

# マイクロ波同軸コネクタ



## マイクロ波同軸コネクタ開発の歴史とその特徴

マイクロ波コネクタには、この表にあるような様々なタイプのコネクタがあります。これらの、歴史的背景をみることによって、そのコネクタが誕生した理由が分かります。時代に要求された仕様、目的、あるいはある特定のアプリケーションに合わせて使用されるよう設計・開発がされてきました。機器内部の接続用として開発されたもの、マイクロ波基板に取り付けて使用するもの、計量用に特別に精密に設計されたもの、ミリ波コンポーネントを取り扱う時、導波管より楽な同軸ケーブルを使用する為のミリ波同軸コネクタ等様々です。

主要なコネクタとして、以下のタイプのコネクタについて記述しています。

- TYPE-N
- BNC SMA
- 7mm
- 3.5mm
- 1. 92mm
- 2. 4mm
- 1. 85mm
- 2. 0mm

次図は、マイクロ波同軸コネクタの種類と使用可能周波数範囲です。ここでラインサイズとは、同軸伝送路の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。

これより高い周波数でも使用できないことはありませんが、不要モードが発生しパフォーマンスが劣化します。不要モードは、主要伝送モードである TEMの他に、高次モード  $TE_{11}$ と中心導体を支える BEADで発生する不要モードが主なものです。実際の  $TE_{11}$ モードの遮断周波数 ( $TE_{11CUTOFF}$ ) は、伝送路のサイズから計算されます。下記は、同軸線路のサイズと高次モードの伝送可能最低周波数（遮断周波数）を表にしました。ここで注意することは、これはあくまでもエアラインでの  $TE_{11}$ 遮断周波数であって、もし誘電体を充填した同軸線路であるならば、 $TE_{11}$ 遮断周波数は、これよりも下がってくるということです。

VHF	UHF	L	S	C	X	Ku	K	Ka	MM
UHF	3000 MHz			4 GHz					
BNC, HN, SMD				N, SC, TNC		SMA, 7mm, N, High Performance TNC		High Performance SMA (26.5 GHz), 3.5mm	
						SSMA, 2.92 (K)		2.4mm	
								1.05mm (M)	
								1.0mm	
100-300M	.3-1 GHz	1-2 GHz	2-4 GHz	4-8 GHz	8-12 GHz	12-18GHz	18-26GHz	26-40GHz	40-110GHz

Line Size	14.29	7.0	3.5	2.92	2.4	1.85	1.0
Spec Freq (GHz)	8.5	18	34	40	50	65/67	110
Limit of TE11	9.5	19.4	38.8	46.5	56.6	73.3	135.7

Theoretical Limit in GHz for TE<sub>11</sub> Mode

## TYPE-N

18GHz

N型コネクタの名前の由来を知っている人は少ないのではないのでしょうか。この問い合わせをするとマイクロ波エンジニアのおよそ99%は、“NAVY”だと答えるに違いありません。TYPENAVYコネクタという紹介は関連文献にそのように紹介されているからで、“NAVYコネクタ”は非常にポピュラー

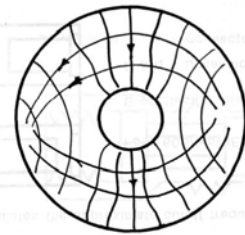
なのです。実は、Nの由来はこのコネクタを開発したエンジニアの一人のイニシャルをとって付けられたのでした。第二次世界大戦中である1942年、当時のレーダーシステムに使用する為、新しい同軸コネクタの検討を始めました。これまで使用していたUHFコネクタでは仕様を満足できなくなっていたからです。NEW YORKのBELL LABORATORIESのPAUL NEILL氏とその開発チームはこの要求に合う堅牢なマイクロ波コネクタを開発したのです。PAUL NEILL氏は、マイクロ波エンジニアではなかったので当初のTYPE-Nコネクタのデザインでは、1GHz以上での特性は思わしくなかったようです。まもなくTYPE-Nコネクタの改良版が出てきました。このコネクタはマイクロ波領域でのパフォーマンスに優れていたためよく使用されるようになり、1980年代まで改良が続けられました。

