

B1 デジタル回路シミュレーション

Ver. 3.05 (2019.03.27)

この実験では、代表的な回路シミュレータである SPICE を用いて簡単なアナログおよびデジタル回路の解析を行う。これにより、講義や演習で学習した回路の特性についての理解をより深めるとともに、将来、シミュレータを用いた高度な回路解析や回路設計を行うことができるよう、回路シミュレーションの基礎を身に着けることを目的とする。^{*1}

1. パソコンの起動とネットワークへの接続

1. パソコンの接続

パソコンは 1 人 1 台使用する。電源ケーブルとマウスを接続する。

2. ログオンとフォルダの作成

アカウント名: “student”, パスワード: “jikken” でログオンする。作業用フォルダとして、[ドキュメント] フォルダに自分のローマ字の名前のフォルダ (例: TarouOsaka) を作成する。(※ファイルの保存場所が分からないと後から困るので、必ずフォルダを作成すること！)

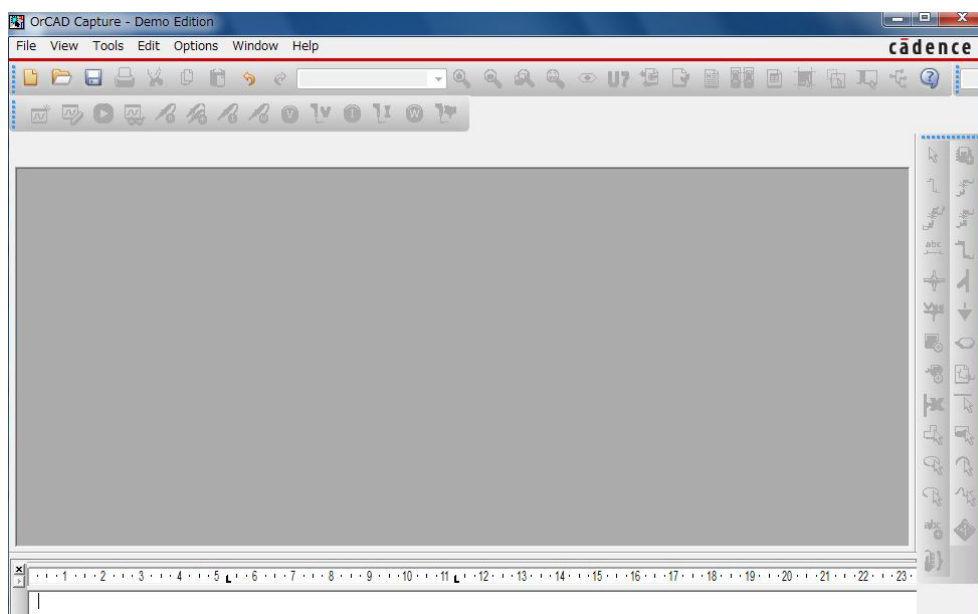


図 1 SPICE の初期画面 (注: SPICE のバージョンによって多少指導書の図と画面と異なる場合があるが基本は同じである。

^{*1} 自分のパソコンにインストールするには OrCAD のページ <https://www.orcad.com/jp/resources/orcad-downloads> からダウンロードして指示に従う。ただしバージョンが違うので本実験のものとは多少異なる。

2. 回路シミュレーター SPICE の使い方

1. SPICE の起動

- Windows のメニューから **OrCAD Capture** をクリック。前ページの図 1 のウィンドが現れる。
- 画面上部のメニューから **[File] → [New] → [Project]** を順にクリックすると、図 2 左のダイアログが現れるので Name 欄にプロジェクト名を入れる。この時 **PSpice Analog or Mixed A/D** をチェックしておくこと。Location は先に作成したフォルダを指定する。
- 次に現れるダイアログ (図 2 右) で **Create a blank project** をチェックして OK をクリックすると図 3 のような空のキャンバス画面が現れるのでここに回路を描いていく。(ここで、Create upon an exsisting project をチェックすると、すでに作った回路を呼び出して変更を加えることができる。)
- 既に作成した回路を呼び出したいときは、**[File] → [Open] → [Project]** と進んで、.opj ファイルを選んでクリックし、現れるエクスプローラー風ダイアログの .dsn をクリックして、SCHEMATIC1 の下の Page1 をクリック。

