

パワーエレクトロニクス工学論

7. 昇圧形電源の実測

7-1 特性式と実測

- (1) 定常特性(電圧変換率、定常リップル、出力Z)
- (2) 動特性(負荷応答特性)
- (3) ループ特性

7-2 性能検討

- (1) スイッチング・ノイズ
- (2) 効率

7. スイッチング電源の実測-1 (昇圧形電源)

7-1 特性式と実測

(1) 定常特性

(A) 電圧変換率

● 理論式

$$* M=V_o/V_i = \frac{1/D'}{1+Z_o/R}$$

$$Z_o = r/D'^2, \quad r=r_L + D \cdot r_s + D' \cdot r_d$$

$$(r_L = 0.085\Omega, \quad r_{ON} = 1.1\Omega, \quad r_d = 0.45\Omega)$$

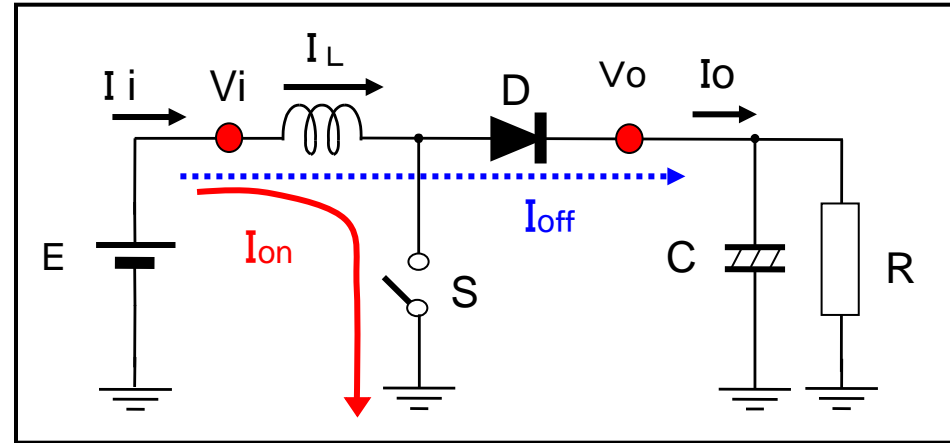
● 実測値:

$$\bullet I_o = 0.305 \text{ A}, \quad V_o = 4.89 \text{ V}, \quad R = 16 \Omega$$

$$M=1/D' (1+Z_o/R)$$

$$Z_o = (1/D' M - 1) \cdot R$$

$$(7-1)$$



$$L = 23\mu\text{H} (R_L = 85\text{m}\Omega), \quad R = 15.5\Omega$$

$$C_o = \text{OS } 200\mu\text{F}, \quad C_i = 100\mu\text{F}$$

Vi [V]	Ii [A]	実測D'	実測M	実測Zo	IL	r	計算Zo	計算M
4	0.48	0.7	1.2	2.697	0.436	0.730	1.490	1.3
3.5	0.55	0.6	1.4	3.087	0.508	0.795	2.208	1.5
3	0.65	0.5	1.6	3.247	0.598	0.854	3.281	1.6
2.5	0.79	0.4	2.0	3.476	0.726	0.912	5.170	1.8
2	1.04	0.3	2.4	5.110	0.984	0.984	10.234	2.0
1.5	1.61	0.2	3.3	8.540	1.525	1.055	26.375	1.9

