

リップル注入方式ヒステリシス制御電源 の解析と安定評価の研究

群馬大学 4年

理工学部 電子情報理工学科

小林研究室 糸井健人

発表内容

1. 研究背景と研究目的
2. 従来のヒステリシス制御電源とその問題点
3. 周波数一定範囲の改善
4. 周波数変化幅の改善
5. まとめと今後の課題

1. 研究背景と研究目的

- 高速動作のLSIが多数搭載(スマホ・PC等)
⇒電源回路の応答性が重要

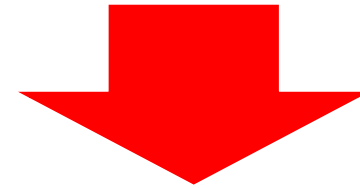
線形制御

電圧制御モード
電流制御モード

クロスオーバー周波数に制限

非線形制御

ヒステリシス制御
(hysteretic control)



リップル注入方式を調べた

- ⇒出力電流減少時に周波数が低下する問題を発見
- ⇒制御が難しい
- ⇒これを改善できないか？

発表内容

1. 研究背景と研究目的
2. 従来のヒステリシス制御電源とその問題点
3. 周波数一定範囲の改善
4. 周波数変化幅の改善
5. まとめと今後の課題

2. ヒステリシス制御電源

基本回路図の特徴

- * 出力電流で動作周波数が大きく変化
- * コンパレータにある程度のリップルが必要



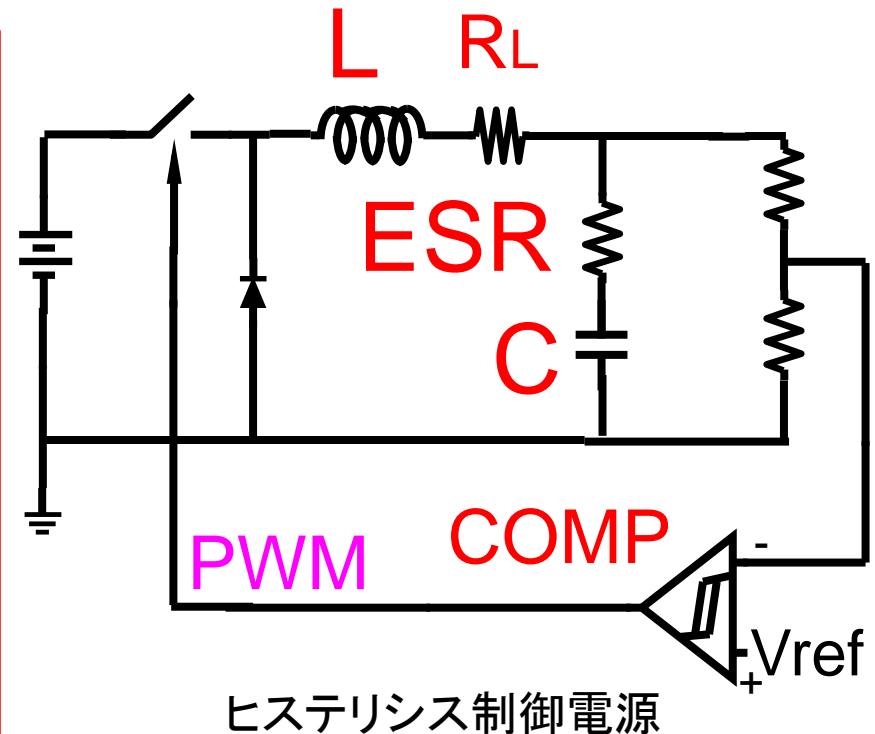
1. ESRの大きい出力コンデンサが必要
2. ヒステリシス付きコンパレータが必要



改善電源

- * リップル注入方式ヒステリシス電源
- * COT方式制御電源

(COT: Constant on Time)



リップル注入方式ヒステリシス制御電源を使用し
問題点を解消

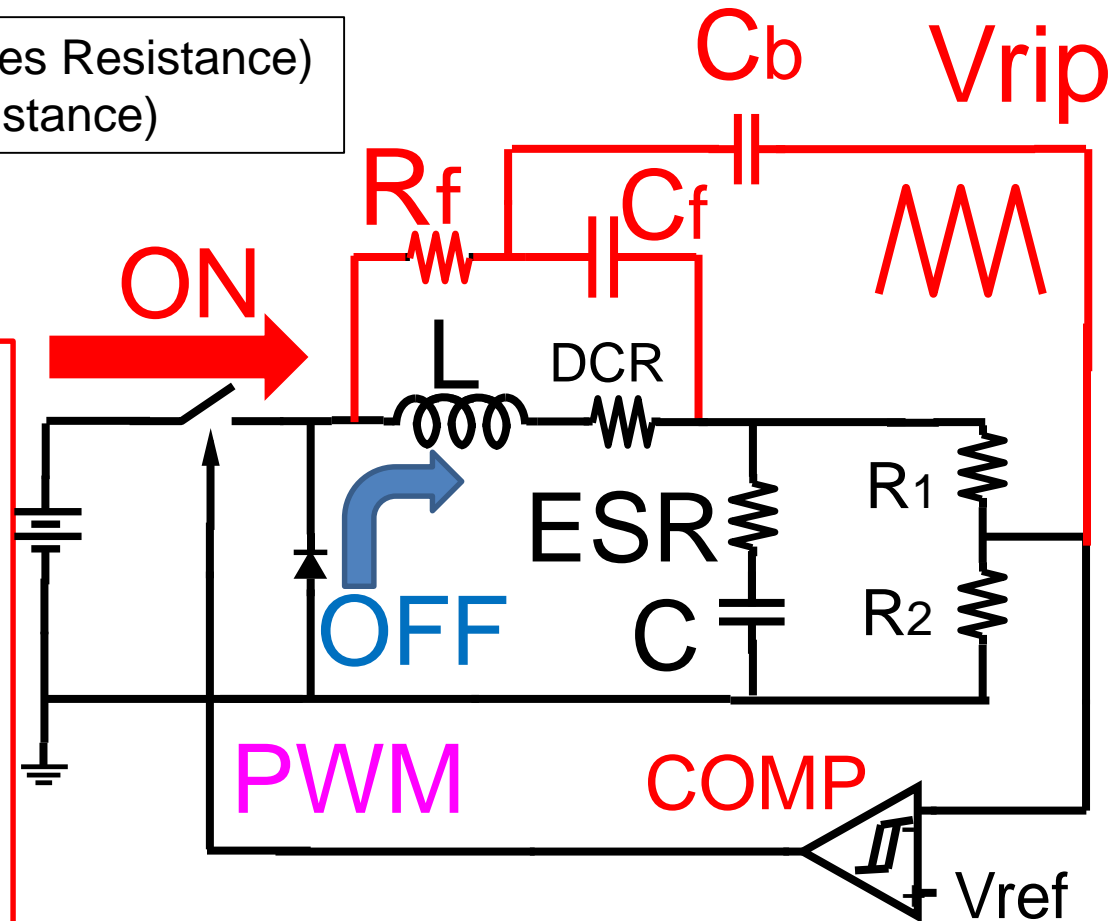
リップル注入ヒステリシス制御電源

- ESRの低い出力コンデンサの使用が可能
- 広い帯域幅を持つ

ESR: 等価直列抵抗 (Equivalent Series Resistance)
DCR: 直流抵抗 (Direct Current Resistance)

実際に用いた素子の値

- 入力電圧 10V
- 出力電圧 3.3V
- $L = 10\text{mH}$
- $C = 100\mu\text{F}$
- $\text{ESR} = 5\text{m}\Omega$
- 出力リップル 0.5mV