メス・コネクタ中心導体のSLOTも4SLOTS CUTから6SLOTS CUTへと変更されました。そして、Hewlett-Packard社（現Agilent-Technologies, Inc.）のJULIUS BOTKAの手で最高のパフォーマンスを得るべく、メスコネクタをブレスジョン・スロットレス型へと改良をしたのでした。1980年代半ばのことです。これにより、スロットレス・TYPE-Nコネクタは、

7mmと並ぶ高性能コネクタへと改善されたのでした。

N型コネクタの基準面は、他のコネクタと少し違います。基準面は外部導体の接続面に設定されていますが、中心導体の接続面と外部導体の接続面には5.258mmものオフセットがあります。これはミスアライメントの機械的ダメージを減らすためのものでした。この他に、中心導体を細くした75Ωコネクタがあります。50Ωコネクタと75Ωコネクタが混在すると、大変危険です。50Ωオス-75Ωメスの組み合わせでは75Ωメスの中心導体のフィンガーが開くか脱落するかして確実に破損します。50Ωメス-75Ωオスの組み合わせでは中心導体の接触が不完全となります。よって使用周波数が高くなると不安定になってきます。コネクタは破損することはありませんが、それゆえに気づくのが遅れることがあります。

H and E Fields for TE<sub>11</sub> Mode

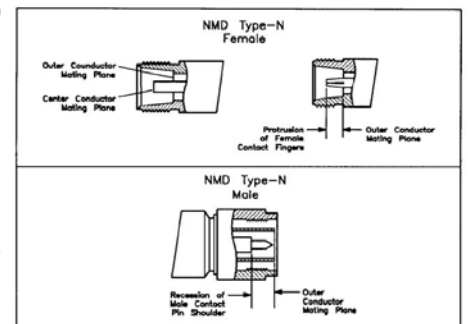


脱着回数 5000回以上保証。

トルクは 12~15in-lbs.



TYPE-N



## BNC

2GHz

通称“BAYONET NAVY CONNECTOR”と呼ばれることが多いこの BNCの名前の由来は TYPE-Nと並んでほとんど知られていません。1950年初頭、PAUL NEILL氏と CARL CONGELMAN氏は、サイズの大きい TYPENコネクタを改良し、小さいサイズのコネクタを開発しました。名前を“BABY NCONNECTOR (略称BNC)” “BABY NEILL CONNECTRO”と呼びました。(ほかにも BAYONET NEILL CONNECTORという呼び方もあったようです)このコネクタは、TWIST LOCK機構を持った画期的なものでした。しかし、当時の BNCコネクタは特性インピーダンス50Ωを維持する点で難点があったようです。現在ではコネクタメーカーで改良され高周波領域まで使用できるものもできています。

注意するところは、50Ωコネクタと75Ωコネクタの使用に混乱が見られることです。使用周波数が低いのでほとんど問題にはならないのですが本来の使い方をすべきでしょう。



BNC (50Ω)



BNC (75Ω)

## TNC

11GHz

1956年、RATHEON社の J. R. MUNRO氏は、当時 BNCコネクタを使っていました。彼は、当時 SPARROW MISSILE SYSTEMの ILLUMINATORレーダーを開発していたのです。この時、振動試験において、BNCコネクタの特徴である BAYONET LOCKING構造が大きな電力リークを起こすことがわかったのです。そこでこの BNCコネクタを改良することにしました。ロックナットとスレッドを取り付けたのでした。その後、GENERAL RF FITTINGS社、SANDIANATIONAL LABORATORIESにて TNCコネクタとして販売されることになりました。TNCの Tは、“TWIST“のことです。

## SMA / OSM

22GHz

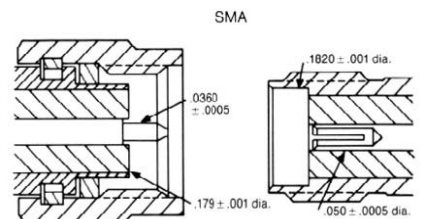
1950年代は新しい形の伝送路が見られるようになってきました。ストリップラインやマイクロストリップライン、セミリジッドケーブルです。これらの伝送路のために、小型のコネクタが新たに必要になってきました。N型では大きすぎたのです。1956年、BENDIX RESEARCH社にてLANDMARK MICROWAVE SYSTEMが開発されていました。このプロジェクトマネージャーである JAMES CHEAL氏は小型の高性能コネクタを必要としていました。そしてメカニカル・エンジニアである VALCOLUSSI氏にその設計を依頼したのです。そして現在でも最も使用されるようになった SMAコネクタが誕生したのです。SMAの正式名称は、SUB-MINIATURE Aです。(他に SMB、SMC と呼ばれるコネクタもある)