● 電圧変換率

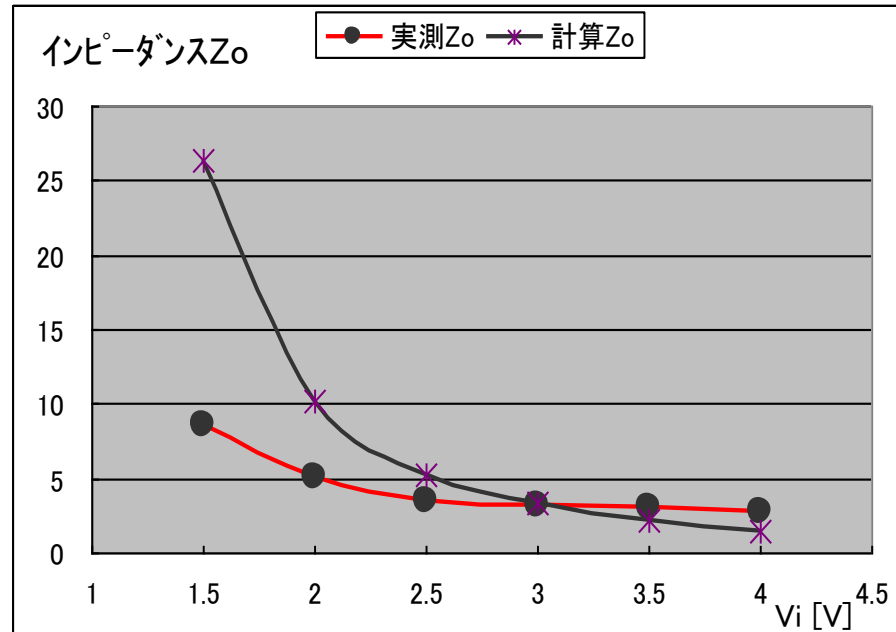
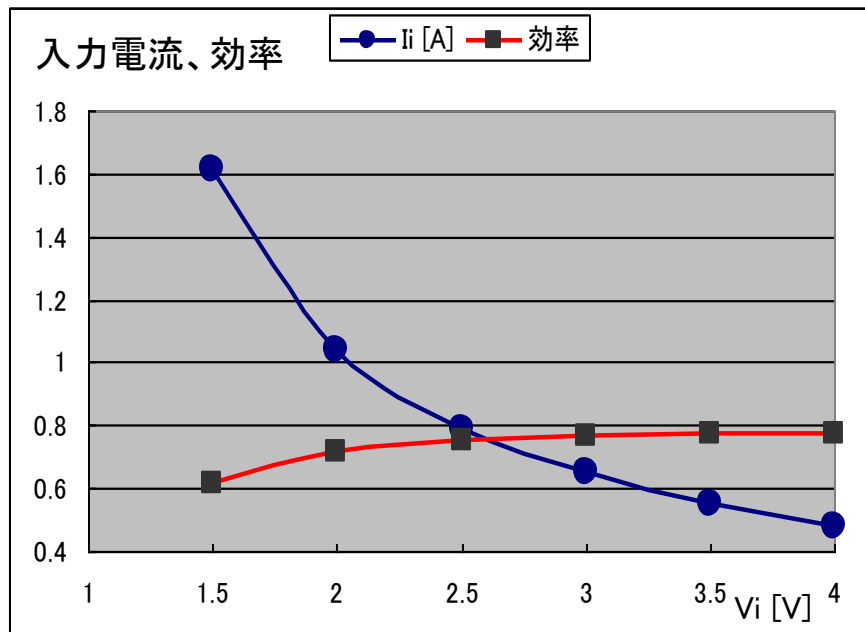
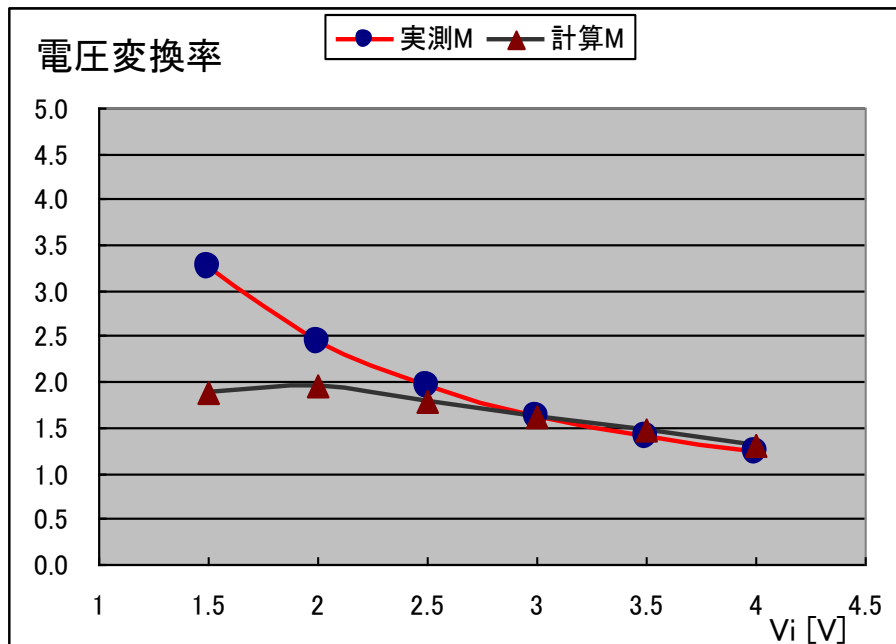
- * 実測値は素直な特性
- * 計算値は、低電圧で？

● インピーダンス

- * 実測値はよいが、計算値はおかしい
- * V_i が小さいと、 M は大きく、 D' は小さくなり、 Z_o は大きくなる

● 入力電流、効率

- * V_i ダウンで I_i , Z_o アップし、効率ダウン



(B) 定常リップル

● 理論式

$$\Delta V_o = \frac{D \cdot T_o}{CR} V_o = \frac{D \cdot T_o}{C} I_o \Rightarrow \text{出力にも依存} \quad (7-3)$$

* $\Delta V_o = 0.009 \cdot D \cdot I_o = \mathbf{0.55 [mVpp]}$ 小さい!

($I_o = 0.305A$, $D' = 0.2$ @ $V_i = 1.5V$)

* 周期 T_o : 降圧形の1/4

● 実測値1: OSコン接続

* 実測値: $\Delta V_o = 58 \text{ mVpp}$ (大きい)

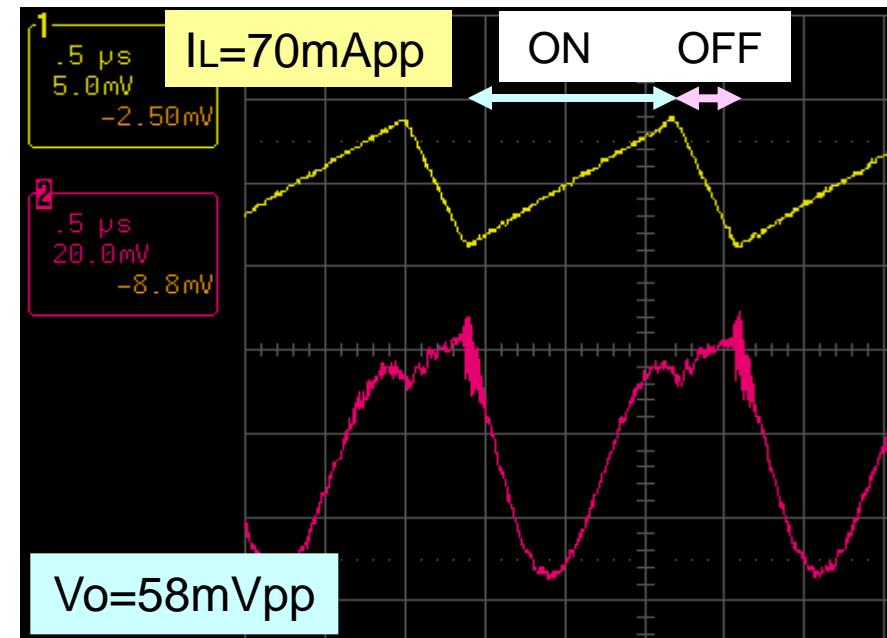
* ESRの検討

$$\begin{aligned} \Delta V_{ESR} &= ESR * \Delta I_L \\ &= 0.04\Omega \cdot 70\text{mA} = \mathbf{2.8 \text{ mVpp}} \end{aligned}$$