リップル注入方式ヒステリシス制御電源

CCM・DCMモード

● CCM・DCMモードとは

* **電流連続モード(CCM)**

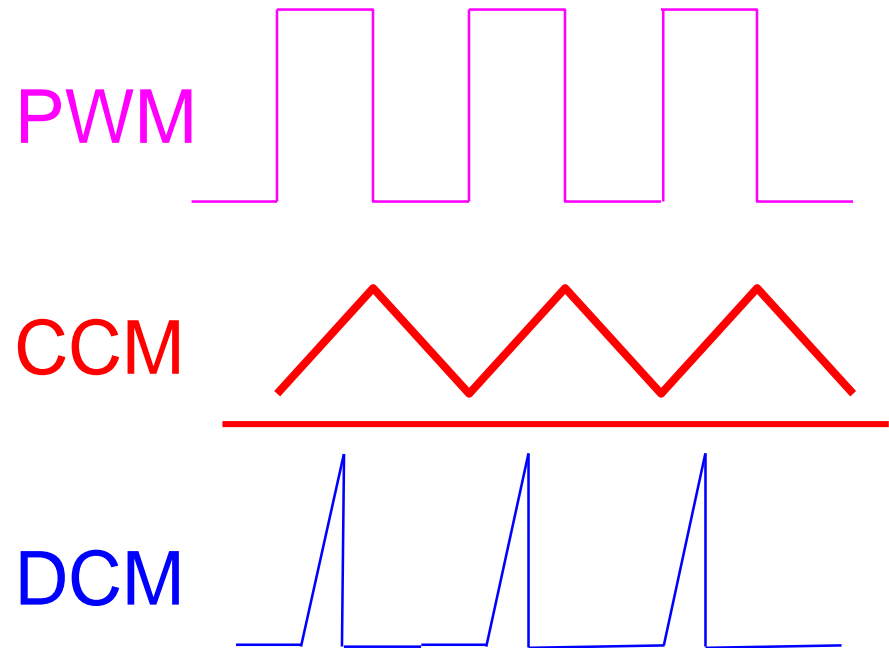
インダクタ電流が**連続**となるモードです。

* **電流不連続モード(DCM)**

インダクタ電流が**不連続**となるモードです。

(DCM: Discontinuous Current Mode)

(CCM: Continuous Conduction Mode)

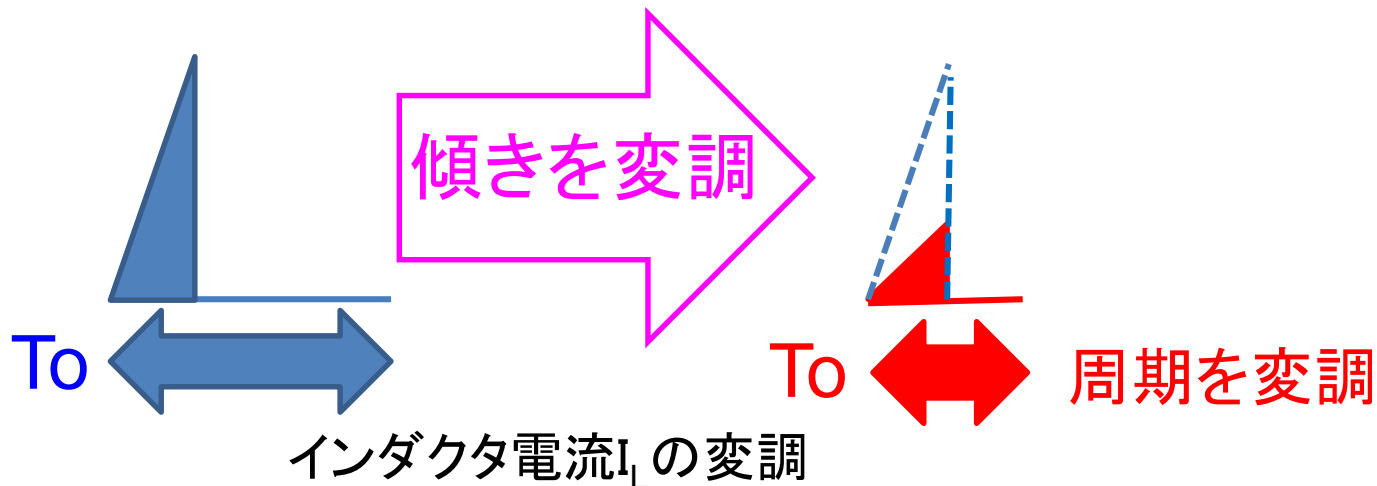
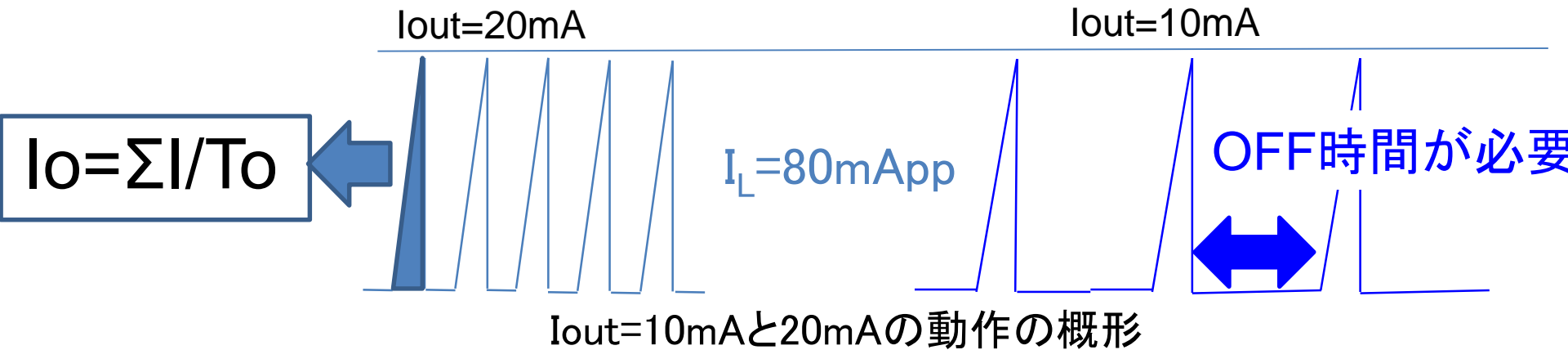


