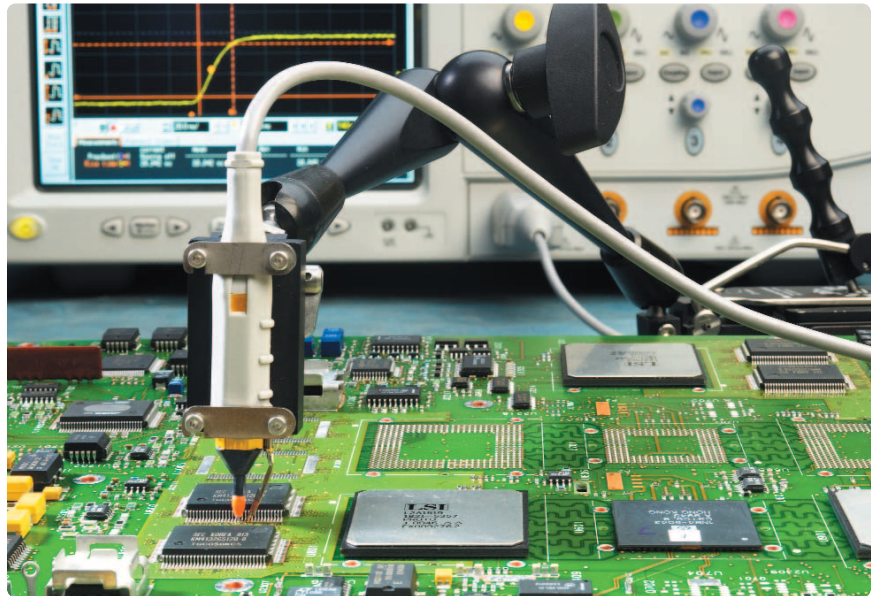


# 広帯域オシロスコープで高確度測定を実現 Agilentアクティブ・プローブ

アプリケーション・ノート1385

## 目次

プローブの入力インピーダンス .....	2
プローブの伝送応答 .....	5
プローブ・アクセサリ .....	9
帯域幅と立ち上がり時間に関する 注意事項 .....	12
結論 .....	16



コンピュータ・システム、次世代半導体、通信システムなどのデザインに携わるエンジニアは、シリコン・デバイスの処理能力の爆発的増大により、信号の急速な高速化への対応を迫られています。高速デバイスがデータを待ってアイドル状態にならないように、外部バスの帯域幅を拡大し、回路基板上のデバイス間で、バックプレーン上で、あるいはケーブルを通して大量のデータ転送を可能にする技術の開発が進められています。

バスの帯域幅を拡大するには、信号周波数を上げるのが1つの方法です。周波数が高くなるほど、デジタル信号の

立ち上がり時間は短くなります。信号の立ち上がり時間が非常に短くなると、低品質のオシロスコープ・プローブでは測定波形にオーバーシュートやリングングが生じます。エンジニアは、このような異常がデザインに起因するものか、測定システムに起因するものかを判断しなければなりません。

高速信号の場合、オシロスコープ・プローブを被試験回路に接触させたときに生じる寄生成分のために、測定波形に重大な異常が発生する場合があります。また、プローブが回路に対する負荷の働きをするために、信号が大幅に変化したり乱れたりすることもありま

す。オシロスコープ・プローブを接続したときに被試験回路と測定波形がどのような影響を受けるかを理解することにより、測定結果を大幅に改善することができます。

このアプリケーション・ノートでは、高速信号の捕捉に使用するオシロスコープ・プローブの選択にあたって考慮すべき以下のような内容を扱います。

- プローブの入力インピーダンス
- プローブの伝送応答
- プロービング・アクセサリ
- オシロスコープ／プローブ・システムの帯域幅



Agilent Technologies

## プローブの入カインピーダンス

オシロスコープのデザイナーは、サンプリング・レート、帯域幅、精度の改善に関して大きな進歩を実現してきました。しかし、特定のアプリケーションに対してオシロスコープの性能を最大限に引き出すには、プローブの選択と操作を慎重に行う必要があります。プローブというアクセサリは、一般に見過ごされがちです。プローブは、被試験回路とオシロスコープとをつなぐ重要なリンクです。測定結果と被試験回路の動作の両方にプローブは影響を与えます。

回路にプローブを接続すると、回路に対して負荷が加わることになります。このプローブ負荷により、信号源から余分な電流を引き込み、テスト・ポイントより後ろの回路動作を変化させ、その結果被測定信号が変化します。

正確な測定を実現するためにプローブは、その周波数レンジ全域で、信号源に過大な負荷をかけたりその他の変化を与えたりせずに、信号を忠実に再現する必要があります。あらゆるプローブは、被測定回路に対して複素インピーダンスの負荷として働きます(図1)。この負荷の影響を許容範囲内にとどめることが重要です。

プローブの仕様には入力抵抗および入力キャパシタンスが記載されており、これらが組み合わさって被試験回路を変化させ、負荷として働きます。低い周波数では、キャパシタはオープン回路と同様の動作をするので、DC抵抗が回路への負荷の主要要素となります。抵抗負荷は非線形の回路動作を引き起こす可能性が低いので、プローブ負荷の影響の中ではあまり心配する必要がないものです。

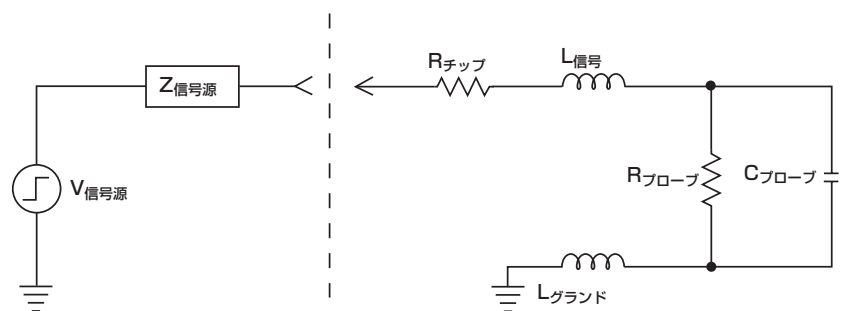


図1. 抵抗性、容量性、誘導性の各素子から構成されるオシロスコープ・プローブの単純な入カインピーダンス・モデル。

## プローブの入カインピーダンス

低インピーダンス・プローブによる過大な電流ドレインは、非線形応答を引き起こしたり、回路の動作を妨害したりするおそれがありますが、今日の低電圧高速信号に対してAgilent 1156A/57A/58Aなどの100 k $\Omega$ プローブを使用する場合には、これは通常問題になりません。

