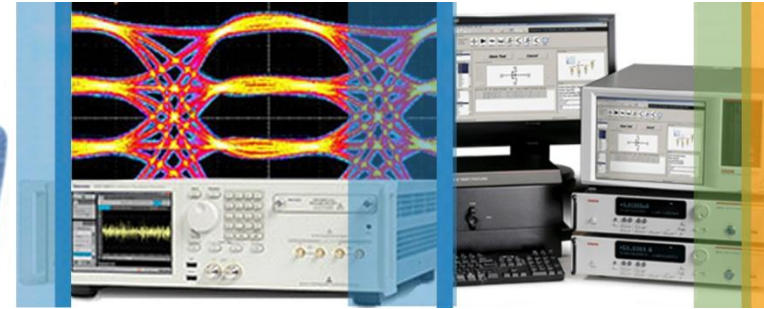


# D-6

## 組込み機器開発に有効な汎用オシロスコープの応用例

テクトロニクス／ケースレー  
イノベーション・フォーラム 2013



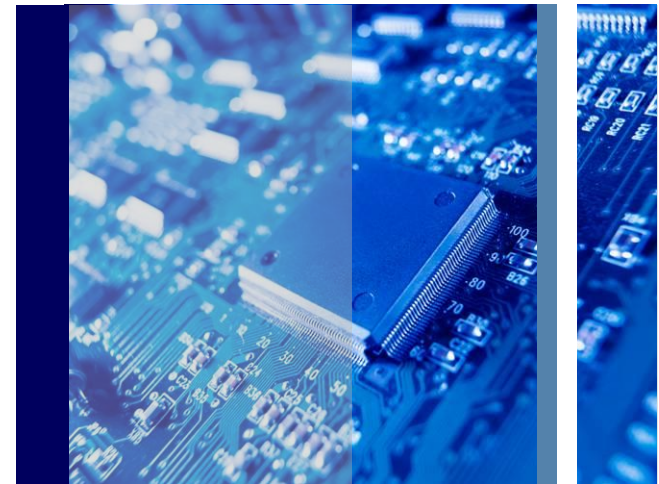
中門 哲士

**Tektronix**<sup>®</sup>

**KEITHLEY**  
A Tektronix Company

# アジェンダ

- イントロダクション
  - チャレンジ
  - ソリューション
- アプリケーション例
  - バッテリ駆動のステッピング・モータ制御
  - 超音波距離計
  - 高輝度LEDドライブ
  - シリアル通信を使ったリチウム・イオン電池の充電器
  - 短距離無線通信
  - SPIコントロールのA/Dコンバータの評価
- まとめ



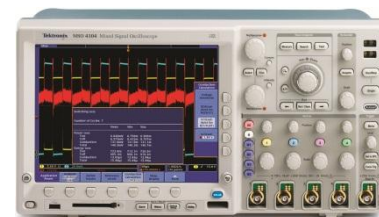
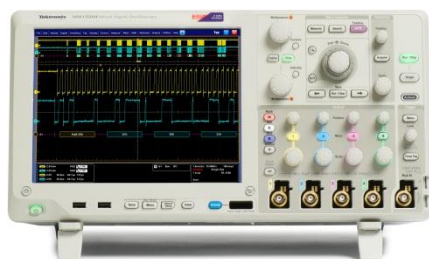
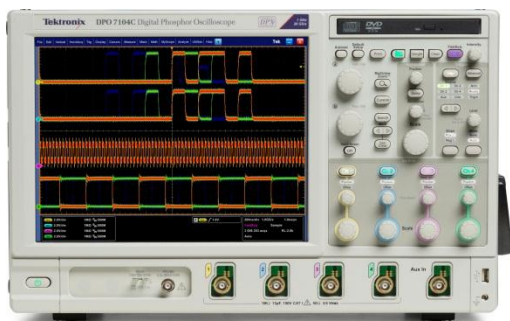
# イントロダクション

## チャレンジ

- 組込み機器に使われるプロセッサのクロック周波数が飛躍的に高速化
  - 高速なメモリの使用(DDR2/DDR3)
  - 内部シリアル・バス・クロックも高速化
  - 家電、制御機器においても高速化
- 機器のパラメータ設定の最適化のプロセス
  - マイクロコントローラのファームウェアのわずかな変更で、大きく組込み機器のパフォーマンスを改善することも可能
  - そのための適正なゲイン、オフセット、ディレイ、ヒステリシスやPWMなどのパラメータの選択には多くの作業時間が必要
- 組込み機器はインテリジェンスを持ち、様々な周辺機器、周辺チップと通信を行っている
  - マイクロコントローラと周辺機器の通信量は増加傾向にあり、多くはシリアル通信である

# イントロダクション ソリューション -1

- 組込み機器のデバックに適したMSO/DPOオシロスコープ・シリーズ

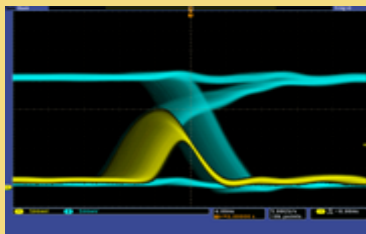


	DPO7000C	MSO/DPO5000	MSO/DPO4000B
周波数帯域	500MHz ~ 3.5GHz	350MHz ~ 2GHz	100 MHz ~ 1GHz
入力チャンネル	アナログ 4	アナログ 4 デジタル 16 (MSO)	アナログ 4 デジタル 16 (MSO)
メモリ長(最大)	500M	250M	20M
シリアル・バス解析	I <sup>2</sup> C, SPI, CAN, LIN, FlexRay UART/RS-232	I <sup>2</sup> C, SPI, CAN, LIN, FlexRay, RS-232/422/485/UART, USB 2.0, MIL-STD-1553, Ethernet,	I <sup>2</sup> C, SPI, CAN, LIN, FlexRay, RS-232/422/485/UART, USB, MIL-STD-1553, Ethernet, I <sup>2</sup> S/LJ/RJ/TDM,
同時解析バス数	4 (使用チャンネル数により制限)	4, 16 (MSO) (使用チャンネル数により制限)	4

# イントロダクション ソリューション -2

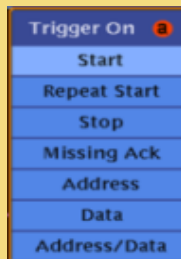
## ■ 組込み機器のデバックに必要な機能\*

### 検出 (Discover)



- 最高 50,000波形/秒の波形取込レート
- 輝度階調によるデジタル・フォスファ表示

### 取込 (Capture)



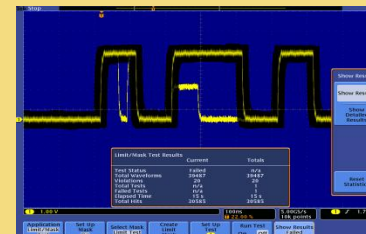
- シリアル・バス解析機能を含め、135を超えるトリガ・コンビネーションを実現
- MagniVu™ 高速デジタル・アキュジションシステムにより 60.6 ps 高分解能を実現
- 低容量パッシブ・プローブ (標準)
  - パッシブで初の1GHz帯域 (通常の2倍)
  - 負荷容量4pF(通常の1/2)
  - 入力抵抗10MΩ

### 検出 (Search)



- Wave Inspector®による操作
  - ロングメモリも使い切る Pan/Zoomコントロール
  - アナログ、デジタル、シリアルバスのデータを自動的に検索してマーク

### 解析 (Analyze)



- 44 種の拡張波形演算
- オプションによるシリアルバス解析
  - I<sup>2</sup>C, SPI, RS-232, I<sup>2</sup>S
  - CAN, LIN, FlexRay
  - USB 2.0, Ethernet
  - MIL-STD-1553
- アプリケーション・サポート
  - パワー解析
  - リミット/マスク・テスト
  - ビデオ

