

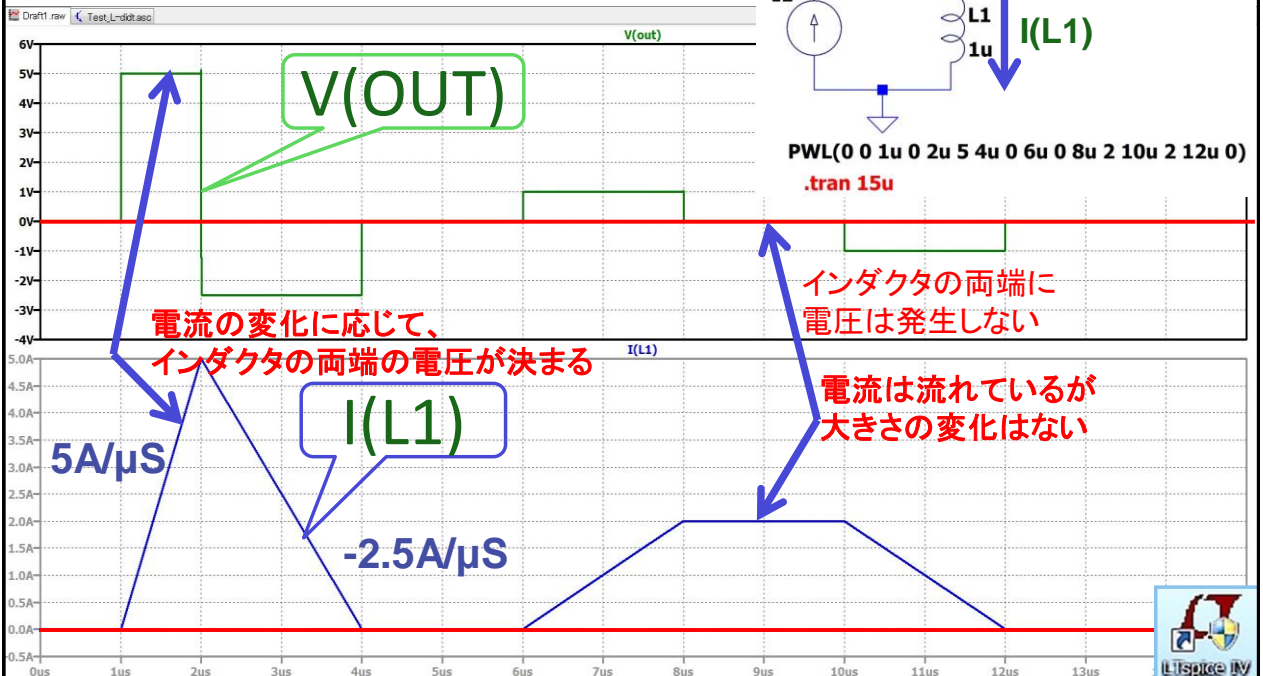
まずは  
電子回路の基礎の復習

## Key Word / Formula

◆ インダクターの両端に発生する電圧

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

## 基礎を確認



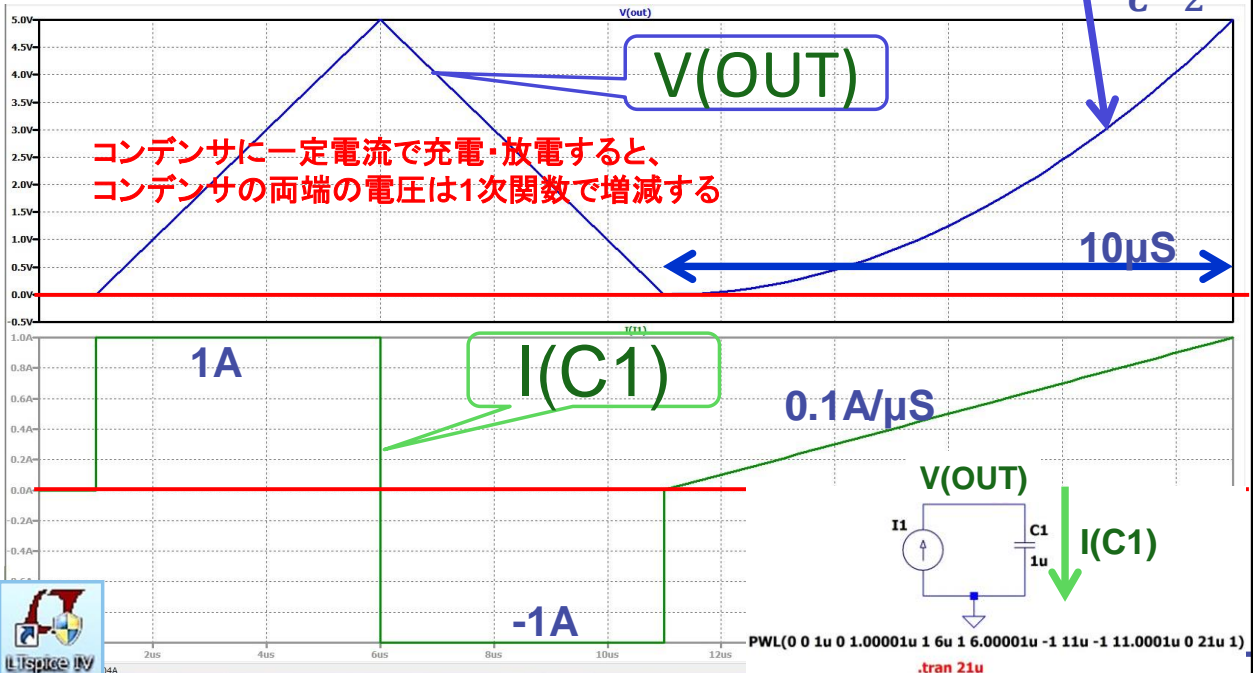
# ついでに・・・もうひとつ

◆ キャパシタの両端に発生する電圧

$$V_C = \frac{1}{C} \int i dt$$

## 基礎を確認

$$V(\text{OUT}) = \frac{1}{C} \frac{it^2}{2}$$



# 開発現場で経験する 様々なトラブルの例

(例) スイッチング電源設計・評価  
に伴ういろいろな現象

## トラブルの原因を推測するには・・・

まず、  
動作原理の基本的な知識が必要

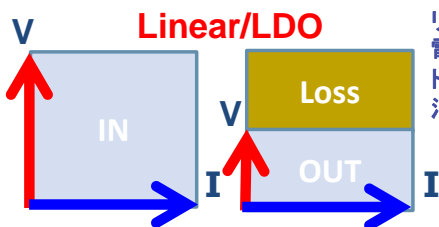
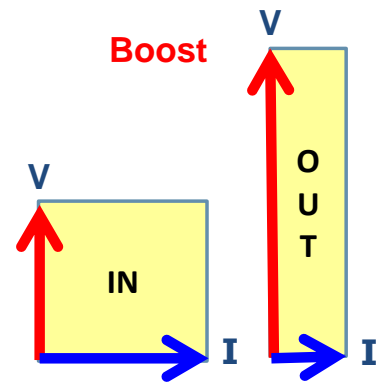
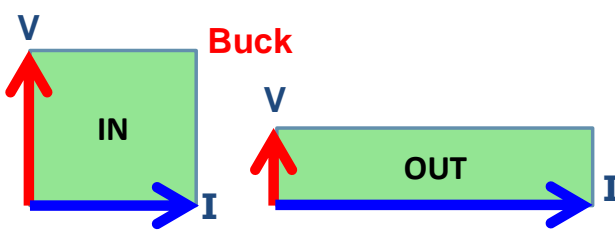
# 本論の前に・・・少し

## 復習

### SW電源 (Buck) の基礎

## スイッチング電源の概念

電力 (電圧・電流) を効率よく組み替える (四角の面積は電力、効率を100%と仮定)



リニアレギュレータは、電圧を降下させるためにトランジスタなどで電力を消費する

制御電流は入力も出力も同じ電流

$$\text{効率}(\eta) = \frac{\text{出力電力}}{\text{入力電力}}$$

# スイッチング電源の特長

## ■ 電源

### ■ AC から DC

- トランスと整流器、スイッチング電源

### ■ DC から DC

- リニアレギュレータ・・・降圧しかできない、正負の反転ができない
- スwitchング電源
  - ◆ 入力電力を効率良く出力電力に変換する
  - ◆ 小型化できる
  - ◆ プラス電源からマイナス電源を作ることが出来る(逆も可)

### ■ DC から AC …… インバーター

# スイッチング電源の用途(1)

## ■ 降圧(Buck)

- システムに供給される電源電圧が高く(12Vとか24V)、内部の様々な回路(マイコン、FPGA、Op.Amp.など)に供給する電源(5V、3.3V、2.5Vなど)を作り出す
- ACアダプターなどの負荷変動に対する出力電圧変化を改善するために利用する(5Vから2.5Vや1.8Vなどを作る)
- 様々な民生機器・産業機器・PCなどで、幅広く利用されている

## スイッチング電源の用途(2)

### ■ 昇圧(Boost)

- 乾電池1本(1.1V~1.6V)からシステムで使うさまざまな電圧を作り出す
  - ハンディ・ポータブル機器
- 5Vのシステム電源しか供給されていない基板で12Vのモーターを駆動したい

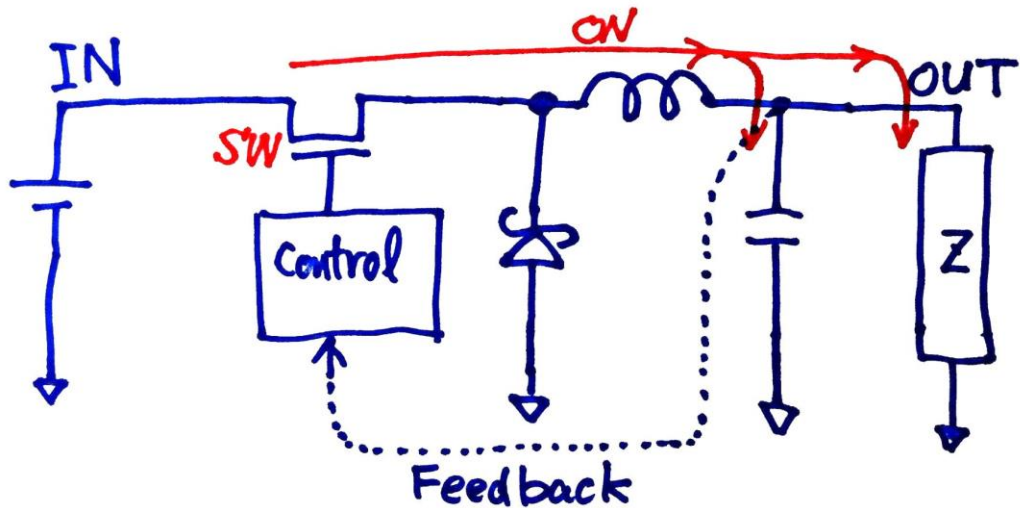
### ■ 昇降圧(Buck-Boost)

- 乾電池2本(2.2V~3.2V)で、2.5Vシステム電源を作りたい
  - ハンディ・ポータブル機器

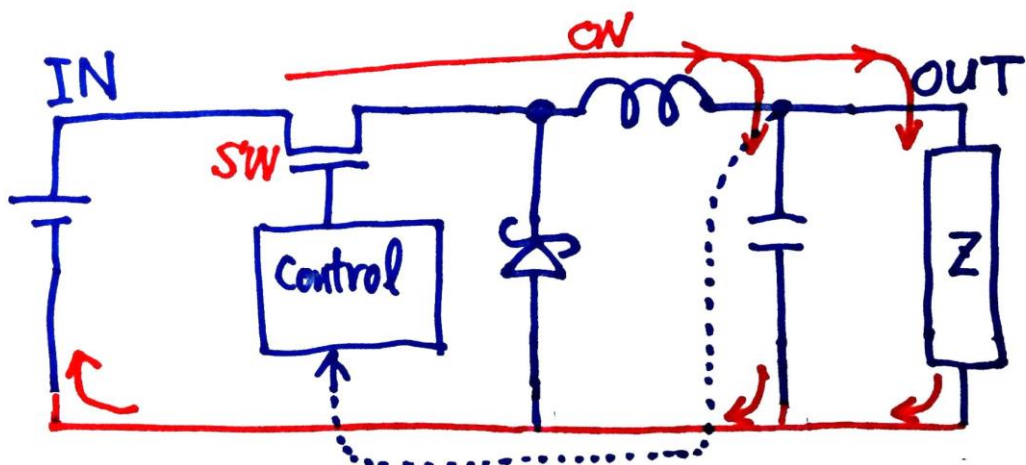
今日は・・・

Buck(降圧)スイッチング電源についてのみ、  
概要を説明します

## Buck(降圧)SW電源の例(1a)



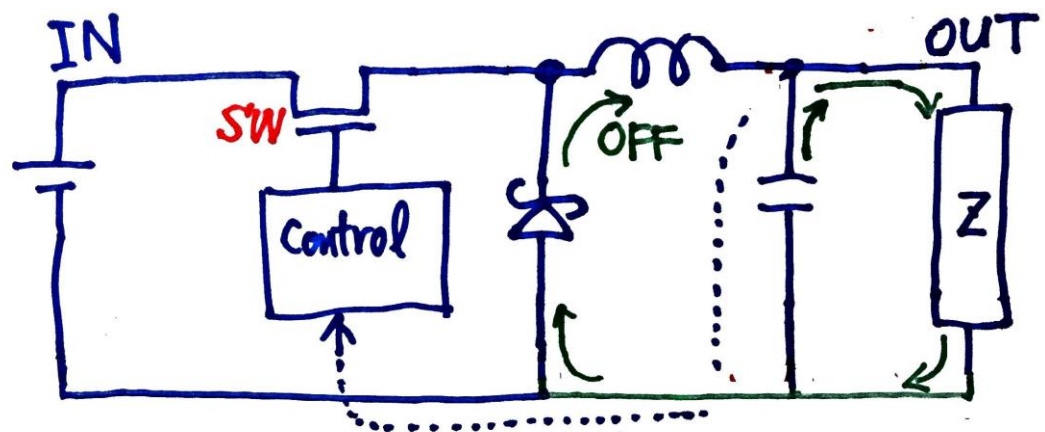
## Buck(降圧)SW電源の例(1b)