信号源インピーダンスが抵抗性だと仮定すると、プローブの抵抗性成分のために、回路の出力抵抗とプローブの入力抵抗からなる電圧ディバイダが形成され、測定信号の形状を変えずに電圧振幅が小さくなります(図2)。プローブ抵抗が信号源抵抗に比べて小さいほど、プローブ負荷のために測定波形の電圧振幅が低下します。また、プローブ抵抗が回路に比べて小さいほど、大きな電流がプローブに流れ、回路に悪影響が生じる可能性が高まります。

信号周波数が高まり、立上がり時間が短くなると、プローブ・キャパシタンスはショート回路に近づき、インピーダンスが小さくなったプローブに大きな電流が流れます。高い周波数では、この容量性のリアクタンスが回路に対する負荷の支配的な因子となり、回路が十分な電圧マージンを確保できずに異常動作する原因となることがあります。

容量性負荷は、立上がり／立下がり時間、帯域幅、エッジ間タイミングなどの測定に影響するため、プローブ関連の測定誤差の主な原因となります。容量性負荷により指数関数的な応答が生じ測定波形の形状を変化させ(図3)、グリッチが減衰したり、リングングやオーバシュートが小さくなったり、測定されたエッジをなまらせることによりセットアップ／ホールド時間の違反を回路に引き起こしたりします。

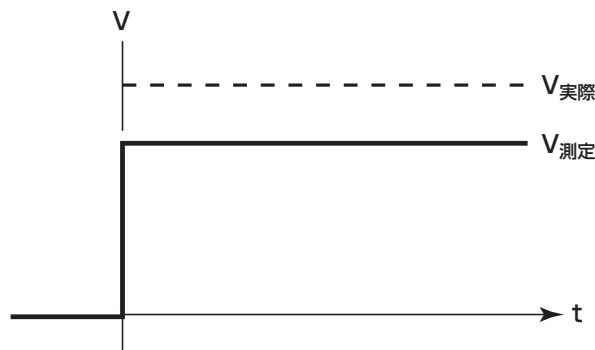


図2. 抵抗性負荷は測定信号の振幅を小さくしますが形状は変化しません。

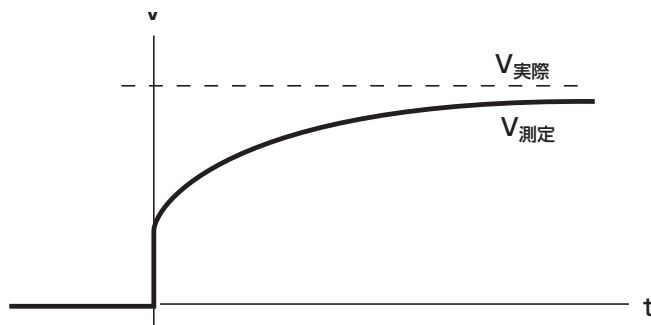


図3. 容量性負荷は指数関数的な応答により波形の形状が変化します。

## プローブの入カインピーダンス

図4は、Agilent 1158Aプローブの入カインピーダンスを6 GHzまで示したものです。図からわかるように、1 MHzまでの低い周波数では、プローブの入カインピーダンスの支配的な成分はプローブのDC抵抗成分 (100 k $\Omega$ ) です。信号周波数が高くなるにつれて、容量性リアクタンスが回路への負荷の支配的な成分になります。2 GHzでAgilent 1158Aは最小インピーダンスの165  $\Omega$ に達します。これはプローブのチップ抵抗により制限された値です。

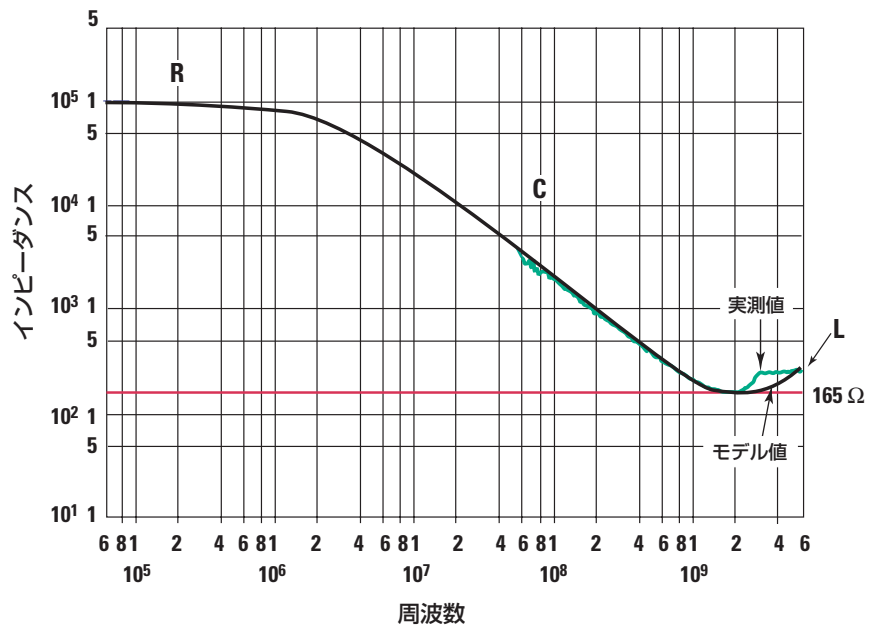


図4. 周波数の上昇に伴うAgilent 1158Aプローブの入カインピーダンスの変化。

測定波形と被試験回路にこれがどのような影響を与えるかの例として、25  $\Omega$  信号源からの非常に高速なエッジを持つデジタル信号を見てみましょう (図5)。図からわかるように、プローブを接続した場合、プローブの入カインピーダンスによって信号が変化しています。

