

電気電子回路演習テキスト 2020

目次

0	はじめに	4
1	ガイダンス	5
1.1	概要	5
1.2	事前課題	6
1.3	オペアンプ	6
1.4	演習内容	11
2	時間領域 spice(過渡解析)	12
2.1	特性根を用いた過渡現象の表現	12
2.2	回路パラメータによる過渡現象の分類	13
2.3	事前課題	14
2.4	発展課題の設定例	15
2.5	発展課題設定報告	16
3	時間領域 Octave(相平面の解析)	17
3.1	連立微分方程式による定式化	17
3.2	パラメータによる変化	20
3.3	事前課題	21
3.4	発展課題の設定例	21
3.5	発展課題設定報告	23
3.6	第1回レポート	23

4	周波数領域 spice(AC 解析)	24
4.1	指数関数入力の場合	24
4.2	複素関数の可視化	26
4.3	事前課題	28
4.4	発展課題の設定例	28
4.5	発展課題設定報告	30
5	入出力特性解析	31
5.1	2 ポート解析 (伝達特性)	31
5.2	事前課題	36
5.3	発展課題の設定例	36
5.4	発展課題設定報告	37
5.5	第 2 回レポート	38
6	能動回路の解析	39
6.1	増幅・スイッチ	39
6.2	事前課題	45
6.3	発展課題	46
6.4	発展課題設定報告	47
7	帰還	49
7.1	フィードバックの考え方	49
7.2	事前課題	51
7.3	発展課題	51
7.4	発展課題設定報告	53
7.5	第 3 回レポート	53
8	時間領域 myDAQ(オシロスコープ)	55
8.1	実験の注意	55
8.2	事前課題	55
8.3	発展課題の設定例	57
8.4	発展課題設定報告	58
9	周波数領域 myDAQ(ボード線図)	58
9.1	ボード線図	58

9.2 事前課題	59
9.3 発展課題の設定例	59
9.4 発展課題設定報告	60
10 入出力特性実験 (ボード線図)	61
10.1 事前課題	61
10.2 発展課題の設定例	61
10.3 発展課題設定報告	62
11 能動回路の実験	63
11.1 事前課題	63
11.2 発展課題 (参考)	64
11.3 発展課題設定報告	65
11.4 第4回レポート	66

0 はじめに

電気電子回路演習では、既に学習したことを関係づけることにより、自ら課題を設定し、学習することを目指す。下記に注意すること。

- すでに修得した線形代数、微分積分などの数学や電気電子回路関係、情報処理関係の講義における考え方や手法を組み合わせることで、より理解を深める。また、理解に基づき回路を実際に動作させ、自ら自由に創り出す視座を得る。
- 計算ツール Octave、回路シミュレータ LTspice、ポータブル計測デバイス myDAQ/ Analog Discovery 2 を手足のように自由に操り、考える習慣を身につけ、他の教科の学習にも活用する。
- 事前課題は演習前に毎回 90 分以上の時間を確保し、完全にツールを使える状態で講義に臨むこと。講義は事前課題をしてきたことを前提に行う。困った場合は 2 限のオフィスアワーを活用すること。
- 発展課題は演習中に自ら課題設定し、演習終了後は自宅においても毎回 90 分以上確保し、納得できるまで試行錯誤すること。小さなことでも追求し、理論からは具体例、具体例からは一般化を試み、複数の見方の関係性を見出すこと。疑問が残った場合は、次週の 2 限オフィスアワーを活用し、何らかの自分のレベルアップが毎回感じられるようにすること。
- 数回の発展課題で得られた成果をまとめてレポートとして提出。式や図を用い、論理的に考え、焦点を絞って正確に伝える方法を身につけること。
- 理解を深めることやツールの修得にはグループ議論が近道。

1 ガイダンス

1.1 概要

電気電子回路演習で扱う内容は、1 回生で習った直列共振回路を中心に、制御電源やスイッチも用いて、以下の4つのテーマを学ぶ。

時間領域: 回路の過渡現象について、1 回生で習った代数的な扱いに加えて幾何学的な見方で、微分方程式を流れとして扱う。これにより、微分方程式の視覚的な捉え方ができる。また、線形代数の知識を利用することにより、大きなシステムも基本的な要素に分解して考えられることを修得する。

周波数領域: 1 回生で習ったフェーザについて、周波数による現象の違いを扱う。時間軸の扱いとは一見異なった見方であるが、回路の固有値など、登場する要素は共通である。また、現象を見る上で複素関数の極が重要になる。

入出力特性: 入出力関係という視点から回路を見る。この見方により、回路を解析するだけでなく、設計へとつなげる見方ができる。また、この場合は複素関数の極に加えて零点も重要な役割を果たす。

能動回路: 入出力関係に増幅という自由度を与えることにより、種々の回路設計への道を開く。さらに出力を入力に戻す帰還(フィードバック)を構成することにより、多様な現象が発生することを学ぶ。

以下に各回で行う内容を示す。初回にすべてのツール・オペアンプを導入し、はじめから能動回路を含む広い発展課題設定を推奨する。NはOctaveによる数値計算、SはLTspiceによる回路シミュレーション、Eはポータブル計測デバイス myDAQ による実験を示す。

テーマ名	学習内容	事前課題	レポート提出
1. ガイダンス	環境整備、オペアンプ実験、波形提出	テキスト 0, 1 章	
2. 時間領域 (S)	過渡解析、特性根、相平面上の軌跡	テキスト 2 章	
3. 時間領域 (N)	連立微分方程式、ベクトル場、固有値	テキスト 3 章	レポート 1
4. 周波数領域 (S)	AC 解析、直列共振、固有値と極	テキスト 4 章	
5. 入出力特性 (S)	伝達関数、極と零点	テキスト 5 章	レポート 2
6. 能動回路 (S)	バイアス、小信号回路、増幅/スイッチ	テキスト 6 章	
7. 帰還 (S)	帰還、発振	テキスト 7 章	レポート 3
8. 時間領域 (E)	実験、波形解析、描画	テキスト 8 章	
9. 周波数領域 (E)	周波数特性の測定 (Bode Analyzer)	テキスト 9 章	
10. 入出力特性 (E)	入出力特性の実験	テキスト 10 章	
11. 能動回路 (E)	増幅/スイッチ回路作製	テキスト 11 章	レポート 4

このテキストのほかに LTspice のガイド、Octave/myDAQ のガイド、設定課題例があるので¹、ツールの学習や発展課題の設定の参考にすること。疑問点は周りの人に尋ねる/Web にアクセスするなど、積極的な情報収集により解決を試みる。公開されたレポートも参考にしながらレポートの書き方を身に着けること。

1.2 事前課題

1. LTspice と Octave をインストール。
2. ノート PC とネットワーク環境整備
3. 次節のオペアンプの説明を熟読し、理解しておくこと。

1.3 オペアンプ

1.3.1 能動回路の必要性

センサの出力で負荷を駆動する例

例えばフォトトランジスタで明るさをセンシングして、LED を光らせる図 1.1 の回路を考える。スイッチ OFF では V_o は 3V 近く出力されていても、スイッチを閉じると 1.5V 程度に低下して LED は光らない。この理由を考えるため、センサ部は内部抵抗をもつ電源、

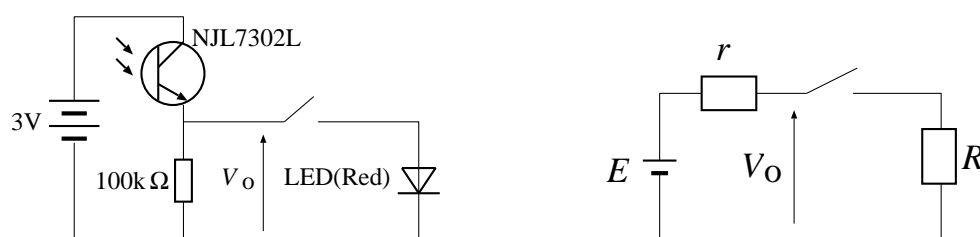


図 1.1: フォトトランジスタの出力に LED を接続した回路とその等価回路

LED を抵抗に置き換えた右側の図で考える。スイッチが OFF のときは $V_o = E$ であるが、スイッチを閉じると $V_o = RE/(r+R)$ となる。つまり、フォトトランジスタの内部抵抗 r が負荷 R に比べて大きく、LED の駆動電圧が低下するために光らない。

L, C, R から成る 2 ポート回路の制約

電源と負荷の間に 2 ポート回路を挿入し、LED を光らせることができるか考える。入力

¹すべて PandA から提供

と出力をもつ回路を次のような縦続行列で表現する。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

例えば、図 1.2 の回路の 縦続行列はそれぞれ以下になる。

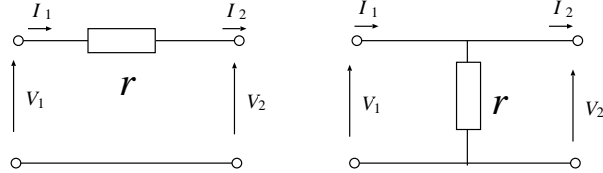


図 1.2: 簡単な抵抗回路

$$\begin{bmatrix} 1 & r \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/r & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

左の回路は入力に比べて出力電圧が減少し、右の回路は入力に比べて出力電流が減少する。一般に L, C, R から成る回路は相反性 ($AD - BC = 1$)、電力の受動性 ($P_1 = \text{Re}[V_1^* I_1] \geq P_2 = \text{Re}[V_2^* I_2]$) の制約があり、電力の増幅はできない。

電圧制御電圧源の導入

電力を増幅するためには次の図のようにセンサと負荷の間に 2 ポート回路として電圧制御電圧源をはさめばよい。

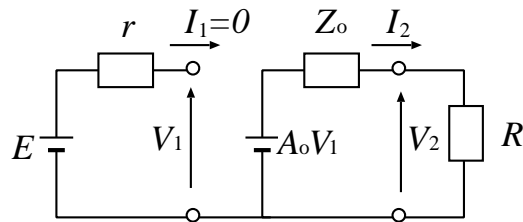


図 1.3: 電源と負荷の間に電圧制御電圧源をはさんだ場合

この場合、制御電源の入出力関係は

$$V_2 = A_o V_1 - Z_o I_2 \quad (1.3)$$

と書け、縦続行列を用いると $I_1 = 0$ なので

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/A_o & Z_o/A_o \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

となる。この制御電源は次の特性をもつ。

一方向性: 縦続行列の行列式が0なので、逆行列を持たない。つまり出力から入力に伝わらない情報がある。このような回路は相反性を持たない ($AD - BC \neq 1$)。

インピーダンス変換: この制御電源の入力インピーダンスは ∞ 、出力インピーダンスは Z_o である。このような回路を挟むことで、センサのインピーダンス r が大きい場合でもが電圧を維持し、負荷を駆動することができる。

電力増幅: $I_1 = 0$ なので制御電源の入力電力 $P_1 = 0$ 。出力電力は $P_2 = \text{Re}[V_2^* I_2]$ であり、制御電源は能動性 ($P_1 < P_2$) をもつ。

このような電圧制御電圧源を実現する素子の代表例がオペアンプである。

1.3.2 オペアンプの考え方

オペアンプとは

オペアンプは電圧制御電圧源を実現するための図 1.4 左のような素子であり、図 1.4 右の



図 1.4: オペアンプとその等価回路

ように入力差動電圧 V_1 を A_o 倍に増幅して出力する。また、入力インピーダンスは大きく入力電流は無視できるが、下記のような注意が必要である。

- 電圧増幅率 A_o は十分大きい (10^6 程) が、値は変動。
- 出力インピーダンス Z_o は数十 Ω 存在する。
- 入力 2 端子と出力端子に加え、実際の回路では \pm の電源供給が必要 (全 5 端子)。実際に出力できる V_2 は電源供給電圧 V_s^+, V_s^- に対して、 $V_s^- < V_2 < +V_s^+$ の範囲内。

電圧増幅率にバラツキがあるため、実際には出力端子から入力の一端子にフィードバックを行い、外部回路だけで特性を固定して用いる。

電圧フォロワ

最も簡単な使い方として次の図のような電圧フォロワあがある。この場合、出力側の特

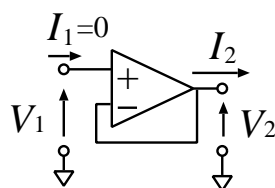


図 1.5: 電圧フォロワ

性は

$$V_2 = A_o(V_1 - V_2) - Z_o I_2 \quad (1.5)$$

と表現できるので入出力の関係は

$$V_1 = \left(1 + \frac{1}{A_o}\right) V_2 + \frac{Z_o}{A_o} I_2 \quad (1.6)$$

となり、縦続行列表現では、

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + 1/A_o & Z_o/A_o \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$$\simeq \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

となる。つまり、電圧増幅率は1であるが、入力インピーダンスが ∞ 、出力インピーダンスが0とみなせる。したがって、次の図 1.6 左のようにフォトトランジスタと LED の間に電圧フォロワを挟むとセンサの内部インピーダンスの問題を解決でき、LED は光る²。

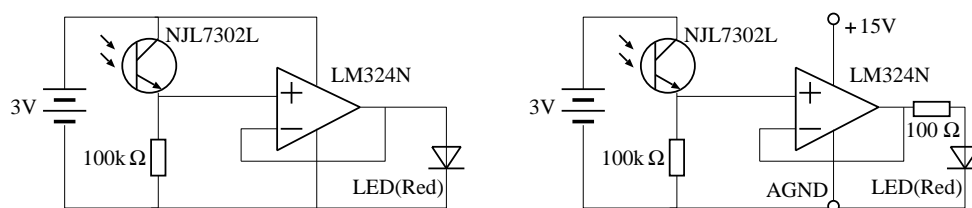


図 1.6: 電圧フォロワによる駆動。左は電池から電源供給、右は myDAQ から供給の場合。この場合には LED に直列に 100Ω の抵抗を接続し、LED を保護すること。

電圧増幅

電圧の増幅も必要な場合は次のように接続する。この場合、

² 左図はオペアンプの電源供給が 3V のため、電圧が低く、LED は光るが理想的なフォロワ動作ではない。理論通りの現象をみるには、右図のように myDAQ の電源から供給すればよい。ただし、LED に過電流が流れることを防ぐため、図のように 100Ω の抵抗を挿入すること。

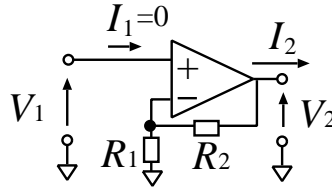


図 1.7: 非反転増幅器

$$V_2 = A_o \left(V_1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_2 \right) - Z_o I_2 \quad (1.9)$$

なので、

$$V_1 = \frac{(A_o + 1)R_1 + R_2}{A_o(R_1 + R_2)} V_2 + \frac{Z_o}{A_o} I_2 \approx \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_2 \quad (1.10)$$

となり、電圧増幅率 $1 + R_2/R_1$ 、出力インピーダンスはほぼ 0 の電圧制御電圧源が実現できる³。抵抗の比のみが重要に見えるが、抵抗を小さくしすぎると、無駄な電力消費になり、大きくしすぎると、ノイズの影響を受ける。

仮想短絡の考え方

オペアンプの動作は増幅率 A_o が十分大きいことを仮定し、入力電位差を 0 とみなすことで、より簡単な見方ができる。すなわち、入力の両端子の電圧は等しく、入力電流は 0 という近似である (仮想短絡)。次に例を示す。オペアンプが上下逆になっていることに注意。図のようにつなぐと、オペアンプの入力端子はともに電位 0 なので、入力電流は

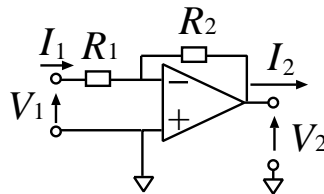


図 1.8: 反転増幅器

$I_1 = V_1/R_1$ 。その電流が R_2 にそのまま流れるので出力電圧は

$$V_2 = -R_2 I_1 = -\frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (1.11)$$

