

ミニマルファブへの期待

ー アナログ集積回路設計・教育の立場から

群馬大学大学院 理工学府 電子情報部門

小林春夫

koba@gunma-u.ac.jp



Kobayashi
Laboratory



群馬大学
GUNMA UNIVERSITY

ミニマルファブへの期待

「塩の辛さ、砂糖の甘さは
学問では教えられない。
なめてみなければ分からない」



松下幸之助氏

ミニマルファブ： アナログ集積回路設計分野の
技術者・学生の育成の観点から期待

発表内容

- アナログ集積回路設計
 - デジタル回路とアナログ回路
 - アナログ回路開発事例
 - SPICEシミュレーション
 - デバイスマデリング
 - レイアウト設計
- ミニマルファブへの期待
- まとめ

発表内容

- アナログ集積回路設計
 - デジタル回路とアナログ回路
 - アナログ回路開発事例
 - SPICEシミュレーション
 - デバイスマデリング
 - レイアウト設計
- ミニマルファブへの期待
- まとめ

デジタル回路とアナログ回路

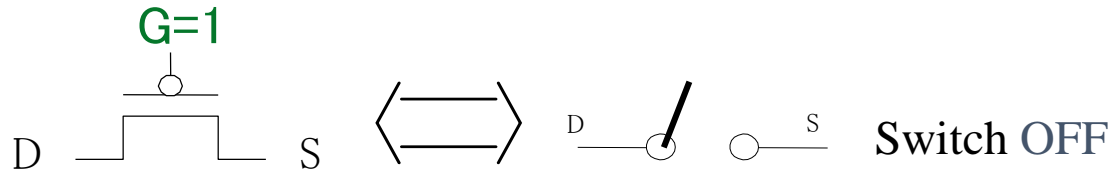
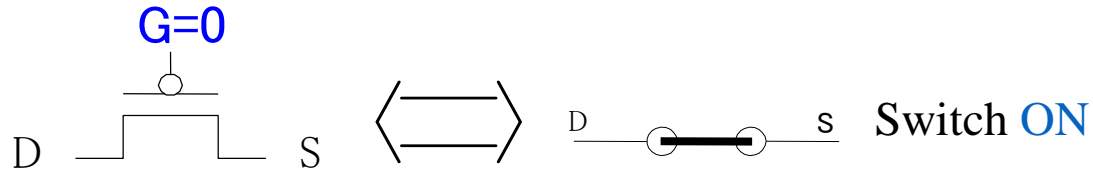
トランジスタの使い方

デジタル回路: スイッチとして使う

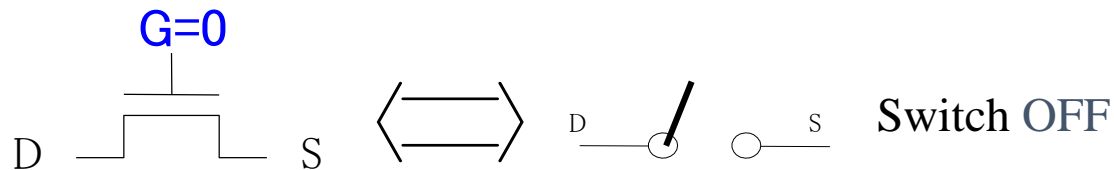
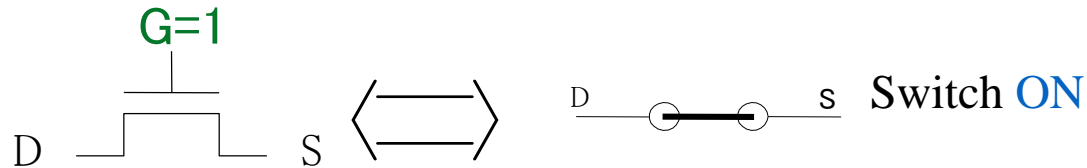
アナログ回路: 信号増幅に使う

PMOS, NMOS スイッチ

(1) PMOS



(2) NMOS

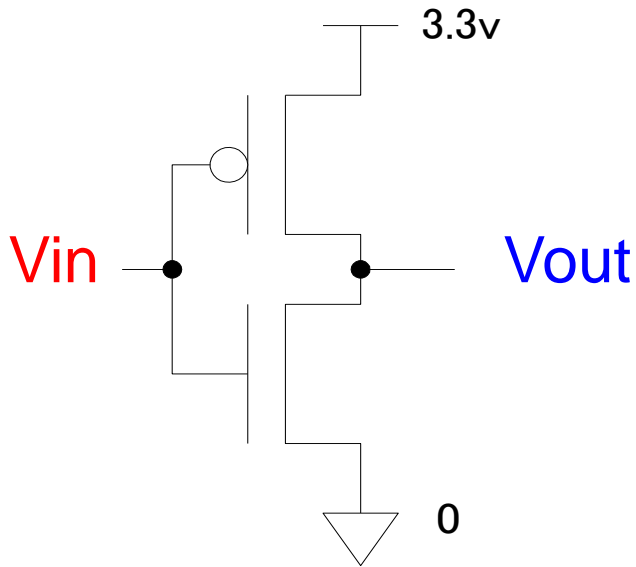


CMOSインバータ回路

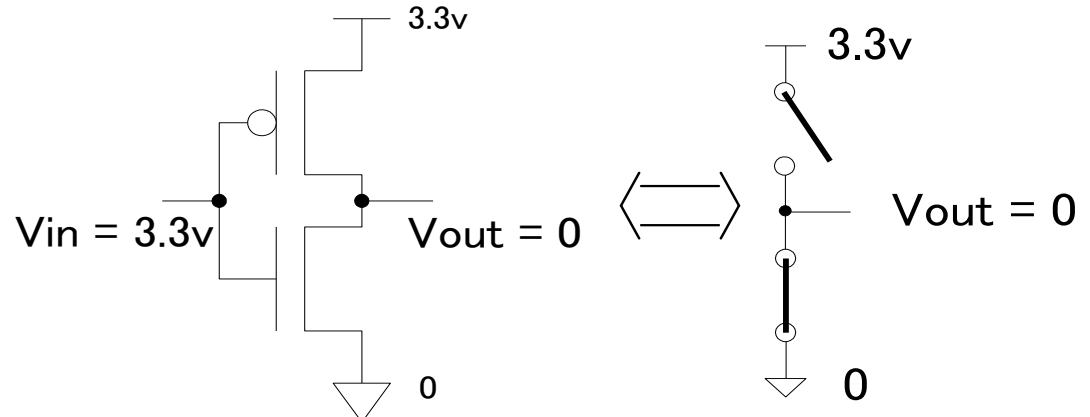
Vin: High \Rightarrow **Vout: Low**

Vin: Low \Rightarrow **Vout: High**

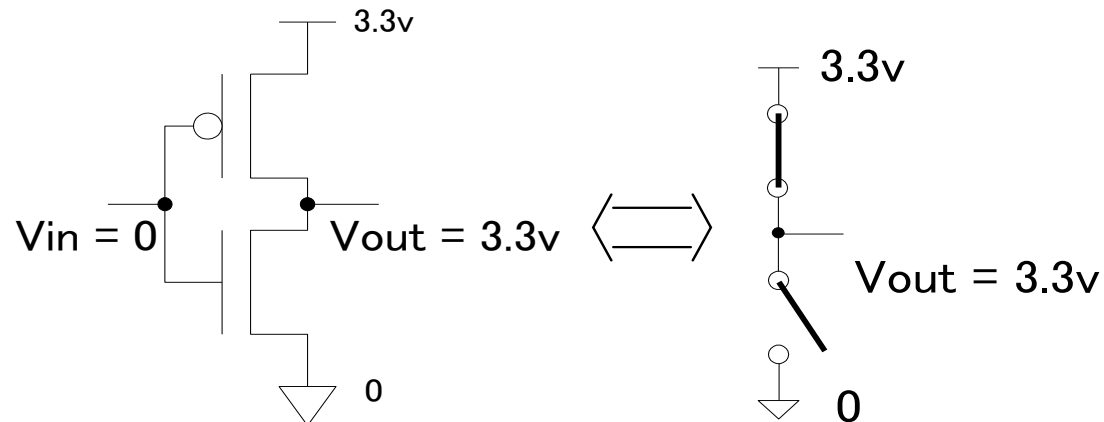
Inverter



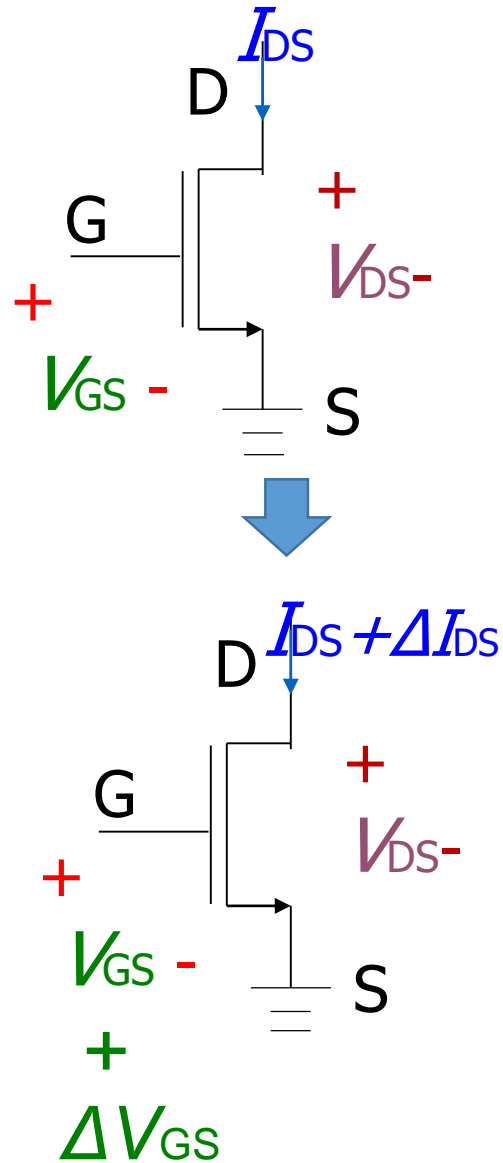
a) when $V_{in} = 1$ (3.3v)



