

省エネ時代のスイッチング回路解析



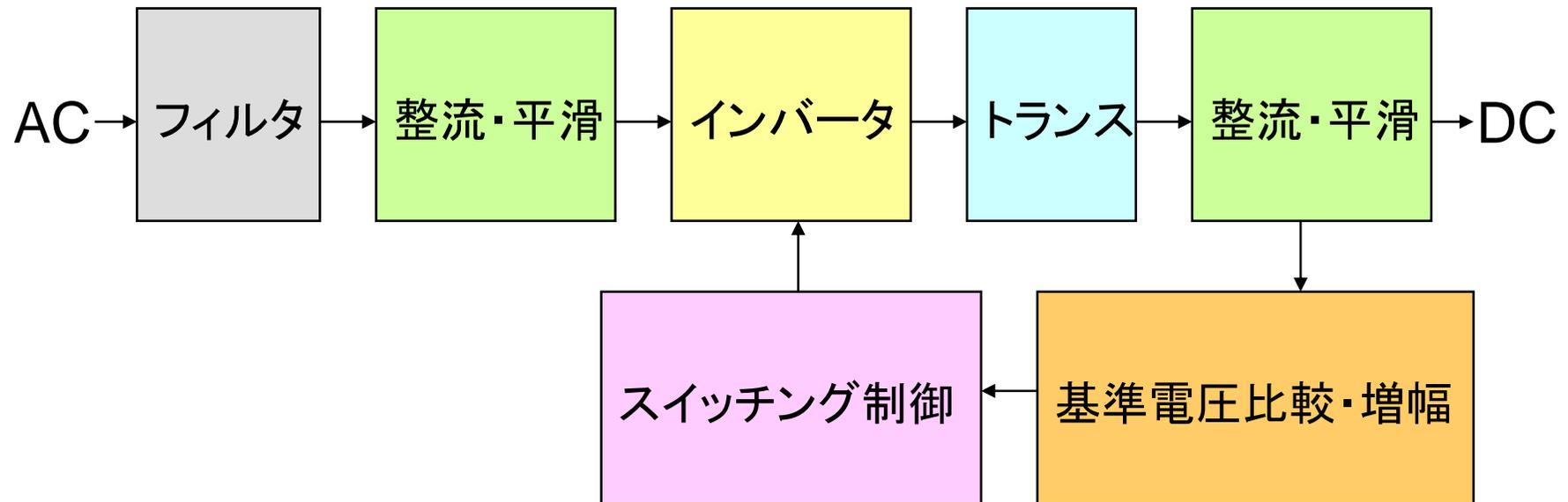
October 30, 2009

www.tektronix.co.jp

Tektronix[®]

スイッチング電源の基本ブロック図

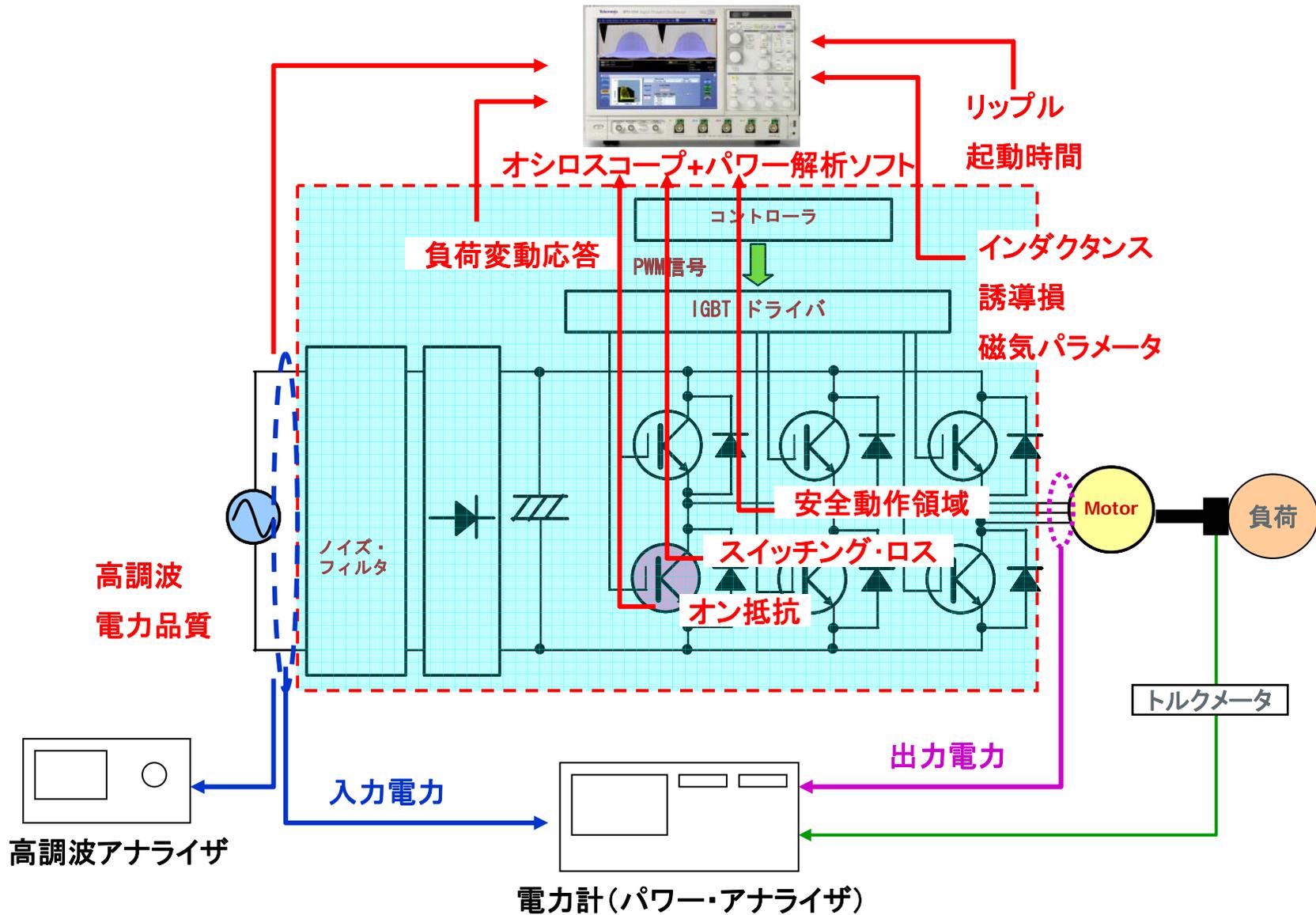
- AC-DC型スイッチング電源回路例



1. スイッチング回路に対する要求と測定項目

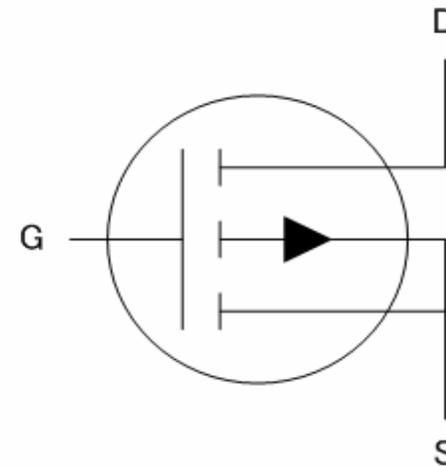
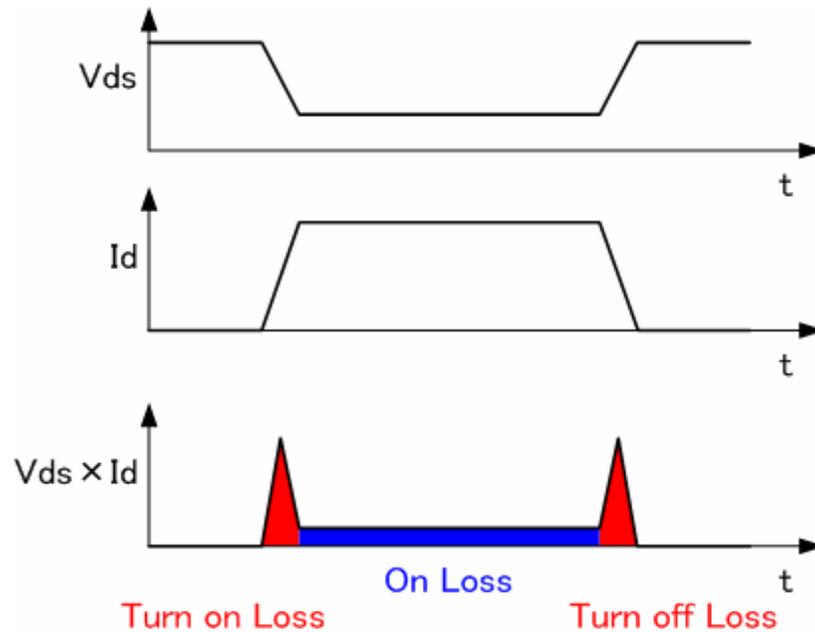
- 高効率化(電力変換効率の改善)
 - スイッチング・デバイス損失の低減
 - スイッチング損失
 - ON抵抗
 - 磁気部品損失の低減
 - コア損失
 - B-H解析など
- 高信頼性
 - 安全動作領域(SOA)の確認、B-H解析
 - 電圧、電流トランジェント応答
- 負荷変動応答性
 - 制御ループの高速応答
 - PWM制御(変調解析)
- 低ノイズ、耐ノイズ化
 - 電流高調波、リップル、電力品質、周波数解析、EMI

使用される測定器



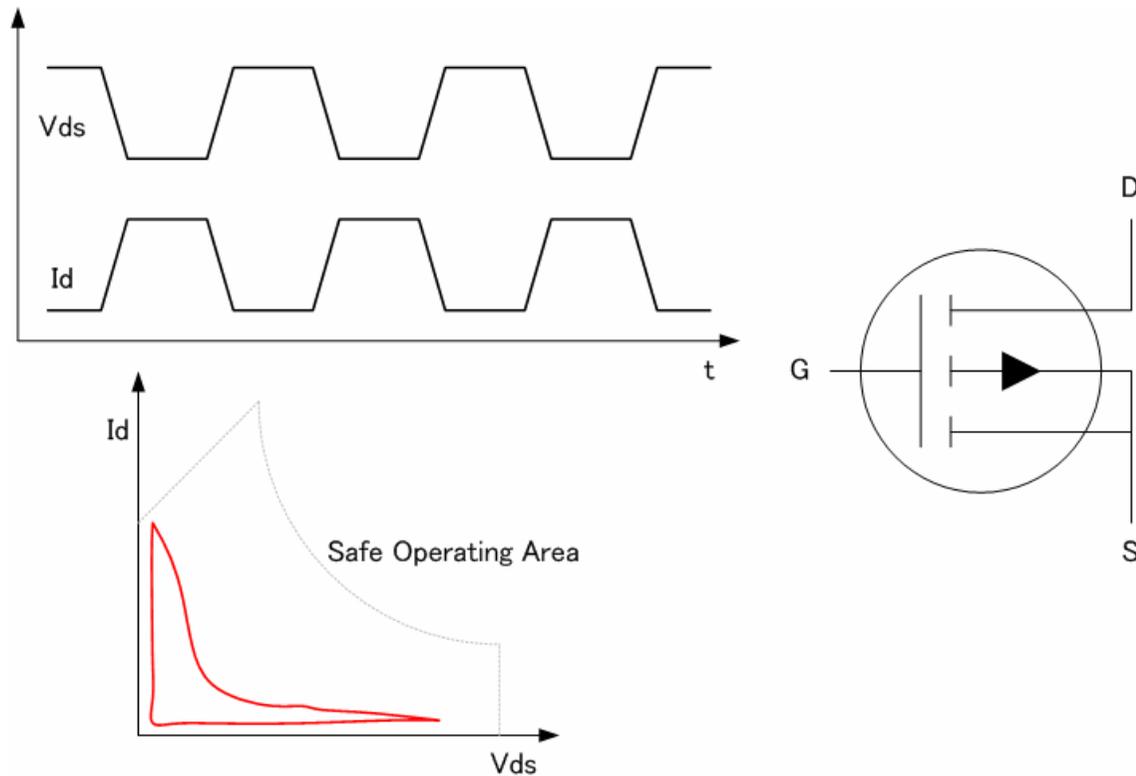
スイッチング・デバイスの評価(1)

- ターン・オン／オフ損失の評価
 - スwitching素子がON/OFFする時の損失
- 定常損失の評価
 - スwitching素子がON/OFFしている間の損失



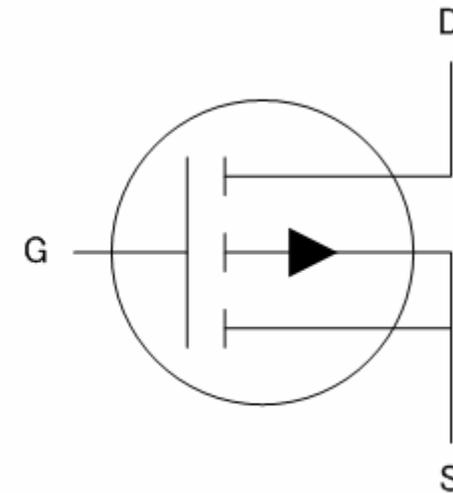
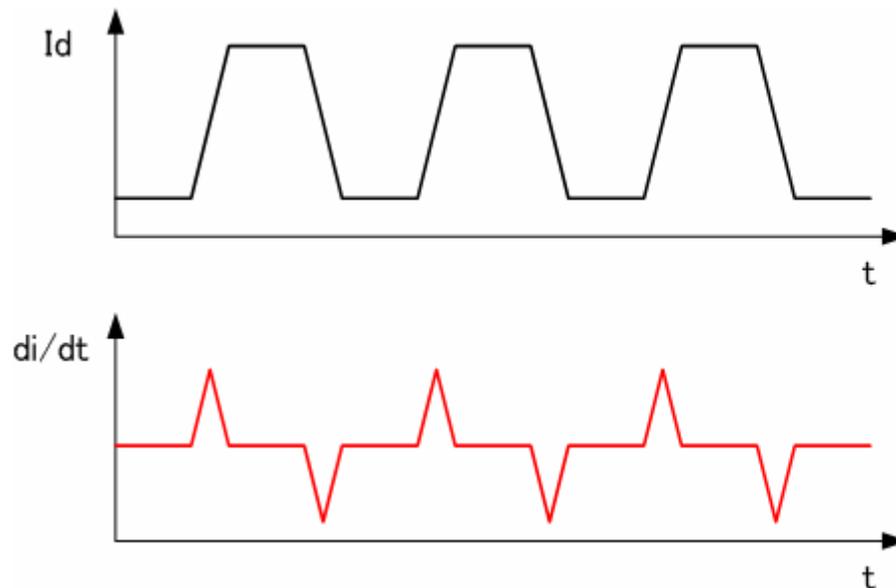
スイッチング・デバイスの評価(2)

