

# 自動電子設計ソフトウェアスイートによる教材用プリント基板の開発

片岡 祥\*, 伊藤陽介\*\*

中学校技術・家庭科(技術分野)や高等学校工業科では、電子回路を備える教材を用いた教育活動が行われている。近年、高度な機能を備える無償提供の自動電子設計ソフトウェアスイートが利用でき、パソコンを用いて容易に電子回路や配線パターン等の基板設計ができるようになってきている。本論文では、主に学校教育で利用する電子機器教材を一般的な学校における情報環境において教員がオリジナルの電子回路とプリント基板を開発することを想定し、自動電子設計ソフトウェアスイートを学校教育用教材開発の観点から選定するとともに、これを用いてプリント基板を開発する手順について述べ、具体的に設計した教材の基板加工機による製作例を示す。

[キーワード: 電子機器教材, 自動電子設計, プリント基板, 基板加工機]

## 1. はじめに

現代社会で利用されている様々な電子機器では、内部に電子回路を備え、それらを固定し接続するためのプリント基板が内蔵されている。中学校技術・家庭科(技術分野)(以下、技術科)や高等学校工業科(特に、電子、情報系学科等)では、電子回路を備える教材を用いた教育活動が行われている<sup>[1,2]</sup>。教員が設計した電子回路は、ユニバーサル基板による製作のほか、配線パターンを生基板上に描画または投影した後エッチングし穴あけ加工したプリント基板によって製作できる<sup>[3]</sup>。これらの方法では、1枚の製作でも工具や薬品等が必要となる上、教材として量産することは困難であった。さらに、部品の参照記号や配置、形状等を示す文字や線を基板上にシルク・パターンとして印刷できないため、学習者が容易にプリント基板を製作できなかった。プリント基板を工場で量産する場合、従来プリント・パターンのフィルム等の初期費用がかかり、少量生産は著しく不経済であった。

一方、回路設計、プリント基板設計、信号解析、部品データ管理システム等の自動電子設計(EDA: Electronic Design Automation)ソフトウェアスイートが従来より電子機器の設計で利用されている。近年、高度な機能を備える無償提供のEDAソフトウェアスイートが利用でき、パソコンを用いて容易に電子回路や配線パターン等の基板設計ができるようになってきた<sup>[4]</sup>。

以上に述べた電子回路とプリント基板の開発環境を考慮し、本論文では、主に学校教育で利用する電子機器教材を一般的な学校における情報環境において教員がオリジナルの電子回路とプリント基板を開発することを想定

し、EDAソフトウェアスイートを学校教育用教材開発の観点から選定するとともに、これを用いてプリント基板を開発する手順について述べ、量産する前段階として設計した基板の基板加工機による製作例を示す。

## 2. EDAソフトウェアスイートの選定

本節では、回路設計とプリント基板設計に重点を置き、回路図CAD、基板設計CAD、加工データ・ビューア等が互いに連携して動作する機能を備えるとともに、無償(有償であるが機能制限付きで無償利用できるものを含む。)提供されているEDAソフトウェアスイートを比較検討し、教材開発に適しているものを選定する。インターネットを介して入手可能であり無償提供されているEDAソフトウェアスイートの一部を表1に挙げる<sup>[5]</sup>。

電子回路とプリント基板の設計・試作段階では、回路設計後プリント基板を試作し、その実験結果から回路にフィードバックして修正することやプリント基板を修正することが多い。そのため、回路図と配線パターンやコネクタ等の機構部品との整合性を担保する機能が必要である。この機能を達成するためには、回路図CADと基板設計CADの連携が必要となり、表1で挙げた「KiCad」、「DesignSpark PCB」、「EAGLE Light Edition」は、その要求を満たすが、「CADLUS CircuitとCADLUS X」、「D2CADとK2CAD」は、その連携機能が弱いため除外する。

「EAGLE Light Edition」については、参考文献[3]で解説されているように多くの利用方法に関する情報が提供されている。しかし、無償提供版では基板サイズや層数に関する機能制限が厳しい。「DesignSpark PCB」は、部品販売会社からの提供ソフトウェアスイートであるた

\* 鳴門教育大学 大学院(修士課程) 教科・領域教育専攻 生活・健康系コース(技術・工業・情報)

\*\* 鳴門教育大学 大学院 自然・生活系教育部

め、多くの回路図記号やフットプリント(部品のプリント・パターン)がすでに提供されているという便利な側面はあるが、特定企業からの提供のため今後無償提供が継続される可能性について不明である。「CADLUS X」は、プリント基板の製造において標準的に使われている「ガーバー形式」を出力できないため選定対象から除外する。

「KiCad」は非営利団体の「KiCad Developers Team」によって開発され、GPL(GNU General Public License)かつオープンソースである。2013年には欧州原子核研究機構(CERN)も開発に参加する等、継続的な機能拡張が期待できる。「KiCad」に同梱されている回路図記号やフットプリントの種類は多くないが、エディッタを用いて容易に作成し追加できる。さらに、「KiCad」は英語版以外に日本語版を含む18ヶ国語にローカライズされているため英語を母国語としない利用者にとって操作を覚えやすいという利点もある。以上の点から、本論文では学校教育用教材を開発するためのEDAソフトウェアスイートとして「KiCad」を選定した。

### 3. KiCadの概要

#### 3.1 ソフトウェアスイートの構成

「KiCad」は、プロジェクト管理(KiCad)、回路図CAD(Eeschema)、フットプリント選択(CvPcb)、基板設計CAD(PcbNew)、加工データ表示(GerbView)、基板設計電卓(Pcb calculator)、画像部品変換(Bitmap2Component)か

らなるEDAソフトウェアスイートである。

「KiCad」は、各ソフトウェアで生成されるファイル群をプロジェクトとして管理し、各ソフトウェアを起動する。

「Eeschema」は、階層構造の複数枚の回路図を作成できるとともに、回路の電氣的な接続検査であるERC(Electrical Rule Checking)を備えている。ERCを用いることで、図面上のみでは把握しにくい電氣的な接続を基板設計前に検査できる。また、回路図記号を新規作成したり編集したりでき、多数の回路図記号を一括してライブラリとして管理できる。参照番号の自動割り振りとネットリスト(配線情報)を出力できる。

同じ回路図記号であっても、設計対象によって異なる形状の部品を使用することは多い。そのため「KiCad」では、回路図記号とフットプリントの対応関係を「CvPcb」を使って設定する。

