

放射抑制シールドを用いた小形アンテナの放射効率測定

石井 望^{†a)}

Radiation Efficiency Measurement for Small Antennas Using a Metallic Shield

Nozomu ISHII^{†a)}

あらまし 小形アンテナの簡易放射効率測定法として知られている Wheeler cap 法及び改良型 Wheeler 法について、動作原理、効率評価式を紹介するとともに、これまでの研究動向を手短に振り返る。これらの方法では、放射抑制シールドを利用するが、その際にシールドの共振により放射効率が評価できなくなる。その対処法についてまとめる。測定の不確かさの評価法について簡単に述べた後、Wheeler cap 法及び改良型 Wheeler 法により評価される放射効率の不確かさが放射抑制シールドを被せたときの放射効率測定の不確かさに大きく依存することを示す。更に、不確かさの軽減手法についても言及する。

キーワード Wheeler cap 法, 改良型 Wheeler 法, 放射効率, 放射抑制シールド, 不確かさ

1. ま え が き

近年、無線機器の高機能化、集積化が進み、送受を担うアンテナを単独で設計・評価することが難しくなっている。このため、アンテナの特性は取り付けられたきょう体や基板の影響を大きく受けるようになった。例えば、放射パターンはアンテナ単独の場合と大きく異なり、複雑になる。またアンテナが波長に比べて小さくなる、すなわち、電気的に小形になるのに伴い、放射パターンが全指向性を示すようになる。このように、最大放射方向での等価等方輻射電力 (EIRP: Effective Isotropic Radiated Power) を以て放射電力を評価することが難しくなっている。そのため、被測定アンテナ (AUT: Antenna Under Test) を見込む全立体角にわたって EIRP を面積分した全放射電力 (TRP: Total Radiated Power) を評価指標とすることが提案されている [1]~[3]。送信アンテナの場合、放射効率は入力電力に対する放射電力の比で与えられることから、TRP 評価法として放射効率測定法が着目されつつある [3]。

放射効率測定法として、放射抑制シールドで AUT を

覆い、放射を抑制する Wheeler 法が知られている。以降、放射抑制シールドを利用する効率測定法を、すなわち、Wheeler cap 法 [4], [5] 及び改良型 Wheeler 法 [6] を Wheeler 法と総称する。Wheeler 法では、シールドで覆うため、測定対象となる AUT の物理的な大きさが制限される。しかしながら、AUT を自由空間に置いたときの反射係数及びシールドで覆ったときの反射係数を測定すればよく、設備が比較的安価で済み、かつ、短時間に測定が行えるという利点がある。アンテナがきょう体や基板と一体的に設計されるようになっており、ここ数年、Wheeler 法に関する発表が増えていることから、Wheeler 法への関心が高まっているといえる。

本論文では、放射抑制シールドを一つだけ用いる Wheeler cap 法及び放射抑制シールドとして両端を可動短絡とする導波管を用いる改良型 Wheeler 法について、測定原理及びその評価式を紹介する。また、これまでに発表された国内外における研究について列挙する。続けて、放射抑制シールドのキャビティ共振により生じる放射効率の落ち込み現象を説明し、その回避方法について言及する。AUT に大きな損失機構が含まれない場合、放射抑制シールドで覆うと、シールドで放射電力がほぼ全反射するため、反射係数の大きさは 1 にかなり近くなる。このとき、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) の不確かさが大きくなることから、放射効率測定に関する不確かさが大きな

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市

Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata-shi, 950-2181 Japan

a) E-mail: nishii@eng.niigata-u.ac.jp

る. Wheeler 法に基づく放射効率測定の不確かさ評価法の流れについて簡単に紹介し, 放射効率測定の不確かさを例示する. 更に, 不確かさを軽減する方法についても言及する.

2. 測定原理・評価式及び研究動向

2.1 Wheeler cap 法

2.1.1 測定原理と評価式

Wheeler cap 法は, 半径 $\lambda_0/2\pi$ 程度の球状放射抑制シールドでアンテナを覆うことにより, アンテナ放射が抑制できるという Wheeler の経験則に基づく [4]. ここで, λ_0 は自由空間における波長である. 現実には, 放射抑制のためにシールドを球状とする必要はなく, 例えば, 図 1 に示す直方体状としても構わない. 図 1 において, 送信アンテナに入力電力 P_i を与えるとき, アンテナを自由空間に置いたときのアンテナへの正味の入力電力を $P_f = P_i(1 - |\Gamma_f|^2)$ とし, アンテナを放射抑制シールドで覆ったときの正味の入力電力を $P_s = P_i(1 - |\Gamma_s|^2)$ とする. ここで, Γ_f, Γ_s はアンテナを自由空間, 放射抑制シールド内に置いたときの反射係数である. このとき, P_s は P_f から放射電力を差し引いた損失電力に対応し, 放射効率 η は

$$\eta = 1 - \frac{P_s}{P_f} \quad (1)$$

で与えられる. 図 2(a) に示すように, アンテナが直列共振回路により表現できる場合は, 式 (1) は

$$\eta^R = 1 - \frac{R_s}{R_f} \quad (2)$$

となる [5]. ここで, R_f, R_s はアンテナを自由空間, 放射抑制シールド内に置いたときの入力インピーダンスの実部である. 図 2(b) に示すように, アンテナが並列共振回路により表現できる場合は, 式 (1) は

$$\eta^G = 1 - \frac{G_s}{G_f} \quad (3)$$

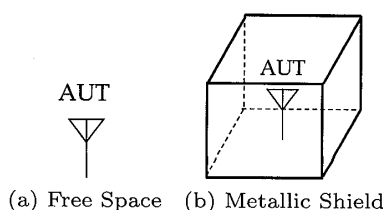


図 1 Wheeler cap 法
Fig. 1 Wheeler cap method.

となる [7]. ここで, G_f, G_s はアンテナを自由空間, 放射抑制シールド内に置いたときの入力アドミタンスの実部である.

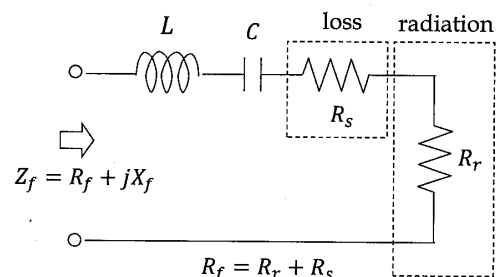
実際, 自由空間での反射係数の大きさが最小となる周波数において, 入力インピーダンスあるいは入力アドミタンスの虚部が 0 になると限らない. この不具合を解消するために, 仮想的にアンテナ入力ポート直前に無損失伝送線を挿入し, 反射係数を修正する方法が知られている [8]. 挿入した伝送線の線路長は, 反射係数の大きさが最小となる周波数において, 入力リアクタンスあるいは入力サセプタンスが 0 となるように決定する.

