

情報社会に生きる小中学生のための計算機の動作原理の教育

甲斐 康司[†] 木室 義彦[†]
坂口 良文^{††} 安浦 寛人^{†††}

情報技術が政治/経済/社会システムに広く組み込まれてきた現在、初等中等教育における情報技術教育が重要となってきた。初等中等教育において「道具の原理を知ってその使い方を判断する」という技術教育の基本に立ち返り、我々は、「計算機は故障ではない限りプログラムのとおりに動作する」という計算機の基本原理の教育カリキュラムおよび教材を開発した。これらは、プログラムの振舞いを実際に視覚的に観察できるように、シミュレータおよび実機により構成されており、その有効性を実験授業により確認した。

An Educational Method of Computer Principles for Elementary and Junior High School Students

KOUJI KAI,[†] YOSHIHIKO KIMURO,[†] YOSHIFUMI SAKAGUCHI^{††}
and HIROTO YASUURA^{†††}

Information technology has been introduced not only in consumer electronics but also in various social infrastructures. It is meaningful and helpful for students to know an essence of information technology for computer principles. A fact that a computer works as it programmed except for fault is essential. To study the fact, a curriculum plays an important role at elementary school and junior high school. We have originated a new curriculum and taught many students using it. In this paper, we described the curriculum and the implemented system and showed experimental results.

1. はじめに

情報技術が広く社会システムへ組み込まれつつある現在、情報技術の専門家ではない一般の人であっても、社会の構成員として、この情報技術について責任を持つことが要請されてきている。この情報技術の導入に関して社会全体で責任を分担できるだけの素地を作ることを、すなわち、情報技術の基本的な原理を社会的な常識とするための情報教育の必要性が指摘されている^{1)~3)}。

情報技術に関する社会全体のコンセンサスを形成す

る1つの方法は、情報技術に関する基本的な知識を初等中等教育において教えることである。この初等中等情報教育に関して、その現状と問題点および将来の方向性が議論されている。たとえば、岡本らは、コンピュータを介した教育、学習の道具として活用する教育に対し、情報技術そのものの教育が十分にされていないと指摘している⁴⁾。また、情報技術の急激な進歩に対応するために、知識の記憶・理解という学習形態ではなく、学習者の主体的な課題解決を意図した学習体験を中心としたカリキュラムの必要性も指摘されている⁵⁾。情報教育の継続性という観点からは、適切な教科書を作成し、初等中等教育の早い段階で情報技術に関する概念を理解させることが高等教育につながると武井らは述べている⁶⁾。また、教員の不足、教材やカリキュラムの不足も指摘されている^{7)~9)}。このような状況の中で、現在、情報技術に携わる専門家の側から、情報教育への様々なアプローチが試みられている^{10)~13)}。しかし、これらの多くは、高等学校の情報教育であるか、小中学生のコンピュータリテラシー教育であり、小中学生を対象にして、情報技術そのもの

[†] 財団法人九州システム情報技術研究所
Institute of System and Information Technologies/
KYUSHU

^{††} 福岡市立東住吉中学校
Higashi Sumiyoshi Junior High School

^{†††} 九州大学大学院システム情報科学研究所
Graduate School of Information Science and Electrical
Engineering, Kyushu University
現在、松下電器産業株式会社半導体社
Presently with Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.
Semiconductor Company

の教育, すなわち計算機の動作原理を教えた事例は少ない。しかし, 我々は, 社会的な常識を養うべき小中学校¹⁴⁾において, 学習体験として計算機の動作原理を理解することは非常に重要なことだと考える。

2. 計算機の動作原理教育

「初等中等教育における計算機の動作原理の理解」とは, 「コンピュータは故障でない限りプログラムされたとおりに動作する」ことを生徒が理解することと我々は考える。これを理解するためには, 情報機器がプログラムという論理的手段で制御されていること, 情報機器の主要構成要素であるプロセッサとメモリの役割と働きを知ることの2点が重要である。このような考えから, 我々は, 小中学生を対象として, この計算機の動作原理教育を行う実験授業を1997年より実施してきた。

2.1 何を学ぶべきか——プログラミング

コンピュータの概念を理解する最も良い方法は, プログラミングの経験であり, これにより, コンピュータの可能性と限界を体験できる^{1), 15)}。しかし, 初学者にとってプログラミングは容易ではなく, これを正しく理解するためには, プログラム実行時の動作を正しくイメージできる必要がある¹⁶⁾。すなわち, 初等中等技術教育においてプログラミング教育を行うためには, プログラムの作成が容易であり, かつ, 逐次, 反復, 条件分岐といったプログラムの振舞いが直観的に理解できる教材が必要である。

従来, プログラムの振舞いを視覚的に確認できるものとして, LOGO 言語のタートルグラフィックス (TG) のようなコンピュータの描画機能を利用するシステムが初等中等教育用に開発され, 効果をあげている^{15), 17), 18)}。しかし, TG は画面表示のみであり, 現実世界との接点が不十分であるとの考えから, LOGO 言語と計測・制御装置等のハードウェアとを接続する試みが行われている¹⁹⁾。また, 優れた描画機能自体がコンピュータをブラックボックス化してしまうという問題も指摘されている²⁰⁾。すなわち, TG だけではなく, 実機として動作するコンピュータを実感できる教材が望まれているといえる。

これらの要件に対し, 我々は, コンピュータを組み込んだ移動ロボットが教材として適当であることをこれまでの実験授業から確認してきた。移動ロボットは, 前進や回転といった LOGO 言語と同様の簡単な命令セットを持ち, かつ, その場で動かすことができるコンピュータである。このため, プログラム実行時の動作をロボットの振舞いとして観察することができ, 繰

計算機の動作原理教育



図1 計算機原理教育

Fig. 1 Educational method of computer principle.