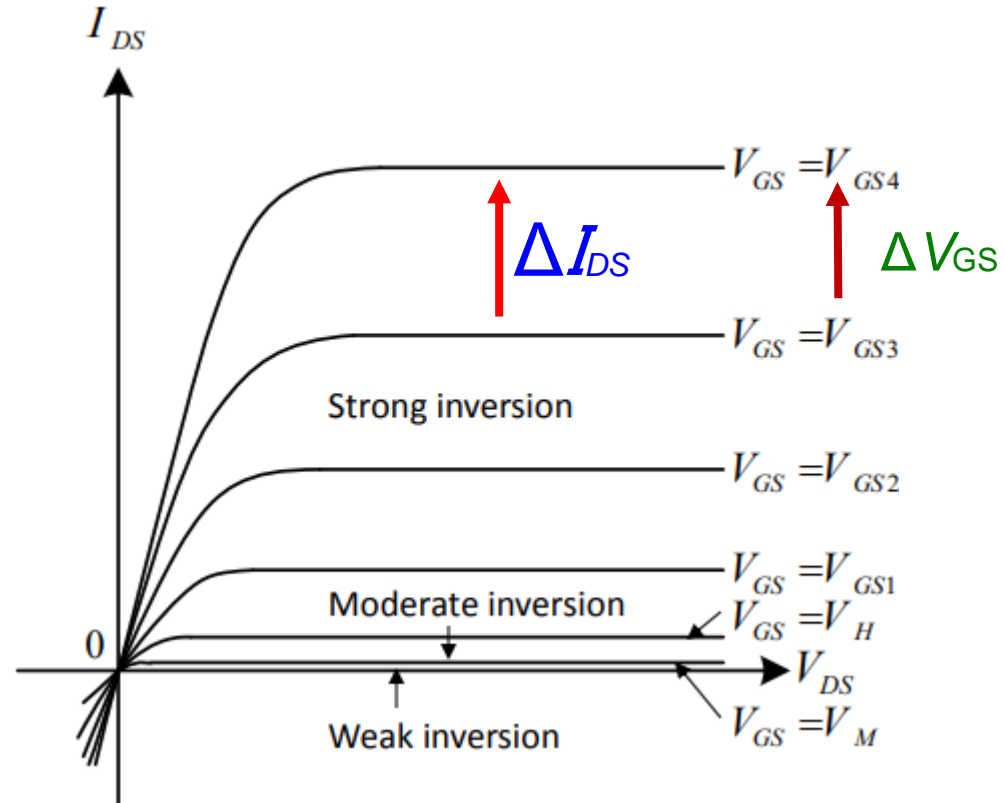
b) when $V_{in} = 0$



アナログ回路 信号増幅



$$\Delta I_{DS} \propto \Delta V_{GS}^2$$



発表内容

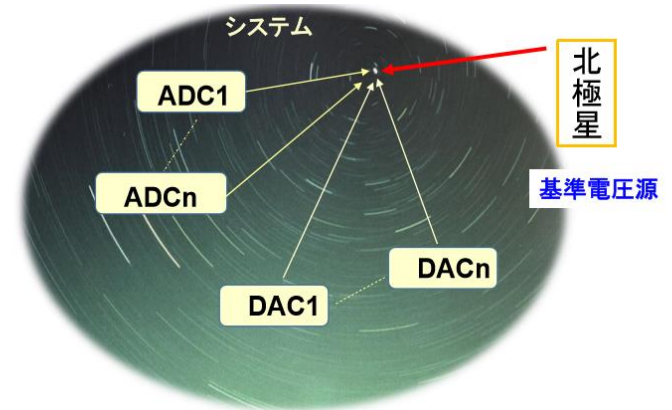
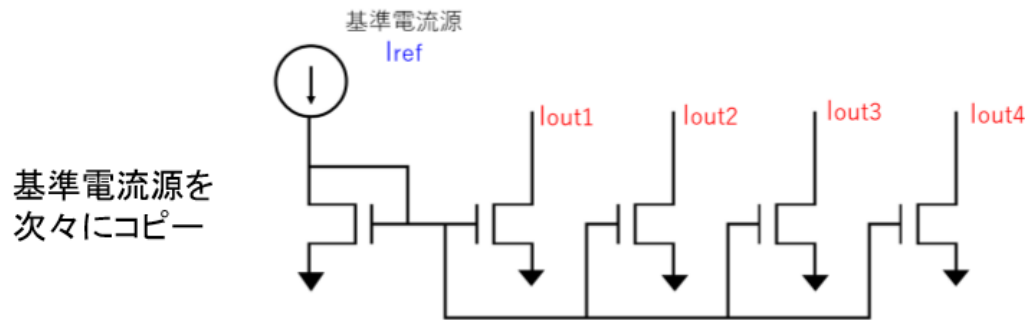
- アナログ集積回路設計
 - デジタル回路とアナログ回路
 - **アナログ回路開発事例**
 - SPICEシミュレーション
 - デバイスマデリング
 - レイアウト設計
- ミニマルファブへの期待
- まとめ

基準電圧源・電流源はアナログ集積回路の北極星

システムの基準電圧源・電流源は、システム精度の基準となるもの。

システム内に複数の基準は設けない。

一つの基準にたいして、システム内の全てのアナログ部精度がトレースする様に設計。



参考 群馬大学 中谷隆之先生 資料

「ものづくり」は「ばらつき」との戦い



「基準」がしっかりしていると「ばらつき」を抑制できる

電源電圧不感 改良永田電流源

オリジナル 永田電流源

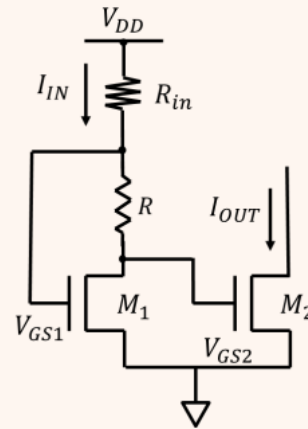
1960年代
日立製作所 永田穰氏
(パイポーラTr)

