オープン・ソース・ハードウェアを活用した 学び方を学ぶ組込みソフトウェア教育

An Education Program on Embedded Software Development Using Open
Source Hardware Aiming to Learn How to Learn New Technologies

舘 伸 幸^{※1}
Nobuyuki TACHI

山 崎 進^{※2}
Susumu YAMAZAKI

次郎丸 沢^{※3}
Taku JIROMARU

We have developed a course that trains graduate students as embedded software engineers. It is important for students to learn how to learn software technologies. Because they evolve rapidly and become obsolescent quickly. The students learn how to collect and read technical references and how to develop software. So far, 36 graduate students have completed this course. In exit questionnaires, 29 of the 36 students viewed the course positively. The students who had negative opinions had low programming skills before attending this course. In future work, we will improve the course and student satisfaction by measuring and adapting course content to their skill levels.

Keywords : Embedded Software Engineering Education, Instructional design

キーワード：組込みソフトウェア工学教育，授業設計，インストラクショナル・デザイン

1. はじめに

ソフトウェア開発技術は，単にコンピュータの制御というだけでなく，今やあらゆる産業の競争力を決めるものとなっている¹⁾。かかる状況下，経済産業省による組込みソフトウェア産業実態調査によれば，事業責任者が政府の施策として期待する項目として「ソフトウェアの開発を担う人材の育成」を1位に挙げた人が最も多い²⁾。

一口に人材育成と言うものの，ソフトウェア開発という分野は，a) きわめて技術進歩が速い，b) 適応分野が多様である，c) 解決すべき問題はいつも技術的に新規性が高いといった特徴がある。このため，技術者は常に新しい技術や知識を自ら学び続ける必要がある。つまり，教えられることに期待することなく，自ら学ぶ能力を必要とする。たとえば中島は³⁾，「何かが得意な人」と，「何かを学ぶのが得意な人」の違いと題して，「『何かを学ぶのが得意な人』というのは，変わりゆくIT産業の中で，常にスキルや知識をバージョンアップし続けながら仕事をしています。この素養を持っているプログラマーこそが，「良いプログラマー」なのだ」と述べている。

本研究では，この「何かを学ぶ」能力に関し，不足する知識をどのようにすれば自力で学び修得することができるかという，「学び方を学ぶ能力」を身につけさ

せる教育を目的とした。

まず2で学習目標と評価基準を述べ，3でハードウェアと開発課題の詳細を，4で指導方略を，5で具体的演習内容を述べ，6で実施結果を示し，7で考察を行って，8で本稿をまとめる。

2. 学習目標

本コースは，教材設計マニュアル⁴⁾を参考に設計を行った。以下に，詳細を述べる。

2.1 前提条件

学習対象者は，情報技術系の大学院1年生とした。彼らは，ソフトウェア開発に関わる基礎的な知識，すなわちC言語によるプログラミングや，UMLによるモデリングについては学習済みであり，それを参加の前提条件としている。

一方で，実践的なソフトウェア開発，特に組込み分野のプログラム開発の経験については，必要なスキル条件としていない。

2.2 行動目標

一般にソフトウェア開発の実習授業などでは，開発環境は教師側が準備をする。また，前提条件となるハードウェア仕様等は，明文化した資料としてこれも教師側が配付する。しかしそれでは，特定のアプリケーションの作り方を学ぶだけとなる可能性がある。また，社会における業務では，開発環境や必要な情報は，開発者自身が準備したり調査したりする必要がある。このような力をつけるためには，問題解決に必要なルールや手順を自ら発見したり考案したりする，「学び方」

2014年4月30日受付

※1名古屋大学

※2北九州市立大学

※3株式会社 OME

を修得する必要がある。そこで、本教育の行動目標をつぎのように設定した。

『与えられた要求仕様を満たすソフトウェアを、教師の最小限の支援を受けて、自分なりに工夫して要素技術を統合し開発することによって問題解決に必要なルールや手順を自ら編み出せること』

2.3 評価条件

学生は、2名から3名でチームを組み、チーム内で相談しあうことができる。また、インターネットを利用して、必要な情報を入手することができる。教師に対しての質疑も許されるが、自力で調査可能な情報は回答されない。