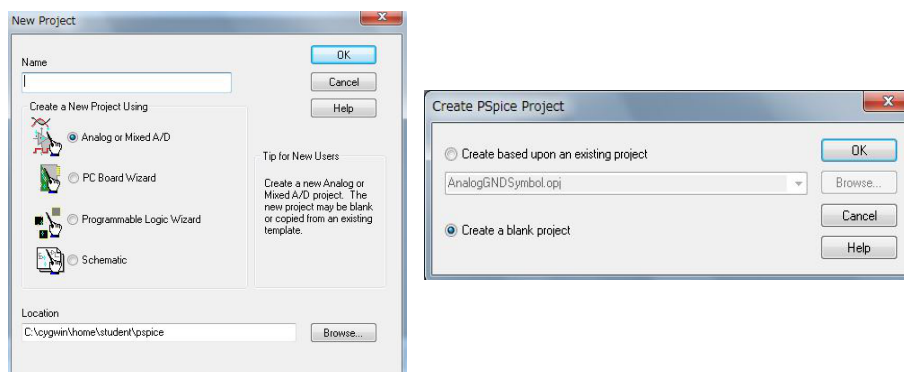


図 2 初めの設定ダイアログ

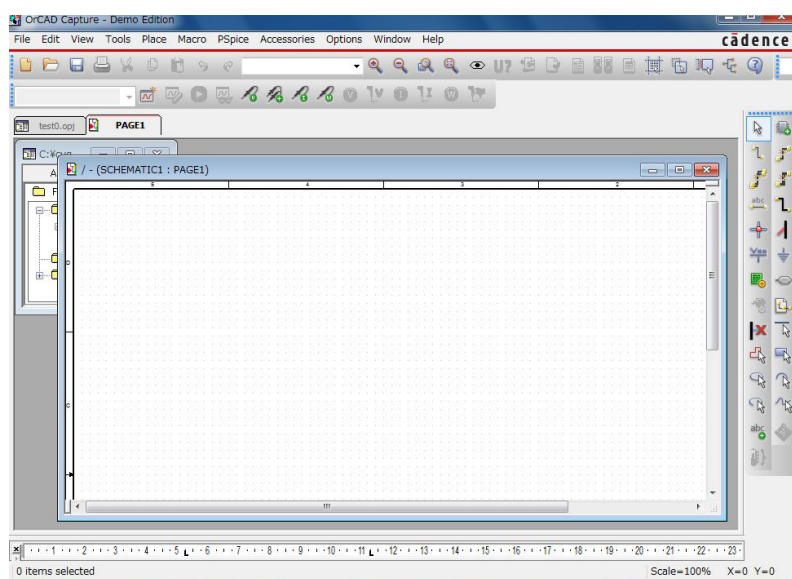


図 3 回路作成のためのウィンド

2. 回路作成

- 画面上部の [Place] から [Part] を選ぶと図 4(右) のダイアログが現れる。
- 抵抗を置きたければ、まず中段の Part List から **R/ANALOG** を選ぶ。すると下段の box に抵抗の記号が現れるので、OK をクリックするとキャンバスに抵抗が配置される。配置が済めば右クリックして **End Mode** をクリックする (または Esc を押す)。同様にして、キャパシタンス (**C/ANALOG**) やトランジスタなどの必要な部品を置く。方形波電源を使う場合であれば、**VPULSE** を選ぶ。右側のメニューバーから **Ground** も選んで画面に置く (Ground がないと SPICE は動かない)。
- 次に、画面右側の配線マークをクリックして、置いた素子をつなぐ。配線が終わったら右クリックして **End Wire** をクリック。
- 抵抗、キャパシタ、電源などの値を入力する。表示されている初期値をダブルクリックすると入力ダイアログが現れるので、値を入力する。k (キロ), m (ミリ), n (ナノ) 等の補助単位が使える。 μ (マイクロ) は u と書くことに注意。M (メガ) は使うとうまく動かない恐れがあるので 10000k などと書くといい。
- 電源のパラメータも入力する。この実験で使うのは、パルス電圧源 (VPULSE), 交流電圧源 (VSIN または VAC), 直流電圧源 (VDC) の 3 種類で、パルス電源のパラメータは図 5 に示してある。VSIN はオフセット (VOFF), 振幅 (VAMPL), 周波数 (FREQ) の 3 つのパラメータを持つ。VDC は電圧値がパラメータである。