回路イメージを描く

回路図作成

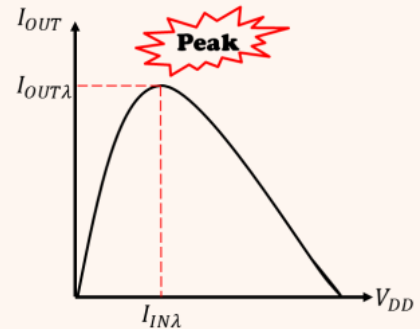
回路シミュレーションで
動作確認・パラメータ値確定

改良 永田電流源

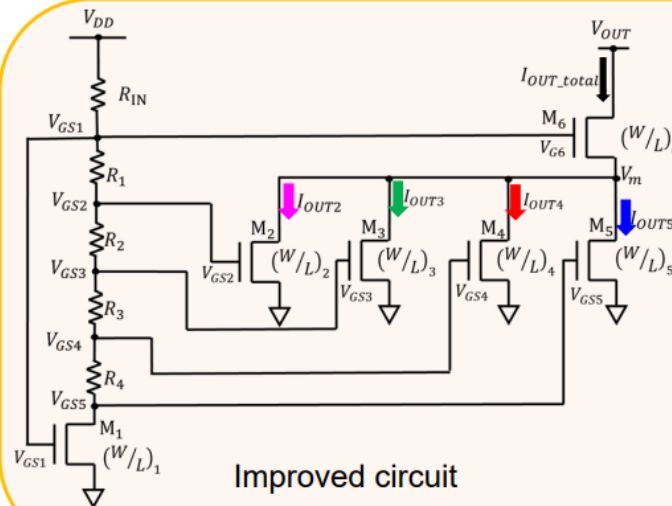


MOS Nagata
Current Mirror Circuit

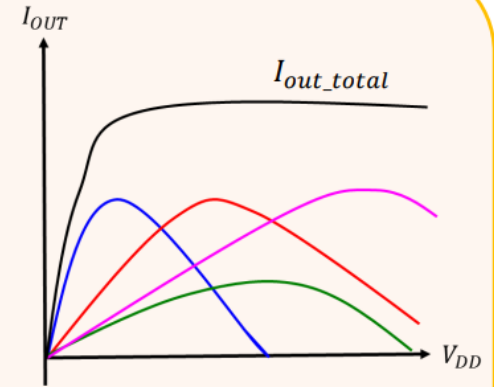
ピーキング電流源



Peaking current
characteristics



Improved circuit



Peaking current characteristics
of improved circuit

改良永田電流源 レイアウト・試作・測定

ASO社による
チップレイアウト

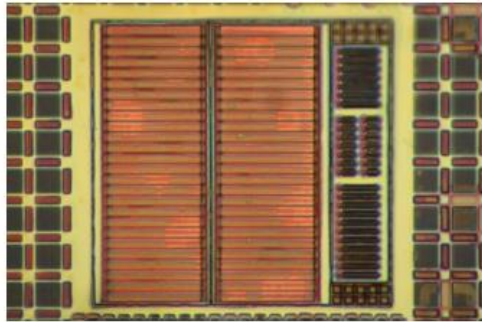
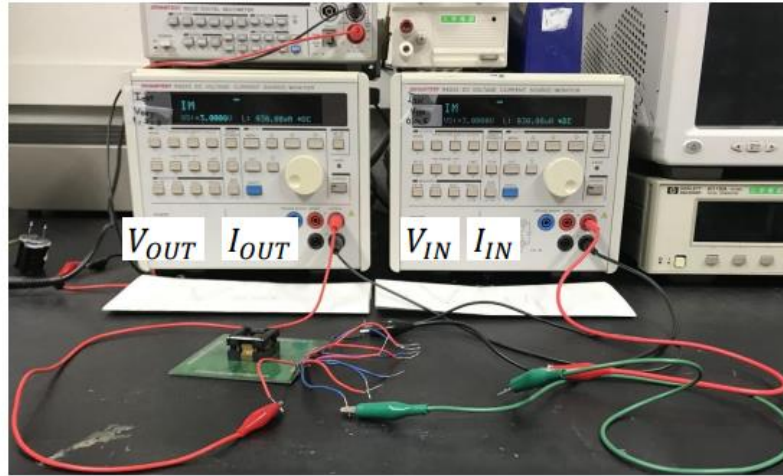
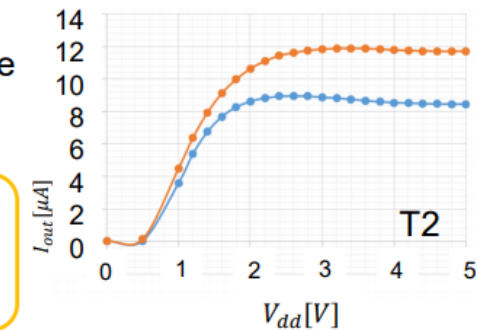
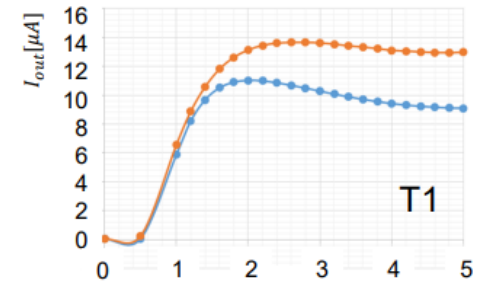


Photo of prototype chip



Measurement environment

- 電源電圧不感
- 温度変動に弱い

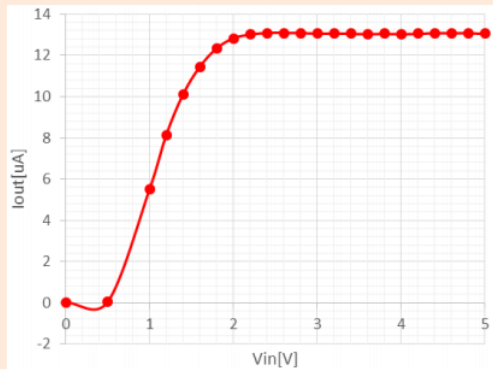


- Room temperature
- High temperature

Use a hair dryer



Measurement result



I_{OUT} in minimum variation

IC設計での温度特性の重要性

自動販売機メーカーの技術者

「**広い範囲の温度で電子回路の特性保証する必要あり。**
学会論文・発表で少しでも温度特性に言及していると
少しは信用する気になる。」

沖縄の炎天下

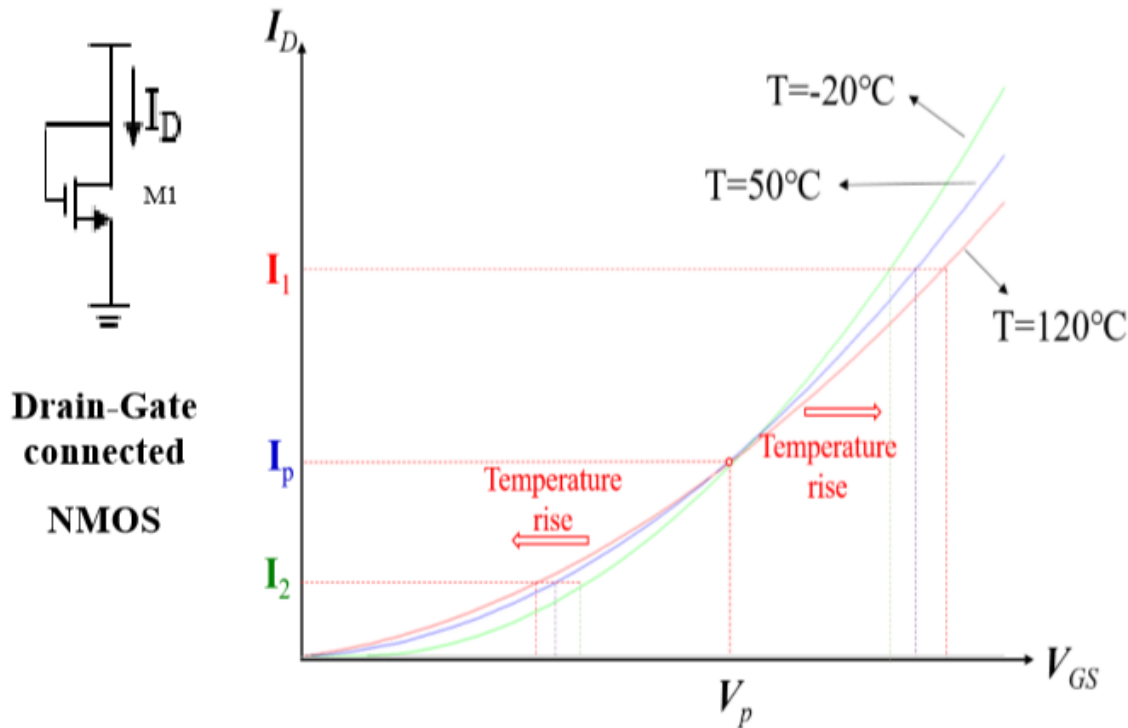


北海道の氷点下



- **信頼性:** ICはジャンクション温度 10°C 上昇で寿命半分
- 車載用ICでも温度特性は重要

MOS 温度特性



アナログ回路



デバイス特性

I_D - V_{GS} characteristic of M1

温度が高くなる



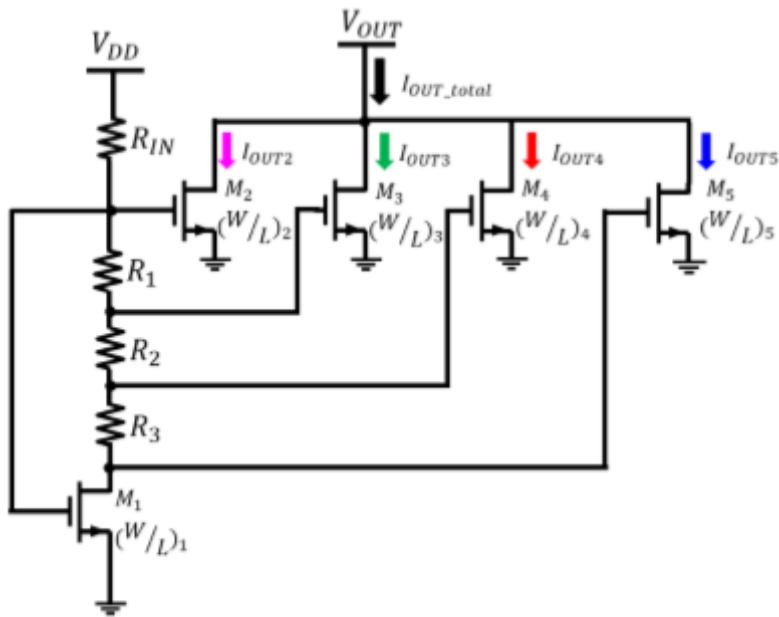
MOS は寝起きが悪くなる

若者の生活習慣 !?

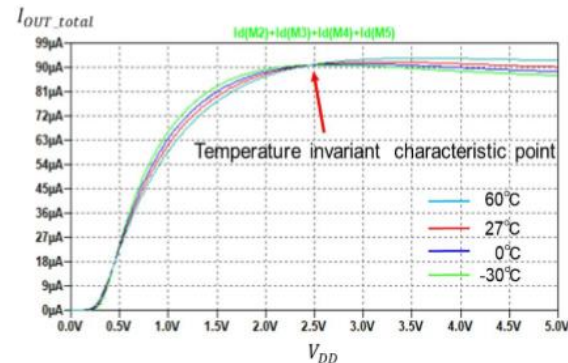
夜: なかなか寝ない (なかなか**オフ**しない)

朝: なかなか起きない (なかなか**オン**しない)

