

デジタル回路実習ボード

～ オリジナル実習ボードを用いたデジタル回路実習 ～

公立千歳科学技術大学 理工学部 電子光工学科 福田 誠

1 はじめに

千歳科学技術大学の電子光工学科では、2 年生の必修の講義科目として「デジタル回路」が設置されているが、それを補完するためには実習が不可欠であった。そこで、2019 年度の春学期から 2 年生の必修科目である「光システム実験」内に「デジタル回路」のテーマを開設することとなった。デジタル回路の実習教材を準備するにあたって市販されている実習ボードの購入を検討したが、市販されている実習ボードでは搭載されている機能が多すぎて初学者にとっては複雑であったり、ブレッドボードを用いているために IC に直接配線を行わなければならないなど、論理素子の動作を視覚的にイメージできる手ごろな教材がみつからなかった。そのため 2018 年度の春学期からオリジナルのデジタル回路実習ボードの設計に着手した。実習ボード製作の基本コンセプトとしては、デジタル回路で用いられる基本ゲート素子の動作を視覚的に体験できること、シンプルな構造で壊れにくく修理しやすい構造であることを目指した。実習を行う際、学生はアナログテスタとデジタルオシロスコープを用いて信号の様子を視覚的に理解できるようにした。本稿では、デジタル回路実習ボードに搭載した機能と実習内容について紹介する。

2 デジタル回路実習ボードの設計

デジタル回路実習ボードには、組み合わせ回路と順序回路について実習できる機能を搭載することとした。組み合わせ回路は、基本的な論理素子 (NOT 回路、AND 回路、OR 回路など) を組み合わせることによって論理式を回路で実現するものである。もう一方の順序回路は、フリップフロップのように入力の時間的な順序によって出力が決定される回路である。以下に製作したデジタル回路実習ボードにどのような回路 (機能) を搭載しているかを具体的に記す。

2-1 実習ボードに搭載した回路

デジタル回路実習ボードに搭載した回路 (機能) を表 1 に示す。実習ボードの電源には +5 V のスイッチング AC アダプタを用いている。

2-2 実習ボードのプリント基板の設計

デジタル回路実習ボードは、ガラスエポキシを基板材料とする両面のプリント基板 (PCB) によって製作した。プリント基板の配線パターン設計には、無償のプリント基板設計 CAD である KiCad を用いて行った。KiCad は CERN (欧州原子核研究機構) の支援を受けて開発が進められたこともあり、本格的な PCB 設計ツールとして普及している。

プリント基板の設計の手順として、KiCad の回路図エディタによってまず図 1 に示す回路図を入力した。回路図を入力する際、使用する部品のうち KiCad のライブラリーに登録されていない部品

のフットパターン(プリント基板上で部品をはんだ付けするための銅箔のパターン)の登録も必要になる。回路図の入力が終了したら KiCad のエラーチェック機能を用いてエラーチェックを行いエラー箇所を修正した。

表 1 実習ボードに搭載した回路(機能)

回路(機能)名	搭載数	説明
基本論理素子(NOT 回路、NAND 回路、AND 回路、OR 回路、NOR 回路、EXOR 回路)	各 1	いずれも、CMOS 汎用ロジックである 74HC シリーズの IC を用いた。各 IC の電源電圧は+5V としたので、論理レベル 0/1 に対応する電圧レベルはおおよそ 0V/5V となる。NOT 回路および NAND 回路にはヒステリシス特性をもつ IC を使用した。
JK フリップフロップ	3	順序回路を構成するために必要な JK フリップフロップを3つ搭載した。
クロック発生回路	1	順序回路を動作させるためのクロック信号として、周波数が約 1 Hz で振幅が+5V の方形波を発生する回路を搭載した。
パルス発生回路	1	プッシュスイッチを押した間だけハイレベルを出力する回路で、プッシュスイッチにローパスフィルタと NOT 回路を接続してチャタリングを防止している。
LED によるレベル表示回路	6	ハイレベルの信号が入力されると赤色 LED が点灯する回路で、論理素子の出力信号のローレベル/ハイレベルを LED の点灯によって判定できるようにした。
ローパスフィルタ	1	CR 回路によるローパスフィルタを1回路搭載した。ステップ応答波形の観察や CR 発振回路の実験に用いる。
アナログ電圧発生回路	1	可変抵抗器によって 0V~+5V の任意の電圧を発生する。論理素子の入出力特性を観察する際に用いる。
トグルスイッチによるローレベル/ハイレベル発生回路	3	組み合わせ回路の入力信号の発生およびスイッチ切り替え時のチャタリングの観察に用いる。
ローレベル、ハイレベル	各 4 端子	実習ボードのアース(0V) およびハイレベル(+5V) に接続した端子で、固定レベルの信号として用いる。

