

電子回路研究会

非線形電子回路および電子回路一般

2019年12月18日(水)・19日(木)

2019年12月19日(木)

東京 (日本大学理工学部駿河台校舎タワー・スコラ)

# 温度に依存しないMOS定電流源の 動作と安定性解析

山本 颯馬\* , Isam Ebisawa Kuswan, 阿部 優大,  
井田 貴士, 柴崎 有祈子, 築地 伸和  
(群馬大学)

鈴木 彰, 轟 祐吉, 柿木 利彦, 小野 信任, 三浦 一広  
((株)ジーダット)

桑名 杏奈, 小林 春夫(群馬大学)

# OUTLINE

- 研究目的
- MOS FET の温度特性
- 温度に依存しないMOS定電流源のコンセプト
- 自己バイアスを用いた回路提案
- シミュレーションによる提案回路の動作と安定性検証
- まとめ

# OUTLINE

- 研究目的
- MOS FET の温度特性
- 温度に依存しないMOS定電流源のコンセプト
- 自己バイアスを用いた回路提案
- シミュレーションによる提案回路の動作と安定性検証
- まとめ

# 研究目的

## 電子回路における信頼性の問題

- Process(プロセス)
- Voltage(電源電圧)
- Temperature(温度)



今回

温度に依存しない定電流源

# OUTLINE

- 研究目的
- MOS FET の温度特性
- 温度に依存しないMOS定電流源のコンセプト
- 自己バイアスを用いた回路提案
- シミュレーションによる提案回路の動作と安定性検証
- まとめ

# MOS FETの電流特性

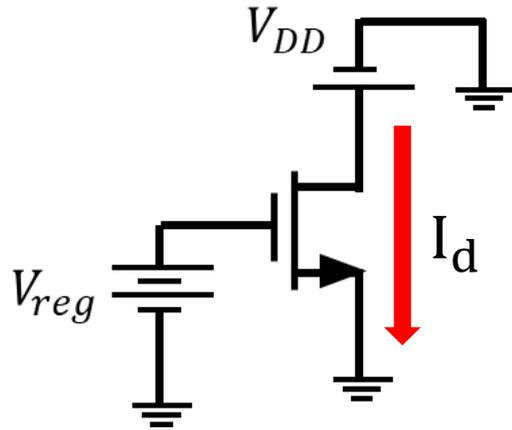
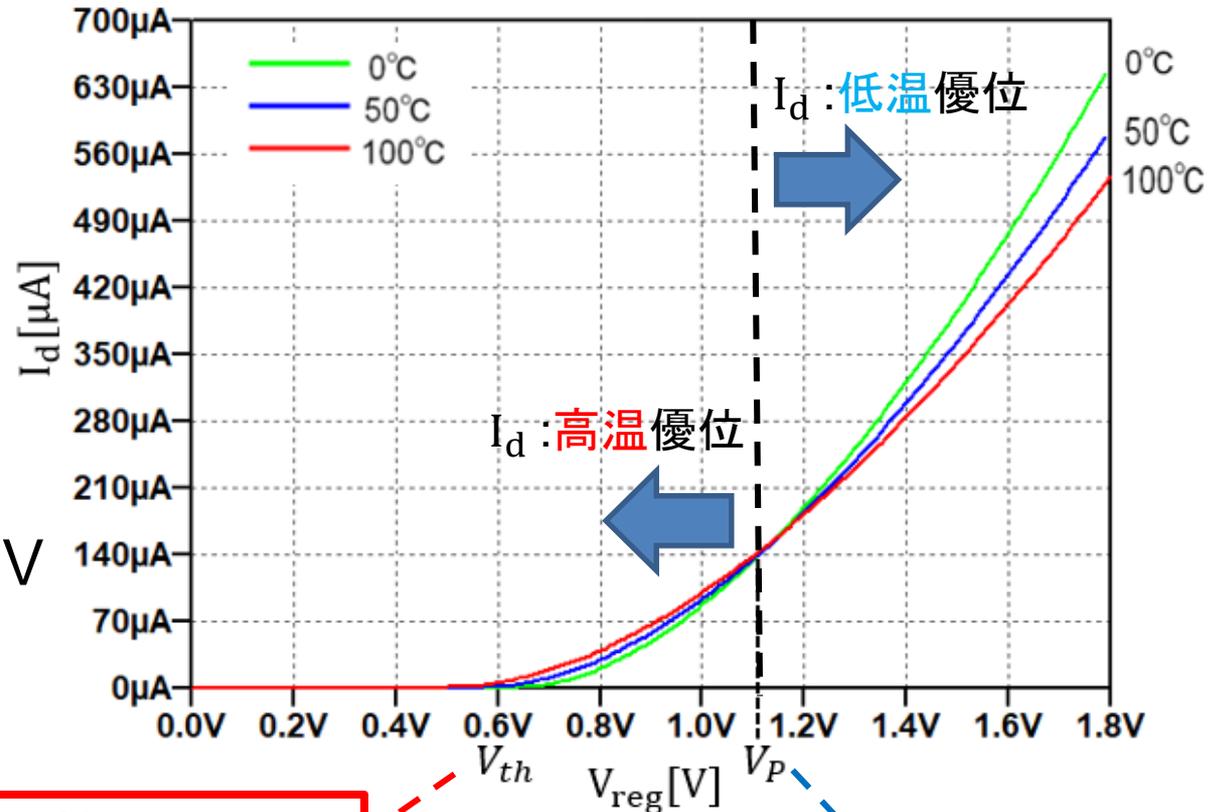


図1 MOS FET電流特性の確認用回路

DC解析  $V_{reg} : 0 \sim 1.8V$



閾値  $V_{th} : 0.6V$

電流が温度に依存しないゲート電圧

図2 MOS FETの温度特性

# OUTLINE

- 研究目的
- MOS FET の温度特性
- 温度に依存しないMOS定電流源のコンセプト
- 自己バイアスを用いた回路提案
- シミュレーションによる提案回路の動作と安定性検証
- まとめ

# 温度に依存しないMOS定電流源のコンセプト

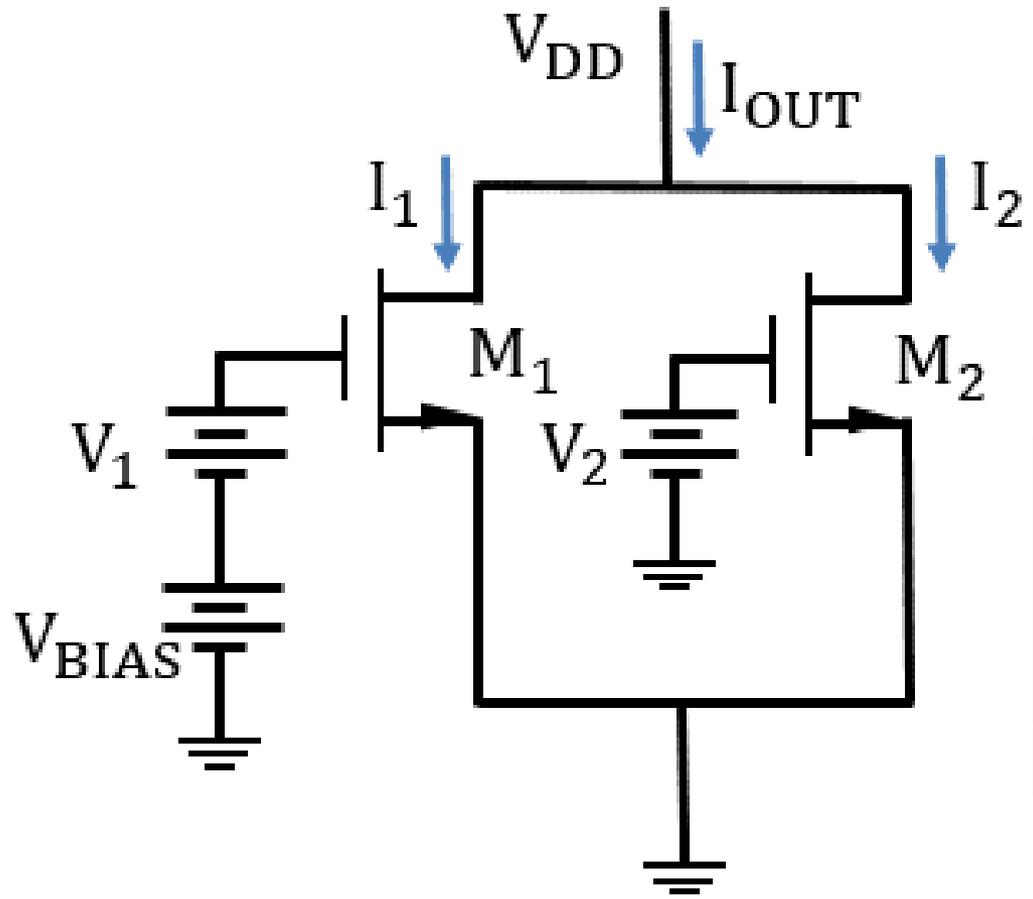


表1 シミュレーション条件

Parameter	Value
$V_{BIAS}$	0.6 V
$V_1, V_2$	0 ~ 1.8 V
$V_{DD}$	5.0 V
$M_1, M_2$	W=20 um, L=2.0 um

図3 提案基準電流源回路のコンセプト

# 各MOS FETの $I_D-V_{GS}$ 特性

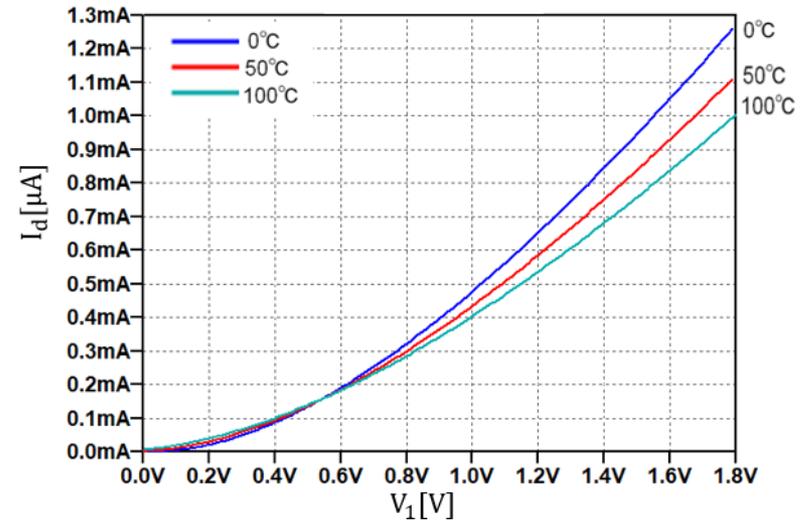
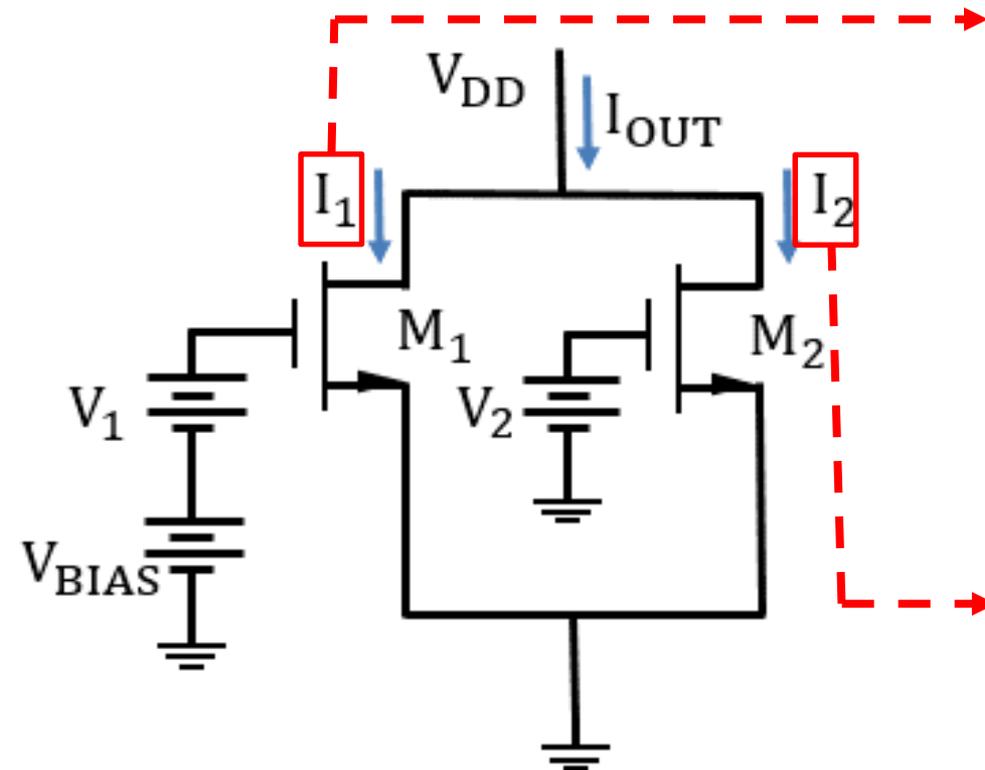


