

電子回路 講義メモ

電気電子工学科

杉山 和彦

この資料は講義内容の要約です。

2007年度の講義中にプロジェクトで表示していたものから作成。

電子回路 第1回

第1週 4月13日

- 授業の進め方 (ガイダンス)
- 初回アンケート
- 教科書
 - 電子回路の基礎 (北野正雄 著, 培風館)
 - 初版に対する正誤表:
<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~kitano/ec/>
- この講義のホームページ
 - 工学部・工学研究科 講義資料のページ
<https://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/lecturenotes/fe/d/>
講義中に掲示しているパワーポイントのファイル → 講義資料

講義内容 (2007年度)

週	日	テーマ	課題等
第1週	4/13	ガイダンス、1章	アンケート
第2週	4/20	1章と2章	
第3週	4/27	2章 能動素子モデル化	レポート 1章の問題 (締切予定4/24)
第4週	5/11	2章 能動素子モデル化	レポート 2章の問題 (5/15)
第5週	5/18	5章 トランジスタ	
第6週	5/25	5章 トランジスタ	
第7週	6/1	5章 トランジスタ	レポート 5章の問題 (6/5)
第8週	6/8	6章 電力増幅	レポート 6章の問題 (6/12)
第9週	6/15	7章 直流増幅	
第10週	6/22	7章 直流増幅	レポート 7章の問題 (6/26)
第11週	6/29	8章 オペアンプ	
第12週	7/6	8章 オペアンプ 10章 発振回路	レポート 8章、9章の問題 (7/17)
第13週	7/13	10章 発振回路	アンケート / 授業評価
	8/7	レポート最終締切	レポート 10章、11章の問題

電子回路

● 歴史

- 電磁波 (1861), 真空管 (1906), トランジスタ (1947), 集積回路 (1958), ...
小型化・集積化

● 使われ方

- 無線通信 (1900), テレビ (1930), レーダー (1940), 計算機 (1950), ...
高速(高周波)・大容量化

● 階層性

- 物理現象 (物性) ⇔ 素子 (デバイス) ⇔ 回路 ⇔ システム

この講義の守備範囲

● (いままた電子回路技術者にニーズが)

- デジタル回路の高速化→アナログ回路のセンスが必要

第1章 電気回路の復習

第1週 4月14日 & 第2週 4月20日

- 直流, 交流, 時間変化する波形
- 複素数の電圧 (電流) とは何か？
 - 複素数平面, Phasor \Leftrightarrow らせん
- 電圧と電流 4/13
 - 双対性
- 電圧源と電流源
 - 一定電流源 (分かりにくいとき \rightarrow 双対性を活用)
 \rightarrow トランジスタ回路に不可欠
- キルヒホフの法則
 - \rightarrow この講義の理解に不可欠

初回アンケートの結果

- 総数 148名 (ありがとう!) →
- 電気電子回路 未取得者 32 % →
- 動機・接点
 - 興味ある 18 % ↘
 - 必要性感じる 24 % ↘
 - 身のまわりにある 24 % →
 - 作ったことある 5名 →
- 電子回路難しそう ~60 % ↗
 - トランジスタ, 増幅回路, バイアス
- なにがしか主体性のある期待 ~60 %

第2章 モデル化された能動素子 (1/3)

第2週 4月20日 ~ 第4週 5月11日

教科書第2章との対応

- 2.1 (3極真空管), **増幅**
- 2.2 **制御電源**, **線形化**
- 2.3 (非線形制御電源)
- 2.4 **バイアス** → 5章 トランジスタで重要
- 2.5 時間応答・周波数特性 → **難解**
- 2.6 (4端子回路)
- 2.7 (**帰還**) → 8章 オペアンプとともに学ぶ
- 2.8 (4端子回路の解析)

赤字: 重要なテーマ

(): 講義では省略, 帰還についてはオペアンプとともに講義

第2章 モデル化された能動素子 (2/3)

第2週 4月20日 & 第3週 4月27日

● 増幅とは？

- 小さな電力で大きな電力を制御すること, でもある.
- 蛇口との対比

● 制御電源

- 今年もJFETで練習 (半導体物性についても簡単に説明) 4/20
- 能動素子 (増幅) を電気回路で取り扱い可能に
⇒ ➔ ブラックボックス化, 等価回路
- 4種類, 相互に変換可能, 素子の特性をよく表すものを使う.

