

# 単一インダクタ・2出力 DC-DCコンバータの検討

津志田 健吾 美和俊介 高橋健司 横尾甫

今井亮輔 ◎村上和貴 岩瀬浩之

Santhos A. Wibowo 小林 春夫 高井伸和

小田口貴宏 高山茂樹 深井功 松田順一

群馬大学大学院電気電子工学専攻

旭化成東光パワーデバイス株式会社

# Outline

- ✓ **研究背景**
- ✓ **単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの考察**
- ✓ **負電圧可変単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータ**
- ✓ **負電圧可変手法の効果確認**  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ **負電圧可変独立手法**  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ **まとめ**

# 研究背景

- ✓ 環境に配慮した電源回路の要求
- ✓ 小型化、低コスト化への要求
- ✓ インダクタのチップ面積占有

ひとつのインダクタで複数出力  
可能な電源回路に着目



PDA



単一インダクタ多出力  
DC-DCコンバータ



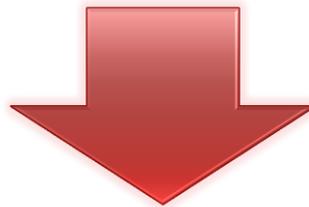
有機ELディスプレイ

# 正負2出力電源の検討

**単一インダクタ複数出力が活用可能分野**

## 産業界での実用可能性

- ✓ デジカメ撮像部:  $+6V$  &  $-2V$
- ✓ 有機ELディスプレイ:  $+15V$  &  $-8V$



**正負2出力DC-DCコンバータの構成検討**

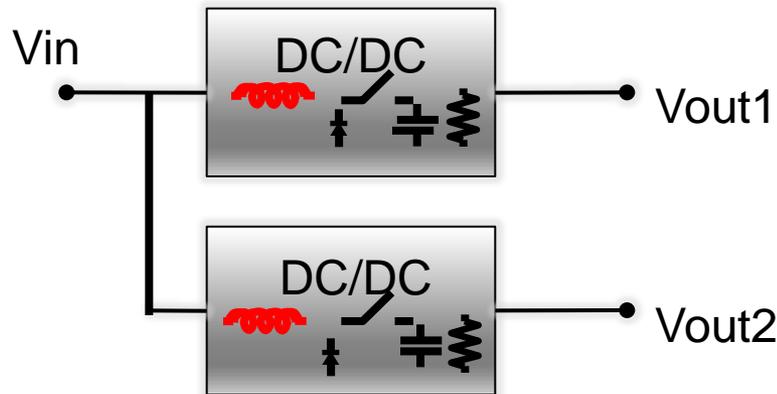
# Outline

- ✓ 研究背景
- ✓ **単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの考察**
- ✓ 負電圧可変単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータ
- ✓ 負電圧可変手法の効果確認  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ 負電圧独立手法  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ まとめ

# 単一インダクタDC-DCコンバータ

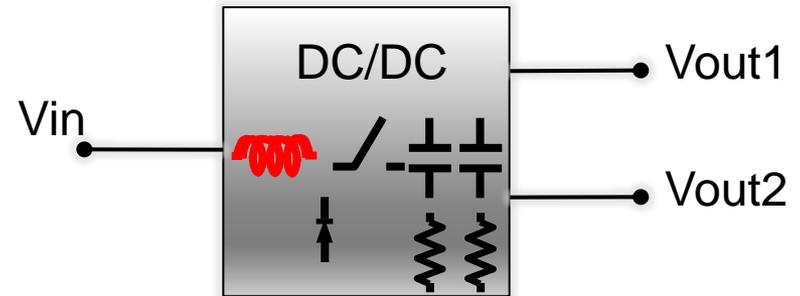
各回路の駆動にそれぞれ独立した電源を必要

従来の2出力DC-DCコンバータ



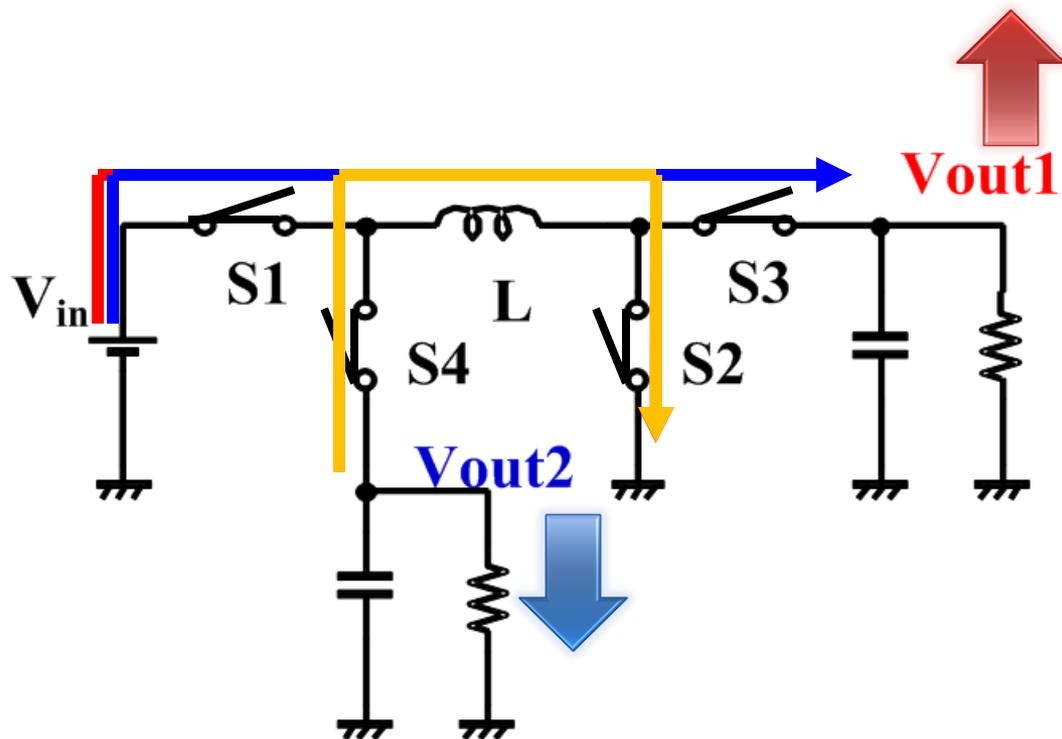
インダクタ L  
サイズ, コスト大

単一インダクタ2出力DC-DCコンバータ

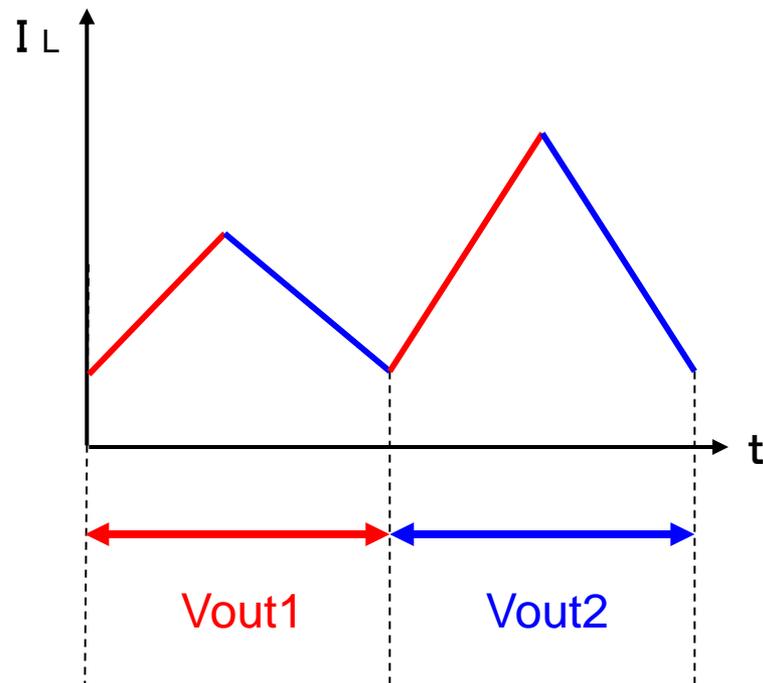


チ近年面積縮小が強い関心化

# 単一インダクタ正負2出力の原理



正負2出力DC-DCコンバータ



インダクタ電流波形

インダクタを時分割して2つの出力を得る

# クロスレギュレーションによる他方の電源への影響

## ✓ クロスレギュレーション

多出力電源において、ある負荷が変動した際の他の出力電圧変動

### ➤ 他方への影響の対策

クロスレギュレーションを抑制する制御回路  
⇒コストの観点から×

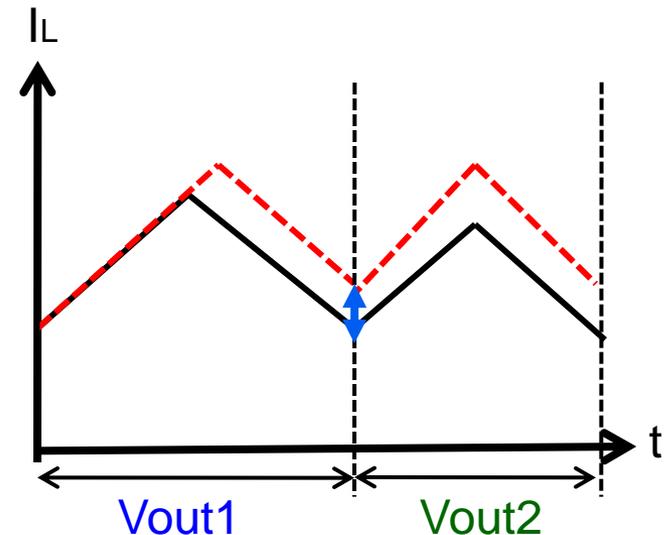
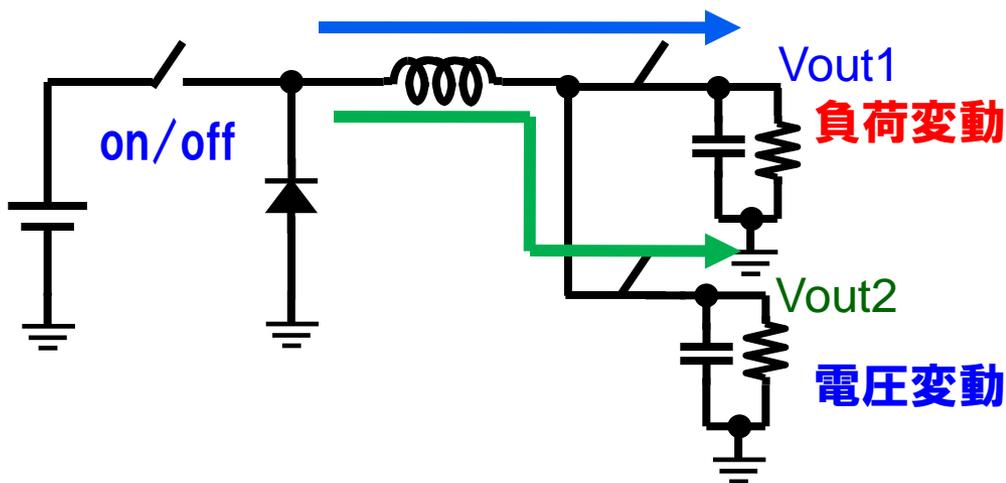


電流モードを変えることでクロスレギュレーションを改善

# 連続モードとクロスレギュレーション

## ✓ 電流連続モード(CCM)

インダクタに流れる電流がいかなる時刻においても  
零にならない動作モード ➡ 電流リップル小

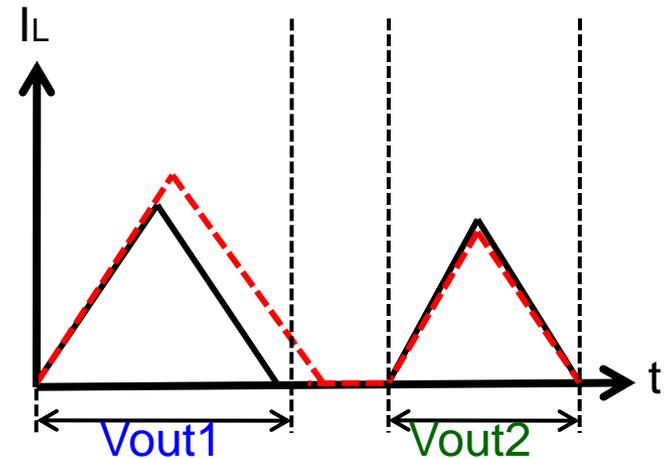
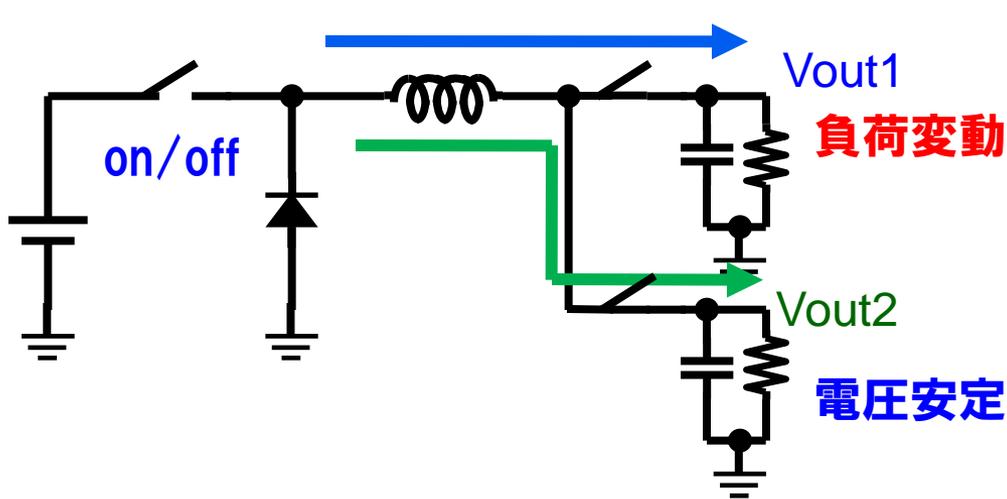


**クロスレギュレーション×**

# 不連続モードとクロスレギュレーション

## ✓ 電流不連続モード(DCM)

インダクタに流れる電流が零になる期間が存在する動作モード  $\rightarrow$  電流リップル大

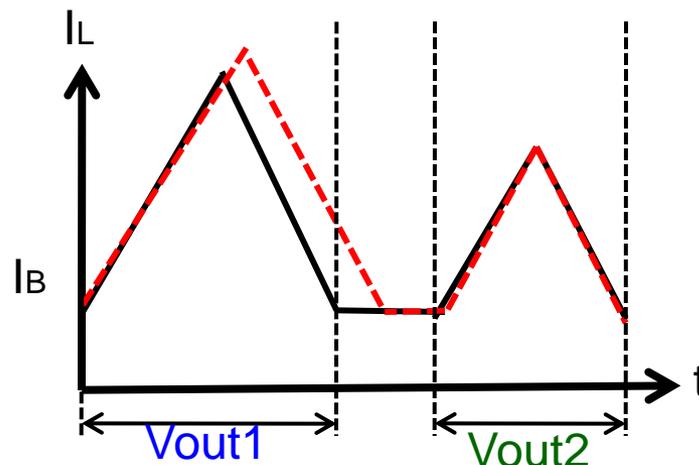
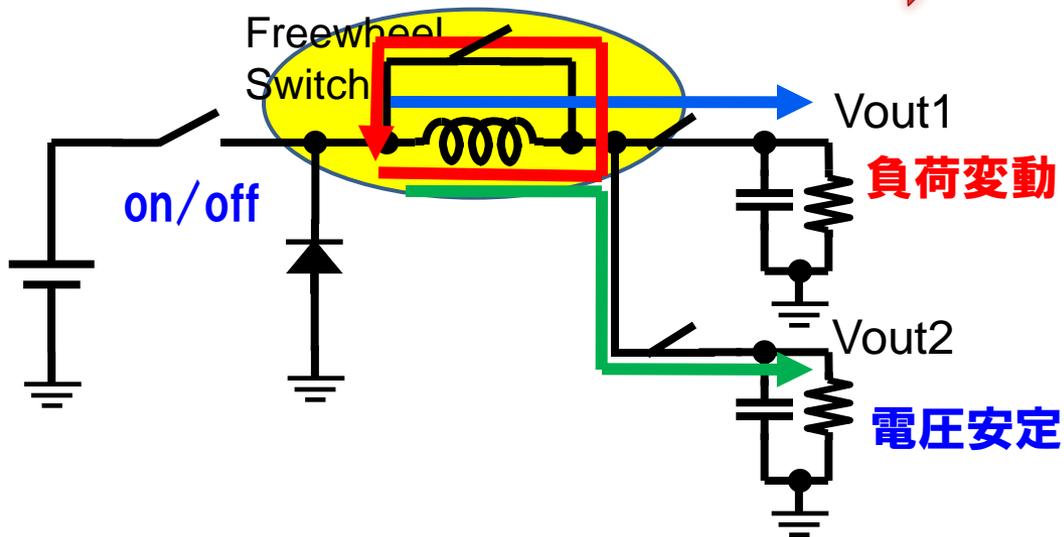