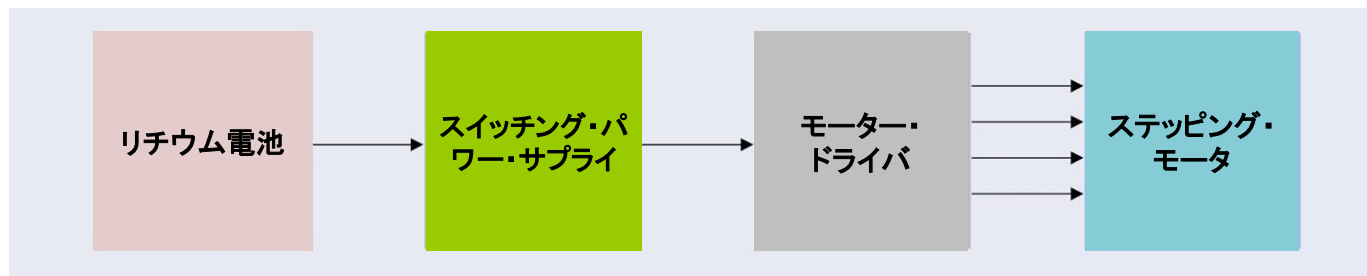
\* : スペック等はMSO4000 シリーズの場合を示す

# アプリケーション例

## バッテリー駆動のステッピング・モータ制御

### ■ 概要

- ー リチウム電池1個を電源に使ったステッピング・モータ



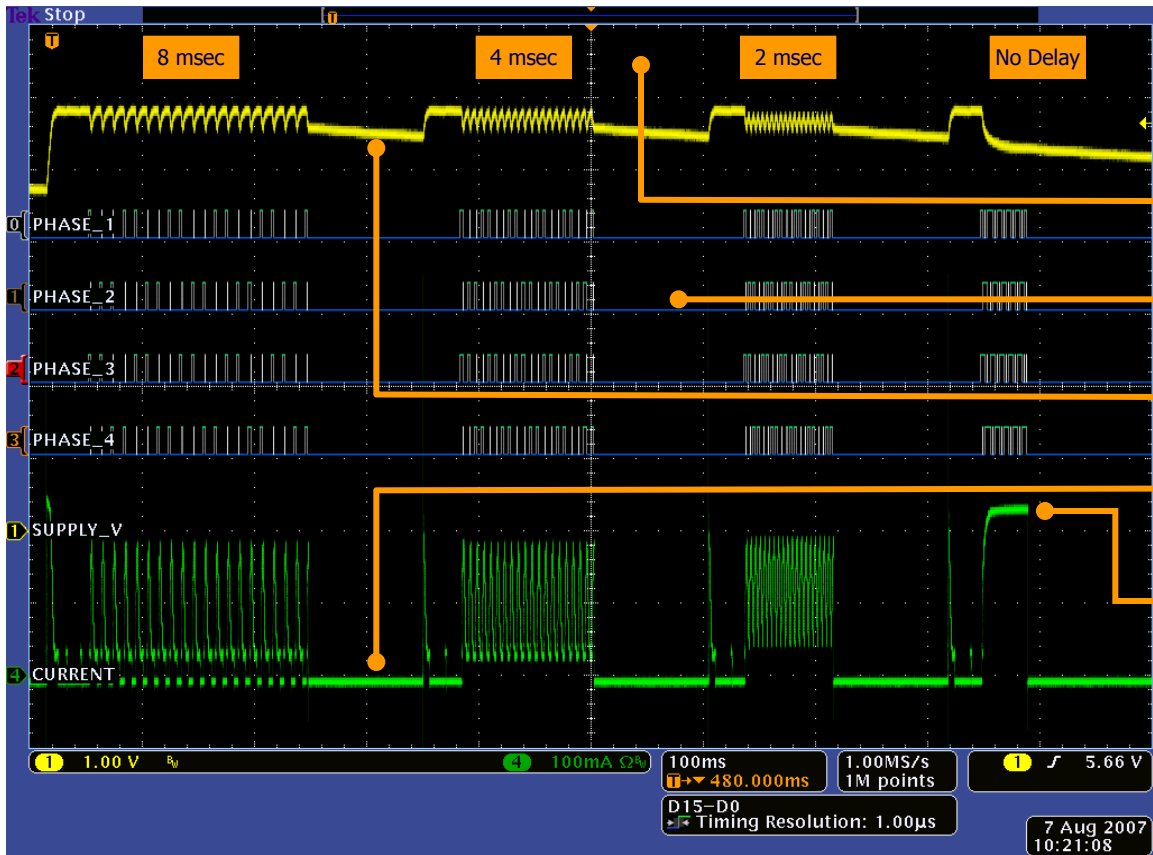
### ■ 目標

- ー 通常動作時の最適ステップ・ディレイの決定
- ー バッテリー最終放電電圧時の最適ステップ・ディレイの決定

### ■ 問題点

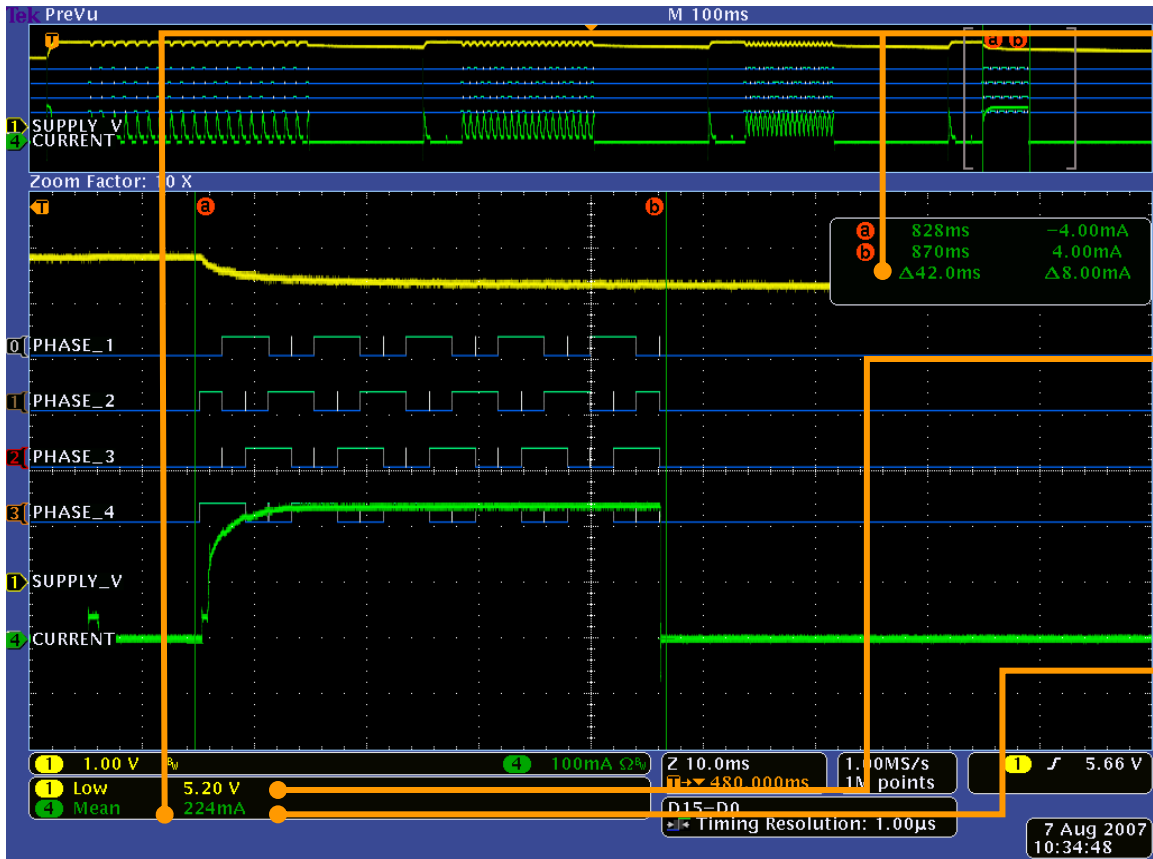
- ー バッテリーの電流制限
  - 通常回転時のバッテリー電流は、最大120mAに制限
  - バッテリー放電終了電圧時の電流は、最大60mAに制限
  - バッテリー電流は、ステップ間のディレイの追加により制限する
- ー スwitching・パワー・サプライ出力電圧のサグ
  - スwitching・パワー・サプライにより、電圧を2.5Vから6Vに昇圧

# 4つのステップ・ディレイ値による測定



- マルチ・ステップ・ディレイの試験を1回で取込
  - 8ms、4ms、2ms、ディレイなし
  - デジタル入力チャンネルによる4相ドライブ波形
  - アナログ入力チャンネルによる電圧波形
  - 電流プローブによる電流波形
- ディレイなしが最も大きな電流だが、消費電力は最小

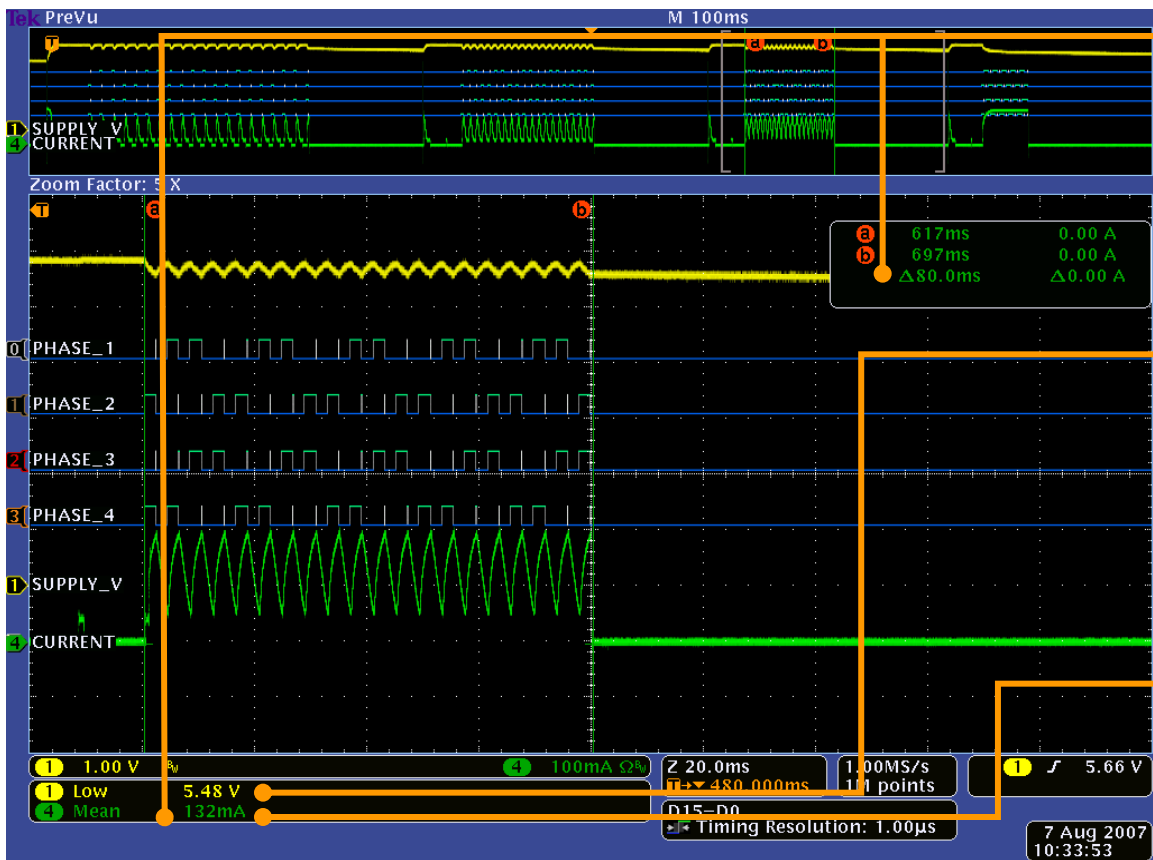
# ステップ・ディレイなしの場合



- Energy =  $9,408\text{mA} \cdot \text{msec}$ 
  - 電流 = 224mA
  - 時間 = 42ms
- 5.2Vまで電圧ドロップ
  - モータの適正ドライブ電圧以下
- バッテリ電流は制限値の120mAを大きく超えている

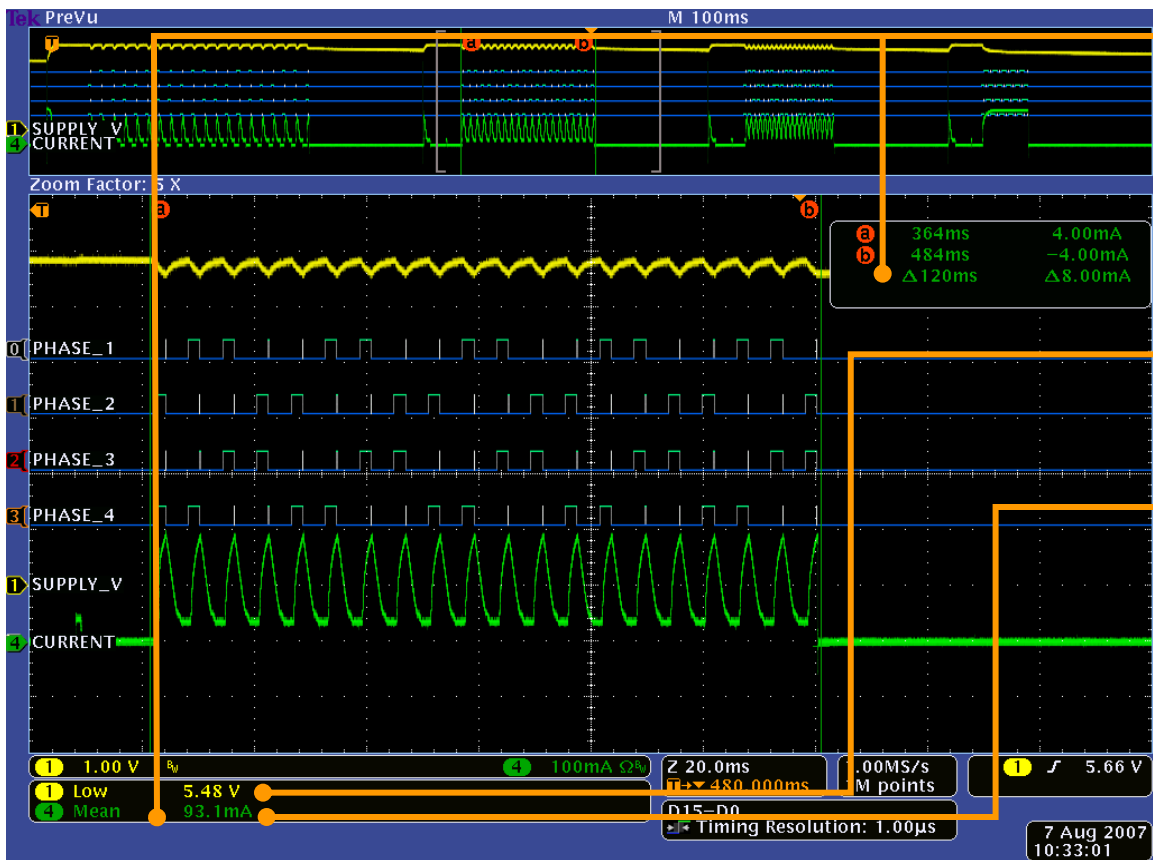


# デレイ 2msの場合



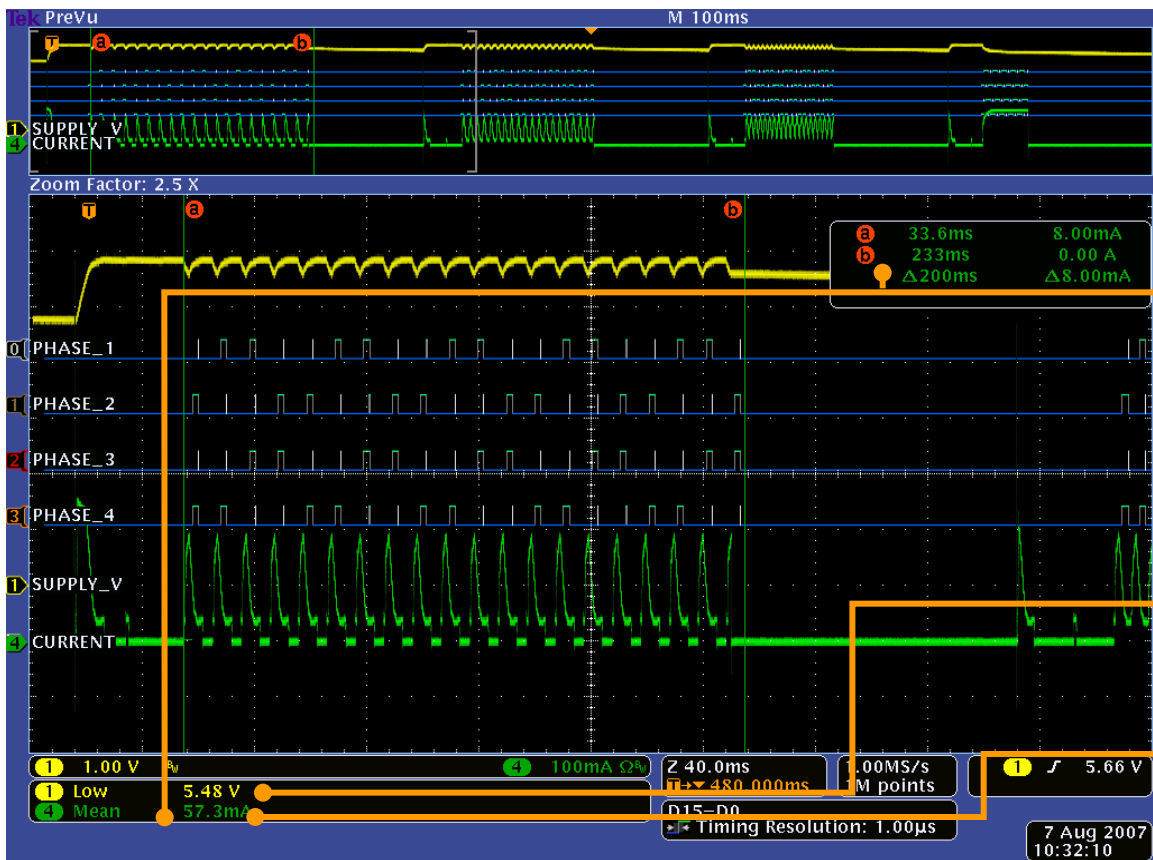
- Energy =  
10,560mA\*msec
  - 電流 = 132mA
  - 時間 = 80ms
- デレイなしより高い
  - 5.48Vまで電圧上昇
- バッテリ電流は制限値に近づいているが、まだ高い

