群馬大学

チャージポンプ電源回路の過渡解析

群馬大学工学部電気電子工学科
○柏瀬賢二、早坂直人、黒岩伸幸、小林春夫

三洋電機セミコンダクタ・カンパニー
名野隆夫

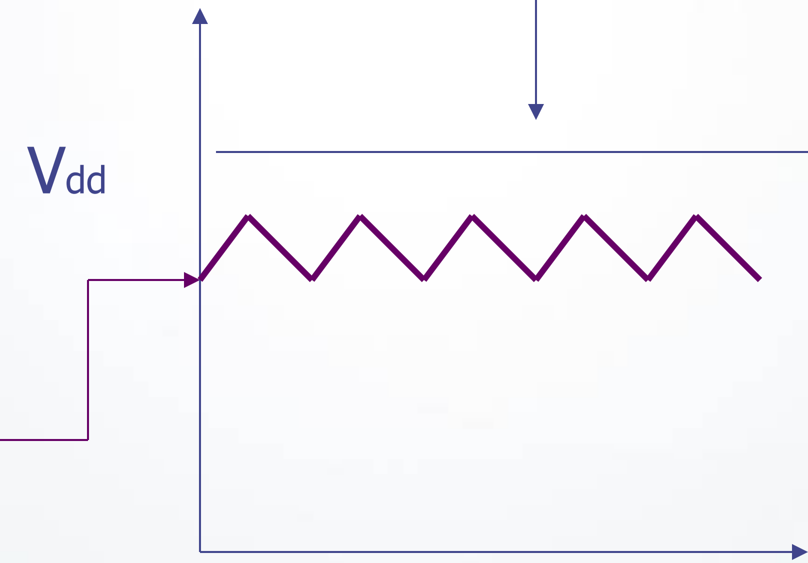
発表内容

- チャージポンプ電源回路の背景
- 研究の目的
- ノード電圧、出力電圧の一般式の導出
- 過渡状態でのエネルギー消費
- 今後の課題

チャージポンプ回路の研究背景

携帯機器での電源回路の必要(1)

- 理想的な電源とは？
  - 負荷によらず
    一定の電圧を供給

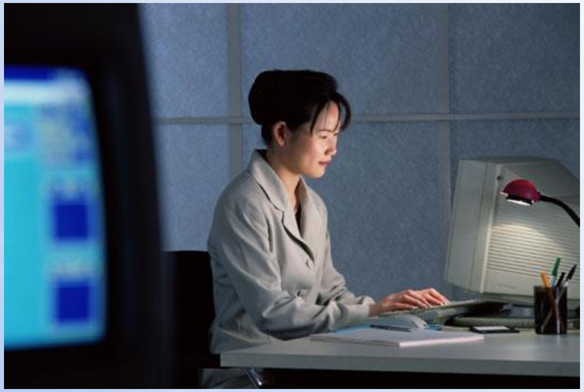


- しかし実際の電源は？
- 内部抵抗により電圧降下
  - 寄生成分等によりリップル電圧
  - 負荷電流の変動に対して出力電圧の追従変動が生じる
- **低リップル･高速追従性を持つ電源回路**が必要

携帯機器での電源回路の必要性(2)

携帯機器において用途によって要求される電源電圧は異なる

- 例えば、
  - PCで作業中　VS　PCのスタンバイ時

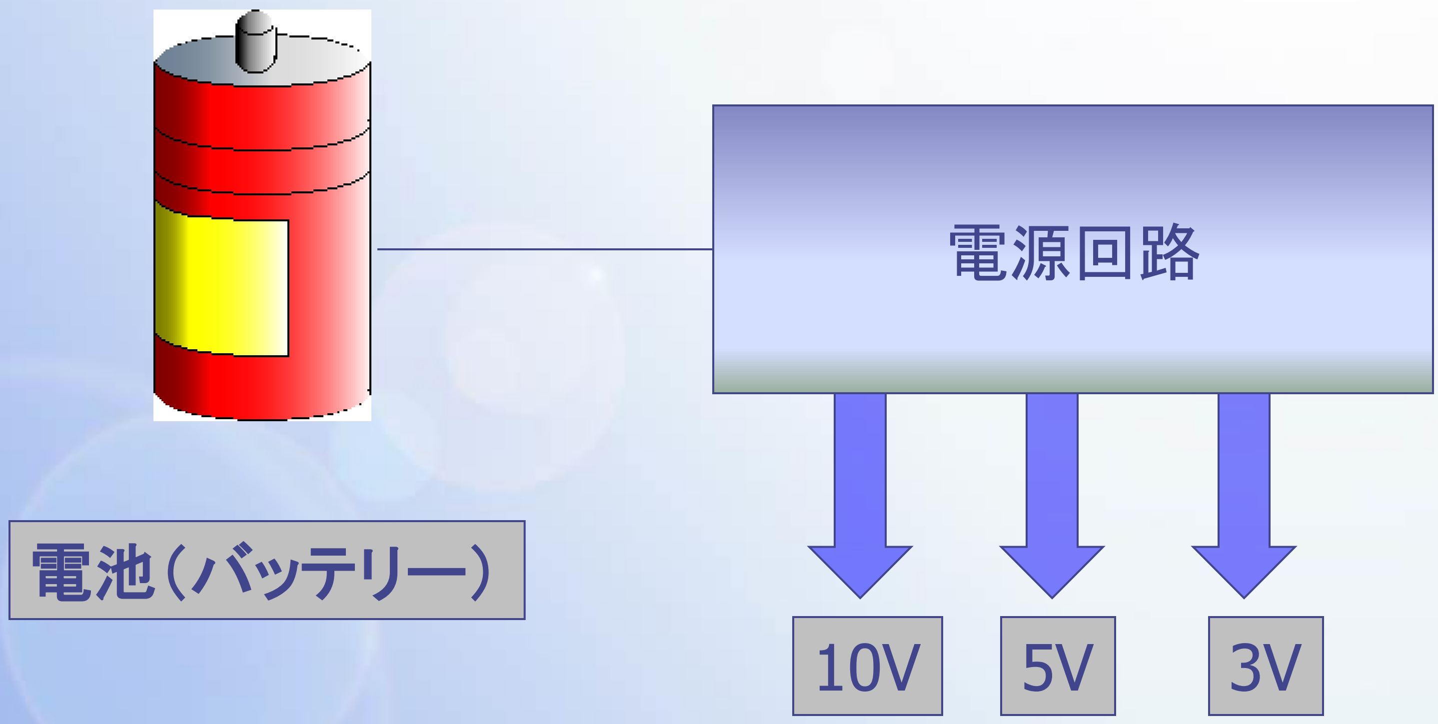


– **可変電源制御が必要**

– **従来はスイッチング電源回路が多用**

携帯機器での電源回路の必要性(3)

- 一つの電源電圧から複数の電源電圧を発生
  携帯機器の動作電圧を最適化



チャージポンプ電源回路とは

- 供給電源電圧より高い電源電圧を発生。

（例えば 入力電源電圧3.3V　出力電源電圧15V）

- 多数のコンデンサによる電荷の積分を、トランジスタ・スイッチやダイオードで切り替えることで実現。

- 一つの電源電圧から複数の出力電圧を発生させることが可能。

携帯機器用チャージポンプ電源回路の課題

1．　スイッチング電源回路
- 高効率、大電流出力　○
- ノイズが大きい　×
- コイルが必要（コスト大、実装上の厚さ）　×

2．　チャージポンプ回路
- ノイズが小さい　○
- コイル不要　　○
- 低効率　　　×
- 出力が小電流（数十 uA)しか流せない　×

Flash Memory 等に使用される。

チャージポンプ電源回路のアプリケーション･市場

- ●携帯電話
- ●PDA (Personal Digital Assistance)
- ●DSC (Digital Still Camera)

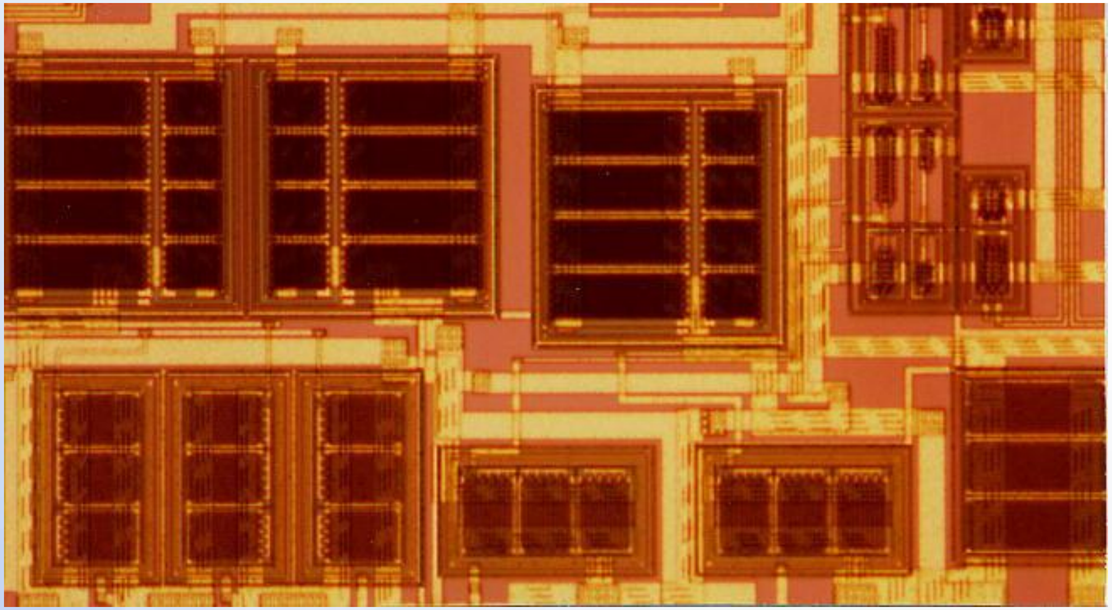
これまでのチャージポンプ回路の研究成果

1. 三洋電機と群馬大の共同研究で開発
   - 三洋電機(飯島隆氏)が

   電子情報通信学会 「回路とシステム軽井沢ワークショップ奨励賞」受賞 (H13年4月)

