



# サブ $\mu$ W, 1.0V CMOS温度センサ回路

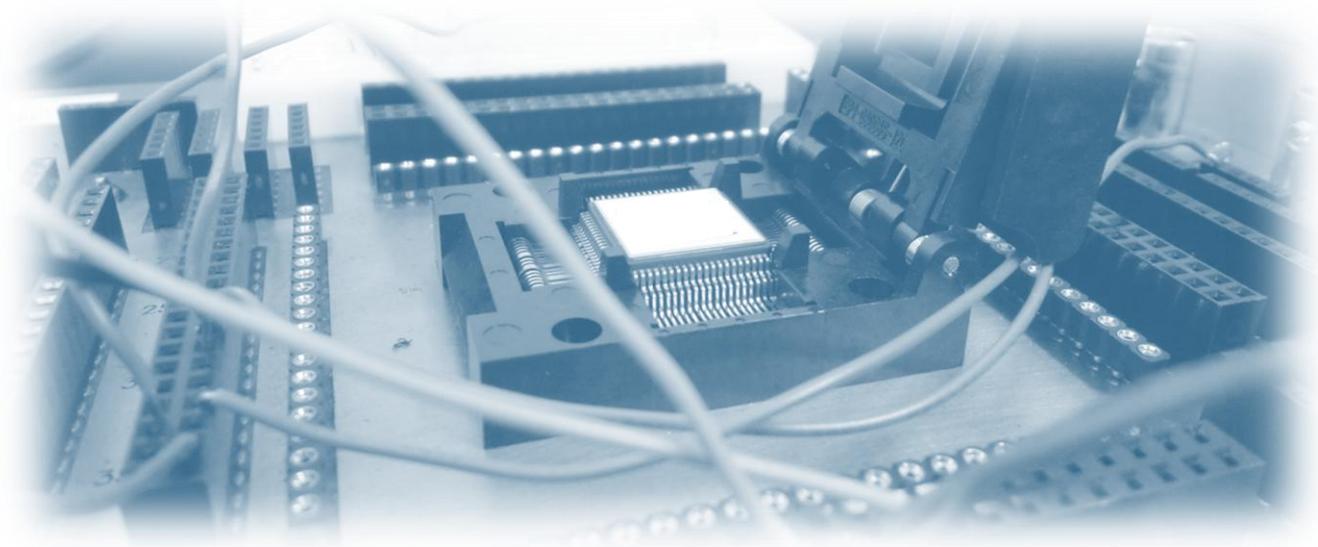
A Sub- $\mu$ W, 1.0V CMOS Temperature Sensor Circuit

坂元 亮太<sup>1</sup>

淡野公一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>宮崎大学大学院工学研究科

<sup>2</sup>宮崎大学工学部



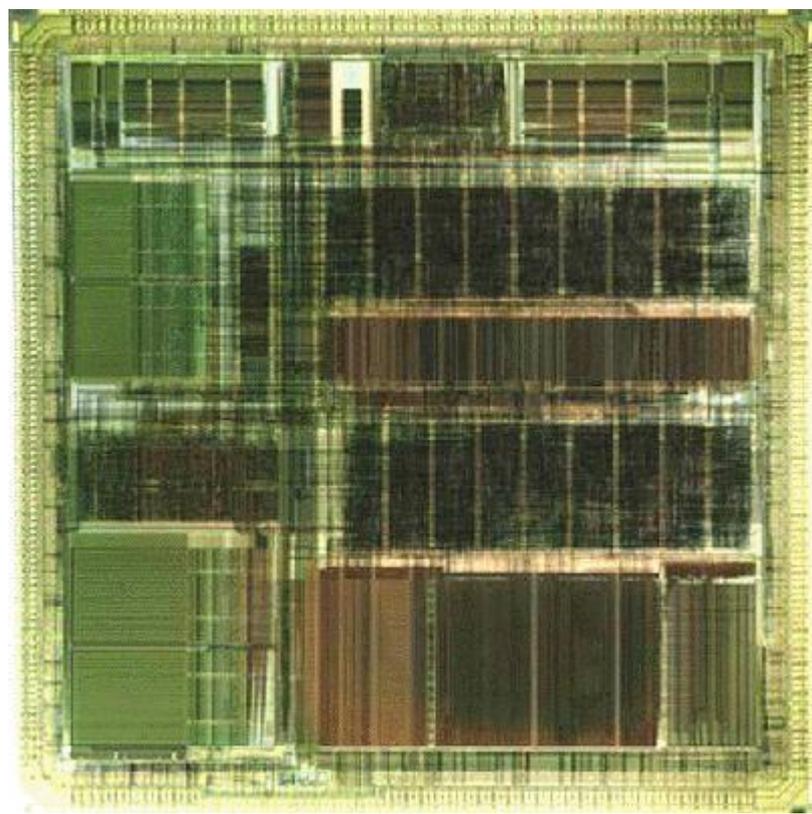
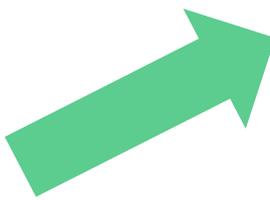
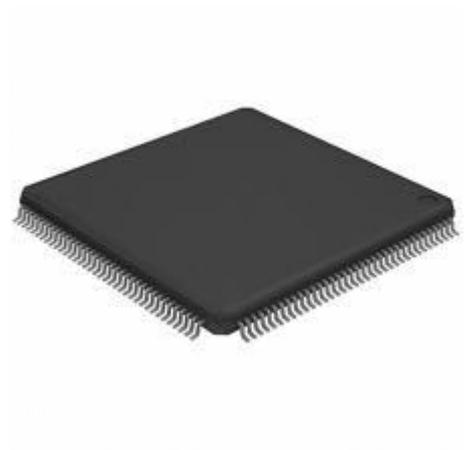


## 発表内容

- 背景
- 研究目的
- 提案回路
- シミュレーション結果
- マスクレイアウト図
- チップの評価結果
- まとめ

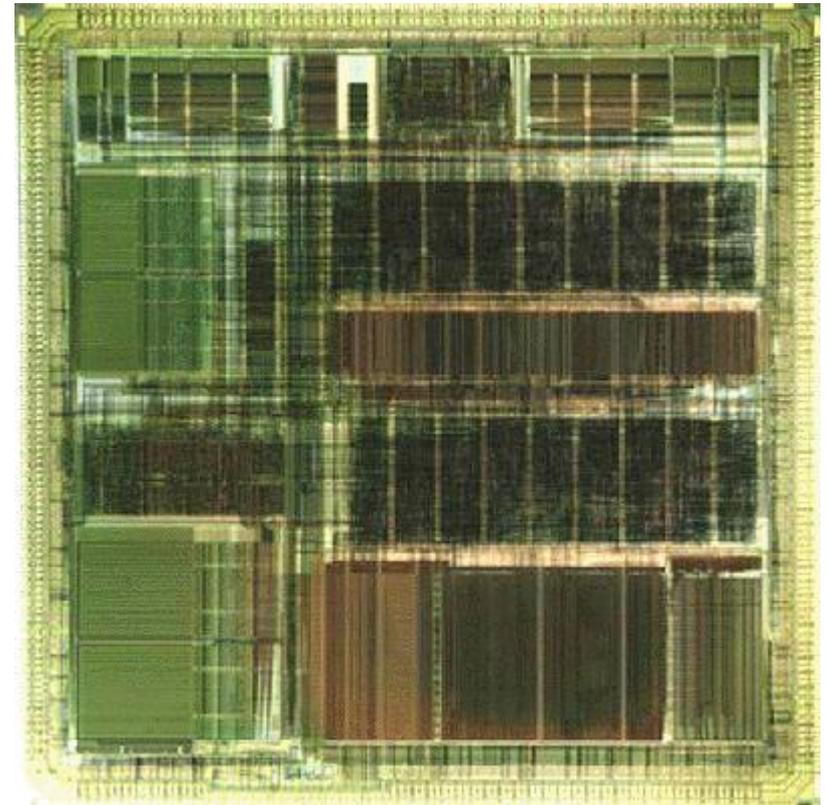
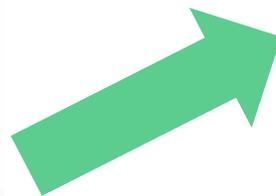