# デレイ 4msの場合



- Energy =  
11,160mA\*msec
  - 電流 = 93mA
  - 時間 = 120ms
- 電圧は5.48Vに留まっている
- バッテリ電流は制限値内に納まっている
- デイレイ3msが電圧、電流値の要件を満たしているうえ、4msよりも少ないエネルギーとなっている

# デレイ 8msの場合



- バッテリー放電終了電圧時の許容電流は60mA
- Energy =  
11,400mA\*msec
  - 電流 = 57mA
  - 時間 = 200ms
- 電圧は5.48Vから変動なし
- バッテリー電流は、放電終了電圧時の許容範囲に納まっている

# アプリケーション例：バッテリー駆動のステッピング・モータ制御

## 結論

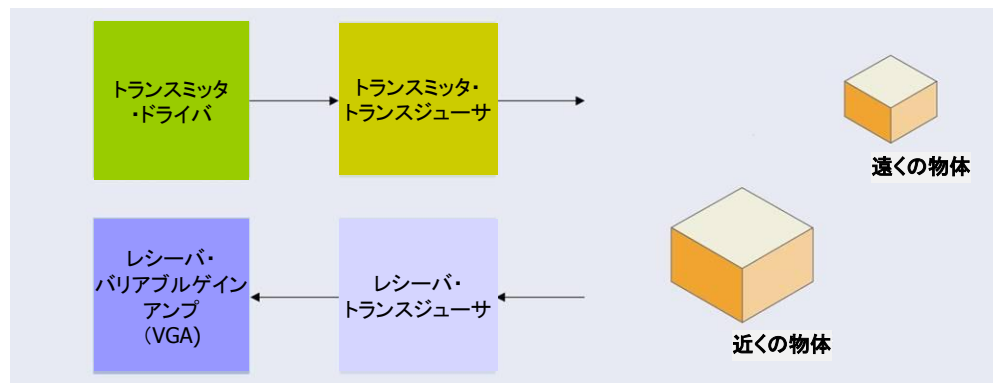
- 結果
  - 通常動作時の最適ステップ・ディレイの決定
    - ステップ・ディレイ: 3ms
  - バッテリ最終放電電圧時の最適ステップ・ディレイ
    - ステップ・ディレイ: 8ms
- 今回の例から明らかなこと
  - 1回のオシロスコープでの波形取込により、複数のモータ・ドライブのパラメータの検討が可能
  - 単発取込でも、正しいモータ・ドライブ・オペレーションの確認が可能

# アプリケーション例

## 超音波距離計

### ■ 概要

- 超音波トランスミッタとレシーバ
- 測定可能範囲は、超音波パルスの伝搬時間に基づく



### ■ 目標

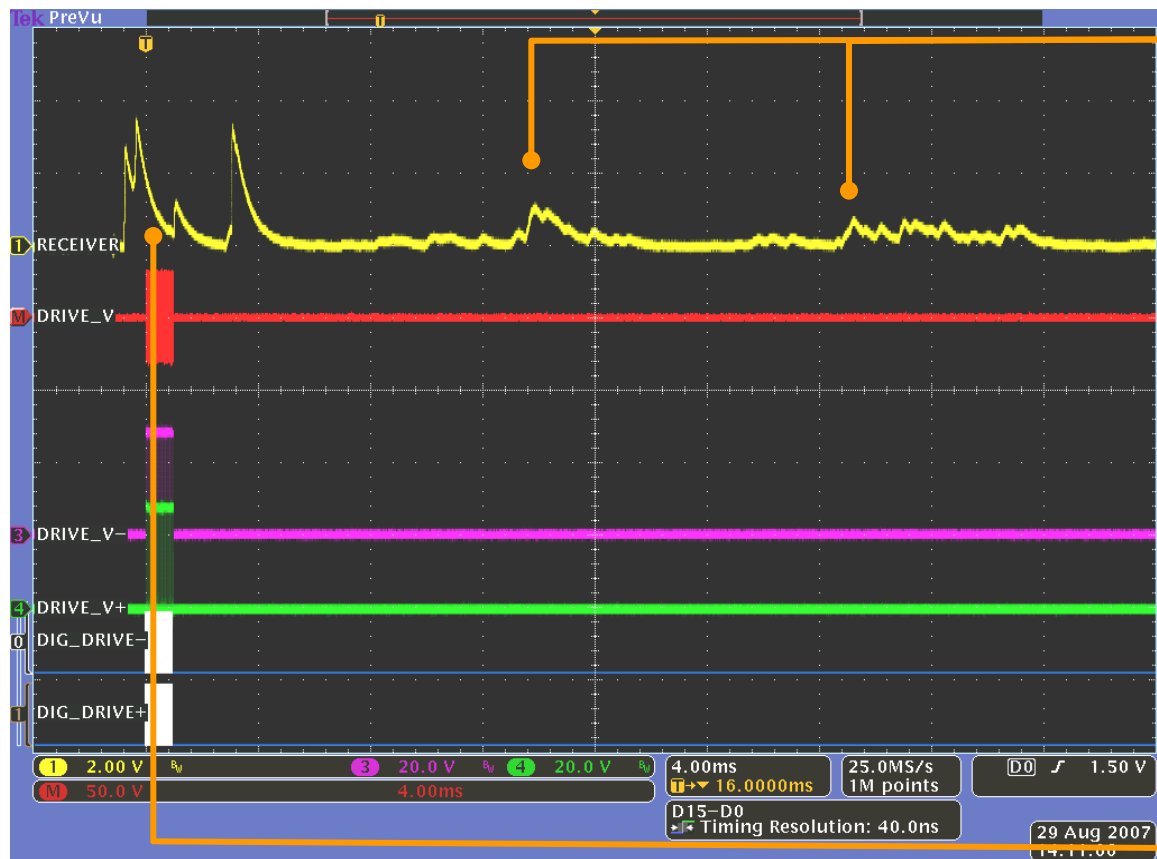
- VGAの最適ゲインの決定
- トランスミッタ・トランスジューサを駆動する電圧と周波数の確認

### ■ 問題点

- 超音波パルスの送信から受信までの全データの取り込み
- その取込波形を用いた送信波形の詳細な測定

# 送信波形と受信波形

## ゲイン = 8



■ 送信波形から14msと28ms離れた、2つの目標から反射してきた受信波形

- 音速を340m/secとすると、2つの目標までの距離は、およそ2.4mと4.8m
- 振幅が小さいので、ゲインをさらに高くとる必要がある

■ 0.6m以遠(=伝搬時間4ms)の距離を測定するため、送信時のノイズは問題にならない

# 拡大した送信波形



■ 送受信波形のドライブ信号の部分を拡大表示

— ドライブ時間:  
1ms 正常

— ドライブ周波数:  
40kHz 正常

— ドライブ電圧:  
60Vp-p 正常

# 送信波形と受信波形

## ゲイン = 16

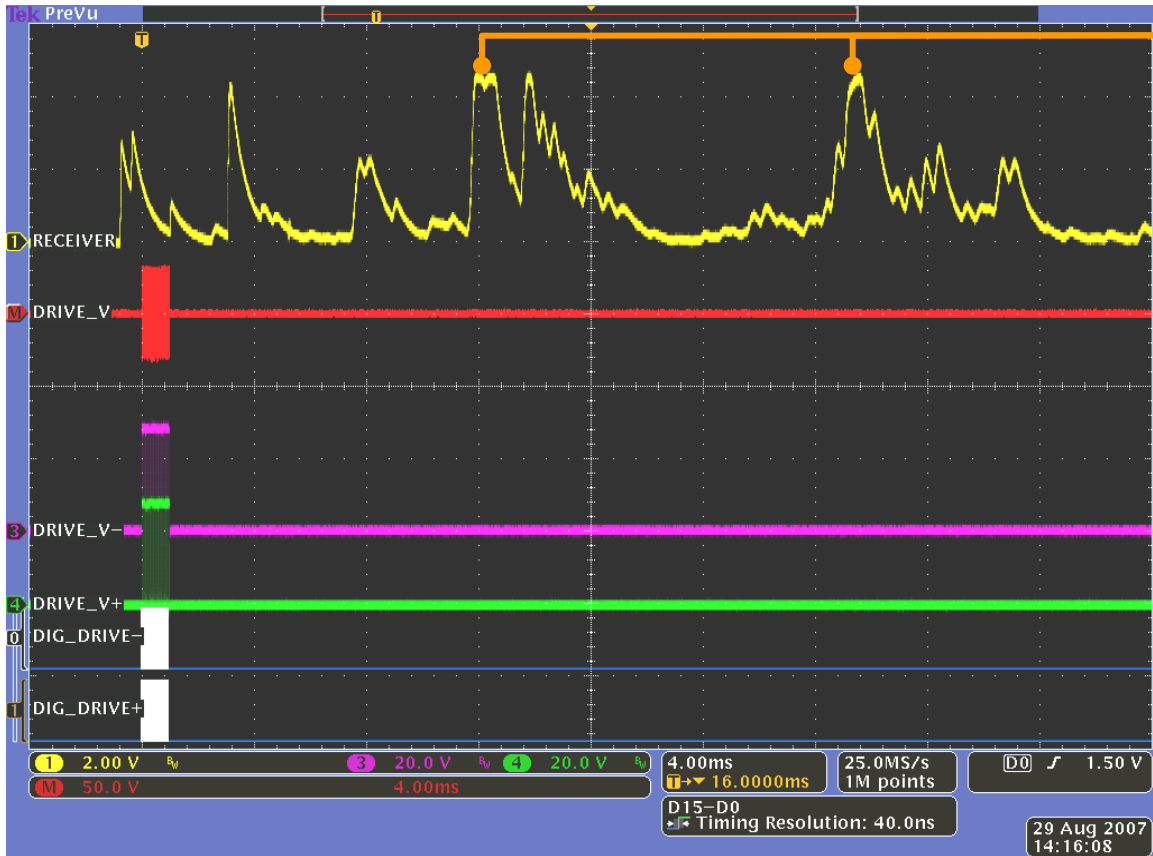


- ゲイン設定を増加したため、受信信号のレベルも増加
  - しかし、クリッピング・レベルの5Vよりまだ低い



# 送信波形と受信波形

## ゲイン = 32



- ゲイン設定をさらに増加したため、受信信号のレベルもさらに増加
  - 最初のターゲット部分はクリップ。VGAが飽和し始めている
  - 二番目のターゲット(遠方の目標物よりの反射)電圧は、フル振幅の5Vに近づいている

# 送信波形と受信波形

## ゲイン = 64



- ゲイン設定をさらに増加したため、受信信号のレベルもさらに増加
  - 両方のターゲットとも、VGAが飽和し、波形はクリップ
  - 距離の読み取り確度低下
  - オーバー・ドライブにより、反射波形に歪が発生
- このゲイン設定は高過ぎる
  - ゲイン=32が適切な設定値

# アプリケーション例：超音波距離計

## 結論

### ■ 結果

- VGAの最適ゲインの決定
  - ゲイン = 32 が最適設定
- トランスミッタが、正しい電圧と周波数でドライブされているかどうかの確認
  - 拡大波形から、1ms持続するバースト信号でドライブされており、バースト信号内のパルスの周波数も正しいことが読み取れる
  - ドライブ信号の電圧波形は、必要とされる対称な形状の2相の信号となっており、その合成波形の“DRIVE\_V”のP-P電圧は、必要とされる約60Vであった

### ■ 今回の例から明らかなこと

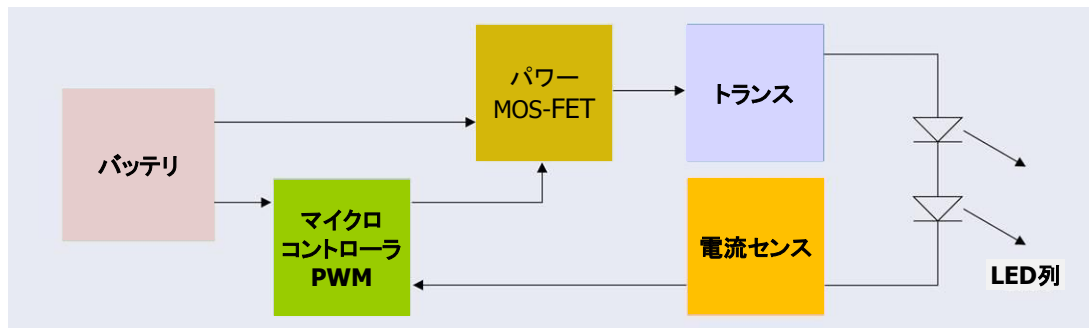
- オシロスコープで送信信号と受信信号の両方の全体波形を取込むことができた
- 同じ波形取込みを拡大して、簡単にトランスミッタのドライブ波形の詳細を観察することができた

