

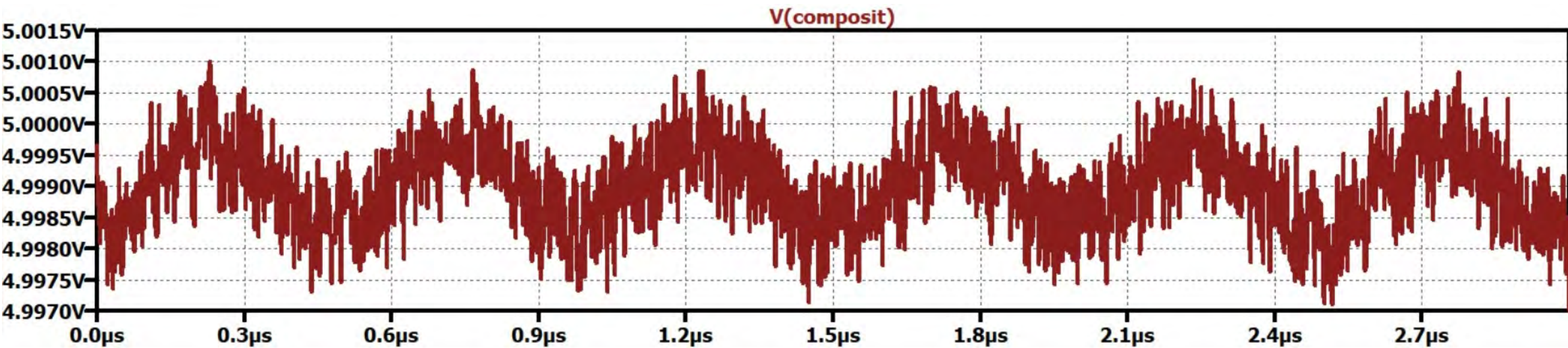
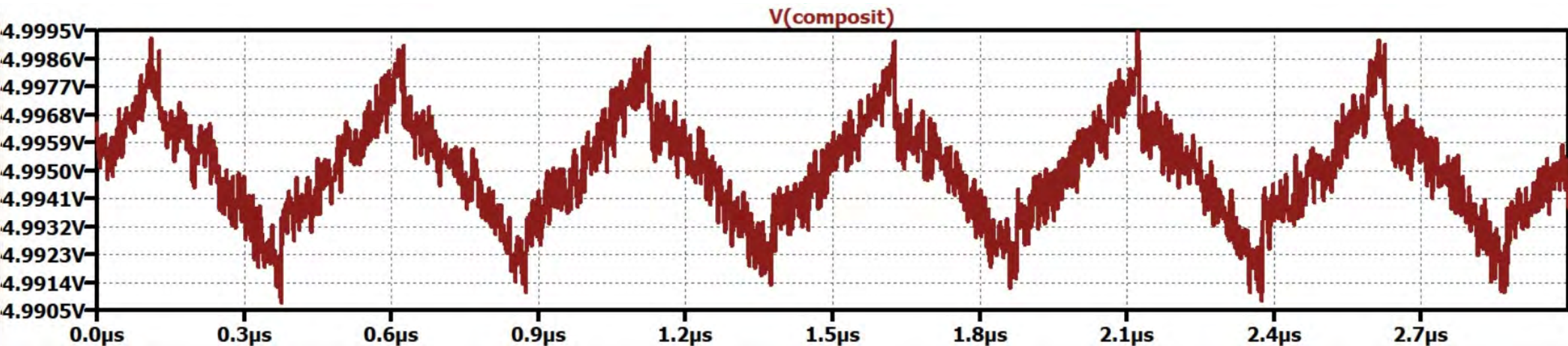
降圧スイッチング電源の 出力電圧リップルと、 スパイク・ノイズ その発生メカニズムを LTspiceで確認する

株式会社三共社

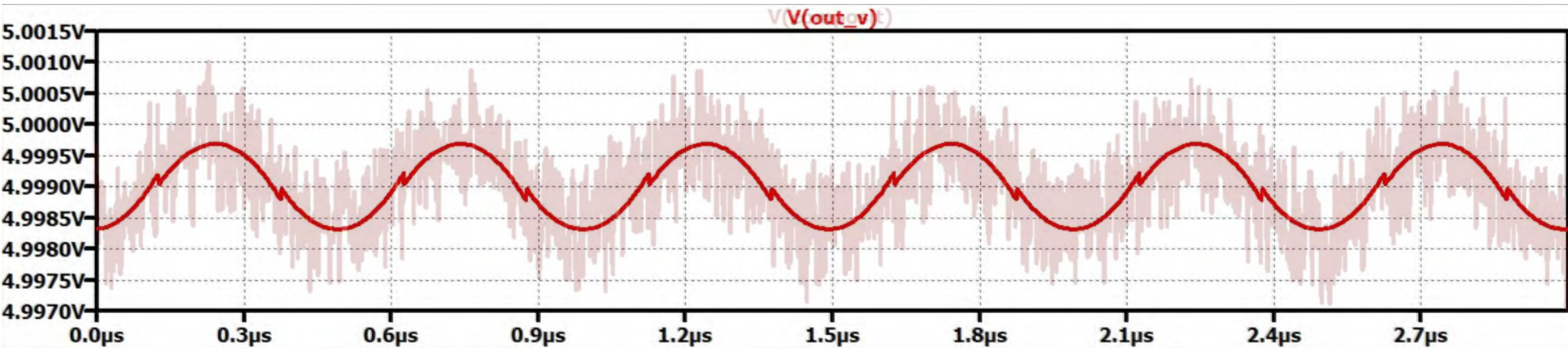
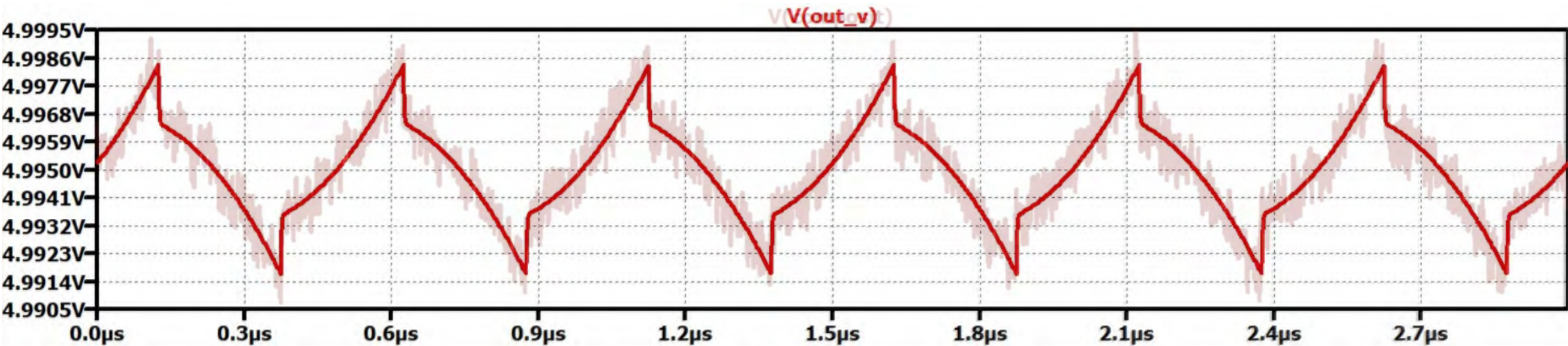
渋谷 道雄



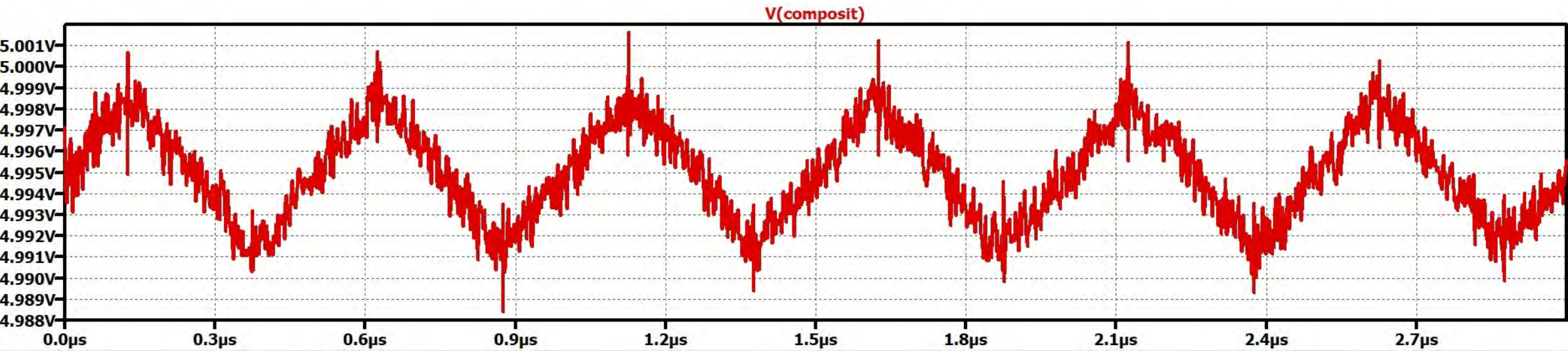
よく見る リップル波形 (1)



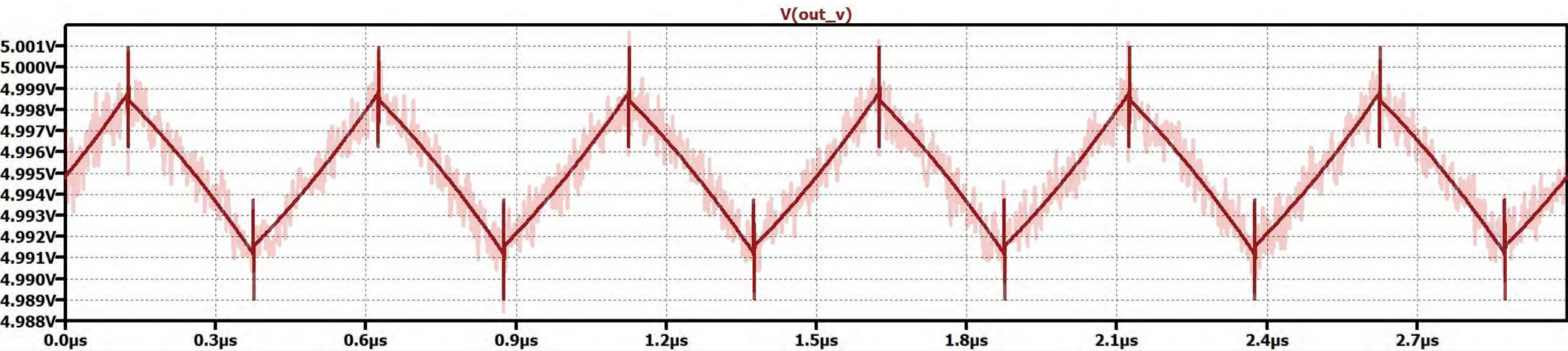
よく見る リップル波形 (1)



よく見る リップル波形 (2)



よく見る リップル波形 (2)



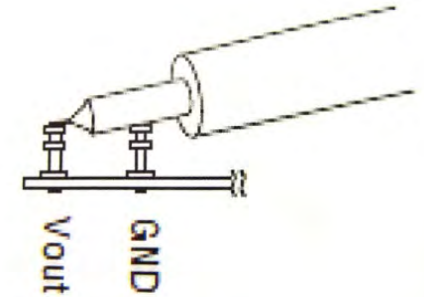
Probing (1)

