

# 半導体デバイスモデリング技術 前半

2020年7月7日  
群馬大学 非常勤講師  
岡部裕志郎

# ■ 自己紹介

\* 群大OBです。

1985年： 電子工学科卒

1987年： 修了(プラズマ実験)

1991年： 名古屋大学大学院博士後期課程修了

・1991～2012年： 三洋電機(株)で半導体デバイスモデリングを担当。

・ 2016年～2019年： 群馬大学知的財産活用センター勤務

・現在、ニプロ医工(株)にて英語業務に従事  
(群馬県館林市松原二丁目19番64号)

# ■ 概要

- 回路設計技術向上のため、SPICEモデルの概要に触れる。
- ダイオード、バイポーラトランジスタ、MOSトランジスタ、抵抗、そして容量デバイスの各モデルを説明する。
- 製造工程のバラツキを表すモデル(コーナー、統計)、そして $1/f$ ノイズモデルも扱う。

# ■内容

## § 1. 回路設計のために

## § 2. 概要

回路シミュレーション、SPICE、モデル、CMC

## § 3. SPICEモデルとは

物理現象の数式化

## § 4. 各素子のモデル1

4-1. ダイオード

4-2. バイポーラトランジスタ

# § 1. 回路設計のために

# ■ 回路設計のために

## 設計方法

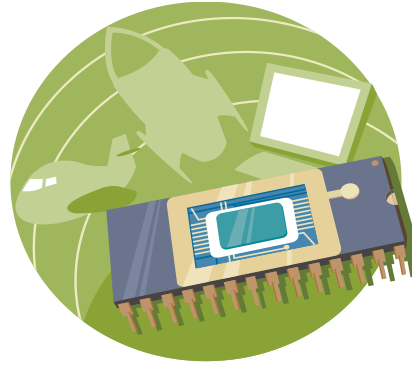
デバイス特性のデータを基に  
最適な回路条件になるように  
素子を組み合わせる。

設計→試作→評価

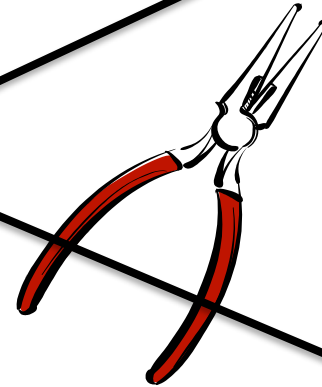
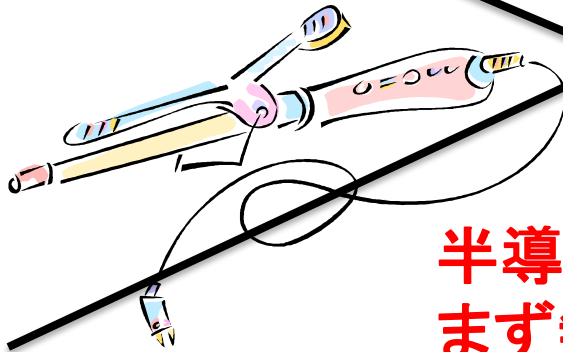
# ■ 回路設計のために

## 設計環境

回路設計用ソフトウェア、ハードウェア一式のこと



**実物を手作業で試作**



**半導体では、  
まず無い！**

## § 2. 概要

- 回路シミュレーション
- SPICE
- モデル
- CMC (Compact Model Coalition)



# ■ シミュレーション

実物の動作を模倣

別な類似システム

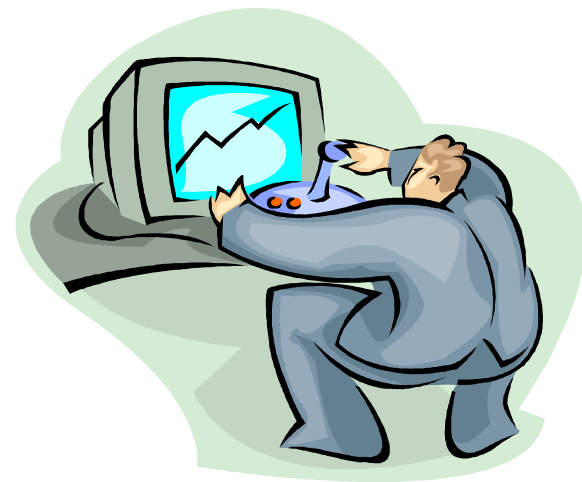


例)

巨大なエネルギーによる破壊現象

× 危険、実現不可能

◎ コンピュータ上で再現



# 回路シミュレーションと試作の特徴

	シミュレーション	試作
時間	1時間	TAT 30日
変更	簡単	無理
費用	数十万円	1千万円/回
教育	よく考える	低い
条件	無限	限定
領域	限定	無限
誤差	やや大きい	なし
準備	1ヶ月	即実行

注) 数字は目安

# ■ 回路シミュレーションの利点

## 1) 短時間

- 実物作製(TAT): 30~60日
- シミュレーション: 数時間

## 2) 変更が容易

## 3) 安価

- 試作: 1回で数千万円
- シミュレーション: ライセンス料+電気代程度

## 4) 考えること

- シミュレーション結果を考えることで、回路設計の技術が向上する。

## 5) 条件は無限に設定可

# ■ 回路シミュレーションの弱い点

## 1) 万全でない

モデルが用意できない場合がある。

## 2) 精度

実物に合わない場合がある。

(現状の最高技術だが、完璧ではない)

## 3) 準備期間

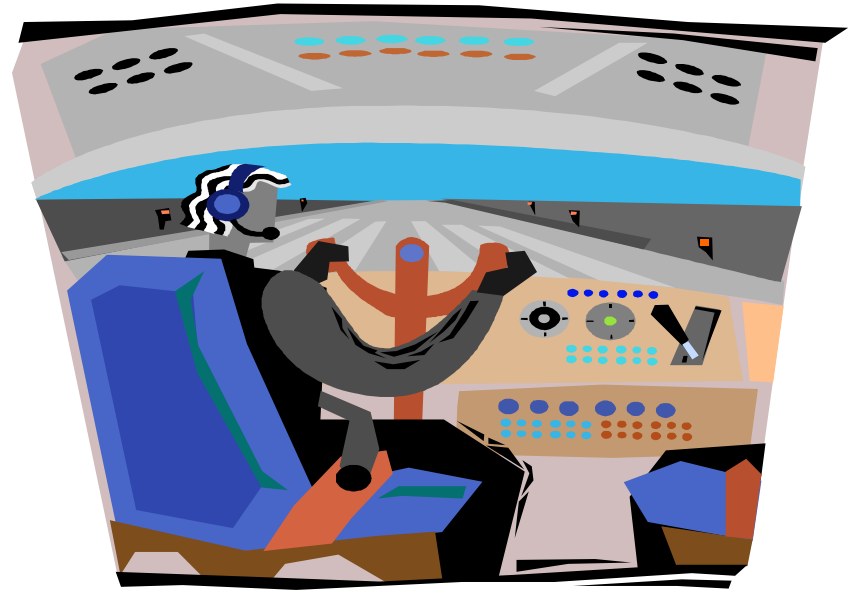
シミュレーションできる環境の準備期間が必要。

# ■ シミュレータ

結果を体感させるためのシステムのこと

例)

航空シミュレータ、音響シミュレータ



# ■ SPICE その1

## SPICE

Simulation Program with Integrated Circuit

Emphasisの略。IC用の回路シミュレータ。

- ・1975年に米UCLA大, Berkely校で開発。
- ・アナログプログラム。
- ・各回路素子の情報をもとにシミュレーションする。
- ・直流(DC)解析、交流(AC)解析、および過渡解析。

spice

香辛料



# ■ SPICE その2

表.1 各社のSPICE

社名	シミュレータ名
ケーデンス	Spectre
シノプシス	HSPICE
SimCAD	SmartSpice
アジレント	ADS
メンター・グラフィック	ELDO
アナログ・デバイス	LTspice

全て米国製

# ■モデル

ある現象を数式を使って表現したもの

例)  $Y = aX + b$

半導体モデル

SPICE → 回路設計用

TCAD → プロセス/デバイス開発用



# ■ 確認\_\_シミュレーションの特徴

## 1. 利点

短時間

Q.1

安価

考えること

任意の条件

## 2. 弱い点

万全でない

Q.2

準備期間

# § 3. SPICEモデルとは

物理現象の数式化

# ■ SPICEモデルとは？

トランジスタ、抵抗、コンデンサなど対象回路を構成する素子レベルの回路情報。

例)

- モデル式:  $Y = aX + b$
- 係数 $a, b$ を変えることで普遍的に使える。
- 係数 $a, b$ : SPICEパラメータ

# ■ SPICEモデル

表.1 各デバイスの代表的なモデル式

デバイス	モデル式
CMOS	BSIM3、4、EKV2 (最新はBSIM6、HiSIM2)
高耐圧MOS、DMOS	HiSIM_HV
バイポーラ	Spice Gummel-Poon、 Mextram504T
抵抗	シミュレータに依存 (温度、電圧特性モデル)
容量	↑

\* 赤字は、世界標準モデル

# ■ CMC (Compact Model Coalition)

## 概要

- ・モデル式の世界標準を決める組織
- ・1996年8月発足
- ・会議は年に4回開催  
(2020年Q2、6/16-19、U.S.A (Virtual))
- ・発足前(標準化が無い時代)の問題点
  - ①シミュレータにより使えるモデル式が異なる
  - ②シミュレータへの導入が遅い、または導入されない
  - ③各社で個別モデルを作り、技術が限定された

## 世界標準化の利点

- ①各シミュレータで使える
- ②シミュレータ間の差が無い
- ③多種多様に使われるためモデル式の改良が容易になる
- ④更に高性能なモデルを作れる

# ■ 世界標準化の例

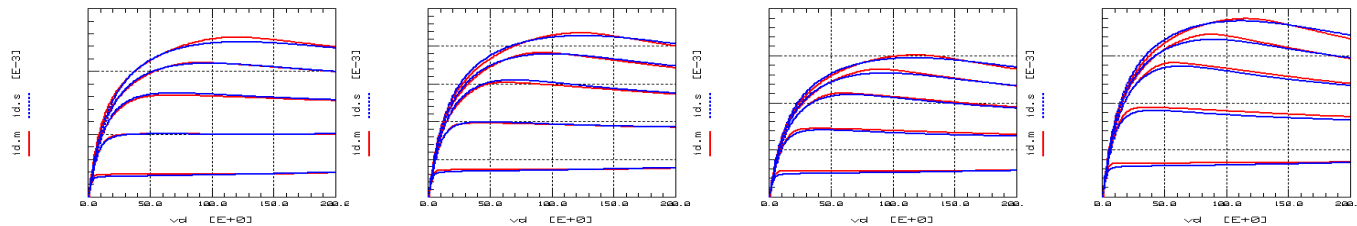
例) 250V Nch\_LDMOSのモデル検討

Gate Width



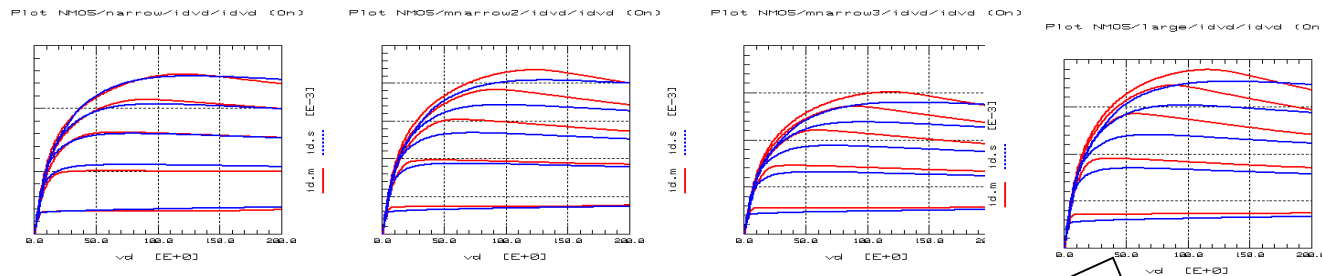
■ HiSIM\_HV(HiSIM-LDMOS-100)

Vgs=4V,6V,8V,10V,12V



実測.: —  
Sim.: —

■ MM20 & MM31 Sub-circuit with W scaling rules



Width-scaling is not accurate enough even after adding W-scaling rule

# ■講義の目的

## 回路シミュレーションを効果的に使うため

SPICEモデルを知らなくても回路設計はできる。

しかし、

回路設計の出来る人は、ある程度、SPICEモデルも理解している。

# ■ 講義の意味

## SPICEモデルの理解

\* シミュレーション結果が妥当かの判断ができる。  
モデルの理解 = 実デバイスの理解。

モデルが分からない、気にしない人

異常に気付かない



試作



不良品の山



倒産！



# ■ 講義内容の概略

## \* SPICEモデルのみに限定

- デバイスの物理現象の説明をする。  
デバイスの詳細は今までの講義を参照。
- シミュレータ(SPICE)の使い方  
習うより慣れろ。
- 回路設計の方法  
後続く講義で理解。

