

高効率スイッチング電源回路の評価技術



テクトロニクス・イノベーション・フォーラム2011

宮崎 強

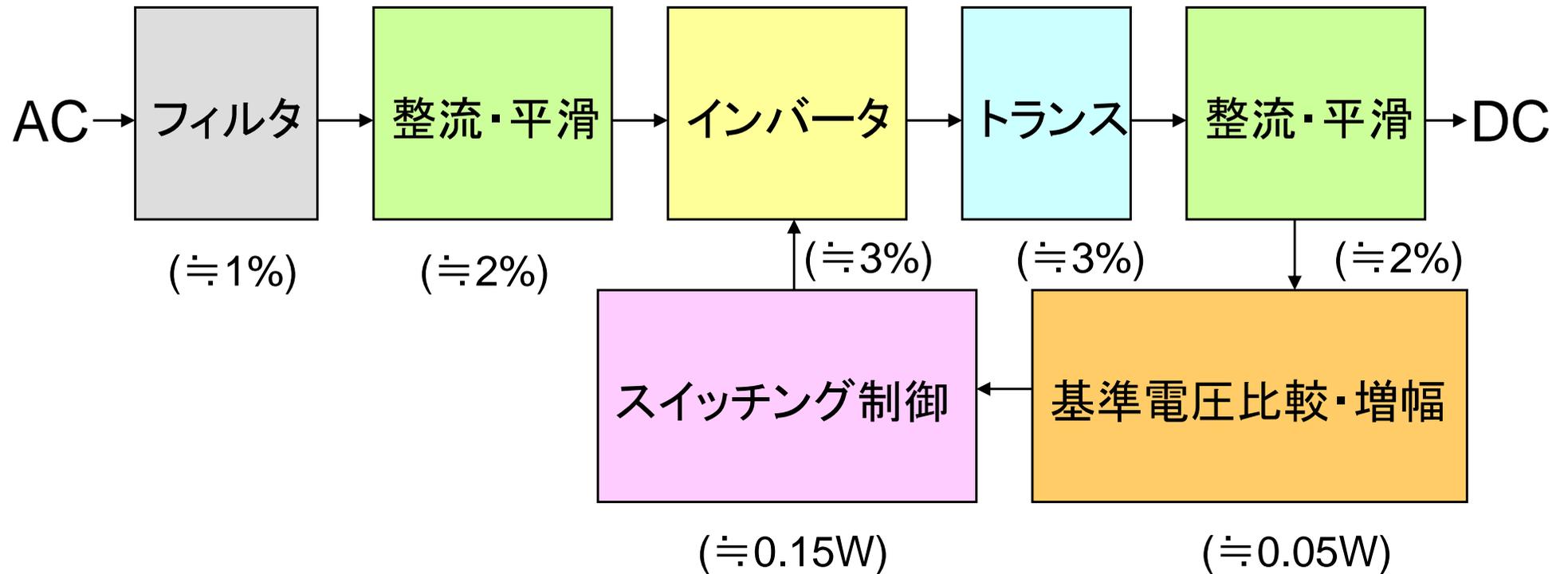
www.tektronix.com/ja

内容

- スイッチング電源回路の測定項目
- 測定上の課題と解決方法
- パワー解析ソフトウェアによる測定例
- 適切な測定器の選択

スイッチング電源の基本ブロック図

■ AC-DC型スイッチング電源回路例



カッコ内は電力損失の例

1. スイッチング電源回路の測定項目



1. スイッチング電源回路に対する要求と測定項目

- 高効率化(電力変換効率の改善)
 - スイッチング・デバイス損失の低減
 - スイッチング損失
 - ON抵抗
 - 磁気部品損失の低減
 - コア損失
 - B-H解析など
- 高信頼性
 - 安全動作領域(SOA)の確認、B-H解析
 - 電圧、電流トランジェント応答
- 負荷変動応答性
 - 制御ループの高速応答
 - PWM制御(変調解析)
- 低ノイズ、耐ノイズ化
 - 電流高調波、リップル、電力品質、周波数解析、EMI

使用される測定器と評価ポイント

下記の全評価項目

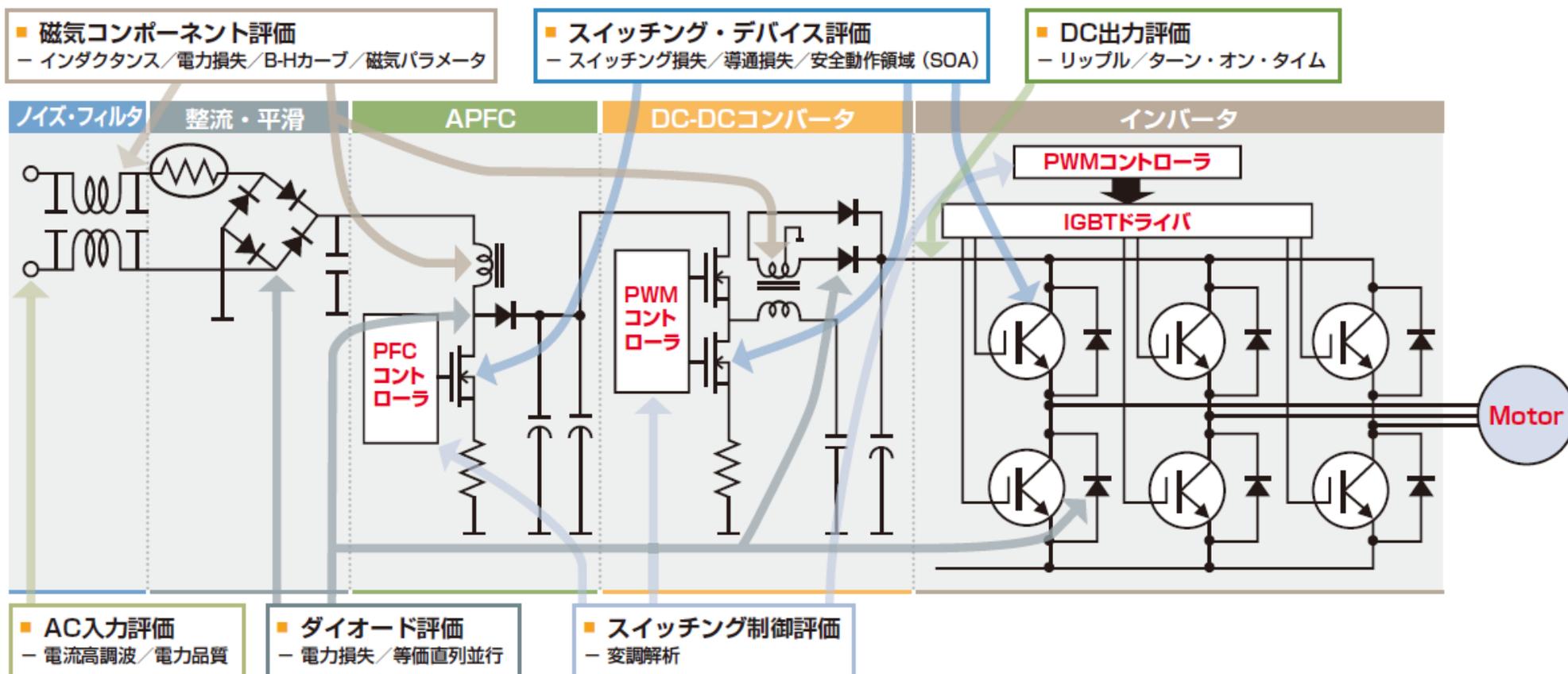


オシロスコープ+パワー解析ソフト

高精度入力／出力電力測定、
電流高調波、電力品質測定



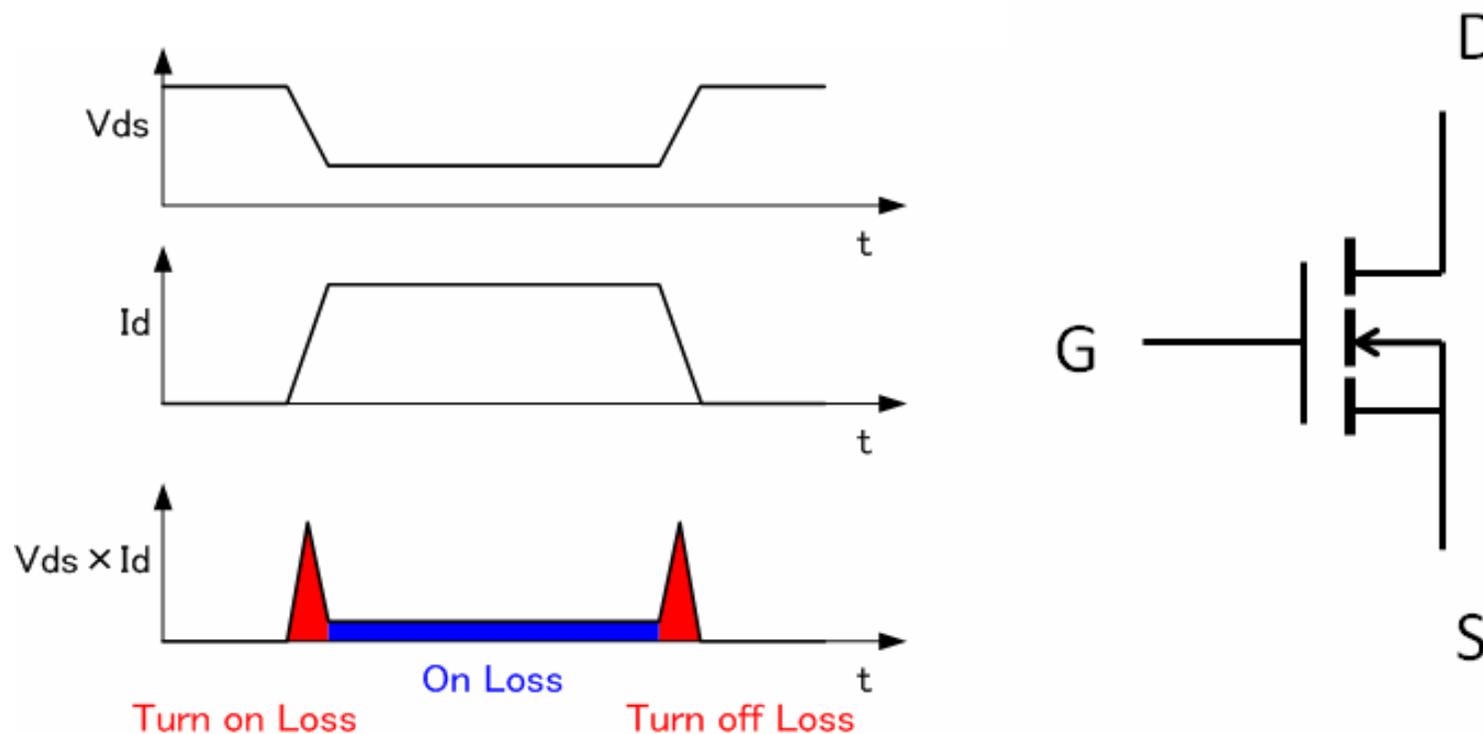
電力計(パワー・アナライザ)
高調波アナライザ



スイッチング・デバイスの評価(1)

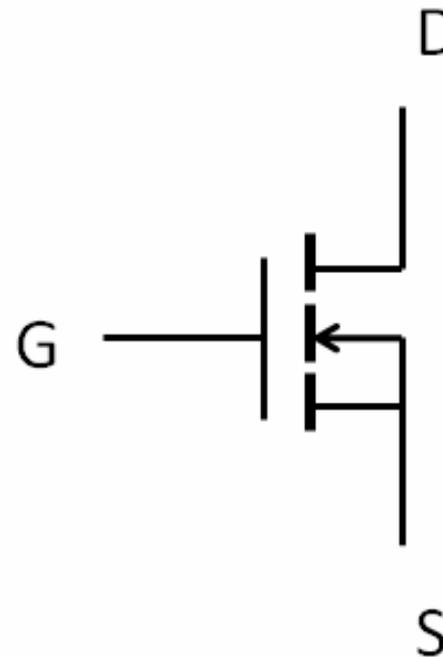
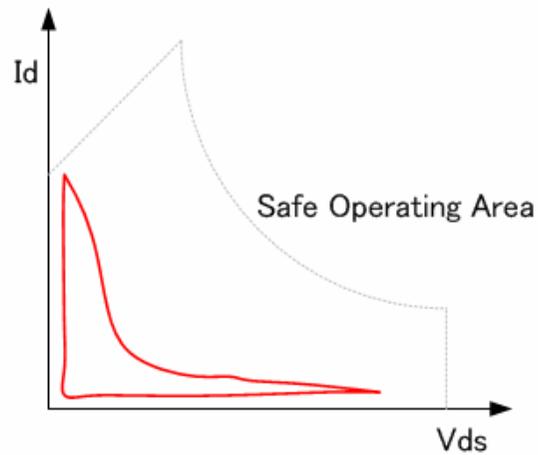
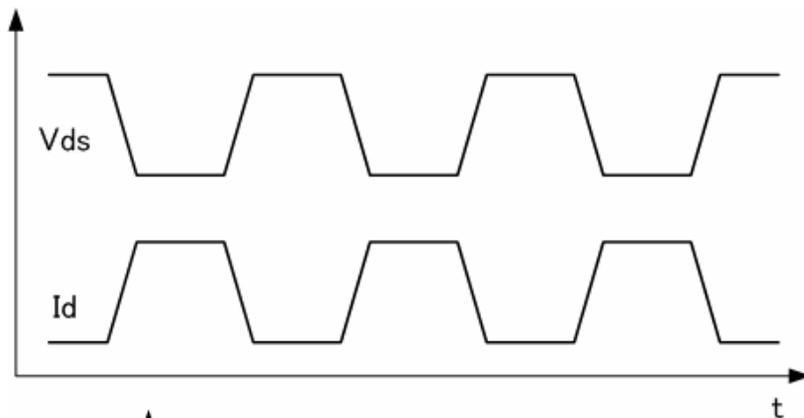
スイッチング損失

- ターン・オン・ロスおよびターン・オフ・ロス
 - パワー・デバイスがON/OFFする時の損失
- 導通損失
 - パワー・デバイスが導通状態の間の損失



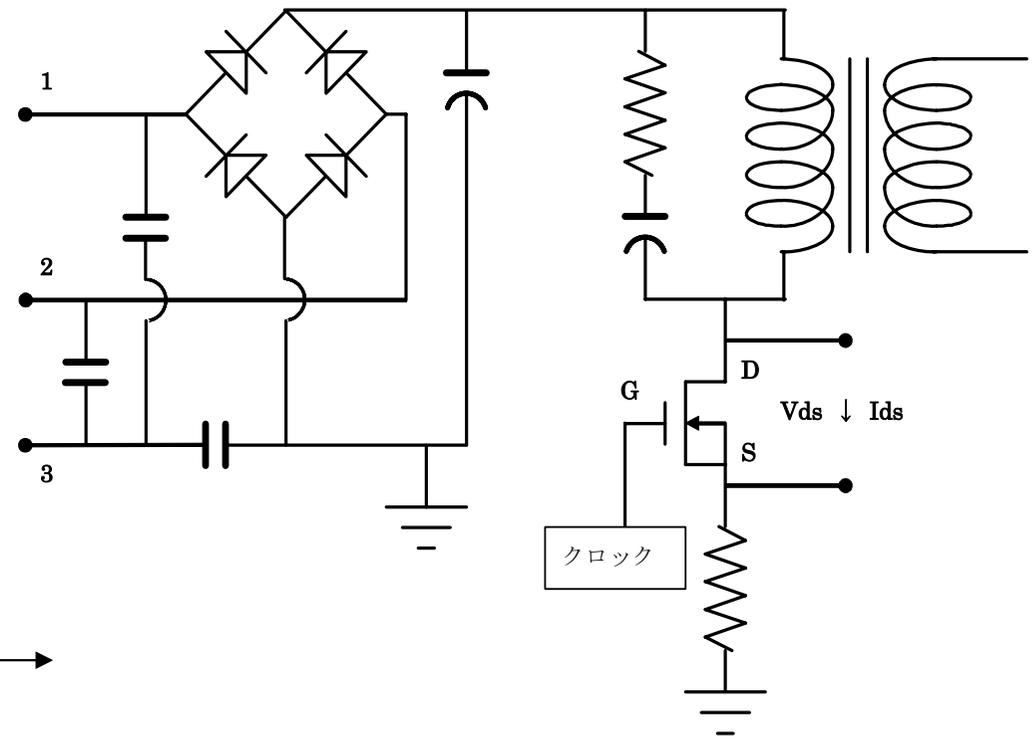
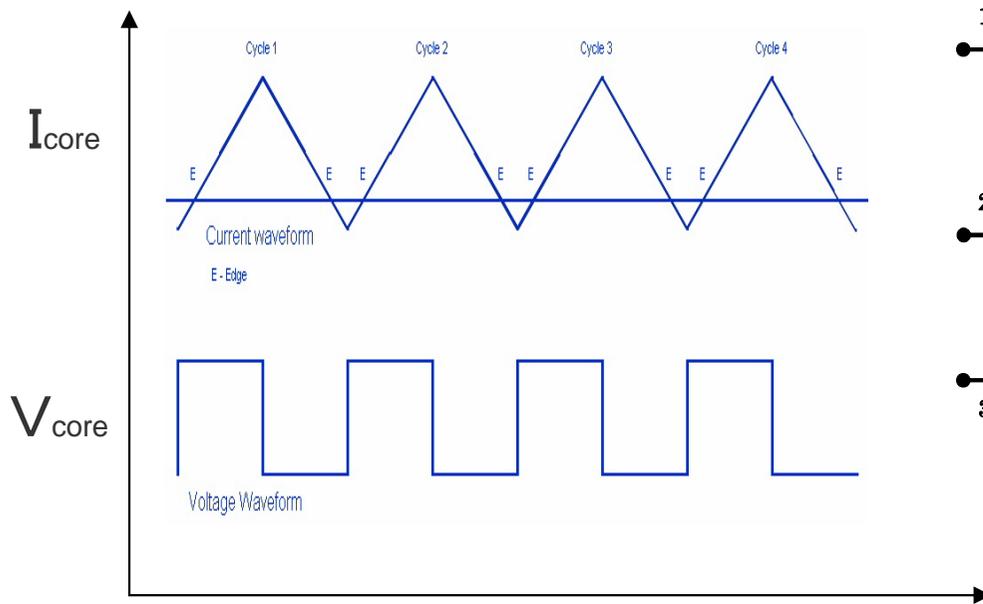
スイッチング・デバイスの評価(2)

- 安全動作領域(SOA)の評価
 - ドレイン・ソース間電圧、電流をX-Y軸にプロット



トランス／コアの評価(1)

- トランス／コアによる電力損失の評価
- スイッチング損失、コア損失を含むトータル損失の評価
- インダクタンス値の測定
 - インダクタンス値は駆動電圧、電流、周波数、波形形状に応じて変化する

