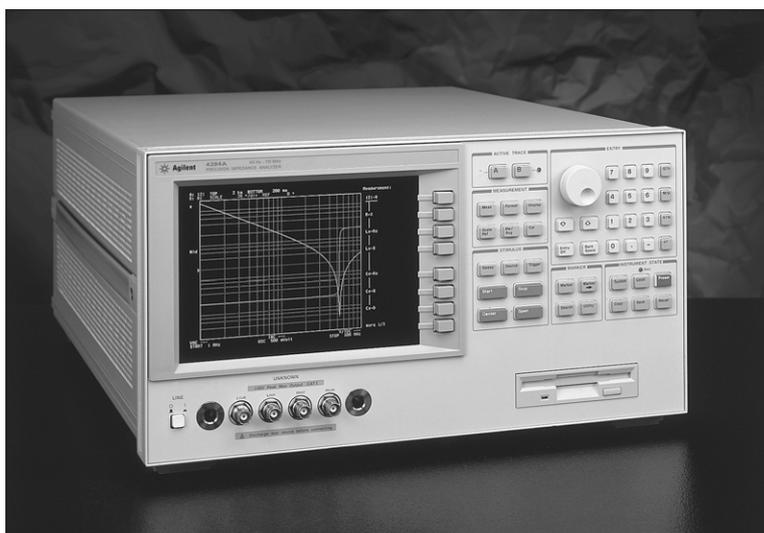


# Agilent Technologies 4294A 110MHz プレシジョン・ インピーダンス・アナライザ LFインピーダンス測定の世界限界を 超える4294Aの新技术

プロダクト・ノート 4294-2



## 1. はじめに

電子部品や材料の高周波化、高品質化にともない、インピーダンス測定器には周波数範囲が広く、高精度なものが求められています。

LF周波数帯でのインピーダンス測定では、自動平衡ブリッジ法と呼ばれる測定法が広く使われています。この方法は、高いインピーダンス測定精度や広い測定範囲が得られる利点がありますが、その回路構成の性格上、高い周波数までの使用は不可能という問題点がありました。

本プロダクトノートでは、周波数範囲拡大に成功しLF帯インピーダンス測定での新たな可能性を広げたAgilent Technologies 4294Aをとりあげ、本製品における自動平衡ブリッジ法の技術革新について解説していきます。

以下に本プロダクトノートの構成を示します。

1. はじめに
2. 従来のインピーダンス測定技術の比較
3. 自動平衡ブリッジ法の特徴
4. 自動ブリッジ法がもっていた技術的課題
5. 4294Aにおける解決1：  
周波数範囲の拡大
6. 4294Aにおける解決2：  
インピーダンス/位相測定精度の向上
7. その他の新技术1：プローブ測定
8. その他の新技术2：ケーブル延長
9. 現在のインピーダンス測定技術の比較
10. おわりに

### ご注意

2002年6月13日より、製品構成をよりわかりやすくするために、Agilent製品のオプション構成が変更されています。カタログの記載と異なりますので、ご発注の前にご確認をお願いします。



Agilent Technologies

## 2. 従来のインピーダンス測定技術の比較

表1は主要なインピーダンス測定技術の比較と従来の使用周波数範囲を示しています。

自動平衡ブリッジ法は、最も高い測定精度と広いインピーダンス範囲をもち、低周波帯のあらゆるインピーダンス測定に適した測定技術です。

IV法は、片線接地デバイスが測定できるところに特徴があり、プローブで回路部品のインピーダンス測定が可能です。しかしながら、自動平衡ブリッジ法に比べて、インピーダンス範囲が狭い、低周波までの使用ができないなどの短所があります。

RF-IV法はIV法に改良を加えてGHz帯までの周波数範囲拡大と高精度/広範囲インピーダンス測定の実現をおこなった測定技術であり、RF帯での部品/材料測定に適しています。

ネットワーク解析法は、ネットワークアナライザ測定の反射係数からインピーダンスを算出するもので、高周波までの測定が可能な唯一の測定技術ですが、インピーダンス値が測定器の特性インピーダンスから遠ざかるにつれて測定精度が大きく低下するという特徴があります。

