

# 昇圧型DC-DCコンバータの効率解析

群馬大学

松田順一

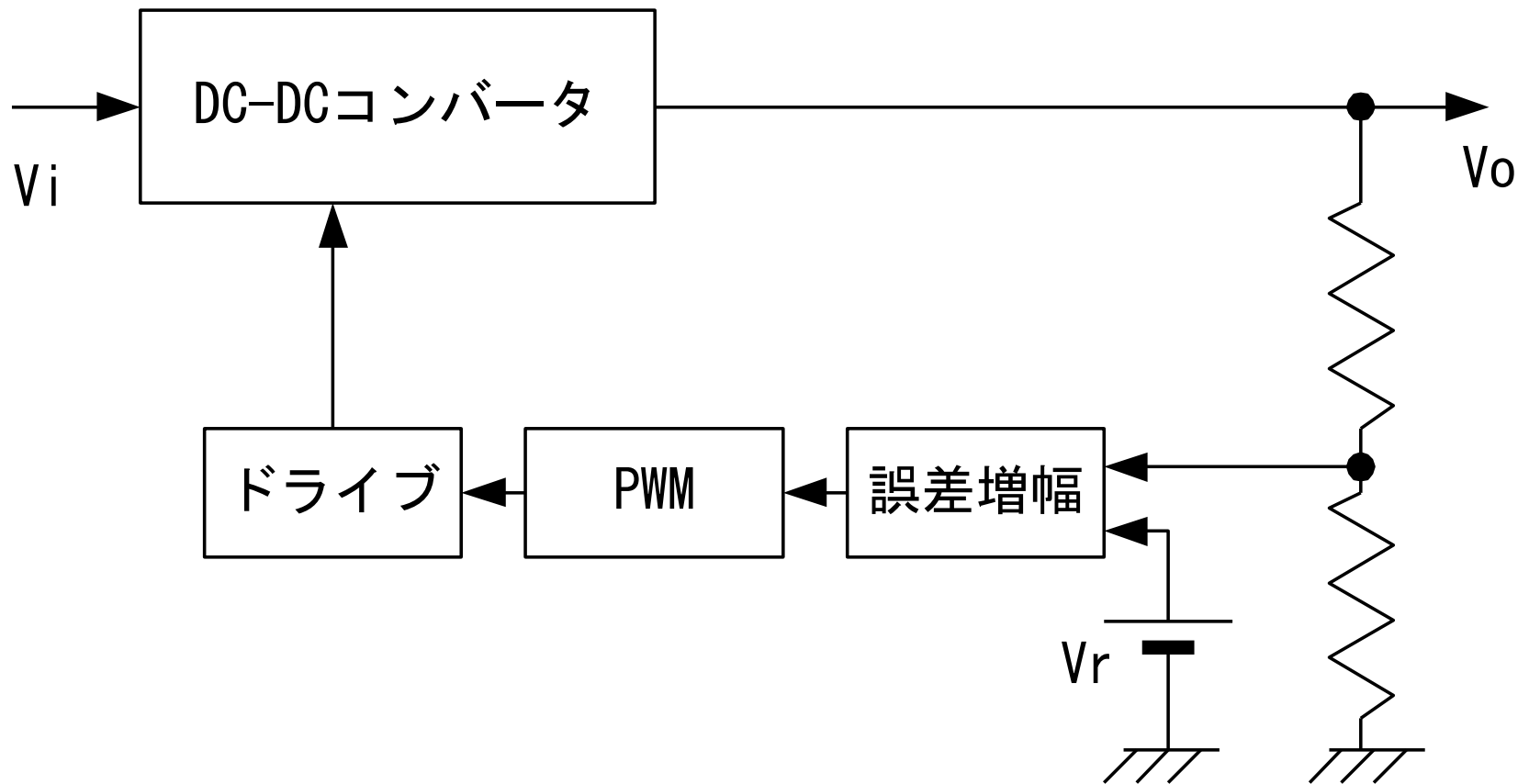
2015年6月14日

# 概要

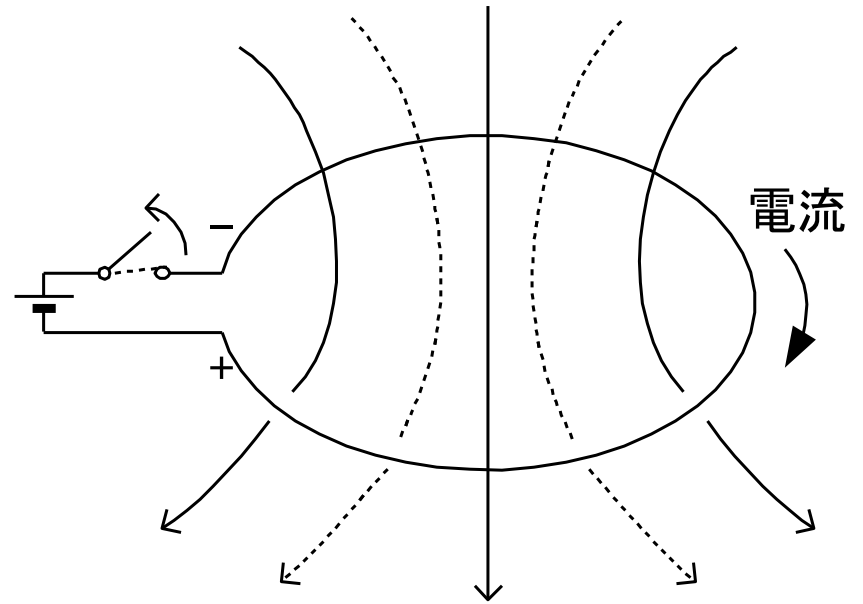
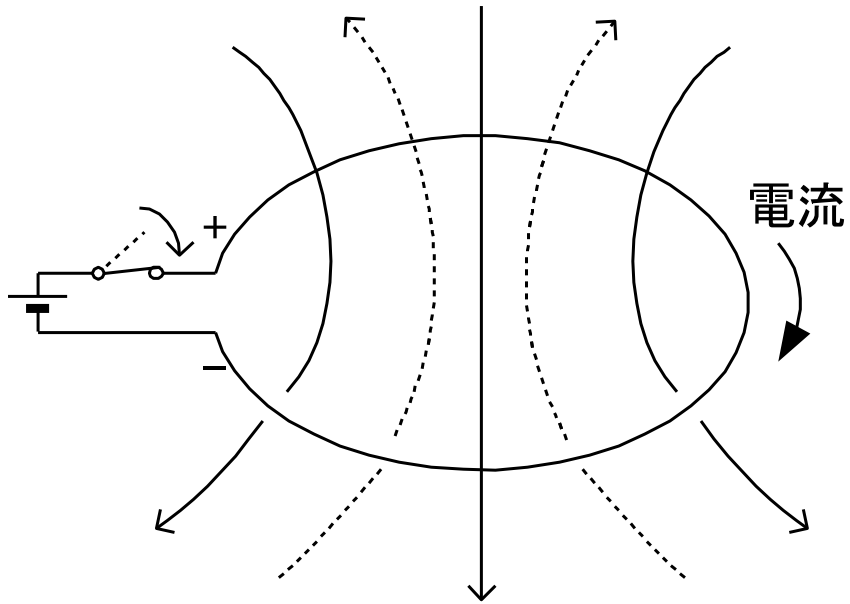
- スイッチングレギュレータ概要
- 昇圧型DC-DCコンバータ解析(多灯白色LEDドライバー)
  - 不連続、臨界、連続モードに於ける解析
- 主なエネルギー損失
- エネルギー効率計算手順とシミュレーション結果
  - 各ノードの電圧・電流の時間変化
  - 各特性の周波数依存性
    - 効率、ピーク電流/許容電流比、ピーク電流、デューティ比、リップル電圧、スイッチング $T_r$ 消費電力
  - スイッチング $T_r$ 特性のゲート幅依存性
    - 消費電力とスイッチング用MOSFETの $R_{ON}$ 、効率とチップ総原価

