



群馬大学

# 高性能カレントミラー回路の 設計とその応用

群馬大学大学院電気電子工学研究科  
通信処理システム第二研究室

指導教官

仁木義規  
小林春夫 教授



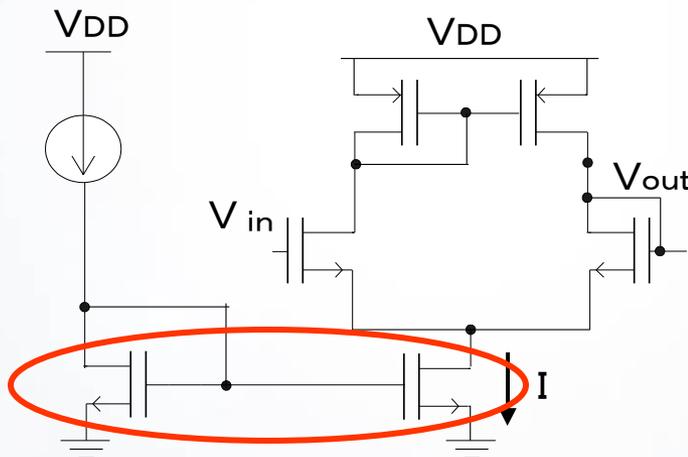
## 発表内容

- ◆ 研究背景
- ◆ カレントミラー回路について
- ◆ OPアンプを使用したカレントミラー回路
- ◆ 高性能カレントミラー回路の提案
- ◆ 高性能カレントミラー回路の応用
- ◆ まとめ



## 研究背景

カレントミラー回路



例.OPアンプ回路

OPアンプ、ADC、DACなど幅広く応用



様々な回路でカレントミラー回路の高性能化を要求

低電圧化

電流コピー精度の向上

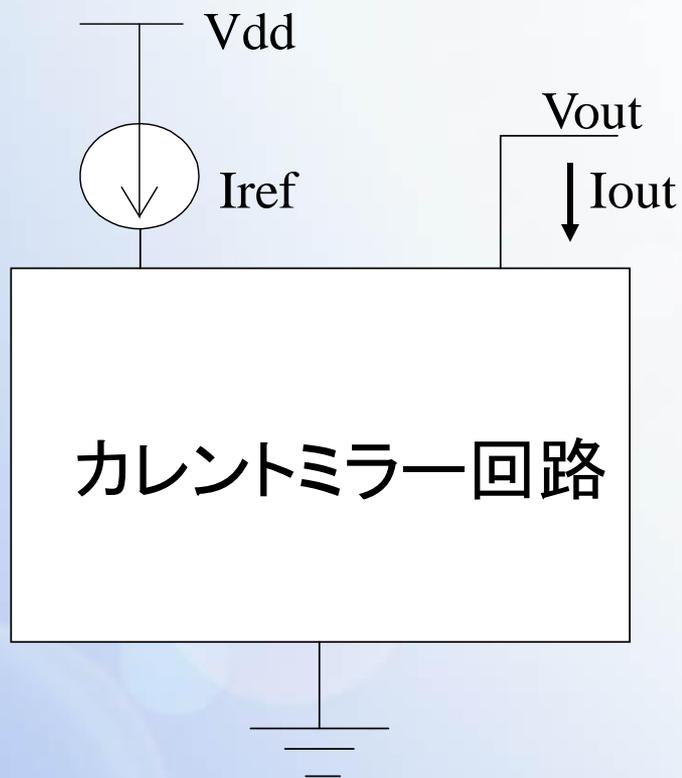


群馬大学

# カレントミラー回路について



## カレントミラー回路とは？



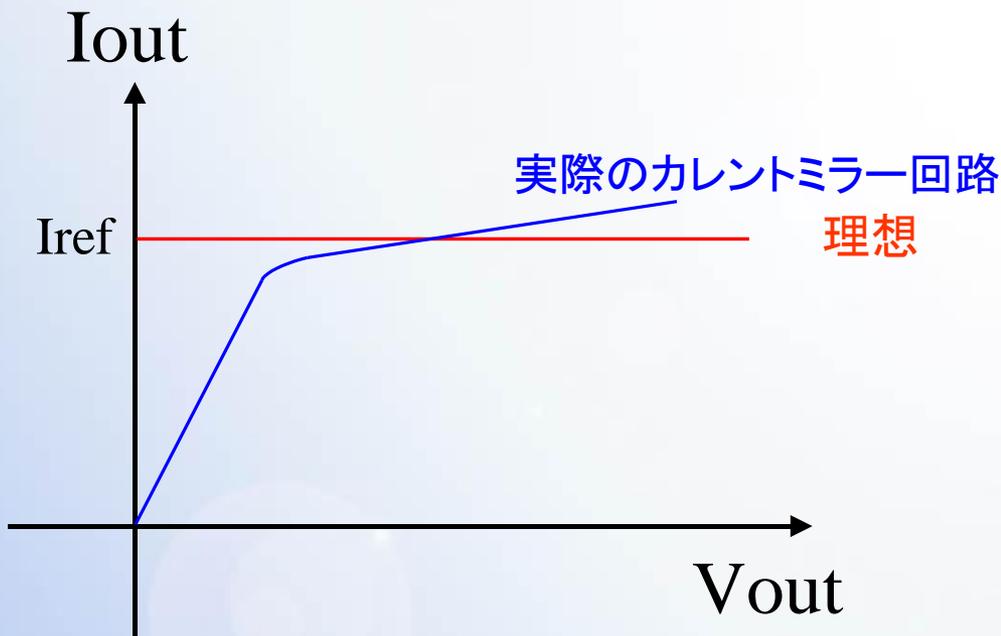
電流をコピー

$$I_{ref} = I_{out}$$

参照電流に等しい出力電流を生成する回路



## 理想的なカレントミラー回路



理想： $V_{out}$ がどんな値でも電流をコピーすることができる



実際にはこれが難しい

研究目的：  
理想にいかに近づけることが出来るか！！



群馬大学

# 基本的なカレントミラー回路



## 基本的なカレントミラー

ゲート - ソース間が等しく、  
飽和領域で動作している  
2つの同一トランジスタには  
等しい電流が流れる

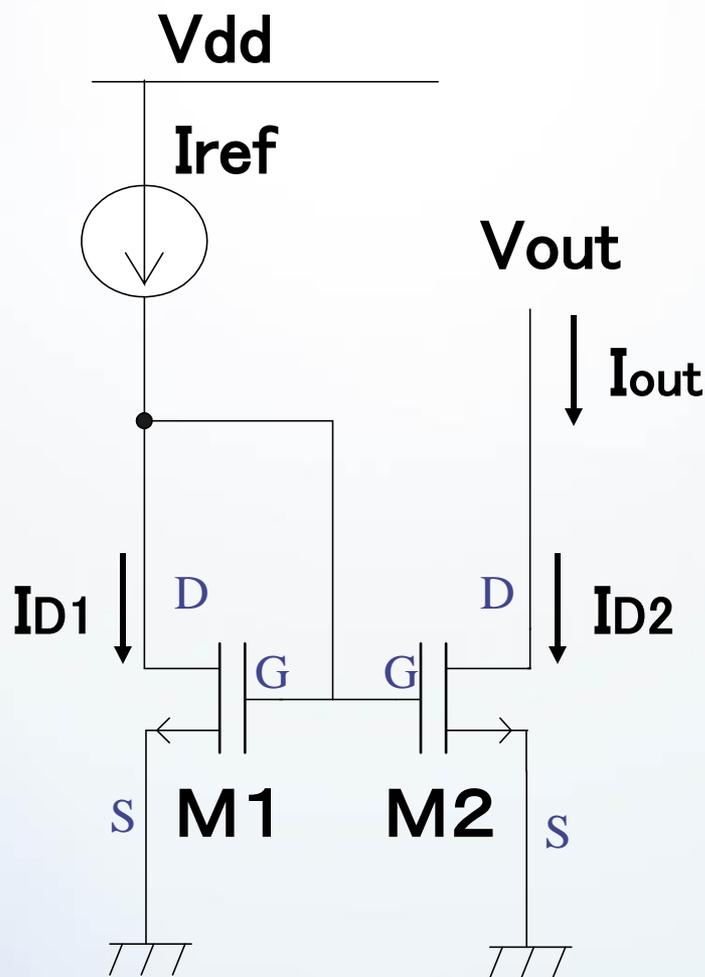
右図でM1とM2が同一の場合



入力電流  $I_{ref}$  と出力電圧  $I_{out}$  の関係は

$$I_{ref} = I_{D1} = I_{D2} = I_{out}$$

※ただしチャネル長変調効果を無視している





## 基本的なカレントミラー

式で表すと(チャネル長効果を無視)

$$I_{ref} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})_1^2$$

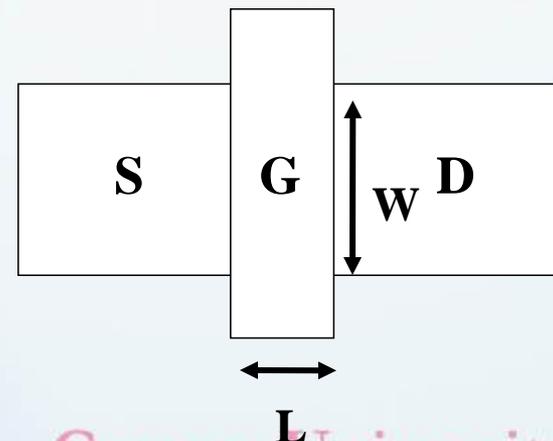
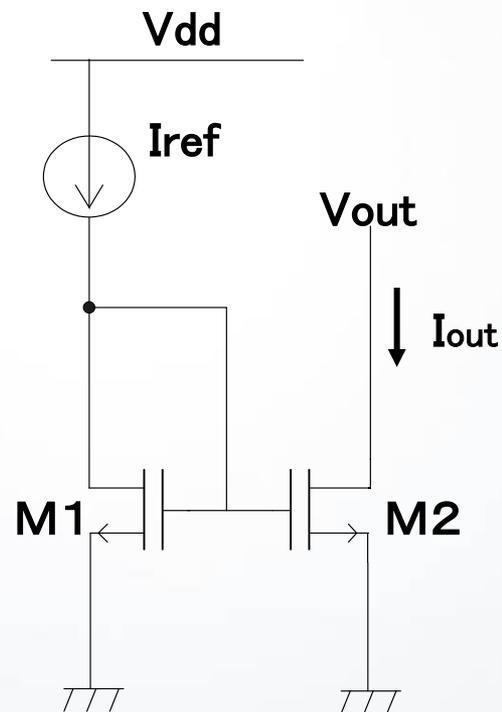
$$I_{out} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})_2^2$$

M1=M2なら

$$I_{out} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_2}{\left(\frac{W}{L}\right)_1} I_{ref} \Rightarrow I_{ref} = I_{out}$$

$C_{ox}$ : 単位面積あたりのゲート酸化膜容量

$\mu_n$ : チャネルの平均の電子移動度





## チャンネル長変調を考える

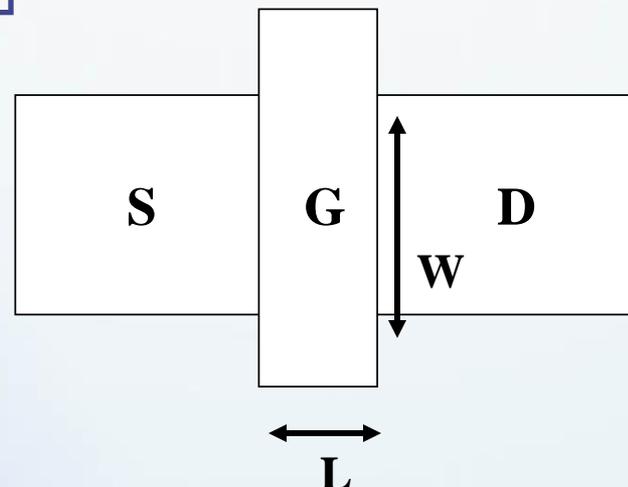
### 「チャンネル長変調効果」

ゲートとドレインの電位差が大きくなるほど  
反転層によるチャンネルの実際の長さは徐々に短くなる

$$I_D \approx \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$\lambda$ :チャンネル長変調係数

$\lambda$ は $V_{DS}$ が増大した時のチャンネル長の変化を相対的に表すので、チャンネル長が長いほど $\lambda$ は小さくなる



# 例. $L=L_1$ と $L=2L_1$ の MOSFETの $I_D/V_{DS}$ 特性

例. $L=L_1$ と $L=2L_1$ のMOSFETの $I_D/V_{DS}$ 特性を図示

$$I_D \approx \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad \text{において、}$$

$$\lambda \propto 1/L$$

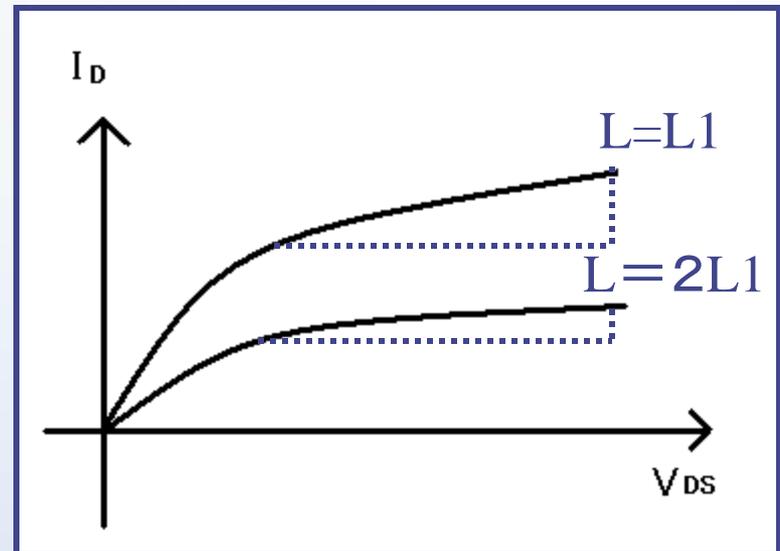
$$\partial I_D / \partial V_{DS} \propto \lambda / L \propto 1/L^2$$

チャネル長が2倍



傾きは1/4

**Lが小さいと傾きが大**

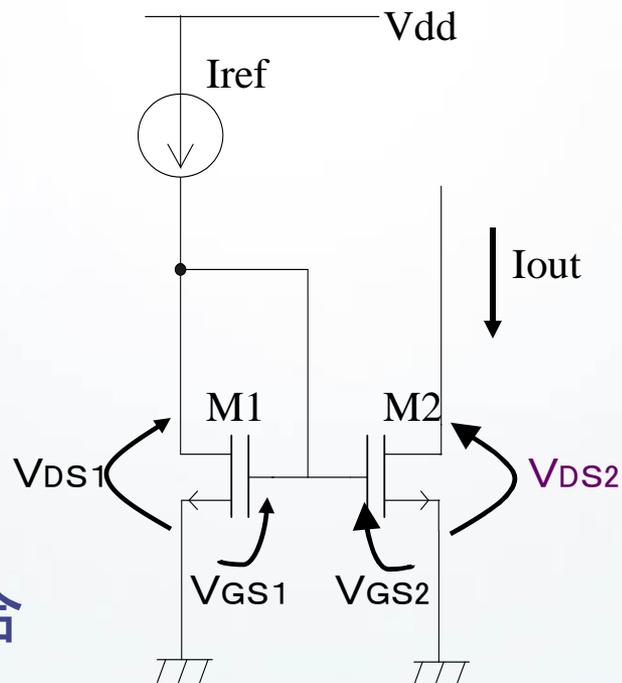




## 基本的なカレントミラーの問題点

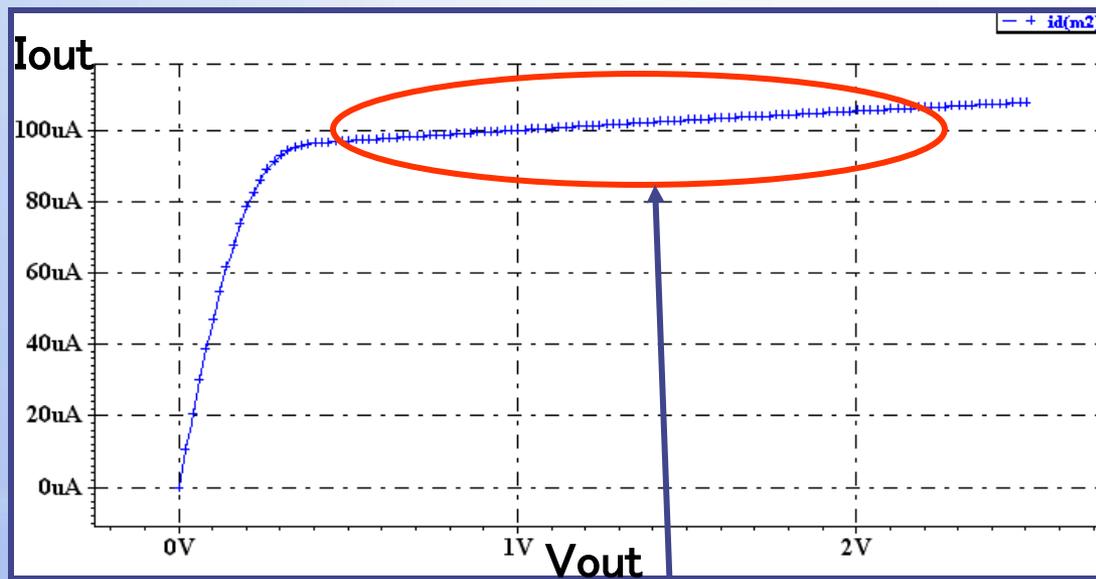
$V_{DS1} = V_{GS1} = V_{GS2}$   
しかし一般には  
 $V_{DS2} \neq V_{GS2}$

最小チャネル長トランジスタを用いた場合



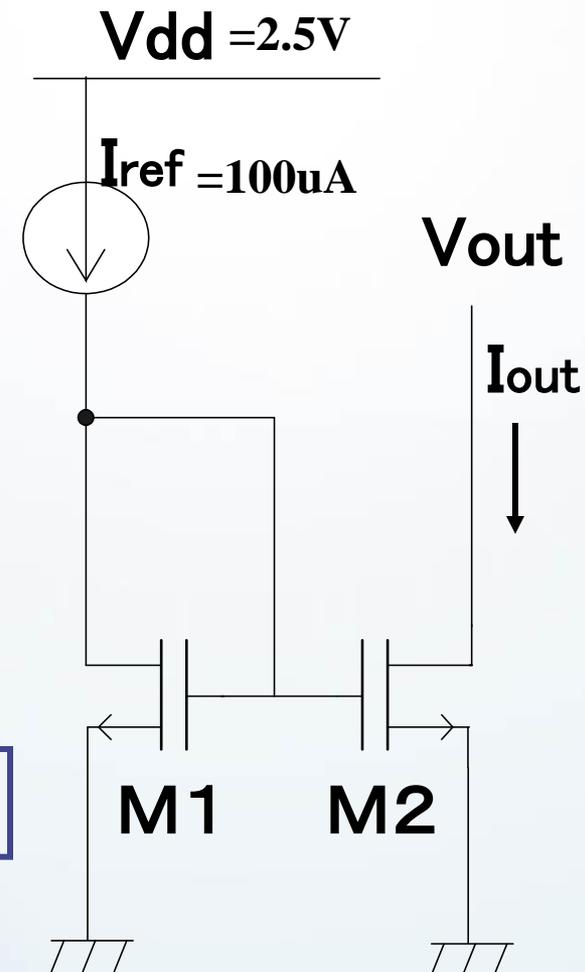
チャネル長変調効果によりIrefとIoutに誤差が生まれる

# 基本的なカレントミラー回路のシミュレーション結果



チャネル長変調効果の影響が大きい

電流のコピー精度 ×





群馬大学

# カスコードカレントミラー回路



## カスコードカレントミラー回路

M1とM2が出力電流を決定

→  $V_X = V_Y$  となればOK

M4をM1に直列に接続



電圧  $V_N = V_{GS4} + V_X$  を発生

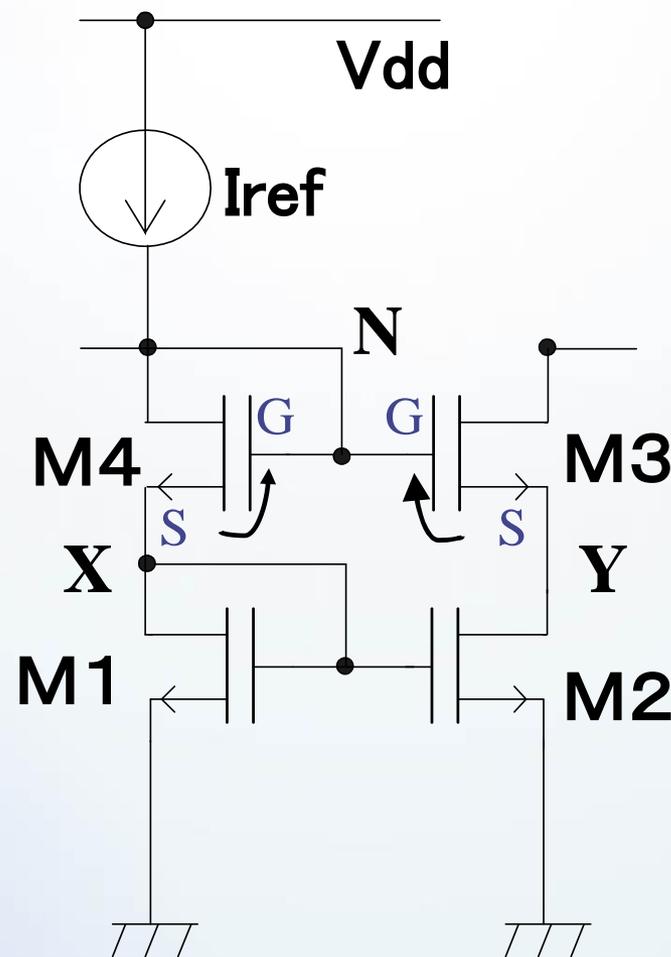


$$V_{GS4} + V_X = V_{GS3} + V_Y$$

$$(W/L)_3 / (W/L)_4$$

$$= (W/L)_2 / (W/L)_1 \text{ ならば}$$

$V_{GS3} = V_{GS4}$  および  $V_X = V_Y$  が成立





## カスコードカレントミラーの問題点

P点の最小許容電圧

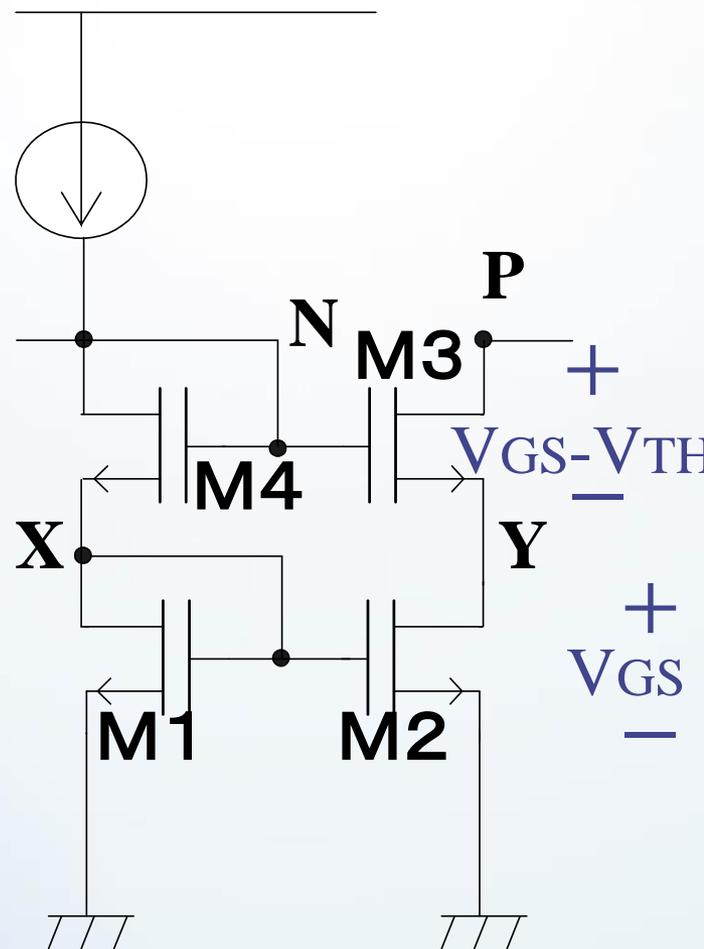
$$V_N - V_{TH} = V_{GS4} + V_{GS1} - V_{TH}$$

