

3-3 無線通信部門におけるISO/IEC17025 校正法の開発

3-3 *Developments of ISO/IEC17025 Calibration Systems in Wireless Communications Department*

岩間美樹 藤井勝巳 増沢博司 小池国正 坂齊 誠 鈴木 晃
宮澤義幸 山中幸雄 篠塚 隆

IWAMA Miki, FUJII Katsumi, MASUZAWA Hiroshi, KOIKE Kunimasa,
SAKASAI Makoto, SUZUKI Akira, MIYAZAWA Yoshiyuki, YAMANAKA Yukio,
and SHINOZUKA Takashi

要旨

無線通信部門 EMC センターでは、校正機関の能力認定に関する国際的な規格である ISO/IEC17025 の取得を目指して 2004 年より作業を開始した。この規格では校正能力だけでなく、校正を取り巻く環境が適切な校正の遂行を保障することを要求している。関連文書の整備及び品質システムを構築した。翌 2005 年 4 月に独立行政法人製品評価技術基盤機構に認定申請を行い、文書審査、現地審査を経て 2006 年 3 月 1 日に JCSS 及び ASNITE - 校正の登録事業者となった。ここでは、ISO/IEC17025 認定の意義、取得の経緯、認定された校正システムの概要、今後の課題について紹介する。

Wireless Communications Department/EMC Center started its attempt for obtaining the ISO/IEC17025 accreditation in 2004. The standard demands both good ability of calibration and proper resource for correct calibration. After we constructed our quality system, we applied for the accreditation to the International Accreditation Japan in April 2005. The surveillance of papers and actual laboratory check was continuously performed during the year 2005. After a number of improvements and revisions of our system, we were granted the accreditation for the JCSS and the ASNITE-Calibration on 1 March 2006. In this paper, the objective and motivation for ISO/IEC17025, the development of the system and calibration systems accredited are described.

[キーワード]

校正, 高周波電力計, 高周波減衰器, 電圧電流発生器, ISO/IEC17025, JCSS, ASNITE Calibration, RF power meter, RF attenuator, Voltage & current generator, ISO/IEC17025, JCSS, ASNITE

1 背景と目的

情報通信研究機構内では以前より、電波法に基づく校正(注:電波法では「較」正としているが、本文では校正と表記する。)を行ってきた。国内法である電波法ではその校正結果は基本的に日本国内でのみ有効である。しかし、国内メーカー

が無線機器を海外へ販売する場合は、輸出先それぞれで必要な校正を受ける必要が生じてくる。場合によっては機器一つ一つを使用するすべての国で校正を受けなければならない。このような不合理を解決するために、国相互でお互いの無線設備の校正を受け入れる相互承認(MRA: Mutual Recognition Arrangement)を結んできた。しかし、

国別にこのような協定を行っていくことは非常に複雑になり、手間もかかる。そのため、校正を行う機関そのものを国際的な規定を基に認定し、認定された機関が行う校正を国際的に有効とするというのが ISO/IEC Guide22(現:ISO/IEC17050)から始まる一連の規則である [1] - [4]。認定校正機関が満たすべき条件は ISO/IEC17025 (以下 ISO17025) にまとめられている [3]。この規定は日本では計量法の下に組み入れられ JIS 化 (JIS Q17025) されている [5]。

日本での ISO17025 の認定については計量法に基づく jcass/JCSS と、計量法の範囲に属さない各認定機関の認定がある。計量法に基づく認定では、国家標準による校正を行う機関と、国家標準に連鎖した標準器による校正を行う機関の 2 種類ある。前者は jcass 認定を、後者は JCSS 認定を受けることができる。しかし、国内の連鎖可能な国家標準がない場合、例えば海外の国家標準に連鎖する標準器を用いた校正でも ISO17025 の認定は可能である。この場合は、各認定機関独自の認定を受けることができる。

当機構においても、既に、平成 15(2003)年 1 月に電磁波計測部門が、自身で保有している国家標準による周波数の校正について ISO17025 (jcass) 認定を取得している。

これに対し、無線通信部門で行っている校正 (高周波電力計、高周波減衰器、電圧電流発生器等) の標準器は国家標準ではないため、電磁波計測部門と同時の ISO17025 取得はできなかった。その後、無線通信部門で扱う校正品目について現状における国家標準の整備状況・連鎖体制も明確になったため、2004 年 4 月より ISO17025 (JCSS) 認定の取得を目指した活動を始めた。

また、計量法以外の認定機関は国内に複数あるが、対象とする分野はそれぞれ異なる。今回、我々が対象とする認定品目を扱うことのできる、独立行政法人製品評価技術基盤機構 (NITE) を認定機関として選択し、申請を行った。

2 認定取得の範囲

当機構の従来の校正範囲は表 1 のとおりである。

現状では日本の国家標準以外からのトレーサビ

表 1 従来 NICT で行っている校正項目

登録点検事業者用測定器の校正 (電波法第二十四条の二)	(1) 周波数計
	(2) スペクトル分析器
	(3) 電界強度測定器
	(4) 高周波電力計
	(5) 電圧電流計
	(6) 標準信号発生器
	(7) 周波数標準器*
委託校正 (電波法第百二条の十八 測定器等の校正に関する規則 第十条)	(1) 周波数標準器*
	(2) ダイポールアンテナ
	(3) バイコニカルアンテナ
	(4) 電界強度測定器
	(5) 標準磁界発生器
	(6) 校正用受信機
	(7) ホーンアンテナ
	(8) 標準電圧電流発生器
	(9) 高周波電力計
	(10) 高周波減衰器
(11) 比較取率測定装置	

* 他部門で校正、jcass 校正を実施中

リティ (標準器の校正連鎖) をとることは、費用や仲介器の上位校正中の拘束期間を考えると難しい。よって従来から国内の標準機関で仲介器の校正を行っており、計量法の範囲でトレーサビリティを確保できる品目として、高周波電力計、高周波減衰器及び電圧電流発生器を今回の ISO17025 認定取得品目として選んだ。また、校正点も、上位校正機関に校正を受けている点と合わせ、範囲の拡張は行わないこととした (表 2)。

