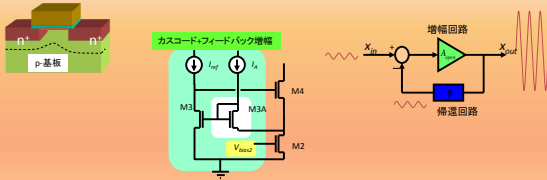


# CMOSアナログ回路講座



内容指導 谷口研二(大阪大学大学院工学研究科教授)  
 学習開発 西之園晴夫(NPO法人学習開発研究所代表)  
 開発推進 河崎達夫(システムLSI技術学院学院長)

## 目次

第1章 MOSFET 第1節 デバイスの構造 第2節 電気的特性 第3節 小信号等価回路 第2章 MOSFETを用いた増幅回路の基礎 第1節 増幅回路を理解する 第2節 実効的な相互コンダクタンス $G_m$ 第3節 各種増幅回路 第4節 抵抗の求め方 第5節 カスコード増幅回路 第3章 増幅回路の周波数特性 第1節 MOSFETの寄生容量 第2節 各種増幅回路の周波数応答特性	第4章 アナログ回路のレイアウト 第1節 アナログ回路におけるノイズの伝搬 第2節 MOSFET対のマッチング 第3節 レイアウトの基本 第5章 電源回路 第1節 カレントミラー回路 第2節 高精度電流源 第3節 参照電圧源 第4節 低電流用(電流+電圧)源 第6章 フィードバック回路 第1節 負帰還の概念とその応用 第2節 増幅回路の種類 第3節 帰還回路とその接続法 第4節 帰還回路の負荷を考慮したフィードバック回路
--	---

## 収録時間

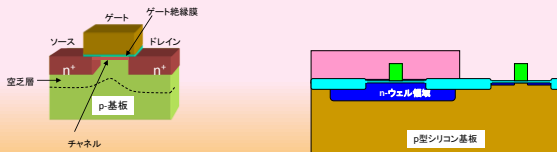
章	節	スライド数	時間	章	節	スライド数	時間
第1章	第1節	34	21分37秒	第4章	第1節	26	31分37秒
	第2節	25	41分51秒		第2節	35	37分21秒
	第3節	21	30分36秒		第3節	12	10分38秒
第2章	第1節	9	13分00秒	第5章	第1節	31	52分
	第2節	10	12分50秒		第2節	0	
	第3節	16	16分44秒		第3節	29	35分50秒
	第4節	22	18分38秒		第4節	7	6分35秒
	第5節	20	20分15秒		第6章	第1節	9
第3章	第1節	10	15分45秒	第2節		9	5分15秒
	第2節	51	71分25秒	第3節		11	15分15秒
				第4節	33	32分16秒	

## 谷口研二教授の授業と学習システムの特徴

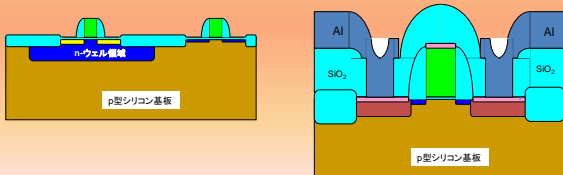
- 電子回路の基礎からCMOSアナログ回路まで幅広く網羅した内容を収録。
- 600枚以上のパワーポイントのスライドを用いた視覚的で懇切丁寧な説明。
- 学習者の注意の焦点化を促すため、パワーポイントのスライド上でポイントが指示棒の代わりに講師の説明と連動して動く。
- 各章の節ごとに視聴したい場所を繰り返し視聴ができる。
- 教え学び合い課題をクリアしていく協調自律学習をベースとしたe-ラーニングを採用。
- 学習目標の提示による学習の意味づけ。
- 確認テストによって学習の定着度を高めることができる。
- キーワード別掲示板を活用することで仲間・メンター・専門家に相談できる。

### 機能

- 受講者が講義ビデオ視聴して「わかにい」と感じたキーワードを登録できる。
- 登録したキーワードごとに掲示板が立ち上がる。
- その掲示板上で受講者同士が質疑応答を行うことができる。