「群馬大学アナログ集積回路研究会 第49回講演会(2006年10月13日)」から作成

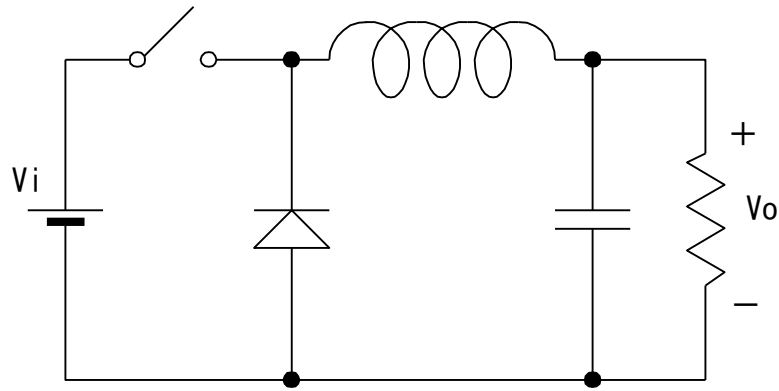
# スイッチングレギュレータの基本構成



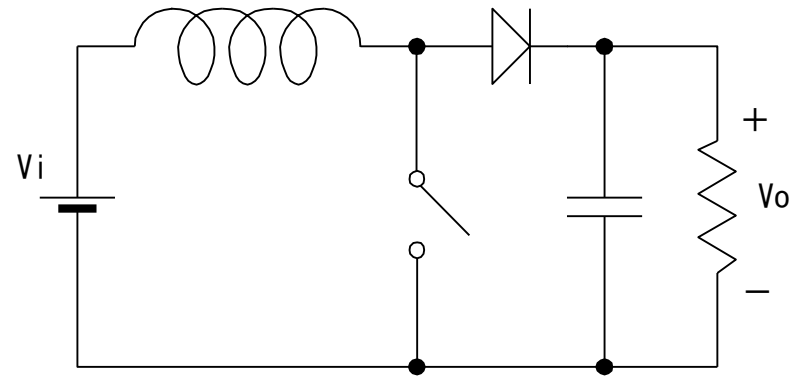
# スイッチングによるコイルの起電力



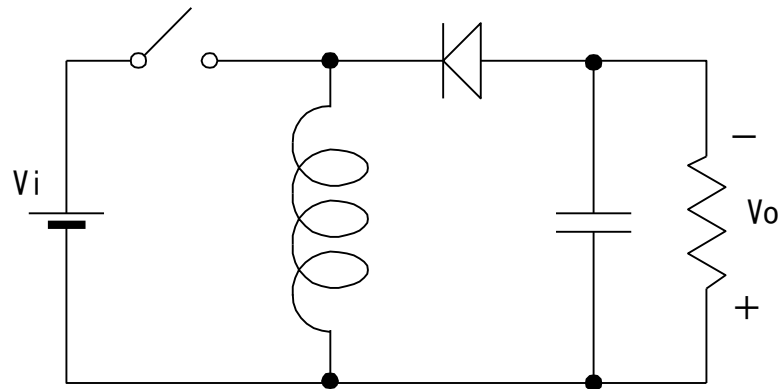
# DC-DCコンバータの基本回路



降压型



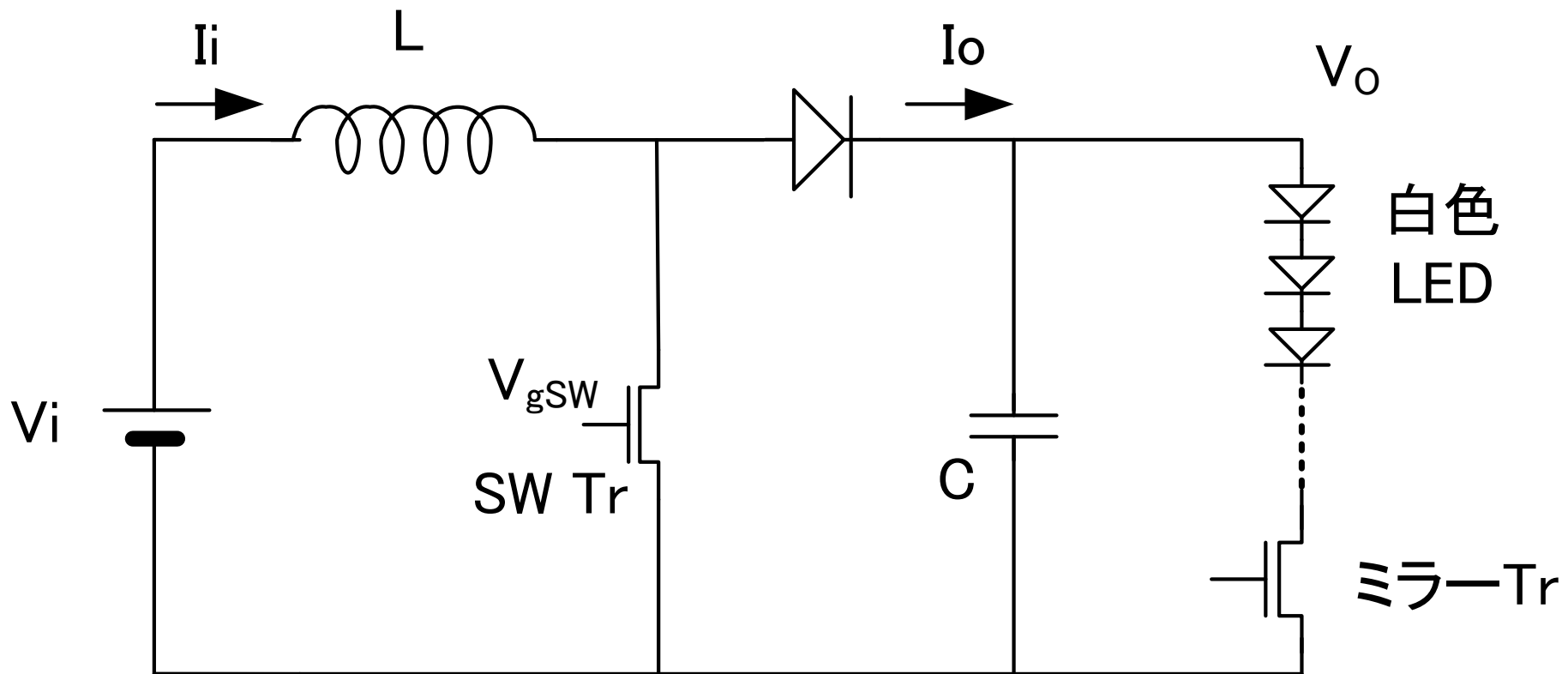
昇圧型



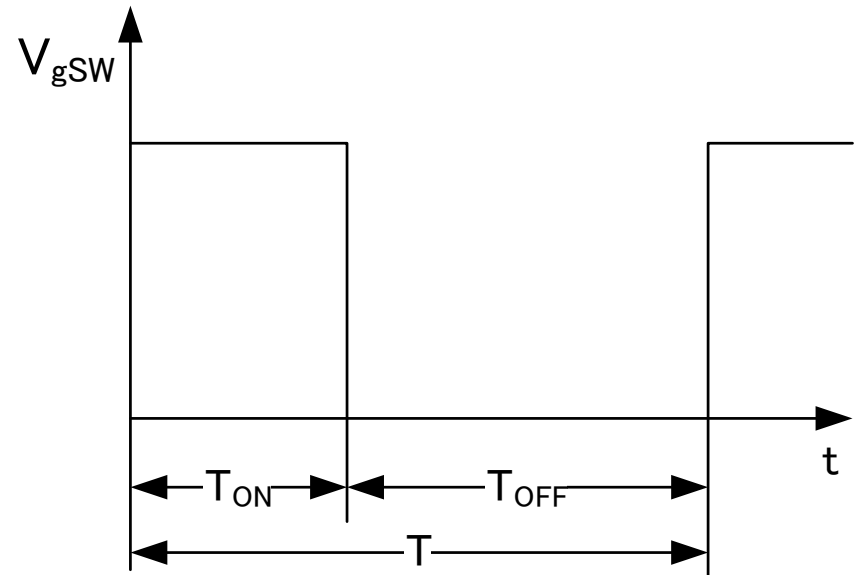
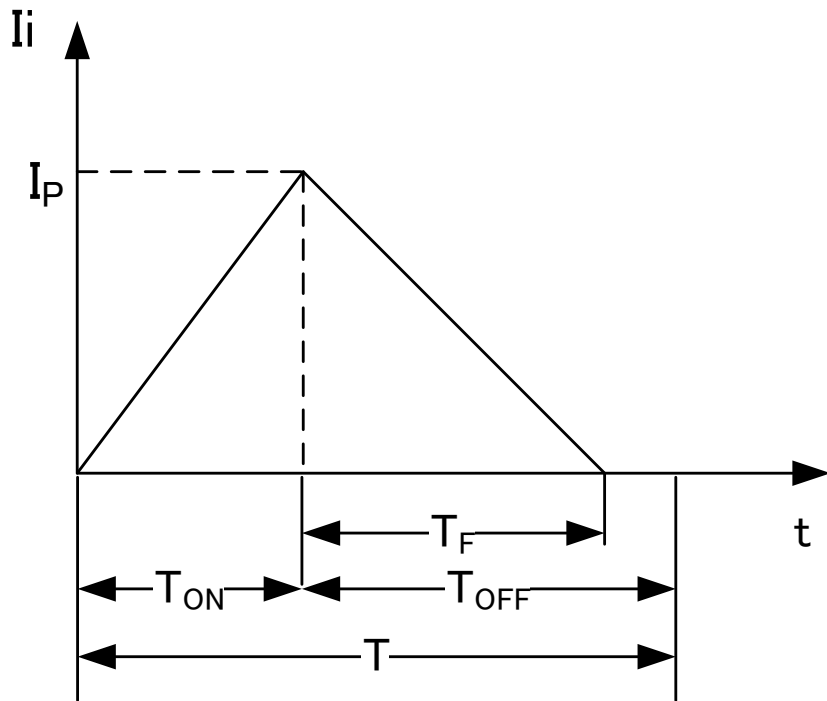
昇降压型

# 昇圧型DC-DCコンバータ回路図

—負荷: 白色LED—



# 不連続モード時の電流の時間変化



# エネルギーの流れ

- $T_{ON}$ 時
  - コイルへのエネルギー蓄積
- $T_{OFF}$  ( $T_F$ )時
  - $T_{ON}$ 時にコイルに蓄積されたエネルギーの放出
  - 電源からのエネルギー供給
  - ダイオードを通して負荷へのエネルギー供給



# 不連続モードの解析1

## (コイルのエネルギー蓄積と放出)

$T_{ON}$ の間コイルに流れる電流

$$I_i = \frac{V_i}{L} t = \frac{I_P}{T_{ON}} t \Rightarrow \frac{V_i}{L} = \frac{I_P}{T_{ON}} \Rightarrow I_P = \frac{V_i D}{L f} \quad \because L \frac{dI_i}{dt} = V_i, D = \frac{T_{ON}}{T}, f = \frac{1}{T}$$

$T_{ON}$ 間にコイルに蓄えられるエネルギー (電源からの供給エネルギー)

$$E_{ON} = \int_0^{T_{ON}} V_i I_i dt = \frac{1}{2} \frac{V_i^2}{L} T_{ON}^2 = \frac{1}{2} L I_P^2$$

$T_F$ の間コイルに流れる電流

$$I_i = \frac{V_o - V_i}{L} (T_F - t) = \frac{I_P}{T_F} (T_F - t) \Rightarrow \frac{V_o - V_i}{L} = \frac{I_P}{T_F} \quad \because L \frac{dI_i}{dt} = V_i - V_o$$

$T_F$ 間にコイルから放出されるエネルギー

$$E_{CF} = \int_0^{T_F} (V_i - V_o) I_i dt = -\frac{1}{2} \frac{(V_i - V_o)^2}{L} T_F^2 = -\frac{1}{2} L I_P^2 \Rightarrow \text{放出エネルギー}$$

# 不連続モードの解析2

(電源から供給されるエネルギー)

$T_F$ は以下で与えられる。

$$T_F = \frac{V_i T_{ON}}{V_o - V_i}, \quad \because \frac{V_o - V_i}{L} = \frac{I_P}{T_F}, \quad \frac{V_i}{L} = \frac{I_P}{T_{ON}} \Rightarrow I_P \text{消去}$$

$T_F$ 間に電源から供給されるエネルギー

$$\begin{aligned} E_F &= \int_0^{T_F} V_i I_i dt = \int_0^{T_F} V_i \frac{V_o - V_i}{L} (T_F - t) dt = \frac{V_i (V_o - V_i)}{2L} T_F^2 \\ &= \frac{1}{2} V_i I_P T_F = \frac{1}{2} \frac{V_i^2}{L} T_{ON} T_F \quad \because \frac{V_o - V_i}{L} = \frac{I_P}{T_F}, \quad \frac{V_i}{L} = \frac{I_P}{T_{ON}} \end{aligned}$$

$T_{ON}$ と $T_F$ 間に電源から供給されるエネルギー (入力エネルギー)

$$E_{IN} = E_{ON} + E_F = \frac{1}{2} \frac{V_i^2}{L} T_{ON}^2 + \frac{1}{2} \frac{V_i^2}{L} T_{ON} T_F = \frac{V_i^2}{2L} T_{ON} (T_{ON} + T_F)$$

# 不連続モードの解析3

## (出力電圧と負荷側消費電力)

$E_{IN}$ が $T$ の間に負荷側で消費されるとすると、その消費電力は

$$P_o = V_o I_o = \frac{V_i^2}{2LT} T_{ON} (T_{ON} + T_F)$$

となる。上式に $T_F = V_i T_{ON} / (V_o - V_i)$ を代入して $V_o$ を求めると、

$$V_o = \frac{V_i^2 T_{ON}^2}{2LT I_o} + V_i = \frac{V_i^2 D^2}{2Lf I_o} + V_i$$

となる。これに、 $I_o$ をかけると $P_o$ の別の式が求まる。

$$P_o = \frac{V_i^2 T_{ON}^2}{2LT} + V_i I_o = \frac{V_i^2 D^2}{2Lf} + V_i I_o$$

# 臨界モードの解析

臨界モードの $I_P$ は不連続モードの場合と同じで以下になる。

$$I_P = \frac{V_i}{L} T_{ON} = \frac{V_i D}{Lf}$$

臨界モードの $P_o$ は不連続モードの $T_F$ が $T_{OFF}$ になる場合であり、以下で表される。

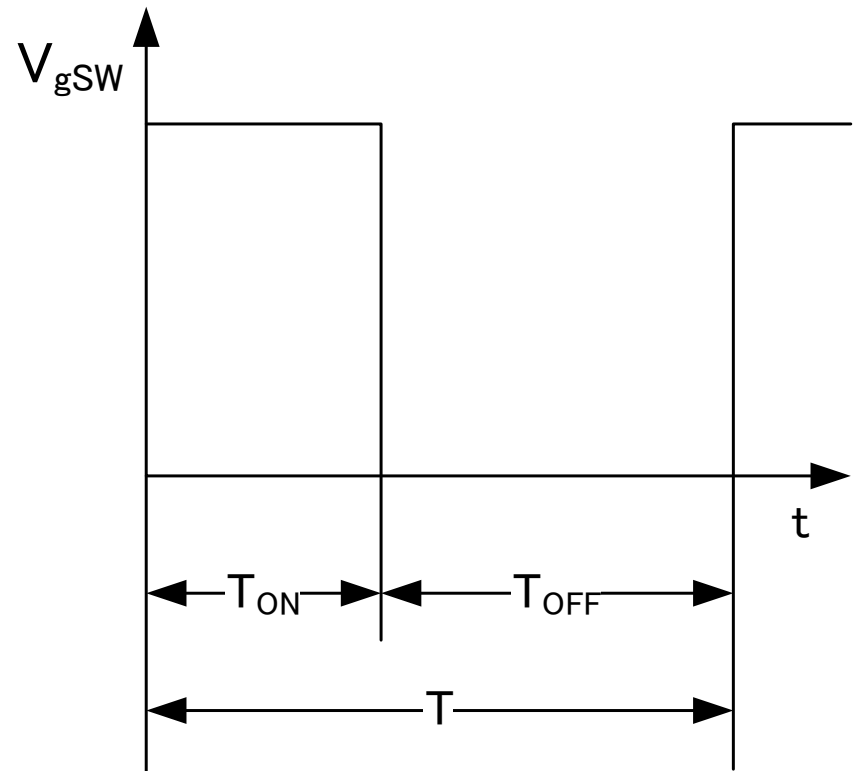
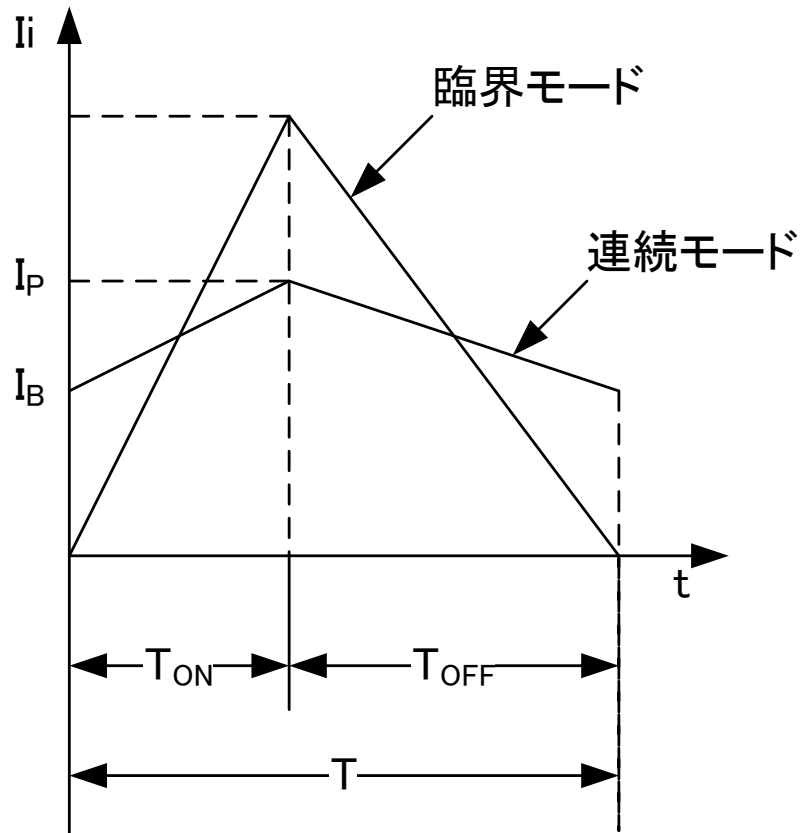
$$P_o = \frac{V_i^2}{2LT} T_{ON} (T_{ON} + T_{OFF}) = \frac{V_i^2}{2L} T_{ON} = \frac{V_i^2}{2Lf} D = \frac{1}{2} V_i I_P$$

また、臨界モードの出力電圧は、 $T_{OFF} = V_i T_{ON} / (V_o - V_i)$ から

$$V_o = \left( 1 + \frac{T_{ON}}{T_{OFF}} \right) V_i = \frac{1}{1-D} V_i$$

となる。

# 連続モード時の電流の時間変化



# 連続モードの解析1

## (コイルのエネルギー蓄積と放出)

$T_{ON}$ の間コイルに流れる電流

$$I_i = I_B + \frac{V_i}{L}t = I_B + \frac{I_P - I_B}{T_{ON}}t \quad \Rightarrow \quad \frac{V_i}{L} = \frac{I_P - I_B}{T_{ON}} \quad \because L \frac{dI_i}{dt} = V_i$$

$T_{ON}$ 間にコイルに蓄えられるエネルギー (電源からの供給エネルギー)

$$E_{ON} = \int_0^{T_{ON}} V_i I_i dt = \frac{1}{2} V_i T_{ON} (I_P + I_B) = \frac{1}{2} L (I_P^2 - I_B^2)$$

$T_{OFF}$ の間コイルに流れる電流

$$I_i = I_P - \frac{V_o - V_i}{L}t = I_P - \frac{I_P - I_B}{T_{OFF}}t \quad \Rightarrow \quad \frac{V_o - V_i}{L} = \frac{I_P - I_B}{T_{OFF}} \quad \because L \frac{dI_i}{dt} = V_i - V_o$$

$T_{OFF}$ 間にコイルから放出されるエネルギー

$$E_{CF} = \int_0^{T_{OFF}} (V_i - V_o) I_i dt = -\frac{1}{2} L (I_P^2 - I_B^2) \quad \Rightarrow \quad \text{放出エネルギー}$$

# 連続モードの解析2

(電源から供給されるエネルギー)

$T_{OFF}$ 間に電源から供給されるエネルギー

$$\begin{aligned} E_{OFF} &= \int_0^{T_{OFF}} V_i I_i dt = \int_0^{T_{OFF}} V_i \left( I_P - \frac{I_P - I_B}{T_{OFF}} t \right) dt = V_i T_{OFF} \frac{I_P + I_B}{2} \\ &= \frac{1}{2} V_i (I_P + I_B) T - \frac{1}{2} L (I_P^2 - I_B^2) \quad \because \frac{V_i}{L} = \frac{I_P - I_B}{T_{ON}}, T_{OFF} = T - T_{ON} \end{aligned}$$

$T_{ON}$ と $T_{OFF}$ 間に電源から供給されるエネルギー (入力エネルギー)

$$\begin{aligned} E_{IN} &= E_{ON} + E_{OFF} \\ &= \frac{1}{2} V_i (I_P + I_B) T \end{aligned}$$

$E_{IN}$ が $T$ の間に負荷側で消費されるとすると、その消費電力は

$$P_o = V_o I_o = \frac{1}{2} V_i (I_P + I_B)$$

# 連続モードの解析3

## (出力電圧とピーク電流)

$T_{ON}$ 時と $T_{OFF}$ 時の下記の関係から

$$T_{ON}\text{時} : \frac{V_i}{L} = \frac{I_P - I_B}{T_{ON}}, \quad T_{OFF}\text{時} : \frac{V_o - V_i}{L} = \frac{I_P - I_B}{T_{OFF}}$$

