

論理回路実験教材の開発

石橋 孝昭*

Experimental Device for Learning of Logical Circuit Design using Integrated Circuits

Takaaki Ishibashi*

Abstract: This paper presents an experimental device for learning of logical circuit design using integrated circuits and breadboards. The experimental device can be made at a low cost and can be used for many subjects such as logical circuits, computer engineering, basic electricity, electrical circuits and electronic circuits. The proposed device is effective to learn the logical circuits than the usual lecture.

キーワード：論理回路，ロジック IC

Keywords : Logical Circuit, Integrated Circuit

1. まえがき

熊本高等専門学校情報通信エレクトロニクス工学科では 2 年生の計算機工学の科目で論理回路の授業を実施している。本校に限らず，一般的に，電気系の大学や高校においても論理回路の授業は実施されている。

論理回路の授業では，コンピュータが扱う 2 進数を学んだ後に，組み合わせ回路と順序回路の動作や設計について学ぶことになる。単位修得者は机上での論理回路設計ができるようになるが，電気回路や電子回路と異なり，実際に動作確認や特性計測の実験を行う機会は少ない。

そのため本校では，図 1 に示すロジックトレーナーを用いて設計と同時に回路を作製し，回路動作を学生自身の目で確認できるようなカリキュラムを取り入れている。その結果，毎年，学生から実験を行うことで理解が深まったとの評価を得ている。このような実験を取り入れたことで，論理回路設計の学習効果は非常に高くなっていると考えられる。

しかしながら，ロジックトレーナーを用いる場合，設計では論理回路素子（MIL 記号）を単純に接続することになり，実際の回路設計で用いる集積回路（IC: Integrated Circuit）を利用した設計は不可能である。このことは，図 2 の CircuitMaker 6.0 Student⁽¹⁾や，図 3 に示す TINA 7⁽²⁾のようなパソコンを利用した回路シミュレータなどのソフトウェアにおいても同様である。

本論文では，ブレッドボードを用いて実際に IC を配線できる論理回路実験教材の作製を行うことで，IC から論理回

路を設計できる技術者を養成することを目的として実施した取り組みとその効果について論じる。本取り組みは，作製後の実験教材で論理回路を学習できることはもちろんのこと，教材作製も IC を利用した回路設計となっている。教材作製を授業に取り入れることで，学生に対して通常の授業では気付きにくいことを習得させることが可能になる。

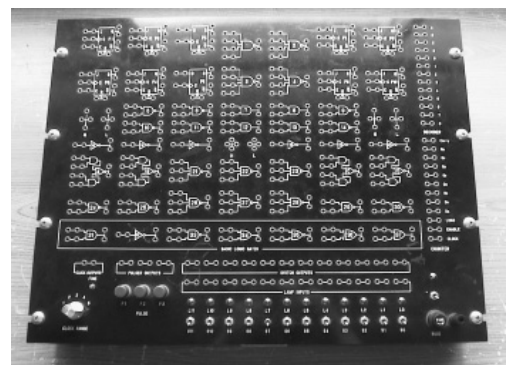


図 1 ロジックトレーナー

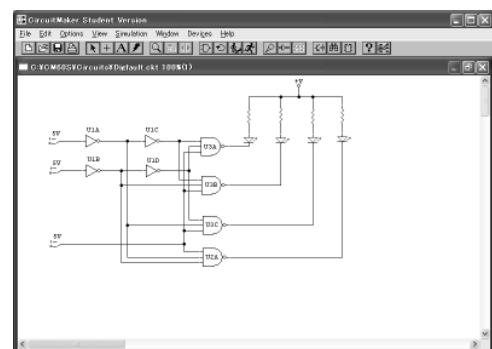


図 2 CircuitMaker 6.0 Student

* 情報通信エレクトロニクス工学科
〒861-1102 熊本県合志市須屋 2659-2
Dept. of Information, Communication and Electronic Engineering,
2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto, Japan 861-1102