このコネクタの中心導体は、テフロンで支えられた構造です。このため接合部分に空気の層ができやすくインピーダンス mismatchesを引き起こします。SMAコネクタは安価なため多くの場面で使用されますが、設計・製造がラフなため整合性(反射係数)は劣ります。SMAコネクタは、外部導体の壁面が薄いため、機械的強度が強くありません。そのため繰り返し脱着は避けるべきです。基本的には、機器内部に組み込んで使用されるコネクタなのです。多くのグレードが存在する SMAですが、一般的には22GHz帯までの使用に耐えます。中には26GHzまで良好な周波数特性をもつものもありますし、12GHz程度までしか使用できないものもあります。

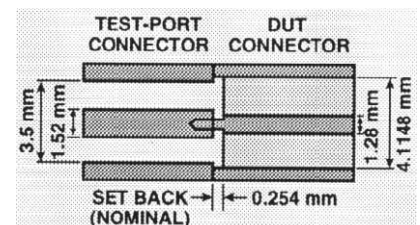


上 SMA(m)

下 SMA(f)



SMAコネクタは、3.5mmコネクタとコンパチブル(接続可能)ですが、外部導体の中心導体のサイズが異なるために整合性はあまり良くありません(精密測定でなければ十分と言えるかもしれませんが、整合性についてのグラフは、3.5mmのパートで説明します)。



## 14mm

9GHz

1960年代になって、精密型同軸コネクタがもめられるようになってきました。General Radio社では米国国家標準局 NBS (現 NIST) のエンジニアとともに、計量用 (METROLOGY GRADE) 標準コネクタを新たに開発することになったのです。14mmコネクタの誕生です。外部導体の内寸サイズが 14mmであることからそう呼ばれます。コスト的には高価なコネクタでもあります。オス / メスなしのコネクタで現在の APC 7mm に似ています。9GHz までの周波数まで使用できます。現在では Maury Microwave 社 (California) や Gilbert Engineering 社 (Arizona) で製造されています。

## 7mm / APC-7

18GHz

1960年代半ば、Hewlett-Packard社は 18GHz帯の精密型テストポート・コネクタが必要になっていました。そして、Amphenol社と共同で、外部導体 7mmの雌雄なしの高性能コネクタを開発しました。このコネクタは他のどのような同軸コネクタよりも再現性、整合性、温度特性に優れています。しかし、唯一の欠点は価格が高いということでした。その後 Amphenol社は、いくつかの改良を施し、APC7 (Amphenol Precision Connector) という商標で販売することになりました。80年代、Hewlett-Packard社の JULIUS BOTKAは、さらに改良を施します。中心導体の Colletをこれまでの 4Slotted Collet から 6SLOTTED COLLETへと変更したのでした。この改良により 7mmコネクタはリターンロス特性と再現性がさらに良くなり、加えて 4lotted Colletにおいて生じていた不要モードをなくすことができたのでした。このように他のどの同軸コネクタよりも基本特性に優れた精密型コネクタが誕生したのでした。脱着回数 5000回以上保証 IEEE Std 287-1968

