

高的能力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

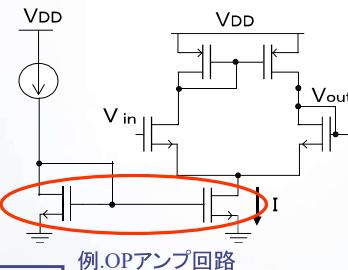
指導教官 仁木義規
小林春夫 教授

Kobayashi Laboratory

Gunma University

研究背景

カレントミラー回路



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

Kobayashi Laboratory

Gunma University

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
- ◆ 高的能力レントミラー回路の提案
- ◆ 高的能力レントミラー回路の応用
- ◆ まとめ

Kobayashi Laboratory

Gunma University 2

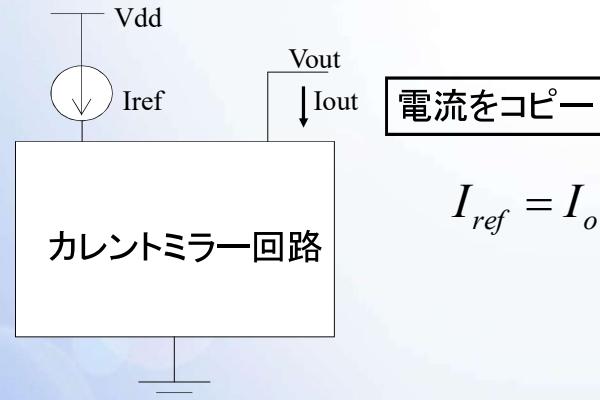
カレントミラー回路について

Kobayashi Laboratory

Gunma University 4



カレントミラー回路とは？



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

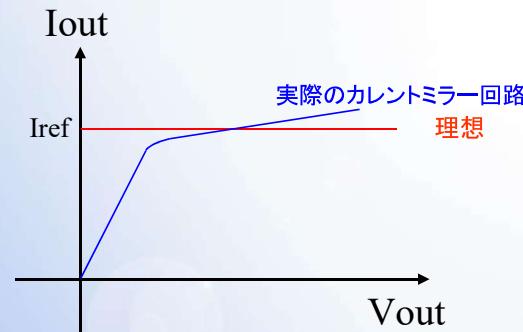
参照電流に等しい出力電流を生成する回路



基本的なカレントミラー回路



理想的なカレントミラー回路



理想: Vout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！！



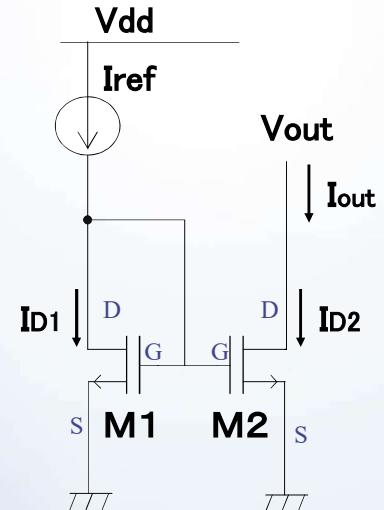
基本的なカレントミラー

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Irefと出力電圧Iout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)

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

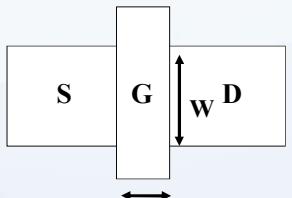
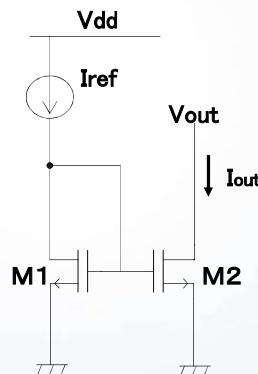
$$I_{out} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})_2^2$$

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

M1=M2なら $I_{ref} = I_{out}$

C_{ox} :単位面積あたりのゲート酸化膜容量

Kobayashi Laboratory



Gunma University 9

例. L=L₁とL=2L₁のMOSFETのID/VDS特性

例.L=L₁とL=2L₁のMOSFETのId/Vds特性を図示

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

において、

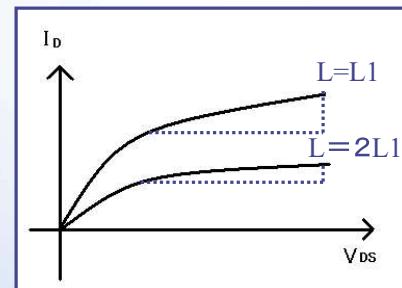
$$\lambda \propto 1/L$$

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

チャネル長が2倍



Lが小さいと傾きが大



Kobayashi Laboratory

Gunma University 11

チャネル長変調を考える

「チャネル長変調効果」

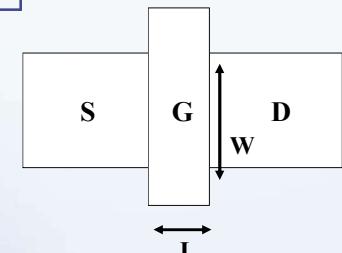
ゲートとドレンの電位差が大きくなるほど

反転層によるチャネルの実際の長さは徐々に短くなる

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

λ :チャネル長変調係数

λ はVDSが増大した時のチャネル長の変化を相対的に表すので、チャネル長が長いほど λ は小さくなる



Gunma University 10

群馬大学 基本的なカレントミラーの問題点

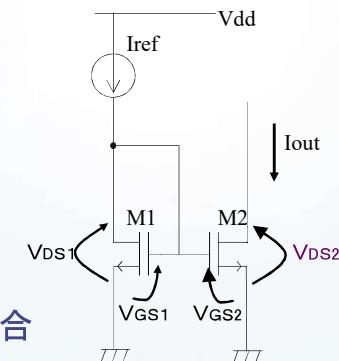
$$V_{DS1} = V_{GS1} = V_{GS2}$$

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

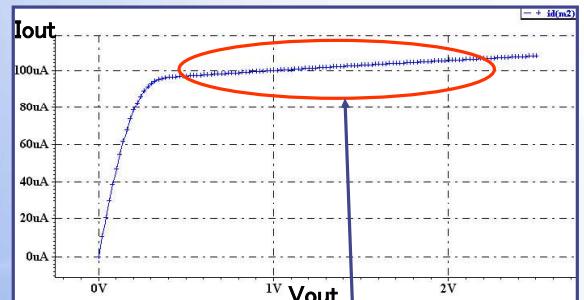
チャネル長変調効果によりIrefとIoutに誤差が生まれる



Kobayashi Laboratory

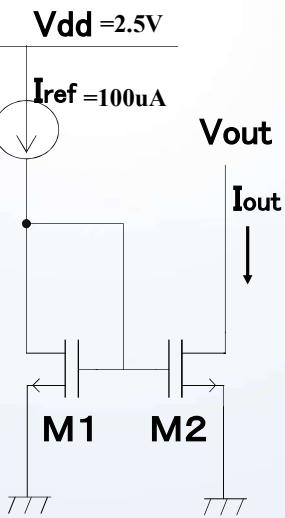
Gunma University 12

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 ×



Kobayashi Laboratory Gunma University 13

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



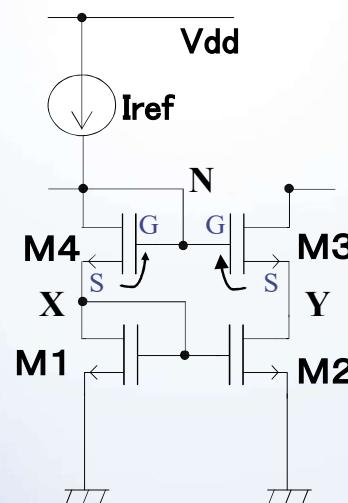
電圧 $V_N = V_{GS4} + V_X$ を発生



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

$$\frac{(W/L)_3}{(W/L)_4} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \text{ ならば}$$