- 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



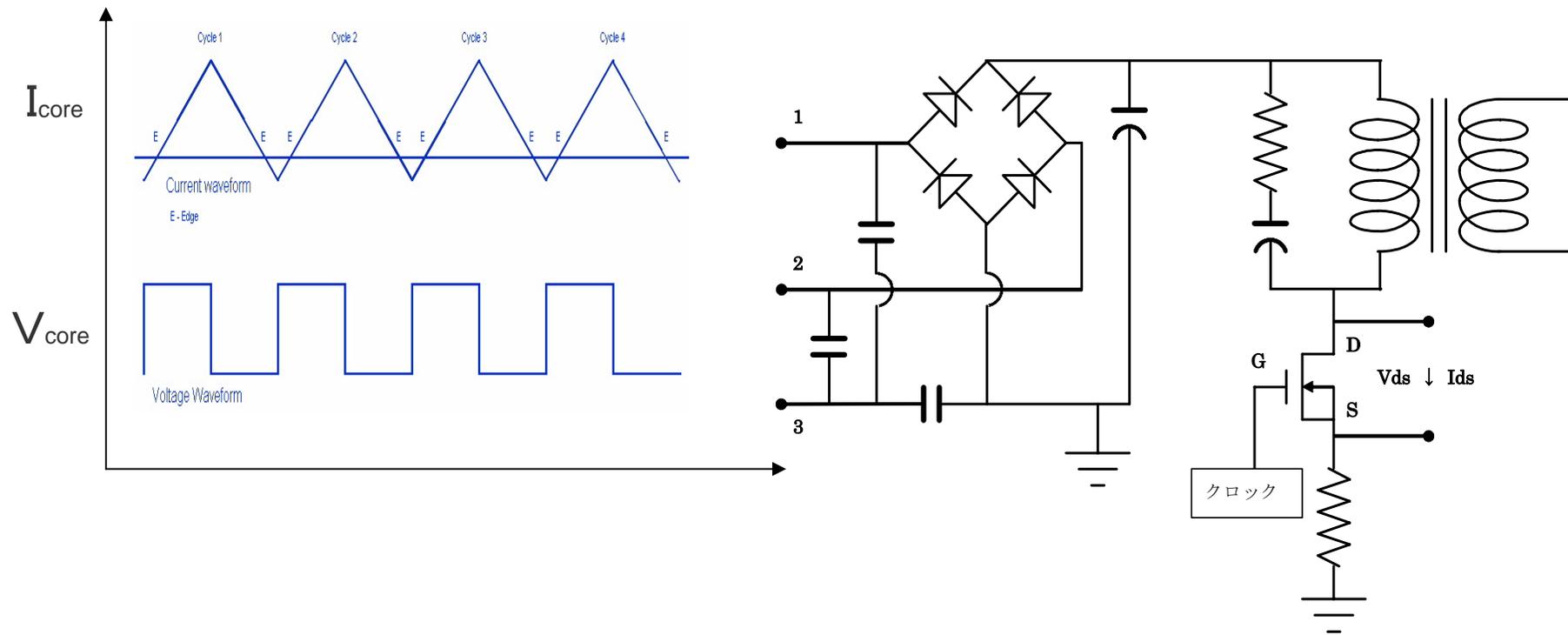
スイッチング・デバイスの評価(3)

- 電圧、電流トランジェント応答の評価
 - 時間当たり電圧、電流の変化量 (dv/dt 、 di/dt) の計測
 - 速ければスイッチング・ロスが減るが誘導やノイズが増加



トランス／コアの評価(1)

- トランス／コア損失の評価
- スイッチング損失、コア損失を含むトータル損失

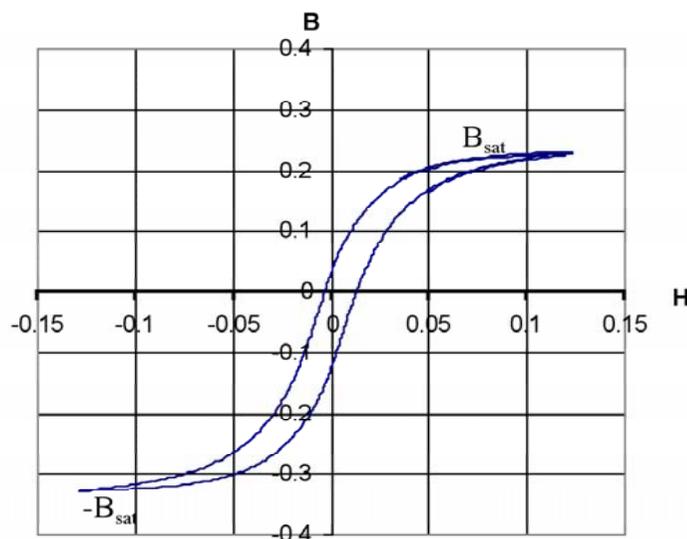


トランス／コアの評価(2)

■ 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) : $B = \mu H$



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

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

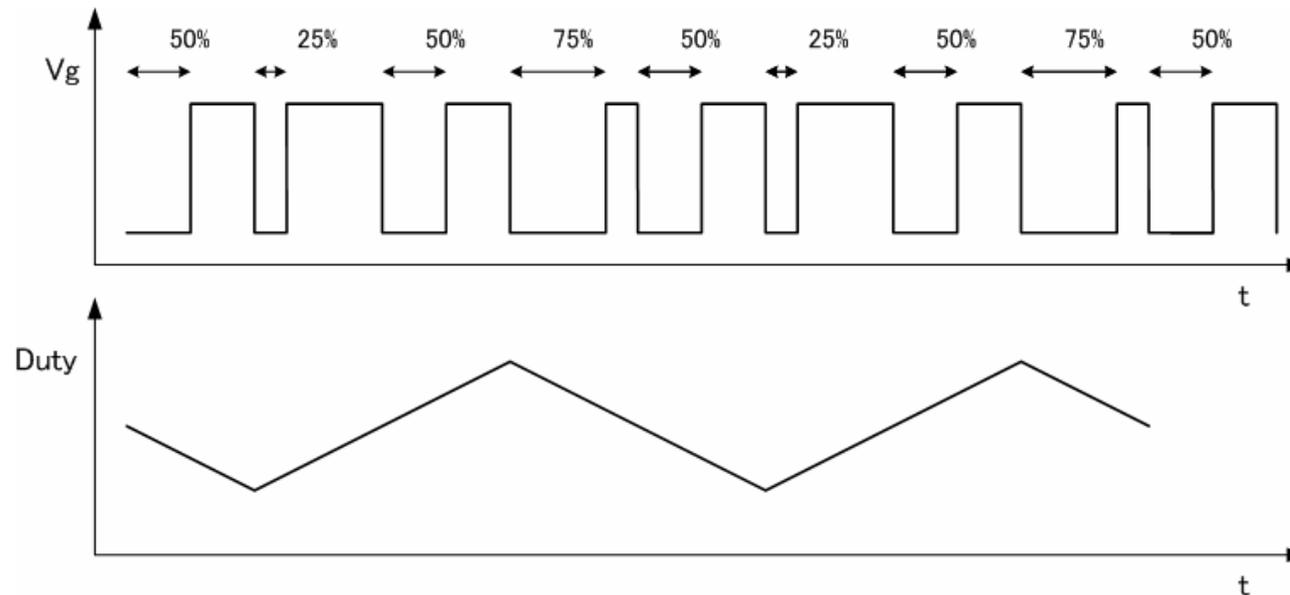
n : 巻線数, A : コア断面積, l : 平均磁路長,
 $v(t)$: 巻線誘導電圧, $i(t)$: 巻線電流

スイッチング制御の評価

■ 変調解析

– PWM (Pulse Width Modulation) 方式の評価

– 負荷変動におけるパルス幅変調の解析

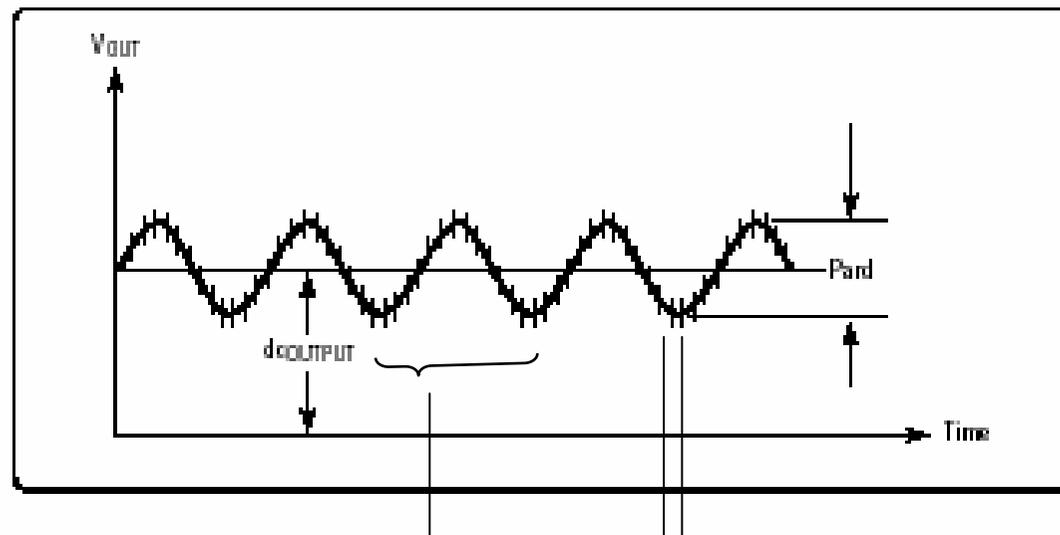


ライン品質、電流高調波の評価

- **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

リップルの評価

- ライン周波数に同期した成分
- スイッチング周波数に同期した成分

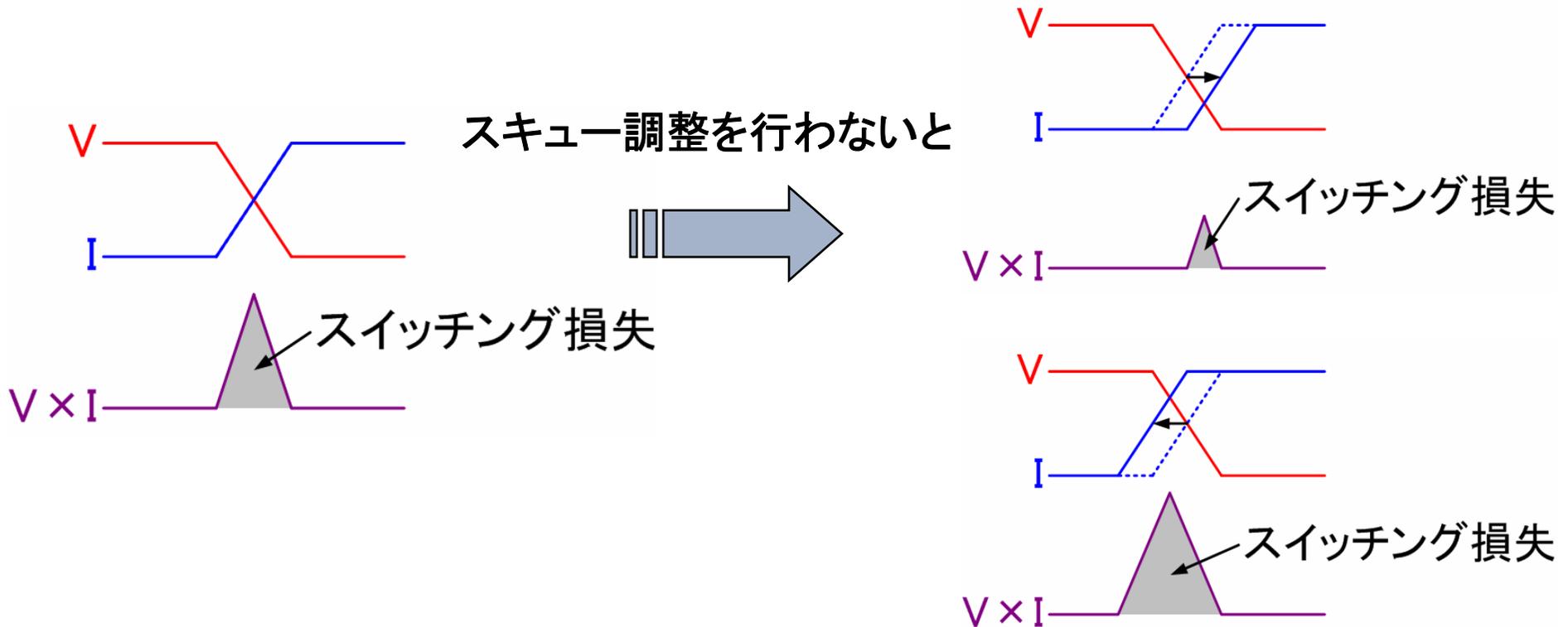


リップル(ライン)

リップル(スイッチング)