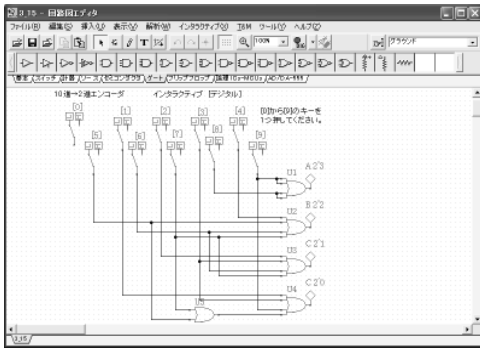


図3 TINA 7

すなわち、論理回路では電源電圧が必要であること、電源の電圧設定を知ること、ICの規格や特性が記載されているデータシートの見方やその内容を理解できるようになること、ICにはバイパスコンデンサを用いること、入力端子はプルアップもしくはプルダウンしておくこと、LEDの点灯には電流制限抵抗が必要なことなどを習得できる。

実際に本教材を作製したところ、費用は2,000円程度であった。市販されているICトレーナーCT-311Rが約20,000円であることと比較すると、搭載部品数などで劣るものの、非常に安価に作製できるメリットがあることが分かる。また、ブレッドボードで回路を作製するため、他科目における電気電子回路作製での利用も可能である。さらに、本教材で用いる素子は容易に入手できるため、授業を発展させた大規模の回路設計も実施可能である。

2. ブレッドボードとロジック IC

2.1 ブレッドボード

ブレッドボードは、ソルダレスボードとも呼ばれる電子回路を作製するためのボードである。本実験教材の作製では、EIC-102Jを使用する。このブレッドボードはジャンパ線が付属されて販売されているため、購入後すぐに製作が可能である。

ブレッドボードの仕組みは以下の通りである。まず、ブレッドボードの穴は0.1インチ(2.5mm)間隔になっている。また、中央の溝は0.4インチ間隔になっている。これらは、ICや7セグメントLEDなどの規格に合わせてあるためである。多くの電子部品では、端子の間隔が0.1インチかその整数倍となっているので、電子部品をそのままブレッドボードに挿すことができる。しかし、抵抗やトランジスタは、ブレッドボードの穴に合わせて端子を整形するフォーミングが必要になる。

ブレッドボードの内部には導体が埋め込んである。この導体は先端がクリップ状になっている。この部分がブレッドボードの穴から挿入されたパーツの足やリード線を押さえる。したがって、ブレッドボードにある多数の穴に電子部品やジャンパ線を直接差し込むことで、電子回路を作製できる。ブレッドボード内部は電氣的に規則的につながっ

ているので、そのことに注意しながら回路を作製する。

ブレッドボードははんだ付けをせずに電子回路を作製できるので、素子を取り変えて行う実験や、新しい回路の試作に便利である。また、はんだごてによる火傷がないことや、はんだ付け不良による回路の誤動作がないことも特徴である。しかし、高周波回路や精密な回路の作製には不向きであるため、作製する回路がブレッドボードで作製可能かどうかを考慮しなければならない。

2.2 ロジック IC

実験教材で用いるロジック ICの型番や論理素子の内蔵数を表1に示す。また、それらのICの内部回路を図4から図15に、真理値表を表2から表13に、それぞれ示す。真理値表内のHはHigh, LはLow, ×は冗長項, ↑はパルスの立ち上がり, ↓はパルスの立ち下がりを示す。さらに、真理値表の二重線より左は入力を、右は出力を示す。

表1の論理素子の数を見ると、組み合わせ回路で学習する、加算器、エンコーダ、デコーダ、比較器、マルチプレクサ、デマルチプレクサなどの回路を作製するには十分な数である。また、順序回路のレジスタ、カウンタなどを作製するときには、JK-FFを利用してD-FFを作製したり、JK-FFやD-FFを利用してT-FFを作製したりすればよいと考ええる。

