ANALOG DEVICES

想像を超える可能性を

AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

これからの回路設計で知っておきたい

最適デジ・アナ信号伝送とSパラメータの基本・実践（前編）

アナログ・デバイセズ株式会社

石井 聡

8/25/2015 – 9/4/2015

Analog Devices Proprietary Information ©

50 ADI 1965 2015

アジェンダ

1. イントロダクション
2. ハイスピード信号伝送は信号を「波」と考える
3. 特性インピーダンスとは一体ナニモノ？
4. 信号反射によるトラブルのしくみと終端抵抗の重要性を理解する
5. 差動信号伝送における信号反射のようすと終端抵抗の必要性を理解する
6. 前編のまとめとAppendix

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES

想像を超える可能性を

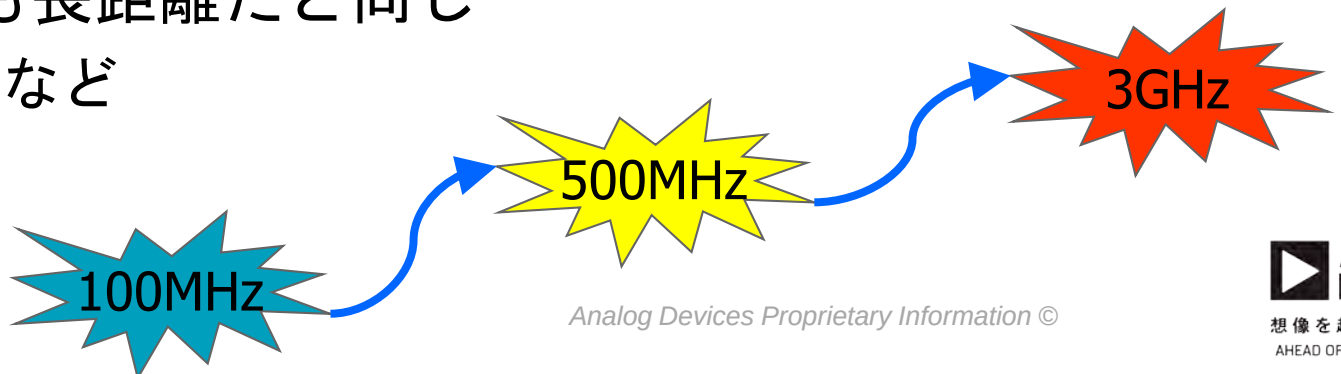
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

1. イントロダクション

Analog Devices Proprietary Information ©

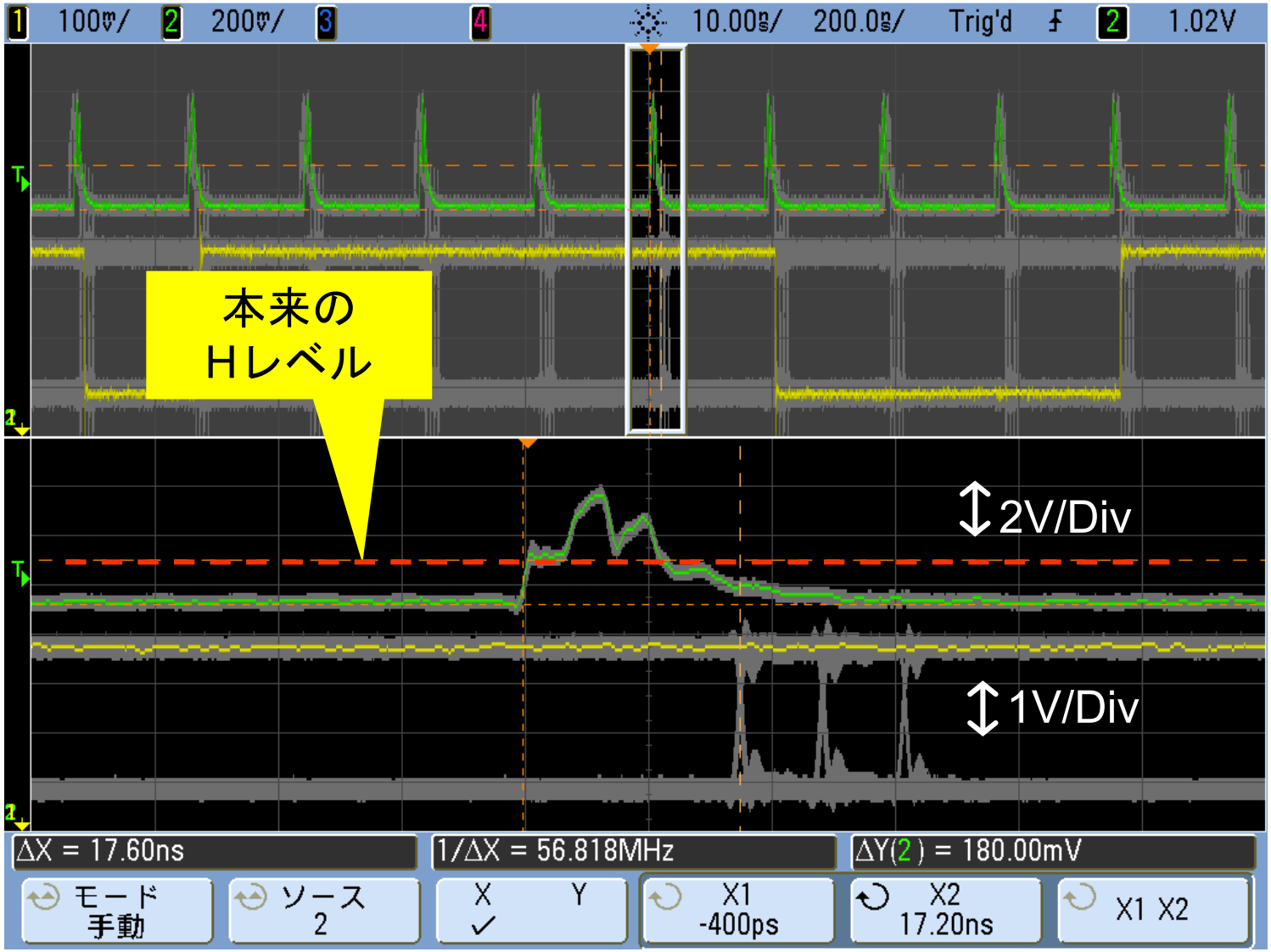
信号伝送に注目する必要性

- 回路設計・仕様がどんどんハイスピード化している
  - **高周波回路**は当然ながらだが
  - **高速デジタル**回路も・・・
    - シリアルATA, IEEE-1394, USB 3.0, PCI Express, JESD204B
    - CPUバスラインなどなど
- 特性インピーダンスの考えが活用されていないのでトラブルが生じていた
- プリント基板上やケーブル内の電圧や電流の動きを伝送線路（特性インピーダンス）として考える必要あり
- 低速でも長距離だと同じ
  - RS485など



Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

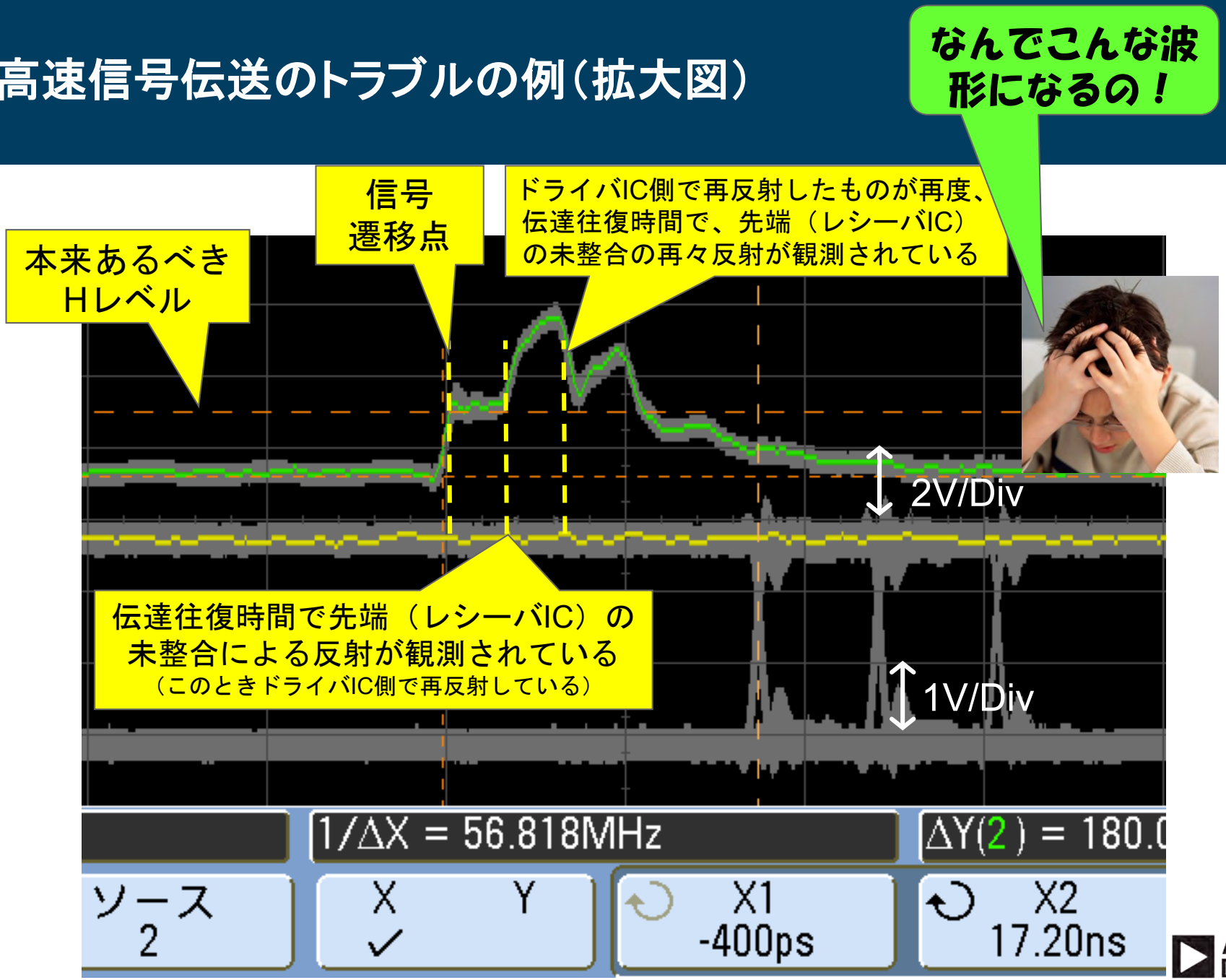
高速信号伝送のトラブルの例「時々エラーが出る」（18nsパルス）



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

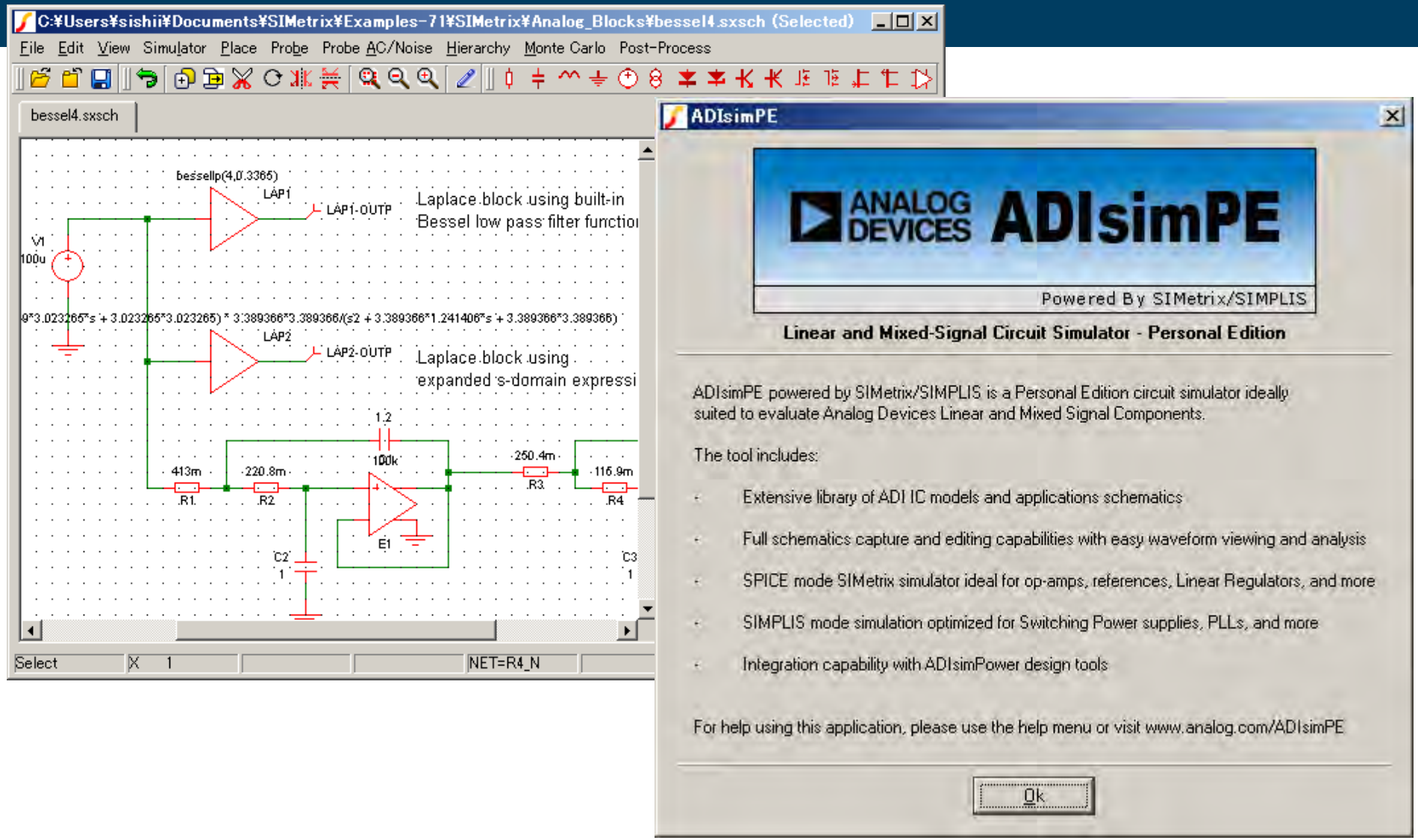
高速信号伝送のトラブルの例（拡大図）



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

使用するSPICEツール ADIsimPE (Personal Edition)



Analog Devices Proprietary Information ©

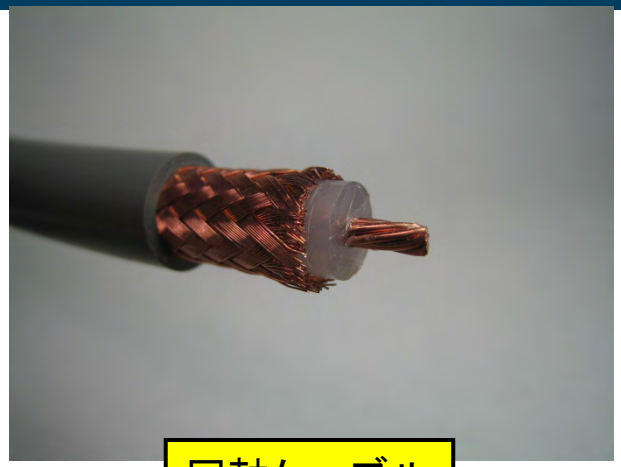
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