$$= (V_{GS4} - V_{TH}) + (V_{GS1} - V_{TH}) + V_{TH}$$

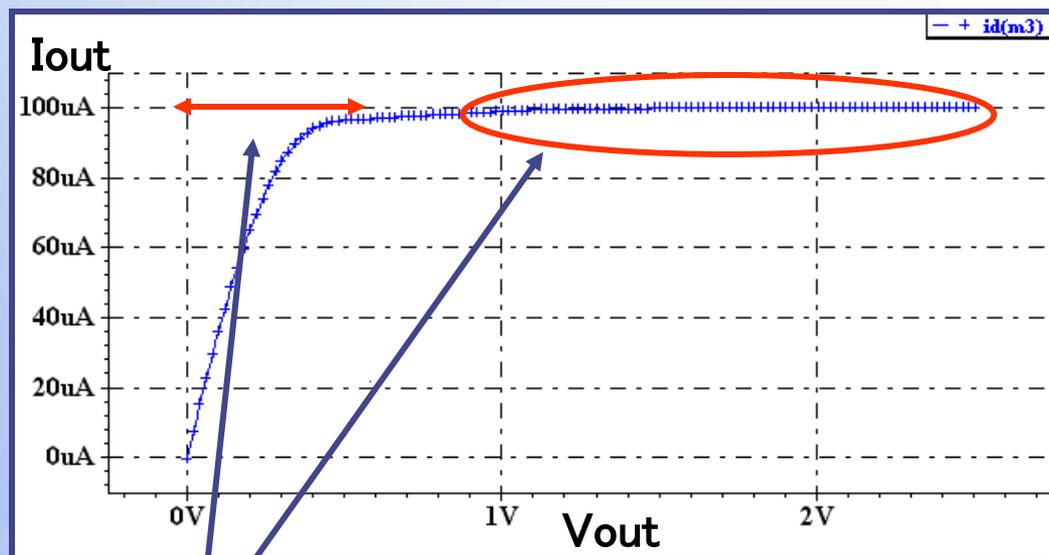
= オーバードライブ電圧2個分 +  
しきい電圧1個分



しきい電圧1個分の電圧余裕を  
“無駄”にしている！



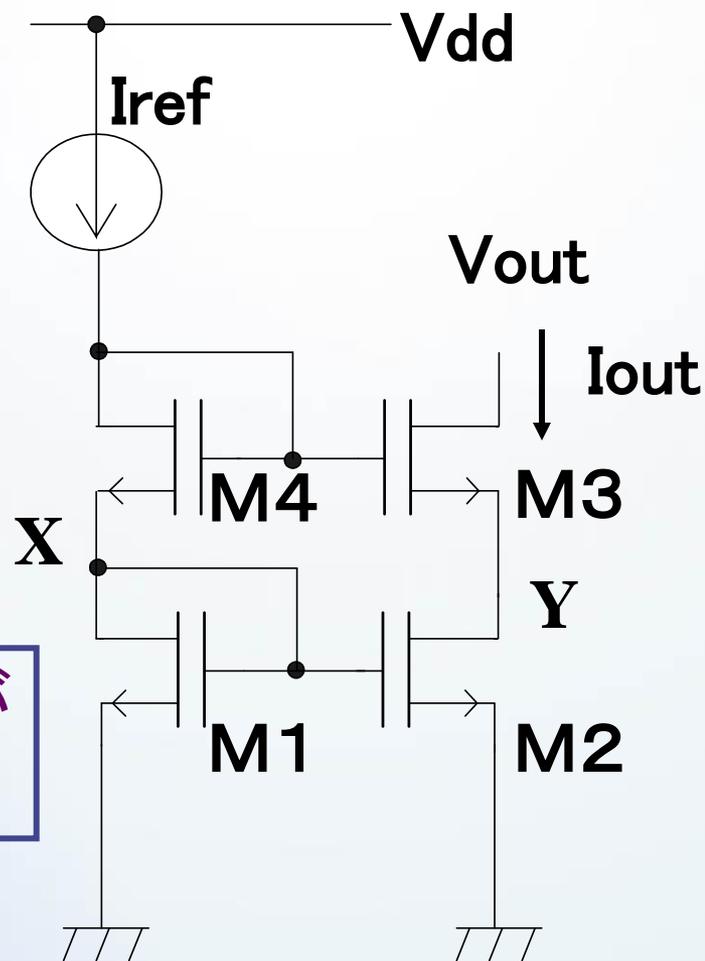
# カスコードカレントミラー回路のシミュレーション結果



チャネル長変調効果の影響は小さいが  
最小許容電圧が高い

電流のコピー精度◎

低電圧化×

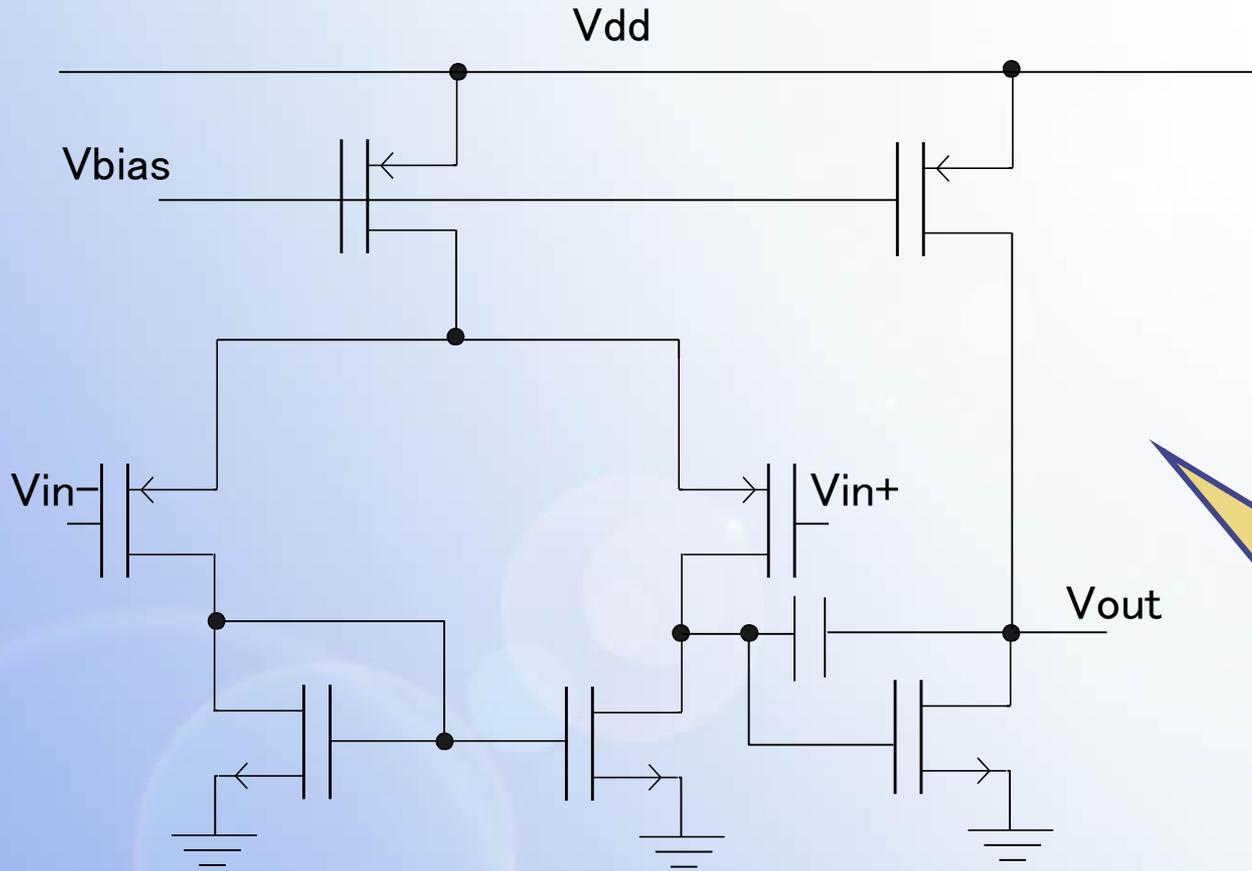




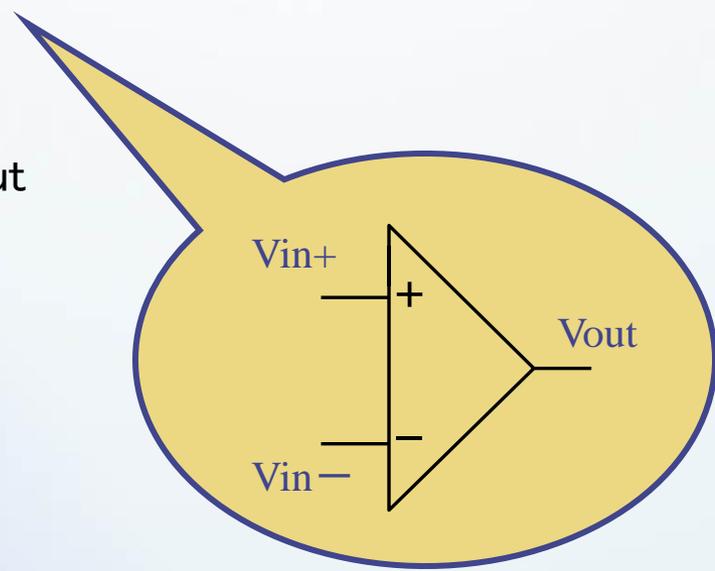
# OPアンプを使用した カレントミラー回路



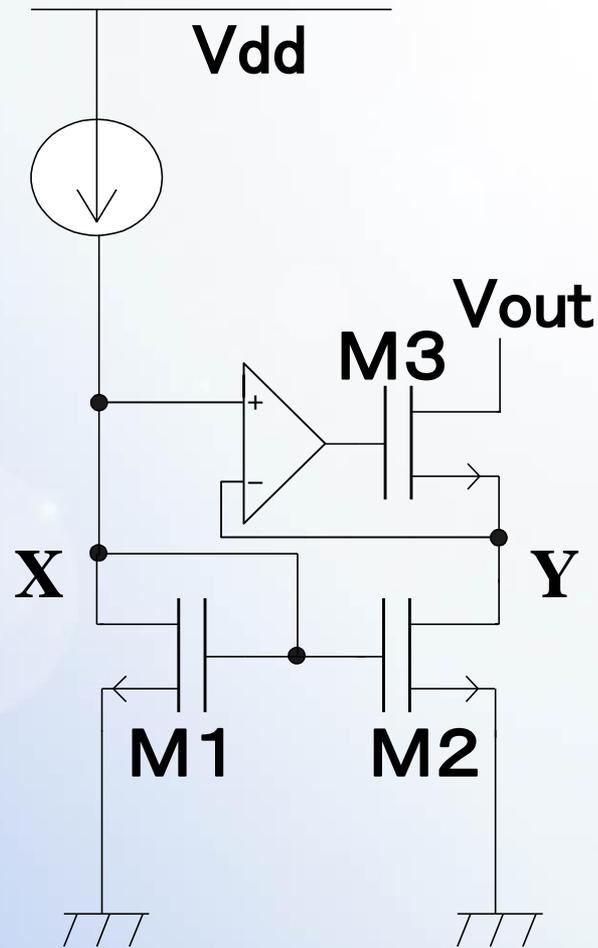
# シミュレーションに使用したOPアンプ



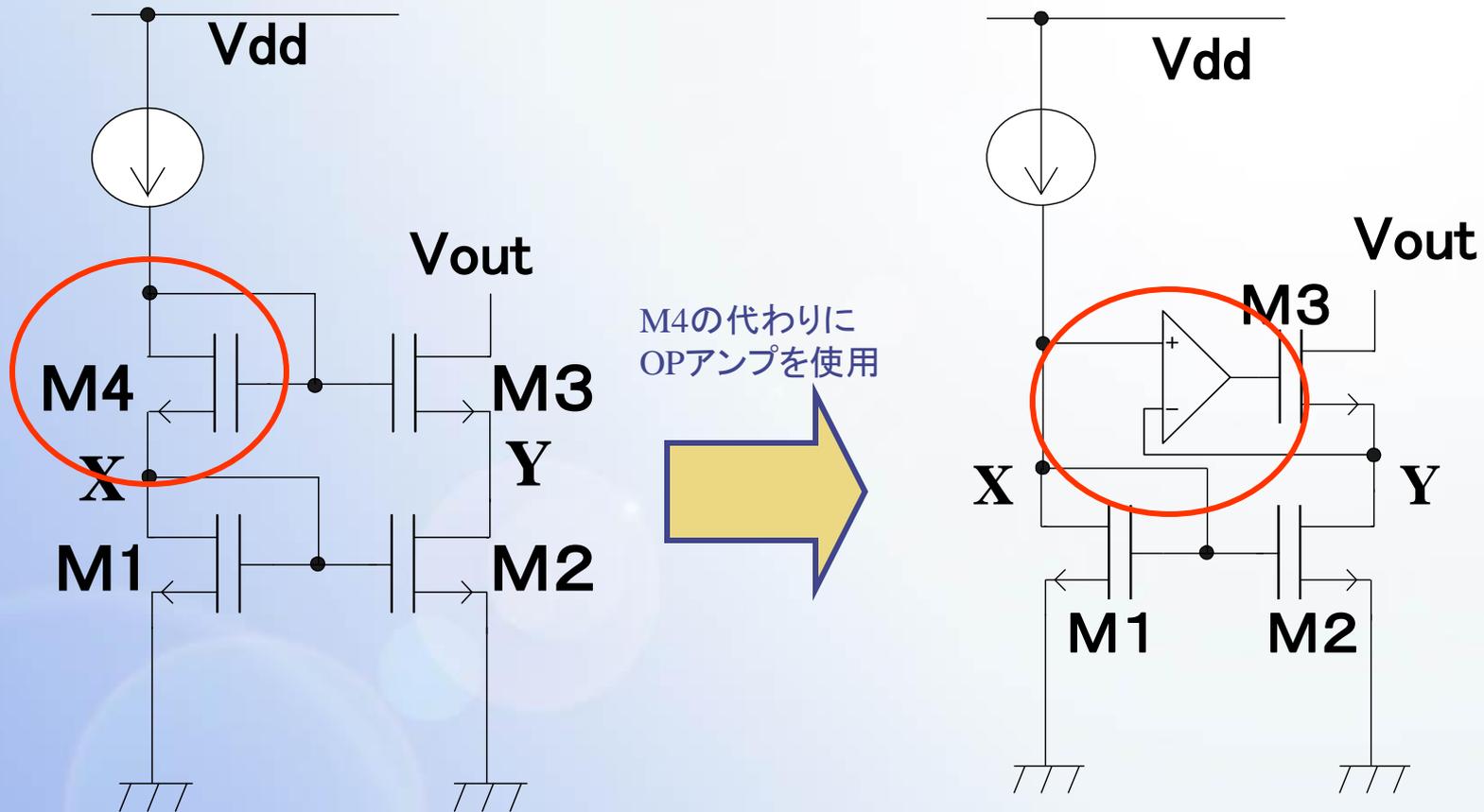
$V_{dd}=2.5V$   
 $V_{bias}=1.25V$



# Basic regulated cascode current mirror

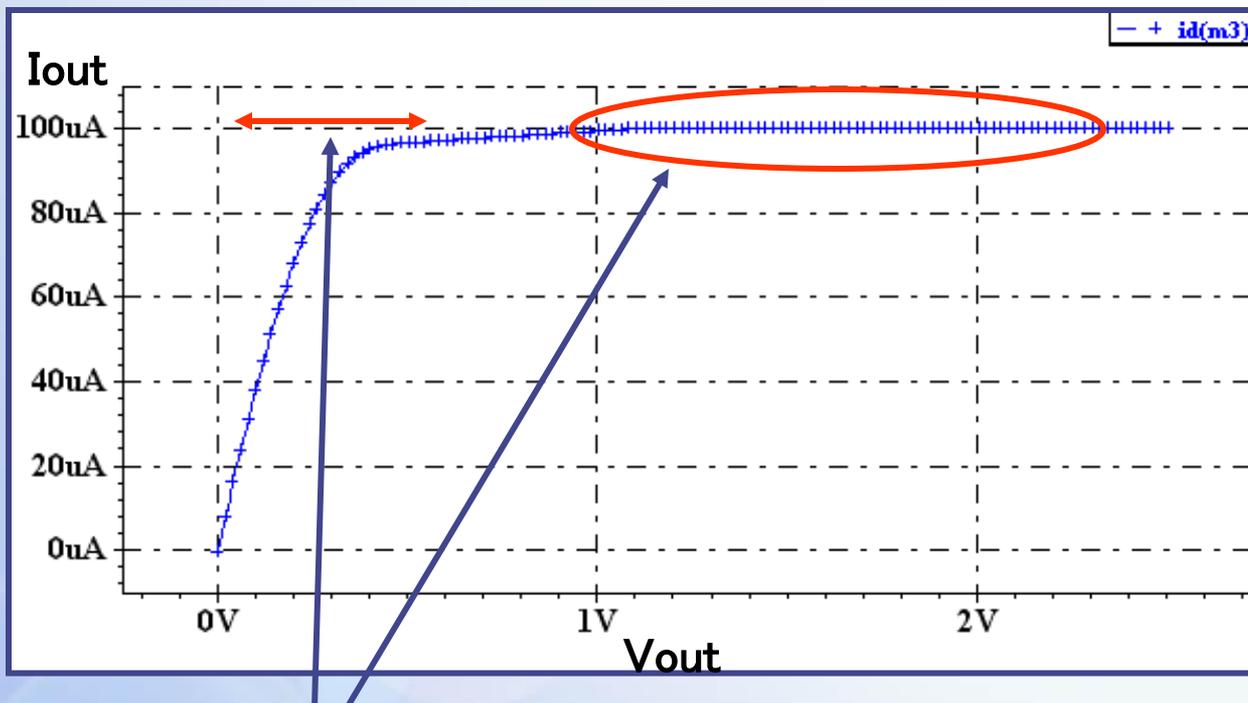
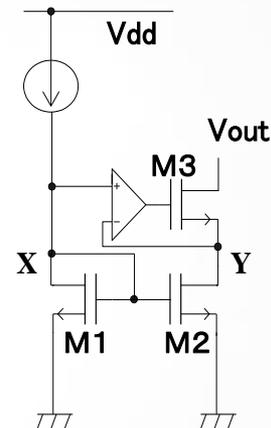