電子部品や材料評価の高精度で広範囲にわたるインピーダンス測定では、一般に低周波帯においては自動平衡ブリッジ法、高周波帯においてはRF-IV法が使用されています。ところが、測定周波数に応じてインピーダンス値がダイナミックに変化するデバイスを測定する場合(例えば、コンデンサやインダクタなどのように)、低周波から高周波までを一台で掃引できる測定器が必要とされ、それぞれの測定技術の周波数範囲の拡大が望まれていました。また、同時にそれぞれの測定技術がもつ測定精度やインピーダンス範囲は保持する必要があります。

このような技術的背景の中、4294Aの開発は自動平衡ブリッジ法をより高い周波数範囲まで拡大しようというものとして位置しています。

表1. 従来の各種インピーダンス測定技術の比較

測定技術	長所	短所	使用周波数範囲	応用例
自動平衡ブリッジ法	高精度測定 広いインピーダンス測定範囲 LF帯の広い周波数範囲	高周波までカバーできない	5Hz-40MHz	低周波帯インピーダンス測定全般  (4194Aなど)
IV法	接地デバイス測定が可能 プローブ測定が可能	測定周波数、測定インピーダンスがピックアップトランスによって制限される	10kHz-100MHz	回路内インピーダンスの測定  (4194A+ 41941Aなど)
RF-IV法	GHz帯までの高精度なインピーダンス測定が可能 接地デバイス測定が可能	低周波帯からの掃引測定はできない	1MHz-1.8GHz	RF帯電子部品および材料の測定  (4291Bなど)
ネットワーク解析法	高周波まで測定が可能	インピーダンス測定範囲が特性インピーダンス付近に制限される	10kHz以上 高周波まで	高周波用電子部品/材料の測定  (8753Eなど)

## 3. 自動平衡ブリッジ法の特徴

自動平衡ブリッジ法の回路構成を図1に示します。

インピーダンス測定を正確に行うには、試料に印可される電圧と試料に流れる電流を正確に検出することが必要です。図1において、試料印加電圧は測定器のHp端子で検出される $V_1$ として検出されます。このHp端子は信号印加のためのHc端子と独立して設けられ、試料の近くで印加電圧を検出し正確さを増しています。一方、試料を通過した電流はLc端子に流れ込みます。この時Lc端子が大地に対して一定の電位を持つ場合、大地との間に存在する浮遊容量の影響によって電流が逃げてしまうことになります。このため、次に説

明するフィードバック回路により、Low側の電位を大地に対して電位差がない状態(仮想接地点と呼ばれる)に保ちます。

仮想接地点の実現は、ヌルループと呼ばれるフィードバック回路により行われます(図1のNull Loop部分)。入力アンプ、狭帯域高利得増幅器、出力アンプからなるヌル増幅器はLp端子の電位を0にすると共に、試料に流れた電流をLc端子に引き込み、電流検出用のレンジ抵抗 $R_r$ へと導く働きをします。レンジ抵抗の両端の電圧値を検出することにより、試料に流れた電流値の測定を行います。インピーダンス測定器は、様々な電流値の検出を高分解能で行うために、複数個のレンジ抵抗を持ちま

