

温度及び電源電圧に依存しない 改良永田穰電流ミラー回路

○細野貴司 平野繭 井田貴士 串田弥音 柴崎有祈子 築地伸和(群馬大学)
諸島洋一 原川弘道 及川武士(エー・エス・オー(株))
桑名杏奈 小林春夫(群馬大学)

群馬大学理工学部電子情報理工学科
情報通信システム第2 小林研究室
4年 細野貴司

OUTLINE

- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 永田穰電流ミラー回路
- ◆ 従来の改良回路案(平野電流源)
- ◆ MOSFETの温度特性
- ◆ 提案回路
 - └ シミュレーション結果
- ◆ 様々な抵抗温度係数の場合
 - └ シミュレーション結果
- ◆ まとめ

OUTLINE

- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 永田穰電流ミラー回路
- ◆ 従来の改良回路案(平野電流源)
- ◆ MOSFETの温度特性
- ◆ 提案回路
 - └ シミュレーション結果
- ◆ 様々な抵抗温度係数の場合
 - └ シミュレーション結果
- ◆ まとめ

研究背景

多くのアナログICは**基準電流源** (電圧源) が必要



PVT変動に対して安定

P: Process (プロセス)

V: Supply voltage (電源電圧)

T: Temperature (温度)

バンドギャップリファレンス回路



- 複雑な構成
- 面積が大きい

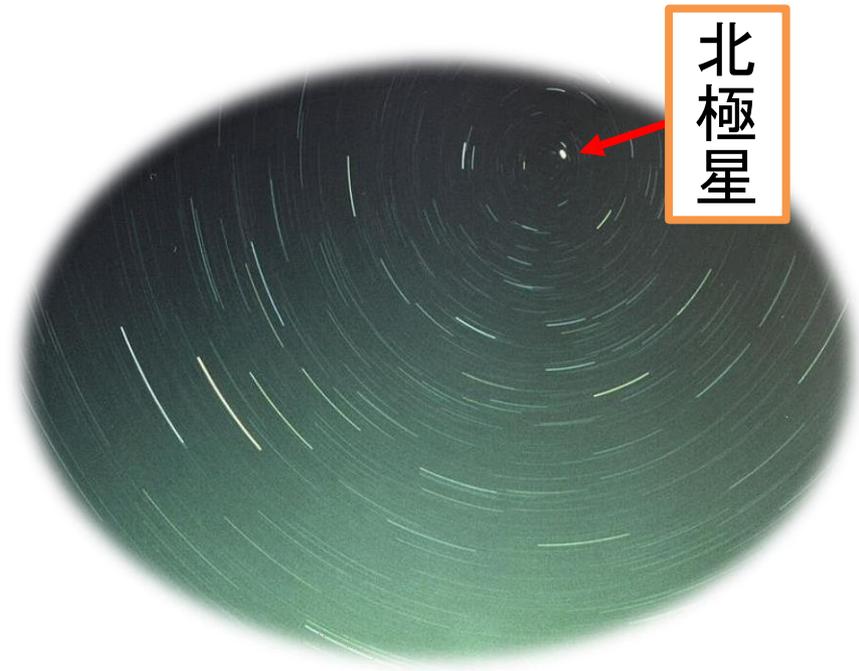
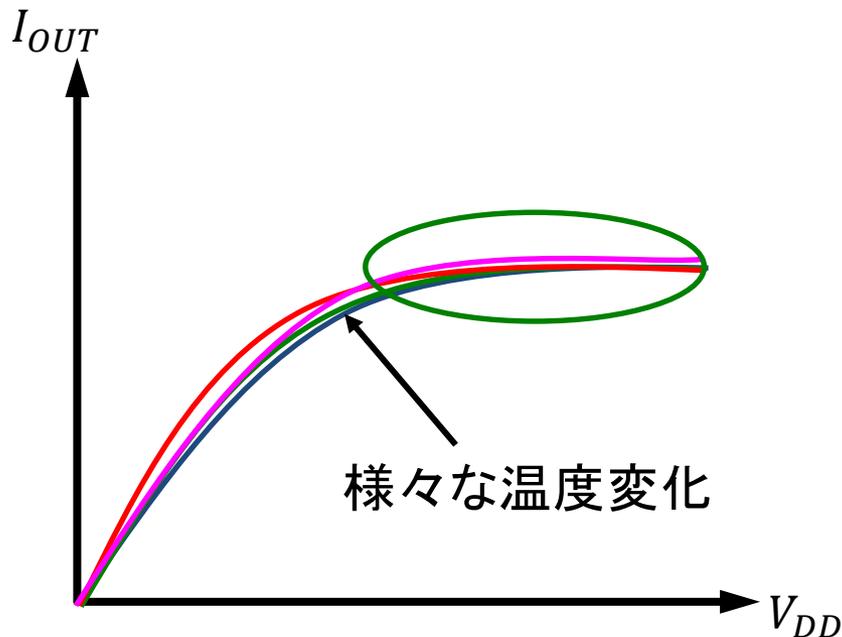
永田穰電流ミラー回路



- シンプルな構成
- 電源電圧の変動に対して一定の電流を持つ

研究目的

永田穰電流ミラー回路をもとに
簡単な構成で、ある程度精度が良い
電源電圧及び温度が変動しても、
一定の電流を出力できる回路の設計



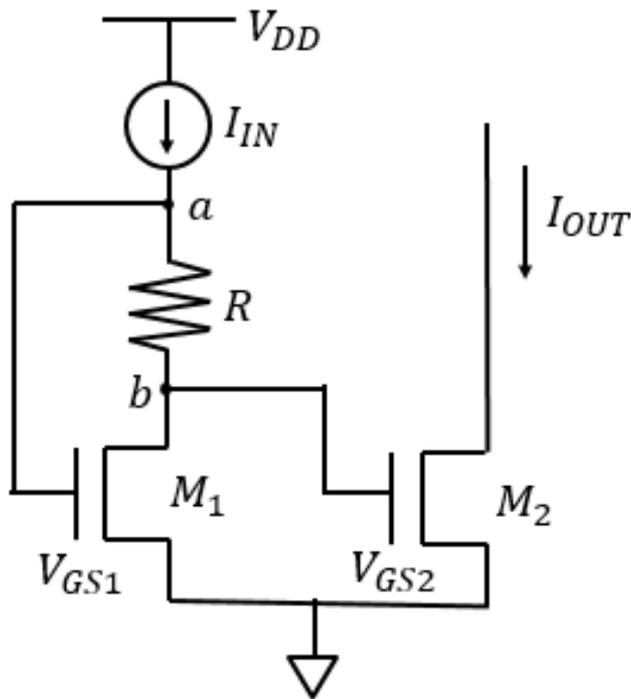
北極星

周りの環境の変化に影響されない

OUTLINE

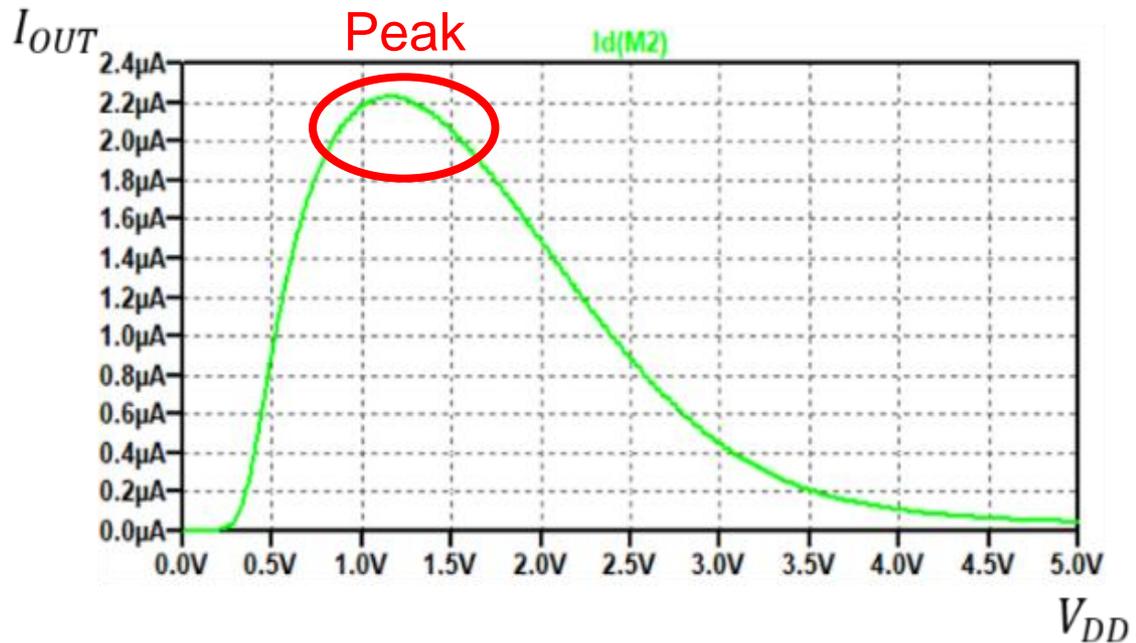
- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 永田穰電流ミラー回路
- ◆ 従来の改良回路案(平野電流源)
- ◆ MOSFETの温度特性
- ◆ 提案回路
 - ↳ シミュレーション結果
- ◆ 様々な抵抗温度係数の場合
 - ↳ シミュレーション結果
- ◆ まとめ