# Basic regulated cascode current mirror



カスコードカレントミラー回路に比べて  
出カインピーダンスがOPアンプのゲイン分だけ高くなる

# Basic regulated cascode current mirror

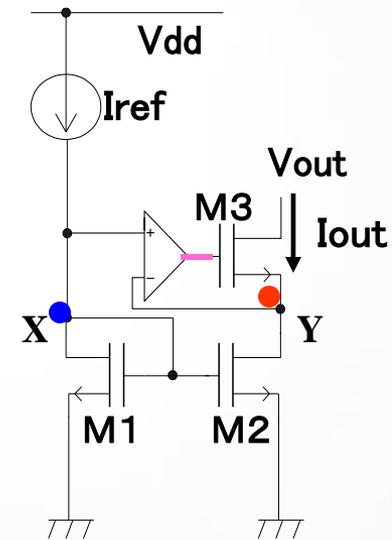
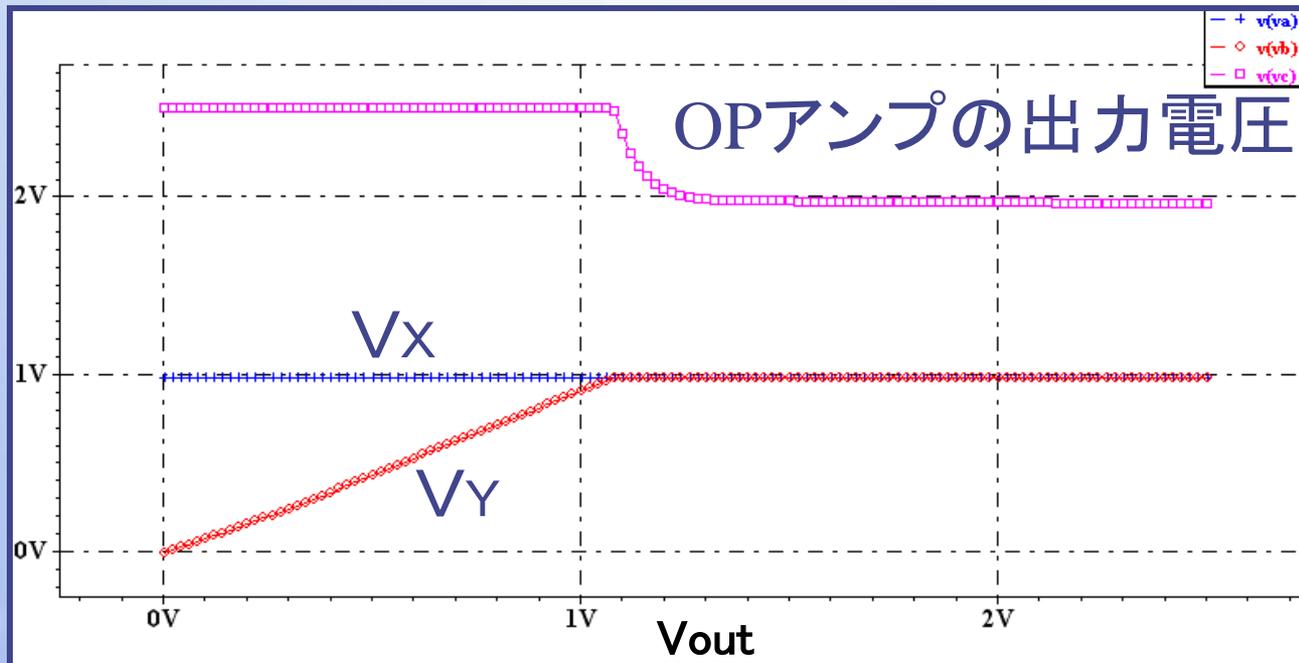


カスコードカレントミラー回路と同様  
チャンネル長変調効果の影響は小さいが最小許容電圧が高い

電流のコピー精度◎

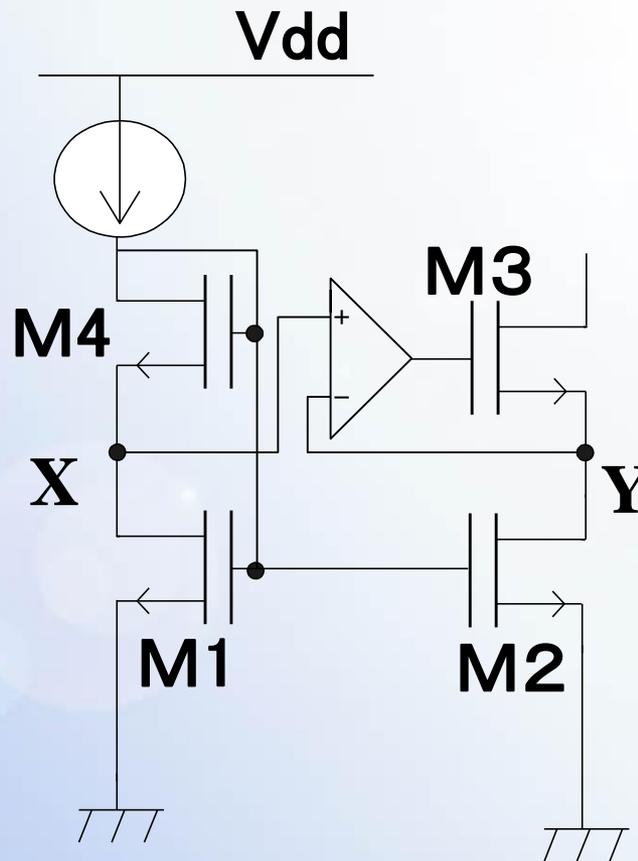
低電圧化×

# Basic regulated cascode current mirror



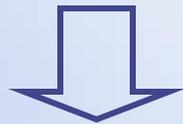
$V_X = V_Y$  になると  $I_{ref} = I_{out}$  となる

# High Compliance regulated cascode current mirror

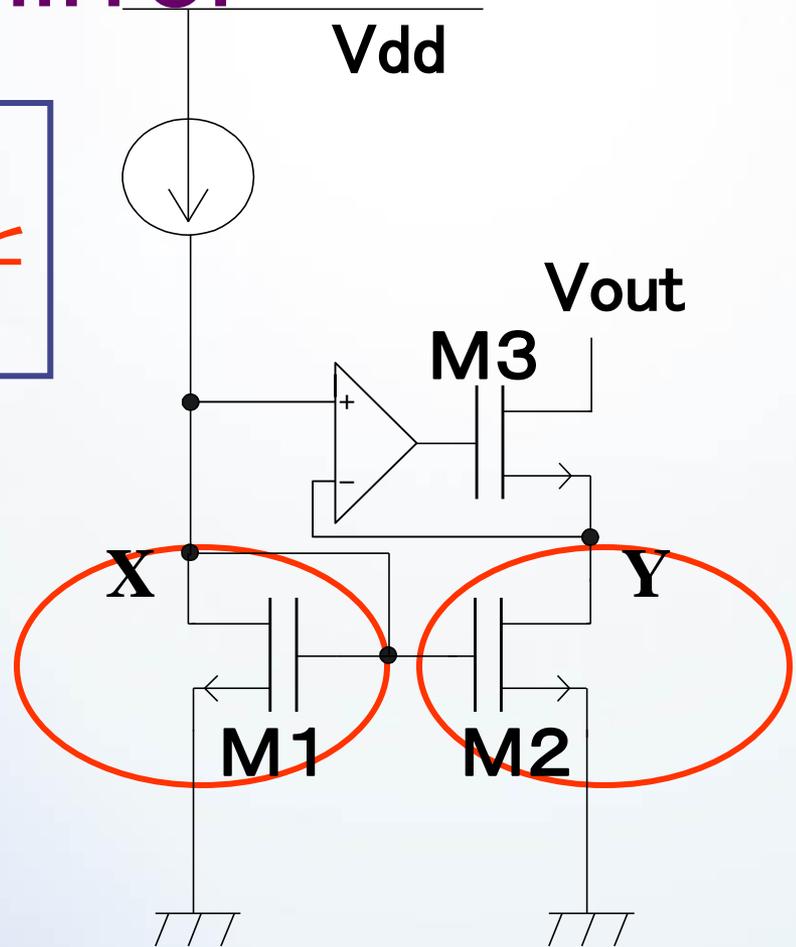


# High Compliance regulated cascode current mirror

いままでのカレントミラーは  
MOSを飽和領域で使うということ  
というのが前提だった



ぴったり  $V_X = V_Y$   
にすることができれば  
MOSを線形領域で使うことが  
できるのではないか



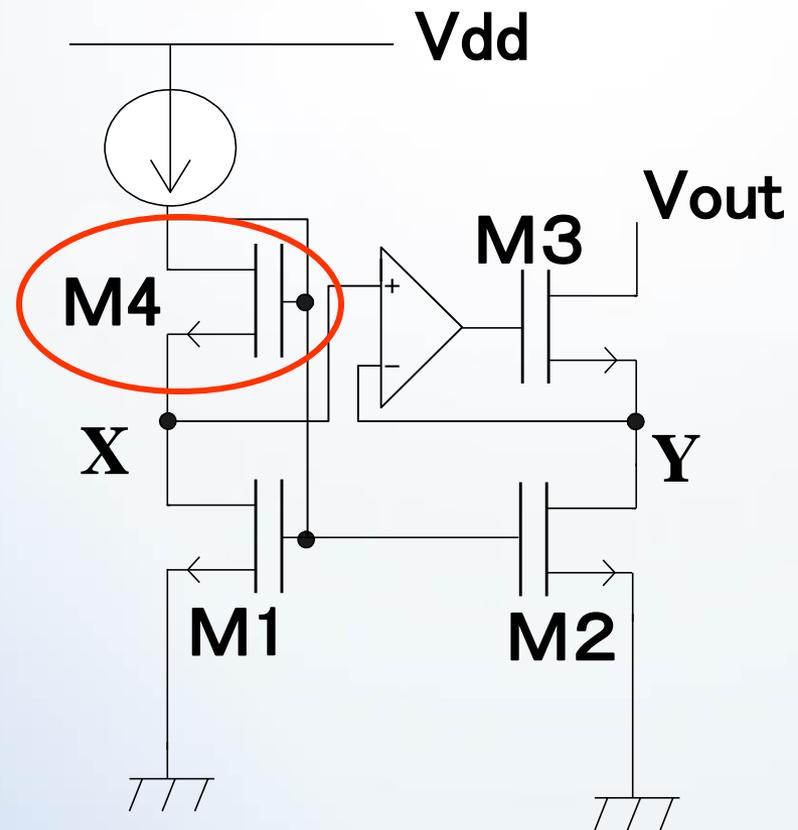
Basic regulated Cascode current mirror

# High Compliance regulated cascode current mirror

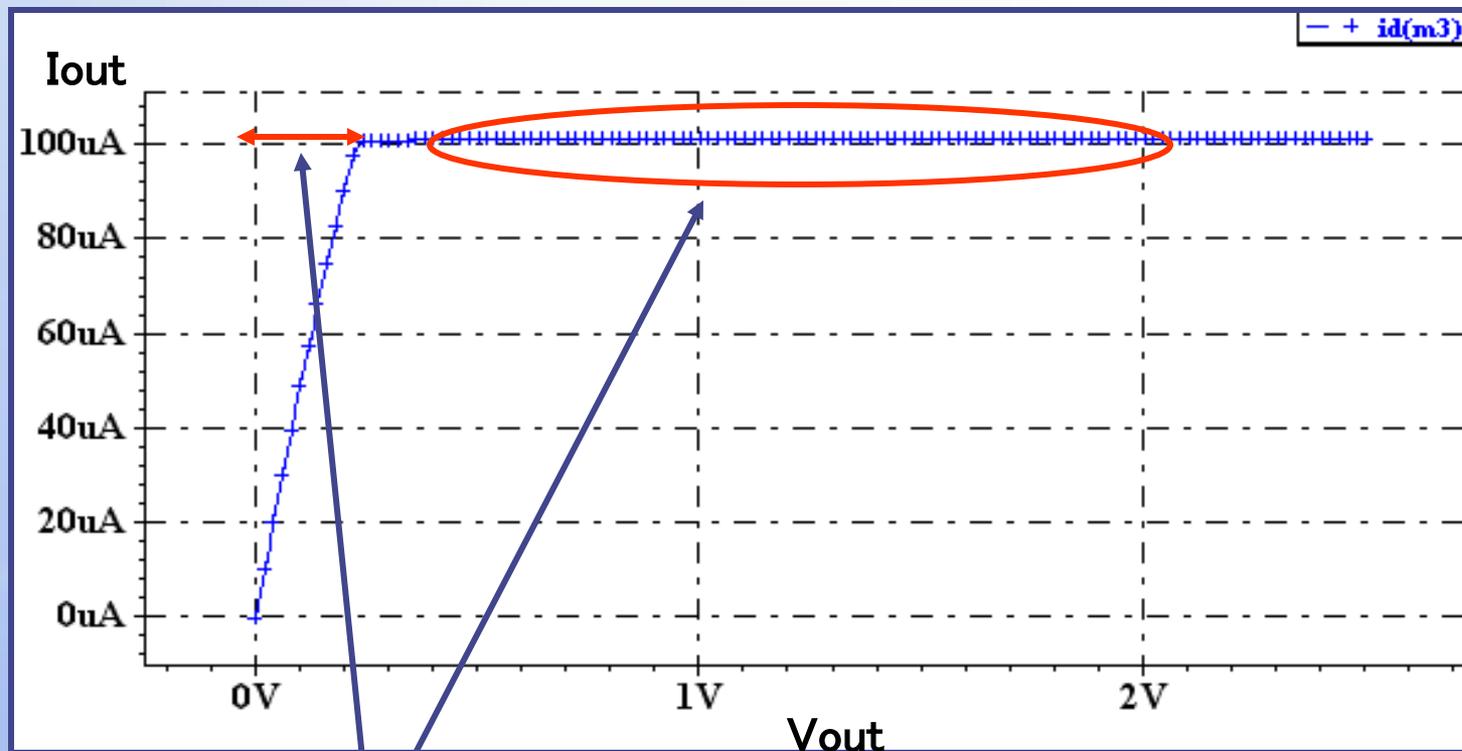
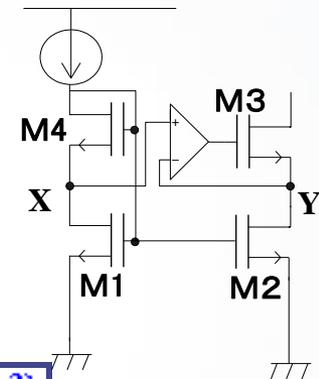
M4を入れることにより  
 $V_X$ が下がる



M1とM2を線形領域で使用



# High Compliance regulated cascode current mirror

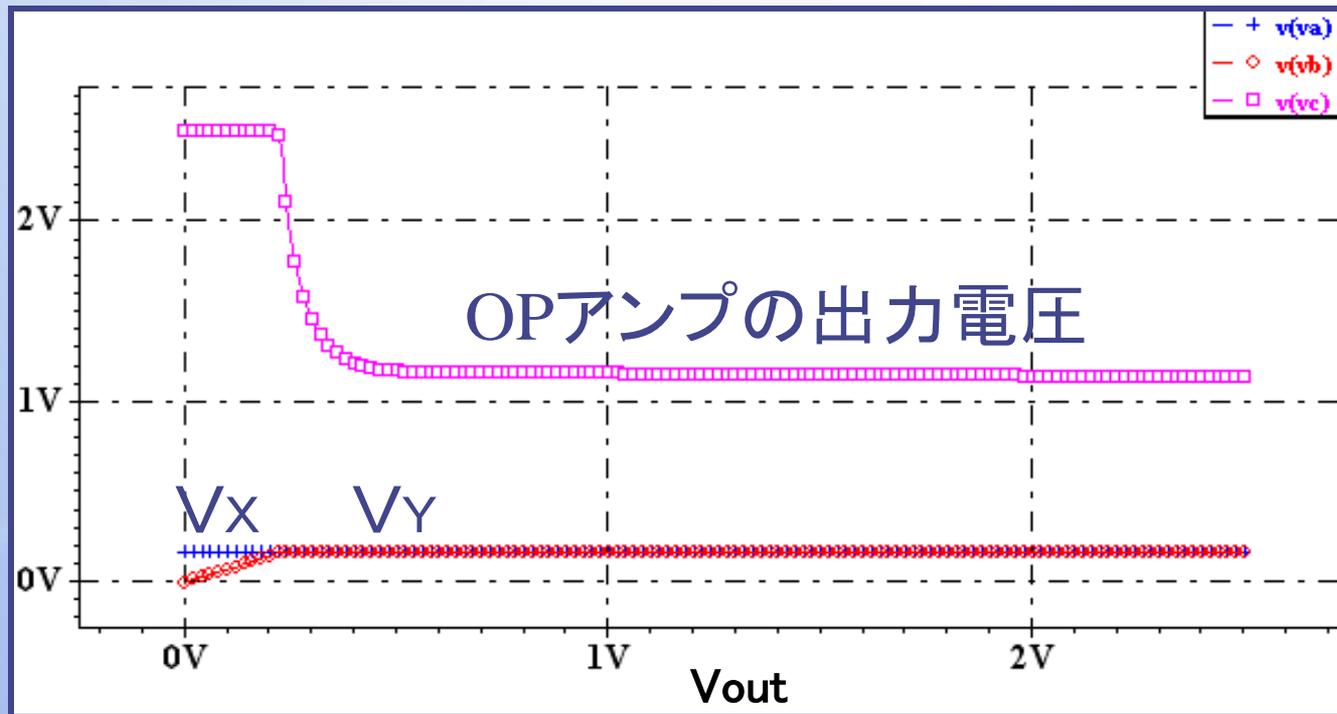
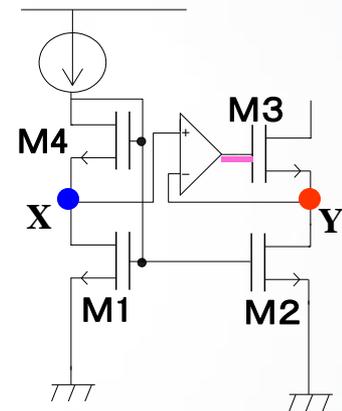


チャネル長変調効果の影響が小さく  
最小許容電圧も比較的低い

電流のコピー精度○

低電圧化△

# High Compliance regulated cascode current mirror

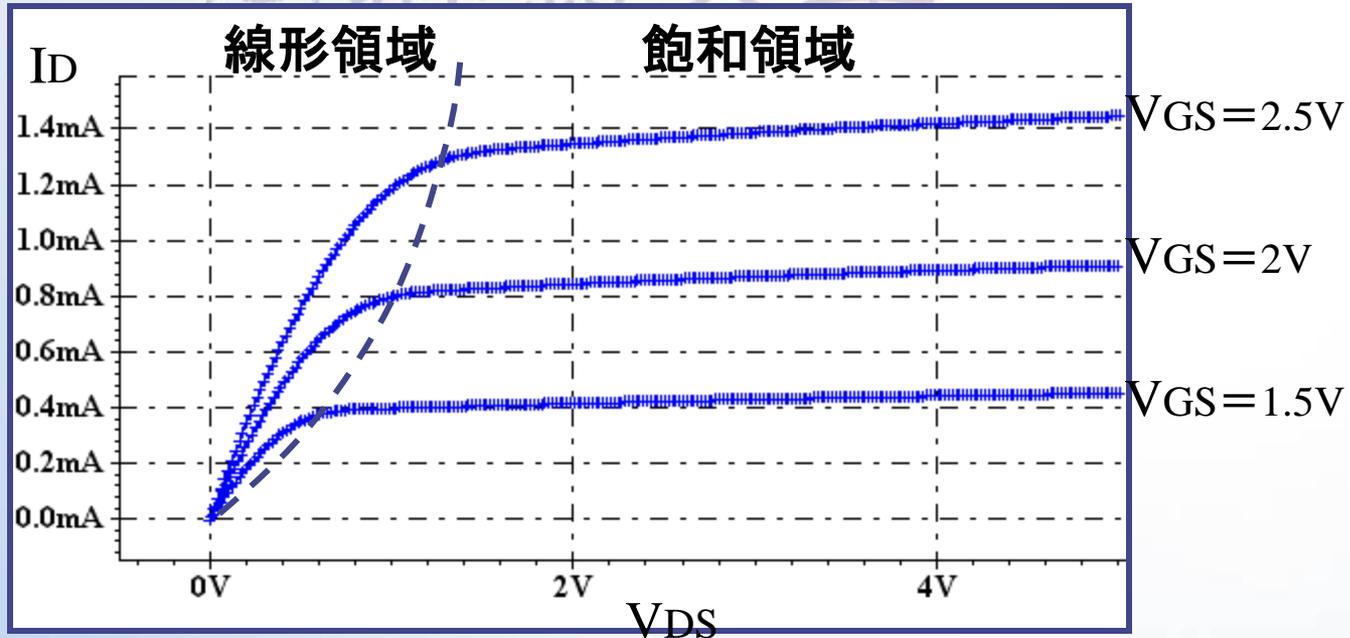
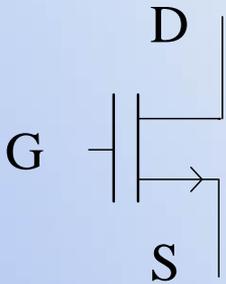


