

連続時間 $\Delta\Sigma$ 用いてDC-DCコンバータ

Continuous-Time Delta-Sigma Controller for DC-DC Converter

趙峰*, 小堀康功, 高虹,
Zachary Nosker, 小林春夫, 高井伸和

アウトライン

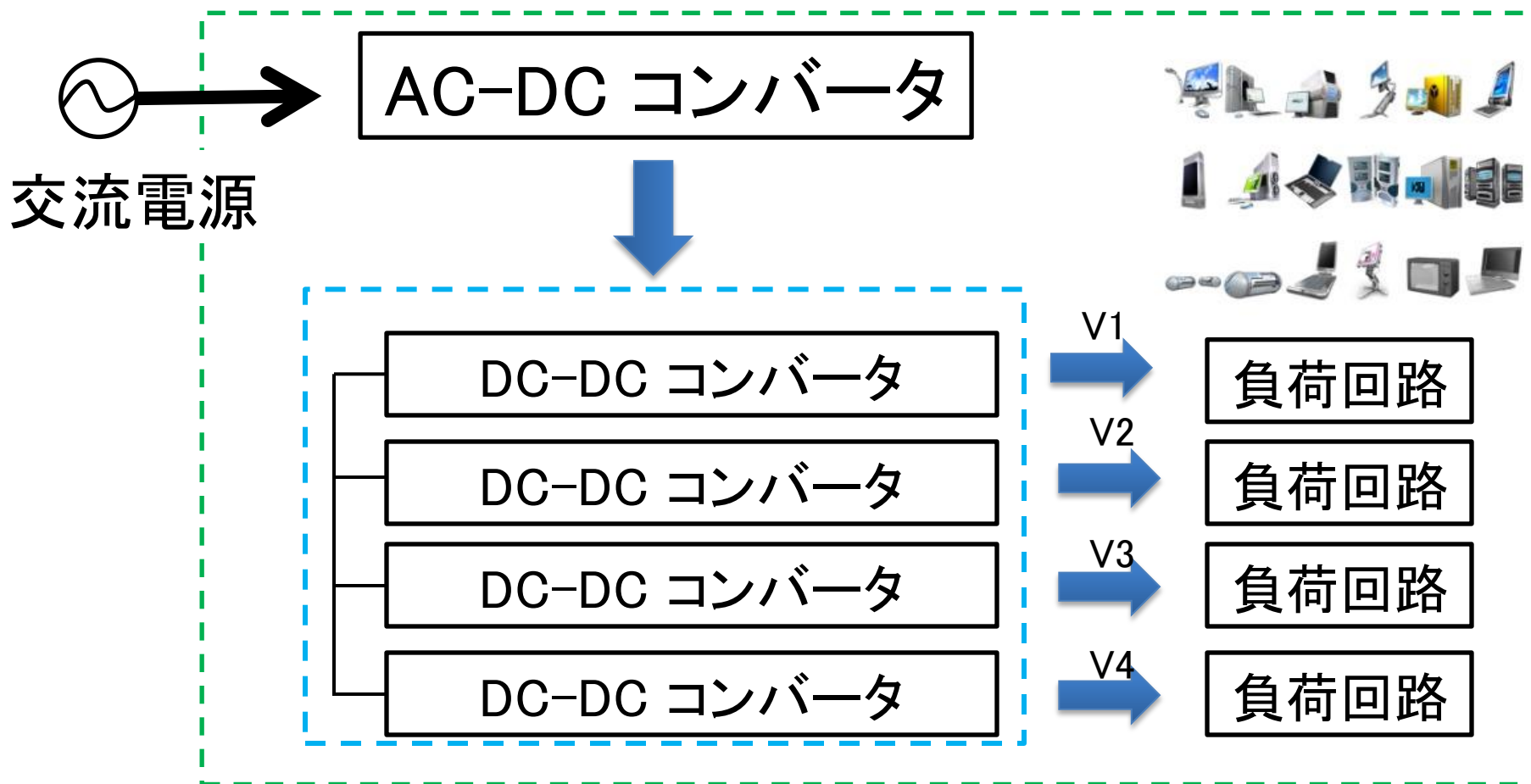
- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類 $\Delta \Sigma$ 変調及び性能の比較
- シミュレーション検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- 実験検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- まとめ

アウトライン

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類 $\Delta \Sigma$ 変調及び性能の比較
- シミュレーション検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- 実験検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- まとめ

研究背景

携帯、パソコン等電子製品
多出力直流電源が必要



研究背景

パワーデバイス技術の進歩



高速スイッチング



DC-DCコンバータ制御に
 $\Delta\Sigma$ 変調器が適用可能

➤ $\Delta\Sigma$ 変調制御の期待される利点:

✓ 高速過渡応答

✓ 高効率

✓ スwitchングノイズのスペクトラム拡散

アウトライン

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類 $\Delta \Sigma$ 変調及び性能の比較
- シミュレーション検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- 実験検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- まとめ

PWM制御のDC-DCコンバータ問題点

高速過渡応答



インダクタのエネルギー
充放電の高速化



高いスイッチング
周波数で動作

高効率



スイッチングロスが削減



スイッチのON・OFF
の回数を少なく

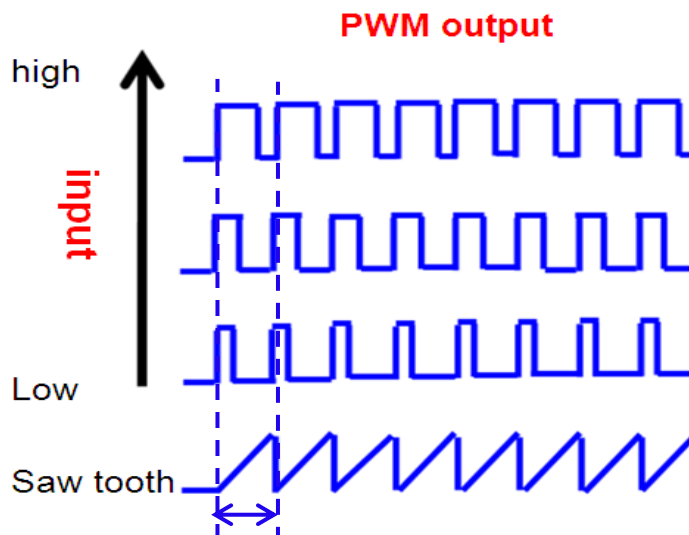
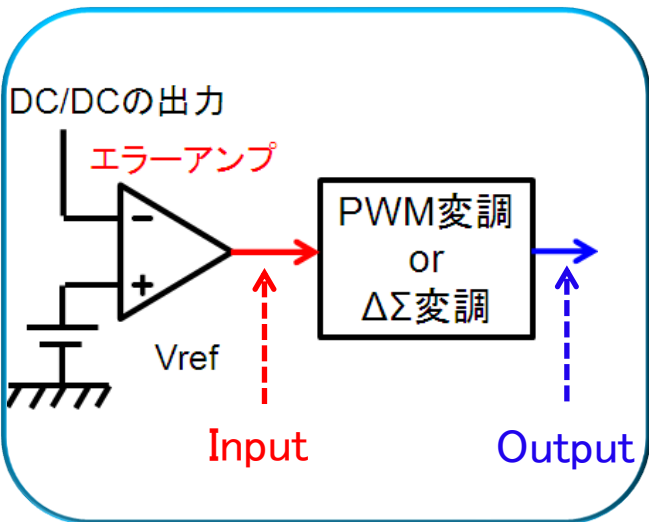


低いスイッチング
周波数で動作

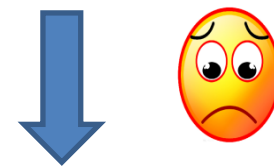
矛盾



PWM制御と $\Delta\Sigma$ 制御の比較

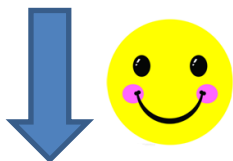


出力信号は毎週期変わる

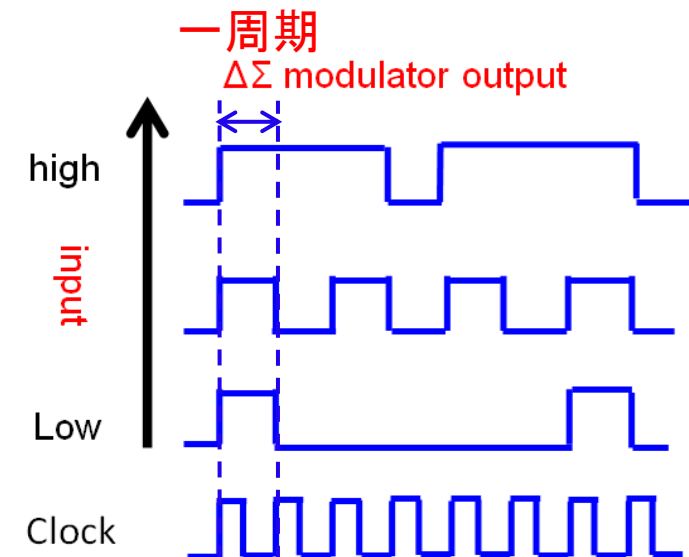


スイッチングロス (up)

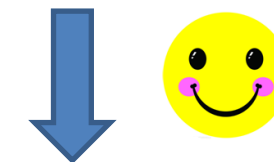
コンバータに調整
スピード速い



高速過渡応答



出力信号は毎週期変わる
ことではない



スイッチングロス (down)

