

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2012

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**
- **電流プローブの使いこなし**

1. スイッチング電源の測定項目

評価に使用される測定器と評価ポイント

下記の全評価項目

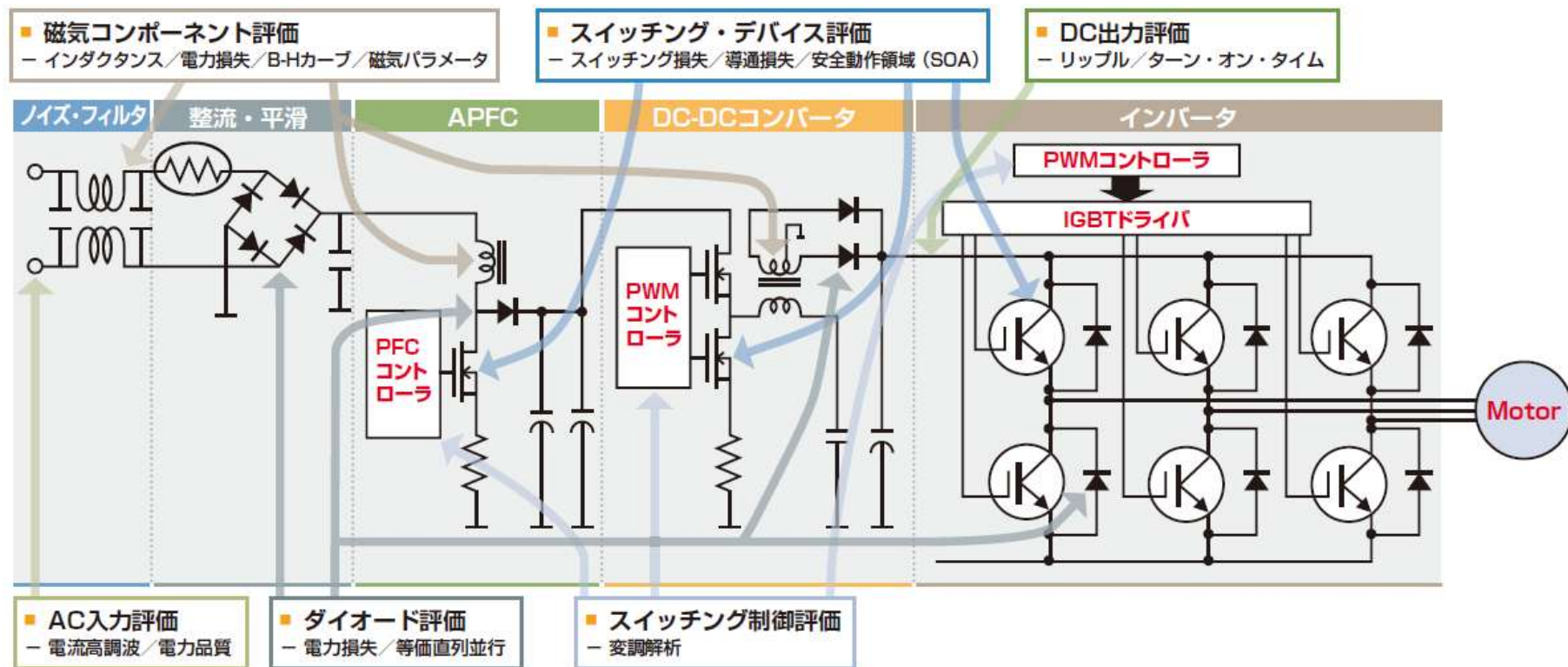


オシロスコープ+パワー解析ソフト

高精度入力/出力電力測定、
電流高調波、電力品質測定



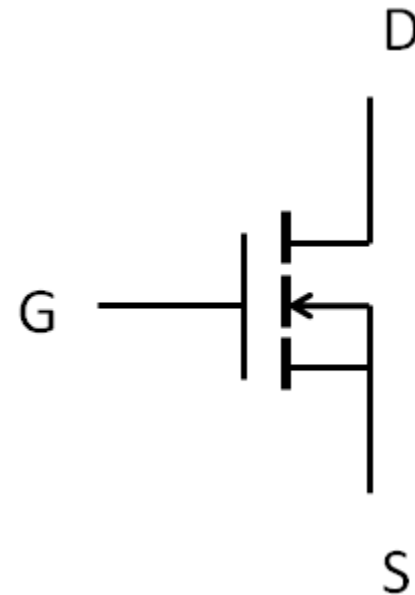
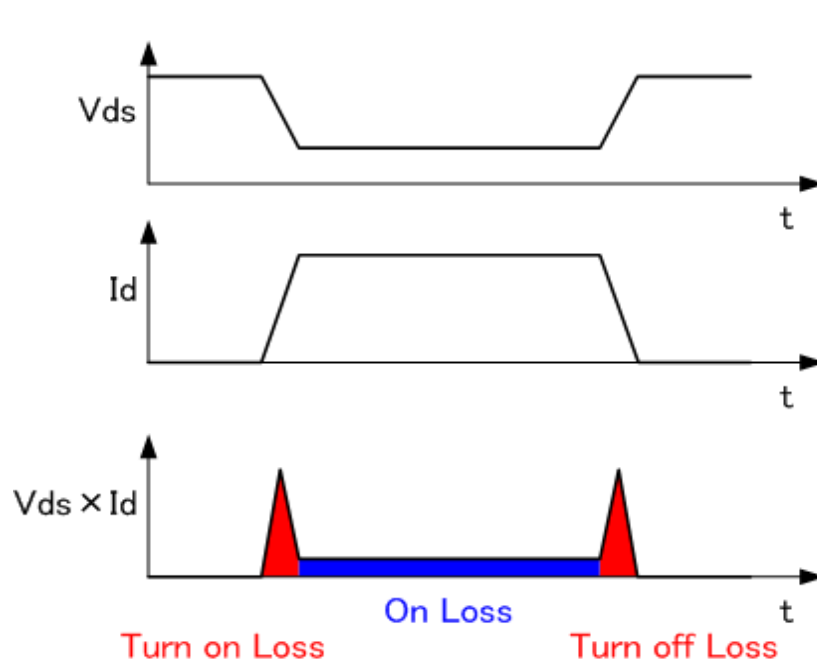
電力計(パワー・アナライザ)
高調波アナライザ



スイッチング・デバイスの評価(1)

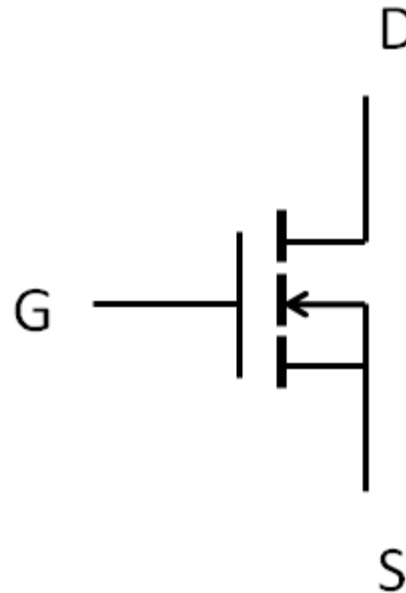
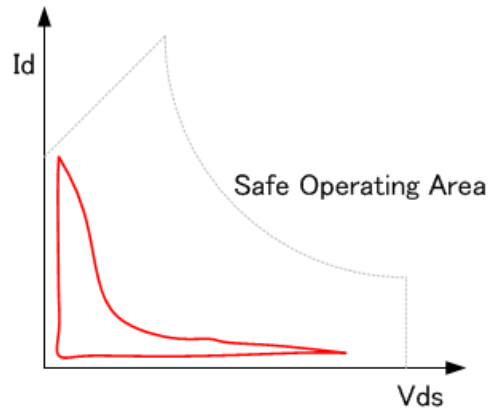
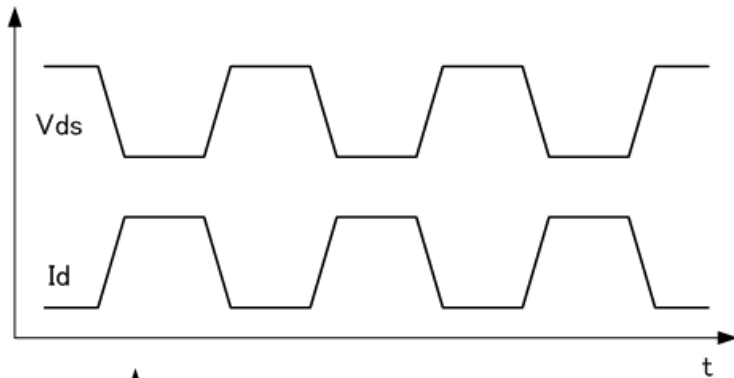
スイッチング損失

- 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



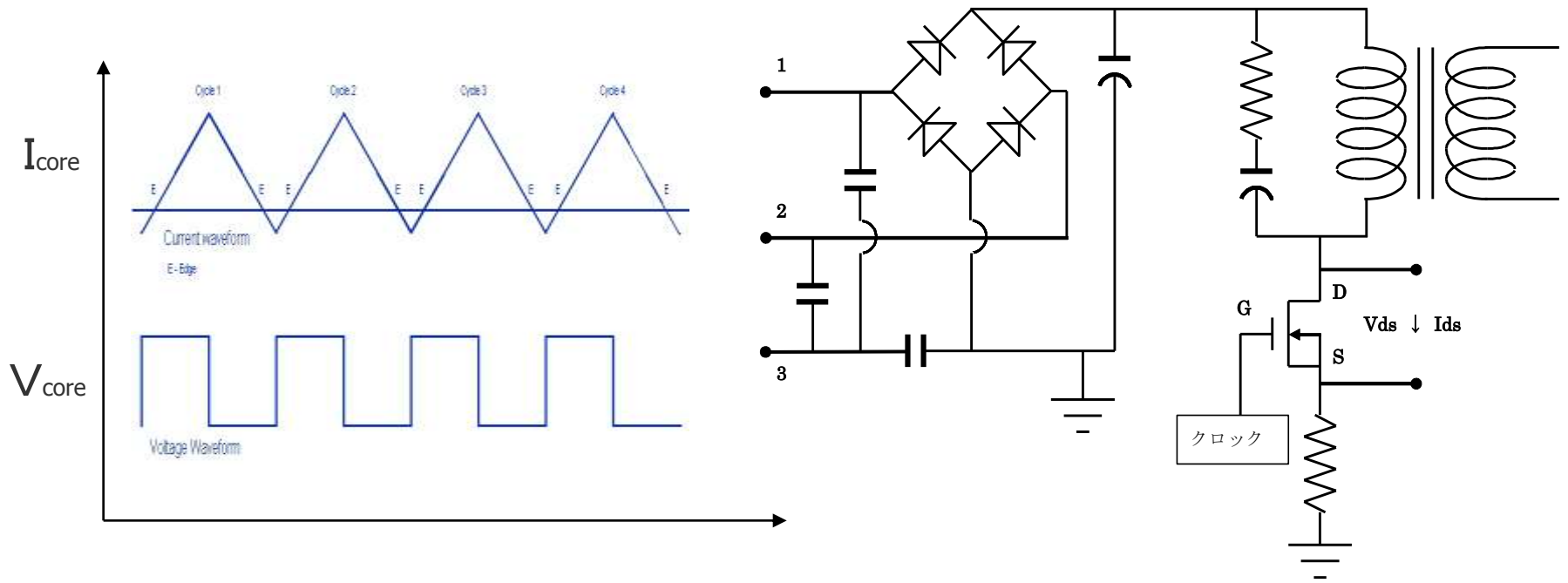
スイッチング・デバイスの評価(2)

- 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

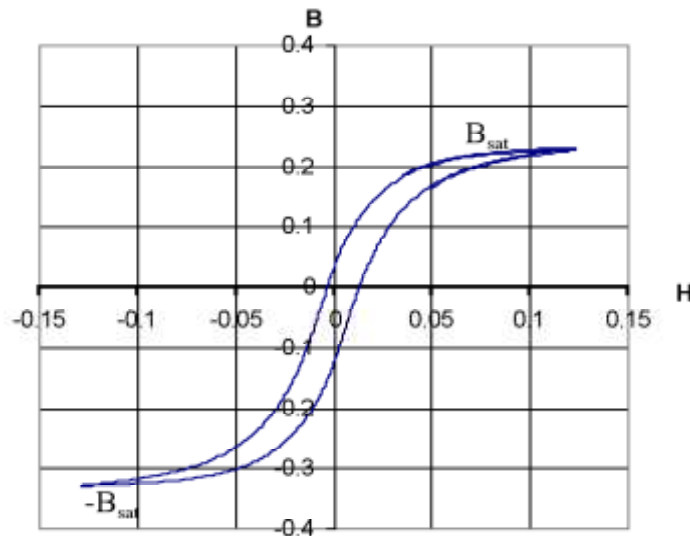


トランス／コアの評価(2)