回路図の入力が終了したら KiCad によって回路の接続情報であるネットリストを生成する。そのデータに基づいて KiCad の基板エディタを用いて配線パターンをデザインしていく。基板エディタを立ち上げると、ネットリストによって接続すべき部品のピン同士が細い線で結ばれた画面が表示されるが、部品の位置は定まっていないので、まず基板面上に部品を配置する。部品の位置が決まったら、ピン同士が細い線で結ばれているので、それを頼りに実際の配線を行う。その際に、配線の太さ、基板の表裏どちらの面に配線するかなどを考慮して、配線同士がショートしないように配線パターンをデザインする。次に、基板表面にシルク印刷(白色の印刷)によって論理素子を描くとともに、端子名などの文字を描く。図 2 にデジタル回路実習ボードのプリント基板のパターン図

を示す。赤色の配線は基板の表面(部品面)、緑色は裏面(はんだ面)の配線パターンを示している。ボードのサイズは 200 mm×300 mm とし、PCB 製造時に配線が切断するなどのトラブルが発生しないように幅 1 mm 以上のパターンで確実に配線を行った。設計したパターンの CAD データをガーバーフォーマットのファイルに変換して、オンラインで PCB 製造会社に送信して製造を依頼した。その際、1.6 mm 厚のガラスエポキシ(FR4)を基板材料とし、両面基板による製造を指定した。