「PcbNew」で設計できる基板の層数(導体)は最大16であり、基板サイズに制限はない。「デザイン・ルール(ネット単位での配線の太さ、クリアランス、ビアの大きさ等)」を配線の追加、修正時にリアルタイムで検査できる機能(DRC)を備えている。部品の自動配置、自動配線機能も利用できるが、簡易的なものである。実用的な自動配線機能は、Javaで動作するFreeRoutingを呼び出して行う<sup>[6]</sup>。このための設計情報データの出力と読み込み機能も備える。ガーバー形式(RS-274X 拡張データ)とドリル・デー

表1 電子回路設計用ソフトウェアスイートの比較

名称	主な機能	動作環境	提供	ソースコード	入手先
KiCad	プロジェクト管理, 回路図CAD, フットプリント選択, 基板設計CAD(DRC, 3D表示), 加工データ出力(ガーバー形式), 加工データ表示, 層数(最大16), 自動配置配線(FreeRouting 呼出機能)	Windows Linux Mac OS X	無償 (GPL)	○	英語版 <a href="http://www.kicad-pcb.org/">http://www.kicad-pcb.org/</a> 日本語版 <a href="http://kicad.jp/">http://kicad.jp/</a>
DesignSpark PCB	プロジェクト管理, 回路図CAD, 基板設計CAD(3D表示), 加工データ出力(ガーバー形式), 層数(無制限), 自動配置配線	Windows	無償	×	<a href="http://www.designspark.com/">http://www.designspark.com/</a>
CADLUS Circuit	回路図CAD, ネットリスト出力	Windows	無償	×	<a href="http://www.p-ban.com/">http://www.p-ban.com/</a>
CADLUS X	基板設計CAD(DRC, 自動ベタ生成), 層数(最大8), ネットリスト取り込み, 加工データ(専用形式)				
D2CAD	回路図CAD, ネットリスト出力	Windows	無償	×	<a href="http://www.yansoft.com/">http://www.yansoft.com/</a>
K2CAD	基板設計CAD(DRC), 層数(最大32), ネットリスト取り込み, 加工データ(ガーバー形式)				
EAGLE Light Edition	プロジェクト管理, 回路図CAD, 基板設計CAD(最大100mm×80mm), 加工データ出力(ガーバー形式), 層数(最大2), 自動配線	Windows Linux Mac OS X	無償 (非商用, 機能制限)	×	<a href="http://www.cadsoftusa.com/">http://www.cadsoftusa.com/</a>

DRC: Design Rule Check (設計条件を検査する機能)

タ(Exellon 形式)からなる加工データを出力できるとともに、HPGL、PostScript、DXF 等による出図機能も備える。三次元の形状情報を持つフットプリントがあれば設計した基板を VRML によって 3D 表示でき、機構部品の干渉等を製作前に確認できる。さらに、単一のプリント基板に複数種類のプリント基板のプリント・パターンを面付できるため基板製造コストを低く抑えることもできる。

「GerbView」は、「PcbNew」で出力した加工データをレイヤ毎に読み込んで重ね合わせ表示でき、加工データを確認できる。「Pcb calculator」は、基板設計に必要な様々な計算支援を行う。「Bitmap2Component」は、画像ファイルから回路図記号やフットプリントに変換するツールである。

「KiCad」では、様々な設計情報を異なるファイルに記録し、プロジェクトファイルで管理する。これらのファイルは、テキスト形式であり、一般的なテキストエディタを用いて内容を確認したり、修正したりできる。英語の操作説明書とチュートリアルは配布元から公開されており、同様の文書の日本語訳も公開されている。

### 3.2 プリント基板設計の手順

図 1 に「KiCad」の各ソフトウェアを用いたプリント基板設計の手順を示す。まず最初に、要求される仕様を満たす回路構成を検討し、回路規模を設定する。「KiCad」を用いてプロジェクトの名称を決定し、プロジェクトファイルを作成する。

その後「Eeschema」を用いて新規に回路図を作成し、回路図記号を配置するとともに、それらを結ぶ回路を構成していく。ここで、回路図記号がない場合は、「回路図記号エディタ」を起動して、回路図記号を新規に作成したり、修正したりする。取り付け穴等の機構部品についても、回路図記号として、回路図内に配置しておく。

「Pcb calculator」を用いて回路定数等を決定する。回路図が完成したら、アノテーション機能によって各回路図記号に参照番号を割り振る。電源供給等の特別な回路図記号の追加した後、ERC を用いて電気的な接続の検査を行う。検査結果が不合格の場合 ERC が合格になるまで回路図を修正する。検査に合格したらネットリストをファイルに出力する。

引き続き「CvPcb」を起動し、各回路図記号とフットプリントを関連付ける。なお、フットプリントが回路図記号に合致しない場合であっても、ピン数が同じでよく似たフットプリントを仮に関連付けておく。

関連付けが完了したら「PcbNew」を起動し、「CvPcb」で更新したネットリストを読み込む。この時点ですべてのフットプリントが重なって表示されるので、メニュー操作により全部品のフットプリントを移動させる。ネットクラスと呼ばれる配線の集合ごとにプリント基板の製

