

直観的なメディア特性を活かした情報教育教材のデザイン

Design of the Educational Tools for Computer Sciences based on the Characteristics of Intuitive Media

内 木 哲 也*

Tetsuya Uchiki

1. はじめに

高等学校における教科「情報」の導入以来、大学初年度生のコンピュータに対する基本的な知識や操作技能は目に見えて向上しているように感じられる。それにもかかわらず、学生のアンケートやヒアリングにはコンピュータとの接触やその操作に対する苦手意識が以前にも増して強く表れており、知識レベルにそぐわない操作方法によって自ら招いた問題状況に直面して難儀している者も散見されている。このような現代の大学生のコンピュータを巡る状況は、彼らの知識と技能とがうまく噛み合わないことに端を発していると考えられ、高度な情報技術の多用を迫る今日の社会環境がコンピュータの基本原則と経験知としての実践的スキルとの溝をさらに深めてしまうこととなるのである。

そもそも、現代のコンピュータは原理的なメカニズムに先達の技術や工夫を多様に組み入れた電子的機構であるため、その作動メカニズムは理論的枠組みだけで単純に説明できない複雑なものとなっている。それ故に、コンピュータの基本動作原理を理解することは現代社会における基本的な素養でありながらも、その全貌を

机上で理解することは極めて困難になっているのである。しかも、電子的機構の作動状態は感覚的に捉えることができず、完成された技術システムの入出力関係やサービス機能を通じた接触だけが許されているに過ぎない。その上、コンピュータは高度なシミュレーション機構でもあるため、その基本動作原理を外部から覆い隠し、一般には垣間見ることさえ困難な程にまで高度化されている。このように基本原則と現実のシステムとしての機能との乖離があまりに著しいため、理論的教育アプローチでは、実践に結びつかない抽象論の域から脱するまでに理解を深化させることが困難となっているのである。その一方で、対極に位置する実践的教育アプローチでも、道具が高度過ぎてかつ著しく変貌することからスキルを極めることが困難であり、スキルを極めたとしてもその道具の本質まで見極めるのは容易なことではない¹⁾。

このような情報教育の問題状況への対応策としては、目に見えないコンピュータの作動原理をシミュレーション技術で視覚化することが考えられ、これまでも欧米を始めとした国内外でコンピュータソフトウェアとしての教材が数多く開発されてきた。しかし、コンピュータソフトウェアとしての教材は、如何に視覚的に解りやすく精巧に作られていたとしても、学習者に

* うちき・てつや

埼玉大学教養学部教授、情報システムの社会学的研究

はビデオゲームのように感じられ、実体感が得られないという問題が生ずる²。その理由は、コンピュータが持つ本質的なシミュレーション能力に起因しており、その入出力関係は自然科学的法則とは無関係に如何様にもソフトウェアで実現可能である、ということを経験する多くの学習者はビデオゲームを通して感覚的に理解していることに由来すると考えられる。このような学習者は、ソフトウェア教材が提示する内容を直観的に理解するのではなく、むしろ逆に説明的な知識として理性的に理解しようとしてしまうと推察されるからである。

つまり、コンピュータの特徴であるところのシミュレータとしての自由度の高さは、教材としては却って問題点となってしまうのである。そのため、コンピュータ上でその作動原理をよりリアルにそして具体的に表現しようとすることは、基本原理を直観的に実感させたいとする開発者の狙いとは裏腹に、「作り物」としての存在感を高めることとなり、むしろ逆効果となると考えられるのである³。しかも、現実のシステムは社会への普及展開に伴って刻々と変貌し、ますます複雑さを増しているため、シミュレータ自体も直ぐに抽象的な位置づけとならざるを得ず、具体性が強いだけに却って教材としての効果効用が損なわれることとなるのである。

この問題は、シミュレータの原理をシミュレータで解説しようとするところに問題の本質があり、ソフトウェア教材による対処法そのものがレトリックになってしまうことなのである。そのため近年では、電子工学的な機構をコンピュータシミュレーションではなく、O'Reilly の“Head First”シリーズ⁴ のように手作業で基本動作をトレースさせることで体感させようとする教材や、Roger Young の“How Computers Work”⁵のように目に見える電気機械式の動作機構として把握させようとする教材が目立

つつある。つまり、誰もが直観的に把握できる物理的な動作機構としてコンピュータの基本動作原理を理解させることで、学習者にとって、「作り物」でない実際の技術的メカニズムとしての、いわば地に足の着いた知識が習得できることを目指した取組と捉えることができる。

以上のような背景から、本論文では現代人の素養であるコンピュータの基本原則を会得し、感覚的に理解を深めるために有効な教材のデザインについて議論することを目的としている。まず、コンピュータの基本動作原理を理解することが、現代社会において重要であることと同時に困難となっていることを社会的文脈の視点から分析して議論する。そして、このような社会的状況を打開すべく、近年取り組まれてきた直観的なメディア特性を生かした教材事例を、学習者への動機付けと教育効果の観点から分析し、基本動作原理の学習という点での効果効用に関して議論する。これらの議論を通して、具体的な教材のデザインに不可欠な、教授すべき基本動作原理を導き出すと共に、教材に求められる要件を明らかにする。最後に、試作した教材から得られた知見に基づき、今後の教材開発に向けた方策について考察する。

2. 現代人の素養としての基本動作原理の理解

人間の感覚器官で直接感知することができない⁶、回路内の電子流動に基づいたコンピュータの動作原理は、当然机上での理論的知識として教授せざるを得ないことは、以前も今も変わりはない。また、コンピュータの基本動作原理も、1940年代の電子式計算機黎明期に Johann L. von Neumann が提唱したとされるプログラム内蔵型コンピュータ⁷から本質的には変化していない。このことから見る限り、コンピュータの基本原則を教授することには大きな変化は生

