

マニュアルにない計測技術
－高周波計測におけるノウハウとエチケット－
Measurement Technology That Has Not Been Described in the Manuals
- Know-how and Etiquette in High-frequency Measurements -

戸高 嘉彦[†] 堀部 雅弘[‡]
Yoshihiko Todaka[†] and Masahiro Horibe[‡]

[†]キーサイト・テクノロジー合同会社 アプリケーションエンジニアリング部

[‡]国立研究開発法人産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 電磁気計測研究グループ

概要

近年、ミリ波帯の回路・デバイス特性の評価ニーズが高まっている。それらの測定にはベクトルネットワークアナライザが用いられており、その測定原理は、従来と何ら変わらない。一方で、測定周波数が高くなることで、同軸コネクタの品質や測定セットアップの違いが測定精度へ影響を及ぼすこととなる。本ワークショップでは同軸コネクタの種類、メンテナンスに加え、測定システム構成、測定方法などの測定精度の向上に不可欠な知識や技術情報を紹介する。



図 各種同軸コネクタ(計測用)

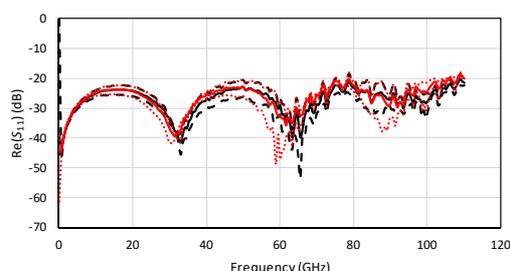


図 校正方法による結果の違い(オンウェハ測定)

Abstract

In recent years, evaluation has been demanded for the circuit and device properties in the millimeter-wave frequency band. In these measurements, vector network analyzer have been used and the measurement principle is conventional. On the other hand, differences in the quality and the measurement setup of the coaxial connector is affecting the measurement accuracy by increasing measurement frequency. In this workshop, the essential knowledge and technical information, coaxial connector types and maintenance, measurement system configuration and measurement methods, to improve the measurement accuracy are introduced.

1. はじめに

近年、ベクトルネットワークアナライザ(VNA)の小型化や低価格化から、アンテナ測定の場面においても活用され始めている。VNAは信号源とレシーバーが一体となったシステムであるため、非常に便利である。また、その測定精度などもメーカーからデータシート等で提供されているため、ユーザーでもVNAを用いた測定の精度や不確かさを算出することができる。

しかし、VNAの測定精度はVNA本体のみでは決まらず、キャリブレーションキットや測定前の設定などが測定結果に大きく影響する。また、VNAに接続するコネクタやアダプタなど、部品の影響もVNAの測定精度を左右することとなる。これはVNAの測定原理が他の高周波測定器とは異なるところに起因しているため、VNAを用いた測定を行う前にはその原理をよく理解して正しく取り扱う必要がある。

マイクロ波同軸コネクタは、伝送線を構成する基本的な部品であり、マイクロ波計測の重要な部品です。しかし、多くのエンジニアは、この精密な部品を取り扱う際に、性能劣化に対する配慮が十分とは言えないのが現状です。マイクロ波帯では、低品質のものや劣化したコネクタを使用すると、信号の反射が大きくなり、信号ロスが増大するだけでなく、多重反射による障害が大きな問題となります。特に計測システムに用いられているマイクロ波部品はその機械的精密さから単価が高く、破損した場合の修理および交換に要する費用は高額となります。ここでは、マイクロ波同軸コネクタの正しい知識と取扱い上の注意点、メンテナンスのポイントを学びます。

2. RF 同軸コネクタ総論

2.1. 高周波同軸コネクタの標準化組織と動向

米国においては、1964年ANSI(米国国家規格協会)の Subcommittee C83.2 で議論され、その結果 MIL-C-3902 においてコネクタと試験方法の両方が仕様化されました。米軍の物資調達に使われる MIL規格には、コネクタ類が数多く規格化されています。また、米国の電気電子技術学会である IEEE (本部ニューヨーク)では精密型の同軸コネクタに関して1968年に最初の規格書 IEEE std. 287 が発行されています。現在も IEEE Subcommittee P287 の Working Group において、継続して審議・改訂しており、計量/計測器グレードを中心に規格化しています。

一方、国際標準化団体の IEC(本部ジュネーブ)にお

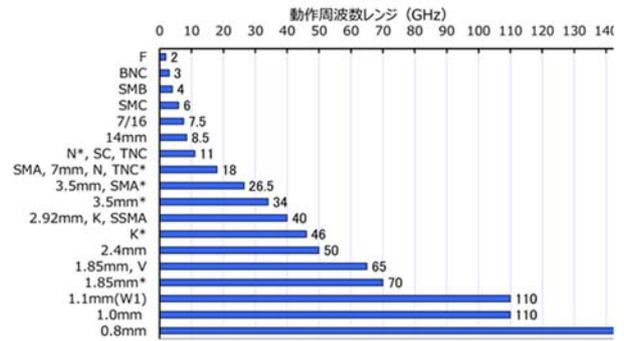


図 3-1.各種コネクタの種類と周波数範囲

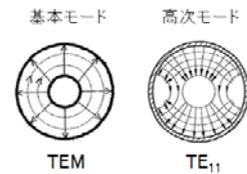


図 3-2. 同軸伝送路の基本モードと高次モード

いては、世界で使用される一般 RF 同軸コネクタや精密コネクタの標準化が行われ、IEC Technical Committee No.46 内の小委員会 SC46F 「R.F. and microwave passive components」、(2002年以前はSC46D 「Connectors for RF cables」)にて国際標準化の審議がなされてきました。IECでは、ここ10年でRF同軸コネクタの標準化が一気に進み、現在30種以上を標準化しています。(IEC61169-*、IEC60169-*、IEC169-*、IEC60457-*)

