

Finite Aperture Time Effects in Sampling Circuit

Asad A. Abidi

University of California, Los Angeles

Miho Arai Kiichi Niitsu Haruo Kobayashi

Gunma University

アウトライン

研究背景・目的

アパーチャタイムの影響の定量化

MOSサンプリング回路での検証

NMOSスイッチの非線形性の考察

まとめ

研究背景・目的

■ 背景

CMOSプロセスの微細化による
信号の高周波化

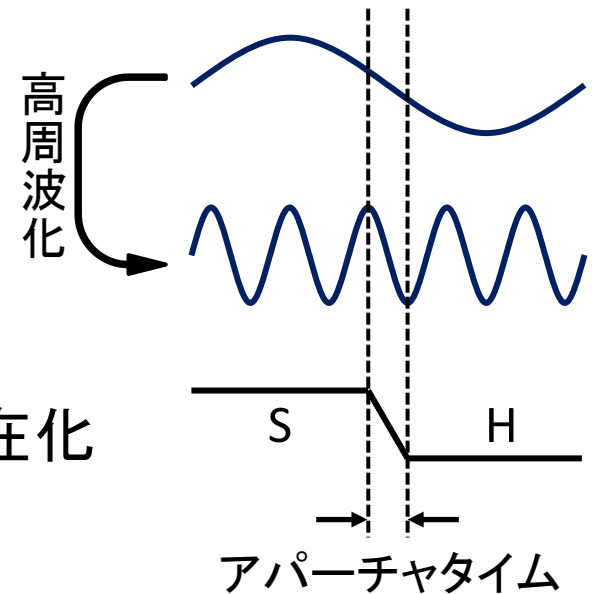


サンプリングにおける
アパーチャタイム(開口時間)の影響が顕在化

サンプリング: 波形取得において重要な技術



アパーチャタイムの影響を考慮して解析を行う必要がある



■ 目的

アパーチャタイムの影響を定量化

アパーチャタイムとシャッタースピード

- 例: カメラのシャッタースピード(アパーチャタイムの逆数)