2.4 合格基準

図1に本研究での教育コース（以下、本コース）で扱う開発プロセスを示す。

これは、ウォーターフォール・モデルに基づいた一般的なプロセスである。本コースでは、開発プロセスを構成する工程ごとに、合格基準を設定した。この中から本論文では、図1で網掛けとしている部分である、「要求分析のうちハードウェア（実行環境）に関するもの」と、「開発環境構築」の、2つの作業における学習について詳細を述べる。それぞれについての合格基準は、以下のように定めた。

- a. 要求分析のうち、ハードウェアに関するもの
 - a 1. 使用するマイコンについて、必要なドキュメント（ユーザーズ・マニュアル）を入手する。
 - a 2. マイコンボードの仕様や回路図を入手する。
 - a 3. a 2に基づいて、教材（マイコン基板+LED）の、LEDやスイッチの接続先を調べる。
- b. 開発環境構築に関するもの
 - b 1. 使用するマイコンのプログラム開発に必要な

ツールを入手する

- b 2. 入手したツールをインストールする。
- b 3. 簡単なサンプルプログラムを作って、開発環境を使えるようにするとともに、ハードウェア分析結果の正しさを調べる

3. 開発課題と使用するハードウェア

開発課題のソフトウェアは、キッチンタイマとした。図2に、そのイメージを示す。

動作仕様の概要は、次のようなものである。通電するとLED1が点灯する。SW2を押下すると時間計測を開始し、LED3が点滅する。基本計測時間は30秒である。SW1を押下すると、基準時間より30秒延長とし（計測時間は1分になる）、LED2が点灯する。時間を計測し終わると、決められたパターンでLED3が点滅して知らせる。計測中にSW2を押下すると計測を中断する。

次に、使用するハードウェア（マイコンボード）について説明する。図3に全体像を示す。

右側はV850という汎用のマイコンを使った、市販のマイコン評価ボードである。これに、プログラムの実行結果を表示するためのLEDを3つ接続している。LEDの接続には、ユニバーサル基板を使っている。また、マイコン基板上には、プログラムの入力に使うプッシュ・スイッチが2個搭載されている。

このマイコンボードは、仕様や回路図が公開されているオープン・ソース・ハードウェアである。その一方で、あまり市場で知られておらず、単純な検索では情報を発見しにくい。また、コピー&ペーストで結果を得られるような応用例は流通していない。この特徴は、今回のような教育の教材に大変適した性質である。

開発環境については、ボードメーカではなく、マイコンメーカのサイトで公開されており、こちらもオープンである。

一口にハードウェアと言っても、マイコンボードとマイコンは異なる物であり、単純に1カ所ですべての情報を得ることはできない。このことを知ることまた、学び方を学ぶことに通じ、本コースの目的に適している。

このように本コースでは、オープン・ソース・ハー

図1 開発工程と本論文での解説工程

図2 開発課題のイメージ

図3 使用するマイコン基板

ドウェアのマイコンボードを用い、ハードウェアもソフトウェアも、とてもシンプルなものである。これは、本コースの主たる目的が、単に「プログラムを作ること」ではないためである。開発課題そのものは、組み込みソフトウェアの特徴的かつ基本的処理である、入力、出力、時間管理といったものを網羅しつつ、できるだけシンプルなものを目指した。

4. 指導方略

学生には、必要な情報は何かを考えるとところから始めさせ、それについて調べ、そして入手し、利用するという、主体的な問題解決活動を体験させる。これにより、不足する知識が何かを把握し、それをどのようにすれば学び修得することができるかという、学び方を学ぶ能力を身につけさせる。

マイコンボード（ハードウェア）は配布するが、与える情報は使用マイコンの型番など最小限とした。学生らは、プログラムを開発するには何が必要かを考え、ハードウェア環境から情報を読み取り、必要な資料を探して入手し、さらにプログラムの開発環境さえも自力で構築することが求められる。これにより、未知の技術が要求される課題を、自力で解決する体験をし、どのようにしたら未知の問題を解決していけるかという「学び方」を学ぶ。

