

高周波インピーダンス標準に関する調査研究

堀部 雅弘*

(平成16年11月1日受理)

A survey of RF & microwave impedance standards

Masahiro Horibe

Abstract

The development of high-frequency impedance standards is very imperative for the industrial world, and is vital to the building of the quality system of Japan calibration service system for high-frequency metrology standards. Especially, coaxial impedance standards with PC-7, Type-N and PC-3.5 connectors are important, because they are commonly used in electrical measurement equipments. We, thus, use the feedback from market needs to develop the coaxial high-frequency impedance standards with PC-7, Type-N and PC-3.5 connectors in the wideband frequency range.

1. 序論

本報告では、高周波インピーダンス標準の産業界における重要性と技術的な問題点を抽出し、今後の産業技術総合研究所（産総研）における標準開発および供給について考察する。

携帯電話や無線LANなどの高周波機器が著しく普及し、通信関連機器以外にも家庭用調理器や医療機器に高周波技術が用いられていることから、身近な存在になっている。欧州では電磁適合性（EMC）に対する規制周波数帯の拡大、規制対象製品の拡大やEMC評価の義務付けなどの背景もあり、EMC試験所に対しての測定機器の校正やそのトレーサビリティが要求され始めていることから、海外計量研究機関（NMI）との計量標準の互換性も重要となっている。また、他の分野では原子時計や量子電圧標準の国家標準開発と維持に用いられており、高周波技術は広く計量標準に不可欠となっている。

天然資源の多くを海外に依存している我が国の経済活動の中心は高性能で高品質な工業製品あるいは部品類の輸出である。この分野で確固たる地位を維持し続けることが、我が国の経済力維持および発展には欠かせない。高精度な計測技術や標準の開発・供給および維持が高度な技術開発を可能にし、また、生み出された製品の品質を保証することとなる。つまり、計測技術および標準開

発が技術立国であるわが国にとって不可欠であり、今後の技術向上における計測標準の立場は変わらない。そんな中、経済活動の拡大とともに各国標準機関の保有する計量標準や標準物質を同等とみなし、各国標準機関が発行する校正証明書を相互承認する協定が結ばれ（グローバルMRA）、高周波でもMRAの技術基盤としての計量標準の重要性が一層増してきた。

高周波技術分野に関する標準はおもに電力、減衰量、雑音そしてインピーダンスである。インピーダンス以外の量に関しては概念的に理解しやすい。たとえば、通信分野で言えば電力は信号の強度であり、減衰量は信号強度の目盛りと関係が深い。また、雑音は信号に対しての妨害を与える。インピーダンスとは電流と電圧の比であって信号線路の特性を表す量であり、高周波回路において伝送線路上で信号をどの程度伝えることができるかに深い関係を有する。伝送線路の特性が接続点などでは一様でないため、伝送した信号は反射されることになる。実際に、高周波信号の授受をするコネクタの内部では無数の反射信号が存在し、入射信号と合成されて授受される。反射がない場合をインピーダンスが整合しているといい、反射がある場合を不整合という。この整合の程度を表すものとして、入射波と反射波の比で表される反射係数がある。つまり、伝送線路のインピーダンスは、その整合・不整合の程度により信号の授受の程度を知るための重要な量である。

* 計測標準研究部門 電磁波計測科

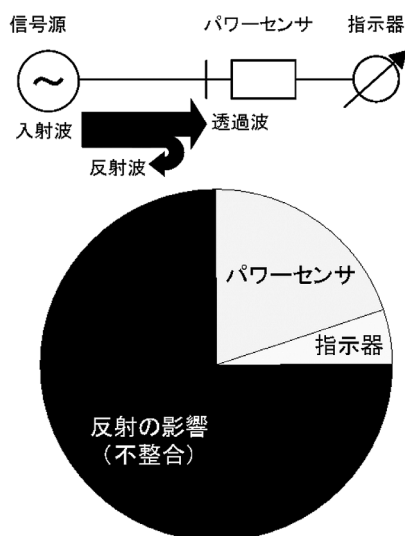


図1 高周波電力測定における不確かさ要因

たとえば、高周波電力の測定においても、信号発生器とセンサの間で信号の授受を行う際に、インピーダンス整合の評価なしには高精度な測定はできない。実際に、図1に示すように電力測定における不確かさは反射の影響によるものがほとんどである¹⁾。高周波減衰量や雑音の測定も高周波信号の授受を基本としていることから、反射の評価が必須である。