■ 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) : $B=\mu H$



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

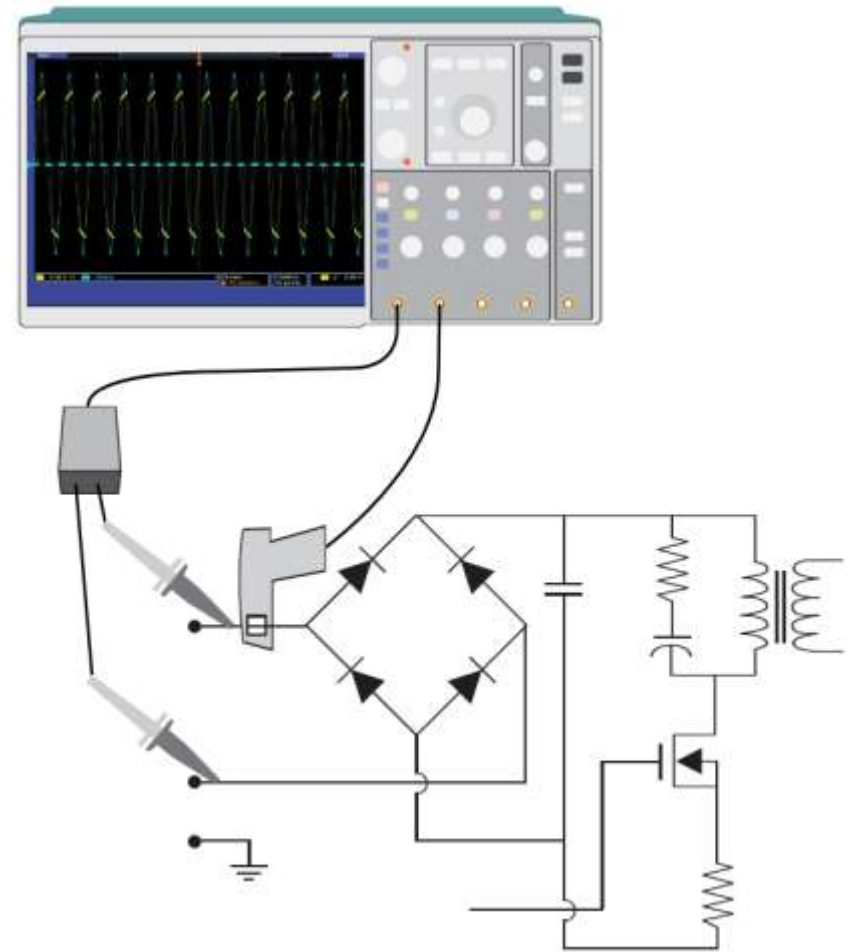
$$H(t) = \frac{n}{l} i(t)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

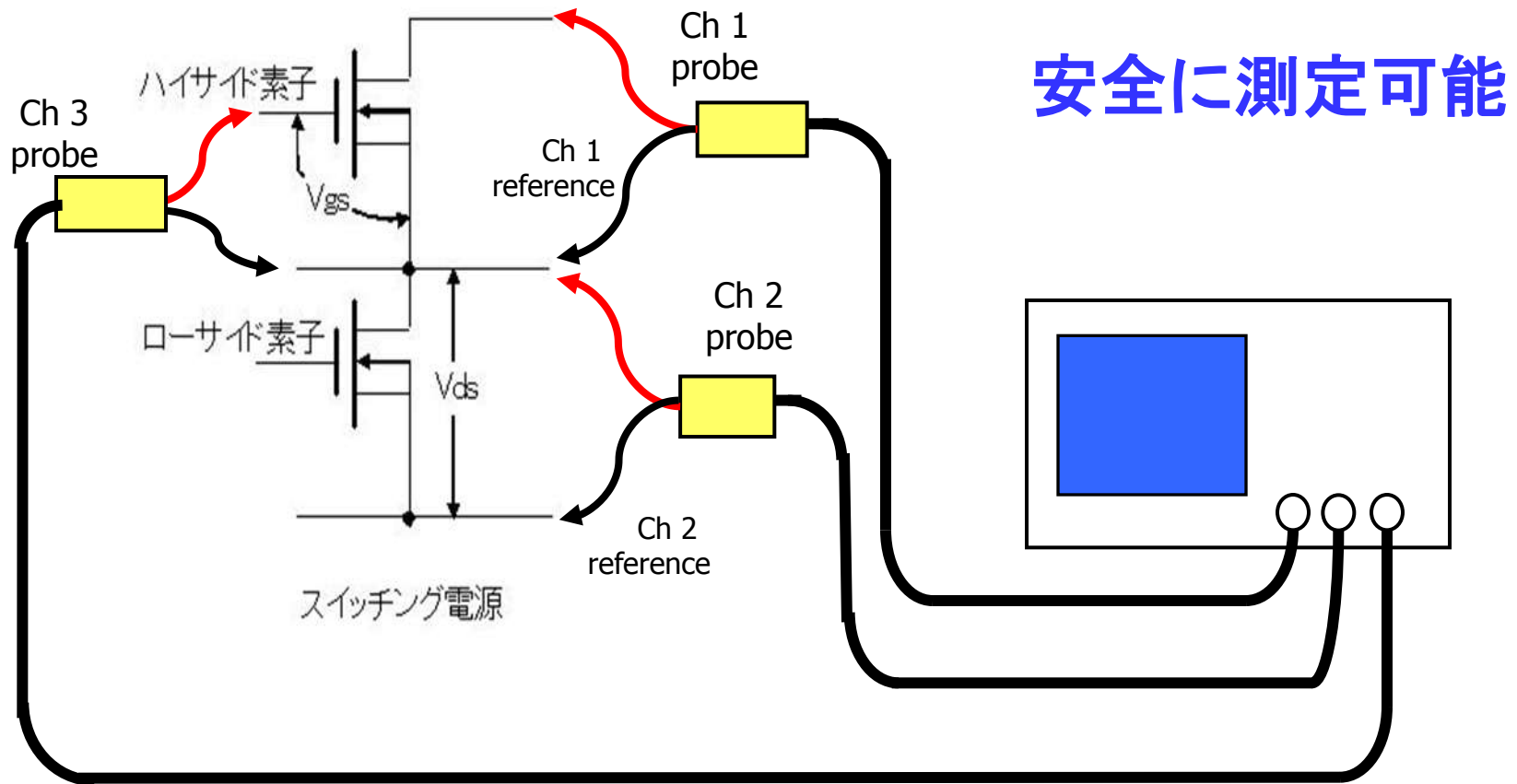
N: サンプル数 n: データ・ポイント

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

① フローティング測定

- 差動プローブによるフローティング測定



広帯域高電圧差動プローブ



周波数帯域が従来品の2倍

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
TMDP0200型※3	200MHz	250:1/25:1	750V	5MΩ/2pF未満.
THDP0200型※3	200MHz	500:1/50:1	1.5kV	10MΩ/2pF未満
THDP0100型※3	100MHz	1000:1/100:1	6.0kV	40MΩ/2.5pF未満

※3: TekVPIプローブ・インターフェース用(DPO7000Cシリーズ、MSO/DPO5000シリーズ、MSO/DPO4000Bシリーズ、MSO/DPO3000シリーズなどに対応)

SiCデバイスやサージなどのノイズを
高確度測定

0Vレベルを自動調整



電源評価用プローブ

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

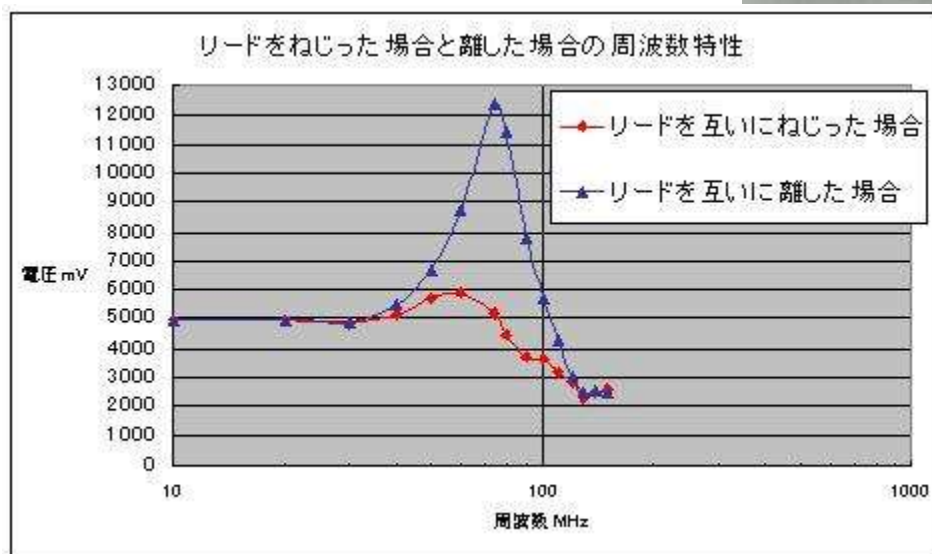
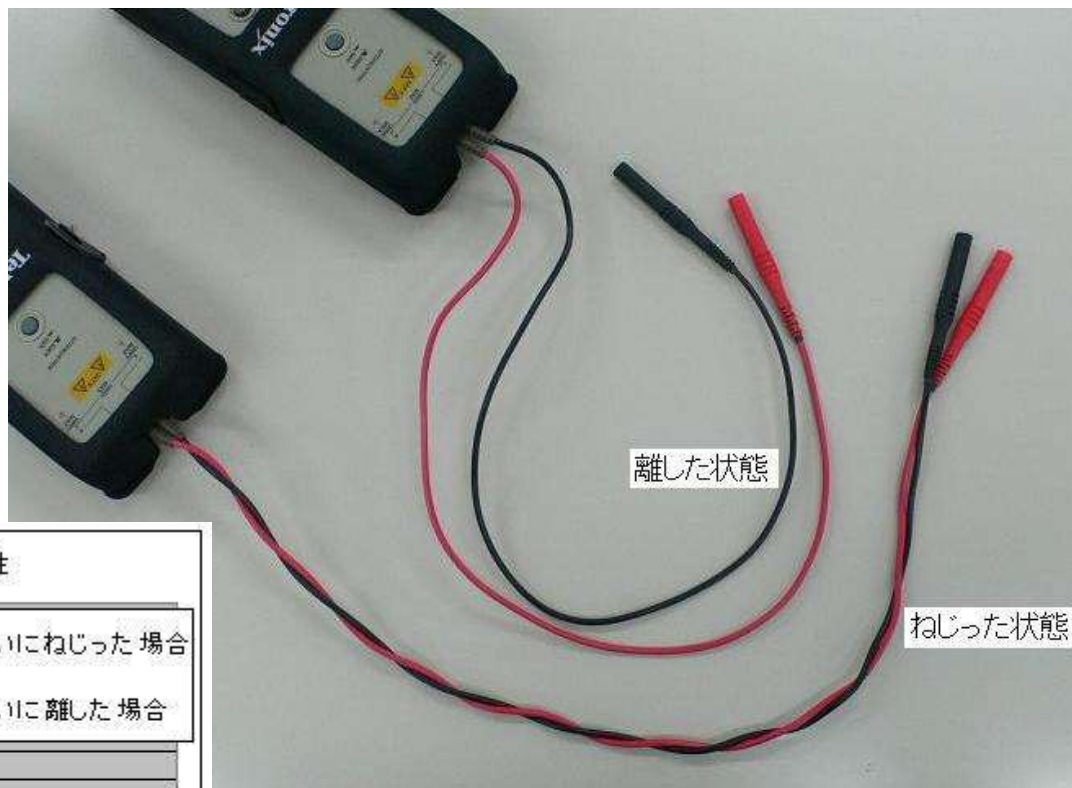
高電圧差動プローブ

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
TDP0500型※3	500MHz	50:1/5:1	42V	1MΩ/1pF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 ※3: TekVPIプローブ・インタフェース用

高電圧差動プローブの入カリード線はねじるもの？

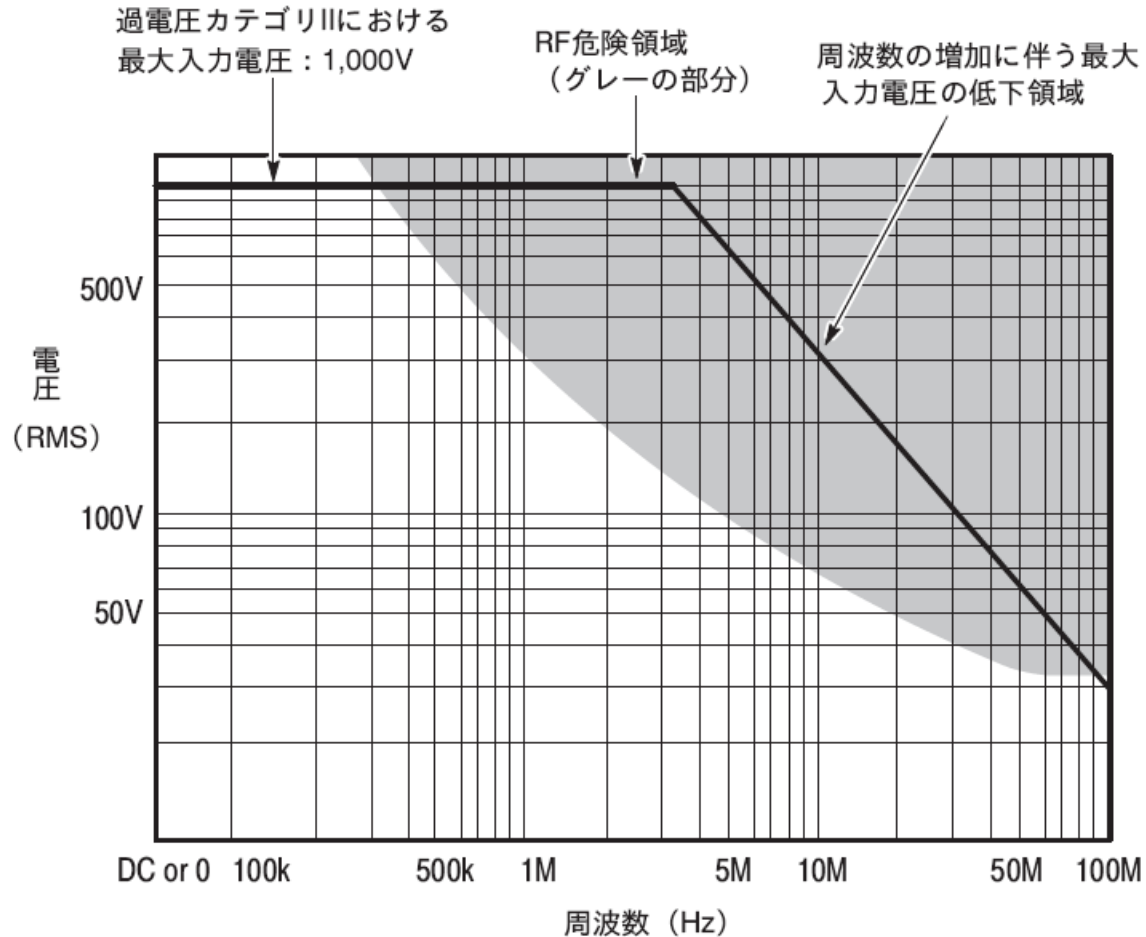
- ねじった状態で、スペックを規定



P5205型

ディレーティング・カーブ

- 周波数が高くなると測定可能電圧は小さくなる



P5205型のプローブ-対地間電圧のディレーティング・カーブ

電源評価用電流プローブ

■ 電流プローブの種類

- TekVPI対応電流プローブ

● TCP0030型

- 最高感度: 1 mA/div
- 周波数帯域: DC~120 MHz
- 最大測定電流: 30Arms AC/DC

● TCP0150型

- 最高感度: 5 mA/div
- 周波数帯域: DC~20 MHz
- 最大測定電流: 150Arms AC/DC

- TekProbe Level2対応電流プローブ

● 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
- 最大連続電流: 30A (DC+peakAC) ~ 750A (DC+peakAC)
- 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の調整を実行してください。