図4  $M_1$ の  $I_D-V_{GS}$  特性

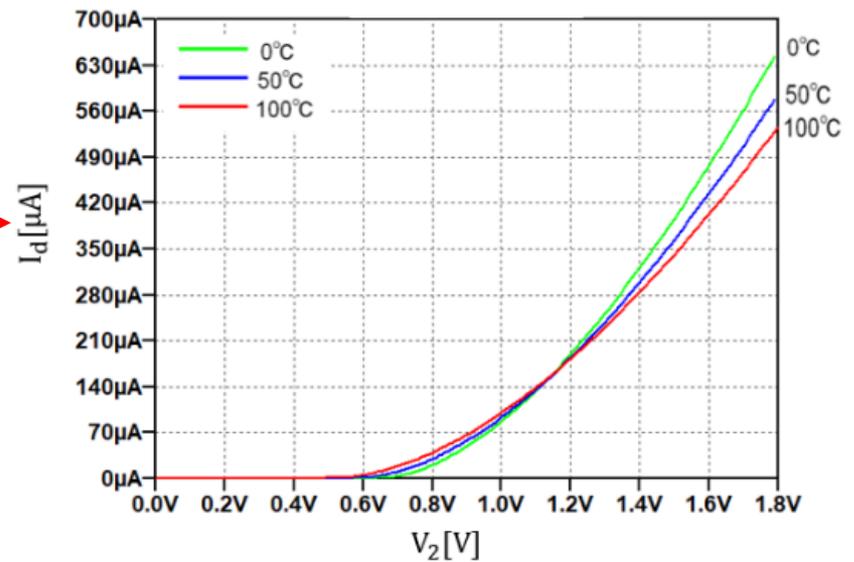


図5  $M_2$ の  $I_D-V_{GS}$  特性

# 温度特性のキャンセル

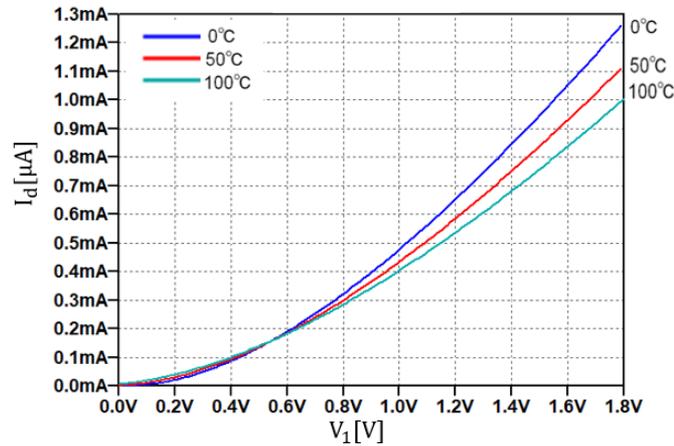


図4  $M_1$ の  $I_D$ - $V_{GS}$  特性

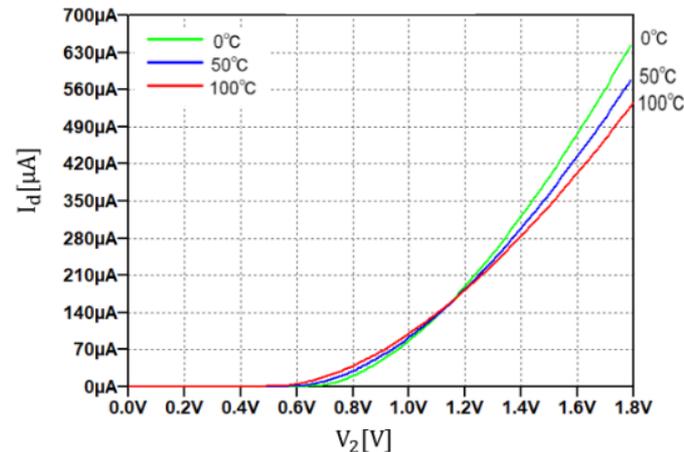


図5  $M_2$ の  $I_D$ - $V_{GS}$  特性

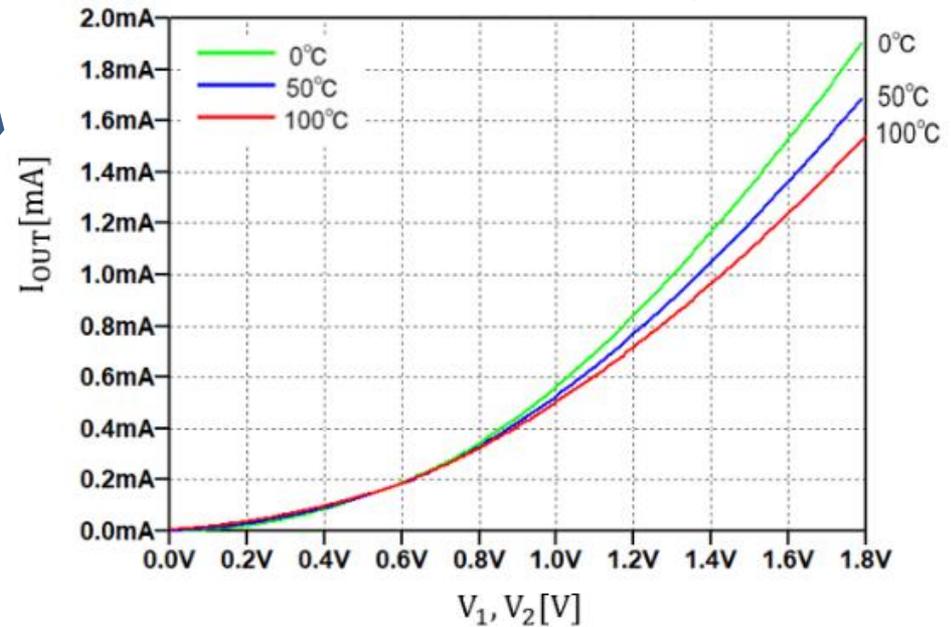
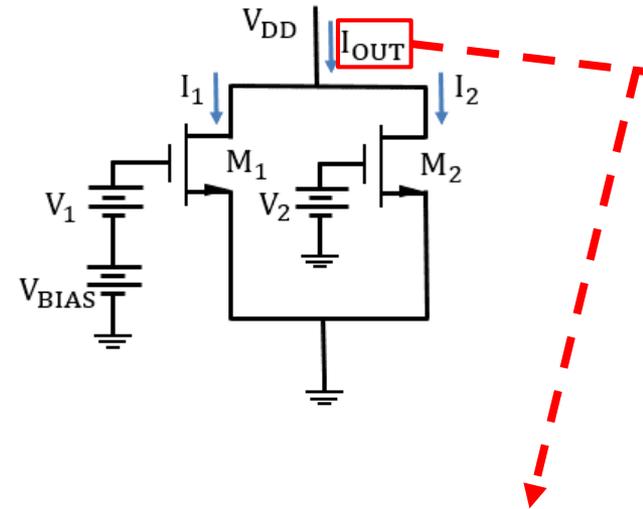


図6 出力電流  $I_{OUT}$

# OUTLINE

- 研究目的
- MOS FET の温度特性
- 温度に依存しないMOS定電流源のコンセプト
- 自己バイアスを用いた回路提案
- シミュレーションによる提案回路の動作と安定性検証
- まとめ