## クロスレギュレーション○

# 擬似連続モードとクロスレギュレーション

## ✓ 擬似連続モード(PCCM)

フリーホイールスイッチングを用いることでインダクタ電流を保持  $\rightarrow$  電流リップル小

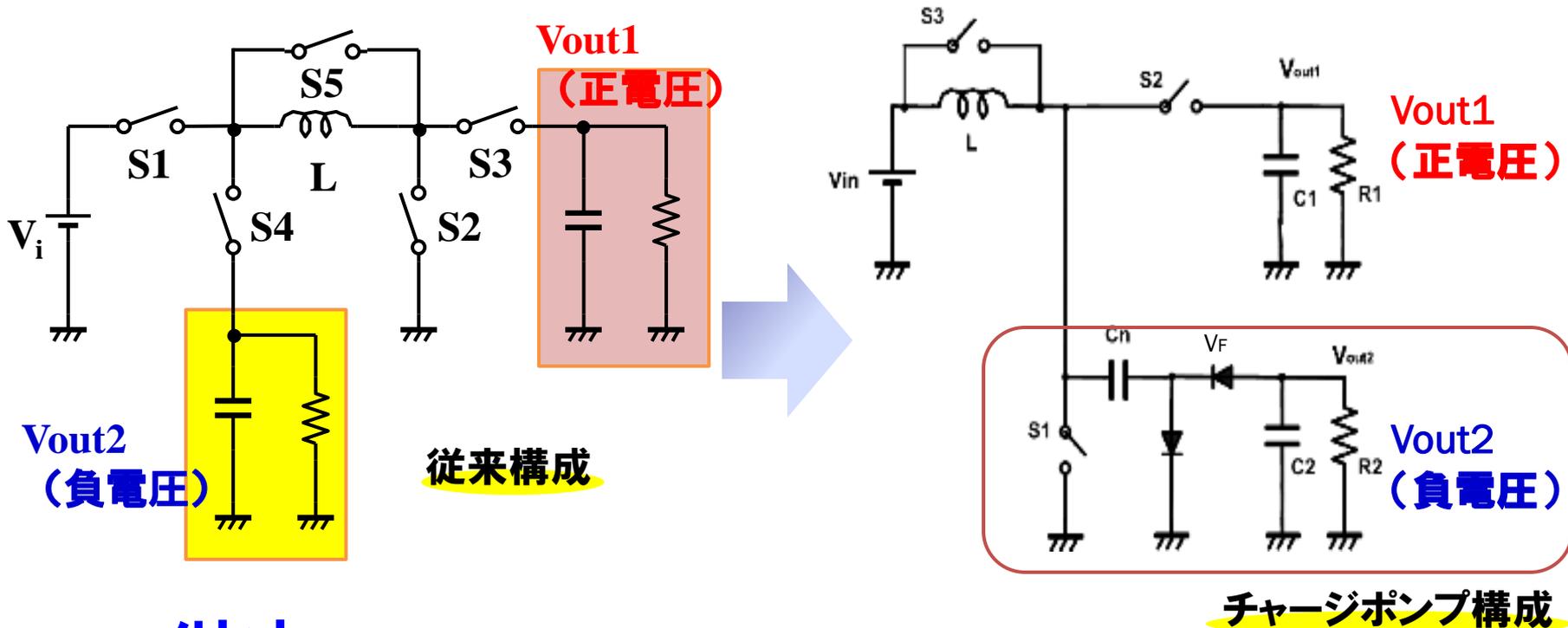


## クロスレギュレーション○

# 単一インダクタ2出力電源における 連続モード、不連続モード、疑似連続モードの比較

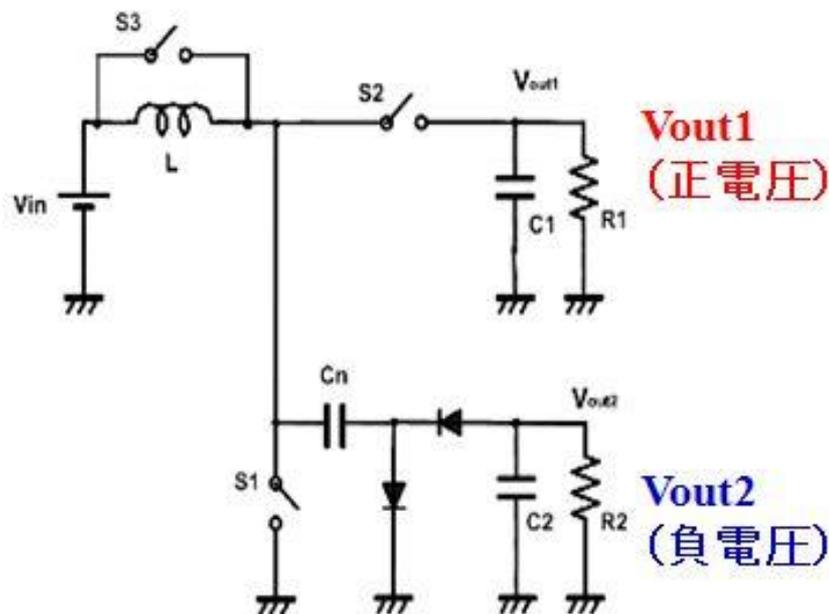
	クロスレギュレーション	大電流	電流リップル
連続モード (CCM)	×	○	○
不連続モード (DCM)	○	×	×
疑似連続モード (PCCM)	○	○	○

# チャージポンプ方式を用いた回路構成の検討

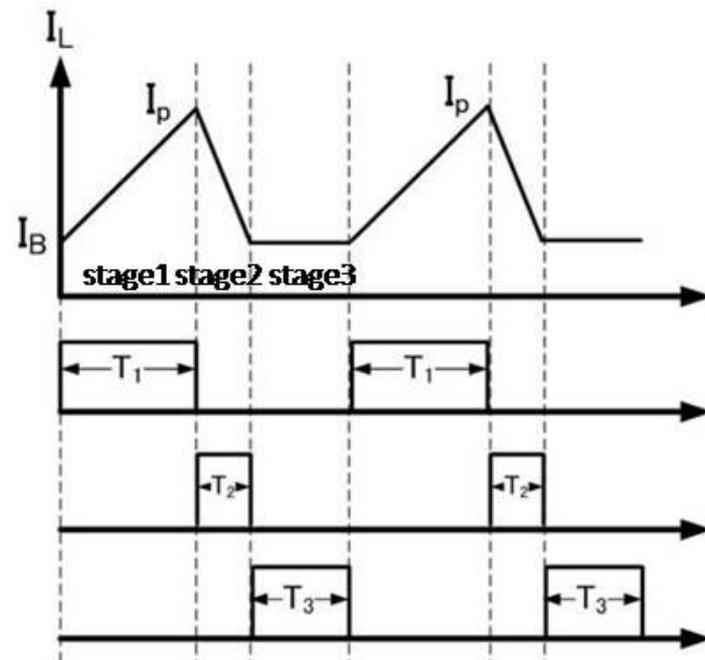


- ✓ **メリット**
  - 正負可変
  - スイッチ数減少によるオン抵抗の低減 (5⇒3)
- ✓ **デメリット**
  - 制御回路の簡単化
  - スイッチ数
  - スイッチングノイズ
  - 負電圧が正電圧に依存  $|V_{out2}| = V_{out1} - 2V_F$

# チャージポンプ方式正負2出力回路の基本動作



回路構成



基本タイミングチャート

stage1

$$\frac{di_L}{dt} = + \frac{V_{in}}{L}$$

stage2

$$\frac{di_L}{dt} = - \frac{V_{out1} - V_{in}}{L}$$

stage3

$$i_L = i_B$$

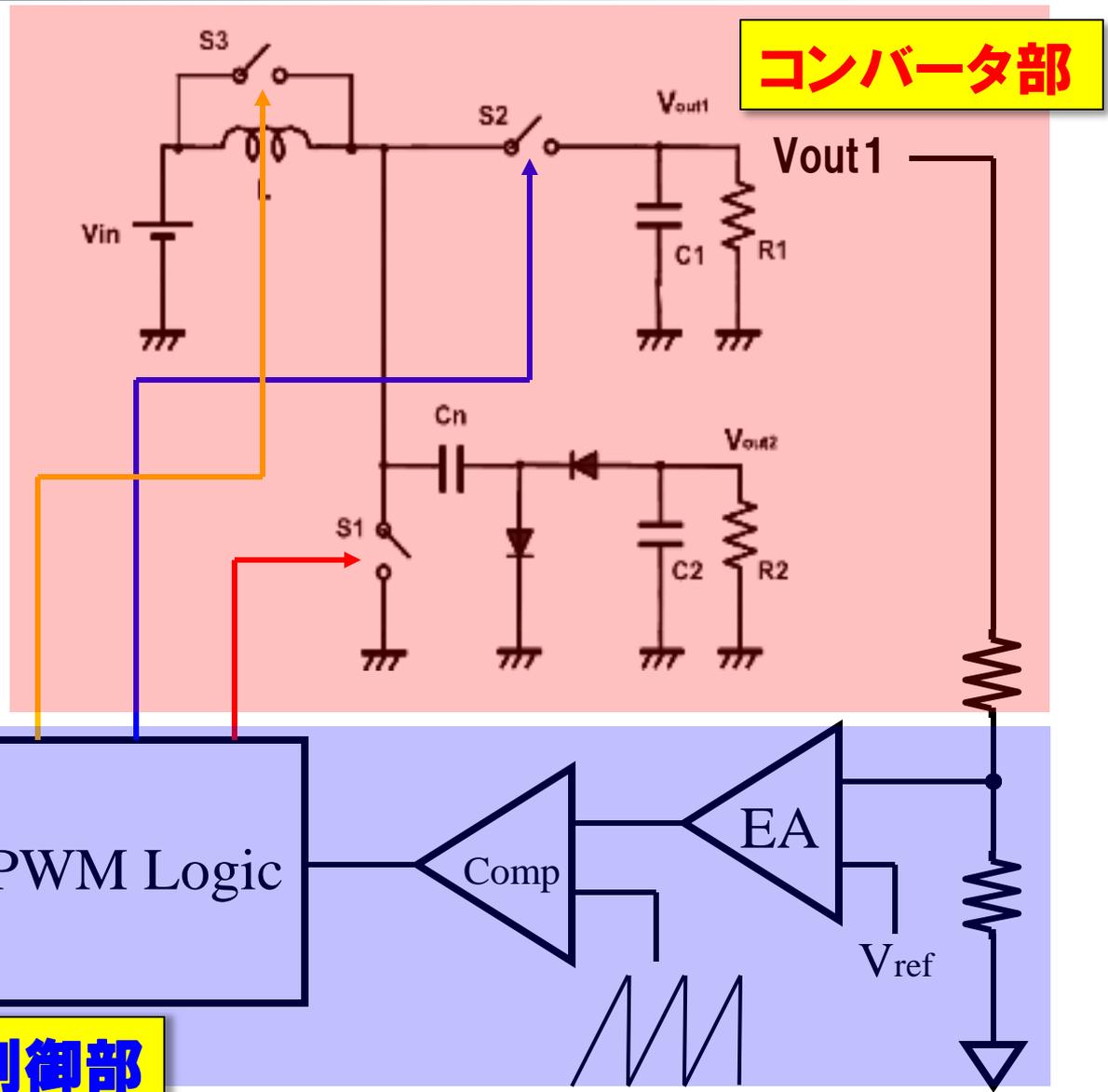
# 電圧制御シミュレーション回路

## ✓ 電圧制御での確認

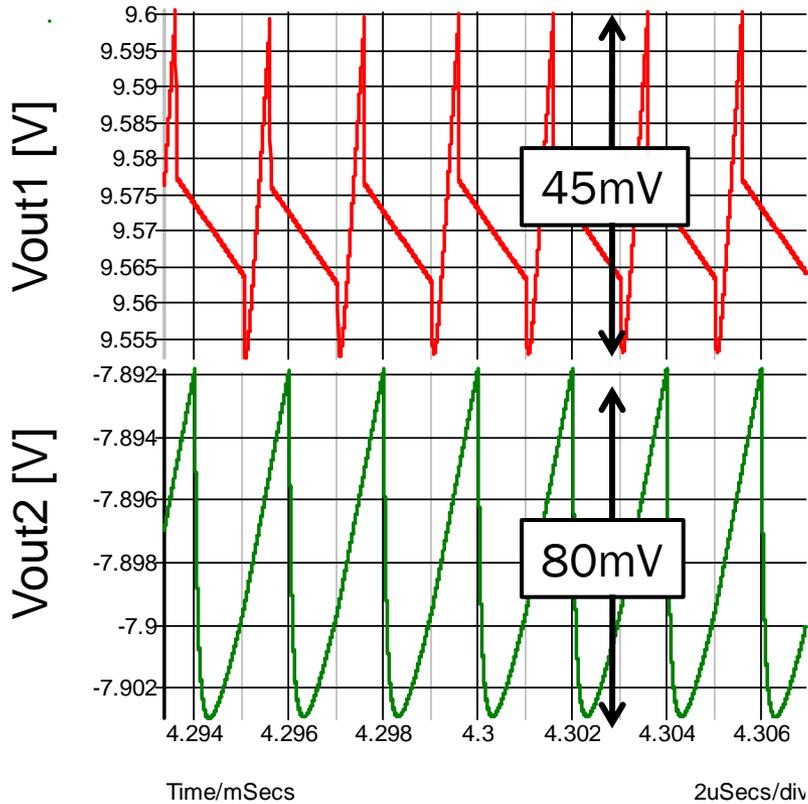
動作周波数: 500kHz

Vin	3.5V
L	4.7uH
Cout	100uF
R	10Ω
Cn	5uF
V <sub>D</sub>	0.8V@5A
R <sub>on</sub>	10mΩ

Sim条件

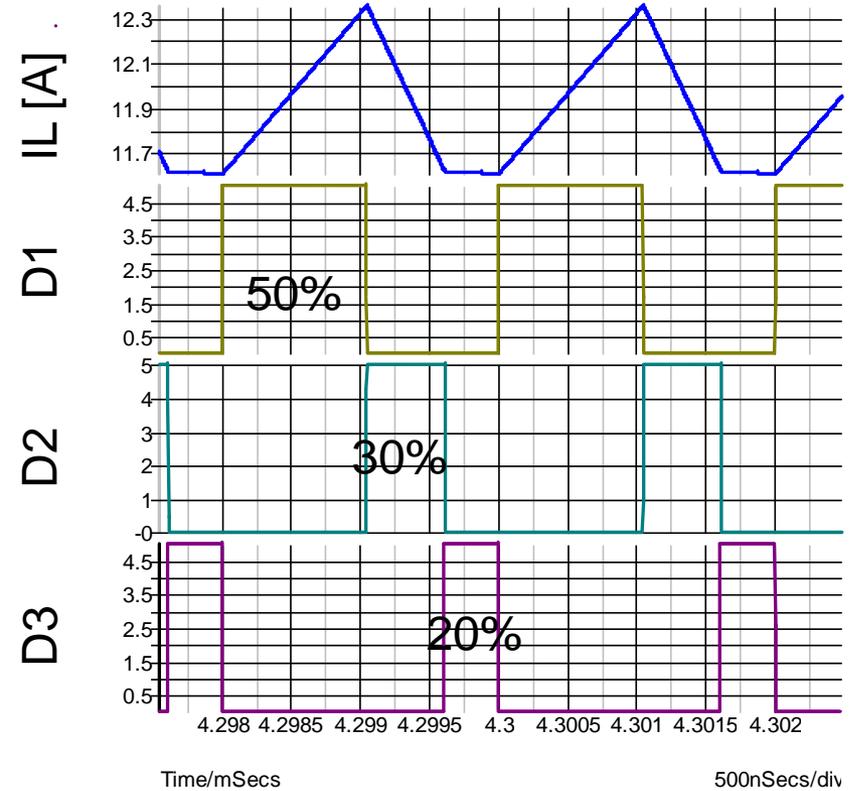


# 電圧制御シミュレーションでの出力電圧



出力電圧波形

Vout1: 9.57 [V]  
Vout2: -7.90 [V]



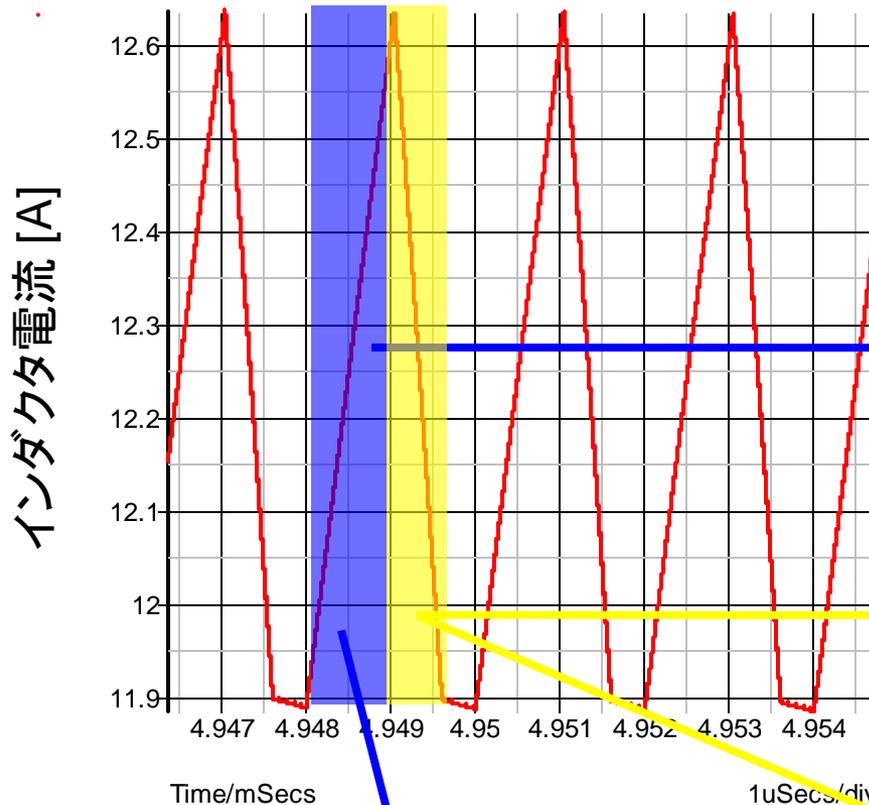
インダクタ電流、タイミング

理論式との一致を確認

$$|V_{out2}| = V_{out1} - 2V_F$$

※ $V_F$ : ダイオードのドロップ電圧

# インダクタ電流における効果確認



## ◎ SIM値

・立ち上がり

$$\frac{di_L}{dt} = 7.3 \times 10^5$$

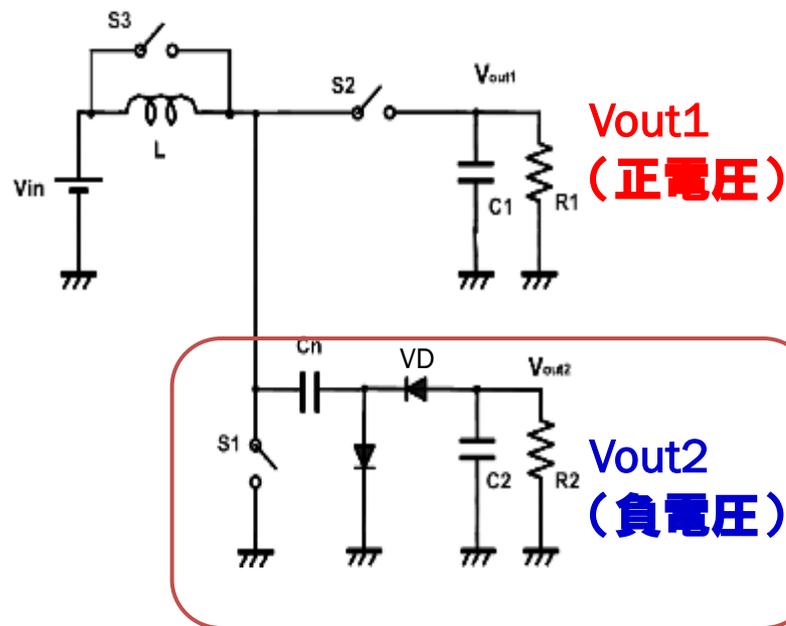
・立ち下がり

$$\frac{di_L}{dt} = -12.2 \times 10^5$$

## ◎ 理論式

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \cong 7.4 \times 10^5 \quad \frac{di_L}{dt} = -\frac{V_{oufl} - V_{in}}{L} = -12.9 \times 10^5$$