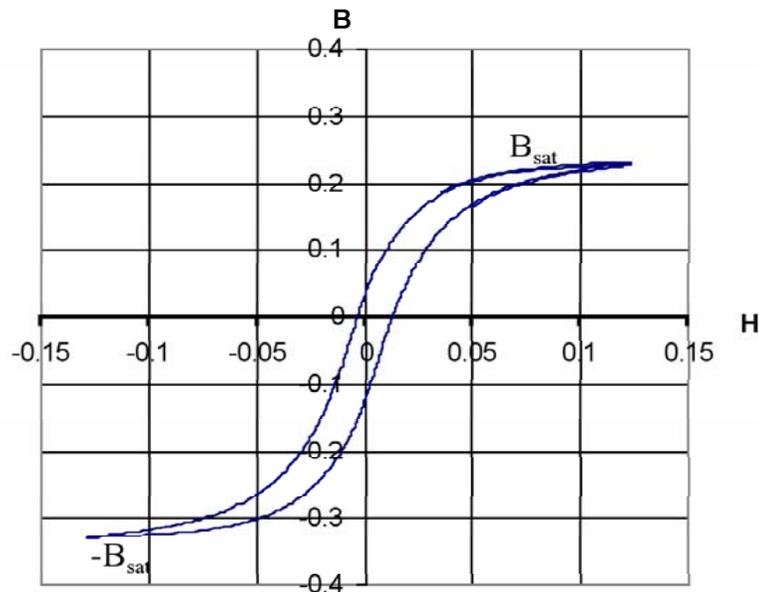


トランス／コアの評価(2)

■ B-H特性の解析

－磁界強度Hと磁束密度Bによる磁化曲線の解析

- － B(磁束密度) : コイル両端電圧の積分値に比例
- － H(磁界) : コイル電流に比例
- － μ (透磁率) : $B = \mu H$



$$B(t) = \frac{1}{nA} \int_0^t v(t) dt$$

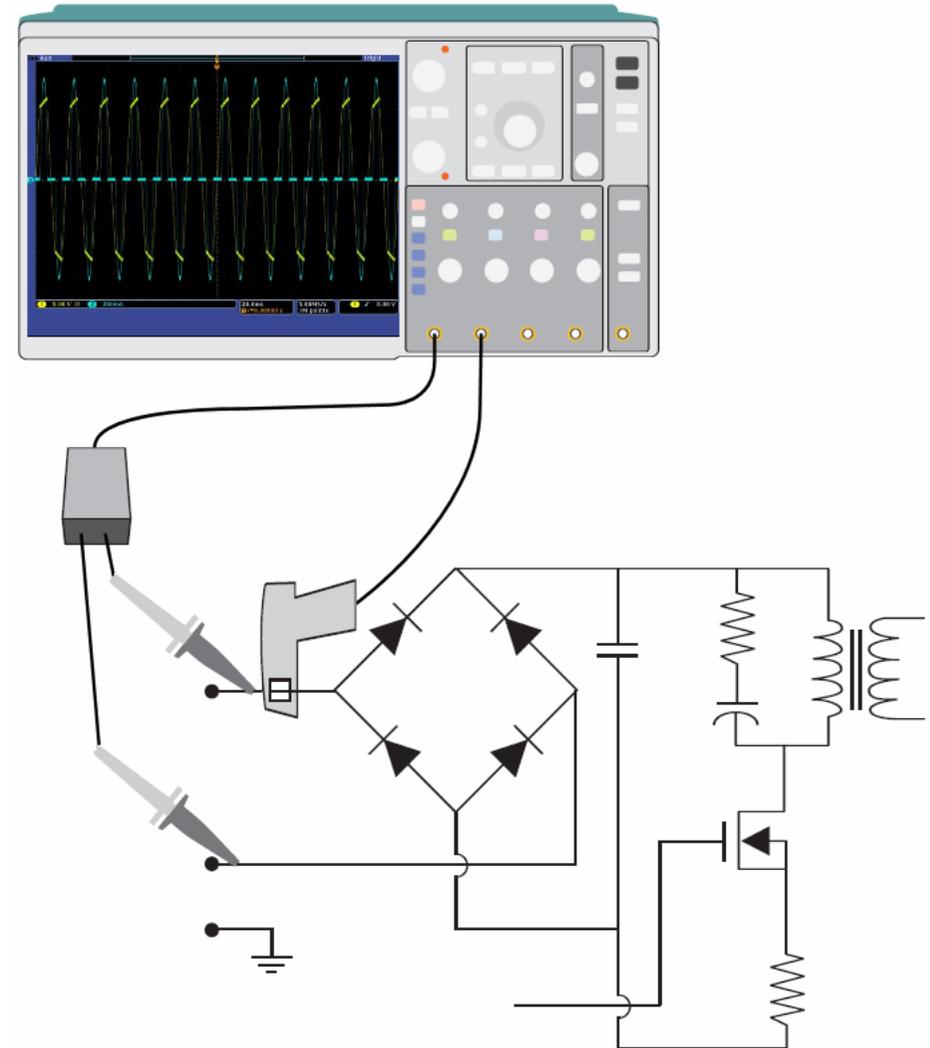
$$H(t) = \frac{n}{l} i(t)$$

n : 巻線数, A : コア断面積, l : 平均磁路長,

$v(t)$: 巻線誘導電圧, $i(t)$: 巻線電流

ライン品質、電流高調波の評価

- ライン品質の評価
 - 実効電力
 - 皮相電力
 - 力率
 - クレスト・ファクタ
 - THD
- 電流高調波の評価
 - EN61000-3-2
 - Amd14
 - MIL1399



参考：電力品質の測定

ライン電力品質解析

DPOPWRによる電力品質の測定項目:

- 電圧のRMS
- 電流のRMS
- 実効電力
- 皮相電力
- 力率
- 電圧のクレストファクタ
- 電流のクレストファクタ
- 電流高調波

$$RMS(v) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v^2(n)}$$

$$RMS(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i^2(n)}$$

$$\text{皮相電力} = P_{Appar} = RMS(v) * RMS(i)$$

$$\text{実効電力} = P_{real} = \sum_{n=0}^{N-1} i(n)v(n)$$

$$\text{力率} = \frac{P_{Real}}{P_{Appar}}$$

$$C_v = \frac{V_{pk}}{V_{RMS}}$$

$$C_i = \frac{I_{pk}}{I_{RMS}}$$

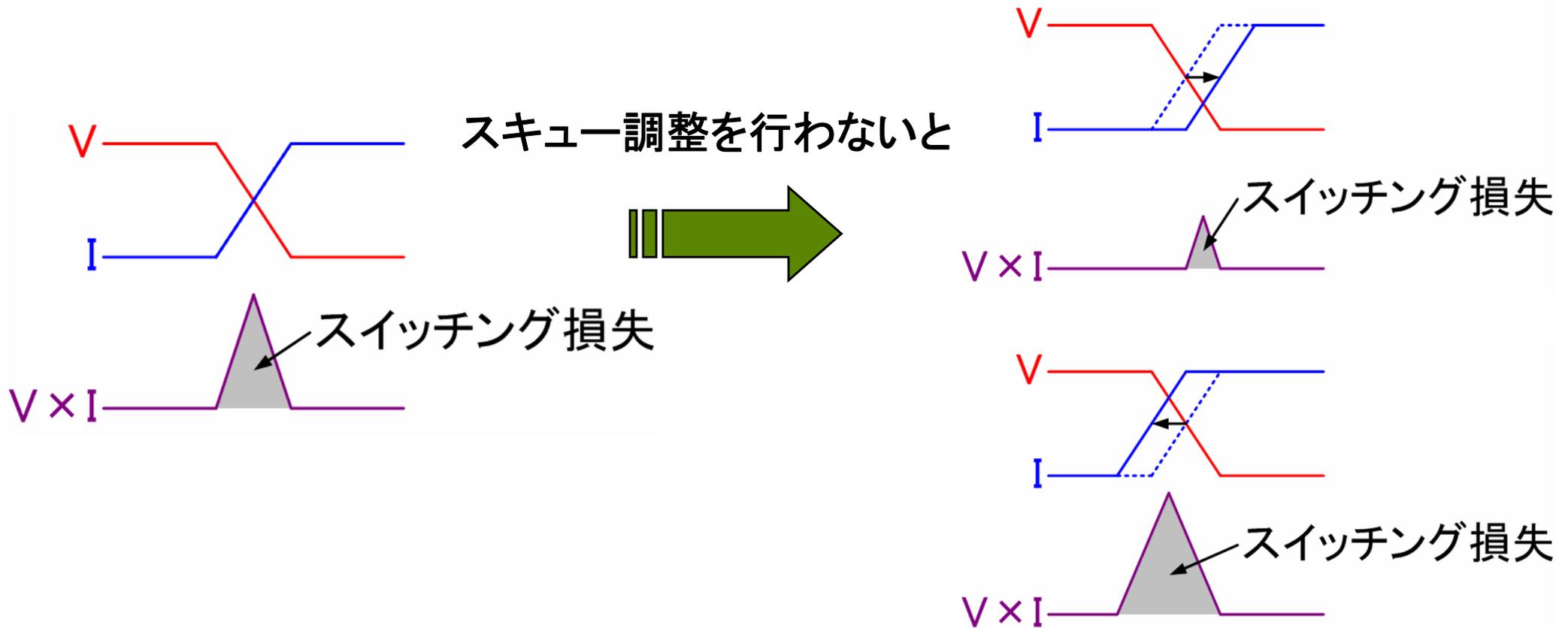
N: サンプル数 n: データ・ポイント
v, i: 特定のポイントにおける電圧値または電流値

2. 測定上の課題と解決方法



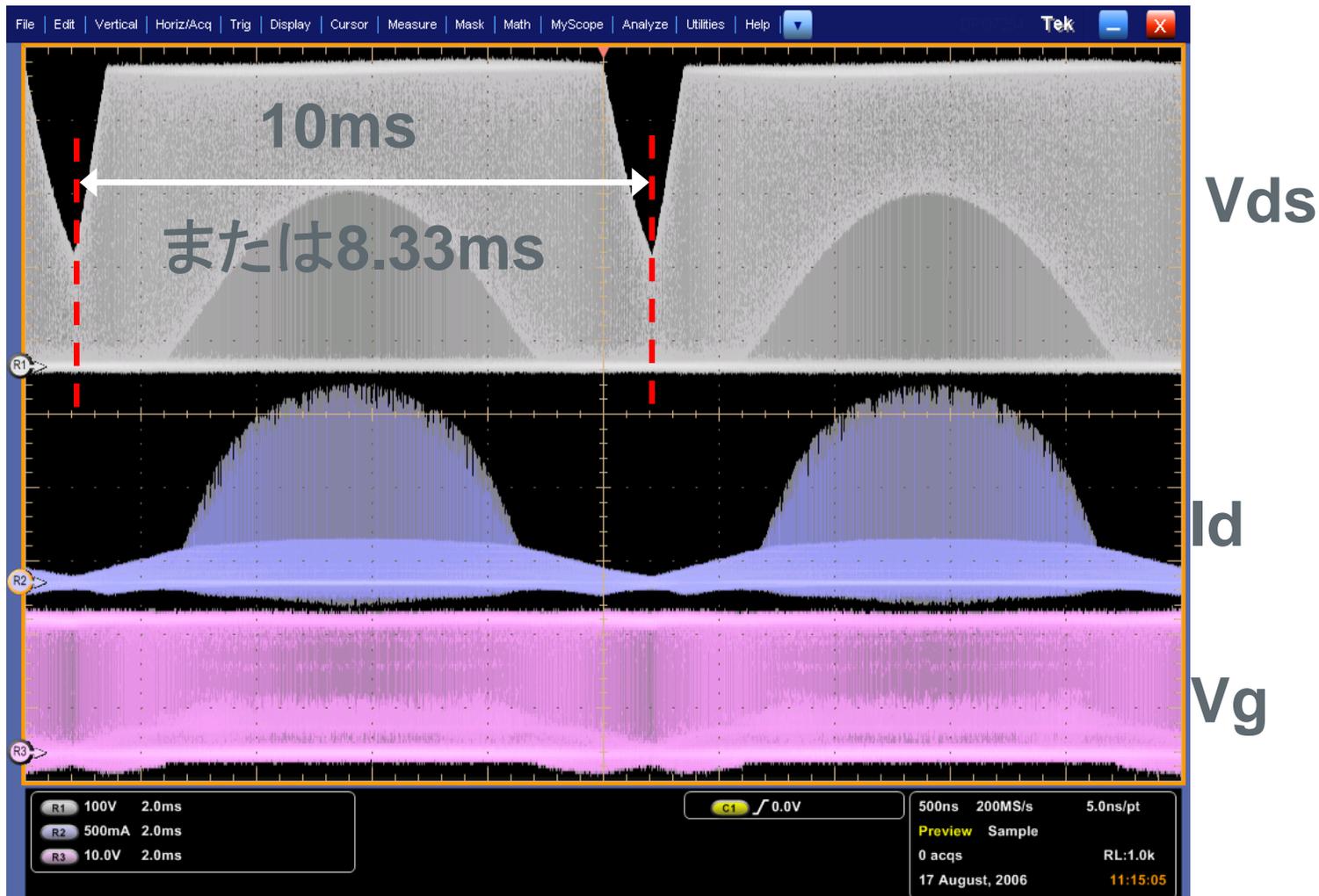
2. 測定上の課題と解決方法 プローブ・デスキューの重要性

- プローブは時間的遅れをもっている
 - 各プローブに合わせたスキュー調整が必要(遅延差の補正)



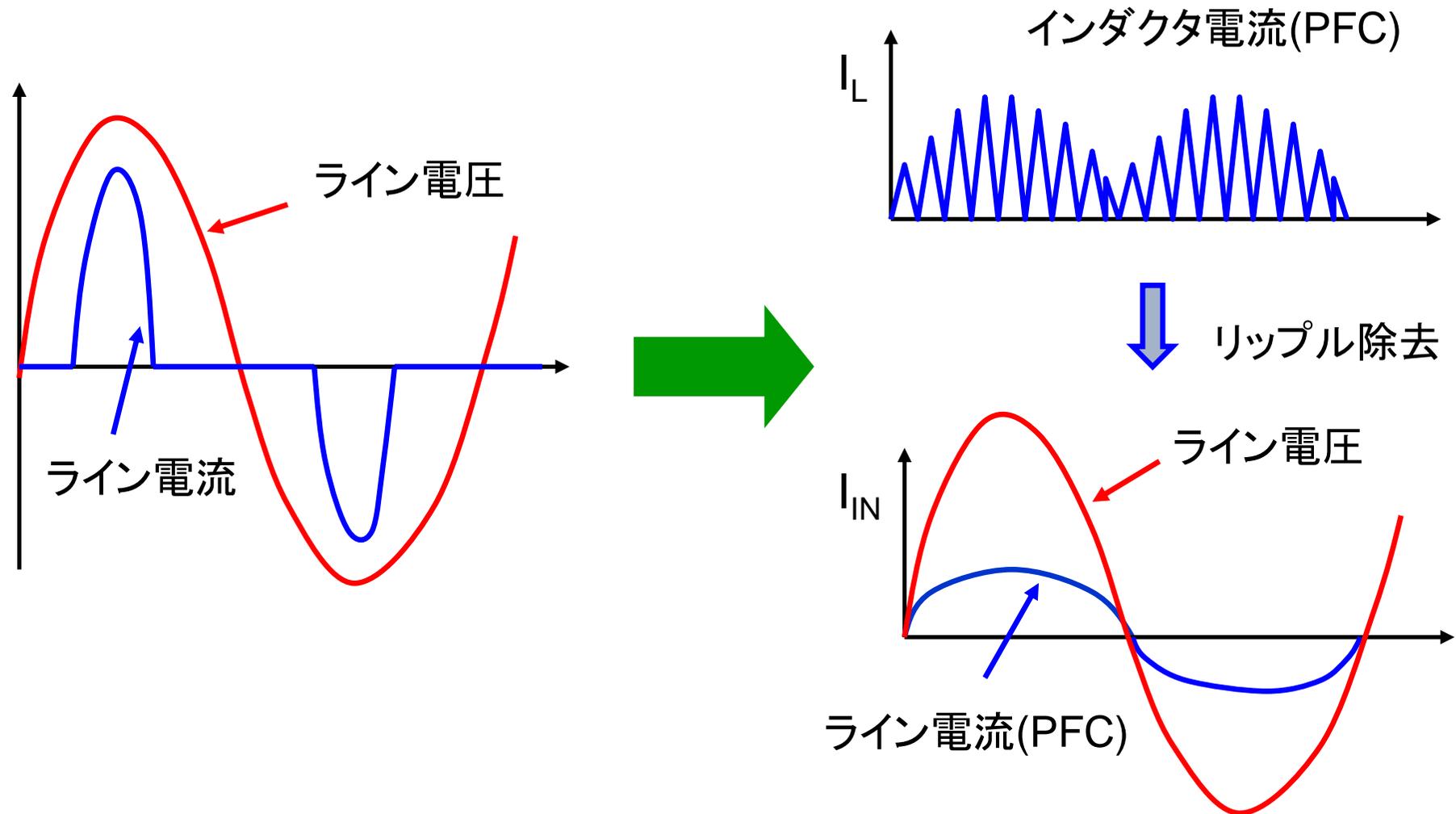
オシロスコープによる測定の課題

- PFC付スイッチング電源の測定
 - 商用電源周期分の波形データの捕捉と解析



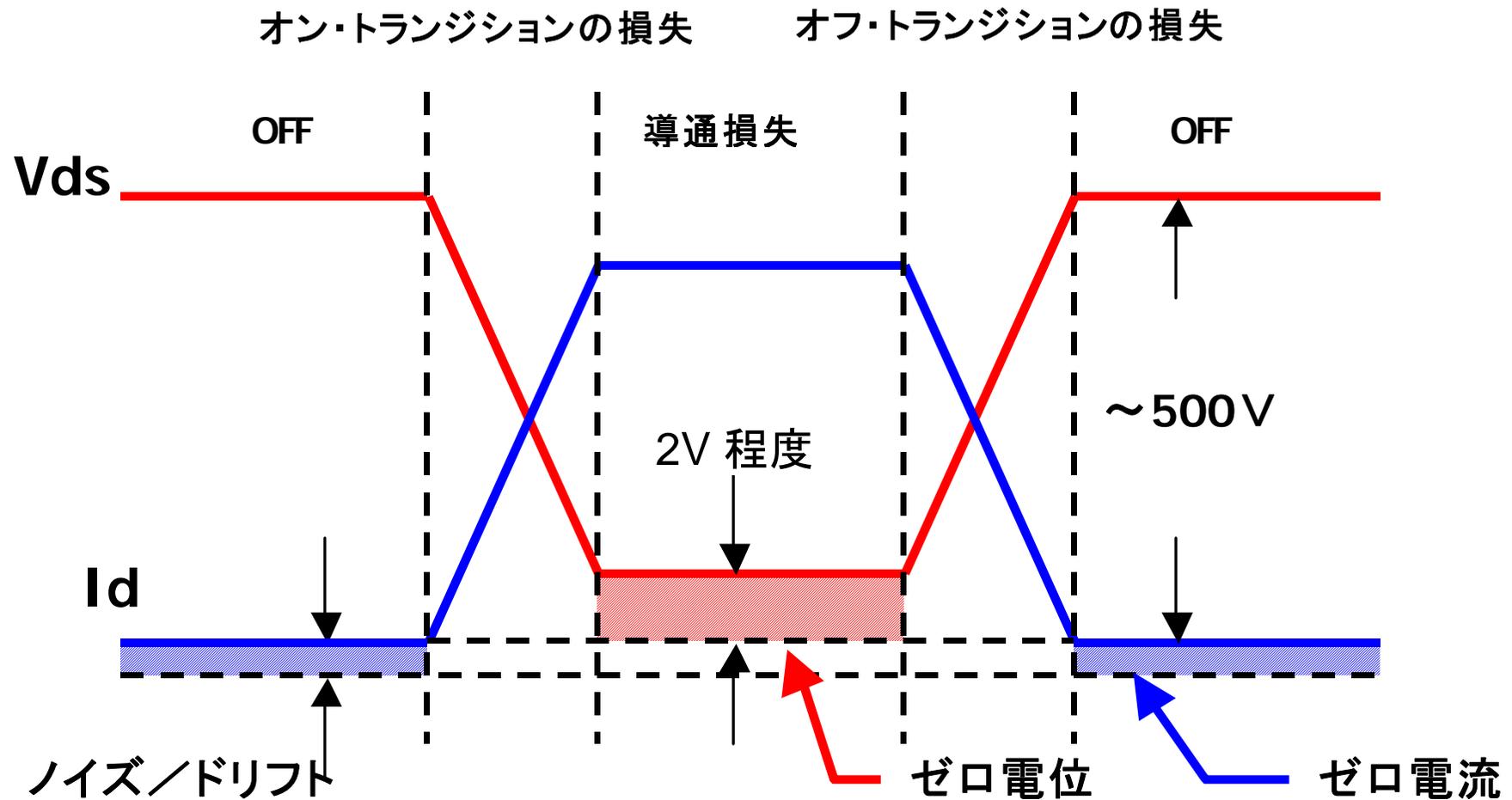
参考: PFC (Power Factor Correction)

