッド間隔 1.43 cm) するようにグリッドを配置した。シミュレーション結果を図 7 に示す。測定結果と同様に、515 MHz で落込みが確認された。図 7 から、この落込みを除いた箇所では理論値と Wheeler 効率は正確に一致していることが確認できる。すなわち、Wheeler 法は簡易な手法でありながら、正確な放射効率が得られることが定量的に示された。

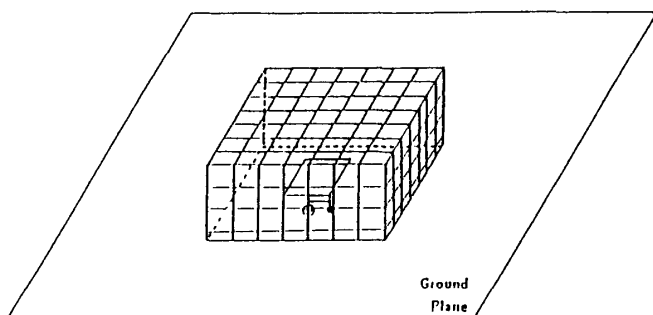


図 6 キャップのワイヤグリッドモデル
Fig. 6 Wire-grid model of a shielding cap.

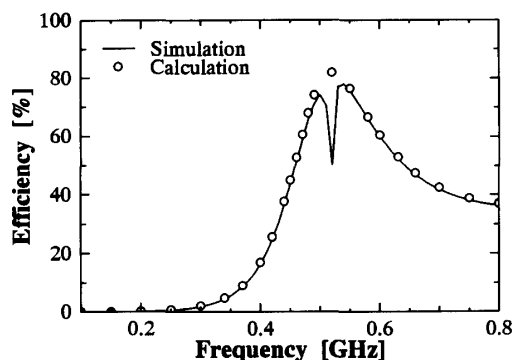


図 7 シミュレーションによる Wheeler 効率と理論値 (cap は 10 × 10 × 5 cm の直方体型)
Fig. 7 Wheeler efficiency obtained by simulation and calculated efficiency.

測定とシミュレーションの両方で Wheeler 効率には整合点付近において落込みが見られる。従って、この落込みは測定方法の善し悪しに起因する問題ではないことが明らかである。

なお、シミュレーションの精度を検討するため、ワイヤグリッドからの漏れ電力 $P_{leakage}$ を調べてみた。漏れ電力比 $P_{leakage}/P_{in}$ は -17 dB 以下であり、キャップのグリッドの切り方はこの程度で十分であることを確認した。

4.2 落込みの原因

Wheeler 法はその定式化の際にいくつかの仮定をしている。すなわち、キャップをかぶせてもアンテナ上の電流分布や共振周波数に変化を生じないこと、また、キャップはラジアン球程度であることが Wheeler 法を用いる条件となっている⁽³⁾。

キャップを付けたとき、付けないときのリターンロスを図 8 に示す。この図から、キャップをかぶせるとリターンロスの極小点に変化していることがわかる。

つまり、キャップがアンテナの周波数特性、すなわちキャップ内部のリアクティブエネルギーに影響を及ぼしていることになる。落込みは整合点で生じており、反射係数 $|\Gamma_{in}|$ は 0 に非常に近い値となっている。また、キャップをかぶせたときの反射係数 $|\Gamma_{cap}|$ は 1 に近い値である。この付近で式 (9) は、 $|\Gamma_{cap}|$ の影響が $|\Gamma_{in}|$ に比べて大きくなっている。従って、アンテナにキャップをかぶせたとき、それがキャップ内部のアンテナ特性 (反射係数) に影響を与えるのであれば、測定される Wheeler 効率はその影響を大きく受けることになる。キャップをかぶせたときのリターンロス極小点の変化の仕方は、キャップの相違やキャップの置き方などによって多少異なるが、どのようなキャップ

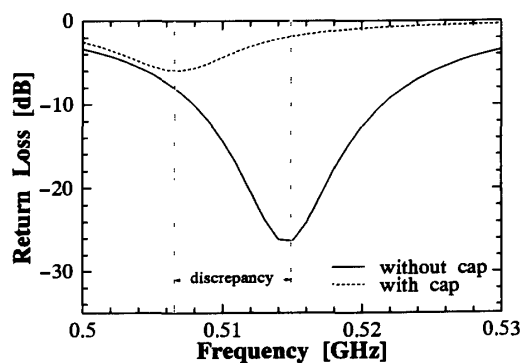


図 8 キャップを付けたときと付けないときのリターンロス
Fig. 8 Return loss with and without a shielding cap.