2. 三洋電機セミコンダクタ・カンパニーで事業化

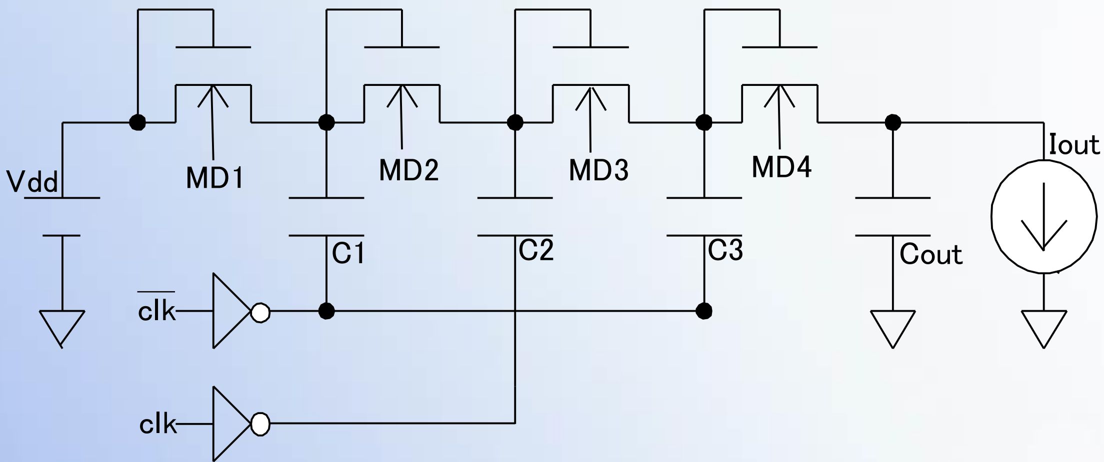
- 開発したチャージポンプ電源回路のチップ写真



縦3.99mm×横4.35mm

三洋電機の半導体プロセスで試作・製品化。

Dickson charge pump回路（3段）

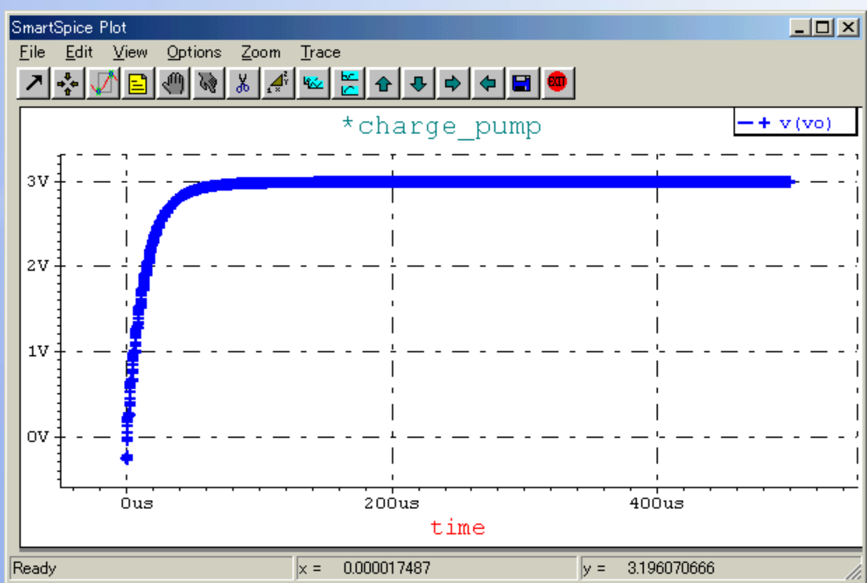


SPICEネットリスト

chargepump.cir - メモ帳

```
*charge_pump

mn1 vdd vdd 1 0 cmosn w=200u   l=2u
mn2 1 1 2 0 cmosn w=200u l=2u
mn3 2 2 3 0 cmosn w=200u l=2u
mn4 3 3 vo 0 cmosn w=200u l=2u

C1 1 vl 50p
C2 2 vh 50p
C3 3 vl 50p
Cout vo 0 100p

C4 1 0 5p
C5 2 0 5p
C6 3 0 5p
C7 vo 0 5p

vdd vdd 0 2
vh vh 0 pulse(0 2 0.01u 0.01u 0.01u 1u 2u)
vl vl 0 pulse(2 0 0.01u 0.01u 0.01u 1u 2u)

Iout vo 0 1u

.tran 0.5u 500u


.probe
*PARAMETER
```