しかし、今回の対象である標準電圧電流発生器の交流電流については、上位校正機関の提供可能な校正点が非常に少ないため、別途トレーサビリティの確保を検討した。当機構の標準器の製造元である FLUKE 社の米国本社が、A2LA (米国国家標準局 (NIST : National Institute of Standards and Technology) にトレーサブルな ISO17025 認証機関) の認定を受けており、米 FLUKE 社による校正が比較的短時間で実施できることから、この部分については FLUKE 社の上位校正機関である NIST からのトレーサビリティをとることとした。ただし、計量法内のトレーサビリティでないため、JCSS 認証は受けられないので、NITE 独自による ISO17025 の認証である ASNITE-校正の認定を取得することとした。

表2 ISO/IEC17025 認定対象校正範囲

区分		校正品目	校正範囲
旧区分: 申請時 (~H17.7)	新区分 (H17.7~)		
電気等	電気等 (直流・低 周波)	標準電流電 圧発生器	直流電流 1V, 10V, 100V (JCSS) 直流電圧 100mA, 1A, 10A (JCSS) 交流電圧 50Hz, 60Hz, 400Hzにおいて 100V (JCSS) 交流電流 50Hz, 60Hzにおいて 1A, 10A (JCSS) 交流電流 1kHz, 5kHz, 10kHzにおいて 200μA, 2.0mA, 20mA, 200mA (ASNITE-校正)
	電気等 (高周波)	高周波電力 計	小電力計 10MHz, 15MHz, 20MHz, 25MHz, 30MHz, 40MHz, 50MHz, 60MHz, 70MHz, 80MHz, 90MHz, 100MHz, 150MHz, 200MHz, 250MHz, 300MHz, 400MHz, 500MHz, 600MHz, 700MHz, 800MHz, 900MHz, 1.0GHz, 1.2GHz, 1.4GHz, 1.5GHz, 1.6GHz, 1.8GHz, 2.0GHz, 2.5GHz, 3.0GHz, 4.0GHz, 5.0GHz, 6.0GHz, 7.0GHz, 8.0GHz, 9.0GHz, 10GHz, 11GHz, 12GHz, 13GHz, 14GHz, 15GHz, 16GHz, 17GHz, 18GHz において 1mW (JCSS) 大電力計 10MHz, 15MHz, 20MHz, 30MHz, 40MHz, 50MHz, 60MHz, 70MHz, 80MHz, 100MHz, 120MHz, 140MHz, 150MHz, 160MHz, 180MHz, 200MHz, 250MHz, 300MHz, 400MHz, 450MHz, 500MHz, 600MHz, 700MHz, 800MHz, 900MHz, 1.0GHz, 1.2GHz, 1.3GHz, 1.4GHz, 1.5GHz, 1.6GHz, 1.7GHz, 1.8GHz, 1.9GHz, 2.0GHzにおいて 10W, 100MHz において、0.1W, 0.5W, 1W, 3W, 5W, 7W, 20W, 30W, 50W (JCSS)
高周波		高周波減衰器	10MHz, 30MHz, 100MHz, 500MHz, 1.0GHz, 5.0GHz, 10GHz において 10dB, 20dB, 30dB, 40dB, 50dB, 60dB, 70dB, 80dB, 90dB 18GHz において 10dB, 20dB, 30dB, 40dB, 50dB, 60dB (JCSS)

3 認定取得の経緯

3.1 申請準備

2004年春より、品質文書の作成を開始した。品質システムに関しては電磁波計測部門の文書を参考に進めた。校正技術の手順書に関しては現在、実際に行っている手順を基にしたが、ISO17025 要求基準に合わせて新たに作り直した部分も多い。2005年1月に初版が完成し、関連文書が整ったのに伴い、ISO17025のシステムが始動した。同月末にはシステムの経営主体となる無線設備の機器校正委員会の第1回を開催した。

また、2月には初回の内部監査を行った。ISO17025システム開始から内部監査の間で実際

の校正はなかったため、主に品質文書と現状との照らし合わせによる指摘を受けた。是正処置として、文書の修正や不足していた備品や表示の整備を行った。その結果を検証するため、再度3月にフォローアップ監査を行った。

以上の申請前の準備を行い、システムについての申請書を2005年4月にNITEに提出した。

3.2 認定審査

(1) 審査

審査は通常どおり、認定機関NITEが審査員チームを編成し、文書審査、現地審査を行うことで進められた。

今回の申請の範囲はJCSSが2区分(電気等・電

磁気)、ASNITE-校正で1区分(電気等)にわたっており、審査チームの構成に関し、5月に通知を受けた。

なお、審査の途中でISO17025をはじめ、関連の規格が改版された(ISO/IEC17025:2005)ため^[4]、区分や条件が変わった部分があるが、審査中は申請時点での規格が適用された。

(2) 文書審査

申請時に提出した文書を基に、ISO17025の規格に照らし合わせた審査が行われた。そのなかで疑義のある内容について、6月26日付けで質問書が提示された。質問の内容及びその対象方針案を決めて7月25日付けで回答した。さらに、9月12日付けで再質問を受けたため、10月11日に回答した。質問の内容は多岐にわたるが、特にこれまでの慣習的に行ってきた校正の作業を明文化するといった面で足りない点を主に聞かれた。

(3) 現地審査

現地審査では、提出されている文書と実際に行われている作業との違い、また実際の校正についての可否を調査される。当グループの監査は11月10日、11日の2日間にわたり実施された。1日目は文書とその実行状況が、2日目は実際の校正作業の審査が行われた。

この現地審査の指摘に基づき、是正報告書を12月27日に提出した。また、その報告書に対して不確かさにおける仲介器の経年変化の見積りについて再度、質問書を受けたため、再検討の上2月8日に回答書を提出した。

(4) 技能試験

技能試験は各認定機関により実施され、認証審査とは別途定期的に受けるものである。しかし、今回は日程の都合上、通常の技能試験を受けることができなかつたため、NITEによる個別試験を受けることとなった。申請区分が2種類であるため、試験も標準電圧電流発生器と高周波減衰器の2種類について1月下旬から2月上旬にかけて行われた。

3.3 審査結果

以上の経緯を経て、2006年3月1日付けで、JCSS(国際MRA付き)、ASNITE-校正で登録事業者となった。

なお、2005年7月に計量法の改正が行われ、

ISO17025認定関係が大幅に変更となり、JCSS認定事業者はJCSS登録事業者と呼称が変更になった。また、事業区分も変更になっており、無線通信部門から申請した範囲は「電気等(直流・低周波)」及び「電気等(高周波)」となっている。