温度にも不感 さらなる改良永田電流源



Proposed circuit



SPICE simulation result

I_{OUT2} and I_{OUT3} have
Negative temperature characteristics



I_{OUT4} and I_{OUT5} have
Positive temperature characteristics



Cancel the temperature characteristics

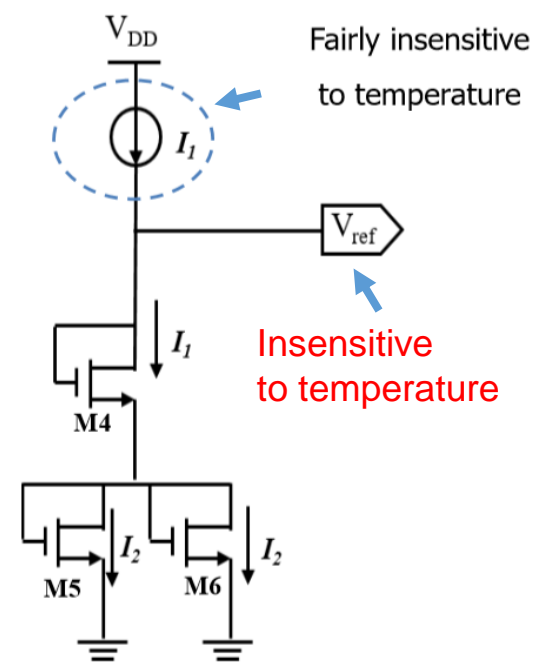
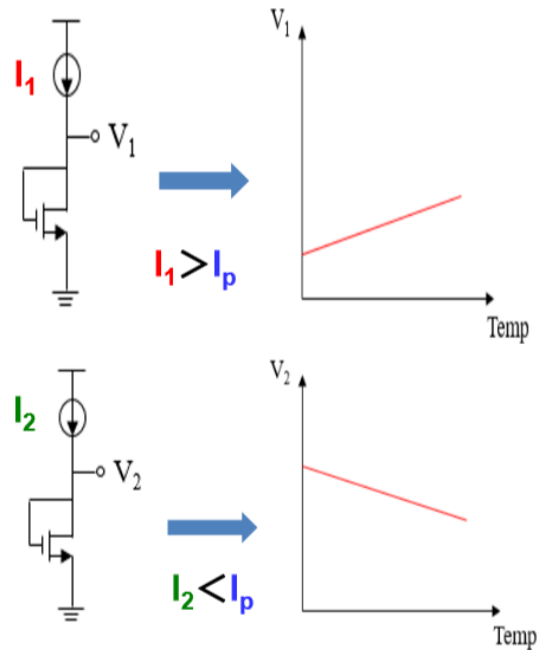
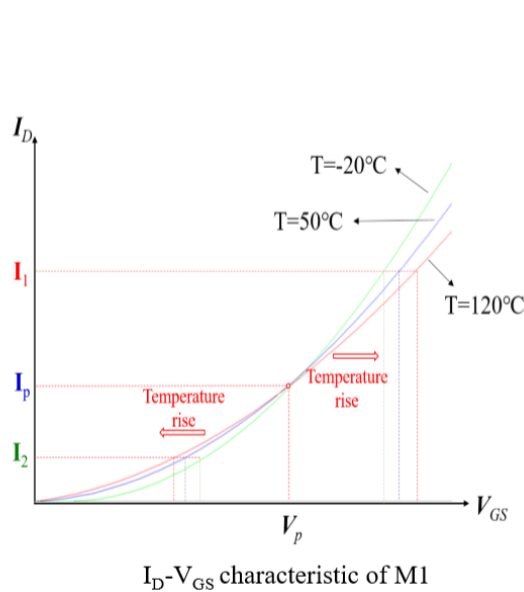
温度特性も回路シミュレーション可能

[2] T. Hosono, N. Kushita, Y. Shibasaki, T. Ida, M. Hirano, N. Tsukiji, A. Kuwana, H. Kobayashi, Y. Moroshima, H. Harakawa, T. Oikawa

"Improved Nagata Current Mirror Insensitive to Temperature as well as Supply Voltage", Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS), Nikko, Japan (Aug. 2019)

温度不感 基準電圧源

Drain-Gate connected NMOS



2019年6月のVLSI Circuit Symp で特殊デバイス使用をした発表有



標準CMOS で 正と負の温度特性を実現できることを発見

[1] L. Sha, A. Kuwana, H. Kobayashi, "Reference Voltage Generation Circuit Insensitive to Temperature", Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS), Nikko, Japan (Aug. 2019)

発表内容

- アナログ集積回路設計
 - デジタル回路とアナログ回路
 - アナログ回路開発事例
 - **SPICEシミュレーション**
 - デバイスマデリング
 - レイアウト設計
- ミニマルファブへの期待
- まとめ

群馬大学
弓仲康史先生
資料より

アナログ集積回路設計の手順

- 仕様を満たす可能性のある構成をイメージを描きながら回路設計
- 回路解析、手計算で概算
- シミュレーションで最終パラメータ値を決定
- レイアウト
- 検証
- チップ試作
- 測定・評価

回路解析の重要性



1) 解析と手計算で、ロングドライブ



2) 数値解析 (MATLAB, Verilog-A) で1パット圏内へ



3) 回路シミュレーションでは軽々カップイン



パター(回路シミュレーション)だけで好スコアが残せますか？

群馬大学客員教授 三木隆博先生

回路シミュレータ SPICEの歴史

SPICE

Simulation **P**rogram with **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis:

カリフォルニア大学バークレー校(UCB)で開発された

トランジスタレベルで回路をシミュレーションする

強力な汎用回路解析プログラム.

- 1960年代に計算エンジン部開発
- 1980年SPICE2G6公開(Cプログラム)
- 1990年以降ベンダーよりGUI環境の異なるEDAツールが多数発表

HSPICE, PSpice, SmartSpice, LTspice etc..

SPICE3のソースコードは公開されている

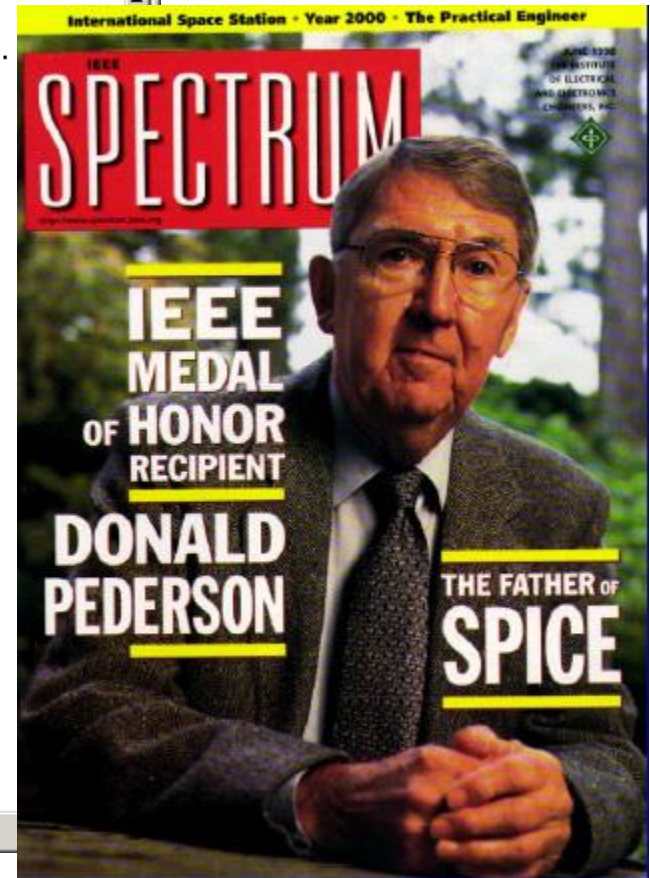
```
tfanal.c - ワードパッド
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ヘルプ(H)
[Icons]
/******
Copyright 1990 Regents of the University of California. All rights reserved.
Author: 1988 Thomas L. Quarles
*****/

/* subroutine to do DC Transfer Function analysis */

#include "spice.h"
#include <stdio.h>
#include "cktdefs.h"
#include "ifsim.h"
#include "util.h"
#include "sperror.h"
#include "smpdefs.h"
#include "tfdefs.h"
#include "suffix.h"

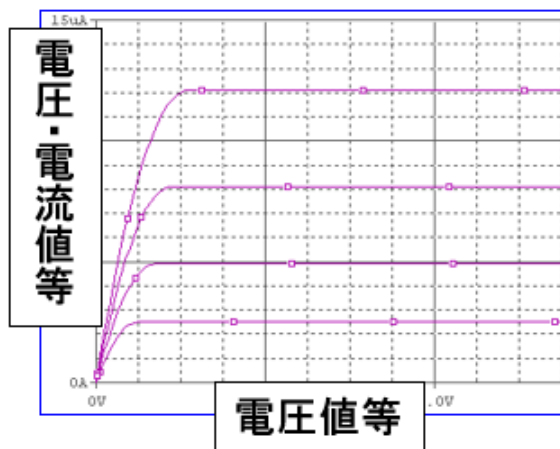
/* ARGSUSED */
int
TFanal(ckt, restart) |
    CKTcircuit *ckt;
    int restart; /* forced restart flag */

ヘルプを表示するには、F1 キーを押してください。
```



