

汎用ロジック IC を用いた論理回路学習のための アップダウン・カウンターの開発

加藤良将*1・宮下十有*2・亀井美穂子*2・鳥居隆司*2

Email: kato@nua.ac.jp

*1: 名古屋芸術大学芸術学部

*2: 椋山女学園大学情報社会学部

◎Key Words

論理回路, デジタル信号, 汎用ロジック IC, チャタリング, シュミットトリガ

1. はじめに

高等学校での教科「情報」は、1999 年に告示された後、2003 年度より「情報 A」「情報 B」「情報 C」^①として導入され、その後、「社会と情報」「情報の科学」^②を経て、現行の「情報 I」「情報 II」^③へと変わり、共通テスト科目^④としても実施され、多くの国立大学で利用^⑤されるようになった。学習内容としては、共通教科「情報 I」では、「情報社会の問題解決」「コミュニケーションと情報デザイン」「コンピュータとプログラミング」「情報通信とネットワーク」の単元で構成され、情報の科学的な理解のウェイトが増加する傾向にある。教科「情報」には、大学における教員養成、教員採用や教員配置^⑥の他、扱う分野の範囲や単位数等、様々な問題^⑦が多く存在する。

日本学会会議における参照基準において情報学は、文理融合の幅広い内容であるが、情報科は Information から Informatics へ変化した。情報のテクノロジーに関する内容の比重が多くなれば、結果的に人文科学や社会科学を基礎とする部分が手薄になり、情報社会の問題は、ほぼテクノロジーによって解決できるとの印象が強くなる。幅広い学問分野の中で総合的に「情報」をとらえ考える方向性が失われていく懸念もある。

教科「情報」は、今後のすべての人々に必要不可欠な教科であり、幅広く情報学の内容を習得するべきもので、急速に進化し変容する情報社会にも対応できる能力を身に付けるものであるとともに、情報の科学的理解を重視する方向性へと変化してきている。

情報教育では、その科学的理解として、コンピュータにおける情報の内部表現や演算等の理解も必要と考えられ、2進数や論理回路を扱うことが多い。しかしながら、実際にデジタル回路の素子等の具体的な動作について言及されているものは極めて少ない。デジタル信号がノイズに強い等の説明がされているものの、現実のスイッチ入力時のノイズの影響を回避し、デジタル信号を安定させる方法についての解説はほとんど見られない。そこで、本研究では、デジタル回路の基礎的な仕組みや具体的な論理回路の挙動を理解するための身近で興味を持ちやすいツールやアクセサリとしても、活用できる汎用ロジック IC、7セグメント LED 等を用いたアップダウン・カウンター・ガジェットを開発したので報告する。

2. 学校教育における電気回路と論理回路

2.1 共通教科「情報 I」での扱い

共通教科「情報 I」の「(3)コンピュータとプログラミン

グ」の単元では、「コンピュータで情報が処理される仕組みに着目し、プログラミングやシミュレーションによって問題を発見・解決する活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。」と記述され、身に付ける知識及び技能として、「(ア) コンピュータや外部装置の仕組みや特徴、コンピュータでの情報の内部表現と計算に関する限界について理解すること。」とある。(ア)に関しては、その内容の取扱いについての言及はないが、その指導要領解説では、「入力装置や出力装置などのハードウェアを抽象化して扱う考え方」「コンピュータ内部でのプログラムやデータの扱い方」について理解するとしている。

この単元が最も詳しく解説されている「情報 I」の教科書では、コンピュータを構成する要素の説明に続いて、CPU の動作や計算の仕組みを扱い、主記憶装置内のプログラム及びデータをレジスタに読み込み、演算装置で演算を行う流れが、アセンブラ言語のようなニーモニックで示されている。その後、「2進数と情報量」や「演算の仕組み」を扱う部分があり、「2進数と情報量」では、CPU の Low と High が「0」と「1」に対応することを示している。デジタル情報と 2進数を対応させた例として、電圧の Low と High 以外に、磁気、DVD 等のピット、スイッチの OFF-ON、ランプの消灯と点灯が示されているが、リレーや真空管、トランジスタは扱われていない。「演算の仕組み」では、論理回路として、論理積 (AND) 回路と論理和 (OR) 回路、否定 (NOT) 回路が、図記号と真理値表で説明され、それらの回路を組み合わせた半加算器にも言及されている。この単元に関連する用語については、ハードウェア関連の用語として、レジスタ、制御装置、演算装置、AND 回路、NOT 回路、OR 回路、半加算器等は、「情報 B」と「情報 I」の教科書には、掲載されているが、「情報の科学」の教科書には、掲載されておらず、真空管、半導体素子、大規模集積回路等の用語は、「情報 A」「情報 B」「情報 C」の時期のみに掲載とのこと^⑧である。