★ ESRの影響が大きいけど、不十分
計算 $\Delta V_o = 3.4 \text{ mV} \ll 58 \text{ mV}$ 実測

$L = 23\mu\text{H}$, $R_L = 85\text{m}\Omega$
 $C_i = \text{ケミコン} 100\mu\text{F}$
 $C_o = \text{OS} 200\mu\text{F}$
 $T_o = 1.8\mu\text{s}$ ($F = 560\text{kHz}$)

OSコン ESR: $80/2 = 40\text{m}\Omega$
セラコン ESR = $8/2 = 4 \text{ m}\Omega$
(測定 $F = 1\text{kHz}$)



電圧リップル1 ($V_i = 1.5V$, $D = 0.2$)

● 実測値2: Vi 変更 (3.5V ← 1.5V)

* 理論値:

$$\Delta V_o = 0.04 \cdot 80 + 1.65 \doteq 5 \text{ mVpp}$$

* 実測値: $\Delta V_o = 20 \text{ mVpp}$

出力リップル: $20/58 = 0.35$ に減少

1次側電流: $1.5/3.5 = 0.43$ に減少

● 実測値3: セラコン使用

* $C_o = 100\mu\text{F}$ セラコン + OSコン $100\mu\text{F}$

・ $\Delta V_o \dots$ 変化なし

* 他の要因有

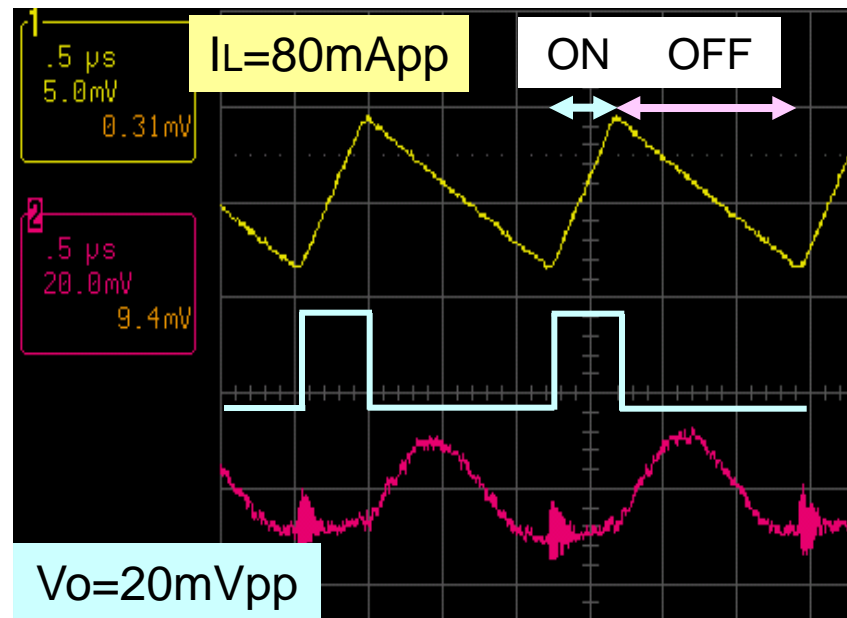
負荷側への電流は急峻

・コンデンサ両端電圧を測定

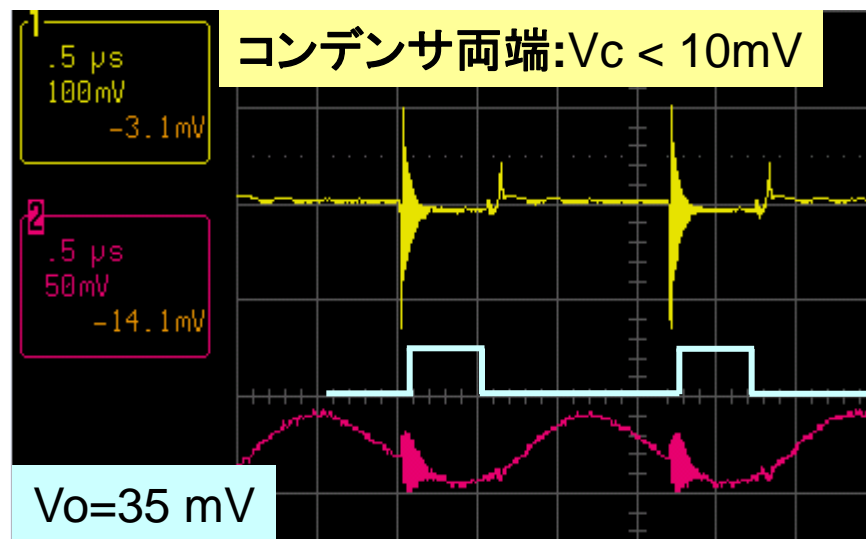
電圧リップル $< 10\text{mVpp}$

★理論値と近い値!