3.4 ISO17025:2005への対応

ISO17025は2005年5月に改版された。改正内容は主に、1999年版の品質システムの部分において、1994年版のISO9000をベースにしていたが、これが2000年に改版されたことに伴い、新版のISO9000と整合させることを目的としている。改版に伴い、トップマネジメントのコミットメントの強化、顧客からのフィードバック、マネジメントシステムの有効性確認などの点で強化を求められている。

今回の審査は2005年版対応の移行時期に当たっており、現システムが対応していない部分は不適合ではなく観察事項として指摘された。このため、以上の3点については、2006年中に対処を決定して経過を認定機関に報告する必要がある。

3.5 認定取得に伴う変更点

今後は、従来から行っている電波法に基づく校正(下記の2種類)に加えて、ISO/IEC17025に基づく校正が追加される。それぞれ較正(校正)対象・範囲が違うので、依頼者に分かりやすく説明していく必要がある。

- (1) 電波法に基づく校正(表1のとおり)
 - ・登録点検事業者用
 - ・委託校正
- (2) ISO/IEC17025に基づく校正(表2のとおり)

校正方法は品目ごとに決まり校正の種別にはよらないが、結果として申請者に出される書類はそれぞれ、「較正完了通知書」、「較正成績書」及び「校正証明書」となる。

4 校正システムの概要

4.1 高周波電力計

4.1.1 はじめに

今回の認定取得の対象とした校正システムは以下の二つに分けられる。

小電力校正システム：校正周波数範囲
 10 MHz～18 GHz、校正電力範囲 1 mW
 大電力校正システム：校正周波数範囲
 10 MHz～2 GHz、校正電力範囲 0.1～50 W
 このうち、今回、JCSS 認定を得た範囲は、その一部であり、表 2 に示すとおりである。

4.1.1 小電力校正システム^[6]

小電力校正システムを図 1 に示す。信号源からの信号はパワースプリッターを介し、被校正電力計 (DUT) 若しくは伸介用電力計側と、指示計 (サーミスタマウント、ブリッジ回路及びデジタルボルトメータで構成) 側に分配される。サーミスタマウントで高周波電力を抵抗変化に変換し、その抵抗変化を高精度のブリッジ回路で検出し、その変化を補償するために必要な直流電流 (電圧) をデジタルボルトメータで測定するものである。サーミスタマウント内の温度は 60℃ 一定になるように制御され、外気の温度変化による抵抗値の変動は無視できるようになっている。

(1) 指示計の値付け

校正システムは、伸介用電力計 (独立行政法人産業技術総合研究所計量標準センター：NMIJ で校正) が所定の電力値を指示するように信号源を調整し、そのときのデジタルボルトメータの電圧と、所定の電力値における NMIJ から提供された校正値を用いて、指示計の値付けを行う。この作業は各周波数について少なくとも年 1 回行う。

(2) 被校正器の校正

被校正器 (DUT) の校正は、パワースプリッターの被測定端子に DUT を接続しその指示値が校正申請書に記載された所定の電力値 P_0 となるように信号源 SG を自動調整し、その時の指示計の読み (P_s) を記録する。次にパワースプリッターの被測

定端子に伸介用電力計を接続し、その指示値が上位校正機関の所定の校正電力 P_0 となるように信号源を調整しそのときの指示計の読み (P_{DUT}) を記録する。これらの値と伸介器の上位校正係数を利用して、以下の式から校正係数を求める。

$$\text{校正係数} = \frac{\text{伸介器測定値}(P_s)}{\text{DUT 測定値}(P_{DUT})} \times \text{伸介器の上位校正係数} \quad (1)$$

4.1.2 大電力校正システム

大電力の高周波電力の精密な測定は、厳密な方法としてカロリメータ法が知られているが、装置が大型でメンテナンスも煩雑なため一般的には実用的でない。このため、実用的な方法として方向性結合器を使用した校正システムを用いている。この校正法は、電力標準の国際比較にも利用されている方法で、校正された標準電力計で方向性結合器の結合係数を精密に計測できれば、よい精度が得られる。図 2 に校正システムの原理図を示す。

(1) 校正システムの値付け

以下の手順により、校正を行う周波数範囲内について、本校正システムの指示計指示値の値付けを行う。

(a) モニタ電力計の校正

小電力校正システムでモニタ電力計を校正する。

(b) 方向性結合器の進行方向の結合度 k_{cf} の導出

図 2(a) のように方向性結合器の一次側の出力端に、標準器 (伸介器：日本品質保証機構 (JQA) で校正) を接続する。さらに、RF 電力を調整し、標準電力計の指示値が所定の値 P_0 (例：10W、ただし JQA の校正値は P_0') になる