# アプリケーション例

## 高輝度LED電源

### ■ 概要

- 高輝度LED用電源
- 単純なマイクロコントローラ・ベースのパルス幅変調(PWM)
- バッテリ駆動



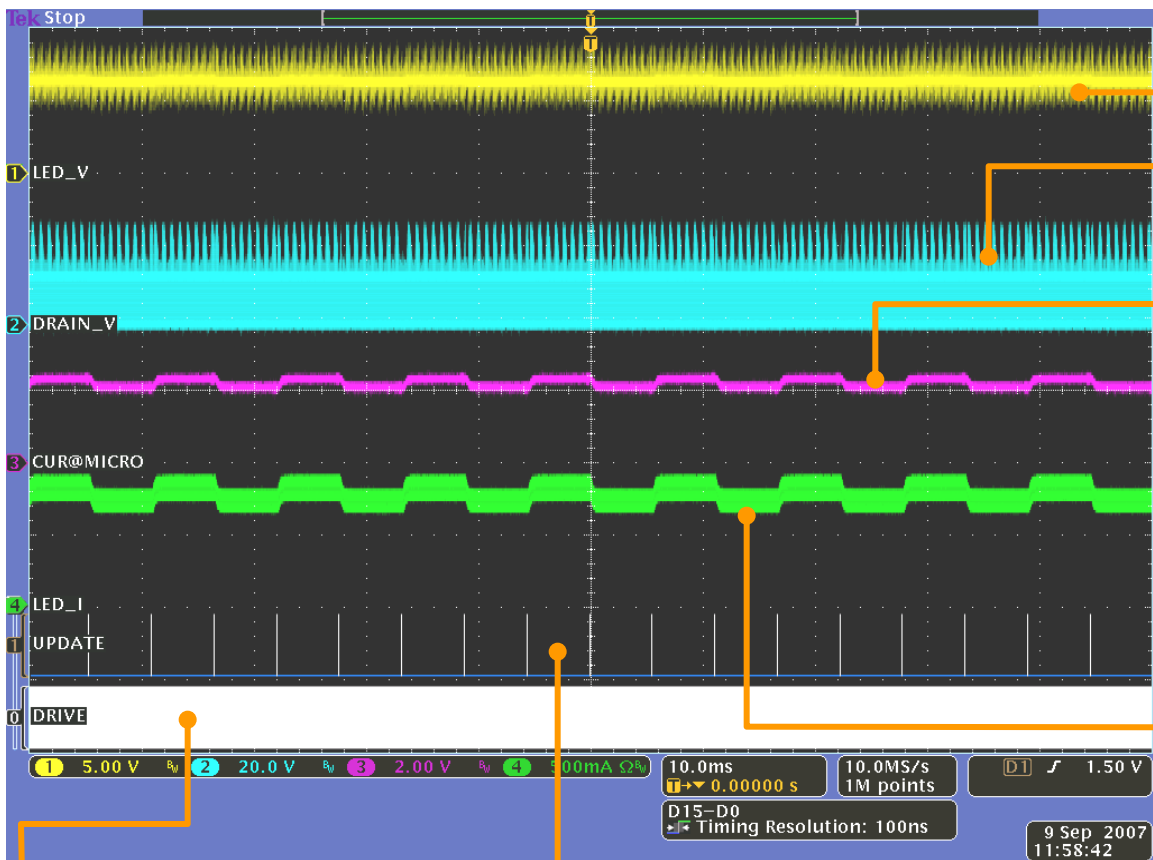
### ■ 目標

- バッテリ電圧の変動、LEDの発熱による駆動電流変化の抑制
- スwitching回路が正しく動作しているか確認
- PWMによるフリッカの発生を防ぐための最適なヒステリシス設定

### ■ 問題点

- 複数のアナログ、デジタル信号の同時モニタ

# LED動作の概要



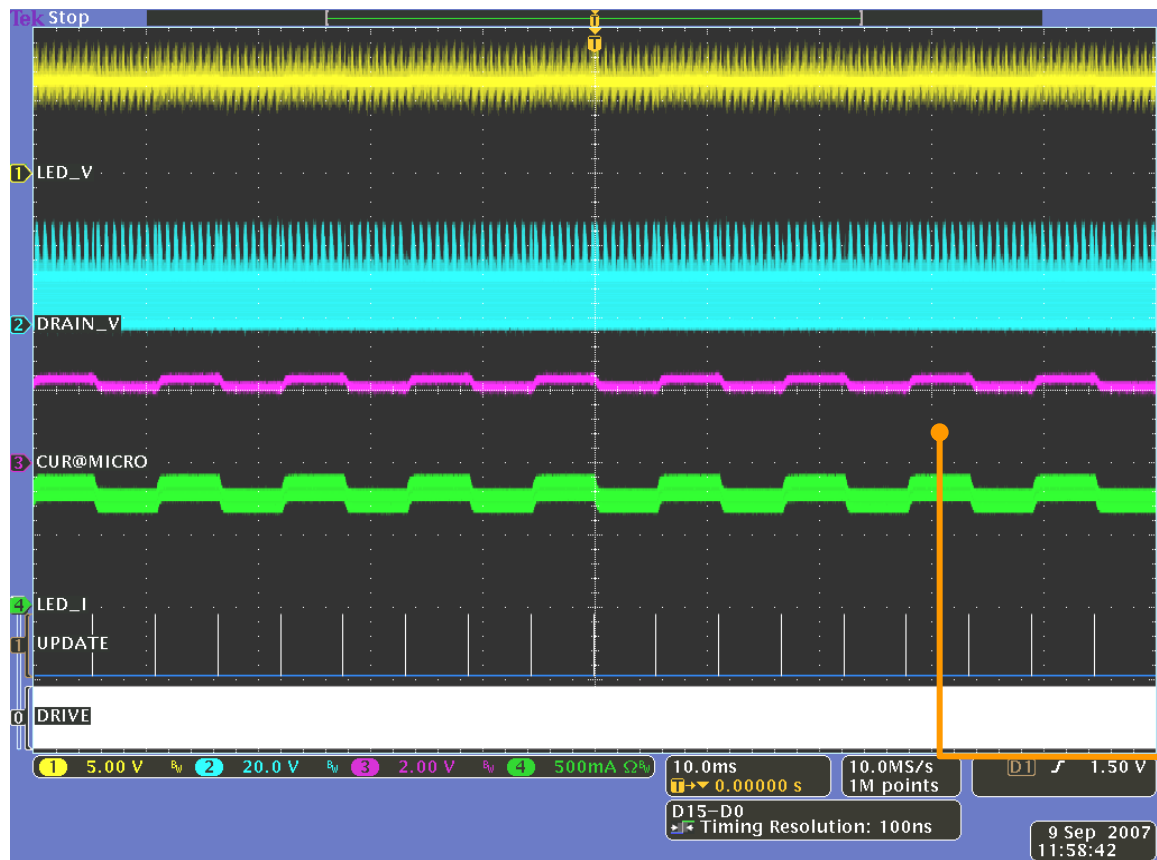
- 電圧
  - LED列に印加される電圧
  - パワーMOS-FETドレイン電圧(トランスをドライブ)
- フィルタをかけ、増幅したLED電流
  - マイクロコントローラのA/Dコンバータへ入力
  - パルス幅調整のため、プログラムされた電流値と比較される
- LED電流
  - 電流プローブによるLED列での電流

- デジタル信号
  - パワーMOS-FETのゲートをドライブ

- テンポラリー・マーカー
  - マイクロコントローラのSWで出力
  - パワー・サプライのデューティ・サイクルを変更中であることを表示

# LED動作

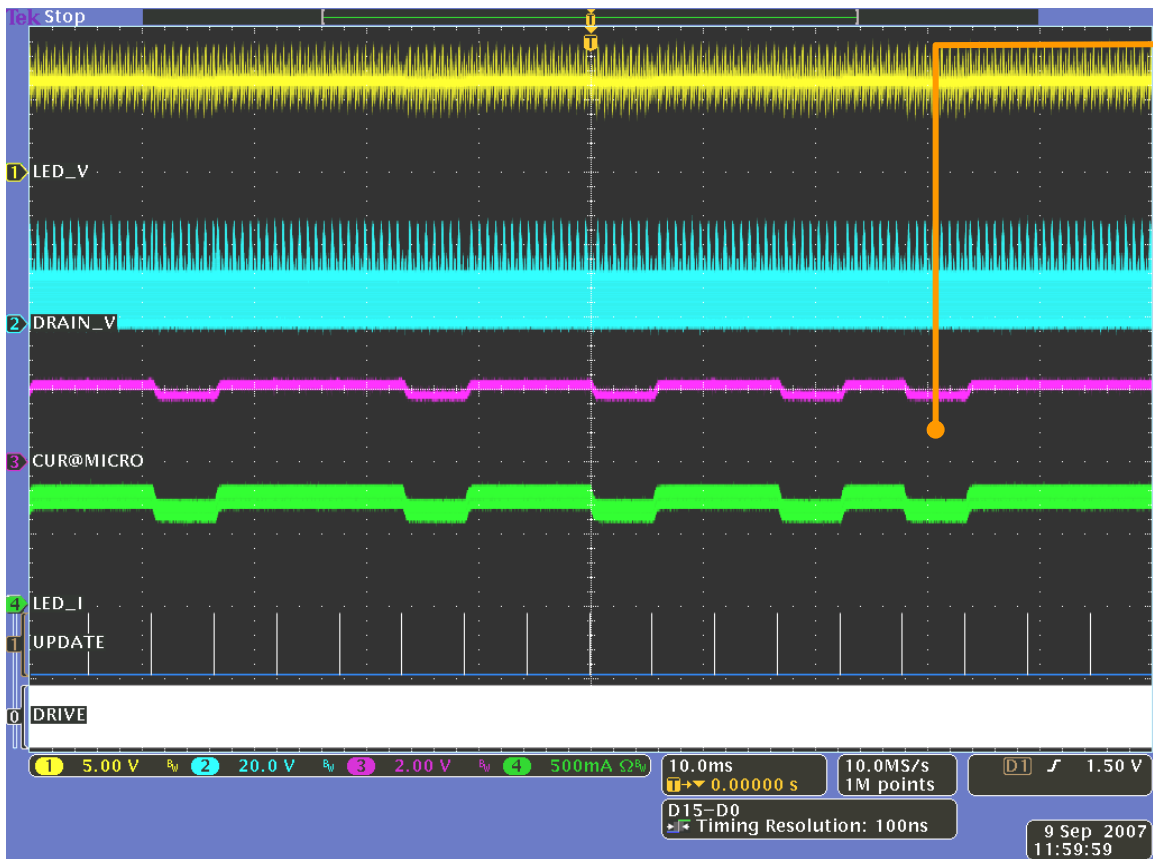
## 電流ヒステリシス値 = 1



- 電流ヒステリシス値 = 1
  - － 測定電流値の1ビットの変化でも、LEDドライブ信号のパルス幅が変わってしまうため、ヒステリシスを設定
- 測定された電流とターゲット値を、マイクロコントローラが比較するたびに、パルス幅と電流が変更される
  - － リップル電流となる

