

# カスケード・マイクロテック社 プローブ・ステーションを用いた 高精度インピーダンス測定 アプリケーション・ノート 1369-3



## 1. はじめに

電子機器の小型化に伴い、部品のIC化やモジュール化が進むにつれ、コンデンサやコイルのような部品もICやモジュールの中に取り込むケースが多くなってきました。例としては、スパイラル・インダクタや薄膜誘電体によるコンデンサを形成するケースが上げられます。これらの部品は比較的小さなインダクタンス値やキャパシタンス値

を持ち、一般に高精度測定器を用いなければ測定が困難です。

ここで紹介する**Agilent E4991A** RFインピーダンス/マテリアル・アナライザと**Agilent 4294A** プレシジョン・インピーダンス・アナライザは十分な性能をもち、プローブ・ステーションと組み合わせることで、前述のようなマイクロ・コンポーネントの測定を可能にします。

本アプリケーション・ノートでは、システムを組む際の、システム構成、インストール、校正、システムの測定性能などの詳細について解説していきます。



Agilent Technologies

## 2. プローブ・ステーションを用いた1ポート・インピーダンス測定アプリケーション

表2-1に主要なアプリケーションを示します。例えば、スパイラル・インダクタのアプリケーションでは、Qの高い数nHのインダクタの開発が試みられています。また、ICパッケージでは、ピン間の容量 (pF) やピンの残留インダクタンス (nH) の測定等も行われています。

一般にこれらのアプリケーションでは、キャパシタンス値と損失係数、または、インダクタンス値とQ値 (クオリティ・ファクタ) を精度よく測定する必要があり、広いインピーダンス範囲で、高精度なインピーダンス測定器が必要とされます。

インピーダンス・アナライザは、これらのインピーダンス測定ニーズを満たす性能を持ち、プローブ・ステーションと組み合わせることで、これらのアプリケーションに最適なソリューションを提供します。周波数に応じて2種類の測定器Agilent E4991Aと、Agilent 4294Aがあり、測定器に応じてケーブル接続や校正の方法が異なります。それぞれの測定器のシステムについて次章以降で解説します。

## 3. Agilent E4991AによるRF帯測定システム (1 MHz - 3 GHz)

### 3.1 測定原理

E4991AはRF I-V法と呼ばれる測定原理を採用し、3 GHzまでの高精度、広インピーダンス測定を可能にします。図3-1にそのブロック図を示します。測定部品 (Device Under Test : DUT) のインピーダンスは測定された電圧と電流から直接求められます。DUTを通った電流は、既知の抵抗の両端電圧として検知され計算されます。これらの技術に関する詳細は、「インピーダンス測定ハンドブック、第2版」(P/N : 5950-3000JA) をご参照下さい。

RF I-V法による高精度測定に加え、E4991Aでは温度安定度を高めるためにレシーバ回路に独自の工夫がされています。E4991Aはレシーバとして2つ

表2-1 プローブ・ステーションを用いた1ポートインピーダンス測定アプリケーション

| アプリケーション                | パラメータ | 最終製品                     | 周波数帯     | 測定ニーズ                                      |
|-------------------------|-------|--------------------------|----------|--------------------------------------------|
| スパイラル・インダクタ             | L, Q  | 携帯電話用RFIC                | GHz      | ・低インダクタンス測定 (nHレンジ)<br>・高 Q測定              |
| ICパッケージ                 | C, L  | ICパッケージ                  | GHz      | ・低インダクタンス測定 (nHレンジ)<br>・低キャパシタンス測定 (pFレンジ) |
| トランジスタダイオード             | C     | CMOS FETピン・ダイオード光通信用デバイス | MHz, GHz | ・C-V測定                                     |
| メモリ                     | C, D  | FRAM, DRAM, SRAM         | MHz, GHz | ・低キャパシタンス測定 (pFレンジ)                        |
| 回路上のループインダクタンスまたは浮遊容量測定 | L, C  | 高速デジタル回路                 | GHz      | ・低インダクタンス測定 (nHレンジ)<br>・低キャパシタンス測定 (pFレンジ) |
| 誘電体材料                   | C, D  | 薄膜誘電体、PCボード              | MHz, GHz | ・広いインピーダンス測定範囲<br>・低損失係数測定                 |
| ディスク・ヘッド                | L, Q  | 磁気ヘッド (MR,GMR,TMR)       | MHz, GHz | ・低インダクタンス測定                                |