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



Kobayashi Laboratory Gunma University 15

カスコードカレントミラー回路

Kobayashi Laboratory

Gunma University 14

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

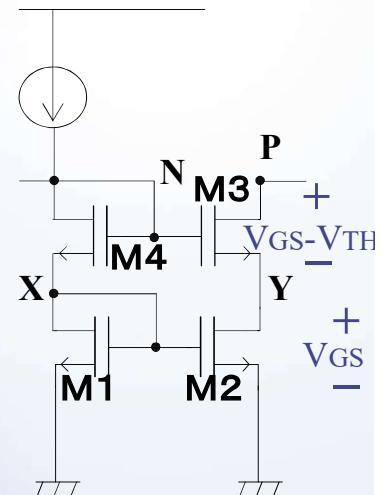
$$V_N - V_{TH} = V_{GS4} + V_{GS1} - V_{TH}$$

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

=オーバードライブ電圧2個分 +
しきい電圧1個分



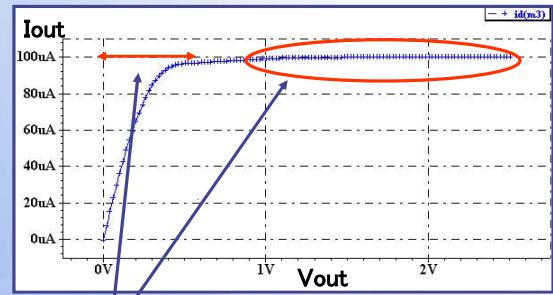
しきい電圧1個分の電圧余裕を
“無駄”にしている！



Kobayashi Laboratory

Gunma University 16

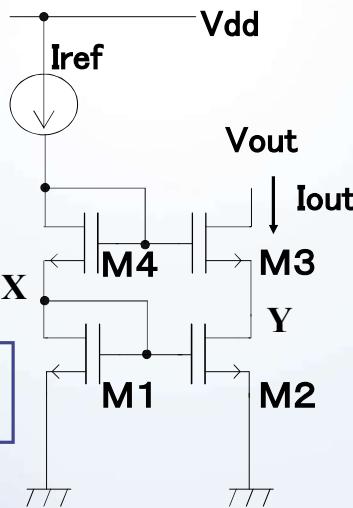
カスコードカレントミラー回路のシミュレーション結果



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

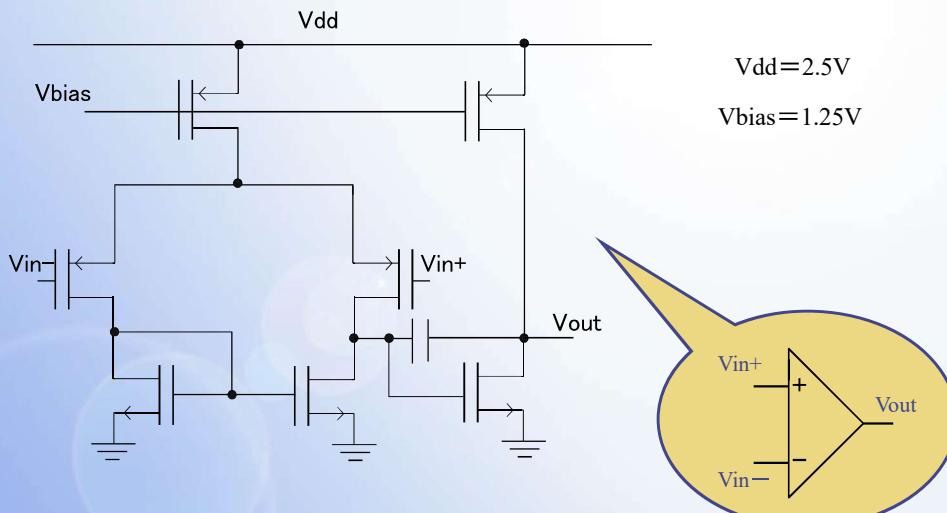
電流のコピー精度◎ 低電圧化×

Kobayashi Laboratory



Gunma University 17

群馬大学 シミュレーションに使用したOPアンプ



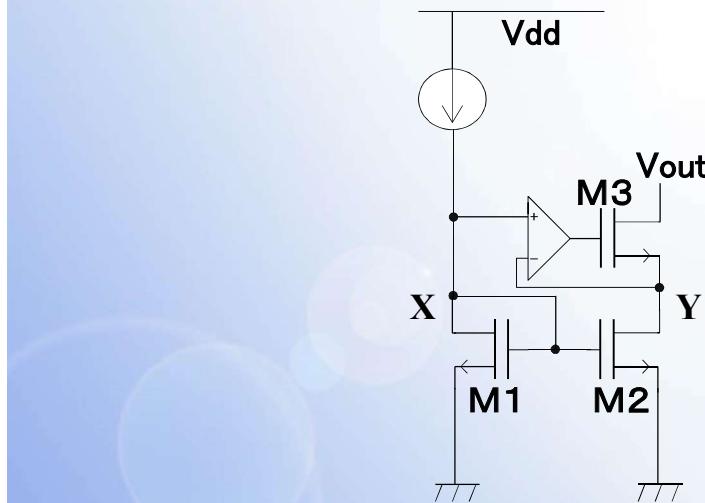
Kobayashi Laboratory

OPアンプを使用した
カレントミラー回路

Kobayashi Laboratory

Gunma University 18

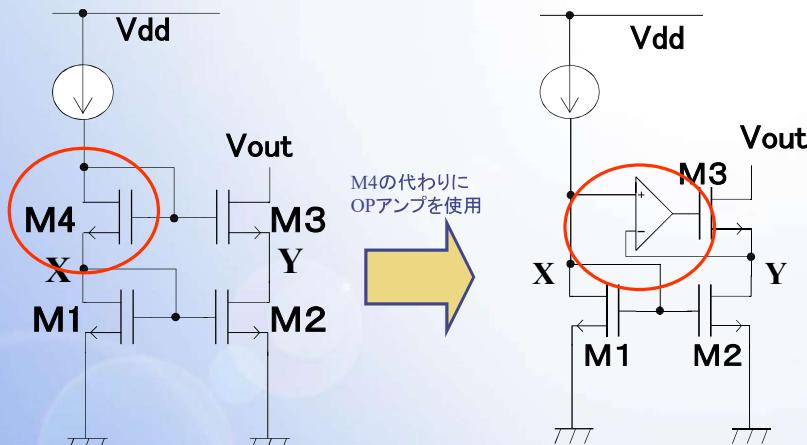
Basic regulated cascode current mirror



Kobayashi Laboratory

Gunma University 20

Basic regulated cascode current mirror

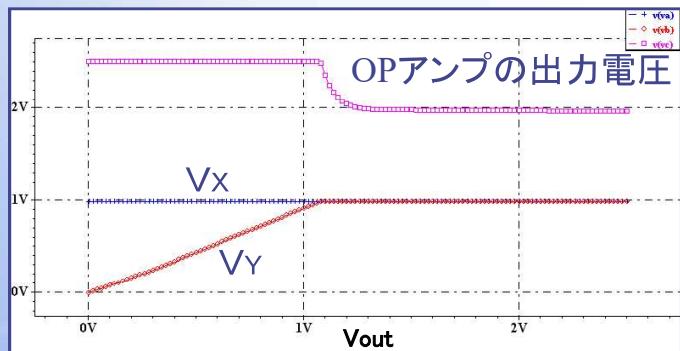


カスコードカレントミラー回路に比べて
出力インピーダンスがOPアンプのゲイン分だけ高くなる

Kobayashi Laboratory

Gunma University 21

Basic regulated cascode current mirror

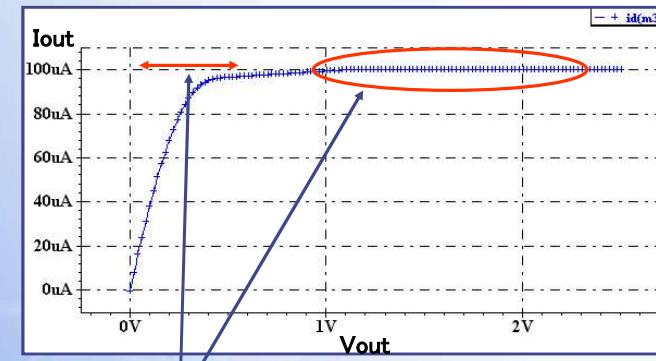