返しや衝突時の場合分けなどにより, 制御構造とその必要性を段階的に理解することができるという利点がある (図1)。また, 生徒の興味を喚起する能動的教材²¹⁾であることは, 授業を実施するうえで, 最も有用である理由の1つでもある。ただし, 実機のみを教材として用いた場合, 機械的な誤差や不具合が生じることにより, ロボットの振舞いとプログラムの振舞いが一致しないこともしばしば生じる。このため, 実機だけではなく, 実機の動きをシミュレートする TG のようなシミュレータを教材として併用する必要がある。

2.2 何を学ぶべきか——コンピュータのしくみ

コンピュータモデルとしては, 5大装置を示すものから, 演算装置の代わりにデータパスを構成要素とするものや5大機能を抽象化した IPO モデルなど, 様々なものが教科書に示されている^{22)~24)}。これは, 多層構造をなす現在のコンピュータモデルを理解するためには, 学習内容に応じたコンピュータモデルの選択²³⁾が必要であることを示すものといえる。また, このコンピュータの説明において, 武井らは, 記憶装置や制御装置のような「装置」というハードウェアが持つ機能のみを説明するのではなく, コンピュータは, ソフトウェアが発揮する機能で構成されて動くものであるという基本的な部分を説明すべきであると強調している²⁵⁾。

このような観点から, 我々は, (1) 制御と演算に対応するプロセッサと記憶に対応するメモリの2つの要素の存在, および (2) メモリに記憶されたプログラムがプロセッサに読み込まれ所定の動作を実行するという機能, の2つを視覚的に表示できる図2のような最下層のコンピュータモデルを採用した。このコンピュータモデルと移動ロボットのコンピュータとの類似性を生徒に考えさせることで, 移動ロボットを用いたプログラミングからコンピュータのより詳しくみ方を学ぶ模型計算機へと連続的に学習を進めることができる。

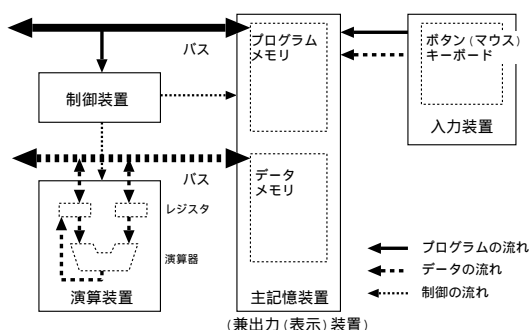


図 2 模型計算機のコンピュータモデル

Fig. 2 Computer model.

以上の考えに沿って、我々は、現役の中学校技術家庭科教諭および技術科研究会と協力し、学校現場の実際のカリキュラム^{26)~28)}を参考にして、カリキュラムの構築、教材の開発、手引書(指導書)の作成を行った。さらに、これらを授業に用い、評価の俎上に載せることを試みた。次章では、このカリキュラムと開発した教材の特徴について述べ、その後、このカリキュラムおよび教材の有効性を検証するために行った実験の結果を報告する。

3. 教材の開発

3.1 電子教科書による計算機の動作原理の学習

計算機の動作原理を学ぶためのカリキュラムおよび教科書では、中学生程度の学力レベルを想定した。カリキュラムは、表 1 に示すように、「計算機の基本的な構成からアルゴリズム、プログラミング言語の基本命令、制御命令を学習するプログラム実験 1」と、コンピュータのしくみについてよりくわしく学習するための、「計算機のアーキテクチャに踏み込み、プロセッサとメモリの役割と働きを知るプログラム実験 2」の二部構成となっている。また、学習内容量は、これまでの実験授業の経験から、全日 8 時間の 1 日間で十分消化することができるものとなっている。表 1 では、そのおおまかな時間配分をコマの番号で表している。また、本カリキュラムでは、教材として移動ロボットの実機((株)イーケイジャパン社製の WAO-II)²⁹⁾および教育用計算機ボード KUE-CHIP2 ボード((財)京都高度技術研究所)³⁰⁾を併用することを想定している。前者は、後述する移動ロボットシミュレータの移動ロボットの原型である。また、後者は、CPU の内部状態を観測できる模型計算機シミュレータの原型である。

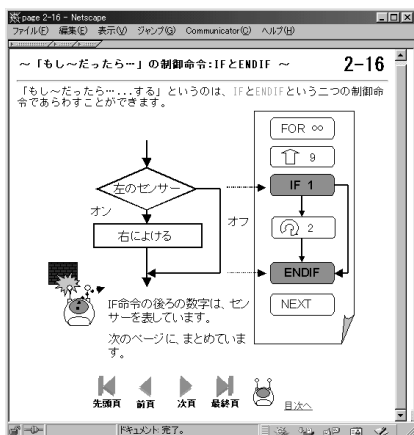
このカリキュラムでは単元が進むごとに新たな知識や概念を学習するように構成されている。同時に、こ

表 1 カリキュラム
Table 1 Curriculum.

