

アナログ情報デジタル化の理解を支援するための AD/DA 変換ツールについて

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

アナログ, デジタル, AD/DA 変換, ON/OFF 制御, PWM, PDM

1. はじめに

現代の情報社会では、AI の日常的な活用や IoT によるモノのネットワーク化が急激に進行し、仮想空間とフィジカル空間の高度な融合が進みつつある。次期学習指導要領の改訂に向け、中央教育審議会の諮問を受けた議論も行われ、情報教育に関する内容として、小学校における総合的な学習や探究に情報に関する領域を設けることや、中学校や高等学校において情報に関する内容をさらに充実させることがあげられている。中学校においては、技術科を情報・技術科（仮称）とする案も議論され、情報技術の仕組みや原理、仕組みが分からないまま生成 AI を使うリスクの懸念も示されている。しかし、公表されている関連資料等では、「AI を補助的に用いてプログラミングを行う」や「情報技術の原理や社会的影響を科学的に理解し、多様な情報を分析・統合・・・」などの文言が散見される。

日本の教育・技術政策を決定する文部科学省の官僚組織や、中央教育審議会をはじめとする有識者会議において議論を行っている構成員の専門性を考えると仕方のない面もあるのかもしれないが、このような表面的な IT 教育が継続されれば、結果として、ハードウェアやソフトウェアの基盤技術を海外に依存する構造から脱却できず、中長期的な国際競争力の低下を招くことが危惧される。

近年の政策方針においては「理系重視」が強調されているものの、実態としてはコンピュータサイエンスそのものよりも、データサイエンスや統計学的内容に比重が置かれる傾向がある。これは、コンピュータを単なる道具として捉え、ツールを上手に活用することを重視する従来のユーザー育成思考の延長線上にあり、基盤となる開発力を培う教育が長年十分に機能してこなかった背景に起因する。

そのため、AI ツールの基盤提供、クラウドサービス (AWS、Microsoft Azure)、OS (Microsoft、Apple、Google)、生成 AI の基盤モデル (OpenAI)、および半導体 (NVIDIA、AMD、Intel 等) の多くは米国企業が市場を主導しており、近年では中国企業の台頭も著しい。このようにプラットフォーム市場において海外企業のシェアが高い現状は、国内産業における重大な課題となっている。

初等中等教育のみならず、高等教育においても「文理融合」や「理系人材養成」を目的とした大学・高専機能強化支援事業等の補助金政策により、情報系学部の新設が相次いでいる。しかし、特に私立大学等においては、文理融合の理念や文系学生への門戸拡大の必要性から、線形代数や解析学、あるいは電子工学や量子力学といった基礎

的な理論・物理系科目が敬遠される傾向にある。代わりに、数式を極力排除した入門的な情報数学や、実務的な応用科目が多数配置される事例が散見される。このようなカリキュラムは、従来のオフィスソフト (Excel 等) の利用が、Python のライブラリ利用や生成 AI のプロンプトエンジニアリングに置き換わった側面が強く、技術の表面的な利用者の育成に留まり、基盤的な開発能力や理系能力の習得に結びつきにくいという課題がある。

本研究では、単なるソフトウェアの利活用にとどまらず、コンピュータが情報を処理する下層の仕組みであるアナログ・デジタル変換 (AD/DA 変換) の原理を、体験的に理解できる教育用ツールを開発し、それらの変換のプロセスの可視化等について確認したので報告する。

2. 情報科での AD/DA 変換

2.1 教科「情報」の学習指導要領

学習指導要領で該当する内容とその取扱いは、「(2) コミュニケーションと情報デザイン」の「ア (ア) メディアの特性とコミュニケーション手段の特徴について、その変遷も踏まえて科学的に理解する」や「イ (ア) メディアとコミュニケーション手段の関係を科学的に捉え、それらを目的や状況に応じて適切に選択すること」である。その学習指導要領解説において、やや具体的に、「情報のデジタル化に関して標本化、量子化、符号化、二進法による表現などを理解するようにするとともに、標本化の精度や量子化のレベルによって、ファイルサイズや音質、画質の変化が生じることを科学的に理解するようにする。」や「例えば、電子メールの送受信や SNS でのコミュニケーションの際に利用する数値や文字、静止画や動画、音声や音楽などの情報について、アナログ情報をデジタル化する一連の手続 (標本化、量子化、符号化) を行い、効率的に伝送するためにデータの圧縮を行うなどの実習が考えられる。」との記述がある。