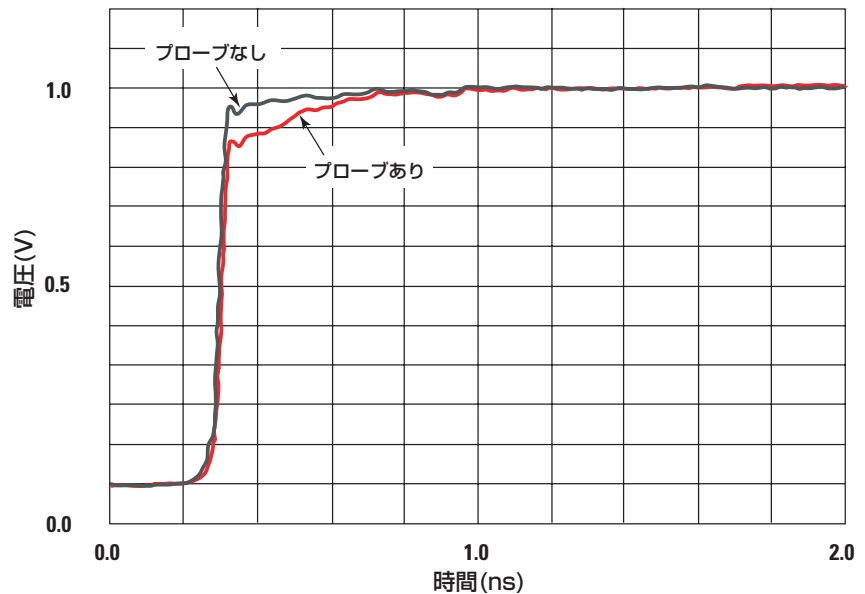


図5. プローブは高い周波数で回路に負荷をかけ、回路がフル電圧に達する時間を増加させます。

## プローブの伝送応答

プローブの入力インピーダンスに影響する寄生成分は、プローブの伝送応答も変化させます。伝送応答はプローブの周波数応答(特性)と呼ばれることもあります。伝送応答は、プローブ出力での電圧をプローブ入力での電圧で割った値 ( $V_{out}/V_{in}$ ) と定義されます。これは通常、dB単位の振幅対周波数のグラフで表されます。

プローブ帯域幅とは、伝送応答が-3 dBまで下がる、すなわち振幅が70.7%にまで低下する点までの連続的な周波数帯域です(図6)。プローブ帯域幅を超えると、信号振幅が大きく減衰され、測定結果が予測不可能になります。

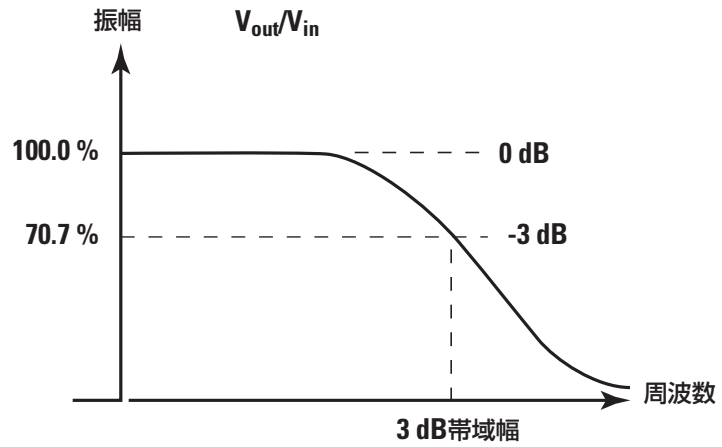


図6. 帯域幅は、機器の伝送応答が3 dB減少する点までの連続した周波数帯域と定義されます。

# プローブの伝送応答

プローブ帯域幅内では、プローブ出力での信号がプローブ・チップでの信号を最小限の劣化で忠実に反映することが望めます。これにより、プローブ・チップでの信号の様子をオシロスコープで正確に観察することができます。

プローブが入力から出力まで信号を最小限の劣化で伝送できるかどうかは、プローブの帯域幅全体で伝送応答がフラット(0 dB)であるかどうかを周波数ドメインで見ればわかります。実際にはこれは実現困難です。被試験回路にプローブを接続すると、物理的な接続の寄生成分とプローブの内部コンポ

ーネントによって共振回路が形成され、その共振周波数がプローブの帯域幅よりも小さくなる場合があります(図7)。このように帯域内に共振があると、プローブの出力が入力と一致しなくなり、測定波形にオーバーシュートやリングングが生じます。

図7の例は、他社製の4 GHzプローブの入力電圧( $V_{in}$ )の帯域内共振です。プローブの出力( $V_{out}$ )が入力電圧に追従していないことがわかります。 $V_{out}$ はフラットなままで、プローブの伝送応答( $V_{out}/V_{in}$ )に5 dBのピークが見られます。