アンテナ入力特性を等価回路で表示し, Wheeler cap 法により放射効率を評価する方法は, 例えば, 複数の並列共振回路の結合により等価回路が与えられるマイクロストリップアンテナ (MSA) に対して適用されている [9].

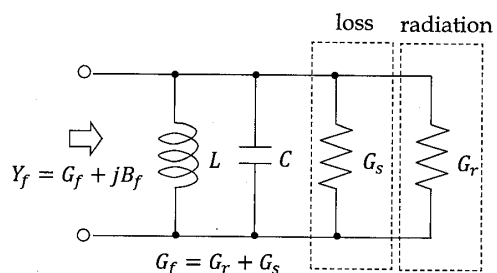
また式 (1) は, 反射係数の大きさを用いて

$$\eta^R = 1 - \frac{1 - |\Gamma_s|^2}{1 - |\Gamma_f|^2} = \frac{|\Gamma_s|^2 - |\Gamma_f|^2}{1 - |\Gamma_f|^2} \quad (4)$$

と与えられる [10]. 式 (4) は反射係数の大きさのみで与えられ, 位相を含まないため, VNA の反射係数測定に関する不確かさを考慮すると, 周波数にもよるが, 式 (2), (3) に比べ, 測定精度の観点で有利である. また, 後述の改良型 Wheeler 法の評価式の派生形とし



(a) Serial Resonant Circuit



(b) Parallel Resonant Circuit

図 2 アンテナの等価回路
Fig. 2 Equivalent Circuits of AUTs.

て、式 (4) を $|\Gamma_s|$ で除した評価式

$$\eta^{\Gamma_m} = \frac{1}{|\Gamma_s|} \eta^{\Gamma} = \frac{1}{1 - |\Gamma_f|^2} \left(|\Gamma_s| - \frac{|\Gamma_f|^2}{|\Gamma_s|} \right) \quad (5)$$

が知られている [11].

2.1.2 研究動向

Wheeler の経験則 [4] に対して、数値シミュレーションあるいは解析により妥当性の検証が行われている [12]~[14]. Newman らにより、 Q ファクタ法とともに、式 (2) の評価式により、多巻ループアンテナの放射効率が測定された [5]. またループアンテナに対して、式 (2) が並列共振時に適用できないこと、放射抑制シールドの導電率は放射効率に大きな影響を与えないことが解析的に示された [15].

放射抑制シールドの形状は、放射効率にほとんど影響を与えない [16], [17]. 一例として、形状が回転円筒体である場合に放射効率評価が実施されている [18]. 直方体シールドにより MSA の放射効率を測定する場合、シールドの高さは不要である [19]. 更に、シールドの共振による放射効率落ち込みを考慮した直方体、円筒、球形シールドの寸法決定法についても議論されている [20], [21]. なかでも、Wheeler cap 法による測定から、プリント基板 (PCB) 装着型のアンテナの放射効率が、PCB を取り除き、アンテナ金属部分だけのモデルで評価できるという知見は興味深い [17].

Wheeler cap 法により実際に効率評価が行われた例としては、板状逆 F アンテナ (PIFA) [22], 誘電体共振アンテナ [23], 低姿勢小形アンテナ [24], RFID [25] が挙げられる. 生体等が組み込まれたアンテナ系の評価例としては、野鳥観測用アンテナ [26], 全身比吸収率 (SAR) 測定への適用 [27] が挙げられる. またミリ波帯アンテナへの適用例としては、コプレーナ導波路 (CPW) 給電オンチップ誘電体共振アンテナ [28] が挙げられる. 更に、アンテナを構成する導電性材料の導電率測定への適用 [29] について検討されているのは興味深い.

村本らにより $\lambda_0/2\pi$ よりも大きい放射抑制シールドを用いると、シールドが共振する周波数を除いて、放射効率を評価できることが示されている [13]. 共振周波数における放射効率落ち込みの対処法としては、落ち込みの前後の周波数において包絡線を結ぶことにより放射効率を推定する方法 [30], あるいは、複数個の形状や寸法の異なるシールドにより放射効率の周波数特性を求め、それらをグラフ上で重ね合わせて表示し、

その極大を結んで得られる包絡線により放射効率を推定する方法 [31] が示されている. その延長線上にある推定法として、放射抑制シールド内でアンテナの位置を何通りか変化させ、得られた複数の放射効率の周波数特性の包絡線により推定する方法がある [32]. 包絡線近似により放射効率の落ち込みに対処する方法は、原始的ではあるが、UWB アンテナのように広帯域にわたって放射効率測定が要求される場合、有用な解決法の一つであろう.

測定精度を確保するための試みとしては、VNA に反射測定に起因する不確かさを軽減することを目的として、式 (2) の二つの抵抗 R_f , R_s から半田による抵抗分 R_{sol} を減算し、放射効率を評価する方法が提案されている. R_f , R_s に共通に R_{sol} が含まれているのを相殺すると同時に、減算により測定系に内包される系統的な不確かさを相殺し、測定精度の改善を実現している [33]. 更に、アンテナ給電線の影響を取り除くために、光ファイバ信号と RF 信号との間を変換するモジュールを利用する方法も検討されている [34].

2.2 改良型 Wheeler 法

2.2.1 測定原理と評価式

改良型 Wheeler 法は、Johnston らによって提案された放射効率測定法であり [6], その評価式は、回路網理論に基づき、数学的に厳密に導出される. 図 3(a) に示すように、アンテナを、ポート 1 が入力ポート、ポート 2 が自由空間に接続されている可逆 2 ポート回路網とみなす. この 2 ポート回路網の S パラメータを用いると、放射効率は

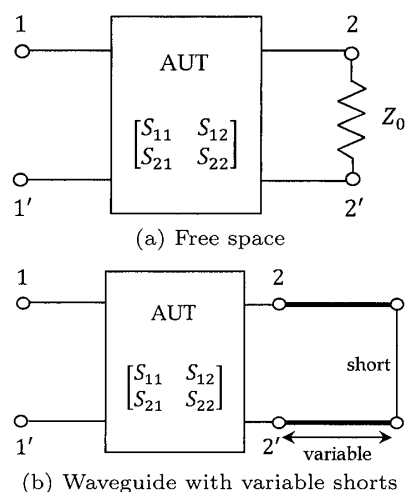


図 3 改良型 Wheeler 法の等価回路

Fig. 3 Equivalent circuits used in reflection method.

$$\eta = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \quad (6)$$

と与えられる [6]. ここで, $|S_{11}|$ はアンテナ入力ポートにおける反射係数の大きさ $|\Gamma_f|$ に対応し, VNA で直ちに測定可能である. $|S_{21}|^2$ の評価には Deschamps の方法を利用する [35]. すなわち, 図 3 (b) に示すように, ポート 2 に終端が短絡された無損失伝送線路を取り付け, その線路長を変化させてポート 1 における反射係数を測定することで $|S_{21}|^2$ を決定する. ポート 2 における反射係数が $\Gamma_i = e^{j\theta_i}$ であるとき, ポート 1 における反射係数は

$$\Gamma_{s,i} = S_{11} + \frac{S_{21}^2 \Gamma_i}{1 - S_{22} \Gamma_i} \quad (7)$$