# LED動作

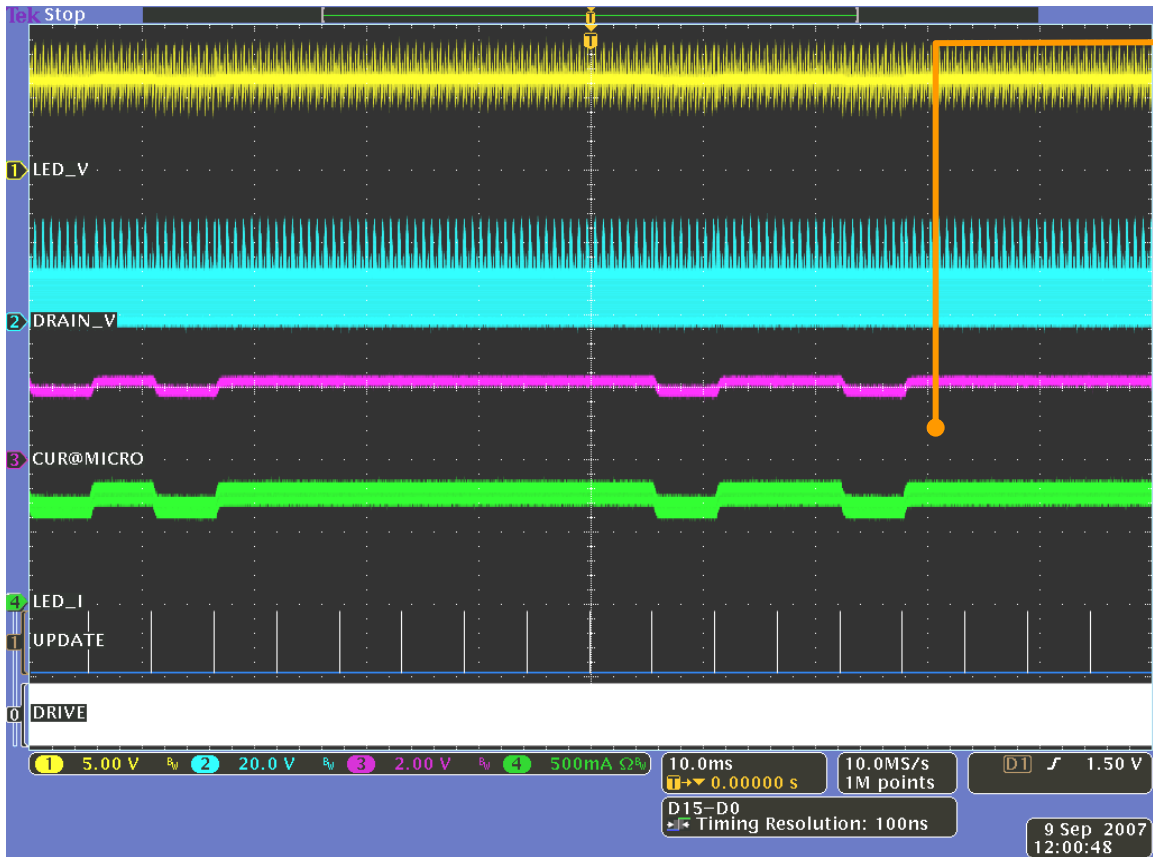
## 電流ヒステリシス値 = 2



- 電流リップルの減少は、ヒステリシス値 = 1 より 2の方が良いことを示す

# LED動作

電流ヒステリシス値 = 4

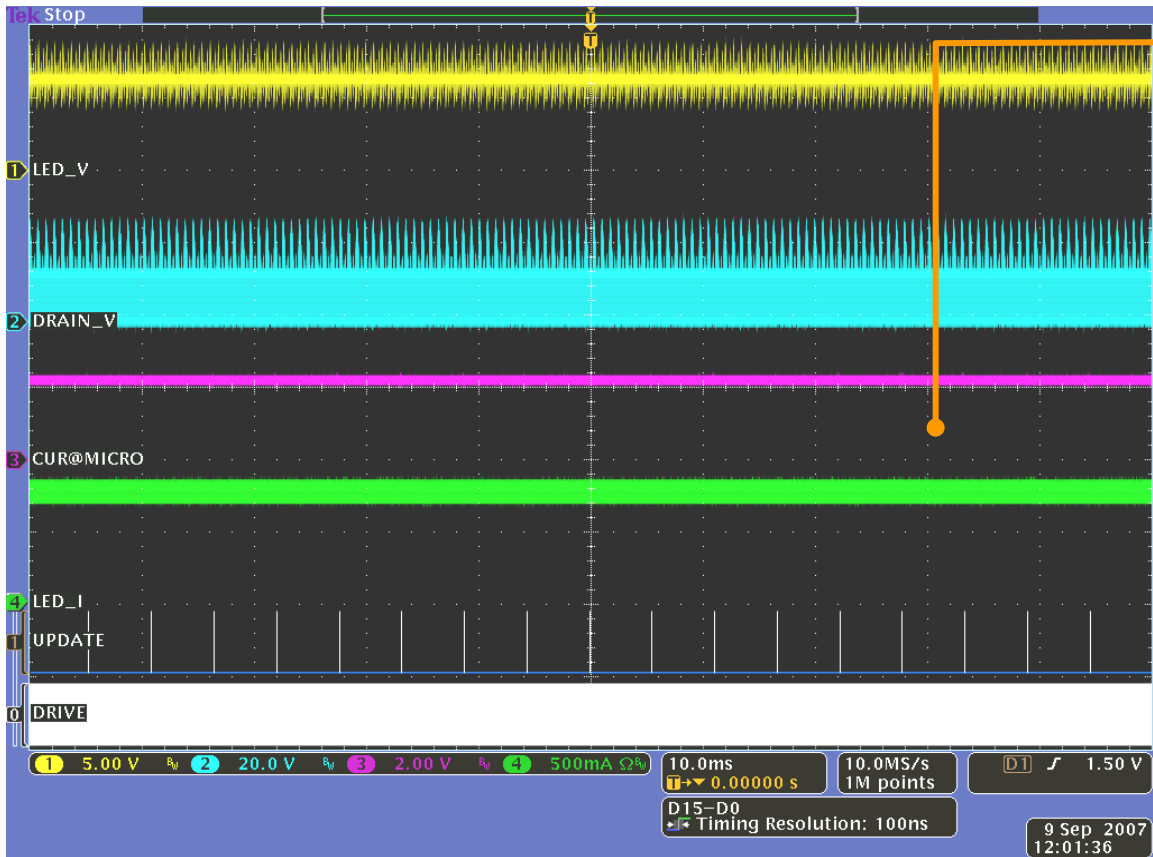


- 電流リップルの減少は、ヒステリシス値 = 4の方がより良いことを示しているが、まだ調整の余地がある



# LED動作

## 電流ヒステリシス値 = 8



- リップル電流が無くなったことは、ヒステリシス値 = 8が最適な設定であることを示す

# パワーMOS-FETの詳細な動作



## ■ 取込波形の拡大

- 動作周波数でのPWM波形とスイッチング電源の詳細な波形
- この詳細波形は、スイッチング電源の安定度解析用に長いタイムフレームで取り込んだ波形から、ズーム機能により表示可能(x1000)

- ドレイン電圧と測定された電流波形は、クリーンなスイッチング動作であることを示している

# アプリケーション例：高輝度LED電源

## 結論

### ■ 結果

- バッテリ電圧の変動、LEDの発熱による駆動電流変化の抑制
  - 電流ヒステリシス値の最適値は 8であることが明らかになった
  - これによりLEDコントロール回路は安定動作
- スイッチング回路が正しく動作しているか確認
  - 拡大波形表示により、動作周波数でのPWM波形とスイッチング電源の詳細な波形を観測
  - 測定されたドレイン電圧と電流波形は、クリーンなスイッチング動作であることを示した

### ■ 今回の例から明らかなこと

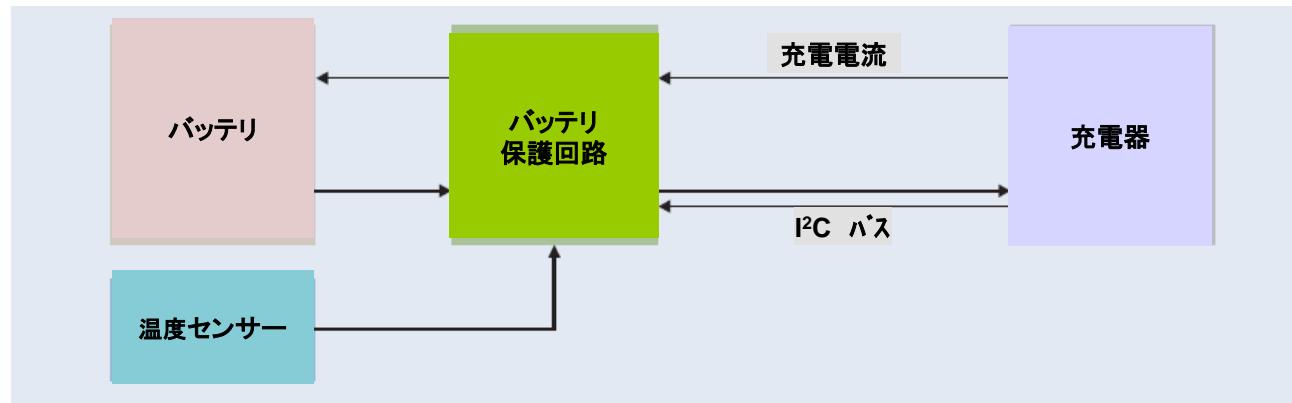
- ミックスド・シグナル・オシロスコープは、全てのアナログと、LED電源の動作を観測するために必要なデジタルの、全ての信号の同時観測が可能
- オシロスコープのロング・メモリにより、安定度測定用に取込んだ(長いタイム・フレームの)波形を拡大して、スイッチング・トランジスタの詳細な動作の観察も可能
- デジタル・チャンネルは、非常に短いマーカー・パルスの表示も可能

