

学習者が容易に結線できる論理回路教具の開発

遠矢 守*・山下 義信**

(1995年10月16日 受理)

The Development of Instructional Aids for Logical Circuit easily wired

Mamoru TOYA and Yoshinobu YAMASHITA

第1章 開発主旨と本研究の概要

コンピュータの仕組みの基礎である「論理回路」について、それを学校教育現場において教授学習させるための教具を開発したので、以下に報告する。

ここで、論理回路の一例として、半加算回路の図面の場合で考えるとする。この回路を、従来から利用されている「ラグ基板上でハンダ付けする方式」で結線したり、あるいは、「ブレッドボード方式」などの方法で結線してみると、元の論理回路図面の配線とは似てもつかない、複雑に入り交じった配線となってしまう。また、市販あるいは自作教具の中には、「ピンボード方式」のものや「ブロック（モジュール）方式」のものもあるが、これらの方式によって結線した結果を見ると、やはり、その配線状態は込み入って初心の学習者にとって理解しにくいものであったり、あるいは、教師自身による教具の自作が困難であったり、それらの教具で実習できる回路に自由度がなかったりなど、教具としての問題点¹⁾が残っている。

さらに加えて、半加算回路のような単純な回路の場合でさえ、学習者の前で論理回路を組みながら種々の演示実験を行うような目的には、上記の方法が適しているとは言えない。

これらの諸点を満足してくれるような教具は、筆者らの知る範囲において、市販品や自作教具の中には見あたらなかったため、以下に示すような3種類の教具の開発を試みた。

〔1〕スチール黒板（または白板）上で演示実験が可能な論理回路教具

本教具は、簡単な回路から「ある程度複雑な論理回路」までについて、その回路を学習者の前で構成しながら「スチール黒板上で演示実験をするための論理回路教具」である。

* 鹿児島大学 教育学部 技術科

** 鹿児島大学 工学部 電気電子工学科

筆者らの教具で、例えば先ほどの半加算回路を組んでみると、後述するように、論理回路図面の配置に近い形で論理素子を配置でき、配線も図面とほぼ相似になるので、学習者にとって配線が理解しやすく（教授者にとって結線しやすく）なっている。

例にあげた回路以外も、比較的簡単な論理回路であれば、参考書などの回路図面に描かれている配置どおりに、各論理素子を配置でき、かつ、手軽に配線できる。しかも、学習者の見ている前で、黒板上に回路を構成しながら、種々の実験を演示することができ、さらに、黒板上に補足説明も書き加えられるという特徴を有している。

これらの詳細について、第2章で製作法を含めて述べることにする。

〔2〕実習用論理回路教具

言うまでもなく、教授者による演習実験を学習者に見せるだけではなく、学習者自身の手により、論理回路に触れ親しみながら、それに対する技能・知識を体得させることも、より重要なことである。

この際、配線に慣れていない初心の学習者にとって、教授者が与える回路図面の配置と実際の電子部品の配置が異なっていると、かなりの学習者が結線に苦勞するという実態がある。また、実際の教育現場においては、この教材について割り当てられる時間にも制限があるという実態もある。

そこで、与えられた論理回路図面とほぼ同じ位置に論理素子を配置でき、しかも、短時間で簡単に結線できるような教具が必要と考え、そのような「生徒実習用教具」について、次の2種類の教具を開発した。

(1) 論理素子の配置を固定した教具

(2) 論理素子を自由に配置できる教具

これらの詳細については、それぞれ第3章、第4章で述べることにする。

第2章 スチール黒板（または白板）上で演習実験が可能な論理回路教具

§ 2. 1 本教具の主旨

講義の際、学習者の前で教具の提示や演習実験などを加えることは、学習者にとって学習内容の理解を助けたり、興味・関心・意欲を引き起こすなど有益なことが多い。

そこで、論理回路に関する演習実験を行おうと、実習基盤上で各論理素子間を結線してみると、その回路が比較的単純な場合であっても、その結線状態は、参考書などに描かれている論理回路図とはほど遠い「込みいった配線状態」になってしまうことが多い。これでは、学習者の理解を妨げてしまったり、学習者の意欲をそいでしまったりする原因になることも考えられる。

すなわち、演習用教具としては、書籍等に描かれている図面の配置どおりに、論理素子を配置で

き、しかも、その結線状態が論理図面と、なるべく近い形で配線できることが望ましい。

この際、演示実験を黒板上で行うとすれば、チョークを用いて図や文字を黒板上の適切な位置に自由な大きさと色で書いて補足説明することができ、黒板の融通性のある特性を生かしながら演示実験を行うことができるので大変都合がよい。