アウトライン

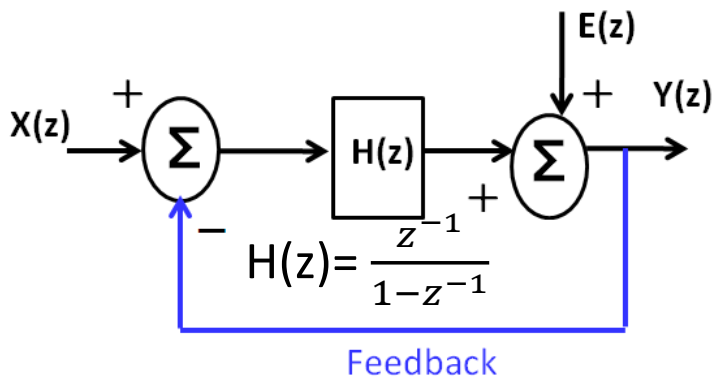
- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類 $\Delta \Sigma$ 変調及び性能の比較
- シミュレーション検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- 実験検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- まとめ

各種類 Δ Σ 変調の検討

- フィードバック対フィードフォワード
- 1次対2次デルタシグマ
- 離散時間対連続時間

フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調

1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$



$$Y(z) = \frac{H(z)}{1 + H(z)} \cdot X(z) + \frac{1}{1 + H(z)} \cdot E(z)$$

$$\text{STF}(z) = z^{-1}$$

$$\text{NTF}(z) = 1 - z^{-1}$$

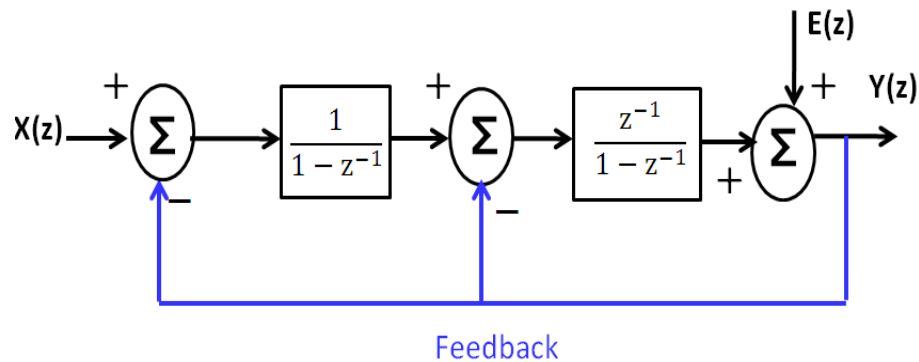
信号伝達関数

ノイズ伝達関数

1クロック遅れ

微分=低域除去

2次フィードバック型 $\Delta \Sigma$



$$Y(z) = z^{-1} \cdot X(z) + (1 - z^{-1})^2 \cdot E(z)$$

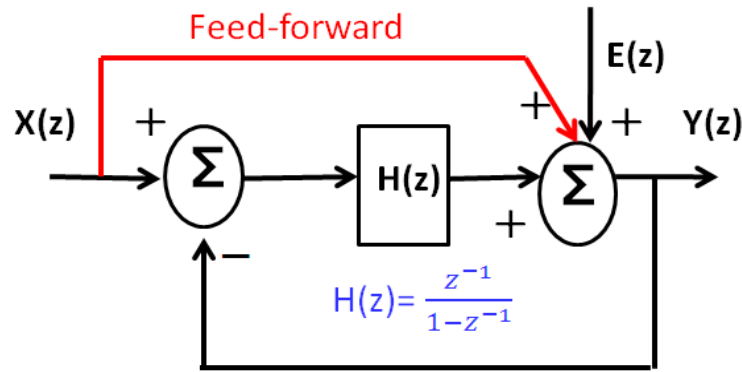
1クロック遅れ

2次微分

低域除去能力向上

フィードフォワード型 $\Delta \Sigma$ 変調

1次フィードフォワード型 $\Delta \Sigma$



$$Y(z) = \underline{\underline{1}} \cdot X(z) + \frac{1}{\underline{\underline{1 + H(z)}}} \cdot E(z)$$

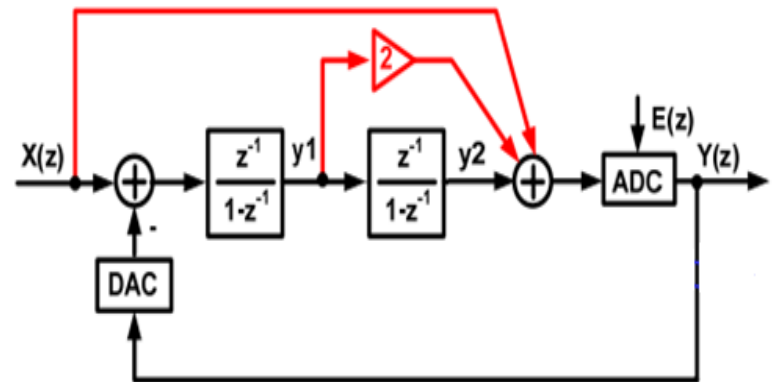
$$STF(z) = \underline{\underline{1}}$$

遅延なし

$$NTF(z) = \underline{\underline{1 - z^{-1}}}$$

1次微分

2次フィードフォワード型 $\Delta \Sigma$



$$Y(z) = \underline{\underline{1}} \cdot X(z) + \frac{1}{\underline{\underline{1 + H(z)}}} \cdot E(z)$$