CCM・DCMモードの概形

DCMはON時間が一定のためON電流により容量Cがオーバーチャージすることによって発生

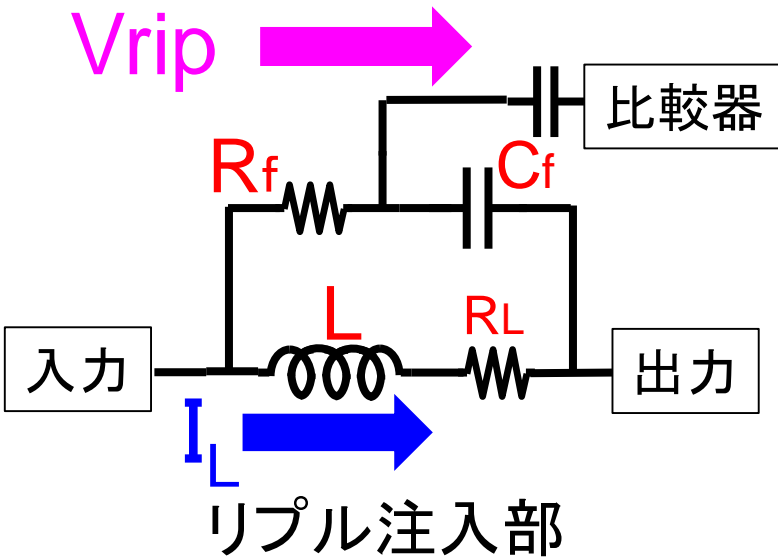
DCM動作時のインダクタ電流解析

負荷電流：微小  V_o が低下までOFF時間が必要



DCM時のインダクタ電流の傾きを変調 \Rightarrow 周期を変調

インダクタ電流 I_L と注入リップル V_{rip}



* インダクタ電流

$$I_L = 80\text{mA}_{pp}$$

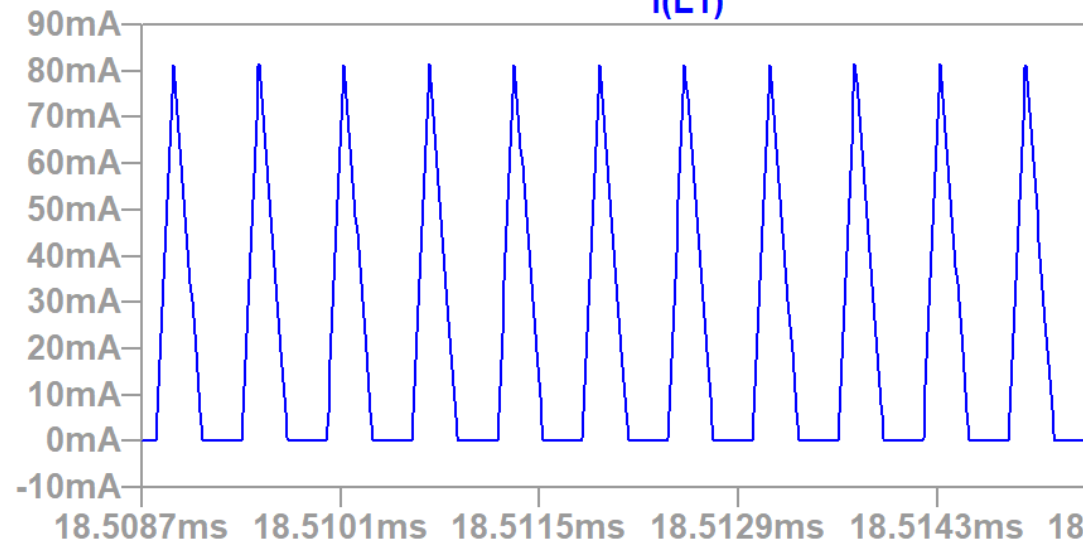
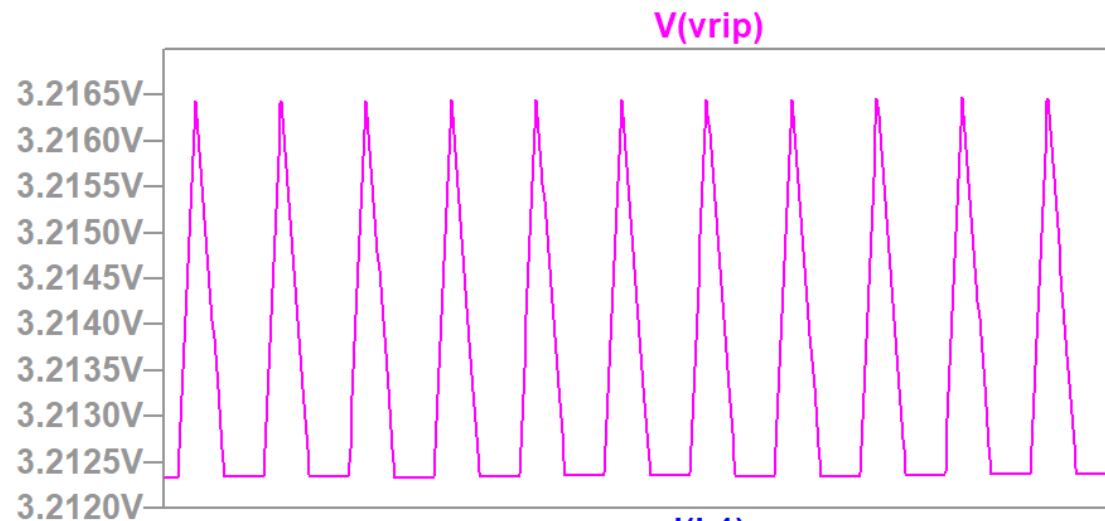
DCM・CCM時も同様

(T_{on} 一定)

* 注入リップル電圧

同様に一定

$$V_{rip} = 4.0\text{mV}_{pp}$$



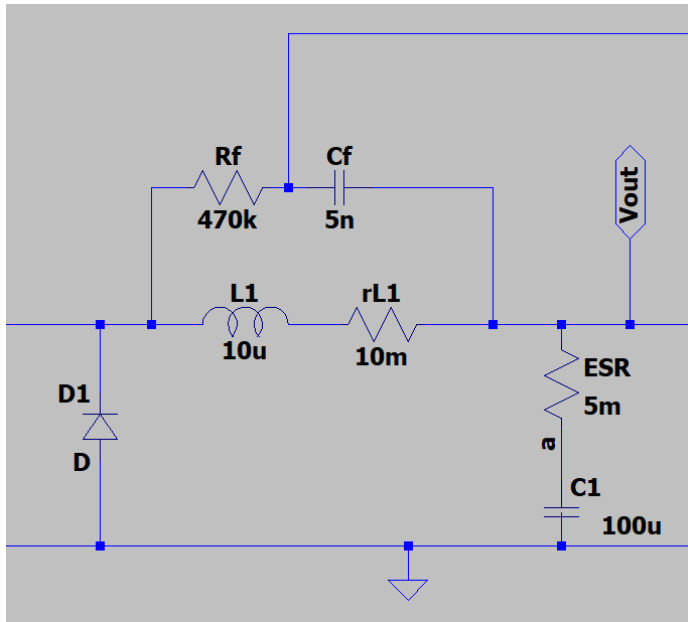
インダクタ電流 I_L と注入リップル波形 V_{rip}

発表内容

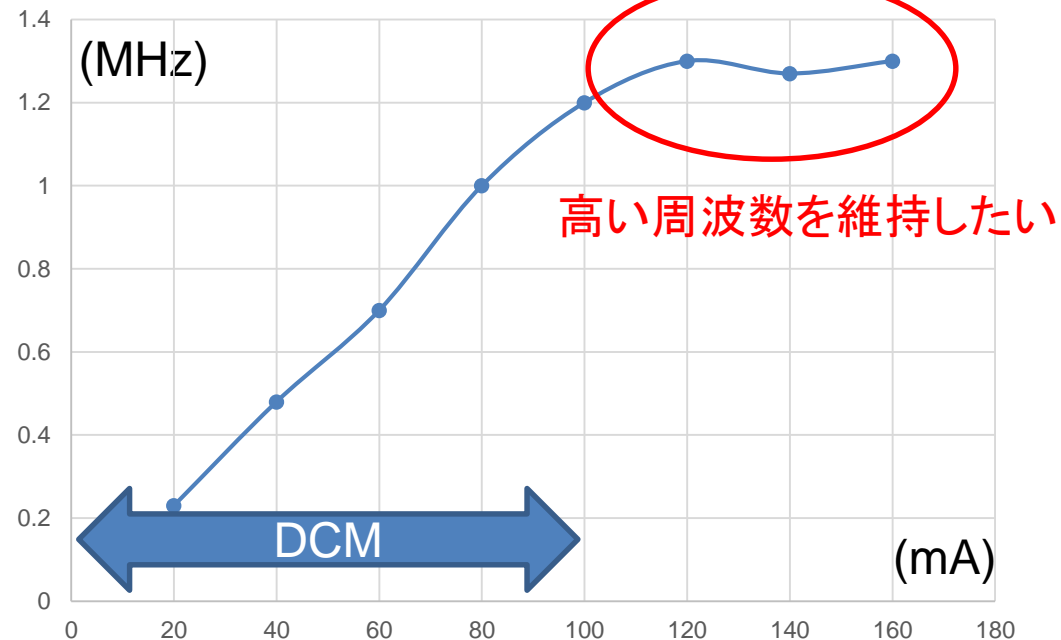
1. 研究背景と研究目的
2. 従来のヒステリシス制御電源とその問題点
3. 周波数一定範囲の改善
4. 周波数変化幅の改善
5. まとめと今後の課題

3. 周波数一定範囲の改善

出力電流 I_o と動作周波数の関係



回路図

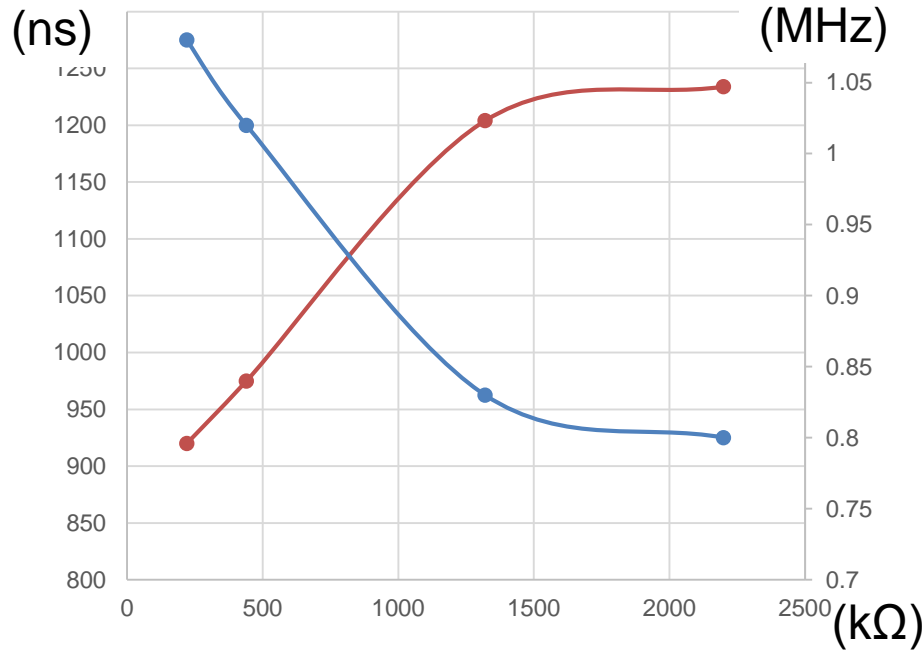


動作周波数と出力電流 I_o の関係

$R_f=470k\Omega$ 、 $C_f=5nF$ との場合、
 DCMの範囲は $I_o=\sim 100mA$ （周波数変化範囲）
 DCMでも、動作周波数の安定範囲の拡大を検討

