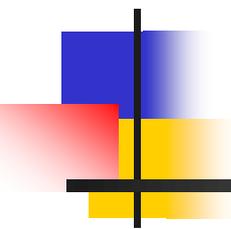


2013年8月12日



電源回路 超入門

群馬大学 理工学研究院 電子情報部門

小林春夫



パワーエレクトロニクスの理念

- 人間社会の利便性の向上
- 関連産業の発展
- 環境への貢献

バランスをとりながら、3者に寄与。



エネルギー、パワー

グランドデザイン

地球規模(global)

長期的(long term)

なビジョンが必要

Long term thinking

産業革命の歴史

第1次産業革命 (1760-1830年台)

力学 動力革命

イギリス 紡績 船舶 鉄道産業へ

第2次産業革命(1865-1890年)

物質科学 重化学工業革命

ドイツ アメリカ 鉄鋼 自動車産業へ

第3次産業革命 (1990-2000年台)

数理学、デジタル情報革命、インターネット

アメリカ 通信 コンピュータ 半導体 家電産業

第4次産業革命が始まりつつある(?)

- 原理： 総合科学 環境エネルギー革命
環境エネルギー産業へ（既存産業の再構築）
- サハラ砂漠での太陽光発電。
そこからの送電、配電、そして蓄電。
一社、一国だけではできない。
- 自動車産業 電気自動車
ビッグスリー から スモールハンドレッドへ
- シェールガス
- 日本では、国の施策

第4次産業革命が始まりつつある(?)

- スマート・グリッド
- パワー半導体 Si MOSFET, IGBT, SiC, GaN
パワーエレクトロニクス
- エレクトロニクス、半導体技術・産業
環境エネルギー技術・産業のキーテクノロジーに
なるストーリーを描くべき
- オーデオ、ゲーム、携帯電話、車、.....
生活を豊かにしてきた。
環境問題は「人類に必須」になりつつある。
「一過性のトレンド、流行り」ではない。

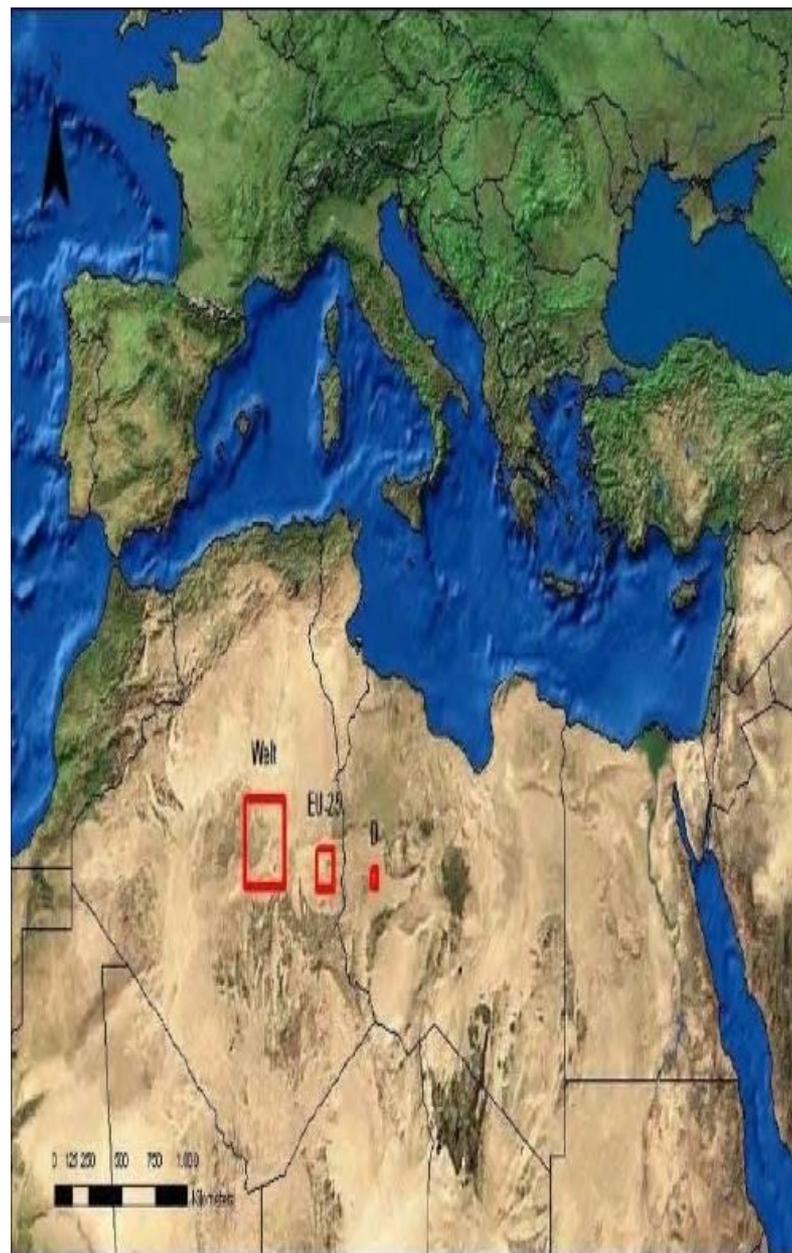
Global thinking

地球規模での発想

砂漠での太陽光発電

全世界, EU25カ国, ドイツの
需要と等しい電力を
太陽エネルギーで発電するのに
必要な面積

「このための
発電, 送電, 変電, 蓄電は
1社、1国ではできない」
(有識者)





電気

- ① 情報 & 信号処理・演算
- ② 通信
- ③ エネルギー

3つの側面から非常に扱いやすい物理量



発電 (Electricity Generation)

電力以外のエネルギーを電力へ変換すること
火力、原子力、水力、地熱、太陽熱、太陽光
風力、波力、海流、潮力

電磁誘導、電気化学反応、光起電力効果
ゼーベック効果



変電 (Electric Transform)

- 狭義 交流の電圧変換
 - 広義
 - 無効電力の調整による電圧の調整
 - 周波数変換
 - 交流と直流との相互変換
 - 直流の電圧変換
- など、電力の変換・調整操作全般を意味する



送電 (Electricity Transmission)

直流送電

交流送電

マイクロ波送電

スマートグリッド

無線送電



蓄電 (Electricity Storage)

- 電力を蓄える
- 昼間の太陽光発電による電力を蓄えたい。



配電 (Electricity Distribution)

電気を配る(分配する)こと。

電気事業における配電とは、

送電網から変電所を通して受電した電力を
需要家に供給するため、配電網システムの
構築とその運用を行う。

電線路の一部を形成する。



DC-DC 変換回路

シリースレギュレータ

スイッチングレギュレータ

- 1・非絶縁型昇圧チョークコンバータ
- 2・非絶縁型降圧チョークコンバータ
- 3・絶縁型フォワード型(降圧)
- 4・絶縁型フライバック(超高压昇圧)
- 5・ハーフブリッジ型
- 6・フルブリッジ型



AC-DC変換回路

- 交流電流から電圧の異なる直流電流へ変換する整流回路
(電子回路は直流電流を利用)
- 交流電流の家庭用電源から給電のために、AC-DC変換回路を使用。
- AC-DC変換回路は機器に内蔵、またはACアダプタとして外部に付属。
- 当初はサイリスタ半導体素子使用
最近はトランジスタ使用



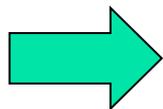
電源回路の技術開発

電源回路の数は膨大、長い間使われる。



開発した技術は
社会的、産業的インパクト大。

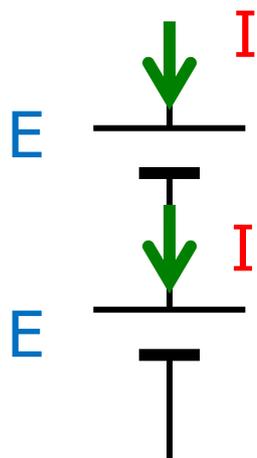
エネルギーハーベスト



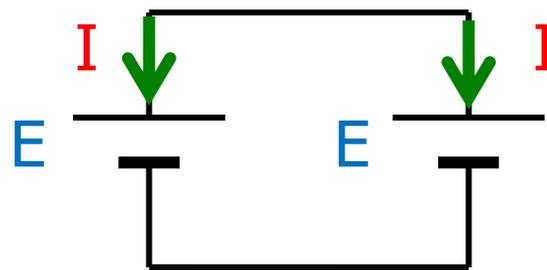
技術者の腕自慢ではなく、
誰もがやってほしい技術

電力(パワー)

- パワー (P) = 電圧 × 電流



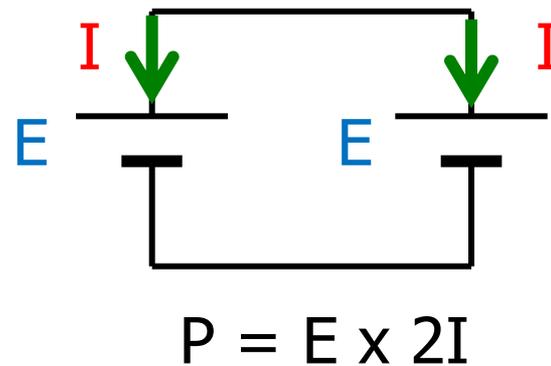
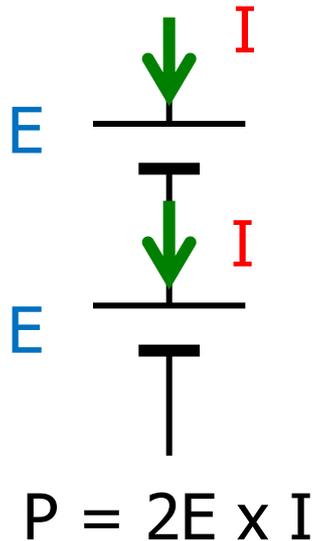
$$P = 2E \times I$$



$$P = E \times 2I$$

降压型電源回路

- パワー (P) = 電圧 x 電流

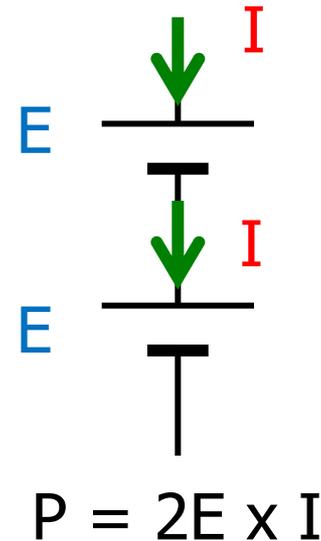
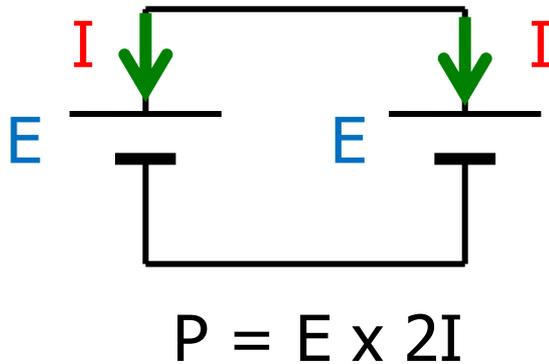


Buck Converter (降压型DC-DC変換器)

出力電圧 $V_{out} < V_{in}$ 、出力電流 $I_{out} > I_{in}$

昇圧型電源回路

- パワー (P) = 電圧 x 電流



Boost Converter (昇圧型DC-DC変換器)

出力電圧 $V_{out} > V_{in}$ 、出力電流 $I_{out} < I_{in}$



電源回路のデバイス

- パワーデバイス(スイッチ) $FOM = R_{ds} \cdot Q_g$
 $V_{ds}=0$ 近辺での R_{ds}
 スイッチング速度
 - ダイオード
 - 制御回路用半導体デバイス
 - コンデンサ
 - インダクタ
 - トランス
- のすべてが重要



パワー系回路、電源回路の 基礎となる法則・学問

オームの法則

キリヒホッフの法則

に加えて

熱力学第1法則（エネルギー保存則）

熱力学第2法則（熱はエネルギーの墓場）

電気・電子に加えて 磁気も必要



電気電子工学分野の科目

「電気回路」の講義内容
パワー系回路の基礎

「電子回路」の講義内容
アナログ回路の基礎



電源回路の基礎技術

- 回路
- 制御、モデリング
- デバイス（半導体、L、C）

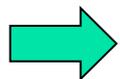
パワー半導体に加え

L, Cの受動部品も重要

電流と電圧のバランス

スイッチング電源での制御技術

- 欧米系アナログ半導体メーカーのいくつか

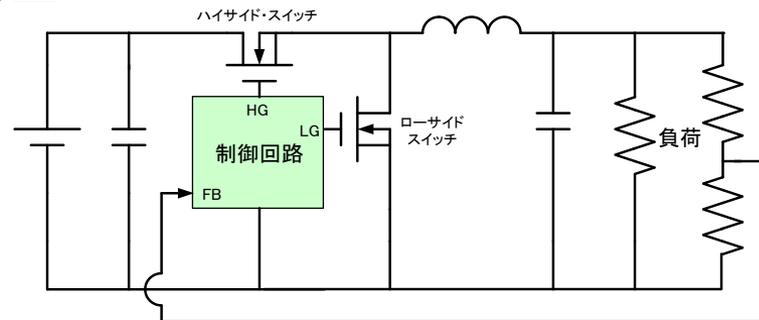


電源制御回路チップで大きな利益

- デジタル制御電源

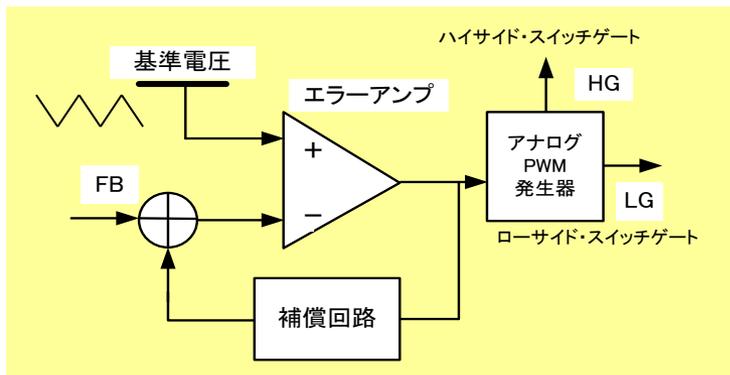
- 微細CMOSでデジタル制御
- デジタルの新アイデアで高性能化
- 通信機能の取り込み