$V_o$ は、以下で表される。

$$V_o = \left(1 + \frac{T_{ON}}{T_{OFF}}\right) V_i = \frac{1}{1-D} V_i \quad \Rightarrow \text{臨界モードの場合と同じ}$$

$I_P$ と $I_B$ は、上記 $T_{ON}$ 時の関係式と $P_o = V_i(I_P + I_B)/2$ から、以下で表される。

$$I_P = \frac{P_o}{V_i} + \frac{V_i}{2L} T_{ON}, \quad I_B = \frac{P_o}{V_i} - \frac{V_i}{2L} T_{ON}$$



# 主なエネルギー損失

- SW Trの $R_{ON}$ による損失
- SW Trのゲートへの充放電による損失
- SW Trのターンオフ時のもれ電流による損失
- SW Trのターンオン時のもれ電流による損失
- ミラーTrの消費電力による損失
- ダイオードの順方向消費電力による損失
- コイルの内部抵抗による損失

# $R_{ON}$ の導出

$V_{DS}$ の低いMOSFETの線型領域において、 $I_{DS}$ は

$$I_{DS} = \frac{\beta_0}{1 + \theta_{eff} (V_{GS} - V_t)} (V_{GS} - V_t) V_{DS}$$

$$\beta_0 = \mu_0 C_{ox} \frac{W}{L}$$

$$\theta_{eff} = \theta_0 + \beta_0 (R_D + R_S)$$

となる。上式から $R_{ON}$ は以下になる。

$$R_{ON} = \frac{V_{DS}}{I_{DS}} = \frac{1 + \theta_{eff} (V_{GS} - V_t)}{\beta_0 (V_{GS} - V_t)}$$

# $R_D$ と $R_S$ がある場合の電流式

$R_D$ と $R_S$ がある場合、 $I_{DS}$ は $V_{DS}$ の低い線型領域において以下になる。

$$I_{DS} = \frac{\beta_0}{1 + \theta_0(V_{gs} - V_t)} (V_{gs} - V_t) V_{ds}$$

$$V_{gs} = V_{GS} - I_{DS} R_S \cong V_{GS}, \quad V_{ds} = V_{DS} - I_{DS} (R_D + R_S)$$

上記近似は、ドレイン側のみドリフト層のある高耐圧Trでは成立する。 $V_{gs}$ と $V_{ds}$ を $I_{DS}$ の式に代入して整理すると、

$$\frac{I_{DS}}{V_{DS}} = \frac{\beta_0 (V_{GS} - V_t)}{1 + \theta_0 (V_{GS} - V_t) + \beta_0 (R_D + R_S) (V_{GS} - V_t)}$$

$$\Rightarrow I_{DS} = \frac{\beta_0 (V_{GS} - V_t) V_{DS}}{1 + [\theta_0 + \beta_0 (R_D + R_S)] (V_{GS} - V_t)} = \frac{\beta_0 (V_{GS} - V_t) V_{DS}}{1 + \theta_{eff} (V_{GS} - V_t)}$$

# SW Trの $R_{ON}$ とゲート容量による消費電力

$T_{ON}$ 時 $R_{ON}$ による消費電力 $P_{RON}$

不連続と臨界モードの場合

$$P_{RON} = \frac{R_{ON}}{T} \int_0^{T_{ON}} \left( \frac{I_P}{T_{ON}} t \right)^2 dt = \frac{1}{3} R_{ON} I_P^2 D \quad \because D = \frac{T_{ON}}{T}$$

連続モードの場合

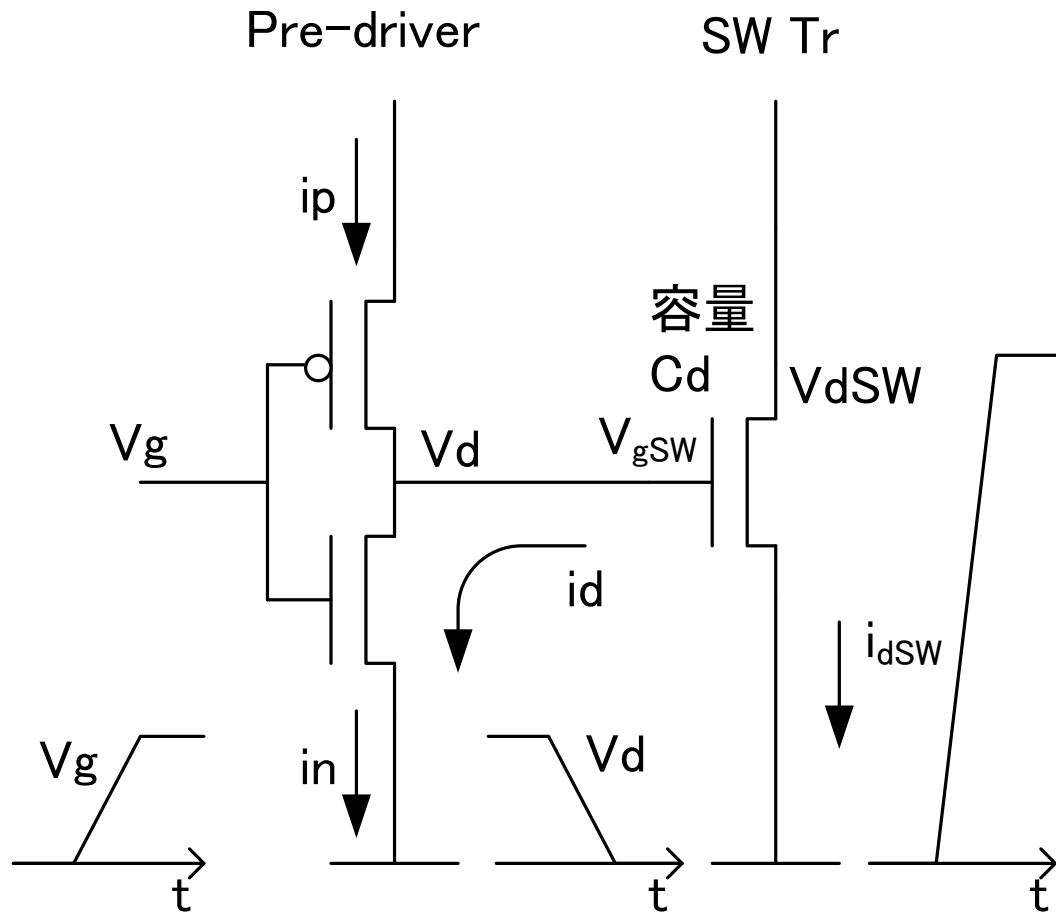
$$P_{RON} = \frac{R_{ON}}{T} \int_0^{T_{ON}} \left( I_B + \frac{I_P - I_B}{T_{ON}} t \right)^2 dt = \frac{1}{3} R_{ON} (I_P^2 + I_P I_B + I_B^2) D$$

SWTrのゲートの充放電による消費電力 $P_{GC}$

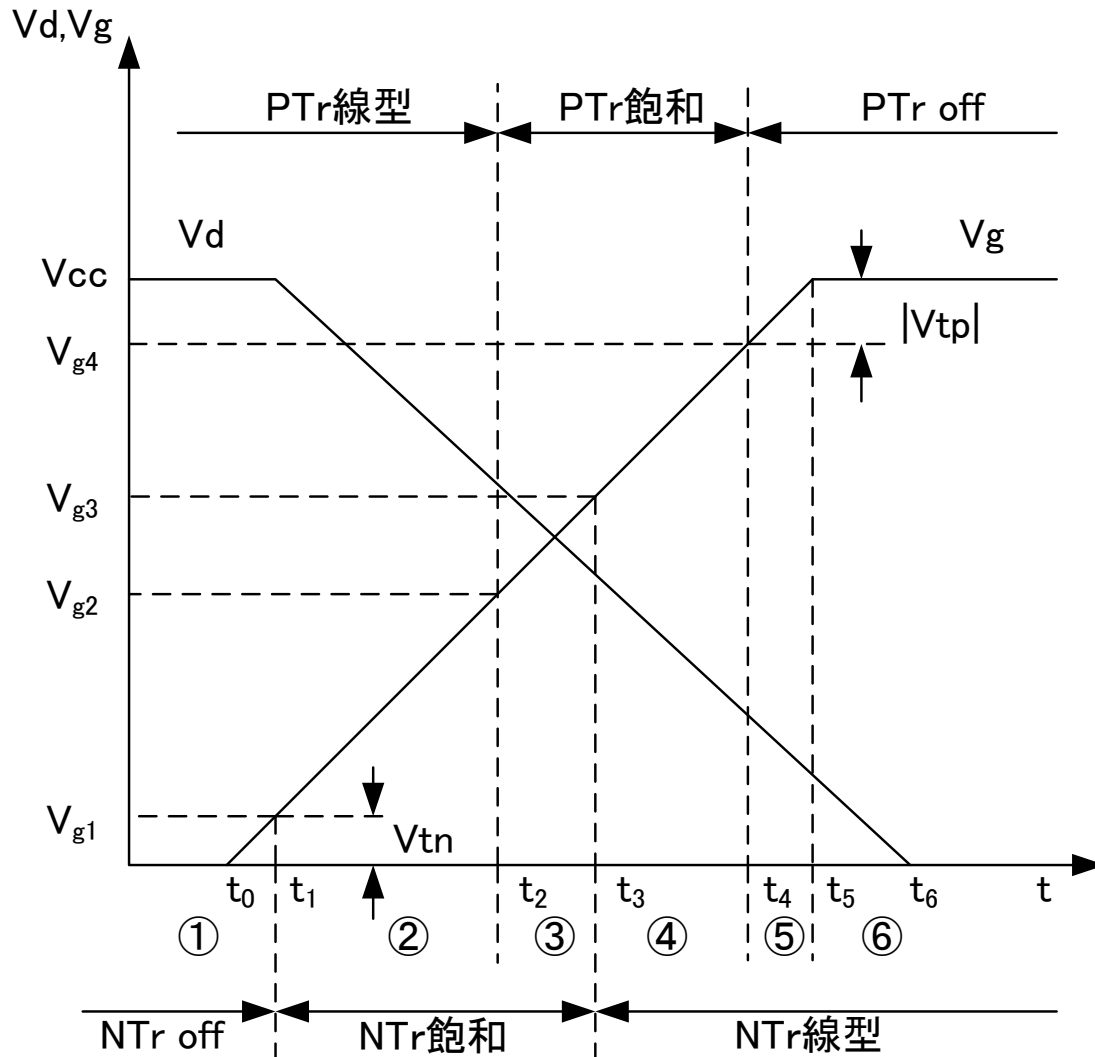
$$\text{充電または放電時} \rightarrow P_{GC} = \frac{1}{2T} C_d V_d^2 \quad \text{充電と放電の合計} \rightarrow P_{GC} = \frac{1}{T} C_d V_d^2$$

(注)この電力はSWTrを駆動するPre-Driverのオン抵抗で消費される

# SW Trターンオフ時の回路



# プリドライバTrの入出力電圧



	NTr	PTr
①	OFF	線型
②	飽和	線型
③	飽和	飽和
④	線型	飽和
⑤	線型	OFF
⑥	線型	OFF

# SW Trターンオフ時の消費電力導出概要

- 近似
  - SWTrのゲート容量 $C_d$ の電荷はプルトライバ- $n$ -chTrのみのONにより放電 (p-chTr:OFF)
- プルトライバ- $n$ -chTrの飽和電圧 $V_{dsat}$ を導出
  - 3次方程式から導出
- プルトライバ- $n$ -chTrのゲート電圧の時間変化(線型)に対するドレイン電圧 $V_d$ の変化導出
  - 飽和領域 $\Rightarrow$ 線型領域 ( $V_{dsat}$ で場合分け)
- SWTrのゲート電圧 $V_{gsw}$  ( $=V_d$ ) の時間変化に対するドレイン電圧 $V_{dsw}$ の変化導出
  - 線型領域 $\Rightarrow$ 飽和領域 (SWTr飽和電圧で場合分け)
- SWTrの線型領域から飽和領域までのエネルギー-累積

# SW Trターンオフ時の消費電力1(1)

## —プリドライバ—n-chTrの $V_{dsat}$ 導出1—

簡単化して、プリドライバのn-chTrのみの動作を考慮する。

$V_g: 0 \Rightarrow V_{cc}$  Tr動作領域：飽和 $\Rightarrow$ 線型

飽和電圧 $V_{dsat}$ を求める。

$$V_g = at$$

$$i_n = i_d = \frac{\beta}{2\alpha} (V_g - V_t)^2 = -C_d \frac{dV_d}{dt}, \quad \alpha = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2}\phi_F}, \quad \beta = \mu C_{ox} \frac{W}{L}$$

$\Rightarrow$

$$-\int_{V_{cc}}^{V_{dsat}} C_d dV_d = \int_{t_1}^{t_3} \frac{\beta}{2\alpha} (V_g - V_t)^2 dt = \int_{V_t}^{V_{g3}} \frac{\beta}{2\alpha a} (V_g - V_t)^2 dV_g$$

$$C_d (V_{cc} - V_{dsat}) = \frac{\beta}{6\alpha a} (V_{g3} - V_t)^3$$

$$C_d (V_{cc} - V_{dsat}) = \frac{\alpha^2 \beta}{6a} V_{dsat}^3 \quad \because \text{飽和条件 } V_{dsat} = \frac{V_{g3} - V_t}{\alpha} \quad 24$$



# SW Trターンオフ時の消費電力1(2)

## —ブロードライバ—n-chTrの $V_{dsat}$ 導出2—

$V_{dsat}$ に関する式は、以下の3次方程式になる。

$$V_{dsat}^3 + \frac{6aC_d}{\alpha^2\beta} V_{dsat} - \frac{6aC_d}{\alpha^2\beta} V_{cc} = 0$$

3次方程式を解いて $V_{dsat}$ は以下の如くになる。

$$V_{dsat} = -y - z$$

$$y = \sqrt[3]{\frac{q \pm \sqrt{q^2 + \frac{4}{27} p^3}}{2}}, \quad z = \sqrt[3]{\frac{q \mp \sqrt{q^2 + \frac{4}{27} p^3}}{2}}$$

$$p = \frac{6aC_d}{\alpha^2\beta}, \quad q = -\frac{6aC_d}{\alpha^2\beta} V_{cc}$$

# SW Trターンオフ時の消費電力2(1)

—ブリドライバ—n-chTrのゲートとドレイン電圧時間変化—

$$V_t < V_g \leq V_{g3} (= \alpha V_{dsat} + V_t): \text{飽和領域}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_g = at \quad \Rightarrow a: \text{定数} (V_g: \text{ゲート電圧線型変化}) \\ i_n = \frac{\beta}{2\alpha} (V_g - V_t)^2 \quad \Rightarrow \text{飽和領域での電流} \end{array} \right.$$

$$V_{g,0} = V_t, \quad Q_{d,0} = 0, \quad V_{d,0} = V_{cc} \quad \Rightarrow \text{初期値}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{g,l+1} = V_{g,l} + a\Delta t \\ Q_{d,l+1} = Q_{d,l} + \frac{i_{n,l+1} + i_{n,l}}{2} \Delta t \quad \Rightarrow \text{SWTr ゲート放電電荷} \\ V_{d,l+1} = V_{d,0} - Q_{d,l+1} / C_d \quad l = 0, 1, 2, \dots, l_s \end{array} \right.$$

