

専門課程から応用課程への連携を志向した 総合制作実習課題とその学習効果

— 太陽電池を用いた充電回路の設計・製作 —

東海職業能力開発大学校 堀内 美磨

General Production Practice Tasks Aiming Linkage from Specialized Technical Program to Professional Technical Program and Their Learning Effects

- Design and manufacture of charging circuits using solar cells -

HORIUCHI Yoshimaro

要約 令和 3 年度に実施した応用課程担当者養成コースの教材開発研究および総合制作実習で設計・製作した太陽電池を用いた充電回路について紹介する。応用課程における標準課題では、習得する技術要素が多いという課題がある。そのため、専門課程で行う総合制作実習において、関連する実習内容の教材を開発し、学生適用することで、応用課程における理解度を促進することにした。本教材では、まず市場のある太陽電池モジュールに対応するための調査を行った上で、300W 級の充電回路の設計・製作を行った。製作した充電回路のノウハウを活用し、総合制作実習では、安全に考慮した上で、充電回路の核となる電子回路設計・製作およびプログラム作成ができる 50W 級の充電回路を製作した。総合制作実習における学生の学習効果は、ハードウェアに対しては一定以上の効果がみられたが、ソフトウェア作成の時間を確保することが課題として挙げられた。実習終了後の学生ヒアリング調査から、今回の実習課題では、応用課程で行う実習との連動性が高く、学生の満足度が高い課題であると確認した。

I はじめに

現在、地球温暖化やエネルギー枯渇の問題が顕在化してきている。その中で、職業能力開発大学校には、環境問題について正しく理解をしたうえで、クリーンエネルギーの活用やエネルギーマネージメントを意識した製品の開発や製作ができる修了生を輩出することが求められている。特に、太陽光発電を始めとしたクリーンエネルギーを活用した技術や、エネルギーを有効利用するための電力制御技術を付与することが必要不可欠である。応用課程 生産電気システム技術科では、太陽光発電に関する標準課題実習として、発電電力制御システム設計製作課題実習を実施している。この実習では、パワーコンディショナーの設計・製作を行う。図 1 に応用課

程の標準課題実習に関連する授業とその関係を、九州職業能力開発大学校の実施例で示す。図 1 において破線で囲んだ発電電力制御システム設計製作課題実習と電気設備設計製作実習の合計 14 単位 (252 時間) を使って、パワーコンディショナーの設計・製作技術を学ぶ。パワーコンディショナーを製作するには、電子回路、パワー

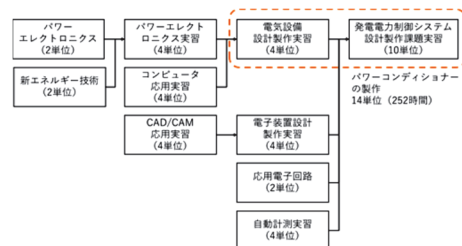


図 1 九州職業能力開発大学校における標準課題 (パワーコンディショナーの製作) に関連する授業の関係

エレクトロニクス、マイコン制御および基板設計の技術要素が必要となる。それらを事前に習得する実習が用意されているものの、習得すべき技術要素が多いという問題がある。一方で、専門課程のカリキュラムでは、専門課程修了での就職を考慮して、電力管理技術や自動化制御技術も習得できるカリキュラム構成になっているため、応用課程で習得するパワーコンディショナーの設計・製作に電子回路や制御プログラミングの実習を専門課程のカリキュラムで増やすことが困難である。

さらに、近年の太陽光発電システムは、蓄電機能を有するシステムが増えているが、充電回路の要素技術を標準課題に追加することが時間的に困難である。そこで応用課程の標準課題で適用する技術要素の中で、蓄電技術を習得するための教材を開発し、専門課程の総合制作実習にて適用することで、専門課程において応用課程に必要な技術要素を習得することにした⁽¹⁾⁽²⁾。