2.2 共通教科「情報」

高等学校の教科「情報」におけるアナログとデジタルの変換についての現状についての動向を調べるために、最新のいくつかの教科書の記述を確認した。実教出版の教科書「高校情報 I」では、「第 2 章 コミュニケーションと情報デザイン」の「12. 情報のデジタル化」において標本化・量子化・符号化が解説されている。「最新情報 I」の「3 章情報のデジタル化とコンピュータ」の「1. 情報のデジタル表現」の「3. 音の表現」において、標本化、量子化、符号化が解説されており、マイクロホンでのデジタル化

の例を示し、PCM（パルス符号変調）方式が説明され、パルス密度変調（PDM）が意識されているとも考えられる。

「情報 I Flex」の「第 2 章 コミュニケーションと情報デザイン」の「2 節 情報のデジタル表現」の「17. 音のデジタル化」において標本化・量子化・符号化が解説され、符号化として PCM（パルス符号変調）方式が図示のみされているが、図としては、パルス密度変調（PDM）を示唆する表現であると考えられる。また、「新訂版 図説 情報 I」では、「第 3 章 情報とコンピュータ」の「2 節 コンピュータでの情報のデジタル表現」の「3. 音の表現」で、音のデジタル化の過程の符号化の段階として PCM（パルス符号変調）方式が図示のみされている。「情報 II」の「第 4 章 情報システム」の「10. 計測・制御システム」の「1. コンピュータによる計測・制御」で、AD コンバータや DA コンバータが示されている。

東京書籍の教科書では、「新編 情報 I」において、「2 章 情報を伝える」の「15 音と画像のデジタル表現」の「1. 音のデジタル化」において、標本化・量子化・符号化が解説され、欄外に MIDI 規格が説明されている。「情報 I Step Forward!」の「2 章 情報デザイン」の「17 音のデジタル表現」において、標本化・量子化・符号化が解説されている。欄外に AD 変換、DA 変換や PCM（パルス符号変調）方式が説明されている。また、「情報 II」は、本文には関連する内容がないが、索引・用語集に AD 変換、標本化、標本化周波数、符号化、量子化、量子化ビット数がある。

日本文教出版は、「情報 I」において、「第 2 章 コミュニケーションと情報デザイン」の「2 節 デジタル化による表現手段」の「4. 音のデジタル化」において、標本化・量子化・符号化が解説され、PCM 方式のデータ量についての記述があり、PCM（パルス符号変調）方式の図になっている。「情報 I ADVANCED」の「第 4 章 情報のデジタル化」の「5. 音のデジタル化」において、標本化・量子化・符号化が解説され、PCM 方式のデータ量についての記述があり、PCM（パルス符号変調）方式の図になっている。「情報 II」の本文には関連する内容がないが、序章において、情報 I で学んだ内容のキーワードとして、標本化、量子化、符号化の語彙のみが示されている。

東京書籍や日本文教出版の教科書では、図がパルス振幅（量子化）に基づく伝統的な PCM モデルを提示しているのに対し、実教出版の図はパルス密度変調（PDM）、すなわちデルタ・シグマ変調のような 1 ビット信号による表現を採用しており、現状の社会で多く利用されている AD/DA 変換の仕組みを意識した構成となっている。

2.3 専門教科「情報」「工業」について

専門教科の情報では、「第 3 節 情報の表現と管理」の目標として、「情報に関する科学的な見方・考え方を働かせ、実践的・体験的な学習を行うことなどを通して、情報産業の維持と発展を支える情報の表現と管理に必要な資質・能力を次のとおり育成することを目指す。」としており、「(1) 情報の表現と管理について体系的・系統的に理解するとともに、関連する技術を身に付けるようにする。」となっており、その内容の「(1) 情報の表現」の「イ メディアの特性とその表現」で、「文字、音・音楽、静止画、