永田穰電流ミラー回路



永田電流ミラー回路

発明 1966年 永田穰氏



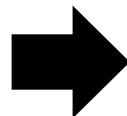
永田電流ミラー回路の特性

入力電流において出力電流がピークを持つ



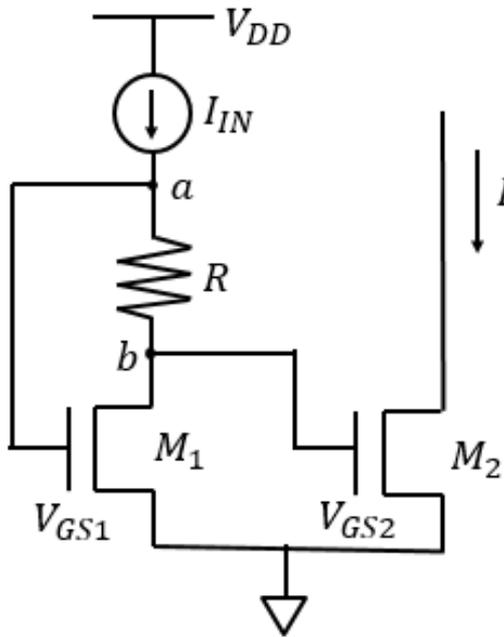
電源電圧に対する出力電流の変動を抑えている

シンプルな構成



DC-DC converter ICなどに使用

ピークを持つ理由



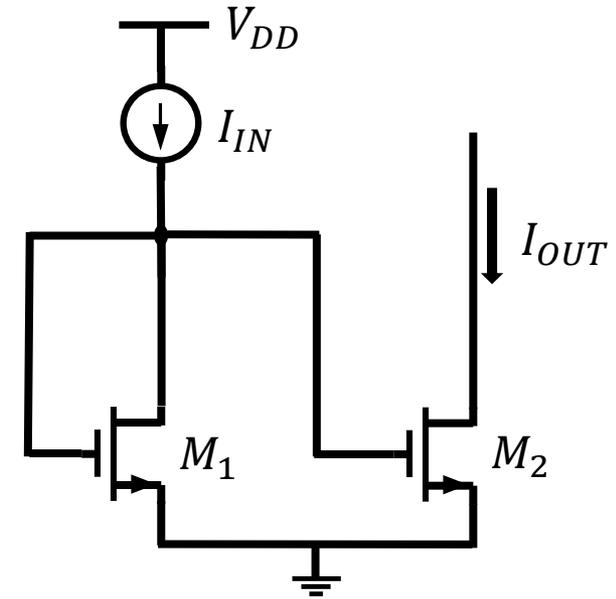
永田電流ミラー回路

I_{IN} が小さい場合

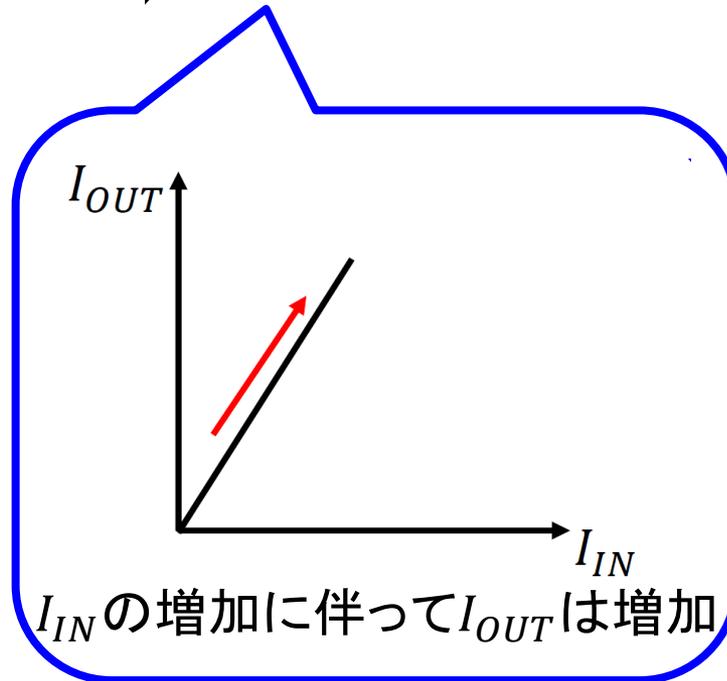


電圧降下 RI_{IN} が小さい

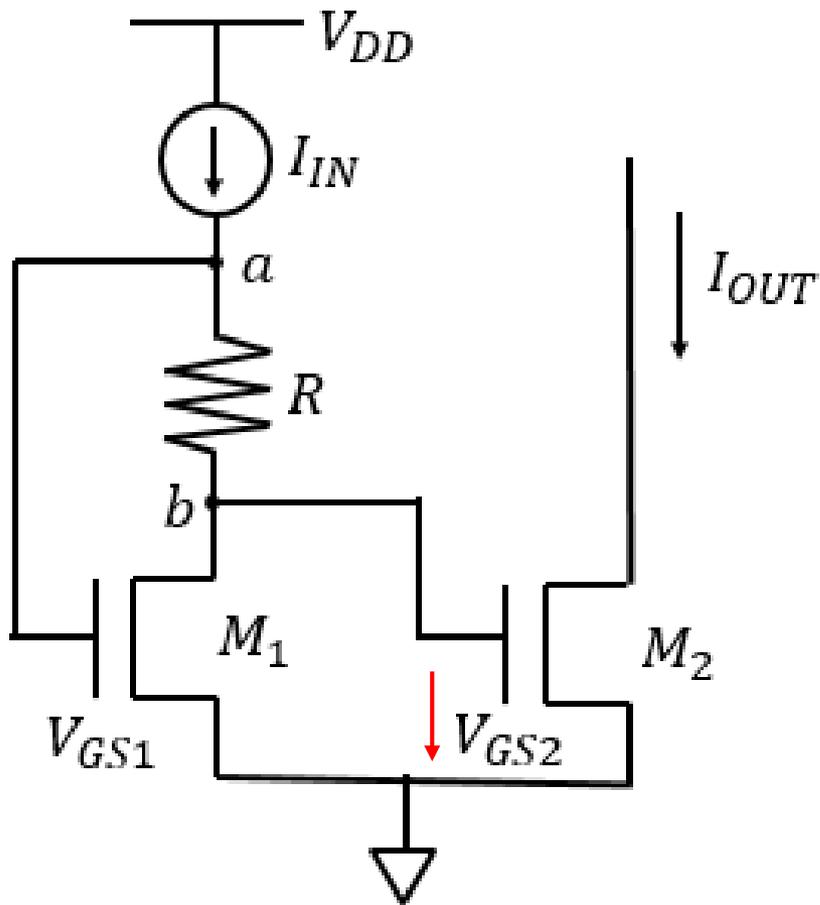
$$\Rightarrow I_{IN} = I_{OUT}$$



カレントミラー回路



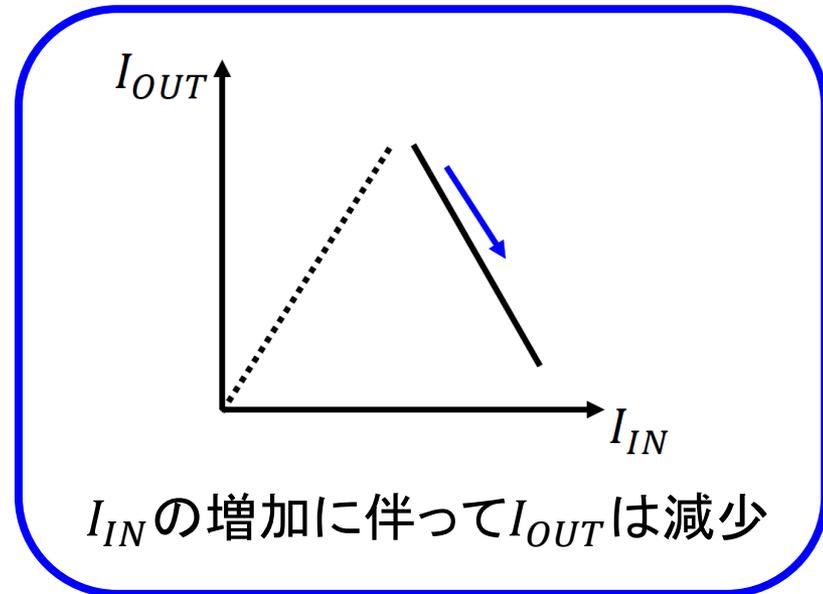
ピークを持つ理由



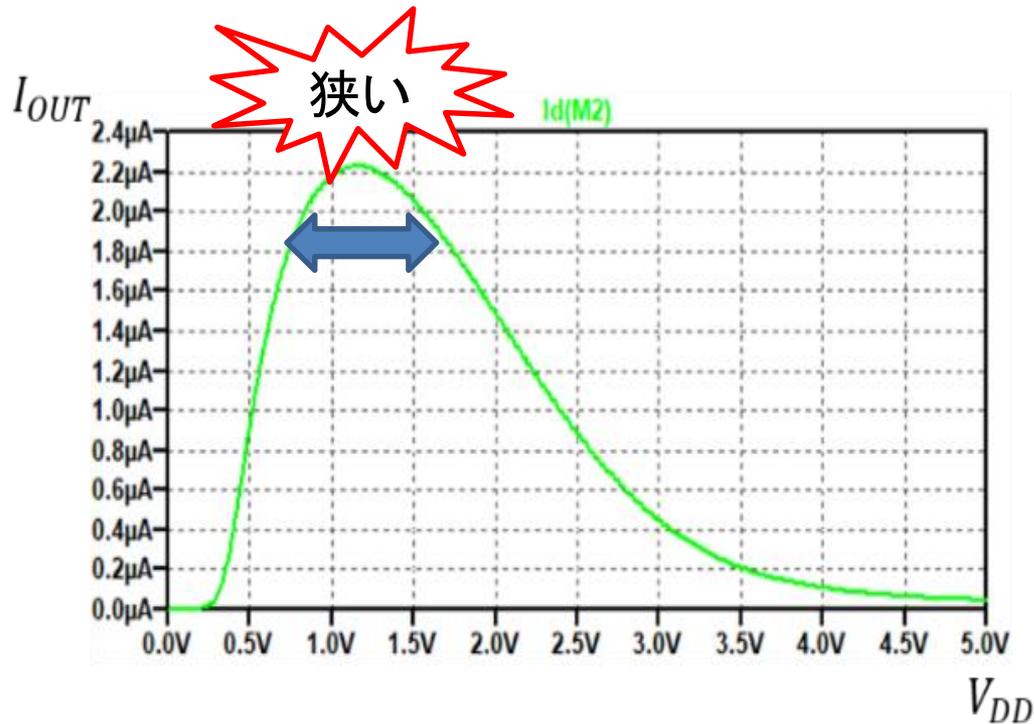
I_{IN} が大きい場合

電圧降下 RI_{IN} が大

V_{GS2} が少



永田穰電流ミラー回路の改良点



改良の余地

出力電流が一定となる範囲が
非常に狭い

↓
広げる

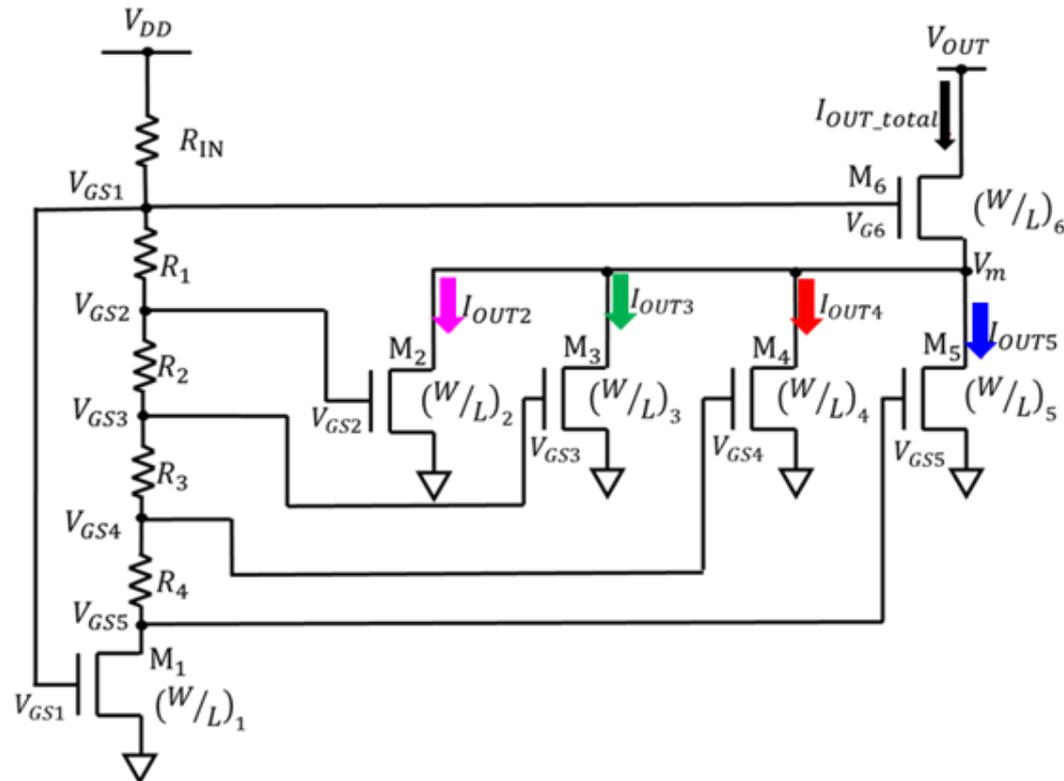