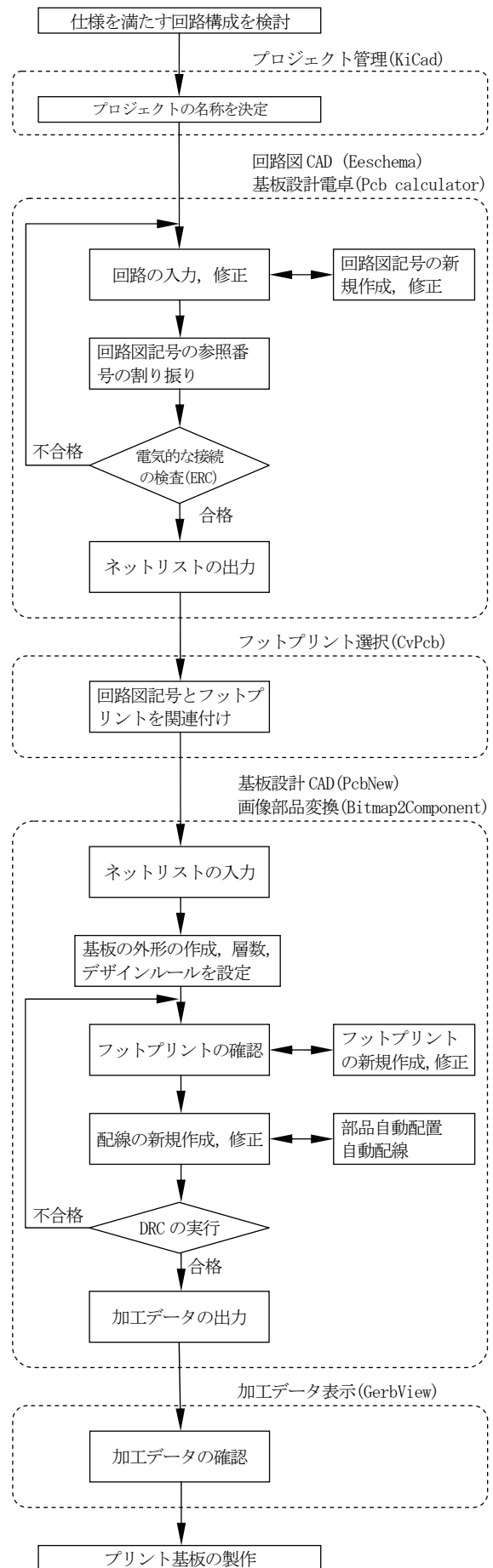


図 1 「KiCad」によるプリント基板設計の手順

作基準に合わせて「デザイン・ルール」を設定する。つぎに、基板の外形を作成する。外形は長方形のみならず多様な形状を作成でき、外形線で囲まれた領域に外形線を作成すると、穴の開いた基板も作成できる。プリント基板の層数は片面基板であっても、両面基板とし表層を「ジャンパ層」として利用する。

コネクタ、スイッチ、取り付け穴等の機構部品を配置し、製作ミスが発生しにくくなるように部品を配置し、かつ、可能な限り配線が短くなるように概略で各部品を手動で配置する。機構部品が含まれる場合、自動部品配置機能を利用しない方がよい。続けて、手動配線と自動配線によって部品間を配線する。配線の新規作成や移動等時には、先に設定しておいた「デザイン・ルール」に基づいて、配線状態がリアルタイムで検査され、ルールに違反する配線はできないようになっている。回路規模が小さい場合、手動配線のみでプリント・パターンを作成できるが、2層以上に配線のある基板や回路規模が大きい場合、手動配線では作業効率が悪い。「KiCad」の自動配置機能は、配線の優先順位指定や再配線、押しのけ配線等の機能がなく、現時点では実用性の低いものである。そこで、Javaで動作するFreeRoutingを呼出し、自動配線を行う。自動配線の後、手動で配線を修正し最適化をはかる。配線が完了したら、未配線の有無と「デザイン・ルール」を満たしているか再度検査する。検査に合格したら加工データをファイルに出力する。

出力された加工データに含まれる外形データ、プリント・パターン、シルク・パターン、ドリル・データを「GerbView」を用いて表示し、設計通りに作成できるか確認する。最後に加工データを用いてプリント基板を製作する。

図1に示したように「KiCad」による電子回路とプリント基板の設計手順は明解であり、各ソフトウェアの操作性にも一貫性がある。一定のトレーニングを受けた教員であれば「KiCad」を用いてオリジナルの電子機器教材を設計できると推測される。

## 4. 教材用プリント基板の設計

### 4.1 教材の仕様

本節では中学校学習指導要領(2008年)技術科の内容「D 情報に関する技術」の「(3)プログラムによる計測・制御」を教育するために開発した教材について述べる<sup>[7]</sup>。本教材は、計測対象として光と接点、制御対象としてスピーカとLEDを取り上げ、順次、分岐、反復からなる情報処理の手順を解釈実行できるマイコンを内蔵する。生活における利活用を想定し、オルゴールを教材化する。例えば、「A材料と加工に関する技術」の内容で製作した箱と組み合わせて、箱を開けるとプログラムによって構成された音階データを再生し、オルゴールを構成する。音階データは、USB通信を介してパソコン等のホスト機から送信され、マイコン内部のフラッシュメモリに記録される。以下、本教材の名称を「PICUSB オルゴール」と呼ぶ。

計測と制御に関わる技術を学習するためにスイッチを押すとLEDの点滅状態を変化させるプログラムを実行したり、スピーカから発生する音を変化させたりするプログラムを実行できるようにする。

マイコンに内蔵するソフトウェアは、ブートローダ、ファームウェア及びユーザプログラムから構成される。学習者はUSB通信を介してユーザプログラムを変更する。ブートローダによってUSB通信を介してファームウェアを更新する。この機能により、ファームウェアの更新は