第2章では、インピーダンスおよび反射係数の定義とインピーダンス標準器のトレーサビリティに関して説明する。第3章では、代表的な高周波インピーダンス測定方法について特徴を述べるとともに、それらの活用法を示す。第4章では、高周波インピーダンス標準への産業界からの要望と海外NMIの標準整備状況をもとに、産総研における高周波インピーダンス標準の開発および供給に関して方向性を示す。第5章では、産総研における高周波インピーダンス標準開発の現状を述べ、第6章で総括を述べる。

2. インピーダンス

2.1 伝送線路の種類

高周波伝送線路は図2に示すように、同軸線路、導波管およびマイクロストリップラインと様々である。また、図3に示すように、同軸線路や導波管はその機械寸法により内部の電磁界分布が決まるため周波数帯域が異なる。また、基本的にこれらの伝送線路は機械構造が異なるので、インピーダンス標準は同軸線路のコネクタ種類や導波管の種類ごとに整備する必要がある。

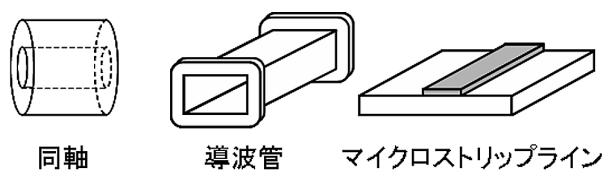


図2 伝送線路の種類

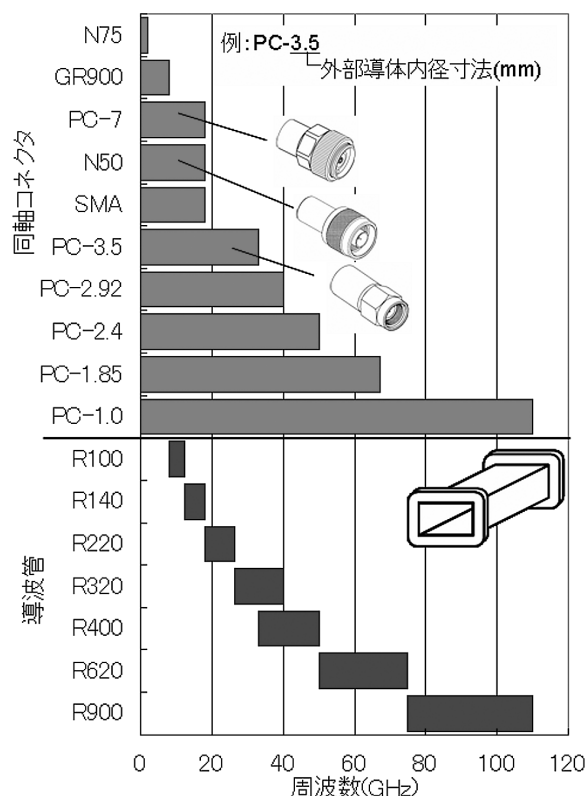


図3 同軸コネクタおよび導波管の帯域

2.2 反射係数

インピーダンスは電圧と電流の比で定義される量であるが、周波数が高くなると信号源で発生した電圧および電流の変化が回路に伝わるのに時間差(位相差)を生じる。そのため電圧および電流は分布を生じ、その値が一義的には決まらない。このため、高周波ではエネルギーの流れ、つまり波として信号を扱うことが適切である。そのため、以下に示すように、インピーダンスとしてよりもむしろ入射波の大きさと反射波の大きさの比である反射係数として式(1)で表される。

$$\text{反射係数 } \Gamma = \frac{\text{反射波の大きさ}}{\text{入射波の大きさ}} \quad (1)$$

インピーダンスと反射係数には次の関係がある²⁾。

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

ここで Z_L は測定物 (DUT) のインピーダンスであり、 Z_0 が測定系あるいは伝送線路の特性インピーダンスである。また、信号には位相が存在するため、反射係数やインピーダンスもベクトル量として $Z_0 = a + jb$ あるいは $|\Gamma| \angle \theta$ の形式で表記されることとなる。