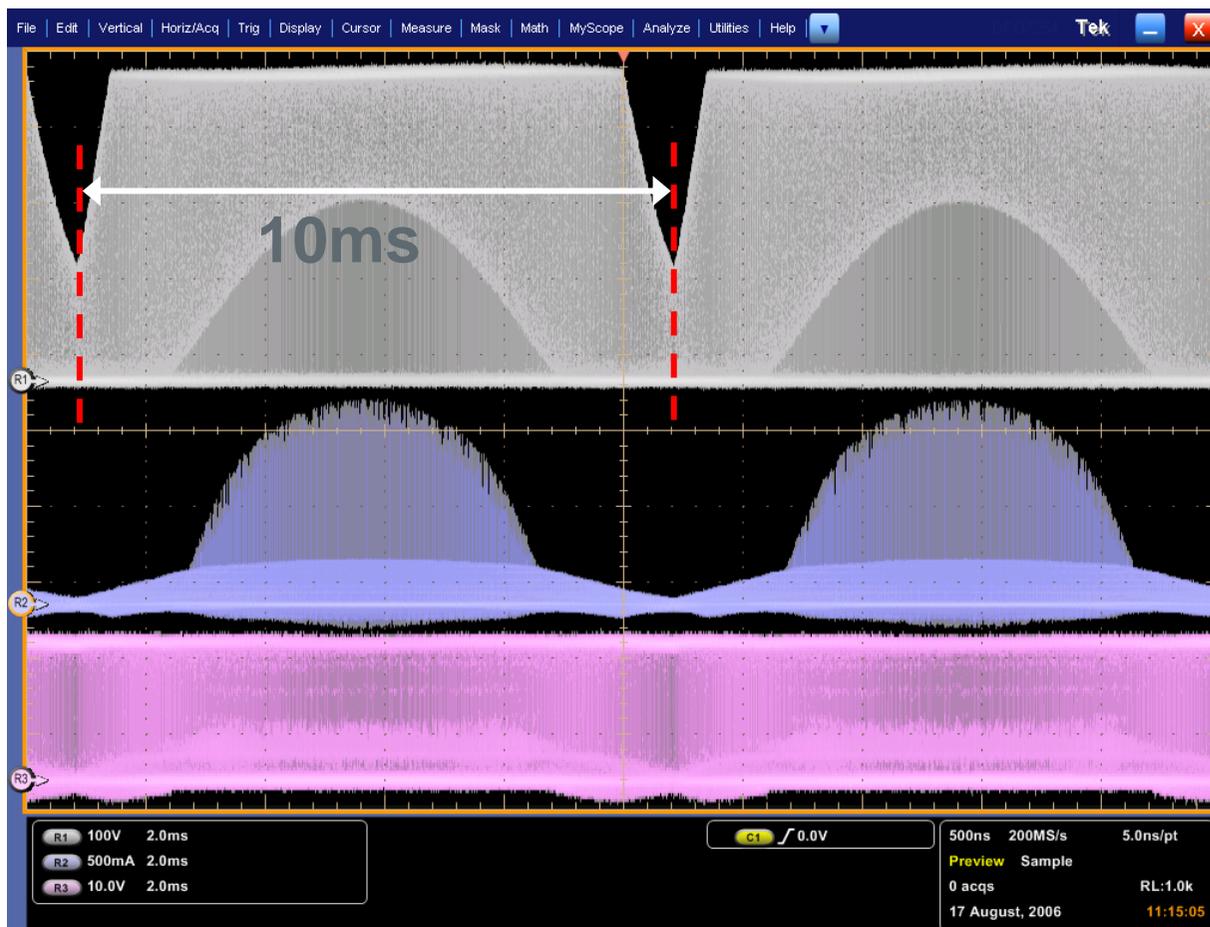
2. 測定上の課題と解決方法 プローブ・デスキューの重要性

- 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



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



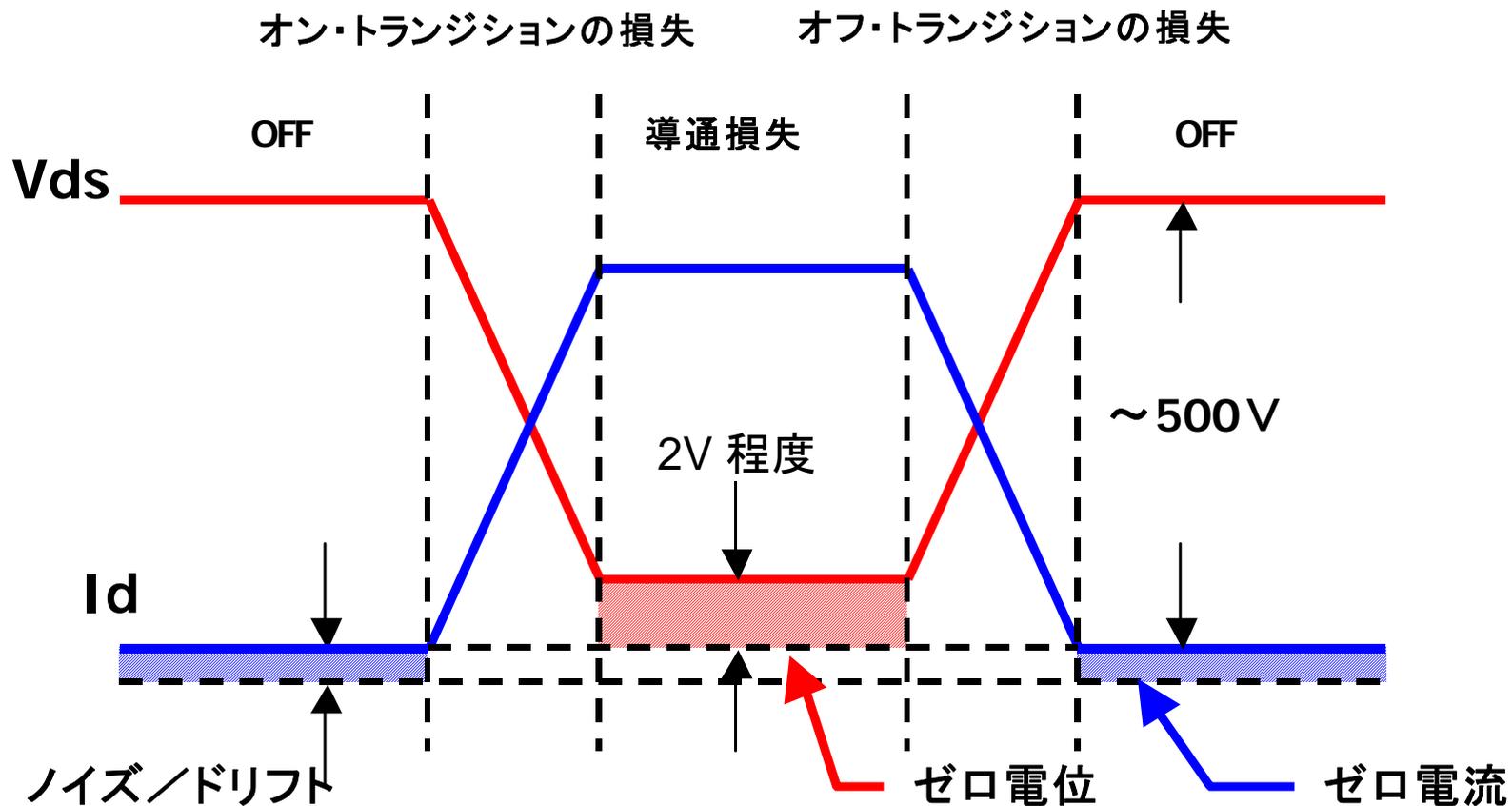
V_{ds}

I_d

V_g

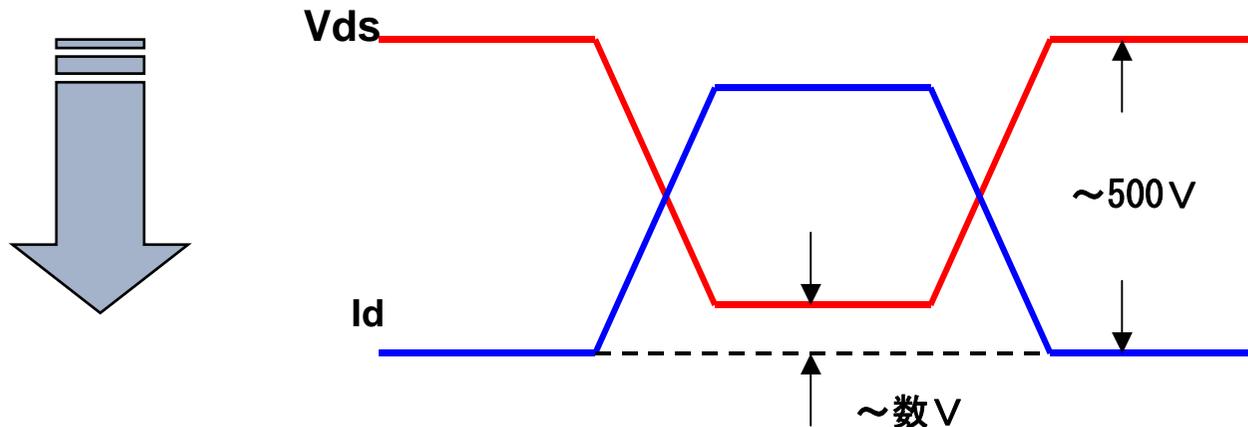
オシロスコープによる測定の課題

- 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(1)

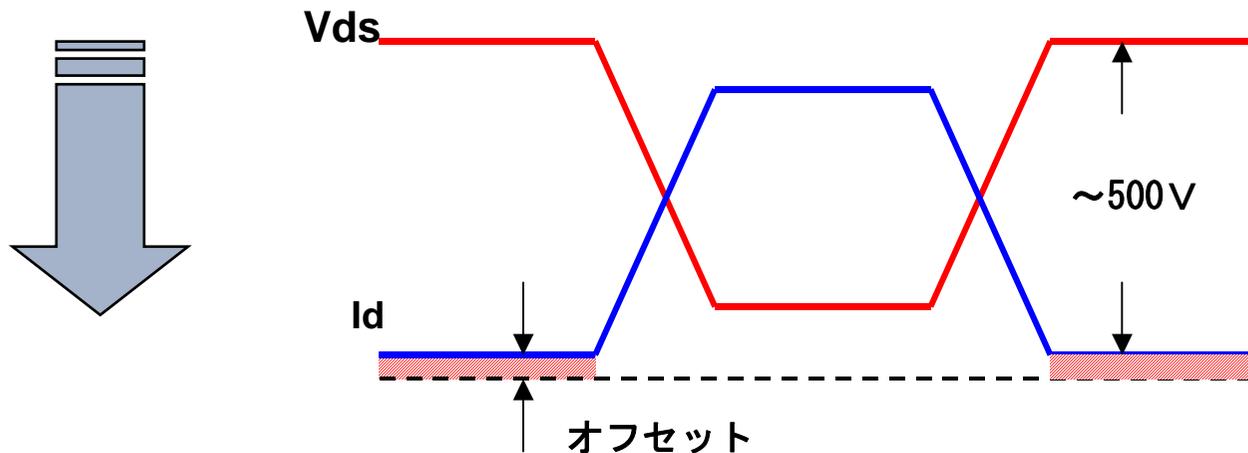
- スイッチング・ロスとオン・ロスの同時測定
 - オシロスコープ：8ビット(256分解能)
 - 0～500V：約2V分解能



- 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

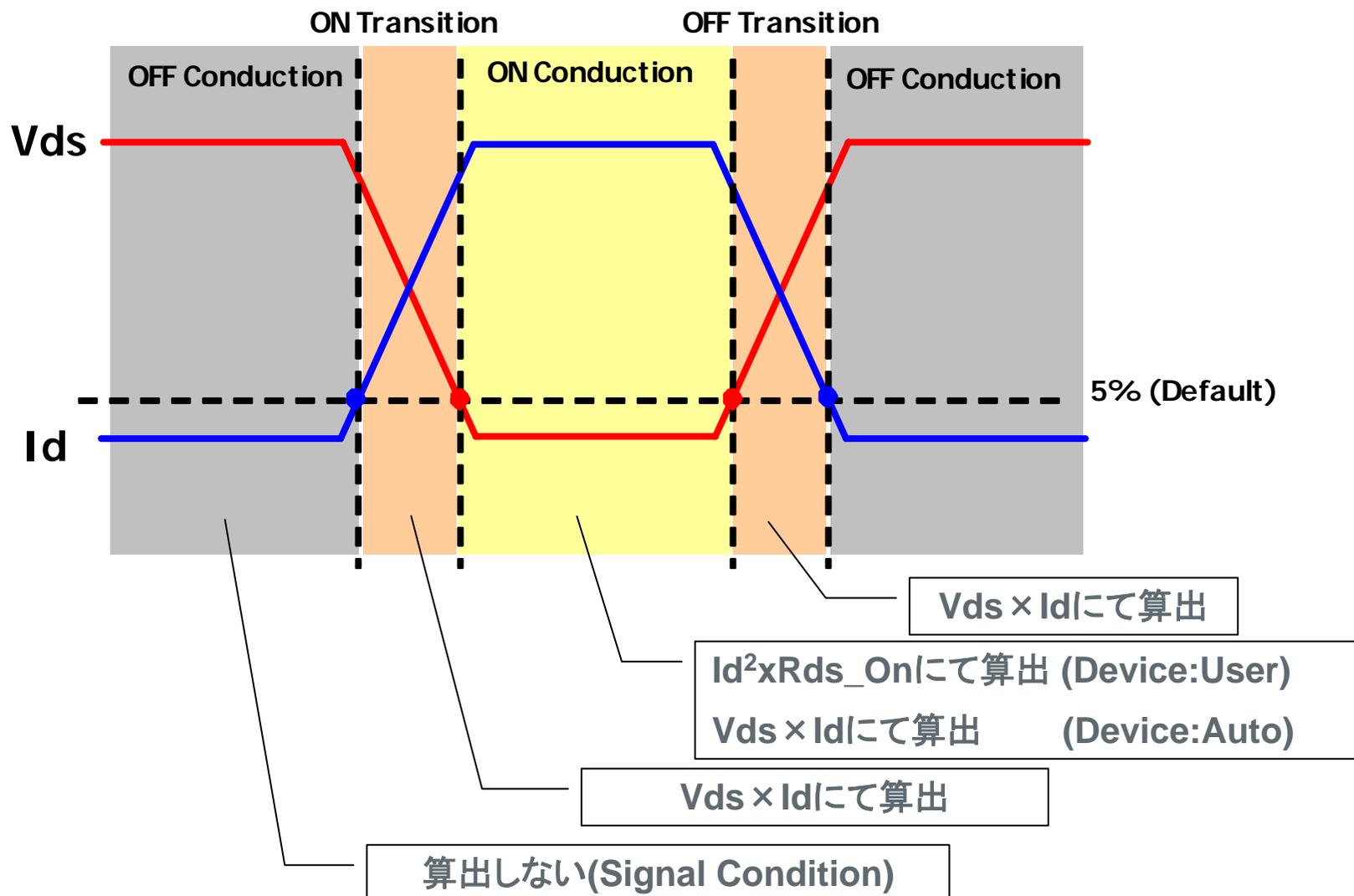
オシロスコープによる測定の課題解決法(2)