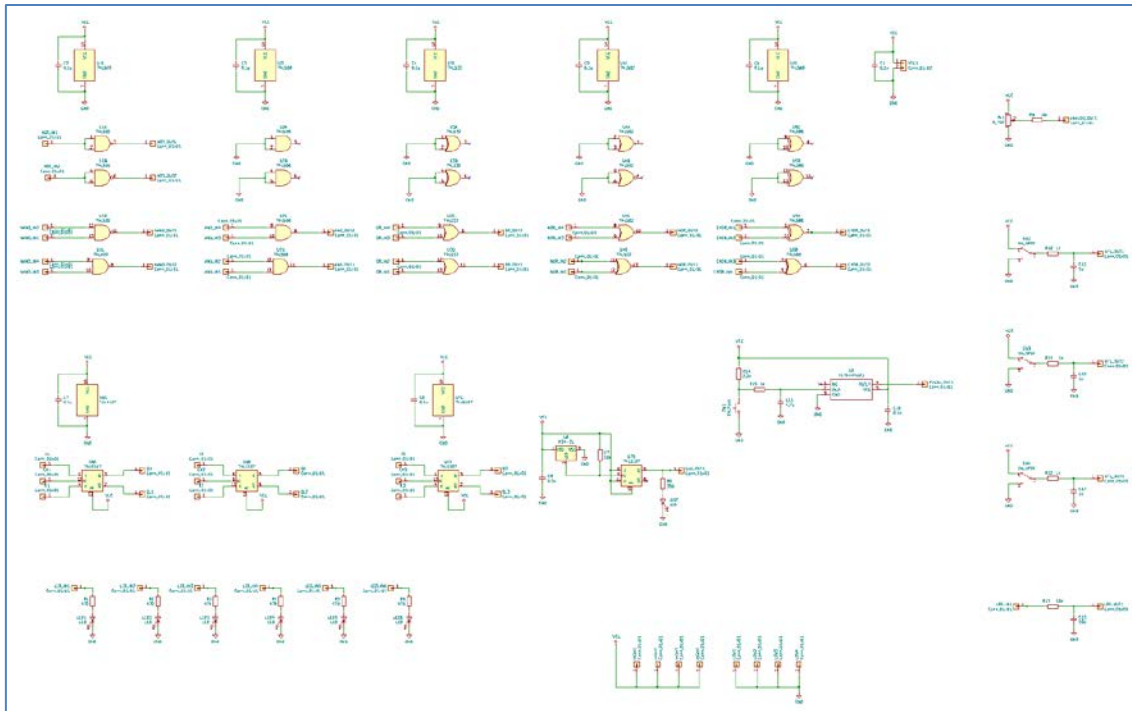


図 1 デジタル回路実習ボードの KiCad による回路図

PCB 製造会社から納品されたプリント基板に、半導体部品、受動素子、端子、スイッチなど約 140 点をはんだ付けして製作したデジタル回路実習ボードの部品面の写真を図 3 に示す。論理素子の入力端子には白色ビーズ付きの端子を、出力端子には黄色のビーズ付きの端子をそれぞれ配置した。また、ハイレベル(+5V)には赤色ビーズ付きの端子を、ローレベル(0V)および GND(0V)には黒色のビーズ付きの端子をそれぞれ配置した。今回はこの実習ボードを 20 枚製作した。

2-3 論理素子間の接続

図 4 に論理素子に接続されたビーズ付きの端子およびそこに IC クリップ付きのリード線を接続する様子を示す。黄色のビーズ付きの端子はデジタル IC の出力端子であるため、黄色端子同士を接続すると IC の出力信号が衝突して IC に大きな負荷がかかるので、ボードおよびテキストには黄色端子には入力端子である白色端子しか接続してはいけない旨の注意書きをしている。