$V_x = V_y$ になると $I_{ref} = I_{out}$ となる

Kobayashi Laboratory

Gunma University 23

Basic regulated cascode current mirror



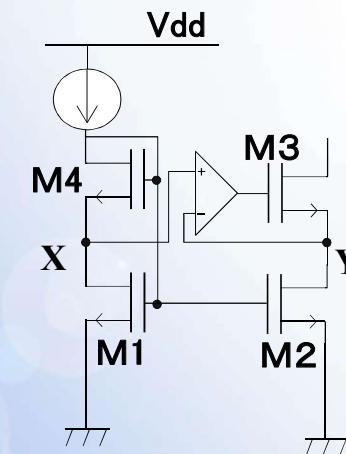
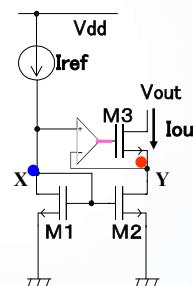
カスコードカレントミラー回路と同様
チャネル長変調効果の影響は小さいが最小許容電圧が高い

電流のコピー精度◎ 低電圧化×

Kobayashi Laboratory

Gunma University 22

High Compliance regulated cascode current mirror



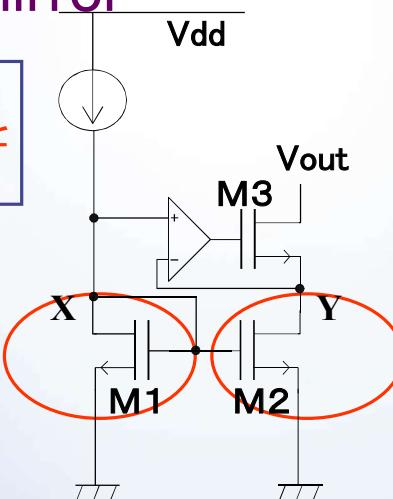
Kobayashi Laboratory

Gunma University 24

High Compliance regulated cascode current mirror

今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



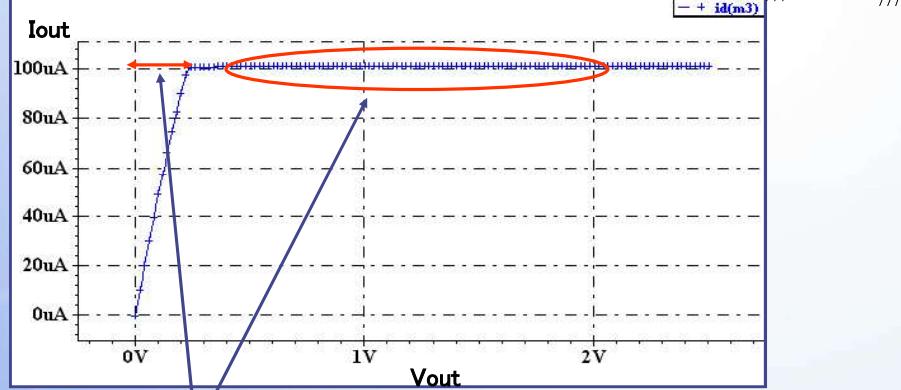
Basic regulated Cascode current mirror

Kobayashi Laboratory

Gunma University

25

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△

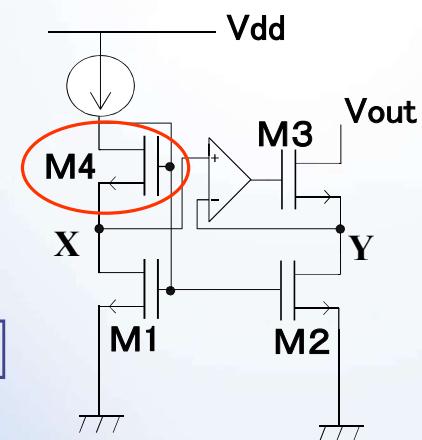
Gunma University

27

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

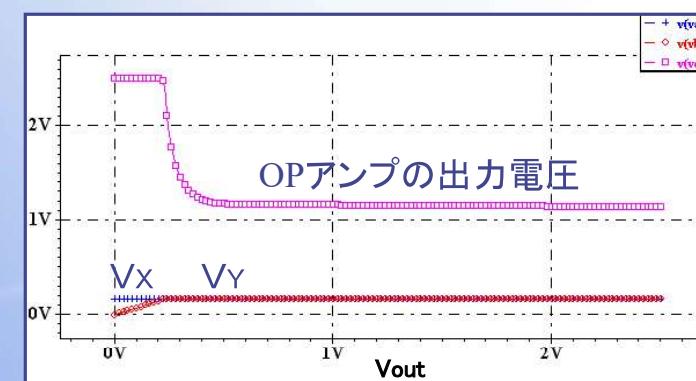


Kobayashi Laboratory

Gunma University

26

High Compliance regulated cascode current mirror



$V_x = V_y$ になると $I_{ref} = I_{out}$ となる

Kobayashi Laboratory

Gunma University

28



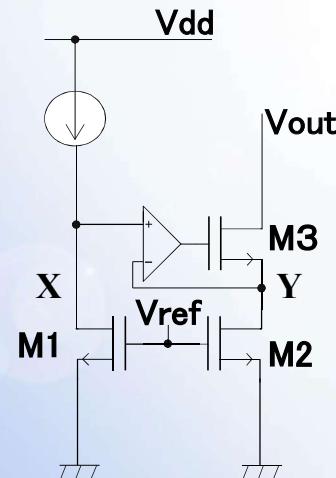
高性能能力レントミラーワン回路の提案

Kobayashi Laboratory

Gunma University 29

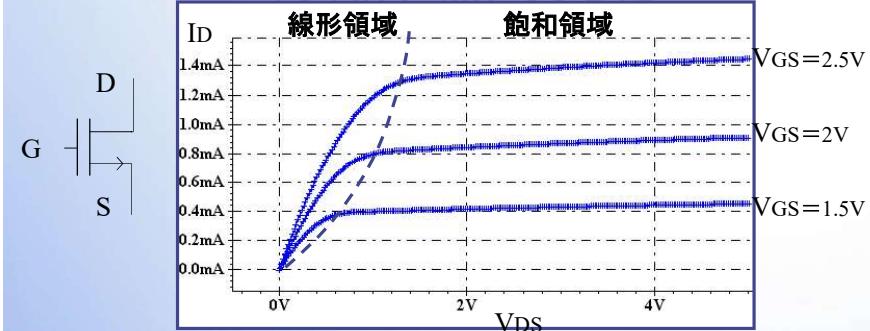


提案回路(1)