動画などのメディアの特性と役割、効果的な表現について扱うこと。」とされている。該当する教科書は、実教出版であるので、「音による表現」の節の「音楽・音楽表現の基礎」では、「音のデジタル化」や「デジタル化と音質」

「MIDI」「音声ファイルの圧縮」「DTM」「ボーカルシンセサイザ」等の部分で、共通教科「情報 I」に掲載されている内容について、デジタル化と音質についてやや詳しく解説し、その後、音楽や音声合成、エフェクト等を扱う内容となっている。

情報科ではないが、専門教科の工業では、その学習指導要領の「電子技術」の目標として、「電子技術に関する知識と技術を習得させ、実際に活用する能力と態度を育てる。」としており、その指導要領解説では、「この科目のねらいは、半導体と電子回路、AD 変換と DA 変換、通信システム及び音響・映像機器などの応用技術や電子計測技術に関する知識と技術を習得させ、実際に活用する能力と態度を育てることである。」と記述されている。「(3) AD 変換と DA 変換の基礎」では、「AD 変換及び DA 変換の原理と利用例を扱うこと」となっており、ここでは、AD 変換及び DA 変換について取り扱い、AD 変換と DA 変換に関する知識と技術を習得させることをねらいとしている。「ア AD 変換」では、「AD 変換の原理や基本的な回路、計測機器などの利用例を取り上げ、AD 変換について理解させ、実際に活用できるようにする。」「イ DA 変換」では、「DA 変換の原理や基本的な回路、制御機器などの利用例を取り上げ、DA 変換について理解させ、実際に活用できるようにする。」としている。

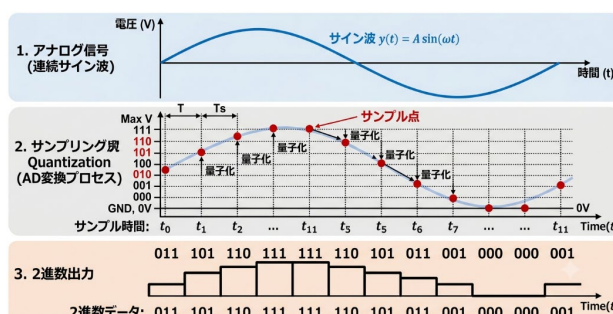


Fig.1 様々な教科書等に記載されているアナログ信号をデジタルデータに変換する説明図.*

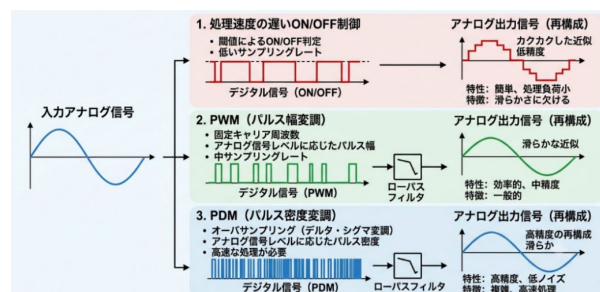


Fig.2 様々な AD/DA 変換、PWM、PDM による変換の概念図.*

「電子計測制御」の「(4) コンピュータによる制御の基礎」「イ 制御プログラム」では、スイッチ、センサ信号入

* Google Nano Banana 2 により生成

力や外部機器の制御など、各種の制御プログラムに関する事例を取り上げ、入出力制御、AD変換、DA変換、ハンドシェークを使った事例、割込み処理などの制御プログラムの考え方などについて理解させ、実際に活用できるようにする。プログラミング言語については、実習や関連科目との連携を図り、実際に活用できるようにする。」

「電子情報技術」の目標は、「電子情報技術に関する知識と技術を習得させ、実際に活用する能力と態度を育てる。」となっており、「(3) コンピュータ制御」の「ウ 入出力と周辺回路」で、インタフェース回路における増幅、直流電圧への変換、交流電圧への変換などの入出力について理解させ、実際に活用できるようにする。また、パラレル信号用インタフェース、シリアル信号用インタフェースなどの周辺回路について理解させる。AD変換回路、DA変換回路についても触れる。」とされている。