# 自己バイアスを用いた回路提案

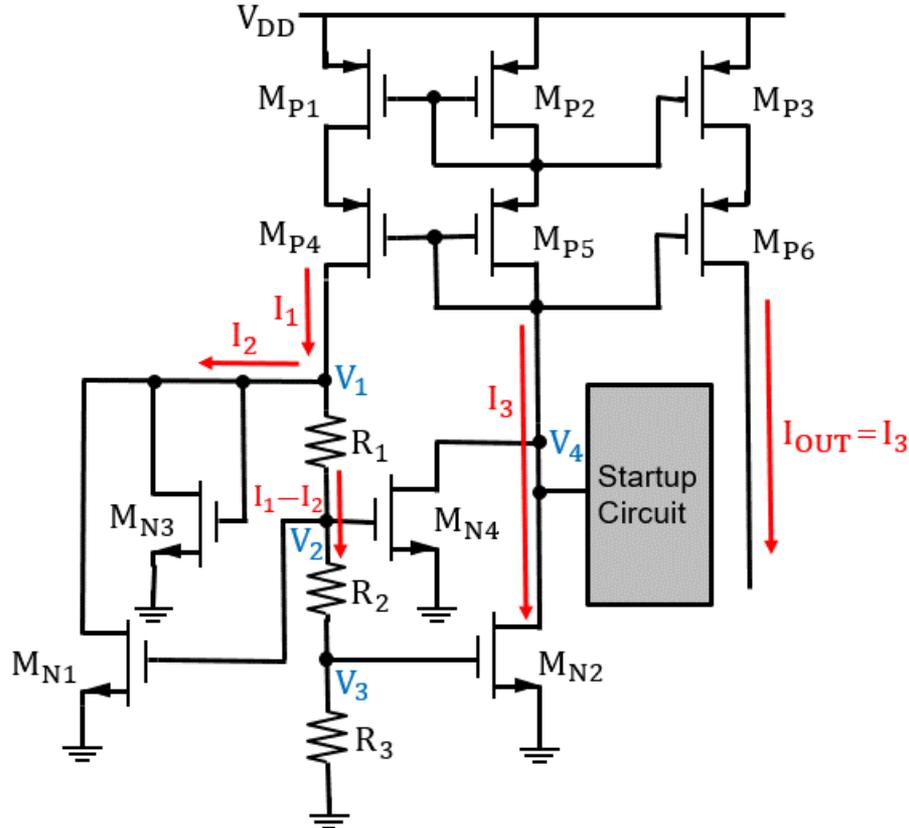


図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

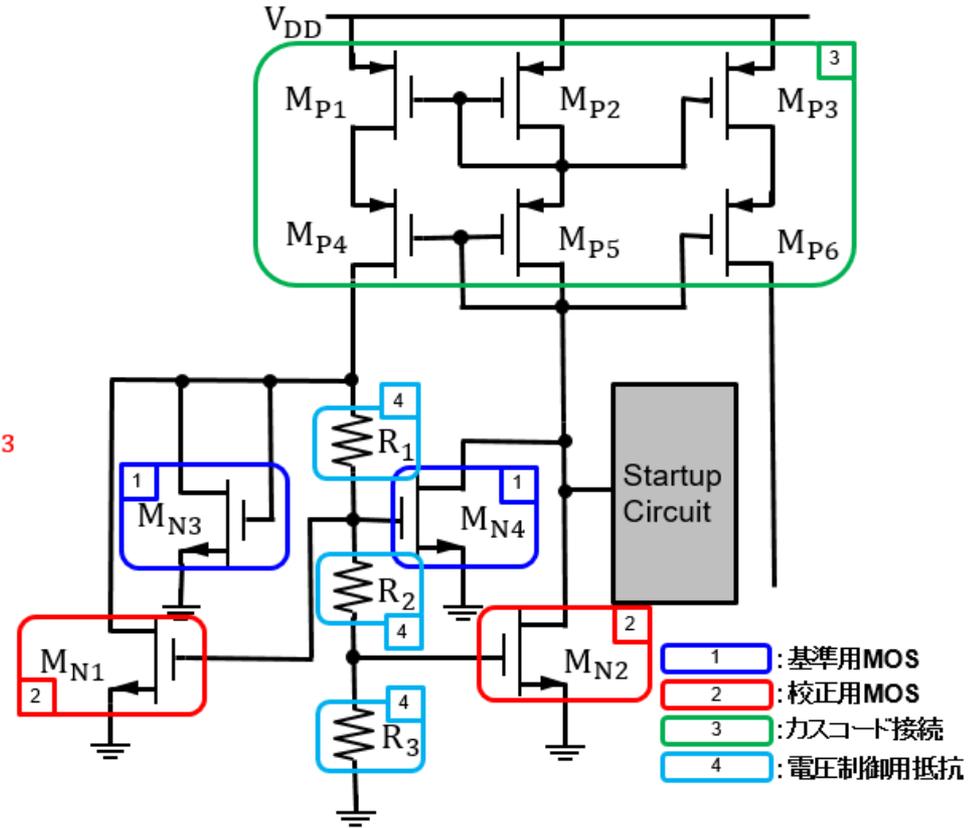


図8 各MOSに対する定義と抵抗の役割

# 回路のネガティブフィードバック作用

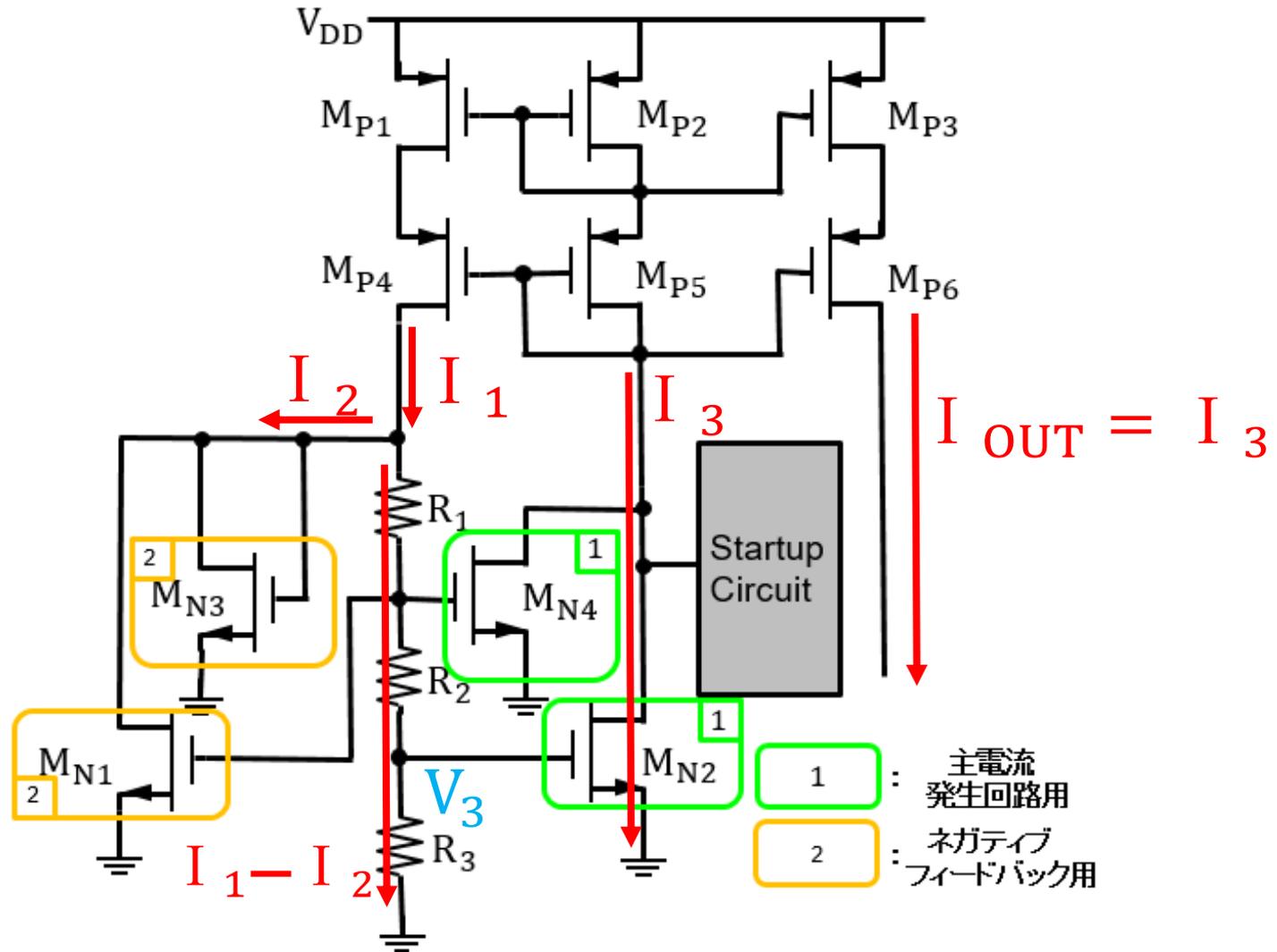


図9 ネガティブフィードバック用MOS

# 提案回路のシミュレーション条件

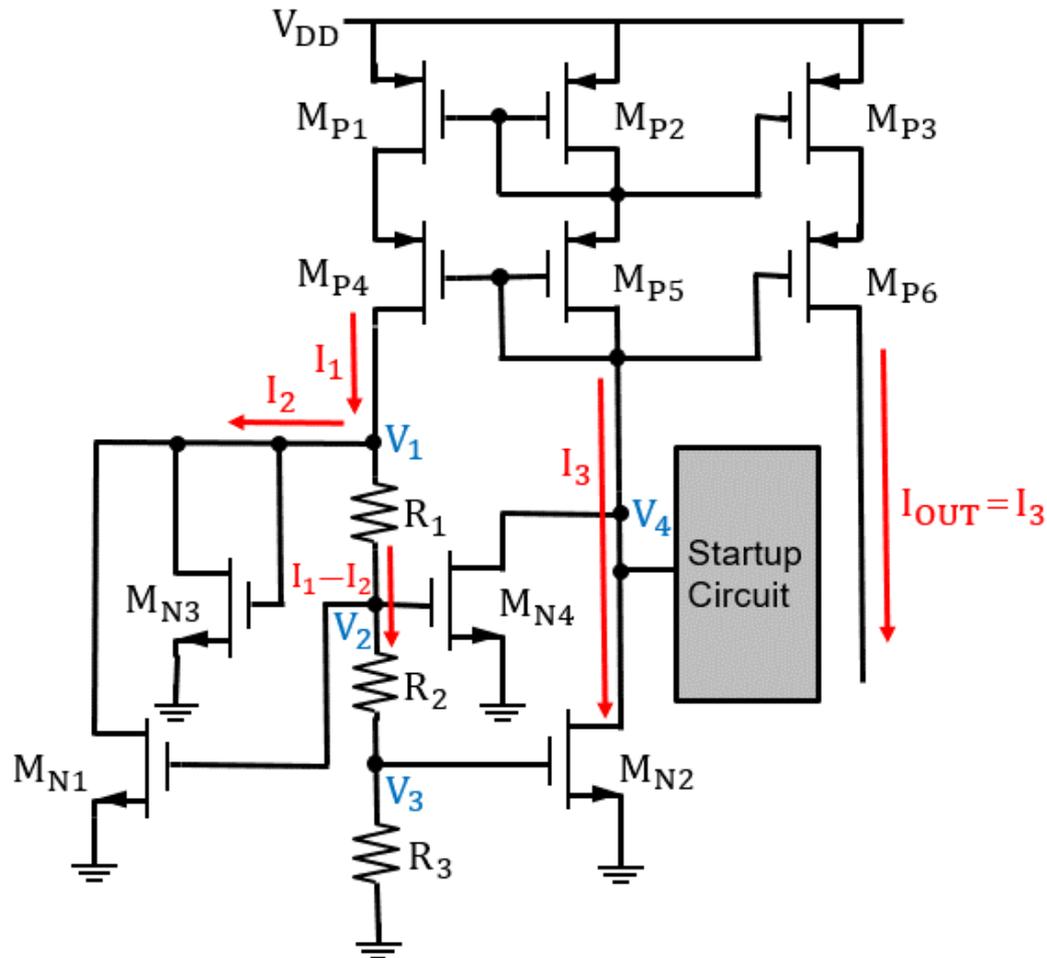


表2 シミュレーション条件

Parameter	Value
$M_{P1} \sim M_{P6}$	W=800 um, L=2.0 um
$M_{N1}, M_{N3}$	W=0.1 um, L=2.0 um
$M_{N2}$	W=200 um, L=2.0 um
$M_{N4}$	W=20 um, L=2.0 um
$R_1$	5k $\Omega$
$R_2$	1.61 k $\Omega$
$R_3$	1.5k $\Omega$
$V_{DD}$	5.0 V

図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

# 出力電流 $I_{OUT}$ と各温度での誤差

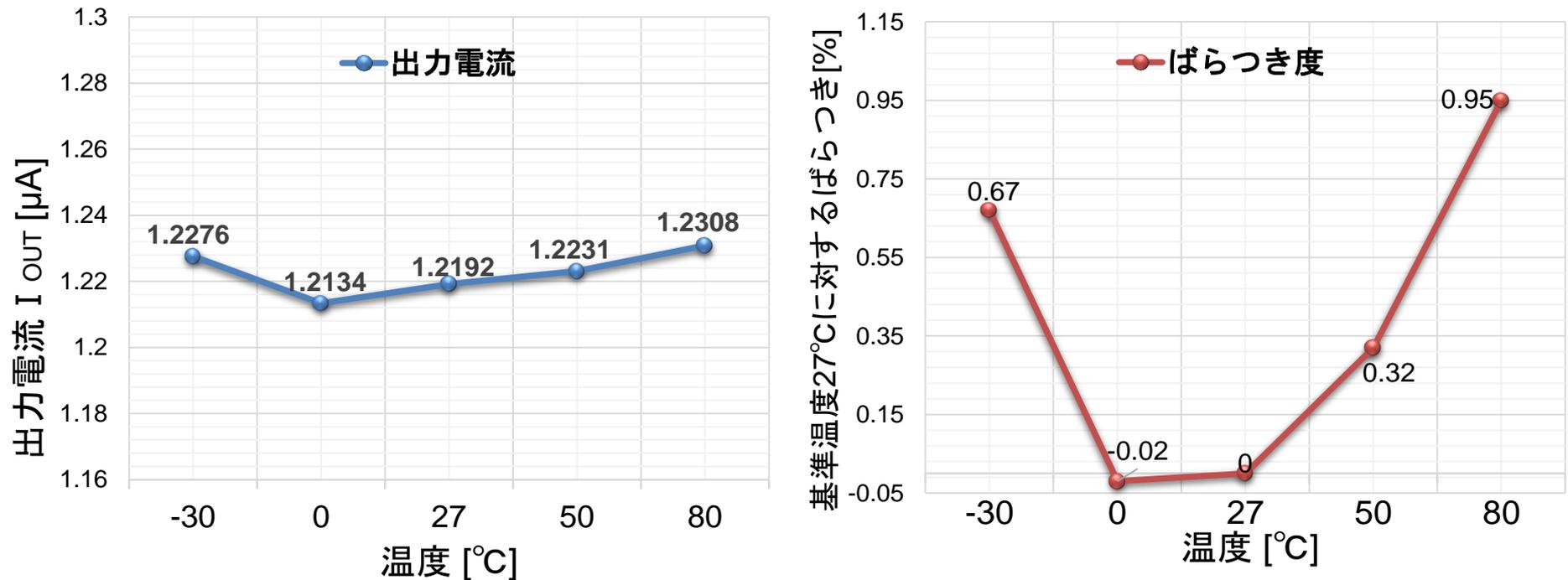
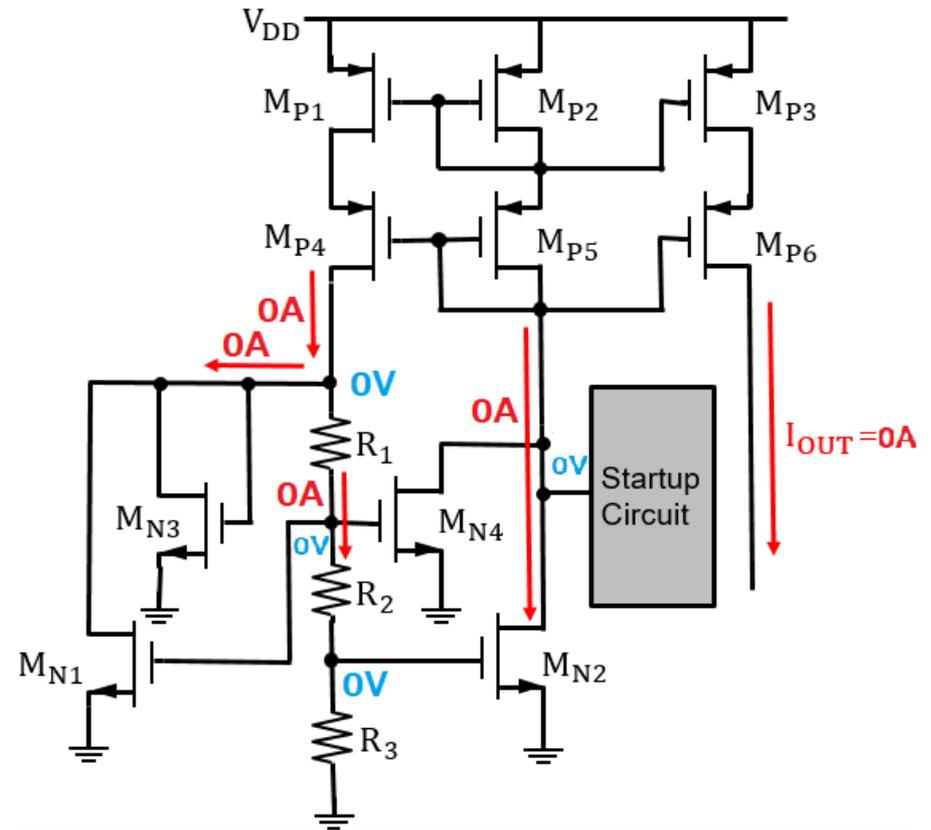
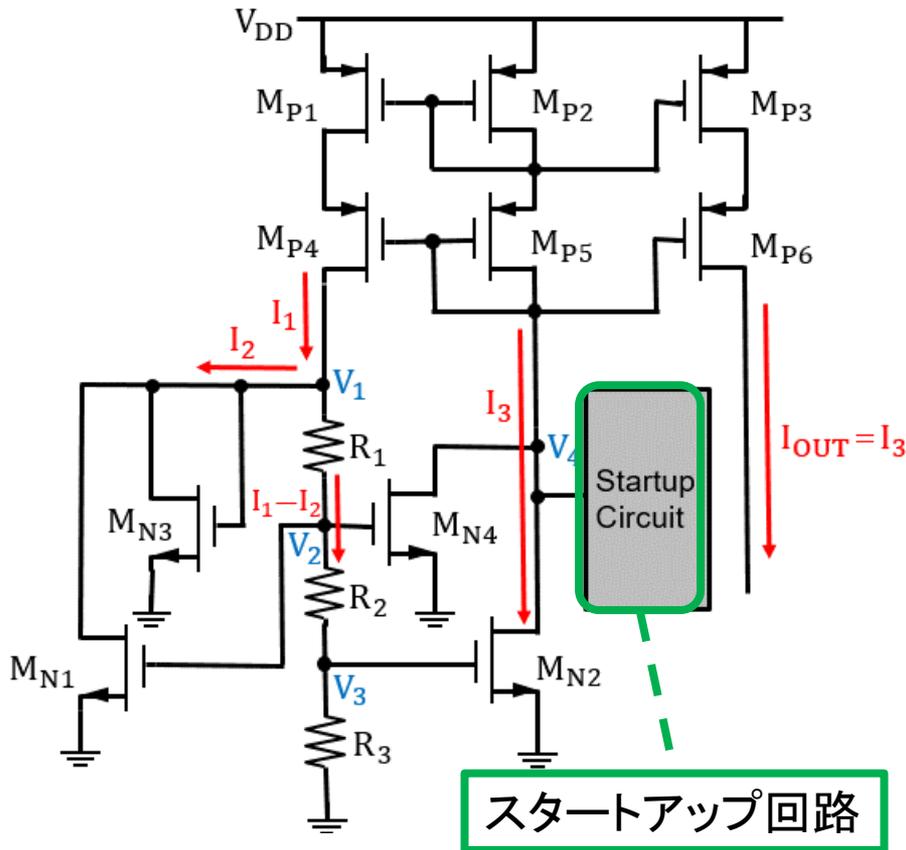