2.3 インピーダンス標準と標準エアライン

エアラインは内部導体と外部導体が空気で絶縁されている構造となっている (図4)。エアラインにおける損失や周波数特性 (表皮効果) を考慮したエアラインのインピーダンスは以下の式で与えられる³⁾。

$$|Z_0| = \left(\frac{L^2}{C^2} + \frac{R^2}{\omega^2 C^2} \right)^{1/4} \quad (\Omega) \quad (3)$$

$$R = \sqrt{\frac{\rho \mu f}{\pi}} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (\Omega/m) \quad (4)$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right) + 2 \sqrt{\frac{\rho \mu}{16\pi^3 f}} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (H/m) \quad (5)$$

$$C = \frac{2\pi \varepsilon}{\ln \left(\frac{b}{a} \right)} \quad (F/m) \quad (6)$$

- Z_0 : エアラインの特性インピーダンス(Ω)
- L : 単位長さあたりのインダクタンス(H/m)
- C : 単位長さあたりのキャパシタンス(F/m)
- R : 単位長さあたりの抵抗(Ω/m)
- a : 内部導体外径(m), b : 外部導体内径(m)
- μ : 透磁率(H/m), ε : 空気の誘電率(F/m)
- ρ : 抵抗率(Ωm), f : 周波数(Hz), $\omega = 2\pi f$ (rad/s)

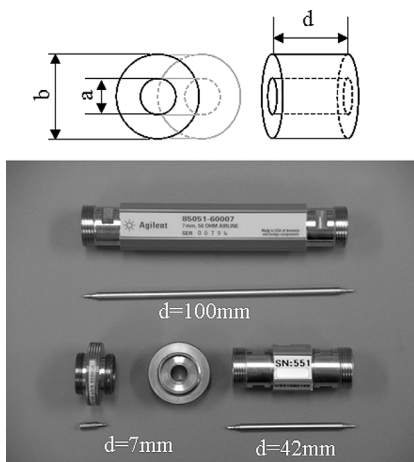


図4 同軸エアライン (a: 内部導体外径、b: 外部導体内径、d: 長さ) 写真はPC-7同軸エアライン

ここで、式(3)~(6)の条件は信号伝送モードがTEMときであるため、エアラインの上限周波数は以下の通りである。

$$f_c \cong \frac{2c}{\pi(a+b)} \quad (7)$$

式(3)~(6)からも分かるように、エアラインの特性インピーダンスは内部導体と外部導体の直径比で決まるため、“長さ (SI単位)” へトレーサビリティをとればよい。つまり、他の高周波標準とは異なり、機械測定が重要な要素技術となる。これによりエアラインの特性インピーダンス Z_0 が算出される。

3. 測定方法

インピーダンスの測定方法にはリフレクトメータ法、 $\lambda/4$ 法、共振法⁴⁾、I-V法⁵⁾、RF-I-V法⁶⁾、定在波法^{4),5),7)} およびブリッジ法^{8),9)} などがある。以下に、リフレクトメータ法および $\lambda/4$ 法の特徴を述べる。

3.1 リフレクトメータ⁵⁾

3.1.1 原理

基本構成は図5に示のように、2つの方向性結合器と信号源および2つの検出器からなる。検出器によりDUTへの入射波の大きさ E_i および反射波の大きさ E_r がそれぞれ独立に測定され、(1)式から反射係数が求められる。

実際には、方向性結合器・検出器・信号源の反射や方向性結合器の不完全さなどの多くの誤差要因が測定システム内に存在するため、測定の前に3つの標準器を用いてリフレクトメータの反射係数平面の校正を行う必要がある。この方法は次に述べるベクトルリフレクトメータや6ポートリフレクトメータなどの基本部分となる。

3.1.2 ベクトルリフレクトメータ^{5),10)}

この方式はヒューレット・パッカード社のHackbornにより開発された。標準器を用いてシステム定数を求め、測定後に補正を行うものである。また、制御するコンピュータと組み合わせることで、調整することなく広帯域にわたる測定が可能となった。基本構成はリフレクトメ

