

# 解説論文

## アンテナ放射電力測定法に関する国内研究動向

石井 望<sup>†a)</sup> 新井 宏之<sup>††b)</sup>

Research Trend of Measurement Methods for Total Radiated Power from an Antenna in Japan

Nozomu ISHII<sup>†a)</sup> and Hiroyuki ARAI<sup>††b)</sup>

あらまし 無線機器の運用形態の多様化に伴い、運用状態における機器からの放射電力の測定、すなわち、機器からの全放射方向での測定が必要となっている。本解説論文では、平成 20 年 4 月から平成 24 年 3 月まで電子情報通信学会内に設置された次世代無線設備試験認証技術時限研究会において発表・討議された話題から、アンテナ一体型無線設備に関する放射電力測定法である全方位指向性測定法及びランダムフィールド法について解説する。特に全方位指向性測定法に関しては、研究会で発表された全球面走査法、部分球面走査法、球面走査アルゴリズム、60° 間隔 3 平面測定法について概観する。更に、簡易放射効率測定法であるウィラー法及び改良型ウィラー法について概観し、放射電力測定法としての可能性について指摘する。

キーワード OTA, TRP, 全方位指向性測定法, ランダムフィールド法

### 1. ま え が き

無線による通信シーンの更なる開拓に伴い、無線機器の運用形態も様々に変化している。携帯電話をはじめとする無線機器の小形化により、従来は無線機とアンテナを切り離して測定できていたものが、アンテナが筐体に組み込まれた形での機器が一般的になってきている。無線機器に対する技術基準適合証明等のための特性試験法は、通常の運用形態や動作状態において測定する必要がある [1]~[3]。現在の技術基準適合証明の試験法ではアンテナ端子での測定を原則としているが、アンテナ一体型の無線機器のように、その原則が適用できない場合は、通常の運用状態における測定を要することになる。例えば、小形機器の使用される状態はランダムな位置なので、OTA (Over The Air Performance Test) として、機器からの全放射方

向での測定が必要となっている。

このような無線設備の高度化・複雑化の傾向を踏まえ、関連分野の研究者・技術者の間での情報共有・連携を活発にし、無線設備の測定技術の向上を図るため、平成 20 年 4 月から平成 24 年 3 月まで電子情報通信学会内に次世代無線設備試験認証技術時限研究会を設置した [1]。研究会では、73 件の発表が行われた。発表分野の内訳は、(1) 全放射電力を主とした放射電力測定 (20.5%)、(2) 各種アンテナ特性の測定 (37.0%)、(3) SAR (Specific Absorption Rate, 比吸収率) 関連の測定法 (15.1%)、(4) 無線設備測定の全般・概要 (4.1%)、(5) 電磁界に関する測定 (5.5%)、(6) 無線設備の総合測定 (8.2%)、(7) 雑音測定 (1.4%) である。新しい無線方式を用いた無線通信機器の特性測定法の開発や改良に関する発表が少なかったのは残念であったが、アンテナ一体型無線設備の放射波測定については発表件数が多く、活発な議論が行われた。アンテナ一体型無線設備の放射波測定をはじめとするアンテナ測定に関する発表を大きく分類すると、球面走査による全放射電力測定 [4]~[9]、位相合成法を用いる放射電力測定 [10], [11]、フィールドシミュレータを用いた放射電力測定 [12], [13]、楕円鏡結合器を用いた放射電力測定 [14]~[16] となる。このほかにも、シート状導波路を用いた放射電力測定 [17]、合成開口法による指向

<sup>†</sup> 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-cho, Nishi-ku, Niigata-shi, 950-2181 Japan

<sup>††</sup> 横浜国立大学大学院, 横浜市

Graduate School of Engineering, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, 240-8501 Japan

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

b) E-mail: arai@ynu.ac.jp

性測定 [18]~[20], 一次元近傍界走査による指向性評価 [21],  $S$  パラメータ法を利用した小形無線端末の放射パターン測定 [22], [23] などの興味深い発表が行われた。

本論文では, アンテナ一体型無線設備に関する放射電力測定について焦点を絞り, その目的とこれまで用いられてきた手法とその問題点, 最近注目を集めている新たな測定法について解説する。具体的には, EUT (Equipment Under Test, 供試機) からの放射強度を全立体角にわたり測定し, 近似的に面積分することで放射電力を評価する全方位指向性測定法, 意図的に多重波環境を形成し, 受信電力の累積確率分布より放射電力を推定するランダムフィールド法, 簡易放射効率測定法であるウィラー法及び改良型ウィラー法の放射電力測定への適用可能性について述べる。全方位指向性測定法, ランダムフィールド法とも, 人体ファントムを近接させた場合の放射電力測定など, 実使用環境を模擬した測定が可能である。しかしながら, 全方位指向性測定法では, EUT をポジションに取り付けて回転させる必要があるため, EUT の重量制限, EUT 支持回転台による不要散乱の影響などが問題となる。ランダムフィールド法では, 同時に指向性を測定できないという欠点がある。全方位指向性測定法については, 全立体角にわたり面積分を行う全球面走査法を解説した後, 全球面走査法の欠点である, (a) 測定系の死角, (b) 等角度分割に起因する立体角の不等面積分割, (c) 二つの角度を機械的に走査することによる測定時間の増大を解決する方法を示す。(a) については, 敢えて反射板の上に EUT を置くことで, 放射パターンを反射板上方に向け, 測定系の死角に放射が向かないようにする部分球面走査法を解説する。(b) については, 等角度分割法以外の球面走査アルゴリズムによる面積分評価を説明する。(c) については, EUT の指向性を考慮し, 測定標本点の数を減らす 3 平面測定法, 一つの角度を電子的に走査する変調プローブアレー法を紹介する。

## 2. EIRP と TRP

### 2.1 EIRP

従来から無線機器の放射電力測定として利用されている等価等方輻射電力 (EIRP: Effective Isotropic Radiated Power) は, 無線機器とアンテナの接続部に給電される送信電力  $P_t$  に対して, アンテナの指向性が等方性であるとき, 送信源から距離  $r$  における放射

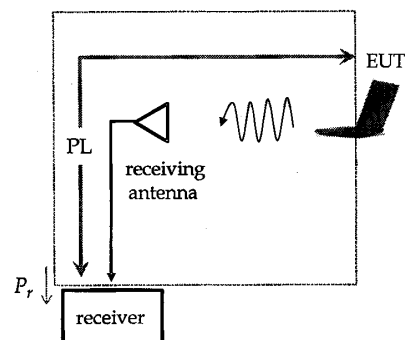


図 1 EIRP 測定系の例

Fig. 1 Measurement system of EIRP.

