

ロゴスキーコイル電流プローブによる高速 SW 電流測定

1. 概要

はじめに

ロゴスキーコイル電流プローブは高速・大電流のスイッチング特性を測定することが可能です。ここではその使用にあたって精度良く、安全に測定するための留意点等について紹介します。

留意点

1. 電流変化の傾き (di/dt) で定義される絶対最大定格を超えないこと。
2. 周囲の電界の影響に注意。
3. プローブとの遅延時間差に注意。

2. 絶対最大定格

2.1. 絶対最大定格

ロゴスキーコイル電流プローブの測定時の最大許容電流は電流変化の傾き (di/dt) で定義されます。これは測定電流の周波数や、立ち上がり時間によって許容電流が変わることを意味します。

型番	Peak [kA/μs]	RMS [kA/μs]
SS-281A,282A	80	1
SS-283A,284A,285A	80	1.5
SS-286A	80	2

表.1 測定電流絶対最大定格

※Peakは単パルス信号に対する値で、この値を1回でも超えてはなりません。

※RMSは連続信号に対する値で、この値を超えてはなりません。

※絶対最大定格を超えた場合はプローブが損傷を受けるもしくは発案・発火の可能性があります。

2.2. 正弦波の場合

正弦波信号の電流変化の傾き (di/dt) は正弦波信号を微分することで求められ、最大傾きは $2 \times \pi \times$ 周波数 \times 信号振幅となります。

2.3. パルス波形の場合

単発パルスの場合、電流変化の傾き (di/dt) は最大電流値 \div 立ち上がり時間 (又は立ち下がり時間) で計算します。

連続パルス信号の場合は電流パルスの立ち上がり、立ち下がり部の (di/dt) を算出し、周期 T からその実効値を算出します。この値が絶対最大定格の RMS 値を超えてはなりません。

$$\frac{d}{dt} I_s(t) = \sqrt{\left(\frac{I_s}{Tr}\right)^2 \times \frac{Tr}{T} + \left(\frac{I_s}{Tf}\right)^2 \times \frac{Tf}{T}}$$

※絶対最大定格の詳細については別紙アプリケーションノート ROG14069「ロゴスキーコイル電流プローブの最大許容電流について」を参照してください。

3. 電圧ノイズの影響

3.1. 測定のポイント

測定する電流が高速になることによって大きな問題となるのが、周囲の電圧ノイズの影響です。ロゴスキーコイル電流プローブは磁界変化を検出して電流を測定しますが、高周波ではコイルと、被測定電極もしくは近傍電極との間の静電結合により電圧変化の影響を受けることが避けられません。このため、10MHz を超える周波数領域やパルスの立ち上がり時間が 30ns 程度になると、測定値の再現性と信頼性の確保が難しくなってきます。少しでも影響を避けるため以下の点に注意してください。

- ① 出来るだけ電圧振幅の少ない場所(ノード)で測定する。
- ② ロゴスキーコイルは浮遊容量が減るよう出来るだけ離す。(接触は特に良くない)
- ③ 適切なレンジの電流プローブを使用する。大電流レンジのプローブで小電流を測定すると SN 比が悪化し、影響を受けやすくなります。
- ④ 再現性を向上させるには測定時のプローブの物理的な配置が変わらないように工夫する。
- ⑤ 不必要な成分を落とせるよう適切な帯域制限を使用する。