じておらず、むしろ以前よりも身近にコンピュータが存在する分だけ理解が容易でより深い学習が期待できるものと一般には捉えられている。

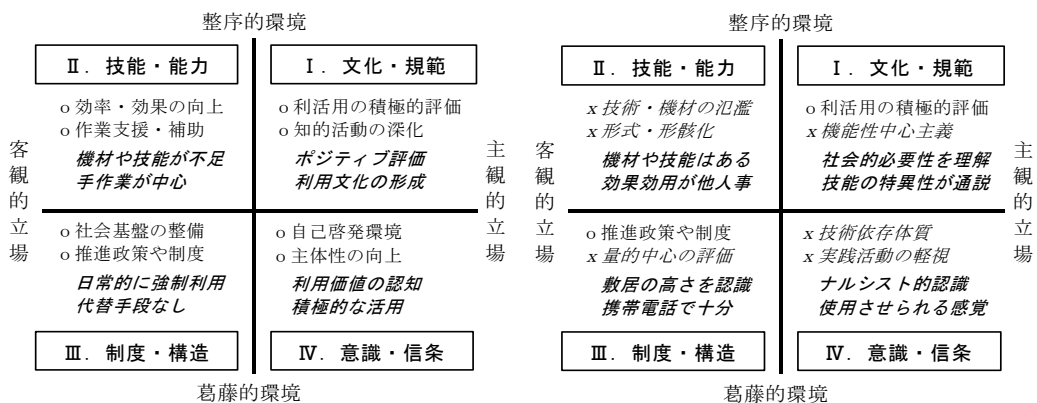
ところが、コンピュータが身近な存在になったことで、学習者が置かれている社会的文脈は以前とは大きく異なっており、却ってそのことが基本原理への接近や深い学習の障害となっている。現代の大学生のような若い人々は、生活環境のみならず、発達段階における多様な局面で陰に陽にコンピュータと接し、その機能がもたらす恩恵に浴してきたといえる。元来、人々が伝統的にあるいは創意工夫しながら手作業で行ってきた種々の情報処理を学習はもとより認識もしないままに、彼らはコンピュータの機能として活用してきたことになるわけである。

つまり、コンピュータ普及以前に育った人々であれば、日常経験として容易に理解できた作動原理さえも、彼らにとっては新たな知識や技法として学習しなければならない分だけ、複雑な処理と受け取られてしまうわけである。しかも、コンピュータの応用範囲は以前より遙かに多様で処理内容も高度であるため、基本動作原理と現実のシステム機能との隔たりは大きく、そのことも基本動作原理から学習者を遠ざける

ことになってしまうのである。

このような情報技術を巡る社会的文脈の相違は、G. Burrell と G. Morgan による社会学パラダイムの枠組み⁸を用いて、図1のように示すことができる⁹。図1では、これらの各視点から見て情報技術が、社会にもたらすメリットを○を付けた項目として、またデメリットを×を付けた項目として示している。コンピュータが社会に広く普及しておらず、学習者が操作にも不慣れな状況では、基本操作技能の習得による技術の理解が中心とされ、操作方法に重きを置いた教育内容となることは当然の帰結といえる。このような社会的文脈は図1aに示したように捉えることができ、技能の習得が技術の理解を深め、さらなる技能の向上と技術の得失や可能性の把握につながる正の好循環が生じることも期待できよう。

これに対して、今日の大学生のようにコンピュータ技術がもたらす多様なサービスを享受しながら成長し、しかも日常的に個人の携帯端末を所持して、場所や時間の制約が少ない利用環境で生活している人々の社会的文脈は、図1bに示したように図1aとは大きく異なっている。彼らは多くの機材やソフトウェアの操作技能を



a) 技術普及以前の学習者が置かれていた社会的文脈

b) 現在の学習者が置かれている社会的文脈

図1 情報技術の学習者を巡る社会的文脈の相違¹¹

身に付けており、その活用方法に関しても良く理解しているものの、逆にビデオゲームなどの経験を通して、コンピュータがもたらすある意味不自然な入出力関係にも慣れ親しんでしまっている。それ故に、コンピュータの操作反応はどのようなものでも受容できる適応性を持っている反面、その反応を実感として素直に受け取ることは希で、経験知としての学習効果も得難くなっていると考えられるのである¹⁰。

その上、提供されるサービス機能が高度に複雑であることとも相俟って、操作技能と享受するサービスとの関係性を表層的に捉えることに慣らされてもいるため、そのメカニズムや原理を探ることは言うに及ばず、理解しようとする意識さえ生じ難いのである。従って、図 1b のような社会的文脈では、新たなサービスや技術システムが表層的な入出力関係を持ったブラックボックスとして導入されることとなる。その結果、技能習得のための訓練や機能に関する知識教育が社会的に強く求められ数多く実施されることとなる。しかし、そのサービスの仕組みやコンピュータそのものはブラックボックスのままであるため、多くの学習者が多様な技能を持ちながらも技術的理解を深めることができずにおり、それ故に原理的な同一性や要諦としての基本的技能にも気づけない、といういわば地に足の着かない状態となってしまうこととなる。このような状態で次々と新たな技術を使用せざるを得ないとすれば、不安ばかりが募る負の悪循環に陥ることは当然と考えられるのである¹²。

このような現代の学習者を巡る社会的文脈においては、コンピュータを多用する社会基盤を安心して利用するためにも、その基本動作原理を理解することが以前にも増して重要となっているといえるのである。しかしながら、その基本動作原理まで理解しなければコンピュータ自体を役立てられない以前の状況とは異なり、今

日では実際のシステム利用に際して動作原理の理解が必要とされないばかりか、その原理的特性を実感することさえ難しい。基本動作原理がコンピュータの利活用と不可分であった時代は、むしろその動作原理に適した分野のみでの利用であったともいえ、しかも演算誤差や処理効率といった基本動作原理に纏わる機能的特性に対処する必要性から、自ずと原理的理解が深まり、利用者の技能水準も高まることともなっていたわけである。

これに対して今日では、安価なコンピュータシステムでさえ、その利活用に原理的知識が必要とされないばかりか、高度な補正技術を用いて、その機能的特性さえも一般の利用者には察知できないように隠蔽されている¹³。そのため、基本原理に関する知識を学ぼうとする動機を得難く、実際に確認することもできないことから、その理解も抽象的な範囲から脱却することができず¹⁴、実社会で具体的にその知見を生かせない机上の知識として、むしろ軽んじられてきたと捉えることさえできよう。

情報技術はこのように高度に社会的な技術であるため、その利活用のための基盤形成は専門の知識や技能を備えた専門家に任せ、一般の利用者は社会生活での利活用さえできればよく、その基本動作原理についてはむしろ知る必要もない、とする考え方もある。しかしながら、電源の入断以外には全く作動原理を掴むことができないコンピュータは、他の機械と比較しても特異な存在といえる。しかもその機能は、社会生活に欠かせないものであるだけでなく、人々の精神活動と深く結びついているため、意識や思想にも強く影響を及ぼすこととなる。その意味からも、コンピュータの基本的な動作原理と特性は、自動車の仕組みと同様に¹⁵、情報技術を利用する全ての人々が理解すべき基礎知識といえるのである。そして、その理解が地に足の

着かない技術を使用する不安感を軽減することともなり、情報技術を多用する社会全体に安定と安心をもたらすと考えられるのである。現代の教育環境の中で、コンピュータの基本動作原理を学習者に直観的に把握させ、地に足の着いた知識として理解を深めさせようとする教材を開発することは、図らずもこのような社会的状況を打開しようとする取組としても捉えることができるのである¹⁶。