II 太陽電池を用いた充電回路の教材開発

1 充電回路の仕様に関する事前調査

太陽光発電システムに使われる充電回路を設計するために、現状の太陽光発電システムを調査した上で、充電回路の設計仕様を決定した。まず、2021年6月現在で国内販売されている太陽電池モジュール1枚における出力容量と開放電圧および短絡電流の調査を行った。図2に開放電圧および短絡電流との関係をまとめたものを、図3に出力容量の分布をまとめたものをそれぞれ示す⁽¹⁾。図2から、最も多い開放電圧と短絡電流の組み合わせを抽出し、安全を考慮して、充電回路の最大電圧を60V、最大電流を15Aに決定した。また、図3の出力容量の分布から、その平均値に近い300W級の充電回路を製作する仕様とした。

次に、充電対象となる蓄電池について調査を行った。太陽光発電システムと組み合わせる蓄電池では、リチウムイオン蓄電池を用いるケースが増えている。一方で、市販されている太陽電池コントローラの中には、鉛蓄電池用のものもあることがわかった。今回は、蓄電池の中では比較的安全であること、また安価であり、総合制作実習や標準課題などで利用実績がある鉛蓄電池を充電対象とした。

最後に、市販されている充電コントローラの機能を調査した。その結果、次に示す9つの機能があるとわかった。

1. 充電電圧・電流制御機能
2. 最大電力点追従 (MPPT) 制御機能

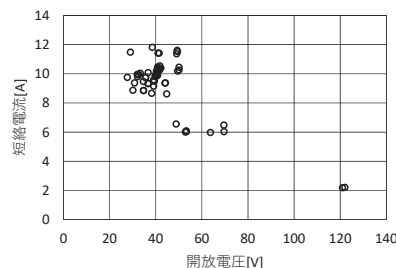


図2 国内メーカーの太陽電池モジュール1枚の開放電圧と短絡電流の組み合わせ

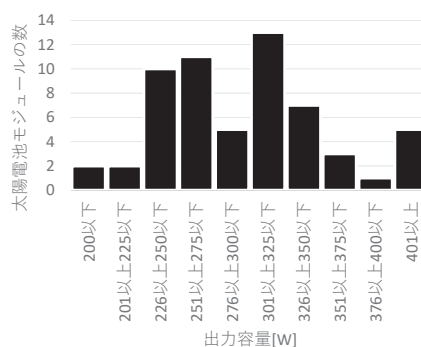


図3 国内メーカーの太陽電池モジュール1枚の出力容量の分布

3. 二次電池の電圧判別機能
4. 過電圧・不足電圧検出機能
5. 状態表示機能 (LED、LCD)
6. 負荷の切断・再接続機能
7. 雷サージ、逆接続などの保護機能
8. 夜間の制御機能
9. USB 電源供給機能

今回の充電回路では、市販されている充電回路の多くに備え付けられている上記の1から5に加えて安全に関する部分を追加して仕様決定した。

- ・ 入力特性は、最高電圧60V、最大電流15A、定格容量300Wとする。
- ・ 出力特性は、出力電圧12Vまたは24Vを自動判別し、最大電流10Aとする。
- ・ 充電電圧・充電電流制御機能およびMPPT制御機能を設ける。
- ・ MPPT制御を用いたバルク充電方式とアブソリュート充電の組合せた充電制御で行う。MPPT制御は山登り法を適用する。充電完了後はトリクル充電に移行する。
- ・ 蓄電池電圧の自動判別機能 0V (蓄電池未接続)、12V、24Vの3種類を自動判別する。
- ・ 蓄電池電圧が自動判別した電圧の120%を超えたら異常表示を出し、太陽電池を充電回路から切り離す蓄電池の過電圧保護を設ける。