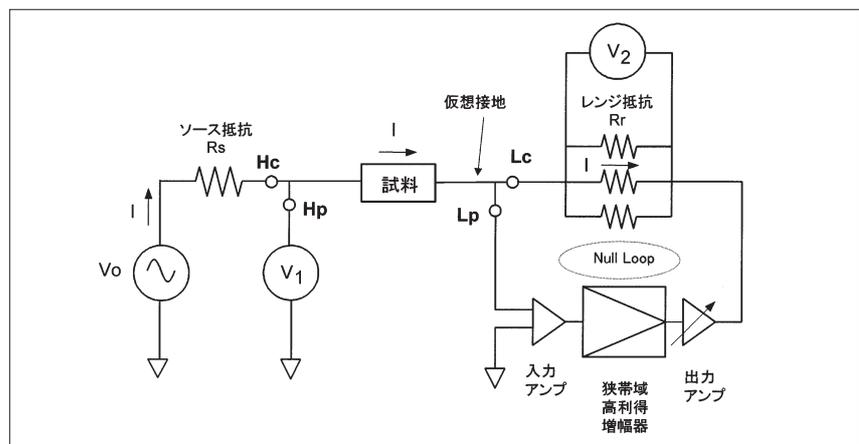


図1. 自動平衡ブリッジ法の回路構成

この測定技術に加え、実際の測定器では測定経路部に4端子対法と呼ばれるケーブル接続法を併用し、信号検出時の各端子に存在する誤差成分を最小限にとどめる工夫を行っています(図2参照)。ここで言う測定経路とは、測定器内部ブリッジ回路の電圧測定部、電流測定部などの各部分から測定器のフロントパネルを経由して部品を接続する部分までの経路を表わすと考えて下さい。4端子対法は、電流と電圧を別の端子で検出することでケーブルに存在する直列残留インピーダンスの影響を軽減することに加え、ケーブルのシールドによるケーブル間浮遊容量の低減や、ケーブルの芯線と外皮に別方向の電流を循環させることによるケーブル間相互インダクタンスの低減などの効果を得るための接続法です。これにより、経路部の影響を受けることなく低インピーダンスから高インピーダンスまでの幅広い範囲でのインピーダンス測定が可能になります。結果として、自動平衡ブリッジ法を用いた一般的なインピーダンス測定器の回路構成は図3のようになります。信号源から出力された信号は図中の矢印のように循環し、自動平衡ブリッジ法と4端子対法の利点を最大限生かして高精度な測定を実現します。

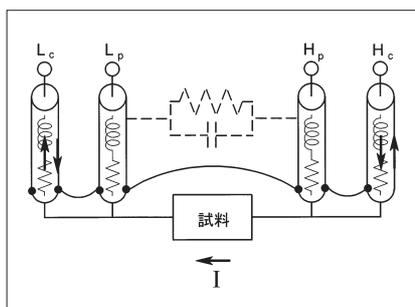


図2. 4端子対ケーブル接続法

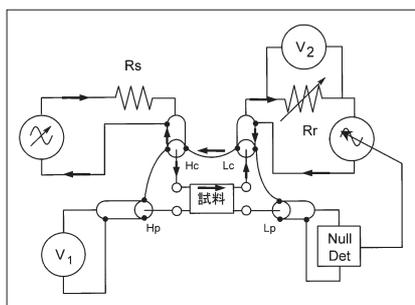


図3. 自動平衡ブリッジ法と4端子対法の併用

#### 4. 自動平衡ブリッジ法がもっていた技術的課題

このように自動平衡ブリッジ法は非常に優れた測定技術であるものの、使用周波数範囲や測定精度を向上させていく上でいくつかの技術的課題がありました。以下に順をおって解説していきます。

##### 技術的課題1：高周波測定やケーブル延長時に測定経路部に発生する定在波のためブリッジ回路のバランスが保てなくなる。

周波数が高くなると、測定経路長と信号波長の関係から、ある条件では経路内に定在波が発生して測定が不可能になる現象が現われます。最初に現象が顕著に現われる条件は、測定経路長が測定信号の波長の1/4に相当するケースです。

例えば周波数が100MHzの場合1/4波長は約75cmですが、この条件付近では定在波が発生し測定経路を通しての正確な信号伝達が不可能になります。また、ケーブル延長を行う場合、1m以上のケーブルを使用すると、100MHz帯までの測定の途中で必ず定在波が発生する条件をむかえ、ブリッジ回路がバランスしなくなります。このため、従来の4194Aではケーブル使用時の周波数範囲の上限が15MHzまでに制限されていました。

では、この現象が測定回路の動作にどのような影響をもたらすかについて詳しく考えてみます。自動平衡ブリッジ回路の測定経路部について深く考えるため、図3を変形させて測定経路の部分を特に拡大したものを図4に示しま

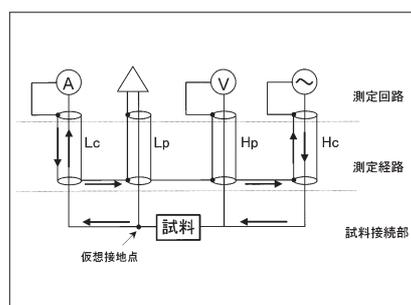


図4. 自動平衡ブリッジ法と測定経路延長部

表2. 自動平衡ブリッジ法における各端子の役割

端子	働き
Lp端子	芯線と外皮の電位を検出しフィードバックをかけることによりブリッジ回路をバランスさせる。
Lc端子	芯線から外皮に流れる電流を検出して電流測定値とする。
Hp端子	芯線と外皮の間の電位差を検出して電圧測定値とする。
Hc端子	信号源信号を出力して試料に印可する。

