

# 極低消費電力CMOSインテリジェント温度センサLSI

第10回システムLSIワークショップ

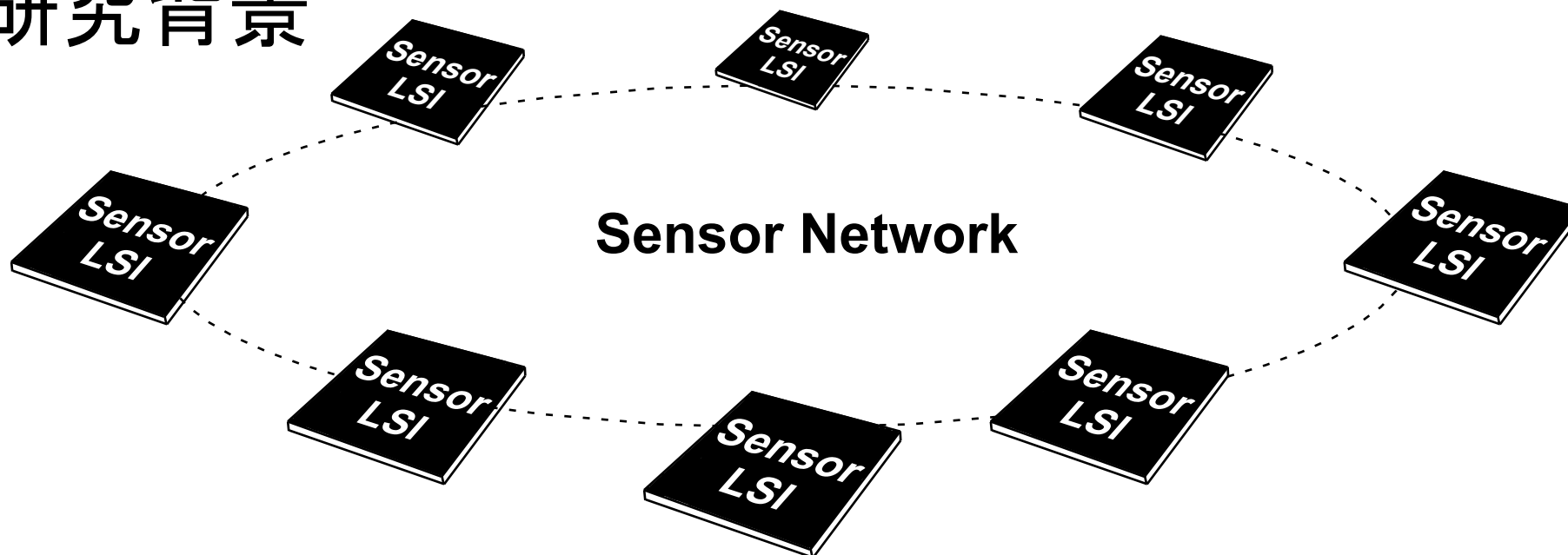
上野憲一\*， 廣瀬哲也， 浅井哲也， 雨宮好仁

北海道大学 大学院 情報科学研究科

<http://sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp>

\* [k\\_ueno@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp](mailto:k_ueno@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp)

# 研究背景



限られた電力供給のもとで動作

## 小型バッテリー

- ・ ボタン電池
- ・ リチウムイオン電池

## 自然エネルギー

- ・ 太陽エネルギー
- ・ 電磁波

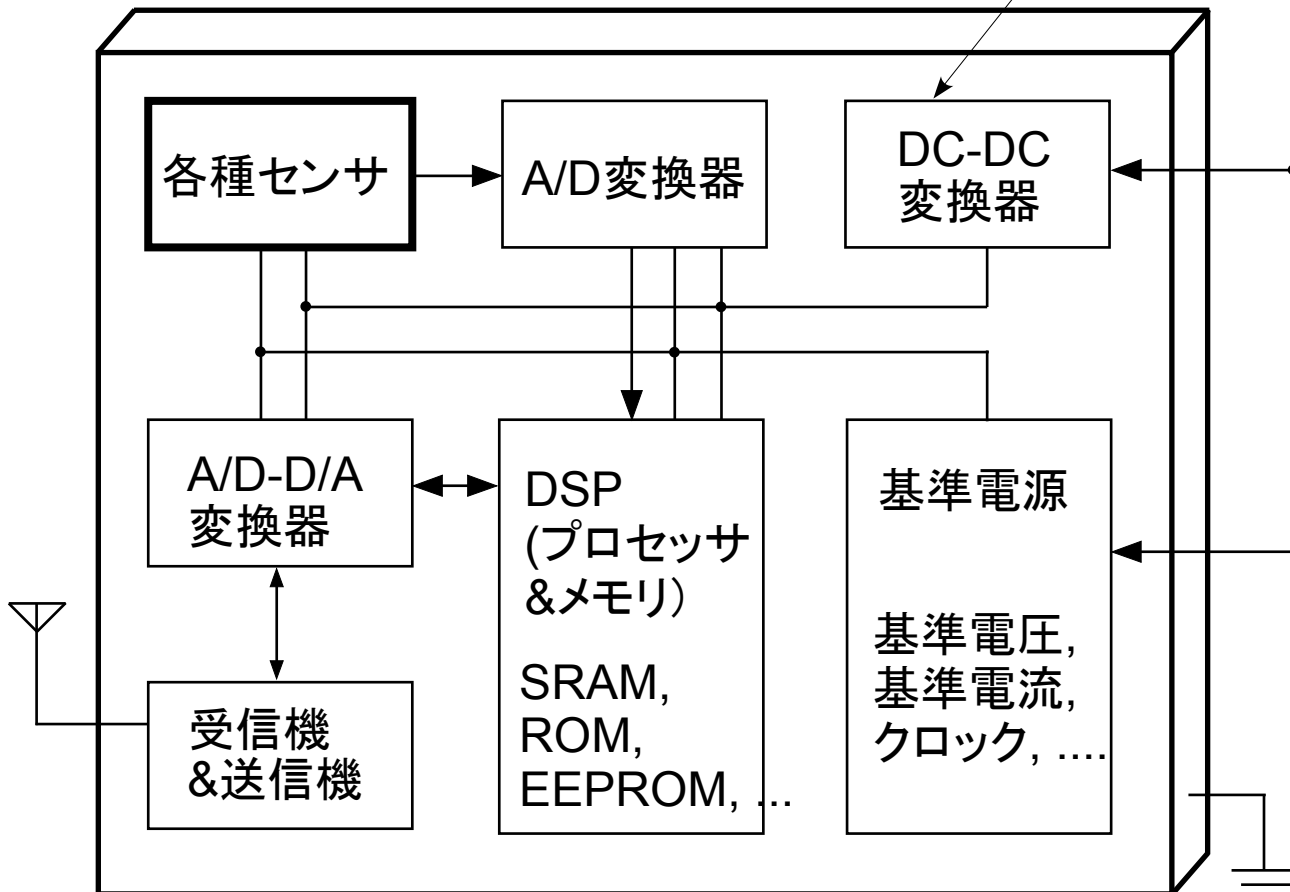
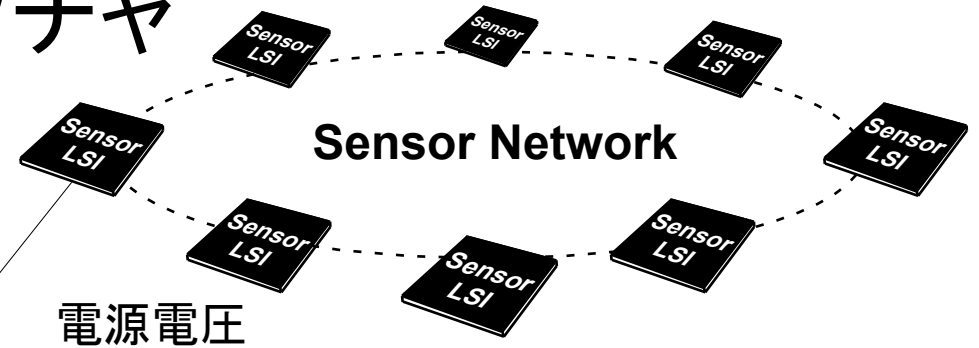
極低消費電力で動作するセンシングLSI