電源はプラス側だけでなく、Feedback  
リターンパスにも気を付ける

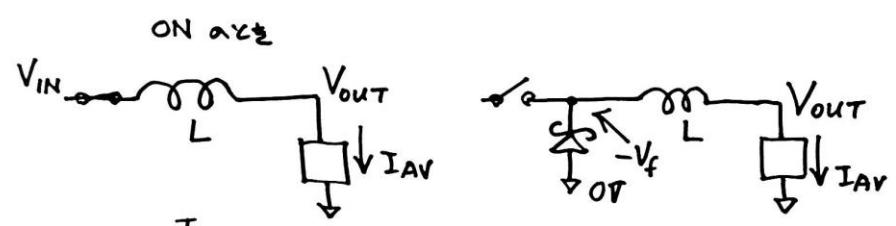


## Buck(降圧)SW電源の例(1c)



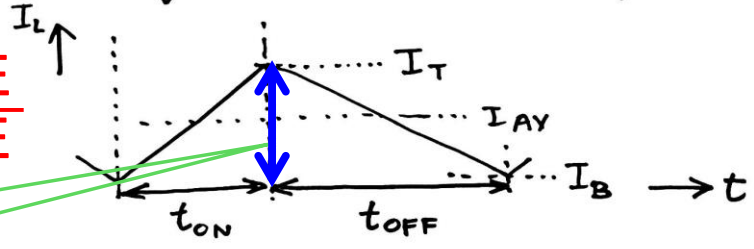
平滑コンデンサには、OFFの後しばらくは充電電流が流れる

## 降圧比の計算(復習) (1)



降圧比 =  $\frac{\text{出力電圧}}{\text{入力電圧}}$

この差がコイルのリップル電流



$$V_{IN} - V_{OUT} = \frac{I_T - I_B}{t_{ON}} \times L$$

$$-V_f - V_{OUT} = \frac{I_B - I_T}{t_{OFF}} \times L$$

↑  $V_f \approx 0$  と近似すると...

## 降圧比の計算(復習) (2)

$$\begin{aligned} (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot t_{ON} &= (I_T - I_B) \cdot L \\ +) \quad -V_{OUT} \cdot t_{OFF} &= (I_B - I_T) \cdot L \\ \hline V_{IN} t_{ON} - V_{OUT} \cdot (t_{ON} + t_{OFF}) &= 0 \end{aligned}$$

$$V_{IN} \cdot t_{ON} = V_{OUT} \cdot (t_{ON} + t_{OFF})$$

$$\frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

繰返し周期

$$\text{Duty (ON)} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \text{降圧比}$$

降圧比は ON 時間に等しい。

## 数値計算は大切です

理論的に導出された式に  
具体的な数値を代入し、  
現実の世界と比較することが重要

理論と実践が乖離しがちなのは、  
具体的な数値計算で、  
現実を見つめないから...

実際に回路を組み上げるのは大変

シミュレーションで、  
実機と同程度の結果が  
確認できるのか？

実機と完全に一致させることはできな  
いが、可能な限りのパラメータを組み  
込めば、実測値に近づく

実機を組み込むのも大変、  
シミュレーションも疑わしい？

まずは、シミュレーションで  
回路全体の動作を確認

工学は、理論的な考察を実際の  
システムに具体化すること。  
数値でとらえ、許容誤差の中に収めること

# 例題を アナログ回路シミュレータで シミュレーションして確認

アナログ回路シミュレータには  
LTspiceを利用



LTspiceの参考書

## シミュレーション

システム構成要素(部品): **モデル**  
連立方程式の数値解析: **シミュレータ**

シミュレーション結果と  
現実の測定結果が一致しない時は、  
モデルが現実と一致していないか、  
測定手法にかかわる問題が9割以上

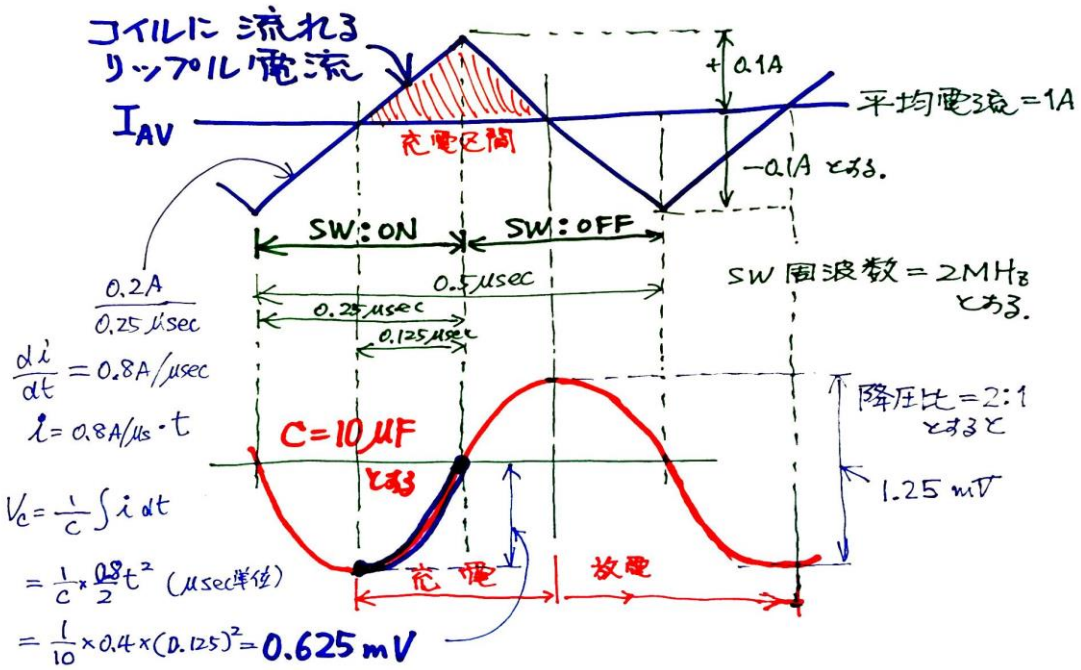
## コイルのリプル電流を単純化し・・・

- ◆ 平滑コンデンサの充放電の動作をシミュレーションする
  - ◆ 理論的な計算値と一致していることの確認
  - ◆ リプル電流のモデルとしては・・・
    - ◆ 平均電流と、リプル電流に分けて電流源を置く
    - ◆ 負荷変動はないものとして、固定抵抗負荷にする
    - ◆ シミュレーションの収束を速めるために、初期電圧設定をする

## 平滑コンデンサーへの充放電

- ◆ リプル電圧(降圧比:2:1の簡単な例)
  - ◆ 平均電流 = 1A (負荷に流れる平均電流)
  - ◆ リプル電流 =  $0.2A_{pp}$ ・・・ +0.1A、-0.1A
    - ◆ スイッチングの間、インダクタに流れる電流の変化量
  - ◆ スイッチング周波数 = 2MHz (周期=0.5 $\mu$ S.)
  - ◆ コンデンサ容量 = 10 $\mu$ F
  - ◆ 負荷抵抗 = 5 $\Omega$ 
    - ◆ 平均電流が1Aなので、負荷に印加される電圧は平均5V
  - ◆ 降圧比 = 2:1 (ONデューティ=50%)

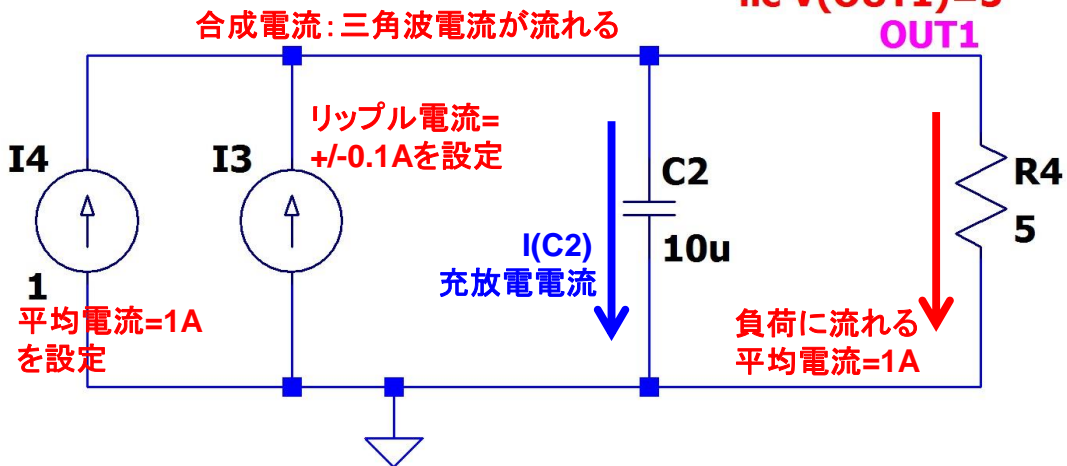
# 具体的な数値計算



# 理想的な状態でのリップル電圧(1)

.tran 0 4u 2u .OPTIONS plotwinsize=0

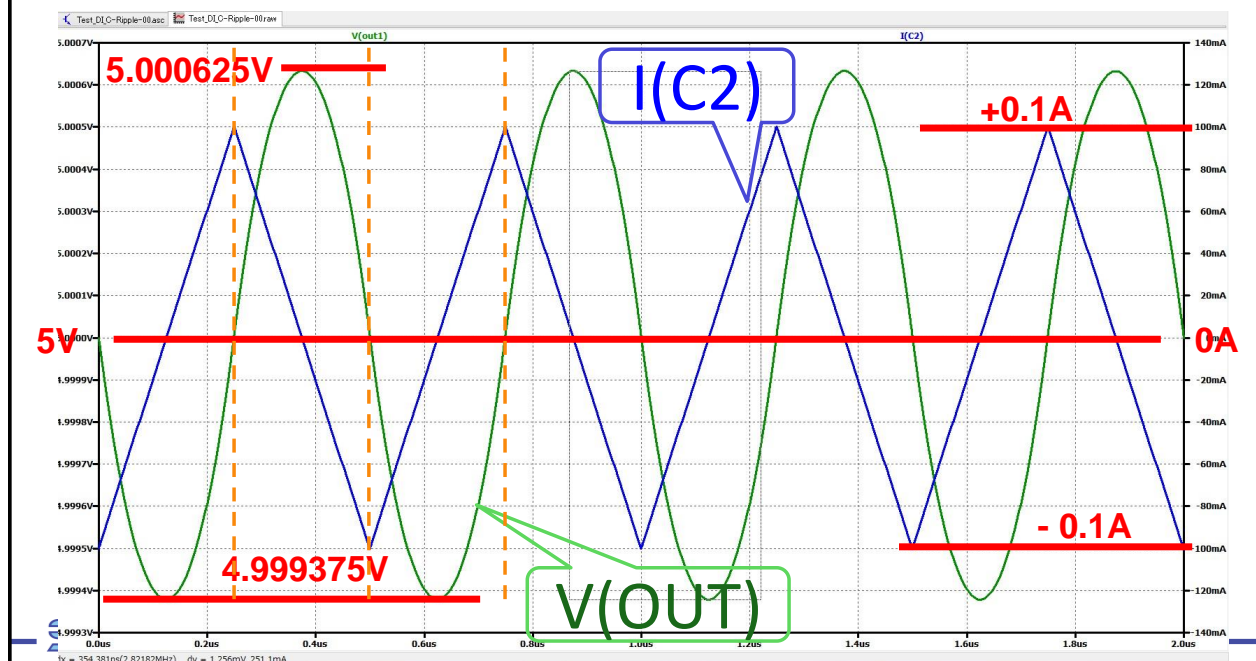
.ic V(OUT1)=5 OUT1



PULSE(-0.1 0.1 0 0.249u 0.249u 0.001u 0.5u)



## 理想的な状態でのリップル電圧(2)



## 隠れインダクター (1)

コンデンサー & それに関連するパターンの

ESL

Equivalent Series Inductance  
(等価直列インダクタンス)