## 第1章 MOSFET 第1節 デバイスの構造




## 内容のあらまし

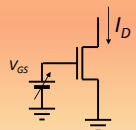
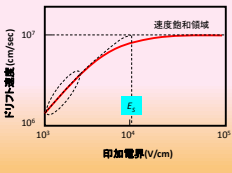
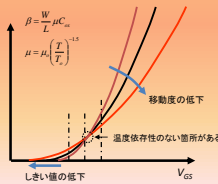
- MOSFETは半導体(シリコン)基板上に電極(ソース、ドレイン、ゲート)が形成されたもの。
- ソース・ドレイン間に電圧を加え、ゲートに加える電圧に応じて、その間に流れる電流が変化する。
- MOSFETの製造法は、シリコン表面にリソグラフィ工程で構造の基になるパターンを形成し、不純物の導入、絶縁層の形成など、多くの一連の処理工程からなっている。

## 学習目標

- MOSFETはどのような働きかを知る。
- MOSFETの構造を学ぶ。
- MOSFETは多くの工程を経て形づくられることを認識する。



**第1章 MOSFET**  
**第2節 電気的特性**

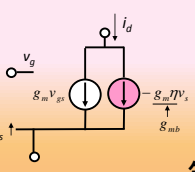




**内容のあらまし**

- MOSFET (nチャネル) のソースを接地し、ドレイン、ゲートに正の電圧を加えるとソース・ドレイン間に電流が流れる。
- ゲート電圧をOVから上げていくと、弱反転領域から、強反転領域になり、その領域に対応した電流が流れる。
- 強反転領域でドレイン電圧をOVから上げていくと、線形領域からはじまり、ドレイン電圧が $\Delta_{ov}$ 以上の電圧で飽和領域になる。
- 飽和領域でチャネル長が大きい場合、ドレイン電流はドレイン電圧を増やしても変化しない。チャネル長が短いと、ドレイン電圧を上げると、ドレイン電流が増加する。
- ソース電圧に対して基板電圧を下げる (基板バイアス) とドレイン電流が減る。これを基板バイアス効果という。

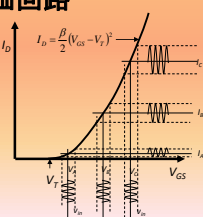
**学習目標**

- MOSFETのソースを接地してドレイン電圧、ゲート電圧を変えたときの動作を理解し、特性式を理解する。
- 短チャネルMOSFETでは飽和領域で、ドレイン電圧を上げるとドレイン電流が増加する。その場合の特性式が係数 $\lambda$ で表されることを理解する。
- ソース電圧に対し基板電圧を下げたときの動作、基板バイアス効果を理解する。



**第1章 MOSFET**  
**第3節 小信号等価回路**

$$r_o = \left( \frac{dI_D}{dV_{DS}} \right)^{-1} \approx \frac{1}{\lambda I_D^2}$$

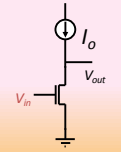
$$g_m^{\max} = \frac{dI_D}{dV_{GS}} \approx \nu_s W C_{ox}$$


**内容のあらまし**

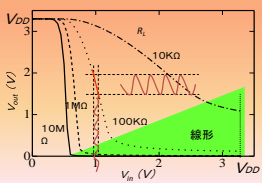
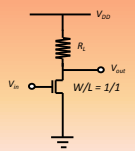
- MOSFETの各端子に直流電圧を加え飽和領域で動作させる (動作点)。
- ゲートに小信号電圧を加えると、ドレイン電流はその電圧に比例して増加する。
- 動作点を変える同じ小信号入力電圧に対して、ドレイン電流の変化量が変わる。動作点をどこに置かが大切。
- ゲートに加える小信号 $v_{gs}$ に対するドレイン電流の変化 $i_d$ を相互コンダクタンス $g_m$ という。 $i_d = g_m v_{gs}$ で示され、電子回路において、ドレイン-ソース端子間に電流源があると見做すことができる。
- ドレイン電圧の変化に対してドレイン電流が変化するのは抵抗によるものと見做すことができる。これを出力抵抗 $r_o$ で表す。
- MOSFETの動作は $r_o$ 、 $g_m$ を用いた等価回路で表すことができる。