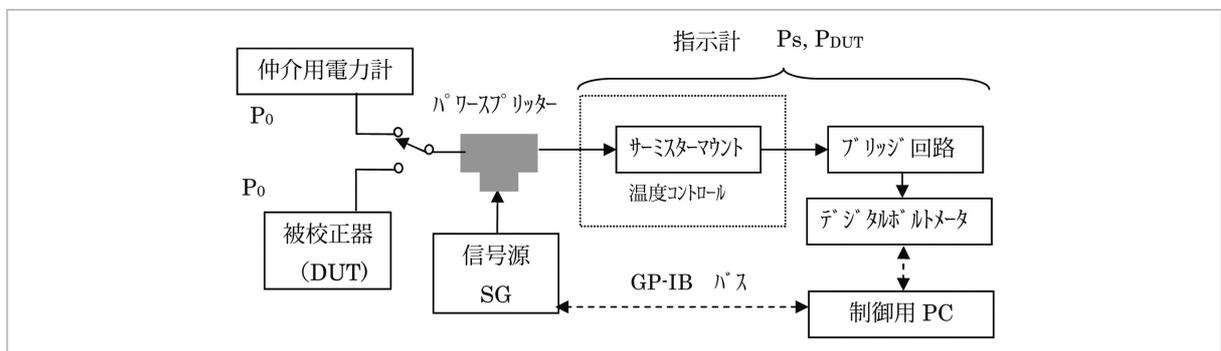


図 1 小電力校正システム

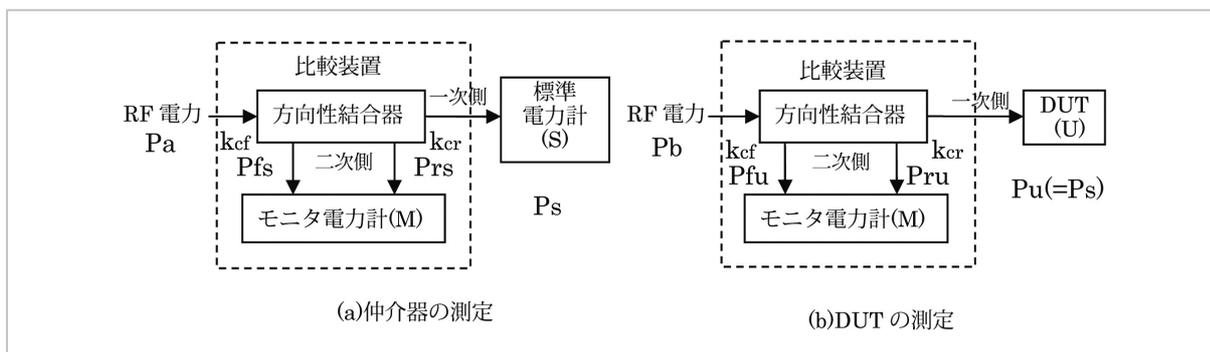


図2 大電力校正システム

ようにする。このときの、モニタ電力計の進行波電力 P_{fs} を読み取り、以下の式を用いて進行方向の結合度を求める。

$$k_{cf} = P_{fs} / P_0' \quad (2)$$

(c) 方向性結合器の反射方向の結合度 k_{cr} の導出

(b) の方向性結合器の入出力を逆にして、同様に RF 電力を加えて、標準電力計の指示値が所定の値 P_0 (例：10W、ただし JQA の校正値は P_0') にした時の反射波電力 P_{fr} を読み取り、以下の式を用いて反射方向の結合度を求める。

$$k_{cr} = P_{fr} / P_0' \quad (3)$$

(2) 標準電力計 (仲介器) への入射電力の測定

上記により求めた結合度 k_{cf} 、 k_{cr} を用いて、以下のように標準器 (仲介器) による測定を行う。

図 2 (a) のように方向性結合器の一次側の出力端に、標準器 (仲介器) を接続し、標準器 (仲介器) の指示値が所定の電力値 P_s になるように RF 電力を調整する。このときの進行電力 P_{fs} と反射電力 P_{rs} を測定し、

$$P_{s0} = k_{cf} \times P_{fs} - k_{cr} \times P_{rs} \quad (4)$$

によって、標準器 (仲介器) への入力電力 P_{s0} を求める。

(3) 被校正器 (DUT) への入射電力の測定

同様にして、DUT の校正を行う。

図 2 (b) のように方向性結合器の一次側の出力端に DUT を接続し、DUT の指示値が所定の電力値 $P_u (=P_s)$ になるように RF 電力を調整する。このときの進行電力 P_{fu} と反射電力 P_{ru} を測定し、

$$P_{u0} = k_{cf} \times P_{fu} - k_{cr} \times P_{ru} \quad (5)$$

によって、DUT への入力電力 P_{u0} を求める。

(4) 被校正器 (DUT) の校正

以上の方法で求めた P_{s0} と P_{u0} から、次式を用いて DUT の校正値 Δ_{DUT} を決定する。ただし、 Δ_{STD} は、標準器 (仲介器) の上位校正値 (上位校正機関で受けた校正値) である。

$$\Delta_{DUT} = \frac{P_{u0}}{P_{s0}} \times \Delta_{STD} \quad (6)$$

4.1.3 校正の不確かさ

(1) 小電力電力計

小電力電力計の校正の不確かさ要因としては、以下の項目が考えられる。値の算出法の概要を合わせて示す。

- (a) 仲介器の不確かさ：校正証明書値 (周波数帯により異なる) を用いる (正規分布)
- (b) 仲介器とスプリッタ間の不整合に起因する誤差：仲介器とスプリッタ間の反射係数を実測して算出
- (c) DUT とスプリッタ間の不整合に起因する誤差：仲介器と DUT とスプリッタ間の反射係数を実測して算出
- (d) 測定の際のばらつき：30 回の測定を繰り返し、ばらつきを実測
- (e) 仲介器の上位校正値の温度による変動： $23\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ の変動を実測
- (f) DUT の表示桁誤差：DUT の最小表示桁の $1/2$ を採用
- (g) 仲介器の経時変化：仲介器の上位校正機関による校正結果の変動を基に求めた。

上記の (c) に示すように、不確かさは DUT に

依存するが、ここでは一例として、最も代表的なパワーセンサ (Agilent 8481A) の場合の不確かさを図 3 に示す。その他の DUT については DUT の反射係数を測定し、その値を用いて不確かさを算出する。なお、JCSS の定義では、(c) の寄与を無視すると最高測定能力が得られる。

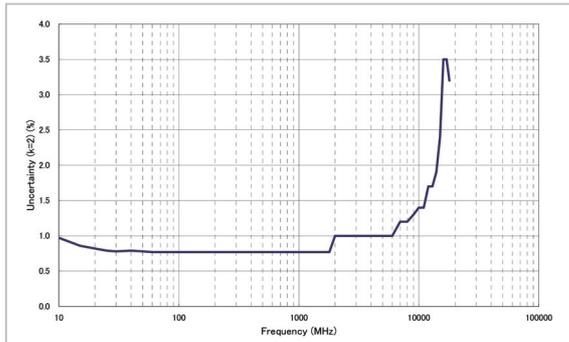


図3 小電力計の校正不確かさの一例 (Agilent 8481A)

(2) 大電力電力計

大電力電力計の校正の不確かさ要因としては、以下の項目が考えられる。値の算出法の概要を合わせて示す。

- (a) 伸介器の不確かさ：校正証明書の値(周波数帯により異なる)を用いる(正規分布)。
- (b) 伸介器と方向性結合器間の不整合に起因する誤差：伸介器と方向性結合器間の反射係数を実測して算出した(U分布)。
- (c) DUT と方向性結合器間の不整合に起因する誤差：DUT と方向性結合器間の反射係数を実測して算出した(U分布)。
- (d) モニタ電力計と方向性結合器間の不整合に起因する誤差：モニタ電力計と方向性結合器間の反射係数を実測して算出した(U分布)。
- (e) 方向性結合器の不完全性：方向性結合器の S パラメータを実測して算出した(U分布)。
- (f) 測定のばらつき：20 回の測定を繰り返しばらつきを実測
- (g) 伸介器の上位校正値の温度による変動：23℃ ± 2℃ の変動を実測した。
- (h) DUT の表示桁誤差：DUT の最小表示桁の 1/2 を採用
- (i) 伸介器の経時変化：伸介器の上位校正機関による校正結果の変動を基に求めた。