方針

複数の永田穰電流ミラー回路を
用いて異なるピークを足し合わせる

OUTLINE

- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 永田穰電流ミラー回路
- ◆ 従来の改良回路案(平野電流源)
- ◆ MOSFETの温度特性
- ◆ 提案回路
 - └ シミュレーション結果
- ◆ 様々な抵抗温度係数の場合
 - └ シミュレーション結果
- ◆ まとめ

従来の改良回路案（平野電流源）



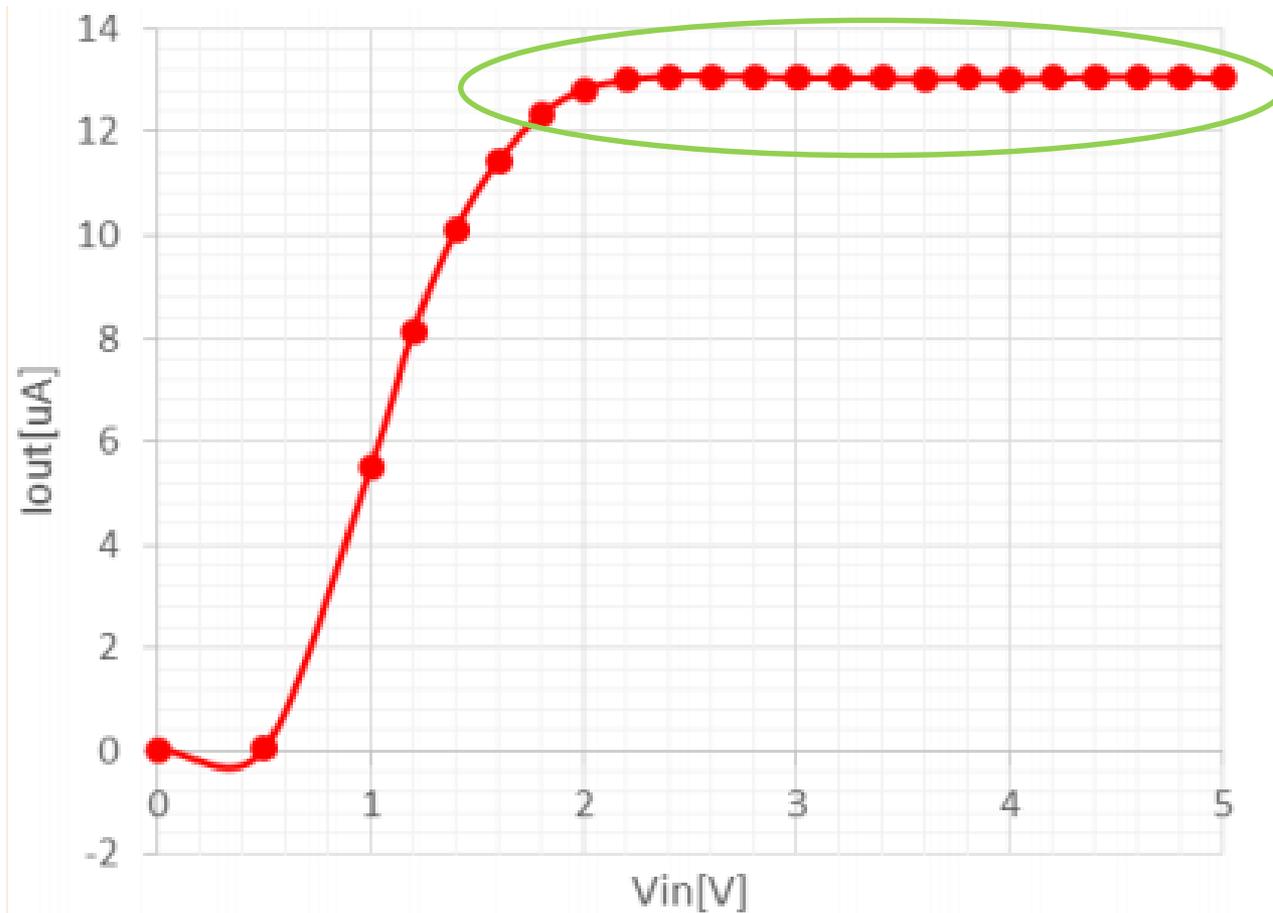
M. Hirano, N. Tsukiji, H. Kobayashi,
 "Simple Reference Current Source Insensitive to Power Supply Voltage Variation - Improved Minoru Nagata Current Source",
 IEEE 13th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Hangzhou, China (Oct. 2016).

複数の永田穰電流ミラー回路を用いて異なるピークを持つ構成



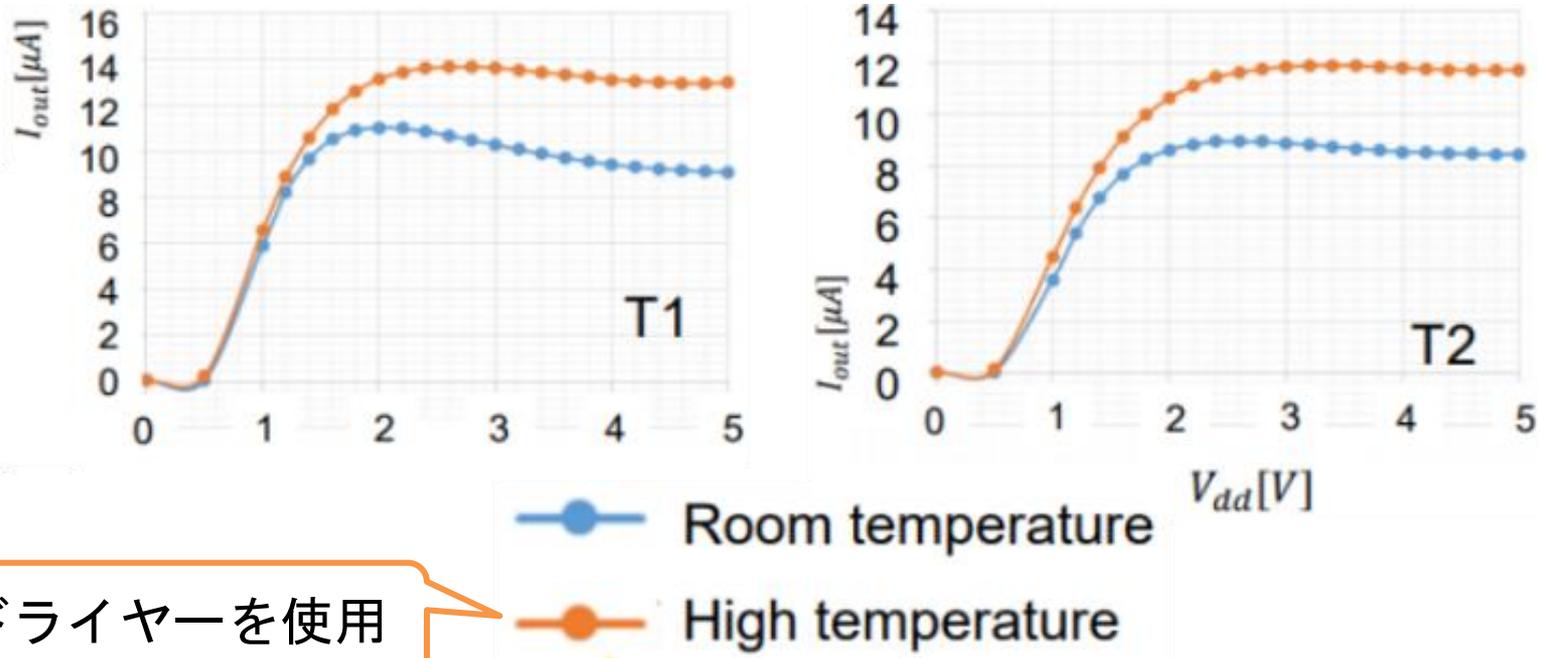
電源電圧が変動しても一定の電流を出力できる回路

従来の回路案の測定結果



シンプルな構成で総出力電流はほぼ一定のため良さそうに見える、、が...