# チャージポンプ方式正負2出力回路の問題点



チャージポンプ方式の回路構成

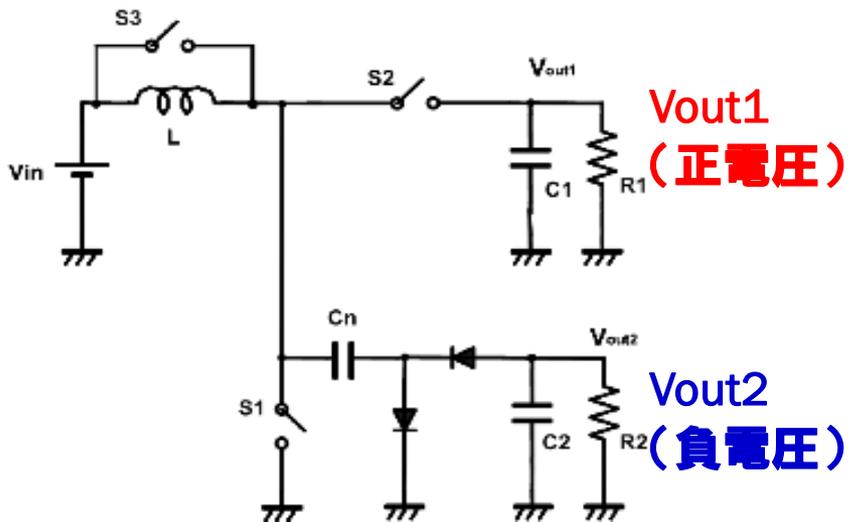
✓ 負電圧が正電圧に依存

➡ チャージポンプ方式で負電圧可変手法の検討

# Outline

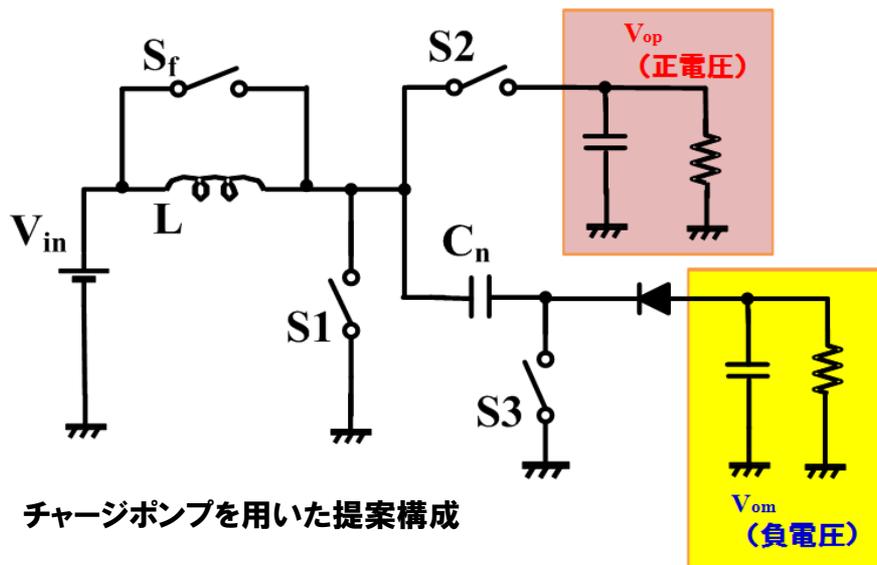
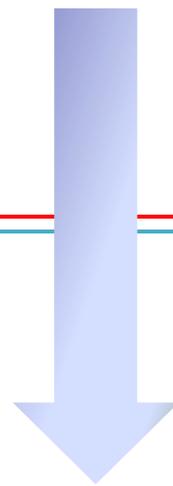
- ✓ 研究背景
- ✓ 単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの考察
- ✓ **負電圧可変単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータ**
- ✓ 負電圧可変手法の効果確認  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ 負電圧独立手法  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ まとめ

# チャージポンプを用いた単一インダクタ 正負2出力DC-DCコンバータ



▶ 単一インダクタ正負2出力DC-DC  
コンバータ従来構成

• 負電圧が正電圧に完全依存

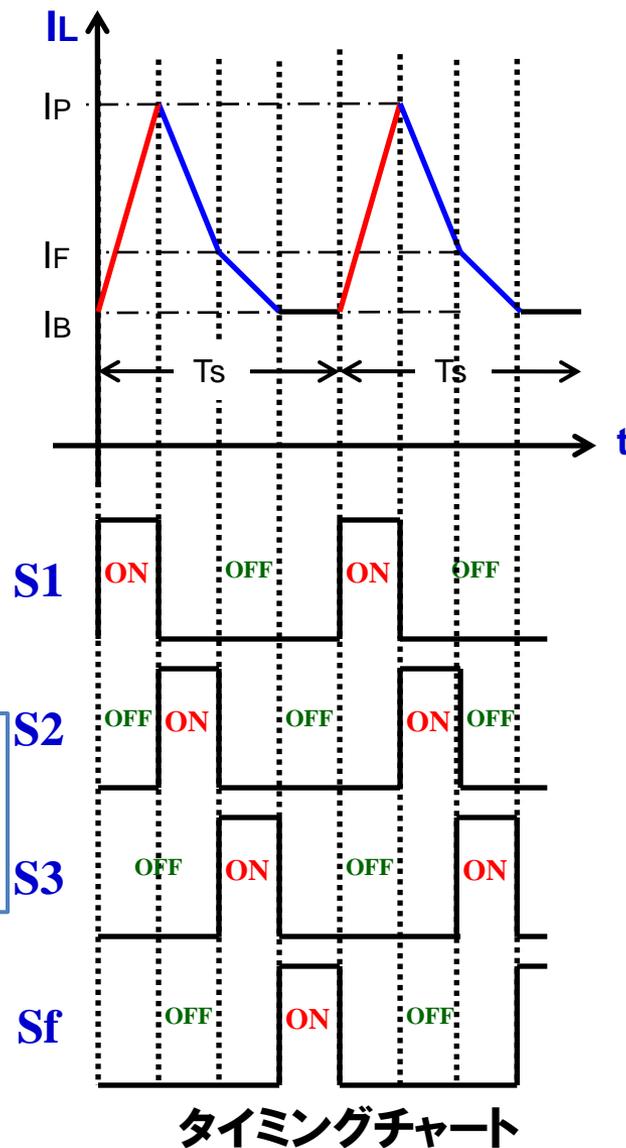
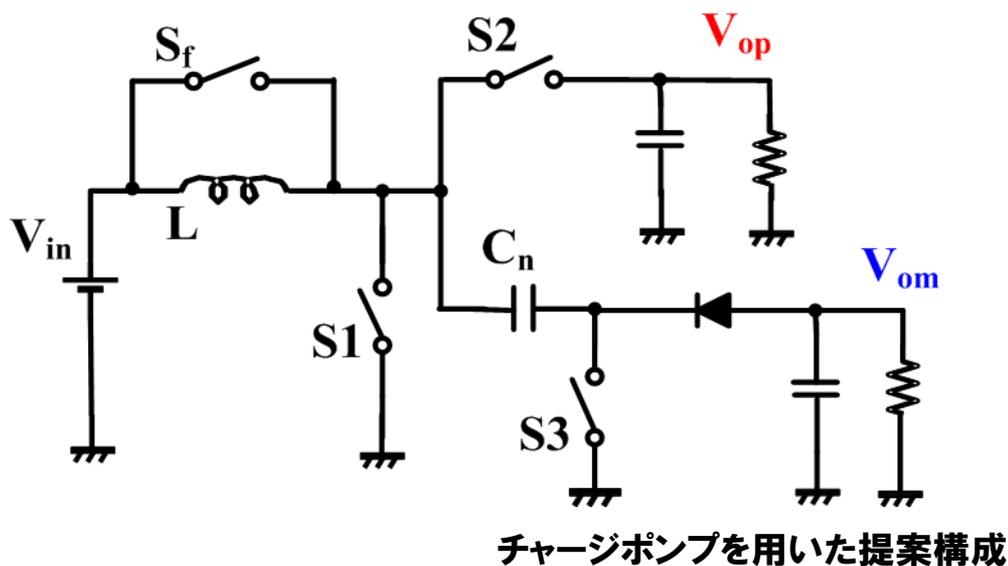