# 背景





## 背景



トランジスタ数の増加に伴い  
消費電流も増加する

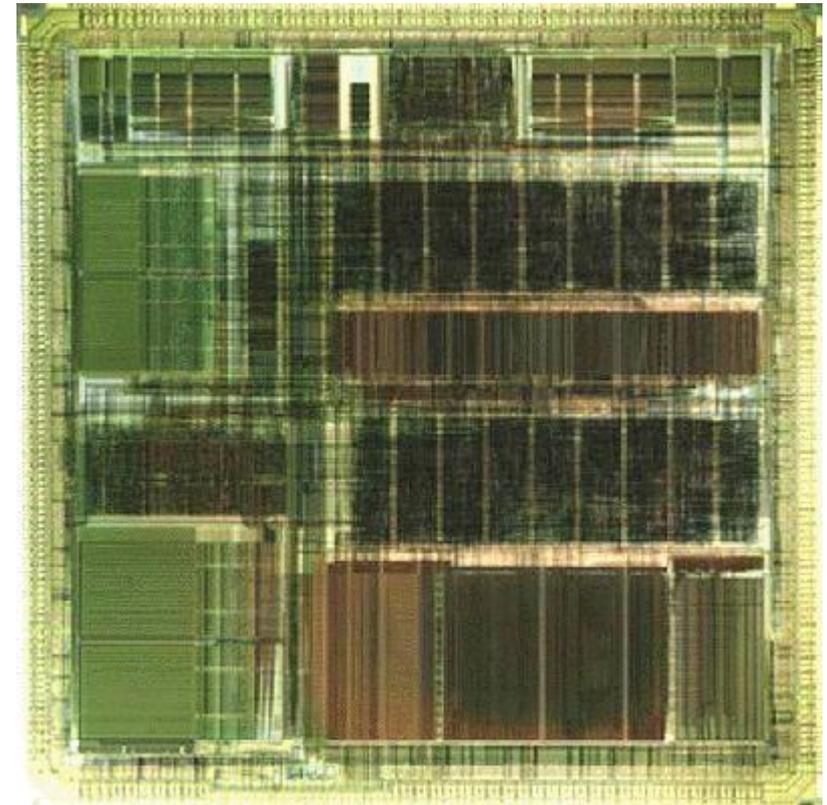
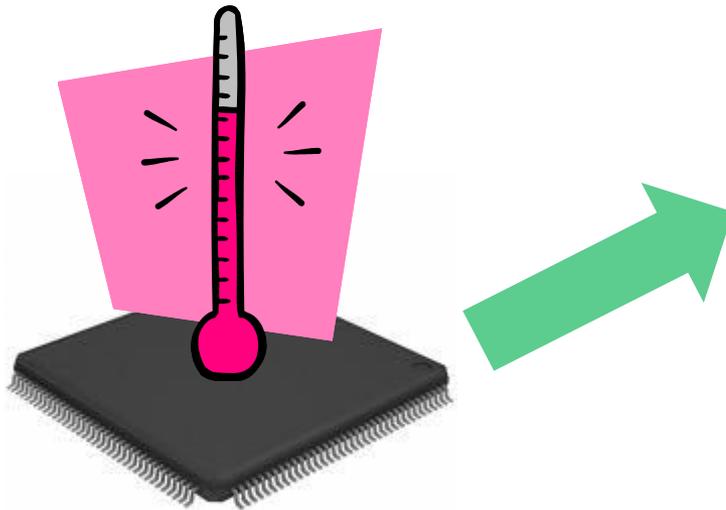
→チップの発熱

## 背景

LSIの温度監視・管理

→同チップ内に

温度センサー回路を集積



トランジスタ数の増加に伴い  
消費電流も増加する

→チップの発熱

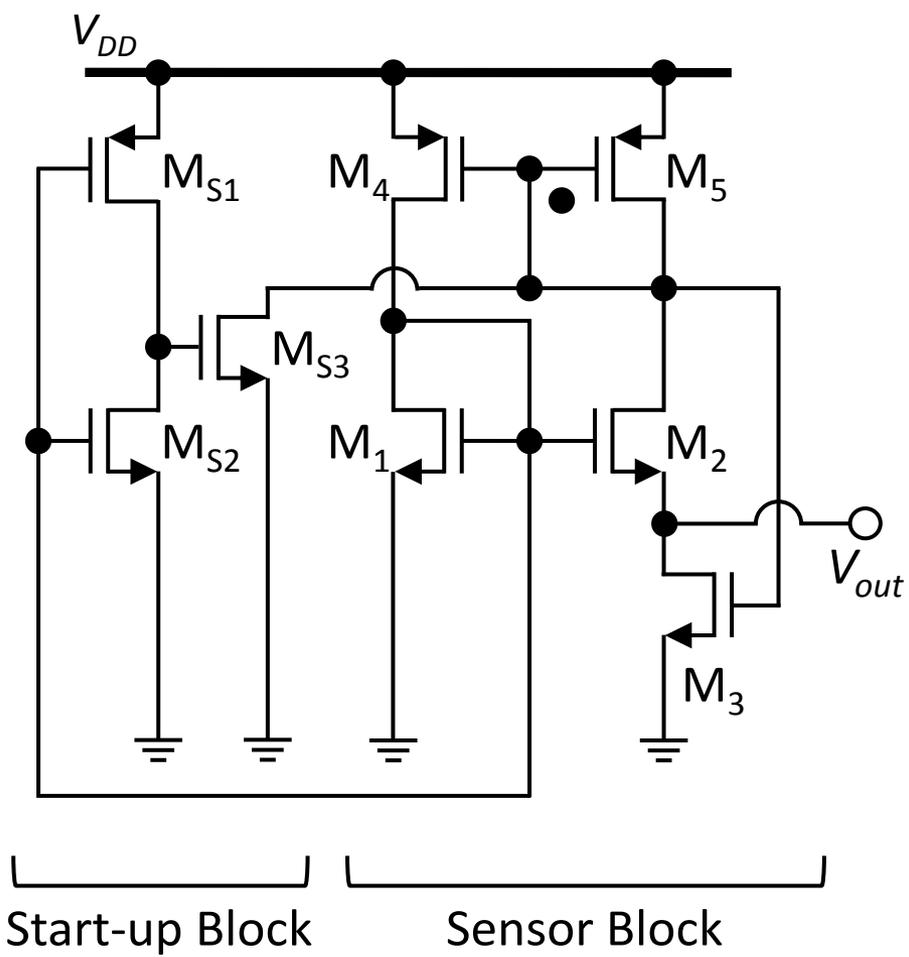


## 目的

1. 低電圧(1.0V)動作が可能
2. MOSFETのみを使用し, 外部バイアス回路が不必要
3. プロセスパラメータによる依存が小さい
4.  $1.0[\text{mV}/^{\circ}\text{C}]$ の温度係数を有している