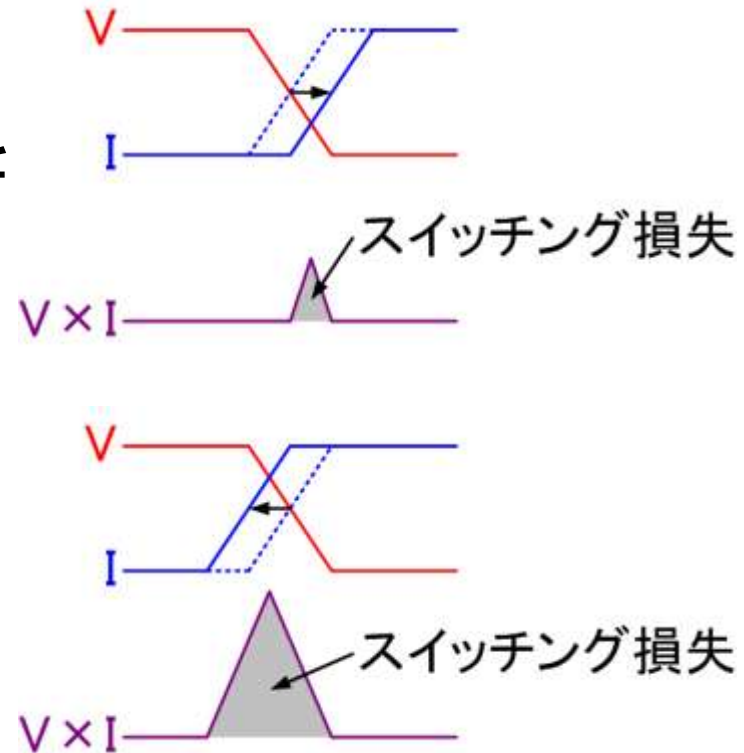
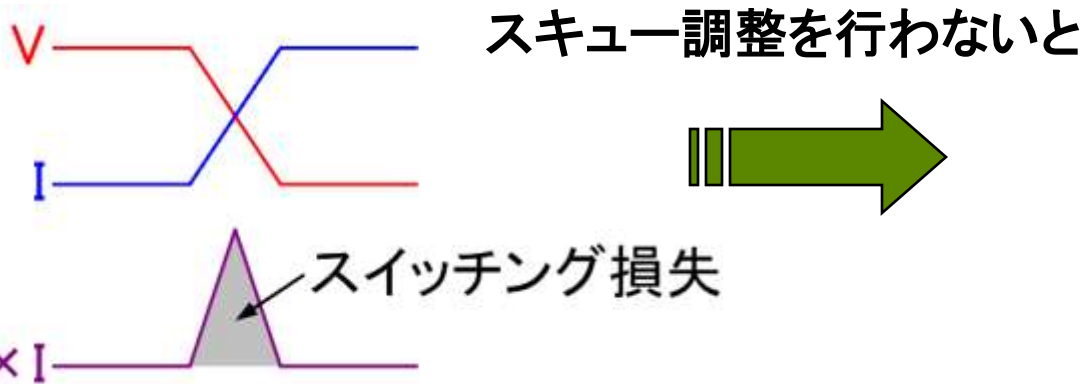


高感度
広帯域

大電流
高感度

② プローブ・デスキューの重要性

- プロ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)



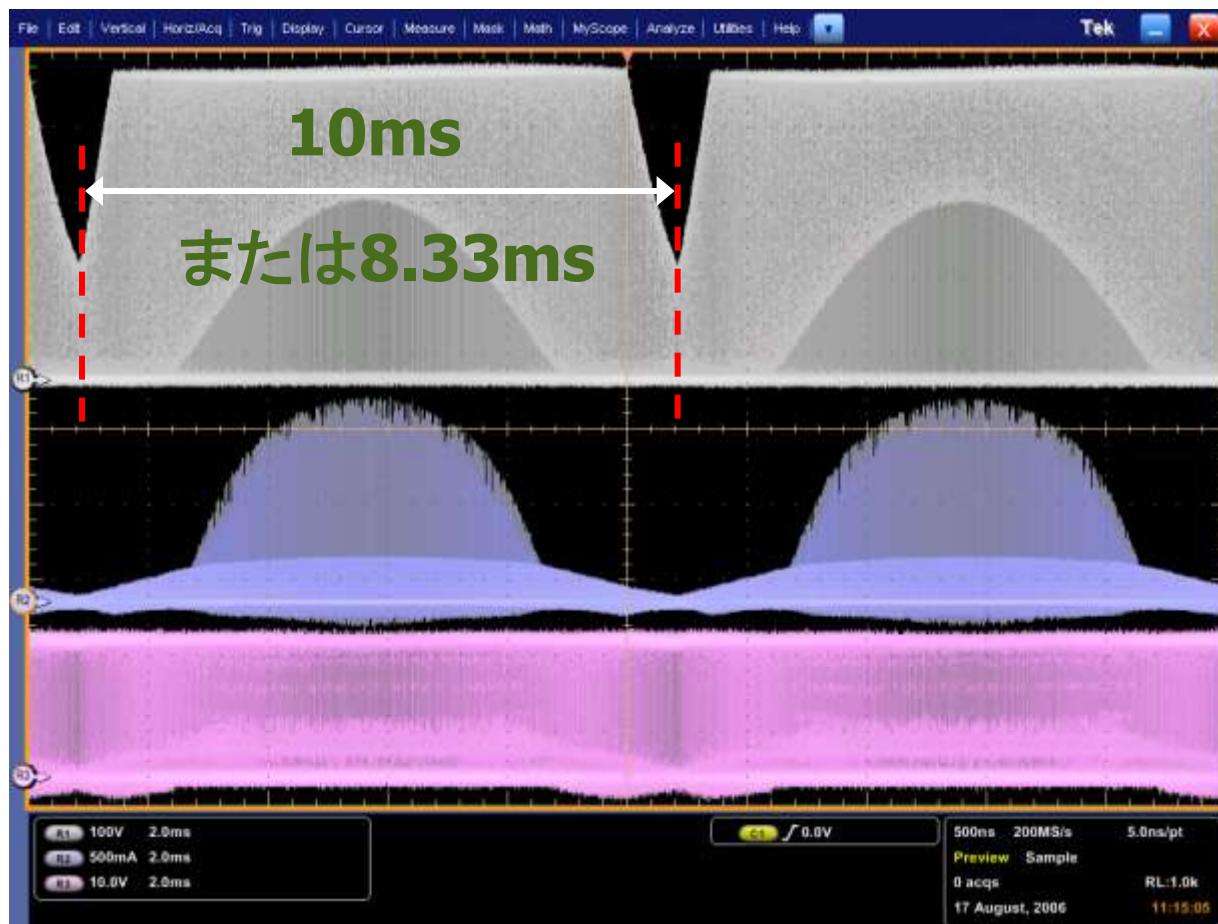
Tek-DPG型
Deskew Pulse
Generator



Deskew Fixture
(067-1686-00)