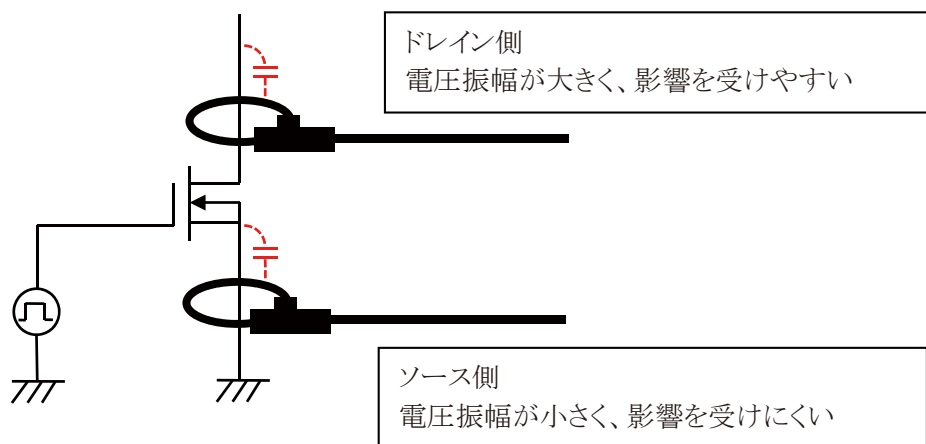


図.1 ローサイド側のスイッチング電流測定

3.2. 測定例

3.2.1. 評価の方法

前記の静電結合でどの程度の波形変化が現れるのかを実測してみました。パルスジェネレータの出力を 50Ω の抵抗で終端します。この抵抗には出力電圧 ÷ 50 の電流が流れますが、この電流をどこで測定するかで、波形が変化することを評価します。

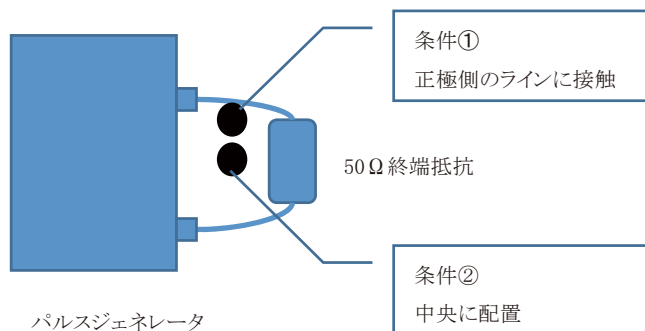


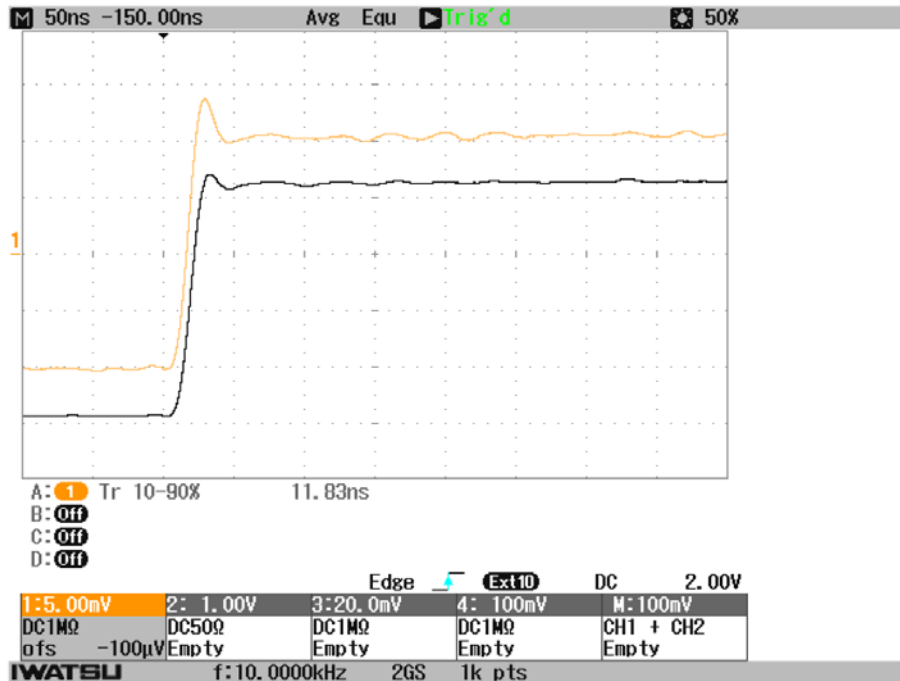
図.2 静電結合の影響度評価

3.2.2.

