

# NMOS, PMOS を用いた 電源電圧および温度に依存しない 永田基準電流源

神尾崇文, 細野貴司, 山本颯馬, 沙 磊  
片山翔吾, チャンミンチー, 桑名杏奈, 小林春夫

群馬大学

鈴木彰, 山田 聡, 加藤智行, 小野信任, 三浦一広  
ジーダット

# OUTLINE

- 研究目的
- 永田穰電流源回路
- MOSドレイン電流の温度特性
- 電源電圧、温度不感電流源の設計
  - ↳ NMOS型
  - ↳ PMOS型
- シミュレーション結果
- まとめ

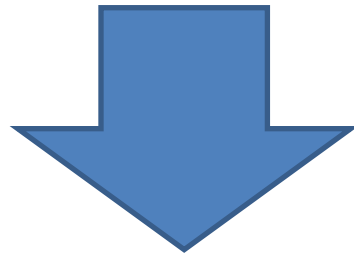
# OUTLINE

- 研究目的
- 永田穰電流源回路
- MOSドレイン電流の温度特性
- 電源電圧、温度不感電流源の設計
  - ↳ NMOS型
  - ↳ PMOS型
- シミュレーション結果
- まとめ

# 研究目的

量産時の製造ばらつき影響抑制のためには

基準が必要



アナログ回路の安定動作のための  
基準の電流・電圧源を設計

# 研究目標

回路素子の多くは  
温度変化で  
入出力特性が変化

回路に供給される  
電源電圧が  
常に安定しているとは  
限らない

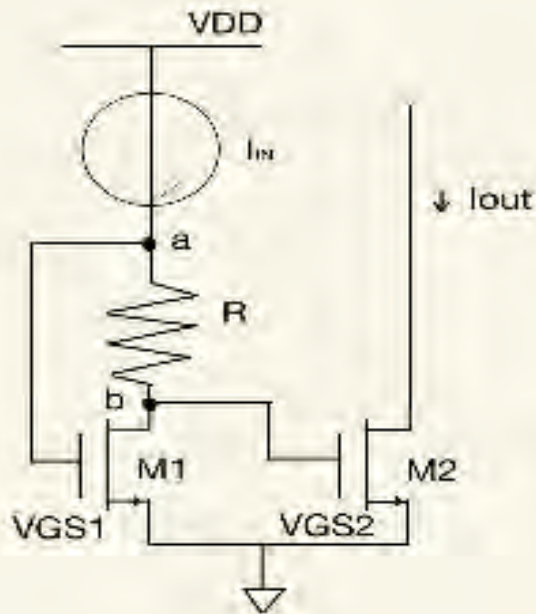
温度・電源が変化しても一定の電流出力をする回路

永田穰ピーキング電流源回路を参考に  
安定な基準電流源を開発

# OUTLINE

- 研究目的
- **永田穰電流源回路**
- MOSドレイン電流の温度特性
- 電源電圧、温度不感電流源の設計
  - ↳ NMOS型
  - ↳ PMOS型
- シミュレーション結果
- まとめ

# 永田穰電流源回路の構成と動作



NMOS永田穰電流源回路

入力電流  $I_{IN}$  が増加  $\rightarrow$   $I_{out}$  も増加

$I_{IN}$  ある値以上で  
電圧降下  $RI_{IN} > V_{GS1}$

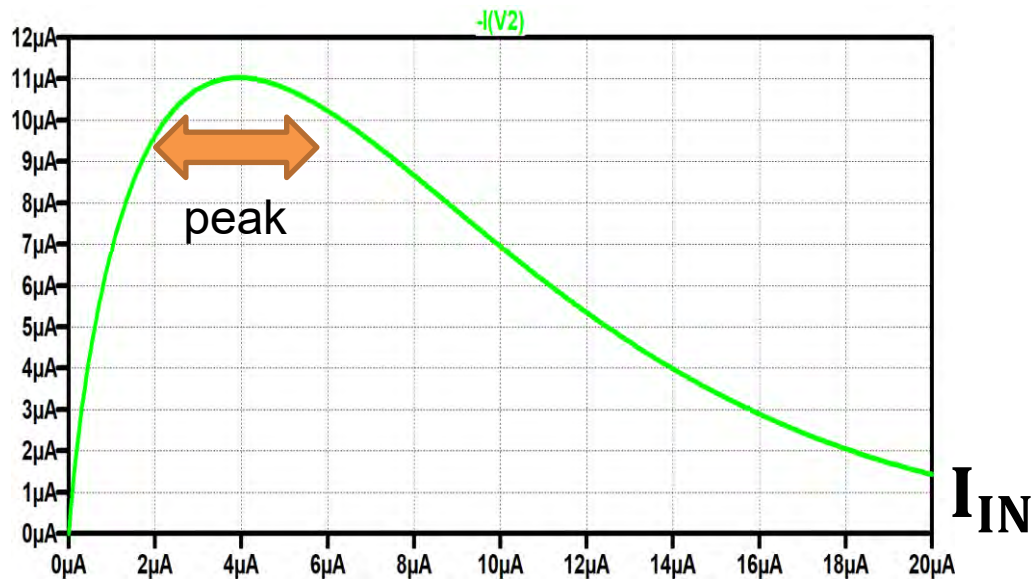
$V_{GS2}$  が減少し  $I_{out}$  が減少



出力電流がピークを持つ回路

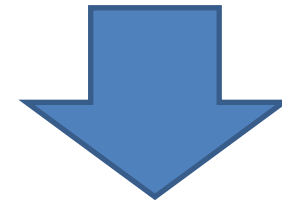
# 永田穰電流源回路の特性

$I_{out}$



永田穰電流源回路出力

入力電流に対し出力電流が  
ピーク点を持つ



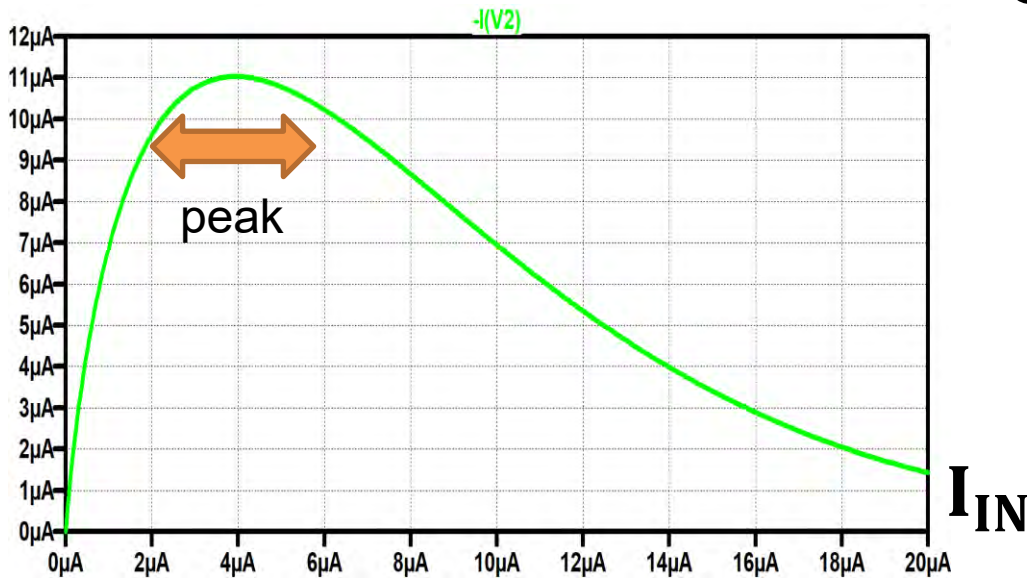
ピーク点付近では入力に  
対する変化が小さい

電源電圧不感性



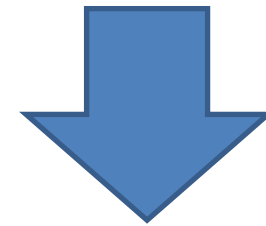
# 永田穰電流ミラー回路の改良の余地

$I_{out}$



永田穰電流源回路出力

- 出力電流が一定となる範囲が狭い  
↳ 範囲の拡大



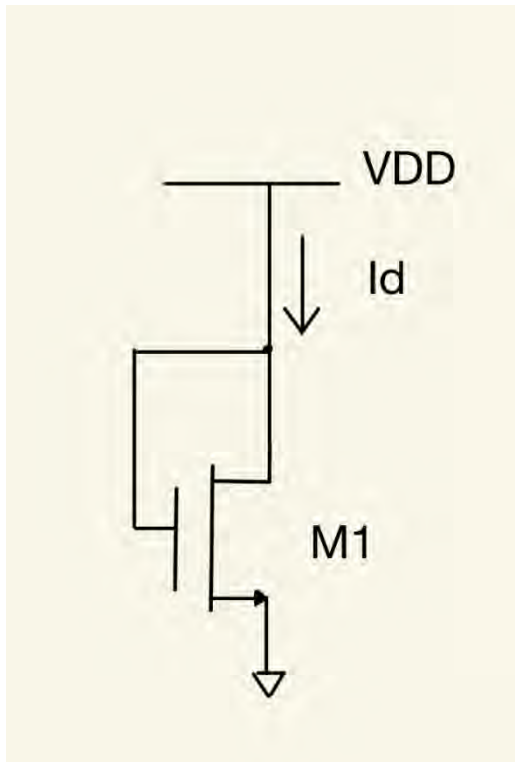
複数の永田穰電流源回路の異なるピーク点を加算

- 温度不感特性も改良の余地あり

# OUTLINE

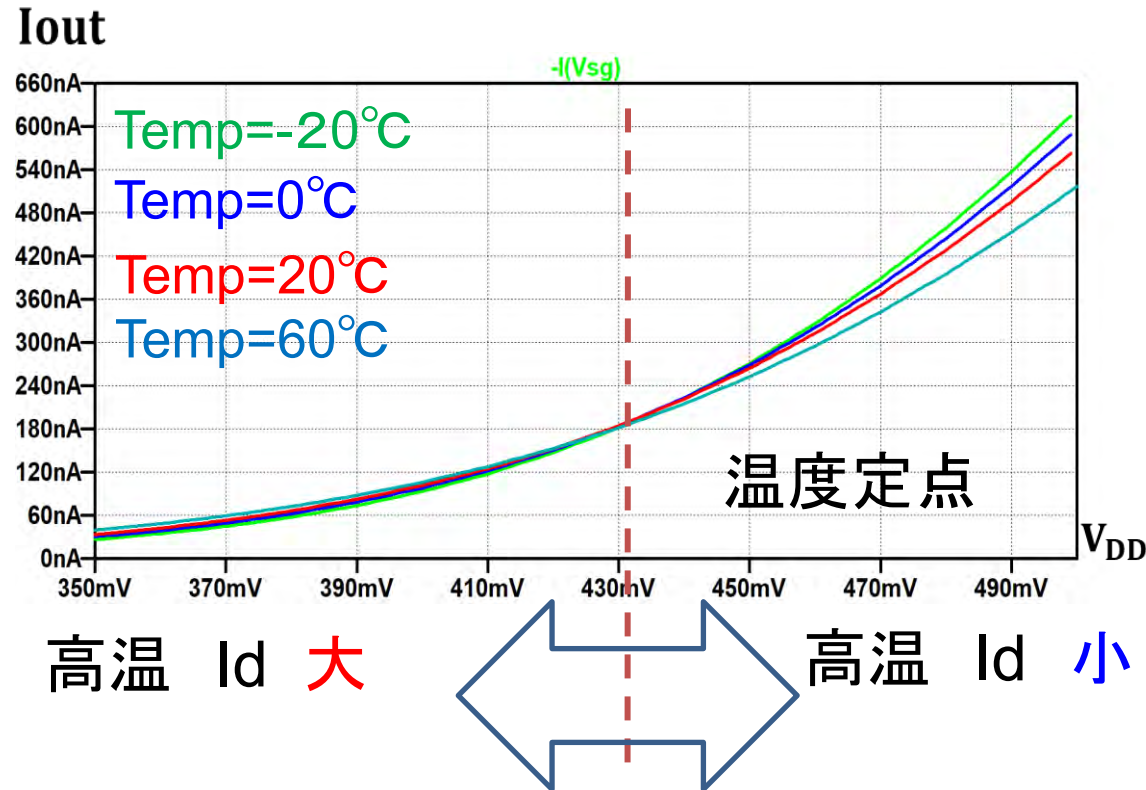
- 研究目的
- 永田穰電流源回路
- **MOSドレイン電流の温度特性**
  - ↳ P型・N型のW/L特性
- 電源電圧、温度不感電流源の提案
  - ↳ NMOS型
  - ↳ PMOS型
- シミュレーション結果
- まとめ

# NMOSドレイン電流の温度特性



LTspice シミュレーションパラメータ  
TSMC 0.18 $\mu$ m CMOS

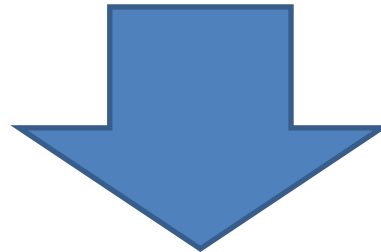
NMOSドレイン電流  
温度特性確認回路図



温度特性を持つ

# MOSドレイン電流の温度特性

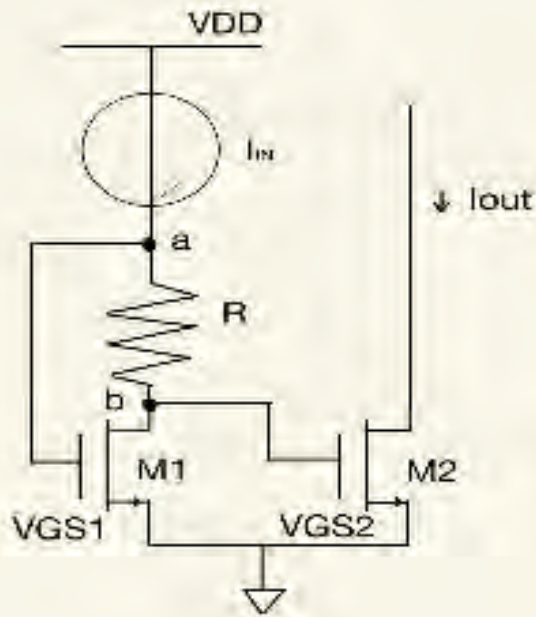
PMOS・NMOSのどちらも温度定点が存在  
↳ドレイン電流は温度特性を持つ



複数の永田穰電流源回路の  
異なる温度特性を打ち消しあう  
ように回路設計する

# MOSFETの温度定点

MOSの温度定点は素子値Lによる影響を受ける



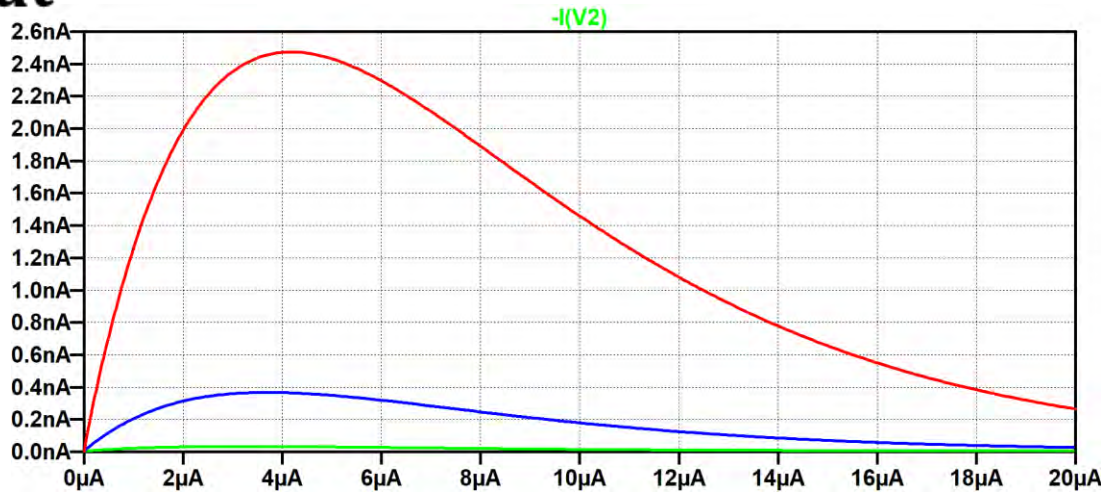
NMOS永田穰電流源回路

$I_{IN}$	0~20 $\mu$ A
$V_{DD}$	3V
$V_{out}$	5V
$M_1, (W [\mu\text{m}] / L[\mu\text{m}])$	$\frac{3}{0.2}$
$R_1$	12k
Temp( $^{\circ}$ C)	-20, 20, 60

$M_2, (W [\mu\text{m}] / L[\mu\text{m}])$ の値を変化させることにより、永田穰電流源におけるFETの素子値W/Lの影響を調べる