2.2 初等・中等教育での電気回路の扱い

これらの論理回路を組み合わせてできる加算器は、現実のコンピュータでは、すべてデジタル回路で構成されている。デジタル回路は、電気信号の High と Low のレベルの電圧が安定的に持続できるものである。これらの状態を規則的に制御できる場合には、論理回路として扱うことができるが、まず、電気については、小学校段階の「A 物質・エネルギー」の単元で、第 3 学年において、「(5) 電気の通り道の「ア 電気を通すつなぎ方と通さないつな

ぎ方があること。」「イ 電気を通す物と通さない物があること。」、第4学年の「(3) 電気の働き」の「ア 乾電池の数やつなぎ方を変えると、豆電球の明るさやモーターの回り方が変わること。」「イ 光電池を使ってモーターを回すことなどができること。」を学習している。第6学年においては、直接的な電気回路ではないが、「(4) 電気の利用」の単元がある。

中学校段階では、理科の「第1分野」の「(3) 電流とその利用」において、「電流回路についての観察、実験を通して、電流と電圧との関係及び電流の働きについて理解させるとともに、日常生活や社会と関連付けて電流と磁界についての初歩的な見方や考え方を養う。」となっている。技術科では、「C エネルギー変換の技術」で、「(2) 生活や社会における問題を、エネルギー変換の技術によって解決する活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。」に「イ 問題を見いだして課題を設定し、電気回路又は力学的な機構等を構想して設計を具体化するとともに、製作の過程や結果の評価、改善及び修正について考えること。」とある。高等学校では、「物理基礎」の「(2) 様々な物理現象とエネルギーの利用」において、「(ウ) 電気」の「ア 物質と電気抵抗」で、「金属中の電流が自由電子の流れによることも扱うこと。また、半導体や絶縁体があることにも触れること。」としており、また、「イ 電気の利用」において、「交流の直流への変換や電磁波の利用にも触れること。」とその内容を取り扱うことになっている。さらに、一部の履修にはなるが「物理」の「(3) 電気と磁気」では、コンデンサーや電気回路を扱い「電気回路に関する実験などを行い、電気回路における基本的な法則を理解すること。」となっている。

Low としてとらえることや、前述したように半加算器を作ることは「情報I」で学ぶ。これらの知識から具体的にコンピュータを動作させるためには、学校教育ではトランジスタをあまり扱わないことも考慮すると、電磁石で構成されているリレーを用いることになる。リレーでコンピュータを製作すると、電磁石の動作が目視できるので、わかりやすいとも考えられるが、電磁石そのものの大きさや消費電力も大きくなる問題点がある。一般的にも、コンピュータは非常に多くのトランジスタで構成され、それらを集積したものがICでさらに大規模になったLSIがCPUであることは、よく知られていることから、本研究では、非常に低電力でコンパクトであり、アクセサリとして常に触れることが可能なアップダウン・カウンタを開発することとした。開発にあたって、トランジスタを集積した名称のTTL(Transistor-Transistor Logic)によるICを選択すべきかもしれないが、TTLタイプのICは、基本的に電源電圧が5Vであるので、消費電力、動作速度、集積度等の他、技術の発展の歴史的な観点から、3Vのボタン電池程度でも十分動作可能なデジタルICとして、CMOSタイプのAND回路、NOT回路、OR回路の素子の他、カウンタICや7セグメント・ドライバーIC、タイマーIC等を用いることとした。

ただ、ここでも問題になることがある。例えば「情報I」では、デジタルは、ノイズに強いことを知識として理解することになっており、いくつかの教科書にもそのような記述がある。しかし、計数カウントを行うとして、スイッチをONにする場合やリレーの電磁石で接点をONにする場合には、チャタリングと呼ばれるノイズが発生することが多い。チャタリングは、メカニカルなスイッチを