従来の低周波帯の測定では測定経路の送電端と受電端では同じ信号振幅値が観測されていました。ところが、高周波化による定在波発生現象は、簡単に言えば測定経路の送電端と受電端で同じ信号振幅値が必ずしも観測されないことを意味します。この定在波の発生自体は、周波数と経路長の関係から4つの測定経路に個別に発生する現象であり、その現象発生場所はそれぞれの経路の長さや周波数の関係から決まります。

表2は4つの測定端子(あるいは測定経路)の役割を示しています。ブリッジ回路のバランスの問題に最も重要な働きをする端子はLp端子です。この端子を中心に形成されるブリッジ回路のフィードバックループはLp端子を仮想接地(電位が0)とするよう回路全体を制御します。Lp端子の測定経路に定在波が存在した場合、Lp端子受電端側での信号の検出が正常に行えなくなる結果、Lp端子の芯線-外皮間の電位調整をうまく行えず、ブリッジ回路がバランスできなくなります。

また、Lp端子の外皮の電位は図3中に示される回路全体に流れる測定信号によって決まるため、Lc、Hp、Hc測定経路に定在波が発生した場合もブリッジの安定性に影響を及ぼします。また、これらの端子はそれぞれ測定信号の印加、測定電圧値の検出、測定電流値の検出のための役割を担うため、たとえブリッジ回路がどうにかバランスしても正しい測定結果が得られなくなります。

**技術的課題2：測定回路のノイズレベルやスプリアスにより高/低インピーダンス測定範囲が制限される。**

高インピーダンスや低インピーダンスの測定には、測定器の回路がもつノイズの程度が影響し、そのレベルが大きいほどインピーダンス測定範囲が小さくなります。昨今では10mΩ以下の低インピーダンスや100kΩ以上の高インピーダンスを測定したいという要求がありますが、従来型の測定器ではそこまでの広い範囲はカバーされていませんでした。また、周波数掃引型のインピーダンスアナライザの場合では、測定回路の複雑さゆえにどうしてもノイズも押さえ切れないという問題もありました。

測定回路のノイズの程度は、測定器のフロントパネル上でオープンインピーダンスやショートインピーダンスを測定した時の値で見ることが可能です。当然のことながら、その時のショートの値が10mΩ程度であれば、10mΩ以下の試料は測定ができないことになります。

測定回路のノイズのレベルを決める主な要素として、信号源のもつノイズやスプリアス、ヌル・ループの心臓部である狭帯域高利得増幅器のノイズ、スプリアス、オフセットレベルなどがあります(図1の自動平衡ブリッジ法の回路を参照のこと)。

**技術的課題3：損失係数(D)やクオリティファクタ(Q)測定時に、測定レンジ切り替え時にジャンプが発生する。**

一般に、自動平衡ブリッジ法では測定電流値の検出のために複数のレンジ抵抗を用いています。図1において、Lc端子から入った電流はレンジ抵抗に入り、レンジ抵抗の両端の電位差を検出することによって電流測定が行われます。広いインピーダンス測定範囲の実現には様々な大きさの電流値を測定することが必要で、そのために電流の大きさに応じたレンジ抵抗が用意されています。

精度の高い測定の実現のためにはレンジ抵抗の校正が不可欠になります。従来の測定器の校正ではそれぞれのレンジ抵抗に応じた標準器を用いて校正を行っていましたが、この場合測定レン

ジによって若干測定値にずれが見られる場合があります。これは測定器で保証されている測定精度の範囲内の現象ですが、特に非常に微妙な測定が要求されるDやQの測定では問題となるケースがありました。

**5. 4294Aにおける解決1：周波数範囲の拡大**

4294Aは最も測定精度の高い方式である自動平衡ブリッジ法を使用し、周波数範囲の拡大と、測定精度のさらなる向上を目指した110MHzインピーダンス・アナライザです。

4294Aでも基本的には図1で述べた自動平衡ブリッジ法の回路構成を使用していますが、4章であげた課題を解決するために様々な技術的革新や改善がなされています。この5章と6章では、従来型の自動平衡ブリッジ法とは異なる部分について解説していきます。

