

電力変換効率曲線を用いた降圧形DC/DC 電源回路の回路素子値推定に関する検討

○櫻井 翔太郎 築地 伸和 小堀 康功 小林 春夫

群馬大学工学部電子情報理工学科
通信処理システム工学第二研究室小林研究室
学部4年 櫻井翔太郎

アウトライン

1. 研究背景と目的
2. 推定原理—DCDC電源の損失と効率
3. 推定結果
4. まとめと課題

アウトライン

1. 研究背景と目的
2. 推定原理—DCDC電源の損失と効率
3. 推定結果
4. まとめと課題

研究背景



スイッチング電源



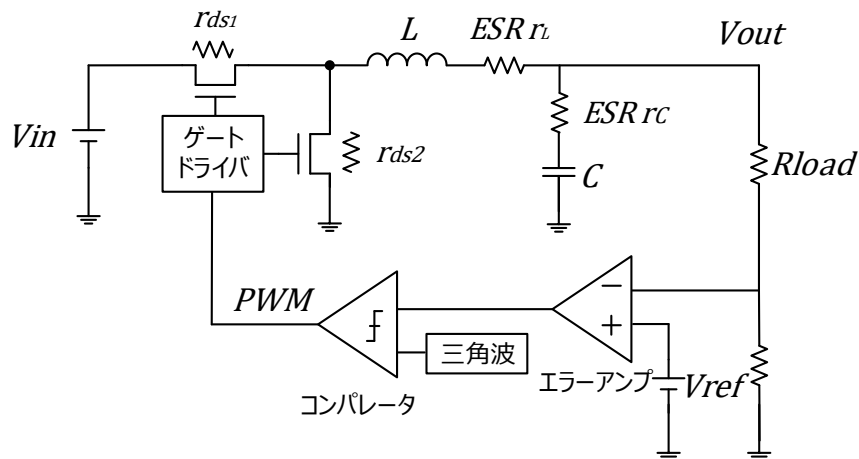
電子機器



IoT デバイス



情報機器



電圧を降圧/昇圧する回路

小型
軽量
高効率

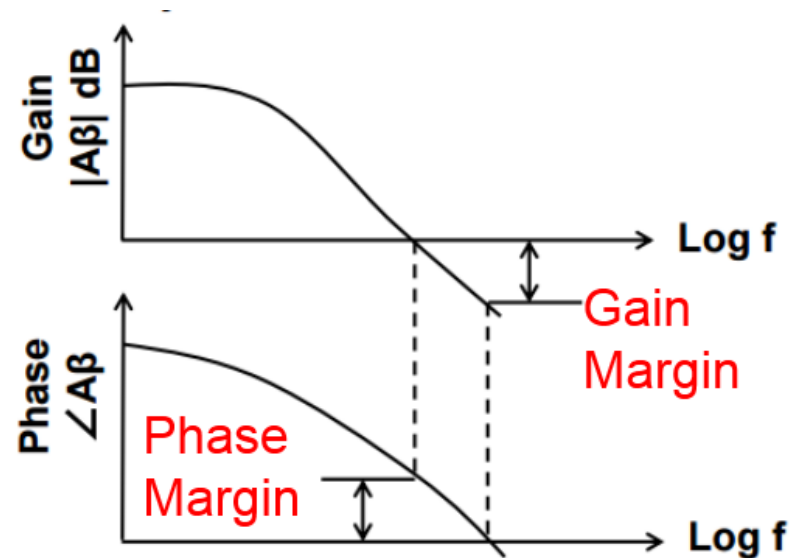
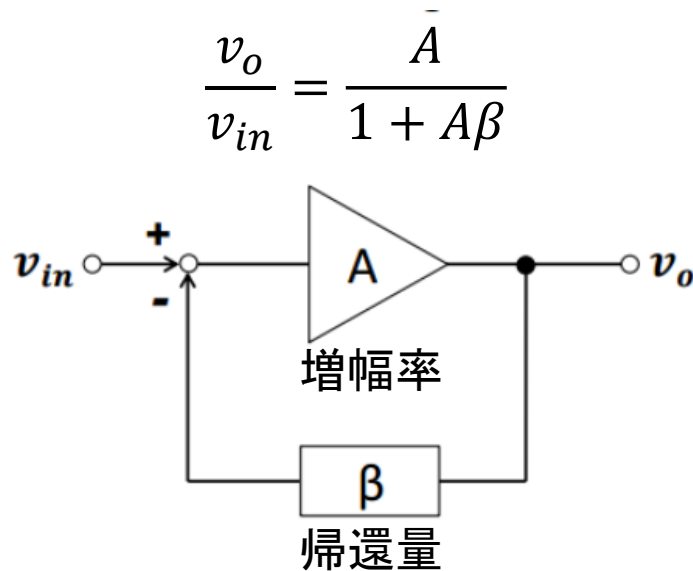
負帰還回路