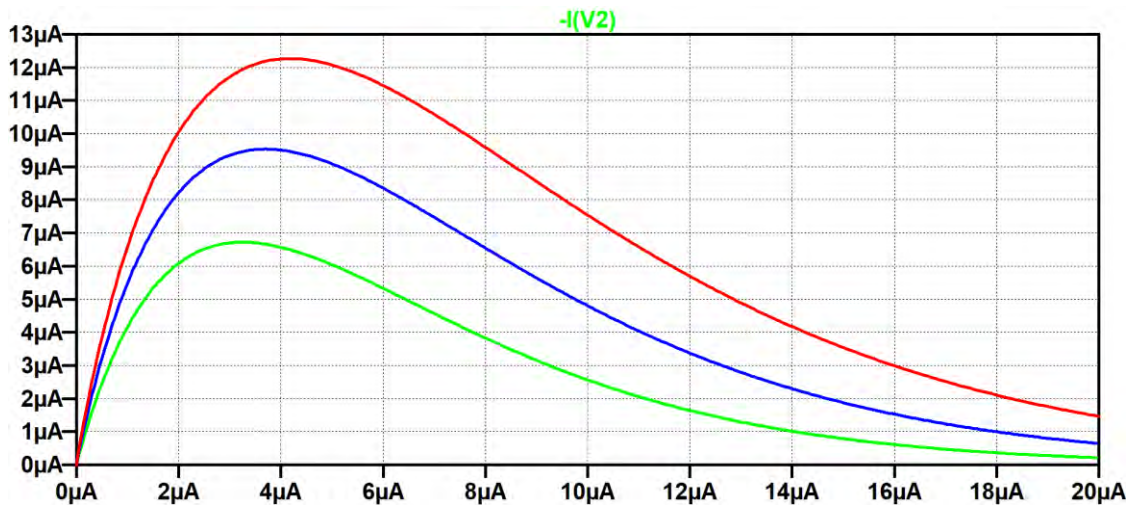
# MOSFETの温度定点

## I<sub>out</sub>



$W=2\mu$   
 $L=0.05\mu$

温度定点  
なし



$W=2\mu$   
 $L=0.08\mu$

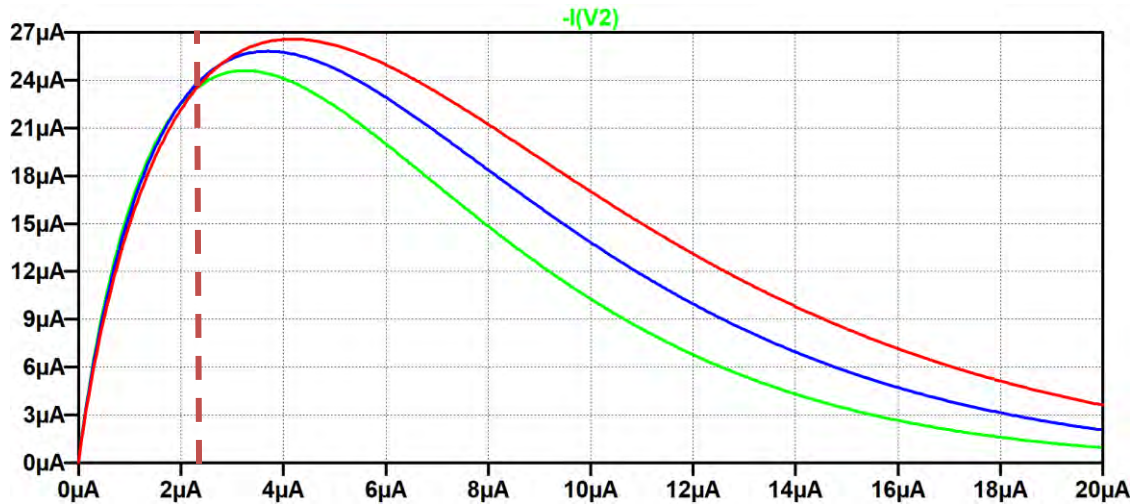
温度定点  
なし

$I_{IN}$



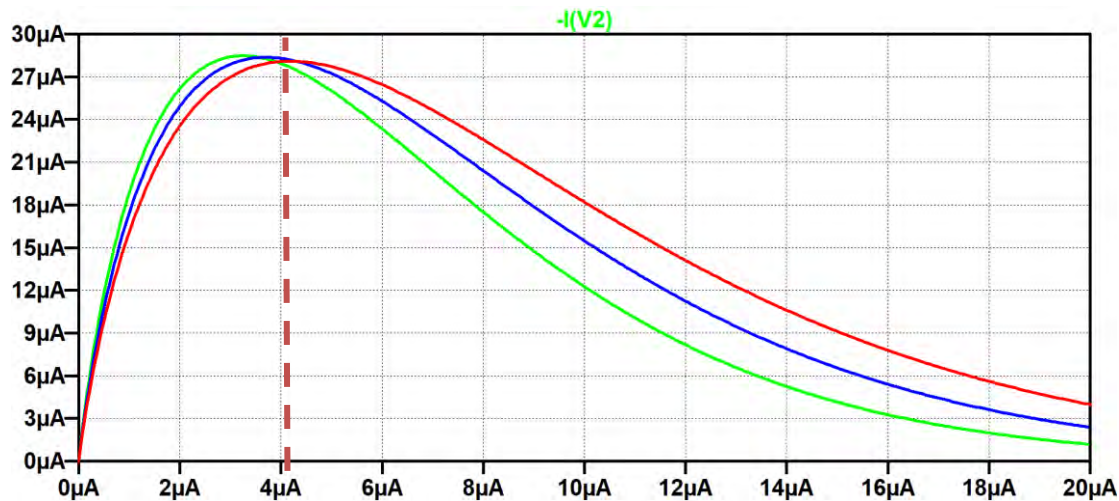
# MOSFETの温度定点

## Iout



$W=2u$   
 $L=0.1u$

温度定点  
2.5uA



$W=2u$       温度定点  
 $L=0.108u$     4uA

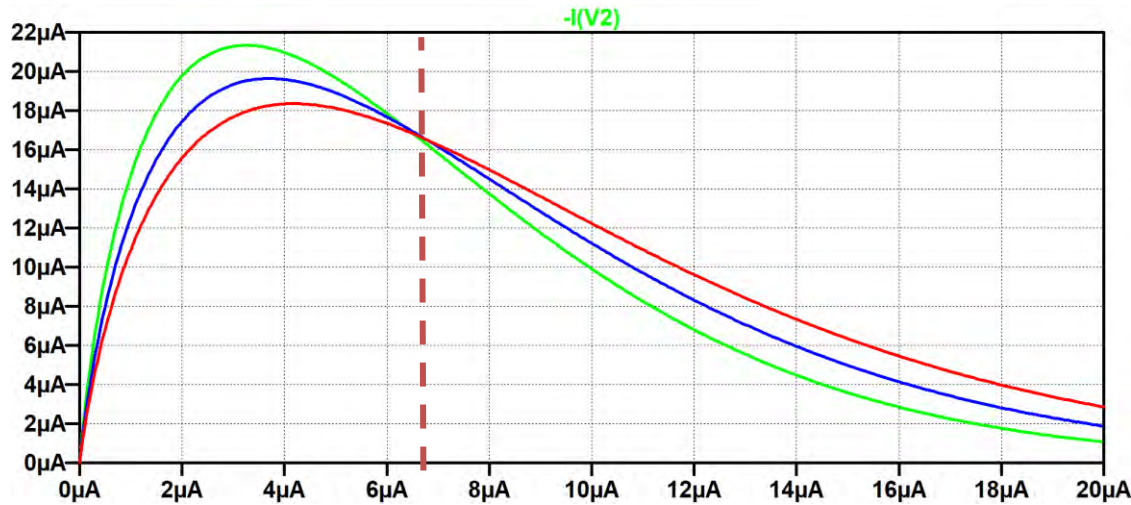


温度定点が最大値  
出力電流の大きさが最大

$I_{IN}$

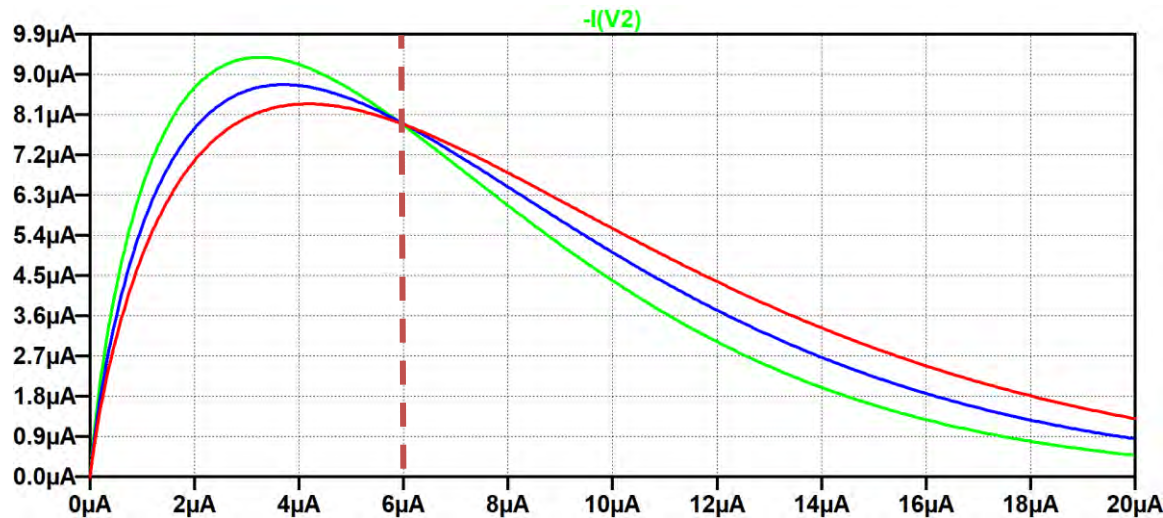
# MOSFETの温度定点

## I<sub>out</sub>



$W=2u$   
 $L=0.15u$

温度定点  
 $6.5uA$



$W=2u$   
 $L=0.2u$

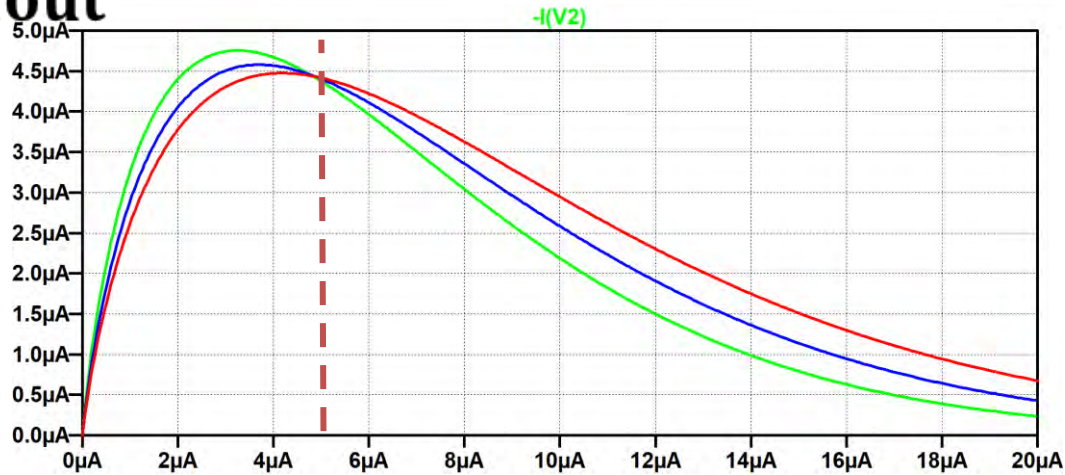
温度定点  
 $6uA$

**I<sub>IN</sub>**



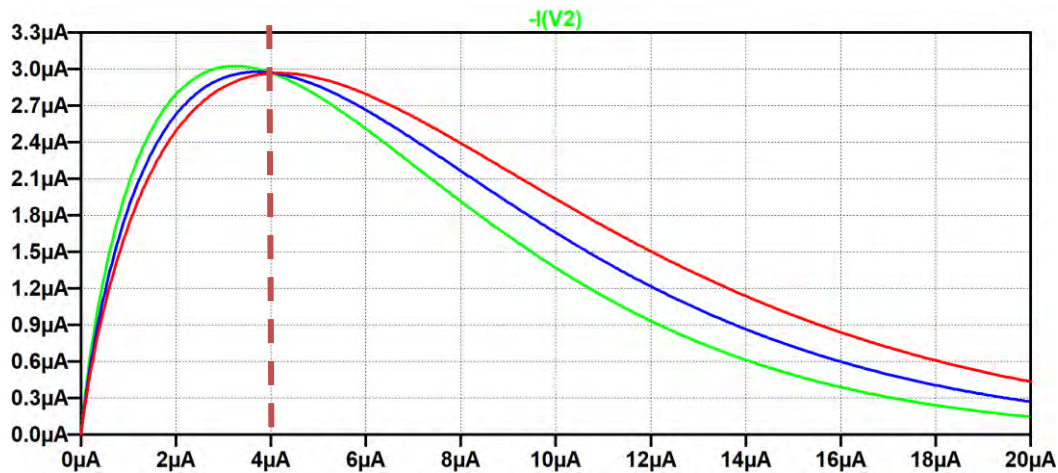
# MOSFETの温度定点

$I_{out}$



$W=2\mu$   
 $L=0.25\mu$

温度定点  
5  $\mu A$



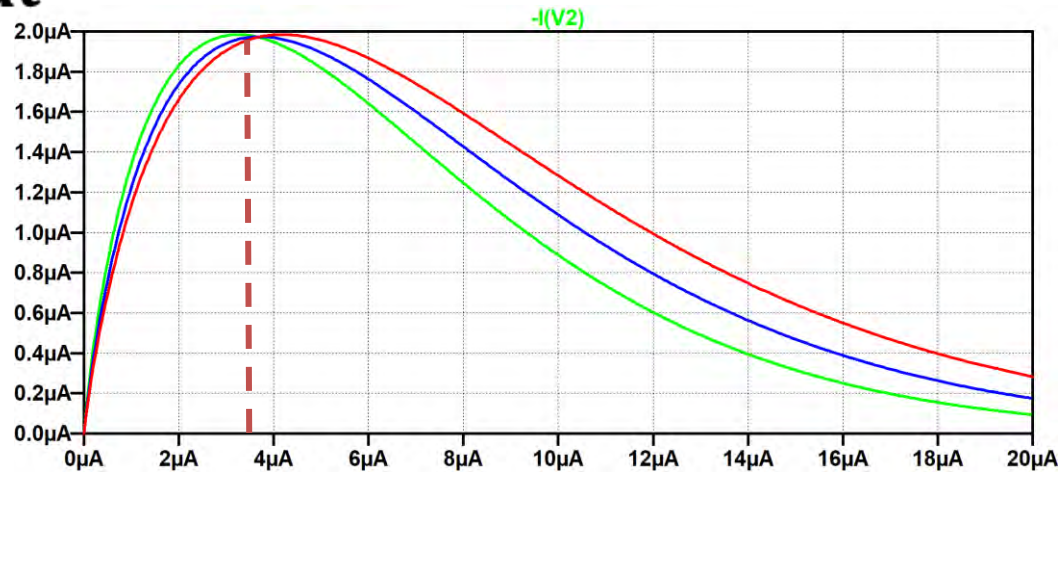
$W=2\mu$   
 $L=0.3\mu$

温度定点  
4  $\mu A$

$I_{IN}$

# MOSFETの温度定点

$I_{out}$



$W=2\mu$

$L=0.4\mu$

温度定点

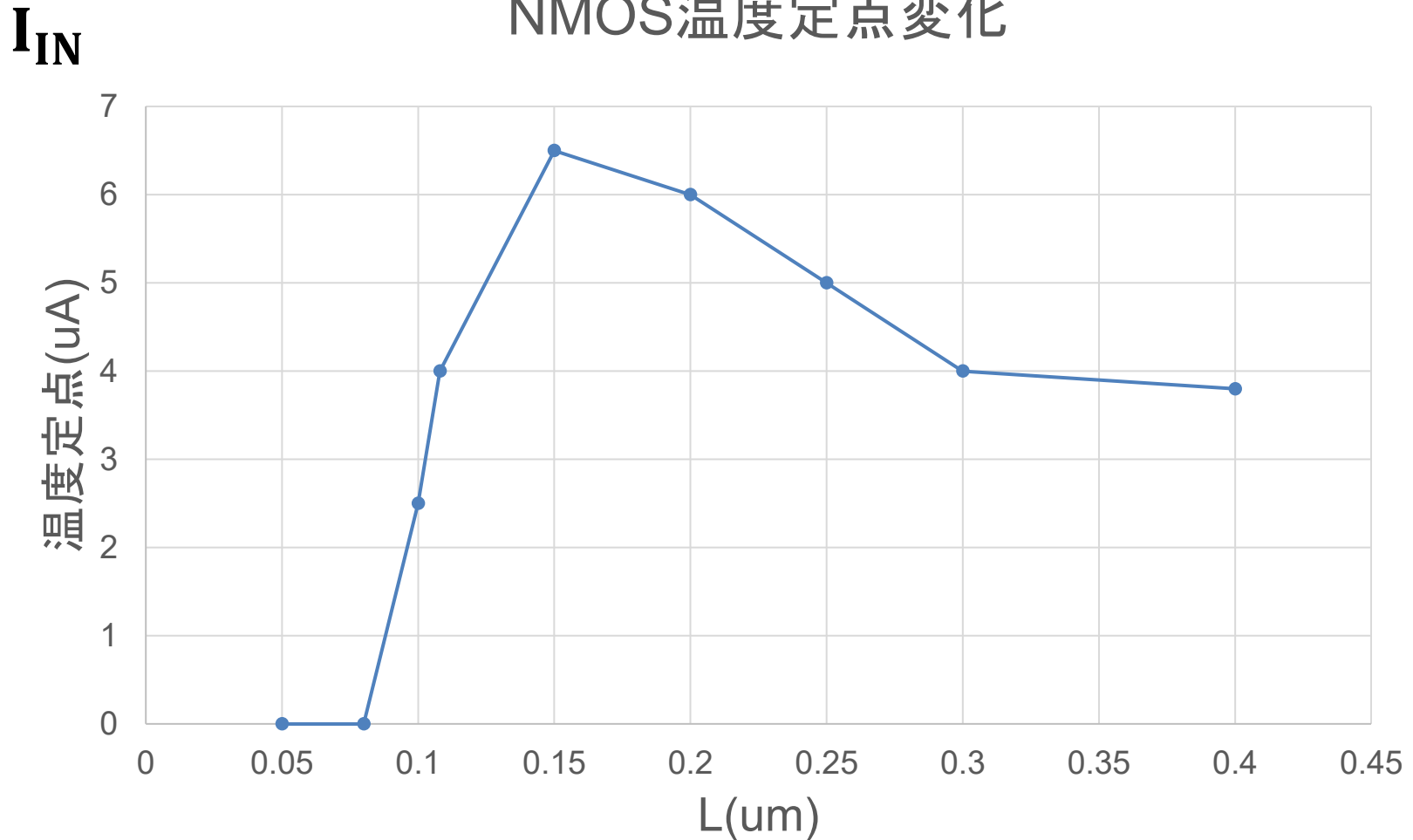
3.8  $\mu A$

$I_{IN}$

これらの結果をまとめると、  
 NMOSは温度定点が最大値に存在するときに、最大の $I_{out}$ をとる  
 $L$ を増加させていくと温度定点が右側に移動していく。一定の値を超えると  
 左へと戻っていくが、出力電流が大きく減少するため温度不感性を考える上で  
 実用的な性質ではない。