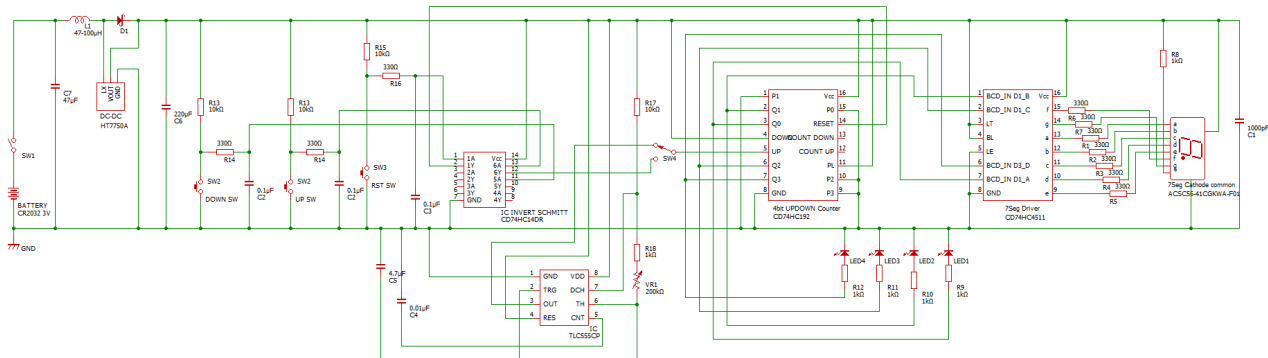


Fig.1 1桁アップカウンターの回路図

ここで電気回路に用いる素子の知識が問題になる場合がある。例えば、小学校で学ぶ電気回路として豆電球を点灯する場合、豆電球の代わりにLEDを使用したとすると、LEDは半導体であり極性があるので、接続する方向によっては点灯しない。しかも、正しい方向に接続したとしても、小学校で扱う乾電池を電源として接続すると、LEDに電流が流れ過ぎることにより、LEDは点灯したと同時に破壊される。現在、あらゆる場所で多数使用されているLEDを用いることは、児童生徒のためになることなので、抵抗や極性を関係ないことにする回路が内蔵されているLED素子を用いる方法もあるが、抵抗や電流の流れを調整する回路は、この単元の内容から外れるものとなる。

2.3 学校教育の学びからデジタル回路へ

電気回路については、小学校から高等学校までの理科等で学習し、電圧をある閾値で区切り、安定的にHighと

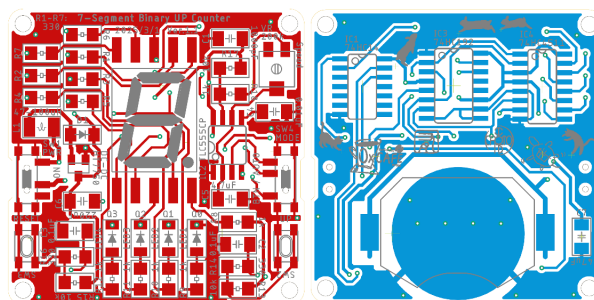


Fig.2 1桁アップカウンターのプリント基板

ONにする場合に発生する非常に有名な現象で、単にスイッチを一度ONにしているにもかかわらず、非常に短時間にON-OFFが繰り返され、最終的にONの状態になるものの、計数カウントを行う機器としては、致命的な欠点となってしまうので、必ず対策を行う必要がある。ところ

が、高等学校の普通科までの知識では、デジタルは、ノイズに強いと学んでいるので、その知識に基づいて計数回路を具体化したとしても、1 カウントを複数回カウントしてしまう誤った動作を行う回路となる可能性が大きい。

3. 汎用ロジック IC によるカウンターの開発

3.1 1 桁アップカウンター

デジタル回路の学び⁹⁾としては、デジタル IC の仕組みや特性、NOT、NAND、NOR 等の各回路、「数学 A」や「情報 I」でも扱うド・モルガンの法則、フリップ・フロップ回路等の基礎的な内容を扱った後、カウンター回路への応用を行う流れが一般的になる。また、スイッチ操作をきっかけにして回路をコントロールするタイミング・パルスやシステムそのものを一定の信号で動作させるクロックについても、知っておく必要がある。