⇒ MOSFETをサブスレッシュホールド領域で動作させるセンサLSIの開発

# スマートセンサ・アーキテクチャ

全ての回路ブロックを  
サブスレッショルド領域動作

⇒  $\mu\text{W}$ 級の消費電力



--- Reference ---  
(<http://sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp>)

## 各種センサ

Ueno K, et al., "A watchdog sensor for assuring the quality of various perishables with subthreshold CMOS circuits," *Symposia on VLSI Technology and Circuits*, 2006, 他5件

## DC-DC変換器

廣瀬., "サブスレッショルドMOSFETのためのスイッチトキャパシタ型DC-DCコンバータ," 第19回回路とシステム軽井沢ワークショップ, 2006, 他2件

## 基準電源

Hirose T, et al., "Ultralow-power current reference circuit with low temperature dependence," *IEICE Trans. Electronics*, 2005, 他2件

## サブスレッショルド・デジタル回路

宮川., "MOS論理ゲート回路のサブスレッショルド動作," *IEICE総合大会*, 2006.

⇒ 各種センサアプリケーション : 温度センサの検討

# PTAT電流生成アーキテクチャ

MOSFETのサブスレッショルド電流

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{V_G - V_{TH}}{\eta V_T}\right)$$

マクローリン展開

$$\exp(x) \approx 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!}$$

$$\exp(x) \approx 1 + x \quad (x \ll 1)$$

$$\exp(x) - \exp(-x) \approx 2x$$

①. 2つの電流の比( $I_0$ ,  $V_{TH}$ に依存しない)

$$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \exp\left(\frac{V_{G2} - V_{G1}}{\eta V_T}\right)$$

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \exp\left(-\frac{V_{G2} - V_{G1}}{\eta V_T}\right)$$

②.  $(V_{G2} - V_{G1}) \ll \eta V_T$

$$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} = 1 + \frac{V_{G2} - V_{G1}}{\eta V_T}$$

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = 1 - \frac{V_{G2} - V_{G1}}{\eta V_T}$$

③. 電流比の差分

$$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} - \frac{I_{D1}}{I_{D2}} = 2 \frac{V_{G2} - V_{G1}}{\eta V_T}$$

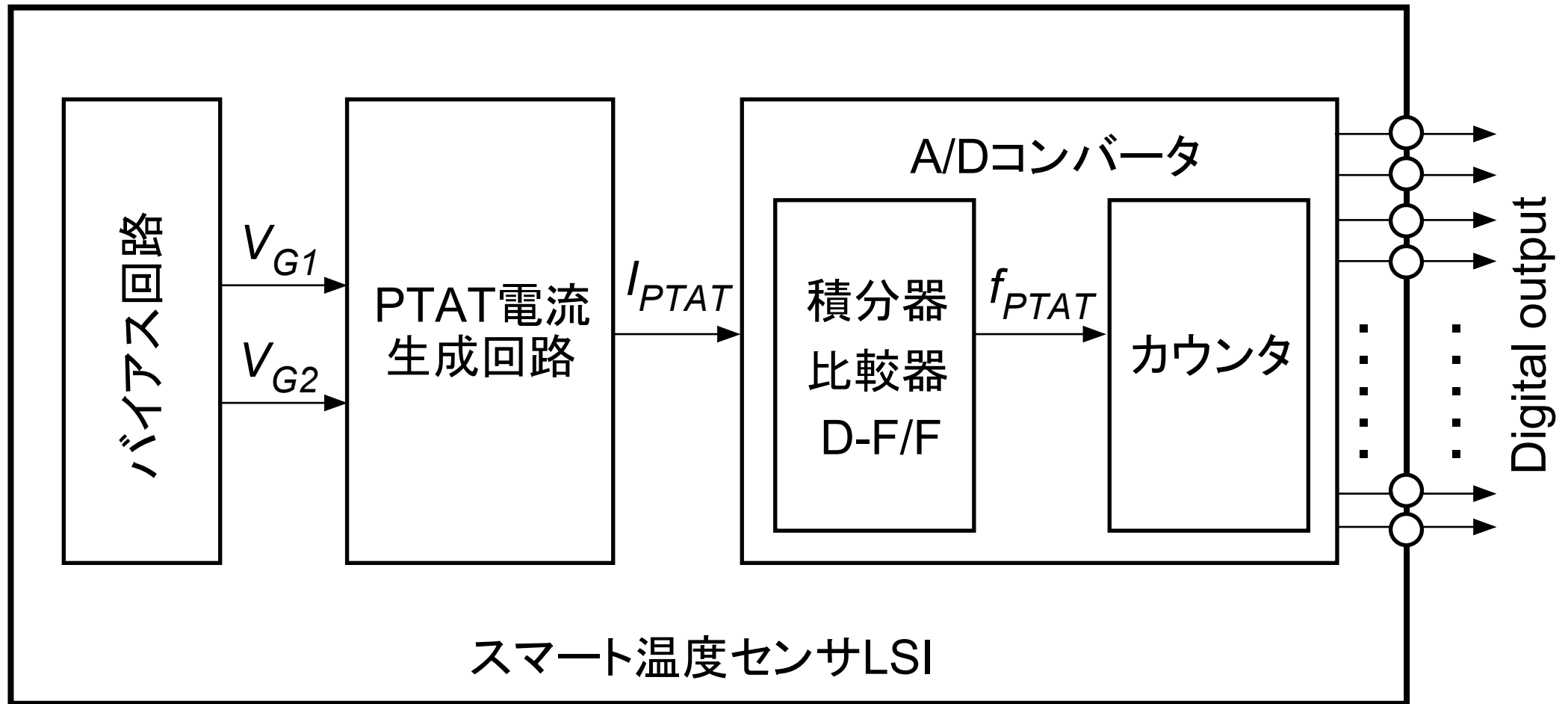
④. 逆数を取ると (PTAT特性)

$$\begin{aligned} \frac{1}{\frac{I_{D2}}{I_{D1}} - \frac{I_{D1}}{I_{D2}}} &= \frac{\eta V_T}{2(V_{G2} - V_{G1})} \\ &= \frac{\eta k_B}{2e(V_{G2} - V_{G1})} T \end{aligned}$$