測定条件①では電圧が振れているラインに接触しているため、静電結合により電圧ノイズが重畳してオーバーシュートが出ています。

CH1(黄):測定条件①

REF(黒):測定条件②

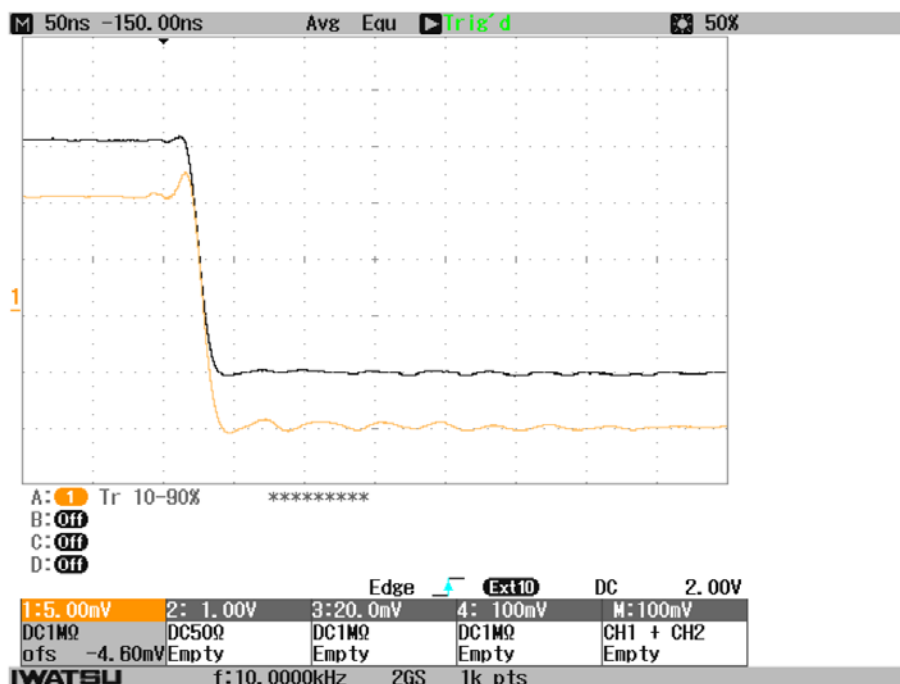


3.2.1. 測定結果(負極性)

これは電流の極性が逆になるようにログスキーコイルの取り付け方向を反対にした場合です。電流の極性は逆になりますが、重畳する電圧ノイズの極性は変わらないため、今度はプリシュートが出たような波形となっています。