論文 / Wheeler 法による放射効率測定に関する検討

を用いた場合においてもリターンロス極小点がずれるということに変わりはなく、このことが落込みの原因になっている。

本論文では Wheeler 効率の算出に反射係数を用いた式 (9) を用いている。この式は、共振モデルを仮定していないためすべての帯域で定義される。しかし、アンテナが共振現象にある場合、アンテナはキャップの影響を受けやすく、リターンロスの極小点、すなわち共振周波数がキャップがない場合に比べて変化する。このことは Wheeler 法適用の条件が成り立っていないことに対応する。

5. キャップの適用範囲

Wheeler 法で用いるキャップはラジアン球程度が望ましいと言われている⁽³⁾。これは、ラジアン球の内部がリアクティブエネルギーで占められ、外部が放射電力であるという仮定に基づいており、内部のリアクティブエネルギーに変化を与えず、放射電力のみを抑制するためである。ラジアン球よりも小さいキャップを用いた場合、アンテナの入力インピーダンスに変化を与える恐れがある。ラジアン球よりも大きなキャップを用いた場合には、放射を完全に抑制できないと考えられる。しかし、この仮定は理想的な微小アンテナを球面波展開したうえで導かれており、大きさを有する実際のアンテナの場合にはそのまま適用できるとは限らない。

3.3 で、キャップの大きさによらず同様の Wheeler 効率が求まることを示した。ラジアン球の体積は波長の 3 乗に比例するが、Wheeler 効率の周波数特性を測定する際にキャップの大きさを測定周波数と共に変化させることは非現実的である。また、キャップがアンテナに与える影響を少なくするためには、キャップはある程度の大きさを必要とする。そこで、ラジアン球よりも大きなキャップを使用する場合について考察する。この場合、キャップの大きさが大きいほど、キャップの空洞共振モードがより低い周波数で発生することに注意しなければならない。

図 9 は、 $10 \times 10 \times 5$ cm のキャップを用いて放射効率の理論値と Wheeler 効率の計算値および測定値を 2 GHz まで示したものであり、また、図 10 は入力インピーダンスの周波数特性である。図 9 において、515 MHz, 1.21 GHz, および 1.55 GHz 付近での落込みは 4.2 で述べた共振現象による落込みである。また、このキャップの空洞共振点は 2.1 GHz にある。

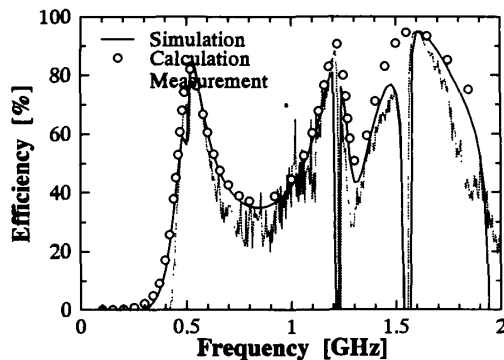


図 9 シミュレーションによる Wheeler 効率と理論値および測定値 (cap は $10 \times 10 \times 5$ cm の直方体型)

Fig.9 Wheeler efficiency obtained by simulation and measurement, and calculated efficiency.

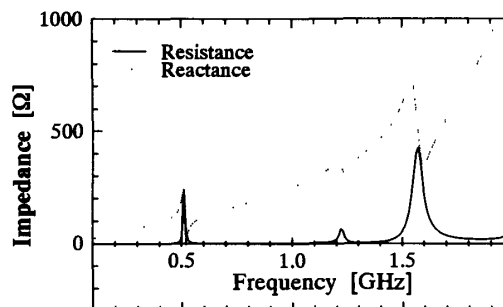


図 10 インピーダンスの周波数特性の計算値

Fig.10 Frequency characteristics of impedance.

使用したキャップの体積がラジアン球 (半径 $\lambda/2\pi$) と同じになる周波数は約 770 MHz と計算され、770 MHz 以上の周波数においてはラジアン球より大きいキャップを使用していることに対応する。また、1.5 GHz において用いた直方体キャップはラジアン球の約 8 倍、2.0 GHz においては約 18 倍の体積をもつ。図 10 から、Wheeler 効率は 1.7 GHz 付近まで理論値に一致していると考えられる。従って、本論文で測定対象としたアンテナについては、ラジアン球の 10 倍程度の体積を有するキャップを用いても正確な放射効率を得ることが可能である。従って、Wheeler 法に用いるキャップの大きさは、空洞共振点に注意すればそれ程厳密である必要はなく、Wheeler 法は容易に放射効率を測定できる手法であると考えられる。

6. むすび

本論文では、小形アンテナで重要なパラメータとなる放射効率について考察した。放射効率の測定法の中で比較的簡易に用いることのできる Wheeler 法に着目し検討した。

本論文では計算機シミュレーションを行うことにより定量的に Wheeler 効率を評価し、Wheeler 効率は一部の落込みを除いては理論値に正確に一致することを示した。

Wheeler 効率はいくつかの箇所で落込みが生ずる。その一つは、従来から知られているキャップの空洞共振点での落込みであるが、その他にアンテナが共振現象にある場合にも落込みが生じることを指摘した。この場合、キャップをかぶせたことにより、リターンロス極小点がアンテナ単体の場合と変化していることを示した。