$V_X = V_Y$  になると  $I_{ref} = I_{out}$  となる



群馬大学

# 高性能カレントミラー回路の提案



回路解析により

M1, M2を線形領域で使用することにより低電圧化可能

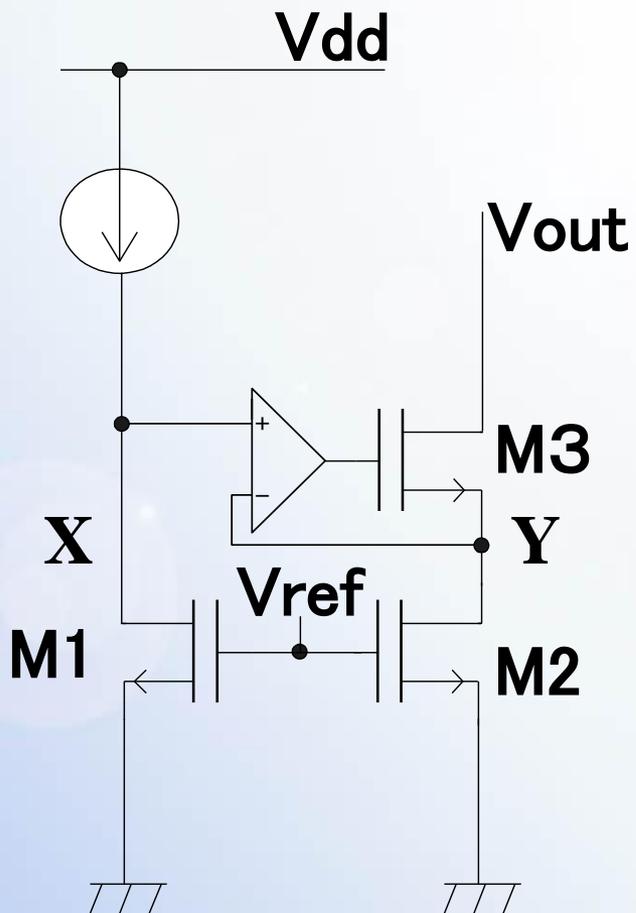


このことに着目し、

さらに理想に近づけることを目指した5つの回路を提案する

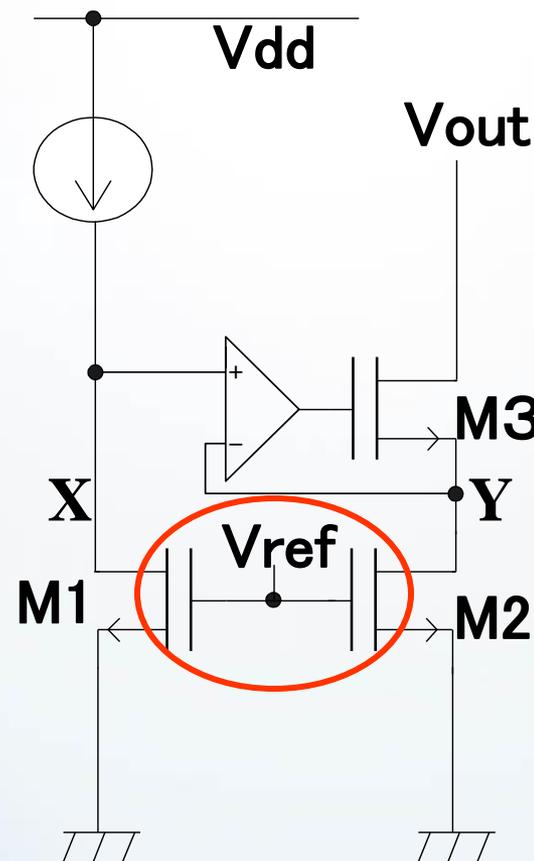
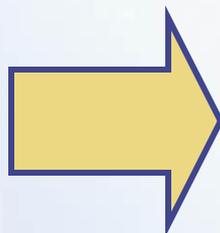
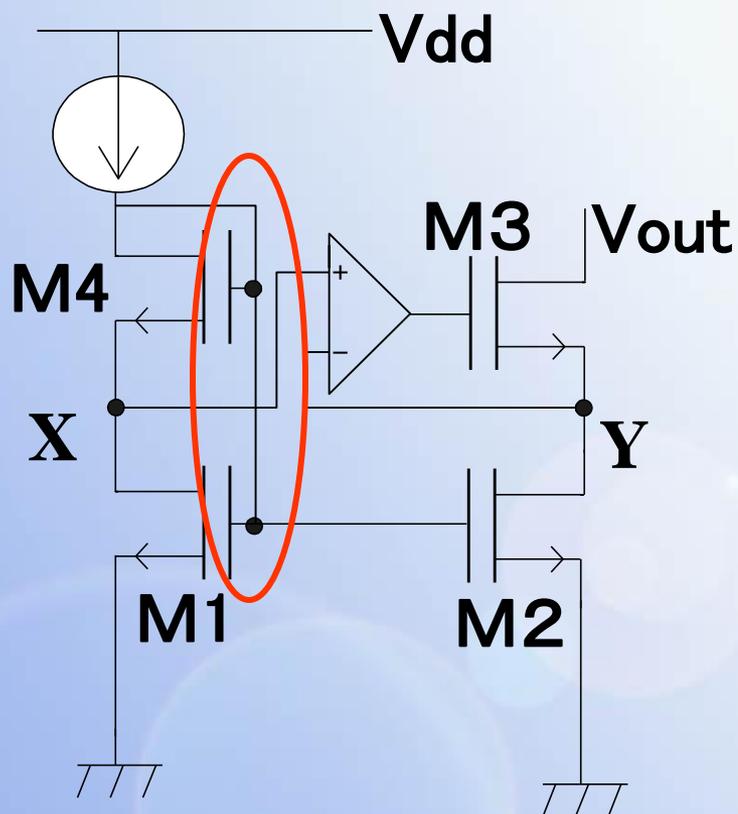


# 提案回路(1)





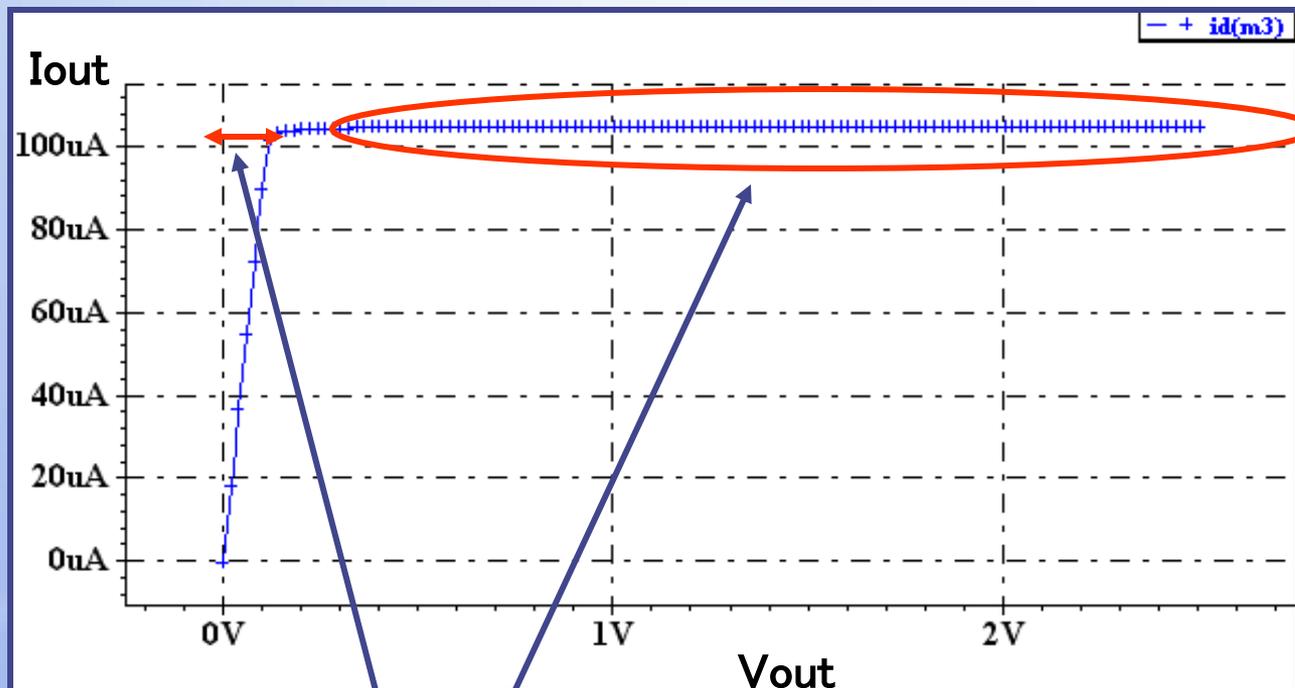
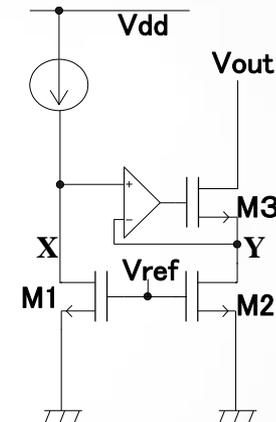
# 提案回路(1)



Vrefを高い電圧値にすることで最小許容電圧を低くすることができると考えた



## 提案回路(1)



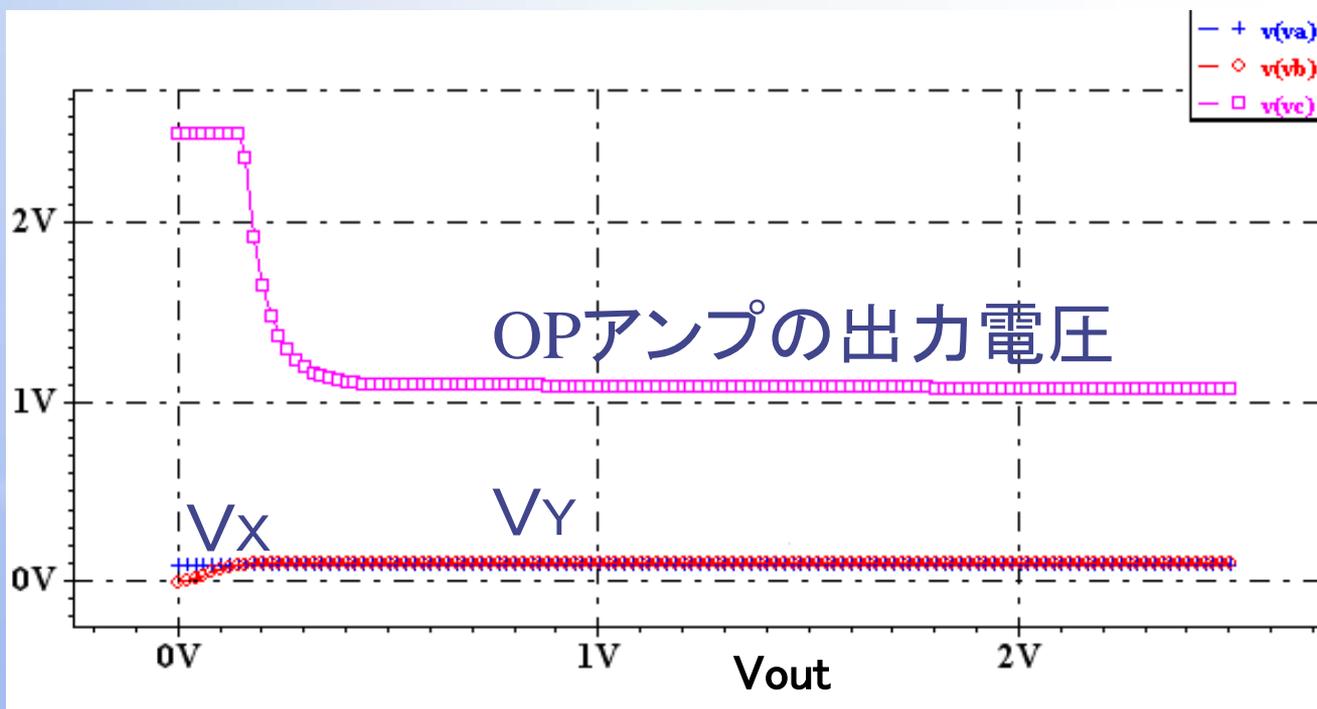
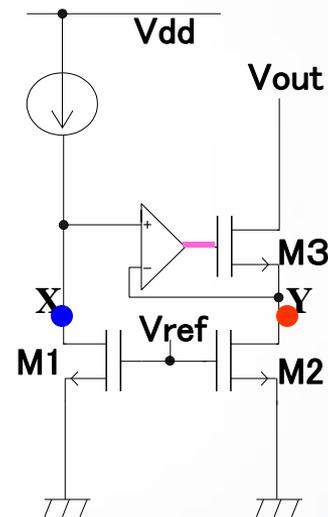
電流コピーの精度は落ちたが  
最小許容電圧を低くすることができた

電流のコピー精度△

低電圧化○



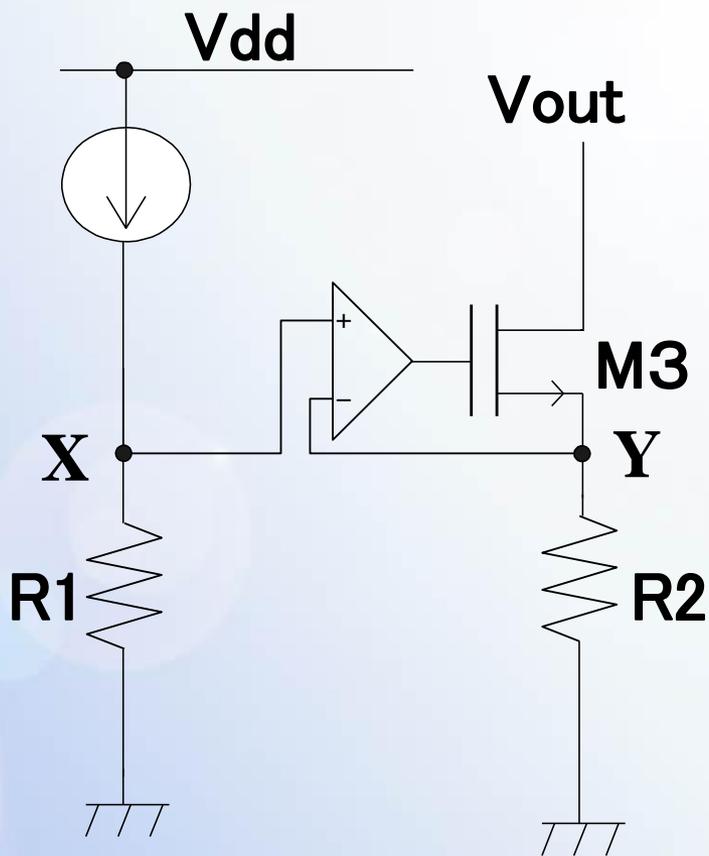
## 提案回路(1)



$V_X = V_Y$  になると  $I_{ref} = I_{out}$  となる



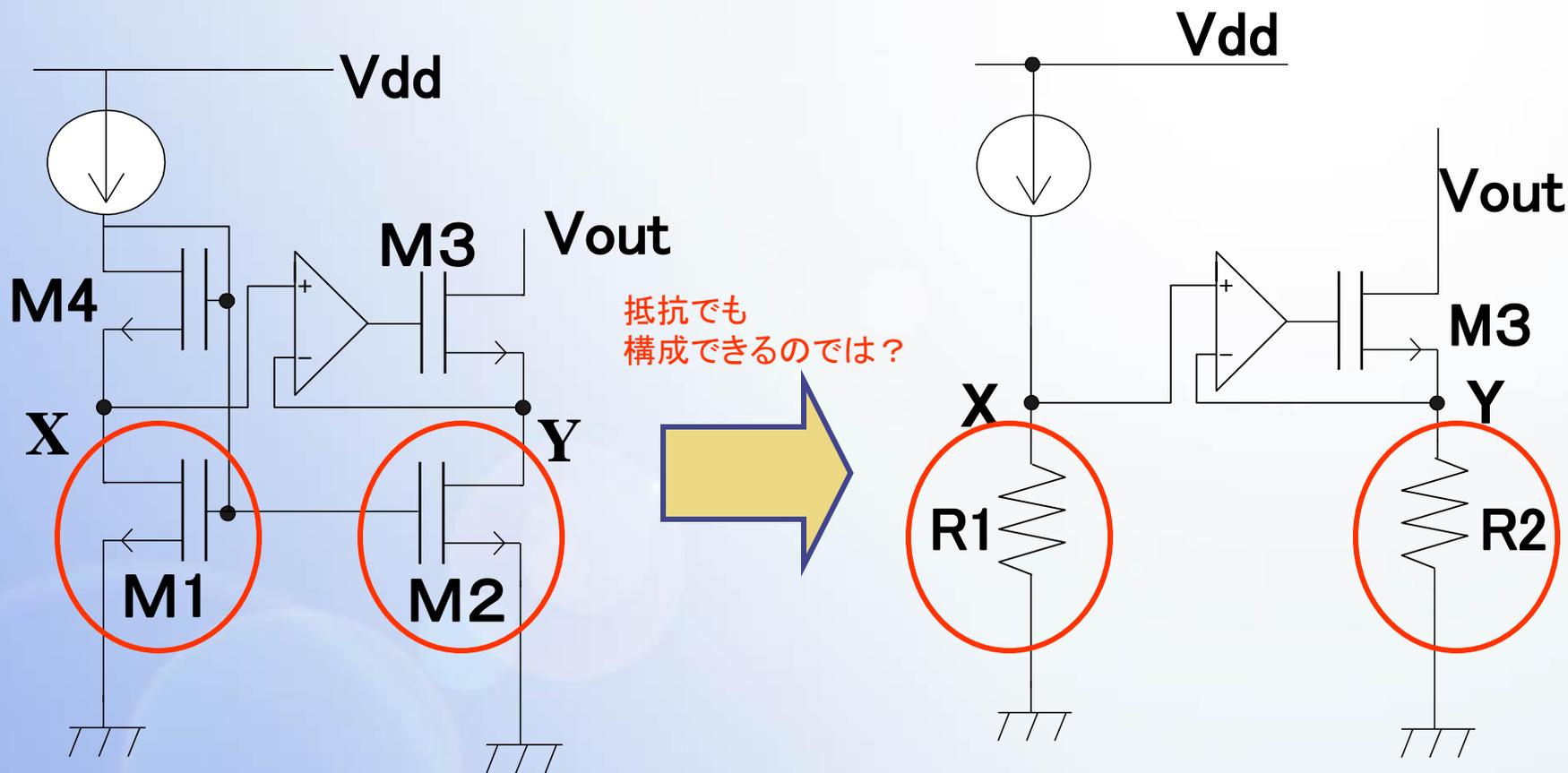
# 提案回路(2)



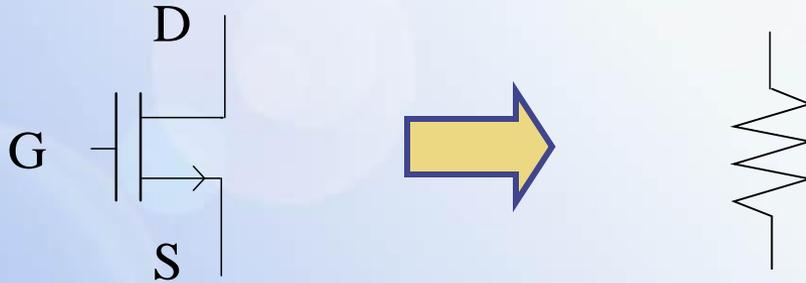
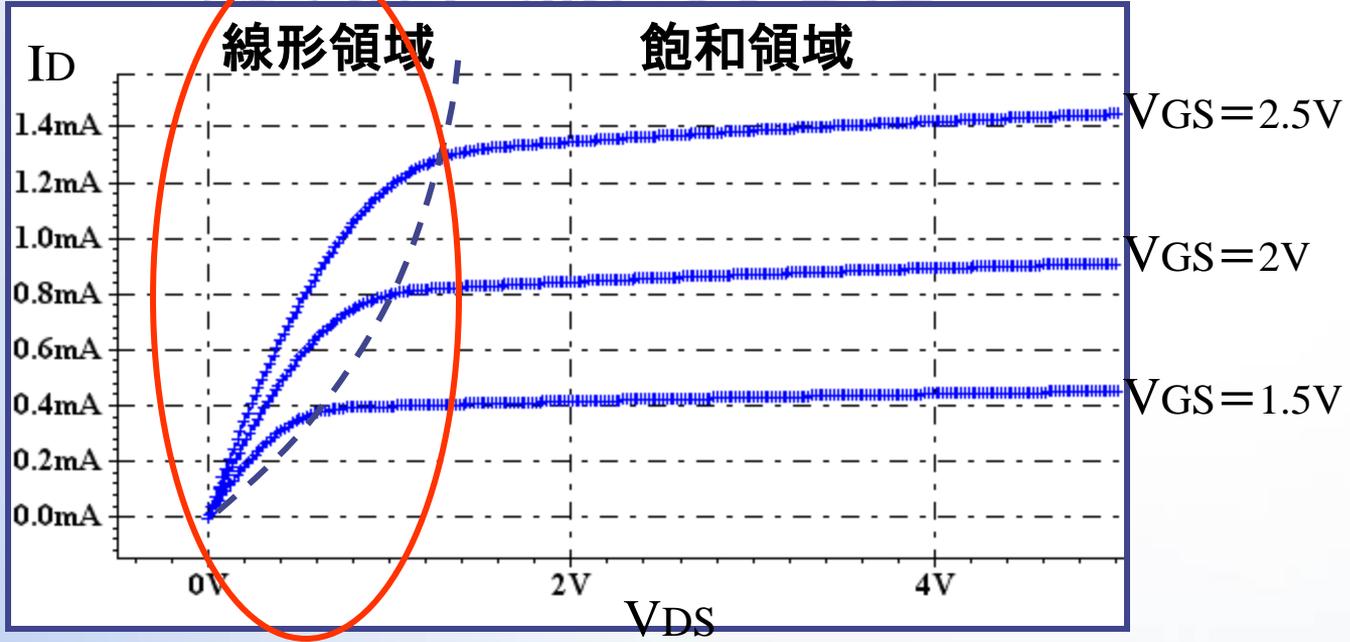
$$R1=R2=1k$$