# ■勘違い

## ・シミュレーション

### 設計者の予測を確認するもの

設計者はシミュレーション結果が妥当なものか判断する必要がある。

## ・回路シミュレータの役割

意図した特性、性能を実現し得るかの**確認**、プロセスパラメータの変動等による特性の変動**評価**など。

## ・大切なこと

自分で結果の予測を行い、それとシミュレーション結果が異なった場合は**すぐに原因を考えてみる**。 →  
バイポーラ、MOS等、能動素子が主因

# ■ SPICEパラメータ の例

## • MOSモデル

(BSIM3Version 3.2モデル式より)

- simulator lang=spectre
- model MN bsim3v3 ¥
- type=n ¥
- version=3.22 ¥
- mobmod=1 ¥
- tnom=27 ¥
- tox=7e-09 ¥
- xj=1e-07 ¥
- nch=1.7e17 ¥
- nsub=6.2e16 ¥
- rsh=100 ¥
- u0=500 ¥
- vth0=0.9276 ¥
- k1=0.53 ¥
- k2=-0.0186 ¥
- k3=100 ¥
- k3b=0 ¥

アルファベットと  
数字の羅列？！

各パラメータは  
物理的な意味を持つ  
(ここでは省略)。

# ■ SPICEモデル式の例

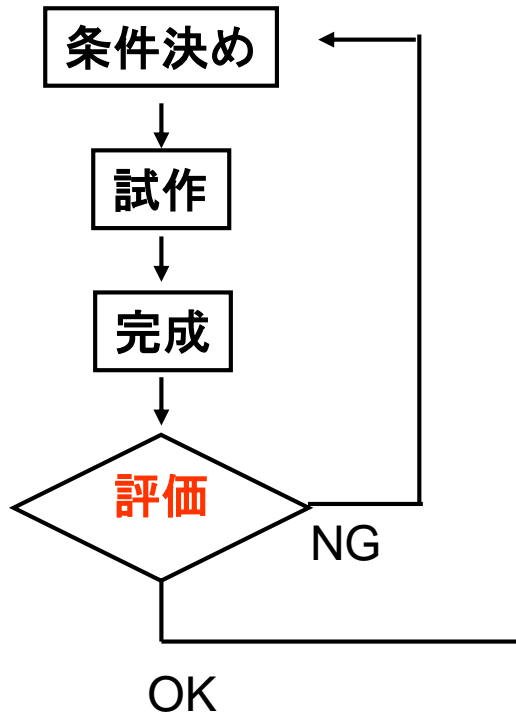
\* 斜字はSPICEパラメータ

$$\begin{aligned} V_{th} = & V_{th0} + K_1 \left[ \sqrt{\phi_s - V_{bs}} - \sqrt{\phi_s} \right] - K_2 V_{bs} \\ & + K_1 \left[ \sqrt{1 + \frac{NLx}{L} \sqrt{\frac{\phi_s}{\phi_s - V_{bs}}}} - 1 \right] \sqrt{\phi_s} \\ & + \left[ K_3 + K_{3B} V_{bs} \right] \frac{T_{ox}}{W + W_0} \phi_s \\ & - \theta_{th}(L)(V_{bi} - \phi_s) \end{aligned}$$

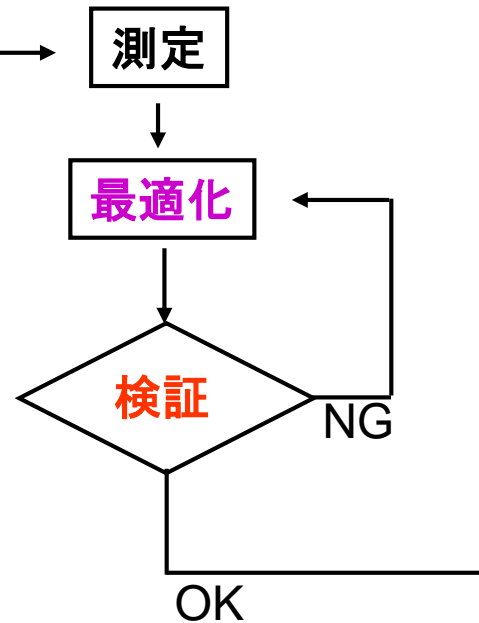
MOSTランジスタのしきい値電圧 $V_{th}$ の式  
(BSIM3 Version 3.2モデル式)

# ■モデル抽出

プロセス構築



モデル抽出\*

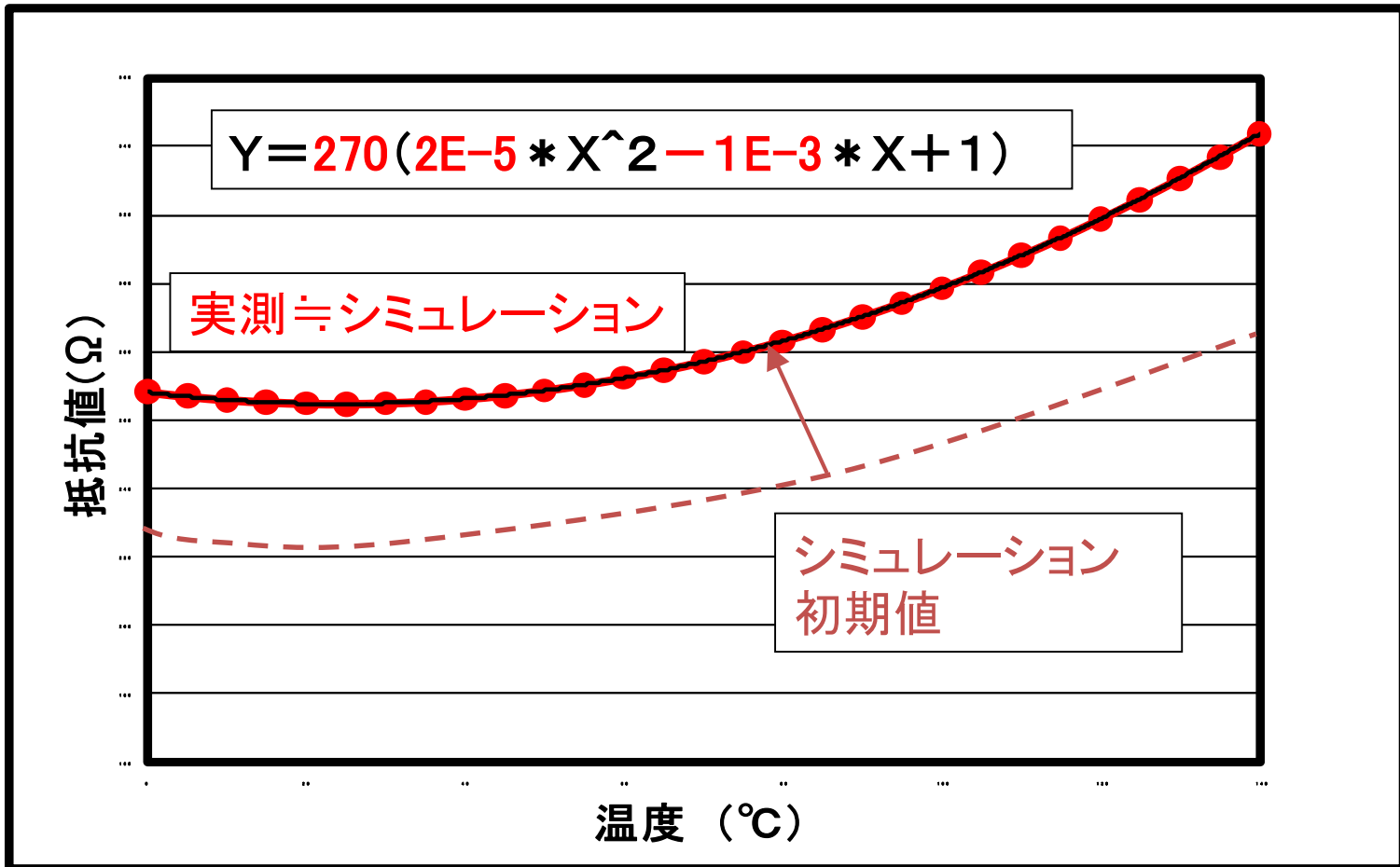


回路設計



\* モデル抽出 = SPICEパラメータ値を決める

# ■ 抽出の例

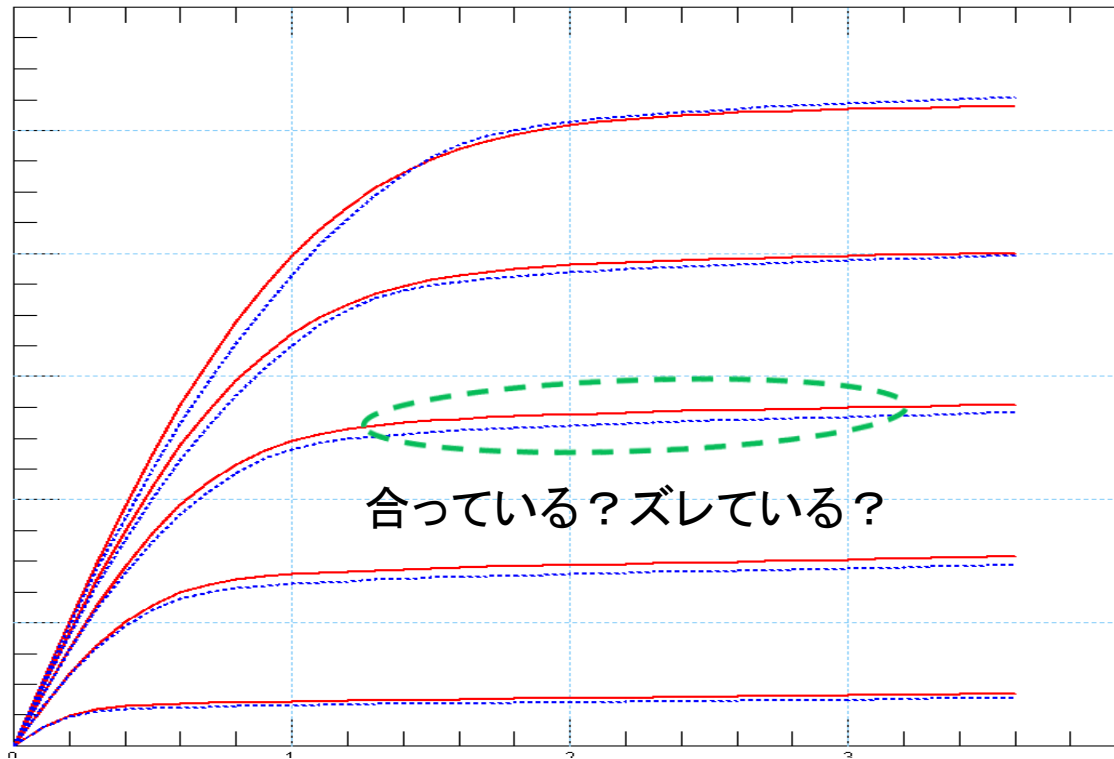


$Y = R(A * X^2 + B * X + 1)$  の式で  
変数 A、B、R を振ることによってシミュレーションを実測に合わせた。

結果:  $R = 270$ 、 $A = 2E-5$ 、 $B = -1E-3$

# ■ フィットデータ

実測とシミュレーション結果を重ねた図のこと。  
モデルの精度が分かる。



— 実測  
·· シミュレーション

# ■ 二乗平均誤差

(Root Mean Square Error)

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \xi_i^2}$$

$X_i (i=1, 2, \dots)$  実測値

$\xi_i = X_i - x_i$  誤差

(各シミュレーション値  $x_i$  の実測値との差)