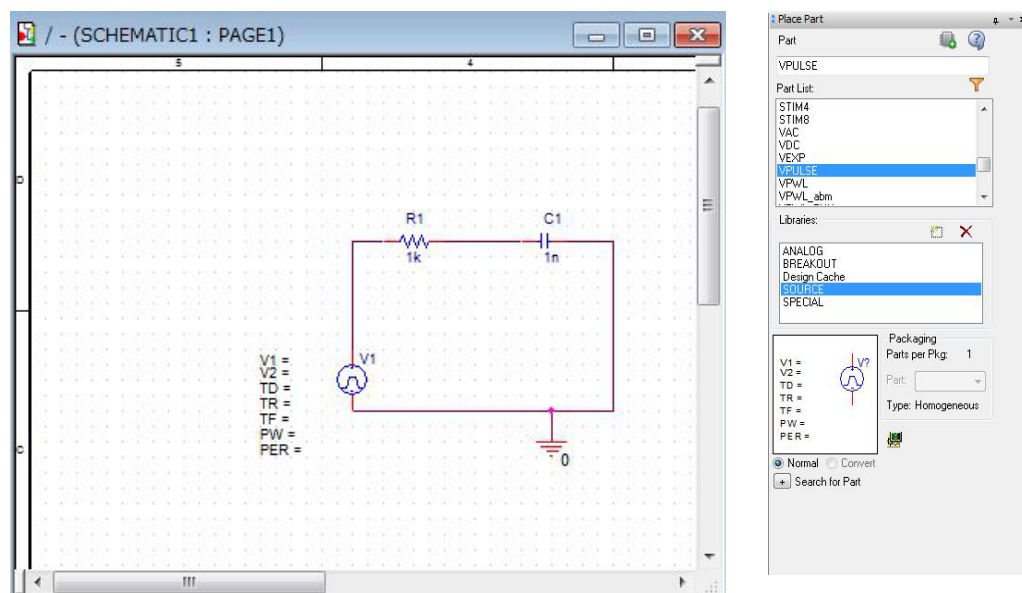


図 4 素子配置のためのダイアログ (右) と回路を作成した画面 (左)

練習

ここまで読んだら図 4 の回路を作ってみよう。これは課題 3-1 と同じもので、素子、電源の値も課題 3-1 のものを用いる。

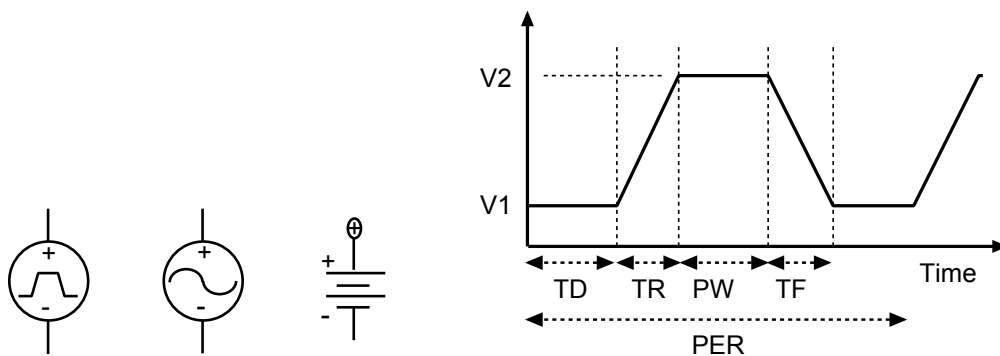


図5 左から、パルス電源 (VPULSE), 交流電源 (VSIN, VAC), 直流電源 (VDC) の記号とパルス電源の設定パラメータ

3. シミュレーションプロファイルの設定

次に、シミュレーションのタイプを設定する。過渡応答を見たいなら **Time Domain** を、電圧による変化を見たいなら **DC Sweep** を、周波数応答を見たいなら **AC Sweep** を選んでパラメータの設定を行う。

- 画面上部の [PSpice] から [New Simulation Profile] を選んでクリック。(すでにある Profile を変更したいなら [Edit Profile] を選ぶ。)
- Name 欄にプロファイル名を入れ、**Create** をクリック。
- 時間応答を調べる場合は **Analysis Type** として **Time Domain** を選んで **Run to Time** (どれだけの時間シミュレーションするか) と **Step Size** を入れる。Step Size は Run to Time の 1/1000 くらいが目安である。
- 電圧をスイープする場合は、**Analysis Type** として **DC Sweep** を選んで **Sweep Variable** に電源名を入れ **Sweep Type** を設定する。2 つ以上の電源がある時には、Primary と Secondary を設定できる。Primary はグラフの横軸となる変数で、Secondary を一定値に固定して Primary がスキャンされる。
- 周波数応答を調べたいときは **Analysis Type** として **AC Sweep** を選ぶと、電源の周波数をスイープすることができる (このときは交流電圧源 VAC を用いる)。