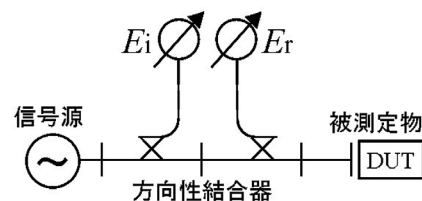


図5 リフレクトメータの原理

ータと同じであり、特徴はベクトル検波方式を採用しているところにある。そのためダイナミックレンジが広いが、システムが高価となる。

3.1.3 6ポートリフレクトメータ¹¹⁾

NBS (現NIST) のHoerらが開発した方式である。この方式は図6に示すように、4つの電力系からなる簡素な構造である。この方式による反射係数 (Γ_d) の測定は、測定システムが理想的な場合には、 P_1, P_2, P_3 および P_4 の高周波電力計の測定値からの式(8)で求められる。

$$\Gamma_d = \frac{\sum_{i=1}^4 (C_i + jS_i) P_i}{\sum_{i=1}^4 \beta_i P_i} \quad (8)$$

ここで、 C_i, S_i, β_i は実数のシステム定数であり、標準器を用いた校正により求められる。直接測定される値はスカラー量であるが、式(8)によりベクトル量として求めることができるところが特徴である。また、システムの構成が簡素であるため安価である。欠点は、ダイナミックレンジが狭いことである¹²⁾。

3.1.4 エラーボックス^{4), 7), 13)}

図7(a)の実際のリフレクトメータは不完全なので多くの不確かさ要因がある。これらの不確かさ要因をエラーボックスという形式で3つの不確かさ要因に集約できる。3つの不確かさ要因は、整合終端器、短絡器および開放器の3つの標準器で不完全なリフレクトメータを校正して求める。これにより、不完全なリフレクトメータを理想リフレクトメータとエラーボックスで表現することができ(図7(b))、測定値のエラー補正ができる。反射係数の測定値の不確かさの評価もでき、DUTの反射係数 Γ_d と測定値 Γ_d' とは以下の関係となる。

$$\Gamma_d' = D + \frac{\Gamma_d(1 - T_r)}{1 - \Gamma_d M_s} \quad (9)$$

ここで、 D, T_r および M_s は3つの不確かさであり、それぞれ信号源から反射信号検出器への漏れ成分による方向性不確かさ、DUTから信号源側を見たときの反射係数によるソースマッチ不確かさ、反射測定系の周波数特性である反射トラッキング不確かさである。リフレクトメータによるDUTの反射係数測定では、これらの不確かさを校正するために3つの標準器が必要となる。

リフレクトメータやネットワークアナライザの校正方法に関しては、様々な方法があり、それぞれ特徴がある。そのため、それぞれの用途に応じて使い分ける必要がある。

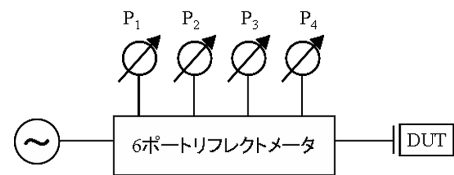


図6 6ポートリフレクトメータ

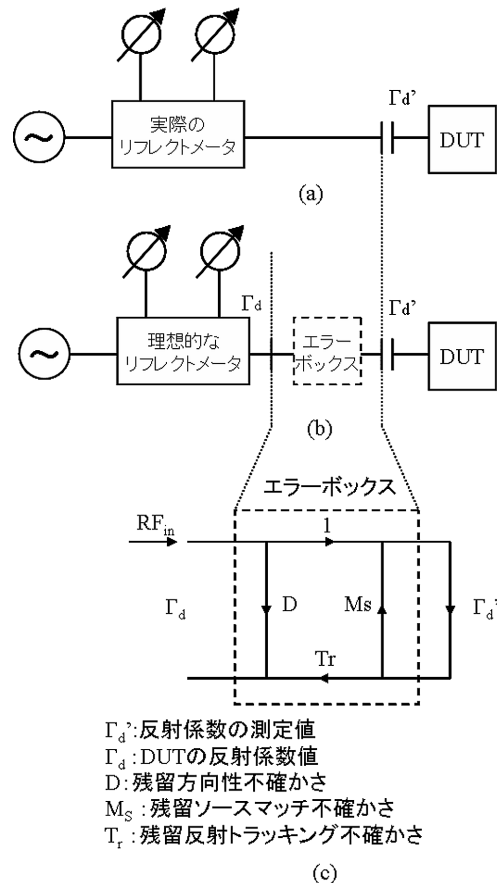


図7 リフレクトメータとエラーボックス

3.2 $\lambda/4$ 法^{14), 15)}

この方法の特徴は、1つの標準エアラインで校正できるところである。標準エアラインの両端で位相が 90°

(波長の $1/4$)になる長さにするので、エアラインへの入射波と反射波の位相差が 180° となることを利用してDUTの反射係数を求める方法である。DUTの反射係数 Γ_d とエアラインに接続したDUTの反射係数 Γ_d' の間には 180° の位相差があり、リフレクトメータで測定されるDUTの反射係数 Γ_m と標準エアラインを接続したDUTの反射係数 Γ_{ma} との2つのベクトルで三角形を形成する(図8)。 Γ_m と Γ_{ma} から式(10)で Γ_d を求めることができる。