図4～6に学習階層図を示す。図4は、学習戦略をソフトウェアの開発プロセスに沿って定義したものである。a. 要求分析する、b. 設計する、c. プログラムを作る、d. 動作を確認するの、4つの工程を定義している。

教師は、基本的にこのプロセスを進めるマネジメン

図4 開発プロセスに則ったプログラム作成

図5 要求分析の学習階層

トと、いくつかの小さなヒントを出すことだけを行う。学生らは不明点について、メンバ同士で相談をしたり、あるいは教師に対して適切な質問を行ったりすることで、作業を進めていく。教えてもらうではなく、わからないことは、聞く、調べるという主体的行動を通して、自分なりの学ぶ方法を編み出していく。

本研究では、図4に示したaからdの各工程について学習階層を設計しているが、本論文ではこのうち「a. 要求分析する」と、「c. プログラムを作る」について詳細を述べ、それら以外は省略する。

図5は、「a. 要求分析する」における学習階層である。要求分析にはまず、「a1. システム（ゴール）の理解」が必要である。システムはハードウェアとソフトウェアから構成されており、その両方について分析する必要があるからである。

作業環境が整えられた学習（演習）では、ソフトウェアの作成にのみ注意がいきがちである。一方で、本コースのような最小限のヒントと材料（教材）のみの場合、学生は前述のようなハードウェアとソフトウェア両方の分析の必要性に容易に気づく。なぜなら、LEDをひとつ点灯させるにも、スイッチの状態を調べるにも、ハードウェアの仕様がわからないとプログラムを設計しようがないからである。このことは逆に、何らかのシステムが、ハードウェアとソフトウェアからできているという組み込みシステムにとっての基本的な概念の理解にもつながる。

「a2. ハードウェアと仕様の対応の理解」では、たとえば要求におけるLED1というランプが、実際のハードウェアではどの部品にあたるのか。そしてその部品は、マイコンのどこに接続しているのか。どうすれば点灯するのか。といったことを分析する。

「a3. 基本部品の理解」では、さらに一步踏み込んで、LEDやスイッチの動作原理について理解を深める。単にプログラムを作るにあたっては不要とも言えるが、トラブルなどが起こった時に、基本原理を知っておくことが役立つことを学ぶ。

たとえば有名なトラブルに、スイッチのチャタリングがある。スイッチの原理を知っていれば、容易に現象について納得でき、また対策も考案しやすい。これは、本コースを進める中でも、ほとんどの学生が現実体験する例である。ハードウェアにまつわるトラブルを効果的に回避したり対策したりするには、動作原

図6 プログラム作成の学習階層

理や、さらには関連する物理現象まで学んでおくことが役立つ。これは、ハードウェアを扱うプログラムに関する、「学び方を学ぶ」ひとつの例である。

「a 4. 機能、ふるまいの抽出と理解」は、一般的なソフトウェアの要求分析にあたる。

a 2で要求の持つハードウェア面の要素を、a 4でソフトウェア面の要素を分析したことにより、a 5で文書としての要求仕様を読解し検討することができるに至る。

次に図6は、「c. プログラムを作る」に関する学習階層である。ここには、c 1. 開発環境を作る という大切な作業がある。先にも述べたが、一般的な授業では、開発環境は教師によって準備されている。しかし仕事の現場では、自分で構築しなければならない。これは「問題解決に必要なルールや手順を自ら編み出す」ことが必要とされる典型的な例のひとつである。

分析結果などの工程産物は、作業ミスや勘違い等による不確定要素を持つ。また、開発環境に代表されるツール類は慣れが必要であり、これも以降の作業における一種の不確定要素となる。

学生は、不確定要素の存在を認識するとともに、どのようにすればそれを以降の工程に持ち越さずに済むかを学ぶ。ここで、c 2における一連の作業もまた、教師が確認方法を指示したりはしない。学生は自ら確認のルールや手順を考え、実行する。つまり、一見c 1の補助作業的に見えるc 2も、学び方を学ぶ重要なしかけとして作用する。