§ 2. 2 本教具の全体像

本教具は、写真1および図1に示すように、

- (a) 実習基盤 = 電源供給盤 (= スチール白板を利用)
- (b) 論理素子盤
- (c) 入力素子盤
- (d) 出力素子盤

から構成されている。

なお、同写真は、半加算回路を組んだ例であり、白板上に描いた論理回路図面に近い形で、各素子

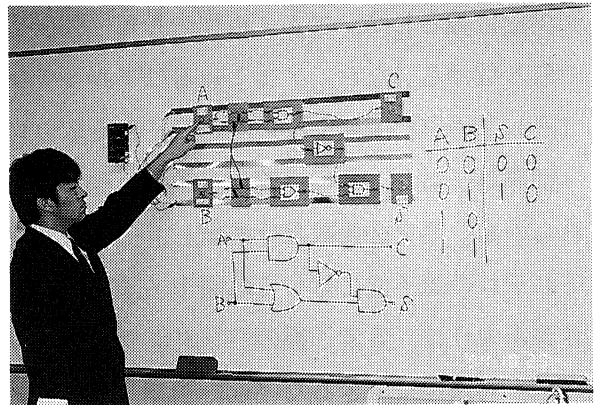


写真1 スチール白板を利用した演示用教具

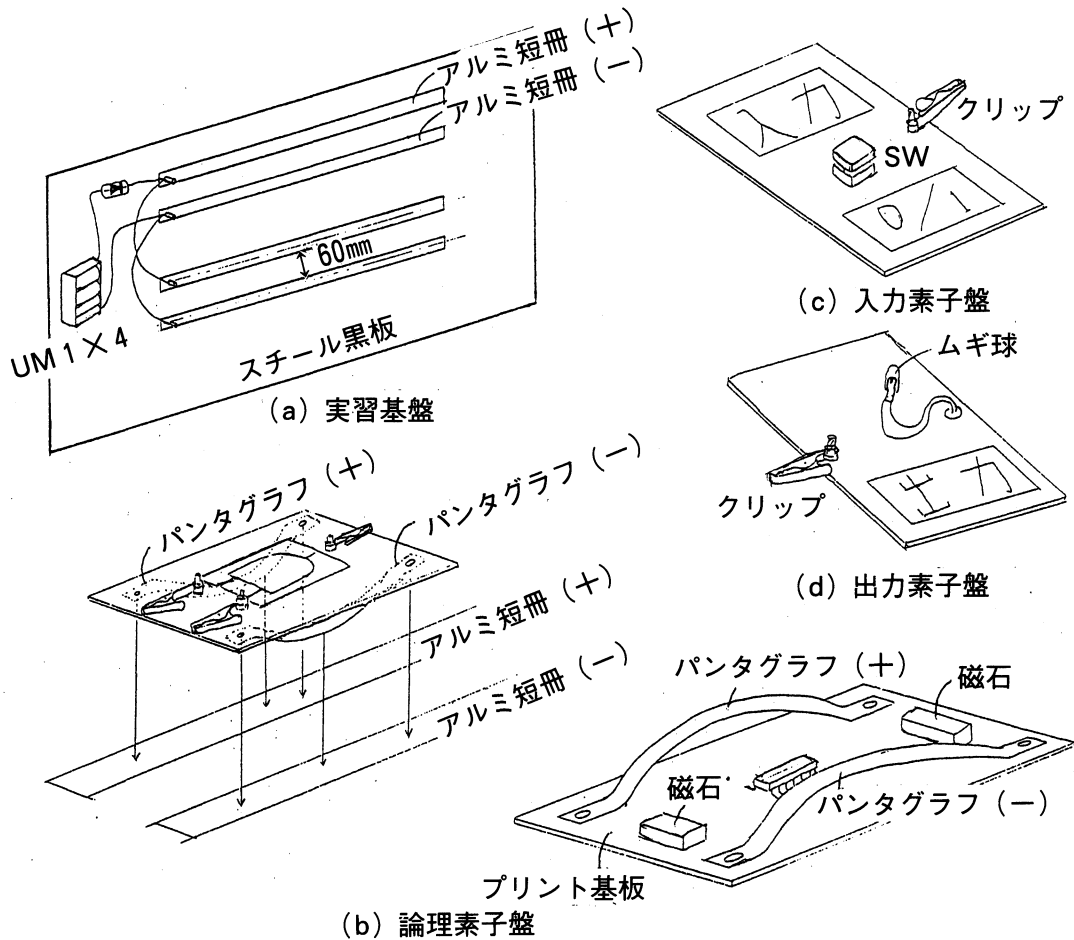


図1 演示用教具

を配置し結線ができていることを示している。

本教具の全体像をつかむため、この教具を使う手順を以下に示すことにする。

【取り扱い手順】

(1) 実習基盤を黑板上に作成する(図1a参照)

スチール製の黑板または白板を利用してこれを実習基盤とする。同図に示すように、ICへの電源供給母線として、アルミ板製の短冊(900×20×.3mm)を地面と水平になるように黑板面に磁石で取り付ける。なお、アルミ短冊はアルミテープでも代用できる。

(2) この実習基盤上に、回路素子盤を取り付ける

回路素子盤としては、論理素子盤(図b)、入力素子盤(図c)、出力素子盤(図d)がある。これらの素子盤を必要数だけ準備し、それらを論理回路図面に描かれている配置に近い形に配置する。それぞれの素子盤に対しては図b左に示すように取り付ける。すなわち、各素子盤へ電源が供給されるように、各素子盤のパンタグラフをアルミ短冊上で接触するように取り付ける。

(3) 回路図にできるだけ近い形で、リード線を用いて結線する

(4) 種々の演示実験を行う

§ 2. 3 回路素子盤の製作手順

各素子盤の中から、論理素子盤を例として、その製作手順を以下に示す(図b参照)。入力素子盤、出力素子盤についてもほぼ同様にして製作する。

(1) プリント基板上に論理素子基盤の回路を構成する

試作程度であればユニバーサル基板でもよいが、感光基板などを利用する方が、回路パターンに共通性があり都合がよい。

(2) 黑板に吸着させるための磁石を取り付ける

図b右に示すように、フェライト系の磁石を(1)のプリント基板の銅箔面に接着する。この際、金属系の磁石では回路と接触する可能性があるため、身近で入手しやすいフェライト系磁石を利用する。

(3) パンタグラフ(=電源供給線)をプリント基板に取り付ける

短冊状のりん青銅板を準備し、その両端をプリント基板の銅箔面にハンダ付けし、これを図bのようにしてパンタグラフとする。このパンタグラフとアルミ短冊を経由して、素子盤へ電源が供給される仕組みとなっている。

なお、ベタのプリント基板の場合はこのままでも良いが、ユニバーサル基板を利用した場合はパンタグラフが銅箔をはがしてしまう可能性もあるため、プリント基板の銅箔面に銅板テープを張り付け補強してから、これにパンタグラフをハンダ付けする。

(4) 素子の入力端子、出力端子を取り付ける

ここでは、図 c のように、クリップをビスどめしたものを、端子として流用している。

(5) 回路素子盤の機能を示すパターン紙を貼り付けておく

§ 2. 4 黒板上で演示実験できる教材例

論理回路教材として実際に製作してみたもののうち、黒板上で利用できる教材例を以下に示す。

- ①基本論理素子に関する実験（たとえば、AND, OR, NOT, NAND, XOR など基本素子の実験, JK-FF, D-FF などの順序回路基本素子の実験, 7セグメント LED ドライバ素子の実験など)
- ②ダイオードやトランジスタなどで構成される AND, OR, NOT 素子などの仕組みを調べる実験
- ③AND, OR, NOT 素子を組み合わせた回路（たとえば、半加算回路 (HA), XOR, 一致回路, 半減算器, 2ビットのエンコータ/デコータ, 1ビットデータセレクタ, デマルチプレクサ, RS ラッチ, マルチバイブレータなど)
- ④NAND 素子のみで構成する回路
- ⑤AND と XOR で構成する HA
- ⑥2組の HA で構成した「全加算器 (FA)」
- ⑦3組の FA で構成した「3ビット全加算器」
- ⑧NOT と FA で構成した「補数による減算器」
- ⑨XOR と FA と NOT で構成した「1ビット加減算器」
- ⑩JK-FF で構成する RS-FF, D-FF, T-FF
- ⑪4組の JK-FF を用いた「16進カウンタ」
- ⑫チャタリングとその防止回路
- ⑬3組の JK-FF と AND を用いた「5進カウンタ」
- ⑭3組の D-FF を用いた「3ビットデータの記憶」
- ⑮4組の D-FF を用いた「4ビットシフトレジスタ」
- ⑯その他

§ 2. 5 本教具の特徴と限界

- (1) 回路図面に描かれている配置どおりに、各論理素子を配置でき、しかも、図面の結線状態に近い形で、手軽に配線できる。
- (2) 学習者の見ている前で、スチール黒板上に論理回路を構成しながら、種々の実験を演示し、黒板とチョークを用いて補足説明ができる。
- (3) 身近な部品を用いており比較的容易に自作できる。
- (4) 「単純な論理回路の実験」から、ある程度「複雑な回路の実験」まで幅広く演示できる。

- (5) その他、収納・保管、運搬が便利であり、操作性もよく信頼度はほぼ100%であり、誤使用や、かなりの乱暴な取り扱いにも耐えるなど、教具としての必要条件を満足している。
- (6) 黒板面という限られたスペースのため、前節に述べた程度の回路等は演示実験可能であるが、これ以上に論理素子数が増えた複雑な回路になった場合、学習者にとって分かりにくいものになってしまう。

第3章 実習用論回路教具(1)

………論理素子の位置を固定した生徒実習用教具………

§3.1 本教具の主旨・考え方

前章の教具は、主として教授者が学習者の前で演示実験するためのものであったが、学習者自身が実際に手にとって実習するための教具も必要と考え、第1章で述べた開発主旨のもとに、2種類の教具を開発した。このうち、本章では、論理素子の位置を固定した方式の「論理学習入門用教具」について述べることにする。