図12 提案回路の出力電流  $I_{OUT}$  と  
27 $^{\circ}C$ を基準としたときの出力電流の誤差

# OUTLINE

- 研究目的
- MOS FET の温度特性
- 温度に依存しないMOS定電流源のコンセプト
- 自己バイアスを用いた回路提案
- シミュレーションによる提案回路の動作と安定性検証
- まとめ

# 提案回路の2種類の状態



今回

回路に電流が安定して流れるための  
条件を調べる

# フィードバックループ切断

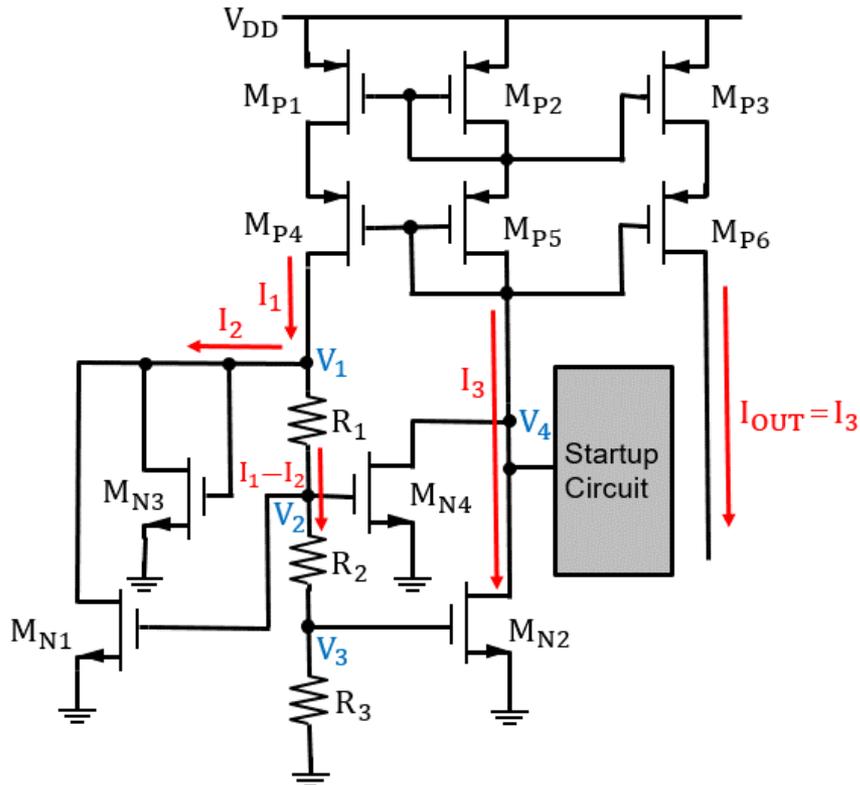


図7 カスコード接続を用いた温度不感型MOS 定電流源

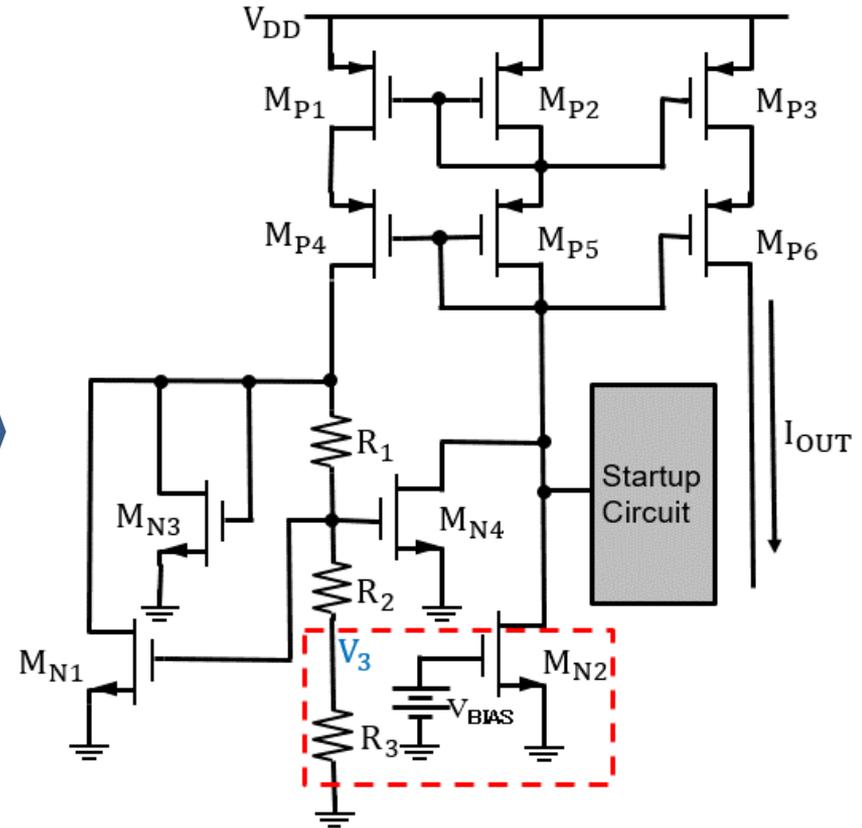


図13 バイアス電圧の生成

閉ループ切断、図8に回路変更  
 $V_{BIAS}$  と  $V_3$  の差 ( $V_{BIAS} - V_3$ ) を調べる

# $V_{BIAS}$ と $V_3$ の差( $V_{BIAS} - V_3$ )

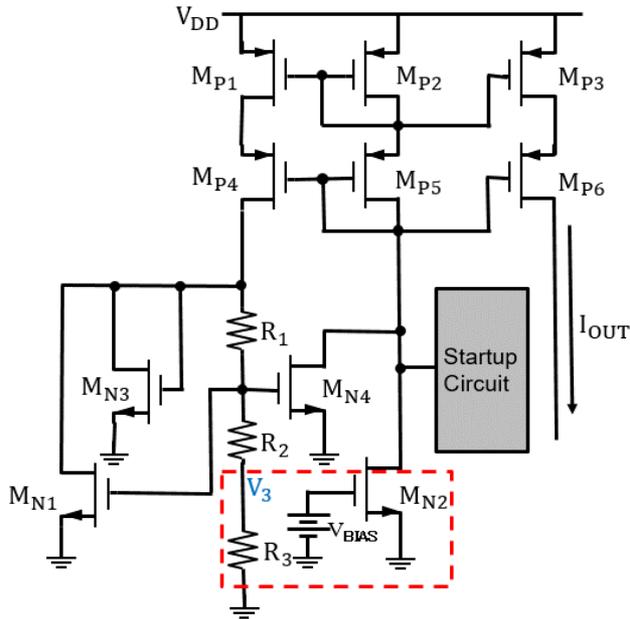


図13 バイアス電圧の生成

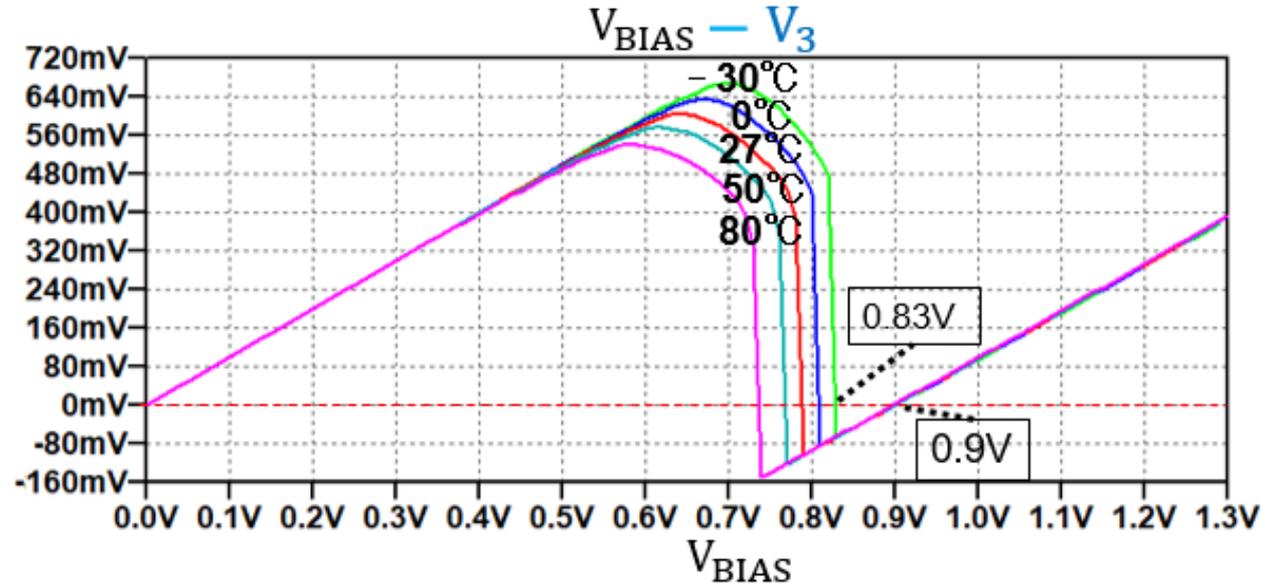


図14  $V_{BIAS}$ と $V_3$ の差( $V_{BIAS} - V_3$ )

例： $-30^\circ\text{C}$ のとき

$V_{BIAS}$  が  $0.83\text{V} \sim 0.9\text{V}$  :  $V_{BIAS} - V_3$  が負

$V_{BIAS}$  が  $0.9\text{V}$  以上 :  $V_{BIAS} - V_3$  が正

# 提案回路における動作

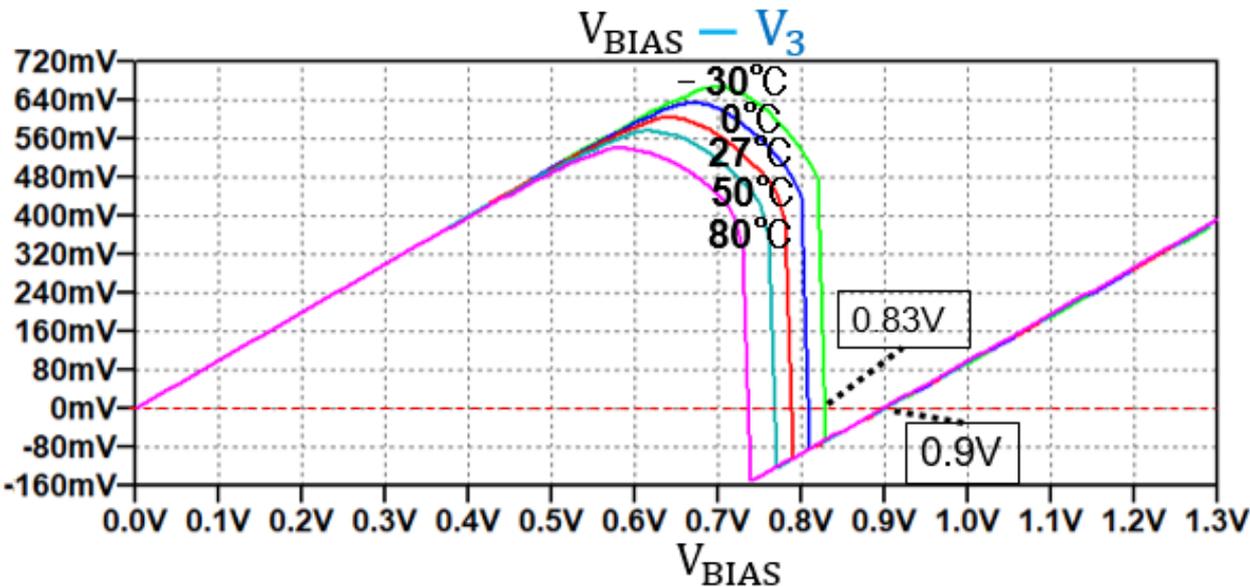


図14  $V_{BIAS}$  と  $V_3$  の差 ( $V_{BIAS} - V_3$ )

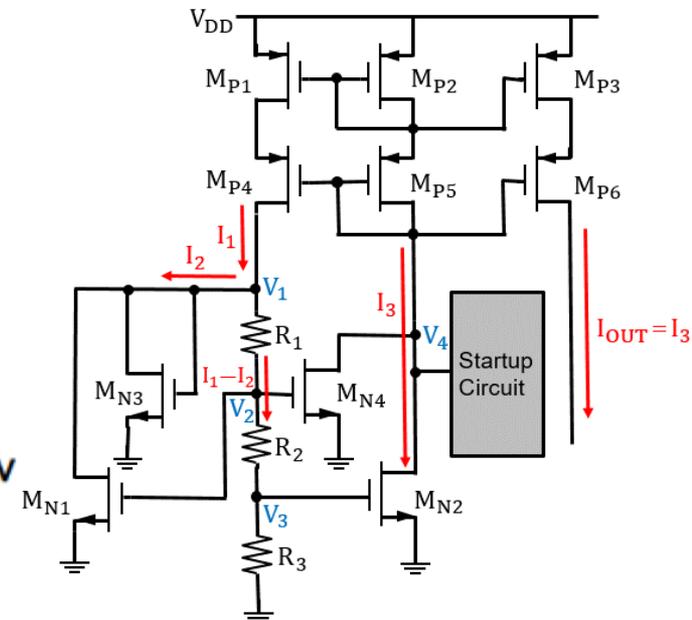


図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

(提案回路において)