**学習目標**

- MOSFETに電圧を加え飽和領域でどうさせる。動作点を理解する。
- ゲートに小信号を加え、ドレイン電流が変化する場合の小信号動作を理解する。
- 小信号動作で重要な量、 $g_m$ 、 $r_o$ を理解する。
- 電子回路ではMOSFETを $g_m$ 、 $r_o$ を用いて記述した小信号等価回路を理解する。



**第2章 MOSFETを用いた増幅回路の基礎**  
**第1節 増幅回路を理解する**

**内容のあらまし**

- MOSFETのソースを接地し、ドレインに定電流を流す回路 (定電流負荷) を考える。
- ゲートに小信号 $v_{gs}$ を加えると、 $g_m v_{gs}$ だけドレイン電流が増加しようとする。電源からは定電流が供給されているので、結局ドレイン電圧が減少し、出力抵抗 $r_o$ に流れる電流が $g_m v_{gs}$ だけ減少、すなわちドレイン電圧が $r_o g_m v_{gs}$ だけ減少した点に動作点に移る。 $V_{ds} = -r_o g_m v_{gs}$   $v_{ds}$ と $v_{gs}$ の比 (増幅率A) は $V_{ds}/V_{gs} = g_m r_o$ となる。 $g_m r_o$ を真性利得という。
- ドレインに抵抗 $R_L$ を接続し、電源電圧を加える、抵抗負荷増幅回路では、ドレインから見た抵抗は $r_o$ と $R_L$ が並列に入ったものとなり、増幅率は $A = g_m (r_o // R_L)$ となる。

**学習目標**

- ソース接地、定電流負荷回路の動作点の設定、小信号入力における増幅の原理を理解する。
- 真性利得 $g_m r_o$ を認識する。
- 抵抗負荷 $R_L$ を接続したソース接地増幅回路の動作を理解する。
- ソース接地増幅回路で動作点の設定、すなわちバイアスの加え方の重要性を理解する。

## 第2章 MOSFETを用いた増幅回路の基礎

### 第2節 実効的な相互コンダクタンスGm

#### 内容のあらまし

- MOSFETの各端子に信号を加えた場合の回路動作を表す一般式を求める。
- 増幅回路の電圧利得は一般的に  $A_v = G_m R_{out}$  で表す。
- Gm、RoutはMOSFETの各端子に接続した抵抗、接続方法によって定まる。
- MOSFETの電流電圧特性は

$$i_d = g_m v_{gs} - \left( g_m + \frac{1}{r_o} \right) v_s + \frac{v_d}{r_o}$$

で与えられる。

#### 学習目標

- 増幅回路の電圧利得が一般的に  $A_v = G_m R_{out}$  で表されることを認識する。
- MOSFETの各端子に信号が加わる場合、上記の一般的式となることを理解する。

接地端子	用途
ソース接地	通常の増幅回路
ドレイン接地	低出力インピーダンス 電圧レベルシフト
ゲート接地	電流-電圧増幅 電圧レベルシフト

## 第2章 MOSFETを用いた増幅回路の基礎

### 第3節 各種増幅回路

#### 内容のあらまし

- ソース接地増幅回路では  $G_m = g_m$        $R_{out} = r_o // R_L$
- ドレイン接地増幅回路では  $G_m = g_m$        $R_{out} = r_o // R_L // \frac{1}{g_m}$
- ゲート接地増幅回路では  $G_m = g_m + \frac{1}{r_o}$        $R_{out} = r_o // R_L$