電圧増幅率 $-R_2/R_1$ で、これを反転増幅器と呼ぶ。⁴

³もちろん電源電圧は出力以上の電圧を供給しないといけない

⁴ R_2 を負荷とみると $J = V_1/R_1$ の電流源が実現できている。

1.4 演習内容

1. 【ここは実験なので後日】ブレッドボード上に Octave/myDAQ ガイドを参考に、フォトトランジスタだけの図 1.1 左では LED が光らないが、オペアンプを用いたフォロワを通した図 1.6 左では LED が光ることを確認。
2. LTspice でオペアンプの動作を確認(センサ出力は電源で模擬)。図 1.6 右のようにオペアンプの供給電圧を 3V から上げることでフォロワとして動作することを確認。
3. octave/myDAQ ガイドの 5 章で octave になれる。
4. 【ここは実験なので後日】図 1.6 右のようにオペアンプの供給電源を myDAQ に変更し(フォトトランジスタの電源は電池のまま)、オシロスコープでオペアンプの入出力電圧を測定、フォロワとしての正常動作を確認。LED の電流を制限するため、LED に直列に 100Ω の抵抗を挿入している。
5. 【ここは実験なので後日】測定したデータを Octave/Excel を用いて描画して提出。

2 時間領域 spice(過渡解析)

2.1 特性根を用いた過渡現象の表現

直列共振回路の過渡現象について、回路シミュレータ LTspice を用いながら復習する。

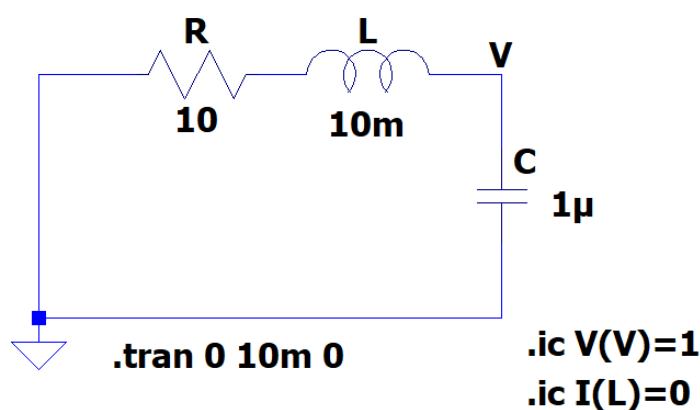


図 2.1: LCR 直列共振回路

図 2.1 のような LCR 直列共振回路において、キャパシタの電圧 v の満たす微分方程式は

$$\left(\frac{d^2}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{d}{dt} + \frac{1}{LC} \right) v = 0 \quad (2.1)$$

と書ける。この解は指数関数を用いて書け、解を $e^{\lambda t}$ とおいて代入すると

$$\left(\lambda^2 + \frac{R}{L} \lambda + \frac{1}{LC} \right) e^{\lambda t} = 0 \quad (2.2)$$

となり、 λ が特性方程式

$$\lambda^2 + \frac{R}{L} \lambda + \frac{1}{LC} = 0 \quad (2.3)$$

の解

$$\lambda = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (2.4)$$

$$= \alpha(-1 \pm \sqrt{1 - \omega_0^2/\alpha^2}) \quad (2.5)$$

の場合に微分方程式を満たす。ただし、

$$\alpha \equiv \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 \equiv \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.6)$$

であり、 α は減衰に、 ω_0 は共振角周波数に関係したパラメータである。この λ は特性根と呼ばれ、回路の特性を表す重要な値であり、退化していない場合は微分方程式の階数の数だけ得られる。

ここで2つの λ をそれぞれを λ_1, λ_2 とおくと、式 (2.1) の解は

$$v(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \quad (2.7)$$

と書ける。つまり2つの独立した解の重ね合わせになる。係数 A, B は初期値によって定めることができる。たとえば、キャパシタ電圧とインダクタ電流の初期値がそれぞれ $v(0) = 1, i(0) = 0$ の場合は

$$v(0) = A + B = 1 \quad (2.8)$$

$$i(0) = C(A\lambda_1 + B\lambda_2) = 0 \quad (2.9)$$

より、

$$v(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 - (\omega_0/\alpha)^2}} \right) e^{\lambda_1 t} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - (\omega_0/\alpha)^2}} \right) e^{\lambda_2 t} \quad (2.10)$$

となる。

2.2 回路パラメータによる過渡現象の分類

解の様子はパラメータ ω_0/α の大きさによって解の様子が異なる。

2つの異なる実数解: $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ($\alpha > \omega_0$) のとき、異なる2つの減衰定数 λ_1, λ_2 をもつ解

$$v(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \quad (2.11)$$

重根: $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ($\alpha = \omega_0$) のとき、重根により独立な解 $e^{-\alpha t}, te^{-\alpha t}$ となり、解は

$$v(t) = Ae^{-\alpha t} + Bte^{-\alpha t} \quad (2.12)$$

複素共役解: $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ($\alpha < \omega_0$) のとき、角周波数 $\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ の振動が減衰定数 α で減衰する解

$$v(t) = Ae^{-\alpha t} \operatorname{Re} \left[e^{j(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t + \theta)} \right] \quad (2.13)$$

LCR 直列共振回路では特性根の実部 α は常に0以下であり、負の場合は定常状態 $v = 0$ に近づく。一方、発振回路の場合のように特性根の実部 α が正になると解は発散する。

2.3 事前課題

次の課題を講義の前しておくこと⁵。

1. LTspice の過渡解析を用いて図 2.1 の LCR 直列共振回路の過渡現象を計算し、得られた波形が理論値と一致することを確認する。

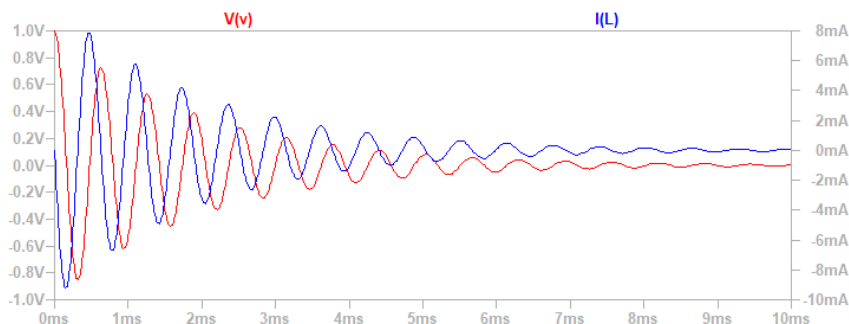


図 2.2: LTspice の実行例

2. グラフの横軸を変えて (i, v) 平面⁶上に解の軌跡を描く。

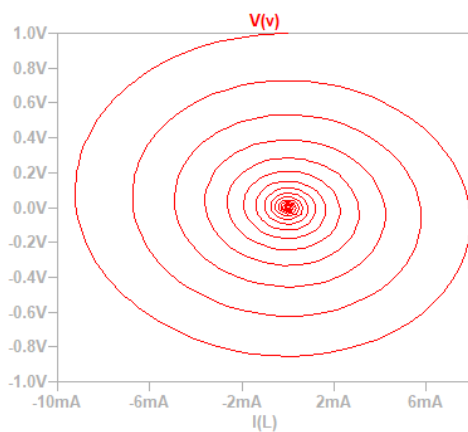


図 2.3: (i, v) 平面 (相平面) 上の軌跡の例

3. データのファイル出力 (TSV 形式)⁷。

⁵LTspice のテキストを参考に。確認のため実行結果の 1 つを PandA にてアップロードすること。

⁶このような平面を相平面と言う。

⁷これは次回 Octave で使う準備。File メニューの Export

2.4 発展課題の設定例

- パラメータ依存性
 - インダクタンス L がない場合は CR の放電回路である。 L を小さくするとどのように CR 放電回路に近づくか。直後の早い動きに注意。
 - 矩形波の電圧源を供給した場合の波形や相平面はどうなるか。
 - 矩形波のパルス幅を調整し、過渡現象が収まる前に電源電圧を切り替えることで、減衰振動の初期値を変えられるだろうか。
- 素子を変える、つなぎ方を変える、素子を増やす
 - LC 共振回路を 2 個用意して結合させた場合について解析 (例題:結合共振器)。
 - キャパシタ 2 個で 2 階の微分方程式になる回路の場合は振動的になるか。
 - 並列共振回路の場合、現象はどのようなになるだろうか。
 - 素子をさらに増やした場合、いくつかの減衰や振動に分けられるか。
 - 1 回生で勉強した回路のテキストにある問題の意味をもう一度考えてみる。
- 見方の違い
 - エネルギーはどのようにやりとりされているか。LTspice で瞬時電力の波形を表示させて考える。電源をゆっくり変化させるとエネルギー消費はどうなるか。
 - 双対回路を考える。
 - 対数グラフで表示すると何が読み取れるか。
- 方法による比較
 - 理論解と LTspice の解は完全に一致するか。数値計算誤差はどのくらいあるか。
 - 回路シミュレーションの精度をあげるにはどうしたらよいか。シミュレーション条件の設定を考える。
- 設計
 - L を 1 個、 C を 1 個を用いた実用的な回路として、スイッチとダイオードを用いた DC-DC コンバータを考える (例題:昇圧コンバータ)。
 - 減衰定数が負になる回路はできるか (例題:CR 発振回路、移相型発振回路)

- オペアンプを用いた微分演算回路で微分方程式を解く。
- 先取り
 - myDAQ を使って過渡現象の実験をする。

2.5 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験

を簡単にまとめて提出すること。

3 時間領域 Octave(相平面の解析)

3.1 連立微分方程式による定式化

ここでは同じ過渡現象を別の角度から考える。直列共振回路で $R = 3\Omega$, $L = 1\text{H}$, $C = 1\text{F}$ とした図 3.1 左の回路において、インダクタの電流とキャパシタの電圧の初期値が $(i, v) = (0.8\text{A}, 0.8\text{V})$ の場合の波形は図 3.1 右のようになる。インダクタの電流は一旦下がってから上昇し、キャパシタの電圧は一旦上がってから減衰する。

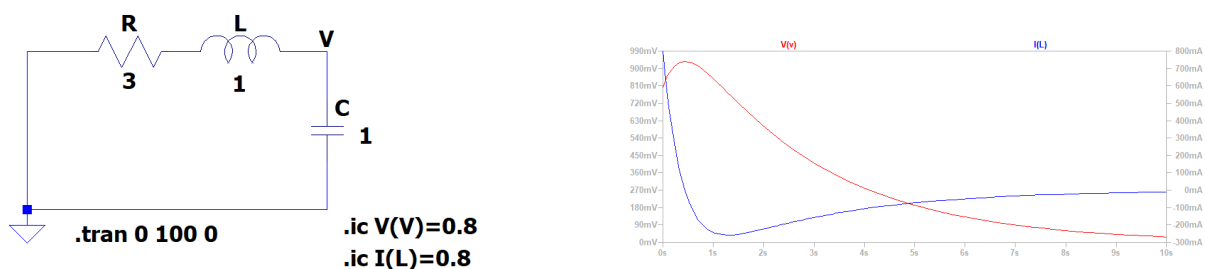


図 3.1: LTSpice による波形

この波形の (i, v) 平面 (相平面) 上に解の軌跡は次の図 3.2 になる。

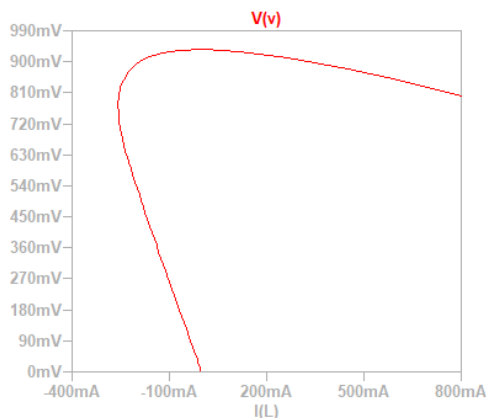


図 3.2: 相平面上の軌跡

この過渡現象の仕組みについて、線形代数の知識を用いて解析する。2 階の微分方程式は 1 階連立微分方程式でも表現でき、この表現では線形代数の固有ベクトルを用いたシステムの分解が可能になる。まず、LCR 直列共振回路の微分方程式を式 (2.1) の形に整理す

る前の段階で、電流 i と電圧 v を用いた形のまま連立微分方程式で表現すると次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

微分方程式の解は図 3.2 のように (i, v) 平面上の軌跡として表現される。

相平面上の解の軌跡の振る舞いを見るために、微分の部分を差分 $\Delta i, \Delta v, \Delta t$ に置き換える。

$$\begin{bmatrix} \Delta i \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \Delta t \\ v \Delta t \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

これは (i, v) 平面において、それぞれの位置 (i, v) に対して微小時間 Δt の間に变化する量 $\Delta i, \Delta v$ が決まることを示している。このように、相平面上の各点にベクトルを対応させたものをベクトル場と言う。例として $R = 3, L = C = 1$ のときのベクトル場を図 3.3 左に示す。

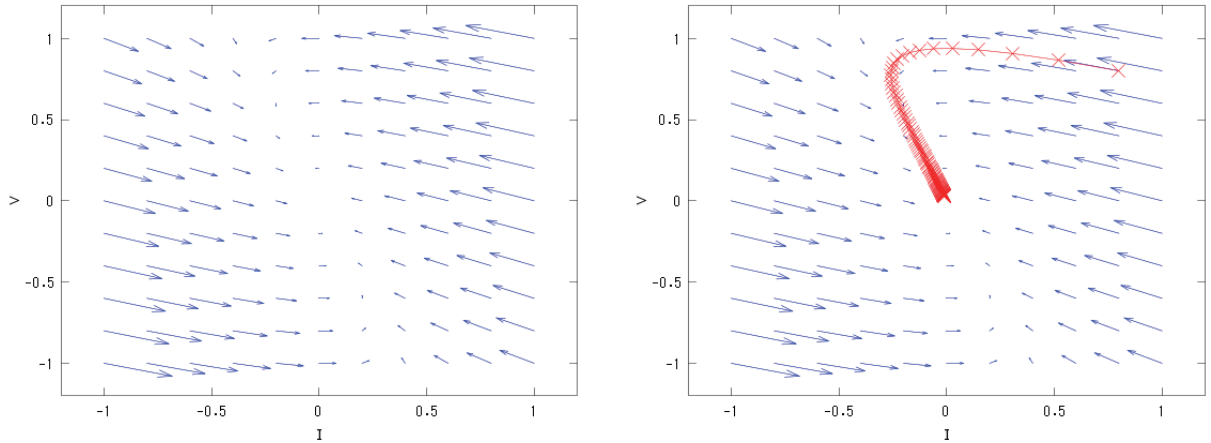


図 3.3: ベクトル場と微分方程式の解の軌跡

ベクトルの大きさは移動の速さ、方向は移動の方向を示している。

次に、Octave の関数 `lsode` を用いて微分方程式を解いてみよう。例えば初期値を $(0.8, 0.8)$ として実際に微分方程式を解いて軌跡を描くと図 3.3 右のようになり、微分方程式の解がベクトル場の流れに沿っていることがわかる。

この図を理解するために行列を

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

といて、この行列の固有値と固有ベクトルを求めてみよう。単位行列を $\mathbf{1}$ とすると、固有方程式は

$$|\lambda \mathbf{1} - \mathbf{A}| = \lambda^2 + \frac{R}{L}\lambda + \frac{1}{LC} = 0 \quad (3.4)$$

となり、式 (2.3) の特性方程式と等しい。したがって、固有値は

$$\lambda = \alpha(-1 \pm \sqrt{1 - \omega_0^2/\alpha^2}) \quad (3.5)$$

となる。

先の例の $R = 3, L = C = 1$ のときは $\alpha = 3/2, \omega_0 = 1$ となり、2つの固有値は実数で

$$\lambda_1 = \frac{-3 + \sqrt{5}}{2}, \quad \lambda_2 = \frac{-3 - \sqrt{5}}{2}, \quad (3.6)$$