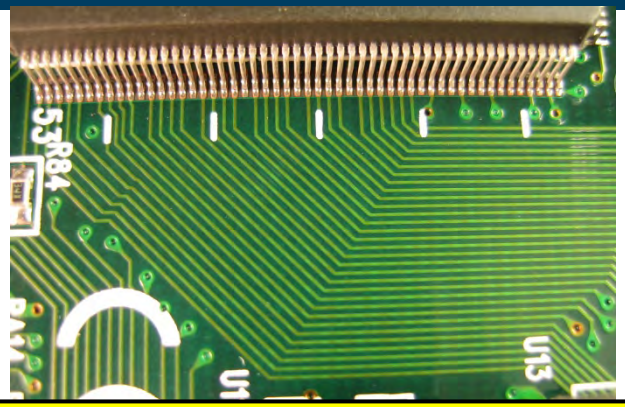
2. ハイスピード信号伝送は信号を「波」と考える

Analog Devices Proprietary Information ©

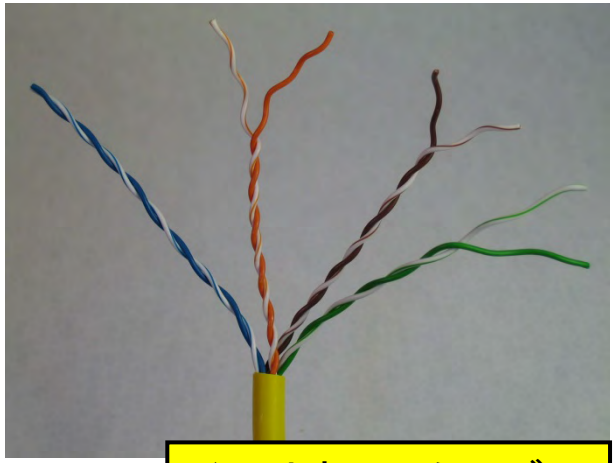
ハイスピード信号伝送回路（伝送線路）の例



同軸ケーブル



高速デジタル信号のプリント基板
（最近は「**インピーダンス・コントロール基板**」というものを使うことも多い）



イーサネット・ケーブル

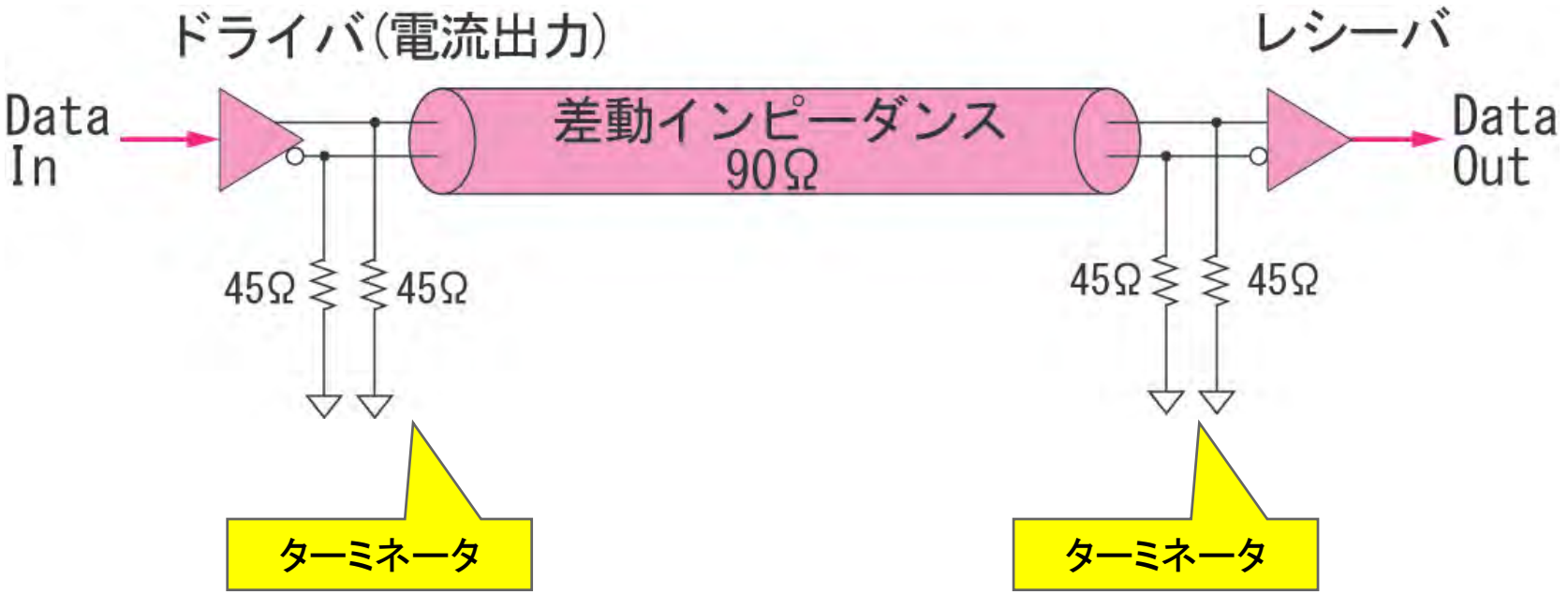
高周波回路（マイクロ・ストリップ・ライン）

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ハイスピード信号伝送（より高度な差動信号伝送）

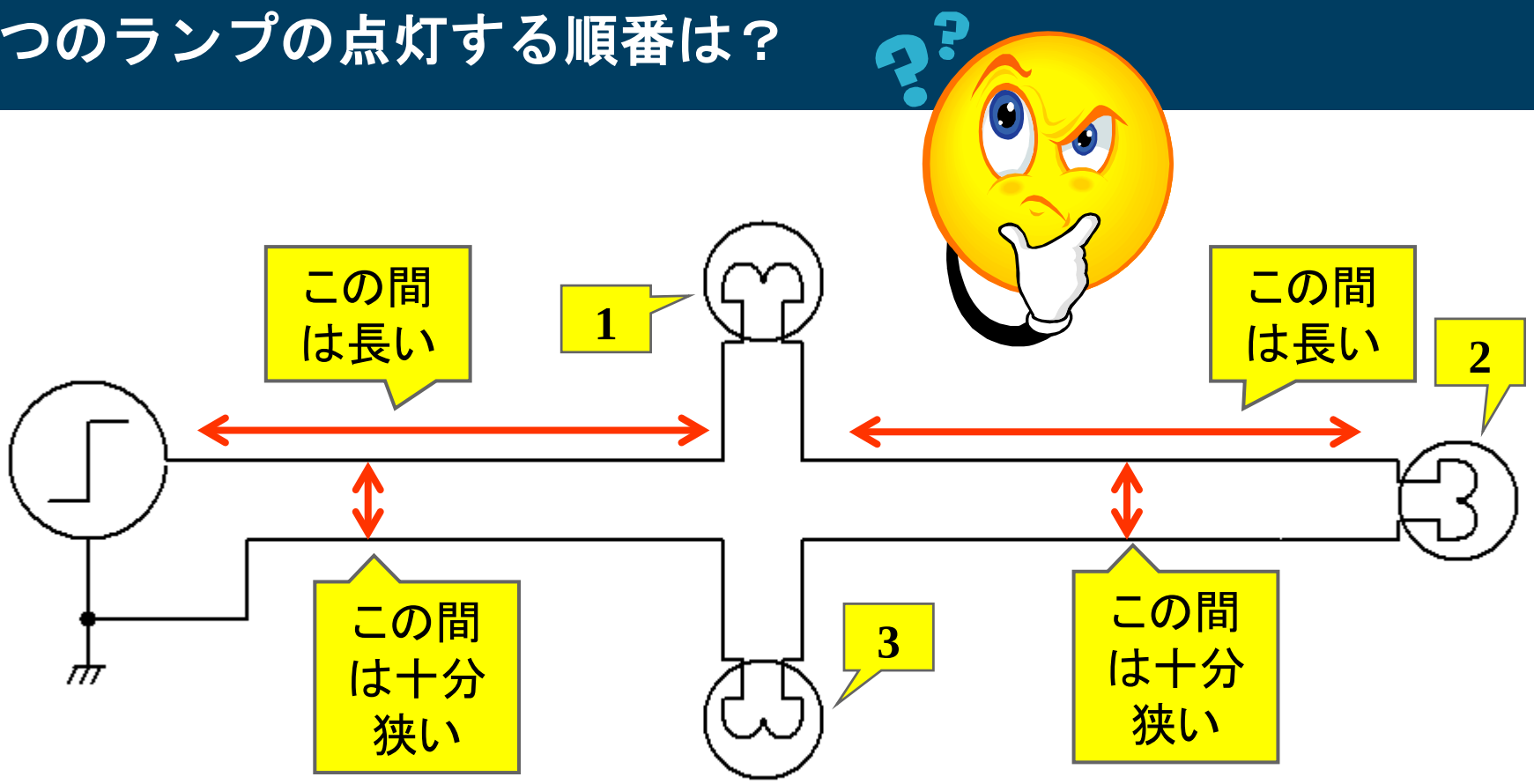
- シリアルATA, IEEE1394, USB 2.0/3.0, LVDS, JESD204Bなどは差動信号伝送
- 「ターミネータ」という言葉があるが、これが以降に示す特性インピーダンスと深く関係している



USB 2.0の回路例
(480Mbps)

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

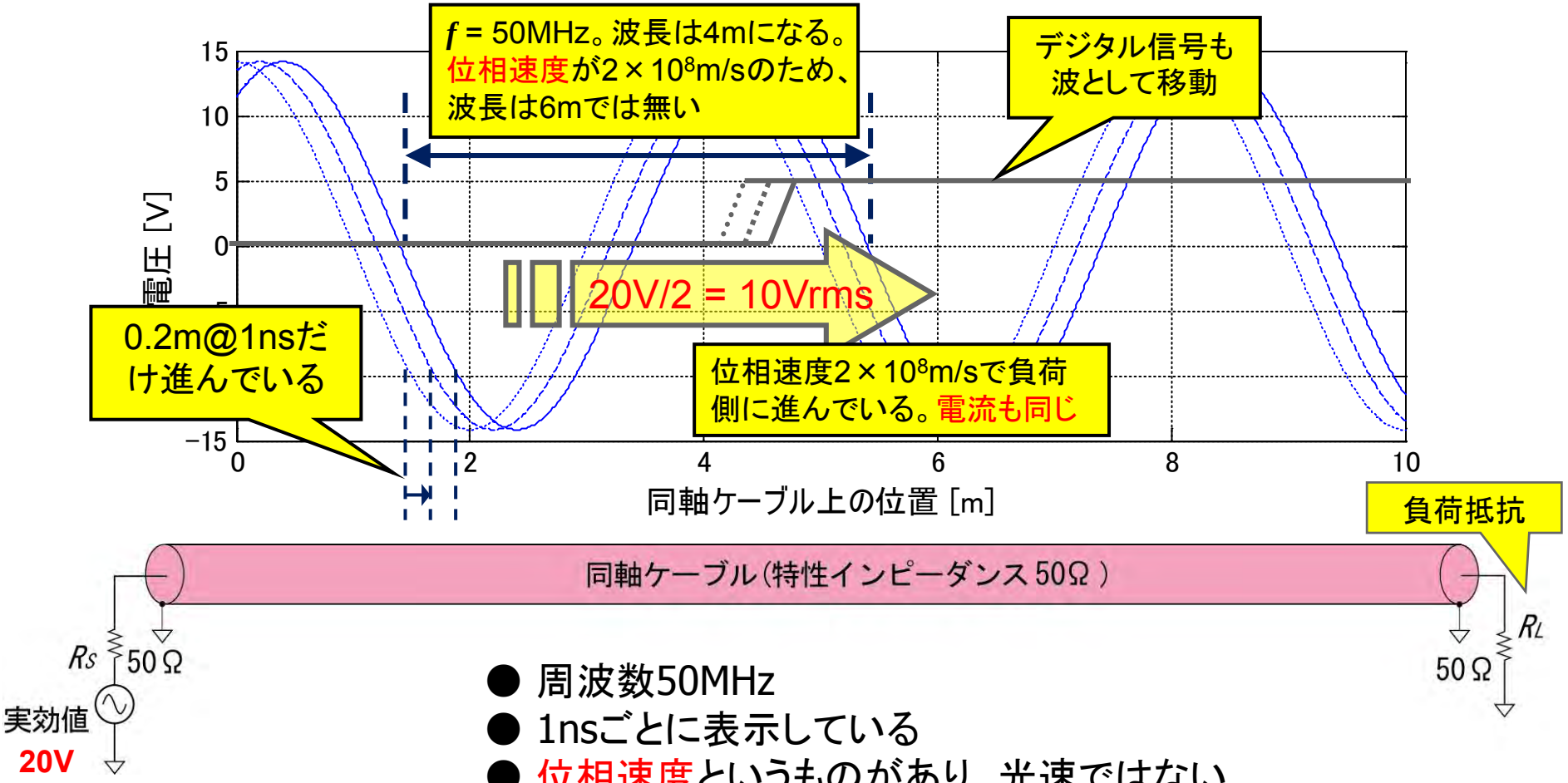
ここでQUIZ! 【1】
3つのランプの点灯する順番は？



① 全部同時
② 1 – 2 – 3の順番
③ 1と3は同時、2が遅くなる

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

電圧や電流は伝送線路内を波として移動していく



- 周波数50MHz
- 1nsごとに表示している
- 位相速度というものがあり、光速ではない

ここでは2×10^8m/s（一般に使われる同軸ケーブルでの位相速度）

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

信号が伝わるのはロープ上を波が伝わるのと同じ

イメージ実験をみてみましょう ①

① ロープを**繰り返し振り**、波が伝わるようす（連続波）を確認します

② ロープを**ひと振り**して波が伝わるようす（パルス・デジタル信号）を確認します

③ ①および②から電気信号の伝わるようすを思い描いてみてください

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

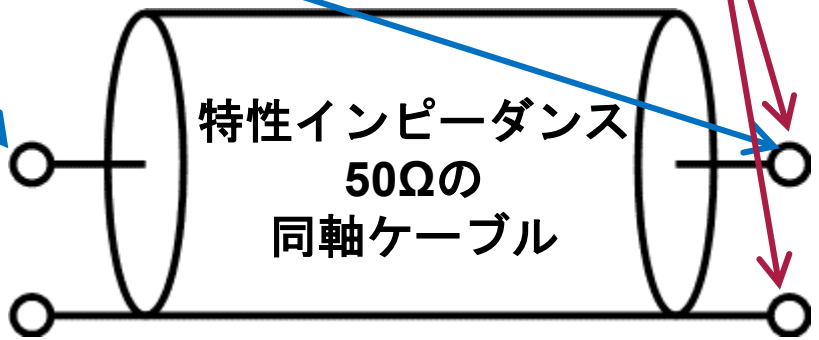
3. 特性インピーダンスとは一体ナニモノ？

Analog Devices Proprietary Information ©

特性インピーダンス50Ωの同軸ケーブルをテスターで測ってみる

当然ながら抵抗値はほぼゼロ

当然ながら抵抗値は無限大



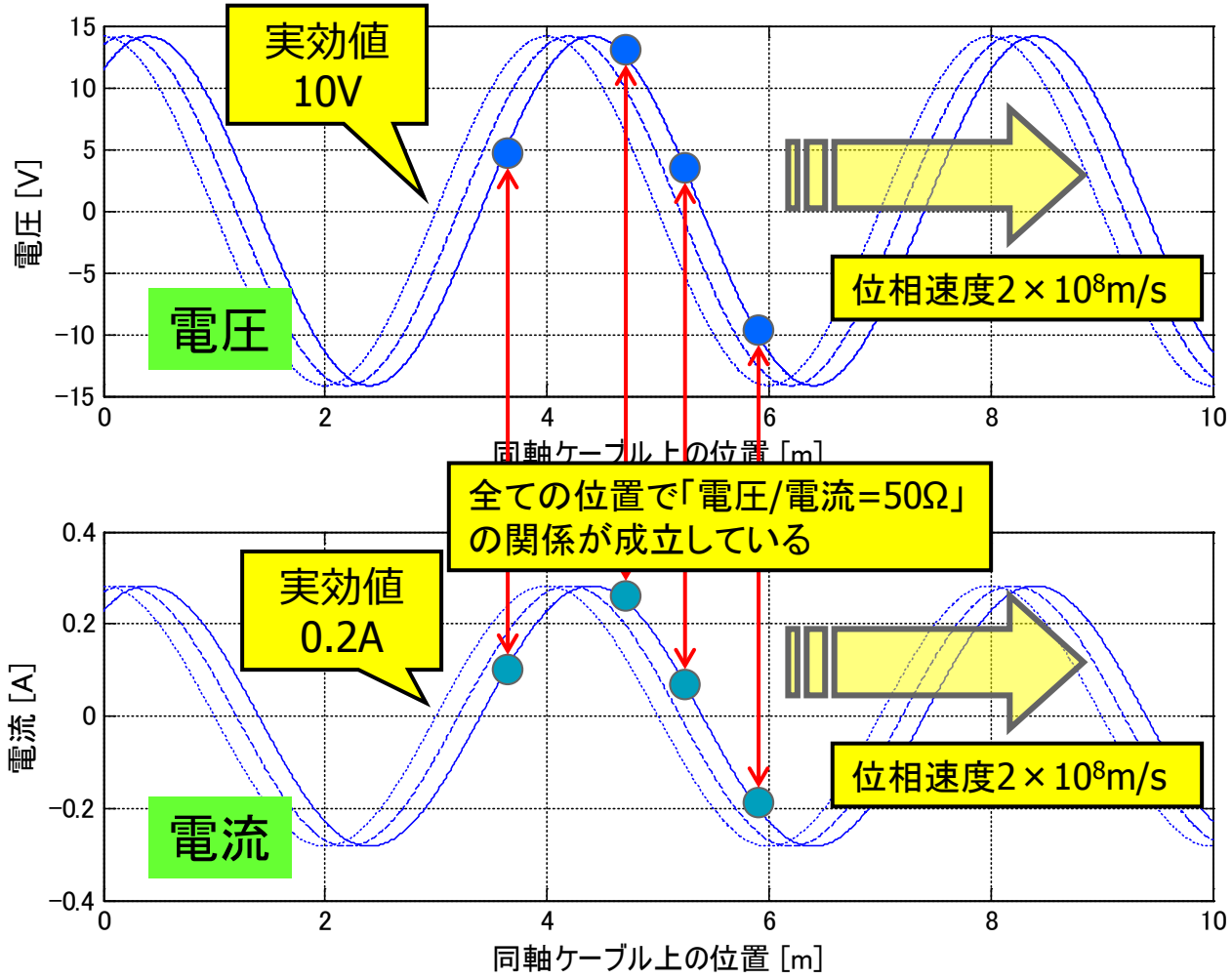
Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