表1 論理回路素子とその型番

論理回路素子	内蔵数	型番
NOT	6	TC74HC04AP
2入力AND	4	TC74HC08AP
2入力OR	4	TC74HC32AP
2入力NAND	4	TC74HC00AP
2入力NOR	4	TC74HC02AP
2入力XOR	4	TC74HC86AP
2to4デコーダ	2	TC74HC139AP
4chマルチプレクサ	2	TC74HC153AP
D-FF	2	TC74HC74AP
JK-FF	2	TC74HC107AP
アップダウンカウンタ	1	TC74HC191AP
BCDto7セグデコーダ	1	TC74HC4511AP

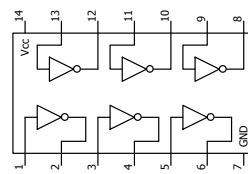


図4 NOT

表2 NOTの真理値表

A	Y
L	H
H	L

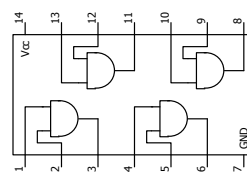


図5 2入力AND

表3 ANDの真理値表

A	B	Y
L	L	L
L	H	L
H	L	L
H	H	H

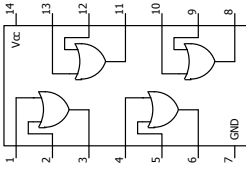


図6 2入力OR

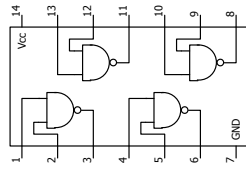


図7 2入力NAND

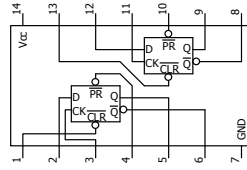


図12 D-FF

表10 D-FFの真理値表

CLR	PR	C	CK	Q
L	H	×	×	H
H	L	×	×	L
L	L	×	×	H
H	H	L	↑	H
H	H	H	↑	L
H	H	×	↓	Q _n

表4 ORの真理値表

A	B	Y
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	H

表5 NANDの真理値表

A	B	Y
L	L	H
L	H	H
H	L	H
H	H	L

表11 JK-FFの真理値表

CLR	J	K	CK	Q
L	×	×	×	L
H	L	L	↓	Q _n
H	L	H	↓	L
H	H	L	↓	H
H	H	H	↓	Q _n
H	×	×	↑	Q _n

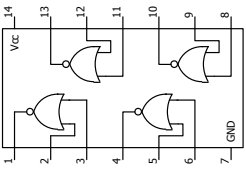


図8 2入力NOR

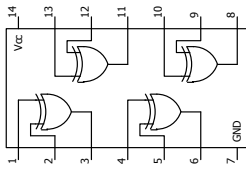


図9 2入力XOR

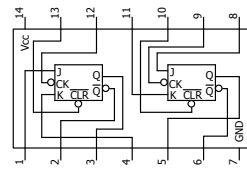


図13 JK-FF

表6 NORの真理値表

A	B	Y
L	L	H
L	H	L
H	L	L
H	H	L

表7 XORの真理値表

A	B	Y
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	L

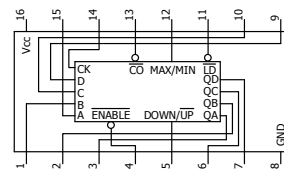


図14 カウンタ

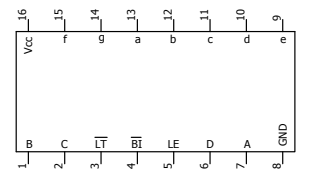


図15 BCDto7セグデコーダ

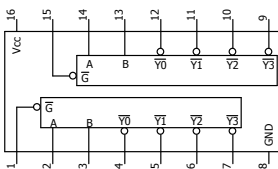


図10 デコーダ

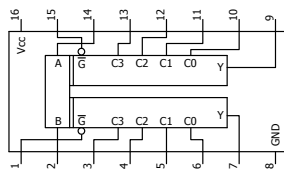


図11 マルチプレクサ

表12 カウンタの真理値表

LD	ENABLE	D/U	CK	QA	QB	QC	QD
L	×	×	×	a	b	c	d
H	L	L	↑	Up count			
H	L	H	↑	Down count			
H	H	×	↑	No change			
H	×	×	↓	No change			