になる。固有値 λ_1, λ_2 に対するそれぞれの固有ベクトル $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ は

$$\mathbf{k}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{R}{2} \left(-1 - \sqrt{1 - \omega_0^2/\alpha^2} \right) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{R}{2} \left(-1 + \sqrt{1 - \omega_0^2/\alpha^2} \right) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

となる。先の例の $R = 3, L = C = 1$ のときは

$$\mathbf{k}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{-3 - \sqrt{5}}{2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{-3 + \sqrt{5}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

となる。先ほどの図に固有空間 (各固有ベクトルの方向の直線) を描くと図 3.4 のようになる。

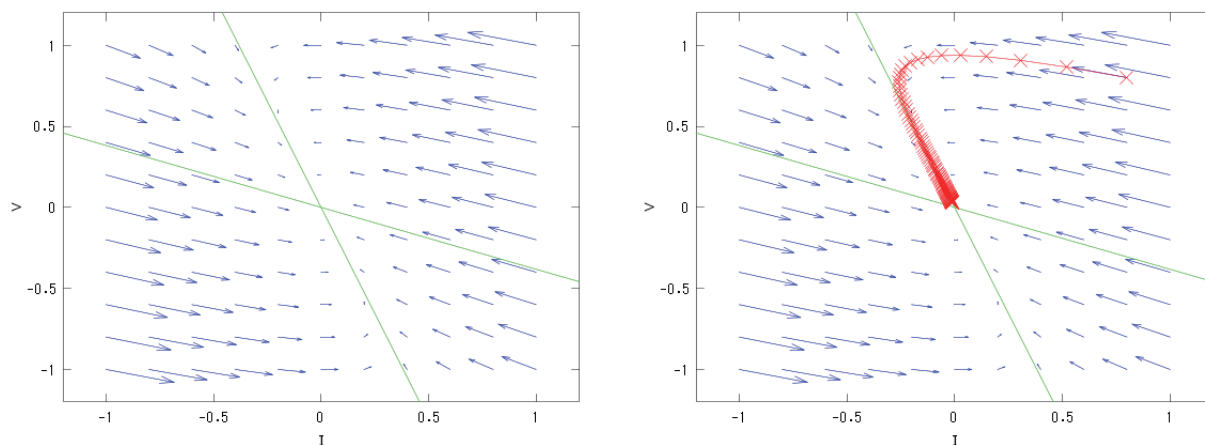


図 3.4: 固有ベクトルとベクトル場

解は初期値から、まず絶対値の大きい固有値の固有ベクトル \mathbf{k}_2 の方向に動き、絶対値の小さい固有値の固有空間に近づいたあと、絶対値の小さい固有ベクトル \mathbf{k}_1 の固有空間

付近をゆっくりと原点まで近づく。このように固有ベクトルに対応する固有空間を用いて考えると、2次元平面における現象も1次元の固有空間の組み合わせとして理解できる。

また、ちょうど固有空間上に初期値を与えると、その後も固有空間上で移動することになる。さらに次元が上がった場合も固有空間に基づいて分解して考えると見通しが良くなる。

3.2 パラメータによる変化

パラメータを変化させたときの相平面の様子はどう変化するか。例えば、 $R = C = L = 1$ の場合は2つの異なる複素固有値なので、減衰振動になるが、そのときの相平面は図 3.5 のように成る。

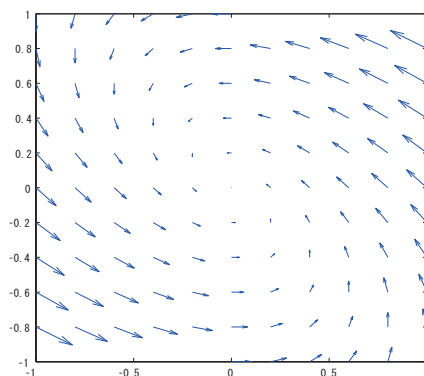


図 3.5: 複素共役固有値の場合のベクトル場

この場合は実数の意味での固有空間は2次元になる。

α と ω_0 を変化させたときの相平面の様子は次のようになる。

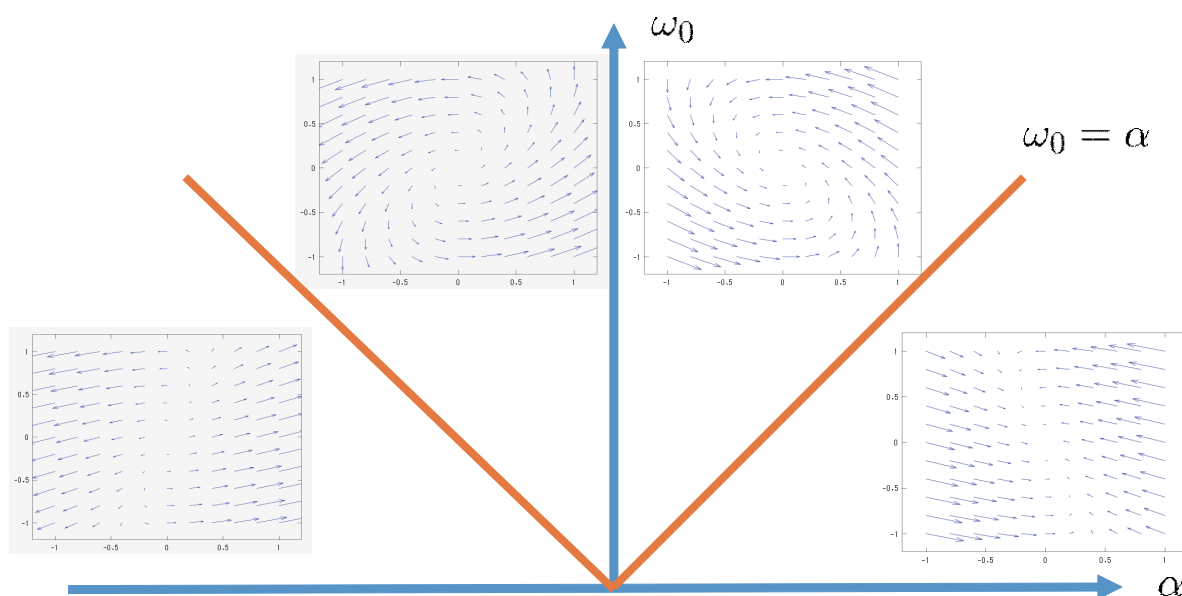


図 3.6: パラメータを変化させたときの位相平面の様子

α が負の場合は平衡点から出ていく方向のベクトル場になる。 $\omega_0 = |\alpha|$ の線より上では複素固有値で渦状、 $\omega_0 = |\alpha|$ の線より下では実固有値で固有ベクトルに沿う形になる。

より高次元の場合も、固有空間ごとに分けて考えることで見通しが良くなる。

3.3 事前課題

次の課題を講義までに行っておくこと⁸。

1. Octave の quiver を用いてベクトル場を描く (図 3.3 左)。
2. Octave の lode を用いて微分方程式を解き、ベクトル場と重ねる (図 3.3 右)。
3. 固有ベクトルも書き込む (図 3.4)。
4. LTSpice で得られた波形と比較。

3.4 発展課題の設定例

- パラメータ依存性

⁸Octave のテキストを参考に。確認のため実行結果を PandA にて提出すること。

- L を小さくして CR 回路に近づけていくと、相平面上ではどのようなになるか。
相平面が 1 次元に縮退する仕組みを考える。
- 矩形波で駆動した場合の相平面上の軌跡はどのようなになるか。
- 固有値が重根の場合の相平面はどのようなになるか。
- 軌跡を数式で表現することはできるか。
- 素子を変える、増やす
 - 共振器を結合させた場合の相平面を考える (例題:結合共振器)。
 - キャパシタ 2 個の 2 階の方程式の場合はどのような相平面になるか。
 - 前回の発展課題で扱った回路の相平面を描いてみる。
 - 電気回路や電子回路の教科書に出てくる回路について、相平面を描いてみよう。
- 見方
 - 固有値は回路における過渡現象と対応することが分かったが、固有ベクトルは何に対応するか。
 - 平面上の軌跡に沿ってエネルギーの変化を見る。
 - 相平面上の動きをアニメーションにして考察する。
- 方法の比較
 - LTspice の結果と Octave の結果、理論値を比較してみる。どのような場合に誤差が大きくなるか。
 - 微分方程式は連続した現象を表現しているが、数値計算では連続量が扱えないため、離散化して微分方程式を解いている。この仕組みについて考えてみよう。
- 設計
 - DC-DC コンバータの位相平面を書く (例題:昇圧コンバータ)。
 - α が負になる例として発振器を解析 (例題: CR 発振回路, 移相型発振回路)。
 - 自分が設定した相平面を実現する回路を求めてみる。
- 先取り
 - myDAQ を使った実験で相平面を描いてみる。

3.5 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験

を簡単にまとめて提出すること。

3.6 第 1 回レポート

時間領域に関するレポートを下記に注意してまとめ、提出すること。

表紙	タイトル, 氏名, 提出年月日を記載. タイトルは一目見て内容が解るように工夫.
1 概要	目的, 実施内容, 結果について簡単に. 200字程度.
2 目的	発展課題の動機. 何を確かめたいのか, 明らかにしたいのか.
3 実施内容	回路図, 理論, 実験回路, その写真などを記載. 後で再実行できる程度の情報が必要(例えば, 回路素子の値など).
4 結果	得られた結果, 例えばグラフや, 回路が動作する様子の分かる写真などを記載し, それぞれの結果が何を表しているかを説明.
5 考察	得られた結果について分析した上で, 何故そうなったのかを自分なりに考えて, 思うような結果が得られていなくても, その原因を考察すること.
6 結論	全体を通して, 目的が達成されたかどうか. 200字程度. 今後の課題など.
7 参考文献	参考にした文献やウェブサイトなど.
8 付録	本文に入りきらない情報 (例えば, Octave のソースコードなど).

4 周波数領域 spice(AC 解析)

4.1 指数関数入力の場合

ここでは直列共振回路において交流のような指数関数で表現される電源がある場合を考える。 $s = \sigma + j\omega$ を複素数として⁹、指数関数 Ee^{st} で表されるような電源を含む LCR 直列共振回路の微分方程式は

$$\left(\frac{d^2}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{d}{dt} + \frac{1}{LC} \right) v = \frac{E}{LC} \text{Re}[e^{st}] \quad (4.1)$$

と書ける。ここで、 $\text{Re}[\]$ は実数部をとりだすことを示している。このような方程式の解として

$$v(t) = \text{Re}[Ae^{st}] \quad (4.2)$$

を考え、これを代入すると

$$\left(s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} \right) Ae^{st} = \frac{E}{LC} e^{st} \quad (4.3)$$

となる。ここで、 $s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} \neq 0$ の場合は

$$A = \frac{E/LC}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (4.4)$$

$$= \frac{E/LC}{(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)} \quad (4.5)$$

となり、解は

$$v(t) = \text{Re} \left[\frac{E/LC}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} e^{st} \right] \quad (4.6)$$

$$= \text{Re} \left[\frac{E/LC}{(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)} e^{st} \right] \quad (4.7)$$

となる。分母は因数分解でき、2つの固有値¹⁰ λ_1, λ_2 が係数の特異点 (極)¹¹ になっていることがわかる。

特に正弦波定常の場合は $s = j\omega$ を代入し、 $v(t)$ のフェーザ表示を

$$v(t) = \text{Re}[V(j\omega)e^{j\omega t}] \quad (4.8)$$

⁹ $\sigma = 0$ の場合は電気回路基礎論でフェーザを導入するときに扱っている。 σ が負の場合は減衰振動、正の場合は発散する振動に対応する。

¹⁰連立微分方程式で表現した場合の行列の固有値。特性方程式の解でもある。

¹¹極においては分母が 0 になって値を持たない。関数論の講義で詳しく習う。

によって与えると、フェーザ $V(j\omega)$ は

$$V(j\omega) = \frac{E/LC}{(j\omega)^2 + \frac{R}{L}(j\omega) + \frac{1}{LC}} \quad (4.9)$$

$$= \frac{E}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega CR} \quad (4.10)$$

$$= \frac{E}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j2\frac{\alpha}{\omega_0}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \quad (4.11)$$

となり、 $|V(j\omega)|$ は損失 (α/ω_0) が小さい場合は共振にともなうピークをもつ。具体的には、 ω で微分してやると $\alpha/\omega_0 < 1/\sqrt{2}$ が満たされる場合に角周波数

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - 2(\alpha/\omega_0)^2} \quad (4.12)$$

において $|V(j\omega)|$ は極大となることがわかる¹²。

一方で

$$V(j\omega) = \frac{E/LC}{(j\omega - \lambda_1)(j\omega - \lambda_2)} \quad (4.13)$$

とも書けるため、固有値 (極) λ_1, λ_2 の情報から周波数特性が得られることがわかる。極が虚軸に近いとそのあたりの角周波数で大きな振幅になる。

下図に $L = 10\text{mH}$, $R = 10\Omega$, $C = 1\mu\text{F}$ 、電源電圧を 1 とした場合の LTSpice による回路シミュレーションの例を示す。

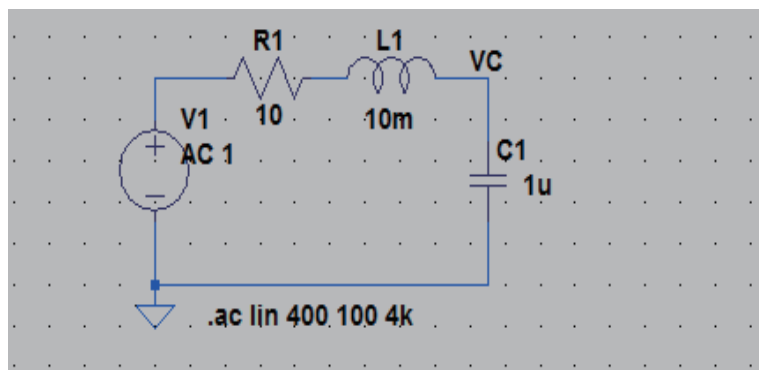


図 4.1: AC 解析の回路

¹²電流 i の極大は共振周波数 ω_0 のとき

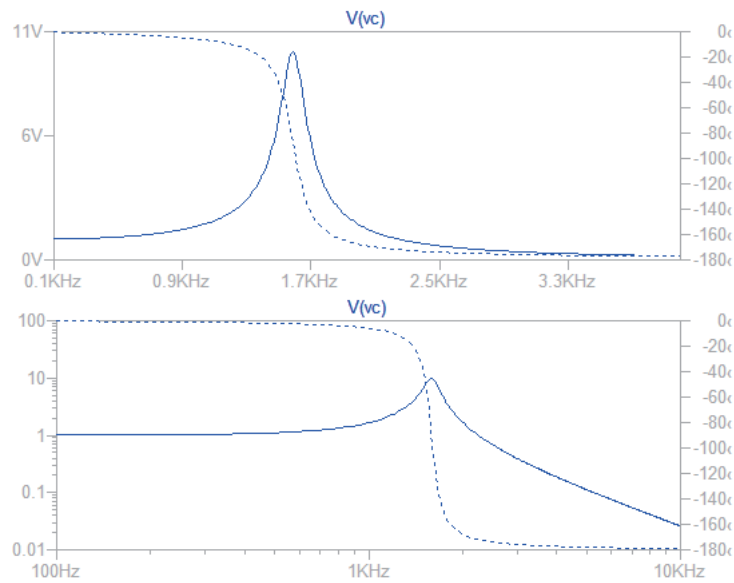


図 4.2: 周波数特性の例 : Linear 表示 (上) と両対数表示 (下)