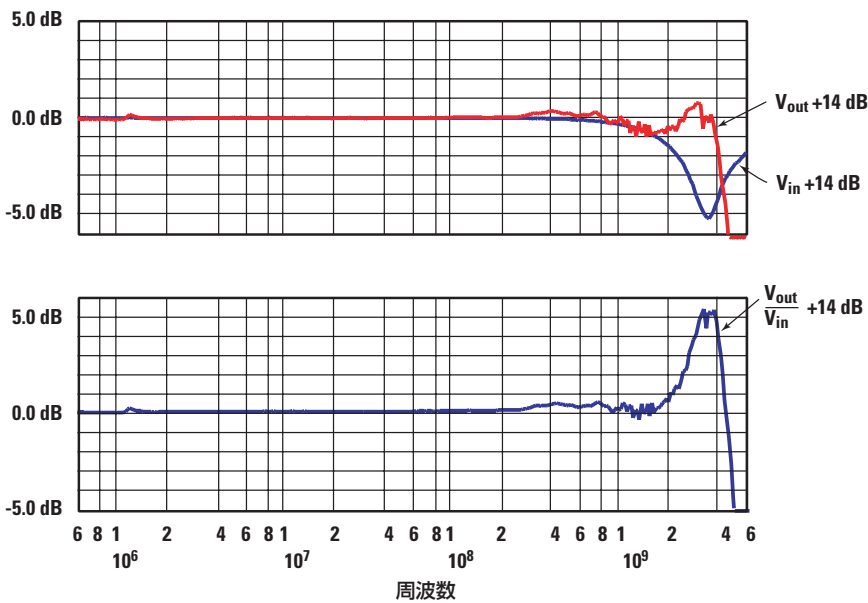


図7. (上) 他社製4 GHzプローブの25Ωシステムでの $V_{in}$ と $V_{out}$ の周波数応答。

(下) プローブの伝送応答。

$V_{in}$ は3.5 GHzで共振により低下し、 $V_{out}$ はフラットなままなので、伝送応答に5 dBのピークが見られます。

## プローブの伝送応答

ところで、 $V_{in}$ が共振したとしても、 $V_{out}$ がフラットなままなら、プローブを接続しないときの信号を表しているのだからかまわないのではないのでしょうか？これはよい質問です。しかし注意すべきことは、このプローブの伝送応答に必ず5 dBのピークが見られることです。これは入力信号を歪ませる働きをし、測定波形のオーバシュートやリングングとして表示される可能性があります。

図8の測定は、2重終端された50Ω伝送ラインの中央で行われています。見かけ上の信号源抵抗は25Ωで、プローブの応答はこの回路に整合されています。信号源抵抗が正確に25Ωでない回路を測定した場合、プローブによる歪みが観察されるはずですが。

このタイプの歪みについて例を挙げて説明します。100 kΩの信号源抵抗を持つ回路上の電圧を、100 kΩのプロ

ーブを使って測定するとします。プローブの伝送応答は、プローブの出力で実際の電圧が観察できるように、この回路に合わせて変更されています。このため、プローブを回路に接続したことで入力電圧が半分になっても、測定波形はプローブが接続される前の元の電圧振幅を示します。

ここで、信号源抵抗が50 kΩの回路にこのプローブを接続したらどうなるでしょうか？プローブの伝送応答はやはり測定波形を変化させるので、プローブの入力で実際に見られるよりも33%大きい電圧の波形が表示されます。

プローブにできる最善のことは、被試験回路へのプローブの影響を最小にし、入力の電圧を最小限の歪みで出力に伝達することです。これにより、プローブ・チップでの信号の様子を正確に観察できるのです。

## プローブの伝送応答

Agilent 1156A/57A/58Aプローブは、この問題を解決するために、プローブするポイントのできるだけ近くに抵抗を配置しています。プローブ・チップに抵抗を配置すれば、プローブの寄生成分が被試験回路から分離され、形成される共振回路がダンピングされます。これにより、プローブの伝送応答 ( $V_{out}/V_{in}$ ) が4 GHzまでの帯域幅全体でフラットに維持されます (図8)。

通常、立上がり時間を正確に測定するには、グランド・リードをできるだけ短くします。

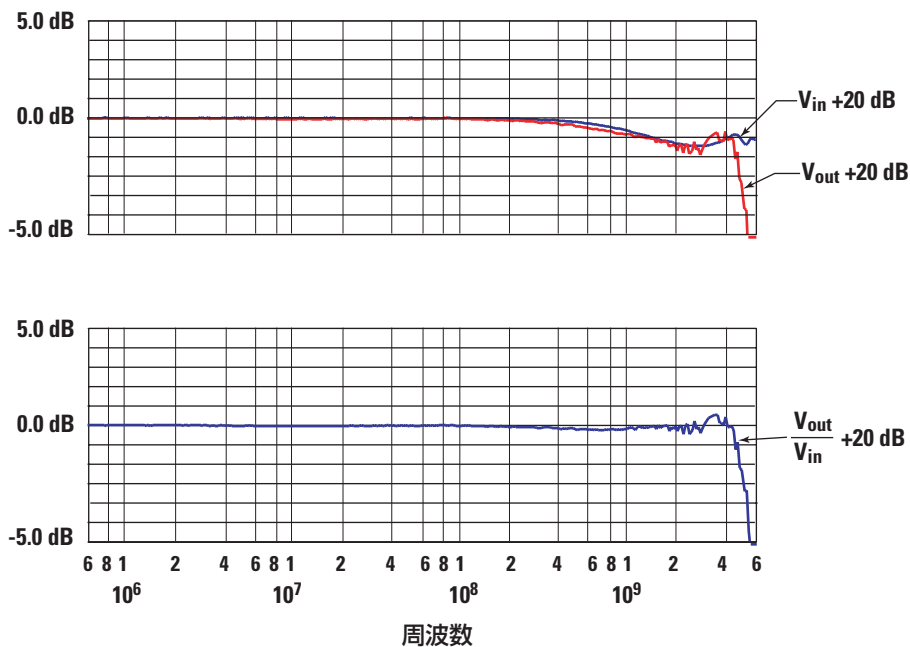


図8. (上) Agilent 1158A、4 GHzプローブの $V_{in}$ と $V_{out}$ の周波数応答。

(下)  $V_{out}$ の周波数応答が $V_{in}$ に忠実に追従しているため、プローブの伝送応答は4 GHz帯域幅の全域でフラットのままです。



## プローブ・アクセサリ

複雑な回路のプロービングにはさまざまな困難が存在するため、プローブを信号とグラウンドに直接接続することが常に可能だとは限りません。このため、接続に便利なように、回路上のいくつかのポイントに短いワイヤをはんだ付けしておくことがよくあります。しかし、これらのワイヤによって増加した