- $V_{BIAS} - V_3$  が負 :  $V_3$  が  $M_{N2}$  のゲート電圧↑
- $V_{BIAS} - V_3$  が正 :  $V_3$  が  $M_{N2}$  のゲート電圧↓

# $V_3$ のフィードバック過程

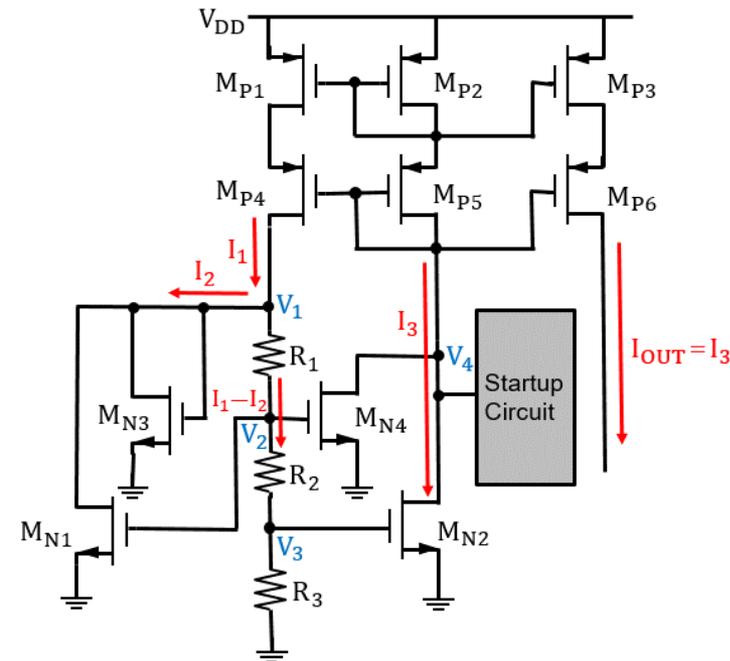


図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

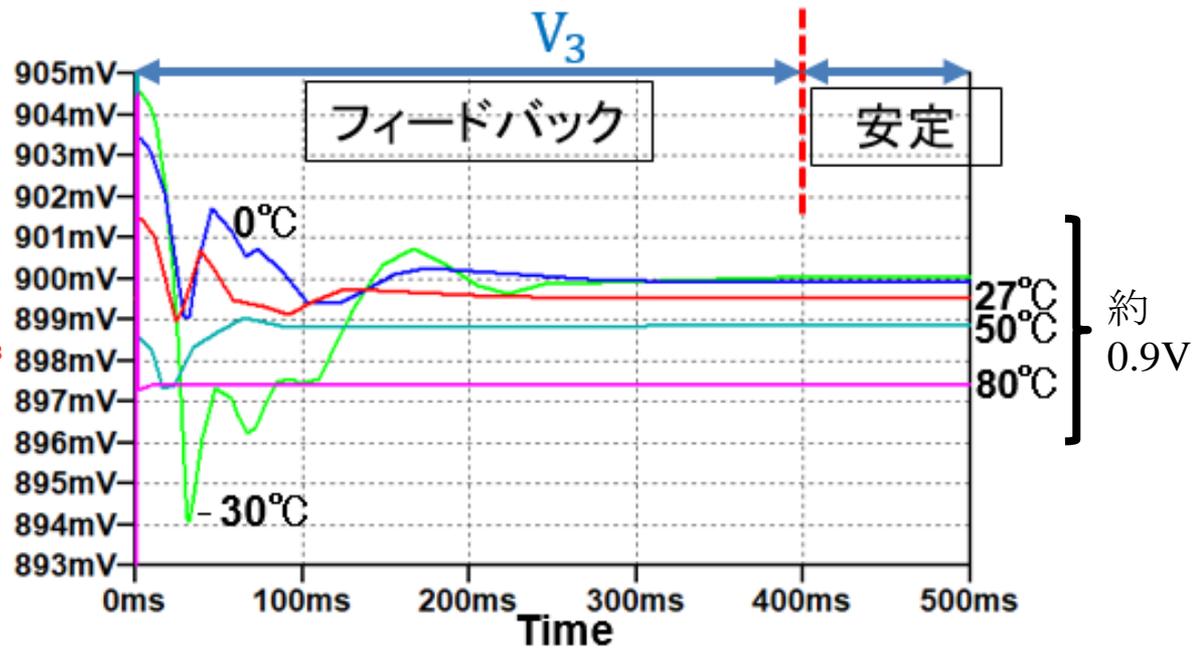


図15  $V_3$ のフィードバック過程

# $R_1 = 7.5\text{k}\Omega$ に変更

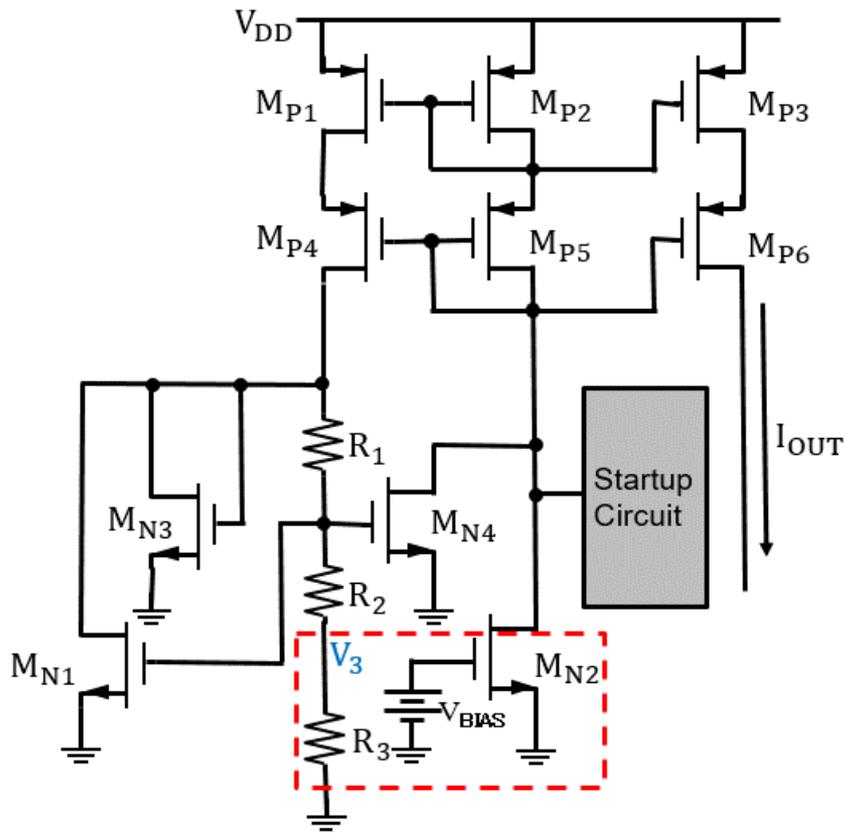


図13 バイアス電圧の生成

表3 シミュレーション条件

Parameter	Value
$M_{P1} \sim M_{P6}$	W=800 um, L=2.0 um
$M_{N1}, M_{N3}$	W=0.1 um, L=2.0 um
$M_{N2}$	W=200 um, L=2.0 um
$M_{N4}$	W=20 um, L=2.0 um
$R_1$	<b>7.5 k<math>\Omega</math></b>
$R_2$	1.61 k $\Omega$
$R_3$	1.5 k $\Omega$
$V_{DD}$	5.0 V

$R_1$ の値を7.5k $\Omega$ に変更

# $R_1 = 7.5k\Omega$ における $V_{BIAS}$ と $V_3$ の差

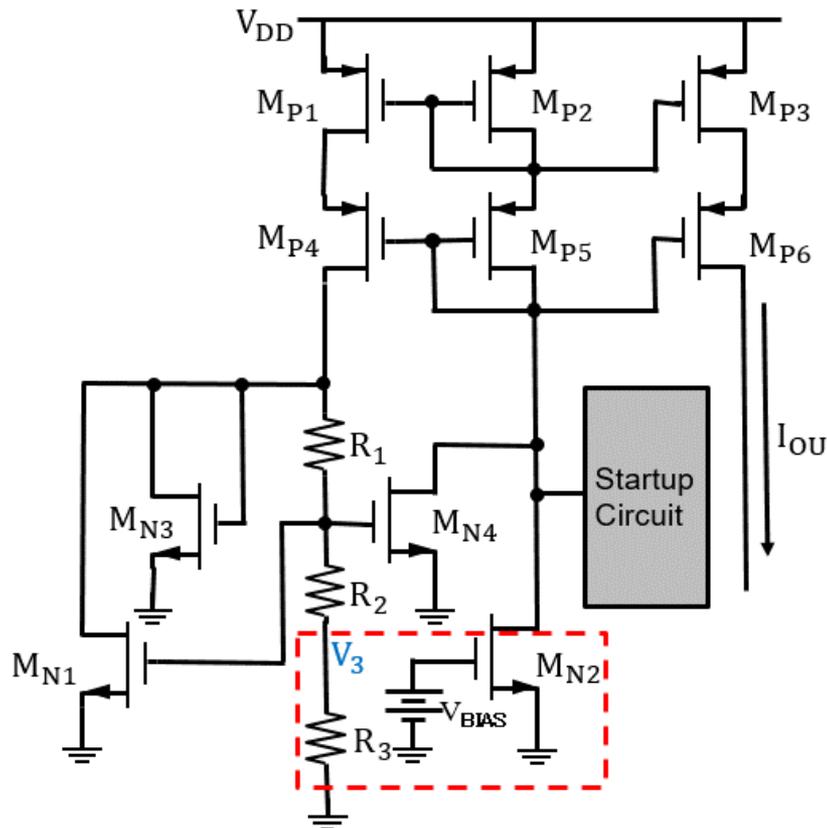


図13 バイアス電圧の生成

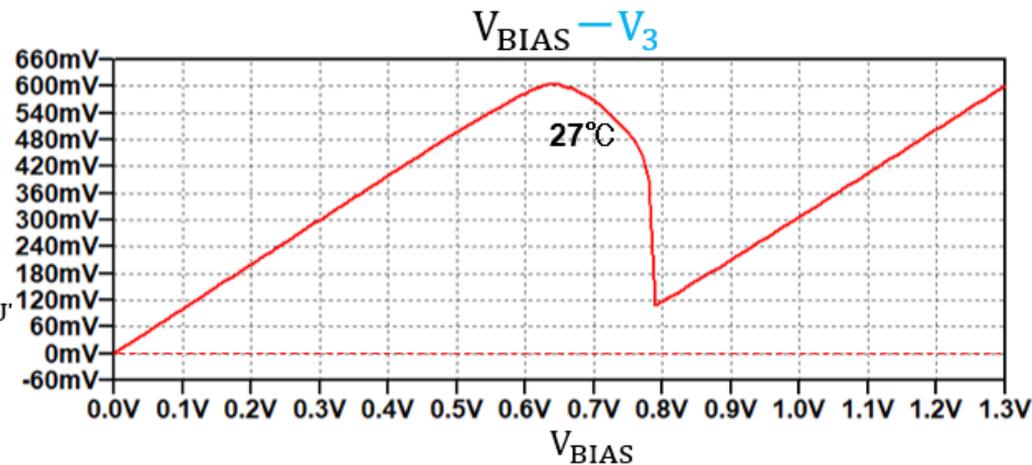


図16  $R_1 = 7.5k\Omega$ に変更後の $V_{BIAS}$ と $V_3$ の差  
( $V_{BIAS} - V_3$ )

# $R_1 = 7.5\text{k}\Omega$ におけるフィードバック

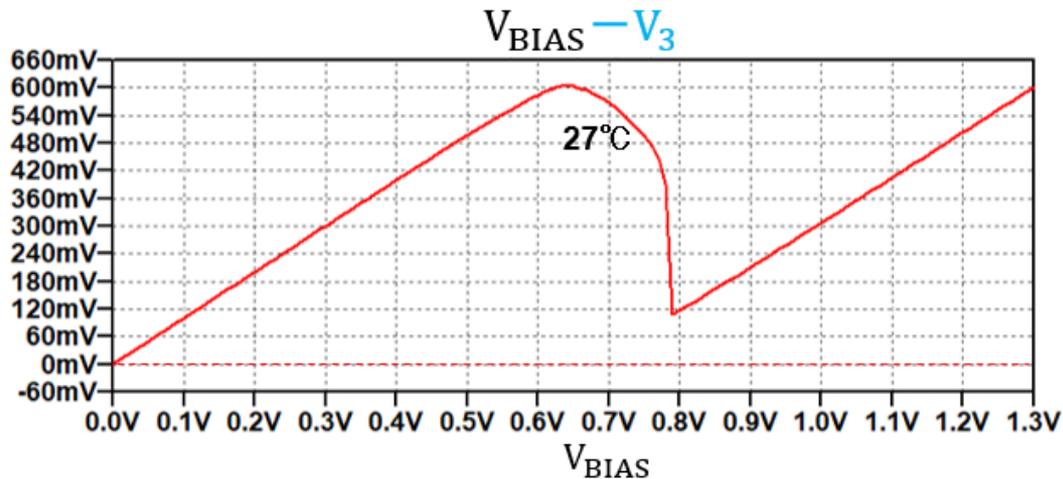


図16  $R_1=7.5\text{k}\Omega$ に変更後の $V_{\text{BIAS}}$ と $V_3$ の差( $V_{\text{BIAS}}-V_3$ )