まず、周波数範囲の拡大についてですが、4294Aでは以下に述べる独自の技術開発により、4章で述べた技術課題の第1の問題を解決しています。

**(1) ケーブル整合型自動平衡ブリッジ法**

4294Aでは、ケーブル整合型自動平衡ブリッジ法と呼ばれる技術を採用しています。回路構成を図5に示します。高周波領域において測定経路に定在波が発生する問題を解決するため、測定経路の送電端や受電端を50Ω特性インピーダンスで終端します。これにより、周波数や測定経路長に関わらず測定信号を送電端から受電端へ正確に伝えることが可能になり、ブリッジ回路のバランスの問題の問題をはじめ印加電圧値や測定電圧、電流値の検出の問題が解決できます。

この方法により本来的に自動平衡ブリッジ法がもつ測定精度の高さとインピーダ

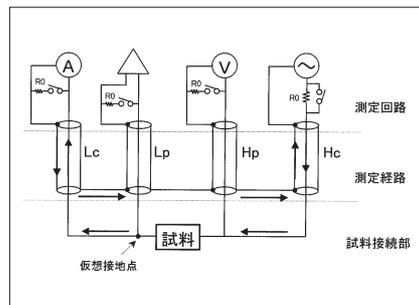


図5. ケーブル整合型自動平衡ブリッジ

ンス測定範囲の広さを維持しながら、測定可能周波数の範囲を大幅に拡大しました。なお、この方法は高周波領域でより大きなメリットを有するため、ケーブル延長なしの場合で15MHz、1m/2mケーブル延長時は5MHz以上で採用し、周波数がそれ以下の場合は従来型の終端なしの方法を使用します。

**(2) 位相補償によるブリッジ安定性の向上**

第1の技術課題(高周波領域でのブリッジの安定性)に対するもう1つの解決策として、4294Aは周波数やケーブル延長に応じて変化するヌル・ループの特性を補償する回路を有しています。

図6にその概要を示します。狭帯域高利得増幅器の前後に信号源 $E_\phi$ とベクトル電圧測定回路 $V_\phi$ を置きます。Lp端子とLc端子を短絡し、 $E_\phi$ から注入した信号を図の矢印のようにヌル・ループ内を左回りに流し、それを $V_\phi$ で測定することによってヌル・ループ回路の特性を測定します。これを4294Aの周波数範囲やケーブル延長状態で行うことにより、それぞれの測定条件でのヌル・ループ回路の特性を把握します。この特性データは測定器内部で保存され、実際の測定に際してブリッジ回路の安定なバランス状態を得るために使用します。

この位相補償回路による特性データ測定は、製造時の調整、定期校正時の調整、ケーブル延長のための補正などで行われます。特に、ケーブル補正では特性の異なる延長ケーブルに対応するためにケーブルごとに特性データ測定を行うことが必要とされ、このため本機能をフロントパネルから実行できるようにしています。

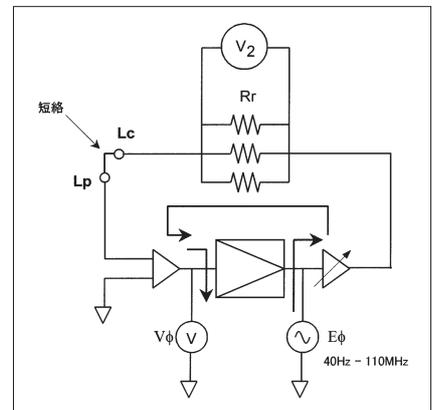


図6. 位相補償によるブリッジ安定性の向上

## 6. 4294Aにおける解決2： インピーダンス/位相測定精度 の向上

4294Aでは4章で述べた技術課題2、3を解決しインピーダンスや位相の測定精度向上を行っています。

### (1) 低ノイズ回路の実現

4294Aでは、測定器回路の設計に細心の注意を払い、ノイズの少ない回路の実現を達成しています。それには、PCボード上のパターン、部品の配置、部品の選択などが含まれます。例えば、信号源には非常に高性能なものを使用し、ノイズレベルの低減やスプリアスの最小化を行いました。また、ヌルループ回路の狭帯域高利得増幅器も性能を向上させ、ノイズ、スプリアス、オフセットの最小化をはかり、ヌル増幅器の等価的な入力換算ノイズを低減しています。