# 提案回路(2)



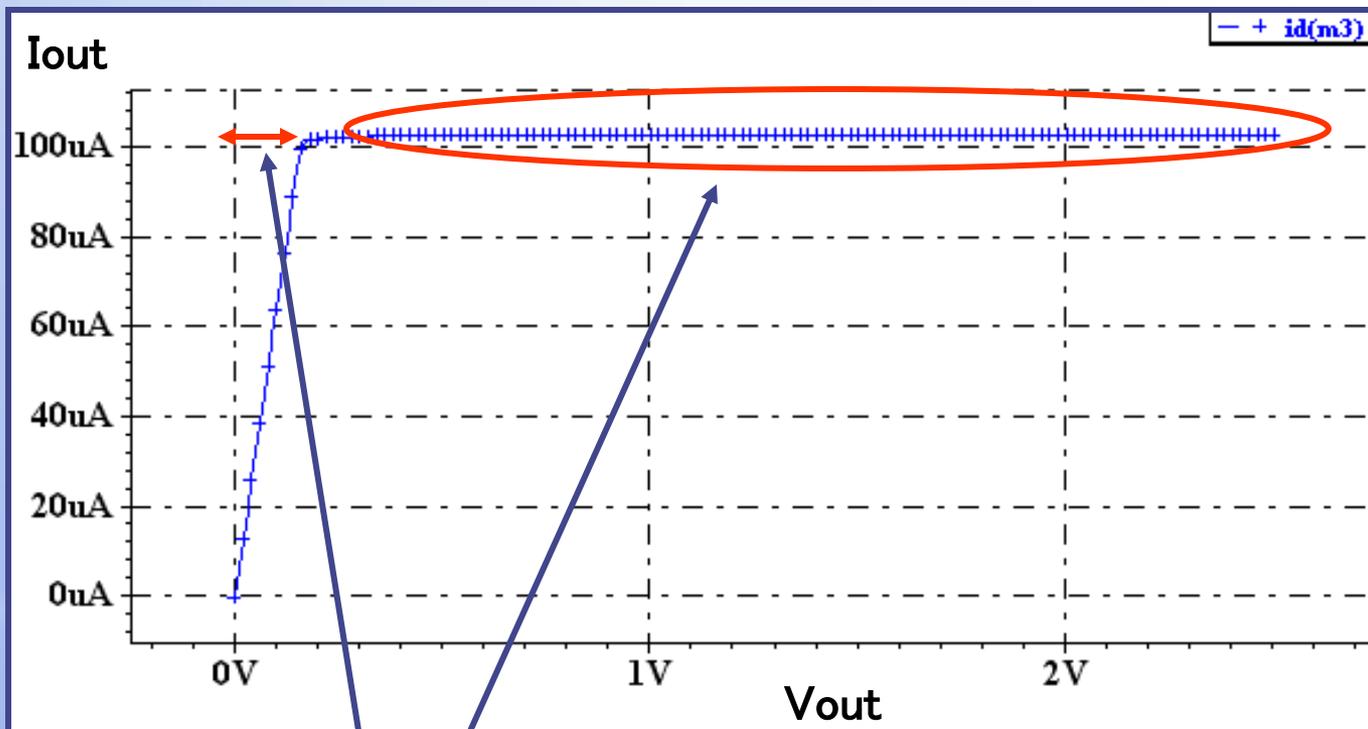
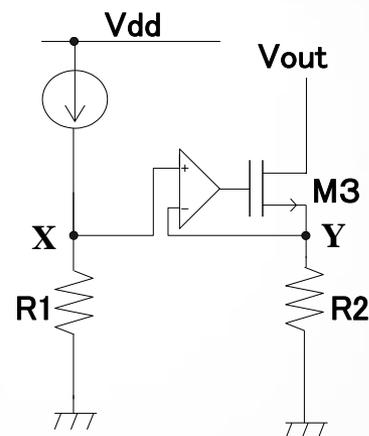
M1とM2を抵抗に変更した



M1とM2を線形領域で使用しているのなら  
抵抗でも代用が可能なのではないか？



# 提案回路(2)

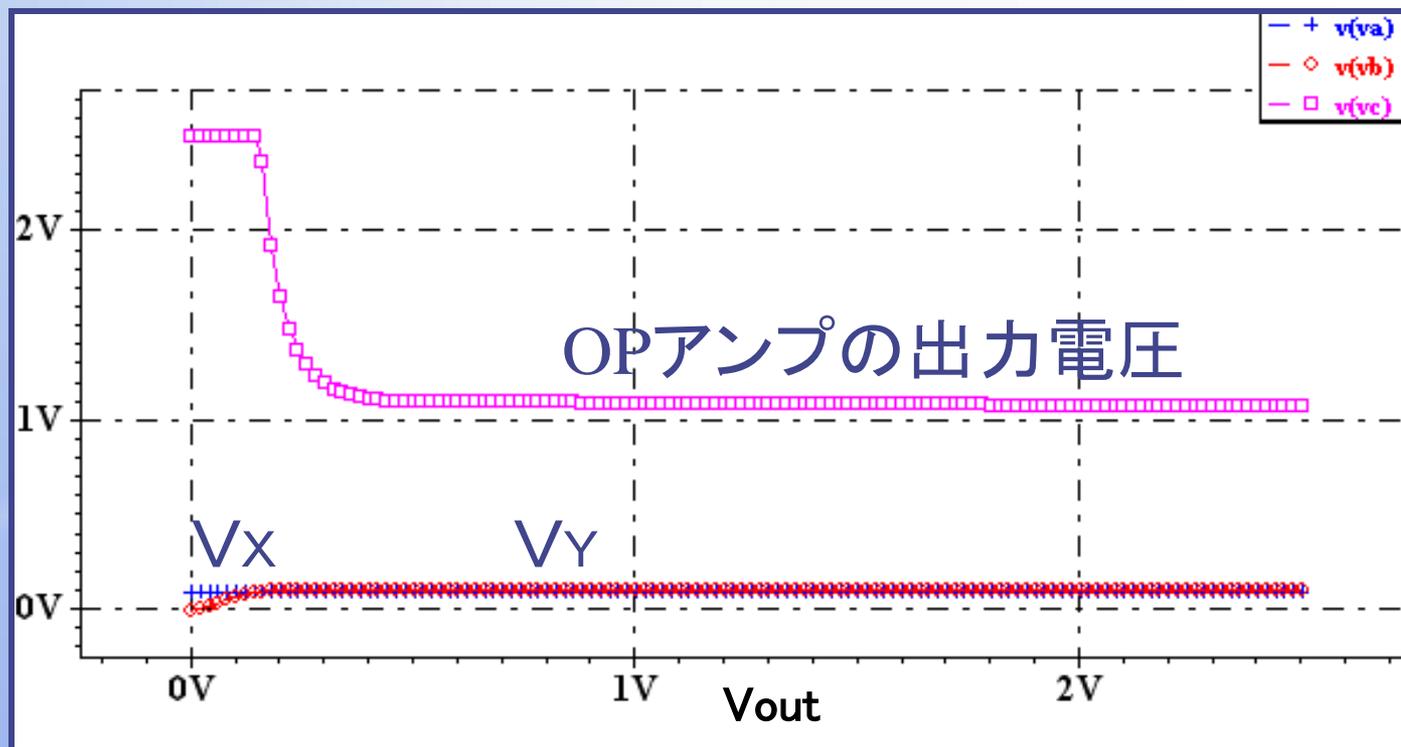
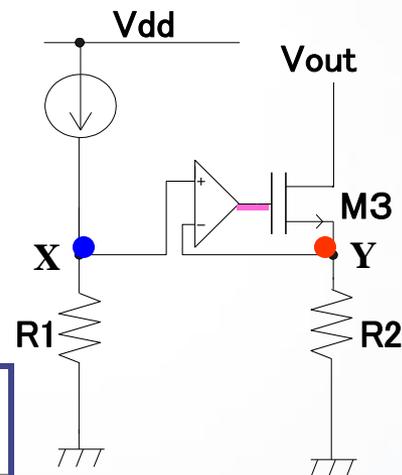


提案回路(1)より  
電流コピーの精度が向上した

電流のコピー精度  $\Delta$   
低電圧化  $\bigcirc$



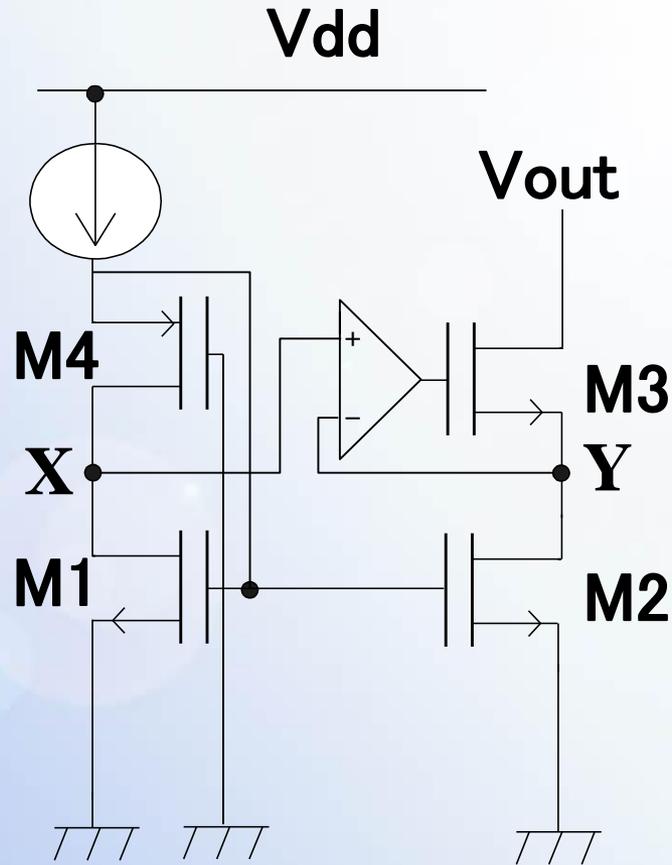
## 提案回路(2)



$V_X = V_Y$  になると  $I_{ref} = I_{out}$  となる

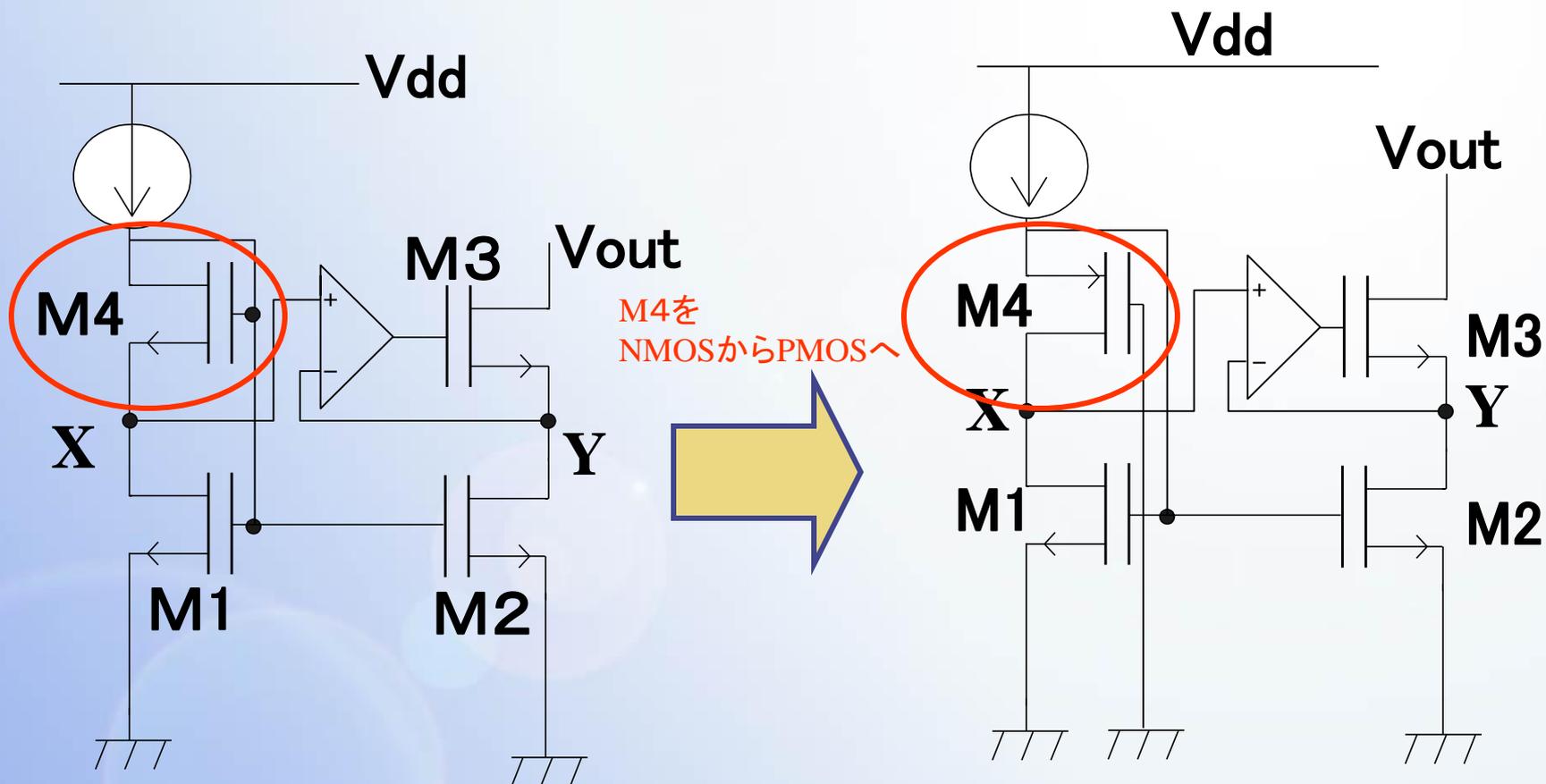


# 提案回路(3)





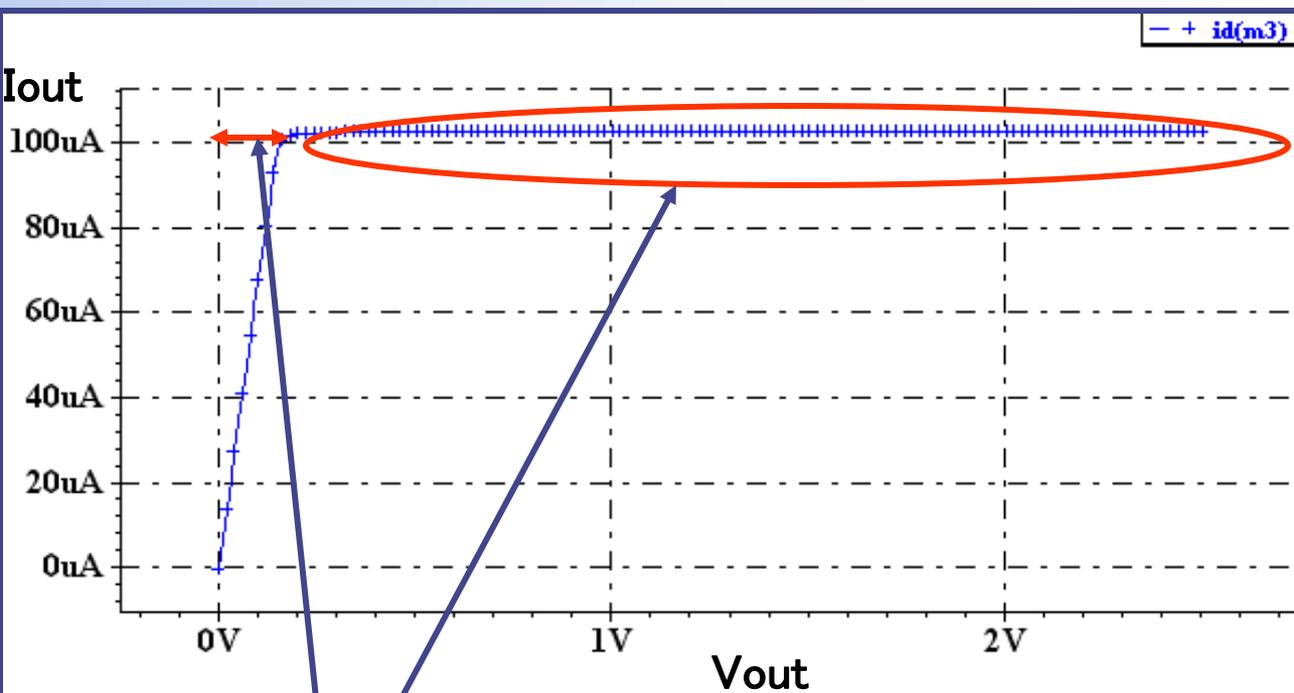
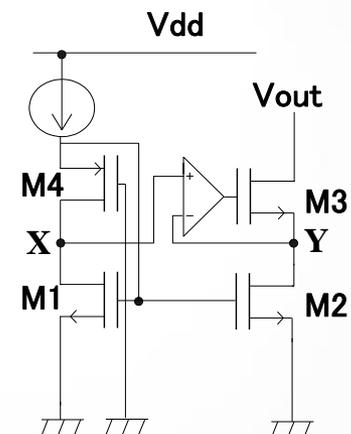
## 提案回路(3)



M4をNMOSからPMOSに変えることによって最小許容電圧を低くすることができる考えた



## 提案回路(3)



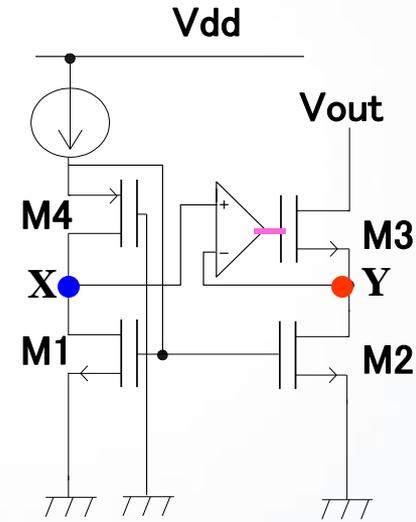
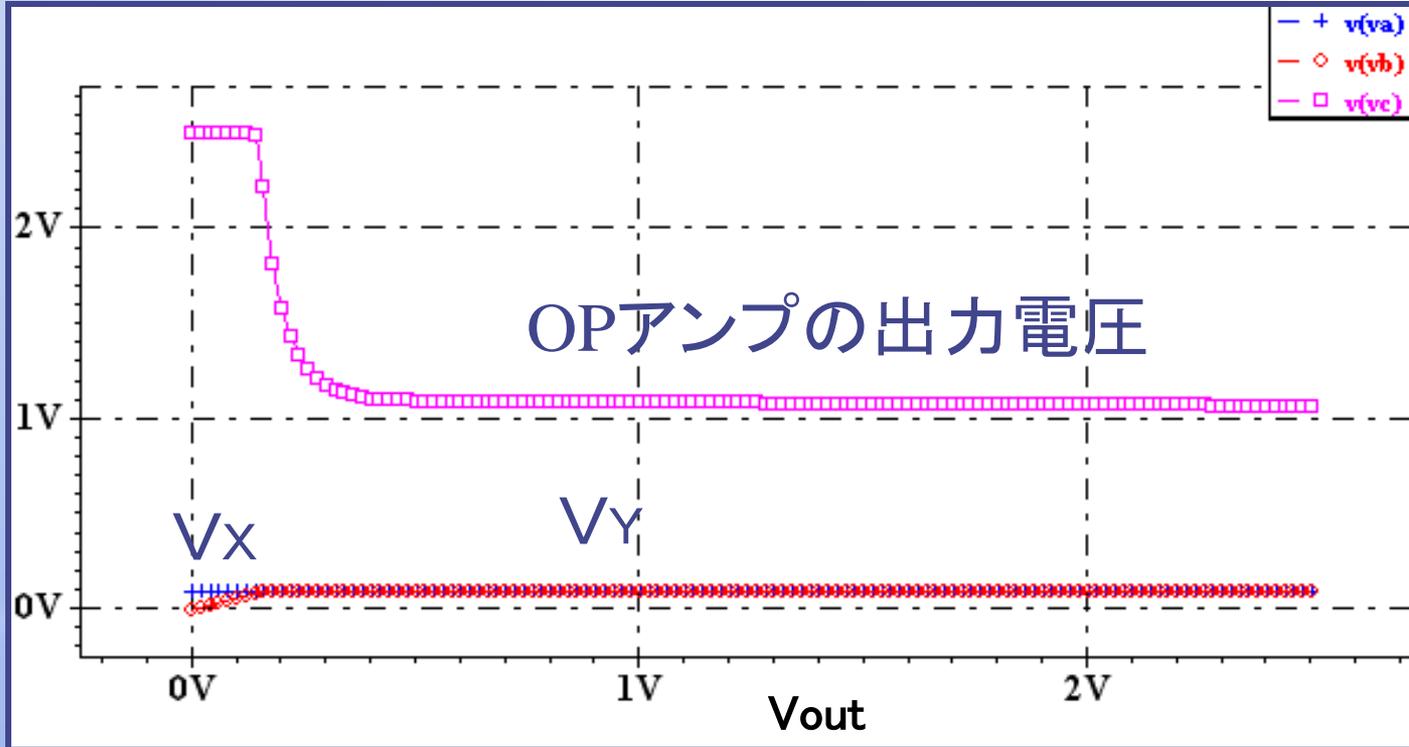
電流のコピー精度  $\Delta$