特性インピーダンス50Ωとは、たとえば10V, 0.2Aが（10/0.2 = 50の比率で）伝わっていくこと

● 波として移動していく電圧と電流との相互関係が特性インピーダンス

● 内部に50Ωの抵抗成分があるわけではない

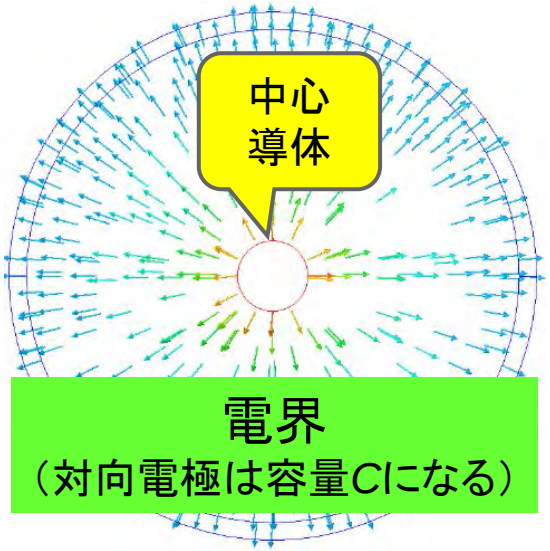


この図は周波数50MHz　横軸は位置[m]です！

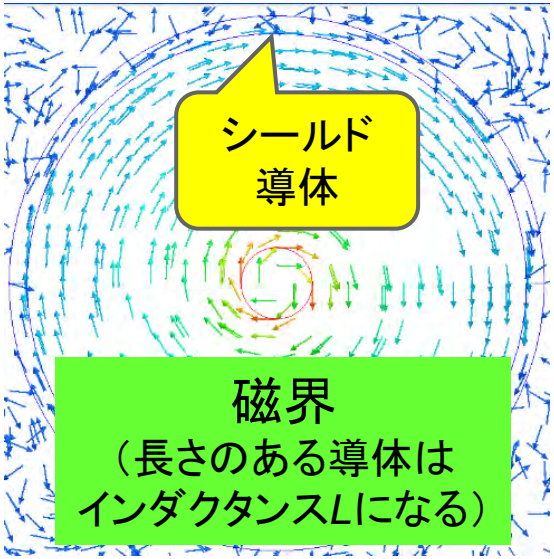
Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

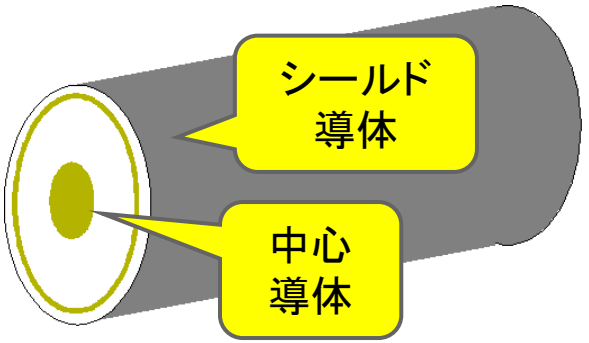
特性インピーダンスはどう決まる？



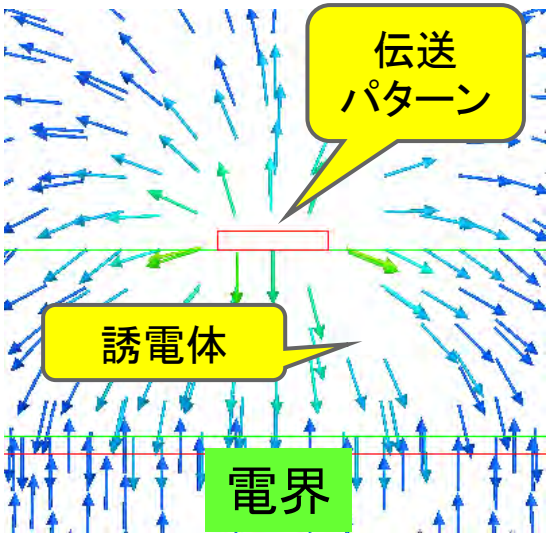
電界
（対向電極は容量Cになる）

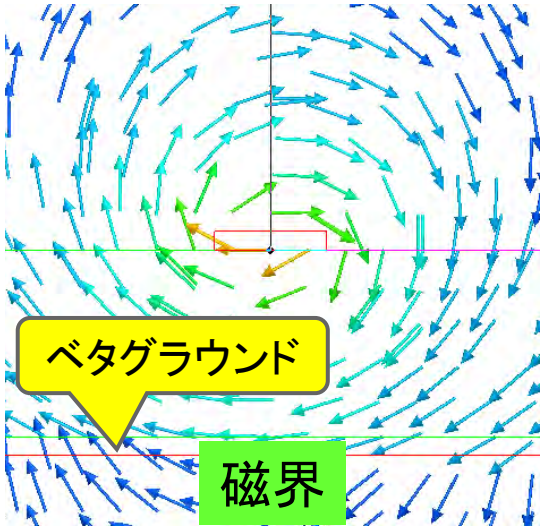


磁界
（長さのある導体は
インダクタンスLになる）

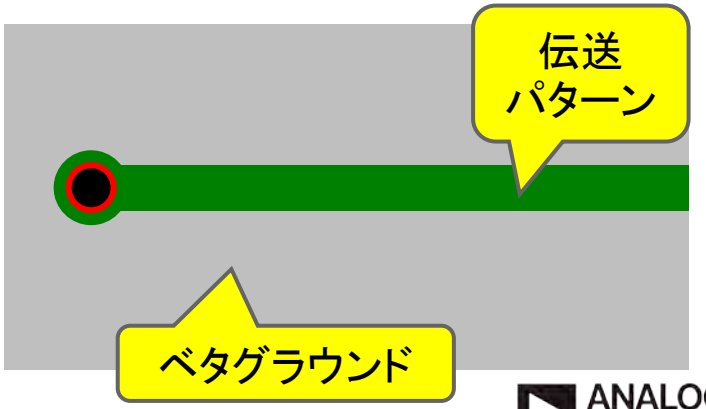


同軸ケーブル



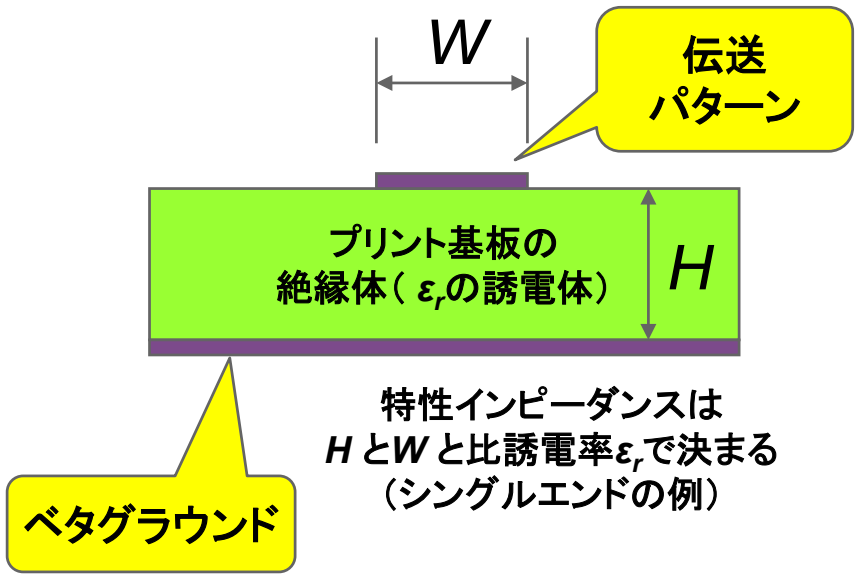


マイクロストリップ・ライン



Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

特性インピーダンスはどう決まる？



特性インピーダンスは
H と*W* と比誘電率ε_rで決まる
（シングルエンドの例）

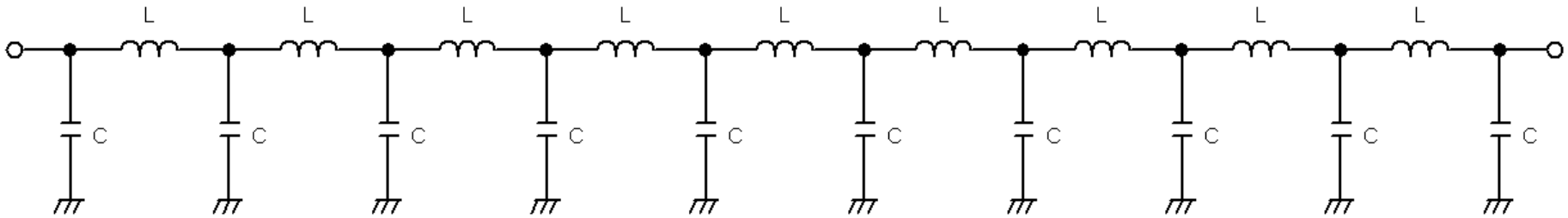
特性インピーダンス

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \propto (H, W, \varepsilon_r)$$

位相速度（伝搬速度）

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

信号の伝わる速度
（光速より遅い）



容量（単位長あたり C [F/m]）と
インダクタンス（単位長あたり*L* [H/m]）
が連なったものとしてモデル化できる

これが「分布定数」

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

インピーダンス・コントロール基板の設計パラメータの例

甲斐エレクトロニクス株式会社様
ご提供資料　製造時シミュレーション

	8層基板	1.6t								
材料	松下FR-4									
比誘電率	4.2									
				シングル50Ω	公差±10%		差動100Ω	公差±10%		
層	構造	材料	厚み	シングル	パターン幅	対抗層	差動	パターン幅	スペース	対抗層
L1	Signal		0.018+0.025μ	50.86Ω	0.22	L2	100.89Ω	0.13	0.14	L2
		PP	0.1mm							
L2	Plane		35μ							
		CORE	0.2mm							
L3	Signal		35μ	50.09Ω	0.24	L2-L4	99.83Ω	0.125	0.115	L2-L4
		PP	0.2mm							
L4	Plane		35μ							
		CORE	0.2mm							
L5	Plane		35μ							
		PP	0.2mm							
L6	Signal		35μ	50.09Ω	0.24	L7-L5	99.83Ω	0.125	0.115	L7-L5
		CORE	0.2mm							
L7	Plane		35μ							
		PP	0.1mm							
L8	Signal		0.018+0.025μ	50.86Ω	0.22	L7	100.89Ω	0.13	0.14	L7

メーカーや材質によって変わる！

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

インピーダンス・コントロール基板の品質管理

シングルエンド・インピーダンス(Z0)測定用テストクーポン(サンプル)

差動インピーダンス(Zdiff)測定用テストクーポン(サンプル)

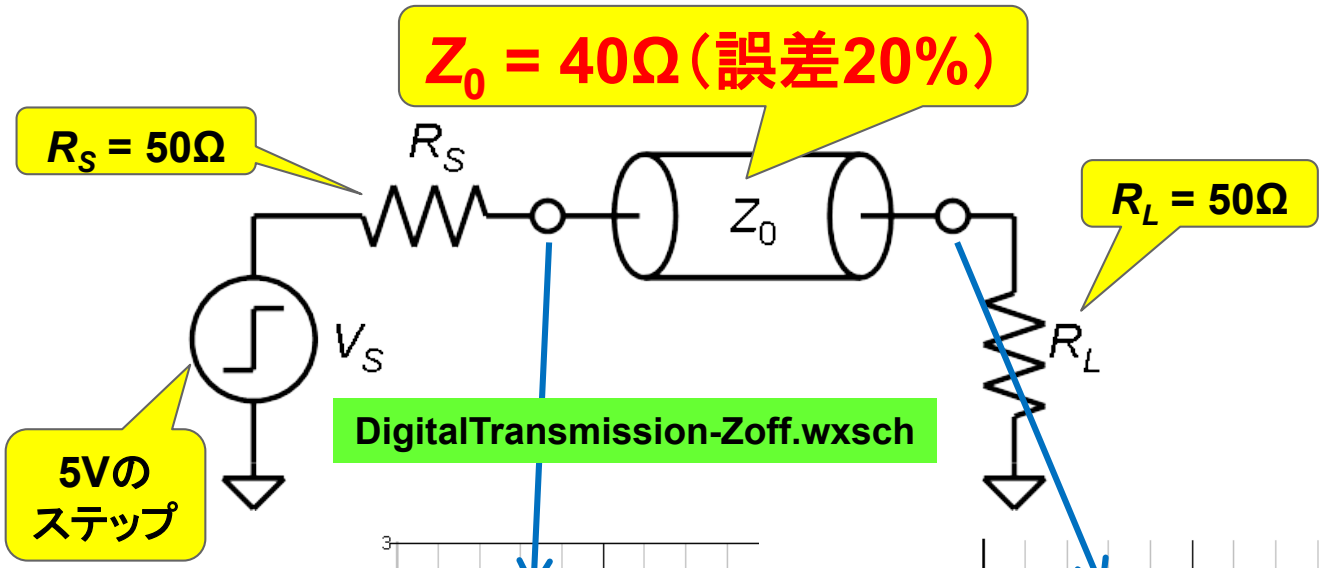
特性インピーダンスの実測風景

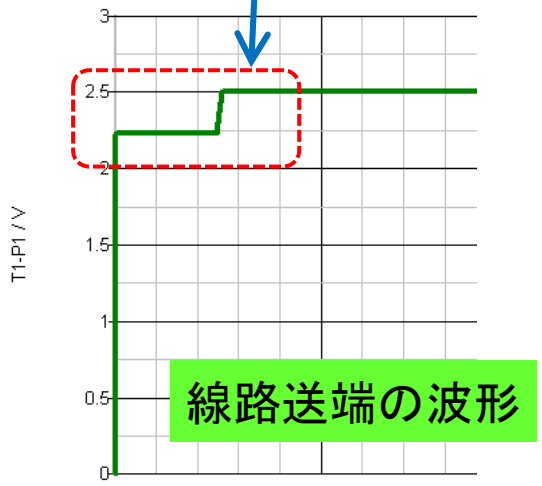
P板.comサイトより転載

Analog Devices Proprietary Information ©

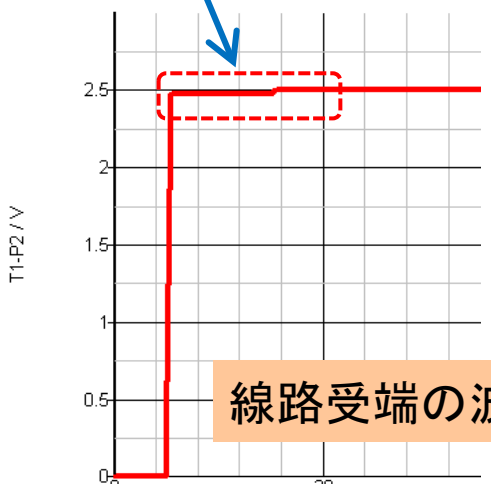
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