2.2. 代表的な高周波同軸コネクタの種類と周波数

図 3-1.では、現在市販されている主要な同軸コネクタの名称と使用周波数範囲の目安を示します。これらは供給メーカーによって、呼び名が違ったり、グレードやクラス分けによって使用できる最大周波数が異なったりします。多くのコネクタの名称には数字が用いられています。これはその同軸の外部導体の寸法に由来します。

次に、同軸型伝送線の最大周波数は、以下の理由により決まっています。表 3-1 は、同軸寸法と周波数の関係を表しています。ここで Line size とは、同軸外部導体の物理的寸法、Spec. Freq.は、モードフリーを保証する上限周波数を指します(絶縁体は空気と仮定)。一般に、同軸伝送路では TEM モードだけが伝搬できる周波数範囲で使用され、高次モードの中で一番低次の TE₁₁ モードが伝搬を始める周波数

Line Size mm	14.29	7	3.5	2.92	2.4	1.85	1
Spec.Freq. GHz	8.5	18	33	40	50	65/67	110
Limit of TE ₁₁ GHz	9.5	19.4	38.8	46.5	56.6	73.3	135.7

表 3-1. 同軸ライン寸法と TE₁₁ 遮断周波数

以上では使用することができません。

次式のように、特性インピーダンス Z_0 、TE₁₁ モードの遮断周波数 f_c は、同軸伝送線路サイズから計算できます。

■同軸の特性インピーダンス Z_0

$$Z_0 = \frac{2c \times 10^{-7}}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} = \frac{59.9585}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} (\Omega) \quad (\text{式 3-1})$$

■TE₁₁ の遮断周波数 $f_c \cong \frac{2C}{\pi \sqrt{\epsilon_r} (D+d)}$ (Hz) (式 3-2)

(D=外部導体寸法 mm、d=内部導体寸法 mm、 ϵ_r =絶縁体の誘電率)

2.3 互換コネクタで生じる反射特性と使用上の注意点

いくつかの同軸コネクタの中には、伝送線路のサイズが異なっているにもかかわらず、直接嵌合することができます。それは、図 4-1 の種類(名称)の組み合わせの場合です。これらを使用するユーザーにとっては利便性を高めるポイントにもなりました。反面、デメリットもあります。

まず、整合性です。一般的には、同種のコネクタ間の反射に比べて、互換コネクタ間で生じる反射の方が大きくなります。この反射の大きさは、一般的な信号を伝送させるには十分小さな反射であることもあり、より正確な反射特性を追求する VNA の同軸テストポート端の校正面のような場所では、できるだけ避けるようにして下さい。

また、図 4-1 では、3.5mm、SMA、2.92mm、2.4mm、1.85mm コネクタが嵌合した状態を示します。伝送線路の寸法の違いに注目して下さい。寸法の異なる同軸が接続した面では、必ず並列容量が増加します。これが原因で同軸の特性インピーダンスがここだけ変化し、反射が大きくなります。

同軸コネクタ接合面では、同種コネクタ間の接続でも微小な不要反射は生じますが、異種コネクタの互換接続ではさらに反射が大きくなります。これによって生じる多重反射は、その後の測定の不確かさを増大する可能性があります。

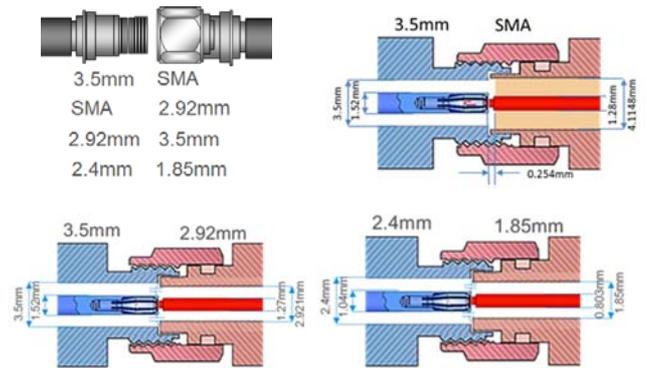


図 4-1.互換コネクタの寸法の違い

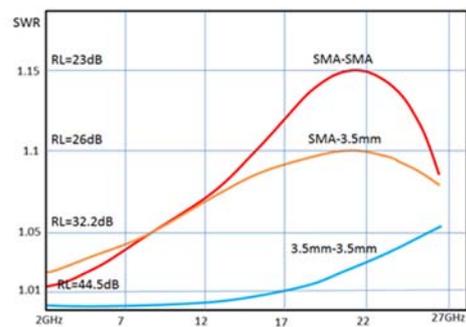


図 4-2.SMA,3.5mm 間の SWR 反射特性

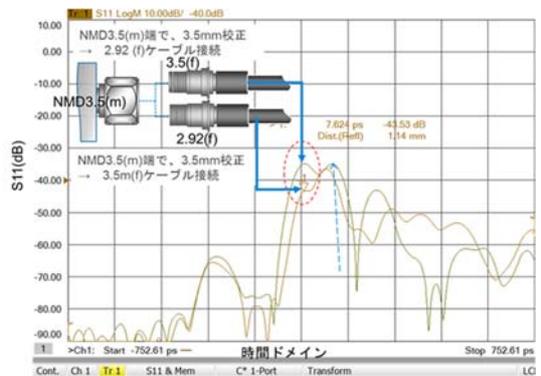


図 4-3 2.92mm、3.5mm 間の反射特性

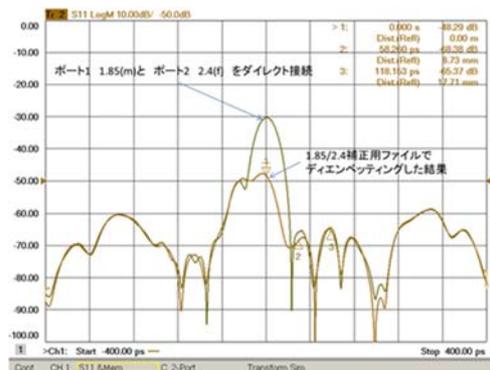


図 4-4. 2.4mm、1.85mm 間の反射特性

図 4-2 のグラフは、SMA と 3.5mm 間の反射特性と同種コネクタ間の反射特性を比較しています。もともと SMA は優れた整合性を保証するためのコネクタではないので、同種間であっても反射特性が良くありません。