電力密度が  $P_t/4\pi r^2$  となることに基づき定義されている。所望方向におけるアンテナの利得  $G$  が求められているときには, 無線機器の送信出力端子で測定された電力  $P_t$  から所望方向での放射電力を EIRP ( $= P_t G$ ) で規定することができる。

EUT からの EIRP 測定は, 図 1 に示すように, 受信アンテナに接続された受信機の出力電力を測定することで行われる [4], [24]。まず, 図 1 において EUT の代わりに利得  $G_s$  の参照アンテナを設置し, 参照アンテナと受信機との間の経路損失 PL (Path Loss) を測定する。参照アンテナへの正味の入力電力を  $P'_s$  とし, 受信機における受信電力を  $P_{r1}$  とするとき, 経路損失 PL の dB 表示は

$$(PL)_{dB} = (P'_s)_{dBm} + (G_s)_{dB} - (P_{r1})_{dBm} \quad (1)$$

と与えられる。次に, 参照アンテナの位置に EUT を配置し, 受信機における受信電力  $P_{r2}$  を測定する。これより, EIRP の dBm 表示は

$$(EIRP)_{dBm} = (P_{r2})_{dBm} - (PL)_{dB} \quad (2)$$

と与えられる。

### 2.2 TRP

アンテナが無線機と一体化して, その機器が 1 波長以上の長さをもつ場合には機器筐体に流れる電流からの放射により, 放射指向性が方向によって大きく変化する。このような場合, EIRP を放射電力の最大値を探索することでも規定することもできるが, 全方位方向での測定が必要になる。このため, 無線機器の放射電力測定において, EIRP に代えて, 全方位方向での EIRP の平均, すなわち, 全放射電力 (TRP: Total Radiated Power)  $P_{TRP}$  を指標とすることが望ましい。また, 近年は携帯電話機のアンテナ評価値が利得

ではなく放射効率  $\eta$  とされる場合も多い．ここで，無線機器への入力電力を  $P_{in}$  とするとき， $P_{TRP}$  と  $\eta$  の間には

$$P_{TRP} = \eta P_{in} \quad (3)$$

という関係が成り立つ．このように，入力電力が既知であれば，無線機器からの TRP を測定することにより放射効率を評価することができる．

全放射電力  $P_{TRP}$  は，放射強度  $U(\theta, \phi)$  を全球面にわたる積分により評価される． $U(\theta, \phi) = \text{EIRP}(\theta, \phi)/4\pi$  の関係にあることに注意して， $P_{TRP}$  は

$$P_{TRP} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \text{EIRP}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta \quad (4)$$

と与えられる．ここで， $\text{EIRP}(\theta, \phi) = \text{EIRP}_\theta(\theta, \phi) + \text{EIRP}_\phi(\theta, \phi)$  であり， $\text{EIRP}_\theta(\theta, \phi)$  及び  $\text{EIRP}_\phi(\theta, \phi)$  はそれぞれ  $\theta$  及び  $\phi$  方向の電界成分を測定することで得られる EIRP である．式 (4) の面積分を評価するためには，全ての方位，すなわち，図 2 に示す球座標系  $(r, \theta, \phi)$  の  $\theta$  及び  $\phi$  に関して EIRP を測定し，その和を求めることになる．ゆえに，全放射電力  $P_{TRP}$  は， $\theta$  及び  $\phi$  方向の分割数をそれぞれ  $N_\theta$  及び  $N_\phi$  として，次のように表される．

$$P_{TRP} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{N_\phi} \sum_{i=2}^{N_\theta} \text{EIRP}(\theta_i, \phi_j) \sin \theta_i \Delta\theta \Delta\phi \quad (5)$$

ここで， $\theta_i = (i-1)\Delta\theta$ ， $\phi_j = (j-1)\Delta\phi$  及び  $\Delta\theta = \pi/N_\theta$ ， $\Delta\phi = 2\pi/N_\phi$  とする．式 (5) における  $i$  の範囲を 2 から  $N_\theta$  までとする理由は， $i=1$  及び  $i=N_\theta+1$  において  $\sin \theta_i = 0$  となり， $\theta=0$  及び  $\theta=\pi$  で EIRP の測定を行う必要がないことを考慮したためである．このため，角度標本数は  $N = (N_\theta-1)N_\phi$

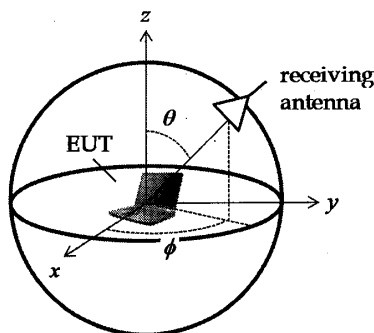


図 2 EUT と球座標系  $(r, \theta, \phi)$

Fig. 2 EUT and spherical coordinate system  $(r, \theta, \phi)$ .

で与えられる．

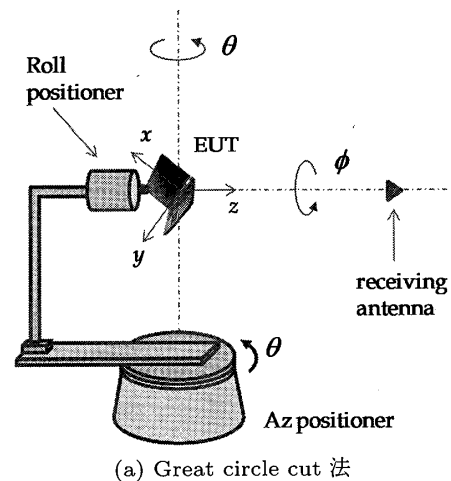
### 3. 全方位指向性測定法

#### 3.1 球面走査法

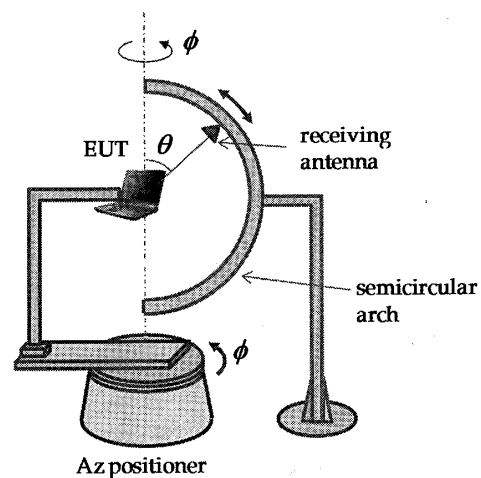
##### 3.1.1 全球面走査法

全方位測定法では，機器を中心として  $\theta$  及び  $\phi$  方向に受信アンテナを配置または走査して，直交する電界強度成分を測定する Great circle cut 法及び Conical cut 法がある．前者は，図 3(a) に示すように，EUT を 2 軸で回転させるため，機器の重量と支柱の電気的定数（特に比誘電率）が問題となる．後者は，図 3(b) に示すように，アーチ形の走査が必要で，機器をアーチの中心で固定するため，支柱の影響をどのように取り除くかが問題となる．

これらの手法は  $\theta$  及び  $\phi$  方向の測定を EUT の指向性の変化の度合よりも十分に小さく測定すること



(a) Great circle cut 法



(b) Conical cut 法

図 3 全球面走査法

Fig. 3 Whole spherical scanning systems.