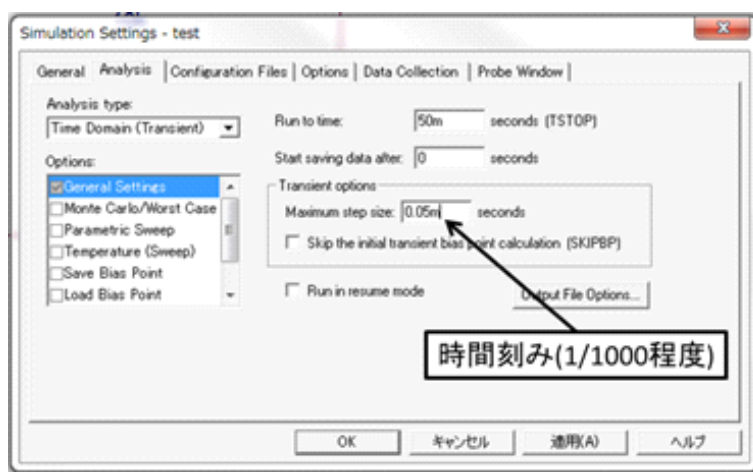


図6 シミュレーション設定のダイアログ

4. 実行

まず、画面上部のメニューバーから電圧プローブまたは電流プローブを選んで測定したい位置に置く。電流プローブは素子に接していないと置けないので注意。

上部メニューの **[PSpice]** から **[Run]** をクリック（または三角の記号をクリック）するとシミュレーションが始まり、グラフが描画される。回路、設定等に間違いがあればエラーが表示されるので、よく読んで対応する。

練習

先の回路を Time Domain でシミュレートしてみよう。Run to time は図が見やすいように考えて設定せよ。

5. よくある間違いと対策

- 配線が途切れている ⇒ 回路をチェックする。ドラッグすると 断線箇所が分かりやすい。
- 素子名が重複している ⇒ 前に使った回路が閉じられていない恐れが強い。複数のウィンドウをひらいたまま作業すると上手くいかないことがあるので一度プログラムを終了し再度シミュレーションを行う。
- グラフに何も表示されない ⇒ プローブを置いていない。
- グラフがずっとゼロのまま ⇒ 素子や電源の設定値がおかしい。n(ナノ) や u(マイクロ) のつけ忘れはないか。
- グラフが折れ線になっている ⇒ Step Time または Increment を小さくする。
- いつまで待っても何も起こらない ⇒ Run to Time が大きすぎるとか Increment が小さすぎる等の理由でシミュレーションに時間がかかっている。
- MOSFET の動作がおかしい ⇒ MOSFET の設定でスペルミスなどはないか確認。基板電圧がおかしい可能性がある。

6. グラフが描けたら行うこと

- まず、描いた線を太くする。線またはグラフ下部の記号をクリックして Property を選び、見やすいよう適当な太さを選ぶ。
- **fn** と **pri sc** を同時に押してグラフが表示された画面を保存する。PAINT を開き、保存した画面をコピーして必要な情報（課題番号、縦軸、横軸、用いたパラメータ、どの線が何を表しているか、など）を書き込んでおく。これを怠ると後でどのグラフがなんだったかわからなくなるのでちゃんと行うこと。
- 名前を付けて自分のフォルダに保存する。

この先の事項は必要に応じて読むこととして、8 ページに進んで課題 3-1 から順に始めよう。

7. パラメータスキャンの方法

SPICE には素子 (たとえばキャパシタンス) の値を少しずつ変えてシミュレーションを行う機能がある。この方法を以下に紹介する。

- ライブラリの追加 (既に追加されているならこの操作は不要)
 - **Place Part** の **Add Library** から **special.olb** を追加する。
 - library に SPECIAL, part に PARAM と入れると”PARAMETERS”という札が現れるのでこれを他と重ならないように回路付近に置く。
- スキャンしたい素子の値をクリック。
キャパシタンスをスキャンしたいなら回路図のキャパシタの値をクリックして Value 欄に {C} と波カッコで囲んで入力する。
- 回路上の”PARAMETERS”をクリックして, **New Column** と進み **Add New Column** タブの Name 欄に C (波カッコは要らない), Value 欄に 1n などと適当な値を入れる。
- **Pspice** タブから **Edit Simulation Profile** を選び, **Parametric Sweep** にチェックを入れる。**Global parameter** をチェックし, 先ほど素子の値を {C} としたなら **Parameter Name** に C と入れる (ここも波カッコは要らない)。さらに, その下の **Sweep Type** 欄に, Start Value, End Value, Increment を入れ OK をクリック。(Value List に計算したい値を列記してもよい)。
- Run をクリックすると, どの値でシミュレーションするか聞かれるので All または OK をクリック。

8. MOS トランジスタの設定方法

図 4 の Place Part 画面で **BREAKOUT - MBreakN** を選ぶと NMOS が, **MBreakP** を選ぶと PMOS が配置される。記号は図 7 のとおりである。ソースとドレインの区別はない。