CH1(黄):測定条件①

REF(黒):測定条件②

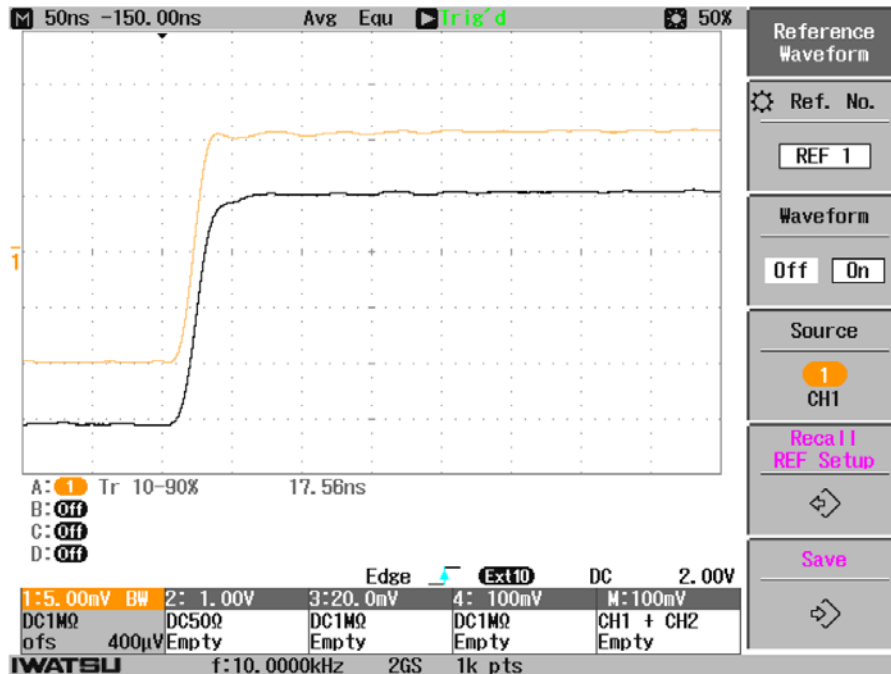


3.2.1. 測定結果(帯域制限 20MHz)

前記の正極性と同じ条件にてオシロスコープ側で 20MHz の帯域制限をかけた場合です。波形変化はより少なくなっています。特に近傍に didt の高い電圧源がある場合、有効な場合があります。

CH1(黄):測定条件①

REF(黒):測定条件②



4. 遅延時間について

4.1. 遅延時間の重要性

インバータなどのスイッチング特性の評価の際に電圧および電流を測定してスイッチングロス进行评估する場合があります。この時に電圧の測定系と電流の測定系の遅延時間があっていないと測定誤差になってしまいます。

以下は FET の V_{ds} と I_d を測定して FET の電力損失を計算している例ですが、電流測定系に遅れがあると FET が ON になるタイミングでは電力損失が小さくなっているように見えてしまいます。FET が OFF になるタイミングでは逆に電力損失が大きくなっているように見え、正確な評価ができません。