1次側電流 (=M·Io) ⇒ GNDノイズ



電圧リップル2 (Vi=3.5V, D=0.6)



(+セラコン)時のリップル電圧 (Vi=3.5V)

(2) 動特性(負荷応答特性)

(A) 電流ステップと電圧ドロップ

● 出力リップル(オーバー/アンダー・シュート)

* 条件:

$$V_i=2.5\text{ V} \Rightarrow V_o=5.0\text{ V}$$

$$\Delta I_o=0.4\text{ A} \quad (I_o=0.35 \Leftrightarrow 0.75\text{ A})$$

$$di/dt=120\text{ mA/us}$$

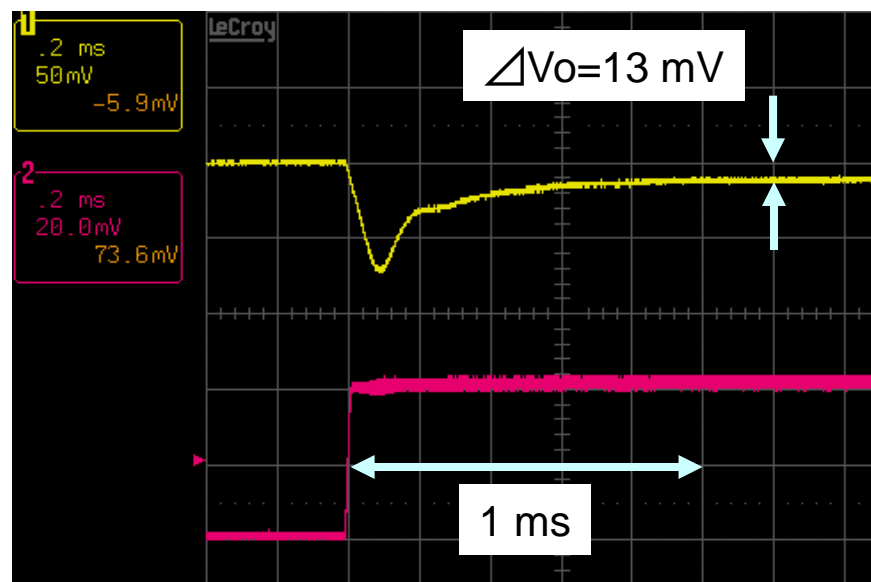
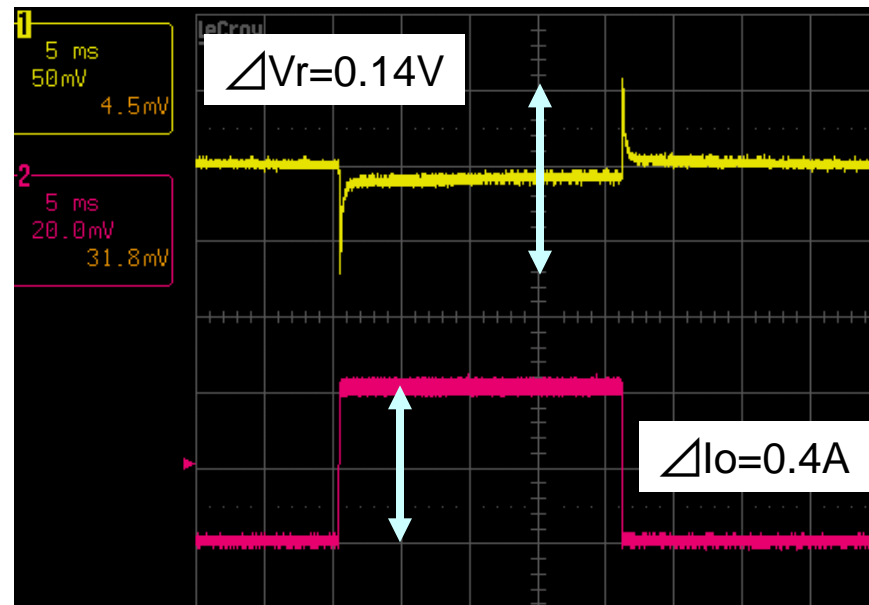
* 実測性能:

$$\text{オフセット: } \Delta V_o=-13\text{ mV}$$

$$\text{シュート: } \Delta V_p=-75\text{ mV}/50\text{ us}$$

★オフセットは 位相遅れ補償で解消

右波形は、LPFによりSWノイズ除去
 $F_c=3.4\text{ kHz}$ ($C=0.1\text{ uF}$ 、 $R=470\text{ }\Omega$)



昇圧形負荷応答特性

(B) 入力電圧 vs 負荷応答シュート

* 条件: 前ページと同様

* 実測性能:

・入力電圧が高いと、シュート小

* 理由は...