### (2) 単一標準器による校正

従来型測定器では複数のインピーダンス標準器を使って測定レンジの補正を行っていたのに対し、4294Aでは1つの標準器を使ってすべての測定レンジを校正する方法を採用し、4章の課題3で述べた問題を解決しています。

4294Aでは50Ω、400Ω、3.2kΩ、25.6kΩのレンジ抵抗からなる4つの測定レンジをもちます。これらの各測定レンジの校正を以下の手順で行います。まず、となりあう測定レンジ間の相対誤差を参照抵抗と呼ばれる共通の抵抗を測定して比較することで補正します。その後、ある一つの測定レンジを外部のインピーダンス標準器で校正することで、全測定レンジの絶対校正を完了させます。これらのために、例えば50Ωと400Ωレンジの相対誤差の補正のためにそれらの測定レンジに適した参照抵抗が1つ用意されているほか(同様に他のレンジ間補正のためにも違った値の参照抵抗が用意されている)、外部の標準器による校正では100Ω抵抗を用いて4294Aの50Ωレンジを絶対校正します。

この校正方法は、測定レンジ間のズレがなくなるため、インピーダンスが大きく変化して測定レンジが複数にまたがるような試料の測定に最適と言えます。また、定期校正における調整など

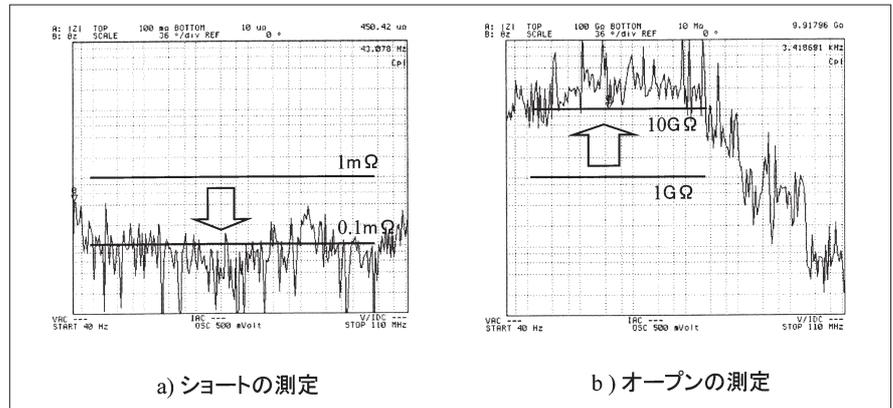


図7. 4294Aのオープン/ショート測定時の測定限界(実力値)

でも便宜性を向上させます。以上の改善により、4294Aではインピーダンス/位相測定精度とその測定可能範囲が格段に向上しています。図7は4294Aにおいてオープンとショートを測定した結果を示しています。これらは、測定器のインピーダンス測定限界を表わすと考えることができます。ショート側の測定限界は従来機種4194Aでは1mΩ弱だったのが4294Aでは0.1mΩ付近に、オープン側の測定限界は4194Aの1GΩ弱から4294Aの10GΩ付近へと、上下のインピーダンス測定限界がそれぞれ1桁づつ範囲が広がっています。

さらに、4294Aでは位相測定の精度も向上しています。図8はクオリティファクタQ測定時の4294Aと4194Aの測定精度の比較を示しています(Q=100の場合)。4294Aでは100Hz付近の低周波帯や10MHz以上での高周波帯においても、10%以下の測定精度が確保できます。

従来、Qの高精度測定には共振法を使った42851A、4342Aなどの測定器が使われていました。4294Aでは、その位相精度の向上により従来の共振法の測定器と同程度の精度での測定が行えるようになりました。表3と図9に4294Aと42851Aを用いたQ測定比較実験の結果を示します。

上図は4294Aと42851Aの測定結果のプロットであり、下のグラフは4294Aと42851Aの結果の差異をパーセントで表示したものです。結果より、両者のデータには非常に高い相関関係があることが確認できます。操作性に関しては共振法の測定器に比べて自動平衡ブリッジ法の方が格段に簡単であり、その点においても4294Aの優位性が確認できます。