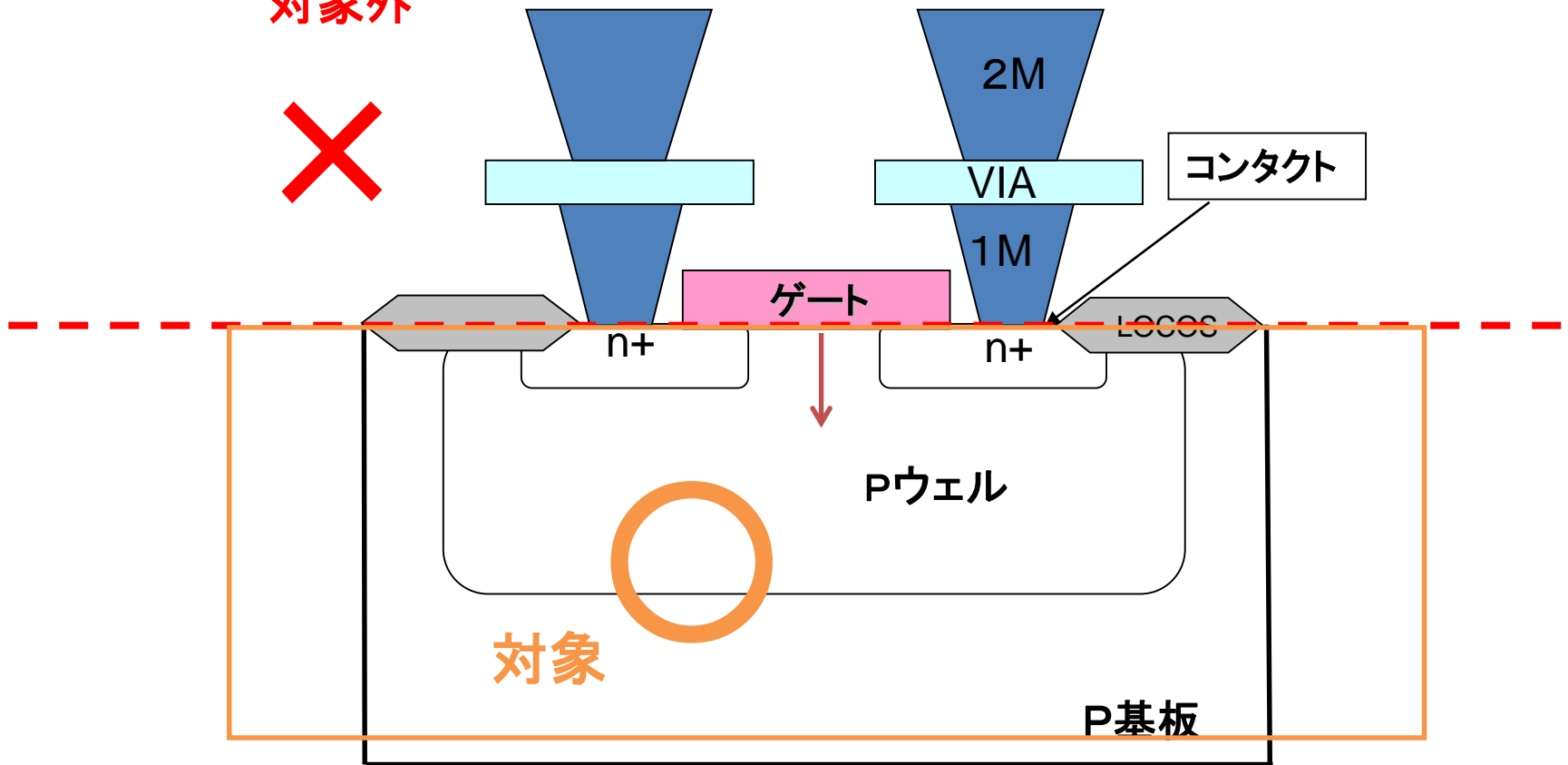
**参考)**

**二乗平均誤差 < 5% が業界標準**



# SPICEモデル化の対象

対象外



基板内部の特性をモデル化

# ■ 解析手法

## 1. DC

入力は直流。各部の直流電流、電圧を調べる。

## 2. 温度

温度を変えた場合の特性を調べる。

## 3. AC

入力のAC信号の周波数を変化させた際の、  
入力信号に対する出力信号の振幅と位相変化を求める。

## 4. 過渡応答

入力波形を定義する。各端子の電圧値変化を求める。

## 5. ノイズ

素子の発生する雑音の他への影響を調べる。

## 6. ばらつき

プロセスが変動した場合の特性を調べる。

# ■モデル確認

## (シミュレーションの前に)

### 1. 必要なモデルがあるか？

実デバイスに対応したモデルが必須  
NchMOSトランジスタにはNMOS用モデル

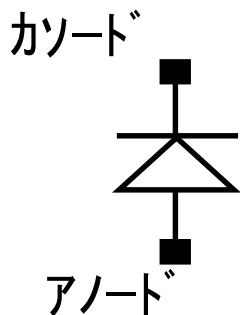
### 2. 精度

フィットデータと平均二乗誤差でチェック

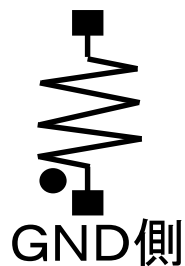
**質問.**

**モデルの二乗平均誤差は、どの程度ならば良いか？**

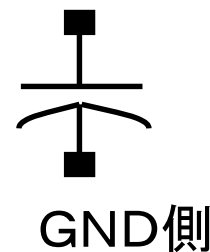
# ■ 回路記号 (シンボル) (Spectreの例)



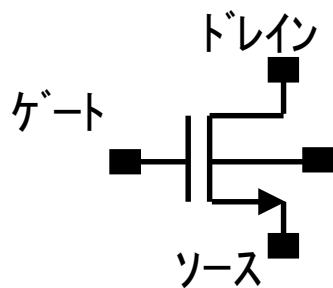
ダイオード



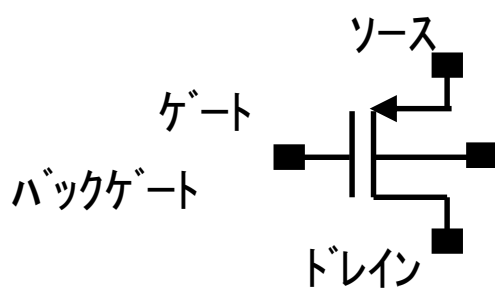
抵抗



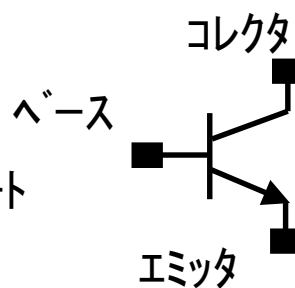
容量



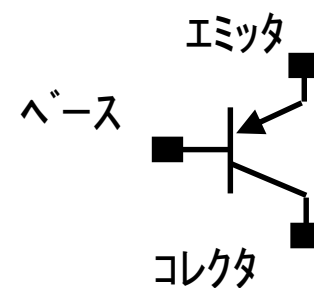
Nch



Pch



NPN



PNP

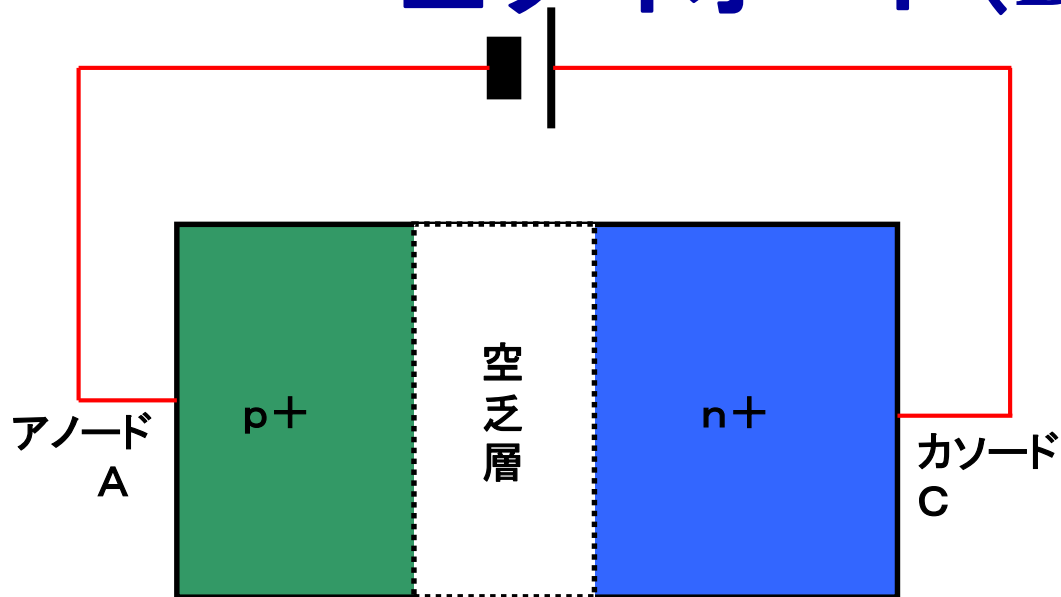
MOSTランジスタ

バイポーラ

## § 4. 各素子のモデル1

### 4-1. ダイオード

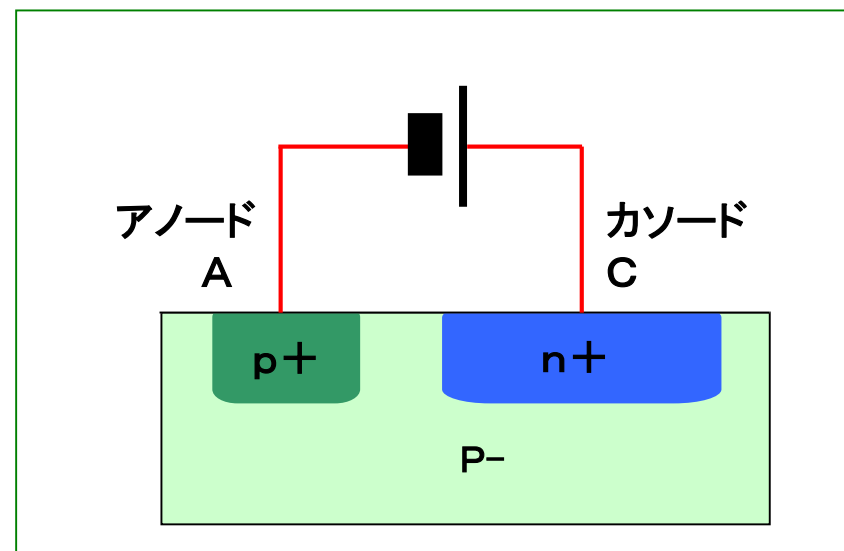
# ■ダイオード(Diode)



PN接合ダイオード(逆方向バイアス)

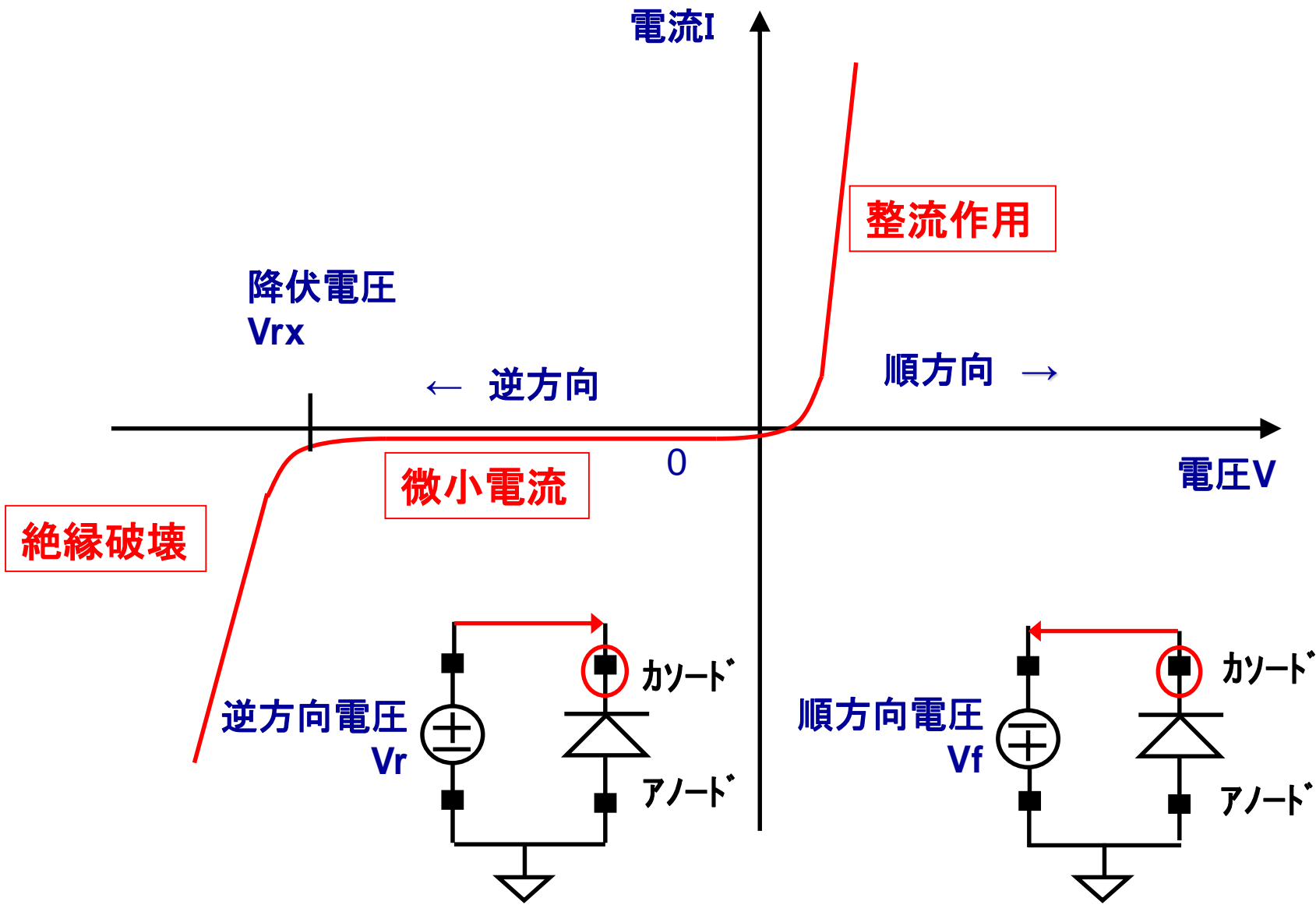
## PN接合

N型SiとP型Siを隣接して形成したもの。  
ダイオード特性を示す。



PN接合ダイオードの断面図

# ■ダイオードのDC特性



# ■ダイオードの容量特性

PN接合は容量になる

$$C_j = C_{jx} / (1 - V_j / V_{jx})^{M_{jx}}$$

$C_{jx}$ : 0Vバイアス時の容量(F)