・昇圧形の電圧変換率Mより

$$M = V_o / V_i = 1 / D'$$

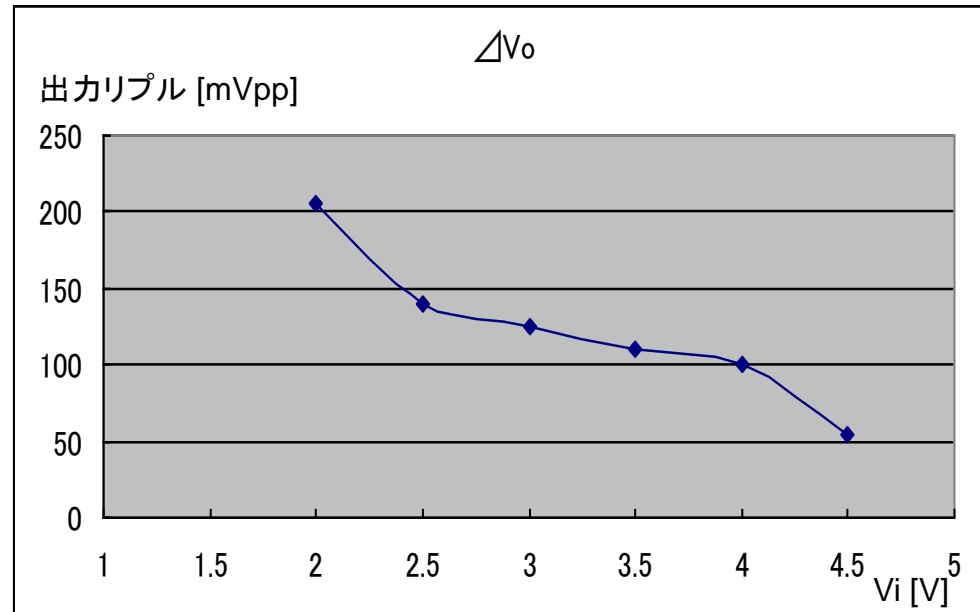
・ V_i が高い $\Rightarrow D'$ も大きい

$$P(s) = 1 + 2\delta(s/w_n) + (s/w_n)^2 \quad (2-81)$$

$$\begin{cases} w'_n = w_o \sqrt{1 + KG_{vdo}} \\ \delta' = \{\delta - KG_{vdo} \cdot w_o / 2w_{vdz}\} / \sqrt{1 + KG_{vdo}} \end{cases} \quad (\text{p.2-58 より})$$

$$G_{vdo} = \frac{\{1 - (r_L + r_s) / RD'^2\} / D'}{(1 + Z_o / R)} \cdot V_o = \frac{\{1 - (r_L + r_s) / RD'^2\}}{(1 + Z_o / R)} \cdot V_i \quad (2-89 \text{ より})$$

* 入力電圧が高い $\Rightarrow D'$ が大きい $\Rightarrow G_{vdo}$ が大きい $\Rightarrow w'_n$ が高い、 δ' が大きい



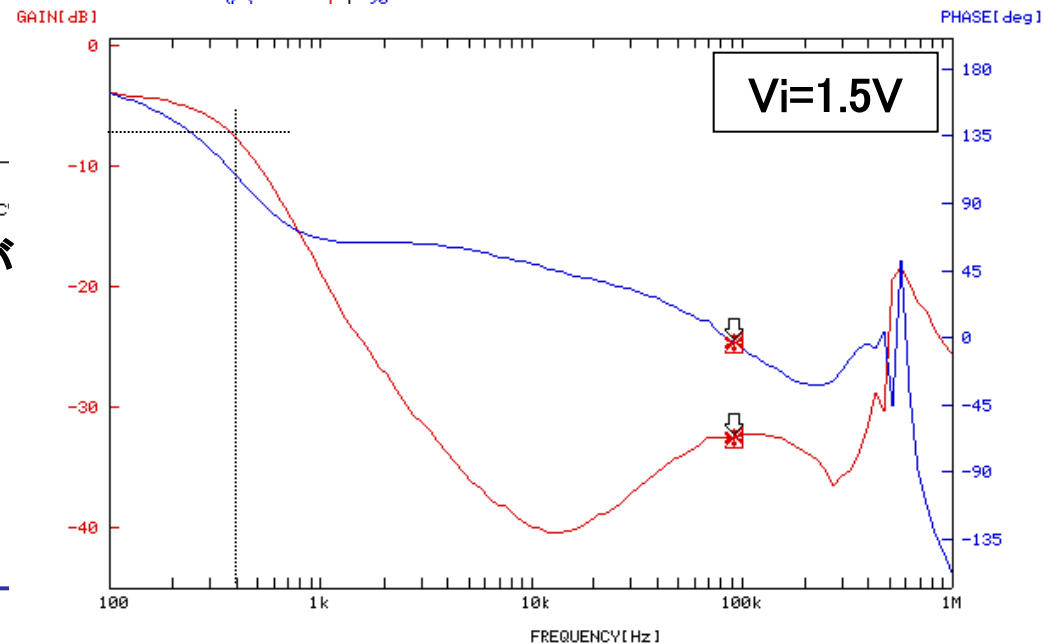
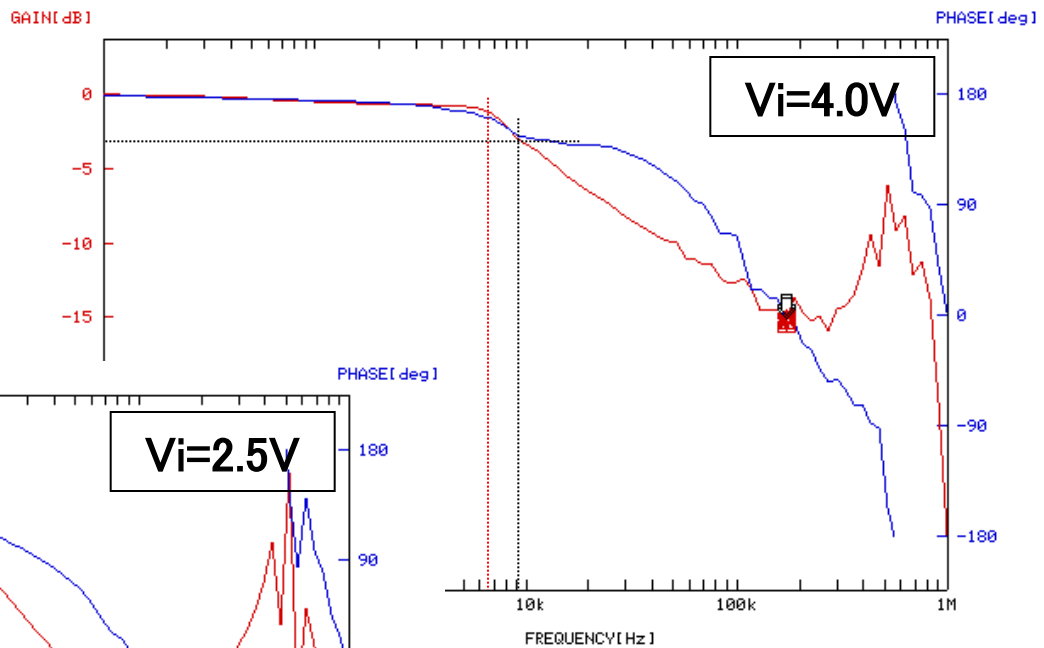
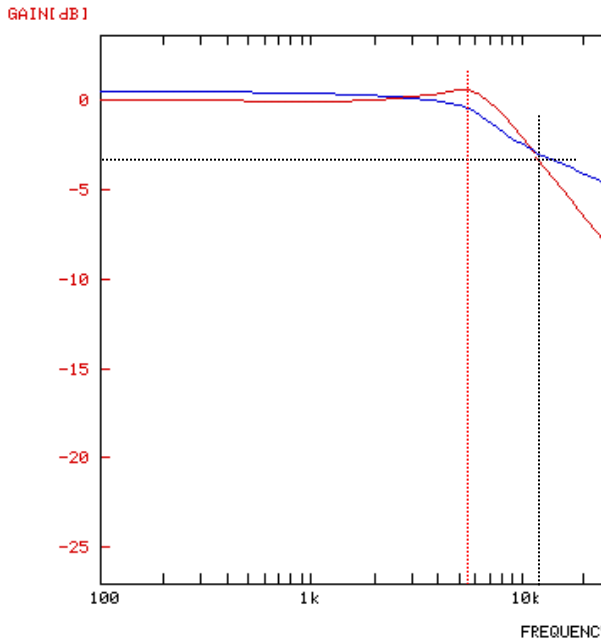
入力電圧 vs 負荷応答出力リップル