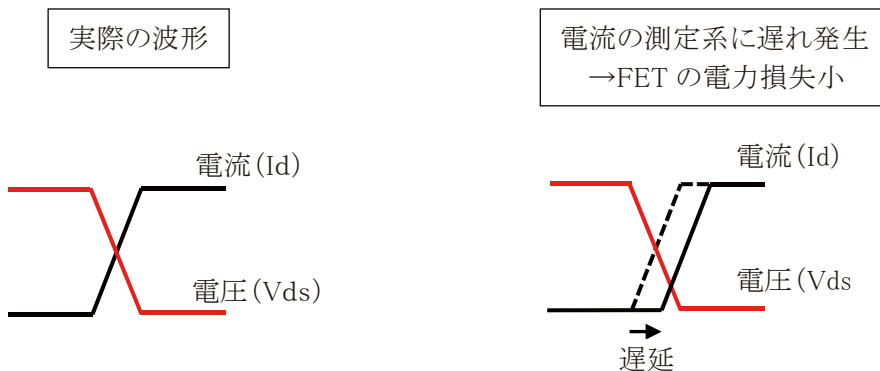


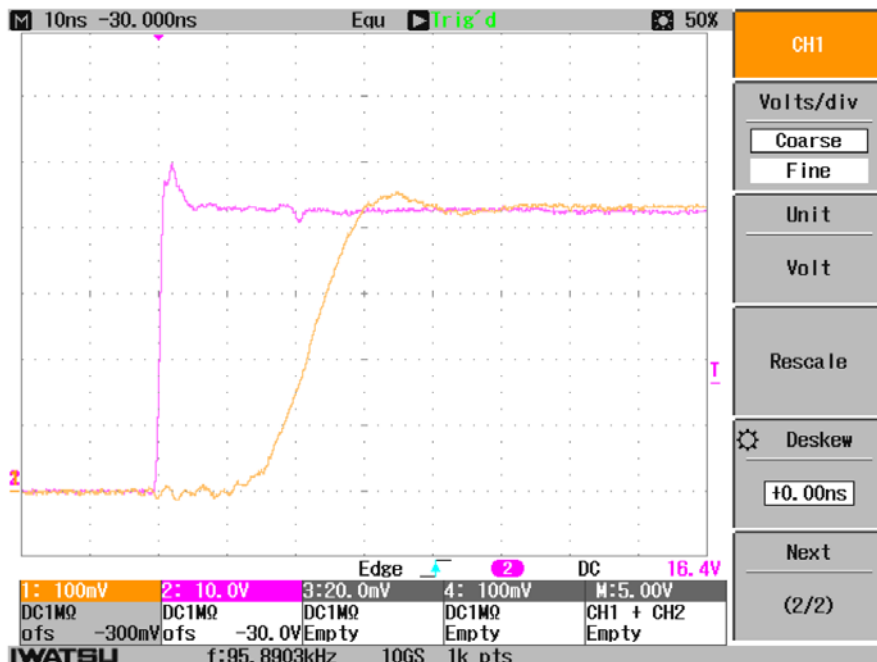
図.3 遅延時間の影響

<初期状態の波形>

ログスキー電流プローブの方が 14ns 程度遅れていることがわかります。この値は電圧プローブに対する相対遅れになりますので、注意してください。

CH1:SS-282A による電流波形

CH2:電圧プローブ (PHV633L) による電圧波形

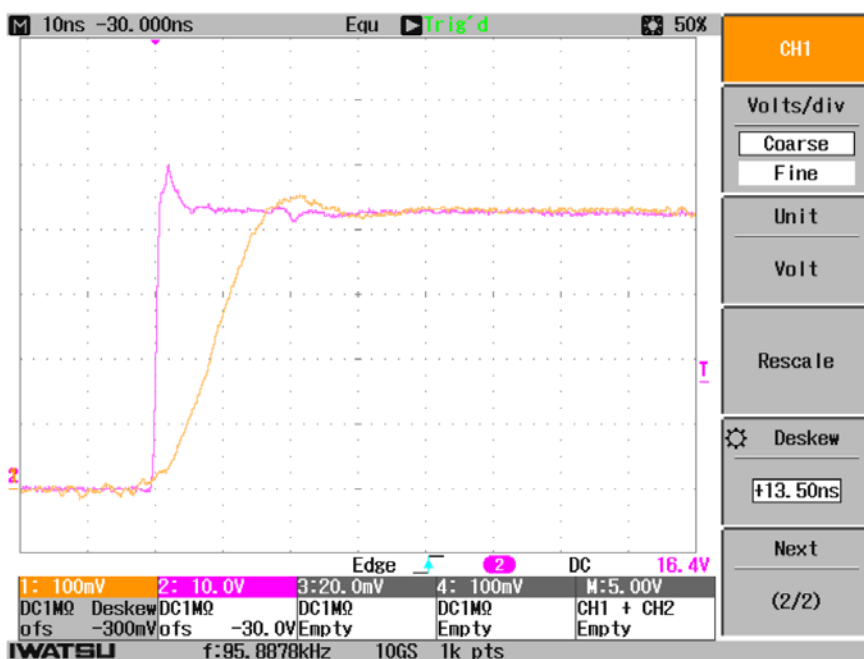


<補正後の波形>

波形の立ち上がり部が一致(*)するようにオシロスコープの「Deskew」機能で 13.5ns の補正をします。

CH1:SS-282A による電流波形

CH2:電圧プローブ (PHV633L) による電圧波形



※この条件での電圧プローブの帯域は 100MHz 以上あり、電流プローブ側の帯域は 30MHz 程度のため、立ち上がり時間に差が出ます。この場合は波形の立ち上がり部分を一致させるように補正します。

4.2. 遅延時間の要因

ログスキー電流プローブ自体の絶対的な遅れ時間は実測で 26~28ns 程度（出力同軸ケーブル 0.5m 含む）となっています。これを要因別に見ると、まずセンサ部のケーブルが約 1.5m であるため、ここで約 7.5ns の遅延が発生します。出力同軸ケーブル 0.5m による遅延は 2.5ns で、残り 17ns (= 27ns - 7.5ns - 2.5ns) が本体部積分器の遅延時間となります。（同軸ケーブルは概ね 5ns/m の遅延時間があります。）