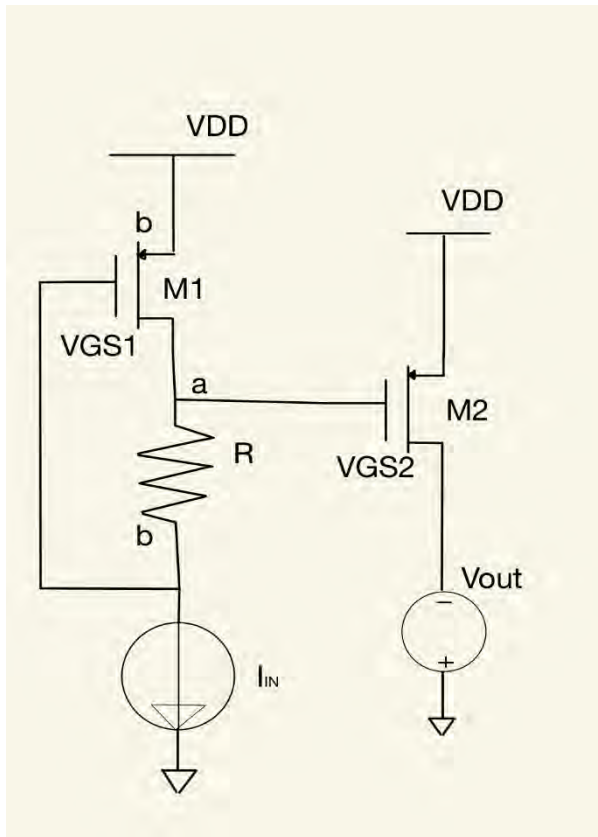
# MOSFETの温度定点

## NMOS温度定点変化



# MOSFETの温度定点

Lを変えたときの温度定点

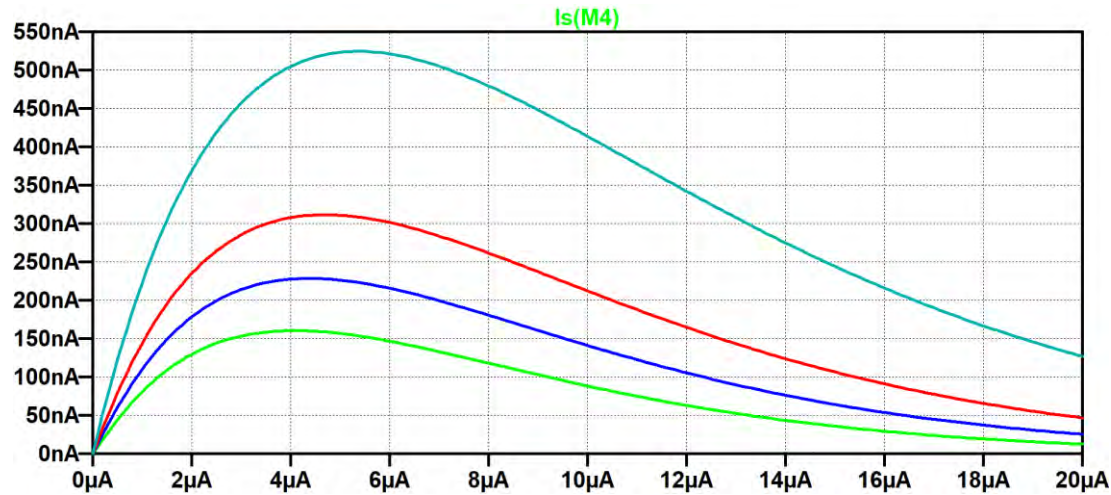


PMOS永田穰電流源回路

$I_{IN}$	0~20 $\mu$ A
$V_{DD}$	3 V
$V_{out}$	
$M_1, (W [\mu\text{m}] / L[\mu\text{m}])$	$\frac{3}{0.2}$
$R_1$	12k
Temp( $^{\circ}$ C)	-20, 20, 60

$M_2, (W [\mu\text{m}] / L[\mu\text{m}])$ の値を変化させることにより、永田穰電流源におけるFETの素子値W/Lの影響を調べる