寄生成分は、プローブの伝送応答を大幅に変化させ、測定波形にオーバーシュートやリングングを引き起こします(図9)。一般的に、プローブの到達範囲を延長するためにワイヤを使用すると、1 cmあたり10 nHものインダクタンスがプローブの等価回路に加わります。

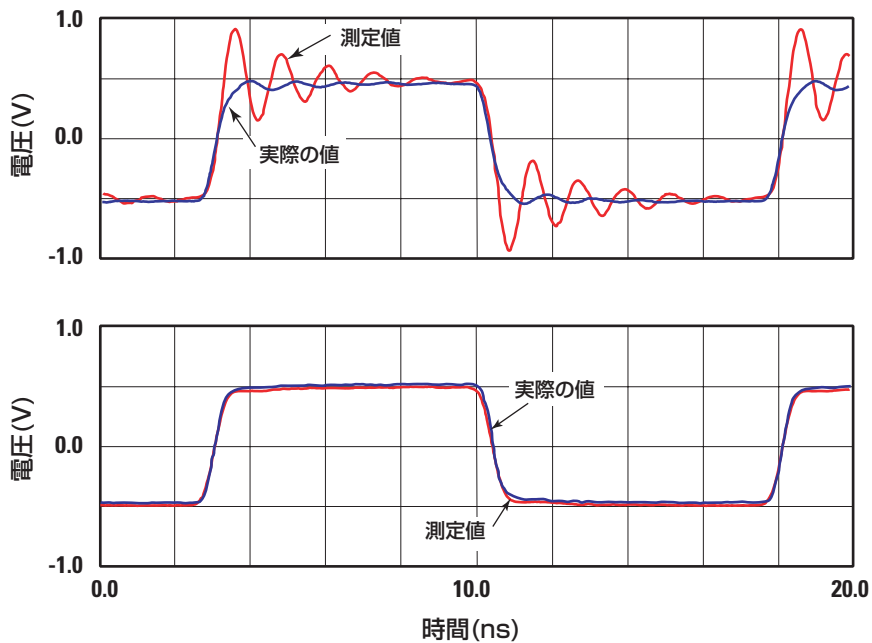


図9. 66 MHz/500 psのクロックの測定結果

(上) 被試験信号に単純な5 cmのワイヤを追加すると、測定波形にオーバーシュートとリングングが生じます。

(下) 適切にダンピングされた5 cmの抵抗性信号リードを使えば、測定波形に歪みを生じずに込み合った場所にプローブを接続できます。

## プローブ・アクセサリ

それでは、パソコンのメモリーソケットの間など、基板上のプローブを直接接続できない場所の信号を評価するにはどうしたらいいのでしょうか？

ほとんどの高性能プローブには物理的な接続を可能にするアクセサリが用意されていますが、残念ながらそれらは高忠実度の信号を伝送するのに必要な電気特性を持っていません。

Agilent Technologiesは、プローブとアクセサリが一体となって1つのシステムを形作ることを十分理解しています。このために、Agilent 1156A/57A/58Aプローブには、困難な接続を可能にし、測定性能を最適化するために適切にダンピングされた豊富なアクセサリが用意されています。測定帯域幅と物理的な接続のトレードオフについてよく理解した上でアクセサリを選択できるよ

うに、1156A/57A/58Aアクセサリの特性試験の結果がプローブに付属しています。

例えば、Agilent 1156A/57A/58Aプローブに用意されている5 cmと10 cmの抵抗性信号リードを使えば、込み合った場所にプローブを接続できます(図10)。これらの信号リードには抵抗性(ダンピング抵抗)チップが装備されており、プローブの寄生成分を被試験回路から分離して、形成される共振回路をダンピングする働きをします。

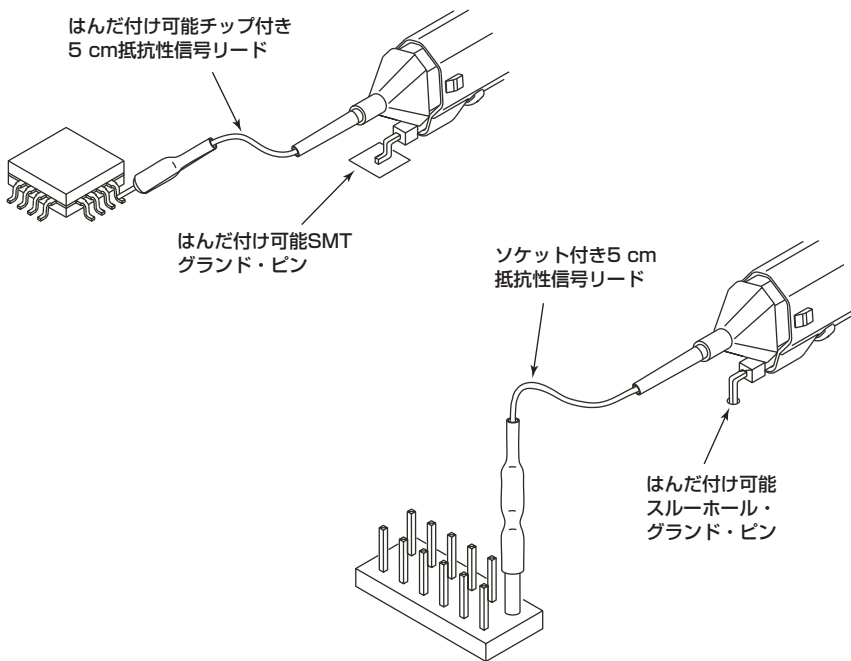


図10. Agilent 1156A/57A/58Aプローブと適切にダンピングされたアクセサリを使うことにより測定の信頼性が高まります。

## プローブ・アクセサリ

これにより、新しいプロービング構成の帯域幅全体でフラットな伝送応答が得られます(図11)。測定波形にオーバーシュートやリングングやその他の歪みを加えることなく、接続困難な場所の信号を測定することが、可能となりました。