## どこに ESL が存在するか？

- ◆コンデンサのリード
- ◆PCBパターンに関するもの
  - ◆線幅・線長
  - ◆配線引き回しのルート
  - ◆VIAコンタクトホール サイズ・数

## 入・出力コンデンサの ESR・ESL

32

### ■ アルミ電解コンデンサの内部構造

#### ■ 日本ケミコン(株)の資料より

- <http://www.chemi-con.co.jp/catalog/pdf/al-j/al-all-1001m-090901.pdf>

内部の引き出し線が、  
ESLの主要因

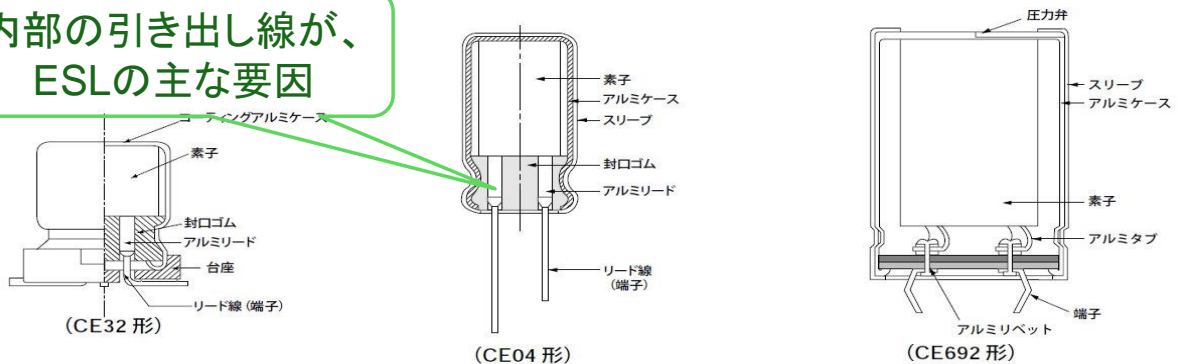


Fig-4 アルミ電解コンデンサの構造 (代表的形状の例)



# PCBパターンのインダクタンスの計算 33

- IENs、
- AN1226、P6

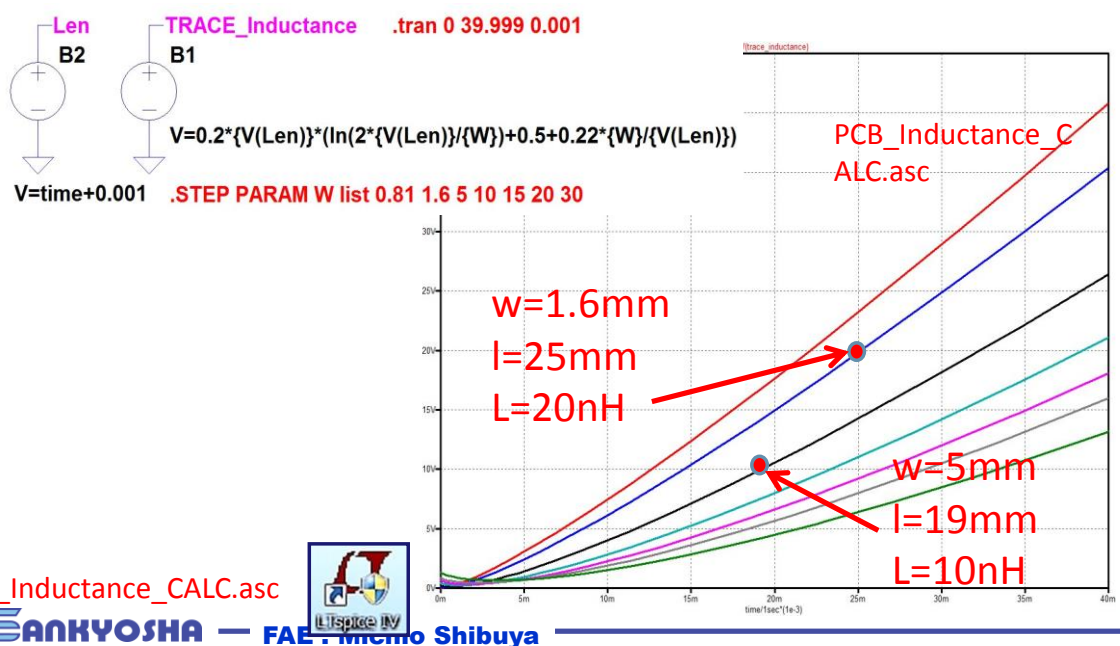
It is also said that “the traces also need to be ‘wide’ and ‘short’”. The necessity of short traces is clearly understood, usually intuitively, by most engineers. In fact the thumb rule of ‘20 nH per inch’ also implies that trace inductance is almost proportional to length. However, **a common ‘intuitive’ mistake is to assume that inductance is inversely proportional to the width of the trace.** So some engineers mistakenly ‘add copper’ lavishly to critical traces (though there are some other reasons why this may be being done, and these will be discussed later). A first approximation for the inductance of a conductor having length ‘l’ and diameter ‘d’ is

$$L = 2l \cdot \left( \ln \frac{4l}{d} - 0.75 \right) \text{ nH}$$

where l and d are in centimeters. Note that the equation for a PCB trace is not much different from that of a wire.

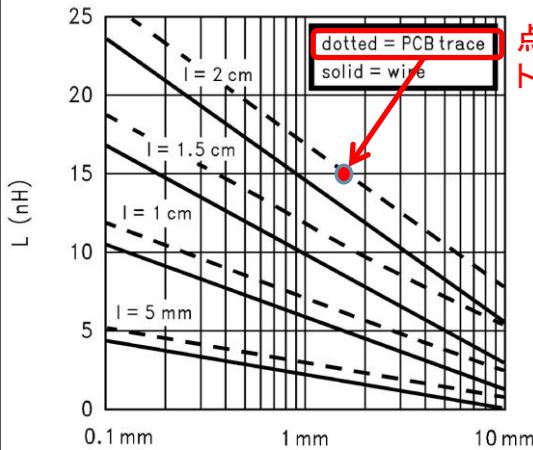


# PCB Trace Inductance (estimated) 34

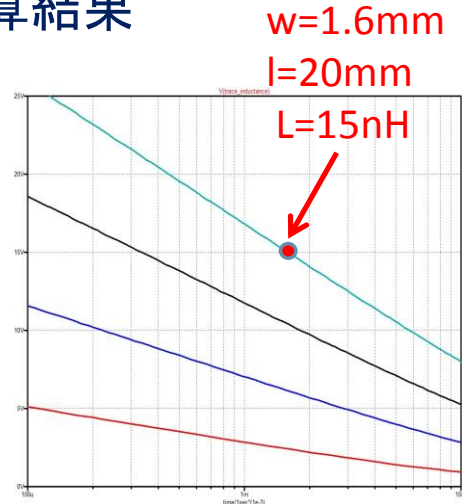


# 単線とPCB-Traceの比較

## ■ NS\_AN-1229 v.s. 計算結果



点線がPCB  
トレース



w=1.6mm  
l=20mm

L=15nH

計算式からの計算結果

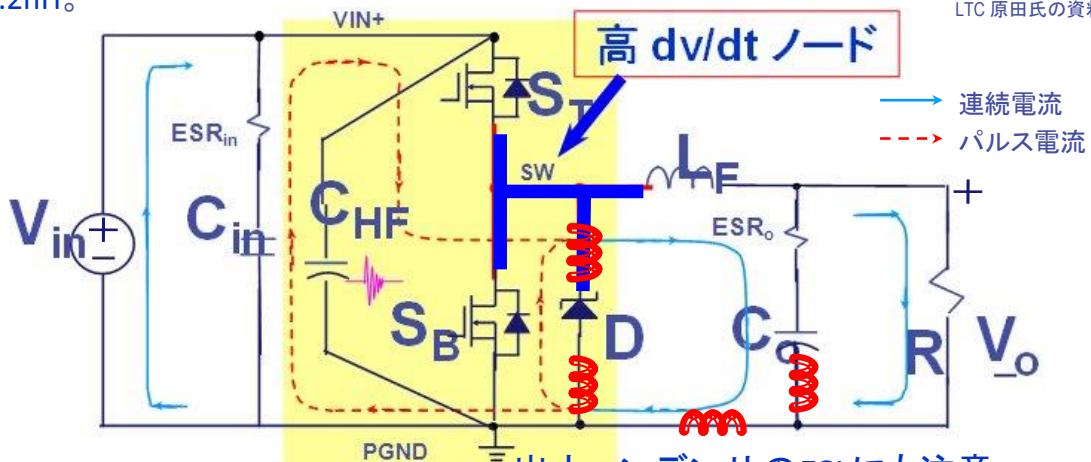
NS AN-1229

ANKYOSHA FAE: Michio Shibuya

# 基板上的のパターンがL成分を持つ

- 高 dv/dt ノードに関連する電流経路は di/dt も大きい。
- VIA のインダクタンス = 標準の1.6mm厚の基板・直径0.4mmのビアは、1個が 1.2nH。

