

論文

科学技術教育におけるUSBインターフェースを活用した 計測・制御教材の開発

The Development of Teaching Materials for Measurement and Control Using USB Interface
in Science and Technology Education

道法 浩孝(高知大学教育学部)

Hiroataka DOHO

Faculty of Education, Kochi University

ABSTRACT

Universal Serial Bus(USB) is a high speed communication standard aimed to integrate the various peripheral interfaces which are connected to a personal computer. The USB has a more improved function than conventional interfaces. In order to deepen and enrich the design and production learning in Technology Education and scientific inquiry learning in Science Education, we developed teaching materials for measurement and control using the USB which is standard interface of personal computers moving on Windows in this study. We evaluated its performance as a teaching material and examined a case applying it to a lesson.

Input-output transmissions of analog and digital signals between personal computers and peripheral instruments using a microcontroller with a built-in USB communication function were performed. We confirmed that this application makes it possible to measure mass data of voltage-current characteristics of electronic circuit elements (e.g. resistors and transistors) and voltage-time characteristics of optional voltage in a short second and accomplish the function as teaching material. Furthermore, we examined the learning process in measurement and control learning, practical and experiential learning and inquiry learning through problem solving and have suggested the possibility of applying them as teaching materials.

Key words : Universal Serial Bus, Measurement and Control, PIC, Electronic Circuit Device, Science and Technology Education

1. はじめに

エレクトロニクス技術の飛躍的な発展, それに伴う情報通信技術の革新は, 1人1台およびそれ以上の割合でのパーソナルコンピュータの普及, 自動車, 携帯電話, 各種の情報家電等へのマイクロコンピュータの組み込みによる製品の高性能化・多機能化を実現した。これらの製品において, コンピュータは外部から入力された情報(計測した情報)を記憶されたプログラムを用いて処理(演算)し, その結果を出力したり対象物を制御することによってその機能を果たしており,

人間による手計算や従来の機器では実現不可能な膨大で複雑な情報処理および高速かつ高精度な制御等を可能にした。

学校教育においても社会の変化に対応すべくコンピュータ等の情報機器の活用および情報・コンピュータに関する学習が推進されている。なかでも中学校技術・家庭科技術分野(以下技術科教育と略記), 理科教育および情報教育において上記のコンピュータの情報処理機能, 計測・制御機能を活用すれば, 従来の学習環境および生徒の適時性等を考慮すると実現不可能で

あった詳細かつ高精度で定量的な計測実験やそれに基づく設計・シミュレーション学習および実地によるアプローチが極めて困難だった事象・現象の観察等が容易に実現可能になり生徒の思考力・問題解決能力の高揚，知識・理解の深化等多大な教育効果が期待できる。

しかし，現在学校教育現場において上記のような視点でコンピュータを活用した実践事例はあまり見られない。技術科教育においてプログラムと計測・制御が生徒の興味・関心に応じて履修させる発展的な内容（選択履修項目）として取り上げられている¹⁾が，これまで報告されている研究事例は，小型マイコンを用いた教材や簡易なインターフェースキット等を活用した実践事例^{2),3)}がほとんどである。現在パソコンに標準装備されているインターフェースはUSBインターフェースであり，これを通してプリンタ等各種の周辺機器との通信が行われているが，これを活用した計測・制御を扱った事例はほとんど見られない。この原因には，USB機器の製作においては，従来のインターフェース機器に比べハードウェアとアプリケーションの他にプロトコル，デバイスドライバ等の製作が必要であり，それらが壁となっていることが考えられる。

プログラムと計測・制御が次期学習指導要領では必修になる⁴⁾こと，現行技術科教育の内容「情報とコンピュータ」の必修項目および学校教育現場での一般的な情報教育においては，パーソナルコンピュータを対象とした情報教育の展開を原則としている⁵⁾ことから学習内容の一貫性，系統性を考慮すると，パーソナルコンピュータをホストコントローラとし，USBインターフェースを用いた計測・制御を扱うことが適切であると考える。

以上の観点から本研究では，科学技術の進展に対応した学習指導法の構築および科学技術教育の深化・充実をめざして，USB通信機能を内蔵した小型マイクロコントローラ（PIC）を利用して，USBインターフェースを活用したパソコン計測・制御教材の開発を行った。そして，その性能評価を行うとともに技術科教育および理科教育における本計測・制御教材を活用した学習展開例を提示し，授業への適用可能性を検討した。

2. 開発したUSB計測・制御教材の概要

USBは，パソコンに接続されている各種の周辺インターフェースを統合することを目的とした高速シリアル通信規格であり，マウス，プリンタ，スキャナ，補助記憶装置等ほとんどの周辺機器のインターフェースとして使用可能でありハブを設けることにより最大127台までの周辺機器を接続することができる。また，プラグ&プレイをサポートしており，パソコンを起動し