低電圧化  $\circ$

提案回路(2)同様  
 提案回路(1)より電流コピーの精度が向上した



## 提案回路(3)



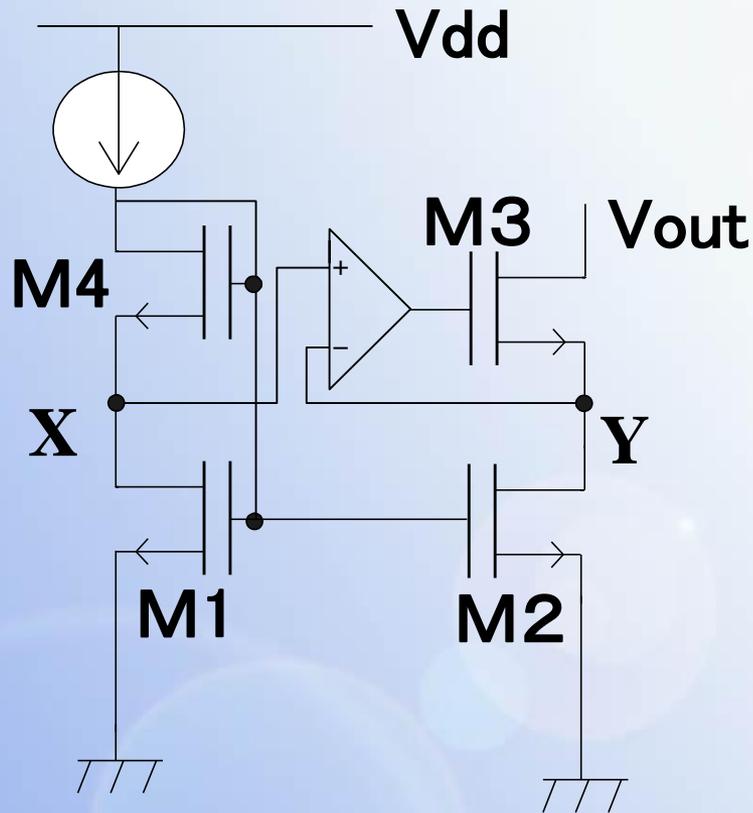
$V_X = V_Y$ になると  $I_{ref} = I_{out}$  となる



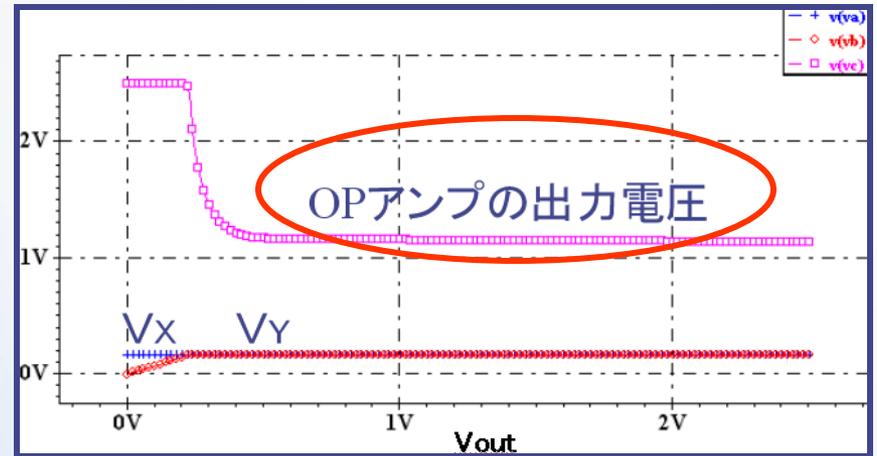
群馬大学

# 高性能カレントミラー回路の提案

(OPアンプの出力を利用した回路)



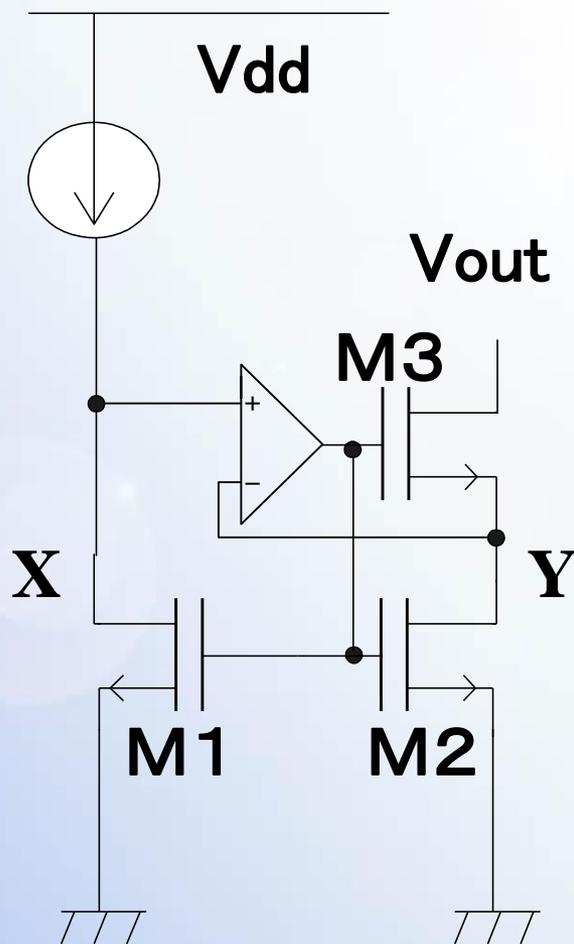
High Compliance regulated cascode current mirror



OPアンプの出力をM1とM2のゲート電圧に利用できないか？

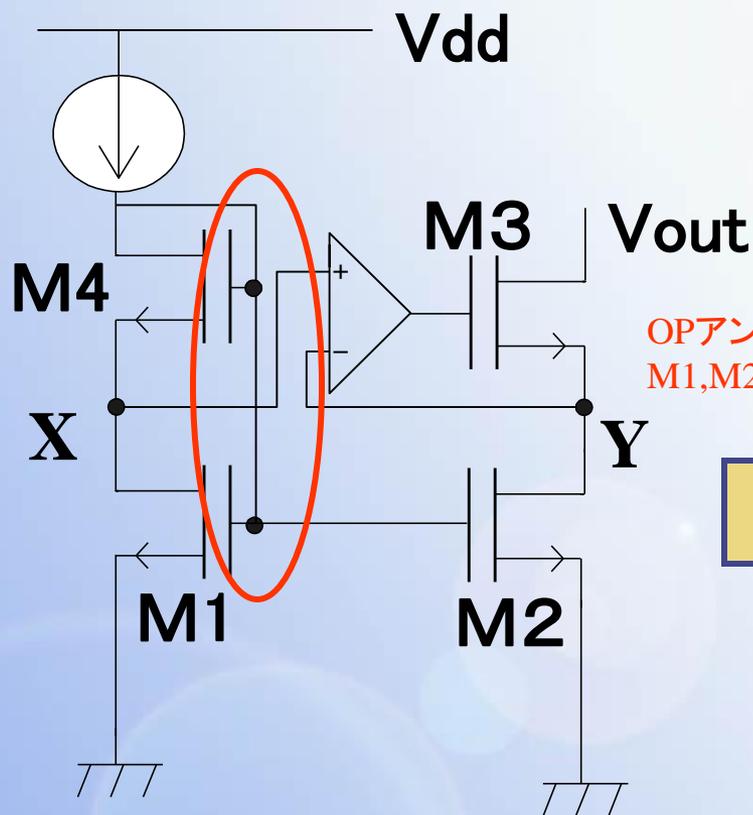


# 提案回路(4)

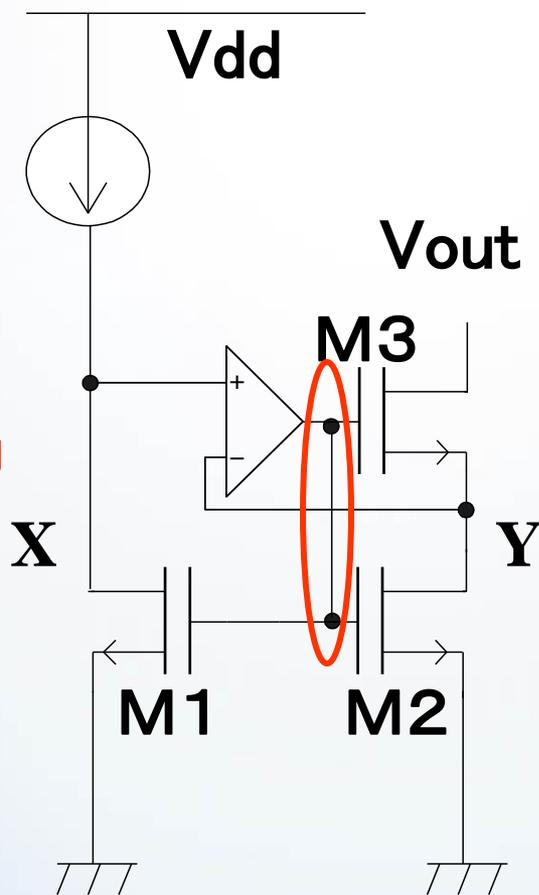
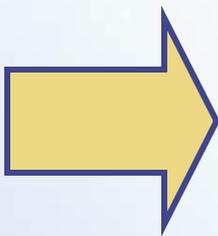




## 提案回路(4)



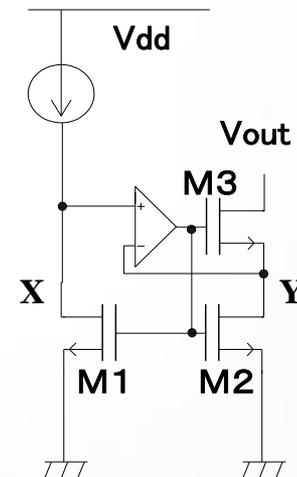
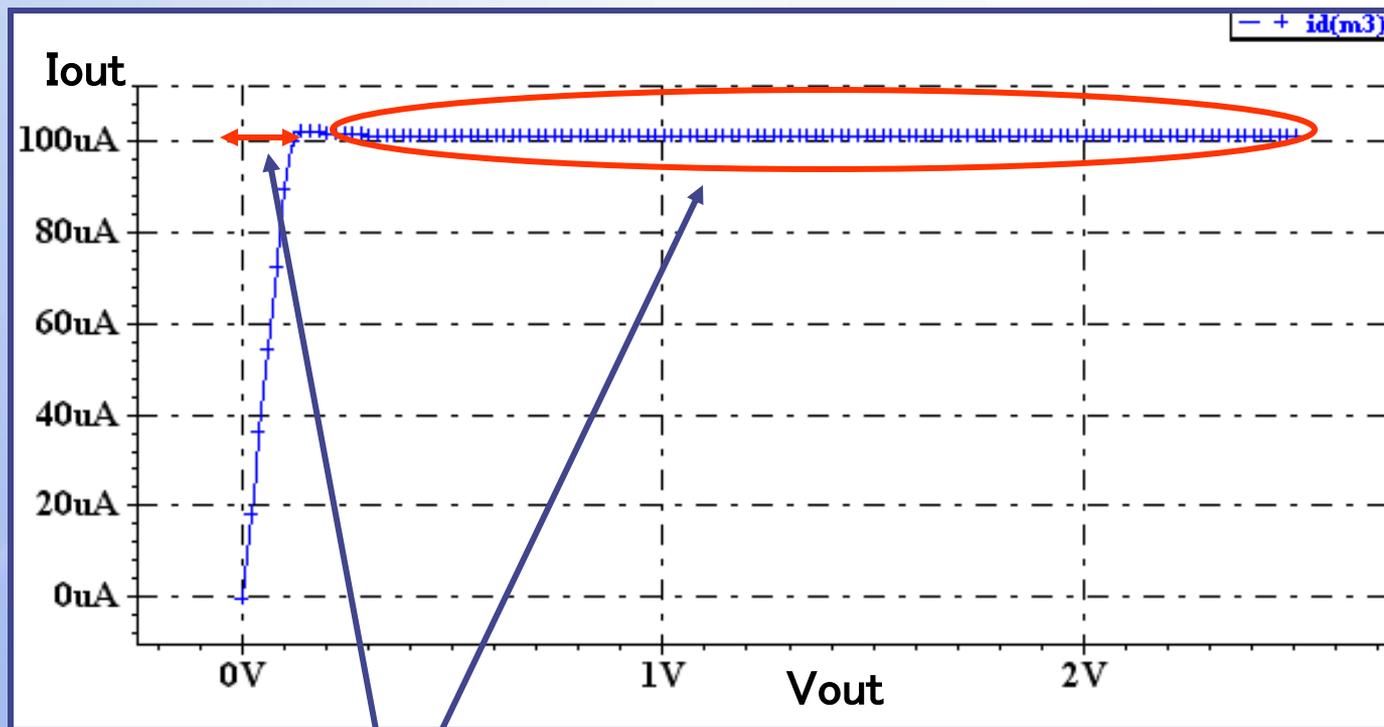
OPアンプの出力を  
M1,M2のゲートに利用



OPアンプの出力を利用して、最小許容電圧を低くし、  
さらに電流ミラー精度も上げることが出来るのではないかと考えた



## 提案回路(4)



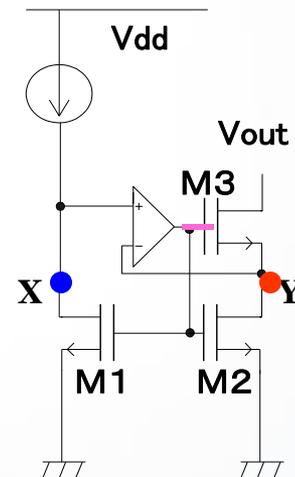
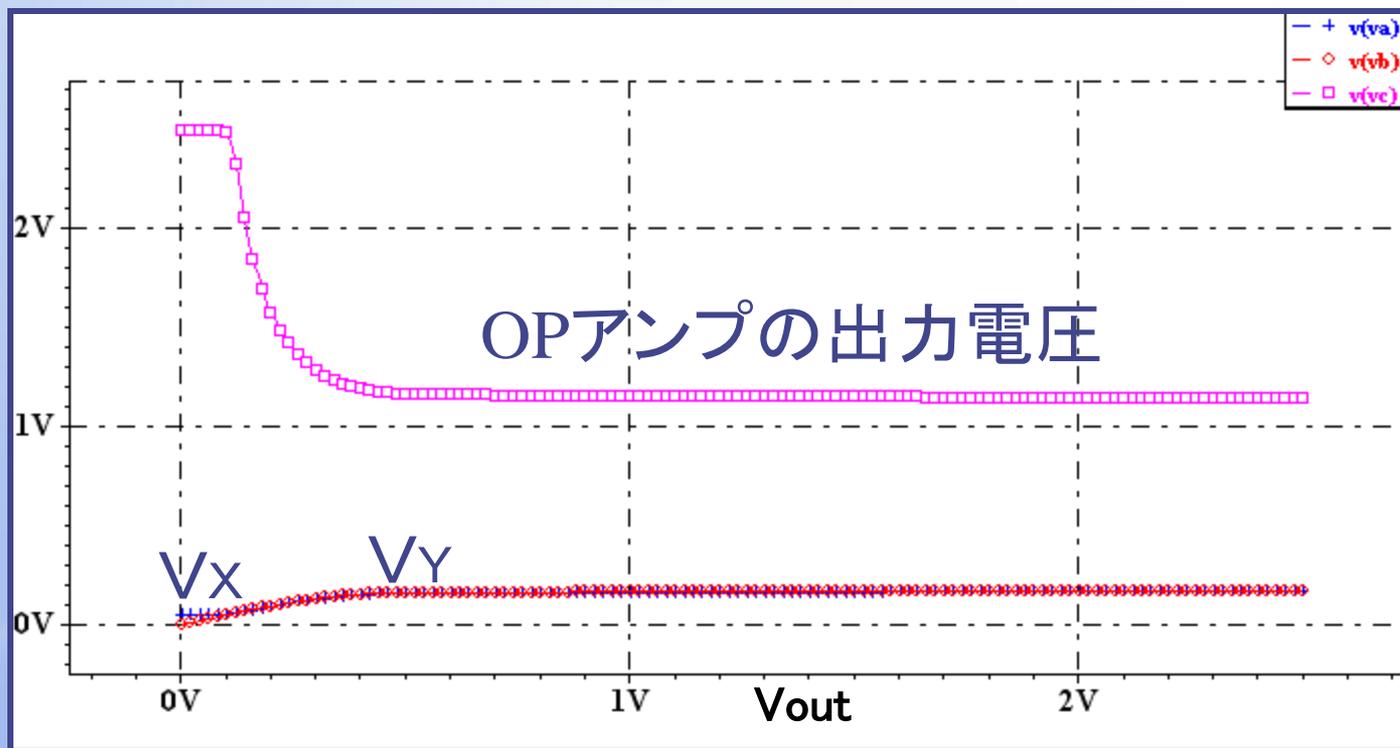
電流コピー精度が向上し、  
最小許容電圧も低くすることができた

電流のコピー精度○

低電圧化○



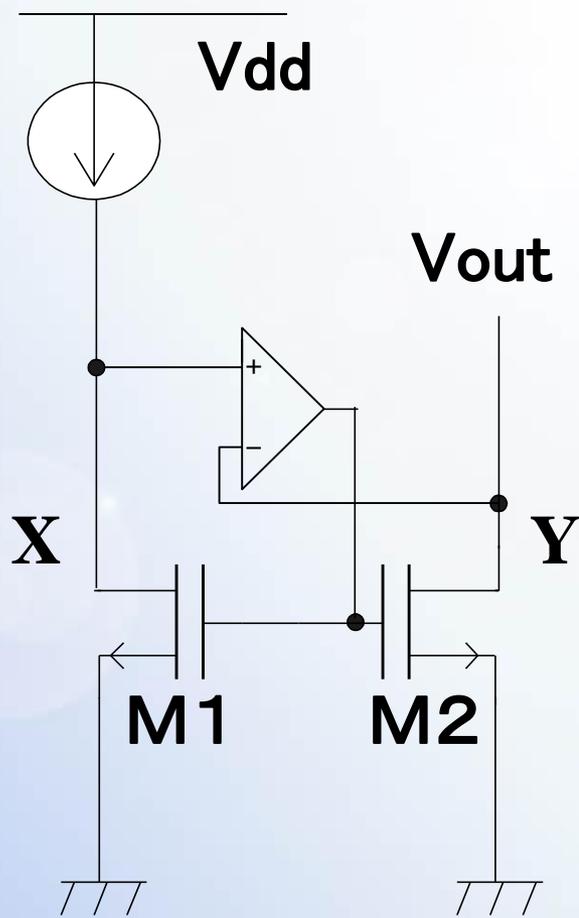
# 提案回路(4)



$V_X = V_Y$  になると  $I_{ref} = I_{out}$  となる

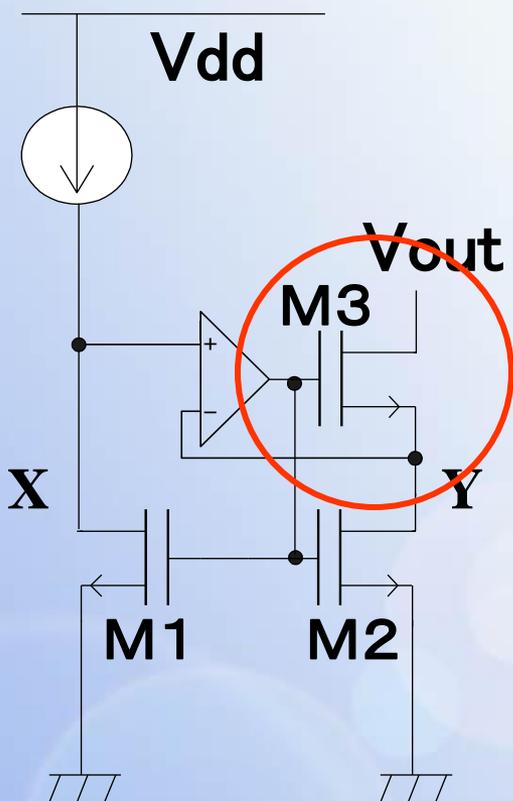


# 提案回路(5)

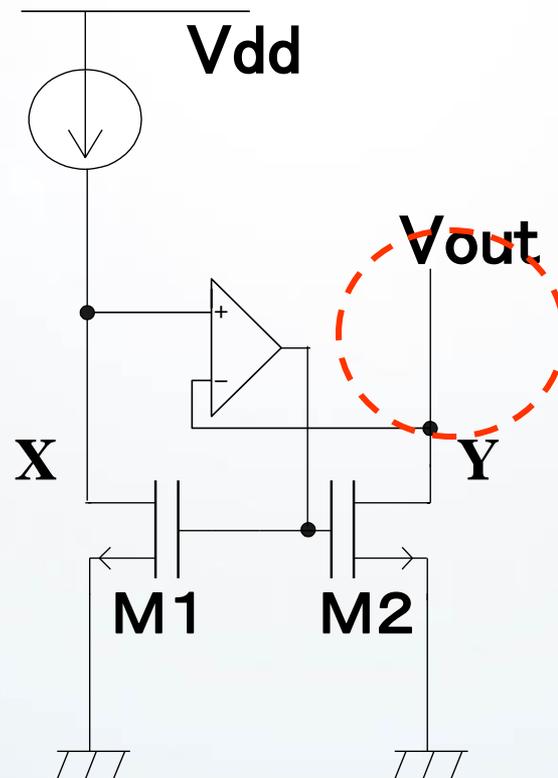
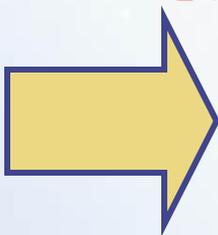