・ 短絡事故時にサーキットプロテクタで蓄電池受電回路から切り離す蓄電池の短絡保護をつける。

・ LCD および LED によって現在の状態を表示する。

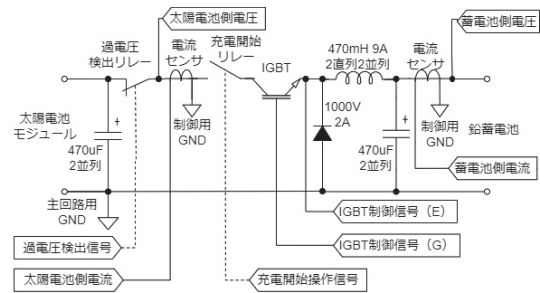
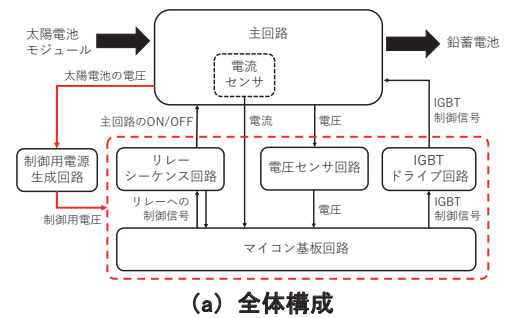
上記の仕様を決定した上で、太陽光発電および充電回路に関する技術の重要性を考えれば、訓練として導入しやすく、かつ、多くの方に技術を習得してもらうことが望ましい。そこで、教材開発を行うにあたり、当該技術を習得できる人材を増やすことを考え、国内販売されている太陽電池モジュールに対応できる充電回路を、入手が容易である材料で構成することで、導入が容易になると考えた。さらに当該技術の指導ができる指導員を増やすために、総合制作実習で教材内容の適用事例を示すことで指導員研修への展開可能な教材になるようにした。

2 300 W 級充電回路の設計・製作

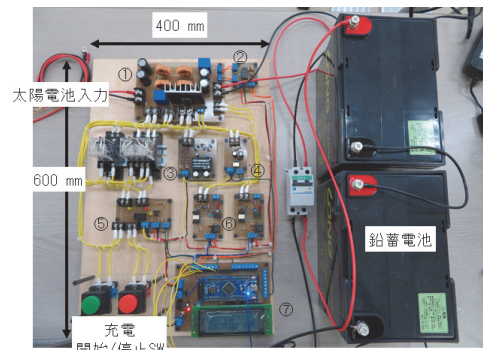
図 4 に充電回路の基本構成図を示す。図 4 (a) は回路構成を、図 4 (b) は主回路の回路図を示す。主回路は、IGBT を用いた降圧 DC/DC コンバータである。制御電源生成回路は、太陽電池モジュールの電圧を利用して制御用電圧を生成する。主回路において、太陽電池側および蓄電池側の電圧は、電圧センサ回路を通して、太陽電池側および蓄電池側の電流は、電流センサを通してマイコン基板回路に取り込む。マイコン基板回路では、太陽電池側の電圧、電流、蓄電池側の電圧および電流をもとに IGBT の制御信号を生成して、IGBT ドライブ回路を通して主回路にある IGBT を制御する。また、蓄電池への充電開始と停止、蓄電池の過電圧に対しては、主回路の ON/OFF を制御するリレー信号をリレーシーケンス回路に送ることで制御を行う。今回製作した 300 W 級充電回路の外観を図 5 に示す。製作した基板は、機能ごとに分けることで、基板の単体試験が容易にできること、かつ、複数人で基板設計・製作が可能になるようにした。

3 評価項目表の作成

製作した充電回路をもとに技術要素を分析し、習得度評価項目表を作成した。表 1 に習得度評価項目表の一部を示す。評価項目を大分類、中分類、小分類の 3 つに分類した。大分類は、材料の知識、回路の知識、計測機器の測定方法、回路設計・実装、ソフトウェアおよび安全の 6 つに分類した。小分類は、製品そのものや、具体的な技術キーワードで分類した。中分類は小分類をグループ化する項目になるように分類した。特に太陽電池や蓄電池といったエネルギーを取り扱う