出力波形



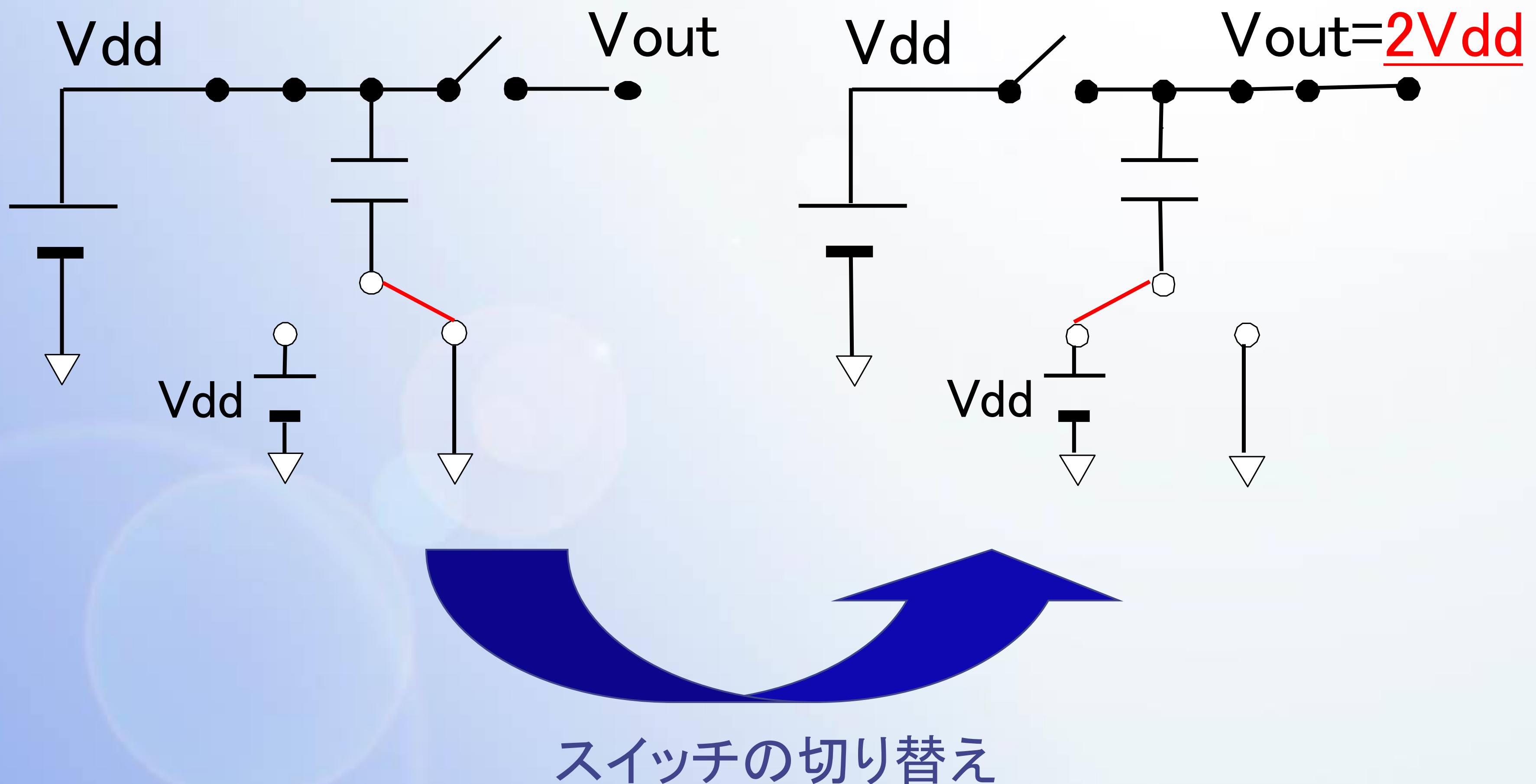
研究の目的

- チャージポンプ電源回路の過渡状態のノード電圧、出力電圧を一般式で表す。

- 入力電源から供給されるエネルギー、容量に蓄積されるエネルギー、スイッチで消費されるエネルギーの関係を調べる。

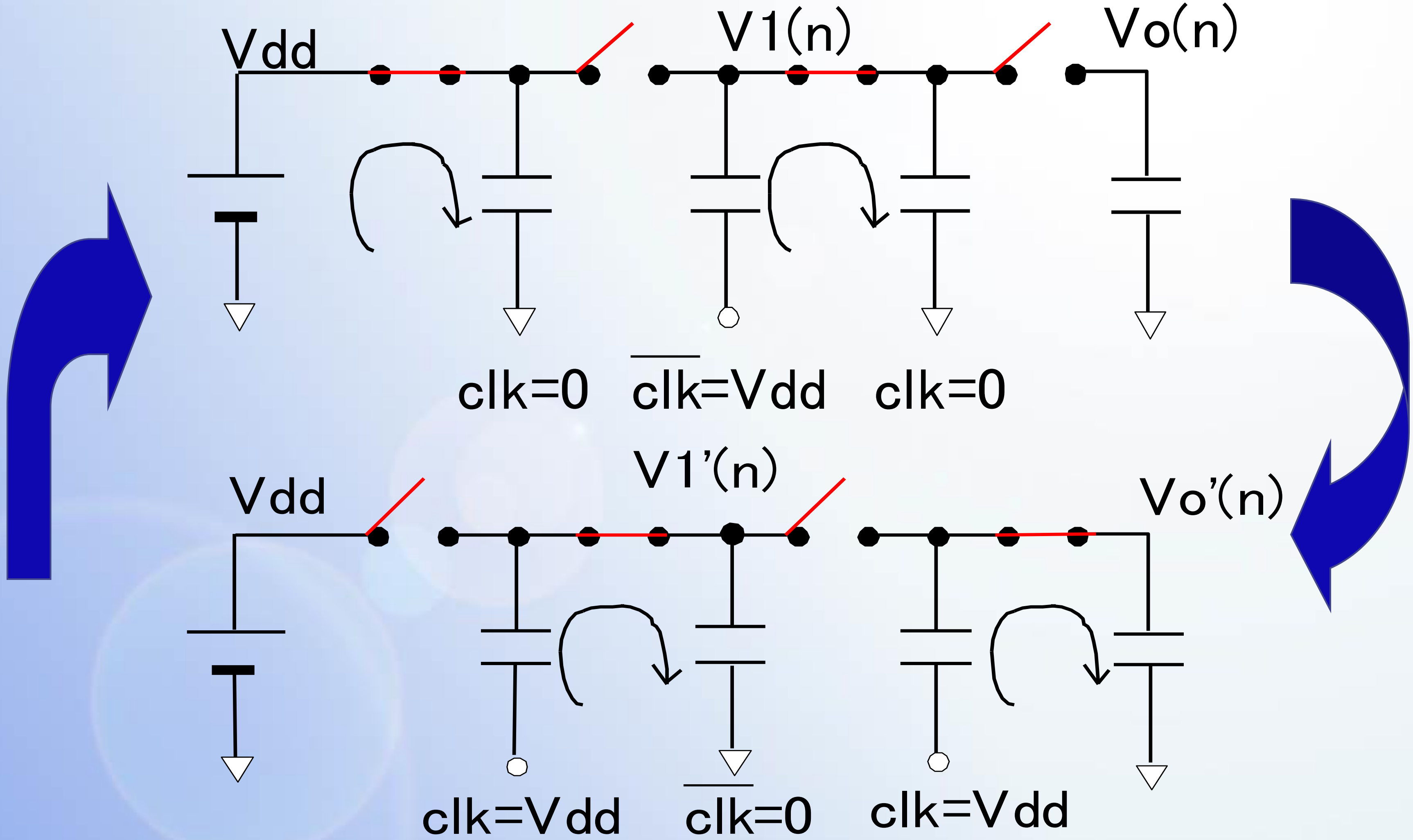
過渡状態における
ノード電圧、出力電圧の
一般式の導出

昇圧の原理

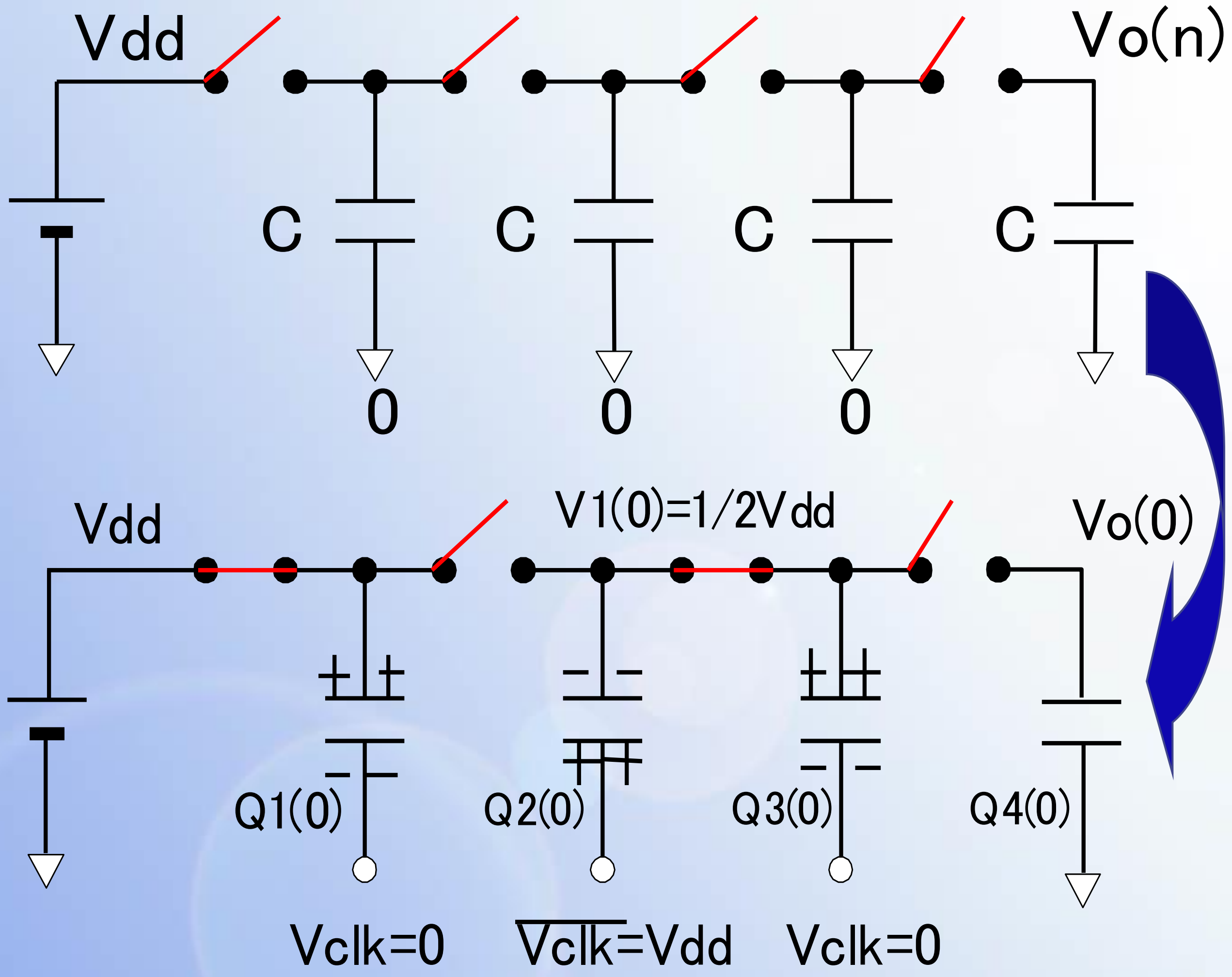


charge pump回路の1サイクル

入力電圧　Vdd　クロックclk,　出力Vo → 4Vdd(定常状態)



初期状態



全スイッチoff
全クロックlow

2つスイッチon
1つスイッチhigh

Q1(0)=CVdd

Q2(0)=1/2CVdd

Q3(0)=1/2CVdd

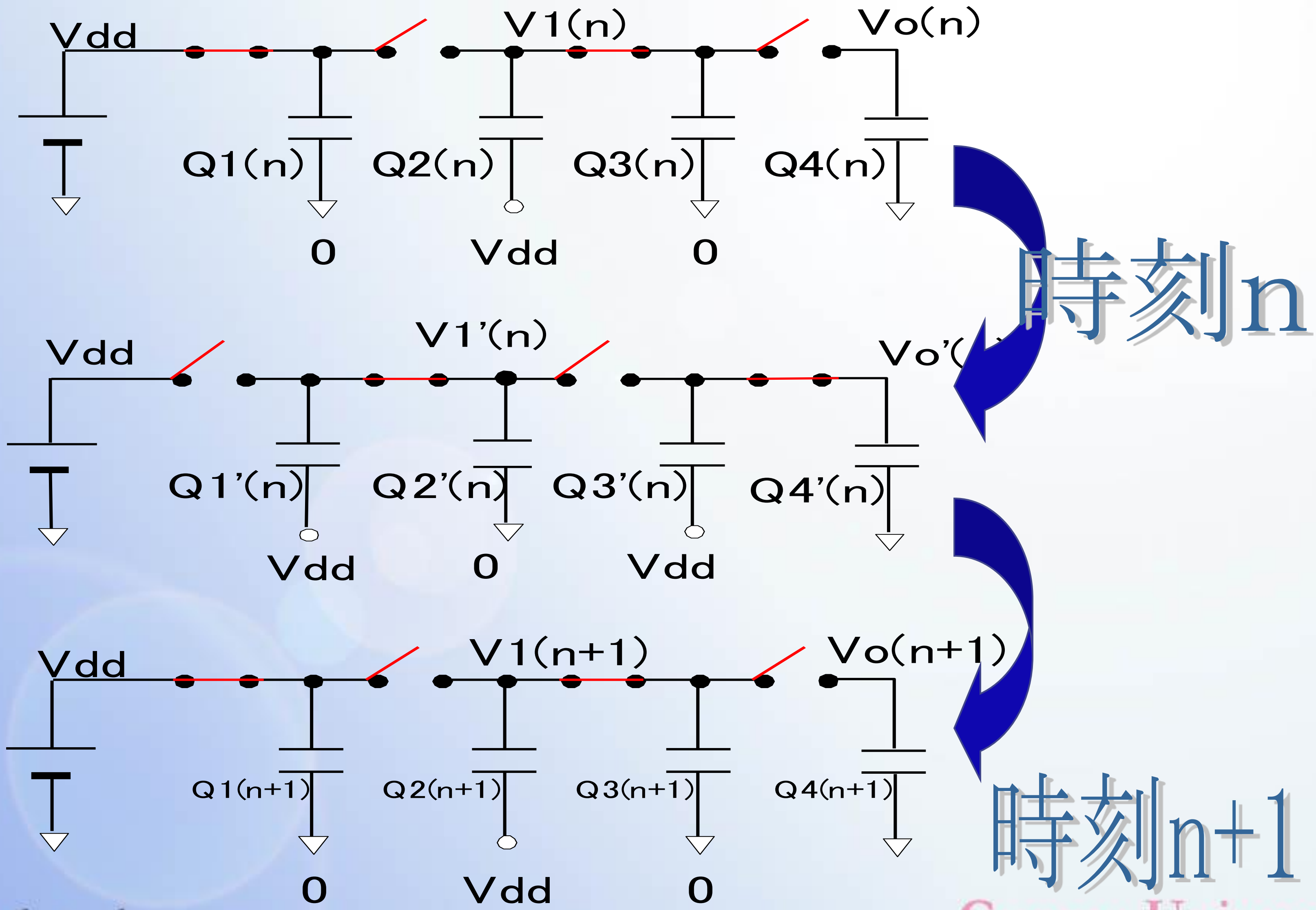
Q4(0)=0

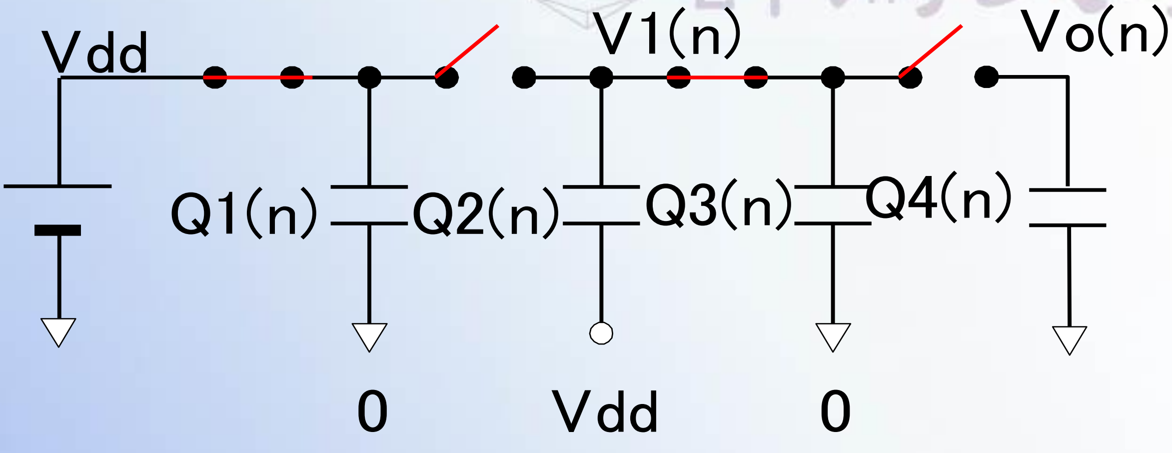
時刻n→n+1によるスイッチの変化

図2

図3

図4





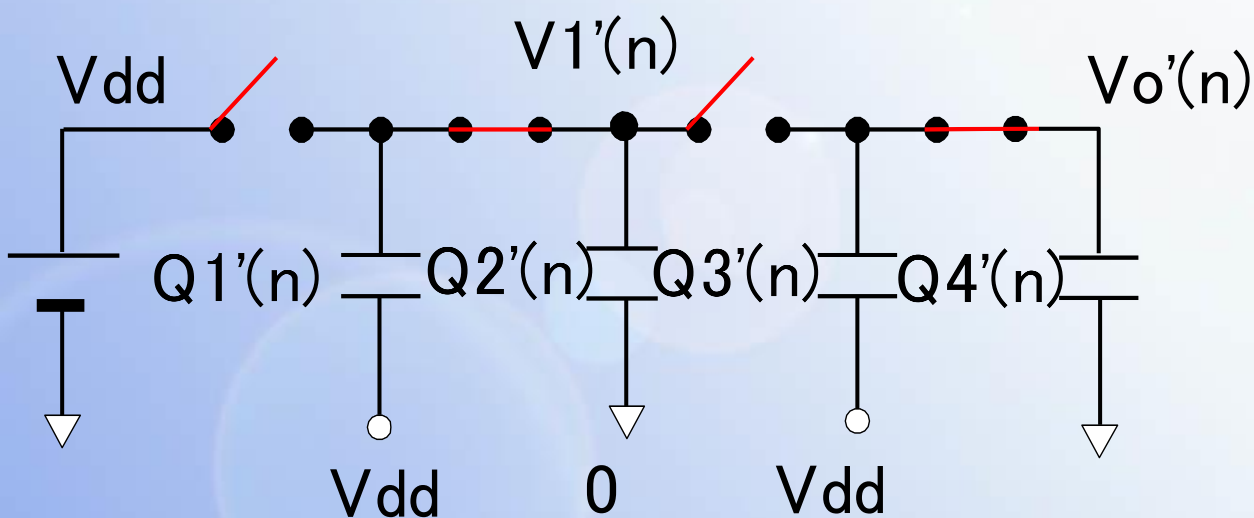
$Q_1(n)=CV_{dd}$

$Q2(n)=C[V1(n)—Vdd]$

$Q3(n)=CV1(n)$

$Q4(n)=Cvo(n)$

図2



$Q1'(n)=C[V1'(n)-Vdd]$

$Q2'(n)=CV1'(n)$

$Q3'(n)=C[Vo'(n)-Vdd]$

$Q4'(n)=CVo'(n)$

図3

電荷保存則より

Q1(n)+Q2(n)= Q1′(n)+Q2′(n)