チャージポンプを用いた提案構成

▶ 提案構成

• 負電圧の可変が可能

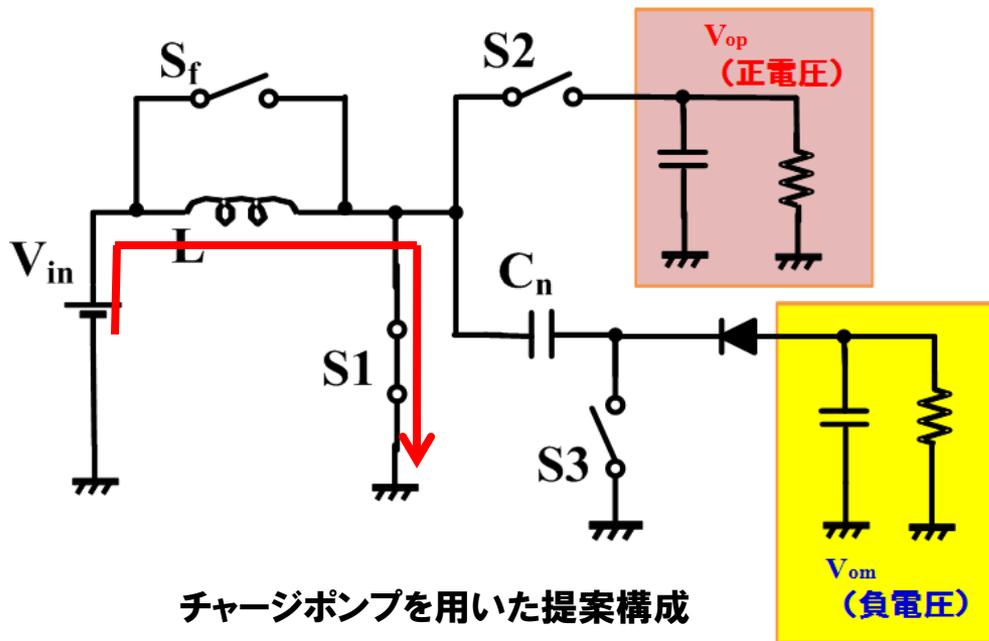
# キャパシタを用いた負電圧可変手法の検討



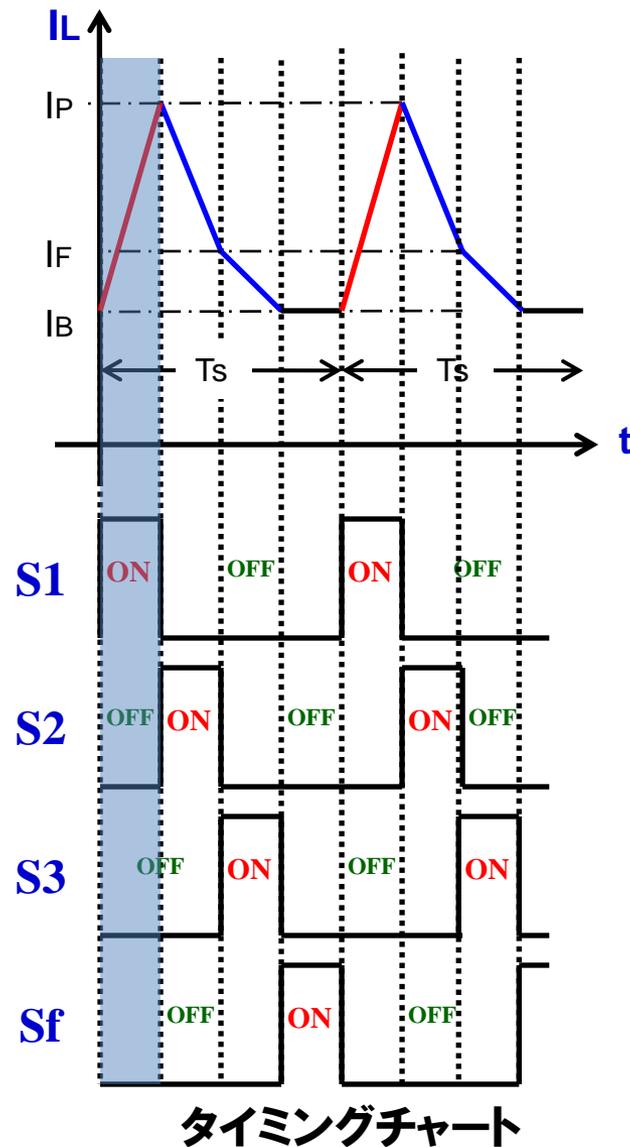
## 従来との違い

負電圧側のスイッチをキャパシタにしてチャージポンプ方式で発生  
スイッチのタイミングをずらす事で負電圧を可変

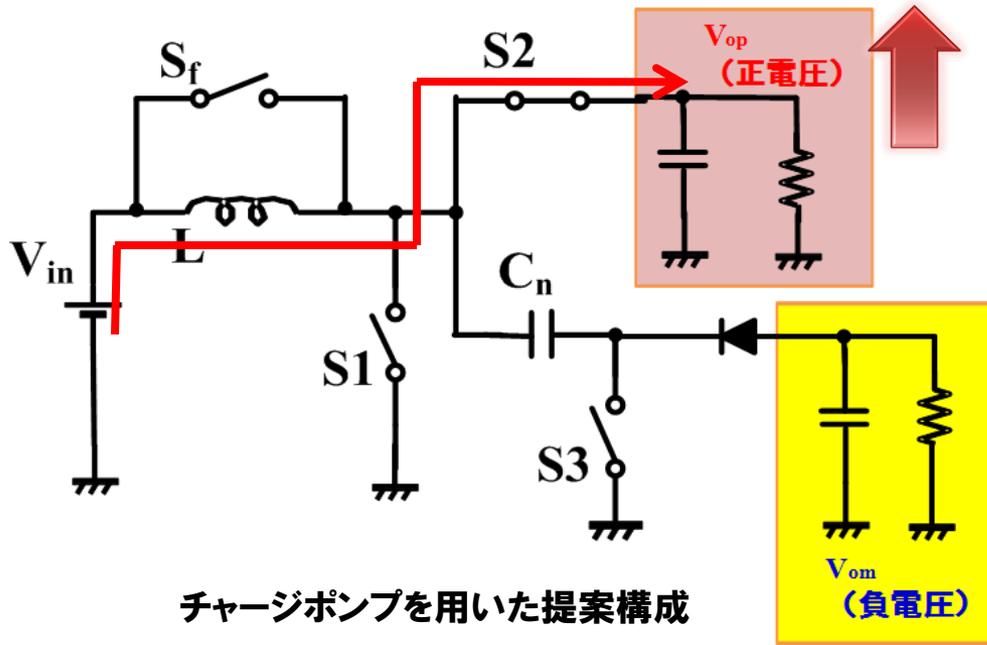
# 正電圧発生動作（昇圧動作T1）



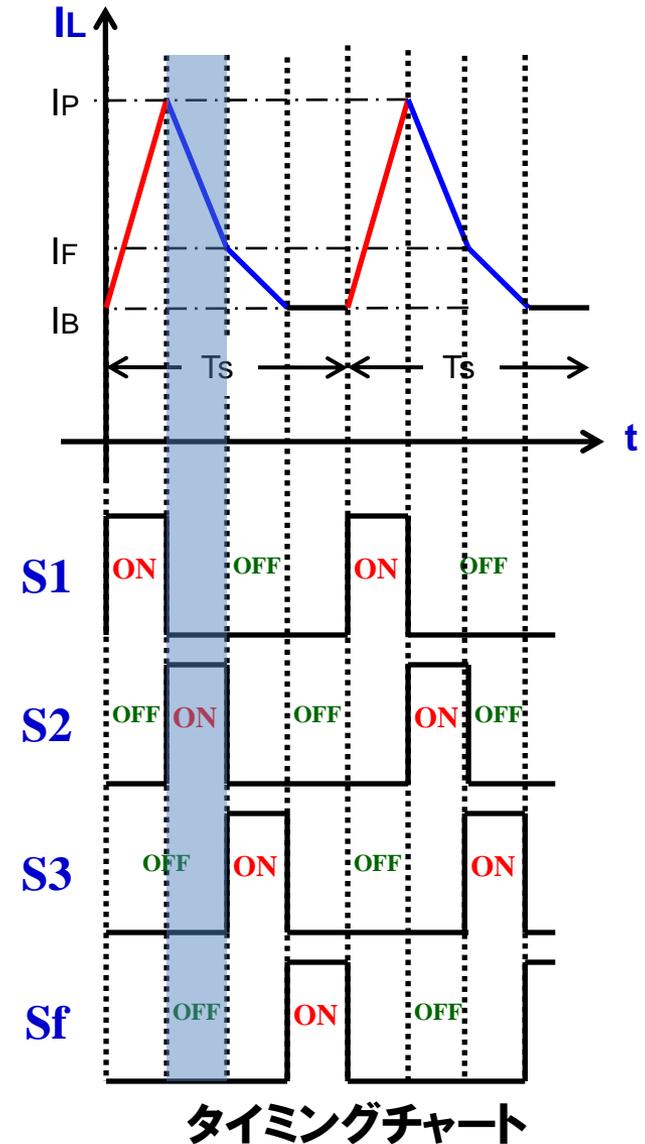
1. S1がON: インダクタにエネルギーを蓄積



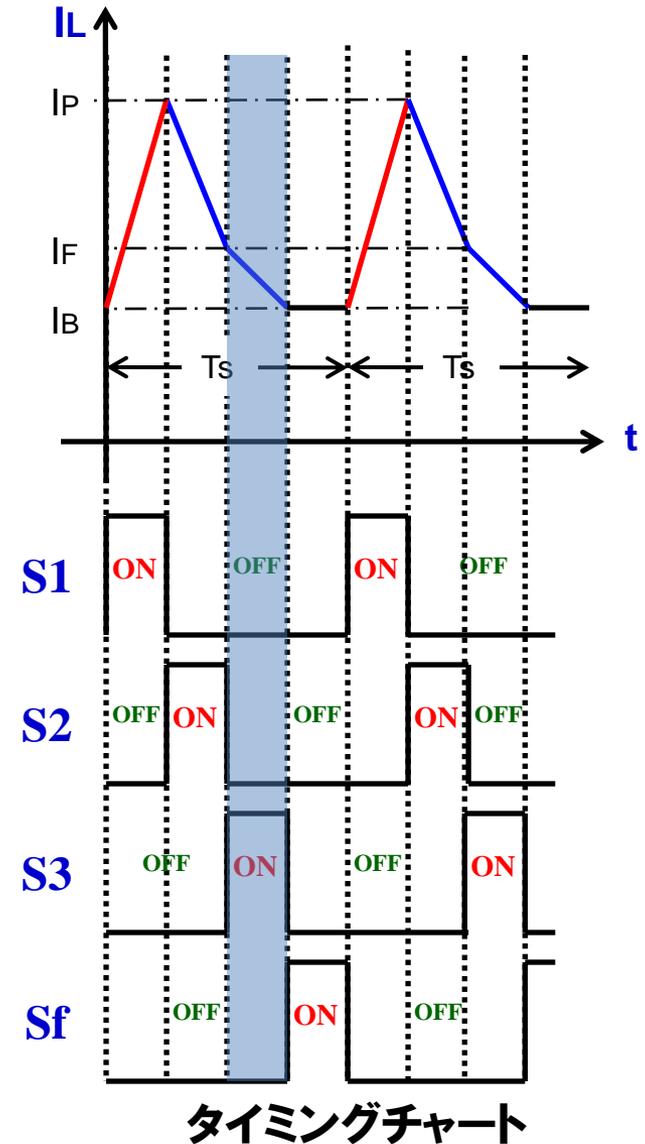
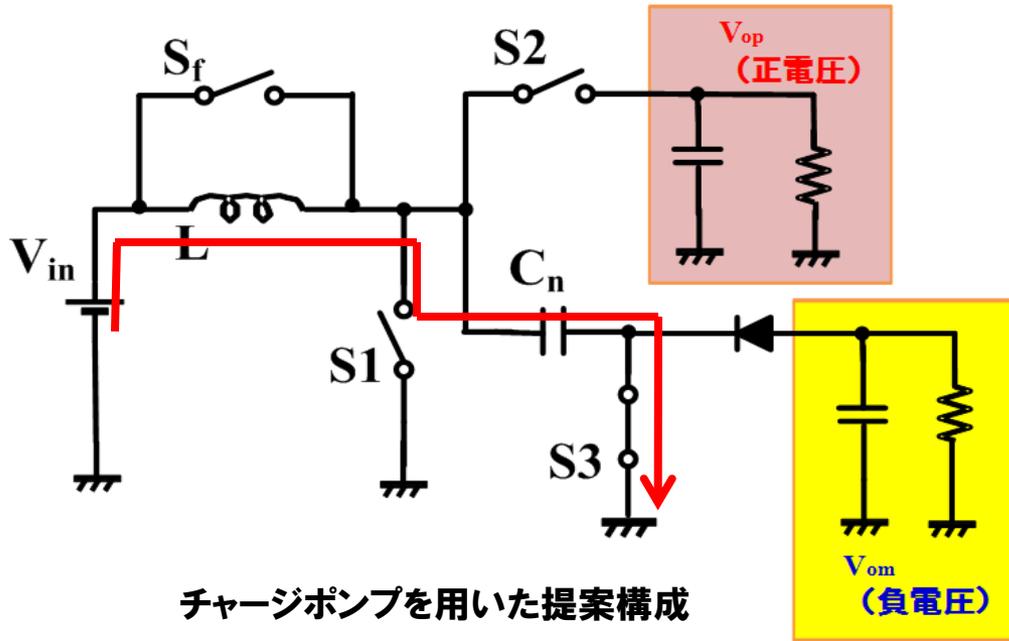
# 正電圧発生動作（昇圧動作T2）



## 2. S2がON: $V_{op}$ 側へエネルギーを放出

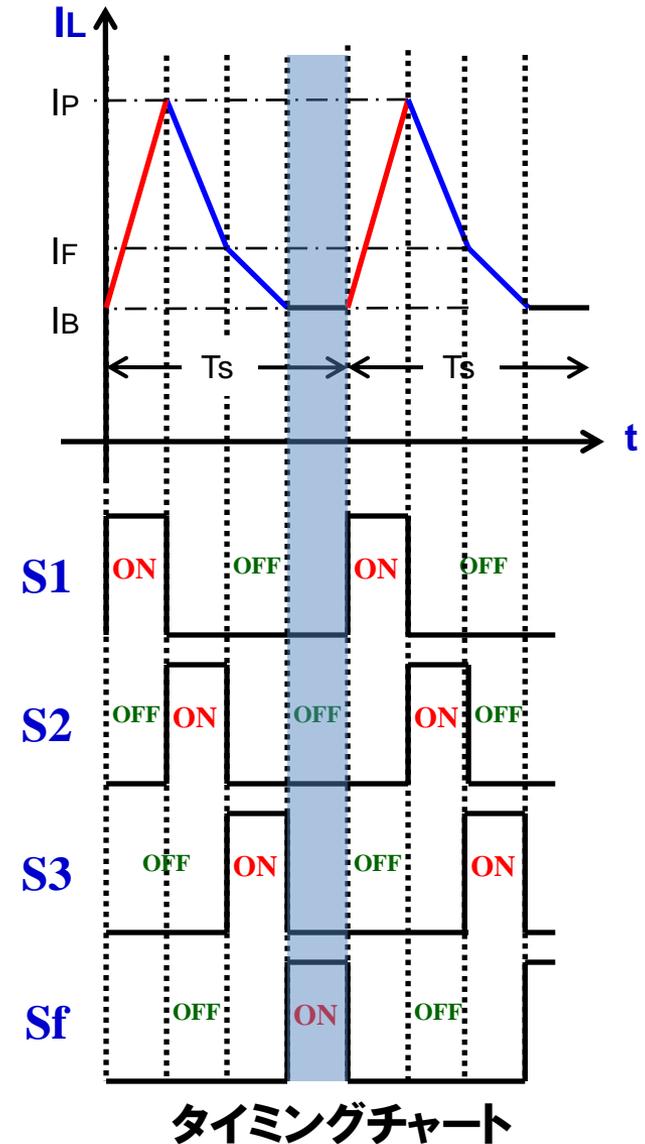
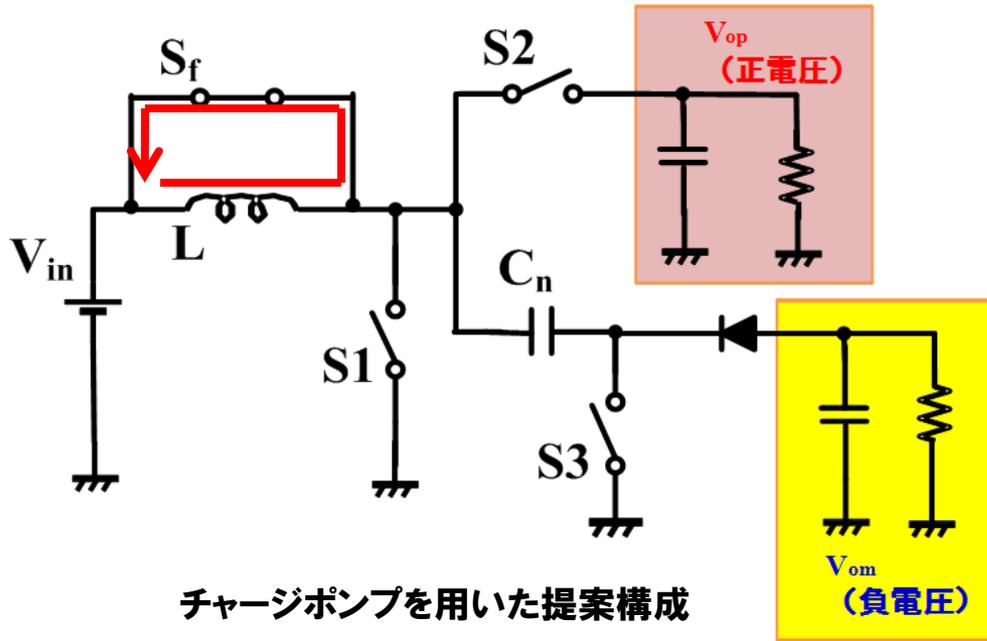


# キャパシタ充電動作T3



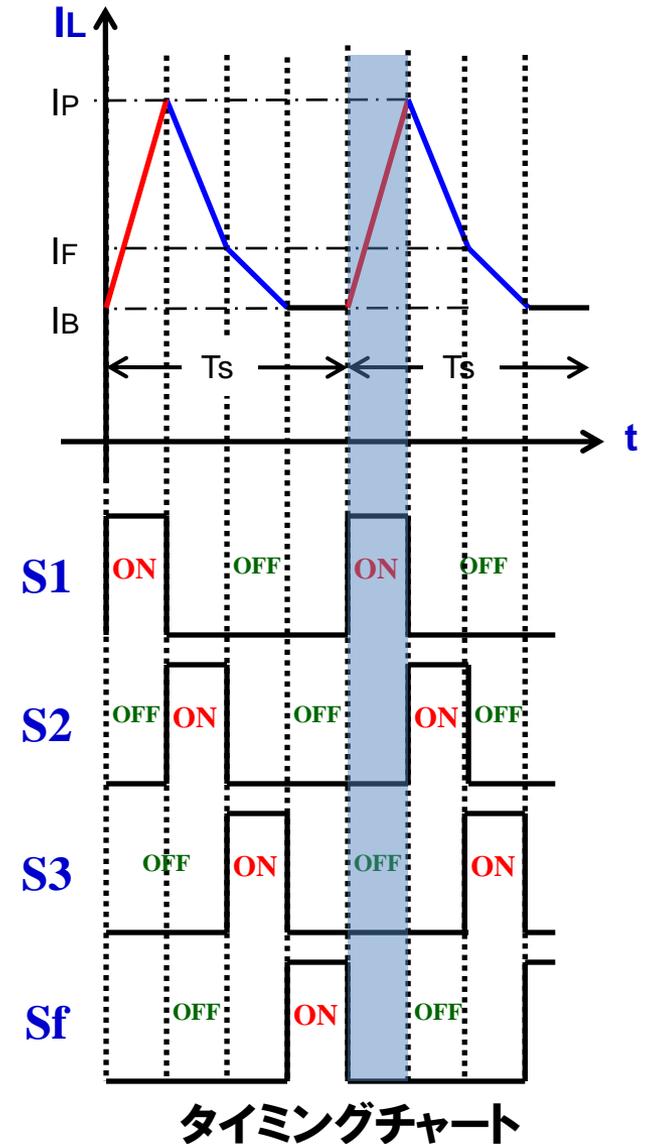
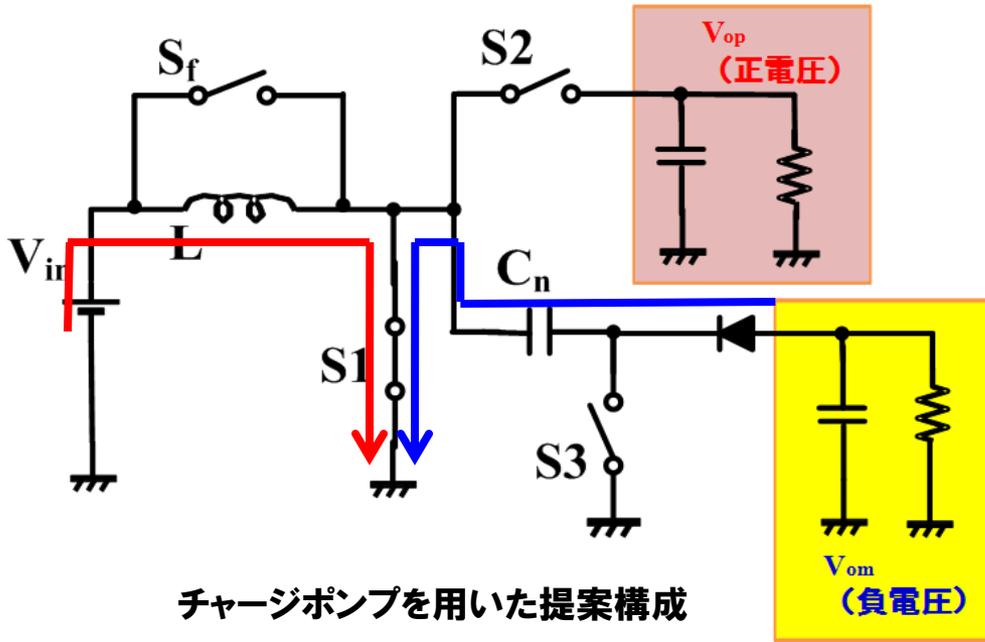
## 3. S3がON: Cnへ電荷を蓄積

# フリーホイール動作T4



4. S<sub>f</sub>がON: インダクタのエネルギーを保持

# 正電圧動作（昇圧動作T1）



5. S1がON: インダクタにエネルギーを蓄積

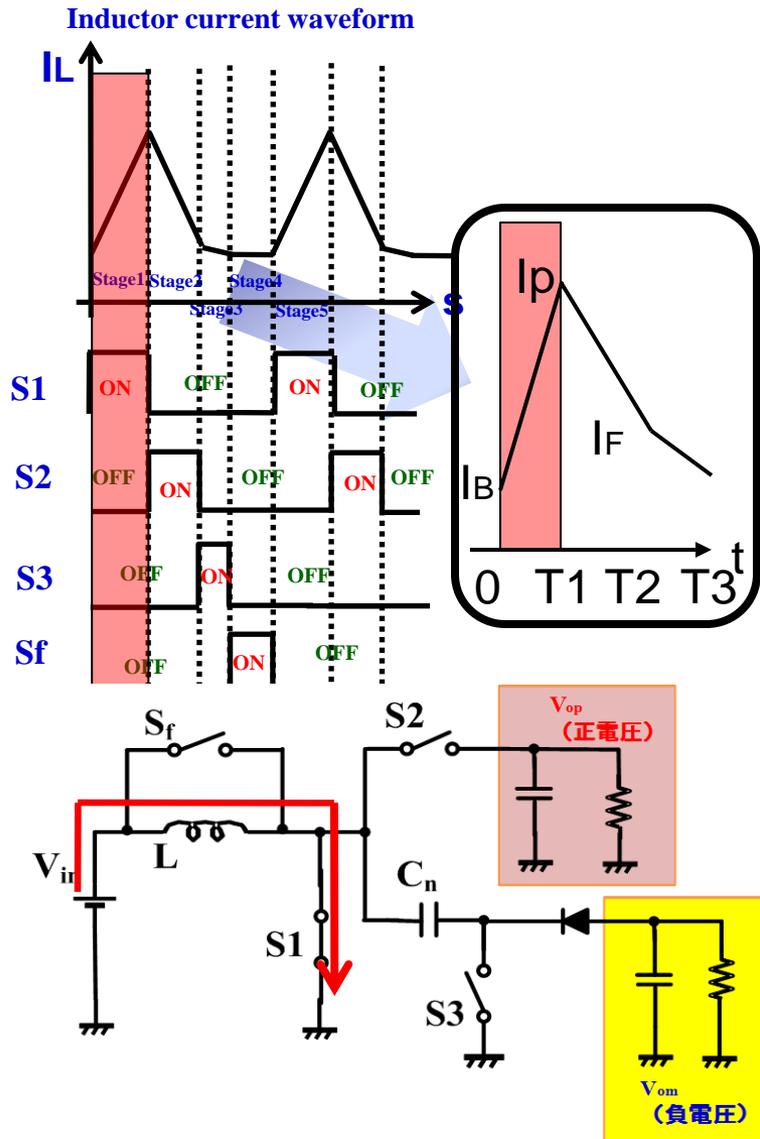
C<sub>n</sub>の電荷がS1側へ放出 → V<sub>om</sub>が減少

以降、同様の動作を繰り返す

# Outline

- ✓ 研究背景
- ✓ 単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの考察
- ✓ 負電圧可変単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータ
- ✓ **負電圧可変手法の効果確認**  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ 負電圧独立手法  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ まとめ