LTC 原田氏の資料より



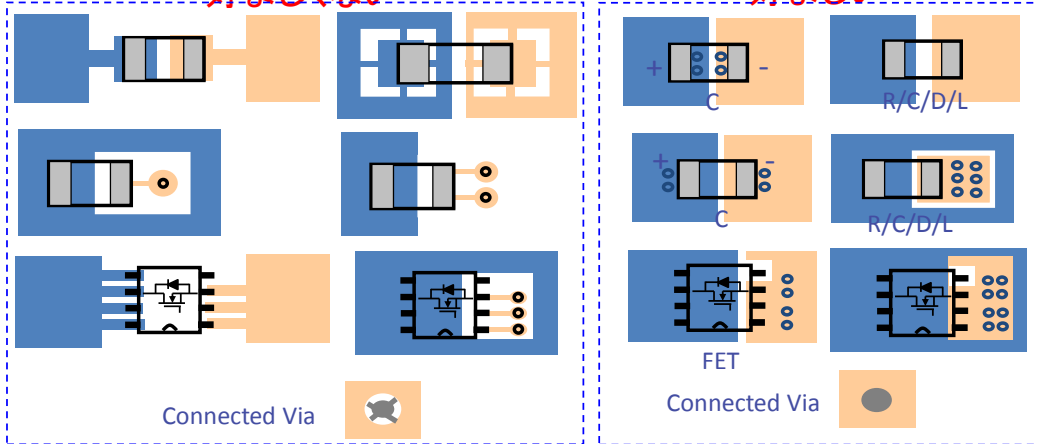
出力コンデンサのESLにも注意

ANKYOSHA FAE: Michio Shibuya

# PCB設計上の注意点・・・ランド形状

好ましくない

好ましい

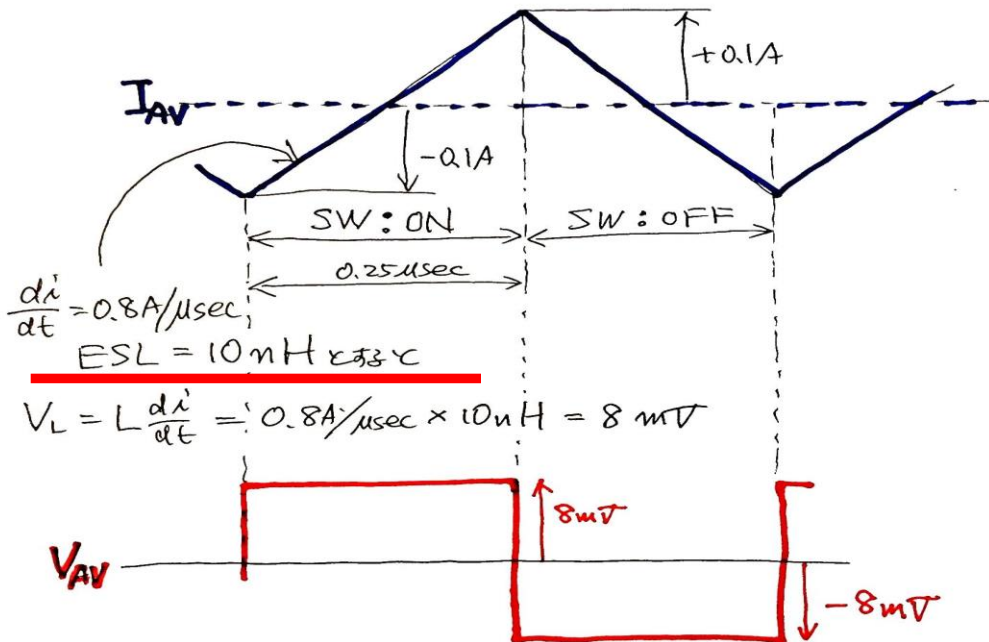


- 太く短く
- ビアにより内層、裏面に接続
- “thermal relief” を避ける
- 抵抗分とインダクタンス成分を最小化

LTC 原田氏の資料より

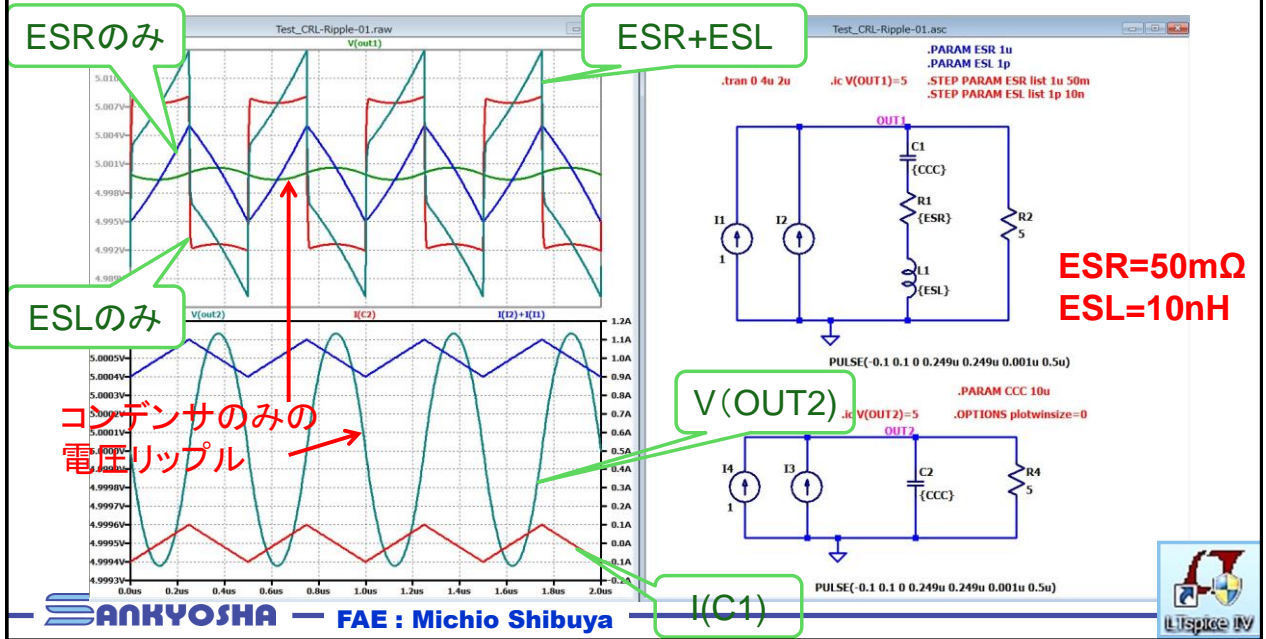


## 前述の例を使って・・・



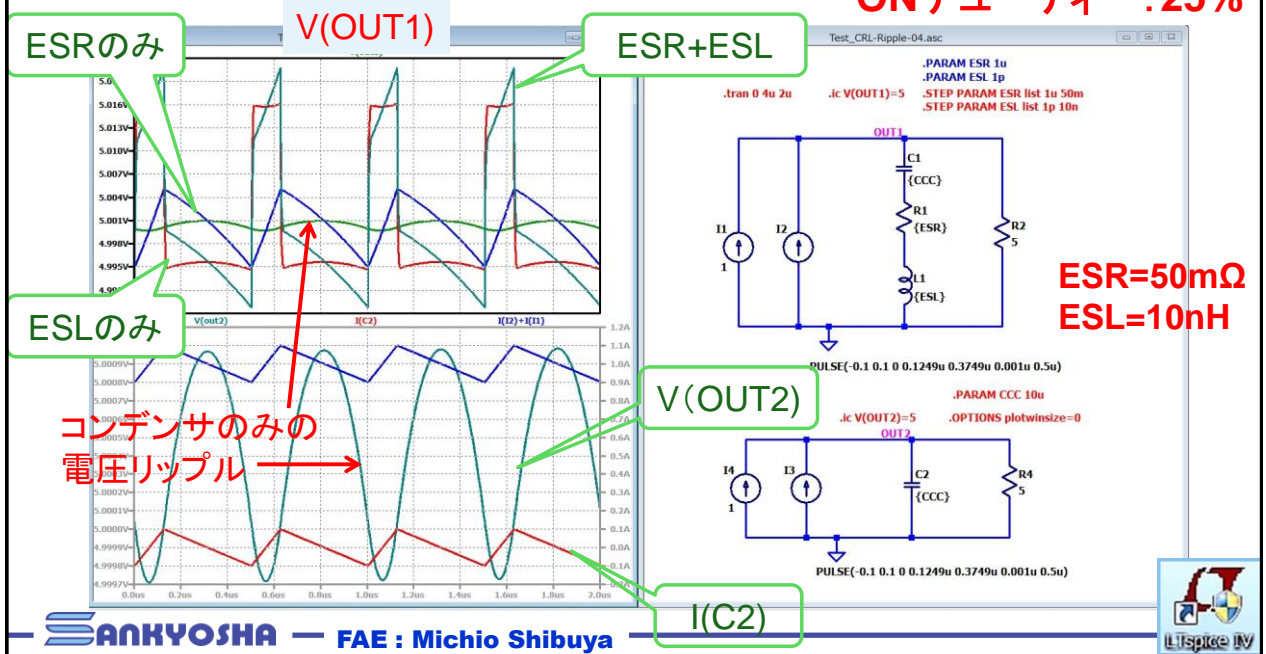
# コンデンサ容量に依存しないリップル-1

ONデューティー: 50%

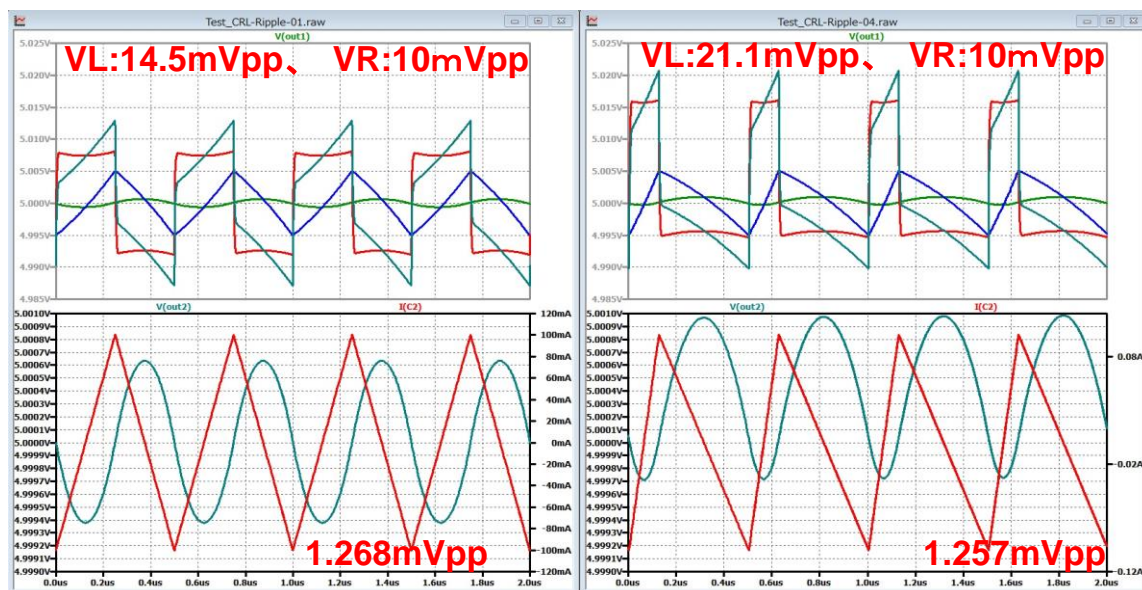


# コンデンサ容量に依存しないリップル-2

ONデューティー: 25%



二つを並べてみると・・・



**SANKYOSHA** — FAE : Michio Shibuya

ESL や ESR がリップルの支配項に  
なっていると・・・

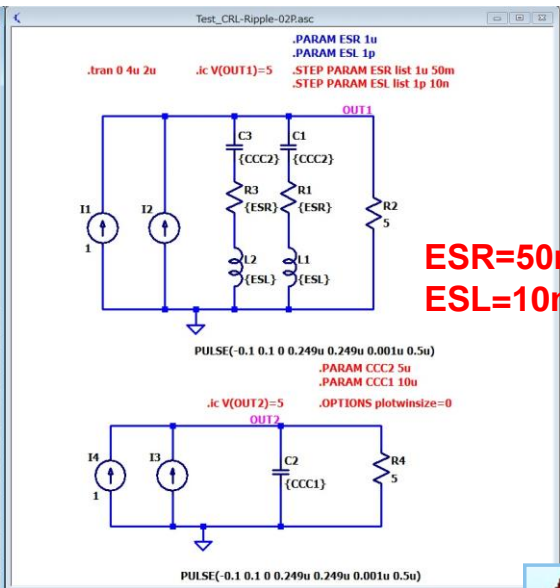
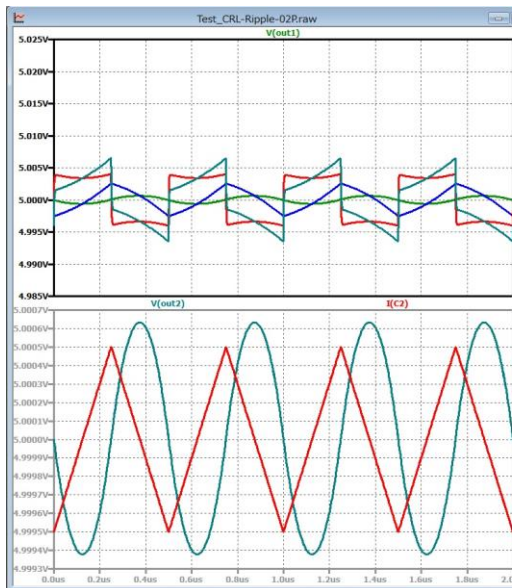
容量を大きくしても  
リップルの振幅は小さくならない

**SANKYOSHA** — FAE : Michio Shibuya

# 容量が半分のコンデンサーを 並列にした場合・・・

ESL や ESR が同じものだとすると・・・

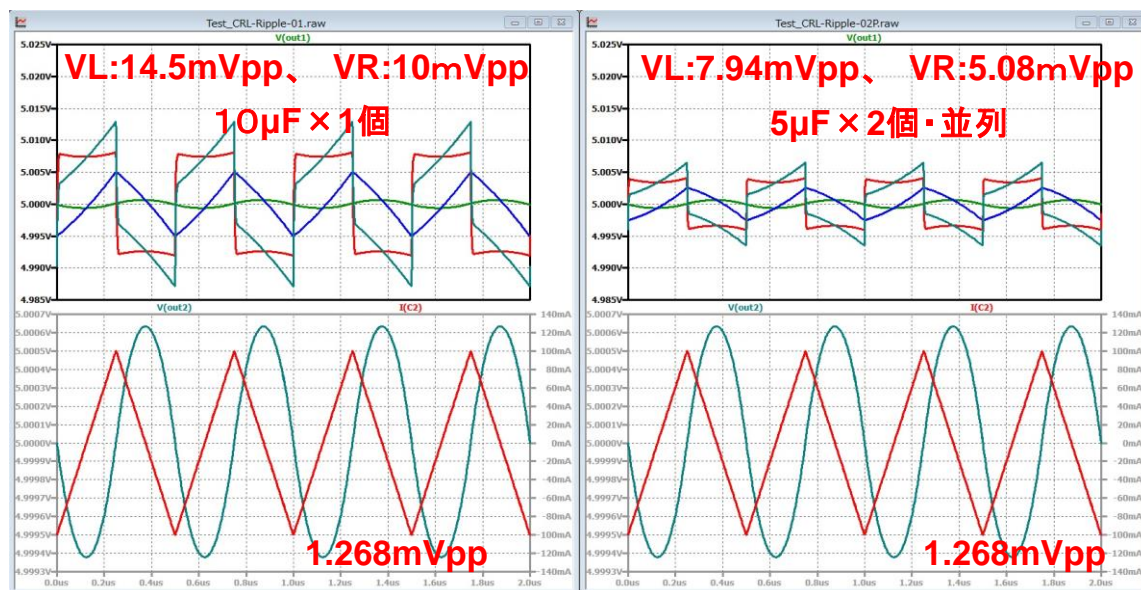
# 平滑コンデンサを並列接続すると・・・



ESR=50mΩ  
ESL=10nH



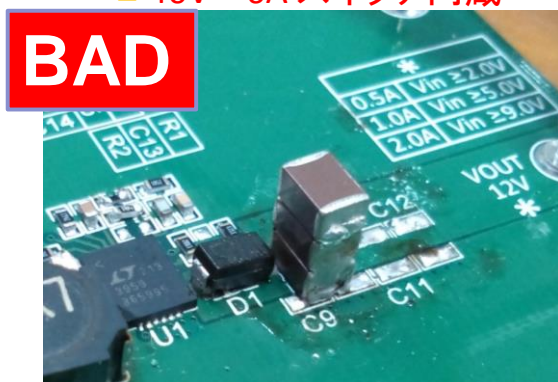
## 二つを並べてみると・・・



## 平滑コンデンサを並列にする場合

### ■ 電流の流れに沿うように接続 (LT3959昇圧の例)

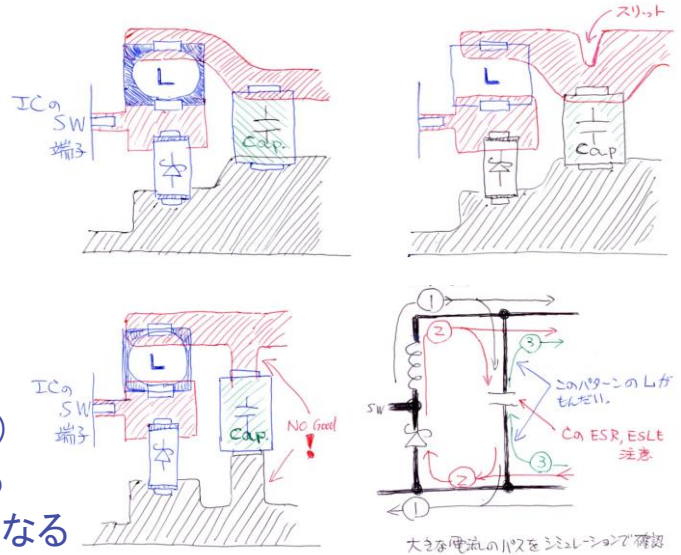
■ 40V・6A スイッチ内蔵



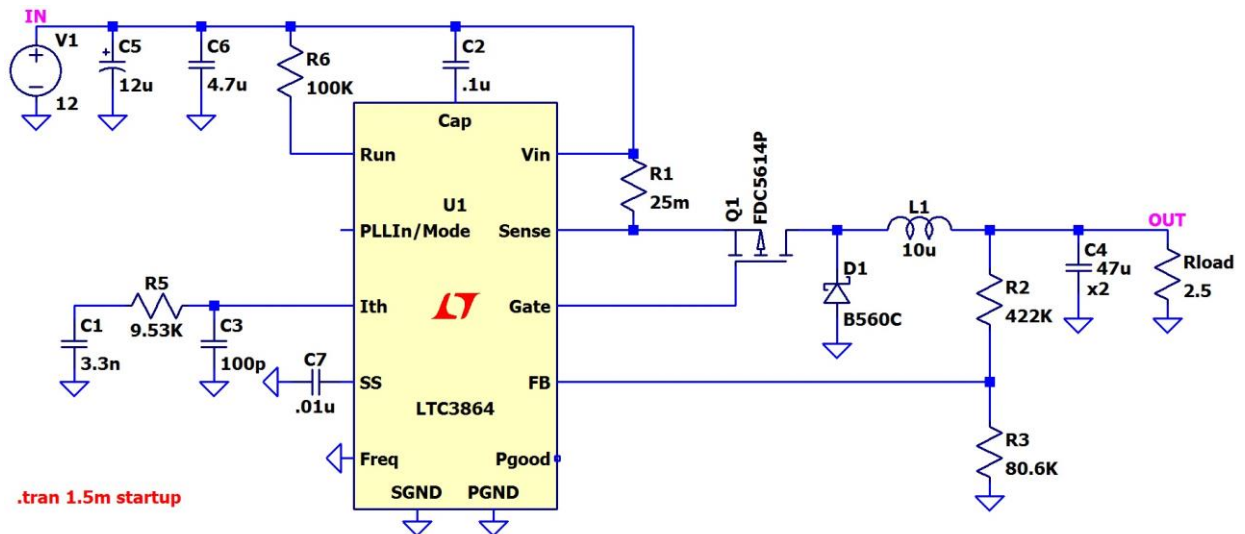
横に並べた場合に比べ、縦に積み上げると約2倍のリプル電圧の大きさになる  
縦積み=約0.6Vpp のリプルが、横並べ=約0.3Vpp になった。