従来の回路案の温度特性(実測値)



ヘアドライヤーを使用

温度特性を持っている

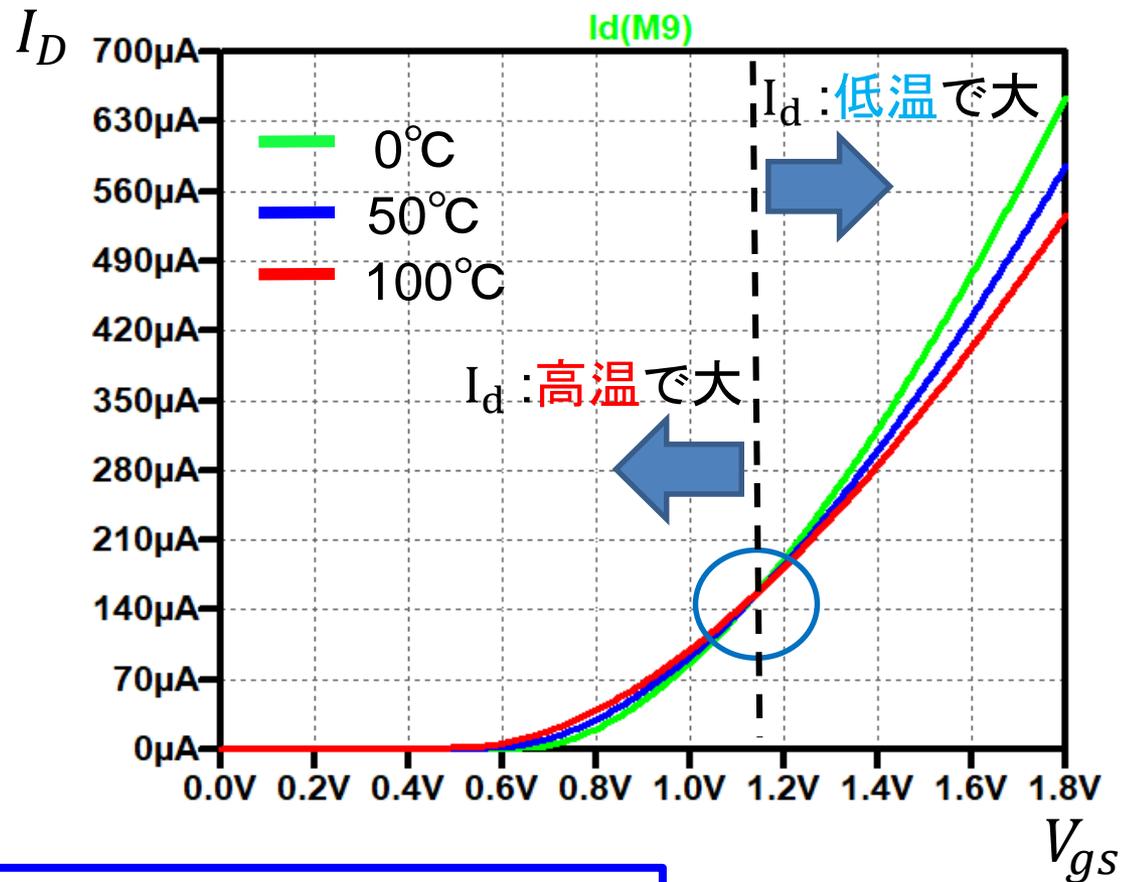
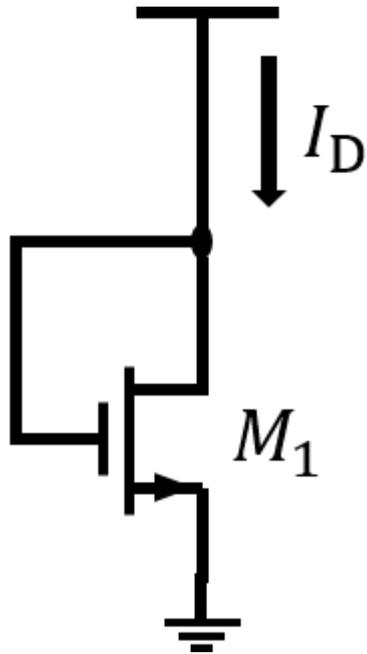


改良の余地あり

OUTLINE

- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 永田穰電流ミラー回路
- ◆ 従来の改良回路案(平野電流源)
- ◆ **MOSFETの温度特性**
- ◆ 提案回路
 - └ シミュレーション結果
- ◆ 様々な抵抗温度係数の場合
 - └ シミュレーション結果
- ◆ まとめ

MOSFETの温度特性



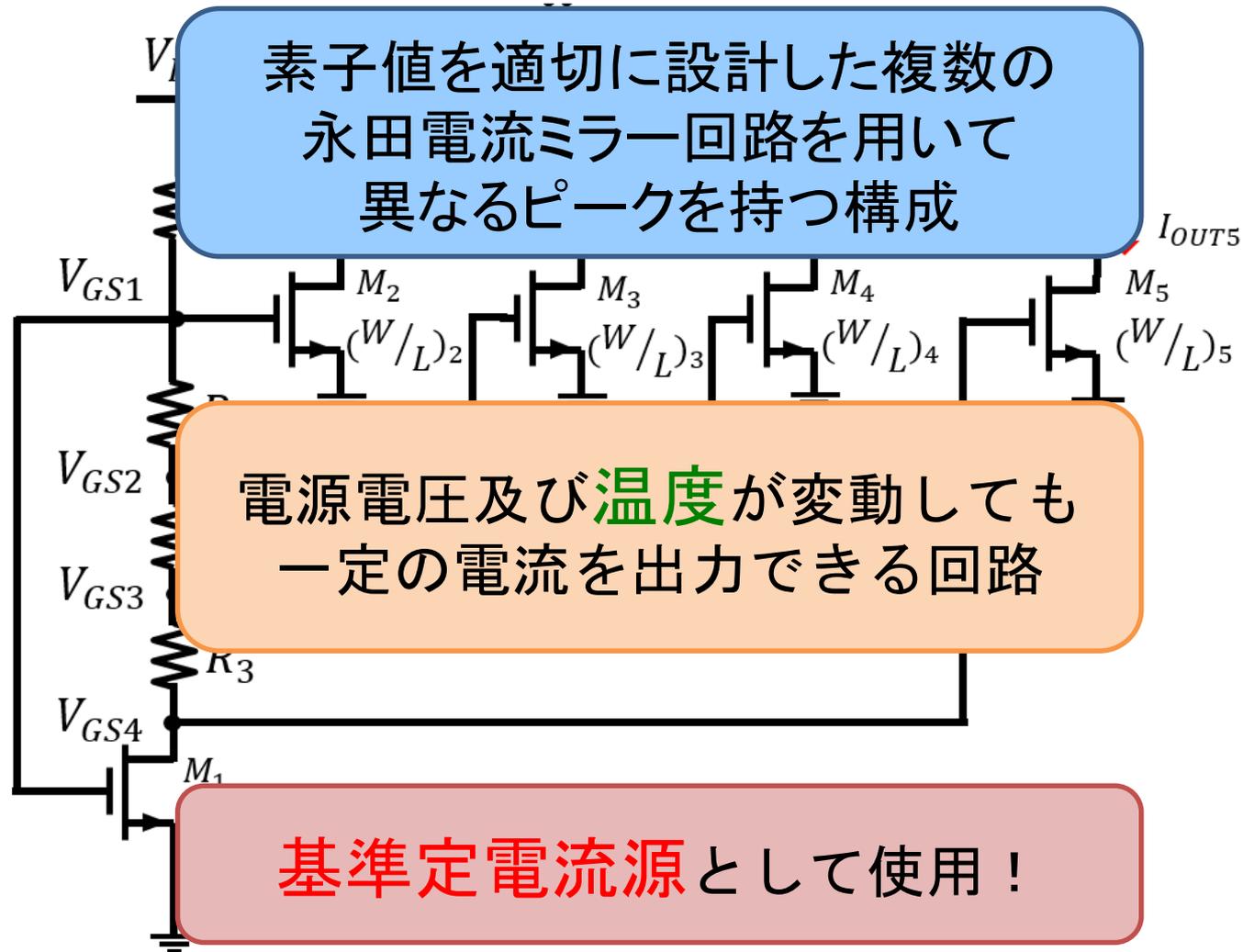
MOSFETは温度特性を持つ

利用して**温度不感**の基準電流源を作る

OUTLINE

- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 永田穰電流ミラー回路
- ◆ 従来の改良回路案(平野電流源)
- ◆ MOSFETの温度特性
- ◆ **提案回路**
 - └ シミュレーション結果
- ◆ 様々な抵抗温度係数の場合
 - └ シミュレーション結果
- ◆ まとめ