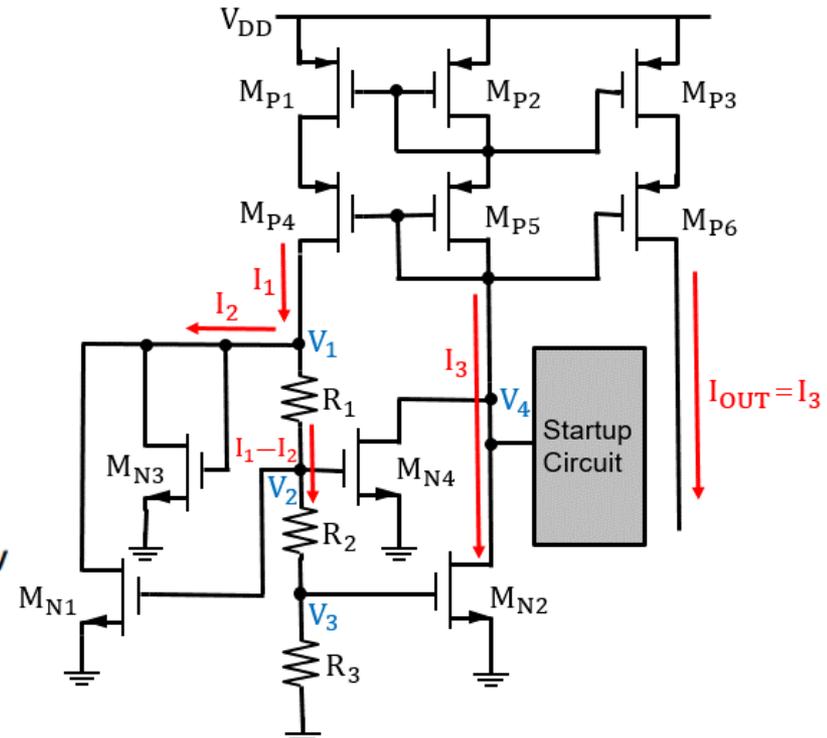


図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

(提案回路において)

$V_{\text{BIAS}} - V_3$  が常に正 :  $V_3$  が常に  $M_{N2}$  のゲート電圧 ↓

# 提案回路でのシミュレーション( $R_1 = 7.5k\Omega$ )

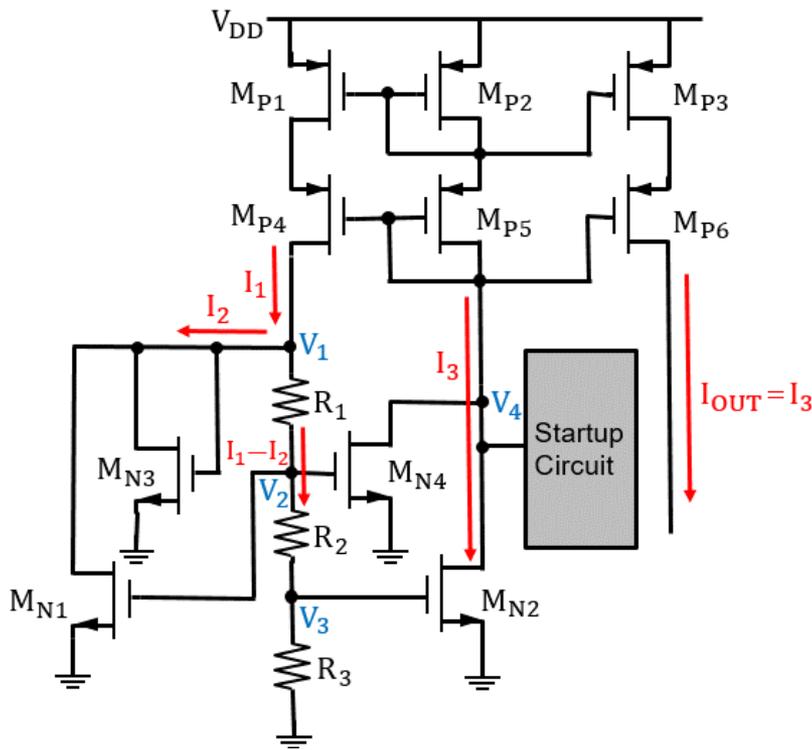


図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

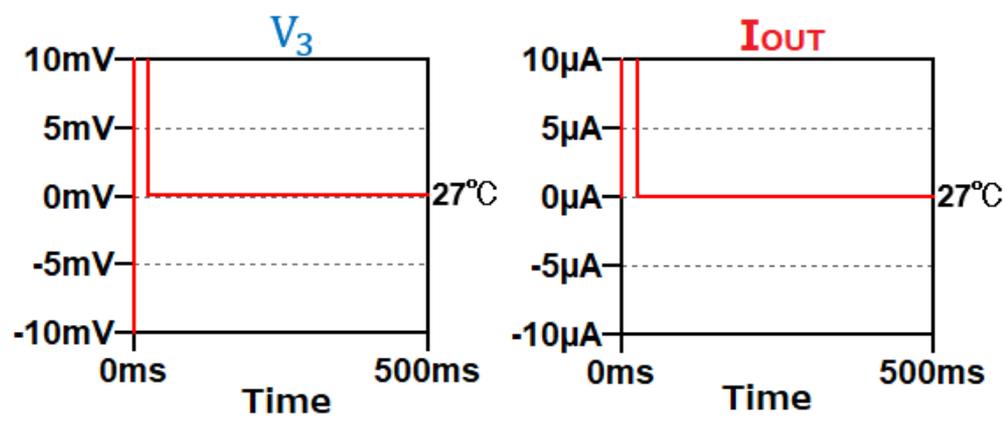


図17  $R_1=7.5k\Omega$ に変更後の $V_3$ と $I_{OUT}$ の値

**$I_{OUT}$ : 電流不通状態に遷移**

# $R_1 = 6.2k\Omega$ に変更

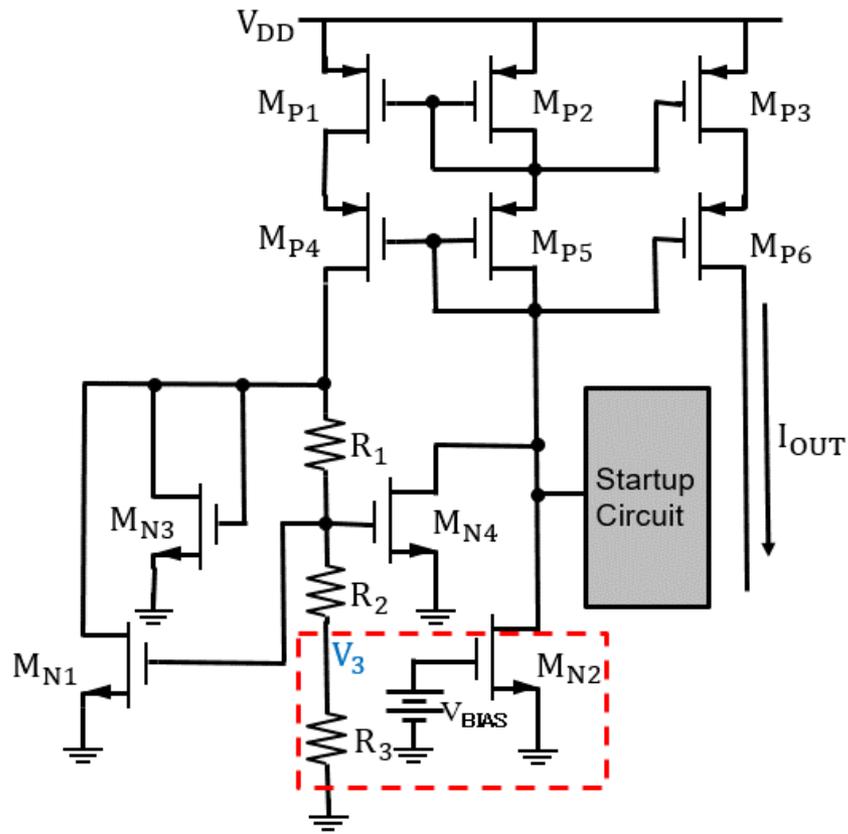


図13 バイアス電圧の生成

表4 シミュレーション条件

Parameter	Value
$M_{P1} \sim M_{P6}$	W=800 um, L=2.0 um
$M_{N1}, M_{N3}$	W=0.1 um, L=2.0 um
$M_{N2}$	W=200 um, L=2.0 um
$M_{N4}$	W=20 um, L=2.0 um
$R_1$	<b>6.2k <math>\Omega</math></b>
$R_2$	1.61k $\Omega$
$R_3$	1.5 k $\Omega$
$V_{DD}$	5.0 V

$R_1$ の値を6.2k $\Omega$ に変更

# $R_1 = 6.2\text{k}\Omega$ における $V_{\text{BIAS}}$ と $V_3$ の差

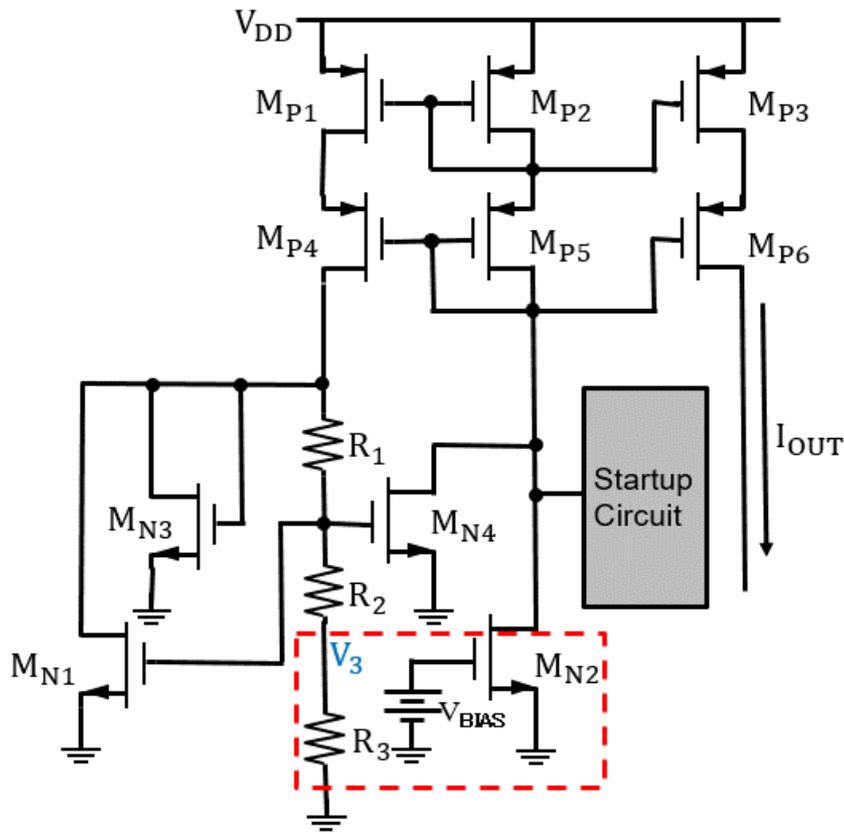


図13 バイアス電圧の生成

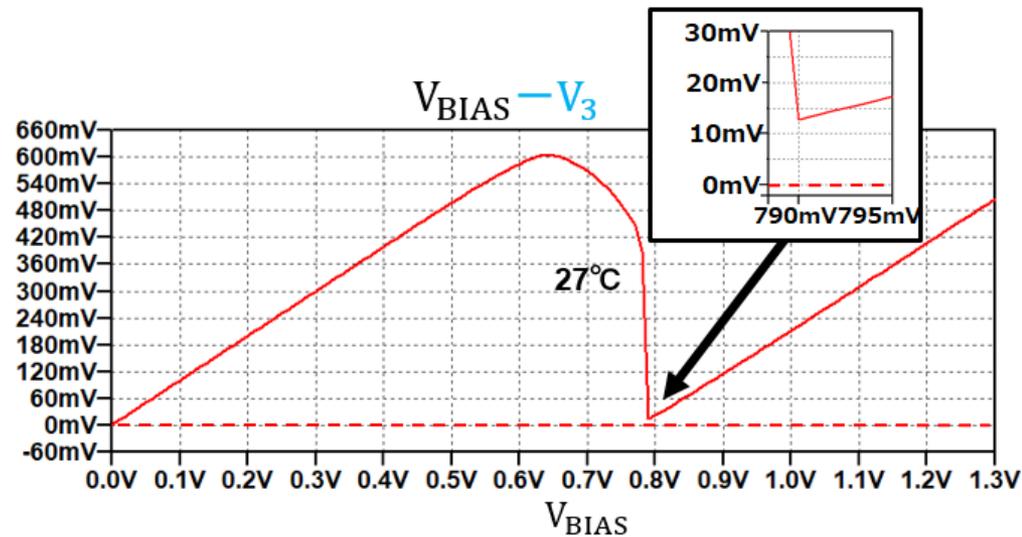


図18  $R_1 = 6.2\text{k}\Omega$ に変更後の $V_{\text{BIAS}}$ と $V_3$ の差  
( $V_{\text{BIAS}} - V_3$ )

