

2. 電力スイッチング及び波形の解析

2. Power Switching and Analysis of Waveform

講義内容

- 1. 理想スイッチと実際のスイッチ**
- 2. 実際のスイッチにおける損失**
- 3. 波形の定量的な表現方法**

理想スイッチの条件（一例）

- ① オンしたときに抵抗が **ゼロ** : **短絡** 状態 (**オン** 電圧 $v_{\text{on}} = 0$)
- ② オフしたときに抵抗が **無限大** : **開放** 状態 (**漏れ** 電流 $i_{\text{off}} = 0$)
- ③ オン \leftrightarrow オフの切り替わりは **瞬時** : **遷移** 時間ゼロ ($t_r, t_f = 0$)
- ④ スwitchingを繰り返しても劣化, 摩耗などの変化がない

Ex. 機械スイッチ

実際は **接触抵抗** が存在

- 接点開閉なので①, ②は満たせそう
- ③は機械的な遷移時間が存在
- ④は機械部品なので有限 (接点劣化等)

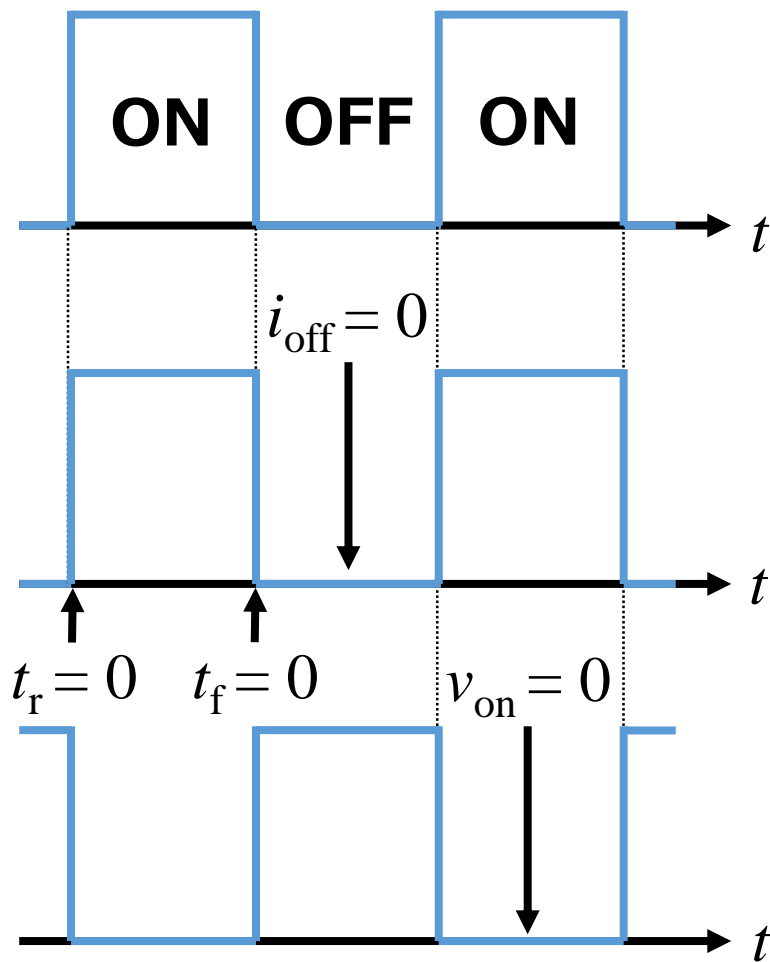
現在は半導体を使ったスイッチが最も **理想に近い**

理想スイッチと現実の半導体スイッチ

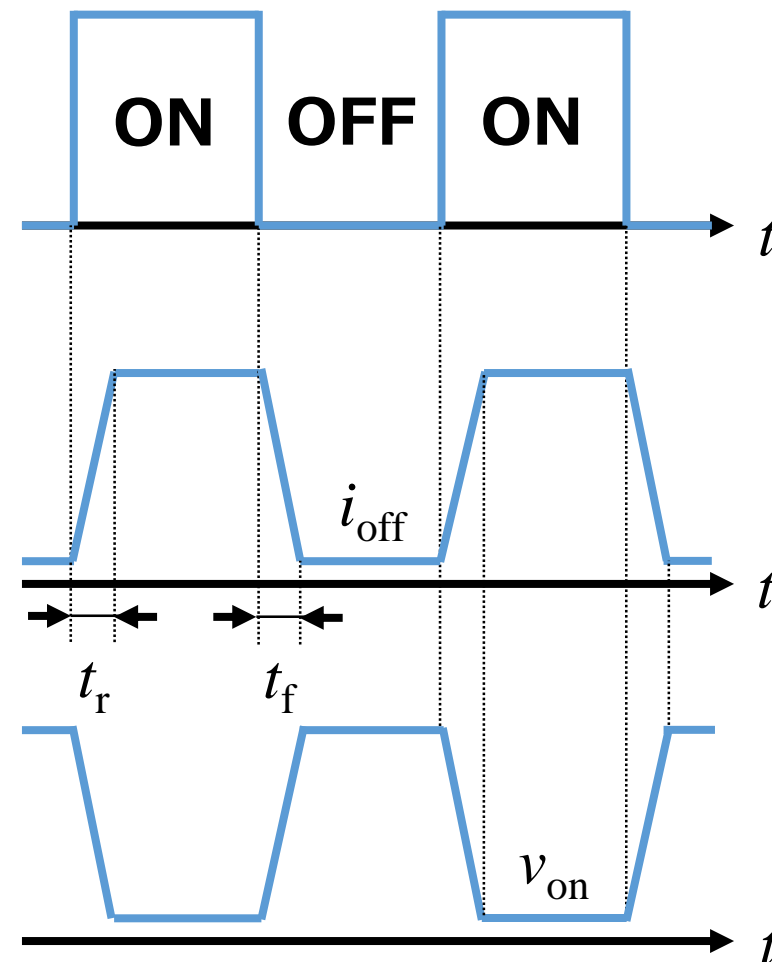
スイッチ
動作

電流

電圧

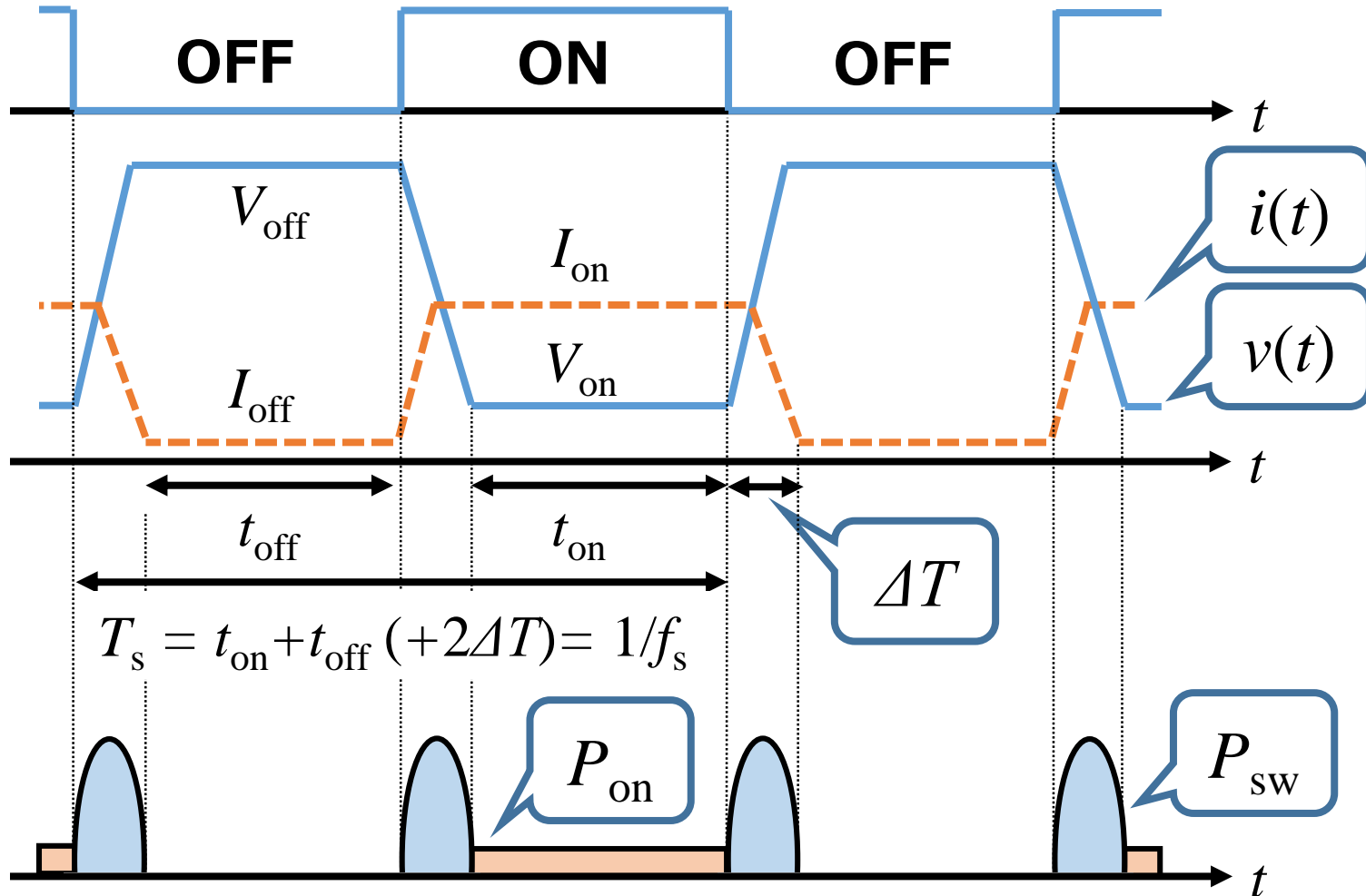


理想スイッチ



実際の半導体スイッチ

半導体スイッチ（パワー半導体デバイス）の損失



オン損失（**導通** 損失）

$$P_{on} = V_{on} \cdot I_{on} \cdot t_{on} \cdot f_s [W]$$