$V_{jx}$ : 接合電位(V)

$M_{jx}$ : 電圧依存係数

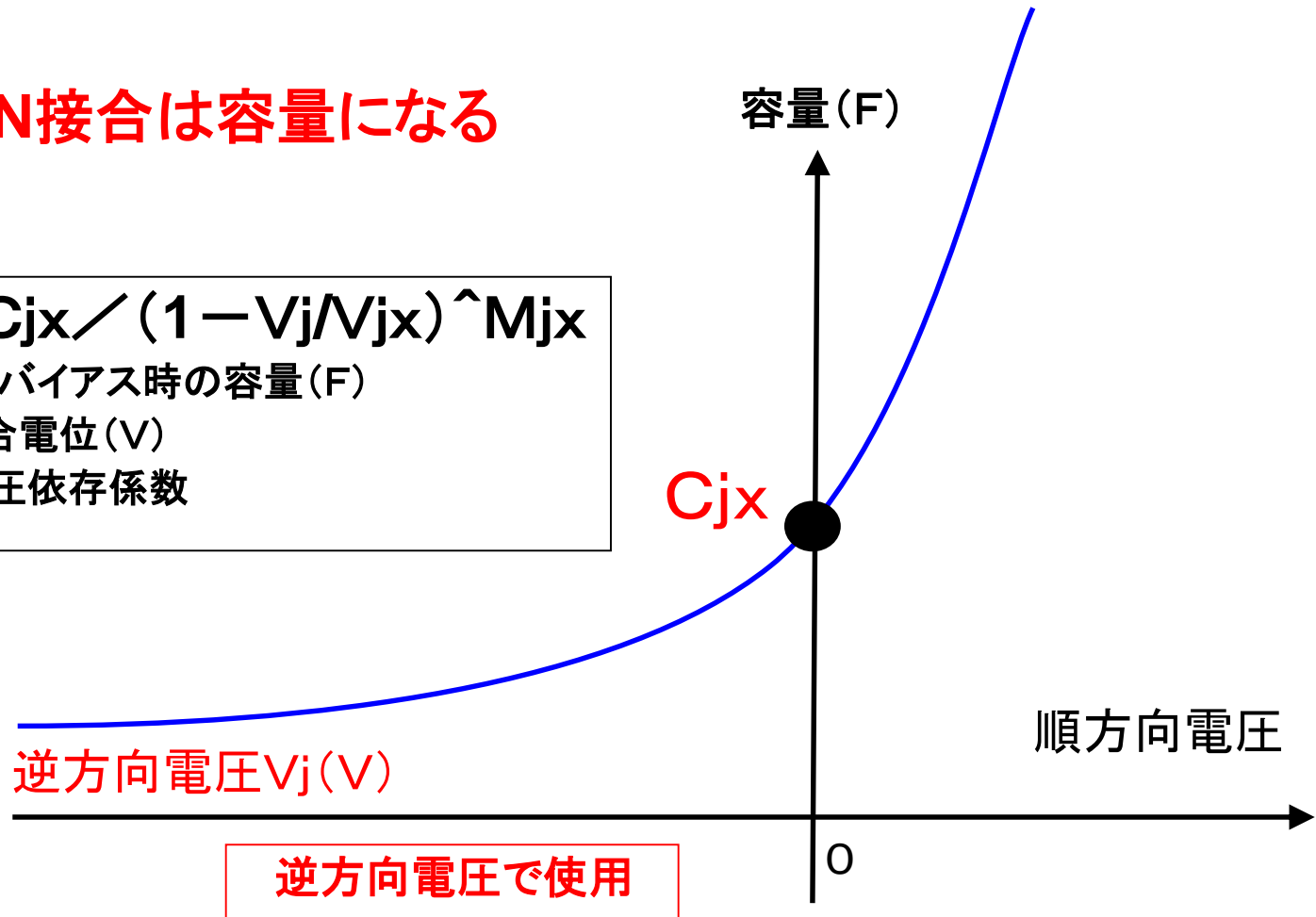
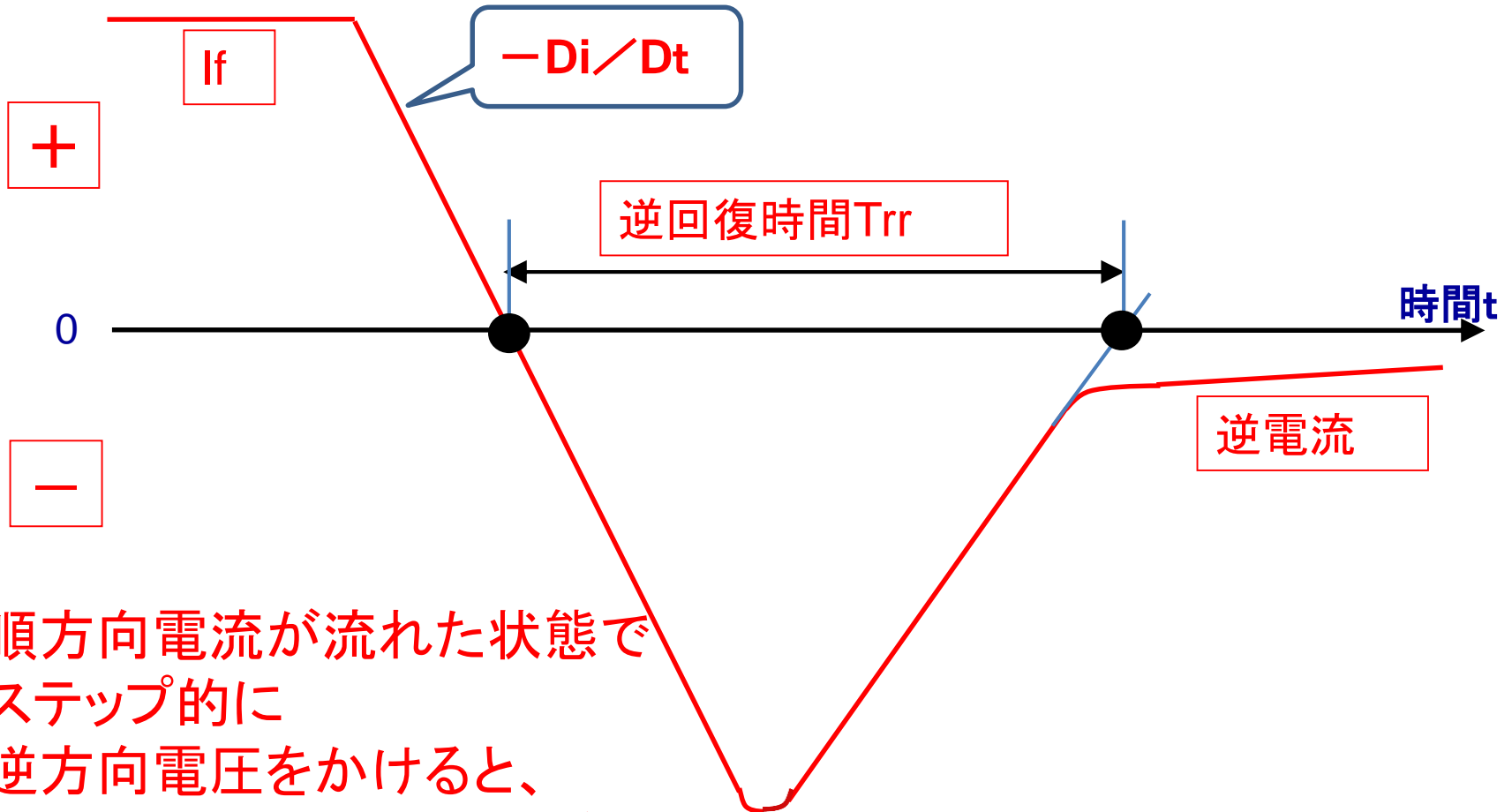