なお、グランド接続はできる限り短くすることが重要です。グランド・リードをプローブに接続した場合、プローブの帰還経路にインダクタンスが加わりますが、これはプローブ内では補償されません。この追加のインダクタンスはプローブの伝送応答を変化させ、測定波形に歪みをもたらします。

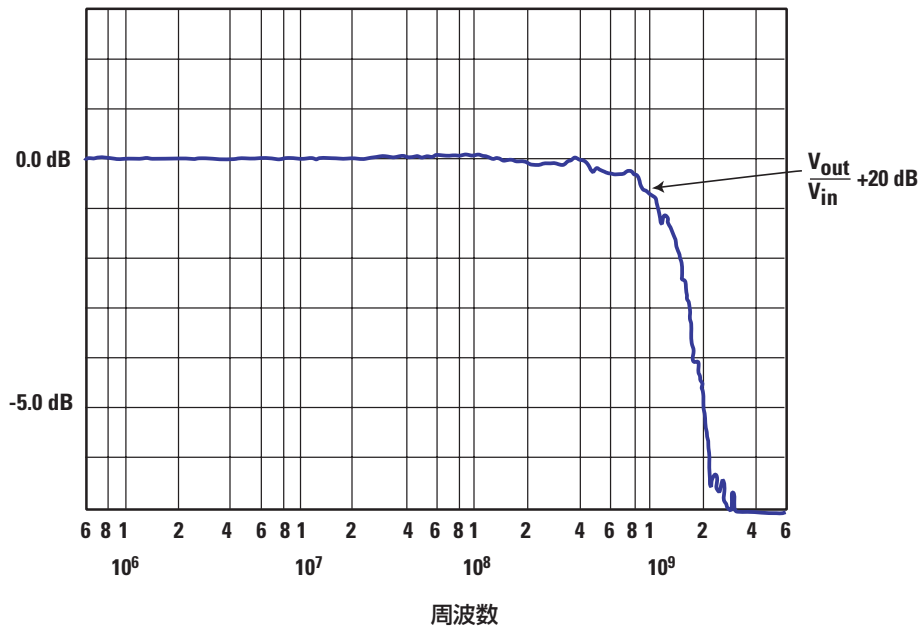


図11. Agilent 1158Aプローブ用の5 cm 抵抗性信号リードを使ってプロービングを行うと、測定の帯域幅は狭まるが、伝送応答はフラットで、測定波形に歪みは生じません。

## 帯域幅と立上がり時間に関する注意事項

帯域幅の制限は、測定精度に関係するため、オシロスコープとプローブの選択にあたって重要な情報です。帯域幅とは、測定システムの伝送応答で出力振幅が基準レベルから-3 dB (70.7%) まで下がる周波数と定義されます (図6)。使用するオシロスコープとプローブにどれだけの帯域幅が必要かを考える必要があります。

連続的な正弦波で伝送される信号は、1つの周波数成分すなわち基本波周波数から構成されます。正弦波の周波数が測定システムの帯域幅制限値に近づくと、測定結果の振幅がしだいに減衰されていきます。システム帯域幅では、正弦波の測定結果に30%の振幅誤差が生じると予想されます。このため、正確な振幅測定を行うには、帯域幅が信号の基本波周波数の3倍以上のオシロスコープ/プローブ・システムを選択する必要があります。

単一の周波数成分から構成される正弦波信号と異なり、デジタル信号には、方形波の高速なエッジを実現するため、多数の周波数からなる広帯域のスペクトル成分が含まれます。デジタル信号の場合、スペクトル成分を決定するのは主にエッジ速度であって、信号の繰り返し周波数ではありません。デジタル信号のエッジ周波数の安全な見積もりは次のようになります。

$$F = 0.5 / (\text{立上がり時間})$$

一般的に、この式は実際に存在するよりも多少高い周波数を算出します。

デジタル信号にはまた、3次と5次の高調波周波数に大きなスペクトル成分があります。これらの高周波成分が減衰されると、立上がり/立下がり時間の測定結果が実際よりも低速になります。このため、立上がり/立下がり時間測定の精度を向上させるには、デジタル信号の立上がり時間の周波数の3倍から5倍のオシロスコープおよびプローブ帯域幅を選択します。

## 帯域幅と立上がり時間に関する注意事項

信号を正確に捕捉するための帯域幅の要件がわかったところで、今度はオシロスコープとプローブのシステム帯域幅をどのように決定するかを考えてみましょう。

あらゆるプローブには帯域幅制限値があるので、プローブを通過できる信号の立上がり時間には本質的な最小値が存在します。一般的にこれは次の式で見積もることができます。

$$\text{立上がり時間} = 0.35 / \text{帯域幅}$$

立上がり時間とは、波形が最終値の10%から90%まで変化するのにかかる時間です。プローブの最小立上がり／立下がり時間はプローブの特性に記載されており、立上がり時間が0の完全なステップ波形を入力したときのプローブの出力を表します。このことを、Agilent 1158Aプローブの入力信号と出力によって示します(図12)。