インピーダンス・コントロール基板に「本当に」必要とされるインピーダンス仕上がり精度（精度5%は必要か？）





線路送端の波形



線路受端の波形

精度5%とか指定していたけど、20%の誤差でも思いのほか暴れが少ないな・・・

でも、これを理論的には、どうやって考えていけばいいのだろうか？

しくみを理解して、シミュレーションで確認して、基板を適切に発注しましょう！

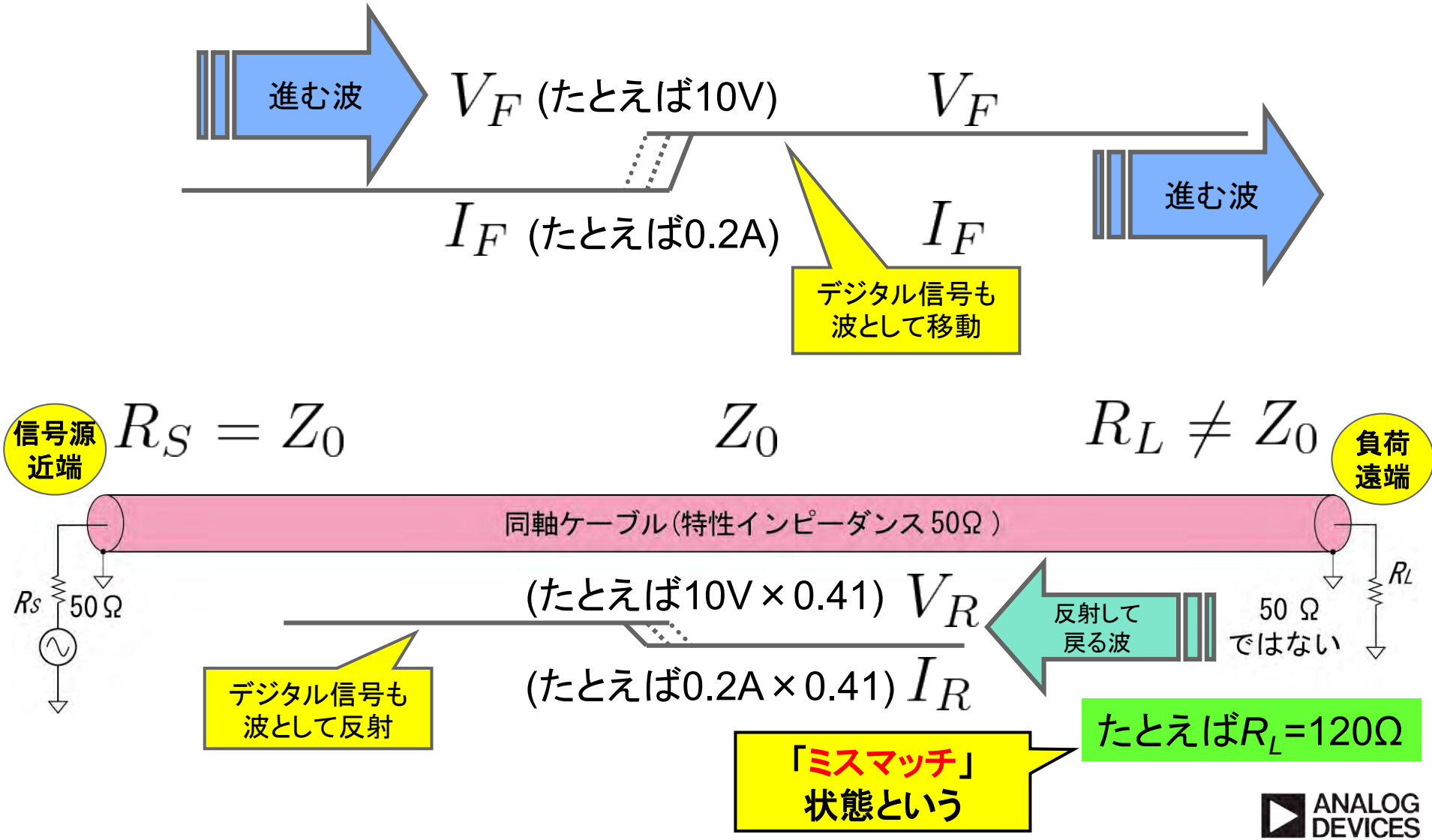
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

4. 信号反射によるトラブルのしくみと終端抵抗の重要性を理解する

Analog Devices Proprietary Information ©

負荷抵抗が特性インピーダンスと異なると電圧と電流が反射する



Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

低速なRS485でもしくみは同じ

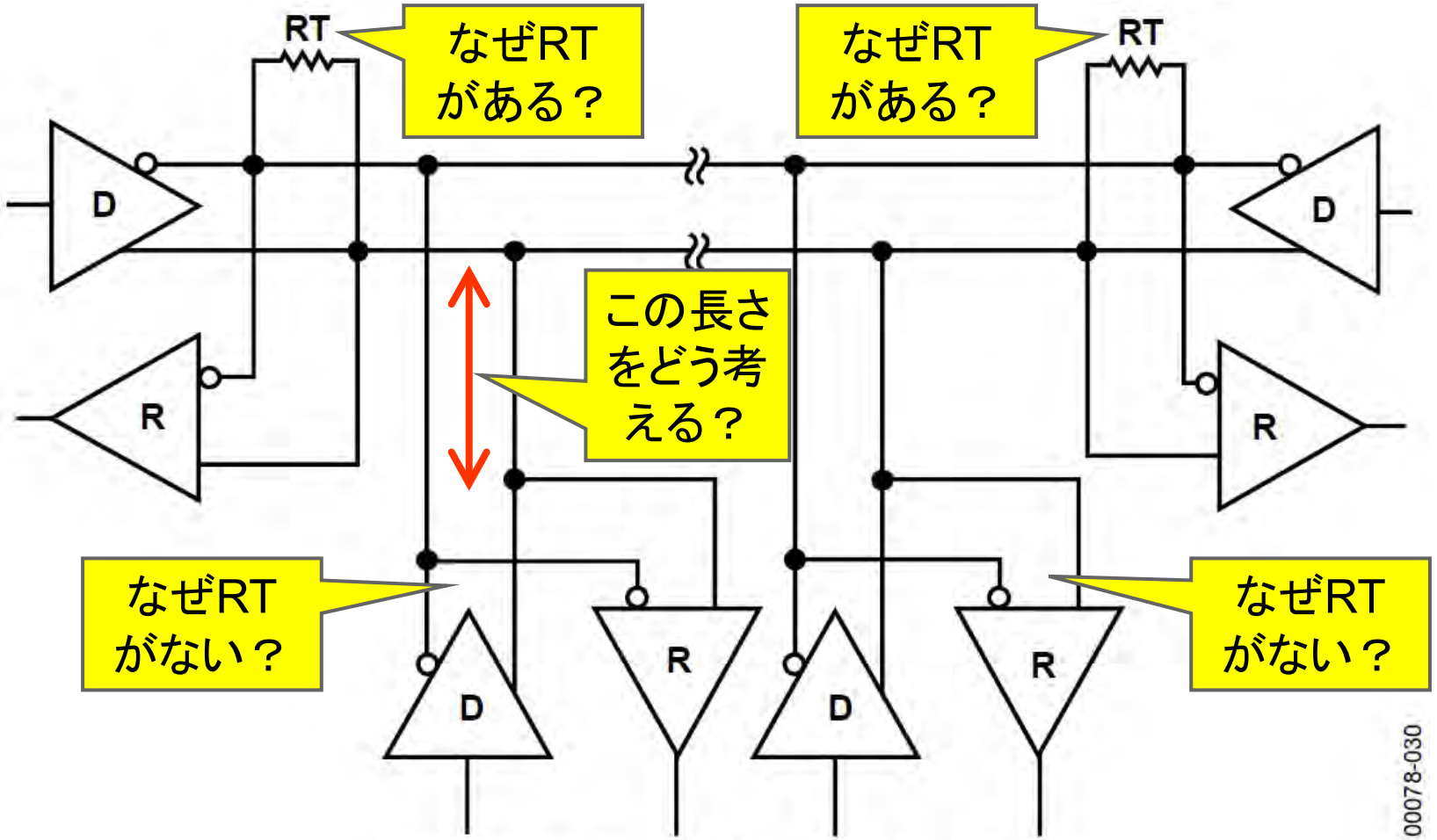


Figure 30. Typical RS-485 Network

これらの疑問に答えるのが、信号反射の理解

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

信号の反射をロープ上を波が伝わる実験で見てみる

イメージ実験をみてみましょう ②

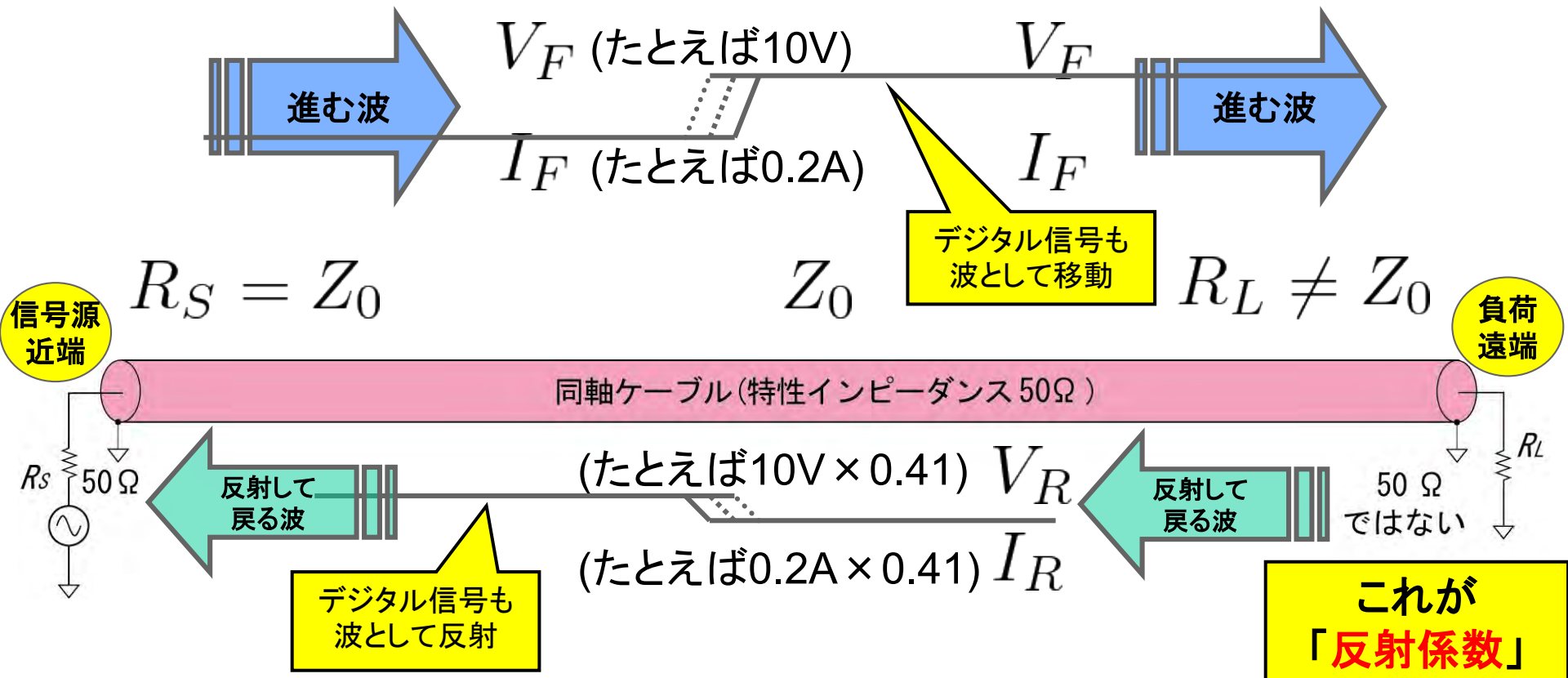
① ロープを**繰り返し振り**、波が伝わるようす（連続波）と**反射**してくるようすを確認します

② ロープを**ひと振りして**波が伝わるようす（パルス・デジタル信号）と**反射**してくるようすを確認します

③ ①および②から電気信号の**反射**するようすを思い描いてみてください

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

反射する比率「反射係数」



これが
「反射係数」

進む波と反射する波の
比率は電流、電圧ともども

$$\frac{V_R}{V_F} = \frac{I_R}{I_F} = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0}$$

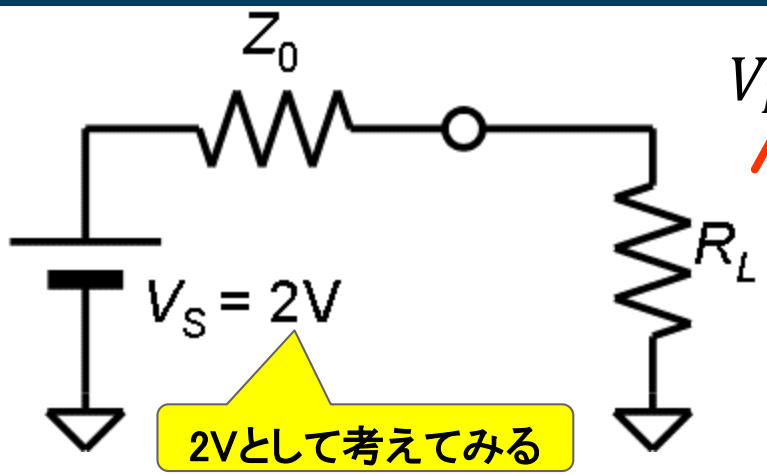
「ミスマッチ」
状態

(たとえばR_L=120Ωなら0.41)

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

信号反射の原理と反射係数 Γの考え方
実はとても簡単・単純な話・・・



2Vとして考えてみる

V_{RL}

マッチングしているときの進む波の大きさだから

$Z_0 = R_L$ならば、$V_{RL}(= V_F) = \frac{V_S}{2} = 1V$

$Z_0 \neq R_L$ならば、$V_{RL} = \frac{R_L}{R_L + Z_0} V_S$

$$V_{RL} = V_F + V_R = \frac{R_L}{R_L + Z_0} V_S$$

進む波と戻る波

進む波 V_F

$$V_R = V_{RL} - V_F = \frac{R_L}{R_L + Z_0} V_S - \frac{V_S}{2} = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0} \cdot \frac{V_S}{2}$$