Q3(n) +Q4(n)= Q3′(n)+Q4′(n)

∴ CVdd+C[V1(n)-Vdd]=C[V1′(n)Vdd]+CV1′(n)

CV1(n) +Cvo(n)= C[Vo′(n)-Vdd]+ Cvo′(n)

$$V1'(n) = \frac{1}{2}\{V1(n) + Vdd\} \cdot \cdot \cdot ①$$

$$Vo'(n) = \frac{1}{2}\{V1(n) + Vo(n) + Vdd\} \cdot \cdot \cdot ②$$

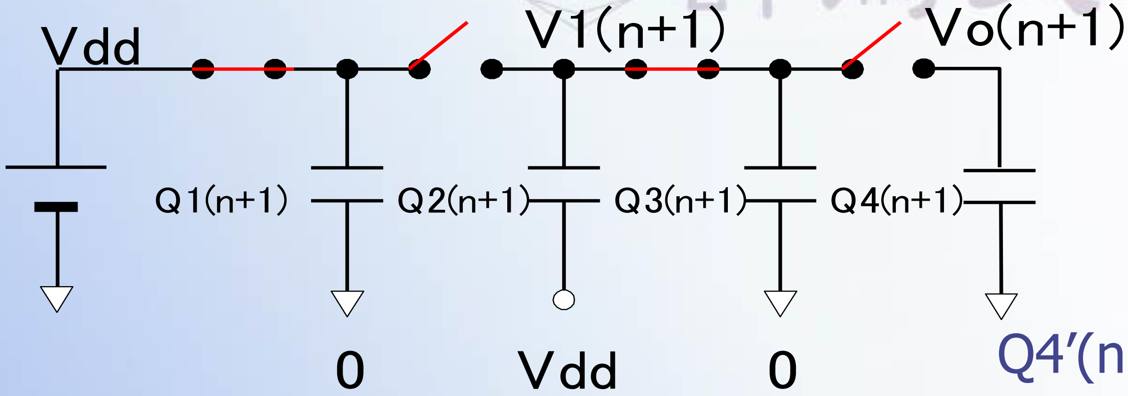


図4

Q4′(n)=Q4(n+1)より

Vo′(n)=Vo(n+1)･･･③

電荷保存則

Q2(n+1)+Q3(n+1)= Q2′(n) +Q3′(n)

∴ C[V1(n+1)-Vdd] +CV1(n+1)

= CV1′(n) +C[Vo′(n)-Vdd]･･･④

②,③,④より

Vo(n+1)=1/2[V1(n)+Vo(n)+Vdd]･･･⑤

V1(n+1)=1/4[2V1(n)+Vo(n)+2Vdd]･･･⑥

Q1(n+1)=CVdd

Q2(n+1)=C[V1(n+1)-Vdd]

Q3(n+1)=CV1(n+1)

Q4(n+1)=CVo(n+1)

⑤⑥より状態方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} Vo(n+1) \\ V1(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vo(n) \\ V1(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}Vdd \\ \frac{1}{2}Vdd \end{bmatrix}$$

$$\Updownarrow$$

V(n+1)=AV(n)+B

この漸化式より

$V(n)=A^{n}V(0)+[A^{n-1}+A^{n-2}+\cdots A+I]B$

● $A=\begin{pmatrix}\frac{1}{2} & \frac{1}{2}\\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2}\end{pmatrix}$ の時

$$A^n=\begin{pmatrix}\frac{1}{2}(\lambda_1{}^n+\lambda_2{}^n) & \frac{1}{\sqrt{2}}(\lambda_1{}^n-\lambda_2{}^n)\\ \frac{1}{2\sqrt{2}}(\lambda_1{}^n-\lambda_2{}^n) & \frac{1}{2}(\lambda_1{}^n+\lambda_2{}^n)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a & b\\ c & d\end{pmatrix}$$

ただし固有値 $\lambda_1=\frac{2+\sqrt{2}}{4},\lambda_2=\frac{2-\sqrt{2}}{4}$

● $S_{n-1}=A^{n-1}+A^{n-2}+\cdots+A+I$ を求める

$$AS_{n-1}=A^n+A^{n-1}+A^{n-2}+\cdots+A^2+A$$

$$-\quad S_{n-1}=\quad A^{n-1}+A^{n-2}+\cdots+A^2+A+I$$

$$(A-I)S_{n-1}=A^n-I$$

$$S_{n-1}=(A-I)^{-1}(A^n-I)$$

$$S_{n-1}=\begin{pmatrix}4(1-a-c) & 4(1-b-d)\\ 2(1-a-2c) & 2(2-b-2d)\end{pmatrix}$$

◆ $V(n)=A^nV(0)+S_{n-1}B$にA^n, S_{n-1}を代入

出力電圧一般式

$$Vo(n)=\frac{1}{2}\left(\lambda_1{}^n+\lambda_2{}^n\right)Vo(0)+\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\lambda_1{}^n-\lambda_2{}^n\right)V1(0)+\left(\frac{-2\sqrt{2}-3}{\sqrt{2}}\lambda_1{}^n-\frac{2\sqrt{2}-3}{\sqrt{2}}\lambda_2{}^n+4\right)Vdd\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \textcircled{7}$$

ノード電圧一般式

$$V1(n)=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\lambda_1{}^n-\lambda_2{}^n\right)Vo(0)+\frac{1}{2}\left(\lambda_1{}^n+\lambda_2{}^n\right)V1(0)+\left(\frac{-3-2\sqrt{2}}{2}\lambda_1{}^n+\frac{2\sqrt{2}-3}{2}\lambda_2{}^n+3\right)Vdd\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \textcircled{8}$$

ここで$\lambda_1=(2+\sqrt{2})/4<1$、$\lambda_2=(2-\sqrt{2})/4<1$

∴ $n\to\infty$のとき $\lambda_1{}^n\to 0$, $\lambda_2{}^n\to 0$

∴ $Vo(\infty)=4Vdd, V1(\infty)=3Vdd$

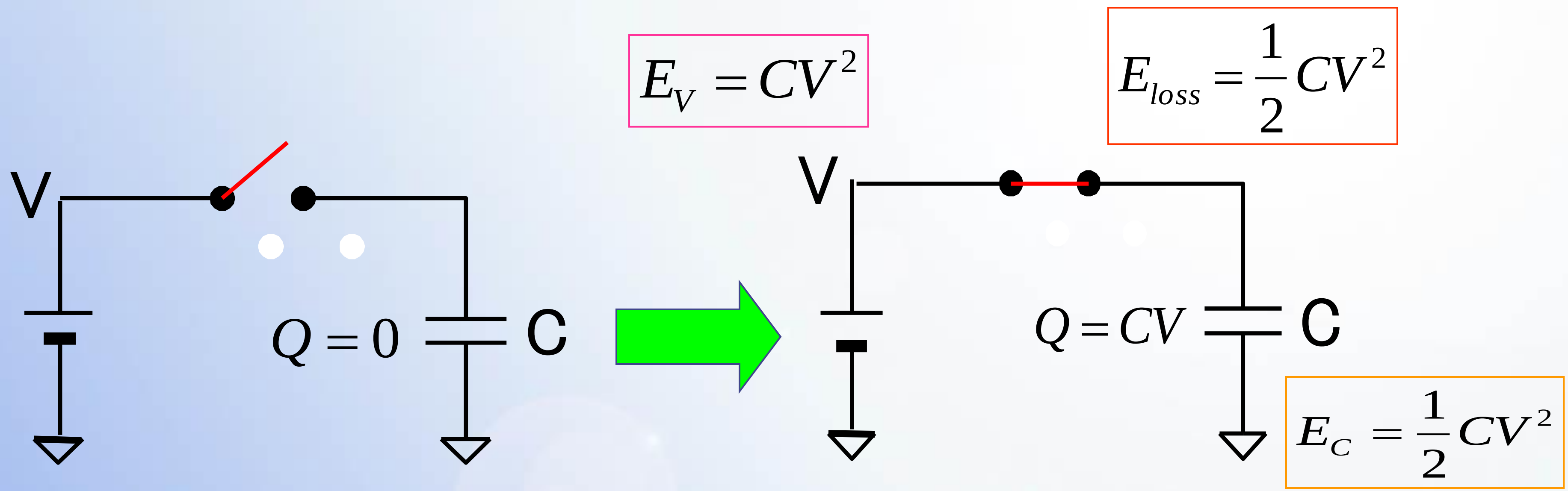
- 状態方程式を用いて、
  3段チャージポンプ回路の出力電圧、
  ノード電圧の一般式を導出。

- 任意のN段のチャージポンプ回路にも
  同様な手法を適用可能。

過渡状態でのエネルギー消費の考察

チャージポンプ回路の過渡状態で
●入力電源Vddから供給されるエネルギー
●容量に蓄積されるエネルギー
●スイッチで消費されるエネルギー
との関係を調べる

容量Cに充電する場合のエネルギー消費



Ev=Eloss+Ec　　Eloss=Ec

- Charge pump回路も、
  容量とスイッチから構成される。

入力電圧Vddから供給されるエネルギー
＝　容量Cに蓄積されるエネルギー　＋
スイッチで消費されるエネルギー

容量Cに蓄積されるエネルギー　＝
スイッチで消費されるエネルギー
が成立することを確認する

①,1サイクルでの
②,過渡状態での

- 供給されるエネルギー
- 容量Cに蓄積されるエネルギー
- ロスされるエネルギー

〃

を求める。

①1サイクルで入力電源Vddから供給されるエネルギー：Es(n)

- 図2→図3の時クロックドライバから供給されるエネルギー
  Vdd(Q1(n)－Q1′(n))＋Vdd(Q3(n)-Q3′(n))