③ PFC付きスイッチング電源評価

- 高速サンプル・レートとロング・レコード長が必要
 - 商用電源周期分の波形データの捕捉と解析



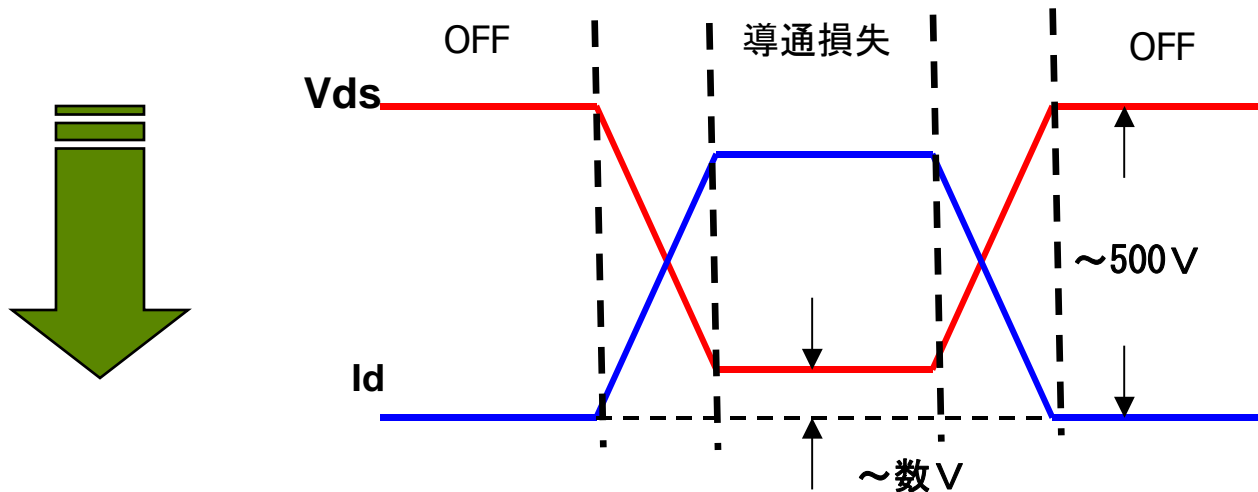
Vds

Id

Vg

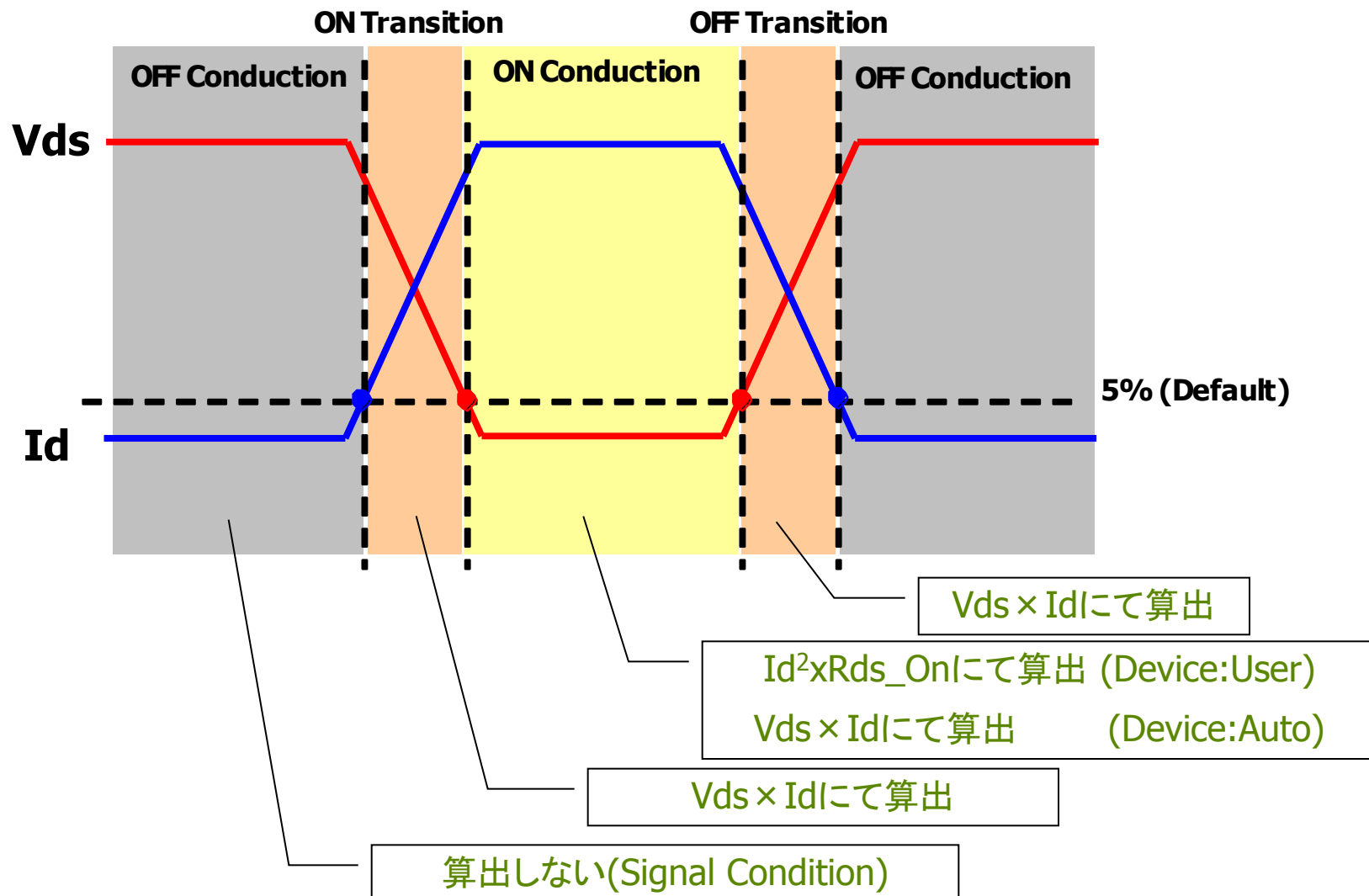
④ 垂直軸分解能の向上

- いかにして測定精度を上げていくか？
- 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



ハイレゾ・モードによる垂直軸分解能の向上

- ノイズに埋もれていた成分も測定可能

サンプル・モード

ハイレゾ・モード



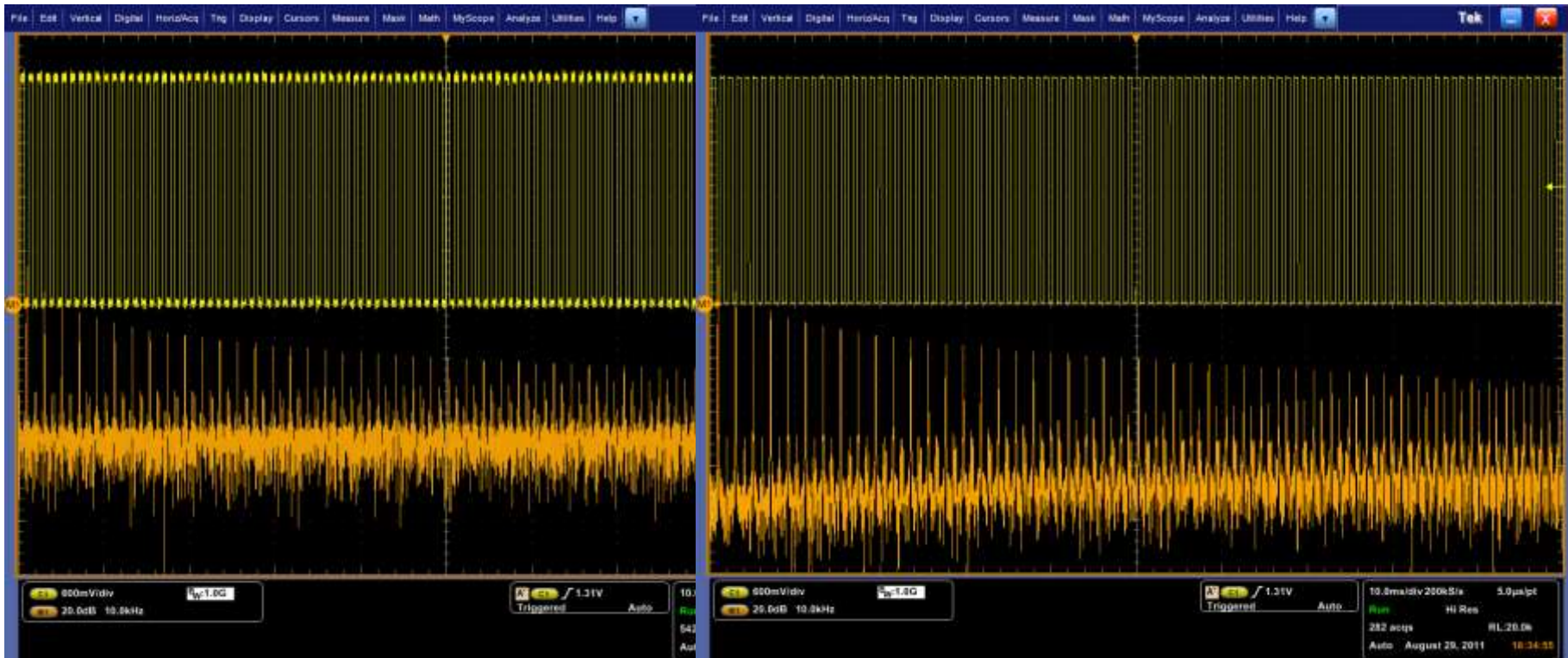
ホワイト・ノイズに埋もれていた成分も測定可能

ハイレゾ・モードによる垂直軸分解能の向上

- ハイレゾ・モードではFFTのノイズ・フロアが下がり、サンプル・モードではノイズに埋もれていた周波数成分も観測できる。

サンプル・モード

ハイレゾ・モード



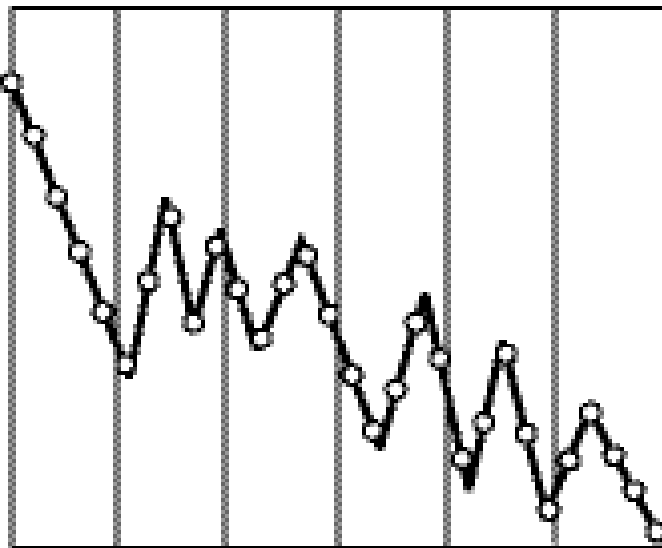
参考：オシロの取込みモード

ハイレゾ・モードはどのような処理をしているの？

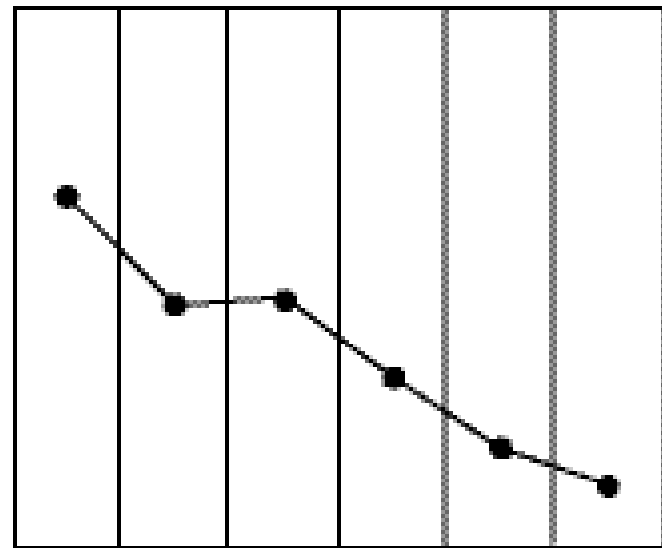
● ハイレゾ(Hi-Res)・モード

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

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

3. パワー解析ソフトウェアによる測定例 VCE(sat)、RDS(on)を電流の関数式で定義

- 電力損失を高確度測定

Since VCE(sat) varies depending on current(I), calculate it as a function of I accounting for current at each edge
 $VCE(sat) = VCE(min) + a \cdot I + b \cdot I^2 + c \cdot I^3 + d \cdot I^4$

Coefficients	
a	b
0.01	0.005
c	d
0	0

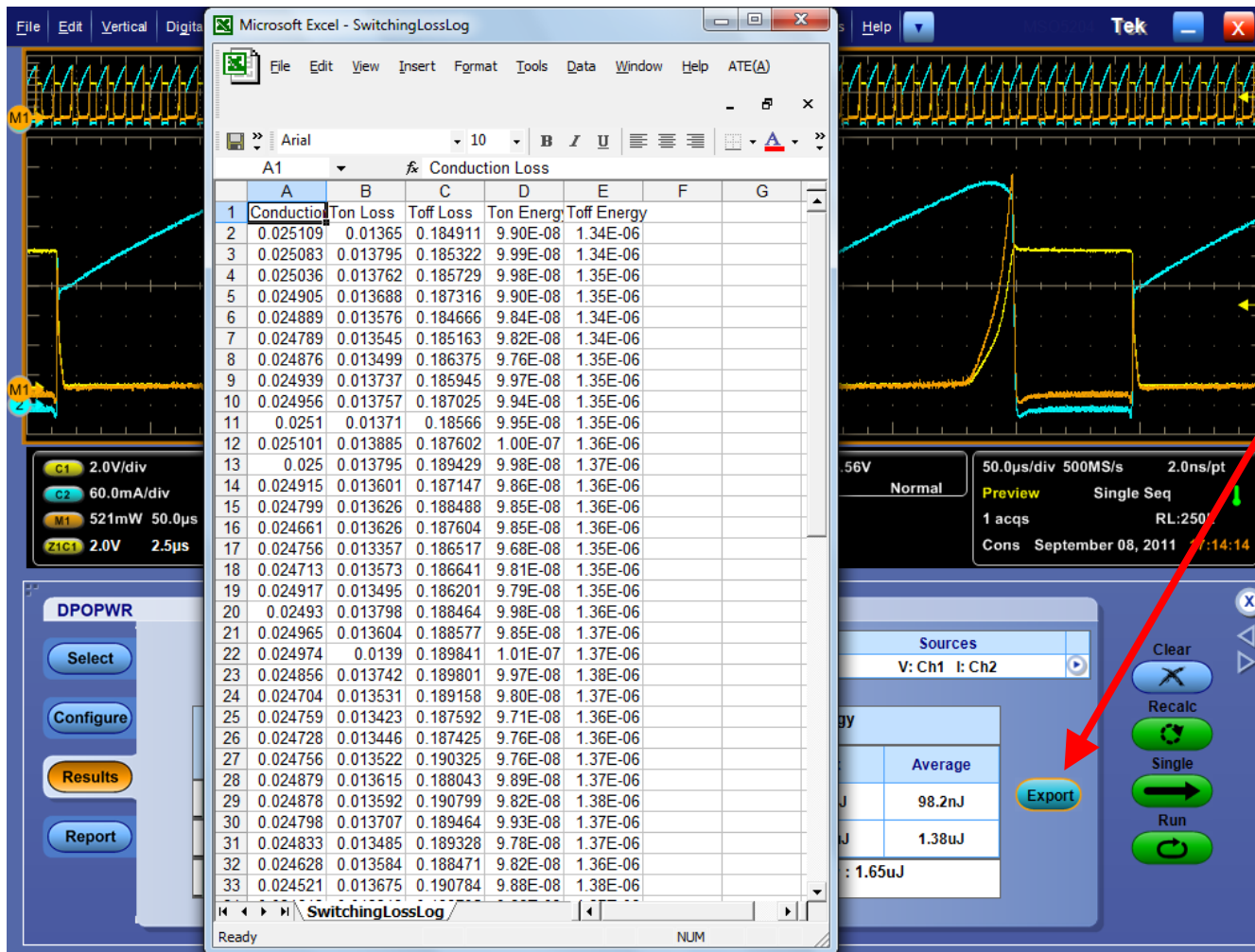
Type	Power Loss			Energy		
	Min	Max	Average	Min	Max	Average
on	0.0W	0.0W	0.0W	0.0J	0.0J	0.0J
off	1.02W	1.59W	1.19W	10.7uJ	16.7uJ	12.5uJ
Total Avg	Avg Loss : 1.55W			Avg Energy : 16.3uJ		

DPOPOPWRによる
スイッチング損失測定例

Turn on, Turn off, Total Avgを自動計測

スイッチング損失測定結果のエクスポート

- 全サイクルのTurn On、Turn Off、Conduction Loss をCSV保存



エクスポート・ボタン

スイッチング損失の評価 (DPOPOPWR)

Turn On / Turn Off / Total Avgの自動計測



モーター1回転の期間を測定 (カーソルで解析範囲指定)

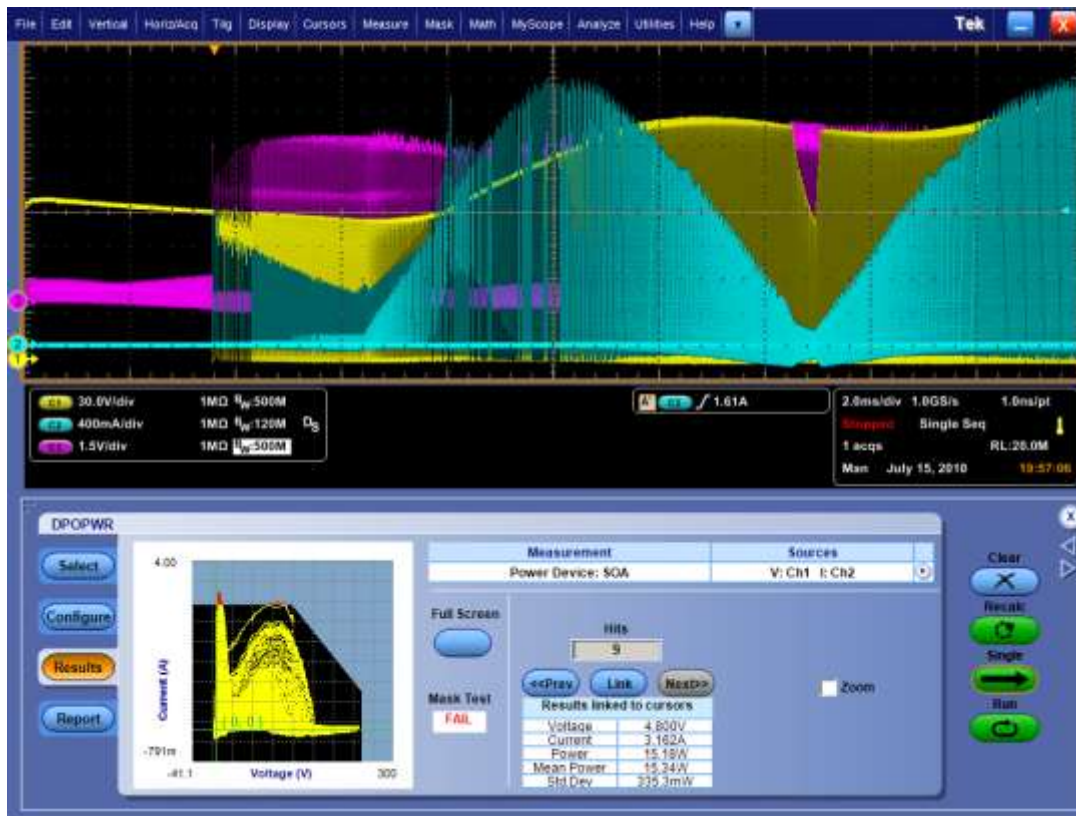
電流は絶対値を使用

損失測定結果

インバータ回路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)