スイッチング 損失

$$P_{sw} = \frac{1}{6} V_{off} \cdot I_{on} \cdot \Delta T \cdot 2f_s [W]$$

f_s が **高くなる** ほど
 P_{sw} は **増加**
(ΔT が無視できなくなる)

※オフ損失 P_{off} は小さいので無視

例題：スイッチング損失の式

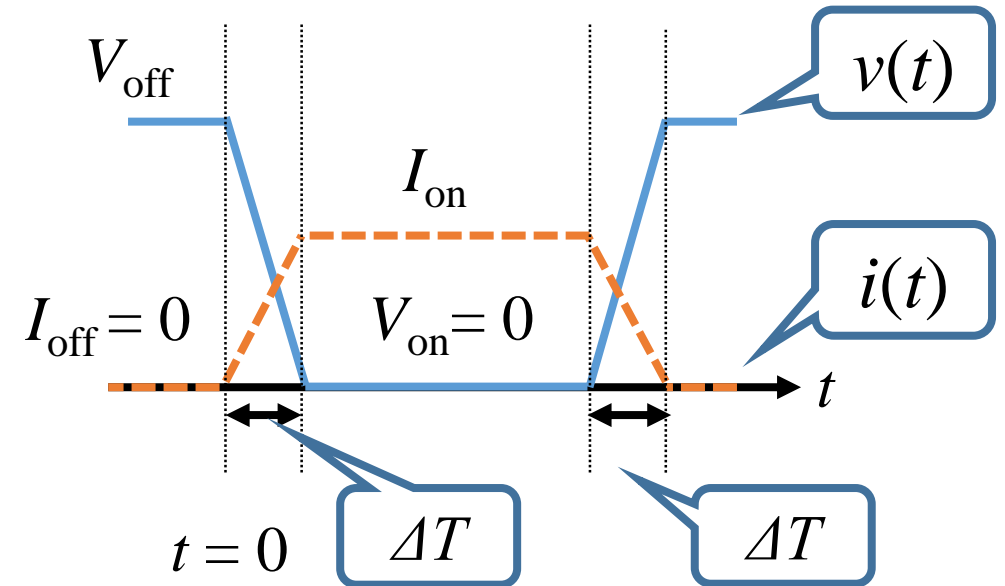
ある半導体スイッチの状態が変化する際、遷移時間 ΔT がかかり、その間の電圧 $v(t)$ と電流 $i(t)$ は下図のように直線的に変化する。また、遷移時間中のスイッチング損失は等しいものとし、オン電圧 V_{on} および漏れ電流 I_{off} は無視する。スイッチの損失 $p(t)$ の時間変化を式で表し、全体のスイッチング損失 P_{sw} を求めよ。