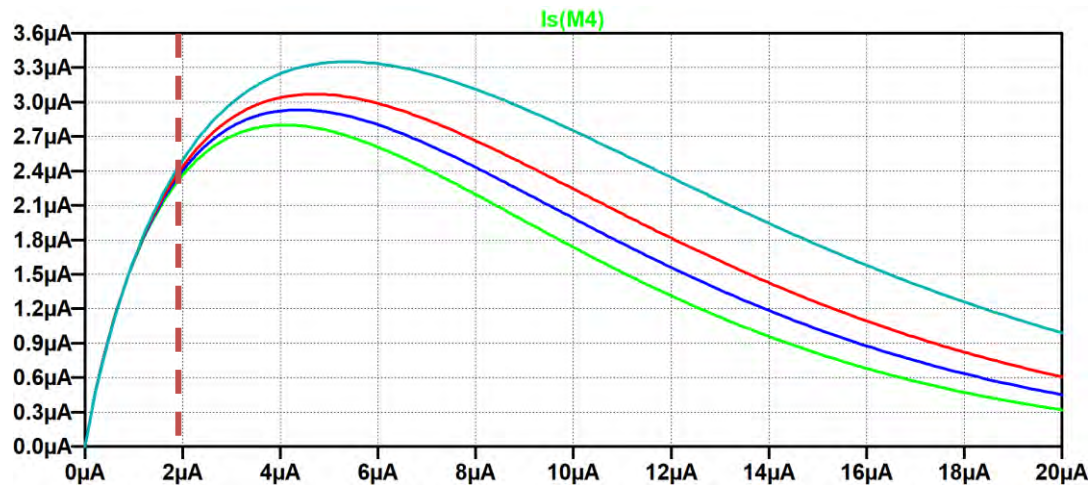
# MOSFETの温度定点



$W=2\mu$

$L=0.1\mu$

温度定点  
なし



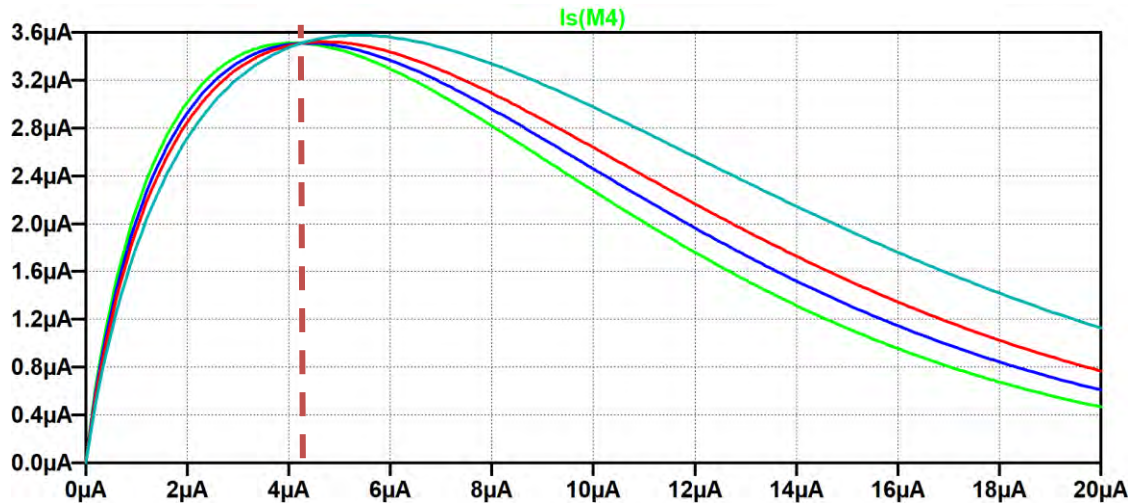
$W=2\mu$

$L=0.15\mu$

温度定点  
2 $\mu$



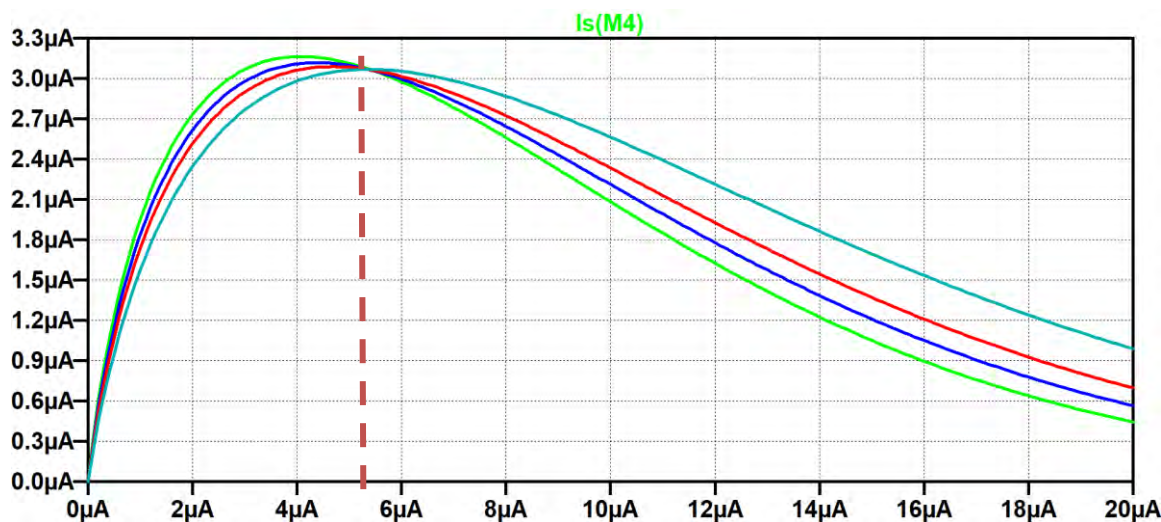
# MOSFETの温度定点



$W=2\mu$       温度定点  
 $L=0.2\mu$     4.2μA



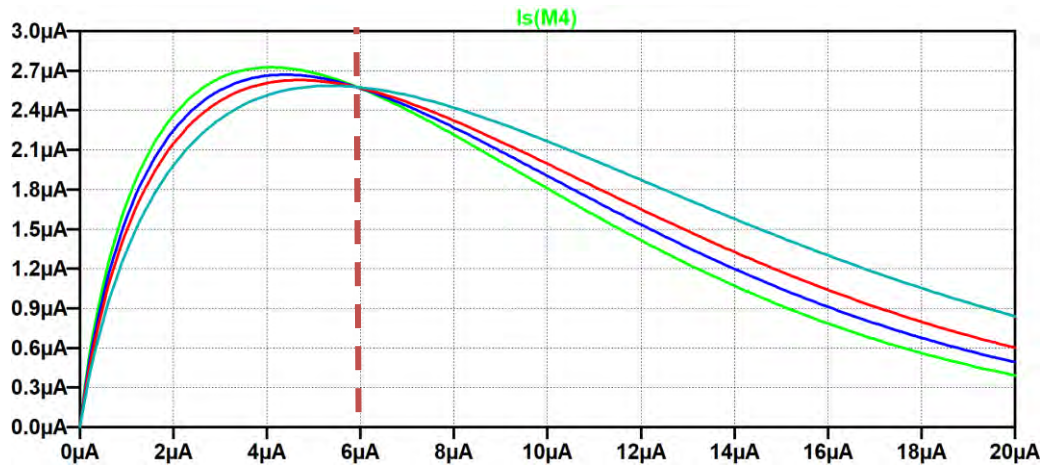
温度定点が最大値  
 出力電流の大きさが最大



温度定点  
 5.2μA

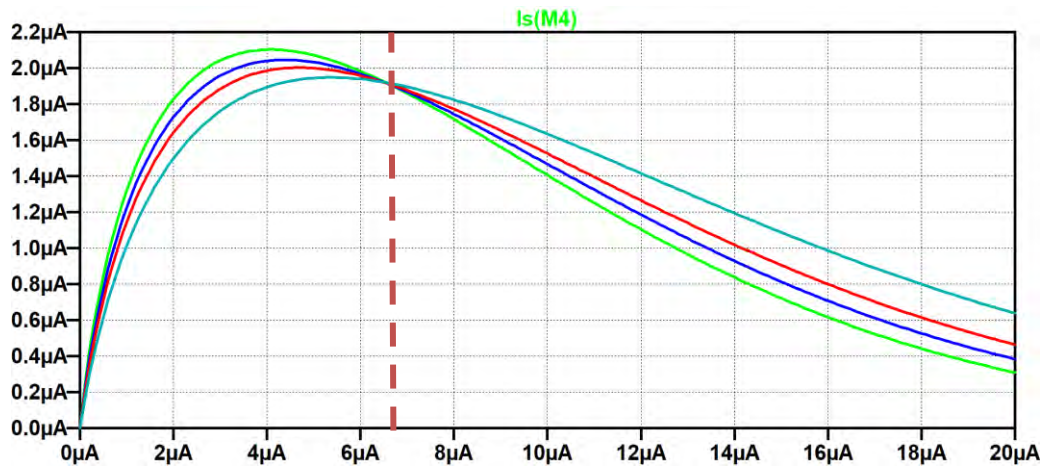
$W=2\mu$   
 $L=0.25\mu$

# MOSFETの温度定点



$W=2\mu$   
 $L=0.3\mu$

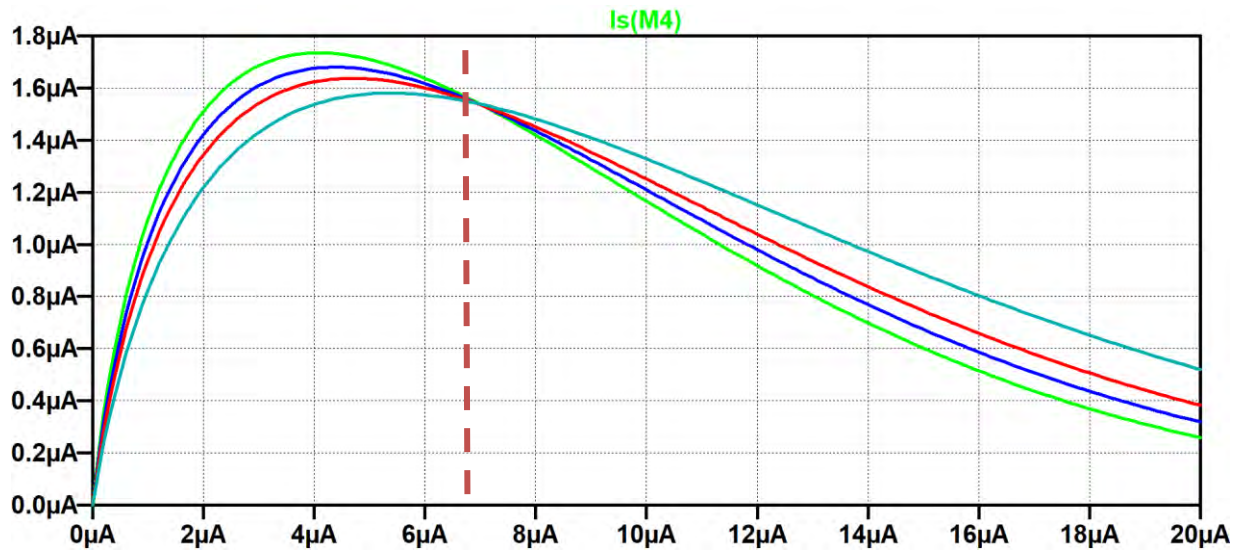
温度定点  
6  $\mu\text{A}$



$W=2\mu$   
 $L=0.4\mu$

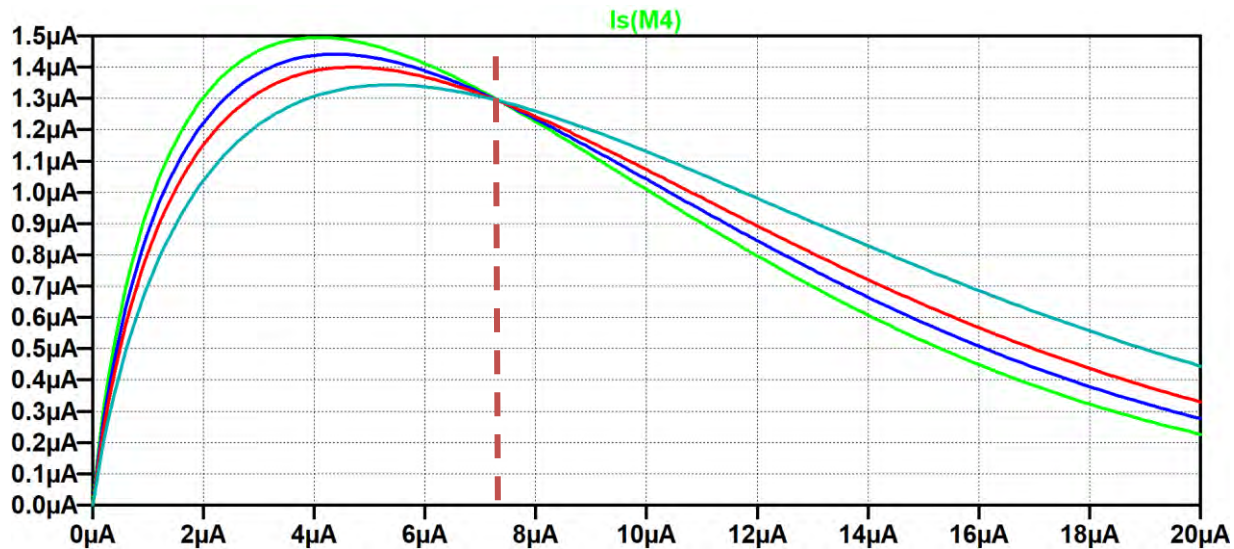
温度定点  
6.5  $\mu\text{A}$

# MOSFETの温度定点



$W=2\mu$   
 $L=0.5\mu$

温度定点  
 $7\mu A$

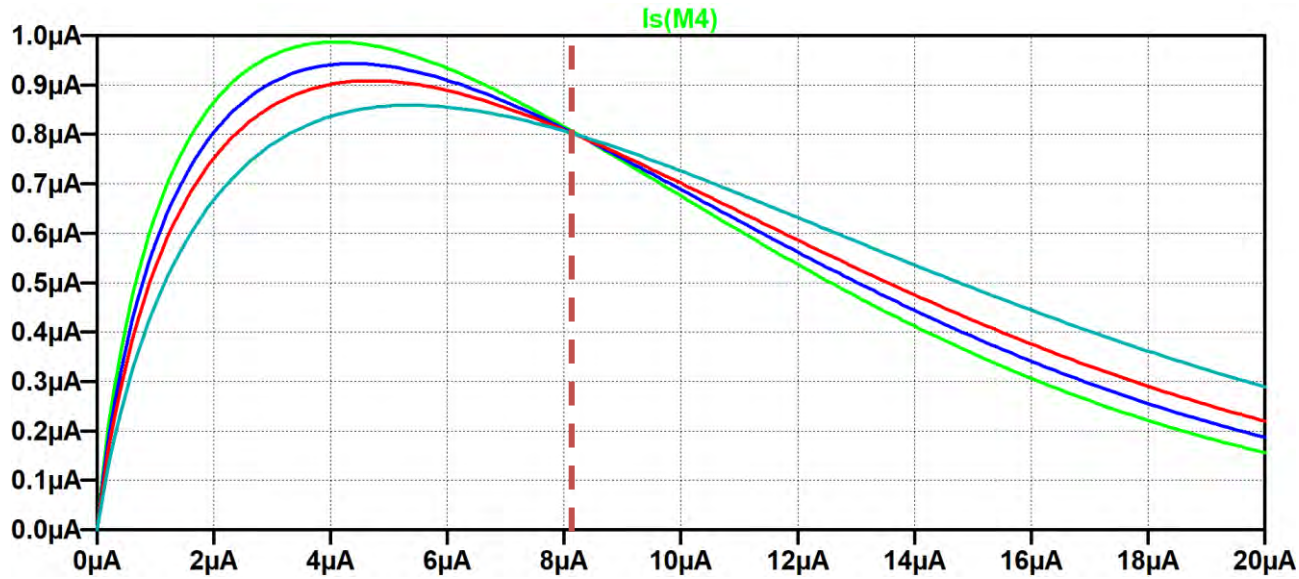


$W=2\mu$   
 $L=0.6\mu$

温度定点  
 $7.2\mu A$

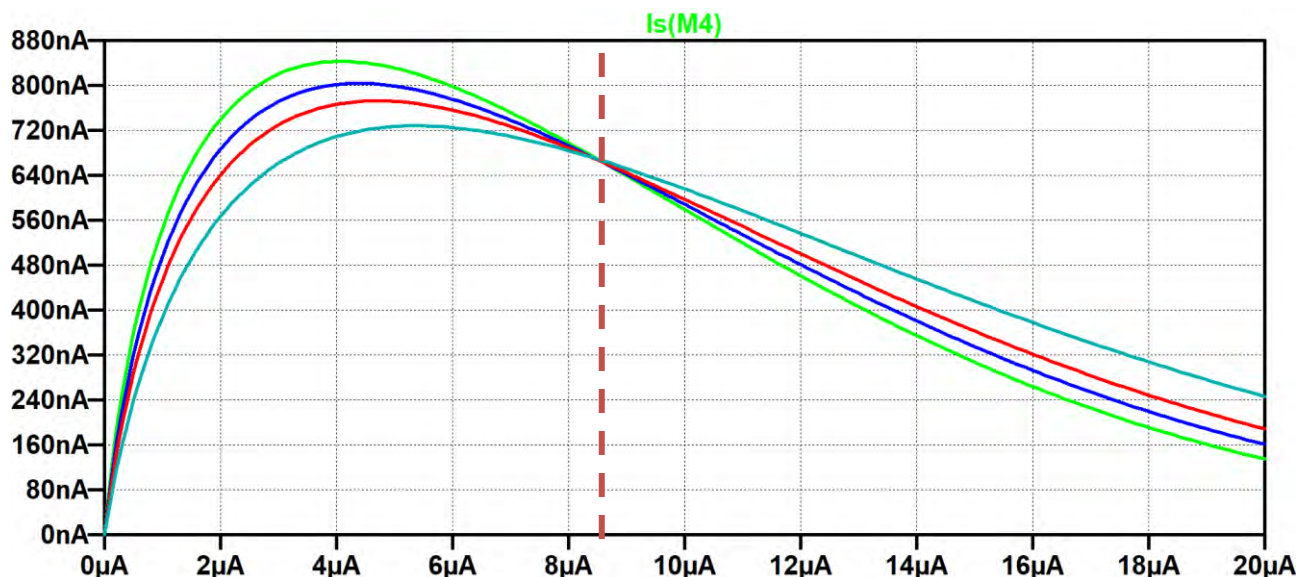


# MOSFETの温度定点



$W=2\mu$   
 $L=1\mu$

温度定点  
8μA



$W=2\mu$   
 $L=1.2\mu$

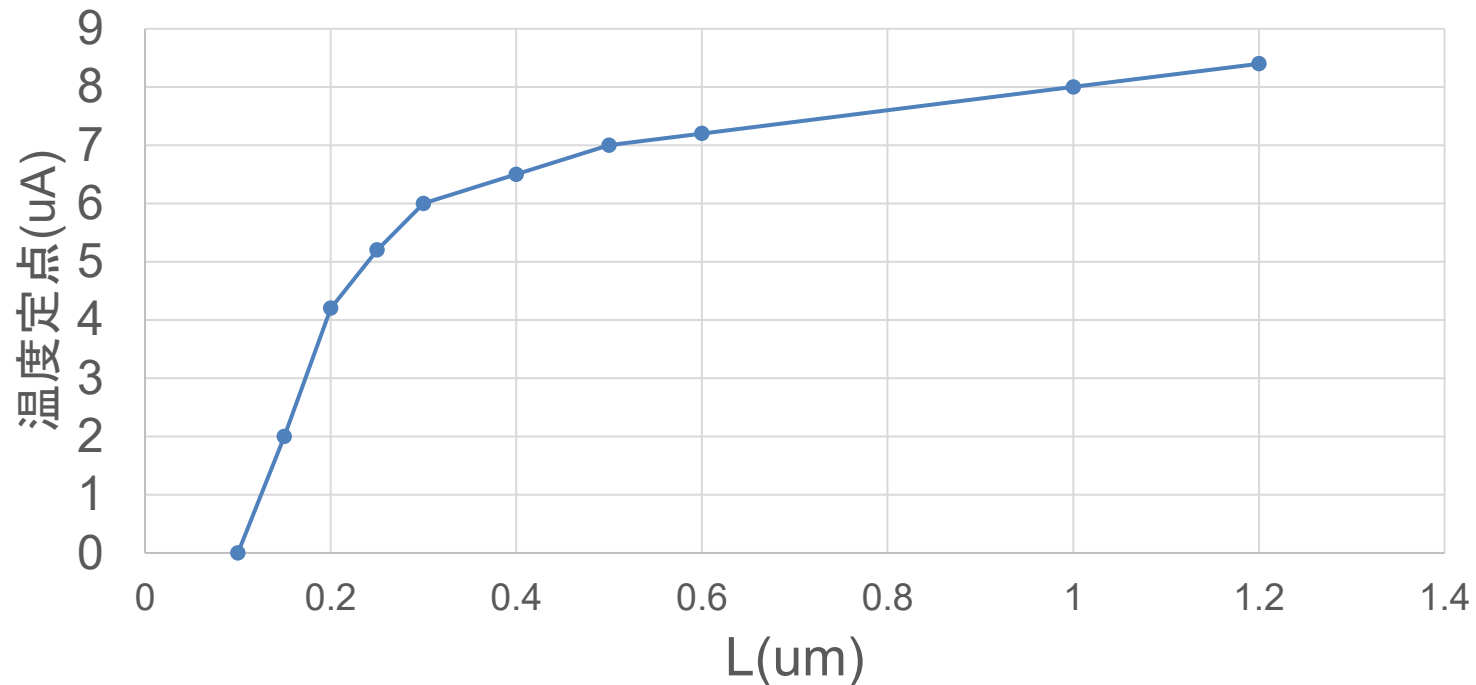
温度定点  
8.4μA

# MOSFETの温度定点

これらの結果をまとめると、  
PMOSも温度定点が最大値に存在するときに、最大の $I_{out}$ をとる  
 $L$ を増加させていくと温度定点が右側に移動していく。

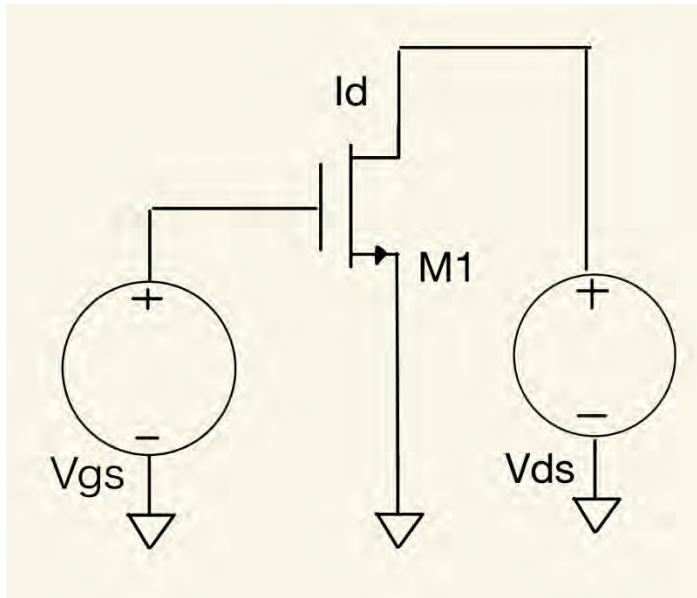
 $I_{IN}$ 

## PMOS温度定点変化

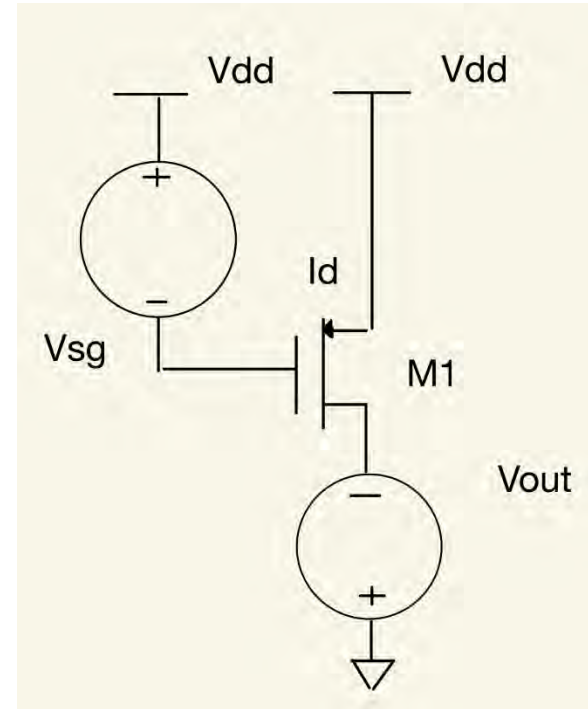


# NMOS, PMOSのW, Lとドレイン電流<sup>27/53</sup>

NMOS, PMOS の W, L が  
ドレイン電流に与える影響を調べる



NMOS回路

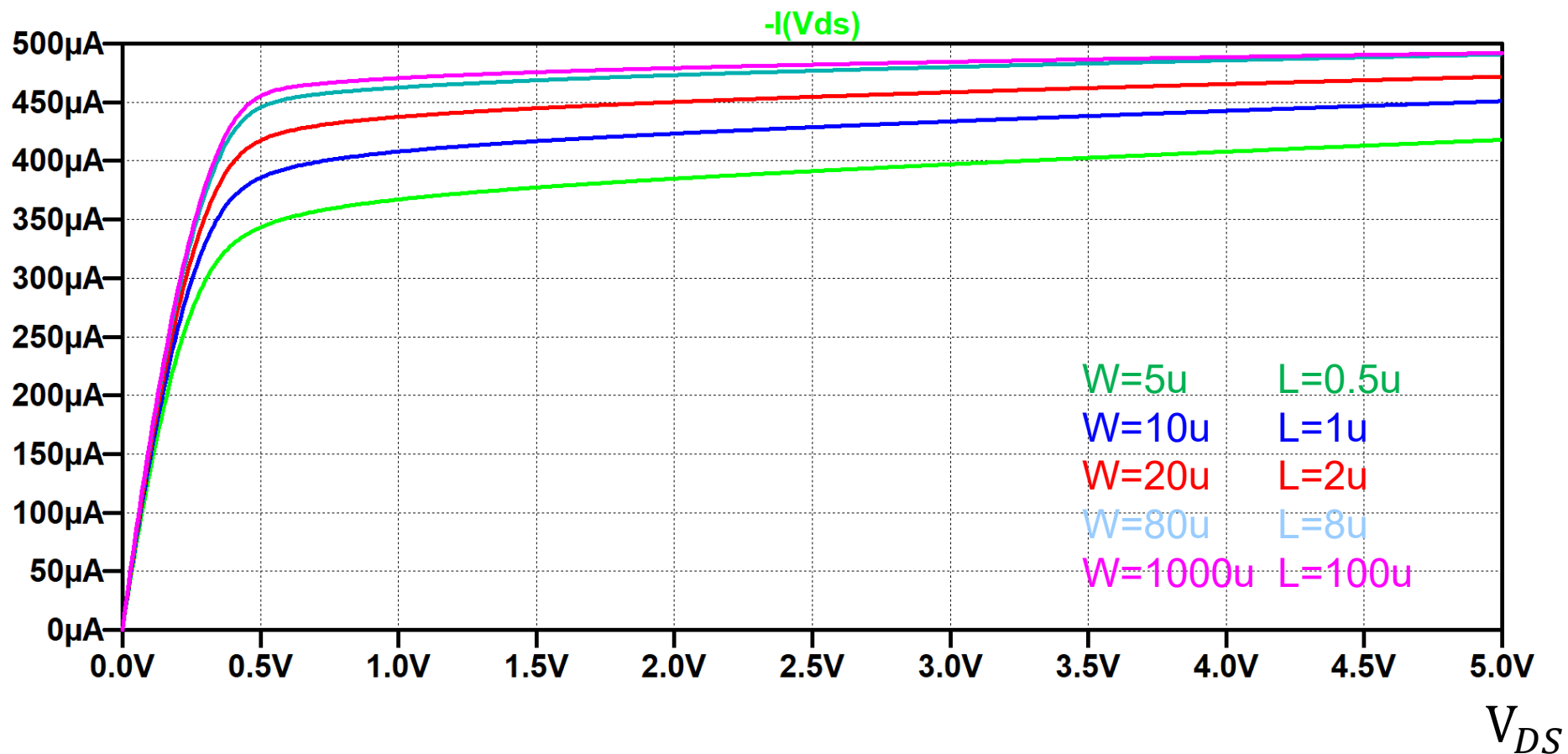


PMOS回路

# NMOSのW, L とドレイン電流特性

W/L = 10 の場合

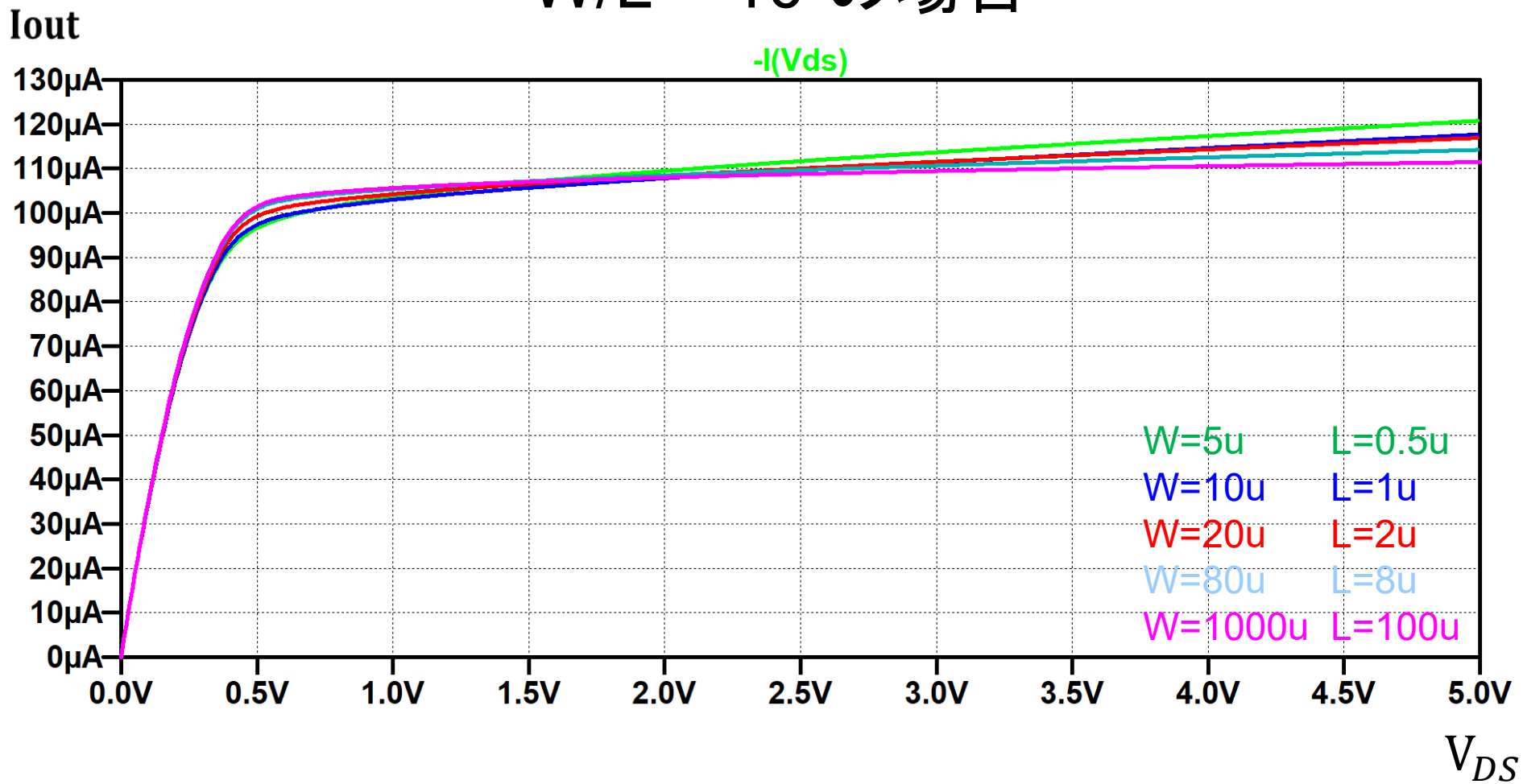
$I_{out}$



NMOS: W/L 比が一定でも W, L のサイズが小  
 → ドレイン電流は小

# PMOSのW, L とドレイン電流特性

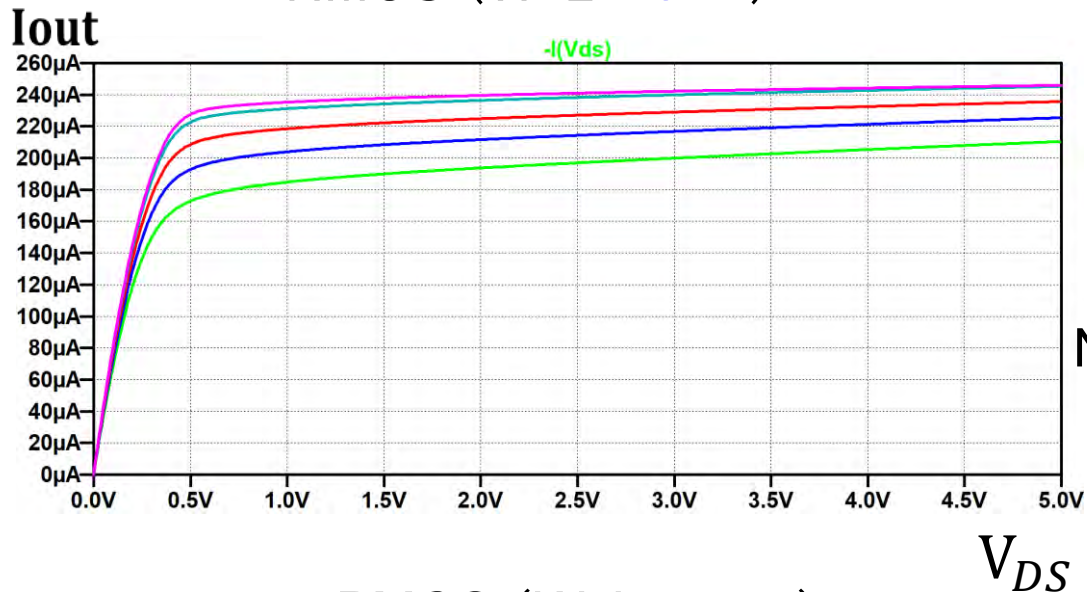
W/L = 10 の場合



PMOS: W/L 比が一定なら ドレイン電流はほぼ一定

# NMOS, PMOSのW, Lとドレイン電流特性

NMOS (W:L=5:1)