＝C/2 Vdd[4Vdd-Vo(n)]･･･⑩

- 図3→図4の時

電源電圧Vddから供給されるエネルギー

Vdd[CVdd-Q1′(n)]= C/2 Vdd[3Vdd-V1(n)]･･･ ⑪

クロックドライバから供給されるエネルギー

Vdd[Q2′(n)-Q2(n+1)]=C/4 Vdd[4Vdd-Vo(n)]･･･⑫

∴Es(n)=⑩+⑪+⑫= C/4 Vdd[18Vdd-2v1(n)-3Vo(n)]･･･⑬

①１サイクルで容量Cに蓄積されるエネルギー:Ec(n+1)-Ec(n)

◆ 図２の時にコンデンサに蓄積されるエネルギー

$$Ec(n)=C/2\ [Vdd^2+(V1(n)-Vdd)^2+V1(n)^2+Vo(n)^2]$$
$$=C/2\ [2V1(n)^2+2Vdd^2-2V1(n)Vdd+Vo(n)^2]\cdots⑭$$

◆ 図4の時にコンデンサに蓄積されるエネルギー

$$Ec(n+1)=C/2\ [Vdd^2+(V1(n+1)-Vdd)^2 +V1(n+1)^2+Vo(n+1)^2]$$
$$=C/16\ [6V1(n)^2+3Vo(n)^2+14Vdd^2+8V1(n)Vo(n) +4Vo(n)Vdd+4V1(n)Vdd]\cdots⑮$$

①1サイクルで容量Cに蓄積されるエネルギー:Ec(n+1)-Ec(n)

従ってEc(n+1)-Ec(n)

$=C/16\ [-10V1(n)^2-5Vo(n)^2-2Vdd^2$

$+8V1(n)Vo(n)+4Vo(n)Vdd+20V1(n)Vdd]$ ・・・⑯

①1サイクルでスイッチで消費されるエネルギー：Eloss(n)

消費されるエネルギー＝（電源電圧から供給されるエネルギー）

－（容量Cに蓄積されるエネルギー）

$$
\begin{aligned}
Eloss(n) &= Es(n)-[Ec(n+1)-Ec(n)] \\
&= C/16\ [10V1(n)^2+5Vo(n)^2+74Vdd^2 \\
&\quad -8V1(n)Vo(n)-16Vo(n)Vdd \\
&\quad -28V1(n)Vdd] \quad \cdots ⑰
\end{aligned}
$$

②過渡状態で電源電圧から供給されるエネルギー:Es

Es= $$\lim_{N\to\infty}\sum_{n=0}^{N} Es(n)$$

初期状態V1(0)=1/2 Vdd、Vo(0)=0
を考慮し⑦、⑧、⑬を代入。

Es=28.5CVdd^2

②過渡状態で容量Cに蓄積されるエネルギー：Ec

- Ec= $\lim_{n\to\infty} Ec(n)$

ここでV1(∞)=3Vdd,Vo(∞)=4Vddより

$Ec(n)=C/2[2V1(n)^2+2Vdd^2-2V1(n)Vdd+Vo(n)^2]$ だから

$Ec=C/2\ (18Vdd^2+2Vdd^2-6Vdd^2+16Vdd^2]$

$Ec=15CVdd^2$

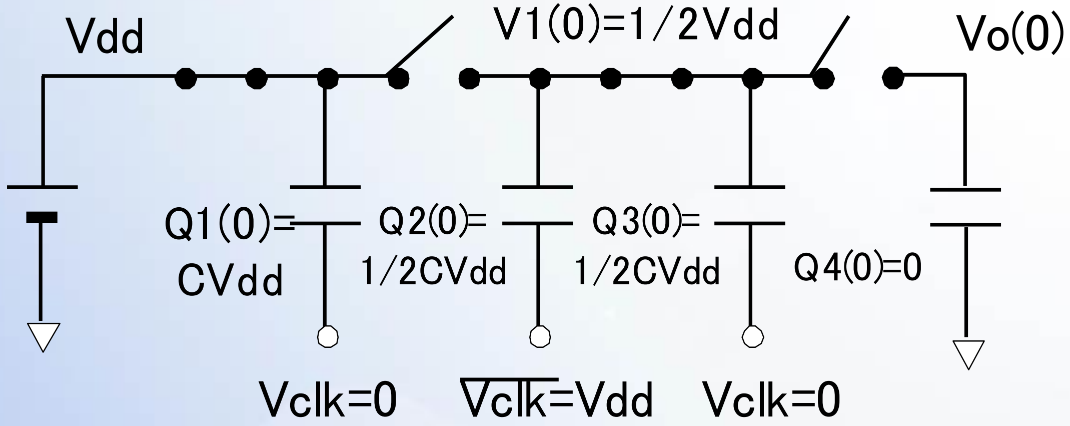
②過渡状態でスイッチで消費されるエネルギー：Eloss

- Eloss= $$\lim_{N\to\infty}\sum_{n=0}^{N} Eloss(n)$$

供給されるエネルギーの時と同様にここで初期状態
V1(0)=1/2 Vdd、Vo(0)=0
を考慮し⑦、⑧、⑰を代入すると

Eloss=14.25CVdd^2

初期状態でのエネルギー



ここで初期状態で電源とクロックから供給されるエネルギー

$Es(0)=CVdd^2+ 1/2\ CVdd^2= \ 1.5\ CVdd^2$

また容量Cに蓄積されるエネルギー

$Ec(0)= C/2\ [Vdd^2+(1/2Vdd)^2 + (1/2Vdd)^2]=0.75CVdd^2$

$\therefore Eloss = 0.75CVdd^2$

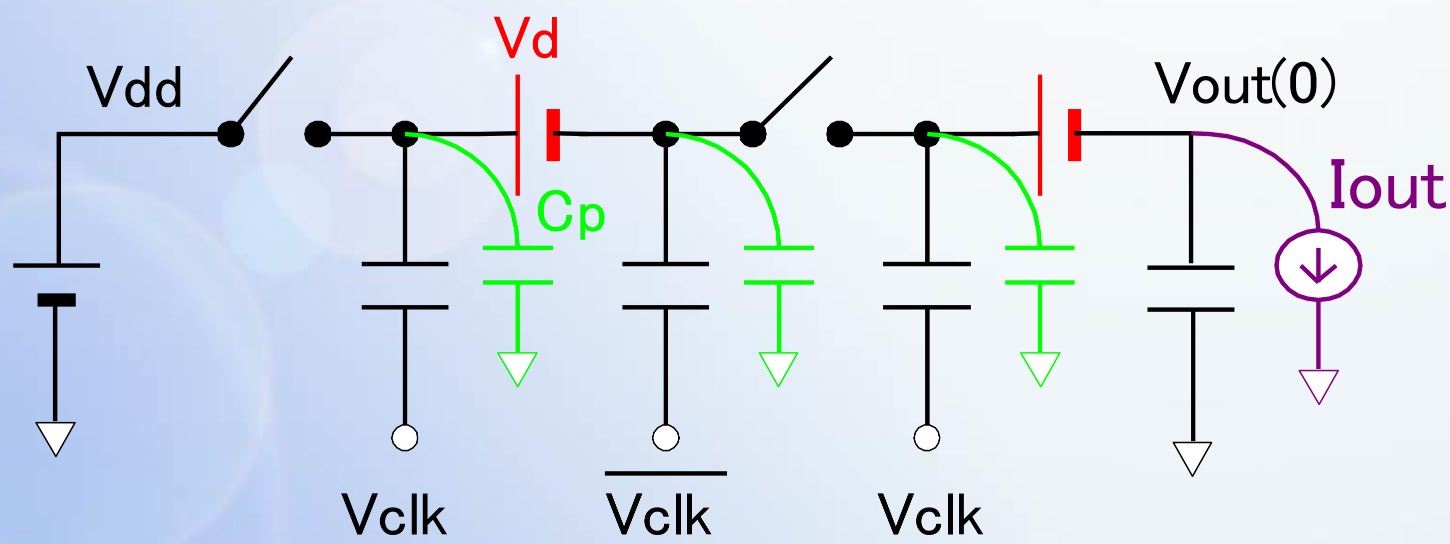
まとめると

- $Es+Es(0)=(28.5+1.5)CVdd^2$
  $=30\ CVdd^2$
- $Ec=15\ CVdd^2$
- $Eloss+Eloss(0)=15CVdd^2$

3段charge pump回路の場合も
電源とクロックから供給されたエネルギーの
半分がコンデンサに蓄積され、
半分がスイッチで消費されることが確認できた。

今後の課題
それぞれを考慮した場合の過渡解析

- 電圧ドロップVd
- 寄生容量Cp
- 出力電流Iout

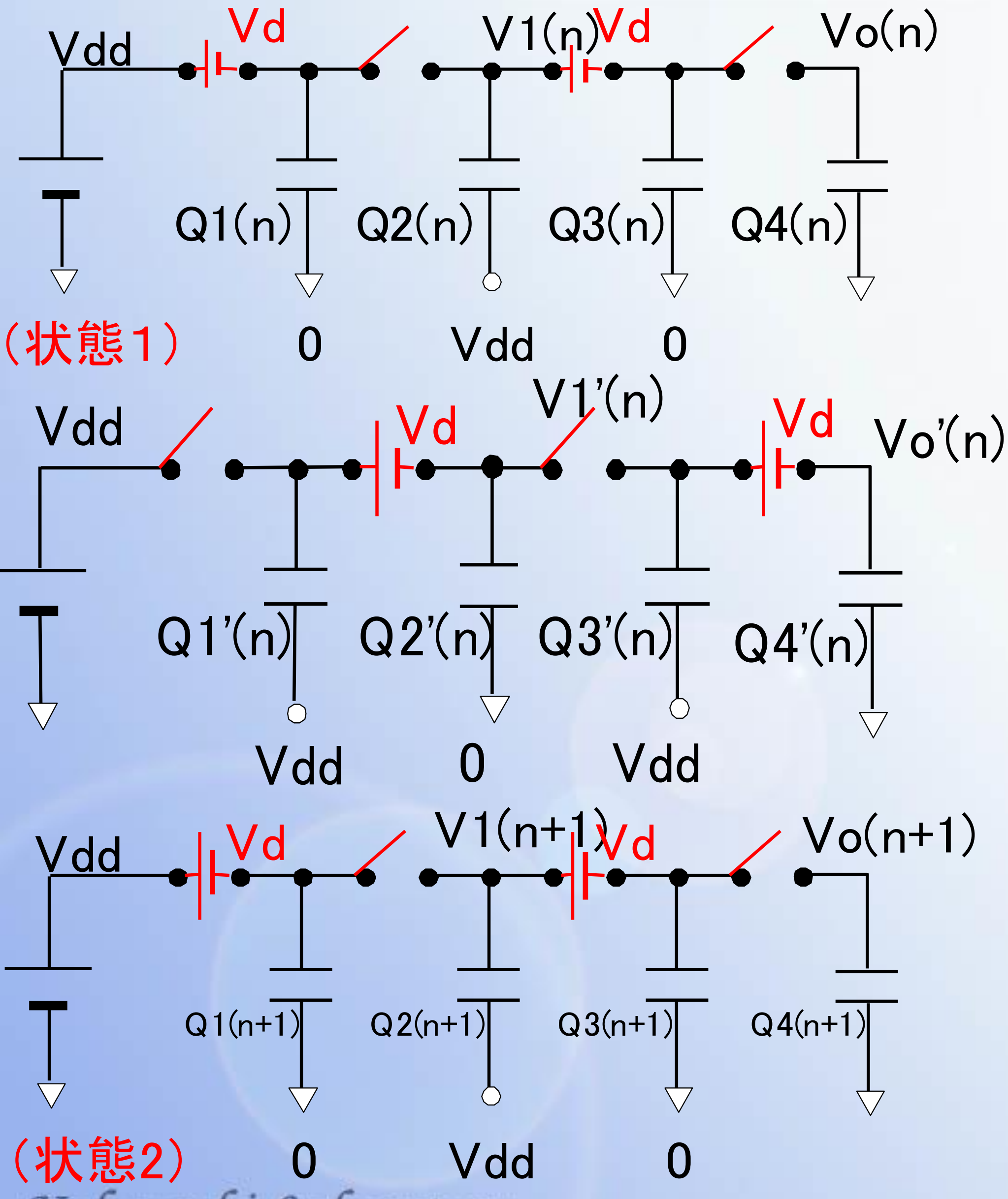


それぞれを考慮した場合の定常解析

- 電圧ドロップ　Vd
- 寄生容量　Cp
- 出力電流　Iout

電圧ドロップを考慮した場合

電圧ドロップVdを考慮したとき



$$V1'(n) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{2}Vdd - Vd$$

$$Vo'(n) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{2}Vo(n) + \frac{1}{2}Vdd - Vd$$

$$V1(n+1) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{4}Vo(n) + \frac{1}{2}Vdd$$

$$Vo(n+1) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{2}Vo(n) + \frac{1}{2}Vdd - Vd$$