# 正電圧発生（昇圧動作理論解析T1）



## ✓ 昇圧動作(Stage1)

➤ 0~T1でインダクタに流れる電流

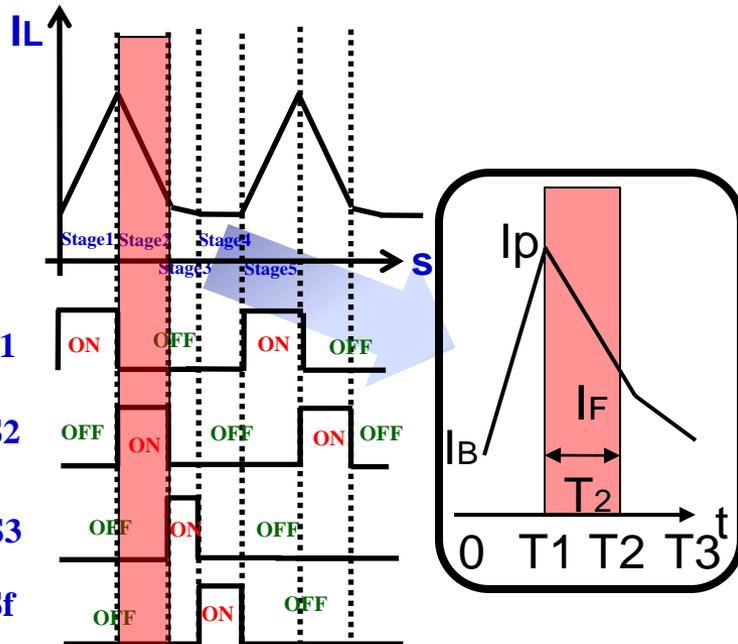
$$I_L = I_B + \frac{V_{in}}{L} t = I_B + \frac{(I_p - I_B)}{T_1} t$$

より

$$\frac{V_{in}}{L} = \frac{I_p - I_B}{T_1}$$

# 正電圧発生（昇圧動作理論解析T2）

Inductor current waveform



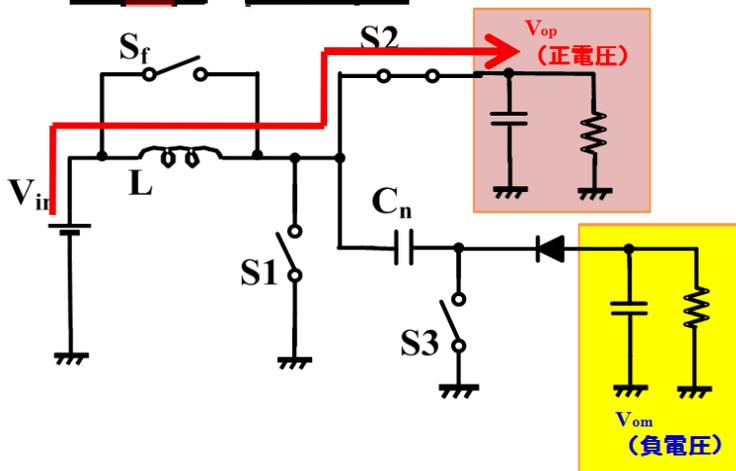
## ✓ 昇圧動作(Stage2)

➤ T1~T2でインダクタに流れる電流

$$I_L = I_p - \frac{I_p - I_F}{T_2} t = I_p - \frac{(V_{op} - V_{in})}{L} t$$

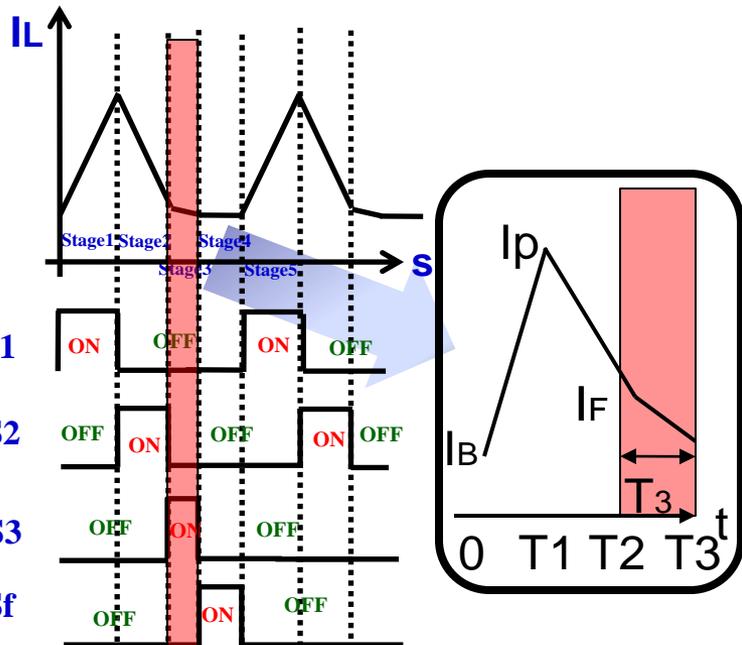
より

$$\frac{V_{op} - V_{in}}{L} = \frac{I_p - I_F}{T_2}$$



# キャパシタ充電（チャージポンプ動作理論解析T3）

Inductor current waveform



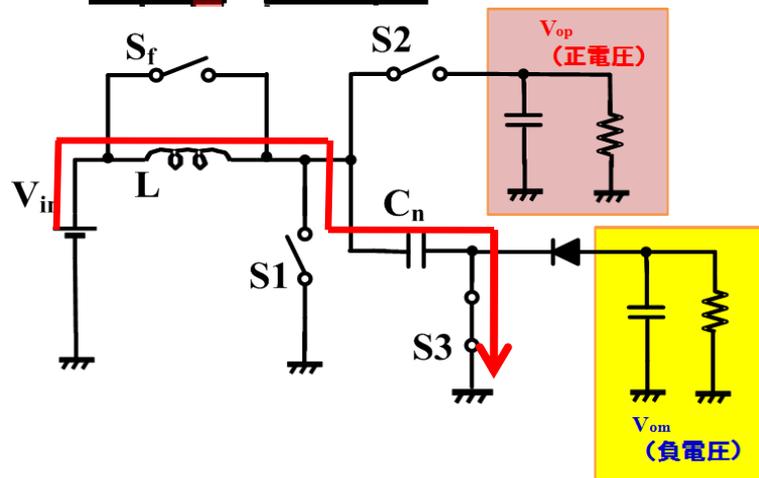
✓ キャパシタ充電(Stage3)

➤ インダクタに流れる電流

$$I_L = I_F - \frac{I_F - I_B}{T_3} t = I_F - \frac{(V_{om} + V_F) - V_{in}}{L} t$$

より

$$\frac{(V_{om} + V_F) - V_{in}}{L} = \frac{I_F - I_B}{T_3}$$



# 正負出力電圧の導出

## ✓ 理論式導出

これまでの解析より

$$\frac{V_{in}}{L} = \frac{I_p - I_B}{T_1} \quad \frac{V_{op} - V_{in}}{L} = \frac{I_p - I_F}{T_2}$$

$$\frac{(V_{om} + V_F) - V_{in}}{L} = \frac{I_F - I_B}{T_3}$$

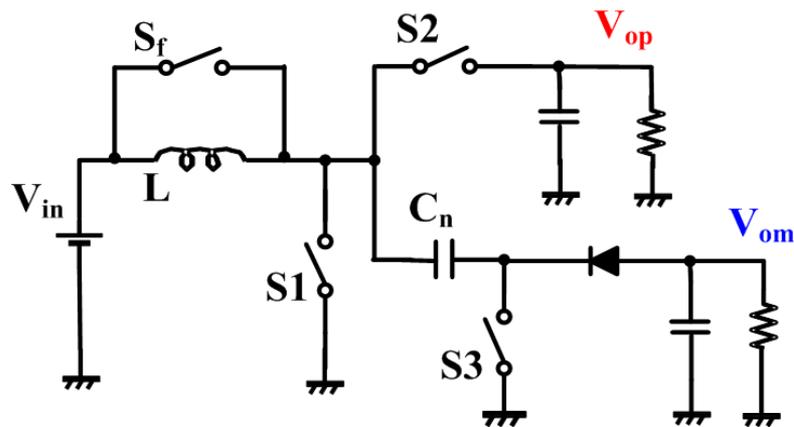
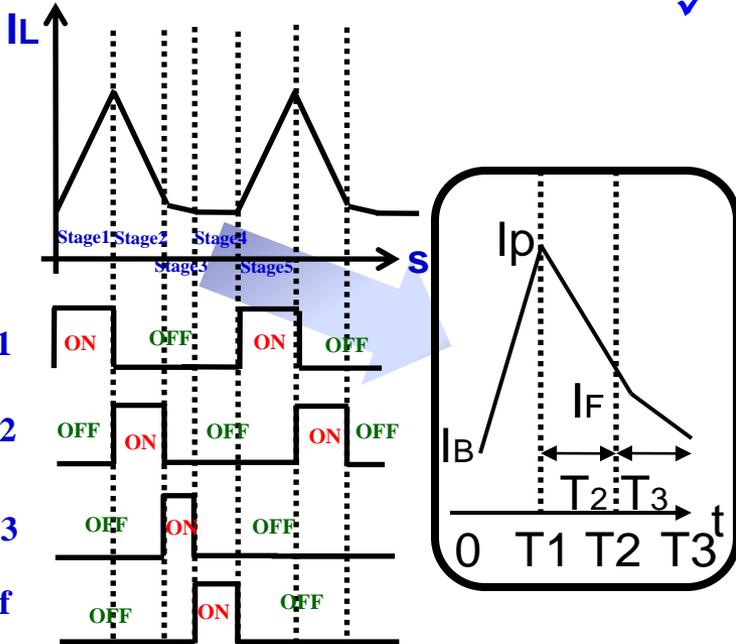
これらをまとめると

$$V_{op} = \frac{(T_1 + T_2 + T_3)V_{in} + (V_{om} + V_F)T_3}{T_2}$$

$$V_{om} = \frac{-(T_1 + T_2 + T_3)V_{in} + V_{op}T_2 + V_FT_3}{T_3}$$

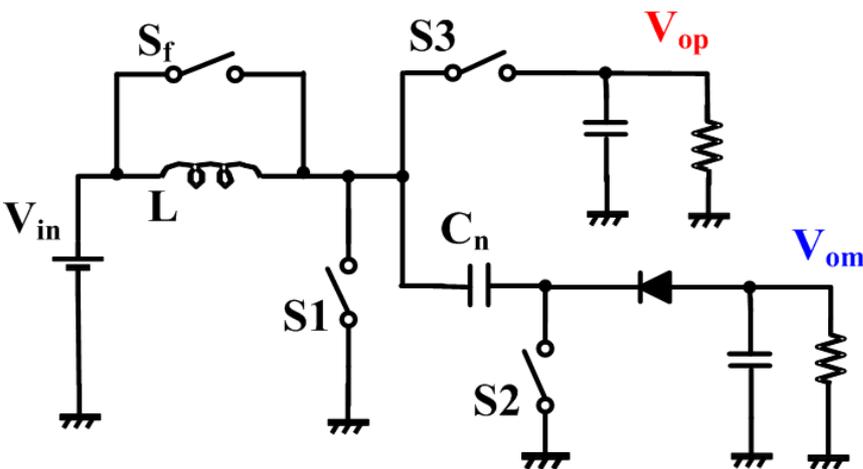
※ $V_F$ : ダイオードのドロップ電圧

Inductor current waveform



# 理論解析に基づいた出力電圧の導出

✓ 理論式から求めた出力電圧



チャージポンプを用いた提案構成

## Sim条件

Vin:3.5V  
VF:0.75V  
L:10uH  
Cout:20uF  
Cn:10uF  
R:10Ω  
Ron:10mΩ  
Fs:500kHz

## 各スイッチの時比率

D1:25  
D2:40  
D3:20  
D4:15

## 理論式

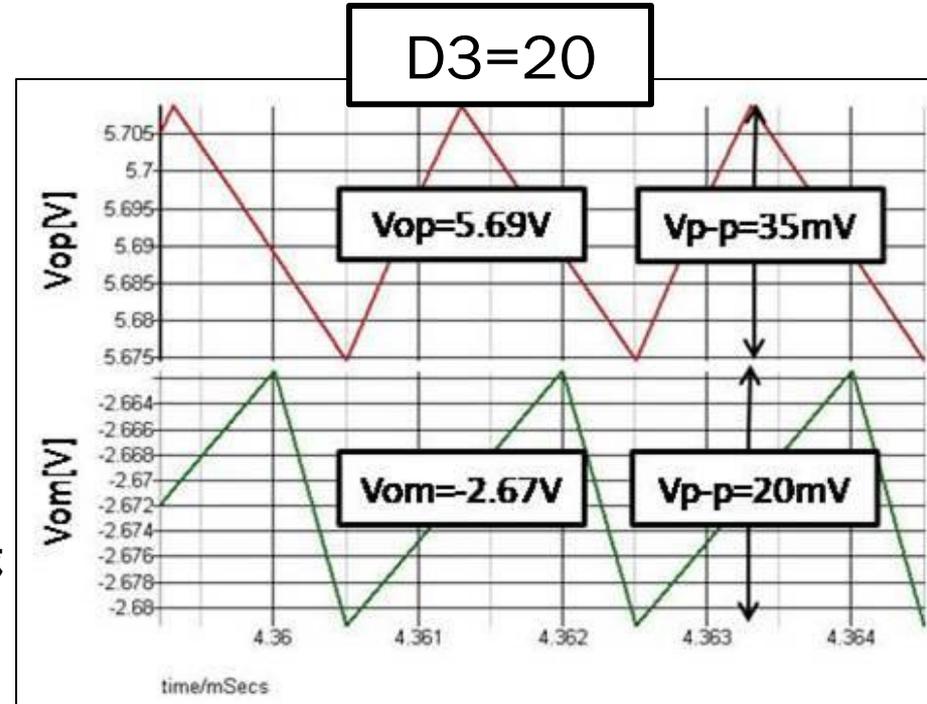
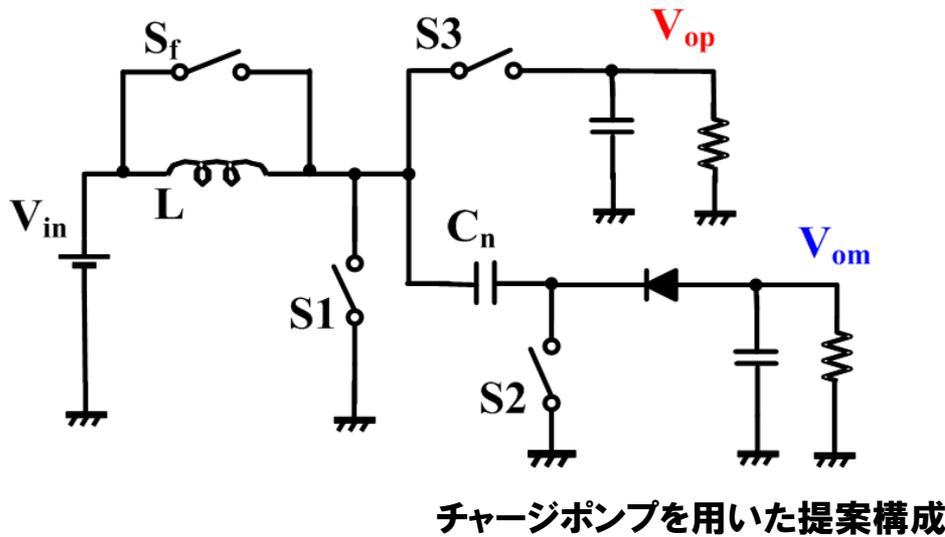
$$\begin{aligned}
 V_{op} &= \frac{(T_1 + T_2 + T_3)V_{in} + (V_{om} + V_F)T_3}{T_2} \\
 &= \frac{1700 \times 3.5 + 3.42 \times 400}{800} \\
 &= 5.73
 \end{aligned}$$

同様に

$$\begin{aligned}
 V_{om} &= - \left| \frac{(T_1 + T_2 + T_3)V_{in} - V_p T_2 - V_F T_3}{T_3} \right| \\
 &= - \left| \frac{1700 \times 3.5 - 5.73 \times 800 - 0.75 \times 400}{400} \right| \\
 &= -2.69
 \end{aligned}$$

# 正負2出力電圧のシミュレーションによる効果確認

✓ 理論式とシミュレーションの比較



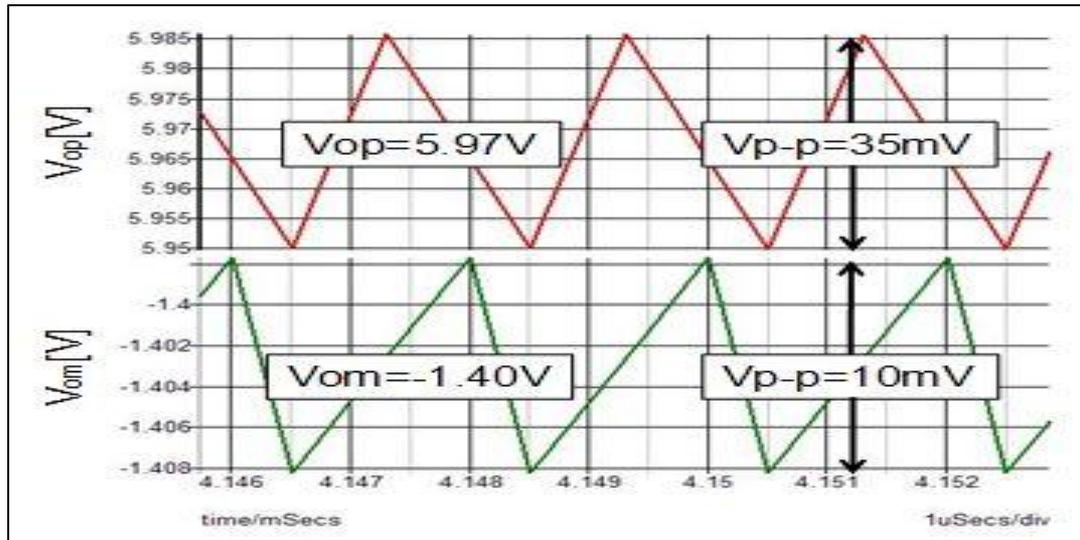
理論式  $V_{op} = 5.73$

理論式  $V_{om} = -2.69$

導出理論式と一致

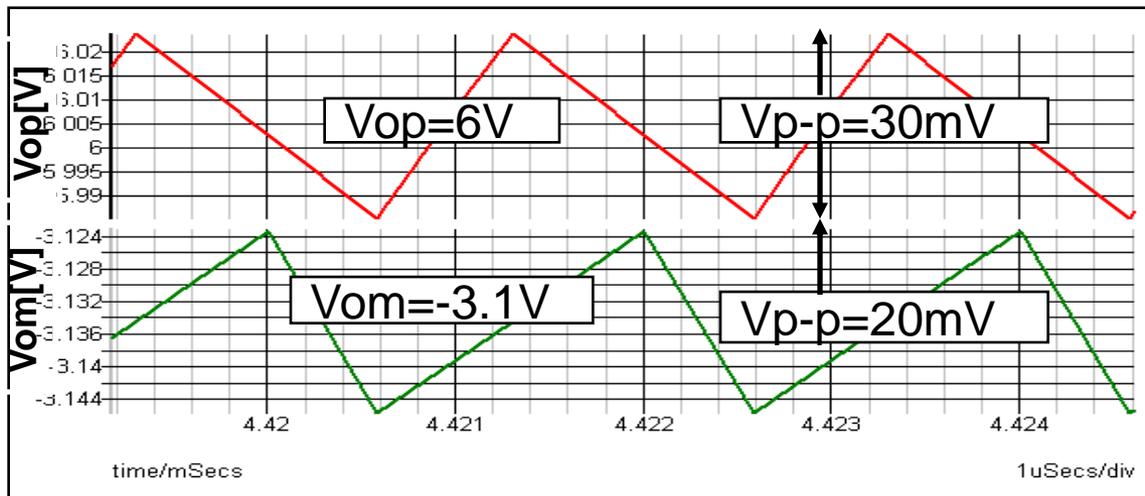
# 負電圧可変効果の確認

Sim条件:  
 Vin:3.5V  
 L:10uH  
 Cout:20uF  
 Cn:10uF  
 R:10Ω  
 Ron:10mΩ  
 Fs:500kHz