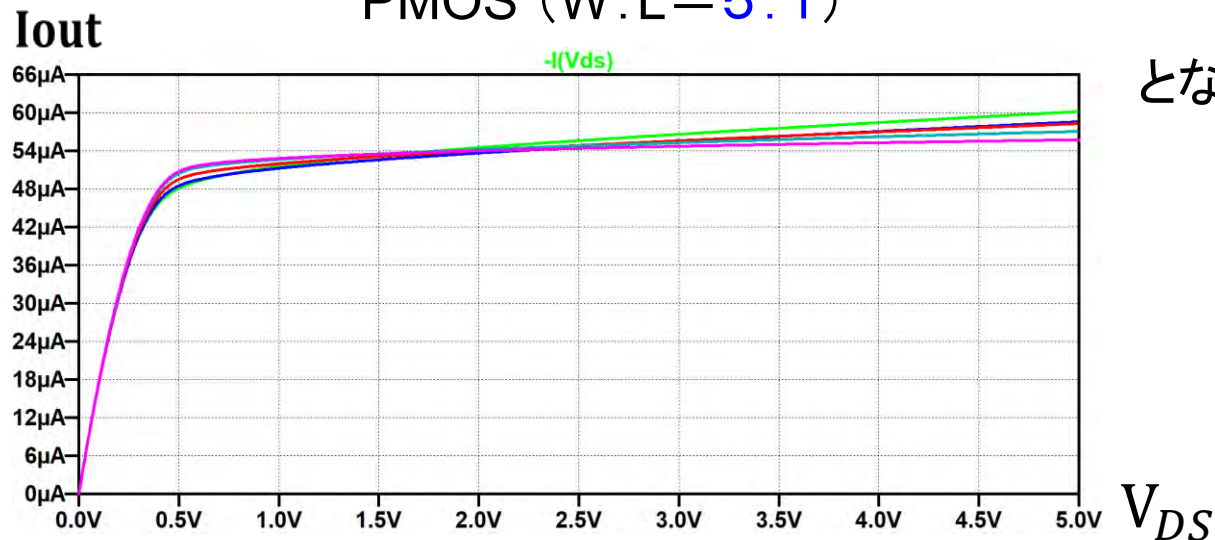


NMOS・PMOSドレイン電流の特徴  
(W:L=10:1)



(W:L=5:1)

PMOS (W:L=5:1)



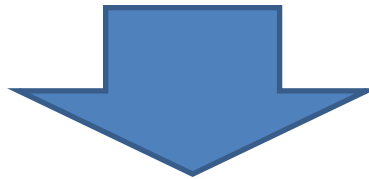
となっても確認することができた

# まとめ： NMOS・PMOSのサイズと電流

測定結果より、

NMOSは $W:L$ の比が一定でも  
大きさにより出力電流に影響を及ぼす

PMOSは $W:L$ の比が一定ならば  
大きさによる出力電流の影響が少ない



NMOS  
素子の大きさの影響を受ける

PMOS  
素子の大きさによる影響を受けにくい

# OUTLINE

- 研究目的
- 永田穰電流源回路
- MOSドレイン電流の温度特性
- 電源電圧、温度不感電流源の設計
  - ↳ NMOS型
  - ↳ PMOS型
- シミュレーション結果
- まとめ



# 電源電圧・温度不感電流源の設計

複数の永田穰電流源回路の  
異なるピーク点を加算



電源電圧不感

複数の永田穰電流ミラー回路の  
異なる温度特性を打ち消すよう  
回路設計



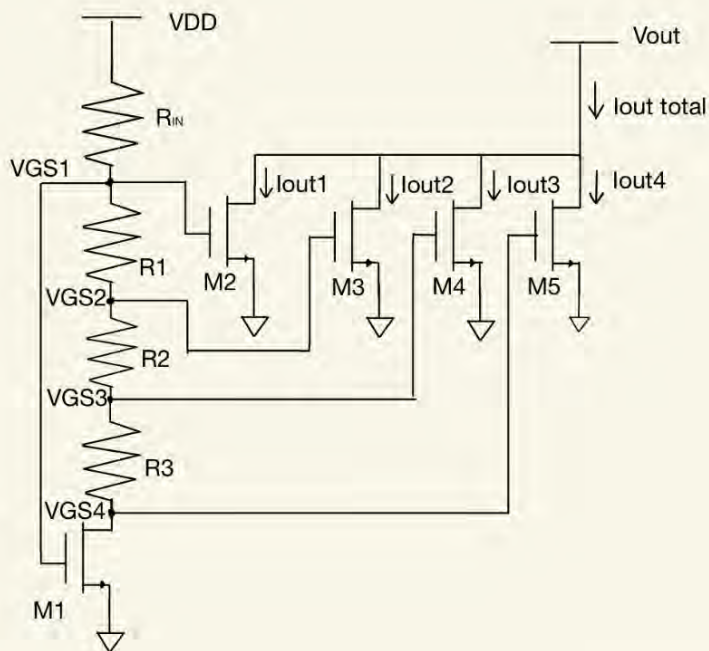
温度不感

NMOS・PMOS両方の素子で  
回路を設計



シンク電流源  
ソース電流源

# NMOS型 シミュレーション回路

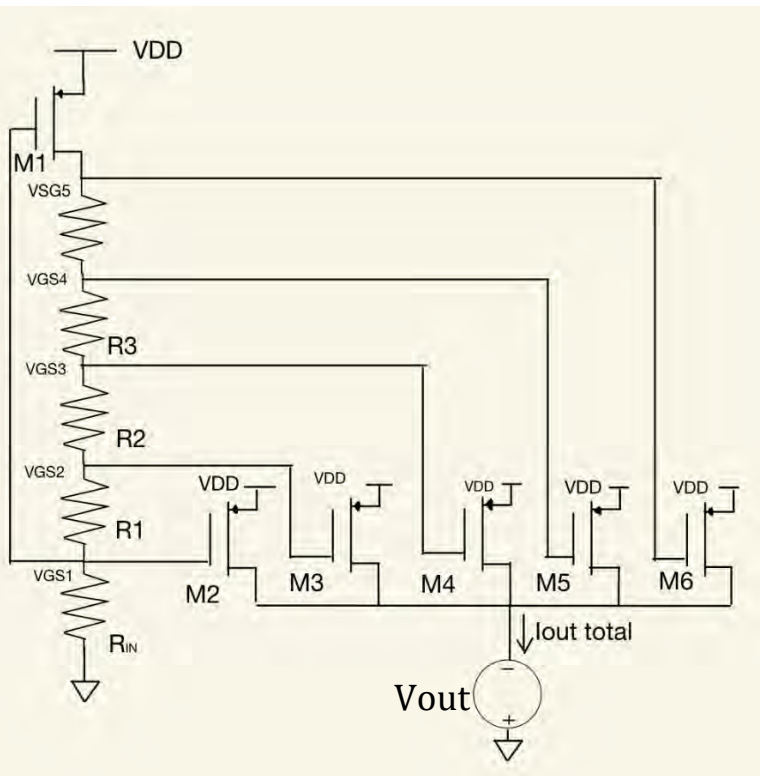


$V_{DD}$	0~5V
Vout	5V
$M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$ (W [ $\mu\text{m}$ ] / L [ $\mu\text{m}$ ])	$\frac{3}{0.2}, \frac{3}{0.3}, \frac{2}{0.2}, \frac{4}{0.2}, \frac{3}{0.12}$
$R_{in}, R_1, R_2, R_3$	500k, 6k, 9k, 11k

LTspice シミュレーションパラメータ  
TSMC 0,18 $\mu\text{m}$  CMOS

NMOS電流シンク型永田電流源

# PMOS型 シミュレーション回路



$V_{DD}$	0~5V
$V_{out}$	
$M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$ (W [ $\mu\text{m}$ ] / L [ $\mu\text{m}$ ])	$\frac{3}{0.15}, \frac{0.5}{0.2}, \frac{2}{0.2}, \frac{4}{0.2}, \frac{6}{0.15}, \frac{12}{0.15}$
$R_{in}, R_1, R_2, R_3, R_4$	500k, 6k, 9k, 11k, 4k

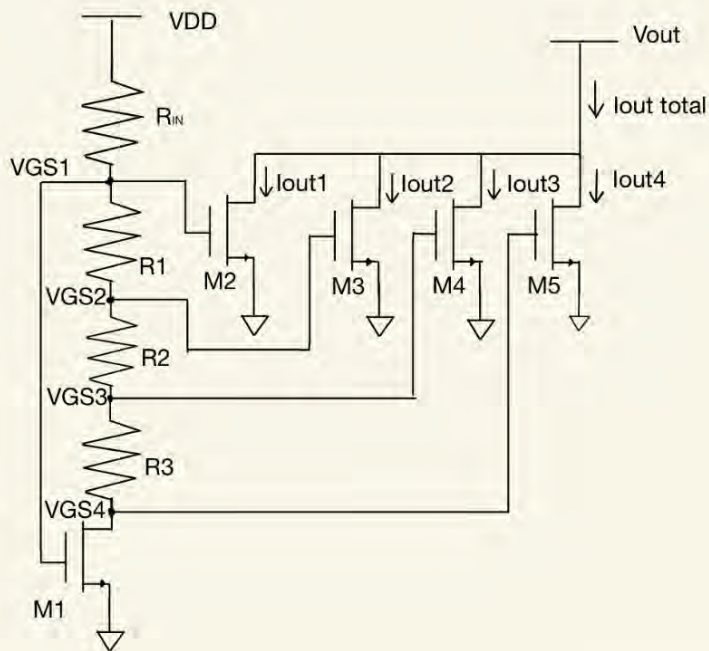
LTspice シミュレーションパラメータ  
TSMC 0,18 $\mu\text{m}$  CMOS

PMOS電流ソース型永田電流源

# OUTLINE

- 研究目的
- 永田穰電流源回路
- MOSドレイン電流の温度特性
- 電源電圧、温度不感電流源の設計
  - ↳ NMOS型
  - ↳ PMOS型
- シミュレーション結果
- まとめ

# NMOS型 シミュレーション回路

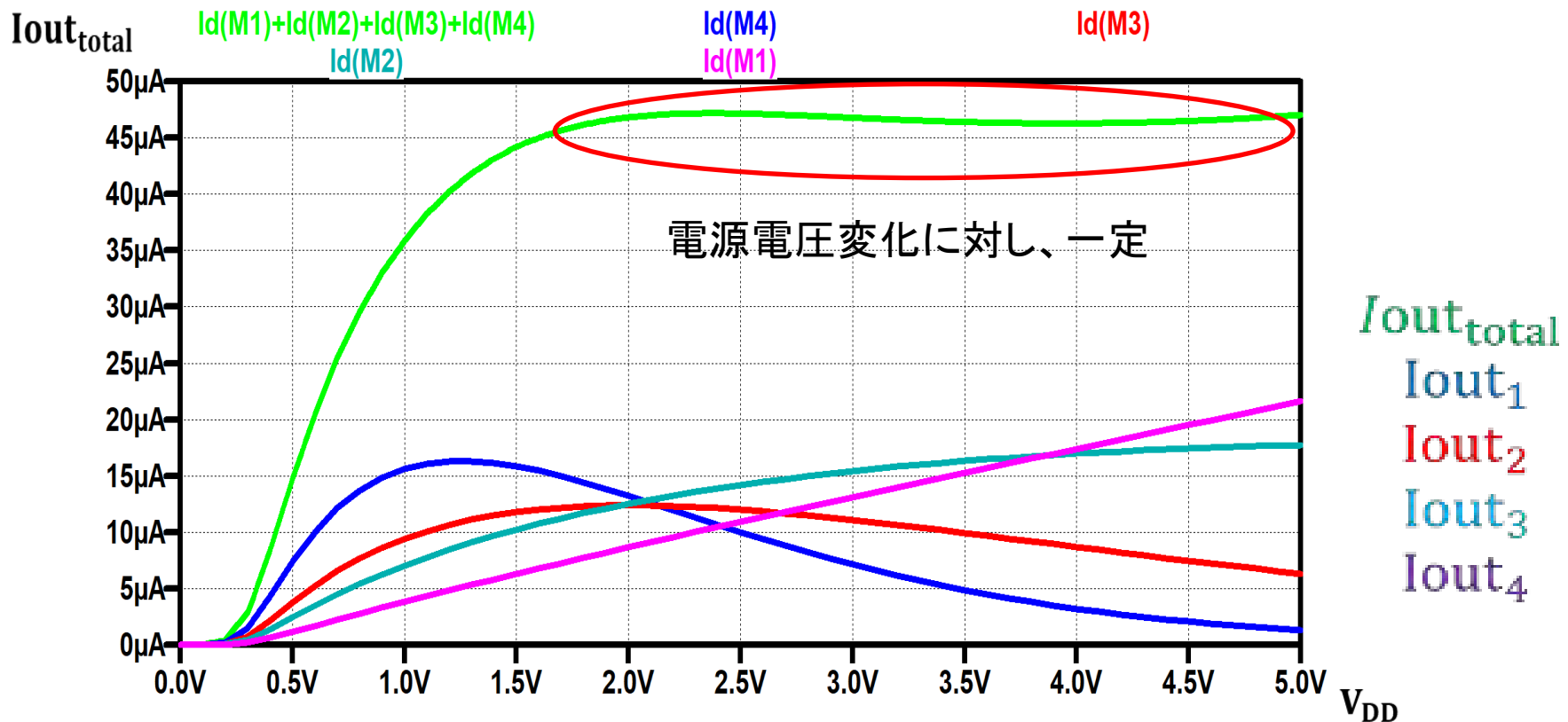


$V_{DD}$	0~5V
Vout	5V
$M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$ (W [ $\mu\text{m}$ ] / L [ $\mu\text{m}$ ])	$\frac{3}{0.2}, \frac{3}{0.3}, \frac{2}{0.2}, \frac{4}{0.2}, \frac{3}{0.12}$
$R_{in}, R_1, R_2, R_3$	500k, 6k, 9k, 11k