$$(V_{G2} - V_{G1} = \text{const.} < 10 \text{ mV})$$

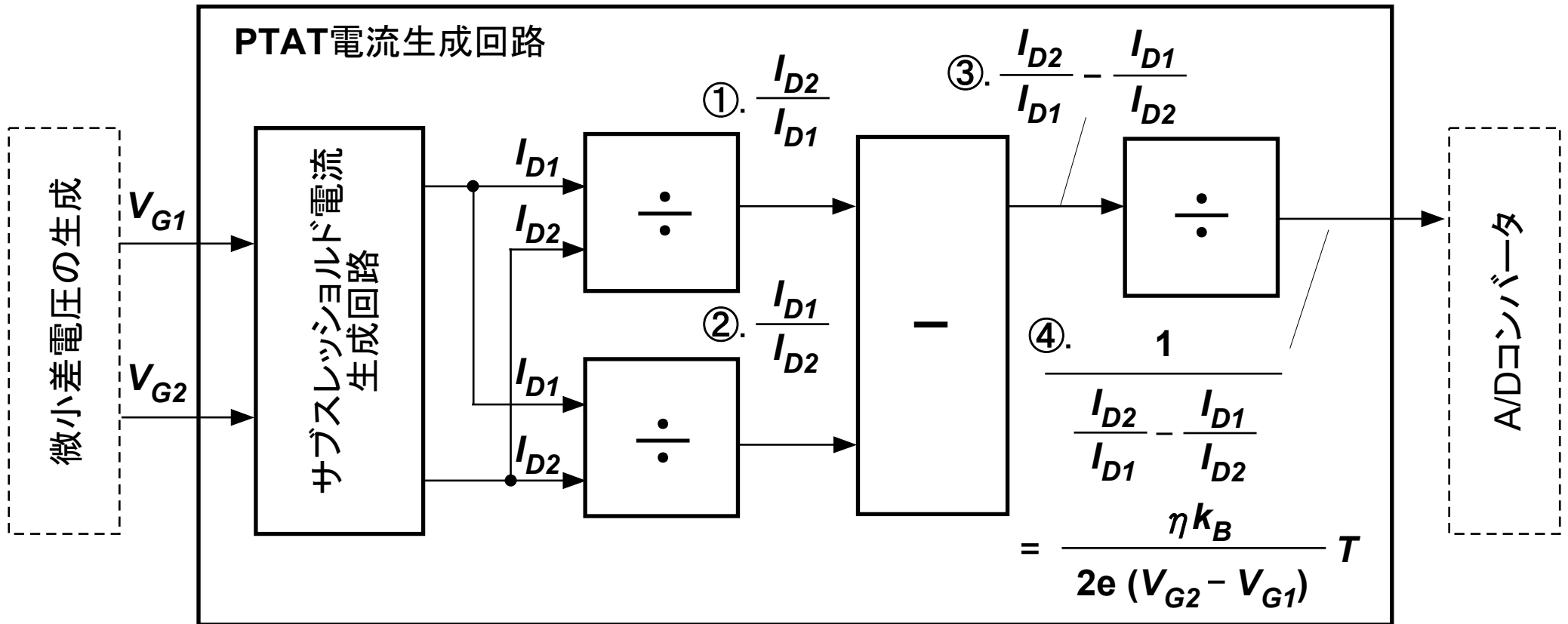
➡ このアーキテクチャに基づいた回路化

# スマート温度センサ・アーキテクチャ



⇒ すべての回路ブロックをサブスレッショルド領域で動作  
(  $\mu\text{W}$ 級の消費電力の実現)

# 回路化 (PTAT電流生成)



回路構成をシンプルに(式変形)

$$\frac{1}{\frac{I_{D2}}{I_{D1}} - \frac{I_{D1}}{I_{D2}}} = \frac{I_{D2} I_{D1}}{(I_{D2} - I_{D1})(I_{D2} + I_{D1})} = \frac{\eta k_B}{2e (V_{G2} - V_{G1})} T$$

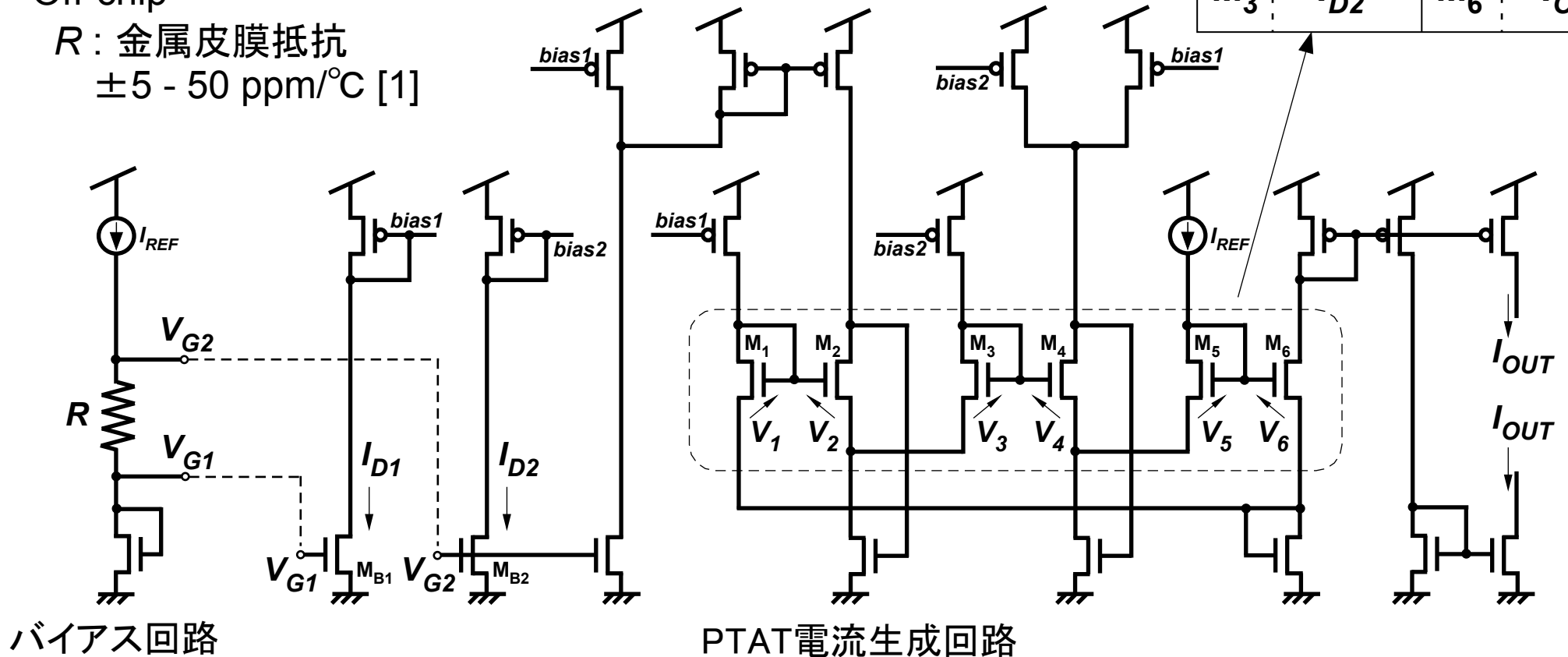
⇒ 上記の式に基づく回路化

# バイアス回路・PTAT電流生成回路

$M_1$	$I_{D1}$	$M_4$	$I_{D2} + I_{D1}$
$M_2$	$I_{D2} - I_{D1}$	$M_5$	$I_{REF}$
$M_3$	$I_{D2}$	$M_6$	$I_{OUT}$

Off-chip

$R$ : 金属皮膜抵抗  
 $\pm 5 - 50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  [1]