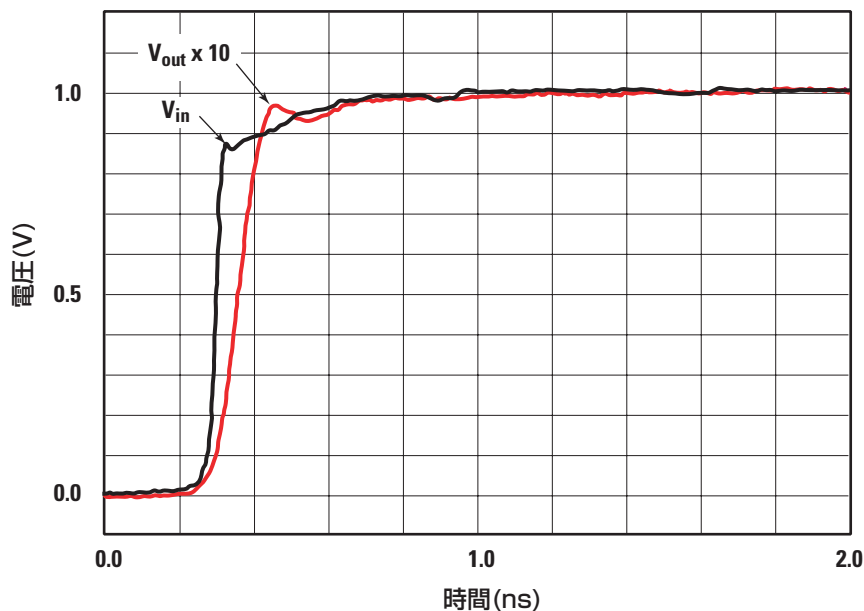


図12. プローブの最小立上がり時間が測定に影響します。

## 帯域幅と立上がり時間に関する注意事項

オシロスコープにも、帯域幅と立上がり時間に関してそれ自体の独立した制限があります。一般的には、オシロスコープとプローブの帯域幅は等しい大きさにすべきと考えられています。しかし、オシロスコープの帯域幅とプローブの帯域幅との関係はそれほど単純ではありません。

オシロスコープとプローブは組み合わせあって測定システムを構成し、それはプローブの伝送応答とオシロスコープの伝送応答が直列につながったものになります。これらの応答の組み合わせによって、測定システムの立上がり時間と帯域幅が決定されます。これらの値は一般的に以下の式で計算されます。

$$\text{システム立上がり時間} = \frac{1}{\sqrt{(\text{tr}(\text{オシロスコープ})^2 + \text{tr}(\text{プローブ})^2)}$$

および

$$\text{システム帯域幅} = \frac{0.35}{\text{システム立上がり時間}}$$

ここで

$$\text{tr}(\text{オシロスコープ}) = \text{オシロスコープの立上がり時間}$$

$$\text{tr}(\text{プローブ}) = \text{プローブの立上がり時間}$$

これらの式は、オシロスコープとプローブの応答がガウシアンロールオフを持つ場合には、システム帯域幅の良好な見積もりとなります(図13)。

応答がガウシアンと異なる場合には、プローブの応答をよく観察して、信号がプローブ・チップからオシロスコープ入力までどのように伝達されるかを理解する必要があります。プローブの応答がフラットで、 $V_{\text{out}}/V_{\text{in}} = 0 \text{ dB}$ であれば、オシロスコープ入力に伝達される信号はプローブ・チップの信号を正確に複製したものになります。

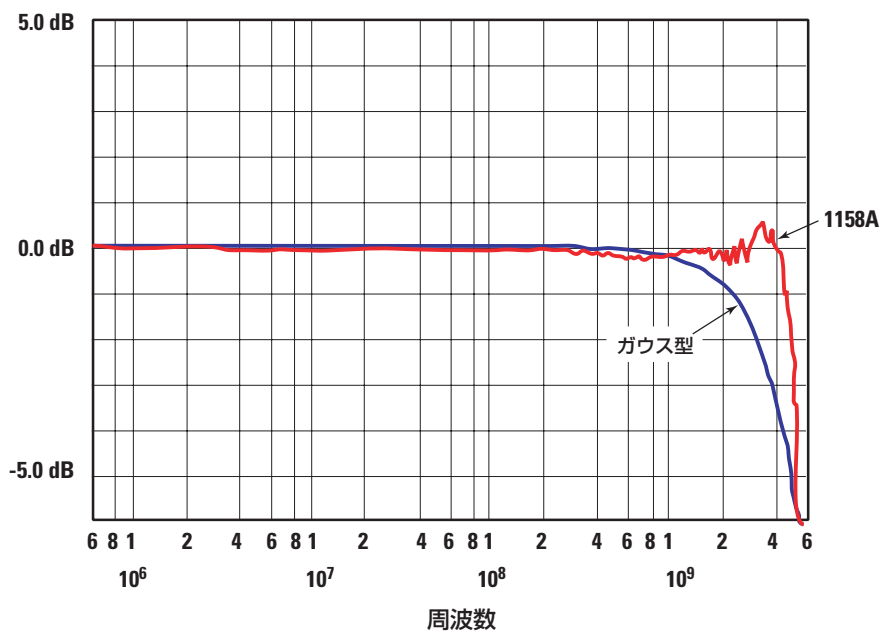


図13. ガウス型の伝送応答とAgilent 1158Aプローブの急なロールオフの比較。

## 帯域幅と立上がり時間に関する注意事項

Agilent Technologiesは、最大限にフラットな応答というこの考え方を、1156A/57A/58Aプローブの開発において採用しました。図14にこれらのプローブの伝送応答を示します。