また、Wheeler 法を用いる際に使用するキャップの形状・大きさは、キャップの空洞共振点に注意すれば、体積でラジアン球の 10 倍程度までの大きさのキャップを用いてよいことを示した。このことは、キャップの大きさはある程度柔軟に選択できることを意味する。

今後の課題として、使用可能なキャップの大きさに関して、さまざまな形状のアンテナについて検討を加えることがあげられる。また、共振現象による落込みに関して、更に詳細に検討する必要がある。

文 献

- (1) 藤本京平：“小形アンテナに関する研究動向”，信学誌，70，8，pp.830-838 (1987-08)。
- (2) Newman E.H., Bohley P. and Walter C.H.: “Two Method for the Mesurment of Antenna Efficiency”, IEEE Trans. Antennas and Propagat., AP-23, 4, pp.457-461 (July 1975)。
- (3) Wheeler H.A.: “The Radiansphere Around a Small Antenna”, Proc. IRE, 47, 8, pp.1325-1331 (Aug. 1959)。
- (4) Glenn S.S.: “An Analysis of the Wheeler Method for Measuring the Radiating Efficiency of Antennas”, IEEE Trans. Antennas Propag., AP-25, 4, pp.552-556 (July 1977)。
- (5) 安藤基朗, 石田聡毅, 伊藤精彦：“Wheeler Cap Method による小型アンテナの放射効率測定”，1987 信学春季全大, S8-1。
- (6) 桜井仁夫, 菊地秀彦, 新井宏之, 安藤 真, 後藤尚久：“アンテナのスケールモデルに対する Wheeler 法による効率測定の考察”，1987 信学春季全大, S8-3。
- (7) 石井 望, 伊藤精彦：“Wheeler Cap 法を用いたカードサイズアンテナの効率測定”，1992 信学秋季全大, B-99。
- (8) Ishii N. and Itoh K.: “A Consideration of the Thin Planar Antenna with Wire-Grid Model”, IEICE trans. commun., E76-B, 12, pp.1518-1525 (Dec. 1993)。
- (9) 井田一郎, 藤沢照彦, 伊藤公一, 高田潤一：“小型ループアンテナの放射効率測定に関する検討”，信学技報, AP92-63 (1992-7)。
- (10) Pozar D.M. and Kaufman B.: “Comparison of Three Methods for the Measurement of Printed Antenna Efficiency”, IEEE Trans. Antennas and Propagat., 36, 1,

pp.136-139 (July 1988)。

- (11) 喬 栄予, 平沢一紘, 藤本京平：“Wheeler Cap 法の検討”，信学技報, AP88-47 (1988-08)。
- (12) Ida I., Takada J. and Ito K.: “Surface-Patch Modelling of a Wheeler Cap for Radiation Efficiency Simulation of a Small Loop Antenna with NEC2”, Electronic Lett., 30, 4, pp.278-280 (Feb. 1994)。
- (13) 村本 充, 石井 望, 伊藤精彦：“Wheeler 法を用いた小型アンテナの効率測定に関する検討”，1993 信学秋季全大, SB-1-6。
- (14) Tilson M.A. and Balmain K.G.: “On the Suppression of Asymmetric Artifacts Arising in an Implementation of Thin-Wire Method”, IEEE Trans. Antennas Propag., 38, 2, pp.281-285 (Feb. 1990)。
- (15) Tilson M.A. and Balmain K.G.: “A Multiradius, Reciprocal Implementation of the Thin-Wire Moment Method”, IEEE Trans. Antennas Propag., 38, 10, pp.1636-1644 (Oct. 1990)。
- (16) Chuang C.W. and Richmond J.H.: “New Expressions for Murual Impedance of Nonplanar-Skew Sinusoidal Monopoles”, IEEE Trans. Antennas Propag., 38, 2, pp.275-414 (Feb. 1990)。

(平成 6 年 11 月 28 日受付)

村本 充



平 4 北大・工・電子卒。平 6 同大学院修士課程了。同年国際電気(株)入社。現在、北大大学院博士後期課程に在学中。小形アンテナの解析および測定に従事。IEEE 会員。

石井 望



平元北大・工・電子卒。平 3 同大学院修士課程了。同年北大・工・電子・助手。現在に至る。この間、小形アンテナの数値解析ならびに測定に従事。IEEE 会員。

伊藤 精彦



昭 38 北大・工・電気卒。昭 40 同大学院修士課程了。同年北大・工・電子・講師。昭 41 同助教授。昭 54 同教授。現在に至る。この間、電磁波、アンテナ、情報伝送、放送衛生による時刻と周波数の精密比較、スーパーレゾリューション法を用いた電磁波測定、太陽発電衛星等の研究に従事。工博。昭 43 年度米沢賞。平 3 SPS 論文賞受賞。昭 45~46 米・シラキューズ大にてアンテナシステムに関する研究に従事。IEEE、テレビジョン学会各会員。