DCMモード(Discontinuous Current Mode): インダクタ電流が不連続の状態

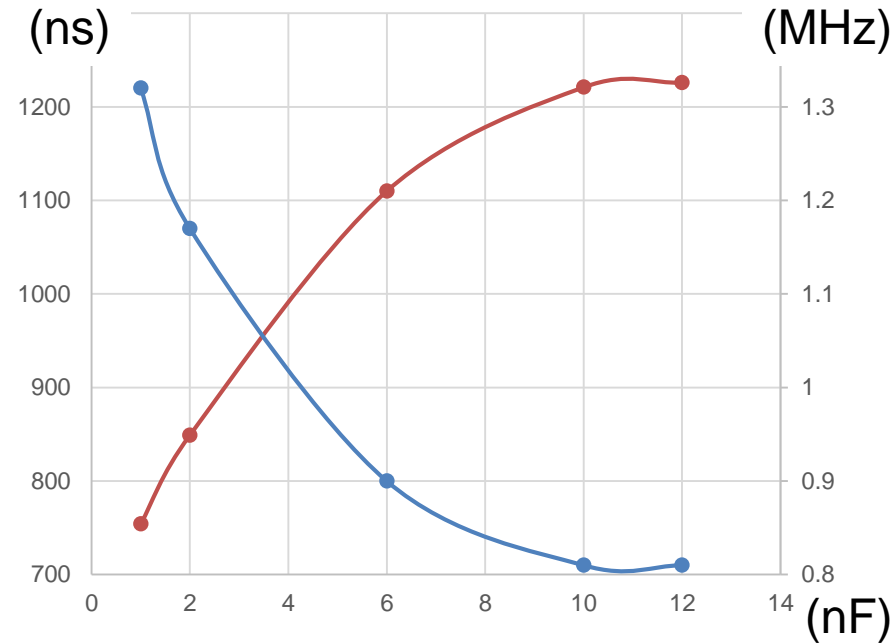
Rf・Cfと動作周波数の関係



グラフ2: Rf 対 Top 対 Fop



Rfの増加に対してTopに比例
Fopに反比例



グラフ3: Cf 対 Top 対 Fop



Cfの増加に対してTopに比例
Fopに反比例

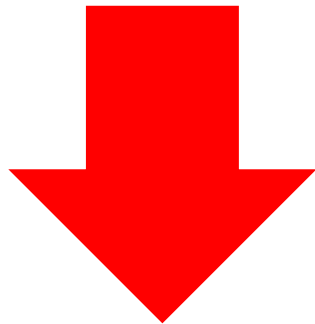
RfとCfの増加に対して動作周波数は低下

DCM時の動作周波数範囲の改善

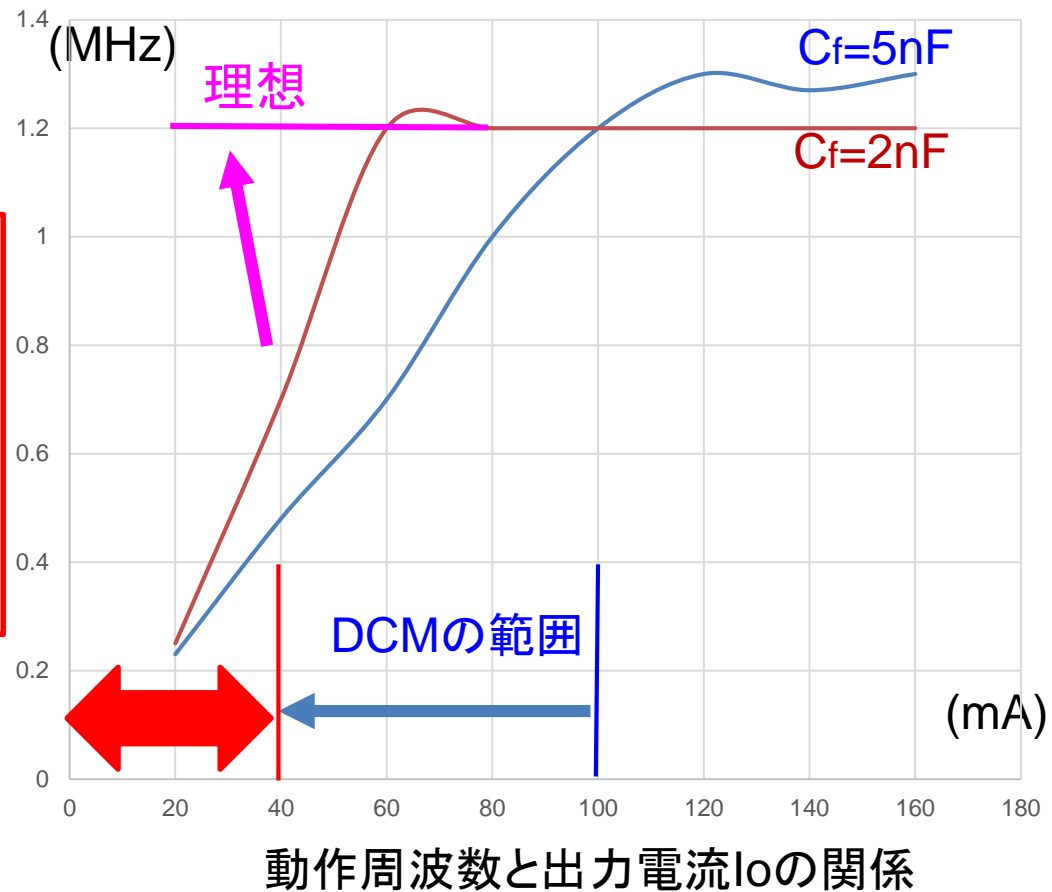
$$C_f=5\text{nF} \Rightarrow C_f=2\text{nF}$$

●改善結果

- * DCM周波数範囲の縮小
 $I_o=100\text{mA} \Rightarrow 40\text{mA}$
- * 一定動作周波数である
出力電流 I_o の範囲を拡大