たまの状態で周辺機器の着脱を行うことができる。このように，USBは，従来のインターフェースにはない機能を備えており，現在Windowsパソコンの標準インターフェースとなっている。

本研究で開発した計測・制御教材は，USBインターフェースを活用してパソコンと外部との間でアナログ信号およびデジタル信号の入出力を行うものである。開発した教材のハードウェア部は，マイクロチップ社製のマイクロコントローラPIC18F2550⁶⁾を用いたUSBインターフェース部と，グラウンドの異なる電圧を高精度で入力するための差動増幅器および抵抗，ダイオード，トランジスタ等の電圧・電流特性を計測するための制御回路から構成されておりパソコンを含めた本教材のブロックダイアグラムは図1に掲げる通りである。

開発したハードウェアを動作させるためには，マイクロコントローラ側へのUSBプロトコルファームウェア，パーソナルコンピュータ側へのデバイスドライバの実装およびマイクロコントローラとパーソナルコンピュータ双方についてのアプリケーションソフトウェアの開発が必要である。本教材開発においては，USBプロトコルおよびデバイスドライバの実装にマイクロチップ社から無償で提供されているUSBフレームワークを使用した。また，アプリケーション開発に使用した言語は，PIC側がC言語（MPLAB C18），パソコン側がBasic言語（Visual Basic2005）である⁷⁾。開発にあたっては，PIC側ソフトウェアで基本的な機能を組み込み，パソコン側のソフトウェアで汎用性やユーザーインターフェースを考慮したソフトウェア開発を行った。

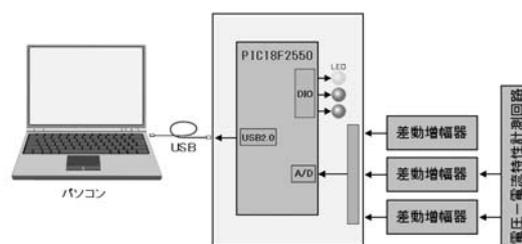


図1 開発した計測・制御教材のブロックダイアグラム

2.1 計測・制御教材のハードウェア部

マイクロコントローラPIC18F2550を用いたUSBインターフェース部の回路図を，図2に掲げる。PIC18F2550は，USB2.0対応モジュールを内蔵した8ビットワンチップマイクロコントローラであり，これに標準USBプロトコル規格を満足するファームウェアであるUSBフレームワークを活用することにより，パソコンとのUSB

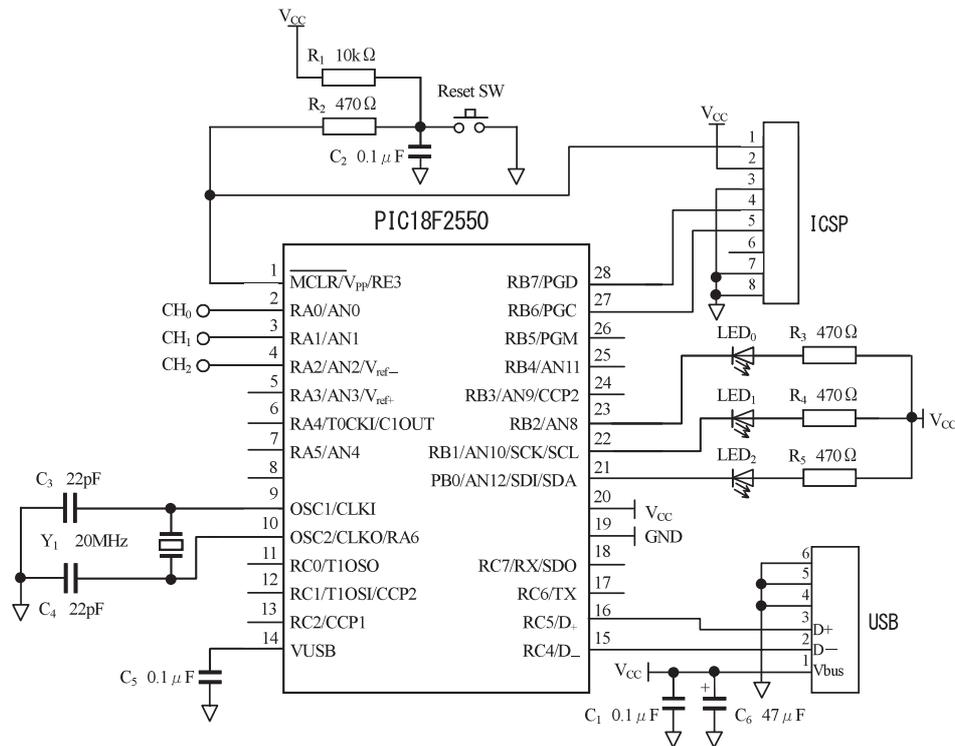


図2 USBインターフェース部の回路構成

通信が可能になる⁹⁾。PIC18F2550の主なハードウェア仕様は、次の通りである。CPUのクロック周波数は最大48MHz、メモリ容量はプログラムメモリが32KB、データメモリが2KBである。入出力ポートは、A、B、C3種類あり、ソフトウェアによる設定でアナログ入力ポート、デジタル入出力ポート等として使用できるようになっている。アナログ入力部のADコンバータの分解能は、10ビットである⁹⁾。