- オフセットによる誤差の発生
 - 電流プローブの残留オフセット
 - Off期間でも見かけ上のロスが発生



- Off期間の損失をゼロとみなす

オシロスコープによる測定の課題解決法

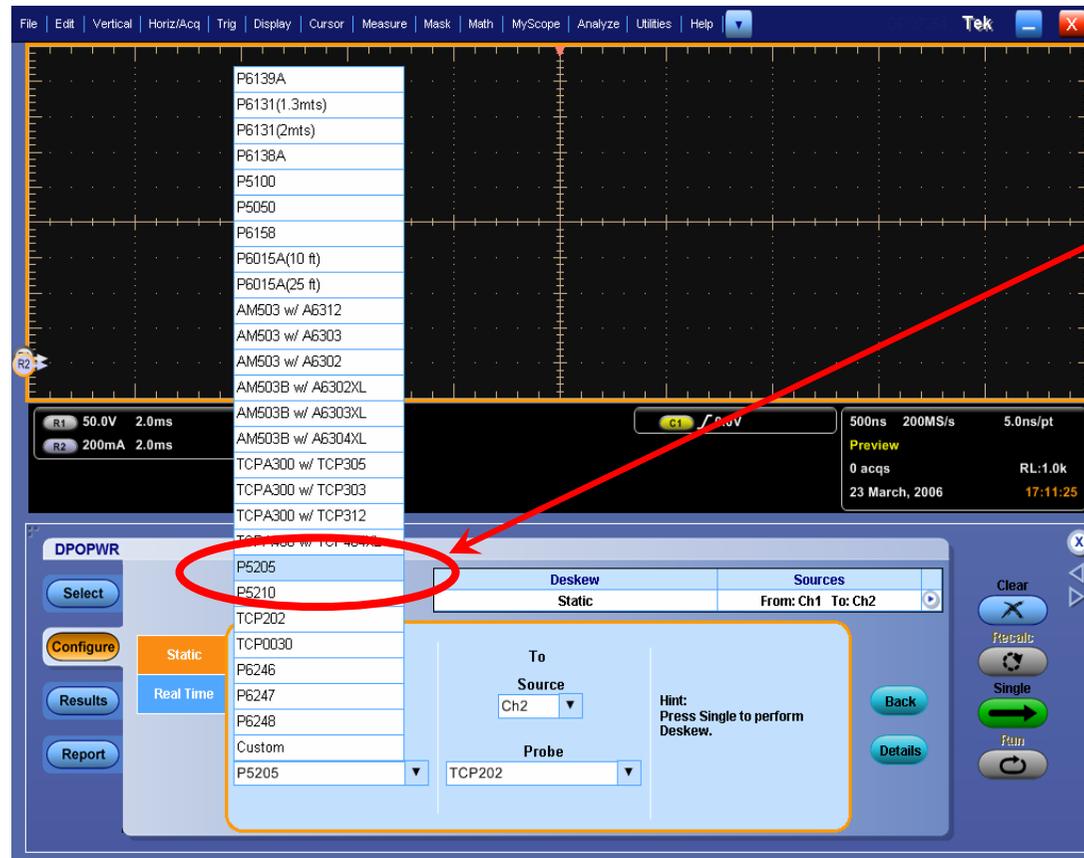


3. パワー解析ソフトウェアによる測定例 パワー解析ソフトウェア DPOPOWER

- DPO7000、DPO/DSA70000B、MSO70000の各シリーズ上で動作
- 差動プローブ、電流プローブをオープン・チョイス
- 豊富な機能、高速解析、ロング・メモリ連携、簡単な操作
 - 自動デスクュー
 - スイッチング損失
 - コア損失、インダクタンス、B-H解析(透磁率、最大/残留磁束密度)
 - 安全動作領域(作成編集機能あり)、di/dt、dv/dt、ON抵抗
 - 変調解析
 - リップル、ライン品質、ターンオン時間
 - レポート作成機能

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



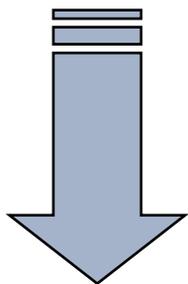
使用プローブを選択



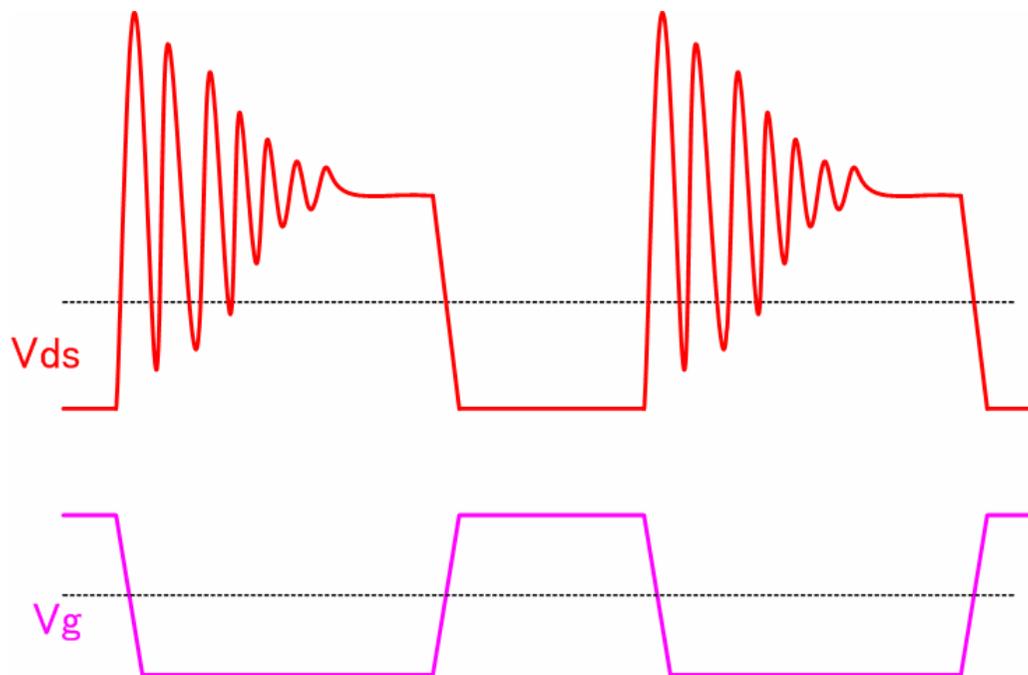
Deskew Fixture
(067-1478-00)

エッジ検出の問題

- エッジ検出
 - ドレイン-ソース間電圧のリングング



- ゲート信号で検出



測定条件 (Type) の設定 (DPOPOPWR)

- 測定チャンネル、測定項目に応じた条件設定
 - 例: Active PFC回路電源のスイッチング損失測定

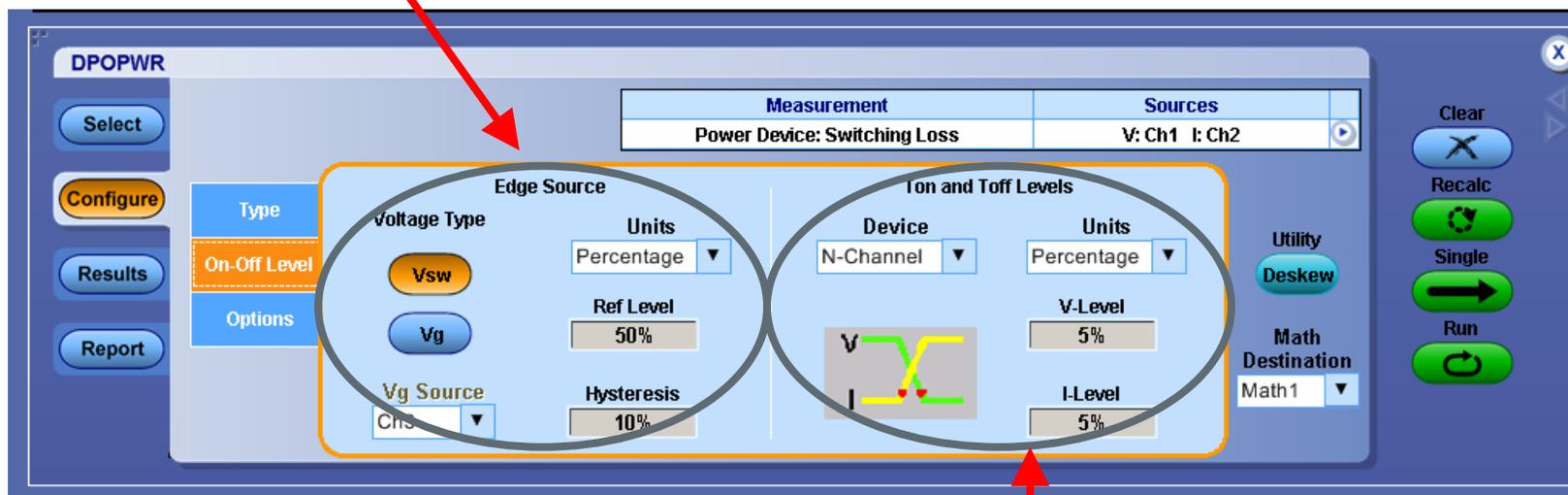
カーソル・ゲート指定 測定チャンネル設定

ON Loss測定時の測定手法の選択

測定条件 (Ref Level) の設定 (DPOPOPWR)

- リファレンス・レベルの設定

スイッチング・エッジの検出



リファレンス・レベルの設定

測定条件 (Options) の設定 (DPOPOPWR)

- フィルタ等の設定
- 条件設定終了後、Runボタンをクリックし測定開始

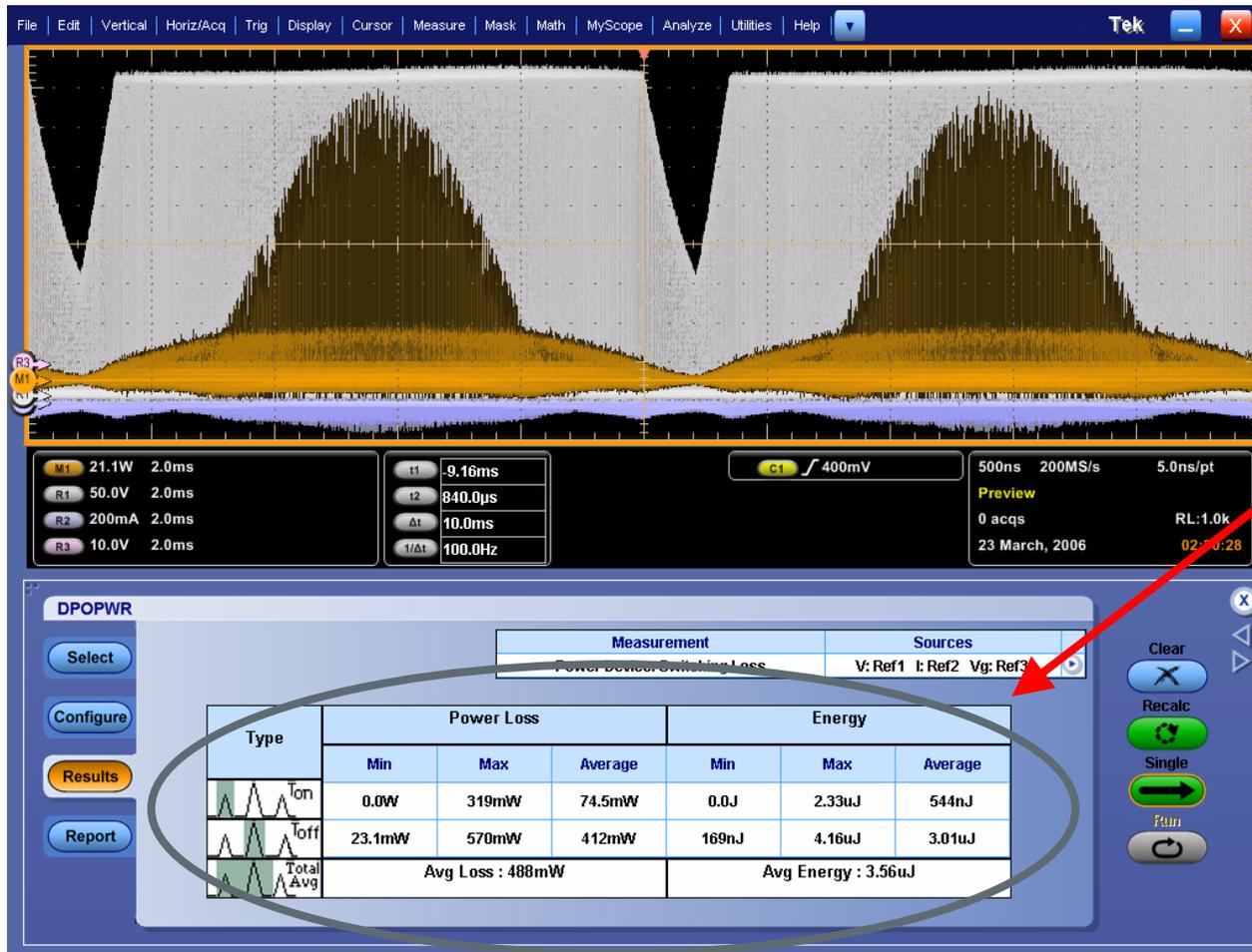
Signal Condition:
Makes switch current zero after switch OFF to next switch ON.

Filter Current:
Select this option if switch current has ringing at the low levels during switch ON.

Switch ON:
Select this option to change the default value for the start of SwitchON. The default value is taken as 5% of max of Vg or 1.5V of Vg, whichever is earlier in time.