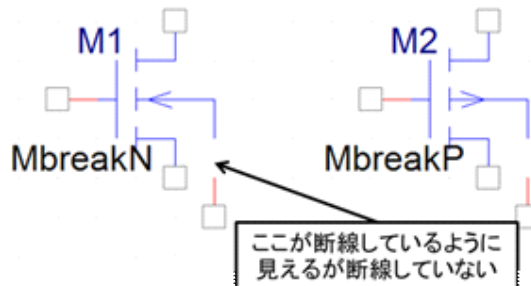


図 7 MOS トランジスタ

MOSFET の SPICE モデルには数多くのパラメータが含まれる。その値をデフォルト値から変更するには, MOSFET の記号を左クリックして選択し (ピンク色になる), 右クリック → **[Edit PSpice Model]** を選択すると, 図 8 のような画面が現れるので, パラメータ値を入力し, メニューの **[File]** → **[Save]** で変更を反映させる。

例えば, MOSFET モデルは LEVEL 1 で, $L = 5\mu\text{m}$, $W = 5\mu\text{m}$, $V_{TO} = 0.8\text{ V}$ (※ SPICE では VTO の “O” はゼロでなくアルファベットのオー), $k' = 2 \times 10^{-5}\text{ A/V}^2$, $\lambda = 0.06\text{ V}^{-1}$ と設定したい場合, 図 8 のように「.model Mbreakn NMOS LEVEL=1 L=5u W=5u VTO=0.8 KP=2e-5 LAMBDA=0.06」(改行なし!) と入力する (※実験で用いる値とは異なるので注意!)。スペルミスすると数値が反映されないので注意すること。本実験では MOSFET モデルは LEVEL 1 を用いる。



図 8 MOS トランジスタのパラメータ入力ダイアログ

3. 課題

3-1. RC 回路の過渡特性と周波数応答

下の図のように、大きさ R の抵抗と容量 C キャパシタが直列につながれた回路を考える。回路に流れる電流を $I(t)$ 、キャパシタに蓄えられた電荷を $Q(t)$ とすると、抵抗、キャパシタに掛かる電圧はそれぞれ RI 、 Q/C で、これらの和が電源電圧に等しいことから

$$RI + \frac{Q}{C} = V(t) \quad (1)$$

が成り立つ。さらに、電流の大きさは電荷の時間変化の割合すなわち $I = dQ/dt$ であることを用いると、

$$R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = V(t) \quad (2)$$

という式が成り立つ。RC 回路についての以下の課題を行え。

- [1(a)] $V(t)$ が一定値の場合に微分方程式 (2) を解いて、解析的に $Q(t)$ を求め、時間の関数として概形を図示せよ。初期条件は $Q(0) = 0$ とする。
- [1(b)] SPICE を用いてこの回路の過渡特性を調べよ。Simulation Profile は Time Domain とし、 $V(t)$ は図に示すような矩形波とする（パルス電源を用いる）。図に示す 2 か所に電圧プローブを置く。まず、抵抗とキャパシタの大きさはそれぞれ $R = 1 \text{ k}\Omega$ 、 $C = 1 \text{ nF}$ とし、得られたグラフから、 Q が飽和値の $1/e$ となる時間を読み取り、それが RC に一致していることを確かめよ。
- [1(c)] パラメータスキャンの方法を用いて、 R を 200Ω から $1 \text{ k}\Omega$ まで振って、電圧の時間変化を調べよ。
- [1(d)] 電源電圧を交流電圧源 (VSIN) に変え、交流電源の周波数を 10 kHz 、 100 kHz 、 1 MHz と変化させて、振幅と位相のずれが周波数によりどのように変化するか調べよ。図が見やすいように Run to time は適宜変えること（周波数の逆数程度とするとよい）。
- [1(e)] Simulation Profile を AC Sweep に変えてシミュレーションを行え。周波数は、 100 Hz から 10 MHz まで振る（電圧源に VAC を用いる）。

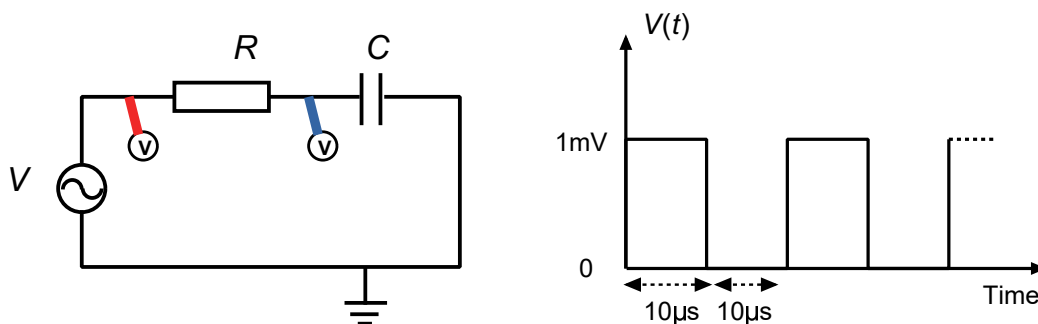


図9 RC 回路とパルス電源のパラメータ

3-2. LCR 回路の過渡応答と周波数応答

図のように、コイル (インダクタ), 抵抗, キャパシタが直列につながれた回路を考える. これらの素子のインダクタ, 抵抗の大きさ, 容量は L, R, C とする. 回路に流れる電流を $I(t)$, キャパシタに蓄えられた電荷を $Q(t)$ とすると, コイル, 抵抗, キャパシタに掛かる電圧はそれぞれ $LdI/dt, RI, Q/C$ でこれらの和が電源電圧に等しいことから