被写体: 固定



被写体: 移動



被写体が早く動く



写真がぶれる

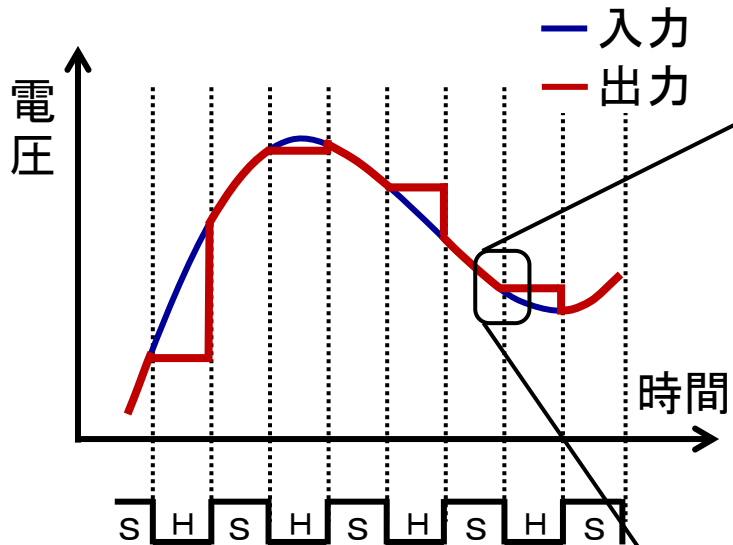
∴

入力信号の高周波化



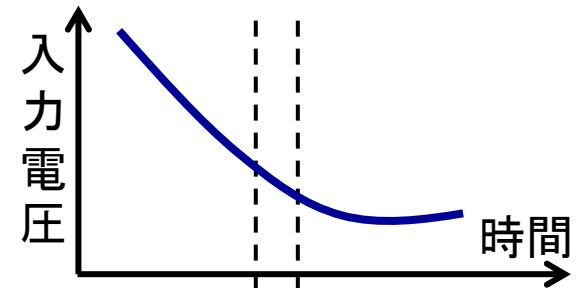
出力信号の特性劣化

アパーチャタイムの定義



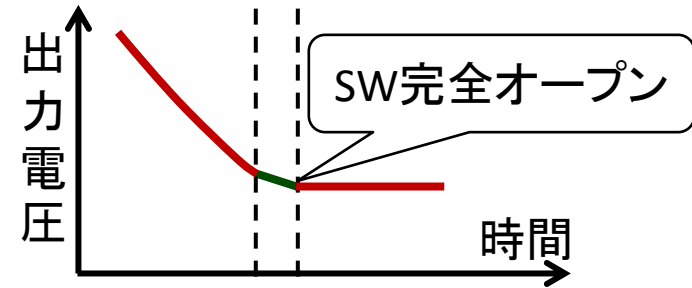
ホールドを開始してから
SWが開き終わるまでの
積分時間

⇓
アパーチャタイム



ホールド開始

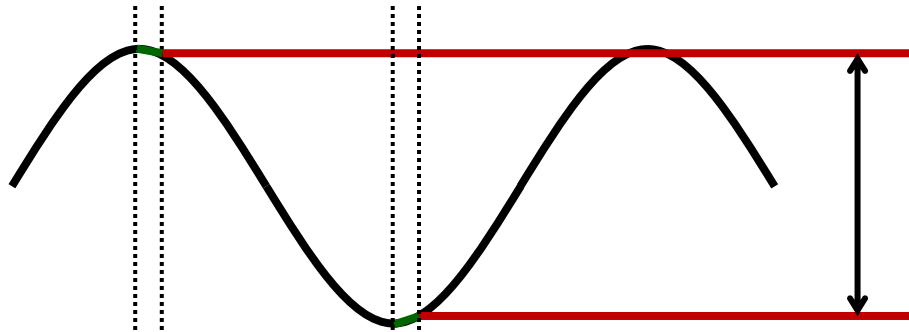
S H



アパーチャタイム

アパーチャタイムの増大

アパーチャタイム: 短



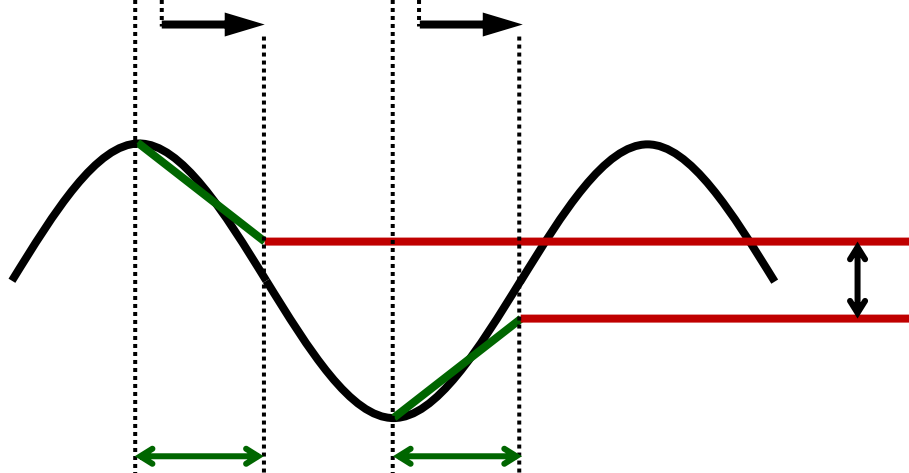
アパーチャタイム \Rightarrow 長



振幅値 \Rightarrow 小



利得 \Rightarrow 小



アパーチャタイム

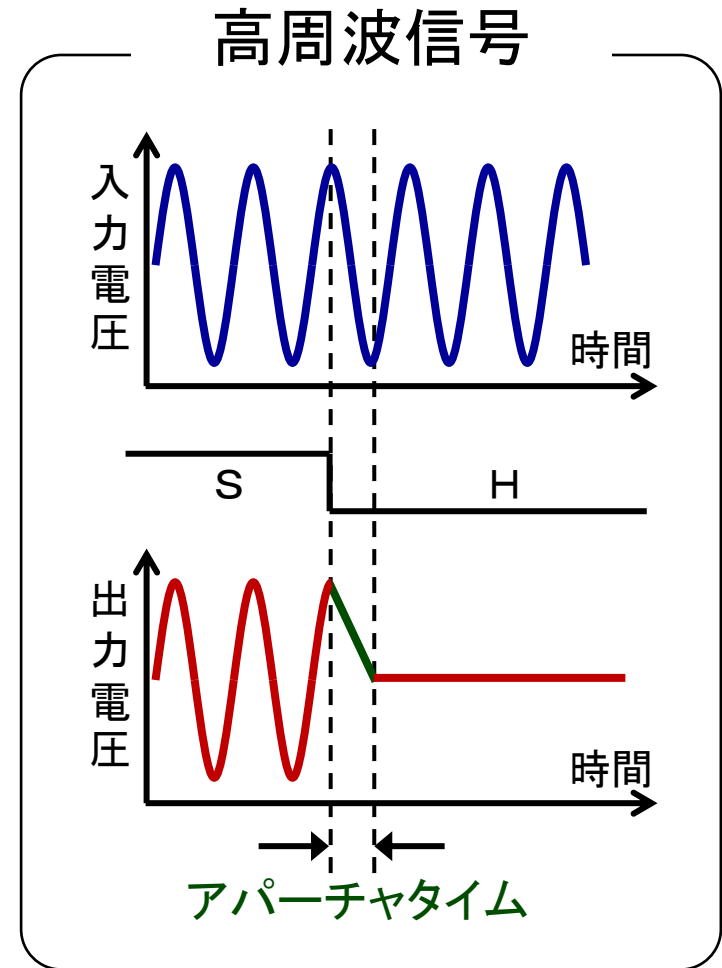
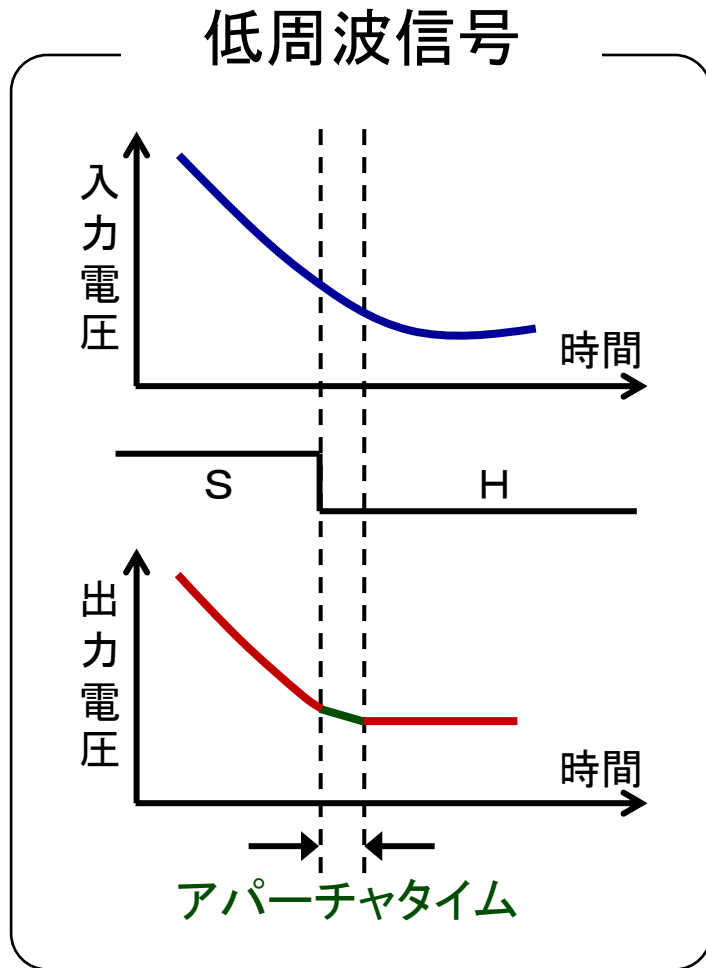
アパーチャタイム: 長

アパーチャタイムの変動分が
平均化されて出力

||

ローパス特性

信号の高周波化とアパーチャタイム



高周波信号 = アパーチャタイムの影響大

アウトライン

研究背景・目的

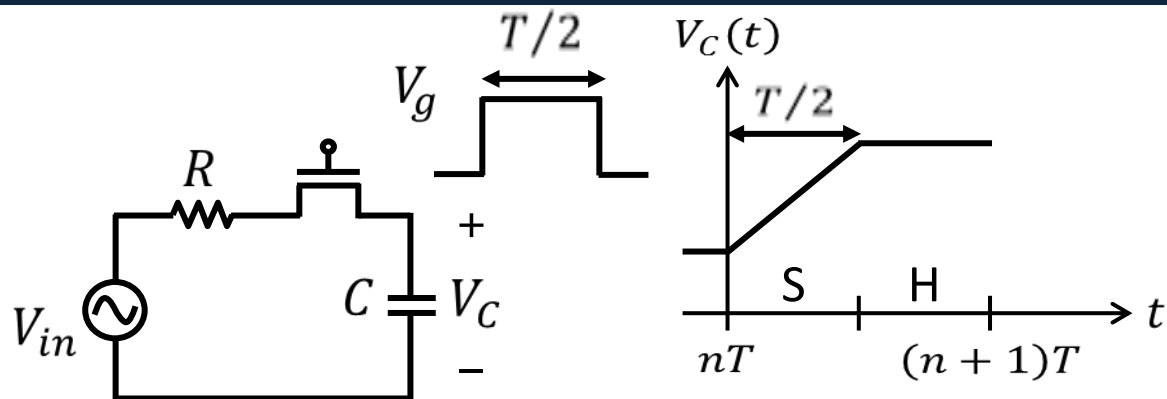
アパーチャタイムの影響の定量化

MOSサンプリング回路での検証

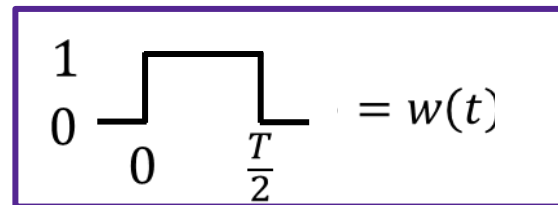
NMOSスイッチの非線形性の考察

まとめ

アパーチャタイムを考慮しない伝達関数



$$V_C((n+1)T) - V_C(nT) = \int_{nT}^{nT + \frac{T}{2}} \frac{V_{in}(t) - V_C(t)}{RC} dt$$



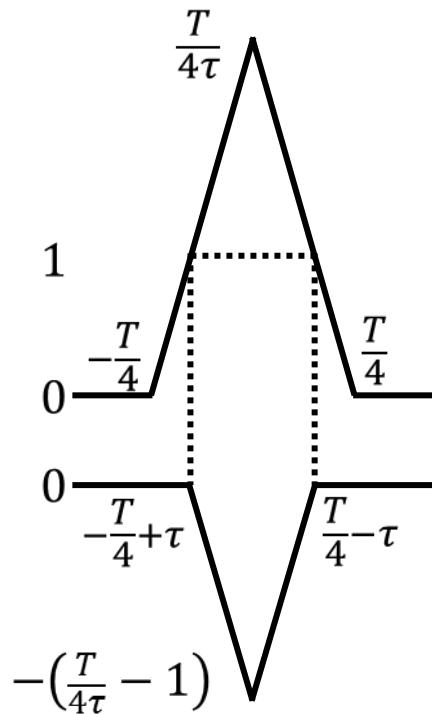
$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_{in}(t) - V_C(t)}{RC} \cdot w(t - nT) dt$$

↓ フーリエ変換

$$\mathcal{F}[V_C(n+1)T - V_C(nT)] = \mathcal{F}\left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_{in}(t) - V_C(t)}{RC} \cdot w(t - nT) dt\right]$$

$$V_C(f)(1 - e^{-j\frac{\omega T}{2}}) = \frac{1}{RC}\{V_{in}(f) - V_C(f)\} \cdot \frac{T}{2} \text{sinc}\left(f\frac{T}{2}\right) \cdot e^{-j\frac{\omega T}{4}}$$

アパーチャタイムを考慮した伝達関数



$\tilde{w}(t)$ $\Lambda(X)$

τ : アパーチャタイム

$$\tilde{w}(t) = \frac{T}{4\tau} \Lambda\left(\frac{t}{T/4}\right) - \left(\frac{T}{4\tau} - 1\right) \Lambda\left(\frac{t}{T/4 - \tau}\right)$$

$$V_C(f) (1 - e^{-j\omega T/2}) = \frac{1}{RC} \{V_{in}(f) - V_C(f)\} \cdot \frac{T}{2} \text{sinc}\left(f\frac{T}{2}\right) \cdot e^{-j\frac{\omega T}{4}}$$

⇓ 矩形波から台形波に対する式へ変換

$$V_C (1 - e^{-j\frac{\omega T}{2}}) = \frac{1}{RC} \{V_{in} - V_C\} \cdot \tilde{w}(f) \cdot e^{-j\frac{\omega T}{4}}$$

$$\frac{V_C}{V_{in}} = \frac{\text{sinc}(\omega\tau_2)}{\text{sinc}(\omega\tau_2) + j\omega\tau_1}$$