(3) ループ特性

(A) 閉ループ伝達関数

* 入力電圧 vs. 伝達特性

($V_o=5V$, $I_o=0.35A$, OSコン: $100\mu F$)



- $V_i=4.0V$, $2.5V$ では F_c に大差はないが減衰係数(ピーク)が異なる
- $V_i=1.5V$ では、急激に F_c が低下もっとゲインを高めるべき

(B) ESRと伝達関数

● 出力コンデンサによる相違

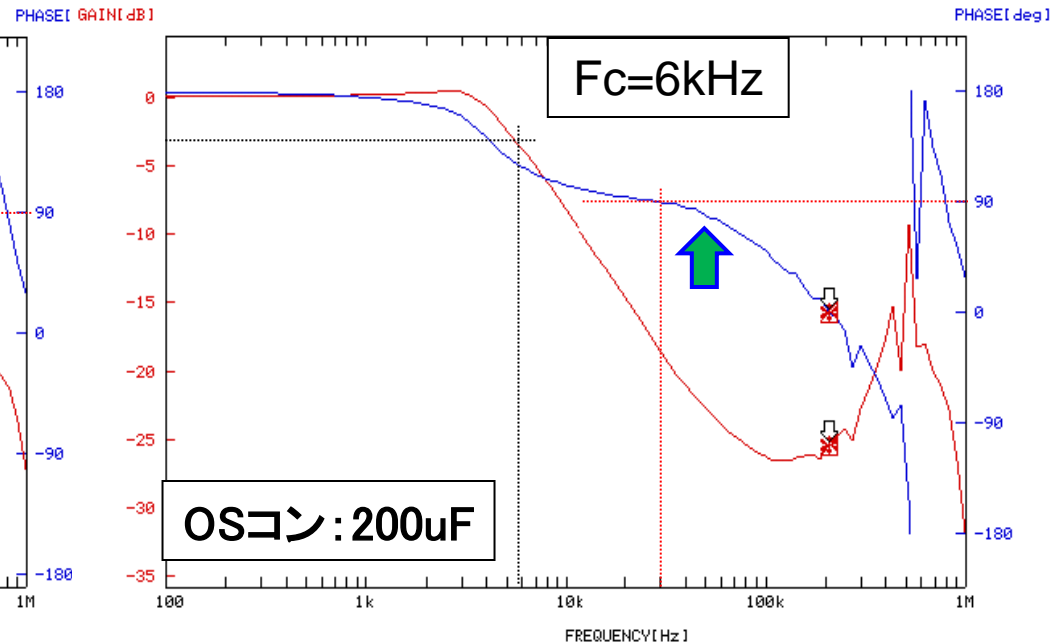
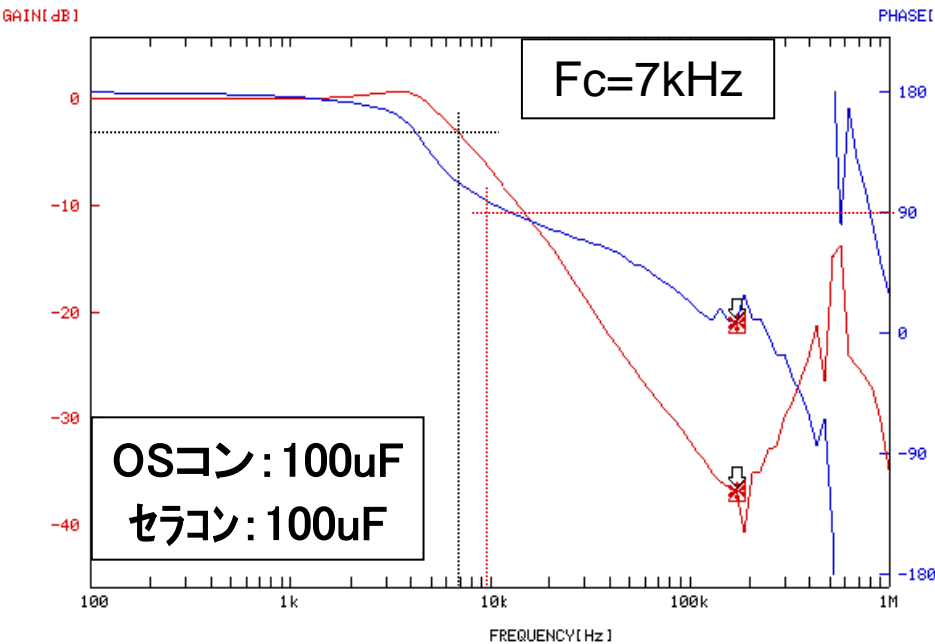
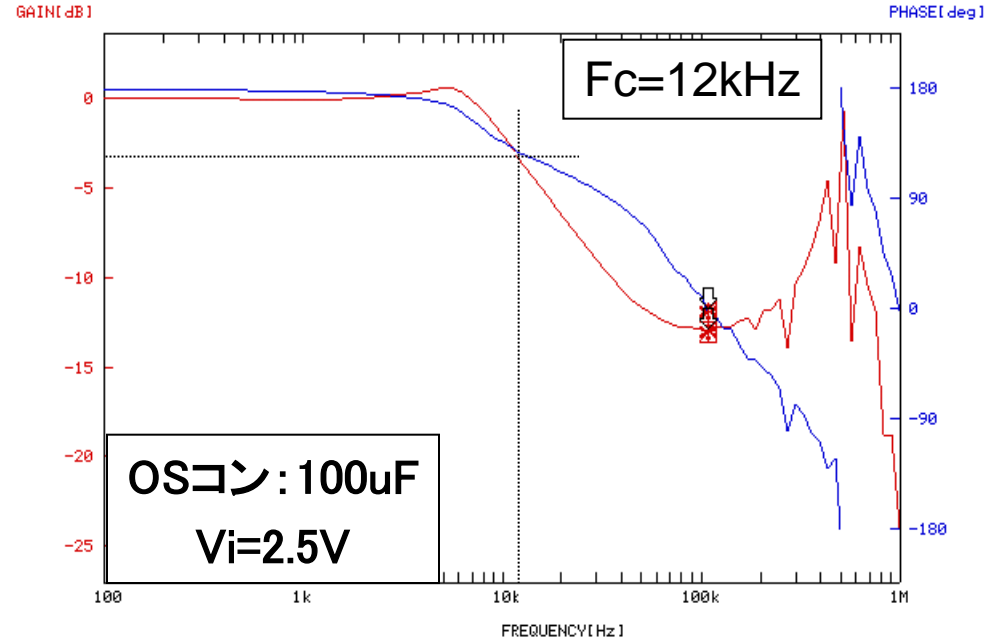
($V_i=2.5V$, $V_o=5.0V$, $I_o=0.35A$)