この例では共振周波数 $f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 1.6\text{kHz}$ であり、その付近でキャパシタの電圧もピークをもつ。また、 $\alpha = \frac{R}{2L} = 0.5 \times 10^3/\text{s}$, $\omega_0 = 10 \times 10^3/\text{s}$ なので、この例の Q 値は $Q = \frac{\omega_0}{2\alpha} = 10$ となっている。位相は共振点付近で 180 度変化する。両対数グラフで表示すると、式 (4.11) の特徴がよく見える。すなわち、 $|V(j\omega)|$ は低周波側では 1 に漸近し、高周波側では周波数が 10 倍になるごとに電圧はおおよそ 100 分の 1 になる。

4.2 複素関数の可視化

AC 解析においては固有値は極として現れ、これにより周波数依存性が決まる。LCR 直列共振回路では共振周波数付近で位相が 180 度変わる。

Octave を使えば複素関数を視覚的にとらえることができる。例えば式 (4.4) の大きさ $|A(s)|$ は

```
x = linspace(-10000,0,100);
y = linspace(-15000,15000,200);
[X,Y]=meshgrid(x,y);
s=X+Y*I;
R=10;L=10e-3;C=1e-6;
z=1./(L*C*s.*s+C*R*s+1);
surfl(X,Y,abs(z))
```

により計算でき、次のような曲面が描かれ、極の存在がよくわかる¹³。この場合、断面

¹³曲面をいろんな角度から眺めることができる。

が虚軸になっているので、周波数特性 (図 4.2) を表現している。極が実軸に近づくと大きな振幅になることもわかりやすい。

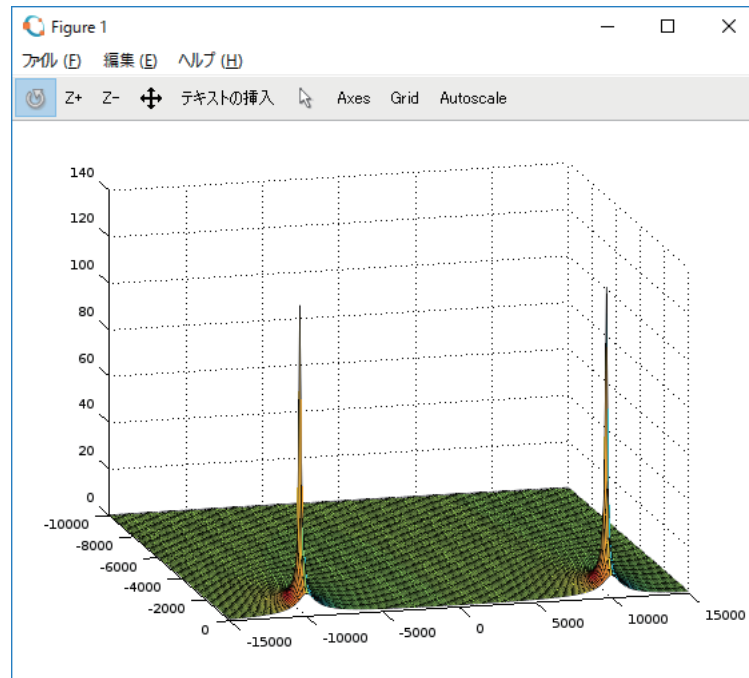


図 4.3: 複素平面上の極

また、式 (4.10) のフェーザ $V(j\omega)$ を複素平面上に描くには、次のように書けばよい。

```
omega = linspace(0,1000000,1000);
L=10e-3;C=1e-6;R=10;E=1;
V=E./((1-omega.*omega*L*C)+I*omega*C*R);
plot(V);
```

実行すると複素平面上の軌跡が得られる。

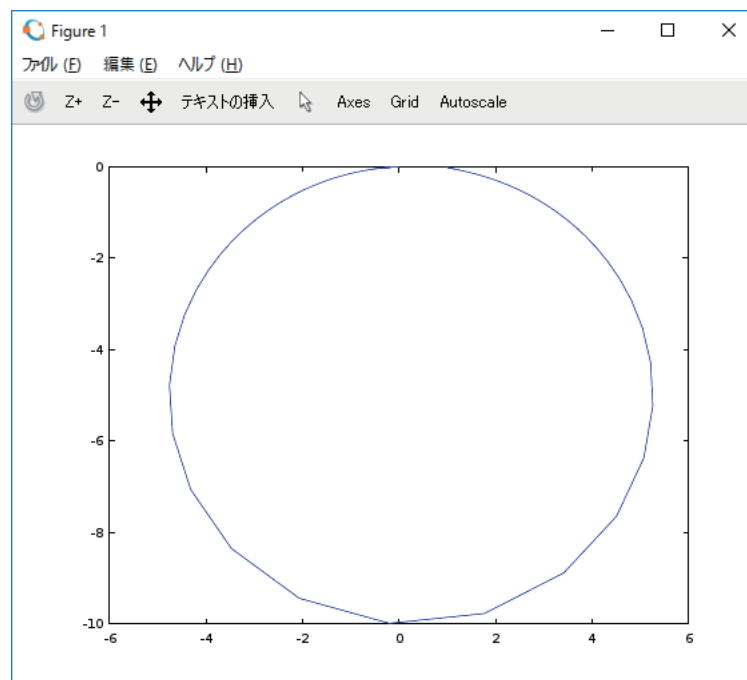


図 4.4: 複素平面上のフェーザ $V(j\omega)$ の動き

$\omega = 0$ では原点付近にある (振幅が小さい) が、右回りに円を描いて、共振周波数では虚軸上を横切り、 $\omega = \infty$ では実軸負方向から原点に近づく。

4.3 事前課題

1. LTspice の AC 解析で LCR 直列共振回路の周波数特性を計算 (図 4.2 参照)。
2. 得られた結果を理論値と比較。

4.4 発展課題の設定例

- パラメータ依存性
 - R を 0 から大きくしていくと複素平面上で極はどのように移動するか。そのとき周波数特性はどのように変化するか。
 - L を小さくしていくと CR 回路の特性にどのように近づいていくか。
- 回路を変える
 - 結合共振器の片方を励振して周波数特性を観察 (例題：結合共振器)。

- インダクタ 2 個の場合やキャパシタ 2 個の場合についてはどのような特性になるか。
- 並列共振回路の場合の周波数特性は？
- ブリッジ回路の周波数特性は？
- 移相型発振器の RC 梯子型回路の周波数特性は。
- いろんな見方
 - 共振回路の Q 値はどんな性質を表現しているか。
 - 交流のエネルギーのやりとりについて瞬時電力、複素電力などいろんな視点で考えてみる。
 - 図 4.2 では周波数特性を大きさと位相で表現したが、これを実部と虚部で書き、関係性を考える。
 - テブナン等価回路に変換して周波数特性をみるとどうなるか。
 - 複素関数 $V(s)$ を描いてみよう。
 - 過渡現象も定常現象も固有値で決まるが、どのような関係があるか。
- 方法の比較
 - 理論と LTSpice の結果を比較。
 - 式 (4.5) を複素関数として描画することにより、性質を考える。
- 先取り
 - myDAQ を使って共振特性を実験を行う。
 - 増幅回路の周波数特性を考える。
 - 正弦波の重ねあわせで矩形波を表現。
- 設計
 - 極を与えてそれを実現する回路を考えてみよう。
 - 極 λ_1, λ_2 が決まれば周波数特性はユニークに決まるか。逆に周波数特性が与えられると極はきまるか。
 - 自分で設計指標をつくり、最適化問題として回路設計。

4.5 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験

を簡単にまとめて提出すること。

5 入出力特性解析

5.1 2ポート解析 (伝達特性)

線形時不変システム¹⁴において入力と出力の比を伝達関数 $G(s)$ と呼ぶ。また、伝達関数の周波数特性 $G(j\omega)$ をボード線図と呼ぶ。LCR 直列共振回路のキャパシタ電圧 $V(j\omega)$ の場合は

$$G(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{E} \quad (5.1)$$

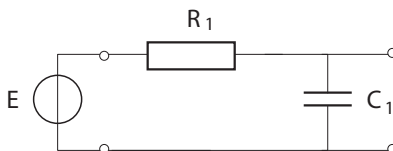
$$= \frac{1}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega CR} \quad (5.2)$$

$$= \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j2\frac{\alpha}{\omega_0}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \quad (5.3)$$

$$= \frac{1/LC}{(j\omega - \lambda_1)(j\omega - \lambda_2)} \quad (5.4)$$

となる。ボード線図において大きさをゲイン線図、位相を位相線図と呼ぶ。

2つのポートをもつ回路は一方を入力、一方を出力として考えると、入力に対して何か作用をして出力する回路と見ることができる。LCR 直列共振回路においても電源を入力、キャパシタの電圧を出力と考えれば2ポート回路になっている。ここでは、さらに簡単なRC回路を考えてみよう。



上のRC回路の入力を電圧源、出力をキャパシタの電圧と見ると、伝達関数は

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega C_1 R_1} \quad (5.5)$$

$$= \frac{\frac{1}{C_1 R_1}}{j\omega + \frac{1}{C_1 R_1}} \quad (5.6)$$

と書け、 $G(s)$ の極 (固有値) は1個のみで $-1/C_1 R_1$ である。dB 表示では

$$20 \log |G(j\omega)| = 20 \log \left| \frac{1}{1 + j\omega C_1 R_1} \right| \quad (5.7)$$

$$= -20 \log |1 + j\omega C_1 R_1| \quad (5.8)$$

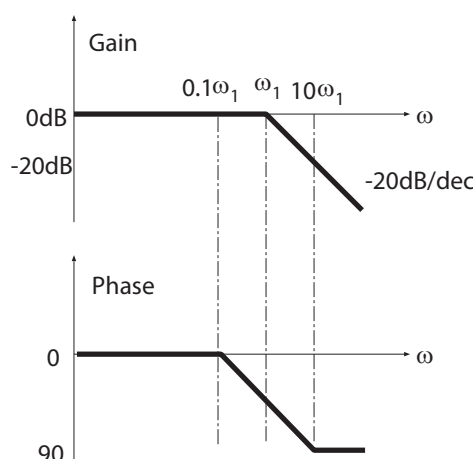
¹⁴これまで扱っているLCR回路は線形であり、素子値は時間に依存しないので線形時不変システムである。

となる。 ω が小さいときは $1 + j\omega C_1 R_1 \approx 1$ とすると大きさは 0dB 付近で位相は 0 度、大きいところでは $1 + j\omega C_1 R_1 \approx j\omega C_1 R_1$ とすると

$$20 \log |G(j\omega)| \approx -20 \log \omega C_1 R_1 \quad (5.9)$$

$$= -20(\log \omega + \log C_1 R_1) \quad (5.10)$$

となり、大きさは $\log \omega$ に対して傾き -20 、すなわち -20dB/dec となる。また、位相は 90 度に近づく。以上からボード線図の概略 (漸近線) は次のように書ける¹⁵。



図の ω_1 は -20dB/dec の漸近線が 0dB と交わる場所であり、 $\omega C_1 R_1 = 1$ となるので、

$$\omega_1 = \frac{1}{C_1 R_1} \quad (5.11)$$

で実軸上の極に対応している。もう少し厳密には $|G(j\omega)|$ は ω_1 において $1/\sqrt{2}$ になるので、 $-20 \log \sqrt{2} = -10 \log 2 \sim -3.01\text{dB}$ だけ下がる。LTSpice による計算結果は次のようになる。角周波数 $\omega_1 = 10^4/\text{s}$ であり、周波数に直すと 1.6kHz あたりで 3dB 落ちていることが確認できる。

¹⁵角周波数 ω の軸も対数表示

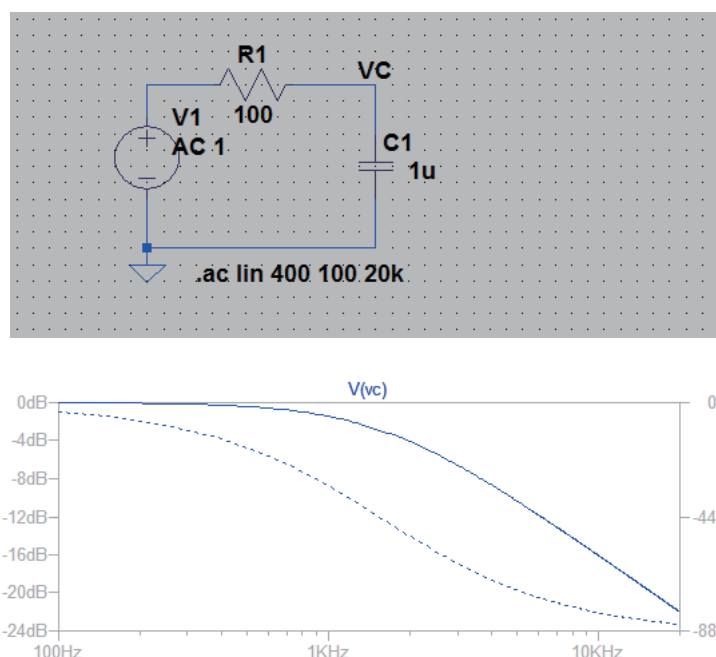


図 5.1: RC 回路のボード線図

もう一段つないだ場合を考えてみよう。基本行列¹⁶を用いると RC 回路は

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + j\omega CR & R \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

のように書ける¹⁷。2段にした場合は

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + j\omega C_1 R_1 & R_1 \\ j\omega C_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + j\omega C_2 R_2 & R_2 \\ j\omega C_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

となり、伝達関数は

$$G(j\omega) = \frac{1}{(1 + j\omega C_1 R_1)(1 + j\omega C_2 R_2) + j\omega R_1 C_2} \quad (5.14)$$

となる、このままで考えても良いが、簡単のため $\omega R_1 C_2$ が小さいとして

$$G(j\omega) \sim \frac{1}{(1 + j\omega C_1 R_1)(1 + j\omega C_2 R_2)} \quad (5.15)$$

と近似できる場合を考えよう。この場合は極は2個で $-1/C_1 R_1, -1/C_2 R_2$ である。

dB 表示では

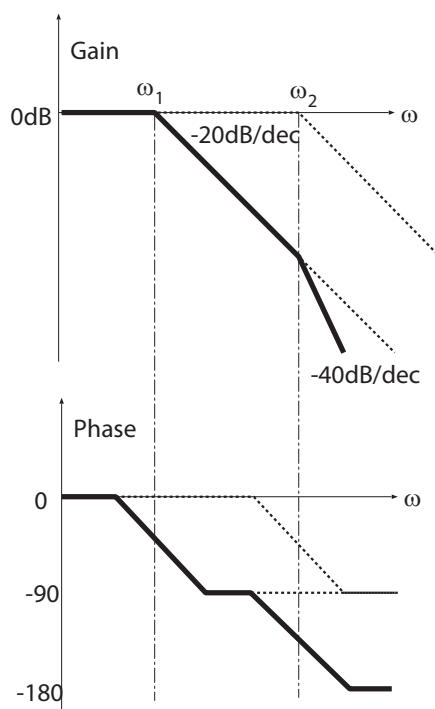
$$20 \log |G(j\omega)| = 20 \log \left| \frac{1}{(1 + j\omega C_1 R_1)(1 + j\omega C_2 R_2)} \right| \quad (5.16)$$

$$= -20 \log |1 + j\omega C_1 R_1| - 20 \log |1 + j\omega C_2 R_2| \quad (5.17)$$