トランスリニア則より

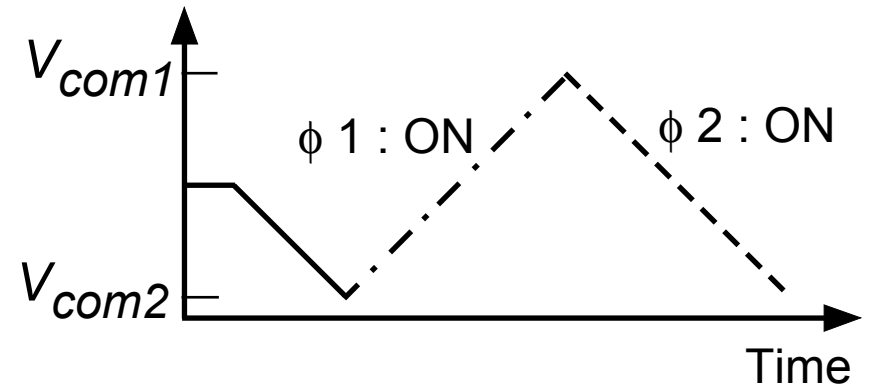
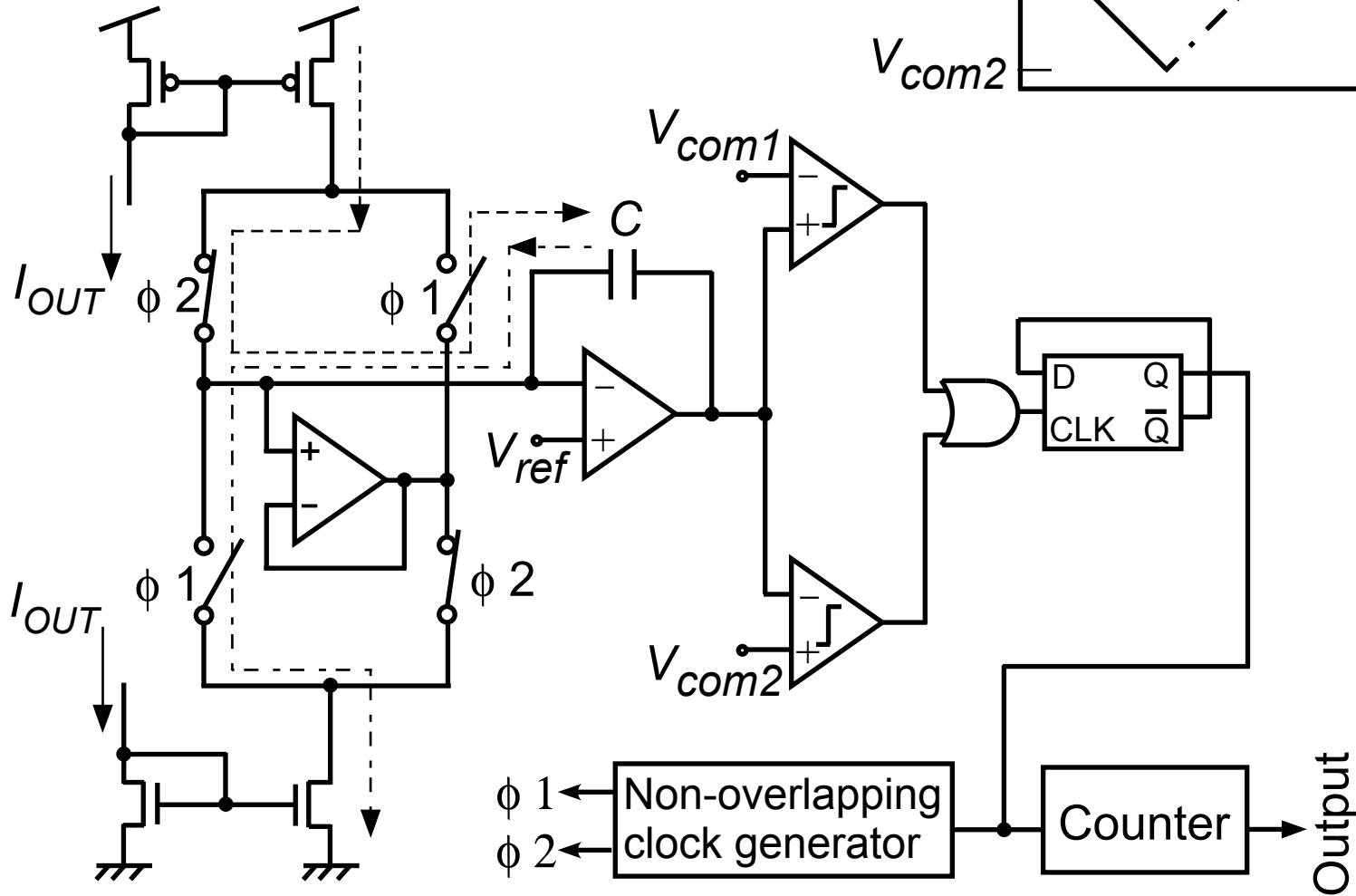
$$V_1 - V_2 + V_3 - V_4 + V_5 - V_6 = 0$$