課題：動作周波数の変化⇒大
制御⇒難しい



発表内容

1. 研究背景と研究目的
2. 従来のヒステリシス制御電源とその問題点
3. 周波数一定範囲の改善
- 4. 周波数変化幅の改善**
5. まとめと今後の課題

DCM時の周波数安定化検討

検討内容の概要

- * リプル発生CRを変えると
DCM範囲は変化する

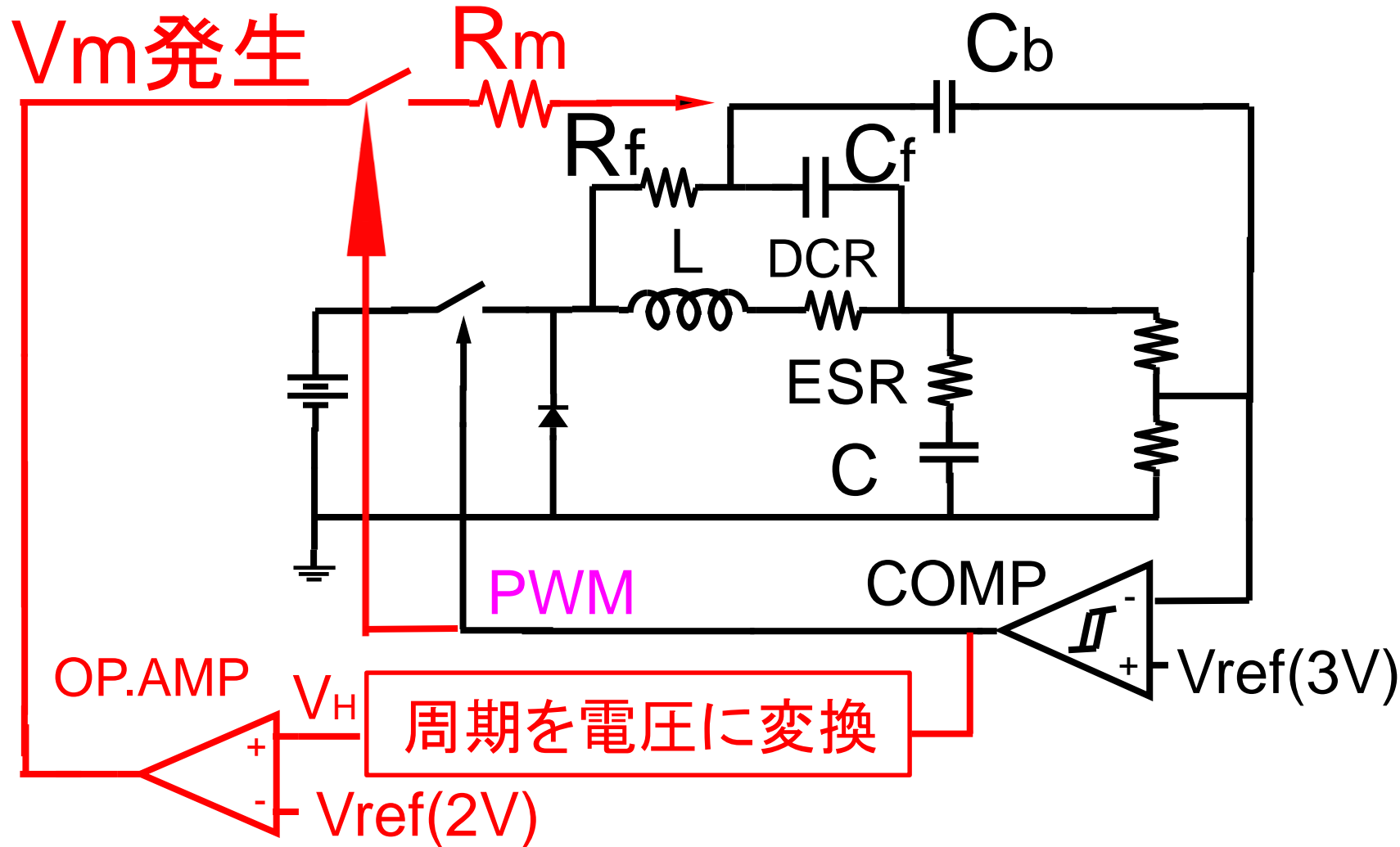


- * CRで発生するリプルの傾斜を変えて
DCMでも周波数を変化させて
一定周波数に制御できないか



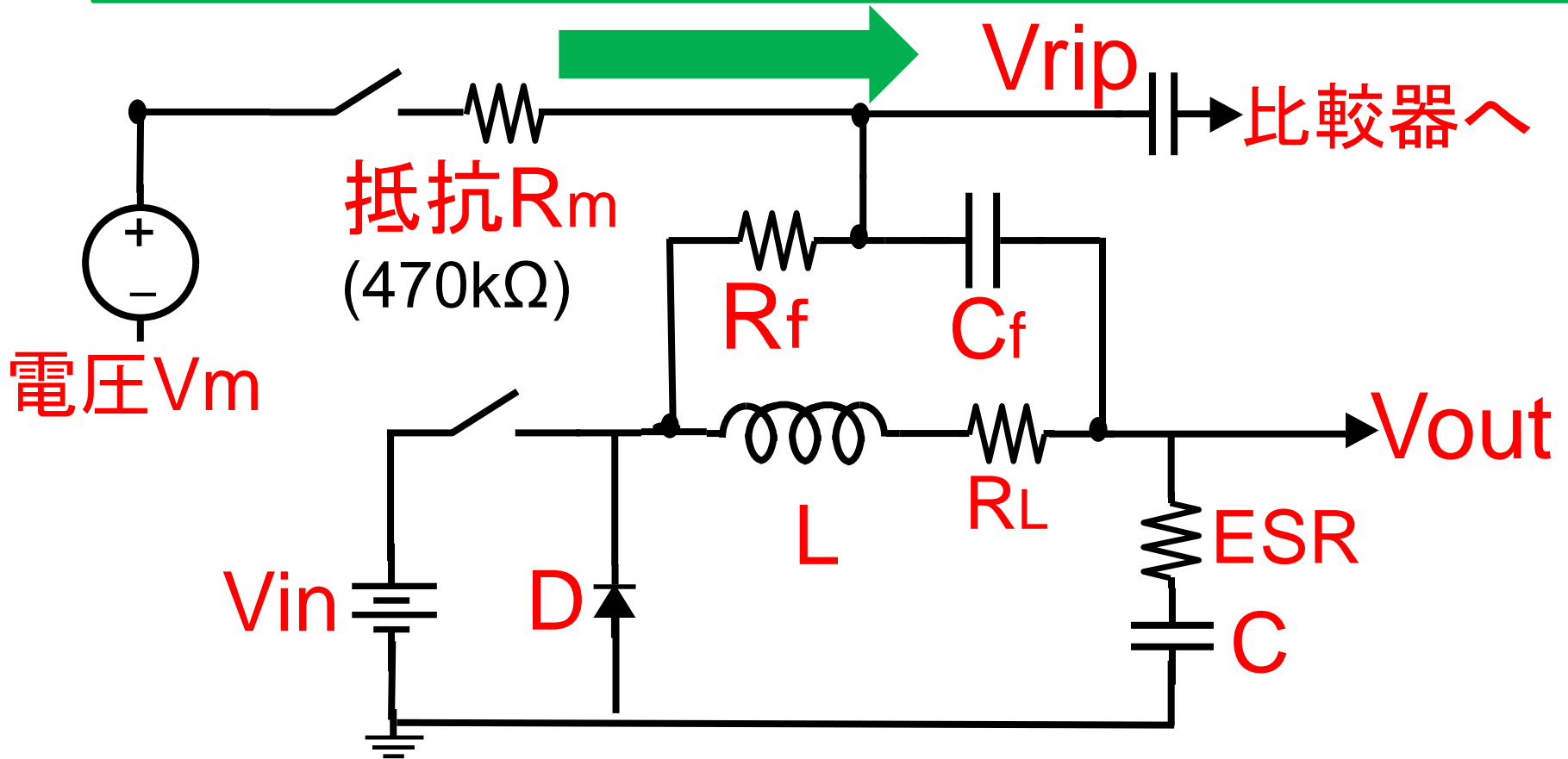
- * 動作周期をチェックして
CRリプルに電流を注入し
周期を一定化できるのではないか？