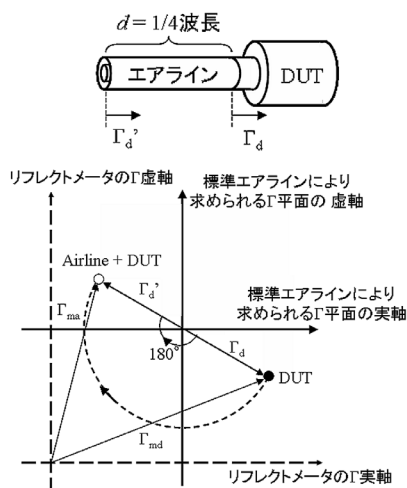


図8 DUTの反射係数(上)とλ/4法の概念図(下)

$$\Gamma_d \approx \frac{\Gamma_m - \Gamma_{ma} + S_{11}}{1 - S_{12}S_{21}} \quad (10)$$

ここで、 Γ_m と Γ_{ma} には測定器の不確かさが含まれるが、DUTの反射係数 Γ_d が小さい領域(0.1以下)では、式(10)による Γ_d の算出では不確かさを無視することができ、不確かさを小さくすることができる。また、 S_{ij} は標準エアラインのインピーダンスから算出されるSパラメータである¹⁵⁾。

この方法では、エアラインの長さにより測定できる周波数範囲が限定されることになる。たとえば、エアラインの長さが10cmでは周波数は750MHzである。

この方法は反射係数が0.1以下に対して比較的高精度に測定できるため、便利である。

4. 高周波インピーダンス標準への要望

4.1 日本における標準整備状況

わが国において、1993年から計量法にもとづいた高周波電力・電圧の指定校正機関への標準供給が旧電子技術総合研究所で行われていた。昨年度までに減衰量および雑音の計量法に基づいた標準供給が開始されている。インピーダンス標準に関してはPC-14で供給されていたが、供給実績が資料・文献からは確認できなかった。現在、PC-14のインピーダンスの供給は行っておらず、供給停止の経緯は不明である。また、電力、電圧、減衰量および反射係数¹⁶⁾の国際比較がされている。しかし、近年では反射係数としての国際比較はされていないものの、電力比較等を通して国際比較がされている。そのため、高周波インピーダンス標準の整備が強く望まれる。

4.2 産業界からの要望

同軸高周波インピーダンス標準整備に対する産業界からの要望が強い。校正事業者における校正実績では、反射係数の校正数は同軸が校正件数全体の99%を占め、そのうちの8割程度がPC-7やN型の7mm系である。特に、反射係数は0.1以下の要望が強い。さらには、近年、A2LA(試験・研究所認可を行う全米審議会)等からのEMC試験所に対しての高周波インピーダンスのトレーサビリティが要求され始めていることもあり、(社)電子情報技術産業協会などから、インピーダンス標準整備の要望が強い。また、高周波電力標準などの開発にも必要であるため、産総研内においても要望が強い。また、EMC分野では9kHz~1GHzの周波数帯のインピーダンス標準整備も求められている。

また、18GHz以上の周波数領域においてはPC-3.5などで約1割を占めている。これは、近年、情報機器等のCPUのクロック周波数が高くなり、4GHzにまで達しようとしていることから、デジタル信号で発生する第5高調波の測定に対応することが背景にある。

4.3 海外研究機関の標準整備状況

また、海外NMIの同軸に関するインピーダンス、高周波電力、減衰量および雑音に関する標準の供給範囲^{17),18)}について図9に示す。高周波電力標準についてはインピーダンス標準とはほぼ同じ割合で整備されている。また、図10に示すように、高周波・電磁界標準のインピーダンスのトレーサビリティ体系からも分かるように、高周波標準整備においてインピーダンスが欠くことのできない標準であることを示している。