開発した教材は、3種類のポートのうちのポートAの3ビットをアナログ入力として活用し、電圧の計測を行った。また、ポートBの3ビットをデジタル出力ポートとして活用し、それにLEDを接続して点滅制御および計測時のインジケータとして活用できるようにした。PICの電源は、バスパワー方式としUSBインターフェースを通してパソコンから供給している。また、PICへのプログラムの書き込みはICSP方式とし、モジュージャックを通してPICを基板に実装したままの状態でのプログラミングができるようになっている。

自然界に存在するアナログ量をパソコンに入力するためには、各物理量をセンサで電圧に変換する必要がある。また、計測精度を高めるにはそのインターフェース部分において、高い入力インピーダンスを維持することが要求される。さらに、複数のデータを同時に入力する場合、その基準となるグラウンドが異なる場合

がある。このような課題に対し、本教材ではアナログ信号の入力部分にインストゥルメンテーションアンプ（高入力インピーダンス差動増幅器）を採用した。図3にその回路図を掲げる。回路は、差動増幅回路の入力部分に電圧フォロワ回路を接続したものであり、3つのオペアンプと利得調整のための高精度抵抗および入力保護抵抗で構成されている。回路の電圧利得は切り替えスイッチによって1倍と0.5倍に設定可能であり、PIC側の0～5Vの入力可能電圧に対し0～10Vの範囲で電圧の計測ができるようになっている。回路に用いたオペア

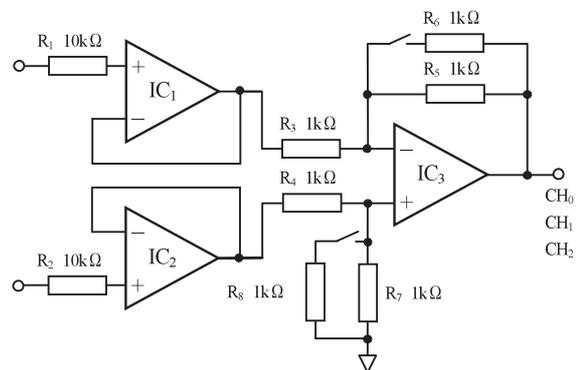


図3 アナログ信号の入力部の回路構成

ンプは、4回路入りフルスイング入出力のCMOSオペアンプLMC6464である。このオペアンプは単電源での動作が可能であり、電源電圧の定格は3.0 V+ 15.5である¹⁰⁾。本教材では、ACアダプタに3端子レギュレータを通して12Vの電源電圧を加えて動作させており、これにより、0~12Vの電圧の範囲で入力が可能になっている。

本教材は、独立した差動電圧を3チャンネル計測できる構成になっているが、そのうちの2チャンネルからの入力信号を同時にサンプリングし2次元表示すれば、抵抗、トランジスタ等の電圧 - 電流特性の計測も可能になる。そこで図4に掲げるような電圧 - 電流特性を計測するための制御回路を実装し、スイッチによる切り替えて機能を付加した。本回路は、トランジスタのコレクタ出力特性の計測を主目的に構成したものであるが、トランジスタのコレクタとエミッタ接続部分に抵抗、ダイオード等の端子を接続すれば、これらの2端子素子の電圧 - 電流特性も計測できるようになっている。電圧 - 電流特性の計測は、電源に並列に接続されている可変抵抗器を手動で滑らか(0.03 rad/s程度)に回転させて素子に加える電圧を変化させ、その時の電圧と電流をサンプリングして行う。ここで、素子に流れる電流は精度0.5%の金属皮膜固定抵抗器に流れる電流を電圧に変換して計測する。また、トランジスタのコレクタ特性計測においては、一般的にコレクタ電圧を変化させると、入力特性が変化しベース電流も変動する。本回路では電界効果トランジスタ(2SK30)を用いた定電流回路を付加して一定に保つようにした。ベース電流を100 μAに設定したときの電流変動は±0.0025%の精度であった。このベース電流値もコレクタ電流と同様に、0.5%の金属皮膜固定抵抗器を通して電圧に変換して計測を行っており、そのモニタリングにはデジタルマルチメータを使用した(本研究ではアジレント社製34410A)。