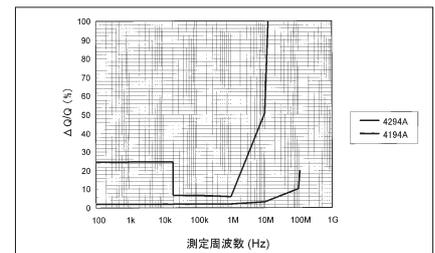


図8. Q=100測定時の4294Aと4194Aの測定誤差(実力値)

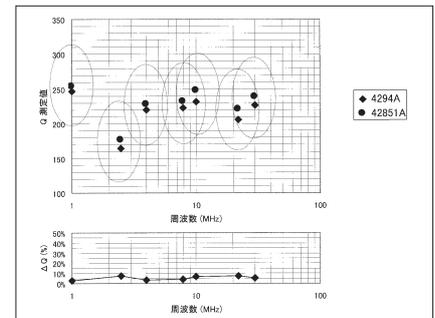


図9. 4294Aと42851AによるQ測定結果の比較

表3. Q測定実験の測定条件

	4294A	4285A + 42851A
測定周波数と測定デバイス	1MHz: 16480A(100μH) 2.5MHz: 16481A(56μH) 4MHz: 16483A(10μH) 7.9MHz: 16485A(2.5μH) 10MHz: 16485A(2.5μH) 22MHz: 16486A(1μH) 30MHz: 16488A(0.28μH)	
使用治具	42942A, 16093B	なし
治具の誤差補正	42942A上でアダプタ用の校正 電気長 3.4mm入力 16093B上OPEN/SHORT 補正実行 (16093B用ショート使用)	ショート補正実行

## 7. その他の新技術1： プローブ測定

4294Aは42941Aと併用することにより、プローブによるインピーダンス測定が行えます。従来のIV法とは異なる新しい技術を用い、周波数範囲の拡大とインピーダンス測定範囲の拡大を行いました。

従来型のプローブでは主として2つの技術的課題がありました。第1にピックアップトランスの使用周波数範囲が測定器の周波数範囲を制限すること。第2にトランスでピックアップし電流を検出する従来の方法では、等価的に内部抵抗が存在する電流測定回路となり理想的な電流検出ができなかったことがあります。後者では、インピーダンス測定範囲が制限されるという問題がありました。

42941Aのプローブ法はAdvanced-IV法と呼ばれる新しい方式を用いています。図10に回路構成の概念図を示します。従来型との違いとして、第1に、ピックアップトランスを使わないことによる周波数範囲の拡大があります。特に、42941Aでは40Hzまでの低周波領域で測定が可能になっています。第2に、電流測定回路として内部抵抗が限りなくゼロに近い理想的な電流計を実現し、インピーダンス測定範囲を大幅に拡大しています。自動平衡ブリッジ法のLow側の回路を利用して電流計とすることでこの問題を解決しました。

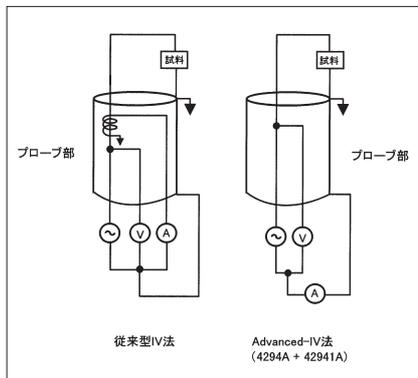


図10. 42941Aと従来プローブの構造の違い

図11は42941Aと従来タイプの41941Aの10%測定精度の範囲を示しています。42941Aでは41941Aに比べて特に低周波領域への拡大と大小インピーダンス測定レンジの拡大が行われ、IV法が利用できる周波数/インピーダンス範囲が大幅に拡大されました。

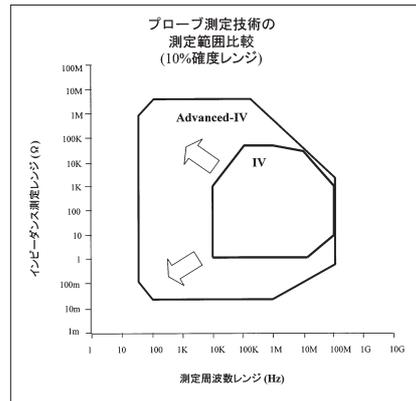


図11. 42941Aインピーダンスプローブの測定範囲

## 8. その他の新技術2： ケーブル延長機能

4294Aでは従来不可能であった100MHz付近における自動平衡ブリッジ法の2mケーブル延長を可能にしています。表4にアジレント・テクノロジー製インピーダンス・アナライザのケーブル延長機能を示します。