- 力率補正回路
 - コンデンサ入力型整流回路の力率を改善する回路



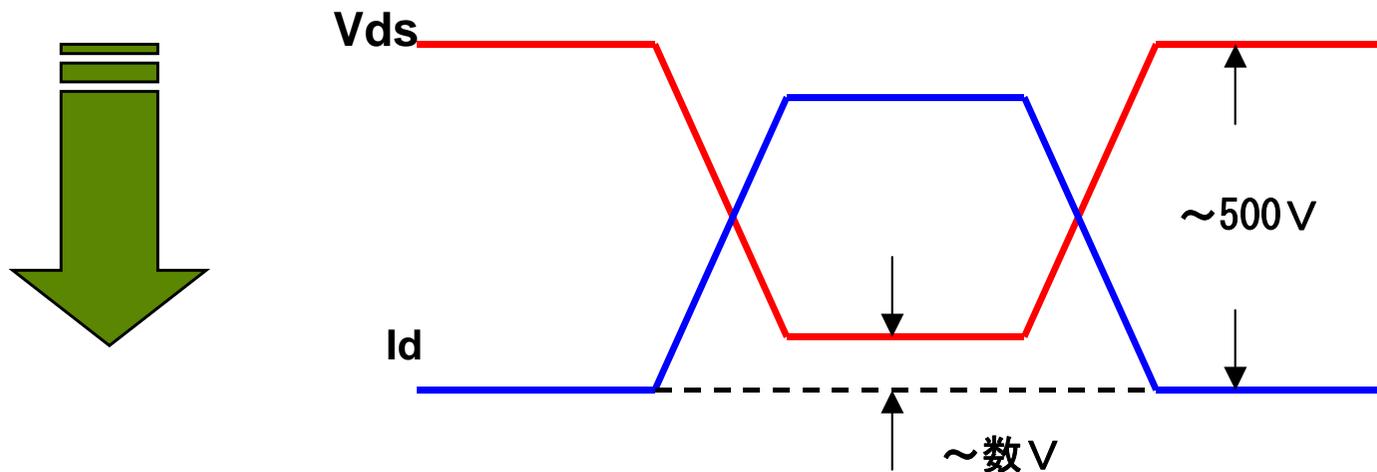
オシロスコープによる測定の課題

- 如何にして測定精度を上げていくか？



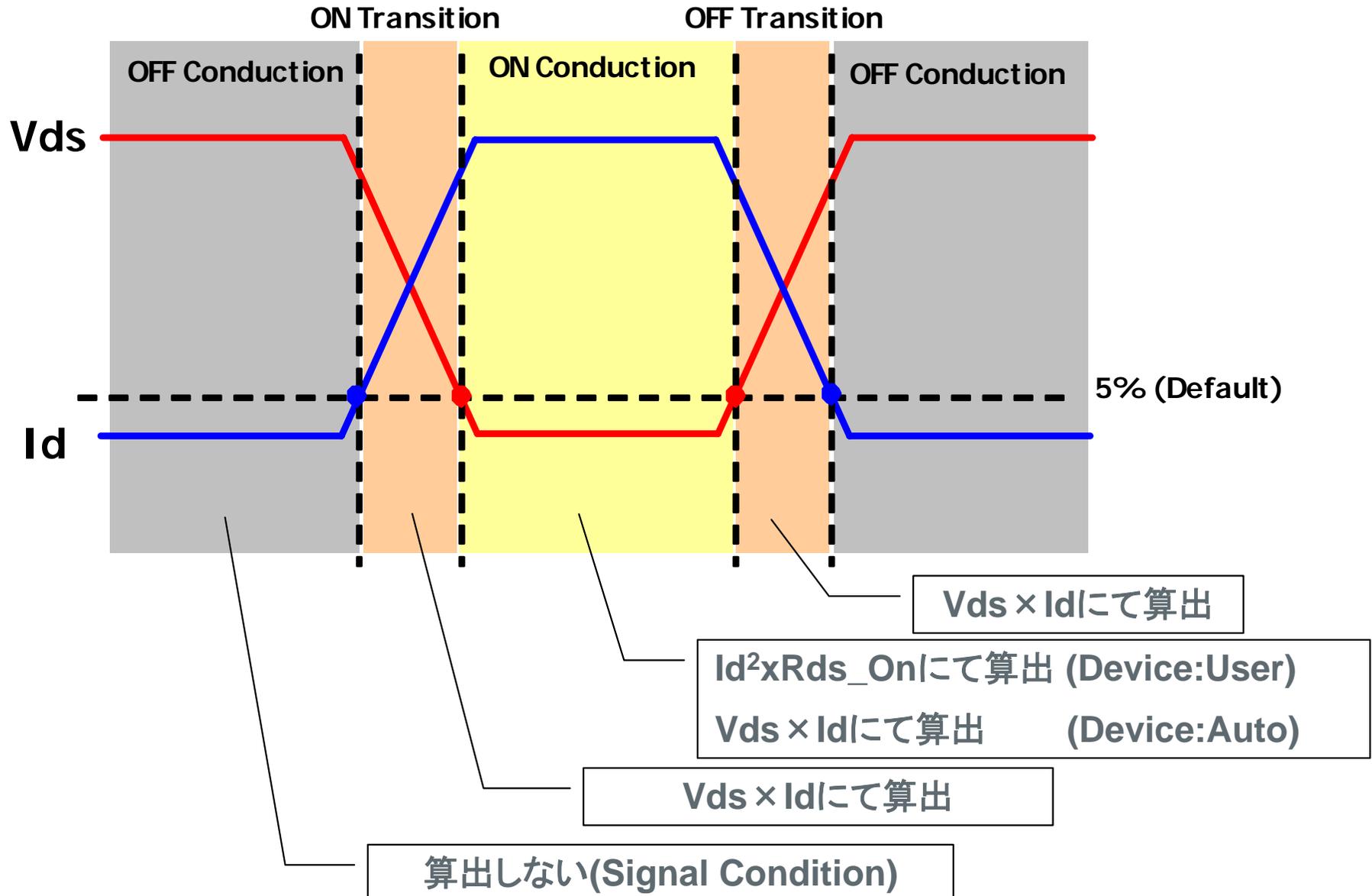
オシロスコープによる測定の課題解決法

- スイッチング損失と導通損失の同時測定
 - オシロスコープ：8ビット（256分解能）
 - 0～500V：約2V分解能



- ON抵抗 (R_{ds}) より $I_d^2 \times R_{ds}$ にて測定
- IGBTでは V_{ce-sat} を一定値として使用

オシロスコープによる測定の課題解決法



3. パワー解析ソフトウェアによる測定例



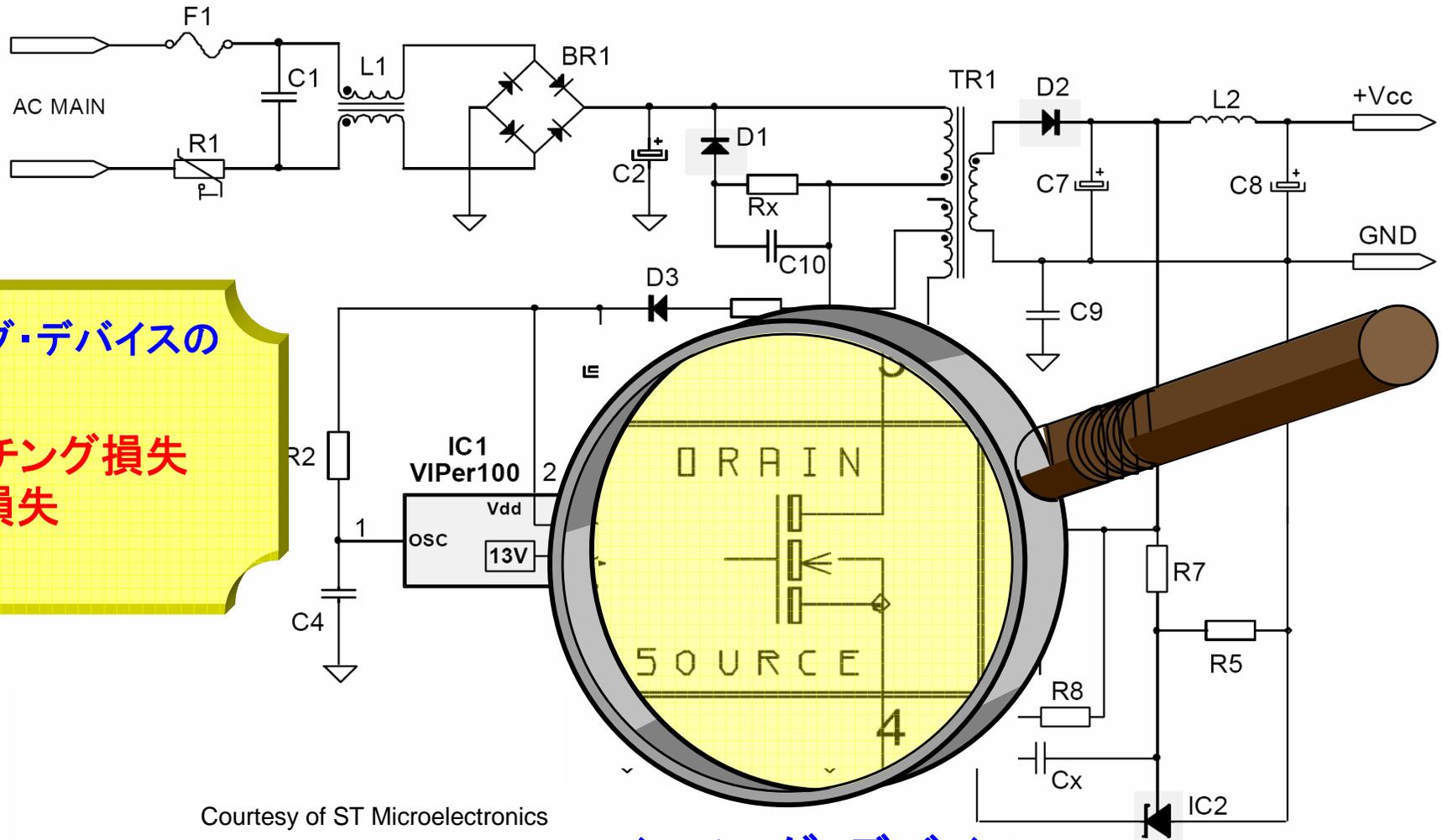
3. パワー解析ソフトウェアによる測定例

パワー解析ソフトウェア DPOPOPWR

- DPO/MSO5000、DPO7000(C)、DPO/DSA/MSO70000(B/C)の各シリーズ上で動作
- 豊富な機能、高速解析、ロング・メモリ連携、簡単な操作
 - 自動プローブ・デスキュー
 - スwitching損失測定
 - マグネティック損失測定(磁気コンポーネントの電力損失測定)
 - インダクタンス測定
 - B-H解析(透磁率、最大/残留磁束密度)
 - 安全動作領域テスト(マスク作成/編集、マスク・テスト)
 - di/dt、dv/dt
 - ダイナミックON抵抗測定
 - 変調解析
 - リップル測定
 - ライン品質、電流高調波規格測定
 - スペクトラム解析
 - ターン・オン時間測定
 - レポート作成機能

スイッチング・デバイスの評価

SMPS (Switch Mode Power Supplies)



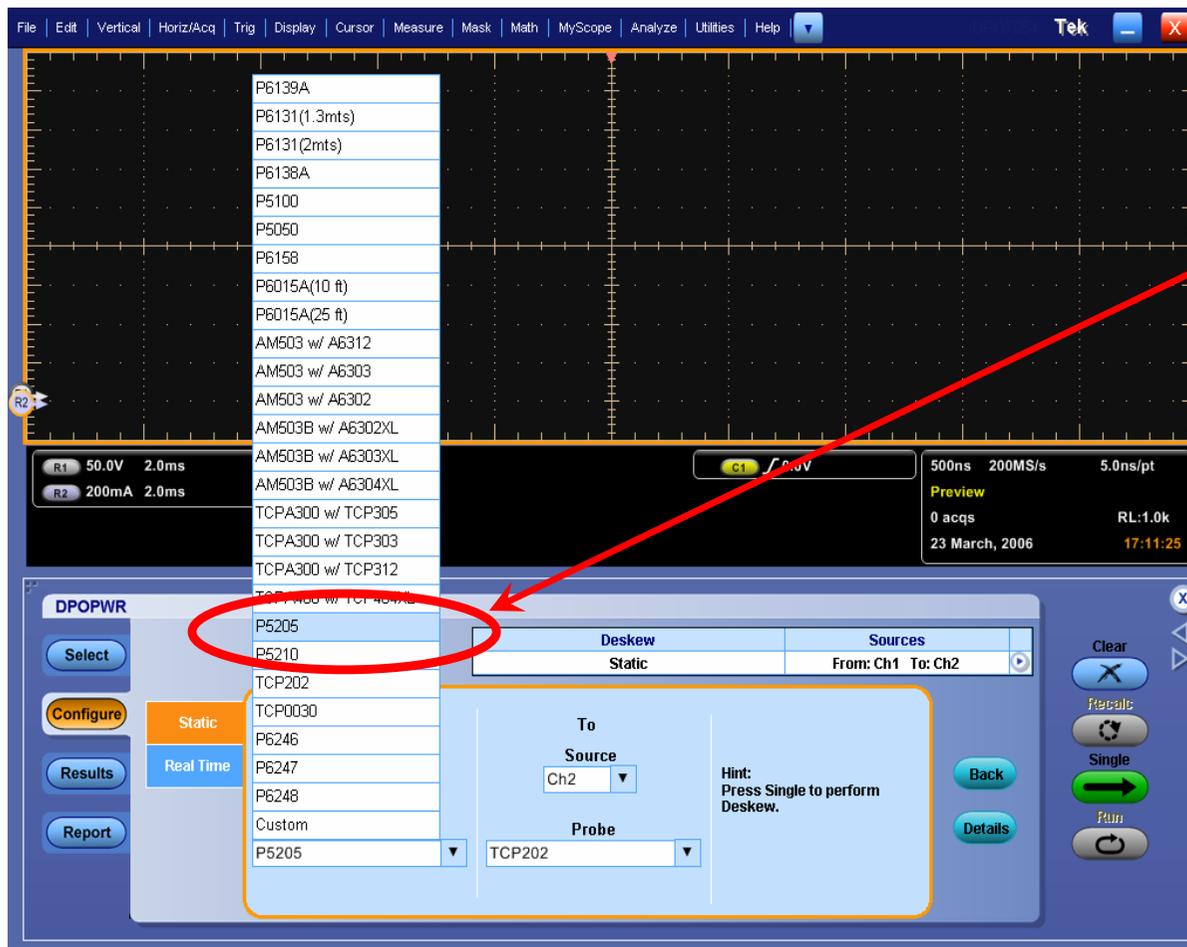
スイッチング・デバイスの
電力損失:
スイッチング損失
導通損失
SOA

Courtesy of ST Microelectronics

スイッチング・デバイス

プローブ・デスクュー機能 (DPOPOPWR)