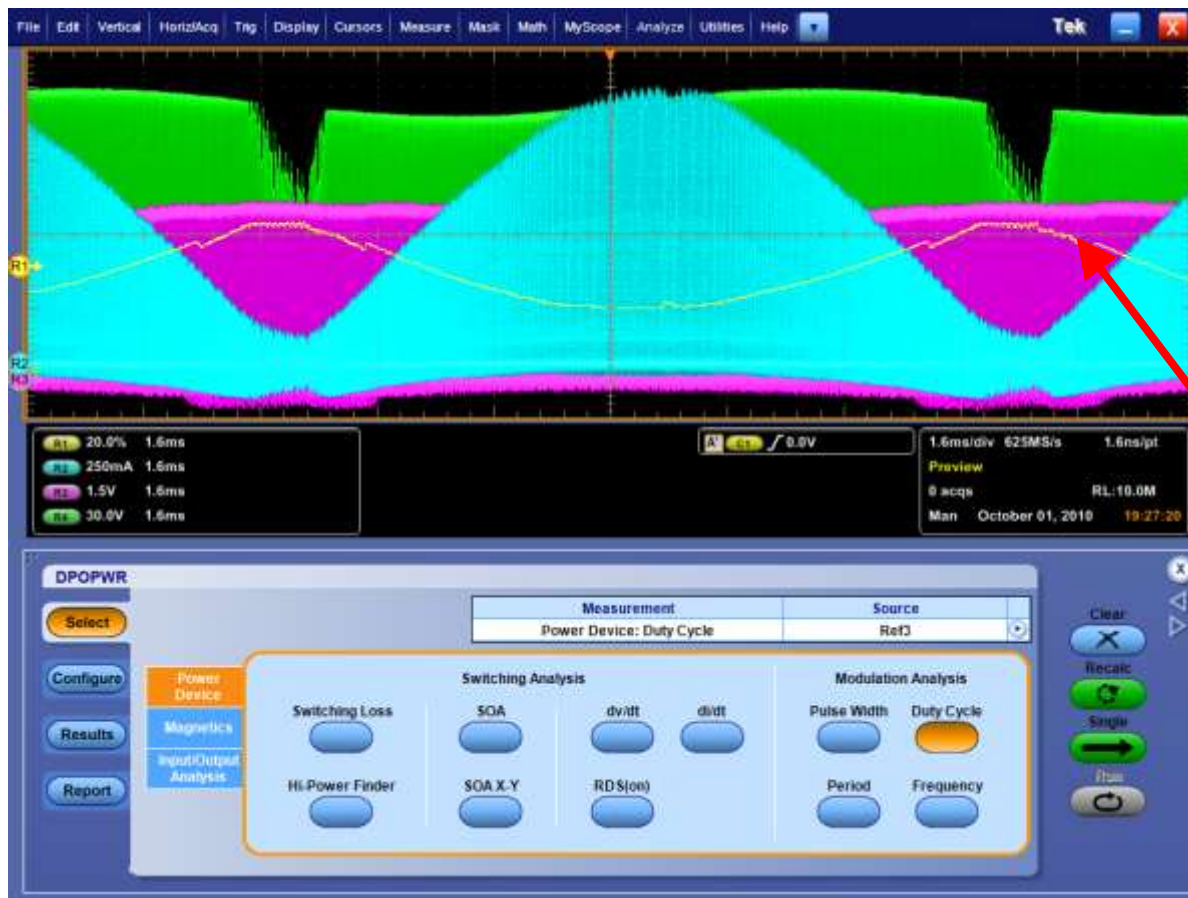
安全動作領域 (SOA) の評価

- Vds、IdをXY表示
- SOAマスク・テスト
- SOAプロットと時間軸波形の自動リンクにより違反波形を特定



スイッチング制御の評価 (DPOPOPWR)

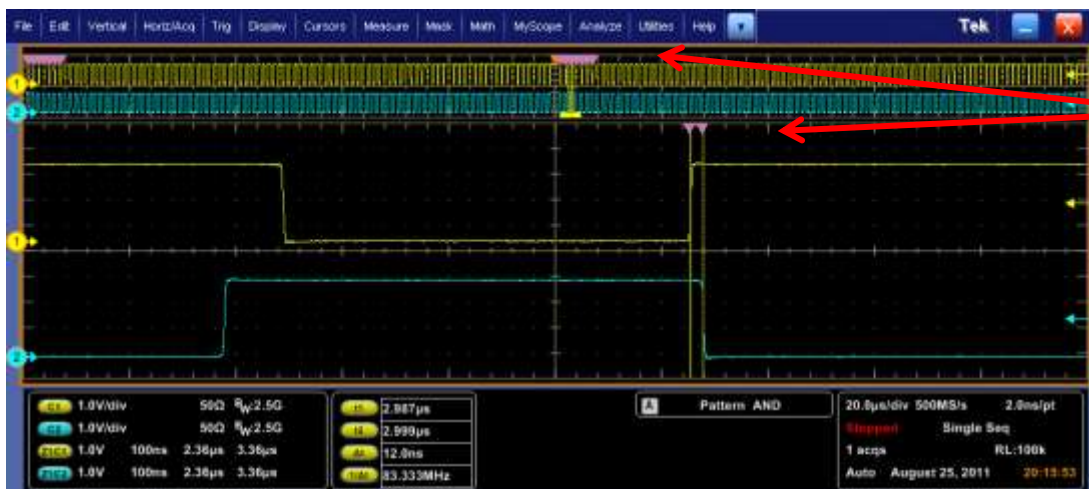
- PWM/PFM変調の時間変化を解析
- パルス幅、デューティ、ピリオド、周波数



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 image shows two panels from the oscilloscope's configuration menu. The top panel is 'Search - Configure' and the bottom panel is 'Trigger - Logic Pattern'. Both panels have red circles highlighting specific settings.

Pattern	Channels	Maths	Refs
1	H 1.4V	X 1.4V	X 1.4V
2	H 1.4V	X 1.4V	X 1.4V
3	X 1.4V	X 1.4V	X 1.4V
4	X 1.4V	X 1.4V	X 1.4V

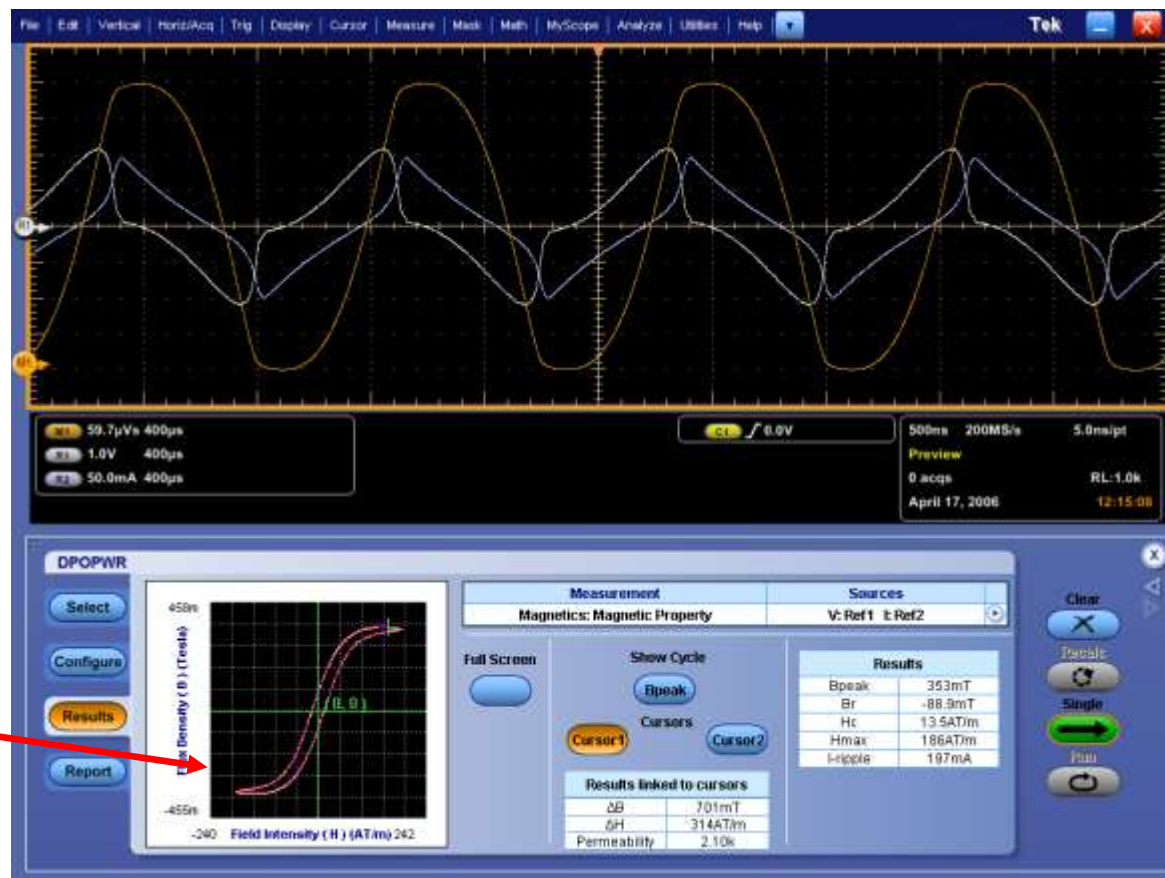
Trigger - Logic Pattern settings:

- Trigger Type: Pattern
- Pattern Type: Pattern
- Input Threshold: CH1 H 1.5V, CH2 H 1.5V, CH3 X 1.2V, CH4 X 1.2V
- Threshold Preset: TTL, ECL, USER
- Time: 14.0ns

貫通電流は、スイッチング制御の不具合、ノイズの影響などによって発生する

磁気コンポーネントのB-H解析 (DPOPWR)