で与えられる. θ_i の変化に対して Γ_i はスミスチャート上で円を描く. 式 (7) は双一次形式であるから, 図 4 に示すように, θ_i の変化に対して $\Gamma_{s,i}$ はスミスチャート上において円を描く. いま, $\Gamma_{s,i}$ の描く円の中心を $S_{11} + z_s$, 半径を r_s とするとき, $|S_{21}|^2 = r_s - |z_s|^2 / r_s$ と与えられる. すなわち, 3 点以上の $\Gamma_{s,i}$ をスミスチャート上にプロットし, 最小二乗法により円の中心 $S_{11} + z_s$ と半径 r_s を求めることで, 放射効率は

$$\eta^m = \frac{1}{1 - |\Gamma_f|^2} \left(r_s - \frac{|z_s|^2}{r_s} \right) \quad (8)$$

で与えられる [36], [37].

$\Gamma_{s,i}$ の描く円の中心が原点であると仮定すれば, $S_{11} + z_s = 0$ より, $|z_s| = |S_{11}| = |\Gamma_f|$ であり, 更に $r_s = |\Gamma_{s,i}| = |\Gamma_s|$ とみなすことにすれば, 式 (5) が得られる. 損失機構を含むアンテナ系では, $\Gamma_{s,i}$ の描く円の中心が原点になるとは限らないので, 全てのアン

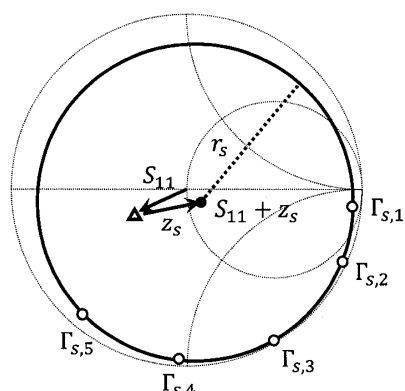


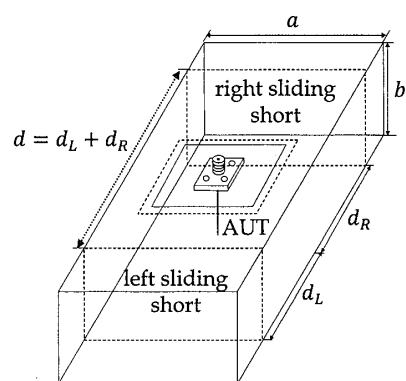
図 4 スミスチャート上における $\Gamma_{s,i}$
Fig. 4 $\Gamma_{s,i}$ on the Smith chart.

テナに対して式 (5) が適用できるわけではない.

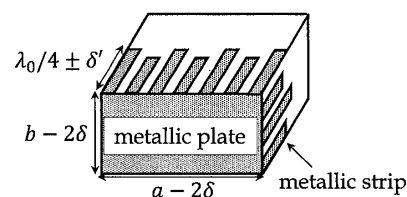
図 5 に改良型 Wheeler 法で使用する導波管及びスライディングショート (SS: Sliding Short) の概観を示す. 導波管を使用するため, カットオフ周波数よりも低い周波数では, $\Gamma_{s,i}$ はスミスチャート上で 1 点に集中し, 放射効率は得られない. 導波管の主モード動作周波数範囲であっても, カットオフ周波数に近い周波数では管内波長が長くなるため, SS を物理的に大きく移動させてもスミスチャート上の円周上での移動量が小さくなり, 円の中心と半径を決定できない, 決定できたとしても精度に問題があるため, 放射効率は実質的に得られない. また, SS を導波管内で動かすためには導波管内壁と SS の間にすき間 δ を設けなければならない, その部分からの電磁波漏れが問題となる. このため, 図 5 (b) に示すように, SS の壁面におよそ $\lambda_0/4$ の長さの導電ストリップを設け, 導波管内壁との間で線路長 $\lambda_0/4$ のマイクロストリップ線路によるチョークを実現し, 短絡面の位置におけるすき間を電氣的に短絡させる. ストリップは $\lambda_0/4$ の長さを若干長くしたものや短くしたもの, すなわち, 長さ $\lambda_0/4 \pm \delta'$ のストリップを互い違いにして SS 側面に設けるとよいとされている [6].

2.2.2 Johnston-Geissler 法

改良型 Wheeler 法を実現する上での最大の問題点は, SS の挿入長を 3 通り以上変化させなければなら



(a) Waveguide with sliding shorts



(b) Sliding short with $\lambda_0/4$ chokes

図 5 方形導波管と可動短絡

Fig. 5 Rectangular waveguide and sliding shorts.

ず、一つの放射抑制シールドのみで放射効率を評価できる Wheeler cap 法に比べて測定系が複雑となる点にある。以下にその解決法を幾つか挙げる。

一般に放射効率が周波数に対して急激に変化しないという性質を利用して、周波数 f を中心とする範囲 $[f - \Delta f, f + \Delta f]$ においてアンテナの損失に関わる性質がほぼ一定であると仮定する。このとき、周波数を変化させることは、改良型 Wheeler 法における SS の線路長を変化させることと等価となる。この方法は Johnston-Geissler 法として知られており [38], Wheeler cap 法と同様に、ただ一つの放射抑制シールドによりアンテナを覆ったときの反射係数 Γ_s の周波数特性を測定するだけで、改良型 Wheeler 法のアルゴリズムに従って放射効率を評価できる。 Δf の選択であるが、等価的な $\Gamma_{s,i}$ がスミスチャート上で半円を描く程度でよく、円を一周するように選ぶと放射効率の周波数特性を追従できないとされている [39]。

また、三つ以上の放射抑制シールドを用意して、それらでアンテナを覆ったときの反射係数を測定することにより、改良型 Wheeler 法のアルゴリズムを適用して放射効率を算出することができる [40]。Wheeler cap 法における放射効率落ち込み回避法として、複数のシールドを利用する方法を紹介したが、三つ以上のシールドを用いるのであれば、改良型 Wheeler 法のアルゴリズムを利用する方が得策である。更に、モード攪拌器によりシールド内の電磁界分布を変化させ、三つ以上のシールドを用意したのと同じ状況を作り出すことも可能である [41]。

2.2.3 研究動向

改良型 Wheeler 法により放射効率が評価された例としては、抵抗装荷 MSA [42] が挙げられる。Johnston-Geissler 法が適用された例としては、携帯電話用アンテナ [43] が挙げられる。また、 S パラメータ法と Johnston-Geissler 法を組み合わせる平衡給電ループアンテナの放射効率が評価されている [44]。