図 4-3 では、校正した 3.5mm テストポートに、3.5mm コネクタ付きケーブルと、2.92mm コネクタ付きケーブルを接続した場合に生じる反射(タイムドメイン解析)を比較しています。

約 10dB 程の反射の差が生じていますが、互換接続でも実用上はほとんど気にする必要が無いほど小さいと言えます。不要反射が小さいとはいえ、より正確な測定を目的とする VNA 測定では、例えば 2.92mm テストポート先端で、3.5mm 校正キットを用いて校正することは避けるべきです。

図 4-4 では、校正した 2.4mm テストポートに 1.85mm コネクタ付きのケーブルを接続した場合に生じる反射特性(タイムドメイン解析)を示していますが、50GHz で約 30dB のリターンロス一般的な用途では十分な性能ですが、VNA の校正キットの性能としては、十分ではありません。繰り返し述べますが、より正確な反射・伝送測定を目的とする VNA の校正面には、このような互換コネクタを用いることは避けるべきです。

2.4 コネクタ接続時に発生する破損事故

同軸コネクタが破損する殆どのケースは、中心導体が何らかのダメージを受けることが多いのですが、そのメカニズムをイラストで解説します。

コネクタが接続される時、オスの中心導体先端の PIN が、メス中心導体の中に挿入されます。挿入されたとき、メス中心導体はスリットが開いて (Slotted)、オスピンを物理的にホールドします(図 5-1)。一方、VNA の校正キット (type-N、3.5、2.4) や一部アダプタでは、最高性能の特性をもつ度量衡グレード(Metrology Grade)標準器が用いられますが、このメスコネクタは金属パイプの内部にインナーコンタクトが挿入された 2 重構造となっています。これを Slotless と呼びます(図 5-2、5-3)。

Slotless 構造は接合時の中心導体のサイズ変動を起こすことがなく、 Z_0 を維持する理想的な構造となっています。そのおかげで、整合特性に優れていることが、図 5-4 の Slotted コンタクトと Slotless コンタクトの比較で分かります。Slotless コネクタは、Slotted コネクタよりも構造が複雑で繊細な為、取り扱いには特に注意すべきです。

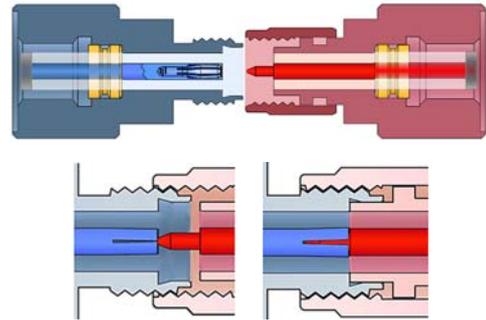


図 5-1. Slotted タイプの中心導体の接続前・後

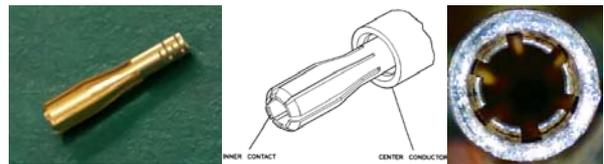


図 5-2. インナーコンタクト部の拡大イラスト

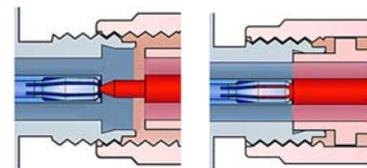


図 5-3. Slotless タイプの中心導体の接続前・後

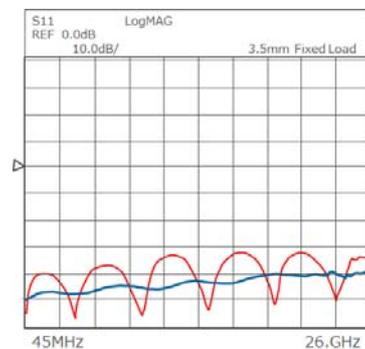


図 5-4. 3.5mm 終端器の反射特性 (赤)Slotted (青) Slotless コネクタ

コネクタの中心導体破損の原因は、

- 1) 中心導体が外部導体の真ん中に位置していない
- 2) オスの中心導体の先端(pin)が曲がっているか、加工精度が悪くて規定サイズを超えている
- 3) 中心導体が規定の位置より、飛び出している
- 4) 接続時に中心導体も一緒に回転して取り付けられている

事が考えられます。



図 5-5. (左)飛び出し (右)中央位置ずれ

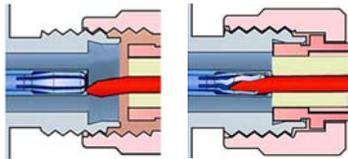


図 5-6. インナーコンタクト破損

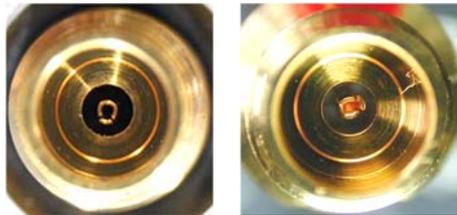


図 5-7. 中心導体の一部 Finger が剥離

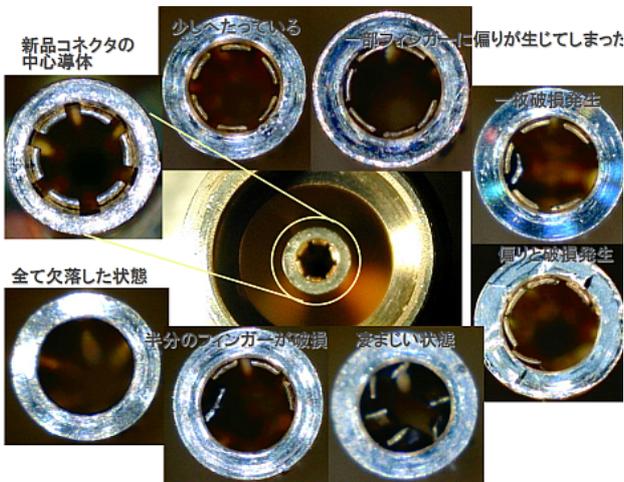


図 5-8. 破損した slotless インナーコンタクト

SMA のように、オスピンの加工精度が低く、規定寸法よりオーバーサイズとなったオスコネクタは、接続する際に、相対するメスコネクタに対し、深刻なダメージを与える事があります(図 5-7)。

