

現場で役立つ
オペアンプ回路
——サーボ系を中心として——

博士(工学) 涌井 伸二 著

コロナ社

ま え が き

電気電子工学科における必修科目の一つに電子回路がある。筆者の学生時代、トランジスタ、電界効果トランジスタ、そしてなんと真空管を使った電子回路まで扱われた。もちろんいまの時代にあつて、真空管の取扱いを講義しても実利は期待できない。加えて、筆者自身の使用経験は皆無であり、要所をおさえた講義はできるわけもない。そのため、おもにトランジスタの接地形式の違い、 h パラメータ等価回路の扱いなどを説明する。最終的には、トランジスタを用いた差動回路の動作とその解析、そして電力増幅回路の動作を理解させることまでを講義する。初学者に対して知識を伝授するのであり、トランジスタ単体の動作、およびこれを使った電子回路の基本構造は学ばざるを得ない。

しかし、卒研配属時の研究あるいはメーカ就職後の仕事の場面で、トランジスタを使った電子回路を扱うことはほとんどない、といつてよいであろう。むしろオペアンプを取り扱う場面の方が圧倒的に多い。そのため、トランジスタを使った電子回路の講義が終了した後は、オペアンプに関する内容を話す。もちろん、初学者向け電子回路のテキストには、トランジスタとともにオペアンプに関する記載が必ずある。しかし、それは貧弱で、かつ記載せざるを得ない内容であるものの、これが難しく扱われているように思う。もちろん、基礎的事項の理解は必要である。しかし、とりあえずオペアンプを使った電子回路を製作し、これを使って仕事をしたい人にとっては、冗長な記載になっていると感じる。そのため、オペアンプの講義時には、実務に直結する内容を話している。この経験から、以下の課題が浮き彫りになった。

(1) 講義では、加減算回路あるいは位相進み補償回路における伝達特性の解析結果を示す。ところが初学者または初級技術者の場合、そもそも加減算回路などの使われ方がわからないので、解析結果だけを示されても実感がわかない。

(2) オペアンプが多数個接続されて所望の機能を実現するのであり、その

なかの一つだけを取り出している，ということを初学者は認識できていない。

(3) オペアンプが実現する機能を伝達関数で表現するが，これを導く基本式を立式できない。すなわち，電位と電流の流れを仮定し，これを回路図に記載することをとおして回路方程式を立てられない。

(4) オペアンプを用いた電子回路を製作した後，この機能をオシロスコープあるいはサーボアナライザ（周波数応答分析装置）を使って計測することになる。しかし，従来の書籍では，特に周波数応答と数式との1対1の関係を十分に説明していない。だから，実務の場面では，不可避なミスの原因を特定あるいは推定したうえで，デバッグすることができない。

上記課題を解決するために本書を執筆した。具体的な特徴は以下のとおりである。

(a) 上記(1)，(2)の解決を図るために，サーボ系の構築という目的のなかにおける一機能としてのオペアンプ回路であるという説明形式を採用した。

(b) 上記(3)に対しては，回路方程式を立式するための補助図面を多数掲載した。

(c) 上記(4)に対しては，実測の周波数応答を掲載し，この計測結果と数式との対応を詳細に説明した。

サーボ系は閉ループを構成しており，このループが備える固有の性質によって「曖昧性」を強力に抑制してくれる。具体的に，数多くの種類があるオペアンプの選定に多大の時間を費やさずとも，そしてこれに外付けする抵抗およびコンデンサの精度に問題があっても，閉じたループが持つ抑圧特性によってサーボ系を動作させることができる。加えて，パワーオペアンプを除外して，信号処理用のものに対して過酷な取扱いを行っても容易には破壊しない。したがって，試作レベルのサーボ系を構築するのであれば，本書に基づく勉強をとおして，大胆にオペアンプを使った回路を製作し，これをサーボ系に投入してほしいと願う。

最後に，出版にあたり多大なるご尽力をいただいたコロナ社の皆様に感謝します。

2017年6月

涌井 伸二

目 次

1. オペアンプの活用

1.1 電子回路という科目	1
1.2 オペアンプを使用する場面	6

2. オペアンプ

2.1 パッケージ	12
2.2 ピンアサインメント	13
2.3 反転アンプと非反転アンプ	14
2.4 外付け素子のインピーダンスおよび伝達関数	15
2.5 伝達関数の算出	17
2.6 トラブル例, オペアンプの選定など	21
演習問題	25