# SW Trターンオフ時の消費電力2(2)

—フリドライバ—n-chTrのゲートとドレイン電圧時間変化—

$$V_{g3} < V_g \leq V_{cc} : \text{線型領域}$$

$$i_n = \beta \left[ (V_g - V_t) V_d - \frac{\alpha}{2} V_d^2 \right] \Rightarrow \text{線型領域での電流}$$

$$V_{g,0} = V_{g3} = V_{g,l_s+1}, \quad Q_{d,0} = Q_{d,l_s+1}, \quad V_{d,0} = V_{d,l_s+1} \Rightarrow \text{初期値}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{g,m+1} = V_{g,m} + a\Delta t \\ Q_{d,m+1} = Q_{d,m} + \frac{i_{n,m+1} + i_{n,m}}{2} \Delta t \\ V_{d,m+1} = V_{d,0} - Q_{d,m+1} / C_d \end{array} \right. \Rightarrow \text{SWT r ゲート放電電流} \quad m = 0, 1, 2, \dots, m_l$$

# SW Trターンオフ時の消費電力3(1)

—SWTr ON時の回路方程式とSWTr線型領域の電流式—

SWTr がON時の回路方程式は以下になる。

$$L \frac{di_{dSW,n}}{dt} + V_{dSW,n} = V_i$$

$$\Rightarrow \frac{di_{dSW,n}}{dt} = \frac{1}{L} (V_i - V_{dSW,n}), \quad n = 0, 1, 2, \dots, n_l$$

線型領域でのSWTr のドレイン電圧 $V_{dSW}$ は以下になる。

$$i_{dSW,n} = \beta_{SW} \left[ (V_{gSW,n} - V_t) V_{dSW,n} - \frac{\alpha}{2} V_{dSW,n}^2 \right], \quad \beta_{SW} = \frac{\mu C_{ox} W}{L} : \text{SWTr}$$

$$\Rightarrow V_{dSW,n} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{2(V_{gSW,n} - V_t)}{\alpha} - \sqrt{\left[ \frac{2(V_{gSW,n} - V_t)}{\alpha} \right]^2 - \frac{8i_{dSW,n}}{\alpha\beta_{SW}}} \right\}$$

# SW Trターンオフ時の消費電力3(2)

## —SWTr線型領域の消費エネルギー—

ゲート電圧とドレイン電流の初期値

$$V_{gSW,0} = V_{d,0} = V_{cc}, \quad i_{dSW,0} = I_P \quad \Rightarrow V_{dSW,0} \Rightarrow \frac{di_{dSW,0}}{dt}$$

時間ステップ $\Delta t$ 後のドレイン電流を求める。

$$i_{dSW,n+1} = i_{dSW,n} + \frac{di_{dSW,n}}{dt} \Delta t, \quad n = 0, 1, 2, \dots, n_l$$

$V_{gSW,n+1} (= V_{d,n})$  と  $i_{dSW,n+1}$  から  $V_{dSW,n+1}$  を求める。

$\Delta t$ 後の累積消費エネルギーは、以下になる。

$$E_{SWOFF,n+1} = E_{SWOFF,n} + i_{dSW,n+1} V_{dSW,n+1} \Delta t, \quad (E_{SWOFF,0} = 0)$$

# SW Trターンオフ時の消費電力3(3)

—SWTr飽和領域の電流式とドレイン電圧の近似—

SWTrの飽和領域  $(V_{gSW} - V_t)/\alpha = V_{dsatSW} \leq V_{dSW}$  の

ドレイン電流  $i_{dSW}$  は以下になる。

$$i_{dSW,m} = \frac{\beta_{SW}}{2\alpha} (V_{gSW,m} - V_t)^2, \quad m = 0, 1, 2, \dots, m_s$$

初期値  $i_{dSW,0}$  は  $V_{gSW,m} \Rightarrow V_{gSW,n_l+1}$  の場合である。

$V_{gSW,m} > V_{gSW,m+1}$  であるから、 $i_{dSW,m} > i_{dSW,m+1}$

$$\Rightarrow \frac{di_{dSW}}{dt} < 0 \quad (\text{コイルにかかる起電力が逆転})$$

$$\Rightarrow V_{dSW,m+1} \approx V_o \quad \text{で近似}$$

# SW Trターンオフ時の消費電力3(4)

—SWTr線型領域から飽和領域の消費エネルギー—

SWTrの線型領域から飽和領域までの  
 $\Delta t$ 毎の累積消費エネルギーは以下になる。

$$E_{SWOFF,0} = E_{SWOFF,n_l+1},$$

$$E_{SWOFF,m+1} = E_{SWOFF,m} + i_{dSW,m+1} V_o \Delta t \quad m = 0, 1, 2, \dots, m_s$$

SWTrが充分ターンオフするまで累積を取ると、

$E_{SWOFF,m_s+1}$ はターンオフ時の消費エネルギーになる。

この場合の消費電力は以下になる。

$$P_{SWOFF} = \frac{E_{SWOFF,m_s+1}}{T}$$

# ミラーTr消費電力

一列のLEDを流れる電流を $I_{LED}$ とすると、  
ミラーTrのゲート電圧は以下となる。

$$V_{gMR} = \sqrt{\frac{2\alpha I_{LED}}{\beta_{MR}}} + V_t,$$

$$\therefore I_{LED} = I_{MR} = \frac{\beta_{MR}}{2\alpha} (V_{gMR} - V_t)^2, \quad \beta_{MR} = \frac{\mu C_{ox} W}{L} : \text{ミラーTr}$$

この場合の飽和電圧 $V_{dsat}$ は、以下で表される。

$$V_{dsat} = \frac{V_{gMR} - V_t}{\alpha}$$

したがって、ミラーTrの消費電力 $P_{MR}$ は、以下となる。

$$P_{MR} = I_{LED} V_{dsat} \quad \Rightarrow \quad P_{TMR} = m I_{LED} V_{dsat} \quad (m \text{列のLED})$$



# コイル内部抵抗の消費電力1 (不連続モード)

不連続モードの場合

$T_{ON}$ 時SWTrの $R_{ON}$ による消費電力と同様に以下になる。

$$P_{COIL,ON} = \frac{R_{COIL}}{T} \int_0^{T_{ON}} \left( \frac{I_P}{T_{ON}} t \right)^2 dt = \frac{1}{3} R_{COIL} I_P^2 D \quad \because D = \frac{T_{ON}}{T}$$

$T_{OFF}$ 時

$$P_{COIL,OFF} = \frac{R_{COIL}}{T} \int_0^{T_F} \left[ \frac{I_P}{T_F} (T_F - t) \right]^2 dt = \frac{1}{3} R_{COIL} I_P^2 \frac{V_i}{V_o - V_i} D$$

$T$ の期間での消費電力は、以下で表される。

$$P_{COIL} = P_{COIL,ON} + P_{COIL,OFF} = \frac{1}{3} R_{COIL} I_P^2 \frac{V_o}{V_o - V_i} D$$

# コイル内部抵抗の消費電力2 (臨界モード)

臨界モードの場合

$T_{ON}$ 時SWTrの $R_{ON}$ による消費電力と同様に以下になる。

$$P_{COIL,ON} = \frac{R_{COIL}}{T} \int_0^{T_{ON}} \left( \frac{I_P}{T_{ON}} t \right)^2 dt = \frac{1}{3} R_{COIL} I_P^2 D \quad \because D = \frac{T_{ON}}{T}$$

$T_{OFF}$ 時

$$P_{COIL,OFF} = \frac{R_{COIL}}{T} \int_0^{T_{OFF}} \left[ \frac{I_P}{T_{OFF}} (T_{OFF} - t) \right]^2 dt = \frac{1}{3} R_{COIL} I_P^2 (1 - D)$$

$T$ の期間での消費電力は、以下で表される。

$$P_{COIL} = P_{COIL,ON} + P_{COIL,OFF} = \frac{1}{3} R_{COIL} I_P^2$$

# コイル内部抵抗の消費電力3

## (連続モード)

連続モードの場合

$T_{ON}$ 時 $R_{COIL}$ による消費電力 $P_{COIL,ON}$

$$P_{COIL,ON} = \frac{R_{COIL}}{T} \int_0^{T_{ON}} \left( I_B + \frac{I_P - I_B}{T_{ON}} t \right)^2 dt = \frac{1}{3} R_{COIL} (I_P^2 + I_P I_B + I_B^2) D$$

$T_{OFF}$ 時 $R_{COIL}$ による消費電力 $P_{COIL,OFF}$

$$P_{COIL,OFF} = \frac{R_{COIL}}{T} \int_0^{T_{OFF}} \left[ I_B + \frac{I_P - I_B}{T_{OFF}} (T_{OFF} - t) \right]^2 dt$$
$$= \frac{1}{3} R_{COIL} (I_P^2 + I_P I_B + I_B^2) (1 - D)$$

$T$ の期間での消費電力は、以下で表される。

$$P_{COIL} = P_{COIL,ON} + P_{COIL,OFF} = \frac{1}{3} R_{COIL} (I_P^2 + I_P I_B + I_B^2)$$

# ダイオードの消費電力

ダイオードの消費電力は、順方向の電圧降下 $V_F$ を一定とし、LED全体 ( $m$ 列) を流れる電流を $mI_{LED}$ とすると、

$$P_D = mI_{LED}V_F$$

で表される。

上記 $P_D$ は、各モード（不連続、臨界、連続）でダイオードを流れる電流に $V_F$ を掛け、それを時間積分して得られる結果と同じになる。

# 効率

全体の効率 $\eta_T$ は、以下で表される。

$$\eta_T = \frac{P_o}{P_{in}} \cong \frac{P_o}{P_o + P_{RON} + P_{GC} + P_{SWOFF} + P_{SWON} + P_{TMR} + P_D + P_{COIL} + P_{CTL}}$$