また、中心導体が回転するような接続は、スロットレス・メスコネクタのインナーコンタクト(薄い金属でできたコンタクト・フィンガー)を破壊します(図 5-8,図 5-9)。

特に、SMA(オス)と校正キットなどの精密型

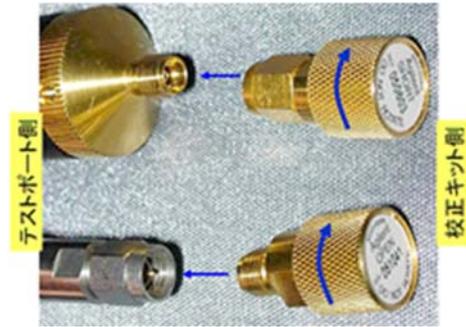


図 5-9.中心導体が回転するような接続は厳禁



図 6-1-1. クリーニングキット一式

3.5mm(メス)に接続すると、3.5mm サイドの中心導体を破損します。すなわち、SMA ケーブル(先端がオス)を VNA で使用する場合この組み合わせとなり、高価な校正キットを著しく劣化させることとなりますので、VNA では SMA ケーブルは極力使用しないで下さい。

2.5 マイクロ波コネクタのコネクタ・ケア

2.5.1.コネクタのクリーニング

図 6-1-2 のように、コネクタは着脱を繰り返していくうちに、金属が擦れ合っできる粘着性付着物で黒ずんできます。また、金属粉が接合面に付着することもあります。このような状態では、測定の実現性が劣化して、コネクタ本来の性能を発揮できなくなります。よって、定期的にこの外部導体コンタクト面の黒ずみをクリーニングします。

99%以上の無水エチルアルコールや先端の細い工業用綿棒、エアダスターなどを用意します(図 6-1-1)。先端を出来るだけ細く潰した綿棒の先にアルコールをつけ、コンタクト面に押し付けて、”コネクタ本体を指で回転させ”ながら、拭きとって下さい。角張った部分の拭き残しは、綿棒の軸を折って平らにし、

アルコールを含ませて擦り取るように丁寧に除去します(図 6-1-2 上)。クリーニングの後は、エアダスターで残ったアルコールを吹き飛ばしてください。

この時気をつけることは、中心導体は繊細なので直接クリーニングしません。外部導体接合面をクリーニングしているときに、誤って中心導体を綿棒で突くことがないように加減して下さい。次に、無水アルコールは樹脂性材料表面を荒らしますので、コネクタ内部に垂れて行かないように注意して下さい。

図 6-1-3 は、SMA コネクタは写真のように、金属粉が PTFE 表面にこびりつき、きれいにクリーニングすることが困難です。このような状況からも SMA コネクタは精密な測定には適していないことが理解できます。

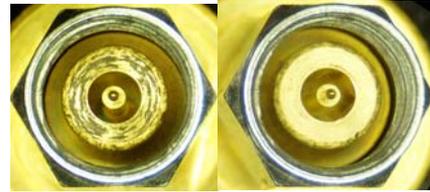


図 6-1-2.コネクタのクリーニング

2.5.2.コネクタの PIN インサージョンの調整

精密同軸コネクタは、中心導体は、外部導体に比べて、若干引っ込んでいるような位置関係になっています。接続時、外部導体がかっちり嵌合した際にも、中心導体同士がぶつかり合わないよう、数ミクロンから十数ミクロン程度引っ込ませています。この距離を PIN インサージョン(PIN DEPTH)といいます。例えば、3.5mm コネクタの場合、IEEE std.P287 によれば、GPC グレードで 0~50.8 μm 以内、LPC グレードで 0~12.7 μm 以内にあることを求めています。校正キットはおおよそ LPC かそれ以上の厳しい数値で管理されています。

これを計測するためには、コネクタ・ゲージというものが販売されています(図 6-2-1)。新しいコネクタがやってきた時や定期的に PIN インサージョンを計測し、もし、プラス側に出っ張っているものが見つかれば、廃棄するか、コネクタを分解して、PIN インサージョンを調整します。この作業は、通常サービスセンターで実施しています。

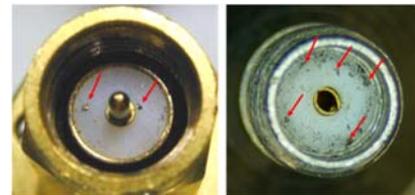


図 6-1-3. SMA コネクタの金属粉の付着

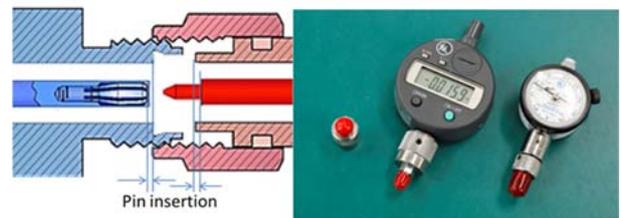


図 6-2-1. Pin Depth 測定に使われるコネクタ・ゲージ(デジタル式とアナログ式)

2.6 適正トルクとトルクレンチ

IEEE、IEC では、コネクタ毎に最大周波数、接続時のトルクの強さを規定しています。しかし規格で規定されているトルクと実際に市場に出回っている一部のコネクタの適正トルクは必ずしも一致しておらず、それぞれのメーカー独自に適正トルクを規定しているものがあります。同軸コネクタを接続する際に、「手締めだけ」だと測定再現性劣化の原因となりますし、通常のレンチだと、トルクをかけすぎてコネクタにダメージを与える可能性があります。そこで適正トルクで締め付けるツールがトルクレンチで、