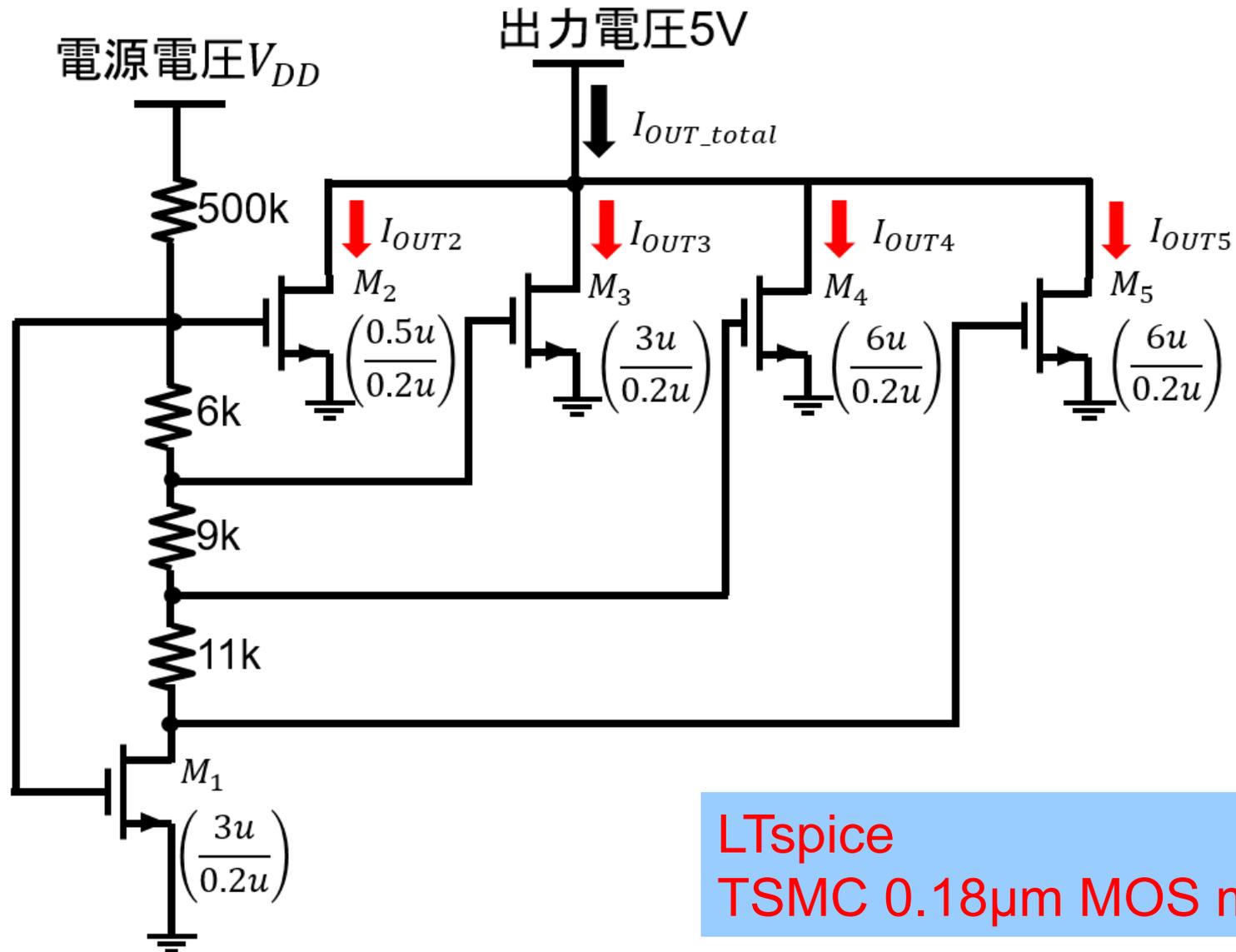
提案回路



OUTLINE

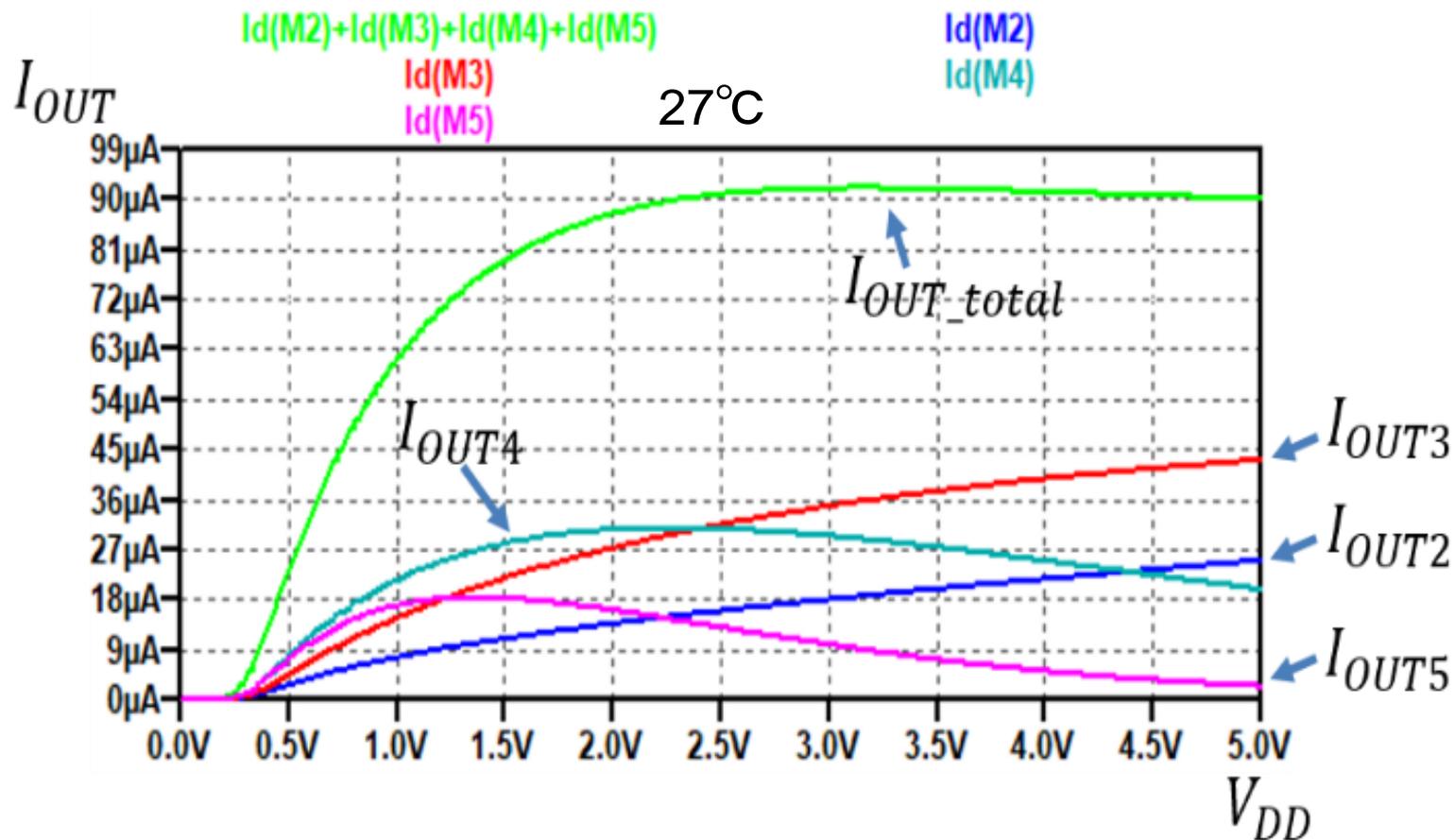
- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 永田穰電流ミラー回路
- ◆ 従来の改良回路案(平野電流源)
- ◆ MOSFETの温度特性
- ◆ **提案回路**
 - ↳ シミュレーション結果
- ◆ 様々な抵抗温度係数の場合
 - ↳ シミュレーション結果
- ◆ まとめ