$$I_{OUT} = I_{REF}^2 \frac{I_{D2} I_{D1}}{(I_{D2} - I_{D1})(I_{D2} + I_{D1})}$$

$$I_{OUT} = I_{REF}^2 \frac{\eta k_B}{2e (V_{G2} - V_{G1})} T$$

$$= \frac{\eta k_B}{2eR} T$$

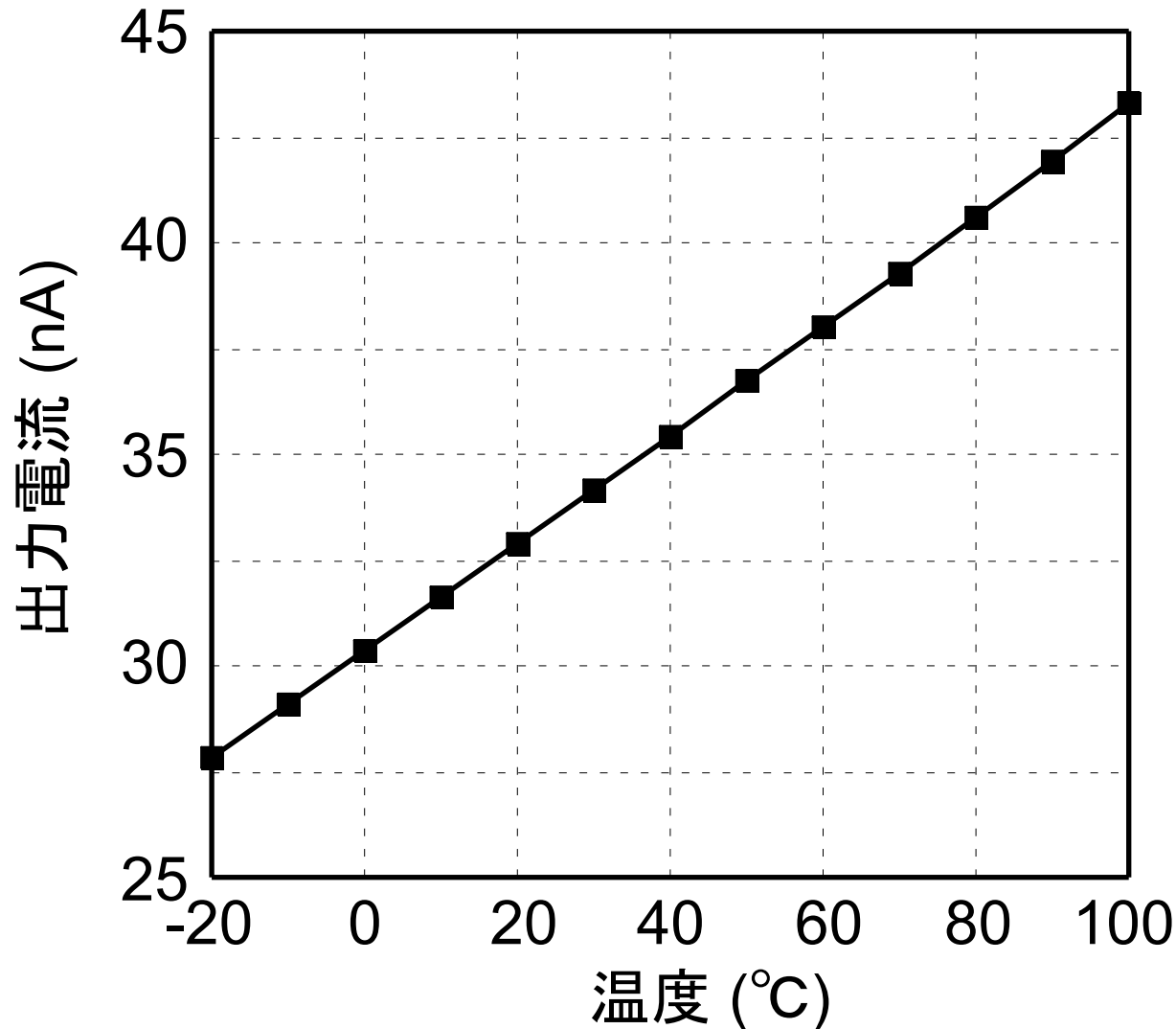
# A/Dコンバータ



$$V_{com1} - V_{com2} = \frac{I_{OUT}}{C} t_0 \quad f = \frac{1}{2t_0} = \frac{I_{OUT}}{2C (V_{com1} - V_{com2})}$$



# シミュレーション結果 (PTAT電流生成回路)



PTAT電流生成回路

$$I_{REF2} = 100 \text{ nA}$$

バイアス回路

$$I_{REF1} = 100 \text{ nA}$$

$$R = 100 \text{ k}\Omega$$

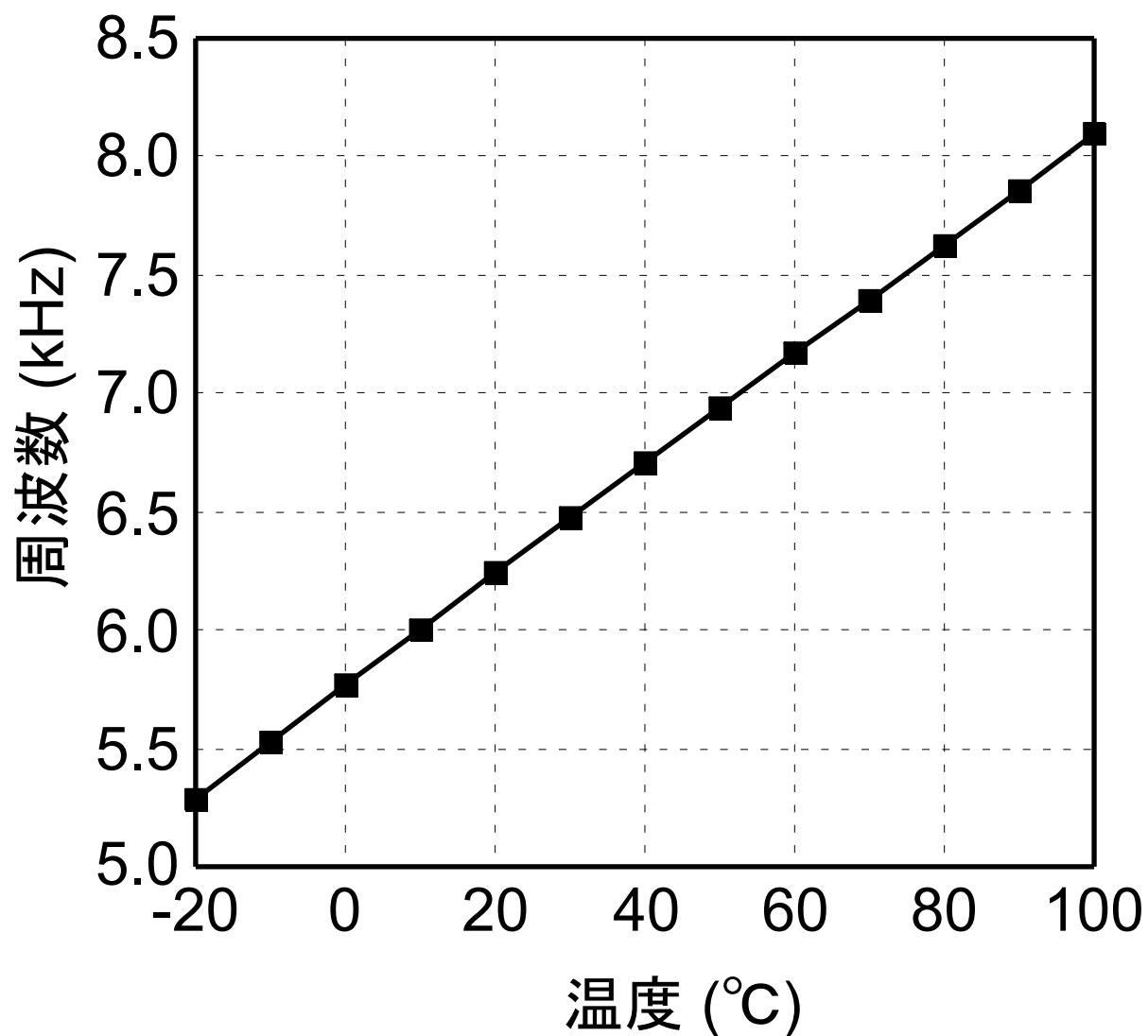
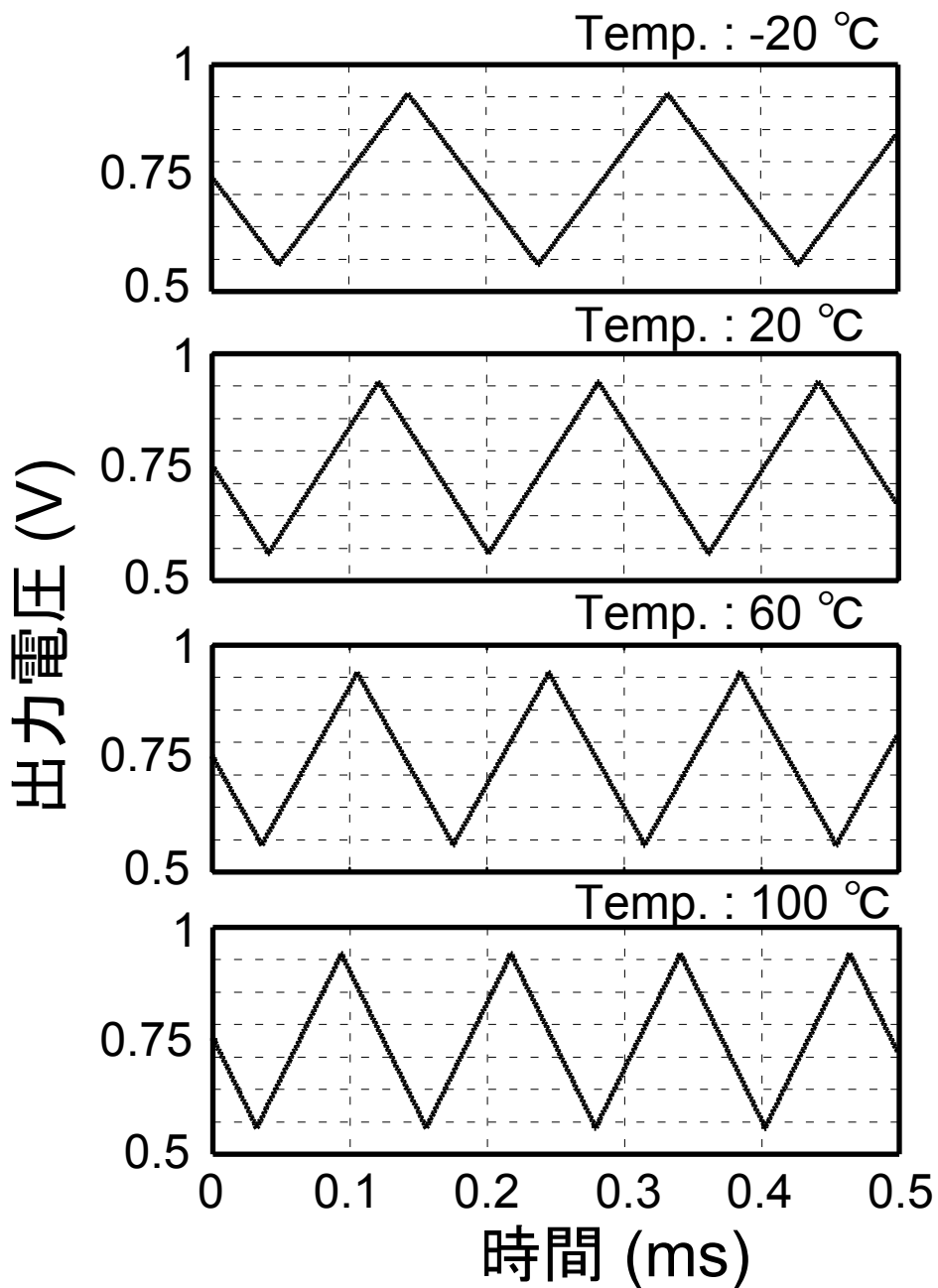
微小差電圧