LTspice シミュレーションパラメータ  
TSMC 0,18 $\mu\text{m}$  CMOS

NMOS電流シンク型永田電流源

# NMOS型 シミュレーション結果

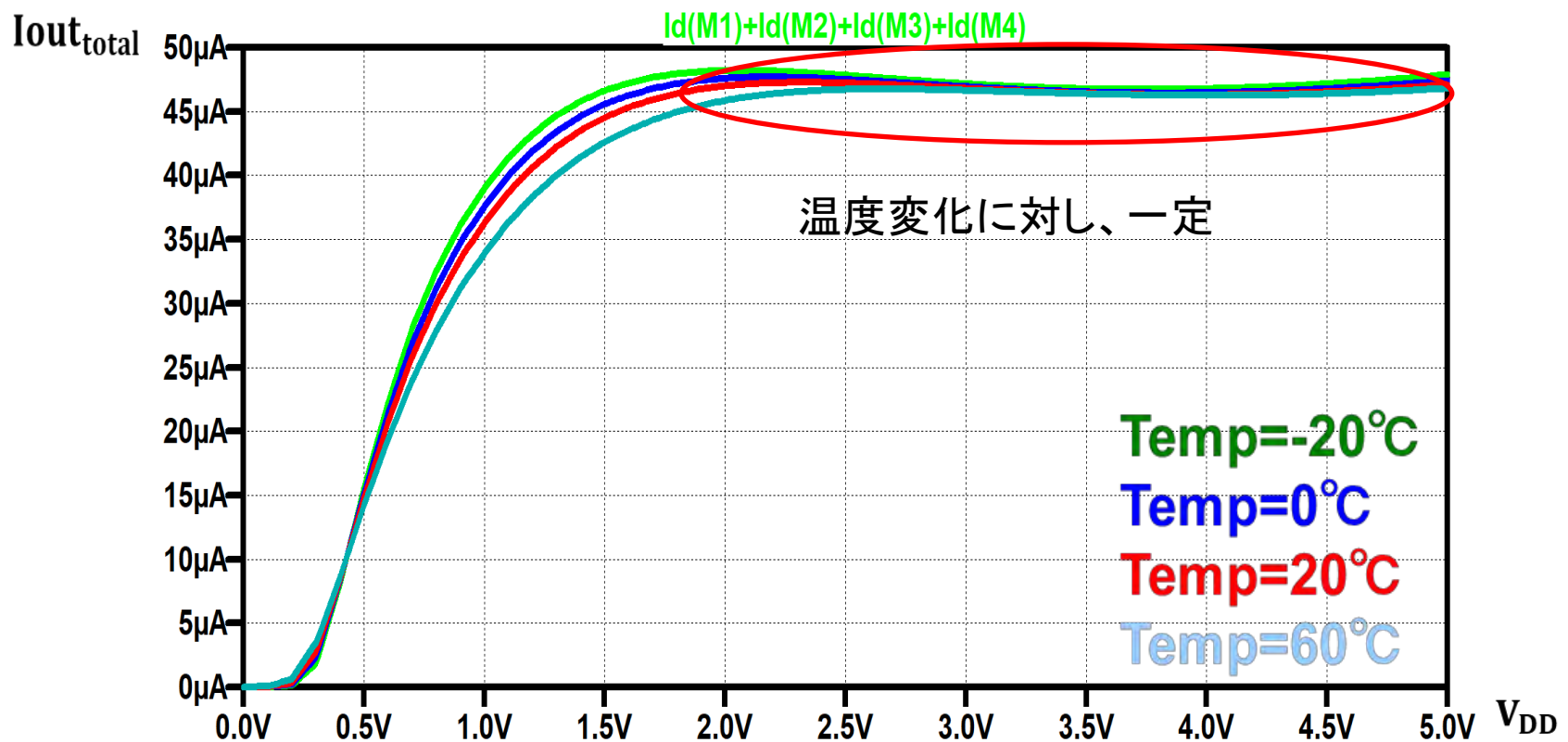


VDDが2~5vに対し出力が一定



電源電圧に不感である

# NMOS型 シミュレーション結果

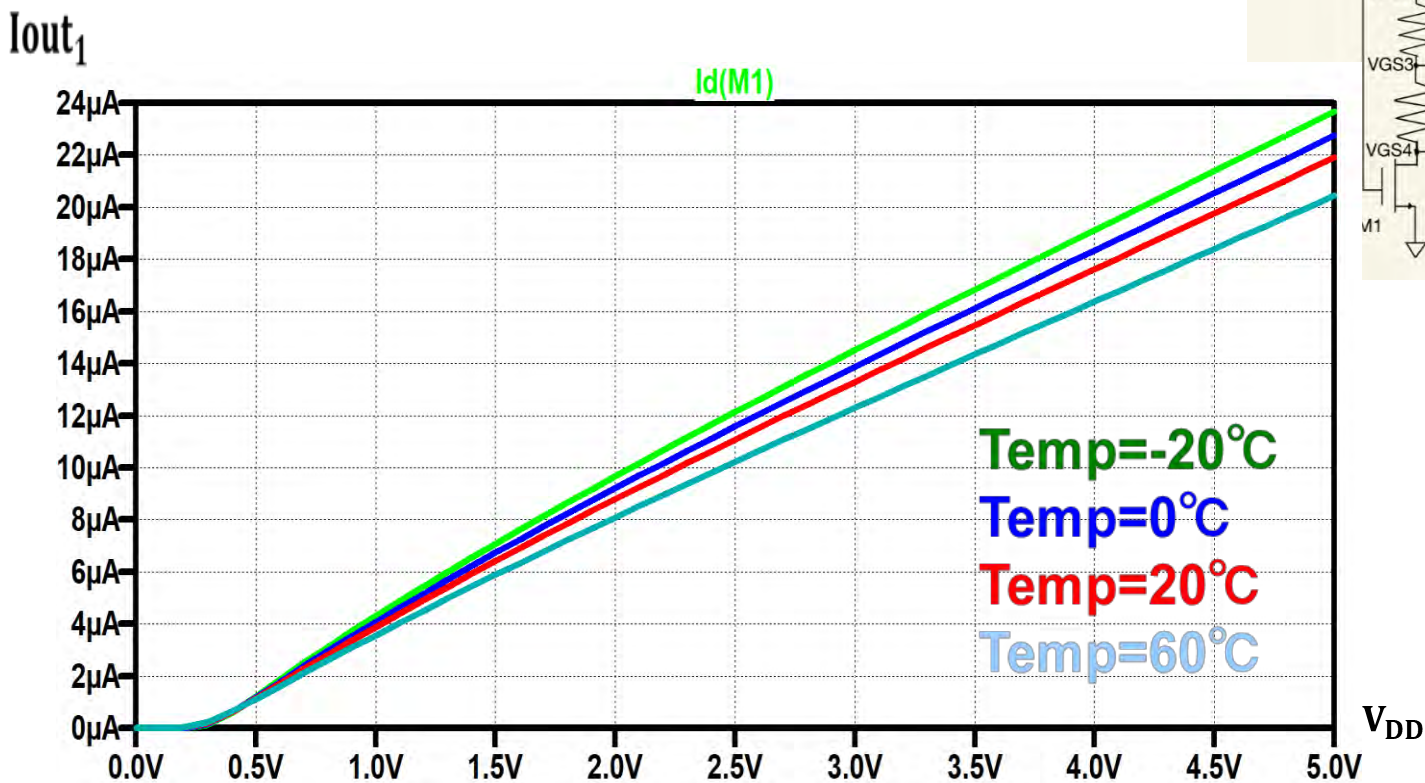


温度変化に不感である

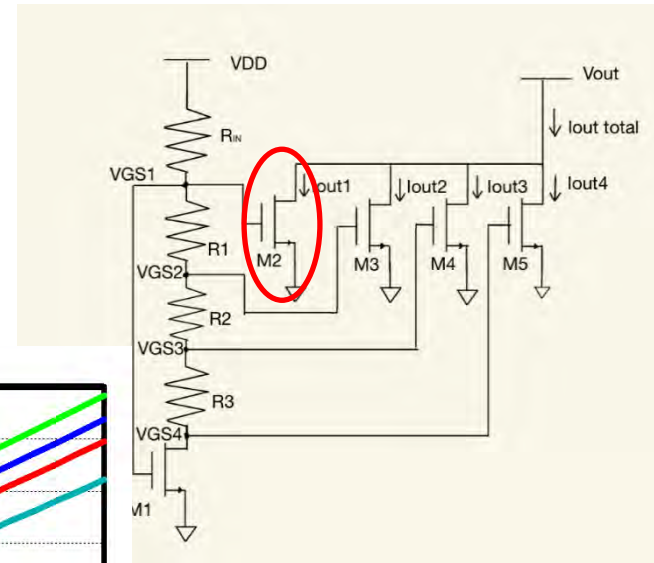
各 $I_{out1} \sim I_{out4}$ の出力に注目する

# NMOS型 シミュレーション結果

高温 → 電流 小



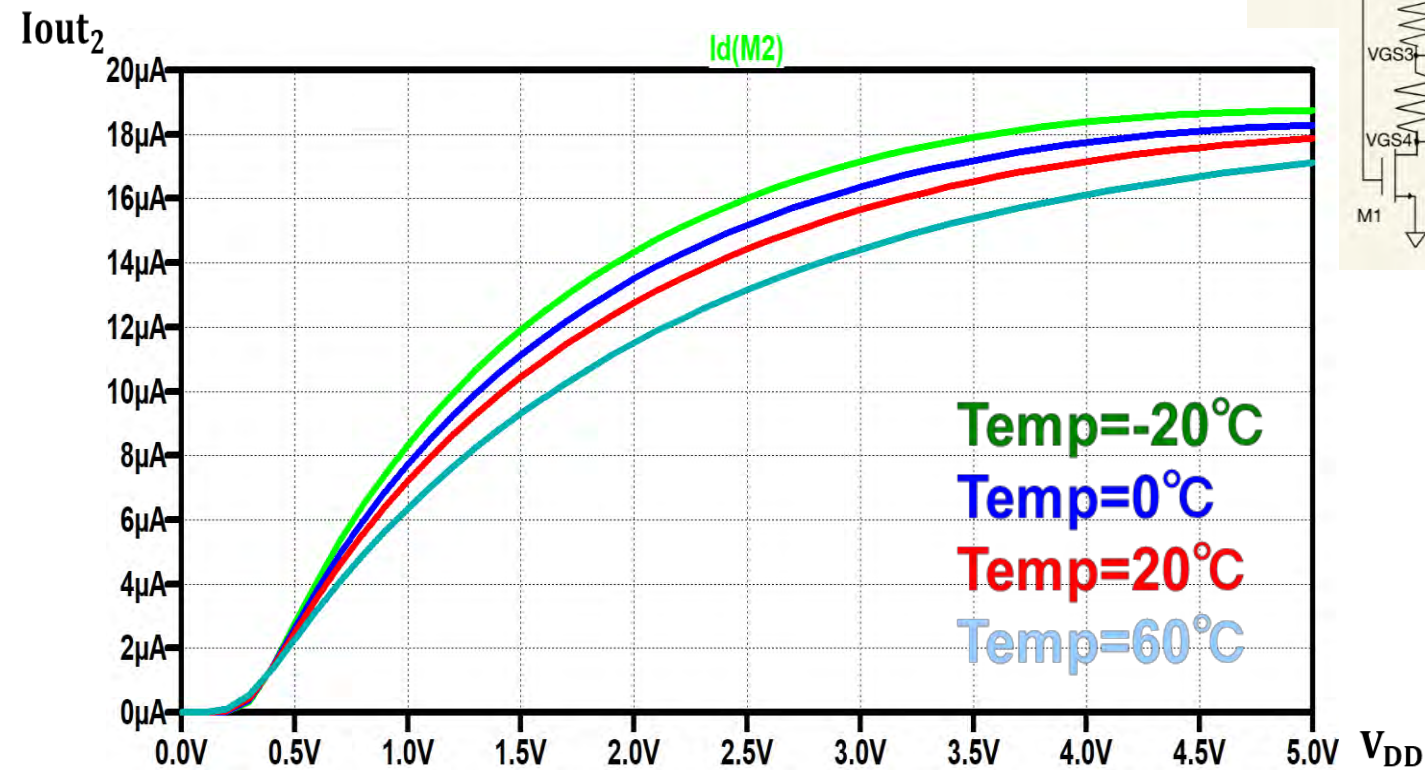
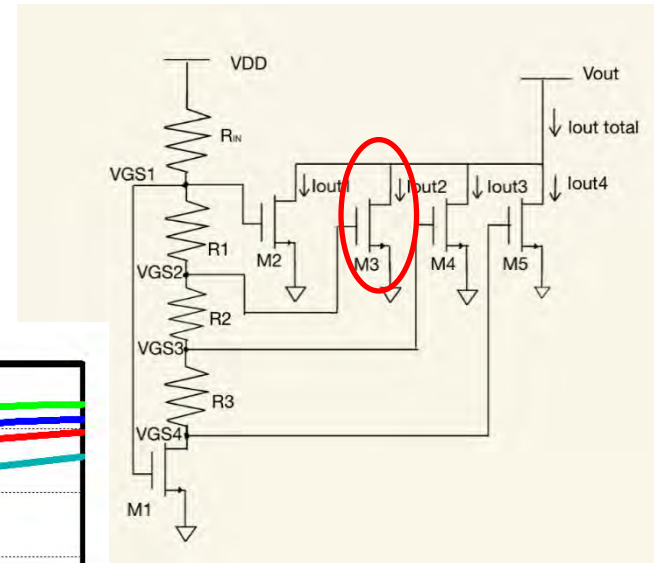
温度係数が負





# NMOS型 シミュレーション結果

高温 → 電流 小



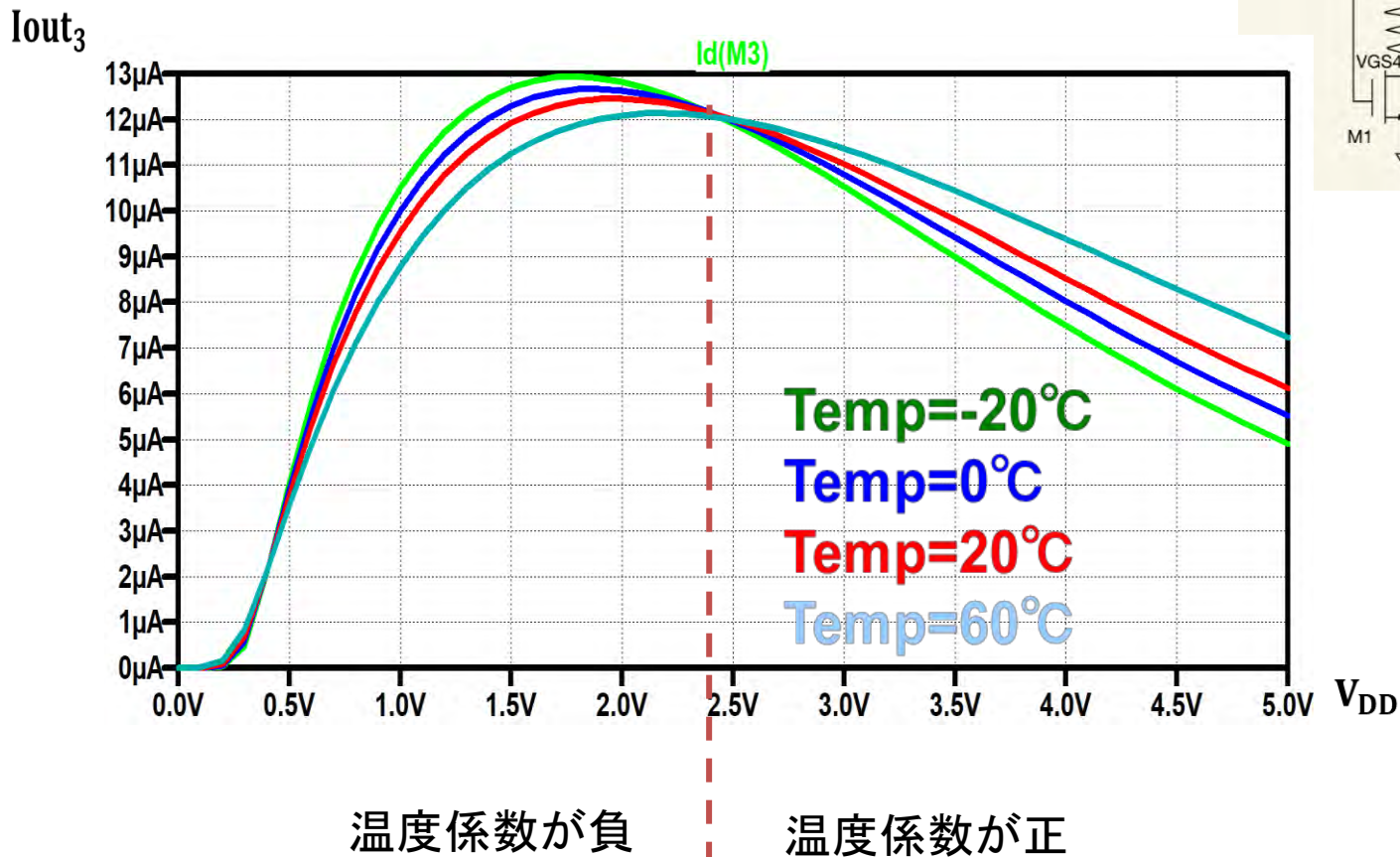
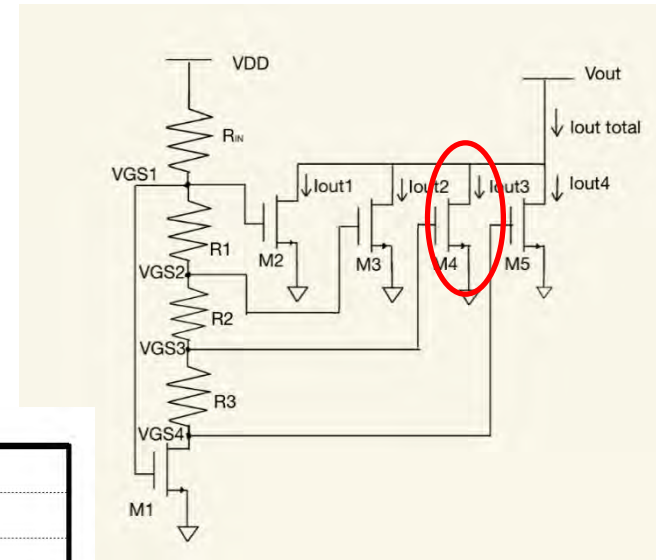
温度係数が負

# NMOS型 シミュレーション結果

高温

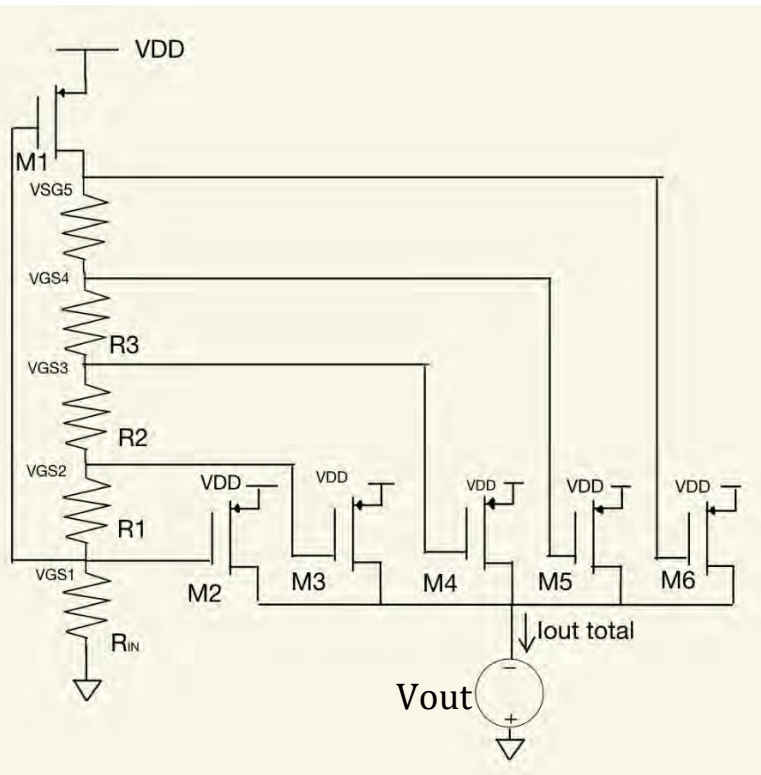
電流 小

電流 大





# PMOS型 シミュレーション回路

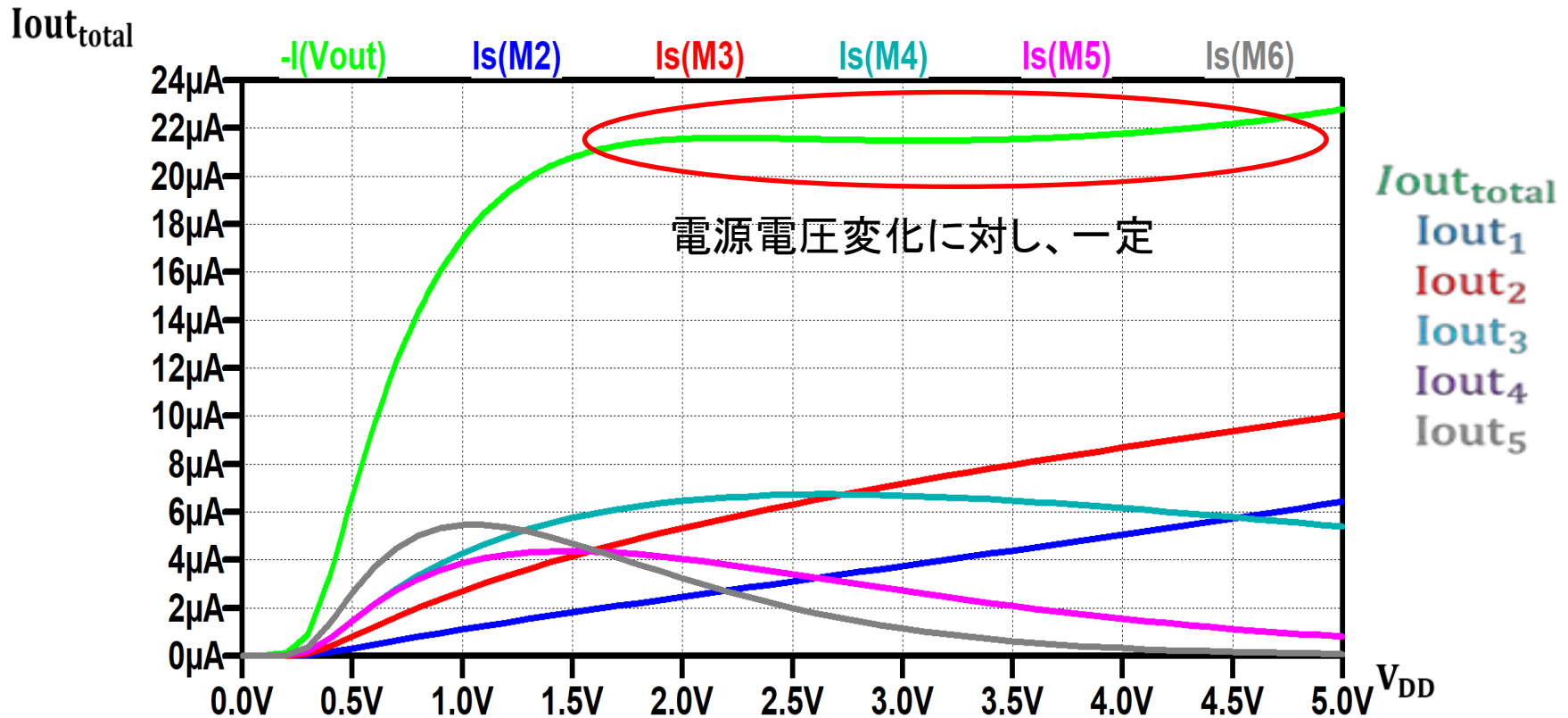


$V_{DD}$	0~5V
Vout	
$M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$ (W [ $\mu\text{m}$ ] / L [ $\mu\text{m}$ ])	$\frac{3}{0.15}, \frac{0.5}{0.2}, \frac{2}{0.2}, \frac{4}{0.2}, \frac{6}{0.15}, \frac{12}{0.15}$
$R_{in}, R_1, R_2, R_3, R_4$	500k, 6k, 9k, 11k, 4k