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。

BAD



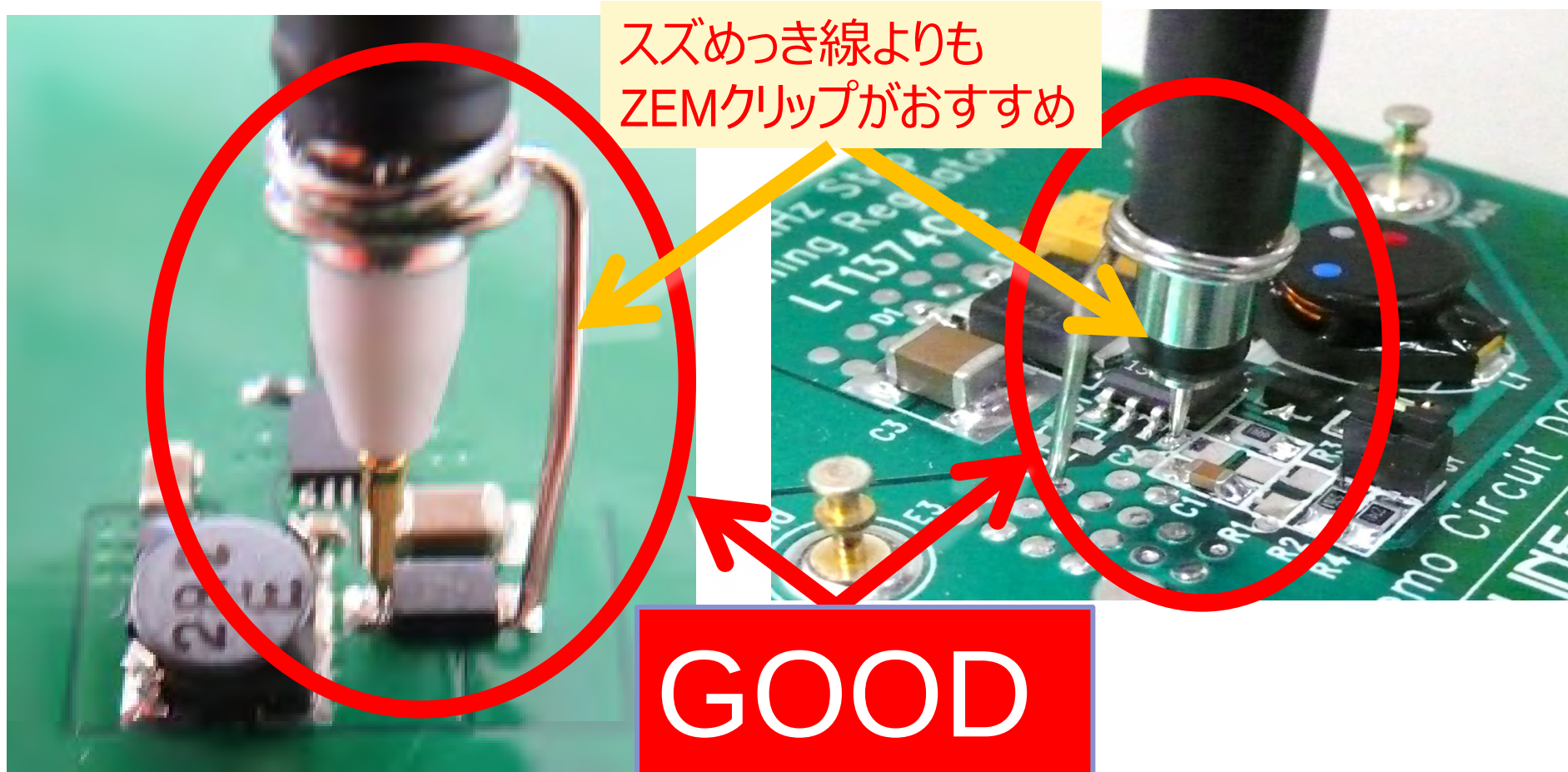
GOOD



プローブを強く押しつけて
先端を折らないように

Probing (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。

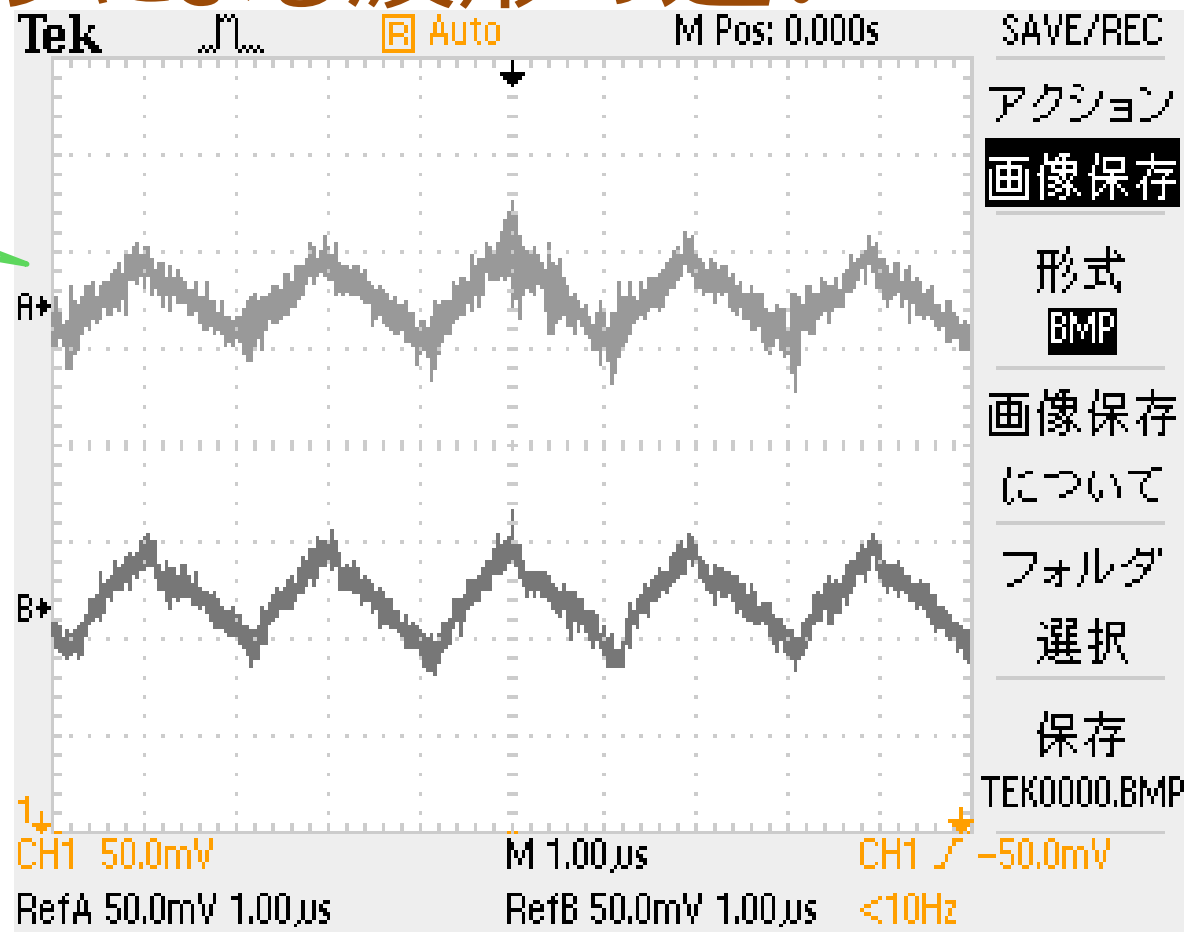


オシロスコープのプローブの取り扱い

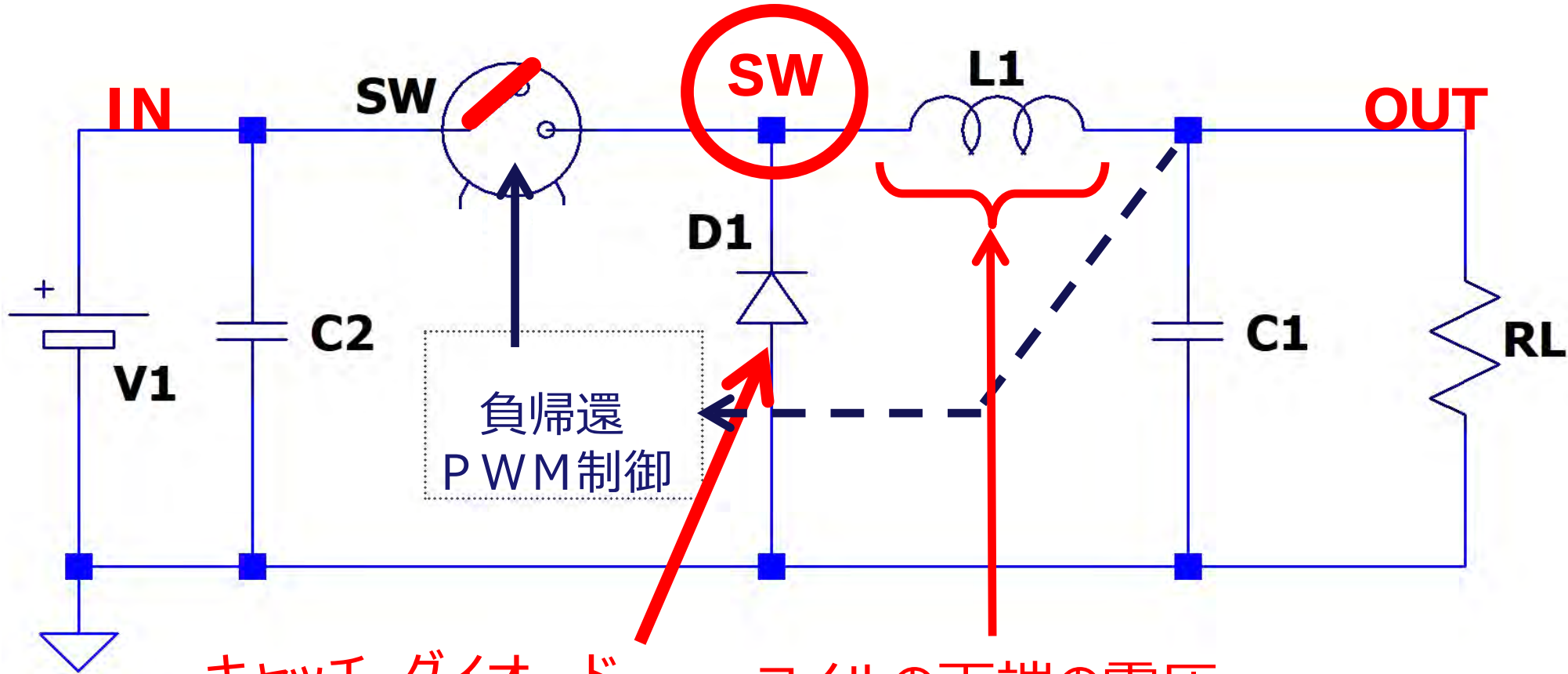
アース・クリップによる波形の違い

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



SW Buck-Converter の基本回路



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

インダクターの両端に発生する電圧

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

SW Buck-Converter の解析手法

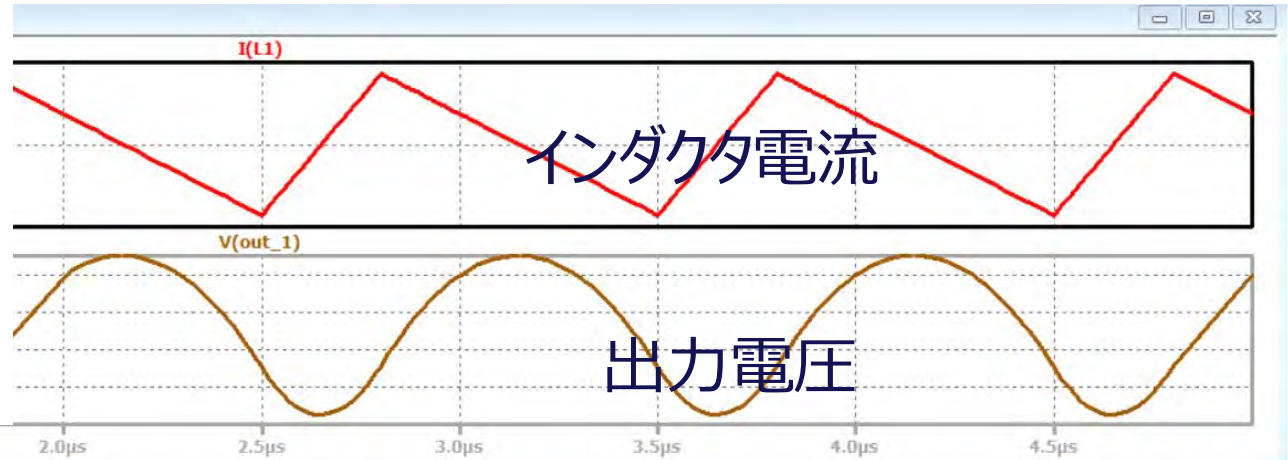
- 回路中に存在する隠れた要素 (R,L,C) を
考慮・考察し、理論的推測をSPICEで確認する。

タイムドメインの波形があれば・・・
周波数解析はFFTで簡単にできる

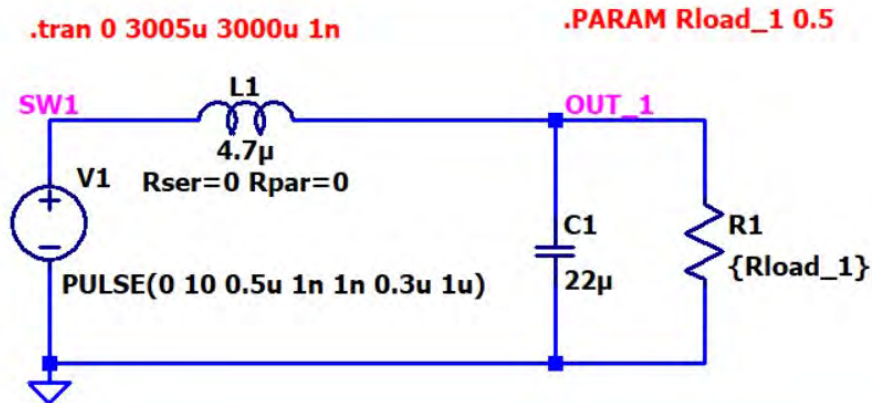
シミュレーション (理想的条件)

$$I_c = I_L - I_{LOAD}$$

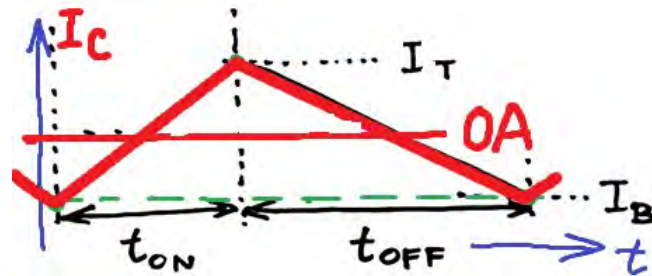
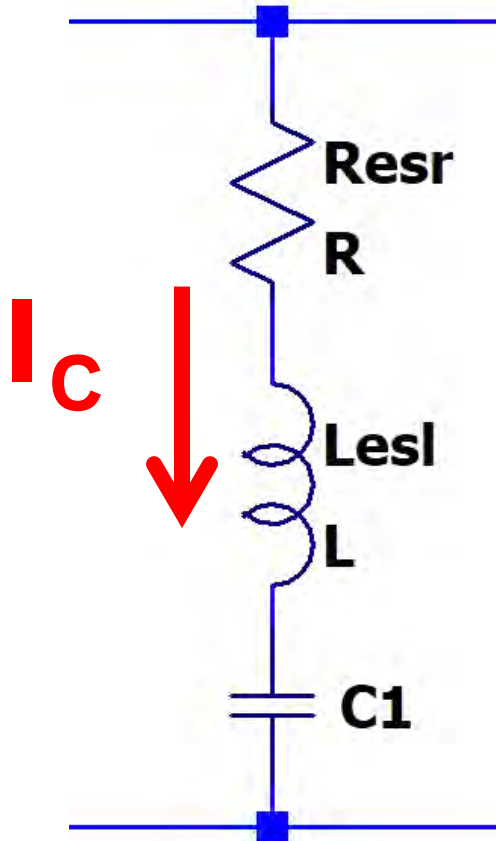
$$V_c = \frac{1}{C} \int I_c dt$$