遅延なし

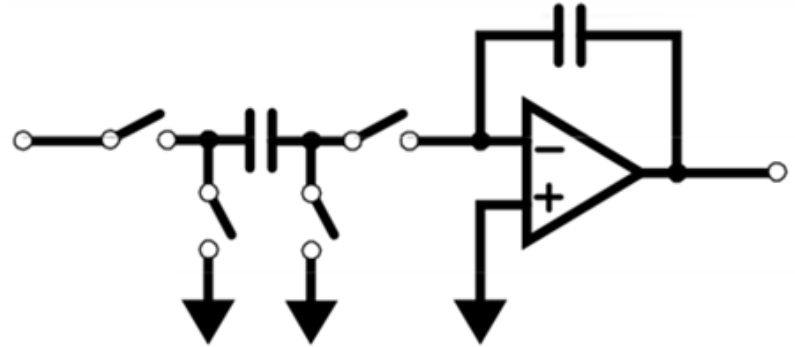
2次微分

良い低域除去能力

離散時間 $\Delta\Sigma$ 対 連続時間 $\Delta\Sigma$

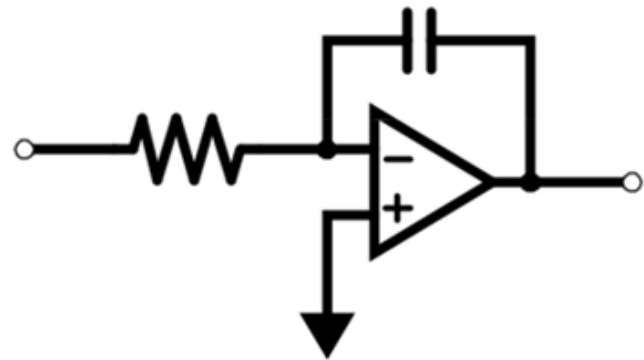
■ 離散時間 $\Delta\Sigma$ 変調器

- 高精度 (信号処理分野)
- 消費電力大
- 低速、低周波信号しか扱えない

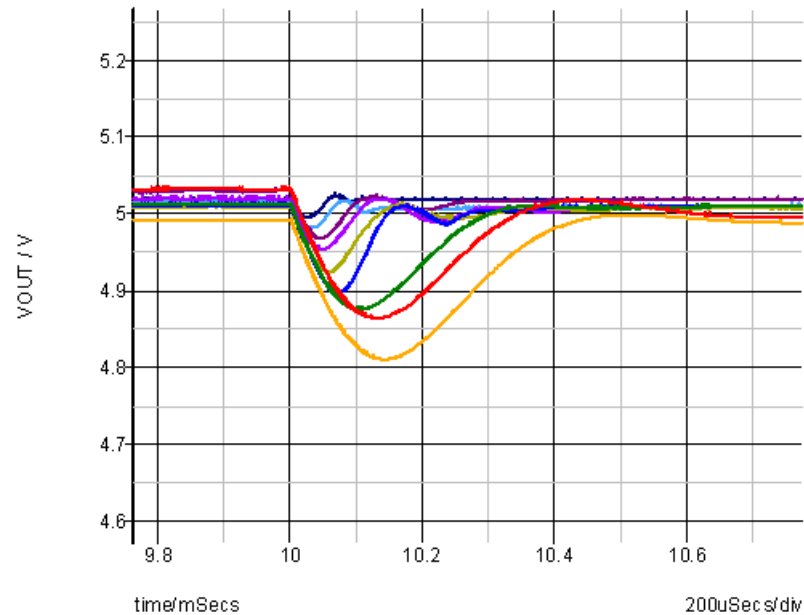


■ 連続時間 $\Delta\Sigma$ 変調器

- 低精度
- 低消費電力 (電源分野)
- 高速、高周波信号しか扱えない



過渡応答特性比較



2次連続時間フィードフォワード型 $\Delta\Sigma$ 変調器



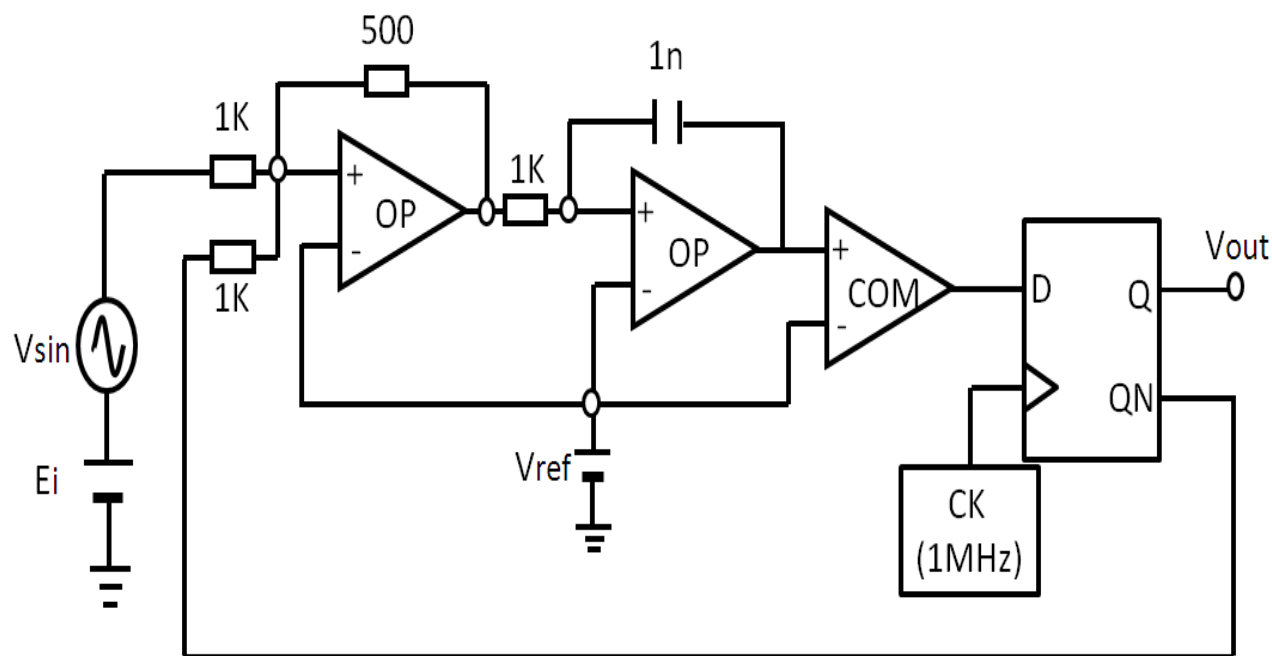
電源回路制御へ応用

(実験の容易化を考えて、1次連続時間フィードバック型を検討する)

アウトライン

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類 $\Delta \Sigma$ 変調及び性能の比較
- シミュレーション検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- 実験検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- まとめ

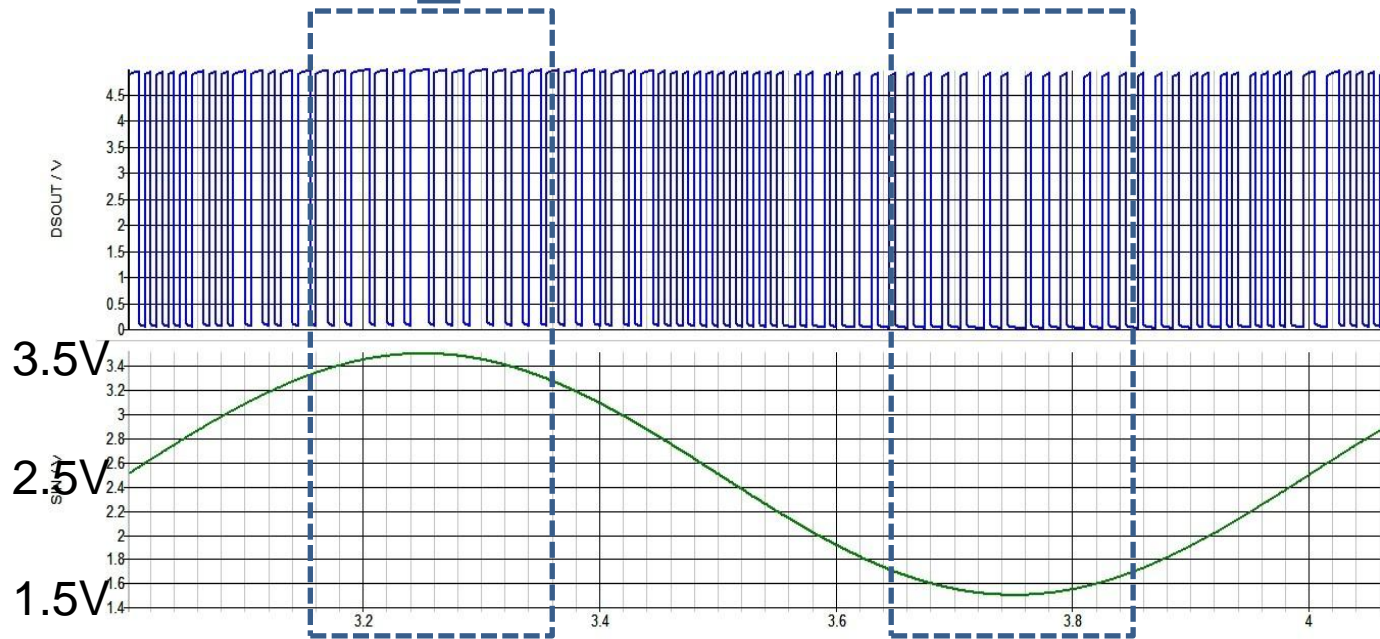
フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器回路 (シミュレーション)



パラメタ:
Vsin= 1V
Ei = 2.5V
Vref=2.5V
Sin信号の周波数は1KHz

$\Delta\Sigma$ 変換器シミュレーション結果

高レベル信号出現頻度が高くなる



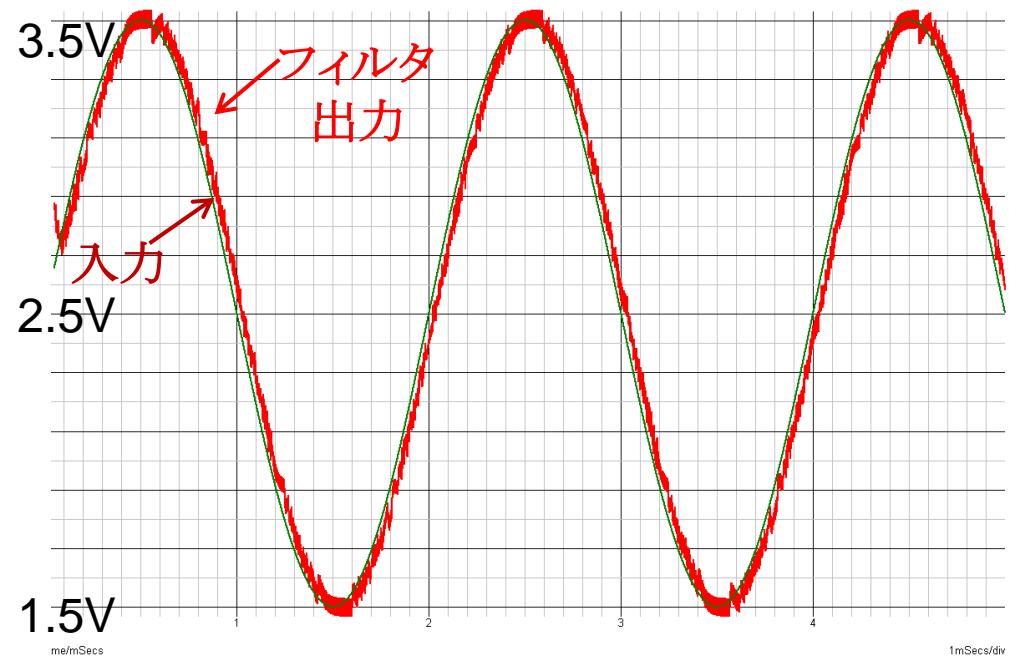
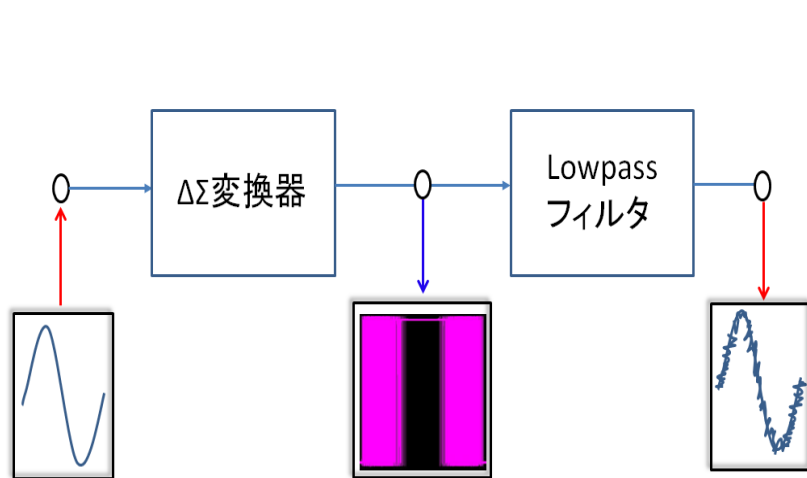
デジタル信号:出力