上記の (c) に示すように、不確かさは DUT に依存するが、ここでは一例として、代表的なパワーセンサ (Agilent 8482A) + 30 dB アッテネータの場合の不確かさは、最悪値で ± 4.2 % (包含係数 k=2) である。その他の DUT については DUT の反射係数を測定し、その値を用いて不確かさを算出する。

4.2 高周波減衰器

4.2.1 はじめに

今回、認定を受けた高周波減衰器校正システムの DUT 校正範囲は、減衰量 0 ~ 90 dB (10 MHz ~ 10 GHz)、0 ~ 60 dB (10 GHz, 18 GHz) である。以降に減衰量の定義、校正の手順、不確かさ評価について述べる。

4.2.2 減衰量の定義

図 4(a) に示すように、整合された ($\Gamma_g = \Gamma_l = 0$) 伝送線路を通して電源から負荷に供給している電力を P_1 とし、次に図 4(a) の a 面に 2 開口素子を挿入した場合、図 4(b) のように負荷に供給される電力を P_2 とする。このとき減衰量 A (dB) は次式のように定義される [7]。

$$A = 10 \log_{10}(P_1 / P_2) \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

4.2.3 校正方法

図 5 に、10 MHz から 18 GHz までの高周波減衰器の校正を行うときの構成図を示す。受信部は減衰器測定用に開発された周波数変換器

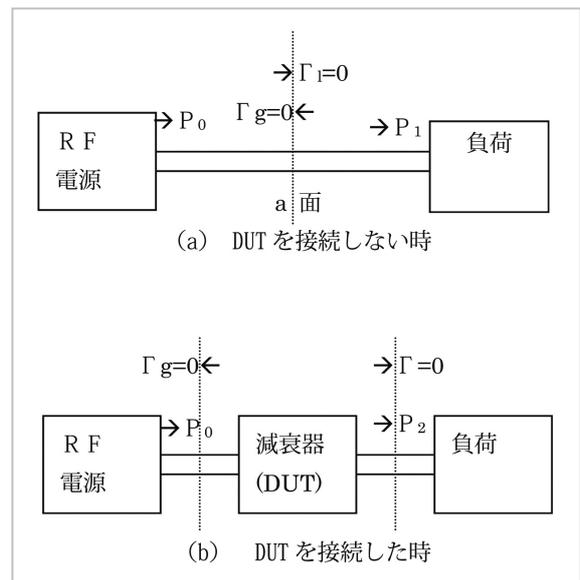


図4 減衰量の定義

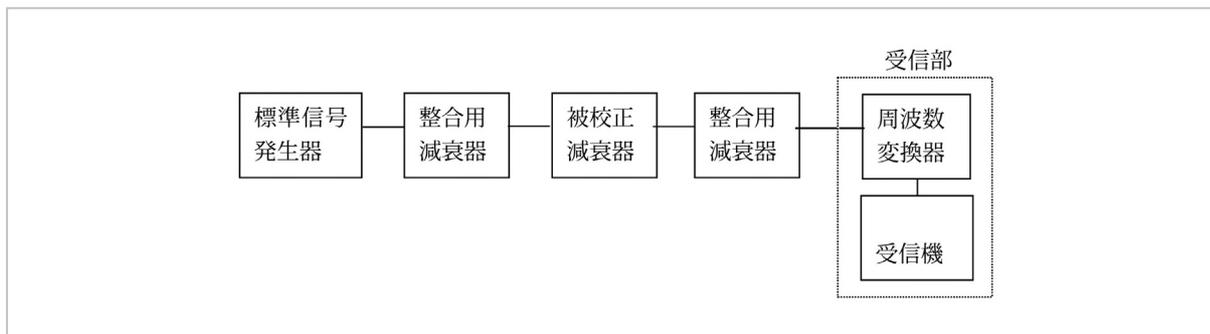


図5 10MHz から 18GHz までの高周波減衰器校正システムの構成図

(TEGAM 社 8852) と、30 MHz 中間周波数のレベルを測定する受信機 (TEGAM 社 VM-7) によって構成される。被校正減衰器は二つの整合用減衰器に挟まれて接続される。

被校正減衰器が固定減衰器のときは、被校正減衰器を挿入した時と、しない時のレベル差を校正值としている。

また、被校正減衰器がステップ減衰器のときはスルー状態 (減衰量の設定がゼロ) と減衰量を加わった時のレベル差を校正值としている。

4.2.4 高周波減衰器校正の不確かさ [7] [8]

(1) ステップ減衰器校正結果の不確かさ

高周波減衰器校正の不確かさ要因とその値を表 3 に示す。

表3 10 MHz-10 GHz 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 dB のステップ減衰器校正の不確かさ

不確かさの要因	寄与 (±dB)	分布形
(a) NMIJ における仲介用減衰器校正の不確かさ	0.01 (k=2)	正規
(b) デジタル分解能 (1/2 桁誤差)	0.005	一樣
(c) 減衰器校正における測定のばらつき ^(*)	0.006	正規
(d ₁) 仲介器減衰器における不整合 ^(*)	0.03	U
(d ₂) DUT 減衰器校正における不整合 ^(*)	実測	U
(e) 仲介器の上位校正環境 (温度) との違いによる変動	0	一樣
(f) 経時変化	0.02	一樣

(*)周波数に依存。最悪値。

表中の (b) の要因は測定器の最小表示桁の 1/2 を採用した。(c) は 20 回繰り返し測定の結果に基づく実測値を用いた。(d) は実測値と参照文献 [8] に基づいて算出した。(e) は、実測した結果、測定のはらつき及び 1/2 桁誤差に包含されている

と確認されたので、0 とした。(f) は、過去の上位校正結果により検討を行ったところ特に傾向を認めなかったので経年変化は 0 としたが、その変動分を考慮して限界値の最大を採用した。また、70, 80, 90 dB に関しては過去の校正值がないが、同じ値を採用した。実際の校正においては、(d₂) の値は DUT 減衰器により実測する。