具体的には、「電子情報技術」には、実教出版の情報ⅠのAD変換の説明と同様の解説の後、デジタル信号を入力としてアナログ信号を出力するDA変換器の説明があり、具体的な例として、4ビットラダー型DA変換器が記載されている。また、「電子技術」には、「3 節アナログ-デジタル変換器」に、1. DA変換器（1. はしご形DA変換器、2. 抵抗分圧形DA変換器）、2. AD変換器（1. AD変換の原理、2. 二重積分形AD変換器、3. 逐次比較形AD変換器、4. 並列比較形AD変換器）の記載がある。

3. 教材としてのAD/DA変換ツールの開発

ここまで述べてきたように、AD/DA変換については、Fig.1に示すように、標準化・量子化・符号化でデジタル化に関する知識とその応用分野の他、いくつかの基礎的でやや具体的なDA変換の方法にとどまっている。そこで、我々は、AD/DA変換を、それぞれ簡単なプログラミングを行うことで実現でき、その様子を確認できる端子を備えたツールを開発し、比較的低い周波数の信号のAD/DA変換が可能であることを確認した。

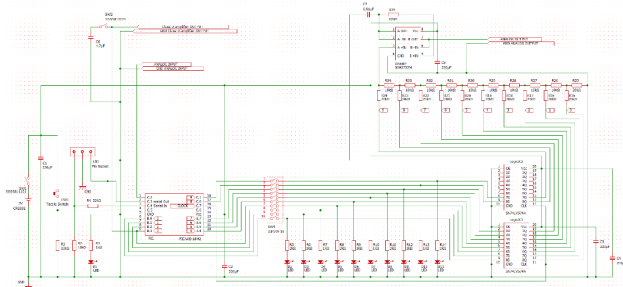


Fig.3 本研究で開発した教材の回路図、アナログ信号のサンプリングによるデジタル化や、PWM、PDMによるAD/DA変換にも対応している。

AD/DA変換は基本的には、Fig.2に示すように、かつての一種のON/OFF制御、離散値制御と捉えることが可能であるが、リレーやトランジスタ等の高速化、およびバンドギャップを用いた電子の流れの制御の改善がなされてきている。この概念図のPDMについては、概念上パルスの幅を一定にするよう、十数回以上、様々な指示※を行ったが、その時点での説明によれば、ピクセル単位で制御して図を生成しているため、現状の仕組みでは、極めて困難との説明とともに出力されたものである。

これらの内容を比較的容易に実現できるようにするため、Fig.3に示すように、ビジュアルプログラミングでプログラミング可能なマイコンPICAXEを用いて、10ビットパラレル出力を行い、LEDによる2進数表示の後、SN74LV574Aを用いて、クロック信号で同期化処理を行い、R-2Rラダー型DA変換を行う仕様とした。R-2Rラダー型DA変換は、工業科の「電子技術」や「電子情報技術」で扱う内容となっているが、非常に簡単な抵抗のみの回路であるので、中学校のオームの法則程度の知識で十分理解できるものである。開発した回路では、R-2Rラダー型DA変換によってアナログ信号とした後、レールtoレールのフルスイングオペアンプにより、ボルテージフォロワや典型的なローパス・フィルタを設定しているが、R-2Rラダー型DA変換のアナログ出力を整えているに過ぎないので、教材として、R-2Rラダー型DA変換後のアナログ信号をそのまま測定してもよい。