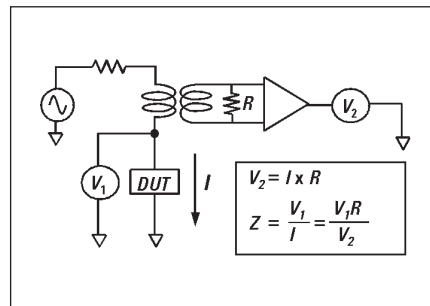


図3-1 RF I-V法

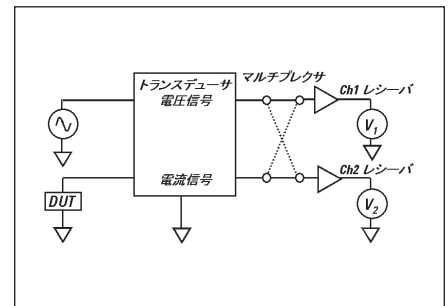


図3-2 E4991Aのレシーバ構成

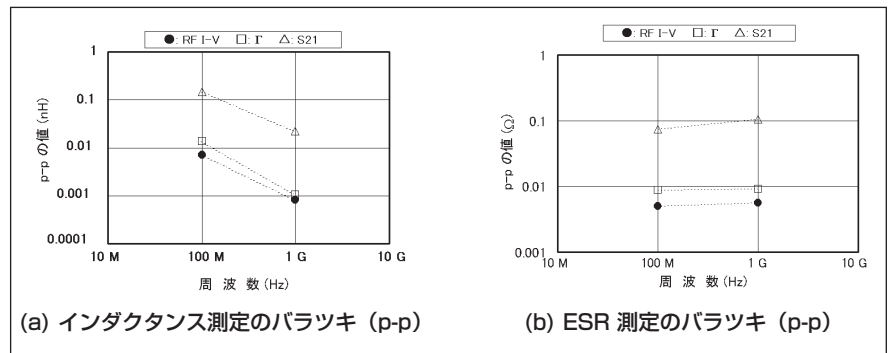


図3-3 1nHのインダクタ測定時の再現性

の電圧測定回路を持ち、1回の測定において、入力電圧V1とV2は、入力スイッチでマルチプレクスされ、それぞれのレシーバで交互に測定され平均化されます。(図3-2参照)。このことにより、温度などによるドリフトをキャンセルして、より安定な測定を実現しています。

図3-3と図3-4にインピーダンス測定におけるE4991Aとネットワーク・アナライザの比較データを示します。

E4991Aの測定法としてRF I-Vを、ネットワーク・アナライザの測定法として反射測定によるGammaと伝送測定によるS21を用い、それらの測定精度の違いを調べます。図3-3は1 nH測定における測定再現性を表わし、図3-4は温度に対する安定度を表しています。E4991AのRF I-V法は再現性が高く、温度安定度にも優れていることが確認できます。一般に、ネットワーク・アナライザに比べ、インピーダンス・アナライザの方が広い範囲でのインピーダ

ンス測定精度に優れ、例えば、ここで示した100 MHzにおける1 nHのインダクタ測定では、インピーダンスは約600 mΩと小さいためその差が顕著に現れています。

インピーダンス測定におけるインピーダンス・アナライザとネットワーク・アナライザの性能の違いについては、E4991A アプリケーション・ノート 1369-2 (P/N: 5988-0728JA) に詳しく解説されていますので、ご参照下さい。

### 3.2. システム構成

E4991Aを用いたプローブ・ステーション・システムの構築には以下のものがが必要です。

- 1) E4991A (オプション010 プローブ・ステーション接続キット付き) (表3-1参照)
- 2) カスケード・マイクロテック社製プローブ・ステーション、プローブ・ヘッド、インピーダンス標準基板 (ISS: Impedance Standard Substrate) (表3-2参照)

E4991Aのオプション010は、プローブ・ステーション接続に必要なケーブル類が含まれるため、これを用いることによりプローブ・ステーションへの接続が正確かつ容易に行えます。