3. 直観的なメディア特性を生かした教材事例

コンピュータは社会に広く普及し、日常的に使用されているにもかかわらず、その基本動作原理を教授することにはそもそも困難が伴っている。それは、コンピュータが万能なシミュレーション機械であることに起因しており、その操作反応自体が理論的動作原理に由来するものであるか、動作原理に則ったシミュレータの反応に過ぎないものであるかを、一般の利用者が感覚的に認識し、見極めることができないからである¹⁷。しかも、コンピュータを構成する電子的機構の動作は直接的には感知し得ないため、基本動作に関する理論的な知識を具体的な感覚と結びつけることができず、実感として把握することも学習者には困難である。実際、記憶装置への数字だけの入出力装置と MPU の状態表示のみを備えた、MPU¹⁸ システム開発技術者育成用の 1 ボードマイクロコンピュータ教材でさえ、学習者が MPU に成り代わって基本原理に従った処理を実行する、というイメージを形成できるまでに至ることは多難なことであった。つまり、コンピュータの作動原理を自身の感覚に対応させて、直観的に把握できるまでに深く理解することは、専門の技術者でも容易なことではないのである。

このような背景から、コンピュータの基本動

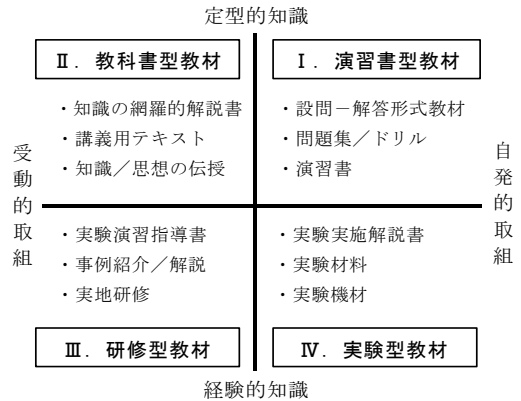


図2 動機付けと教育効果による教材の分類

作原理を経験的な感覚と結びつけることで、具体的な現象として学習者に直観的に把握させ、理解を深めさせようとする取組が数多くなされている。その取組の一環として、直観的なメディア表現を用いた教材が開発されてきた。このような取組は、主として実際の教育現場で実践的になされており¹⁹、教育現場で教師が用いる教具や学習者自身が主体的に使用する教材として、具体的な実験用機材から教科書や演習書などの書籍に至るまで、多様な形態のものが開発されている。これらの教材²⁰の全体像を掴むため、先の社会的文脈の分析と同様に G. Burrell と G. Morgan の社会学パラダイムの枠組みを用いて、図2のような分類視点を導きだした。図2では、Objective－Subjective の横軸を学習者の学習への動機付けと捉えて、その取組姿勢が受動的か自発的かという観点での分類軸とし、Regulation－Radical Change の縦軸を学習者への教育効果と捉えて、学習で身に付く知識が定型的か経験的かという観点での分類軸とした、4つの分類視点を提示している。

図2の第I象限は、自発的取組で定型的知識を学ぶ視点であり、「演習書型教材」の視点といえる。第II象限は、受動的取組で同じく定型的知識を学ぶ視点であり、講義などで網羅的に知

識を学ぶための「教科書型教材」の視点といえる。このように定型的知識の学習には、問題集やテキストといった書物や電子書籍が該当する。これに対して、図2の下半分に位置する経験的知識を身に着けるためには、研修や実験のような、座学ではない実践的な活動が不可欠であるため、その活動で利用する、或いは活動そのものを促す教材が該当する。第Ⅲ象限は、経験的知識を身に着けるための受動的取組である研修で使用する「研修型教材」の視点であり、第Ⅳ象限は、経験知識を身に着けるために自発的に取り組む実験で使用する「実験型教材」の視点とすることができる。第Ⅳ象限の「実験型教材」には実験材料や実験機材が該当するが、第Ⅲ象限の「研修型教材」としては、研修を实践するために必要な環境構築方法や実施要領のような指導書や、研修での材料が中心となる²¹。

感性に直接訴えかける表現を用いた先駆的な教材としては、Ziff Davis 社による“*How it works*”シリーズ²²を挙げることができる。本書は、コンピュータや通信のメカニズムを分かりやすく図解した先駆的な「教科書型教材」であり、一般読者を対象とした啓蒙書としてだけでなく、コンピュータの基本動作原理を教授するための教科書として十分に利用可能な内容を備えていた。そのため、本シリーズはその後も改訂が続けられており、例えば Ron White による Windows PC の動作機構を解き明かした書籍は、現在第9版が出版されている²³。しかし、本書は高機能化に伴って複雑化しつつある Windows PC の動作原理を、実際の具体的な動作に照らして解説する形態を取っているため、版を重ねる度にその内容は極端に肥大化し、現在の版は百科事典のようになっている。その一方で解説は具体性を重視した内容であるため、多様化する周辺装置やインターフェースに関する詳細な技術解説に多くのページが割かれてお

り、基本動作原理を教育するための教科書として相応しいとは言い難い、総花的な内容になってしまっている。

図解により直観的に理解させようとするアプローチでも、Roger Young による「教科書型教材」では、表層的な機能を分かりやすく図解しようとするのではなく、演算機構と記憶機構との基本的な動作原理を単純な電気回路の組み合わせによって解説することで、コンピュータの基本動作原理を電気回路の動作イメージを通して学ぶことができるよう構成されている²⁴。本書で解説に使用されている電気回路は能動素子を用いない直流回路であるため、回路図からその動作を推し測ることができ、入手可能な材料を用いて実験的に動作を確認することも可能である²⁵。

また Tim Bell らは、紙や、カード、ペンだけを用いて、データ処理を手作業で行うことを通して、コンピュータの演算原理からアルゴリズムまでも初等教育の中で体験的に学習できる教育方法を提案し、指導者向けの教科書²⁶を作成している。本書に掲載された課題は、含意に富んで楽しく理解できる内容であるが、初等教育ということから、あくまでも指導者の指導の下で学習者が実施すべき内容といえる。その意味で本書は「研修型教材」であり、本書に沿った内容で学習者が教室で使用する教材は、副教材として使用する学習ドリルのような「演習書型教材」と位置づけられよう。

「演習書型教材」としては、プログラミング言語の習得を目的としたものが古くから多数出版されてきたが、言語記述力も先述した MPU の動作原理を学ぶことと同様に、学習者自身が言語処理系に成り代わってその言語で記述可能な処理手順を実行するイメージを形成できるまでに至るのは困難なことであった。このような状況に対処すべく、O'Reilly Media 社はプログ