## PCB設計上の注意点

- ◆ 出力コンデンサの位置
- ◆ 電流が流れるルートにコンデンサが有効に置かれているか？
- ◆ パターンのL成分やコンデンサのESLで( $dv/dt$ が大)出力のスパイクノイズが増える
- ◆ ESRはリップルを低減しきれなくなる

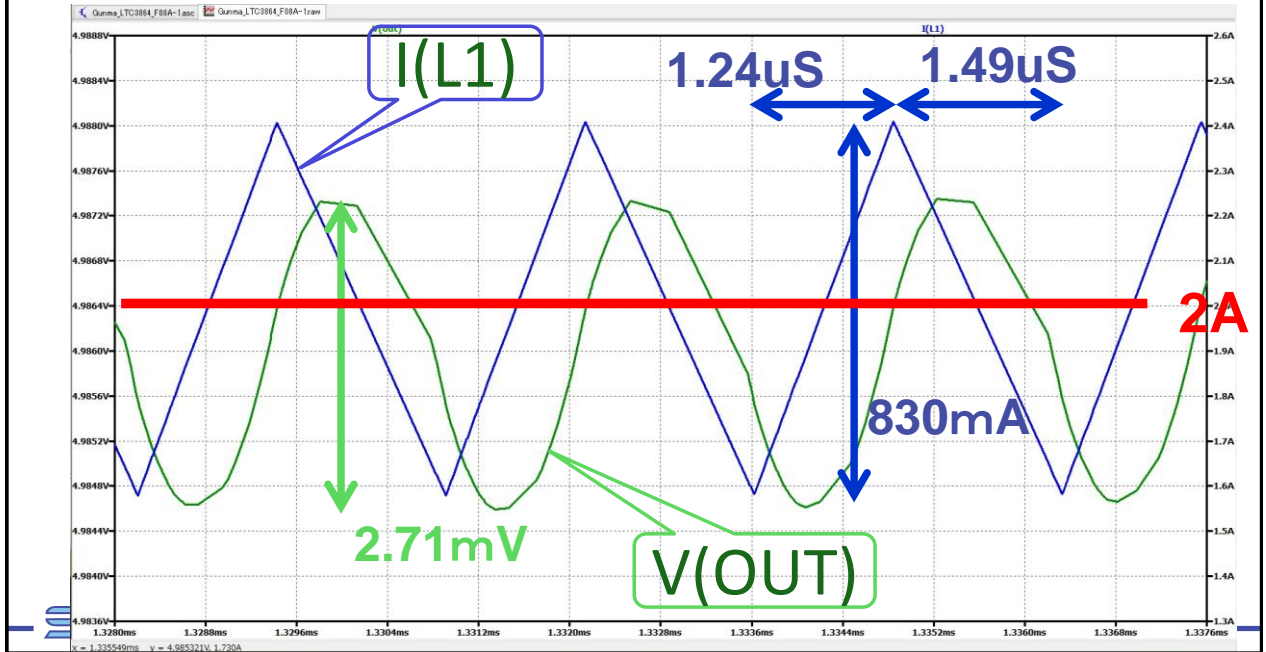


## Buck (降圧) SW電源の例 (2a)

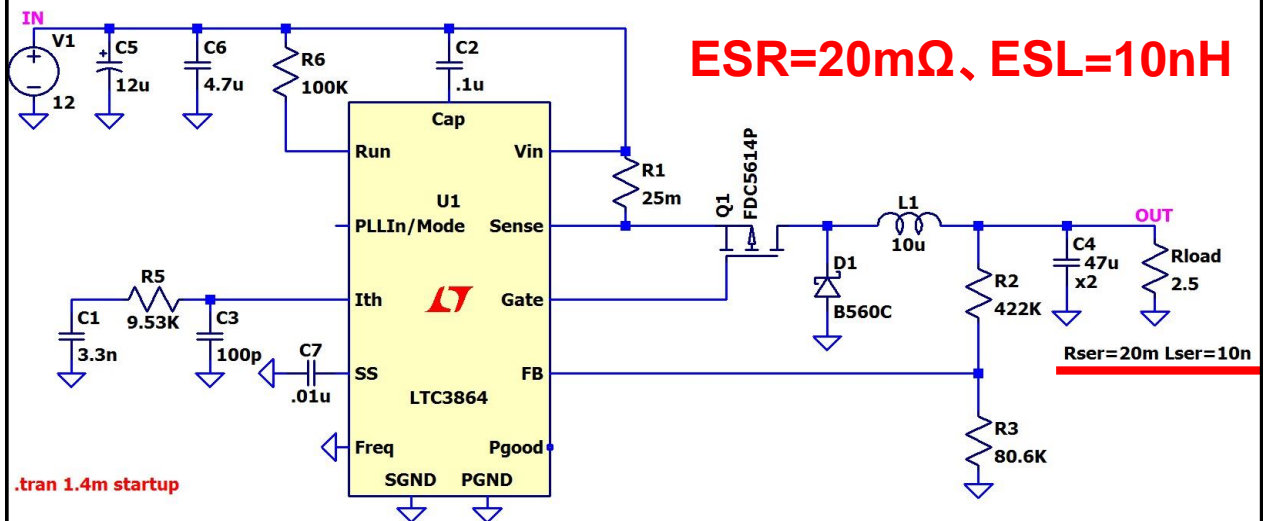




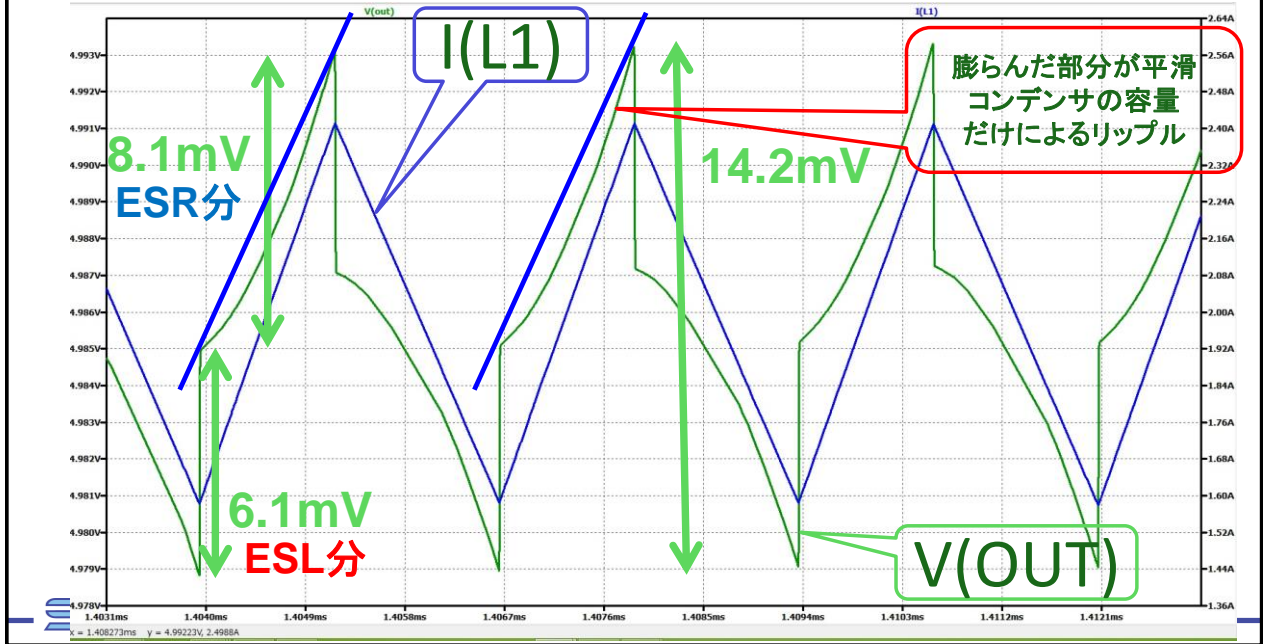
## Buck (降圧) SW電源の例 (2b)



## Buck (降圧) SW電源の例 (2c)



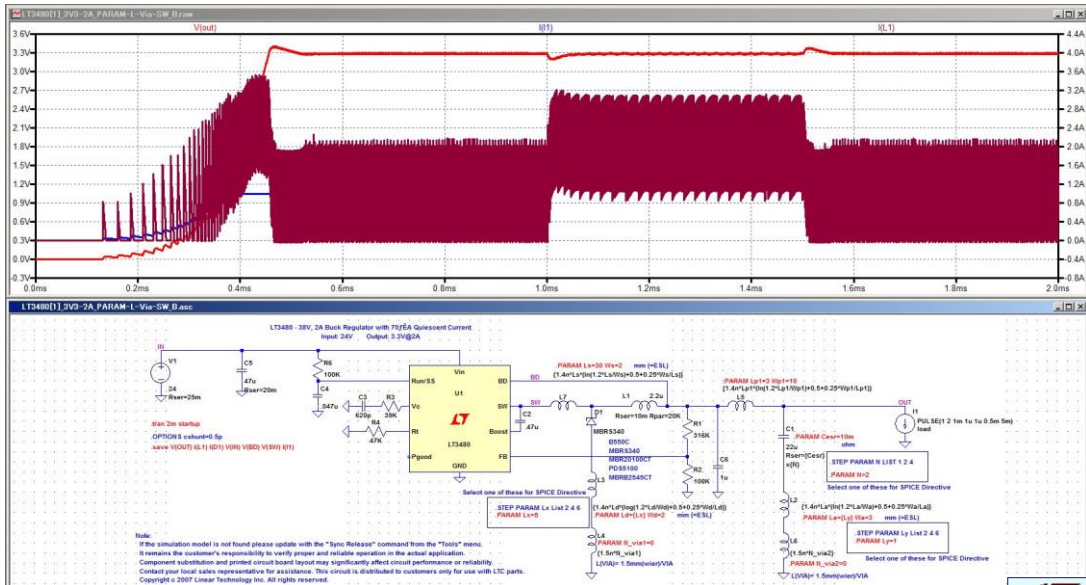
## Buck(降圧)SW電源の例(2d)