カスケード・マイクロテック社の製品に関しては、直接カスケード・マイクロテック社よりご購入下さい。

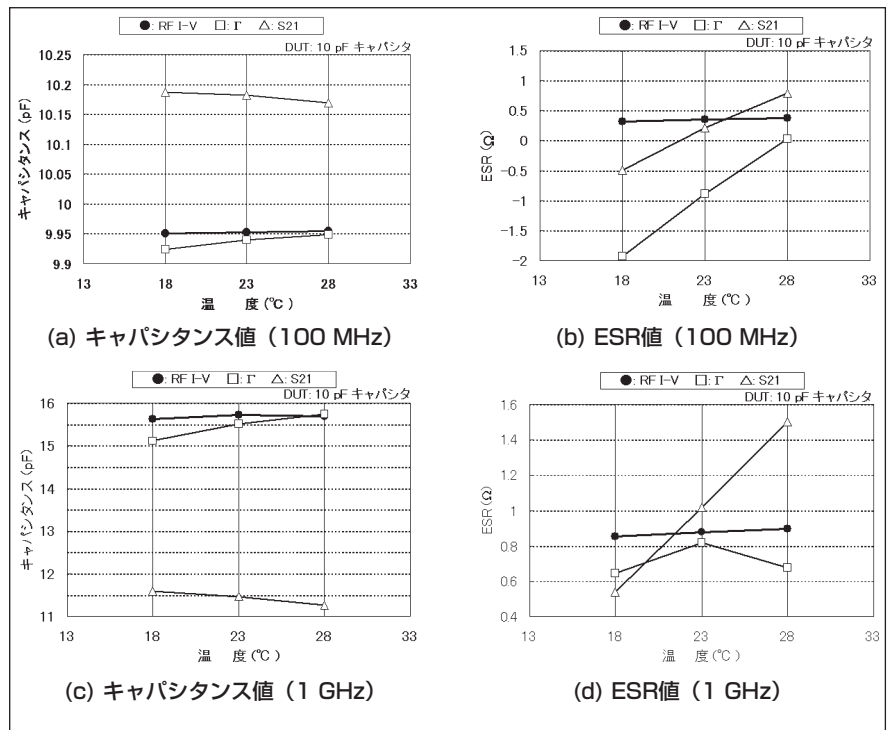


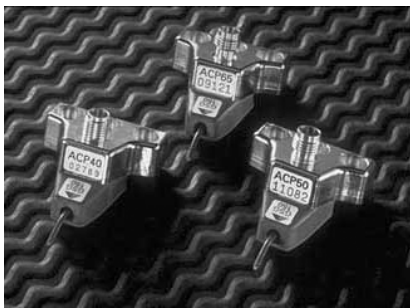
図3-4 温度安定性

表3-1 E4991Aシステムに必要なアジレント社製品

| 製品名      | 内容                     | 備考                                                                                                                                                        |
|----------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| E4991A   | RF インピーダンス/マテリアル・アナライザ |                                                                                                                                                           |
| オプション010 | プローブ・ステーション接続キット       | 以下のものを含まれます。<br>・E4991A小型テスト・ヘッド (1 ea.)<br>・1 m ケーブル (1 ea.)<br>・N (m)-SMA(f) アダプタ (3 ea.)<br>・3.5 mm-7 mm アダプタ (1 ea.)<br>・ネジ (4 ea.)<br>・ワッシャー (4 ea.) |

表3-2 E4991Aシステムに必要なカスケード・マイクロテック社製品

| 製品名         | 内容                                                                                      | 備考                                                                                                                                                                   |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| プローブ・ステーション | カスケード・マイクロテック<br>サミット 9000/11000/<br>12000 シリーズ                                         |                                                                                                                                                                      |
| プローブ・ヘッド    | カスケード・マイクロテック<br>ACP シリーズ<br>ACP40-GS<br>ACP40-SG<br>ACP40-GSG<br>HPC シリーズ<br>HPC40-GSG | 周波数範囲:<br>DC-40 GHz<br>ACP シリーズ・プローブ・ピッチ:<br>50-1250 μm<br>(標準: 100, 125, 150, 200, 250 μm)<br>HPC シリーズ・プローブ・ピッチ:<br>100, 125, 150, 200, 250 μm<br>(標準: 100, 150 μm) |
| インピーダンス標準基板 | インピーダンス標準基板                                                                             |                                                                                                                                                                      |
| その他の必要な部品   | マウント・プレートと<br>セミ-リジッドケーブルのセット                                                           | 部品番号 (カスケード・マイクロテック)<br>123-723 (サミット 9000用)<br>123-724 (サミット11000/12000用)                                                                                           |



### 3.3 インスタレーション

図3-5はE4991Aを用いたシステムのシステム構成とケーブル接続例を示しています。

E4991Aの測定精度は、テストヘッドの7 mmコネクタ端面で規定されています。プローブ・ステーションに接続するには、延長ケーブルを用います。延長ケーブルは、測定上の誤差要因になる可能性があるため、できるだけ短くかつ非常に安定したものを用いる必要があります。また、オプション010のテストヘッドは、標準のものよりも小さいものを採用していますが、これにより、テストヘッドをプローブヘッドの近くに設置し、延長ケーブルを短くすることができます。

### 3.4 校正

オープン/ショート/ロード校正をカスケード・マイクロテック社のプローブ・ヘッドの先端において、カスケード・マイクロテック社のインピーダンス標準基板 (ISS) を用いて行います。

校正を行う前に、キャリブレーション・キットの値をE4991Aに入力する必要があります。これを行うことで、より精度の高い校正が可能になります。キャリブレーション・キットの値はカスケード・マイクロテック社のプローブ・ヘッドの箱に記載されています。