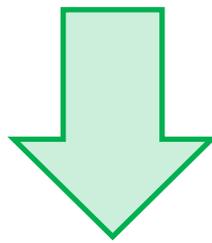
# 提案するPTAT回路のコア回路



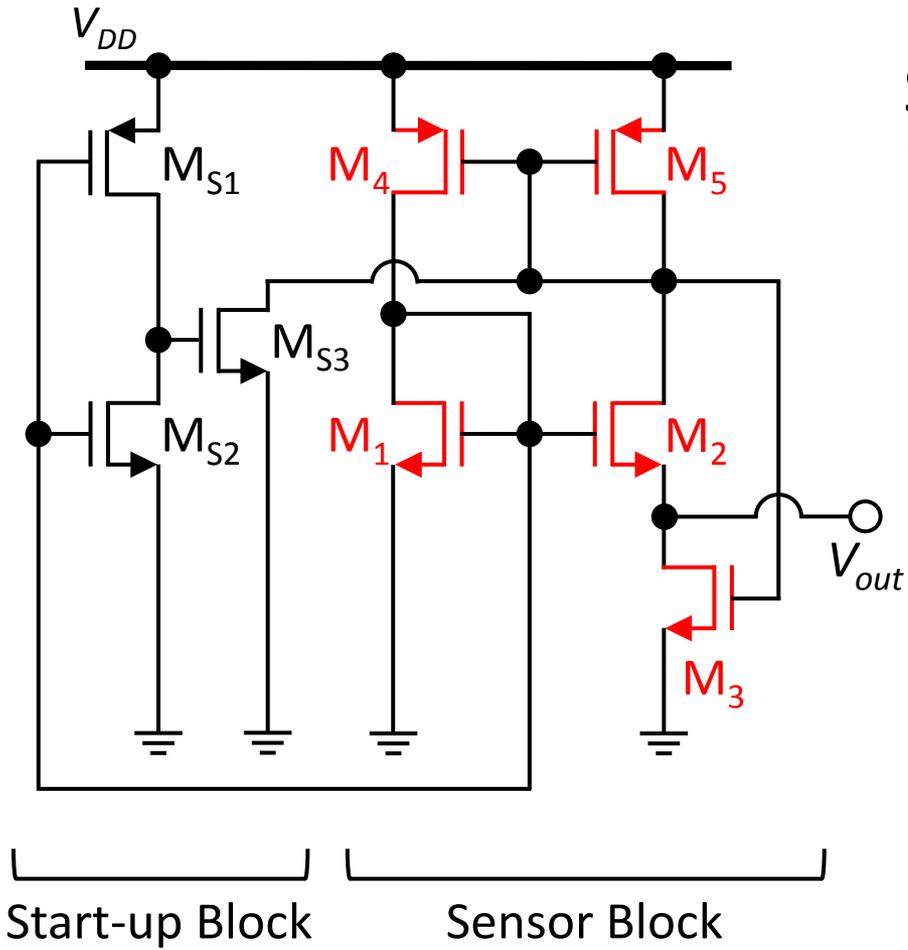


# 提案するPTAT回路のコア回路

Sensor Block のトランジスタは  
弱反転領域 ( $V_{th} > V_{gs}$ ) で動作

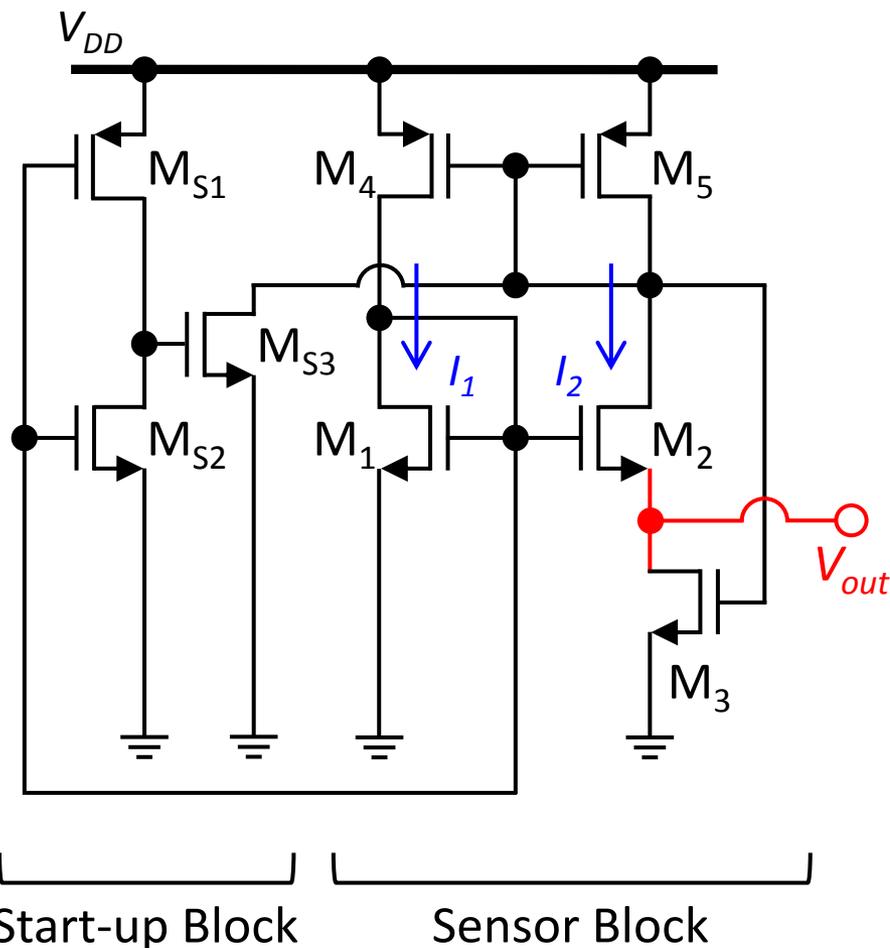


低電圧・低消費電力動作





# 提案するPTAT回路のコア回路



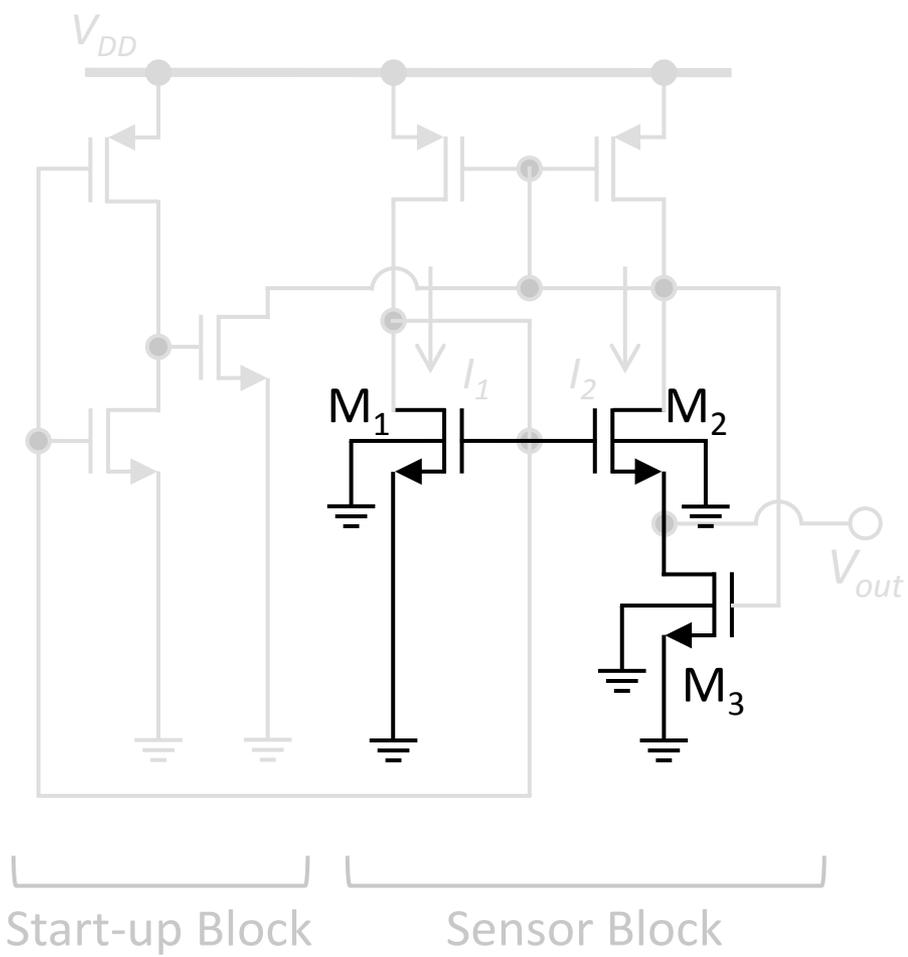
電流  $I_1, I_2$  を用いて  
出力電圧を求める

出力電圧式

$$V_{out} = n \frac{k}{q} \ln \left( \frac{W_2/L_2 \cdot I_1}{W_1/L_1 \cdot I_2} \right) T_k + V_{th1} - V_{th2}$$