#### 学習目標

- 各増幅回路の回路の形を知り、それぞれの  $G_m$ 、 $R_{out}$  を理解する。

## 第2章 MOSFETを用いた増幅回路の基礎

### 第4節 抵抗の求め方

出力抵抗

$$R_{out} = R_L // \left( r_{o2} + (g_{m2} r_{o2} + 1) \left( r_{o1} // \frac{1}{g_{m1}} \right) \right)$$

$$\approx R_L // \left( r_{o2} + \frac{g_{m2} r_{o2}}{g_{m1}} \right)$$

#### 内容のあらまし

- ソース、ドレイン側に抵抗R<sub>S</sub>、R<sub>D</sub>がある場合、第2章第2節に示した式は

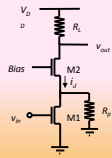
$$i_d = \frac{g_m v_{gs} - \left( g_m + \frac{1}{r_o} \right) v_s + \frac{v_d}{r_o}}{1 + g_m^* R_S + \frac{R_S + R_D}{r_o}}$$

- ゲート接地の場合、ドレインから見た抵抗は  $R_S (g_m^* r_o + 1)$  で、 $R_S$  が約  $g_m^* r_o$  倍となる。
- ソース側から見た抵抗は  $\frac{R_L}{g_m^* r_o} + \frac{1}{g_m^*}$  となる。R<sub>L</sub> が  $\frac{1}{g_m^*}$  だけ小さく見える。

#### 学習目標

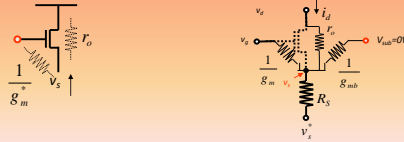
- ソース、ドレインに抵抗R<sub>S</sub>、R<sub>D</sub>がある一般的な場合の考え方を、テキストをじっくり読んで理解する。  $1/g_m^* r_o$
- ソース側から見るとRDが  $g_m^* r_o$  倍になること、ドレイン側から見るとRSが  $g_m^* r_o$  倍になることを憶える。

接地端子	用途
ソース接地	普通の増幅回路
ドレイン接地	電圧バッファ レベルシフト
ゲート接地	カスコード回路の形成
カスコード	高性能増幅器 (高利得)



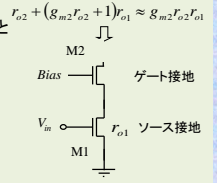
## 第2章 MOSFETを用いた増幅回路の基礎

### 第5節 カスコード増幅回路



#### 内容のあらまし

- ・図の回路をカスコード回路と言う。
- ・第2章第4節で学んだ $R_2$ の代わりにM1を入れると、 $r_{O1}$ の  $g_{m1}r_{O1}$  倍になる。
- ・カスコード回路を用いると増幅率が大きくできることがわかる。
- ・負荷側にPMOSのカスコード回路、M3、M4を用いると、増幅率は

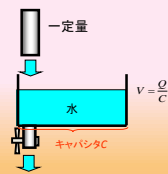
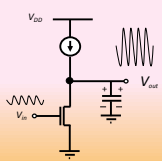


$$A_v = -g_{m1} \left[ (g_{m2}r_{O2} + 1)r_{O1} // (g_{m3}r_{O3} + 1)r_{O4} \right]$$

で表され、大きな値が得られる。

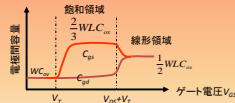
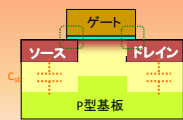
#### 学習目標

- ・カスコード回路の動作原理、重要性を理解する。
- ・各種増幅回路を自ら一覧表にまとめ、記憶にとどめる。



## 第3章 増幅回路の周波数特性

### 第1節 MOSFETの寄生容量

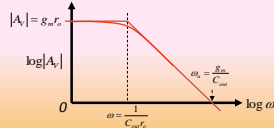
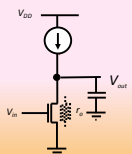


#### 内容のあらまし

- ・電子回路の各部(ノード)には必ず寄生容量が存在し、回路動作に影響する。
- ・とくに寄生容量の影響が大きいのが周波数特性である。

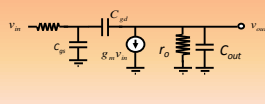
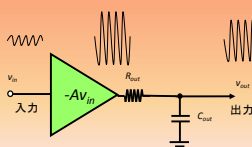
#### 学習目標