電圧ドロップVdを考慮したとき

状態方程式

$$\begin{bmatrix} V1(n+1) \\ Vo(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1(n) \\ Vo(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/2 & 0 \\ 1/2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vdd \\ Vd \end{bmatrix}$$

に$n \to \infty$を代入

$$\begin{bmatrix} V1(\infty) \\ Vo(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1(\infty) \\ Vo(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/2 & 0 \\ 1/2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vdd \\ Vd \end{bmatrix}$$

$$V(\infty) = AV(\infty) + B$$

$$V(\infty) = (I - A)^{-1} B$$

$$\therefore V1(\infty) = 3Vdd - 2Vd$$

$$Vo(\infty) = 4Vdd - 4Vd$$

電圧ドロップVdを考慮したとき

定常状態における1サイクルでの

●入力電源Vddから供給されるエネルギー：
　Es(∞) Es(∞)=0

●全容量に蓄積されるエネルギー：Ec(∞)

状態1の時Ec1(∞)=15c(Vdd-Vd)2

状態2の時Ec2 (∞)=15c(Vdd-Vd)2

●ロスされるエネルギー:Eloss(∞)

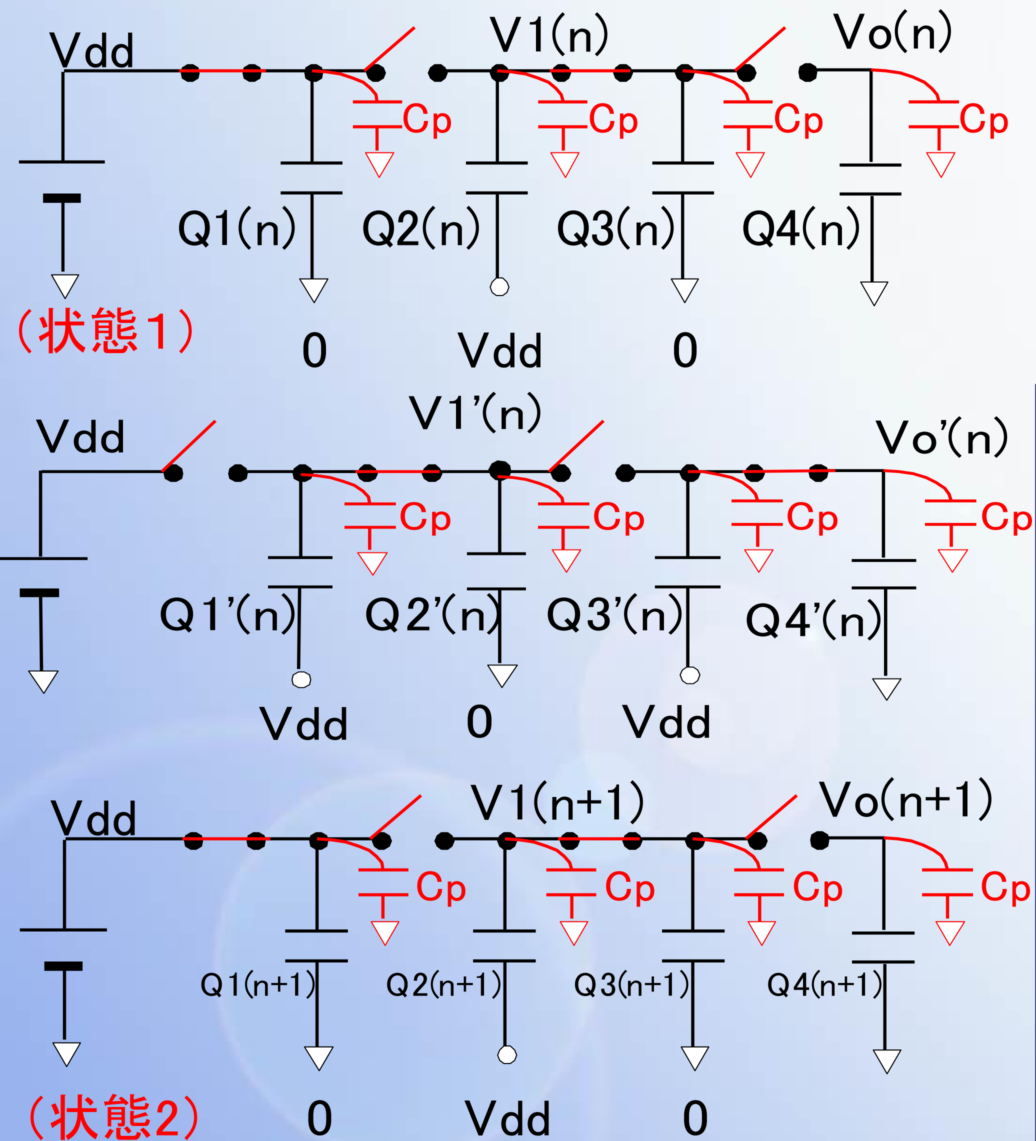
Eloss(∞)= [Es(∞)-{Ec2(∞)-Ec1(∞)}]

=0

定常状態になると電荷の移動なし

寄生容量を考慮した場合

寄生容量Cpを考慮した場合



$$V1'(n) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{2}Vdd$$

$$Vo'(n) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{2}Vo(n) + \frac{1}{2}Vdd - \frac{Cp}{C + Cp}Vdd$$

$$V1(n+1) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{4}Vo(n) + \frac{1}{2}Vdd - \frac{1}{4}\frac{Cp}{C + Cp}Vdd$$

$$Vo(n+1) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{2}Vo(n) + \frac{1}{2}Vdd - \frac{1}{2}\frac{Cp}{C + Cp}Vdd$$

寄生容量Cpを考慮した場合

状態方程式

$$\begin{bmatrix} V1(n+1) \\ Vo(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1(n) \\ Vo(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{C}{2(C+Cp)} Vdd \\ \dfrac{2C+Cp}{4(C+Cp)} Vdd \end{bmatrix}$$

から$n \to \infty$として

$$\therefore V1(\infty) = (3 - \frac{2Cp}{C+Cp})Vdd$$

$$Vo(\infty) = (4 - \frac{3Cp}{C+Cp})Vdd$$

寄生容量Cpを考慮した場合

定常状態における1サイクルでの

●入力電源Vddから供給されるエネルギー: Es(∞)

$$Es(\infty) = \frac{3CCp}{C+Cp}Vdd^2$$

●全容量に蓄積されるエネルギー:Ec(∞)

状態1の時 $Ec1(\infty) = \frac{1}{2(C+Cp)}(30C^2+21CCp+4Cp^2)Vdd^2$

状態2の時 $Ec2(\infty) = \frac{1}{2(C+Cp)}(30C^2+21CCp+4Cp^2)Vdd^2$

●ロスされるエネルギー:Eloss(∞)

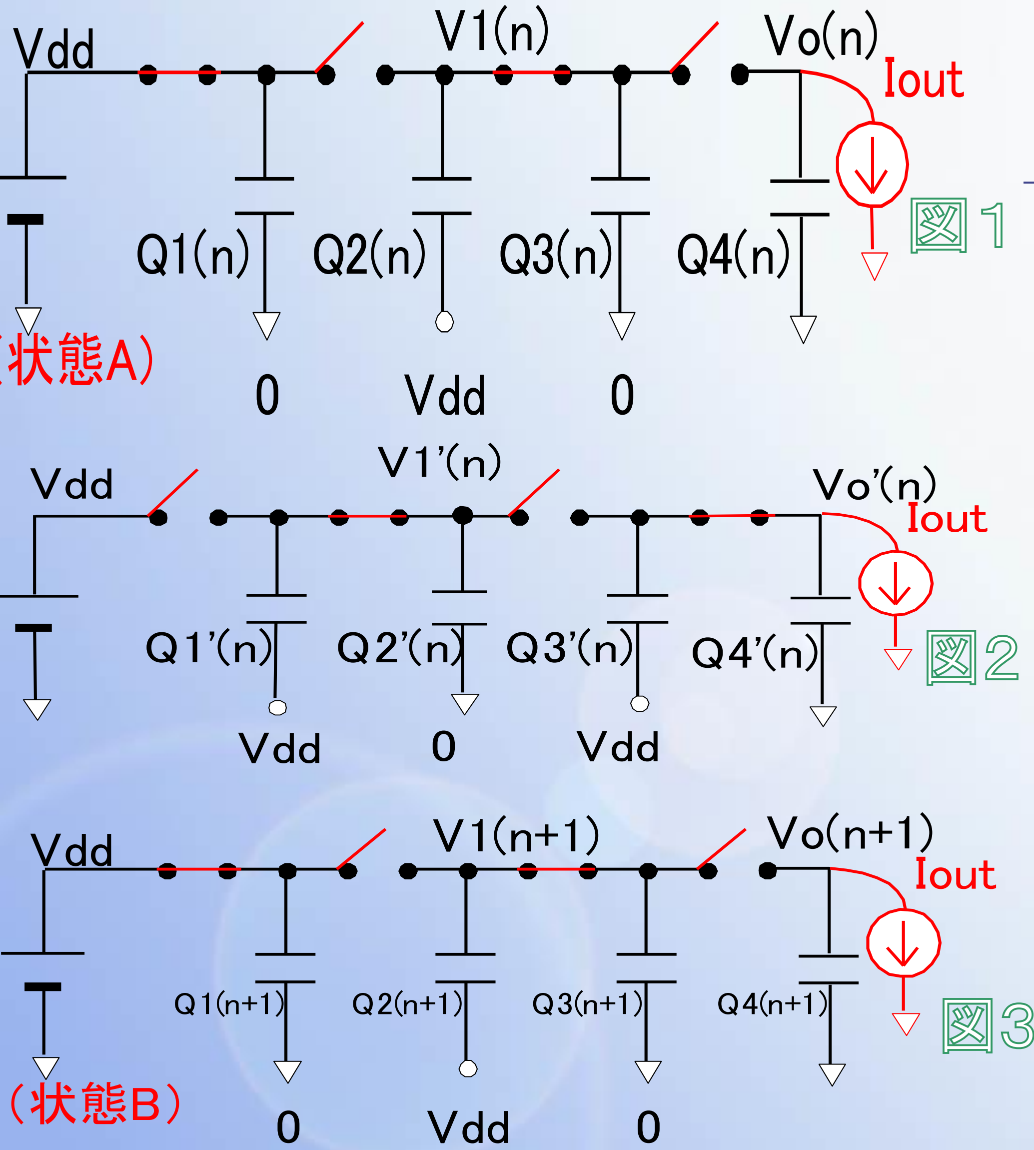
Eloss(∞)= [Es(∞)-{Ec2(∞)-Ec1(∞)}]