図.1 接合容量—接合電圧特性



# ■ダイオードの過渡特性

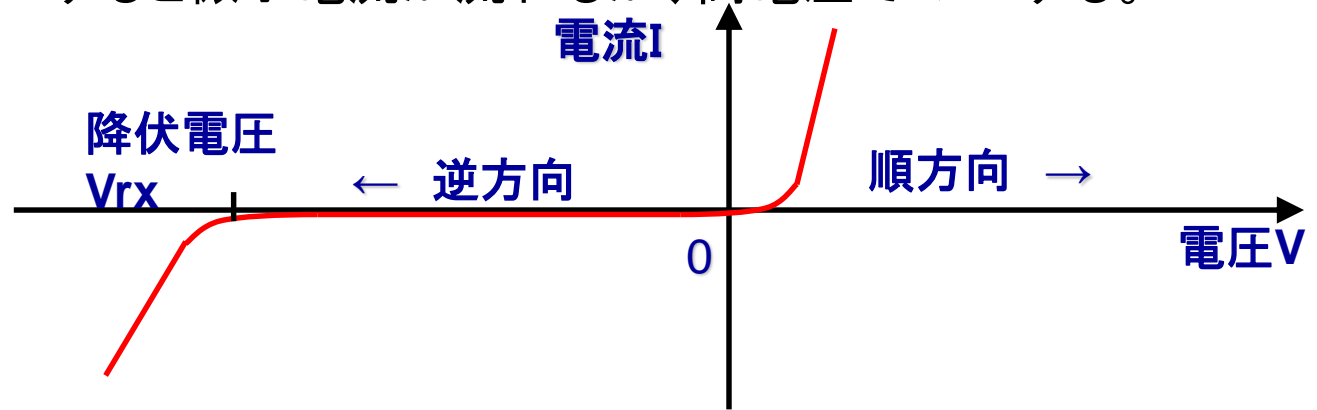


順方向電流が流れた状態で  
ステップ的に  
逆方向電圧をかけると、  
一時的に逆方向に電流が  
流れる。

# ■ 確認\_\_ダイオード特性

## 1. DC特性

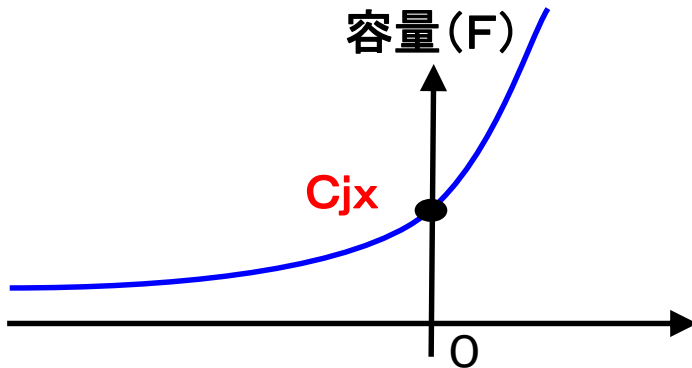
逆方向にバイアスすると微小電流が流れるが、高電圧でQ1. する。



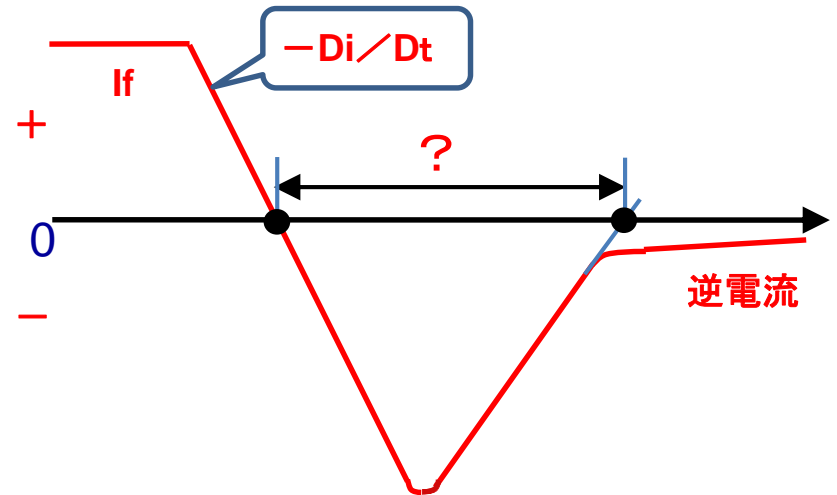
## 2. 容量特性

PN接合はQ2. となる。

PN接合にQ3. の状態で使用する。



## 3. 過渡特性



## § 4. 各素子のモデル1

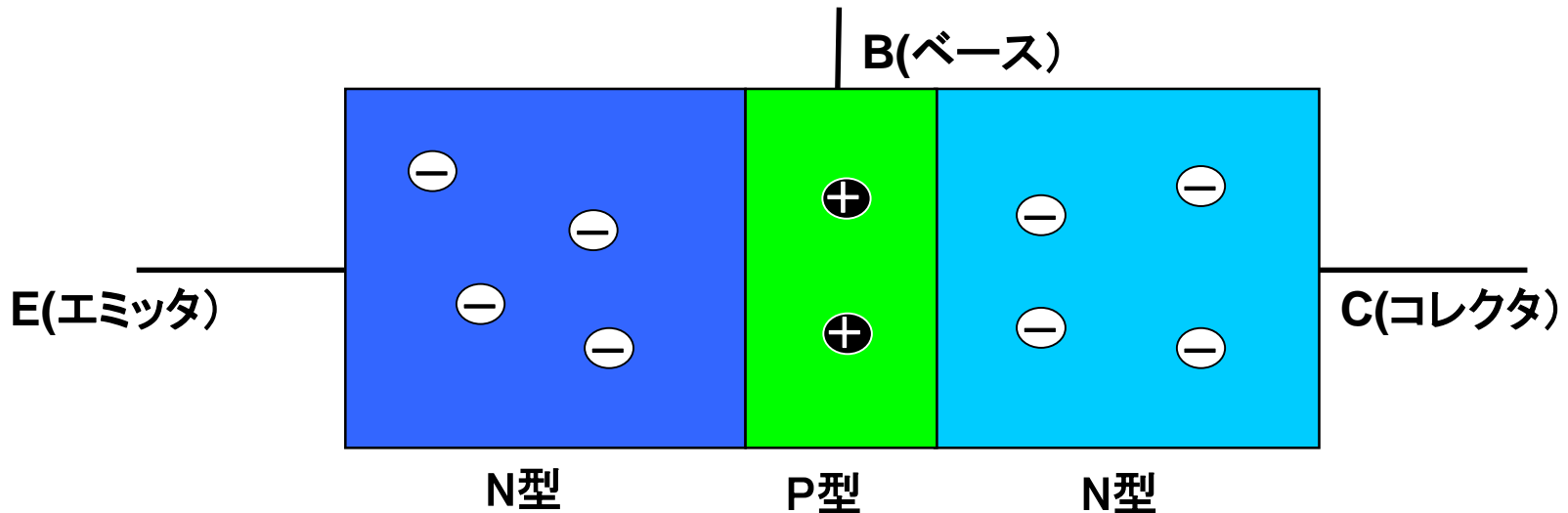
### 4-2. バイポーラトランジスタ

# ■バイポーラトランジスタの特徴

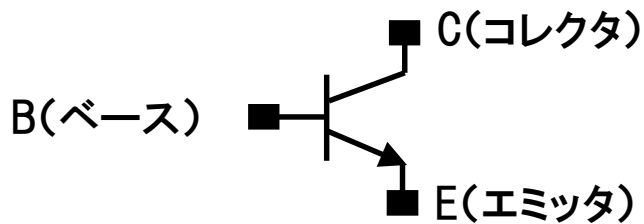
	バイポーラ	MOS
駆動方式	電流	電圧
用途	アナログ	デジタル、アナログ
増幅率	高	中→高*
完成時間TAT	2週間	1~2ヶ月
マスク枚数	10枚	30枚
値段	安価	高価→安価
ミスマッチ	小	大
消費電力	多	少
速度	低	高
微小信号	苦手	問題無し

\*微細化で高性能、安価になった

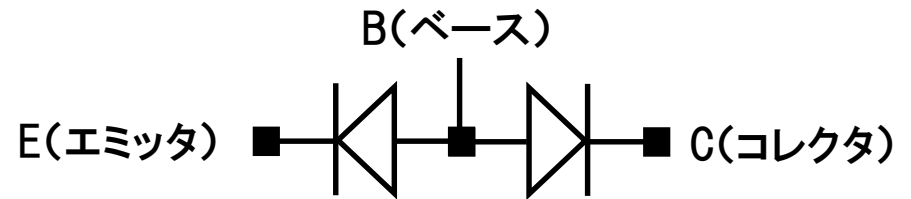
# ■バイポーラトランジスタ



## バイポーラトランジスタの構造(NPN型)



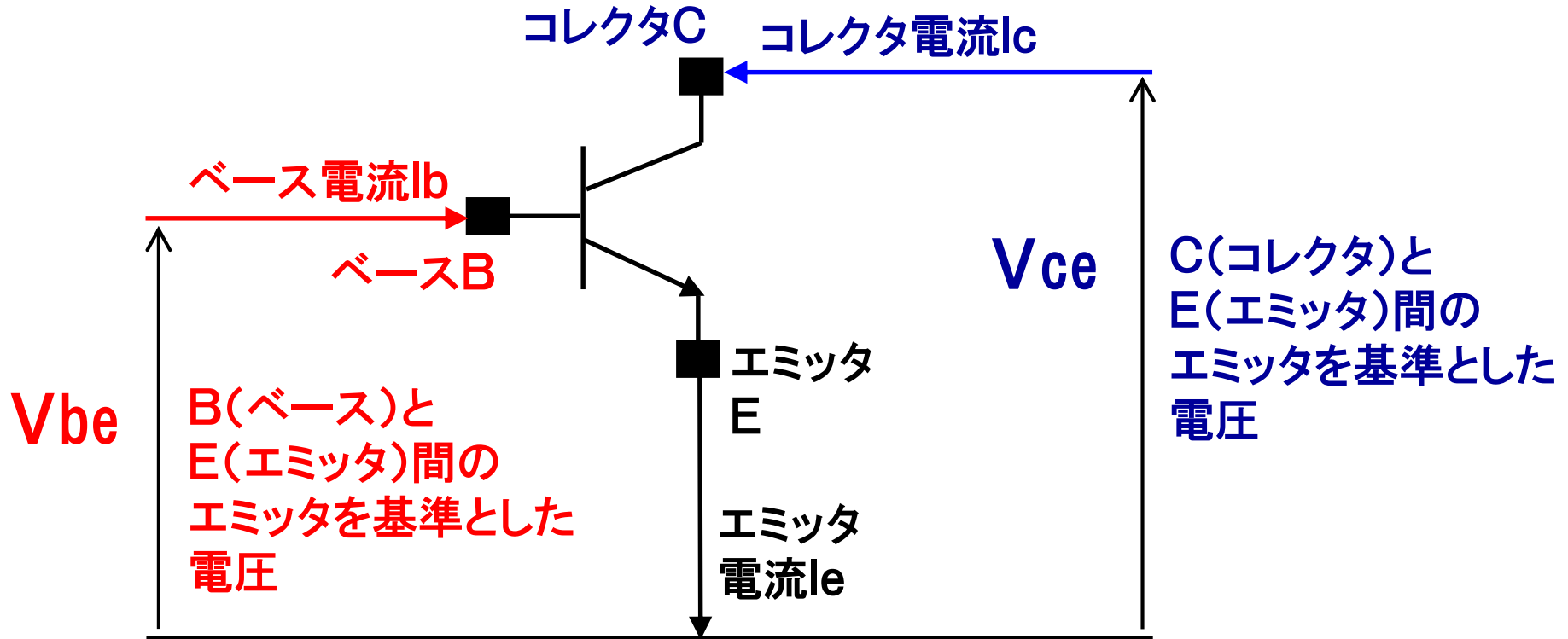
図記号



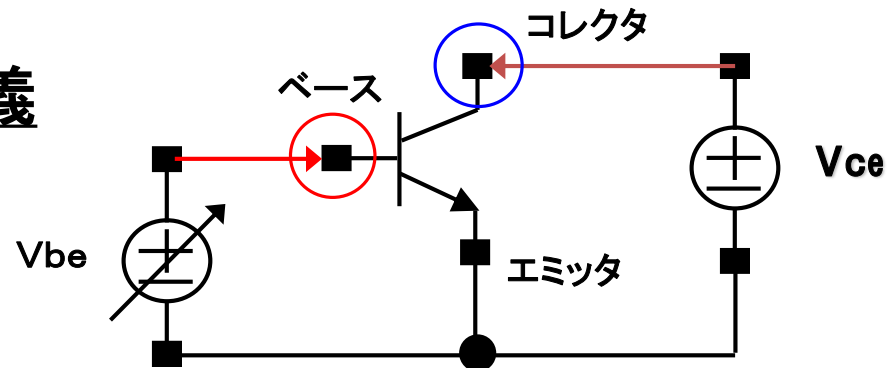
等価回路(ベース幅が狭いことが条件)

トランジスタ(transistor): trans(遠くから操作する)+resistor(抵抗器)