この機能面での性能向上は、5章で述べたブリッジ安定性向上のための技術革新によるものです。ケーブル先端における測定精度は保証され、部品/材料評価用システムの構築と高精度測定に貢献します。

表4. アジレント・テクノロジー製インピーダンス測定器のケーブル延長機能

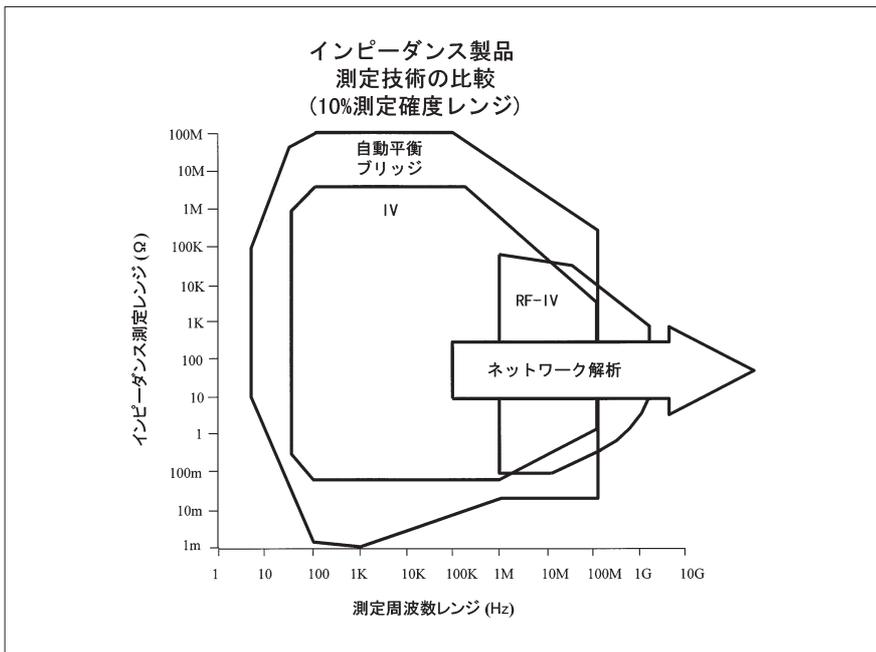
製品モデル	ケーブル長	周波数上限
4294A	0m, 1m, 2m	110MHz
4194A	0m, 1m	15MHz
4192A	0m, 1m	13MHz

## 9. 現在のインピーダンス測定技術の比較

自動平衡ブリッジ法の使用周波数範囲の拡大により、各インピーダンス測定技術がカバーできる範囲の関係が大きく変わりました。図12は各測定技術における測定精度10%の範囲を示します。

自動平衡ブリッジ法の周波数上限が40MHzから110MHzに拡大されたことにより、従来はIV法でしか測定できなかった周波数範囲が自動平衡ブリッジ法で測定できるようになりました。これにより自動平衡ブリッジ法の本来の利点である「インピーダンス測定範囲の広さ」や「測定精度の高さ」を生かした測定がこれらの周波数帯でも実現できます。

一方、自動平衡ブリッジ法の周波数範囲が拡大されたとは言え、実装基板上の部品など片線接地デバイスの測定にはやはりIV法が必要です。Advanced-IV法の登場により周波数範囲やインピーダンス測定範囲が従来のIV法に比べて大幅に拡大され、実用範囲が大幅に拡大されました。



## 10. まとめ

4294Aは独自の最新技術により、広い周波数、広いインピーダンス測定範囲、高精度測定を実現したインピーダンス・アナライザです。部品/材料の研究開発や評価、回路のインピーダンス測定など110MHzまでのインピーダンス評価のあらゆる用途に最高水準の性能を提供します。1.8GHzまでの4291B インピーダンス・アナライザと合わせてご活用下さい。

アジレント・テクノロジー株式会社

本社 〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1

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時間受け付け

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。



Agilent Technologies

June 29, 2001

5968-4506JA  
0000-01H