海外NMIの高周波インピーダンス整備状況を図11に示す。調査資料^{17),18)}によれば、インピーダンス標準整備件数全体の65%が同軸、導波管は35%であった。同軸インピーダンスではPC-7、N型およびPC-3.5でほぼ6割となっている。帯域が50GHzまでのPC-2.4は、NIST、NPLをはじめ5研究機関で供給を行っている。つまり、海外NMIの標準整備状況からも、PC-7、N型およびPC-3.5の同軸インピーダンス標準の整備が重要であることが分かる。

海外NMIのインピーダンス測定方法に関して、7割近くのNMIがベクトルリフレクトメータ方式、NISTなど4研究機関が6ポートリフレクトメータ方式を採用している。

さらに、50GHz以上の高域のインピーダンスに関しても、NISTやNPLがPC-1.85の標準供給を行っており、低域インピーダンスにおいても、NPL^{19),20)}、NISTおよびPTB^{21),22)}でそれぞれ独自の方法で標準整備・供給が行われている。

また、NPLではインピーダンス校正の自動化により業務の効率が図られ、年間100件以上の校正を行っている。

高周波インピーダンス標準への要望としては、早急な整備が不可欠であることを改めて認識させられた。産業界からの要望や海外NMIの整備状況から、PC-7,N型およびPC-3.5の同軸インピーダンス標準の整備が最優先であることも認識させられた。また、EMCとの関係もあり、産業界からは低域から高域にかけての広帯域でのインピーダンス標準の整備が必要である。

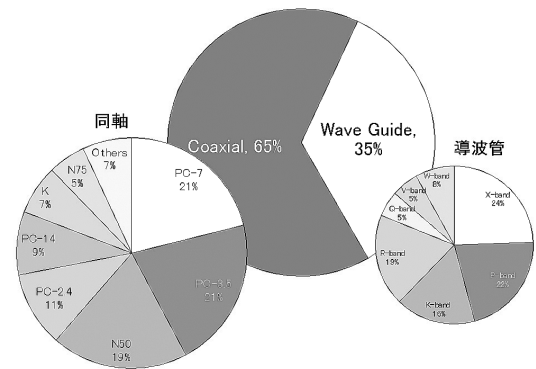


図11 海外NMIの高周波インピーダンス準備状況

また、海外NMIの状況から、PC-2.4やPC-1.85といった高域側のインピーダンス標準整備の必要性も今後考えられる。

5. 産総研における高周波インピーダンス標準開発の現状

高周波インピーダンス標準のトレーサビリティ体系を図12に示す。エアラインの内部導体外径および外部導体内径の測定と挿入損失測定からの抵抗率の算出からエアラインの特性を計算している。両装置を図13に示す。エアラインの内径はエアマイクロメータ、外径は非接触で測定できるレーザーマイクロメータで測定している。この装置の特徴は、長いエアラインの内径を、位置を決めて長さ方向に等間隔に測定できることである。PC-7、N型およびPC-3.5が測定可能である。