3. 補償器

3.1 加減算回路	39
3.2 バッファアンプ	47
3.3 PI 補償器	50
3.4 PID 補償器	56
3.5 位相進み補償器	59
3.6 位相遅れ補償器	77

3.7	位相進み遅れ補償器	82
3.8	ローパスフィルタ	83
3.9	バンドパスフィルタ	89
3.10	ノッチフィルタ	92
	演習問題	95

4. 特殊回路

4.1	ゲイン調整・切替え	116
4.2	時定数の切替え	119
4.3	オフセット調整	121
4.4	ゲイン零化のスイッチ	123
4.5	リミッタ	126
4.6	IV変換器	129
4.7	ウィンドコンパレータ	131
4.8	基準電圧の設定とバイアス電流の通電	134
4.9	その他の回路	137
	演習問題	141

5. 電流アンプ

5.1	電流フィードバックとは (DCモータの電流ドライブ回路)	149
5.2	電流フィードバックの有無による比較	154
5.3	電流アンプと補償器の一体化	157
5.4	パワーデバイスの保護回路	160
5.5	圧電素子の駆動回路	161
	演習問題	165

	引用・参考文献	174
	索引	175

1 オペアンプの活用

3本足のトランジスタを使った電子回路の解析を行えるようにするためには、1.1節に示すものを含めた数多くの演習問題を解く必要がある。しかし、学生あるいは初級技術者が、解析法を理解し、難なくそれを操れても、残念ながら、実用の電子回路の動作理解は簡単ではなく、いわんや所望の機能を実現する電子回路を設計することもできない。ところが、オペアンプを使った電子回路の場合、基本的な扱いを理解すれば、即座に使いこなせる。そして、1.2節に述べる例のように、オペアンプを活用したい場面はトランジスタに比べて圧倒的に多い。

1.1 電子回路という科目

電気電子工学科の必修科目の一つに電子回路がある。筆者の学生時代には、バイポーラトランジスタ、電界効果トランジスタ (FET)、そして真空管までも扱われた。現在では、対象をトランジスタに絞って、この素子特性、バイアスの与え方、等価回路の扱い、そして具体的な回路を示しての分析方法を講義している。具体的に、トランジスタに関する講義の最終場面では、**差動回路** (differential circuit)、そしてA級、B級、AB級、C級電力アンプの動作理解までを扱う。

ここで、**図 1.1.1 (a)** に npn 型のトランジスタを使った差動回路の一例を示す。差分の入力電圧に応じて動作する回路であり、同相ノイズを打ち消すなどの特徴を有する。じつは、この回路構造が**オペアンプ** (演算増幅器, operational amplifier を略したオペアンプの呼称が一般的) のなかに実装され

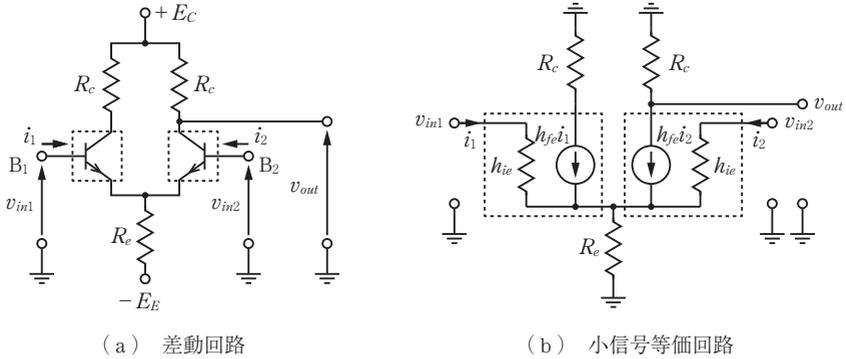


図 1.1.1 トランジスタを使った差動回路とその小信号等価回路[†]

ている。さて、電子回路の講義では、図 1.1.1 (a) の動作を理解させるために解析を実施する。以下のとおりである。

*** 講義内容 (その 1) *****

図 1.1.1 (a) の回路を、 h パラメータを用いた同図 (b) の小信号等価回路に変換する。この等価回路から、回路方程式は式 (1.1.1) である。

$$\left. \begin{aligned} v_{in1} &= h_{ie}i_1 + R_e(1+h_{fe})(i_1+i_2) \\ v_{in2} &= h_{ie}i_2 + R_e(1+h_{fe})(i_1+i_2) \\ v_{out} &= -R_c h_{fe}i_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.1)$$