- ・MOSFETの寄生容量がどこに存在し、どのような動作特性かを理解する。



## 第3章 増幅回路の周波数特性

### 第2節 各種増幅回路の周波数応答特性

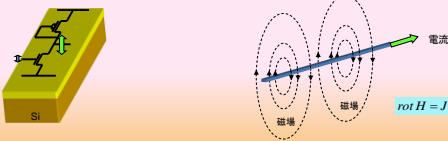


#### 内容のあらまし

- ・ソース接地回路で出力部に容量 $C_{out}$ がある場合、増幅率は  $A_v = -g_m(r_o // 1/sC_{out})$  で与えられる。
- ・周波数が  $1/C_{out}r_o$  のところで増幅率  $A_v$ は1/2になる。
- ・さらに周波数を上げると、周波数の増加とともに増幅率は減少する。
- ・  $1/C_{out}r_o$ をこの回路の極という。
- ・さらに周波数を上げると、 $g_m/C_{out}$  の周波数で増幅率が1になる。この周波数をユニティゲイン周波数という。
- ・ゲート・ドレイン間に容量 $C_{gd}$ があると、入力から見た容量 $C_{in}$ は  $C_{in} = (1+A)C_{gd}$  と大きい値になる。
- ・この効果をミラー効果という。

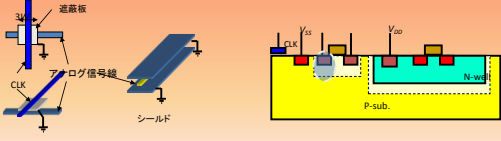
#### 学習目標

- ・出力に容量がある場合の増幅率の周波数依存性を理解する。
- ・周波数特性において重要な極、ユニティゲイン周波数とはどういう量が覚える。
- ・ソース・ドレイン間容量によるミラー効果を理解する。
- ・各種増幅回路の周波数特性を理解する。



### 第4章 アナログ回路のレイアウト

#### 第1節 アナログ回路におけるノイズの伝播

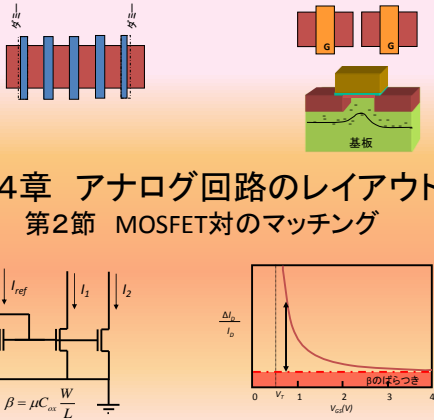


#### 内容のあらまし

- 電気信号線が隣接していると、静電結合により一方の信号が他に影響して、誤動作の原因となる。
- 静電結合を防止するため遮蔽により遮断する方法がある。
- 差動信号線による方法でノイズの影響を軽減する方法もある。
- 電磁誘導によるノイズの影響もある。
- シリコン基板中に生じた電荷の移動によるノイズがある。このノイズはガードリングにより予防される。

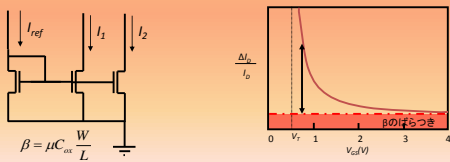
#### 学習目標

- 静電結合により信号線間にノイズが発生することを理解する。
- 信号線間には電磁誘導によるノイズも発生することを理解する。
- シリコン基板に異常な電荷が発生する状況を理解する。
- シリコン基板に発生した電荷の吸収法を理解する。



### 第4章 アナログ回路のレイアウト

#### 第2節 MOSFET対のマッチング

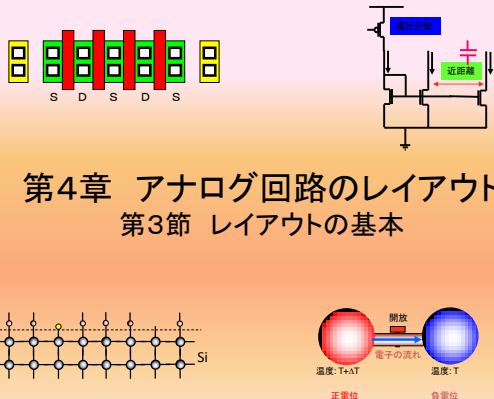


#### 内容のあらまし

- シリコン基板上に形成されたMOSFETは隣接したものでも特性が異なることがある。
- 一対のMOSFETについて、製造のパラツキを抑えるため、トランジスタの向きを揃える。
- 発熱によるマッチング特性変動を抑えるため、コモンセントロイド構造とする。
- ランダムパラツキはLWの平方根に反比例する。