$$V_{G2} - V_{G1} = 10 \text{ mV}$$

出力電流

$$I_{OUT} = I_{REF2} \frac{\eta k_B}{2e (V_{G2} - V_{G1})} T$$
$$= \frac{\eta k_B}{2eR} T$$

# シミュレーション結果 (A/Dコンバータ)



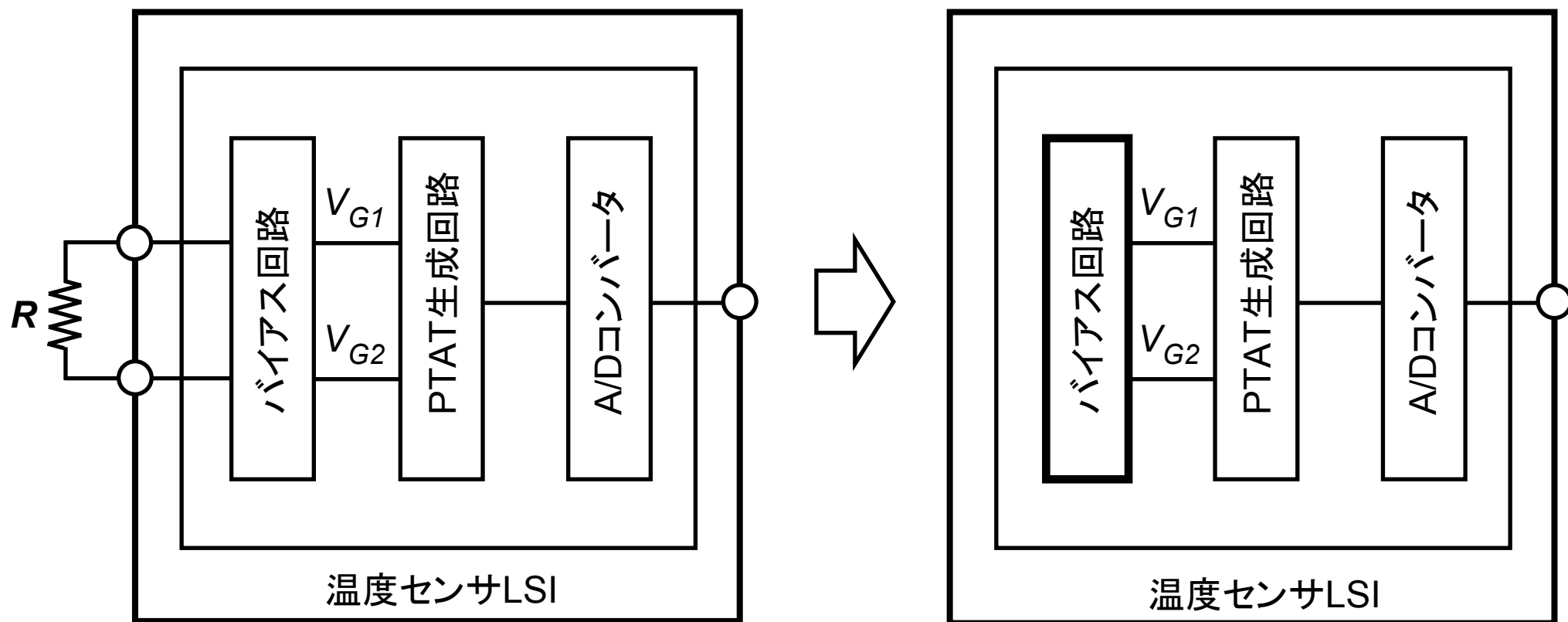
$$f = \frac{I_{OUT}}{2C (V_{com1} - V_{com2})} = \frac{\eta k_B}{4eRC} T$$