## 隠れインダクター (2)

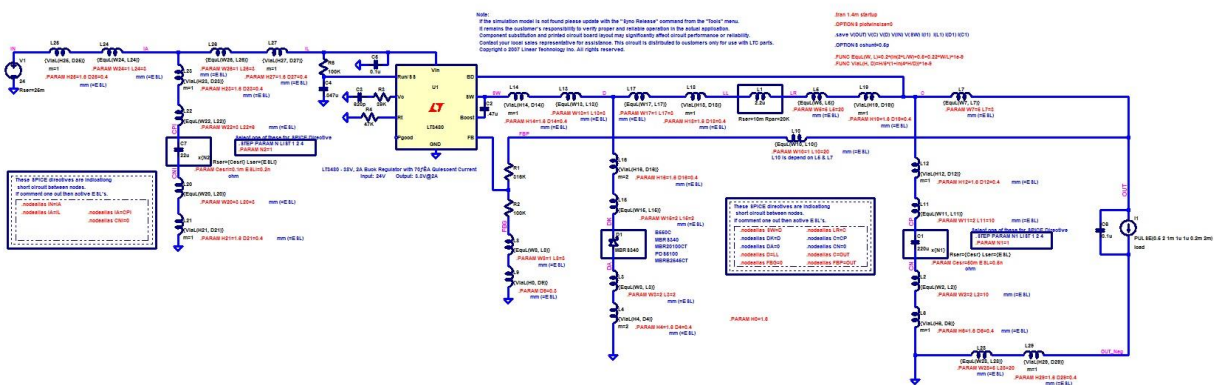
配線とVIAに関連する  
ESL

# SW 電源の配線インダクタンス(1)



**LT3480[1]\_3V3-2A\_PARAM-LL\_FB\_LVIA-CSHUNT-A.asc**

# SW 電源の配線インダクタンス(2)



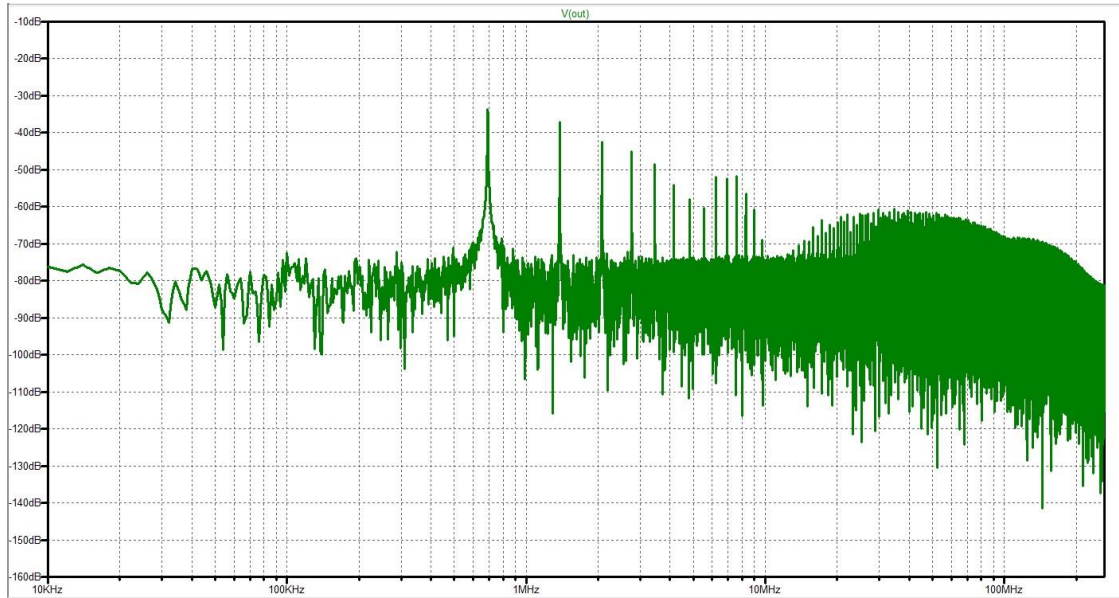
**LT3480[1]\_3V3-2A\_PARAM-LL\_FB\_LVIA-Alias-FFT.asc**



**LT3480[1]\_3V3-2A\_PARAM-LL\_FB\_LVIA-Alias.asc**

**ANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya**

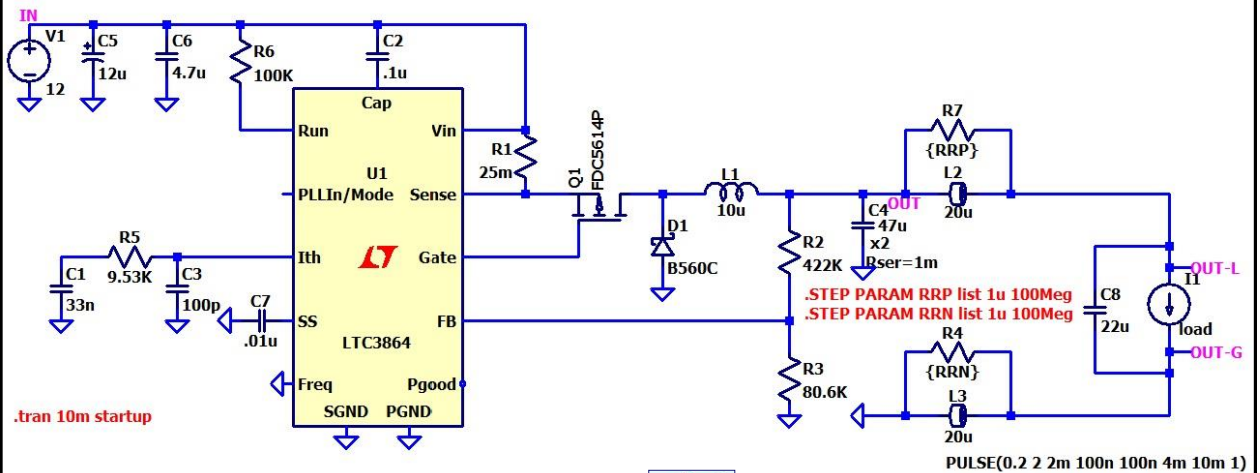
# PCBパターンによるEMI(例)



ANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya

## 堂々と取り付けた余分インダクター(1a)

◆ 電源ラインの引き回しに、むやみにFBを入れない

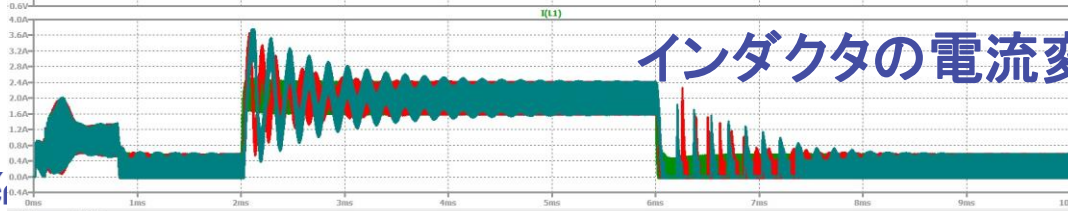
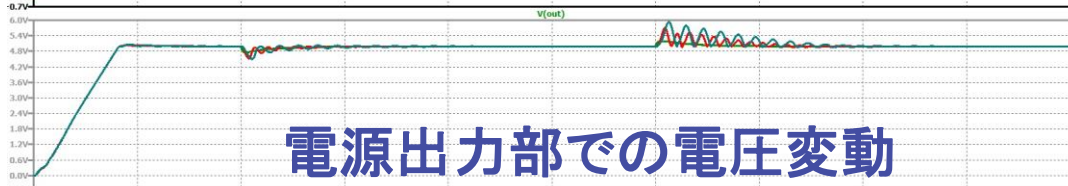
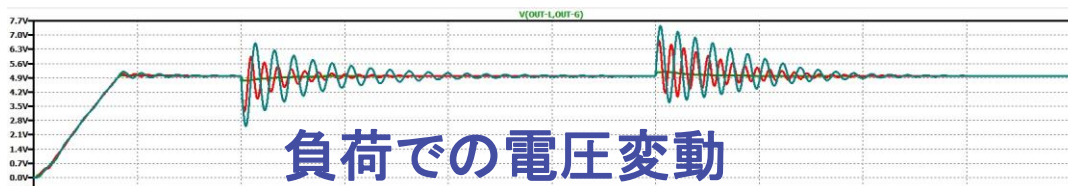


ANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya



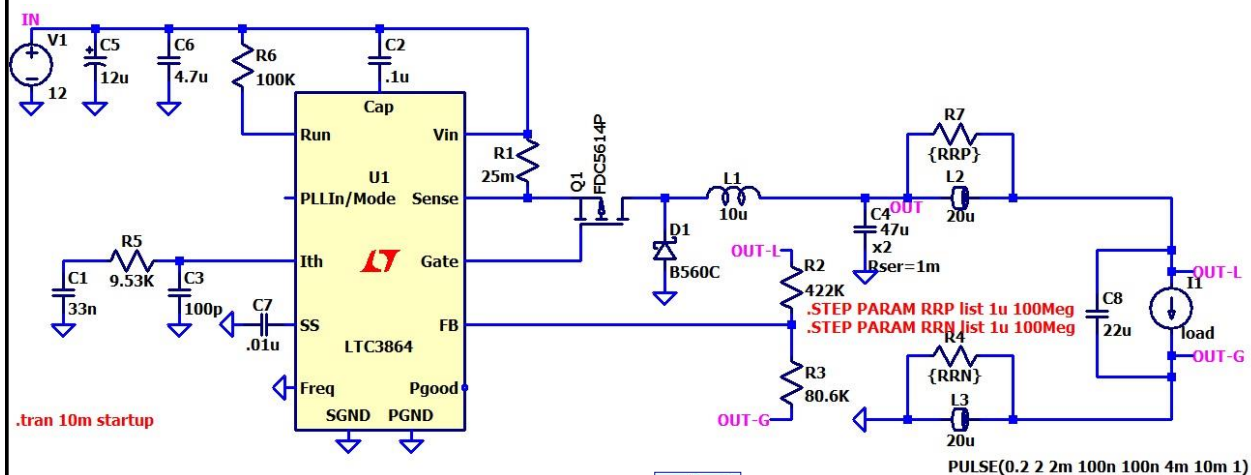
## 堂々と取り付けた余分インダクター(1b)

- ◆ 電源ラインの引き回しに、むやみにFBを入れない



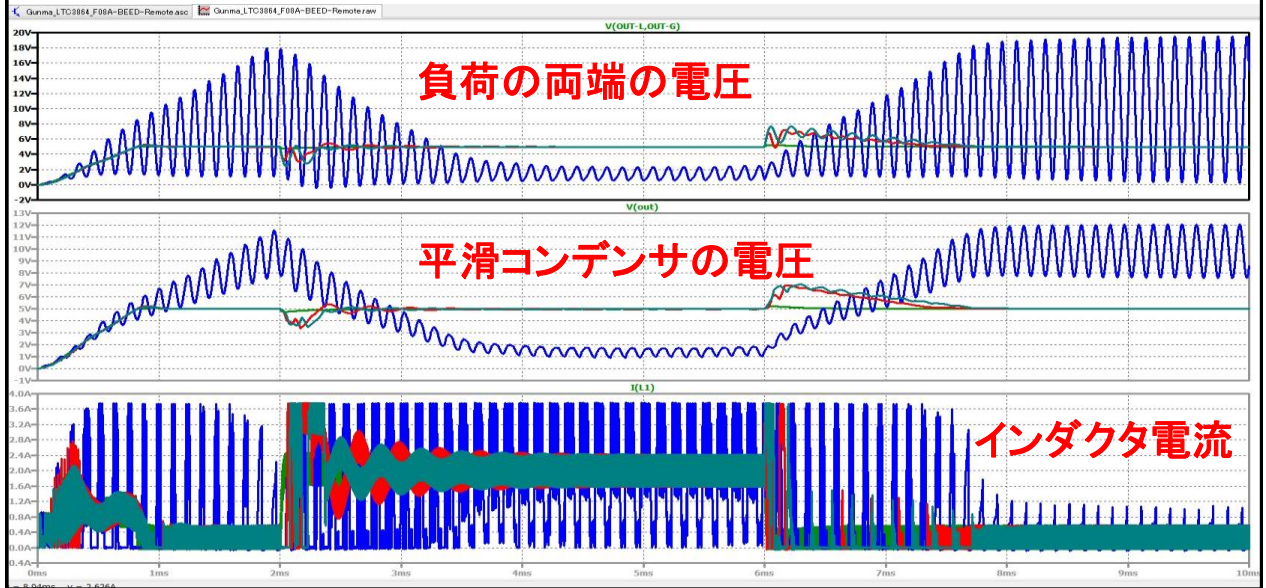
## 堂々と取り付けた余分インダクター(2a)

- ◆ FB とさらに 電圧検出をリモートセンシングにした



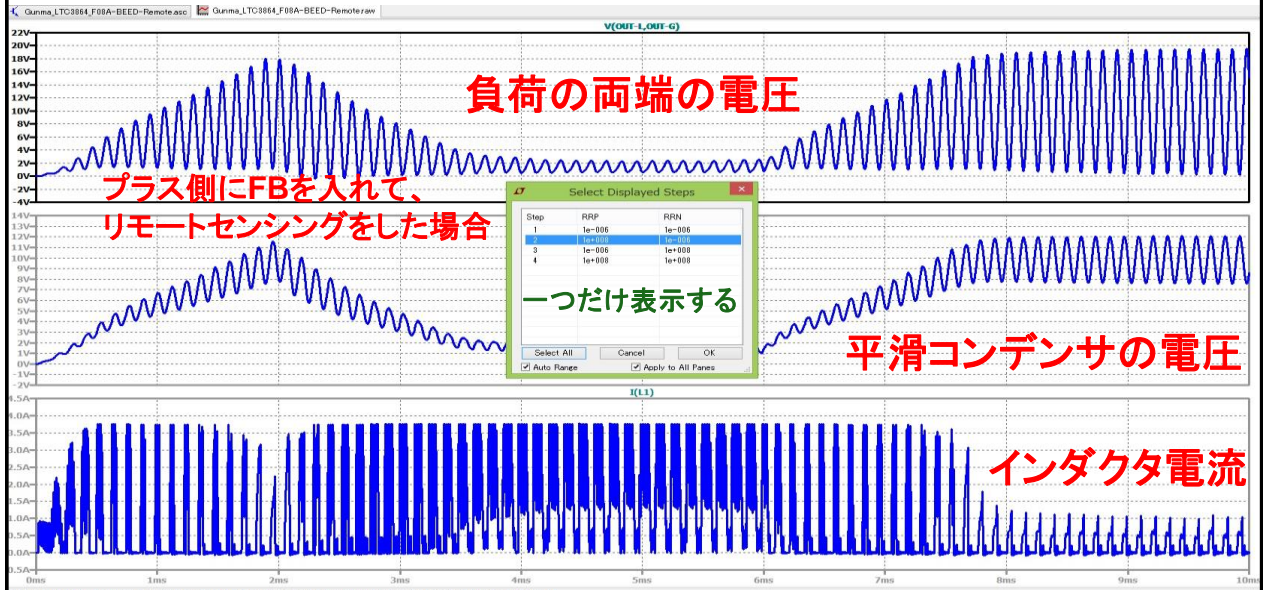
## 堂々と取り付けた余分インダクター(2b)