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{Q}{C} = V(t) \quad (3)$$

が成り立つ. この式を時間で微分し, 電流は $I = dQ/dt$ で表されることを用いると,

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

となる. 右辺の dV/dt をゼロとすると, この微分方程式は, 速度に比例したまさつ力を受ける調和振動子の微分方程式

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + 2m\gamma \frac{dx}{dt} + m\omega_0^2 x = 0 \quad (5)$$

(m : 質量, x : 変位, γ : まさつ係数, ω_0 : 振動数) と同じ形をしていることからわかるように, LCR 回路を流れる電流 I は減衰振動に類似した振る舞いをする (dV/dt は外力に相当する). この回路について以下の課題を行え.

- [2(a)] $dV/dt = 0$ のときの微分方程式 (4) の解を手計算で求め, 概形を図示せよ. ただし初期条件 $I(0) = 1\text{mA}$, $dI/dt(0) = 0$ を課す.
- [2(b)] SPICE を用いてこの回路を流れる電流の時間変化を求めよ. Simulation Profile は Time Domain とし, 電流測定のためのプローブを置く. $V(t)$ は下の図に示すような矩形波とし, 素子の値は $L = 10\text{mH}$, $C = 1\text{nF}$, R は 200Ω から $1\text{k}\Omega$ まで 200Ω 刻みで変化させる.
- [2(c)] 電源電圧を $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$ と交流電圧に変え (VAC を用いる), AC Sweep のシミュレーションを行え. R は $1\text{k}\Omega$ に固定し, ω を 1kHz から 1MHz まで変化させて, 振動数による変化を調べ, 電流が極値を取る周波数と, L, C, R の値の関係を考察せよ.

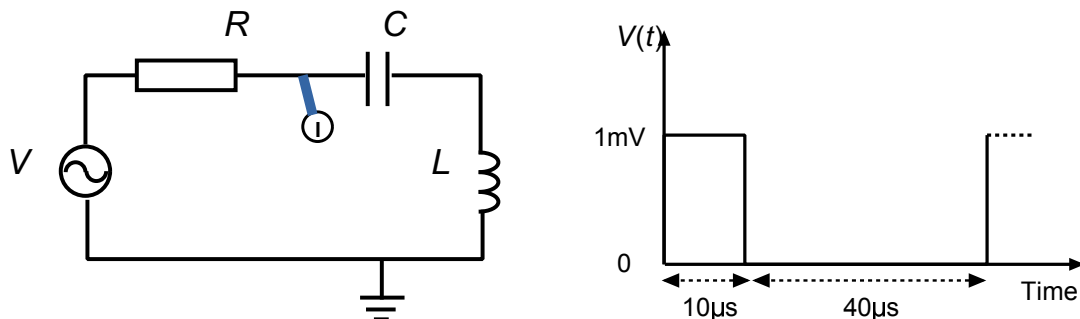


図 10 LCR 回路と電源電圧

3-3. フィルター回路の周波数依存性

- [3(a)] 下図 (a) の回路の周波数特性を調べよ. $R = 1\text{k}\Omega$, $C = 10\text{nF}$ として, 入力電源に VAC を用いて電源の周波数をスキャンして, V_{OUT} の周波数依存性を調べよ.
- [3(b)] 下図 (b) の回路についても同様のシミュレーションを行え. 入力電源に VAC を用いて電源の周波数をスキャンして, V_{OUT} の周波数依存性を調べよ.
- [3(c)] (a) と (b) を直列につないだ回路を作成し, 周波数特性を調べよ.
- [3(d)] (a) と (b) を並列につないだ回路を作成し, 周波数特性を調べよ.
- [3(e)] 講義, 演習で習ったことを思い出してこの上記の回路の動作, 特性を解析せよ.