プログラミング言語を中心に物理学や数学、統計学などの習得を目的とした演習書である“Head First”シリーズを上梓している。同シリーズの特徴は、単に課題を提示して解答させるのではなく、課題を考える道筋を示しつつ、自分で計算や作図、プログラム実行といった具体的な手作業をこなすことで、基礎を確認しながら頭と身体で学習するように課題が構成されていることである。しかしながら、本シリーズではコンピュータの基本動作機構を扱ったものは出版されていない。実用的な演習書という観点から現実の具体的な機材を対象とすると、“How it works”シリーズと同様に、多岐に亘る詳細な内容を扱わなければならない、しかも対象とする具体的な機材のライフサイクルも短い、というように取り扱い難い対象であるためと推察される²⁷。

一方、学習者から見て、コンピュータに自作のプログラムを実行させることは、そもそも実験的な行為であることから、以前はコンピュータそのものが「実験型教材」であったといえる。コンピュータシステムが拡大化してその挙動が見えにくくなってからも、MPUの学習キット²⁸がその役割を果たしてきた。MPUが社会に普及して学習者の範囲も一般に広く拡大してきたことを受け、LEGO社はMPUの学習キットよりも直観的に分かりやすい「実験型教材」であるMindStormsを開発した。MindStormsは従来のLEGOブロックをベースに、MPUを内蔵した制御装置と、モータやLED、光センサー、タッチセンサーなど組み込んだ入出力機能を果たす機能ブロックとをセットにした機能型のブロック教材であり、簡単なロボットや自律型機械を組み上げ、実験することができる。また、MPUの動作制御用に流れ図のような視覚的に分かりやすいプログラミングツールも用意されており、音や光、物体の運動などの物理的現象

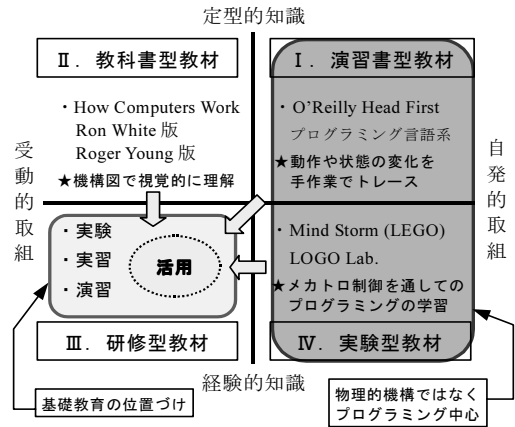


図3 教材の開発状況

で動作状況を確認しながら、感覚的にMPU制御を理解することができるのである。この教材の狙いは、直観的なメディアによる入出力を用いたプログラミング学習を通してコンピュータの動作原理を学ぶことにあるといえる。

これまでに開発されてきた直観的なメディア特性を生かした教材事例を図2の枠組みで分類すると、図3のように分類することができ、その開発状況の特徴が明らかになる。図3は、自発的に学習に取り組める教材が物理的機構を直観的に把握するものではなく、直観的なメディアによってプログラミング技能を習得し高めるための学習教材が中心であることを示している。また、情報教育のような教育の現場は、教科書、演習書、実験教材を活用して実践される研修の場であり、学習者の理解を深めるためにそれらの教材を使い分けながら実践されていると捉えることができるのである。このことから明らかになることは、これまでの情報教育では、コンピュータの基本動作原理が授業の中で教科書的な知識として教授されているに止まり、学習者が主体的に学ぶ内容はプログラミングという実践的技能が中心で、そのほとんどが基本動作原理そのものを学習者に直接的に理解させようとする取組ではなかったということである。

学習者がプログラミング言語を習得して、コンピュータに自分が意図した振る舞いをさせようとする過程を通して、ある程度はコンピュータの物理的機構に関する理解を深めることができる。しかしながら、プログラミングを通して学習できることは、物理的機構上の処理系の動作メカニズムに止まざるを得ない。その理由は、プログラミング言語処理系が物理的機構のシミュレータの役割を果たしていることにあり、MPU の動作そのものはブラックボックス化されているからである²⁹。その状況はソフトウェアによる物理的機構のシミュレータ教材を通したある種「間接的な³⁰」学習と同様といえ、先にも述べたように、現代の社会的文脈においては、その類の「間接的な」教材からは多くの学習者が実感を得難く理解を深められない、という問題に帰着してしまうことともなるのである。

4. 基本動作原理の理解を目的とした教材のデザイン

そもそもプログラミングを通してのコンピュータの基本動作原理へのアプローチは、現代のように高度に洗練され抽象化されたプログラミング言語を用いるのではなく、利用者との唯一のインターフェースである MPU への機械命令や、それと一対一に対応したアセンブリ言語によるものとしてなされたことである。今日でも、機械命令を用いれば、MPU との「直接的な」接触が可能であるが、MPU 自身も現代では単純な基本動作原理のみから構成されているのではなく、高度なメカニズムが多数組み込まれているため、動作原理を学習する教材として相応しいとは言い難い³¹。

感覚的にその動作を認識できない電子回路のみで構成されたコンピュータの基本動作原理を把握するには、まずブラックボックスとなって

いるその内部のメカニズムを白日の下に晒して、その動作原理である主要な構成要素の動作を逐一確認できるような教材が必要とされる。しかし、教材としてのコンピュータは、他の機械機構の教材と同様に、それが作動する基本原理となる必要最小限のメカニズムのみで構成されていなければならない。そのため、このような教材のデザインには、まず第一に教材の学習目標を設定するために、教授すべきコンピュータの基本的な動作原理を導き出すことが必要となる。そして、学習者がこの動作原理を会得することと共に、感覚的に理解を深めるために有効と考えられる、直観的なメディア特性として実現すべき物理的メカニズムと、それに基づいた具体的な教材のあり方を検討する必要がある。

4. 1 教授すべき基本動作原理

高度に複雑化した現代のコンピュータでも、その基本動作原理は Automata Theory³² で数学的に扱うことができるオートマトン (automaton) として表現可能であり、その基本的動作はオートマトンの一種であるチューリング機械の原理に従うといえる。オートマトンは、入力と出力を結ぶ有限個の内部状態から成る抽象的な数学的モデルであり、入力によって内部状態が変化すると共に、内部状態に応じた出力がなされる。英国の数学者であるチューリング (Alan M. Turing) は、自動計算機械をオートマトンとして数学的に扱うために、無限に長く情報を読み書きできるテープと、情報をテープに読み書きするためのヘッド、有限の内部状態を持てる制御装置で構成されるチューリングマシン (Turing machine) と呼ばれる仮想機械と捉えた。チューリングマシンは、制御装置の内部状態とヘッドから読み出した情報の組み合わせにより、機械の内部状態を変え、ヘッドを左右に一つ動かし、ヘッドの位置のテープに