- プローブを選択して自動デスクュー
- リアルタイム・デスクューにも対応

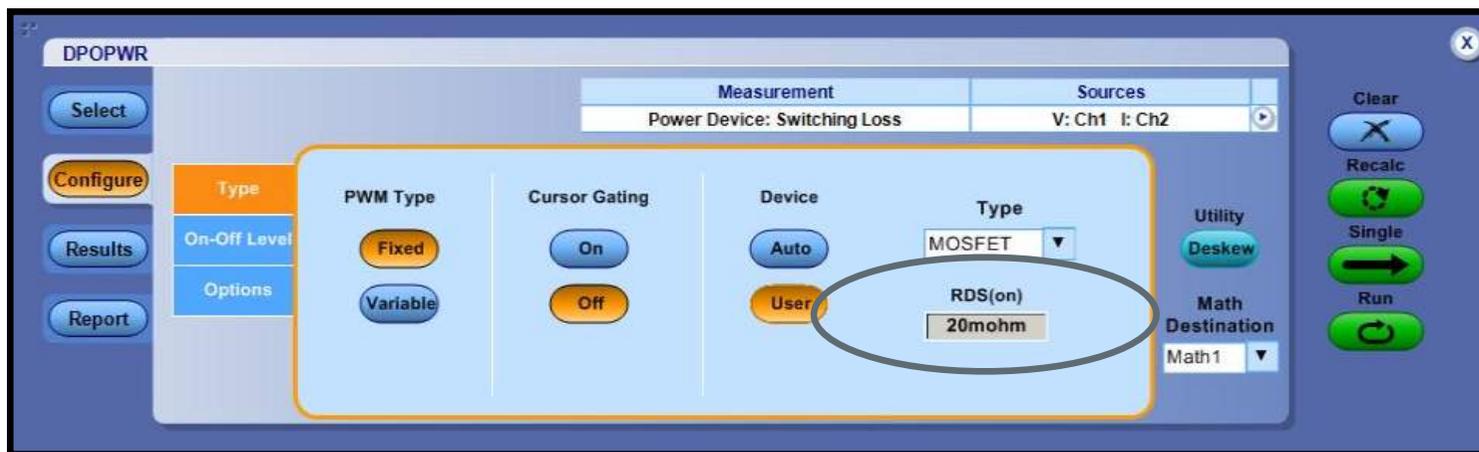


使用プローブを選択

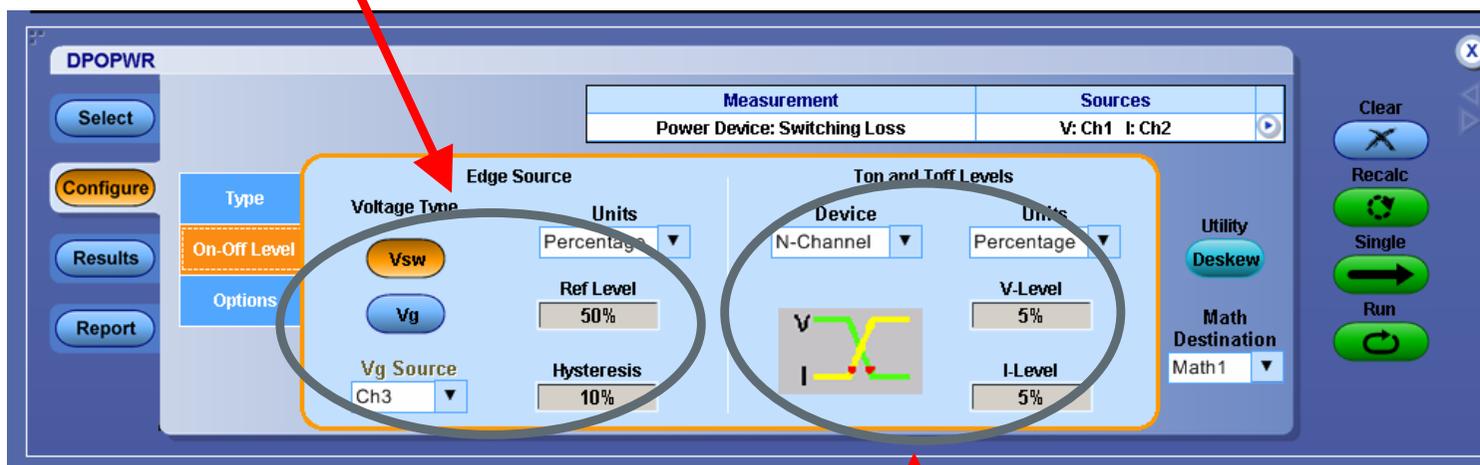


Deskew Fixture
(067-1686-00)

RDS_{ON} または V_{CE(sat)} の入力 (DPOPWR)



スイッチング・エッジの検出

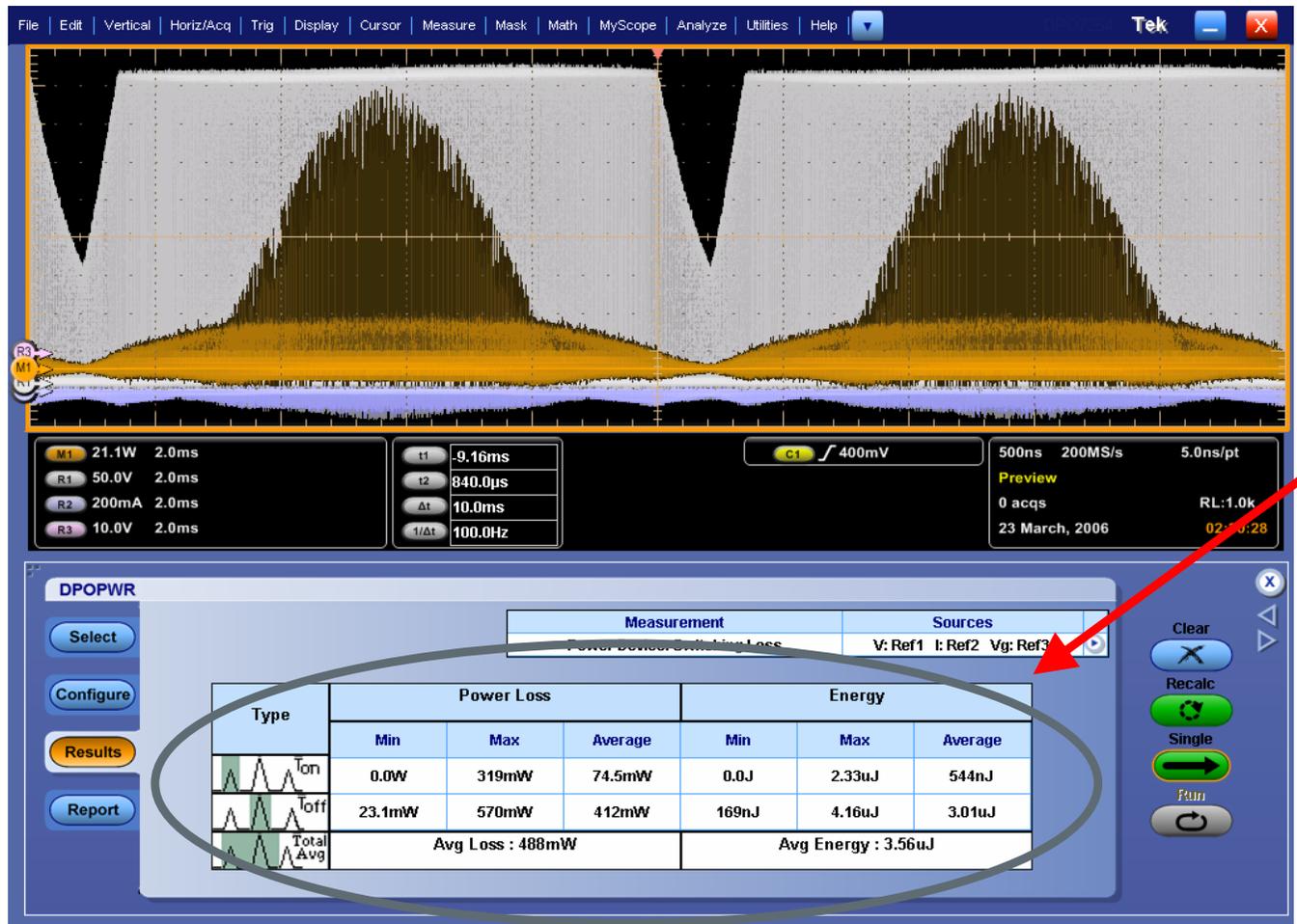


リファレンス・レベルの設定
(IGBTのテール電流評価にも有効)

テクトロニクス・イノベーション・フォーラム 2010

スイッチング損失の評価 (DPOPOPWR)

- Turn On / Turn Off / Total Avgの自動計測



損失測定結果

PFC付電源のスイッチング損失測定例 (スイッチング損失および導通損失)

ピーク損失の解析、検索 (DPOPOPWR)

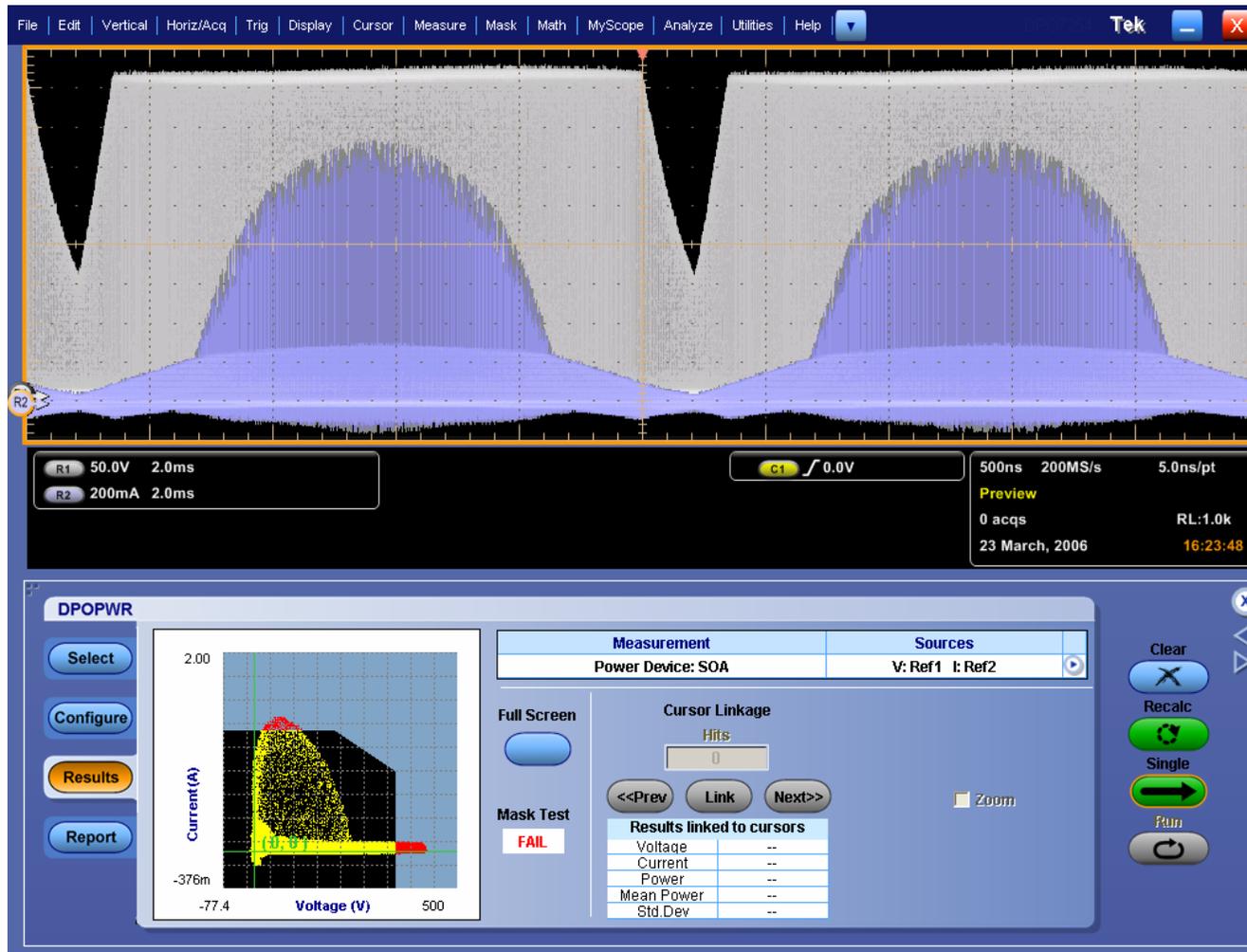
- ピーク電力損失を自動検索
- 波形相関機能により、損失の大きい波形を自動ズーム



ピーク損失表示

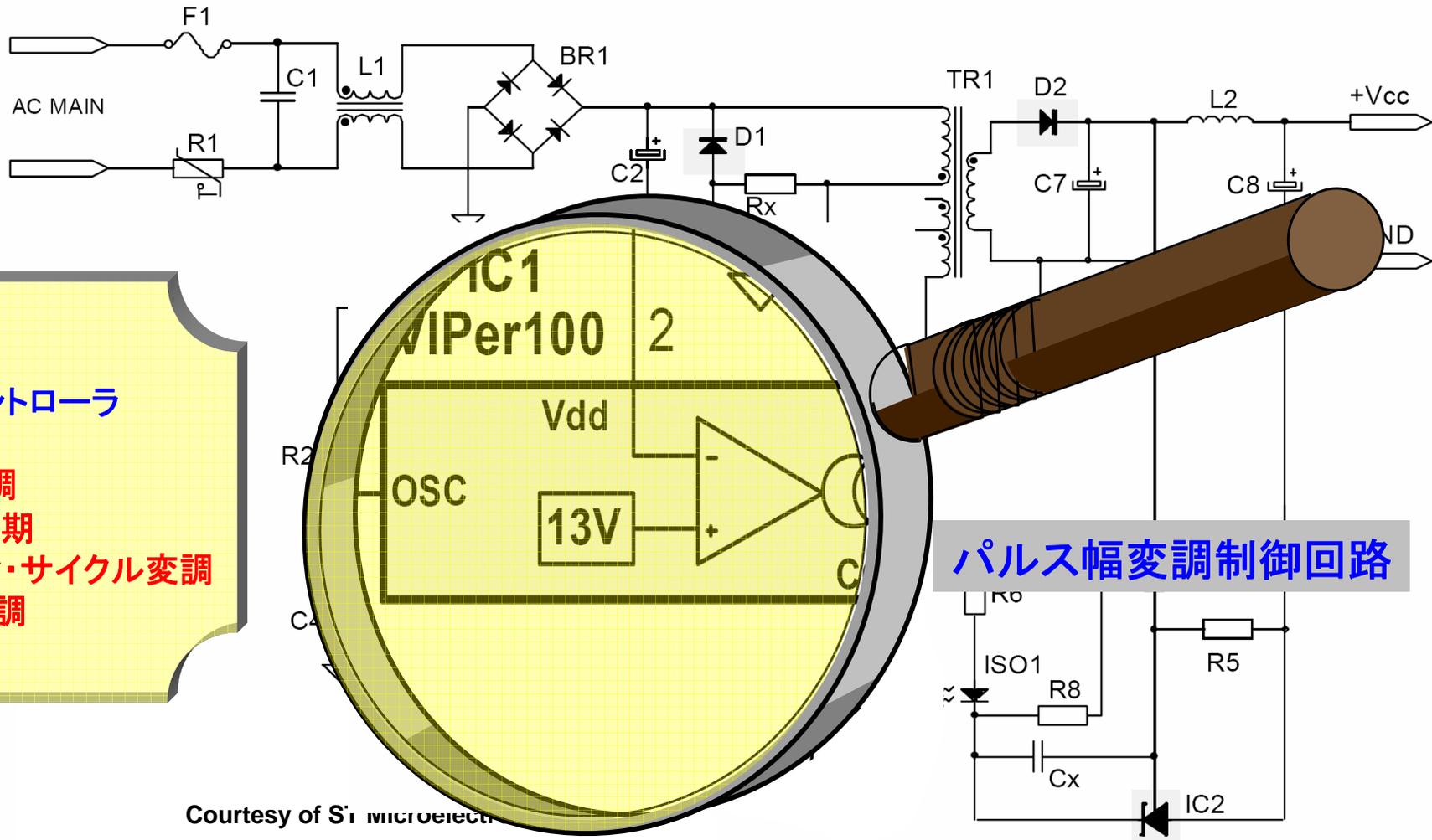
安全動作領域 (SOA) の評価 (DPOPWR)

- Vds、IdをXY表示
- SOAマスク・テスト



スイッチング制御の評価

SMPS



PWM コントローラ

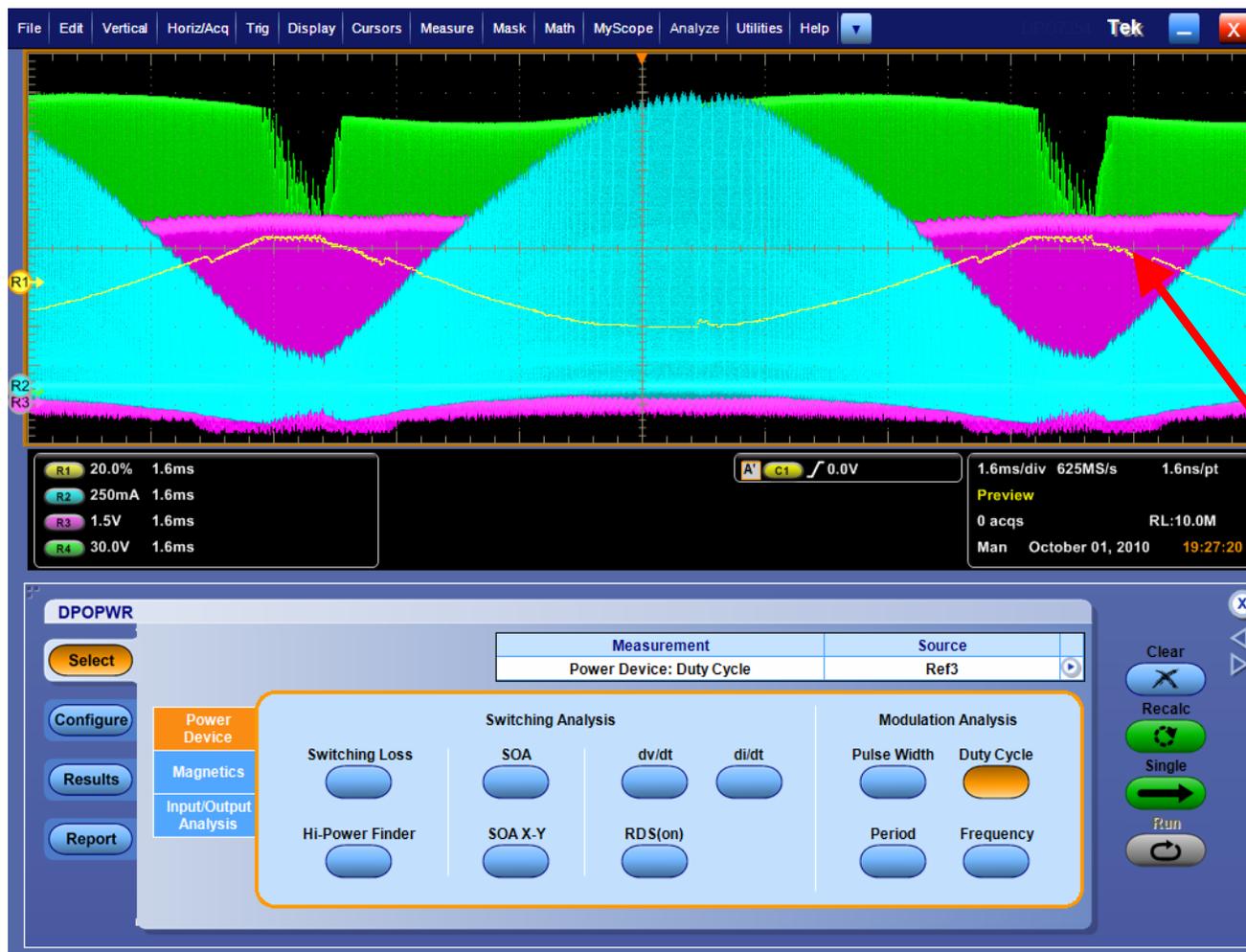
PWM 変調
クロック周期
デューティ・サイクル変調
周波数変調

パルス幅変調制御回路

Courtesy of ST microelect

スイッチング制御の評価 (DPOPOPWR)