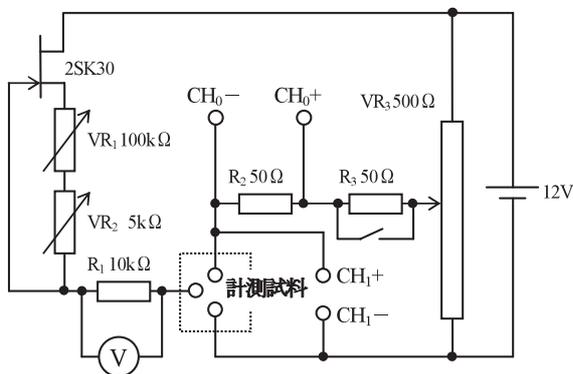


図4 電圧 - 電流特性計測回路の構成

2.2 計測・制御教材のソフトウェア部

USBフレームワークは、USB規格の第9章に準拠するプロトコル規格を満足するファームウェアであり、マイクロチップ社がUSB2.0対応PIC用に無償で提供している。本教材においては、このUSBフレームワークのCDCクラスを使用してUSBプロトコルの実装を行った。CDCクラスは、USBをCOMポートに変換する機能を持ったRS232Cエミュレータであり、これを組み込むことによって、PIC側もパソコン側も従来のRS232C通信での接続と同様の感覚でUSB通信を行うことが可能になる¹¹⁾。

PIC側のソフトウェア開発は、マイクロチップ社製MPLAB C18コンパイラ Student Editionを用いて行った¹²⁾。PIC側ソフトウェアのフローチャートを図5に掲げる。プログラムは、While(1)文による無限ループのなかで実行される。まずUSBの接続状態をチェックし、接続状態であればパソコンからのイベントをポーリングしてデータ受信の有無をチェックする。接続状態でなければループの最初に戻り接続チェックを繰り返す。次に受信データがあればそのデータの値に応じた処理に分岐する。図に示すように、LEDの点滅制御、電圧 - 電流特性の計測、各チャンネル単独での計測または3チャンネル同時計測を行う8つの機能に対応するプログラムを開発している。各処理が終了すると、再度ループの最初に戻り接続チェックを行う流れになっている。

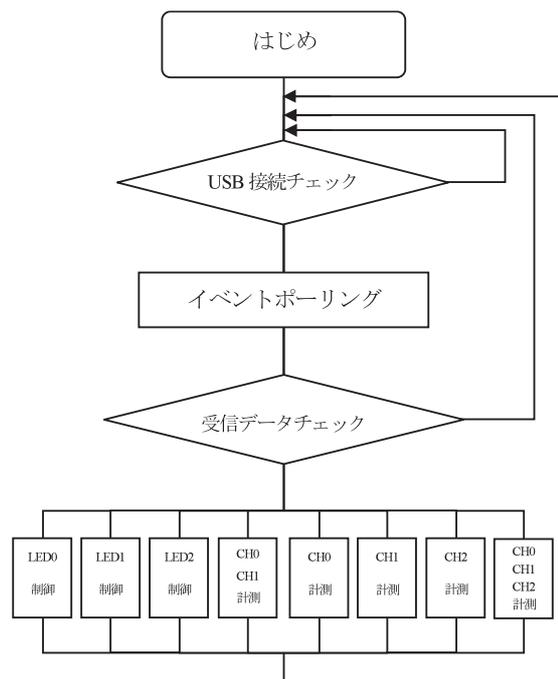


図5 PIC側ソフトウェアのフローチャート

パーソナルコンピュータ側のソフトウェア開発は、マイクロソフト社製Visual Basic2005 Student Editionを用いて行った^{13),14)}。ソフトウェアは、Windows APIを使ってCOMポートの通信プログラムを作成し、PICに組み込んだ8つの処理をイベントドリブン方式で選択・起動させ、3つのチャンネルに入力される電圧、トランジスタ、抵抗器等の電圧 - 電流特性の計測およびLEDの点滅制御を行うものである。

表1は、パソコン側で開発したソフトウェアの機能である。電圧 - 電流特性の他に各チャンネルに入力される電圧を単独および複数チャンネル同時に計測できるようになっている。

開発した計測ソフトは、選択したチャンネルから入力される信号を一定の周期でサンプリングし、ディスプレイ画面上にその値を表示すると同時にグラフ表示するものであり、表示方法を選択することにより電圧 - 電流特性および電圧 - 時間特性を表示できるようになっている。計測においては、サンプリング周期、サンプリング時間（サンプリング回数）を任意に設定することができる。また、サンプリングしたデータを演算処理して画面表示、グラフ表示する機能も備えている。