各スイッチの  
時比率

D1:25  
 D2:40  
 D3:10  
 D4:25



各スイッチの  
時比率

D1:29  
 D2:36  
 D3:20  
 D4:15

# 負電圧可変効果の確認

	従来	提案1
理論式	$V_{op} = \frac{T_1 + T_2}{T_2} V_{in}$ $ V_{om}  = V_{op} - 2V_F$	$V_{op} = \frac{(T_1 + T_2 + T_3)V_{in} + (V_{om} + V_F)T_3}{T_2}$ $V_{om} = \frac{-(T_1 + T_2 + T_3)V_{in} + V_{op}T_2 + V_FT_3}{T_3}$
時比率(%)	D1:50, D2:30, D3:20	(1) D1:25, D2:40, D3:10, D4:25 (2) D1:29, D2:36, D3:20, D4:15
シミュレーション結果	$V_{op} = 9.57V$ $V_{om} = -7.90V$	(1) $V_{op} = 5.97V, V_{om} = -1.40V$ (2) $V_{op} = 6.0V, V_{om} = -3.1V$



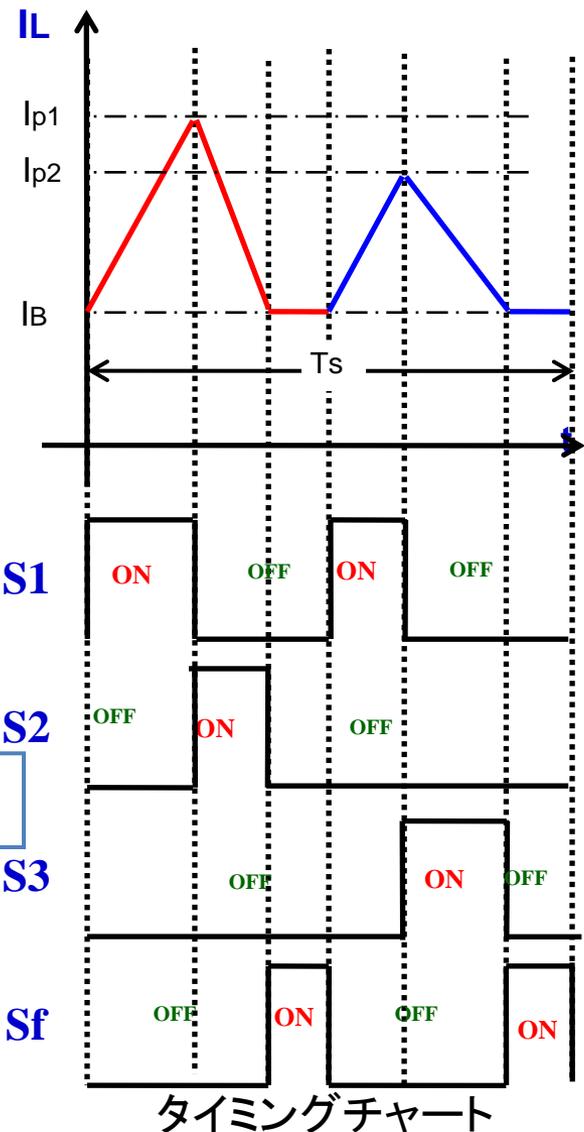
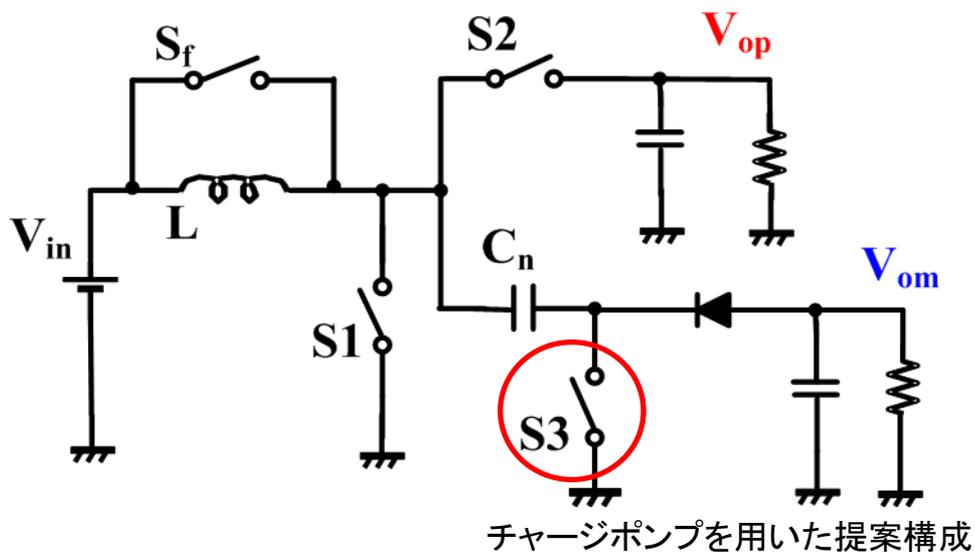
依存性を改善



# Outline

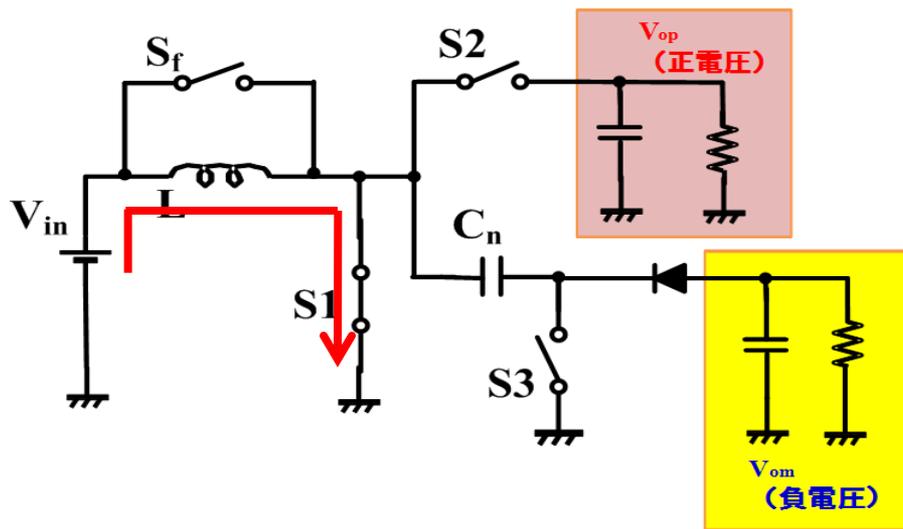
- ✓ **研究背景**
- ✓ **単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの考察**
- ✓ **負電圧可変単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータ**
- ✓ **負電圧可変手法の効果確認**  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ **負電圧独立手法**  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ **まとめ**