■ スwitchング電源回路

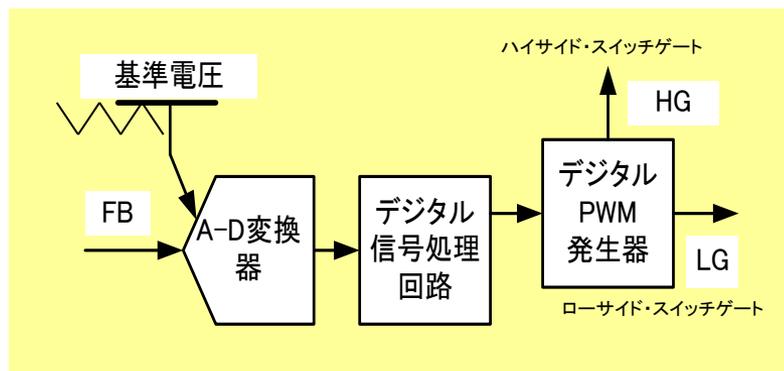


■ 制御回路部

■ アナログ方式



■ デジタル方式





アナログ回路と電源回路の違い 国際学会から

- 電源回路の国際会議での発表
→ 多くの国、多くの機関からの発表
- アナログ回路の国際会議での発表
→ 限定されたグループから

アナログ回路と電源回路の違い 回路設計の感覚が異なる

- アナログ回路の美
バランス、対称性

美は対称性にあり



- パワー回路
対称であることにはこだわらない



C,L 電圧、電流の双対性

■ パワー = 電圧 x 電流

容量 C

$$I = C (dV/dt)$$

インダクタ L

$$V = L (dI/dt)$$



インダクタ L

高周波回路: 周波数領域で考える

インピーダンス $j\omega L$

高い周波数で大、位相が90度回る

電源回路: 電流を時間領域で考える。

エネルギー蓄積素子

アナログ回路: Lは使用しない。

スイッチング電源パワー回路部のポイント

インダクタによる回路設計の広がり

C と L

電圧 と 電流

直流 と 交流

正 と 奇

「戦いは**正**を以て合い、**奇**を以て勝つ。

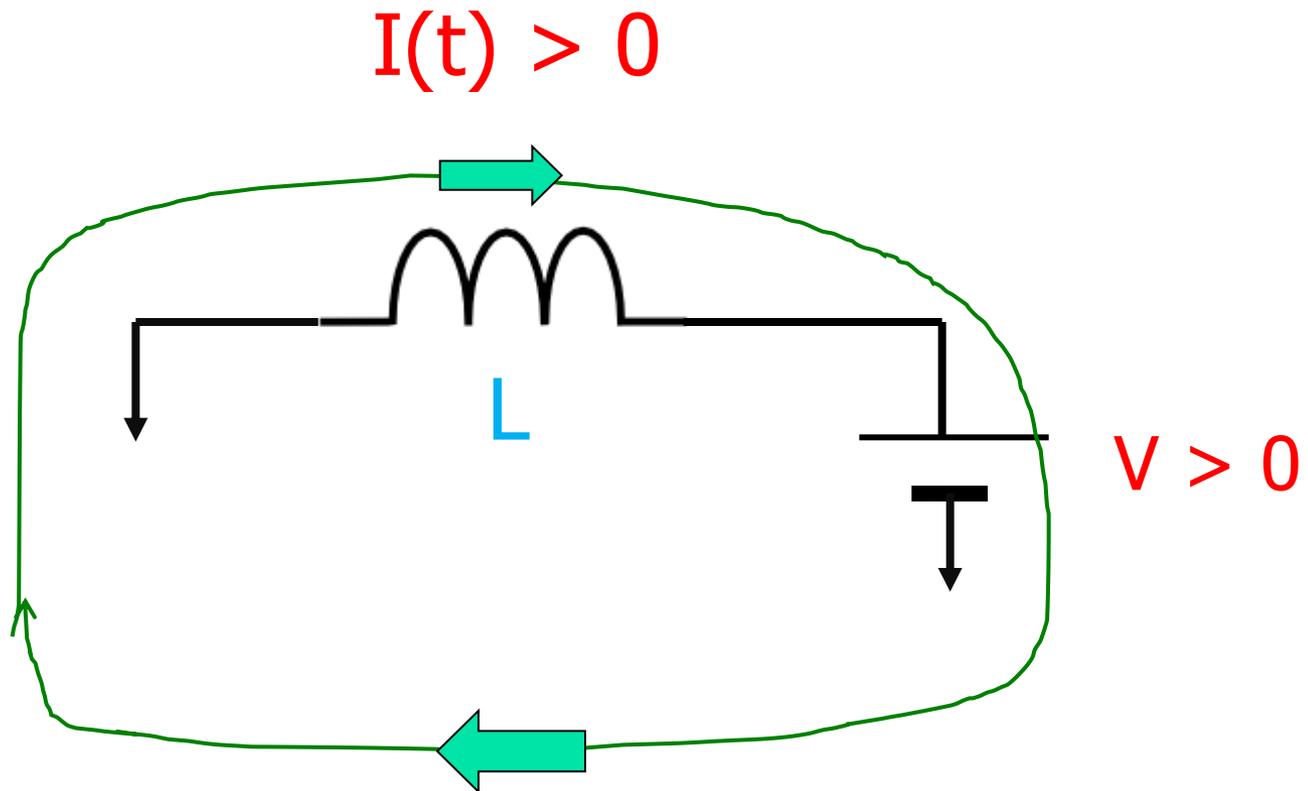
よく**奇**を出だす者

窮まりなきこと天地のごとく、

尽きざること江河のごとし。」（孫子）

インダクタの不思議

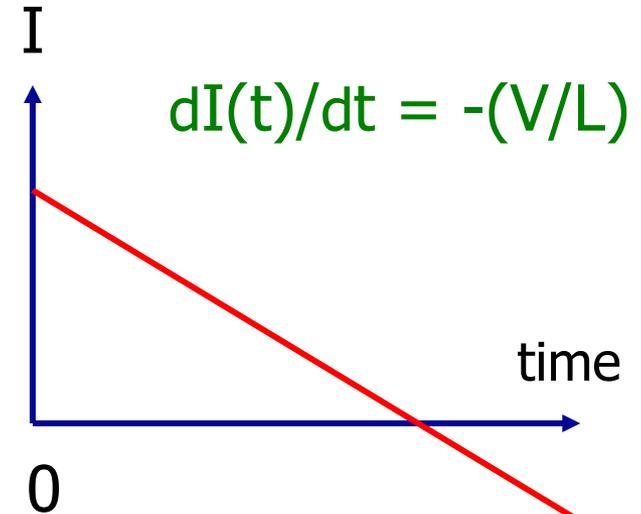
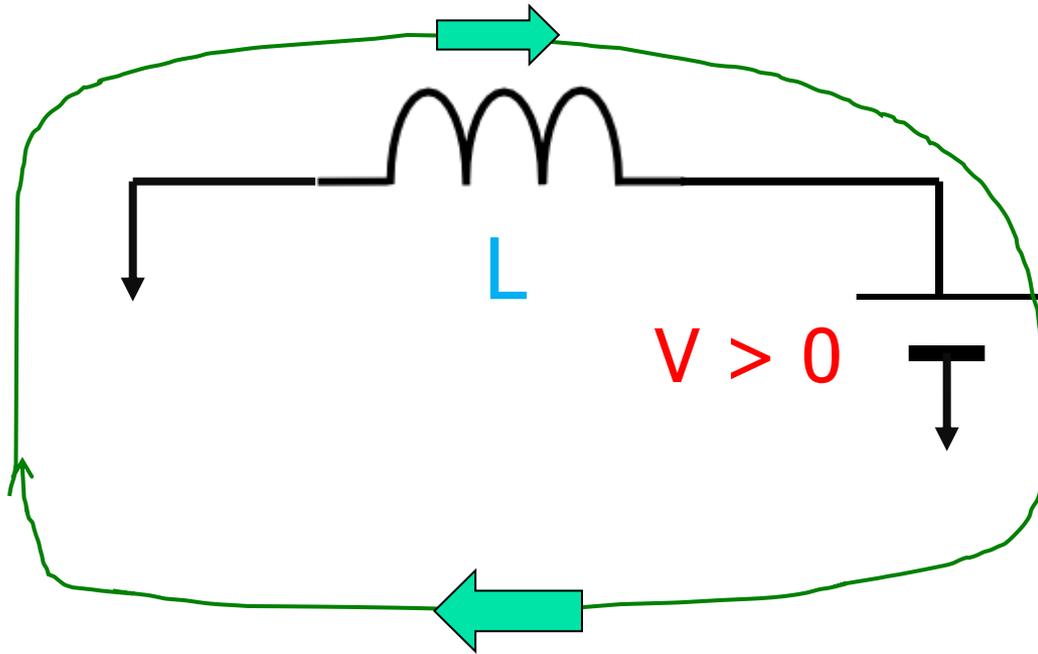
インダクタは低電位から高電位に 電流が流れるか ？