## 3.5mm / APC-3.5

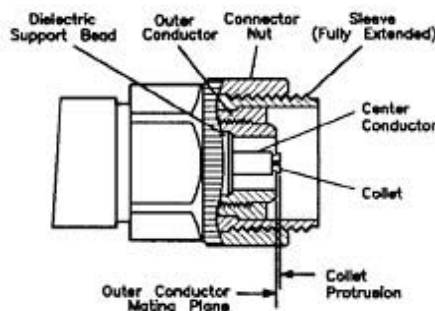
Up To 33GHz

1970年代、Hewlett-Packard社は、SMAコネクタとコンパチブルな INSTRUMENTGRADEのマイクロ波コネクタを探していました。これまでの SMAコネクタは、テフロンが充填された誘電体インターフェースであり、テストポート・コネクタ、ましてや校正キットのコネクタとしては受け入れられないものでした。そのような要求から HP社の LARRYRENIHANは外部導体 3.5mmの精密コネクタを設計し、Amphenol社と共同で開発・製造を行いました。当初動作周波数は 26.5GHzで設計されました。しかし ModeFree動作周波数は33GHzです。更に、1980年代に HP社 JULIUS BOTKAにより精密型の SLOTLESSコネクタへと改良されたのです。この SLOTLESSコネクタは、従来の HP社計測器に使用されていた SLOTTED型のコネクタや校正標準器の SLOTTED型コネクタから順次置き換えられていきました。Amphenol社からは APC3.5

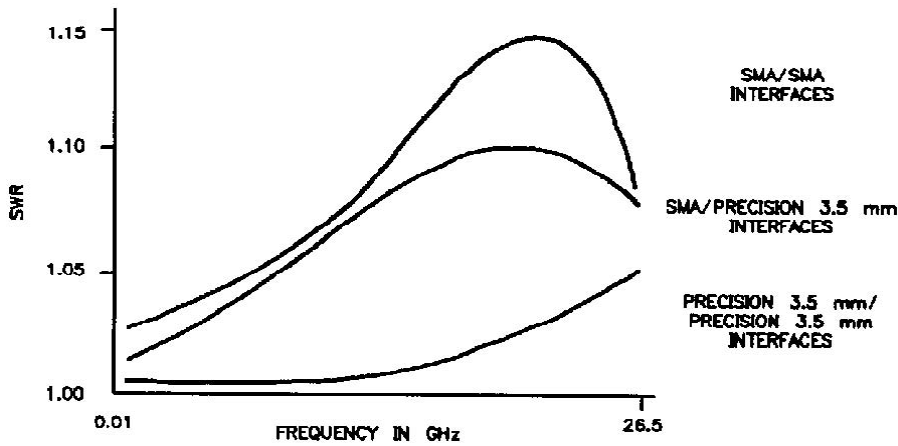
( Amphenol Precision Connector ) の名称で販売されています。脱着回数 3000回以上保証



7mm 上図 Slotted Collet型  
下図プレシジョン型



上から  
3.5mm (m)  
3.5mm (f)

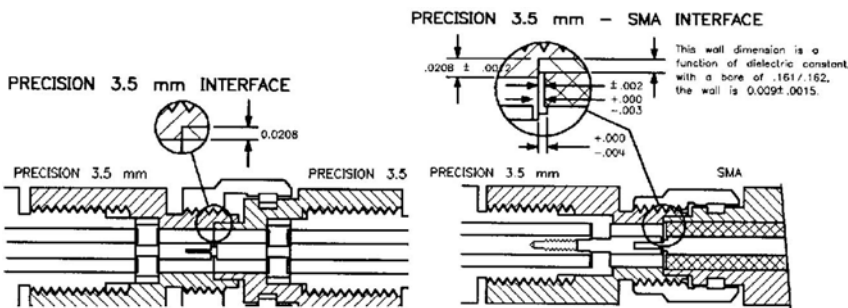


3.5mmコネクタは、外部導体壁面が厚いため 3000回以上の脱着が可能です。

SMA、2.92mmコネクタとダイレクトに接続が可能です。しかし伝送路のサイズが異なるため接続面で反射が起こります。注意すべきは SMAコネクタとの接合で、SMAの加工精度が悪く、特に