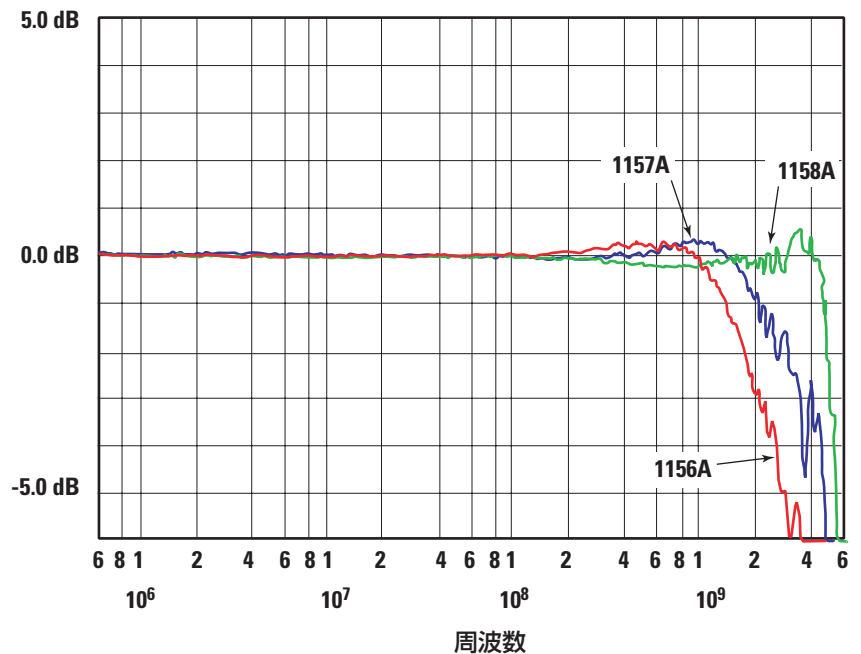


図14. Agilent 1156A (1.5 GHz)、1157A (2.5 GHz)、1158A (4 GHz) プローブの伝送応答。

表1は、Infiniiumオシロスコープで測定システムの帯域幅を最大化するための推奨プローブ構成を示します。プローブの伝送応答はInfiniiumオシロスコープの帯域幅全体でフラットなので、プローブによるシステム帯域幅の低下はありません。

Infiniium 54800シリーズ・オシロスコープ	オシロスコープ・プローブ	システム帯域幅
54835A (1.0 GHz)	1156A (1.5 GHz)	1.0 GHz
54845A (1.5 GHz)	1157A (2.5 GHz)	1.5 GHz
54846A (2.25 GHz)	1158A (4 GHz)	2.25 GHz

表1. 測定システムの帯域幅を最大化するための推奨構成。

## まとめ

電子機器の周波数の上昇とともに、オシロスコープ・プローブの選択が測定結果と被試験回路の動作に与える影響が重要になってきます。

新しくプローブを選択する際には、以下の要素を考慮してください。

1. プローブの入力インピーダンスを調べ、回路に与える影響を考察します。高周波では負荷効果が重要になること、グランド・リードはなるべく短くすることを念頭に置きます。
2. プローブの帯域幅全体で伝送応答がフラットでなければ、測定に歪みが生じます。伝送応答がフラットであれば、プローブ・チップの信号が忠実に反映され、最小限の劣化でオシロスコープに伝達されます。

3. 測定結果の品質はプローブと接続によって制限されるので、プローブを正しく選択し、適切にダンピングされたアクセサリと組み合わせて使用することで、測定結果の品質と再現性を改善することができます。
4. オシロスコープとプローブは一体となって測定システムを構成します。システム全体の帯域幅に対するプローブの影響を理解することにより、アプリケーションに最適なオシロスコープとプローブを選択するのに必要な情報が得られます。

プローブにできる最善のことは、被試験回路へのプローブの影響を最小にし、入力電圧を最小限の歪みで出力に伝達することです。Agilent 1156A/ 57A/58Aプローブは、最先端の性能で高速回路の正確な測定を可能にします。

## 関連カタログ

カタログ名	カタログ・タイプ	カタログ番号
Infiniium 54800シリーズ・オシロスコープのプローブ、アクセサリおよびオプション	Selection guide data sheet	5968-7141JA
Agilent 1156A/57A/58A アクティブ・プローブ	Product overview	5988-3361JA
Agilent Technologies Infiniium 54800 シリーズ・オシロスコープ	Color brochure	5988-3788JA
広帯域プローブのシグナル・インテグリティに関する真実	アプリケーション・ノート	5988-6515JA

計測  
お客様窓口

受付時間 9:00~19:00  
(12:00~13:00も受付中)  
※土・日・祭日を除く

FAX、E-mail、Webは24時間受け付けています。

TEL ☎ 0120-421-345  
(0426-56-7832)

FAX ☎ 0120-421-678  
(0426-56-7840)

E-mail: 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 2002

アジレント・テクノロジー株式会社

## サポート、サービス、およびアシスタンス

アジレント・テクノロジーが、サービスおよびサポートにおいてお約束できることは明確です。リスクを最小限に抑え、さまざまな問題の解決を図りながら、お客様の利益を最大限に高めることにあります。アジレント・テクノロジーは、お客様が納得できる計測機能の提供、お客様のニーズに応じたサポート体制の確立に努めています。アジレント・テクノロジーの多種多様なサポート・リソースとサービスを利用すれば、用途に合ったアジレント・テクノロジーの製品を選択し、製品を十分に活用することができます。アジレント・テクノロジーのすべての測定器およびシステムには、グローバル保証が付いています。製品の製造終了後、最低5年間はサポートを提供します。アジレント・テクノロジーのサポート政策全体を貫く2つの理念が、「アジレント・テクノロジーのプロミス」と「お客様のアドバンテージ」です。

## アジレント・テクノロジーのプロミス

お客様が新たに製品の購入をお考えの時、アジレント・テクノロジーの経験豊富なテスト・エンジニアが現実的な性能や実用的な製品の推奨を含む製品情報をお届けします。お客様がアジレント・テクノロジーの製品をお使いになる時、アジレント・テクノロジーは製品が約束どおりの性能を発揮することを保証します。それらは以下のようなことです。

- 機器が正しく動作するか動作確認を行います。
- 機器操作のサポートを行います。
- データシートに記載している基本的な測定に係わるアシスタンスを提供します。
- セルフヘルプ・ツールの提供。
- 世界中のアジレント・テクノロジー・サービス・センターでサービスが受けられるグローバル保証。

## お客様のアドバンテージ

お客様は、アジレント・テクノロジーが提供する多様な専門的テストおよび測定サービスを利用することができます。こうしたサービスは、お客様それぞれの技術的ニーズおよびビジネス・ニーズに応じて購入することが可能です。お客様は、設計、システム統合、プロジェクト管理、その他の専門的なサービスのほか、校正、追加料金によるアップグレード、保証期間終了後の修理、オンサイトの教育およびトレーニングなどのサービスを購入することにより、問題を効率良く解決して、市場のきびしい競争に勝ち抜くことができます。世界各地の経験豊富なアジレント・テクノロジーのエンジニアが、お客様の生産性の向上、設備投資の回収率の最大化、製品の測定精度の維持をお手伝いします。



Agilent Technologies

October 25, 2002  
5988-5021JA  
0000-00DEP