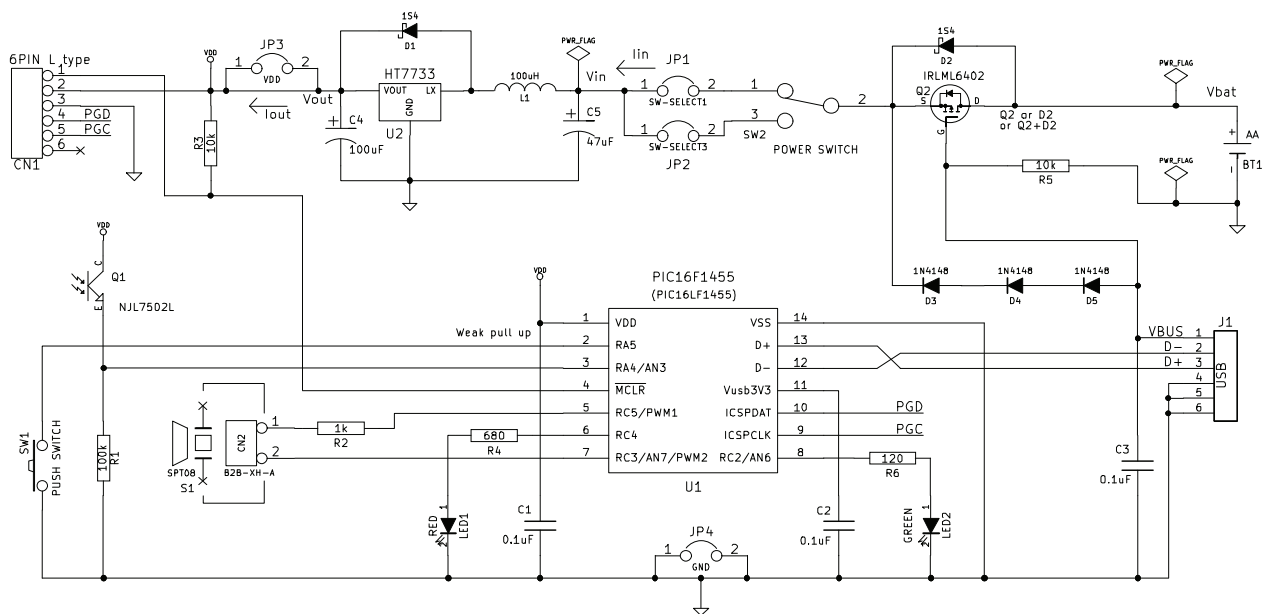


図2 PICUSB オルゴールの回路図

パソコン等のホスト機と USB ケーブルのみで実行でき、特別な書き込み装置を必要としない。ソフトウェアの開発では「プログラマ/デバッガ」を用いて基板にマイコンを実装したままの状態内で蔵メモリにプログラムを書き込み、デバッグする。

電源は乾電池1本で動作する構成とし、USB 接続中は、USB から供給される電源を利用するように電源を切り替え、乾電池の消耗を抑える。

## 4.2 回路設計

要求仕様を満たすとともに技術科における教材用としての経済性も考慮して、PICUSB オルゴールの回路を設計した。図2に「Eschema」で作成した回路図を示す。マイコン(U1)は、本教材の中核となる部品でありハードウェアとソフトウェアの両面から検討し Microchip 製 PIC16F1455 または PIC16LF1455 を選定した<sup>[8]</sup>。PIC16LF1455 は PIC16F1455 の動作電圧 2.3~5.5V と比較してより低電圧の 1.8~3.6V で動作する。U1 は小型かつ取扱いの容易な 14 ピン DIP パッケージの提供があり、自

己書き換え可能なフラッシュメモリ、最高 48MHz 動作、USB2.0 通信、PWM 信号発生、AD 変換、タイマ、基準電圧発生等の各機能を備える。

押しボタンスイッチ(SW1)による接点とフォトトランジスタ(Q1)による照度を計測し、赤と緑の LED(LED1, LED2) と圧電スピーカ(S1)をそれぞれ制御する回路を U1 を中心として構成している。ここで、U1 の入力ポート RA5 に備えられた「Weak pull up」機能を用い SW1 のプルアップ用抵抗を省いている。圧電スピーカは、二つの PWM 信号(PWM1, PWM2)により駆動され音を発する。USB 通信用 B 型コネクタ(J1)と「プログラマ/デバッガ」を接続するための L 型 6 ピンコネクタ(CN1)の 2 つを備える。

電源は定格電圧 1.5V の乾電池 1 本(BT1)とし、USB ケーブルを介してホスト機側から供給される電源(VBUS: 5V)が使用できる間、乾電池からの電源を遮断するようにダイオード D2 と D3 の働きによって供給元を切り替える。D2 による電圧降下は 0.3~0.4V 程度あるため、D2 の代わりにゲート閾値電圧(V<sub>gs(th)</sub>)が 0.9V 以下の P チャネル型 MOS-FET(Q2)によって電圧降下を抑え、乾電池の終止

表 2 PICUSB オルゴールの構成部品一覧

品名	参照記号	規格等	数量	備考
マイコン	U1	Microchip 製 PIC16F1455	1	PIC16LF1455 利用可。14 ピン DIP パッケージ
IC ソケット	-	DIP 型 14 ピン	1	マイコン(U1)用
DC-DC コンバータ	U2	HOLTEK 製 HT7733	1	HT7733A も利用可であるがやや自己消費電力が増加し変換効率が低下する。
フォトトランジスタ	Q1	新日本無線製 NJL7502L	1	
MOS-FET	Q2	International Rectifier 製 P チャネル型 MOS-FET IRLML6402	1	面実装型 SOT-23 パッケージ
LED	LED1	OptoSupply 製赤色 LED OSDR5113A	1	赤色 LED の同等品利用可
	LED2	OptoSupply 製緑色 LED OSNG5113A	1	緑色 LED の同等品利用可
ダイオード	D3, D4, D5	Fairchild 製 1N4148	3	同等品利用可
ショットキーバリアダイオード	D1, D2	PANJIT 製 1S4	2	Q2 を実装する場合、D2 は省略可 PANJIT 製 SD103A 等の同等品利用可
抵抗器	R1	100k $\Omega$ (1/4W)	1	1/6W 利用可
	R2	1k $\Omega$ (1/4W)	1	〃
	R3, R5	10k $\Omega$ (1/4W)	2	〃
	R4	680 $\Omega$ (1/4W)	1	LED1 の輝度に応じて抵抗値を調整する。1/6W 利用可
	R6	120 $\Omega$ (1/4W)	1	LED2 の輝度に応じて抵抗値を調整する。1/6W 利用可
セラミックコンデンサ	C1, C2, C3	0.1 $\mu$ F	3	
電解コンデンサ	C4	100 $\mu$ F	1	等価直列抵抗(ESR)が小さいほどよい。耐圧 16V 以上
	C5	47 $\mu$ F	1	〃
インダクタ	L1	100 $\mu$ H	1	直流抵抗 0.5 $\Omega$ 以下で小さいほどよい。定格電流 0.4A 以上
圧電スピーカ	S1	SPL 製 SPT08 (直径 24mm)	1	周波数に対する発音レベルに不連続性の小さいものがよい。
スイッチ	SW1	基板用押しボタンスイッチ	1	
スイッチ	SW2	3 ピン 1 接点型基板用トグルスイッチ	1	同型スライドスイッチ利用可
コネクタ	J1	基板用 USB コネクタ B 型	1	
コネクタ	CN1	L 型ピンソケット (6 ピン)	1	プログラマ/デバッガ(Microchip 製 Pickit3)との接続用
コネクタ	CN2	日本圧着端子製ベース付ポスト B2B-XH-A	1	圧電スピーカ(S1)との接続用
コネクタ	-	日本圧着端子製ハウジング XHP-2	1	圧電スピーカ(S1)のハーネス用
スペーサ	-	M3 $\times$ 10mm	4	
電池ケース	BT1	COMFORTABLE 製単三電池 $\times$ 1 本用	1	基板取付用ピン 2 本付
電池	-	単三型乾電池 (1.5V)	1	単三型ニッケル水素等の電池(定格電圧 1.2V)利用可
プリント基板	-	片面 1.6mm 厚 95mm $\times$ 75mm	1	