リップル注入形安定化対策回路



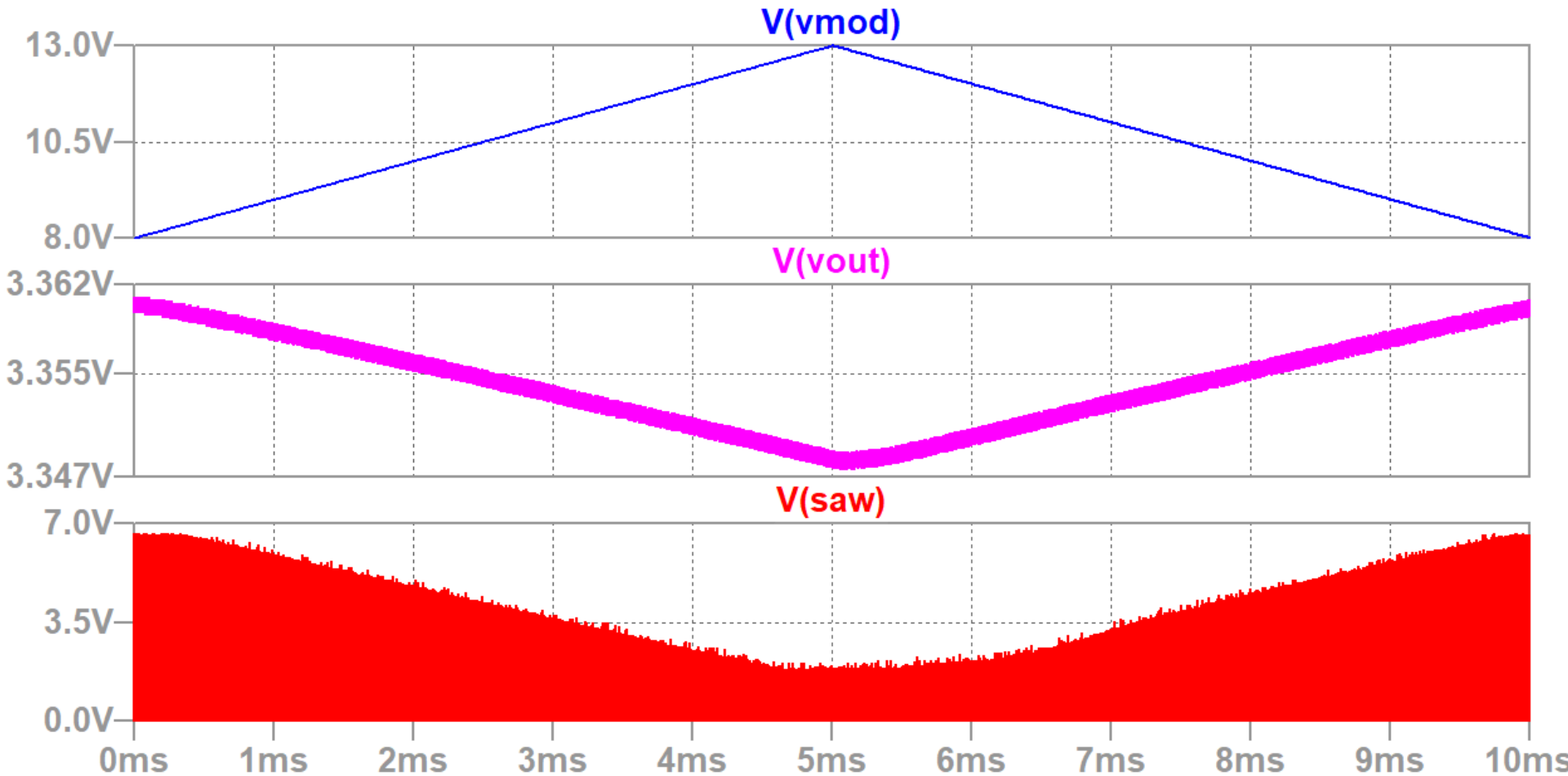
リップル発生部への電流注入

電圧源と抵抗 $R_m(470k\Omega)$ による電流注入



注入リップル波形 V_{rip} を変調し、ON時間を短縮できないか検討

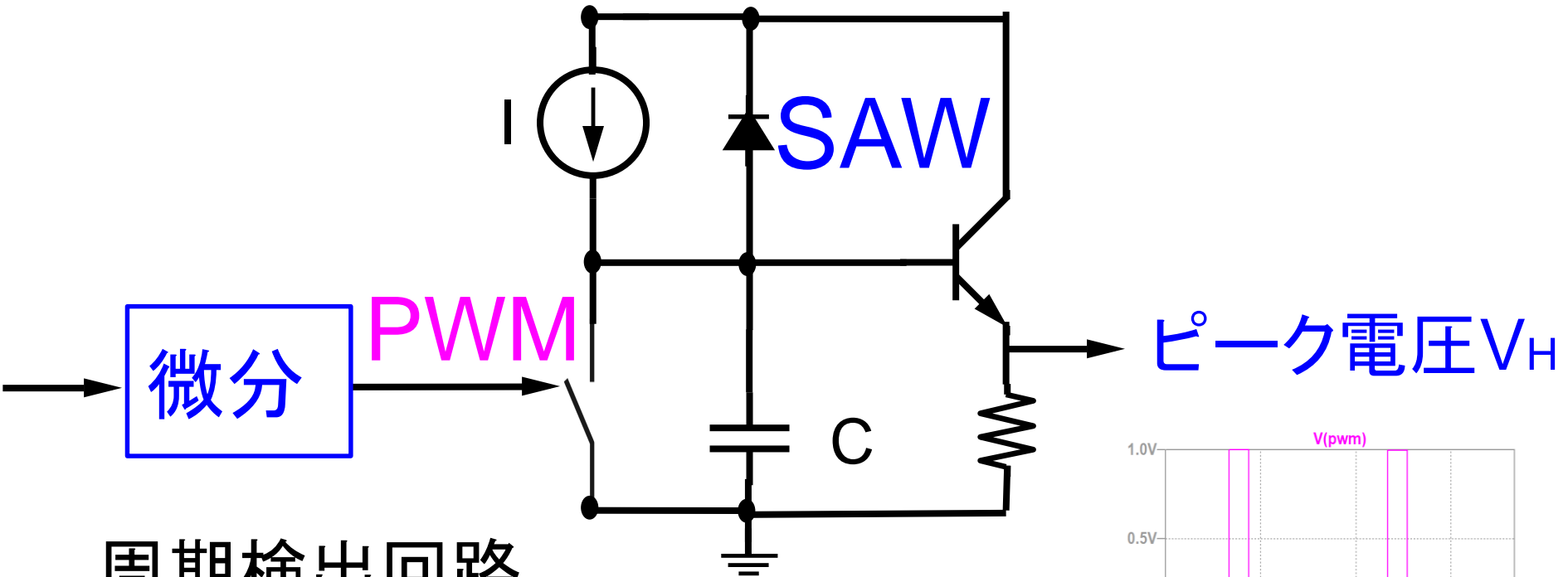
リップル発生部への電流注入



リップル発生部への電流注入と動作周波数(電圧+抵抗)

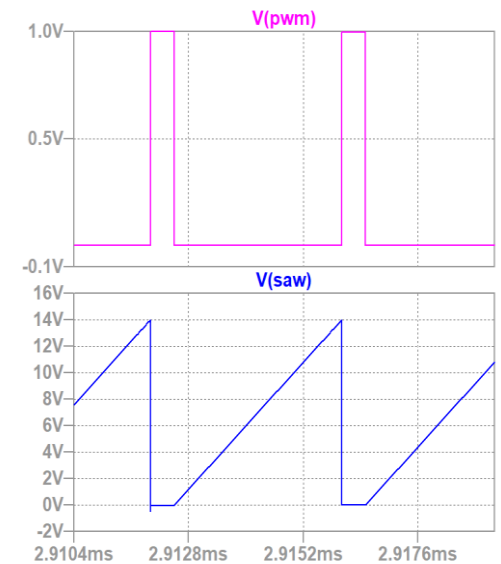
V_m の変化に対してSAW(周波数)は線形的に変化

周期検出回路



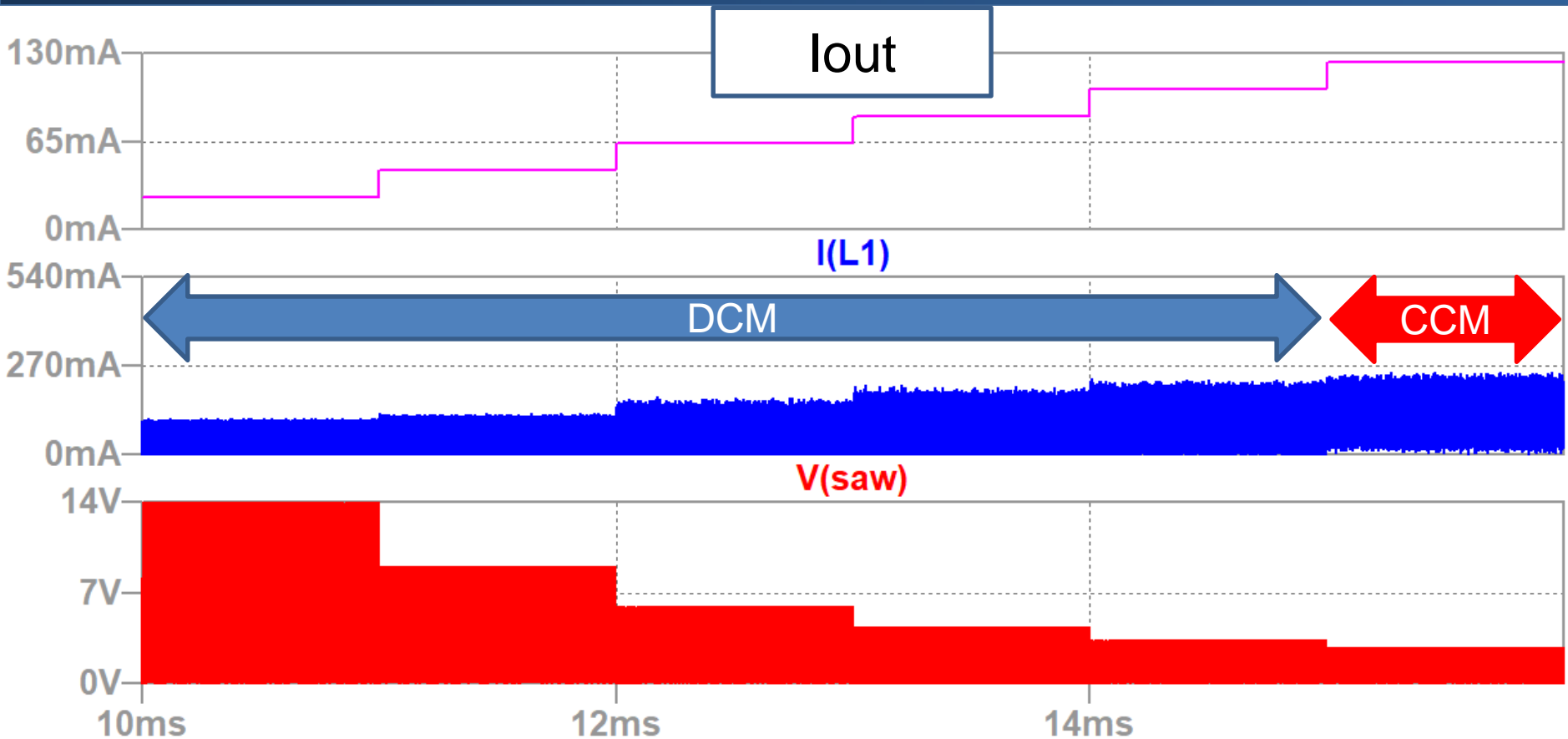
周期検出回路
(ピーク電圧 V_H 検出)