$P_{in}$ : 入力電力

$P_o$ : 出力部の負荷 (LED) による消費電力

$P_{RON}$ : SWTrの $R_{ON}$ による消費電力

$P_{GC}$ : SWTrのゲート容量による消費電力

$P_{SWOFF}$ : SWTrのターンオフ時の漏れ電流による消費電力

$P_{SWON}$ : SWTrのターンオン時の漏れ電流による消費電力

$P_{TMR}$ : 全ミラーTrによる消費電力

$P_D$ : ダイオードによる消費電力

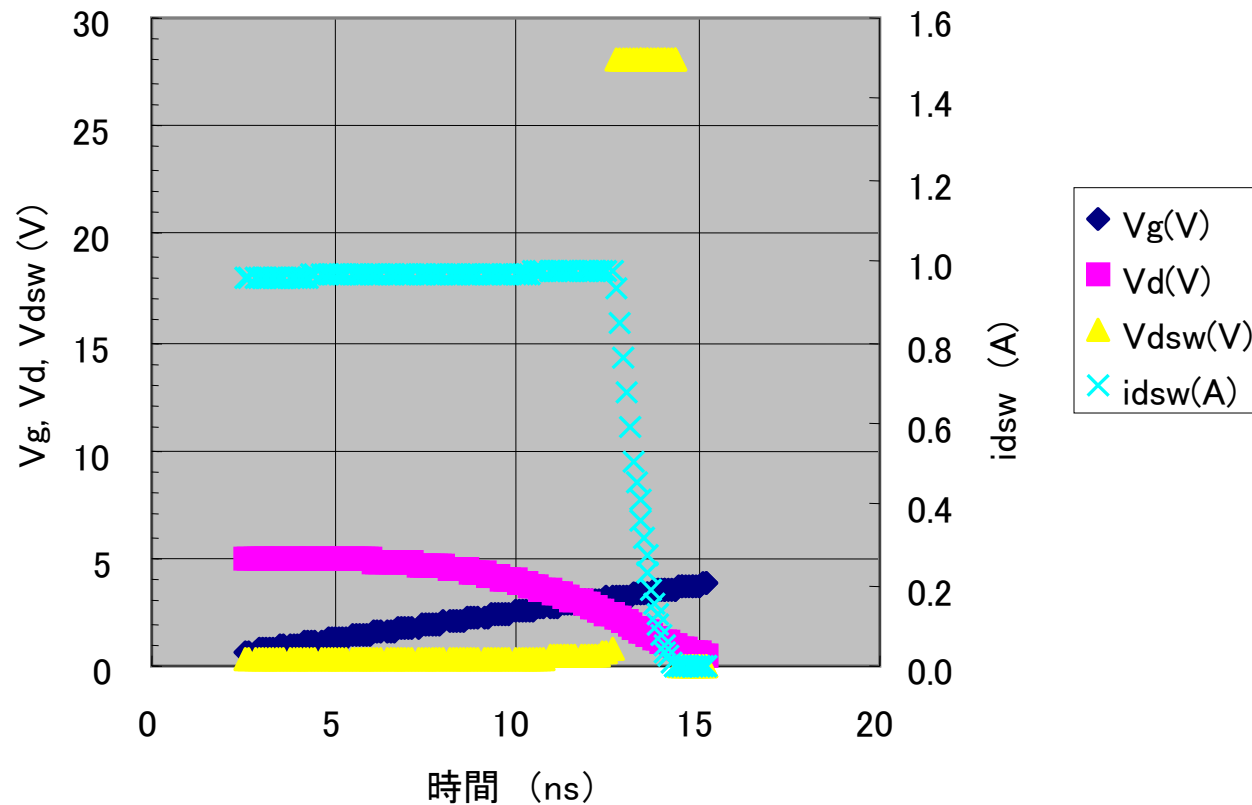
$P_{COIL}$ : コイルの内部抵抗による消費電力

$P_{CTL}$ : 制御部での消費電力

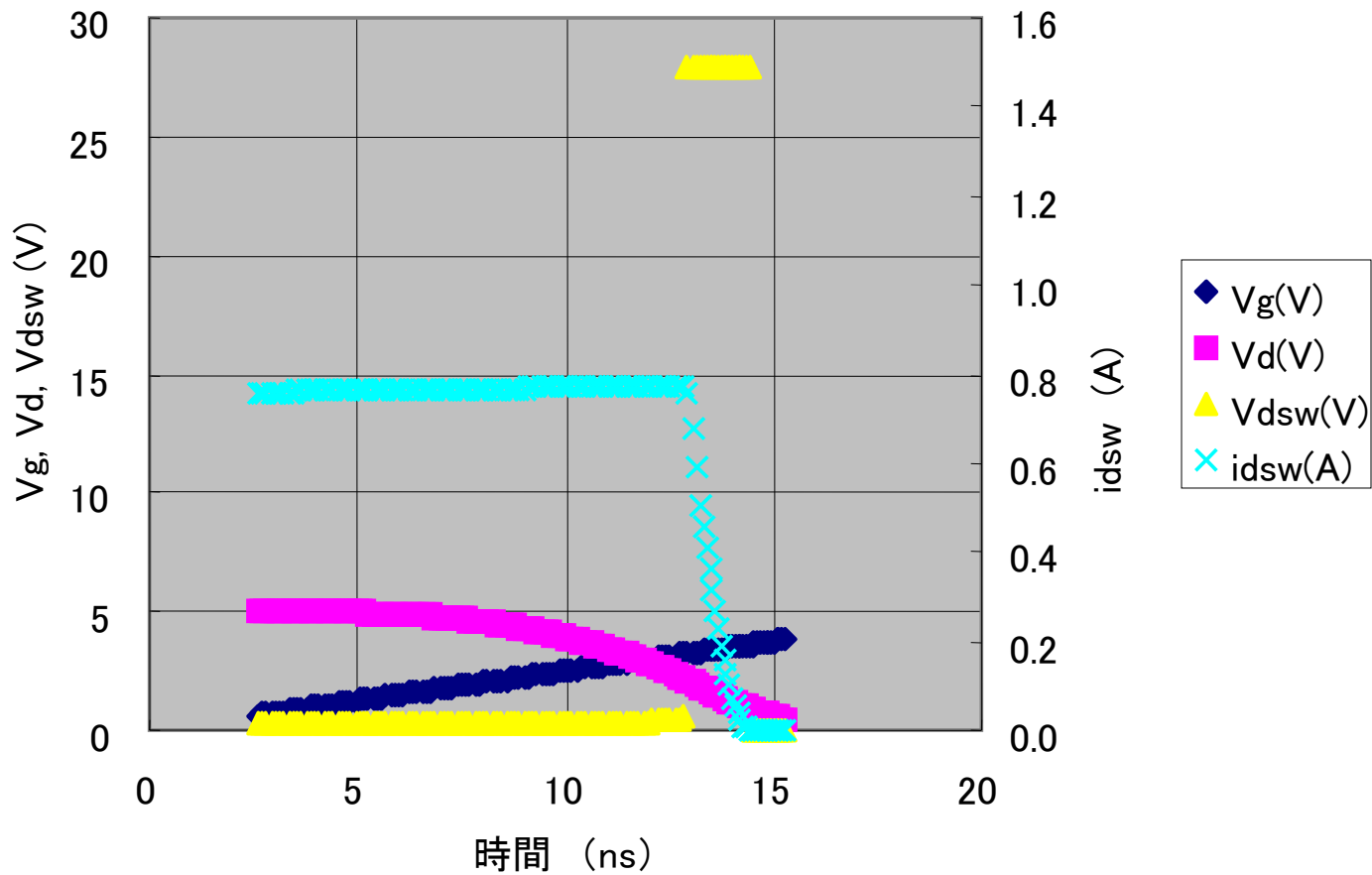
# エネルギー効率計算手順概要

- 出力の消費電力算出
  - LEDの場合: LEDの数(並列×直列)
    - 出力電流×出力電圧=負荷側(出力)の消費電力
- 臨界モードの周波数算出
  - Lの入力⇒fcrの算出
- 各特性の周波数依存性の抽出
  - $f < f_{cr}$ : 不連続、 $f = f_{cr}$ : 臨界、 $f > f_{cr}$ : 連続
  - デューティ比、ピーク電流
  - エネルギー損失の抽出
  - エネルギー効率の計算