スイッチング損失の評価 (DPOPOPWR)

- Turn On / Turn Off / Total Avgの自動計測



損失計測結果

ピーク損失の解析、検索 (DPOPOPWR)

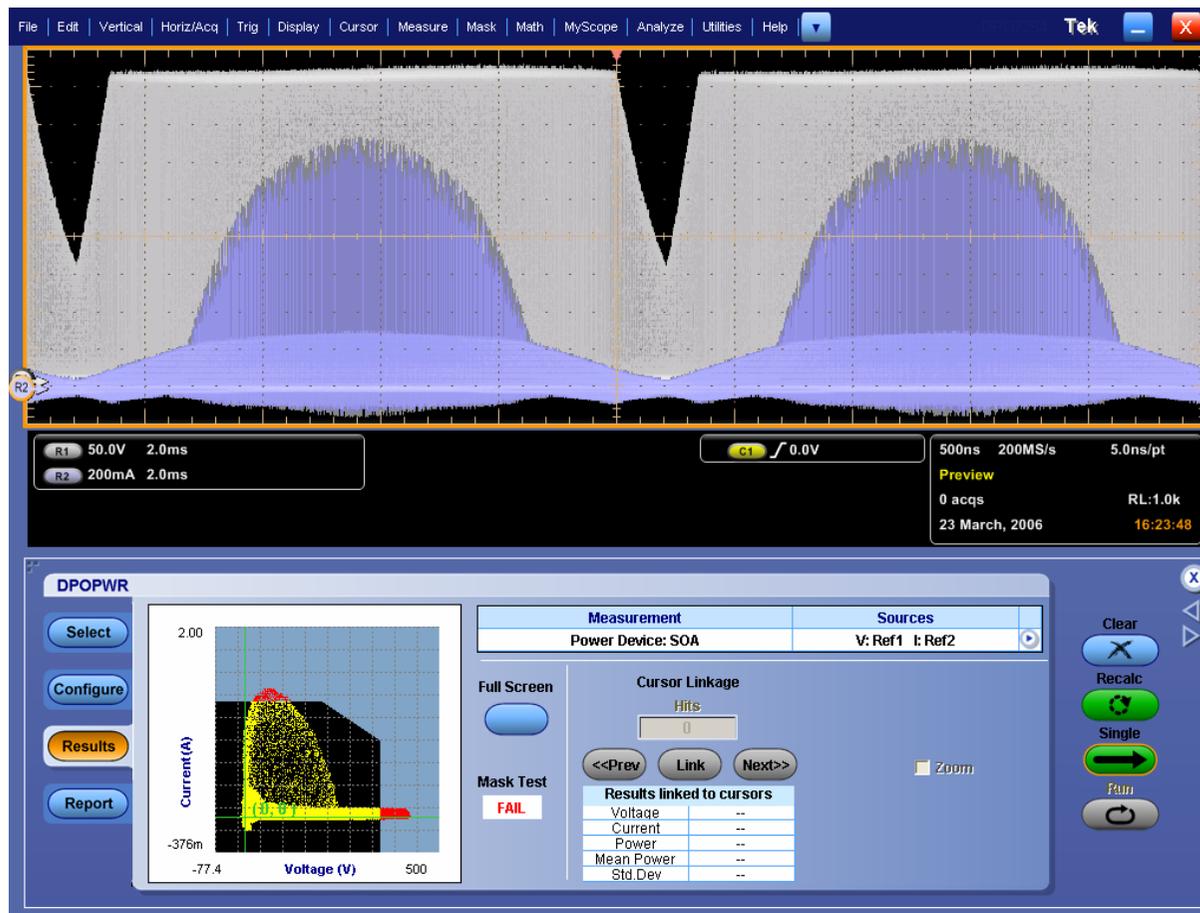
- メモリ上のピーク損失を自動検索
- 波形相関機能とズーム表示



ピーク損失表示

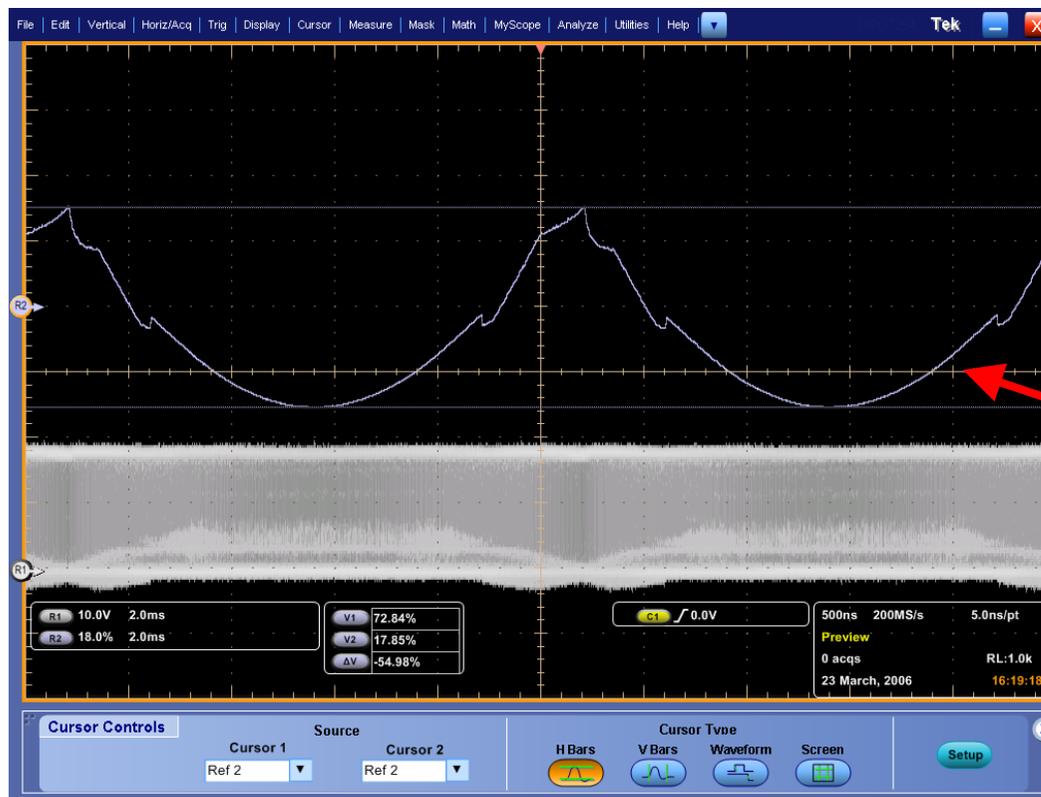
安全動作領域 (SOA) の評価 (DPOPOPWR)

- Vds、IdをXY表示
- SOAマスク・テスト



スイッチング制御の評価 (DPOPOPWR)

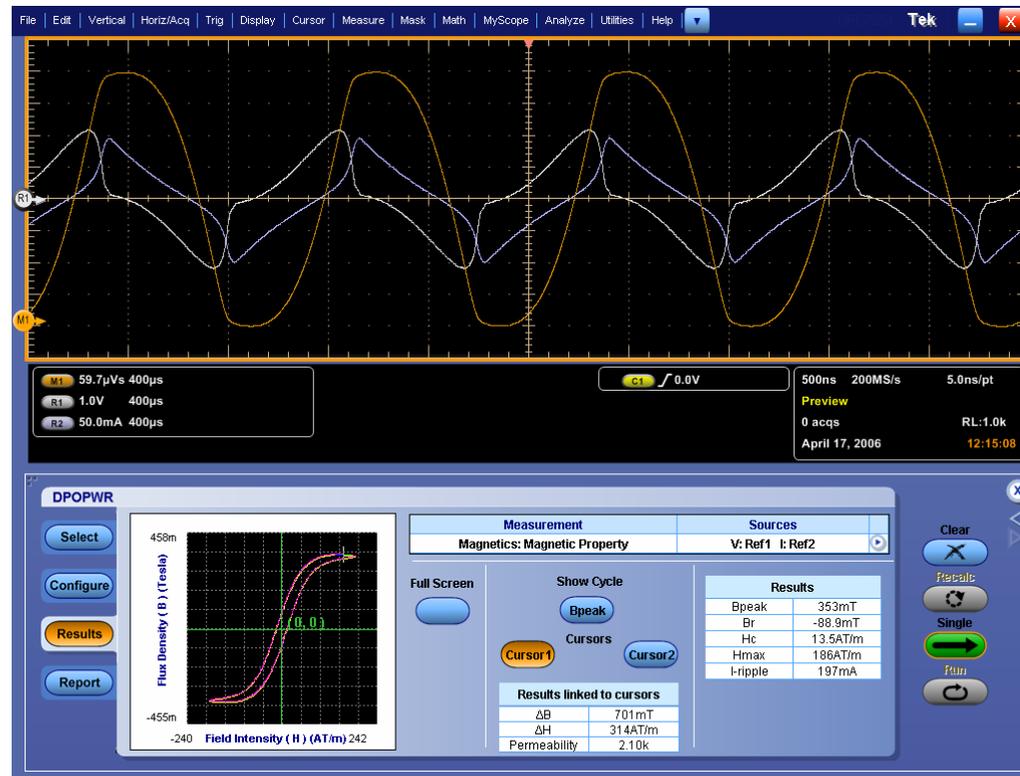
- PWM/PFM変調の時間変化を解析
- パルス幅、デューティ、ピリオド、周波数



デューティ比の
時間変化

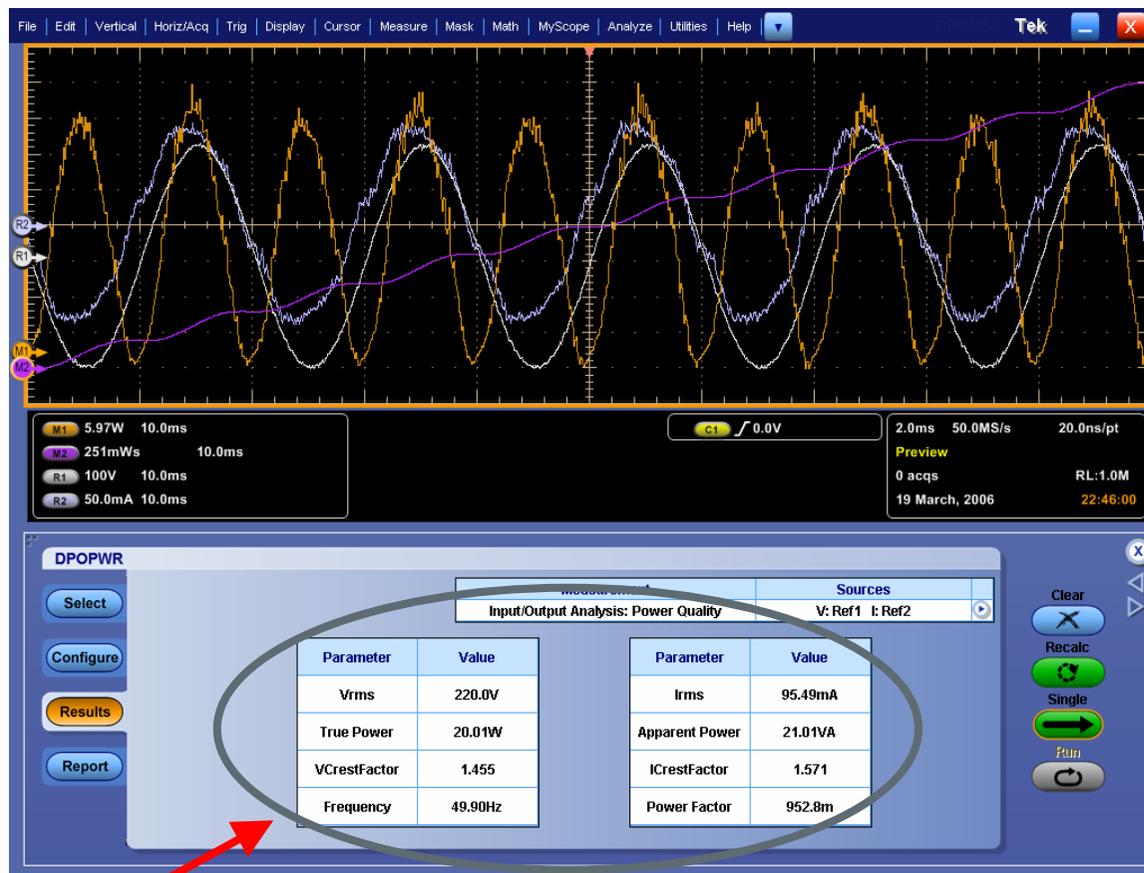
磁気部品のB-H解析 (DPOPWR)

- B-Hヒステリシス曲線の表示、解析
- 磁気パラメータ測定 (透磁率、残留/最大磁束密度など)
- コア損失
- インダクタンス値



ライン電源品質の評価(DPOPWR)

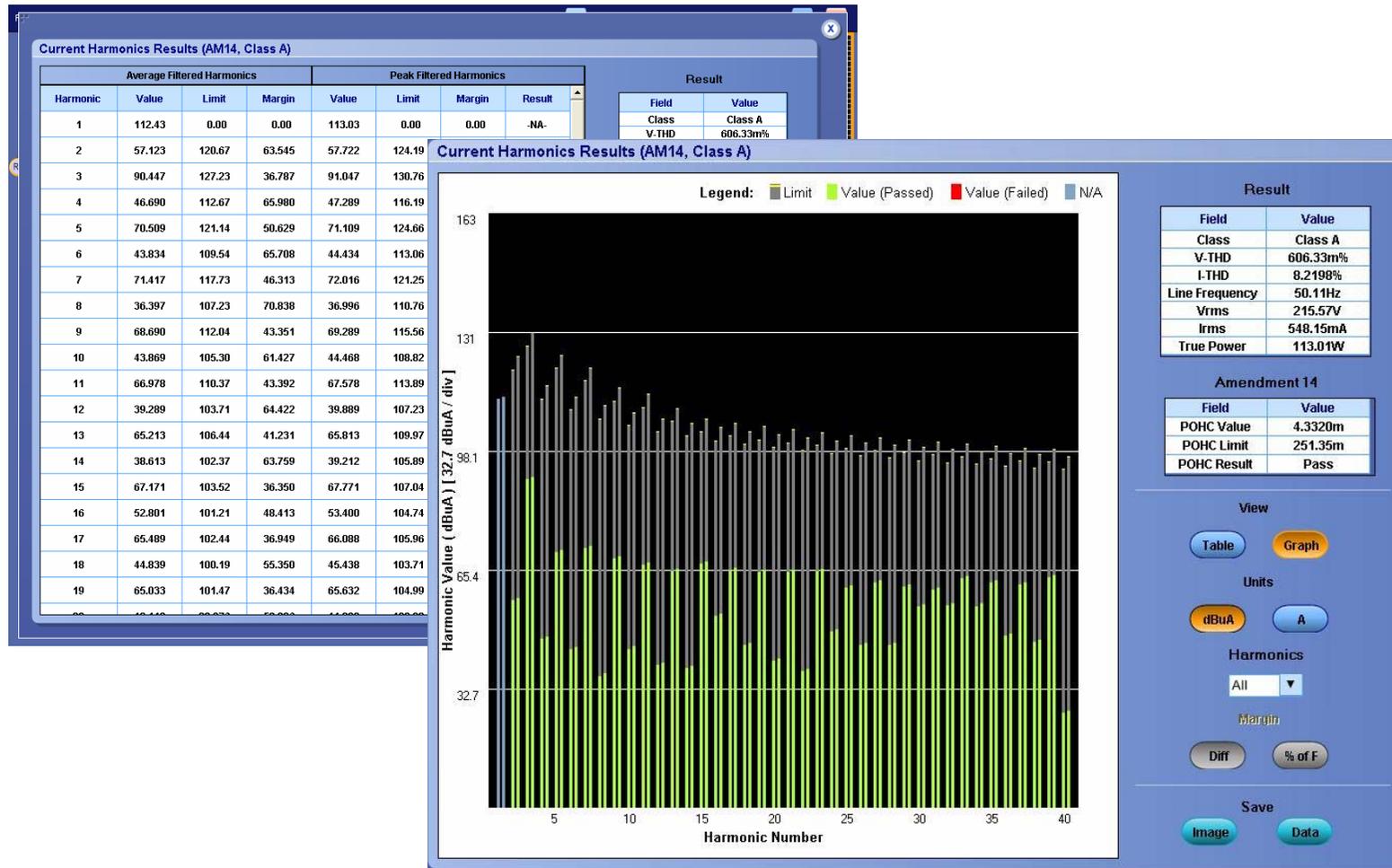
- 実効電力、皮相電力、力率などを自動計測



電源品質計測結果

電流高調波の評価 (DPOPWR)