Kobayashi Laboratory

Gunma University 31



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



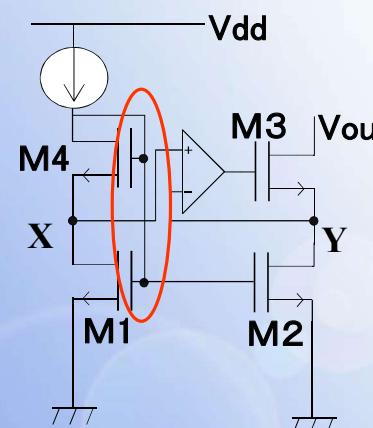
このことに着目し、

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

Kobayashi Laboratory

Gunma University 30

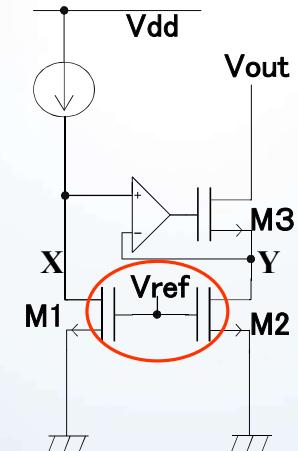
提案回路(1)



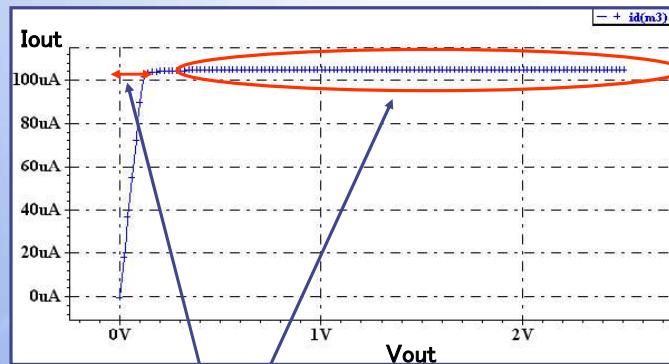
Vrefを高い電圧値にすることで最小許容電圧を
低くすることができると思った

Kobayashi Laboratory

Gunma University 32



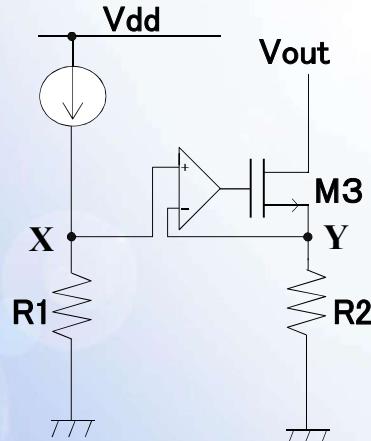
提案回路(1)



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

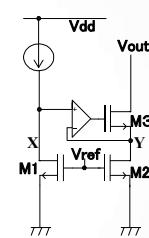
Kobayashi Laboratory

提案回路(2)

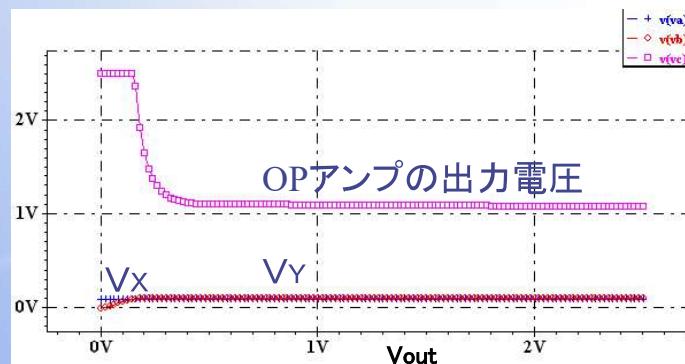


$$R1 = R2 = 1k$$

Kobayashi Laboratory



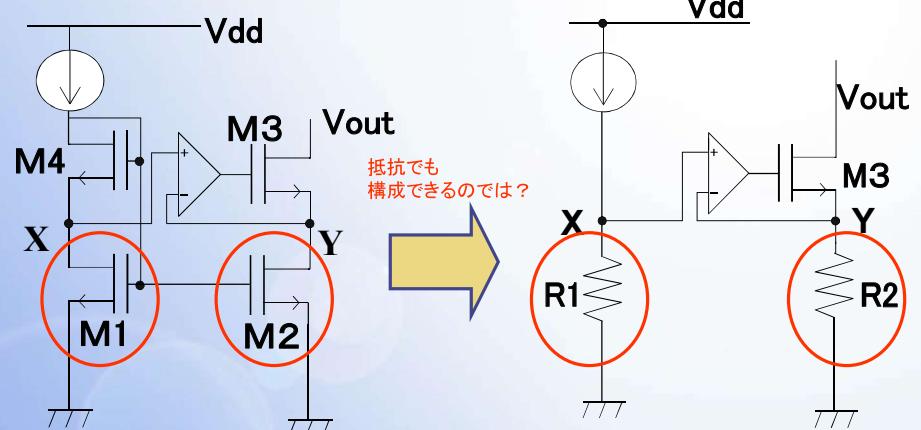
提案回路(1)



VX=VYになるとIref=Ioutとなる

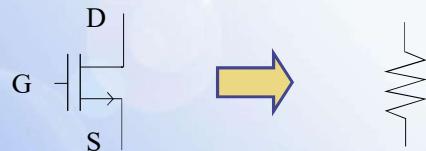
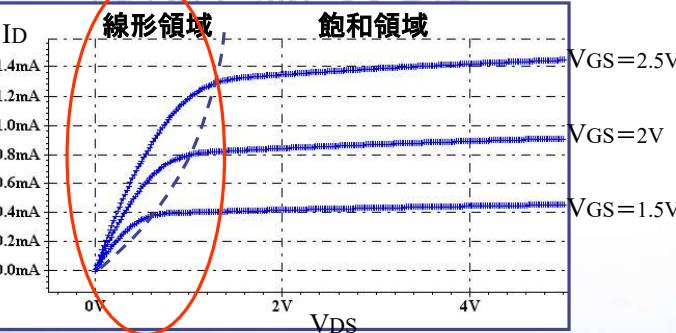
Kobayashi Laboratory

提案回路(2)



M1とM2を抵抗に変更した

Kobayashi Laboratory

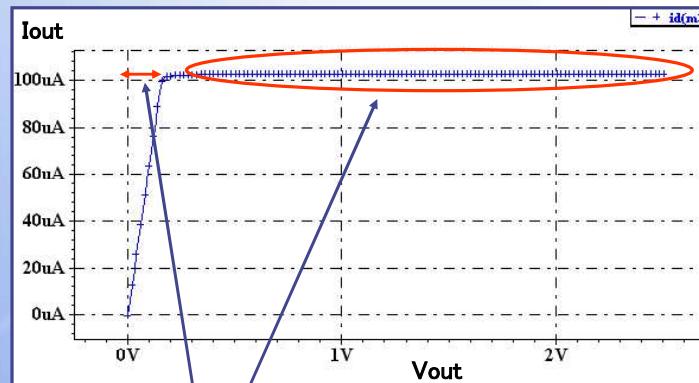


M1とM2を線形領域で使用しているのなら
抵抗でも代用が可能なのではないか？

Kobayashi Laboratory

Gunma University 37

群馬大学 提案回路(2)