SPICE シミュレーション回路



LTspice
TSMC 0.18 μ m MOS model

シミュレーション結果



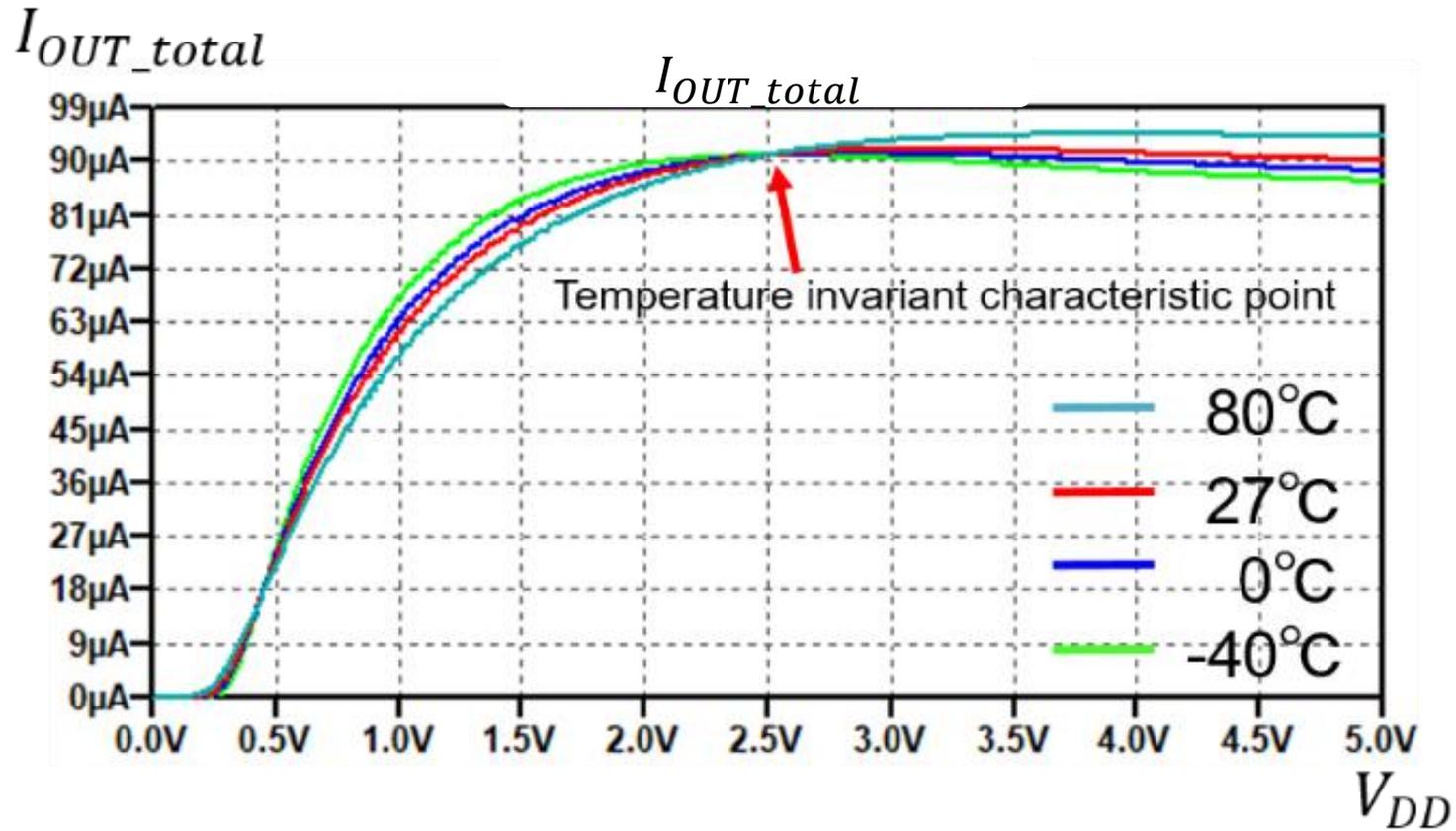
$$I_{OUT_total} \approx 90\mu\text{A}$$



V_{DD} に対して広範囲で出力電流が一定である

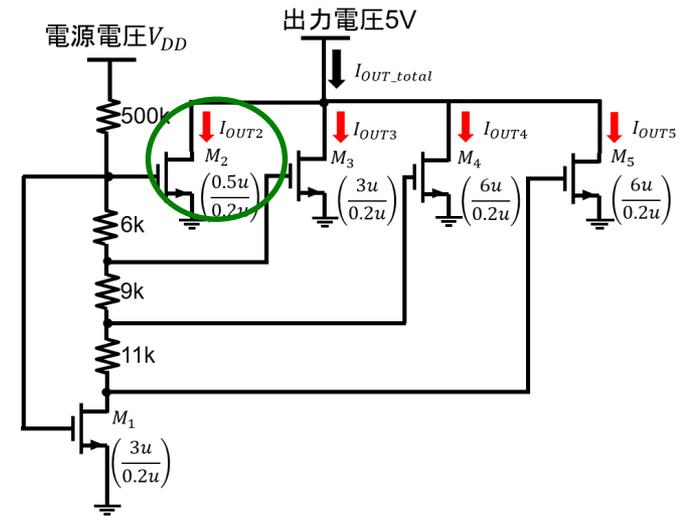
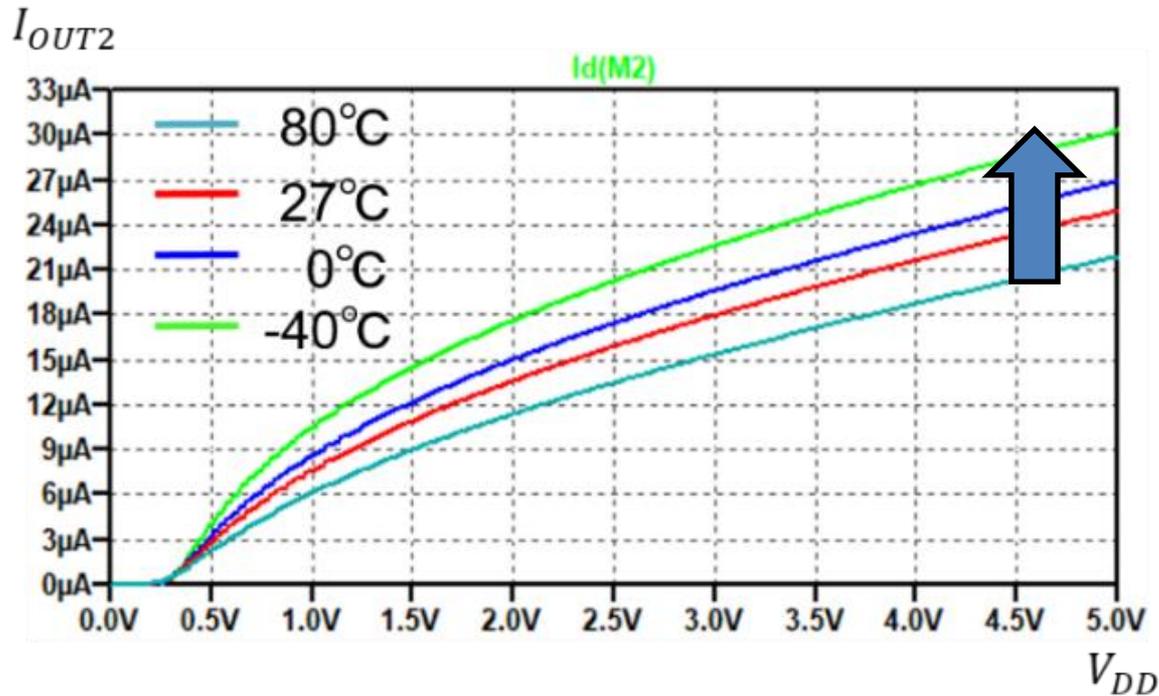
提案回路での温度変化

```
.TEMP -40 0 27 80
```



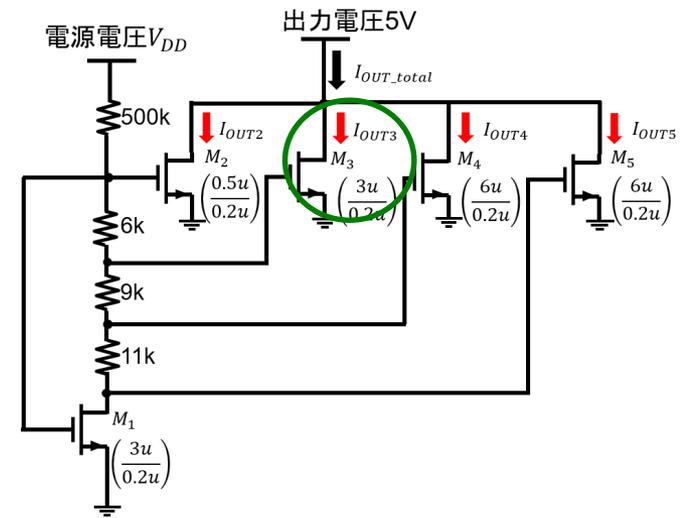
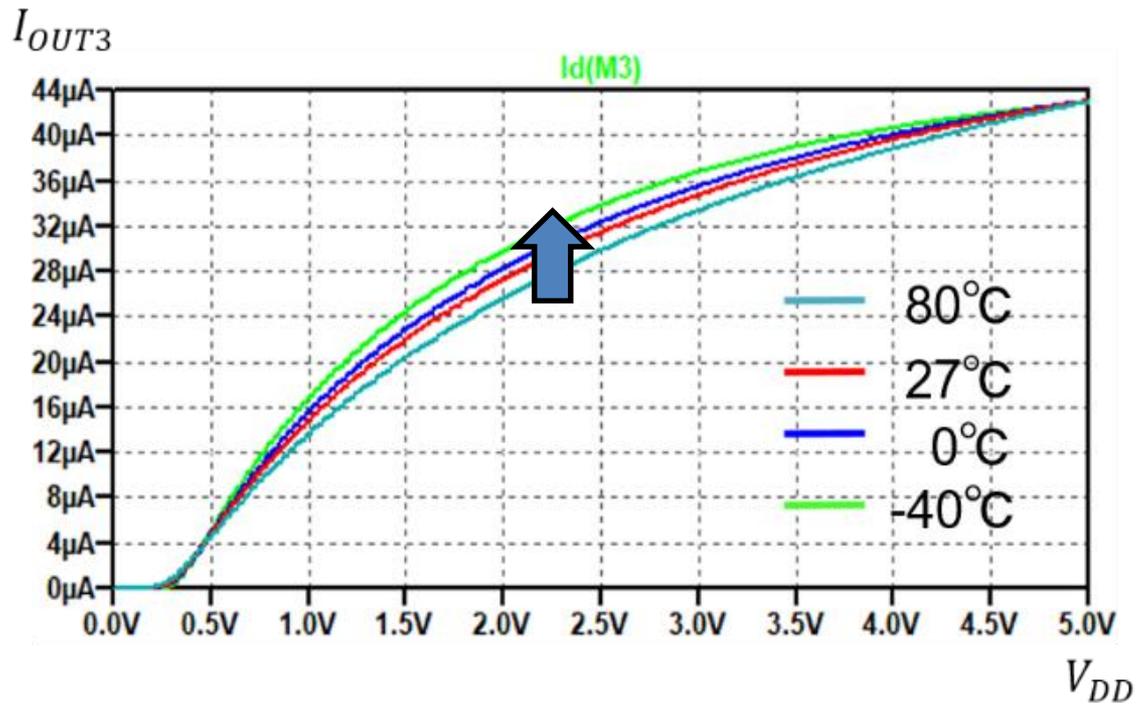
温度不感点が設定できた

M2を流れる電流



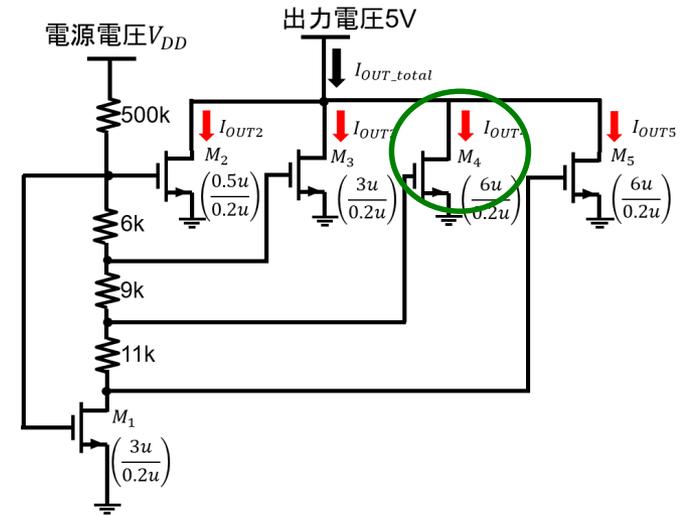
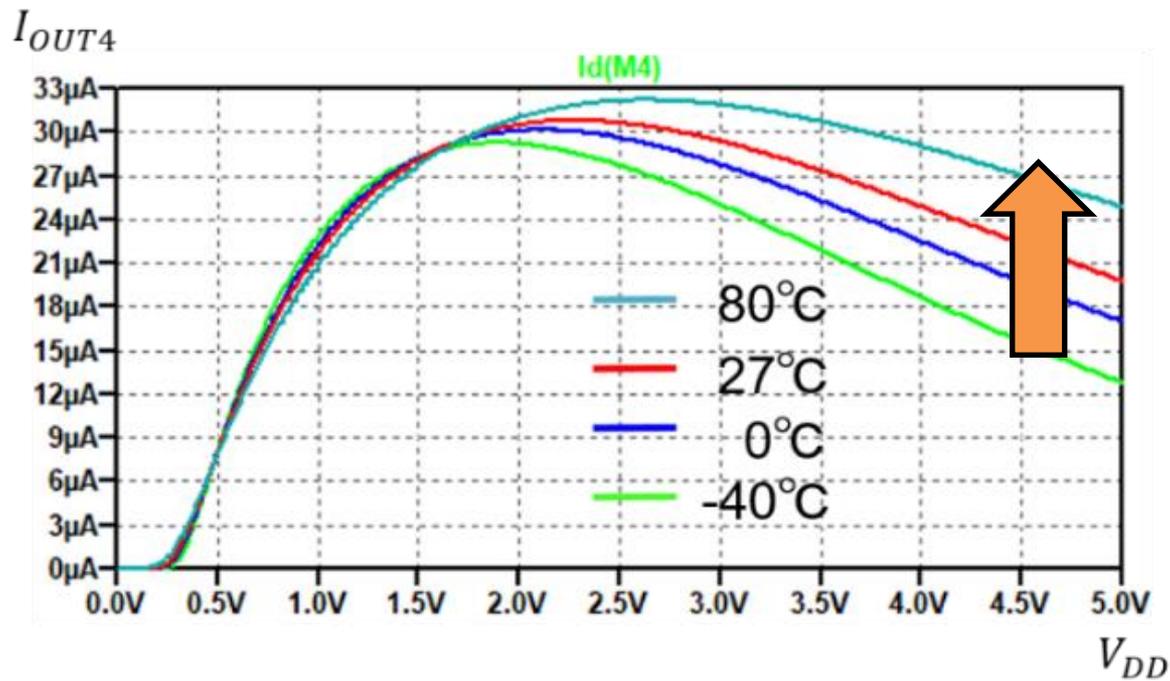
負の温度特性を持っている