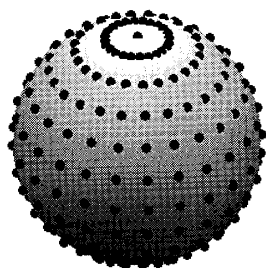


図 4 等角度分割法における標本点分布 ( $N_\theta = 12$ ,  $N_\phi = 24$ ,  $N = 264$ )

Fig.4 Sampling points on unit spherical surface for ordinary equi-angle method with  $N_\theta = 12$ ,  $N_\phi = 24$  and  $N = 264$ .

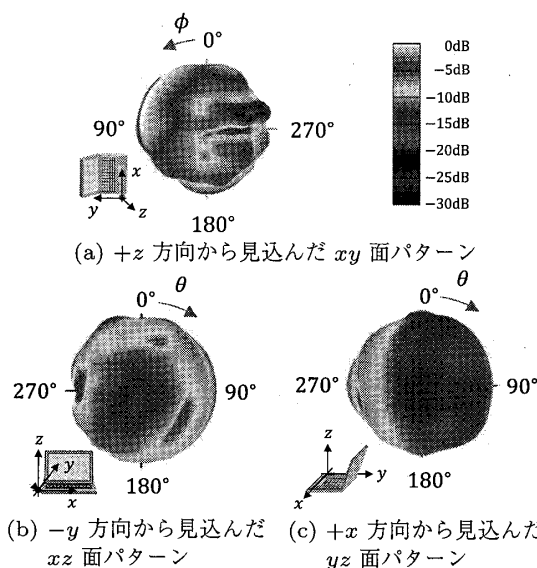


図 5 全球面走査システムでの模擬 EUT (TX) の EIRP の 3D パターン

Fig.5 3D pattern of pseudo-TX's EIRP for whole spherical scanning system.

が前提である。 $\theta$  及び  $\phi$  をどの程度に分割して測定するかは EUT の放射特性に依存するが、全方位指向性を示す携帯端末機器に対して、CTIA (Cellular Telecommunications and Internet Association) では分割間隔として  $15^\circ$  ( $N_\theta = 12$ ,  $N_\phi = 24$ ,  $N = 264$ ) を推奨している [25]。この分割間隔に対する球面上における角度標本点を図 4 にプロットする。

図 5 は、ノート PC のきょう体内に 2.412 GHz の発振器及びアンテナを内蔵した模擬 EUT (以下、ノート PC 型模擬 EUT) の EIRP に関する三次元パターンの測定例を示す [4], [24]。測定は Conical cut 法により実施されており、 $\phi$  回転テーブルを直接 EUT 支持台とした点が図 3 (b) と異なっている。この EUT 支持台下側の死角回避及び支持台による不要散乱の低減

表 1 等角度分割法における標本数  $N$  と角度間隔  $\Delta\theta = \Delta\phi$  の関係

Table 1 Number of sampling points,  $N$  versus angular interval,  $\Delta\theta = \Delta\phi$  for ordinary equi-angle method.

$N$	24	60	144	264	612	2520
$\Delta\theta = \Delta\phi[\text{deg}]$	45	30	20	15	10	5
$P_{\text{TRP}}[\text{dBm}]$	6.50	6.55	6.70	6.77	6.79	6.80

のため、支持台には比誘電率が発泡ポリスチロールとほぼ同等で強度に優れた誘電体材料を使用している。また、測定時の角度間隔は  $\Delta\theta_{\text{mes}} = 5^\circ$ ,  $\Delta\phi_{\text{mes}} = 1^\circ$  である。図 4 と図 5 との比較より、分割間隔が  $15^\circ$  以下であれば、TRP の評価には十分であることが推測される。実際、角度標本数に対する TRP の収束性を調べると、表 1 から分かるように、 $N = 264$  で誤差 0.1 dB 以内で測定できる。

全球面走査法による TRP 評価では、(a) 回転支持機構による不要散乱波の影響及び死角の存在、(b)  $\theta$  及び  $\phi$  を等角度に分割する際、全ての標本点で立体角  $\sin\theta_i \Delta\theta \Delta\phi$  が等しくならないことにより生じる誤差、(c)  $\theta$  及び  $\phi$  の二つの角度を機械的に走査することによる測定時間の増大が問題となる。(a) の解決法としては、駆動部を誘電率の小さい材料で構成する方法 [4], [24]、あるいは、EUT の放射方向を意図的に変更し、球面の一部を走査することで TRP が評価できるようにした部分球面走査法 [4], [24] がある。(b) の解決法としては、角度重み  $\sin\theta_i$  を含まないようにして球面積分を評価すればよい [6], [27], [28]。(c) の解決法としては、二つの角度の一方を電子的な走査に置き換える方法 [32], [33]、あるいは、EUT の放射パターンを考慮した上で走査カット面を限定し、測定時間の短縮を図る方法 [8], [9], [29], [30] が挙げられる。以降、これらの解決法のいくつかを紹介する。

### 3.1.2 部分球面走査法

全球面測定法では EUT からの放射電力と指向性パターンを同時に取得できる利点はあるが、EUT や受信アンテナを直交 2 軸で回転・走査させなければならないため、測定装置が複雑となり、死角が生じやすいという欠点がある。放射パターンの測定は行わず、放射効率のみの測定でよいのであれば、EUT 回転台に金属反射板を付けて EUT 放射波を上半球に集中させるとよい。この半球面に放射波測定により TRP を求めると、死角がなく、測定時間も短縮できる [26]。この方法では回転台の機械的強度を十分に取れるので、重

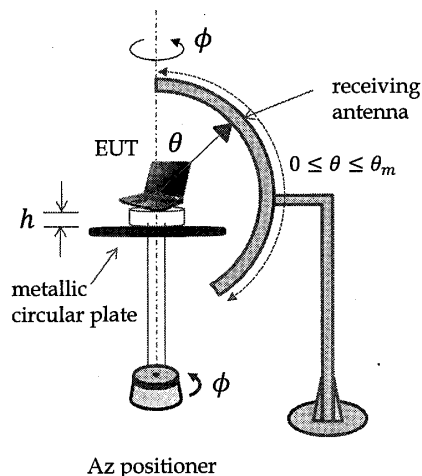


図 6 部分球面走査法  
Fig. 6 Partially spherical scanning system.