# 臨界時の各特性の時間変化

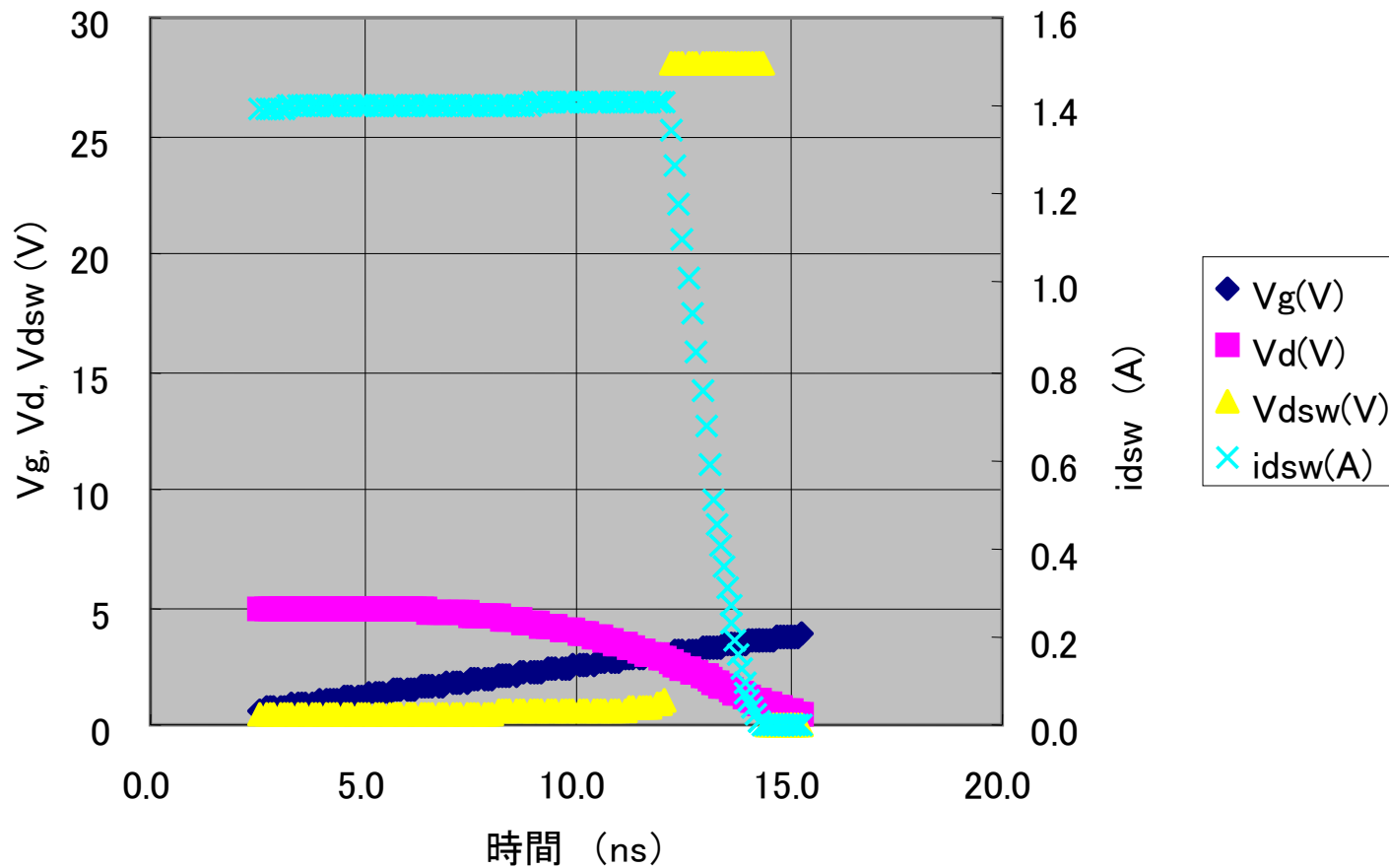


# 連続時の各特性の時間変化

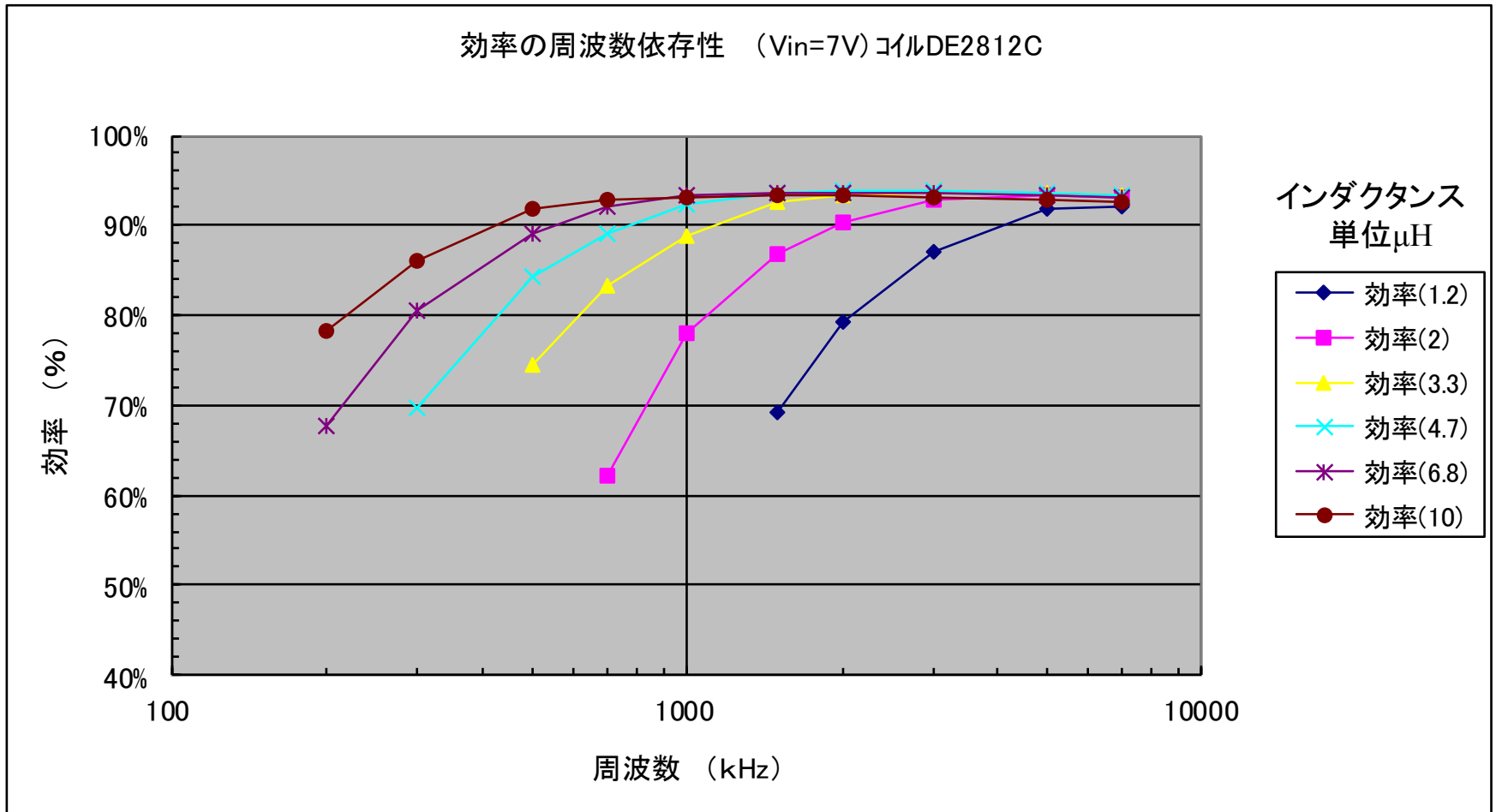




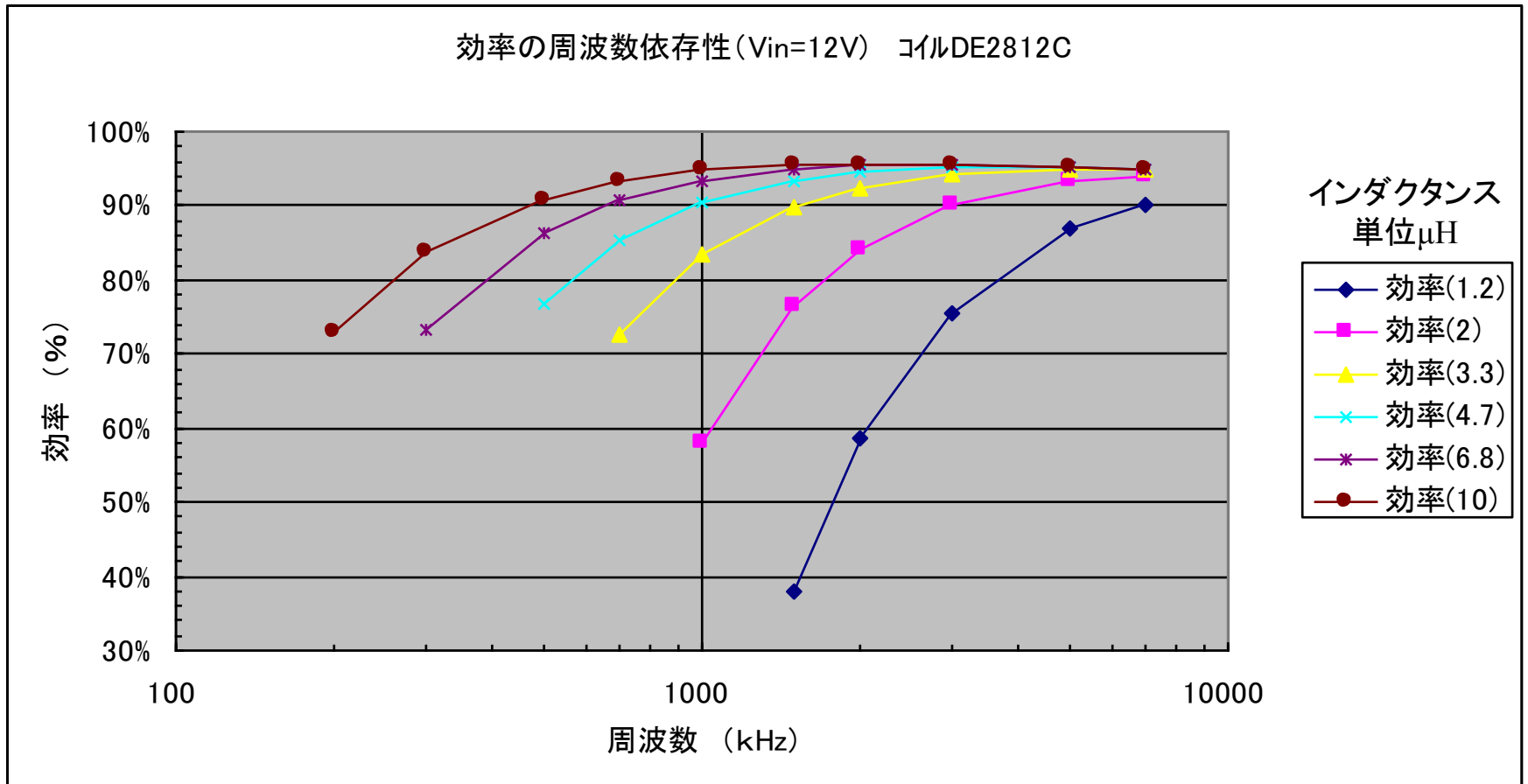
# 不連続時の各特性の時間変化



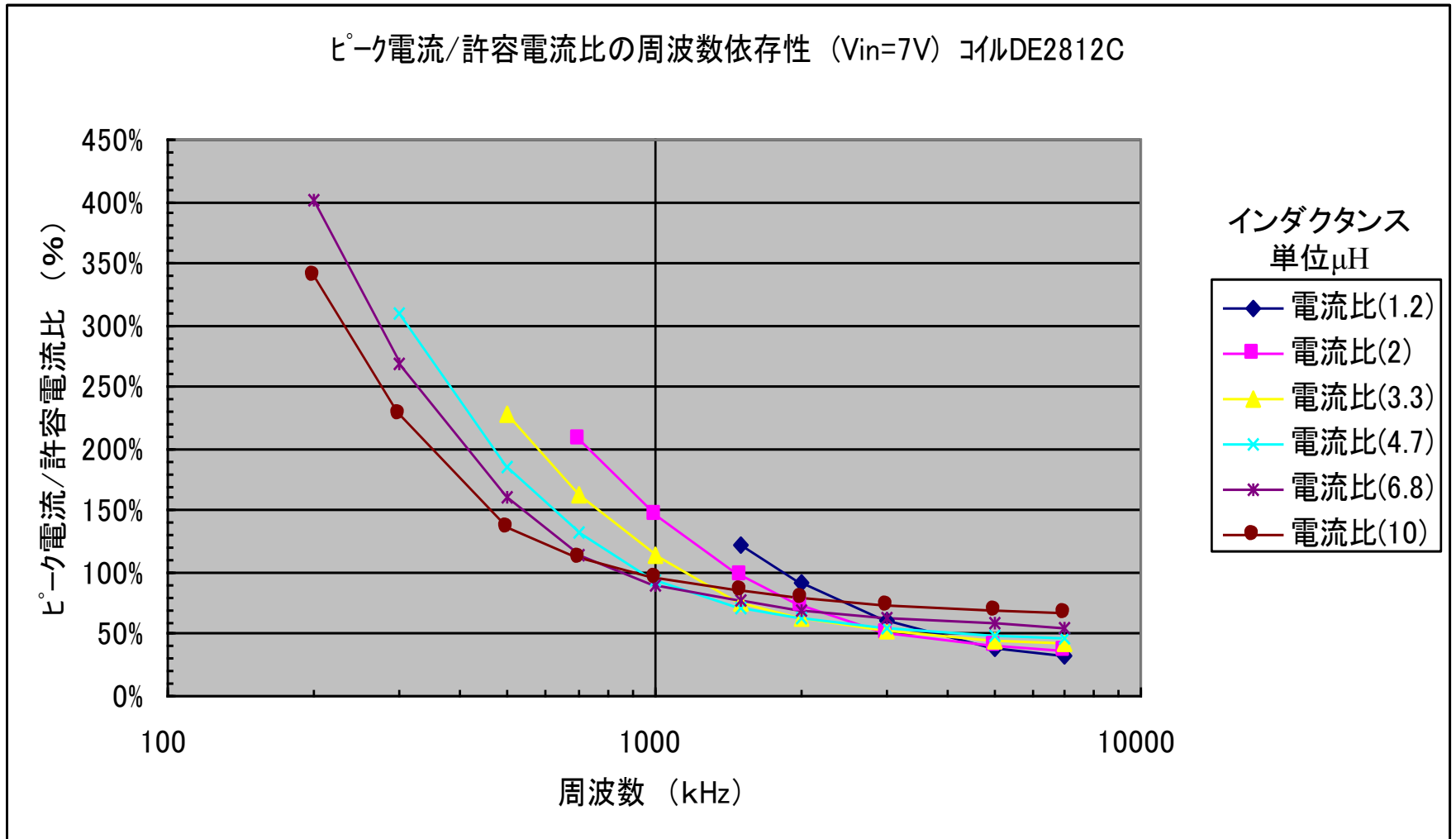
# 効率の周波数依存性



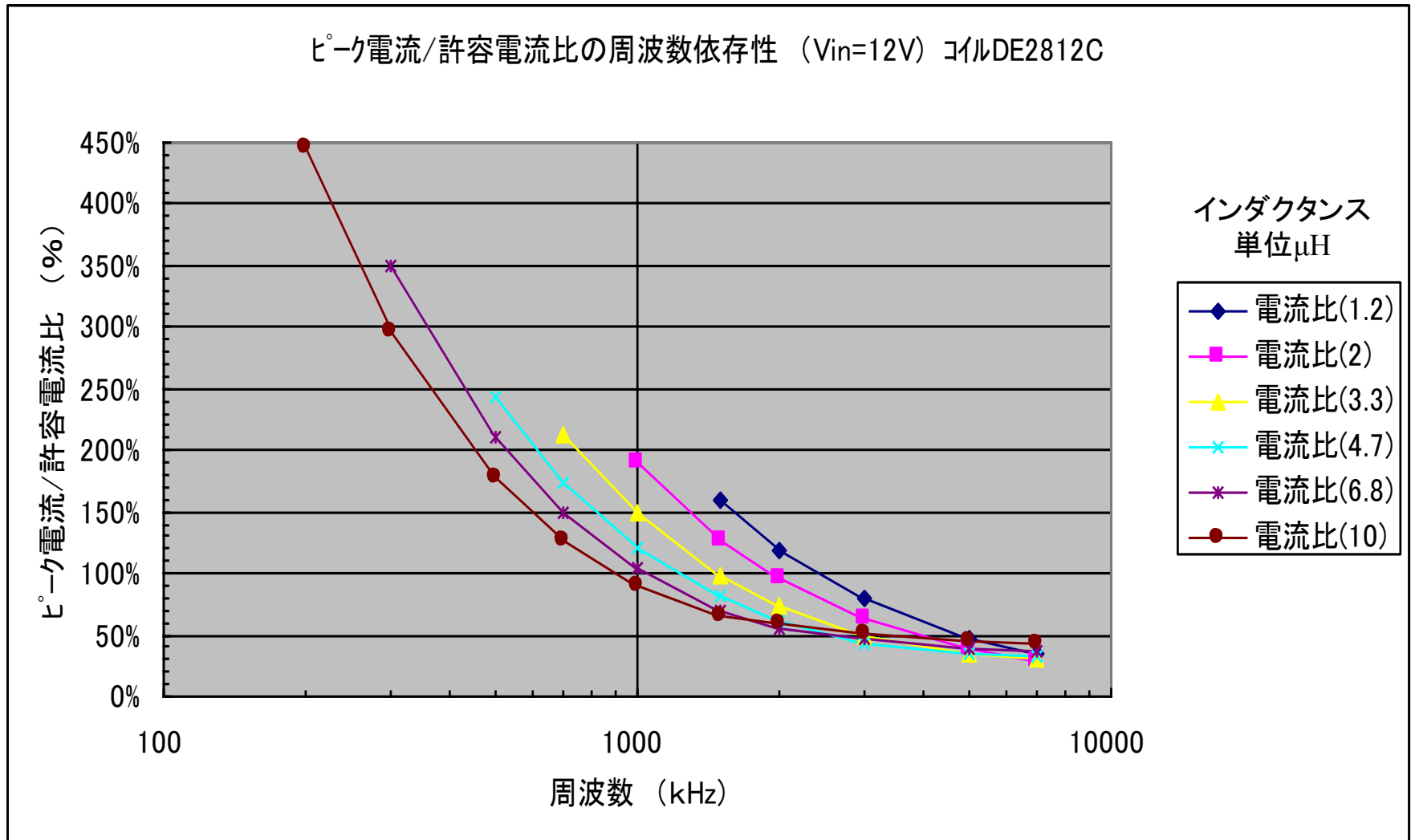
# 効率の周波数依存性



# ピーク電流/許容電流比の周波数依存性

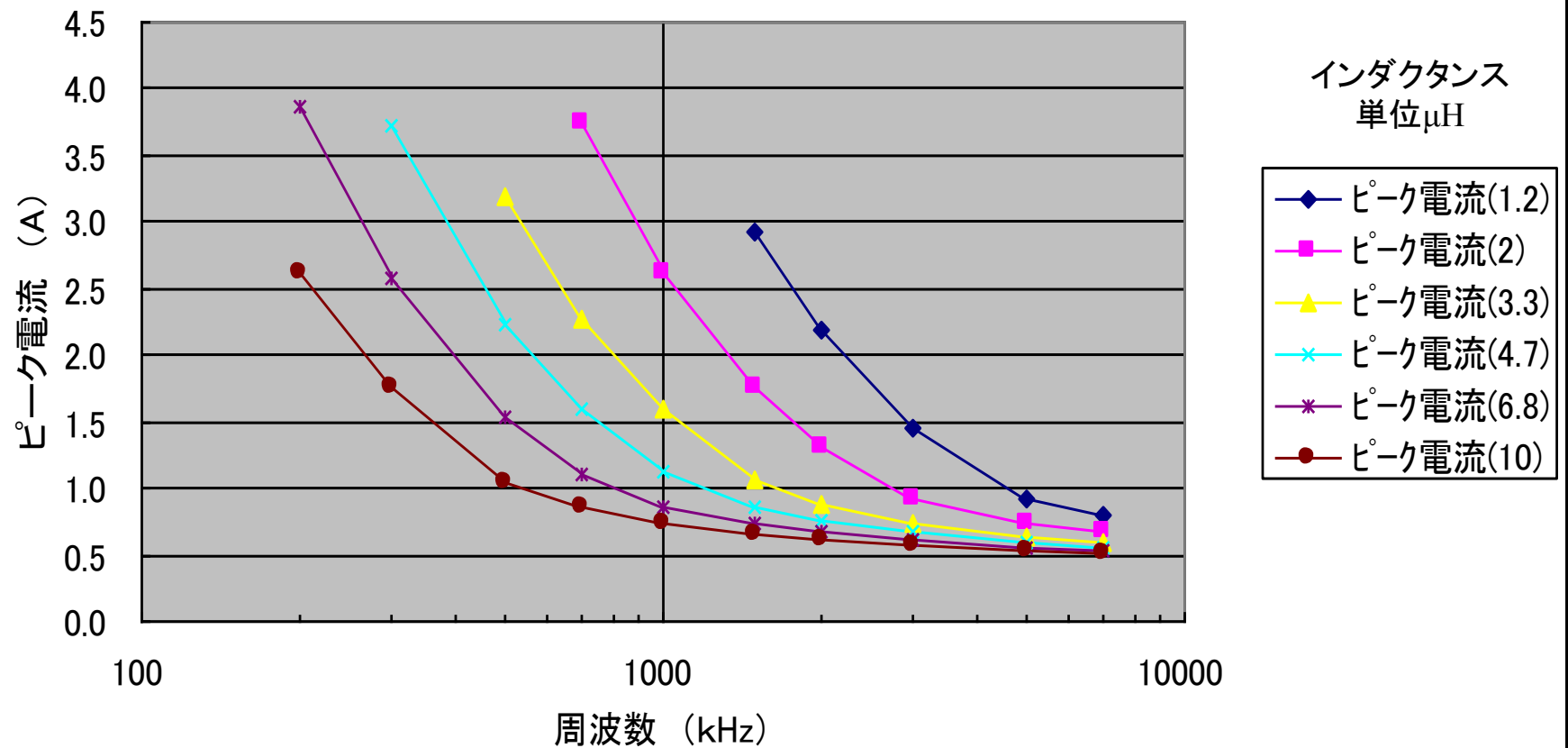


# ピーク電流/許容電流比の周波数依存性

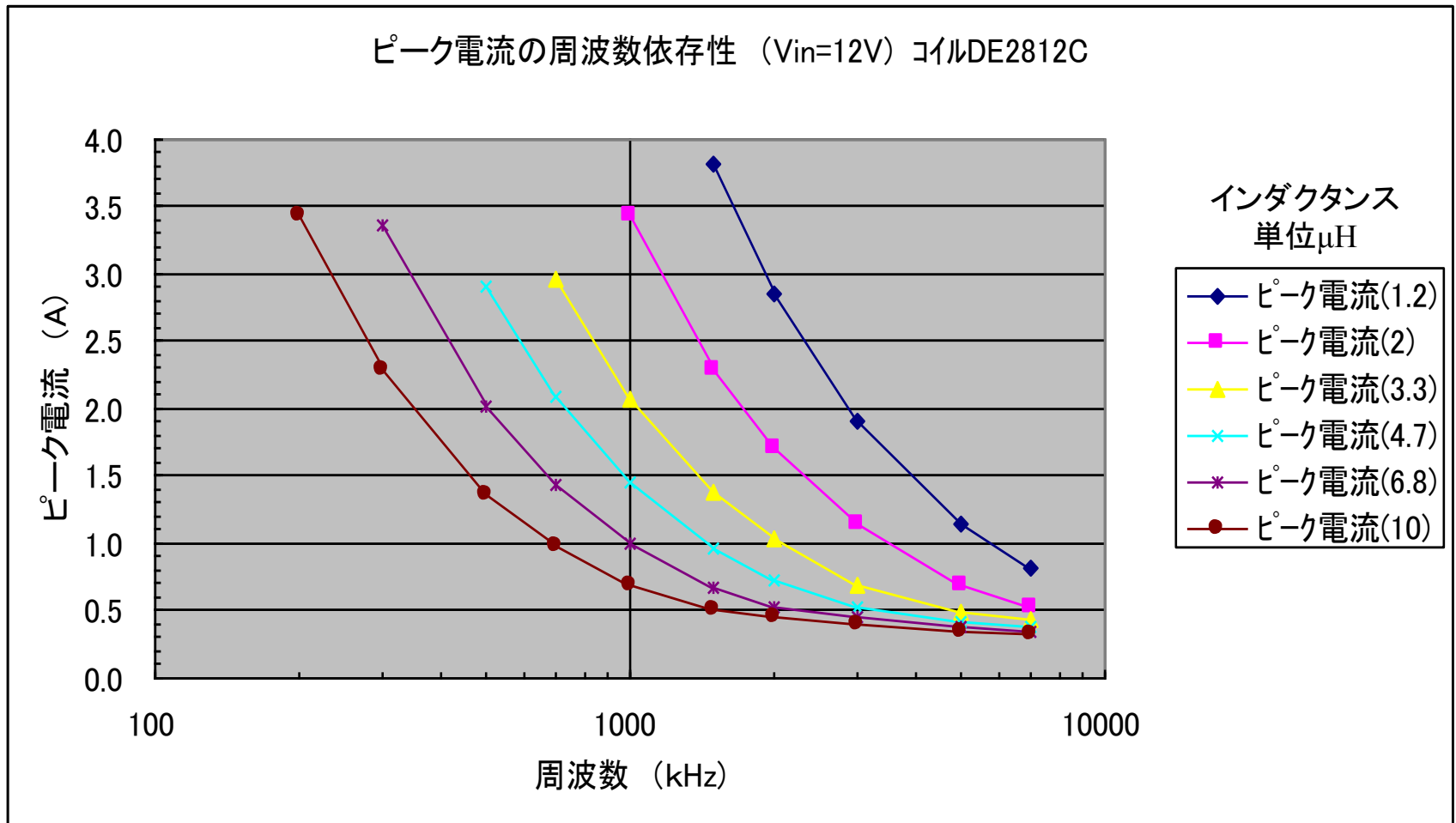


# ピーク電流の周波数依存性

ピーク電流の周波数依存性 (Vin=7V) コイルDE2812C