理想的・・・
LのDCR・・・・なし
CのESR・ESL・・・・なし

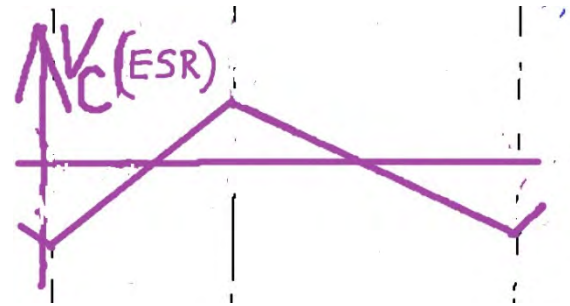


コンデンサの経路に・・・ ESR & ESL



それぞれの成分・・・ESR・ESL で発生した電圧を重ね合わせると・・・

次のスライド



ESR、ESL、の重ね合わせ

コイルのリプル電流から負荷電流を差し引いた分がコンデンサに流れる電流 I_C

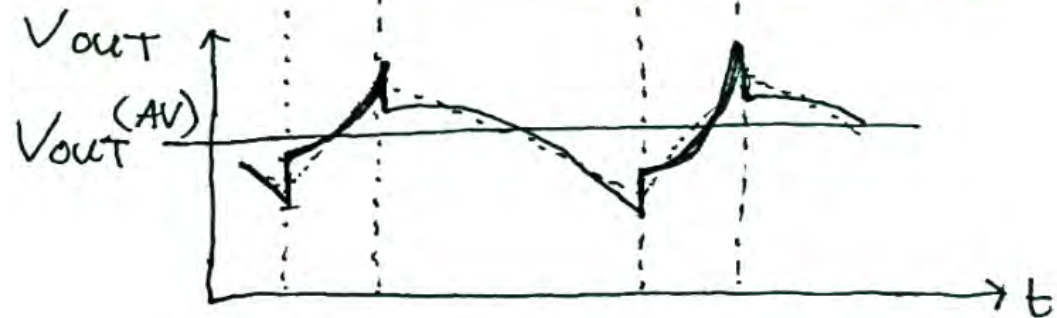
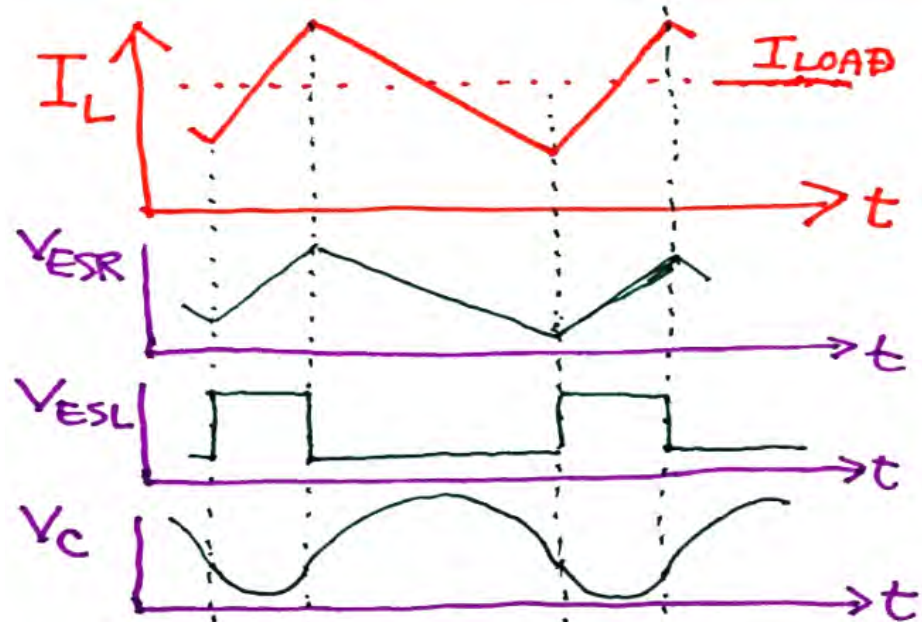
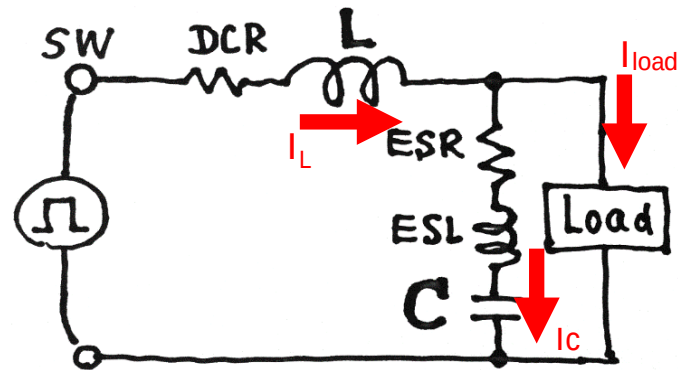
$$I_C = I_L - I_{LOAD}$$

$$V_{ESR} = ESR \cdot I_C$$

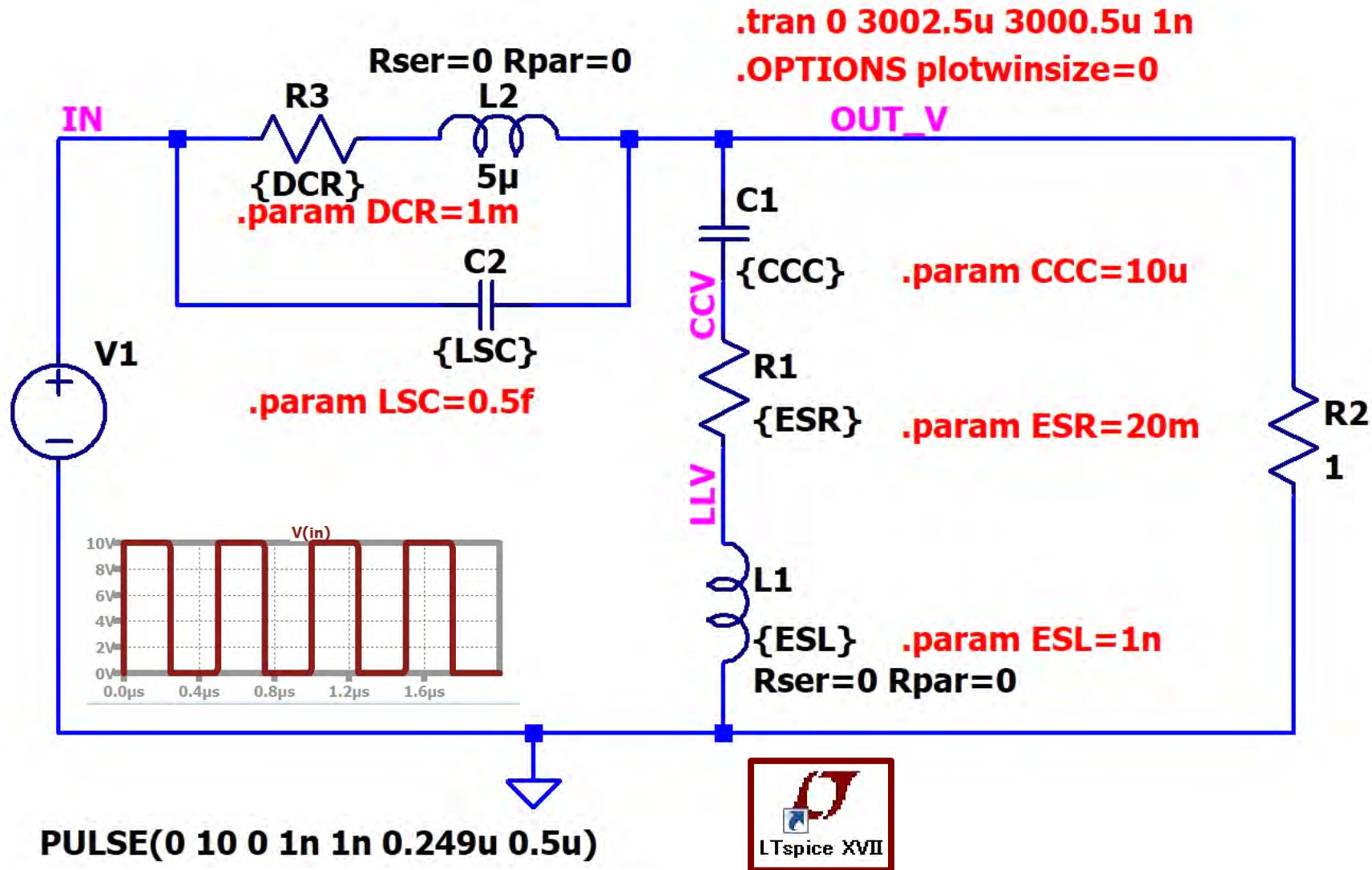
$$V_{ESL} = ESL \frac{dI_C}{dt}$$

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

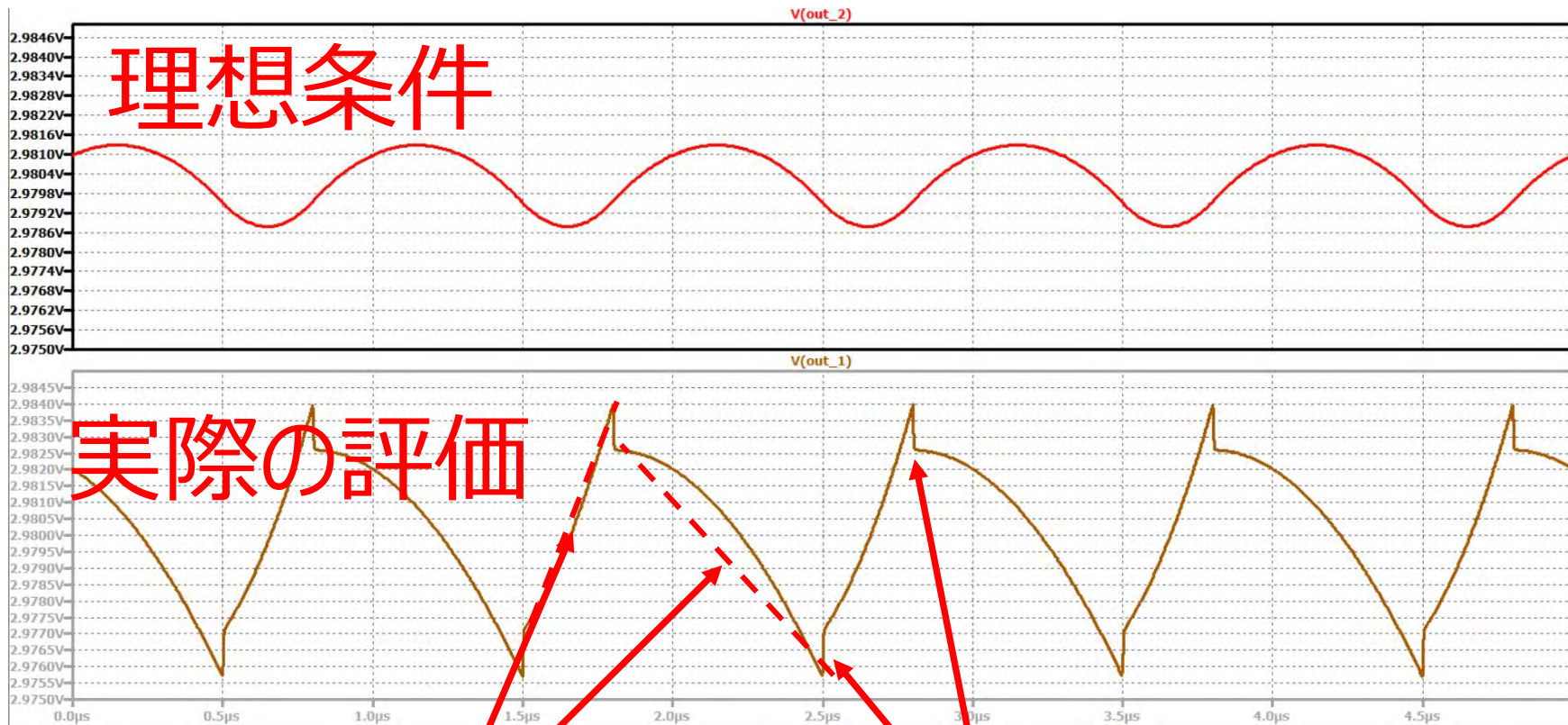
重ね合わせ



実験 (確認) 回路



実際の評価でよく表れるリップル波形



ESRによる勾配

ESLによる段差

ESL の原因は・・・

- 部品のリード線
- PCBパターン
 - ESLを低減するには・・・
 - 線幅を広く
 - 線長を短く

PCB 上のインダクタンス

隠れインダクター

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

■ 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

内部の引き出し線が、
ESLの主な要因

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

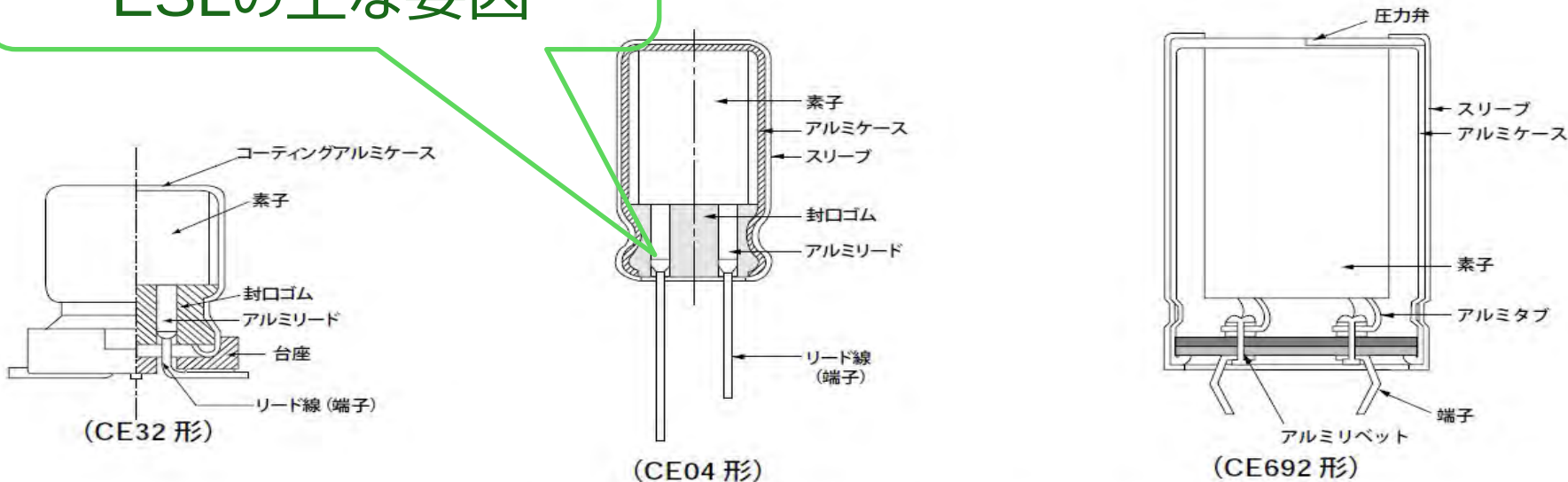


Fig-4 アルミ電解コンデンサの構造（代表的形状の例）

PCBパターンのインダクタンスの計算

these will be discussed later). A first approximation for the inductance of a conductor having length 'l' and diameter 'd' is

Wire

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

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

$$L = 2l \cdot \left(\ln \frac{2l}{w} + 0.5 + 0.2235 \frac{w}{l} \right) \text{ nH}$$

where 'w' is the width of the trace. For PCB traces, L hardly depends on the thickness of the copper (1 oz or 2 oz board). Both the above equations are plotted in *Figure 3*. It will be seen that for a given length, a PCB trace of width 'x' has higher inductance than a wire of diameter 'x'. In fact **the width of a PCB trace has to be about 1.78 times the diameter of a wire for the same inductance.**