戻る波 V_R

実際はこれに位相量が入る！

$$\frac{V_S}{2} = V_F = 1V$$

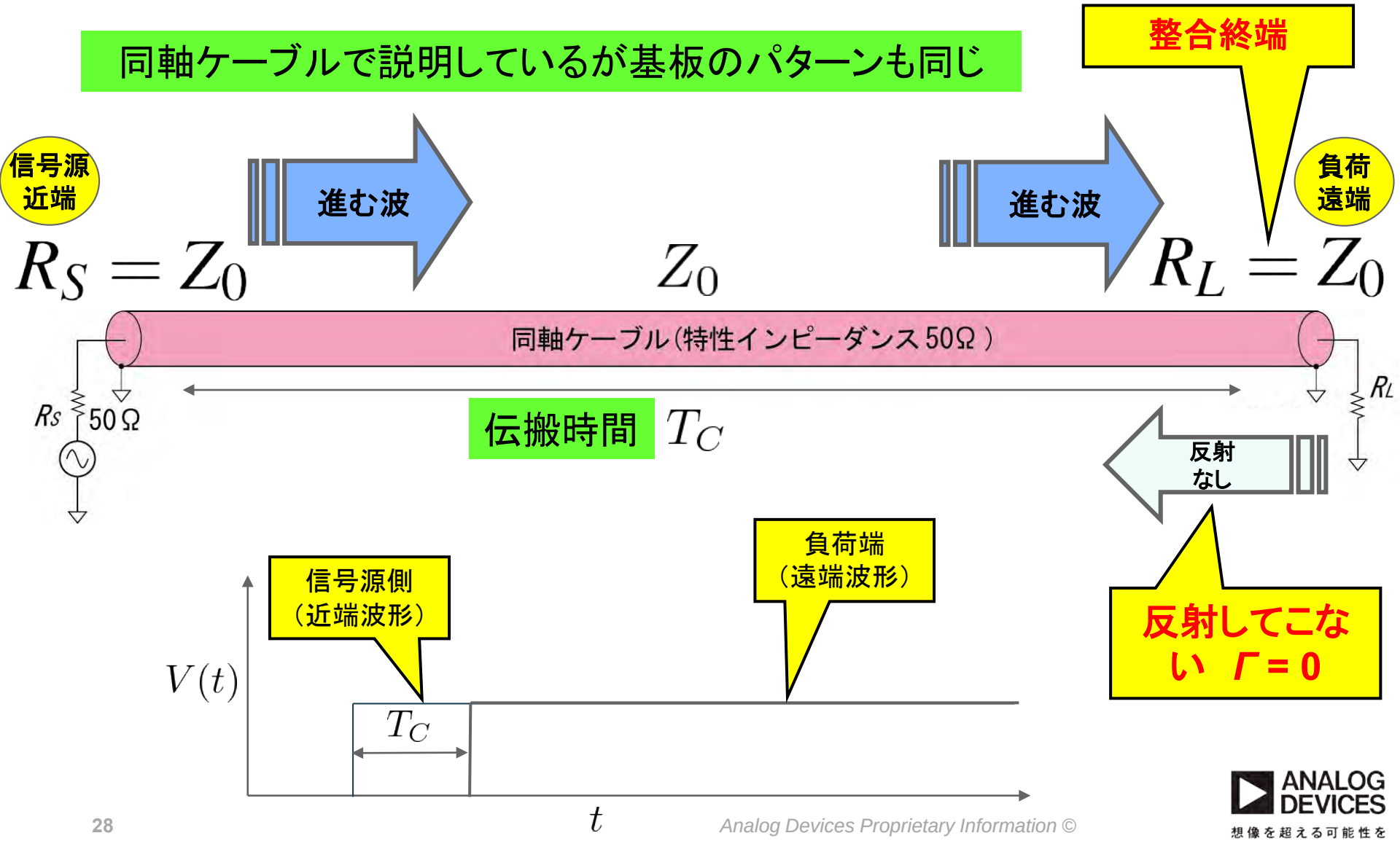
反射係数Γになる。こんなに簡単なんだ！

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

本来は負荷端（遠端）で終端する

同軸ケーブルで説明しているが基板のパターンも同じ

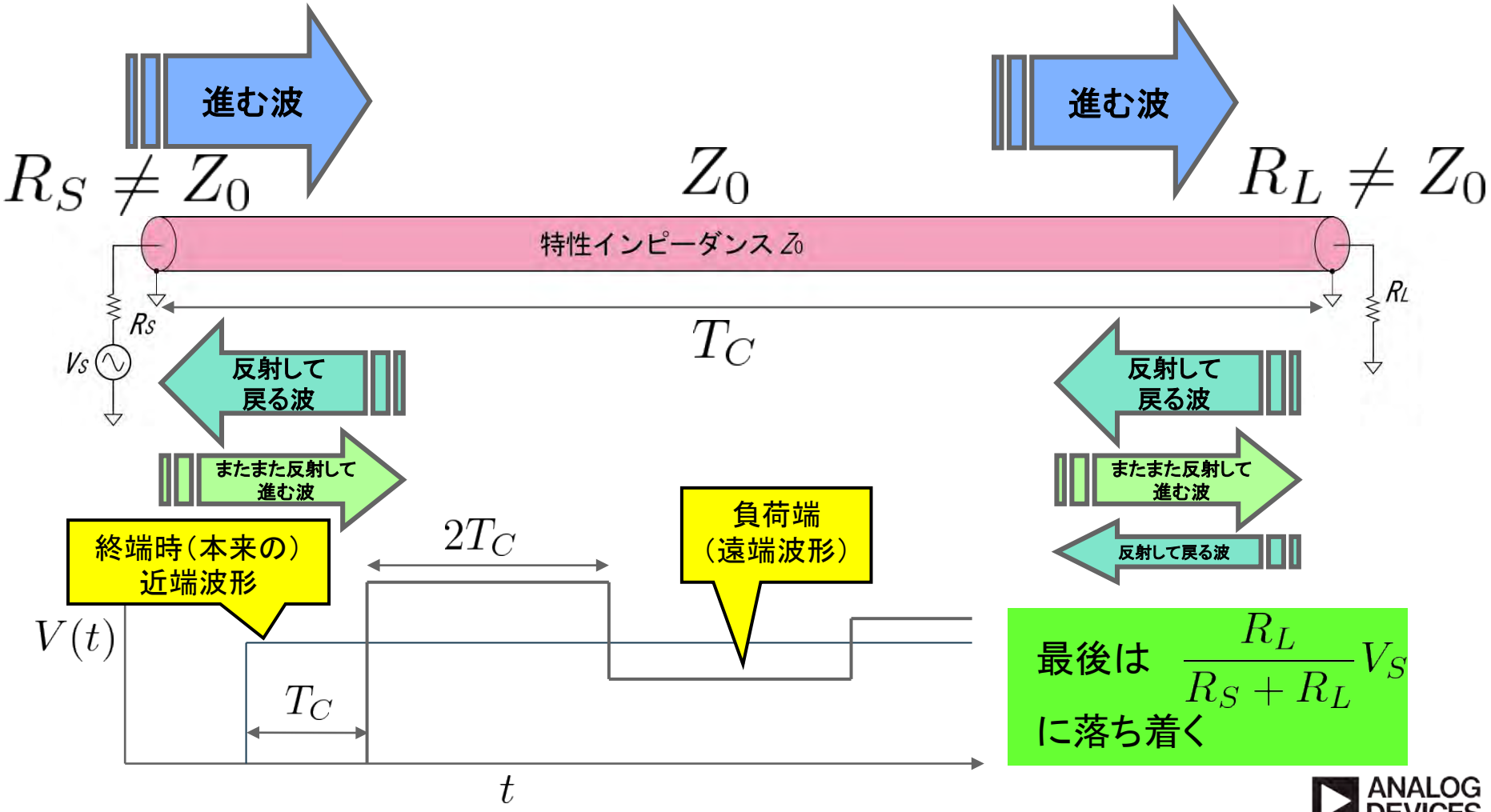


Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

デジタル信号での多重反射

信号源のインピーダンスも異なっていると、反射して戻ってきた信号がまたそこでも再反射してしまう（多重反射）



最後は $\dfrac{R_L}{R_S + R_L} V_S$ に落ち着く

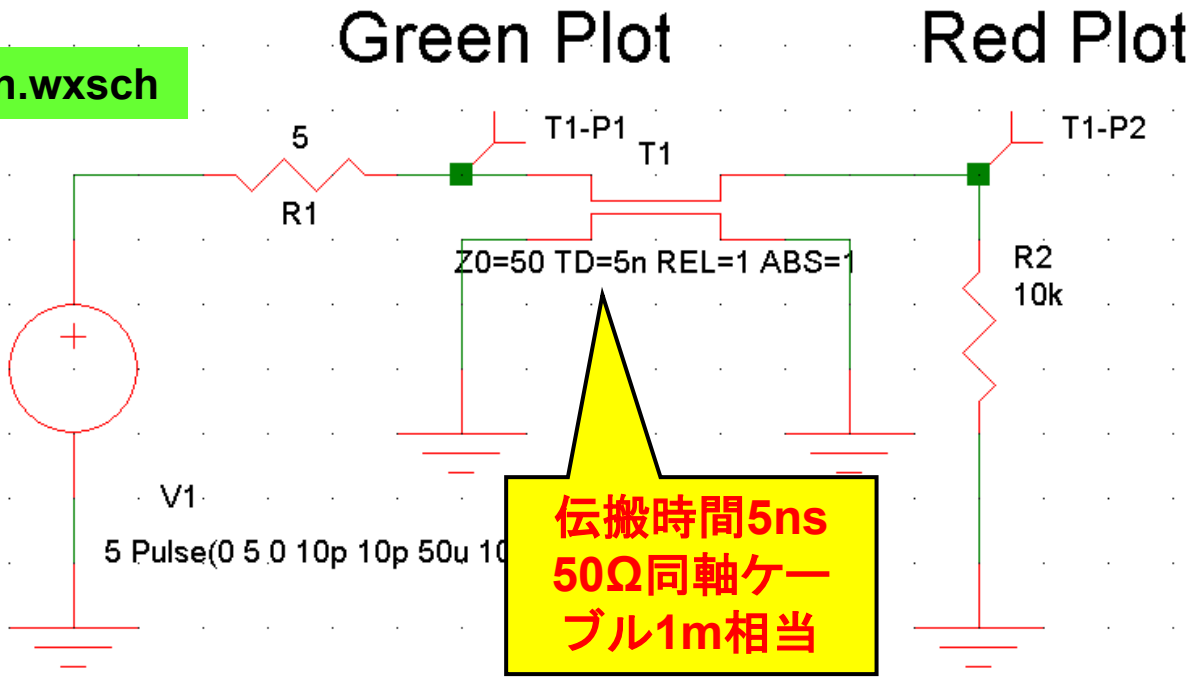
Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

シミュレーションで終端と反射を見てみる

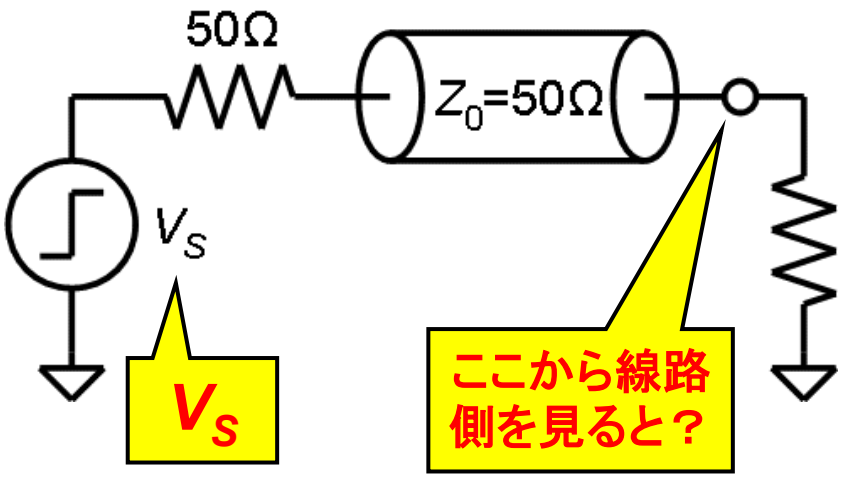
- 基本は近端と遠端を終端
  - 信号源50Ω、負荷50Ω
- デジタル回路での多重反射のようすを見てみる
  - 5Vを送って5Vを受けるCMOSデジタルでは**どう対策**する？
  - ひとつが**「近端終端（信号源に50Ω）」**という技
- 「近端終端」で近端に戻ってきたとき再反射が無い

DigitalTransmission.wxsch

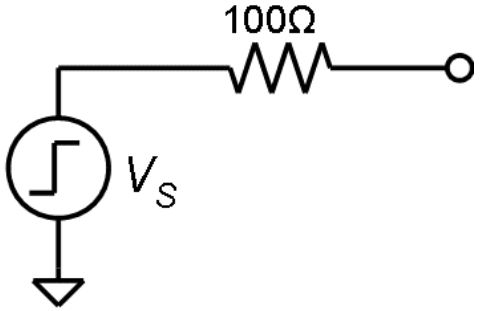


ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

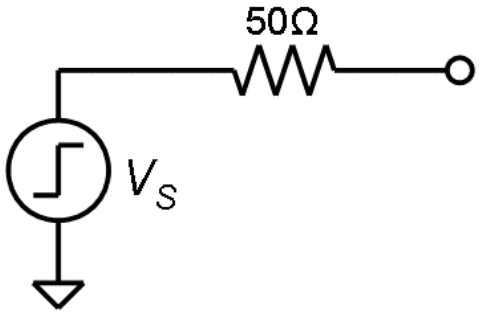
ここでQUIZ! 【2】
この伝送線路の出力等価回路は？



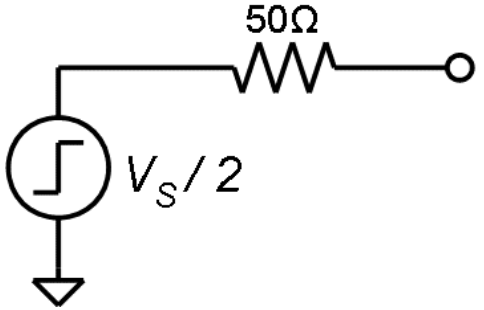
① V_Sと100Ω



② V_Sと50Ω



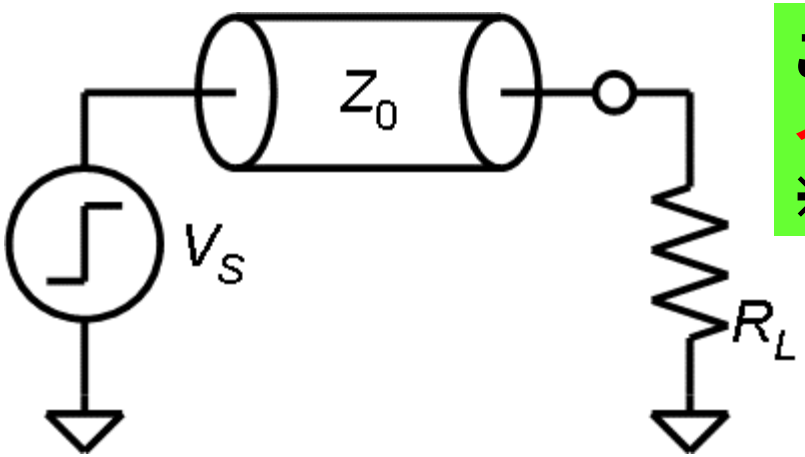
③ V_S / 2と50Ω



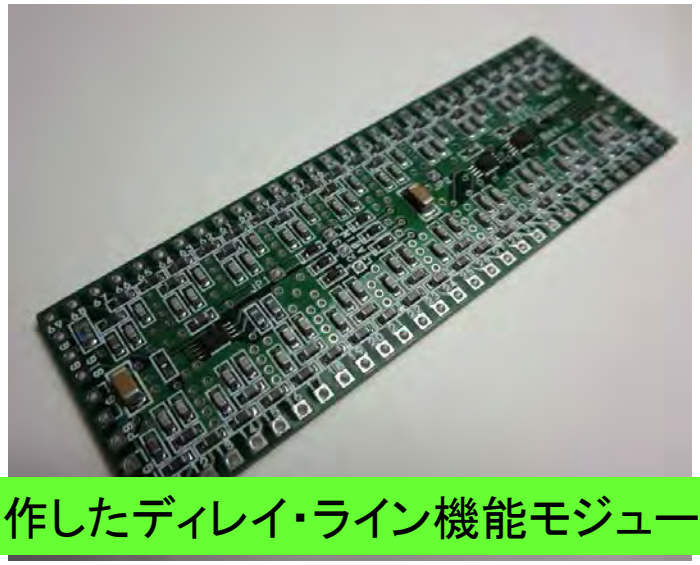
Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