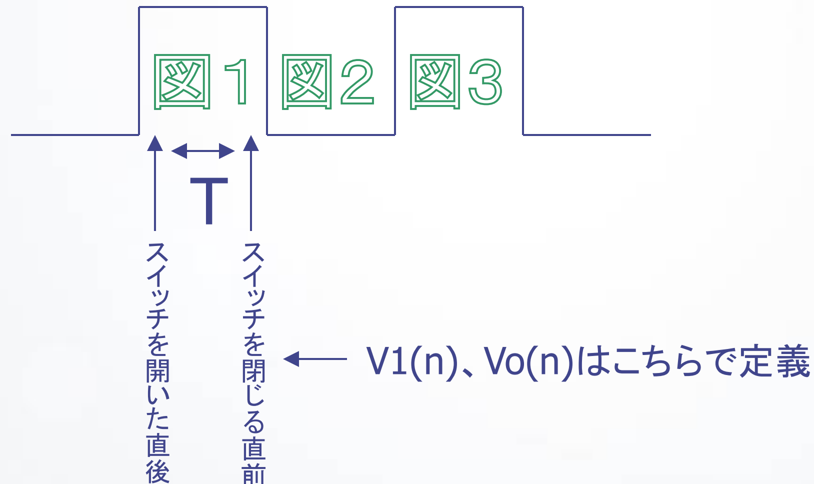
$$= \frac{3CCp}{C+Cp}Vdd^2$$

定常状態でも電荷の移動有り

出力電流Ioutを考慮した場合

出力電流Ioutを考慮した場合





$$V1'(n) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{2}Vdd$$

$$Vo'(n) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{2}Vo(n) + \frac{1}{2}Vdd - \frac{1}{2}\frac{T \cdot Iout}{C}$$

$$V1(n+1) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{4}Vo(n) + \frac{1}{2}Vdd - \frac{1}{4}\frac{T \cdot Iout}{C}$$

$$Vo(n+1) = \frac{1}{2}V1(n) + \frac{1}{2}Vo(n) + \frac{1}{2}Vdd - \frac{3}{2}\frac{T \cdot Iout}{C}$$

出力電流Ioutを考慮した場合

状態方程式

$$\begin{bmatrix} V1(n+1) \\ Vo(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1(n) \\ Vo(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vdd \\ \frac{TIout}{C} \end{bmatrix}$$

から$n \to \infty$として

$$\therefore V1(\infty) = 3Vdd - 4\frac{T \cdot Iout}{C}Vdd$$

$$Vo(\infty) = 4Vdd - 7\frac{T \cdot Iout}{C}Vdd$$

出力電流Ioutを考慮した場合

定常状態における1サイクルでの

●入力電源Vddから供給されるエネルギー：Es(∞)

Es(∞)= $8Vdd \cdot T \cdot Iout$

●全容量に蓄積されるエネルギー：Ec(∞)

状態1の時Ec1(∞)= $\frac{1}{2}C\{30Vdd^2 - 96Vdd\frac{T \cdot Iout}{C} + 81(\frac{T \cdot Iout}{C})^2\}$

状態2の時Ec2 (∞)= $\frac{1}{2}C\{30Vdd^2 - 96Vdd\frac{T \cdot Iout}{C} + 81(\frac{T \cdot Iout}{C})^2\}$

●ロスされるエネルギー:Eloss(∞)

Eloss(∞)= [Es(∞)-{Ec2(∞)-Ec1(∞)}]

= $8Vdd \cdot T \cdot Iout$

<u>定常状態で電荷の移動有り</u>

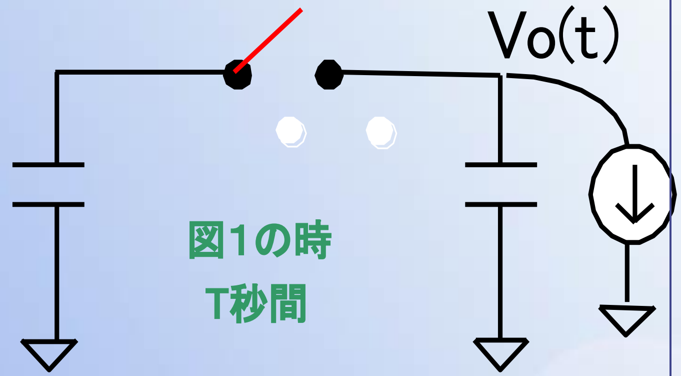
出力電流Ioutを考慮した時の効率

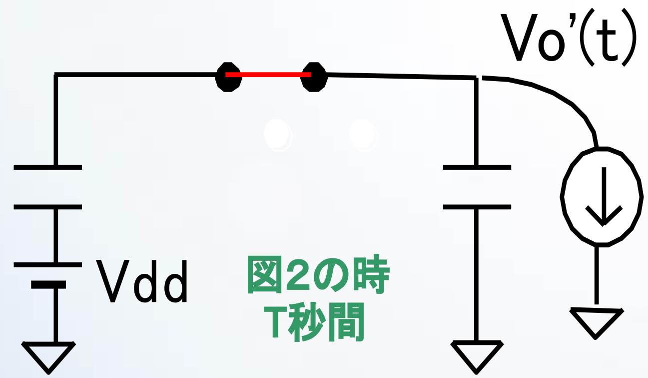
$$Eloss = Eload + Eswloss$$

（ロスされるエネルギー）＝（出力されるエネルギー）＋（スイッチでロスされるエネルギー）

$$\boxed{効率 = \frac{Eload(\infty)}{Es(\infty)}}$$

$$\left(Eload(\infty) = Iout\int Vo(t)dt\right)$$



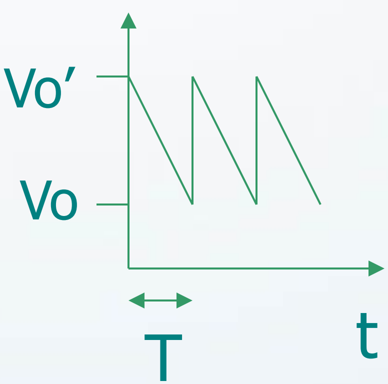


$$\frac{1}{2}c\left(Vo(\infty)+\frac{1}{c}T\cdot Iout\right)^2-\frac{1}{2}cVo(\infty)^2$$

$$=4Vdd\cdot T\cdot Iout-\frac{13}{2}\frac{T^2\cdot Iout^2}{c} \quad ・・・①$$

$$\frac{1}{2}(Vo'+Vo)\cdot T\cdot Iout$$

$$=4Vdd\cdot T\cdot Iout-\frac{11}{2}\frac{T^2\cdot Iout^2}{c} \quad ・・・②$$



$$Eload(\infty) = ① + ②$$

$$= 8Vdd\cdot T\cdot Iout - 12\frac{T^2\cdot Iout^2}{C}$$

$$\therefore (効率) = \frac{Eload(\infty)}{Es(\infty)} = 1-\frac{3}{2}\frac{T\cdot Iout}{C\cdot Vdd}$$

(C → 大、Vdd → 大、T → 小、Iout → 小ならば高効率)

出力電流を考慮した場合の
効率についての一般性について

3段のチャージポンプ回路についての効率は

1 −3A/2　　　　（ただし$A=\dfrac{T\cdot Iout}{C\cdot Vdd}$）

1～6段まで同様の計算をすると

1段	2段	3段	4段	5段	6段
1-A	1-4A/3	1-3A/2	1-8A/5	1-5A/3	1-12A/7

Aの係数に注目

a_n		1	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{12}{7}$
b_n	（a_{n+1}とa_nの差）	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{21}$	
C_n	（$=\frac{1}{b_n}$）	3	6	10	15	21	
d_n	（c_{n+1}とc_nの差）	3	4	5	6		