インダクタの不思議

インダクタは低電位から高電位に 電流が流れ得る

$$I(0) > 0$$

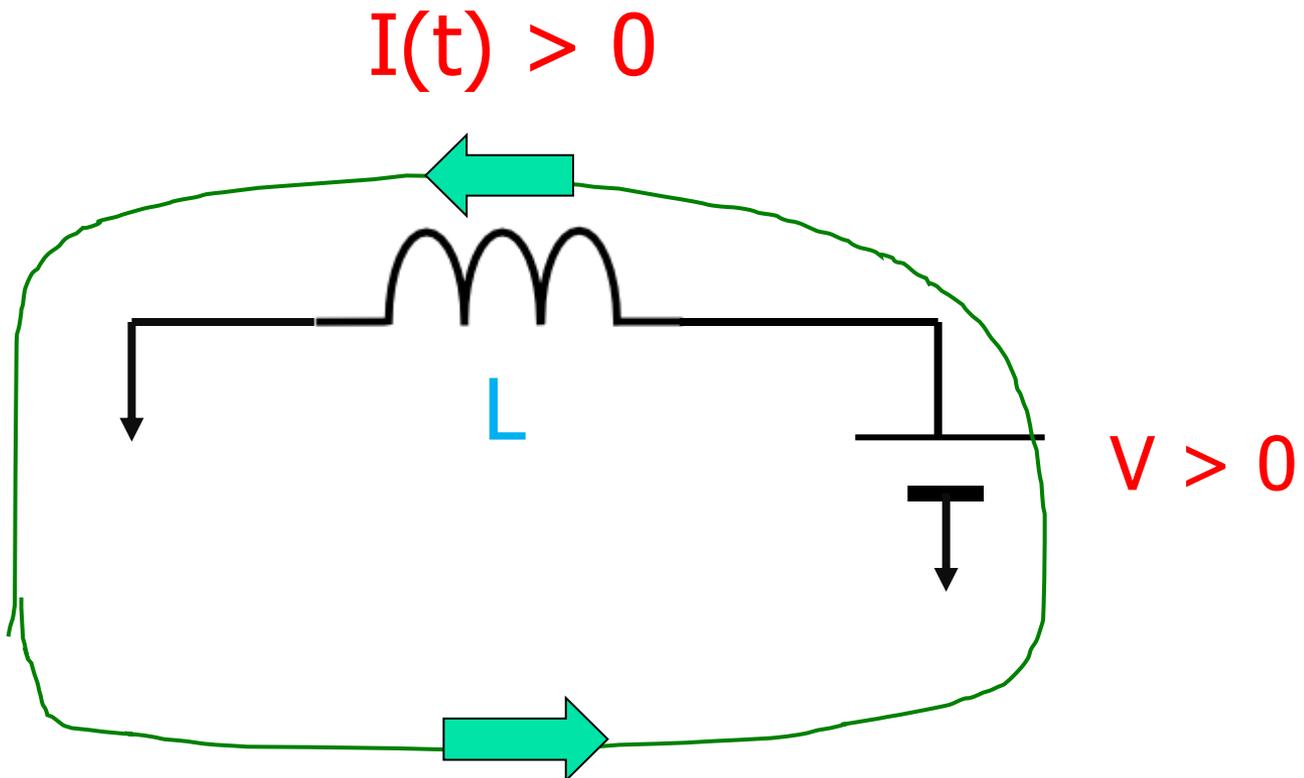


電流は時間とともに
減少する

インダクタに蓄積されているエネルギー $(1/2) L I^2$
時間とともに減少

インダクタの不思議

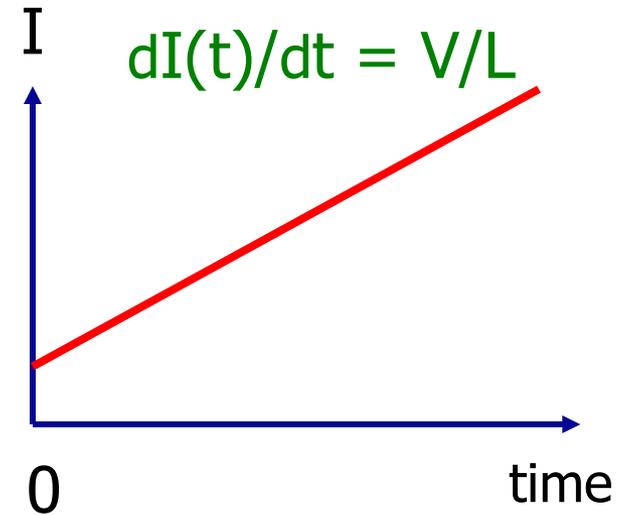
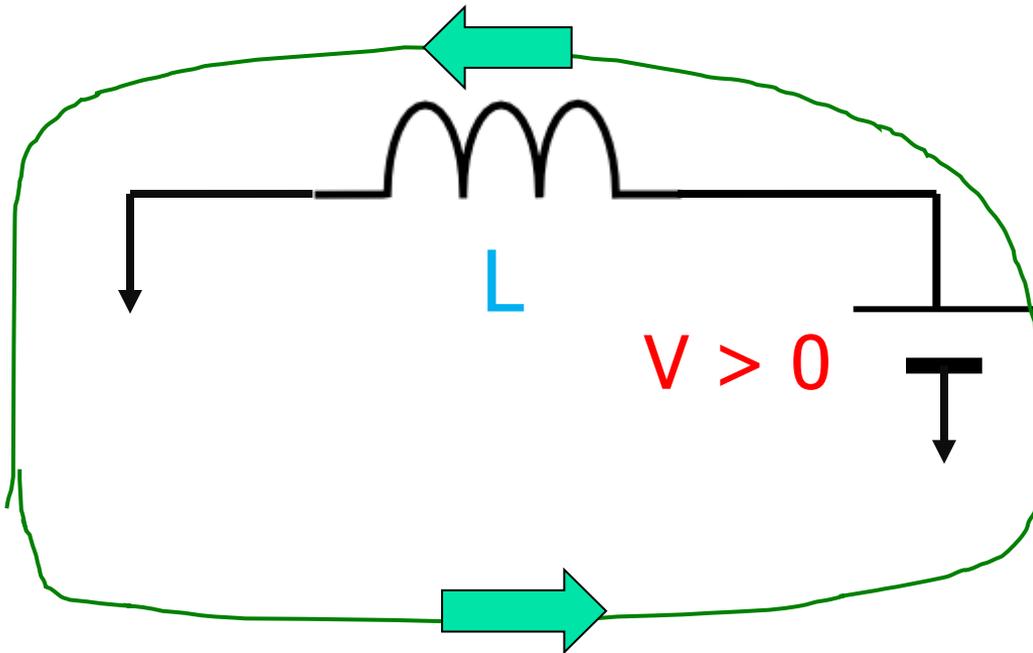
インダクタは 高電位から低電位に電流が流れるか？



インダクタの不思議

インダクタ電流はどのようなになるか。

$$I(t) > 0$$

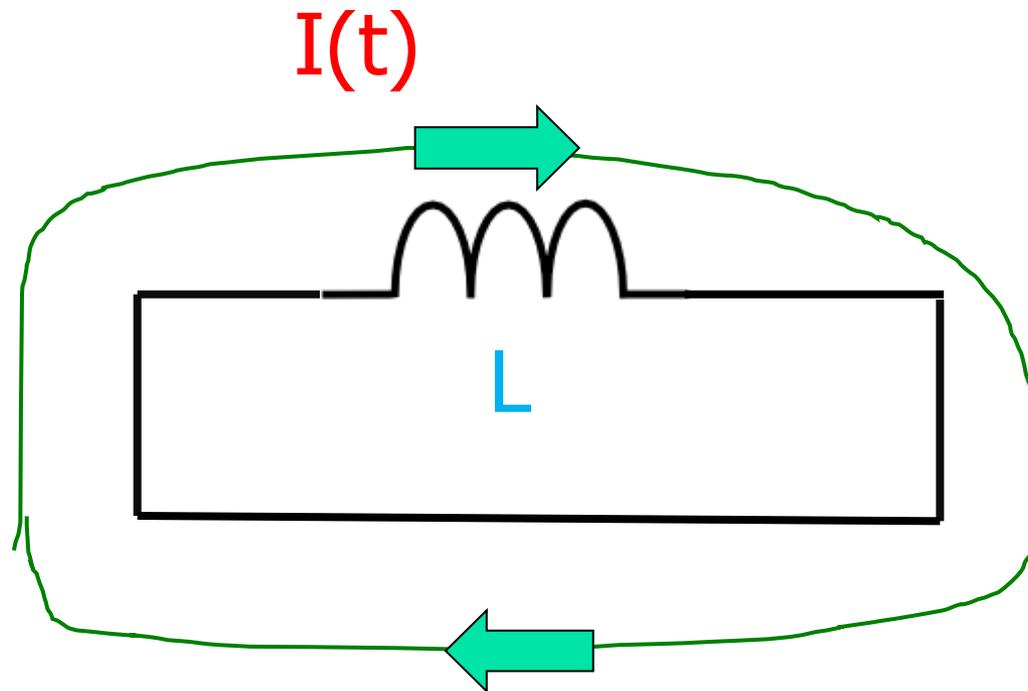


電流は時間とともに増加する

インダクタに蓄積されているエネルギー $(1/2) L I^2$
時間とともに増加

インダクタの不思議
インダクタに

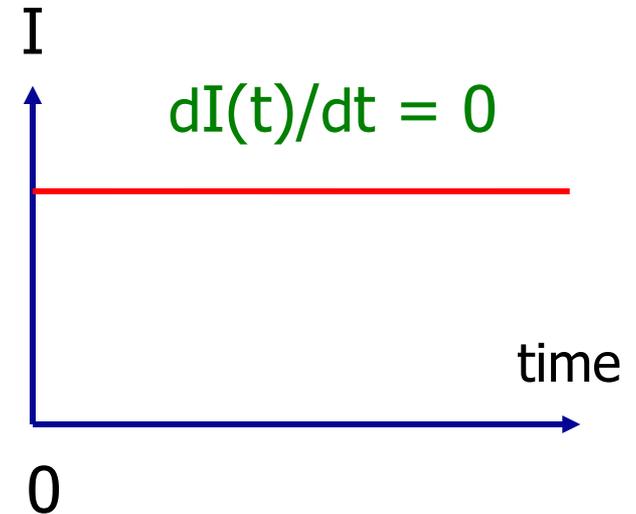
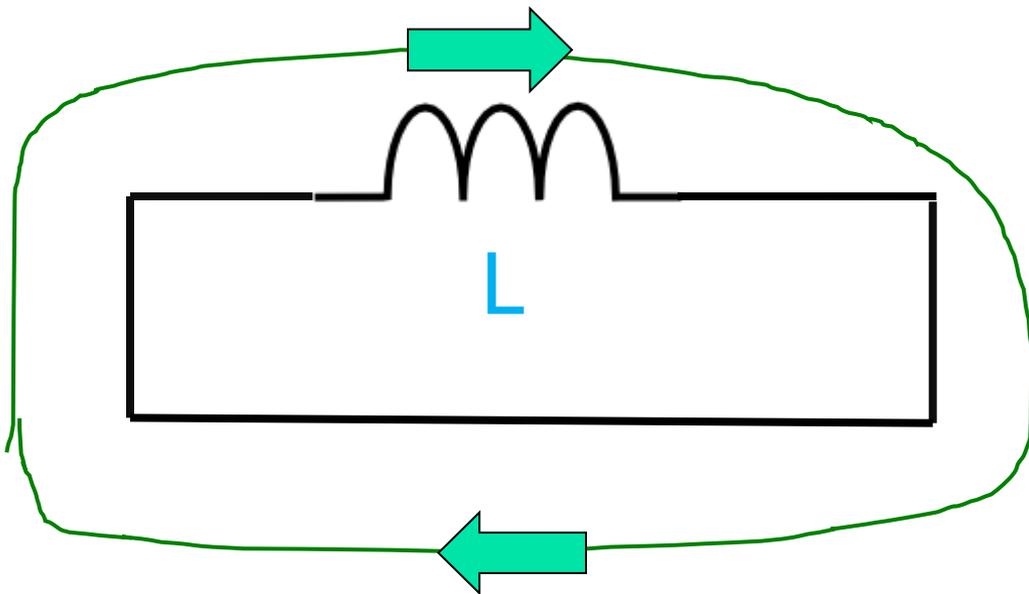
電圧が加わっていないときの電流は？



インダクタの不思議

インダクタは電流メモリ

$$I(t) = \text{一定}$$



寄生抵抗あれば
電流、エネルギーは
減少していく

インダクタに蓄積されているエネルギー $(1/2) L I^2$
一定値が保存される

L はオーバーシュートを引き起こす

- R, C回路 1次系

ステップ応答

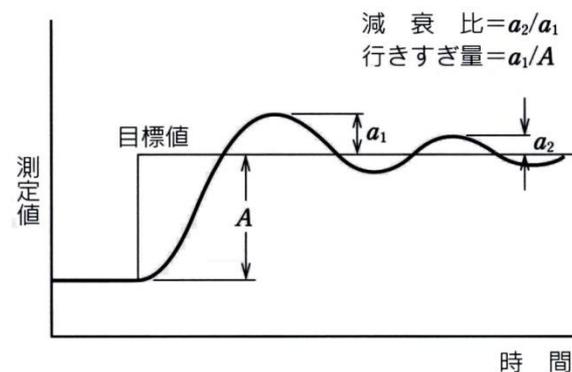
→ 振動的にはならない。

(オーバーシュートを生じさせない)