次に、 $v_{in1}=0$ の条件下で電圧増幅度 $A_v = v_{out}/v_{in2}$ を求めると式 (1.1.2) となる。

$$A_v = -\frac{h_{fe}R_c \{h_{ie} + R_e(1+h_{fe})\}}{h_{ie}^2 + 2(1+h_{fe})R_e h_{ie}} \quad (1.1.2)$$

さらに、近似を行って式 (1.1.2) は式 (1.1.3) となる。

[†] 抵抗の記号として、旧 JIS では鋸齒状 ($\sim\sim\sim$) としていたが、現 JIS では箱状 ($\text{---}\square\text{---}$) に変更している。電子回路では、抵抗を鋸齒状、インピーダンスを箱状に書いて、両者を区別することが一般的であるので、本書では、抵抗とインピーダンスの区別を強調するため、抵抗を鋸齒状、任意のインピーダンスを箱状とした。

$$A_v \approx - \frac{h_{fe} R_c (h_{ie} + R_e h_{fe})}{h_{ie}^2 + 2h_{fe} R_e h_{ie}} \quad (1.1.3)$$

初学者にとっての理解を困難にする要因を挙げると以下のとおりである。

〔1〕 交流的に短絡（ショート）

図 1.1.1 (a) の直流電源 $+E_C$ と $-E_E$ は、同図 (b) では短絡のうへ接地されている。これを**交流的に短絡**と称する。トランジスタを動作させるには、直流電圧の供給が不可欠である。一方、小信号等価回路では、交流信号に対する振舞いだけを見るため、直流電源 $+E_C$ と $-E_E$ を短絡する。

〔2〕 トランジスタの h パラメータ等価回路

h パラメータを使ったトランジスタの等価回路は図 1.1.2 である。ここで、記号の意味は以下のとおりである。

v_1 : 入力電圧 [V], v_2 : 出力電圧 [V]

i_1 : 入力電流 [A], i_2 : 出力電流 [A]

h_{ie} : 出力短絡時の入力インピーダンス [Ω]

h_{re} : 入力開放時の電圧帰還率 [-]

h_{fe} : 出力短絡時の電流増幅率 [-]

h_{oe} : 入力開放時の出力アドミタンス [S (=1/ Ω)]

(下付き添字 e はエミッタ接地を意味する)

ところが、小信号等価回路の図 1.1.1 (b) では、図 1.1.2 をそのまま使用してはいない。 $h_{re}=0$, $1/h_{oe}=\infty$ であることを既知とする回路となっている。

〔3〕 近似の多用

式 (1.1.2) から式 (1.1.3) への近似にあたって、 $1+h_{fe} \approx h_{fe}$, すなわち $h_{fe} \gg 1$ というトランジスタの性質を使う。すでに、上記〔2〕において $h_{re}=0$, $1/h_{oe}=\infty$ を導入したと同様に、トランジスタを用いた回路解析の場合、注意書きがなくても自明なこととして扱われる。結局のところ、上記〔1〕～

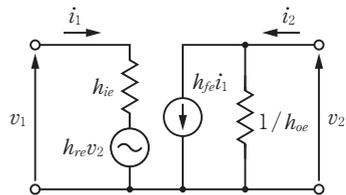


図 1.1.2 トランジスタの h パラメータ等価回路

[3] の知識を持たないと、回路方程式である式 (1.1.1) を立式できず、したがって、図 1.1.1 (a) の設計指標の一つである式 (1.1.3) の電圧増幅度 A_v も算出できない。

さらに、 h パラメータを用いた等価回路の扱いでは、入力インピーダンス R_{in} と出力インピーダンス R_{out} を計算する演習が必ず登場する。筆者も、テキストの記載を踏襲しつつ、補足の説明を加えて図 1.1.3 (a) を示して R_{in} を求めさせる講義を行っている。

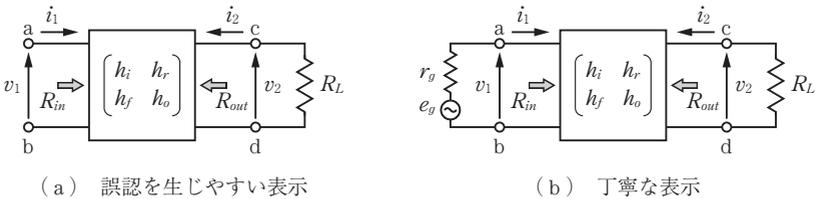


図 1.1.3 h パラメータを使った入力インピーダンス R_{in} の算出

*** 講義内容 (その 2) *****

基本式は式 (1.1.4) のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= h_i i_1 + h_r v_2 \\ i_2 &= h_f i_1 + h_o v_2 \\ v_2 &= -R_L i_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.4)$$