スイッチング電源は負帰還制御を用いる

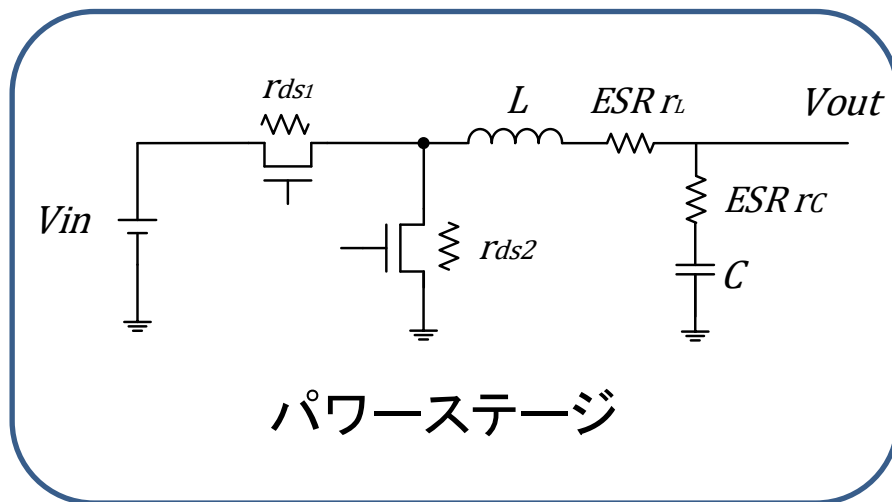
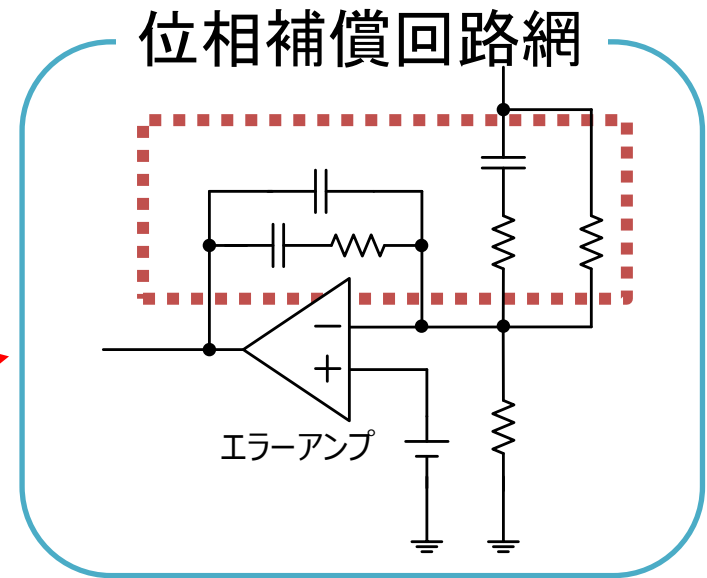
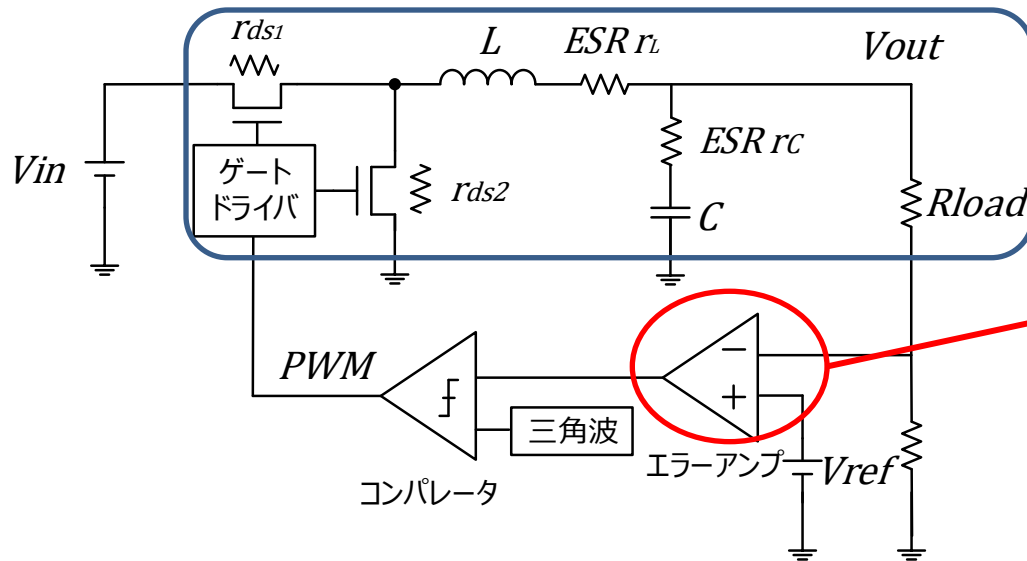
$A\beta = -1$ の時、回路は発振



適切な位相補償設計が必要



位相補償設計



$$G_{dv}(s) \Big|_{\substack{\Delta V_i=0 \\ \Delta I_o=0}} = \frac{\Delta V_o}{\Delta D} \rightarrow \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

パワーステージの伝達関数

位相補償設計に必要！

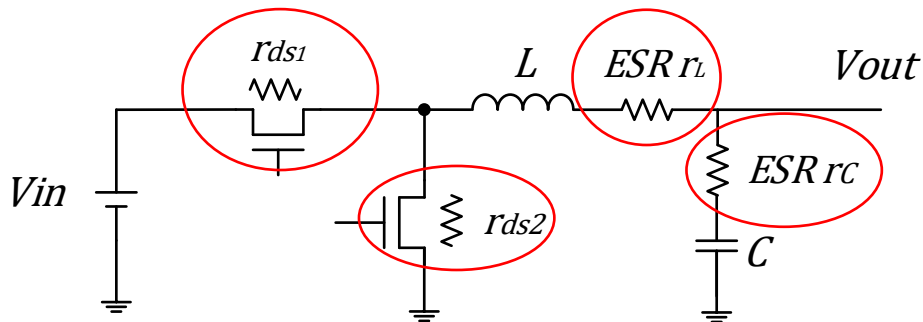
パワーステージの伝達関数と素子値

$$G_{dv}(s) \Big|_{\substack{\Delta V_i=0 \\ \Delta I_o=0}} = \frac{\Delta V_o}{\Delta D} \rightarrow \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\underline{\zeta}\omega_n s + \omega_n^2}$$

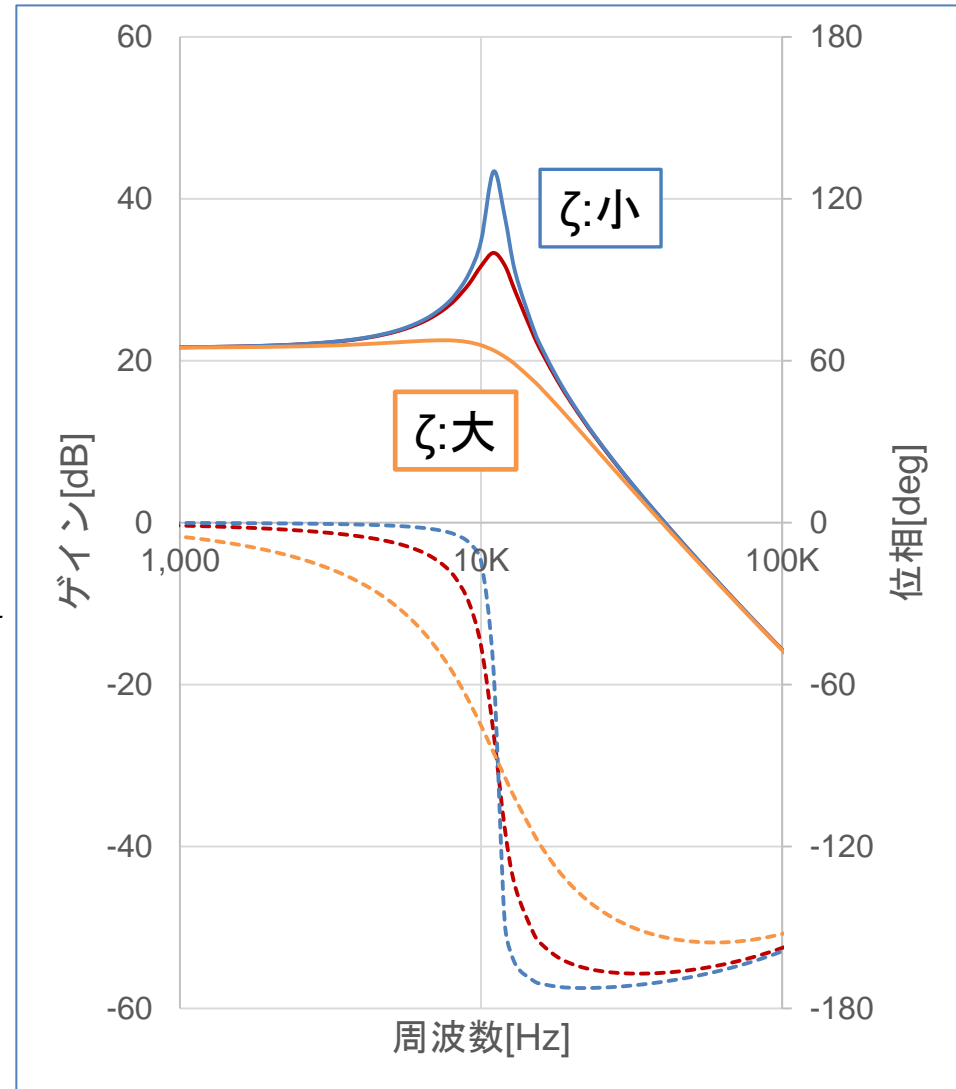
→ 振動係数 ζ が特性に関与

$$\zeta = \frac{r_L + r_{ds} + r_C}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