電圧まで有効に利用する。なお、D2 と Q2 の両方を実装してもよい。乾電池またはVBUSから供給された電源電圧は、DC-DCコンバータ(U2)によって3.3Vに昇圧される。U2は入力電圧0.7~6.0Vの範囲で動作するが、3.3Vを超えるとその電圧が出力されるためVBUS(5V)を3つのダイオード(D3, D4, D5)によって電圧降下させ、常に3.3V以下の出力となるようにする<sup>[9,10]</sup>。

電源スイッチ(SW2)のジャンパ(JP1またはJP2)は、スイッチの機構上、オンになる状態のスイッチのレバー位置が一定となるように導通させる。また、動作確認を容易にするためチェック端子JP3とJP4を設けている。図2中の「PWR\_FLG」は、ERC用の電源供給部品として利用され、部品としての実体はない。回路設計時に選定したPICUSBオルゴールの構成部品の一覧を表2に示す。

### 4.3 プリント基板設計

図1に示した「KiCad」によるプリント基板設計に従った操作手順を図3に示す。まず、「KiCad」を起動しプロジェクト管理画面を表示し、新規にプロジェクトファイルを作成する(図3(a))。つぎに、回路図CAD「Eeschema」を起動し、回路図の入力や編集を行う。編集ではドラッグ操作を行うことで、部品と配線を同時に修正できる(図3(b))。回路図の完成後、回路図記号とプリント基板に配置するフットプリントを選択する。「CvPcb」を起動し「Eeschema」によって出力されたネットリストを読み込み、各部品に対応するフットプリントを関連付ける。フットプリントは同じ部品であっても、片面基板、両面基板、基板加工機用基板等によってそれぞれ半田付けするパッドの形状を変更しなければならない。片面基板のパッドでは、スルーホールを生成できないためパッド部分が剥離しやすい。そのため、大き目のパッド形状とし、端子間が狭い場合は小判形にする。スルーホールを生成できる両面基板のパッドは、製造基準に合致した大きさにする。さらに、基板加工機用基板のパッドは、切削によるパッドの縮退を考慮して、やや大きめにしておく。フットプリントはプリント基板に実装する部品の形状と正確に合致している必要があるため、「KiCad」に同梱されているものであっても、パッドの位置と形状ならびに外形を確認し、実際の部品と異なる場合には、修正後、別の名称で保存し利用する(図3(d))。

基板設計CAD「PcbNew」を起動し、ネットリストを読み込む。初期状態ではすべての部品が重なって表示されるので、手動またはグローバル移動により各部品を再配置する。配線幅やクリアランスからなる「デザイン・ルール」を設定する。「デザイン・ルール」は製作するプリント基板によって基準値があり、それに応じて決める。ここでは、基板加工機を用いて生基板の銅箔面を切削してプリント基板を製作するため配線幅を0.9mm、クリアラ

ンスを0.5mmとした。「PcbNew」では、ネットのクラス毎に異なる「デザイン・ルール」を設定可能であり、例えば、電源系の配線幅を太くし、信号伝達系の配線幅を細くする等、柔軟な対応ができる。設定した「デザイン・ルール」は、配線中でもリアルタイムで適用されるため効率よく編集作業ができる。

つぎに、必要な基板サイズを各部品の配置状態から決定する。本教材では片面基板で製作するためコネクタや電池ケース、各部品間の配線に必要なパターンの面積等から、基板の外形サイズを95mm×75mmとした。編集画面上で基準点を定め、基板外形レイヤに長方形の外形を設定する。四隅に取り付け穴を配置し、圧電スピーカ、電池ケース、各スイッチ、USBコネクタ、「プログラマ/デバッガ(Microchip製Pickit3)」との接続用コネクタ等のそれぞれについて操作性を考慮しつつ配置する。片面基板を作成する場合であっても「PcbNew」では両面基板として表層と裏層を配線できるようにしておく。裏層から表層にビアを介して配線し、つぎのビアで表層から裏層に配線することで、二つのビア間における表層の配線がジャンパ線として取り扱えるようになる。さらに、コネクタやスイッチ等において異なる端子が部品の内部でつながっている状態を設定する場合も、当該端子間を表層で配線することで対応できる。

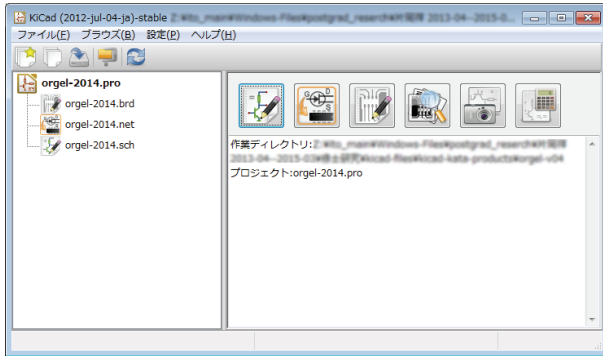
部品の配置後、FreeRoutingによる自動配線機能を用いて配線パターンを生成する。その後、手作業により配線や部品の配置を修正していく(図3(e))。なお、片面基板の場合、FreeRoutingによる自動配線であってもジャンパ線が多くなる傾向がある。手作業によって部品の配置と配線を修正することでジャンパ線を減少させていく。PICUSBオルゴールの場合、自動配線時4本あったジャンパ線を手動配線によって1本に減少させている。また、必要に応じて「ベタ・パターン」を生成する。USB通信等の高速通信を行う配線では、すべての信号線の配線長がほぼ同じとなるように等長配線する。

PICUSBオルゴールでは、面実装型パッケージ(SOT-23)しか供給されていないMOS-FET(Q2)を利用するため、Q2のみ裏層に部品を配置している。Q2はSOT-23であるが、端子間は2.5mmあるため手作業で半田付けできる。部品の配置等を示すための表層のシルク・パターンの内容は、文字や図形等が重複しないように、かつ、部品を実装したときに見えなくなる位置に配置する。PICUSBオルゴールではシルク・パターンを印刷できない場合もあるため、重要な部品(BT1, Q2)については、パターンとして裏層に表現している。