◆FB とさらに 電圧検出をリモートセンシングにした



## 堂々と取り付けた余分インダクター(2c)

◆FB とさらに 電圧検出をリモートセンシングにした



## 隠れインダクター (3)

バラック配線の  
引き回しのケーブルの  
インダクタンス

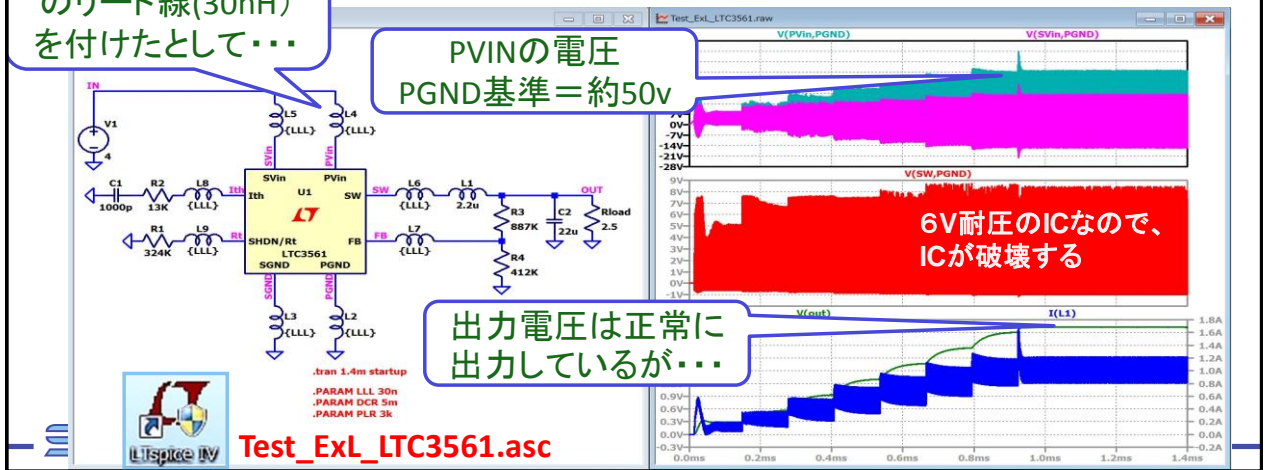
## スイッチング電源回路は 高周波回路です

バラック配線をする  
と、ICの絶対最大定格オーバーに  
なることがあります

# SW電源ICの電線を延ばすと・・・

- 電線のインダクタンス成分により、オーバーシュート、アンダーシュートが発生・・・耐圧を超えてICが破壊する

全てのピンに5cmのリード線(30nH)を付けたとして・・・



## 隠れインダクター (4)

電流検出抵抗の  
取り付け位置に注意

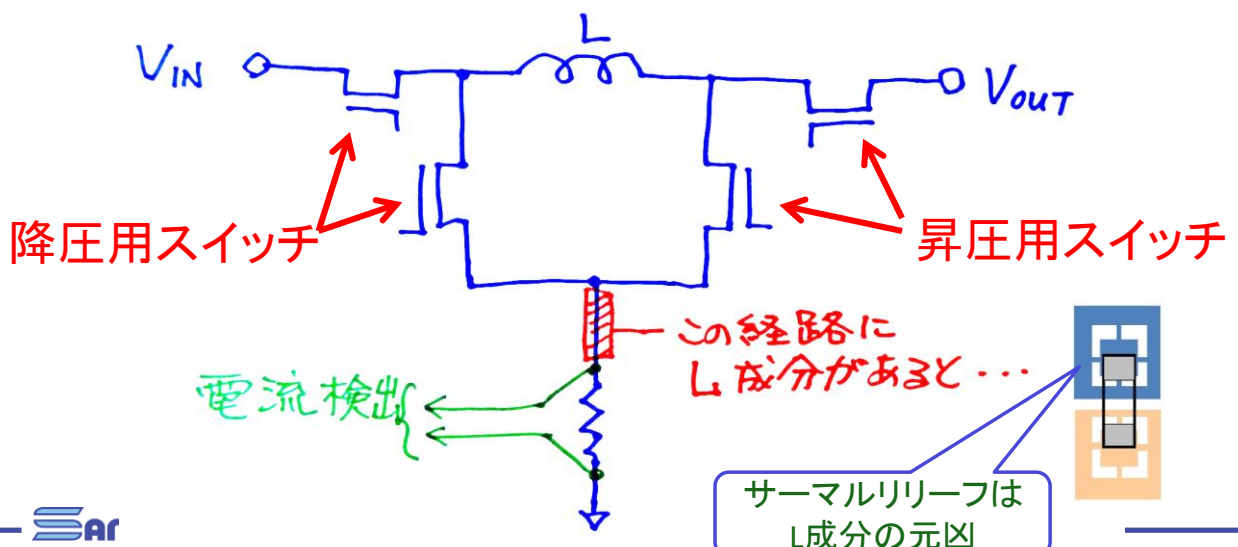


# 大電流が流れるスイッチ回路では $di/dt$ が大きくなるので 小さなインダクタンスにも注意する

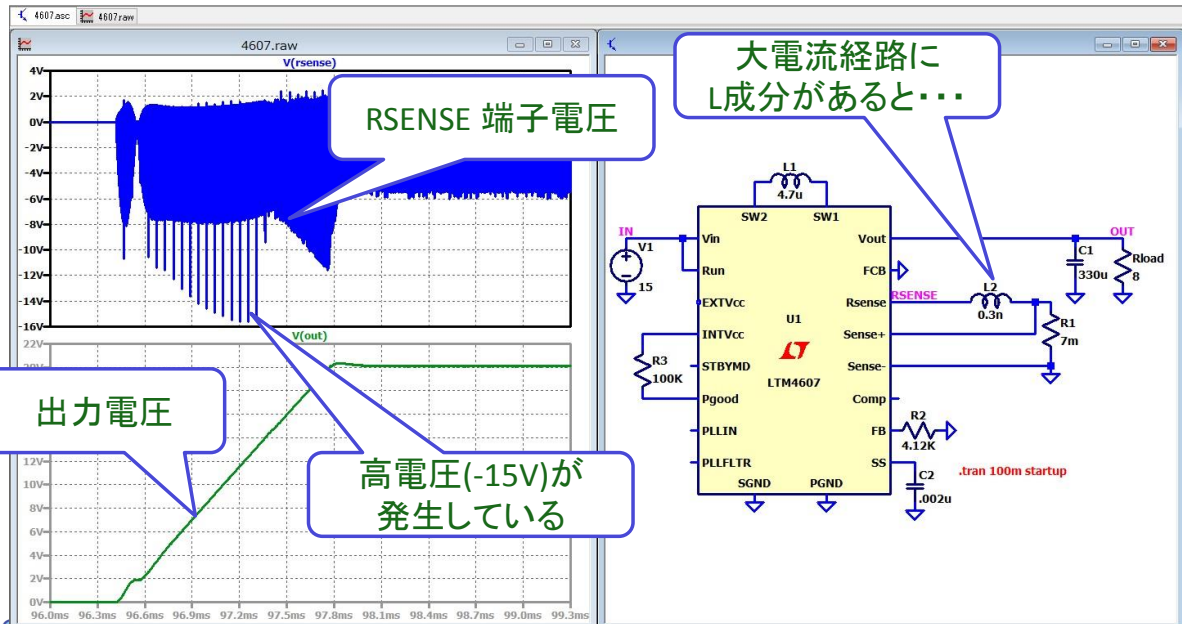
電流検出抵抗のはんだ付けランドに  
サーマル・リリーフをつけてはいけない

## 4-SW Buck-Boost の例

Buck-Boost (4-SW Type) の基本形

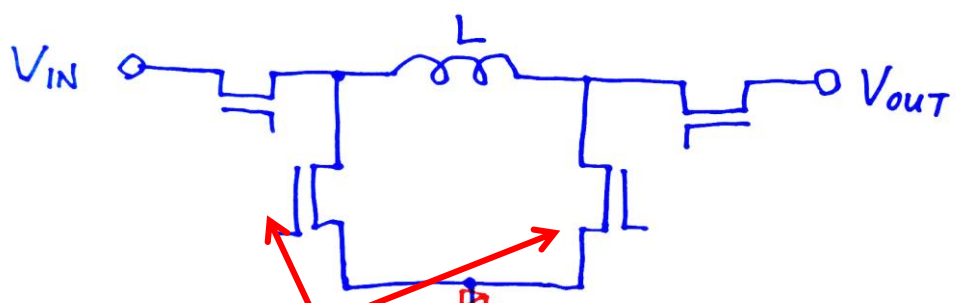


# 電流検出の経路にL成分があると...



## 4-SW Buck-Boost の例

Buck-Boost (4-SW Type)の基本形



FETのSourceがマイナスになると Gate電圧が0V程度にしていると FETがONしてしまう。  
 場合によってはTop-Bottomで貫通電流が流れることがありうる

この経路にL成分があると...

## データ・シートなどにある、 参考回路例には 隠れインダクターは 一切書かれていません

実際のPCBや、ユニバーサル基板を作ると  
元の回路図には表現されていない**L成分**が  
形成されます。

実際の回路では、これを含めて「**回路**」です。

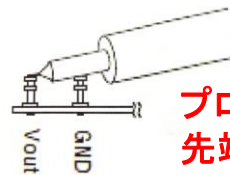
## 隠れインダクター (4)

オシロスコープの  
プロービング  
(アースクリップ付リード)