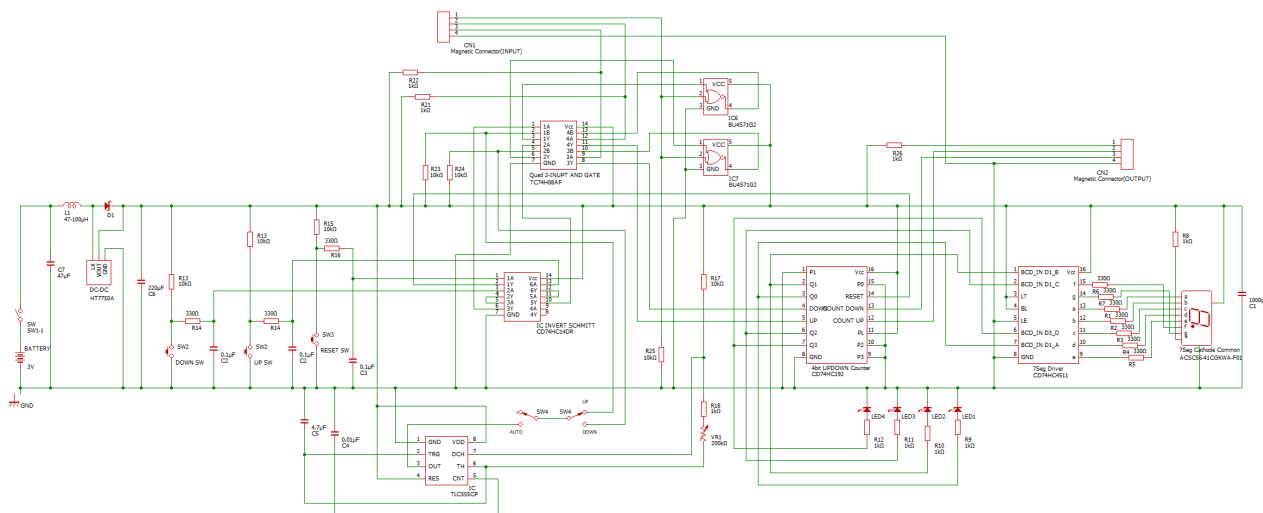


Fig.3 コネクタ接続により複数桁表示が可能な多桁アップダウン・カウンターの回路図

しかしながら、あまり内容的に膨大な知識体系を必要とするものでは、「情報 I」の教材として活用が困難であるので、まず、1 桁のアップカウンターを開発した。原理的なカウンターとしては、「0」と「1」の信号を2進数として表現するフリップ・フロップ回路を複数組み合わせるのが理想的かもしれないが、ここでは、電源電圧が2〜6Vで動作する4bitのバイナリカウンタ IC、CD74HC192を用いた。その結果を、Fig.1に示すようにLEDで2進数表示させるとともに、7セグメント・ドライバ IC、CD74HC4511を用いて、7セグメントLEDディスプレイによる10進数表示させるようにした。さらに、TLC555CPタイマー ICを用いることで、自動的に数字をカウントするようにした。Fig.1のCD74HC14DRは、6つのシュミットトリガ入力を搭載したインバータの汎用ロジック ICで、前述のチャタリングに対応するものである。リセットスイッチとカウントアップするためのタクトスイッチ入力からのノイズを防ぐ。CD74HC14DRは、6つの入力があるので、回路図では、カウントダウンスイッチにも考慮しているが、1桁表示のみでもあるので、その出力をカウンター ICに接続していない。Fig.2の1桁アップカウンターのプリント基板のデザインでも、このカウントダウンのためのタクトスイッチは省略した。使用する電子部品は、すべて表面実装の部品を用いたことで、アクセサリとして扱うことが可能な大きさ(4cm×4cm)となった。

3.2 多桁アップダウン・カウンター

1 桁アップカウンターは、1 桁のアップカウントスイッチとリセットスイッチを備え、2 進数のLED表示と7セグメントLEDによる自動アップカウント機能及びアップカウント速度調節機能があるが、7セグメントLEDを1つしか搭載していないので、当然、桁上がりはできない。そこで、この1 桁アップカウンターを複数接続することで、多桁表示と桁上がりにも対応した多桁アップダウン・カウンターも開発(Fig.3)した。プリント基板のデザインをFig.4に示す。この多桁アップダウン・カウンターでも、1 桁アップカウンターと同様にすべて表面実装の部品を用いた。CD74HC192には、キャリー(CARRY)出力は、カウントアップ時に0になるタイミングでLowが出力され、ボロー(BORROW)出力では、カウントダウン時に9になるタイミングでLowになるため、これらの出力を複数の