# $R_1 = 6.2k\Omega$ におけるフィードバック

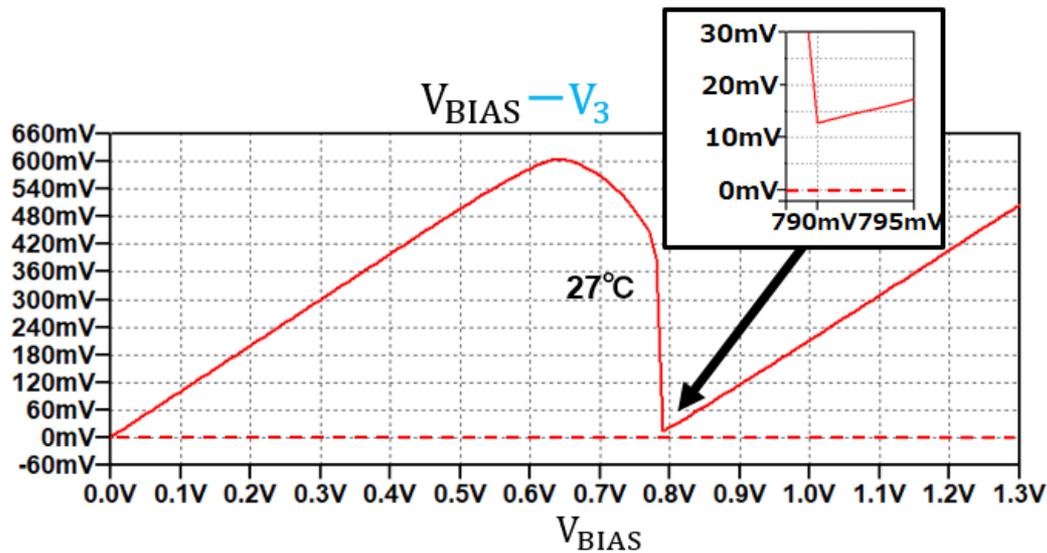


図18  $R_1=6.2k\Omega$ に変更後の $V_{BIAS}$ と $V_3$ の差( $V_{BIAS} - V_3$ )

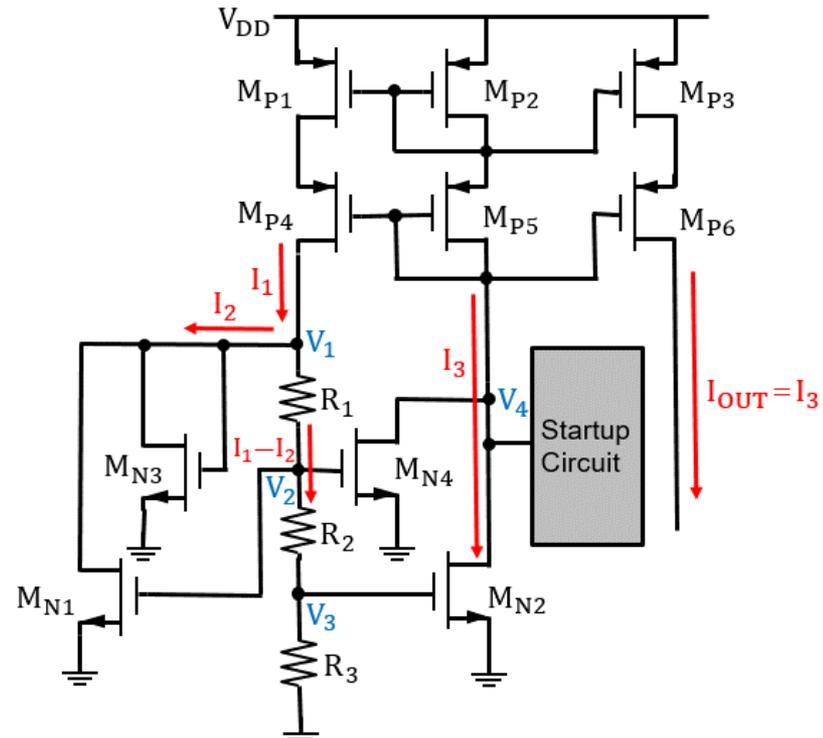


図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

(提案回路において)

$V_{BIAS} - V_3$  が常に正 :  $V_3$  が常に  $M_{N2}$  のゲート電圧 ↓

# 提案回路でのシミュレーション( $R_1 = 6.2k\Omega$ )

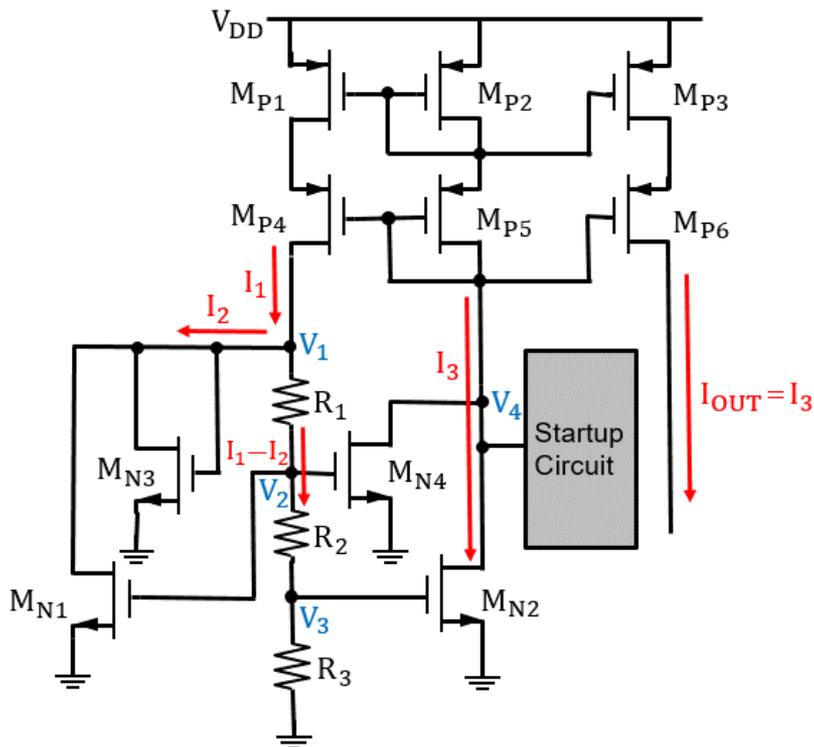


図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

電流が流れる状態と流れない状態の境目→不安定

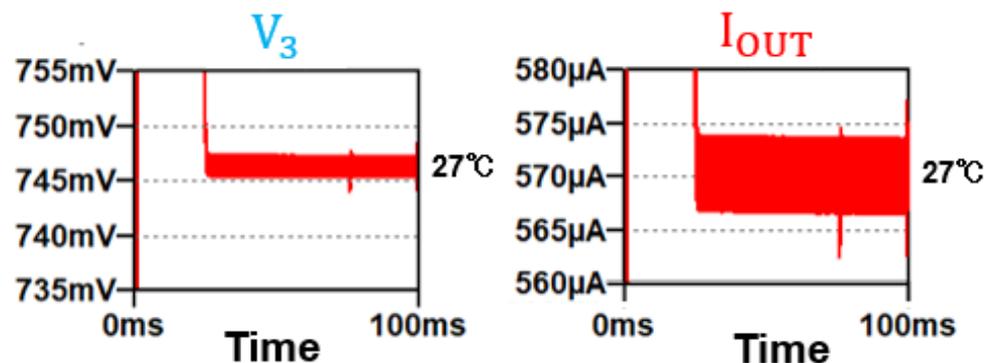


図19  $R_1=6.2k\Omega$ に変更後の $V_3$ と $I_{OUT}$ の値

$V_3$ 、 $I_{OUT}$ : 不安定状態に遷移

# $R_1 = 6k\Omega$ に変更

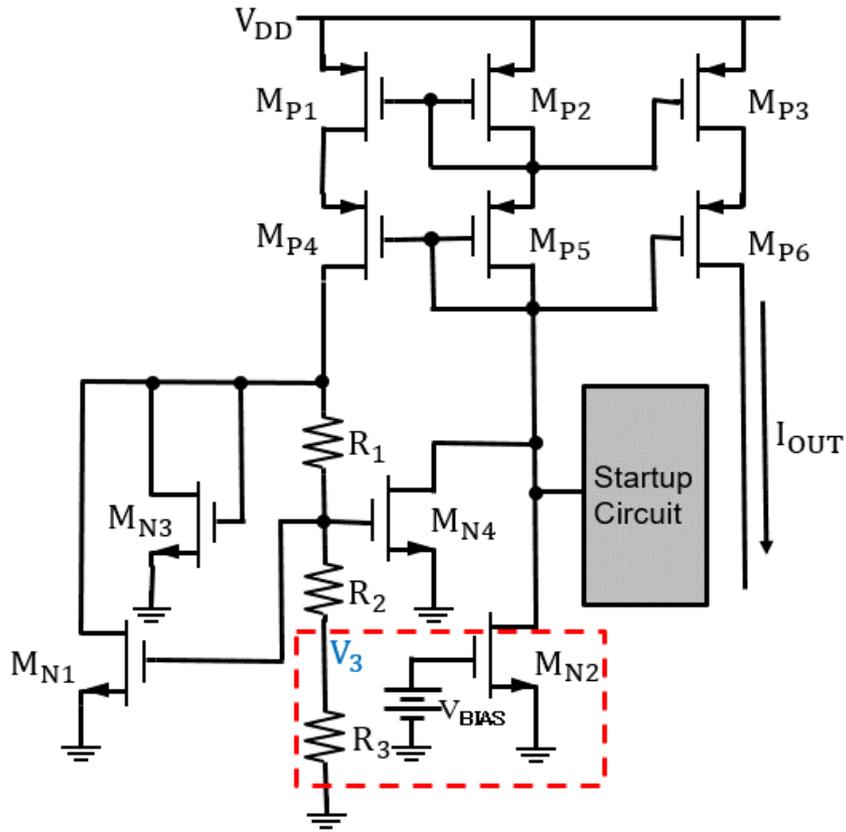


図13 バイアス電圧の生成

表5 シミュレーション条件

Parameter	Value
$M_{P1} \sim M_{P6}$	W=800 um, L=2.0 um
$M_{N1}, M_{N3}$	W=0.1 um, L=2.0 um
$M_{N2}$	W=200 um, L=2.0 um
$M_{N4}$	W=20 um, L=2.0 um
$R_1$	<b>6k <math>\Omega</math></b>
$R_2$	1.61k $\Omega$
$R_3$	1.5k $\Omega$
$V_{DD}$	5.0 V

$R_1$ の値を6k $\Omega$ に変更

# $R_1 = 6k\Omega$ における $V_{BIAS}$ と $V_3$ の差

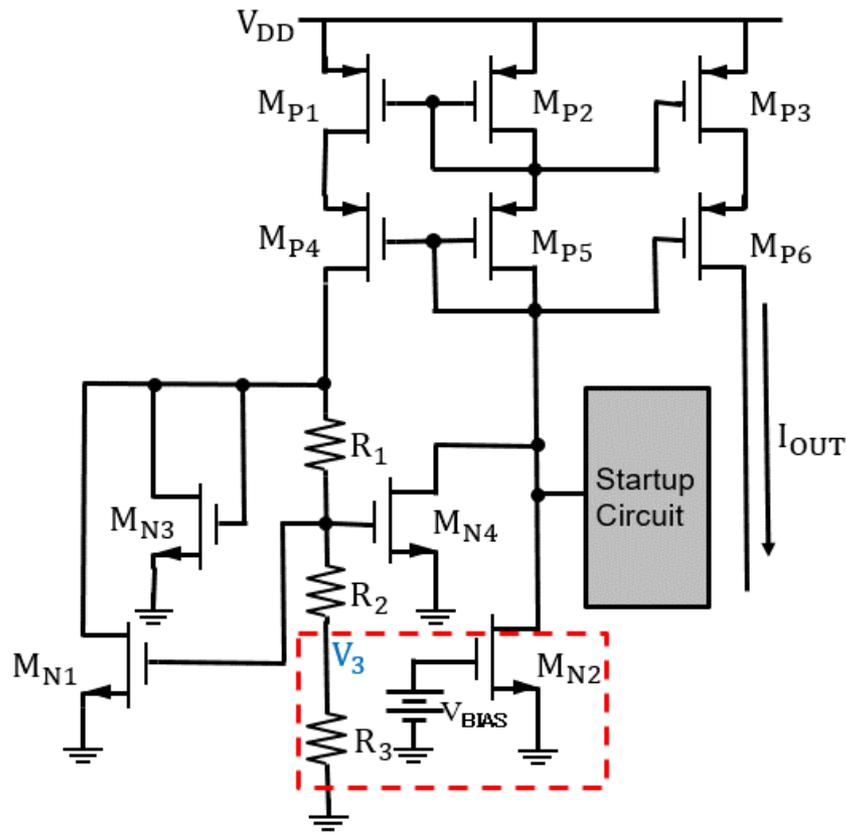


図13 バイアス電圧の生成

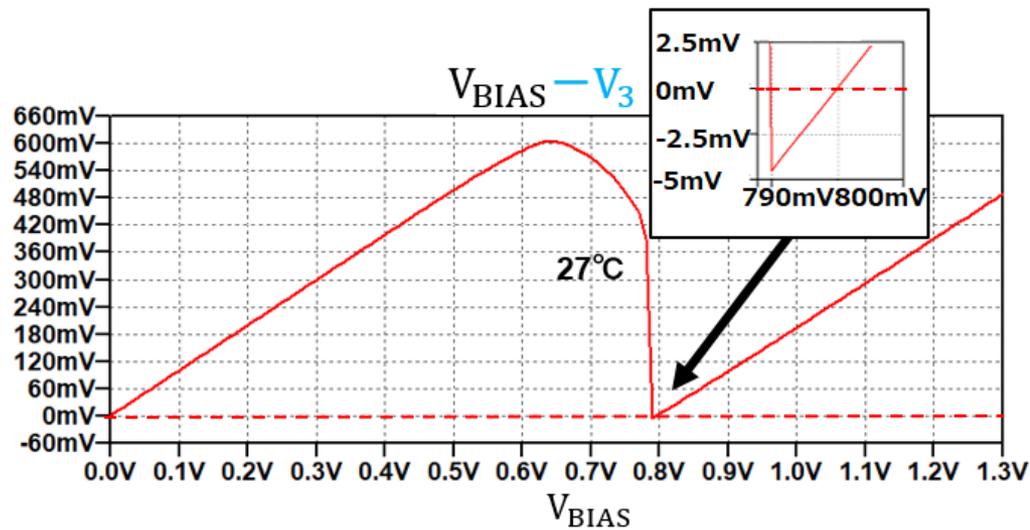


図20  $R_1 = 6k\Omega$ に変更後の $V_{BIAS}$ と $V_3$ の差  
( $V_{BIAS} - V_3$ )