(a) 全体構成
(b) 主回路の回路図
図 4 充電回路の基本構成図



- ①主回路
- ②電流センサ増幅回路
- ③制御電源生成回路
- ④IGBT ドライブ回路
- ⑤リレーシーケンス回路
- ⑥電圧センサ回路
- ⑦マイコン基板回路

図 5 教材開発した 300 W 級充電回路の外観

表 1 作成した習得度評価項目表(一部抜粋)

大分類	中分類	小分類	評価基準
材料の知識 (22項目)	抵抗	カーボン抵抗	1: 知らない 2: 名前は知っている 3: データシートをみて 特性を説明できる 4: 実装時の注意事項を 説明できる 5: 具体的な実装方法を 説明できる
	コイル	トロイダルコイル	
	コンデンサ	積層セラミックコンデンサ	
		電解コンデンサ	
	ダイオード	整流ダイオード	
		ツェナーダイオード (ZD)	
		定電流ダイオード (CRD)	
		LED	
	トランジスタ	NPN トランジスタ (2SC1815)	
	IGBT	N チャンネル IGBT	
	オペアンプ	汎用オペアンプ	
	絶縁アンプ	TLP7920	
	DC-DC コンバータ	非絶縁型	
		絶縁型	
	フォトカプラ	TLP250、TLP351	
	リレー	電子リレー	
		電磁リレー	
	電流センサ	クローズドループ方式	
太陽電池	太陽電池		
二次電池	鉛蓄電池		
マイクロコンピュータ	RX62N		
LCD	キャラクタ型 LCD		

実習課題であるため、安全の技術要素を大分類に入れ、安全に配慮するように評価項目表を作成した。作成した小分類は71項目となった。評価方法は、判断基準の目安を設け5段階の評価とした。

4 総合制作実習に適用する際の課題

図5で製作した充電回路をそのまま総合制作実習に適用する場合、取り扱う電圧および電流が大きいため、回路素子の過電圧保護や、回路素子の並列化など本来習得すべき内容と異なる部分の検討が必要になる。また実験・実習時における感電や漏電をはじめとした安全配慮が必要になることから、そのまま適用するには不適用と判断した。そのため、総合制作実習で使用する太陽電池モジュールは、電子部品の過電圧保護回路を必要としないものの中で、出力容量が大きいモジュールを選定した。また、充電回路を評価する際に、蓄電池をあらかじめ放電する必要があるが、今回の総合制作実習では、図6に示すワンショット回路を用いた放電回路を製作した。タイマを用いて制御することで、蓄電池の放電量を把握することができ、充電回路の評価を容易にした。

III 総合制作実習の課題設定および適用

1 総合制作実習における充電回路の仕様

図5で教材開発した300W充電回路をもとに、令和3年度総合制作実習に太陽電池を用いた充電回路の製作の課題を設定した。実習対象の学生は、専門課程電気エネルギー制御科2年生3名とした。製作した充電回路の仕様を次に示す。

- ・ 太陽電池モジュールは50Wの太陽電池モジュールを、蓄電池には、12V鉛蓄電池を使用する。制御用マイコンは、応用課程で使用するマイコンを使用する。
- ・ 蓄電池への充電開始および停止は、押しボタンの操作で行う。
- ・ 接続した蓄電池に対して、蓄電池の定格電圧を自動判別し、定電流定電圧制御で充電をする。定電流制御時は、MPPTによる制御を用いる。
- ・ 充電回路の現在の状況をLCDで表示する。
- ・ 制御用の電源は、太陽電池モジュールの発電電力を利用する。制御回路で使用する電圧の種類が最小限になるように回路設計を行う。
- ・ 安全対策として、太陽電池が接続されている主回路と制御回路は電氣的に絶縁する。また、充電回路には、過電圧・過充電検出および主回路の遮断機能を設ける。