ζ は回路素子値に依存

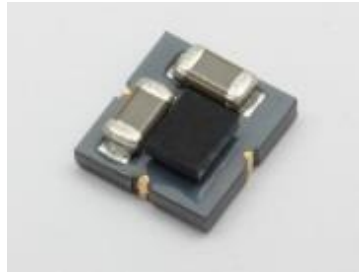


位相補償設計に
回路素子値は必須

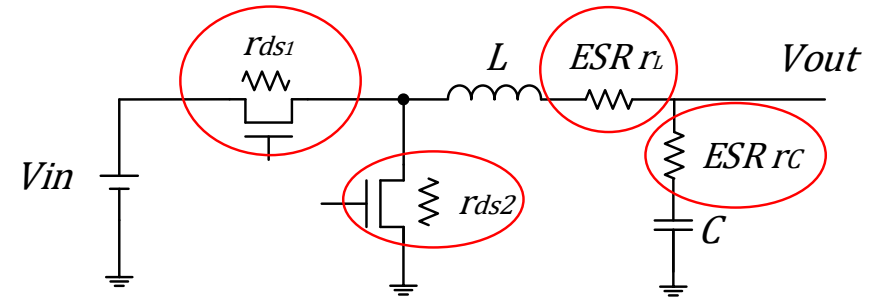


現状

実装済の電源



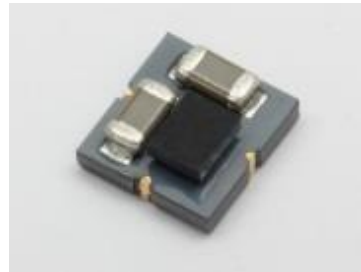
回路素子値



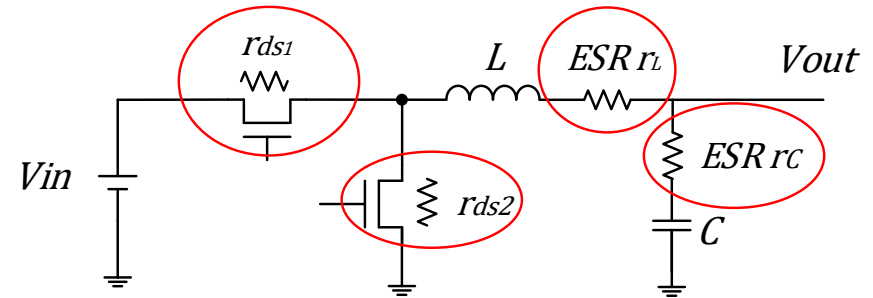
困難

提案解決手法

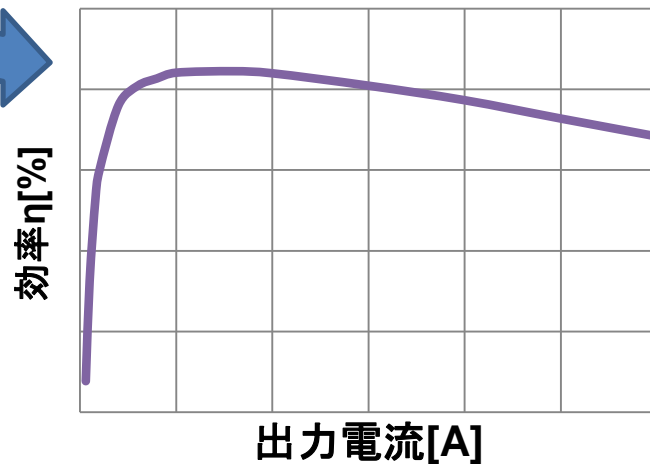
実装済の電源



回路素子値



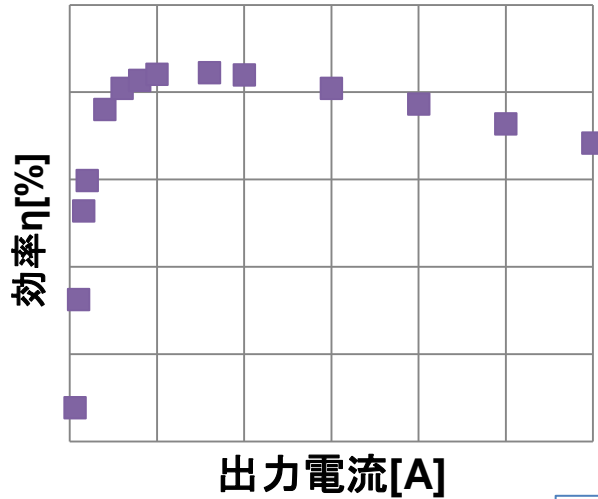
測定された効率曲線



回路素子値を直接
測定せずに効率曲線から推定

目的

測定効率曲線



損失の理論式

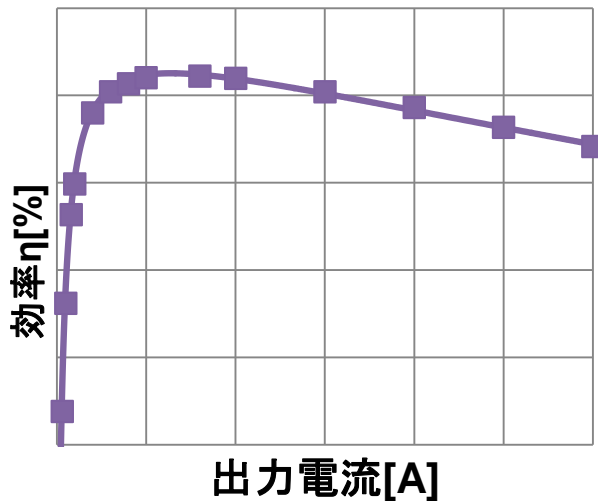
$$P_{sw\ loss} = \frac{1}{6} V_i I_o (\Delta T_{ON} + \Delta T_{OFF}) \cdot f_{sw}$$

$$P_L = R_L \cdot I_o^2 \quad P_C = R_C \cdot I_o^2$$

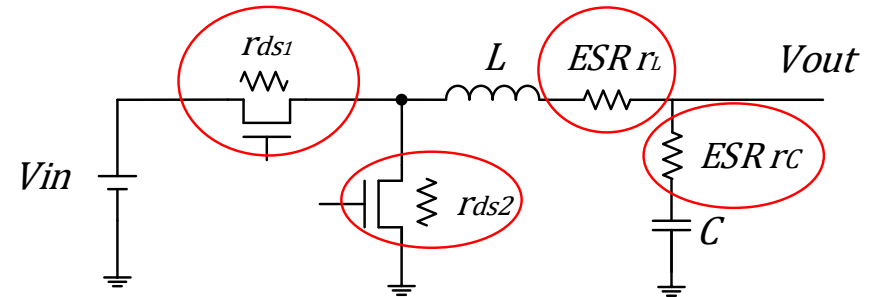
$$\eta = \frac{V_{out} \cdot I_o}{V_{out} \cdot I_o + P_{loss}}$$