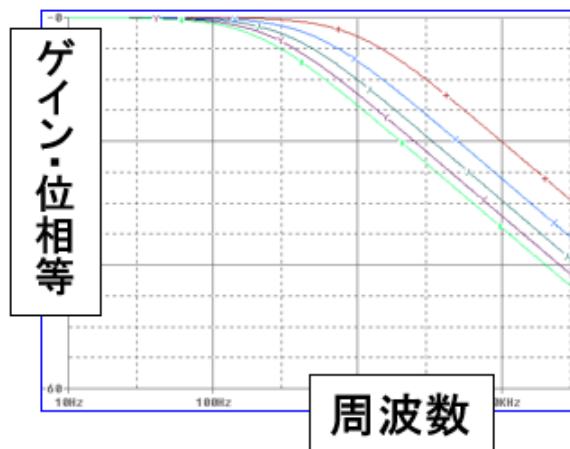
SPICEの基礎

DC解析



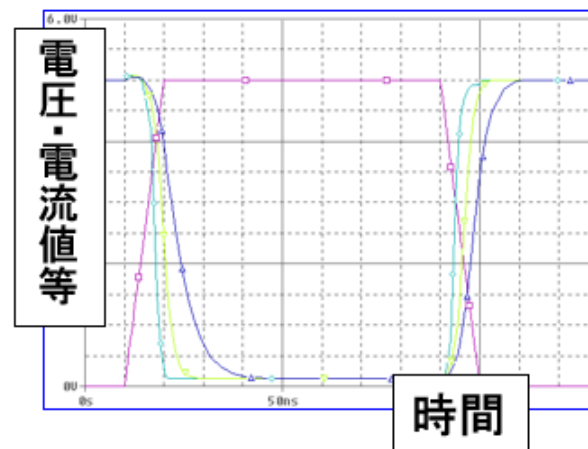
直流電圧/電流を変化させ、
それに対応する出力を解析

AC解析



周波数を変化させ、
それに対応する出力を解析

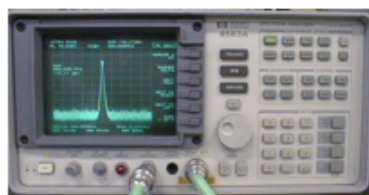
過渡(Transient)解析



時間とともに回路の信号が
変化する様子を解析



電源、カーブトレーサ

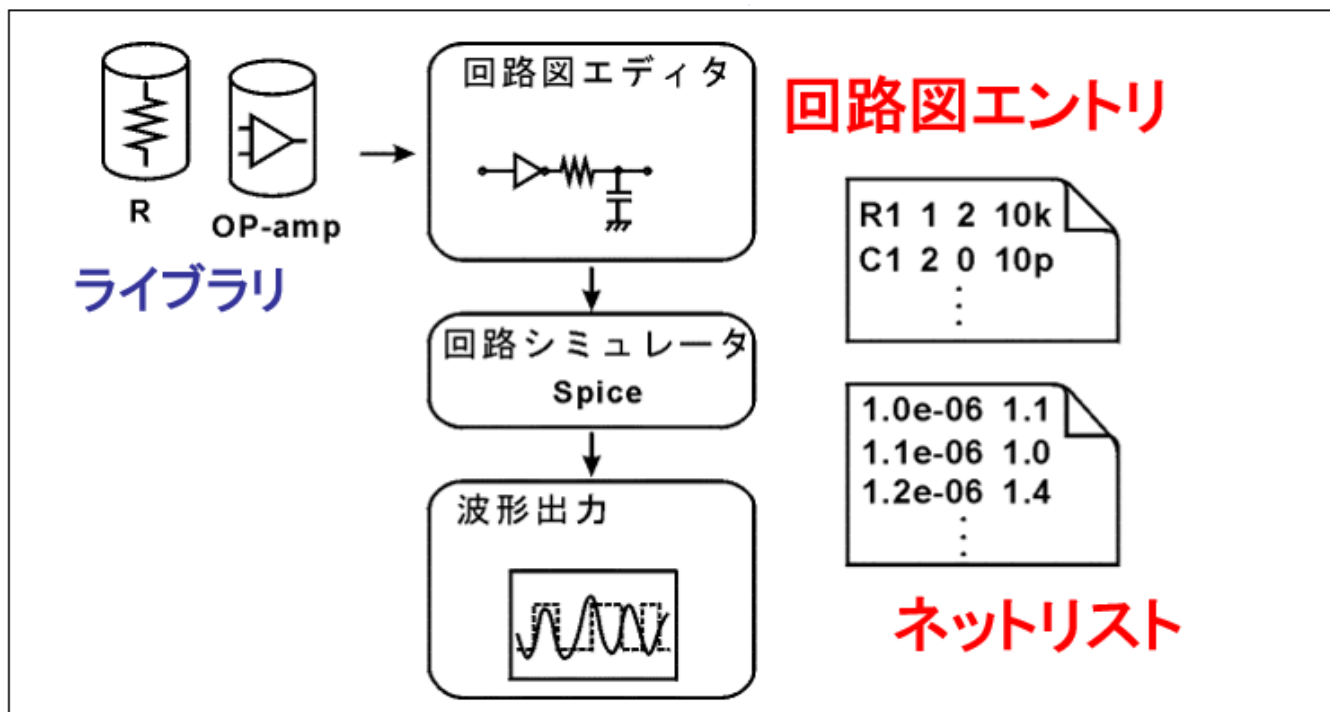


スペクトルアナライザ



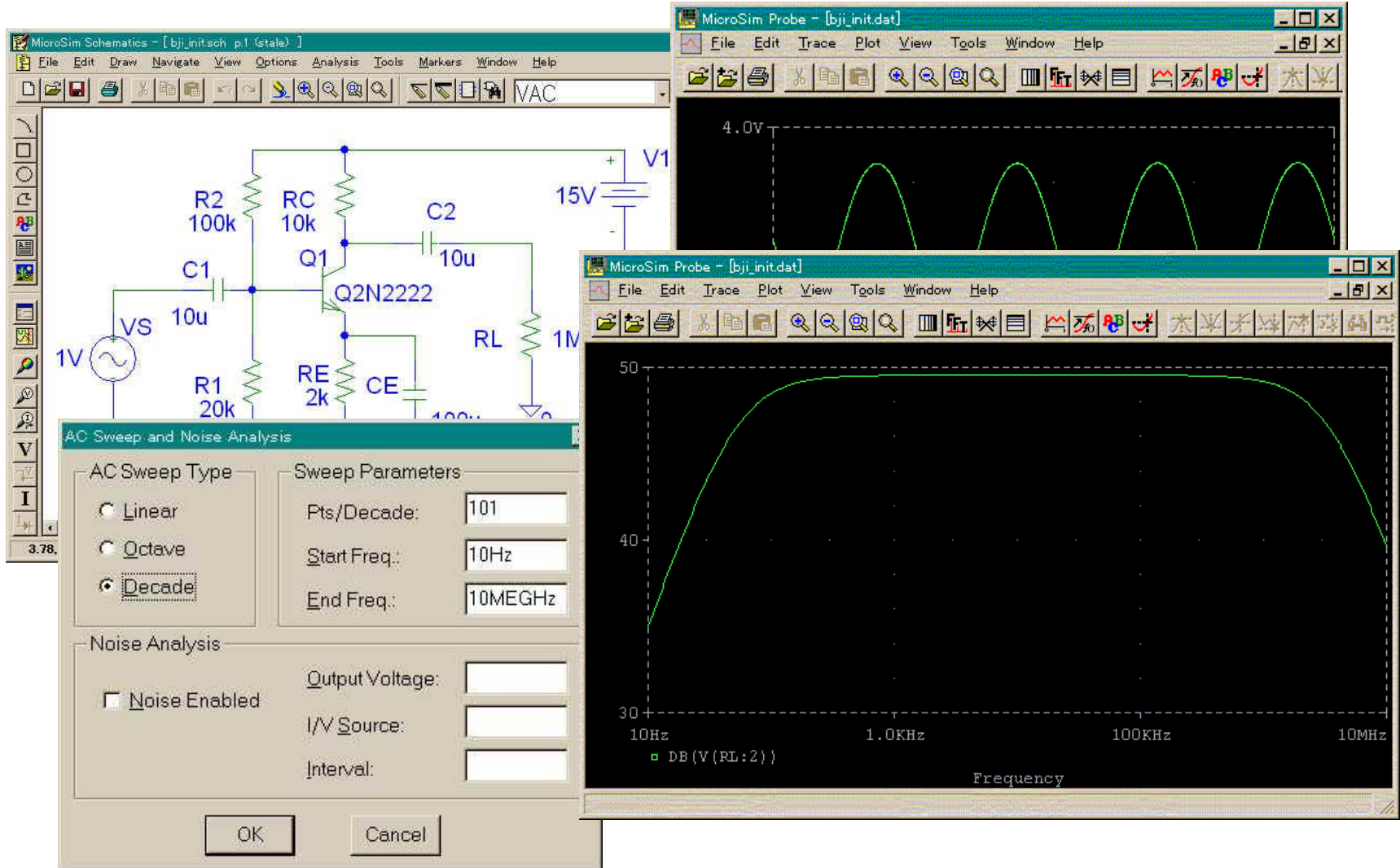
発振器、オシロスコープ

回路シミュレーションの流れ



- ① 回路図入力およびシミュレーション条件設定
回路図エントリツール *Schematics, Gateway, CosmosSE*
- ② シミュレータ本体。ライブラリ、回路接続データ
(ネットリスト)に基づき、回路シミュレーションを行う
回路シミュレータ *PSpice, SmartSpice, HSPICE*
- ③ シミュレーション結果をグラフ表示
波形ビューワ *Probe, SmartView, Cosmos-Scope*

現在のSPICE: GUIベースの入出力



SPICEの解析機能

1. 直流、交流(DC, AC)解析

: 直流、交流信号に対する回路応答

2. 過渡(Transient)解析: 時刻変化に伴う回路応答

3. フーリエ解析: 過渡解析の結果、信号の周波数成分を 求める(信号のひずみの計算)

4. 雑音解析: 抵抗、トランジスタが発生する雑音が 出力にどのように影響するか求める

5. 感度解析: 素子の変動(ばらつき、温度特性)が 出力にどのように影響するかを求める

SPICEの利点・欠点

利点

- 実際に回路を作って動作確認する必要がないため、経済的、設計の能率がよい。
- 素子の値を自由に変更したり、温度変化によるばらつきなどを考慮できる。
- 任意のノード電圧、任意の枝の電流を観測できる。

欠点

- 大規模回路のシミュレーションには膨大な時間を要する。
- 理想モデルによる机上の空論での設計に走りがち。

発表内容

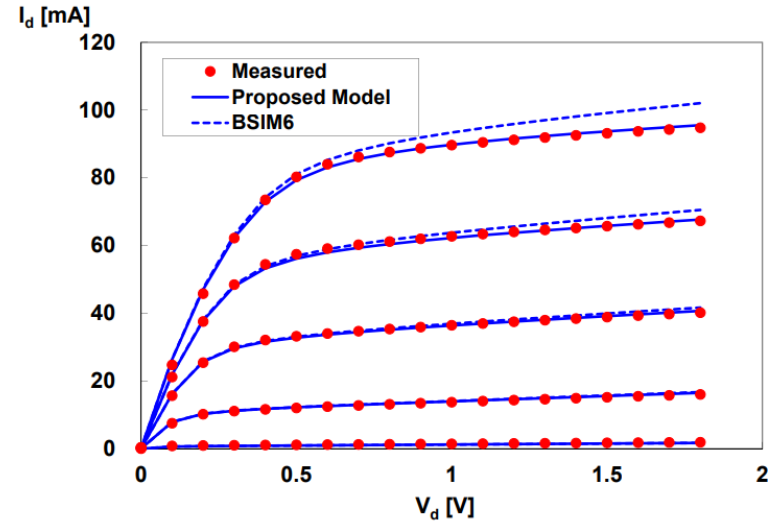
- アナログ集積回路設計
 - デジタル回路とアナログ回路
 - アナログ回路開発事例
 - SPICEシミュレーション
 - デバイスマデリング
 - レイアウト設計
- ミニマルファブへの期待
- まとめ