基板に接続することで、多桁表示が可能になる。それぞれの基板を接続するために、基板の左右の端にプランジャ、スプリング、バレルから構成されるポゴピンを両端のマグネットで保持するタイプのコネクタを用い、2つの基板を容易に接続できる構造とした。

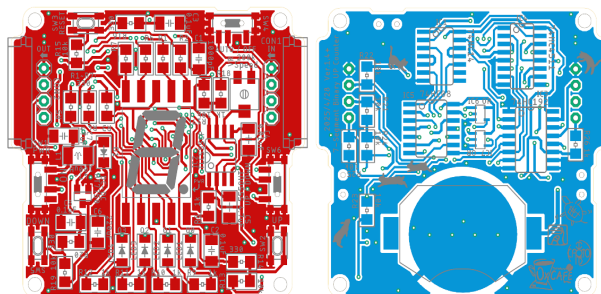


Fig.4 マグネチックコネクタ接続により多桁表示が可能なアップダウン・カウンターのプリント基板

4. 実装及び考察

今回、開発にあたっては、ブレッドボードで仮の配線を行い、挙動を確認しながら電子回路の作成を行った。教材の目的として、軽量でアクセサリのようにも扱うことができることがあった。そのため、電源として、コンビニ等でも入手しやすい3VのCR2032リチウムイオン一次電池のボタン電池を選択したが、使用したデジタル ICの電

源電圧は、2V 以上で動作するが、複数のデジタル IC や 7 セグメント LED 等での電力消費もあり、ボタン電池のみの電源では、若干動作が不安定になることがあった。そこで、安定的に動作させるため、ステップアップ DC-DC コンバータを用いて昇圧し、バッファのために $220\mu\text{F}$ のコンデンサを用いることとした。選定した部品は、前述したようにすべて表面実装部品としたので、バッジ程度 ($4\text{cm}\times 4\text{cm}$) の大きさで完成させることができ、計数カウンターやタイマー、番号表示器等としても活用できると考えられる。