$(\tau_1 = RC, \tau_2 = \tau)$

アパーチャタイムの影響を考慮した伝達関数
(本研究成果)

提案と従来伝達関数との整合性

$$\frac{V_C}{V_{in}} = \frac{\text{sinc}(\omega\tau_2)}{\text{sinc}(\omega\tau_2) + j\omega\tau_1}$$

$(\tau_1 = RC, \tau_2 = \tau)$

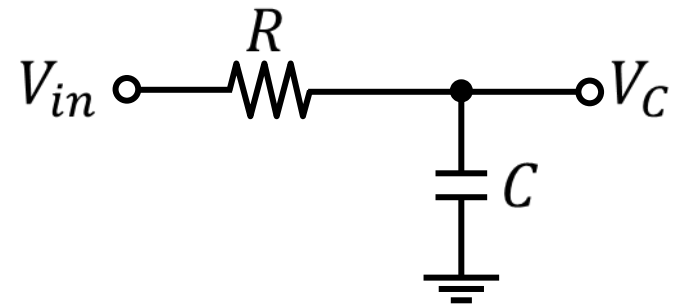
アパーチャタイムの影響を考慮した伝達関数(提案)

$\tau_2 \rightarrow 0$: アパーチャタイムがない場合

↓ $\text{sinc}(\omega\tau_2) \rightarrow 1$

$$\frac{V_C}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega\tau_1}$$

$(\tau_1 = RC)$



アパーチャタイムを考慮しない伝達関数(従来)