- EN61000-3-2、Amd14、MIL1399規格に対応



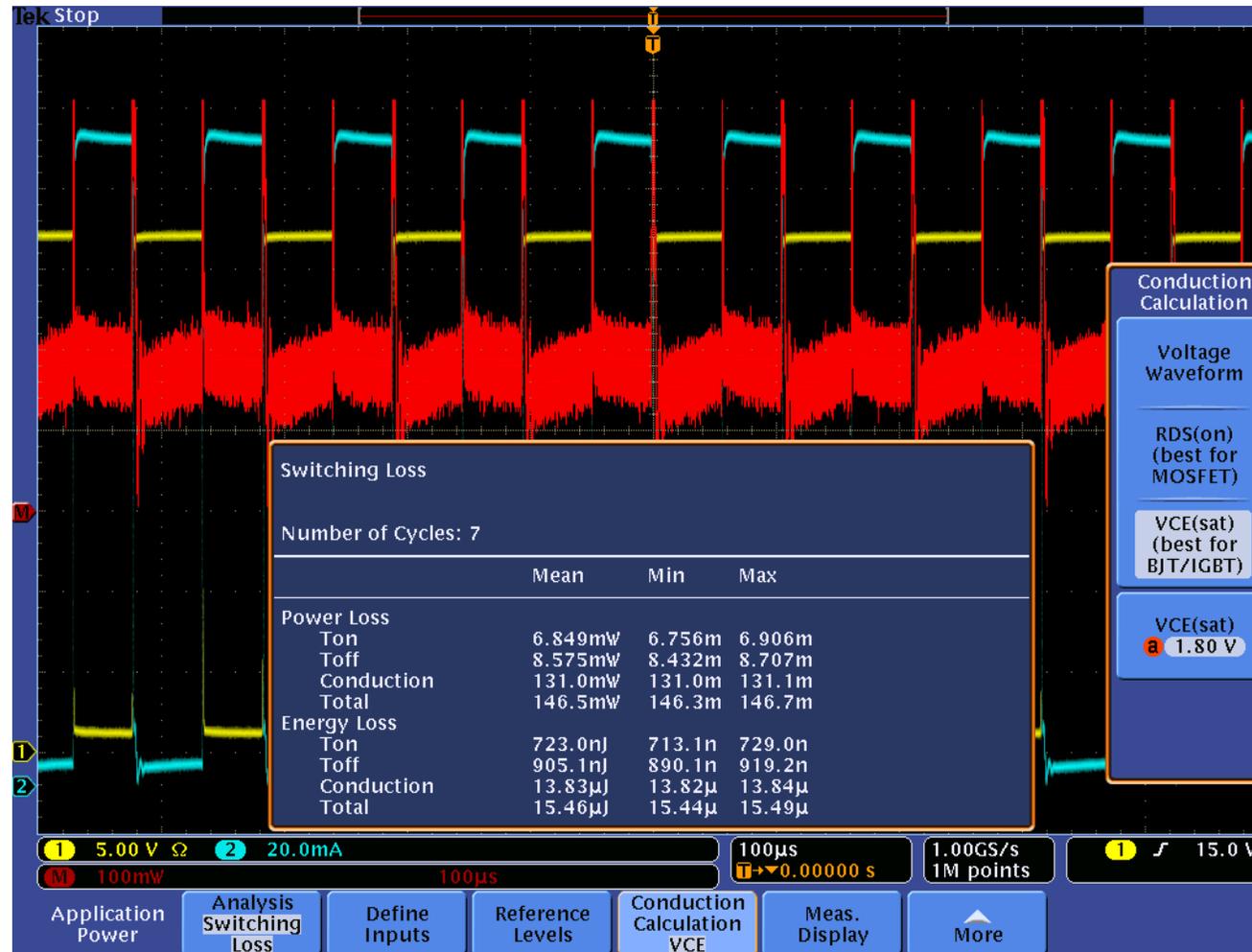


その他の機能(DPOPWR)

- ダイナミックON抵抗測定
- リップル測定
 - ライン周波数成分
 - スイッチング周波数成分
- スペクトラム解析
- レポート作成

参考：DPO/MSO4000シリーズによる測定例

■ DPO4PWRによるスイッチング・ロスの自動測定



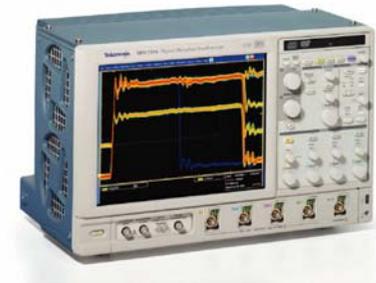
4. 適切な測定器の選択

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
- 豊富なアキュジションおよびトリガ機能
 - ハイレゾ、ピーク・ディテクト、アベレージ・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

推奨オシロスコープ

- **DPO7000シリーズ + DPOPWR**
 - 周波数帯域: 3.5GHz、2.5GHz、1GHz、500MHz
 - 最高サンプル・レート: 2ch同時20GS/s、10GS/s、5GS/s
4ch同時10GS/s、5GS/s、2.5GS/s
- **DPO/DSA70000Bシリーズ、MSO70000シリーズ + DPOPWR**
 - 周波数帯域: 20GHz、16GHz、12.5GHz、8GHz、6GHz、4GHz
 - 最高サンプル・レート: 4ch同時50GS/s、25GS/s
- **DPO/MSO4000シリーズ + DPO4PWR**
 - 周波数帯域: 1GHz、500MHz、350MHz
 - 最高サンプル・レート: 4ch同時5GS/s、2.5GS/s
- **DPO/MSO3000シリーズ + DPO3PWR**
 - 周波数帯域: 500MHz、300MHz、100MHz
 - 最高サンプル・レート: 4ch同時2.5GS/s



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

- DPO7000/4000シリーズ・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：120 MHz

— TCP0150型

- DPO7000/4000シリーズ・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：20 MHz



スイッチング電源評価用電流プローブ

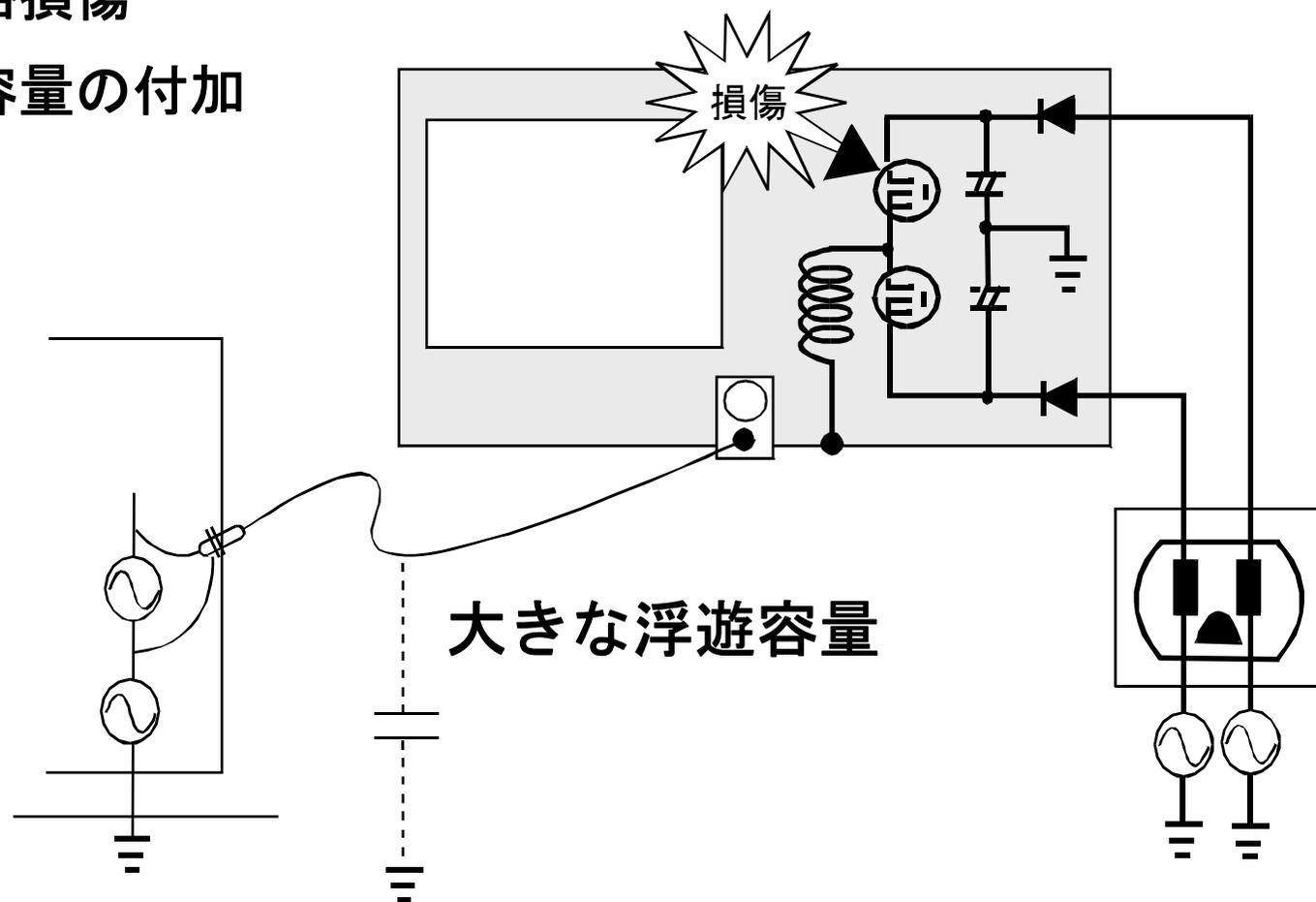
- TCPシリーズ・電流プローブ
 - TCP202型
 - 周波数帯域: DC~50MHz
 - 最大連続電流: 15A (DC+peakAC)
 - TEKPROBE®インタフェースにてアンプ不要
 - TCP300/400シリーズ
 - 周波数帯域: DC~100MHz (TCP312型)
 - 周波数帯域: DC~50MHz (TCP305型)
 - 周波数帯域: DC~15MHz (TCP303型)
 - 周波数帯域: DC~2MHz (TCP404XL型)
 - 最大連続電流: 30A (DC+peakAC) (TCP312型)
 - 最大連続電流: 50A (DC+peakAC) (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。