校正には2つの異なる校正測定点モードがあり、校正時に使われる周波数設定が異なります。一つは「周波数固定点モード」と呼ばれ、校正データはあらかじめ測定器に記憶された特定の周波数点で測定されます。この場合、

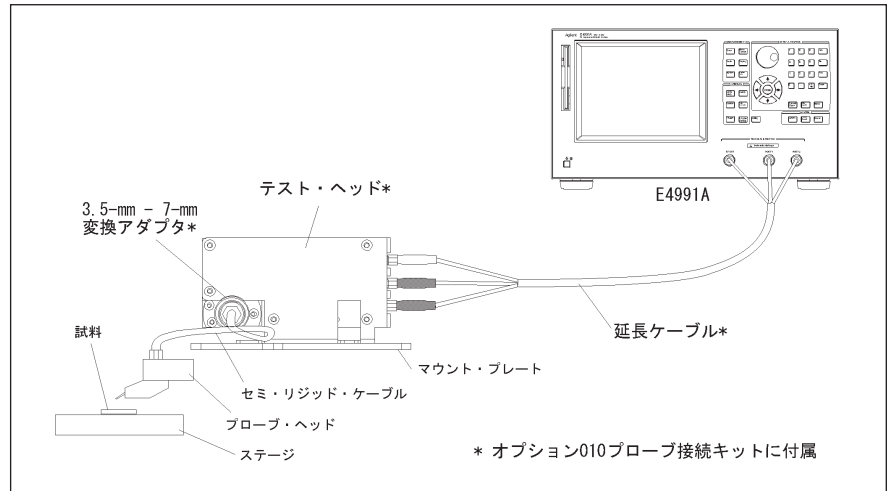


図3-5 E4991Aを用いたプローブ・ステーション・システム

校正データは全周波数範囲で有効になり、DUTの測定時に設定した周波数点が校正データ測定点と異なる場合においても、校正データが補間されて適用されます。もう一つのモードは「ユーザ定義点モード」と呼ばれ、校正データはユーザが指定した周波数点でのみ測定されます。この場合、測定は最も精度よく行えるという利点がある反面、周波数範囲を変更したときは再度校正を実施する必要があります。プローブ・ステーションを用いた今回の測定では、測定の精度を重視し、「ユーザ定義点モード」を用いて校正を行います。

高精度測定用に開発された測定治具で、今回測定の基準値をとるために用います。この測定では、プローブ・ステーションと接続するケーブル延長部の影響を見ることが主要な目的です。

図より両者の結果は、平均値でみるときわめてよく一致していることがわかります。また、平均値からの偏差 ( $3\sigma$ ) は最大でも0.016 nHであり、1 nHという微小インダクタの測定としては非常によい測定結果が得られています。

### 3.5 測定結果

測定結果を図3-6に示します。ここでは、1 nHのSMDインダクタを異なる2つの測定治具を用いて測定しました。1つは前述のカスケード・マイクロテック社のプローブ・ステーション、もう一つはSMD部品用の測定治具であるAgilent 16196Bです。16196Bは、SMD部品の