# 提案するPTAT回路のコア回路



電流  $I_1, I_2$  を用いて  
出力電圧を求める

出力電圧式

$$V_{out} = n \frac{k}{q} \ln \left( \frac{W_2/L_2}{W_1/L_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) T_k + \underline{V_{th1} - V_{th2}}$$



$$V_{th1} \neq V_{th2}$$

## コア回路の出力式

### しきい電圧について考える

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma \left( \sqrt{|2\Phi_F + V_{sb2}|} - \sqrt{2\Phi_F} \right)$$

$$\approx V_{th0} + \gamma \left( \frac{V_{sb2}}{2\sqrt{2\Phi_F}} \right) \leftarrow$$

一次近似

$$(2\Phi_F > V_{sb2})$$

$V_{sb2} = V_{ds3} = V_{out}$  であることを考慮すると...

$$V_{out} = \frac{n}{1 + \gamma \frac{1}{2\sqrt{2\Phi_F}}} \cdot \frac{k_B}{q} \ln \left( \frac{W_2/L_2}{W_1/L_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) \cdot T_k$$



## コア回路の出力式

スロープ  
ファクタ  $\rightarrow n = 1 \sim 1.5$

分母  $\rightarrow 1 + \gamma \frac{1}{2\sqrt{2\Phi_F}} = 1 \sim 1.5$

近似

$(2\Phi_F > V_{sb2})$

$V_{sb2} = V_{ds3} = V_{out}$  での

を考慮すると...

$$V_{out} = \frac{n}{1 + \gamma \frac{1}{2\sqrt{2\Phi_F}}} \cdot \frac{k_B}{q} \ln \left( \frac{W_2/L_2 \cdot I_1}{W_1/L_1 \cdot I_2} \right) \cdot T_k$$



## コア回路の出力式

### しきい電圧について考える

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma \left( \sqrt{|2\Phi_F + V_{sb2}|} - \sqrt{2\Phi_F} \right)$$

$$\approx V_{th0} + \gamma \left( \frac{V_{sb2}}{2\sqrt{2\Phi_F}} \right) \leftarrow$$

一次近似  
( $2\Phi_F > V_{sb2}$ )

$V_{sb2} = V_{ds3} = V_{out}$  であることを考慮すると...

$$V_{out} \approx \frac{k_B}{q} \ln \left( \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) \cdot T_k$$

## コア回路の出力式

### しきい電圧について考える

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma \left( \sqrt{|2\Phi_F + V_{sb2}|} - \sqrt{2\Phi_F} \right)$$

$$\approx V_{th0} + \gamma \left( \frac{V_{sb2}}{2\sqrt{2\Phi_F}} \right) \leftarrow$$

一次近似

$$(2\Phi_F > V_{sb2})$$

$V_{sb2} = V_{ds3} = V_{out}$  であることを考慮すると...

$$V_{out} \approx \frac{k_B}{q} \ln \left( \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) \cdot T_k$$

定数



## コア回路の出力式

### しきい電圧について考える

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma \left( \sqrt{|2\Phi_F + V_{sb2}|} - \sqrt{2\Phi_F} \right)$$

$$\approx V_{th0} + \gamma \left( \frac{V_{sb2}}{2\sqrt{2\Phi_F}} \right) \leftarrow$$

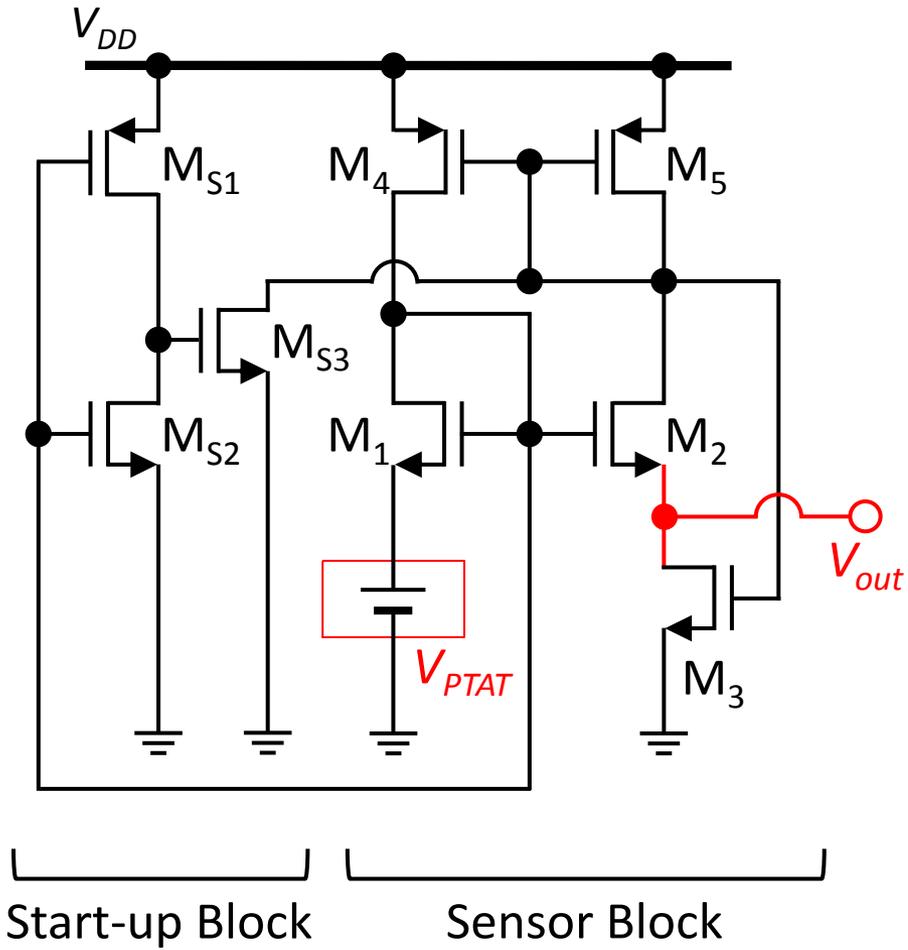
一次近似  
( $2\Phi_F > V_{sb2}$ )

$V_{sb2} = V_{ds3} = V_{out}$  であることを考慮すると...

$$V_{out} \approx \frac{k_B}{q} \ln \left( \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) \cdot T_k$$