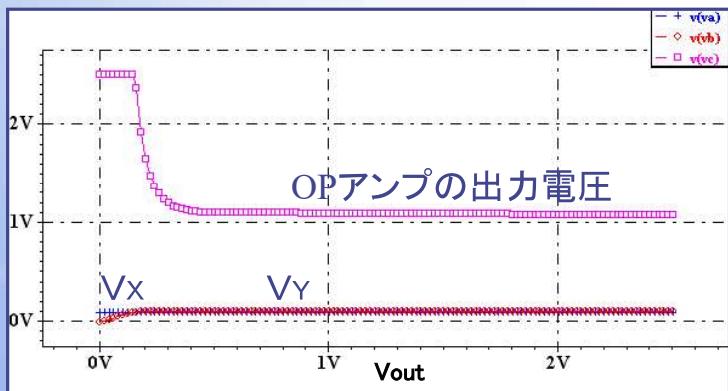


提案回路(1)より
電流コピーの精度が向上した

電流のコピー精度△
低電圧化○

Kobayashi Laboratory
Gunma University 38

群馬大学 提案回路(2)

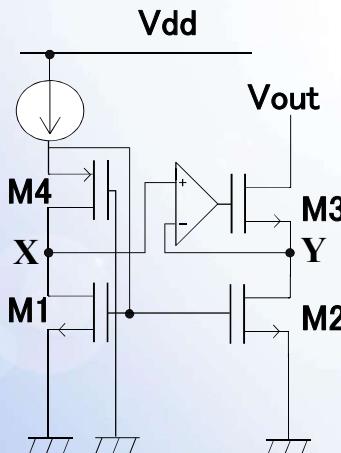


$V_x = V_y$ になると $I_{ref} = I_{out}$ となる

Kobayashi Laboratory

Gunma University 39

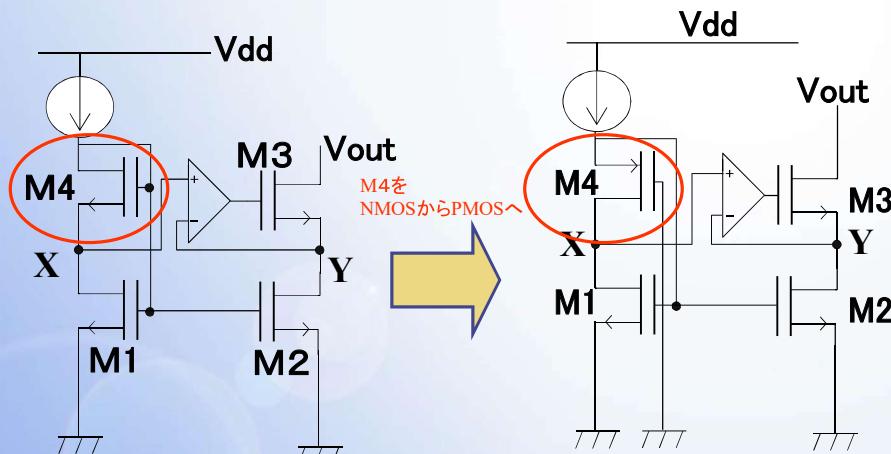
群馬大学 提案回路(3)



Kobayashi Laboratory

Gunma University 40

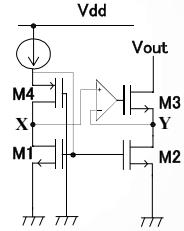
提案回路(3)



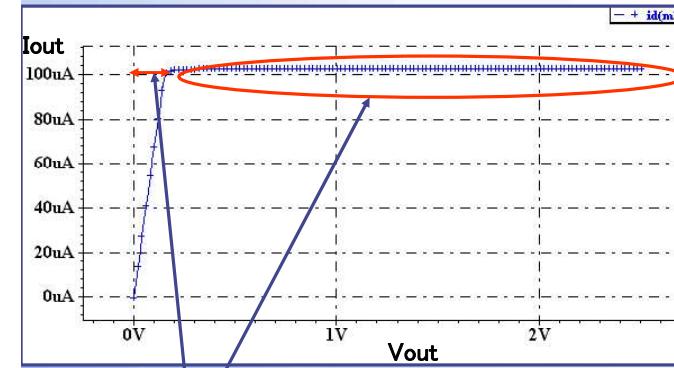
M4をNMOSからPMOSに変えることによって最小許容電圧を
低くすることができると考えた

Kobayashi Laboratory

Gunma University 41



提案回路(3)



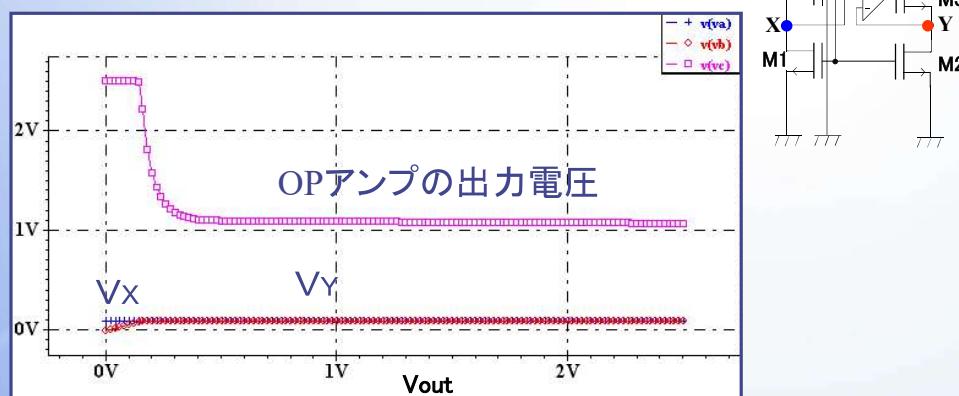
電流のコピー精度△
低電圧化○

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

Kobayashi Laboratory

Gunma University 42

提案回路(3)



Vx=VyになるとIref=Ioutとなる

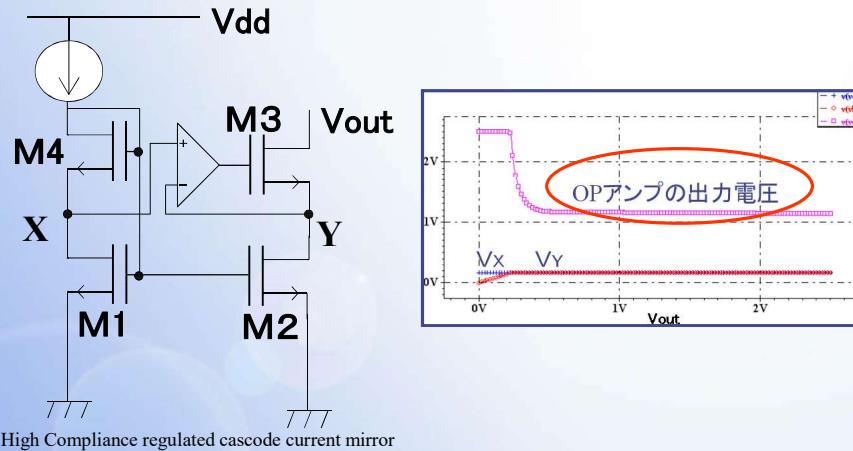
Kobayashi Laboratory

Gunma University 43

高的能力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)