デバイスモデリング

- トランジスタの基本電流式
 ➡ 実測と合わない

$$I_d = K' \frac{W}{L} \left[(V_{gs} - V_t) V_{ds} - \frac{1}{2} V_{ds}^2 \right] \quad \text{線形領域}$$

$$I_d = \frac{1}{2} K' \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds}) \quad \text{飽和領域}$$



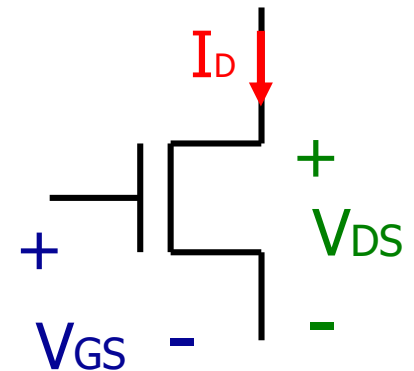
より複雑なモデリング式

物理的パラメータ
数学的パラメータ

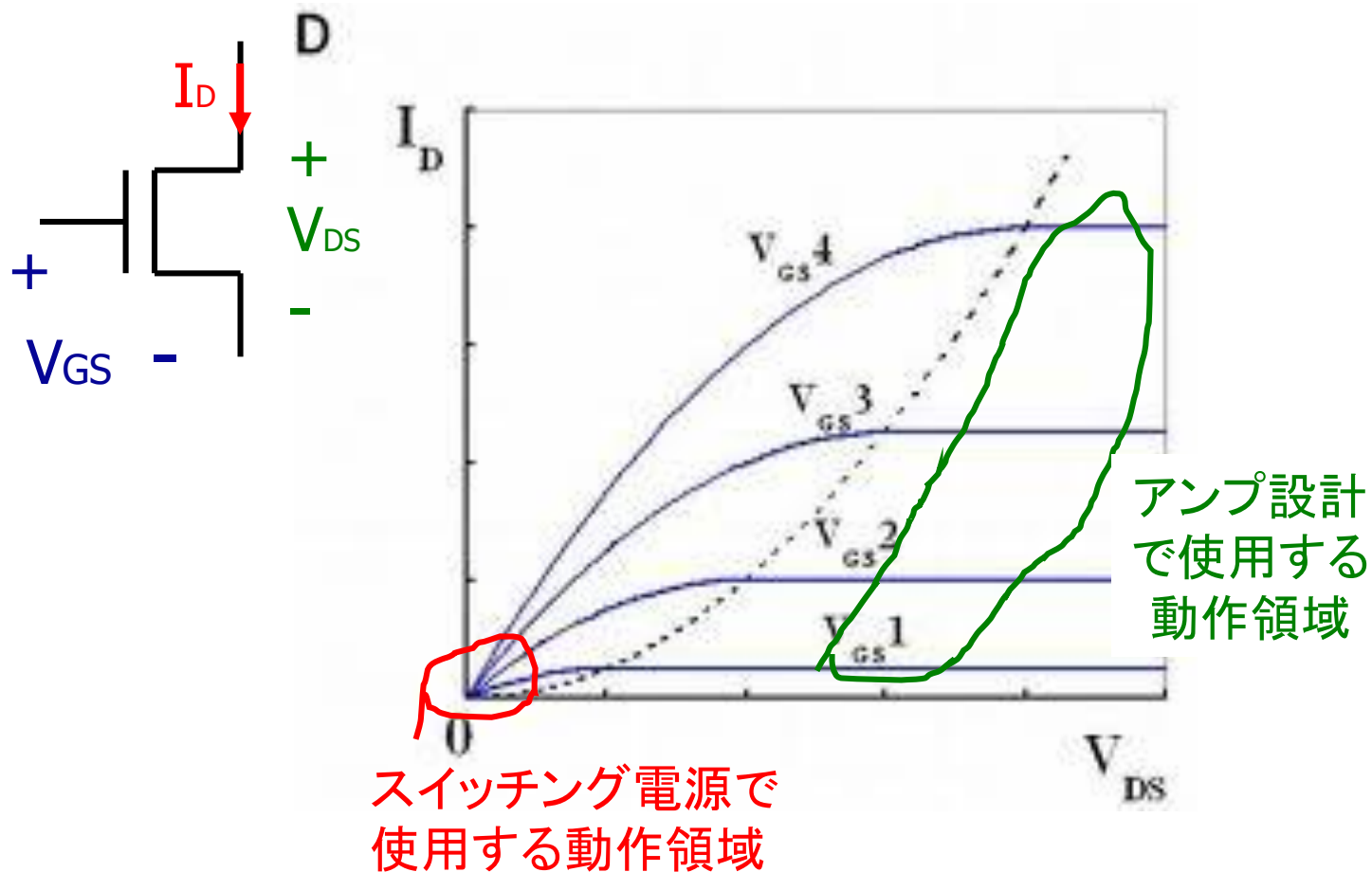
複雑な式 ➡ 精度よし 計算時間がかかる

- モデリング式のパラメータ値を実デバイスから抽出する
- 様々なデバイスのモデリング開発

(元)群馬大学客員教授
青木均先生



使用する回路の動作領域で「合わせる」



RF CMOS のモデリング:

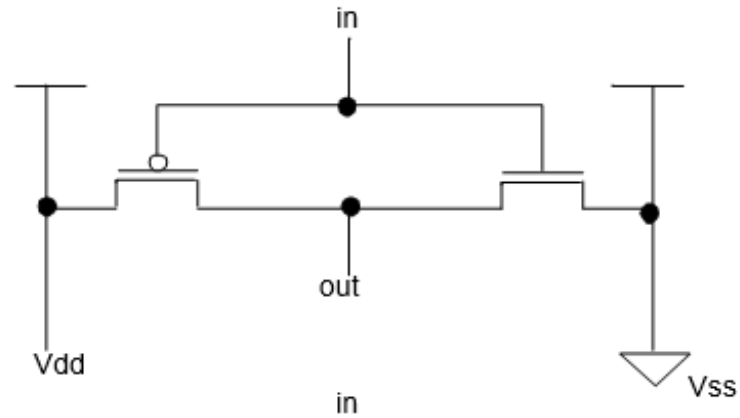
高周波までシミュレーションと実測を合わせるため
小さな寄生R, C要素、短時間ダイナミクスも考慮

発表内容

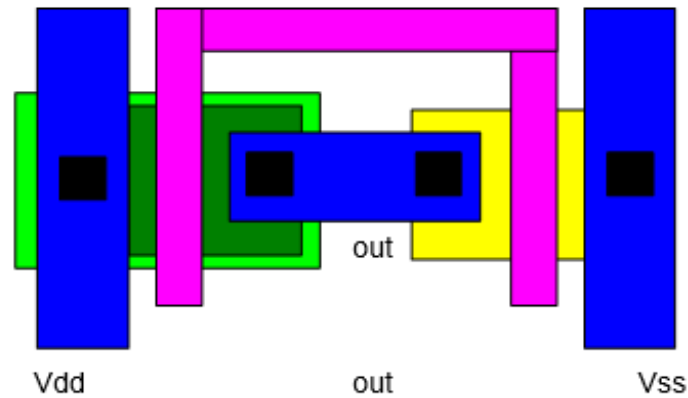
- アナログ集積回路設計
 - デジタル回路とアナログ回路
 - アナログ回路開発事例
 - SPICEシミュレーション
 - デバイスマデリング
 - レイアウト設計
- ミニマルファブへの期待
- まとめ