表1 開発したパソコン側ソフトウェアの機能

機能名	機能内容
USB接続	COMポートをオープンし、結果を表示
LED制御	3個のLEDの点滅制御
電圧 - 電流特性計測	電子回路素子の電圧 - 電流特性の計測
1ch計測	各チャンネルに入力された電圧の計測
2ch同時計測	任意の2チャンネルに入力された電圧の同時計測
3ch同時計測	3つのチャンネルに入力された電圧の同時計測

3. 開発した計測・制御教材による電圧・電流の計測

本章では、開発した計測・制御教材を用いて電子回路に用いられている基礎的な回路素子である抵抗器、コンデンサ、トランジスタ等の半導体素子の電気的特性を計測した結果を例示するとともに、その結果を教材化の視点で考察する。

図6に、開発した教材を使用して固定抵抗器の電圧 - 電流特性を計測した時の表示画面例を掲げる。図は、39 Ω 、100 Ω および820 Ω の固定抵抗器の電圧 - 電流特性計測時の表示画面である。それぞれの素子に対し電圧を0~10Vの範囲で変化させ、その時の電圧と電流の組を1000組計測し、画面のグラフ上にプロットしている。計測時のサンプリング周期は50msec、要する時間は50secであり、短時間で各種の電子回路素子の特性を

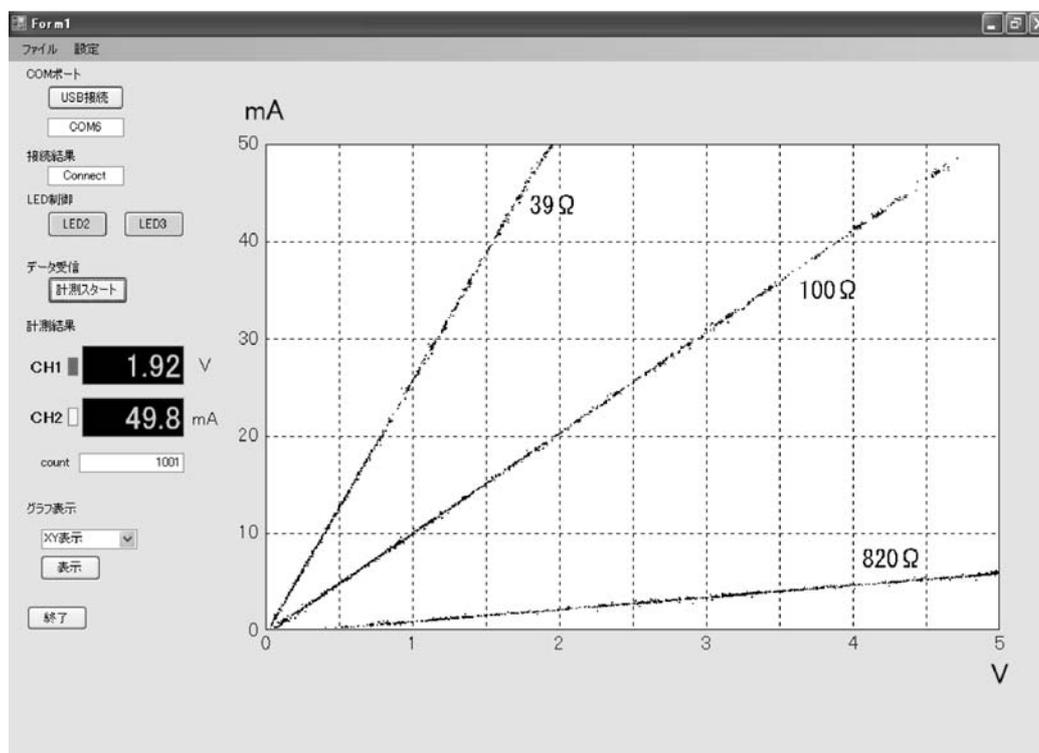


図6 固定抵抗器の電圧 - 電流特性計測時の表示画面

容易に計測したり、細かなパラメータの変化に対する特性の変化を計測・考察することが可能である。また、図に示すように画面上にはリアルタイムで計測結果がグラフ表示されるとともに、電圧および電流の値も表示されるようになっている。

定格値の異なる固定抵抗器の電圧 - 電流特性を短時間で多数計測することにより、抵抗値と電圧 - 電流特性との関係およびオームの法則に関する学習を実測データに基づいて展開することが可能になる。

図7は、3種類のダイオードの電圧 - 電流特性を計測した結果である。特性の非線形性およびダイオードの種類によるその違いを容易に把握することができる。また、実際の回路に組み込んだ時の動作電圧・動作電流を容易に把握でき、定性的な回路設計、定量的な回路設計双方の展開が可能になる。