電圧プローブの遅れ時間が既知の場合は、この約 27ns をログスキー電流プローブの遅延時間として補正することも可能ですが、より正確には後述の測定により遅延時間差を補正する必要があります。

4.3. 遅延時間差の補正方法

4.3.1. 測定の方法

電圧の測定系と電流の測定系の遅延時間差(スキュー)を補正するには、実際に使用するプローブとオシロスコープを用いて図.2 のような測定系にて行います。

高速/大振幅のパルスジェネレータの出力を 50Ω 終端器で終端しますが、このとき電流を検出できるように検出用のコイルを GND 側に挿入します。この検出コイル部に流れる電流をログスキー電流プローブで測定し、パルスジェネレータの出力電圧を電圧プローブで測定します。

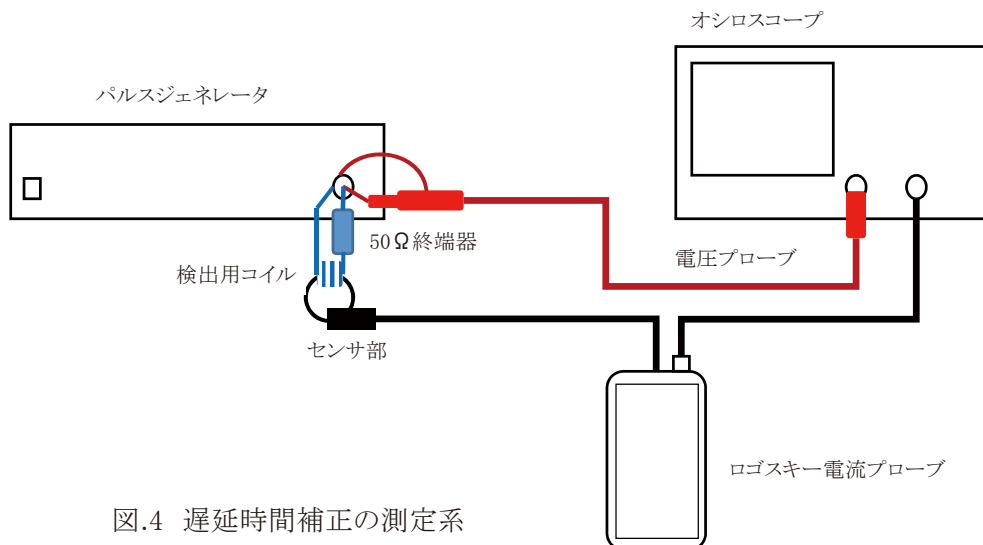


図.4 遅延時間補正の測定系

※パルスの立ち上がりが遅いと正確に測定できませんので、10ns 程度の立ち上がり時間のパルスジェネレータが必要です。

※等価的な電流を増やしたい場合はコイルのターン数を増やします。ただし、コイルのインダクタンスが増えてくると電圧/電流の位相差が出てきてしまいますので、コイルはなるべく小径にして 5 ターン程度にするべきです。

4.3.2. 補正の実施例

<使用機器>

- パルス発生器: PSPL2600 (PSPL 社製)
- オシロスコープ: DS-5554 (IWATSU 製)
- 電圧プローブ: PHV633L (PMK 社製)
- 電流プローブ: ログスキー電流プローブ SS-282A

<測定方法>

パルス発生器から振幅約 42[V] のパルスを出し、5 ターンコイル経由して 50Ω で終端します。この時の測定電流は $42[V] \div 50[\Omega] \times 5[\text{ターン}] = 4.2A$ となりますので、これをログスキー電流プローブで極性が正になるように測定します。電圧プローブはパルス発生器の出力に最短のリード長で接続します。この時、GND リードを使うと波形が乱れて正確に測定できない場合があります。