# アプリケーション例

## シリアル通信によるリチウム・イオン電池の充電器

### ■ 概要

- リチウム・イオン電池の充電はクリITICAL
- バッテリーの温度によりチャージ・レートをコントロールする必要がある



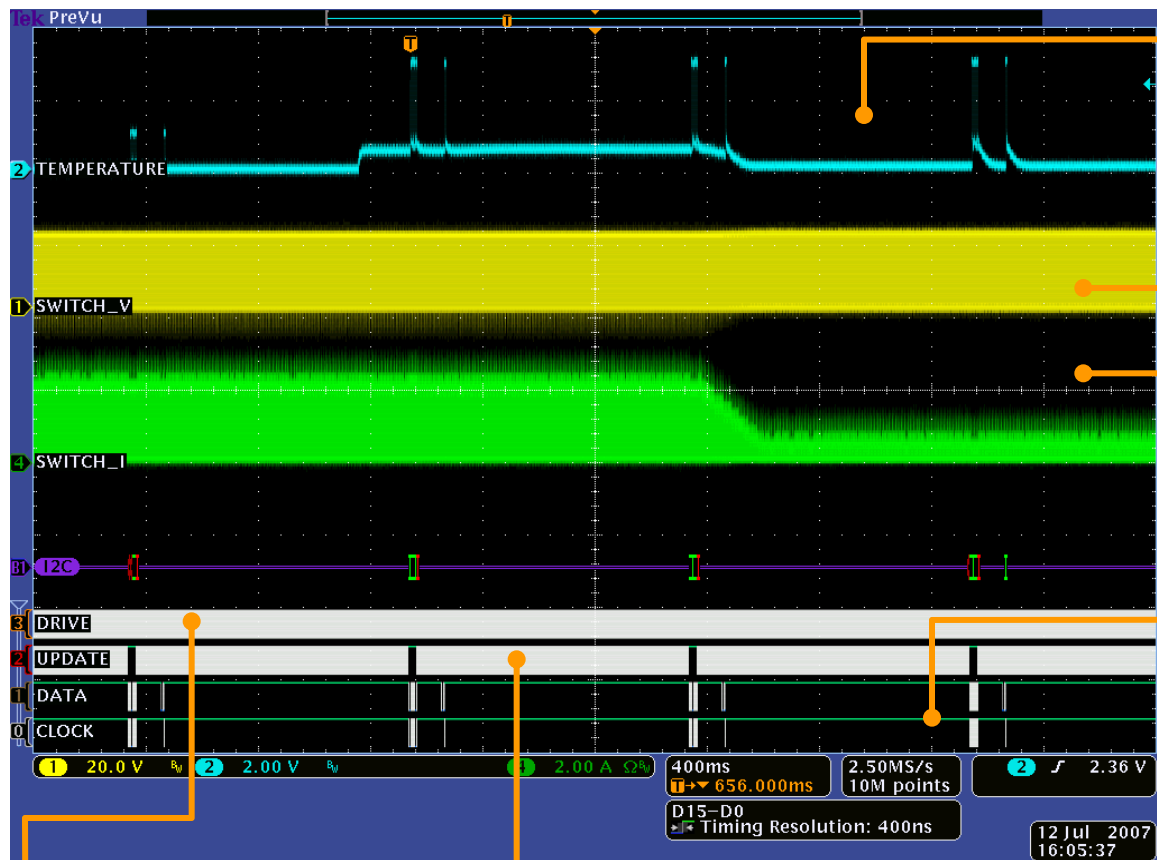
### ■ 目標

- バッテリー温度により充電電流を制御する充電器のレスポンスの測定
- 充電電流補正のタイミングとコントロール安定度の確認

### ■ 問題点

- I<sup>2</sup>Cメッセージのデコード
- 電流補償全期間のデータ取得

# 充電器動作の概要



## ■ 温度

- サンプルされたバッテリーの温度。アナログ信号

## ■ 電圧と電流

- パワー・トランジスタの電圧
- パワー・トランジスタの電流
- 充電電流の制御のためパルス幅変調 (PWM) されている

## ■ I<sup>2</sup>Cバスのデコード

- “DATA”、“CLOCK”の二線のモニタ
- 電流波形の下に表示されるデコードされたデータは、コミュニケーションの流れのデバックを簡単化

## ■ デジタル信号

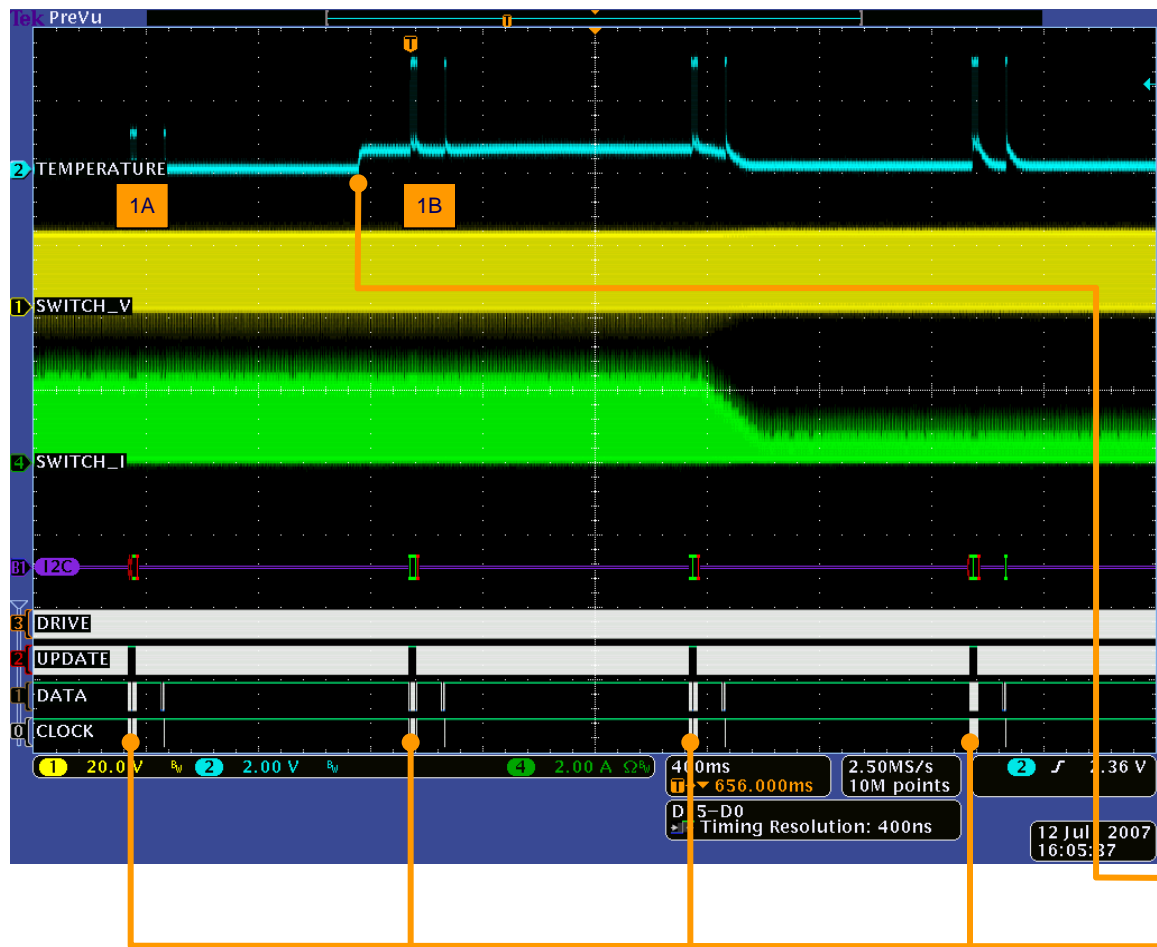
- パワーMOS-FETのゲートをドライブ

## ■ テンポラリ・マーカー

- マイクロコントローラのSW中に挿入されている
- 充電器が電流補償を行っているタイミングを示す。これによりシステムのレスポンスを測定可能

# 充電器の動作

## 温度変化により充電電流を補償



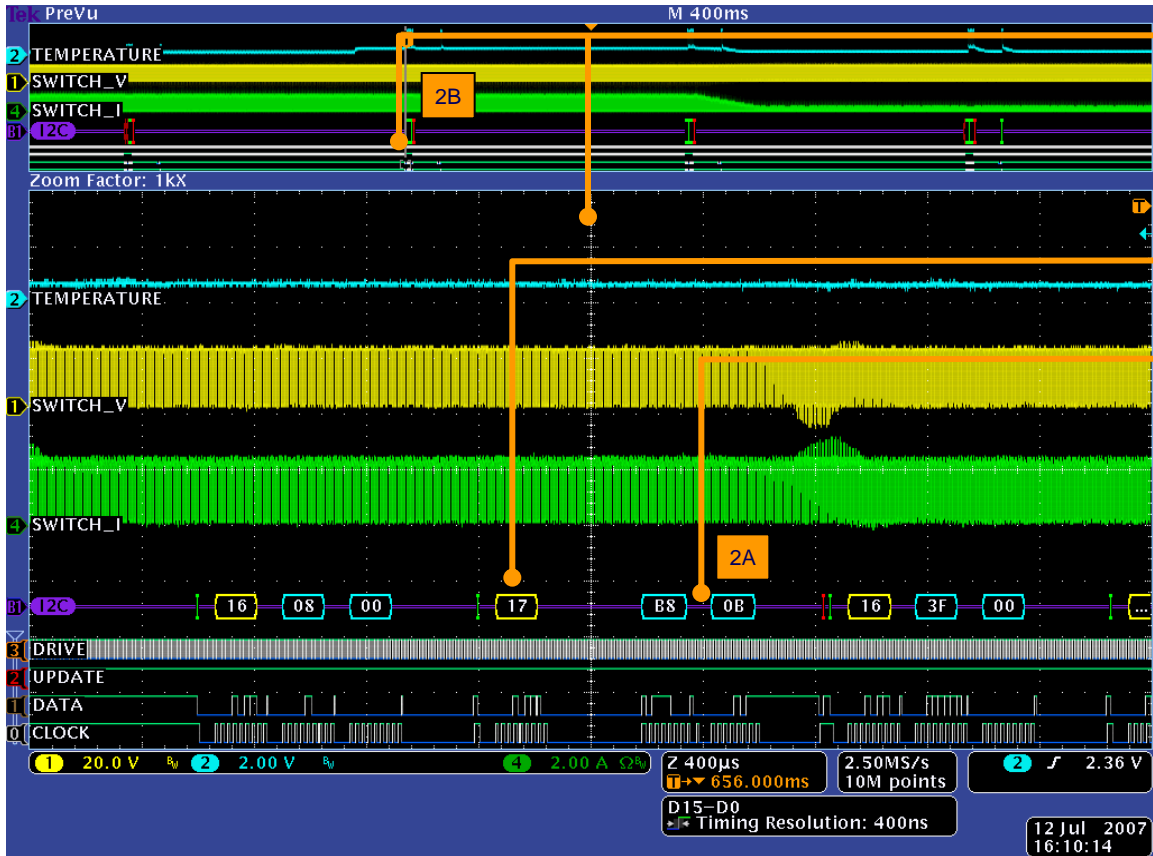
### ■ 表示

- 表示は温度変化に対するレスポンスを観察するため、充電器の動作を4秒間にわたって表示
- 温度変動「1A」→「1B」
- 充電器のスイッチング電源の出力電圧と電流
- I<sup>2</sup>C通信
- コントロール・ループのモニタ(Update)

### ■ 温度変化に対するレスポンス

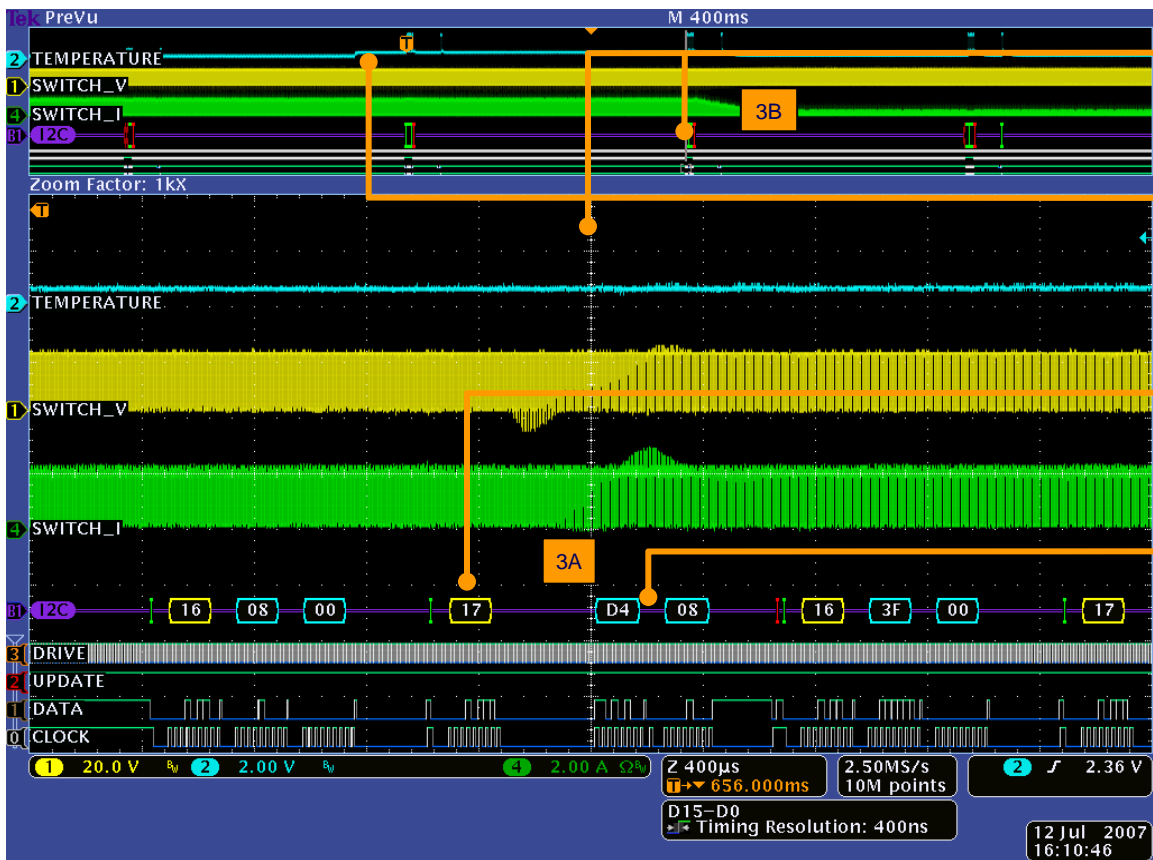
- 温度変化
- 充電器の読み込みポイント

# I<sup>2</sup>Cデータ初期値のデコード



- 拡大位置 と拡大表示
  - 常時拡大前の全トレースも表示「2B」
  - リード・コマンド (0x17)
- 温度データ (0x0BB8)
  - 下位バイトが先「2A」
- まだ動作に変更はない
  - このI<sup>2</sup>Cの読み値は、バッテリー保護回路によって読み取られた新しい温度データの前のデータ
  - そのため、データはまだ変わっていない (0x0BB8)

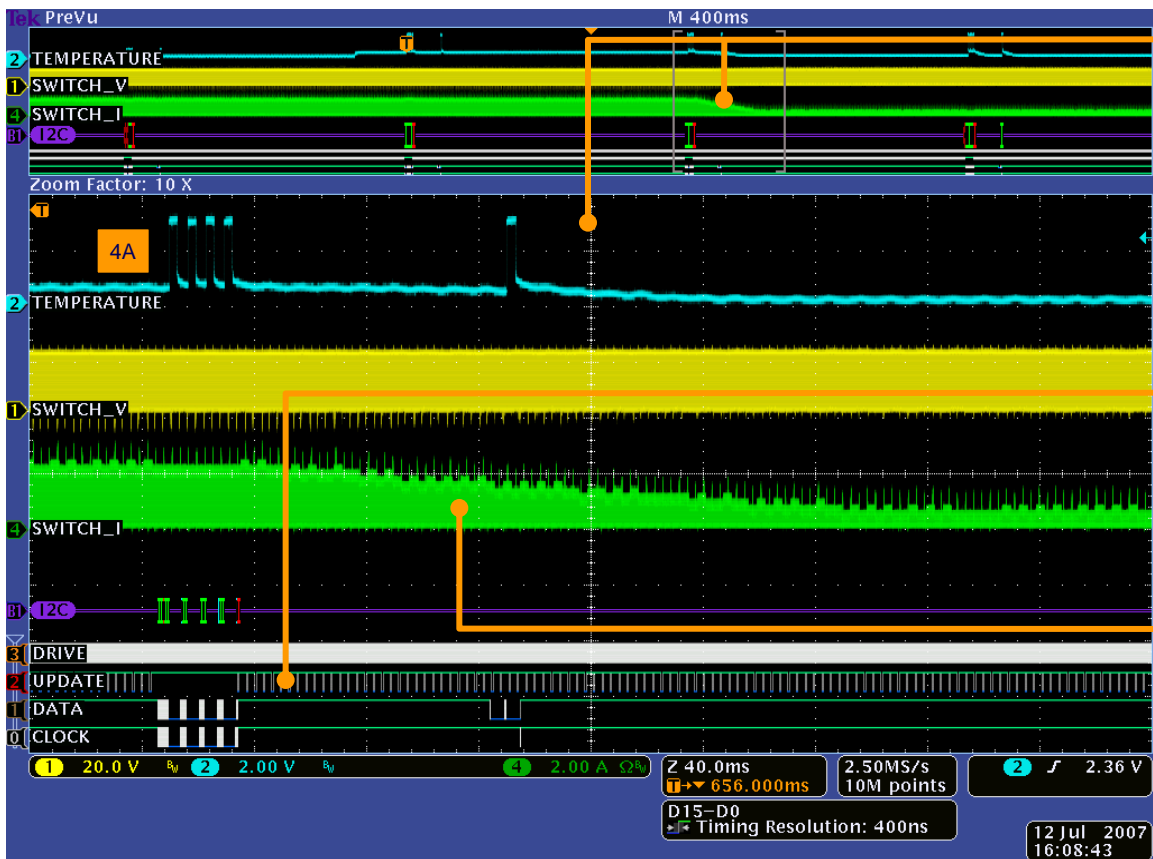
# 温度読み取り後のI<sup>2</sup>Cデータのデコード



- 次の読み取り部分の拡大と位置「3B」
- バッテリ保護回路によって読み取られた温度変化
- リード・コマンド (0x17)
- 新しい温度データ「3A」 (0x08D4)



# ゆるやかな充電電流の削減



- 拡大波形表示と拡大位置
  - I<sup>2</sup>Cのデータ読み取り直後の期間、ゆるやかな電流調整が見られる
- 電流のアップデート
  - 温度変化による新しい設定充電電流まで、各“Update”パルスごとに電流補正値を増加させる
  - 大電流から小電流レベルへのスムーズな調整「4A」
    - およそ10msでスタート
    - 約200msで移行
    - 2Aから0.25Aまで変化