図8は、トランジスタ2SC2120のコレクタ出力特性の計測結果である。パラメータであるベース電流の変動幅は $50\mu\text{A}$ である。計測結果から、ベース電流の変動に比例してコレクタ電流が変化していることおよびその割合（電流増幅率）を考察することができ、トランジスタの増幅作用に関する学習を効果的に展開することが可能になる。また、計測した出力特性曲線上に直流・交流の負荷直線を作図することを通して、回路に使用するトランジスタの特性に応じた回路設計学習を展開することが可能になる。

図9は、電圧 - 時間特性計測機能を活用して3種類のコンデンサの放電特性を計測した結果である。計測結果からコンデンサの静電容量と電気的特性の違いを容易に把握可能であり、回路におけるコンデンサのはたらきや使用法についての学習において、学習者の理解促進に有効に活用することが可能である。また、放電特性曲線から静電容量を計算することができ、ソフトウェアを工夫することにより、静電容量計に応用することも可能である。

4. 開発した計測・制御教材の授業への適用

本章では、開発した計測・制御教材の科学技術教育への適用事例案を、技術科教育および中学校理科教育について述べる。

4.1 技術科教育における適用事例案

技術科教育では、エネルギー変換に関する技術を利用した機器の設計・製作学習において、電気回路が教材として扱われている¹⁵⁾。ここでは、図10に示すLEDの点灯回路の設計・製作学習に本研究で開発した計測・制御教材を適用し、回路設計学習を展開する学習事例を述べる。