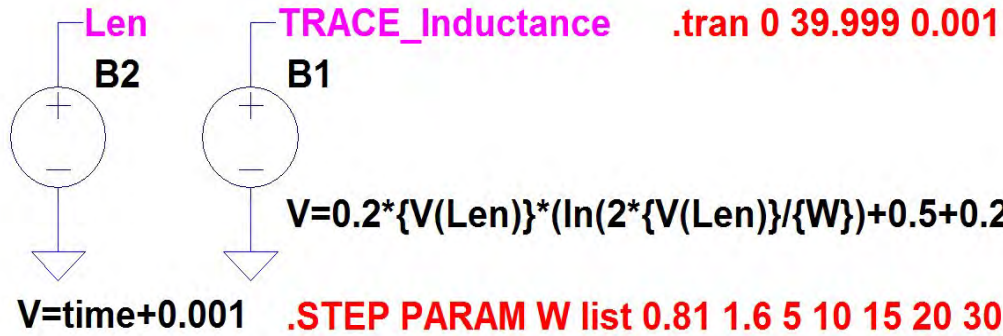
INS、

■ AN1229、

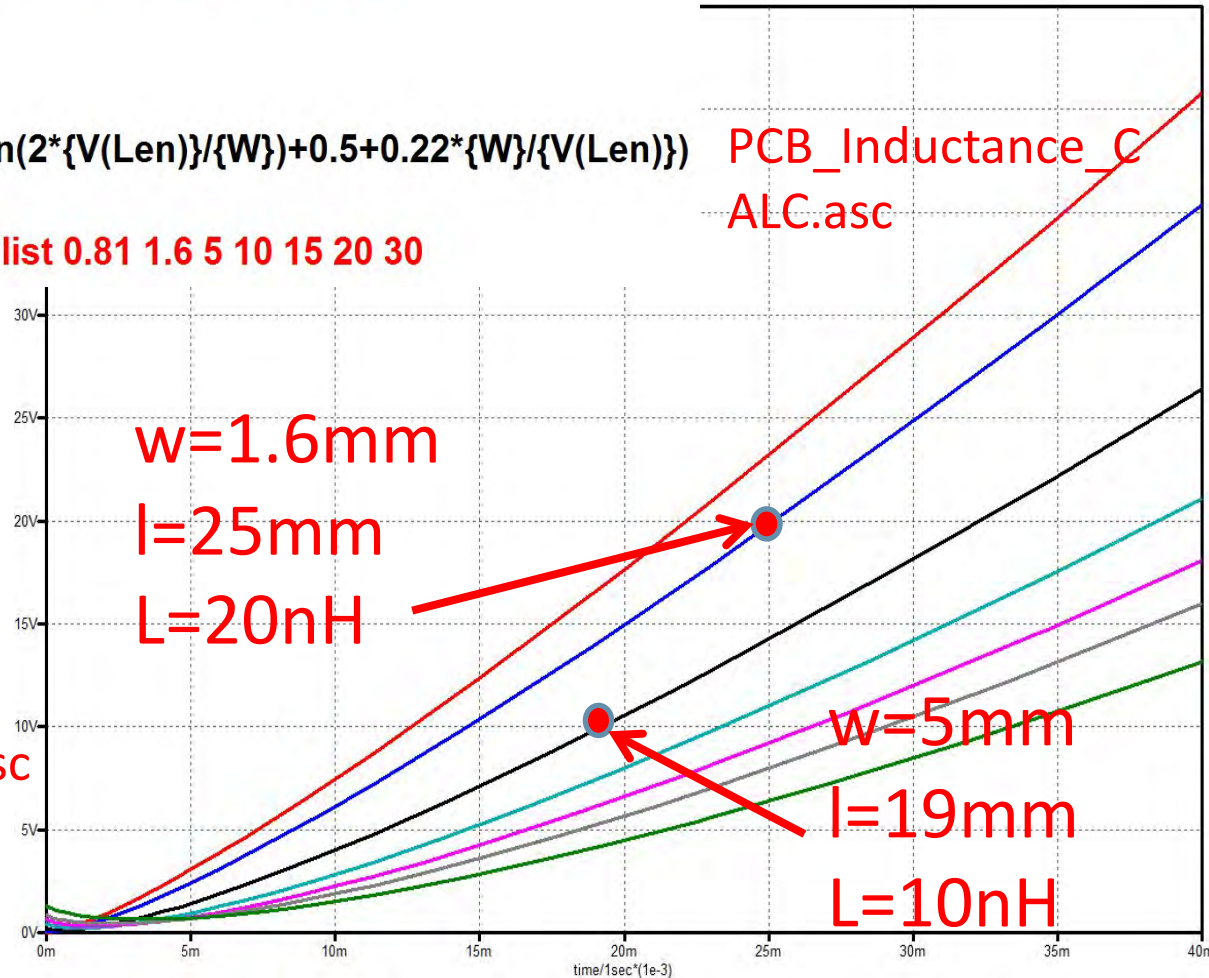
P6-P7

PCBトレースの式「+」

PCB Trace Inductance (estimated)



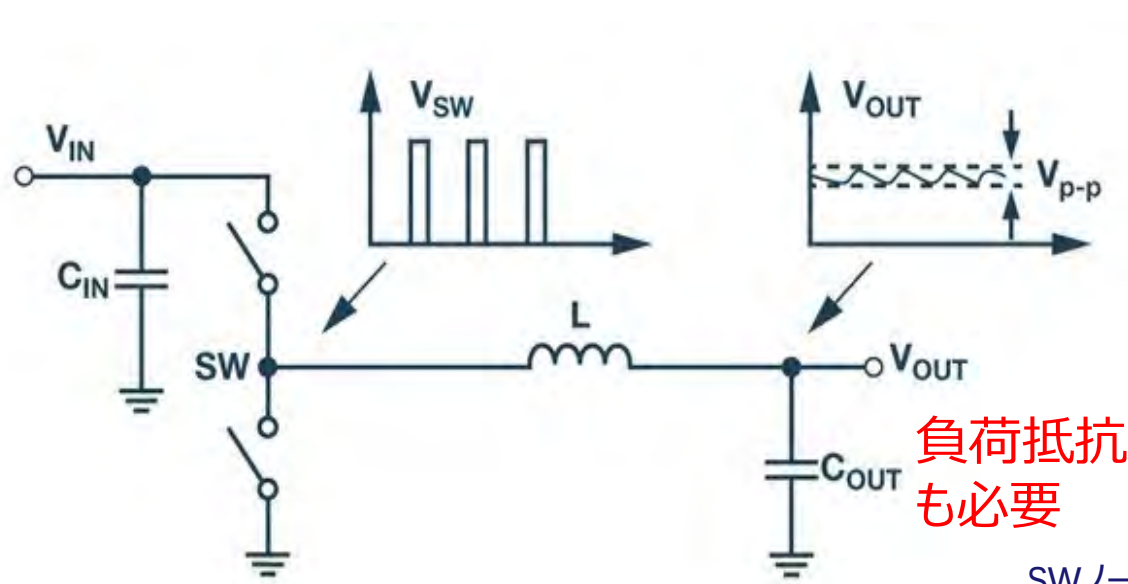
PCB_Inductance_CALC.asc



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

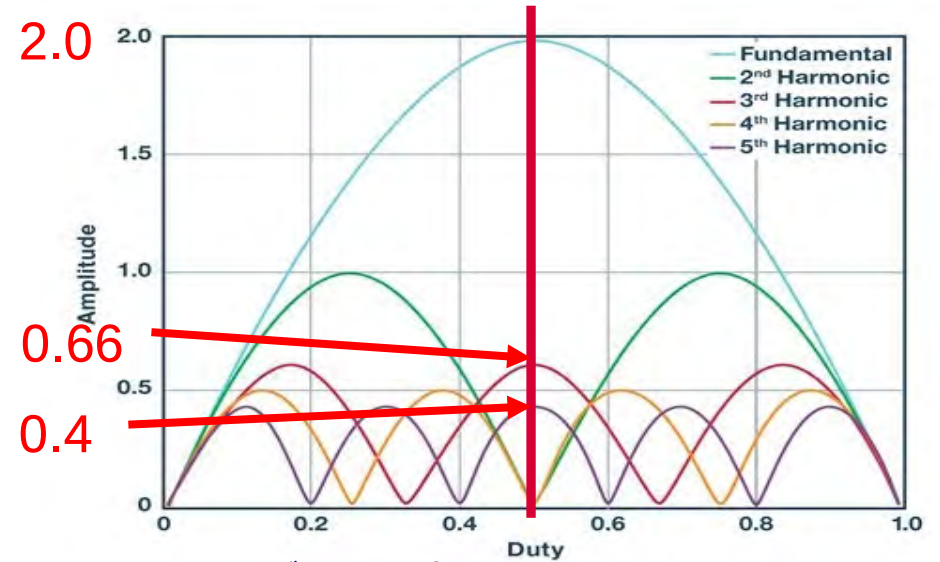
LCフィルタとリップルノイズを考察する手法を見る



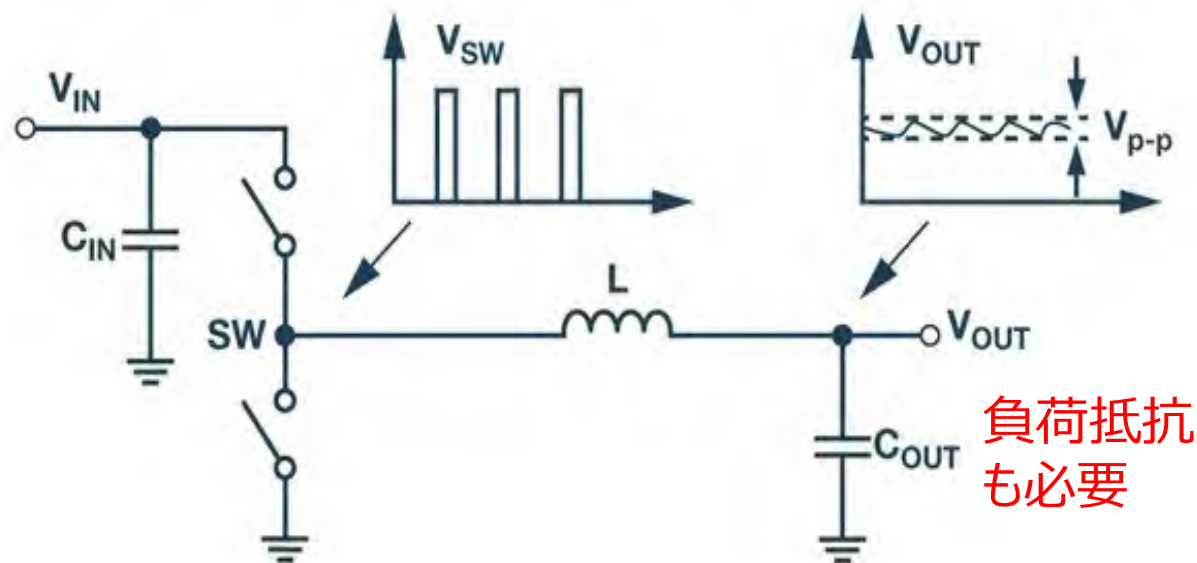
SWノードから見てVoutまでをLCのフィルタとして見立てたときの伝達関数の式。

この式を（さまざまなデューティサイクルについて）解くことは容易ではないので、シミュレーションが役にたつ。

しかし、高調波成分のパワースペクトラムを基に、フィルター特性を考察しても、位相特性が消えているので、時間領域での波形は計算できない・・・リップル電圧波形（時間の関数としては）はこの式の解析からは出てこない。



SWノードに印加される方形波のデューティ（横軸）と、2次から5次までの高調波の比率
デューティ50%なら、1次から、3次、5次・・・と振幅は1, 1/3, 1/5・・・となる。

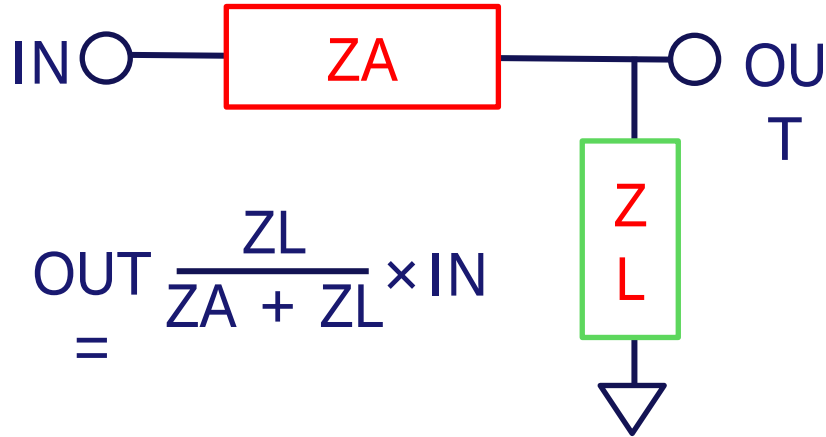


このアプローチでは
リップル波形（時間変
化）はわかりません。

下の伝達関数の式には、上の図にな明
示されていないものが含まれている。

$$T_{LC}(j\omega) = \frac{ESR + j\omega \times ESL + \frac{1}{j\omega \times C_{OUT}}}{ESR + j\omega \times ESL + \frac{1}{j\omega \times C_{OUT}} + \frac{\frac{1}{j\omega \times C_L} (DCR + j\omega \times L)}{\frac{1}{j\omega \times C_L} + DCR + j\omega \times L}}$$

伝達関数を立式しても・・・？



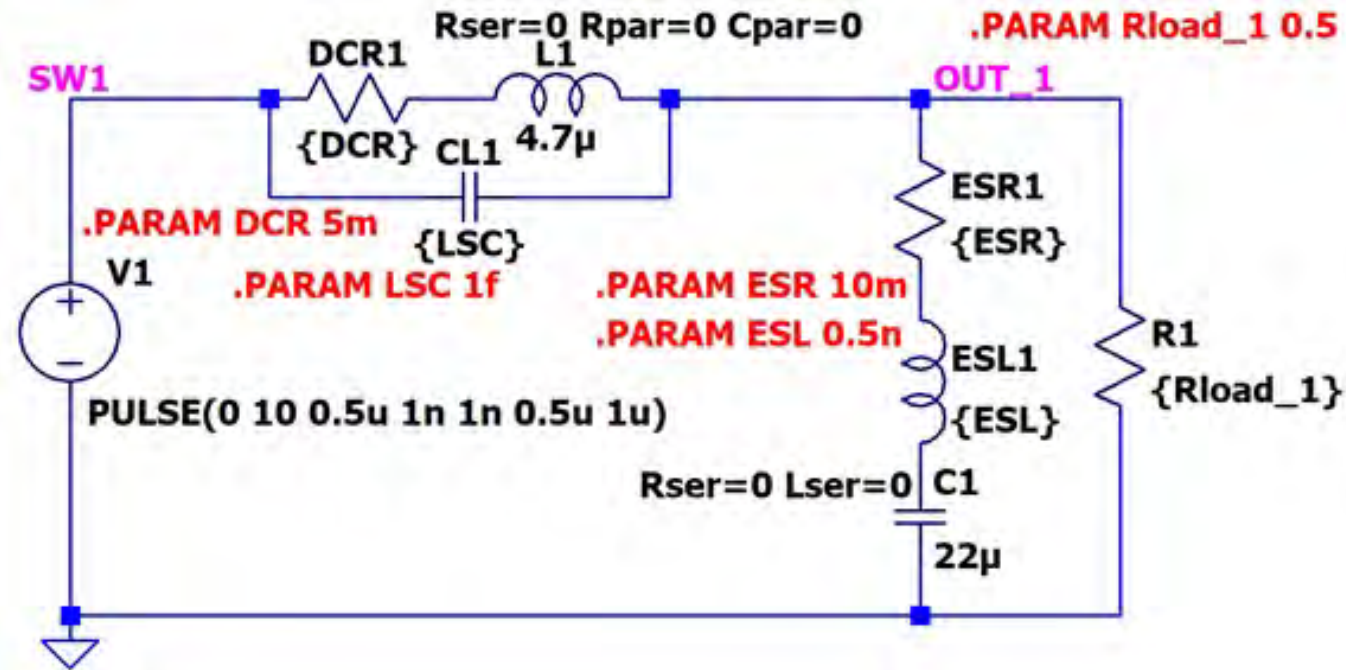
$$OUT = \frac{Z_L}{Z_A + Z_L} \times IN$$