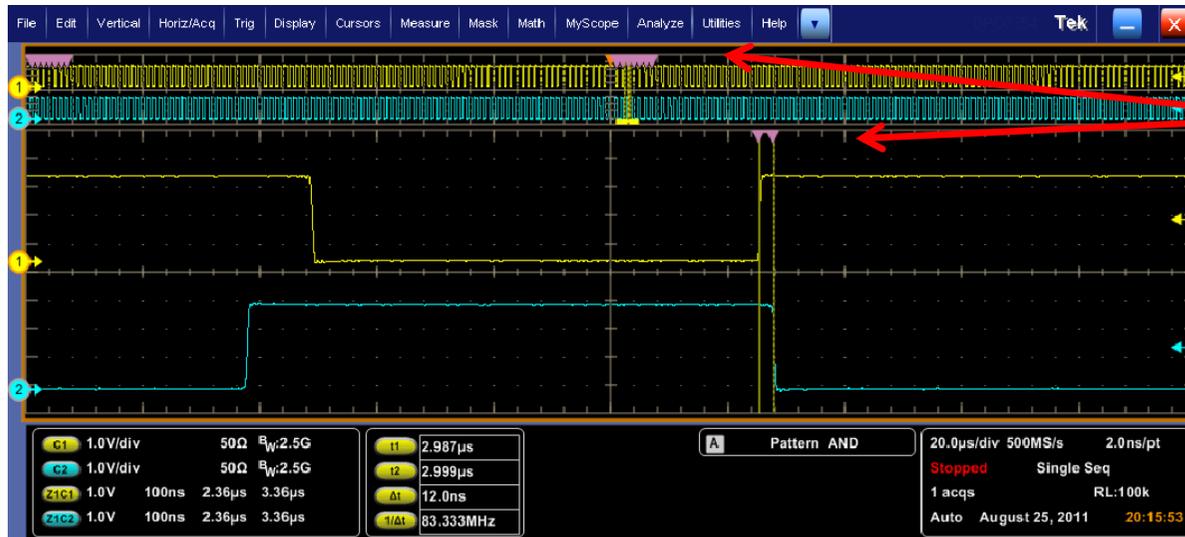
- PWM/PFM変調の時間変化を解析
- パルス幅、デューティ、ピリオド、周波数



デューティの
タイム・トレンド

スイッチング制御の評価 貫通電流防止のタイミング・マージン解析

■ パターン・トリガとサーチ&マークによる自動検索



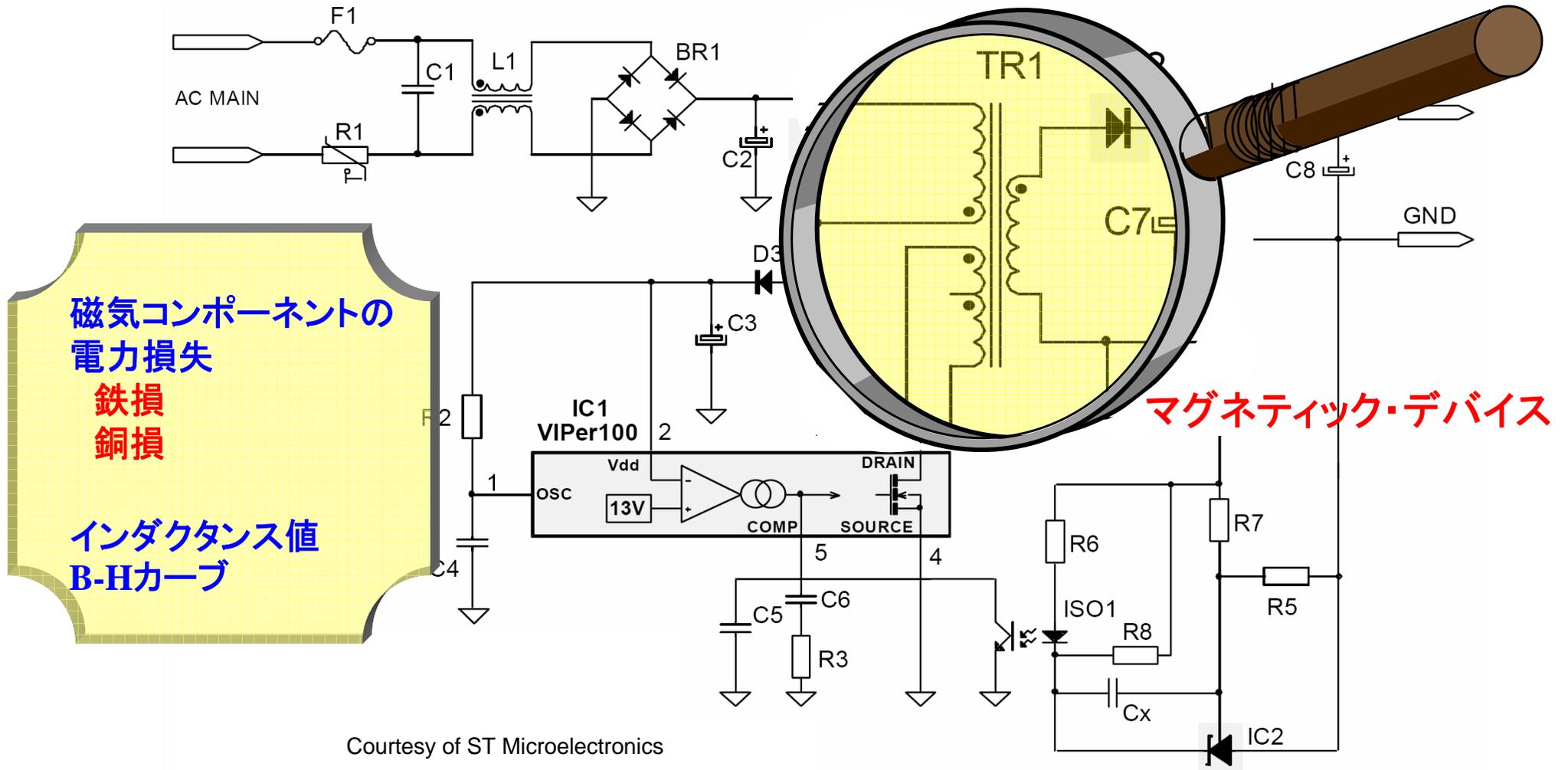
タイミング・マージンの少ない波形を自動識別してマーキング（ピンクの逆三角形）

タイミング・マージンが14ns未満の波形でトリガ、自動識別する設定例

The 'Search - Configure' panel shows a search pattern 'HHXXXX...' and a 'Trigger if Pattern' setting with a 'Time' of '14.0ns'. The 'Trigger - Logic Pattern' panel shows a 'Pattern Type' of 'AND' and an 'Input Threshold' of '1.5V' for Ch1 and Ch2. A red circle highlights the 'A.Pattern → Acquire' button and the 'Time' field set to '14.0ns'.

磁気コンポーネントの評価

SMPS



磁気コンポーネントのB-H解析 (DPOPOPWR)

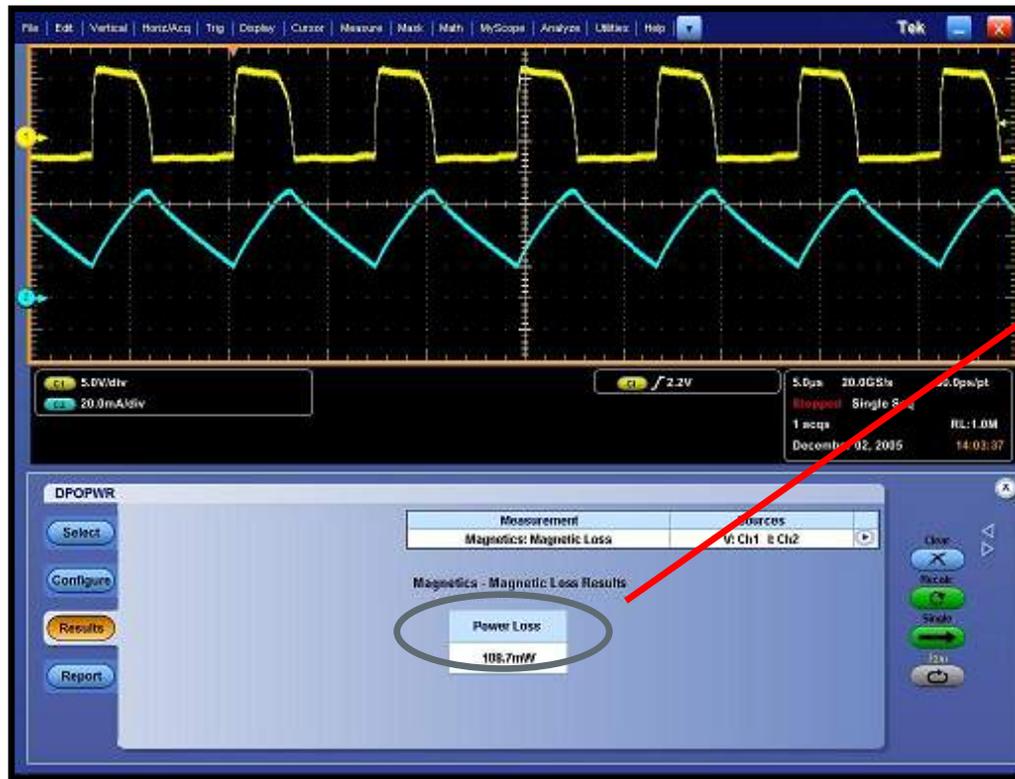
- B-H ヒステリシス・カーブの表示、解析
- 磁気パラメータ測定
 - 透磁率
 - 残留磁束密度
 - 最大磁束密度
 - 最大磁界強度
 - 保磁力
- マグネティック損失
- インダクタンス値



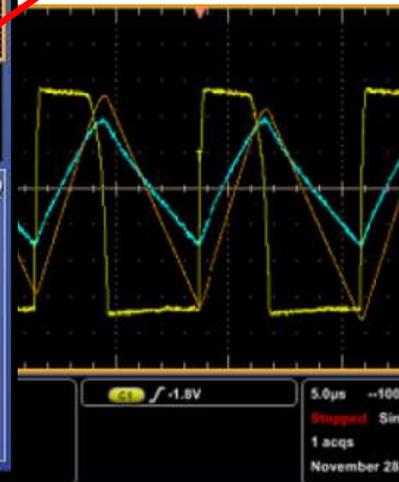
B-H ヒステリシス・カーブ

磁気コンポーネントの電力損失測定例

- 動作している周波数、電流、電圧条件での電力損失、インダクタンス値



磁気部品の電力損失
108.7mW



インダクタンス値
58.97µH

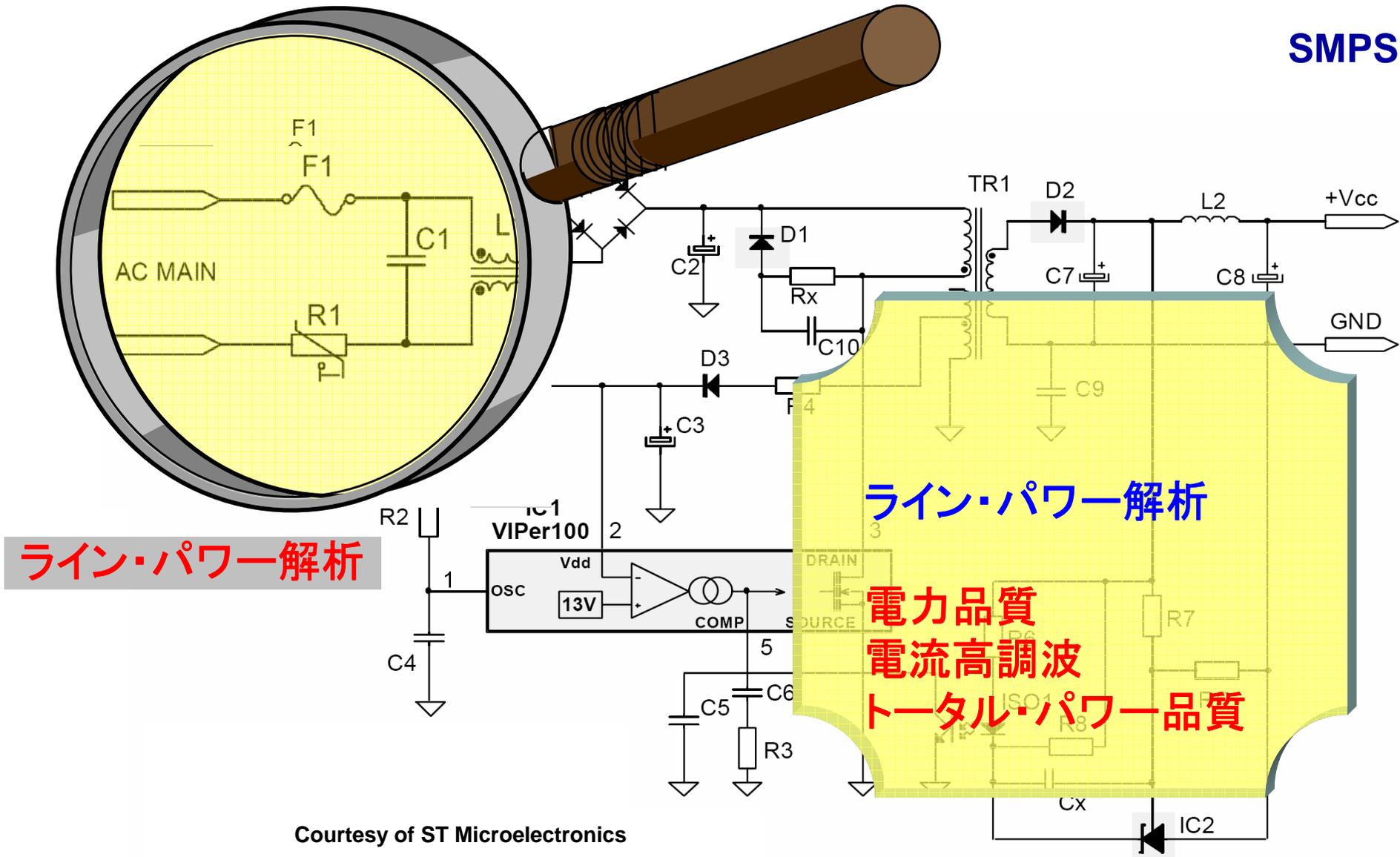
磁気コンポーネントの電力損失

- 鉄損
 - － ヒステリシス損
 - － 周波数に比例して増加
 - － 渦電流損
 - － 周波数の2乗に比例して増加
- 銅損
 - － 抵抗損
 - － リッツ線の隣接効果
 - － 漏れ磁束による導体内渦電流損

DPOPWRでは、トータルのマグネティック電力損(鉄損+銅損)を測定

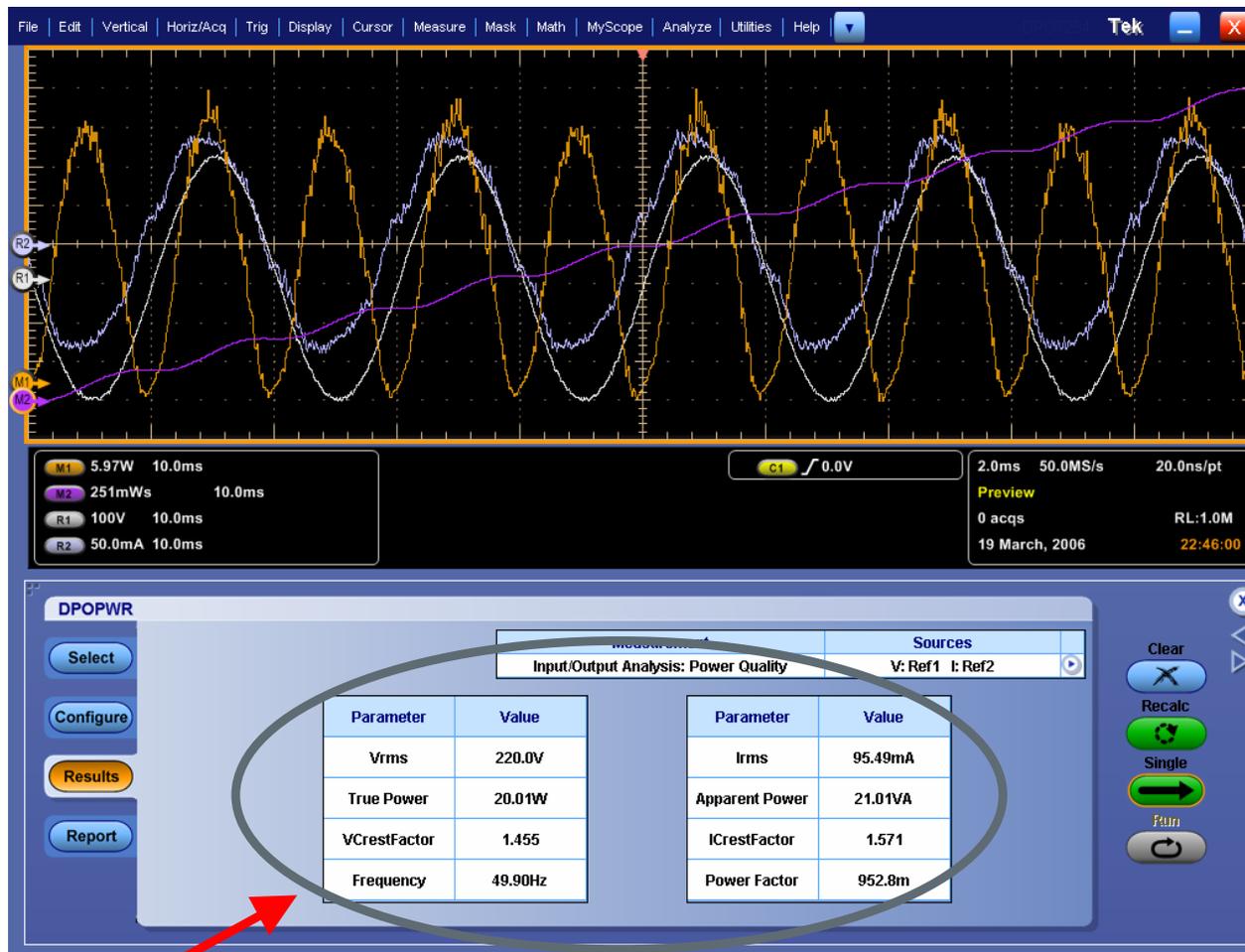
ライン・パワー解析

SMPS



ライン電源品質の評価(DPOPOPWR)