¹⁶縦続行列、四端子行列などとも言う。

¹⁷相反性により行列式は1。損失がない場合の基本行列は対角成分は実数。

となり2つの極による作用を加え合わせた形になり、見通しが良い。ボード線図の概略は次のように成る。



また、LTSpice による計算例は次のようになる。

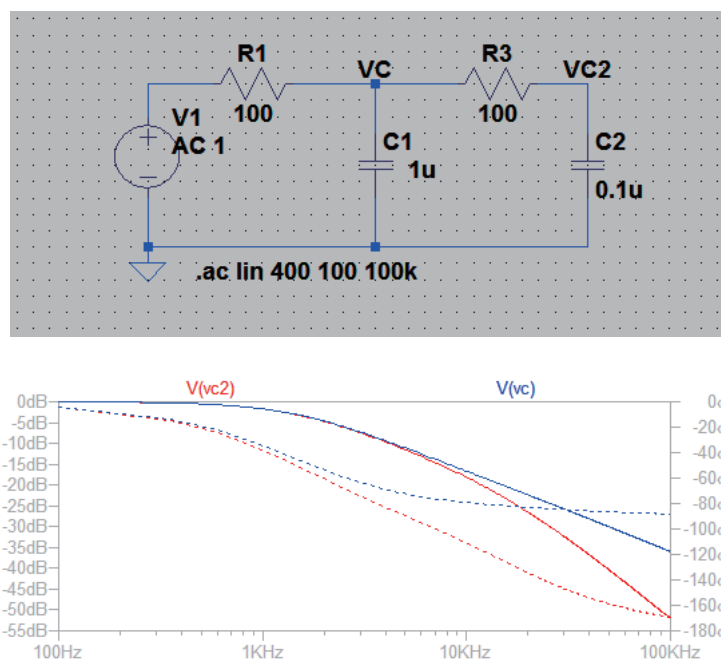
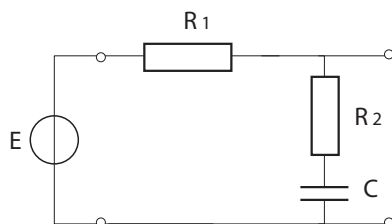


図 5.2: 2 段 RC 回路の計算例

また、図のような回路を考えてみよう。



この場合の伝達関数は

$$G(j\omega) = \frac{1 + j\omega CR_2}{1 + j\omega C(R_1 + R_2)} \quad (5.18)$$

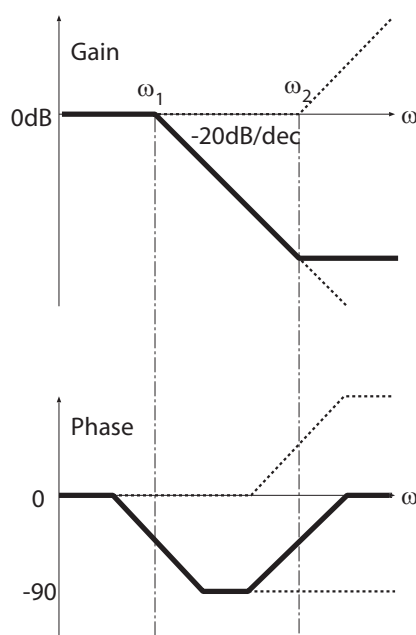
$$= \frac{j\omega + \frac{1}{CR_2}}{j\omega + \frac{1}{C(R_1 + R_2)}} \quad (5.19)$$

となる。この場合は分母の極 $-1/C(R_1 + R_2)$ に加えて分子に零点¹⁸ $-1/CR_2$ が現れる。dB 表示では

$$20 \log |G(j\omega)| = 20 \log \left| \frac{1 + j\omega CR_2}{1 + j\omega C(R_1 + R_2)} \right| \quad (5.20)$$

$$= -20 \log |1 + j\omega C(R_1 + R_2)| + 20 \log |1 + j\omega CR_2| \quad (5.21)$$

となる。この場合は零点も重ね合わせて考えることになる。零点に関しては符号が正なので次のようなボード線図になる。



¹⁸伝達関数が 0 になる点

また、LTSpice による計算結果は次のようになる。

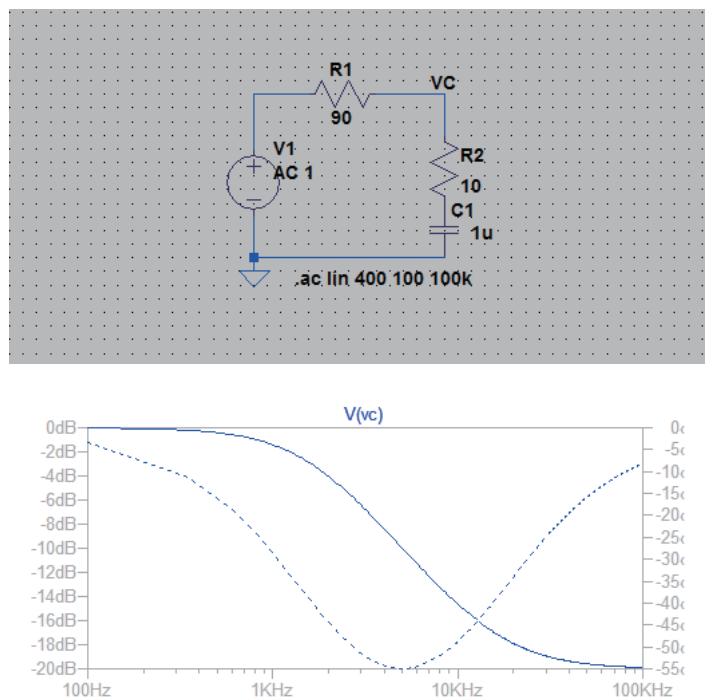


図 5.3: 零点をもつボード線図の計算例

回路固有の特性は極に対応する固有値に現れるが、入出力という意味で伝達関数を考える場合、極に加えて零点を考えることにより、その特性を見通しよく把握することができ、いろんな特性の回路を設計することが可能になる。

5.2 事前課題

1. RC 回路の入力を 1V として LTspice で伝達関数を計算 (図 5.1 参照)。
2. RC 回路を 2 段にして LTspice で伝達関数を計算 (図 5.2 参照)。
3. 零点を含む例についても LTspice で伝達関数を計算 (図 5.3 参照)。

5.3 発展課題の設定例

- 回路を変える
 - － 2 ポート回路を多段化した回路を解析。

- 結合共振器の入出力特性を解析。
- LC 梯子型回路を伝搬する波を観察。
- 2つの周波数を重ね合わせて入力して、フィルタとしての特性を観察。
- いろんな見方
 - 2ポート回路を多段化した場合の特性を基本行列 (縦続行列) の固有値を用いて考える。
 - 極と零点が互いに打ち消しあって消える場合や、極と零点が近くにある場合の特性を考える。
 - 極と零点の配置と過渡現象の関係を考察。
 - 伝達関数を $j\omega$ の関数として複素平面に描いてみる。伝達関数の実部と虚部にはどのような関係があるか。
- 設計
 - 矩形波にフィルタを通して正弦波をつくる。
 - ローパス、ハイパス、バンドパスフィルタを設計してみる。
 - 振幅は変化させずに位相だけ変える全域通過フィルタをつくる。
 - オペアンプを使ったフィルタを設計。

5.4 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験

を簡単にまとめて提出すること。

5.5 第2回レポート

周波数特性、入出力特性に関するレポートを下記に注意してまとめ、提出すること。

表紙	タイトル, 氏名, 提出年月日を記載. タイトルは一目見て内容が解るように工夫.
1 概要	目的, 実施内容, 結果について簡単に. 200字程度.
2 目的	発展課題の動機. 何を確かめたいのか, 明らかにしたいのか.
3 実施内容	回路図, 理論, 実験回路, その写真などを記載. 後で再実行できる程度の情報が必要(例えば, 回路素子の値など).
4 結果	得られた結果, 例えばグラフや, 回路が動作する様子の分かる写真などを記載し, それぞれの結果が何を表しているかを説明.
5 考察	得られた結果について分析した上で, 何故そうなったのかを自分なりに考えて, 思うような結果が得られていなくても, その原因を考察すること.
6 結論	全体を通して, 目的が達成されたかどうか. 200字程度. 今後の課題など.
7 参考文献	参考にした文献やウェブサイトなど.
8 付録	本文に入りきらない情報 (例えば, Octave のソースコードなど).

6 能動回路の解析

6.1 増幅・スイッチ

これまで扱ってきた回路は受動回路と呼ばれ、2ポート回路では入力から出力に至る間に減衰することが避けられない¹⁹。一方、トランジスタに代表される能動回路を用いることにより、信号を増幅することが可能になる。ここでは、能動回路を考えるために必要なバイアス、小信号等価回路について、できるだけ単純な回路を用いて考える。また、増幅された信号を入力に戻す帰還（フィードバック）という作用はいろんな現象を引き起こす。ここではその一つとして能動性を利用した振動現象（発振）を観察する。

6.1.1 バイポーラトランジスタの基本動作の考え方

トランジスタは3端子の素子であり、3つめの端子を利用して増幅やスイッチなどこれまでのLCR受動素子とは異なった作用が実現できる。ここではnpnトランジスタのエミッタ接地を用いてバイアスの考え方、増幅やスイッチについて考えよう。

ベース・エミッタ間のpn接合に順方向バイアス、ベース・コレクタ間のpn接合に逆バイアスをかけた図6.1のようなエミッタ接地の回路を考える。

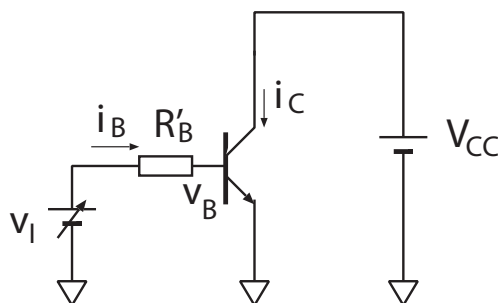


図 6.1: エミッタ接地

ここで、 R'_B はトランジスタのベース領域自体がもつ抵抗であるが、わかりやすくするため、トランジスタの外に描いてある。

トランジスタにおいてベース電圧 v_B に対するコレクタ電流 i_C が、指数関数特性の電圧制御電流源 $i_C = I_S e^{\frac{v_B}{V_T}}$ で書けるとする²⁰。電流増幅率 β すなわち $i_C = \beta i_B$ と考えると²¹、ベースエミッタ間電圧 v_B で制御された電流源が並列に並んだ図6.2のようなモデルになる。

¹⁹ エネルギーの意味で。

²⁰ ベースエミッタ間のpn接合の電流が、ほぼコレクタ電流になる。 $V_T = kT/e \sim 25\text{mV}$, $I_S \sim 1\text{pA}$

²¹ ベースエミッタ間のpn接合の電流の少しだけがベースに流れる。 $\beta \sim 100$

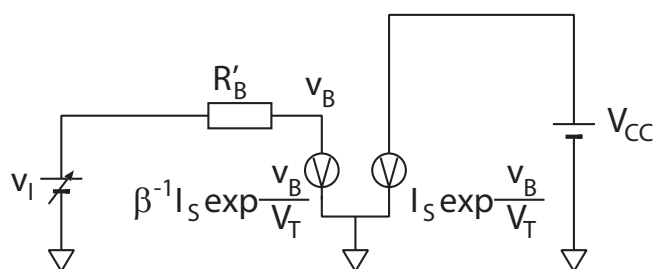


図 6.2: モデルによる表現

- v_I を 0 から増加させると, v_B が増加するが, 指数関数特性ではじめのうちはほとんどコレクタ電流は流れない (遮断領域). $i_B = \beta^{-1} i_C$ なので, ベース電流もわずかである.
- v_I が指数関数の立ち上がりとなみなせる 0.6V 程度を超えてくるとコレクタ電流, ベース電流が流れ出し, それにともなって, R'_B の影響も出てくる (活性領域).

電流を電圧に変換するために, 図 6.3 のようにコレクタ抵抗 R_C を入れた場合を考えよう。

- v_I が大きいと大きな電流が流れ, v_C は減少する。 $v_C \sim 0$ になった時点でベースコレクタ間の pn 接合の逆バイアスが無くなり, i_C は飽和する (飽和領域).

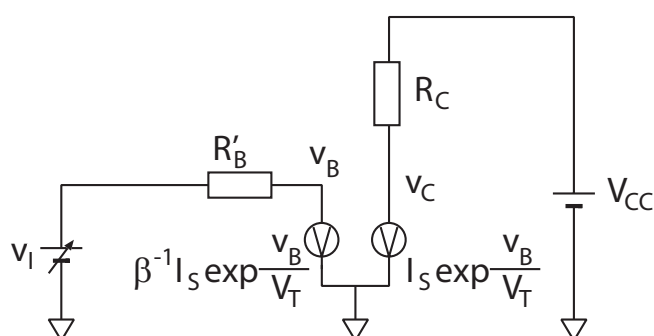


図 6.3: コレクタ抵抗を入れた場合

トランジスタをコレクタエミッタ間のスイッチとして使う場合は, 遮断領域がオフ, 飽和領域がオンに相当する. 一方, 活性領域は増幅に用いられる.

このような振る舞いを LTSpice で試してみると次の図のようになる。

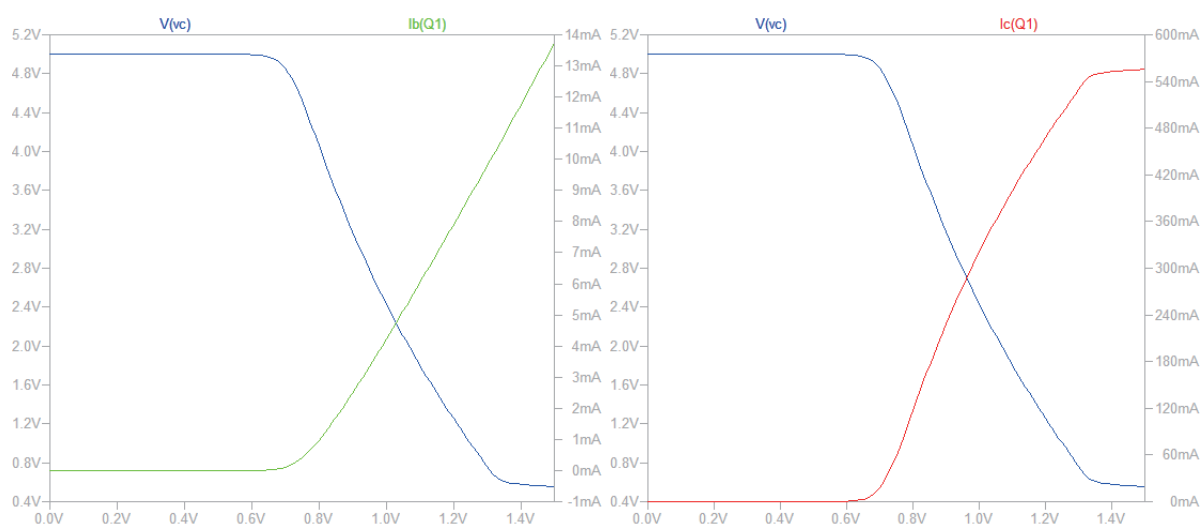
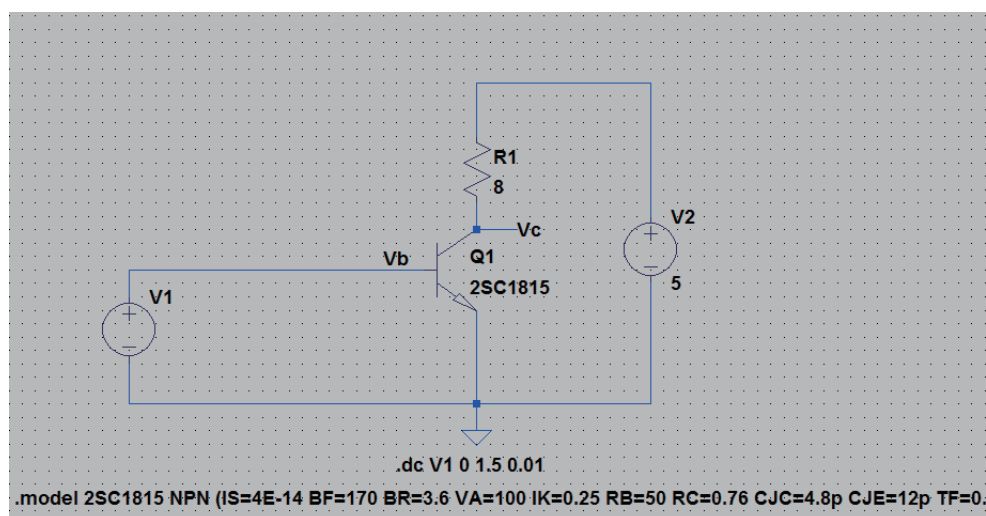