$$V_H(V_{saw}) = I \times \frac{1}{C} \times \frac{1}{f}$$



周期と電圧の関係

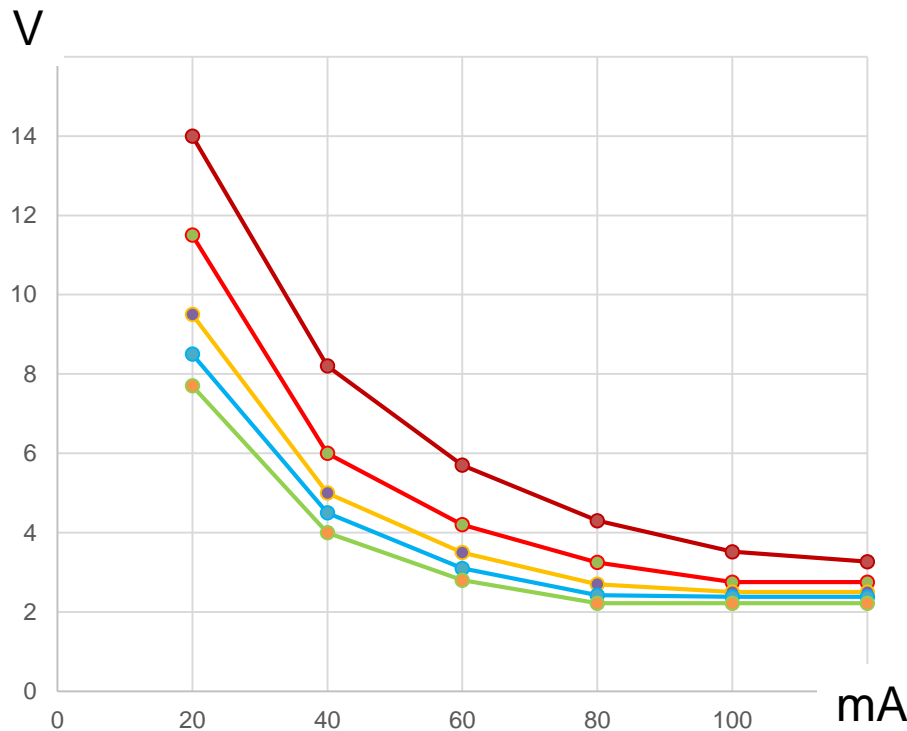
出力電流と周波数



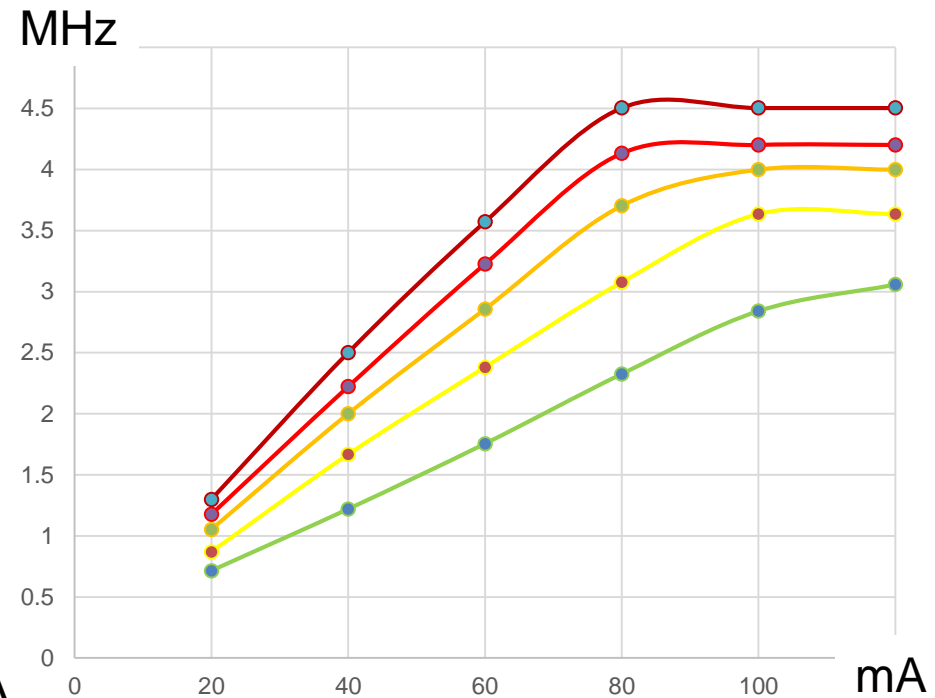
I_{out} 、 I_{L1} 及び SAW (周波数) の関係

出力電流 I_{out} の変化に対して SAW の電圧は減少
 $I_{out}=0\sim 100\text{mA}$ までは DCM、 120mA は CCM

出力電流と V_H の関係



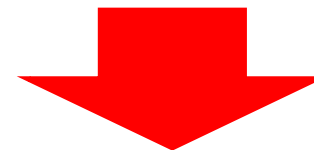
ピーク電圧 V_H と出力電流 I_o の関係



周波数と出力電流 I_o の関係

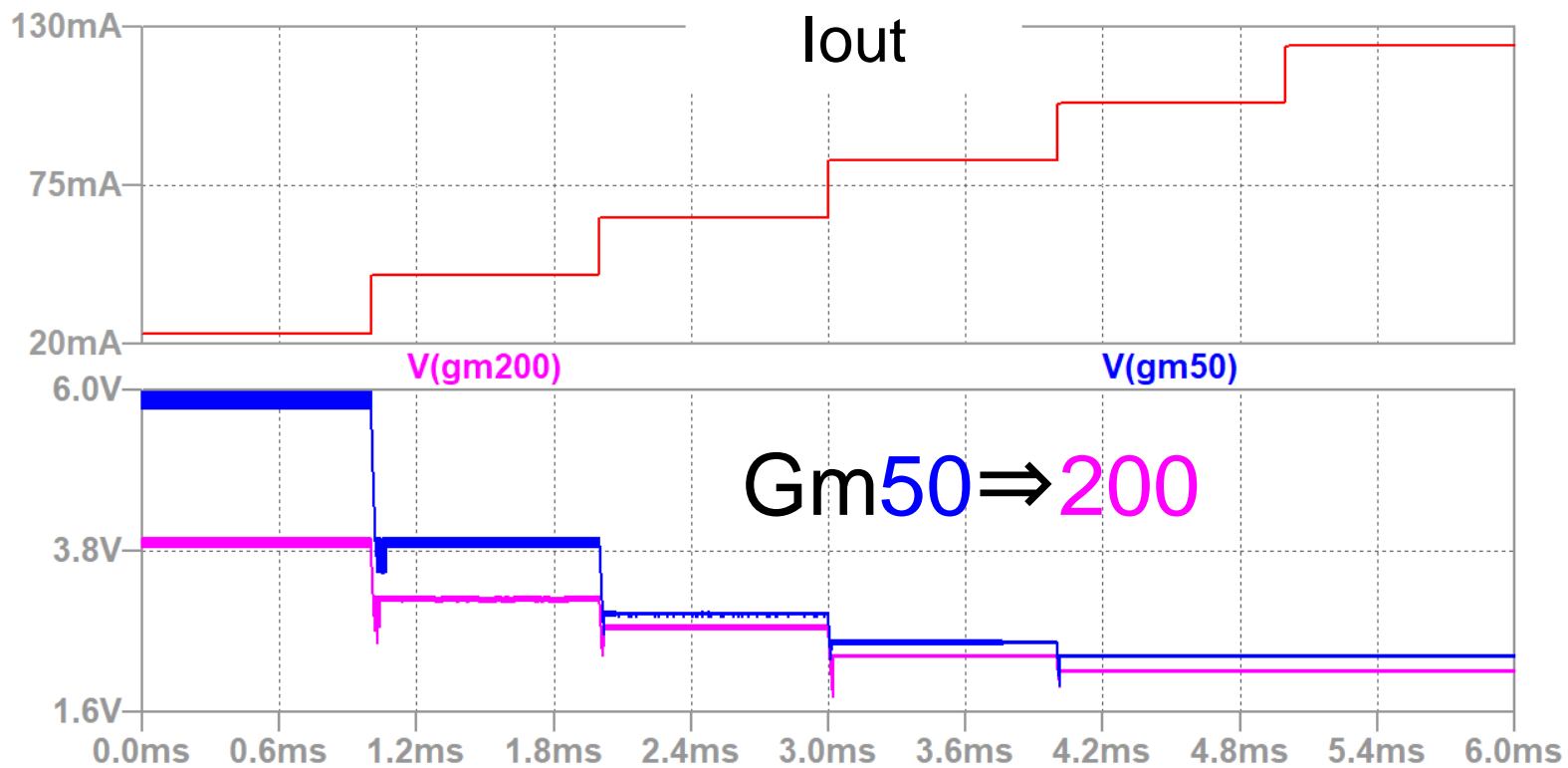
- V_m なし
- $V_m=8V$
- $V_m=10V$
- $V_m=12V$
- $V_m=14V$