## オシロスコープのプローブの取り扱い(1)

- デモボードで、リップルやスパイク・ノイズを測定する場合、プローブのアースクリップを外して、プローブのGNDは基板上の直近に接続します。

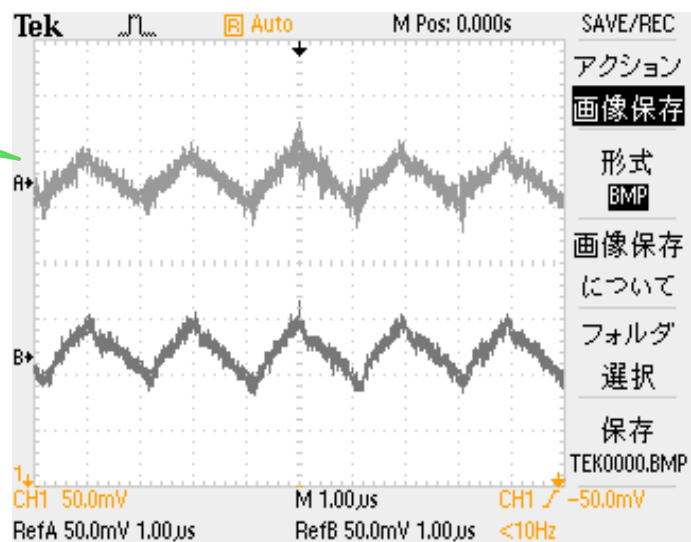


プローブを強く押しつけて  
先端を折らないように

## オシロスコープのプローブの取り扱い アース・クリップによる波形の違い

ややノイズが大きい

- アース・クリップ 使用
- アース・クリップを外して測定

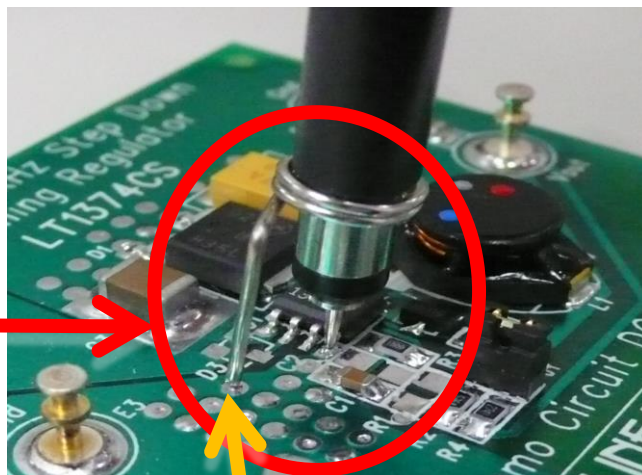


## オシロスコープのプローブの取り扱い(2)

- ◆ デモボードで、リップルやスパイク・ノイズを測定する場合、プローブのアースクリップを外して、プローブのGNDは基板上の直近に接続します。

**GOOD**

プローブを強く押しつけて先端を折らないように



スズめっき線よりもZEMクリップがおすすめ

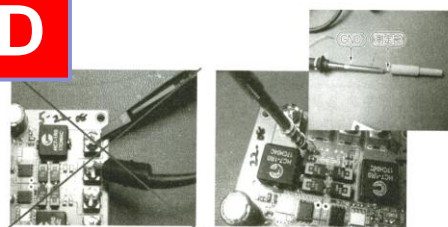
**SANKYOSHA** — FAE : Michio Shibuya

## トランジスタ技術・2009年10月号・付録

アースクリップをはずして、直近にGNDをとる方法を示しています



**BAD**



(a) リプル・ノイズ測定 不適切な例 (b) リプル・ノイズ測定 適切な例

プローブのアースクリップリードを使うと本来の信号以外の成分が観測される

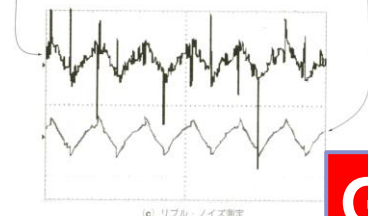


図21 リプル・ノイズの測定

**GOOD**

**SANKYOSHA** — FAE : Michio Shibuya

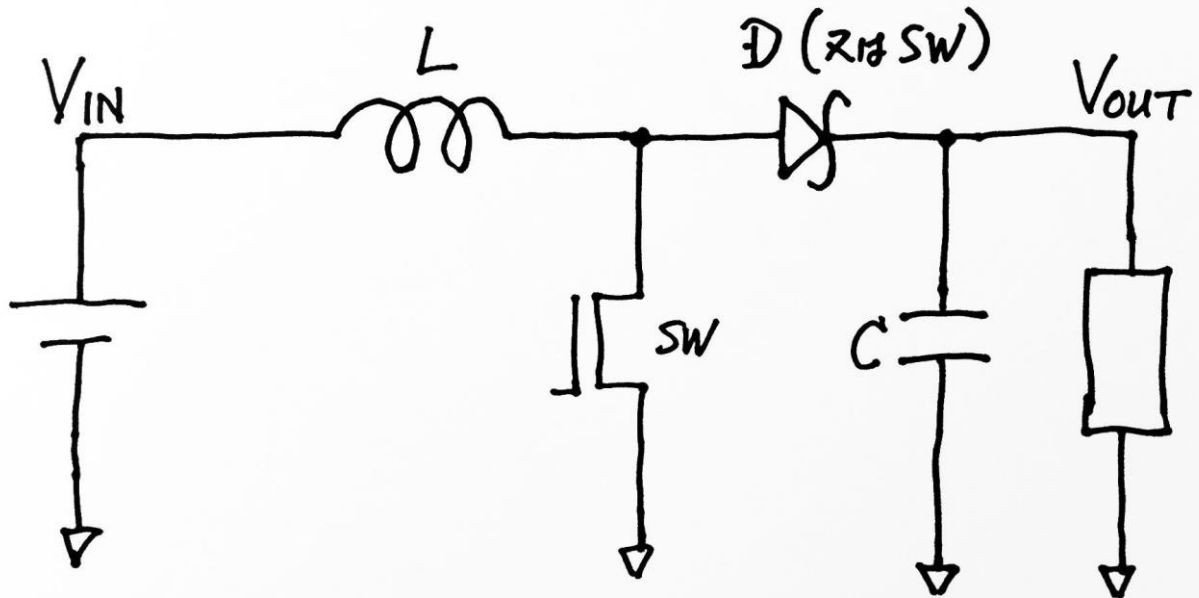
どのICメーカーの  
技術サポートチームも  
信号の正しい計測手法について  
啓蒙活動をしています

もし、何らかのトラブルが起きても  
正しい計測をすることで、  
解決のヒントが得られます。  
正しい測定をしないと、  
解決の糸口は見つかりません

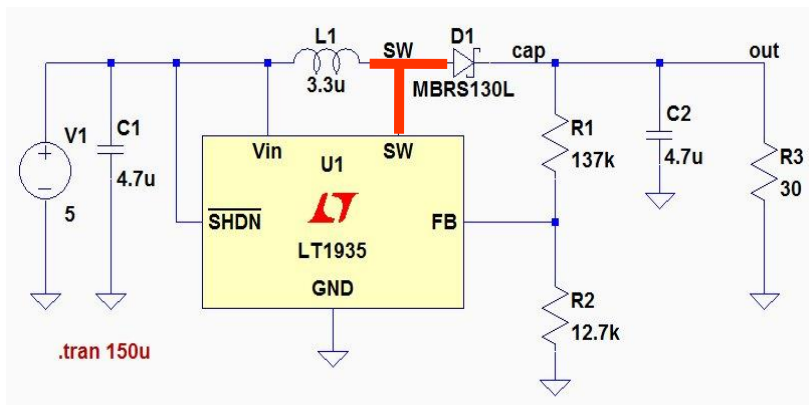
隠れインダクター (5)  
オシロスコープのプロービング  
(電流プローブの挿入)など...

**逆起電力**

## スイッチング昇圧回路の基本形



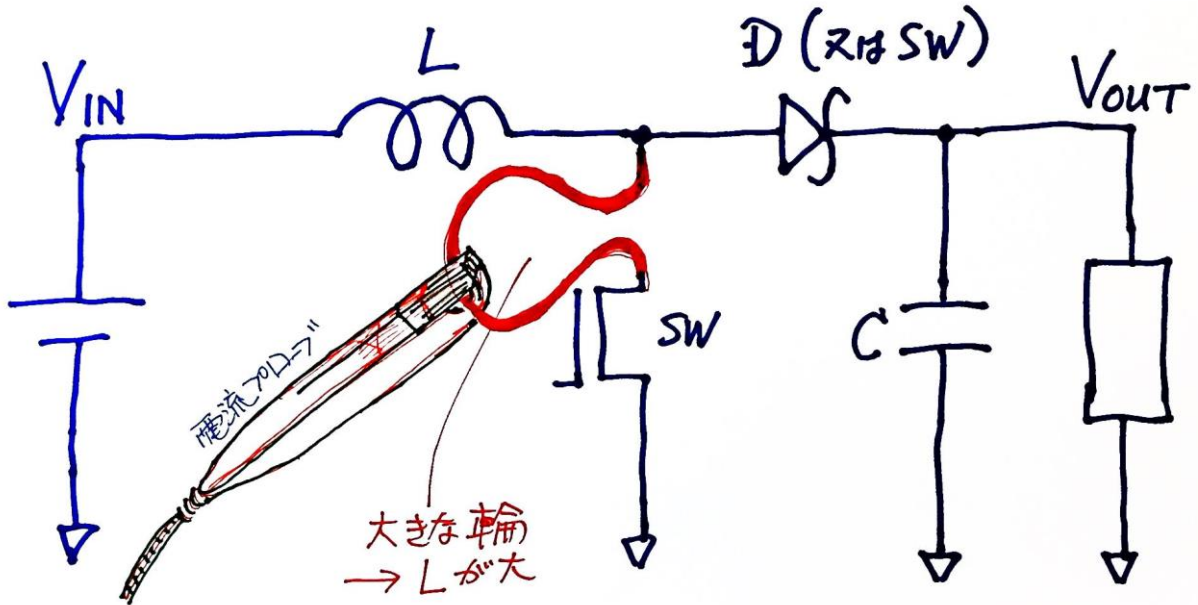
## 昇圧SW電源の注意点(1)



- ICのスイッチ電流を測ろうとして、インダクタとICのスイッチの間のラインに、電流プローブを挿入すると、ICの破壊につながる可能性がある。

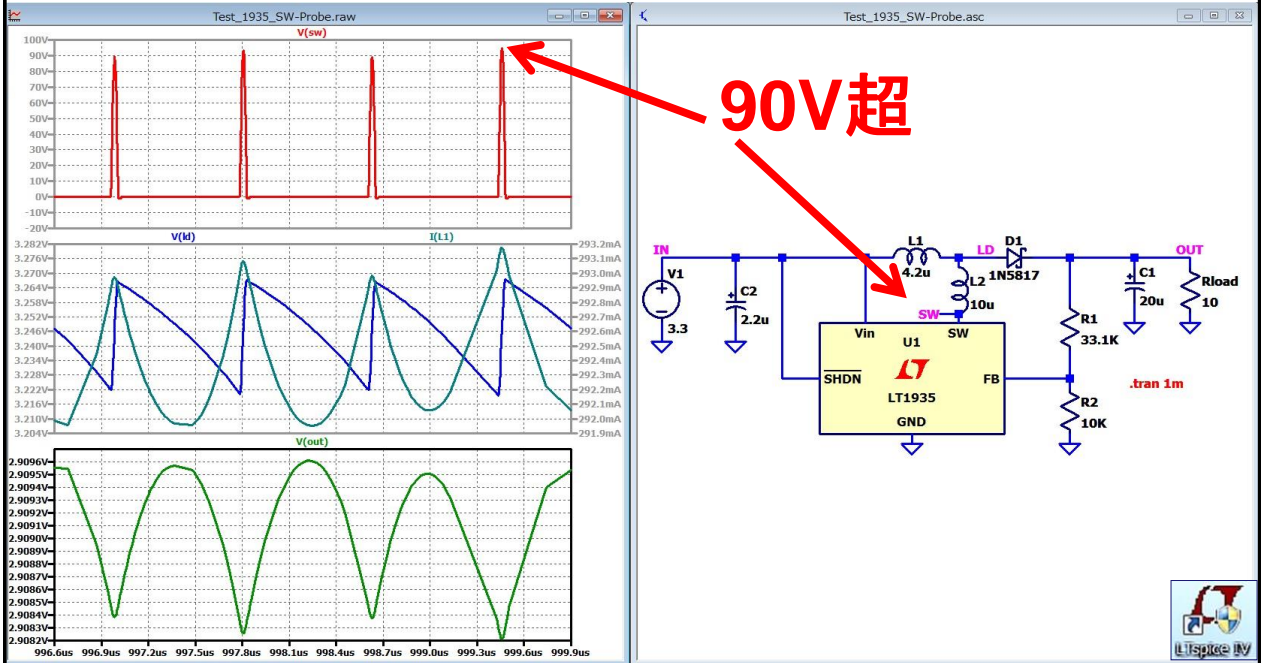


## SW電流測定の注意点(2)



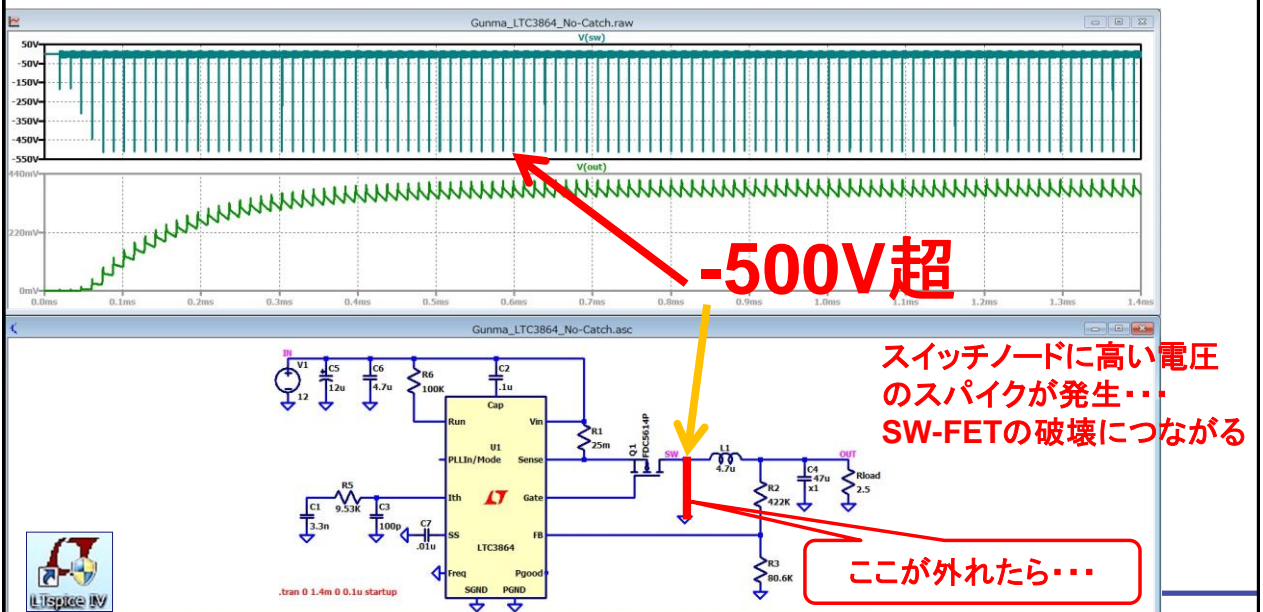
## ICそのもののSW端子の電流(?)

82



# 評価中に キャッチダイオードが外れた状態で 電源を入れてしまいました

## Buck (降圧) SW電源で キャッチダイオードがなかったら



## Key Word / Formula

◆ インダクターの両端に発生する電圧

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

Lが隠れていようがまいが、  
この公式は常に成立します

公式を記憶することは、  
試験で点数を取るため  
のものではなく

現場の様々な問題点を解決する  
ためのヒントを与えてくれる  
普遍法則を活用することです

ここからは年寄りの説教です

## 経験

失敗した事柄を、  
理論的に考察して、  
理論と実践の関連付けをすること。  
次の応用に発展できる

## 熟練

同じ手法・類似の作業を  
長年繰り返すことで、  
作業の能率や効率を  
向上させることができる

## 質問

回路図通りに作りました。  
うまく動作しません。  
考えられる原因を教えてください。



YAHOO! 知恵袋  
JAPAN

教えて! goo

SANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya

回路を設計・製造していて、  
分からないことがあったら  
ICメーカーや代理店に  
問い合わせをする

理屈はわからなくていいから  
やり方だけ教えてほしい

YAHOO! 知恵袋  
JAPAN

教えて! goo

SANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya

・・・ではなく  
問題解決能力を  
高めてもらいたい

電子工学を理解するうえで  
基礎となる学問は・・・  
物理学、数学、(論理学)

できる限り  
メーカーのデータ・シートや  
アプリケーション・ノートにある  
理論式を自分で検証し、  
具体的な数値を代入してみる。

文献にある式を鵜呑みにしない

失敗から学び、  
好奇心をもって、  
新たな課題に取り組んでください。