LTspice シミュレーションパラメータ  
TSMC 0,18 $\mu\text{m}$  CMOS

PMOS電流ソース型永田電流源

# PMOS型 シミュレーション結果

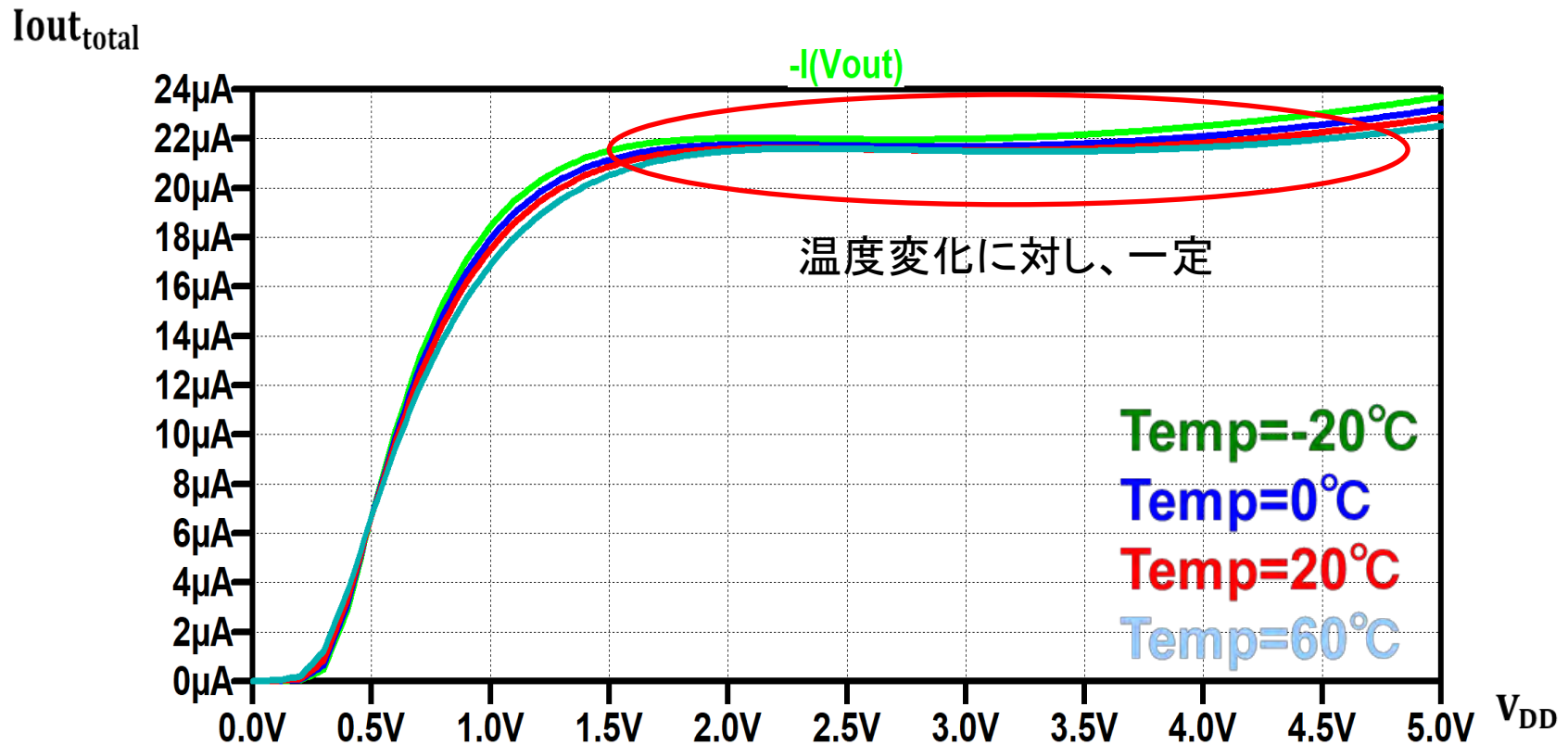


VDDが1.5~5vに対し出力が一定



電源電圧に不感である

# PMOS型 シミュレーション結果



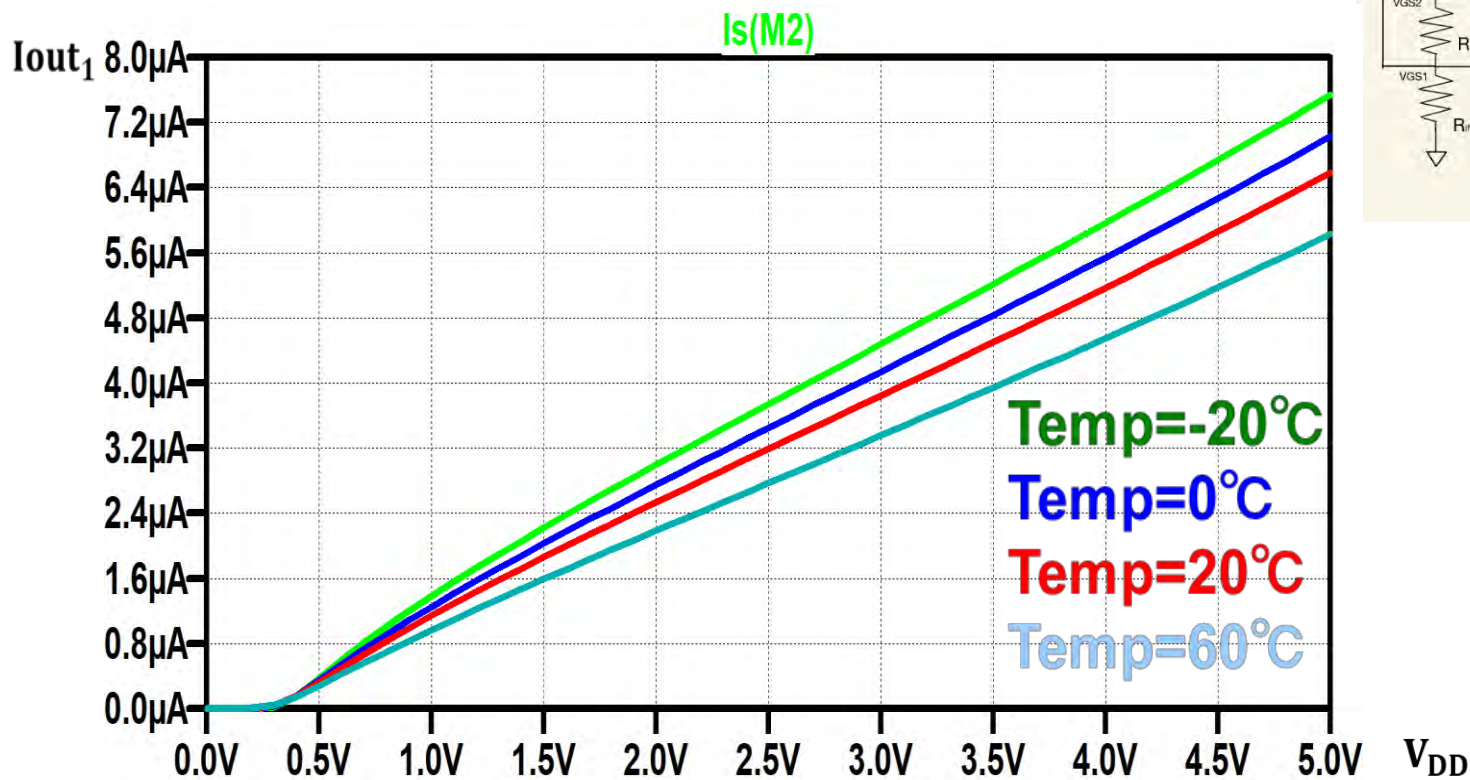
温度変化に不感である

各 $I_{out1} \sim I_{out5}$ の出力に注目する

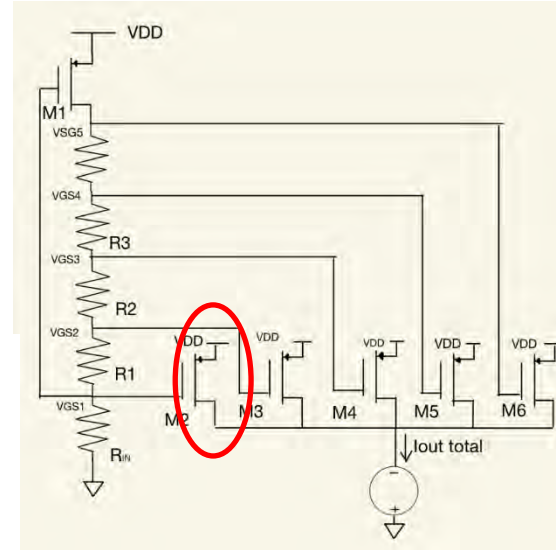


# PMOS型 シミュレーション結果

高温 → 電流 小

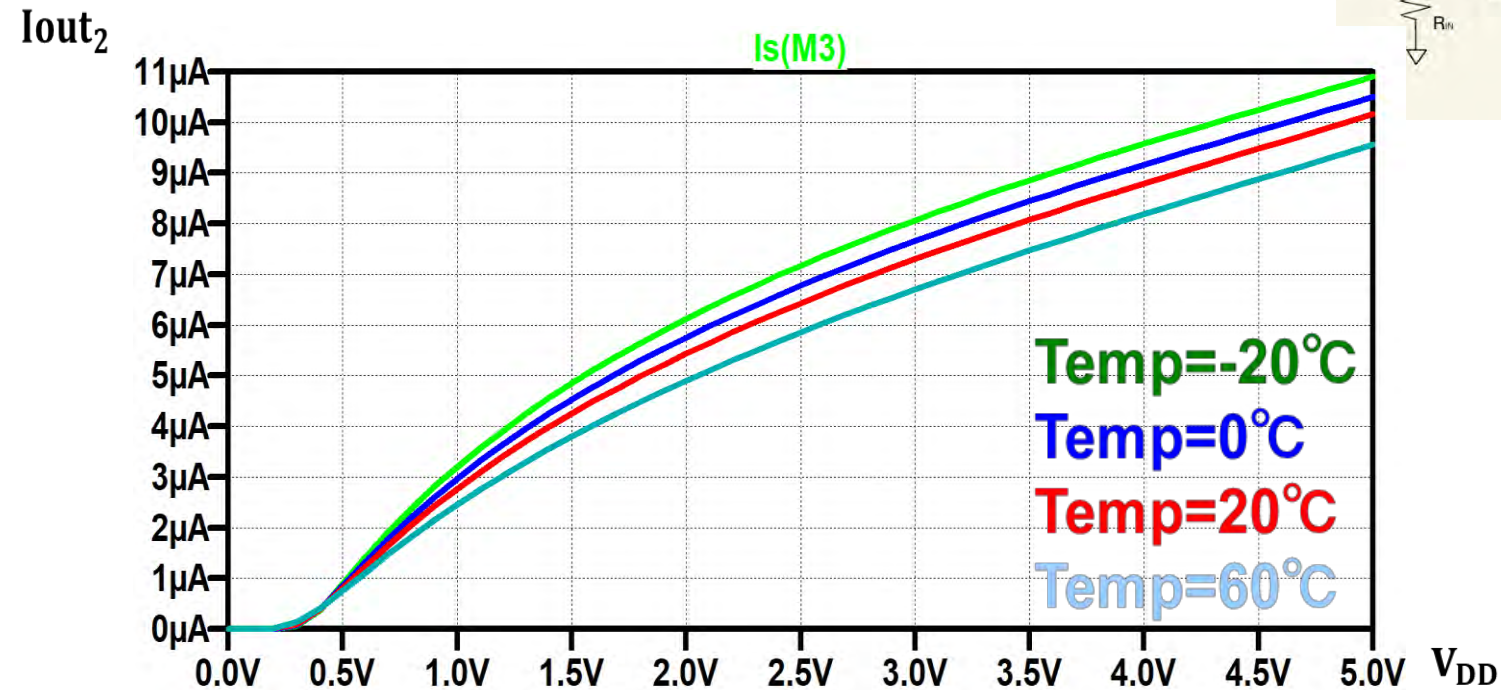
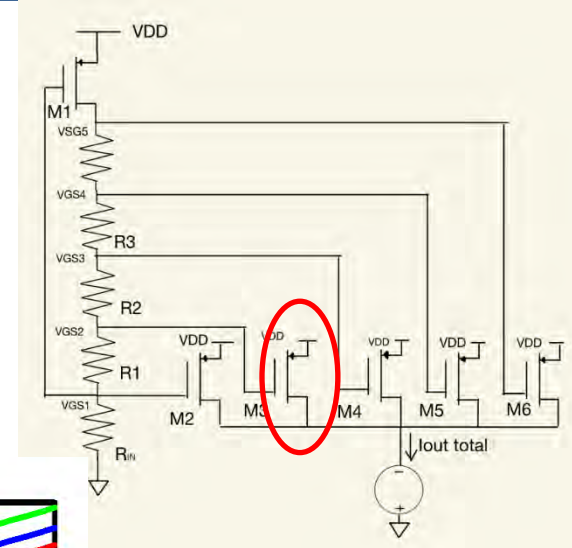


温度係数が負



# PMOS型 シミュレーション結果

高温 → 電流 小



温度係数が負



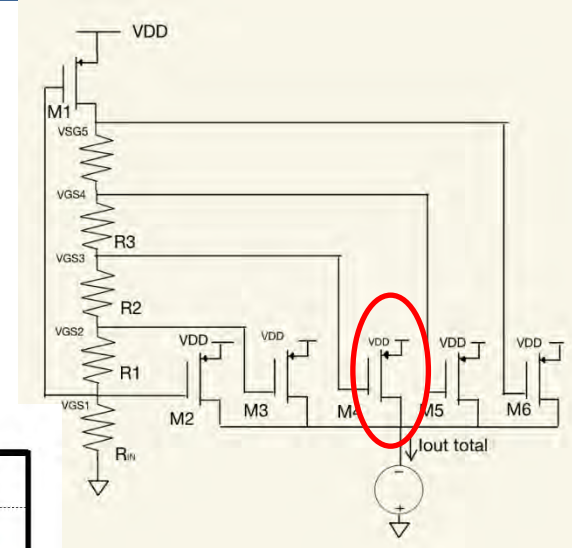
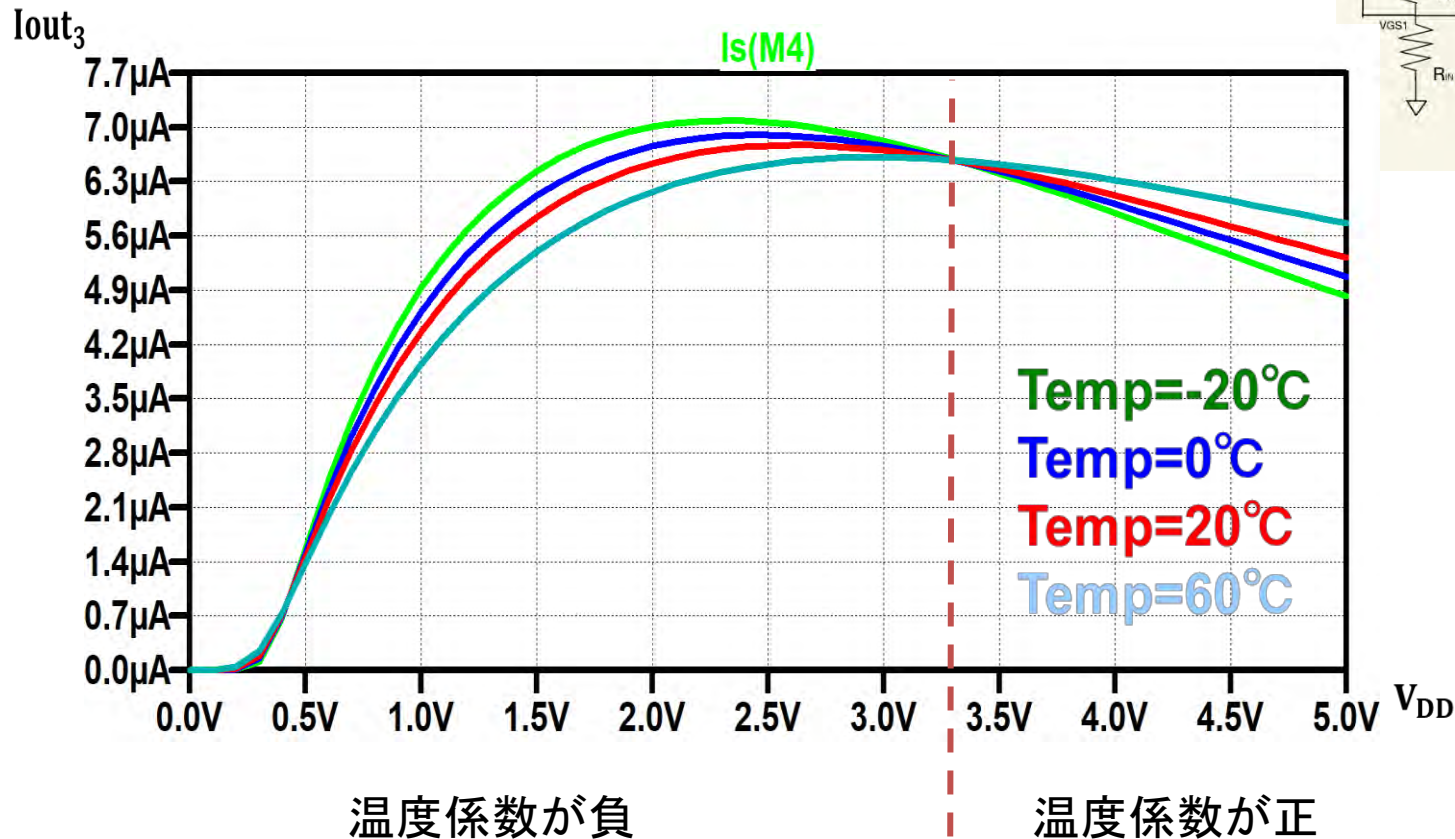
# PMOS型 シミュレーション結果