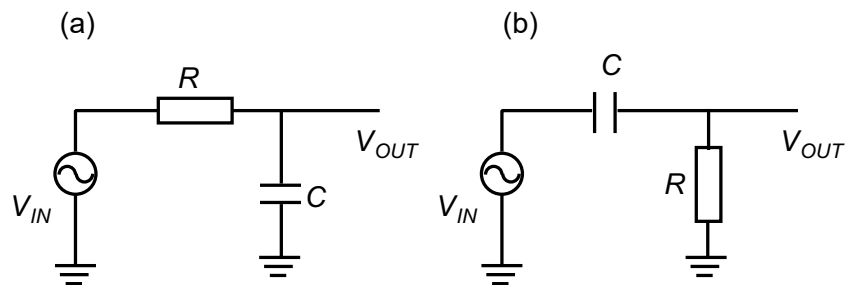


図 11 (a) Low-pass filter, (b) High-pass filter

3-4. 電界効果トランジスタの特性と増幅回路

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) は現在のディジタル集積回路を構成する主要な能動素子である。その回路記号を 5 ページの図 7 に示す。NMOS と PMOS の 2 種類の型があり、それぞれソース (Source), ドレイン (Drain), ゲート (Gate) の 3 端子を有する。MOSFET のモデルにも様々なバージョンがあるが、本課題では最も簡単な Level 1 モデルを用いる。これによれば、ドレイン電流 I_D は図のようにソースを基準に測った各端子電圧、すなわち ドレイン電圧 V_D , ゲート電圧 V_G の関数として次式のように与えられる (V_T はしきい値電圧)。

- | | | |
|----------|--------------------------------|---|
| (1) オフ領域 | $(V_G < V_T)$ | $I_D = 0$ |
| (2) 線形領域 | $(V_T < V_G, V_G - V_T > V_D)$ | $I_D = k' [(V_G - V_T)V_D - V_D^2/2] (1 + \lambda V_D)$ |
| (3) 飽和領域 | $(V_T < V_G, V_G - V_T < V_D)$ | $I_D = (k'/2) [(V_G - V_T)^2] (1 + \lambda V_D)$ |

以下の課題を行え。

まず、N チャネル MOS トランジスタ (Mbreak-N) を用いて図 12(左) の回路を作成せよ。トランジスタのパラメータは次のように設定する。

	L (μm)	W (μm)	V_{TO} (V)	k' (A/V ²)	λ (V ⁻¹)
NMOS	5	5	0.8	2.2×10^{-5}	0

- [4(a)] DC スイープで、 V_1 を Primary, V_2 を Secondary として、 V_1 を 0~5V, V_2 を 0~5V まで動かして、特性曲線を描け。
- [4(b)] DC スイープで、 V_1 を Secondary, V_2 を Primary として、 V_1 を 0~5V, V_2 を 0~5V まで動かして、特性曲線を描け。電圧の増分は Primary は 0.1V, Secondary は 1V とする。
- [4(c)] 回路を図 12(右) のように変更し、 $V_{DC} = 3$ V, $V_{DD} = 5$ V, $V_{AC} = 1$ mV, $\omega = 1$ kHz と設定せよ。 V_{OUT} の時間変化を調べよ。抵抗 R を 1 k Ω から 100 k Ω まで振って、 V_{OUT} の振幅の変化を調べよ。

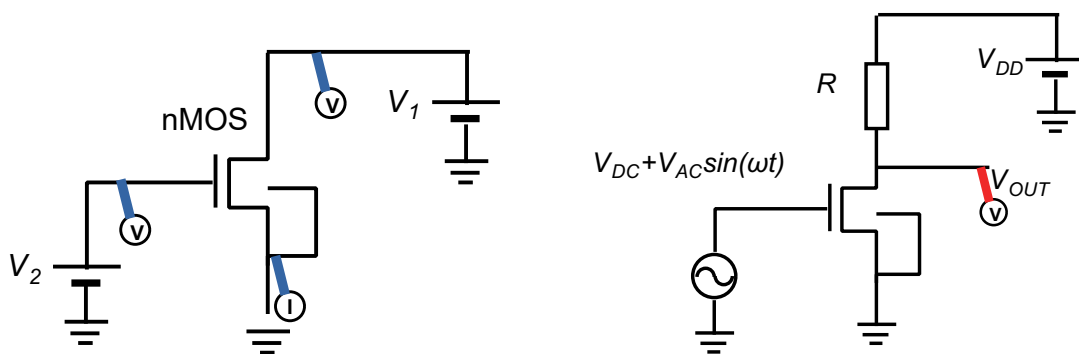


図 12

3-5. 抵抗負荷型インバータ回路

図の回路で, 入力電圧が $0V$ の時には NMOS トランジスタは遮断されているので非常に大きい抵抗とみなせ, 出力 V_{OUT} は $V_{DD}(=5V)$ となる. 一方入力電圧が $V_{DD}V$ の時には NMOS トランジスタは導通しているので出力 V_{OUT} は接地すなわち $0V$ となる. 従って, 入力とは反対の信号が出力される. この回路をインバータもしくは NOT ゲートと呼ぶ.