Kobayashi Laboratory

Gunma University 44

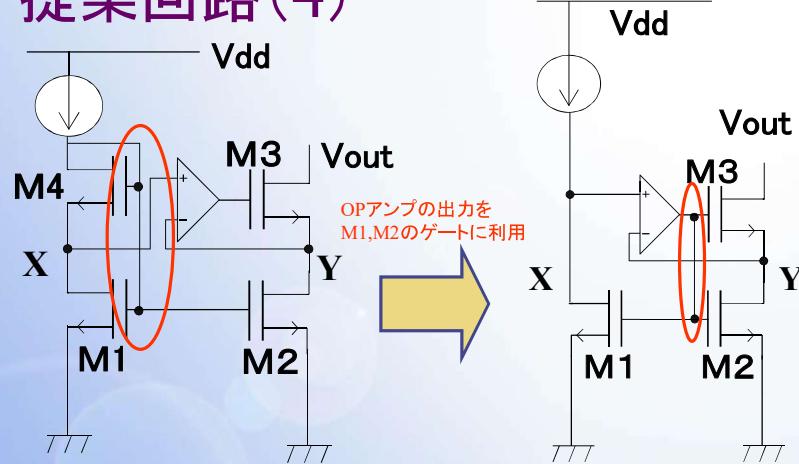


OPアンプの出力をM1とM2のゲート電圧に利用できないか？

Kobayashi Laboratory

Gunma University

提案回路(4)

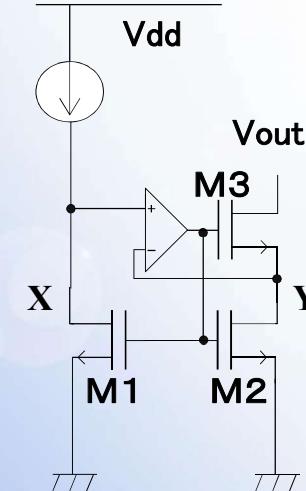


OPアンプの出力を利用して、最小許容電圧を低くし、
さらに電流ミラー精度も上げることが出来るのではないかと考えた

Kobayashi Laboratory

Gunma University 47

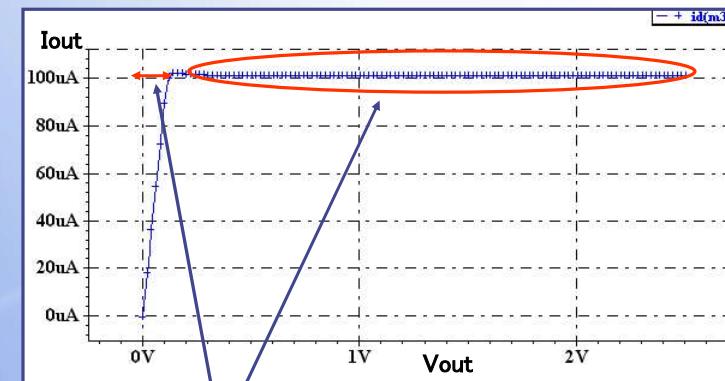
提案回路(4)



Kobayashi Laboratory

Gunma University 46

提案回路(4)



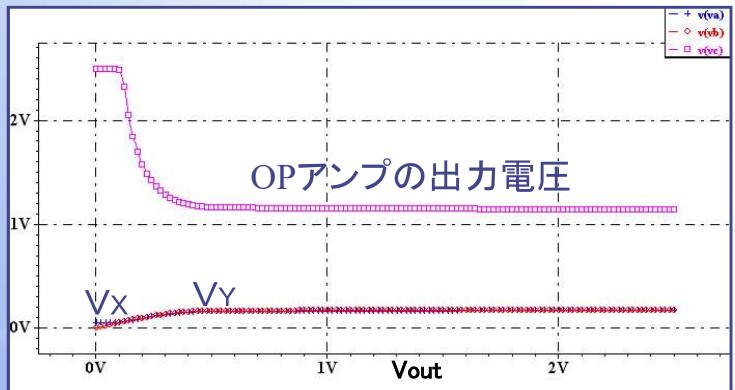
電流コピー精度が向上し、
最小許容電圧も低くすることができた

Kobayashi Laboratory

電流のコピー精度○
低電圧化○
Gunma University 48



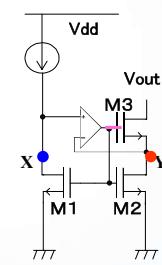
提案回路(4)



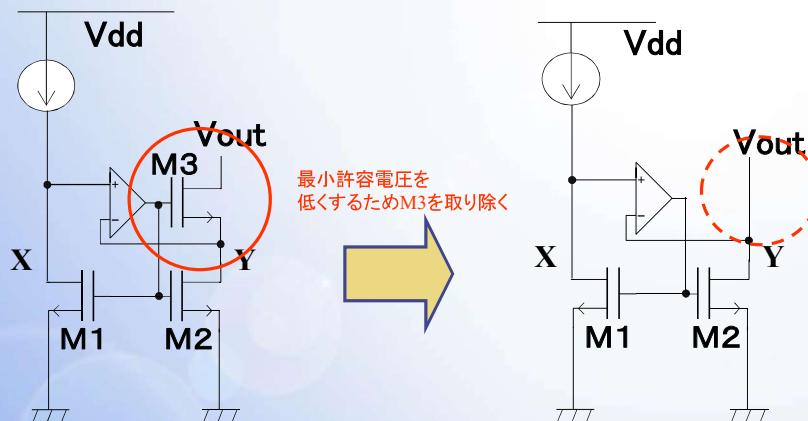
$V_x = V_y$ になると $I_{ref} = I_{out}$ となる

Kobayashi Laboratory

Gunma University 49



提案回路(5)



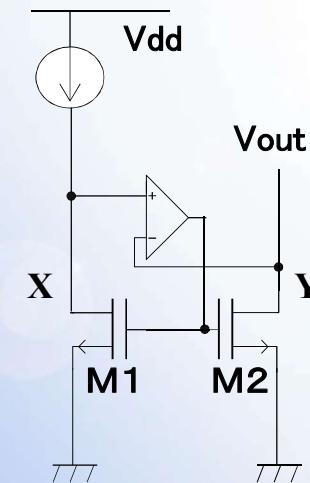
M3を取り除いて、さらに最小許容電圧を
低くすることが出来るのでないかと考えた

Kobayashi Laboratory

Gunma University 51



提案回路(5)

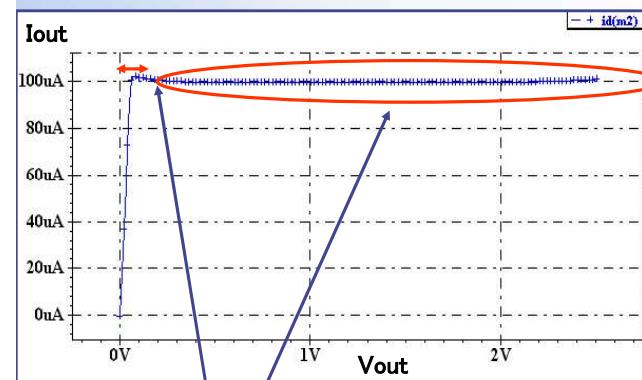


Kobayashi Laboratory

Gunma University 50



提案回路(5)



電流のコピー精度◎

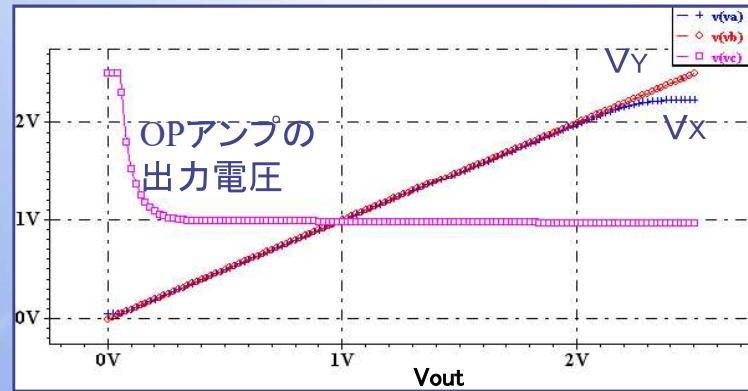
最小許容電圧をさらに低くすることができ、
また電流コピーの精度も向上した

Kobayashi Laboratory

Gunma University 52

低電圧化◎

提案回路(5)