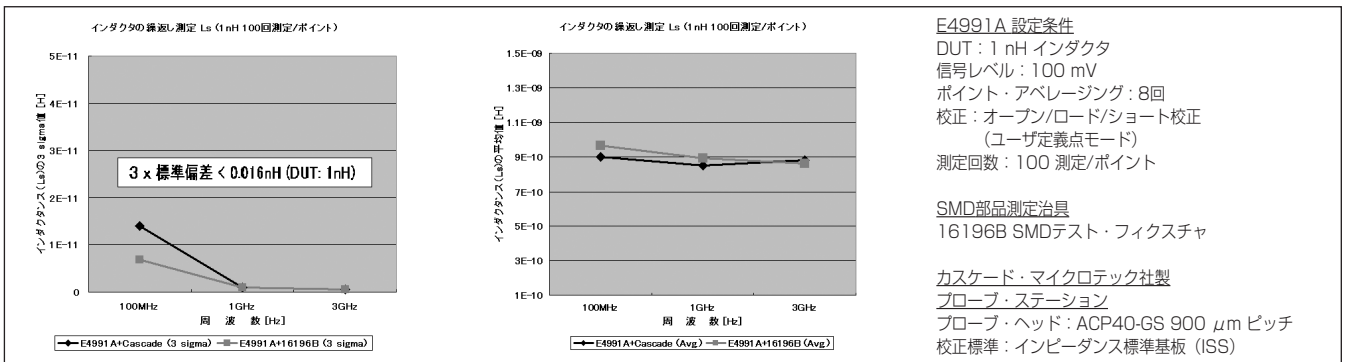


図3-6 Agilent E4991Aシステムによる測定結果

## 4. Agilent 4294AによるLF/HF帯測定システム (40 Hz - 110 MHz)

### 4.1 測定原理

4294Aは、インピーダンス測定に、自動平衡ブリッジ法を採用しています。この測定技術を使うことにより非常に高精度、かつ広いインピーダンス範囲での測定が可能になります。また、4294Aによりこれまで上限が数十MHzに限られていた周波数範囲が、110 MHzと広くなりました。図4-1にそのブロック図を示します。この回路では、L点(仮想接地点)の電位をほぼ0 Vに保ち、DUTを流れる電流が、そのままレンジ抵抗Rを流れるように動作します。DUTのインピーダンス値はHigh側の電圧測定値と、レンジ抵抗両端の電圧値として得られる電流測定値から計算されます。

測定精度向上のため、自動平衡ブリッジ法は図4-2に示される4端子対ケーブル接続法と併せて使用されています。このため、DUTを4294Aに接続する際には、これらの測定法とケーブル接続法を有効に生かすための以下のような注意が必要です。

- 1) ケーブルの先端では、4本のケーブルの外皮(ガードと呼ばれる)を全て接続する必要があります。これは、測定系を流れる電流が、測定器に戻るために必要となります。測定精度向上のためには、4端子対ケーブル接続法の構成をできるだけ先端近くまで保つことが望ましく、そのためにはこのガードの接続を、プローブ先端近くで行う必要があります。
- 2) 測定系のケーブルは、すべて大地グラウンドから浮いている必要があります。これは自動平衡ブリッジ法の仮想接地点は、大地グラウンドから浮いている必要があるため、大地グラウンドに接しているとブリッジ回路が正しく動作しなくなるので注意が必要です。

測定原理に関する詳しい解説は、「インピーダンス測定ハンドブック、第2版」(P/N 5950-3000JA)をご参照下さい。

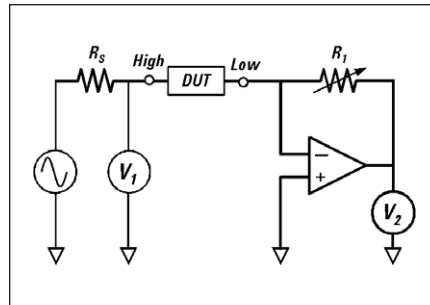


図4-1 自動平衡ブリッジ法

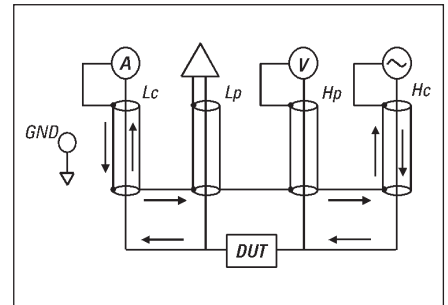


図4-2 4端子対ケーブル接続法を用いた自動平衡ブリッジ測定回路

### 4.2 システム構成

4294Aを用いたプローブ・ステーション・システムの構築には、以下のものがが必要です。

- 1) 4294A プレシジョン・インピーダンス・アナライザ (Agilent 16048G/H テスト・リード付き) (表4-1参照)
- 2) カスケード・マイクロテック社製プローブ・ステーション、プローブ・ヘッド、インピーダンス標準基板 (ISS) (表4-2参照)。

カスケード・マイクロテック社の製品に関しては、直接カスケード・マイクロテック社よりご購入下さい。

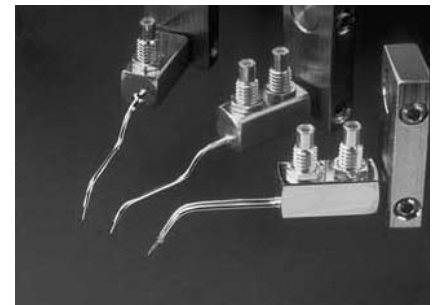


表4-1 4294Aシステムに必要なアジレント社製品

| 製品名       | 内容                           | 備考                            |
|-----------|------------------------------|-------------------------------|
| 4294A     | プレシジョン・インピーダンス・アナライザ         |                               |
| 16048G/H  | テスト・リード、BNC (1 m または 2 m)    |                               |
| その他の必要な部品 | BNC (m)-BNC (m) アダプタ (4 ea.) | 部品番号 (アジレント・テクノロジー) 1250-0216 |