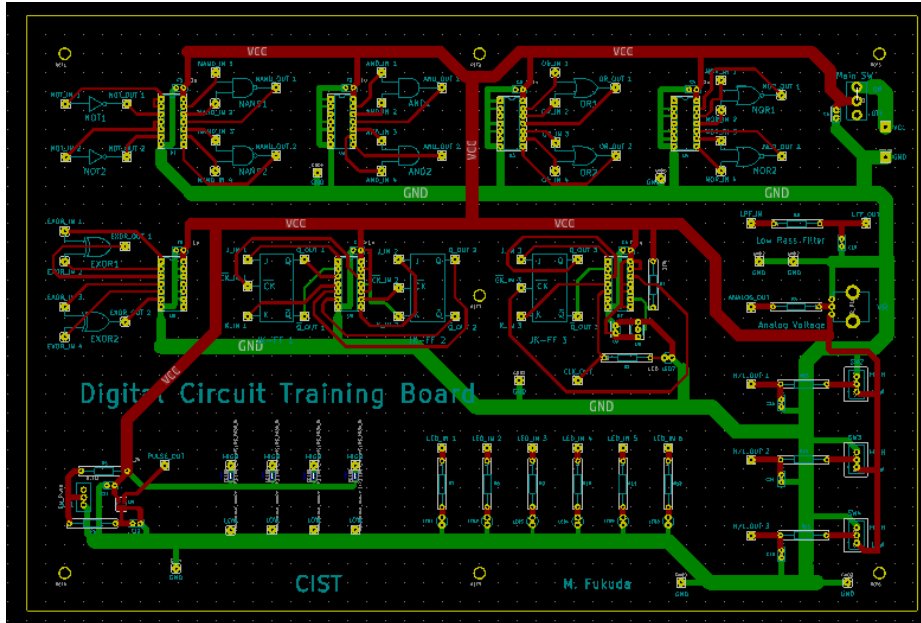


図2 デジタル回路実習ボードのプリントパターン図

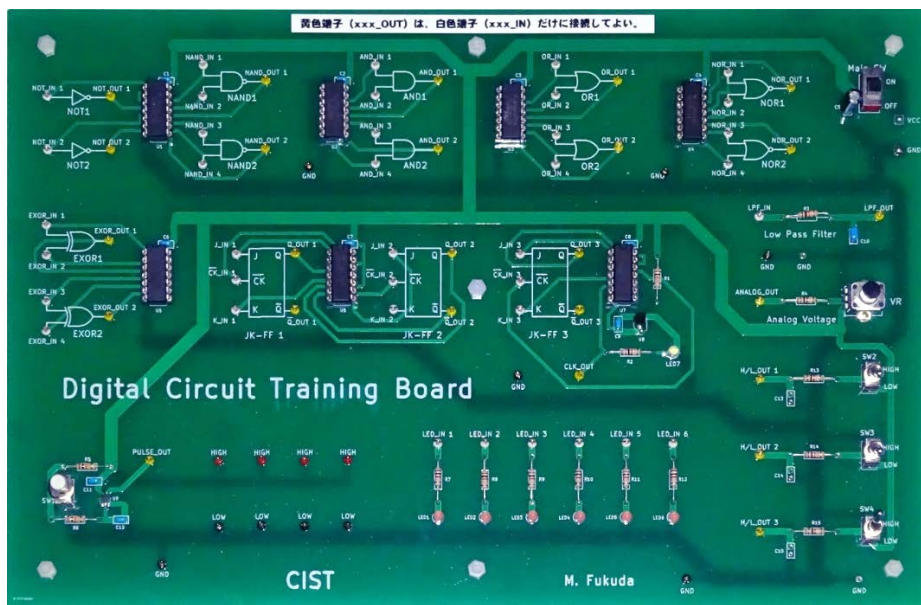


図3 製作したデジタル回路実習ボード

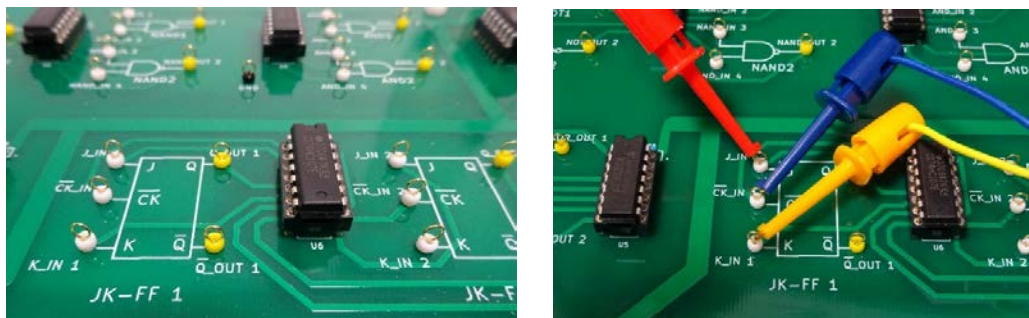


図4 ビーズ付き端子とIC クリップによる接続の様子

図 5 は実習に用いる配線用の IC クリップ付きのリード線と IC クリップの先端の写真である。リード線の両端に IC クリップをはんだ付けしたものを製作した。リード線の長さは 20 cm と 30 cm の 2 種類とし、5 色の色分けをして合計 10 本を用いて実習を行うようにした。