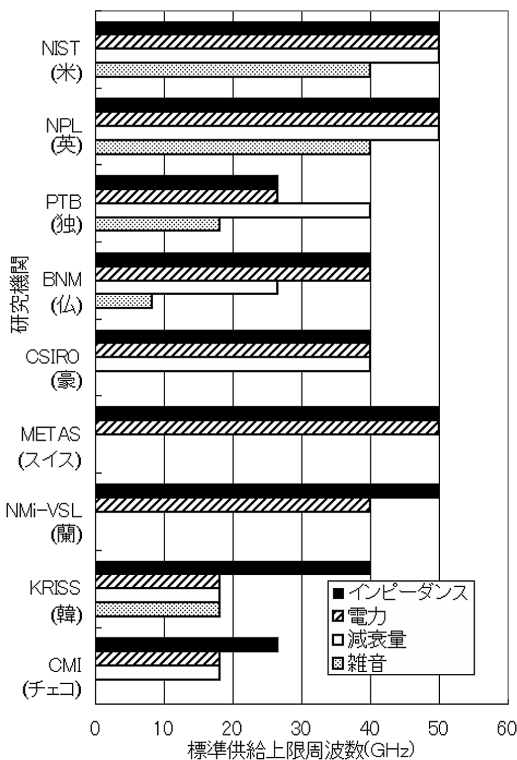


図9 海外NMIの高周波標準供給範囲（同軸）

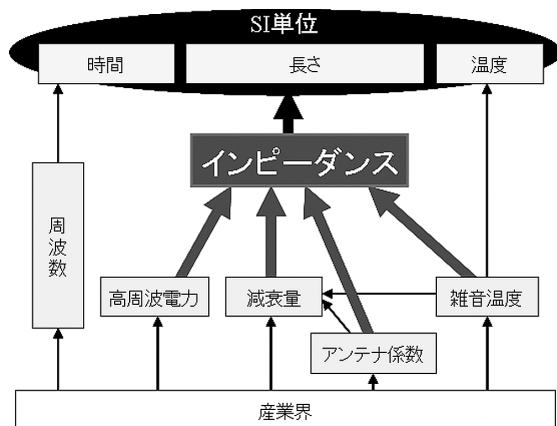


図10 高周波・電磁界標準トレーサビリティ体系の概要

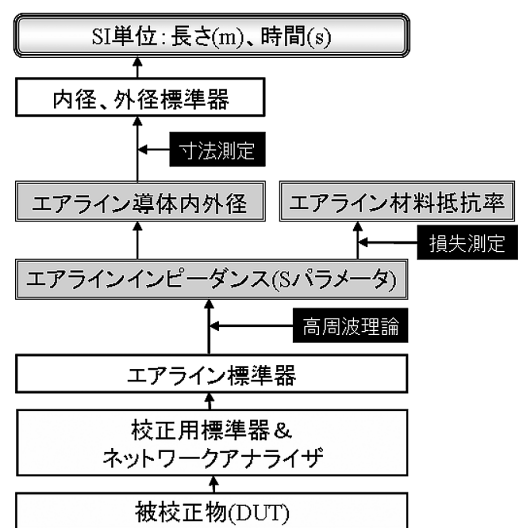


図12 高周波インピーダンスのトレーサビリティ体系

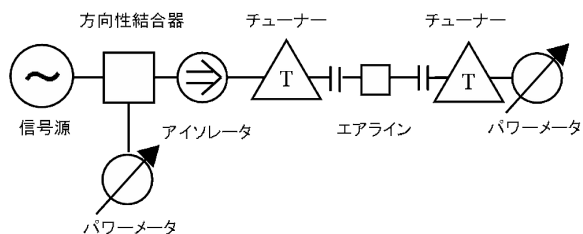
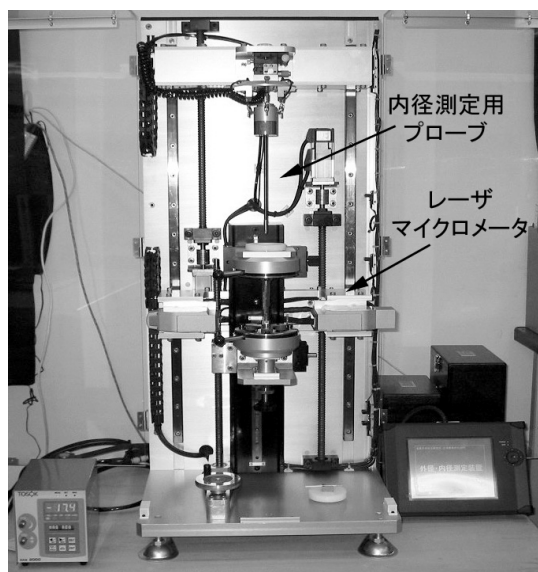


図13 エアライン機械寸法測定装置（上）と挿入損失測定装置の回路図（下）

抵抗率は挿入損失測定により減衰定数を測定して算出する。これは、測定系にエアラインを挿入することで生じる損失をパワーメータにより測定する方法であり、DUT自体の挿入減衰量を測定できる。測定は、チューナーで信号源側とセンサ側の不整合を小さくするように調整している。

6. 総括

高周波インピーダンス標準の整備は産業界のみならず、他の高周波標準に対しても品質システムを構築する上で重要な量であるため、要望が非常に強い。そこで、特に要望の強いPC-7、PC-3.5およびN型コネクタに対しての低域から高域にかけての広範囲にわたるインピーダンスの標準の早急な整備を目指す。

また、指定校正機関制度が廃止されたこともあり、産業界への標準供給における産総研の立場が非常に重要となってきた。標準開発のみならず、標準維持・管理システムの構築が不可欠であり、対応していきたい。