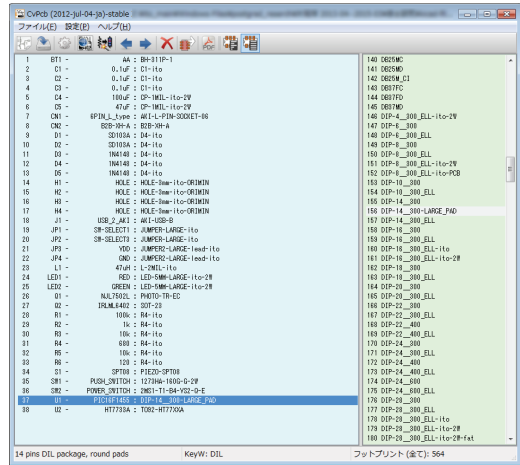
最後に、加工データ表示「GerbView」を起動し、「PcbNew」によって出力された外形データ、プリント・パターン、シルク・パターン、ドリル・データをレイヤー毎に割り当て表示し、内容を確認する。図4に設計したPICUSB

オルゴールの裏層のプリント・パターンと表層のシルク・パターンを示す。各部品を容易に実装できる間隔があり、ダイオードや電解コンデンサ等の極性のある部品の方向

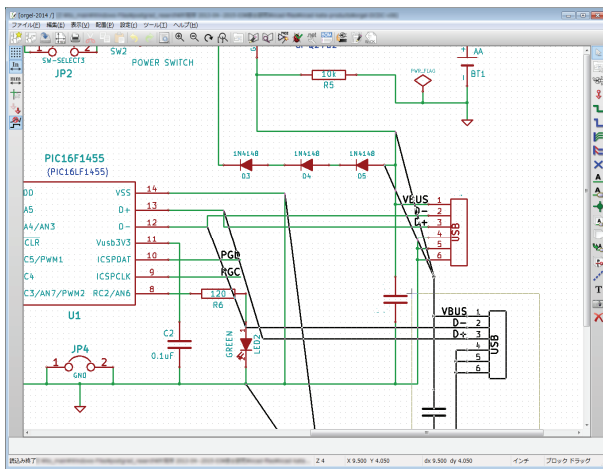
を揃えて、製作ミスを防ぐ配慮がなされている。



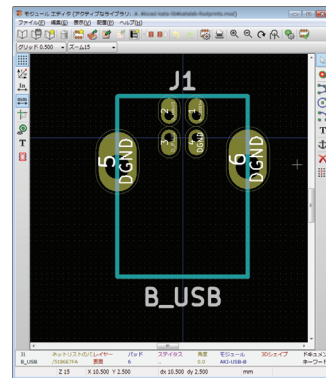
(a) プロジェクト管理画面



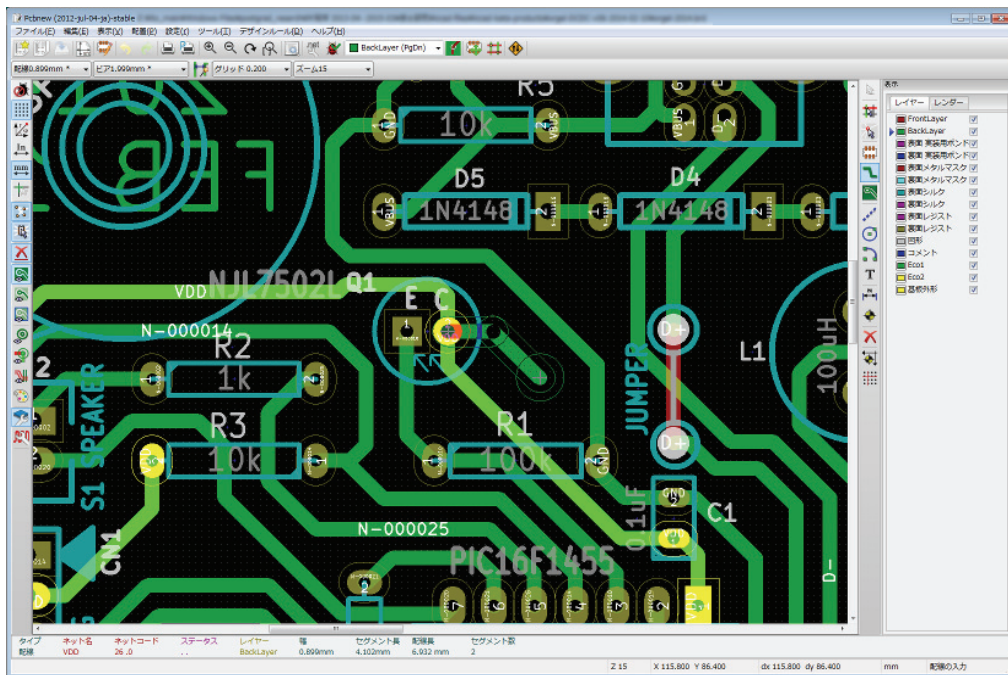
(c) フットプリント選択 (GvPcb) の画面



(b) 回路図 CAD (Eeschema) による編集画面



(d) フットプリントの編集画面



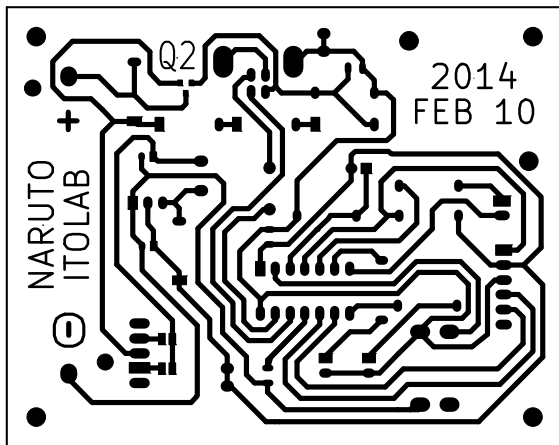
(e) 基板設計 CAD (PcbNew) によるプリント・パターンと部品配置の編集画面