- 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



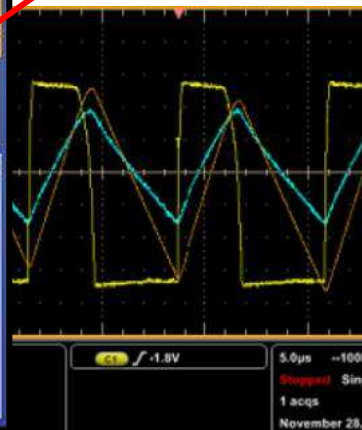
B-H ヒステリシス・カーブ

磁気コンポーネントの電力損失測定例

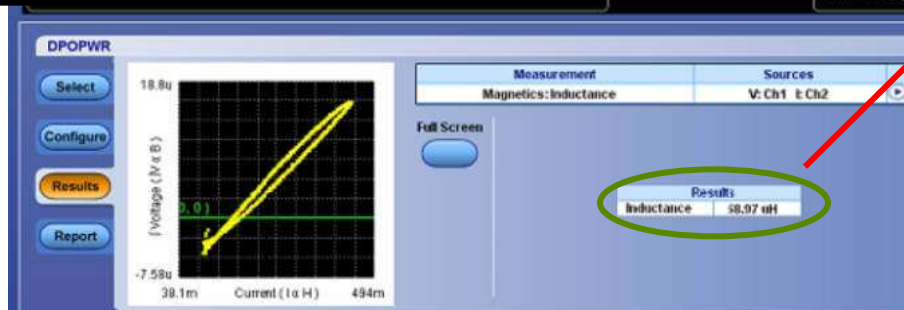
- 動作している周波数、電流、電圧条件での電力損失、インダクタンス値



磁気部品の電力損失
108.7mW



インダクタンス値
58.97 μ H



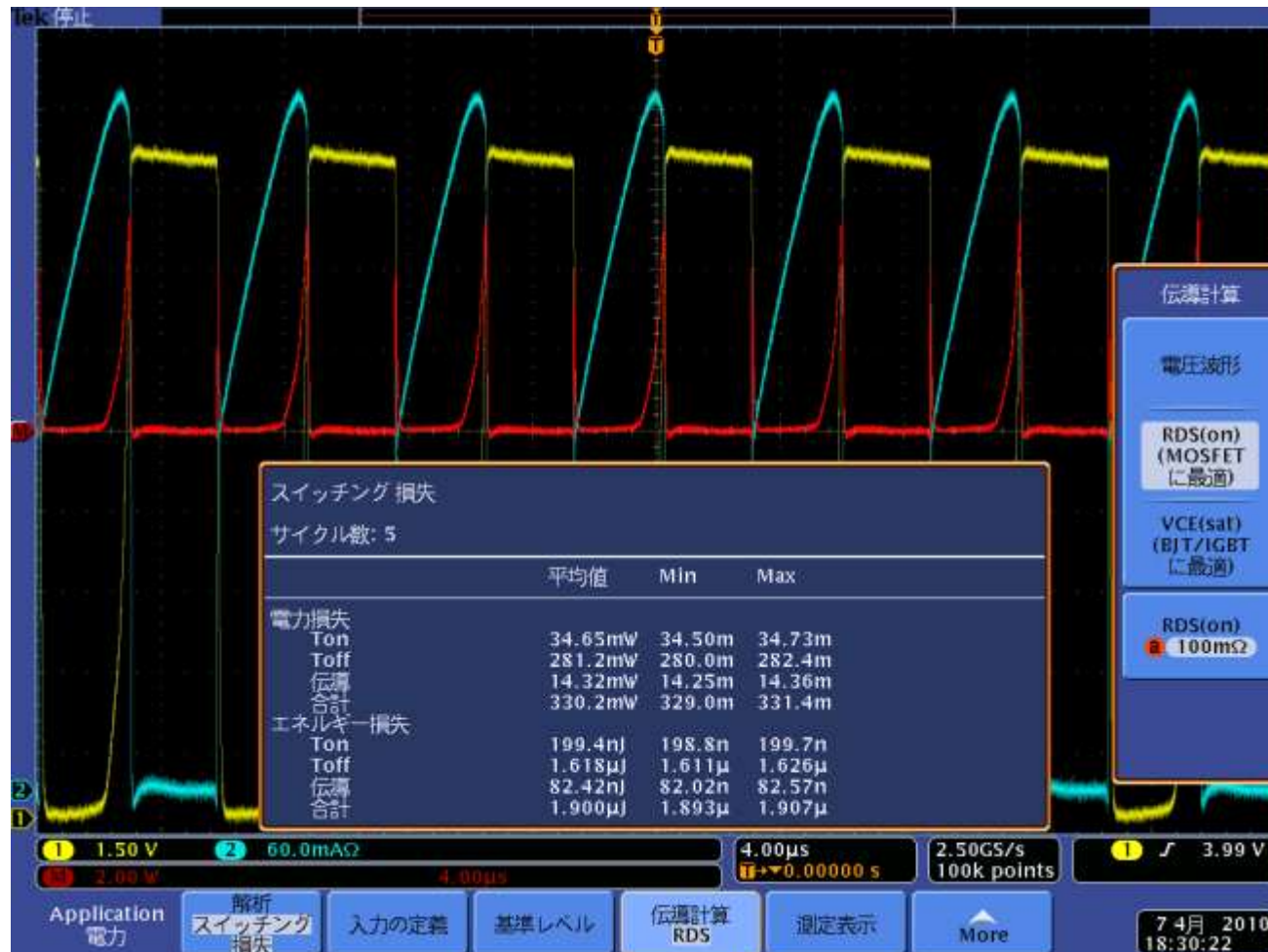
磁気コンポーネントの電力損失

- 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

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



4. 適切な測定器の選択 パワー解析用推奨構成 — 1

オシロスコープ

■MSO/DPO5000シリーズ+パワー計測パッケージ

- 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
 - ・ DPOPWR パワー解析ソフトウェア (Opt.PWR)
 - ・ TCP0030型 電流プローブ (30Arms 120MHz)
 - ・ THDP0200型 高電圧差動プローブ (1500V 200MHz)
 - ・ 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

■THDP0200型 × 1本を追加 (合計2本)

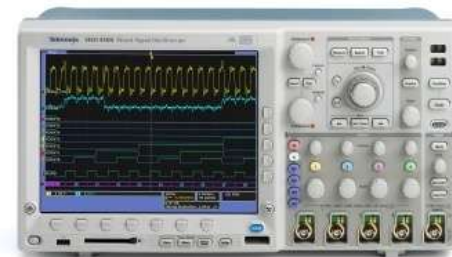
- ゲート信号へのプロービング用
- 補助電源 119-7465-00 × 1個
- ケーブル 161-A005-00 × 1本を追加



パワー解析用推奨構成 ー 2

オシロスコープ

- MDO/DPO/MSO4000(B) シリーズ + DPO4PWR
 - 周波数帯域: 350MHz、500MHz、1GHz
 - 最高サンプル・レート: 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

- THDP0200型 × 2本
 - 耐圧: 差動1500V、対地1000Vrms
 - 周波数帯域: 200MHz



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)
- TPS2000B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(内蔵)
- MSO/DSA/DPO70000Cシリーズ + DPOPOWER (Opt.PWR)
 - 4GHz、6GHz、8GHz、12.5GHz、16GHz、20GHz



DPO/MSO3000シリーズ

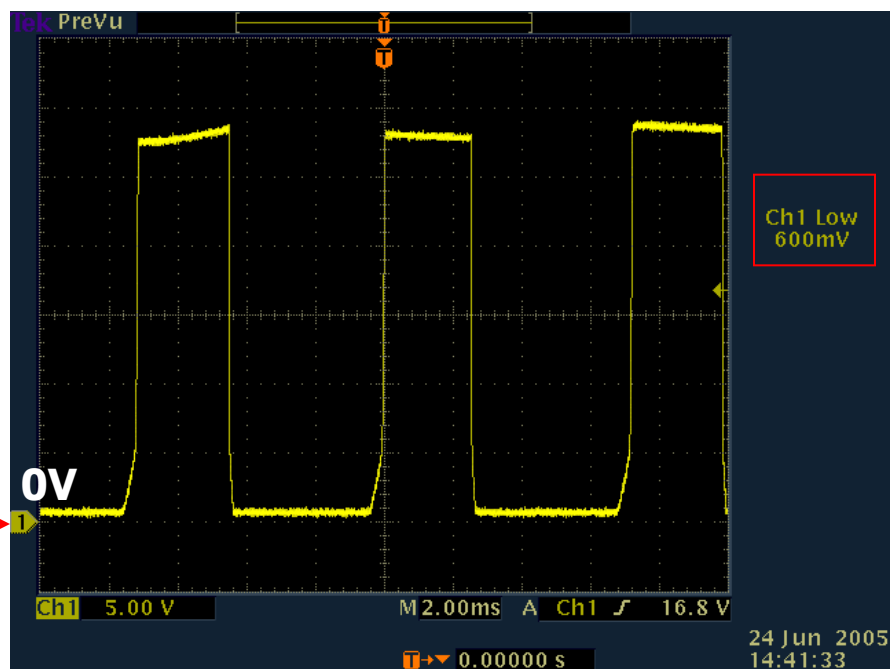


TPS2000Bシリーズ

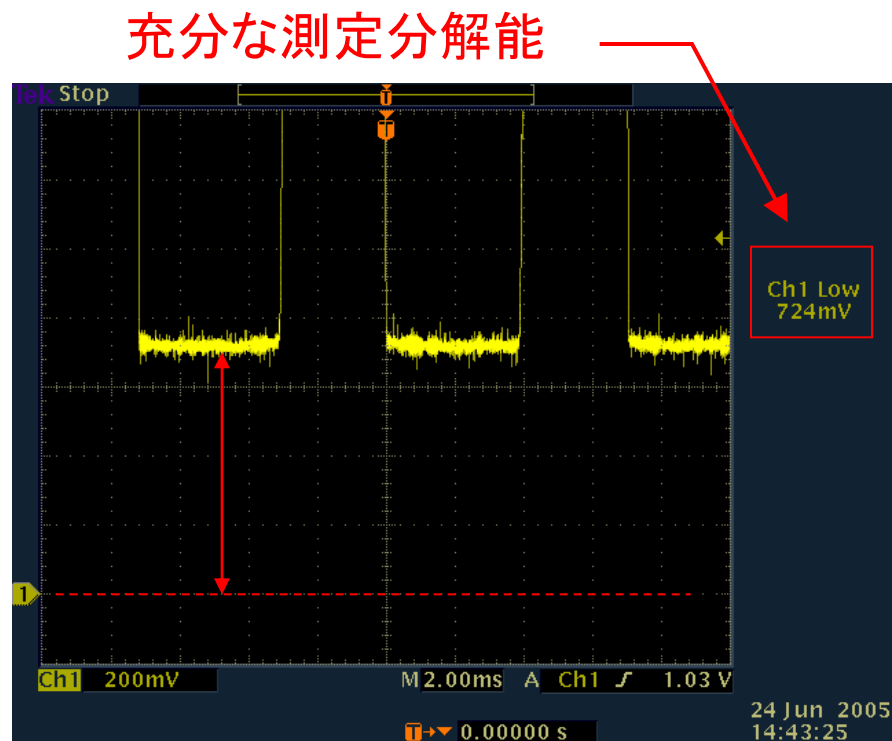
PFC付き電源解析の場合はロング・レコード長での取り込みが必要なため、MSO/DPO4000Bシリーズ以上を推奨。

オーバードライブ・リカバリの問題(1)

- 比較的影響が少ない例



5V/div

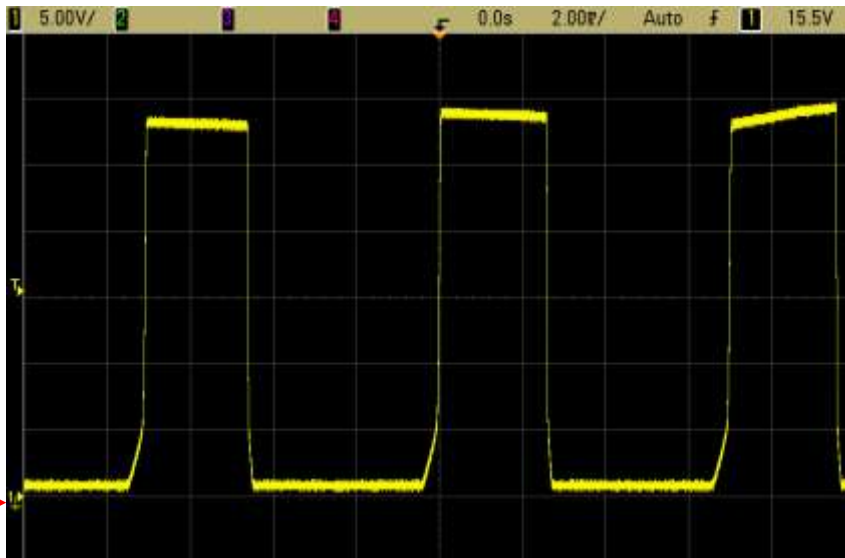


200mV/div

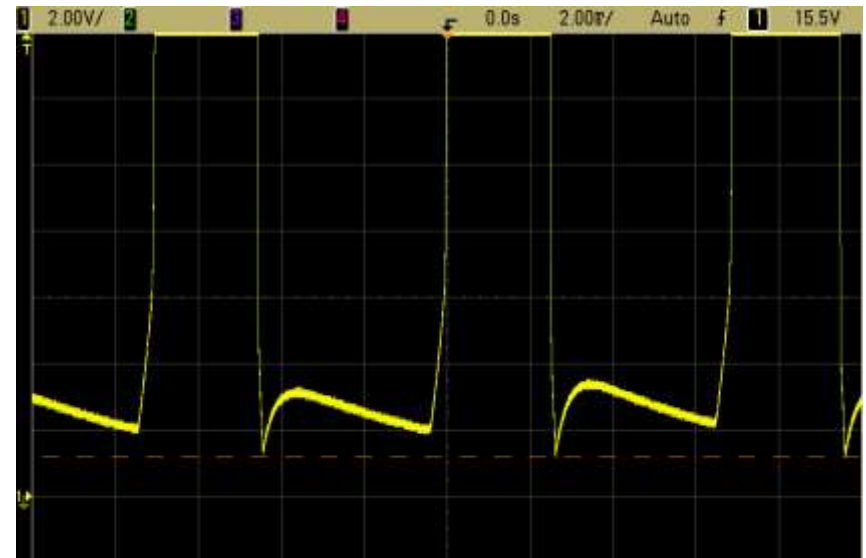
オーバードライブ・リカバリの問題(2)