- 実効電力、皮相電力、力率などを自動計測

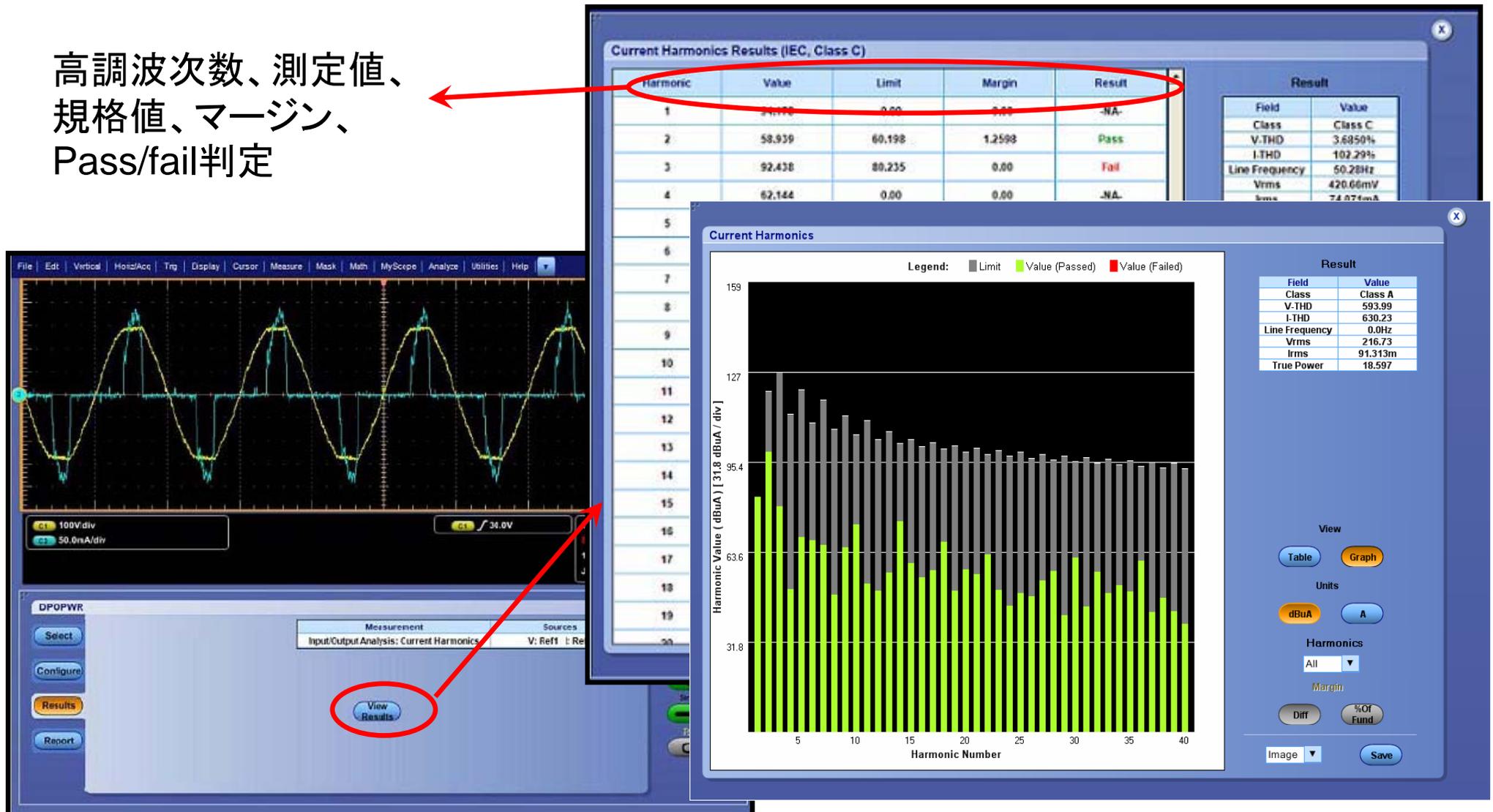


電源品質計測結果

電流高調波の規格測定 (DPOPWR)

- IEC-EN61000-3-2、Amd14、MIL1399規格に対応

高調波次数、測定値、規格値、マージン、Pass/fail判定



入力/出力解析

- リップルおよびノイズ



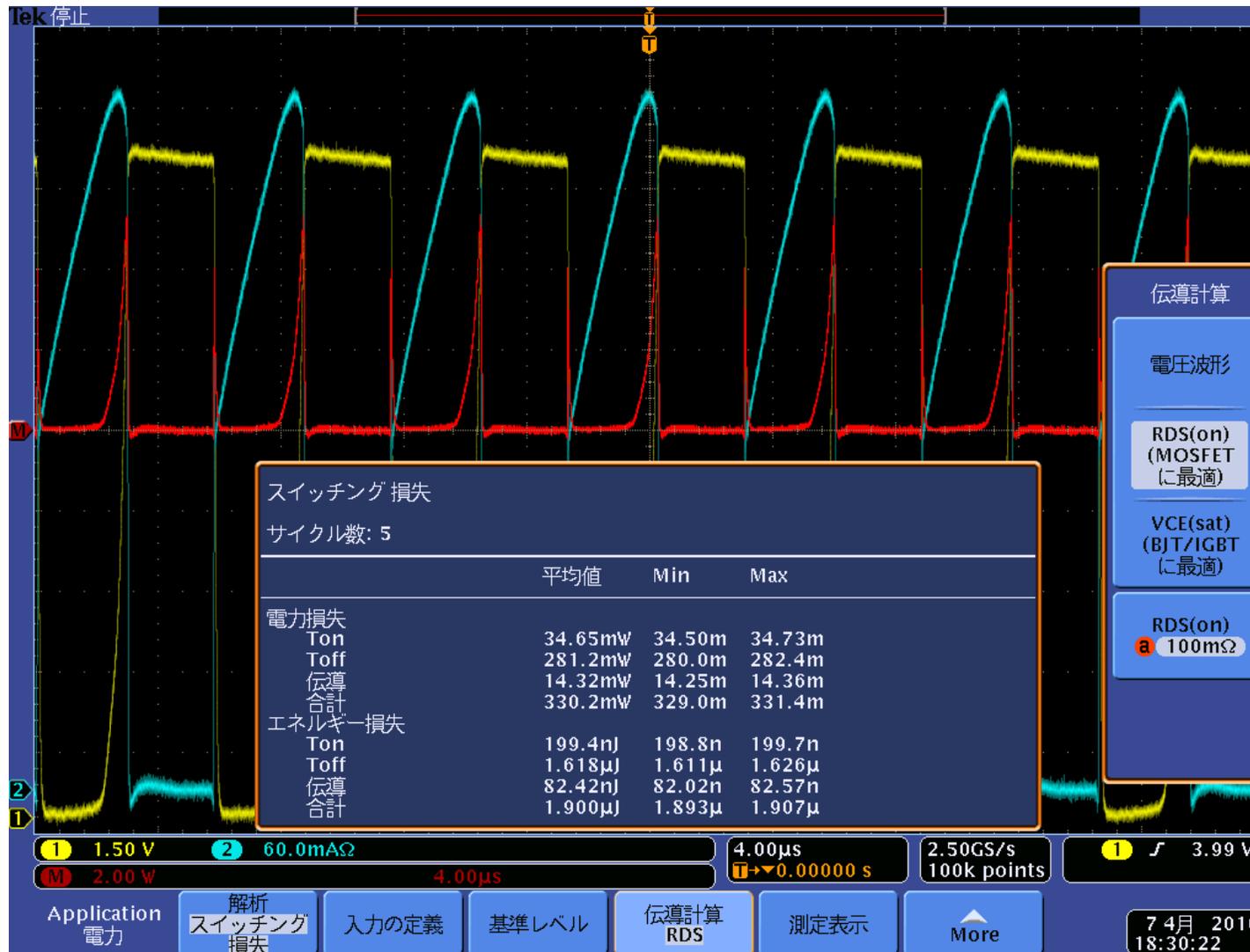
ライン周波数成分の
リップル: 1.091Vpp



スイッチング周波数成分の
リップル: 31.74mVpp

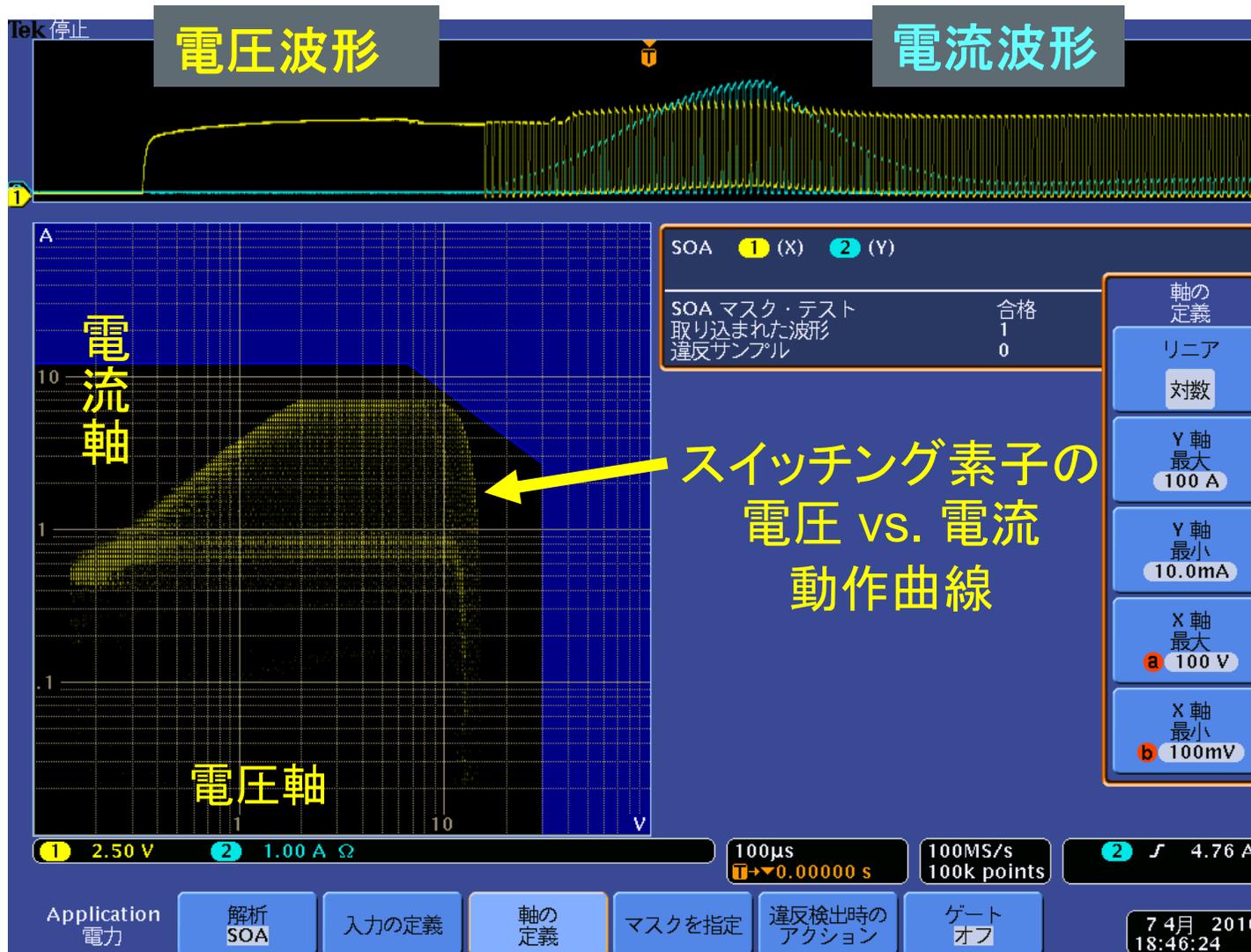
参考: DPO/MSO4000Bシリーズによる測定例 1

■ DP4PWRによるスイッチング・ロスの自動測定



参考: DPO/MSO4000Bシリーズによる測定例 2

■ DPO4PWRによるSOAの評価



参考: DPO/MSO4000Bシリーズによる測定例 3

■ DPO4PWRによる電流高調波テスト(リスト表示)



参考: デスキュー・パルス・ジェネレータ

- **TEK-DPG型 デスキュー・パルス・ジェネレータ**
 - DPO/MSO5000、DPO/MSO4000B、DPO/MSO3000シリーズで使用可能
- **パワー・デスキュー・フィクスチャ 067-1686-00**



TEK-DPG型



067-1686-00

4. 適切な測定器の選択



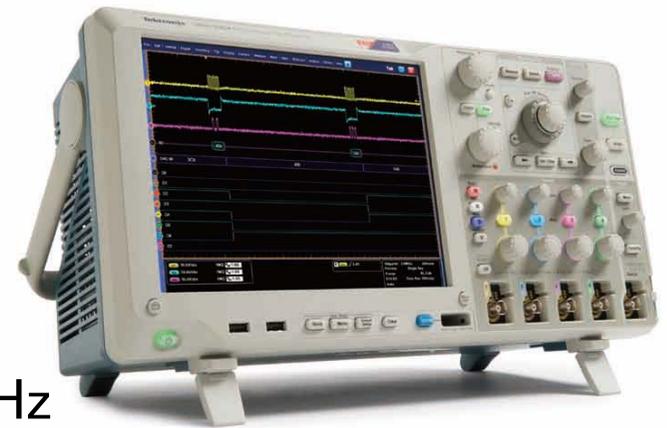
4. 適切な測定器の選択

スイッチング回路評価に必要なオシロスコープの性能

- スwitching波形の立上り/立下り時間を測定可能な周波数帯域とサンプル・レート(2ch/4ch同時取込み)
- 波形演算機能および解析機能
 - 波形間演算、微分、積分、FFT解析等を装備
 - スwitching損失、コア損失などの自動測定
- 豊富なアクイジションおよびトリガ機能
 - ハイレゾ、ピーク・ディテクト・モード
- 高速波形取込機能(DPO)
 - 例えば、最高で250,000波形/秒以上の波形取込
- レポート作成、出力
 - 電子ファイルにてデータ管理

パワー解析用推奨構成 — 1

オシロスコープ



- MSO/DPO5000シリーズ + PS1
 - 周波数帯域: 350MHz、500MHz、1GHz、2GHz
 - 最高サンプル・レート: 4ch同時 5GS/s
 - レコード長 : 4ch同時 12.5M、2ch同時 25M (標準)
(オプションで 4ch同時 125M、2ch同時 250M)
 - パワー計測パッケージ PS1
 - DPOPWR パワー解析ソフトウェア (Opt.PWR)
 - TCP0030型 電流プローブ (30Arms 120MHz)
 - P5205A型 高電圧差動プローブ (1300V 100MHz)
 - TPA-BNC型 アダプタ
 - デスキュ・フィクスチャ (067-1686-xx)



PFC付き電源解析用途の場合は

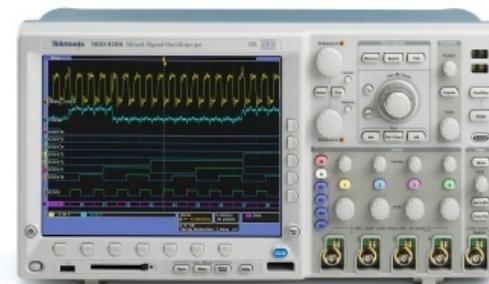
- P5205A型 × 1本を追加 (合計2本)
 - ゲート信号へのプロービング用
 - 補助電源 119-7465-00 × 1個
 - ケーブル 161-A005-00 × 1本を追加



パワー解析用推奨構成 ー 2

オシロスコープ

- DPO/MSO4000B シリーズ + DPO4PWR
 - 周波数帯域: 350MHz、500MHz、1GHz
 - 最高サンプル・レート: 4ch同時 5GS/s(標準)
 - レコード長 : 4ch同時 20M (標準)
 - パワー解析モジュール DPO4PWR



電流プローブ

- TCP0030型 × 1本
 - 最大電流: 30Arms 波数帯域: DC ~ 120MHz

高電圧差動プローブ

- P5205A型 × 2本、TPA-BNC型 × 2個
 - 耐圧: 差動1300V、対地1000V
 - 周波数帯域: 100MHz



デスクュ・フィクスチャ

- デスクュ・フィクスチャ(067-1686-xx)、TEK-DPG型(ジェネレータ)

その他のパワー解析用オシロスコープ

- DPO/MSO3000シリーズ + DPO3PWR
 - 500MHz、300MHz、100MHz
 - 最高サンプル・レート: 4ch同時 2.5GS/s
 - レコード長: 4ch同時 5M(標準)
- DPO7000Cシリーズ + DPOPOWER (Opt.PWR)
 - 500MHz、1GHz、2.5GHz、3.5GHz
 - 最高サンプル・レート: 4ch同時 5GS/sまたは10GS/s
 - レコード長: 4ch同時 12.5M(標準) 125M(オプション)
- TPS2000シリーズ + TPS2PWR1
 - 200MHz、100MHz
 - 各チャンネル独立フローティング
 - バッテリ駆動
- MSO/DSA/DPO70000Cシリーズ + DPOPOWER (Opt.PWR)
 - 4GHz、6GHz、8GHz、12.5GHz、16GHz、20GHz



DPO/MSO3000シリーズ



TPS2000シリーズ

PFC付き電源解析の場合はロング・レコード長での取り込みが必要なため、MSO/DPO4000Bシリーズ以上を推奨。

スイッチング電源評価用電流プローブ

■ TekVPI対応電流プローブ

— TCP0030型

- DPO/MSO5000、DPO/MSO4000(B)、DPO7000(C)シリーズ等のオシロスコープへ直接接続
- 最大測定電流：30Arms AC/DC
- 最高感度：1 mA/div
- 周波数帯域：DC～120 MHz

高感度
広帯域



— TCP0150型

- DPO/MSO5000、DPO/MSO4000(B)、DPO7000(C)シリーズ等のオシロスコープへ直接接続
- 最大測定電流：150Arms AC/DC
- 最高感度：5 mA/div
- 周波数帯域：DC～20 MHz