# $R_1 = 6k\Omega$ におけるフィードバック

$V_{BIAS}$ と $V_3$ の大きさが2回逆転

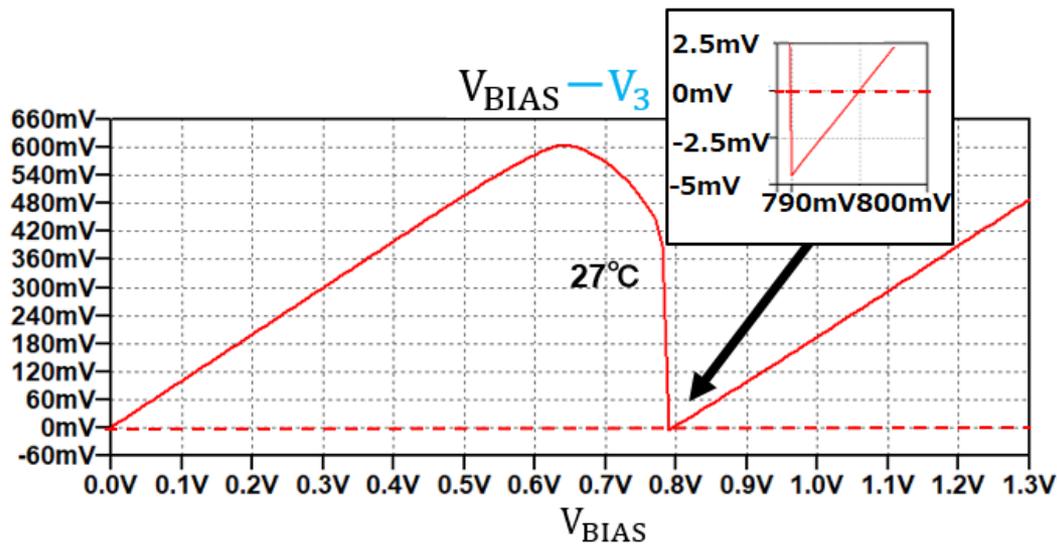


図20  $R_1=6k\Omega$ に変更後の $V_{BIAS}$ と $V_3$ の差( $V_{BIAS} - V_3$ )

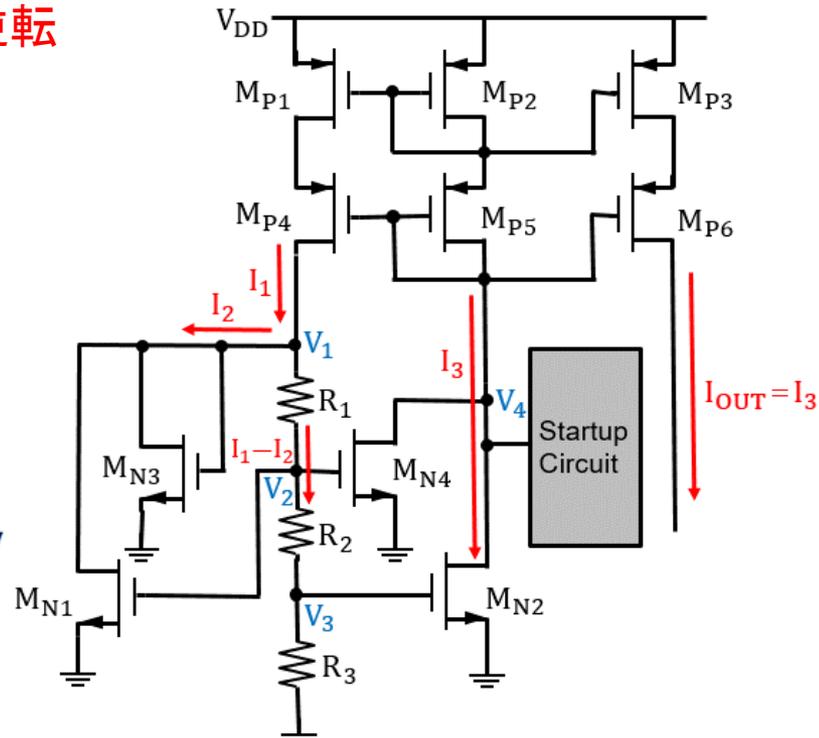


図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

(提案回路において)

$V_{BIAS} - V_3$  が負 ( $V_{BIAS}: 790mV \sim 795mV$ ) :  $V_3$  が  $M_{N2}$  のゲート電圧  $\uparrow$

$V_{BIAS} - V_3$  が正 ( $V_{BIAS}: 795mV$ 以上) :  $V_3$  が  $M_{N2}$  のゲート電圧  $\downarrow$

$V_3$  が約795mVに安定

# 提案回路でのシミュレーション( $R_1 = 6k\Omega$ )

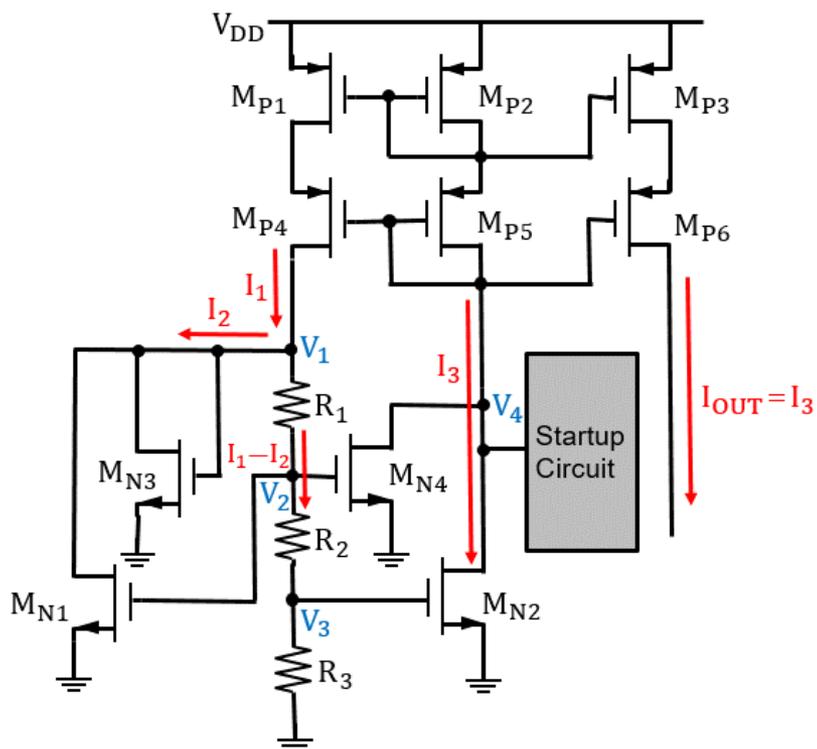


図7 カスコード接続を用いた温度不感型 MOS 定電流源

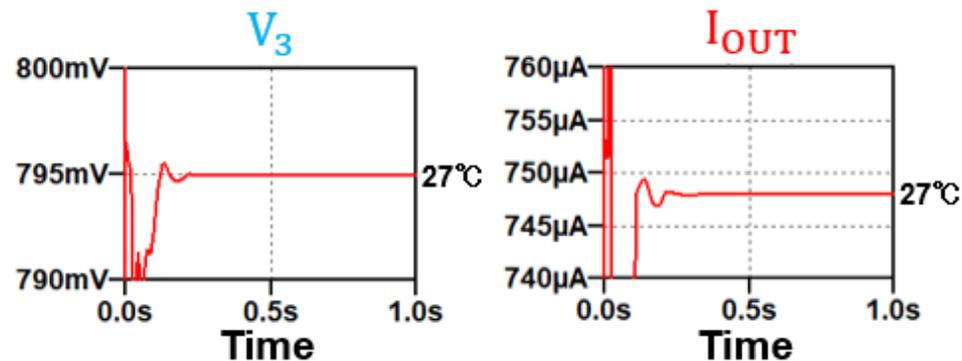


図21  $R_1=6k\Omega$ に変更後の $V_3$ と $I_{OUT}$ の値

$V_3$ : 約795mV  
 $I_{OUT}$ : 約748µA  
 に安定

# 提案回路の安定条件

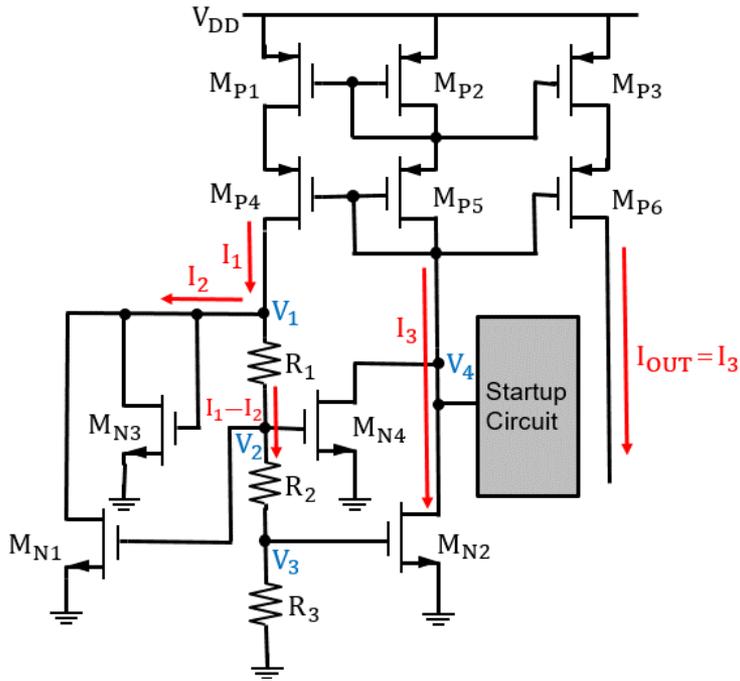


図7 カスコード接続を用いた温度不感型MOS 定電流源

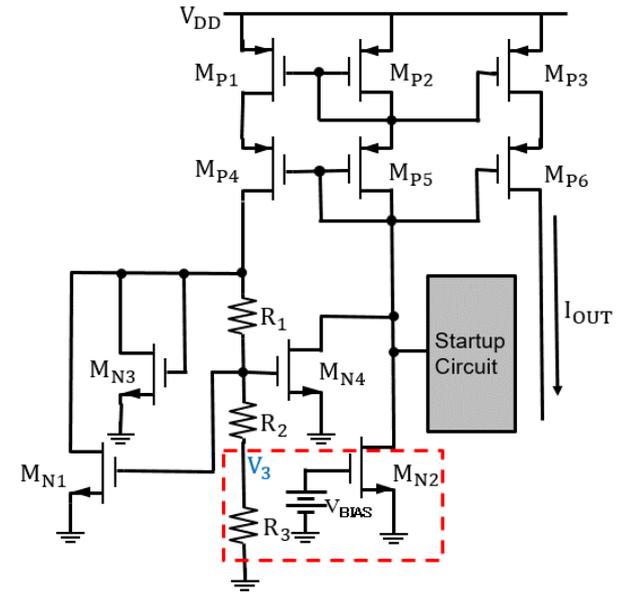
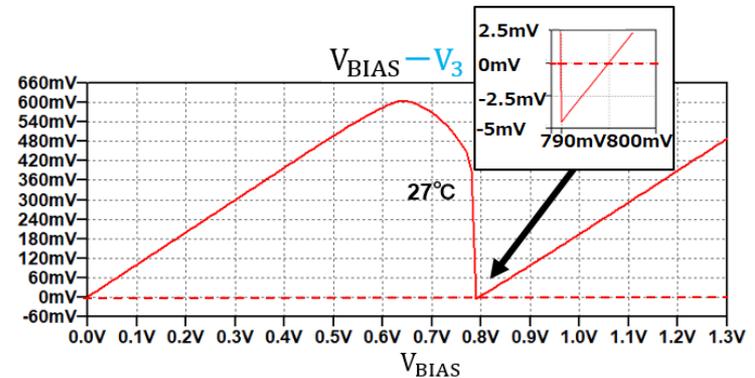


図13 バイアス電圧の生成



DC 解析  $V_{BIAS}$

$V_{BIAS}$  と  $V_3$  の大きさが2回逆転  $\Rightarrow$  回路安定

# OUTLINE

- 研究目的
- MOS FET の温度特性
- 温度に依存しないMOS定電流源のコンセプト
- 自己バイアスを用いた回路提案
- シミュレーションによる提案回路の動作と安定性検証
- まとめ

# まとめ

- まとめ
  - MOS FETの温度特性をキャンセルする回路のコンセプトを紹介した。
  - 自己バイアスを用いることにより、提案回路においてMOS FETの温度特性をキャンセルできることを確認した。
  - LTspiceシミュレーションによって提案回路の動作と安定性する条件について検証を行った。
- 今後の課題
  - 電源電圧の変動の影響を調べる。

# 受けた質問・コメント

- この回路を持ってこなければならぬのはどんな状況か。どのようなものがこの回路の用途としてふさわしいのか。
- $M_{N2}$ と $M_{N4}$ のゲート部分でループを切って、オープンループにした状態のオープンループの利得を調べて安定条件を満たすかどうかを調べれば、すべてのパラメータに対して一般的な解が見えるのではないか。