# 性能のまとめ

プロセス	0.35 $\mu\text{m}$ , 2P-4M CMOS
電源電圧	1.5 V
温度レンジ	-20 - 100 $^{\circ}\text{C}$
消費電力	5.8 $\mu\text{W}$ ( $T = 100^{\circ}\text{C}$ )
連続動作時間	1.2年 ( ボタン電池 (35 mAh) ) 5年 ( リチウム電池 (190 mAh) )

# 抵抗 $R$ (Off-chip)を用いない回路構成の検討

Off-chip - 抵抗 $R$   $\Rightarrow$  On-chip - バイアス回路

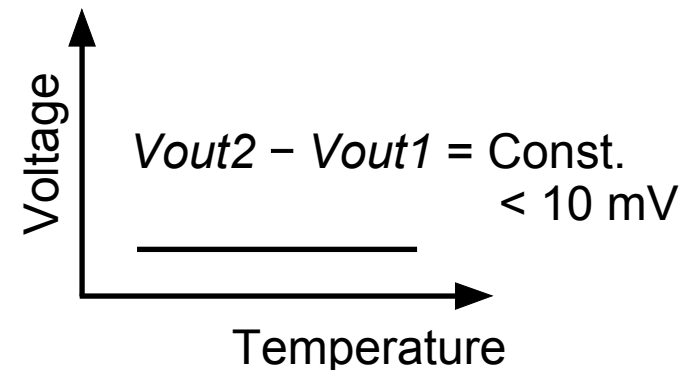
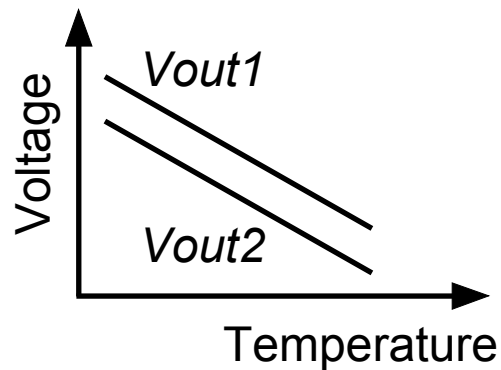
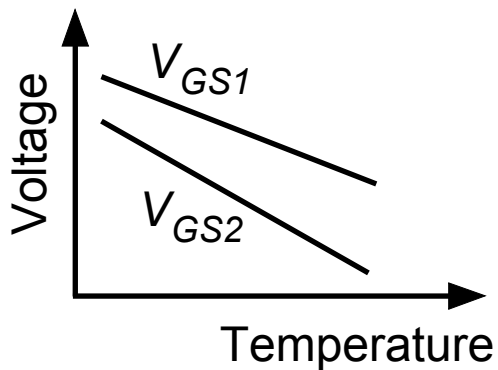
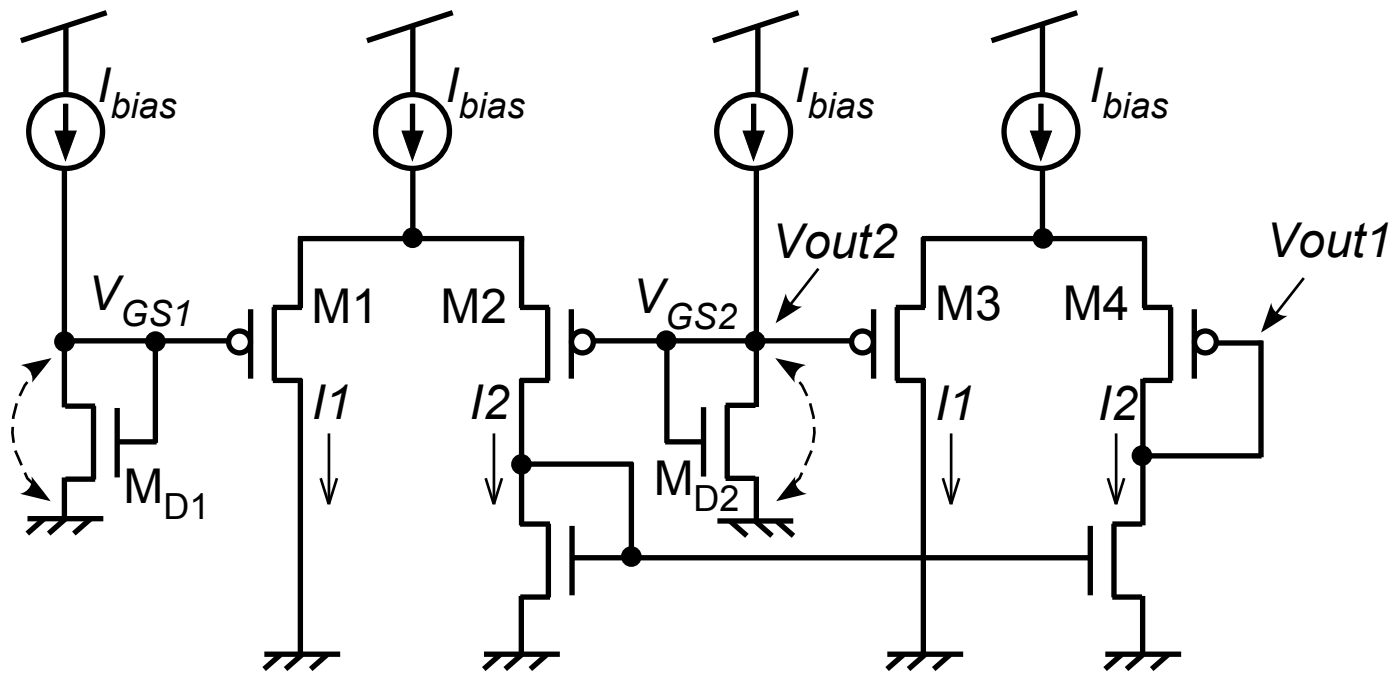