表8 デコーダの真理値表

G	B	A	Y ₀	Y ₁	Y ₂	Y ₃
H	×	×	H	H	H	H
L	L	L	L	H	H	H
L	L	H	H	L	H	H
L	H	L	H	H	L	H
L	H	H	H	H	H	L

表9 マルチプレクサの真理値表

G	B	A	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	Y
H	×	×	×	×	×	×	L
L	L	L	L	×	×	×	L
L	L	L	H	×	×	×	H
L	L	H	×	L	×	×	L
L	L	H	×	H	×	×	H
L	H	L	×	×	L	×	L
L	H	L	×	×	H	×	H
L	H	H	×	×	×	L	L
L	H	H	×	×	×	H	H

表13 BCDto7セグデコーダの真理値表

LE	BI	LT	D	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g
×	×	L	×	×	×	×	H	H	H	H	H	H	H
×	L	H	×	×	×	×	L	L	L	L	L	L	L
L	H	H	L	L	L	L	H	H	H	H	L	L	L
L	H	H	L	L	H	L	H	H	L	H	L	L	H
L	H	H	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L	H
L	H	H	L	H	L	L	L	H	H	L	L	L	H
L	H	H	L	H	H	L	L	L	H	H	L	L	L
L	H	H	H	L	L	L	H	H	H	L	L	L	L
L	H	H	H	L	L	H	H	H	H	L	L	L	L
L	H	H	H	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L
L	H	H	H	H	×	×	L	L	L	L	L	L	L
H	H	H	×	×	×	×	LEの立ち上がり時の出力を保持						

3. 論理回路実験教材の作製

3.1 電源

電子工作の簡便さを考慮して、電源は乾電池とする。ロジック IC のデータシートから、IC の動作電圧範囲は 2~6V と記載されているため、その範囲内で決定しなければならない。また、出力回路の LED を点灯させることを考える。今回使用する LED の順方向電圧が約 2V であることから、それよりも高い電圧にしなければならない。また、3.5 のパルス発生回路の電源電圧も同じ電源を利用したい。そこで利用するタイマ IC のデータシートを確認すると、1.5V から動作し、絶対最大定格は 15V と記載されている。以上のことから、電源は乾電池 2 本の 3.0V に決定する。

3.2 入力回路

論理回路への入力はタクトスイッチ (押しボタンスイッチ) を用いることにする。タクトスイッチは、スイッチを押すと導通し ON になり、離すと遮断され OFF になる。タクトスイッチでは ON を維持するときは必ず押し続けなければならないいけないデメリットがあるため、トグルスイッチを用いてもよい。このようなスイッチを用いる場合、ロジック IC の未使用の入力端子をオープンにしないことが重要である。TTL IC であれば未使用の端子は High として動作するが、ノイズに弱くなってしまふ。また、C-MOS IC の場合、未使用端子は High か Low かが決まらず不安定となってしまう。さらに、同じ IC 内の未使用素子の入力端子もオープンにしてはならない。そのため、机上の MIL 記号だけの回路設計では意識し難い未使用の端子の処理が必要である。

未使用端子をオープンにしないためには、プルアップもしくはプルダウンする。プルアップは電源に接続することであり、プルダウンはグラウンドに接続することである。タクトスイッチを用いて High と Low を切り替えるためには、図 16 や図 17 の回路を作製することになる。図 16 と 17 では入力レベルの説明のため、NOT 素子も記載している。図 16 では、タクトスイッチが OFF のとき NOT の入力はグラウンドが接続されているため Low になる。タクトスイッチが ON になると抵抗で電圧降下が生じて High が入力される。一方、図 17 では、タクトスイッチが ON のとき Low が入力され、OFF のとき High が入力されることになる。今回は図 16 のプルダウンを採用する。このときのプルダウン抵抗は 10k Ω とした。