従来からある市販あるいは自作教具では、AND、OR、NOTなどの論理素子を実習基盤(=パネル)上に整然と配置してあり(すなわち同種類の論理素子を集めて揃えるように配置してあり)、その入出力端子間をバナナピンジャックなどで配線する方法を採用している。

しかし、この方式では、半加算回路程度の簡単な回路の場合でさえも、その配線した結果の状態は込み入ったものになってしまうことが多い。

そこで、本稿では、その開発に当たって次のように考えて見ることにした。すなわち、論理回路について学習すべき教材としては様々なものが考えられるが、これらの中から、

- ① コンピュータの演算機能の基礎である「半加算器」
- ② 1ビットの記憶機能がある「フリップフロップ」
- ③ 発振を体験できる「マルチバイブレータ」

などの概念が、論理回路を体得させる上で重要で精選した教材であると考え、本教具ではこれらの回路に教材を限定してしまうことにする。

このことにより、これらの3つの回路について、回路図面に近い形で結線できるように、実習基盤(パネル)上の論理素子の配置を工夫すればよくなる。図2が、そのように工夫した論理素子の配置図であり、実習基盤の論理回路図でもある。なお、同図において黒丸は入出力端子である。

これにより、上記の回路①~③については教授者が与える回路図面に近い形で各論理素子が配置されているので、学習者は苦勞することなく結線できることになる。

写真2は、RSフリップフロップを結線した場合であり、このように、図面に近い形の配線状態になり、学習者にとって分かりやすく容易に結線できることを示している。なお、半加算回路やインバータを利用したマルチバイブレータの場合でも、同様の結果が得られている。

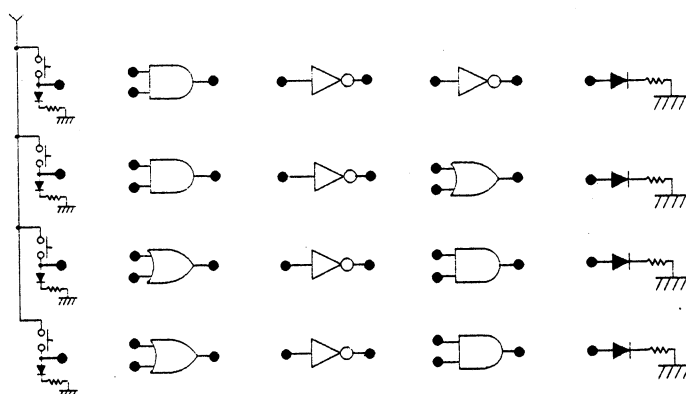


図2 実習用教具（固定配置型）

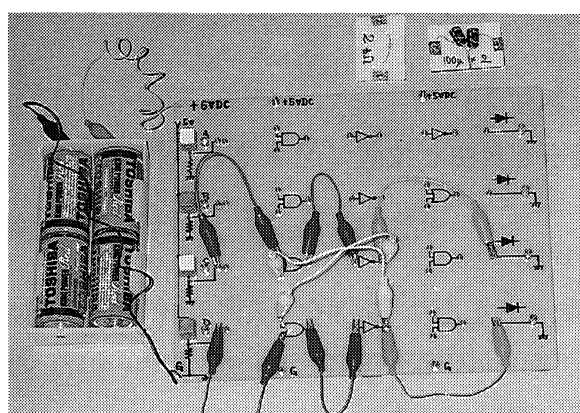


写真2 実習用教具（固定配置型）

§ 3. 2 本教具の製作手順

①プリント基板（200×250×1.6mm程度）を学習者数に見合うだけの枚数を準備し、図2に示すような論理素子の配置になるようにプリントパターンを作成する。この際、多くの枚数を作成する場合は、感光基板を利用するとよい。さらに入出力端子、LED、スイッチなど部品を取り付けるための孔あけ加工を行う。

②プリント基板の表面（銅箔面でない面）上に次の部品記号を書き込む。すなわち、論理素子記号、電源（+端子、GND端子）、抵抗、LED、ダイオードなどである。

③IC、LED、抵抗、スイッチ、電源リード線などの部品を取り付け、ハンダ付けする。この際、ICは銅箔面に直接ハンダ付けして取り付ける方が簡単である。

④入出端子としては、2mmφ程度のビスナットを取り付ける。あるいは、メッキ線を「ステープルの針」のような形状にしたものを利用すると、学習者にとって結線作業がより容易になる。

⑤結線の際、使用するミノムシクリップ付きリード線を必要数だけ準備する。

§ 3. 3 本教具の発展性と限界

本教具の教材としては、§ 3. 1の①～③の回路に加えて、AND、OR、NOT、NAND、NOR、

XOR などの基本論理素子に関する実習を、第1章で述べた主旨のもとで実習することができる。

本教具の試作版を鹿大附属中学校で使用したが、小型プリント基板を利用したため端子間が狭くなり、端子を接続する際、その困難さを訴える生徒がいたものの、全員の生徒達が授業時間内に半加算器、フリップフロップの回路等を構成させることができた。

なお、本教具を複数セット用意すれば、それらを相互に接続することにより、全加算器や、複数ビットの記憶機能を持たせることも可能である。

本方式による教具は、比較的ローコストで簡易に自作でき、また、入門レベルの論理学習には適切であると考えられる。しかし、実習可能な論理教材の範囲が限定されているので、上記の内容を越えるレベルの場合、あるいは、論理素子の位置を自由に配置させたい場合などでは、次章で述べるタイプの教具を併用する必要がある。

第4章 実習用論回路教具(2)

………論理素子を自由な位置に配置できる教具………

§4.1 本教具の趣旨・特徴

第2章で演示用の論理回路教具を述べ、第3章で入門用の実習用教具について述べた。本章では、論理素子を自由に配置でき、配線の状態が理解しやすく、幅広い種類の実習を行うことのできる、次のような特徴を持つ教具を開発してみた。

①学習者は、論理素子ブロック^{注1)}を、与えられた図面の配置に近い位置あるいは自分の思う自由な位置に配置できる。このため、それらの入出力端子間の結線も与えられた回路の配置に近い形になるので、初心者でも簡単容易に結線できる。

②逆に、学習者に課題を与え回路構成を考えさせる場合、論理素子ブロックを学習者の思う位置に配置できるので、結線に不慣れな者でも試行錯誤しながら回路構成を考えさせることができる。

③キャパシタを利用することにより内蔵電池の数を減らし、ローコスト化でき、また、電池交換という保守の煩わしさからも解放される。

④「比較的簡単な入門的実験」から「ある程度複雑な実験」までの「幅広い種類の実験実習」が可能である。

⑤学習者の誤操作に対しても頑丈である。電源の極性の間違いや、入力出力のとりちがいなどによる誤操作が予想されるが、これに対しては最近のCMOSの特性が改善されているため、本教具の場合、通常の使用法の範囲内であれば、破壊されることは極めて少ないと言える。

^{注1)}ここで言う「論理素子ブロック」とは、基本論理素子(たとえばAND, OR, NOTなど)、あるいは、ある程度まとまった論理動作を行う素子(たとえばエンコーダ、デコーダ、フリップフロップ、カウンタ、発振器など)を、一つのプラスチックケース内に組み込んであるブロックのことを指している。