情報を書き込むという単純動作を、制御装置の内部状態が停止状態になるまで実行し続けるわけであるが、この動作原理は今日のコンピュータでも根源的には同じである。

しかしながら、チューリングマシンは数学的に洗練されているが故に、却ってコンピュータの基本原則との乖離が大きく、動作機構としても抽象度が高いため、その基盤である論理演算との関連性も見出し難い。実際、チューリングマシンは計算可能性を検討する数理論理学のために導き出された概念モデルであり、コンピュータ科学分野でさえも、基礎理論として多くの人々が理解しているとは考え難い状況といえる。その一方で、コンピュータの基本原則としては、2進演算処理にまつわる個別の論理演算機構が中心であり、その集合体としてのシステムの概念や状態遷移による動作概念については、機能ブロック図のような抽象的概念の説明に止まっている。

このような実情は、本来、基本原則で実現される機能を基礎としてより高度な機能が実現される、という機能の地道な積み重ねとして説明されていた過程が、現実のコンピュータ技術の急速な進展の影響を受けて省略されてしまったことが原因と考えられる。そのため、マクロなコンピュータシステムとミクロな基本原則とを橋渡しする知識が教授されず、双方が乖離したままとなってしまったといえよう。このように原点に立ち戻ってみれば、コンピュータの基礎教育に必要なことは、高度で技術的な抽象度も高い実際の具体的機構に関する知識や理解ではなく、むしろ現実とかけ離れたレベルではあるものの、コンピュータの電子演算機構としてのメカニズムとその動作原理を確実に理解することである、ということが明らかとなるのである。

このような観点に立って、コンピュータの基本原則をチューリングマシンの制御装置をも含

めて捉え直してみれば、それは電子スイッチの集合体であり、現在のスイッチ群の状態で次のスイッチ群の状態が決まるように動作することが、その根本的な作動原理といえる。もちろん、コンピュータとして一連の動作を実行するよう機能させるためには、それぞれのスイッチに機能的役割を付与しなければならないが、それこそがコンピュータの処理機構を具体的に理解するために欠かせない原理としての知識となる。例えば、全体の制御機構としての役割を担うスイッチや、他のスイッチの状態を変えるスイッチなどを考えることで、電子演算機構がコンピュータシステムとして機能する動作原理を具体的に把握することができるからである。

4. 2 教材に求められる要件

コンピュータの動作原理を具体的に実感して感覚的に会得するためには、単に完成された機構を覗き見るだけでなく、直観的に動作原理を把握できるレベルまでにその機構を分解し、それらの要素機構を自ら組み上げる作業過程を経験することが重要と考えられる³³。そのような教材は、学習者が自発的に取り組むことができ、直観的なメディアを通して体験的知識を会得することになることから、「実験型教材」に位置づけられるものである³⁴。そしてそれは、直観的に動作原理を把握できる基本要素機能ブロックの集合であり、LEGO社のブロックのように組み上げることで、基本的なコンピュータとして動作するデータ処理機構が実現できるというものである。

先述したようなコンピュータのデータ表現および演算の基本原則としてのスイッチの概念は、これまでも多くの教材で取り上げられてはきたものの、一般的には静的な状態を示す概念レベルに止まり、その作動原理や制御機構としての動作メカニズムまではほとんど取り上げられて

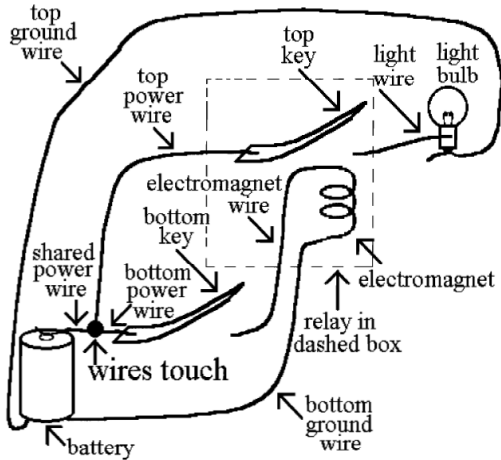


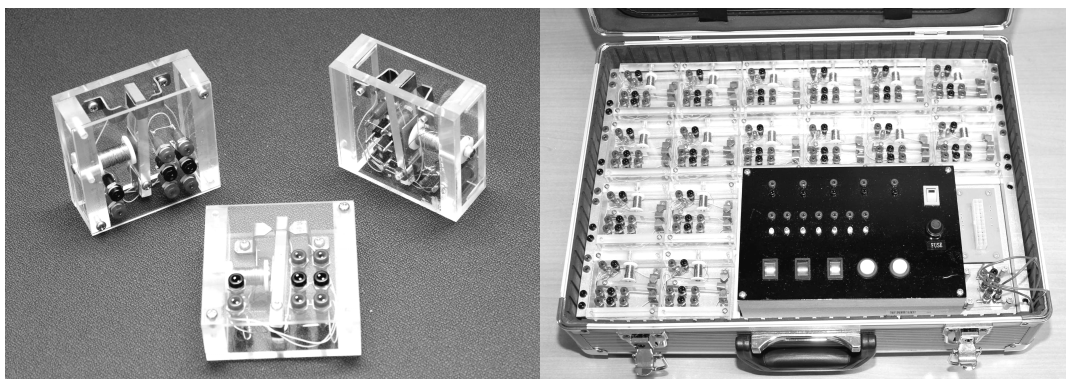
図4 基本原理としての自動開閉スイッチ³⁶

こなかった³⁵。しかし、コンピュータの基本動作原理として理解すべきことは、チューリングマシンで定義しているように、記憶機構を持ち、その読み書きができると共に、自身の状態を記憶でき、ある一定の手続きで自身の状態を順次遷移できる、という単純機能だけに絞ることができるのである。ここでまず重要となるのが状態遷移の機構を制御する順序回路を構成する論理演算機構である。しかも、原理的には論理演算機構を組み合わせたフリップフロップ (flip-flop) 回路により、もう1つの重要な要素である記憶機構も実現可能であるため、これ

だけが実現できれば良いこととなる。また、論理演算は原理的に NAND 演算だけで全ての論理演算が可能³⁷であることから、NAND 演算回路を構築できることが教材に最低限求められる原理的な機能といえる。