DCM周波数は I_o に比例



制御可能

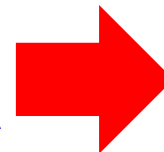
フィードバックゲイン G_m と V_H の関係



フィードバックゲインの変化とSAWピーク保持電圧 V_H の関係

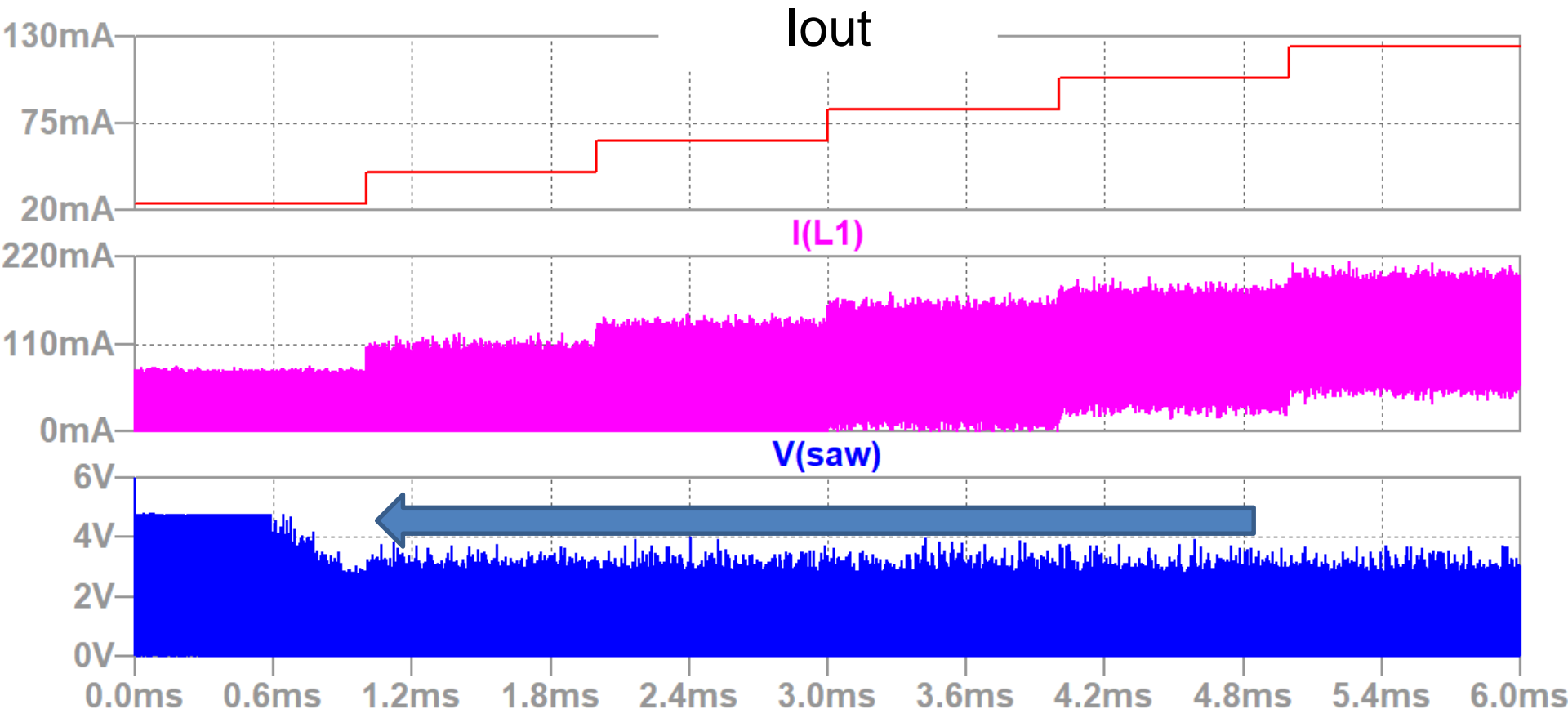
フィードバックゲインを大きくする

V_H は2Vに収束 \Rightarrow 周波数変化が縮小



周波数が一定に近づく

フィードバックゲイン $G_m=500$ 倍 $R_m=220k\Omega$



出力電流変化 (DCM・CCM) 時の動作周波数 (SAW 波形)

DCMでも、周波数の安定な範囲が拡大

改善後の動作周波数

● 改善結果

* 周波数変化率も改善:

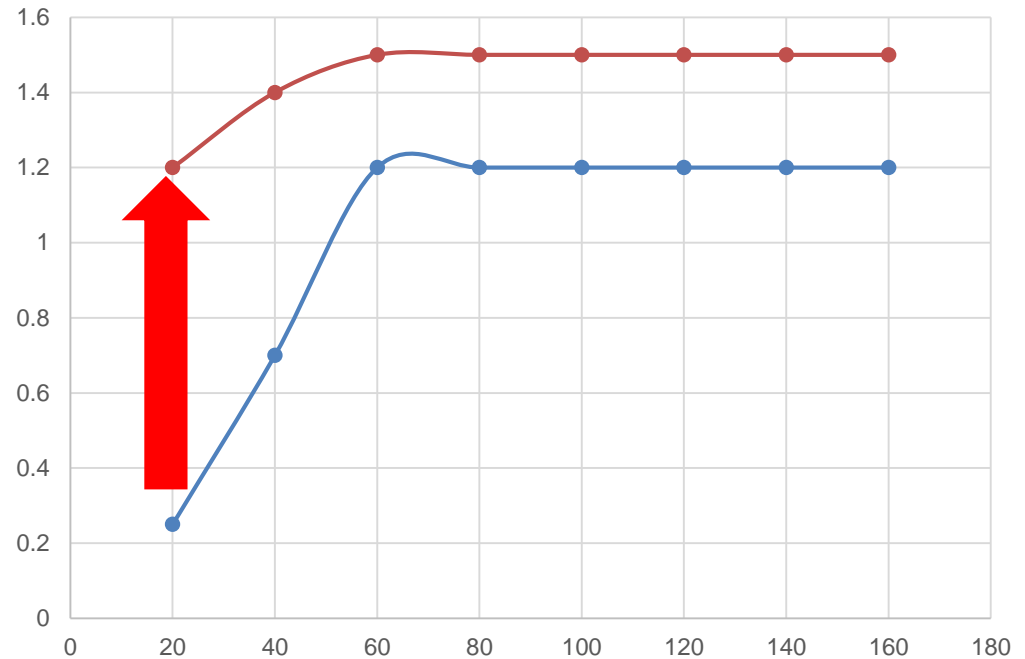
$$\alpha = 100 \cdot \Delta F / F_0$$

85% \Rightarrow 20%

* 周波数変化幅の改善:

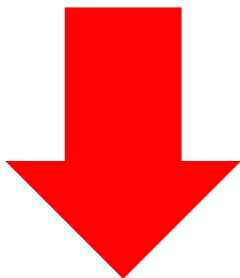
1.1MHz \Rightarrow 0.3MHz

MHz



mA

改善後の出力電流変化と動作周波数の関係



Io=40mA以下では、さらに検討が必要

発表内容

- 1: 研究背景と研究目的
2. 従来のヒステリシス制御電源とその問題点
3. 周波数一定範囲の改善
4. 周波数変化幅の改善
5. **まとめと今後の課題**

まとめと今後の課題

まとめ

1. $R_f \cdot C_f$ を**変化** ⇒ 安定周波数範囲の拡大
($I_o=100\text{mA} \Rightarrow 40\text{mA}$)
2. CRで発生するリプルの傾きを**変調**
⇒
 - 周波数変化率も改善
($\alpha=100 \cdot \Delta F/F_0=85\% \Rightarrow 20\%$)
 - 周波数変化幅の改善
($1.1\text{MHz} \Rightarrow 0.3\text{MHz}$)

今後の課題

- $I_o=40\text{mA}$ 以下においても1.5MHzで安定させる

Q & A

Q: この回路を考案する上で最も苦労したことは何か？

A: 変調電圧 V_m と抵抗 R_m の決定

Q: 出力電流を大きくしたときに
オペアンプが発振することはないのか？

A: 出力電流を大きくした場合でもシミュレーションを行ったがこの問題は確認できなかった