● 線形化 ←

時間変動する信号(交流)も扱いたい

第2章 モデル化された能動素子 (3/3)

第3週 4月27日 & 第4週 5月11日

● デモ実験1：制御電源と入出カインピーダンス

4/27

● 線形化

— 動作点(バイアス) と 信号 の切り分け

- 線形化を素子を使う立場から見たものともとれる
- 信号分を線形で取り扱う → 交流理論で解析可能に

— (線形で扱われる信号の) 時間応答・周波数応答

→ 時間軸上・周波数軸上での重ね合わせの原理

5/11

第5章 トランジスタ (1/3)

第5週 5月18日

- 初めてのトランジスタ(1959年)について解説
- トランジスタの原理 簡略版
- トランジスタの特性 (基本: 電圧制御電流源)

– ルール1
$$i_E = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \approx i_C$$

– ルール2
$$i_B = \frac{1}{\beta} i_C$$

- ▲ 3章, 4章 (動作原理) は各自で目を通しておくこと
 - 詳細は半導体工学, 等

第5章 トランジスタ (2/3)

第5週 5月18日

● ベース電流の重要性

- ベース抵抗の影響 (ベース拡がり抵抗, 外付抵抗)

$$i_b \neq 0 \quad v_I = V_T \ln\left(\frac{i_C}{I_S}\right) + \frac{1}{\beta} i_C R_B$$

- (第1項) 電圧制御領域, (第2項) 電流制御領域

$i_b \neq 0$ ではこちらが支配的

- **ルール3** 電流制御領域では $v_{BE} \sim 0.6 \text{ V}$

$$v_I \approx 0.6 \text{ V} + \frac{1}{\beta} i_C R_B \rightarrow \text{折れ線近似}$$

第5章 トランジスタ (3/3)

第6週 5月25日 & 第7週 6月1日

● デモ実験2: トランジスタによる増幅とその特性

● 接地方式

	電圧利得	電流利得	入力インピーダンス	出力インピーダンス
エミッタ接地	中	中	中	中
ベース接地	大	1	小	大
コレクタ接地	1	大	大	小

● バイアス

– 種々のバイアス方式

- 安定度の比較 対 温度, 電源電圧
→ レポート, 数値をあたってみて、相互に比較してみる。

– バイアス回路と小信号回路 (線形化) の分離

- 小信号等価回路 (5.4節) はpass

第6章 電力増幅

第8週 6月8日

- 設計の要点
 - 大振幅, インピーダンス整合, 電力効率
- 動作クラス
 - A級 — 効率
 - B級 — プッシュプル
 - C級 — 同調増幅器 (講義せず)
 - D級 — PWM, インバータ

第7章 直流増幅 (1/2)

第9週 6月15日

- 直流信号 (センサ出力, 等)の増幅
 - バイアスと信号の分離ができない
- 直流成分のドリフト対策が必要
 - バイアスの安定化
 - 定電流、定電圧回路
 - カレントミラー
 - 対称回路による打消し — 差動増幅器
 - 温度補償
- 例)) オペアンプの内部回路

第7章 直流増幅 (2/2)

第10週 6月22日

- 差動増幅器

- 対称回路によるドリフトの低減
- 同相雑音の除去

- ◆ 能動負荷

- ◆ CMRR (common mode rejection ratio)

- 共通定電流源のご利益

- 平衡伝送による雑音対策

- 平衡伝送はコモンモード雑音に強い
- デモ実験3: 平衡伝送によるコモンモード雑音除去

第8章 オペアンプ (1/4)

第11週 6月29日

- オペアンプ(演算増幅器、operational amplifier)
 - 名前はアナログ計算機へ応用されたことから
 - モノリシックIC化、現在は多種多様