QUIZ【2】に関する冊子をP板.com展示ブースで配布中



このしくみを利用し製作した「ディレイ・ライン回路」を展示しています
※ 冊子はご名刺と交換となります



製作したディレイ・ライン機能モジュール

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES

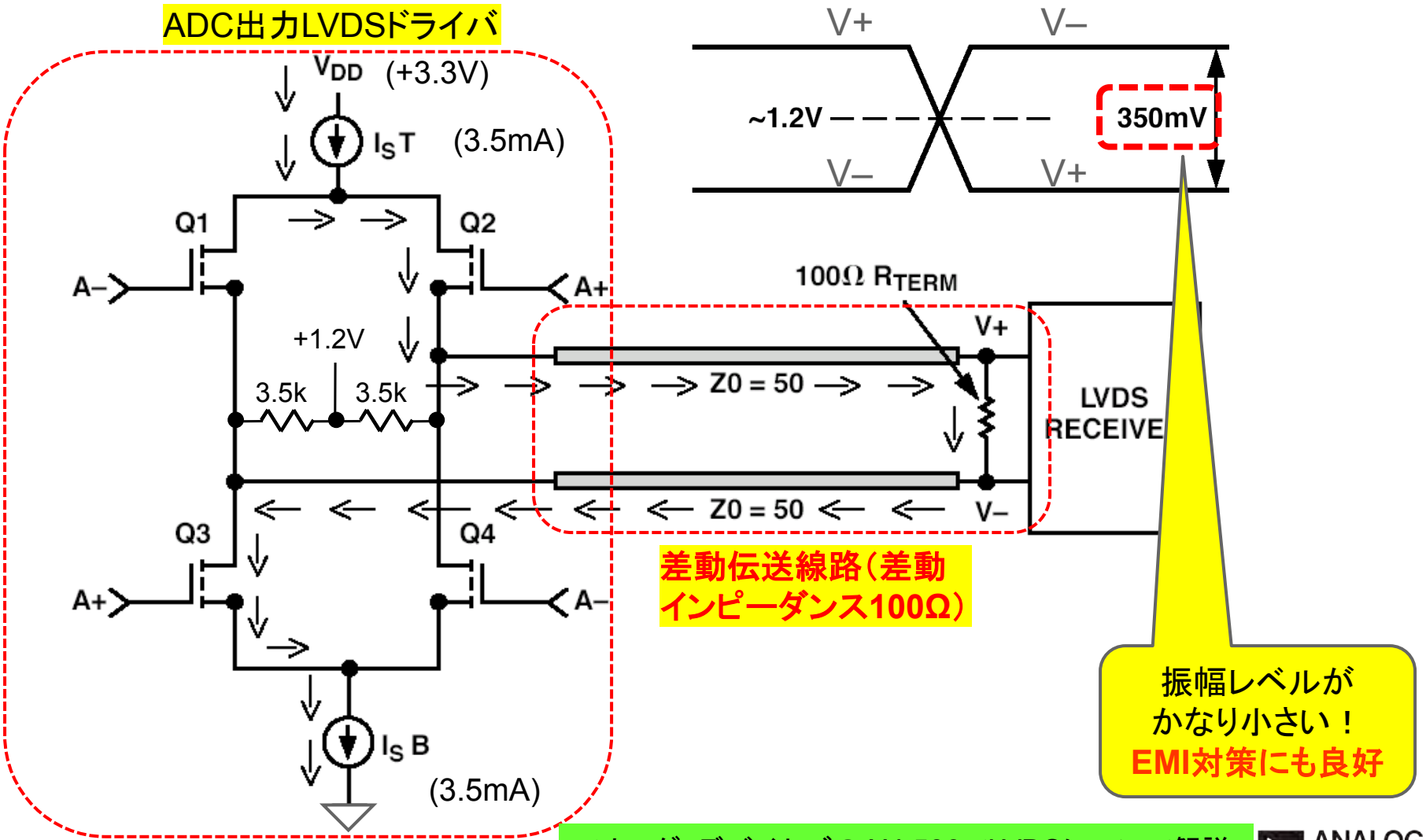
想像を超える可能性を

AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

5. 差動信号伝送における信号反射のようすと終端抵抗の必要性を理解する

Analog Devices Proprietary Information ©

差動信号伝送の例「LVDSは高速かつ低EMI」

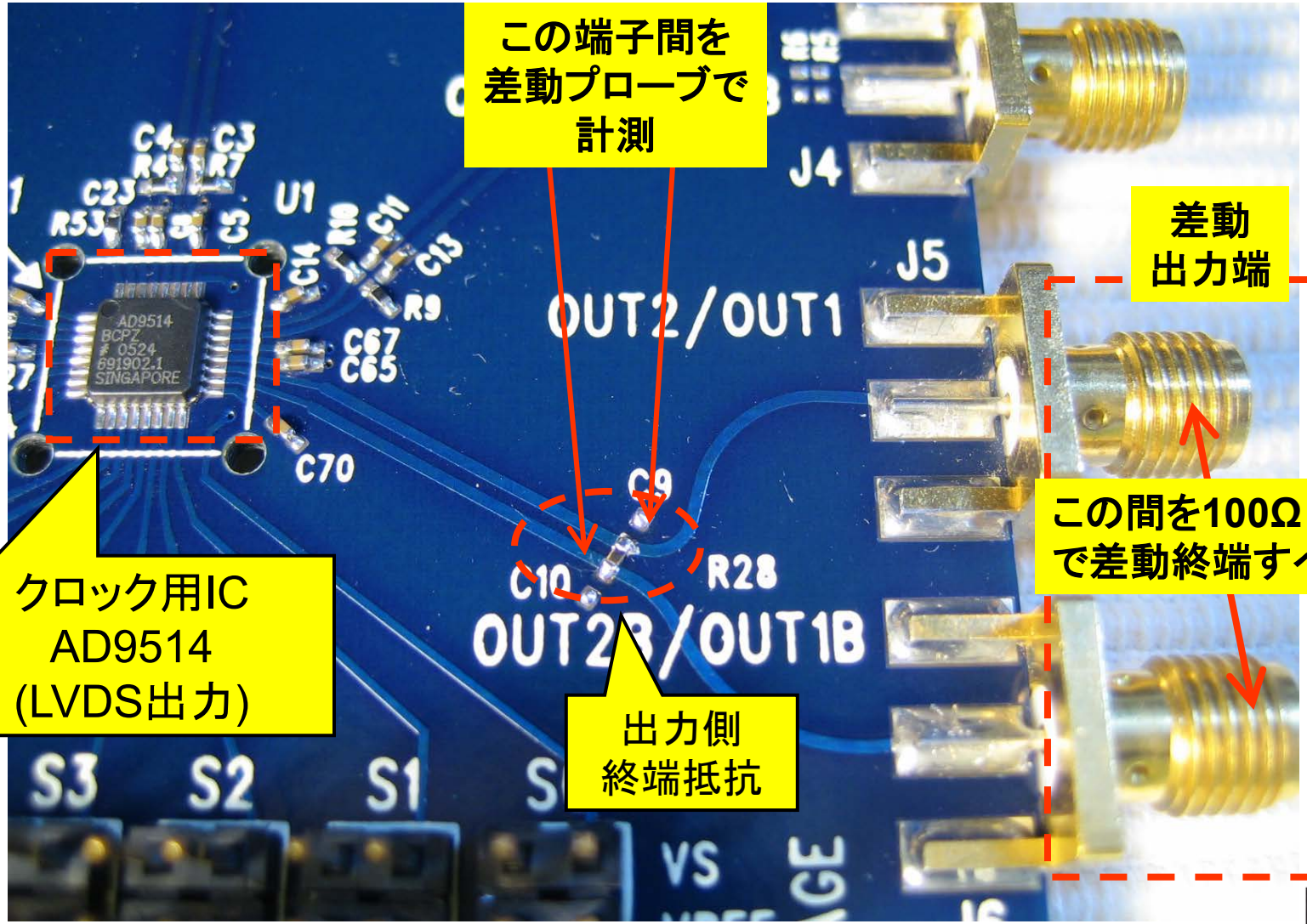


アナログ・デバイセズのAN-586でLVDSについて解説

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

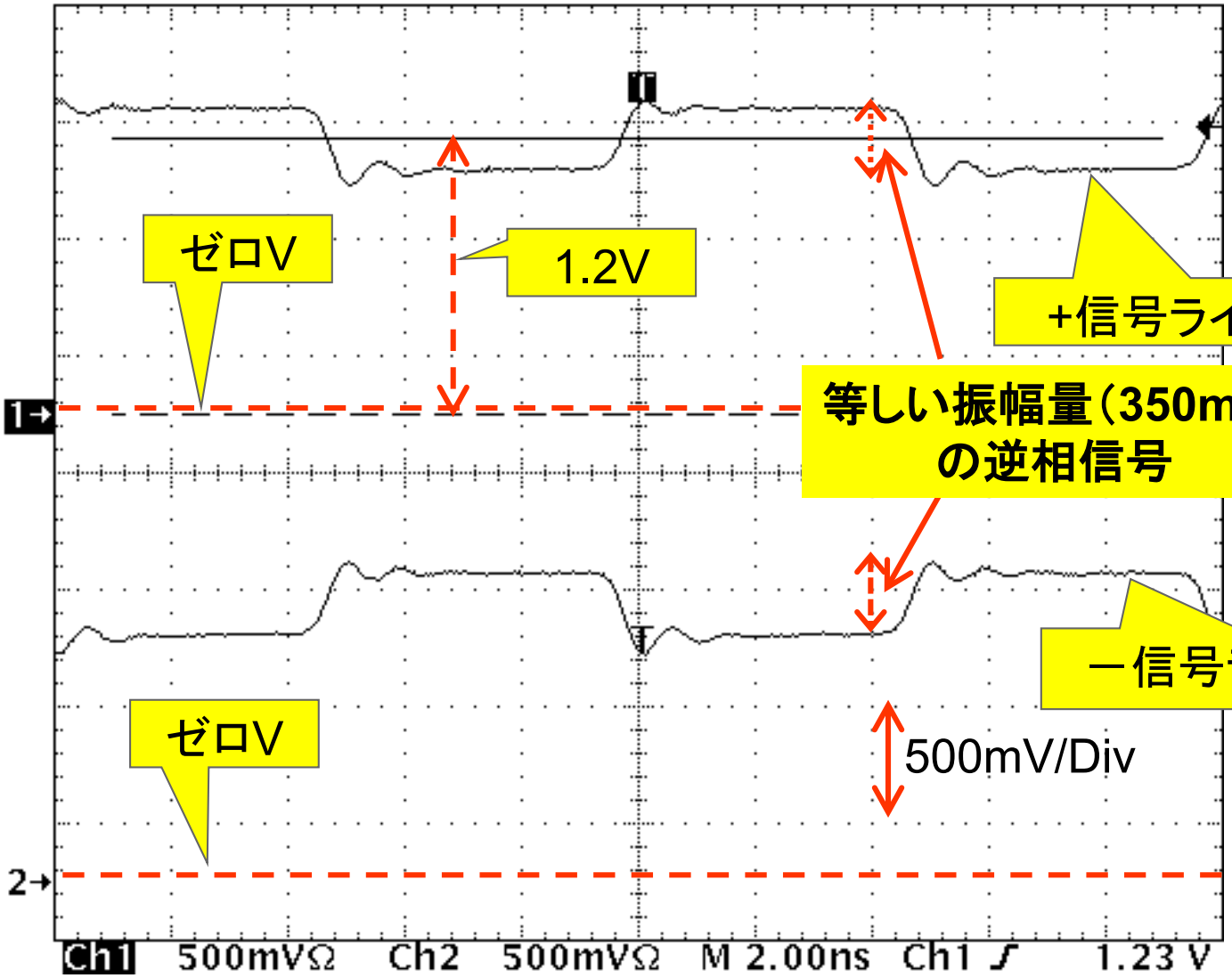
CLKドライバ AD9514のLVDS信号で終端状態のデモ



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

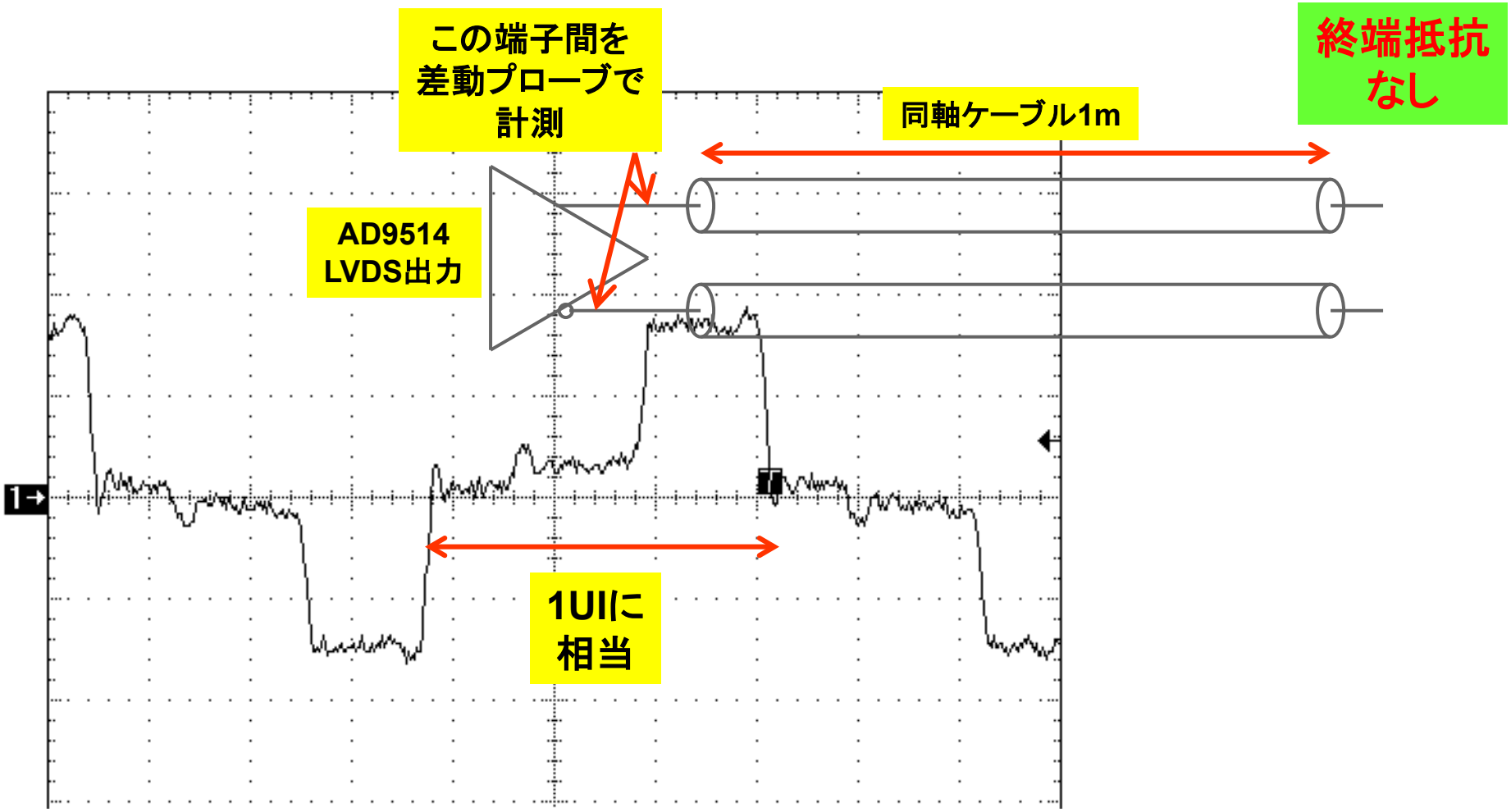
CLKドライバ AD9514のLVDS信号で終端状態のデモ（シングル・エンドで終端して200Mbpsを観測）



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

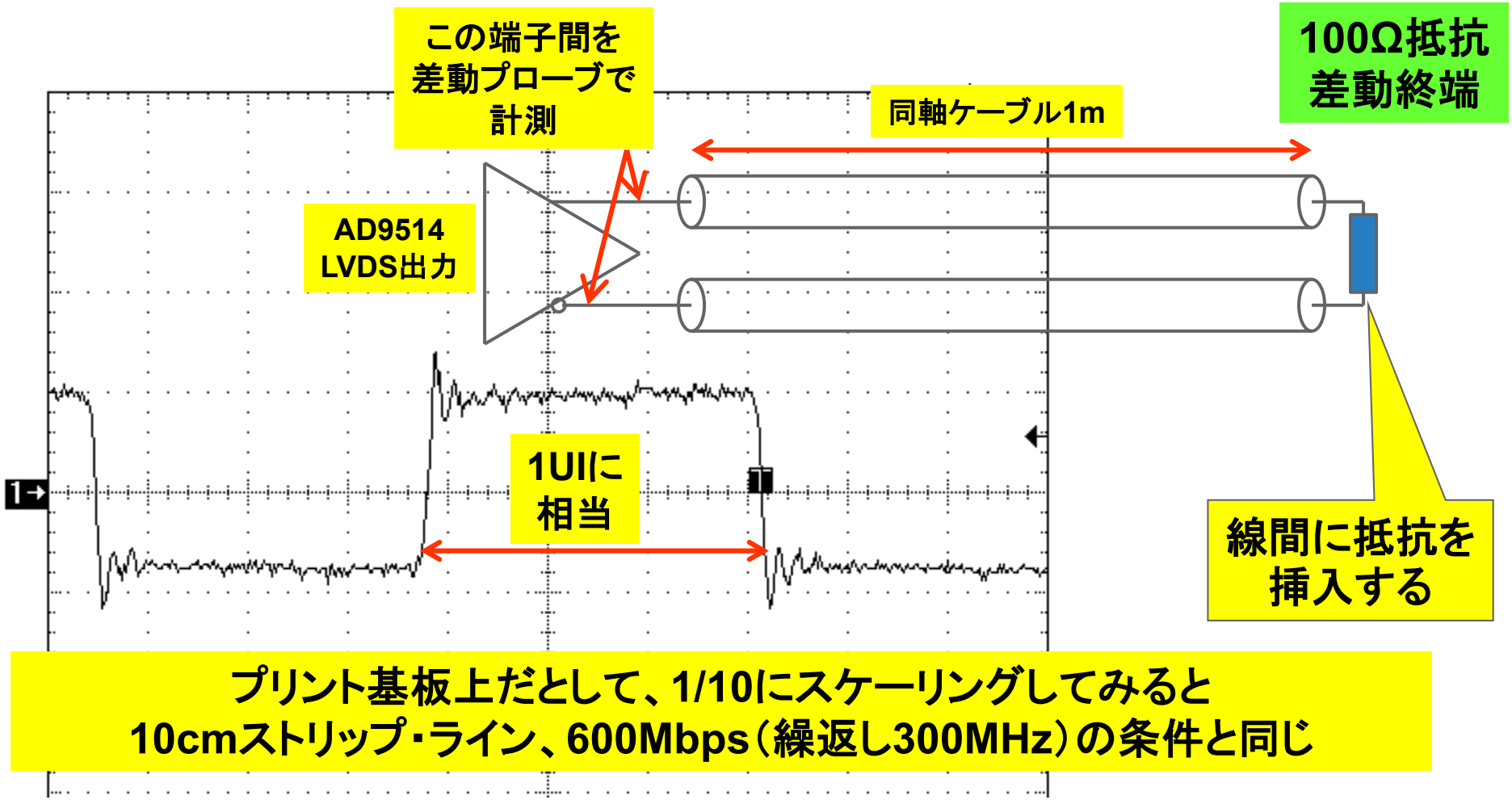
適切に終端されていない場合の信号反射（60Mbps）



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

差動信号伝送の終端方法と
適切に終端された場合の信号波形（60Mbps）



プリント基板上だとして、1/10にスケーリングしてみると
10cmストリップ・ライン、600Mbps（繰返し300MHz）の条件と同じ

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES

想像を超える可能性を

AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

6. 前編のまとめと Appendix

Analog Devices Proprietary Information ©

前編のまとめ

- 信号はパターン上を「波」として移動（伝搬）する
  - このイメージを理解することが大切
- 電圧と電流の「波」の比率が特性インピーダンス
  - 中に抵抗体があるわけではない
- 特性インピーダンスに合わせた「終端」が必要
  - 終端が不適切だと信号が反射する
- 差動伝送でも考え方は同じ
- 回路の動きの「基本」をイメージで抑えておくだけで、トラブルを未然に回避できる