3.5mmメスコネクタの性能を劣化させる原因になります。

3.5mmコネクタは、SMAコネクタより反射係数が非常に低く、3.5mm-3.5mmの接続は SMA-SMA接続より格段に優れたマッチング特性をもっています。

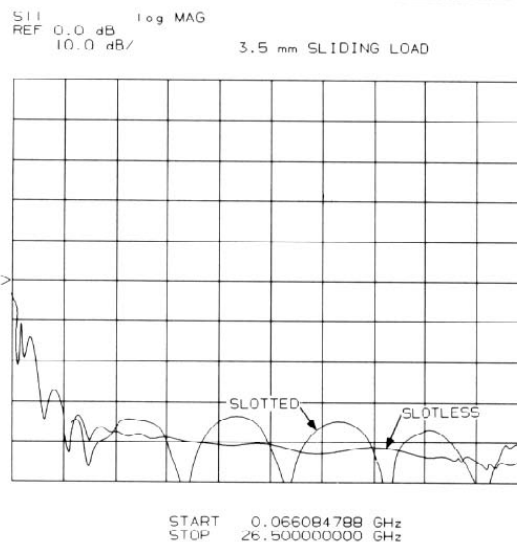
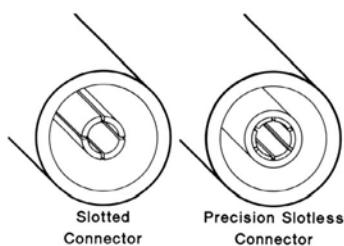


左のグラフは 3.5mmコネクタが SMAコネクタに比べて、如何に反射が小さく整合性に優れているかを示しています。また SMA-SMA接続よりも SMA 3.5mm接続の方が反射係数が低いことが分かります。

(\* SMAとの接合面にはギャップが生じてしまう。これが反射係数の悪化を招く)

## スロットレス・メスコネクタ

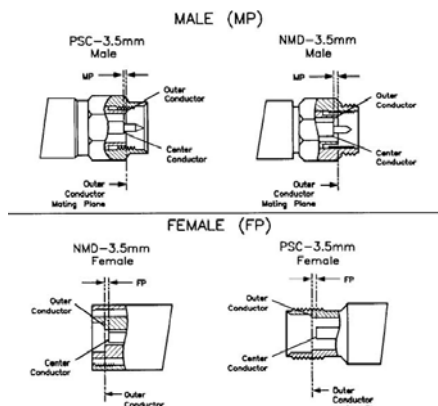
通常の slottedコネクタとより精密な Precision Slottlessコネクタの中心導体の違いを分かりやすくイラストにしました。オスピンと接合したときに、メスの中心導体の寸法が変わらない PRECISION SLOTLESSの方が反射特性が優れていることが実測値からも分かります。SLOTTEDコネクタの方に、多重反射と見られる大きなリップルが生じています。



## NMD3. 5mm

テストセットへのケーブルの脱着回数が多く、精密測定が多いベクトル・ネットワーク・アナライザではできるだけテストポート・コネクタの性能を高め、誤差発生要因を減らす工夫が必要です。アジレント・テクノロジー社の VNA テストセットには、特殊な 3.5mm コネクタを使用しています。それが、NMD3.5mm (HP NETWORK MEASUREMENT DIVISION 3.5mm) です。計測器用に設計された特殊な

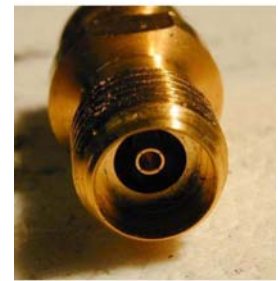
3.5mm コネクタで、外部導体を肉厚にして機械的強度を高め、外部からのメカ的ダメージを受けにくくしています。