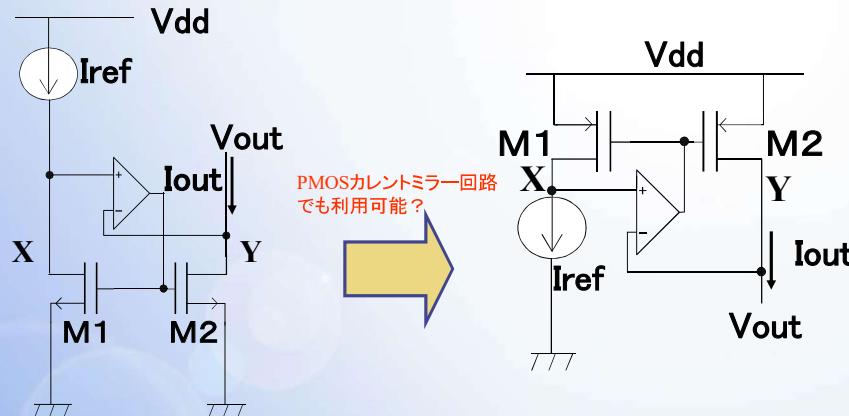
$V_x = V_y$ になると $I_{ref} = I_{out}$ となる

Kobayashi Laboratory

V_{out} が小→線形領域使用
 V_{out} が大→飽和領域使用

Gunma University 53

提案回路(5)をPMOSで構成

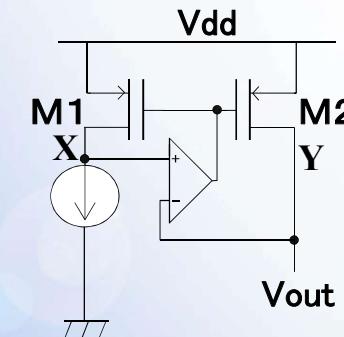


OPアンプの出力をPMOSカレントミラーにも利用

Kobayashi Laboratory

Gunma University 55

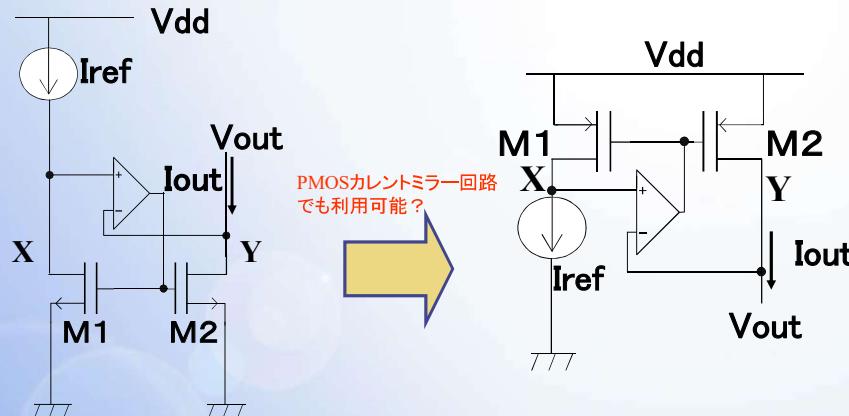
提案回路(5)をPMOSで構成



Kobayashi Laboratory

Gunma University 54

提案回路(5)をPMOSで構成



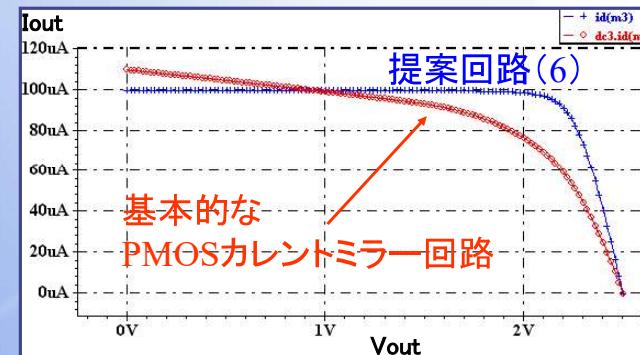
OPアンプの出力をPMOSカレントミラーにも利用

Kobayashi Laboratory

Gunma University 55

提案回路(5)をPMOSで構成

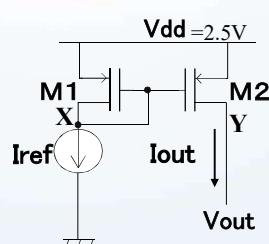
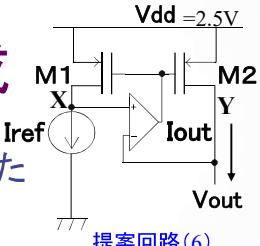
基本的なPMOSカレントミラーア回路との比較をした



$V_{dd}-V_{out}$ 、すなわちM2の V_{DS} が小さくても
電流をコピーできる

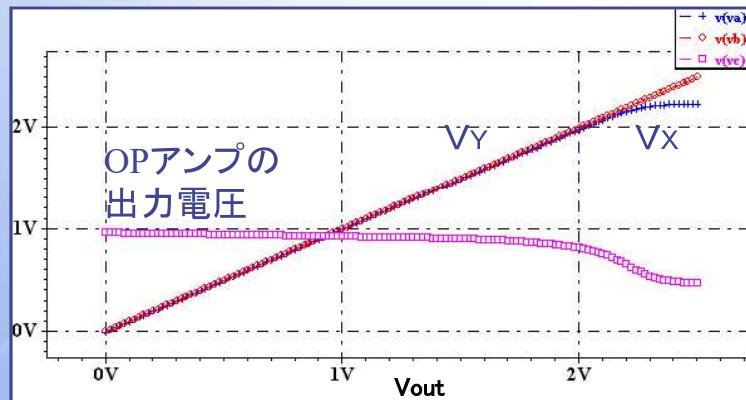
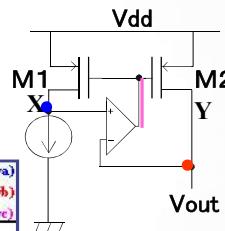
Kobayashi Laboratory

Gunma University 56



基本的な
PMOSカレントミラーア回路

提案回路(5)をPMOSで構成



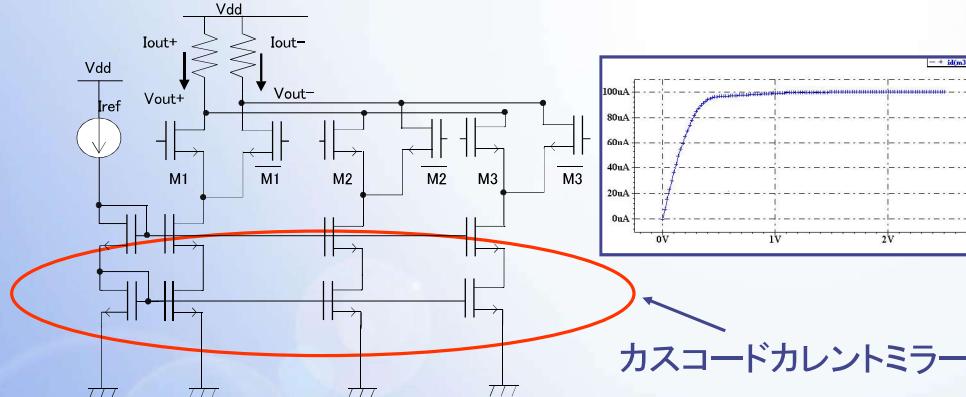
V_X=V_YになるとI_{ref}=I_{out}となる

Kobayashi Laboratory

Gunma University

57

DACへの応用



従来の電流源を用いたDAC
(2bitセグメント型DAC)