フィッティング

フィッティング効率曲線



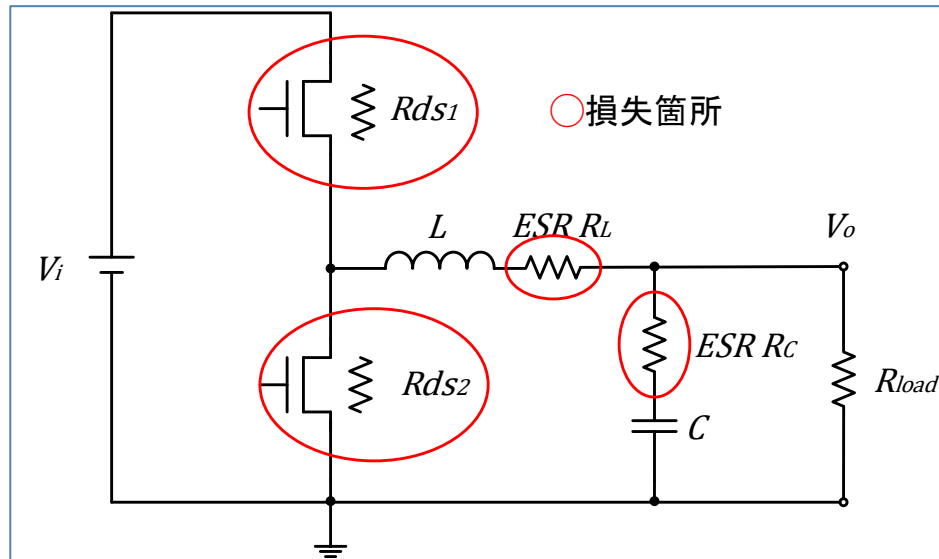
回路素子値



アウトライン

1. 研究背景と目的
2. 推定原理—DCDC電源の損失と効率
3. 推定結果
4. まとめと課題

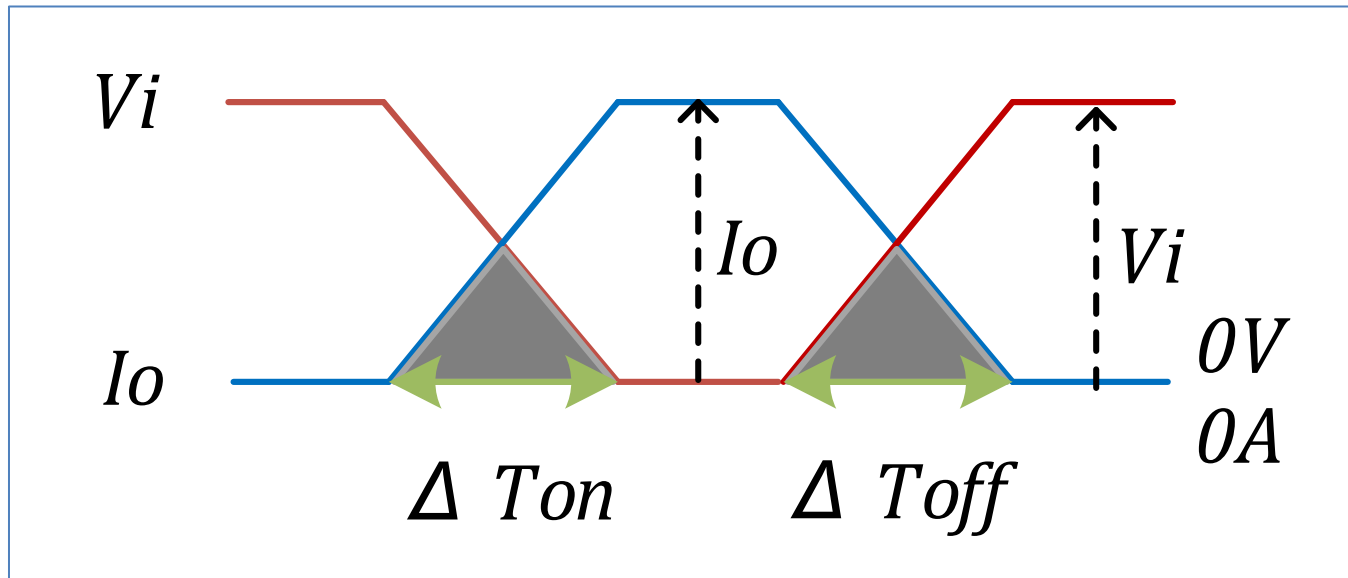
スイッチング電源の損失



1. 出力電流に比例する一次損失
スイッチング損失 $: P_1 [W]$
2. 出力電流の二乗に比例する二次損失
導通損失 $: P_2 [W]$
3. 出力電流に依存しない固定損失 $: P_{const} [W]$

P_1 –スイッチング損失

一次損失



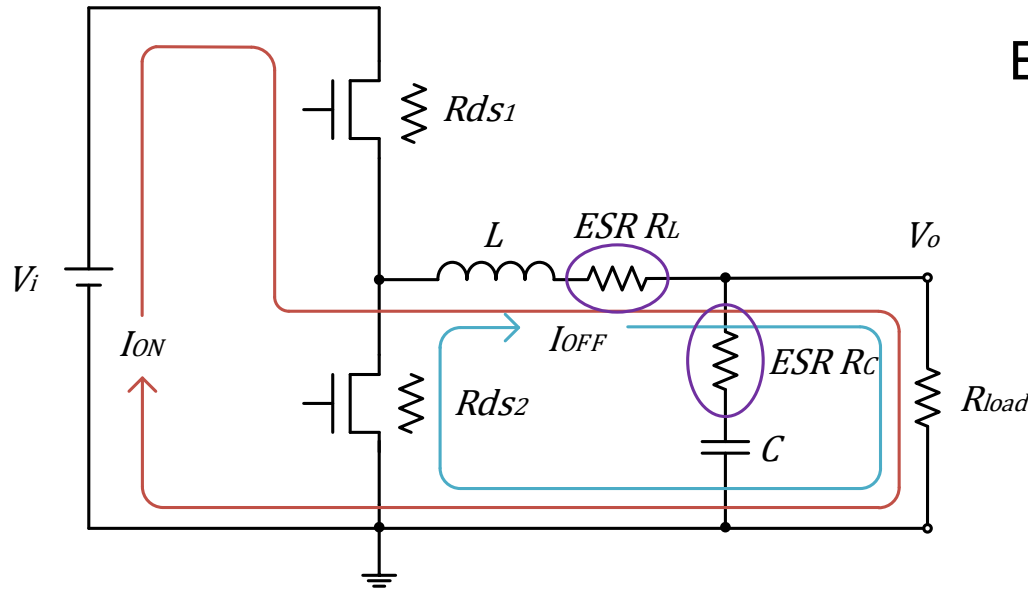
$$P_{sw\ loss} = f_{sw} \left[\int_0^{\Delta T_{on}} v_{tr}(t) \cdot i_{tr}(t) dt + \int_0^{\Delta T_{off}} v_{tr}(t) \cdot i_{tr}(t) dt \right]$$

$$= \frac{1}{6} V_i \cdot I_o (\Delta T_{ON} + \Delta T_{OFF}) \cdot f_{sw}$$

V_i : ドレインソース間電圧[V]
 I_o : 出力電流(ドレイン電流)[A]