改良型 Wheeler 法は導波管のカットオフ周波数以下では原理的に利用できないのに対して、Wheeler cap 法は放射抑制シールドの共振周波数よりも十分低い周波数で適用すべきとされている。このため、Wheeler cap 法と改良型 Wheeler 法の使い分けとして、放射抑制シールドの共振周波数以下では Wheeler cap 法を適用し、それ以上では Johnston-Geissler 法を利用すべきとする文献もある [39], [45]。

更に、求円アルゴリズムの選択 [46]、放射効率の周

波数特性に現れる不連続を取り除く方法 [46]～[48] についても検討されている。なお、改良型 Wheeler 法のスキームがアンテナの熱雑音測定に適用されているのは興味深い [48]。

3. 測定上の注意

Wheeler 法においては、放射抑制シールドの共振により、放射効率が過小評価される [13], [31], [36]。一つはシールドがキャビティ共振する場合であり、もう一つはアンテナとシールドの間で共振が生じる場合である [36]。いずれの場合も、共振によりアンテナの損失抵抗よりもシールド壁面の表面抵抗による寄与が大きく現れることに起因する [31], [49]。したがって、これらの共振が生じる状況で Wheeler 法による放射効率の測定は避けなければならない、あらかじめ測定可能な周波数範囲について調べておく必要がある。

3.1 キャビティ共振

シールドの形状が直方体、円筒、球形である場合、最も簡単なキャビティ共振の判別法はシールドの共振周波数を調べることである。例えば、長さが a, b, d であるような三辺をもつ直方体シールドの場合、よく知られているように

$$f_{mnl} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{\ell}{d}\right)^2} \quad (9)$$

で与えられる周波数で共振する。ここで、 c_0 は自由空間における光速である。また、 m, n, ℓ は非負の整数であり、これらの取り得る組合せは TE モードであるか、TM モードであるかで決まる [50]。実際には、シールドの工作精度を考慮して、この周波数の $\pm 3\%$ の範囲の周波数を共振とみなすとよい [20], [36]。

AUT に大きな損失機構が含まれない場合は、シールドで覆ったときの反射係数の大きさ $|\Gamma_s|$ に対して、 $|\Gamma_s| < e$ となる場合をキャビティ共振とみなすことも可能である [36], [51]。 e の値は経験的に $e = 0.9$ 程度にすればよいが、実際には落ち込みの回避具合を調べて e の値を調整すべきである。

3.2 アンテナとシールドの間における共振

アンテナとシールドの間で共振が生じる場合は、アンテナから当該シールド面への導波管伝搬を考え、アンテナと当該シールド間の距離が $\lambda_g/2$ の自然数倍となる場合に相当する [36]。ただし、 λ_g は当該導波管の管内波長とする。この落ち込みの周波数範囲 Δf_d は広く、10 ～ 20% に及ぶため [36], [49]、シールドを選

択する際にあらかじめ考慮すべきである。

3.3 Wheeler cap 法特有の注意事項

Wheeler cap 法においては、選択した評価式により評価不能となる周波数が生じることに注意しなければならない。例えば、式 (2) は並列共振で、式 (3) は直列共振で使用することはできない。これらは、アンテナが直列共振回路、並列共振回路によりモデル化できない場合が対応している。

また、損失機構を含むアンテナ系において、式 (4) あるいは式 (5) が必ずしも有効とは限らない。ここでいう損失機構とは、アンテナに抵抗が装荷された場合あるいはアンテナ周辺に損失性物体（生体・ファントムなど）が配置された場合に生じる損失機構を指す。結局、Wheeler cap 法においては、アンテナを適切な等価回路で表示した上で、シールドの有り無しにより放射抑制を制御し、放射効率を決定すべきである。すなわち、アンテナの動作原理（等価回路）を考慮した上で、適切な評価式を選択する必要がある。

Wheeler cap 法の適用が容易なアンテナとして、接地板上に設けられたアンテナがある。アンテナを覆うように金属キャップを被せ、接地板と接触させることで放射抑制シールドを実現できるが、この金属キャップと接地板との間の電氣的接触がしばしば問題視される。このことは、モノポールアンテナのように、接触面の方向で放射が大きい場合に注意を要する。接触を良くするために、導電性テープを貼る、ネジ止めをする、密着度を上げるために重しをキャップに載せる、スチールウールを薄くして接触面に挟んで密着するなどの方法が試されている。接触面にチョーク構造を設けた専用の放射抑制シールドを製作することも一策であろう。更に、接地板上に設けられたアンテナでは、接地板に流れる電流による損失も Wheeler cap 法によって損失電力とみなされることに注意しなければならない [5]。

なお、接地板を利用しないアンテナについては、放射抑制シールドにセミリジッドケーブルを貫通させて給電し、シールド内における反射係数を測定することになる [44], [45]。更に、バランなどの整合回路を含むアンテナ系の放射効率の測定も Wheeler cap 法の手順どおりに測定すればよい [52]。整合回路の寄与を取り除き、アンテナ自身の放射効率を得たい場合は、整合回路の S パラメータを前もって測定し、アンテナ系の反射係数からその寄与を取り除けばよい [50]。

3.4 改良型 Wheeler 法特有の注意事項

改良型 Wheeler 法においては、アンテナと短絡面の間に導波管伝搬が生じることが効率の評価を可能とする条件であるため、その導波管が主モードで動作する周波数範囲で適用すべきである [36]。関連して、カットオフ周波数よりもやや高い周波数では、その管内波長が長くなるため、改良型 Wheeler 法により放射効率を求めることはできない。また、アンテナとシールドの最短距離を $0.15 \sim 0.20\lambda_0$ とする必要があることが知られている [6]。

導波管の伝搬モードと結合しない放射成分に対しては、SS をアンテナ極近傍で動かさないといけないという制約を課すべきとの報告もある [53]。構造が複雑なアンテナが測定対象である場合はこの点にも注意すべきである。

4. 不確かさ評価

大きな損失機構を含まないアンテナ系の放射効率を Wheeler 法によって評価する際、放射抑制シールドで覆ったときの反射係数の大きさは、放射効率により減じるとはいえ、1 に近い値を示す。VNA を用いて反射係数を測定する場合、反射係数の大きさが 1 に近くなると不確かさが大きくなるため、放射効率測定の不確かさもその影響を大きく受ける。

4.1 測定の不確かさと評価方法

不確かさに馴染みのない読者の便を図るため、不確かさ評価について概略を説明しておく [2], [54]。測定において真の値は決して得られない。したがって、測定値と真の値の差分で与えられる誤差も得られない。このため、真の値に対して測定値がどの程度の不確かさで存在するのかを見積もる必要がある。具体的には、測定値のばらつき、更には測定値の偏りに関する記述などが必要になる。

不確かさは偶然不確かさ要因と系統的な不確かさ要因からなる。偶然不確かさは、測定の際に生じるランダム変動に起因し、測定回数を増やすことで軽減できる。系統的な不確かさは、測定系に内包される特定の原因により生じ、その原因が定量化できる場合は補正を行うことで軽減できる。