	理想	現実
利得	∞	$\sim 10^5$
帯域	DC $\sim \infty$	DC \sim (1MHz \sim 1GHz)
入力インピーダンス	∞	10k Ω \sim T Ω
出力インピーダンス	0	$\sim 50 \Omega$
雑音	0	(1 \sim 10) nV/Hz ^{1/2}
オフセット	0	1 μ V \sim 10mV
安定性	深い負帰還	帯域とtrade off

第8章 オペアンプ (2/4)

第11週 6月29日

- 非常に大きな利得をもつ
- 負帰還をかけて使うもの (利得の安定化)

– 開ループ特性 $v_o = A_o(v_+ - v_-)$

– 閉ループ特性 $v_o = \frac{A_o}{1 + A_o\beta} v_i$ β : 帰還率
(非反転増幅回路)

$$\rightarrow \frac{1}{\beta} v_i \quad (A_o\beta \gg 1)$$

- 仮想短絡 (ループ利得 $A_o\beta \gg 1$ のとき)

➡ 計算に便利

$$v_+ - v_- \rightarrow 0$$

第8章 オペアンプ (3/4)

第11週 6月29日 & 第12週 7月6日

● 負帰還と周波数特性

$$A_o(\omega) = \frac{A_o(0)}{1 + j(\omega/\omega_1)}$$

– 利得と帯域

$$A_o(0) \rightarrow \frac{A_o(0)}{A_o(0)\beta}, \quad \omega_1 \rightarrow \omega_1 \times A_o(0)\beta$$

– 系の安定性 (フィードバック制御)

● 正帰還 (発振、多重安定(メモリ))

第8章 オペアンプ (4/4)

第12週 7月6日

- 応用回路 (入出力特性はたいてい仮想短絡で計算できる。)
 - 反転増幅, 加算, 減算
 - 微分回路, 積分回路
 - 差動増幅
 - 非線形回路
 - インピーダンス変換
 - トランスコンダクタンス回路
 - ボルテージフォロア

第10章 発振回路 (1/2)

第12週 7月6日 & 第13週 7月13日

● 定常発振

— 損失 \leq 正帰還量 (エネルギー投入)

— 振幅の安定化

振幅 \uparrow (\downarrow) \Rightarrow 帰還量 \downarrow (\uparrow)

ファン・デル・ポルの方程式 (リミットサイクル)

— 例: LC発振器

エミッタ接地は g_m の極性が逆 \Rightarrow 工夫が必要

第10章 発振回路 (2/2)

第13週 7月13日

- 正帰還でループ利得 $A\beta(\omega) = 1$
 - ウィーンブリッジ発振器
 - CR発振器 → 損失大, 大きな利得が必要
 - 低周波発振器
 - 移相型発振器
- 水晶発振器
 - 高い周波数安定度 ($10^{-6} \sim 10^{-13}$)
- CRタイミング発振器(ししおどし)

(淡赤の項目は時間不足で説明できなかった)

その他

講義では紹介できなかった項目

- 第11章 (時間不足)
 - アナログ乗算器
 - 変調, 復調
 - 直交振幅変調
 - PLL
- トランジスタでやりのこしたこと
 - アーリ効果 (今年も多少説明した)
 - T型等価回路、ハイブリッド行列
 - 教科書のT型等価回路の部分 (5.4 節) を読む学生諸君へ.
 - 電流源に並列に入っている出力アドミタンスがアーリ効果を表します.
 - 教科書ではこの節以前まで $v_{BE} \sim 0.6$ Vで一定, と扱ってきましたが, ここでは v_{BE} の微小変化も線形化して取り込みます. r_b, r_e はこのことから発生する微分抵抗です. ($R_B=0$, すなわちexp特性だけで議論していることにも注意)

$$\Delta v_{BE} = \Delta \left[V_T \ln \left(\frac{i_C}{I_S} \right) \right] \approx \frac{V_T}{i_{CQ}} \Delta i_C = \left(\frac{1}{g_m} \right) \Delta i_C$$

- ミラー効果 (高周波特性)