図3 「KiCad」によるプリント基板設計の操作手順

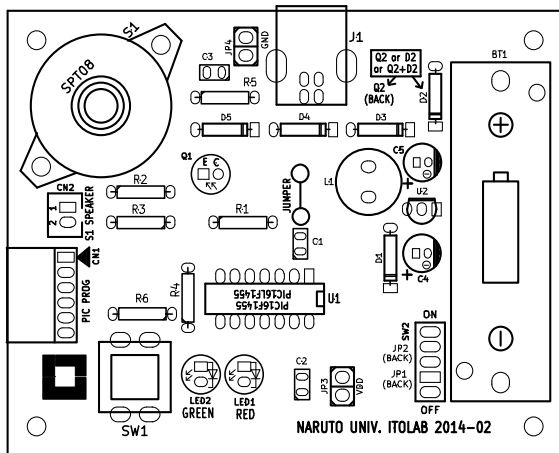
## 5. 教材用プリント基板の製作

### 5.1 基板加工機による製作

生基板の銅箔面をエンドミルによって切削しプリント・パターンを製作する。ここでは、CNC 基板加工機(オリジナルマインド製 CIP100)を用いた<sup>[11]</sup>。まず、「KiCad」で作成した加工データのうち裏層のプリント・パターン、ドリル・データ、基板外形データを基板加工専用 CAM ソフトウェア(オリジナルマインド製 ORIMIN PCB)に読み込み、プリント・パターンを切削加工するための NC プログラムに変換する<sup>[11]</sup>。図 5(a)に PICUSB オルゴールのプリント基板を加工するための NC プログラムを示す。NC プログラムは CAM ソフトウェア NCVC(NC Viewer and Converter)を用いて 3D プレビューを行い、変換結果を確認できる(図 5(b))<sup>[12]</sup>。CIP100 の制御用ソフトウェア(USBCNC)に NC プログラムを読み込み、切削加工したプリント基板を図 5(c)に示す<sup>[11]</sup>。ここで、切削加工、穴あけ加工及び外形加工に要した時間は全部で約 70 分であった。図 4(a)のプリント・パターンが正確にプリント基板とし



(a) 裏層のプリント・パターン



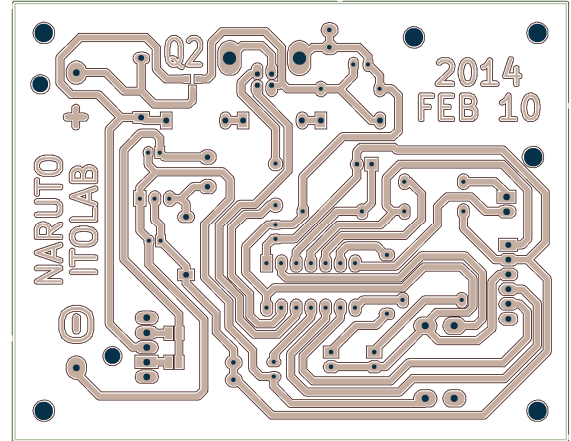
(b) 表層のシルク・パターン

図 4 PICUSB オルゴールのプリント基板 (95mm × 75mm)

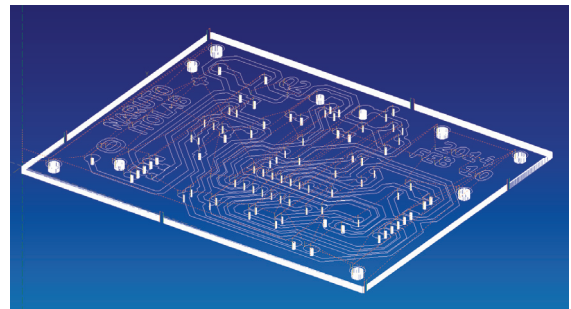
て加工されていることがわかる。

### 5.2 教材の製作例

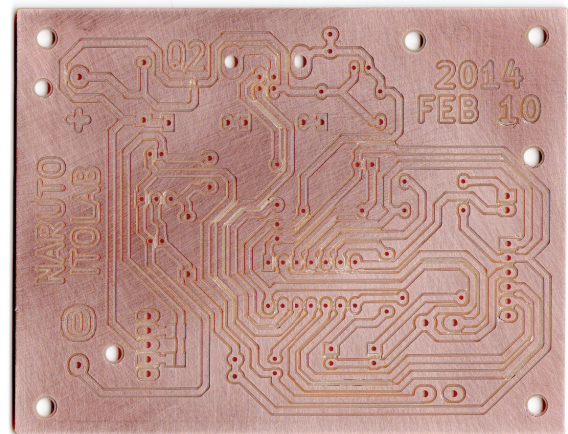
図 5(c)に示したプリント基板に各部品を実装した PICUSB オルゴールを図 6 に示す。本基板に配置した部品の間には十分余裕があり、中学生が半田付け作業を効率よく行える。製作後の基板の裏層から部品の最上部まで



(a) プリント・パターンを切削加工するための NC プログラムへの変換結果



(b) NC プログラムの 3D プレビュー (NCVC<sup>[12]</sup>)



(c) 切削したプリント基板の裏層

図 5 基板加工機によるプリント基板の製作



の高さは18mmであり、箱に内蔵しやすい大きさに仕上がっている。USB 通信、押しボタンスイッチ(SW1)の状態の計測、フォトトランジスタ(Q1)による照度の計測、圧電スピーカ(S1)の鳴動のそれぞれについて検査用プログラムをマイコンに書き込み動作を確認したところ、各機能とも設計どおりに動作していることが検証された。

U1にPIC16LF1455を用いてLED1とLED2の両方を点灯した状態( $V_{DD}=3.3V$ のとき消費電流10.5mA)において、Q2とD2による電圧降下 $V_f=V_{bat}-V_{in}$ とU2の出力電圧( $V_{out}=V_{DD}$ )を計測した結果を図7(a)に示す。ここで、 $V_{bat}$ と $V_{in}$ は、それぞれ電池電圧とDC-DCコンバータ(U2)への入力電圧である。一般的なアルカリ乾電池の終止電圧1.0Vまで利用する場合、 $1.0V \leq V_{bat} \leq 1.6V$ における $V_f$ の平均値は14mVと極めて小さくなりMOS-FET(Q2)の有効性が明らかとなった。この範囲での $V_{out}$ の平均電圧は3.29VでありU2は安定した電圧を出力できている。