# コア回路の改良



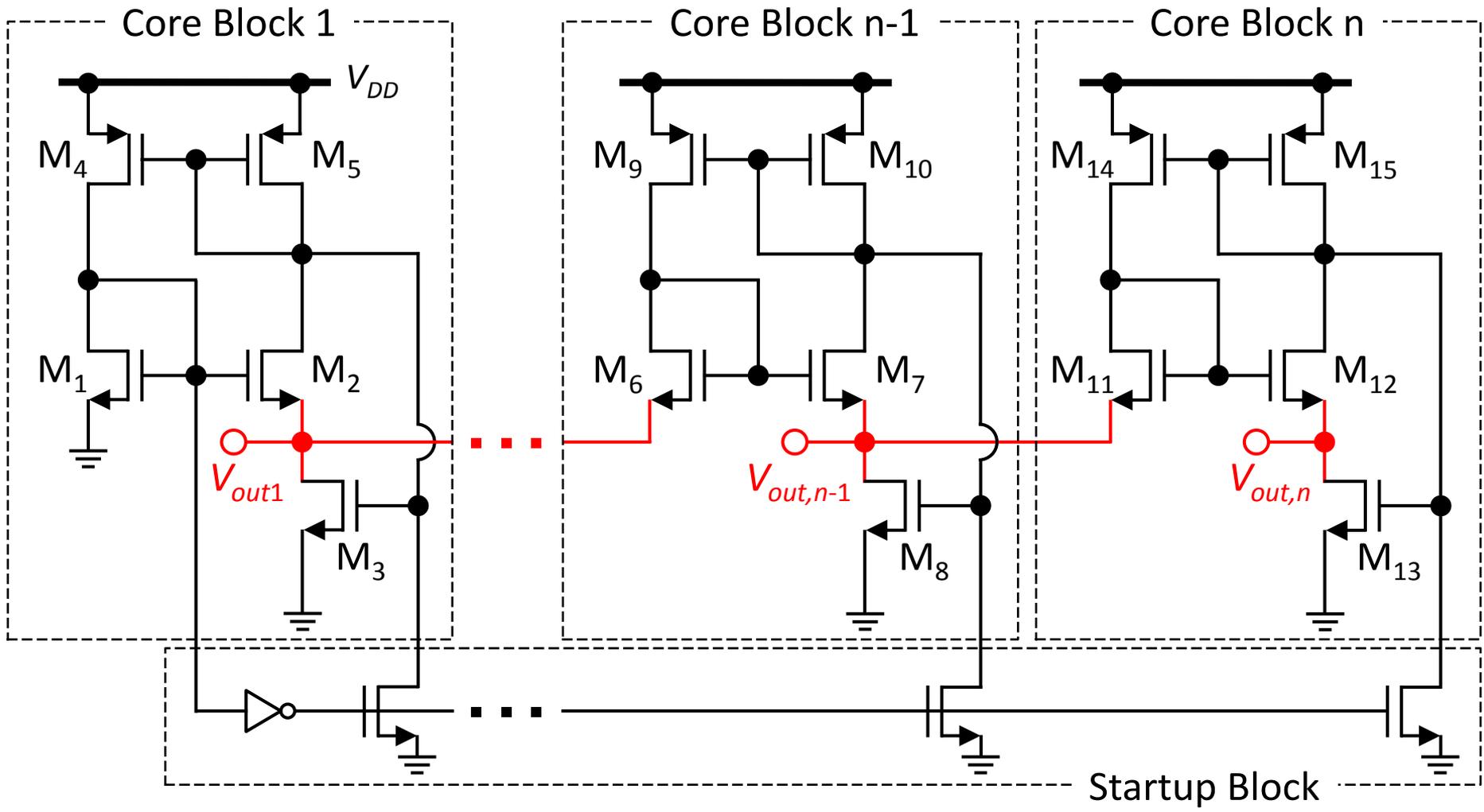
$V_{PTAT}$  だけレベルシフトされる

$$V_{out} = \frac{k}{q} \ln \left( \frac{W_2/L_2 \cdot I_1}{W_1/L_1 \cdot I_2} \right) T_k + V_{PTAT}$$

$V_{PTAT}$  が PTAT 電圧であれば  
効率よくセンサ感度を上げられる



# コア回路の縦続接続



## 回路の出力式

### 出力電圧式

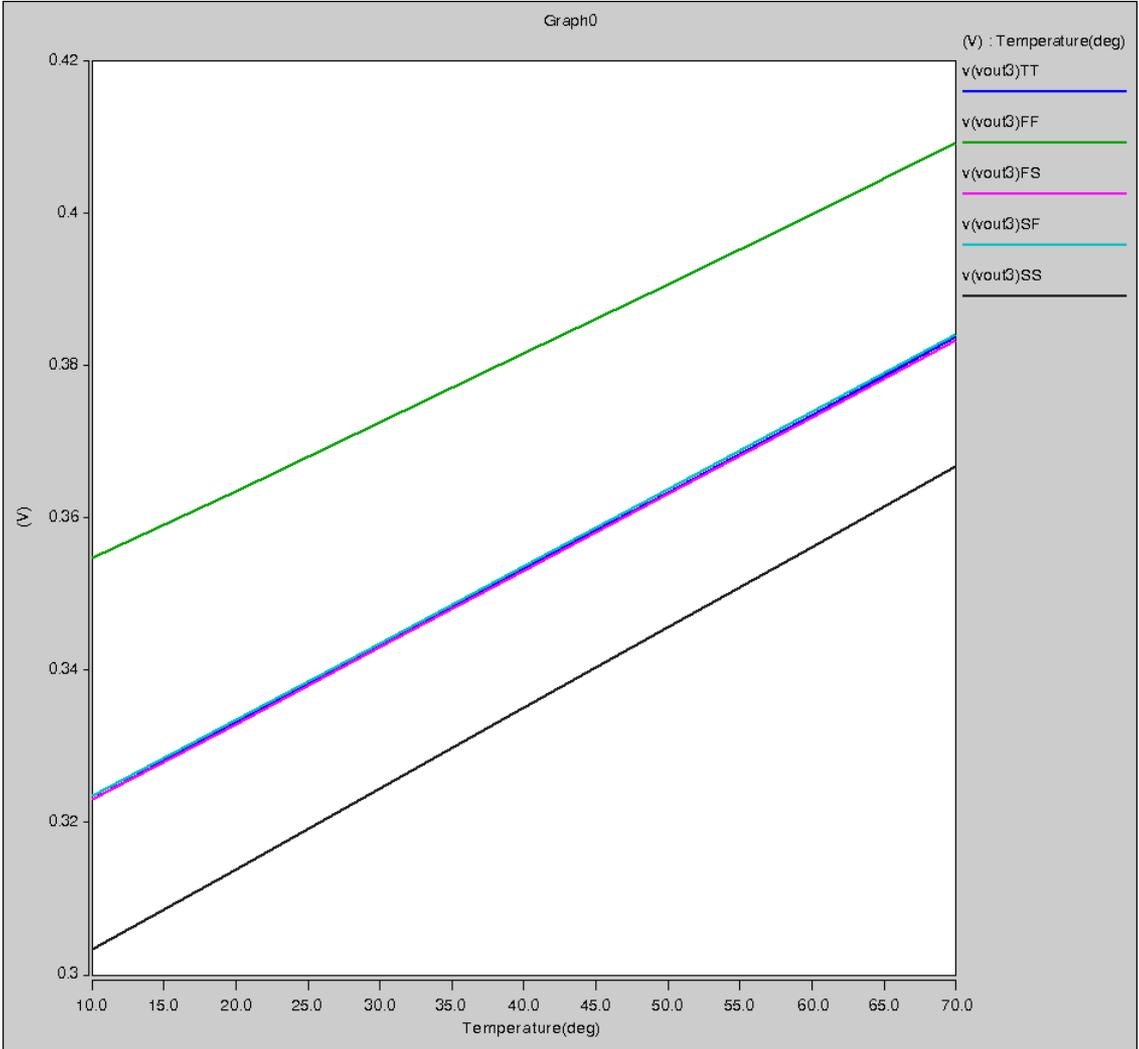
$$V_{out,n} = \frac{k}{q} \left\{ \ln \left( \frac{W_2/L_2}{W_1/L_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) + \ln \left( \frac{W_7/L_7}{W_6/L_6} \cdot \frac{I_6}{I_7} \right) + \dots \right\} T_k$$

コア回路を縦続接続することで、より効率的に高感度化を実現できる

$$V_{out} = \frac{k_B}{q} \ln \left( \frac{W_2/L_2}{W_1/L_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) T_k$$