図 6.4: LTSpice による計算例：入力電圧 $v_I = v_B$ を変化させたときの i_B, v_C, i_C の変化

ベース電圧 $v_B = 0.6V$ 付近で i_B, i_C ともに指数関数的に立ち上がるが、 $v_B = 0.8V$ 付近ではベース抵抗 R_B のために直線的になる。ベース電圧 v_B の増加とともにコレクタ電圧 V_C は減少し、 $v_B = 1.3V$ 付近で $V_C \sim 0.6V$ になり、ベースコレクタ間の pn 接合が逆バイアスを保てなくなり I_C は飽和する。0.8V 付近で電流は 100 倍程度に増幅されている。

次に、入力を正弦波 $v_I(t)$ にして、これを増幅することを考えてみよう。指数関数の非線形性のために、原点を中心にして正弦波のベース電圧 $v_I(t)$ を加えるとベース電流 i_B とコレクタ電流 i_C は負側には小さくしか振れない。横軸に入力電圧 v_B 、縦軸に出力コレクタ電圧 v_C をとった場合の模式図を図 6.5 左に示す。コレクタ電圧波形は入力信号の負の部分がクリップされた形になる。そこで、バイアスとして直流電圧を正弦波信号に加えると、図 6.5 右のように波形が正しく増幅される。このように、バイアスを加えることでトラン

ジスタの適切な特性の部分を利用することができる。

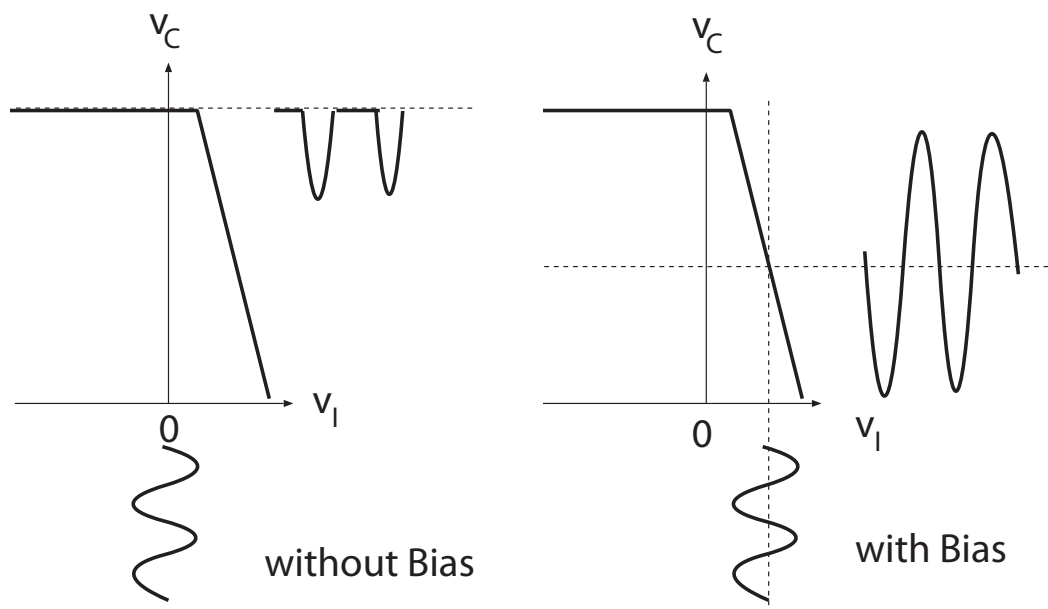


図 6.5: バイアスの無い場合とある場合の比較

6.1.2 直流バイアスの作り方

もう少し詳しくみるために、直流バイアスと小信号に分けて特性を考えてみよう。例えば、

$$i_B = i_{BQ} + i_b \quad (6.1)$$

のように表現する。第一項が直流バイアス，第二項が小信号成分である²²。

簡単なバイアスとして図 6.6 のようなベース電流バイアスを考えよう。

²²以下でもバイアスは添え字に Q を、小信号は添え字を小文字にして表現する

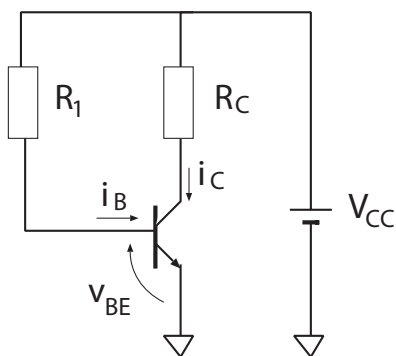


図 6.6: ベース電流バイアス

負荷 R_C のバイアス電流 i_{CQ} を決めるとそれに対応して $i_{BQ} = \beta^{-1} i_{CQ}$ が決まり, $v_{BE} \sim 0.6V$ とすると, ベース電流バイアスを決める R_1 は

$$R_1 = \frac{V_{CC} - 0.6V}{i_{BQ}} \quad (6.2)$$

とすればよい。

6.1.3 小信号等価回路の考え方

小信号の増幅について考える. 信号源にバイアス電流が流れ込まないように, 図 6.7 のように信号源とバイアスとの間に C_B を挿入する.

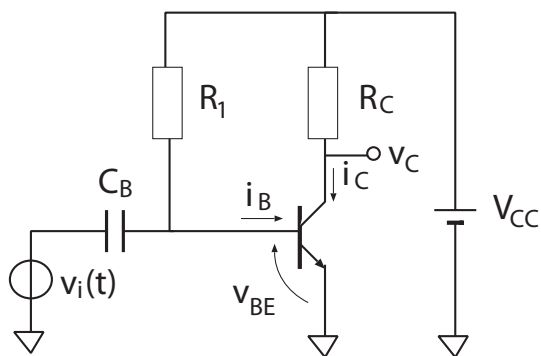


図 6.7: 小信号の増幅

トランジスタ部をモデルで表現すると図 6.8 になる.

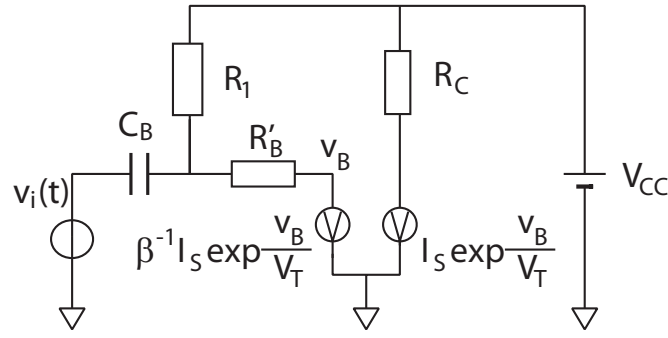


図 6.8: 小信号増幅のためのモデル

バイアスに対して

$$i_{BQ} = \beta^{-1} I_S e^{\frac{v_{BQ}}{V_T}}, \quad i_{CQ} = I_S e^{\frac{v_{BQ}}{V_T}} \quad (6.3)$$

が成立している場合を考える．小信号成分 v_b, i_b, i_c を含んだ場合の関係は

$$i_{BQ} + i_b = \beta^{-1} I_S e^{\frac{v_{BQ} + v_b}{V_T}}, \quad i_{CQ} + i_c = I_S e^{\frac{v_{BQ} + v_b}{V_T}} \quad (6.4)$$

と書ける．小信号が小さいとしてテーラー展開の1次の項で近似すると，ベース電流については

$$i_{BQ} + i_b = \beta^{-1} I_S e^{\frac{v_{BQ}}{V_T}} + \beta^{-1} \frac{I_{CQ}}{V_T} v_b \quad (6.5)$$

となり，バイアスの関係 (6.3) を考慮すると小信号に対して線形な関係

$$i_b = \beta^{-1} \frac{I_{CQ}}{V_T} v_b = \beta^{-1} g_m v_b \quad (6.6)$$

で表現できる．同様にコレクタ電流の小信号に対しては

$$i_c = \frac{I_{CQ}}{V_T} v_b = g_m v_b = \beta i_b \quad (6.7)$$

が成立する．これを図にすると小信号等価回路は図 6.9 になる．

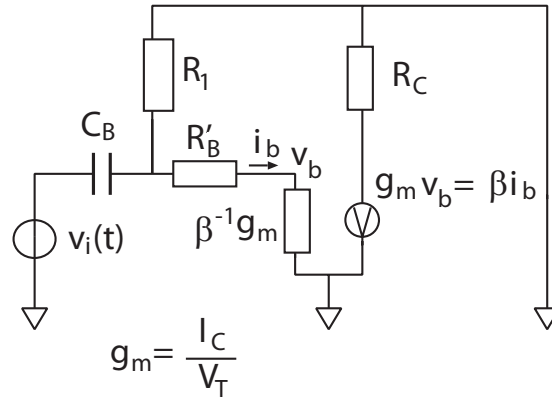


図 6.9: 小信号等価回路

見やすいように整理すると図 6.10 になる.

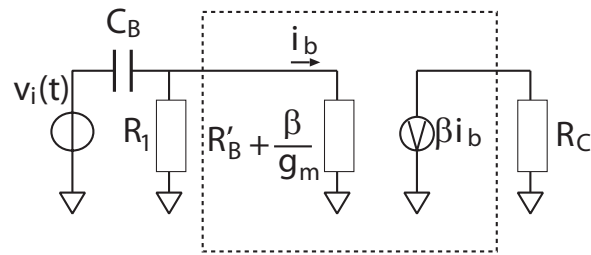


図 6.10: 整理して描いた小信号等価回路

入力部は入力信号を通すハイパスフィルタなので遮断角周波数

$$\omega = \frac{1}{C_B \{R_1 // (R'_B + \beta/g_m)\}} \quad (6.8)$$

が入力信号に比べて十分小さくなる必要がある.

トランジスタ部の電流増幅率 A_i は

$$A_i = \beta \quad (6.9)$$

であり、これを電圧で表現すると電圧増幅率 A_v は,

$$A_v = -\beta \frac{R_C}{R'_B + \beta/g_m} \quad (6.10)$$

$$(6.11)$$

となる.

6.2 事前課題

1. LTSpice を使って図 6.4 のトランジスタの振る舞いを確かめてみよう. 理論とあっているか。
2. 図 6.11 の回路で交流を入力して各部分の波形を確認しよう.

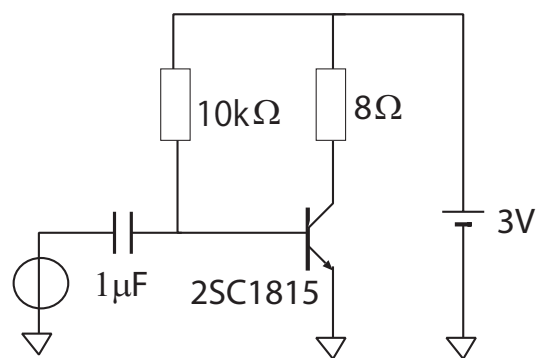


図 6.11: 例題

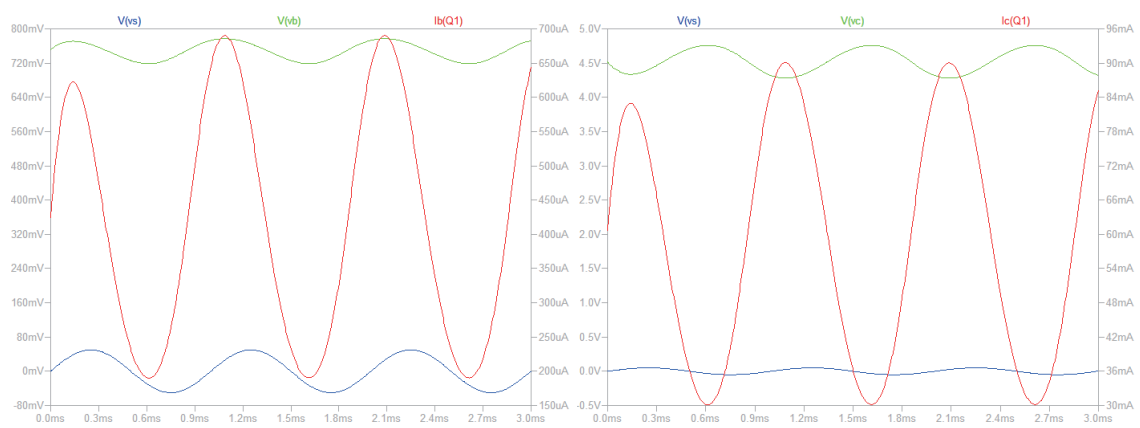
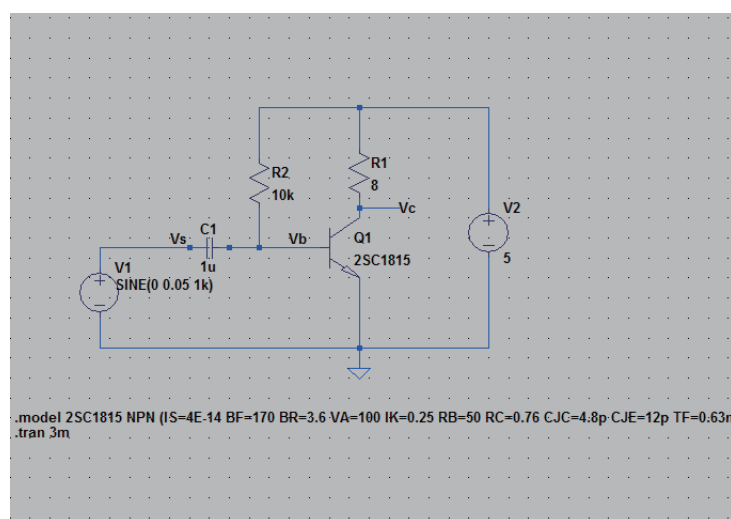


図 6.12: LTSpice による計算例

6.3 発展課題

- パラメータを変化させる

- 増幅回路にある素子を無くしてみてもその必要性を考えてみよう。
- バイアスのパラメータを変えるとどのような変化が見られるだろう。バイアスを変えてその振る舞いを検討してみよう。
- 非線形性
 - 小信号成分は小さいとして議論を進めてきたが、小信号成分を大きくしていくとどのようなになるだろう。
- 誤差
 - Spice のモデルはここで扱った数式モデルよりも実際のデバイスに近いモデルを使っている。その差異についてみてみよう。
 - ベース電流バイアスは電流増幅率の影響を受けやすい。その様子を確認してみよう。
- いろんな回路
 - 電子回路のテキストに登場する回路を解析してみよう。
 - 発表会の課題を試してみよう。
- 設計
 - 他の安定したバイアスを設計してみよう。
 - 飽和領域を使ってスイッチを作ってみよう。
 - 非線形性を利用して何か作ってみよう。
 - トランジスタの物性について考えてみよう。

6.4 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験
- 個人として行う内容を明確に

を簡単にまとめて提出すること。

7 帰還

7.1 フィードバックの考え方

トランジスタは入力から出力へはうまく信号が伝わるが、逆向きには信号は伝わりにくい一方向性の素子であるが、出力を入力に戻してやることで大きく特性を変化させることができる。このように出力を入力にもどしてやることを帰還（フィードバック）という。図 7.1 のように増幅率 A 倍に増幅された出力 v_o を帰還率 B 倍して入力 v_i に加えた場合を考える。

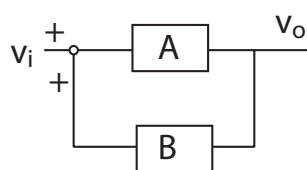


図 7.1: 帰還の考え方

このとき、定常状態が存在すれば

$$v_o = A(v_i + Bv_o) \quad (7.1)$$

が成立するため、

$$v_o = \frac{A}{1 - AB} v_i \quad (7.2)$$

が成立する²³。帰還が入力を強める方向の場合を正帰還，入力を弱める方向の場合を負帰還と言う。正帰還は発振回路，メモリ，コンパレータなどに利用され，負帰還は利得の安定化や入力/出力インピーダンスの制御などに利用される。