- 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

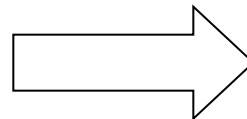
他社オシロスコープの例



5V/div



2V/div

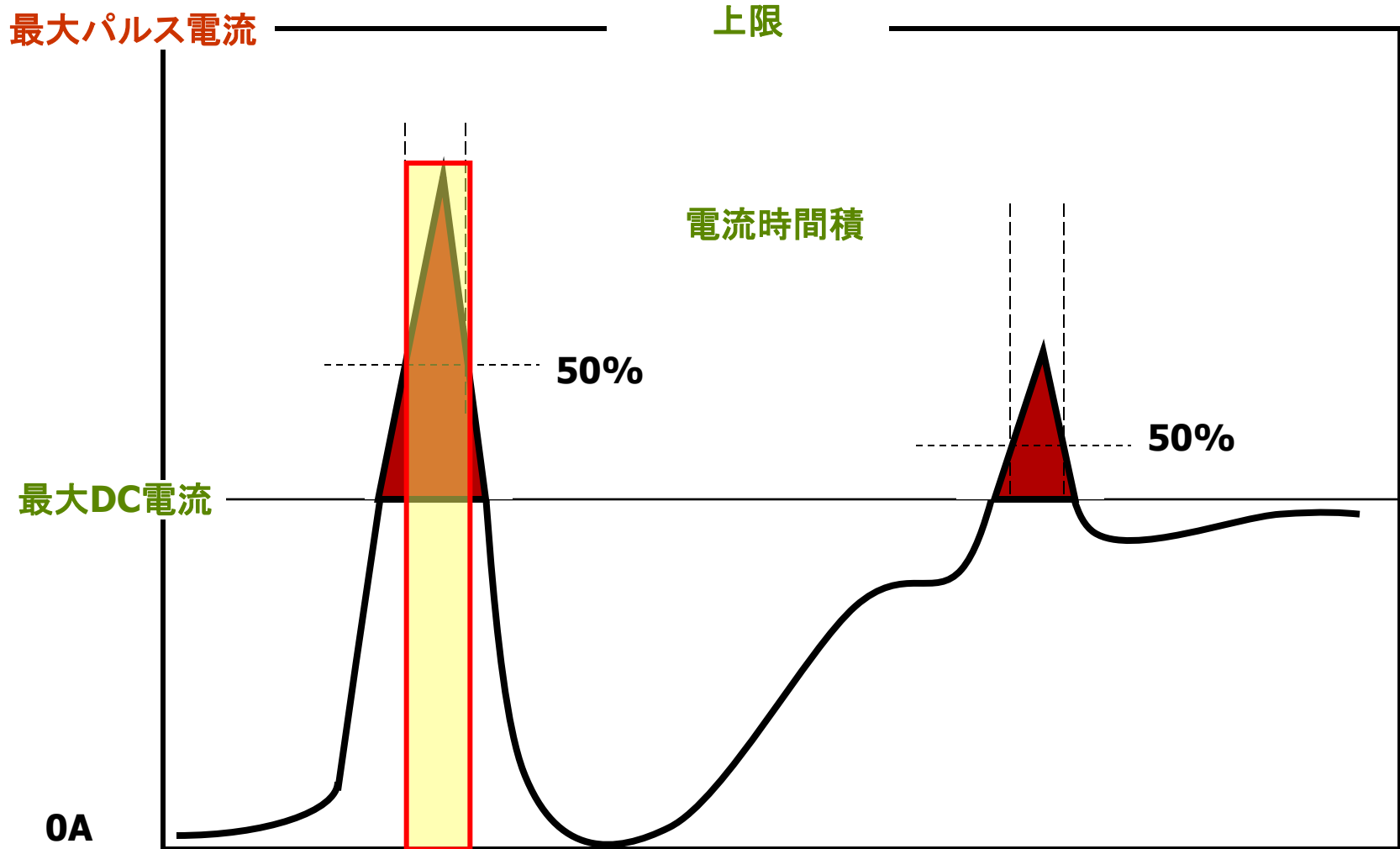


5. 電流プローブの性能と使いこなし

電流プローブの電流制限

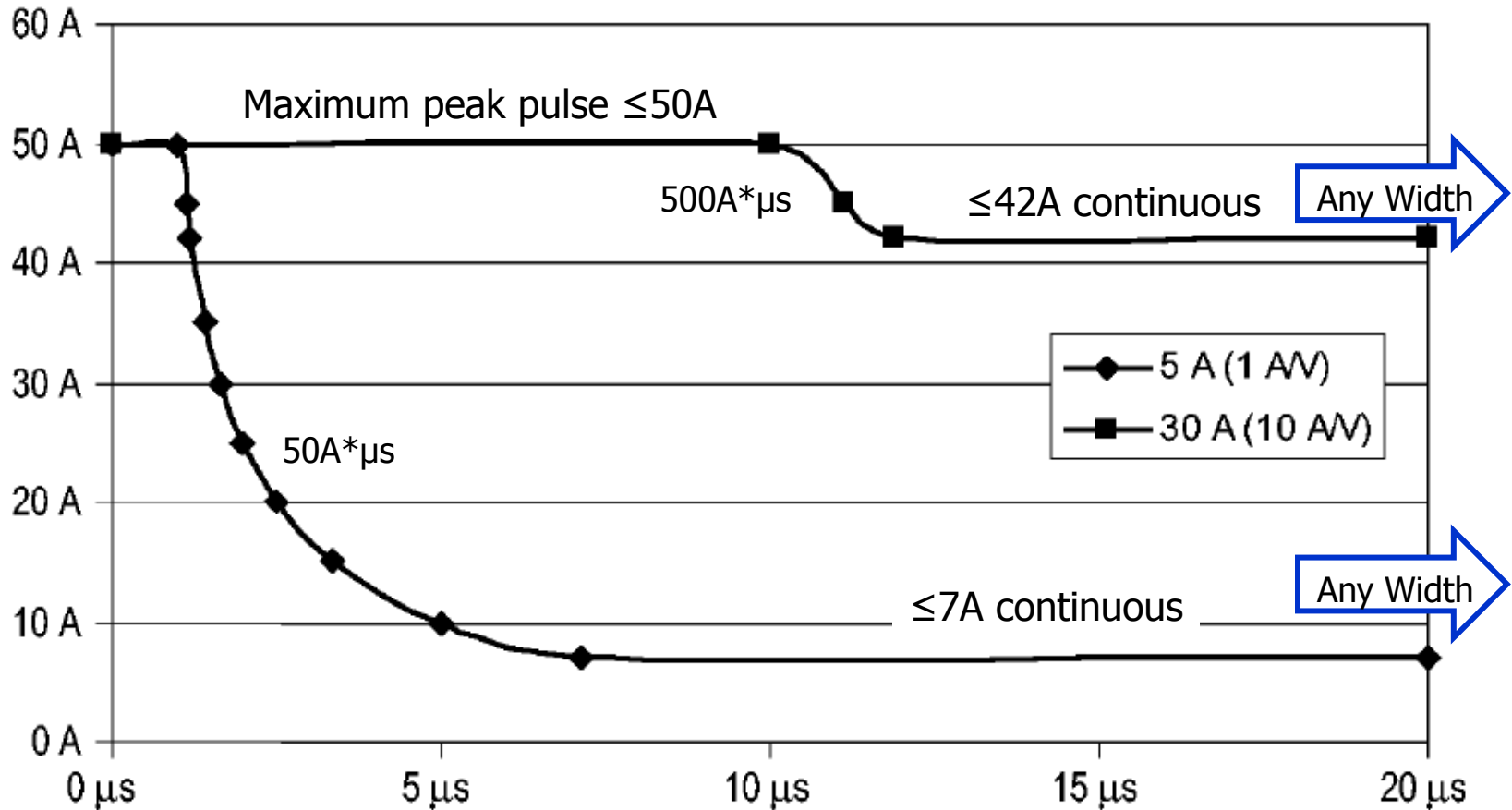
パラメータ	設置プローブ			
	TCP312	TCP305	TCP303	TCP404XL
範囲、公称	1A/V、 10A/V	5A/V、 10A/V	5A/V、 50A/V	1A/mV
最大電流積 (周波数低下については、図 4-2 ~ 図 4-5 を参照)	1A/V - 50A* μ s 10A/V - 500A* μ s	5A/V - 500A* μ s 10A/V - NA	5A/V - 3000A* μ s 50A/V - 15000A* μ s	なし
電流転送率	1 V/Amp および 100 mV/Amp	200 mV/Amp および 100 mV/Amp	200 mV/Amp 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

電流プローブの測定限界(電流時間積)



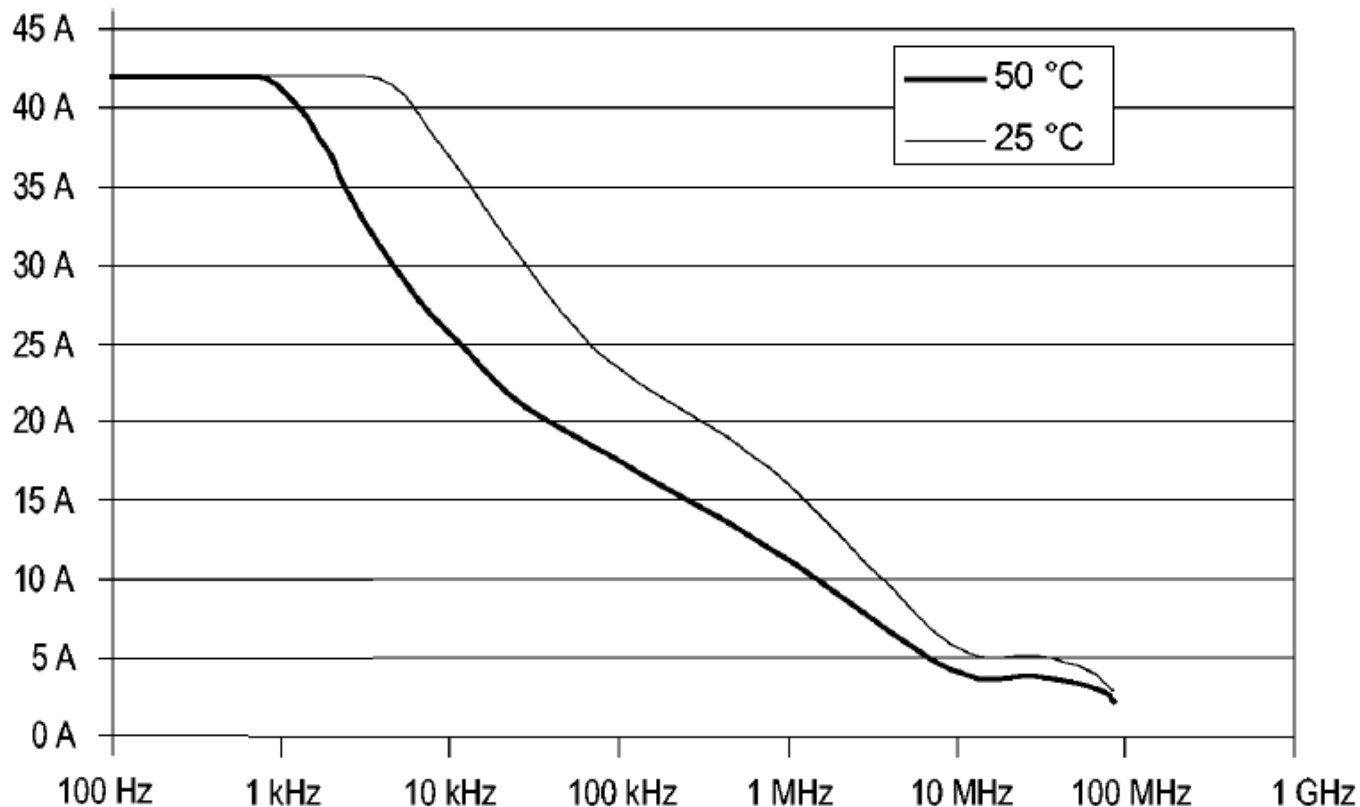
電流プローブの測定限界 ~ パルス幅とピーク電流

TCP0030型の最大パルス電流とパルス幅



電流プローブのディレーティング・カーブ

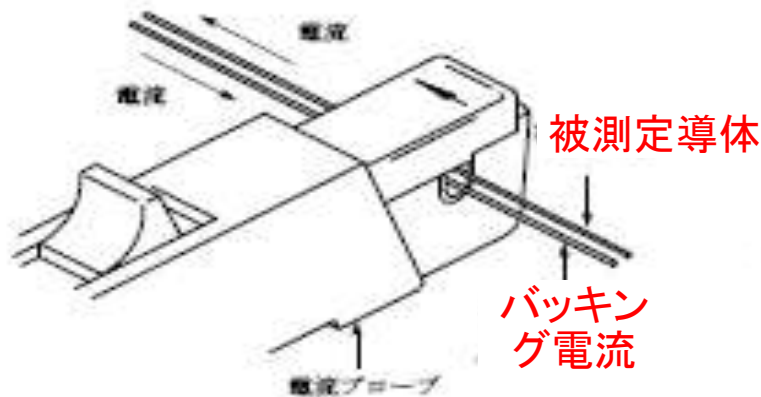
- 周波数が高くなると測定可能電流は小さくなる



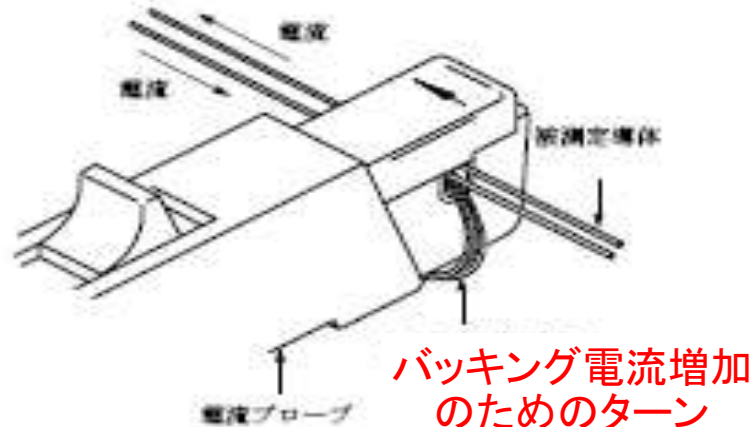
TCP0030型のディレーティング・カーブ

電流プローブの性能と使いこなし

■ DC範囲の拡大



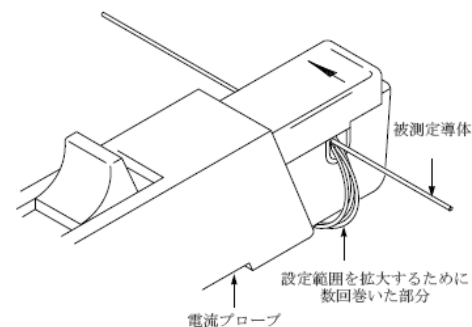
(1) オフセット(バッキング)電流の追加



(2) オフセット電流の拡大

■ 感度の拡大

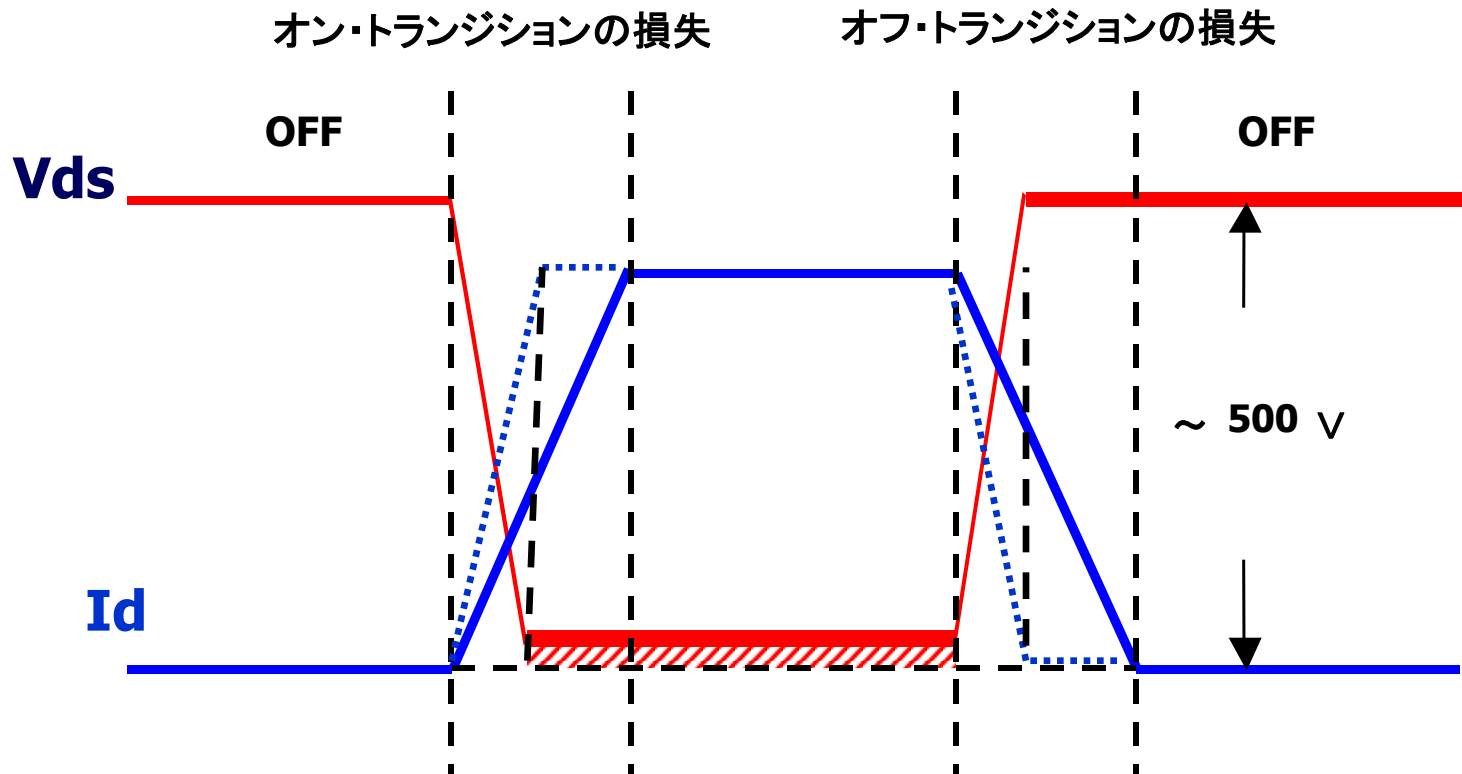
- Nターンすれば感度はN倍
- 挿入損失と周波数帯域に注意
- 約20nH/インチ