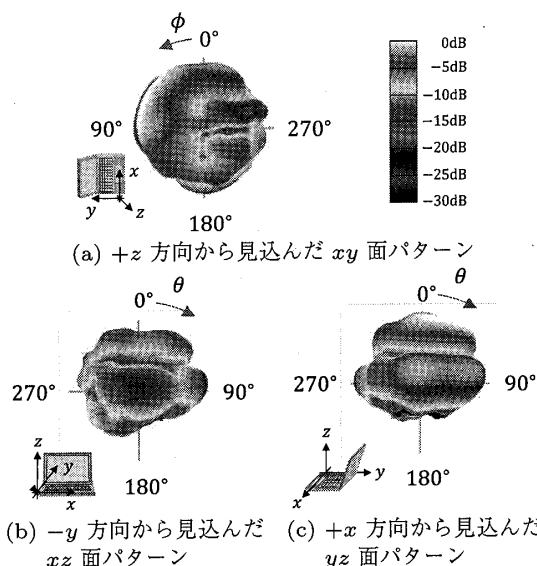


図 7 部分球面走査システムでの模擬 EUT (TX) の EIRP の 3D パターン  
Fig. 7 3D pattern of pseudo-TX's EIRP for partially spherical scanning system.

量物の測定等に有効である。更に、反射板下側にケーブルを隠せるので、電源ケーブル付き EUT の測定が可能となる。

この部分球面走査の放射パターン測定装置の概略を図 6 に示す。この装置は、EUT の回転台の上面に金属反射板を付けたもので、全球面放射パターン測定装置の  $\theta$  ポジショナはそのまま使用する。なお、 $\theta$  方向の走査範囲は  $0 \leq \theta \leq \theta_m$  とする。ここで、 $\theta_m$  は  $\theta$  方向における受信アンテナの可動限界を示す角度である。

2.412 GHz においてノート PC 型模擬 EUT の部分球面走査による三次元放射パターンの測定例を図 7 に示す。図 5 と比較すると、 $xz$  面及び  $yz$  面のパターン

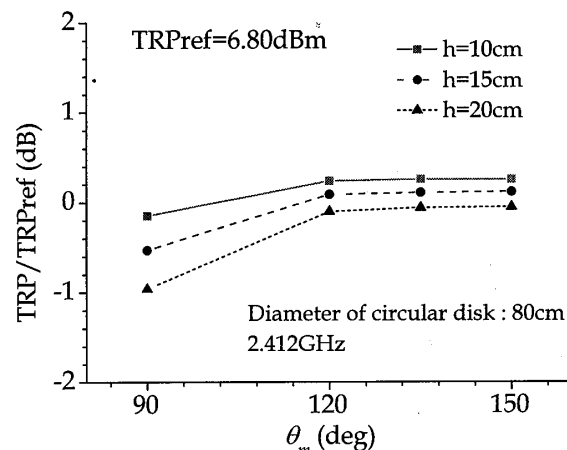


図 8 部分球面走査法における走査範囲と TRP 収束  
Fig. 8 Scanning range versus error of TRP for partially spherical scanning.

では、反射板により下方への放射が小さくなることが分かる。

更に、角度分割を  $5^\circ$  として、部分球面走査における  $\theta$  方向の可動限界を示す角度  $\theta_m$  と TRP の関係を図 8 に示す。ここで TRP の参照値  $\text{TRP}_{\text{ref}}$  として、表 1 に示す全球面走査法における  $\Delta\theta = \Delta\phi = 5^\circ$  での TRP の値を採用する。すなわち、 $\text{TRP}_{\text{ref}} = 6.80 \text{ dB}$  とする。図 8 の縦軸は TRP の  $\text{TRP}_{\text{ref}}$  に対する比  $\text{TRP}/\text{TRP}_{\text{ref}}$  の dB 表示である。また、反射板と模擬 EUT の間の距離  $h$  をパラメータとしている。図 8 から、 $\theta_m \geq 120^\circ$  とすれば、TRP は 0.3 dB 以内で収束することが分かる。

一般に、被測定アンテナを反射板に近づけると、反射板下方への回り込み放射が減少し、 $\theta_m$  を小さくできる。半波長ダイポールアンテナを反射板に対して配置したとき、アンテナの入力特性変化は反射板から高さが半波長以上あればほぼ影響がないという実験結果が得られている [24]。FDTD シミュレーションにより、直径 2.3 波長程度の円形反射板に対して高さ 0.3–0.6 波長の範囲に半波長ダイポールアンテナを設置するとき、 $\theta_m = 120^\circ$  で偏波によらず 10% 以内の誤差で放射効率が算出できることが分かっている [24]。更に、ノート型 PC 内蔵アンテナを模擬した FDTD シミュレーションにより、角度分割を  $15^\circ$  としても実用的な TRP 評価が可能であることが明らかにされている [24]。

### 3.2 球面走査アルゴリズム

#### 3.2.1 修正等角度分割法

従来の等角度分割法では、 $\theta$  に関する間隔が一定で

表 2 修正等角度分割法における標本数  $N$  と角度間隔  $\Delta\phi$  の関係 ( $N_\phi = 2N_z$ )

Table 2 Number of sampling points,  $N$  versus angular interval,  $\Delta\phi$  for modified equi-angle method with  $N_\phi = 2N_z$ .