入力信号を下図のような矩形パルスとして, 以下の事項を調べよ. $R=10M\Omega$ とする. NMOS のパラメータは前のページに記したものとする.

- [5(a)] 電圧プローブだけを置いて Time Domain でシミュレーションし, 入力電圧と出力電圧が逆であることを確かめよ (キャパシタンスを $10fF$ とする).
- [5(b)] C を $20fF$ から $100fF$ まで $20fF$ 刻みで変化させ, 出力信号の時間遅れと C の大きさの関係を調べよ.
- [5(c)] 電流プローブを置いて, 貫通電流の時間変化を調べよ (電圧プローブは外しておく).

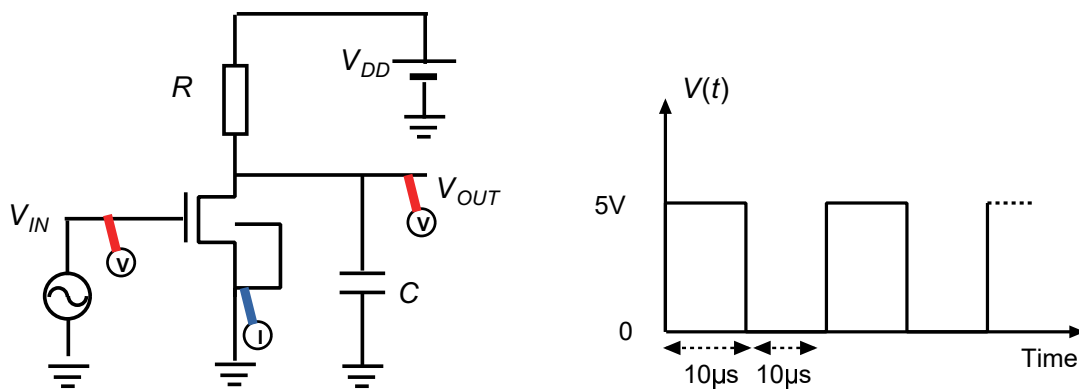


図 13 抵抗負荷型インバータ回路と入力電圧

3-6. CMOS インバータ回路

貫通電流が大きいという抵抗負荷型インバータ回路の欠点を改善したのが、図に示す CMOS インバータ回路である。この回路では、抵抗の代わりに p チャネル MOS トランジスタを用いているため、定常状態ではどちらか一方のトランジスタは必ず閉じている。そのため定常状態では貫通電流が流れず、低消費電力を実現している。

V_{DD} は 5V, 入力信号を前ページ図 14 の矩形パルスとして、以下の事項を調べよ。トランジスタのパラメータは次のように設定する。

	L (μm)	W (μm)	V_{TO} (V)	k' (A/V^2)	λ (V^{-1})
NMOS	5	5	0.8	2.2×10^{-5}	0
PMOS	5	5	-0.8	7.3×10^{-6}	0

- [6(a)] Time Domain でシミュレーションし、入力電圧と出力電圧が逆であることを確かめよ (キャパシタンスを 10fF とする)。
- [6(b)] C を 20fF から 100fF まで 10fF 刻みで変化させ、出力信号の時間遅れと C の大きさの関係を調べよ。
- [6(c)] 電流プローブを置いて (電圧プローブは外す)、貫通電流の時間変化を調べよ。
- [6(d)] 課題 5(c) と 6(c) の結果について、それぞれなぜそのようになるか、違いはどこから来るか考察せよ。

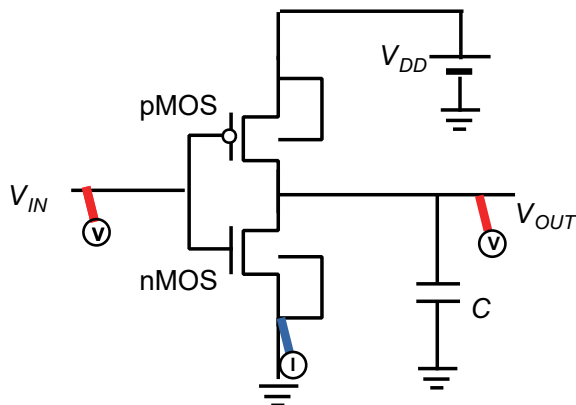


図 14 CMOS インバータ回路

レポートについて

レポートは、次回実験日の 12:30~12:50 にこの場所 (E1-113) に提出。早く提出したい場合は、事前連絡の上 森藤まで直接提出してもよい (E6 棟 E419 号室)。質問等がある場合は森藤 (morifuji@eei.eng.osaka-u.ac.jp) へ。