マイクロ波同軸コネクタを取り扱う上では必需品です。トルクレンチは、レンチの先端が規定トルク以上になると、折れ曲がる構造になっています。しかし、図 7-1 のような使い方をしては、十分ケアできていないとは思えません。図 7-1 は悪い例です。回転方向が正しくありませんし、強く握ると上下方向に力がかかり、コネクタに不要な負荷をかけてしまいます。トルクレンチは、図 7-2 のように指を添えるようにして適切に回転してください。トルクレンチの回す方向にも気をつけてください。図 7-2 のように、補助レンチとトルクレンチとの間の角度は 90 度以内にセットすることが基本です。角度が 90 度以上開くと、上下方向の不要な力が加わることとなります。

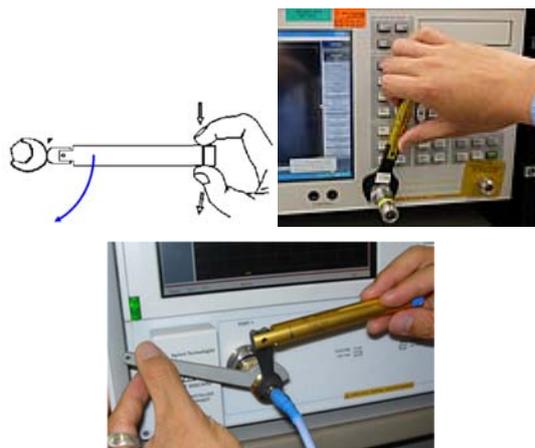


図 7-1. 間違ったトルクレンチ使用 3 例

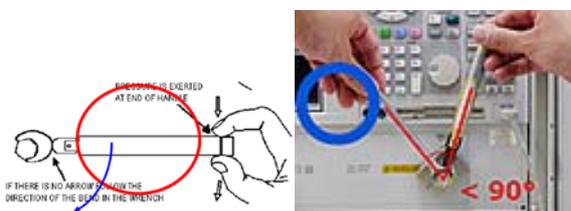


図 7-2. 正しいトルクレンチの使用

ツールの正しい使い方は必ずマスターしましょう。高周波コネクタはとてもデリケートな部品であるということを認識して取り扱きましょう。

3. 高精度高周波 S パラメータ計測のノウハウ

3.1. ベクトルネットワークアナライザシステム

ベクトルネットワークアナライザ(VNA)による測定の結果は、VNA 自体の測定性能だけでなく、コネクタな接続部品の種類(グレード)や状態、ケーブルの性能、VNA の設定条件、オペレータの経験などが深く関係する。また、測定したい特性によっても、設定やセットアップが異なることとなる。そこで、VNA を使用する代表的な測定について、気を付ける点を解説する。

3.1.1 反射特性測定

校正では、ネットワークアナライザの不整合や方向性といった内在する偏差要因を補正するために行なう。そのため、校正キットの性能、特性により、校正後のネットワークアナライザの不確かさも異なってくる。

同軸の場合、マイクロ波帯では OSLT 校正が、よく

用いられる。ロードで方向性の補正を行うため、ロードの反射がゼロであることが理想である。

しかし、ロード内部の抵抗体の特性のずれ、内部の余剰インダクタンス要素などから生じる、周波数特性をもつ反射特性があるため、その分がネットワークアナライザの不確かさとなる。方向性は、測定対象物が低反射のときに、測定結果に影響を及ぼす。

また、ショートやオープンは、不整合要素の補正に用いられる。ショートやオープンもコネクタ接続部などでの余剰な反射特性により、実際の標準器の特性は理想的な特性とは異なる。そのため、校正後のネットワークアナライザでは、高反射の測定の際の不確かさに影響を及ぼすこととなる。

ミリ波導波管やオンウェハの測定では、TRL か用いられることが多い。これは、OSLT 校正で用いるロード標準器を高精度に低反射で作ることが困難なため、基準ラインのインピーダンスを基準(前提)にして校正を行う方法である。この場合、基準ラインのインピーダンスのズレ(一般的には、50 Ω の測定系の場合には、50 Ω からのズレ)が、校正の不確かさに影響する。さらに、TRL 校正では、2 つのポートのリフレクト標準器の特性も同一であることが前提となっているため、その両者の特性の違いも不確かさの増大の要因となる。

標準器の特性のみならず、校正時の接続部での不要な反射なども大きく影響する。特にサブミリ波やテラヘルツ導波管やミリ波を超えるオンウェハ測定では、校正時の接続、コンタクトの反射測定への影響が顕著である。

3.1.2 伝送特性測定

覇者特性評価と同様に校正用標準器の特性の影響が大きい。特に、損失が小さいデバイスの測定では、信号入力ポートと反対側のポートの不整合の影響(多重反射)が主要な不確かさの一つとなる。損失が小さいケーブルなどを測定した際、測定トレースにリップルが観測されるが、これが不整合による影響である。

高損失の場合、測定器のダイナミックレンジ性能、あるいは、設定条件によることとなる。

また、位相特性測定では、ケーブルの影響も大きい。ケーブルの位相特性が曲げや環境温度変動などで変化し、その結果、伝送特性結果にも現れる。

3.1.3 広周波数帯域測定

ネットワークアナライザは、一度に広い周波数範囲を測

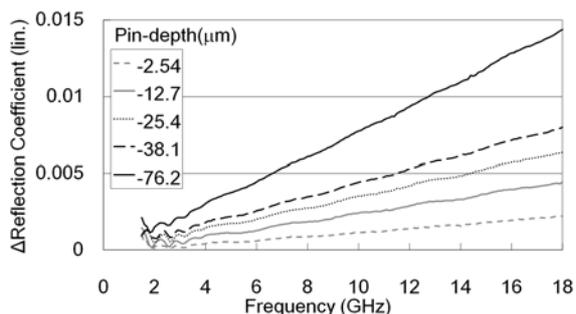


図 8 ピン深さと接続部での反射特性の関係 (MWE2014 WS14-02 より)[9]