## 提案回路(5)



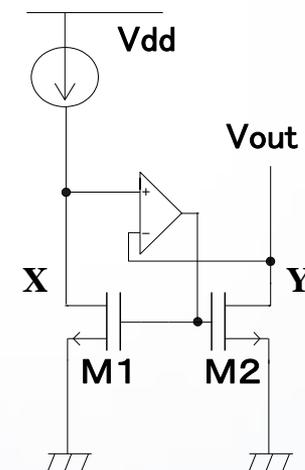
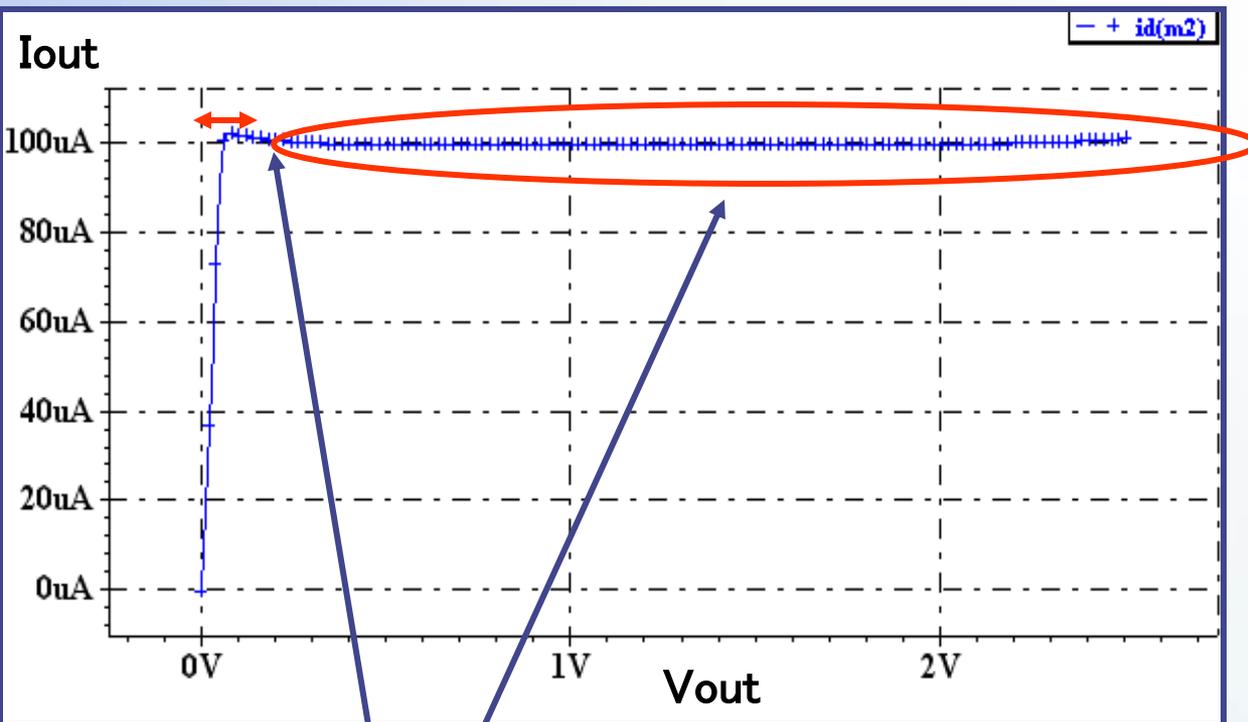
最小許容電圧を  
低くするためM3を取り除く



M3を取り除いて、さらに最小許容電圧を  
低くすることが出来るのではないかと考えた



# 提案回路(5)



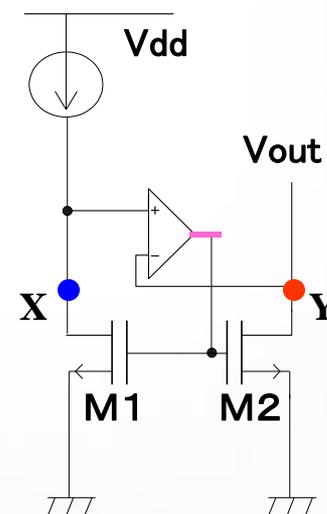
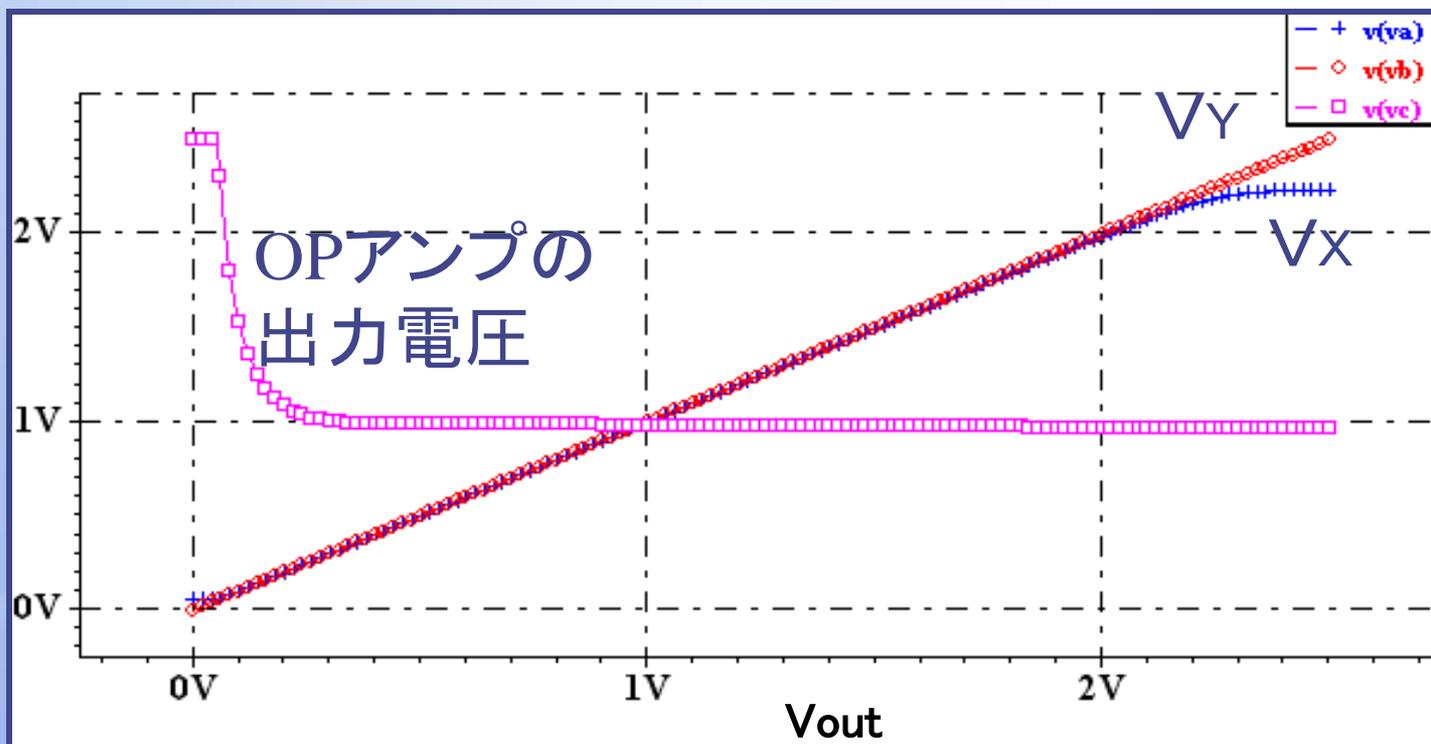
電流のコピー精度◎

低電圧化◎

最小許容電圧をさらに低くすることができ、  
また電流コピーの精度も向上した



## 提案回路(5)

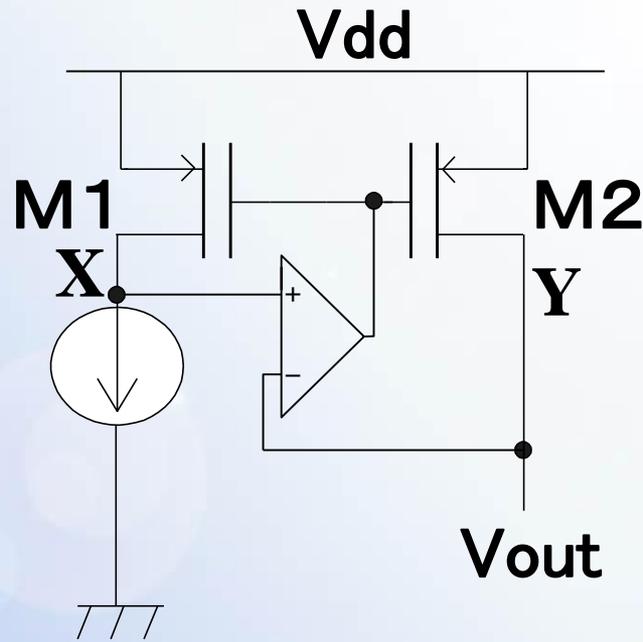


$V_X = V_Y$ になると  $I_{ref} = I_{out}$  となる

Voutが小 → 線形領域使用  
Voutが大 → 飽和領域使用

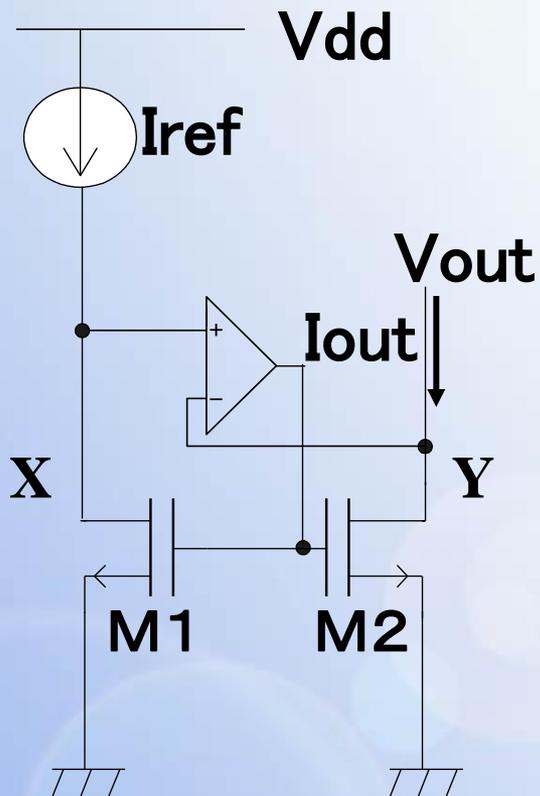


## 提案回路(5)をPMOSで構成

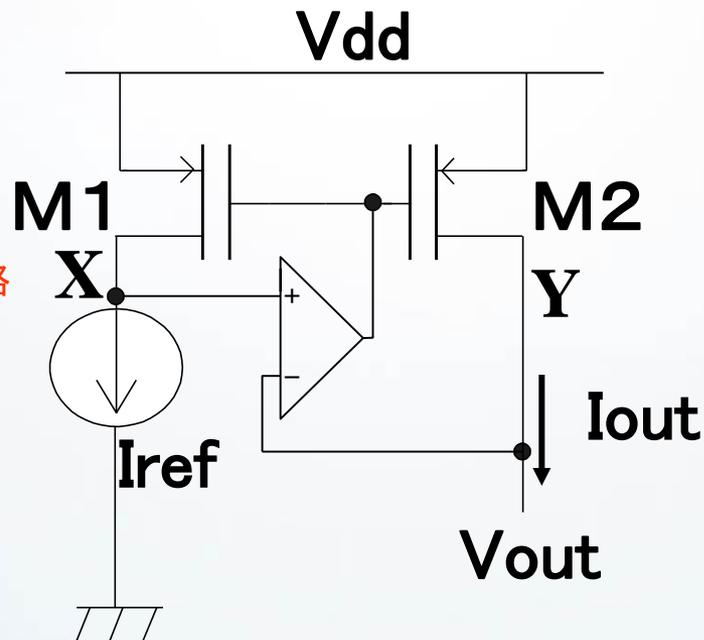
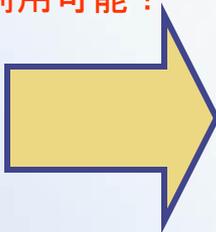




## 提案回路(5)をPMOSで構成



PMOSカレントミラー回路でも利用可能?

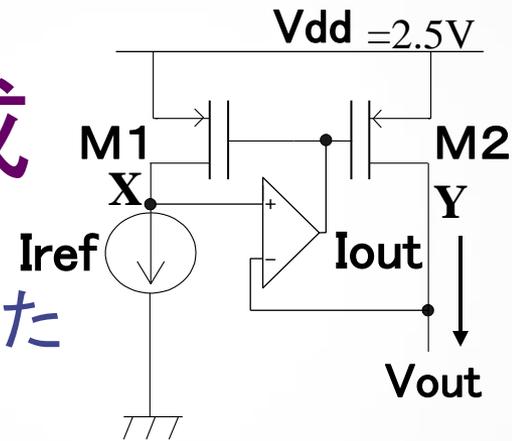


OPアンプの出力をPMOSカレントミラーにも利用

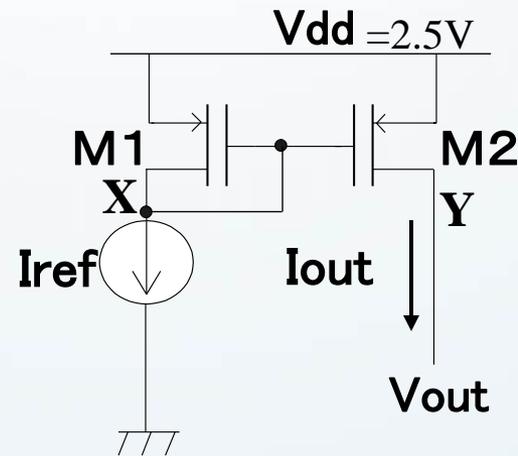
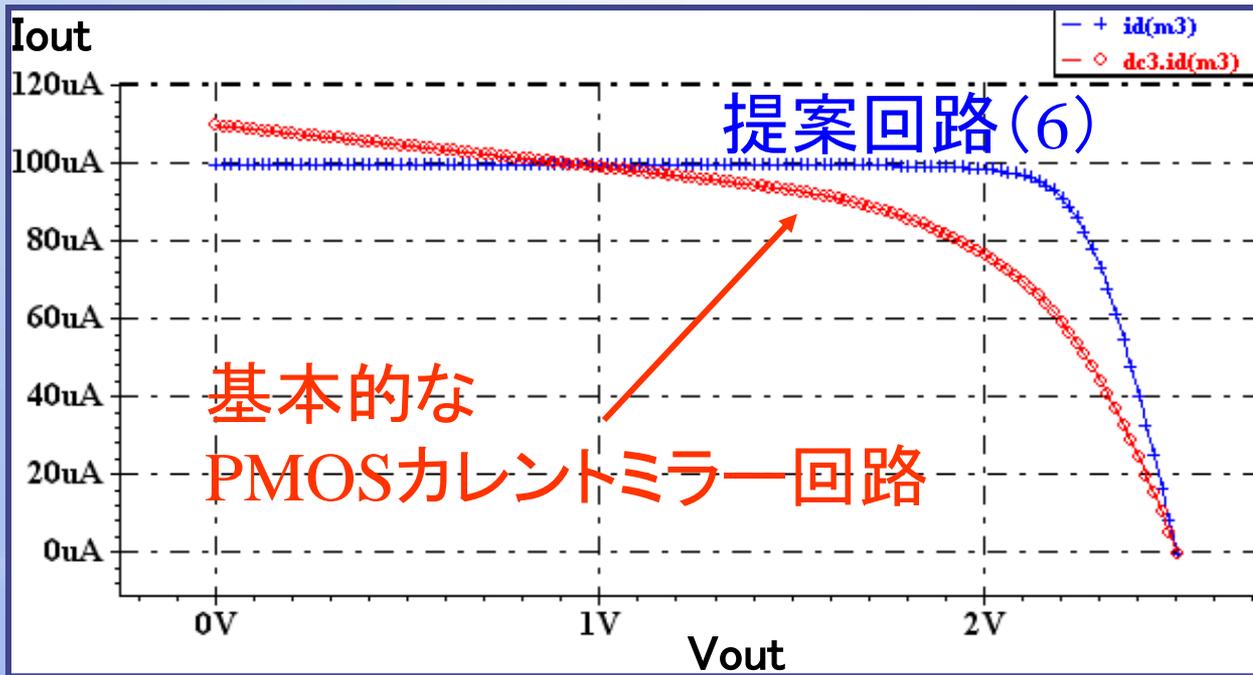


# 提案回路(5)をPMOSで構成

基本的なPMOSカレントミラー回路との比較をした



提案回路(6)

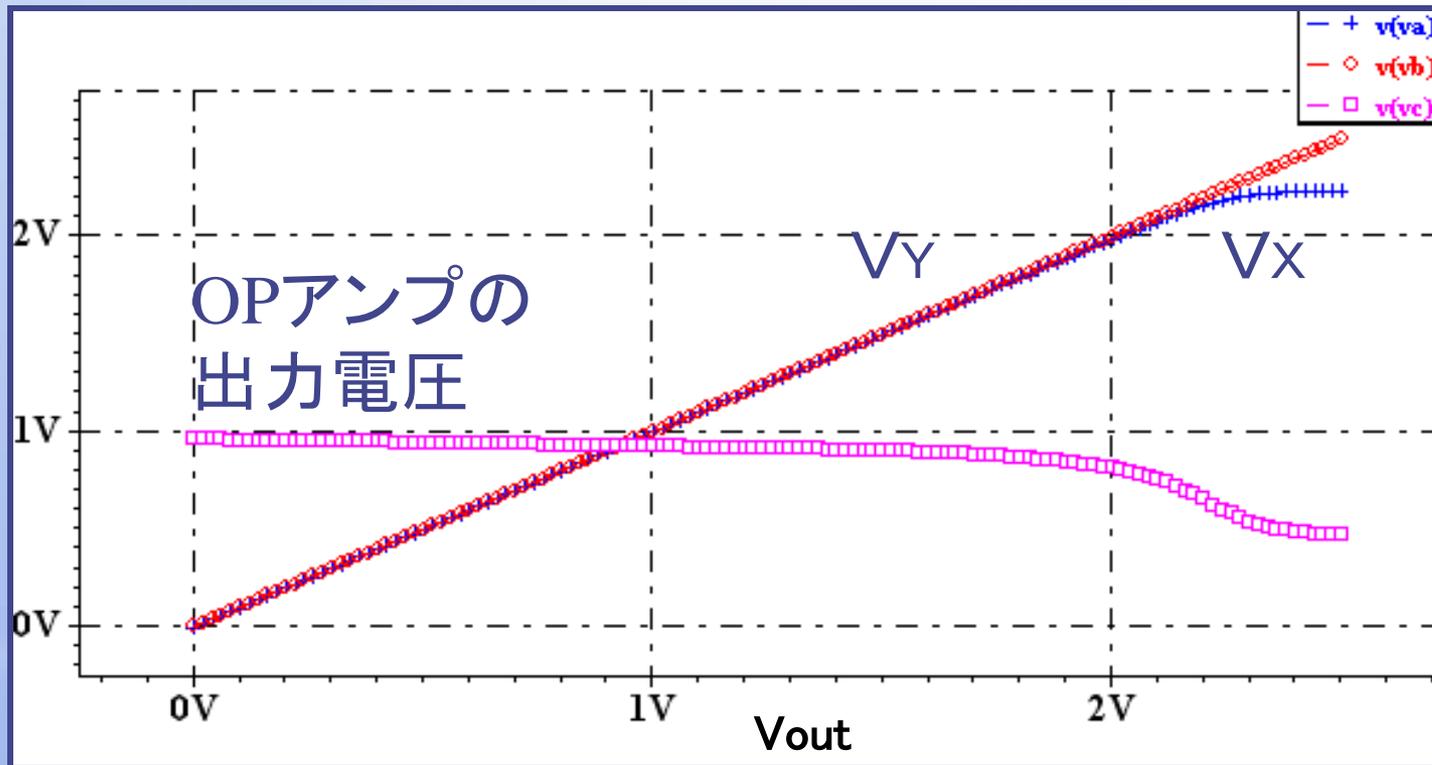
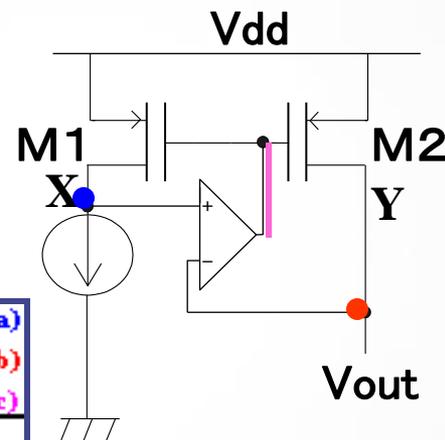