アナログ信号:入力

高レベル信号出現頻度が低くなる



$\Delta\Sigma$ 変換器シミュレーション結果



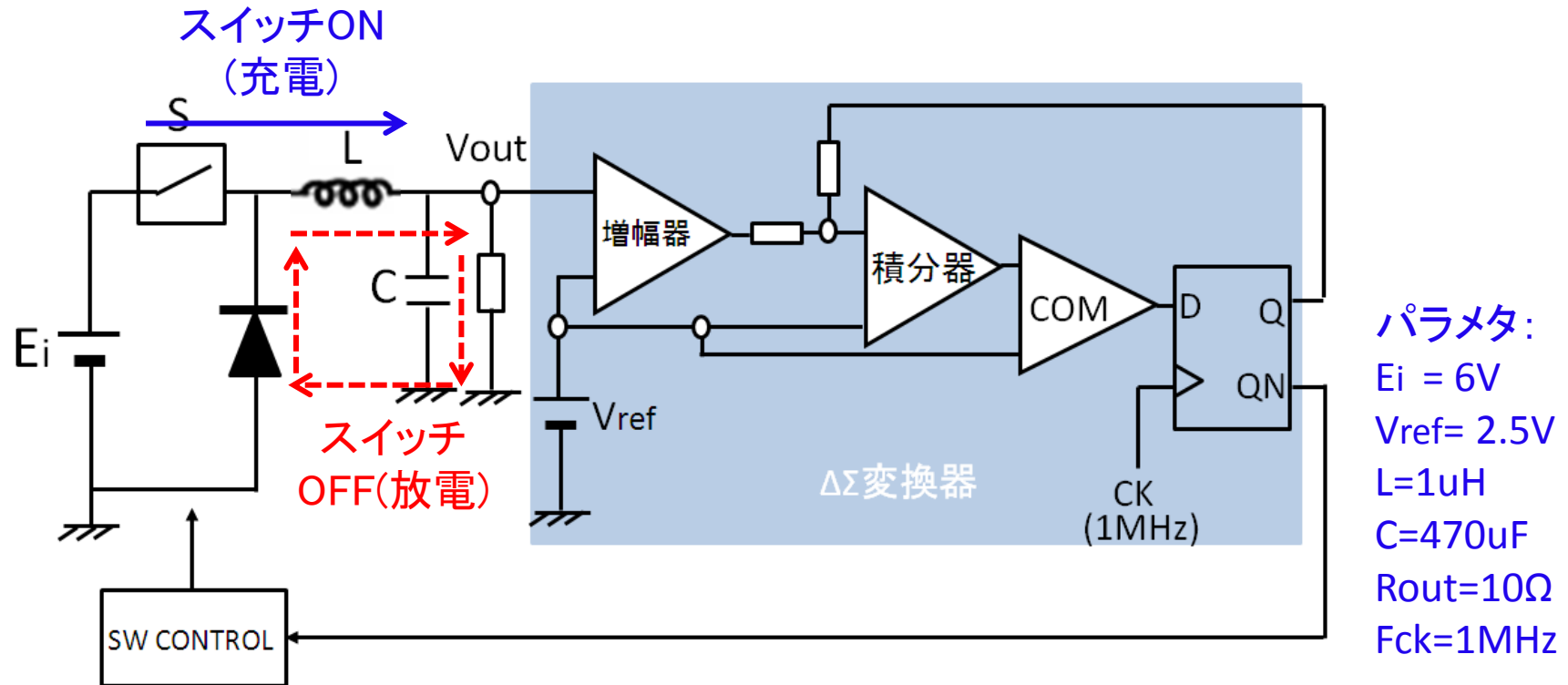
出力信号の特徴:

- 出力信号はノイズが載せている
(量子化の原因)
- 出力信号は入力より少し遅れている
(フィードバック制御及びローパスフィルタ位相回転の原因)

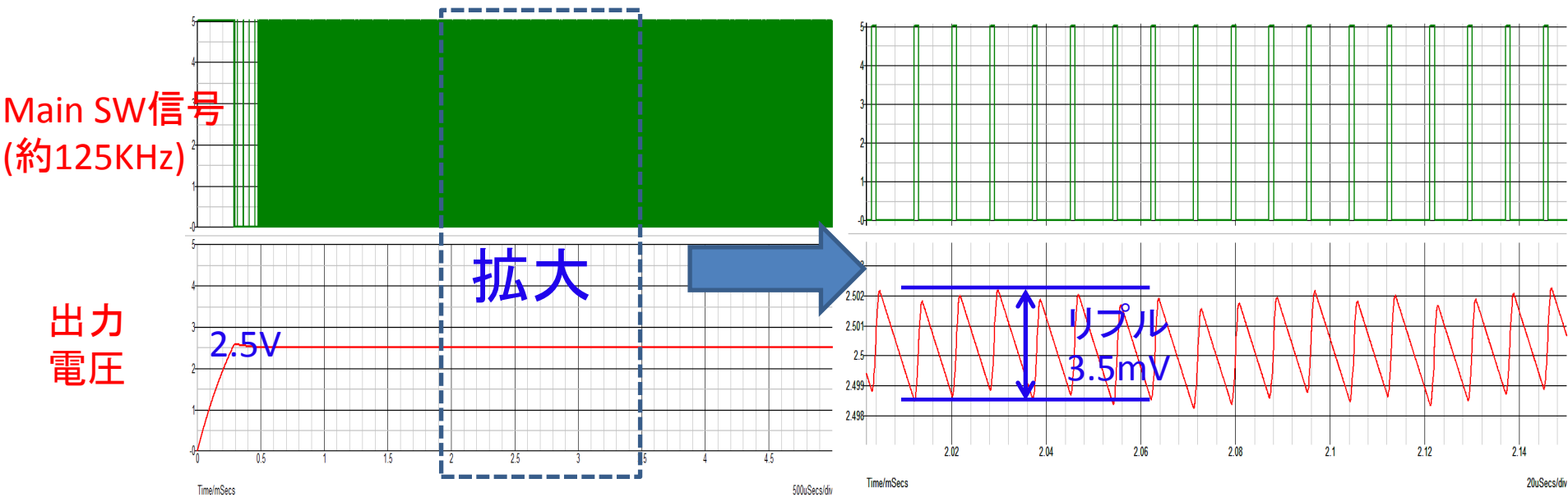
アウトライン

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類 $\Delta \Sigma$ 変調及び性能の比較
- シミュレーション検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- 実験検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- まとめ

DC-DCコンバータ (シミュレーション)



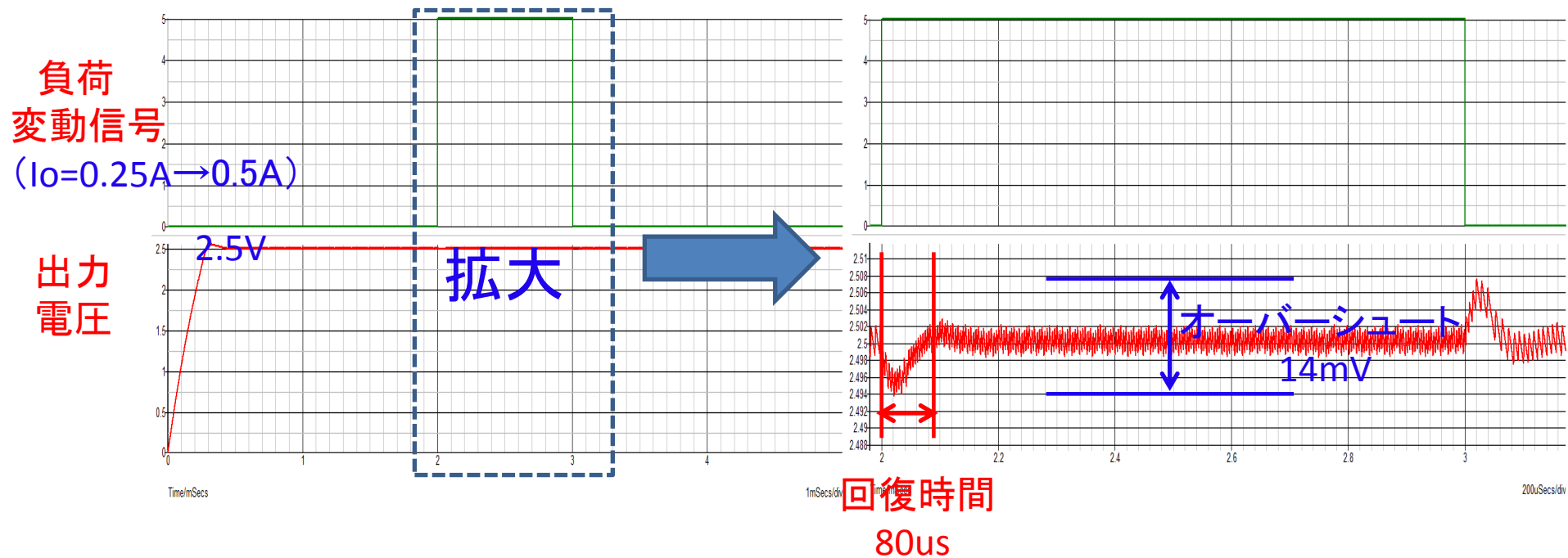
DC-DCコンバータ出力 (定常状態)



(定常状態 $I_o=0.25A$)