大電流
高感度



スイッチング電源評価用電流プローブ

■ TCPシリーズ・電流プローブ

— TCP202型

- 周波数帯域: DC~50MHz
- 最大連続電流: 15A (DC+peakAC)
- TEKPROBE®インタフェースにてアンプ不要

— TCP300/400シリーズ

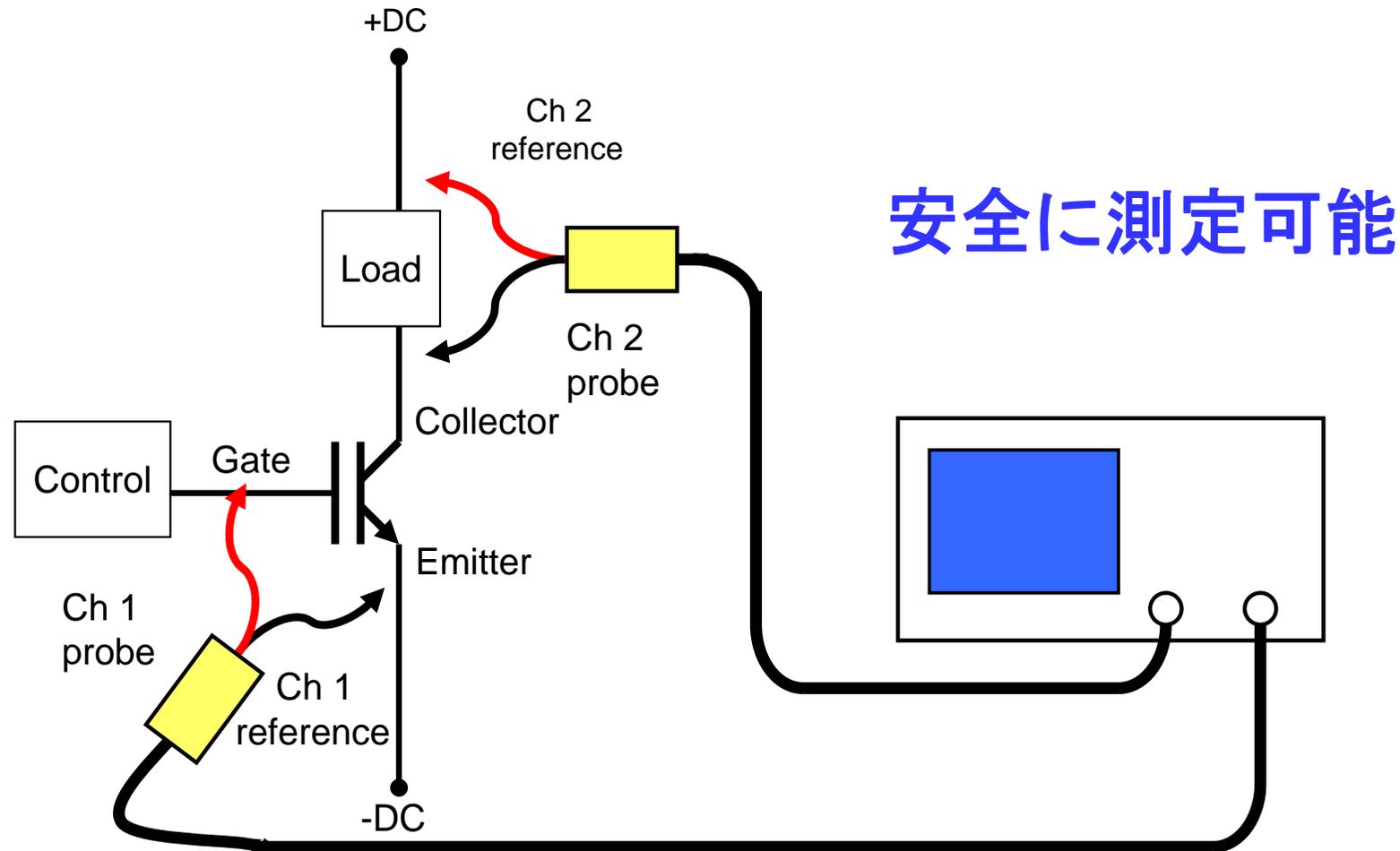
- 周波数帯域: DC~100MHz (TCP312型)
- 周波数帯域: DC~50MHz (TCP305型)
- 周波数帯域: DC~15MHz (TCP303型)
- 周波数帯域: DC~2MHz (TCP404XL型)
- 最大連続電流: 30A (DC+peakAC) (TCP312型)
- 最大連続電流: 50A (DC+peakAC) (TCP305型)
- 最大連続電流: 150A (DC+peakAC) (TCP303型)
- 最大連続電流: 750A (DC+peakAC) (TCP404XL型)
- TCPA300/400型アンプ使用
- TEKPROBE®インタフェースにて電流値自動換算



測定前に、0A (DCオフセット) の調整を実行してください。

フローティング測定～差動プローブの重要性

- 差動プローブによるフローティング測定



Floating IGBT Gate and Collector Measurements

スイッチング電源評価用電圧プローブ



■ P5200Aシリーズ・高電圧差動プローブ

– P5205A型 *New!*

- 周波数帯域: DC~100MHz / 立上り時間: <3.5ns (代表値)
- 最大差動動作電圧: 1300V (DC+peakAC)、対地1000Vrms
- CMRR: >10000:1 (DC)、>1000:1 (100kHz)

– P5202A型 *New!*

- 最大差動動作電圧: 640V、対地450Vrms、他はP5205A型と同じ

– P5210A型 *New!*

- 周波数帯域: DC~50MHz / 立上り時間: <7ns (代表値)
- 最大差動動作電圧: 5600V (DC+peakAC)、対地2300Vrms
- CMRR: >10000:1 (DC)、>1000:1 (100kHz)

高CMRR

■ TDP1000シリーズ差動プローブ

– TDP1000型 / TDP0500型

- 周波数帯域: DC~1GHz / 500MHz
(立上り時間: <350ps、<700ps)
- 最大動作電圧: 42V

広帯域
高耐圧

測定前に、0Vの調整を実行してください。

新製品情報

高電圧プローブ(シングルエンド)



型名	周波数帯域 (-3dB)	減衰比	最大入力電圧	入力抵抗／入力容量
P5100A型	500MHz	100:1	2.5kV	40MΩ/2.8pF
TPP0850型※1	800MHz	50:1	2.5kV	40MΩ/1.5pF

※1: MSO/DPO5000シリーズ、MSO/DPO4000Bシリーズ専用

高電圧差動プローブ

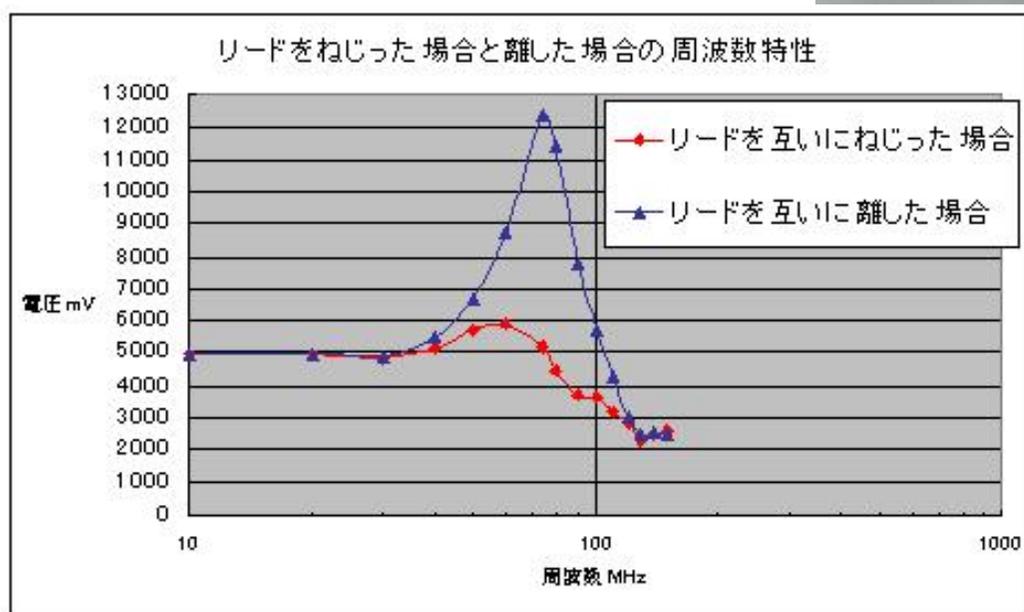
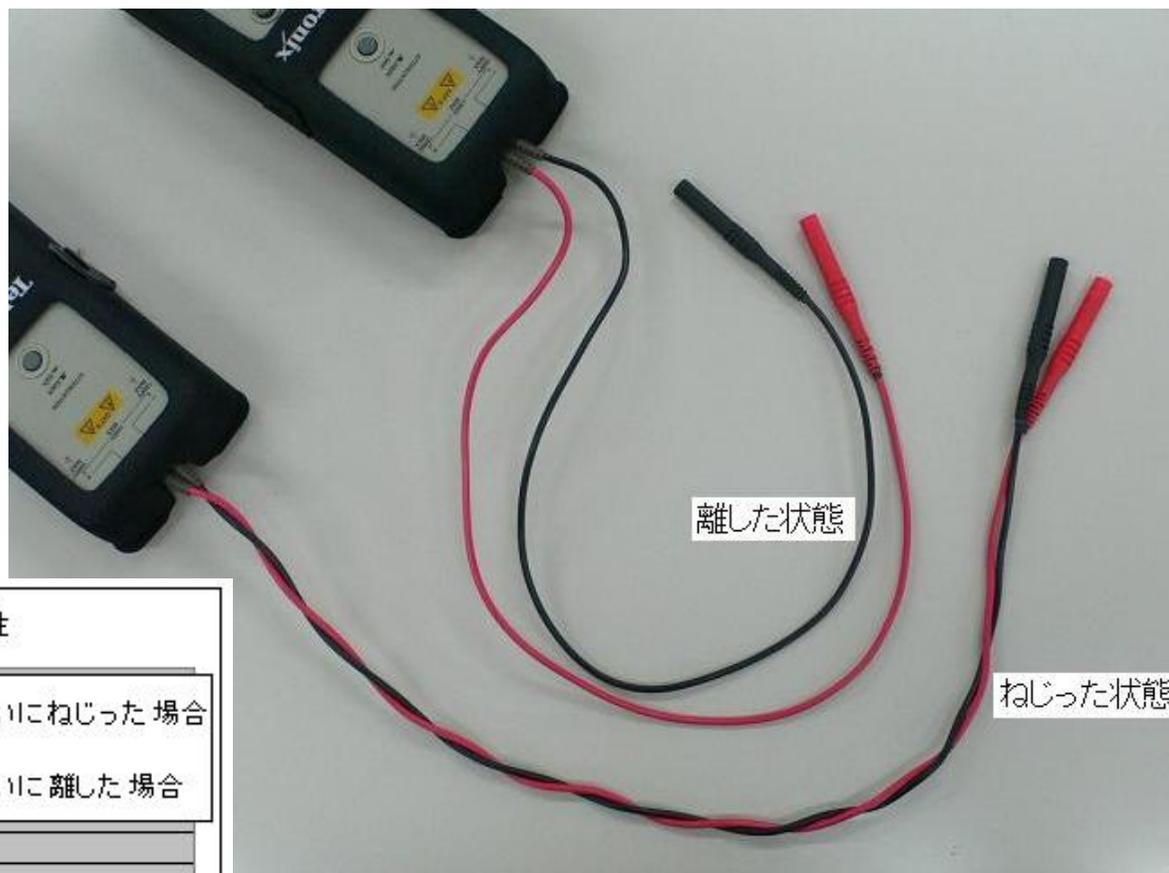


型名	周波数帯域 (-3dB)	減衰比	最大差動入力電圧	入力抵抗／入力容量
P5202A型※2	100MHz	200:1/20:1	640V	5MΩ/2pF未満.
P5205A型※2	100MHz	500:1/50:1	1.3kV	10MΩ/2pF未満
P5210A型※2	50MHz	1000:1/100:1	5.6kV	40MΩ/2.5pF未満
P5200A型	50MHz	500:1/50:1	1.3kV	10MΩ/2pF未満

※2: DPO7000(C)シリーズ、MSO/DPO5000シリーズ、MSO/DPO4000(B)シリーズでは、TPA-BNC型 TekVPI-TekProbe BNCアダプタが必要

高電圧差動プローブの入カリード線はねじるもの？

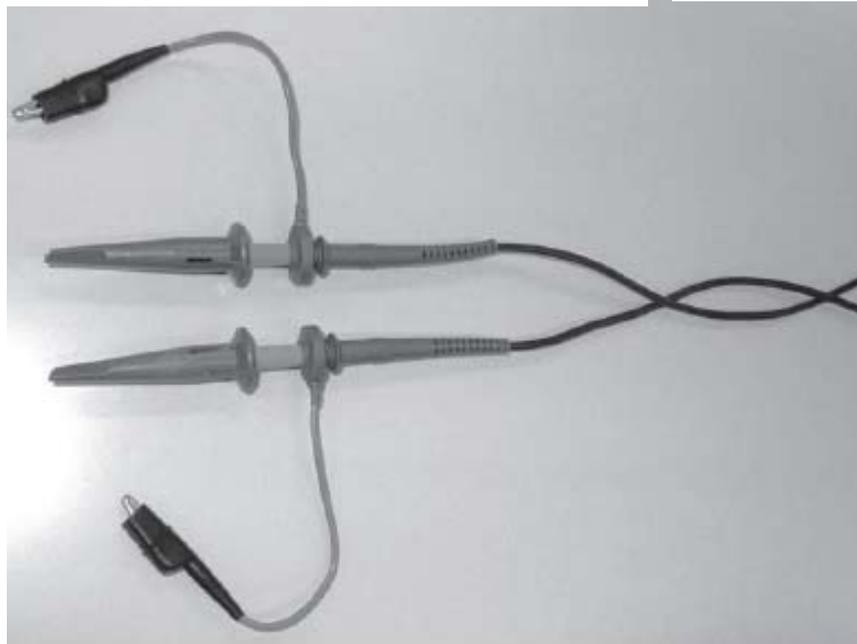
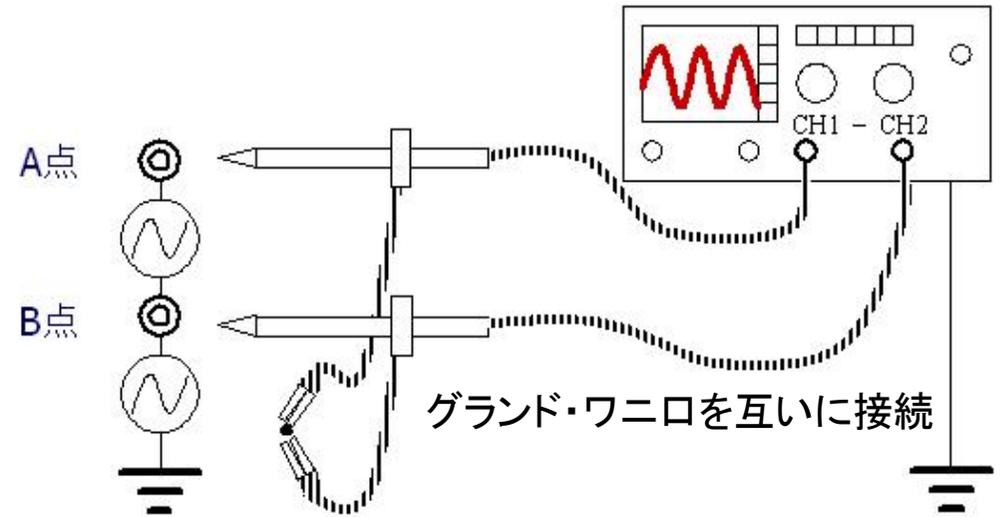
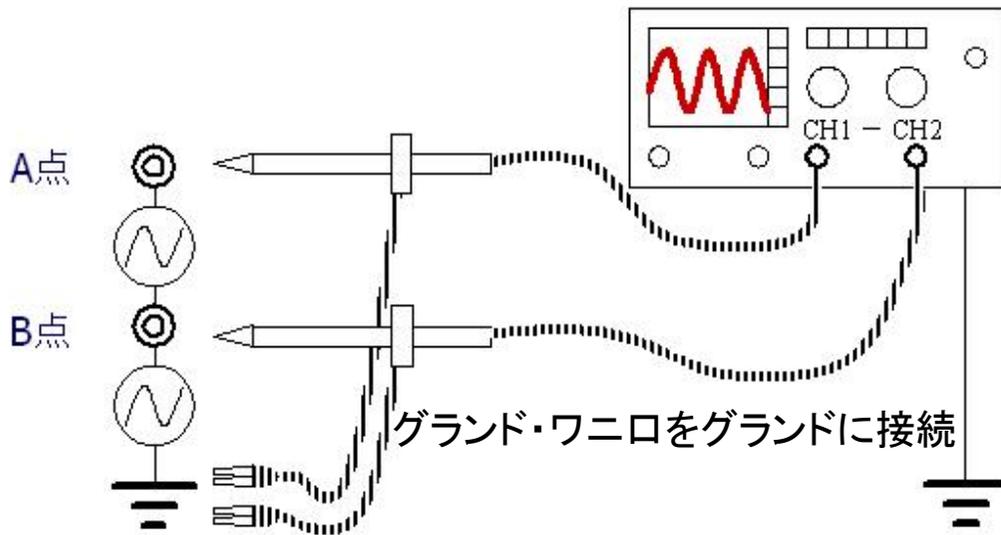
- ねじった状態で、スペックを規定