# キャパシタを用いた負電圧可変手法の検討

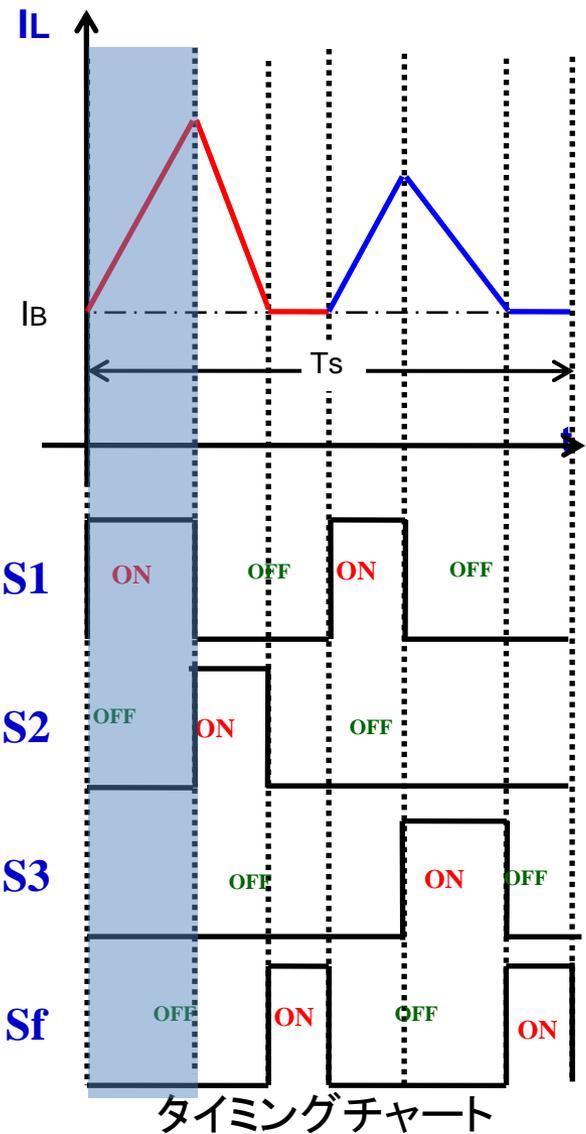


• スイッチのタイミングをずらす事で負電圧を可変

# キャパシタを用いた負電圧可変手法の検討

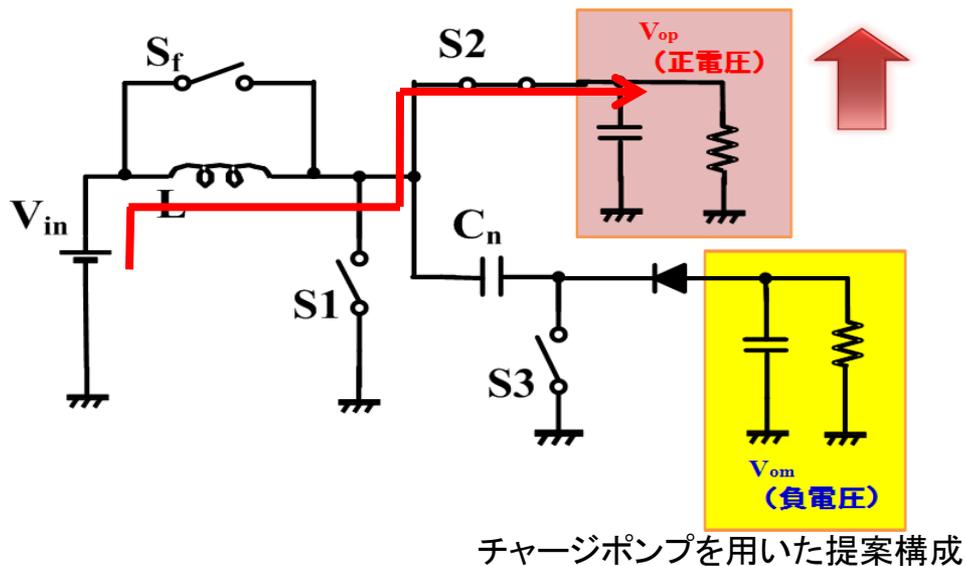


チャージポンプを用いた提案構成

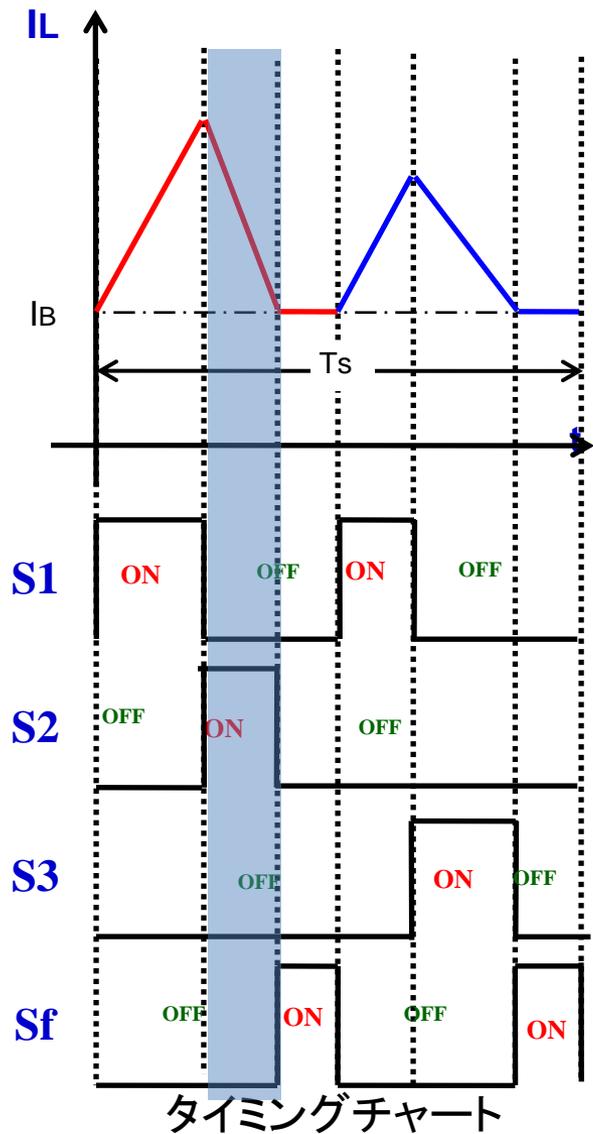


1.  $S_1$ がON: インダクタにエネルギーを蓄積

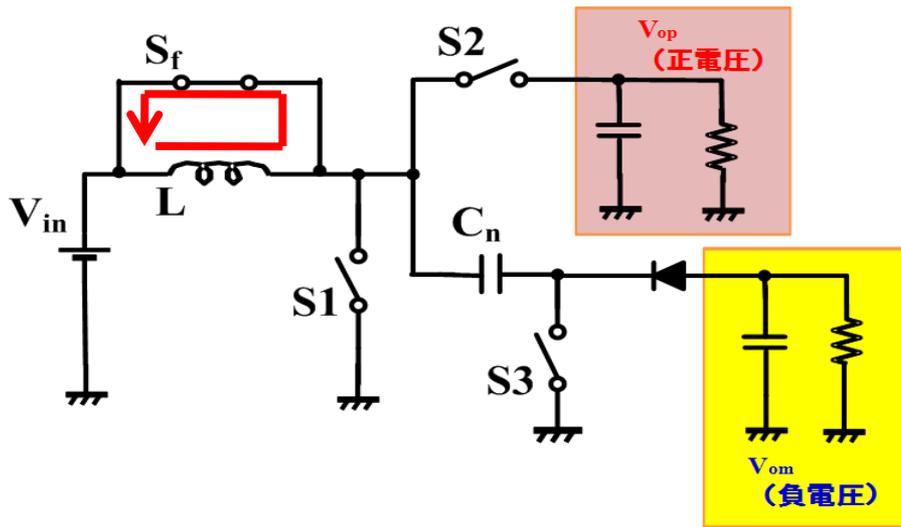
# キャパシタを用いた負電圧可変手法の検討



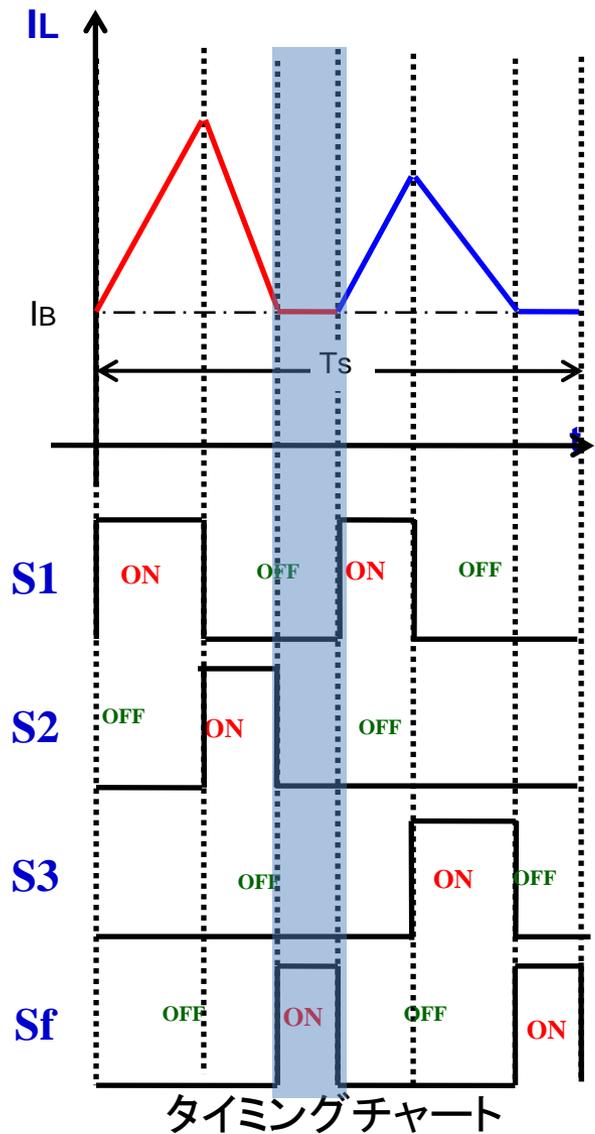
2. S2がON:  $V_{op}$ 側へエネルギーを放出



# キャパシタを用いた負電圧可変手法の検討

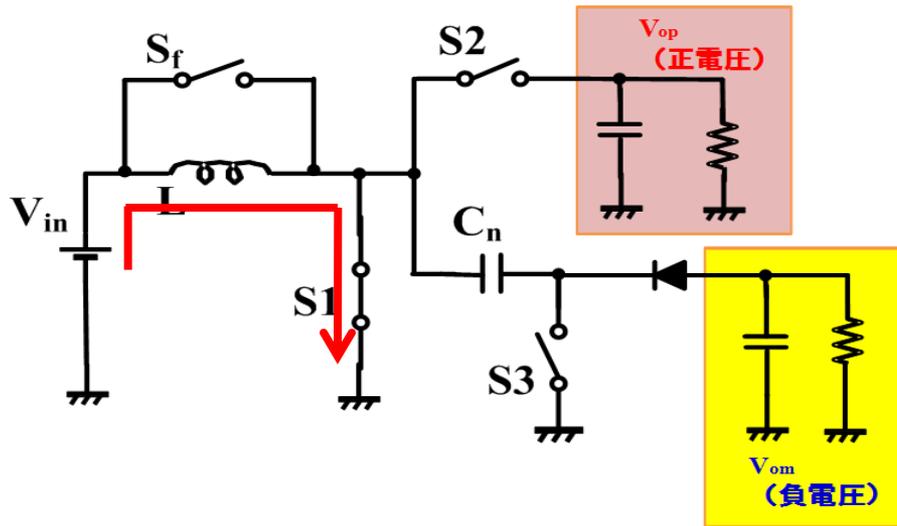


チャージポンプを用いた提案構成

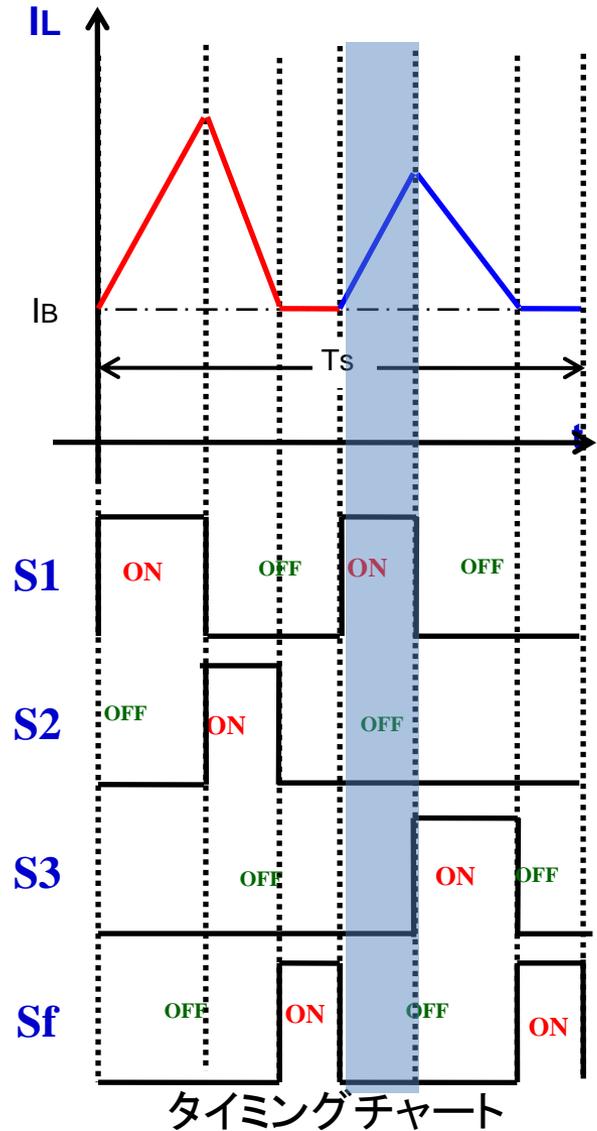


3. S<sub>f</sub>がON: インダクタのエネルギーを保持

# キャパシタを用いた負電圧可変手法の検討

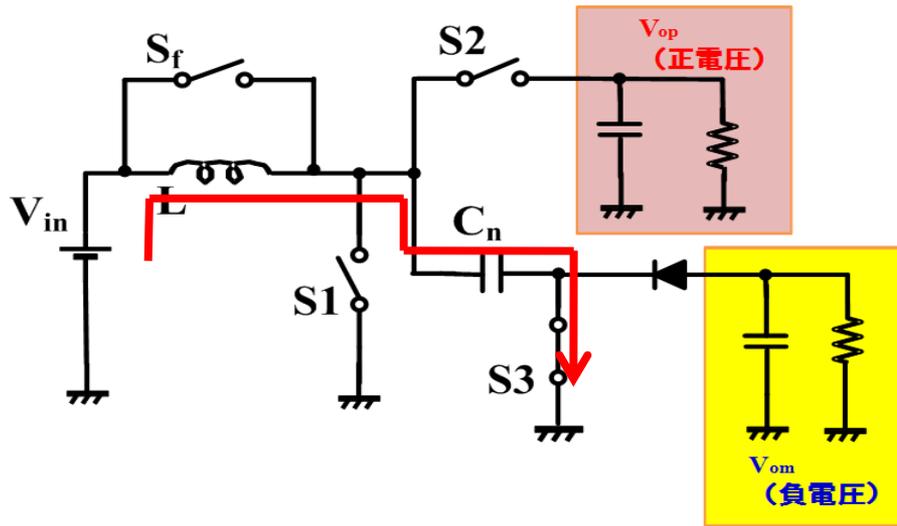


チャージポンプを用いた提案構成



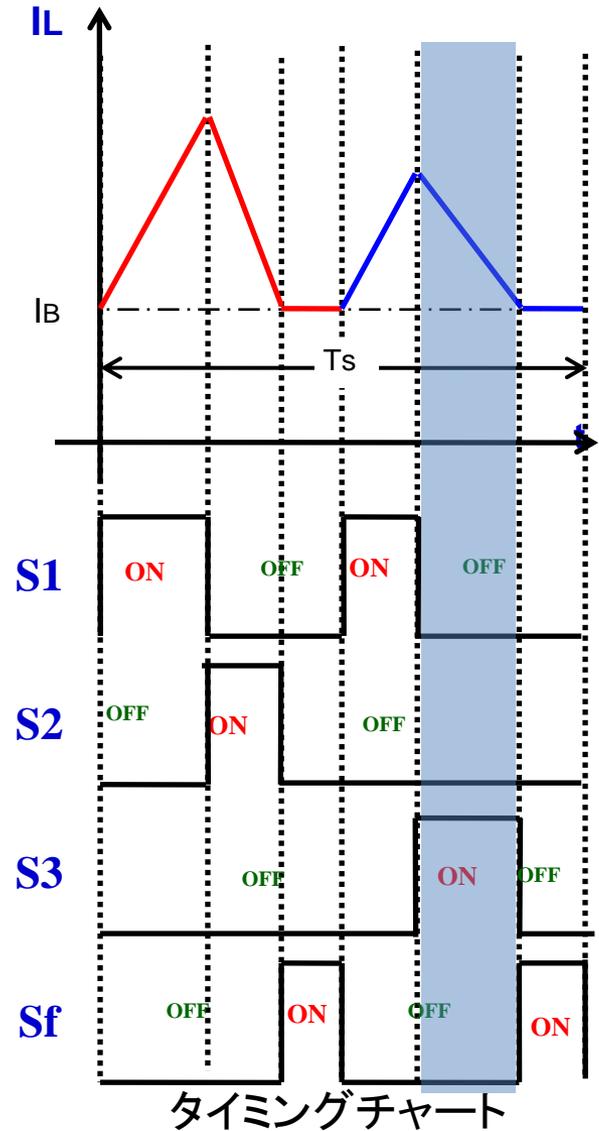
4.  $S_1$ がON: インダクタにエネルギーを蓄積

# キャパシタを用いた負電圧可変手法の検討

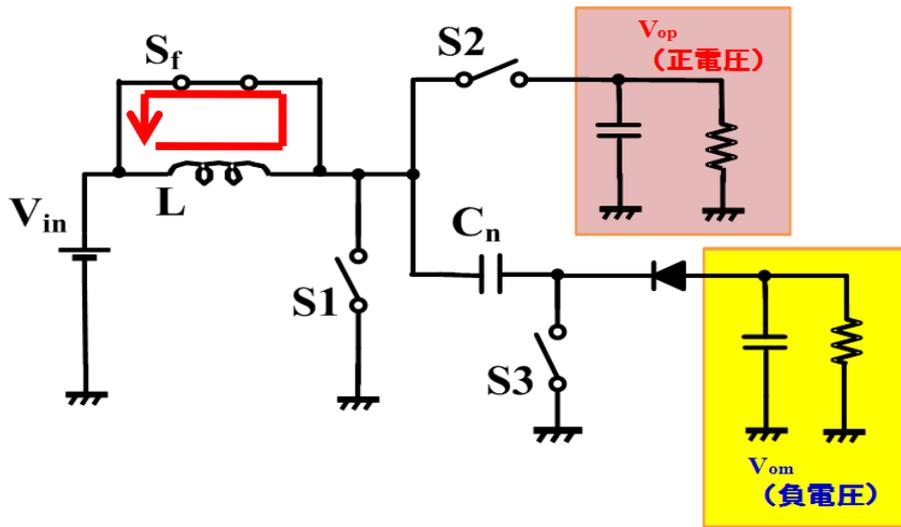


チャージポンプを用いた提案構成

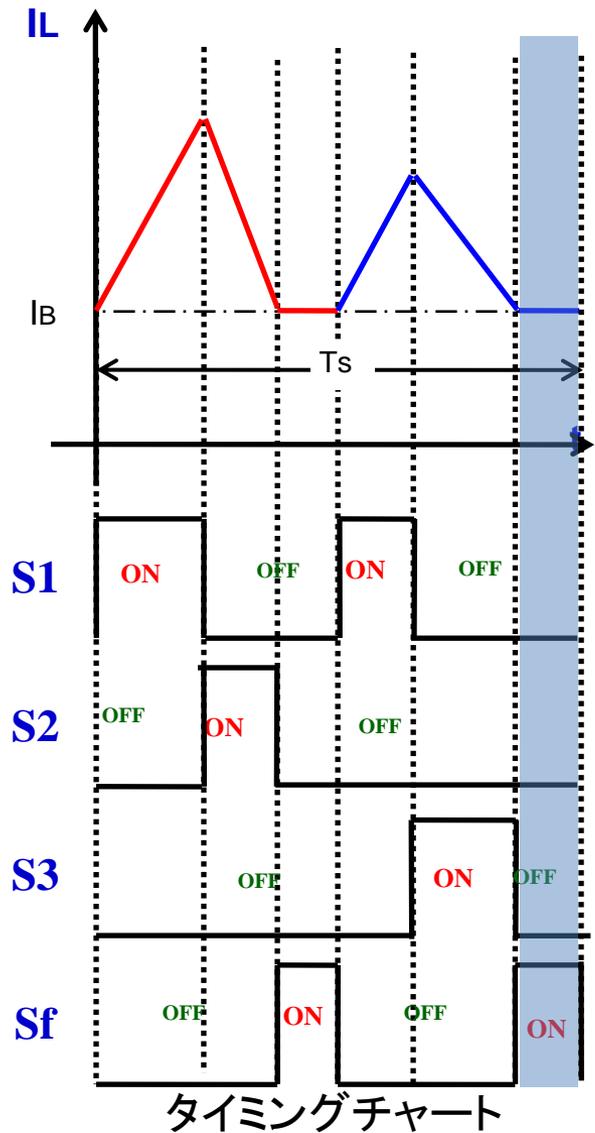
5. S3がON: C<sub>n</sub>へ電荷を蓄積



# キャパシタを用いた負電圧可変手法の検討

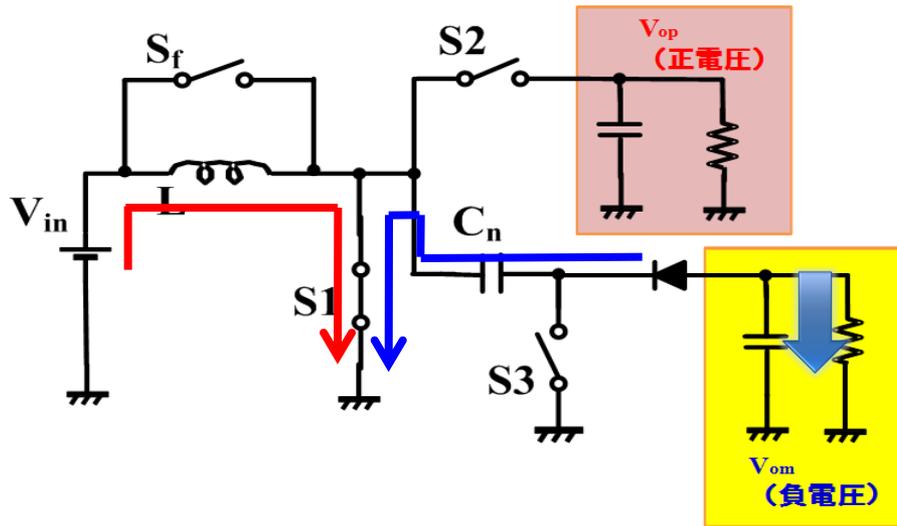


チャージポンプを用いた提案構成

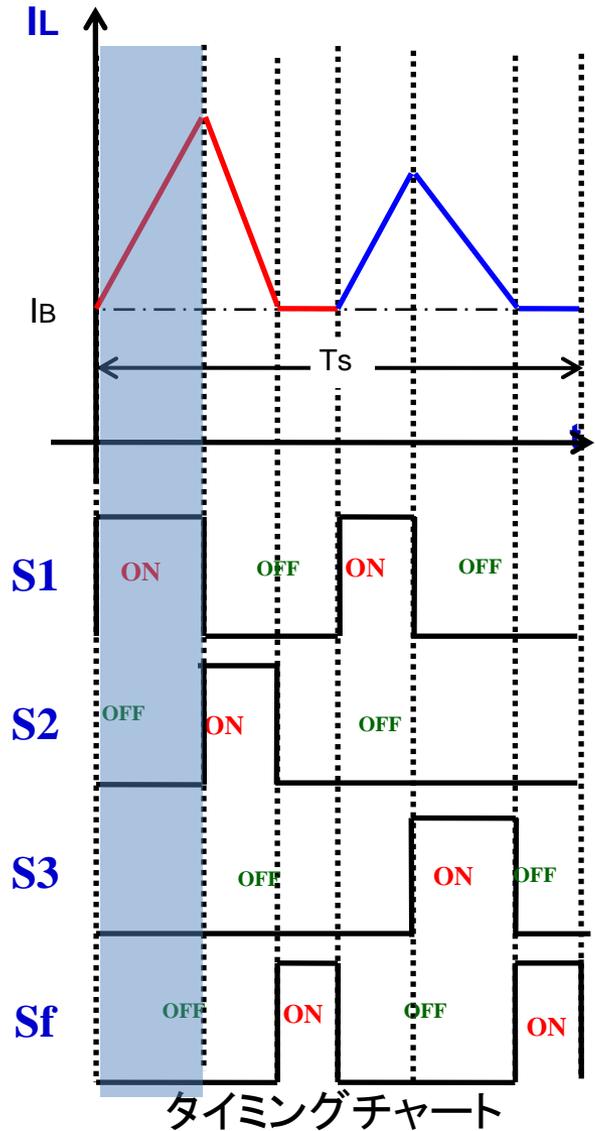


6. S<sub>f</sub>がON: インダクタのエネルギーを保持

# キャパシタを用いた負電圧可変手法の検討



チャージポンプを用いた提案構成

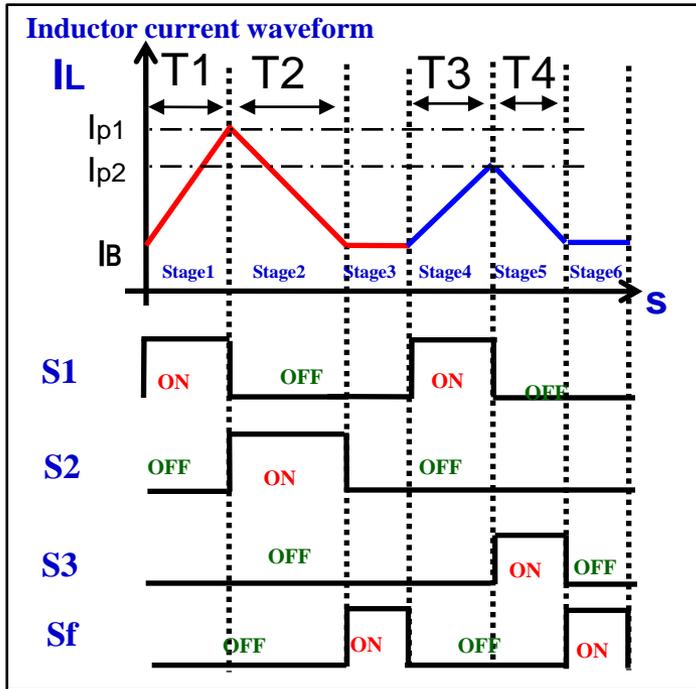


7. S<sub>1</sub>がON: インダクタにエネルギーを蓄積

C<sub>n</sub>の電荷がS<sub>1</sub>側へ放出 → V<sub>om</sub>が減少

以降、同様の動作を繰り返す

# 正負出力電圧の導出



•インダクタ電流の解析より

$$\frac{V_{in}}{L} = \frac{I_{P1} - I_B}{T_1} \quad \frac{V_{op} - V_{in}}{L} = \frac{I_{P1} - I_B}{T_2}$$