今回は発振回路を用いて，帰還の仕組みを考えてみよう (例題 7.3 節も参考に)。トランジスタの電圧増幅率を A_v とし，帰還回路の伝達関数を $B(j\omega)$ とおく。ある角周波数 ω_0 において，式 (7.2) の分母 $1 - A_v B(j\omega_0) = 0$ が満たされると，分母が 0 になり，無限大倍に増幅されることになる。つまり入力が無くても微小なノイズから出力があわれ，これが発振現象に相当する。これは $j\omega_0$ が式 (7.2) の伝達関数の極になっているとも言える。

図 7.2 のような発振回路を考えよう。

²³ $v_o = Av_i + A(AB)v_i + A(AB)^2v_i + \dots$ とも考えられる。収束するための条件を考えてみよう。

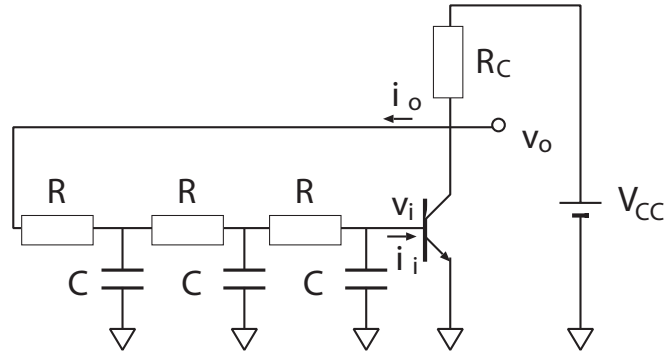


図 7.2: 移相型発振回路

トランジスタの出力が3段のRCローパスフィルタを通して入力に帰還される回路になっている。エミッタ接地回路の出力 v_o は入力 v_i に対して位相が180度ずれているので、さらに位相を180度ずらして正帰還を作り、発振させる仕組みである。

RCのローパスフィルタの基本行列は

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 + j\omega CR & R \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

なので、3段の帰還回路は \mathbf{F}^3 となる。つまり、

$$\begin{bmatrix} v_o \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + j\omega CR & R \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix}^3 \begin{bmatrix} v_i \\ i_i \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

と書ける。

簡単のため $i_i = 0$ とすると、電圧 v_o から電圧 v_i への帰還なので帰還率は

$$B(j\omega) = 1/(\mathbf{F}^3)_{11} \quad (7.5)$$

$$= \frac{1}{(j\omega CR)^3 + 5(j\omega CR)^2 + 6j\omega CR + 1} \quad (7.6)$$

となる。電圧増幅率を A_v とすると、式(7.2)は

$$v_o = \frac{\{(j\omega CR)^3 + 5(j\omega CR)^2 + 6j\omega CR + 1\} A_v}{(j\omega CR)^3 + 5(j\omega CR)^2 + 6j\omega CR + 1 - A_v} v_i \quad (7.7)$$

と書ける。分母が0になる条件を求めてみよう。まず、虚部が0になる条件を考えると²⁴,

$$(j\omega CR)^3 + 6j\omega CR = j\omega CR(6 - (\omega CR)^2) = 0 \quad (7.8)$$

²⁴位相が180度ずれる条件。トランジスタの A_v で位相が180度ずれて、さらに B で180度ずれるため、正帰還になる。

これを満たす角周波数 $\omega_0 = \sqrt{6}/(CR)$ とおくと、式 (7.7) は

$$v_o = \frac{\{1 - 5(\omega_0 CR)^2\} A_v}{1 - 5(\omega_0 CR)^2 - A_v} v_i \quad (7.9)$$

$$= \frac{-29A_v}{-29 - A_v} v_i \quad (7.10)$$

となる。したがって、 $A_v = -29$ のときに、極 $j\omega_0 = j\sqrt{6}/(CR)$ をもつことになる。

このような発振器は、フィルタで位相がずれることを利用して、正帰還を実現しているため移相型発振器という。

7.2 事前課題

- 移相型発振回路を LTSpice で過渡解析してみよう。参考: $R = 10\text{k}\Omega$, $C = 0.1\mu\text{F}$, $R_C = 10\text{k}\Omega$, $V_{CC} = 5\text{V}$, 2SC1815
- 移相型発振回路をつってみよう (参考)²⁵。

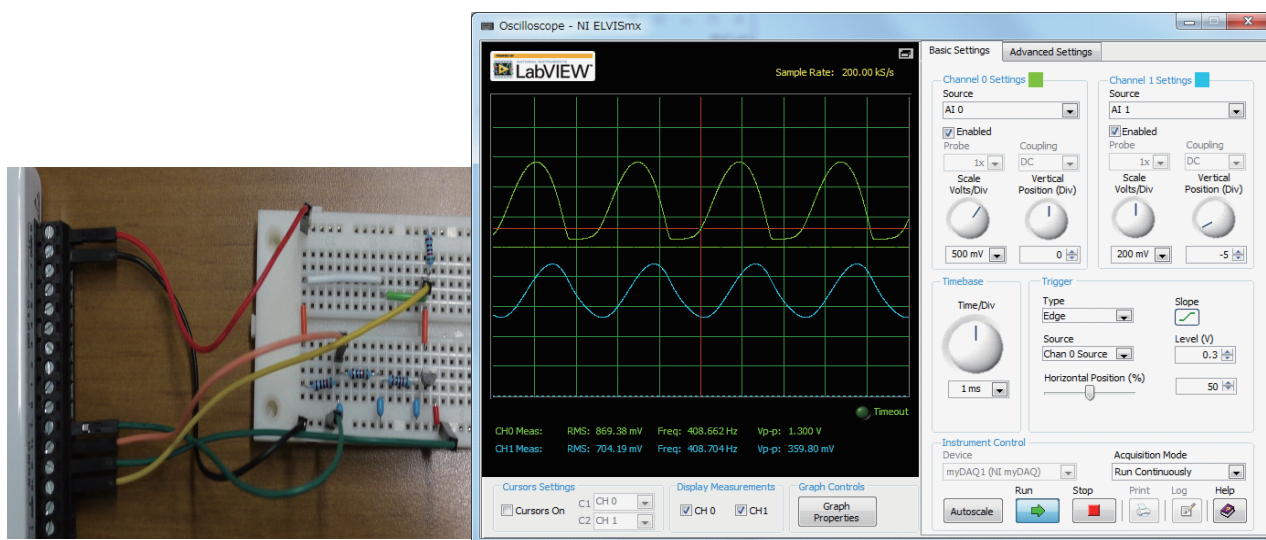


図 7.3: 移相型発振回路の実験

7.3 発展課題

- パラメータを変化させる
 - － 発振器のパラメータを変えてみよう。どんな現象が見られるか。

²⁵ 出力にイヤホンをつなぐと音が聞こえる。

- 差異
 - 理論とシミュレーション、実験ではどのような差が見られるか。
- 回路を変える
 - ローパスフィルタを4段にするとどうなるか。
 - CR ハイパスフィルタにすると、逆に位相が進んで正帰還が実現できる。この場合も発振するだろうか。
 - 発振器の発振周波数は等しい素子で作っても個々の回路で微妙に異なる。これらを結合させてみるとどのような現象がみられるか。
- 解析
 - 本当に $|A_v| \geq 29$ で発振しているだろうか。
 - 発振の条件は理論で導出したが、振幅は何で決まっているのだろうか。
 - この発振回路では直流電源でエネルギーを供給しているが、発振周波数の電力はどこから供給されているのだろう。
- 見方の違い
 - 発振器の小信号に対する微分方程式をたて、固有値を求めてみよう。
 - 発振の様子を相平面で観察してみよう。
- 設計
 - 発振器の波形を増幅してスピーカーで聞いてみよう。

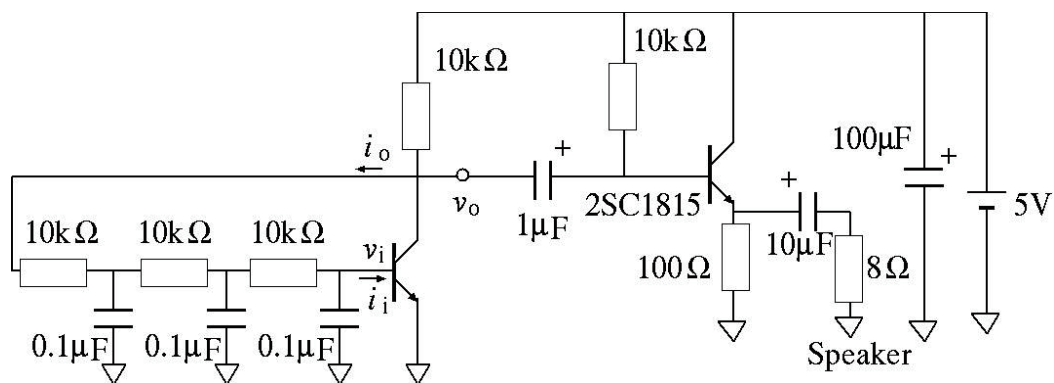


図 7.4: 発振器の出力をコレクタ接地回路で駆動した場合

- 例では位相をずらせて正帰還を実現したが、共振を利用しても発振器は作れるか？
- いろんな回路
 - 今回は正帰還の例を見たが、負帰還もよく用いられる。その効果をみてみよう。
 - バイポーラトランジスタの代わりに MOSFET の場合について検討してみよう。
 - オペアンプを使って微分や積分を行う回路を作ってみよう。

7.4 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験
- 個人として行う内容を明確に

を簡単にまとめて提出すること。

7.5 第3回レポート

入出力特性に関するレポートを下記に注意してまとめ、提出すること。

表紙	タイトル, 氏名, 提出年月日を記載. タイトルは一目見て内容が解るように工夫.
1 概要	目的, 実施内容, 結果について簡単に. 200字程度.
2 目的	発展課題の動機. 何を確かめたいのか, 明らかにしたいのか.
3 実施内容	回路図, 理論, 実験回路, その写真などを記載. 後で再実行できる程度の情報が必要(例えば, 回路素子の値など).
4 結果	得られた結果, 例えばグラフや, 回路が動作する様子の分かる写真などを記載し, それぞれの結果が何を表しているかを説明.
5 考察	得られた結果について分析した上で, 何故そうなったのかを自分なりに考えて, 思うような結果が得られていなくても, その原因を考察すること.
6 結論	全体を通して, 目的が達成されたかどうか. 200字程度. 今後の課題など.
7 参考文献	参考にした文献やウェブサイトなど.
8 付録	本文に入りきらない情報 (例えば, Octave のソースコードなど).

8 時間領域 myDAQ(オシロスコープ)

8.1 実験の注意

LCR 直列共振回路を体感するために、myDAQ を用いて実験を行う (myDAQ のテキスト参照)。オシロスコープでは周期的な現象は重ね書きによって静止させてみるができる。そのタイミングを決めるのがトリガである。下記トリガーの設定をマスターすること。

Type: Immediate は計測したそのままを表示、通常は Edge でトリガをかける。

Source: どのチャンネルをもとにトリガをかけるか。

Slope: 立ち上がりか立下りのどちらをトリガにするか。

Level: 電圧レベルがいくらのときをトリガにするか。

Horizontal Position: トリガ点を表示のどの位置におくか。

- myDAQ はアナログ電流出力が 2mA までしか出せないので注意。
- 極性のある電解コンデンサではなくセラミックコンデンサを使うこと。
- オシロスコープで何も表示されないときはトリガを Immediate にしてみる。その後エッジトリガをかけて波形を止めて観測。
- ブレッドボード内の配線情報や抵抗値、容量値の読み方は PandA 上に解説がある。
- インダクタの抵抗は大きいので理論値と比較する場合は注意すること (直流で計っておくとよい)。

8.2 事前課題

1. ブレッドボード上に LCR 直列共振回路を構成する²⁶。

²⁶下の写真のブレッドボードは部品キットのものと違うので注意。

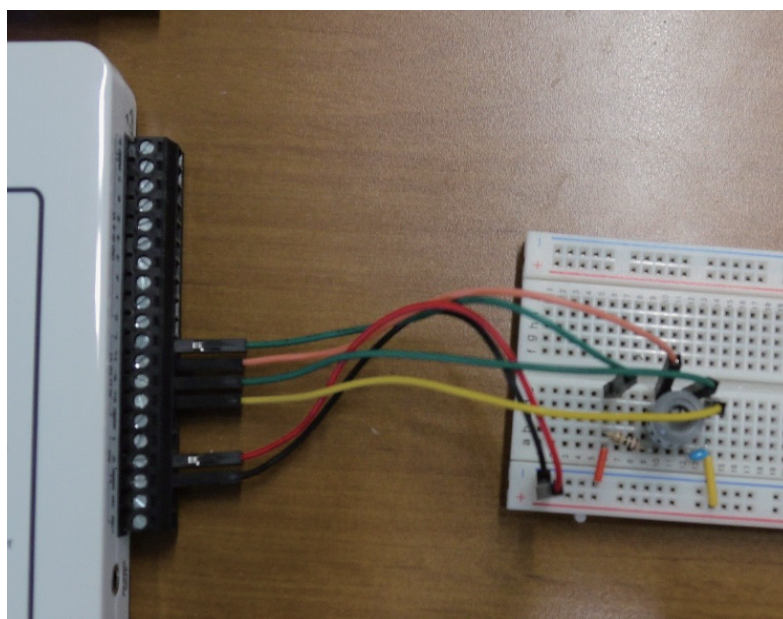


図 8.1: 実験の様子

2. myDAQ を用いて矩形波励振に対するキャパシタの電圧を観測する。

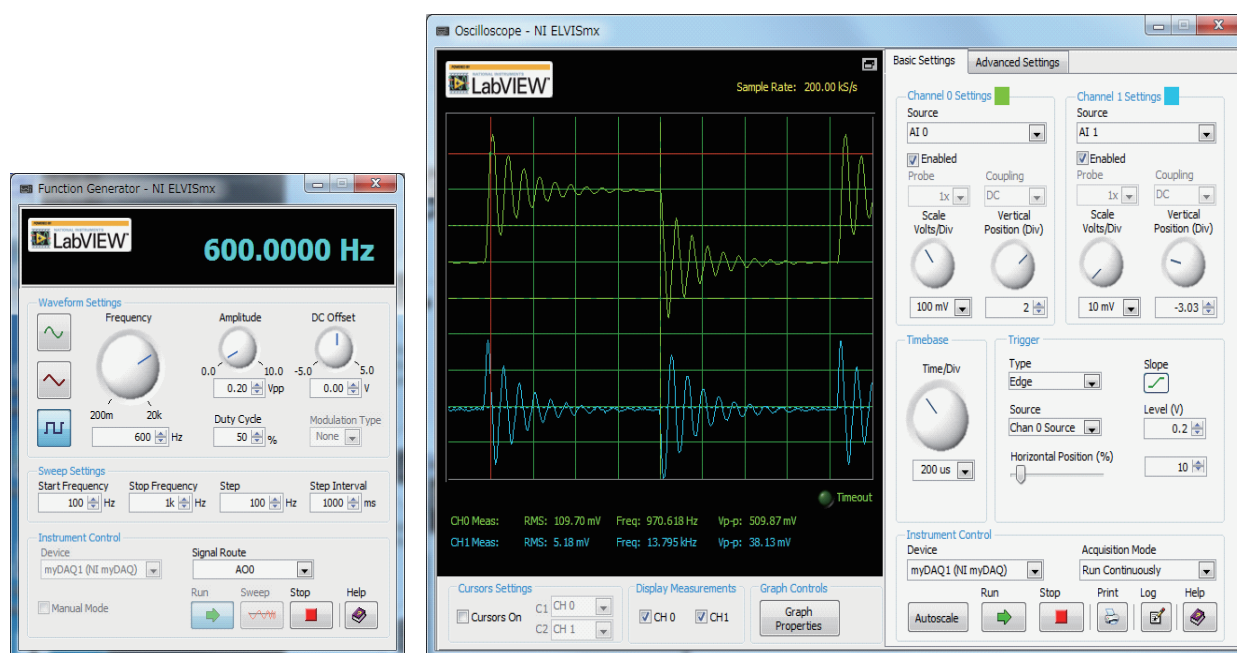


図 8.2: myDAQ による測定

3. 波形をファイル出力し、Octave や LTSpice の結果と比較する。

8.3 発展課題の設定例

- いろんな回路
 - 前回の発展課題で扱った回路を実際に動作させる。
 - 結合共振器を観察する (例題：結合共振器)。
 - 並列共振を試してみよう。電流源が必要になるが、オペアンプを使うとよい。
- 設計
 - 1 個の乾電池で青色 LED を点灯 (例題：昇圧コンバータ)。
 - ダイオードも使って DC-DC コンバータを作成 (例題：昇圧コンバータ)。
 - 不安定な平衡点をもつ回路として発振回路で実験してみよう (例題：CR 発振回路、移相型発振回路)。
 - コイルを巻いてインダクタを作って測定。
- パラメータ依存性
 - 初期値を変えて現象の変化を見てみよう。初期値を変えるには電源電圧や Duty cycle を変えればよい。
- 誤差
 - 理論値と比較。誤差の原因を考察。
 - インダクタの内部抵抗を考慮して Octave や LTspice と比較。
- パラメータ推定
 - 実験結果から実際の回路のパラメータを推定。
 - 素子値が誤っていた場合、どの素子がおかしいかみつける方法は？
 - 対数グラフを使って指数関数の振る舞いを推定。
- 解析
 - 実験結果を理論値、数値計算、ベクトル場などと比較。
 - エネルギーはどこで消費されているだろうか。実測データから計算。