CMOSインバータ回路のレイアウト

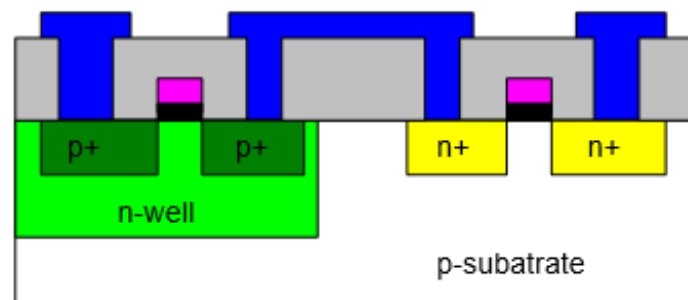
CMOS
インバータ
回路図



レイアウト図

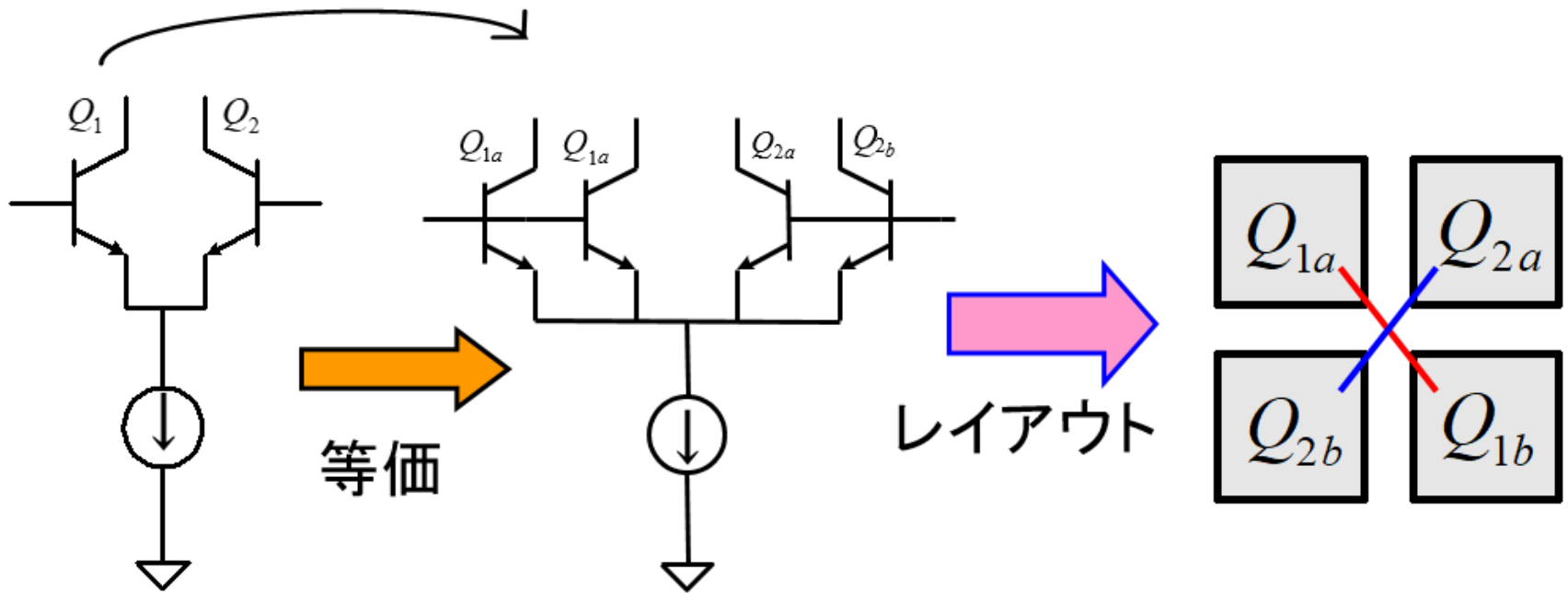


断面図



トランジスタ・ペアのコモンセントロイド配置

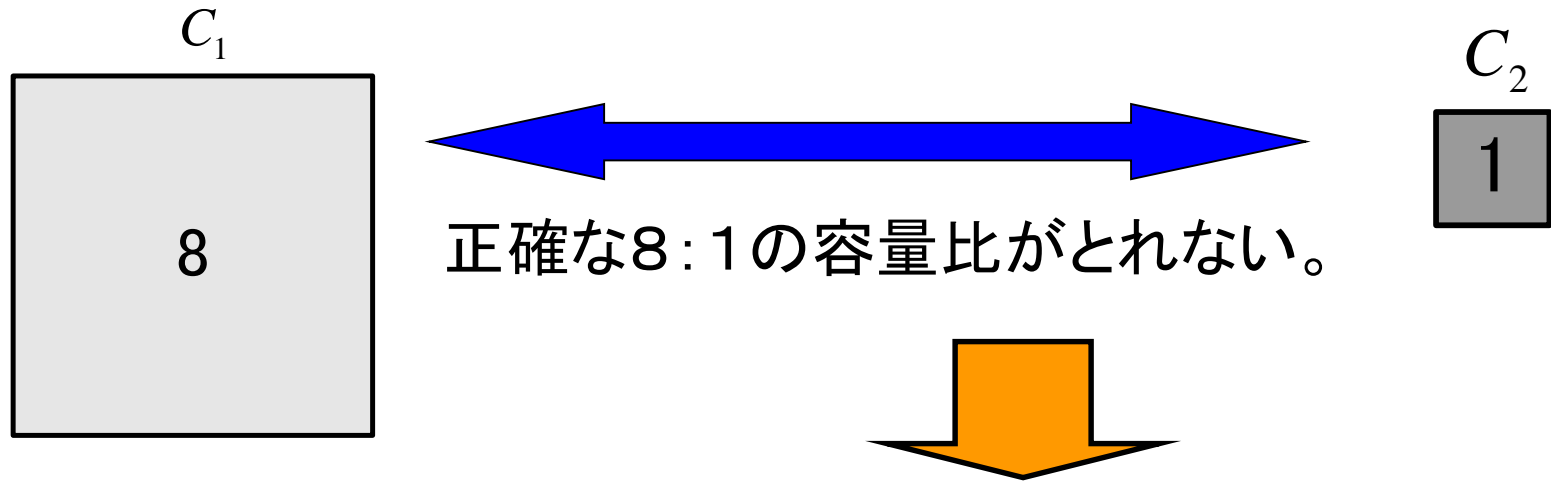
面積半分のエミッタ2つに分解



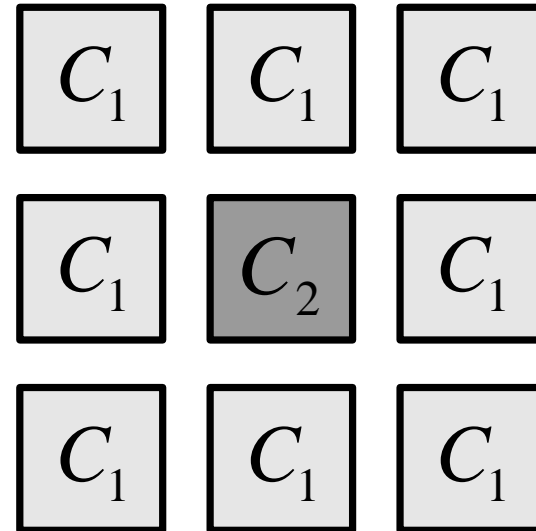
Q1, Q2 のトランジスタ特性
- 理想的には「同じ」
- 現実には「ミスマッチあり」

- MOS はバイポーラに比べ ミスマッチ大

容量のマッチングをとるためのレイアウト



- 同じ容量を8個並列接続で“端”の影響(フリンジ容量)を除去
- 重心を同じくする
コモン centroid法で“傾斜”の影響を除去

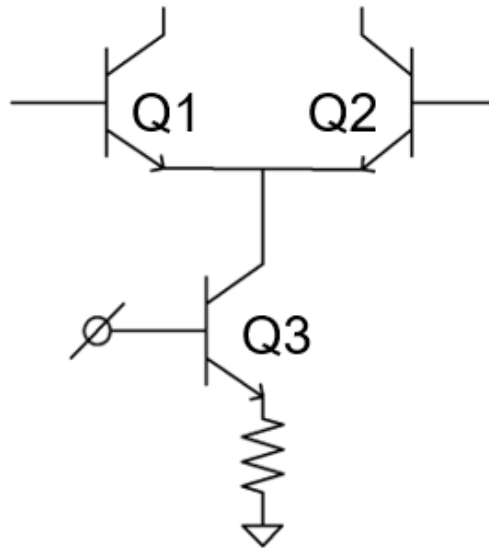


発熱の影響の考慮

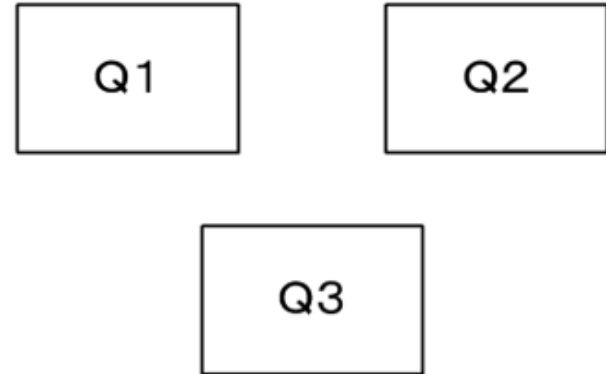
バイアス電流大のバイポーラトランジスタ等
パワー系デバイスや
センサ回路等高精度アナログ回路の
レイアウト設計には「熱の影響」を
考慮する必要あり。