アウトライン

研究背景・目的

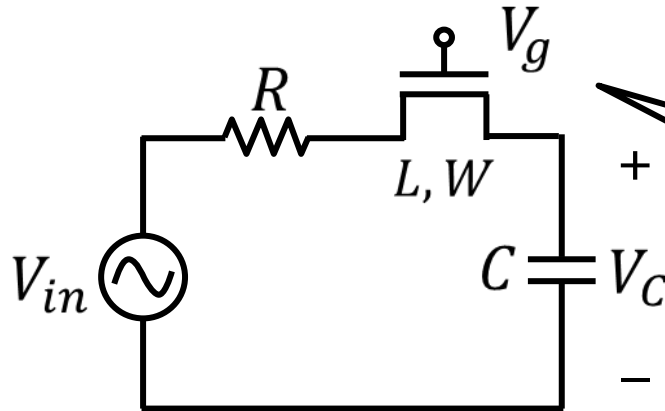
アパーチャタイムの影響の定量化

MOSサンプリング回路での検証

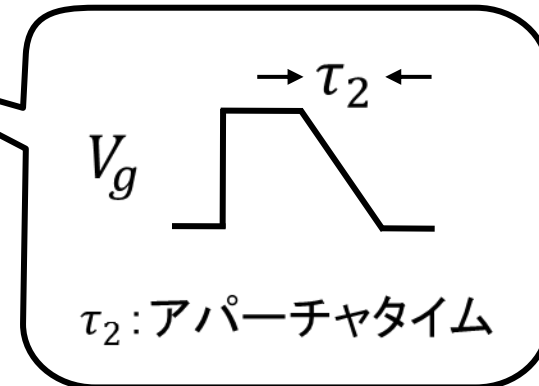
NMOSスイッチの非線形性の考察

まとめ

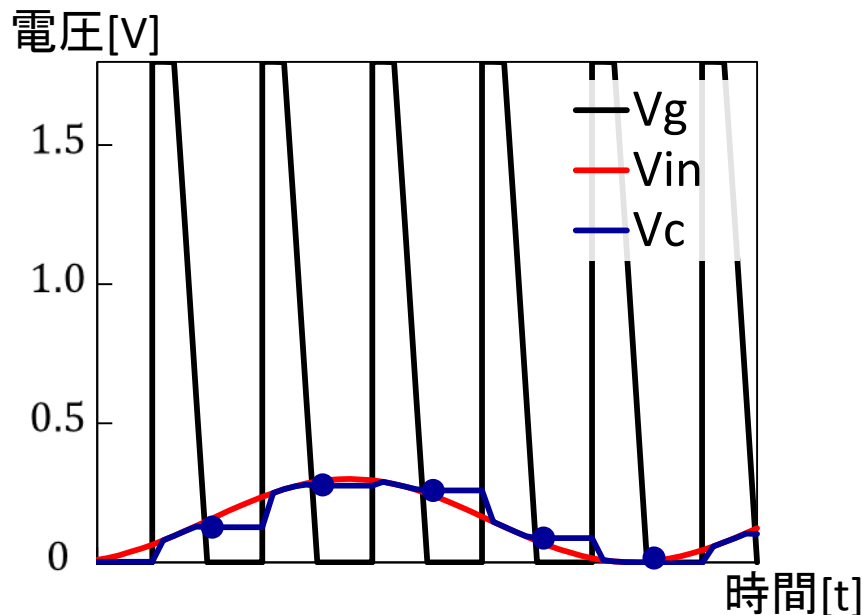
サンプリング回路での解析方法



サンプリング回路



TSMC 0.18um 使用



SPICEによる過渡解析

- の部分で等価時間サンプリング



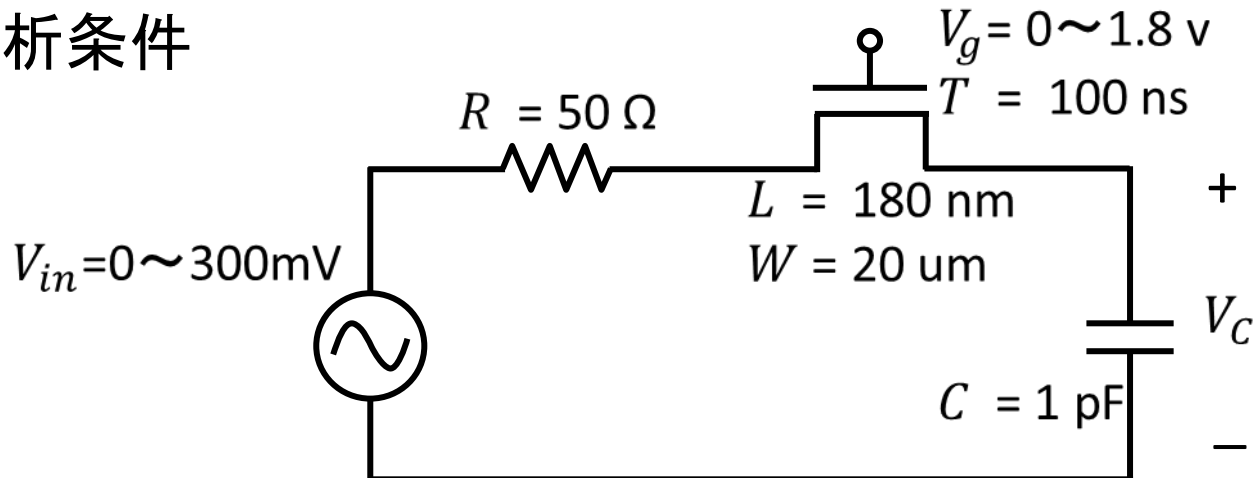
振幅値・利得を算出



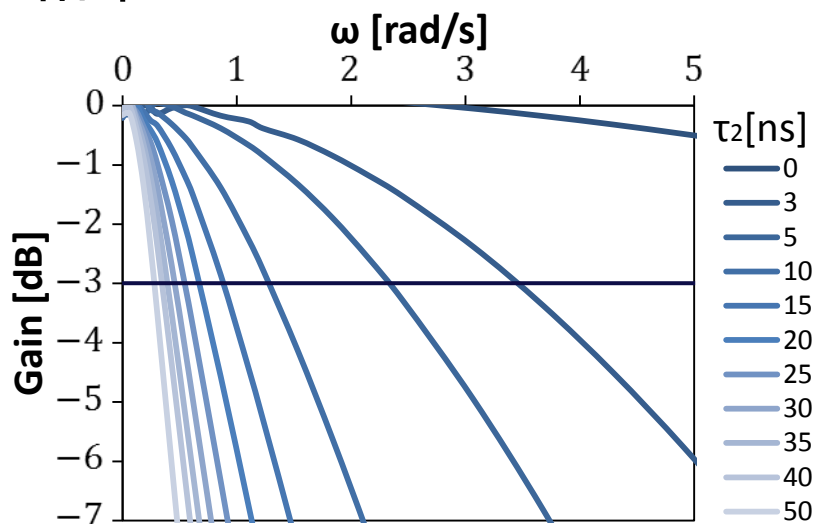
理論値との比較

解析条件・結果

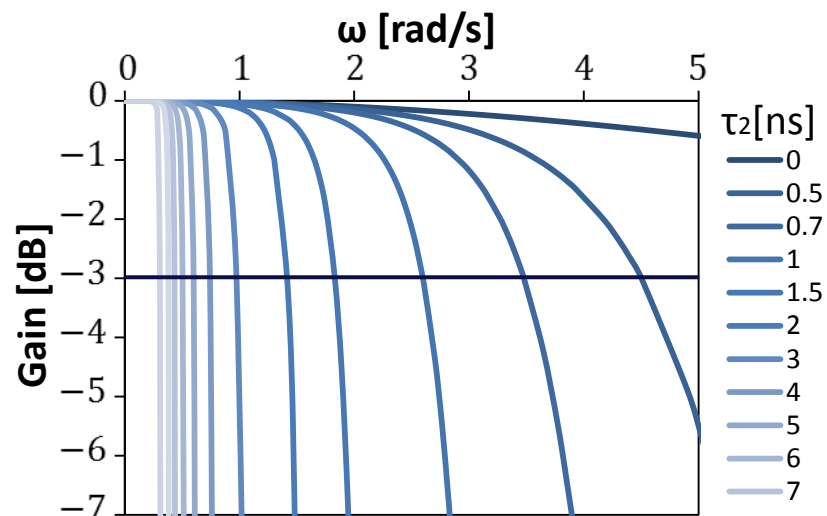
■ 解析条件



■ 結果



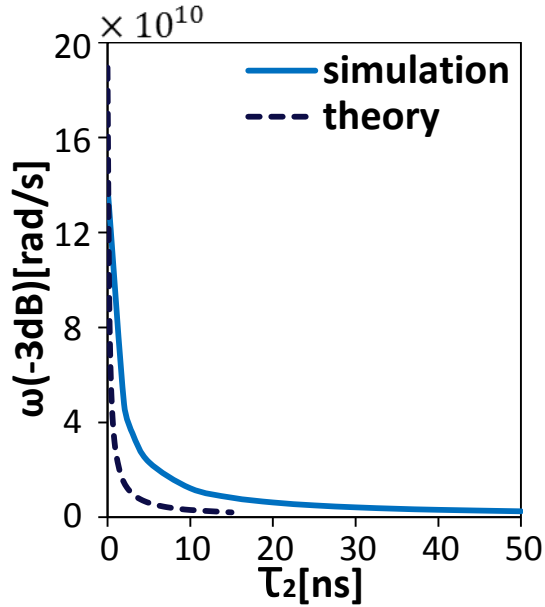
解析結果



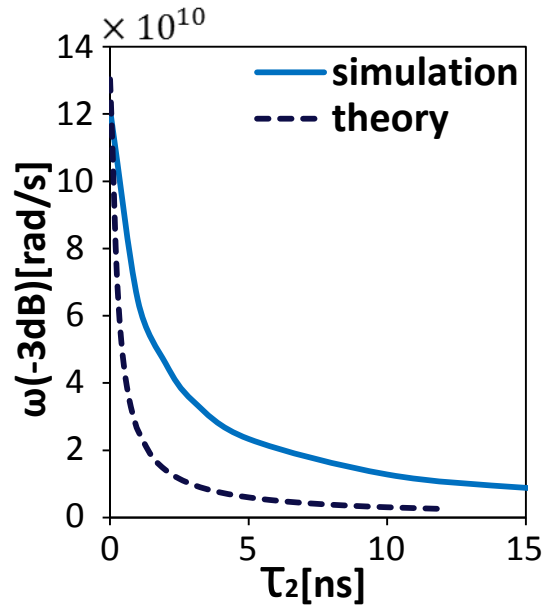
理論値

-3dB帯域で比較

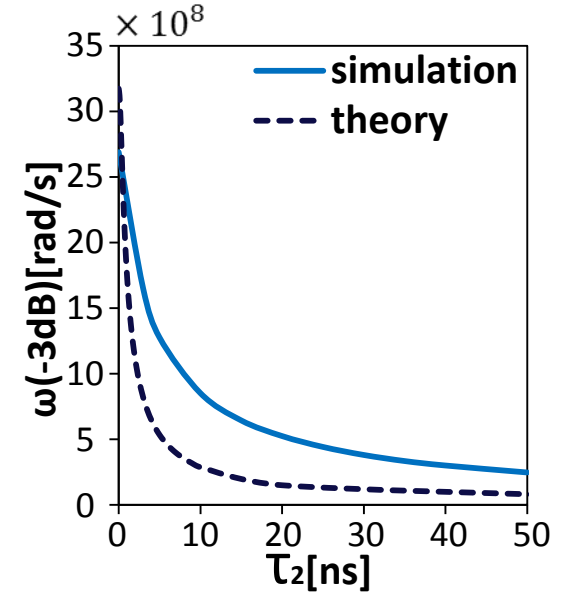
W=200um



W=20um



W=2um



解析結果 \neq 理論値

アウトライン

研究背景・目的

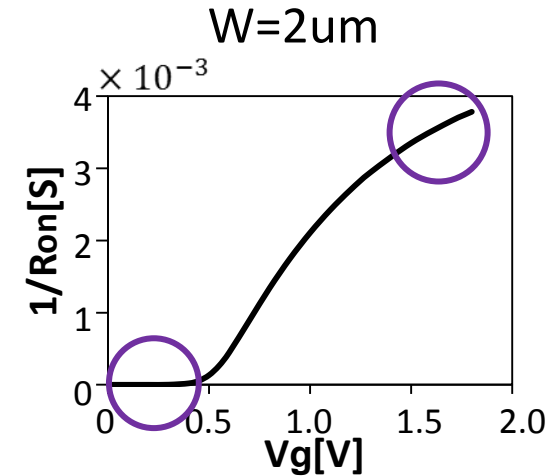
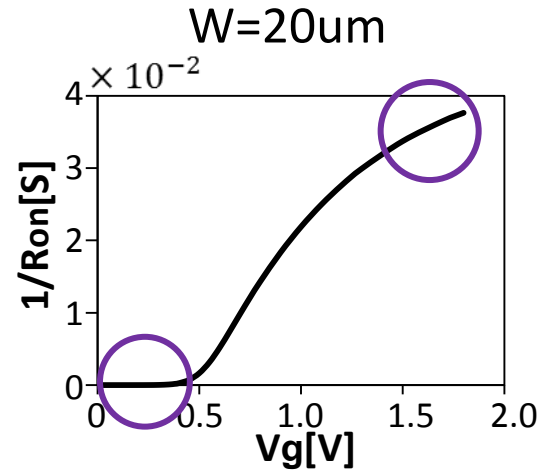
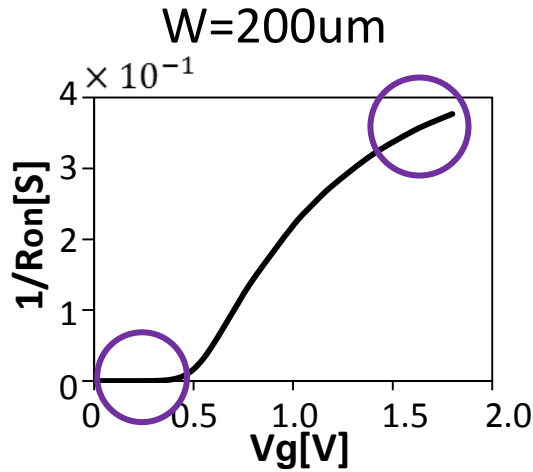
アパーチャタイムの影響の定量化