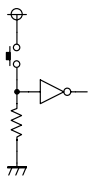


図 16 プルダウン

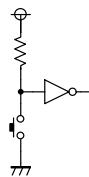


図 17 プルアップ

3.3 出力回路

回路動作を確認するために、本教材では LED を用いる。

すなわち、LED の点灯や消灯によって、出力が High であるか Low であるかを判断する。LED を点灯させるためには、適切な電流を LED に流せばよい。実際の回路では、電源と LED と抵抗を直列接続し、その抵抗の値によって電流値を決めることになる。そのため、このときの抵抗は電流制限抵抗と呼ばれている。

LED の順方向電圧が 2.0V であることを考慮して、LED に流す電流の値を決めれば、電流制限抵抗の抵抗値は自ずと求まる。LED のデータシートから、今回の LED の絶対最大定格を見ると、順方向電流は 30mA と記載されているので、それを十分に下回る電流値である 2mA とする。2mA では電流が少ないようにも思えるが、実際に点灯させてみたところ、十分な明るさであった。また、この値はロジック IC の絶対最大定格も十分に下回っている。以上のことから、電流制限抵抗は $(3V - 2V) / 2mA = 500\Omega$ のようにオームの法則で求める。市販の抵抗は E 系列で抵抗値が決められているので、今回は 470 Ω とした。

素子の動作確認のためには、図 18 の正論理か図 19 の負論理のように接続する。図 18 では NOT の出力が High のときに点灯し、Low のときに消灯する。逆に、図 19 では NOT の出力が High のときに消灯し、Low のときに点灯する。今回は正論理を利用する。

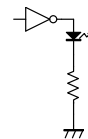


図 18 正論理

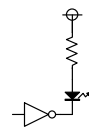


図 19 負論理

順序回路のカウンタなどで利用できる 7 セグメント LED は図 20 のような端子の配置と内部構造になっている。この端子の割り当ては型番によって異なるので確認が必要である。また、アノードコモン LED とカソードコモン LED があるため、注意しなければならない。図 21 のように、BCDto7 セグデコーダの出力に電流制限抵抗を接続し、電流制限抵抗と各 LED を接続する。また、7 セグメント LED の 3 番または 8 番端子をグラウンドに接続する。このようにすれば、カウンタ等の出力を数字として見ることが可能になり、回路動作の確認が容易になる。なお、BCDto7 セグデコーダの電源や入力等の回路は省略している。

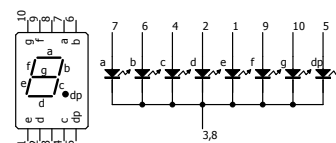


図 20 7セグメント LED

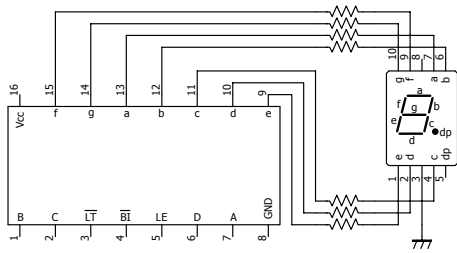


図 21 BCDto7セグデコーダと7セグメントLED

3.4 論理回路

ロジック IC の配線として、図 22 に示すように、NAND 素子を例に挙げる。各 IC には電源とグラウンドが必要であるため、Vcc を電源に、GND をグラウンドに配線する。また、電源のノイズを低減するためのバイパスコンデンサを、IC のすぐ近くに接続する。本教材のバイパスコンデンサは 0.1 μ F の積層セラミックコンデンサを用いる。

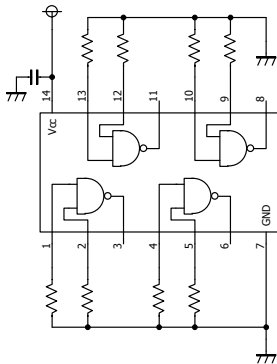


図 22 ロジック IC の配線

3.2 の通り、入力端子をオープンにしないため、全ての入力端子をプルダウンする。実験では、3.2 や 3.3 の入出力回路を図 23 のようにジャンパワイヤを用いて接続する。