## 2.92mm / K

Up To 40GHz

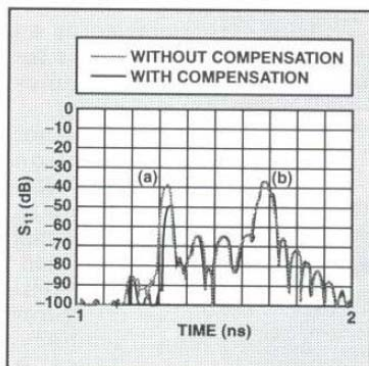
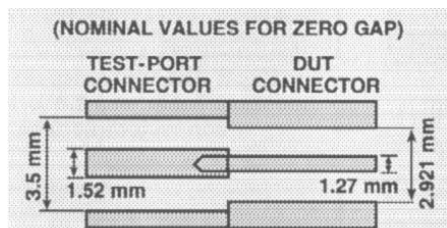
2.92mm コネクタは現在では、K コネクタとして広く知られています。そしてこの K コネクタは、Wiltron社が市場に紹介して良く知られる様になりましたが、オリジナルの 2.92mm デザインにほとんど手を加えられずに呼び名だけ変えられて“K”としたことはあまり知られていません。この 40GHz コネクタは、Wiltron社が設計したコネクタではないのです。実際には、1974年、Maury Microwave社の MARIO MAURY 氏が設計しました。MPC3 と呼ばれた当初のコネクタを採用する大手計測器メーカーがなく、市場に出回るのはほとんどなかったようです。1980年代初頭、Weinschel Engineering と Wiltron Company がこのコネクタを利用し始めました。1983年になって、Wiltron社の BILL OLDFIELD 氏が、K コネクタとして市場に出しました。オス・コネクタの中心導体寸法をオリジナルの設計のものよりやや短くして、接続時のミス・アライメントによるダメージを小さくしたのです。このコネクタの特長は、SMA や 3.5mm とコンパティビリティをもち、40GHz まで使用でき、安価であるという点で、近年良く使用されるようになりました。しかし、メス側中心導体の金属壁厚が薄くその為メカ的なダメージを受けやすく、特に SMA との接続時には注意したいところです。SMA 自体が加工精度が低く相手側のコネクタを破損しやすいからです。故に、このメスの金属壁厚の不足により、スロットレス・コネクタ化することはほとんど不可能で、今日 K コネクタのスロットレス・メスコネクタがないのはそのためです。スロットレス・コネクタがないということは精密な校正標準器ができないということにもなります。よって HP 社はこのコネクタを自社の計測器用標準コネクタとして採用しませんでした。脱着回数 400 回以上



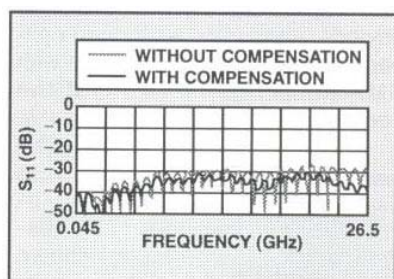
上から Anritsu K (f)  
(Terminator) Agilent  
2.92 (f) (Adapter) Agilent  
2.92 (m) (Adapter)

## 2.4mm/ APC-2.4 / OS-50 Up To 50GHz

下図は、Kコネクタ（2.92mm）を3.5mmに接続したときに発生する不整合による反射の状態を表しています。Agilent8510Cには、Connector Compensation機能があり、違うタイプのコネクタで発生するミスマッチを補正してくれる機能があります。



The time domain measurements of a 3.5 to 2.92 mm connector interface; (a) the step interface and (b) the load.



The frequency domain measurements of a 3.5 to 2.92 mm connector interface.

2.4mmコネクタと1.85mmコネクタは、Hewlett-Packard社で同時に開発されました。1986年、IRELANDのEUROPEAN MICROWAVE CONFERENCEにてHP社のJULIUS BOTKA、PAUL WATSONらによって発表されました。当時WILTRON社が販売していた40GHz帯Kコネクタよりも高性能なコネクタをめざして開発されたのです。SMAや3.5mmコネクタとのコンパチビリティを捨てる代わりに、Kコネクタがかかえる問題を全てクリアすることができたのです。しかし2.4mmコネクタは高周波コネクタであるが故に、小型で加工の許容誤差がとても厳しいため、どうしても高価になりがちでした。そこで開発初期、HP社はAMPHENOL社とMA/COM OMNI SPECTRA社の2社に協力を仰ぎ3グレードのラインアップを揃え、用途に応じて選択ができるようにしたのです。すなわち、METROLOGY GRADE (PSC-2.4), INSTRUMENT GRADE (APC-2.4), PRODUCTION GRADE (OS-50)です。MA/COM社は、一般的な使用のためのProduction Gradeを担当し、比較的安価に市場に出すことができました。OS-50シリーズがそれです。Amphenol社は、Instrument Gradeのコネクタの供給会社となりました。現在APC 2.4という商標で販売しています (Amphenol Precision Connector 2.4)。HPは、ハイパフォーマンス METROLOGY GRADEコネクタを開発担当しました。このようにしてHP、MA/COM、Amphenolの3社はお互いに協力して、マイクロ波の市場に2.4mmコネクタを供給してきたのでした。