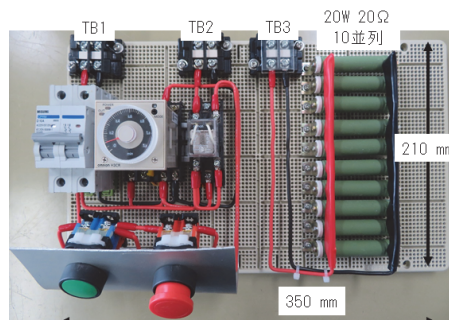


図6 蓄電池放電用リレーシーケンス回路

仕様設定するにあたり、実習で使用する材料の購入の容易性および充電回路の保護機能について配慮した。

2 総合制作実習の進め方

総合制作実習では、次に示す1から8の順序で実習を行った。応用課程の標準課題の進め方の中で、設計評価を除けば、概ね同じ進め方で実施しているため、応用課程で養成する能力を意識して実施した³⁾。

1. 太陽電池の充電回路における座学および調査
2. 充電回路で使用する素子の基礎実験
3. 充電回路で使用するマイコンの基本機能を使用したプログラム課題の作成
4. 回路設計および基板実装
5. 実装基板の単体試験
6. 太陽電池、蓄電池および実装基板の配線
7. 充電回路のプログラム作成
8. 充電回路の評価（総合評価）

電子回路については、ブレッドボード上で回路を作成して実験を行った後、同じ部品を基板実装できるようにディスクリート部品で構成した。実験を通して、電子部品の特性を理解し、回路設計する際の配線イメージを持てること、実験で使用する計測機器が正しく使えること、および回路中に不具合があった際にどこが問題になっているかを自分で判断できるようにするため、基礎実験の時間に多くの時間を使用した。プログラムの作成は、総合制作実習の前に行う後期集中実習（10月最初の2週間）の期間において、マイコンの基本機能の確認と実際の充電回路に使用するマイコンのI/Oポートを用いて実装する課題を学生に取り組みさせた。課題で作成したプログラムを充電回路のプログラムに再利用することで製作時間の短縮を図った。周辺回路は、ブレッドボード上に配線をすることで、マイコンと実装する基板とのインターフェースを意識するようにした。

3 製作物および評価

総合制作実習で製作した充電回路および実習風景を図7に示す。設計した基板の大きさを考慮して、市販のアルミ筐体を選定して収めることにした。完成した充電回路を実際の太陽電池モジュールおよび蓄電池に接続し充電の評価を行った。蓄電池は、定格12Vの蓄電池を満充電状態から図6に示す放電回路で15分間放電したものを使用した。図6の負荷抵抗は2Ωであり、定格12Vの蓄電池を15分接続すると放電容量は約1.5Ahとなる。充電開始前は12.34Vであった端子電圧が、65分間の充電で、12.80Vまで上昇した。また65分間の充電量は、データロガーの測定結果から1.09Ahであることを確認した。天候および実習時間の関係で満充電まで至らなかったが、太陽光模擬電源装置を用いた実験では、満充電後にトリクル充電に移行していることを確認した。

4 総合制作実習終了後の学生ヒアリング

総合制作実習終了直後に、実習時に失敗した内容としてどのようなものがあつたかを面談によるヒアリングで調査した。調査した結果、教材作成時に指導員が想定していなかった失敗事例も確認できた。大きく分類すると5つの失敗事例に分けることができる。

一つ目は、回路設計における失敗事例である。マイコンのピン配置を間違えたり、信号線と電源線を間違えたりといった単純な間違いだけでなく、信号線間のクリアランスが不足していたり、他の基板との接続関係を考慮しない部品配置を行うなど、後工程を考慮しない失敗が散見された。

二つ目は、回路実装における失敗事例である。抵抗値を間違えたり、極性のある部品を逆に実装したりすることもあつたが、耐電圧が足りない部品の実装といった回路で使用する電圧を考慮していない失敗もあつた。

三つ目は、動作検証(実験)における失敗事例である。電気的絶縁している回路のGNDを共通にして測定することや、測定対象の電位が異なる測定点を同時に測定した間違いが散見された。