# ■バイポーラトランジスタを考える準備



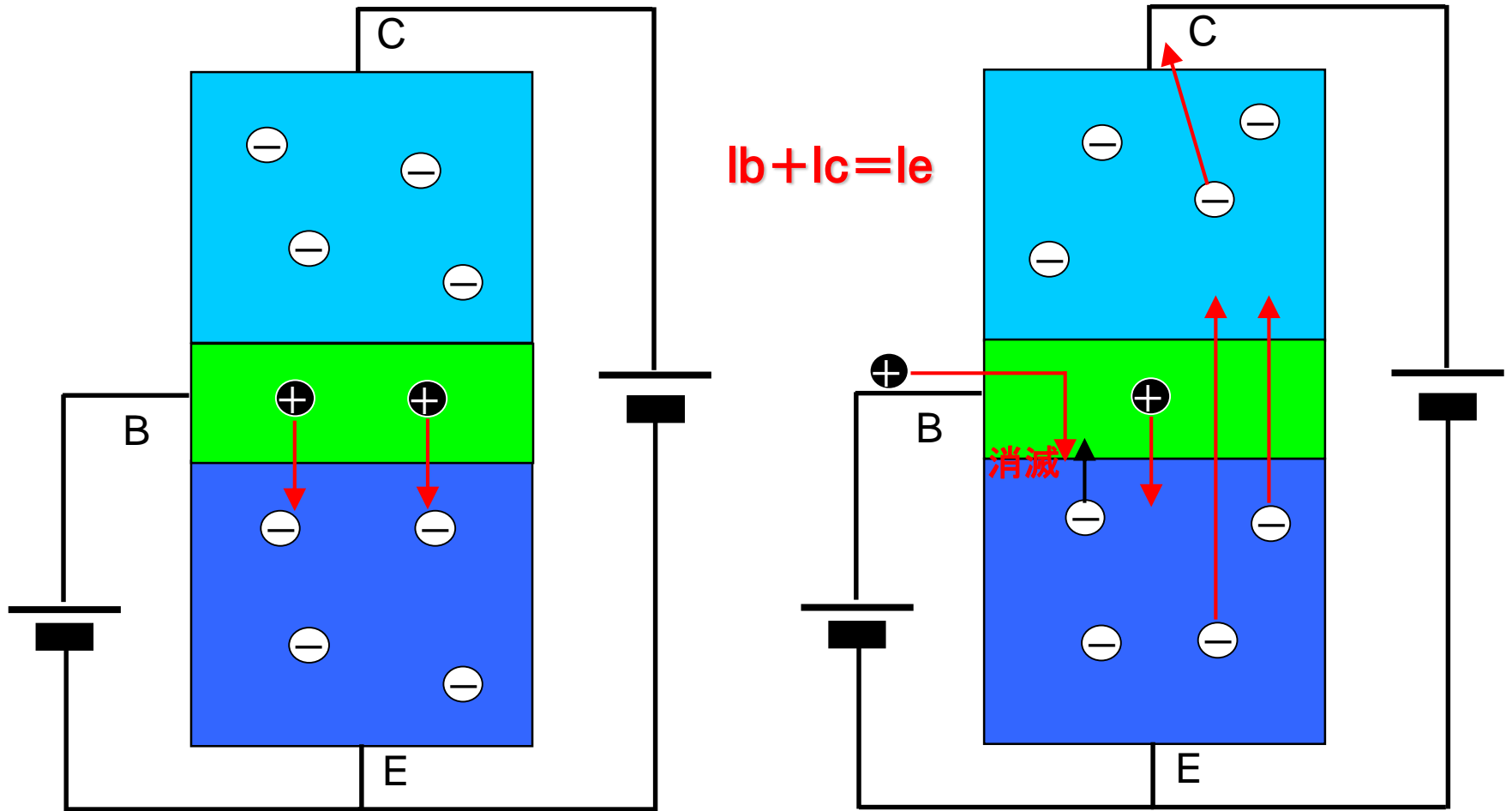
## 電圧・電流の定義



$V_{be}$ を振る回路

# ■バイポーラトランジスタの動作

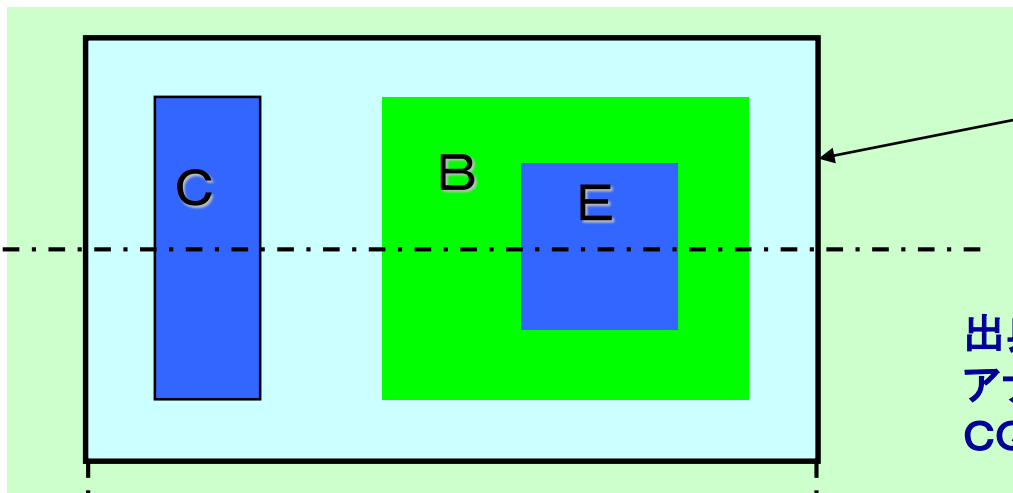
電子と正孔の2種類の極性(Bi-Polar)のキャリアを使うトランジスタ



バイポーラトランジスタ中の電子と正孔の動き

# ■バイポーラトランジスタの構造 (NPN)

平面

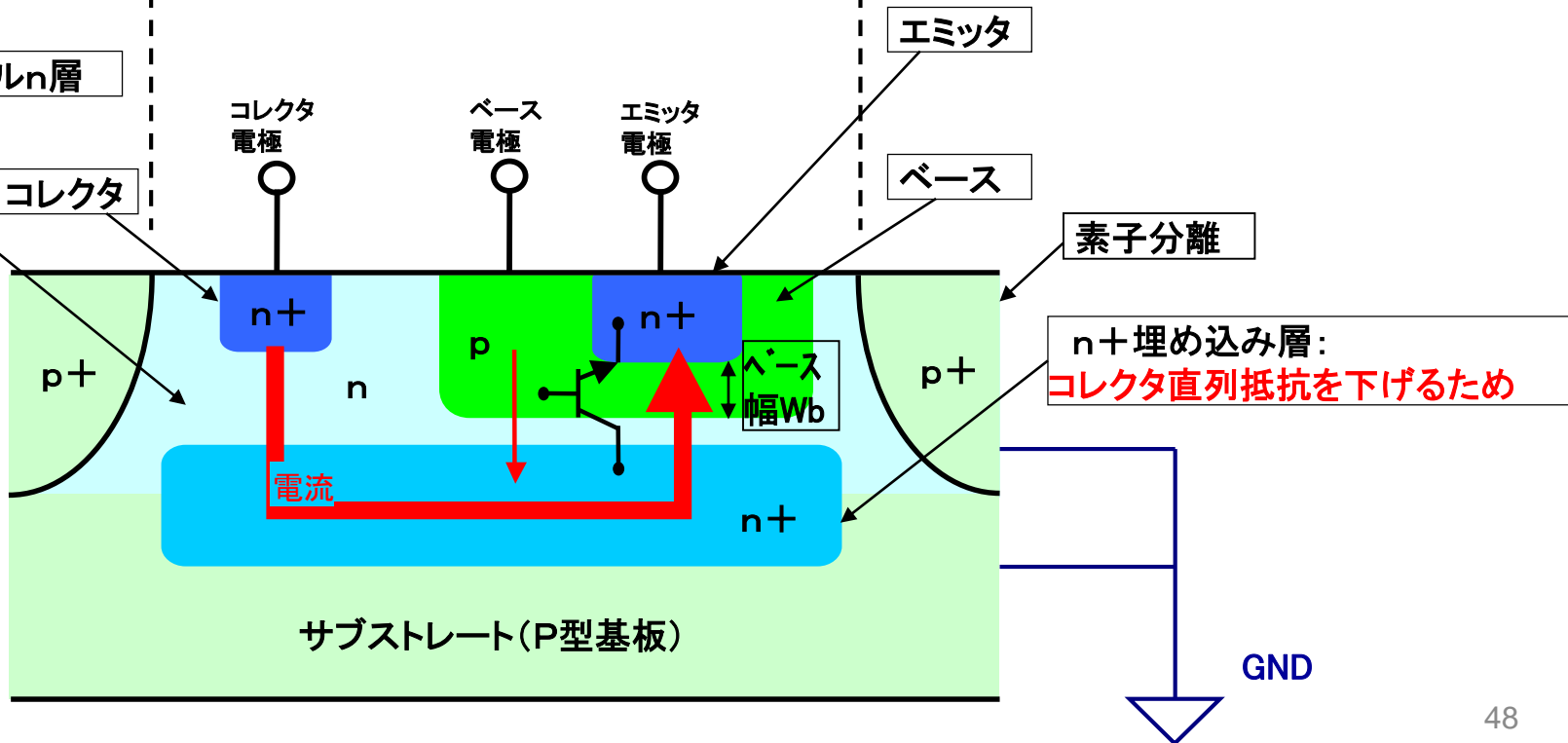


1つのNPNトランジスタ  
囲まれた部分を“アイランド  
(島)”と呼ぶ

出典：  
アナログICの機能回路設計入門、  
CQ出版社、青木著。

エピタキシャルn層

断面



エミッタ

コレクタ  
電極

ベース  
電極

エミッタ  
電極

コレクタ

ベース

素子分離

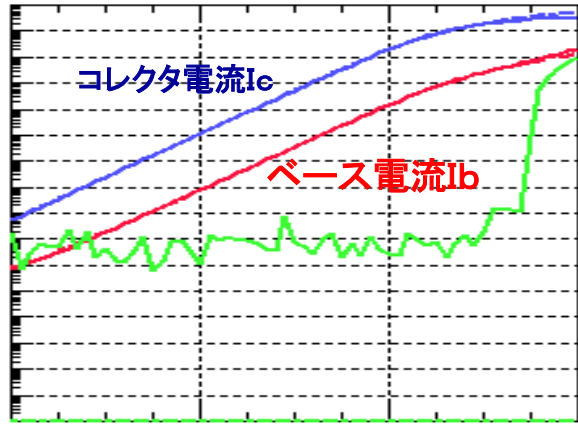
n+埋め込み層：  
コレクタ直列抵抗を下げるため

サブストレート (P型基板)

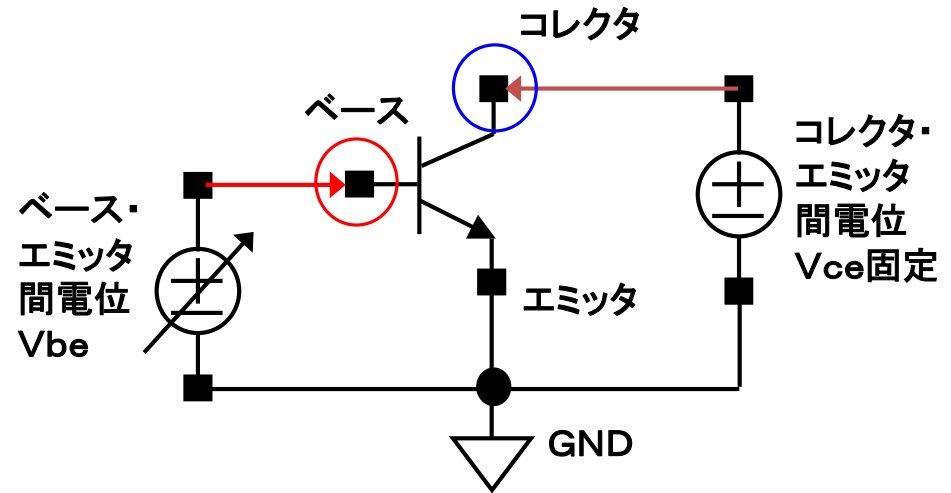
GND



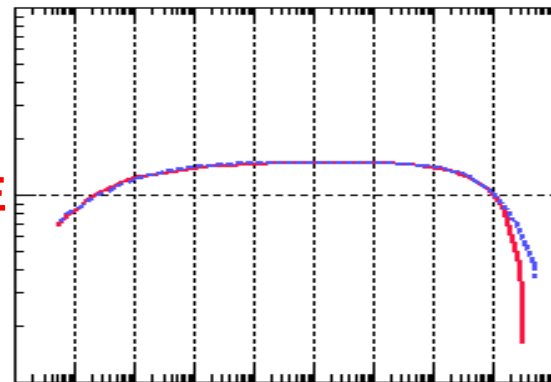
# ■DC特性その1; 順方向低電流領域



ベース・エミッタ間電圧  $V_{be}$  (V)



エミッタ接地の回路図

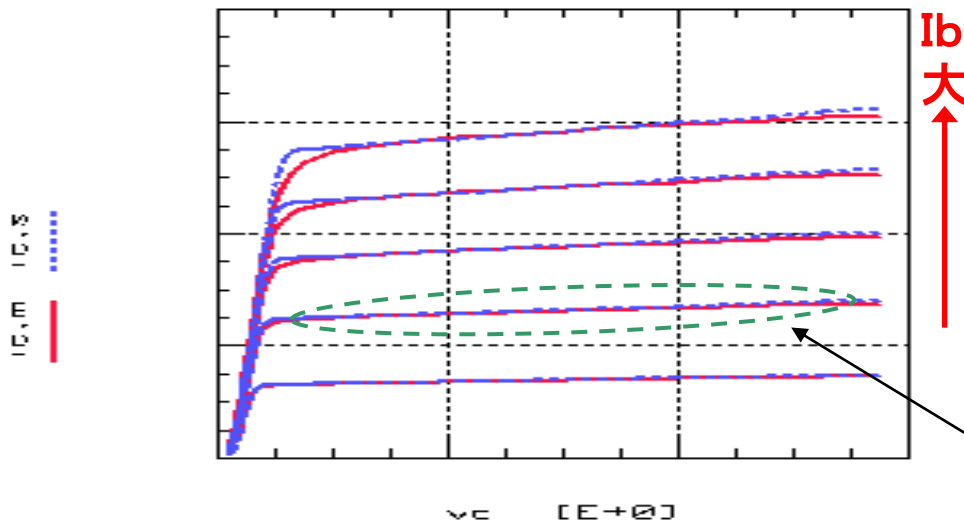


コレクタ電流  $I_c$  (A)

$h_{FE}$ : 増幅率  
コレクタ電流  $I_c$  / ベース電流  $I_b$

# ■ DC特性その2; $I_c - V_c$ 特性

コレクタ電流  $I_c$  (A)