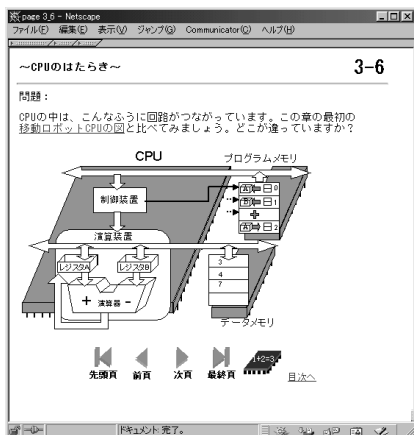
カリキュラムおよび学習目標	コマ番号
1. はじめに 計算機の基本構成と基本動作を理解し、本カリキュラムで何を学ぶかを知る	
(a) 学習をはじめの前に：計算機の構成や基本的な使用方法を確認する	1
(b) 電子教科書テキストとシミュレータ：電子教科書の使用方法を理解させ、学習者の興味を喚起する	
2. プログラム実験 1 (移動ロボットの制御) 移動ロボットを題材に、学習者自らが思考し考案したプログラムの振舞いを実際にグラフィカルな表示および動作として確認することで、「情報機器がプログラムという論理的手段で制御されていること」を理解する	
(a) 流れ図について：自分の考え(問題の解き方、アルゴリズム)の表し方を学ぶ	2
(b) プログラムの作成手順：プログラミングの方法を学ぶ	
(c) 基本的な動作のプログラム：単純なコマンド(プログラム)を基に、プログラムとロボット(計算機)の動きとの関係性を学ぶ	
(d) 繰り返しの方法：繰り返しの方法を学ぶことで、より複雑な動きをするプログラムが作成できることを学ぶ	3
(e) 場合分けの方法：センサを利用した場合分けの方法を学ぶことで、より複雑な動きをするプログラムが作成できることを学ぶ	4,5
(f) 問題：いくつかの問題に対し、プログラミングとシミュレータや実機による検証を行い、本項目の理解を深める	6,7
(g) まとめ	
3. プログラム実験 2 (模型計算機上での計算) 模型計算機を題材に、「情報機器の主要構成要素であるプロセッサとメモリの役割と働きを知ること」を理解する	
(a) コンピュータの基本構成：身の回りの情報機器を題材に計算機にはプロセッサとメモリがあることを学ぶ	8
(b) マイクロプロセッサの仕組みと処理の流れ：電卓の動作を考え、プロセッサとメモリがどのような働きを持っているかを学ぶ	9
(c) プログラムの作成：模型計算機を動作させるプログラムを作成し、計算機の内部動作について学ぶ	10
(d) 問題：いくつかの問題に対し、プログラミングとシミュレータや実機による検証を行い、本項目の理解を深める	
(e) まとめ	
4. まとめ コンピュータがプログラムという論理的手段で制御されることや、コンピュータの主要構成要素であるプロセッサとメモリの役割と働きを確認する	11

れまでに学習したものを使って解決できる問題とそうでない問題が練習問題として与えられるように構成されている。これにより、生徒は「計算機にできることと、できないことがある」という事実は何度も直面することになる。これを繰り返すことで、「計算機は、原理的に、プログラムされたとおりにしか動作しない」という事実を体験的に学習することができる。このカリキュラムを効果的に進めるためには、知識を習得し、これを基に思考するステップと、自分の考えを確認するステップを交互に行うことができる学習環境が必要である。そのために、以下の教材を開発した。

(1) 電子教科書：Web ブラウザで閲覧可能な教科書。体験学習を実現するために、テキスト(図 3)およびシミュレータ(図 4, 図 5)から構成される。テキストは HTML 言語により記述され、また、シミュレータは同じ Web ブラウザで実行できるように Java アプレットとして実現されている。生徒は、各自のクライアントマシンから、Web サーバマシン上に設置されたこの



(a) プログラム実験 1



(b) プログラム実験 2

図 3 電子教科書テキスト画面

Fig. 3 Snapshot of an electric textbook.

電子教科書を閲覧, 実行する. これにより, テキストによる知識の理解とシミュレータによる検証の繰返しを同一画面上で容易に行うことができる (図 6).

- (2) 手引き書: 電子教科書を使って授業を実施する教師のための手引き. 授業 1 コマ内での時間配分やより細かな学習目標, 生徒に対する教師の支援内容, 生徒の評価基準を設計している. 次に各シミュレータの詳細を説明する.

3.2 電子教科書シミュレータの詳細

3.2.1 移動ロボットシミュレータ

アルゴリズムやプログラムの振舞いを観察する対象として, 本カリキュラムでは小型の移動ロボットを用いた. この移動ロボットは, 左右独立駆動輪を持ち, 頭部に左右 2 個の接触センサを備えている. 表 2 に示すように, 前進や後退, 回転などの直観的に理解し



図 4 電子教科書シミュレータ画面 (移動ロボットシミュレータ)

Fig. 4 Snapshot of a robot simulator.

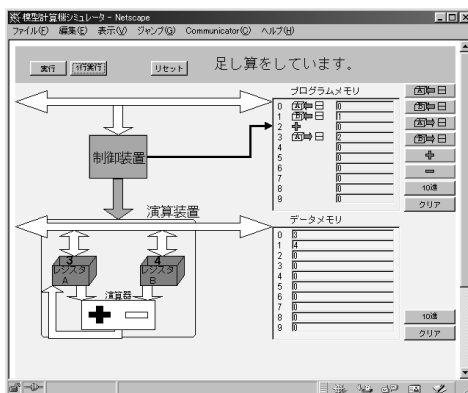


図 5 電子教科書シミュレータ画面 (模型計算機シミュレータ)

Fig. 5 Snapshot of a computer simulator.

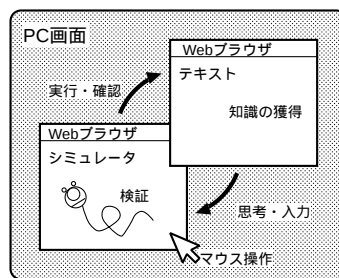


図 6 電子教科書画面

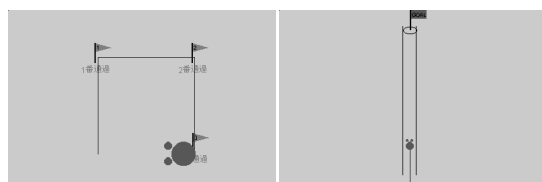
Fig. 6 Layout of PC screen.

やすい基本命令セットのほかに, 繰返しと場合分けの制御命令が用意されている.

これをシミュレートするものが, 図 4 に示す移動ロボットシミュレータである. 本シミュレータは, 画面上部に実機を模したボタン式的コマンド入力部, 画面右側にプログラムの表示および編集が可能なプログ

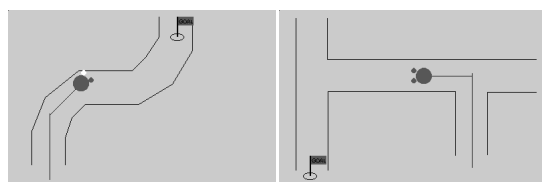
表 2 移動ロボットのプログラム書式
Table 2 Command set of a mobile robot.