8.4 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験

4. レポートタイトル案

を簡単にまとめて提出すること。

9 周波数領域 myDAQ(ボード線図)

9.1 ボード線図

線形時不変システム²⁷において入力と出力の比を伝達関数 $G(s)$ と呼ぶ。また、伝達関数の周波数特性 $G(j\omega)$ をボード線図と呼ぶ。LCR 直列共振回路のキャパシタ電圧 $V(j\omega)$ の場合は

$$G(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{E} \quad (9.1)$$

$$= \frac{1}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega CR} \quad (9.2)$$

$$= \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j2\frac{\alpha}{\omega_0} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \quad (9.3)$$

$$= \frac{1/LC}{(j\omega - \lambda_1)(j\omega - \lambda_2)} \quad (9.4)$$

となる。

ボード線図において大きさをゲイン線図、位相を位相線図と呼ぶ。

²⁷これまで扱っている LCR 回路は線形であり、素子値は時間に依存しないので線形時不変システムである。

9.2 事前課題

myDAQ には自動でボード線図を測定する機能がある。2つのアナログ入力ポート AI0, AI1 で、それぞれ電源 E と電圧 $V(j\omega)$ を測定すればよい。実際に LCR 共振回路に対してボード線図を測定し、理論値と比較する²⁸。

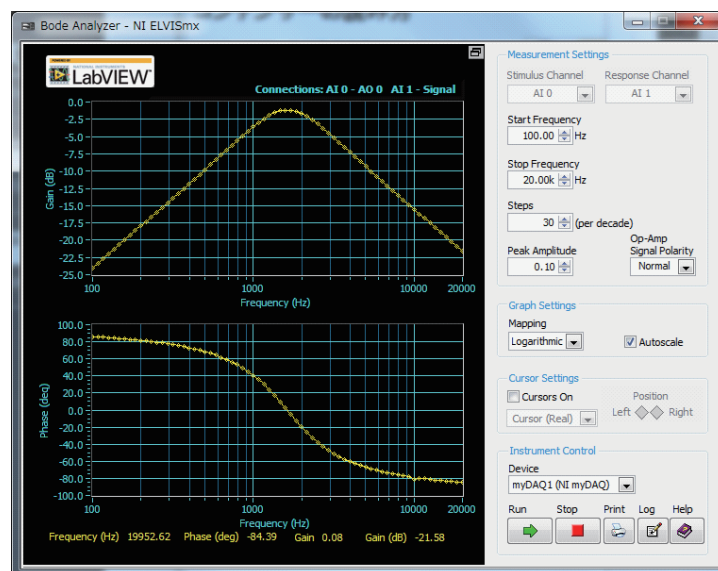


図 9.1: AC 解析の実験例 ($R = 100\Omega$, $L = 10\text{mH}$, $C = 1\mu\text{F}$.)

9.3 発展課題の設定例

- パラメータ依存性
 - 素子の値を変えて実験。
 - Q 値をあげるにはどのようなパラメータにすればよいか。
- 解析
 - エネルギーはどこで消費されているだろうか。複素電力で考える。
 - 実際の実験回路では損失をもつ。その影響について考える。
- 誤差
 - 実験とシミュレーション結果の差異について原因を考える。

²⁸正しい形が得られない場合は入力振幅 (Peak Amplitude) が大きすぎる可能性が高い。オシロスコープで確認してからボード線図を描くように。

- パラメータ推定
 - 実験結果から実際の回路パラメータを推定。
- 先取り
 - 増幅回路の周波数特性。
 - 矩形波から正弦波を取り出す回路を作る。
- 設計
 - 周波数特性を与えてそれを実現する回路を作ってみよう。

9.4 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験

4. レポートタイトル案

を簡単にまとめて提出すること。

10 入出力特性実験 (ボード線図)

10.1 事前課題

1. 実際に 2 ポート回路を作って実験してみよう。
2. LTSpice の結果と比較してみよう。

10.2 発展課題の設定例

- 解析
 - 実際の回路の損失の影響について考察。
- 誤差
 - 誤差の影響はどのような形で特性に現れるか。
- パラメータ推定
 - 2 ポート回路をブラックボックスとして考えてアドミタンス行列を測定で求める。
- いろんな回路
 - 2 ポート回路を多段化して実験。
 - LC 梯子型回路で波を伝搬させる。
 - 2 つの周波数を重ね合わせして入力し、フィルタとしての特性を見る。
- 先取り
 - 増幅回路を作って入出力特性を測定。
 - フィルタを使って発振器をつくる。
- 設計
 - 矩形波にフィルタを通して正弦波をつくる。
 - 相反性の無い回路を作る。
 - ローパス、ハイパス、バンドパスフィルタをつくる。
 - 全域通過フィルタをつくる。

10.3 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験

4. レポートタイトル案

を簡単にまとめて提出すること。

11 能動回路の実験

11.1 事前課題

1. トランジスタの基本特性を測定してみよう。

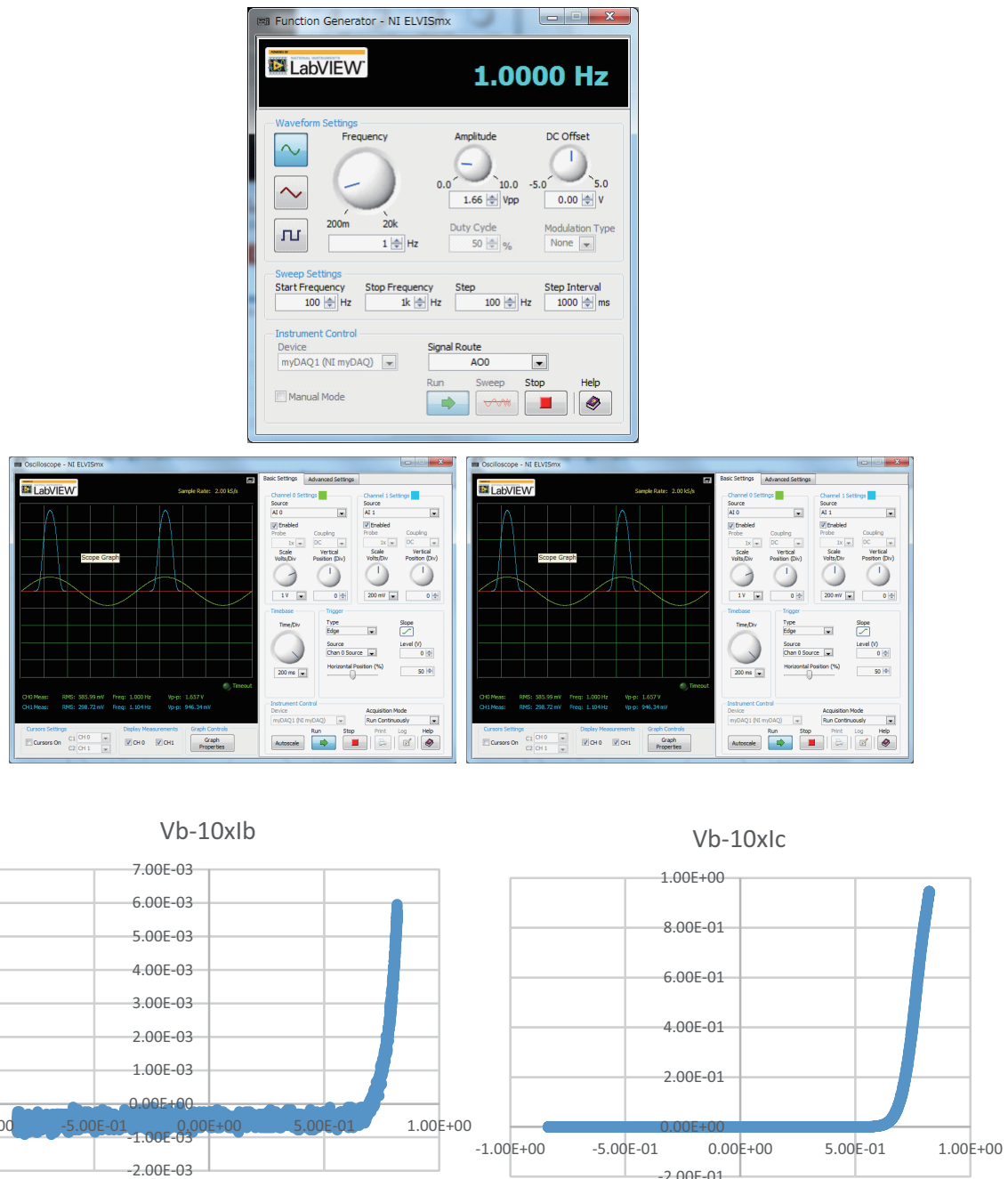


図 11.1: 実験による測定例

2. ノート P C のミニジャックから音を出力し、出力としてスピーカ (8Ω) を使うと音を増幅することができる。図 11.2 の回路を組んで音を増幅して波形を観察してみよう²⁹

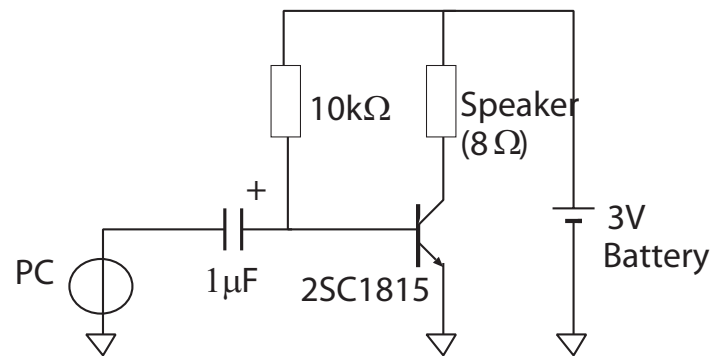


図 11.2: 増幅回路の例

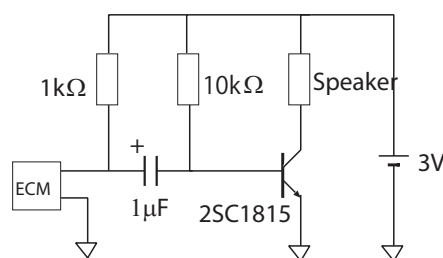


図 11.3: マイクの増幅

11.2 発展課題 (参考)

- パラメータを変化させる
 - － バイアス (動作点) を変化させてみよう。
- 差異
 - － 実験の波形とシミュレーションの波形の違いについて考えてみよう。
- パラメータ推定
 - － 実験結果からトランジスタのパラメータを推定してみよう。
- 設計

²⁹ 音のセンサー入力としてマイク ECM(Electret Condenser Microphone) を用いてもよい (図 11.3 参照).

- もっと増幅率をあげるためにはどうしたらよいか。
- エミッタフォロア (コレクタ接地回路) をつなげてスピーカをもっと強く駆動してみよう。

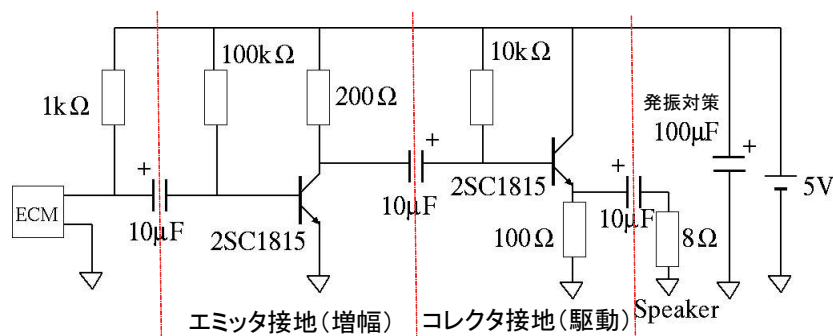


図 11.4: コレクタ接地を使って Speaker を強力に駆動

- いろんな増幅回路をつくってみよう。

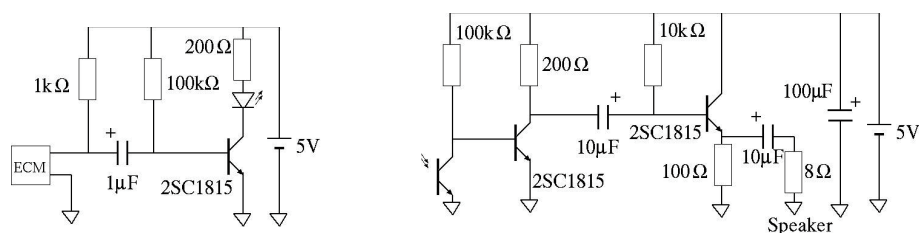


図 11.5: ECM を増幅して LED を光らせ、フォトトランジスタで受けてスピーカを駆動。

11.3 発展課題設定報告

演習時間のまとめとして、当日 16 時ころ、

1. 設定した発展課題の目的

- 発展課題を設定した理由

2. 演習時間に実施した内容

- 演習時間内に行ったこと、および結果・考察
- 演習で判明した課題・問題点

3. 自宅でこれから実施する内容

- 自宅で実施する予定の解析・実験
- 個人として行う内容を明確に

を簡単にまとめて提出すること。

11.4 第4回レポート

入出力特性に関するレポートを下記に注意してまとめ、提出すること。

表紙	タイトル, 氏名, 提出年月日を記載. タイトルは一目見て内容が解るように工夫.
1 概要	目的, 実施内容, 結果について簡単に. 200字程度.
2 目的	発展課題の動機. 何を確かめたいのか, 明らかにしたいのか.
3 実施内容	回路図, 理論, 実験回路, その写真などを記載. 後で再実行できる程度の情報が必要(例えば, 回路素子の値など).
4 結果	得られた結果, 例えばグラフや, 回路が動作する様子の分かる写真などを記載し, それぞれの結果が何を表しているかを説明.
5 考察	得られた結果について分析した上で, 何故そうなったのかを自分なりに考えて, 思うような結果が得られていなくても, その原因を考察すること.
6 結論	全体を通して, 目的が達成されたかどうか. 200字程度. 今後の課題など.
7 参考文献	参考にした文献やウェブサイトなど.
8 付録	本文に入りきらない情報 (例えば, Octave のソースコードなど).