ターンオン(OFF→ON)する際を考える。変化が始まるまでの時間を $t = 0$ とすると、 $0 \leq t \leq \Delta T$ の範囲で

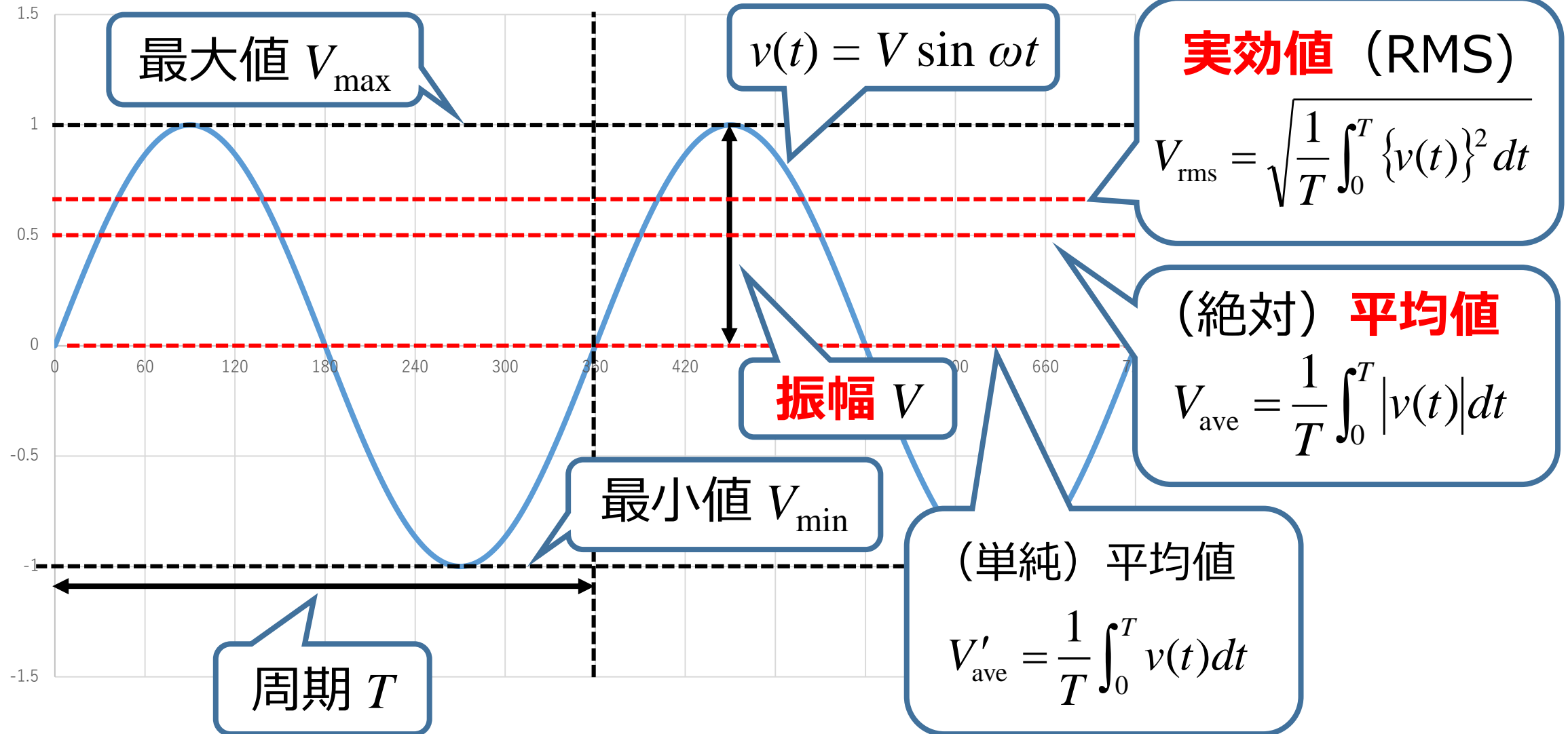
$$\left\{ \begin{array}{l} v(t) = V_{off} - \frac{V_{off}}{\Delta T} t \\ i(t) = \frac{I_{on}}{\Delta T} t \end{array} \right. \quad \text{より,} \quad \begin{array}{l} p(t) = v(t)i(t) = \left(V_{off} - \frac{V_{off}}{\Delta T} t \right) \frac{I_{on}}{\Delta T} t \\ = \frac{V_{off} I_{on}}{\Delta T} \left(t - \frac{t^2}{\Delta T} \right) \end{array}$$