開発環境の動作を確認し、ハードウェアの使い方も理解できたところで、「c 3. ソフトウェア部品をC言語で作る」という、コーディング作業へ進む。本論文では省略したが、本コースでは設計においてUMLを用いて記述している。ここで言うソフトウェア部品とは、設計において定義された処理単位のことを指す。

最後に、「c 4. エラーを修正する」で文法的エラーを取り除いて、プログラミング工程を終える。

5. 具体的演習方法

次に具体的な演習方法に関し、開発環境構築とハードウェア分析について述べる。

5.1 開発環境構築

教師は、最小限のヒントとして、CPU名と、マイコンボード上のメーカー名(多くの市販マイコンボードは、ボード上にメーカー名がシルク印刷されている)の場所のみを学生に伝える。

学生は、マイコンボードのメーカー名から、比較的容易にマイコンボード・メーカーのWebページにたどり着く。しかしそこにはきわめて似通った類似品が多数存在するため、他方のヒントであったCPU名とともにページ内から目的の製品を探す必要がある。

一般にマイコンにはファミリーと呼ばれる多数の類似製品が存在する。型番が少し異なるだけで大きく仕様が異なる場合もあり、業務ではその誤認識によるトラ

ブルも実際に存在する。本コースの受講学生の中にも、誤認識によって誤った資料を入手してしまう例が毎回1~2例あった。

学生らは、ミスを犯したのが自分か他人かに関わらず、多数の類似品があることや、それによるミスがありうることを体験する。これは、与えられた学習環境で行う開発演習では得られない知見である。

目的の製品のWebページからは、製品のドキュメントをダウンロードすることができる。今回の製品では、このドキュメントに開発環境のインストール方法が詳しく記述されている。学生はそれに従い、今度はマイコンメーカーのWebサイトから、必要なファイルを探す。ここにも、同様に多数のファミリー製品の情報が溢れているが、再度ミスを犯す学生は、少なくともこれまで出ていない。これは、マイコンボードの情報を得る時に、マイコンという製品カテゴリに関する情報の探し方(それは学び方的一种とも言える)を学んだことを活かしているためと考えられる。

学生は、いくらかの苦労を伴いながらも、開発環境のインストールを完了する。これに関しては、学生は日頃からパソコンの「扱い方を学んでいる」ため、特に問題は起こらない。

5.2 ハードウェア分析

一般に、設計工程において分析は最初の要求分析で実施する。本コースでは、要求仕様書にはハードウェアに関する情報を記載していない。このため、要求分析~設計では、使用するハードウェア・リソースが何か、までしかできない。実際のプログラムを作る時点になって、はじめて学生は情報が不足していることに気づく。たとえばLEDは、マイコンのリソースのどこを動かせば点灯するのか。またスイッチは、どこを読めば状態を知ることができるのかといった、具体的情報の必要性によりやくここで気づく。

社会における業務では、通常このようなことはなく、マイコンのリソースへの割り当ても仕様書で明示されるのが通常である。しかし、それは完璧であることはむしろまれで、そのために後工程になってからミスや手戻りが発生する事例は、枚挙にいとまがない。この原因のひとつは、特に経験の少ない技術者の、組込みソフトウェア開発において、ハードウェア・リソースの扱いがきわめて重要な情報であることへの、認識の甘さがある。

学生は、プログラミング直前になって重要な情報が不足していることに直面することからもまた、組込みソフトウェアの開発のしかたの学び方における大切な点を学ぶことができる。

ここで質疑を行わせて、教師が情報を与えることも可能であるが、本コースでは自力解析を行わせている。それは次のような理由からである。

組込みソフトウェア開発は、ハードウェアの制御と密接な関わりを持つことが多い。このためたとえば、回路図などを、書けないまでも読めるという、ハード

ウェア情報への「アクセスのしかたを学んでおく」ことは、将来大きなアドバンテージとなるのである。田中ら⁵⁾は、「組込みソフトウェア技術者には、通常の情報技術者より広い分野の知識と技術が求められる」として、ハードウェアの知識を持つ組込みソフトウェア技術者の育成について論じている。

対象がハードウェアという未知の世界であっても、どうすれば必要な情報を得ることができるかという、「方法」を学ばせる。これは、本コースの主目的である「学び方を学ぶ」ことの主軸である。