MOSサンプリング回路での検証

NMOSスイッチの非線形性の考察

まとめ

NMOSのON抵抗の非線形性を考慮

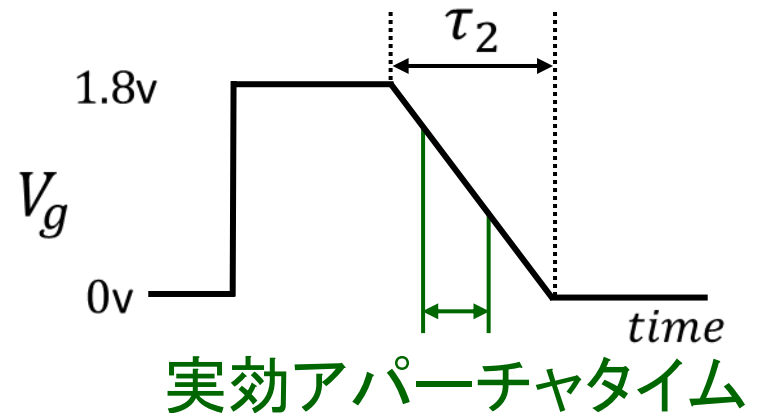


0~1.8V: 線形近似

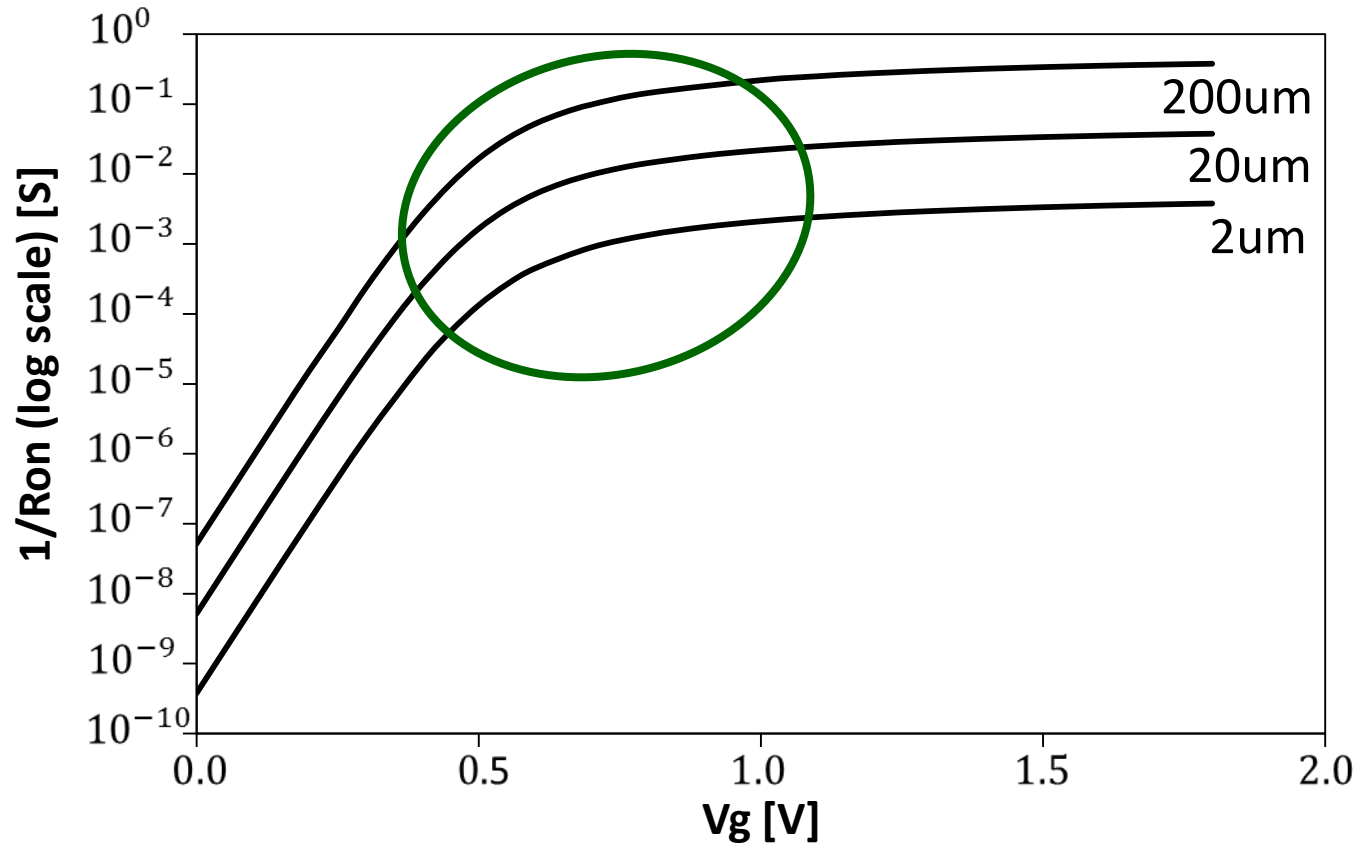
○領域は非線形性が強い

↓ 非線形性を考慮

アパーチャタイムに
対応する電圧を定義

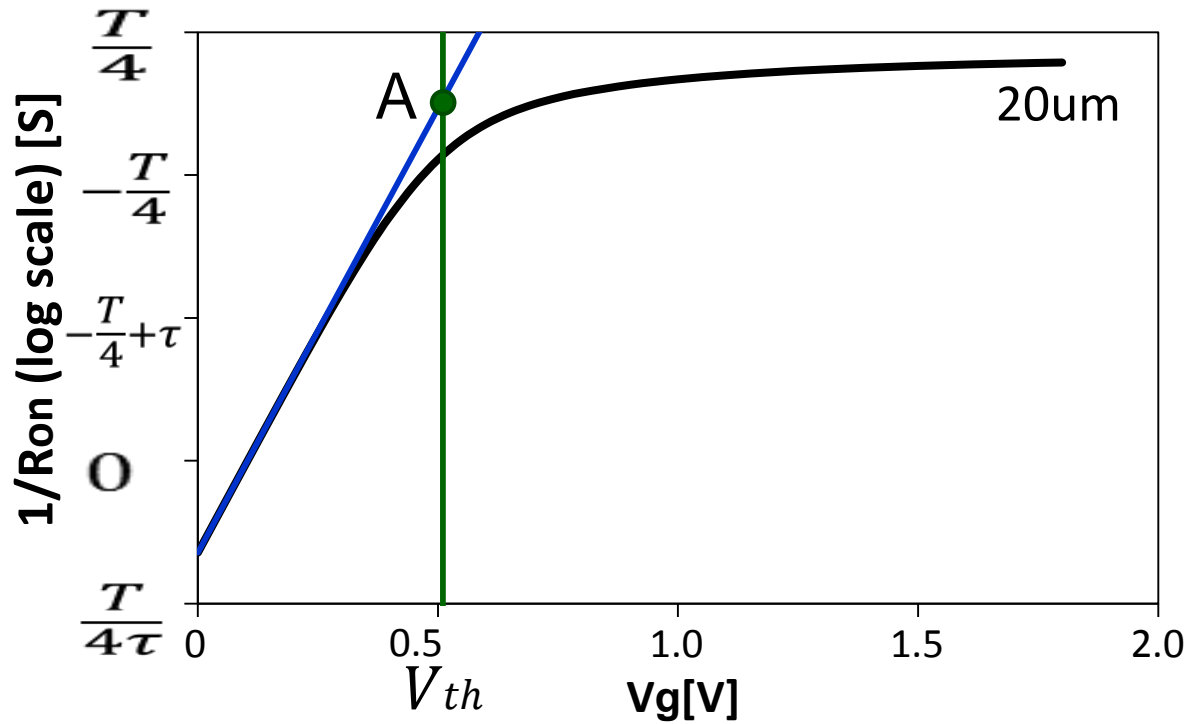


ON抵抗が大きく変化する領域



○ 近傍が実効アパーチャタイムであると想定

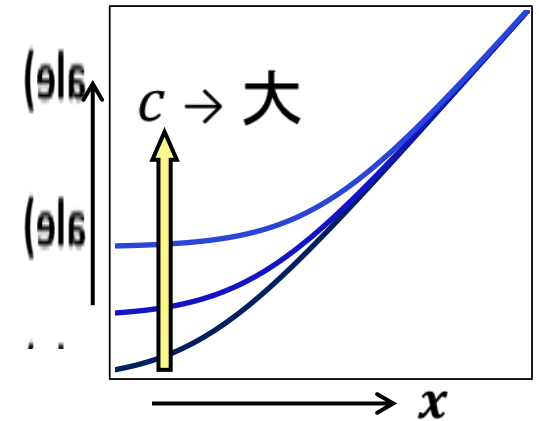
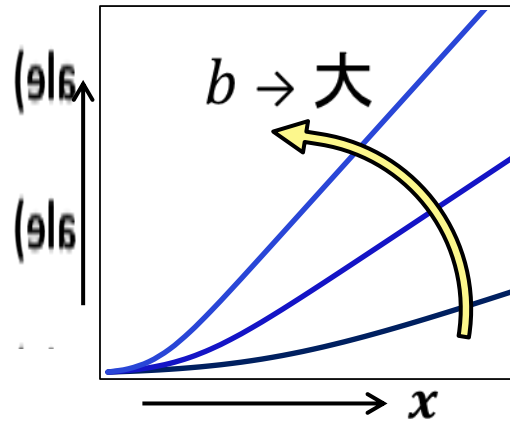
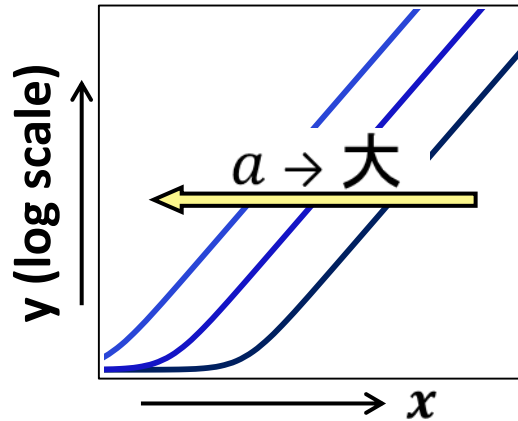
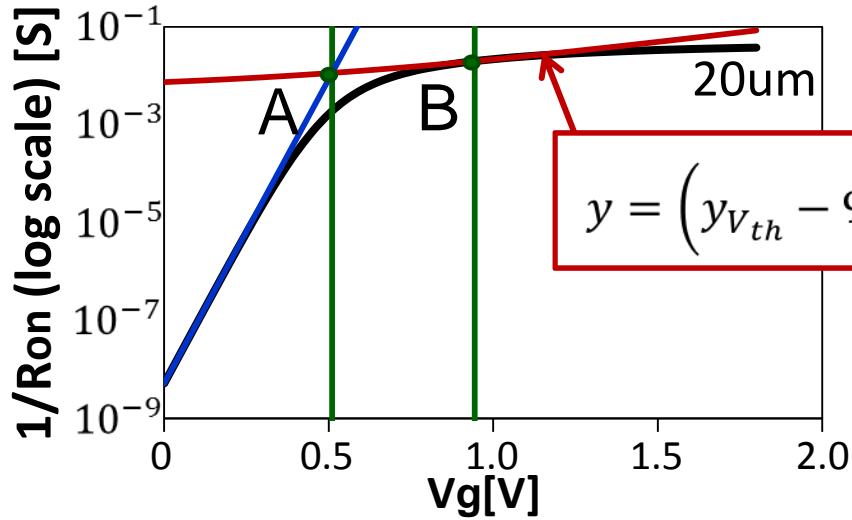
MOSがオンし始める点Aの導出



サブスレッショルド領域

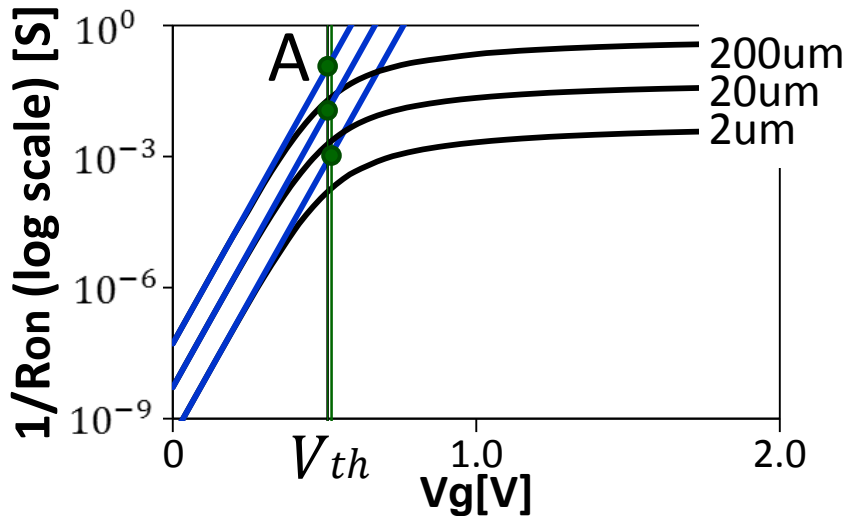
ゲート電圧とコンダクタンス = 指数関係

MOSが完全にオンする点Bの導出



$\left\{ \begin{array}{l} a, c : y \text{ 切片} \\ a, b, c : \text{傾き、湾曲率} \end{array} \right.$

交点Aを通る線のy切片



ゲート幅が10倍変化



グラフ、交点Aも同様に変化



交点Aを通る線:

傾きほぼ一定で同様に変化

交点Aを $(V_{th}, y_{V_{th}})$ とおく

$$y = ae^{bx} + c$$