具体的な教材には、スイッチの自動開閉を直観的に把握できるよう表現されることが望まれるが、そのような仕組みとしてはリレーのような電磁スイッチが有望であり、Roger Young の教材でも中心的な作動原理として、図4に例示するような形で説明している。このような機構をリレーで実現することは容易であるが³⁸、リレースイッチはケース内に納められており動作も少ないことから、その開閉動作が視認し難いという問題点がある³⁹。そこで我々は、コイルを巻いて電磁石を作成することから始め、図4の模式図と同様に作動し、かつスイッチの開閉動作がよく見える自動開閉スイッチブロックを試作した(図5)。各スイッチブロックはリレー駆動用端子とスイッチング端子を備えたユニット構造となっており、それらの端子をケーブルで接続してゆくことで、連携的な動作を表現することができる。

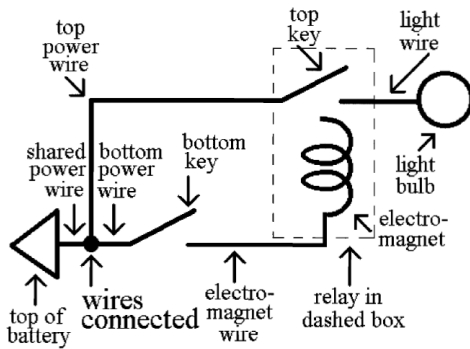
この自動開閉スイッチを図6で示すように接続することにより、AND 演算回路を作成でき



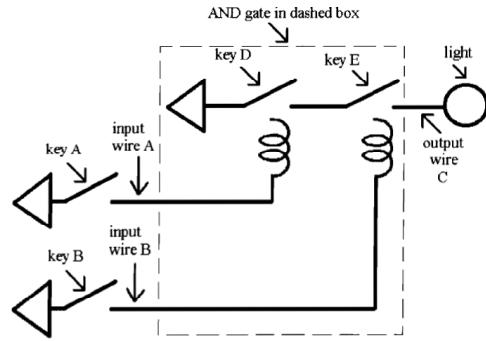
a) 自動開閉スイッチブロック

b) 教材としての実験キット

図5 基本原理教育用の教材としての試作した自動開閉スイッチ⁴⁰



a) 自動開閉スイッチの配線ダイアグラム表現



b) 配線ダイアグラム表現による AND 演算回路

図6 自動開閉スイッチの配線ダイアグラム表現による AND 演算回路⁴¹

る。この回路を応用して、スイッチを入れたときに自動スイッチが開くように、図6の2つのスイッチ閉動作を反転すれば NAND 演算回路となる。この NAND 演算回路を2組用意して、各々の出力を襷掛け状態で入力へ戻すフィードバック回路とすることで、1bitの記憶回路であるフリップフロップを実現できるのである。このように自動開閉スイッチによる論理演算回路を組み上げてゆくことで、最終的にはコンピュータとしての演算処理機構を実現することが可能なのである。

5. おわりに

本研究の目的は、人間が感覚的に察知することができない電子的機構の原理を、光や音、物体の運動等の物理的な動作機構として実現することで、直観的に把握できる教材のあり方を議論し、具体的な教材をデザインすることにある。本論文で提示した自動開閉スイッチ以前にも、著者らは、リレー駆動の全加算器や半導体素子を用いた論理演算ブロックなどを試作してきた。そして、これらを実際に教育現場で用いることを通して、学習者がコンピュータの基本原則を直観的に強く実感できることを確認してきたと

同時に、学習者の理解を深化させる手立てとして、このような教材の有効性に対する確信をより深めるに至っている。

これまでの試作機による教育実践を通して明らかにされつつあることは、自動開閉スイッチの動作過程を示すには、必ずしも本論文で提示したような大きな動作として表現しなければならないわけではないということである。半導体素子を用いた電子式のスイッチでも、スイッチの開閉状態を2色のLEDで示すようにしたところ、状態が認識し易く、動作も見え易いとの評価を得ている。また、リレーとの比較で、半導体素子によるスイッチはリレーのような動作音が発生しないことが動作の把握における直観性を損なわせているとの見解も得られている。

また、コンピュータの基本動作原理は、全て単機能の自動スイッチで実現可能であるが、簡単な演算機構だけで組み上げることは接続が複雑になることから、却って直観的な理解を損ねてしまう危険性がある。それを回避するためには、ある程度の機能をまとめた論理回路ブロックを予め用意しておくことである⁴²。高度で複雑なメカニズムを理解する際には、その高機能なブロックを利用することで、これまでの教材で説明されてきた機能ブロック図のような機構

説明とも親和性を持たせることができ、しかもブラックボックス化されていた機能ブロックの理解にもつながる教材と成り得ると考えられる。

情報基礎教育は、これまで一般的に情報工学的な見方、捉え方に立脚した教育カリキュラムを採用し、コンピュータを利用者の問題解決のために実践的に活用するための「型」を提示および伝授しつつ、レポートや論文の質を効率的および効果的に向上させることをねらった内容であったといえる⁴³。コンピュータシミュレーションによる教材開発は、その延長上の自然なアプローチであるといえる。しかし、知識と技能経験とが乖離してしまう問題の所在は、そもそも情報技術が人間活動の高度な模倣技術であることに由来しているといえる。情報技術は形式および定型的な人間活動のほとんどを模倣して処理できてしまうため、人間は人間的行動に注力できるわけであるが、それは逆に人間に社会的および人間的な行動の本質的な意義を迫ることとなるからである。

企業組織での業務改革と同様に、人間の知育や発達過程における情報メディアの使用方法や教育効果が問い直されなければならない状況に至っていることがこの問題の根元的な要因といえよう。従って、この問題を解決するためには、経験知を主体的に知識と結びつけるように促す環境が必要であり、日常生活環境にそれを求められない今日においては、教育現場での取組が重要となるのである。本研究でデザインされた教材が、教育の現場での経験知に裏付けされた確かな知識形成のための道具として、さらにはそのような知識に立脚した主体的な行動により、社会問題となりつつある学習者の知力と社会的モラルの向上に資することを願ってやまない。

本論文で議論したデザインコンセプトに基づいた教材は、教育現場で広く用いるためには今後の実践やさらなる試作実験を通じた検証が不

可欠であるが、直観的なメディア特性を活かした教材は地に足の着いた知識基盤を形成する手だてとして期待できよう。本論文での議論が、今後の大学レベルでの情報教育のあり方を検討および議論する上での一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究は、平成 23～25 年度科学研究費補助金（基盤研究(C)、課題番号 23501134「直観的なメディア特性に基づいた情報教育のための教材に関する研究」）により、具体的な学習環境の構築に向けた基礎研究の一環として実施された。また、本研究の予備実験の機材製作および実験遂行にあたり、本学教養学部文化環境専修 三平貴之氏（現武州製薬株式会社）に多大なご協力を頂いた。記して感謝の意を表す。