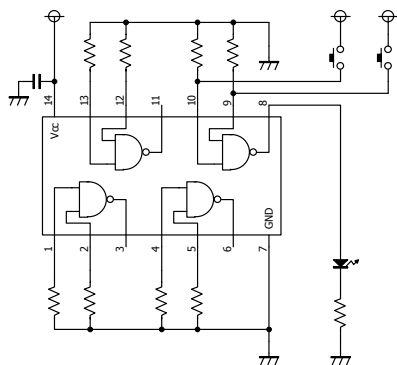


図 23 ロジック IC の入出力

3.5 パルス発生回路

順序回路の動作確認にはクロックパルスが必要になる。タクトスイッチの ON/OFF でクロックを入力すると、チャタリングが発生してしまう。そこで、LMC555 を用いてパルス発生回路を作成する。今回作成する回路は LMC555 のデ

ータシートに記載されている 50% デューティ・サイクル・オシレータであり、その回路図を図 24 に示す。このとき、パルスの発振周波数を可変にすることと、発振周波数を視覚で認識できることを意識して作製する。また、パルスを任意で発振させたり停止させたりできるようにする。

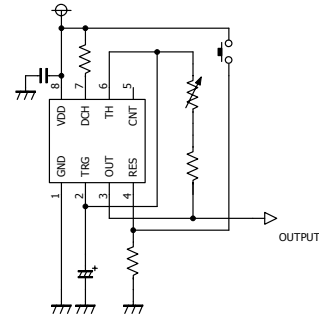


図 24 LMC555

まず、発振周波数を決める。視覚認識できる周波数は 1Hz 程度と考える。その発振周波数にするための素子の値は、データシートの発振周波数の式に基づいて計算する。ここでは、22 μ F の電解コンデンサ、1k Ω の固定抵抗、100k Ω の可変抵抗を接続して、可変抵抗の値で発振周波数を任意に変化できるようにする。

次に、発振を停止させる回路を付加する。4 番ピンのリセット端子に電源電圧が加われば発振を開始し、0V が加われば発振を停止することがデータシートに記載されている。そこで、3.2 の入力回路をここでも利用する。他の素子値はデータシートの値をそのまま利用する。図 24 のように配線すれば、タクトスイッチを ON にしたときにだけ、OUTPUT からパルスを入力する回路が完成する。

以上のようにして作製された論理回路を図 25 に示す。

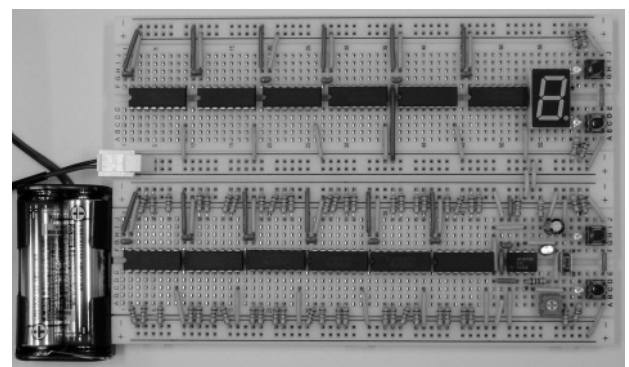


図 25 論理回路実験教材

4. 論理回路実験教材の学習効果

4.1 既存の学生実験との比較

作製した本教材と既存のロジックトレーナーに内蔵されている素子数の比較を表 14 に示す。ロジックトレーナーでは NAND 素子が多いことが分かる。これは、論理回路の完

全系の学習のためであると考え、一方、本教材はデコーダとマルチプレクサを持っている。デコーダからデマルチプレクサを作ること、マルチプレクサからエンコーダを作るとは簡単であるので、それらを利用した応用回路の作製も可能である。以降では、2年生の計算機工学で図1のロジックトレーナーを用いて実施している下記の①から⑦の7項目の実験について、本教材を用いたときにそのまま実施可能であるかどうかについて報告する。

表14 論理回路の素子数

論理回路素子	本教材	ロジックトレーナー
NOT	6	7
2入力AND	4	5
2入力OR	4	2
2入力NAND	4	11
2入力NOR	4	1
2入力XOR	4	1
3入力NAND	0	6
4入力NAND	0	4
デコーダ	2	0
マルチプレクサ	2	0
D-FF	2	2
JK-FF	2	8