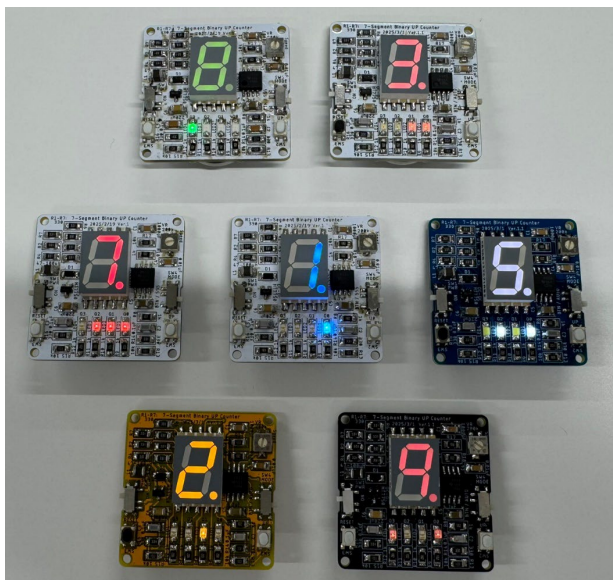


Fig.5 様々な色の 7 セグメント LED と 2 進数表示のための LED を実装した 1 桁アップカウンターの動作

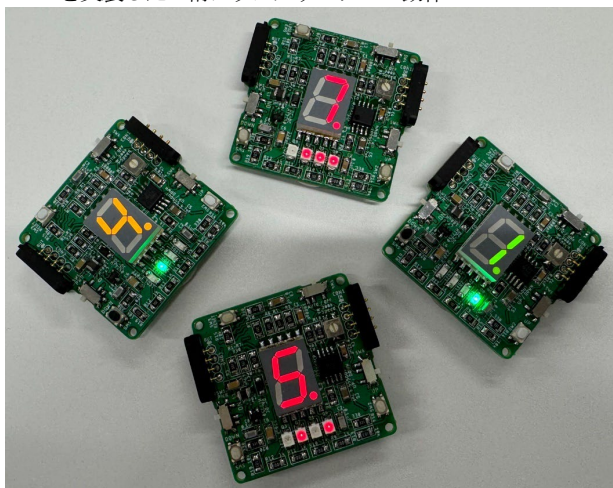


Fig.6 多桁アップダウン・カウンターの分離動作

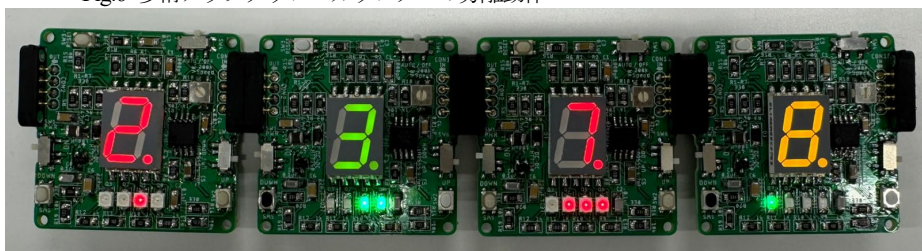


Fig.7 多桁アップダウン・カウンターの磁気コネクタで連結してカウントしている様子

本研究で開発した 1 桁アップカウンターに表面実装部品を実装し、2 進数や数字を表示させた例を Fig.5 に示す。多桁アップダウン・カウンターは、前述の 1 桁アップカウンターに、ダウンカウントができる回路を実装している

ので、Fig.6 に示すように単体でも動作するが、Fig.7 に示すように磁気接続タイプのボゴピンを接続して動作させると、最も下の桁を表示している一番右の基板の、それぞれのタクトスイッチを押すことで、アップカウントもダウンカウントも連動して動作する。コネクタを取り付けたことや、接続時の動作のための回路を追加したため、前述の 1 桁アップカウンターより若干大きいサイズ ($5\text{cm}\times 4.5\text{cm}$) となった。ただ、桁数が多くなると、当然カウントに時間がかかるので、最も左の基板の 7 セグメント LED の変化を確認には、かなり時間がかかる。さらに、その基板のタイマー IC を動作させることで、自動カウントも可能であるが、あらかじめアップカウントかダウンカウントかスライドスイッチで切り替えておく必要がある。それぞれの基板の電源は基本的には、それぞれの基板から供給される仕組みになっているが、桁上げや桁下げ動作時の出力等が接続されているコネクタ間を通して若干干渉するので、さらに最適化し改善する予定にしている。

5. おわりに

このようなデジタル回路を作成することで、コンピュータの動作として学ぶ知識や理解だけでは、困難な問題や実装の経験を得ることができる。しかしながら、特に高等学校の普通科では、卒業後の進路も様々であるので、このような教材が、社会に出たときに役立つと説明したとしても、生徒の心に響かないかもしれない。実験系の大学の学部で行われている実験や演習及びその考え方や実施方法、成果のまとめ方についても、「情報 I」等で、学力の 3 要素以外には、特に具体的な指針が明確に示されているわけではない。試行錯誤を続けながら、手探りで授業を行っている状況もあるのではないと思うが、学生の基礎的な知識や理解を、それぞれの電子部品の成り立ちや電子回路の仕組みを通して、確実なものとし、この分野のおもしろさを体験的に理解しながら、創造性を育む方向へと貢献できればと考えている。

参考文献

- (1) 高等学校学習指導要領(平成 11 年告示), 文部科学省, 1999.
- (2) 高等学校学習指導要領(平成 21 年告示), 文部科学省, 2009.
- (3) 高等学校学習指導要領(平成 30 年告示), 文部科学省, 2018.
- (4) 令和 7 年度大学入試選抜に係る大学入学共通テストに関する検討状況について, 大学入試センター, 2021.
- (5) 2024 年度以降の国立大学の入学者選抜精度 国立大学協会の基本方針, 国立大学協会, 2022.
- (6) 生涯学習施策に関する調査研究(高等学校情報科担当教員の現況等に関する調査研究), 文部科学省委託調査, 2017
- (7) 澤田大祐, 高等学校における情報科教育の現状, 調査と情報, 国立国会図書館, 2020.
- (8) 赤澤紀子, 赤池英夫, 柴田雄登, 角田博保, 中山泰一, 情報科教科書に現れる用語の変遷: 情報 ABC から情報 I・情報 II まで, 情報処理学会論文集, 教育とコンピュータ, Vol.10, No.1, pp.13-24, 2024.
- (9) 湯山俊夫, デジタル回路の設計・製作(第 9 版), CQ 出版, 1999.