⑥身近な入手しやすい部品を利用しており、また、製作の祭、特殊な工具や加工も不要であり、本教具は教育現場の教師でも自作可能である。

§ 4. 2 本教具の全体像

本教具の全体像をつかむため、この教具を使う手順を示すことにする。

写真3は半加算回路を構成して行く途中で、論理素子ブロックを配置したところを示している。

学習者は、同写真のように論理素子ブロックをその回路に必要な数だけ（同写真では OR 素子ブロック1個、AND 素子2個、NOT 素子1個）準備し、それらを実習基盤のステンレス板上に配置する。この際、ブロックは自分が考える位置、または与えられた回路図に描かれたのと近い位置に、自由に配置できる。

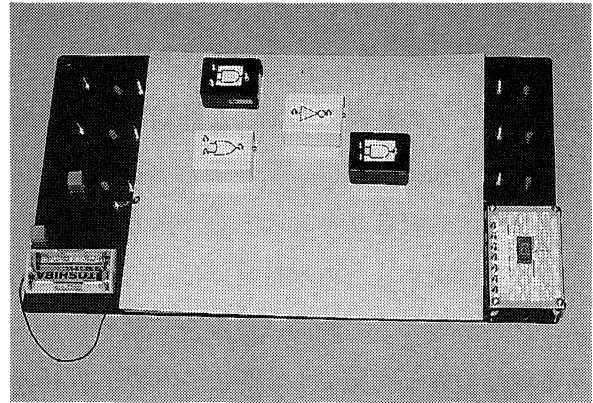


写真3 実習用教具（自由配置型）

このあと回路図面にしたがって、論理素子ブロックの入出力端子間をミノムシクリップ付きリ

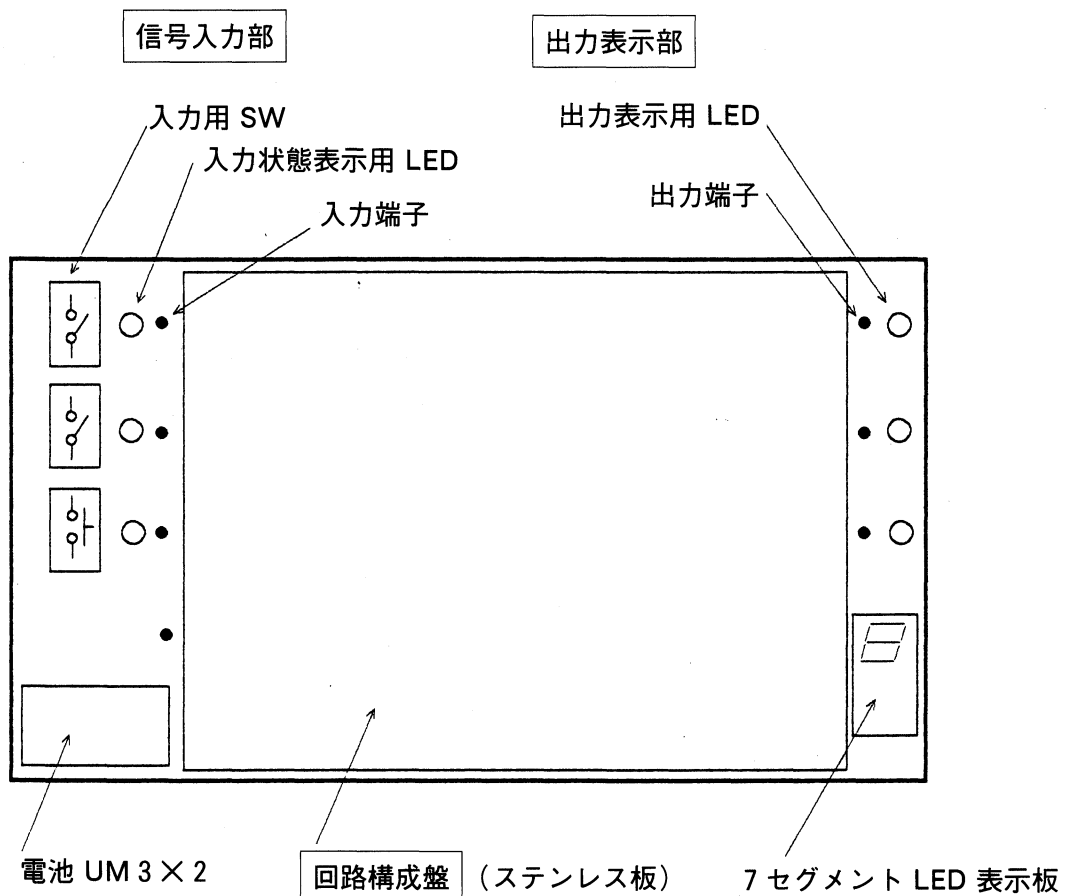


図3 実習用教具（自由配置型）の基盤

ド線（以下、ミノムシ線と略記する）を用いて結線してから、論理動作を確認する実験を行う。

すなわち、本教具は、(A) 実習基盤、(B) 論理素子ブロック、(C) ミノムシ線から構成されている。なお、このうち、実習基盤は、図3に示すように、信号入力部（入力スイッチ、表示用LED部、入力端子）、論理回路構成盤（ステンレス板＝アース）、出力表示部（出力端子、表示用LED）および電源部（UM3×2）から構成されている。

§ 4. 3 この教具の基本的な仕組みと動作原理

従来の方法であれば、論理素子 IC 1 個ごとに電源供給配線が不可欠なため、論理素子の数が増すごとに、学習者からみると益々込み入った配線となってしまふ。

これを解決するため本教具では、「論理素子ブロック」ごとに電源（電池）を組み込み、そのブロック（ケース）の底面には銅箔を貼り付け、これをアース（共通）として使用することにより、ある程度複雑な回路でも学習者から見れば込み入らない配線を可能にしている。

写真4 (a) が論理素子ブロックの外観を示しており、(b) がそのフタを開いた内部の状態である。(c) が同ブロックの底面の状態を示しており、論理素子ブロックの底面には銅箔を貼り付けてある。さらに図4に示すように、ケースの底面に予め孔（8mmφ程度）をあけておき、その孔を通してプリント基板上的のアースと銅箔部分とをハンダで接続しておく。

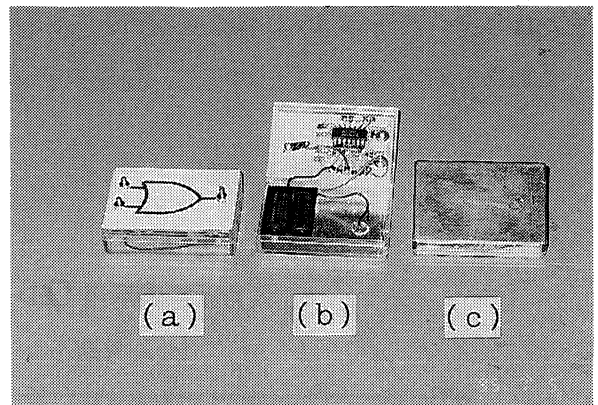


写真4 論理素子ブロック

これにより、論理素子ブロックを実習基盤のステンレス板上に置くだけで、ステンレス上にある全ての論理素子ブロックについて、そのアースがすべて共通になったことになる。さらに、通常は論理回路図面に電源回路は記入されることはないが、本教具ではこれとも完全に整合することになり、配線を込み入らせない仕掛けにもなっている。