Off-chipの抵抗体を用いないバイアス回路の検討

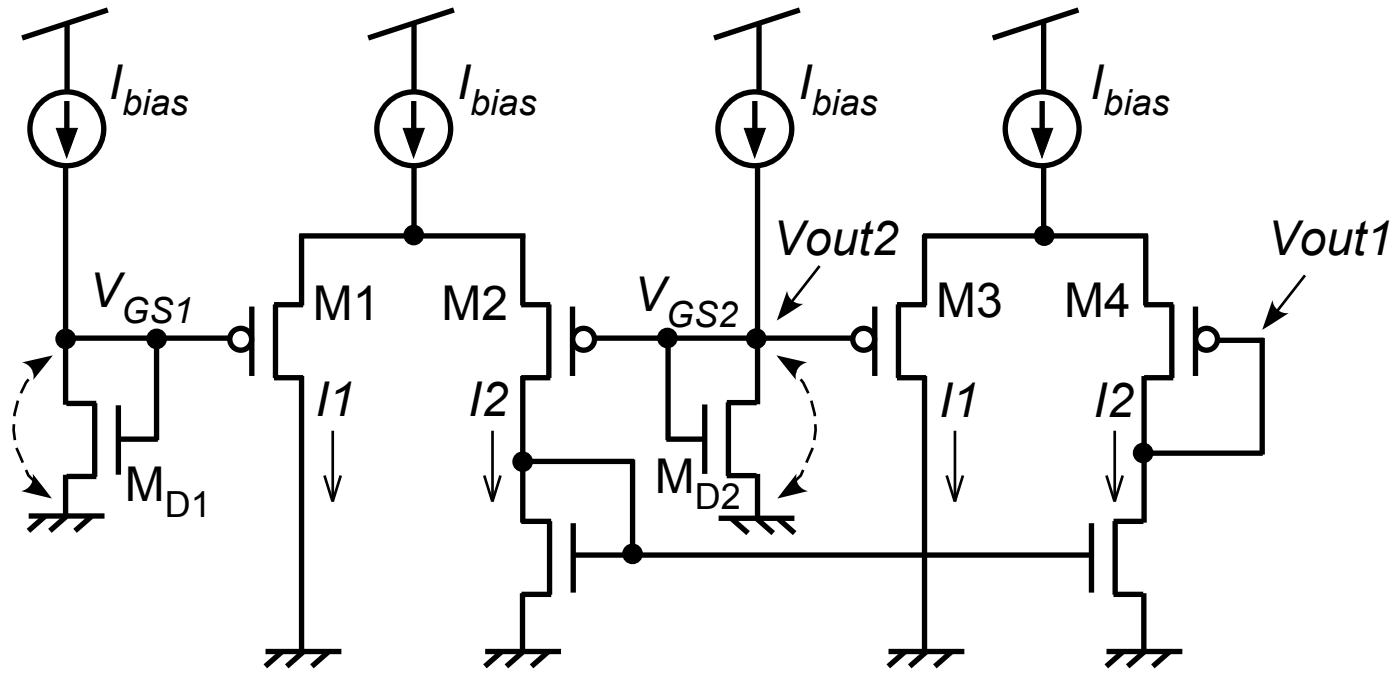
一定微小差電圧の生成( $V_{G2} - V_{G1} < 10 \text{ mV}$ )

# バイアス回路の検討

(フローティング電源回路)



# 動作原理



ダイオード接続  $M_{D1}$ ,  $M_{D2}$  の  $V_{GS} (= V_{DS})$

$$V_{GS,Di} = V_{TH,Di} + \eta V_T \ln \left( \frac{I_{bias}}{K_{Di} I_0} \right) \quad (i = 1, 2)$$

$V_{GS,D1}$ ,  $V_{GS,D2}$  の差電圧

$$\Delta V_{GS,D} = \Delta V_{TH,D21} + \eta V_T \ln \left( \frac{K_{D1}}{K_{D2}} \right)$$

$$V_{out1} - V_{out2} = V_{GS4} - V_{GS3} \text{ (微小差電圧)}$$

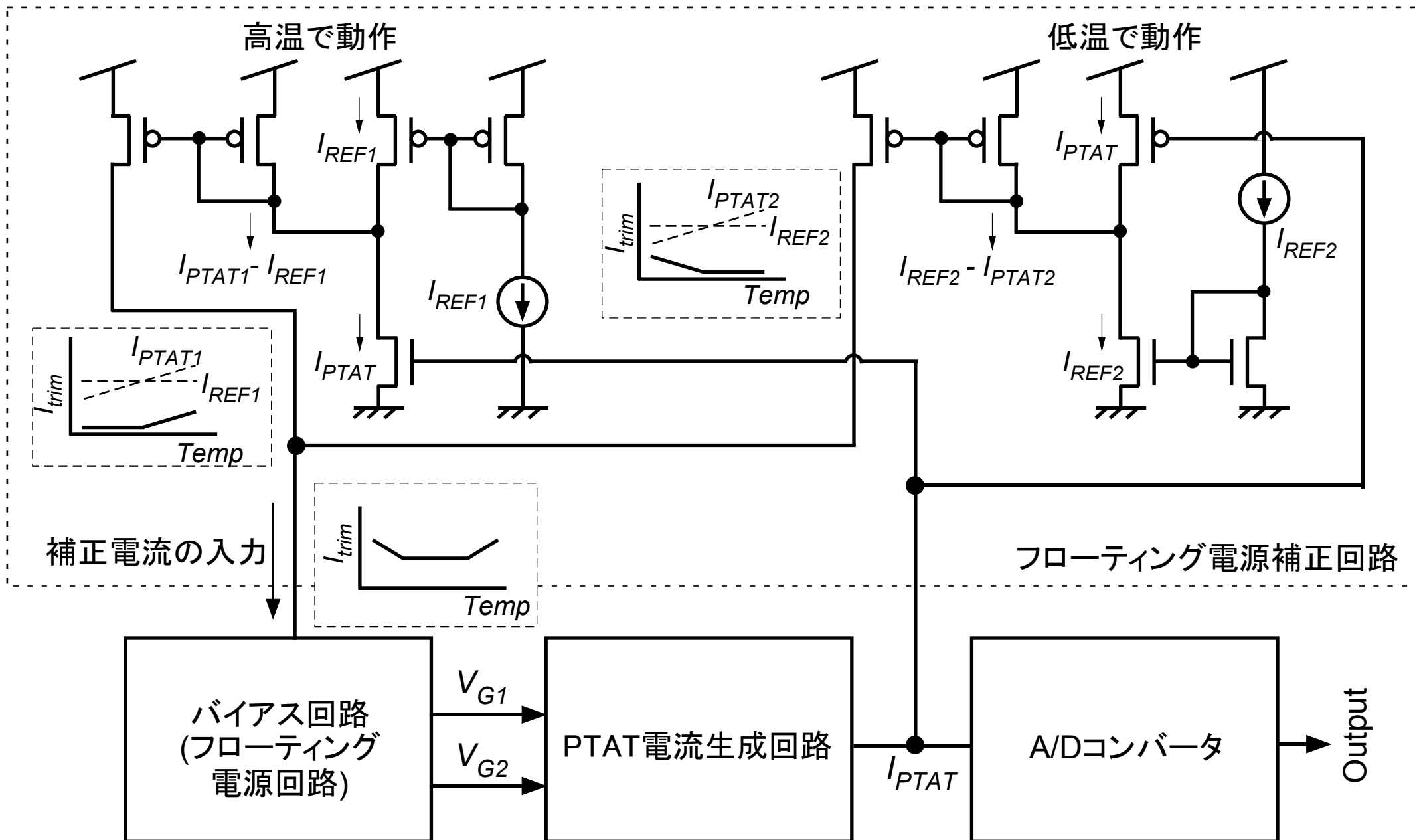
$$\Delta V_{out12} = \underbrace{\sum_{ij} \Delta V_{TH,ij}}_{\text{しきい値の差分}} + \eta V_T \ln \left( \frac{K_{D1} K_4 K_1}{K_{D2} K_3 K_2} \right)$$

しきい値の差分

(サイズ調節でキャンセル)

$$\Rightarrow \Delta V_{out12} = \text{const.} < 10 \text{ mV}$$

# 高精度化に向けた補正回路の検討



# まとめ

CMOSサブスレッショルド領域で動作する温度センサを提案

- ・ SPICEシミュレーションにより動作を確認
- ・ MOSFETのサブスレッショルド電流を利用してPTAT電流を生成
- ・ 消費電力 5.8  $\mu$ W

ボタン電池で1.2年の連続動作

- ・ バイアス回路 (フローティング電源回路) の検討

今後の予定

- ・ キャリブレーション回路
- ・ バイアス回路も含めたオンチップでの構成