* 出力 C_o 2倍 \Rightarrow F_c 半減

* ESRの低減(セラコン100 μ F変更)

F_c 不変だが、特性変化

ESRによる位相進み



7-2 性能検討

(1) スイッチング・ノイズ

(A) SW-ON時に共振

$F = 80 \text{ kHz}$

(B) リプル低減検討

① ゲートドライブ抵抗 R_g の変更

② C_o の追加:

OSコン100 μ F+セラコン47 μ F

●ゲートドライブ抵抗の変更

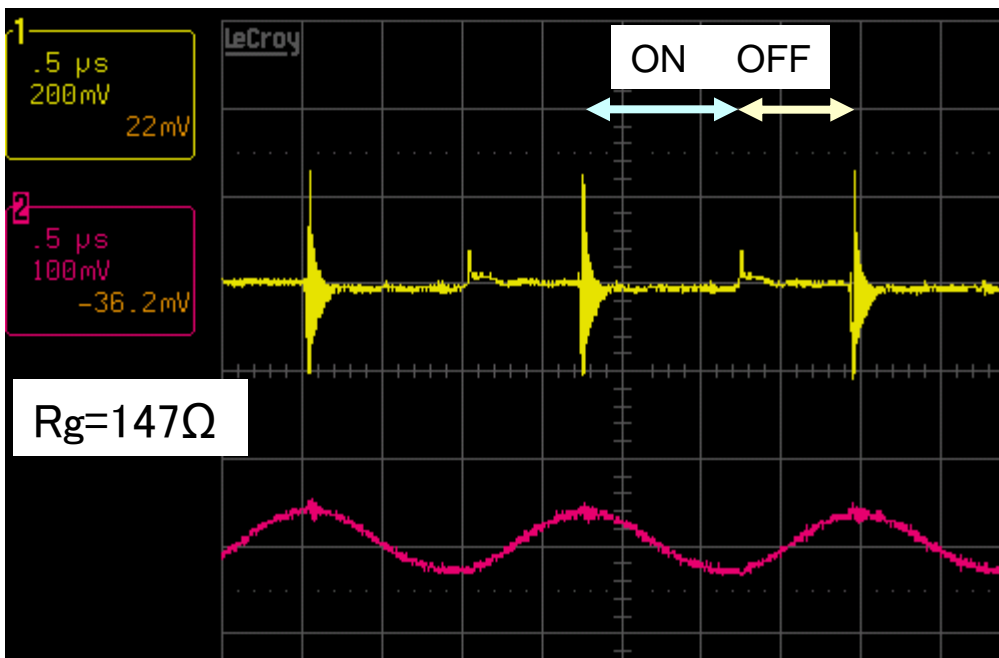
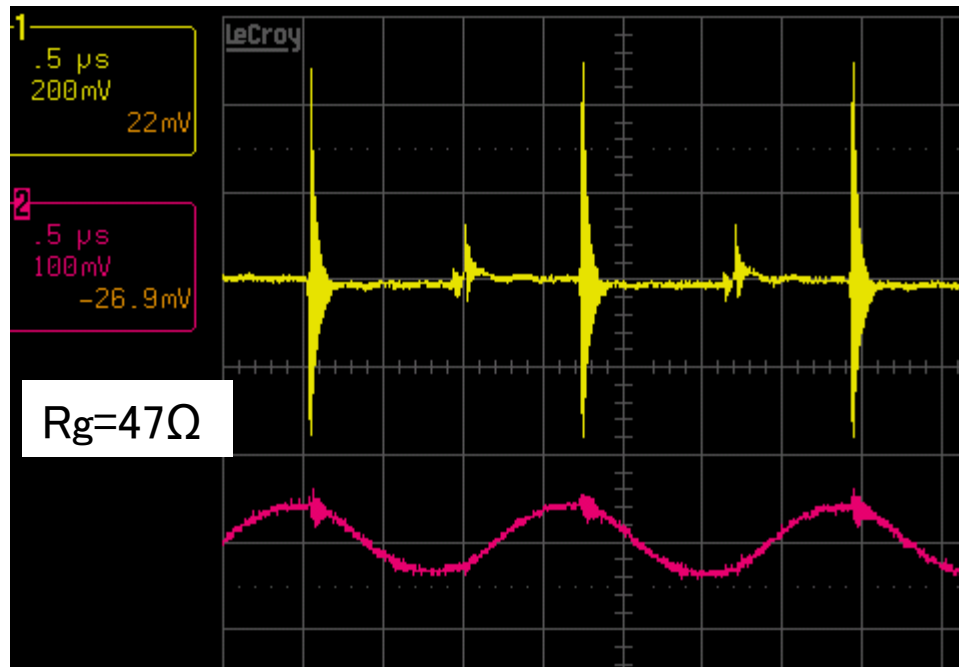
* 抵抗: $R_g = 47 \Rightarrow 147\Omega$