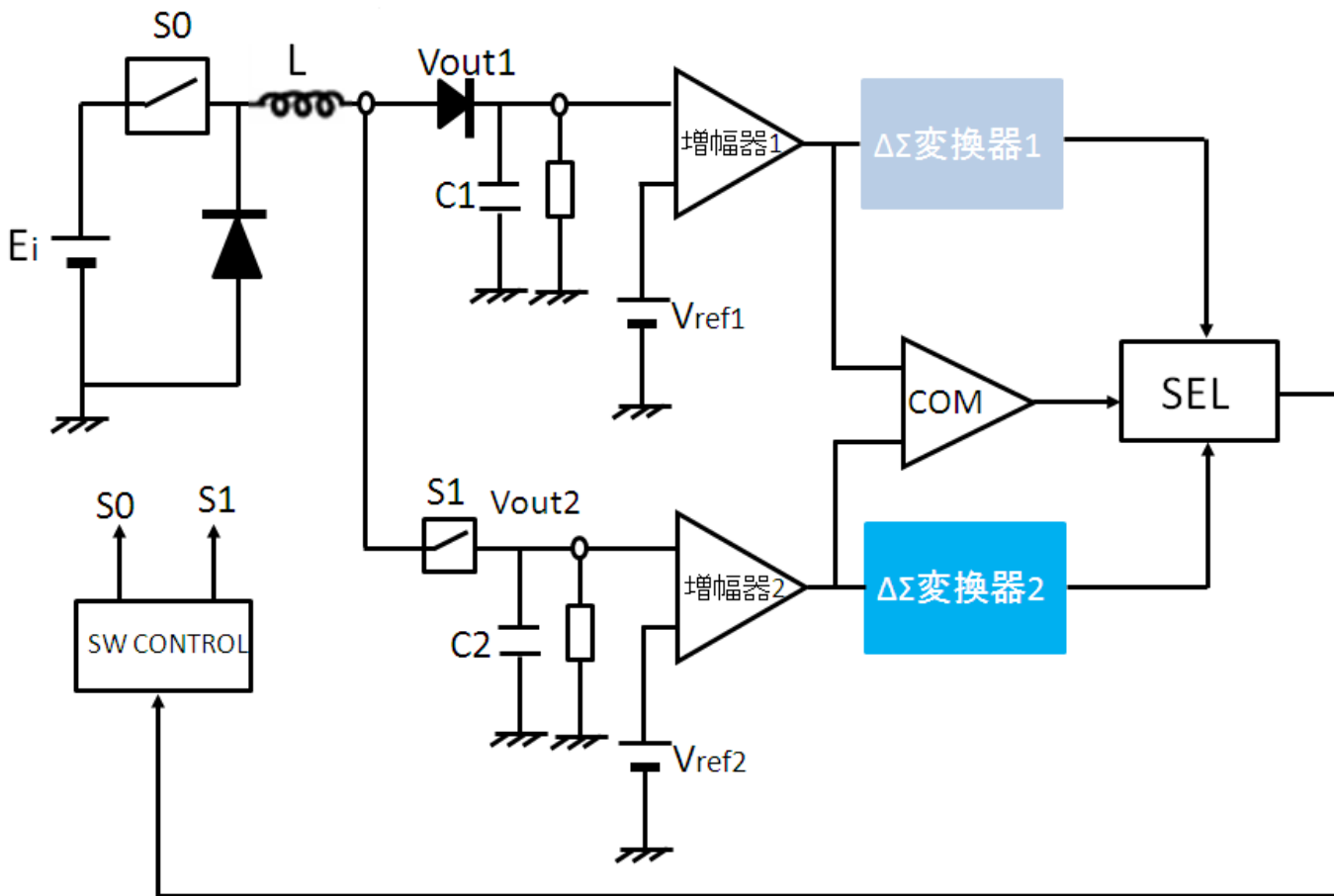
出力電圧安定
出力電圧リップル小さい

DC-DCコンバータ出力 (負荷変動状態)



増幅器の利得を大きくする及び位相遅れ補償を使って、
回復時間が短くできて、レギュレーションもよくなる

単インダクタ2出力DC-DCコンバータ (シミュレーション)



パラメタ:

$E_i = 6V$

$V_{ref1} = 2.5V$

$V_{ref2} = 1.5V$

$L = 1\mu H$

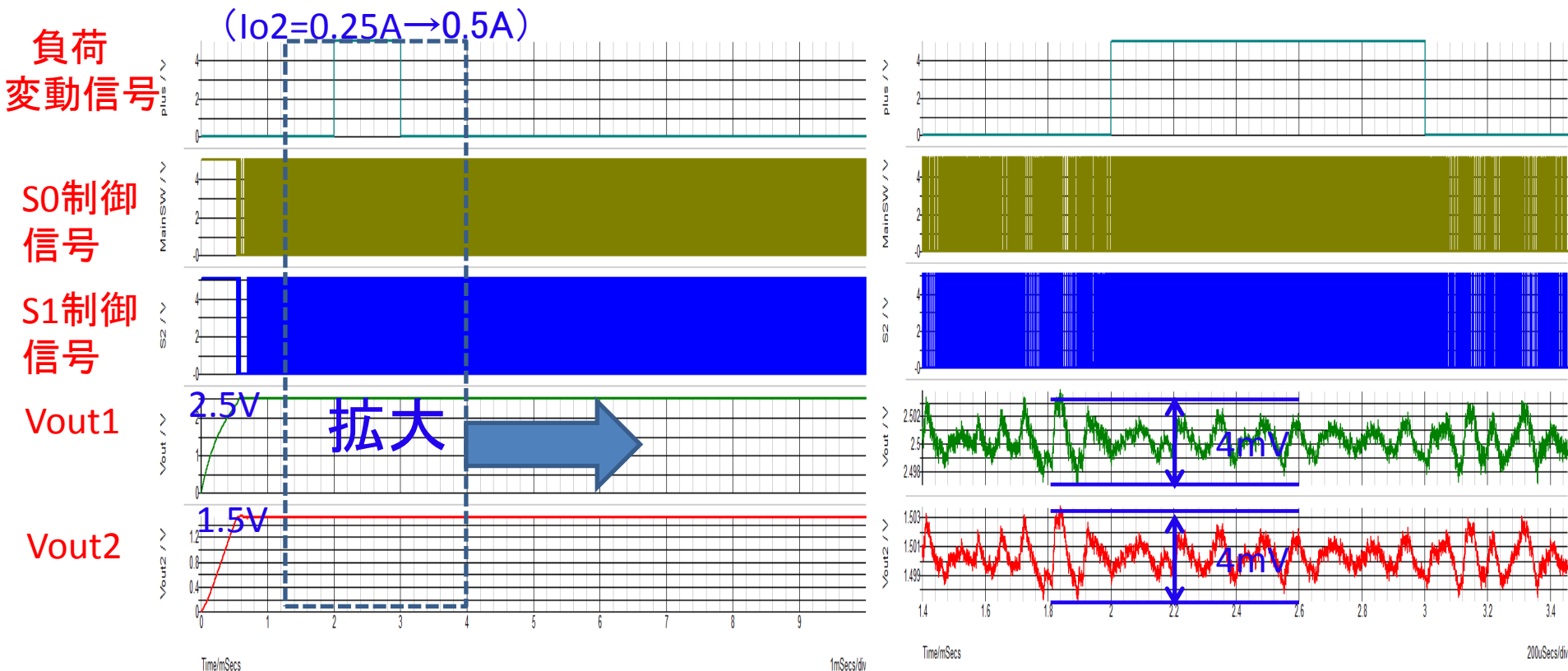
$C_1 = 470\mu F$

$C_2 = 470\mu F$

$F_{ck} = 1MHz$

二つ回路はセレクタの出力により制御される

単インダクタ2出力DC-DCコンバータ出力 (負荷変動特性)

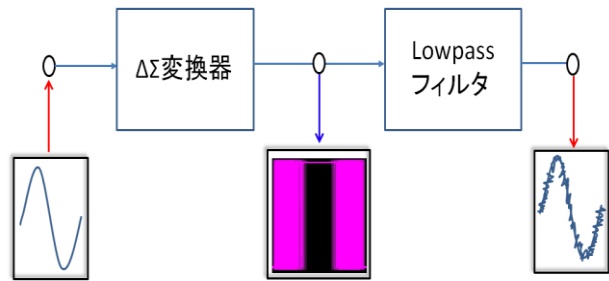
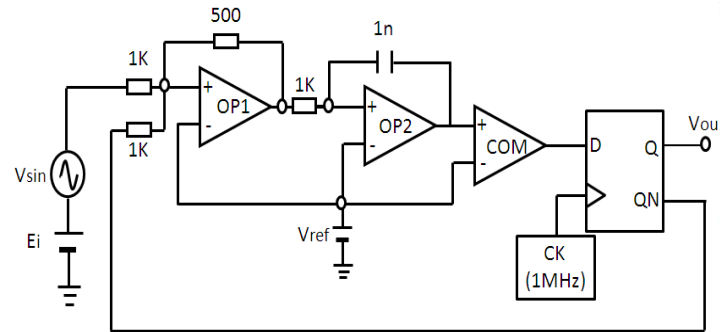


二つ出力電圧は安定
リップルも小さい

アウトライン

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類 $\Delta \Sigma$ 変調及び性能の比較
- シミュレーション検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- 実験検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- まとめ

フィードバック型 $\Delta\Sigma$ 変換器



パラメタ:

$E_i = 2.5V$

$V_{sin} = 1V$

$F_{ck} = 1MHz$

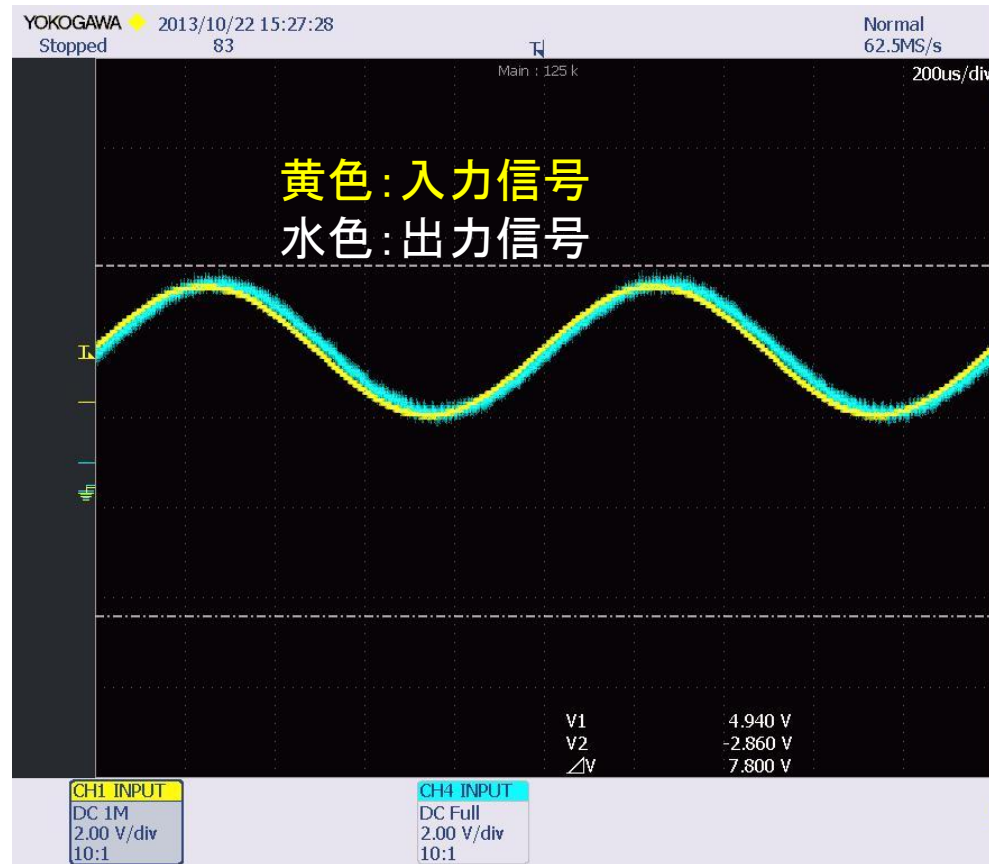
ローパスフィルタの

遮断周波数は16KHz



フィルタの出力信号は元の信号に戻った

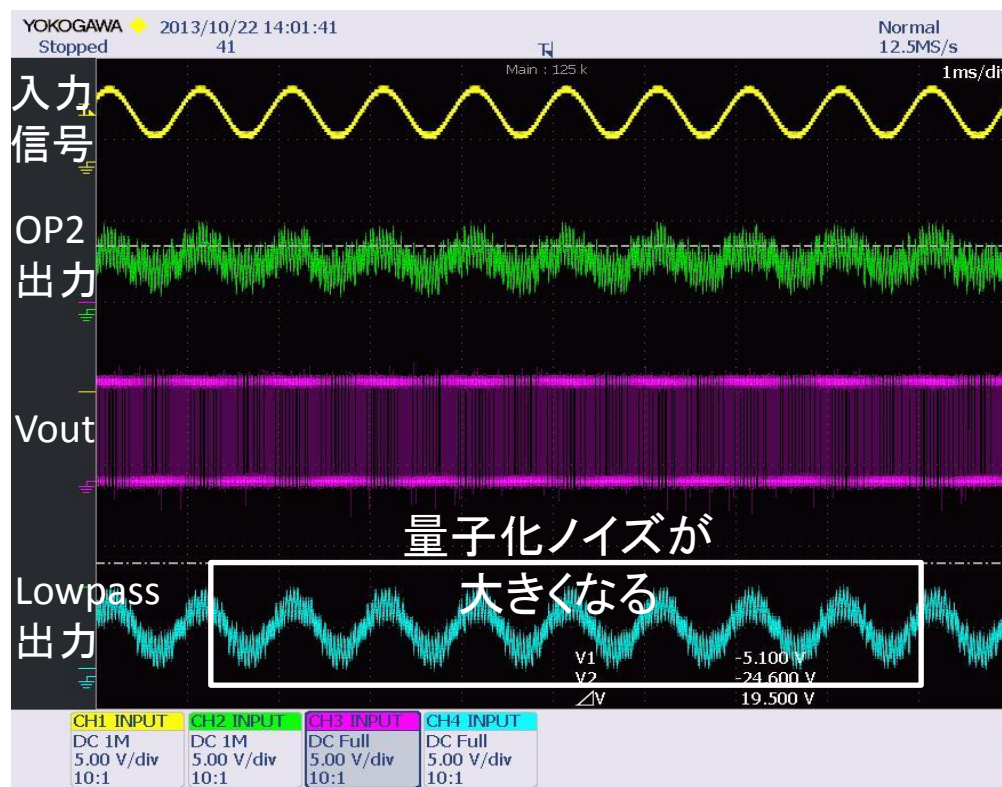
入力信号と出力信号の比較



- 出力信号:
- 位相は少しい遅れる
 - 量子化ノイズが出てくる

推測: クロック信号の周波数が低くなると、量子化ノイズが大きくなる。

フィードバック型 $\Delta\Sigma$ 変換器検討 (クロック信号周波数を減らす)