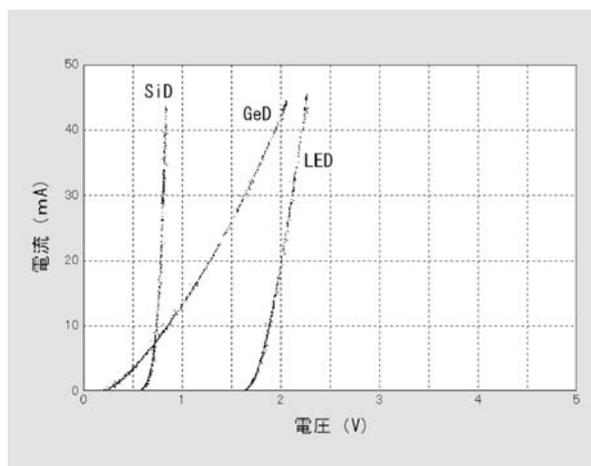


図7 各種ダイオードの電圧 - 電流特性計測結果

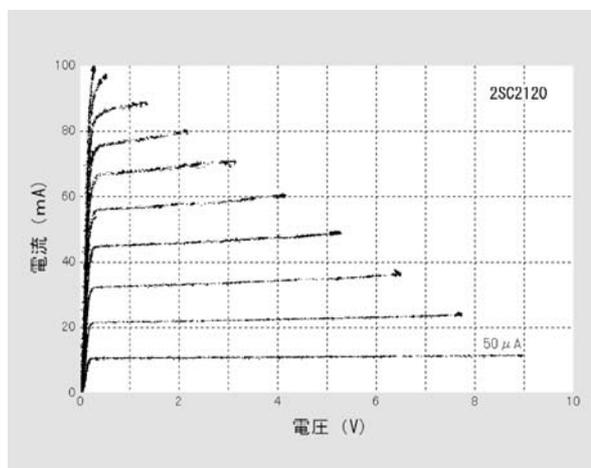


図8 トランジスタのコレクタ出力特性計測結果

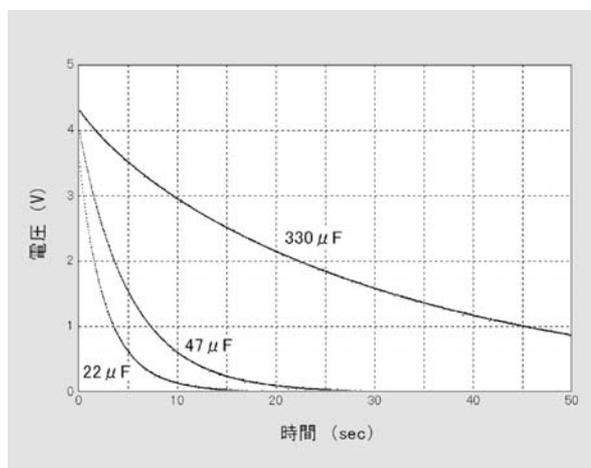


図9 容量の異なるコンデンサの放電特性計測結果

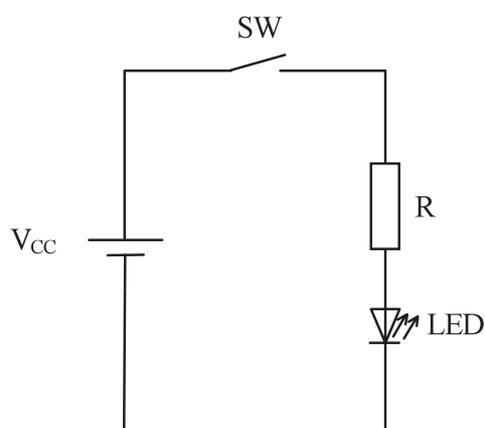


図10 LEDの点灯制御回路図

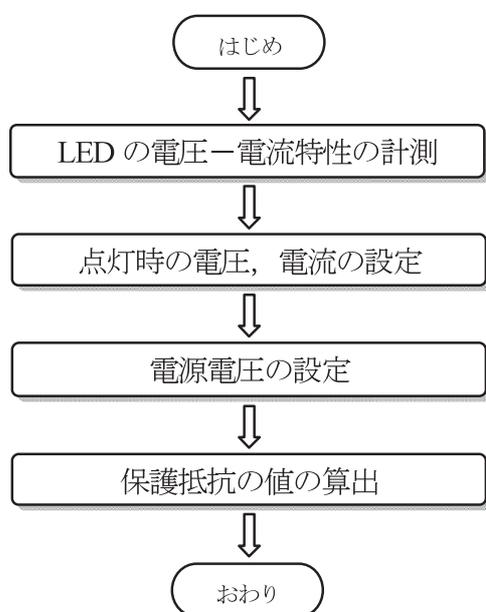


図11 技術科教育の授業における学習展開案

学習展開を図11に掲げる。学習は、まず学習者が回路に使用するLEDの電圧 - 電流特性を開発した計測・制御教材を用いて計測する。ここで計測と同時に電圧 - 電流特性曲線上のLEDが点灯する領域も把握させておく。次に計測結果から、LED点灯時の電圧および電流（動作点）を決定させる。続いて、電源電圧 V_{cc} を決定させ、オームの法則を適用して保護抵抗の値を計算し、適切な保護抵抗 R の値を決定する。以上のように計算によって抵抗値を求める方法の他に、決定した電源電圧と動作点から計測した特性曲線上に負荷直線を引き、その傾きから保護抵抗 R の値を決定することもできる。

従来技術科教育の電気回路の設計・製作学習においては、学習者の適時性や興味・関心、多大の時間を要すること等を考慮して回路の設計は暗箱として扱われ、回路構成および部品定数は画一的に定められたものを使用していた。本教材を適用し、パソコンを援用した電気回路の設計学習を展開すれば学習者の興味・関心を高め、理解・納得を伴った設計・製作学習すなわち科学的なものづくり学習が実現可能になると考えられる。

4.2 理科教育における適用事例

平成20年3月に公示された新学習指導要領によると、中学校理科教育では、学習内容『(3) 電流とその利用 ア電流（イ）電流・電圧と抵抗』において、合成抵抗についての学習が扱われている¹⁶⁾。ここでは、合成抵抗の性質を実験結果に基づいて問題解決的・探究的に学習する過程において本教材を適用する事例について述べる。

学習展開を図12に掲げる。学習は、まず定格値の等しい複数の固定抵抗器を直列および並列に接続し、本計測・制御教材を用いてその電圧 - 電流特性を計測する。図13に100 の固定抵抗器を用いた計測結果を示す。この図は2個の固定抵抗器を用いた例であるが、3個、4個と固定抵抗器を増やした場合、または抵抗器の定格値を変更した場合について実験する。そして、この結果を分析・考察し法則性を見出し、合成抵抗の性質を帰納的に発見する。