式 (1.1.4) を解いて、 $R_{in} = v_1 / i_1$ は式 (1.1.5) となる。

$$R_{in} = h_i - \frac{h_r h_f}{h_o + \frac{1}{R_L}} \quad (1.1.5)$$

ここで、特に初学者の場合、端子 a-b の左側に何も接続していないオープンの状態にもかかわらず電流 i_1 が流れている図 1.1.3 (a) の表示には、省略があることを正しく理解したい。因果関係を踏まえて描くと図 1.1.3 (b) である。つまり、内部インピーダンス r_g を持つ信号源 e_g の接続によって、はじめて端子 a-b 間に入力電圧 v_1 を発生させ、結果として電流 i_1 、 i_2 が流れる。このことを踏まえると、出力インピーダンス $R_{out} = v_2 / i_2$ の導出では、式 (1.1.4)

の第3式から、即座に $R_{out} = -R_L$ としてしまいがちな誤答を避けられる。

具体的に、図 1.1.3 (b) だけを与えて出力インピーダンス R_{out} を求めさせる問題が与えられたとき、図 1.1.4 に示す図 (a) から図 (b) の手順が必要となる。

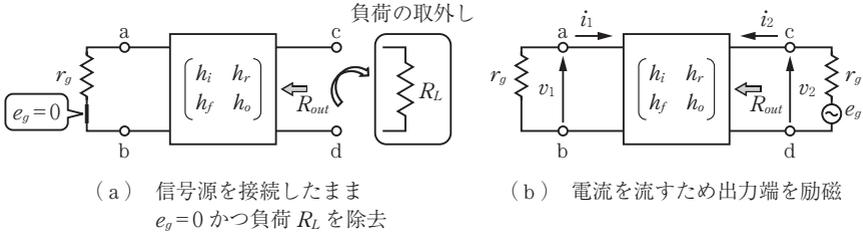


図 1.1.4 出力インピーダンス R_{out} を求める手順

まず、図 1.1.4 (a) のように、信号源を接続しておく。ただし、 $e_g = 0$ と設定する。さらに、負荷 R_L を外さなければならない。ここで、 $e_g = 0$ かつ R_L を外した状態の図 1.1.4 (a) では、電流 i_1 、 i_2 が流れるはずがない。そこで、同図 (b) のように、出力側の端子 c-d 間に v_2 を印加するために信号源 e_g を接続する。すると、電流 i_2 が、そして電流 i_1 が流れる。そのため、 R_{out} を求めるための基本式は式 (1.1.6) となる。

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= h_i i_1 + h_r v_2 \\ i_2 &= h_f i_1 + h_o v_2 \\ v_1 &= -r_g i_1 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.6)$$

式 (1.1.6) を解いて、 R_{out} は式 (1.1.7) となる。

$$R_{out} = \frac{1}{h_o - \frac{h_r h_f}{h_i + r_g}} \quad (1.1.7)$$

さらに、電子回路の講義では、式 (1.1.5) の R_{in} と式 (1.1.7) の R_{out} を求めさせた後に、3種類の接地形式によって大小関係があることを学ばせる。結果として、3種類のなかで、 R_{in} が最も大きく、そして R_{out} が最も小さい接地形

索 引

【あ】	重ね合わせの理	42	
圧電素子	161	カスケード接続	29
アナログスイッチ	117, 118	仮想接地	19
【い】		可変抵抗器	117
位相遅れ補償器	77	可変容量マルチプライア	146
位相進み遅れ補償器	82	ガルバノスキャナ	92
位相進み補償器	59	完全積分器	58
イマジナルアース	19	完全微分器	58
イマジナルショート	19	還流ダイオード	160
インピーダンス整合	145	【き】	
インピーダンス補正	171	擬似積分	79
【う】		擬似積分補償器	46
ウィンドコンパレータ	132	逆システム	112
ウィーンブリッジ	105	逆バイアス	130
【え】		極	66
演算増幅器	1	極零相殺	94
【お】		金属皮膜抵抗	24
オフセット	121	【く】	
オフセット電圧	114	加え合せ点	39
オペアンプ	1	【け】	
オールパスフィルタ	96	減衰係数	88
折線近似	52	【こ】	
折点周波数	52	交流的に短絡	3
【か】		コモンモードチョーク	172
回生ダイオード	160	コモンモード電流	172
外乱	152	固有角周波数	88
開ループゲイン	17	コレクタ接地	6
加減算回路	42	コンプリメンタリペア	158
【あ】		【さ】	
		最終値定理	104
		最大平坦特性	86
		差動アンプ	42
		差動回路	1
		三角波	169
		【し】	
		実用単位系	166
		時定数	51
		遮断周波数	86
		シャント	125
		縦続接続	48
		周波数伝達関数	35
		出力アドミタンス	3
		出力インピーダンス	4, 17
		仕様書	13
		小信号等価回路	2
		状態	89
		状態フィードバック	89
		初期値定理	104
		【す】	
		スナバ回路	160
		【せ】	
		正帰還	21, 40
		積 分	50
		接合型ジャンクション FET	124
		絶対値回路	138
		折点周波数	52
		零 点	66