命令	第 2 オペランド	説明
前進	1~9	ロボットが前方へ距離 n 進む。
後退	1~9	ロボットが後方へ距離 n 進む。
停止	1~9	ロボットが n 単位時間、一時停止する。
左回転	1~9	ロボットが $n \cdot \pi/8$ だけ左回転する。
右回転	1~9	ロボットが $n \cdot \pi/8$ だけ右回転する。
for	1~8 と ∞	後続の next との間の命令を n 回繰り返す。
next	なし	前出の for に対応する繰返しの範囲。
if	1, 2	条件が成立すると if と endif の間の命令を実行する。ただし、2 つのセンサが同時にオンの状態は、入れ子構造で表現する。
endif	なし	前出の if に対応する分岐の範囲。



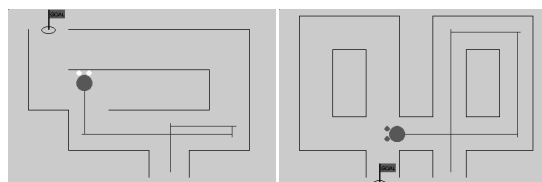
(a) 基本命令のみ

(b) 繰返し



(c) 場合分け (道なりに走行)

(d) 場合分け (直角に転回)



(e)(f) 異なるコースに対する共通のアルゴリズム

図 7 移動ロボットシミュレータコース

Fig. 7 Course layouts.

ラム表示部、そしてプログラムの実行状態をアニメーションで示すシミュレーション画面部から構成されている。プログラムは、通常の実行・停止ボタンのほかに、1行実行ボタンにより、命令ごとに動作を止めながら観察することができるようになっている。また、プログラムの実行順序は、プログラム表示部内の矢印により示されており、プログラムの実行行とシミュレータ画面でのロボットの動きを対応させて観察することができる。

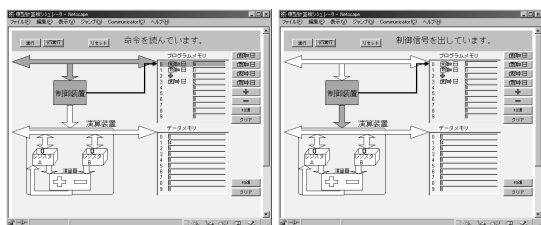
シミュレーション画面部には、あらかじめ、いくつかの迷路コースを準備しており、単元に応じて、順に新しい問題に生徒が挑戦できるようになっている。図 7 は、この一部を示している。まず、図 7(a) では、3 つの旗を周るという課題を与えることで、前進や回転と

いった基本命令を使ったプログラミングを試行錯誤しながら行うことができる。ロボットが非常に小さく表示された長い直線コースの図 7(b) では、単一の前進命令だけでは、ほんの少ししか進むことができない。このため、前進命令を 10 回以上繰り返して書いても、容易にはゴールに到達できないことを生徒は実感することになる。これにより、制御命令の 1 つである繰返し命令が有効であることに生徒自ら気付かせることができる。図 7(c), (d) では、(b) で作成した前進プログラムをそのまま用い、コースの壁にわざと衝突させることで、その対策として左右のセンサを用いた場合分けの必要性を生徒に気付かせることができる。図 7(e), (f) では、2 つのコースを 1 つのプログラムで通り抜ける課題を示し、問題を解くアルゴリズム (考え方) の重要性に気付かせることができる。このように、今まで学習した内容では解くことが困難な問題を順に与えることで、生徒がプログラミングの新しい概念に自分で気付くことができるように設計されている。また、これらのコースの壁やゴールの旗は自由に編集することができ、生徒の学習進度に応じた問題作成が可能である。このような機能は、生徒たちの様々なチャレンジ精神を発揮させることができ、カリキュラムに対する生徒の興味を持続させる点でも有効である。

3.2.2 模型計算機シミュレータ

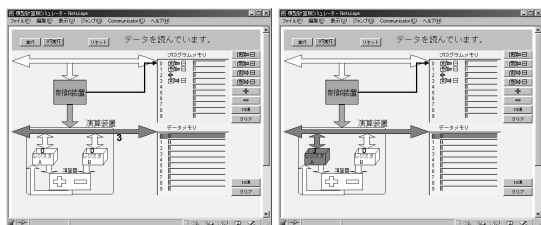
模型計算機シミュレータがモデル化する計算機は、図 2 に示すように、制御装置、演算装置 (レジスタ、演算器)、プログラムメモリとデータメモリ、バスで構成されたロードストア型のものである。このコンピュータモデルをそのまま視覚化したものが、模型計算機シミュレータである (図 5)。このシミュレータに用意する命令セットはロード、ストアおよび加減算の 3 種類とした。なお、ロード、ストア命令は、シミュレータ画面内ではメモリとレジスタを模した絵記号により表されている。

この模型計算機シミュレータは、プログラムの流れ、データの流れ、制御の流れをそれぞれ視覚的に確認できるものとなっている。プログラムおよびデータの流入は、模式図のプログラムメモリおよびデータメモリ上に直接行う。また、プログラムを実行すると、制御装置やレジスタへのバスを通るプログラムやデータの流れ、演算器への制御信号がアニメーションにより表示される。図 8 は、この命令実行の様子を示している。また、1行実行ボタンは、基本命令とプロセッサの動きを命令フェーズ単位で表示することができる。このように、この模型計算機シミュレータは、プロセッサとメモリとの関係が直観的に生徒に理解できるように



(1) 命令を読み込む

(2) 制御信号を出す



(3) データを読み出す

(4) レジスタにセットする

図 8 模型計算機シミュレータの動作 (ロード命令)

Fig. 8 Motion of a computer simulator.