高周波インピーダンス標準の高周波化や反射係数の拡張、不確かさの改善や、将来的には応用向けの標準研究

および開発を、今後の産業界の動向を見据えて検討していきたい。

謝辞

本調査研究をまとめるにあたり、(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門 小見山耕司 高周波標準研究室長には、今後の研究計画の策定に貴重なご意見をいただきました。ここに心から感謝いたします。また、高周波標準研究室 信太正明 招聘研究員には、技術的なご指導、校正業務および研究計画立案に関して貴重なご意見を頂きました。ここに深く感謝いたします。最後に、高周波標準研究室の室員の皆様には本調査研究をまとめるにあたり、貴重なご意見を頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 高周波電力校正マニュアル(産業技術総合研究所, 2003年2月1日発行)
- 2) 横島一郎, 高周波測定技術の基礎—Sパラメータ入門— (リアライズ社, 1992) .
- 3) R. E. Nelson, and M. R. Coryell, “Electrical Parameters of Precision, Coaxial, Air-Dielectric Transmission Line,” *National Bureau of Standard, Monograph 96* (1966).
- 4) 計測技術マニュアル編集委員会編, 電磁波計測技術ハンドブック, (安全問題研究会発行, 1995) .
- 5) 山本博, 大川澄雄, 改版高周波測定, (コロナ者, 1982) .
- 6) インピーダンス測定ハンドブック—インピーダンス測定とその応用—, (Agilent Technologies, 2003) .
- 7) S. F. Adam, *Microwave Theory and Applications*, (Prentice-Hall, 1969).
- 8) R. N. Jones and L. E. Huntley, “Precision Coaxial Connectors in Lumped Parameter Immittance Measurement,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 15 (1966) 375-380.
- 9) R. N. Jones and L. E. Huntley, “A Precision High Frequency Calibration Facility for Coaxial Capacitance Standards,” *National Bureau of Standard, Technical Note 386* (1970).
- 10) R. A. Speciale, “A Generalization of the TSD Network-Analyzer Calibration Procedure, Covering n-Port Scattering Parameter Measurements, Affected by

- Leakage Errors," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 25, No. 12 (1977), 1100-1115.
- 11) C. A. Hoer, "A New Analyzer Incorporation Tow Six-Port Reflectmeters," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 25, No. 12 (1977) 1070-1074.
- 12) J. R. Juroshek, "On-Line Accuracy Assessment for the Dual Six-Port ANA : Experimental Results," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 36, No. 2 (1987) 520-523.
- 13) D. M. Pozar, *Microwave Engineering* second-edition, (Addison-Wesley Publishing Company, 1991).
- 14) D. Woods, "Immittance transformation using precision air-dielectric coaxial lines and connectors," *Proc. IEE*, Vol.18, No.11, (1971) 1667-1674.
- 15) D. M. Kerns and R. W. Beatty, *Basic Theory of Waveguide Junctions and Introductory Microwave Network Analysis*, (Pergamon Press, 1967).
- 16) U. Stumper, "International Comparison DT-RF 75 A4, : Reflection Coefficient in 14mm/50Ω Coaxial Line at 0.5GHz, 3GHz and 7GHz" *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 44, No. 6 (1995) 985-990.
- 17) NIST web site :
<http://ts.nist.gov/ts/htdocs/230/233/calibrations/Electromagnetic/RF-microwave.htm>
- 18) Bureau International des Poids et Mesures, BIPM calibration and measurement capabilities of National Metrology Institutes database, 国際度量衡局, 国立計量研究所校正能力データベース,
<http://kcdb.bipm.org/AppendixC/>
- 19) M. G. Cox, M. P. Dainton, N. M. Ridler, M. J. Salter and P. R. Young, "An Interpolation Scheme for Precision Intermediate Frequency Reflection Coefficient Measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.* Vol. 52, No. 1 (2003) 27-37.
- 20) A. G. Morgan, N. M. Ridler and M. J. Salter, "Generalization Adaptive Calibration Schemes for Precision RF Vector Network Analyzer Measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 52, No. 4 (2003) 1266-1272.
- 21) L. Grno, U. Stumper and T. Weimann, "Calibration of Complex Reflections in The MHz Range with Planar Thin Film Resistors Traced Back to DC Standards," CPEM'92, Extended Abstract (1992) 246-247.
- 22) U. Stumper, Private Communication, Visiting PTB (2004).