下の伝達関数の式を回路図で表現すると・・・
左図のようになる。

本来なら、負荷抵抗分も入れないと・・・

$$ESR + j\omega \times ESL + \frac{1}{j\omega \times C_{OUT}}$$

$$T_{LC}(j\omega) = \frac{ESR + j\omega \times ESL + \frac{1}{j\omega \times C_{OUT}}}{\frac{1}{j\omega \times C_L} (DCR + j\omega \times L) + \frac{1}{j\omega \times C_L} + DCR + j\omega \times L}$$



$$V_{OUT}(j\omega) = V_{SW}(j\omega) \times T_{LC}(j\omega)$$

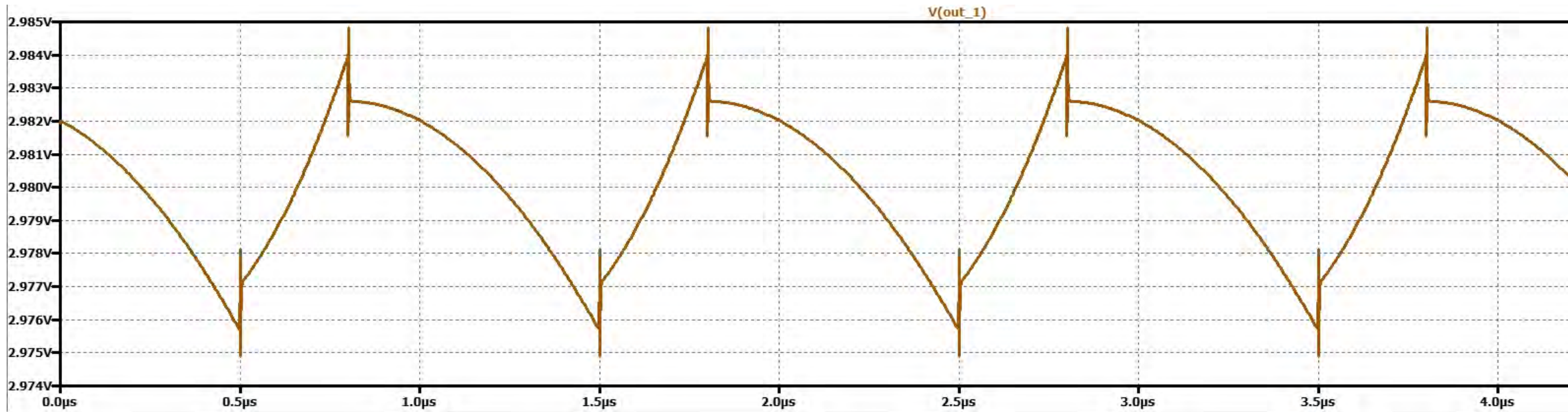
後半の「スパイク・ノイズ」の説明で、詳しく解説します

SW端子からみて・・・出力回路を
LCフィルターと考えるだけでは、
波形の形の解析には向いていない。

基本に立ちかえて、
キルヒホッフの法則で考える
要するに・・・シミュレーション
するほうが話が早い

実際には・・・

出力電圧波形に SPIKE NOISE が 観測されることがあります



オシロスコープのプロービングに細心の注意を
払っても、このような波形が観測されます。

スパイク・ノイズの発生メカニズム

SW電源に限らず、**スパイク状の信号**が発生する条件
(メカニズム) はどのようなものがあるか？

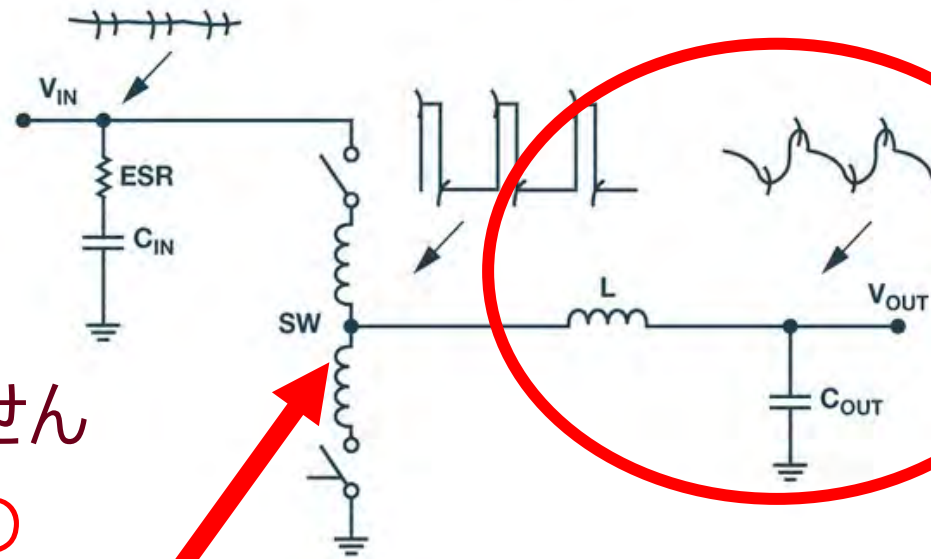
?

階段状の電圧変化に伴い...

スパイク・ノイズの説明に、
この様な図を見かけますが...
この図からは何のヒントもありません

Lに流れる電流を瞬断したときの
逆起電力ではなく...