具体的手順を述べる。先にダウンロードしてあるマイコンボードのドキュメントには、最終ページに回路図が記載されている。最初、ほとんどの学生ははじめての回路図に当惑する。ここで教師は、これは一種の地図であることを説明する。工場や消防署、果樹園や水田、そして道路がある代わりに、さまざまな電子部品の場所と、それらをつなぐ電線の道路があるといったふうである。この例示は効果的で、学生は読めそうだという気持ちになる。

次に、探すべき建物（部品）はなにかを学生に述べさせ、スイッチとLEDであることを確認させる。ここで教師は、スイッチにはそれを示す記号があることを伝える。ちょうど、地図上で「市役所が◎であるように」である。しかし、どのような記号かは教えない。すでに学生は、必要な技術情報を得る方法をこれまでの過程で学んでいるはずだからである。

学生はスイッチの記号を探し出し、今度はそれをマイコンボードの回路図から探し出す。教師は、そこにつながっている線をたどるように指導する。片側はたいてい電源がグラウンド（基準電位）につながっていて、行き止まりである。もう一方は、たどっていくと、必ずマイコンのポートにたどり着く。そこには、たとえばP71などという記号が記載されている。

ではP71とは何か。洞察力のある学生は、ここでマイコンのマニュアルを調べる必要性に気づく。気づかない学生には、教師が「“マイコンの” P71ですね?」といった簡単なヒントを出す。マイコンのマニュアルの必要性に気づいた学生は、容易にマニュアルをダウンロードする。彼らはすでに、マイコンというのに関する必要な情報を得る方法を学んでいるからである。

スイッチが接続しているポートがわかると、今度は、スイッチを押したときの論理は何かが問題になる。本コースの実施時には、スイッチのポートとは反対側の行き止まりにある記号について、教師が説明をした。つまりそれは、電源（+）なりグラウンド（0V）なりであるという内容である。

学生は、中学高校の理科で電気回路を学んではいるので、理解力のある学生はこのヒントでスイッチ押下時の論理を理解できる。そうでない学生には、どうすればよいかを議論させる。彼らは、実際に押下してみてプログラムで読んでみればよいといったアイデアを考案したりするので、教師は実行を勧める。すでに開

発環境はインストール済みなので、学生は容易に試すことができる。このように、「試しにやってみる」という方法を知ること、学び方を学ぶことのひとつと言える。

次に学生はLEDの接続を調べる。これも記号は簡単に調査できる。しかし、今回LEDはマイコンボード上にはなく、マイコンボードに接続したユニバーサル基板上に実装してある（図3左側）。そして、この拡張部分の回路図は用意していない。まったくのオリジナル回路であるため、インターネットでの検索も役に立たない。

ここで教師は、対象をよく観察してみましょうとだけヒントを与える。実はこの拡張部分は、図7のように配線がむき出しになっており、目で追えるようになっている。

すでに未知の回路図でも、線を追えばマイコンへの接続がわかることを学んでいる学生は、それが印刷した線でなく、実際の電線であっても同様であることを理解できる。そして実物の回路の電線と、ボードの回路図の線を追い、LEDがつながっているマイコンの端子を探し出す。ここでも、スイッチのとき同様に、LEDの点灯論理は何か問題になるが、やはりスイッチのとき同様、ある学生はLEDのマイコンとは反対側の接続を調べて推察し、またある学生は実際に該当するポートに値を書き込んで調べる。それぞれが、基本を押さえつつ自分なりの理解の方法を身につけていることを、見て取れる。つまり、学び方を学んだこと（による応用）を、すぐに確認できるしくみである。

6. 実施結果

我々はこれまでに、2012年に16名、2013年に20名の大学院1年生に、この教育を実施した。学習時間は、1回あたり90分×15コマ=1350分の集中講座である。

課題のプログラムについては、2012年は16名全員が、2013年は20名中18名が基本要求仕様について完成に至った。（2名は不具合が残った）

図8に、受講後に実施したアンケート結果の一部を示す。自由形式の記述項目で、「本コースへの感想」、「自力での資料調査を重要視しましたがどうでしたか」と、「ペアで作業したことはどうでしたか」という3つの問いへの回答を集計したものである。グラフ中の数値は、いずれも人数を示す。重複回答も計数している。