- ①動作確認と完全系：論理回路素子の動作確認は問題ない。ド・モルガンの定理も検証できる。しかしながら、完全系はNANDとNORが少ないので実施が困難である。
- ②単純化：単純化前の回路の規模が大きときには素子数が限られているため実施できないことがあり、工夫が必要である。一方、単純化後の回路は作製可能である。
- ③3桁の加算器：半加算器も全加算器も作ることができる。また、本教材にはXORが多いため、現在実施している2桁や3桁の加算器は簡単に作成できる。
- ④比較器・エンコーダ・デコーダ：比較器は2桁の比較まで実施可能である。エンコーダは、論理素子の組み合わせ回路でもマルチプレクサからの回路でも実施できる。デコーダは2bitのデコーダは問題ない。また、デコーダICを用いた実験も実施できる。
- ⑤フリップフロップ：NAND素子やNOR素子を用いてSR-FFを作ること、D-FFを利用してT-FFを作ることやJK-FFを利用してT-FFを作ることでもできる。
- ⑥簡単な順序回路の設計：簡単な順序回路で動作の検証をしているため、本教材で実施できる。
- ⑦4bitレジスタと4bitカウンタ：FFを用いた4bitのレジスタ、4bitカウンタを製作できる。さらに、カウンタICや7セグメントLEDを利用した実験も実施できる。

4.2 本教材の特徴

本教材は、ブレッドボード上でICなどの素子を配線して実験回路を作製すること、作成した実験回路で論理回路の実験を実施できることが大きな特徴であり、データシートを見ることから始まり、ICの中身を意識することができ

る。また、ICの電源やバイパスコンデンサ、LEDの電流制限抵抗、入力端子のプルアップやプルダウン、7セグメントLEDの取り扱いについても習得できる。

その一方で、教科書以外の内容を多く含むため、その内容の解説のための時間を確保しなければならない。また、作製のためにデータシートを読むことになるが、データシートの記載内容を理解してもらうためには、専門用語を理解することも必要になる。

4.3 本教材の効果

実際に本教材を利用した学生は、2年次の計算機工学において、ロジックICを用いたタイマや比較器などを作ることができるようになった。また、3年次の情報通信工学実験の問題解決型授業（PBL: Problem Based Learning）において、タイマやカウンタを用いたもぐらたたきゲームなどを自作した。さらに、4年次の情報通信工学実験の創造実験において、光による多重通信、いらいらぼうゲーム、カウンタを用いた応用回路などを、ロジックICを利用して自作した。このようなロジックICを用いた作品が完成したことは例年になく、本教材は学生の論理回路設計能力を身に付けるための教材として効果があると考えられる。

5. あとがき

本論文では、ICから論理回路を設計できる技術者の養成を目的として、ロジックICやブレッドボードによる実験教材を作製する取り組みとその効果について紹介した。本取り組みは、作成した教材を実験に利用するだけでなく、教材を作製するときにも論理回路設計に必要な知識を身に付けることができる特徴を持つ。また、ICやLEDのデータシートに触れる機会があり、即戦力を身に付けた技術者を育成することが可能であると考えられる。さらに、本教材は既存のロジックトレーナーに対して小型であり、教材を自己管理できるため、教室や自宅での自主学習も期待できる。

本実験教材は学生が所有できる論理回路設計の教材であるために簡単かつ安価となるようにした。今後は、実際の論理回路で必要となるチャタリング防止回路や正確なクロック発生回路を製作する。また、LEDの点灯に関して、LEDと電流制限抵抗の接続順序や負論理を用いた回路設計が多く利用されている点についても追加していきたい。さらに、市販されているICには入手の容易なICと困難なICがある理由などの内容を盛り込んだ教材を検討する予定である。

（平成24年9月21日受付）

（平成24年11月7日受理）

参考文献

- (1) 加藤肇：“電子回路シミュレータ入門,” ブルーバックス (2010)
- (2) 小峯龍男：“デジタル回路のしくみと基本,” 技術評論社 (2007)