ここにスパイクがあっても、
LCフィルタで出力には
ほとんど出てきません

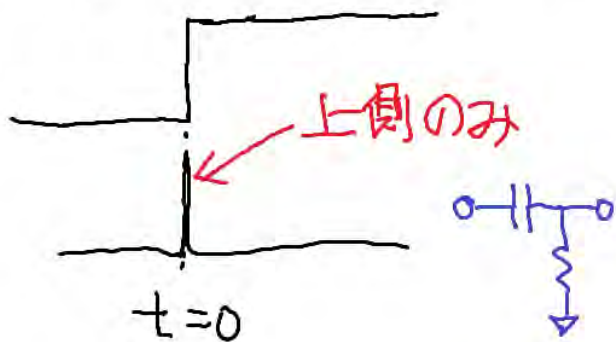


原因・・・その（１）

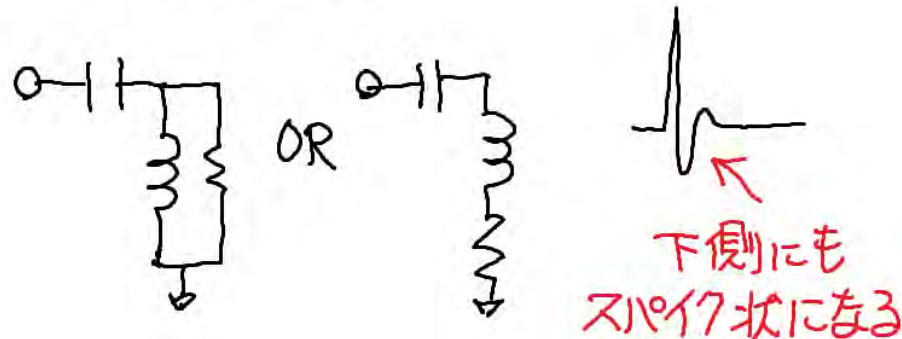
電圧（または電流）が急激に変化したとき、
時定数の短い・・・

「微分回路」あるいは「（共振回路の）減衰振動」

$$\frac{d}{dt} U(t=0) = \delta(0)$$



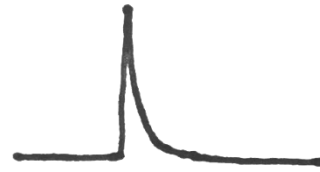
OR LCの共振と短い時定数の
減衰振動



原因・・・その（２）

さらに「微分回路」を通る

1回微分

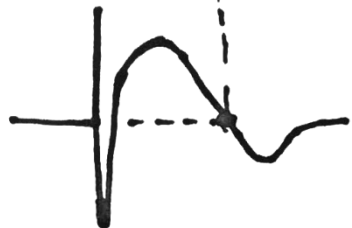


2回微分

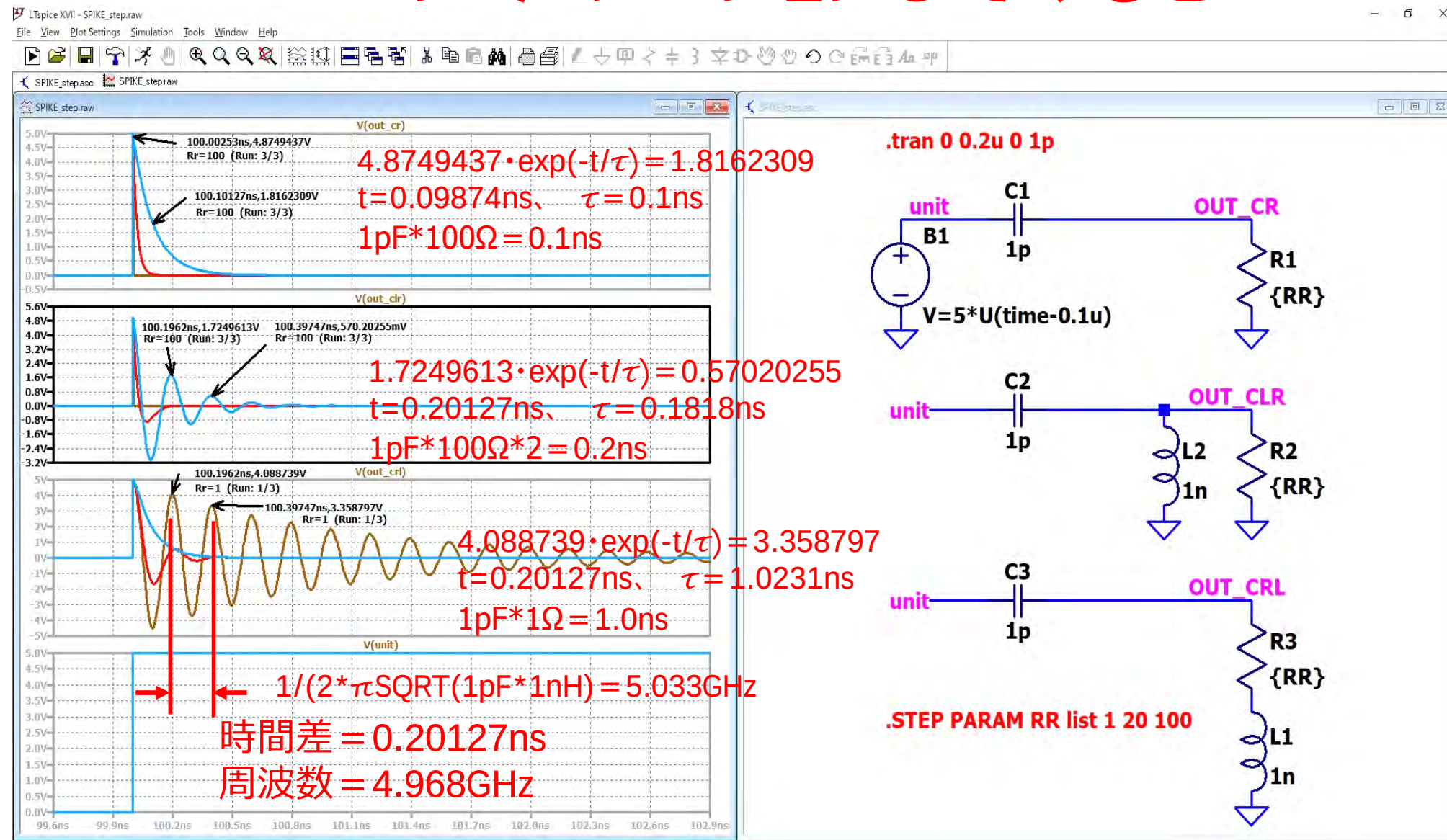


アナログTV時代の輝度信号の
エッジ強調に使われていた

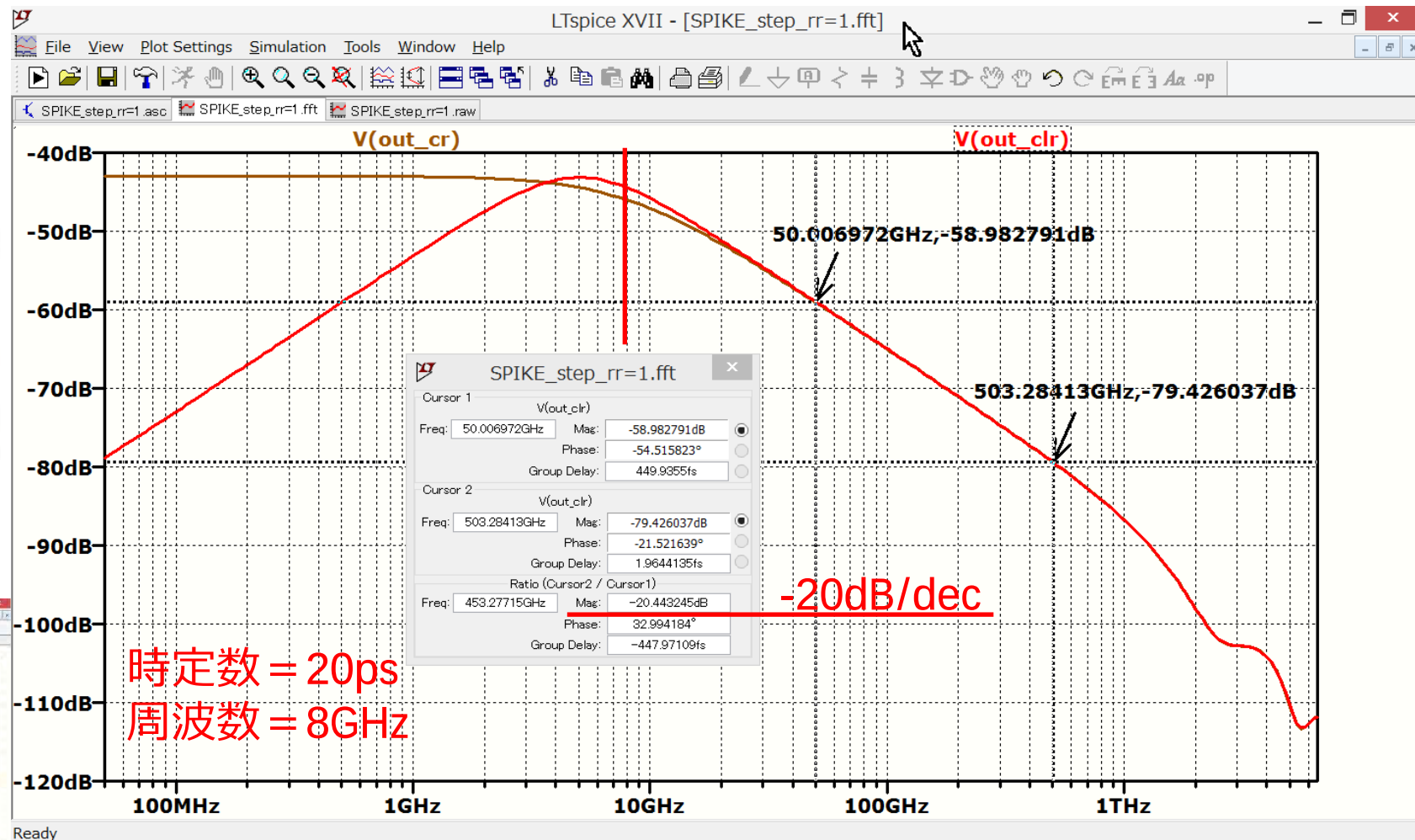
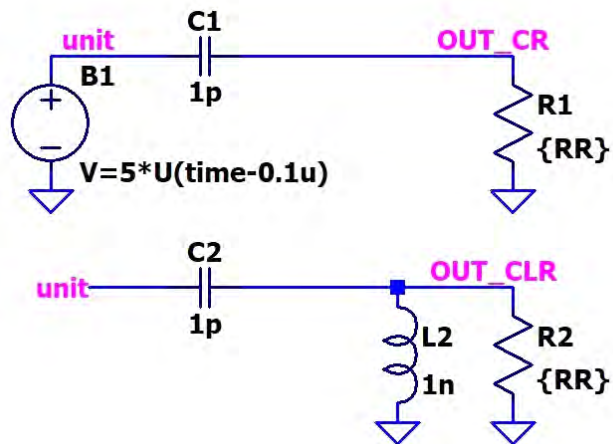
3回微分



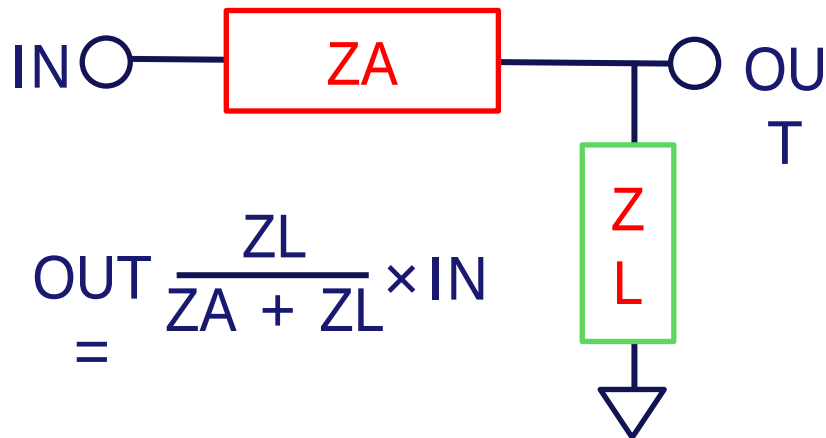
シミュレーションしてみると・・・



スペクトラムは (1pF-20Ω) ...



微分要素・減衰振動要素はどこ？

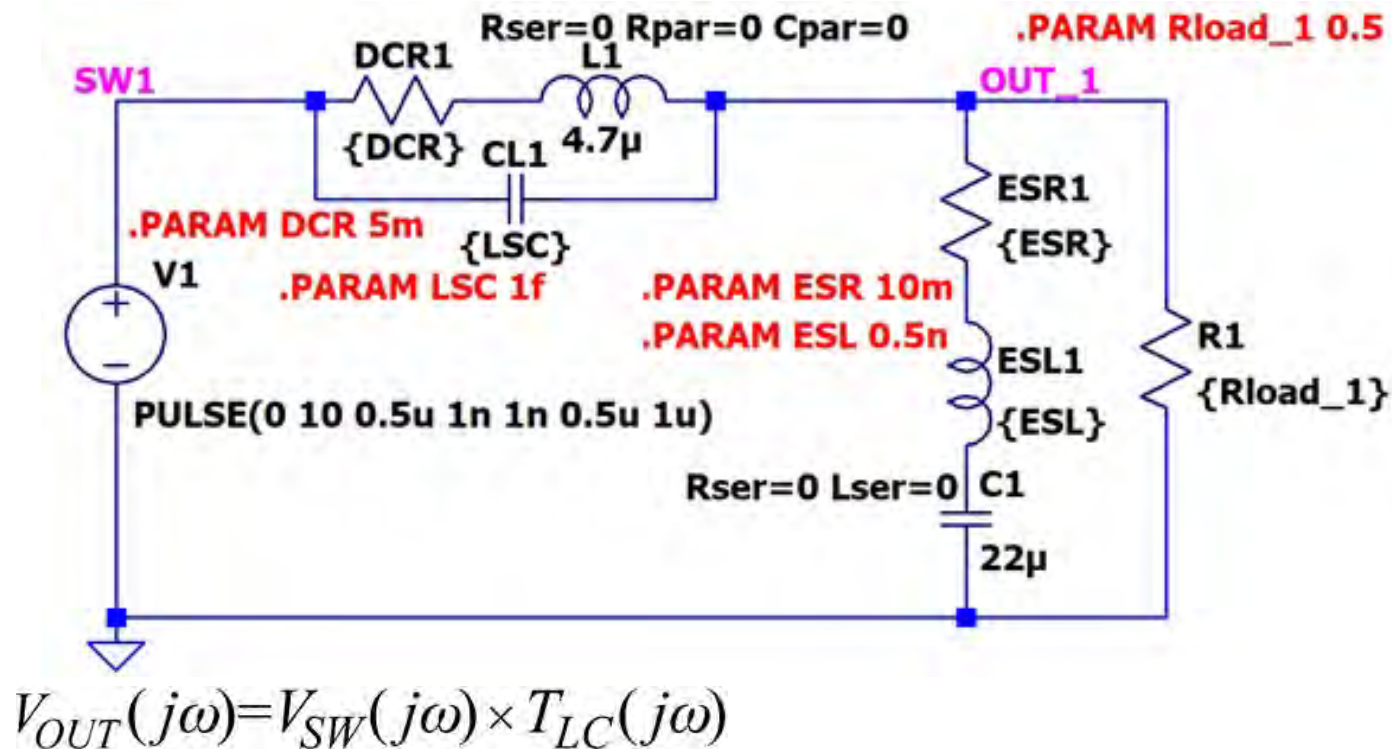


$$OUT = \frac{ZL}{ZA + ZL} \times IN$$

下の伝達関数の式を回路図で表現すると・・・
左図のようになる。

本来なら、負荷抵抗分も入れないと・・・

$$T_{LC}(j\omega) = \frac{ESR + j\omega \times ESL + \frac{1}{j\omega \times C_{OUT}}}{\frac{1}{j\omega \times C_L} (DCR + j\omega \times L) + \frac{1}{j\omega \times C_L} + DCR + j\omega \times L}$$



スパイクの発生に 寄与する要素は？

平滑コンデンサのESL：
部品そのものよりも、PCB配線・VIAなどに注意

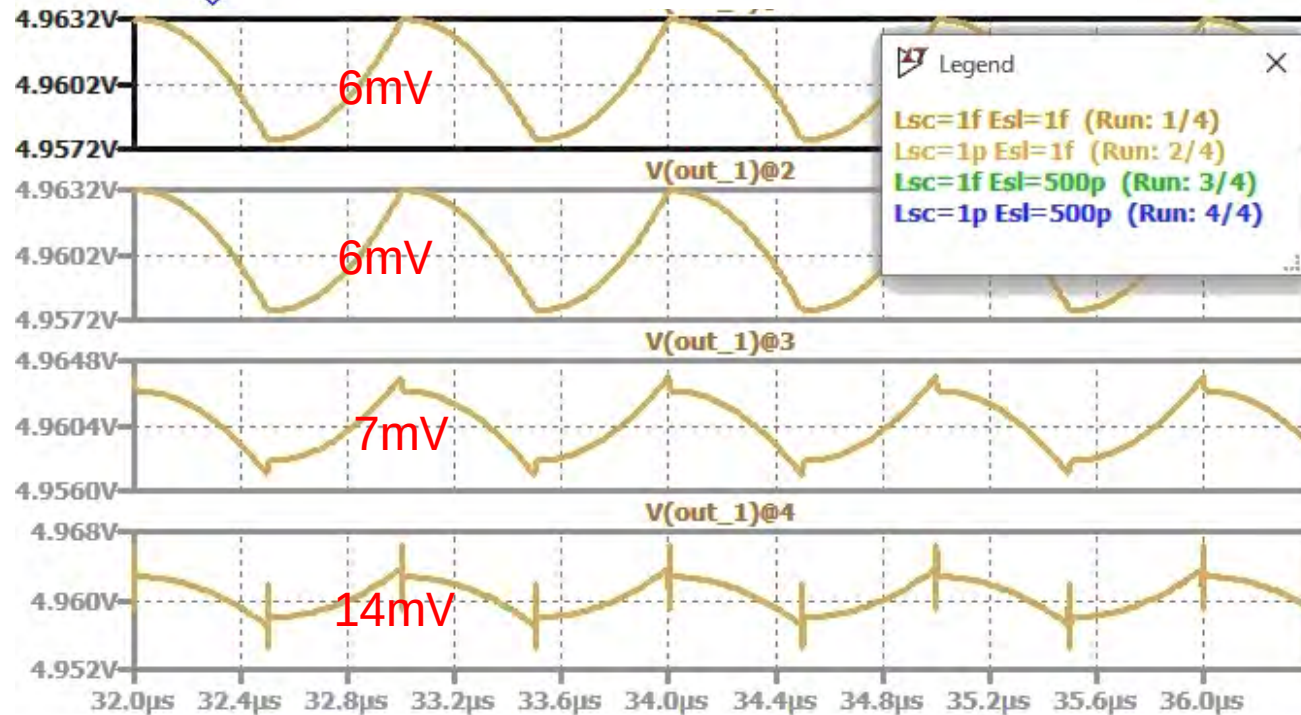
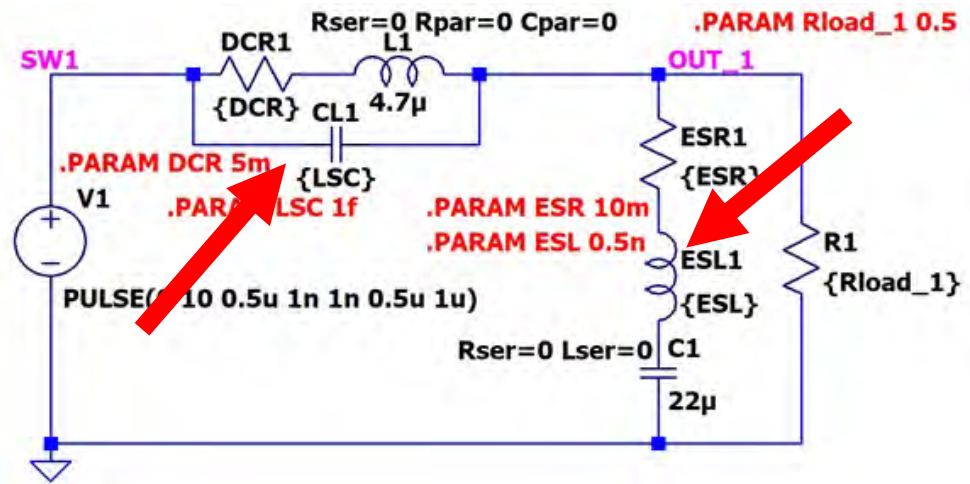
右のシミュレーション結果のグラフは・・・

1 番上：Lの端子間寄生容量 = なし
& 平滑コンデンサのESLなし

上から 2 番目：Lの端子間寄生容量 = 1pF
& 平滑コンデンサのESLなし

上から 3 番目：Lの端子間寄生容量 = なし
& 平滑コンデンサのESL = 0.5nH

1 番下：Lの端子間寄生容量 = 1pF
& 平滑コンデンサESL = 0.5nH

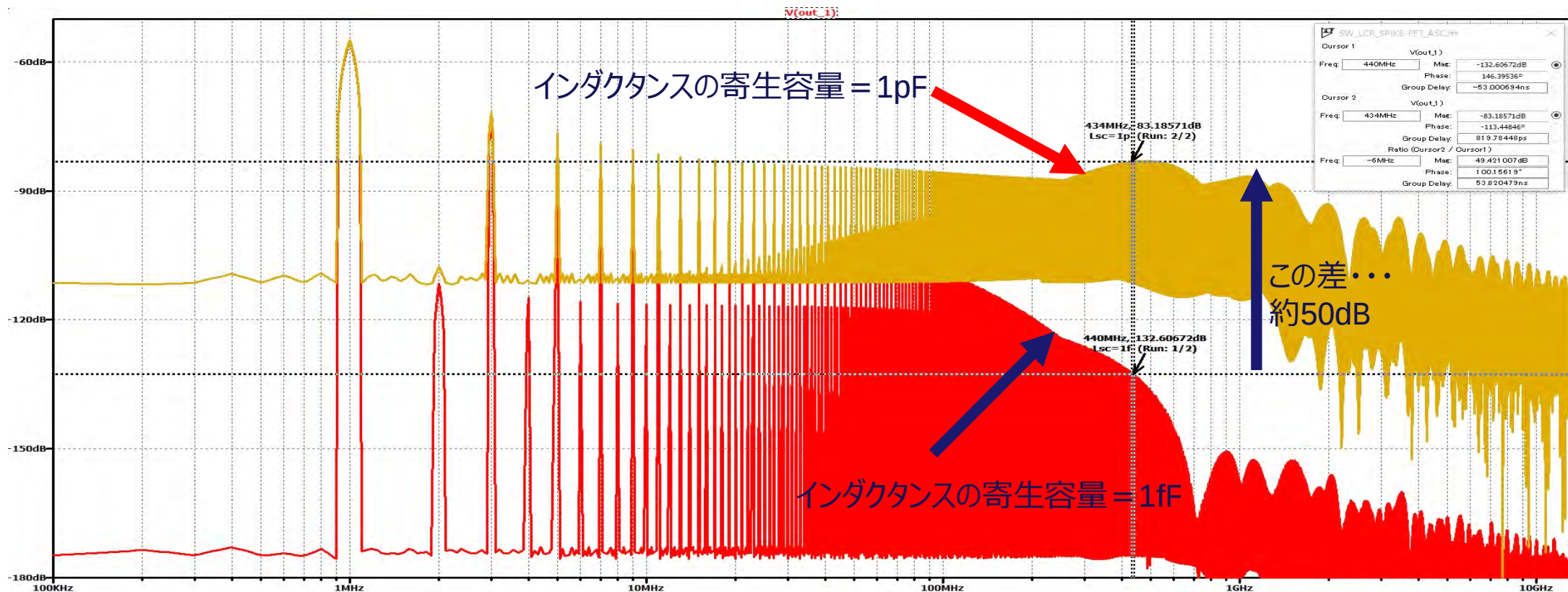


LSCとESLが同時に存在しないとスパイクノイズは見えない

この条件の時のみ「スパイクノイズ」が発生する

シミュレーションで確認 (Lの寄生容量の影響)