P_2 - インダクタ、キャパシタの導通損失

二次損失



ESR(Equivalent Series Resistance)

等価直列抵抗による I^2R ドロップ

導線、金属皮膜の抵抗成分が起因

• インダクタの銅損

$$P_L = R_L \cdot I_o^2$$

R_L : コイルの等価直列抵抗 [Ω]

I_o : 出力電流 [A]

• キャパシタの損失

$$P_C = R_C \cdot I_C^2 \quad \text{※ } I_C \propto I_o$$

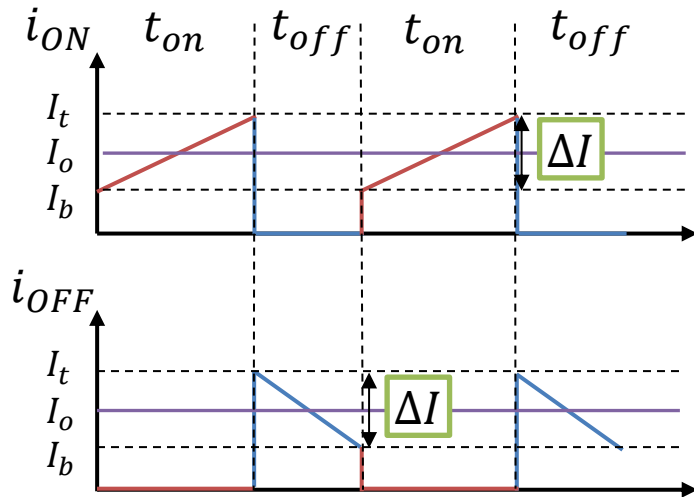
R_C : キャパシタの直列等価抵抗 [Ω]

I_C : キャパシタに流れるリップル電流 [A]

P_2 – MOSFET 導通損失

二次損失

MOSFET 導通損失

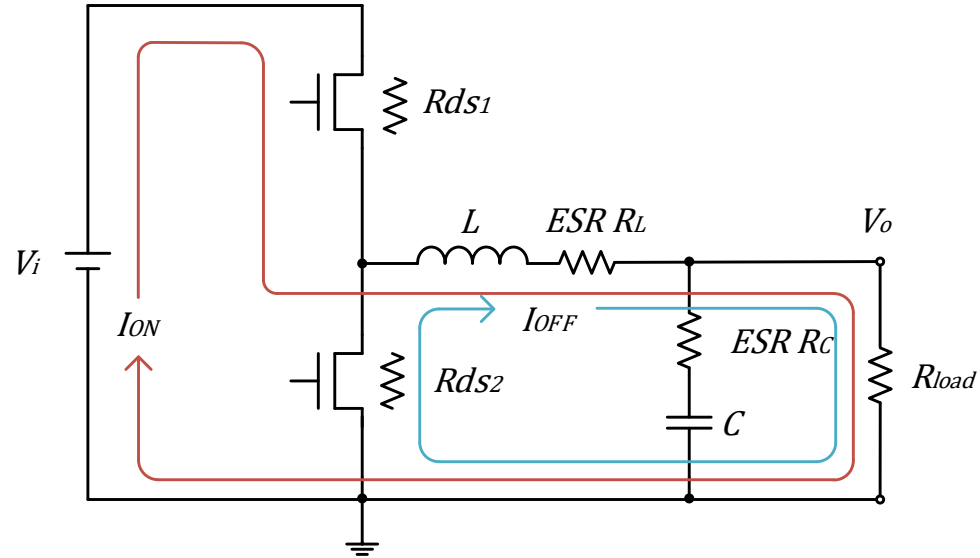


$$P_{cond1}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} \left(I_o^2 + \frac{\Delta I^2}{12} \right) \cdot R_{ds1}$$

$$P_{cond2}$$

$$\left(1 - \frac{V_o}{V_{in}} \right) \left(I_o^2 + \frac{\Delta I^2}{12} \right) \cdot R_{ds2}$$



$$P_{cond} = I_o^2 \left[\frac{V_o}{V_{in}} (R_{ds1} - R_{ds2}) + R_{ds2} \right]$$

I_o : 出力電流[A]

ΔI : リップル電流[A]

R_{DS1} : ハイサイドMOSオン抵抗[Ω]

R_{DS2} : ローサイドMOSオン抵抗[Ω]

スイッチング電源の損失式

一次損失: P_1

$$P_{sw\ loss} = \frac{1}{6} V_i I_o (\Delta T_{ON} + \Delta T_{OFF}) \cdot f_{sw}$$

二次損失: P_2

$$P_L = R_L \cdot I_o^2 \quad P_C = R_C \cdot I_C^2 \quad ※ I_C \propto I_o$$

$$P_{cond} = I_o^2 \left[\frac{V_o}{V_{in}} (R_{ds1(on)} - R_{ds2(on)}) + R_{ds2(on)} \right]$$

固定損失: P_{const}

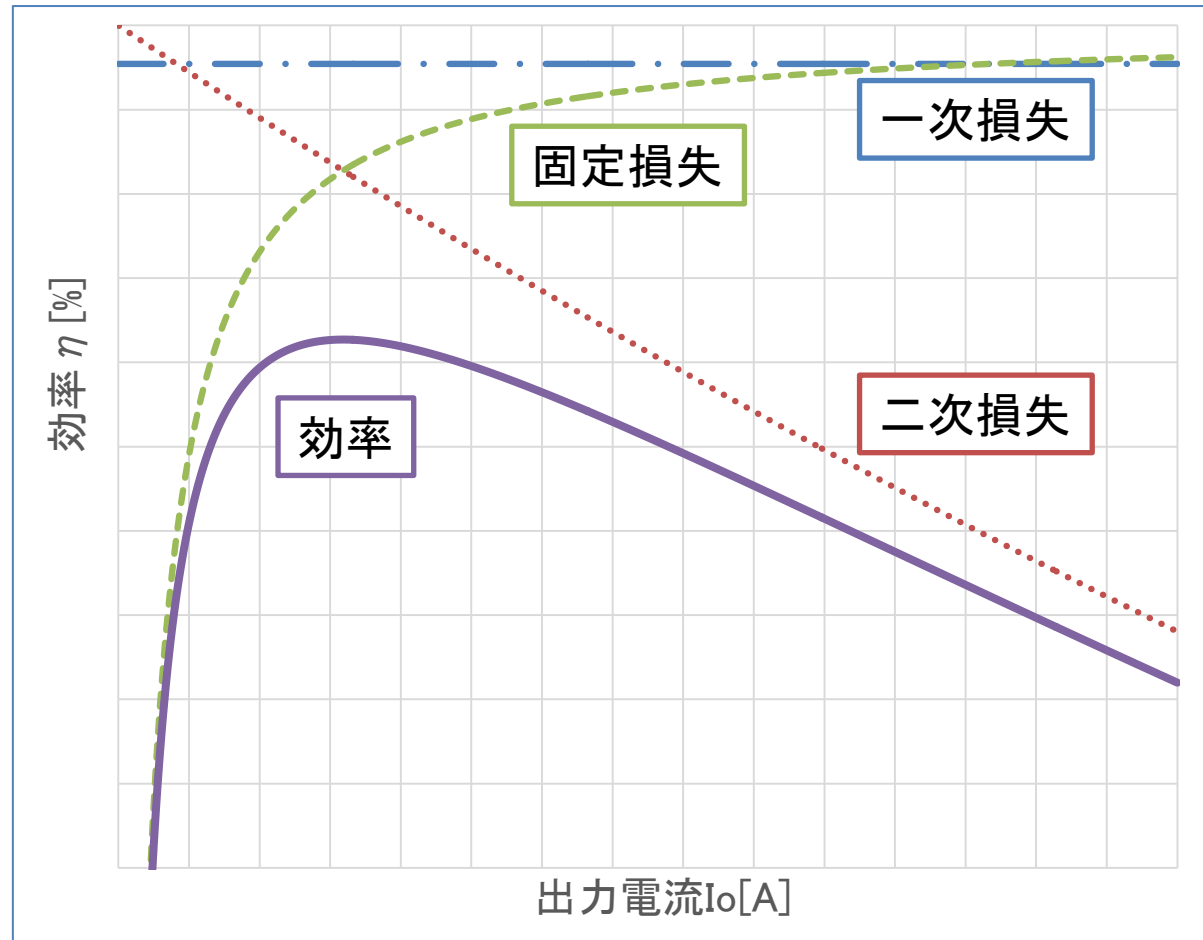
エラーアンプ
コントロールステージ コンパレータ の自己消費電力
ゲートドライバ