# スイッチング電源の電流波形と電圧波形



- ロング・メモリの利点
  - 長いタイムフレームで取込んだ波形を拡大することにより、詳細な電流と電圧の波形を観測可
- 完全な表示
  - デジタルのドライブ信号が同時に表示できるため、ドライブの遅延とスイッチング時間が観測可
  - この波形から、電流リップルの測定が可能
  - スwitching電源内のインダクタンスのリップルは、電流がハイからローへ遷移する間もよくコントロールされている

# アプリケーション例：

## シリアル通信によるリチウム・イオン電池の充電器 結論

### ■ 結果

- バッテリ温度により充電電流を制御する充電器のレスポンスの測定
  - 電流は温度変化後、約200msで変化
  - デコードされたI<sup>2</sup>Cのデータは、正しい温度を示した
- 充電電流が変化している間のコントロール安定度の確認
  - 電流はスムーズに、2Aから0.25Aに変化した

### ■ 今回の例から明らかなこと

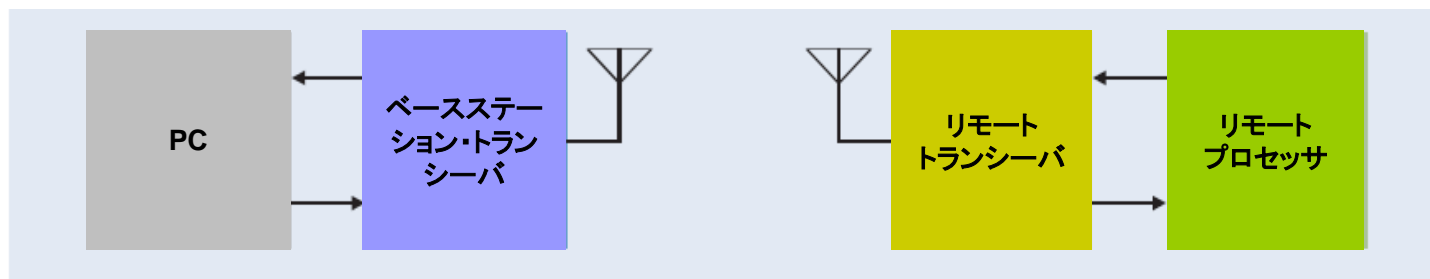
- I<sup>2</sup>Cのデコード機能を持つオシロスコープは、この通信システムを持つ組み込み機器観測に有用
- 単発取込で、充電の周期全体のみならず、スイッチング電源部の詳細な動作の観察が可能

# アプリケーション例

## 短距離無線通信

### ■ 概要

- PCとリモート機器間での双方向コミュニケーション
- 有線パスと無線パスのコンビネーション



### ■ 目標

- やり取りされているデータが双方向共に正しいデータであることの確認
- 通信の各段階でのタイミングの測定

### ■ 問題点

- 2種類の異なった通信スキーム: RS-232、専有ASK無線
- すべてのパートのデータのやりとりの解析のために単発で全データ取込

# PCから送信して応答がPCに帰って来るまでのフル・コミュニケーション・サイクル



- RS-232 信号の全ランザクション
  - 全ランザクションを確実に取り込むため、応答のRS-232信号のスタート・ビットでトリガ
  - ベース・ステーションへ送信「5A」
  - 応答メッセージ「5B」
- トータル・ランザクション時間は 約250msec

# PCからのイニシャルのRS-232パケットのデコード



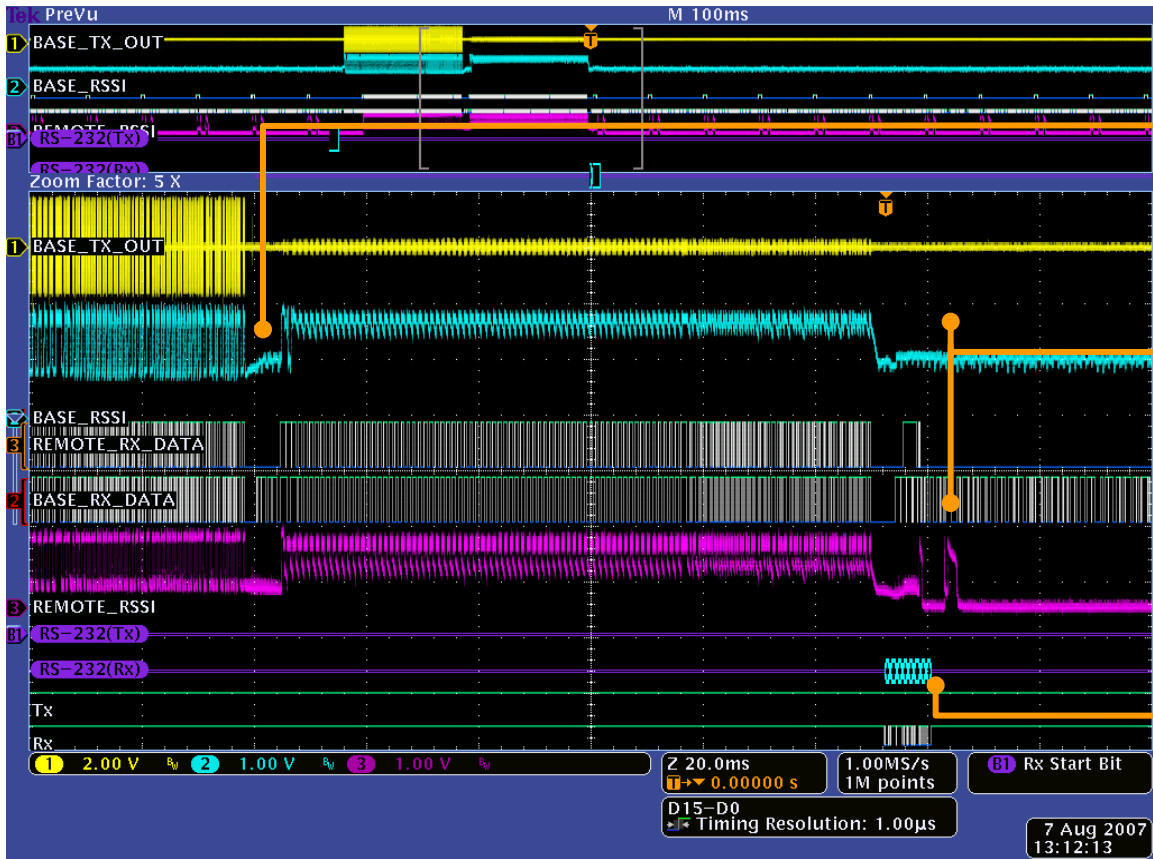
- PCから送出されるデータをデコード表示で見るために波形を拡大
- 正しいパケットが送出されていることが簡単に確認可能
  - 最初のバイト: コマンド (0x21)
  - ベース・ステーション・アドレス (0x0000)
  - バッテリ電圧の読み出し要求 (0x3A)
  - アーギュメント無し: 全て0 (0x0000)
  - チェック・サム (0x5B)

# ベース・ステーションの送出波形とリモート・レシーバの信号



- wakeup プリアンブル  
送出後のベース・ステーション送出波形
  - データは長短の搬送波信号パルスで示される
- レシーバはアナログ、デジタルともに全く同じパターンを出力している

# 応答と受信信号



- リモートが応答
- メッセージの受信から応答送信までの時間 (およそ10msec)
- ベース・ステーション・レシーバでの応答されたメッセージ(デジタル信号とアナログ信号)
- 応答されたRS-232信号は、リモートからのメッセージ受信後、最小ディレイで出力 (およそ5ms)



# PCへ戻る応答メッセージのデコード



■ デコードされたRS-232のメッセージにより、正しいパッケージが応答されたことが簡単に確認できる

- 最初のバイト: コマンド (0x21)
- リモート・アドレス (0xFFFF)
- ベース・ステーションが応答を確認するためのエコー (0x3A)
- データ: 2.5V (0x012F)
- チェック・サム (0x0289)

# アプリケーション例：短距離無線通信

## 結論

### ■ 結果

- やり取りされているデータが双方向共に正しいデータであることの確認
  - 送受信のメッセージが正しいことが確認された
- 通信の各段階でのタイミングの測定
  - 全メッセージの送信から受信まで約250msであった

### ■ 今回の例から明らかなこと

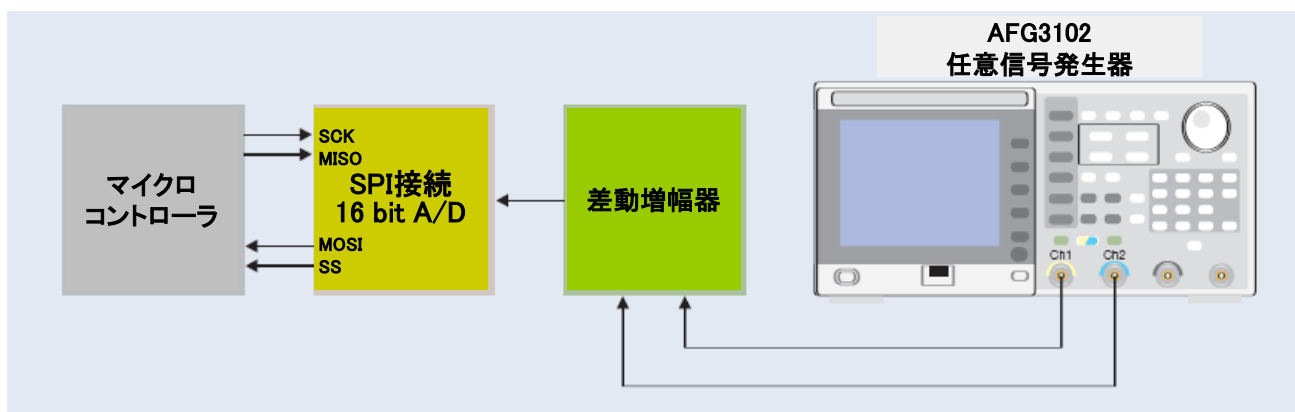
- オシロスコープのRS-232のデコード機能は、コミュニケーション・パケット評価に有用
- オシロスコープのロング・メモリにより、コミュニケーション・プロセスのラウンド・トリップの全体を記録でき、プロセスの各部分はその波形を拡大表示することにより確認が可能

# アプリケーション例

## SPIベースのA/Dコンバータ評価

### ■ 概要

- SPIシリアル・バス接続の16-bit A/Dコンバータのパフォーマンス調査



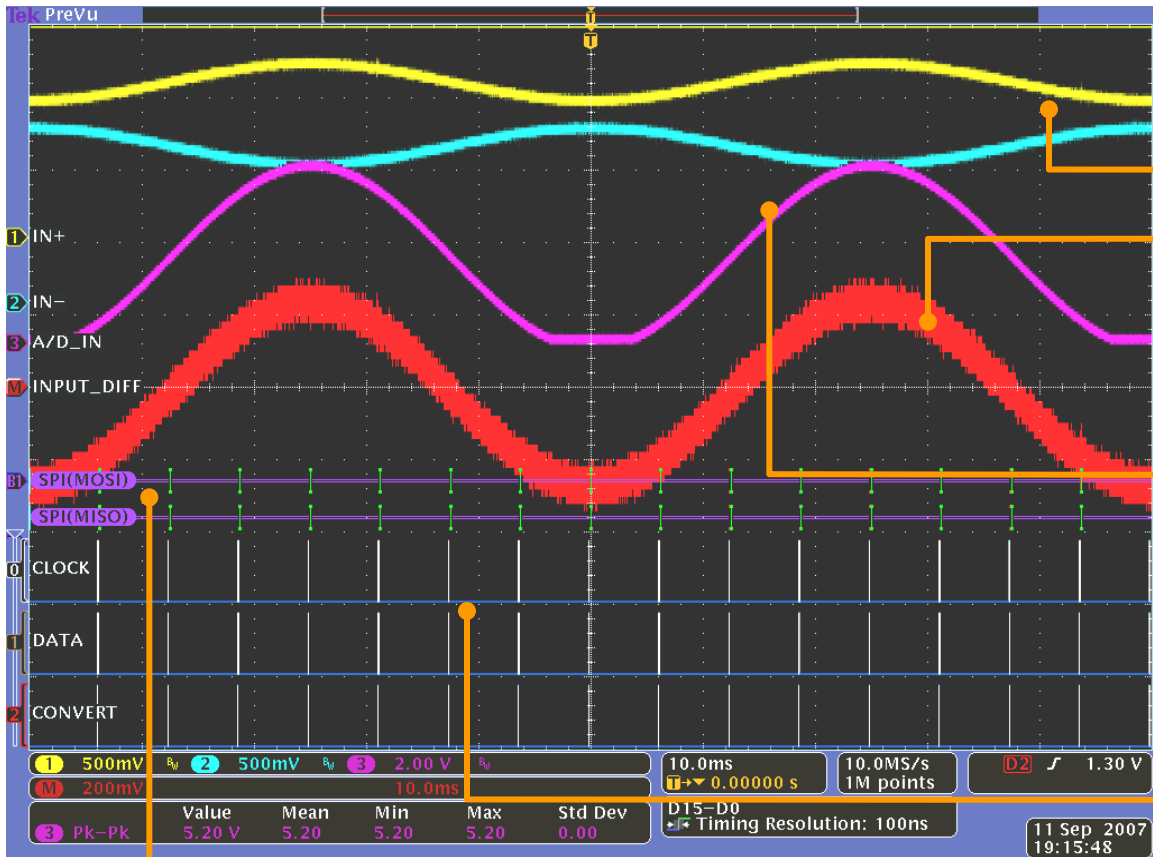
### ■ 目標

- A/Dコンバータが正しくセット・アップでき、正当なSPIコードを出力することを確認
- A/Dコンバータがその入力フル・レンジにわたって正しく動作することの確認