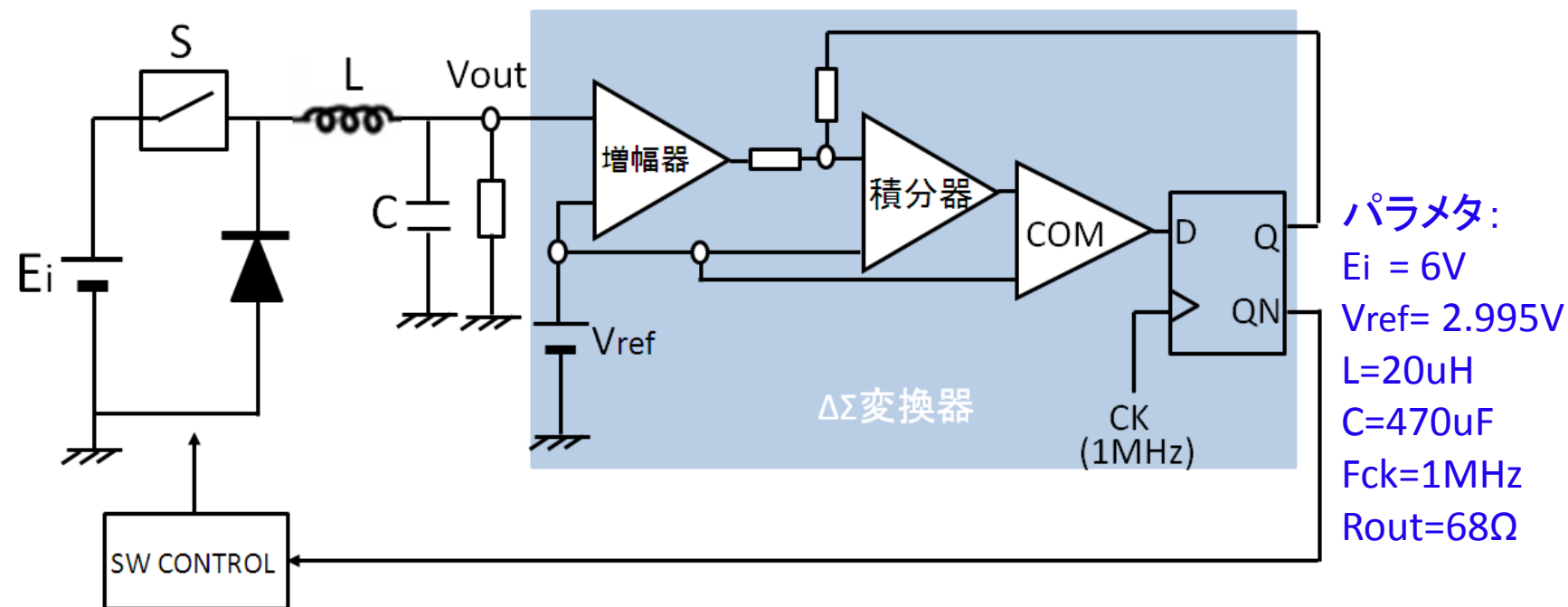
クロック信号周波数を1MHzから100KHzにする

予想通りの結果が出てくる

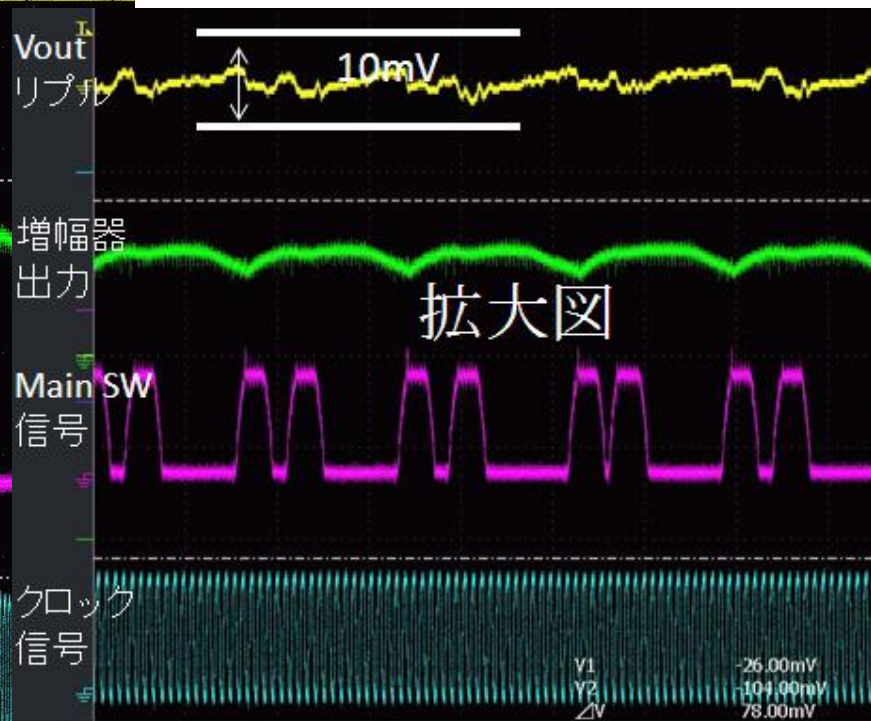
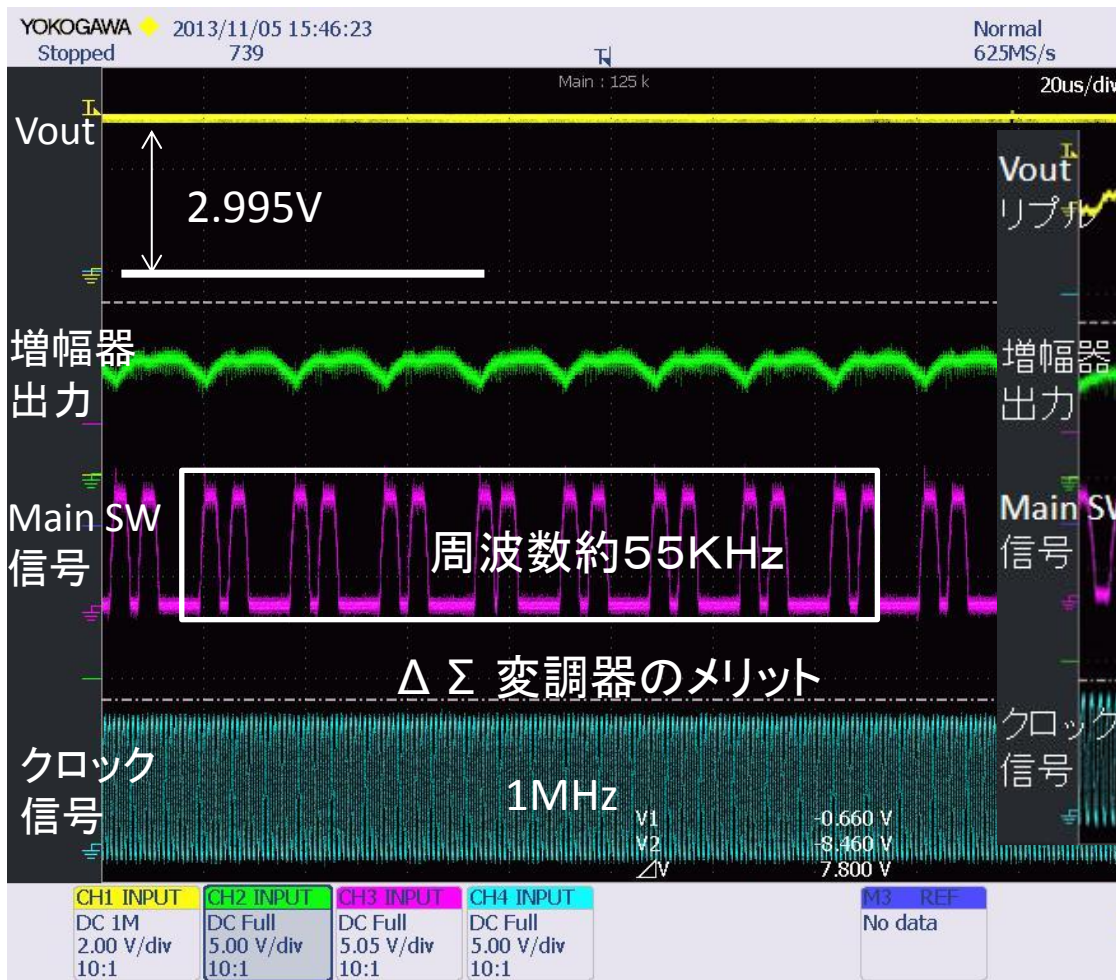
アウトライン

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類 $\Delta \Sigma$ 変調及び性能の比較
- シミュレーション検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- 実験検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- まとめ

DC-DCコンバータ実験検討



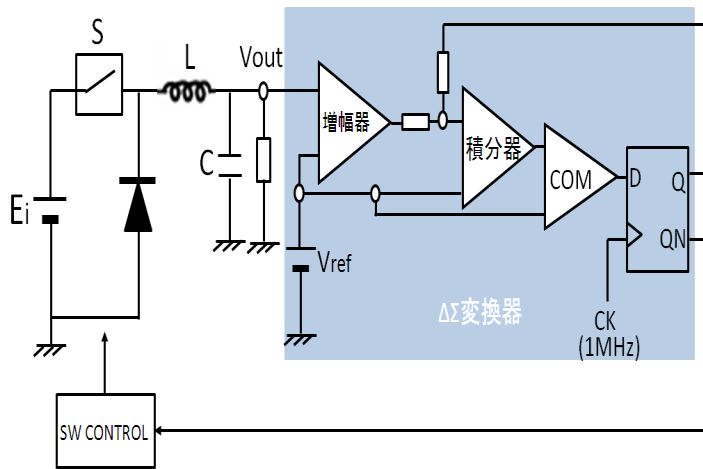
DC-DCコンバータ出力 (定常状態)



回路安定
リップル小さい

DC-DCコンバータ出力

(負荷変動状態)



パラメタ:

$E_i = 6V$

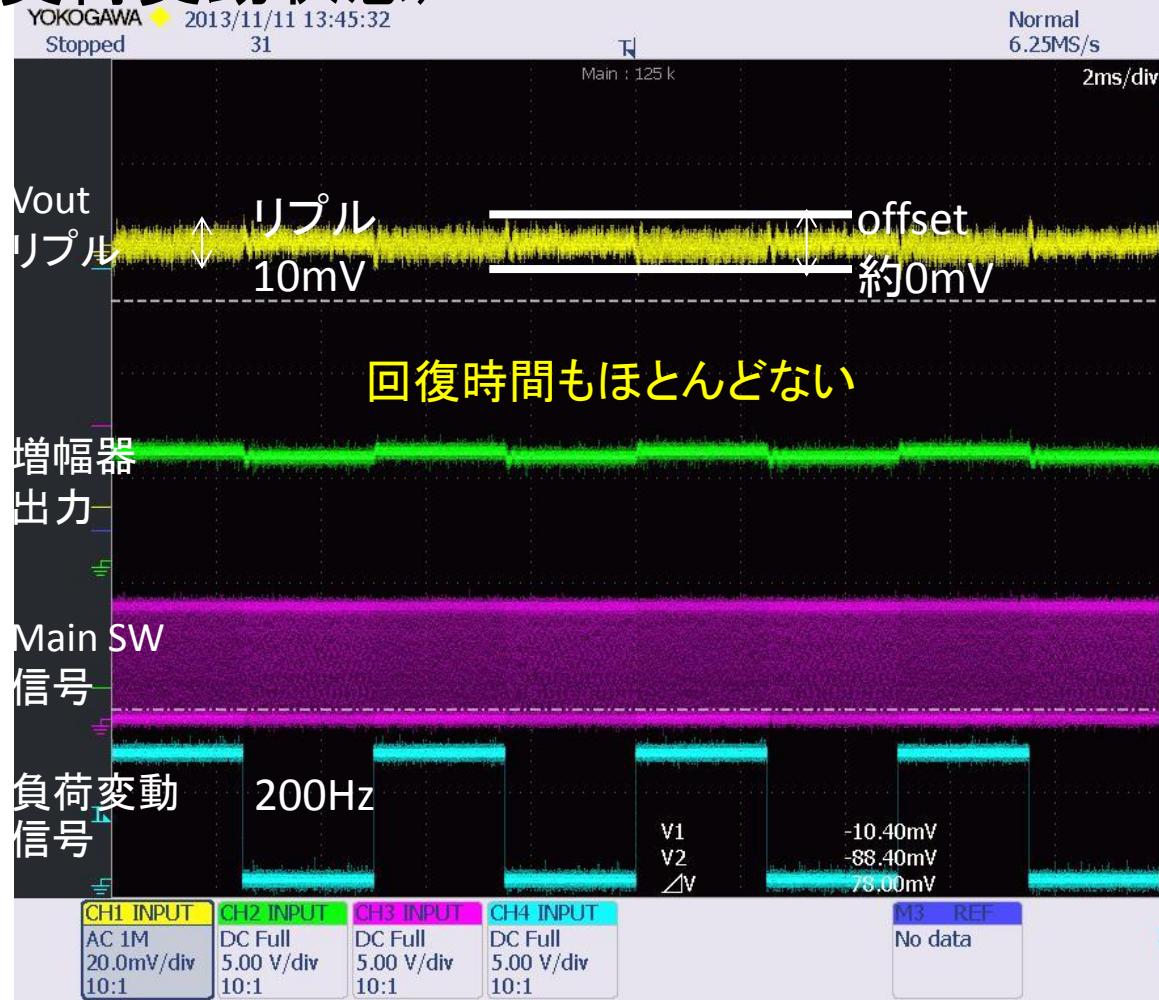
$V_{ref} = 2.995V$

$L = 20\mu H$

$C = 470\mu F$

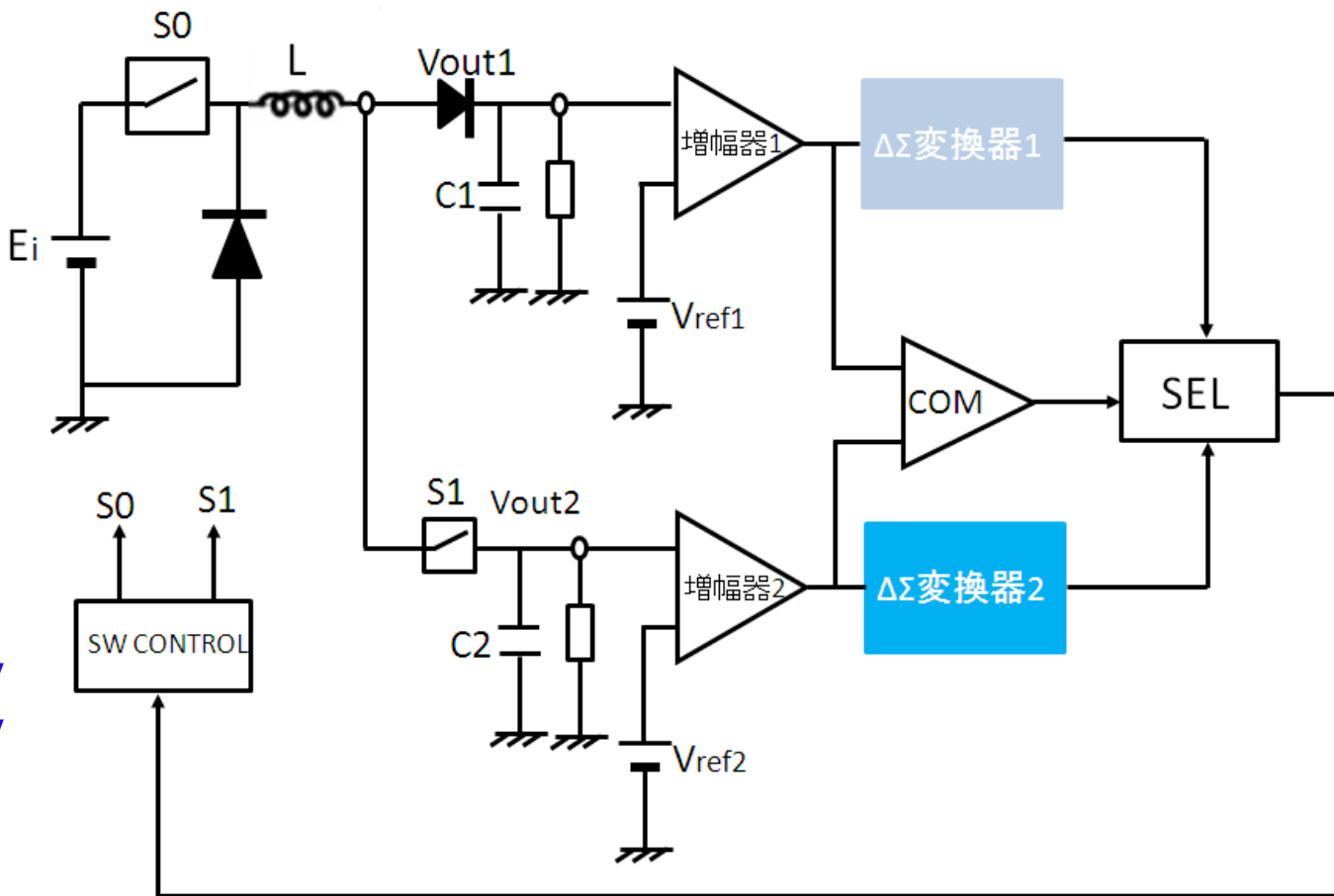
$F_{ck} = 1MHz$

$R_{out} = 68 \rightarrow 34\Omega$



レギュレーション特性が良い

単インダクタ2出力DC-DCコンバータ 実験検討



パラメタ:

$E_i = 6V$

$V_{ref1} = 2.995V$

$V_{ref2} = 1.495V$

$L = 20\mu H$

$C_1 = 470\mu F$

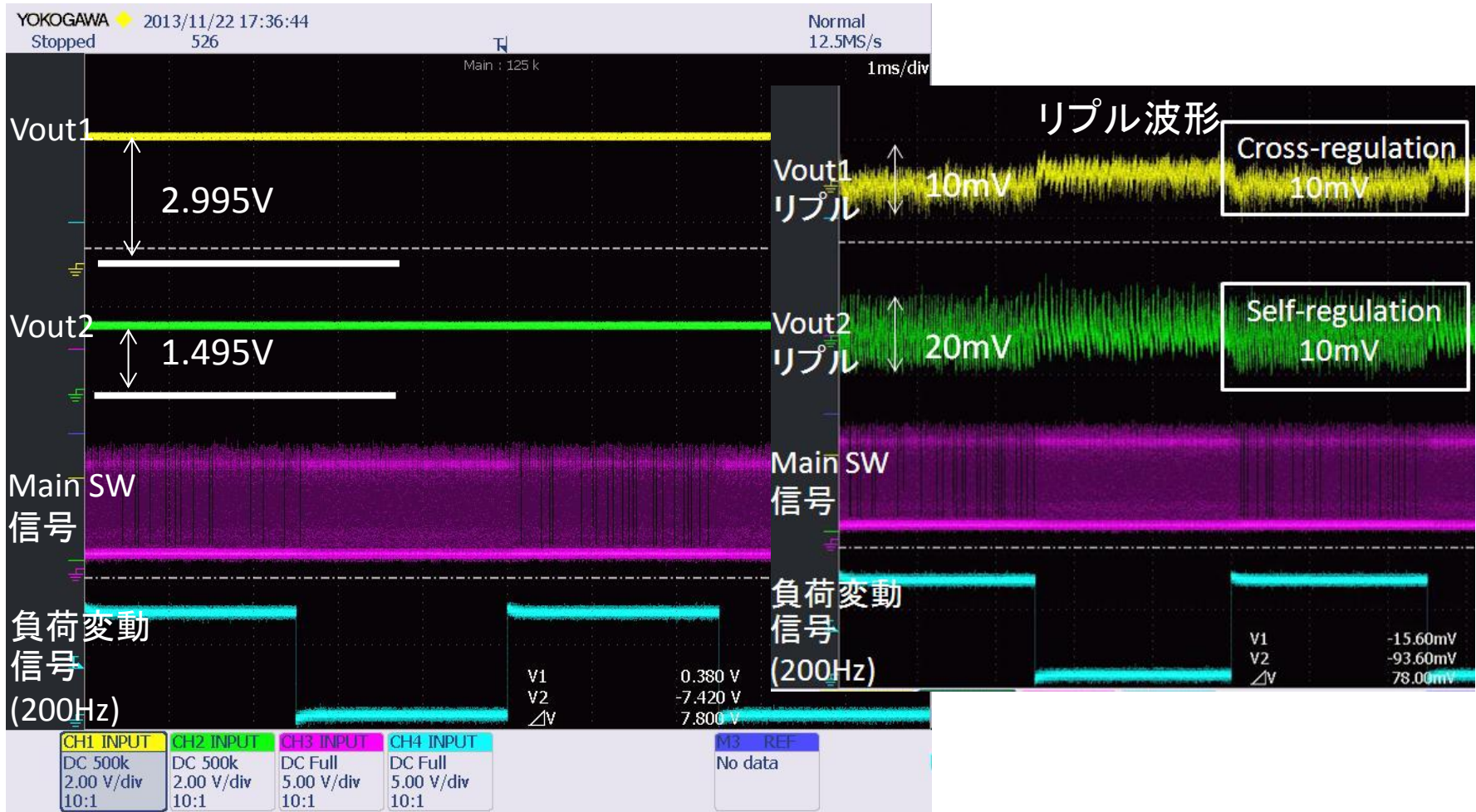
$C_2 = 470\mu F$

$F_{ck} = 1MHz$

$R_{out1} = 33\Omega$

$R_{out2} = 22\Omega$

単インダクタ2出力DC-DCコンバータ出力 (負荷変動状態)



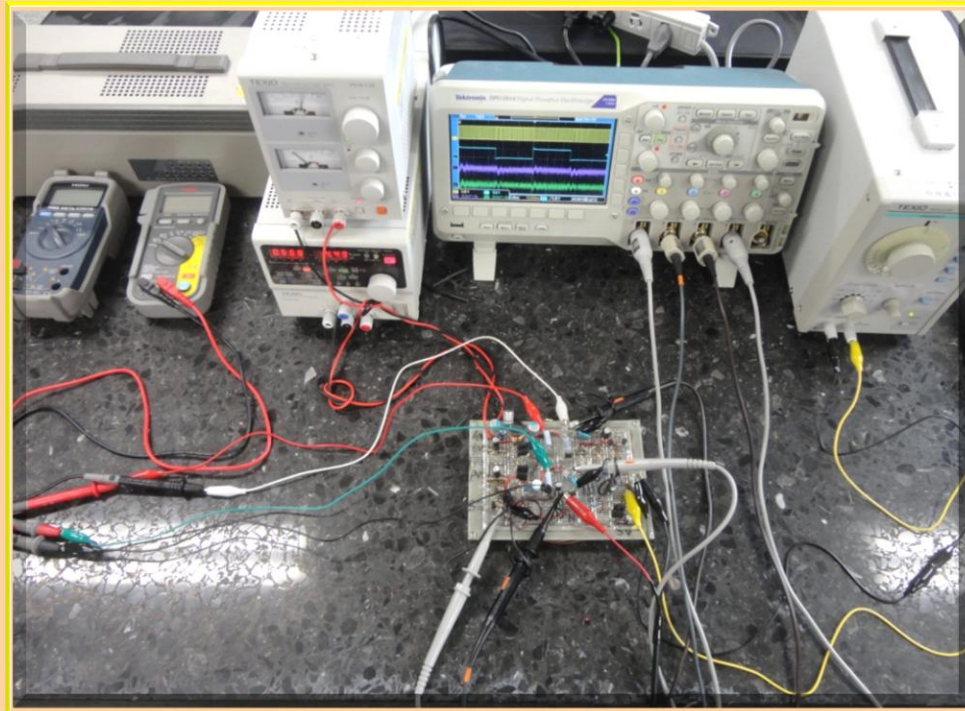
アウトライン

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類 $\Delta \Sigma$ 変調及び性能の比較
- シミュレーション検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- 実験検討
 - 1次フィードバック型 $\Delta \Sigma$ 変調器
 - $\Delta \Sigma$ 変調器を用いてDC-DCコンバータ
- まとめ

まとめ

- PWM制御DC-DCコンバータの問題点
- $\Delta \Sigma$ 変調器はDC-DCコンバータに応用を提案
- シミュレーションより動作と性能を確認
(DC-DCコンバータ出力電圧特性、レギュレーション特性)
- 実装評価よりコンバータの有効性を確認

将来の課題



現在:

- 効率
は低い
- 電磁
干渉
状況大

- 将来課題:
- 効率の向上を評価
 - 面積削減率を評価
 - フィードフォワード型 $\Delta\Sigma$ の動作を検討