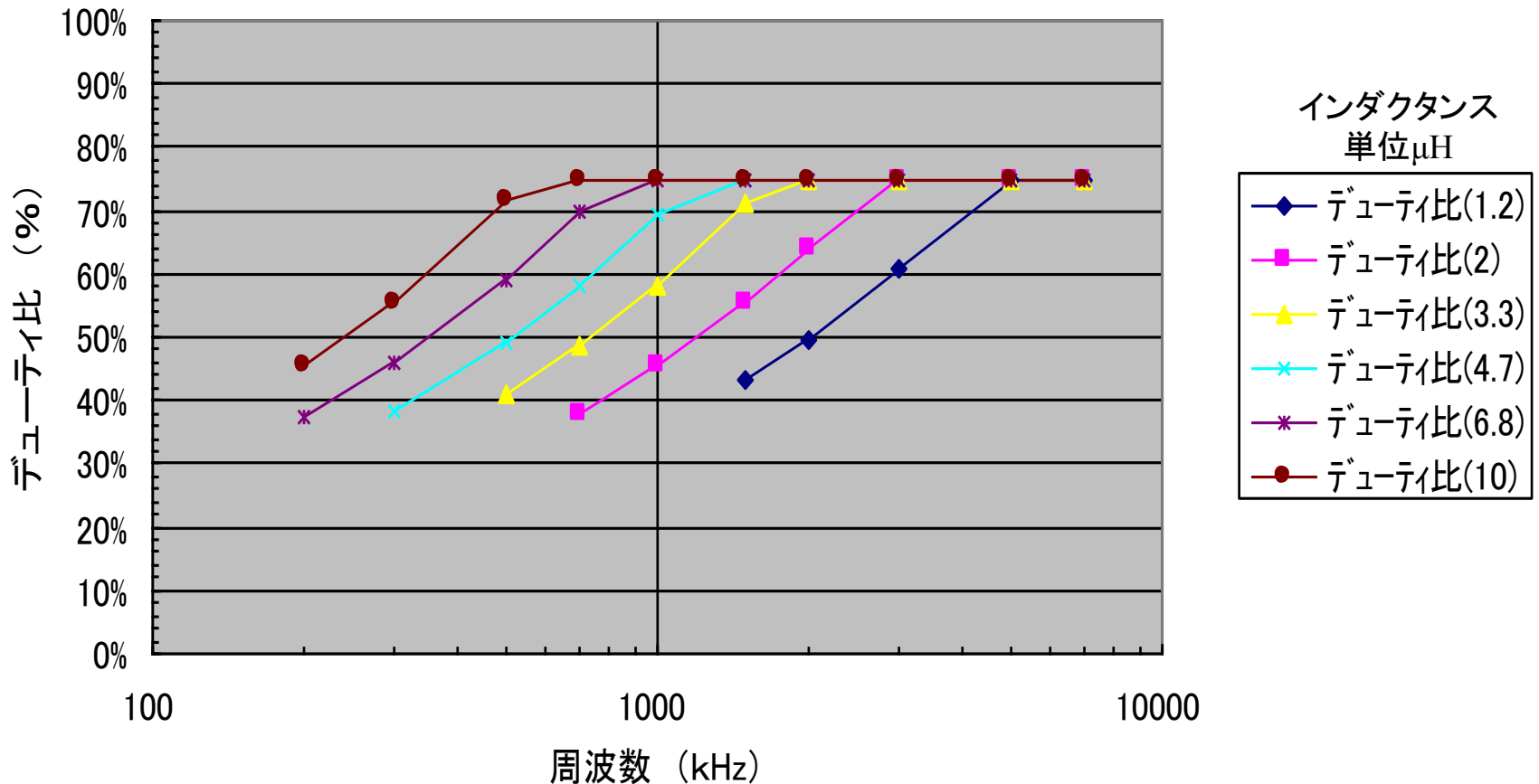


# ピーク電流の周波数依存性



# デューティ比の周波数依存性

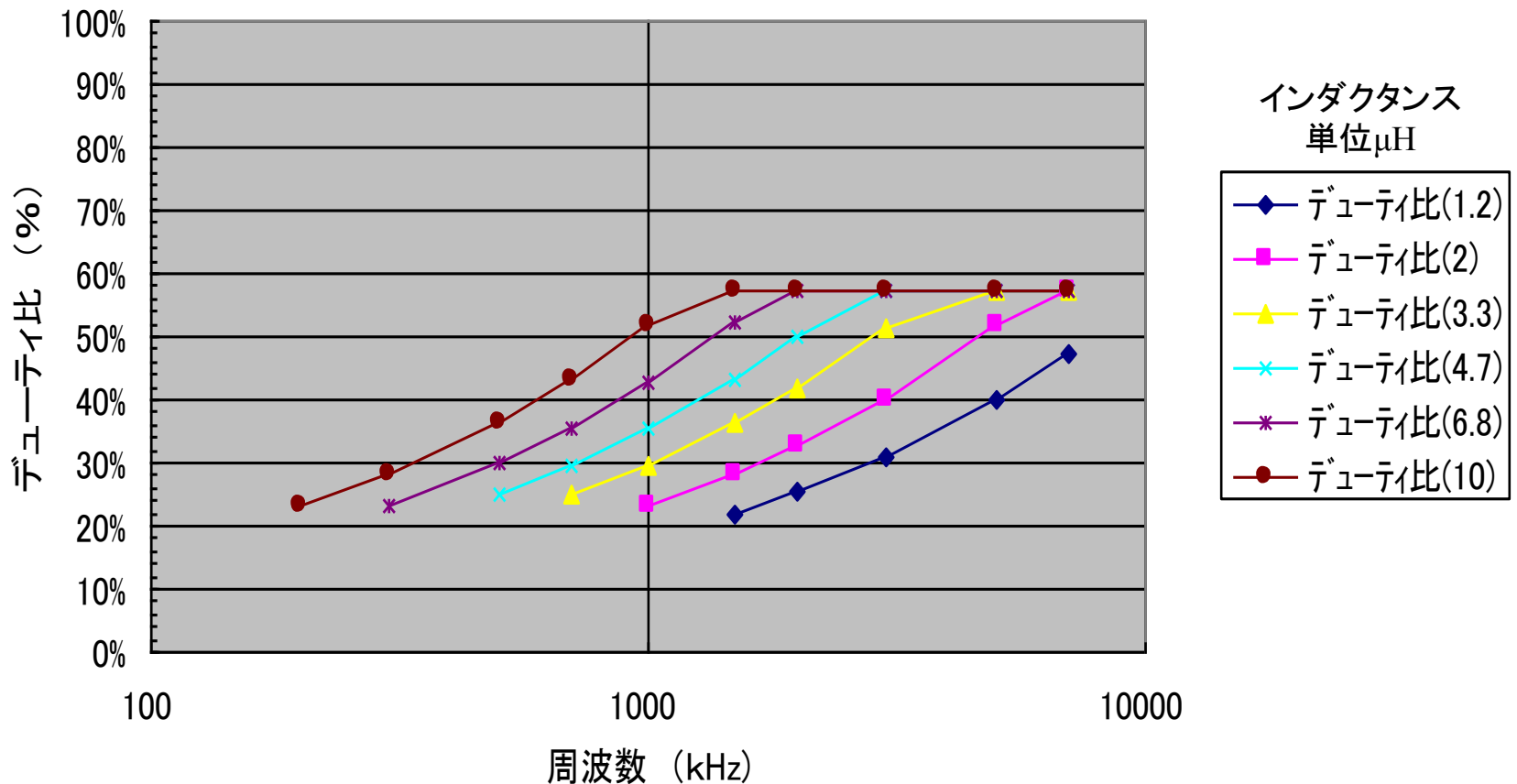
デューティ比の周波数依存性 (Vin=7V) コイルDE2812C



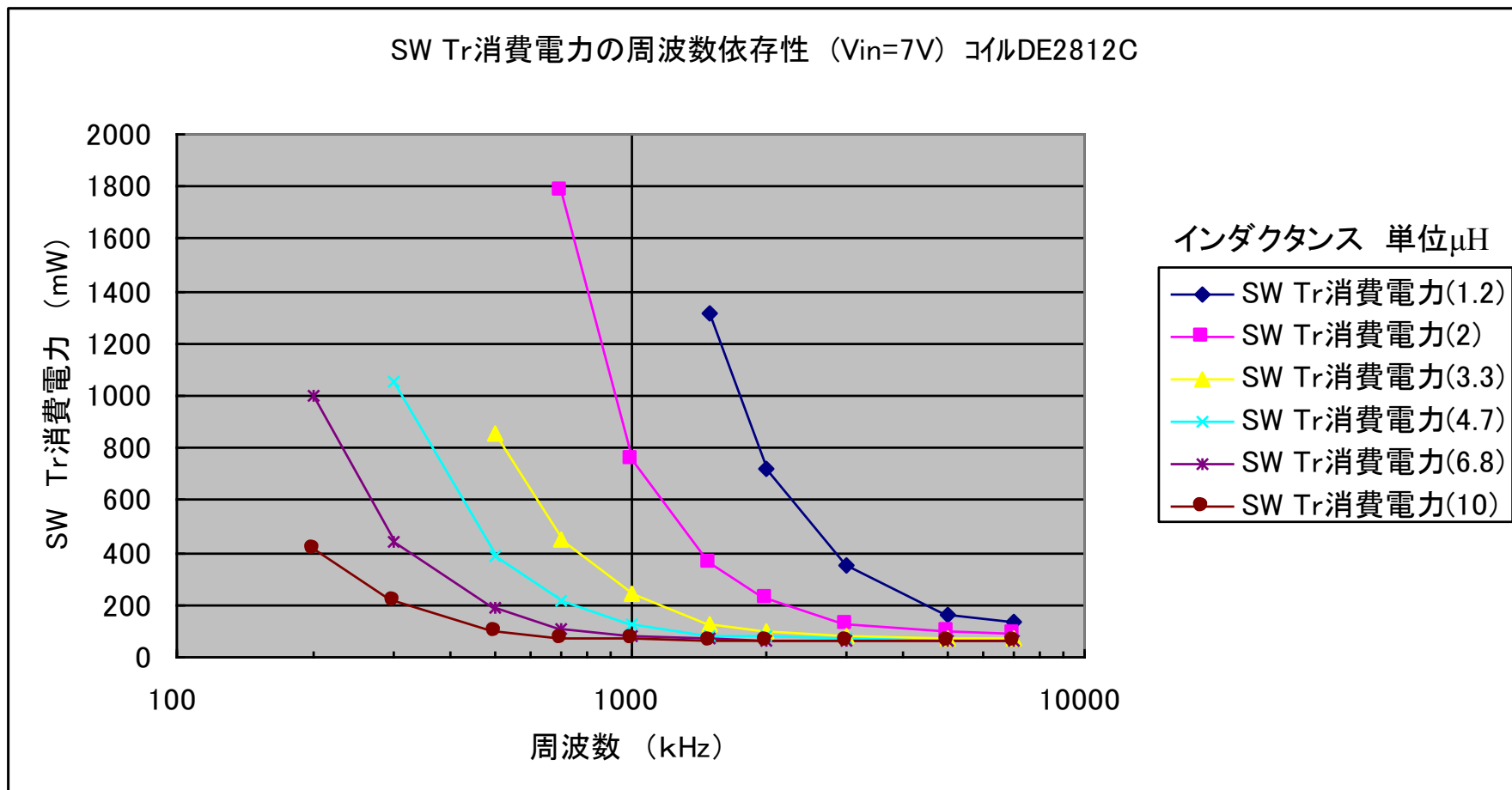


# デューティ比の周波数依存性

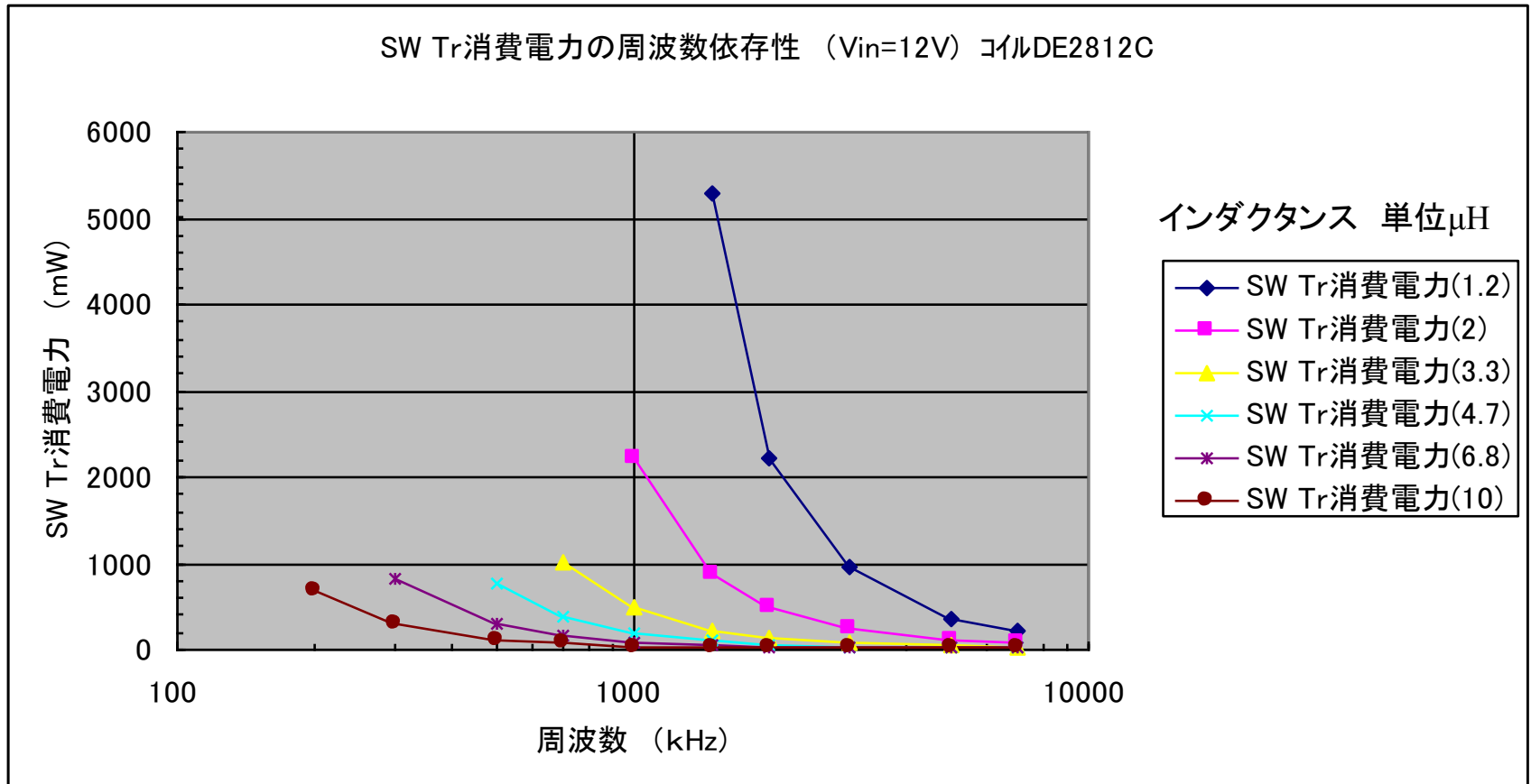
デューティ比の周波数依存性 (Vin=12V) コイルDE2812C



# SW Tr消費電力の周波数依存性

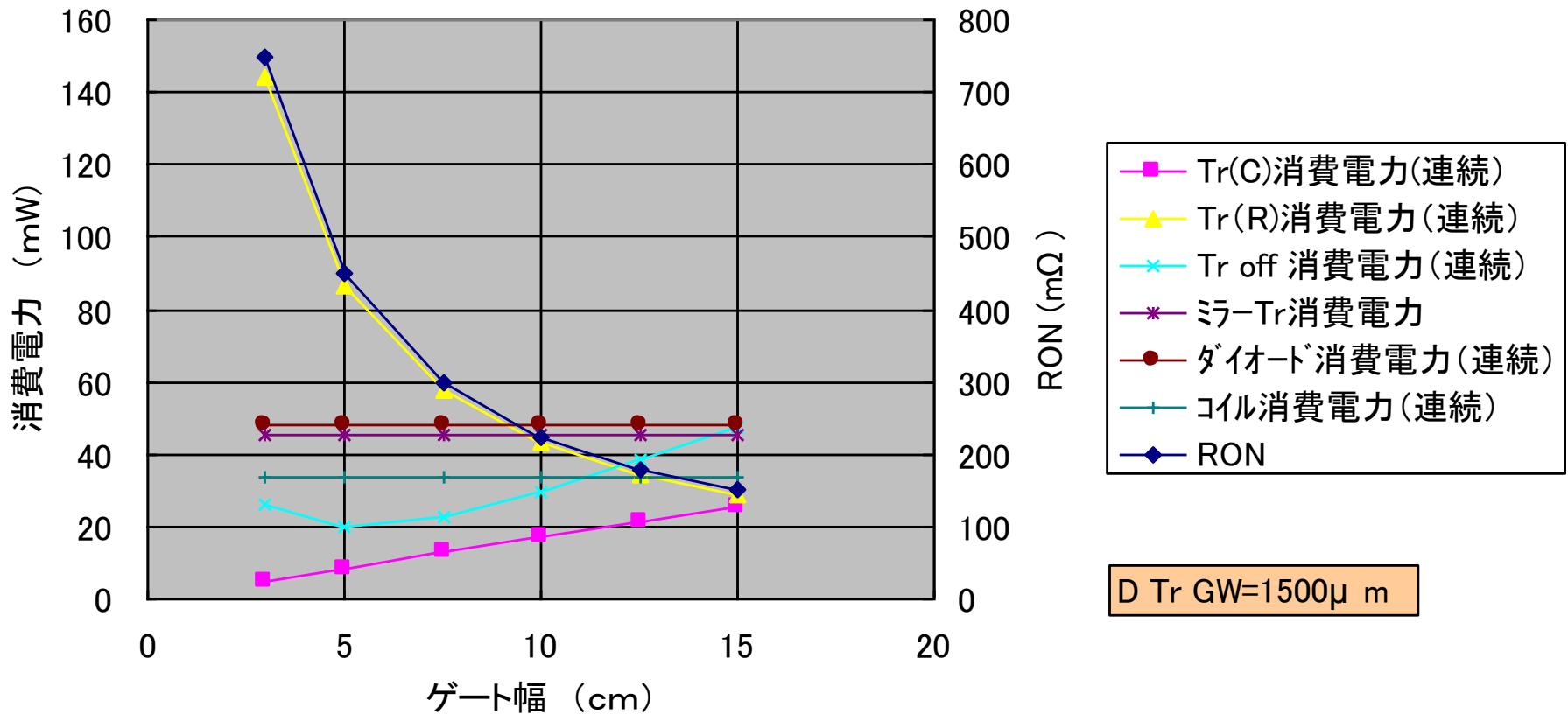


# SW Tr消費電力の周波数依存性



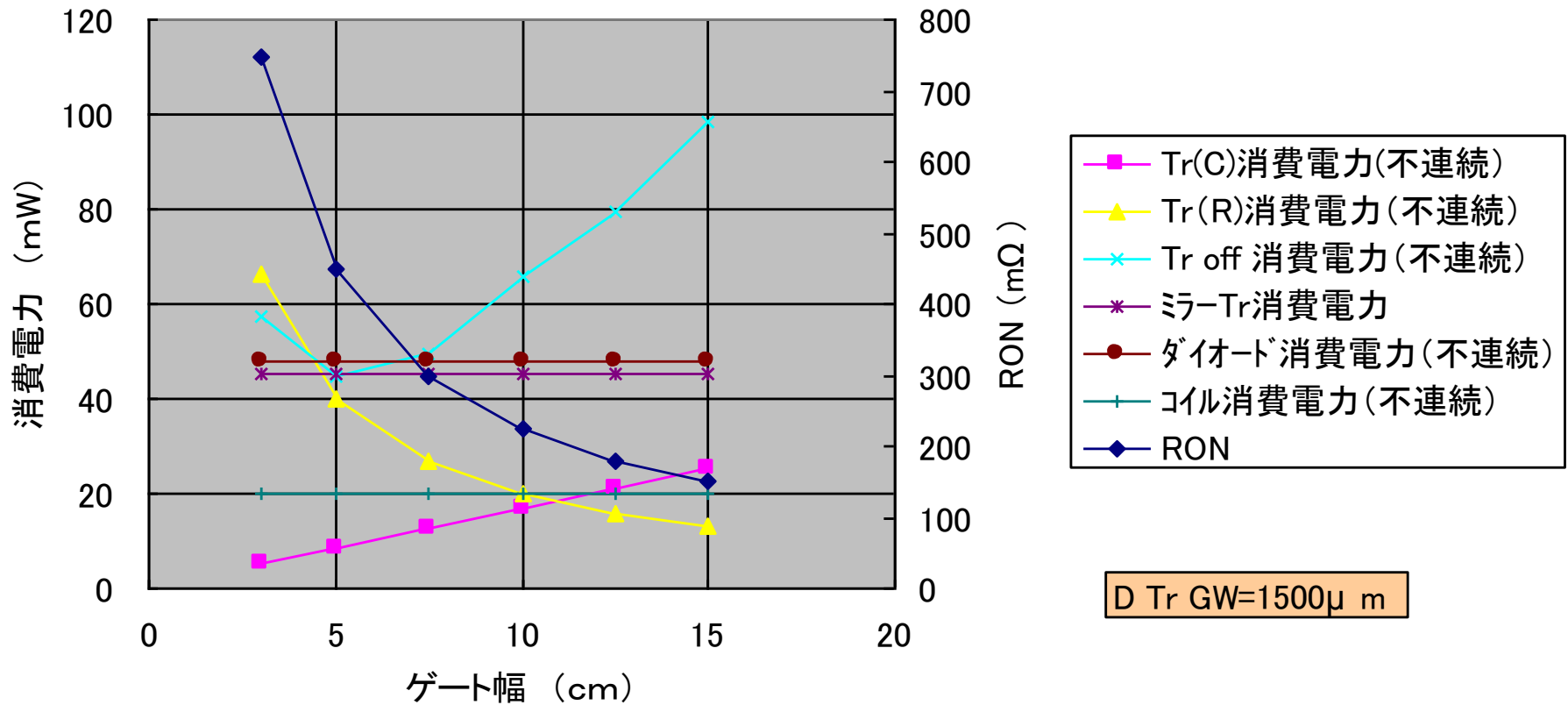
# SW Tr消費電力と $R_{ON}$ のゲート幅依存性

SW Tr消費電力とRONのゲート幅依存性(連続f=2MHz) (Vin=7V) DE2812C