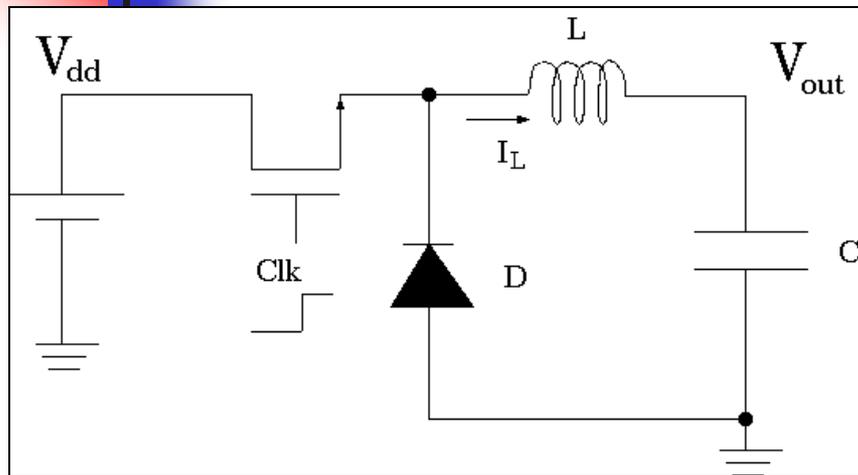
- L, C, R 回路 2次系

ステップ応答

→ Lが強ければ振動的になる。



DC-DC変換回路の原理



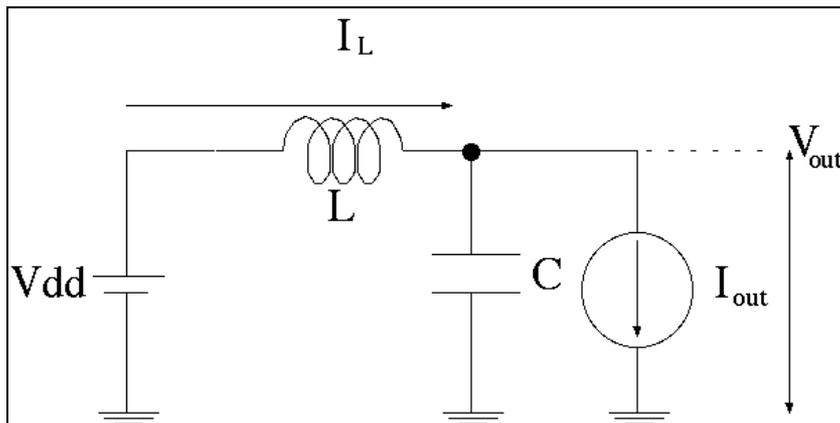
ONのときの電流の変化量 = OFFのときの電流の変化量

$$V_{\text{out}} = \frac{T_{\text{on}}}{T} \cdot V_{\text{dd}}$$

T; クロック周期

出力電圧はクロックデューティ(比率)によって決定

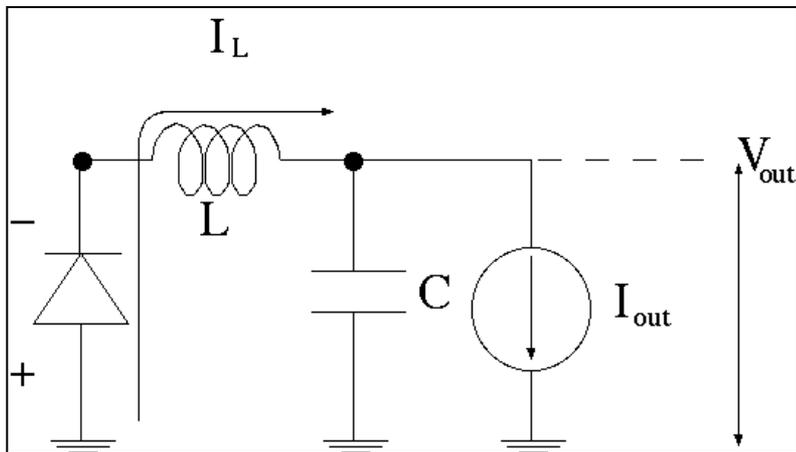
DC-DC変換回路の原理



◆ Clk=ONのとき

$$\Delta I_L = \frac{V_{dd} - V_{out}}{L} \cdot T_{on}$$

DC-DC変換回路の原理



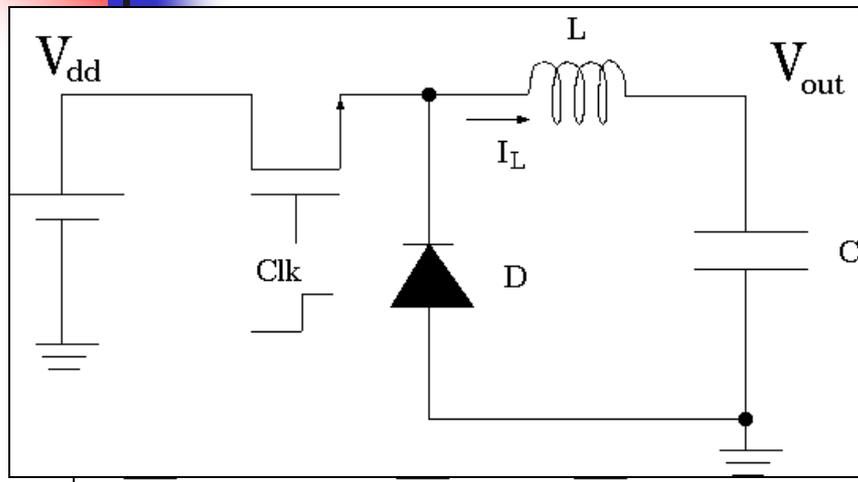
◆ Clk=OFFのとき

$$\Delta I_L = -\frac{V_{out}}{L} \cdot T_{off}$$

ON からOFF 時  電流 I_L は保たれる。
インダクタ電流は変化する場合も連続的である。

DC-DC変換回路の原理

◆ Clk=ONのとき



$$\Delta I_L = \frac{V_{dd} - V_{out}}{L} \cdot T_{on}$$

◆ Clk=OFFのとき

$$\Delta I_L = -\frac{V_{out}}{L} \cdot T_{off}$$

ONのときの電流の変化量 = OFFのときの電流の変化量

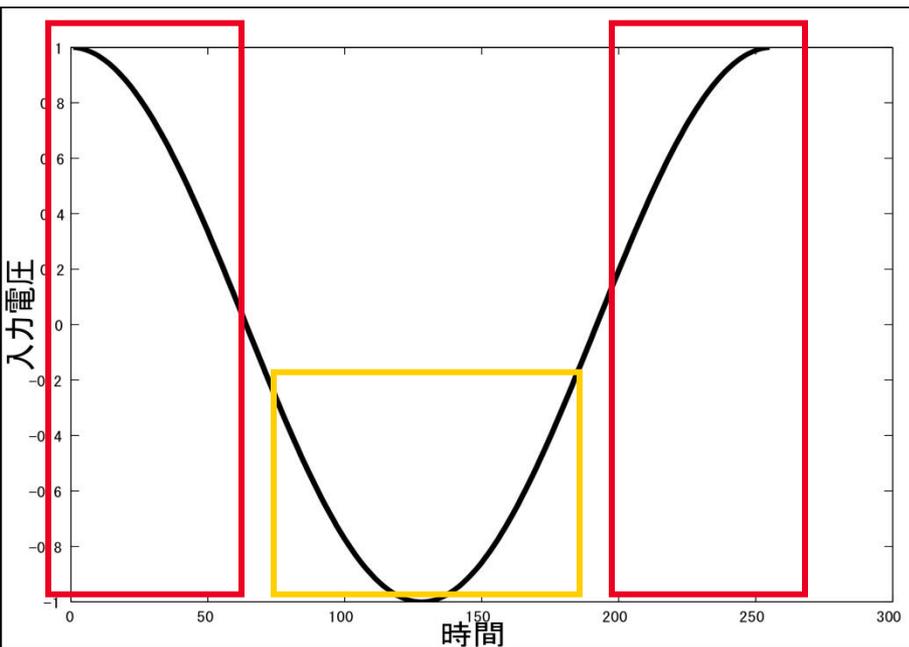
$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T} \cdot V_{dd}$$

T; クロック周期

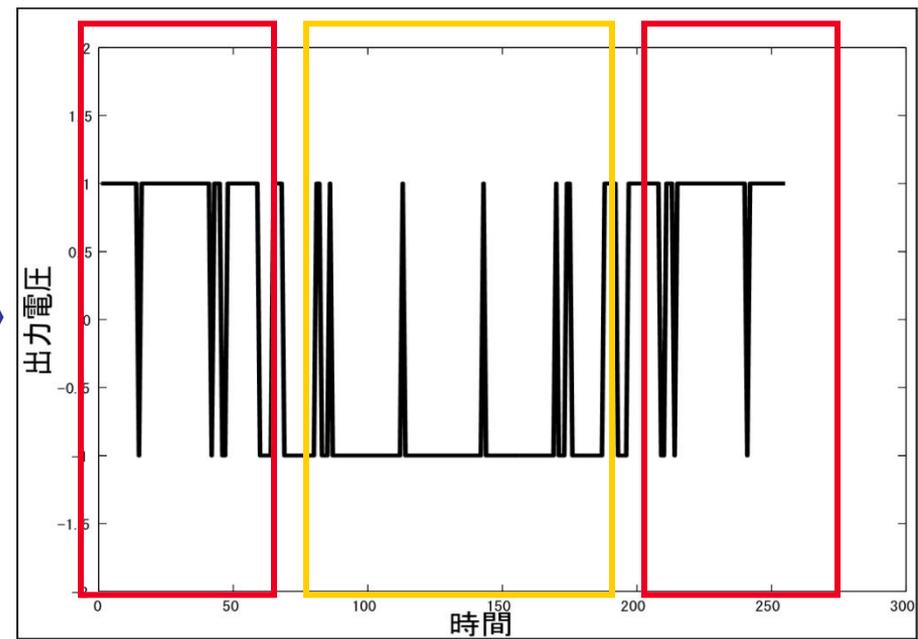
出力電圧はクロックデューティ(比率)によって決定

PWM(パルス幅変調)制御方式

DC-DC電源回路の
駆動クロックデューティ(比率)を変調

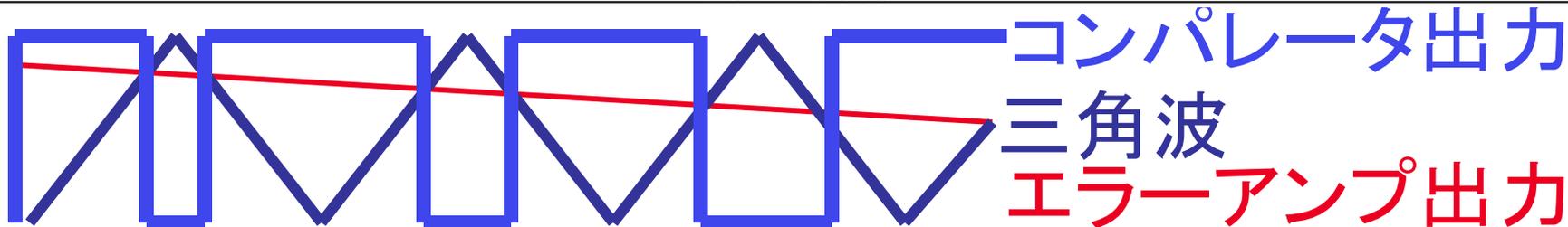
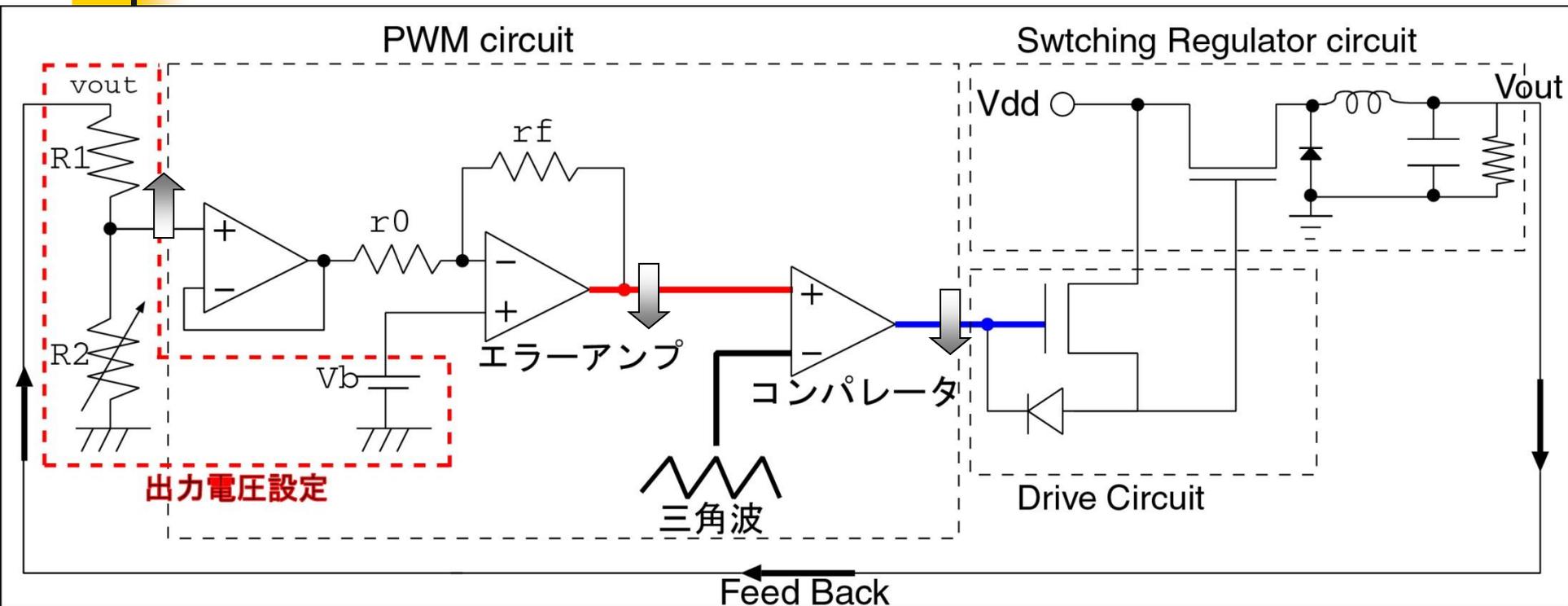