表4-2 4294Aシステムに必要なカスケード・マイクロテック社製品

| 項目          | 製品名                                        | 備考                                                                 |
|-------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| プローブ・ステーション | カスケード・マイクロテック サミット 9000/11000/12000シリーズ    |                                                                    |
| プローブ・ヘッド    | カスケード・マイクロテック DCP-100 シリーズまたは DCP-HTR シリーズ | 周波数範囲 : DC - 100 MHz<br>プローブタイプ : Single-tip または Dual-tip (Kelvin) |
| その他の必要な部品   | トライアキシャル・ケーブル (4 ea.)                      | 部品番号 (カスケード・マイクロテック) 104-330-LC                                    |
|             | トライアキシャル BNC (m) - BNC (f) アダプタ (4 ea.)    | 部品番号 (カスケード・マイクロテック) 103-837                                       |
|             | シールド付きケーブル (1 ea.)                         | 部品番号 (カスケード・マイクロテック) 123-625                                       |

### 4.3 インスタレーション

ケーブル接続の概念図を図4-3に示します。また、接続の実例を図4-4に示します。よい接続を実現するには、以下の5点について注意を払う必要があります。

- 1) ケーブルの延長には16048G/Hを使用して下さい。このケーブルは当社が特性を評価し、延長端での測定精度を規定しています。ケーブル端をプローブ近くに設けられたコネクッション・プレートに図4-4(b)に示されるアダプタを用いて接続します。
- 2) コネクッション・プレートからの延長を、4本の短いトライアキシャル・ケーブルを使って行います。このとき、4端子対ケーブル接続法の構成がそのまま継続されるよう注意を払います。
- 3) トライアキシャル・ケーブルを、プローブ・ヘッドに接続します。プローブ・ヘッドはHigh側とLow側の2本1組が必要で、測定器からくるHp, HcをHigh側に、Lp, LcをLow側に接続します。
- 4) Low側とHigh側の外皮（ガード）をお互いに接続します（図4-4中の(A)を参照）。

図4-5に、2つの異なるコンタクト方法を示します。2端子接続ではコンタクト抵抗の影響を避けることができず、DUTのインピーダンスが小さい時には、それが測定誤差の原因になります。このため、目安として100 Ω以下のインピーダンスを測定する際には、4端子接続（ケルビン接続）を使うことを推奨します。カスケード・マイクロテック社では、これに対応する2種類のプローブ・ヘッドを提供しています。DCPシリーズ・プローブ・ヘッドの“Single-Tip”タイプは2端子接続用、“Dual-Tip (Kevin)”タイプは4端子接続用です。

最後に、図4-3、図4-4の接続例では延長部にトライアキシャル・ケーブルを使用しました。これは高インピーダンスの測定アプリケーションにおいて、微小電流の測定を精度よく行うため

で、一般にはこの方法を推奨します。仮に、インピーダンスがさほど大きくなく、また、より簡単な接続が望まれる場合は50 Ω系のBNCケーブルの使用も可能です。この場合でも、ケーブル接続の注意点は変わりません。

### 4.4 ケーブル補正

4294Aでケーブル延長を行う場合、ケーブルを含めた測定系全体の特性を把握するためのケーブル補正（アダプタ・セットアップ）を行う必要があります。これを行うことにより、ケーブル延長時でも、110 MHzまでブリッジ回路をバランスさせることが可能になります。4294Aのオペレーション・マニュアル内の「アダプタ・セットアップ」を参考に、位相補正を以下の要領で実施してください。

- 1) “Cal”ハードキー内の“Adapter”メニューでケーブルの長さを設定します（1 mまたは2 m）。Agilent社製ケーブル（16048G/H）と、それ以降の延長ケーブルを含めた全体の長さに近いものを選択します。
- 2) Lp端子とLc端子を短絡します。カスケード・マイクロテック社の4端子接続用プローブ・ヘッド（Dual-Tip）を使用している場合、インピーダンス標準基板のショートを使用して、Lp端子とLc端子を短絡します。2端子接続用プローブ・ヘッド（Single-Tip）を使用している場合は、これらはプローブ内ですでに短絡されているためこの作業は必要ありません。
- 3) 位相補正を実施します。

4294Aのオペレーション・マニュアルのアダプタ・セットアップには、ロードも行うことが記述されていますが、今回のようなプローブ・ステーション接続時には必要ありません。この後のプローブ・ステーションの残留分の補正において、ロード補正を行うためです。

### 4.5 補正

オープン／ショート／ロード補正をプローブ・ヘッドの先端でインピーダン

ス標準基板（ISS）を用いて行います。補正を行う際、補正測定点モードとして“Compen Point : User”を選択します。4294Aには2つの補正測定点モードがあります。1つは「固定周波数モード」と呼ばれ、補正データはあらかじめ測定器に記憶された特定の周波数点で測定されます。この場合、補正データは全周波数範囲で有効になり、DUTの測定時に設定した周波数点が補正データ測定点と異なる場合においても、補正データが補間されて適用されます。もう一つのモードは「ユーザ定義点モード」と呼ばれ、補正データはユーザが指定した周波数点でのみ測定されます。この場合、測定は最も精度よく行えるという利点がある反面、周波数範囲を変更したときは再度補正を実施する必要があります。プローブ・ステーションを用いた今回の測定では、高精度な測定を重視し、「ユーザ定義周波数」を用いて補正を行います。