不確かさを見積もるために、A タイプ及び B タイプの不確かさ評価が用意されている [54]。A タイプ評価では、 n 回の測定を繰り返す、あるいは、モンテカルロ法を用いたシミュレーションにより、平均の実験標準偏差を求め、それを標準不確かさとする。モンテカ

ル口法を用いる評価では、不確かさの要因に対して、平均値を測定値とし、標準偏差を標準不確かさとする正規分布が得られるようにランダムな仮想測定値を生成し、測定量の不確かさを見積もる [55]。一方、Bタイプ評価では、前もって得られる情報を用いて推定標準偏差を求め、それを標準不確かさとする。測定量 Y が複数の独立な量 X_i から得られるとき、測定推定値 y に対する合成標準不確かさ $u_c(y)$ は、入力推定値 x_i の標準不確かさ $u(x_i)$ を用いて

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) \quad (10)$$

で評価される。ただし、 $c_i = \partial f / \partial x_i$ は感度係数である。なお、式 (10) は不確かさの伝搬則と呼ばれる。Bタイプ評価は、測定量に対する評価式が与えられており、不確かさの伝搬則に関する計算が複雑とならない場合に有効である。さもないければ、モンテカルロ法による A タイプ評価を用いるべきである。拡張不確かさ U は、合成標準不確かさ u_c に区間に関する信頼水準に基づく包含係数 k を乗じ、 $U = k u_c$ により得られる。例えば、 $k = 2$ は 95% の信頼水準に対応する。

4.2 不確かさ評価の例

以降、VNA により測定される反射係数の大きさ $|\Gamma|$ 及び位相 θ に関する不確かさ $u(|\Gamma|)$ 及び $u(\theta)$ が反射係数の大きさ $|\Gamma|$ の関数であると仮定する。

4.2.1 Wheeler cap 法の不確かさ評価の例

反射係数の大きさに着目する評価式 (4) 及び (5) に関する B タイプの相対合成標準不確かさ $u_c(\eta)/\eta$ は

$$\left[\frac{u_c(\eta)}{\eta} \right]^2 = \left[p_f \frac{u(|\Gamma_f|)}{|\Gamma_f|} \right]^2 + \left[p_s \frac{u(|\Gamma_s|)}{|\Gamma_s|} \right]^2 \quad (11)$$

により与えられる [55]。ここで、 p_f は共通で

$$p_f = \frac{2|\Gamma_f|^2(1 - |\Gamma_s|^2)}{(1 - |\Gamma_f|^2)(|\Gamma_s|^2 - |\Gamma_f|^2)} \quad (12)$$

で与えられる。一方、 p_s は、評価式 (4) に対して

$$p_s^\Gamma = \frac{2|\Gamma_s|^2}{|\Gamma_s|^2 - |\Gamma_f|^2} \quad (13)$$

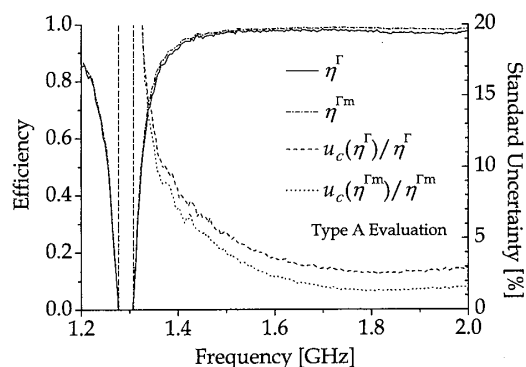
で与えられ、評価式 (5) に対して

$$p_s^{\Gamma_m} = \frac{|\Gamma_s|^2 + |\Gamma_f|^2}{|\Gamma_s|^2 - |\Gamma_f|^2} \quad (14)$$

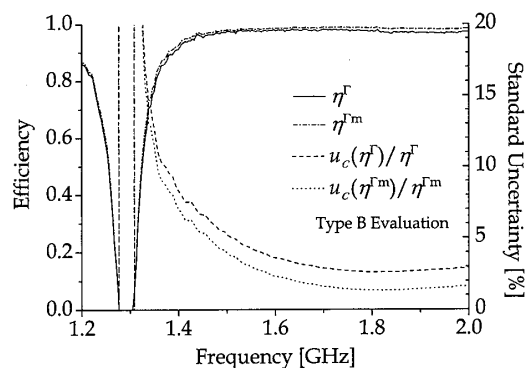
で与えられる。大きな損失機構を含まないアンテナ

系では、 $(1 - |\Gamma_s|^2)$ はほぼ 0 に近い値を示すから、 $p_f \ll p_s$ となり、放射抑制シールドで覆った際の反射係数の不確かさが放射効率測定の不確かさを決定づける。また、一般に $|\Gamma_s| < |\Gamma_f|$ であるから、 $p_s^\Gamma > p_s^{\Gamma_m}$ となり、評価式 (5) の不確かさが評価式 (4) より小さい。

図 6 は、 $a = 2b = d = 150\text{mm}$ のアルミニウム板より構成された直方体放射抑制シールドで覆い、評価式 (4) 及び (5) により、40 mm モノポールアンテナの放射効率及びその不確かさを評価した例である。図 6(a) の標準不確かさはモンテカルロ法を用いた A タイプ評価によるものであり、図 6(b) の不確かさは式 (11) による B タイプ評価によるものである。モンテカルロ法における正規乱数の発生回数は 1000 としている。これらと比較することにより、モンテカルロ法を用いた A タイプ評価と式 (11) による B タイプ評価は同一の不確かさを与えることが分かる。なお、1.3 GHz 前後での放射効率の落ち込みはシールドの共振により生じており、不確かさも大きくなるこ



(a) η^Γ , η^{Γ_m} and Type A uncertainty.



(b) η^Γ , η^{Γ_m} and Type B uncertainty.

図 6 Wheeler cap 法による 40 mm モノポールアンテナの放射効率と標準不確かさ

Fig. 6 Radiation efficiency and uncertainty for 40 mm monopole antenna using Wheeler cap method.

表 1 η^{Γ} 及び $\eta^{\Gamma m}$ に対する不確かさバジェット
Table 1 Uncertainty budget for η^{Γ} and $\eta^{\Gamma m}$.

(a) Uncertainty budget for η^{Γ} at 1.60 GHz.

Source	Tolerance, $\pm\%$	Distribution	Divisor	p_i^{Γ}	Standard uncertainty, $\pm\%$
$ \Gamma_f $	1.35	Normal	1	0.02	0.03
$ \Gamma_s $	1.28	Normal	1	2.81	3.59
Combined standard uncertainty, u_c					3.59
Expanded uncertainty, $U = ku_c$, $k = 2$ for 95% confidential interval					7.17

(b) Uncertainty budget for $\eta^{\Gamma m}$ at 1.60 GHz.