PWM入力信号



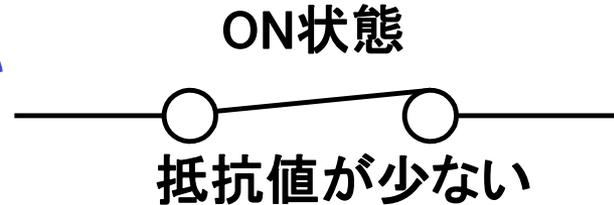
PWM出力信号

PWM制御方式を用いたDC-DC変換回路

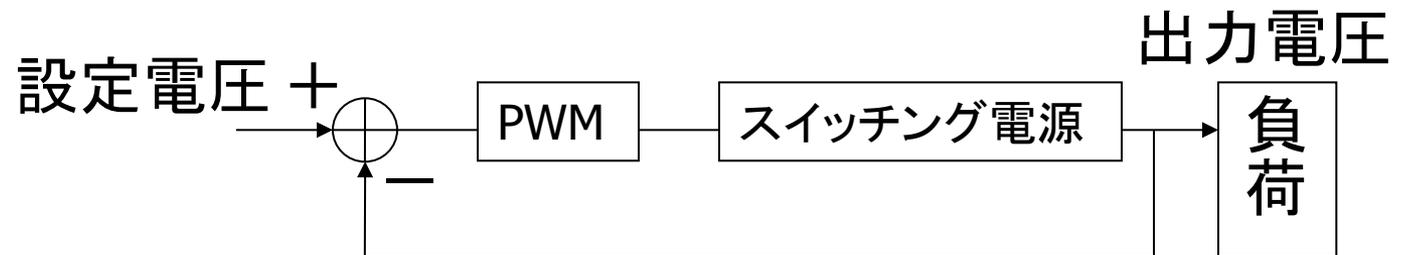


PWM制御の特徴

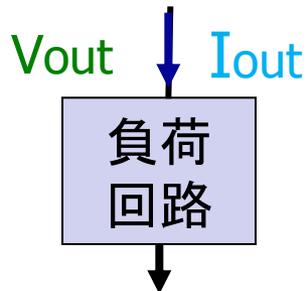
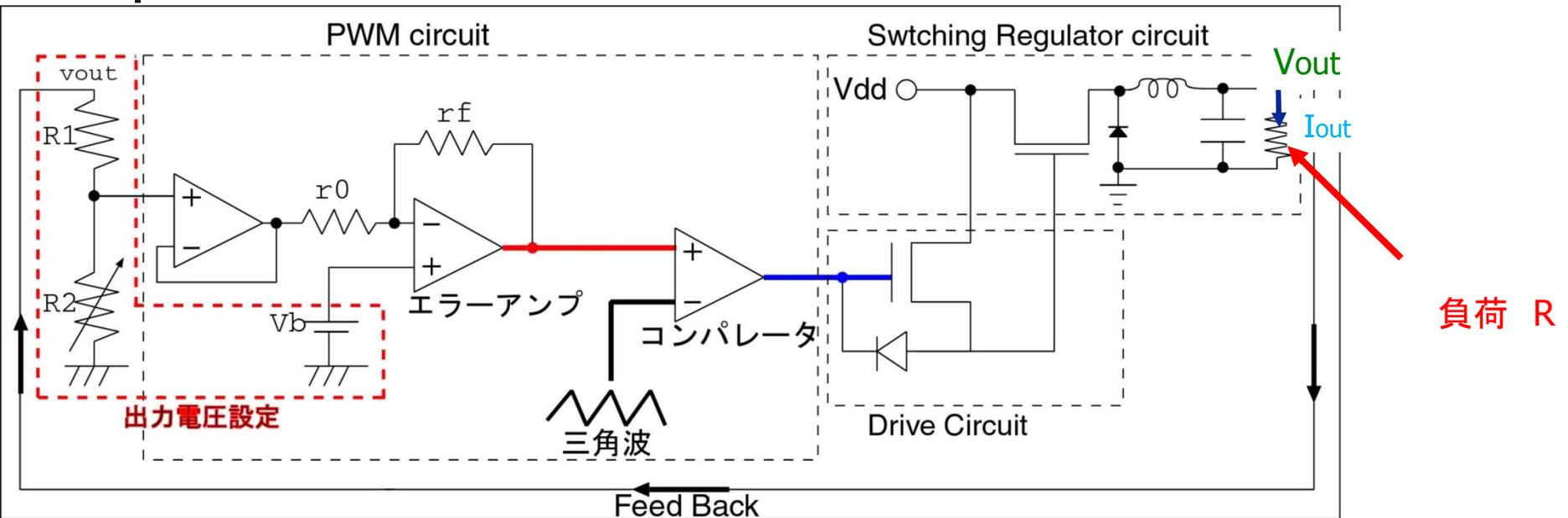
- スイッチでON/OFF
⇒ 電力効率が良い



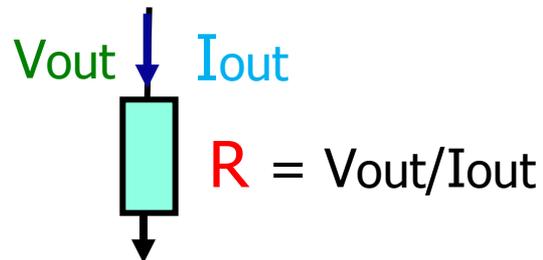
- 帰還制御
⇒ 負荷によらず出力電圧が安定



負荷回路の抵抗Rでのモデリング



デジタルのプロセッサ等



抵抗Rでのモデル



トランジスタの役割を大別

MOS動作領域

- ① 信号増幅 (飽和領域)
- ② 電流源 (飽和領域)
- ③ 可変抵抗 (線形領域)

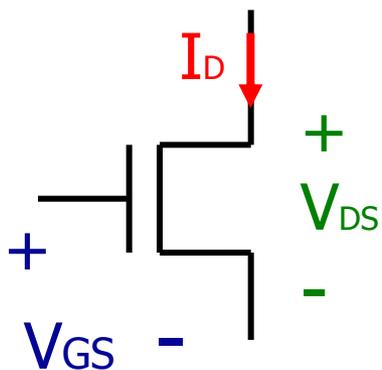
Transistor = Trans + Resistor

Linear Regulator

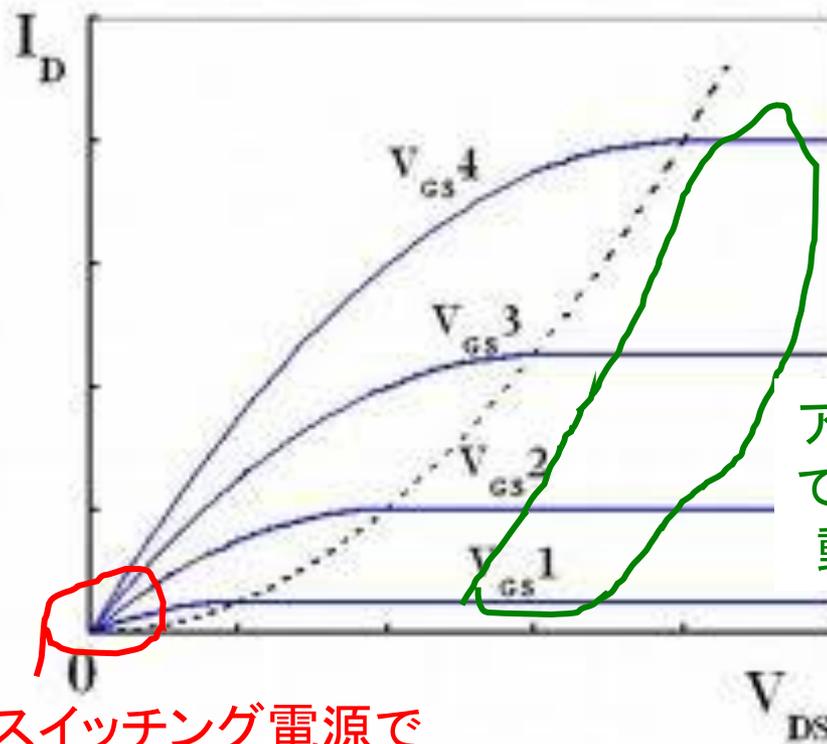
- ④ スイッチ (線形領域@ $V_{ds} = 0$)

Switching Regulator

使用するMOS動作領域



D



アンプ設計
で使用する
動作領域

スイッチング電源で
使用する動作領域

理想スイッチは電力損失がゼロ

● 電力損失 $P = V I$

● スイッチオフ

$$I = 0 \longrightarrow P = 0$$



● スイッチオン

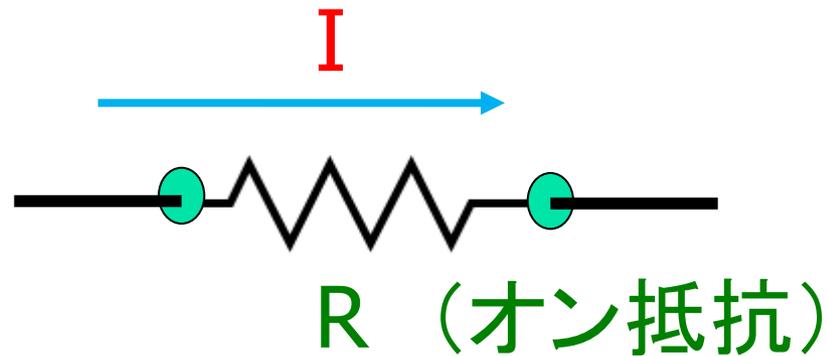
$$V = 0 \longrightarrow P = 0$$



実際のスイッチの電力損失

導通損失 (Conduction Loss)

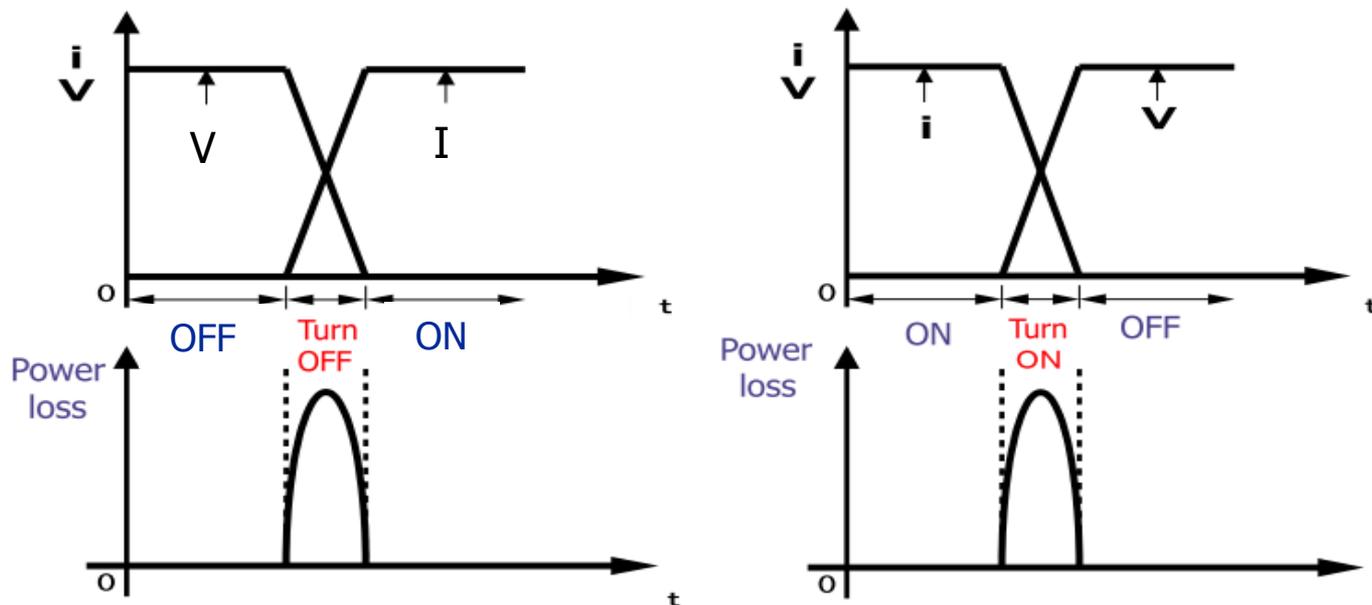
● スイッチオン



導通損失 $P = R I^2$

実際のスイッチの電力損失

スイッチング損失 (Switching Loss)

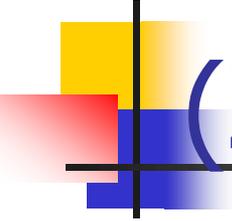


Switch turn OFF

Switch turn ON

高速スイッチングデバイス

→ スwitching損失 小



ゼロ電圧スイッチング (Zero Voltage Switching : ZVS)

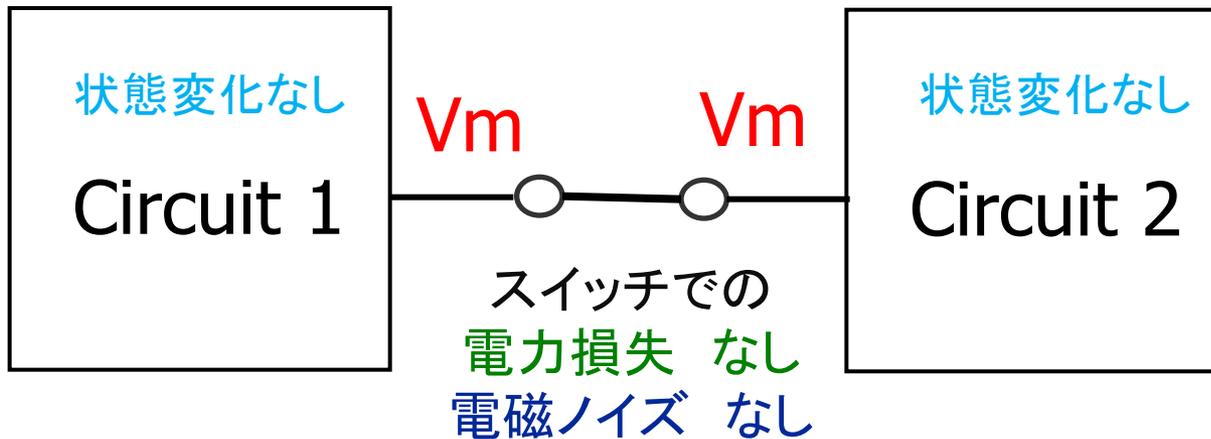
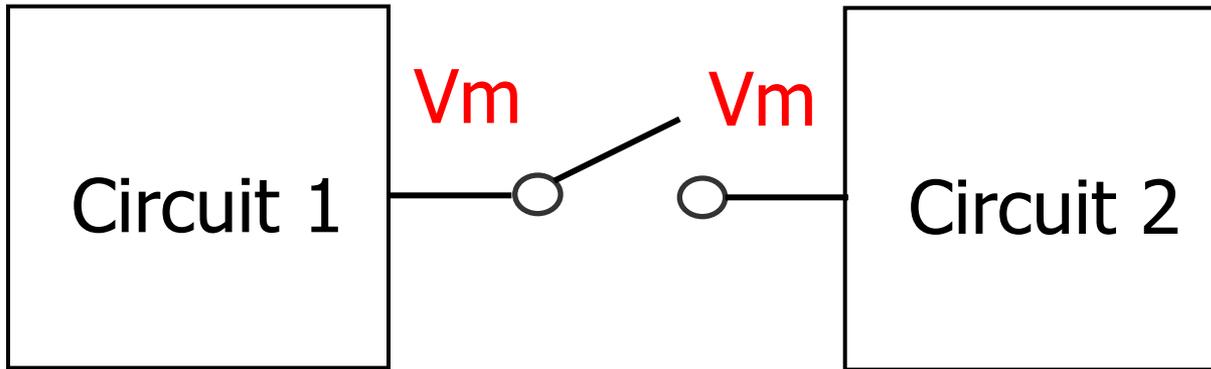
状態を変化せずにスイッチをオン