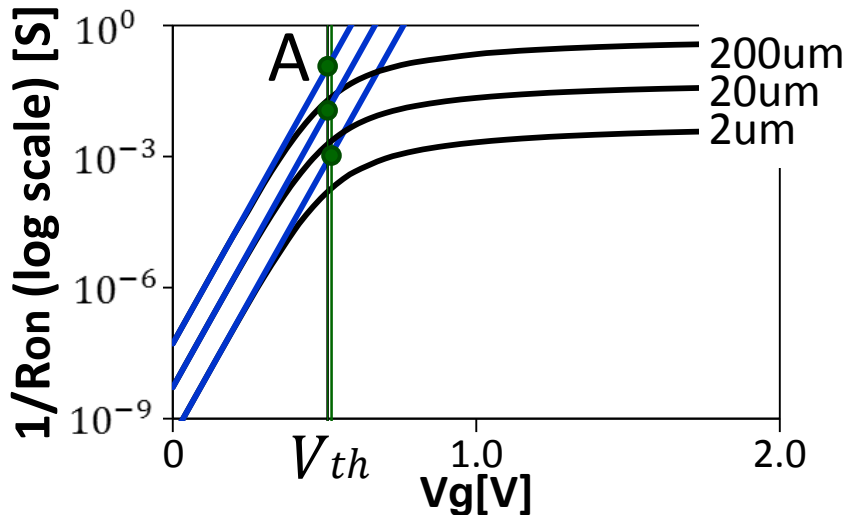
$$y = (y_{V_{th}} - c)e^{b(x - V_{th})} + c$$

$$\begin{cases} a, c & : y\text{切片} \\ a, b, c & : \text{傾き、湾曲率} \end{cases}$$

$$\Downarrow c = 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot c'$$

$$y = \left(y_{V_{th}} - 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot c' \right) e^{b(x - V_{th})} + 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot c'$$

交点Aを通る線の傾き・湾曲率



ゲート幅が10倍変化



グラフ、交点Aも同様に変化



交点Aを通る線:

傾きほぼ一定で同様に変化

$$y = \left(y_{V_{th}} - 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot c' \right) e^{b(x-V_{th})} + 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot c'$$

傾きの要素 = b, c'

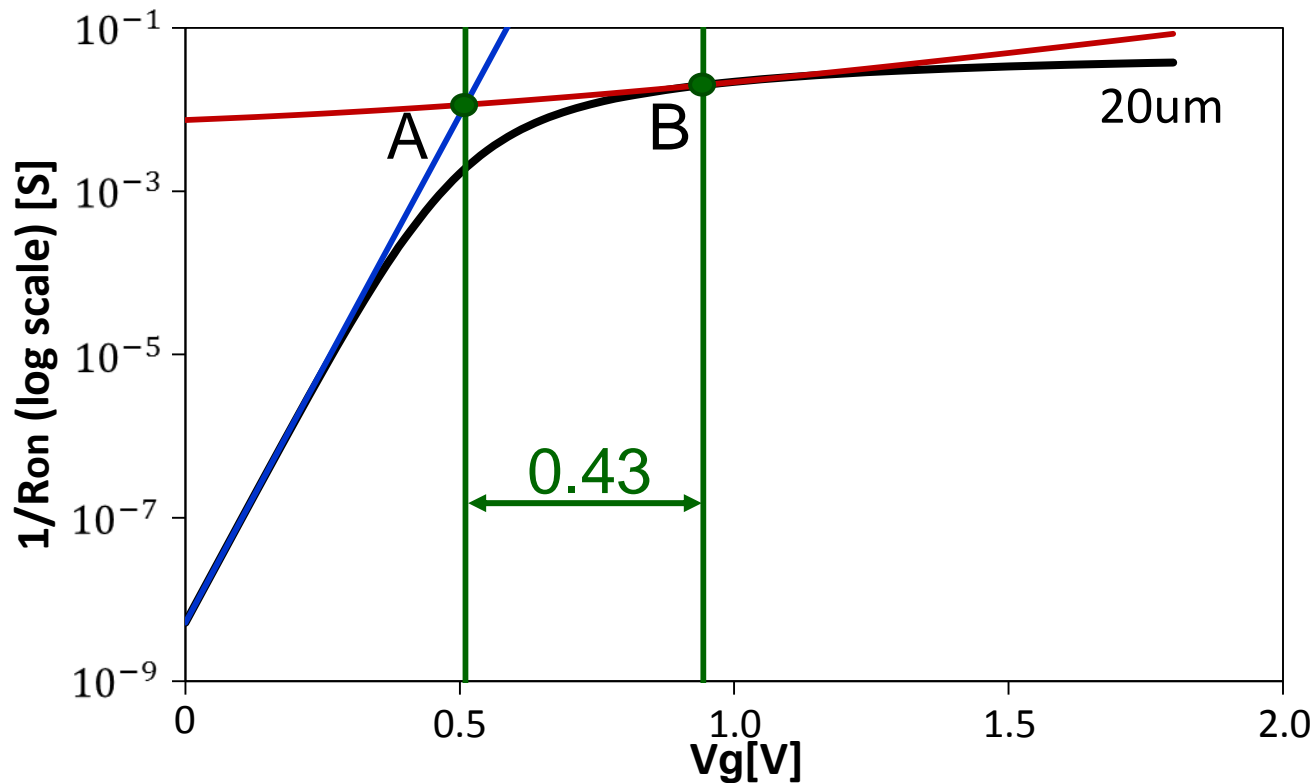
$$b = \frac{1}{V_{th}} \quad c' = V_{th}$$