高温

↓

電流 小      電流 大

↓

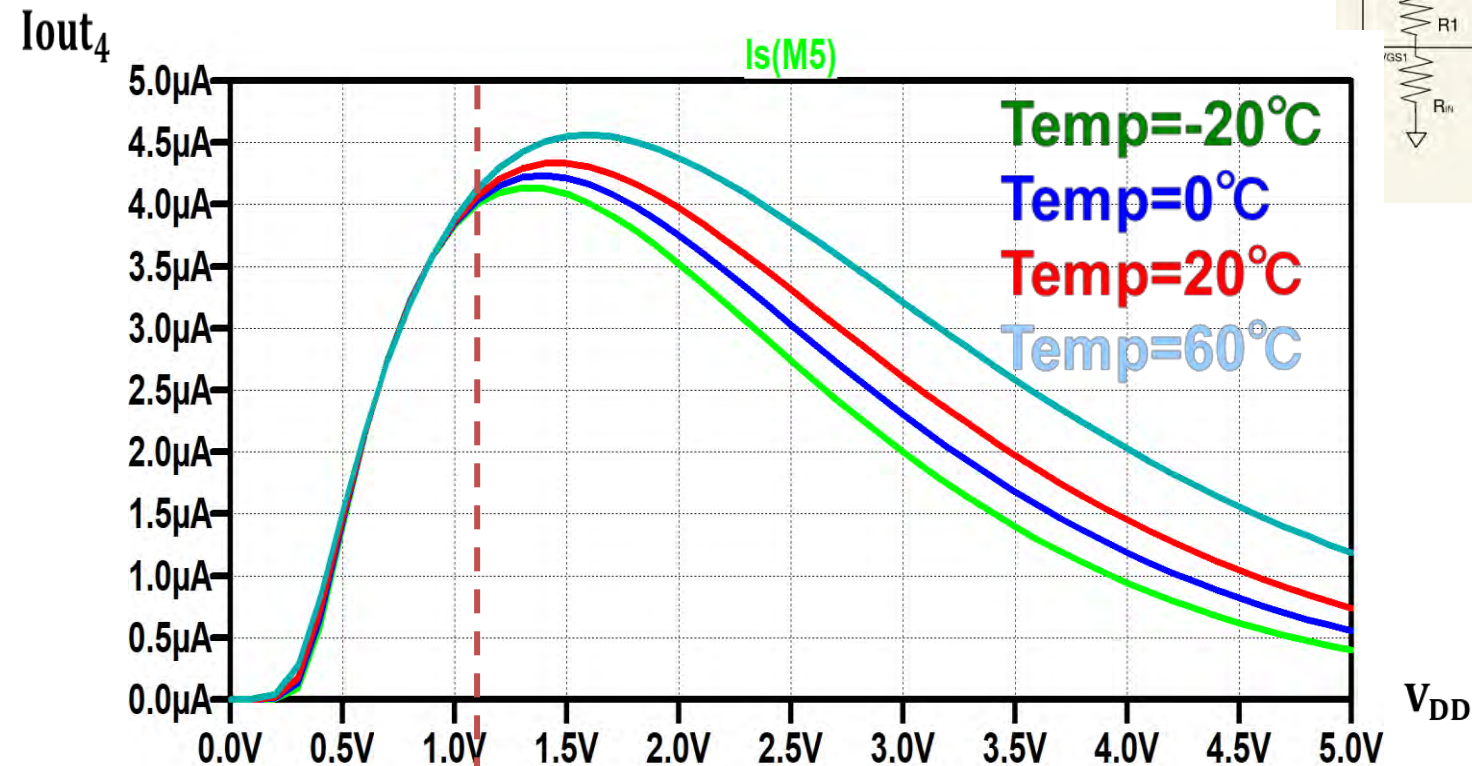
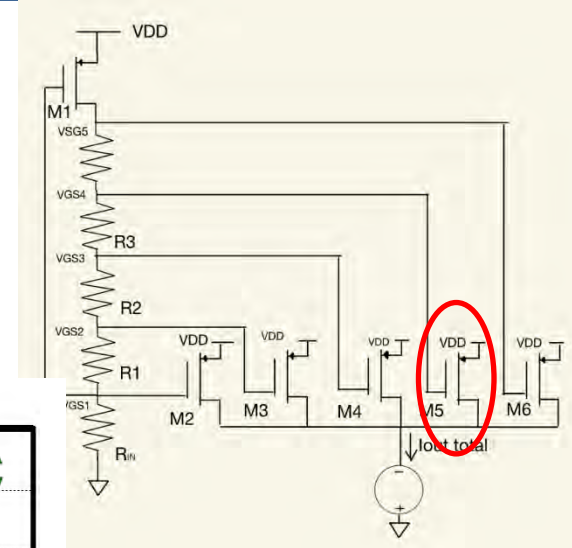


# PMOS型 シミュレーション結果

高温

電流一定

電流大



温度係数 ゼロ

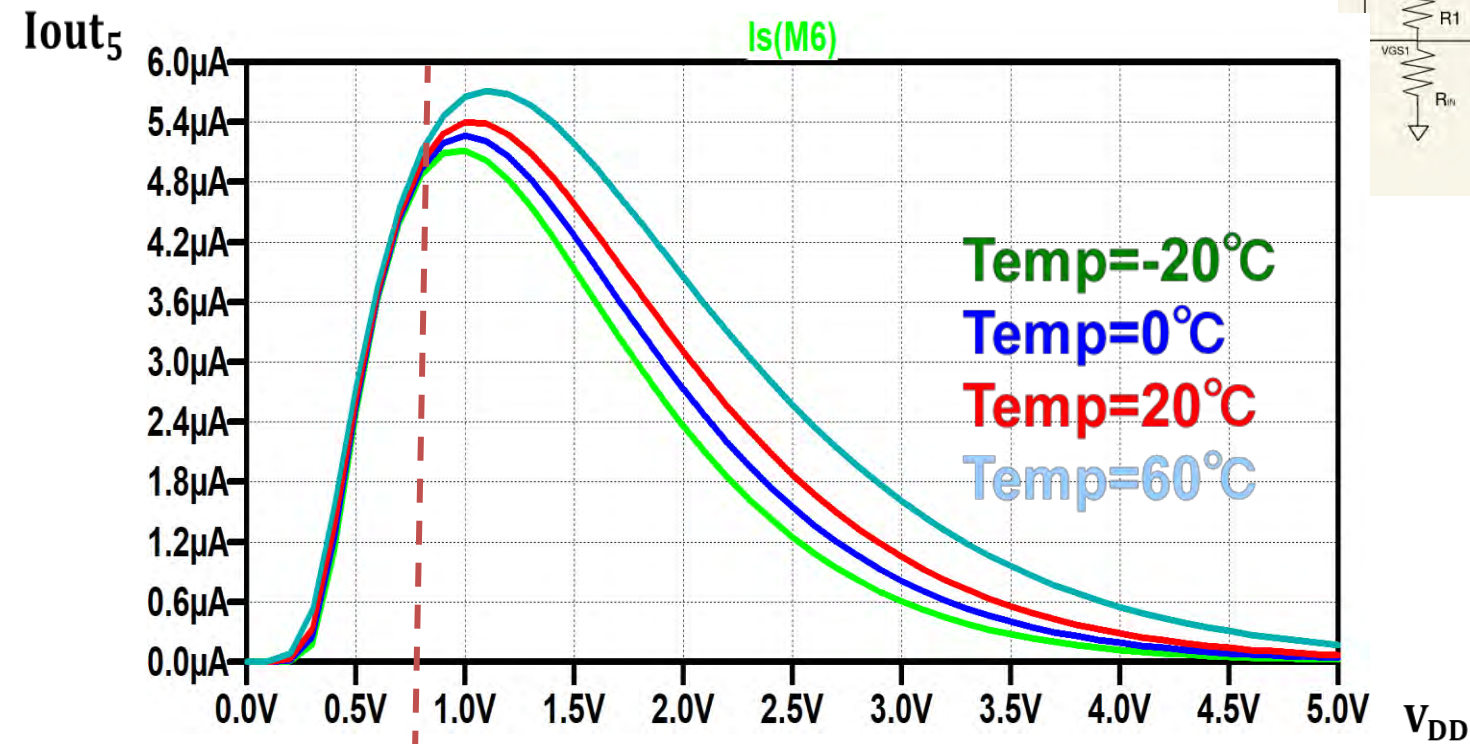
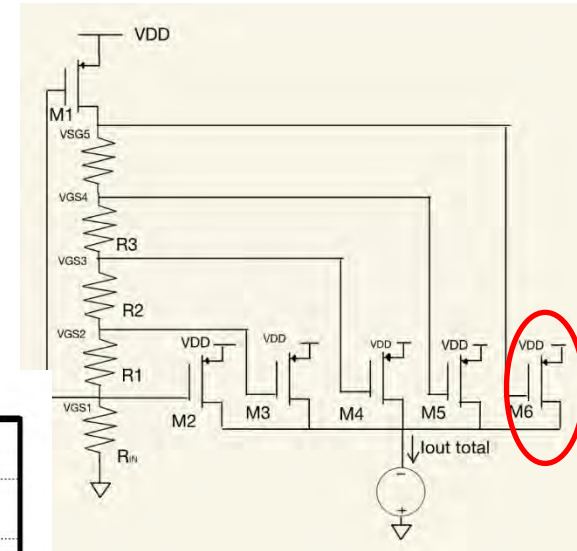
温度係数が正

# PMOS型 シミュレーション結果

高温

電流一定

電流大



温度係数がゼロ

温度係数が正

# OUTLINE

- 研究目的
- 永田穰電流源回路
- MOSドレイン電流の温度特性
- 電源電圧、温度不感電流源の設計
  - ↳ NMOS型
  - ↳ PMOS型
- シミュレーション結果
- まとめ

# まとめ

- 電源電圧・温度不感な基準電流源である
  - NMOS電流シンク型永田電流源
  - PMOS電流ソース型永田電流源の構成を考案し  
SPICEシミュレーションで検証した。
- 今後はCMOSチップでの実現、  
実測検証を行っていく

# Q&A 群馬大学2月22日

Q1, なぜ並列に加算させる永田電流源の数は4個以上なのか？  
2個ではできないのか？(千葉先生)

A, 今回作成の際に2個並列も作成しましたが、うまく電源電圧の不感性或温度への不感性を持たせることができなかった。4つ以上使うことで不感性を表現できた

Q2, 回路に使用した素子値はどのように考えのもと設計したのか？(千葉先生)

A, 回路設計の際に特に注意したのはMOSFETの素子値だった。今回の発表資料には記載しなかったが、P28、29のような波形の場合、Lの増減で温度定点の位置をWの増減で出力電流の大きさが変わることを確認した。

# Q&A 群馬栃木学会

Q、どのような回路で使用するのか？

A、今回は、電流源に電源と温度に対する不感性を  
持たせることを考えました。そのためどのような形で  
実用化させるかは考慮していませんでした。

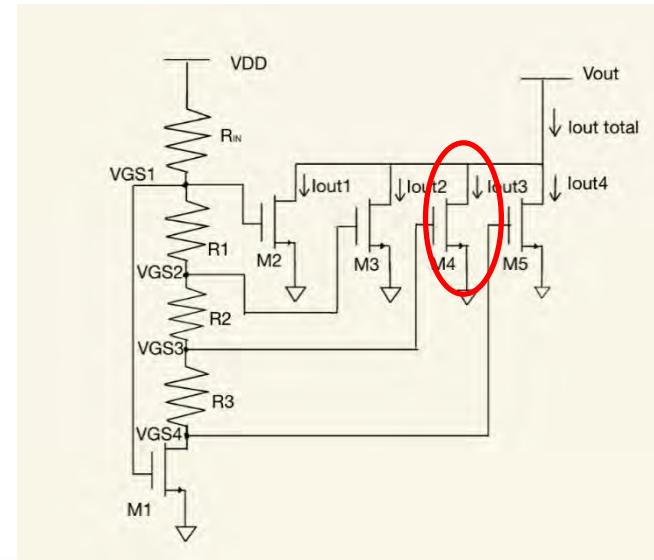
Qデバイスでのバラつきは考慮しているのか？

A、考慮していませんでした。

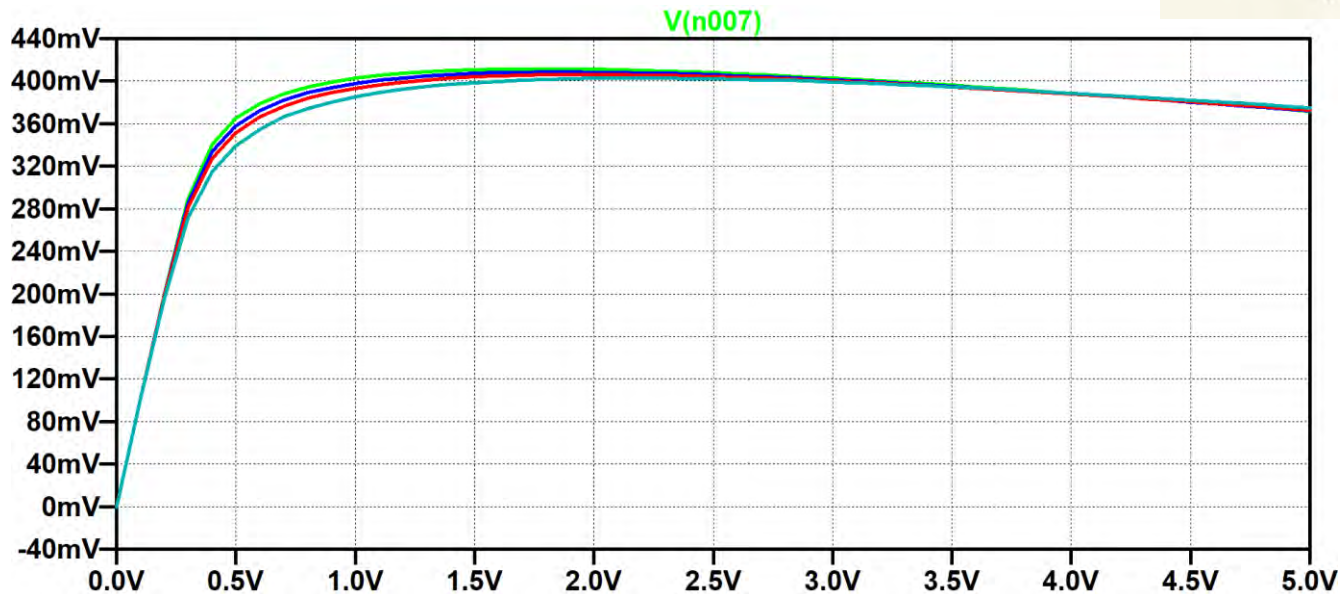


# 追加スライド

P.28, 29 の温度特性がクロスするときの  
それぞれM4、M5のゲート電圧 (Vgs)



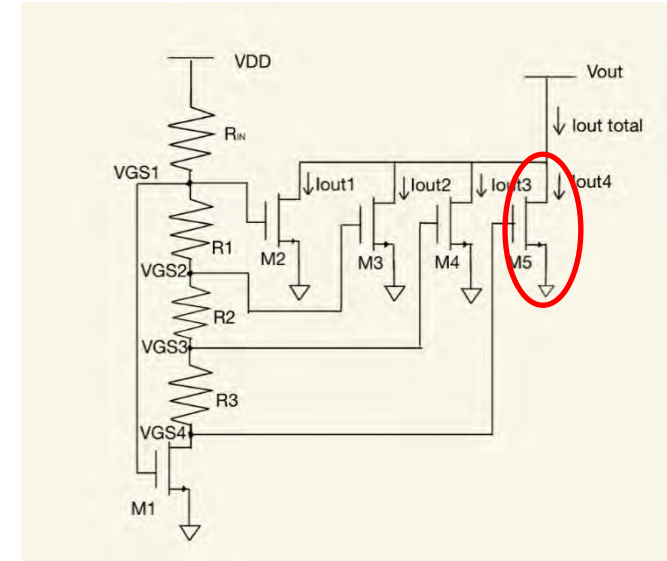
Vgs



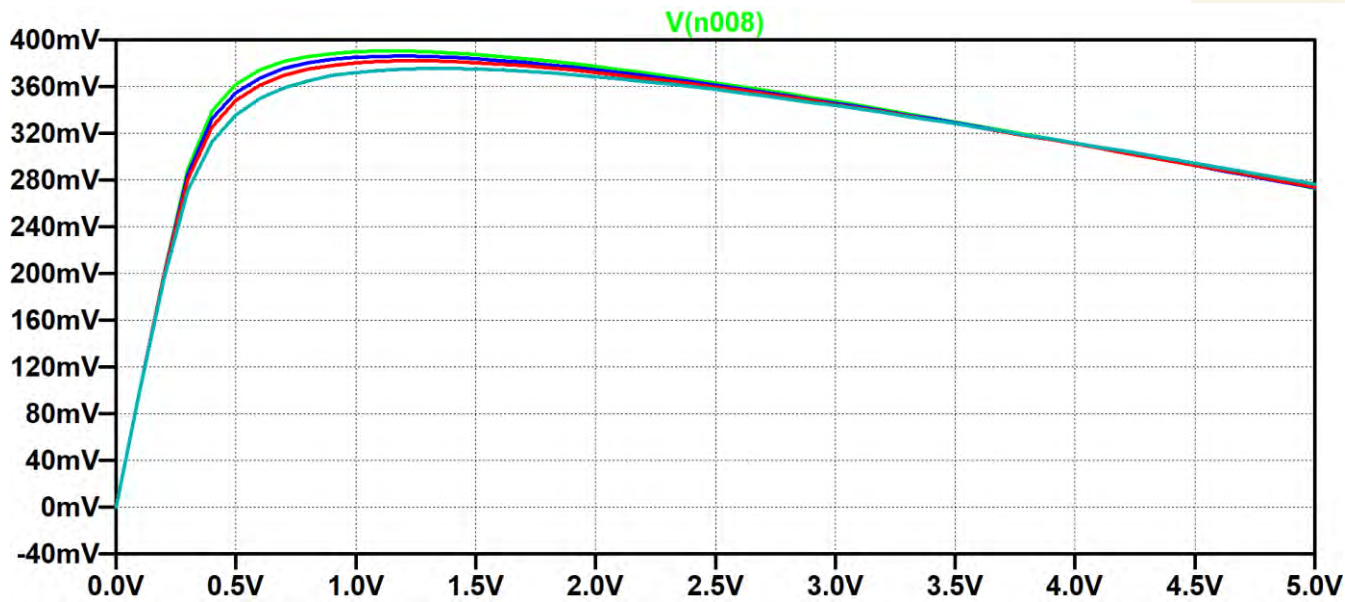
Vdd



# 追加スライド



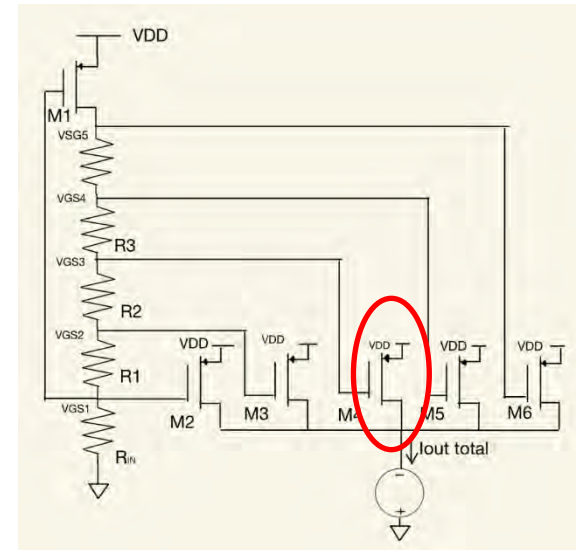
Vgs



Vdd

# 追加スライド

P35. の温度特性がクロスするときのM4の  
ゲート電圧 (Vsg)



Vgs