$$d_n = n+2$$

$$c_n = 3+\sum_{k=1}^{n-1} d_k = \frac{1}{2}(n+1)(n+2)$$

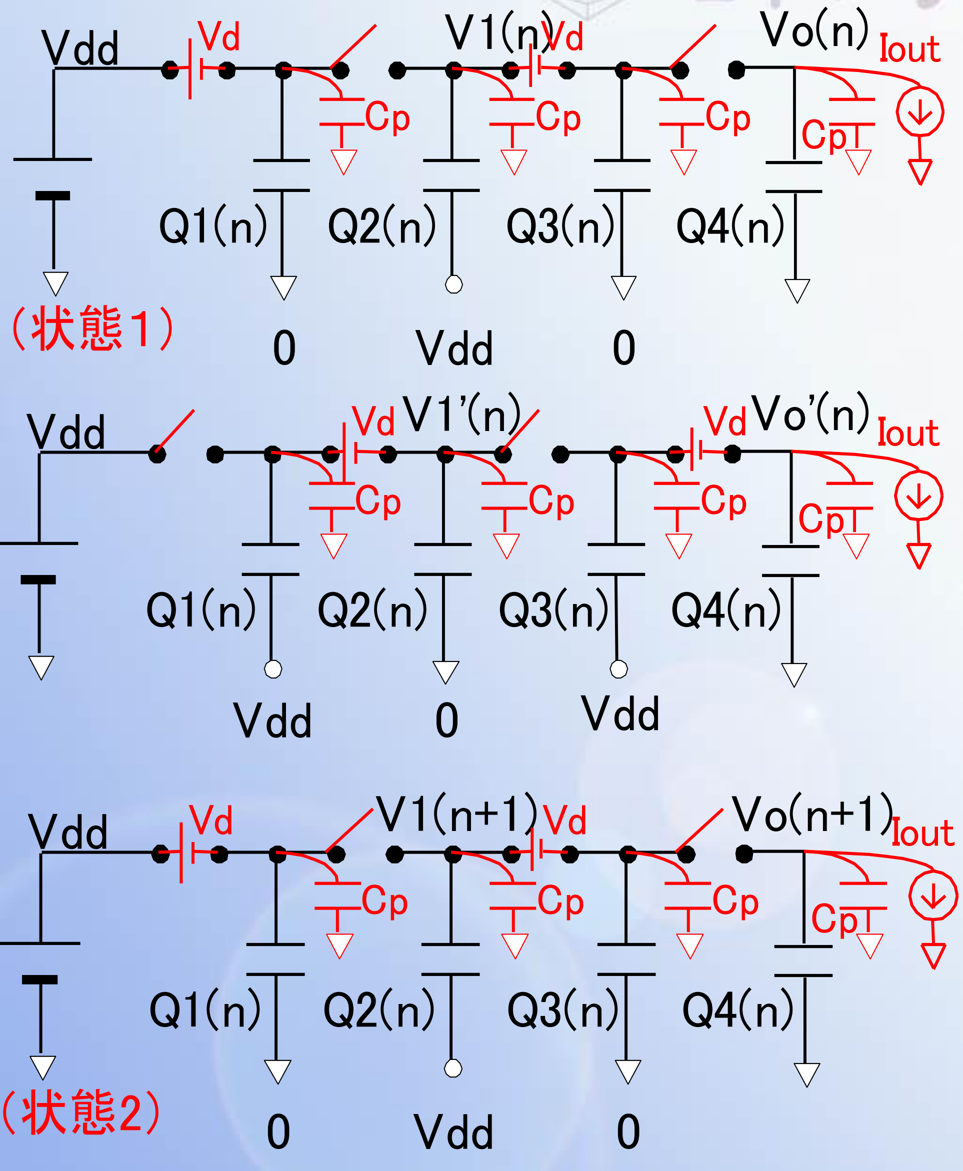
$$b_n = \frac{2}{(n+1)(n+2)}$$

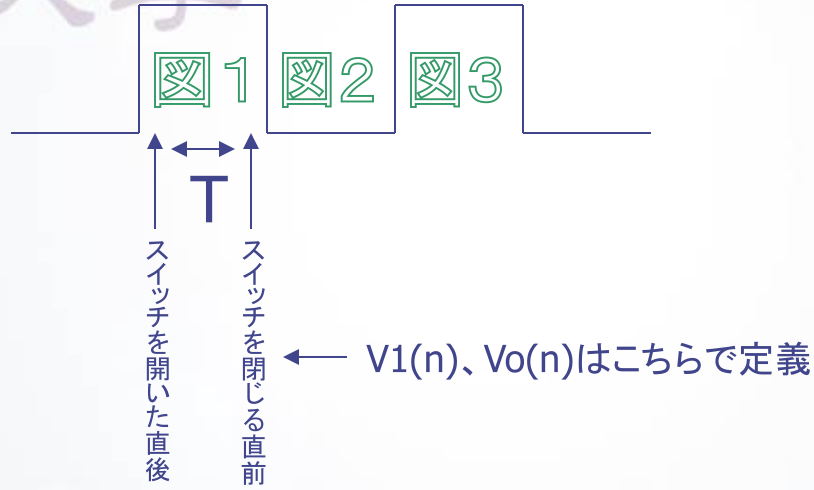
$$a_n = 1+\sum_{k=1}^{n-1} b_k = 1+\sum_{k=1}^{n-1}\frac{2}{(n+1)(n+2)} = \frac{2n}{n+1}$$

$$\boxed{\therefore(\text{効率の一般式}) = 1-\frac{2n}{n+1}\cdot A}$$

電圧ドロップ、寄生容量、出力電流を全て考慮した場合

Vd,Cp,Iout全てを考慮した場合





$$V1'(n) = \frac{1}{2}Vdd + \frac{1}{2}V1(n) - Vd \quad \cdot\cdot\cdot ①$$

$$Vo'(n) = \frac{1}{2}Vo(n) + \frac{1}{2}V1(n) - Vd + \frac{CVdd}{2(C+Cp)} - \frac{TIout}{2(C+Cp)} \quad \cdot\cdot\cdot ②$$

$$V1(n+1) = \frac{1}{2}V1'(n) + \frac{1}{2}Vo'(n) + Vd \quad \cdot\cdot\cdot ③$$

$$Vo(n+1) = Vo'(n) - \frac{TIout}{C+Cp} \quad \cdot\cdot\cdot ④$$

Vd,Cp,Iout全てを考慮した場合

①,②,③,④で$n \to \infty$としてまとめると
定常状態でのノード電圧と出力電圧

$$V1(\infty) = Vdd - 2Vd + 2\frac{CVdd}{C+Cp} - 4\frac{TIout}{C+Cp}$$

$$V1'(\infty) = Vdd - 2Vd + \frac{CVdd}{C+Cp} - 2\frac{TIout}{C+Cp}$$

$$Vo(\infty) = Vdd - 4Vd + 3\frac{CVdd}{C+Cp} - 7\frac{TIout}{C+Cp}$$

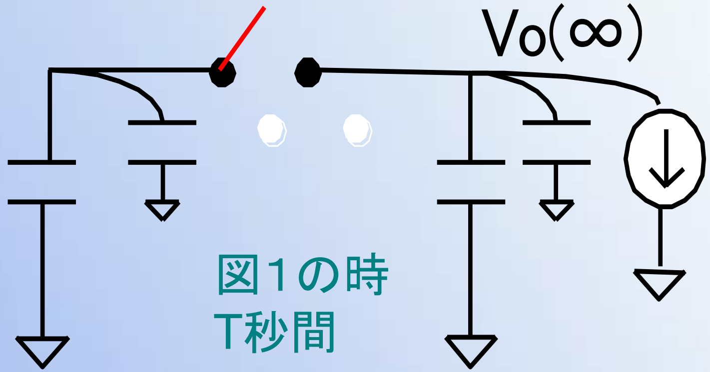
$$Vo'(\infty) = Vdd - 4Vd + 3\frac{CVdd}{C+Cp} - 6\frac{TIout}{C+Cp}$$

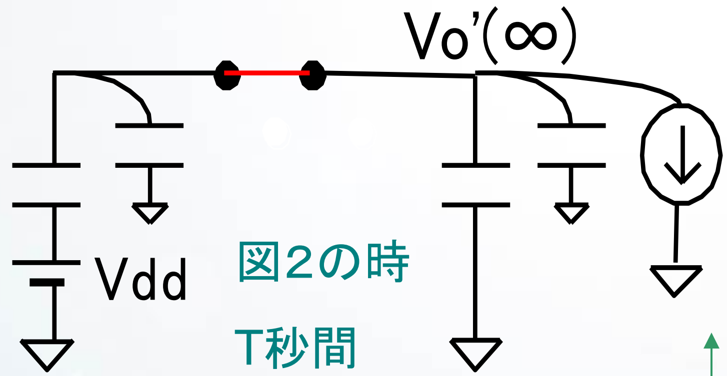
が得られる。

Vd,Cp,Iout全てを考慮した場合

$$効率 = \frac{Eload(\infty)}{Es(\infty)}$$

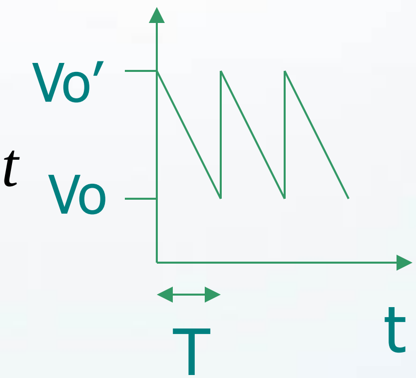
$$\left(Eload(\infty) = Iout\int Vo(t)dt\right)$$





$$\frac{1}{2}\left(2Vo(\infty) + \frac{TIout}{C+Cp}\right)TIout \quad \cdots ⑤$$

$$\frac{1}{2}\left(2Vo'(\infty) + \frac{TIout}{C+Cp}\right)TIout \quad \cdots ⑥$$



$$\therefore Eload(\infty) = ⑤ + ⑥ = \left(2Vdd - 8Vd + 6\frac{CVdd}{C+Cp} - 12\frac{TIout}{C+CP}\right)TIout$$

Vd,Cp,Iout全てを考慮した場合

定常状態での供給されるエネルギー$Es(\infty)$

$n \rightarrow n'$の時

クロックから入力されるエネルギー：

$$Vdd(Q1-Q1')+Vdd(Q3-Q3')=CVdd(2Vdd-2\frac{CVdd}{C+Cp}+4\frac{TIout}{C+Cp})\cdot\cdot\cdot⑦$$

$n' \rightarrow n+1$の時

クロックから入力されるエネルギー：

$$Vdd(Q2'-Q2(n+1))=CVdd(Vdd-\frac{CVdd}{C+Cp}+2\frac{TIout}{C+Cp})\cdot\cdot\cdot⑧$$

電源電圧から入力されるエネルギー：

$$Vdd(Q1(n+1)+Q5(n+1)-Q1'(n)-Q5'(n))=2VddTIout\cdot\cdot\cdot⑨$$

$$\therefore Es(\infty)=⑦+⑧+⑨=\underline{3CVdd^2-3\frac{C^2Vdd^2}{C+Cp}+6\frac{CVddTIout}{C+Cp}+2VddTIout)}$$

$$\therefore(効率)=\frac{Eload(\infty)}{Es(\infty)}$$

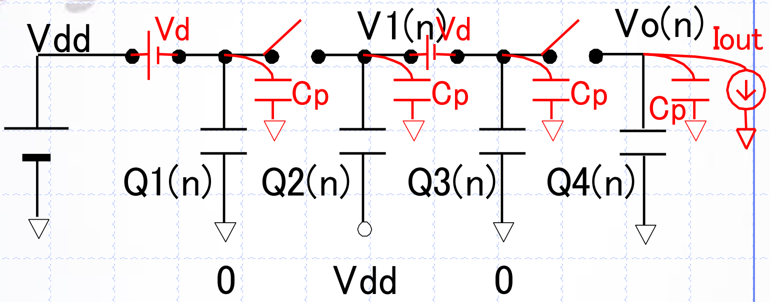
$$=1-\frac{3CCpVdd^2+8(C+Cp)VdTIout+12T^2Iout^2}{3CCpVdd^2+8CVddTIout+2CpVddTIout}$$

($Vd=Cp=0$とすると$Iout$のみを考慮した場合の効率に一致する。)

Vd,Cp,Iout全てを考慮した場合の効率の一般性について

３つを考慮した場合､3段では

$$(効率) = 1 - \frac{3CCpVdd^2 + 8(C+Cp)VdTIout + 12T^2Iout^2}{3CCpVdd^2 + 8CVddTIout + 2CpVddTIout}$$



同様の計算をすると

$$(１段の効率) = 1 - \frac{CCpVdd^2 + 4(C+Cp)VdTIout + 4T^2Iout^2}{CCpVdd^2 + 4CVddTIout + 2CpVddTIout}$$

$$(２段の効率) = 1 - \frac{2CCpVdd^2 + 6(C+Cp)VdTIout + 8T^2Iout^2}{2CCpVdd^2 + 6CVddTIout + 2CpVddTIout}$$

それぞれの項の係数を見ると次のような一般式が予想出来る。

電圧ドロップ*Vd*,寄生容量*Cp*,出力電流*Iout*の全てを考慮した場合

(*n*段チャージポンプ回路の効率)

$$= 1 - \frac{nCCpVdd^2 + (2n+2)(C+Cp)VdTIout + 4nT^2Iout^2}{nCCpVdd^2 + (2n+2)CVddTIout + 2CpVddTIout}$$