$N$	26	62	146	266	614	2522
$\Delta\phi[\text{deg}]$	45	30	20	15	10	5
$P_{\text{TRP}}[\text{dBm}]$	6.78	6.63	6.70	6.74	6.78	6.80

あったが、式 (5) から分かるように、角度重み  $\sin\theta$  が含まれる。これは  $z = \cos\theta$  として  $\theta$  から  $z$  に変数変換することによってなくすることができる。

$$P_{\text{TRP}} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \text{EIRP}(\cos^{-1} z, \phi) dz d\phi \quad (6)$$

上記の積分は、球面を  $z$  に関して一様に分割する。すなわち、面素  $dzd\phi$  は  $z$  及び  $\phi$  のすべての変数に対して一定の値を示し、角度に関する重みはない。このとき、式 (6) は EIRP の和として離散化される。

$$P_{\text{TRP}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_\phi} \sum_{i=1}^{N_z+1} \text{EIRP}(\theta_i, \phi_j) \quad (7)$$

ここで、 $\theta_i = \cos^{-1}\{1 - (i-1)\Delta z\}$ 、 $\phi_j = (j-1)\Delta\phi$  であり、 $\Delta z = 2/N_z$ 、 $\Delta\phi = 2\pi/N_\phi$  とする。なお、 $N_z$  は  $z$  方向の分割数、 $N_\phi$  は  $\phi$  方向の分割数とする。また  $N$  は標本数であり、 $N = (N_z - 1)N_\phi + 2$  と与えられる。本論文では、この分割法を修正等角度分割法と呼ぶことにする。一例として、 $N_\phi = 2N_z$  とするときの標本数  $N$  と  $\Delta\phi$  の関係を表 2 に示す。与えられた  $\Delta\phi$  に対して、修正等角度分割法における標本数は従来の等角度分割法のそれにほぼ等しい。

また表 2 には、標本数  $N$  に対するノート PC 型疑似 EUT の修正等角度分割法により評価された TRP が示されている。周波数は 2.412 GHz である。EIRP の角度データは、角度間隔が  $\Delta\theta_{\text{mes}} = 5^\circ$ 、 $\Delta\phi_{\text{mes}} = 1^\circ$  となるように取得されており、修正等角度分割法で指定される標本点  $(\theta_i, \phi_j)$  に対応するデータがないため、本論文では、 $(\theta_i, \phi_j)$  に最も近い角度のデータで代用する。このとき、標本数に対する TRP の収束性を調べると、TRP は  $N = 266$  で誤差 0.1 dB 以内で測定されている。参考までに、標本数が  $N = 266$  であるときの球面上における角度標本点を図 9 にプロットする。

### 3.2.2 一般化らせん点法

角度重みが均一となる球面分割法として、球面を等

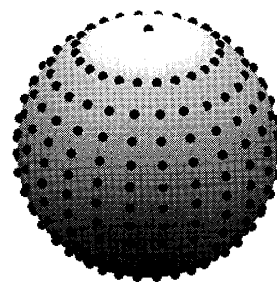


図 9 修正等角度分割法における標本点分布 ( $N_\phi = 2N_z$ ,  $N = 266$ )

Fig. 9 Sampling points on unit spherical surface for modified equi-angle method with  $N_\phi = 2N_z$  and  $N = 266$ .

面積領域に分割法が知られている。式 (4) の積分を全立体角  $\Omega$  にわたる面積分に書き換える。

$$P_{\text{TRP}} = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \text{EIRP}(\theta, \phi) d\Omega \quad (8)$$

この積分を離散化して

$$P_{\text{TRP}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \text{EIRP}(\theta_k, \phi_k) \quad (9)$$

となる。 $(\theta_k, \phi_k)$  は球面分割アルゴリズムで割り当てられた角度である。また標本数は  $N$  であり、 $k = 1, 2, \dots, N$  とする。球面を等面積に分割するアルゴリズムの一つとして、一般化らせん点法が知られている [6], [31]。このアルゴリズムでは、球面に沿ったらせんを一樣に分割して標本点を割り付ける。具体的には、 $(\theta_1, \phi_1) = (0, 0)$ 、 $(\theta_N, \phi_N) = (\pi, 0)$  とし、 $k = 2, 3, \dots, N-1$  に対して

$$\begin{aligned} h_k &= 1 - 2 \frac{k-1}{N-1}, \\ \theta_k &= \cos^{-1} h_k, \\ \phi_k &= \phi_{k-1} + \frac{3.6}{\sqrt{N}} \frac{1}{\sqrt{1-h_k^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

と割り当てる。 $N = 200$  の場合の球面上に配置される標本点を図 10 に示す。

図 11 はノート PC 型模擬 EUT の標本数に対する TRP の収束性を示している。周波数は 2.412 GHz である。修正等角度分割法の場合と同様に、一般化らせん点法で割り当てられた標本点  $(\theta_k, \phi_k)$  に対応する EIRP の角度データがないため、本論文では、 $(\theta_k, \phi_k)$  に最も近い角度のデータで代用する。図 11 から、一般化

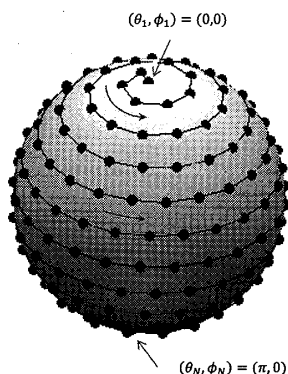


図 10 一般化ら旋点法における標本点分布 ( $N = 200$ )  
Fig. 10 Sampling points on unit spherical surface for generalized spiral method with  $N = 200$ .

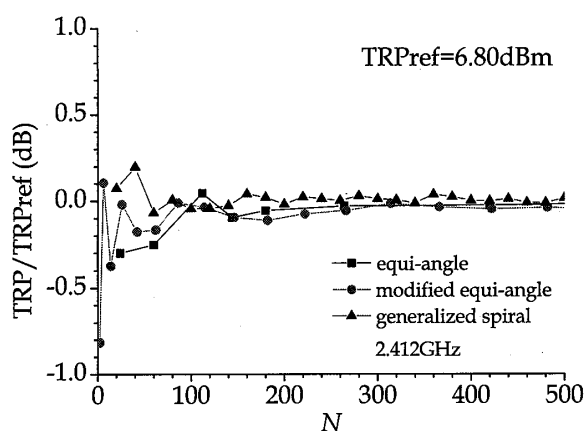


図 11 標本数と TRP 収束の関係  
Fig. 11 Number of sampling points versus error of TRP for ordinary/modified equi-angle and generalized spiral points methods.

ら旋点法で評価された TRP は  $N \geq 200$  において誤差が 0.1 dB となることが分かる [27]。ここで、図 11 の縦軸に含まれる  $\text{TRP}_{\text{ref}}$  は TRP の参照値であり、表 1 に示す全球面走査法における  $\Delta\theta = \Delta\phi = 5^\circ$  の TRP の値、すなわち、 $\text{TRP}_{\text{ref}} = 6.80 \text{ dB}$  としている。

### 3.3 測定時間の短縮手法

#### 3.3.1 $60^\circ$ 間隔 3 平面測定による簡易測定

携帯端末の長手方向に  $z$  軸を設定すると、 $\phi$  方向の指向性が  $\theta$  方向に比べて相対的にブロードになる傾向がある。この場合、TRP の評価において  $\phi$  方向の角度間隔  $\Delta\phi$  を粗く選ぶことができ、測定時間の短縮が図れる [8], [9], [30]。その一例として、 $60^\circ$  間隔 3 平面測定による簡易測定法が提案されている。筐体長が 1 波長以下の端末に対しては、式 (5) において  $\phi$  方向の分割数が  $N_\phi = 6$ 、つまり、角度間隔が  $\Delta\phi = 60^\circ$  として  $\theta$  方向を走査して TRP を評価することができ

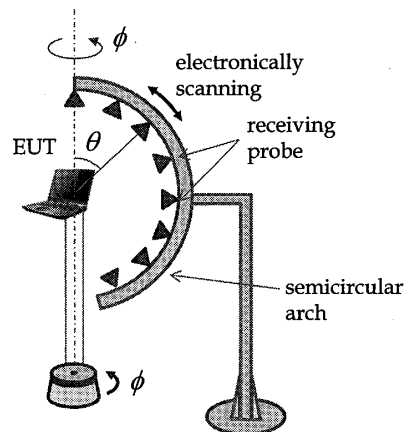


図 12 変調プローブアレー法  
Fig. 12 Modulated probe array system.