ここで、校正の最高測定能力は、上記表の数値を用いて以下のように計算する。この時、DUT の不整合不確かさ (d₂) は仲介器の不整合 (d₁) と同じと仮定している。ここで、合成標準不確かさは

$$U_{\max} = \frac{\sqrt{(a/2)^2 + 2(b/\sqrt{3})^2 + 2c^2 + (d_1/\sqrt{2})^2 + (d_2/\sqrt{2})^2 + (e/\sqrt{3})^2 + (f/\sqrt{3})^2}}{\quad} \quad (8)$$

ここで、(d₁) と (d₂) は同じであり、(e) は 0 であるので

$$U_{\max} = \frac{\sqrt{(0.01/2)^2 + 2 \times (0.005/\sqrt{3})^2 + 2 \times 0.006^2 + 2 \times (0.03/\sqrt{2})^2 + 0 + (0.02/\sqrt{3})^2}}{\quad} \quad (9)$$

$$= 0.034$$

となり、最高測定能力は 0.068 dB (k=2) となる。

なお、実際の DUT の不確かさは、(d₂) の DUT の寄与分は実測値を用いて求める。

80, 90 dB の場合の不確かさについて表 4 に示す。また、18 GHz の場合の不確かさについて表 5 に示す。

この場合、最高測定能力は 0.26 dB (k=2) となる。

表4 10MHz-10GHz、80、90dB のステップ減衰器校正の不確かさ

不確かさの要因	寄与 (±dB)	分布形
(a) NMIJ における仲介用減衰器校正の不確かさ	0.02 (k=2)	正規
(b) デジタル分解能	0.005	一樣
(c) 減衰器校正における測定のばらつき (*)	0.014	正規
(d ₁) 仲介器減衰器における不整合(*)	0.126	U
(d ₂) DUT 減衰器校正における不整合(*)	実測	U
(e) 仲介器の上位校正値の環境 (温度) の違いによる変動	0	一樣
(f) 経時変化	0.02	一樣

(*)周波数に依存。最悪値。

表5 18GHz 10, 20, 30, 40, 50, 60dB のステップ減衰器校正の不確かさ

不確かさの要因	寄与 (±dB)	分布形
(a) NMIJ における仲介用減衰器校正の不確かさ	0.01 (k=2)	正規
(b) デジタル分解能	0.005	一樣
(c) 減衰器校正における測定のばらつき (*)	0.006	正規
(d ₁) 仲介用減衰器校正における不整合(*)	0.05	U
(d ₂) DUT 減衰器校正における不整合(*)	実測	U
(e) 仲介器の上位校正値の環境 (温度) の違いによる変動	0	一樣
(f) 経時変化	0.02	一樣

(*)周波数に依存。最悪値。

この場合、最高測定能力は 0.11 dB (k=2) となる。

(2) ステップ減衰器の不整合による不確かさの算出

ネットワークアナライザにより信号側反射係数 Γ_G 、受信機側反射係数 Γ_L 、ステップ減衰器のスルー時の S_{11} 、 S_{22} 、 S_{21} 、減衰値が加わったときの S_{11} 、 S_{22} 、 S_{21} を測定する。減衰量が 10-70 dB のときは (1) 式 (参考文献 [9] 16 式) によりステップ減衰器の不整合不確かさ M_s を算出する。

表6 固定減衰器校正の不確かさ (代表値)

周波数	減衰量 (dB)	不確かさ (k=2)
10MHz-10GHz	10,20,30,40,50,60,70dB	0.13dB
	80,90dB	0.33dB
18GHz	10,20,30,40,50,60dB	0.11dB

ただし、 $S_{12}=S_{21}$ とした。記号 b はスルー時、記号 e は減衰値が加わったときを表す。

$$M_s = 10 \log_{10} \left| \frac{(1 - \Gamma_G S_{11e})(1 - \Gamma_L S_{22e}) - \Gamma_G \Gamma_L S_{12e} S_{21e}}{(1 - \Gamma_G S_{11b})(1 - \Gamma_L S_{22b}) - \Gamma_G \Gamma_L S_{12b} S_{21b}} \right|^2 \quad (10)$$

減衰量が 80-90 dB のときは Γ_G が測定できないためカタログ値 (SWR=2) を使用し、(11) 式 (参考文献 [8] 2 式) によりステップ減衰器の不整合 M_s を算出する。

$$M_s = \frac{8.686}{\sqrt{2}} \sqrt{|\Gamma_G|^2 (|S_{11b}|^2 + |S_{11e}|^2) + |\Gamma_L|^2 (|S_{22b}|^2 + |S_{22e}|^2) + |\Gamma_G|^2 |\Gamma_L|^2 (|S_{21b}|^4 + |S_{21e}|^4)} \quad (11)$$

(3) 固定減衰器の場合

この場合、減衰器校正における測定のばらつきはステップ減衰器に比べて約 10 倍大きく、また、下記のように固定減衰器の不整合不確かさを算出する式は位相成分を考慮せず絶対値を用いているため、算出された不確かさは増大する。デジタル分解能は、標準減衰器、DUT 減衰器の両方に関するため度数を 2 とした。

固定減衰器の不整合不確かさ M_s の算出は以下のとおり行う。

ネットワークアナライザにより信号側反射係数 Γ_G 、受信機側反射係数 Γ_L 、固定減衰器の S_{11} 、 S_{22} 、 S_{21} を測定し、下式により固定減衰器の不整合不確かさ M_s を算出する。

ただし、減衰量が 80-90 dB のときは Γ_G が測定できないためカタログ値 (SWR=2) を使用した。

$$\begin{aligned} M_{S1} &= 20 \log_{10} (1 + |\Gamma_G| |\Gamma_L|) \\ M_{S2} &= 20 \log_{10} (1 + |\Gamma_G| |S_{11}|) \\ M_{S3} &= 20 \log_{10} (1 + |\Gamma_L| |S_{22}|) \\ M_{S4} &= 20 \log_{10} (1 + |\Gamma_G| |\Gamma_L| |S_{21}|^2) \\ M_s &= \sqrt{M_{S1}^2 + M_{S2}^2 + M_{S3}^2 + M_{S4}^2} \end{aligned} \quad (12)$$