¹ それ故に、実践的教育アプローチでは、現場で直ぐに利用可能な高度で特殊な技能を徒に習得させるといった表層的な訓練の罠に陥りがちであることが否定できない。実際、現代の情報工学教育の中でも、ソフトウェアシステム開発現場で使用される高度なツールをそのまま教育用ツールとして用い、その操作方法やそのツール上だけで有効な局所的な知識や方法の訓練を「教育」と称している事例が散見される。このような「教育」の修了生は確かに社会で即戦力として活躍できるであろうが、実際にはプログラム開発において最も基本的な変数や実行制御の概念さえ理解していない者や、課題制作もインターネット上で雛形を探すことに心血を注ぐといった表層的な問題解決者などを輩出するばかりで、将来の社会を支える人材育成の観点からは大変危機的な状況にあると著者らは危惧している。

² 実験経済学の市場実験は、教室で口頭で実施する場合には経済理論を実験結果として体感しながら学ぶことができる良い教材となるが、コンピュータシステム上で実施した場合には実感を得られた受講生が少ないという現象も同様の問題に起因している[Uchiki 2008, 内木 2010]。

³ そのことは、情報教育関連の学会や企業でこれまで数

- 多くの教材が開発されて来ているながらも、標準的な教材としての決定打を欠いていた理由と符合すると言えよう。
- 4 Anderson and Benedetti 2009, Griffiths 2009 など、多くの書籍がシリーズとして出版されている。なお、日本語で翻訳出版されているのは、統計学を除いてプログラミング言語やシステム設計技法などの習得を目的とした内容に関するものばかりで、物理学[Lang 2008]や、代数学[Pilone and Pilone 2008]、幾何学[Fallow and Griffiths 2009]などに関しては翻訳されていない。
 - 5 Young 2001.
 - 6 感電により痛みや痺れを感じるのは、ある意味社会的に利用者が危険が察知できるように統御された特別な状況下での事例である。実際、我々は心電図測定器や低周波治療器で使用されている微弱な電流を感じることができず、逆に死に至るような強い電力との接触を回避するための感知力も持っていない。
 - 7 一般にノイマン型計算機 (von Neumann computer) と呼ばれ、現在の一般の計算機は全てこの型に分類できる[長尾, 他 1990, p.563]。
 - 8 Burrell and Morgan 1979, p.22.
 - 9 詳細については、文献[内木 2009]参照。なお、本文献では一般情報基礎教育の社会的文脈として議論されているが、本質的部分は本論文で議論している技術的理解に関する情報教育と同じである。
 - 10 人間の一種の適応能力の表れと考えられよう。このことが示唆することは、幼少期からのコンピュータとの接触は一般に期待されているようなポジティブな効果よりも、むしろこのような自然な感覚を歪めるネガティブな効果をもたらす危険性ではなからうか。
 - 11 内木 2009, p.17 and p.20.
 - 12 このような利用者が不安を募らせる環境こそが、今日の IT ビジネスを展開させている要因とも捉えることができよう。
 - 13 このような技術特性の高度な隠蔽や自動補正技術は、教育上のネックであるだけでなく、健全な技術者を育成し、技術を未来に継承していくためには却って大きな障害となるものと危惧される。
 - 14 近年のコンピュータでは、計算誤差のような基本動作原理上の特性を利用上の欠点と見なして、複雑な機構により覆い隠してしまうため、一般的な利用の範囲でそれらを目の当たりにすることはほとんどなく、システムのバージョンアップにも伴い、その数少ない事例も減少の一途を辿っている。
 - 15 精神活動の結びつきという観点からすれば、自動車のような物理的效果をもたらす機械以上に、その特性や

仕組みを知らなければならない対象といえよう。

- 16 そもそも開発動機は、コンピュータの基本原理に関する理解を深めさせたいという単純な理由であり、学習者の理解度向上を目指した現場での取り組みがこのような教材開発に結びついたといえる。しかし、基本原理教育への拘りや思い入れこそが、現場担当者達の意識の底流にある社会的文脈の暗黙的認識に基づいたことであると捉えることもできよう。
- 17 内木 2007. 本稿でコンピュータの計算機能すらシミュレーションに過ぎないことを言及している。
- 18 Micro Processor Unit の略で、PC で用いられているような超小型演算処理装置。
- 19 教育実践が中心であることと、具体的な効果測定が困難であることから、学会発表や論文としての報告がほとんどなされておらず、実態が掴みにくい状況にあるが、関連する教材の利用状況や関心度の高さなどから、多くの教育現場で何らかの形で取り組まれていると捉えることができる。
- 20 本稿では利用者や利用場面を特定した議論はなされないため、以下では教材と教具を区別せずに教材と記す。
- 21 双方共に実践的な活動のためのマニュアルも教材として含まれるが、それらはあくまでも実践の指南書としての間接的な位置づけであり、マニュアルを通して学ぶわけではない。
- 22 Ron White 1993, Derfler, Jr., Freed 1993, Eddings 1994, Rizzo 1993 等を始めとして、多数出版されてきた。
- 23 Ron White 1993 & 2007. 現在は、Que Publishing より出版されており、2013 年初旬に最新版 (第 10 版) が刊行予定と告知されている。その他に、通信ネットワーク全般を扱った *How Networks Work* が第 7 版 [Derfler, Jr., Freed 1993 & 2004]、インターネットを対象とした *How the Internet Works* が第 8 版 [Eddings 1994, Gralla 2006] まで改訂が続けられている。
- 24 Young 2001. 多くのコンピュータシステムの入門書 [例えば、アイテック情報技術研究部編 2009] でも、データ表現や論理演算を簡単な電気回路で説明しているものの、それ以降は論理回路や機能ブロックダイアグラムのような形式的概念での説明となっている。
- 25 小学校の理科で学ぶような能動素子を含まない小電力の直流回路は、基本的に電流が経時変化せず、スイッチの入断時以外は静的な安定状態が保たれるため、回路からその挙動をほぼ正確に把握できる。
- 26 Bell, Witten, Fellows 2005. 本書はよく考えられた秀逸な教科書であるが、初等・中等教育に適した内容