工夫されている。

なお、カリキュラムおよび電子教科書のより詳細な内容は文献 32) に記述している。

4. 実験授業

4.1 実験の概要

設計・開発した計算機教育カリキュラムの有効性に関するデータ収集および実証を目的として実験を行った。

実験は、学習者と実施環境を変えて 3 回実施した (表 3)。まず、学習者に関しては、公募に応じ自主的に授業に参加する生徒と、通常の学校授業内での生徒の 2 通りを設定した。また、実施環境として、本教材の開発者自身が授業を行う場合と、開発者とは異なる第三者が本教材を用いて授業を行う 2 通りの授業を設定した。なお、実験時期の関係から、第三者が通常の学校において行う実験授業は実施しなかったが、本研究の最終的な目標は、この通常の学校での計算機原理教育授業である。各実験単位の概要を表 4 に、授業風景を図 9 に示す。

次に、実験手順について述べる。図 10 は、実験の流れを示している。まず、カリキュラム実施の前後における被験者の変化を計測するため、事前テストを実施する。その後、計算機原理教育カリキュラムに基づき座学と実験を行い、学習の進度に応じて、被験者の学習到達度を計る試験問題 (学習プリント) を与える。このとき、使用するコンテンツは、電子教科書テキストおよびシミュレータであり、学習者 1 人に 1 台の PC および小型ロボット、迷路コースを用意した。カ

表 3 実験の組合せ

Table 3 Pattern of experiments.

生徒	開発者による授業		第三者による授業
	公募による学習者	実験単位 1	実験単位 2
通常の授業を受けている学校生徒	実験単位 3	—	—

表 4 実験単位の概要

Table 4 Environment of experiments.

	実験単位 1	実験単位 2	実験単位 3
被験者	中学校生徒 (1~3 年)	中学校生徒 (1~3 年)	中学校生徒 (3 年)
被験者数	25 名	19 名	17 名
募集方法	一般公募	一般公募	通常授業
期間	1999/7/28 全日 (8 時間)	1999/11/23 全日 (8 時間)	1999/7~11 1 コマ 50 分の 8 回授業
場所	ISIT	ASTEM	福岡市内中学校
講師	教材開発者	情報技術に 携わる第三者	教諭と開発者 によるチーム ティーチング

ISIT: (財)九州システム情報技術研究所, ASTEM: (財)京都高度技術研究所



(a) 座学授業

(b) 実機を用いた授業

図 9 授業風景

Fig. 9 Photos of lessons.

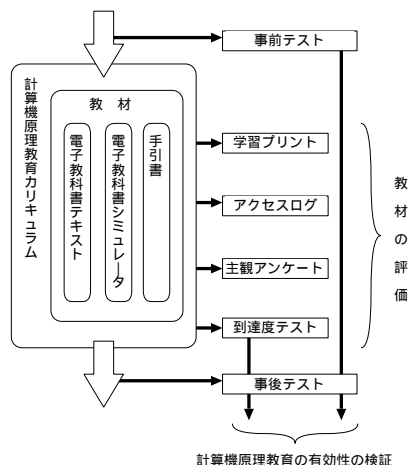


図 10 評価・検証の流れ

Fig. 10 Flow of an experiment.

リキュラム終了後、教材、カリキュラムに関する生徒の主観に基づくアンケートを収集する。最後に、到達度テストおよび事後テストを実施する。

4.2 カリキュラムおよび教材の評価

実験は、設計・開発した計算機教育カリキュラムについて、以下の2項目を検証するために行われた。

● 教材の評価

- 教材の道具としての検証
- 教材を用いて学習できたことの検証

● 計算機原理教育の有効性に関する検証

「教材の道具としての検証」とは、教材が学習者の主体的な学習体験に有用であったかを問うものであり、図10での主観アンケートおよび教材の操作性を調べたアクセスログが相当する。また、「教材を用いて学習できたことの検証」とは、教材の開発時に設定した学習到達目標に、生徒が到達できたかを計る通常の試験であり、図10での学習プリントおよび到達度テストがこれに相当している。「計算機原理教育の有効性に関する検証」とは、計算機の動作原理を知識としてではなく体験として理解できたかを問うものである。

本研究では、計算機動作原理教育における体験学習の効果を重視していることから、本節では、(1) 学習者から見た教材の道具としての検証、および、(2) 体験に基づく計算機原理教育の有効性に関する検証の二点について、その評価結果を示すこととする。なお、「教材を用いて学習できたことの検証」については、あらかじめ設定した学習目標に達していることが、学習プリント(課題ごとの試験問題)および到達度テストで確認されている。

4.2.1 教材の道具としての評価

〔目的〕学習者にとって本教材が道具として適していることを評価する。

〔方法〕学習後、教材に関する学習者の主観的な感想を問うアンケートを実施した。質問する項目は、(a) 学習内容の難易度、(b) 学習内容の理解度、(c) 教材(テキスト)に対する興味、(d) 教材(シミュレータ)に対する興味、とし、それぞれ、「はい」を5、「ふつう」を3、「いいえ」を1とする5段階間隔尺度で学習者ごとに評価させることとした。同時に、シミュレータと実機の併用の有効性についても質問を行った。

〔実験結果データ〕図11および図12に主観アンケートの集計結果を示す。図11は、実験単位1から3の結果を1つにまとめたものであり、各実験単位における主観評価の傾向もほぼ同一であった。なお、図12は、実験単位2,3において新たに追加した項目であり、実験単位1のデータは含まれていない。また、表5

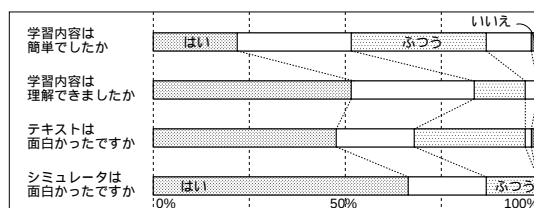


図11 カリキュラムおよび教材に対する生徒の主観評価

Fig. 11 Result of inquiries about curriculum.

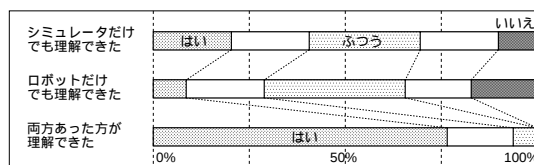


図12 シミュレータと実機との併用に対する生徒の主観評価

Fig. 12 Result of inquiries about a simulator and a robot.