ところでブロック内には電池を内蔵させる必要があるが、TTL型ICを用いると、+5V電源が必要であり、そのため乾電池4本とダイオード1本が必要である。このためブロック自体が単5電池を利用しても大型化してしまう。

そこで、本教具ではC-MOS型ICを利用することにより、電源が+3Vで動作可能となり、しかも、定電圧化などの配慮も必要なく、単5の電池2本ですみ小型化できる。また、C-MOSの場合、その消費電流も少なく、コイン電池（CR1616または2025など）を利用すれば、さらに小型化が可能である。

さらに、都合のよいことにブロック内に内蔵する電池は、AND、OR素子の場合、§4.5で証明するように、IC一個当たり470マイクロ程度の電解コンデンサで十分代用することが可能であ

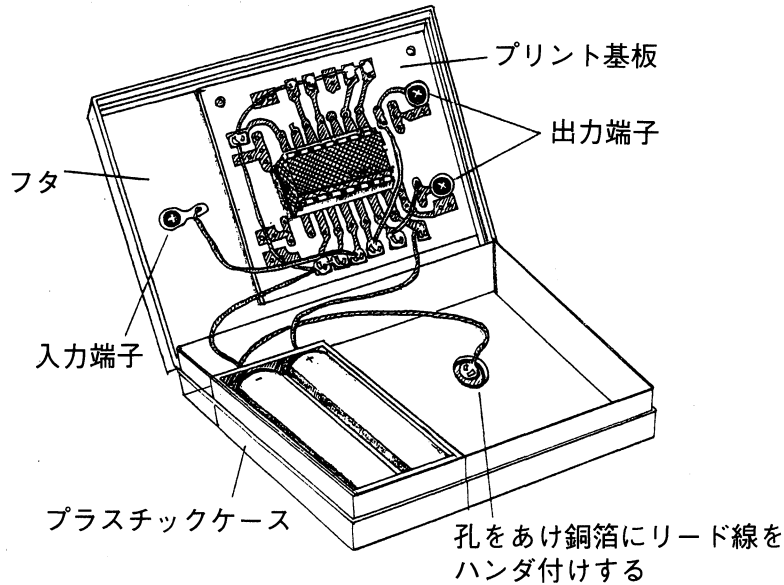


図4 論理素子ブロック

る。これにより、「教具のローコスト化」や「電池取り替えなどの保守簡易化」などの特徴を持たせることができる。

§ 4. 4 本教具の製作手順

本教具は、上述したように実習基盤，論理素子ブロック，ミノムシクリップ線から構成されており，以下にその製作手順を述べる。

【1】実習基盤の製作

①不透明なアクリル板（ $350 \times 200 \times 2$ mm程度）を準備し，図3に示す部品配置にしたがって取り付けのための孔あけ加工を行う。

②ステンレス板（0.3mm厚程度）を回路構成盤としてアクリル板上の入力部と出力部の間に取り付ける。なお，この際，アルミ板でなくステンレス板を用いると，後述するように，論理素子ブロックを磁力により密着させることができ，使用感が改善される。

③入力回路（3組の入力スイッチ，表示用LED，入力端子）および出力回路（3組の出力端子，出力表示のためのLED）を取り付ける。必要に応じて入出力端子数を増やしたり，7セグメントLEDなどを取り付ける。

なお，入力スイッチは，押しボタン型とトグル型を混在させるとよい。

④電池ボックスと+3Vを出力する端子を取り付ける。また，ある程度複雑な実験を行う必要がある場合は，+3Vを供給するための電源供給線として，メッキ線（ $1\text{ mm } \phi$ ）を実習基板上部に取り付ける。

⑤アクリル板裏面には，図5に示す回路を結線する。試作程度であれば，ユニバーサルプリント

基板を用いればよいが、教具として何組も製作する必要がある場合は、感光基板などを利用して製作する方がよい。

なお、同図において、入力端子と出力端子の間の点線で囲んだ部分は、図3における回路構成盤(ステンレス板)であり、これにはアースとしての役目を果たさせるようにアースしておく。

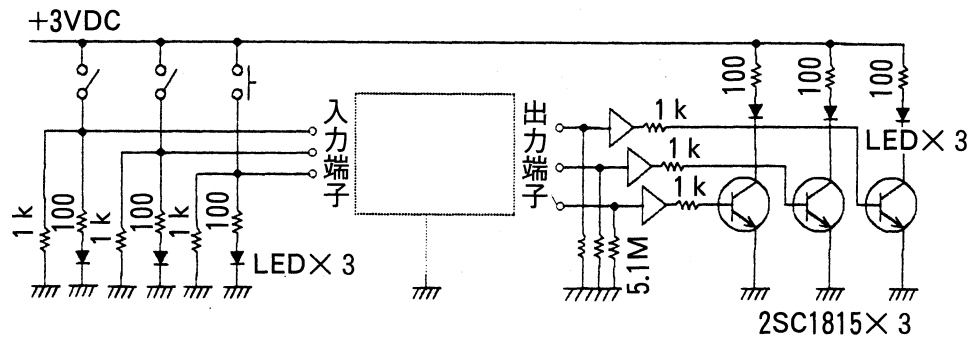


図5 実習基盤の回路図

【2】論理素子ブロックの製作

論理回路について実習させる際、教授すべき教材の範囲にもよるが、論理素子ブロックとしては、一般的には次のようなものが必要と考えられる。この中から実験実習の内容・目的や学習者の実態などを考慮し、取捨選択して製作する。

AND, OR, NOT, XOR, バッファ, NAND, NOR, 半加算回路, 全加算回路, エンコーダ, デコーダ, JK フリップフロップ, D フリップフロップ, 1 Hz 発振器, チャタリング防止回路など。

これらの論理素子ブロックを製作する際、ブロックごとに電源を内蔵させる必要があるが、その方式によって、次の3種類に分類できる。

- (a) 単5電池を内蔵する方式
- (b) キャパシタで電源を代用する方式
- (c) コイン電池を用いる方式

(a) 単5電池内蔵方式

ここでは、NOT 素子ブロックを例に、その製作手順を以下に示す。

①プラスチックケース(70×45×20mm程度)を準備する。クリップや画鋲の入っているケースなどを利用してもよいが、ここでは個数や形・大きさを揃えるため、パーツショップで購入できるパーツボックスを利用する。

②ケースからフタをはずし、フタにはビスナット(3mmφ)を取り付ける。これは図4に示すように論理素子ブロックの入力端子、出力端子として利用される。

IC(CMOS型IC74HC04)をプリント基板上にICソケットを介して取り付け、その一組の入出

力端子をフタのそれに接続する。この際、CMOS型ICの特性上、使用しない入力端子はすべてアースしておく必要がある。

さらに、ICのVcc端子、GND端子にリード線を接続し、リード線他端は電源に接続するため引っ張りだしておく。

③フタをはずしたケースの底面には、図4のように8mmφ程度の孔をあける。次に、このケースの外側底面の全面に銅箔を貼り付ける。この銅箔面に②で引っ張り出しておいたリード線(GND)をハンダ付けする。この際、銅箔面の接着剤を除去したのち、そこを予備ハンダしておく、簡単にハンダ付けできる。