Kobayashi Laboratory

Gunma University

59

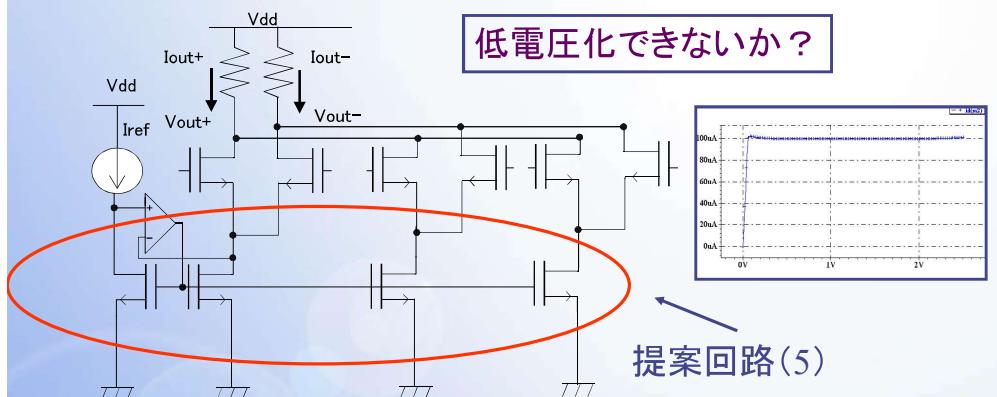
高性能能力レントミラー回路の応用

Kobayashi Laboratory

Gunma University

58

DACへの応用



低電圧化できないか?

提案回路(5)

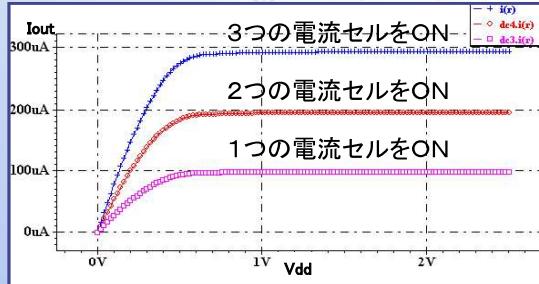
提案電流源を用いたDAC
(2bitセグメント型DAC)

Kobayashi Laboratory

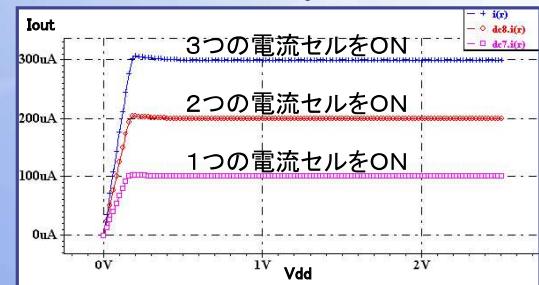
Gunma University

60

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！！

Gunma University

61

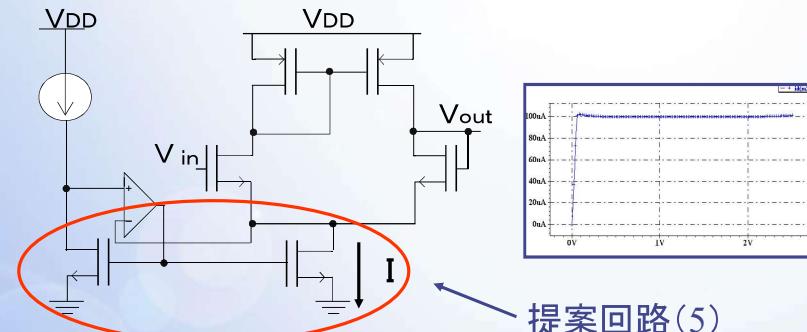
Kobayashi Laboratory



群馬大学

OPアンプへの応用

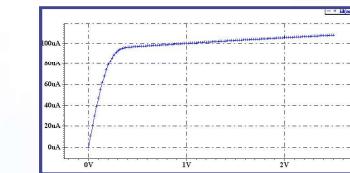
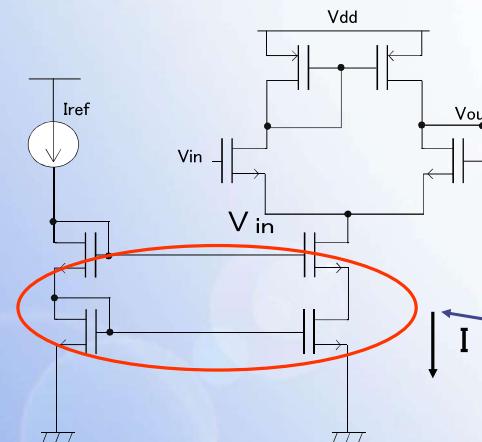
低電圧化できないか？



Gunma University
63

Kobayashi Laboratory

OPアンプへの応用



カスコード
カレントミラー回路

Kobayashi Laboratory

Gunma University

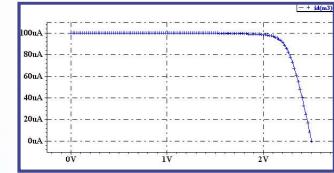
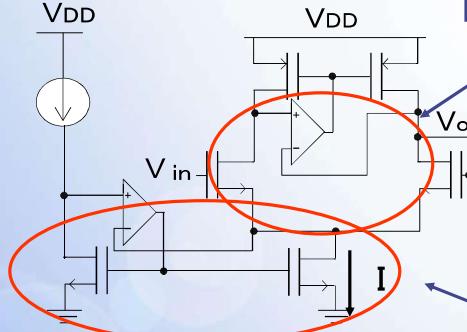
62



群馬大学

OPアンプへの応用

さらに低電圧化できないか？



提案回路(5)
PMOS構成

提案回路(5)

提案差動アンプ回路(2)

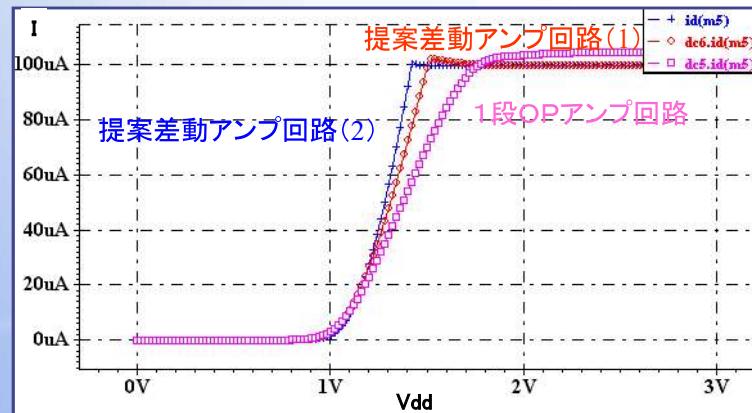
Kobayashi Laboratory

Gunma University

64

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！！

Kobayashi Laboratory

Gunma University 65

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)	◎	◎

Kobayashi Laboratory

Gunma University

まとめ

Kobayashi Laboratory

Gunma University

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

Kobayashi Laboratory

Gunma University 68