表5 主観評価項目間の相関
Table 5 Correlation of inquiries.

	難易度	理解度	テキスト	シミュレータ
難易度	1.00	0.54	0.18	0.28
理解度	-	1.00	0.44	0.53
テキスト	-	-	1.00	0.52
シミュレータ	-	-	-	1.00

は、主観評価項目間の相関値を求めたものである。

〔評価および考察〕学習内容の難易度と比較して、生徒たちの主観的な達成感(理解度)は、より大きくなっている。これは、生徒たちの自己評価を高める要因が本教材にあったことを示しているといえる。また、この理解度とシミュレータに対する興味の「はい」「いいえ」の割合は、ほぼ同じ傾向を示している。生徒たちの理解度とシミュレータに対する興味との相関値は、負の回答(いいえ)が少ないことから切断効果により相関値が低く現れる傾向があるにもかかわらず、0.53と大きいことから、能動的な学習態度が理解度と関係があることが予想される。また、図12において、シミュレータと実機と両方あった方が授業が理解できたと回答した生徒が全体の8割近く存在したことは、実機とシミュレータの相補性および体験学習の効果を示しているといえる。

4.2.2 計算機の基本的な仕組みとプログラムの役割の理解

〔目的〕仮説:「計算機原理教育により、プロセッサとメモリの役割を理解し、計算機の動作の仕組みを理解できるようになる」を設定し、教材の有効性を検証する。

〔方法〕 事前事後テストの点数を基に、授業の前後で学習者の理解に変化があるか否かを t 検定により判定した。ここで、「プロセッサとメモリの役割と働きを正しく理解できる」とは、以下の事項を理解できていることとした。

事項 1: プロセッサはメモリ内のプログラムを、そのとおりに 実行する。

事項 2: プロセッサはメモリ内のプログラムを つねに、そのとおりに 実行する。

事項 3: プロセッサはメモリ内の 間違った プログラムも、そのとおりに 実行する。

事項 4: プロセッサが実行するメモリ内のプログラムは、人間が入力したもの である。

これらの事項に対し、授業中に教えていない(明示的には解答を示していない)問題を生徒に与え、生徒の学習体験に基づく理解度を調べた。具体的には、移動ロボットが異常な振舞いをした場合のありうる原因のすべてを問う設問を準備した。以下に、設問例と正答(括弧内の $\circ \times$)を示す。

設問 1: コンピュータが勝手にプログラムを変更した ($\times$)

設問 2: コンピュータがたまたま調子が悪かった ($\times$)

設問 3: プログラムに誤りがあった ($\circ$)

設問 4: プログラムの入力ミスがあった ($\circ$)

なお、設問 1, 2 においては、たとえば、プログラム自身による上書きや熱暴走なども正答として考えられるが、今回の試験では除外した。これは、実験に用いた移動ロボットではこのような状態は生じず、生徒の学習体験には反映されないと考えたためである。

〔実験結果データ〕 表 6 に集計結果を示す。設問数は 10 であり、各 1 点とした後、前述の 5 段階間隔尺度のアンケートとの比較のために、5 点満点に正規化した。各実験単位とも事後テストの平均点は事前テストを上回った。この平均点に有意な差があるかは、対応がある 2 条件の平均値の差の検定手法を用いて判断することができる³¹⁾。なお、 t 値の 5%水準の臨界値には、文献 31) 中の数表を用いた。検定を行った結果、実験単位 2 および実験単位 3 では、 t 値が対応する自由度の 5%水準の臨界値よりも大きいことから、平均点に有意な差があるということができた。一方、実験単位 1 では、有意な差がないという帰無仮説を棄却することはできなかった。

3 つの実験単位は、受講した生徒がそれぞれ異なる。このため、実験単位間の差を調べておく必要がある。これを調べるために、3 つの実験単位から 2 組を取り出し、対応のない 2 条件の平均値の差の検定手法を用

表 6 事前事後テストの集計結果

Table 6 Results of pre/post test.

	実験単位 1	実験単位 2	実験単位 3
事前テスト			
データ数 n	25	19	17
平均点 $\bar{X}$	4.05	4.08	3.24
分散 s	1.04	0.63	1.38
事後テスト			
データ数 n	22	19	17
平均点 $\bar{X}$	4.20	4.41	4.26
分散 s	0.93	0.39	0.60
t 値 (臨界値)	1.28 (2.02)	2.54 (2.03)	3.16 (2.04)

表 7 実験単位間の比較

Table 7 Comparison among experimental groups.

	実験単位 1 と 実験単位 2	実験単位 1 と 実験単位 3	実験単位 2 と 実験単位 3
事前テスト			
t 値 (臨界値)	0.10 (2.02)	2.37 (2.02)	2.52 (2.03)
事後テスト			
t 値 (臨界値)	0.77 (2.02)	0.21 (2.02)	0.61 (2.03)

いて事前事後テストの点数を比較した(表 7)。事前テストの結果では、実験単位 1 と実験単位 2 との間の t 値は臨界値よりも小さかったのに対し、実験単位 1 と 3、および、実験単位 2 と 3 の間では、それぞれの t 値は臨界値よりも大きかった。すなわち、実験単位 3 の平均点よりも実験単位 1 および 2 の平均点が有意に大きいという結果が得られた。一方、事後テストにおける平均点の差を同様に比較したところ、各 2 条件の t 値はそれぞれの臨界値よりも小さく、3 つの実験単位の間には有意な差は見られなかった。この結果から、授業の実施前では、実験単位 1 および実験単位 2 が、公募により実験に参加した被験者であり、参加者にはあらかじめ計算機に対する理解がある程度備わっていたと予測されるのに対し、実験単位 3 は、通常の学校の授業に参加する生徒であったため、必ずしも計算機に対する興味が有り、計算機の動作原理の理解がなされているとは限らなかったと考えることができる。一方、授業を実施したことにより、3 つの実験単位は、同じレベルに達したと考えることができる。

次に、事前事後テストの設問ごとに、学習者の理解度の変化を調べた。表 8 は、前述の設問 1 から 4 の正答率の変化を表にしたものである。この表では、すべての実験単位において、入力ミスに関する設問 4 の正答率が上っている。これは、学習教材が非常に簡単なロボット(コンピュータ)であったために、授業の実施前では、ほとんどの学習者は、自分が入力ミスをするとは思わなかったことが、実際に実験を行う中で、

表 8 正答率の変化

Table 8 Comparison between pre/post test.