\Rightarrow リプル: 0.80 \Rightarrow 0.45Vpp

● ESRの低下

* C_o にセラコン47 μ F 追加

\Rightarrow 大差なし



(C) 入力Cと電源ノイズ

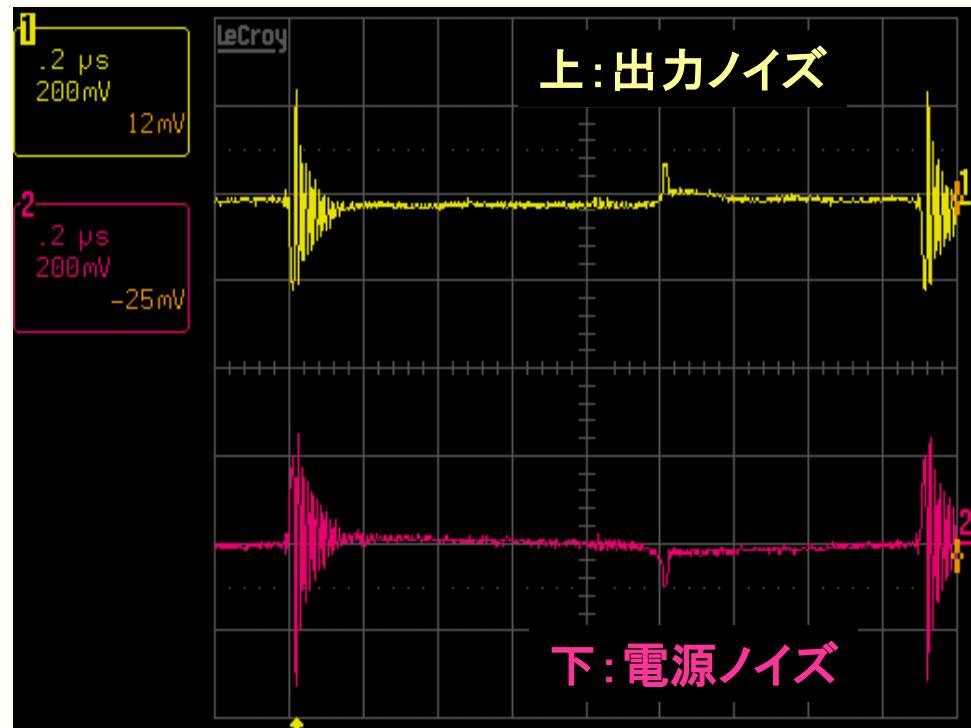
* 初期状態

- ・入力 C_i : ケミコン100 μ F
- ・電源ノイズ: 0.60Vpp

* OSコン: 100 μ Fの追加
両ノイズとも 効果なし

* セラコン: 47 μ Fの追加
両ノイズとも 効果なし

[理由] ダイオード導通時には
電源ラインは無関係



(D) インダクタンスとノイズ

* L: 23 μ H \Rightarrow 47 μ H

* 出力ノイズ: レベル・周波数共 同 じ \Rightarrow 共振LCは?

* 電源ノイズ: やや低下 (0.50Vpp)

(2) 効率:Lの違いによる効率変化

* 条件: $V_i=2.5V$ 、 $V_o=4.98V$ 、 $I_o=0.35A$

* インダクタンス

・ $L_o: 22.7\mu F$ 、 0.086Ω \Rightarrow $L_1: 47.1\mu F$ 、 0.108Ω

* 効率

・ $\eta_o = 75.5\%$ \Rightarrow 71.2% (出力= $1.75W$ 、 $\Delta P=$)

・ コイル内部抵抗の増加により、効率低下

・ 入出力の共振ノイズも不変

\Rightarrow Lを下げ、 r_L を小さくして 効率を上げたほうがよい

ただし、インダクタ電流の振幅が増大 \Rightarrow 効率低下、飽和注意

以上