さらに、単5用の電池ケースをプラスチックケース内側に接着し、この+端子に②で引っ張り出してあるリード線(Vcc, GND)を接続する。

④このケースにフタをかぶせ、フタの上面にはこの論理素子ブロックがNOTであることを示す紙を貼っておく。

以上は、NOT素子ブロックを例に製作法を示したが、他の論理素子ブロックについても、ほぼ同様に製作できる。

たとえば、半加算回路素子ブロックの例で考えるならば、ケース内に入れるICの種類や数の違いや、入力出力端子数の違いがあるだけである。すなわち、半加算回路の場合、予め半加算回路として機能するようにプリント基板上に必要な結線を施しておき、論理素子ブロックとしてモジュール化しておくのである。

(b) キャパシタで電源を代用する方式

AND素子、OR素子、半加算回路、フリップフロップなどの論理素子ブロックを製作する場合は、そのケース内に電池を内蔵させる必要はない。電池の代わりにキャパシタ(470μ10wV程度のもの)で代用できるのである。なお、NOT系の論理素子(NOT, NOR, NANDなど)の場合については(c)で述べる。

また、このキャパシタで代用できるという理論的根拠については、§4.5で述べることにする。なお、使用に当たって、予めキャパシタを充電してから実験を開始する必要は全くない。これについてもそこで述べることにする。

本方式では、電池やそのケースも不要となることから、キャパシタをユニバーサルプリント基板に直付けするだけでよく、さらに製作が容易になり小型化やローコスト化できる。すなわち、プラスチックケースもその大きさが40×30×20mm程度の小型のものが利用できる。ただ、小型・軽量化したことにより、結線する際、実習基盤上の密着性が減少し操作性が若干悪くなるため、プラスチックケースの内底に小型磁石(13×8×5mm程度)を取り付け、回路構成盤(ステンレス板)との密

着性を保たせるようにする。この際、磁石の周囲をステンレス板などの磁性体で囲んだものを準備し、これをプラスチックケース底面の銅箔部に密着するようにして製作すると、磁石を小型化でき、回路構成盤との密着をより強めることができる。

(c) コイン電池を用いる方式

NOT 系論理素子の場合、上述のように電池をキャパシタで代用すると、使用開始に当たって、一旦、出力が“論理0”になるように、入力端子の組み合わせを設定する必要がある。これでは取り扱いが面倒となり、教具として必要条件の一つ（操作性がよいこと）が損なわれてしまう。また、現在では、5V1F 程度の大容量キャパシタでも低価格で容易に入手できるようになったので²⁾、それを利用する方法もあるが、この場合でも、やはり使用直前に充電する手数が必要であり、教具としての改善の余地が残されている。

したがって現在のところ、NOT 系の論理素子の場合には電池を内蔵する必要があり、(b) 方式の教具程度までに小型化するために、本教具では単5電池2個の代わりにリチウム電池1個(+3V, CR1616または2025など)を利用することにする。ただし、CMOSの場合、その消費電流は少ないものの、未使用時に電池を取りはずさないでおくのは得策ではなく、電池用ケースが必要である。この場合、専用の電池ケースは、一般には入手しにくいので、写真5に示すような方式をとると簡単に自作できる。この手法は文献³⁾の方法を本教具用に改善している。

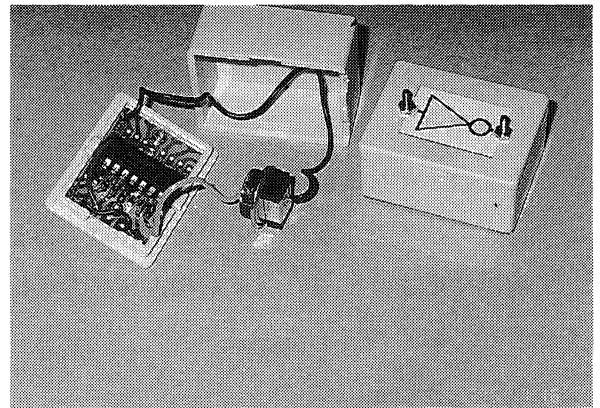


写真5 コイン電池型 NOT 素子

すなわち、製作手順は次の通り。

①基本的には(a)と同じ手法で製作する。ただし、プラスチックケースとして(b)で利用した同じものを利用し小型化を図る。また、(a)の③の電池ケースを取り付けるかわりに次のような製作手法をとる。

②小型磁石(例えば13×8×4mm, 12mmφ)を2個準備する。図6に示すように、銅箔テープ(8mm幅)を磁石に巻き付けるようにして貼り付ける。

③一方の磁石の銅箔テープ上(N極)に、スポット状の予備ハンダをしておく。他方の磁石の銅箔上(S極)の位置にも同様に予備ハンダしておく。

④この予備ハンダしたところに、(a)の②から引っぱり出したリード線(V_{CC}, GND)をハンダ付けする。

⑤二つの磁石の間にリチウム電池を挟み込むことにより、CMOSに電源が供給できることにな

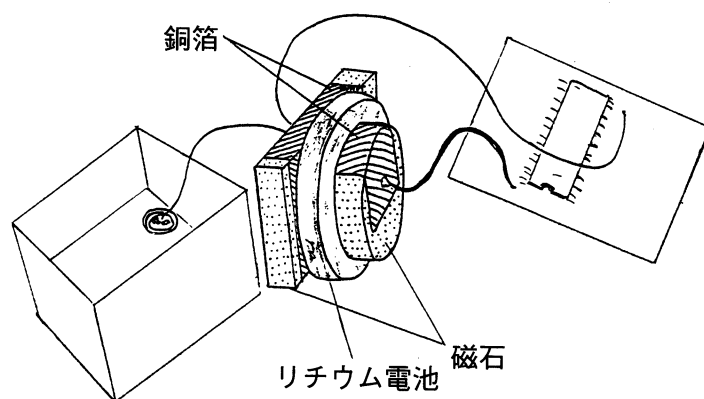


図6 コイン電池型論理素子ブロックのしくみ

る。この部分が回路部と短絡しないように、ビニールテープなどを巻き付け絶縁しておく。

⑥ケースにフタをして、フタの上面にはこの素子ブロックの機能を示す紙を貼っておく。

§ 4. 5 キャパシタで電源が代用できる動作原理（信号源が電源となる動作原理）

【1】保護回路

本教具の基本論理素子 AND, OR, NOT, NAND, NOR, XOR 等は相補形金属酸化物電界効果トランジスタ (CMOST) で構成されており、その内の一つ OR 素子の回路構成を図7に示す。全回路を A, B, C, D の4ブロックに分けて、それぞれの回路のはたらきを説明する。

論理回路の主体は B ブロックで、NAND 回路を構成している。A ブロックは信号源と主回路がお互いに影響を受け合わないよう間に挿入された緩衝 (バッファ) 回路で、論理回路としては NOT 回路である。C ブロック, D ブロックも同じく NOT 回路で構成された緩衝回路である。D ブロックの出力 Y が論理 OR の出力端子, C ブロックの Y_4 が NOR の出力端子である。B ブロック, C ブロックは内部配線のみで外部には端子は出ていない (NOR 回路として出荷されるときは D ブロックは除去され Y_4 が出力端子として外部に現れる)。また D ブロックは OR 回路の出力端子として Y 端子のみが外部に現れる。この外に入力端子 X_1, X_2 と動作エネルギーの供給源 (直流電源) 端子と接地端子が外部接続端子となっている。