5. CTとの波形比較

高速電流波形の評価時に良く標準として用いられているカレントトランス(CT)との波形比較結果です。

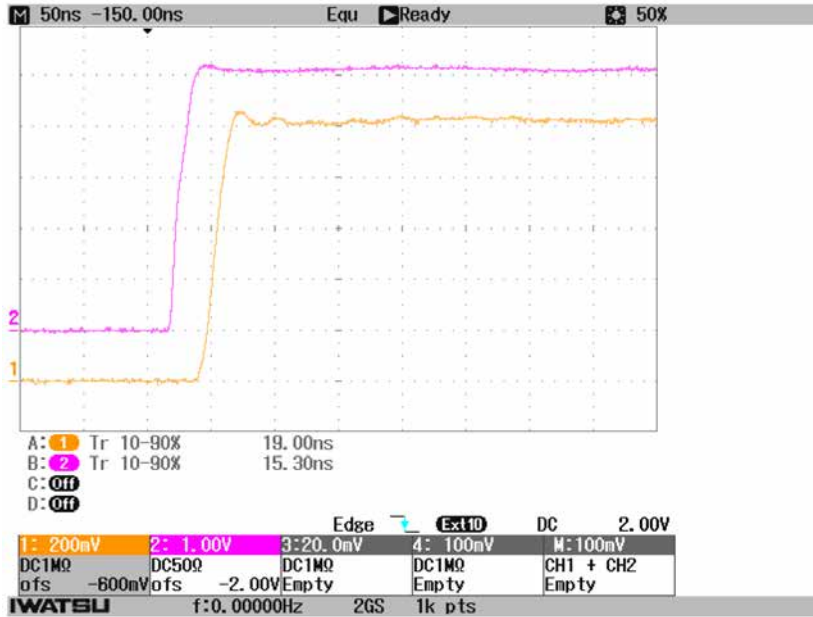
ロゴスキー電流プローブ:SS-282A

カレントトランス:2877(Pearson社 帯域 200MHz)

測定信号:カスタム電流パルス発生器 10A、Tr=15ns

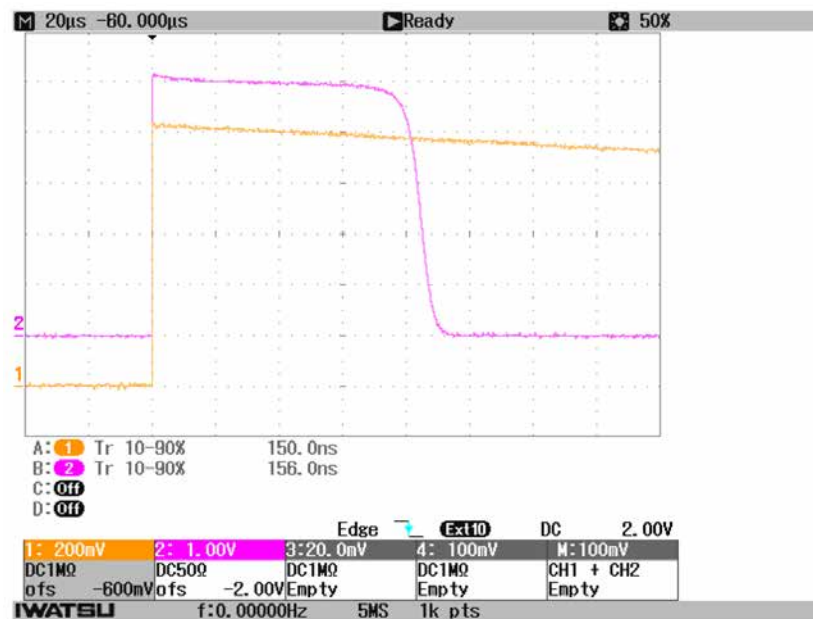
<立ち上がり波形>

CH1:SS-282A、CH2:カレントトランス



<全体波形>

カレントトランスは磁気飽和により、80 μ s 付近で測定できなくなっていますが、SS-282A は問題なく測定できています。(ロゴスキーは原理上飽和することがありません)



技術的なお問い合わせはカスタマサポートまで フリーダイヤル0120-102-389 Email:info-tme@iwatsu.co.jp