四つ目は、組立および配線における失敗事例である。これは、電源線の極性間違いや配線ミス、加工寸法の違いなど単純なミスが多かった。

五つ目として、プログラムにおける失敗事例である。ポートの設定間違いやA/D変換の計算式を間違えるなどが挙げられたが、回路設計に多くの時間を費やしたため、学生本人が修正した部分の失敗事例しか出ていない結果となった。

IV 教材適用による学習効果

習得度評価項目表を用いて、学生に5段階の自己評価を行わせた。評価は、実習開始前(2021年9月)および実習終了後(2022年1月)に実施した。図8に習得度評価項目表を用いた学習効果の比較を示す。実習開始前の調査から、自己評価が低い項目を抽出した結果、材料の知識、回路の知識およびプログラミングが挙げられた。そこで、実習で使用していない素子および回路は、基礎実験を行った後に、充電回路の設計・製作を行うこと、ソフトウェアについては、マイコンの基本プログラム確認から始め、全体のプログラムから仕様に合わせてプログラムを修正することを重点項目として実習を行った。実習終了時の結果から、材料の知識と回路の知識については、図8より、学習効果が大幅に向上した。また回路設計・実装、計測機器の測定方法および安全に関しては、実習前でも高い評価であったが、実習後は自己評価がより高くなっていることを確認した。このことからハードウェアに関連する項目については、教材の適用による学習効果があることが確認できた。一方で、ソフトウェア項目については、自己評価が低く、与えられたプログラムを読んでプログラムが実際に行っていることが理解できると

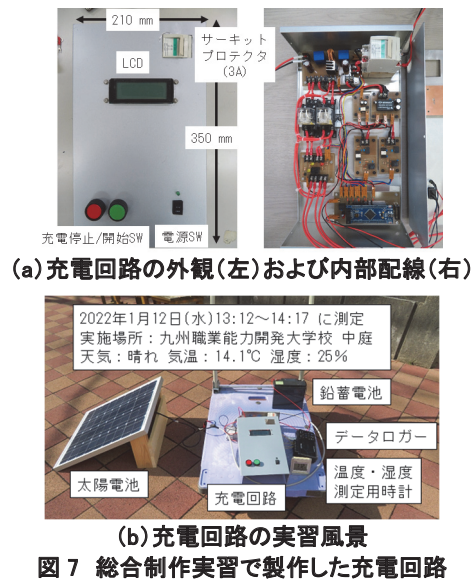


図7 総合制作実習で製作した充電回路

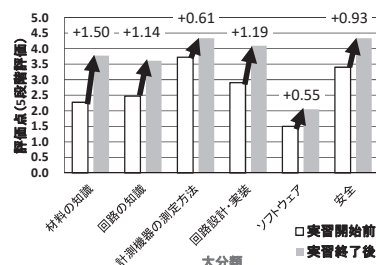


図8 習得度評価項目表を用いた学習効果

表 2 ソフトウェアに関する学習効果

中分類	小分類	実習開始前	実習終了後
マイコン (RX62N)	I/O出力	1.67	2.33
	タイマによるPWM出力	1.33	2.67
	タイマ割込み	2.00	2.33
	A/D変換	2.00	2.33
	低電圧検出 (LVD)	1.33	1.67
アルゴリズム	PWM法	1.67	2.33
	MPPT法	1.00	1.33
	電圧制御方式	1.33	2.00
	定電圧定電流方式	1.33	2.00
	LCDIによる出力	1.00	2.33
インター フェース	電流センサによる電流値の取り込み	1.67	2.00
	電圧センサによる電圧値の取り込み	1.67	2.00
	PWMによるIGBTドライブ回路の駆動	1.00	1.33
	電磁リレーのON/OFF制御	2.00	2.00