内部配線される素子は外部から遮蔽されているので、電荷の付着等でトランジスタを破壊するようなことはないが、外部端子は人体や種々なものと接し電荷が付着する機会が多い。しかし接地端子は接地され、直流電源端子も一定電圧に保持され素子を破壊する異常電圧を発生させることはない。また出力端子 Y は負荷回路に接続されたりして付着した電荷を比較的容易に放電できるが、入力側 NOT 回路のゲート端子に付着した電荷は容易に放電されず、ゲートには無視できないほどの高い電圧を生じトランジスタを破壊してしまうことがある。そこでゲートに多量の電荷が蓄積するのを防ぐために、A ブロックの NOT 回路の入力端子にダイオード等を用いてゲートの電荷を放電させ、トランジスタの破壊を防ぐ回路が考案された。この抵抗を含むダイオード回路を保護回

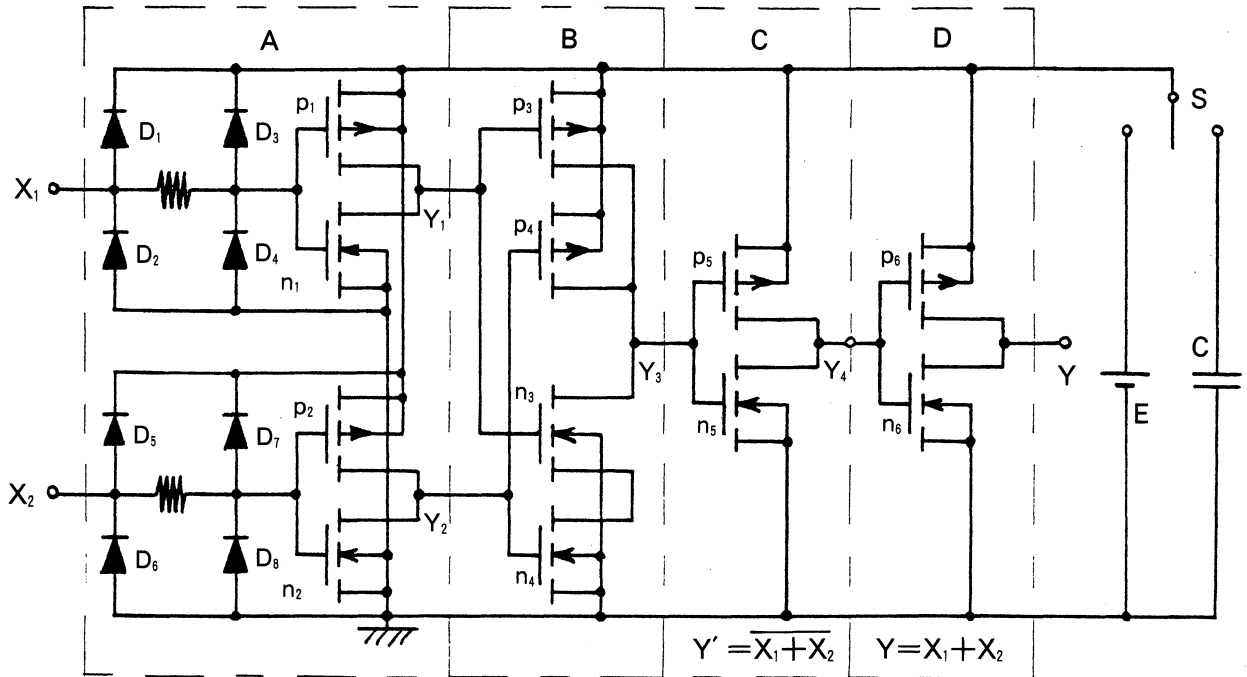


図7 OR回路 (Y出力) と NOR回路 (Y'出力)

路という。保護回路を付加するとゲート電圧が pMOST のソース端子の電圧より約0.6ボルト以上高くなるとダイオード D_1 あるいは D_1 と D_3 に電気が流れ電荷を放電してゲート電圧が pMOST の基盤電圧より0.6ボルト以上高くなることを防いでくれる。またゲートが負の電圧になったときはダイオード D_2 あるいは D_2 と D_4 が導通して、ゲートの電圧が nMOST のソース電圧より0.6ボルト以上低くなることを防いでいる。本回路の場合 pMOST の基盤及びドレインへの直流供給電圧を E ボルトとすれば、ゲートの最高電圧は $(E+0.6)$ ボルト、最低電圧は -0.6 ボルトとなる。

【2】2入力論理回路の動作

直流電源を正常に接続したとき、直流電源を接続しないで本来の直流電源部にキャパシタを接続した場合の CMOS 論理回路の OR 回路の動作について述べる。回路の動作説明は教具に用いた図7の OR 回路を使用する。

(a) 直流電源を使用した通常の動作

図7の回路でスイッチ S を E に接続し、信号を左端 X_1 , X_2 から加え出力を Y 端子から取り出すと本回路は OR 回路として正常に動作する。一点鎖線で区分した A は保護回路付きの NOT 回路、B は NAND 回路、C と D は保護回路なしの NOT 回路である。

X_1 , X_2 の入力電圧が何れも 0 ボルト (論理 0) のときは、A ブロックの nMOST (n_1 と n_2) は遮断、pMOST (p_1 と p_2) は導通となるのでその出力 Y_1 , Y_2 は何れも E ボルト (論理 1) となる。ブロック B では Y_1 , Y_2 とともに E ボルトであるから、pMOST (p_3 と p_4) は遮断、nMOST (n_3 と

n_4)は導通して Y_3 は接地され出力電圧は 0 ボルト (論理 0) となる。C ブロックと D ブロックは何れも NOT 回路であるから最終出力 Y は Y_3 と同じく 0 ボルトとなり OR 回路であることがわかる。

次に X_1 , X_2 の電圧が E ボルト (論理 1) のときは A ブロックの出力 Y_1 及び Y_2 は何れも 0 ボルトとなりブロック B に伝わる。ブロック B では両信号とも 0 ボルトであるから, n_1 , n_2 とも遮断, p_1 と p_2 は導通となる。したがって出力端子 Y_3 の電圧は E ボルトとなり, 最終出力端子 Y にも同じく E ボルト (論理 1) が現れる。

更に, X_1 が 0 ボルト, X_2 が E ボルトのときは, B ブロックの p_3 は遮断, p_4 は導通となる。 p_3 と p_4 は並列に接続されているので, 出力端子 Y_3 は電源と接続され E ボルトとなる。一方 n_4 は導通となるが直列に接続された n_3 が遮断であるから Y_3 は接地されることはない。したがって Y_3 は E ボルトを保持する。

以上の動作では出力電圧や動作中の出力電圧 E ボルトはスイッチで接続された電源から供給され, 保護回路は本来の保護目的以外の特別のはたらきはない。

次にスイッチ S を C 側に接続した場合を考える。

(b) 直流電源の代わりにキャパシタを利用した本教具の動作

本教具の論理素子盤 (NOT 系を除く) では, 直流電源をキャパシタ C で代用しているが, その動作原理について考える。なお, キャパシタ C には最初電荷は蓄積されていないものとする。