従来このような学習を進めるには、多大な時間を要するため、実験を省略して学習が展開されることがほとんどであった。本教材を適用すれば、多大なデータ

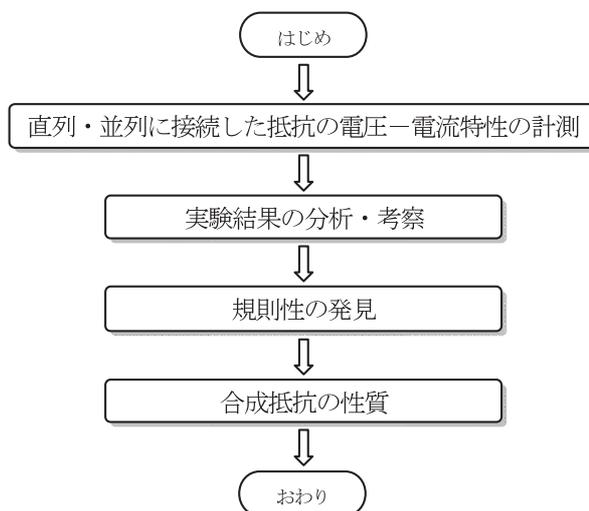


図12 理科教育の授業における学習展開案

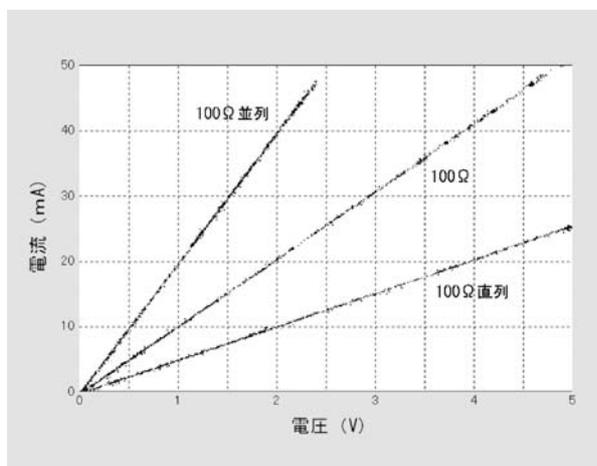


図13 直列・並列に接続した抵抗の電圧 - 電流特性計測結果

の収集が短時間で容易に可能になり、実験およびそれに基づく思考活動を通じた探究活動的な学習展開が可能になり、学習者の科学的な見方や考え方の育成に効果が期待される。また、理科教育においてパソコンを用いた計測実験を取り上げることは、学習者に科学の最先端における研究手法を体験させることになる。

5. おわりに

学校教育現場におけるパーソナルコンピュータを中心とする情報通信環境の整備は、インターネットに代表される情報検索を通じた調べ学習、高機能なソフトウェアを活用した資料作成、プレゼンテーション等の学習形態を浸透させた。同時に、それらを通して高度情報通信社会を生きぬくために必要な情報リテラシの育成が図られている。一方、子どもたちのリアルなものに触れる機会、経験に基づく学習の不足が進行する現状において、「ものづくり教育」、「科学技術教育」の重要性およびその充実が指摘されている。

本研究は、この両者を相互に融合し科学技術教育における新たな学習形態の1試案の提案を目的として、USBインターフェースを活用した計測・制御を取り上げ、それを用いた実測データに基づく設計・製作学習、科学的探究学習について考察した。開発した教材は、3チャンネルの高入力インピーダンス電圧入力端子を備えており、パソコンを通して基礎的な電子回路素子の電圧 - 電流特性の計測、各端子に入力された信号の時

系列変化等の計測を精細に行うことが可能であり、教材としての機能を示すことができた。

なお、現在本教材を用いて計測できる物理量は電圧と電流であるが、目的に応じたセンサを取り付けることにより、温度、圧力、明るさなど各種の物理量の計測が容易に可能である。また、ソフトウェアの工夫によりサンプリングレート的高速化も可能であり、交流信号計測への拡張性も備えている。さらに、本論文では中学校教育での適用事例を述べたが、本教材は、高等学校、大学における科学技術教育においても適用可能と考えられる。

以上の観点から、本教材の機能・性能の充実、多様な教育場面での適用および授業実践を通しての教材の性能評価を今後の課題とし、教材開発研究を進めたい。

参考文献

- 1) 文部省：中学校学習指導要領解説技術・家庭科編，pp. 42 - 44 (1999)
- 2) 森慎之助：ロボット教材を用いた制御・プログラミング学習の授業実践と作業分析，日本産業技術教育学会誌第47巻3号，pp. 201 - 207 (2005)
- 3) 伊藤陽介他：「プログラムと計測・制御」のためのロボット学習材の開発と実践，日本産業技術教育学会誌第49巻3号，pp. 213 - 221 (2007)
- 4) 文部科学省：中学校学習指導要領解説技術・家庭科編，pp. 41 - 42 (2008)
- 5) 前述1) pp. 34 - 36
- 6) PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet, Microchip Technology Inc (2004)
- 7) 後閑哲也：PICで楽しむUSB機器自作のすすめ，技術評論社，pp. 50 - 56 (2006)
- 8) 前述7) pp. 26 - 30
- 9) 前述6)
- 10) LMC6462/LMC6464：URL <http://www.national.com/Jpn/>
- 11) 前述7) pp. 84 - 85
- 12) 前述7) pp. 102 - 109
- 13) 前述7) pp. 120 - 129
- 14) 林晴比古：明快入門 Visual Basic 2005 ビギナー編，Soft Bank Creative (2007)
- 15) 前述1) pp. 27 - 28
- 16) 前述2) p. 50