る [9]。すなわち、EIRP を測定する面を  $zx$  平面、この面を  $z$  軸の周りに  $\phi$  方向に  $60^\circ$  及び  $120^\circ$  回転させた 3 平面のみに限定できる。

#### 3.3.2 変調プローブアレー法

図 3 に示す全球面走査法では 2 軸を機械的に走査するために測定時間を要する。図 12 に示すように、このうち 1 軸を電子的走査に置き換えることにより測定時間を短縮することができる [32], [33]。図 12 では、 $\phi$  方向は機械的走査であるが、 $\theta$  方向は受信アンテナとショットキーダイオードから構成される受信プローブを一定の角度間隔にアレー配置し、各プローブにおいて RF 信号を LO 信号により IF 信号に変調し、電子的走査を実現している。

### 4. ランダムフィールド法

EUT からの放射電力を測定する際の問題点は、EUT の指向性によって受信点での放射強度が異なることである。EMC 測定で用いられるような床を金属面として最大値を検索する手法では、測定点でのハイトパターンを周波数ごとに計測する必要があり、測定に非常に多くの時間が必要となる。ランダムフィールド法は、この指向性の影響を受けないようにして放射電力を測定する方法である。

図 13 に示すように、直接波を含まないレーリフフェージング環境下にある市街地の決められた径路に沿って EUT から送信し、固定された位置に設置された受信アンテナで電波を受信し、受信電力に関する累積確率を求める。EUT の代わりに、放射電力が既知である基準アンテナから同じ径路に沿って送信し、受信

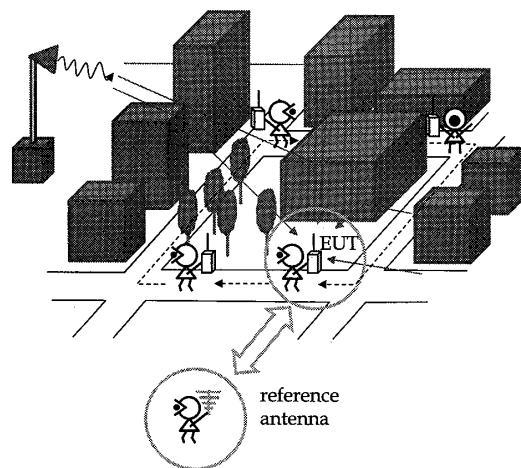


図 13 ランダムフィールド法  
Fig. 13 Random field method.

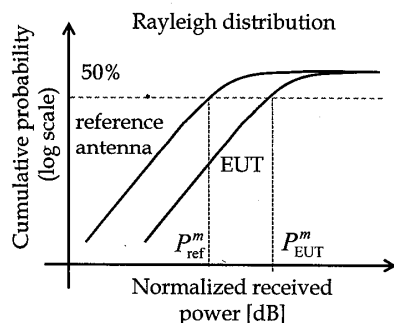


図 14 ランダムフィールド法における受信電力の累積確率  
Fig. 14 Cumulative probability of received power for random field method.

電力に関する累積確率を求める。測定では数百から数千のデータを取得し、図 14 に示すように、そのデータの中央値を受信レベルとして採用する。EUT 及び基準アンテナの受信電力の中央値を  $P_{\text{EUT}}^m$  及び  $P_{\text{ref}}^m$  とする。このとき、基準アンテナからの放射電力  $P_{\text{ref}}$  が既知であるならば、EUT からの放射電力  $P_{\text{EUT}}$  は

$$P_{\text{EUT}} = \frac{P_{\text{EUT}}^m}{P_{\text{ref}}^m} P_{\text{ref}} \quad (11)$$

と与えられる。実環境下でのランダム性は測定場所を適切に選定すれば優れたものが得られるが、室外での測定のため時間がかかり、天候の影響や無線機器の免許の問題等もあり、同等な測定を室内の装置で行う方法が種々検討されている。

ランダムフィールド法に基づく代表的な室内測定として、リバブレーションチャンバを利用する方法が知られている。リバブレーションチャンバでは、図 15 に示すように、シールドルーム内に EUT と受信アンテナを配置し、壁面のモード攪拌器で電磁界の偏波及

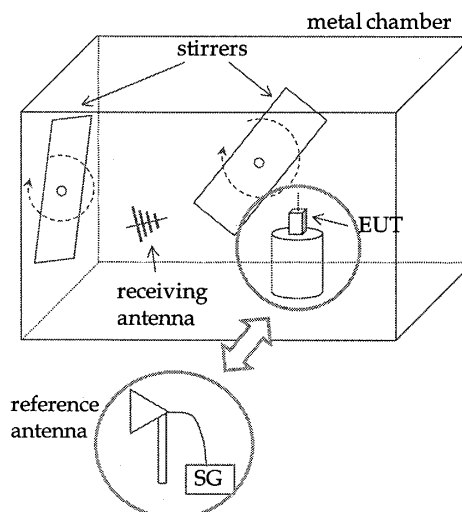


図 15 リバブレーションチャンバ  
Fig. 15 Reverberation chamber.