定できる点で、非常に有用性が高い測定システムである。しかし、その測定では、周波数を掃引して、それぞれの周波数点において、Sパラメータを測定しているため、周波数に対して急峻な特性(共振現象やフィルタのカットオフ特性)などを評価する際には、その周波数軸の分解能(測定周波数点数)が重要になる。このような急峻な変化を測定する場合には、より細かな周波数間隔で測定することが必要となる。

しかし、測定周波数点数が増加することで、全帯域で測定を完結するためには、時間がかかることとなる。その場合、周辺環境温度の変化による、被測定物や測定系(ケーブルも含む)などの特性変動の測定結果への影響も懸念される。その対策として、周波数掃引速度を上げることも考えられるが、そのためには、IF帯域幅を広げるなどを行う必要がある。その影響として、ノイズフロアが上がり、フィルタ特性評価では、阻止域特性での測定ダイナミックレンジに影響を及ぼすこととなる。

この対策として、近年のVNAでは、通過域と阻止域で、測定の条件を個別に設定できるものもある。例えば、阻止域では、周波数点数を減らしIF帯域幅を狭める。阻止域と通過域の変化領域では、周波数点を増やす。IFは広げるなどの、測定で重要視したい特性に合わせた設定を行うことを推奨する。

3.1.4 高ダイナミックレンジ測定

広いダイナミックレンジ測定のためには、小信号領域でのノイズフロアの影響の低減と、高信号領域でのレシーバーの飽和(非線形性)と信号強度との関係で決まる。

最近のVNAでは、レシーバー自体の性能が向上し、

高いダイナミックレンジを実現できており、レシーバーの非線形性の問題は見え辛くなっている。そのため、VNA自体の信号出力も高レベル化しても非線形性の影響が少なくなっており、VNAの測定信号のレベルを高くすることが可能となっている。そのため、ダイナミックレンジが向上している。

上記のハードウェア特性の改善に加え、設定条件によりノイズフロアを低減することが可能である。先にも述べたIF帯域幅を狭くすることが挙げられる。この他、測定時の平均化(ポイントアベレージ)も有効である。ただし、両者ともに、先に述べた測定時間の増大があるため、測定環境の温度等の安定性とのトレードオフとなる。

3.2. 同軸コネクタによる測定

3.2.1 コネクタピン深さ、互換性の問題

前節でコネクタのメンテナンスの重要性を述べた。ここでは、コネクタの内外導体の接触部(インターフェイス)の測定結果への影響を解説する。コネクタの内導体接触面が外部導体より出ている場合には、接続する相手側の内導体を押すことになる。これが測定器のコネクタであれば、修理する必要があると多大なコストを払うこととなる。一方で、内導体が凹んでいる場合、破損の恐れはないが、コネクタ接合部での不要な反射を生じることとなる。その為、測定結果のトレースにリップルを生じたり、被測定デバイスの特性には無い、周波数特性を生じたりすることとなる。

また、SMA、3.5 mm、2.92 mm や、2.4 mm、1.85 mm といったコネクタは、形状や寸法で互換性があり、勘合することができる。しかし、内外導体の直径が異なるため、接合部では段差(不連続)が発生する[10]。その為、たとえ特性インピーダンスが 50Ω であったとしても、接合部で反射が生じ、測定結果に反映されることとなる。つまり、VNAの校正においても、テストポートと同じコネクタ種類の校正キット(標準器)を使用しなければ、校正後のVNAには大きな偏差(不確かさ)を生じることとなる。

3.2.2 同軸ケーブル

先にも少し触れたが、測定に用いるケーブルの特性は、VNA 測定における主な不確かさ要因の一つである。高精度な VNA 測定を実現したいのならば、ケーブルを使用しないことが最善策と言っても良いくらいである。デバイスの反射測定だけであれば、ケーブルを使わない選択肢もありうる。また、1.0 mm 同軸の VNA 測定システムでは、周波数特性拡張モジュールをケーブルを使用せず、直接接続する方法も提案されている[11]。

しかし、多くの場合では、ケーブルを使用しなければならぬため、ケーブルの選択が重要となる。ケーブルも価格は様々であり、その特性も様々である。基本特性としては、単位長さあたりの減衰や、ケーブルの反射特性である。オープンサイトでのアンテナ計測などでは、減衰特性は非常に重要となる。室内で行うデバイス計測では、ケーブルが長くないため、減衰特性の違いによる測定結果への影響は見えないといえる。

むしろ、ケーブルの曲げや温度変化による位相特性の変化、つまり、ケーブルの曲げ特性や温度特性が安定した VNA 計測を実現する上で不可欠な条件となる。また、曲げ特性にも、曲げても位相特性が変化し辛い特徴と、曲げた後に元の状態に戻した際に位相特性が元の状態に戻る特徴があり、それぞれ測定したい対象物やパラメータにより、ケーブル 1 つにも求められる性能や特徴が変わってくる。そのため、測定したい内容を予め吟味、決定してから、ケーブル選びを含めた、VNA のシステム構成を検討する必要がある。

3.3. 導波管による測定

3.3.1 高精度導波管

前節の同軸コネクタの測定と同様に、接続部の影響は主要な不確かさ要因である。特に、ミリ波、サブミリ波、さらにテラヘルツと周波数が高くなり、波長が短くなるほど、導波路の合わせ精度の影響が顕著になる。つまり、同じ加工精度、合わせ精度の導波管接合部を使用した場合、100 GHz のときに比べ、1 THz では、精度の電気特性に及ぼす影響は単純には 10 倍大きくなると考えられる。そのため、従来の導波管フランジでは、1 THz で VNA 測定を行った場合には、不確かさの主要因は接続の再現性であった。