感度を拡大するためのターン

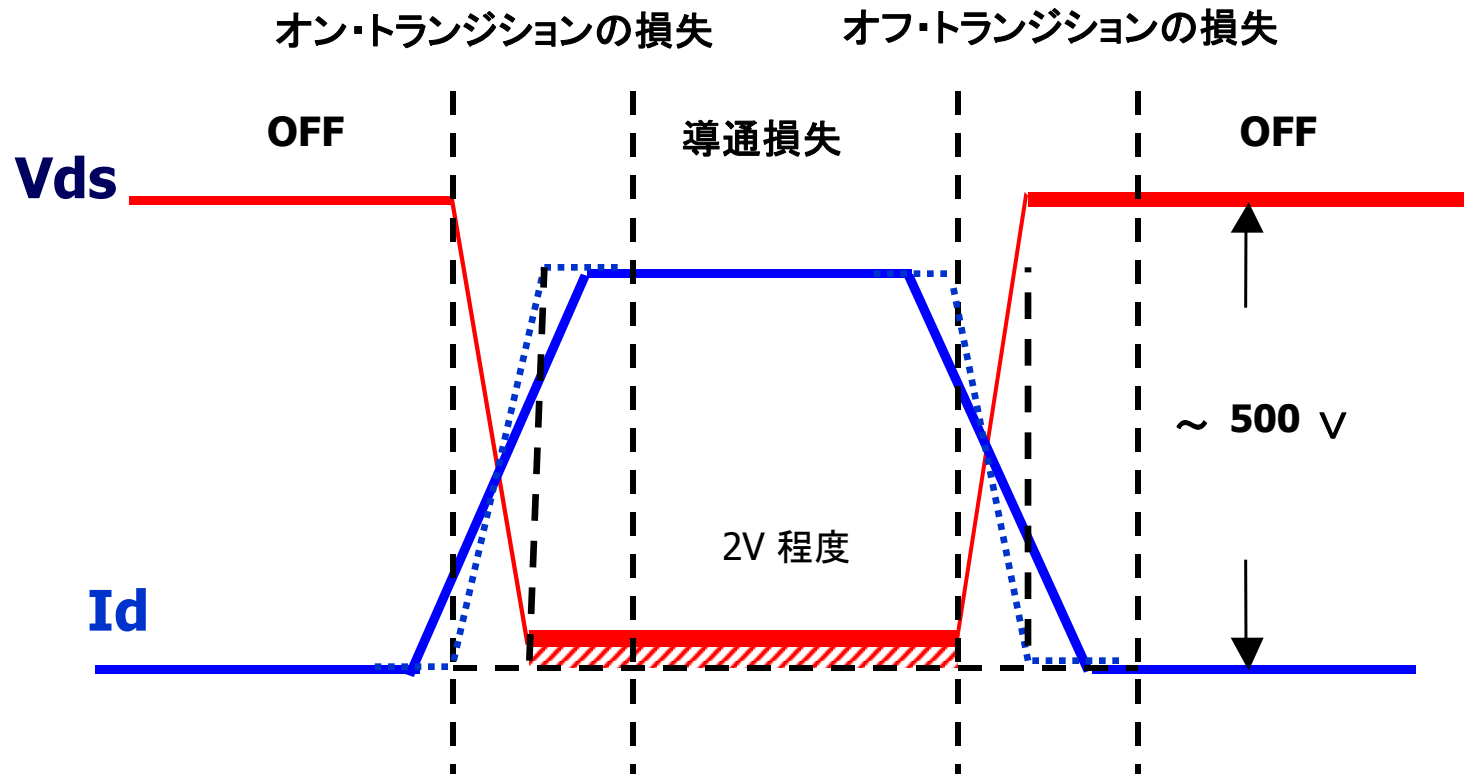
参考：電流プローブの周波数帯域と電力損失測定

- 電流プローブの周波数帯域が不足している場合
 - ターン・オン・ロスが小さく見える
 - ターン・オフ・ロスは大きく見える



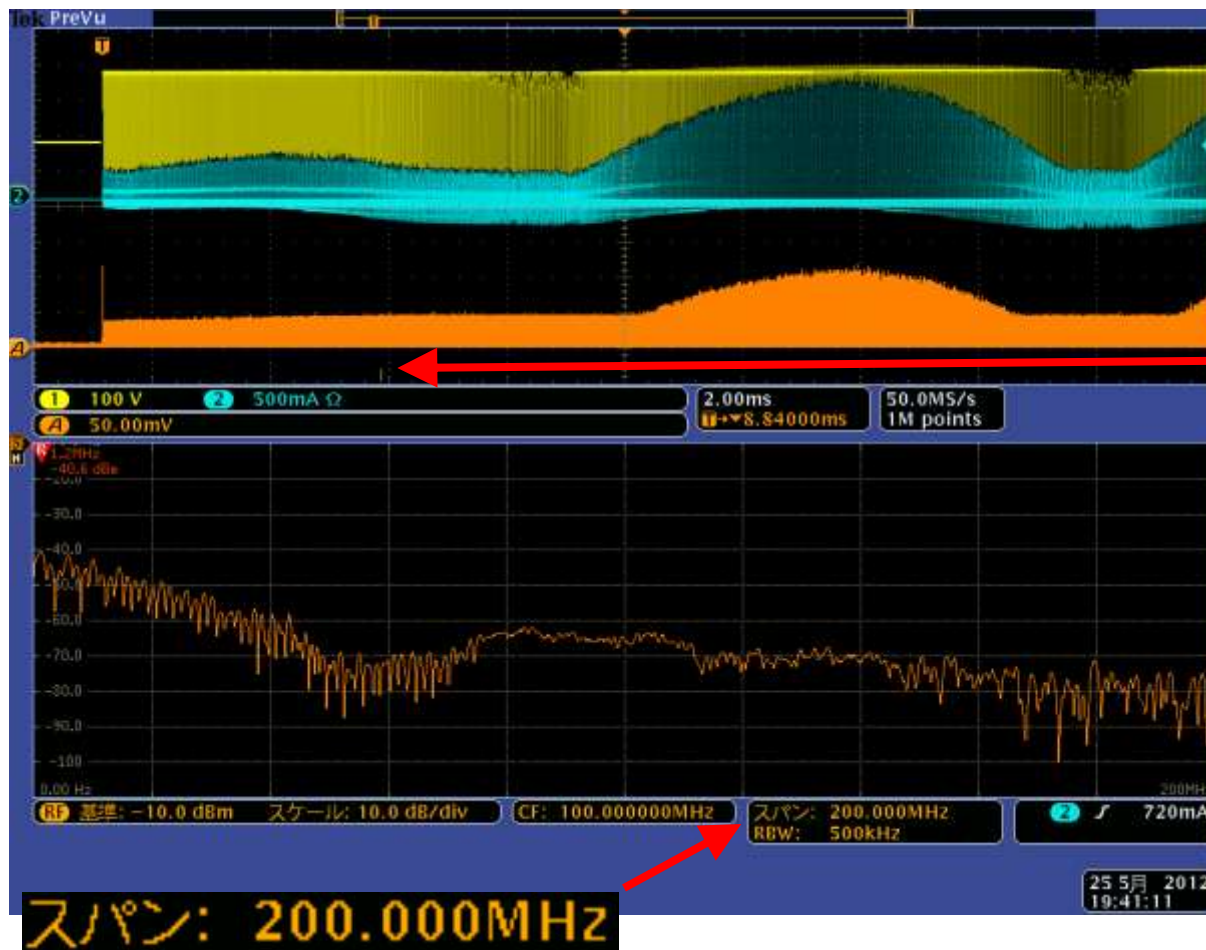
参考：電流プローブの周波数帯域と電力損失測定

- 電流プローブの周波数帯域が不足している場合
 - 振幅の50%でスキュー調整しておくのとターン・オン、ターン・オフとも大きく見える



参考: スイッチング電源の放射ノイズ測定の実例

- MDO4104-6型によりPFC電源を測定
 - RF入力に近接界プローブを接続し、放射ノイズを測定



Ch1: Vds (黄色)

Ch2: Id (青色)

スペクトラム・パワー
の時間変動

スペクトラム・タイム

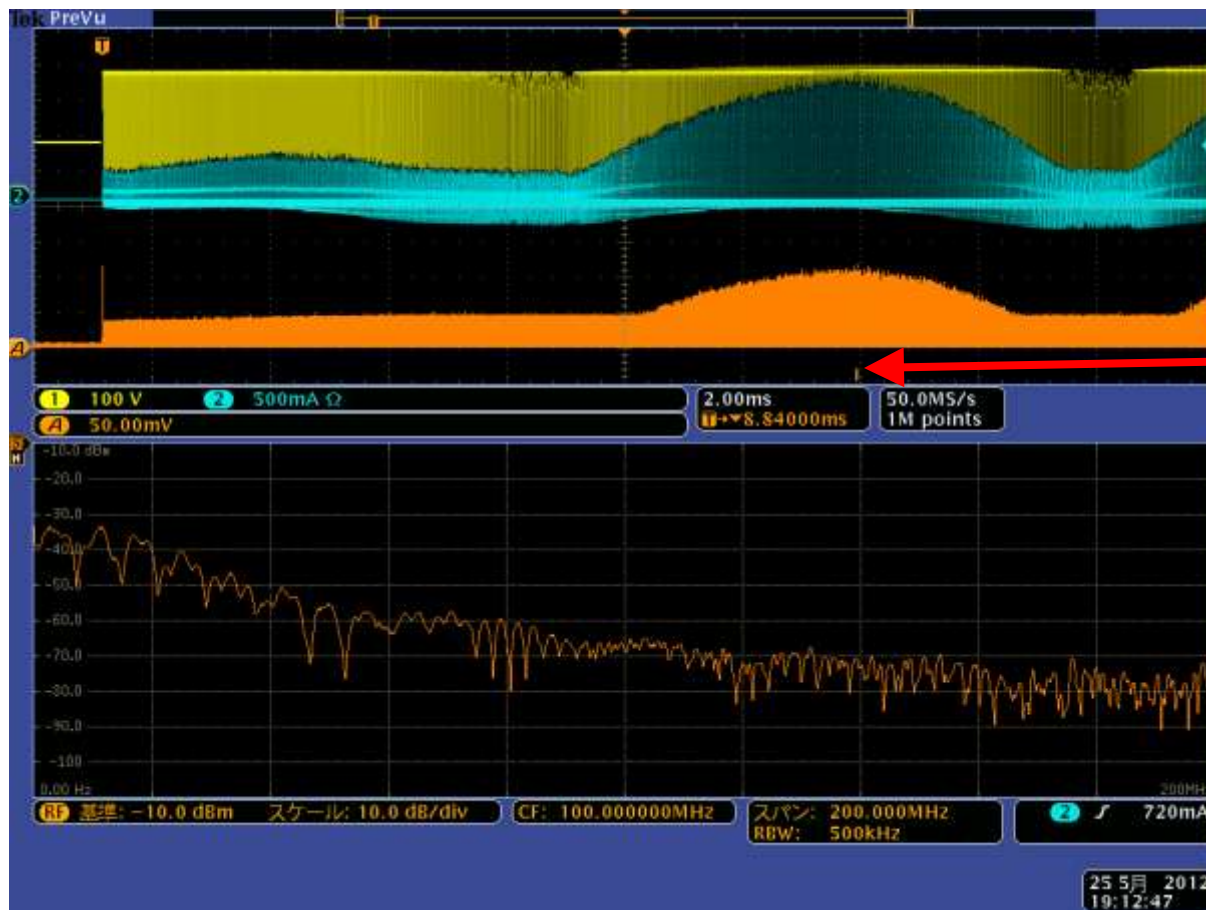
Panノブで自由に
時間を移動可能



スペクトラム・タイムの瞬間
のスペクトラム
(近接界プローブを使用)

参考: スイッチング電源の放射ノイズ測定の実例

- MDO4104-6型によりPFC電源を測定
 - RF入力に近接界プローブを接続し、放射ノイズを測定



Ch1: Vds (黄色)

Ch2: Id (青色)

スペクトラム・パワー
の時間変動

スペクトラム・タイム

Panノブで自由に
時間を移動可能



スペクトラム・タイムの瞬間
のスペクトラム
(近接界プローブを使用)

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
- 広帯域高電圧差動プローブ/高電圧プローブにより高効率回路に対応
 - 業界唯一 周波数帯域200MHz 1.5kV 高CMRRの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
- 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

ご清聴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>