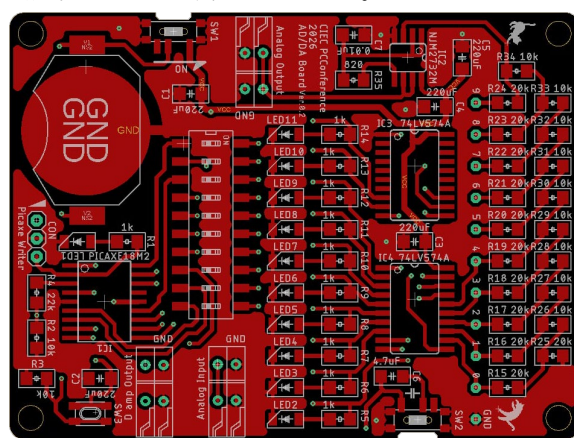


Fig.4 本研究で開発した教材の基板デザイン

この回路図をFig.4に示すように、表面実装部品で構成する基板（60mm×70mm程度）としてデザインした。机の大きさやどのようなデザインの教室等であっても、授業等で展開できるように、ボタン電池のCR2032で動作するポータブルな教材として設計した。

4. 開発した教材による変換

4.1 アナログ入力とAD/DA変換

今回、開発した教材に100Hz程度のアナログ正弦波をPICAXEのC.2端子より入力し、デジタル化した結果をR-2Rラダー型DA変換を行った様子をFig.5に示す。

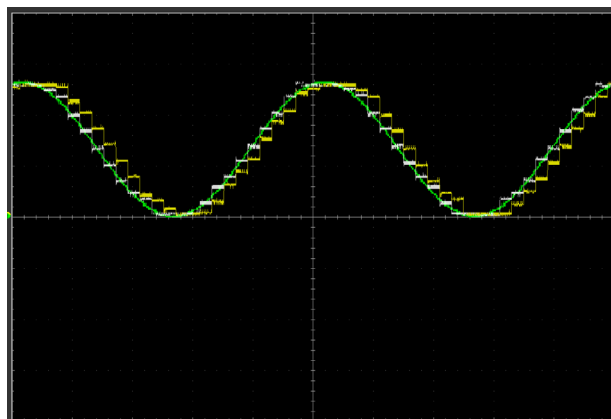


Fig.5 本研究で開発した教材による正弦波の変換とラダー型DA変換器によるアナログ化

4.2 100Hz 正弦波のアナログ入力と PDM 変換

前述と同様の 100Hz の正弦波をアナログ入力し、PDM 変換を行い、PDM 信号をそのまま出力した様子を Fig.6 に示す。

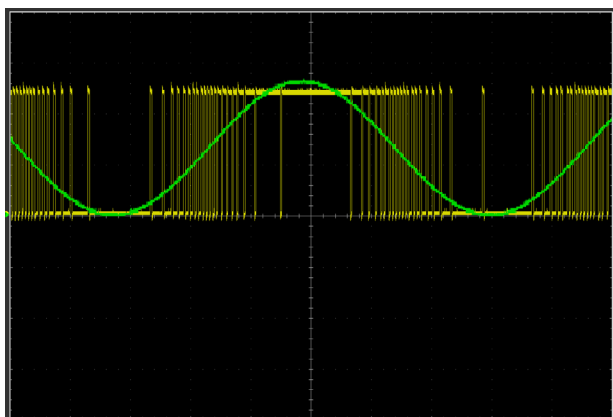


Fig.6 本研究で開発した教材による正弦波の PDM 変換

5. 考察

本教材では、ワンチップの高性能な DAC (D/A コンバータ) を採用せず、あえて R-2R ラダー型 DA 変換回路を導入した。この回路は抵抗のみで構成されており、中学校で履修する「オームの法則」程度の知識で十分に動作原理を理解でき、D/A コンバータは「ブラックボックス」ではなく、計算可能な物理現象の組み合わせとして捉えることが可能となる。前述した LED による 2 進数表示や、オシロスコープを用いた実際の波形観察を組み合わせることで、従来は教科書の「概念図」としてしか学べなかったデジタル・アナログ変換のプロセスを、現実の電圧変化として直感的に理解できるようになる。

また、既存の教育課程においては、例えば、多くの教科書において ON/OFF 制御は「風呂の湯沸かし」や「エアコンの温度設定」といった限定的な事例でのみ扱われる傾向がある。本稿が意図するのは、ON/OFF 制御によるハンチング現象 (チャタリング) の弊害を防ぐためのヒステリシス制御といった基礎を単に教え込むことではない。現在の学校教育では、理科 (物理)、技術分野 (技術・家庭) や共通教科「情報」がそれぞれ別のカリキュラムとして分断されている点が本質的な課題である。