そこで、導波管フランジも従来とは異なる構造が提案され、標準化もされている(図 9)[12, 13]。



図 9 ミリ波・テラヘルツ用高精度導波管[12]



図 10 ミリ波・テラヘルツ用高精度導波管[14]

3.3.2 測定系

マイクロ波帯での導波管測定では、主に同軸一導波管変換器を用いて、導波管の測定システムを構成している場合が多い。そのため、システム構成での注意点は、同軸の測定と同じである。

一方で、ミリ波以上の帯域では、周波数拡張モジュールを用いる。そのため、測定では導波管のテストポートの最初アライメントが重要となる。先に述べたフランジを高精度にしても、アライメントの問題があれば、高精度で安定した接続が出来ず、高精度な測定は実現できない。さらに、最初のアライメン

トを厳密に行ったのち、周波数拡張モジュールとVNA 本体を繋ぐケーブルの特性や取り回しによっても、測定結果の精度を左右する。ケーブルが短い場合、信号の損失が小さいことは有利に働くが、測定中にケーブルの可動範囲が大きくなることで、引張りやねじりなどの機械的なストレスが加わりやすくなる場合が多い。これにより、周波数拡張モジュールに入力される信号の位相が変化し、VNA 校正後の測定結果へも影響することとなる。それらの条件を考慮したミリ波帯の VNA システムセットアップの一例を図に示す。

3.3.3 接続方法

計測器に用いられる導波管(主に、UG 型)の場合、接続には 4 本のネジが用いられる。マイクロ波帯では導波管のフランジも大きく、ネジの頭も大きいため、ドライバーでのネジ締めも容易である。しかし、ミリ波帯になると、導波管フランジは小型化、信号損失の影響を避けるために、テストポート導波管の長さも短く(1インチ以下)となるため、ドライバーで均一に4本のネジを締めることが困難となっている。さらに、ミリ波帯の導波管では、ネジの締め付けトルクが標準化されていない。これらの状況から、高精度な導波管フランジを用い、アライメントを厳密に行ったところで、高精度に測定を実現することが困難になっている。そこで、ミリ波帯以上ではネジ締めに替わるクランプでの接続方法も提案されている。これにより、容易に均一なトルクで接続を可能とするだけでなく、取り付け・取り外しに係る時間を削減することができ、測定の迅速化を実現して、周辺温度等の変化による測定精度の劣化を抑制することが可能となる。

一連の対策は、操作性・作業性を改善することによる測定の高精度化であり、測定器自体の性能によらず、測定器ユーザーで測定精度の改善が可能な取り組みである。

3.4. オンウェハ測定

3.4.1 プロービング技術

オンウェハ測定においても、ミリ波、さらにはテラヘルツにまで測定範囲の要求が拡大している一方、測定の手法は、未だ変わることなく、GSG(グランド-シグナル-グランド)等の高周波プローブでデバイス等のコンタクトパッドに接触して測定している。

校正や測定時のパッドの位置やコンタクト方法については、標準化のような公的なガイドはないものの、メーカー等で推奨された方法や、位置合わせ用のパターンが

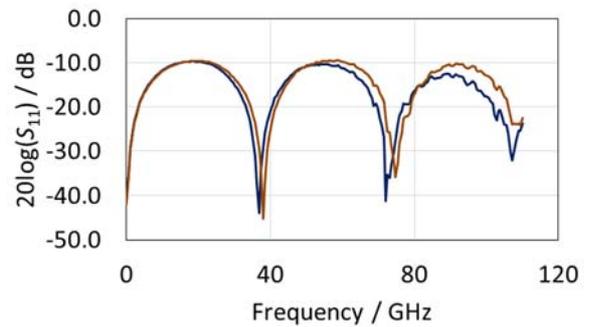


図 11 コンタクト位置によるオンウェハ測定結果の違い (ミスマッチラインの反射特性)

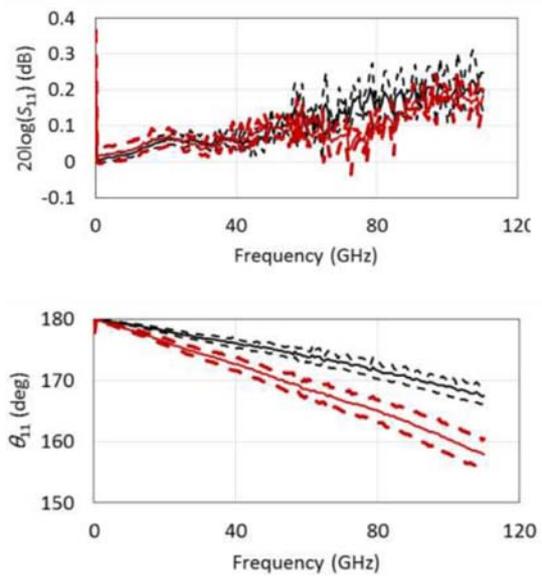


図 12 高周波プローブ (ピッチ) の違いによるオンウェハ測定結果の違い(ショート測定時) (上) 振幅特性、(下) 位相特性

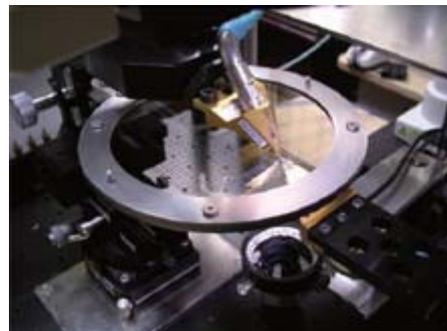


図 13 全方位プローバーの例(写真: モーデック社提供)