損失面積は等しいので、全体のスイッチング損失は、

$$P_{sw} = 2f_s \int_{t=0}^{\Delta T} p(t) dt = \frac{2f_s V_{off} I_{on}}{\Delta T} \left[\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3\Delta T} \right]_0^{\Delta T} = \frac{1}{6} V_{off} \cdot I_{on} \cdot \Delta T \cdot 2f_s$$

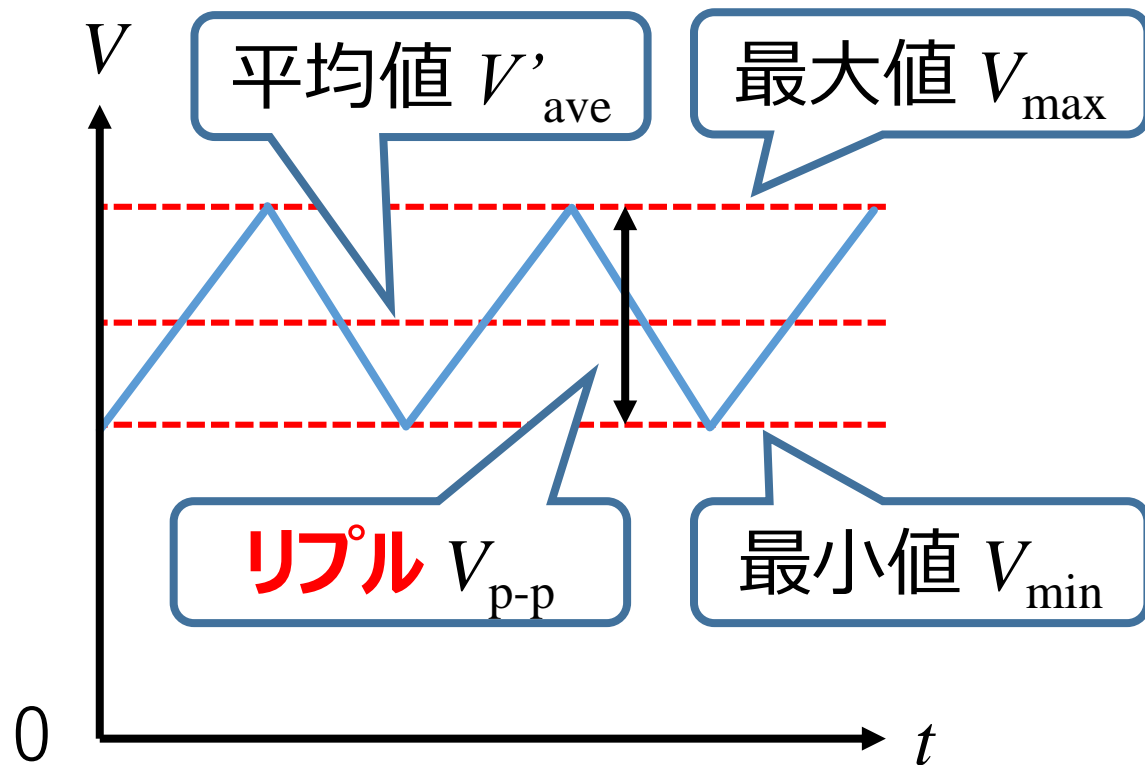


波形を定量的に表す手法（交流：実効値，平均値）



波形を定量的に表す手法 (リップル・リップル)