① 入力 X_1 , X_2 のうち少なくとも何れかの一つに E ボルトの電圧が加わった場合

A ブロックではゲートに E ボルトの電圧の加わった nMOST は導通し, pMOST は遮断となり 0 ボルトが出力される。ゲート電圧が 0 ボルトの nMOST は遮断となり, pMOST は導通するので pMOST のソース端子電圧が供給される。しかし pMOST のソース端子には直流電源は接続されていないので, 本来電圧は 0 ボルトであるが X_1 , X_2 何れかの E ボルトの信号源から保護ダイオードを通して電気が流れ, pMOST のソースの電圧は約 $(E-0.6)$ ボルトの電圧になっておりキャパシタンス C も同じ電圧に充電される。したがって入力が 0 ボルトの NOT 回路の出力端子には $(E-0.6)$ ボルトの電圧が現れる。このとき出力端子に現れる電圧 $(E-0.6)$ ボルトの電圧の大きさが, CMOST の閾値電圧 (回路の状態が変化する最低の電圧) より大きければ次段以降の論理回路は正常に動作するが, 閾値電圧より小さいときは誤動作となるかあるいは全く動作しない。したがって $(E-0.6)$ ボルトの大きさ, すなわち信号電源の大きさ E に回路の動作は影響を受けることになる。例えば E が 3 ボルトであると $(E-0.6)$ ボルトは 2.4 ボルトとなり閾値電圧を越えているので転移可能となるが, E が 1.5 ボルトの場合は $(E-0.6)$ は普通の CMOST 回路では転移不可能である。本回路の動作では信号源と保護ダイオード及びキャパシタのはたらきで回路は動作するがキャパシタは必須というわけではない。

② ①の入力の後で X_1 , X_2 とも論理 0 が入力された場合

pMOST のソースへの直流電源は接続はされてはいないが前回までの論理演算によって、キャパシタ C に電荷が充電されておりその電圧は約 $(E-0.6)$ ボルトを保っているのです、あたかも $E-0.6$ ボルトの電圧が pMOST のソースに供給されているような形になっている。したがって X_1 , X_2 とも論理 0 の場合はその出力 Y_1 , Y_2 には論理 1 に相当する電圧 $(E-0.6)$ ボルトの電圧が現れる。この電圧が閾値電圧以上であれば以降の論理回路は正常に動作して、出力端子 Y には論理 0 が現れる。本回路ではキャパシタが必須の素子ということになる。

③ はじめから両入力 X_1 , X_2 が共に 0 ボルト (論理 0) の場合

この場合直流電源も接続されておらずまたキャパシタ C も充電されていないので、pMOST のソース電圧は 0 ボルトである。したがって A ブロックの NOT 回路は全く動作しないので出力 Y_1 , Y_2 とも 0 ボルトであり、B ブロック以降の回路も全く動作せず出力端子 Y の電圧も 0 である。

ただこれを論理回路的に見た場合、2つの入力 0, 0 に対して出力が 0 であるので、あたかも OR の演算を行ったように見えるだけである。(②と同じ 0 入力であるがその動作は全く異なっている)。

(c) NOR 回路

NOR 回路は先の OR 回路の出力 Y の前段 Y_4 を出力端子としたものである。

① 直流電源で動作する場合

正常に動作し動作内容も前述の OR 回路と全く同じであるから省略する。

② 直流電源を省略しキャパシタを接続した場合

X_1 , X_2 の初回入力に際し少なくとも何れかに E ボルト (論理 1) が加わったときは OR 回路の場合と同じように信号源からダイオードを通して C を充電し pMOST のソース電圧を論理 1 の電圧以上に保持できるので OR 回路の場合と同じような動作をする。詳細は省略する。

X_1 , X_2 の初回入力が共に 0 の場合出力は論理 1 に相当する高い電圧が必要であるが、残念ながら pMOST のソース電圧は 0 ボルトであるので論理 1 の高い電圧は得られない。そこで今回の教具ではリチウム電池を使用した。NAND, NOR, XOR 等については回路の構成前に「これら 3つ (あるいはすべて) の素子には最初エネルギーを与えます」と表明して入力端子から入力電圧 E ボルト、あるいはそれ以上の電圧を供給してから実験を始めるようにすると、電池は不要になる。この場合、保護ダイオード及びキャパシタ C は必須の素子である。

§ 4. 6 本教具の特徴と今後の課題

§ 2. 4でのべたような種々の実習テーマ（教材）について、本章の「論理素子を自由に配置できる教具」を用いても実習が可能である。

これらの回路を本教具を用いて組んだ場合、その素子ブロックを与えられた図面に近い形に配置でき、電源の配線も不要であるため、配線作業に不慣れな学習者でも容易に結線できる特徴を持っている。実際に TTL 方式の教具を附属中で使用してみたが、生徒たちは半加算回路などの配線作業に抵抗感を持たせることなく、接触不良動作のあった一班を除く全班が完成させることができ、この教具に関する所期の目的は一応達成できたと考えている。今回、生徒たちから出た意見を元に、種々の改良を進めてきたが、CMOS 方式に改良したものは、小型化、ローコスト化でき、また、動作に関して極めて高い信頼性を持つようになっている。しかし、製作者の段階ではほぼ100%の信頼性のある動作をしているが、生徒に実際に使用させると接触不良、電線の断線が予想されるなどこの種の教具で避けて通れない問題があり、さらに、これ以外にも予想できない問題点も発生することが考えられ、今後は、実際の教育現場で試用を重ねる必要がある。

おわりに

本稿で述べた論理教具の開発に当たっては、しくみが単純化され学習者にとって分かりやすいもの、操作手順が簡単なもの、可能な限り誤操作や乱暴な取り扱いにも耐えうるもの、身近で入手しやすい材料部品を利用すること、特殊な加工技術を要せず現場教師が自作できるもの、信頼度が100%の動作をすること、保守・管理・収納が煩わしくないこと……等の諸点に留意して製作した。本稿で述べた教具はそれらの諸点について、現段階ではほぼ満足しているものと考えている。なお、実際に筆者自身の授業でも試用してみたが、利用しない場合に比べて種々の点で重宝しているという実感も得ている。しかし、これは製作者本人が使用した場合であって、他の人が使用すると意外に利用されないことが多いという現実もあるので、今後、実際の教育現場で試用を重ね改良を進めるとともに、諸賢の意見を仰ぎ誰でもがより手軽に製作でき、広範に利用できるものに改善できればと考えている。

謝 辞

本教具の製作に当たっては、1994年度卒業研究指導学生堂蘭英彦君に感謝するとともに、開発に当たっては試作教具を実際の教育現場で試用して頂き有益な助言を頂戴した鹿児島大学教育学部付属中学校有村修次教諭、南信一教諭、ならびに鹿屋市立鹿屋東中学校（当時）上園英男教諭に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 井出：理科教材・教具の理論と実際，東洋館出版，pp.161-163 (1988)
- 2) 島本：電気二重層コンデンサの仕組みと使い方，エレクトロニクスライフ，pp.134-136，Vol.756 (1995)
- 3) 全国理科教育センター研究協議会：身近な素材を生かした小学校理科教材の研究，東洋館出版社，pp.60-61 (1994)
- 4) 遠矢，萩嶺：スチール黒板で演示できる論理回路教具，日本産業技術教育学会第37回全国大会講演要旨集，pp.39 (1994)
- 5) 遠矢，堂藺：黒板上で演示実験を行うための「論理教材・教具」，日本教材学会年報第6巻，pp.20-22 (1994)
- 6) 遠矢，有村，南：比較的簡単に結線できる論理回路教具の開発，日本産業技術教育学会第38回全国大会講演要旨集，pp.100 (1995)
- 7) 山田，朝比奈：“What is Electronics” by INELCO S.p.A (1974)