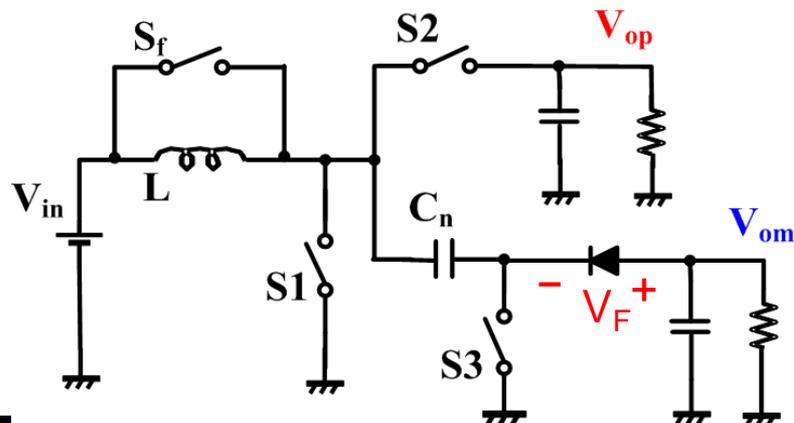
$$\frac{V_{in}}{L} = \frac{I_{P2} - I_B}{T_3} \quad \frac{(V_{om} + V_F) - V_{in}}{L} = \frac{I_{P2} - I_B}{T_4}$$

•これらをまとめると( $V_F=0.8[V]$ のダイオードを使用)

$$V_{op} = \frac{T_1 + T_2}{T_2} V_{in}$$

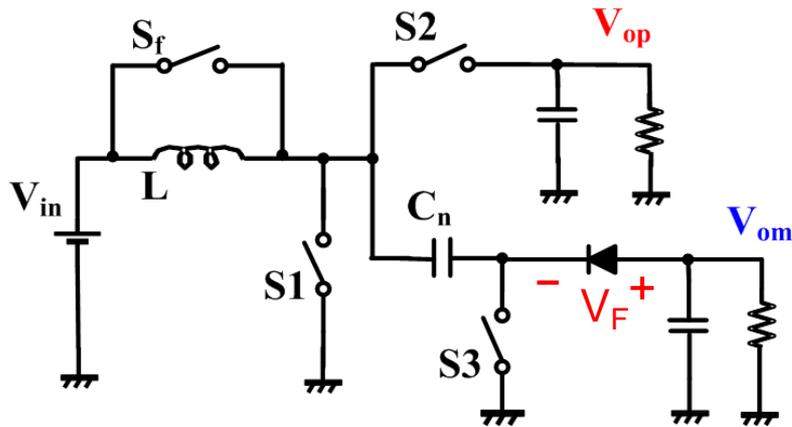
$$V_{om} = -\frac{T_3 + T_4}{T_4} V_{in} + V_F$$

※ $V_F$ :ダイオードのドロップ電圧



# 理論解析(シミュレーションによる確認)

## 理論式



### Sim条件:

Vin:3.5V  
 L:10uH  
 Cout:20uF  
 Cn:10uF  
 R:10Ω  
 Ron:10mΩ  
 Fs:500kHz

■ spectreにて確認

### 各スイッチの時比率

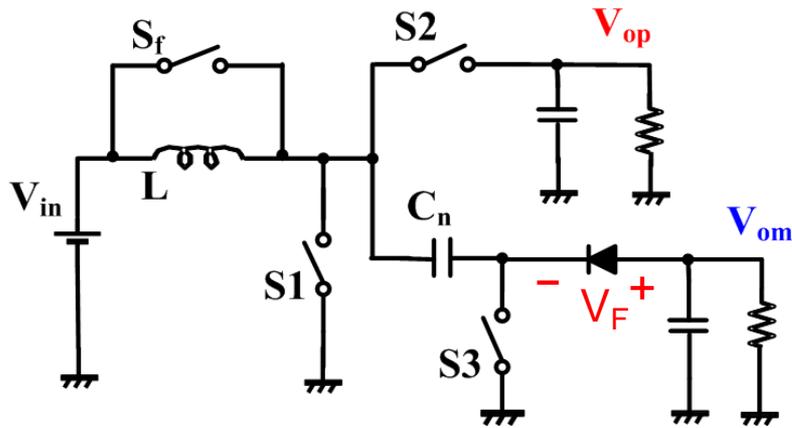
D1:7.5  
 D2:23.5  
 D3:20  
 D4:25.8

$$\begin{aligned}
 V_{op} &= \frac{T_1 + T_2}{T_2} V_{in} \\
 &= \frac{0.3 * 10^{-6} + 0.94 * 10^{-6}}{0.94 * 10^{-6}} * 3.5 \\
 &= 4.62
 \end{aligned}$$

同様に

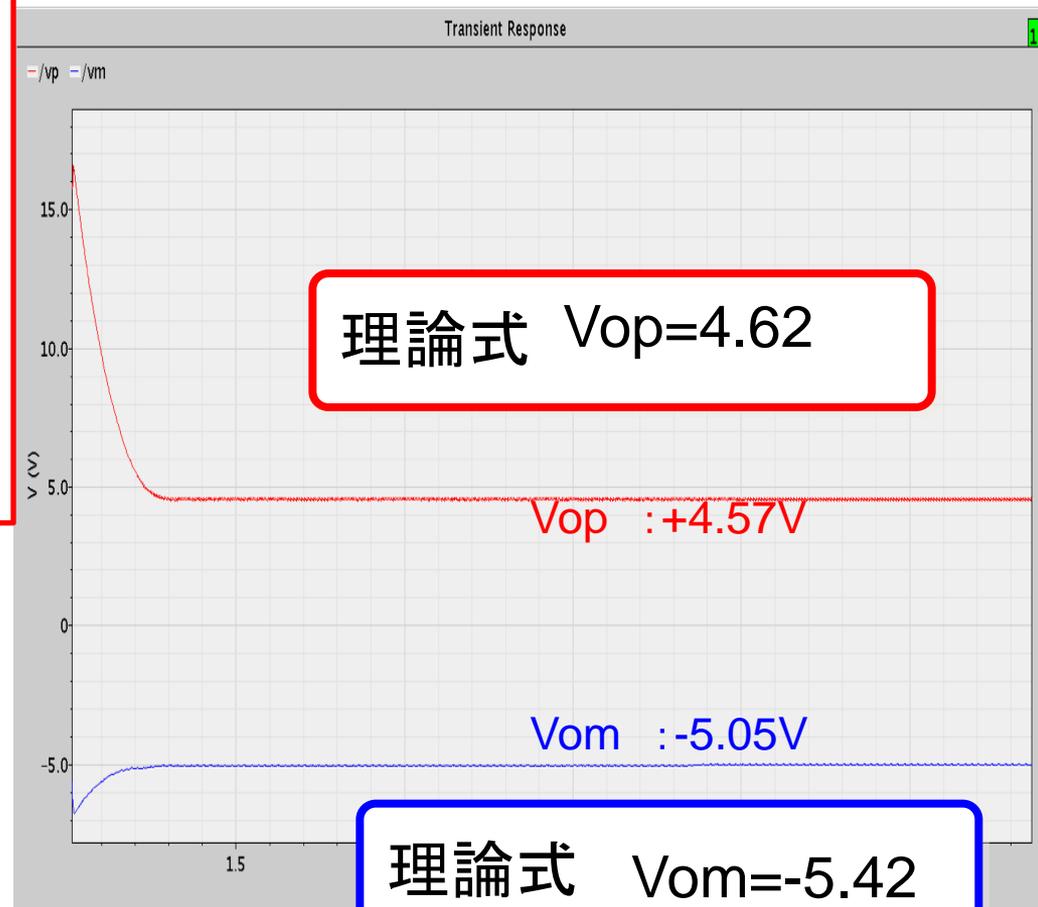
$$\begin{aligned}
 V_{om} &= -\frac{T_3 + T_4}{T_4} V_{in} + V_F \\
 &= -\frac{0.8 * 10^{-6} + 1.03 * 10^{-6}}{1.03 * 10^{-6}} * 3.5 + 0.8 \\
 &= -5.42
 \end{aligned}$$

# 理論解析(シミュレーションによる確認)

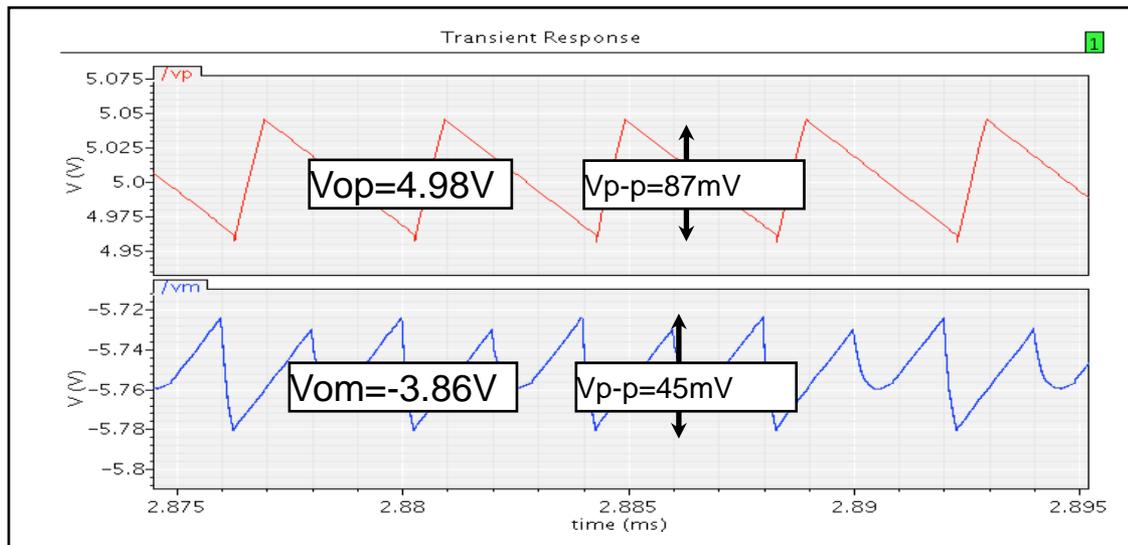


■ spectreにて確認

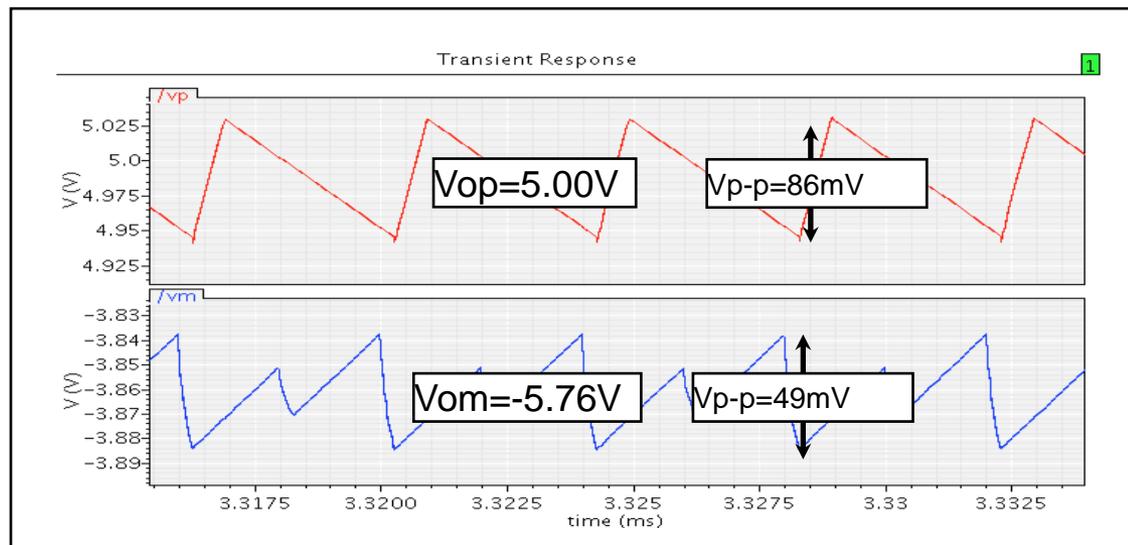
理論式に近い値を確認



# シミュレーション(負電圧可変)



各ステージ  
の時比率:  
D1:7.5  
D2:16  
D3:26.5  
D4:7.5  
D5:18  
D6:24.5



各ステージ  
の時比率:  
D1:7.5  
D2:17  
D3:25.5  
D4:22.5  
D5:23  
D6:4.5

# 負電圧可変効果の確認

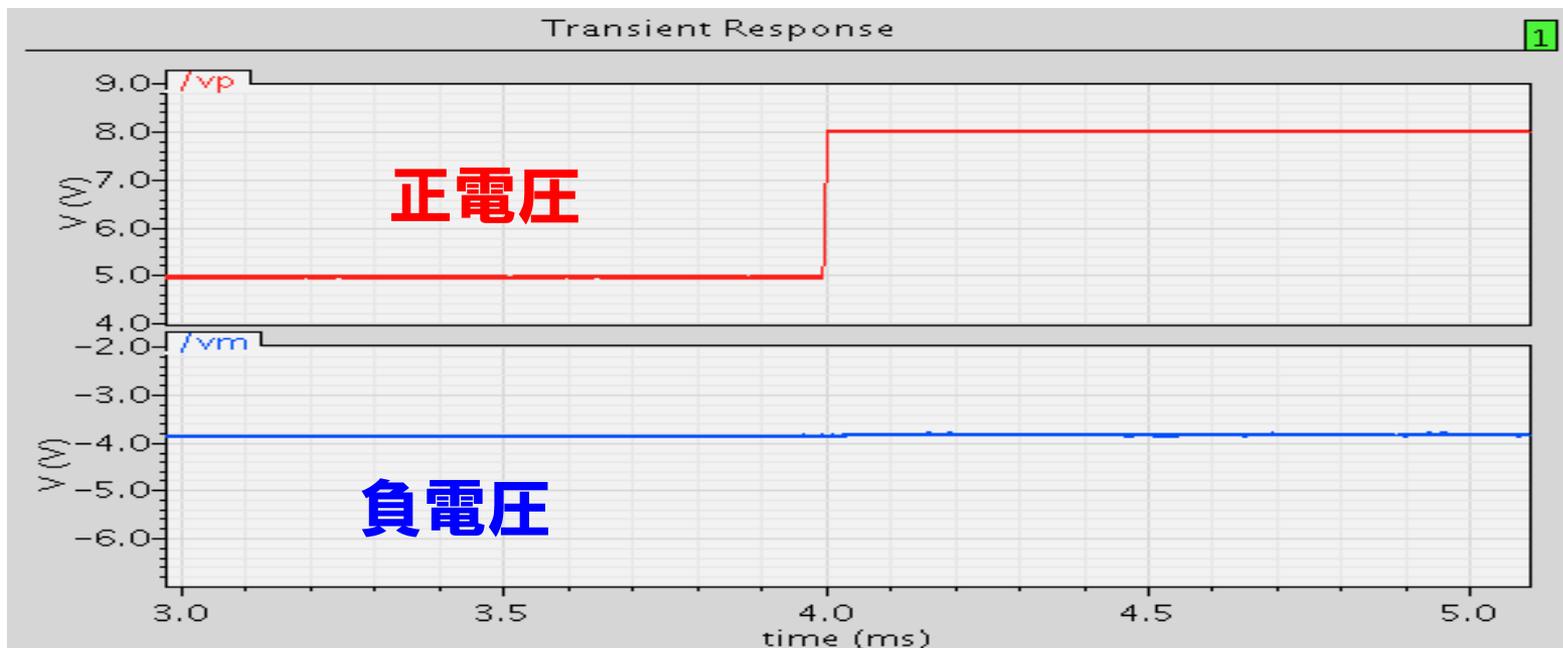
	提案1	提案2
理論式	$V_{op} = \frac{(T_1 + T_2 + T_3)V_{in} + (V_{om} + V_F)T_3}{T_2}$ $V_{om} = \frac{-(T_1 + T_2 + T_3)V_{in} + V_{op}T_2 + V_FT_3}{T_3}$	$V_{op} = \frac{T_1 + T_2}{T_2} V_{in}$ $V_{om} = -\frac{T_3 + T_4}{T_4} V_{in} + V_F$
時比率(%)	(1) D1:25, D2:40, D3:10, D4:25 (2) D1:29, D2:36, D3:20, D4:15	(1) D1:7.5, D2:16, D3:26.5, D4:18, D6:24.5 (2) D1:7.5, D2:17, D3:25.5, D4:22.5, D5:23, D6:4.5
シミュレーション結果	(1) $V_{op}=5.97V, V_{om}=-1.40V$ (2) $V_{op}=6.0V, V_{om}=-3.1V$	(1) $V_{op}=4.98V, V_{om}=-3.86V$ (2) $V_{om}=5.00V, V_{om}=-5.76V$

依存性を改善

# シミュレーション(クロスレギュレーション)

正電圧: 5V→8Vに変動

提案構成



クロスレギュレーションの  
改善を確認

# Outline

- ✓ 研究背景
- ✓ 単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの考察
- ✓ 負電圧可変単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータ
- ✓ 負電圧可変手法の効果確認  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ 負電圧独立手法  
(理論解析とシミュレーションによる動作確認)
- ✓ まとめ

# まとめ

- ✓ **単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータ**
  - **低チップ面積、低コスト化**
- ✓ **構成方法**
  - **疑似連続モードを用いたチャージポンプ方式の提案**
- ✓ **キャパシタを用いた負電圧可変手法**
  - **シミュレーションと解析にて負電圧可変効果を確認**
- ✓ **今後の課題**
  - **提案構成での制御回路の検討**
  - **実電源による実測確認**

---

**ご清聴ありがとうございました**