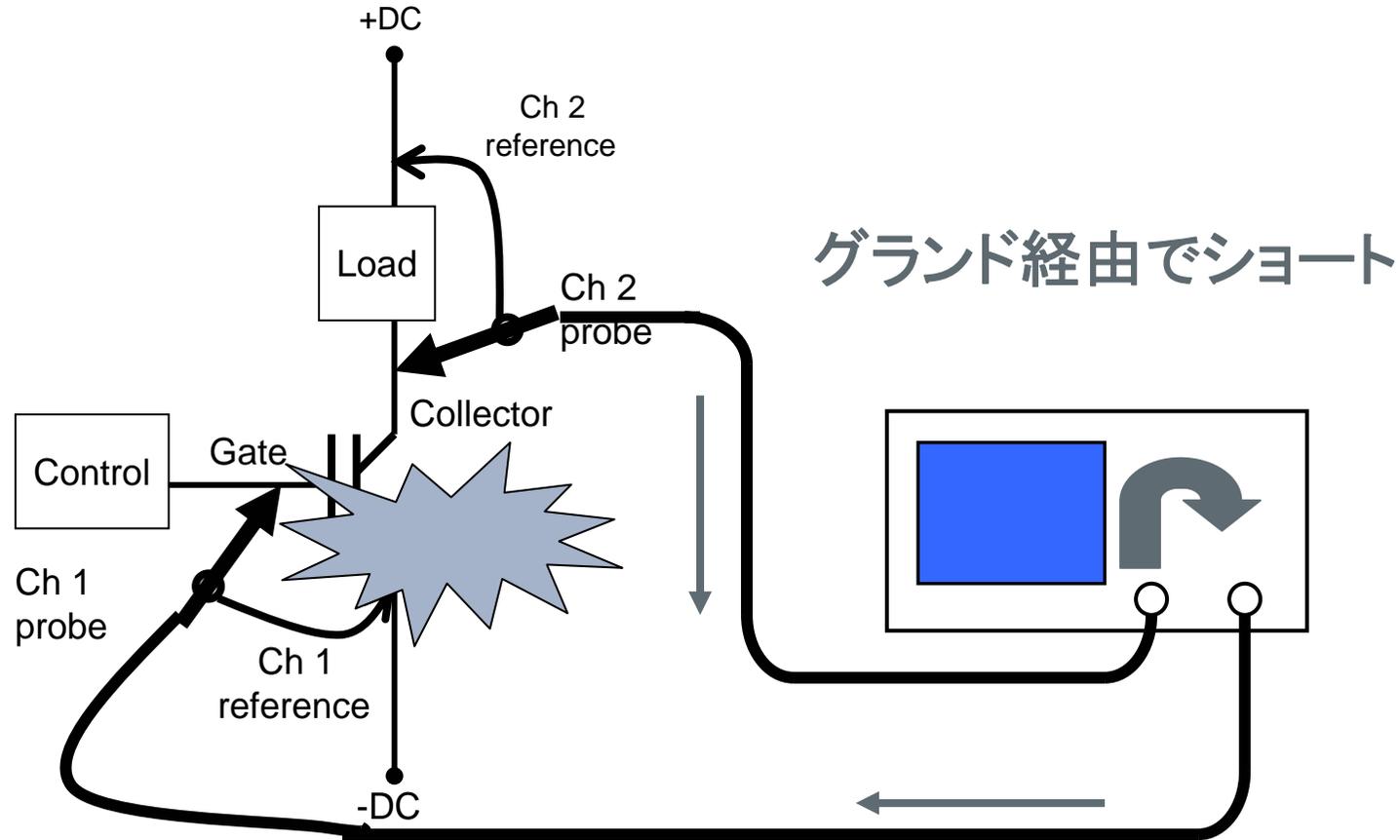
お勧めできないフローティング測定

- 感電
- 電源回路損傷
- 対地間容量の付加



フローティング測定の実必要性

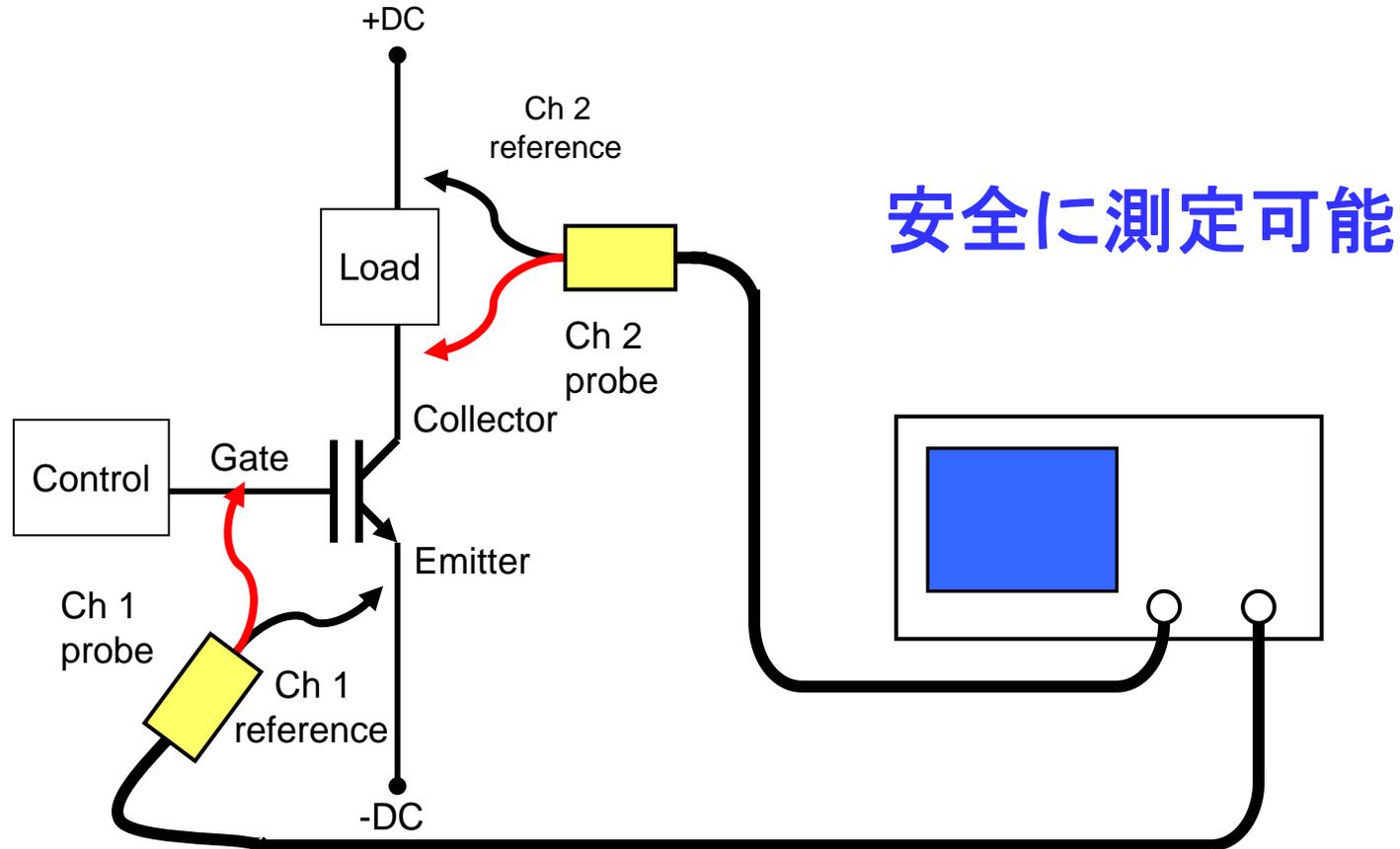
- シングルエンド・プローブ測定での問題点



Floating IGBT Gate and Collector Measurements

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

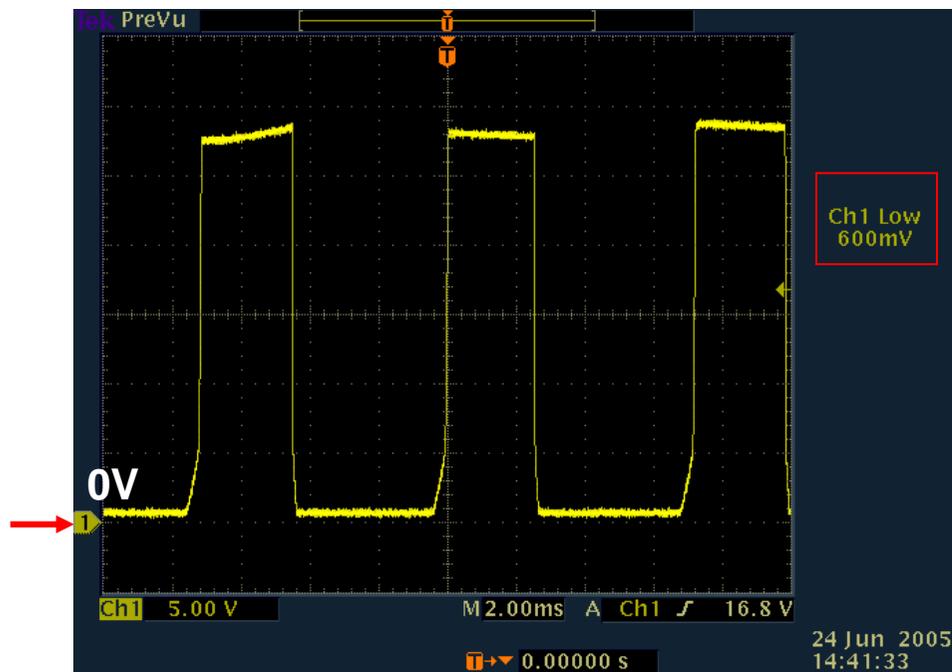
- P5200シリーズ・高電圧差動プローブ
 - P5205型
 - 周波数帯域: DC~100MHz / 立上り時間:、<3.5ns(代表値)
 - 最大差動動作電圧: 1300V (DC+peakAC)
 - CMRR: >3000:1 (500VDC)、>300:1 (100MHz)
 - P5210型
 - 周波数帯域: DC~50MHz / 立上り時間:、<7ns(代表値)
 - 最大差動動作電圧: 5600V (DC+peakAC)
 - CMRR: >3000:1 (500VDC)、>300:1 (1MHz)



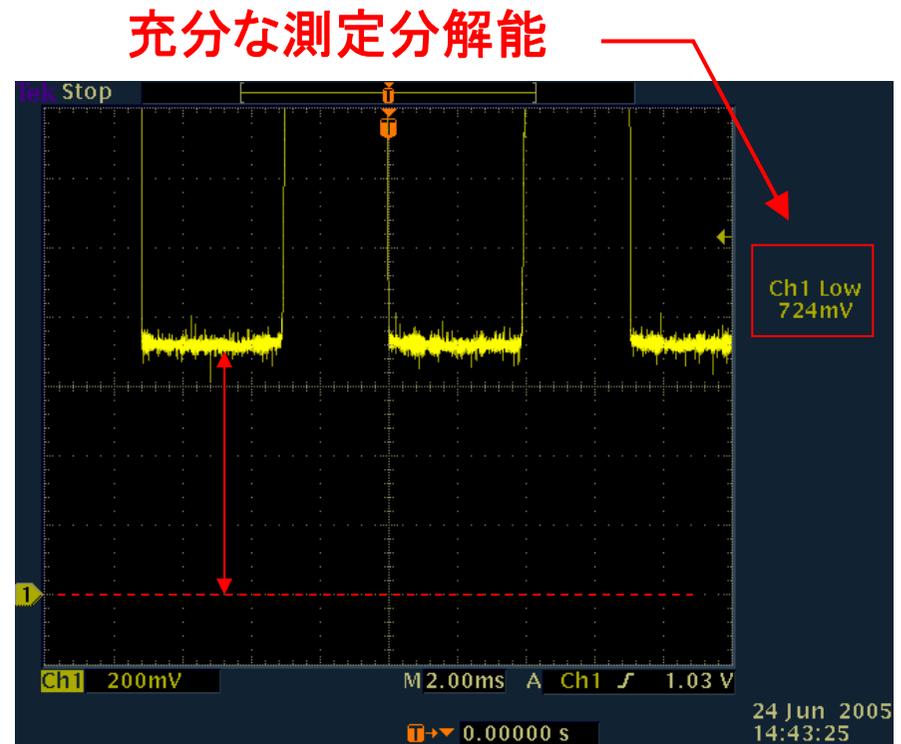
測定前に、0V(DCオフセット)の調整を実行してください。

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



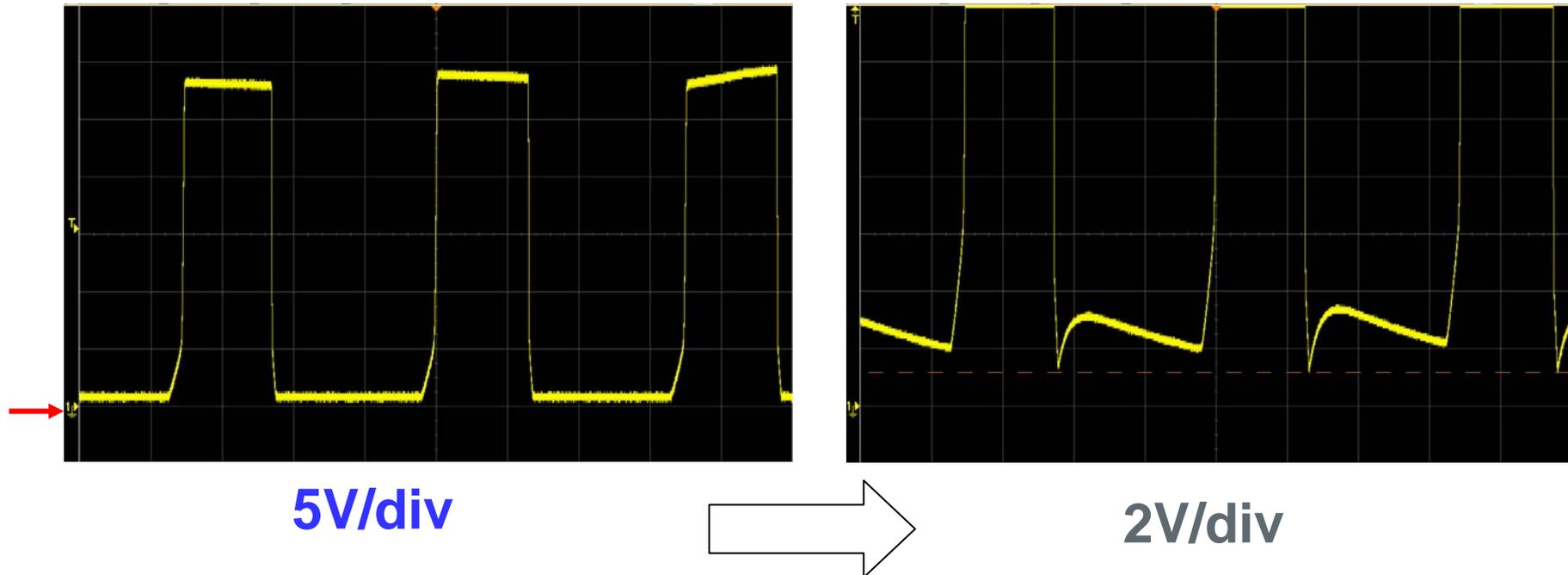
5V/div



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



5. 電流プローブの性能と使いこなし 電流プローブの電流制限

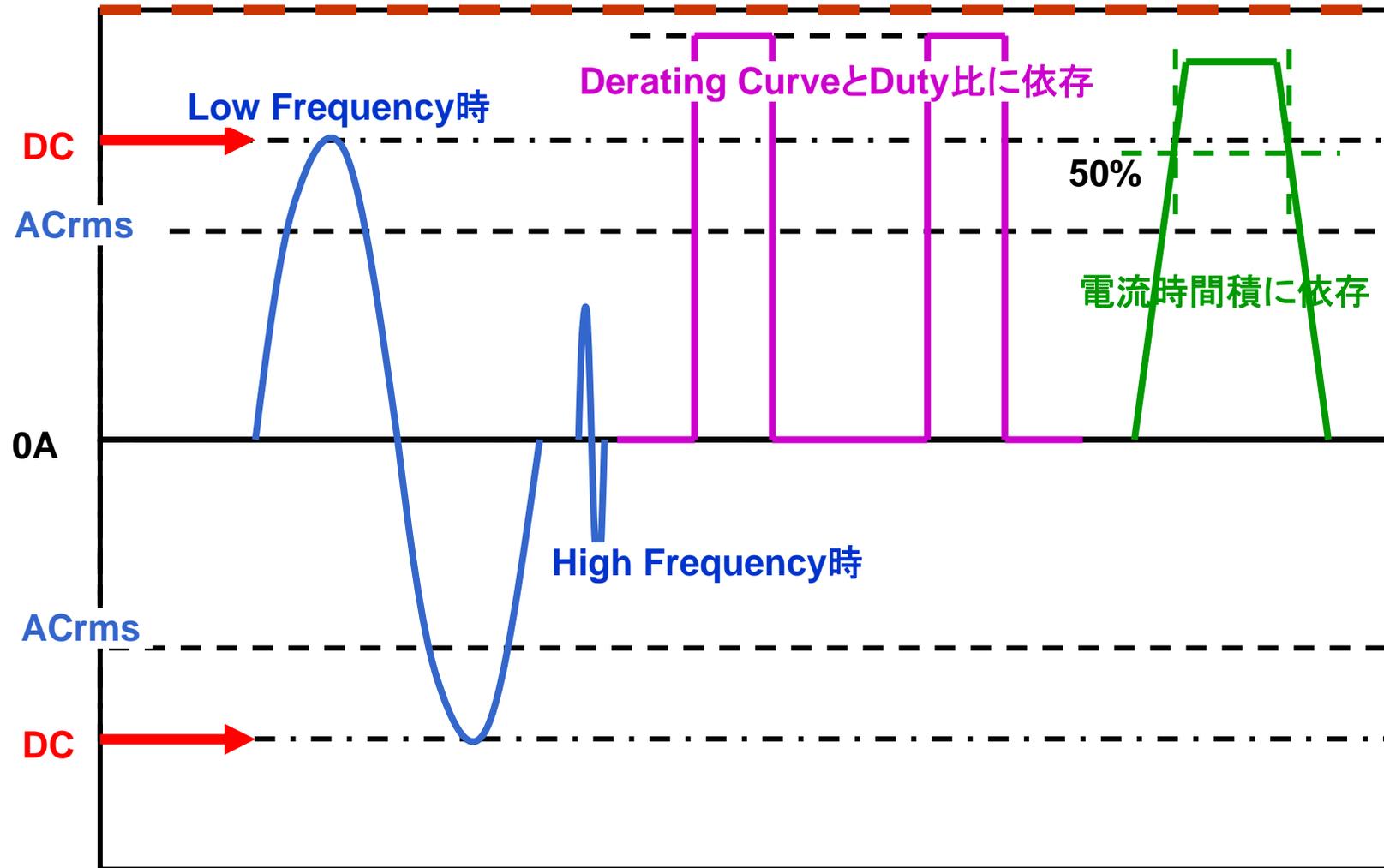
パラメータ	設置プローブ			
	TCP312	TCP305	TCP303	TCP404XL
範囲、公称	1A/V、 10A/V	5A/V、 10A/V	5A/V、 50A/V	1A/mV
最大電流積 (周波数低下については、図 4-2～図 4-5 を参照)	1A/V - 50A* μ s 10A/V - 500A* μ s	5A/V - 500A* μ s 10A/V - NA	5A/V - 3000A* μ s 50A/V - 15000A* μ s	なし
電流転送率	1 V/Amp および 100 mV/Amp	200 mV/Amp および 100 mV/Amp	200 mV/Amp および 20 mV/Amp	1 mV/Amp
設定範囲での最大電流定格				
高電流設定範囲	10A/V の範囲	10A/V の範囲	50A/V の範囲	1A/mV の範囲
DC (連続)	30A	50A	150A	500A
DC (非連続)	該当なし	該当なし	該当なし	750A
RMS (正弦波)	21A	35A	150A	500A
ピーク・パルス	50A	50A	500A	750A