以上の結果を用いて導出した各範囲における固定高周波減衰器校正の不確かさの値は以下のとおりである。

4.3 標準電圧電流発生装置^{[9] - [11]}

4.3.1 校正原理

本校正で参照標準器として用いる標準電圧電流発生器の発生値には、直流電圧・電流、交流電圧・電流がある。

直流電圧では、まず線形性に優れたハイブリッドレファレンスアンプの利得をゼロ調後にフルレンジポイントで校正し、直線近似で内挿法を適用してその線形利得を決定する。次に参照となる電圧をパルス幅変調し、整流・調整(分圧/増幅)することにより任意の直流電圧を発生させている。

直流±11 V レンジと±22 V レンジのレンジ利得定数は、10 V 標準直流電圧発生器とドリフト特性及びヒステリシス特性に優れた 11 V/22 V レンジ共用の内蔵型ハイブリッドレファレンスアンプの出力値を直接比較することで決定される。他のレンジの出力値は、仕様上長期間安定性が保証されたレンジ切り換え用のアンプ及びデバイダーを用いることで、工場出荷時に確認校正されたレンジ変換値を保持した状態で使用できるものとしている。ただし、国家トレーサビリティではリニアリティによる拡張が原則として認められていない上、特に本方式の拡張は現状では否定されている。

交流電圧は、内蔵型 AC/DC トランスファスタウンダードから直接供給される。出力は独立していて、工場出荷時に NIST とのトレーサビリティの下に校正された状態に置かれる。工場出荷後に出力値を調整することはできない仕様であるため、新たに別のトレーサビリティを持つことは決していない。

直流・交流電流については外部の標準抵抗器との比較から値付けされた抵抗の両端に現れる電圧を基準としてオームの法則に基づき出力される。

ただし、交流電流出力値のチェックは交直変換過程により一旦直流に変換してから行う。このときに不可避な変換誤差が生じることと、電圧を含め低周波とはいえ厳密には非線形であるため、測定法から交流電圧・電流を拡張したくとも内挿法の適用は困難であることを考慮する必要がある。

各々の出力値は、認定された校正機関で直接ポイント校正することで限定された値に対しトレーサビリティを確保している。

さらに、標準直流電圧発生器及び標準抵抗器により内部に保有する直流電圧レファレンス(ツェナーダイオードから成る 6.5 V 及び 13 V の電圧標準)及び抵抗レファレンス(1.0 Ω 及び 1.9 Ω の抵抗標準)は値付けされ、出力値のチェック時に基準として用いられる。

4.3.2 校正方法

標準電圧電流発生器の校正は、あらかじめ上位校正機関(日本電気計器検定所: JEMIC)で校正された校正点に対し、仲介器(常用参照標準・ASNITE 校正標準)からの出力と DUT からの出力をデジタルマルチメータ(DMM)又は DMM と電流シャントとの組合せを指示器として機能させることによって行う。以下に簡単な手順を述べる。

- (1) DUT の出力を校正依頼された値 G_{DUT} に設定し、DMM の指示値を読む。
- (2) DUT と仲介器とを入れ替える。
- (3) (1) で測定した DMM の指示値に等しくなるように仲介器の出力を調整する。調整後の仲介器の出力値 G_{STD} を上位校正值 G_S (公称値 G_{STD0}) で補正して校正值 G_C を得る。

$$G_C = G_{STD} \cdot G_S / G_{STD0} \quad (13)$$

ここで、電流の測定は、DMM 内部のシャントで電圧に変換された後、電圧値として測定され、さらに電流値に変換され表示される。また、直流 10 A の校正では、図 6 に示すように外部に電流シャントを接続し電圧値で測定する。

4.3.3 測定の不確かさ

測定の不確かさは、(a) 校正システムの不確かさ、(b) 仲介器の不確かさ、(c) 校正システムの安定度、(d) 測定のばらつき、(e) DMM の読み取り桁誤差、(f) DMM の分解能誤差及び (g) 熱起電力の影響から算出される。

- (a) 校正システムの不確かさは、メーカーより NIST にトレースされた不確かさとして提供されている。この不確かさには、標準電圧電流発生器の安定度、温度係数、線形性、電源変動率、全負荷から無負荷における負荷変動率のほか、更に外部標準(仲介器:

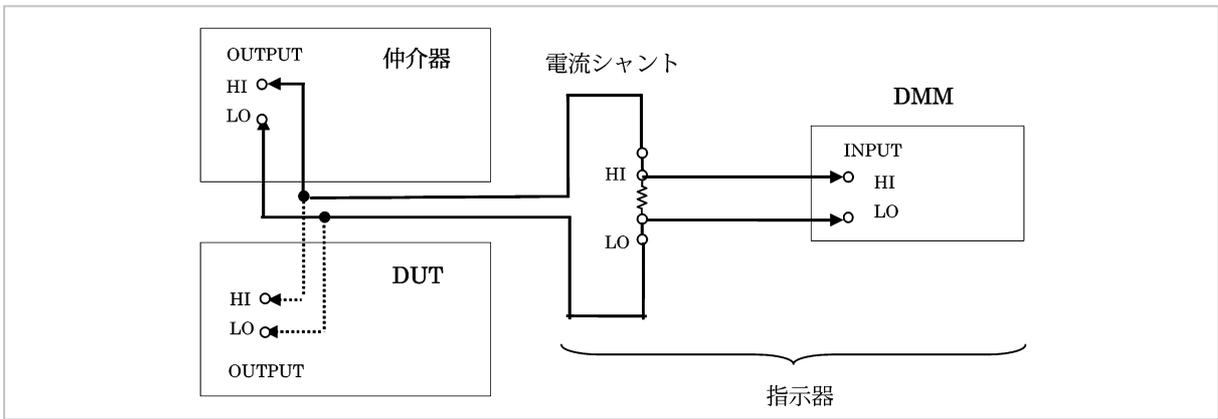


図6 発生器 校正方法の例(電流シャントは電流 10A のみに使用)

標準直流電圧発生器、標準抵抗器)の校正不確かさが含まれている。また、この不確かさは外部校正後一年間の絶対不確かさ仕様値(95%値)を利用する。

- (b) 仲介器の不確かさは、上位校正機関による校正証明書により校正ポイントごとに $k=2$ の不確かさが与えられている。
- (c) 校正システムの安定度は、15 分間以上連続して標準電圧電流発生器の発生値を DMM で実測した値から算出される標準偏差を用いる。
- (d) 測定のばらつきは、実際と同じ手順で 5 回測定した時の標準偏差を用いた (t -分布)。
- (e) DMM の読み取り桁誤差及び
- (f) DMM の分解能は、各々最小桁の $\pm 1/2$ 桁誤差の一様分布とする。
- (g) 熱起電力の影響は、テストリードの熱起電力仕様値 ($1.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 以下) と仲介器、DUT 間の温度差から一様分布で見積もる。ただし、仲介器、DUT 間の温度差は、温度差が最大になることが予測される電源投入後校正開始直前に出力端の根元で測定した標