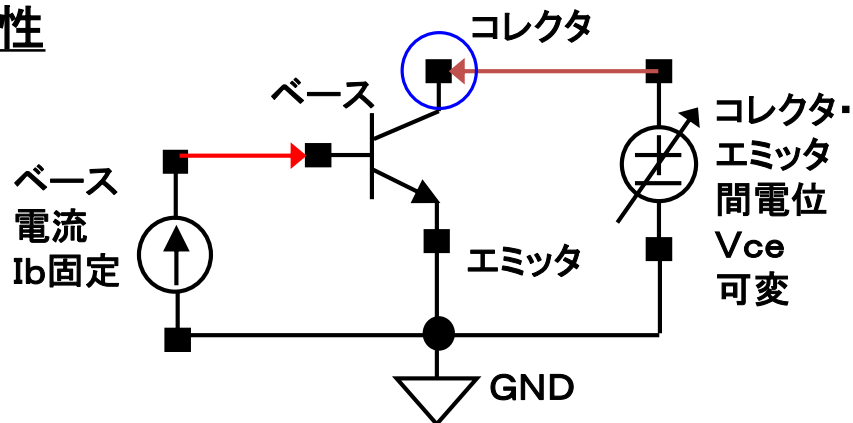


ポイント①  
ベース電流  $I_b$  大で  
コレクタ電流  $I_c$  大

ポイント②  
ベース電流  $I_b$  一定ならば  
コレクタ電流  $I_c$  は、ほぼ一定

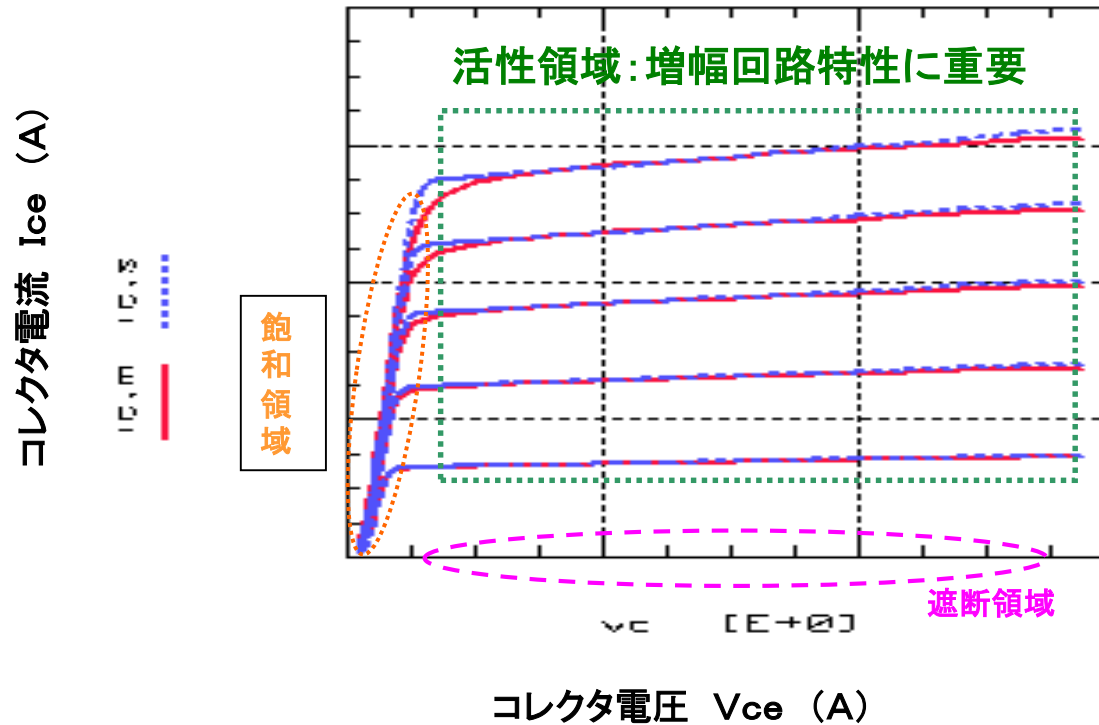
コレクタ電圧  $V_{ce}$  (A)

## コレクタ電流 $I_c$ - コレクタ電圧 $V_c$ の特性



エミッタ接地の回路図

# ■ DC特性その2; $I_c - V_c$ 特性2



**遮断領域:**

$I_c = 0$  ( $V_{be}$ が小さい)。

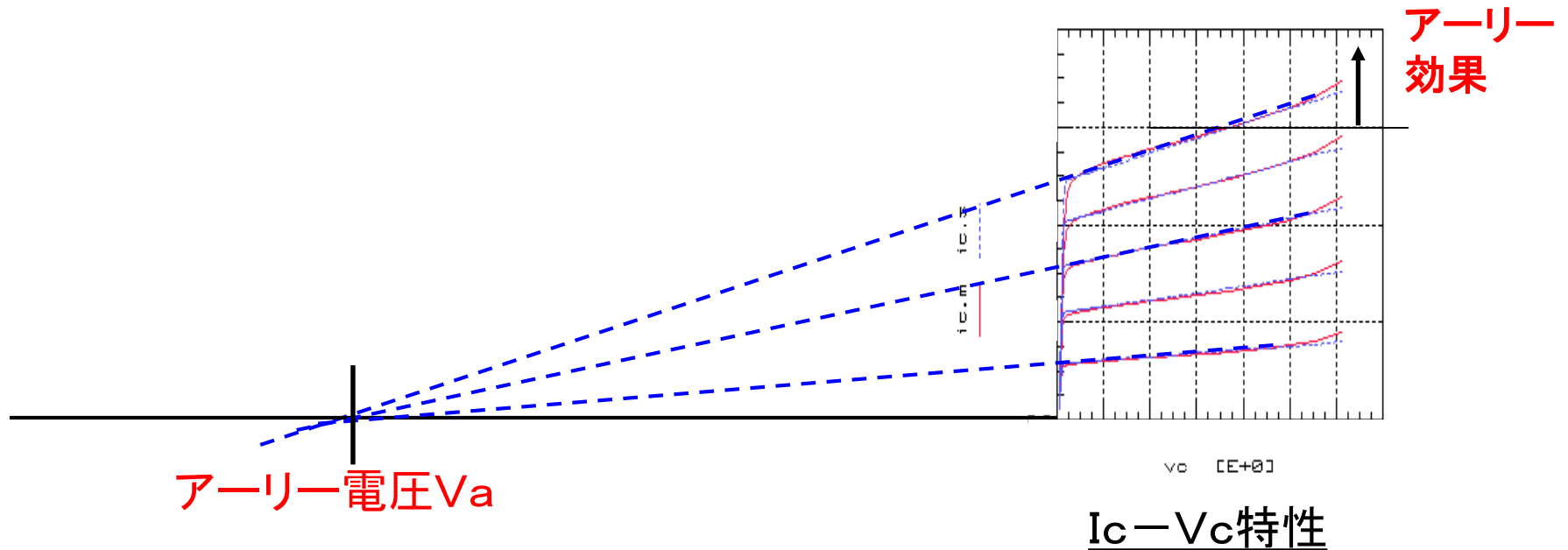
**活性領域:**

$V_{be}$ の変化に従って  $I_c$  が変化する。

**飽和領域:**

$V_c \doteq 0$  となり、 $V_{be}$  を高くしても、これ以上  $I_c$  が増えない。

# ■ DC特性：アーリー効果とアーリー電圧



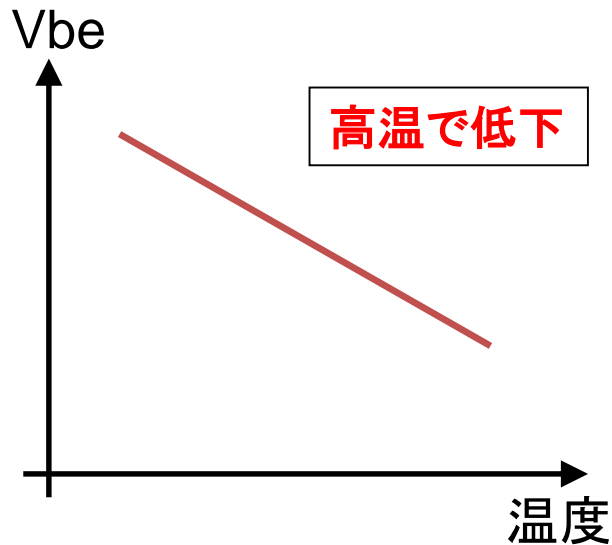
## ・アーリー効果

$V_{ce}$ が高くなると電流が増える（実効的なベース幅が狭くなるため）。

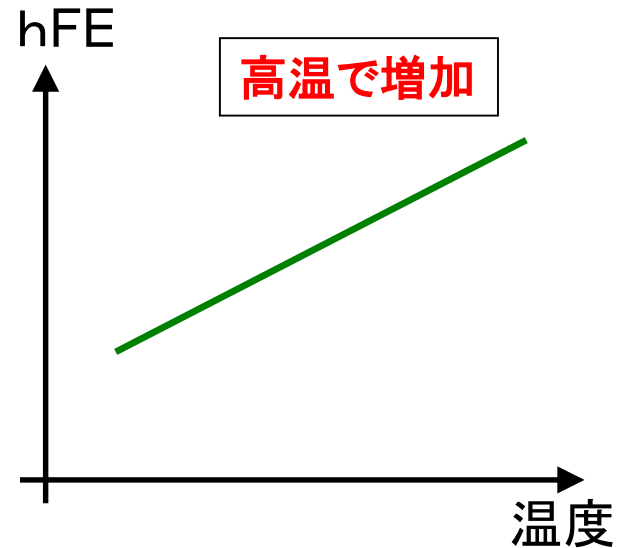
## ・アーリー電圧

線形領域の外挿線と電圧軸との交点。理想は $\infty$ ＝線形領域の傾きが水平

# ■ 温度特性その1



ベース・エミッタ接合電位 $V_{be}$ の温度特性



$h_{FE}$  (コレクタ電流 / ベース電流) の温度特性

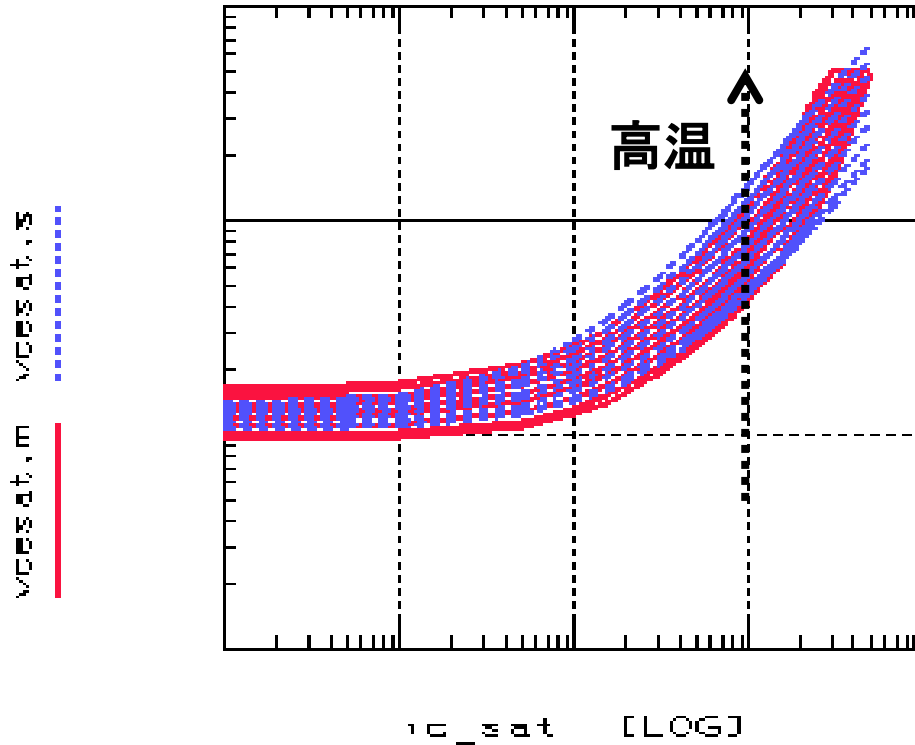
高温ほど電流が流れやすい(非線形)