P5205型

参考: シングル・エンド・プローブ2本で引き算

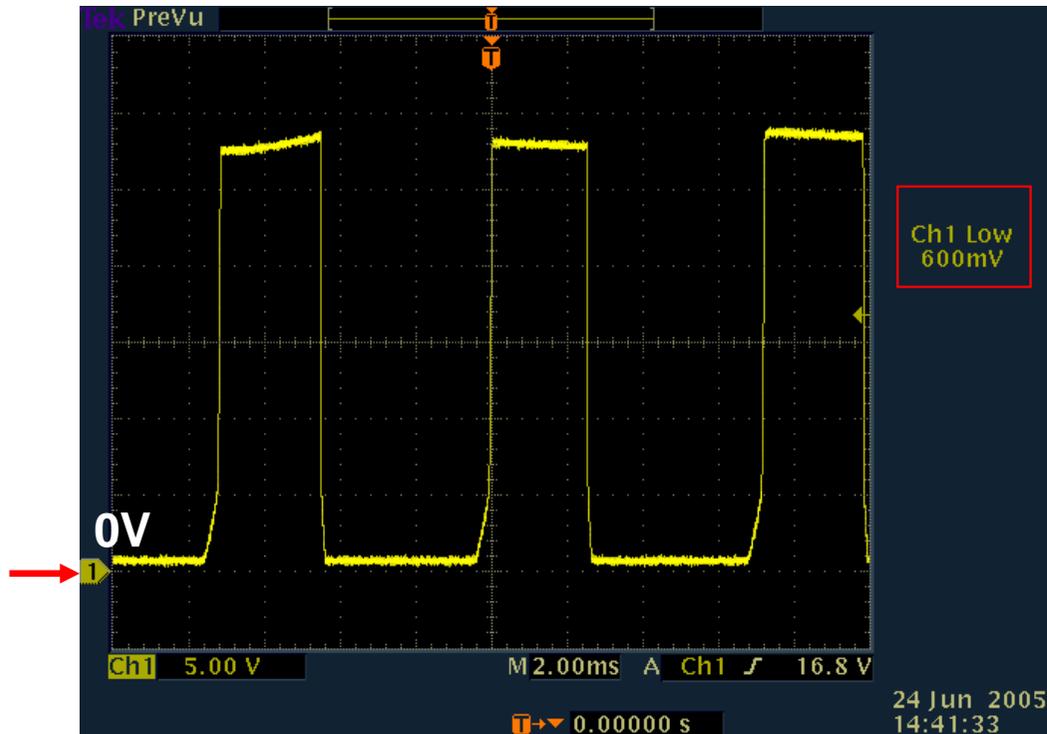
- プローブが2本あれば



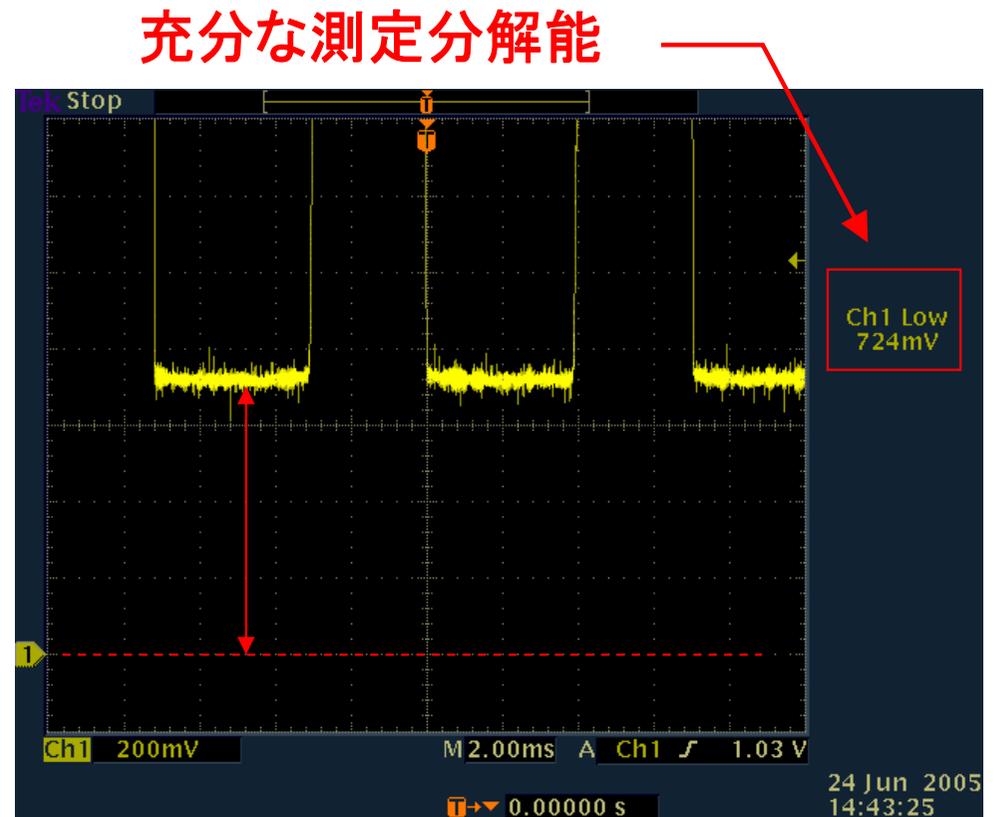
P5100A型 高電圧プローブ
2.5kV 500MHz

オーバドライブ・リカバリの問題(1)

- 比較的影響が少ない例



5V/div

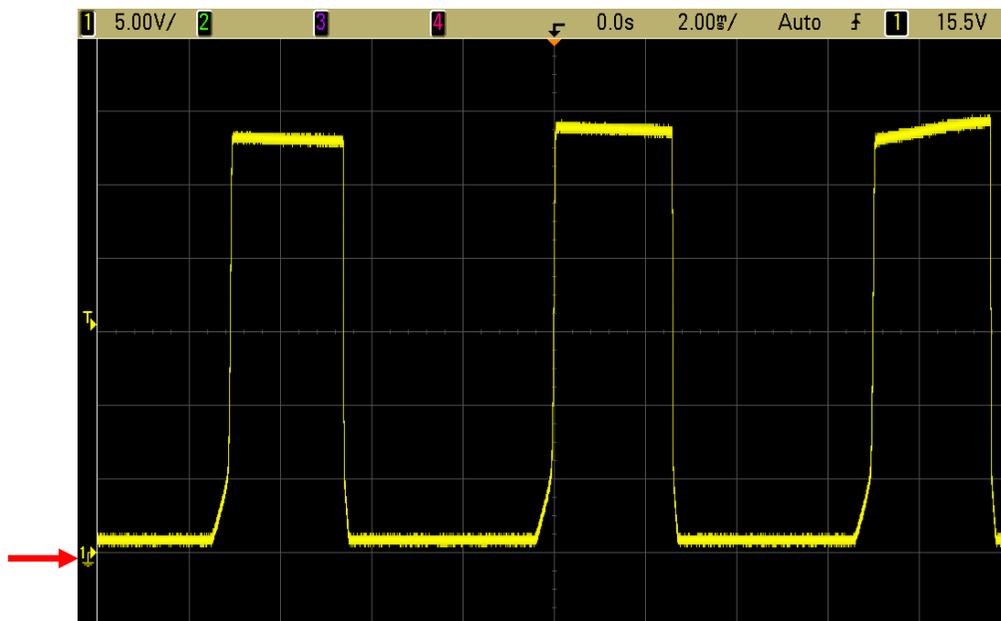


200mV/div

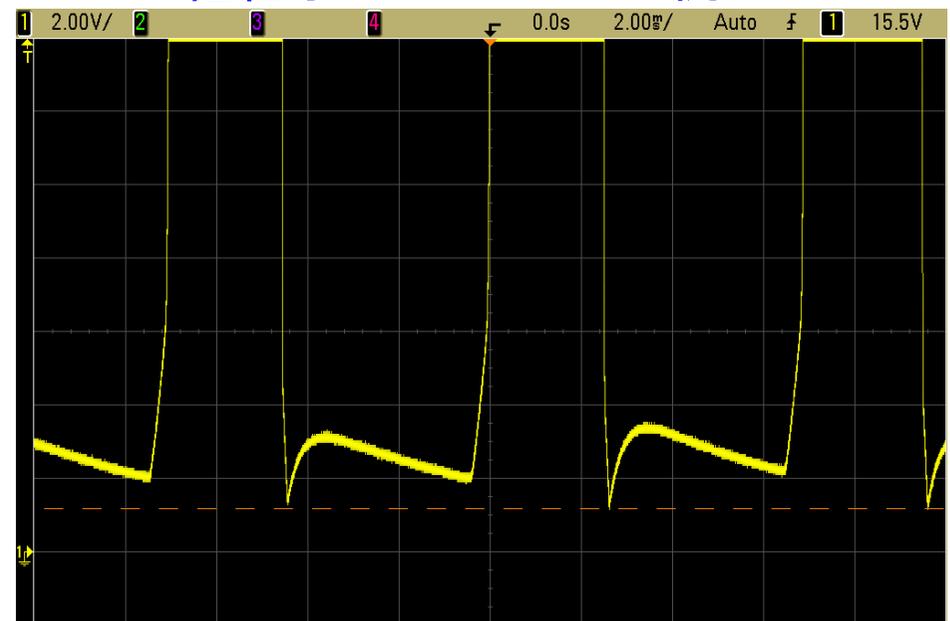
オーバードライブ・リカバリの問題(2)

- オーバードライブ・リカバリ特性が充分でない場合
- 入力信号はダイナミック・レンジを越えないという前提のオシロの場合
- 全振幅を表示させると、 $V_{CE}(\text{sat})$ は、オシロの誤差に埋もれる
- 10GS/sのオシロスコープでハイレゾ・モードを使用しても、12ビットの垂直軸分解能を得るには、39MS/s以下に設定する必要あり
⇒ 実用的ではない

他社オシロスコープの例



5V/div



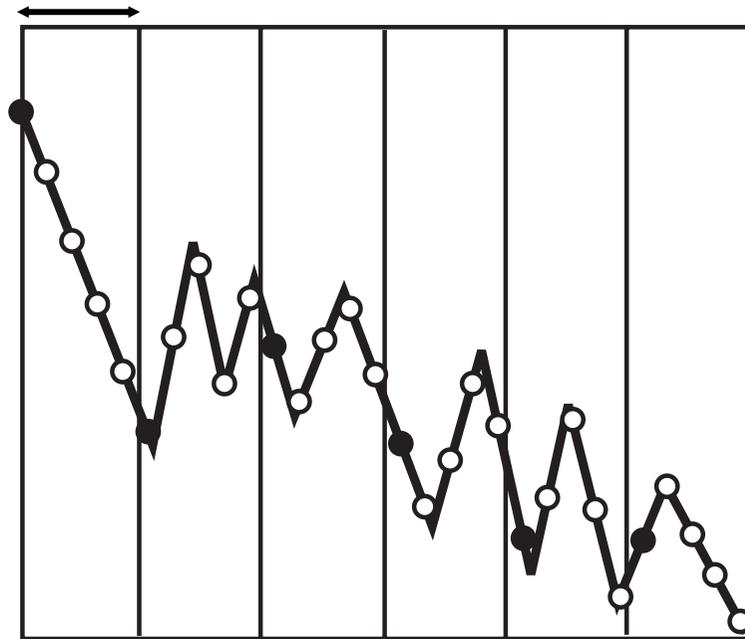
2V/div

参考： オシロの取込みモード サンプル・モードはどのような処理をしているの？

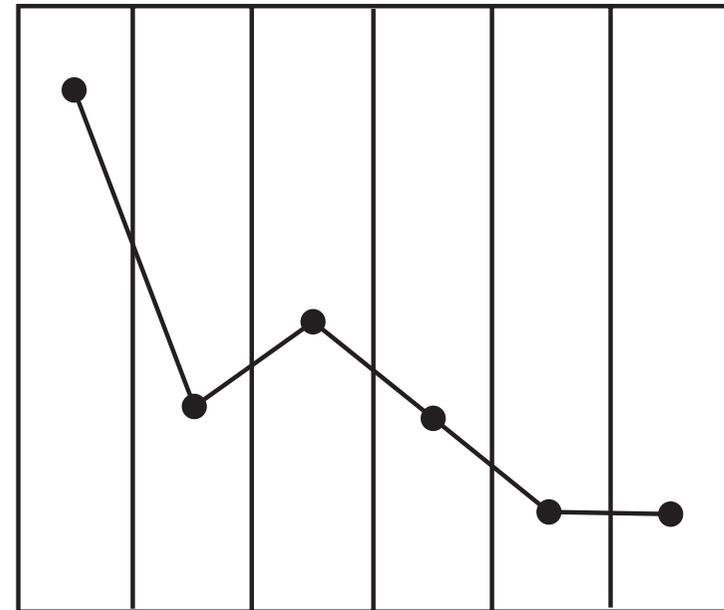
● サンプル・モード(通常モード)

インターバル内の一番左端のサンプル・ポイントのみメモリに格納します。

サンプル・インターバル



内部でデジタイズされたサンプル・ポイント



画面表示されたサンプル・ポイント

参考：オシロの取込みモード

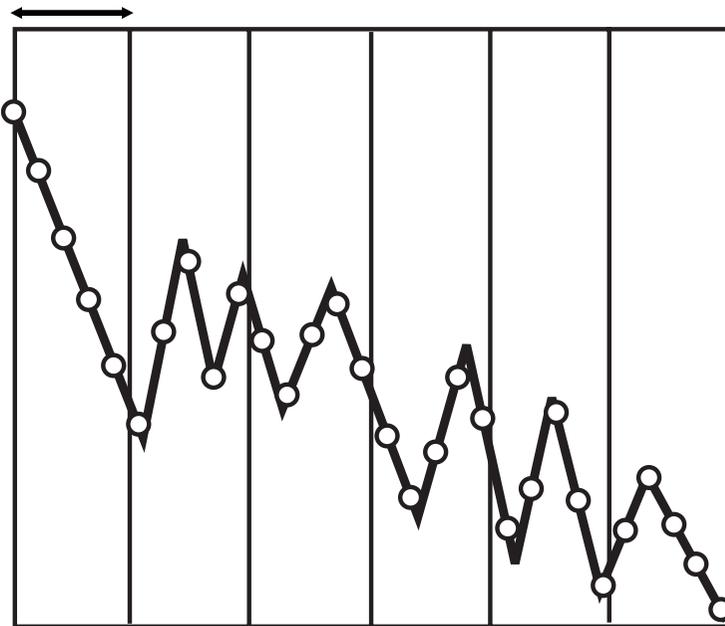
ハイレゾ・モードはどのような処理をしているの？

● ハイレゾ(Hi-Res)・モード

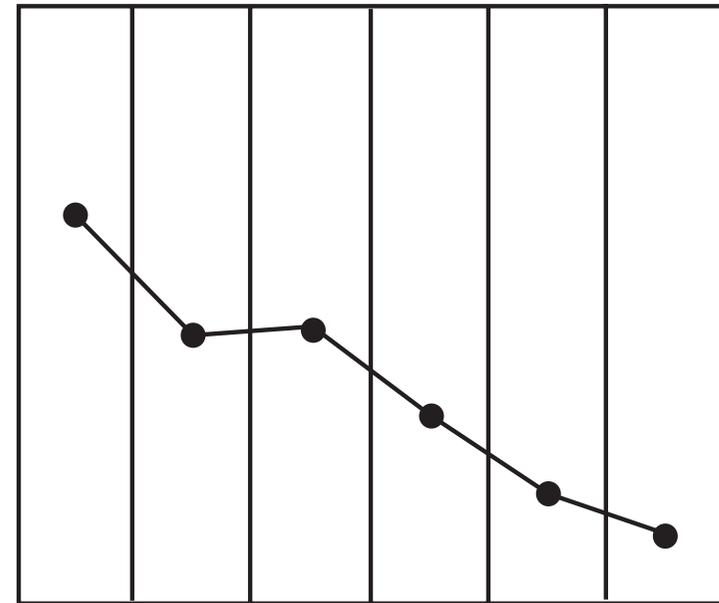
各インターバル内で平均を取り、その平均値をメモリに格納します。

ノイズの多い単発信号でもノイズを除去することができます。

サンプル・インターバル



内部でデジタイズされたサンプル・ポイント



画面表示されたサンプル・ポイント

- SOA解析、磁気コンポーネント測定、スイッチング損失測定に効果的
- 処理結果を直接メモリに保存するため、レコード長を有効使用
- 1sec/divなどの遅い時間軸、ロール・モードでも使用可能

参考：ハイレゾ・モードによる垂直軸分解能の向上

- ハイレゾ・モードの表示ビット分解能 = $8 + 0.5 \times \log_2 N$
N = (内部最高サンプル・レート ÷ 設定サンプル・レート)
- 2 byte メモリ(16ビット)の内、1ビットはサイン・ビットであるため、計算上は15ビットまで増えるが、まるめ誤差などを考慮すると、最高13ビット相当まで改善可能
- 周波数帯域 = $0.44 \times$ 設定サンプル・レート に制限
- $V_{CE(sat)}$ や R_{ON} の測定には、オーバードライブとハイレゾ・モードの併用が効果的

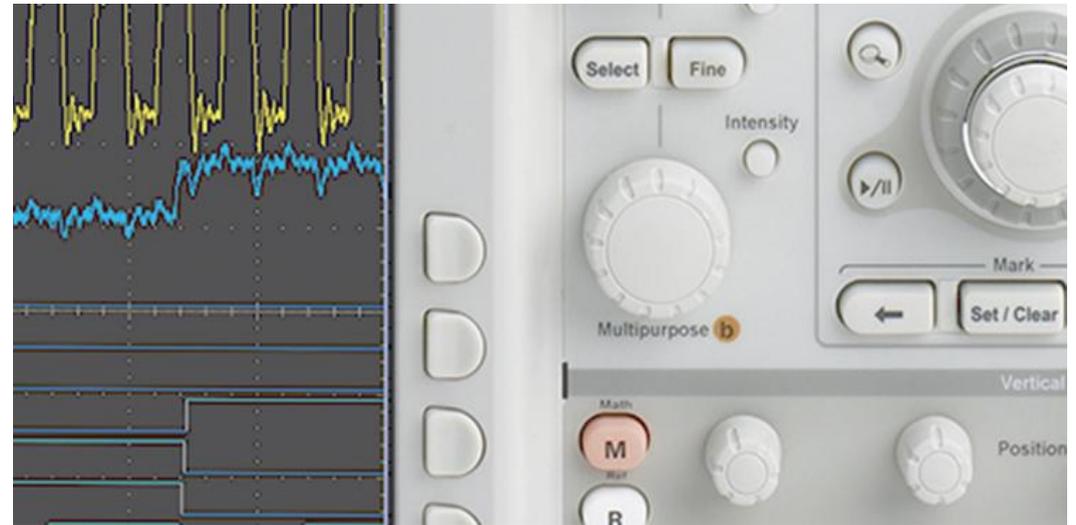
Tektronixのハイレゾ・モードの特長

- 真のハイレゾのため、上記Nの値が大きいほど、ビット分解能とS/Nが向上
- ハイレゾ処理結果を波形メモリに直接保存するため、レコード長が減少しない

Tektronixのパワー解析ソリューションの特長

- 高電圧差動プローブも電流プローブもプローブ倍率を自動識別
 - オシロスコープに装着するだけで自動識別、適正な単位表示
 - 測定ミスを防止でき、安全で確実な測定が可能
 - 微小電流用から大電流用までTCPシリーズは全て自動識別可能
- 充実した新高電圧プローブ/高電圧差動プローブ
 - 業界唯一 2.5kV 500MHzのP5100A型、2.5kV 800MHzのTPP0850型
 - 高CMRR、1300V、100MHzのP5205A型など
- 微小電流から大電流まで、1本で広いダイナミック・レンジをカバー
 - 確度の高い測定が可能
 - TCP0030型: 1mA/div ~ TCP0150型: 5mA/div ~
 - 大電流プローブもアンプ内蔵でコンパクトなため、持ち運びが容易(TCP0150型)
- スイッチング損失だけでなく安全動作領域のマスク・テストも可能
 - 信頼性評価にとって、SOAは重要
- 磁気部品の電力損失測定
 - 高効率電源にとって、磁気部品の電力損失は無視できない

ありがとうございました。



本テキストの無断複製・転載を禁じますテクトロニクス社 Copyright Tektronix

 **Twitter** [@tektronix_jp](https://twitter.com/tektronix_jp)

 **Facebook** <http://www.facebook.com/tektronix.jp>