$V_{bat}$ ,  $V_{in}$ , U2への入力電流( $I_{in}$ ),  $V_{out}$ 及び出力電流( $I_{out}$ )を計測し、電力変換効率を求めた結果を図7(b)に示す。 $k[\%]$ はU2のみの効率を示し、 $V_{bat}$ による変化は少なくその平均効率は83.4%であった。この結果は参考文献[9]に示された性能を満たしている。 $\eta[\%]$ は $V_f$ とU2による効率を示す。 $\eta$ は $V_f$ による影響で $k$ より下がっているものの、 $1.0V \leq V_{bat} \leq 1.6V$ のとき、その平均効率は82.4%となり、十分高い性能を得ることができた。

## 6. まとめ

本論文では、学校の情報環境において教員がオリジナルの電子回路とプリント基板を設計できるEDAソフトウェアスイートとして「KiCad」を選定した。技術科の計測・制御学習用教材を取り上げプリント基板の開発手順を具体的に示した。設計したプリント基板を基板加工機を用

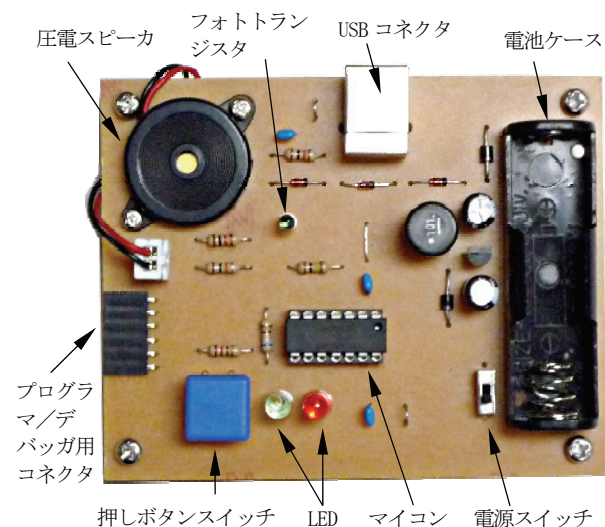


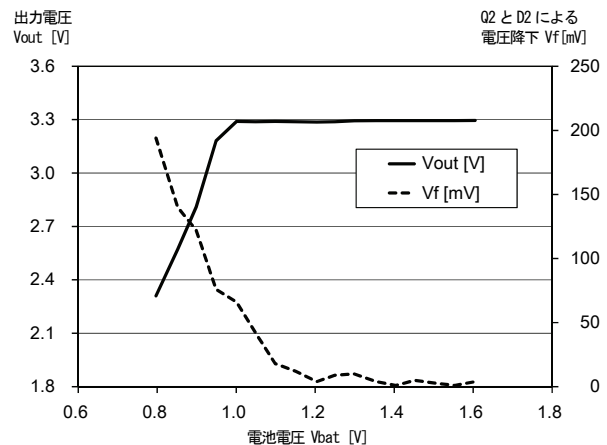
図6 基板加工機で加工したプリント基板に部品を実装し製作したPICUSB オルゴール

いて製作した結果、設計仕様を満足していることが確認され、「KiCad」によって教材用プリント基板が開発できることが示された。

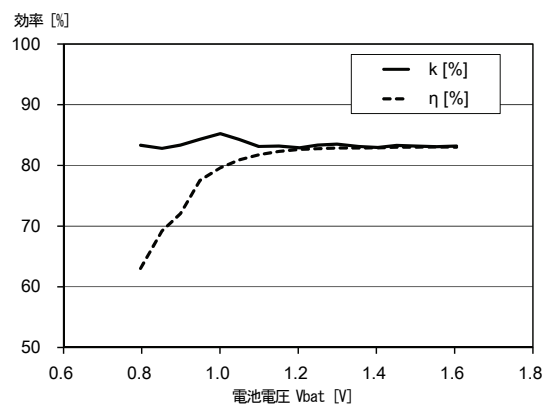
今後、PICUSB オルゴールに対応するブートローダとファームウェアを開発し、技術科において計測・制御学習できるようにユーザープログラムの仕様を定めるとともに、ホスト機側で動作するアプリケーションプログラムも開発する予定である。

## 参考文献

- [1] 樋口大輔, 紅林秀治(2011): コンピュータによる計測・制御学習のための汎用計測・制御基板の開発, 日本産業技術教育学会誌, 第53号, 第3号, pp. 169-178
- [2] 館隆彦(2012): Arduinoによる自動制御学習の教材教具開発, 青森県総合学校教育センター, 情報教育長期研究講座報告, G8-02, [http://www.edu-c.pref.aomori.jp/kenkyu/2011/reports\\_data/d\\_cj01.pdf](http://www.edu-c.pref.aomori.jp/kenkyu/2011/reports_data/d_cj01.pdf) (最終アクセス日: 2014年2月19日)
- [3] 後閑哲也(2009): EAGLEによるプリント基板製作の素, 技術評論社, pp. 205-226



(a) 電源に関する電圧



(b) 電力変換効率( $k$ : U2,  $\eta$ :  $V_f$ とU2)

図7 電源回路の計測結果

- [4] トランジスタ技術 SPECIAL 編集部(2005) : 技術者のためのプリント基板設計入門, CQ 出版
- [5] 米倉健太他(2013) : プリント基板を初体験, トランジスタ技術, 2013年5月号, pp. 55-119
- [6] FreeRouting, <http://www.freerouting.net/>(最終アクセス日 : 2014年2月5日)
- [7] 文部科学省(2008) : 中学校学習指導要領解説 技術・家庭編, 教育図書
- [8] Microchip technology(2012) : PIC16(L)F1454/5/9 Data Sheet, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41639A.pdf>(最終アクセス日 : 2014年2月5日)
- [9] Holtek semiconductor(2010) : HT77XX PFM Asynchronous Step-up DC to DC Converter (100mA), <http://www.holtek.com.tw/pdf/consumer/77xxv190.pdf>(最終アクセス日 : 2014年2月19日)
- [10] Holtek semiconductor: Using the HT77XX Step-up DC/DC Converter, D/N: HA0109E, <http://www.holtek.com.tw/english/tech/appnote/consumer/pdf/ha0109e.pdf>(最終アクセス日 : 2014年2月18日)
- [11] 株式会社オリジナルマインド : [http://www.originalmind.co.jp/products/kitmill\\_cip](http://www.originalmind.co.jp/products/kitmill_cip)(最終アクセス日 : 2014年2月14日)
- [12] 舞鶴工業高等専門学校教育研究支援センター : NVC のページ, <http://s-gikan2.maizuru-ct.ac.jp/xcl/>(最終アクセス日 : 2014年2月14日)