パラメータとして値で与える

各損失の効率に与える影響

出力電流に対して

- 一次損失
→一定
- 二次損失
→単調減少
- 固定損失
→対数増加



各損失による影響を考慮しながらフィッティング

各損失と電力変換効率

$$P_2 = P_{MOS} + P_L + P_C = K_2 \cdot I_o^2$$

$$P_1 = P_{sw} = K_1 \cdot I_o$$

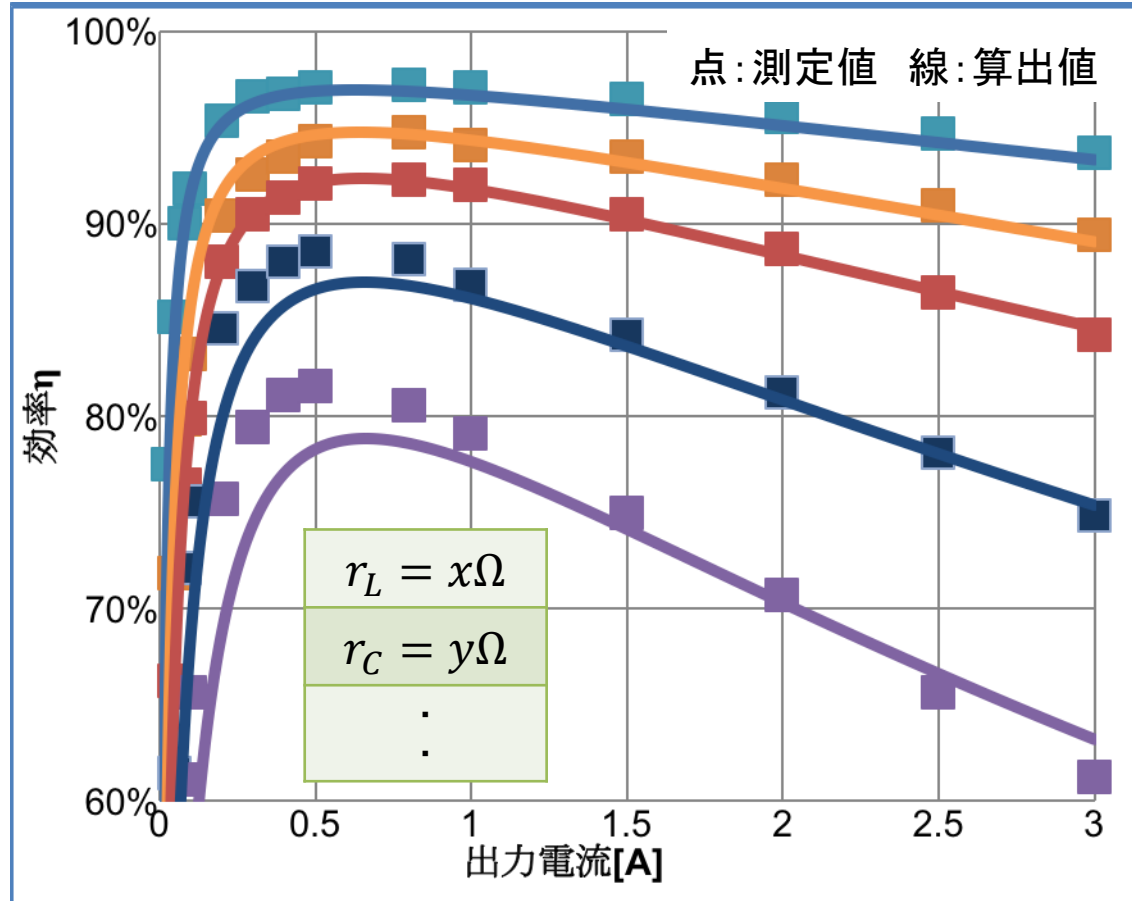
$$P_{const}$$

$$P_{loss} = P_2 + P_1 + P_{const}$$



電力変換効率

$$\eta = \frac{V_{out} \cdot I_o}{V_{out} \cdot I_o + P_{loss}}$$



算出した効率を実測値と比較
 フィッティングにより素子値を推定

アウトライン

1. 導入
2. 推定原理—DCDC電源の損失と効率
3. 推定結果
4. まとめと課題

推定対象

- 市販の同期整流形DC/DCコンバータの評価基板を使用
- 測定した電力変換効率曲線のみを使用