Source	Tolerance, $\pm\%$	Distribution	Divisor	$p_i^{\Gamma m}$	Standard uncertainty, $\pm\%$
$ \Gamma_f $	1.35	Normal	1	0.02	0.03
$ \Gamma_s $	1.28	Normal	1	1.81	2.31
Combined standard uncertainty, u_c					2.31
Expanded uncertainty, $U = ku_c$, $k = 2$ for 95% confidential interval					4.62

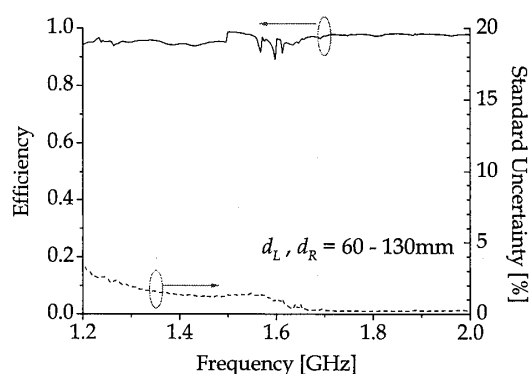
とが分かる．不確かさの主因を調べるために，表 1 のバジェット表示が有効である．同表には，不確かさの要因 (Sources) である $|\Gamma_f|$ 及び $|\Gamma_s|$ の許容誤差 (Tolerance)，確率分布 (Distribution)，その確率分布で決まる除数 (Divisor)，正規化された感度係数 p_f 及び p_s が与えられており，式 (11) 右辺の各項に基づき標準不確かさ (Standard uncertainty) が計算され，その二乗和により合成標準不確かさ (Combined standard uncertainty) が得られる．バジェットの詳細な見方は文献 [55] を参照されたい．表 1 から分かるように，評価式 (4)，(5) 共に放射抑制シールドで覆ったときの反射係数の大きさに関する不確かさの寄与が支配的であり，評価式 (5) が評価式 (4) の 6 割強の不確かさを示している．

なお，抵抗及びコンダクタンスに着目する評価式 (2)，(3) に関する測定の不確かさ評価については文献 [55] を参照されたい．

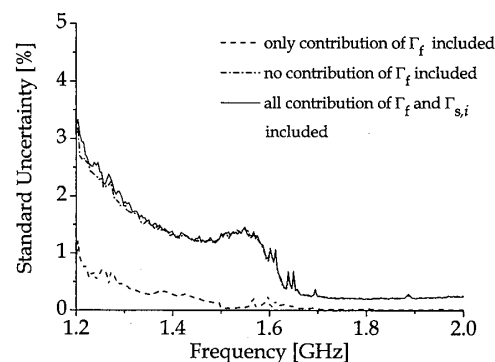
4.2.2 改良型 Wheeler 法の不確かさ評価の例

改良型 Wheeler 法における放射効率の評価式は式 (8) で与えられるが， $|z_s|$ 及び r_s が $\Gamma_{s,i}$ の複雑な関数であるため，解析的に感度係数を計算し，不確かさを評価するのに膨大な労力を要する．そのうえ， $|z_s|$ 及び r_s の間には相関があるため，式 (10) に更に相関項を追加して評価しなければならない [54]．このため，改良型 Wheeler 法による放射効率測定の不確かさ評価には，B タイプ評価よりもモンテカルロ法による A タイプ評価が適している [55]．

図 7(a) に，40 mm モノポールアンテナの改良型 Wheeler 法による放射効率測定及びその標準不確かさを示す．ここで，断面が $a = 2b = 150\text{mm}$ であるような方形導波管と SS に対して，アンテナと両側の SS ま



(a) η^m and Type A uncertainty.



(b) Uncertainty analysis for $u_c(\eta^m)$.

図 7 改良型 Wheeler 法による 40 mm モノポールアンテナの放射効率と標準不確かさ

Fig. 7 Radiation efficiency and uncertainty for 40 mm monopole antenna using reflection method.

での距離 d_L, d_R を 60 mm から 130 mm まで 10 mm 間隔で動かした．不確かさはモンテカルロ法による A タイプ評価により与えられ，正規乱数の発生数は 1000 としている．参考までに，1.60 GHz における標準不確かさは 1.04% であり，評価式 (5) に基づく Wheeler cap 法による放射効率測定標準不確かさ 2.31% より

も小さい。

モンテカルロ法による A タイプ評価により不確かさ要因を定量的に見積もるためには、着目する要因に関する値に対してのみ正規乱数列を発生させればよい [55]。図 7(b) は、先ほどの 40 mm モノポールアンテナを改良型 Wheeler 法で放射効率測定した場合の個々の要因に対する不確かさを示したものである。同図から、アンテナを両端可動短絡の導波管内に設置した際の反射係数測定が放射効率測定の不確かさが放射効率測定全体の不確かさとほぼ一致することが分かる。

5. 不確かさの軽減方法

Wheeler 法に基づく放射効率の不確かさは大きくなるのは、VNA の反射係数測定の不確かさが反射係数の大きさが 1 に近づくほど大きくなるためである。したがって、測定の不確かさを軽減するためには、VNA に直接アンテナを接続するのではなく、大きさが 1 に近い反射係数の測定をより不確かさが小さくて済む測定法に置き換えればよい。

例えば、アンテナと VNA の間に整合回路あるいは減衰器を挿入することにより、反射係数の大きさを小さくできる [52], [56]。しかし、別途整合回路あるいは減衰器を 2 ポート回路網として特性を測定し、その特性を取り除く後作業が増えるだけでなく、これらの回路素子を挿入することで測定の不確かさを増やす可能性があることに注意しなければならない。

これに対して、筆者らは 180° 3 dB ハイブリッド結合器と可動短絡を用いた反射係数測定法を開発し、Wheeler cap 法による効率測定に適用している。上述のモンテカルロ法により A タイプの不確かさ評価を行ったところ、VNA に直接接続して反射係数を測定する場合に比べて、不確かさが軽減されることを確認している [57]。 180° 3 dB ハイブリッド結合器に代えて、 90° 3 dB ハイブリッド結合器あるいは電力分配器を用いても、VNA に直接接続して反射係数を測定する場合に比べて不確かさを軽減することができる [56], [58]。

6. む す び

アンテナの簡易効率測定法である Wheeler cap 法及び改良型 Wheeler 法の測定原理、効率評価式について概観するとともに、これらの方法に関するこれまでの研究を手短に紹介した。Wheeler cap 法については、今のところ、あらゆるアンテナに適用できる簡単な評価式は存在せず、アンテナの等価回路を考慮