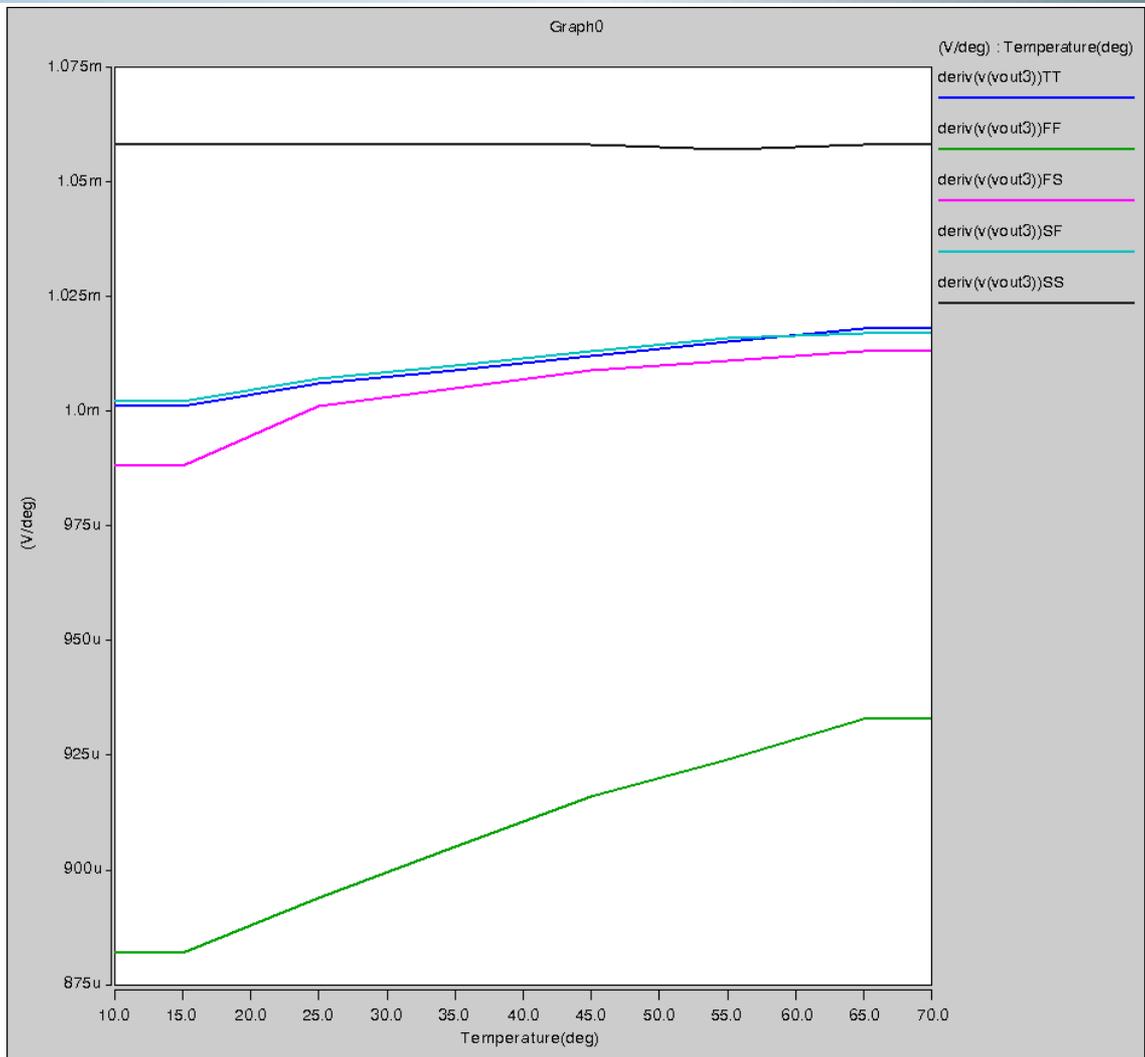
# シミュレーション結果



温度と出力電圧の関係



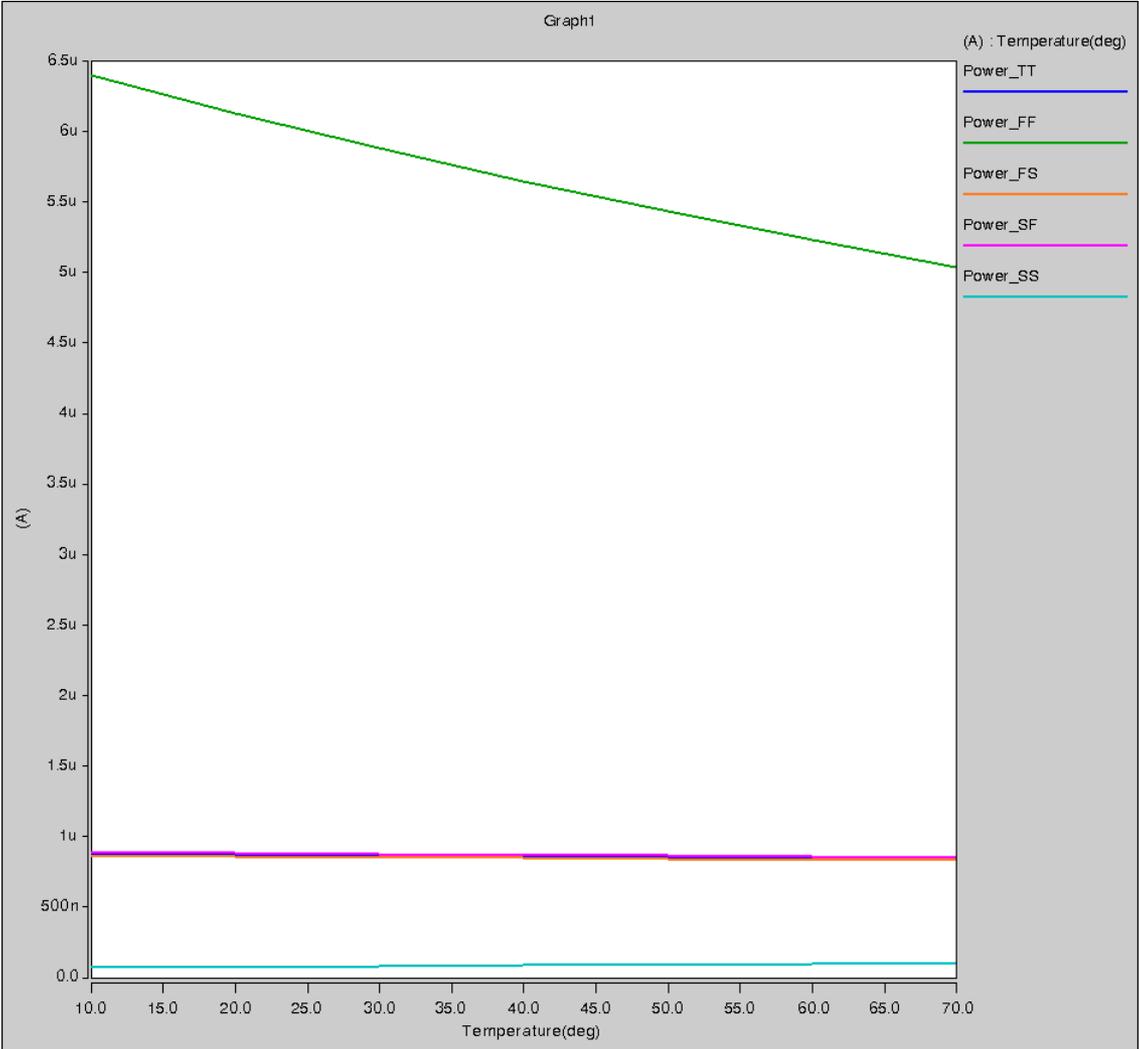
# シミュレーション結果



温度と温度係数の関係



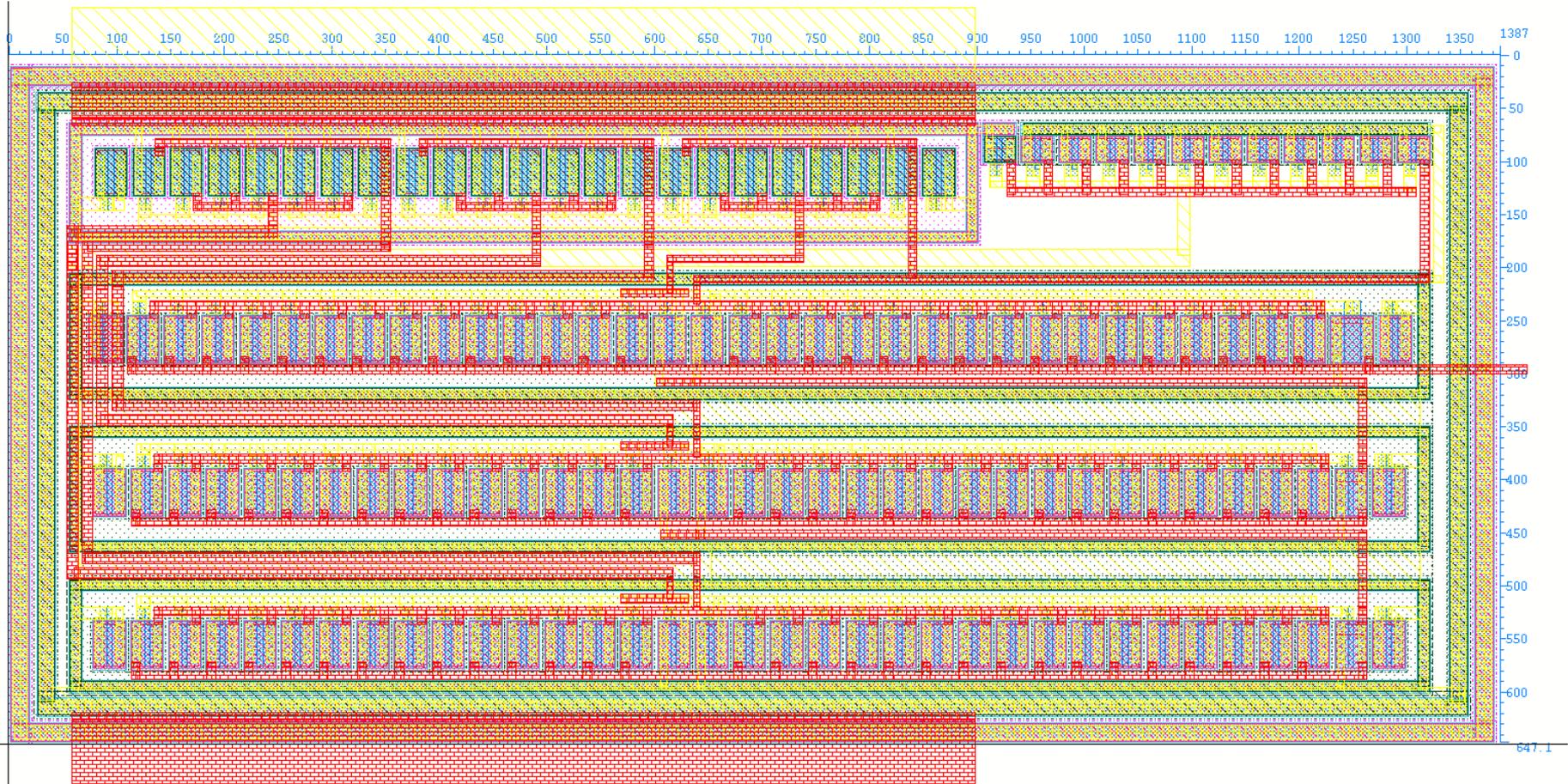
# シミュレーション結果



温度と消費電力の関係



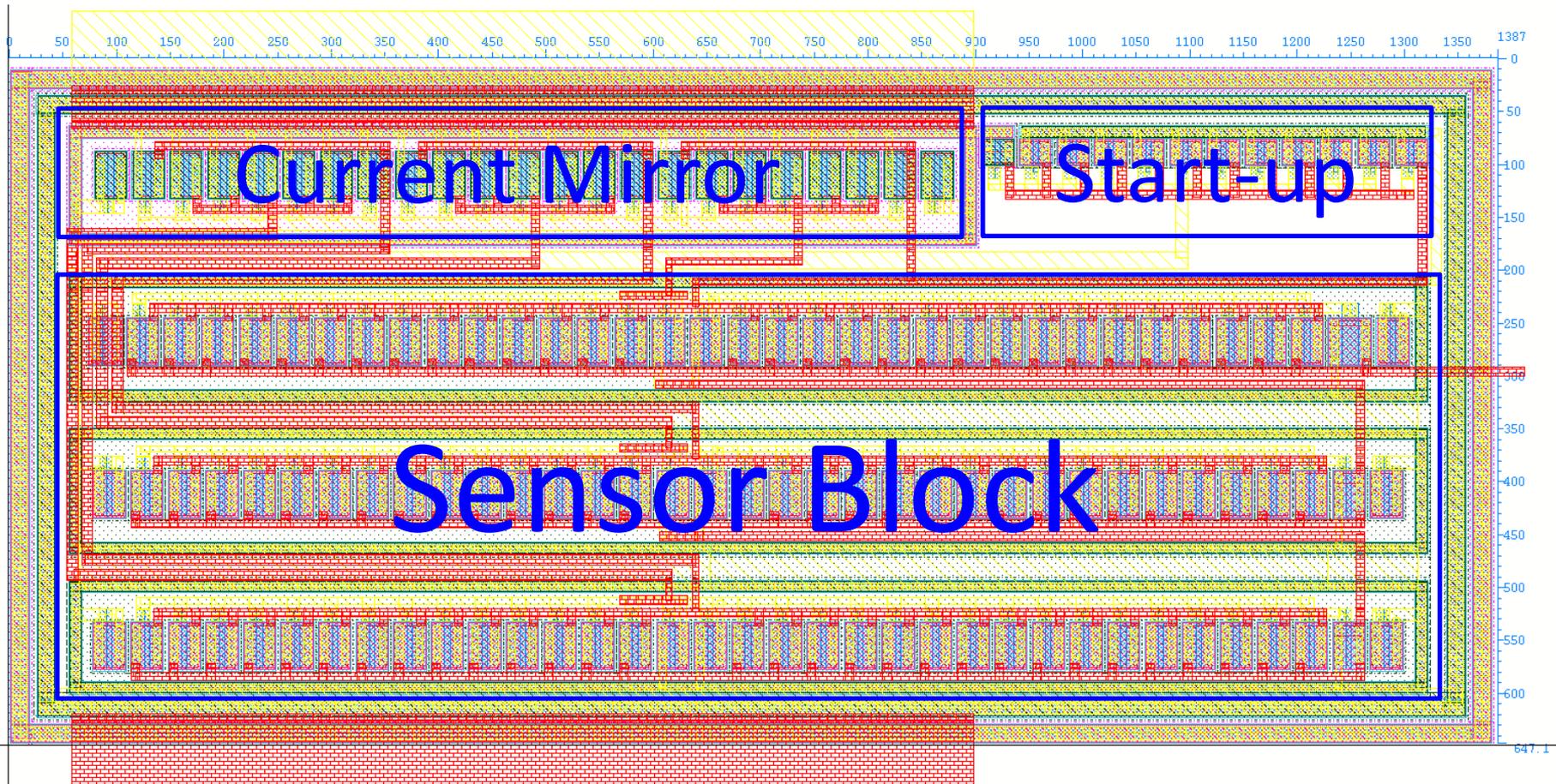
# マスクレイアウト図



1400um × 650 um



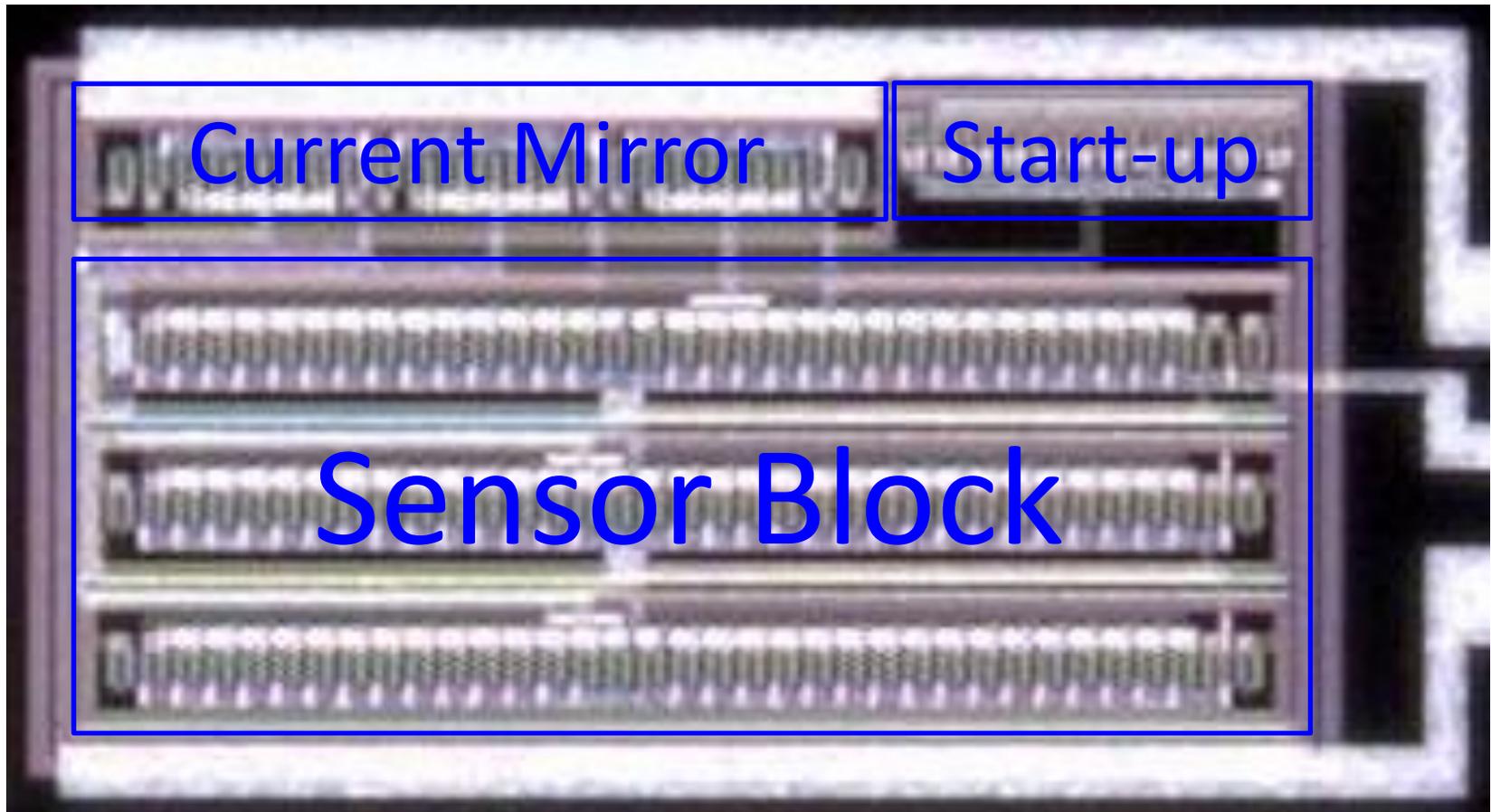
# マスクレイアウト図



1400um × 650 um

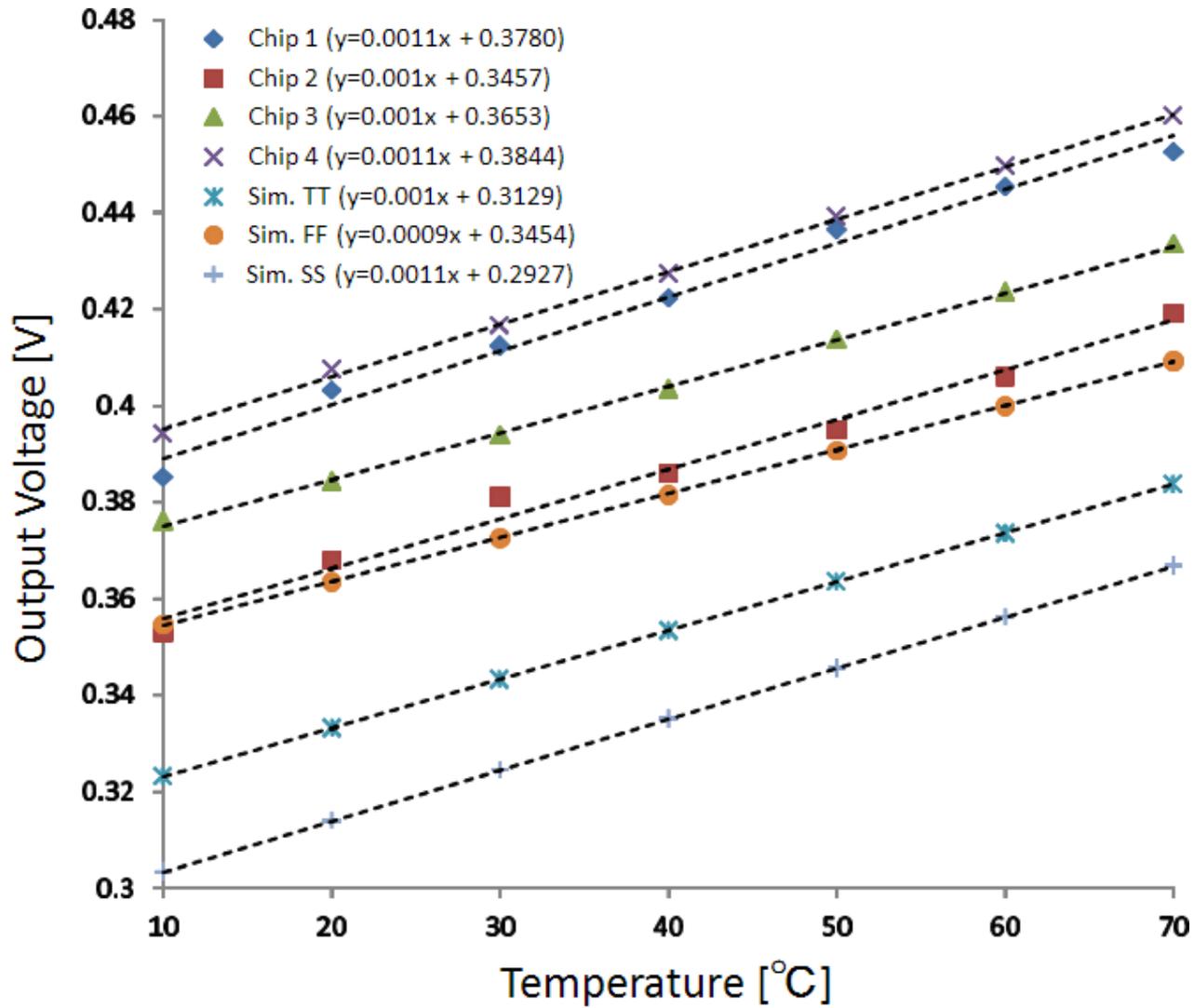


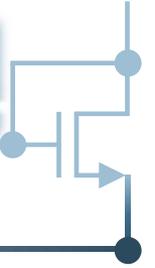