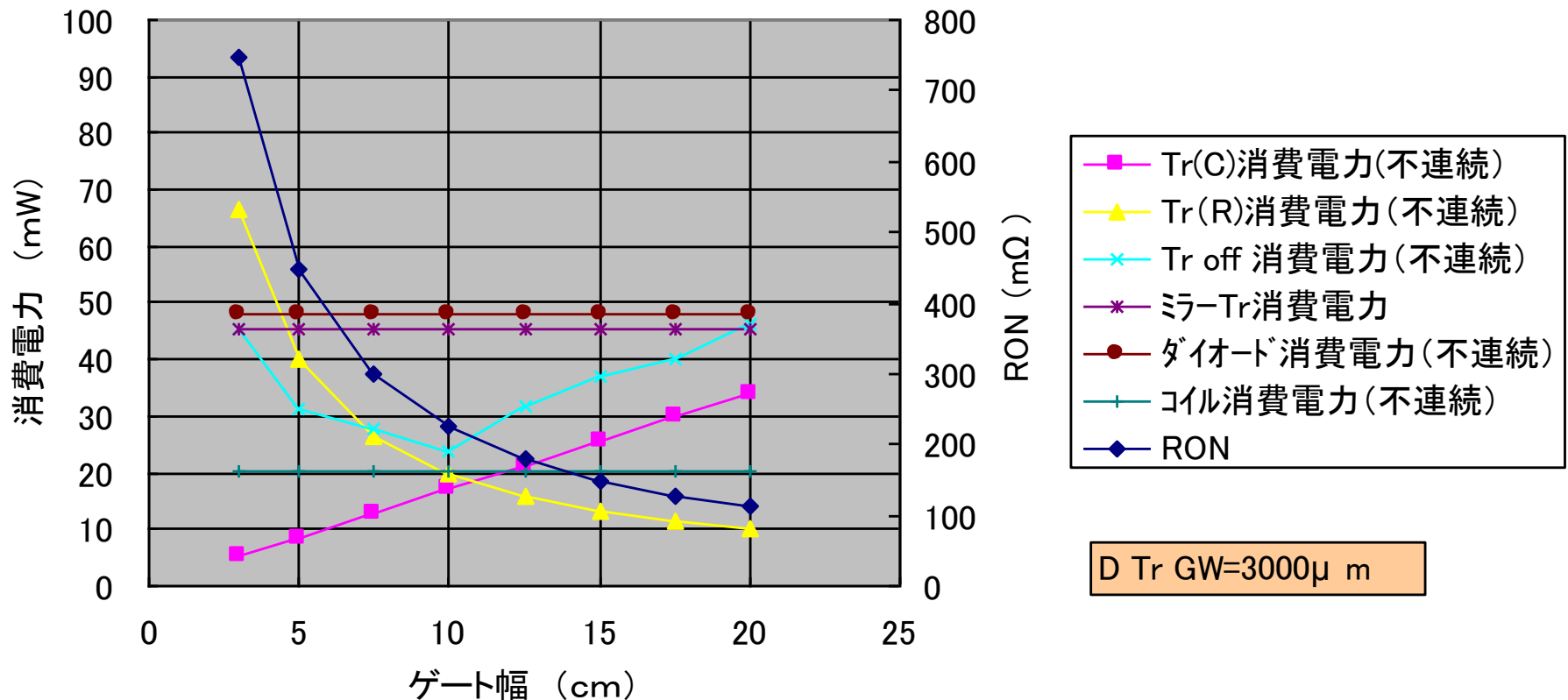
# SW Tr消費電力と $R_{ON}$ のゲート幅依存性

SW Tr消費電力と $R_{ON}$ のゲート幅依存性 (不連続 $f=2\text{MHz}$ ) ( $V_{in}=12\text{V}$ ) DE2812C

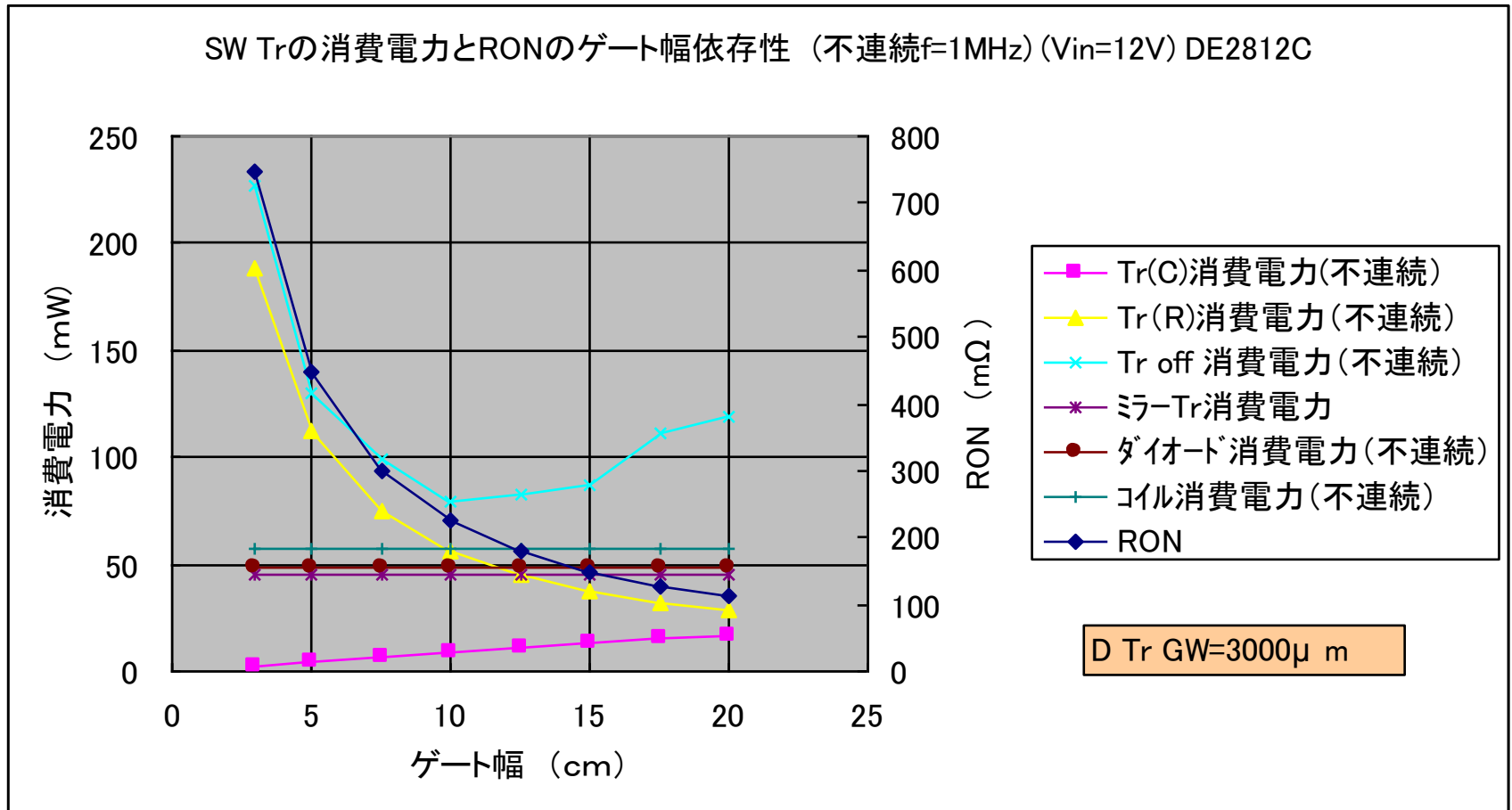


# SW Tr消費電力と $R_{ON}$ のゲート幅依存性

SW Trの消費電力と $R_{ON}$ のゲート幅依存性 (不連続 $f=2\text{MHz}$ ) ( $V_{in}=12\text{V}$ ) DE2812C



# SW Tr消費電力と $R_{ON}$ のゲート幅依存性



# SW Tr効率とチップ総原価のゲート幅依存性

SW Trの効率とチップ総原価のゲート幅依存性(不連続f=2MHz)(Vin=12V) DE2812C