### 4.6 測定結果

測定の結果を図4-6に示します。ここでは、1 pF SMDコンデンサを2つの測定治具で測定して比較しました。1つは、1 mの標準ケーブルとカスケード・マイクロテック社のプローブ・ステーションを用いた4端子（ケルビン）接続でコンタクトを行うプローブ・システム、もう1つはAgilent 16034G SMDテスト・フィクスチャです。16034GはSMD部品測定用の専用治具で、今回のケースでは基準データをとるために使用しました。この測定の目的はプローブ・ステーション接続時のケーブル延長による影響をみることにあり、このためこれら2つのデータを比較します。図4-6よりプローブ・システムを用いた測定結果は、SMD測定治具を使用した値に、きわめて近い値が得られています。両者の平均値は非常によい相関があり、偏差（3σ）も1 pFの測定に対して0.005 pF以内におさまっています。

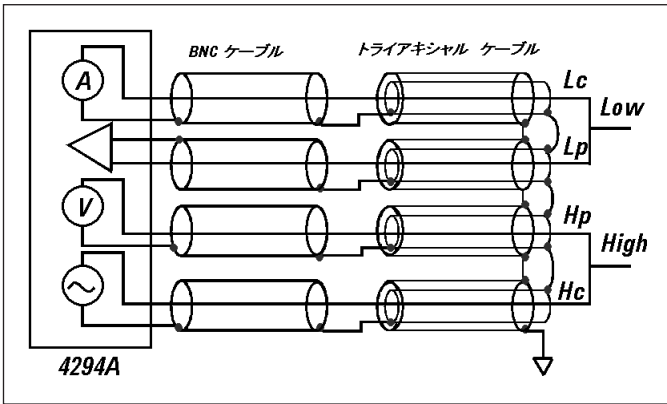


図4-3 ケーブル接続図

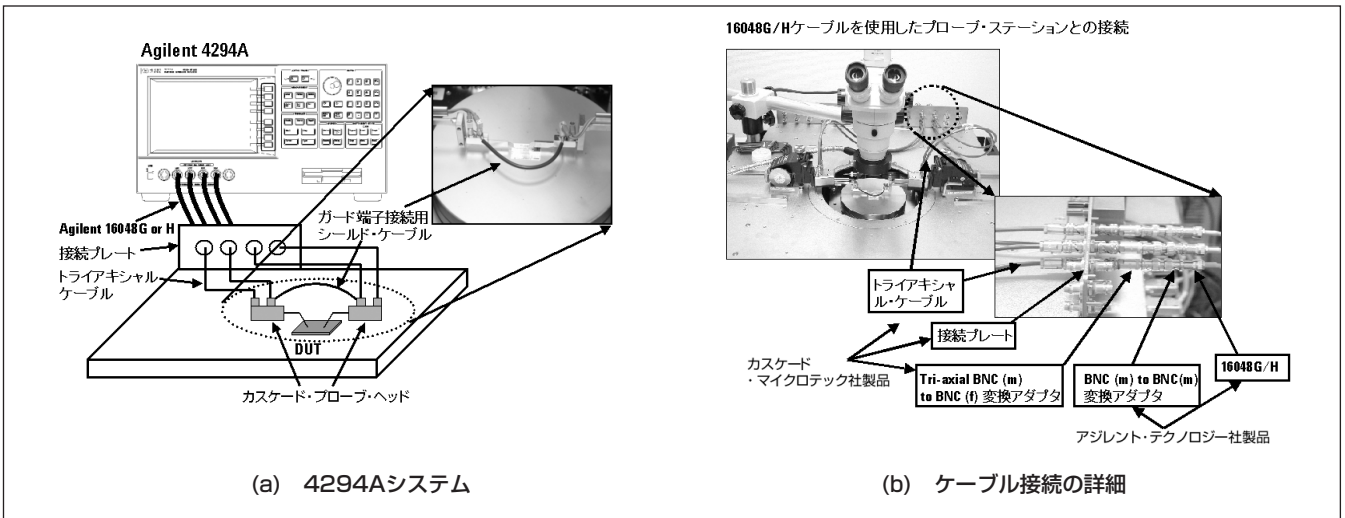


図4-4 ケーブル接続の実例

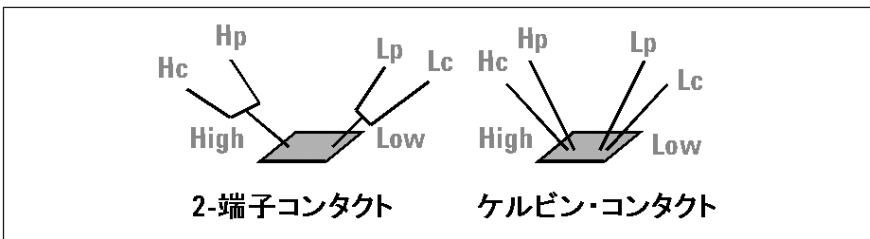


図4-5 2端子コンタクトとケルビン・コンタクト

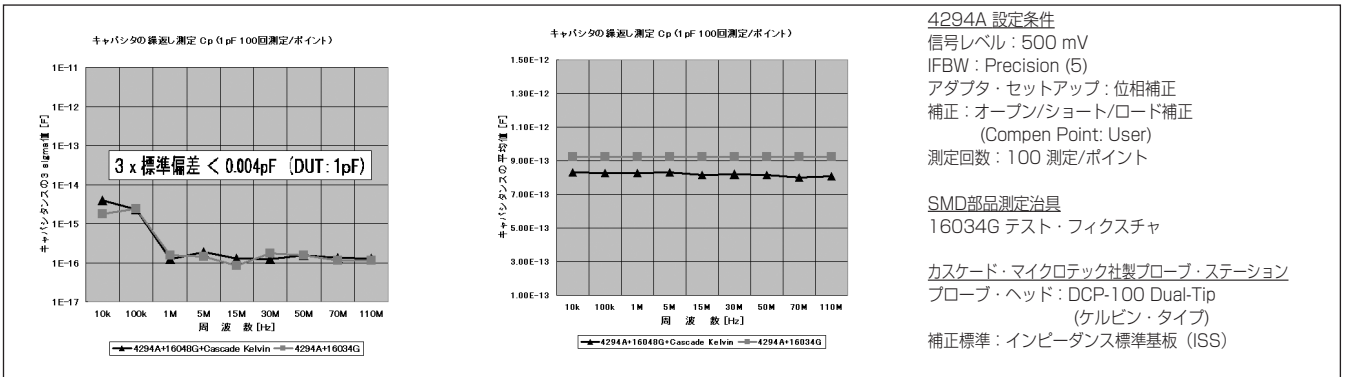


図4-6 Agilent 4294Aシステムによる測定結果

## 5. まとめ

このアプリケーション・ノートでは、インピーダンス・アナライザと、プローブ・ステーションを用いてインピーダンス測定をする方法について解説しました。プローブ・ステーションに接続するには、ケーブルの延長などの作業が必要となるものの、適切なケーブル接続と校正や補正を行えば、延長のない測定治具の場合に近い精度で測定が行えることがわかりました。このアプリケーション・ノートを参考にして、プローブ・ステーションを組み合わせた測定システムを構築し、ICウエハの素子などのインピーダンス評価のお役に立てれば幸いです。

## 参考文献

“インピーダンス測定ハンドブック第2版”  