一例として、情報に関する内容では「CPU には数百億個以上のトランジスタが集積されている」といった説明がされる。しかし重要なのは、集積された個数そのものよりも、トランジスタが半導体の結晶構造におけるバンドギャップを応用したデバイスであるという動作原理の理解である。電子が量子力学的に取り得ないエネルギー準位が存在するという事実は物理学 (化学) の領域であり、この性質を電子の流れ (電流) の制御や調整に応用したものがトランジスタであるという文脈は、現在の情報教育のハードウェアを扱う領域であってもほとんど言及されていない。当然、信号増幅のためのアンプにも利用できるという言及はなく、A 級アンプを自作するのは、趣味の領域にとどまるラジオ少年で十分ということで、中学校の技術で学べばよいということなのかもしれない。ただ、A 級、AB 級アンプについての知識は、トランジスタや真空

管を ON/OFF ではなく、増幅するための素子と捉えている。ただ、最近普及しているハイレゾ対応アンプは、すべて D 級アンプであると言っても過言ではない。

トランジスタの本質的な仕組みへの理解は極めて重要であるにもかかわらず、学校教育現場では「トランジスタはスイッチの役割を果たすため ON/OFF が切り替えられ、それを組み合わせることで 0 と 1 を表現し、AND 回路や OR 回路などの論理ゲートを構成できる」という説明にとどまっている。また、電流の ON/OFF 制御からインバータ (否定) 回路を導くような文脈での説明や、論理演算から論理数学へと発展させる展開もほとんど見られない。その結果、半導体物理という微視的な世界が、いかにして現代の高性能なコンピューティング技術へと繋がっているのか、その技術的連関に対する生徒の想像力を喚起することが極めて困難な状況にある。このように、非常に幅広い分野が密接に関連し合っている現代のテクノロジーを支えているからこそ、教科横断的なカリキュラムデザインを再考する必要がある。

実際の教育現場において本教材を用いた授業実践を行い、生徒の理解度や興味関心の変容について定量的・定性的な評価を行うことは今後の重要な課題である。しかし、一部の共通教科「情報」の教科書において PDM を示す図が採用され、AD/DA 変換の仕組みへの言及が始まっている現状を踏まえると、本教材の活用を通じて、ブラックボックス化された半導体チップの内部やハードウェアそのものへの関心を誘発することは、中長期的な視点においても極めて有意義であろう。

6. おわりに

本研究では、高等学校の情報科および専門教科における情報のデジタル化に関する教育の現状と課題を整理した上で、アナログ信号とデジタルデータの変換プロセスを体験的に学習できる AD/DA 変換ツールを開発し、その動作等を確認した。

現在の情報教育や人材育成においては、ソフトウェアやツールの利活用 (ユーザーとしてのスキル) に焦点が当てられる傾向がある。しかし、ハードウェアやソフトウェアの根幹となるコンピュータサイエンス (CS) やデータサイエンス (DS) の開発能力、さらにはその前提となる数学や物理学の基礎的な理解が希薄なままでは、中長期的な我が国の技術競争力の低下を招く懸念がある。

現代の高度な情報社会は、半導体技術やコンピュータの高速処理、そしてアルゴリズムを支える数学的理論など、最先端技術を根底で支える分厚い基礎技術のレイヤーの上に成り立っている。本研究で開発したような、基礎的な変換原理をブラックボックス化せずにハードウェアレベルで可視化・体験できる教材を活用することは、表面的なツールの理解に留まらず、本質的な人材の育成に寄与すると考えられる。

参考文献

- (1) 高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示), 文部科学省, 2018.
- (2) アナログ・デバイゼス社, 「アナログ/デジタル変換ハンドブック」, 丸善出版, 2004.
- (3) Behzad Razavi, 「Analysis and Design of Data Converters」, Cambridge University Press, 2025.