### ■ 問題点

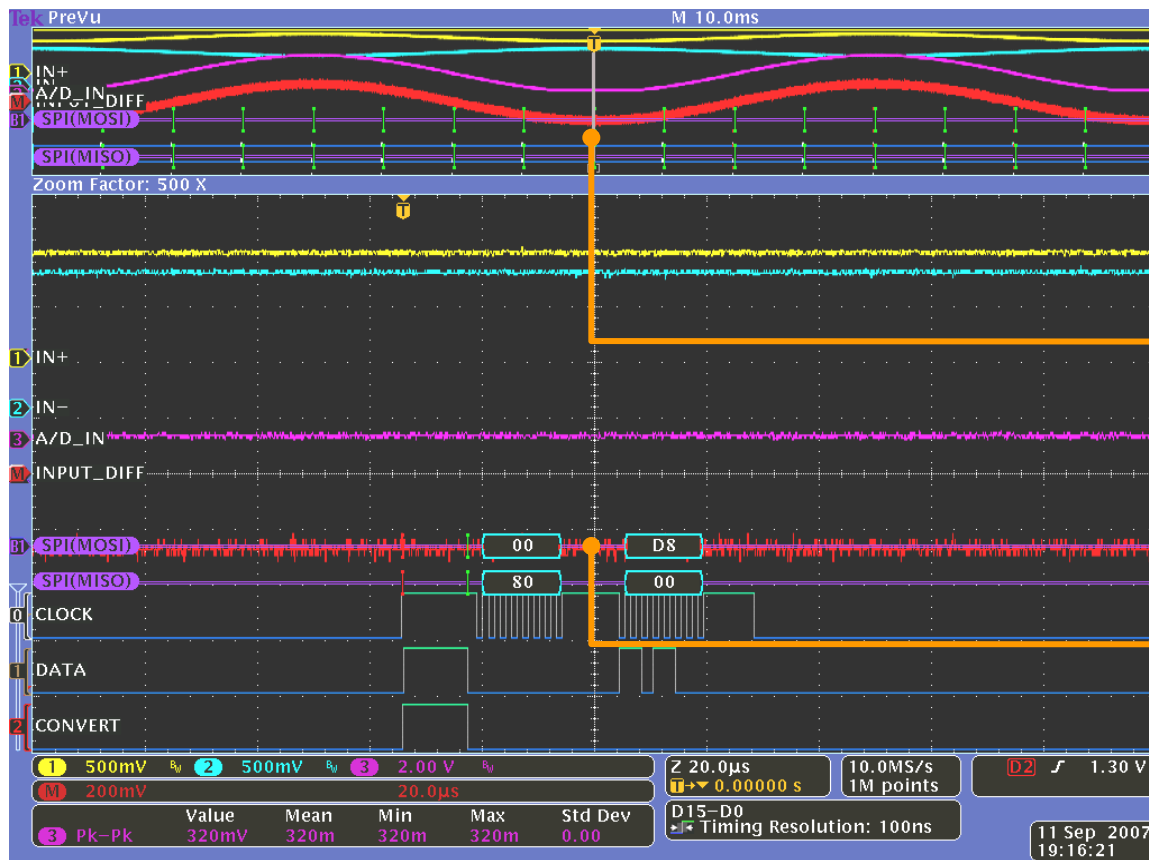
- 1周期フルに波形をA/D変換し、デコードする
- 1周期全体にわたって各サンプル点を観察する

# 正弦波を入力した時の評価システム各部の波形



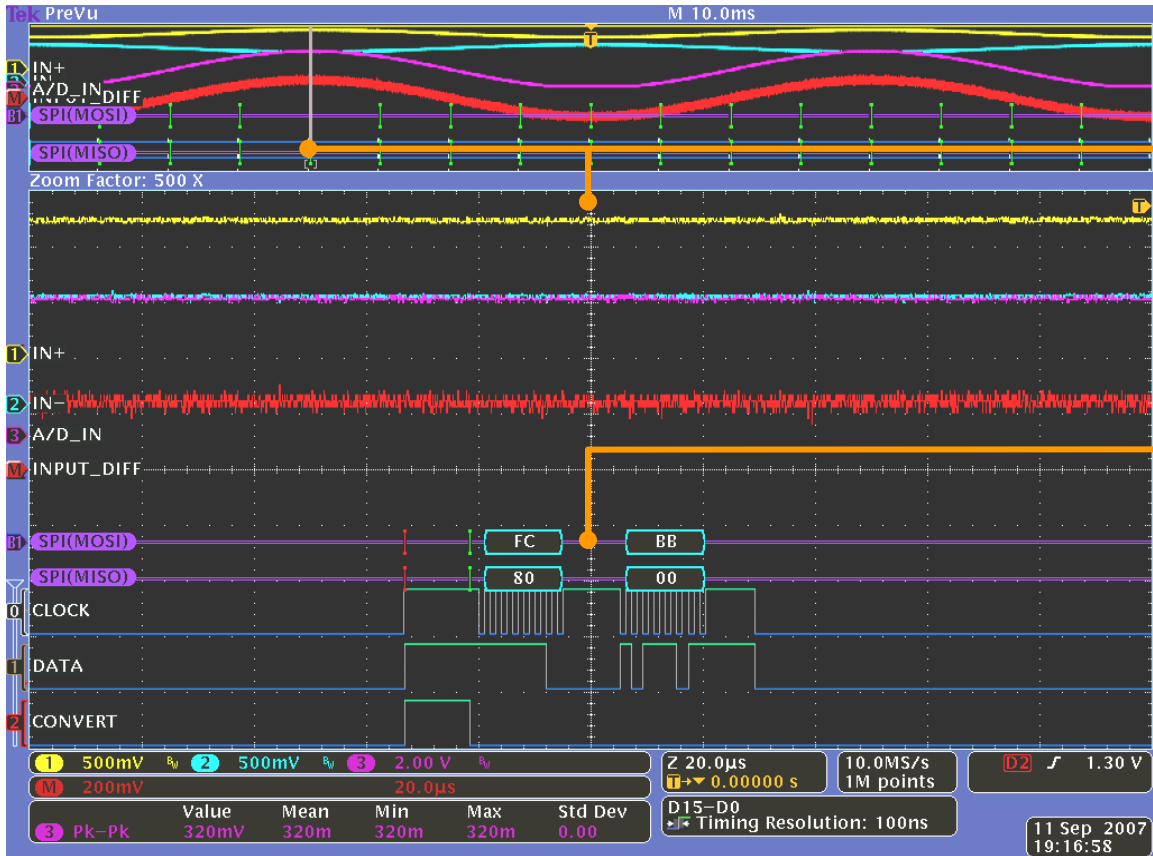
- A/Dコンバータ前段のアナログ回路の動作確認
  - 任意信号発生器の出力
  - 演算機能による、2つの信号の引き算波形
    - A/D前段の差動増幅器を想定
  - A/Dコンバータに実際に入力される信号。差動増幅器出力
- A/D出力のSPIデータを機能
  - SPIのコントロールとデータ出力
  - デコードされたデータ

# 正弦波底部のデータ



- オシロスコープに搭載されたロング・メモリにより、様々な波形を1回で取込可能
  - 拡大位置
    - 拡大部分を変えることにより、波形の異なった部分のサンプル・データを検証
  - A/DコンバータのSPI出力(MOSI)をデコード
    - このサンプル・ポイントの出力値は小さい(0x00D8)

# 正弦波頭頂部のデータ



## ■ ロング・メモリでの取込

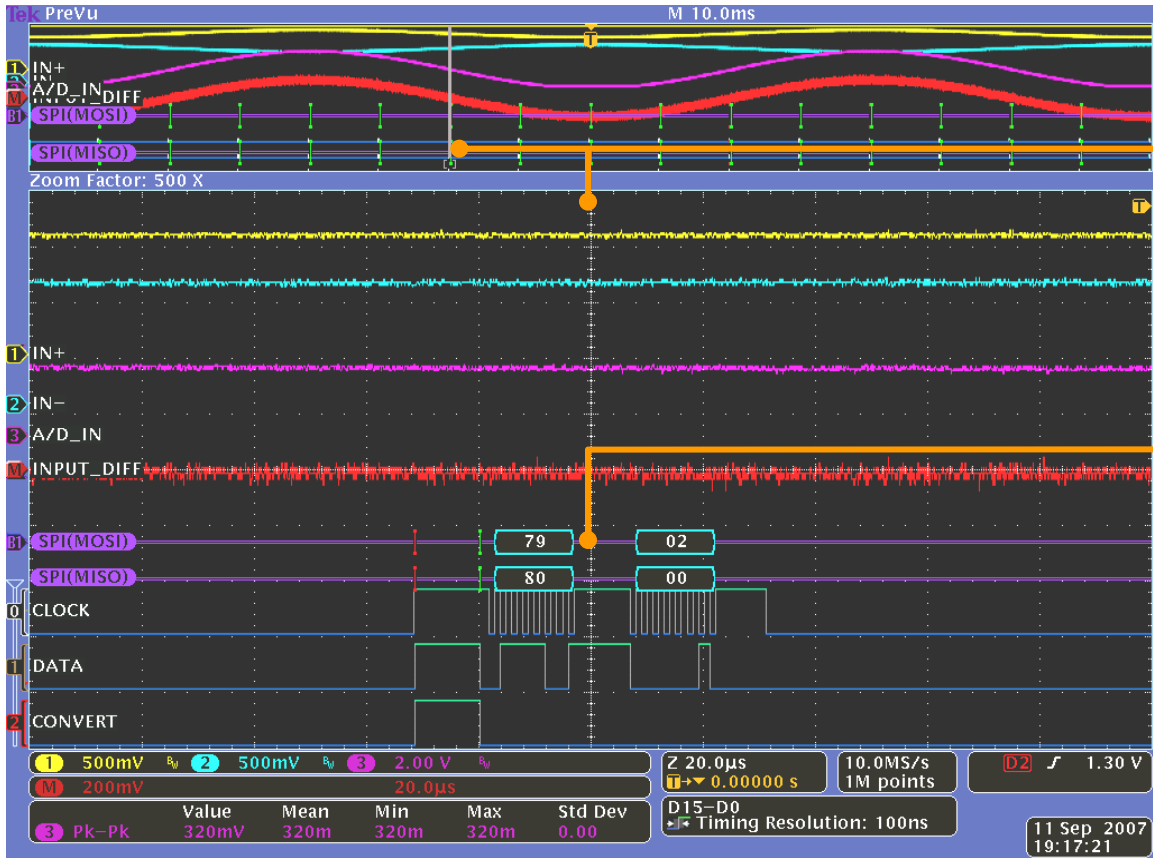
### — 拡大波形と拡大位置

- 拡大部分を変えることにより、波形の異なった部分のサンプル・データを検証

### — A/DコンバータのSPI出力(MOSI)をデコード

- このサンプル・ポイントの出力値は16-bit A/Dレンジの最高値に近い (0xFCBB)

# 正弦波中央部のデータ



## ■ ロング・メモリでの取込

- 拡大波形と拡大位置
  - 入力電圧波形の中心

- A/DコンバータのSPI出力(MOSI)をデコード

- このサンプル・ポイントの出力値は16-bit A/Dレンジの中央値に近い (0x7902)

# アプリケーション例：SPIベースのA/Dコンバータ評価

## 結論

### ■ 結果

- A/Dコンバータが正しくセット・アップでき、正当なSPIコードを出力することを確認
  - A/Dコンバータは正しくセットアップされた
  - 出力コードは入力波形各部分の電圧を正しく変換したものであった
- A/Dコンバータがその入力フル・レンジにわたって正しく動作することの確認
  - A/Dコンバータは、入力フル・レンジにわたって正しく応答した

### ■ 今回の例から明らかなこと

- オシロスコープのロング・メモリは、低周波を1周期、単発でフルに取り込んだ場合でもバスのデコードされたデータを観察可能
- SPIデコード機能は、SPIバスの動作の迅速で信頼性の高い確認が可能



## まとめ

- 半導体デバイスの動作速度の高速化、低価格化により、アナログ回路の多くがデジタル化されているため、エンジニアはアナログ/デジタル両方の信号を同時に扱う必要性がある
- 組込み機器はインテリジェンスを持ち、機器内部あるいは外部と通信を行っている。その多くはシリアル通信である
- 最新の計測器は、そのようなアナログ、デジタル混在＋シリアル通信を含む回路でも、それらの信号の相関をとりながら実動作の迅速な掌握が可能であり、適切な計測器を選択することにより、設計とデバッグ時間の短縮化が可能となる

本テキストの無断複製・転載を禁じます。テクトロニクス/ケースレーインストルメンツ  
Copyright © Tektronix, Keithley Instruments. All rights reserved.

[www.tektronix.com/ja](http://www.tektronix.com/ja)  
[www.keithley.jp/](http://www.keithley.jp/)

 **Twitter**    [@tektronix\\_jp](https://twitter.com/tektronix_jp)  
 **Facebook**    <http://www.facebook.com/tektronix.jp>

**Tektronix**<sup>®</sup>   
A Tektronix Company