した上で、適切な評価式を選択すべきである。改良型 Wheeler 法については、厳密な回路理論に基づいているという強みはあるが、両端に可動短絡が接続された導波管内にアンテナを設置し、3 通り以上の可動短絡の位置の組合せに対して反射係数を測定しなければならないという実用上の問題がある。このため、近似的ではあるが、一つの放射抑制シールドのみで近似的に改良型 Wheeler 法を実現する方法が利用されるようになっている。Wheeler 法を適用する際には、共振による放射効率の落ち込みを回避する必要がある。このためには、共振を避けて適切な周波数範囲を選ぶ、あるいは、共振が生じる場合を放射効率測定から除外すればよい。更に、不確かさ評価法について概観し、Wheeler 法による放射効率測定の不確かさが放射抑制シールドで覆ったときの反射係数測定に関する不確かさに支配されることを例示により明らかにした。不確かさを軽減するためには、アンテナ前段に減衰器を挿入するなどして反射係数の大きさを小さくする工夫を施すか、不確かさが小さい別の反射係数測定法を採用すべきであることを指摘した。

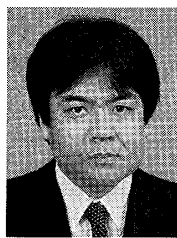
文 献

- [1] CTIA certification, "Test plan for mobile station over the air performance – method of measurement for radiated RF power and receiver performance," revision number 2.2.2, Dec. 2008.
- [2] 石井 望, アンテナ基本測定法, コロナ社, 2011.
- [3] 石井 望, 新井宏之, "アンテナ放射電力測定法に関する国内研究動向," 信学論 (B), vol.J95-B, no.5, pp.607–617, May 2012.
- [4] H.A. Wheeler, "The radiansphere around a small antenna," Proc. IRE, vol.47, no.8, pp.1325–1331, Aug. 1959.
- [5] E. Newman, P. Bohley, and C. Walter, "Two methods for the measurement of antenna efficiency," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-23, no.4, pp.457–461, April 1975.
- [6] R.H. Johnston and J.G. McRory, "An improved small antenna radiation-efficiency measurement method," IEEE Antennas Propag. Mag., vol.40, no.5, pp.40–48, Oct. 1998.
- [7] 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," 昭 62 信学総全大, S8-1, March 1987.
- [8] W.E. McKinzie III, "A modified Wheeler cap method for measuring antenna efficiency," Proc. 1997 IEEE AP-S Int. Symp., vol.1, pp.542–545, Montreal, Canada, July 1997.
- [9] C. Cho, I. Park, and H. Choo, "A modified Wheeler cap method for efficiency measurements of probed patch antennas with multiple resonances," IEEE

- Trans. Antennas Propag., vol.58, no.9, pp.3074–3078, Sept. 2010.
- [10] 桜井仁夫, 菊池秀彦, 新井宏之, 安藤 真, 後藤尚久, “アンテナのsmallモデルに対する Wheeler 法による効率測定の考察,” 昭 62 信学総全大, S8-3, March 1987.
 - [11] 石井 望, 金子貴幸, 宮川道夫, “新しい Wheeler 効率の評価式,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.7, pp.1370–1371, July 2005.
 - [12] I. Ida, J. Takada, and K. Ito, “Surface-patch modelling of a Wheeler cap for radiation efficiency simulation of a small loop antenna with NEC2,” Electron. Lett., vol.30, no.4, pp.278–280, Feb. 1994.
 - [13] 村本 充, 石井 望, 伊藤精彦, “Wheeler 法による放射効率測定に関する検討,” 信学論 (B-II), vol.J78-B-II, no.6, pp.454–460, June 1995.
 - [14] Y. Huang, R.M. Narayanan, and G.R. Kadambi, “On Wheeler’s method for efficiency measurement of small antennas,” Proc. 2001 IEEE AP-S Int. Symp., vol.3, pp.346–349, Boston, USA, July 2001.
 - [15] G. Smith, “An analysis of the wheeler method for measuring the radiating efficiency of antennas,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-25, no.4, pp.552–556, April 1977.
 - [16] 喬 栄予, 平沢一紘, 藤本京平, “Wheeler Cap 内のアンテナ素子上電流分布,” 信学論 (B), vol.J71-B, no.11, pp.1370–1372, Nov. 1988.
 - [17] T.M. Vu, A. Diallo, C. Luxey, and G. Kossiavas, “Optimization of the size and the shape of a Wheeler cap for mobile phone-antenna efficiency measurements,” Proc. EuCAP 2007, Edinburgh, UK, Nov. 2007.
 - [18] T. Teshirogi, T. Kawamura, A. Yamamoto, T. Sakuma, Y. Kimura, and Y. Nago, “Total radiated power measurement for antenna integrated radios using a spheroidal coupler,” Proc. ISAP 2009, pp.572–575, Bangkok, Thailand, Oct. 2009.
 - [19] H. Choo, R. Rogers, and H. Ling, “On the Wheeler cap measurement of the efficiency of microstrip antennas,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.53, no.7, pp.2328–2332, July 2005.
 - [20] C. Kakoyiannis and P. Constantinou, “Upper bounds on fixed-geometry Wheeler cap efficiency measurements - Part I: System model and rectangular cavities,” Proc. EuCAP 2011, pp.71–75, Rome, Italy, April 2011.
 - [21] C. Kakoyiannis and P. Constantinou, “Upper bounds on fixed-geometry Wheeler cap efficiency measurements - Part II: Spherical and cylindrical cavities,” Proc. EuCAP 2011, pp.76–80, Rome, Italy, April 2011.
 - [22] N. Ishii and K. Itoh, “A consideration of the thin planar antenna with wire-grid model,” IEICE Trans. Commun., vol.E76-B, no.12, pp.1518–1525, Dec. 1993.
 - [23] R.K. Mongia, A. Ittipiboon, and M. Cuhaci, “Measurement of radiation efficiency of dielectric resonator antennas,” IEEE Microw. Guid. Wave Lett., vol.4, no.3, pp.80–82, March 1994.
 - [24] R. Chair, K.M. Luk, and K.F. Lee, “Radiation efficiency analysis on small antenna by Wheeler cap method,” Microw. Opt. Tech. Lett., vol.33, no.2, pp.112–113, April 2002.
 - [25] A. Galehdar, D.V. Thiel, and S.G. O’Keefe, “Antenna efficiency calculations for electrically small, RFID antennas,” IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett., vol.6, pp.156–159, 2007.
 - [26] J.M. Martin, G.W. Swenson, and J.T. Bernhard, “Methodology for efficiency measurements of electrically small monopoles for animal tracking,” IEEE Antennas Propag. Mag., vol.51, no.2, pp.39–47, April 2009.
 - [27] T. Arima, T. Imamura, and T. Uno, “A new whole body SAR measurement technique by using Wheeler cap method,” Proc. ISAP 2011, no.FrF1-5, Jeju, Korea, Oct. 2011.
 - [28] M. Fakharzadeh, M.R. Nezhad-Ahmadi, B. Biglarbegan, and S. Safavi-Naeini, “Efficiency measurement of millimeter wave on-chip antennas,” Proc. 2011 IEEE AP-S Int. Symp., pp.3141–3143, Spokane, USA, July 2011.
 - [29] A. Galehdar, P.J. Callus, and K. Ghorbani, “A novel method of conductivity measurements for carbon-fiber monopole antenna,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.59, no.6, pp.2120–2126, June 2011.
 - [30] H.G. Schantz, “Measurement of UWB antenna efficiency,” Proc. IEEE VTC 2001 Spring, vol.2, pp.1189–1191, Rhodes, Greece, May 2001.
 - [31] Y. Huang, R.M. Narayanan, and G.R. Kadambi, “Electromagnetic coupling effects on the cavity measurement of antenna efficiency,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.51, no.11, pp.3064–3071, Nov. 2003.
 - [32] Y. Huang, Y. Lu, S. Boyes, and T.-H. Loh, “Source-stirred chamber/cap method for antenna radiation efficiency measurements,” Proc. EuCAP 2011, pp.164–168, Rome, Italy, April 2011.
 - [33] I. Ida, K. Ito, and Y. Okano, “Accurate measurement of small input resistances using a conventional network analyzer,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.47, no.2, pp.389–391, Feb. 1999.
 - [34] N. Clow and I.L. Morrow, “ESA measurements using the hybrid fibre-optic reflection measurement system,” Proc. LAPC 2009, pp.793–796, Loughborough, UK, Nov. 2009.
 - [35] G.A. Deschamps, “Determination of reflection coefficients and insertion loss of a wave-guide junction,” J. Appl. Phys., vol.24, no.8, pp.1046–1050, Aug. 1953.
 - [36] 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,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.11, pp.2287–2295, Nov. 2005.
 - [37] W.L. Schroeder and D. Gapski, “Direct measurement of small antenna radiation efficiency by calorimet-