基本的なPMOSカレントミラー回路

Vdd-Vout、すなわちM2のV<sub>DS</sub>が小さくても電流をコピーできる



# 提案回路(5)をPMOSで構成



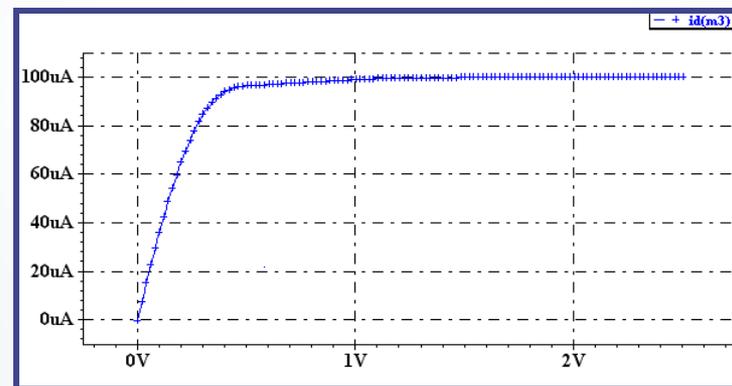
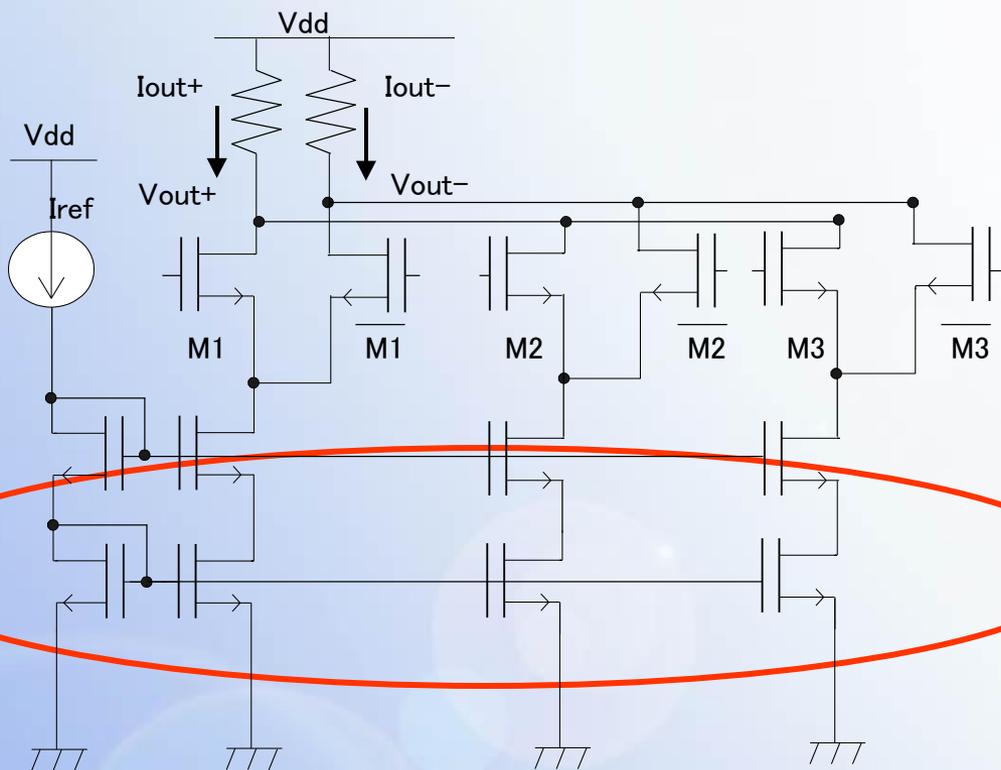
$V_X = V_Y$ になると  $I_{ref} = I_{out}$  となる



# 高性能カレントミラー回路の応用



## DACへの応用



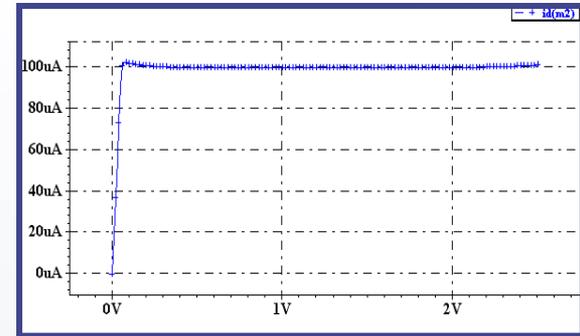
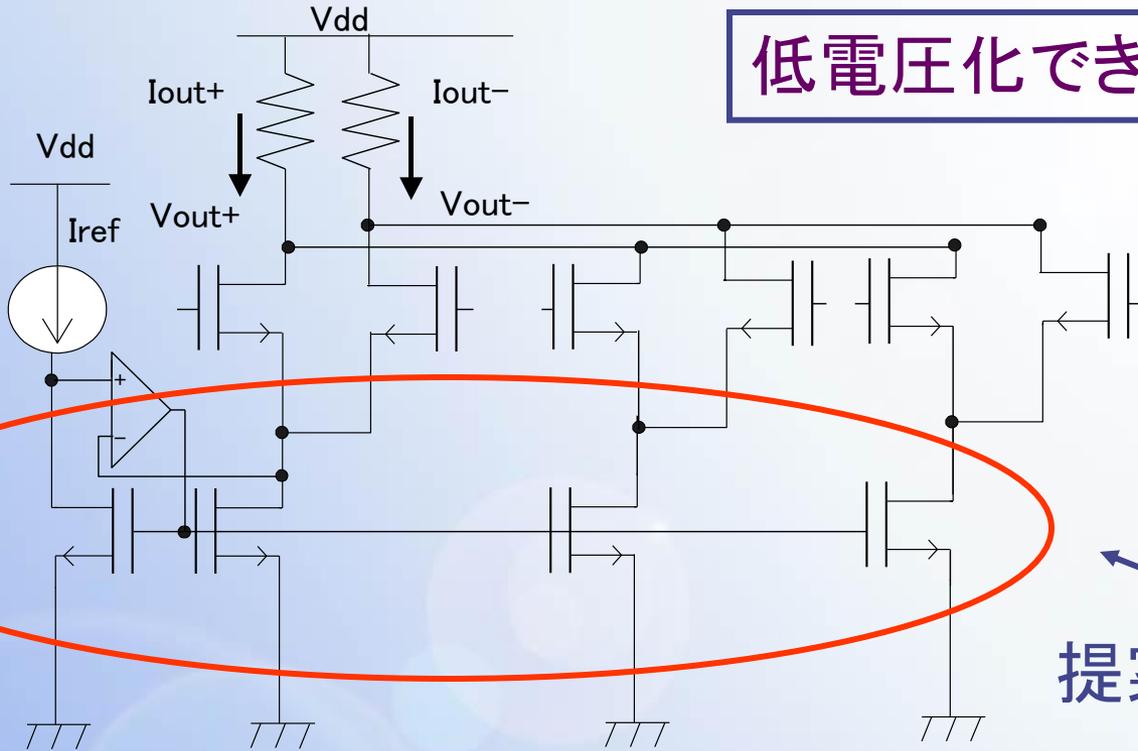
カスコードカレントミラー

従来の電流源を用いたDAC  
(2bitセグメント型DAC)



## DACへの応用

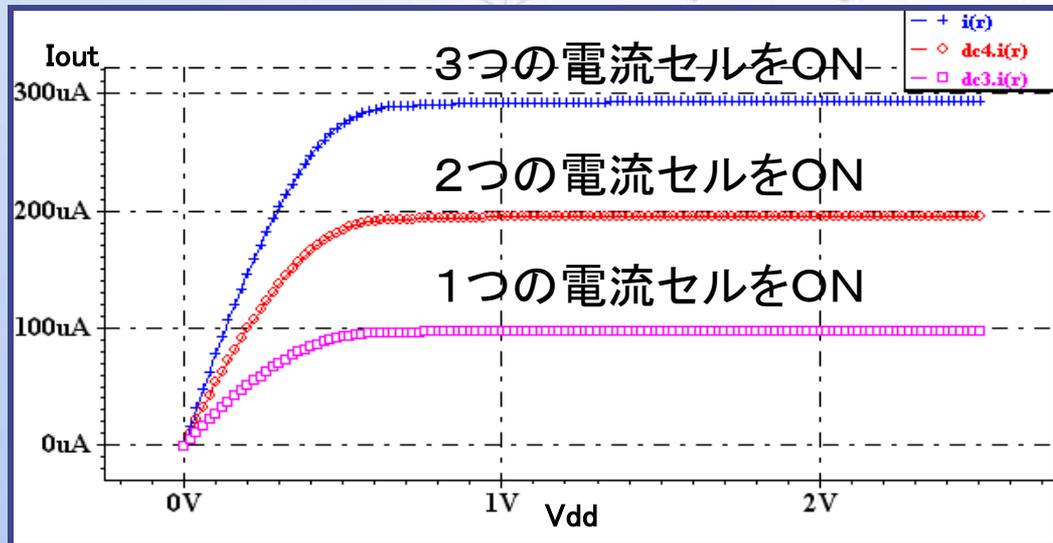
低電圧化できないか？



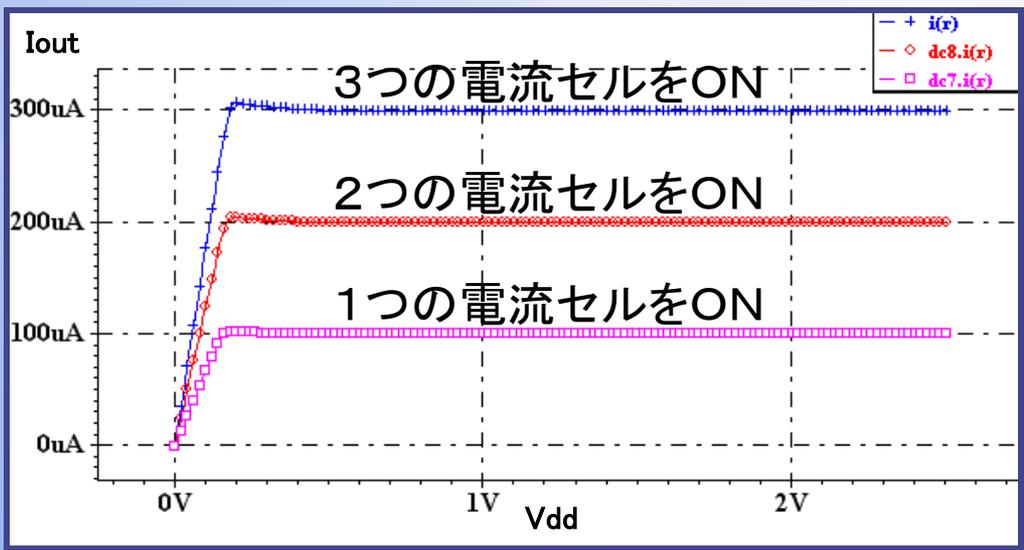
提案回路(5)

提案電流源を用いたDAC  
(2bitセグメント型DAC)

従来電流源を用いたDAC



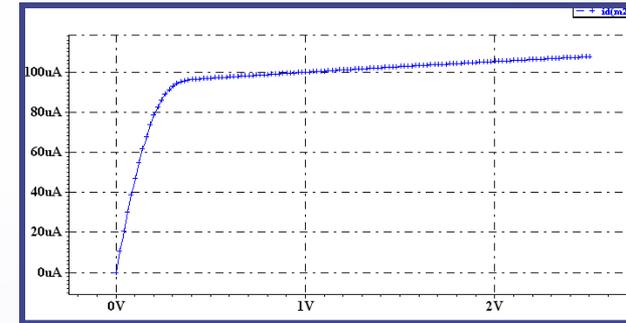
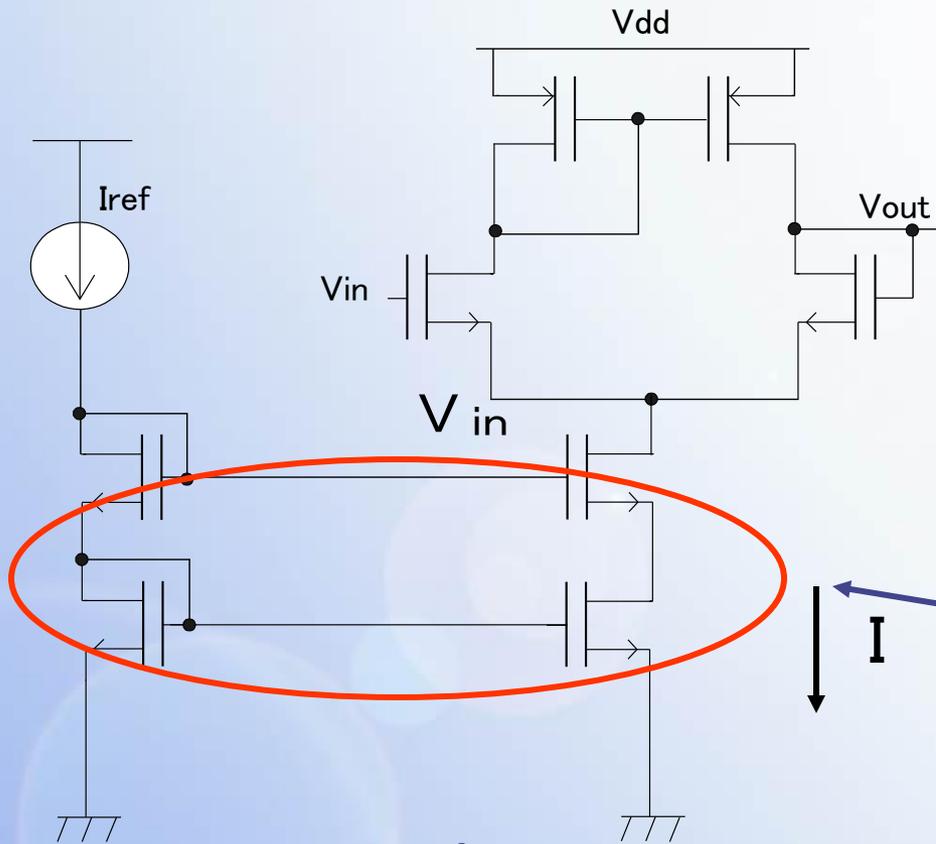
提案電流源を用いたDAC



低電圧化、  
電流のコピー精度  
の向上に成功！！



## OPアンプへの応用



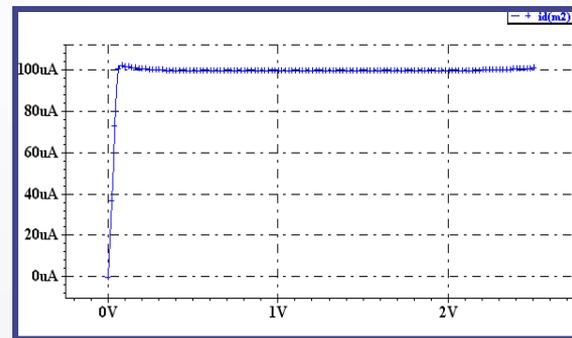
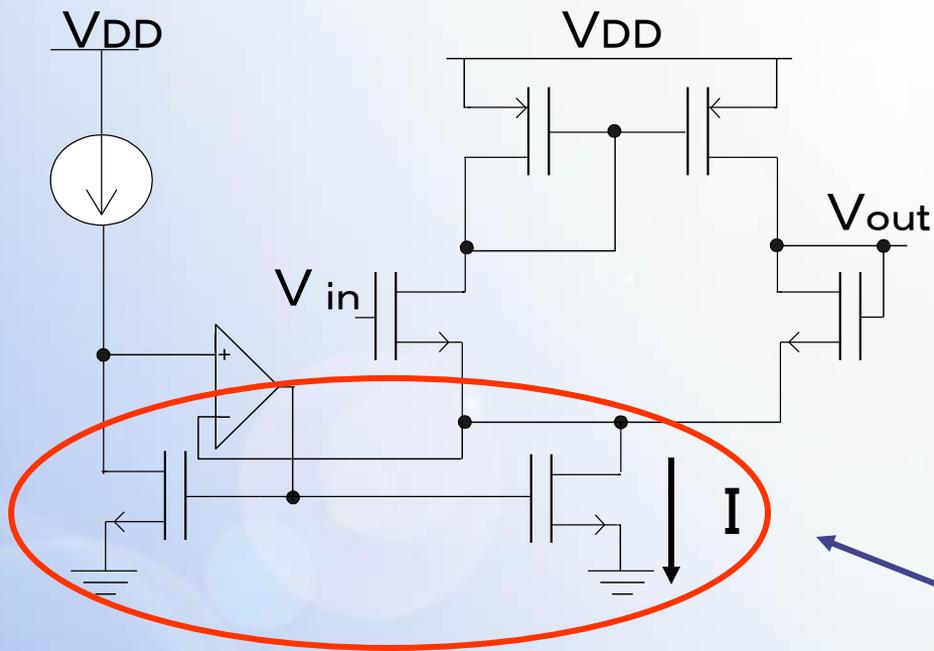
カスコード  
カレントミラー回路

1段OPアンプ回路(差動アンプ)



## OPアンプへの応用

低電圧化できないか？



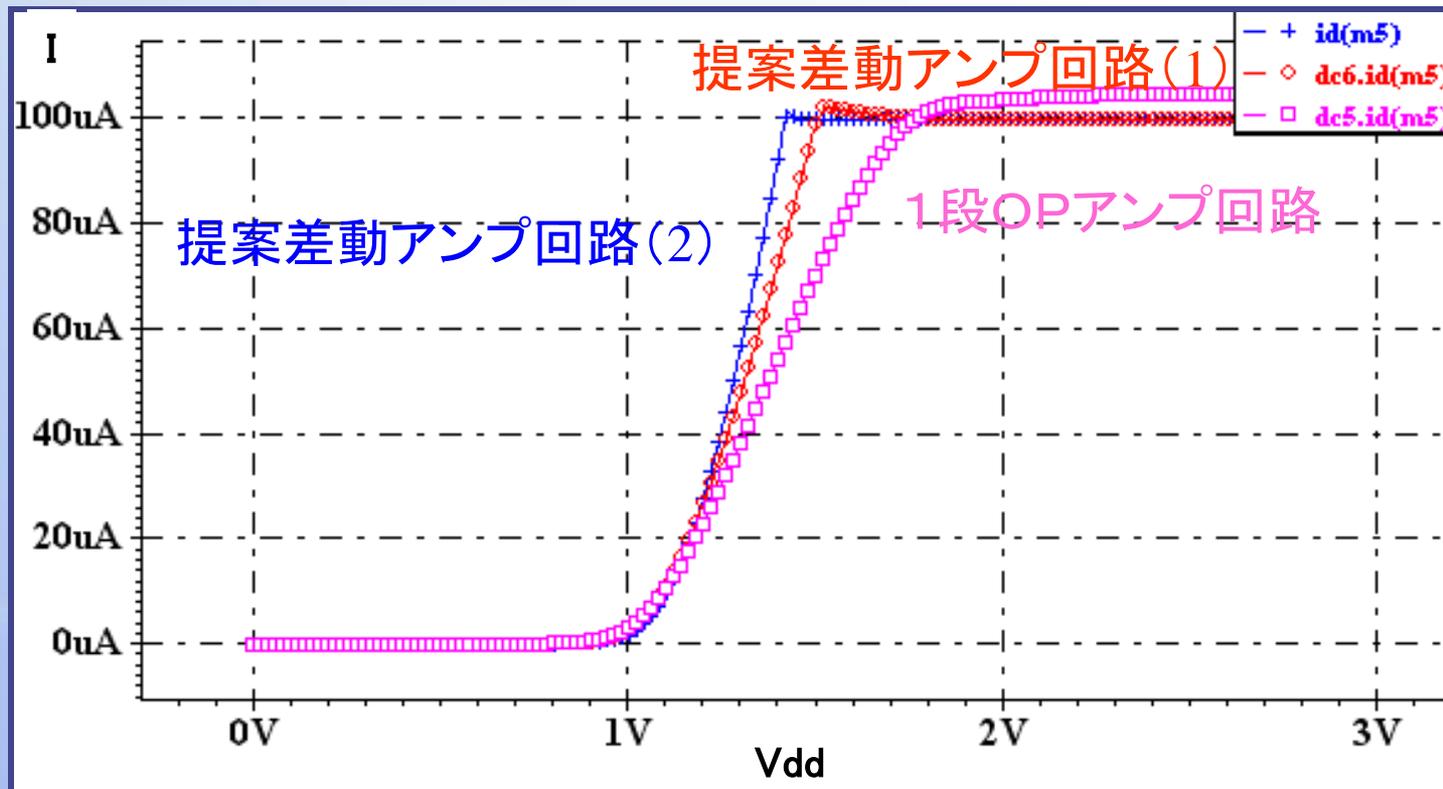
提案回路(5)

提案差動アンプ回路(1)





## OPアンプへの応用



低電圧化に成功！！



群馬大学

まとめ



## 各カレントミラー回路のまとめ

	低電圧化	電流コピーの精度
基本的なカレントミラー回路	×	×
カスコードカレントミラー回路	×	◎
Basic regulated cascode current mirror	×	◎
High Compliance regulated cascode current mirror	△	○
提案回路(1)	○	△
提案回路(2)	○	△
提案回路(3)	○	△
提案回路(4)	○	○
提案回路(5)	◎	◎



## まとめ

### ◆カレントミラー回路の解析

- ★ 線形領域を使用できることを確認

### ◆高性能カレントミラー回路の提案

- ★ 5つの高性能カレントミラー回路の提案
- ★ それぞれの回路の高性能化を確認

### ◆高性能カレントミラー回路の応用

- ★ 提案DACの高性能化を確認
- ★ 提案OPアンプの高性能化を確認