$$y = \left(y_{V_{th}} - 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot V_{th} \right) e^{\left(\frac{x}{V_{th}} - 1 \right)} + 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot V_{th}$$

実効アパーチャタイムの算出法

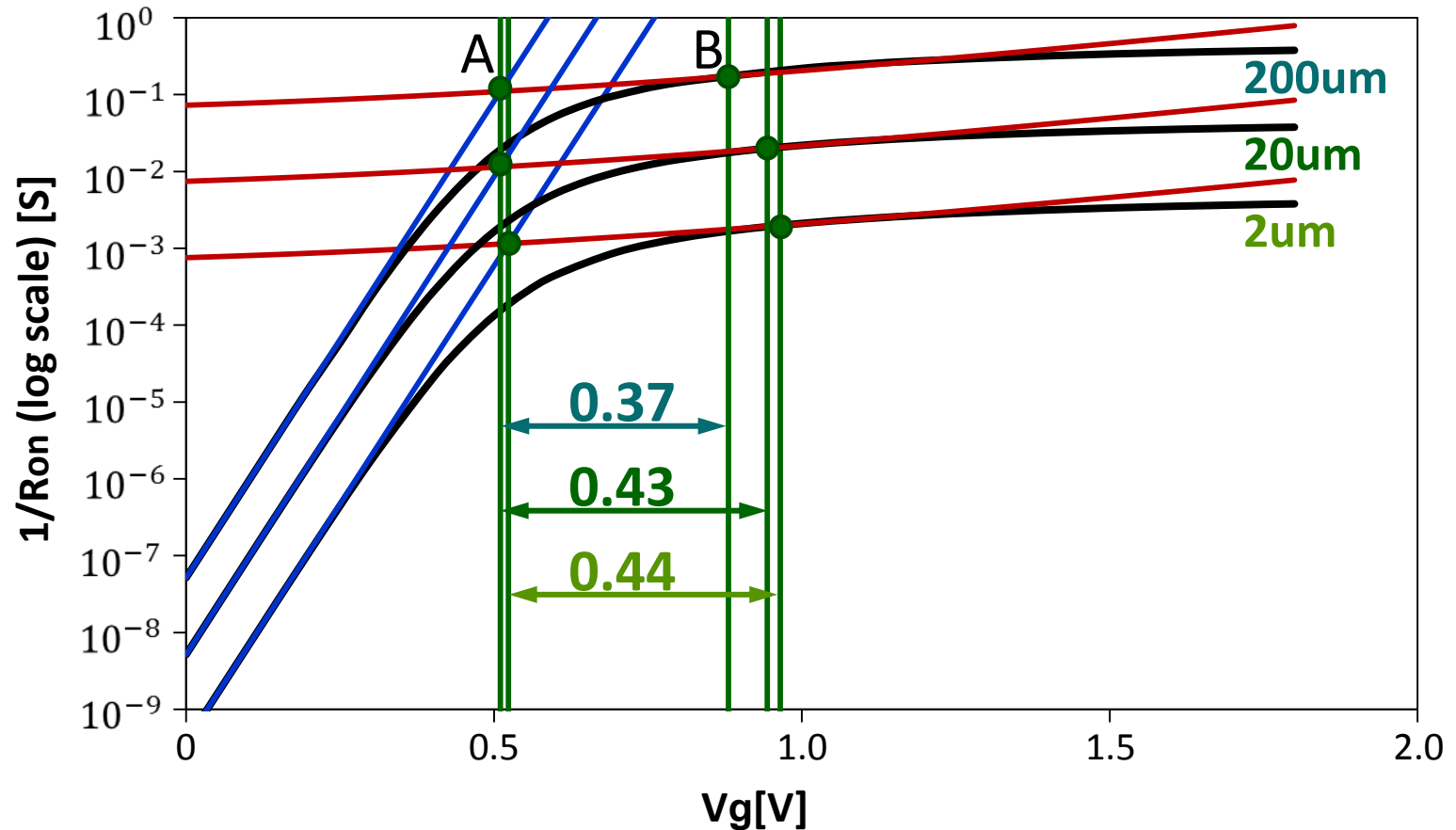
- MOSが完全にONする電圧

$$y = \left(y_{V_{th}} - 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot V_{th} \right) e^{\left(\frac{x}{V_{th}} - 1 \right)} + 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot V_{th}$$



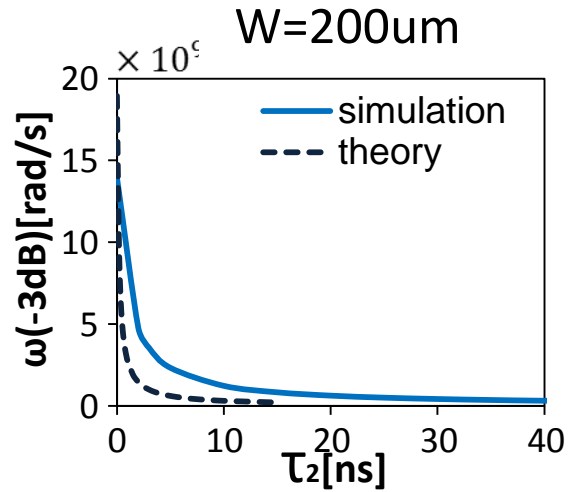
$$\therefore \text{実効アパーチャタイム } \tau_{\text{eff}} = \frac{0.43}{1.8} \times \tau_2$$