M3を流れる電流



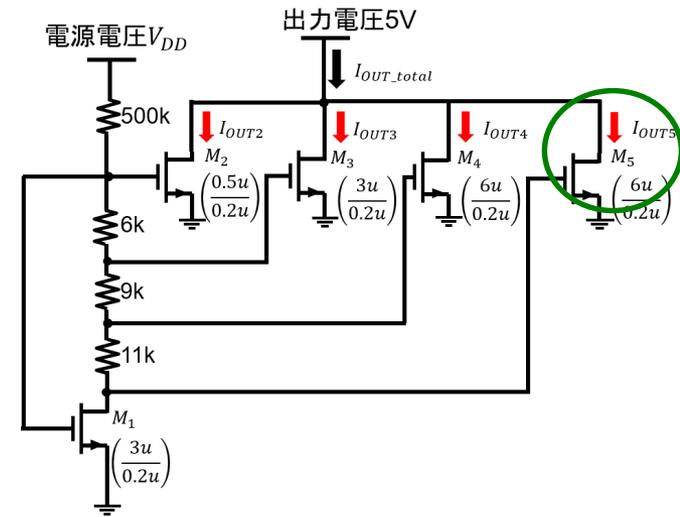
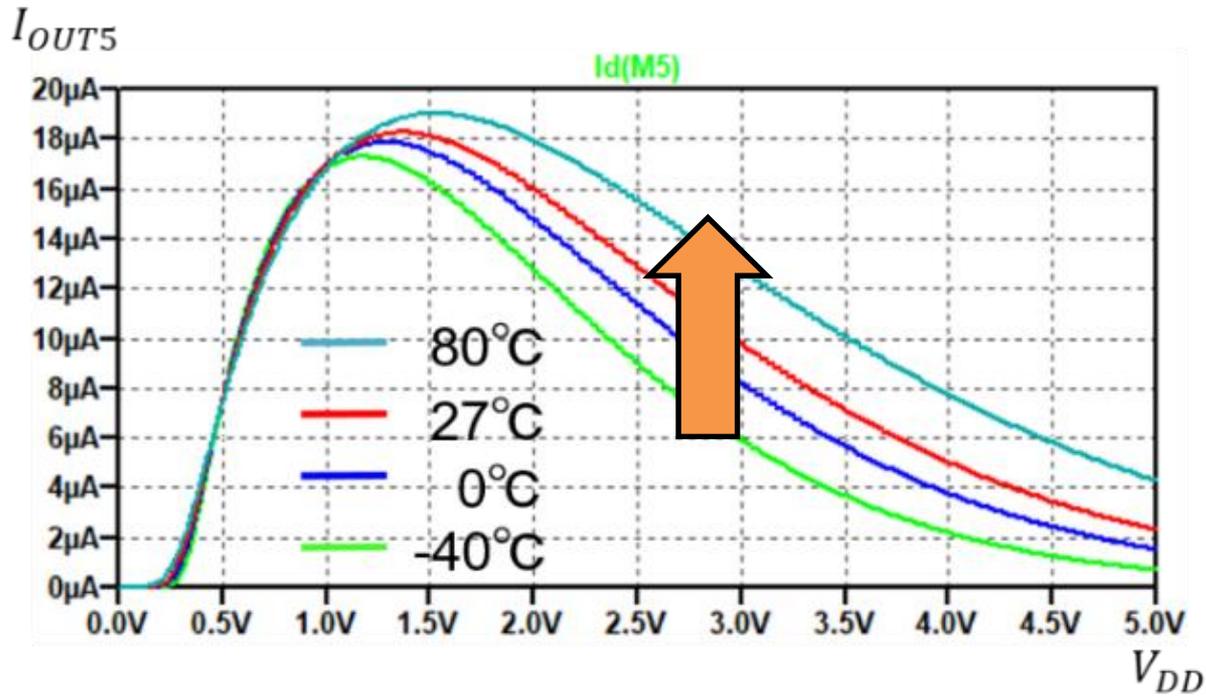
負の温度特性を持っている

M4を流れる電流



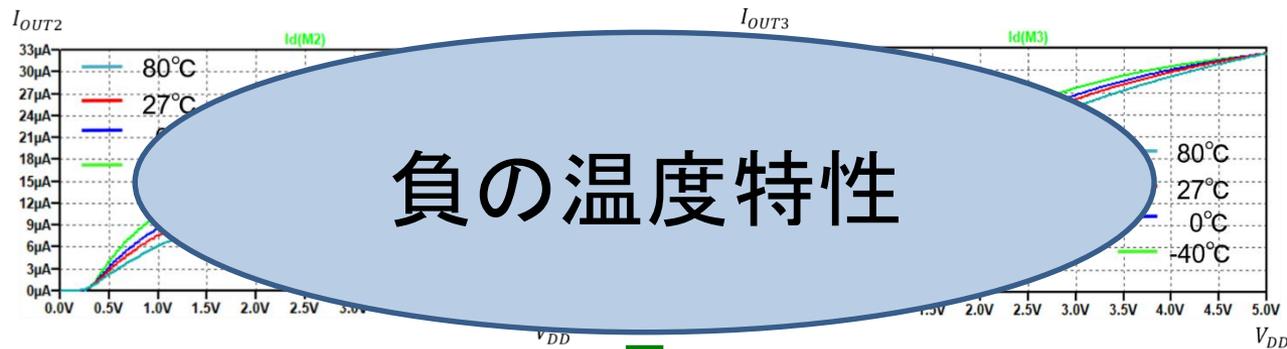
高電圧側で正の温度特性を持っている

M5を流れる電流



高電圧側で正の温度特性を持っている

温度特性向上の理由



負の温度特性



正の温度特性

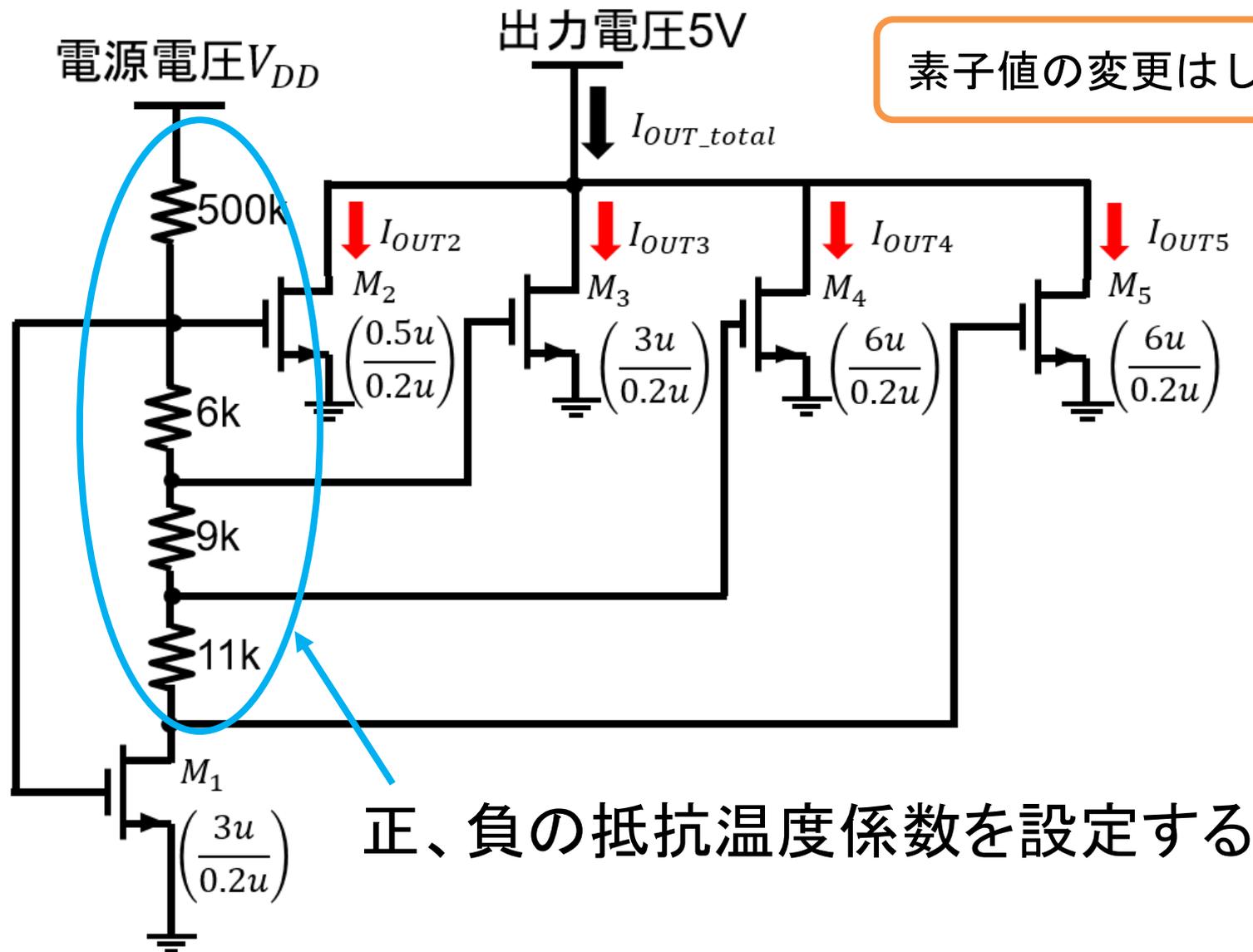


温度特性をキャンセル

OUTLINE

- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 永田穰電流ミラー回路
- ◆ 従来の改良回路案(平野電流源)
- ◆ MOSFETの温度特性
- ◆ 提案回路
 - └ シミュレーション結果
- ◆ 様々な抵抗温度係数の場合
 - └ シミュレーション結果
- ◆ まとめ