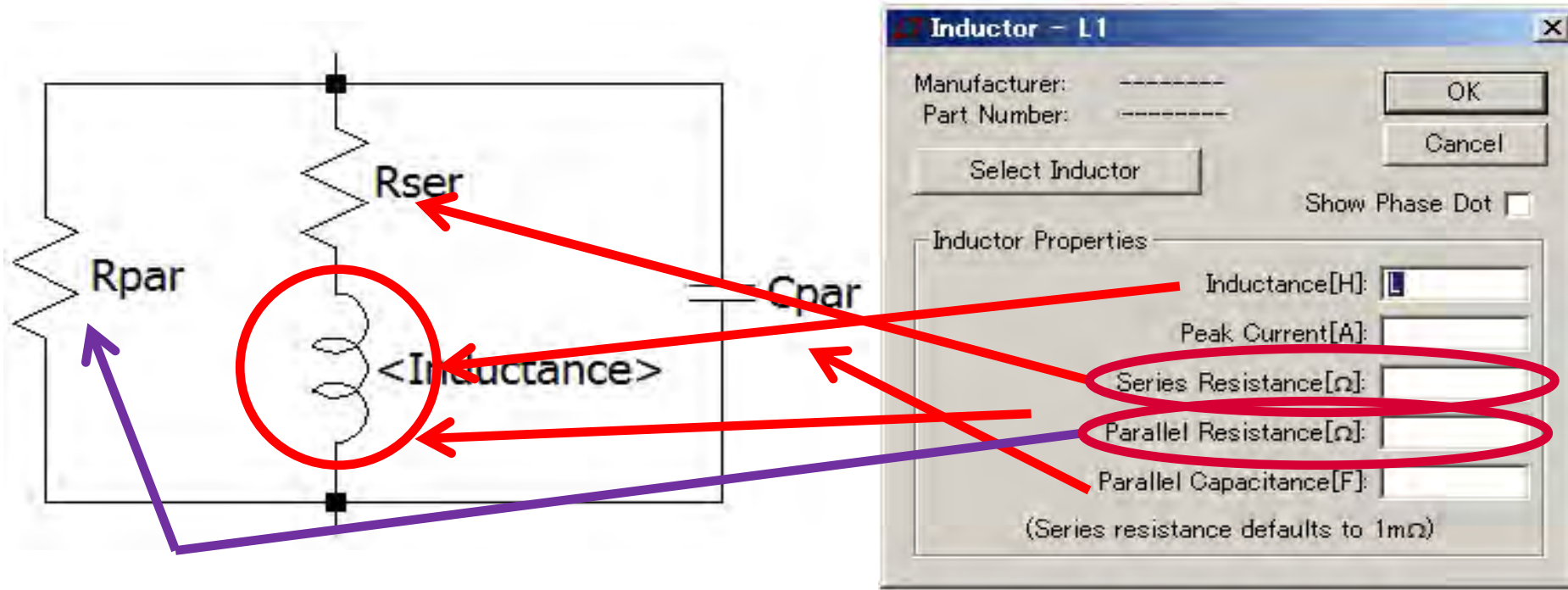
出力コンデンサのESL=0.5nH固定



インダクタンスの寄生容量があり、かつ、平滑コンデンサ（とその経路の）ESLがあると、「デルタ関数」と同様の振る舞いと考えることができる。それにより「スパイクノイズ」によって、広い帯域にわたって「白色雑音」的スペクトラムを認めることができる。

インダクタに含まれるパラメータ

部品記号の上でマウスの右クリック



DCR

デフォルトでは・・・

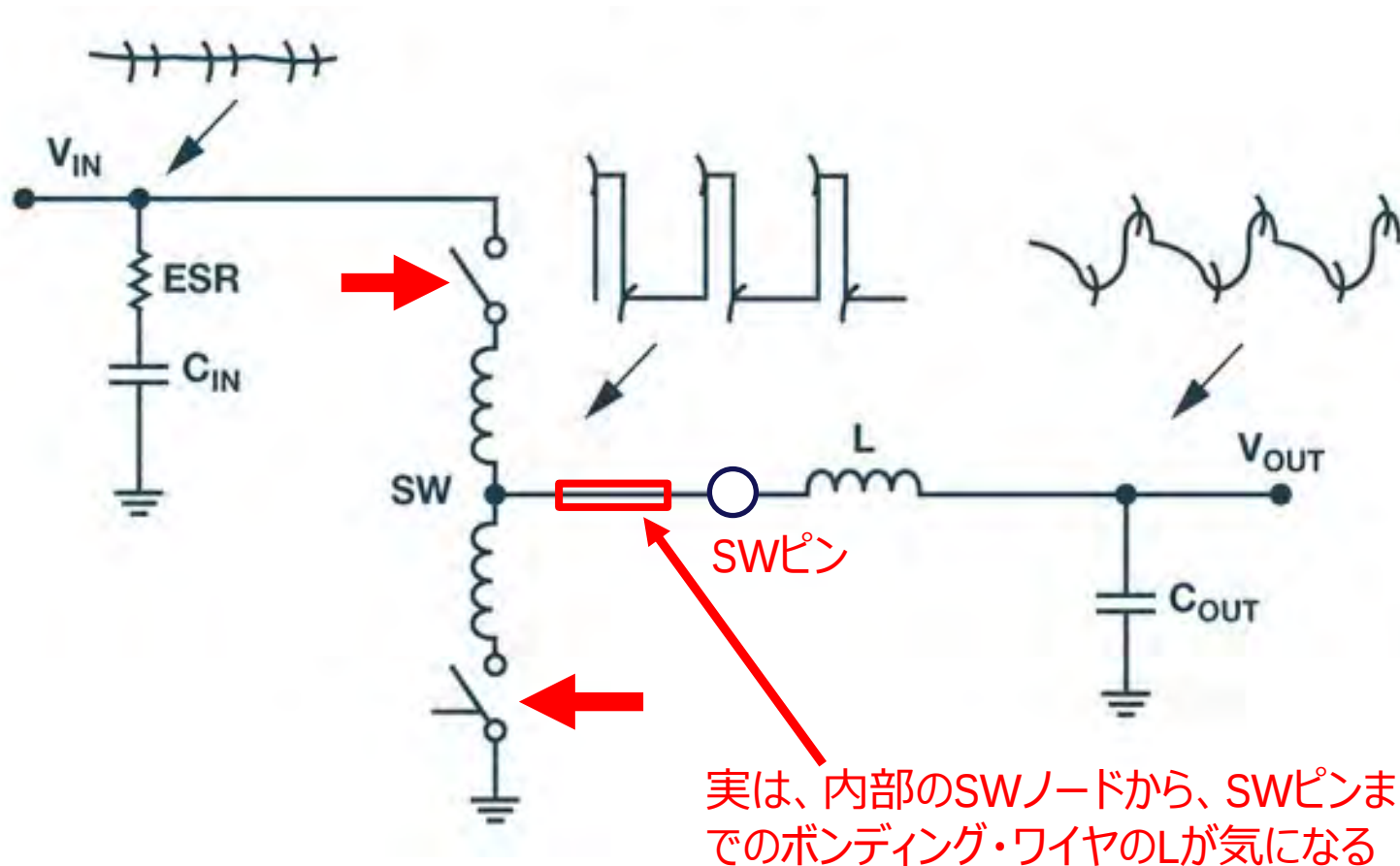
DCR=1mΩ、

$R_{par} = \text{インダクタンスの値} \times 10e12 \quad (\mu\text{H} \rightarrow \text{M}\Omega)$

Rparを「なし」にするときには・・・0
コイルがショートするのではない・・・特例

おまけ

どうにも・・・この絵が気になって



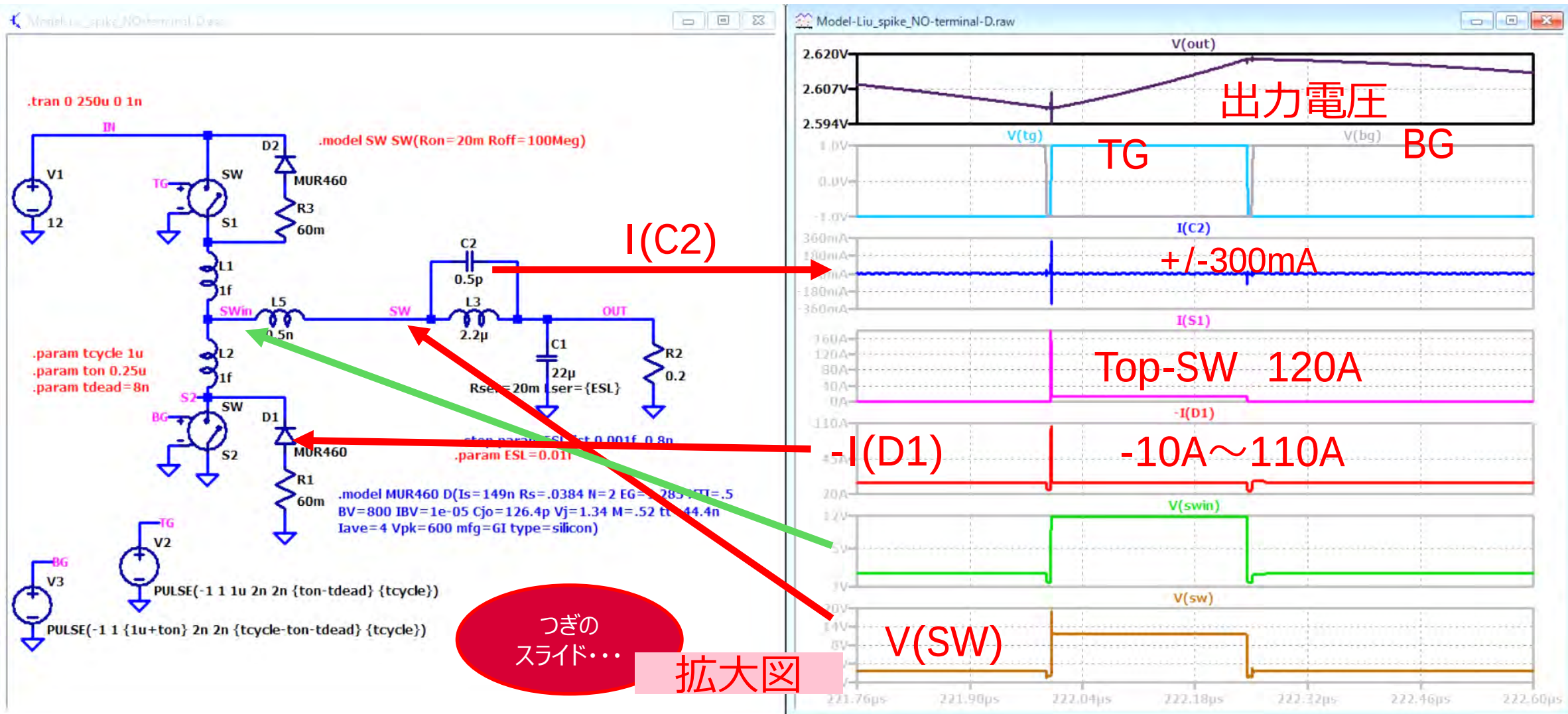
この絵の中には、微分要素は含まれていない。

インダクタに流れる電流をSWで突然OFFにすると「逆起電力」・・・（痛い）スパイク状の高電圧が発生するけど・・・。

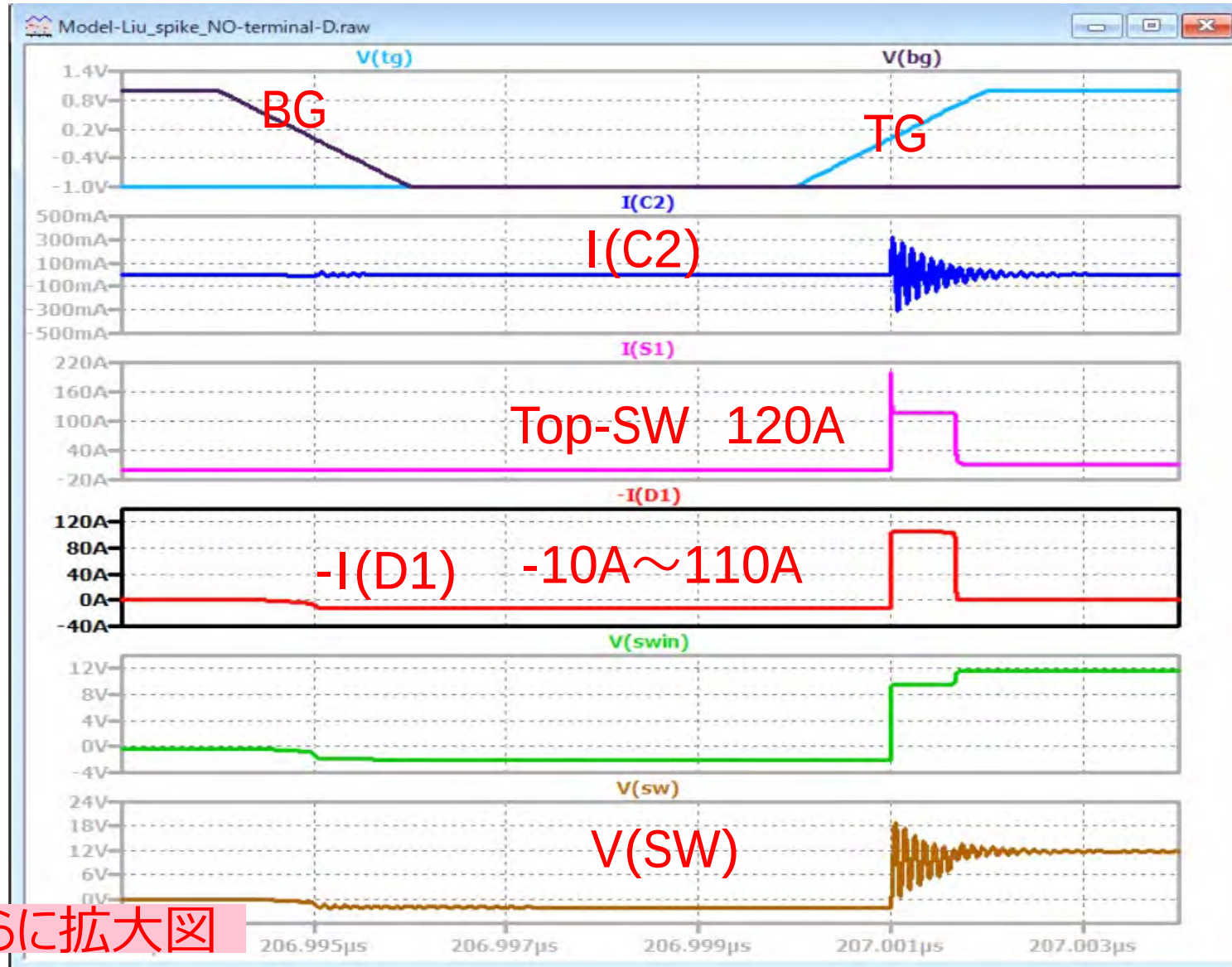
実際のスイッチ（FETやBJT）ではボディー・ダイオードの接合容量やバルクの抵抗があって、 di/dt が（大雑把に言って）小さくなる。