誰もきがかからないように
ドアを開ける

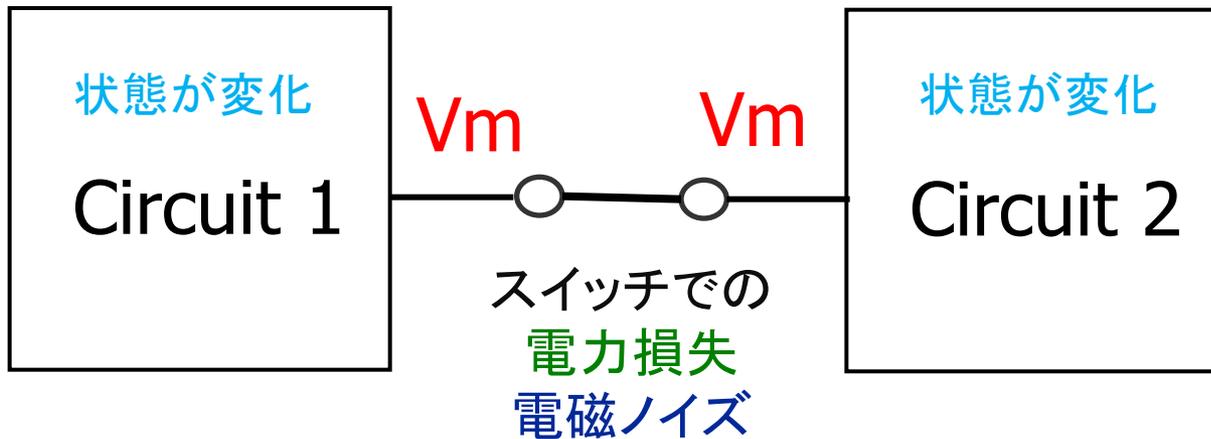
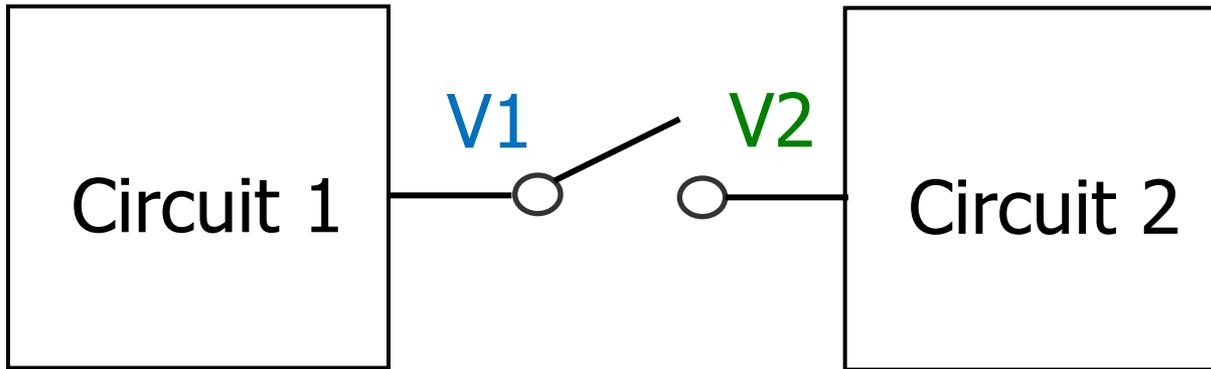
(ドアの前で待ち人なしのときに
ドアを開ける)

ZVS (Zero Volt Switching)

$V_1 = V_2$ で スイッチオン



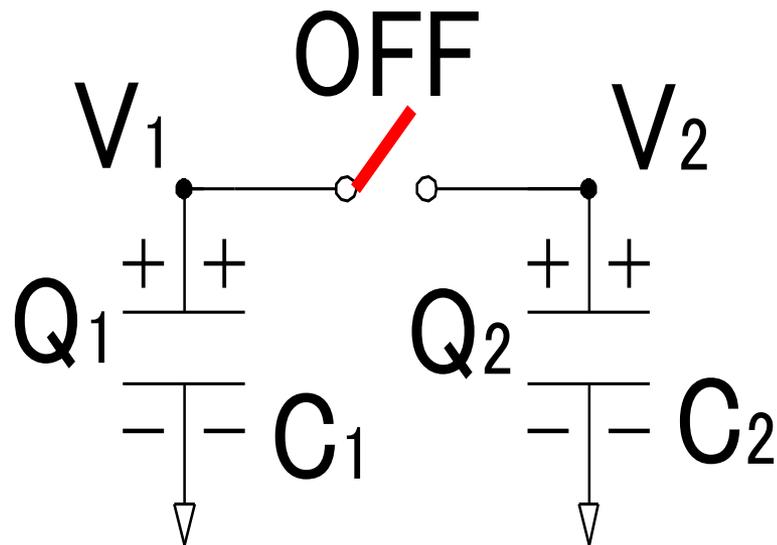
$V1 \neq V2$ で スイッチオン



スイッチ

OFF  ON

● スイッチ OFF 時



電荷：

$$Q_1 = C_1 \cdot V_1$$

$$Q_2 = C_2 \cdot V_2$$

エネルギー：

$$E = \frac{1}{2} C_1 \cdot V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 \cdot V_2^2$$

スイッチ

OFF → ON

● スイッチ ON 時

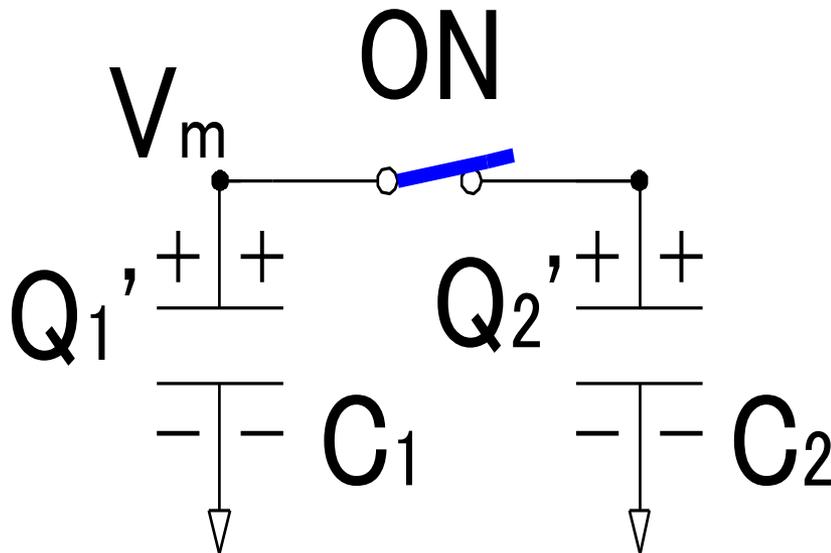
電荷：

$$Q_1' = C_1 \cdot V_m$$

$$Q_2' = C_2 \cdot V_m$$

エネルギー：

$$E' = \frac{1}{2} (C_1 + C_2) V_m^2$$



● 電荷保存則

SW OFF 時の電荷 $Q_1 + Q_2$

ON 時の電荷 $Q_1' + Q_2'$

$$\therefore V_m = \frac{1}{C_1 + C_2} (C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2)$$

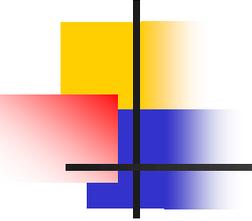
● SW OFF 時と ON 時の蓄積エネルギーは異なる。

SW ON時のスイッチでのエネルギー・ロス

$$\begin{aligned} E_{loss} &= E - E' \\ &= \frac{1}{2} \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} (V_1 - V_2)^2 \end{aligned}$$

● $V_1 = V_2$ のとき、SW ON → ゼロ電圧スイッチング

→ スイッチ・エネルギー・ロス $E_{loss} = 0$



ゼロ電流スイッチング (Zero Current Switching: ZCS)

状態を変化せずにスイッチをオフ

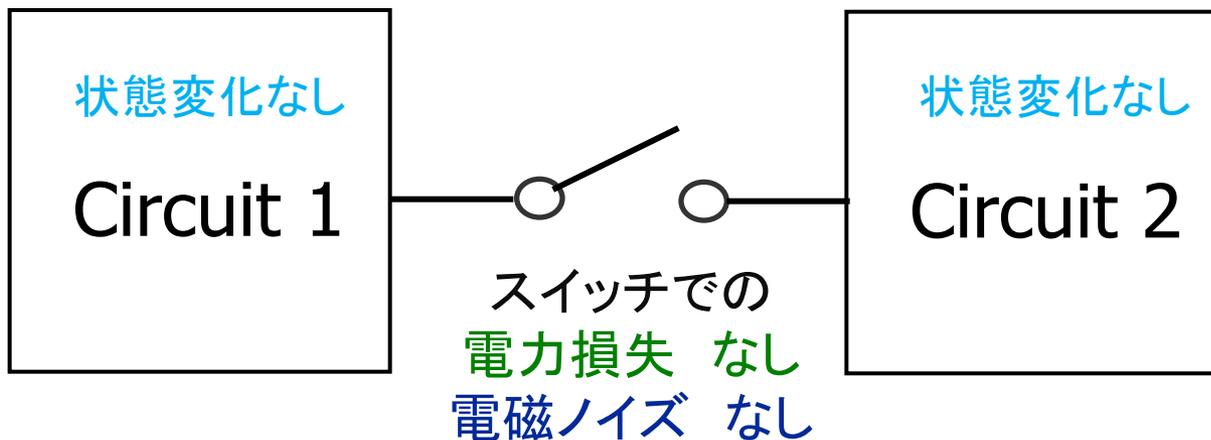
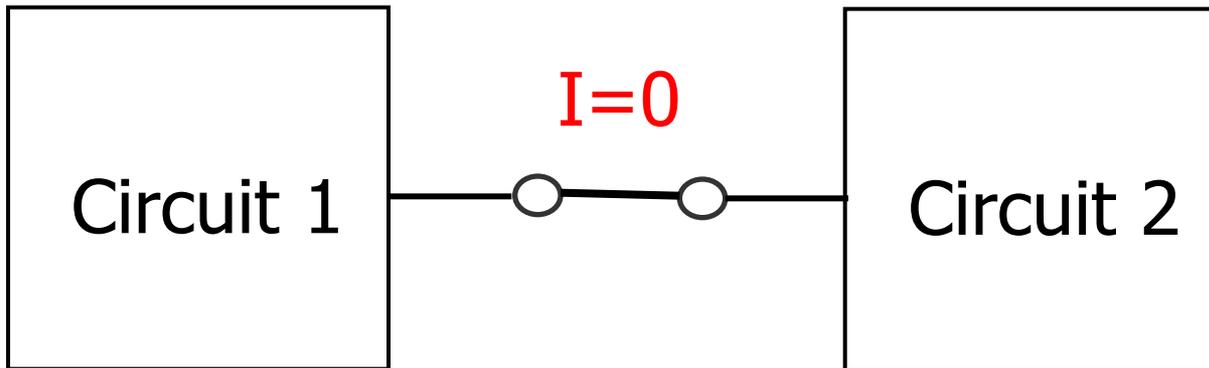
誰も気がつかないように
ドアを閉める

(ドアを通る人がいないときに
ドアを閉める)