発熱による温度上昇まで考慮した
回路シミュレータの市販のものはない。

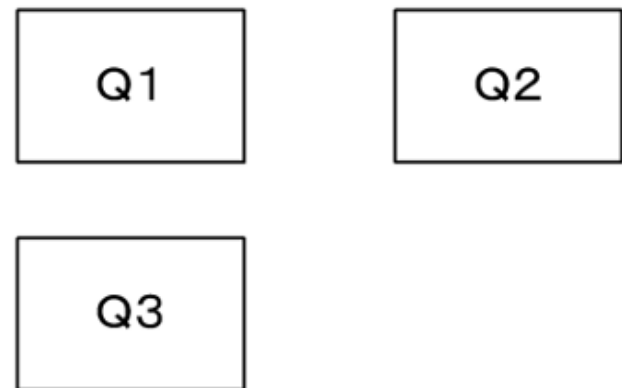
例：バイポーラ
差動アンプの
レイアウト



熱バランスを考慮したレイアウト



熱バランスを考慮しないレイアウト



アナログ回路のレイアウト

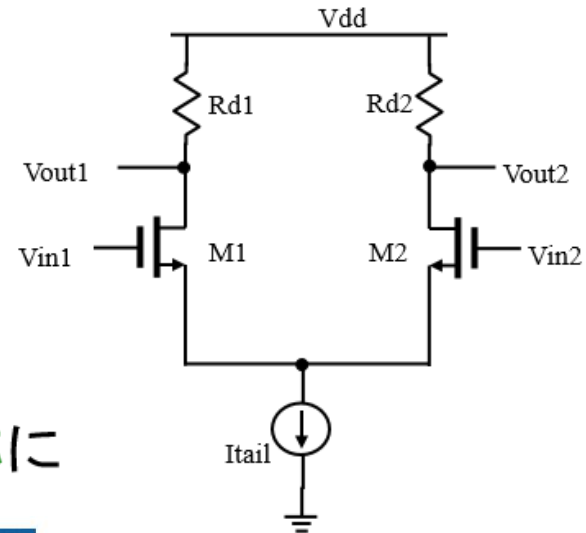
- 見た目が美しいのは 良いレイアウト

- 「美しいレイアウト」とは何か

その一つとして

アナログ回路は差動回路が多用

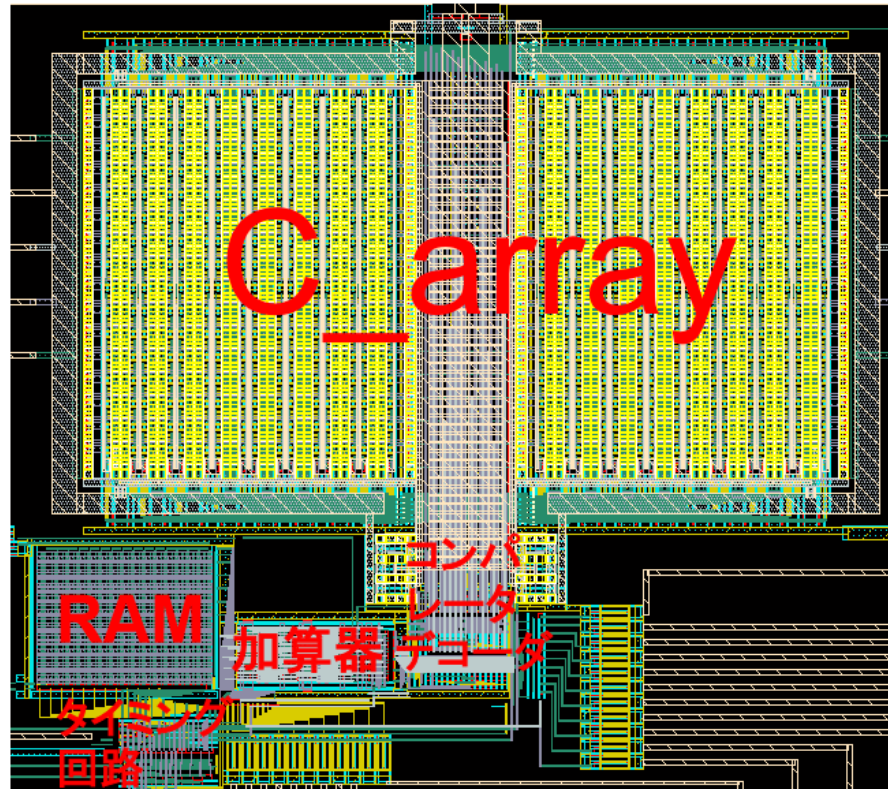
回路が対称 ⇒ レイアウトも対称に



差動回路
左右対称



対称なレイアウト（逐次比較近似ADC）



- アナログ集積回路のレイアウト:
 - 完全自動化は難しい
 - 技術者によるレイアウトの方がコンパクト化（高速・高周波化、低コスト化）ミスマッチ小（高精度化） できる

UCLA Royce Hall

左右対称ではない



発表内容

- アナログ集積回路設計
 - デジタル回路とアナログ回路
 - アナログ回路開発事例
 - SPICEシミュレーション
 - デバイスマデリング
 - レイアウト設計
- ミニマルファブへの期待
- まとめ

主観を交えて

LSI技術の普及は回路技術者育成を阻害 !?

1990年代半ば アナログ集積回路設計の講演会
谷本洋先生 (現)北見工大名誉教授 (当時)東芝

- LSI設計では失敗は許されない (コスト、時間のため)
- 動作し性能を出したアナログ回路
 - ➡ レイアウトを含め 次のLSIでもそのまま使用
- 回路改良のチャレンジなし
 - ➡ やがて、その回路設計内容も伝承されなくなる

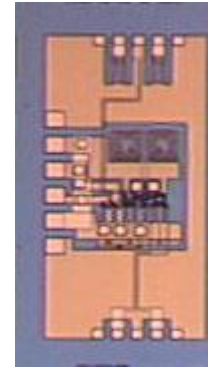
ミニマルファブ: 回路設計者・研究者がチャレンジしやすい

回路設計者とデバイス・プロセス技術

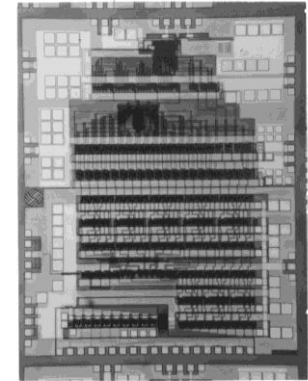
- 回路設計者がデバイス・プロセス技術者と仕事をすると得るところが大きい

- 25年前の講演者の経験

- 田中貴金属さんからの電話を受ける財テク？
金配線, プラチナ使用



GaAs HBT
トラックホールド
回路



SiGe HBT
7bit ADC

- プロセス開発と並行して(安定していないプロセスで)回路設計

➡ 差動回路を多用した

ミニマルファブ:

回路技術者がデバイス・プロセス技術に触れられる

回路とデバイスの協調

ミニマルファブでは
回路の工夫とともにデバイス・プロセスの工夫が可



特長のあるデバイス

「標準CMOS によるデジタルチップ」以外の
少量生産デバイスで競争力を持てる可能性

例:

- センサ内蔵アナログ回路
- 耐放射線回路
- 化合物半導体パワーデバイス
- そのドライバ回路

...

ミニマルファブ: 技術者育成の観点から
ファンダリ大手のシャトルとは異なる

セキュリティの確保

ハードウェア トロージャン(トロイの木馬)

ハードウェア ウィルス

設計、製造、流通過程で埋め込まれる

特定コードを受けると起動
システムに打撃を与える



軍用に加え
車載でも重要

ミニマルファブ: セキュリティが確保しやすい

様々な分野の研究者育成

群馬大学
桑名杏奈先生

数値流体力学分野



産総研ミニマルファブGr
との共同研究連携の可能性

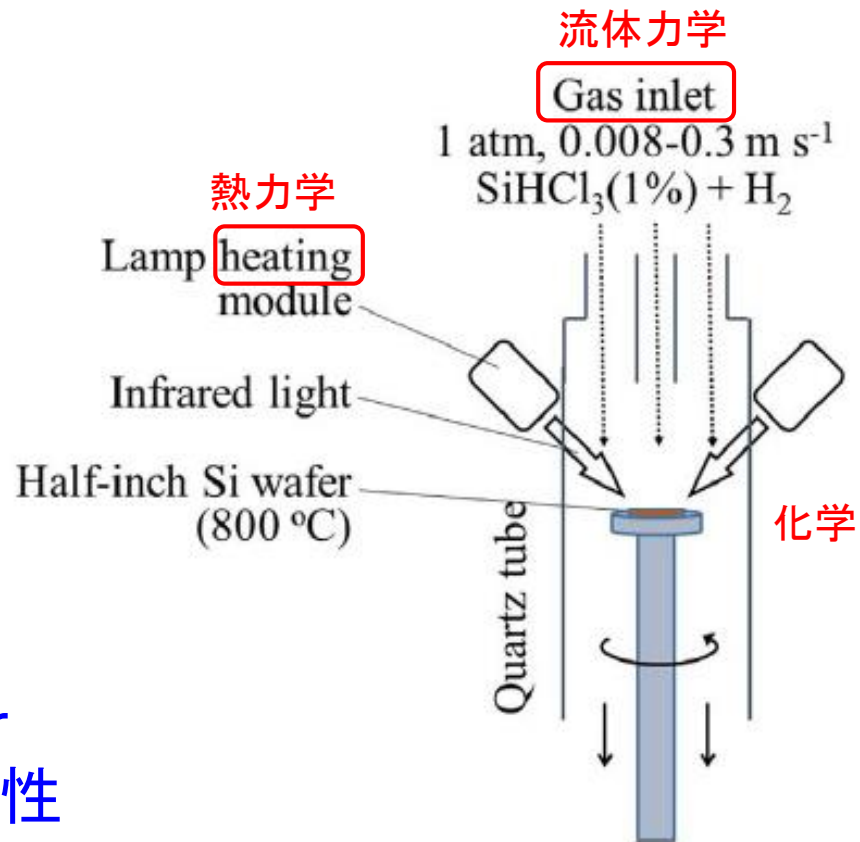


Fig. 1. Chemical vapor deposition reactor for Minimal Fab.

[画像出典]

Ayami Yamada, Ning Li, Miya Matsuo, Mitsuko Muroi, Hitoshi Habuka, Yuuki Ishid, Shin-Ichi Ikeda, Shiro Hara
"Transport phenomena in a slim vertical atmospheric pressure chemical vapor deposition reactor utilizing natural convection"
Materials Science in Semiconductor Processing 71 (2017) 348–351

収支の概算が重要

物理学者 エンリコ・フェルミ

シカゴにピアノの調律師は何人いるのか？

- 1: シカゴの人口は300万人
- 2: シカゴでは、1世帯あたりの人数が平均3人
- 3: 10世帯に1台の割合でピアノを保有している世帯
- 4: ピアノ1台の調律は平均して1年に1回
- 5: 調律師が1日に調律するピアノの台数は3つ
- 6: 週休二日とし、調律師は年間に約250日働く

- 1: シカゴの世帯数は、 $(300万/3)=100万$ 世帯
- 2: シカゴでのピアノの総数は、 $(100万/10)=10万台$
- 3: ピアノの調律は、年間に10万件

(1人の)ピアノの調律師は1年間に $250 \times 3=750$ 台を調律

調律師の人数は $10万/750=130$ 人程度

ミニマルファブ：半導体設備投資と回収の概算がしやすい!?



イタリアの物理学者
「概算」の達人

発表内容

- アナログ集積回路設計
 - デジタル回路とアナログ回路
 - アナログ回路開発事例
 - SPICEシミュレーション
 - デバイスマデリング
 - レイアウト設計
- ミニマルファブへの期待
- まとめ

日本人と集積回路技術

「縮み志向の日本人」(李 御寧)

大木	➡	盆栽
大自然	➡	庭園
うちわ	➡	扇子
傘	➡	折畳傘
文章	➡	短歌・俳句
電子回路システム	➡	集積回路



「なにもなにも ちひさきものはみなうつくし」
(清少納言 枕草子)

ミニマルファブ: 「ちひさきもの」

「ミニマルファブへの期待」 まとめ

40年前 将棋アマチュア強豪

「難局で どう指したらよいかわからないときは
自分に合った手を指せ。

受けが好きな人は守りの手を、
攻めが好きな人は攻めの手を指せ。」



現在の日本の半導体産業 難局か!?

日本人に合ったやり方として ミニマルファブに期待

「彼を知り己れを知れば、百戦百勝す。

彼を知るは難きに以て易く、己を知るは易きに以て難し」

国学者 佐藤一斎 (言志晩録)