(P/N5950-3000JA)

**Agilent E4991A** RFインピーダンス/マテリアル・アナライザ、製品カタログ  
(P/N 5980-1234JA)

**Agilent E4991A** アプリケーション・ノート 1369-2, “RF I-V法によるインピーダンス測定のネットワーク測定法に対する優位性” (P/N 5988-0728JA)

**Agilent 4294A** プレシジョン・インピーダンス・アナライザ、製品カタログ  
(P/N 5968-3808JA)

**Agilent 4294A** プロダクト・ノート 4294-2, “LFインピーダンス測定の技術限界を超える**Agilent 4294A**の新技術” (P/N 5968-4506JA)

カスケード・マイクロテック社製の製品に関しては、直接カスケード・マイクロテック社にお問い合わせ下さい。

**カスケード・マイクロテック株式会社**  
〒153-0042 東京都目黒区青葉台4-7-7  
住友青葉台ヒルズ1F  
Tel: 03-5478-6100  
Fax: 03-5478-6105  
E-mail: sales@cmj.co.jp  
URL: <http://www.cmj.co.jp>

計測  
お客様窓口

受付時間 9:00~19:00  
(土・日・祭日を除く)  
※FAXは24時間受付

TEL ☎ **0120-421-345**  
(0426-56-7832)

FAX ☎ **0120-421-678**  
(0426-56-7840)

E-mail: [contact\\_japan@agilent.com](mailto:contact_japan@agilent.com)

電子計測ホームページ

<http://www.agilent.co.jp/find/tm>

●記載事項は変更になる場合があります。  
ご発注の際はご確認ください。

Copyright 2001  
アジレント・テクノロジー株式会社



**Agilent Technologies**

July 27, 2001

5988-3279JA  
0230-01H