Ex. 直流+三角波



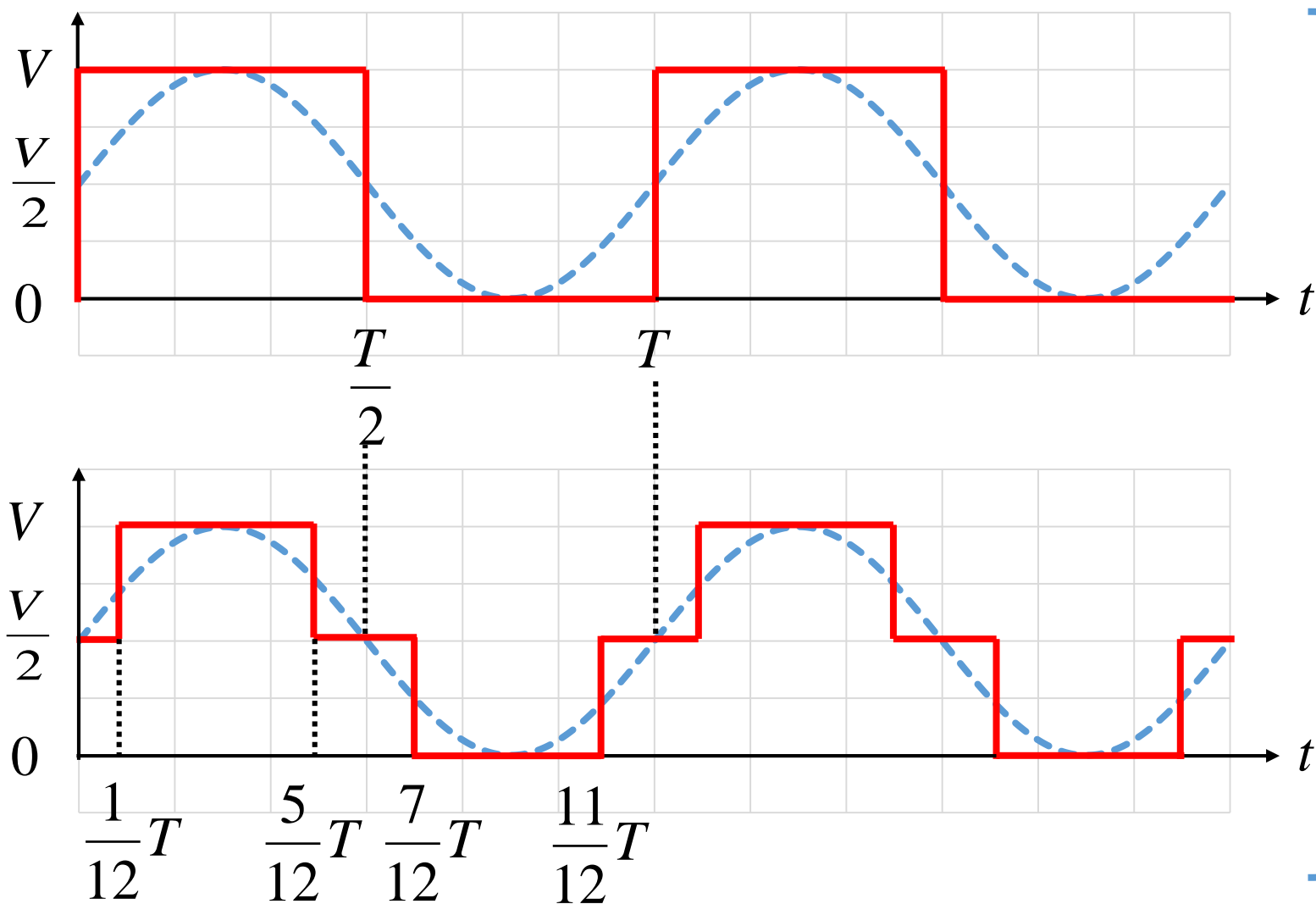
リップル率 (**脈動** 率)

$$\frac{V_{max} - V_{min}}{V'_{ave}} = \frac{V_{p-p}}{V'_{ave}} = \frac{\Delta V}{V'_{ave}}$$