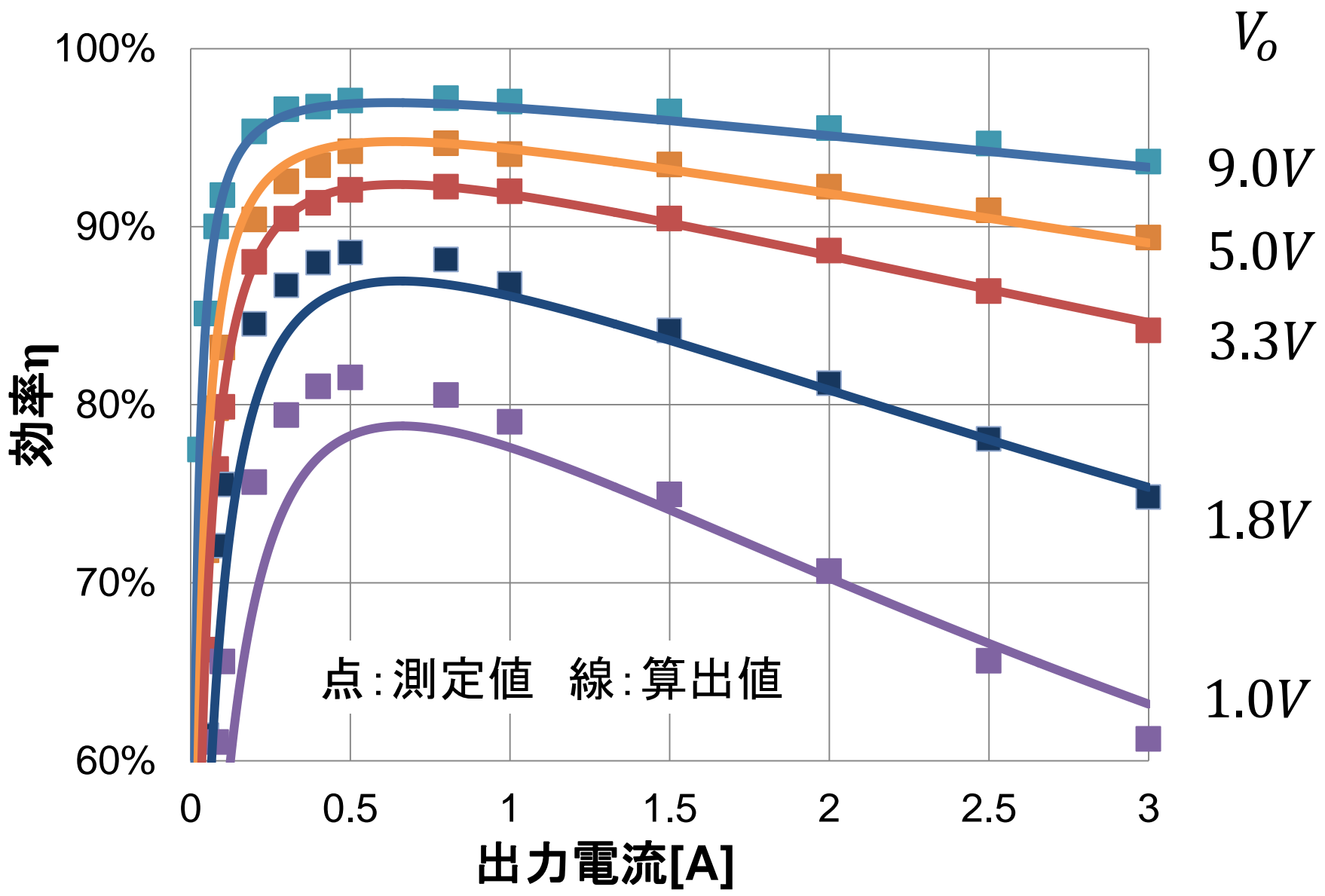
推定パラメータ

- インダクタ ESR
- MOSFETのハイサイドのオン抵抗
- MOSFETのターンオン時間
- 固定損失
- キャパシタ ESR
- MOSFETのローサイドのオン抵抗
- MOSFETのターンオフ時間

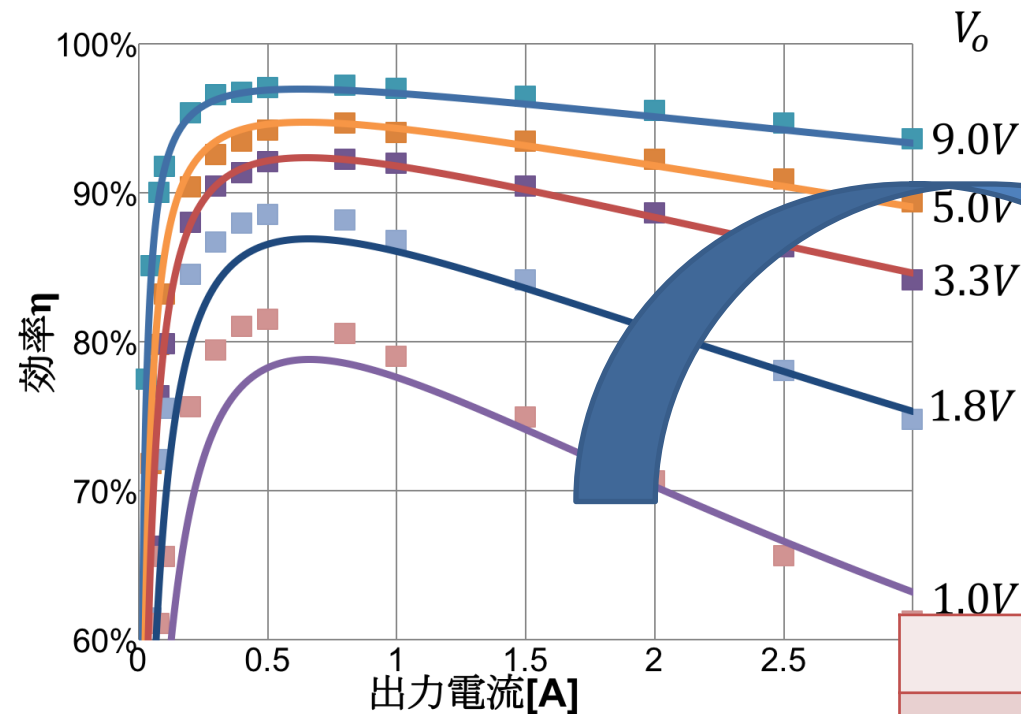
評価回路の設定パラメータ

入力電圧 V_i	12.0V
出力電圧 V_o	1.0V/1.8V/3.3V/5.0V/9.0V
スイッチング周波数 f_{sw}	380kHz
出力インダクタ L	10 μ H
出力キャパシタ C	20 μ F

フィッティング結果



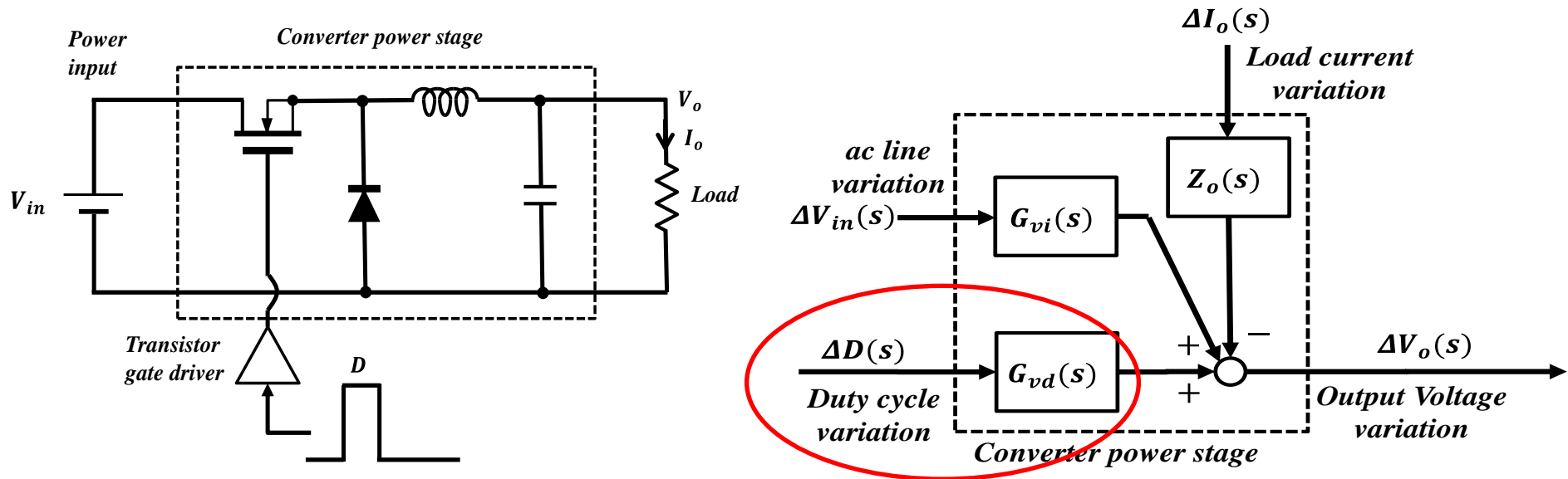
推定結果



評価回路の推定値

インダクタ ESR	19.43m Ω
キャパシタ ESR	30m Ω
ハイサイドMOSFET オン抵抗	150m Ω
ローサイドMOSFET オン抵抗	130m Ω
MOSFET ターンオン時間	10nsec
MOSFET ターンオフ時間	40nsec
固定損失	150mW