図7 拡張部分のLEDの配線

- 対象者：本コース受講学生
2012年度16名，2013年度20名
- 調査日：2012年9月7日，2013年9月27日
- 調査方法：アンケート用紙を配布して記入
- 回答項目：全9項目中，自由形式の3項目

7. 考察

我々は2章で目標行動を設定したが，2年間で36名中34名が自力で開発を完遂できており，また自由形式で記述された本コースへの感想に，この目標行動に合致した行動が29名の回答に見られた。これは，本授業計画が全くの間違いではなかったことを示唆している。課題プログラムの完成率から，難易度も適切であったと考えている。一方で，社会的スキルや技術的スキルに関する問題点が浮かび上がった。

自由形式の質問の中で，自力での資料調査についての感想を求めたところ，肯定的な意見が24件，とまどいの意見が7件，否定的な意見が9件あった。肯定的意見は自力で調べることでより身についたと回答している学生が多かった。一方でとまどいや否定的な意見は，さらなるヒントや指導を求めるものが多く，分からない事への不安が見られる。

今回のアンケートでは，各学生の行動特性尺度を調べていないため，この差が各学生の元来持つ行動特性の差であるのか，授業方法によるものであるかの判断が難しいが，何かしらの改善が必要である。

また，本論文では触れなかったが，本コースでは2名のペア（一部3名）で学習を行った。このことに関し，「ペアを組んで作業したことはどうでしたか?」という質問に対しては，おおむね肯定的な回答が多かったが，8名がとまどい，または否定的な回答であった。この8名の回答内容もまた，社会的行動に価値を置いていない意見が見られるという意味で共通している。

質問や相談などの社会的かつ主体的行動は，自分の能力を超えた分野に対する効率的な学習には不可欠である。よって，今後分からないときにどのような行動を取れば良いかという社会スキルについて体験できるミニゲームなどを取り入れるなどのカリキュラムを組

み込むことで，より良い結果になることが予想される。

また技術スキル面では，否定的意見を書いた学生は，肯定的意見を書いた学生よりも，前提条件としているプログラミング・スキルが低いことが，授業の観察からわかっている。

ペアでの学習についても，ペア間のプログラミング・スキルの差が大きい場合に，否定的意見が出やすいことが，同様に授業の観察からわかっている。

以上のことから，本コースのような技術教育への参加学生には，プログラミング・スキルに関してなんらかの事前チェックが必要と考えられる。少なくともペアを組むにあたっては，そのチェック結果を考慮すべきであり，次回実施から対策する予定である。

8. おわりに

本研究の試行結果から，知識を教えるのではなく，問題解決に必要なルールや手順を自ら編み出す能力を鍛えること，つまり学び方を学ばせる教育について，可能性が見いだせたと考えている。

今後，考察に述べた改善点等を工夫し，より効果的な教育方法をさらに研究していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 経済産業省 商務情報政策局：IT化の進展と我が国産業の競争力について，2007年，Webページ，<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g70313a03j.pdf>，参照日：2014-5-1
- 2) 経済産業省 商務情報政策局 情報処理振興課：2010年版組込みソフトウェア産業実態調査報告書，事業責任者向け調査
- 3) 中島聡：中島聡の「端境期を生きる技術屋たちへ」，エンジニアtype，2014，Webページ，<http://engineer.typemag.jp/article/nakajima-16>，参照日：2014-5-1
- 4) 鈴木克明：教材設計マニュアル，北大路書房，2002
- 5) 田中康一郎，花野井歳弘：ハードウェアの知識を持つ組込みソフトウェア技術者の育成プログラム，九州産業大学情報科学会誌，7-1，2008

著 者 紹 介

館 伸幸

2012年ルネサスマイクロシステム株式会社退社
同年，名古屋大学組込みシステム研究センター勤務
文部科学省「分野地域を越えた実践的情報教育協働ネットワーク」組込み分野の名古屋大学事業に従事

図8 自由形式記述の集計結果