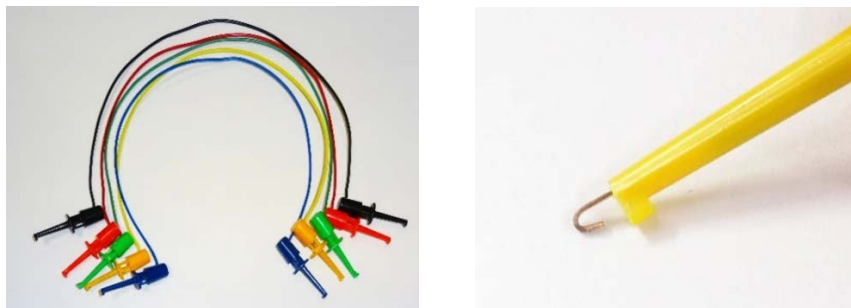


図 5 配線用の IC クリップ付きリード線と IC クリップの先端

3 デジタル回路実習ボードを用いた実習の内容

デジタル回路実習ボードを用いた実習は大きく分けて、論理素子の静的な(信号が時間的に変化しない)動作の実習と時間変化を伴うフリップフロップを用いた実習である。前者は組み合わせ回路、後者は順序回路とよばれる。実習は 90 分×4 コマで実施するので、はじめの 1 コマをボードの使い方を理解するための実習に、2 コマ目を論理素子の動作を理解するための実習に、残りの 2 コマを時間変化を伴った信号を扱う実習に割り当てている。実習に用いるテキストでは 36 の実習項目を提示しており、以下にその一部を紹介する。

実習例 1	実験ボードの AC アダプタをコンセントに接続し、ボードの電源スイッチを ON にする。アナログテスタを用いて以下の端子の電圧を測定しなさい。 VCC HIGH LOW
-------	---

デジタル回路の実習では、ローレベル/ハイレベルを観察させるための手段の一つとして、図 6 に示すアナログテスタを用いることとした。上記の実習例は、デジタル回路実習ボードの仕組みを理解するための実習例であり、アナログテスタのメータの読み方を練習する。



図 6 アナログテスタ

実習例 2 クロック発生回路の出力電圧を、アナログテスタを用いて観察しなさい。

デジタル回路実習ボードに搭載したクロック信号発生回路では、周波数がおよそ 1 Hz の 0V/5V の方形波をクロック信号として発生する。上記の実習例 2 では、クロック信号をアナログテスタで観察することによって、図 7 に示すようにローレベル/ハイレベルがおよそ 0.5 秒ごとに変化する様子を目視で確認できるようになっている。

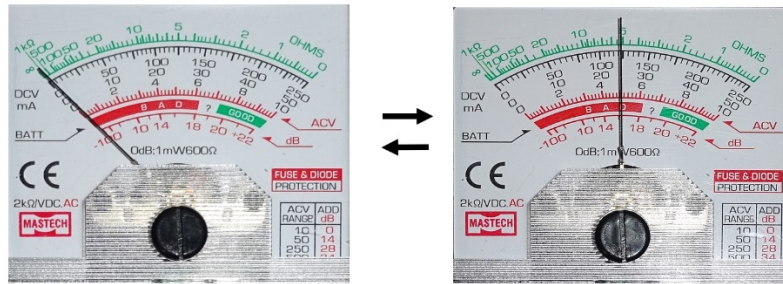
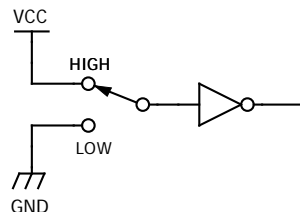


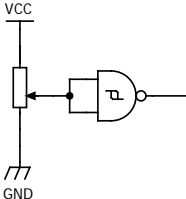
図 7 アナログテスタによるクロック信号の観察

実習例 3 NOT ゲートの動作確認 (トグルスイッチによるレベル切り替え)

トグルスイッチが HIGH と LOW それぞれの場合について NOT ゲートの出力端子の電圧をアナログテスタで測定しなさい。



この実習例では、NOT ゲートへの入力電圧をトグルスイッチによってハイレベル/ローレベルを切り替えて、それぞれの場合について NOT ゲートの出力端子の電圧をアナログテスタで観察する。電圧の大きさをメータの振れによって視覚的に理解することができる。