全波整流回路	138				
【そ】		【ね】		【へ】	
ソフトリミッタ	128	熱暴走	170	偏差	39
【た】		【の】		【ほ】	
ダイオードゲート	134	ノッチ中心角周波数	94	方形波	168
対称形ソフトリミッタ	126	ノッチフィルタ	93	補償器	39
ダーリントン接続	137, 160	ノーマルモード電流	173	ボード線図	51
炭素（カーボン）皮膜抵抗	24	【は】		ボトム検出	140
【つ】		バイアス電圧	136	【ま】	
ツェナーダイオード	128	バイアス電流	136	マイラコンデンサ	24
【て】		バイアス補償抵抗	113	【み】	
定位系	162	バイカッド回路	86	ミラー積分回路	58
定格電力	167	ハイパスノッチフィルタ	110	ミラー微分回路	58
ディレーティング	170	ハイパスフィルタ	89	【む】	
電圧増幅度	2	バタワースフィルタ	7, 33, 84	無定位系	163
電圧・電流変換器 VIC	156	バッファアンプ	47	【め】	
電圧ホロワ	47	ハードリミッタ	128	メタル CAN	13
電界効果トランジスタ	123	パルス幅変調	168	【よ】	
電解コンデンサ	100	パワーオペアンプ	156	容量マルチプライア	145
電源リップルフィルタ	11	反転アンプ	12, 14	4端子定数	63
伝達関数	15	半導体レーザ	10	【ら】	
電流電圧変換器	130	反時計方向	137	ラプラス演算子	15
電流フィードバック	150	バンドパスフィルタ	88, 89	【り】	
電流ブースタ	8, 157	半波整流回路	138	理想オペアンプ	19, 43
【と】		【ひ】		リミッタ	126
特性多項式	88	ピーク検出	140	【れ】	
時計方向	137	ビート	169	零点	66
ドリフト	101	ヒートシンク	170	レーザダイオード	10
【に】		非反転アンプ	12, 14	【ろ】	
2端子対回路	60	微分	50	ローパスノッチフィルタ	110
入力インピーダンス	3, 4, 17	比例	50	ローパスフィルタ	83
入力バイアス電流	113	【ふ】		ロールオフ	84
【ぬ】		フィルムコンデンサ	24		
null 周波数	94	フォトダイオード	6		
		負帰還	21, 40		
		複素共役	74		
		フライホイールダイオード	160		

[B]		[F]		[P]	
Bainter	109	<i>F</i> パラメータ	64	PI 補償器	50
				PID 補償	56
				PWM	168
				PWM アンプ	169
[C]		[H]		[S]	
CCW	137	<i>h</i> パラメータ	2		
CW	137				
[D]		[I]		[T]	
		IV 変換器	130	SI 単位	166
DIP	12			SOP	13
[E]		[N]		[T]	
E24 系列	31, 142	null 周波数	94	Twin-T 型	106
				T 型	55

— 著者略歴 —

1977年 信州大学工学部電子工学科卒業
1979年 信州大学大学院修士課程修了（電子工学専攻）
1979年 株式会社第二精工舎（現セイコーインスツル株式会社）勤務
1989年 キヤノン株式会社勤務
1993年 博士（工学）（金沢大学）
2001年 東京農工大学大学院教授
現在に至る

現場で役立つ オペアンプ回路 — サーボ系を中心として —

Operational Amplifier Circuits in Servo System Available to Industry

© Shinji Wakui 2017

2017年7月25日 初版第1刷発行



検印省略

著者	わく い しん じ 涌 井 伸 二
発行者	株式会社 コロナ社
代表者	牛来真也
印刷所	新日本印刷株式会社
製本所	有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00899-9 C3055 Printed in Japan

(横尾)



<出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。