平均値に対する変動幅の **比率**

リップルは直流電源の **評価** や **設計** などに用いられる

波形を定量的に表す手法（ひずみ率（歪率））



平均値, リプル率も
ともに等しい



どちらの波形がより
正弦波 に近いか



ひずみ率 を用いて
定量的に評価

周期 T ($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$)の周期関数である任意の関数は

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad \text{として表すことが出来る}$$

➡ 周期関数は **直流成分** と **正弦波形** の組み合わせで表現可能

a_0 : **直流成分**, $n=1$ の成分 : **基本波成分**, $n=2$ 以上 : **高調波成分**

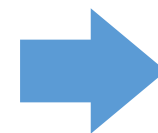
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt$$

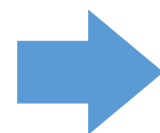
波形を定量的に表す手法（ひずみ率（歪率））

各成分に展開することができる周期波形が
正弦波からどのくらい歪んでいるか



数値で定量的に
表現したい！

ひずみ分の総量を
基本波の大きさ で **規格化**



全高調波ひずみ率
(THD)

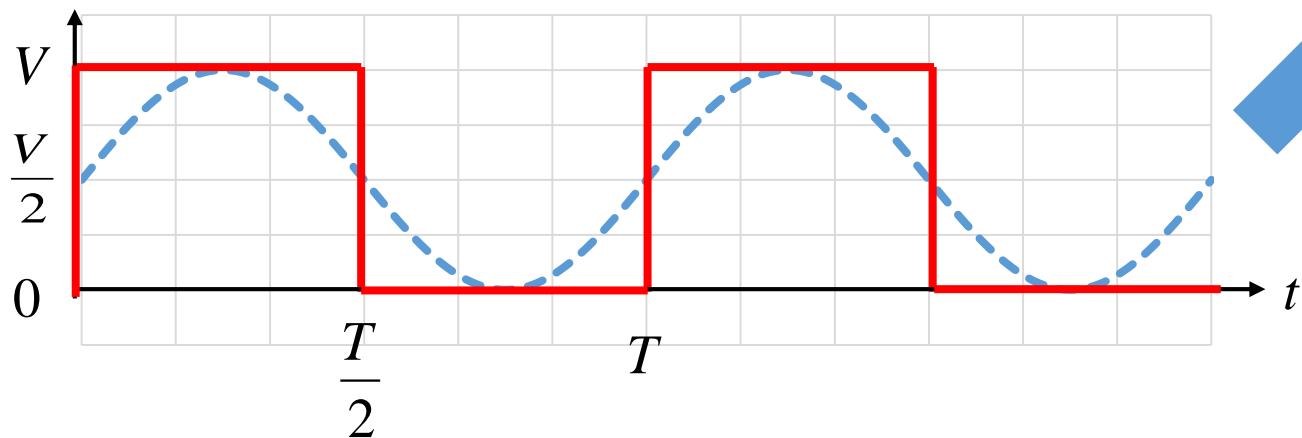
$$\text{THD} = \frac{\text{高調波の実効値}}{\text{基本波の実効値}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_{\text{rms}}^2 - V_1^2}}{V_1}$$

$V_{\text{rms}}^2 = \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2$

例題：全高調波ひずみ率（１）

下の波形の全高調波ひずみ率を求めよ

直流 + 矩形波



直流成分： $V/2 \Rightarrow a_0$
交流成分： 振幅 $V/2$ の矩形波

絶対値： 常時 $V/2$ の直流
実効値： $V_{\text{rms}} = V/2$

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) = \frac{V}{2} + \frac{2V}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\omega t}{2n-1}$$

直流成分

交流成分

と、フーリエ級数展開ができた

必要なのは $n = 1$ の項

例題：全高調波ひずみ率（2）

$n = 1$ の項を抜き出す

$$v(t) = \frac{V}{2} + \frac{2V}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\omega t}{2n-1} \Big|_{n=1} = \frac{V}{2} + \frac{2V}{\pi} \sin \omega t \quad \rightarrow \quad \text{実効値 } V_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{v(t)\}^2 dt} = \frac{2V}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}V}{\pi}$$

直流成分

交流成分 $n = 1$

正弦波の実効値 $V_{\sin_rms} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$

全高調波ひずみ率

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_{\text{rms}}^2 - V_1^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{\left(\frac{V}{2}\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{2}V}{\pi}\right)^2}}{\frac{\sqrt{2}V}{\pi}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1} \approx 0.483$$

THD : Total Harmonic Distortion