設問	実験単位 1		実験単位 2		実験単位 3	
	事前	事後	事前	事後	事前	事後
1. 勝手に変更	0.80	0.73	0.84	0.89	0.76	0.88
2. たまたま変	0.80	0.82	0.84	0.79	0.59	0.76
3. プログラムミス	0.88	0.91	0.89	0.89	0.76	1.00
4. 入力ミス	0.76	0.91	0.68	0.95	0.47	0.76

自分の犯すミスに気付いたことが大きいと思われる。また、設問 3 のプログラムミスが存在する可能性については、実験単位 3 において、大きく正答率が上がっている。実験単位 3 は、コンピュータの操作経験がほとんどない学習者であったが、プログラミングを経験することにより、コンピュータを盲信することの誤りに気付いたものといえる。なお、実験単位 2 において、「コンピュータの調子がたまたまおかしかったから」との誤答が増えているが、これは、ロボットのメカニカルな不調とを混同して回答している学習者がいたためであった。

〔評価および考察〕授業を実施したことにより、(1) 事前事後テストの平均点が上がったこと、(2) 実験単位の 2 と 3 では、事後の平均点の上昇において、有意な差があったと認められたこと、(3) 実験単位間の比較結果より、すべての実験単位がほぼ同じレベルに達していたこと、から、本カリキュラムにより、学習者が、「プロセッサとメモリの役割と働き」を正しく理解できるようになるということが検証された。なお、学習者の理解度は、授業参加の動機や講師の資質にも左右されることから、本カリキュラムだけで、すべての生徒が計算機動作原理に対する正しい理解を獲得できるとは限らない。しかし、一般社会において、計算機原理がほとんど身につけていない、という現状を考えるならば、このカリキュラムを用いた授業を実施することは生徒たちに何らかの良い効果を与えことができるものといえる。

なお、実験基礎データおよび集計結果などのより詳細な内容は文献 33) に記載している。

5. 課題と今後の取り組み

5.1 成 果

本論文では、これまでに開発してきた、中学生程度を学習者として想定する計算機の動作原理教育カリキュラムの幅広い普及に向けて、教科書の電子化とその教育効果の検証作業を行った。まず、電子化の作業としては、Web ブラウザを用いて閲覧可能とするためのカリキュラムの電子テキスト化だけでなく、プログ

ラムの動作を電子テキスト上で「動き」として確認し実感できるシミュレータを組み込むことを目標とした。これにより、プログラムの振舞いがシミュレーション結果としてグラフィカルに表示可能となり、学習者の理解を促進することを狙った。この電子化した教科書および実機とを併用する実験授業を実施し、教材自体の効果の測定とこの教材を用いた計算機原理教育の有効性の検証を行った。

実験授業による検証の結果、本教材は、中学生を対象とした教室型授業において非常に有効であるとの結果を得た。また、計算機の動作原理教育自体についても、シミュレータおよび実機のプログラミングという学習体験を通して、情報機器がプログラムという論理的手段で制御されていること、情報機器の主要構成要素であるプロセッサとメモリの役割と働きを知ることの 2 点が、中学生にも十分理解でき、コンピュータに関する正しい認識を得ることができることが示された。

なお、今回の実験では、計算機の動作原理について、体験学習による直感的理解が大きく役立っていることは確認できたが、プロセッサの動作原理についてどの程度まで教えることが適切であるかは確認できていない。これについては、中学校技術科教育で行われている制御に関する授業や、今後実施される予定の高等学校での普通教科「情報」の授業の中で、社会常識として、どこまでコンピュータのしくみを理解しておいた方がよいのかを議論していかなければならないと考えられる。

5.2 今後の展開

実験授業の結果から、本論文で提案したような計算機の動作原理教育を中学校教育から始めても早過ぎることはありえないと考える。今後は、より教育現場に近い、または児童生徒と接する機会の多い教育文化施設などにおいて、開発したこれら電子教科書教材およびカリキュラムを利用してもらい、学習者が自ら考え習得していく、体験型・能動型学習による計算機原理教育の普及と、よりよい教材の開発に助力していきたいと考えている。