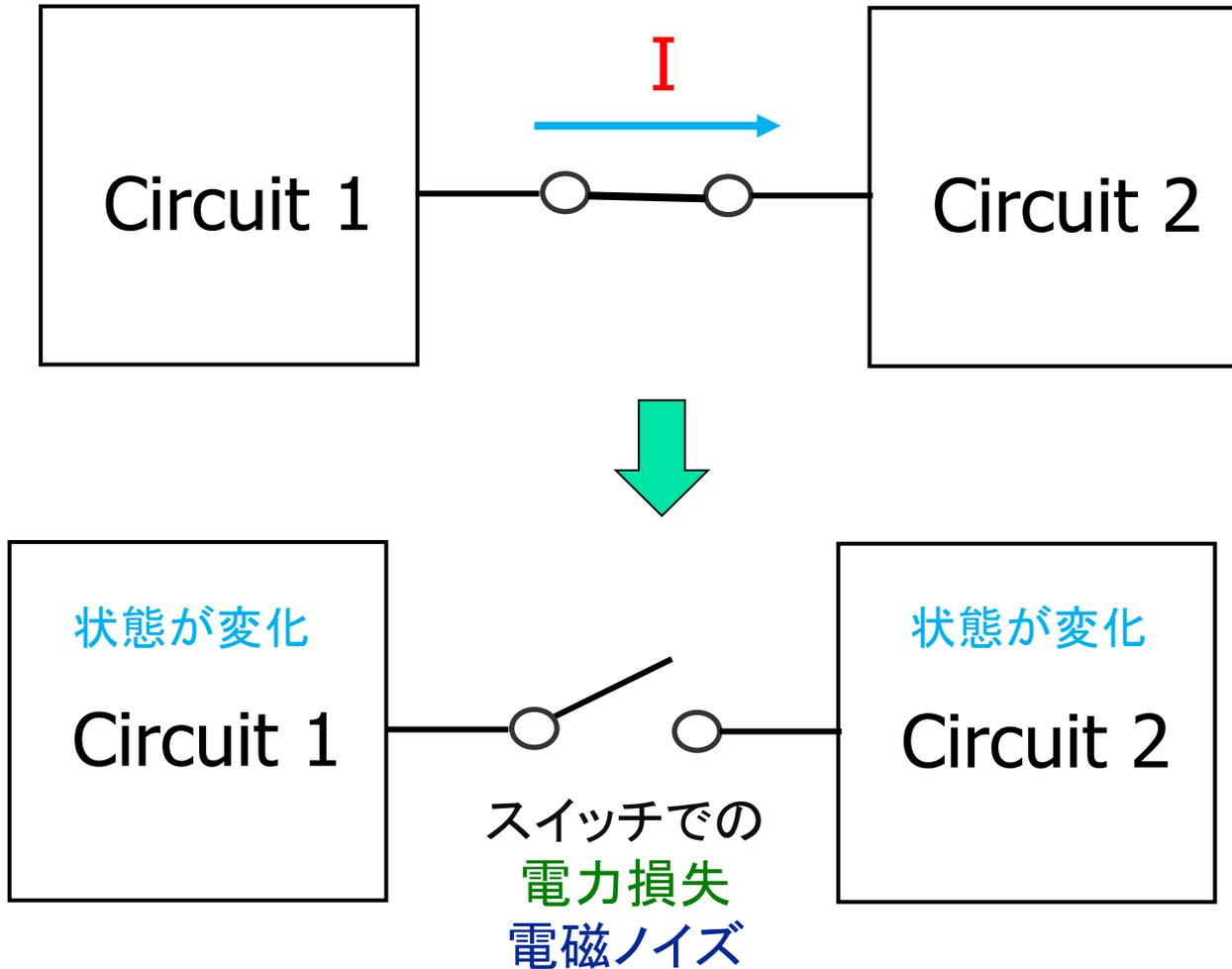
ゼロ電圧スイッチングの双対問題

ZCS (Zero Current Switching)

電流 $I = 0$ で スイッチオフ

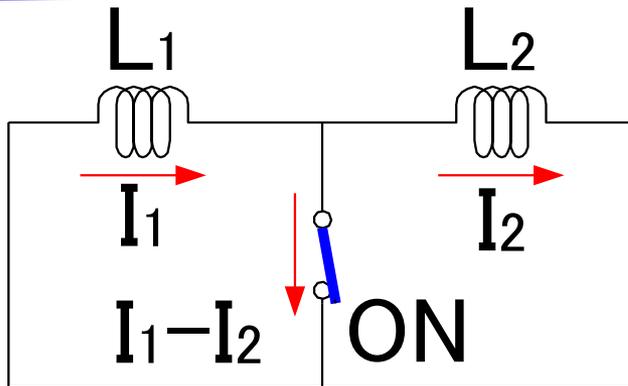


電流 $I \neq 0$ で スイッチオフ

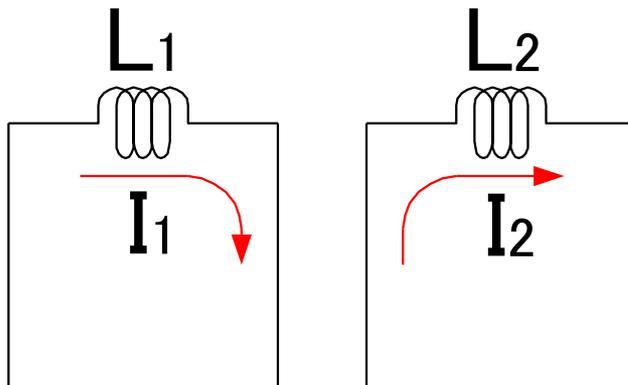


スイッチ

ON → OFF



|||



● スイッチ ON 時

磁束：

$$L_1 \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2$$

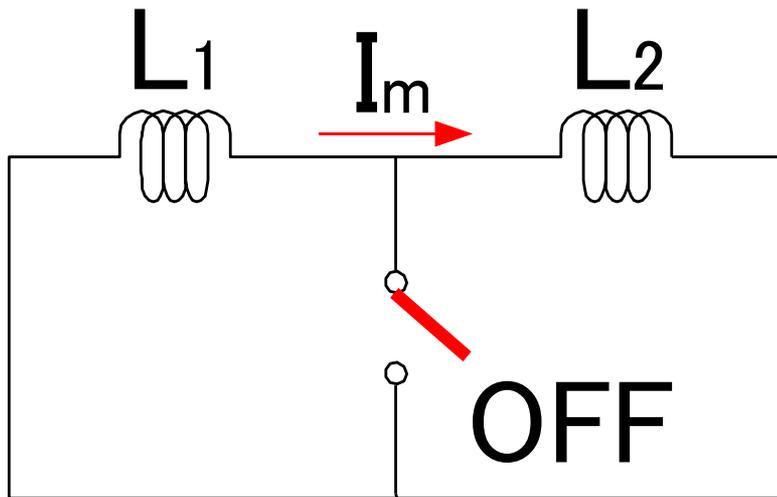
エネルギー：

$$E = \frac{1}{2} L_1 \cdot I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 \cdot I_2^2$$

スイッチ

ON → OFF

● スイッチ OFF 時



磁束：

$$(L_1 + L_2)I_m$$

エネルギー：

$$E' = \frac{1}{2} (L_1 + L_2) I_m^2$$

●磁束保存則

SW ON 時の磁束 $L_1 \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2$

OFF 時の磁束 $(L_1 + L_2)I_m$

$$I_m = \frac{1}{L_1 + L_2} (L_1 \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2)$$

● SW ON 時と OFF 時の蓄積エネルギーは異なる。

SW OFF 時のスイッチでのエネルギー・ロス

$$\begin{aligned} E_{loss} &= E - E' \\ &= \frac{1}{2} \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} (I_1 - I_2)^2 \end{aligned}$$

● $I_1 = I_2$ のとき、SW OFF → ゼロ電流スイッチング

→ スイッチ・エネルギー・ロス $E_{loss} = 0$

「名料理人が牛をさばく」



莊子

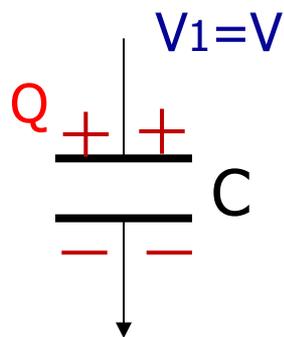
牛は さばかれているのも
死んだのも気付かない。

「私は牛の筋や骨の隙間に刀を入れるので
刀が折れたり欠けたりしない。
未熟者は力任せにするから
刀が折れたり欠けたりする。」

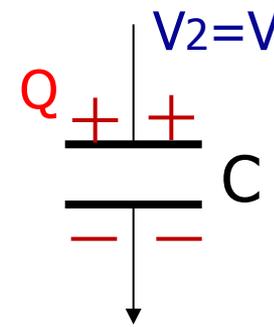
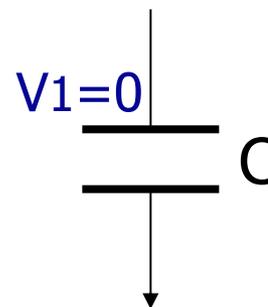
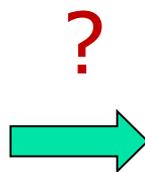
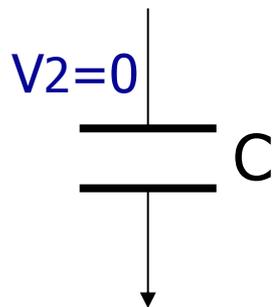
ソフトスイッチング = 名料理人