最大電流の制限

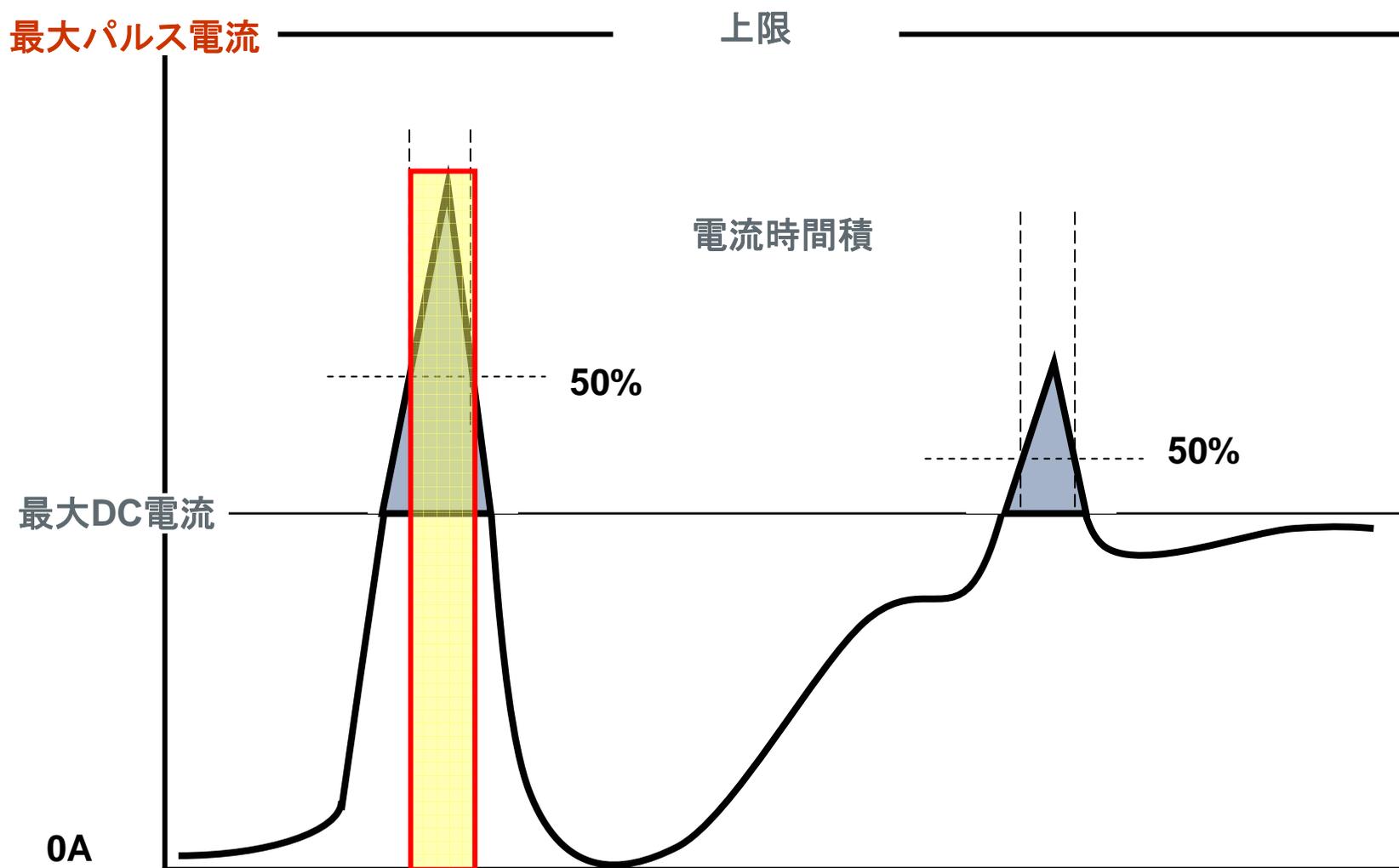
- 最大電流(連続)
 - 直流電流
 - 交流電流
 - サイン波: 周波数に依存 (Derating Curve)
 - パルス波: 周波数とデューティ比に依存
- 最大パルス電流
- 電流時間積

最大電流の制限

最大パルス電流



電流プローブの測定限界(電流時間積)



電流プローブの測定限界 ～ デイレイティング

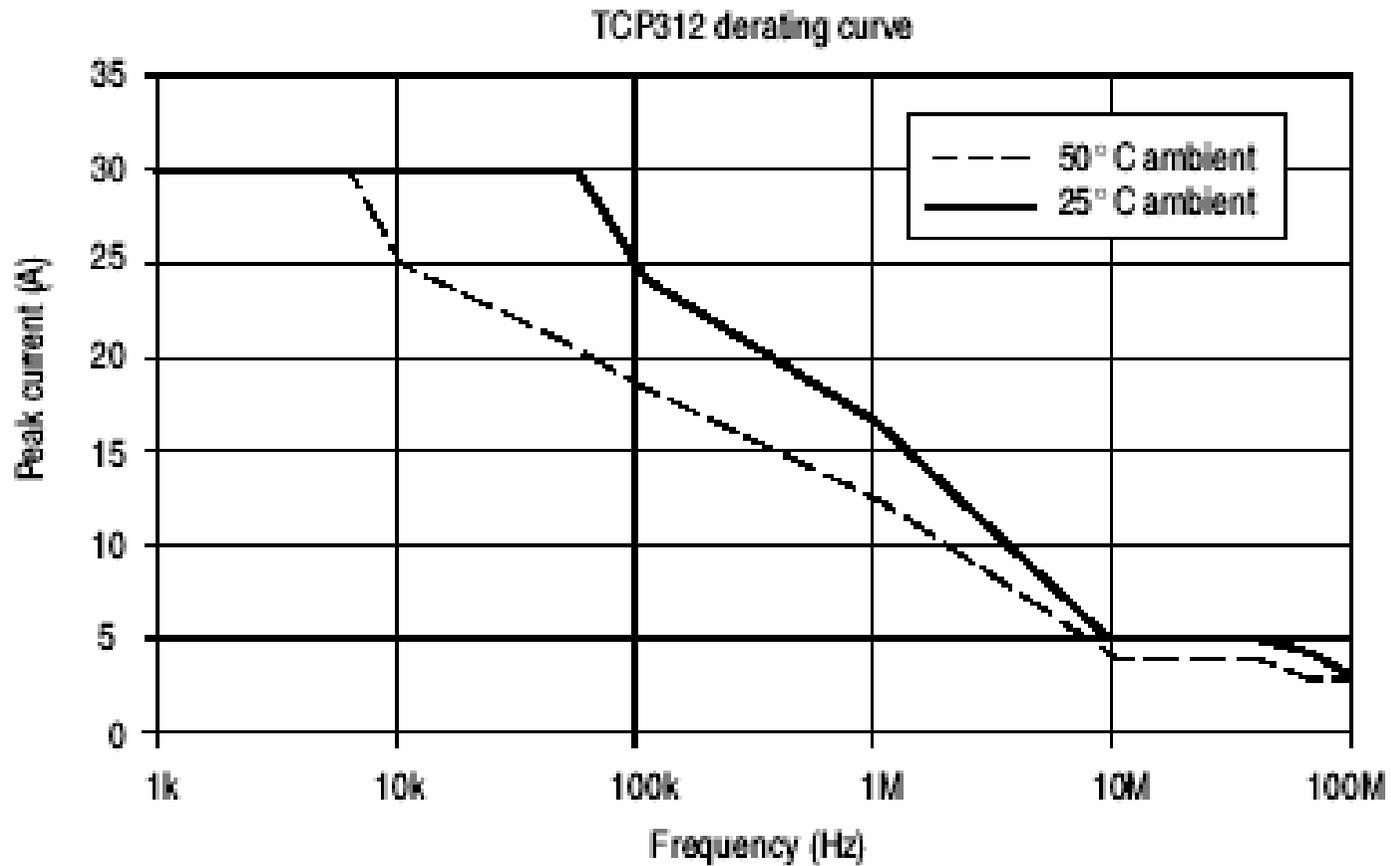
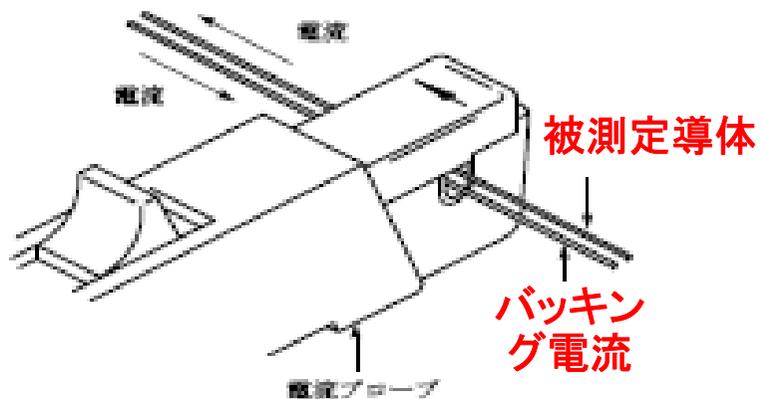


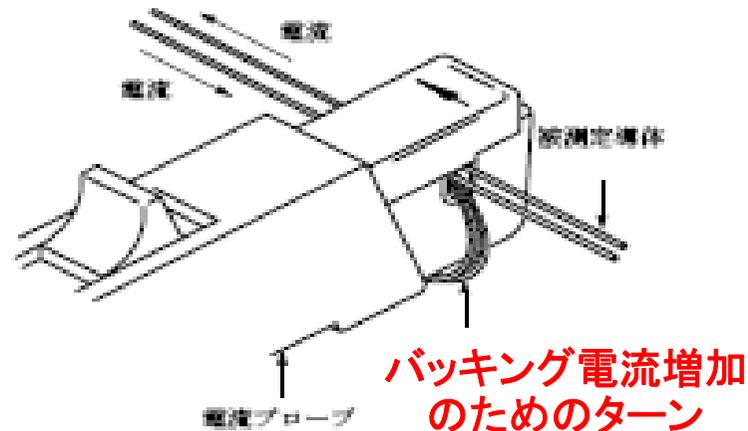
Figure 4-2: Frequency derating - TCP312

応用測定

■ DC範囲の拡大



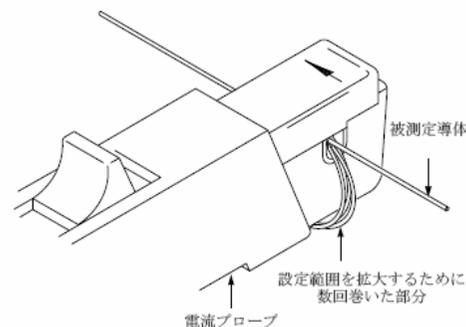
(1) オフセット(バックキング)電流の追加



(2) オフセット電流の拡大

■ 感度の拡大

- Nターンすれば感度はN倍
- 挿入損失と周波数帯域に注意

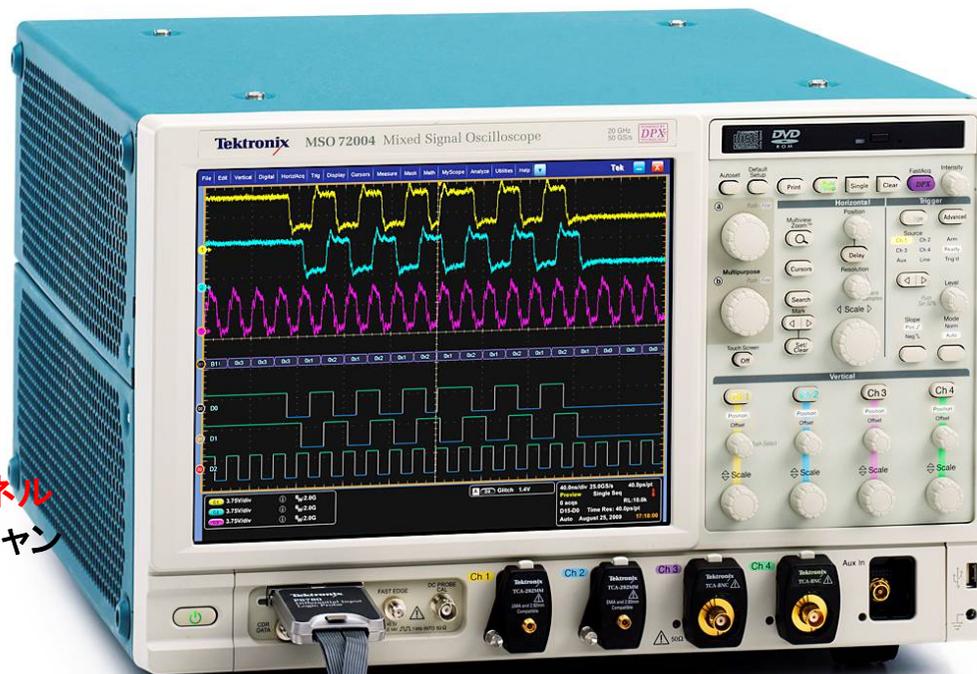


感度を拡大するためのターン

最高峰のMSO

NEW MSO70000シリーズ・ミックスド・シグナル・オシロスコープ

世界最高のアナログ/デジタル性能でシステム謙称、デバッグを強力に支援



■16 デジタル・チャンネル
最高速のアナログ・チャンネルに統合

■イベント・トリガ
発見の難しい現象を検出

■新ロジック・プローブ
低負荷効果で高い信号再現性

■80 ps デジタル・タイミング分解能

■20 ps アナログ・タイミング分解能

■ロング・メモリ
アナログ・デジタル(250M)

iCapture™ 任意デジタル信号のアナログ観測可能

バス・デコード 平行、I2C, SPI シリアルバス

ご出席、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。
日本テクトロニクス株式会社
Copyright Tektronix

October 30, 2009

Tektronix[®]