- であるため、残念ながら高等教育における学習者の知的レベルにはそぐわない。なお、本書は教員に向けた教育手引き書と共にインターネット上で無償配布されており、日本では兼宗進らにより紙の本として出版されている日本語訳版も入手可能である。
- 27 想定される読者数がそれ程多くないということが、出版されていない最大の要因といえよう。
- 28 例えば、1970年代に販売された NEC TK-80やTK-85などを代表的な製品として挙げることができるが、学習用の「実験型教材」としては学研の電子ブロック FX-マイコン[学研 1981]が代表例といえよう。
- 29 むしろ処理系の仮想化こそがプログラミング言語の役割といえ、それ故に多くの異なる処理系上で、同一のプログラムを書き換えることなく実行可能となるのである。
- 30 コンピュータを操作することから、シミュレータを使用することも直接コンピュータに触れていることと錯覚しがちであるが、それはいわば役者の振り舞いを通して役者本人の手柄や性格を判断するようなもので、程度の差こそあれ、間接的な接触の域を脱することはできない。
- 31 先述した MPU 開発技術者用の教材も同様な意味で一般的な学習教材とはなり得ない理由でもある。
- 32 Automata とは「自動」を意味するギリシャ語由来の言葉であり、単数形の automaton と共に自動機械全般を指す用語であるが、理論コンピュータ科学では演算機構を状態とその遷移とで表現したものを automaton (オートマトン) と呼び、その動作を数学的に捉える理論が Automata Theory である。
- 33 ガソリンエンジンの動作機構を理解するために、一度分解し、再度組み立てる技術科教育の実習と同様である。
- 34 図3でも示した通り、「実験型教材」は学習者による主体的な自学自習を目指した教材と位置づけられるが、演習や授業内実験としての教授目的用と教材とも成り得るものである。
- 35 Roger Young の教科書ではこの点に着目し、スイッチの動作制御がコンピュータの制御および演算機構であることを示し、電磁スイッチの動作として説明している[Young 2001]。
- 36 Young 2001, p.18.
- 37 一般的な論理演算は、論理積 (AND)、論理和 (OR)、否定 (NOT) の3つの論理演算で構成されるが、A の否定を A NAND A、A と B の論理積を (A NAND B) NAND (A NAND B)、A と B の論理和を (A NAND A) NAND (B NAND B) とのよう否定論理積 NAND だけでこれら総てを表現できる。

- 38 実現に際しては、駆動電源を制御する問題があるため、容易とは言い難く、電子的または機械的な工夫が必要となる。
- 39 実際にリレーで構成した論理回路を教材として用いたときの学習者からの意見反応でもある。
- 40 三平 2011.
- 41 Young 2001, p.11 & p.26.
- 42 最初の段階として NAND ブロック、次に記憶ブロック、デコーダー、等のように積み上げてゆくのである。それにより、今は部品が供給されていないことから活用できない、個別機能チップの組み合わせによって CPU を構築する教材[渡波郁 2003]も再度利用できることとなる。
- 43 内木、富澤 2008 and 2009, 内木 2009. これらの文献では具体的事例に基づいた議論がなされている。

参考文献

- アイテック情報技術教育研究部編 (2009) 『コンピュータシステムの基礎 (第15版)』アイテック.
- Anderson, Al and Ryan Benedetti (2009) *Head First Networking*, O'Reilly Media, Inc., (木下哲也訳 (2010) 『Head First ネットワーク 一頭とからだで覚えるネットワークの基本』オライリージャパン).
- Bell, Tim, Ian H. Witten and Mike Fellows (2005) *Computer Science Unplugged*, <http://www.unplugged.canterbury.ac.nz>, (兼宗進監訳 (2007) 『コンピュータを使わない情報教育 一アンプラグドコンピュータサイエンス』イーテキスト研究所).
- Burrell, Gibson and Gareth Morgan (1979) *Sociological Paradigms and Organisational Analysis*, Heinemann, (鎌田伸一、金井一頼、野中郁次郎訳 (1986) 『組織理論のパラダイム 一機能主義の分析枠組』千倉書房)
- Derfler, Jr., Frank J. and Les Freed (1993) *How Networks Work*, Ziff-Davis Press.
- Derfler, Jr., Frank J. and Les Freed (2004) *How Networks Work (7th Ed.)*, Que Publishing.
- Eddings, Joshua (1994) *How the Internet Works*, Ziff-Davis Press.
- 学研 (1981) 『FX シリーズ説明書』学習研究社.
- Fallow, Lindsey and Dawn Griffiths (2009) *Head First 2D Geometry*, O'Reilly Media, Inc.
- Gralla, Preston (2006) *How the Internet Works (8th Ed.)*, Que Publishing.
- Griffiths, Dawn (2009) *Head First Statistics*, O'Reilly Media, Inc., (木下哲也、黒川洋、黒川めぐみ訳 (2009)

- 『Head First Statistics 一頭とからだで覚える統計の基本』オライリージャパン).
- Lang, Heather (2008) *Head First Physics*, O'Reilly Media, Inc.
- 三平貴之 (2011) 『直観的なメディア特性に基づいたコンピュータ基礎教育教材の開発』平成 22 年度埼玉大学教養学部卒業論文.
- 長尾真, 石田晴久, 稲垣康善, 田中英彦, 辻井潤一, 所真理雄, 中田育男, 米澤明憲編 (1990) 『岩波情報科学事典』
- Pilone, Tracey and Dan Pilone (2008) *Head First Algebra*, O'Reilly Media, Inc.
- Rizzo, John and K. Daniel Clark (1993) *How Macs Work*, Ziff-Davis Press.
- 渡波郁 (2003) 『CPU の創りかた』株式会社毎日コミュニケーションズ.
- 内木哲也 (2007) 「社会科学におけるコンピュータシミュレーションの意義」『埼玉大学紀要』第 43 巻, 第 1 号, 埼玉大学教養学部, pp.1-18.
- Uchiki, Tetsuya (2008) “Design of Oral Market Experiment Support System,” *SEFBIS Journal*, No.3, pp.77-87.
- 内木哲也, 富澤浩樹 (2008) 「社会的文脈を考慮した情報基礎教育のデザイン」『経営情報学会 2008 年春季全国研究発表大会予稿集』D4-1, 経営情報学会, June 7-8.
- 内木哲也, 富澤浩樹 (2009) 「情報基礎教育のデザインに関わる社会的文脈の再考」『経営情報学会 2009 年春季全国研究発表大会予稿集』A4-2, 経営情報学会, July 11-12.
- 内木哲也 (2009) 「情報基礎教育を巡る社会的文脈の変容と教育方策に関する研究」『埼玉大学紀要』第 45 巻, 第 1 号, 埼玉大学教養学部, pp.13-23.
- 内木哲也 (2010) 「実験手法に基づいた経済学教育支援システムのデザイン」『埼玉大学紀要』第 46 巻, 第 1 号, 埼玉大学教養学部, pp.61-77.
- White, Ron (1993) *How Computers Work*, Ziff-Davis Press.
- White, Ron (2007) *How Computers Work (9th Ed.)*, Que Publishing.
- Young, Roger, 2001, *How Computers Work -Processor and Main Memory- (2nd Ed.)*, LOTONtech.