実効アパーチャタイムに対応する電圧

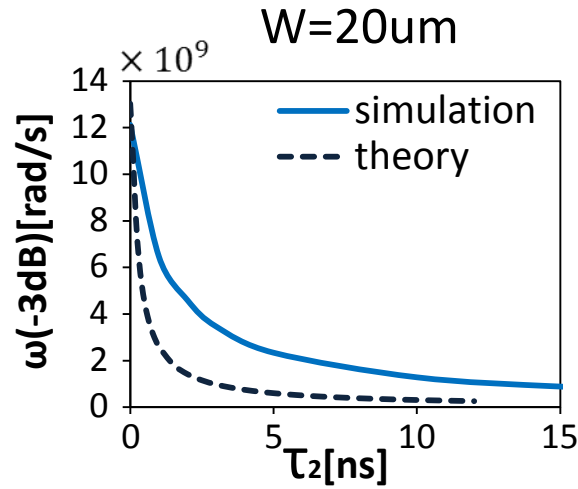


ゲート幅ごとに実効アパーチャタイムに対応する電圧を算出

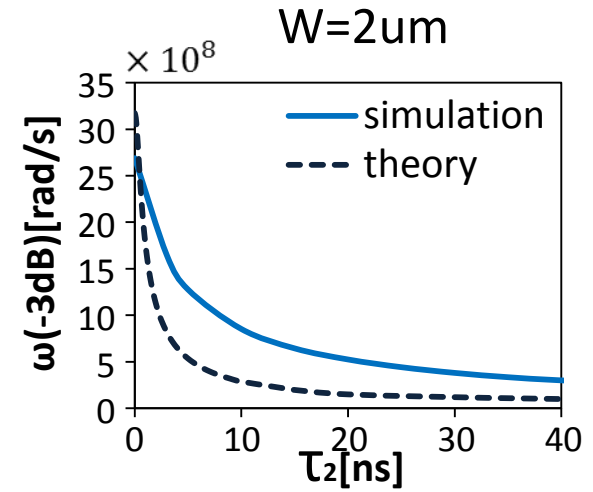
解析結果へのフィードバック



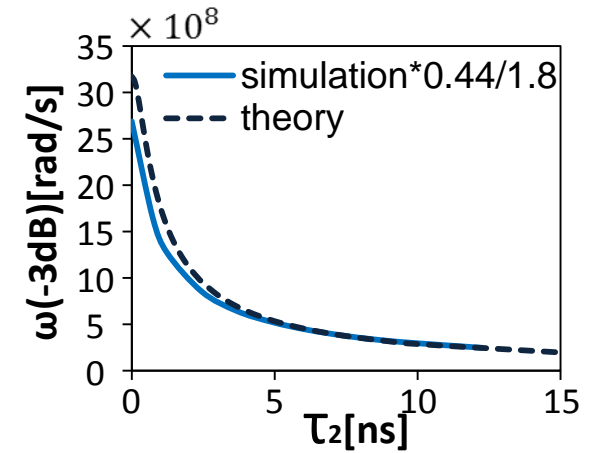
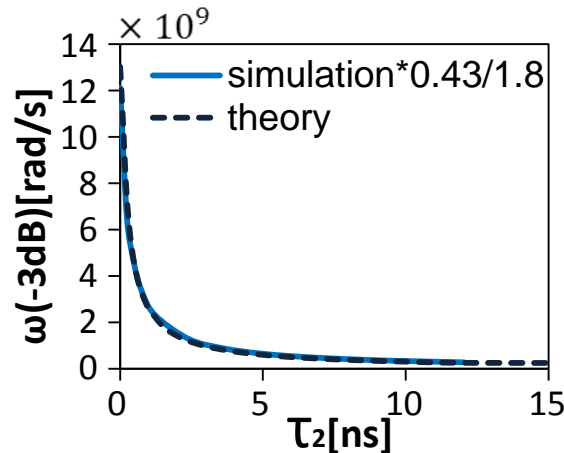
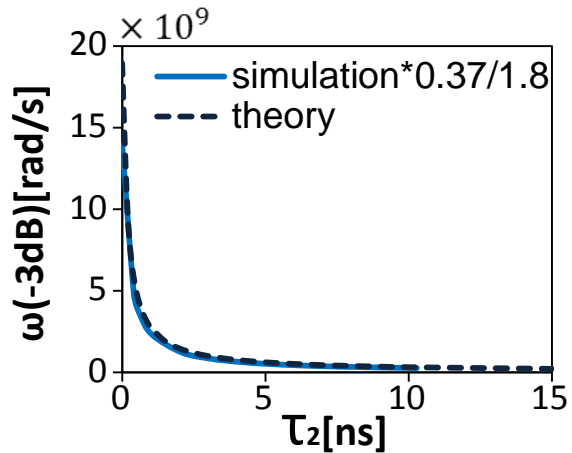
↓ 0.37/1.8倍



↓ 0.43/1.8倍



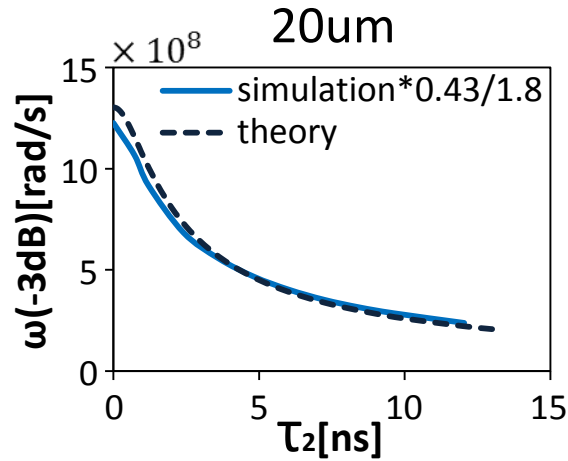
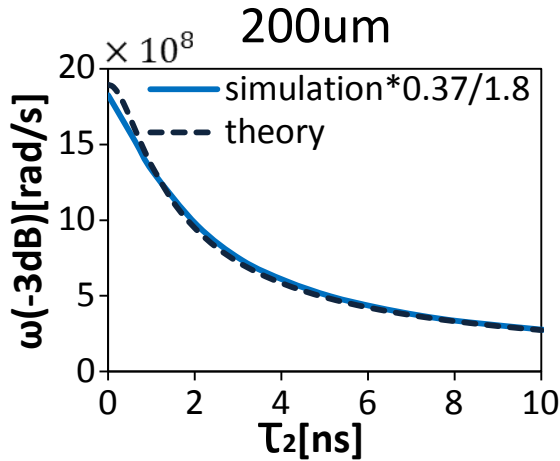
↓ 0.44/1.8倍



解析結果 \cong 理論値

RC,Wのパラメータを変化

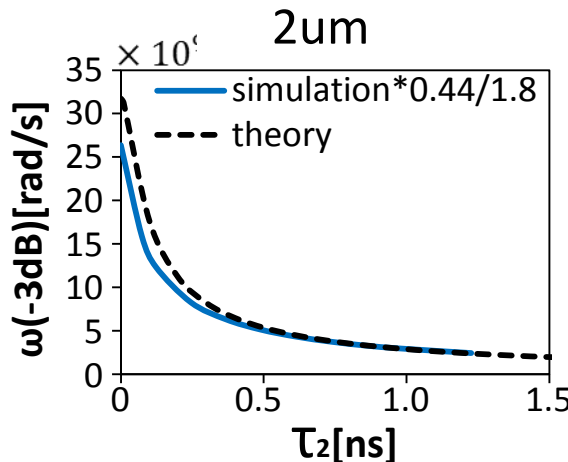
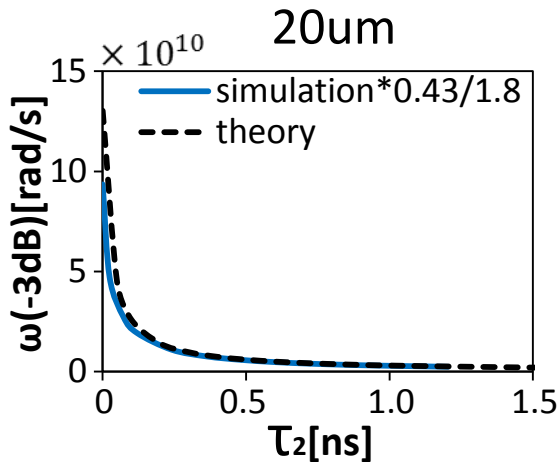
R=50[Ω] C=10[pF]



解析結果 ≅ 理論値



R=50[Ω] C=0.1[pF]



様々なパラメータで
妥当性を検証できた

アウトライン

研究背景・目的

アパーチャタイムの影響の定量化

MOSサンプリング回路での検証

NMOSスイッチの非線形性の考察

まとめ

まとめ

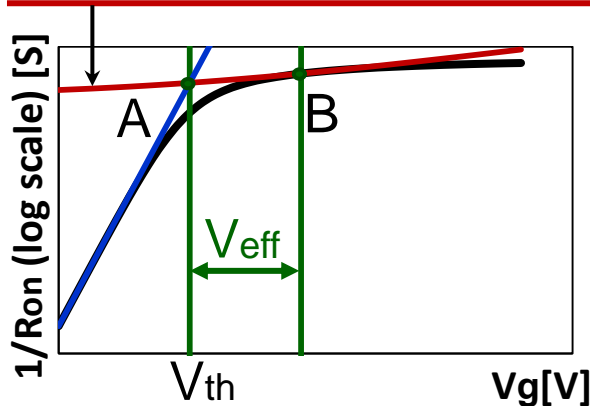
- アパーチャタイムの影響を考慮した伝達関数

$$\frac{V_C}{V_{in}} = \frac{\text{sinc}(\omega\tau_2)}{\text{sinc}(\omega\tau_2) + j\omega\tau_1}$$

($\tau_1 = RC$, $\tau_2 =$ アパーチャタイム)

- 実効アパーチャタイムを考慮するための式

$$y = \left(y_{(th)} - 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot V_{th} \right) e^{\left(\frac{x}{V_{th}} - 1 \right)} + 9 \times 10^{-8} \frac{W}{L} \cdot V_{th} \quad ※$$



- A : 接線と V_{th} との交点
- B : ※式とグラフとの交点

$$\tau_{eff} = \frac{V_{eff}}{V_{dd}} \tau_2$$

アパーチャタイムの影響を考慮した
簡単かつ精度の良い式を導出することが出来た