容量間の電荷伝送

エネルギー損失なしで 右から左は可能か



$$Q = C V$$

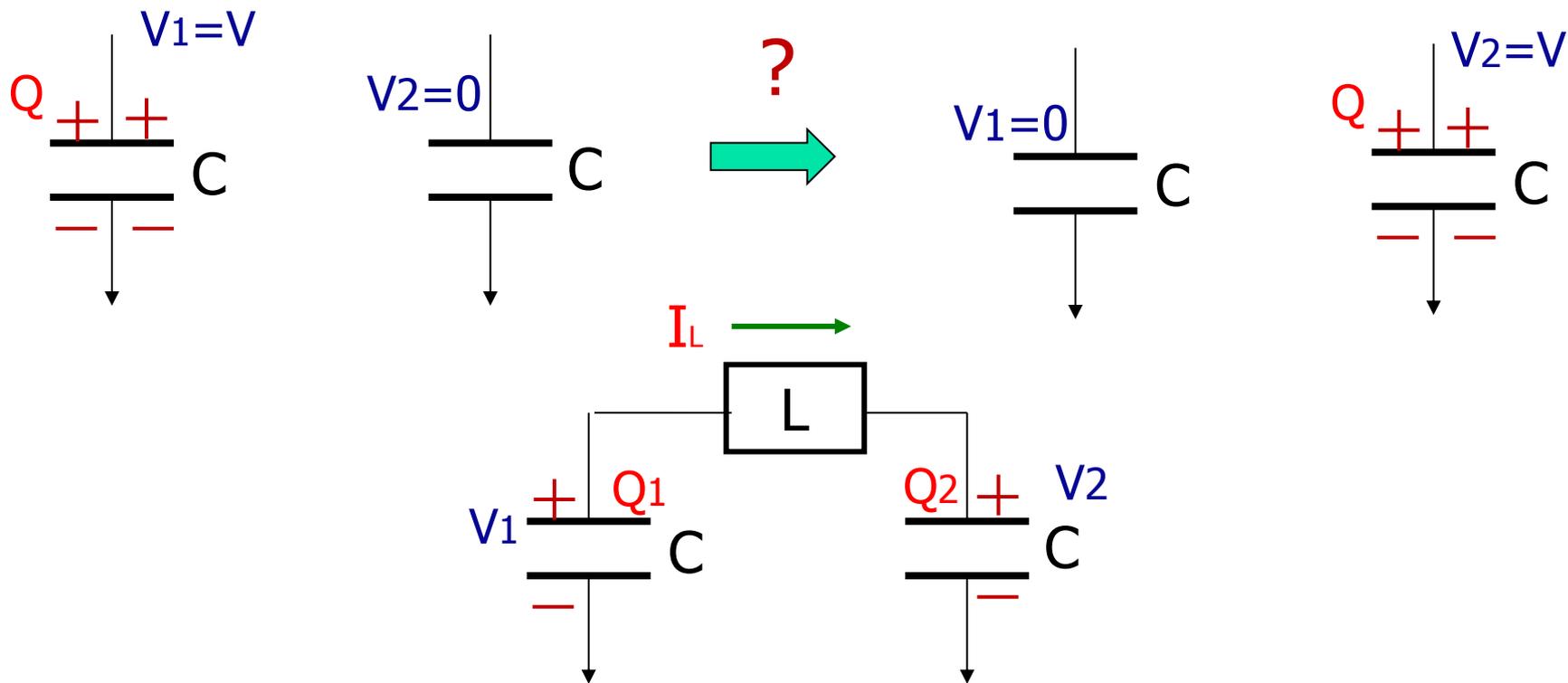


$$Q = C V$$

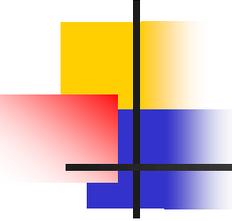
容量間の電荷伝送

インダクタは優れた受動素子

エネルギー損失なしで 右から左は**可能**！



$$(1/2) C V_1^2 + (1/2) C V_2^2 + (1/2) L I_L^2 = \text{一定}$$



「効率」ではなく「損失」で考える

「電源効率を96% から98% に」

→ 大したことはない？

効率96% → 損失4%

効率98% → 損失2%

「損失を半分(4%から2%)にする」

→ 非常に大きな効果

付録

アナログ集積回路での 美しい回路/レイアウトとは何か

「美は対称性にある」（白石洋一先生）

パワエレ回路、電源回路は
この感覚はほとんどない！

アナログ回路のレイアウト

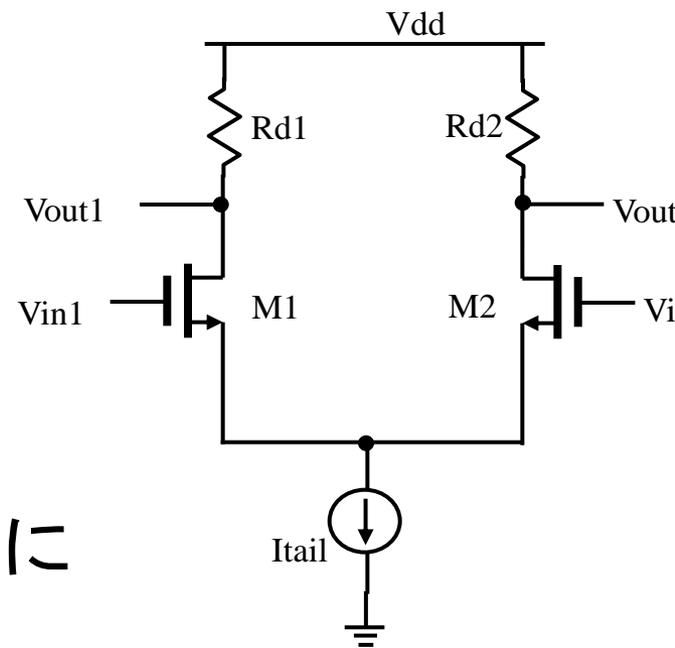
- 見た目が美しいのは 良いレイアウト

- 「美しいレイアウト」とは何か

その一つとして

アナログ回路は差動回路が多用

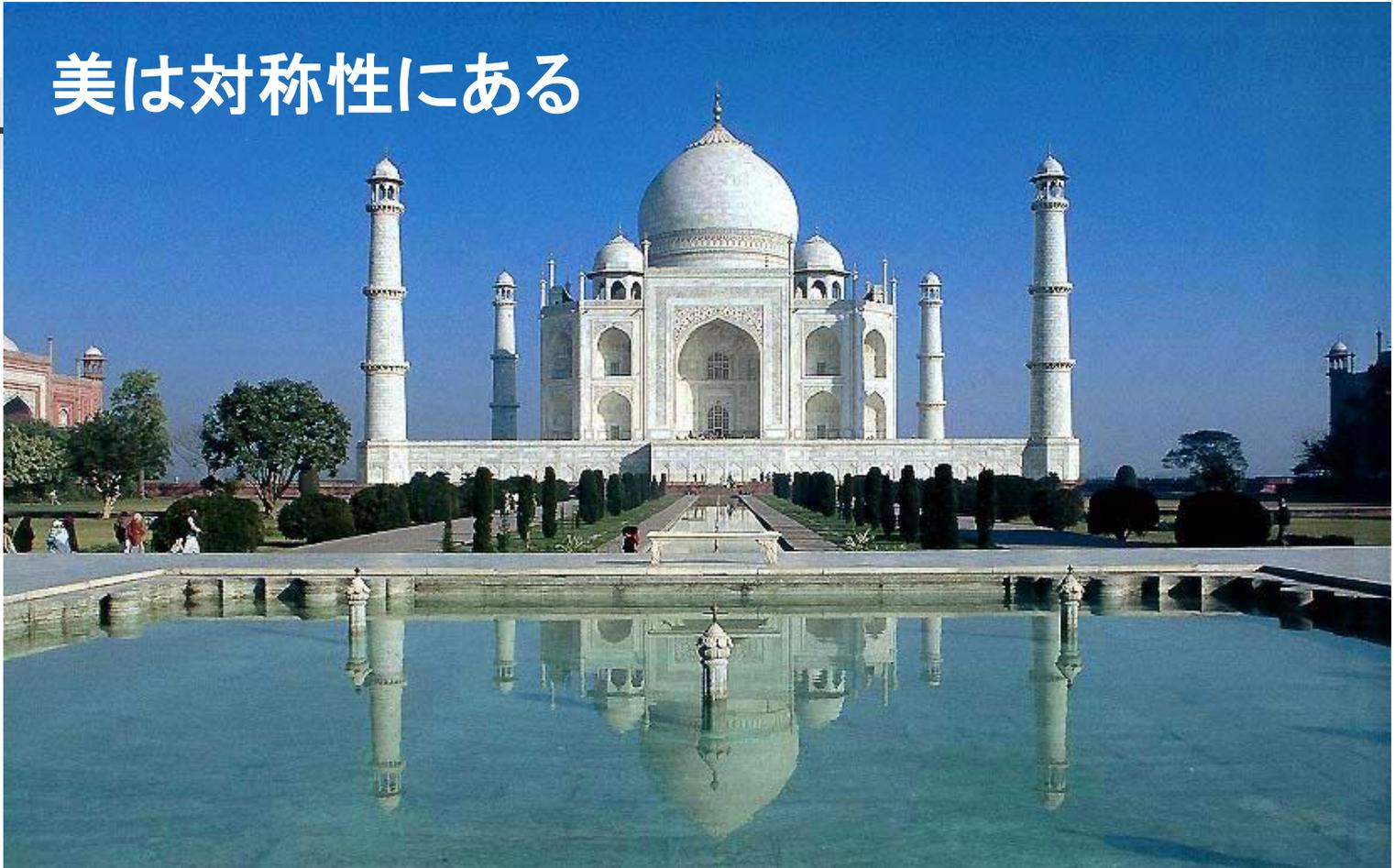
回路が対称 → レイアウトも対称に



差動回路
左右対称

レイアウト設計者が求める美しさ

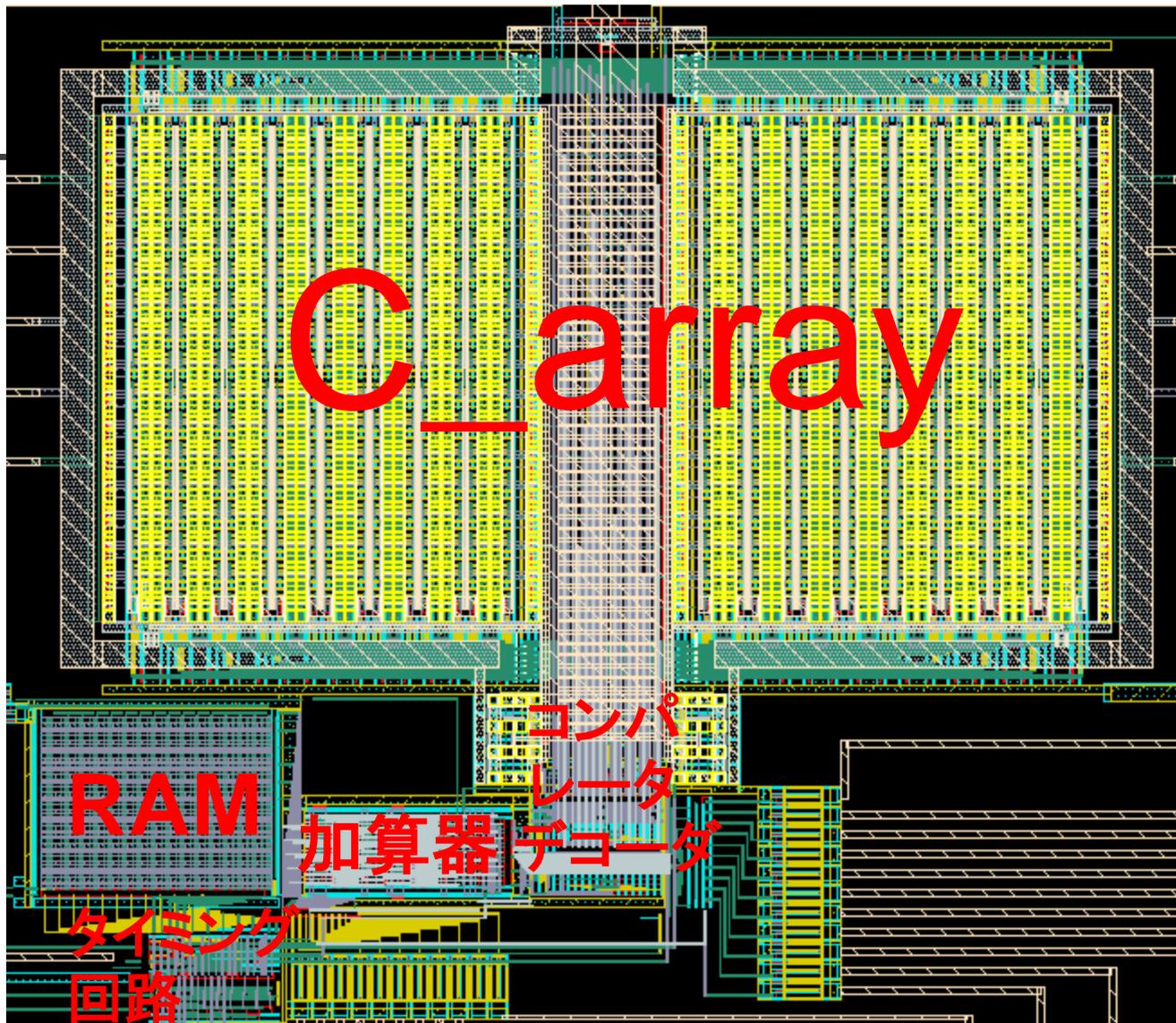
美は対称性にある



タージマハール

群馬大学 白石洋一先生 資料より

対称なレイアウト (逐次比較近似ADC)



タージマハール

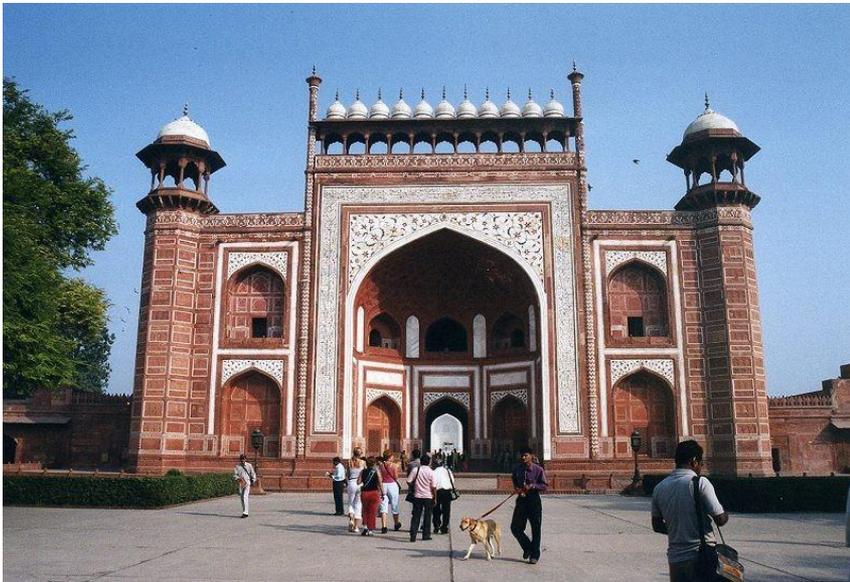
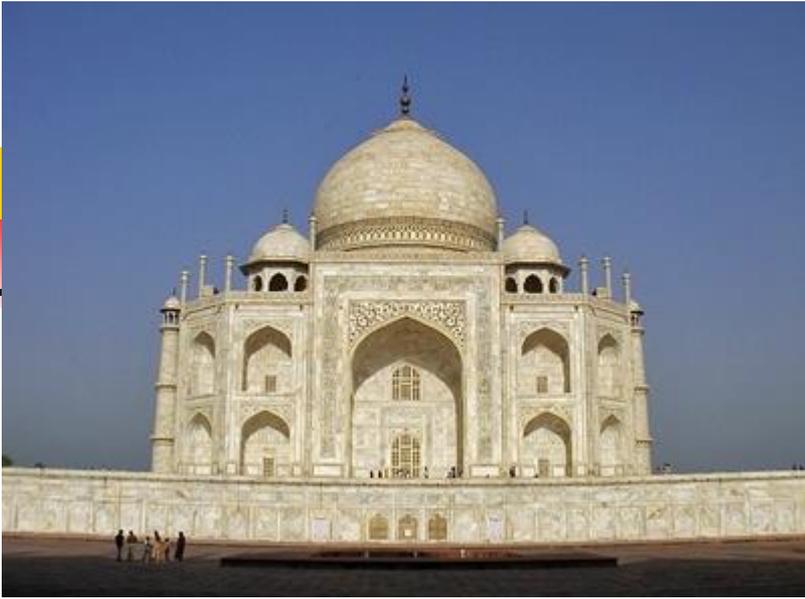


22年間かけて造営された
いとしい妻への記念碑

正確無比なシンメトリーが美しいパレス風の建物。
ムガル帝国5代皇帝シャー・ジャハーンが、
亡くなった王妃のために1632年から22年の歳月をかけて造営。

愛の代償は幽閉。シャー皇帝の予想外の末路
皇帝は晩年タージマハールの向かいに黒大理石の宮殿を
建てようとした。

第3皇子によって近くのアグラ城の塔に幽閉されてしまう。
理由はタージマハール建築での莫大な浪費。
皇帝は塔の中から7年間タージマハールを眺め、
その生涯を閉じた。



UCLA Royce Hall

左右対称ではない



クイズ:
なぜ対称に
作らなかったのか