<p>実習例 4</p>	<p>NAND ゲートの入出力特性 (アナログ電圧入力)</p> <p>アナログ電圧発生回路の出力電圧を NAND ゲートの二つの端子に同時に入力して、アナログ電圧を 0V→5V に増加させるときと、5V→0V に減少させるときそれぞれについて、NAND ゲートの入力電圧と出力電圧の関係をグラフに表しなさい。</p> <div style="text-align: center;">  </div>
--------------	---

デジタル回路実習ボードの NOT ゲートおよび NAND ゲートには、ヒステリシス特性を持った論理素子を搭載しており、上記の実習例では NAND ゲートへの入力電圧を上昇させるときと下降させる際に閾値 (スレッシュホールド) が異なることから、図 8 のようなヒステリシス特性を観察することができる。

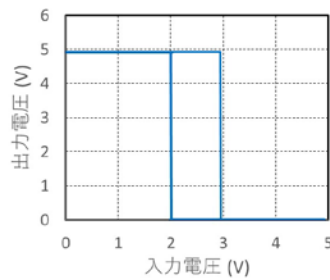
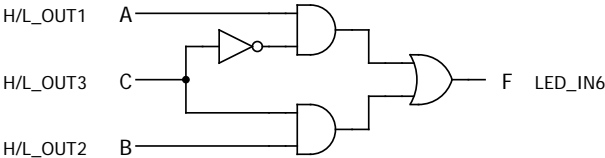
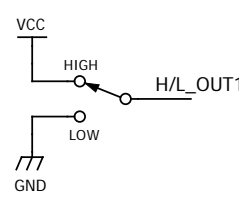


図 8 ヒステリシス特性

<p>実習例 5</p>	<p>下記の回路を組み立てて、その真理値表を完成しなさい。</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>真理値表</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td></tr> </tbody> </table>	A	B	C	F	0	0	0		0	1	0		1	0	0		1	1	0		0	0	1		0	1	1		1	0	1		1	1	1	
A	B	C	F																																			
0	0	0																																				
0	1	0																																				
1	0	0																																				
1	1	0																																				
0	0	1																																				
0	1	1																																				
1	0	1																																				
1	1	1																																				

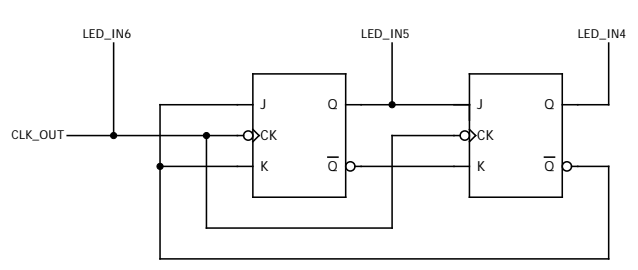
この実習例では、回路図の通りに配線して、トグルスイッチによる 8 通りの入力パターンを与えたときの出力を LED の点灯/消灯によって観察して真理値表を完成させる。

<p>実習例 6</p>	<p>オシロスコープのトリガモードをノーマルモードにして、トグルスイッチをローレベルからハイレベルに切り替えるときの電圧波形を観察しなさい。</p> 
--------------	--

この実習によって、オシロスコープのトリガ機能を用いて電圧波形の過渡的な変化を捉える方法を学ぶ。図 9 に示すように、時間軸方向を拡大すると、波形の立ち上がりにチャタリングを観察することができる。多くのデジタル回路の教科書で、チャタリングについて書かれているので、その様子を実際に観察できるようにした。



図 9 チャタリング波形

<p>実習例 7</p>	<p>下記の回路を組み立てて、LED の点滅の様子とオシロスコープによる電圧波形の変化の様子を観察して、回路の動作を考察しなさい。</p> 
--------------	--

上記の実習例では、JK フリップフロップによる 3 進カウンタを組み立てて、その動作を調べる実習である。図 10 (左) に上記の回路の配線の様子を示す。回路規模が大きくなると配線が複雑になるため、すべての配線が終わってから配線チェックをするのは効率的ではない。そこで、一本のリード線を接続するごとに図 10 (右) のように回路図中の対応する配線にマーカーペンで着色するように指導している。