2.4mmコネクタは、2.92mm(K)やSMAと接合しない設計にしてある為、接合による破損はほとんどありません。

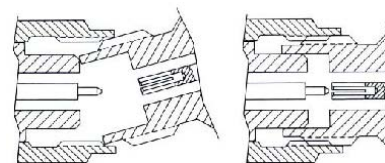
写真を見てください。3.5mmと比べると接合面が広く機械強度を上げていることがわかります。これは3.5mmよりデリケートであるが故に起こりやすい外部からの曲げや衝撃を避けることができるのです。また、メスの中心導体の壁厚は3.5mmと同じにしています。さらにオスの中心導体は

3.5mmに比べて40%程短くしています。精密型スロットレス・コネクタの2.4mmは、校正キット・ベリフィケーションキット等に使用されています。Hewlett-Packard社はこのコネクタの特許を放棄し、標準コネクタへとしました

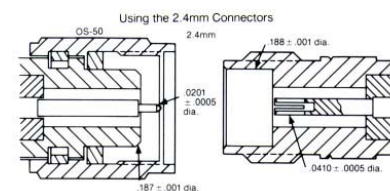
1.85mmとの接続可能。  
5000回以上の脱着保証。



上から  
2.4mm (m)  
2.4mm (f)



ミスアライメントを無くすための工夫です。まず外部導体が正しく接合した後に中心導体が接合するように設計されています。



上図は、PRODUCTION GRADEの寸法図

### 2.4 mm CONNECTOR GRADES

	Production	Instruments	Metrology
Performance:	Medium	High	High
Return Loss at 18 GHz	>28	>34	>42
# Connections:	>500	>20,000	>20,000
Cost:	Low	Medium	High
Applications:	Cables, Adapters, Components, Microstrip, Stripline Assemblies	Test Equip., Adapters, Attenuators, Systems	Standards Loads, Opens, Shortals, Adapters

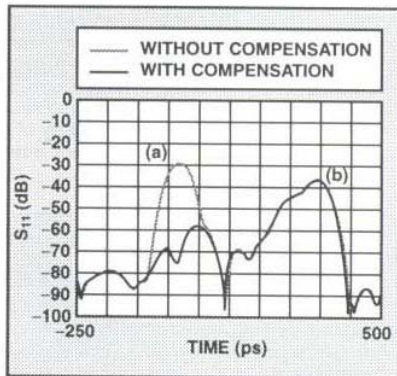




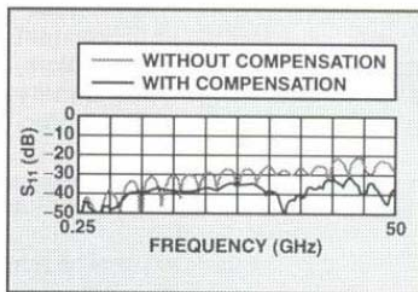
# 1.0mm

Up To 110GHz

下図は、1.85mmコネクタを2.4mmに接続した場合の反射を周波数ドメインとタイムドメインとで観測したものです。2.4mmと1.85mmとは、外部導体寸法、中心導体ともに寸法が違うため反射が生じます。タイムドメイン・ゲーティングでこの不連続による反射を取り除くこともできます。



The time domain (bandpass) measurements of a 2.4 to 1.85 mm connector interface; (a) the step interface and (b) the load.



The frequency domain measurements on a 2.4 to 1.85 mm connector interface.

1989年、Hewlett-Packard社の PAUL WATSON は、110GHzまで使用できる同軸コネクタを開発、IEEE P.287 Precision Connector Standards Subcommitteeを通じて紹介されました。外部導体 1.0mm、中心導体 0.43mm で設計し、最大動作周波数 135GHz、使用最大周波数 110GHzというスペックです。HP社はこのコネクタの特許権を放棄、IEEEの標準コネクタとなりました。1mmコネクタは機械強度にも考慮されており、規定回数以上の脱着強度や接続再現性の要求スペックを満たしています。このコネクタの各部品は大変小さく精密機械加工が大変困難でした。従って現在 1.0mmを製造しているコネクタメーカーは、HP社（現 Agilent Technologies, Inc.）の他、ドイツの Rosenberger社（輸入代理店伯東）や日本の WAKA製作所（販売：株式会社販売関東電子応用開発）の限られたコネクタメーカーのみとなっています。脱着 3000回以上を保証