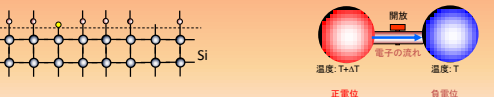
#### 学習目標

- マッチングとはどういうことか説明せよ。
- マッチングを満たすための方策を列記せよ。



### 第4章 アナログ回路のレイアウト

#### 第3節 レイアウトの基本



#### 内容のあらまし

- MOSFETのW、Lが決まっても、実際の形に実現する(レイアウト)ときに、抵抗、寸法精度などの要因を考慮する必要がある。
- 抵抗、容量以外に物理・化学的に安定動作が得られるよう配慮が必要である。

#### 学習目標

- 回路をデバイスとして実現するレイアウトにおいて、目的とする正しい結果を得るために考慮すべき要因を理解し、列記せよ。

**第5章 電源回路**  
**第1節 カレントミラー回路**

**内容のあらまし**

- 二つのMOSFETのそれぞれのゲート・ソース間電圧が等しいと、両方のドレイン電流も等しい。言い換えると一方のドレインにある電流を流すと、他方のドレインにも同じ値の電流が流れる。
- この回路をカレントミラー回路と言う。
- この原理を生かして高い増幅率の回路を作ることが出来る。

**学習目標**

- カレントミラー回路の原理を理解する。
- オーバードライブ電圧のはたらきを理解する。
- 低電圧動作など、カレントミラー回路にいろいろ工夫を加えることを理解する。

**第5章 電源回路**  
**第2節 高精度電流源**

	出力抵抗	出力電圧(下限)
カレントミラー回路	$r_o$	$\Delta_{ov}$
低電圧カスコッド電流源	$(g_{m3}r_o)r_o$	$2\Delta_{ov}$
低電圧カスコッド電流源 (利得増強型)	$(g_{m3}r_o)^2 r_o$	$\approx \Delta_{ov} \sim 2\Delta_{ov}$

**内容のあらまし**

- カスコッド電流源よりさらに出力抵抗を高くするために補助アンプを用いて利得増強型アンプを用いる電流源のこと。
- 低電圧動作のため補強アンプの構成にいろいろ工夫を加える。

**学習目標**

- 利得増強型アンプの動作原理を理解する。
- 低電圧動作のために工夫された回路の動作原理を理解する。

**第5章 電源回路**  
**第3節 参照電圧源**

**内容のあらまし**

- ダイオードのV-I特性には温度依存性がある。
- ダイオードと抵抗の組み合わせにより温度依存性のない特性が得られる。
- 1.25Vというシリコンのバンドギャップに等しい電圧が得られるので、バンドギャップ参照電圧という。

**学習目標**

- ダイオードと抵抗の組み合わせで温度係数のない電圧が得られることを理解する。

## 第5章 電源回路

### 第4節 低電源用(電流+電圧)源

電圧  $V_{BE1}$

電圧  $V_{BE}$

電流  $I$

電位は低下  
高温

$V_{DD}$

$R_1$

$R_2$

$R_3$

$D_1$

$KD_1$

### 内容のあらまし

- ダイオードと抵抗で構成された回路に補助抵抗を導入し、抵抗値を選ぶことにより、低電源電圧用電源を作ることが出来る。

### 学習目標

- 低電圧電源の動作原理を理解する。

## 第6章 フィードバック回路

### 第1節 負帰還の概念とその効用

増幅回路

帰還回路

利得の低下

帯域幅の拡大

負帰還あり

$\log \omega$

### 第6章 フィードバック回路

#### 第1節 負帰還の概念とその効用

入力	出力	入力インピーダンス	出力インピーダンス
直列	並列	$Kz_{in}$	$z_{out} / K$
直列	直列	$Kz_{in}$	$Kz_{out}$
並列	並列	$z_{in} / K$	$z_{out} / K$
並列	直列	$z_{in} / K$	$Kz_{out}$