謝辞 本研究における、教材の電子化および実証実験は、平成 11 年度、IPA(情報処理振興事業協会)情報サポート事業の一環として実施されたものである(11 情入第 93 号)。また、教材の作成、実証実験の実施において、ご協力いただいた、福岡市東部技術科研究会および福岡市教育委員会の諸先生方(財)京都高度技術研究所神原弘之氏、実験に参加してくれた生徒さんに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 大岩 元：中等教育における情報教育—コンピュータ・リテラシー，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.49-5, pp.29-32 (1998).
- 2) 安浦寛人：情報技術を社会常識にするためには，情報処理，Vol.40, No.1, pp.47-49 (1999).
- 3) 永田元康，橋本孝之，八田武志，島田昌敏：情報教育概論，コロナ社 (1996).
- 4) 岡本敏雄，西之園晴夫：初等中等教育での情報教育の取り組みと現状，情報処理，Vol.38, No.7, pp.594-599 (1997).
- 5) 岡本敏雄，西之園晴夫，永野和男：初等中等教育での情報教育の内容，情報処理，Vol.38, No.8, pp.713-719 (1997).
- 6) 武井恵雄，大岩 元：高等教育との接続性からみた情報教育，情報処理，Vol.38, No.9, pp.811-819 (1997).
- 7) 伊藤一郎，山崎謙介：初等中等学校における情報教育の課題，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.56-10, pp.71-78 (2000).
- 8) 田中匡史，古賀明彦，西山晴彦，若井樹雄，山岸純子，小川 徹，浅輪 晃，中川正樹，武井恵雄，大岩 元：情報教育を支援するネットワーク利用教育支援環境の提案，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.56-8, pp.55-62 (2000).
- 9) 中村直人，松田稔樹：情報教育担当教員の養成，情報処理，Vol. 38, No.10, pp.923-928 (1997).
- 10) 堀内征治，三井健太郎，中川正樹，小谷善行，大岩元：高専学生による中学校の情報教育支援の実践，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.55-7, pp.49-55 (2000).
- 11) 斐品正照，河村一樹：宮城大学における小・中学生を対象にした情報教育の試み (2)，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.54-2, pp.9-16 (1999).
- 12) 山岸純子，小川 徹，田中匡史，辻 政昭，小谷善行，武井恵雄，大岩 元，中川正樹：小・中・高等学校における情報教育支援体制確立の試み，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.53-5, pp.33-40 (1999).
- 13) 中川正樹，武井恵雄，大岩 元，小谷善行，都倉信樹：情報教育に何が一番必要か，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.51-4, pp.25-32 (1999).
- 14) 学校教育法，現行法令 CD-ROM 第 4 版 (株)ぎょうせい (1997).
- 15) 兼宗 進，久野 靖：学校教育用オブジェクト指向言語「Dolittle」の提案，情報処理学会プログラミングシンポジウム予稿集 (2001).
- 16) 長谷川聡，山住富也，小池慎一：プログラミング教育における制御構造のイメージと理解度について，情報処理学会論文誌，Vol.39, No.4, pp.1180-1183 (1998).
- 17) 和田 勉：高等学校「情報」科目の教科書案—情報 B (2)「プログラムとは何か」および情報 C (2)，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.49-7, pp.41-48 (1998).
- 18) 兼宗 進，久野 靖：学校教育用オブジェクト指向言語/環境の構想について，情報処理学会情報教育シンポジウム予稿集 (2000).
- 19) 伊藤 務，吉田昌春：Windows 環境における計測教材の開発，日本産業技術教育学会東海支部大会予稿集 (1999).
- 20) 上田信行，古堅真彦：プログラミングを通した論理的思考の外在化の実験，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.50-7, pp.49-56 (1998).
- 21) 辻 政昭，国府方久史，中島義司，小谷善行，武井恵雄，大岩 元，中川正樹：高等学校「情報」授業における電子教材の活用法，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.56-3, pp.17-24 (2000).
- 22) 矢島脩三：計算機の機能と構造，岩波書店 (1982).
- 23) 河村一樹：高等学校「情報」科目の教科書案—情報 B (1)「コンピュータの構成」，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.49-10, pp.65-72 (1998).
- 24) Patterson, D.A. and Hennessy, J.L. (著)，成田光彰 (訳)：コンピュータの構成と設計，日経 BP 社 (1996).
- 25) 武井恵雄，丸山健夫：IT 教育のためのコンピュータ・モデル，情報処理学会研究報告，Vol.CE, No.43-3, pp.17-24 (1997).
- 26) 福岡県中学校技術・家庭科研究会情報基礎領域部会 (福岡市)：情報基礎領域展開例つづり，第 37 回全日本中学校技術・家庭科研究大会 (1998).
- 27) 浅見 匡 (編著)：中学校技術・家庭科指導細案 木材加工・金属加工・情報基礎，明治図書 (1993).
- 28) 文部省：中学校指導書 技術・家庭編，開隆堂 (1998).
- 29) (株)イーケイジャパン：WAO-II 説明書 (1996).
- 30) ASTEM：KUE-CHIP2 教育用ボードリファレンスマニュアル (1992).
- 31) 森，吉田 (編著)：心理学のためのデータ解析テクニカルブック，北大路書房 (1999).
- 32) (財)九州システム情報技術研究所：情報学習サポート事業「計算機および情報技術の原理教育のための教材開発」実験環境構築作業報告書，11 情人第 93 号，情報処理振興事業協会 (2000).
- 33) (財)九州システム情報技術研究所：情報学習サポート事業「計算機および情報技術の原理教育のための教材開発」実証実験作業報告書，11 情人第 93 号，情報処理振興事業協会 (2000).

(平成 13 年 2 月 7 日受付)

(平成 14 年 1 月 16 日採録)



甲斐 康司 (正会員)

昭和 41 年生。平成 3 年九州大学大学院総合理工学研究科情報システム学専攻修士課程修了。同年松下電器産業 (株) 入社。平成 8 年 (財) 九州システム情報技術研究所に出向。

現在は松下電器産業 (株) 半導体社で第 3 世代移動体通信端末用のシステム LSI の開発に従事。IEEE-CS 会員。



坂口 良文

昭和 37 年生。昭和 60 年近畿大学第二工学部建築学科卒業。同年福岡市中学校技術科教諭に採用。平成 8 年より福岡市立東住吉中学校に勤務。平成 10 年第 37 回全日本中学校

技術・家庭科研究大会情報基礎領域として、移動ロボットの実験授業を実施。



木室 義彦 (正会員)

昭和 36 年生。昭和 61 年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。昭和 63 年より九州大学工学部助手。九州大学工学部講師を経て、平成 10 年より (財) 九州システム情報技術研究所研究員。ロボットビジョンの研究

に従事。日本ロボット学会、計測自動制御学会各会員。



安浦 寛人 (正会員)

昭和 28 年生。昭和 53 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。昭和 55 年より京都大学工学部助手。京都大学工学部電子工学科助教授を経て、平成 3 年より九州大学大学院教授。現在、システム情報科学研究院教授およびシステム LSI 研究センター長。平成 7 年～

13 年九州システム情報技術研究所非常勤研究室長を兼務。LSI システムの設計手法と CAD の研究およびハードウェアアルゴリズムの研究に従事。電子情報通信学会、IEEE、ACM 等の会員。