校正基板上に提供されており、それらを利用して目視で位置合わせを行い、校正や測定を行っている。このため、

目視の精度(カメラの解像度)やオペレータの感覚、ステージ・プローブアクチュエータの位置合わせ精度、手動で行う場合にはオペレータのスキルといった、オペレータに依存する項目が多い。導波管の合わせ精度と同様に、マイクロ波帯に比べ、波長が短いミリ波、さらにはテラヘルツ領域では、同程度の位置ズレでも、測定結果への影響は大きくなり、場合によっては、最大の不確かさ要素となる。位置ズレによる測定結果への影響について、測定結果の例を図に示す。高精度化には、位置合わせ精度の向上のほか、従来のコンタクト方式の測定とは異なる、非接触プローブの技術[15]の検討も必要である。

さらに、製品の高度化に伴い、回路が基板の両面に実装されるなど、複雑化していることもあり、従来の片面からの測定だけでなく、両面からアクセス可能な新たなコンセプトも必要となってくるといえる。

3.4.2 プローブ種類の違い

プローブによる測定は、導波路のサイズが規格で決まっている同軸や導波管と異なり、導波路の寸法(コプレーナ導波路のGSGの間隔など)を自由に選択・製造することができる。そのため、高周波プローブのGSGのピッチも様々な提供されている。また、様々なメーカーから、それぞれの特徴を生かした高周波プローブが提供されている。ユーザーの立場では、どのプローブを使用しても同じ特性が得られることが理想ではあるが、実際には、異なる結果が得られることが多い。その一例を図に示す。

これには、プローブの針先の形状と標準基板の基準パターンとの関係から、余剰インダクタンスや浮遊キャパシタンスなどの影響がプローブのデザインごとに変換することが考えられる。さらに、針先だけでなく、プローブ針先周辺の電磁界の干渉や、2ポート測定の場合には、ポート間の干渉など、測定精度に係る要因が複雑に関係していることが考えられる。

VNA測定において、トレーサビリティを考えるうえでもっとも基本的な校正方法は、マルチラインTRLであり、上位の校正基板の校正(値付け)には、この手法が用いられる。

3.5. その他の高周波計測

VNAでは校正により不整合要素を補正するため、 mismatchesの影響が見えない。高速オシロスコープ、スペクトラムアナライザは、入力インピーダンスが整合取れていることが前提となり、不整合があれば、被測定デバイスのインピーダンス mismatchesと多重反射を起こすこととなる。また、多重反射はオシロ

スコープなどとデバイスの間をつなぐケーブルの長さによって、多重反射の周期が異なり、周波数特性が生じる。測定においては mismatchesの影響を減らす必要がある。

4. まとめ

私達が市中で入手できる同軸コネクタは、DC、低周波帯のものからマイクロ波ミリ波帯のものまで幅広くラインアップされていますし、価格も1つ数100円から10万円以上するものまであります。正しい取り扱い方とメンテナンス方法をマスターし、いつまでも高い性能を維持するように心がけて下さい。

高精度なVNA測定においては、VNAの性能はもちろん必要条件ではあるが、それだけでは実現できない。むしろ、周辺のケーブルや環境を整えることで、初めてVNAの性能を生かすことができる計測システムを実現することができる。そのセットアップは、測定したい対象やパラメータ、測定器が置かれている環境など、総合的に検討する必要がある。100人ユーザーがいれば、個々の要求に適した100通りのセットアップ・測定条件が存在する。

そのためには、自身が測定したいパラメータをどの程度の精度で測定したいかを明確に把握することが第一歩である。

文 献

- [1] BRUNO O. WEINSCHL, 「Standardization of Precision Coaxial Connectors」 PROCEEDINGS OF THE IEEE. VOL. 55N, O. 6, JUNE 1967
- [2] NORBERT J. Slandek, 「Standardization of Coaxial Connectors in the IEC」
- [3] PROCEEDINGS OF THE IEEE LOL 74. NO 1 JANUARY 1986
- [4] IEEE Standard for Precision Coaxial Connectors (DC to 110 GHz), 21 September 2007 IEEE Std 287™-2007 IEEE Instrumentation and Measurement Society
- [5] Mario A. Maury, Jr. Maury Microwave Corporation, MICROWAVE COAXIAL CONNECTOR TECHNOLOGY: A CONTINUING EVOLUTION, the Microwave Journal 1990 State of the Art Reference, September 1990; Updated December 2005
- [6] キーサイトテクノロジー、ミリ波コネクタの手入れ, 5989-4514JAJ, September 04, 2014
- [7] キーサイトテクノロジー、マイクロ波ミリ波同軸コネクタ, 5988-8015JA, December 22, 2014
- [8] 戸高 マイクロ波/ミリ波 同軸コネクタの基礎と取り扱いかた、トランジスタ技術増刊 RF ワールド NO.33
- [9] 堀部雅弘、「ネットワークアナライザによる高精度測定法」MWE2014 ワークショップダイジェスト WS14-02, 2014
- [10] Roger Pollard, "Compensation Technique Improves Measurements for a Range of Mechanically Compatible Connectors," Microwave Journal (ISSN 0192-6225), vol. 37, no. 10, p. 91-99, Oct., 1994.

- [11] Connection platform coaxial system for 1.0 mm VNA extenders (AIST-NMIJ), <https://www.youtube.com/watch?v=PeVdc6LrP5Q>
- [12] “Flanges for waveguides. Part 2: Relevant specifications for flanges for ordinary rectangular waveguides”, IEC 60154-2 ed. 3rd, July 2016.
- [13] “IEEE Standard for Rectangular Metallic Waveguides and Their Interfaces for Frequencies of 110 GHz and Above,” IEEE P1785, <http://grouper.ieee.org/groups/1785>.
- [14] Masahiro Horibe, “Specific Uncertainty Measurement Model for Vector Network Analyzer with Frequency Extension Module at Terahertz Frequency,” CPEM2016 Digest, May 2016.
- [15] K Topalli , et. al., “Non-contact probes for THz circuits and integrated devices,” Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2012 IEEE,

著者紹介

戸高 嘉彦

キーサイト・テクノロジー合同会社 アプリケーションエンジニアリング部,
yoshihiko_todaka@keysight.com

堀部 雅弘

国立研究開発法人産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 電磁気計測研究グループ, 研究グループ長, masahiro-horibe@aist.go.jp