### 内容のあらまし

- 増幅回路において入力信号のところに出力信号の一部を戻し、差し引くようにした回路をフィードバック回路と言う。
- 出力信号の一部を戻す量を帰還率 $\beta$ で表す。
- 増幅率 $A$ が非常に大きければ、負帰還を行った回路の増幅率は $1/\beta$ となり、 $A$ に依存しなくなる。すなわち、製造的にばらつきの大きい $\beta$ に依存しない、増幅率の再現性がよい増幅回路ができる。
- 負帰還回路は周波数特性の改善、ノイズの低減に有効である。

### 学習目標

- 負帰還回路の動作原理を理解し、基幹回路の増幅率の式を導出できるようにする。
- 増幅率 $A$ が大きい場合、負帰還を行った回路の増幅率が $A$ に依存せず、 $\beta$ のみによって定まることを理解する。
- 負帰還回路では増幅回路の周波数特性、ノイズ特性が向上することを理解する。

## 第6章 フィードバック回路

### 第2節 増幅回路の種類

電流増幅: Current amplifier

電流

電流

$V_{in}$

$R$

$V_{out}$

$i_{out} = G_m V_{in}$

$G_m V_{in}$

$V_{in}$

$R$

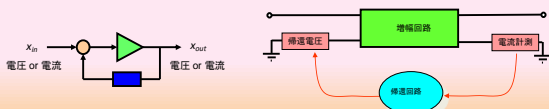
$V_{out}$

### 内容のあらまし

- 帰還回路の入力、出力信号は電圧の場合も、電流の場合もある。
- 入力信号、出力信号が電圧か電流かによって4種類の基幹回路ができる。

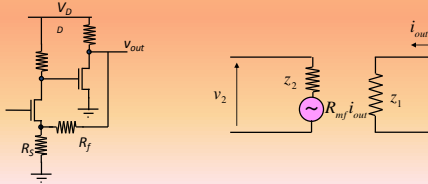
### 学習目標

- 帰還回路の入力信号と出力信号が電圧か電流かによって、4種類の回路ができることを認識する。



## 第6章 フィードバック回路

### 第3節 帰還回路とその接続法



#### 内容のあらまし

- 出力信号を取り出す(モニタする)場合、電圧をモニタする場合は帰還回路は入力信号に並列に接続され、電流をモニタする場合は直列に接続される。
- 入力回路に戻すとき、電圧として戻すときは直列に接続され、電流として戻すときは並列に接続される。

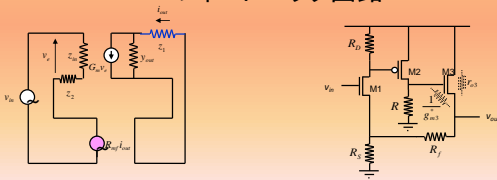
#### 学習目標

- 増幅回路の出力から信号を取り出し、入力へ戻す、電圧、電流の4種類の回路例を理解する。
- 出力から電圧を取り出すときは並列接続、電流を取り出すときは直列接続、入りに電圧として戻すときは直列接続、電流として戻すときは並列接続であることを認識する。



## 第6章 フィードバック回路

### 第4節 帰還回路の負荷を考慮したフィードバック回路



#### 内容のあらまし

- 帰還回路によって増幅回路の入出カインピーダンスが変化し、増幅率の特性が変化する。
- 帰還回路の回路素子を増幅器の回路素子に組み込み、等価的な増幅器で表し、帰還回路の特性を求める。

#### 学習目標

- 帰還回路によって増幅回路の増幅率などが変化するを理解する。
- 基幹回路の素子による変化分を増幅器に組み込み、等価的な増幅器の特性を定めることを理解する。
- 例題について具体的な計算法を理解する。