※シミュレーション・ファイルは近日公開いたします

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Appendix

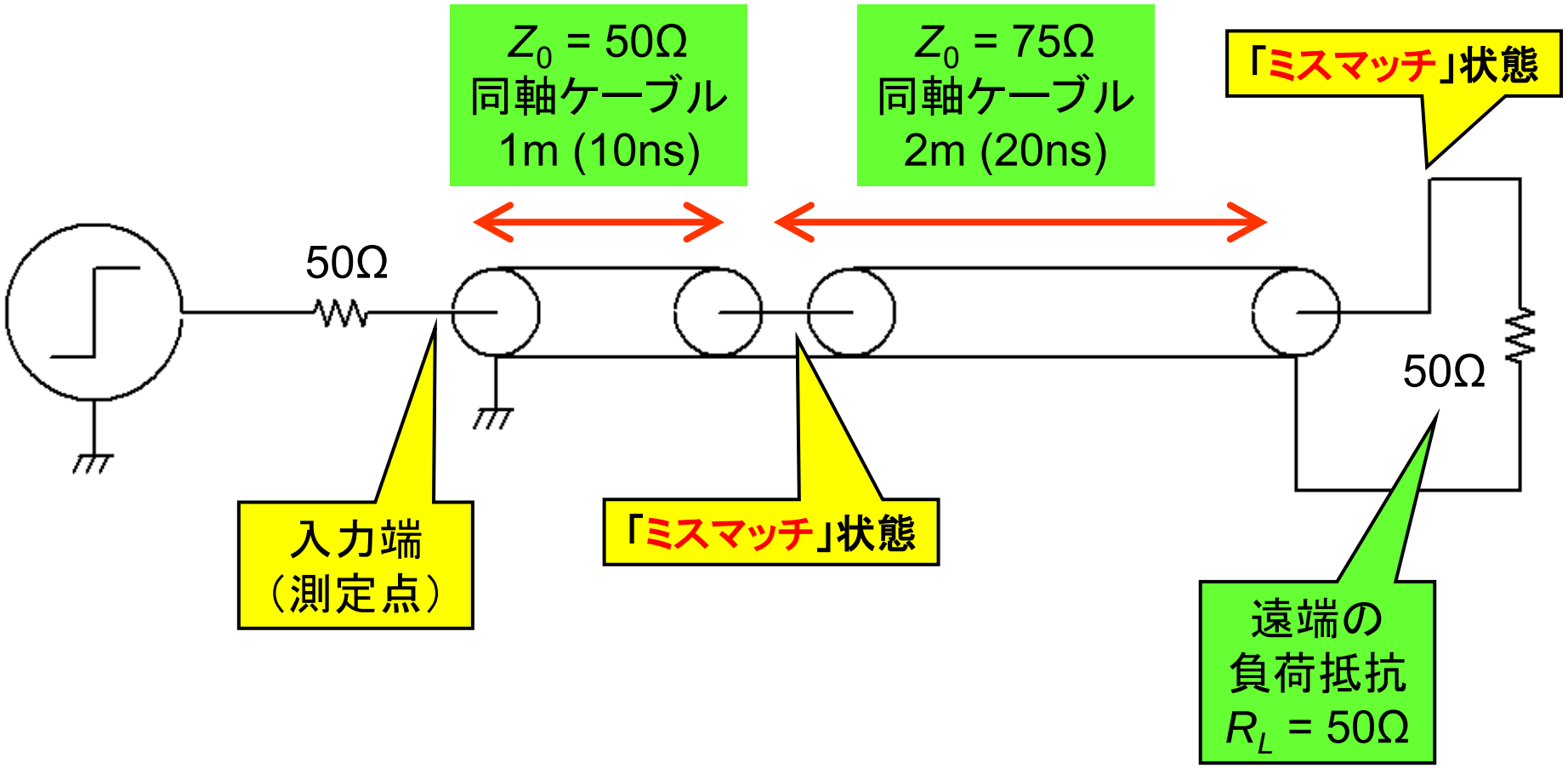
- 1. 途中に不連続があっても反射する
- 2. 差動信号伝送は外部から混入するコモン・モード（ノイズ）成分の影響を除去できる
- 3. 差動受信により信号純度が向上するようす
- 4. ハイスピード信号での「差動回路の限界」
- 5. コモン・モード成分が差動信号に変換されてしまうようす