び振幅が空間で一様となるようにランダムに攪拌する [35], [36]。EUT 及び受信アンテナは対称位置に配置しないようにすること、EUT から受信アンテナに直接波が入射しないようにすることなど、直接波を含まないレーリーフェージング分布となるように工夫する必要がある。

散乱体を簾状にシールドルーム内に設置した上で EUT を回転させ、その指向性の影響を抑制することでランダム環境を実現できる [37]。更に、小形シールドボックス内で EUT を回転させて指向性の影響を取り除く方法 [38]、受信アンテナを複数配置して移相器を用いて電氣的に受信アンテナの指向性を走査し、ランダム性を得るフィールドシミュレータを利用する方法 [12], [13], [34] が知られている。移相器を用いるもの以外は機械的な回転機構を必要とし、数十秒から数分の測定時間を要するが、球面走査法に比べると短時間での測定が可能となる。

## 5. その他の放射電力測定法

回転楕円反射鏡によって受信アンテナへ EUT からの放射を集光させ、変位法と併用することで、放射電力を測定する方法が提案されている [14], [15]。また簡易的な放射電力評価法としては、小形シールドボックス内の EUT を入れ、EUT 近傍の電界、または磁界強度から近似的に放射電力を推定することも行われており、製品のばらつき検査等には有効である。更に、シート状導波路に携帯電話機を乗せて、シート状導波路に接続された出力ポートから送信電力を推定するこ



とも提案されている [17].

## 6. 関連する測定法

式 (3) から分かるように、放射効率を測定することができれば、EUT への入力電力が既知であるとき、EUT の TRP 評価が可能となる。すなわち、放射効率測定法は TRP 測定に利用できる可能性があり、今後の検討が望まれる。このため、小形アンテナの簡易放射効率測定法であるウィラー法及び改良型ウィラー法を手短に紹介しておく。現状ではウィラー法及び改良型ウィラー法を用いて EUT の TRP 評価を行うためには、EUT の設置方法などに解決すべき問題があることから、以降、測定対象を AUT (Antenna Under Test, 供試アンテナ) に限定した記述としている。

ウィラー法では、図 16(a) に示すように、AUT を地板上に設定し、図 16(b) に示すように、それを金属シールドで覆い、シールドの有無による入力インピーダンスの放射抵抗の差から被測定アンテナの放射効率が測定される [39]。シールドによる共振現象に注意をして測定を行えば、短時間で高精度な測定ができるのでよく用いられる手法である。このシールドによる共振の影響を除去するためには、図 16(c) に示すように、導波管内に AUT を設置し、短絡板を移動させて導波管内の定在波の位置を調整するとよい。

改良型ウィラー法では、AUT を、入力ポートがポート 1 に、自由空間がポート 2 に接続されている 2 ポート回路網とみなし、同じく図 16(c) に示す可変シールドの大きさを 3 通り以上変化させることで放射効率

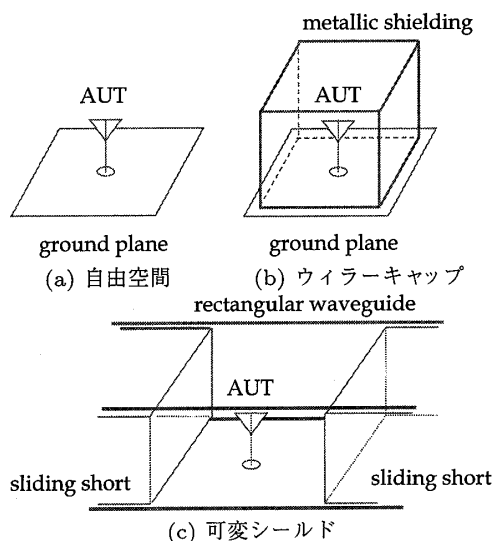


図 16 ウィラー法及び改良型ウィラー法  
Fig. 16 Wheeler and reflection methods.

を推定する [39]。更に、平衡給電型の AUT に対して、改良型ウィラー法と  $S$  パラメータ法を組み合わせる放射効率を評価する方法も検討されている [40]。

## 7. む す び

本論文では、アンテナ一体型無線機器の放射電力及び放射指向性の測定法として用いられる OTA 技術について解説した。TRP 測定法は、球面上の走査を行って指向性も同時に測定できるタイプと EUT の指向性の影響を閉空間内に人工的に作られたランダムなフィールド中で測定するタイプに大別されること、それらの具体例について示した。これらの測定法は発展途上のものであり、今後も新たな手法やより精度が高く、短時間で測定することが望まれており、これからの展開に期待したい。

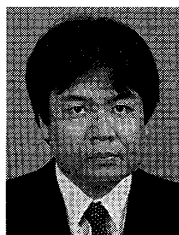
謝辞 本論文で使用した放射強度に関する測定値は、総務省受託研究「高速・高精度測定技術の研究開発」からの引用である。御配慮を賜った関係委員会の委員各位に深謝する。なお、本論文で多数引用させて頂いた次世代無線設備試験認証技術時限研究会は（財）テレコムエンジニアリングセンターの公益的調査研究助成（研究集会）を受けて行われたものである。

## 文 献

- [1] 笹岡秀一, “無線設備試験認証の技術課題と関連研究会活動報告,” 信学通誌, no.14, pp.76-78, 2010.
- [2] 小川晃一, “携帯端末アンテナシステムの評価・解析・高性能化技術,” 信学論 (B), vol.J93-B, no.9, pp.1100-1114, Sept. 2010.
- [3] 電子情報通信学会 (編), アンテナ工学ハンドブック (第2版), オーム社, 2008.
- [4] 渡辺忠博, 中島恭一, 重野誉敬, 新井宏之, “全球面及び部分球面走査による小型無線機の全放射電力測定,” 信学技報, ACT2008-13, Dec. 2008.
- [5] 石井 望, “等スペース点法を利用したアンテナ一体型無線端末による全放射電力の評価,” 信学技報, ACT2009-6, June 2009.
- [6] 吉田真由美, 新井宏之, “一般化螺旋スキャンによる TRP 測定,” 信学技報, ACT2009-18, Feb. 2010.
- [7] 石井 望, “アンテナ一体型無線端末に関する全放射電力測定法の比較,” 信学技報, ACT2010-4, July 2010.
- [8] 渡邊裕樹, 前山利幸, 天野良晃, 中野雅之, “携帯電話機を対象とする総合無線性能の簡易測定,” 信学技報, ACT2009-11, Nov. 2009.
- [9] 大越祐輔, 渡邊裕樹, 前山利幸, “60 度間隔の 3 平面総合無線性能測定の適用範囲についての検討,” 信学技報, ACT2010-12, Dec. 2010.
- [10] 斎藤博治, 渡辺忠博, 杉浦 行, 山中幸雄, “位相補償を用いる無線設備放射電力測定の検討,” 信学技報, ACT2009-5, June 2009.