上から  
1.0mm (m)  
1.0mm (f)

# W(1.1mm)

Up To 110GHz

一方、Wコネクタ（1.1mmコネクタとも呼ばれ、1996年 Anritsu/Wiltron社によって、開発されました。SMAコネクタと同様にその構造はシンプルです。ケーブルの中心導体を剥いて先端を鋭く削り、そのままオス・コネクタの中心導体にするもので、低コストで製作ができます。しかし、機械的強度に弱く IEEEの標準コネクタに採用されませんでした。



## マイクロ波同軸コネクタのサイズ比較

この写真は、代表的なマイクロ波同軸コネクタの大きさを比較したところです。周波数が高くなるにつれてコネクタサイズも小さくなっていきます。

## 適正トルクとトルクレンチ

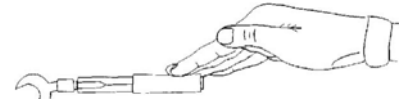
これらの同軸コネクタを適正に取り扱うための重要で必要不可欠なのが、トルクレンチです。トルクレンチとは、写真のようにレンチの先端が規定トルク以上になると、折れ曲がる構造になっています。何故トルクレンチが同軸コネクタを取り扱う上で必要不可欠なのでしょう？皆さんはコネクタを接合するときに、レンチを使用することは多いでしょう。なぜなら、手締めだとあまりよくトルクがかからず接続が不完全になり、測定再現性が劣化するからです。にもかかわらず、トルクレンチが手元になく、モンキーレンチや固定のレンチを使って、目いっぱい締め付けている例を何度となくお目にかかります。これは非常に危険な行為と言えます。マイクロ波コネクタは、その加工精度は非常に高いものが多く、一般的にとてもデリケートなものなのです。トルクを適正トルク以上にかけると、どうなるのでしょうか？多くの場合、コネクタの堅牢さに助けられて不具合は発生しませんが、規定トルクを大幅にオーバーするような締めつけ方をしたり、堅牢性に劣るコネクタ（特に機器内部接続用に設計された SMAコネクタや外部導体金属壁厚の薄い

2.92mmなど）では、締め付けすぎると“中心導体同士が物理的に押し合い”状態になってひどい場合は破損してしまいます。ほんのちよつとのずれやギャップは、コネクタの整合性を劣化させリップルを発生させます。高周波コネクタはと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うべきです。注意しましょう。下表は、各マイクロ波コネクタの適正トルクとトルクレンチをまとめたものです。分かりにくいところは、SMA用トルクレンチの使い分けでしょう。SMA-SMA、SMA(m)-3.5(f)の場合は5ポンドのSMA用を使用します。ところが、SMA(f)-3.5(m)の場合は8ポンドのトルクレンチを使用しても構いません。

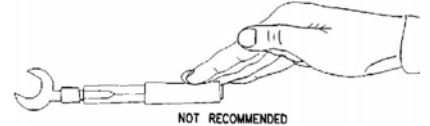
PROPER CONNECTOR TORQUE

	Torque cm-kg	Torque N-cm	Torque in-lbs	Wrench P/N
Type-N、 7mm			12	85054-60024 8710-1935
3.5mm	9.2	90	8	8710-1765
NMD3. 5 NMD2. 4	9.2	90	8	8710-1764
SMA	5.7	56	5	8710-1582
2.4mm	9.2	90	8	8710-1765
1.85mm	9.2	90	8	8710-1765
1.0mm			4	8710-2079

トルクレンチは、次のように指を添えるようにして適切にトルクをかけてください。無理に力を加えないように支えてください。



トルクレンチの回す方向にも気をつけてください。下図は悪い例です。



悪い例です。トルクレンチを握り締めて回すと、過剰にトルクがかかります。また、回転の中心がずれて繊細なコネクタにダメージを与えることもありますので注意してください。



7mm用 12ポンド-インチ



NMD3. 5mm/2.4mm用 8ポンド-インチ



1.85mm, 2.4mm, 3.5mm用

8ポンド-インチ



1.0mm用 4ポンド-インチ



SMA用 5ポンド-インチ