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

1. 途中に不連続があっても反射する

Appendix

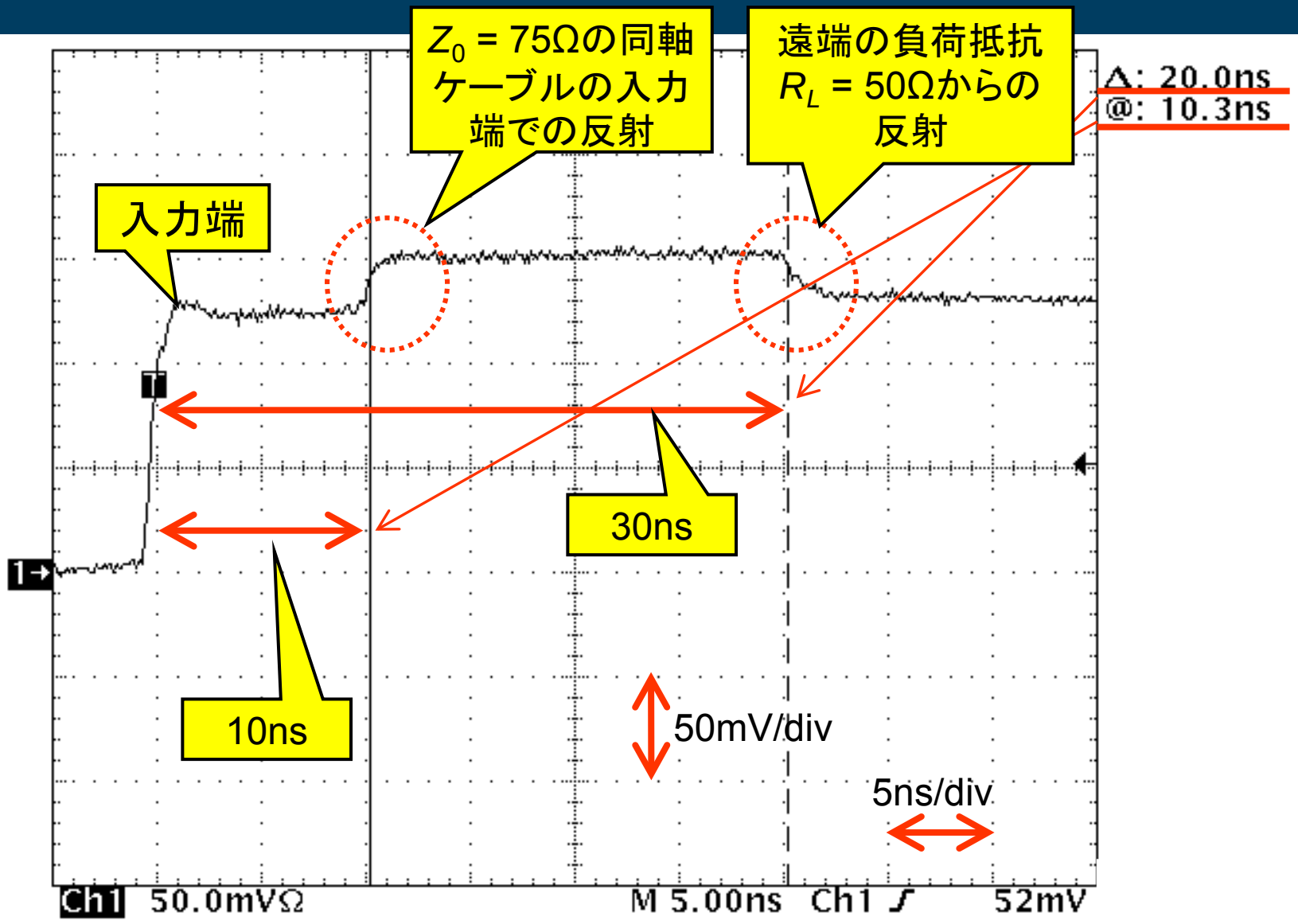


Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

1. 途中に不連続があっても反射する（つづき）

Appendix

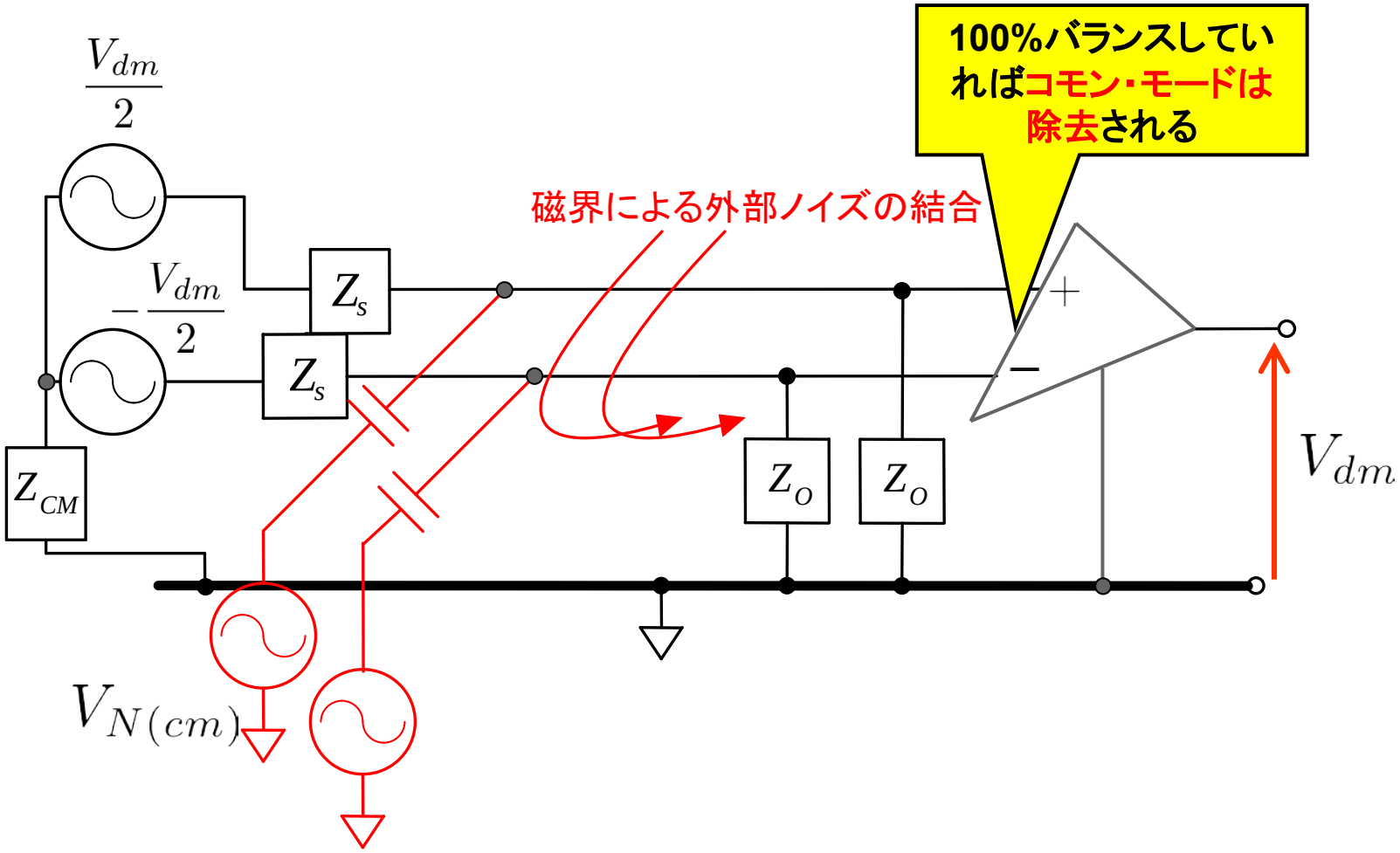


Analog Devices Proprietary Informat

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

2. 差動信号伝送は外部から混入するコモン・モード（ノイズ）成分の影響を除去できる・・・（例1 外部電磁界）

Appendix

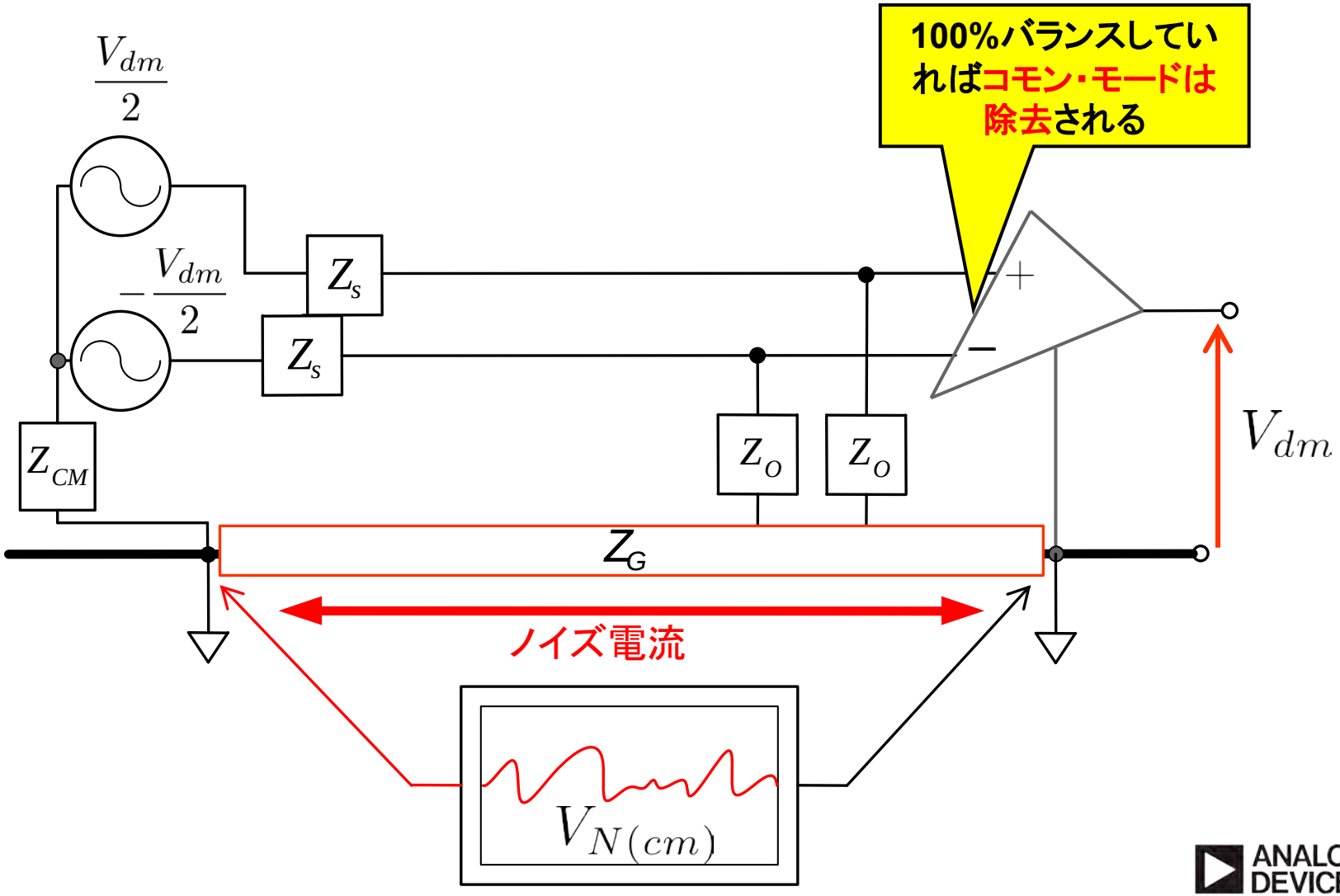


Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

2. 差動信号伝送は外部から混入するコモン・モード（ノイズ）成分の影響を除去できる・・・（例2　グラウンド・ノイズ）

Appendix

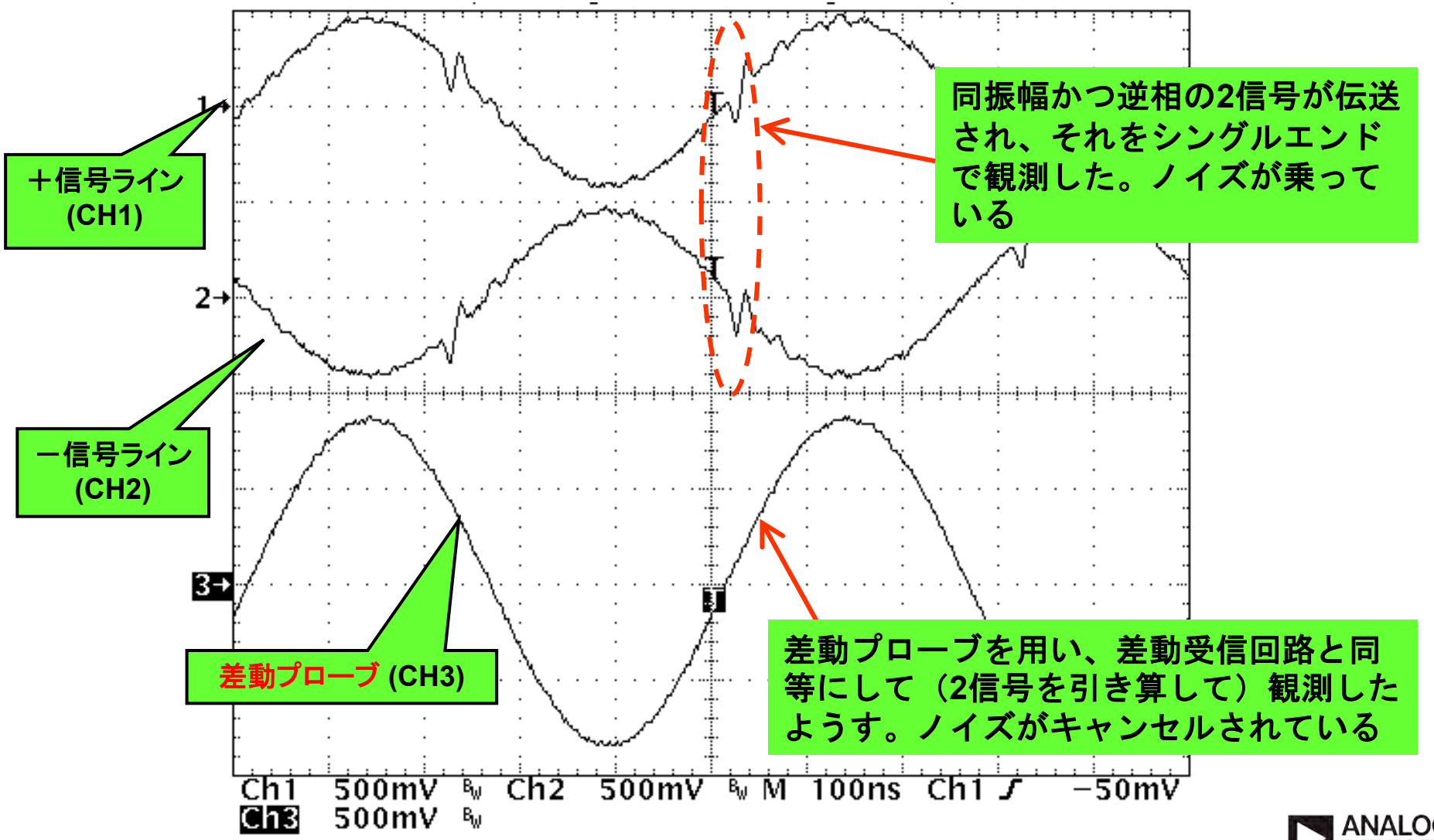


Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

3. 差動受信により信号純度が向上するようす
コモン・モード（ノイズ）成分が除去される

Appendix

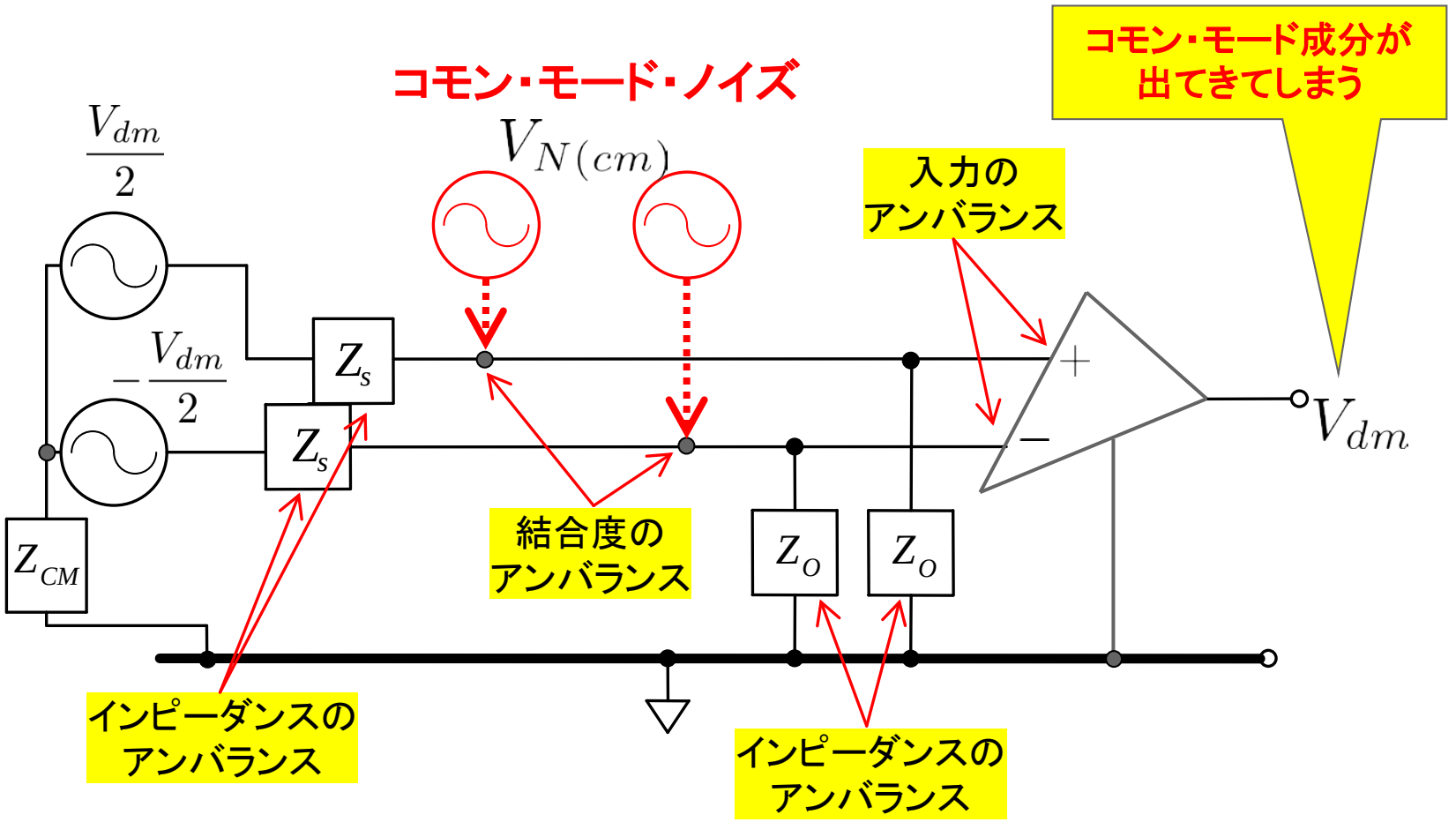


Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

4. ハイスピード信号での「差動回路の限界」
・・・アンバランスによりコモン・モード成分が差動信号に変換されてしまう

Appendix

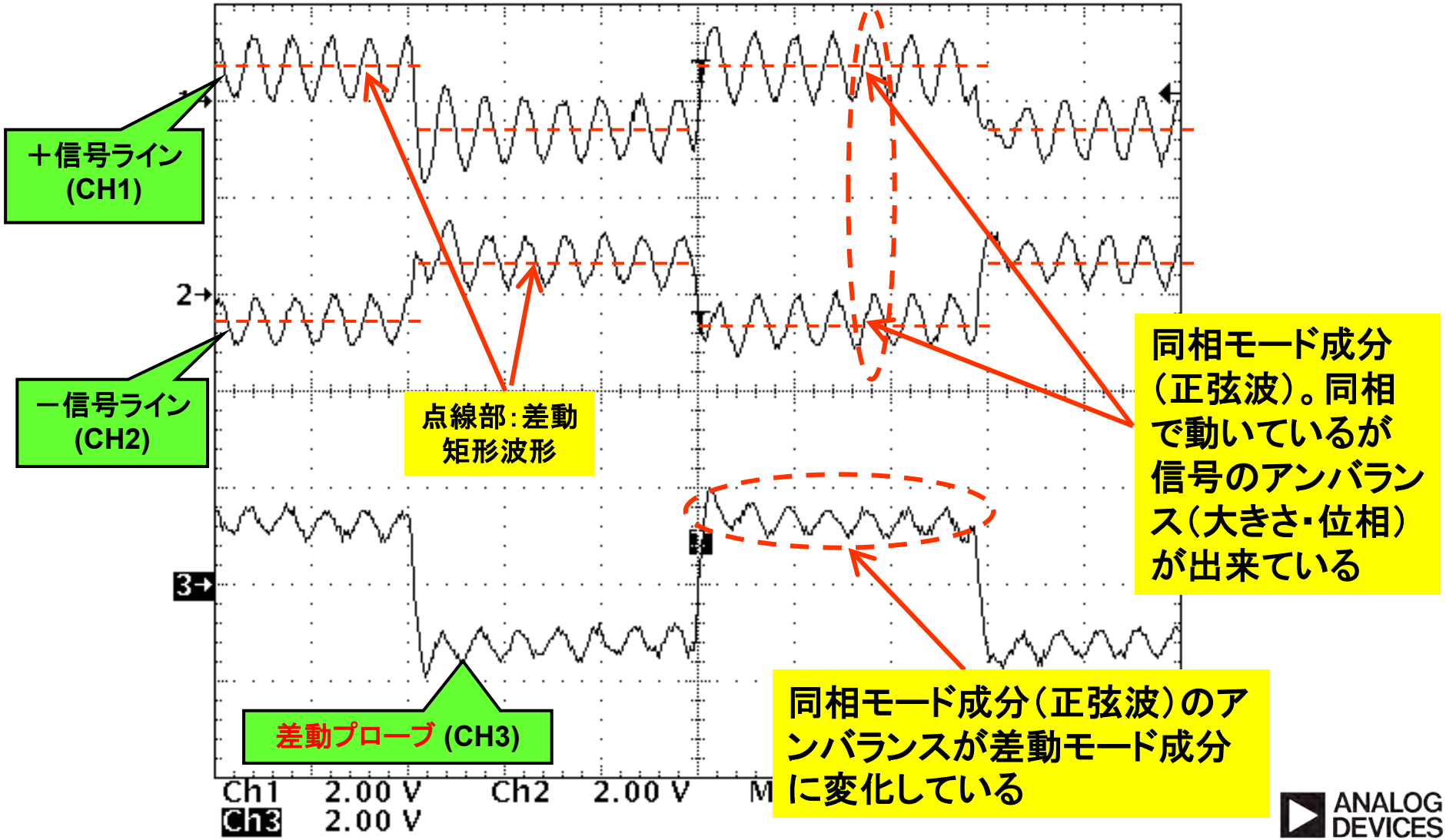


Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

5. コモン・モード成分が差動信号に変換されてしまうようす

Appendix



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

セミナー当日に出たご質問の補足解説

- 名古屋会場のこのセッションで、以下の質問をいただきました。回答が若干不足していたこと、また重要な話題でしたので、事後ですが解説を補足いたします

- ご質問「スライド21（最後に添付）で線路受端（遠端）の波形変化が小さいことはわかったが、これは反射係数Γの大きさから考えて、小さすぎないか」

【補足解説】

- 反射係数を計算してみると、$R_S = R_L = 50\Omega,\ Z_0 = 40\Omega$から

$$\Gamma = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0} = 0.111$$

となります。遠端からはこの率で反射していることは違いありません（これは質疑応答のときにお話したとおりです）

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

補足解説のつづき

- 一方、近端も$R_S \neq Z_0$となり、これにより進行波V_Fの大きさが整合時と異なることになります。近端の等価モデルで考えると、進行波V_Fは

$$V_F = \frac{Z_0}{R_S + Z_0} V_S = \frac{40}{90} V_S = 0.444 V_S$$

となります。整合時より進行波V_Fは若干低くなります

- つづいて遠端の方を考えます。進行波V_Fが遠端に到着した瞬間の、遠端の端子電圧V_{RL}を、遠端の等価モデルで考えると

$$V_{RL} = \frac{R_L}{Z_0 + R_L} 2V_F = \frac{50}{90} \cdot 2 \cdot \frac{40}{90} V_S = 0.493827 V_S$$

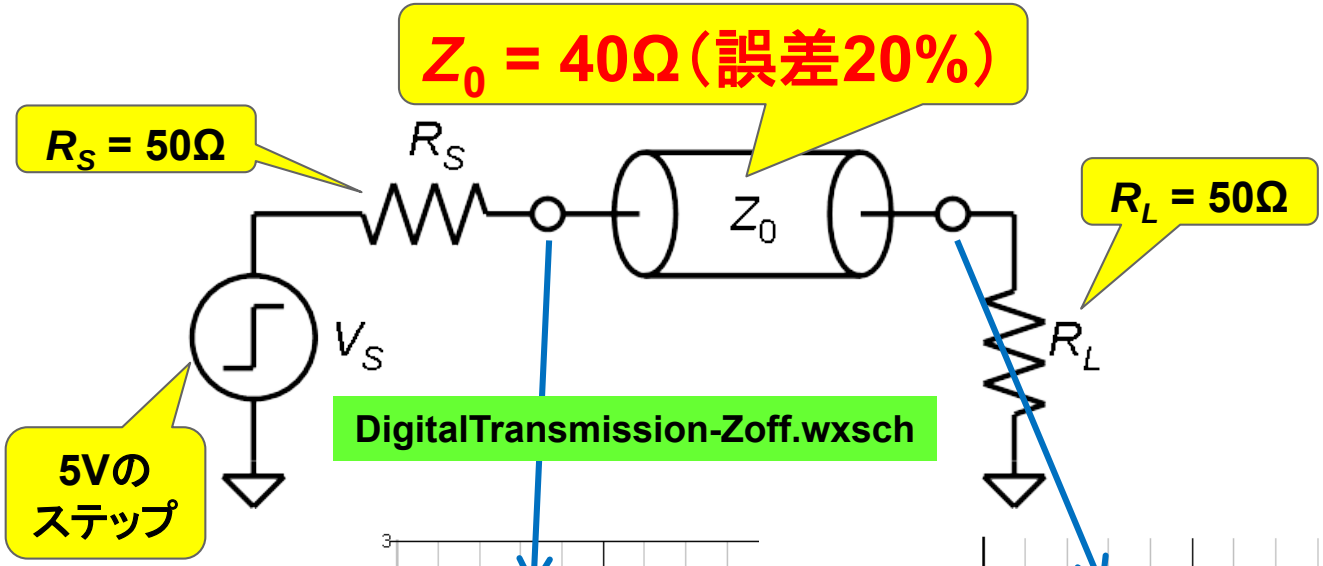
となり、シミュレーション結果と一致することがわかります。以降、多重反射を繰り返し、最終的にV_{RL}は

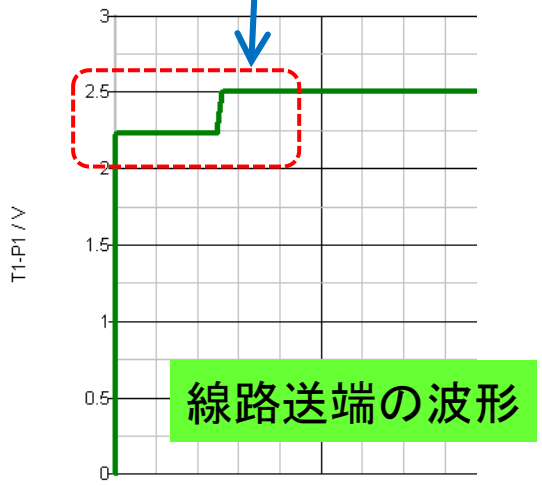
$$V_{RL} = \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S = \frac{1}{2} V_S$$

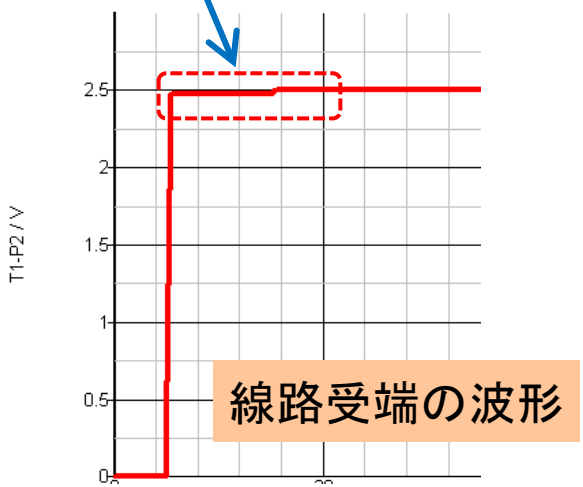
に収束します。R_S, R_LとZ_0の大きさの相互関係が逆でも同様に計算できます

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

インピーダンス・コントロール基板に「本当に」必要とされるインピーダンス仕上がり精度（精度5%は必要か？）







精度5%とか指定していたけど、20%の誤差でも思いのほか暴れが少ないな・・・

でも、これを理論的には、どうやって考えていけばいいのだろうか？

しくみを理解して、シミュレーションで確認して、基板を適切に発注しましょう！

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™