準的な値として 1.4°C を用いている。これ以上の温度差が生じる DUT の校正では不確かさを算出し直す必要がある。また、テストリード接続後 6 秒間経過した時点での標準的の温度差は最大でも 0.3°C 未満、実際には接触面であるため時間の経過とともにほぼ無視できると見なせる。

したがって、校正の不確かさ $U_m (k=2)$ は、

$$U = \sqrt{(\text{校正システムの不確かさ}/2)^2 + (\text{仲介器の不確かさ}/2)^2 + (\text{校正システムの安定度})^2 + (\text{測定のばらつき})^2 + (\text{DMM}1/2 \text{有効桁読み取り誤差}/\sqrt{3})^2 \times 2 + (\text{DMM分解能}/\sqrt{3})^2 \times 2 + (\text{熱起電力の影響}/\sqrt{3})^2} \quad (14)$$

$$U_m = 2 \times U \quad (k=2) \quad (15)$$

として算出できる。不確かさの算出例を表 7 (JCSS)、表 8 (ASINITE) に示す。

表7 標準電圧電流発生器校正 (JCSS) の不確かさ (代表値)

直流						
項目	電圧			電流		
	1V	10V	100V	0.1A	1A	10A
不確かさ(k=2)	$\pm 9.7 \mu\text{V}$	$\pm 81 \mu\text{V}$	$\pm 960 \mu\text{V}$	$\pm 7.6 \mu\text{A}$	$\pm 110 \mu\text{A}$	$\pm 4100 \mu\text{A}$

交流						
項目	電圧		電流			
	100V		1A		10A	
	50Hz, 60Hz	400Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
不確かさ(k=2)	$\pm 10\text{mV}$	$\pm 9.8\text{mV}$	$\pm 0.70\text{mA}$	$\pm 0.70\text{mA}$	$\pm 5.2\text{mA}$	$\pm 5.1\text{mA}$

表8 標準電圧電流発生器校正 (ASNITE) の不確かさ (代表値)

交流電流						
項目	200 μ A			2mA		
	1kHz	5kHz	10kHz	1kHz	5kHz	10kHz
不確かさ(k=2)	± 54 nA	± 170 nA	± 410 nA	± 440 nA	± 1700 nA	± 4100 nA
項目	20mA			200mA		
	1kHz	5kHz	10kHz	1kHz	5kHz	10kHz
不確かさ(k=2)	± 4.2 μ A	± 17 μ A	± 41 μ A	± 42 μ A	± 170 μ A	± 410 μ A

5 今後の予定

今回の認定取得を通じて、従来、必ずしも明確に文書化されていない手順や、見落とししていた不確かさの項目やその取扱いが明確になるなど、多くの有益な情報を得ることができた。今後は、品質システムに基づき、品質の高い校正結果を提供するとともに、その品質を維持・改良していく必要がある。

また、今回は、標準電圧電流発生器・高周波電力計・高周波減衰器の3品目のみの認定取得であった。しかし、当グループでの校正品目はほかにもあり、特にニーズの高いアンテナについても今後 JCSS を取得する予定である。また、今回取得

した高周波電力計や高周波減衰器においても、更に高い周波数での校正が求められており、順次範囲の拡大を行っていく予定である。このためには国内でのトレーサビリティの確保が最も重要であり、主な計量標準の供給元である産業総合研究所と連携を取りながら進めていくこととしている。

謝辞

日ごろから、ご指導頂く、鈴木良昭 EMC センター長(無線通信部門長、EMC ユニット長)に感謝いたします。また、内部監査でお世話になった、電磁波計測部門 細川瑞彦グループリーダー、斉藤春雄主幹に感謝いたします。

参考文献

- 1 ISO/IEC17050 1, "Conformity assessment – Supplier's declaration of conformity – Part 1 General requirements", Oct.01, 2004.
- 2 ISO/IEC 17011, "Calibration and testing laboratory accreditation systems – General requirements for operation and recognition", Sep.01, 2004.
- 3 ISO/IEC17025 : 1999, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", Dec.15, 1999.
- 4 ISO/IEC17025 : 2005, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", 2005.
- 5 “JISQ17025 試験所および校正機関の能力に関する一般要求事項理解のために”, 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター, Jan. 2006.
- 6 “高周波・マイクロ波・レーザ計測”, 産業計測標準委員会編
- 7 JCSS 計量法事業者認定制度：不確かさの見積もりに関するガイド 30B 設定での同軸ステップ減衰器 (第3版)
- 8 Harris,I.A., Warner,F.L., "Rek-examination of mismatch uncertainty when measuring microwave power and attenuation", In : IEE Proc., Vol.128, Pt. H, No.1, Feb.1981.
- 9 CALIBRATION, Philosophy in Practice Second Edition, FLUKE, 1994.
- 10 5700A CALIBRATOR Service Manual, FLUKE PN791996, Feb.1990, Rev 8, 5/95 (5700A CALIBRATOR Service Manual) FLUKE PN791996, Feb. 1990, Rev 8, 5/95.
- 11 5700A CALIBRATOR Operator Manual, FLUKE PN791905, Sep. 1988, Rev 6, 7/92.



岩間美樹
無線通信部門 EMC 計測グループ主任
研究員
電磁環境計測



藤井勝巳
無線通信部門 EMC 計測グループ研究員
博士(工学)
電磁環境工学



増沢博司
財団法人電波技術協会
較正



小池国正
財団法人テレコムエンジニアリングセンター
較正



坂齊 誠
無線通信部門 EMC 計測グループ研究員
環境電磁工学



鈴木 晃
無線通信部門 EMC 計測グループ主任
研究員
較正



宮澤義幸
無線通信部門 EMC 計測グループ主査
EMC 測定



山中幸雄
無線通信部門 EMC 計測グループリーダー
EMC 測定



篠塚 隆
無線通信部門研究主管
環境電磁工学