推定結果を用いた伝達関数の計算



位相補償設計にあたり
パワーステージの伝達関数が必要



推定値を用いることで算出が可能

パワーステージ伝達関数

開ループ伝達関数

$$G_{dv}(s) \Big|_{\substack{\Delta V_i=0 \\ \Delta I_o=0}} = \frac{\Delta V_o}{\Delta D} = \frac{V_i \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \left(1 + \frac{s}{\omega_{esr}} \right)$$

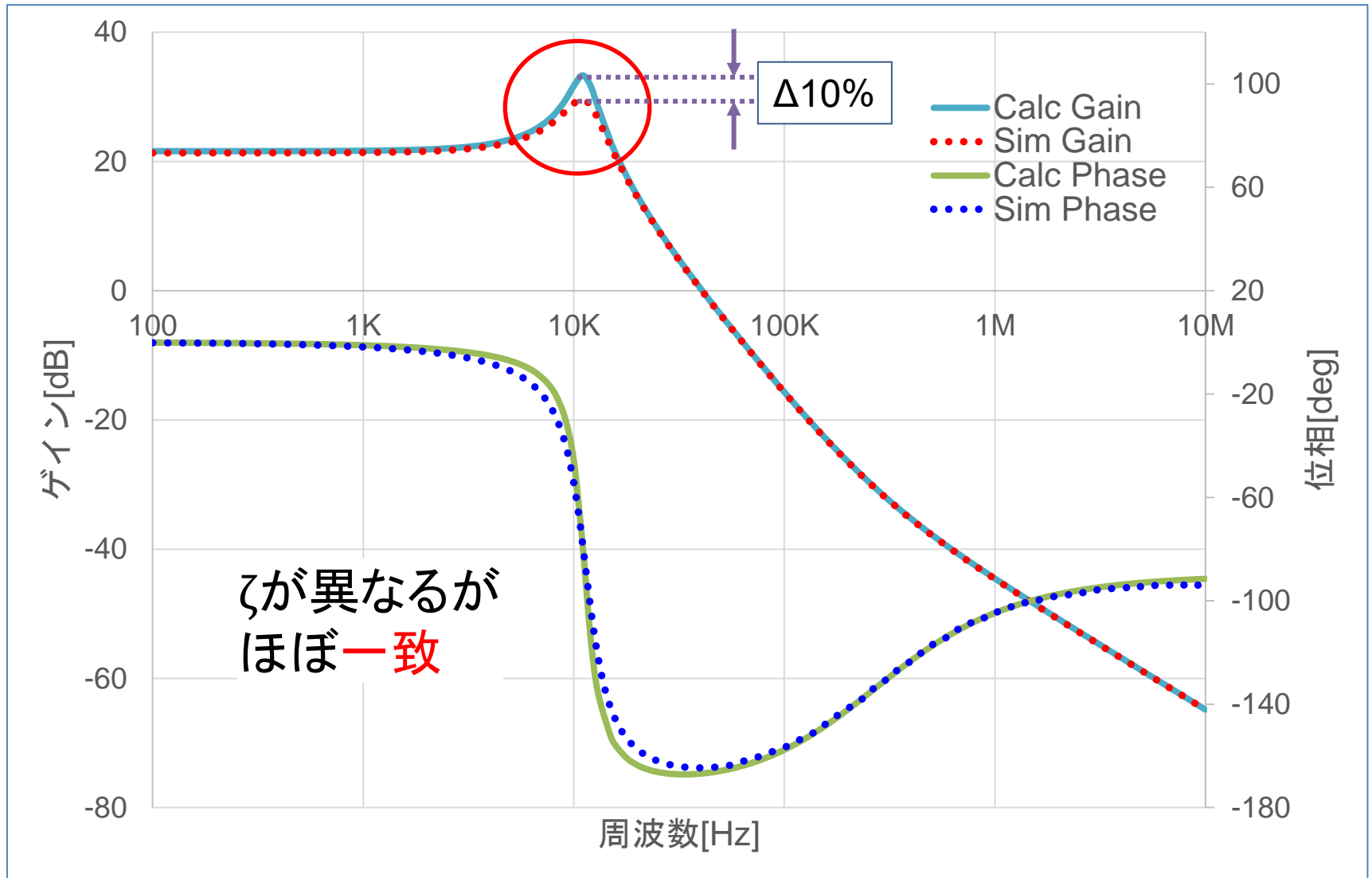
$$= \frac{V_i(1 + j\omega C r_c)}{1 - \omega^2 LC + j\omega C(r_L + r_c + r_{ds})}$$

$$\zeta = \frac{r_L + r_c + r_{ds}}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad \omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \omega_{esr} = \frac{1}{C r_c}$$

伝達関数のパラメータ

スイッチング周波数 f_{sw}	380kHz	入力電圧 V_i	12V
出カインダクタ L	10 μ H	出力キャパシタ C	20 μ F
インダクタ ESR r_L	19.43 Ω	キャパシタ ESR r_c	30m Ω
ハイサイド MOSFET オン抵抗 r_{ds1}	150m Ω	ローサイド MOSFET オン抵抗 r_{ds2}	130m Ω

推定算出値とシミュレーションの比較



アウトライン

1. 研究背景と目的
2. 推定原理—DCDC電源の損失と効率
3. 推定結果
4. まとめと課題

まとめと課題

まとめ

- 測定された効率曲線から回路素子値を推定する手法を提案
- 推定値を用いてパワーステージの開ループ伝達関数を算出

課題

- 実際に回路素子値が一致しているか、測定済みの実装電源と比較
- 未着目損失の影響の検討

ご清聴ありがとうございました

1. 研究背景と目的
2. 推定原理—DCDC電源の損失と効率
3. 推定結果
4. まとめと課題

Q&A

Q 目的は伝達関数を求めたいということで良いか？伝達関数が一致すればよいか？ 宇大

A 電圧モードでは位相補償の設計に伝達関数が必要となることから、伝達関数を推定し、位相補償の設計を最適化することが目的ですのでその通りである。

Q スイッチング損失の理論式が少し違うかも

A 再考察します。

Q&A

Q鉄損は含まれているか？

A 固定損失として数値の中に入っているものとしたため、具体的な値を示してはいない。

Q位相を確保するとのことだが、実際に行っている減衰定数の整合性に関しては示した？

A 今後の課題として、回路素子値を測定した実装回路と比較する必要がある。なので今回はまだ示せていない。