- ric method,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.54, no.9, pp.2646–2656, Sept. 2006.
- [38] M. Geissler, O. Litschke, D. Heberling, P. Waldow, and I. Wolff, “An improved method for measuring the radiation efficiency of mobile devices,” Proc. 2003 IEEE AP-S Int. Symp., vol.4, pp.743–746, Columbus, USA, June 2003.
- [39] P. Miskovsky, J.M. Gonzalez-Arbesu, and J. Romeu, “Antenna radiation efficiency measurement in an ultrawide frequency range,” IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett., vol.8, pp.72–75, 2009.
- [40] 桑原和人, 榛葉雄大, 金子貴幸, 石井 望, 片桐康男, 宮川道夫, “一つの放射シールドを用いた改良型 Wheeler 法によるアンテナの放射効率測定,” 2005 信学総大, B-1-278, March 2005.
- [41] R.H. Johnston and J. Chu, “Small antenna efficiency measurements using overmoded cavities,” Proc. 2003 IEEE AP-S Int. Symp., vol.4, pp.723–726, Columbus, USA, June 2003.
- [42] S.V. Hum, J.Z. Chu, R.H. Johnston, and M. Okoniewski, “Efficiency of a resistively loaded microstrip patch antenna,” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol.2, pp.22–25, 2003.
- [43] C. Mendes and C. Peixeiro, “Radiation efficiency of several handset antennas obtained with a modified Wheeler cap method,” Proc. EuCAP 2007, Edinburgh, UK, Nov. 2007.
- [44] J. Zhang, S. Pivnenko, and O. Breinbjerg, “A modified Wheeler cap method for radiation efficiency measurement of balanced electrically small antennas,” Proc. EuCAP 2010, Barcelona, Spain, April 2010.
- [45] C. Mendes and C. Peixeiro, “Theoretical and experimental validation of a generalized Wheeler cap method,” Proc. EuCAP 2007, Edinburgh, UK, Nov. 2007.
- [46] A. Sutinjo, R.H. Johnston, and M. Okoniewski, “Improved efficiency measurement and analysis methods using an overmoded Wheeler cap,” Proc. 2010 IEEE AP-S Int. Symp., Toronto, Canada, July 2010.
- [47] Y. Katagiri, N. Ishii, and M. Miyakawa, “Reduction of small dips in efficiency estimated by reflection method,” Proc. ISAP 2007, pp.65–68, Niigata, Japan, Aug. 2007.
- [48] L. Belostotski, A. Sutinjo, R.H. Johnston, M. Okoniewski, M.A. Petursson, and T. Burgess, “Study of thermal noise generated in a Vivaldi antenna using the improved Wheeler cap method,” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol.10, pp.1047–1050, 2011.
- [49] N. Ishii, Y. Katagiri, and M. Miyakawa, “Analysis of the reflection method for measuring the radiation efficiency using the transmission line model,” IEICE Trans. Commun., vol.E90-B, no.9, pp.2394–2400, Sept. 2007.
- [50] D.M. Pozar, Microwave Engineering, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2005.
- [51] 藤本将也, 石井 望, “ループアンテナおよび逆 F アンテナに対する改良型 Wheeler 法における効率落ち込み条件についての実験的考察,” 信学技報, A-P2011-63, Aug. 2011.
- [52] I. Ida, J. Sato, T. Sekizawa, H. Yoshimura, and K. Ito, “Dependence of the efficiency-bandwidth product on electrical volume of small dielectric loaded antennas,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.50, no.6, pp.821–826, June 2002.
- [53] 広川和幸, 久我宣裕, “偏波面を考慮した小型アンテナ放射効率測定,” 2004 信学総大, B-1-52, March 2004.
- [54] 飯塚幸三 (監修), 計測における不確かさ表現ガイド, 日本規格協会, 1996.
- [55] 石井 望, 坪池裕司, “Wheeler 法及び改良型 Wheeler 法による放射効率測定における不確かさ評価,” 信学論 (B), vol.J94-B, no.9, pp.1094–1103, Sept. 2011.
- [56] 小林陽平, 石井 望, “二つの新しい反射係数推定法を用いた Wheeler 法による効率測定における不確かさの比較,” 信学技報, AP2011-88, Oct. 2011.
- [57] 小林陽平, 石井 望, “ハイブリッド結合器と可動短絡を用いた Wheeler 法による放射効率の測定及びその不確かさ評価,” 信学論 (B), vol.J95-B, no.3, pp.433–441, March 2012.
- [58] N. Ishii and Y. Kobayashi, “Radiation efficiency measurement based on Wheeler method using 90-degree 3dB hybrid coupler and sliding short,” 信学技報, A-P2011-139, Jan. 2012.

(平成 24 年 1 月 6 日受付, 2 月 27 日再受付)



石井 望 (正員：シニア会員)

平元北大・工・電子卒。平 3 同大大学院修士課程了。同年北大・工・助手, 平 10 新潟大・工・助教授, 平 19 同大・工・准教授。小形・薄型アンテナ, 損失媒質中アンテナ測定, 電磁環境設計等の研究に従事。平 6 本会学術奨励賞受賞。著書「アンテナ基本測定法」他。IEEE 会員。工博。