ひとつ気になるのは、ボトム側のボディー・ダイオードが逆バイアスに切り替わる時電流。この時の電流で、出力電圧にどれほどのスパイクが発生するのだろうか・・・？

SW端子に発生するスパイクノイズ



SW端子に発生するスパイクノイズ（拡大図）



つぎの
スライド...

さらに拡大図

SW端子に発生するスパイクノイズ（拡大図）

$$1 \div (2 \times \pi \times \sqrt{0.5 \text{E}-9 \times 0.5 \text{E}-12})$$

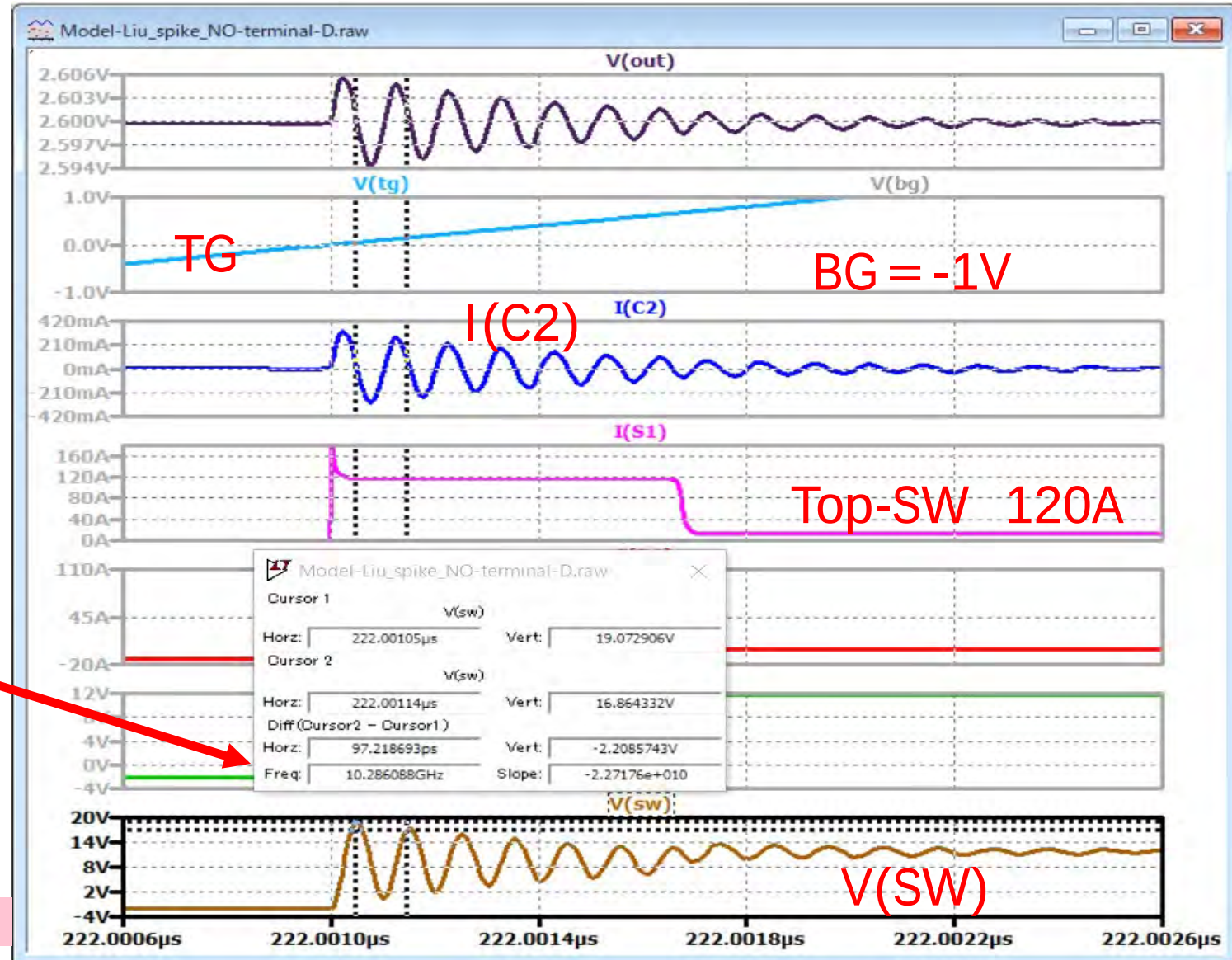
0.5nH, 0.5pF

$$1.00658424209 \times 10^{10}$$

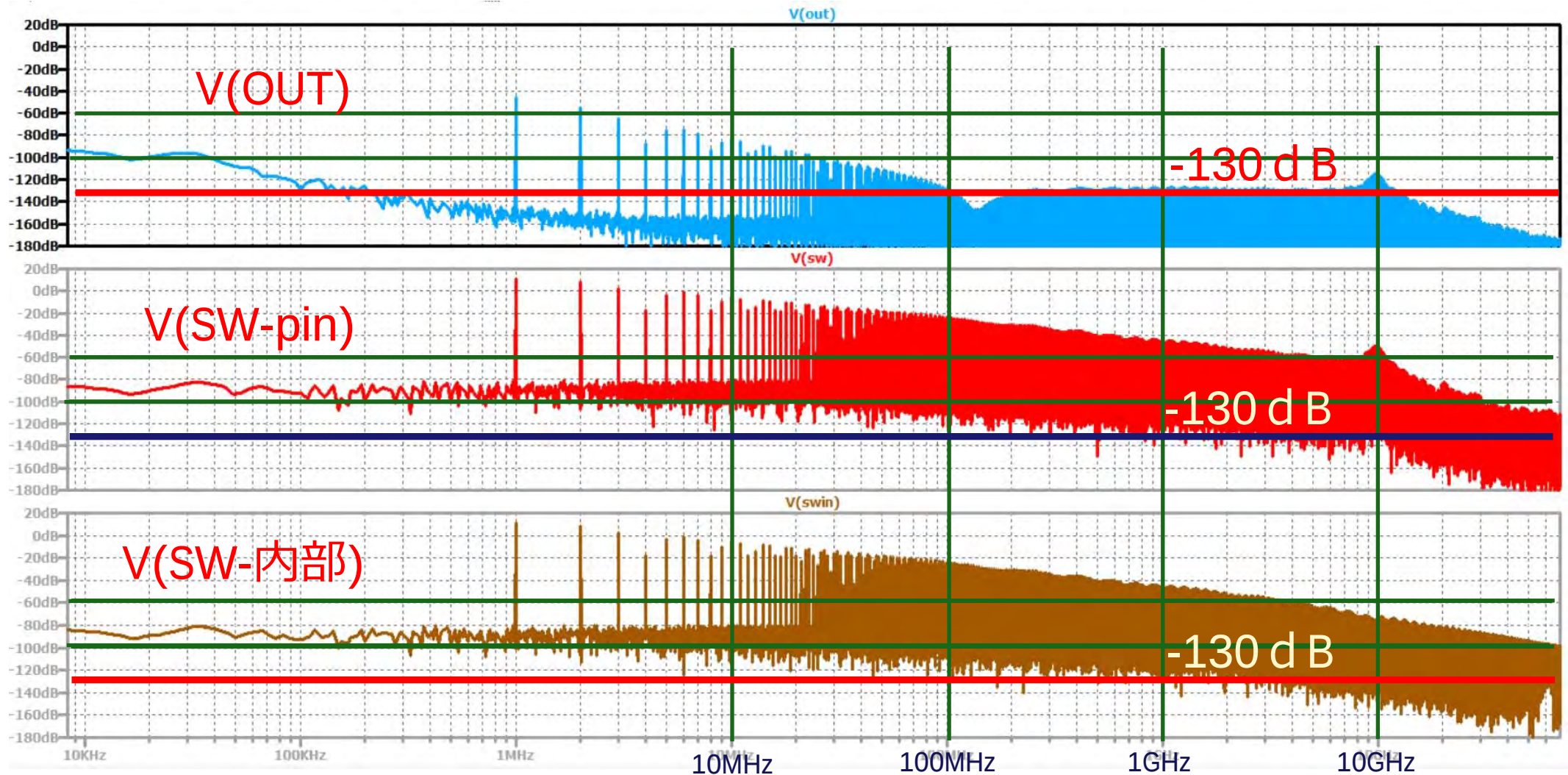
共振周波数
10.2GHz

つぎの
スライド...

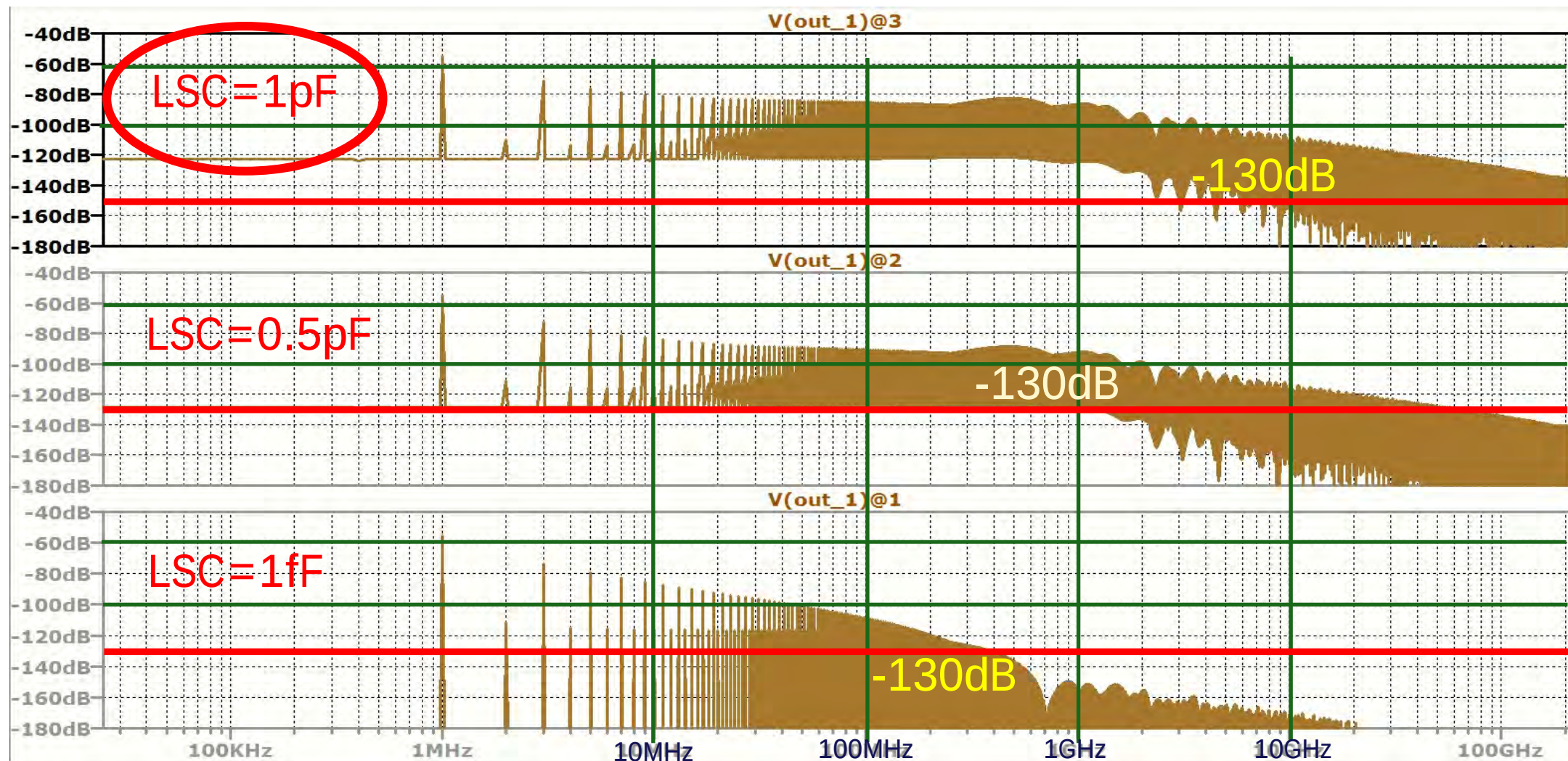
FFT解析



SW端子に発生するスパイクノイズに起因する スペクトラム (入力電圧=12V) (+1.6dB)



インダクタの寄生容量と平滑コンデンサのESL(0.5nH)に起因する 出力電圧スパイク・ノイズのスペクトラム (SW電圧=10V)



前ページのスライドと比較する

こちらの方がノイズの支配項になっている

LTspiceを活用し、
スイッチングBuckコンバータの
リップルとスパイクノイズの
考察の例を示しました。

Seminar

ご参加ありがとうございました