抵抗温度係数の設定



抵抗温度係数の設定

抵抗温度係数の変更



パラメータtcを設定

$$R = R_0(1 + dt \times tc1 + dt^2 \times tc2 + dt^3 \times tc3 + \dots)$$

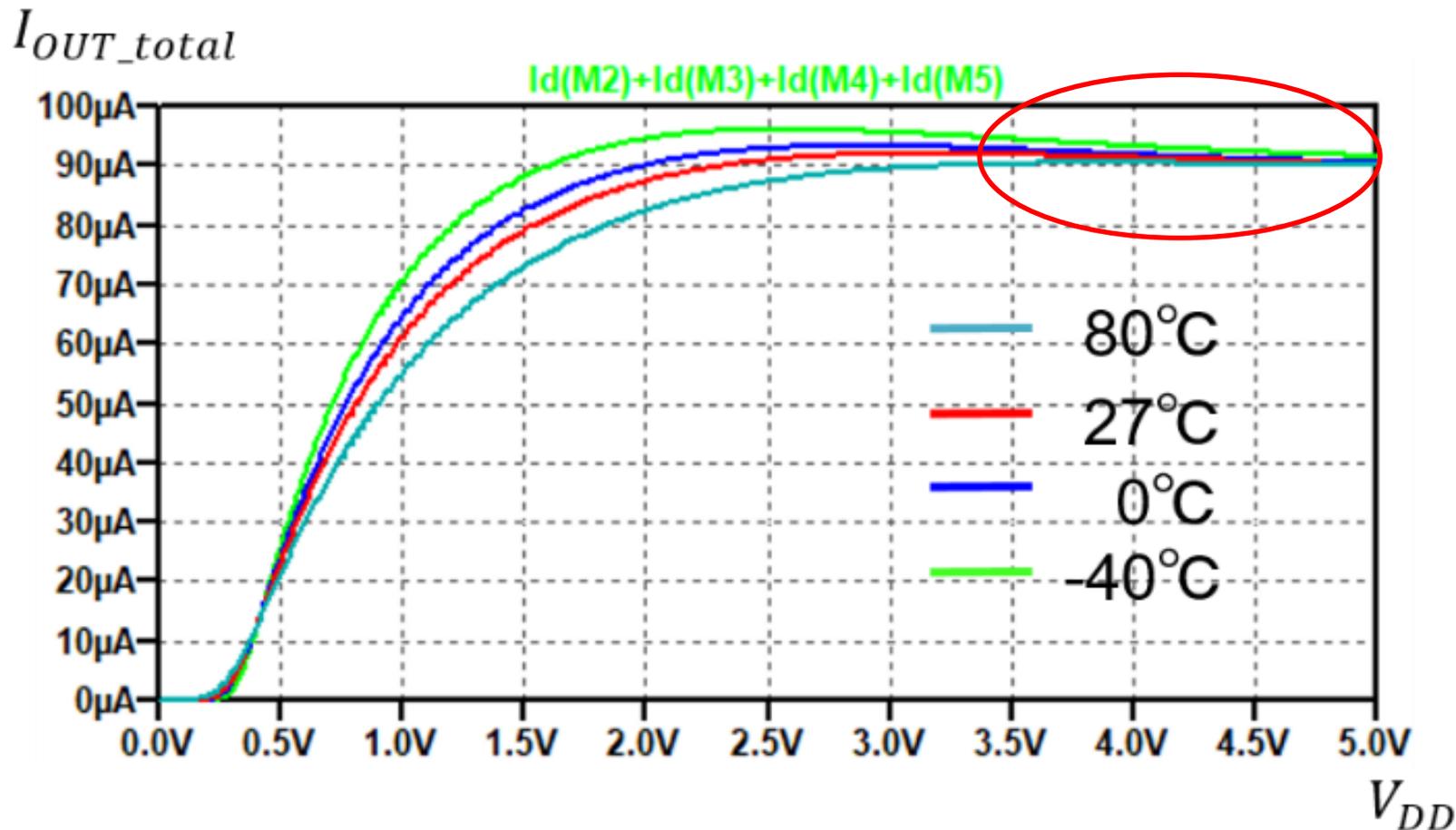
$dt = \text{temp} - t_{\text{nom}} \quad (t_{\text{nom}} = 27^\circ\text{C})$

今回は

ケース① $tc1 = 0.001$ を抵抗に設定

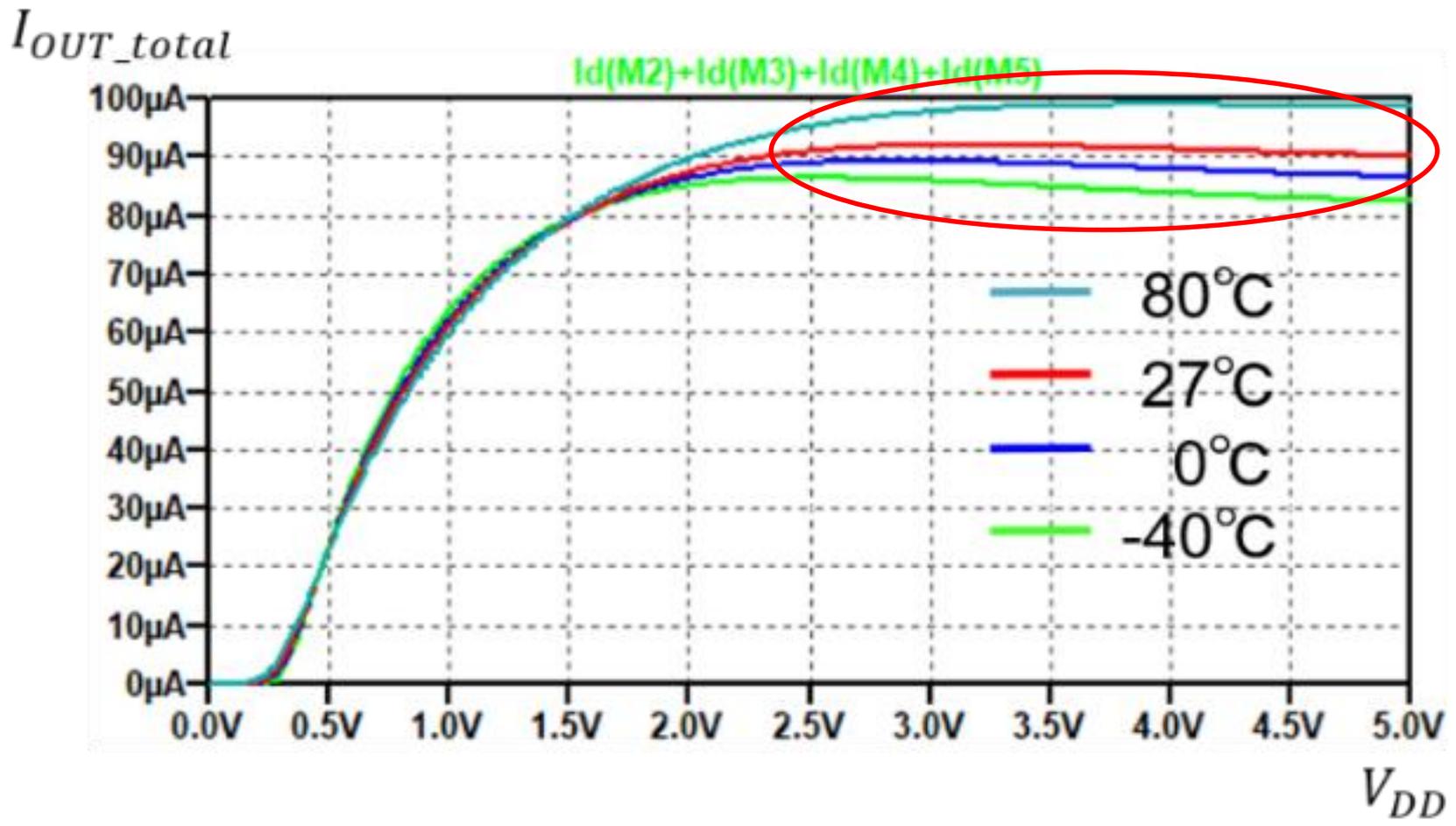
ケース② $tc1 = -0.001$ を抵抗に設定

tc=0.001のときのシミュレーション結果



温度による出力電流変動が低減する

tc=-0.001のときのシミュレーション結果



温度による出力電流変動が大きくなる

OUTLINE

- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 永田穰電流ミラー回路
- ◆ 従来の改良回路案(平野電流源)
- ◆ MOSFETの温度特性
- ◆ 提案回路
 - └ シミュレーション結果
- ◆ 様々な抵抗温度係数の場合
 - └ シミュレーション結果
- ◆ まとめ

まとめ

- MOS提案回路について示した。
- 比較

回路	電流一定範囲	温度
永田穰電流ミラー回路	Fair	Fair
平野電流源	Excellent	Fair
提案回路	Excellent	Good

- MOSサイズや抵抗値を適切に設定することで温度不感特性が向上した。
- 抵抗温度係数が既知の場合、素子値を設計しなおすことで温度不感特性が向上すると考えられる。
- チップでも実現したい

質問・コメント

- 0.18 μm モデルを使用しており普通に使うと電圧5Vでは厳しいが、5V用のオプションを使ってシミュレーションしているのか。
- 5Vで使用するときLが0.2 μm というのは小さいので、実際にチップを作るとなったらもっと実用に即した値を考えるべき。
- 並列につなげる問題点として、出力インピーダンスが下がるというのがある。平野さんの回路はカスコードにしているため出力インピーダンスが高くなるが、提案回路では低いままなのでその時電流源としての性能が出るかどうか。
- 永田電流がピークを持つ理由を小信号解析してわかっているか。抵抗値とMOSの g_m にはある関係があるため、ピークを持つ構成になっている。