いう、こちらが想定していた学習効果を得ることができなかった。表 2 にソフトウェアに関する学習効果を示す。全体的に自己評価が低い、中でも低電圧検出 (LVD)、MPPT 法のアルゴリズム、PWM による IGBT ドライブ回路の駆動は低い結果となった。理由としては、専門課程の授業内では出てこない技術内容であること、基本プログラムからの修正が少なくコードを読むことによる習得になったこと、学生がソフトウェアに対する苦手意識に対して実習時間の設定が短かったことの 3 点が考えられる。このことからソフトウェアに関しては、適切な技術内容を説明し、プログラムを読むだけでなく記述できる課題を組み込むとともに、学生のスキルを判断した上で、学習時間を十分確保することで改善できる可能性があることがわかった。

V 教材開発、教材適用による効果および課題の考察

教材開発及や教材適用を通して得られた効果および課題について 3 つの視点から考察する。

第 1 に、教材開発の観点で考察する。太陽光発電に関連した実習テーマを選定することで、学生が環境エネルギーに関連する実習テーマを選択できる。今回の教材開発研究においては、教材コンセプトにもとづいて入手の容易性や施設にある既存の装置および材料を中心に教材開発を進めたため、新規で充電回路を製作するには、実習を展開しやすい教材である。一方で、教材開発の中で、次に示す 9 項目は、製作時間の関係から十分に検討を尽くしていないため、新たに充電回路を設計・製作する際には、発展・改善の余地がある。

1. 模擬電源の検討および評価
2. 蓄電池の検討
3. 負荷を含めた充電の検討
4. 放熱板の検討
5. 太陽電池の開放電圧が高い場合の部品保護
6. 太陽電池の開放電圧が低い場合の部品選定
7. 表面実装部品の使用検討
8. 各種計測器における GND レベルの取り扱い
9. 材料の選定および発注

第 2 に、総合制作実習での適用結果について考察する。総合制作実習で製作した充電回路は、総合制作実習 (12 単位 216 時間) で完成させることを前提に教材作成をしてきた。しかし、実際に学生適用すると設計製作するには時間が足りないことがわかった。学生の実習満足度を満たすために、習得度評価項目表での実習前自己評価および学生へのヒアリングを行った後に、学生と重点課題を設定した結果、学生の実習満足度が高かった一方で、習得する内容に偏りが出たことから実習時間の配分を調整する必要があると認識した。

第 3 に、応用課程との連携の観点で教材効果を考察する。今回開発した実習教材は、応用課程で学習する内容が含まれている。専門課程の総合制作実習において、本報告で示した内容で行うことで、応用課程で行う学習内容の一部を事前に学習することができた。その結果、応用課程の授業において、学習した内容については、習得する時間が短縮されたため、他の技術内容を習得するための時間を多く割り当てることができた。また、学生とのヒアリングの結果から、総合制作実習の進め方は、応用課程の標準課題の進め方に沿って進めたため、応用課程での標準課題では実習に戸惑うことなく実施できたことを確認した。さらに、学習効果の高かった回路設計に関連する実習においては自信をもって作業ができたことが報告された。一方で、実習時間が足りなかったソフトウェアに関連する内容は、応用課程の関連科目で補うことで実習内容をさらに理解できるようになると考える。

VI おわりに

太陽電池を用いた充電回路の教材開発をし、総合制作実習を通じて学生に教材適用することで学生が失敗するところや時間がかかるところを理解し、実習実施時の問題点や課題が明らかになった。次年度以降に実施する総合制作実習において、実習テーマを設定する際の参考になれば幸いである。

【参考文献】

- (1) 堀内美磨：「太陽電池を用いた充電回路に関する教材開発」、令和 3 年度 応用課程担当者養成コース研究論文 (2022)。
- (2) 岡山志臣、田中貴弥、福村友康：「太陽電池を用いた充電回路の製作」、令和 3 年度 九州職業能力開発大学校 総合制作実習 最終報告書 (2022)。
- (3) 応用課程の考え方 (平成 31 年度改定)、公共職業訓練部大学校課 (2019)。