$V_{be}$ は高温で低下→固定バイアスではバイアス電流が増加→発熱

\* 高温になりやすい

# ■ 温度特性その2

コレクタ・エミッタ間電位  $V_{cesat}$

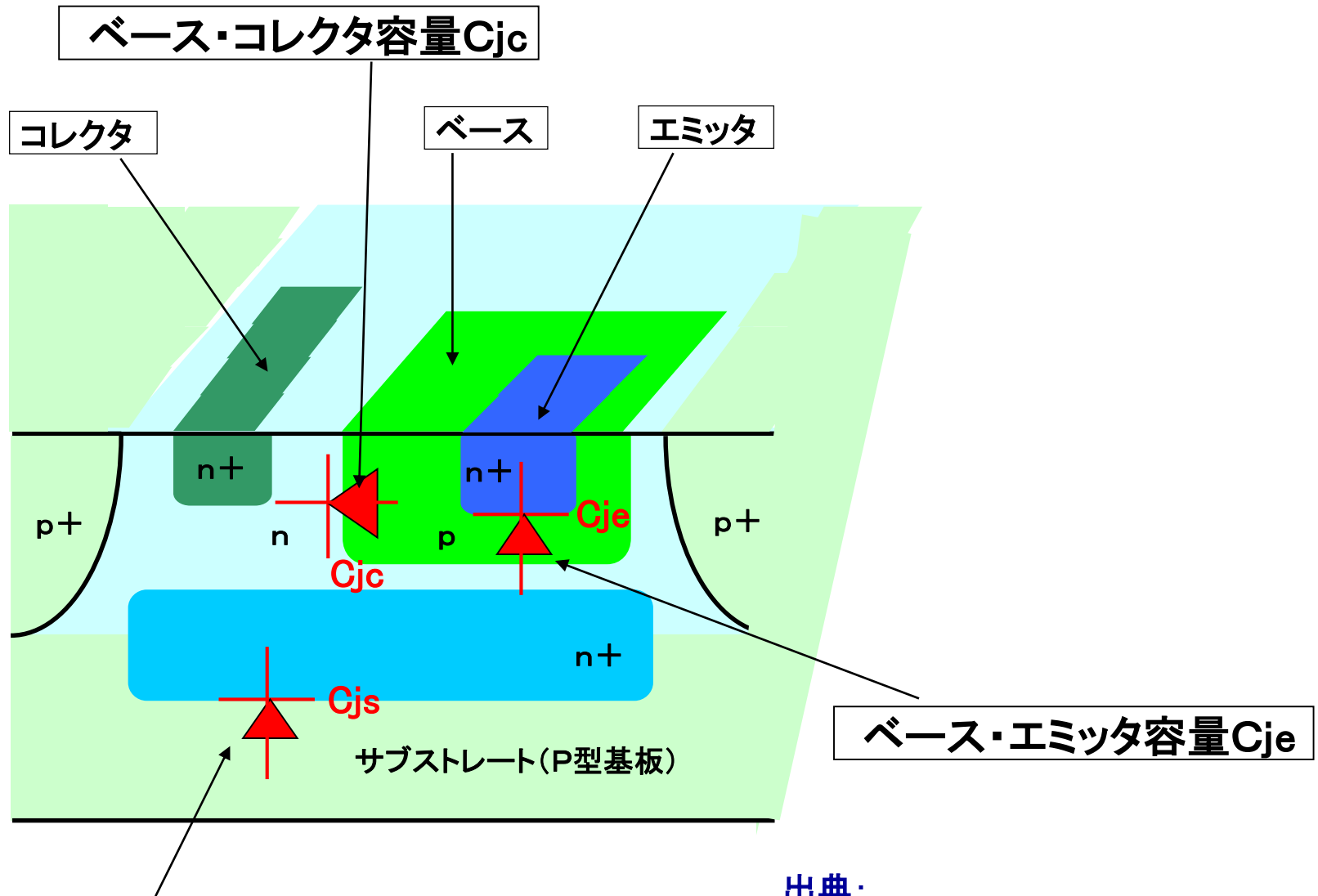


高温で増加する

コレクタ電流  $I_c$  (A)

コレクタ抵抗  $R_c$  の温度特性

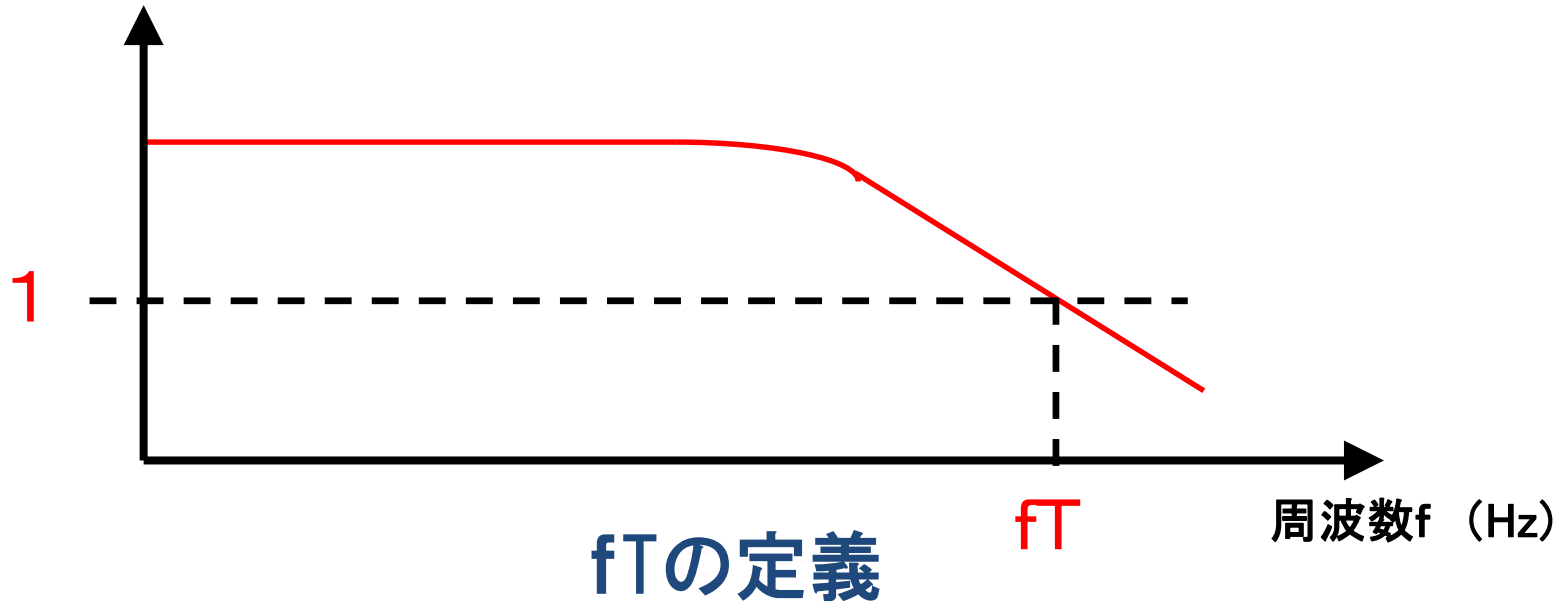
# ■容量特性



出典：  
アナログICの機能回路設計入門、  
CQ出版社、青木著。

# ■ 周波数特性

電流利得



## ・ $f_T$ (遮断周波数)

電流利得 = 1 となる周波数

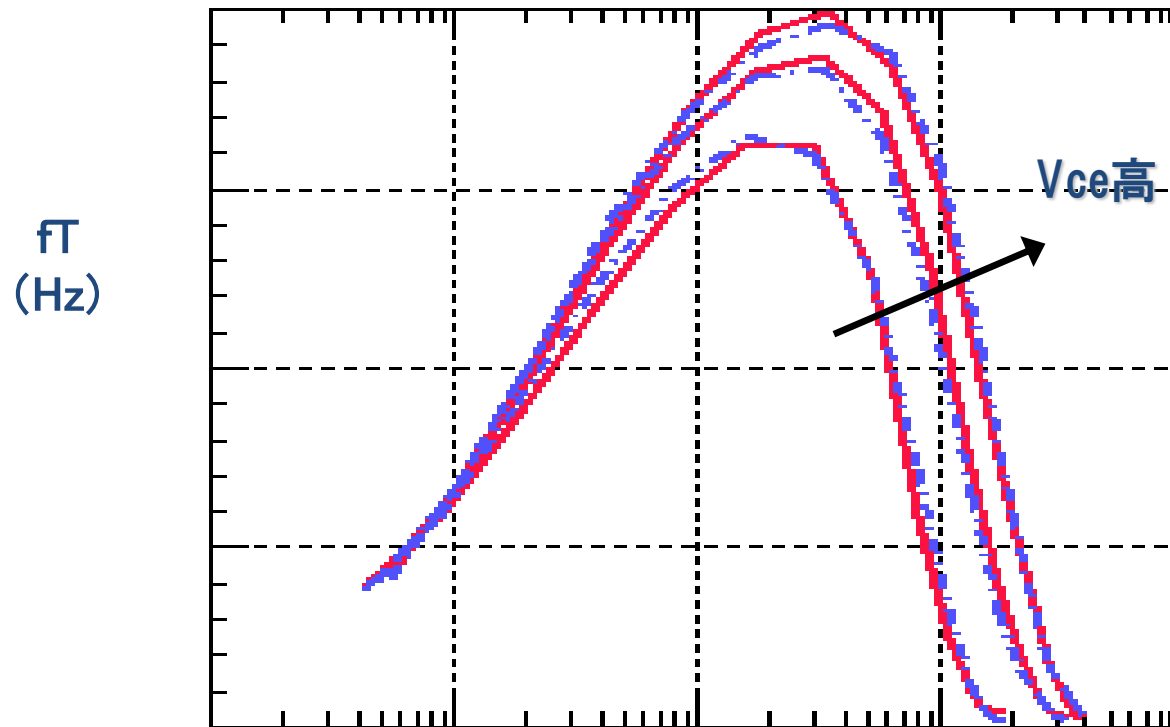
その回路またはデバイスの使用し得る限界周波数

## ・ $f_{max}$ (最大発振周波数)

電力利得 = 1 となる周波数



# ■ 周波数特性 ( $f_T$ — $I_c$ 特性) の例



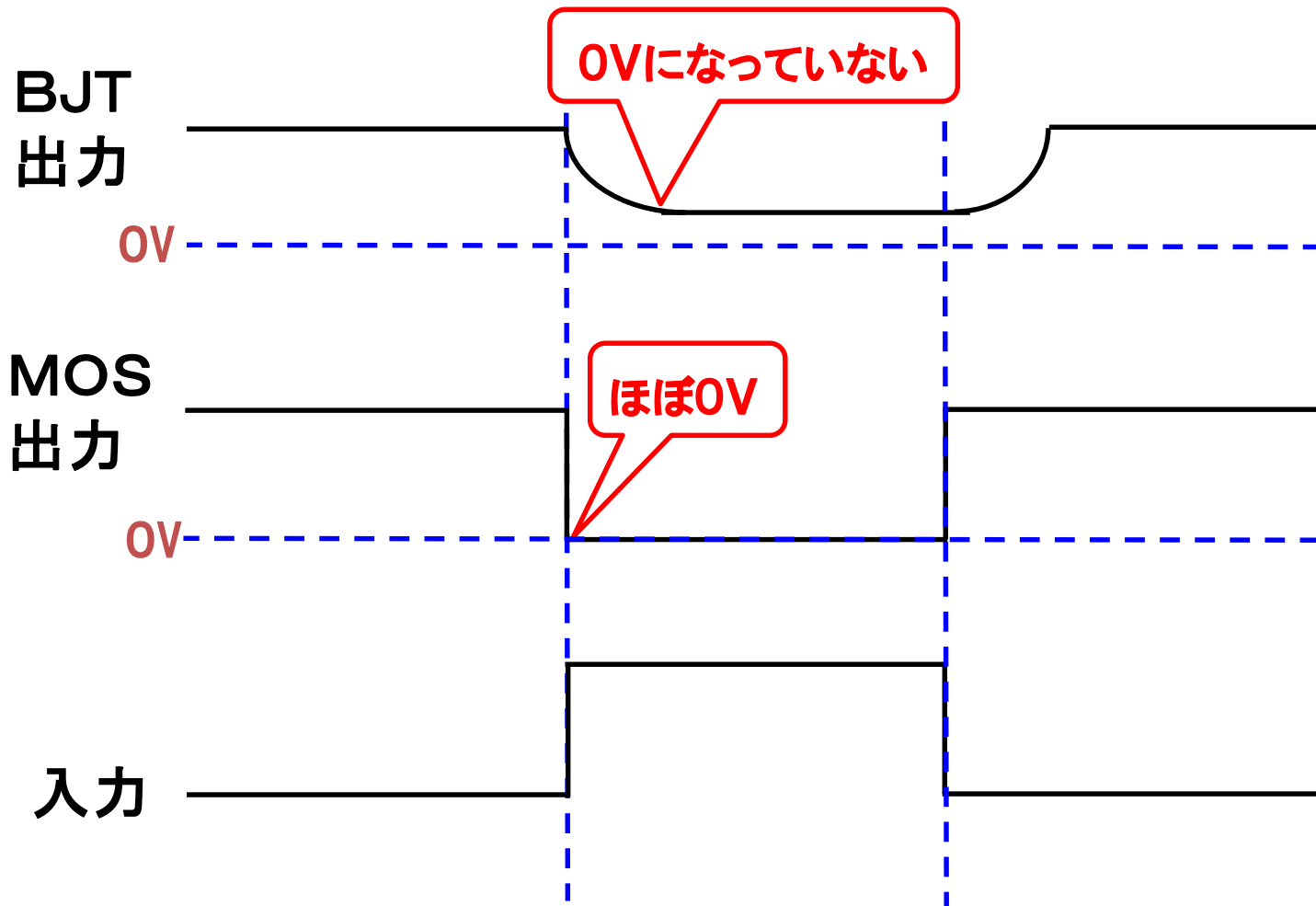
— 実測

--- シミュレーション

コレクタ電流  $I_c$  (A)

# ■ 過渡応答特性の例

\* BJTはMOSに比べて遅い



# ■バイポーラモデルの例

\* Mextram504Tは高精度モデル。ただしシミュレーション時間はSGP(Spice Gummel-Poon)モデルの3倍。