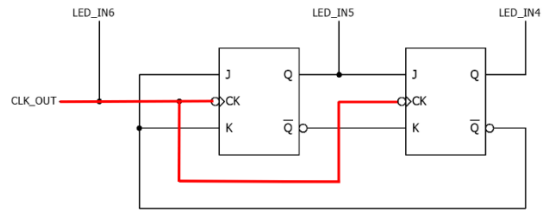
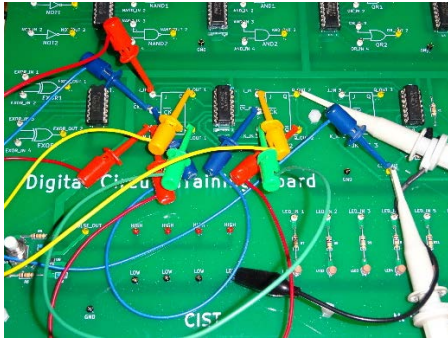


図 10 配線の様子 (左) と配線ミスを防ぐための方策 (右)

この実習では、図 11 (左) の表に示す二つの LED の点灯の様子および図 11 (右) のデジタルオシロスコープによるクロック入力と、回路図中の右側の JK フリップフロップの Q 出力の波形観察によって、回路がどのような動作をするかを考察させる。LED の点灯の様子から三つのクロックが入力されるごとにリセットされることと、オシロスコープの画面で元の波形が 3 分周されることが観察されるので、両者からこの回路は 3 進カウンタであることを理解させる。

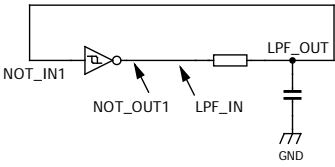
LED 点灯の様子

	LED_IN4	LED_IN5
0	●	●
1	●	○
2	○	○
0	●	●
1	●	○
2	○	●
0	●	●
	⋮	⋮
	⋮	⋮
	⋮	⋮

●消灯 ○点灯



図 11 LED 点灯のパターンとデジタルオシロスコープによる波形観察の様子

<p>実習例 8</p>	<p>下記の回路を組み立てて、NOT 回路の入力と出力の波形をオシロスコープで観察しなさい。</p> 
--------------	--

この実習では、NOT 回路の出力電圧 (0V/5V) によってキャパシタが充放電することと NOT 回路がヒステリシス特性をもつことから、図 12 に示すように発振が継続的に起こるこ

とを理解させる。図12の上側の波形(キャパシタの充放電の波形)の振幅は、図8で示したNOT回路のヒステリシスの幅(およそ1V)であることも観察できる。

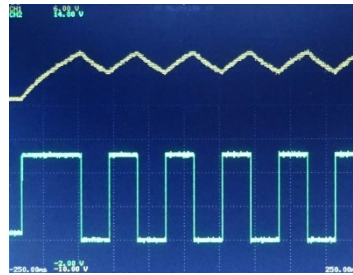


図12 発振回路の波形

4 むすび

以上のように、電子光工学科2年生の秋学期に実施している「光システム実験」のデジタル回路の実習に用いる実習ボードについて、その設計コンセプトとボードに搭載した機能を示し、実習ボードを用いた実習例について紹介した。実際に、実習ボードを授業で使用したところ、学生は前半の組み合わせ回路に関する実習では迷うことなくスムーズに作業を進めることができた。これはデジタル回路の講義科目で既習であったためであると推察される。後半の時間変化を伴う順序回路では、波形の読み取り方やオシロスコープのトリガ機能の設定など初めて扱う項目があるため、それらを難しく感じる学生が多く見られたが、適切なタイミングで助言することによって、学生は波形観察の手法を理解した。最後に、本テーマを通して、回路図の見方や電子回路の取り扱い方など、電子光工学科の学生として修得すべき事柄をより深く理解できるように、さらにテキストを改良していくこととする。