## チップ写真





# 試作したチップの評価結果





## 試作したチップの評価結果

Temp. [°C]	Chip 1 [V]	Chip 2 [V]	Chip 3 [V]	Chip 4 [V]	Sim. TT[V]	Sim. FF [V]	Sim. SS[V]
10	0.3851	0.353	0.3760	0.3943	0.3231	0.3547	0.3033
20	0.4031	0.368	0.3842	0.4075	0.3331	0.3635	0.3139
30	0.4123	0.381	0.3939	0.4167	0.3432	0.3725	0.3245
40	0.4222	0.386	0.4033	0.4274	0.3533	0.3815	0.3351
50	0.4365	0.395	0.4136	0.4392	0.3634	0.3907	0.3456
60	0.4453	0.406	0.4235	0.4496	0.3735	0.3999	0.3562
70	0.4526	0.419	0.4335	0.4600	0.3837	0.4092	0.3668

(消費電力: 7.28 $\mu$ W)



## まとめ

- 各々のチップから温度に比例した出力電圧が発生
- 1.0 [mV/°C]以上の温度係数
- シミュレーション値と測定値で、約0.1 [V]の誤差
- 測定チップ間で最大44.2 [mV]のばらつき
  - ➡ 酸化膜厚さのばらつき(スロープファクタのばらつき)が出力電圧に影響
- 消費電力は7.28 [μW](@室温)
  - ➡ トランジスタがFast側にばらつき、電流が多く流れた？



## 今後の課題

試作したチップの中に、  
出力電圧が発振し不安定動作するものがあった

提案回路は利得を持っていないので  
スタートアップ回路が原因か？

今後の課題

回路が不安定動作する原因を  
突き止めること