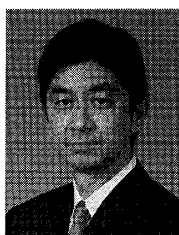
- [11] 斎藤博治, 渡辺忠博, 杉浦 行, 祝迫光廣, “位相補償を用いる無線設備放射電力測定の見直し II — EUT 台の材料と位相基準アンテナの影響,” 信学技報, ACT2009-8, June 2009.
- [12] 塚本光啓, 新井宏之, “フィールドシミュレータを用いた携帯機の放射電力測定,” 信学技報, ACT2008-11, Sept. 2008.
- [13] 新井宏之, 塚本光啓, “軽量ファントムとフィールドシミュレータによる小型端末機器の放射電力測定,” 信学技報, ACT2009-12, Nov. 2009.
- [14] 河村尚志, 山本 綾, 佐久間徹, 木村幸泰, 名古屋彦, 手代木扶, “楕円鏡結合器を用いた小形無線機器端末の全放射電力測定法 (その 2),” 信学技報, ACT2009-3, June 2009.
- [15] 河村尚志, 山本 綾, 佐久間徹, 木村幸泰, 名古屋彦, 手代木扶, “楕円鏡結合器を用いた小形無線機器端末の全放射電力測定法 (その 3) — 可変整合器による結合度の改善,” 信学技報, ACT2009-7, Nov. 2009.
- [16] 河村尚志, 山本 綾, 佐久間徹, 名古屋彦, 手代木扶, 斎藤博治, 張間勝茂, 杉山 功, “小形無線機器端末の各種 TRP 測定法の比較 — 3D 積分法, 反射法, 楕円鏡結合器法,” 信学技報, ACT2010-13, Dec. 2010.
- [17] K. Eom, A. Kato, and H. Arai, “Radiation Power Measurement of Mobile Phone Using Sheet-like Waveguide,” 信学技報, ACT2008-12, Dec. 2008.
- [18] 山口 良, 木村泰子, 小宮一公, 長 敬三, “測定距離が短い電波暗室における遠方界指向性測定,” 信学技報, ACT2008-17, Dec. 2008.
- [19] 山口 良, 小宮一公, 長 敬三, “合成開口波源を用いた遠方界測定法における対向アンテナの指向性の影響,” 信学技報, ACT2010-3, July 2010.
- [20] 小宮一公, 山口 良, “合成開口波源による定在波を考慮した利得測定法,” 信学技報, ACT2011-5, Sept. 2011.
- [21] 佐藤啓介, “偏波共用プローブを用いた一次元近傍界測定による指向性測定精度の検討,” 信学技報, ACT2011-6, Sept. 2011.
- [22] 深沢 徹, 宮下裕章, 小西善彦, “S パラメータ法を用いた小形無線端末上アンテナの放射パターン測定,” 信学技報, ACT2010-11, Dec. 2010.
- [23] 深沢 徹, 宮下裕章, 小西善彦, “S パラメータ法による小形無線端末上アンテナの動作利得測定,” 信学技報, ACT2011-4, Sept. 2011.
- [24] (財) テレコムエンジニアリングセンター, 平成 19 年度広帯域放射電力測定技術に関する研究開発報告書, March 2008.
- [25] CTIA Certification: Test plan for mobile station over the air performance — Method of measurement for radiated RF power and receiver performance, Rev. 2.2.2, Dec. 2008.
- [26] T. Yamada, N. Kuga, and H. Arai, “Radiation efficiency measurement with partial spherical scanning by using a reflector,” Proc. ISAP2007, 1B4-3, pp.69–72, Niigata, Japan, Aug. 2007.
- [27] N. Ishii, “Comparison of sampling methods for total radiated power estimation from radio equipment integrated with antennas,” IEICE Trans. Commun., vol.E94-B, no.5, pp.1174–1183, May 2011.
- [28] N. Ishii, “TRP estimation using random points allocated by Monte Carlo method,” Proc. Thailand-Japan Microwave 2011, pp.128–131, Ladkrabang, Thailand, Aug. 2011.
- [29] Y. Amano, H. Ishikawa, and T. Inoue, “Mean effective gain performances of small antenna for mobile phone in 3-D and three orthogonal planes,” Proc. ISAP 2008, pp.593–596, Taipei, Taiwan, Oct. 2008.
- [30] 渡邊裕樹, 前山利幸, “携帯電話機を対象とする全放射電力の簡易測定法,” 信学論 (B), vol.J93-B, no.9, pp.1292–1295, Sept. 2010.
- [31] E.A. Rakhmanov, E.B. Saff, and Y.M. Zhou, “Minimal distance energy on sphere,” Mathematical research Letters, vol.1, pp.647–662, 1994.
- [32] L.J. Foged and A. Scannavini, “Efficient testing of wireless devices from 800 MHz to 18 GHz,” Radio-engineering, vol.18, no.4, pp.460–466, Dec. 2009.
- [33] Q. Chen, K. Sawaya, T. Habu, and R. Hasumi, “Simultaneous electromagnetic measurement using a parallel modulated probe array,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.49, no.2, pp.263–269, May 2007.
- [34] H. Arai, Measurement of mobile antenna system, Artech House, 2001.
- [35] P.S. Kildal and R.K. Rosengren, “Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency and diversity gain of their antennas: Simulations and measurements in reverberation chamber,” IEEE Commun. Mag., vol.42, no.12, pp.102–112, Dec. 2004.
- [36] T. Sugiyama, T. Shinozuka, and K. Iwasaki, “Estimation of radiated power of radio transmitters using a reverberation chamber,” IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.8, pp.3158–3163, Aug. 2005.
- [37] 前田忠彦, 諸岡 翼, “屋内ランダムフィールド法による小形アンテナ放射効率測定法 — 測定精度の実験的検討とその改善法,” 信学論 (B), vol.J71-B, no.11, pp.1259–1265, Nov. 1988.
- [38] 新井宏之, 浦川智宏, 寺西 学, “小形シールドボックスを用いた端末機の放射電力測定,” 信学論 (B-II), vol.J81-B-II, no.7, pp.691–698, July 1998.
- [39] 石井 望, アンテナ基本測定法, コロナ社, 2011.
- [40] J. Zhang, S. Pivnenko, and O. Breinbjerg, “A modified Wheeler cap method for radiation efficiency measurement of balanced electrically small antennas,” Proc. EuCAP 2010, C27P1-5, Barcelona, Spain, April 2010.

(平成 23 年 9 月 6 日受付, 11 月 11 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」ほか。IEEE 会員。工博。



新井 宏之 (正員：フェロー)

昭 57 東工大・工・電気電子卒。昭 62 同大大学院博士課程了。工博。同年同大助手。現在、横浜国立大学大学院工学研究院教授。電磁波加熱用マイクロ波回路。移動体通信アンテナ及び電波伝搬。EMC などの研究に従事。平元篠原記念学術奨励賞。第 8 回。第 17 回。第 22 回電波功績賞各賞受賞。著書「電波工学（共著）」、「新アンテナ工学」ほか。IEEE シニア会員。